

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

Rev.14

(第5部 M A A P)

## 目次

### － 第5部 MAAP －

|  |        |
|--|--------|
| 1. はじめに.....                             | 5-1    |
| 2. 重要現象の特定.....                          | 5-2    |
| 2.1 事故シーケンスと評価指標.....                    | 5-2    |
| 2.2 ランクの定義.....                          | 5-9    |
| 2.3 物理現象に対するランク付け.....                   | 5-12   |
| 3. 解析モデルについて.....                        | 5-37   |
| 3.1 コード概要.....                           | 5-37   |
| 3.2 重要現象に対する解析モデル.....                   | 5-38   |
| 3.3 解析モデル.....                           | 5-41   |
| 3.4 ノード分割.....                           | 5-83   |
| 3.5 入出力.....                             | 5-85   |
| 4. 妥当性確認.....                            | 5-88   |
| 4.1 妥当性確認方法.....                         | 5-88   |
| 4.2 妥当性確認（事故解析及び実験解析）.....               | 5-95   |
| 4.3 妥当性確認（感度解析）.....                     | 5-168  |
| 4.4 実機解析への適用性.....                       | 5-205  |
| 5. 有効性評価への適用性.....                       | 5-219  |
| 5.1 不確かさの取り扱いについて（評価指標の観点）.....          | 5-219  |
| 5.2 不確かさの取り扱いについて（運転操作の観点）.....          | 5-224  |
| 6. 参考文献.....                             | 5-236  |
| 参考1 MAAPとNUREG-1465のソースタームについて.....      | 5-238  |
| 別紙1 入力項目リスト.....                         | 5-243  |
| 別添1 新知見への対応について.....                     | 5-別1-1 |
| 別添2 実験知見を踏まえたMAAPコードの有効性評価への適用性について..... | 5-別2-1 |
| 添付1 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の防止について.....      | 5-1-1  |
| 添付2 溶融炉心と冷却材の相互作用について.....               | 5-2-1  |
| 添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について.....            | 5-3-1  |



## 1. はじめに

本資料は、炉心損傷防止あるいは格納容器破損防止に関する重大事故等対策の有効性評価（以下「有効性評価」という。）に適用するコードのうち、MAAP (MAAP4) コードについて、

- ・有効性評価において重要となる現象の特定
- ・解析モデル及び入出力に関する説明
- ・妥当性確認
- ・有効性評価への適用性

に関してまとめたものである。

## 2. 重要現象の特定

### 2.1 事故シーケンスと評価指標

MAAP コードが適用される炉心損傷防止対策の事故シーケンスグループ及び格納容器破損防止対策の格納容器破損モードについて、具体的な事故シーケンス並びにその事象推移、運転操作及び評価指標について記述する。

#### 2.1.1 炉心損傷防止対策

##### (1) 高圧・低圧注水機能喪失

この事故シーケンスグループでは、原子炉の出力運転時において、異常な過渡変化又は事故（LOCA を除く）の発生後、高圧注水機能が喪失し、原子炉減圧には成功するが、低圧注水機能が喪失することを想定する。重要事故シーケンスとして、例えば「給水流量の全喪失＋非常用炉心冷却系（高圧注水系及び低圧注水系）起動失敗」が選定されている。

この重要事故シーケンスでは、給水流量の全喪失後、原子炉水位は急速に低下し、原子炉水位低信号が発生して原子炉がスクラムし、炉心出力は直ちに崩壊熱レベルまで低下する。原子炉水位低信号で非常用炉心冷却系（高圧注水系及び低圧注水系）の起動に失敗する。原子炉水位低信号で主蒸気隔離弁が閉止すると原子炉圧力は上昇し、原子炉圧力が逃がし安全弁の設定値に到達すると断続的に弁から蒸気が放出され、これにより原子炉の圧力は逃がし安全弁設定値近傍に維持される。一方、原子炉注水機能喪失の状況下では原子炉圧力容器内の保有水が減少し続け、いずれは炉心露出により燃料被覆管温度が上昇し、炉心損傷に至る。

炉心損傷を防止するために、手動操作により逃がし安全弁を開き、原子炉を急速減圧し、原子炉の減圧後に低圧代替注水系による原子炉注水を開始する。原子炉の急速減圧を開始すると、冷却材の流出により原子炉水位は低下し、有効燃料棒頂部を下回るが、低圧代替注水系による注水が開始すると原子炉内保有水及び原子炉水位が回復し、炉心は再冠水する。

原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力及び格納容器雰囲気温度は、逃がし安全弁から放出される蒸気により徐々に上昇するが、格納容器代替スプレイ系による冷却及び格納容器圧力逃がし装置による除熱を行う。本事象の場合、格納容器の過圧・過温破損を防止することが評価目的であることから、評価指標は「原子炉格納容器圧力及び温度」である。

##### (2) 高圧注水・減圧機能喪失

この事故シーケンスグループでは、原子炉の出力運転時において、異常な過渡変化又は事故（LOCA を除く）の発生後、高圧注水機能が喪失し、かつ、原子炉減圧機能が機能喪失することを想定する。重要事故シーケンスとして、例えば「給

水流量の全喪失＋非常用炉心冷却系（高圧注水系）起動失敗＋原子炉の減圧の失敗」が選定されている。

この重要事故シーケンスでは、給水流量の全喪失後、原子炉水位は急速に低下し、原子炉水位低信号が発生して原子炉はスクラムし、炉心出力は直ちに崩壊熱レベルまで低下する。原子炉水位低信号で非常用炉心冷却系（高圧注水系）の起動に失敗する。原子炉水位低信号で主蒸気隔離弁が閉止すると原子炉圧力は上昇し、原子炉圧力が逃がし安全弁の設定値に到達すると断続的に弁から蒸気が放出され、これにより原子炉の圧力は逃がし安全弁設定値近傍に維持される。一方、原子炉が高圧に維持され低圧注水系による原子炉注水が困難な状況下では、原子炉圧力容器内の保有水が減少し続け、いずれは炉心露出により燃料被覆管温度が上昇し、炉心損傷に至る。

炉心損傷を防止するために、原子炉代替減圧系（原子炉自動減圧インターロック）により原子炉を減圧し、原子炉の減圧後に非常用炉心冷却系（低圧注水系）により原子炉注水を開始する。原子炉の急速減圧を開始すると、冷却材の流出により原子炉水位は低下し、有効燃料棒頂部を下回るが、低圧注水系による注水が開始すると原子炉内保有水及び原子炉水位が回復し、炉心は再冠水する。

原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力及び格納容器雰囲気温度は、逃がし安全弁から放出される蒸気により徐々に上昇するが、残留熱除去系による除熱を行うことで、抑制する。本事象の場合、格納容器の過圧・過温破損を防止することが評価目的であることから、評価指標は「原子炉格納容器圧力及び温度」である。

### (3) 全交流動力電源喪失

この事故シーケンスグループでは、原子炉の出力運転時において、全交流動力電源喪失の発生後、安全機能を有する系統及び機器が機能喪失することを想定する。重要事故シーケンスとして「外部電源喪失＋非常用ディーゼル発電機等の機能喪失」が選定されている。

この重要事故シーケンスでは、全交流動力電源喪失後、原子炉はスクラムし、炉心出力は直ちに崩壊熱レベルまで低下する。原子炉水位低で原子炉隔離時冷却系が自動起動して水位は維持される。しかし、直流電源が枯渇すると長時間の注水が期待できないため、いずれは炉心露出により燃料被覆管温度が上昇し、炉心損傷に至る。

炉心損傷を防止するために、原子炉隔離時冷却系による原子炉注水によって原子炉水位を適切に維持しつつ、代替交流動力電源設備及び低圧代替注水系の準備が完了したところで、原子炉の減圧及び低圧代替注水系による原子炉注水を開始する。原子炉の減圧は、逃がし安全弁により手動操作にて実施する。減圧を開始すると、冷却材の流出により原子炉水位は低下するが、低圧代替注水系による注水

が開始すると原子炉水位が回復し、炉心は再冠水する。

原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力及び格納容器雰囲気温度は、逃がし安全弁から放出される蒸気により徐々に上昇するが、残留熱除去系又は格納容器圧力逃がし装置による除熱を行うことで抑制する。本事象の場合、格納容器の過圧・過温破損を防止することが評価目的であることから、評価指標は「原子炉格納容器圧力及び温度」である。

#### (4) 崩壊熱除去機能喪失

この事故シーケンスグループでは、原子炉の出力運転時において、異常な過渡変化又は事故（LOCAを除く）の発生後、炉心冷却には成功するが、崩壊熱除去機能が喪失することを想定する。重要事故シーケンスとして、例えば「給水流量の全喪失+取水機能喪失」及び「給水流量の全喪失+残留熱除去系の故障」が選定されている。

この重要事故シーケンスでは、給水流量の全喪失後、原子炉水位は急速に低下し、原子炉水位低信号が発生して原子炉はスクラムし、炉心出力は直ちに崩壊熱レベルまで低下する。原子炉水位低で原子炉隔離時冷却系等が自動起動して水位は維持されるが、外部電源の喪失を想定すると、取水機能喪失時には非常用ディーゼル発電機等の機能喪失による全交流動力電源喪失により、長時間の注水継続は期待できないために、いずれは炉心露出により燃料被覆管温度が上昇し、炉心損傷に至る。また、残留熱除去系故障時には非常用炉心冷却系等によって炉心の冷却は維持されるものの、原子炉格納容器からの除熱機能喪失によって原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力及び格納容器雰囲気温度が限界圧力及び限界温度を超過する。

取水機能喪失時に炉心損傷を防止するために、原子炉隔離時冷却系等による原子炉注水によって原子炉水位を適切に維持しつつ、代替交流動力電源により給電を開始し、低圧又は高圧代替注水系による原子炉への注水を開始すると原子炉水位が回復し、炉心は再冠水する。原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力及び格納容器雰囲気温度は、逃がし安全弁から放出される蒸気により徐々に上昇するが、最終ヒートシンクへの代替熱移送系を用いた除熱によって抑制する。

また、残留熱除去系故障時には、原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力及び格納容器雰囲気温度の上昇を抑制するため、格納容器代替スプレイ系による冷却及び格納容器圧力逃がし装置による除熱を行う。

上記のとおり、格納容器の過圧・過温破損を防止することが評価目的であることから、評価指標は「原子炉格納容器圧力及び温度」である。

## (5) LOCA 時注水機能喪失

この事故シーケンスグループでは、原子炉の出力運転時において、LOCA 発生後、「高圧注水機能及び低圧注水機能が喪失する場合」又は「高圧注水機能及び原子炉減圧機能が喪失する場合」に、炉心の著しい損傷に至る事象を想定する。重要事故シーケンスとして、例えば「中小破断 LOCA+非常用炉心冷却系（高圧注水及び低圧注水系）起動失敗」が選定されている。

この重要事故シーケンスでは、LOCA 発生後、原子炉はスクラムし、炉心出力は直ちに崩壊熱レベルまで低下する。しかし、非常用炉心冷却系（高圧注水系及び低圧注水系）の起動失敗により、原子炉水位が低下し、やがて炉心露出により燃料被覆管温度が上昇し、炉心損傷に至る。

炉心損傷を防止するために、手動操作により逃がし安全弁を開き、原子炉を急速減圧し、原子炉の減圧後に低圧代替注水系等による原子炉注水を開始する。原子炉の急速減圧を開始すると、冷却材の流出により原子炉水位は低下するが、低圧代替注水系等による注水が開始すると原子炉水位が回復し、炉心は再冠水する。

原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力及び格納容器雰囲気温度は、LOCA 破断口から放出される冷却材及び逃がし安全弁から放出される蒸気により徐々に上昇するが、格納容器代替スプレイ系による冷却及び格納容器圧力逃がし装置による除熱を行う。本事象の場合、格納容器の過圧・過温破損を防止することが評価目的であることから、評価指標は「原子炉格納容器圧力及び温度」である。

### 2.1.2 格納容器破損防止対策

#### (1) 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）

この格納容器破損モードは、原子炉格納容器内へ流出した高温の原子炉冷却材のフラッシング、熔融炉心の崩壊熱によって発生した水蒸気及びジルコニウム-水反応等によって発生した非凝縮性ガスの蓄積によって、原子炉格納容器内の雰囲気圧力・温度が徐々に上昇し格納容器破損に至る事象である。重要事故シーケンスとして、例えば「大破断 LOCA 時注水機能喪失」が選定されている。

この重要事故シーケンスの場合、事象発生後、炉心出力は直ちに崩壊熱レベルまで低下するが、非常用炉心冷却系の機能が喪失することを想定するため、原子炉水位が急速に低下して炉心が露出し、やがて炉心損傷に至る。炉心部では、熔融した炉心は燃料棒を伝って下方へ流れ落ちていくが、低温領域まで降下すると一部が固化して、閉塞領域を形成する。閉塞領域が形成されると、その領域にある熔融炉心自身の発熱や上方から流下してきた熔融炉心によってプールが形成される。クラストが保持されている間は熔融炉心プールが拡大するが、クラストの破損によって熔融炉心は原子炉圧力容器下部プレナムに落下する。下部プレナム内に残存していた原子炉冷却材により、一時的に熔融炉心は冷却されるが、やが

て下部プレナム内の原子炉冷却材が蒸発すると、溶融炉心が崩壊熱により再加熱されていく。溶融炉心が高温状態となると、原子炉压力容器下部ヘッ드의構造材温度も上昇していき、やがて下部ヘッド貫通部の逸出等により破損に至る。原子炉压力容器の破損により、溶融炉心は格納容器下部に落下する。格納容器下部には格納容器下部注水系による原子炉压力容器破損前の注水操作により、冷却水が溜まっており、落下してきた溶融炉心の保有熱により急速に蒸発を開始し、溶融炉心温度が低下した後も崩壊熱により継続的に蒸発していく。冷却水による溶融炉心からの除熱が十分でない場合には、溶融炉心とコンクリートの境界温度がコンクリート溶融温度以上となり、コンクリートからの脱水及びコンクリートの溶融が起きることになる。コンクリートの脱水により発生した水蒸気は、格納容器の過圧に寄与するほか、溶融炉心内部の金属と反応して水素発生に寄与する場合もある。これらの水蒸気、発生した非凝縮性ガス等の蓄積によって、原子炉格納容器内の雰囲気圧力・温度が緩慢に上昇し、やがて格納容器過圧・過温破損に至る。

この事象に対する格納容器破損防止対策として、低圧代替注水系等による原子炉注水、格納容器代替スプレイ系による格納容器冷却及び格納容器圧力逃がし装置等による格納容器除熱がある。原子炉压力容器内の溶融炉心の冷却を低圧代替注水系等によって行うが、溶融炉心の崩壊熱によって原子炉格納容器内に放出される蒸気により、格納容器の圧力及び雰囲気温度は徐々に上昇する。格納容器スプレイを実施することによって、格納容器の圧力及び雰囲気温度の上昇を抑制するが、外部水源からの総注水量が制限値に達した時点で、格納容器スプレイを停止する。その後、格納容器の圧力及び雰囲気温度は再び上昇するものの、格納容器圧力逃がし装置等による除熱により、格納容器破損を防止する。

本事象の場合、格納容器の過圧・過温破損を防止することが評価目的であることから、評価指標は「原子炉格納容器圧力及び温度」である。

## (2) 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱

この格納容器破損モードは、原子炉圧力が高い状況で原子炉压力容器が破損し、高圧の水蒸気及び水素が放出されるとともに、溶融炉心が液滴状に格納容器雰囲気へ飛散し、格納容器の圧力・温度が急上昇して破損に至る事象である。重要事故シーケンスとして、例えば「高圧注水・減圧機能喪失＋全交流動力電源の喪失」が選定されている。

この重要事故シーケンスの場合、事象発生後、炉心出力は直ちに崩壊熱レベルまで低下するが、高圧注水・減圧機能が喪失することを想定するため原子炉水位が徐々に低下し、いずれは炉心が露出し、炉心損傷に至る。炉心部では、溶融した炉心は燃料棒を伝って下方へ流れ落ちていくが、低温領域まで降下すると一部が

固化して、閉塞領域を形成する。閉塞領域が形成されると、その領域にある溶融炉心自身の発熱や上方から流下してきた溶融炉心によってプールが形成される。クラストが保持されている間は溶融炉心プールが拡大するが、クラストの破損によって溶融炉心は原子炉压力容器下部プレナムに落下する。下部プレナム内に残存していた原子炉冷却材により、一時的に溶融炉心は冷却されるが、やがて下部プレナム内の原子炉冷却材が蒸発すると、溶融炉心が崩壊熱により再加熱されていく。溶融炉心が高温状態となると、原子炉压力容器下部ヘッドの構造材温度も上昇していき、やがて下部ヘッド貫通部の逸出等により破損に至る。原子炉圧力が高圧状態で原子炉压力容器破損に至るため、高圧の水蒸気及び水素が放出されるとともに、溶融炉心の分散放出が発生する。分散放出された溶融炉心は液滴状に格納容器雰囲気へ飛散し、格納容器の圧力・温度が急上昇して破損に至る可能性がある。

この事象に対する格納容器破損防止対策として、原子炉压力容器破損までに手動操作にて、原子炉を速やかに減圧させることで、溶融炉心の分散放出を抑制する。

本事象の場合、原子炉の減圧により原子炉圧力が高い状況での溶融物の噴出を防止することが評価目的であることから、評価指標は「原子炉圧力」である。

### (3) 原子炉压力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用

この格納容器破損モードは、溶融炉心と格納容器下部のプール水が接触して一時的な圧力の急上昇が発生し、このときに発生するエネルギーにより構造物が破壊され格納容器破損に至る事象である。水蒸気爆発については、これまでの知見により、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて低いと考えられるが、溶融炉心から冷却材への伝熱による水蒸気発生に伴う急激な圧力上昇（圧力スパイク）の可能性があることから、ここでは、圧力スパイクによる格納容器破損を取り扱う。重要事故シーケンスとして、例えば「高圧・低圧注水機能喪失＋全交流動力電源の喪失」が選定されている。

この重要事故シーケンスの場合、事象発生後、炉心出力は直ちに崩壊熱レベルまで低下するが、高圧・低圧注水機能が喪失しているため、原子炉水位が徐々に低下して炉心が露出し、炉心損傷に至る。炉心部では、溶融した炉心は燃料棒を伝って下方へ流れ落ちていくが、低温領域まで降下すると一部が固化して、閉塞領域を形成する。閉塞領域が形成されると、その領域にある溶融炉心自身の発熱や上方から流下してきた溶融炉心によってプールが形成される。クラストが保持されている間は溶融炉心プールが拡大するが、クラストの破損によって溶融炉心は原子炉压力容器下部プレナムに落下する。下部プレナム内に残存していた原子炉冷却材により、一時的に溶融炉心は冷却されるが、やがて下部プレナム内の原子炉冷却材が蒸発すると、溶融炉心が崩壊熱により再加熱されていく。溶融炉心が

高温状態となると、原子炉圧力容器下部ヘッドの構造材温度も上昇していき、やがて下部ヘッド貫通部の逸出等により破損に至る。格納容器下部には格納容器下部注水系による原子炉圧力容器破損前の注水操作により、冷却水が溜まっており、落下してきた熔融炉心の保有熱により急速に蒸発し、圧力スパイクにより格納容器破損に至る可能性がある。

本事象では、圧力スパイクにより、瞬時に原子炉格納容器圧力が急上昇し、原子炉格納容器の破損に至る可能性があることから、評価指標は「原子炉格納容器圧力」である。

#### (4) 水素燃焼

この格納容器破損モードは、ジルコニウム-水反応等によって発生した水素の燃焼により格納容器破損に至る事象である。重要事故シーケンスとして、例えば「高圧・低圧注水機能喪失+全交流動力電源の喪失」が選定されている。

この重要事故シーケンスの場合、事象発生後、炉心出力は直ちに崩壊熱レベルまで低下するが、高圧・低圧注水機能が喪失しているため、原子炉水位が徐々に低下し、炉心が露出し、炉心損傷に至る。炉心露出部で燃料棒が過熱していくと燃料被覆管のジルコニウム-水反応によって多量の水素が発生するとともに、水の放射線分解によって水素及び酸素が発生する。発生した水素及び酸素は、原子炉内で発生する蒸気とともに、逃がし安全弁を通じてウェットウェルに流入し、サブプレッション・プール水中にとりこまれた核分裂生成物による水の放射線分解に伴って発生する水素及び酸素とともに空間部に蓄積し、一部は真空破壊弁を通じてドライウェルに流入する。格納容器スプレイにより格納容器内で蒸気の凝縮が進むと、格納容器内の水素及び酸素濃度は上昇する。なお、水素及び酸素の可燃限界は、水素濃度 4 vol%以上、かつ、酸素濃度 5 vol%以上が指標とされている。

この事象に対する格納容器破損防止対策として、格納容器内雰囲気を窒素置換することによる不活性化及び格納容器圧力逃がし装置による可燃性ガスの排出によって、水素燃焼の発生を抑制する。

本事象の場合、格納容器内において水素爆轟が発生しないことを確認することが目的であり、BWRでは、格納容器内雰囲気が窒素封入により不活性化されており、また炉心損傷後はジルコニウム-水反応に伴い多量の水素が発生するため、水素燃焼の発生に対しては酸素濃度の上昇が律速となる。そのため、「酸素濃度」を評価指標として選定する。なお、水素濃度の上昇に伴い格納容器内の酸素濃度は相対的に低下するため、酸素濃度を保守的に評価する観点で、水素濃度については実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド指定の全炉心内のジルコニウム量の 75%が水と反応する想定ではなく、MAAPの評価値を用いる。



#### (5) 溶融炉心・コンクリート相互作用

この格納容器破損モードは、格納容器下部床上へ落下した溶融炉心によりコンクリート侵食が継続し、格納容器の構造部材の支持機能が喪失し、格納容器破損に至る事象である。重要事故シーケンスとして、例えば「大破断 LOCA 時注水機能喪失」が選定されている。

この重要事故シーケンスの場合、事象発生後、炉心出力は直ちに崩壊熱レベルまで低下するが、非常用炉心冷却系の注入に失敗しているため、原子炉水位は急速に低下し、炉心が露出し、炉心損傷に至る。炉心部では、溶融した炉心は燃料棒を伝って下方へ流れ落ちていくが、低温領域まで降下すると一部が固化して、閉塞領域を形成する。閉塞領域が形成されると、その領域にある溶融炉心自身の発熱や上方から流下してきた溶融炉心によってプールが形成される。クラストが保持されている間は溶融炉心プールが拡大するが、クラストの破損によって溶融炉心は原子炉圧力容器下部プレナムに落下する。下部プレナム内に残存していた原子炉冷却材により、一時的に溶融炉心は冷却されるが、やがて下部プレナム内の原子炉冷却材が蒸発すると、溶融炉心が崩壊熱により再加熱されていく。溶融炉心が高温状態となると、原子炉圧力容器下部ヘッドの構造材温度も上昇していき、やがて下部ヘッド貫通部の逸出等により破損に至る。原子炉圧力容器の破損により、溶融炉心は格納容器下部に落下する。格納容器下部には格納容器下部注水系による原子炉圧力容器破損前の注水操作により、冷却水が溜まっており、落下してきた溶融炉心の保有熱により急速に蒸発を開始し、溶融炉心温度が低下した後崩壊熱により継続的に蒸発していく。冷却水による溶融炉心からの除熱が十分でない場合には、溶融炉心とコンクリートの境界温度がコンクリート溶融温度以上となり、コンクリートからの脱水及びコンクリートの溶融が起きることになる。溶融炉心によるコンクリートの溶融侵食が継続すると、格納容器の構造部材の支持機能が喪失し、格納容器破損に至る。

この事象に対する格納容器破損防止対策として、原子炉圧力容器の下部から溶融炉心流れ出す時点で、格納容器下部において溶融炉心の冷却に寄与する十分な水量及び水位を確保し、かつ、溶融炉心の落下後に崩壊熱を十分に上回る原子炉注水及び格納容器下部注水系による注水を行うことによって、溶融炉心の冷却を行う。

本事象の場合、コンクリート侵食を抑制することが評価目的であることから、評価指標は「コンクリート侵食量」である。

## 2.2 ランクの定義

本資料の本文「2. 有効性評価における物理現象の抽出」で抽出された物理現象のうち MAAP で評価する事象において考慮すべき物理現象を対象に、表 2.2-1 の定義に従って「H」、「M」、「L」及び「I」のランクに分類し、「H」及び「M」に分類された物理現象を重要現象として抽出する。

なお、本資料の本文「2. 有効性評価における物理現象の抽出」で抽出された物理現象は、事故シーケンスグループに対して抽出されたものであり、具体的な重要事故シーケンスでは生じない場合もあり、その場合は「I」に分類する。

表 2.2-1 ランクの定義

| ランク | ランクの定義                          | 本資料での取り扱い   |
|-----|---------------------------------|---|
| H   | 評価指標及び運転操作に対する影響が大きいと考えられる現象    | 物理現象に対する不確かさを実験との比較等により求め、実機評価における評価指標及び運転操作への影響を評価する。  |
| M   | 評価指標及び運転操作に対する影響が中程度と考えられる現象    | 事象推移を模擬する上で一定の役割を担うが、評価指標に対する影響が「H」に比べて顕著でない物理現象であるため、必ずしも不確かさによる実機評価における評価指標及び運転操作への影響を評価する必要はないが、本資料では、実機評価への影響を感度解析等により評価するか、「H」と同様に評価することとする。 |
| L   | 評価指標及び運転操作に対する影響が小さいと考えられる現象    | 事象推移を模擬するためにモデル化は必要であるが、評価指標及び運転操作への影響が明らかに小さい物理現象であるため、検証／妥当性確認は記載しない。   |
| I   | 評価指標及び運転操作に対し影響を与えないか、又は重要でない現象 | 評価指標及び運転操作へ影響を与えないか、又は重要でない物理現象であるため、検証／妥当性確認は記載しない。  |

## 2.3 物理現象に対するランク付け

本資料の本文「2 有効性評価における物理現象の抽出」で抽出された物理現象のうち MAAP で評価する事象において考慮すべき物理現象を対象に、2.1 で述べた事象進展を踏まえ、表 2.2-1 の定義に従って、評価指標及び運転操作への影響に応じて表 2.3-1 及び表 2.3-2 のとおりランク付けを行い、「H」及び「M」に分類された物理現象を重要現象として抽出した。

以下、物理現象ごとに考え方を示す。

### (1) 核分裂出力 [炉心 (核)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、いずれも事象発生後早期に原子炉がスクラムし、未臨界となるため、炉心露出後の燃料被覆管温度上昇時の原子炉出力は崩壊熱が支配的となる。したがって、核分裂出力は炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が低いと考えられる。また、核分裂出力は熔融炉心の挙動への影響は無く、格納容器破損防止における各評価指標に対して影響は無い。

### (2) 出力分布変化 [炉心 (核)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、いずれも事象発生後早期に原子炉がスクラムし、未臨界となるため、炉心露出後の燃料被覆管温度上昇時の原子炉出力は崩壊熱が支配的となる。したがって、出力分布変化は炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が低いと考えられる。また、出力分布変化は熔融炉心の挙動への影響は無く、格納容器破損防止における各評価指標に対して影響は無い。

### (3) 反応度フィードバック効果 [炉心 (核)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、いずれも事象発生後早期に原子炉がスクラムし、未臨界となるため、炉心露出後の燃料被覆管温度上昇時の原子炉出力は崩壊熱が支配的となる。したがって、反応度フィードバック効果は炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が低いと考えられる。また、反応度フィードバック効果は熔融炉心の挙動への影響は無く、格納容器破損防止における各評価指標に対して影響は無い。

### (4) 制御棒反応度効果 [炉心 (核)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、いずれも事象発生後早期に原子炉がスクラムし、未臨界となるため、炉心露出後の燃料被覆管温度上昇時の原子炉出力は崩壊熱が支配的となる。したがって、制御棒反応度効果は炉心損傷防止における

評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が低いと考えられる。また、制御棒反応度効果は溶融炉心の挙動への影響は無く、格納容器破損防止における各評価指標に対して影響は無い。

#### (5) 崩壊熱 [炉心 (核)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、いずれも事象発生後早期に原子炉がスクラムし、未臨界となるため、炉心露出後の燃料被覆管温度上昇時の原子炉出力は崩壊熱が支配的となり、主な熱源として事象進展の速さに影響する。したがって、崩壊熱は炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度及び格納容器破損防止における各評価指標に対して重要度が高いと考えられる。

#### (6) 三次元効果 [炉心 (核)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、いずれも事象発生後早期に原子炉がスクラムし、未臨界となるため、核熱水力不安定事象は発生しない。したがって、核的な三次元効果は、炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度及び格納容器破損防止における各評価指標に対して影響は無い。

#### (7) 燃料棒内温度変化 [炉心 (燃料)]

核分裂あるいは崩壊熱により燃料棒内で発生した熱は、燃料棒内の熱伝導、燃料棒表面熱伝達により冷却材へと放出される。ギャップ熱伝達を含む燃料棒内の伝熱特性に基づく燃料棒内温度の変化は燃料被覆管温度に影響し、燃料被覆管温度が非常に高温となった場合には、燃料被覆管の酸化反応による発熱及び水素の発生を考慮する必要がある。したがって、燃料棒内温度変化は、燃料被覆管温度が顕著に上昇する以前の炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が低く、格納容器破損防止における各評価指標に対しては重要度が高いと考えられる。

#### (8) 燃料棒表面熱伝達 [炉心 (燃料)]

核分裂あるいは崩壊熱により燃料棒内で発生した熱は、燃料棒内の熱伝導、燃料棒表面熱伝達により冷却材へと放出される。ギャップ熱伝達を含む燃料棒内の伝熱特性に基づく燃料棒内温度の変化は燃料被覆管温度に影響し、燃料被覆管温度が非常に高温となった場合には、燃料被覆管の酸化反応による発熱及び水素の発生を考慮する必要がある。したがって、格納容器破損防止における各評価指標に対しては、表面熱伝達の影響が大きくなり、重要度が高いと考えられる。燃料被覆管温度が顕著に上昇しない炉心損傷防止の領域においては、一時的に炉心が露出しても早期に再冠水し、冠水状態では熱伝達が十分大きくなることから、燃料棒表面の熱伝達変

化による影響は小さく、崩壊熱による燃料棒からの発熱が支配的となる。したがって、燃料棒表面熱伝達は、炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が低いと考えられる。

#### (9) 沸騰遷移 [炉心 (燃料)]

核分裂あるいは崩壊熱により燃料棒内で発生した熱は、燃料棒内の熱伝導、燃料棒表面熱伝達により冷却材へと放出される。燃料棒表面において核沸騰から膜沸騰へ沸騰遷移が生じた場合には、熱伝達の低下によって燃料被覆管温度が上昇するものの、事象初期の短期間における燃料被覆管温度に影響する現象であり、長期的な挙動に着目した場合の影響は小さい。したがって、沸騰遷移は、炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が低いと考えられる。また、沸騰遷移は熔融炉心の挙動への影響は無く、格納容器破損防止における各評価指標に対して影響は無い。

#### (10) 燃料被覆管酸化 [炉心 (燃料)]

核分裂あるいは崩壊熱により燃料棒内で発生した熱は、燃料棒内の熱伝導、燃料棒表面熱伝達により冷却材へと放出される。ギャップ熱伝達を含む燃料棒内の伝熱特性に基づく燃料棒内温度の変化は燃料被覆管温度に影響し、燃料被覆管温度が非常に高温となった場合には、燃料被覆管の酸化反応による発熱及び水素の発生を考慮する必要がある。したがって、燃料被覆管酸化は、燃料被覆管温度が顕著に上昇する以前の炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が低く、格納容器破損防止における各評価指標に対して重要度が高いと考えられる。

#### (11) 燃料被覆管変形 [炉心 (燃料)]

燃料被覆管温度が非常に高温となった場合には、燃料被覆管の変形及び酸化反応による発熱や水素の発生、燃料被覆管の破損によるペレットと燃料被覆管の間隙部に蓄積した FP の原子炉圧力容器内への放出を考慮する必要がある、格納容器破損防止における各評価指標に対して重要度が高いと考えられる。炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対しては、燃料被覆管の変形により炉心冷却性への影響が考えられるものの、長期的な挙動に着目した場合の影響は小さいため、重要度が低いと考えられる。

#### (12) 三次元効果 [炉心 (燃料)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、水位が低下して炉心が露出して燃料棒表面温度が高くなった場合には、円周方向及び軸方向からの三次元的な燃料棒間

の輻射熱伝達（三次元効果）が生じる。燃料被覆管温度が顕著に上昇しない炉心損傷防止の領域においては、一時的に炉心が露出しても再冠水することから、三次元効果の影響は小さく、崩壊熱による燃料棒からの発熱が支配的となるため、重要度が低いと考えられる。また、三次元効果は溶融炉心の挙動への影響は無く、格納容器破損防止における各評価指標に対して影響は無い。

#### (13) 沸騰・ボイド率変化 [炉心（熱流動）]

評価する具体的な重要事故シーケンスは、いずれも炉心露出の可能性があり、二相水位が有効燃料棒頂部を下回ると炉心が露出し、燃料被覆管の温度上昇が始まるため、燃料被覆管温度が非常に高温となった場合には、燃料被覆管の酸化反応による発熱及び水素発生を考慮する必要がある。したがって、二相水位に影響する沸騰・ボイド率変化は、炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対しては、燃料被覆管温度が顕著に上昇せず、長期的な挙動に着目した場合の影響は小さいため、重要度が低く、格納容器破損防止における各評価指標に対しては、炉心冷却状態への影響が大きく、溶融炉心の挙動への影響が考えられるため、重要度が高いと考えられる。

#### (14) 気液分離（水位変化）・対向流 [炉心（熱流動）]

評価する具体的な重要事故シーケンスは、いずれも炉心露出の可能性があり、二相水位が有効燃料棒頂部を下回ると炉心が露出し、燃料被覆管の温度上昇が始まるため、燃料被覆管温度が非常に高温となった場合には、燃料被覆管の酸化反応による発熱及び水素発生を考慮する必要がある。したがって、二相水位に影響する気液分離（水位変化）・対向流は、炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対しては、被覆管温度が顕著に上昇せず、長期的な挙動へ着目した場合に影響は小さいため、重要度が低く、格納容器破損防止における各評価指標に対しては、炉心冷却状態への影響が大きく、溶融炉心の挙動への影響が考えられるため、重要度が高いと考えられる。

#### (15) 気液熱非平衡 [炉心（熱流動）]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、早期に再循環ポンプがトリップするため、事象初期を除いて炉心領域に強制循環は無いため、冷却材の注水による気液熱非平衡状態が考えられるが、炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対しては、長期的な挙動に着目した場合の影響は小さく、格納容器破損防止における各評価指標に対しては、溶融炉心の挙動への影響は小さいため、重要度が低いと考えられる。

#### (16) 圧力損失 [炉心 (熱流動)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、早期に再循環ポンプがトリップするため、事象初期を除いて原子炉圧力容器内における流動は、炉心部とダウンコマ部の静水頭が支配的であると考えられる。したがって、圧力損失は炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度並びに格納容器破損防止における各評価指標に対して重要度が低いと考えられる。

#### (17) 三次元効果 [炉心 (熱流動)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、ダウンコマに注水された冷却材が下部プレナムを経由して、又は、炉心バイパス部から燃料集合体の漏えい経路を経由して炉心部へ流入する際、圧力損失が均一となるように熱出力に応じて燃料集合体間で流量配分される三次元効果が発生する。ただし、長期的な挙動へ着目した場合に三次元効果の影響は小さく、炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が低いと考えられる。また、三次元効果は熔融炉心の挙動への影響は無く、格納容器破損防止における各評価指標への影響は無い。

#### (18) 冷却材流量変化 [圧力容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、いずれも事象発生後早期に再循環ポンプがトリップし、原子炉圧力容器内における冷却材流量変化は長期間に亘り自然循環が支配的となる。長期的な挙動に着目した場合、炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対しては、原子炉圧力容器内の自然循環による冷却材の流量変化の影響は小さく、格納容器破損防止における各評価指標に対しては、熔融炉心の挙動への影響は小さいため、重要度が低いと考えられる。

#### (19) 冷却材放出 (臨界流・差圧流) [圧力容器]

炉心損傷防止において評価する具体的な重要事故シーケンスでは、逃がし安全弁や LOCA 破断口からの冷却材放出によって、原子炉格納容器圧力及び温度に影響を及ぼすものの、長期的には崩壊熱によって発生した水蒸気等による影響が支配的であり、冷却材放出 (臨界流・差圧流) は、評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が低いと考えられる。格納容器破損防止における高压熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱の評価指標である原子炉圧力に対しては、逃がし安全弁からの冷却材放出による原子炉圧力への影響があり、重要度が中程度であると考えられる。格納容器破損防止のその他の評価指標に対しては、炉心損傷後において、原子炉圧力容器からの流れの駆動力となる水蒸気の発生による影響は小さいため、評価指標に対する影響は小さく、重要度は低いと考えられる。



#### (20) 沸騰・凝縮・ボイド率変化 [圧力容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、逃がし安全弁を用いた原子炉の急速減圧あるいは LOCA 発生後の冷却材流出による原子炉減圧があり、減圧沸騰による各部の蒸気発生とボイド率変化によって二相水位が変化する。また、原子炉への注水によって蒸気が凝縮する。しかしながら、炉心以外の領域の沸騰、凝縮及びボイド率変化は炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度並びに格納容器破損防止における各評価指標への影響は小さく、重要度は低いと考えられる。

#### (21) 気液分離・対向流 [圧力容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、いずれも炉心露出の可能性があり、二相水位が有効燃料棒頂部を下回ると炉心が露出する。しかしながら、炉心以外の領域の気液分離・対向流は炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度並びに格納容器破損防止における各評価指標への影響は小さく、重要度は低いと考えられる。

#### (22) 気液熱非平衡 [圧力容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、炉心が露出した場合に、露出部周囲の蒸気が過熱蒸気となり、気液熱非平衡状態が考えられるものの、原子炉圧力容器外へ流出するまでに、ダウンカマから発生した飽和蒸気や構造材の熱伝達によって、ほぼ飽和状態となるため、炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対する影響は無い。また、熔融炉心の挙動への影響は小さく、格納容器破損防止における各評価指標に対しては、重要度が低いと考えられる。

#### (23) 圧力損失 [圧力容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、早期に再循環ポンプがトリップするため、事象初期を除いて原子炉圧力容器内における流動は、炉心部とダウンカマ部の静水頭が支配的であると考えられる。したがって、圧力損失は炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度並びに格納容器破損防止における各評価指標に対して重要度が低いと考えられる。

#### (24) 構造材との熱伝達 [圧力容器]

炉心損傷以前において、原子炉圧力容器等の構造材の保有熱は、原子炉冷却材との熱伝達（構造材との熱伝達）を通じて原子炉格納容器圧力及び温度に影響を与えるものの、長期的には崩壊熱によって発生した水蒸気等による影響が支配的である。したがって、構造材との熱伝達は炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納

容器圧力及び温度並びに格納容器破損防止における各評価指標に対して重要度が低いと考えられる。

なお、溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達は、物理現象「下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達」において考慮する。

#### (25) ECCS 注水（給水系・代替注水設備含む）〔圧力容器〕

炉心損傷防止及び格納容器破損防止における格納容器過圧・過温破損及び水素燃焼において評価する具体的な重要事故シーケンスでは、非常用炉心冷却系（ECCS）及び代替注水設備を使用して炉心の冷却を行う。原子炉圧力容器への注水は、原子炉格納容器への放出エネルギーに影響を与え、格納容器圧力変化に影響を及ぼすため、ECCS 注水（給水系・代替注水設備含む）は、炉心損傷防止及び格納容器破損防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が中程度であると考えられる。格納容器破損防止における水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対しては、注水による水蒸気や水素の発生量への影響が考えられ、水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対して重要度が中程度であると考えられる。また、格納容器破損防止における溶融炉心・コンクリート相互作用の評価指標であるコンクリート侵食量については、注水された水が原子炉圧力容器破損口から流れ出ることによる溶融炉心の冷却が考えられるため、重要度が高いと考えられる。格納容器破損防止におけるその他の事故シーケンスにおいては、ECCS（給水系・代替注水設備含む）の作動は考慮しておらず、評価指標に対する影響は無い。

#### (26) ほう酸水の拡散〔圧力容器〕

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、いずれもほう酸水の注入を考慮していない。したがって、ほう酸水の拡散は炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度並びに格納容器破損防止における各評価指標への影響は無い。

#### (27) 三次元効果〔圧力容器〕

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、いずれも事故後長期において炉心が露出する場合に、燃料被覆管温度が上昇する事象であり、炉心流量急減過程において、下部プレナム内の流量配分が不均等になる可能性があるが、事故直後に再循環ポンプがトリップするため影響は小さい。したがって、三次元効果は炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が低いと考えられる。また、三次元効果は溶融炉心の挙動への影響は無く、格納容器破損防止における各評価指標に対して影響は無い。

#### (28) 冷却材放出 [格納容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、逃がし安全弁や LOCA 破断口からの冷却材放出によって、原子炉格納容器圧力及び温度に影響を及ぼすものの、長期的には崩壊熱によって発生した水蒸気等による影響が支配的であり、冷却材放出は、炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度並びに格納容器破損防止における各評価指標に対して重要度が低いと考えられる。

#### (29) 格納容器各領域間の流動 [格納容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、崩壊熱によって発生した水蒸気及びジルコニウム-水反応によって発生した非凝縮性ガス（含む水素）は、LOCA 破断口からドライウェルを経由し、又は逃がし安全弁を介してウェットウェルへ流入し、サブプレッション・プール水温度を上昇させる。ウェットウェルにおける気液界面の熱伝達によって、気相部の圧力・温度が上昇し、原子炉格納容器圧力及び温度に影響を与える。したがって、格納容器各領域間の流動は、炉心損傷防止及び格納容器破損防止における格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が高いと考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標については、高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の評価指標である原子炉圧力に対しては、現象の発生防止として、原子炉圧力の低下が評価の主体となっており、重要度は低いと考えられる。溶融燃料-冷却材相互作用の評価指標である原子炉格納容器圧力に対しては、溶融炉心と冷却材の相互作用に伴う圧力スパイクによる原子炉格納容器圧力の上昇が評価指標となっており、重要度は高いと考えられる。ウェットウェル空間部に蓄積された水素及び酸素の一部は真空破壊弁を通じてドライウェルに流入するため、格納容器内における非凝縮性ガスの濃度分布に影響があり、水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対して重要度が高いと考えられる。また、溶融炉心・コンクリート相互作用の評価指標であるコンクリート侵食量については、溶融炉心から上面水プール及びコンクリートへの熱伝達が支配的であり、格納容器各領域間の流動の影響は小さいため、重要度は低いと考えられる。

#### (30) サプレッション・プール冷却 [格納容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、残留熱除去系等を用いて格納容器からの除熱が可能であり、サブプレッション・プール冷却は、炉心損傷防止及び格納容器破損防止における格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が高いと考えられる。ただし、炉心損傷防止における高圧・低圧注水機能喪失及び LOCA 時注水機能喪失の事故シーケンスにおいては、サブプレッション・プール冷却は考慮しておらず、評価指標に対する影響は無い。また、サブプレッション・プールの冷却によって水蒸気が凝縮し、非凝縮性ガスの濃度が上昇

するため、水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対して重要度が高いと考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対する影響は無い。

### (31) 気液界面の熱伝達 [格納容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、ウェットウェルにおける気液界面の熱伝達によって、気相部の圧力・温度が上昇し、原子炉格納容器圧力及び温度に影響を与える。したがって、気液界面の熱伝達は、炉心損傷防止及び格納容器破損防止における格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が中程度であると考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対しては影響が小さく、重要度が低いと考えられる。

### (32) 構造材との熱伝達及び内部熱伝導 [格納容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉格納容器内温度の上昇により、原子炉格納容器本体をはじめとする原子炉格納容器内の構造材との熱伝達が生じる。構造材との伝熱は、その熱容量により原子炉格納容器内温度の変化を抑制する方向に作用し、短期的には影響が大きい。また、材料により伝熱特性が異なり、熱伝導率の高い金属では表面熱伝達の影響が大きいのに対し、熱伝導率の低いコンクリートでは、コンクリート内部の熱伝導の影響が大きくなる。したがって、炉心損傷防止及び格納容器破損防止における格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が中程度であると考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対しては影響が小さく、重要度が低いと考えられる。

なお、溶融炉心と構造材間の熱伝達は、物理現象「溶融炉心とコンクリートの伝熱」において考慮する。

### (33) スpray冷却 [格納容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、格納容器スプレイにて、原子炉格納容器圧力及び温度の抑制が可能である。したがって、スプレイ冷却は、炉心損傷防止及び格納容器破損防止における格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が高いと考えられる。ただし、炉心損傷防止における高圧注水・減圧機能喪失の事故シーケンスにおいては、スプレイ冷却は考慮しておらず、評価指標に対する影響は無い。また、スプレイの作動によって水蒸気が凝縮し、非凝縮性ガスの濃度が上昇するため、水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対する重要度は高いと考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対する影響は無い。

#### (34) 放射線水分解等による水素・酸素発生 [格納容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、炉心損傷後、放射線水分解、ジルコニウム-水反応等によって水素・酸素が発生し、原子炉格納容器圧力に影響を与える可能性があり、格納容器破損防止における格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が中程度であると考えられる。ただし、炉心損傷防止における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対しては、炉心損傷に至ることは無いため、影響は無い。水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対しては、濃度を可燃限界以下に抑制することそのものが評価指標となり、重要度が高いと考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標への影響は小さく、重要度が低いと考えられる。

#### (35) 格納容器ベント [格納容器]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、格納容器圧力逃がし装置にて、原子炉格納容器圧力及び温度の抑制が可能であり、格納容器ベントは、炉心損傷防止及び格納容器破損防止における格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が高いと考えられる。ただし、炉心損傷防止における高圧注水・減圧機能喪失の事故シーケンスにおいては、格納容器ベントは考慮しておらず、評価指標に対する影響は無い。また、格納容器ベントによって、格納容器内の雰囲気組成が変化するため、水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対して重要度が高いと考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対する影響は無い。

#### (36) リロケーション [圧力容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器内の炉心燃料は、原子炉冷却材の減少によりヒートアップし、炉心溶融を伴い徐々にリロケーションする。炉心のリロケーションは、溶融炉心の冷却性、原子炉圧力容器の破損挙動等、炉心溶融後の事象進展に与える影響が大きい。リロケーションの過程における、炉心の流路閉塞挙動によって、水素の発生量への影響が考えられ、格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して、重要度が高いと考えられる。さらに、水素濃度の上昇に伴って格納容器内の酸素濃度は相対的に低下するため、水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対して、重要度が高いと考えられる。また、リロケーションは溶融炉心の下部プレナムへの移行挙動に関係し、原子炉圧力容器の破損タイミングにおいて溶融炉心の持つ崩壊熱や格納容器下部へ落下する溶融炉心の量への影響が考えられるため、高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱の評価指標である原子炉圧力、溶融燃料-冷却材相互作用の評価指標である原子炉格納容器圧力及び溶融炉心・コンクリート相互作用の評価指標であるコンク

リート侵食量に対して、重要度が高いと考えられる。

なお、本物理現象以降の物理現象については、炉心損傷後の物理現象であり、炉心損傷以前の現象を扱う炉心損傷防止における評価指標に対する影響は無い。

### (37) 原子炉圧力容器内 FCI(熔融炉心細粒化) [圧力容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器内の炉心燃料は、原子炉冷却材の減少によりヒートアップし、炉心熔融を伴い徐々にリロケーションする。熔融炉心が原子炉圧力容器下部プレナムへ移行する際に、原子炉圧力容器下部プレナムに冷却材が残存する場合、熔融炉心と冷却材との相互作用が生じ、熔融炉心が細粒化し、水との熱伝達により水蒸気を発生させつつ冷却される。急速な水蒸気の発生によって発生する圧力スパイクは、原子炉圧力容器破損のタイミングにおける原子炉圧力に影響を与える可能性がある。したがって、原子炉圧力容器内 FCI(熔融炉心細粒化)は、高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の評価指標である原子炉圧力に対して、重要度が中程度であると考えられる。水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対する影響は無い。格納容器破損防止におけるその他の評価指標への影響は小さく、重要度が低いと考えられる。

### (38) 原子炉圧力容器内 FCI(デブリ粒子熱伝達) [圧力容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器内の炉心燃料は、原子炉冷却材の減少によりヒートアップし、炉心熔融を伴い徐々にリロケーションする。熔融炉心が原子炉圧力容器下部プレナムへ移行する際に、原子炉圧力容器下部プレナムに冷却材が残存する場合、熔融炉心と冷却材との相互作用が生じ、熔融炉心が細粒化し、水との熱伝達により水蒸気を発生させつつ冷却される。急速な水蒸気の発生によって発生する圧力スパイクは、原子炉圧力容器破損のタイミングにおける原子炉圧力に影響を与える可能性がある。したがって、原子炉圧力容器内 FCI(デブリ粒子熱伝達)は、高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の評価指標である原子炉圧力に対して、重要度が中程度であると考えられる。水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対する影響は無い。格納容器破損防止におけるその他の評価指標への影響は小さく、重要度が低いと考えられる。

### (39) 熔融炉心の再臨界 [圧力容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、制御棒熔融開始から炉心熔融に至る間に原子炉圧力容器内に注水される可能性があるが、事象進展に伴い流路が閉塞し、熔融プールが形成されるため、熔融炉心が再臨界する可能性は十分小さい。したがって、熔融炉心の再臨界は格納容器破損防止における各評価指標への影響は無い。

#### (40) 構造材との熱伝達 [圧力容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器内の炉心燃料は、原子炉冷却材の減少によりヒートアップし、炉心溶融を伴い徐々にリロケーションする。この過程において、制御棒等の炉内構造物も、溶融燃料からの放射熱伝達等により溶融し、炉心下部に移行する。構造材との熱伝達によって、溶融炉心の移行挙動、溶融炉心の量や組成等の炉心溶融後の事象進展に与える影響が考えられる。溶融炉心の移行挙動については、炉心の流路閉塞挙動による水素の発生量への影響から、格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して、重要度が高いと考えられる。また、水素濃度の上昇に伴って格納容器内の酸素濃度は相対的に低下するため、水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対して、重要度が高いと考えられる。構造材の溶融による溶融炉心の量や組成への影響からは、原子力圧力容器の破損タイミング、破損後の溶融炉心の放出量や放出された溶融炉心と水蒸気の反応による発熱等の影響が考えられるため、高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の評価指標である原子炉圧力、溶融燃料－冷却材相互作用の評価指標である原子炉格納容器圧力及び溶融炉心・コンクリート相互作用の評価指標であるコンクリート侵食量に対して、重要度が高いと考えられる。

#### (41) 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達 [圧力容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、炉心のリロケーションによって下部プレナムに溶融炉心が堆積し、原子炉圧力容器へ熱的負荷を与える。したがって、下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達は、格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して、原子炉圧力容器壁を介した格納容器雰囲気への伝熱の影響が考えられ、重要度が中程度であると考えられる。また、原子炉圧力容器下部プレナムに冷却材が残存する場合には、溶融炉心と冷却材との熱伝達による水蒸気発生によって原子炉圧力が上昇するため、高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の評価指標である原子炉圧力に対して、重要度が高いと考えられる。溶融炉心・コンクリート相互作用の評価指標であるコンクリート侵食量に対しては、格納容器下部への注水開始の判断基準を原子炉圧力容器下鏡温度とした場合に、運転操作に対する影響が考えられ、重要度が高いと考えられる。水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対する影響は無い。溶融燃料－冷却材相互作用の評価指標である原子炉格納容器圧力に対する直接的な影響は無く、重要度が低いと考えられる。

#### (42) 原子炉圧力容器破損 [圧力容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器は、下部プレナムに堆積した溶融炉心との熱伝達による熱的負荷によって破損に至る。原子炉圧力容器破損の破損時期と破損形態（破損口の口径）は、原子炉圧力容器内及び原子炉格納

容器内での熔融炉心の挙動に影響を与える。水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対しては、原子炉压力容器の破損時期における核分裂生成物の移行挙動への影響や、放出された熔融炉心の反応による非凝縮性ガスの発生による影響が考えられ、重要度が高いと考えられる。高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の評価指標である原子炉圧力に対しては、原子炉压力容器破損までに低減することが目的であり、重要度が高いと考えられる。格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度、熔融燃料－冷却材相互作用の評価指標である原子炉格納容器圧力及び熔融炉心・コンクリート相互作用の評価指標であるコンクリート侵食量に対しては、原子炉压力容器の破損形態による熔融炉心落下時の冷却による蒸気の発生挙動や熔融炉心の拡がり挙動への影響、破損時期による放出された熔融炉心の崩壊熱による影響が考えられ、重要度が高いと考えられる。

#### (43) 放射線水分解等による水素・酸素発生 [压力容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、崩壊熱による炉心ヒートアップに伴い、ジルコニウム－水反応によって水素が発生し、水蒸気と共に原子炉格納容器内に移動した後、原子炉格納容器圧力に影響を与える可能性がある。したがって、放射線水分解等による水素・酸素発生は、格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が中程度であると考えられる。水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対しては、濃度を可燃限界以下に抑制することそのものが評価指標となり、重要度が高いと考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標への影響は小さく、重要度が低いと考えられる。

#### (44) 原子炉压力容器内 FP 挙動 [压力容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、燃料被覆管の破損や炉心の熔融によって、核分裂生成物（FP）が原子炉压力容器内に放出される。放出された FP は、原子炉压力容器内の気相や液相の流れに伴って輸送され、炉心あるいは熔融炉心の中に残存した FP は、熔融炉心の移動に伴って輸送される。気相中に浮遊するエアロゾル状の FP は、原子炉压力容器壁面や内部構造物等の構造材表面へ付着し、崩壊熱によって構造材の温度上昇に寄与する。原子炉压力容器の外面が非常に高温となった場合には、自然対流及び輻射熱伝達により格納容器内雰囲気温度に影響を与える可能性があるが、原子炉压力容器からの輻射は保温材を介していることから影響は小さく、自然対流による影響が支配的となる。FP の移行挙動による影響として、FP による水の放射線分解に伴う水素及び酸素発生、熔融炉心の持つ崩壊熱を始めとした各物理領域において熱源となる崩壊熱分布に影響が考えられる。したがって、原子炉压力容器内 FP 挙動は、格納容器過圧・過温度破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度、水素燃焼の評価指標である酸素濃度及び熔融炉心・コンク



リート相互作用の評価指標であるコンクリート侵食量に対して、重要度が中程度であると考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対する影響は無い。

(45) 原子炉圧力容器破損後の高圧溶融炉心放出 [格納容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、高圧溶融物放出及びそれに続く格納容器雰囲気直接加熱の発生防止を評価しており、現象モデルとしては考慮しない。

(46) 格納容器雰囲気直接加熱 [格納容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、高圧溶融物放出及びそれに続く格納容器雰囲気直接加熱の発生防止を評価しており、現象モデルとしては考慮しない。

(47) 格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり [格納容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器破損後、格納容器下部に落下した溶融炉心が床面に堆積し、格納容器下部に事前に注水されたプール水による冷却を伴いつつ、格納容器下部のコンクリートを加熱する。このとき、コンクリート温度が融解温度を上回る場合に、コンクリートが分解し、非凝縮性ガスが発生する可能性がある。溶融炉心の堆積状態は、落下後の溶融炉心の堆積高さ、水プールへの伝熱面積に影響を与える。したがって、格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり、溶融炉心・コンクリート相互作用の評価指標であるコンクリート侵食量に対して、重要度が高いと考えられる。また、格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対する影響は小さく、重要度が低いと考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対する影響は無い。

(48) 内部構造物の溶融、破損 [格納容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器破損後、格納容器下部に溶融炉心が落下し、格納容器下部区画内に存在する制御棒駆動装置等の構造物を溶融、破損させる可能性がある。しかしながら、溶融炉心の落下時に溶融炉心との接触によって溶融、破損する構造物は限定的であり、影響は小さく、内部構造物の溶融、破損は溶融燃料-冷却材相互作用の評価指標である原子炉格納容器圧力、溶融炉心・コンクリート相互作用の評価指標であるコンクリート侵食量に対して、重要度が低いと考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対する影響は無い。

(49) 原子炉圧力容器外 FCI (溶融炉心細粒化) [格納容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器破損後、格納容器下

部に水プールが存在する場合、落下する熔融炉心が水プールに接触する際の液-液混合に伴って、熔融炉心が細粒化して水中に分散し、分散した粒子状デブリからの熱伝達によって急速な水蒸気発生が起こり、圧力スパイクが発生する可能性がある。したがって、原子炉圧力容器外 FCI(熔融炉心細粒化)は、格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が中程度であると考えられる。また、格納容器下部における熔融炉心から水への熱伝達及び熔融炉心の形態は格納容器下部における熔融炉心の冷却性に影響を与える可能性があり、熔融燃料-冷却材相互作用の評価指標である原子炉格納容器圧力、熔融炉心・コンクリート相互作用の評価指標であるコンクリート侵食量に対して、重要度が高いと考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対する影響は無い。

#### (50) 原子炉圧力容器外 FCI (デブリ粒子熱伝達) [格納容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器破損後、格納容器下部に水プールが存在する場合、落下する熔融炉心が水プールに接触する際の液-液混合に伴って、熔融炉心が細粒化して水中に分散し、分散した粒子状デブリからの熱伝達によって急速な水蒸気発生が起こり、圧力スパイクが発生する可能性がある。したがって、原子炉圧力容器外 FCI(デブリ粒子熱伝達)は、格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して重要度が中程度であると考えられる。また、格納容器下部における熔融炉心から水への熱伝達及び熔融炉心の形態は格納容器下部における熔融炉心の冷却性に影響を与える可能性があり、熔融燃料-冷却材相互作用の評価指標である原子炉格納容器圧力、熔融炉心・コンクリート相互作用の評価指標であるコンクリート侵食量に対して、重要度が高いと考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対する影響は無い。

#### (51) 格納容器直接接触 [格納容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器の破損によって、下部プレナムに蓄積していた熔融炉心が格納容器下部に放出される可能性があるが、格納容器バウンダリは、熔融炉心と直接接触することが無い構造となっており、格納容器直接接触は、格納容器破損防止における各評価指標への影響は無い。

#### (52) 熔融炉心と格納容器下部プール水との伝熱 [格納容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器破損後、格納容器下部に落下した熔融炉心が床面に堆積し、プール水による冷却を伴いつつ、格納容器下部のコンクリートを加熱する。このとき、コンクリート温度が融解温度を上回る場合に、コンクリートが分解し、非凝縮性ガスが発生する可能性がある。したがって、熔融炉心と格納容器下部プール水との伝熱は、格納容器破損防止における熔融

炉心・コンクリート相互作用に対する評価指標であるコンクリート侵食量に対して、重要度が高いと考えられる。また、非凝縮性ガスの発生により、格納容器過圧・過温破損における評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対する影響があり、重要度が中程度であると考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対する影響は無い。

#### (53) 溶融炉心とコンクリートの伝熱 [格納容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器破損後、格納容器下部に落下した溶融炉心が床面に堆積し、格納容器下部に事前に注水されたプール水による冷却を伴いつつ、格納容器下部のコンクリートを加熱する。このとき、コンクリート温度が融解温度を上回る場合に、コンクリートが分解し、非凝縮性ガスが発生する可能性がある。したがって、溶融炉心とコンクリートの伝熱は、溶融炉心・コンクリート相互作用の評価指標であるコンクリート侵食量に対して、重要度が高いと考えられる。また、非凝縮性ガスの発生により、格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対する影響があり、重要度が中程度であると考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対する影響は無い。

#### (54) コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生 [格納容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器破損後、格納容器下部に落下した溶融炉心が床面に堆積し、格納容器下部に事前に注水されたプール水による冷却を伴いつつ、格納容器下部のコンクリートを加熱する。このとき、コンクリート温度が融解温度を上回る場合に、コンクリートが分解し、非凝縮性ガスが発生する可能性がある。したがって、コンクリートの分解及び非凝縮性ガスの発生は、溶融炉心・コンクリート相互作用の評価指標であるコンクリート侵食量に対して、重要度が高いと考えられる。また、非凝縮性ガスの発生により、格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度及び水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対する影響があり、重要度が中程度であると考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対する影響は無い。

#### (55) 溶融炉心の再臨界 [格納容器(炉心損傷後)]

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、原子炉圧力容器の破損によって、下部プレナムに蓄積していた溶融炉心が格納容器下部に放出される可能性があるが、この時、溶融燃料は炉心形状を維持しておらず、落下時において、制御棒等の中性子吸収材も溶融炉心内に取り込んでいると考えられることから、溶融炉心の再臨界

は発生しないと考えられる。したがって、溶融炉心の再臨界は格納容器破損防止における各評価指標への影響は無い。

**(56) 原子炉格納容器内 FP 挙動 [格納容器(炉心損傷後)]**

評価する具体的な重要事故シーケンスでは、燃料被覆管破損や炉心溶融が発生すると、核分裂生成物（FP）が原子炉圧力容器内に放出される。放出された FP は、原子炉圧力容器内の気相や液相の流れに伴って輸送され、LOCA 破断口や逃がし安全弁を経由して原子炉格納容器内に移動し、各物理領域において熱源となる崩壊熱分布に影響する。したがって、原子炉格納容器内 FP 挙動は、格納容器過圧・過温破損の評価指標である原子炉格納容器圧力及び温度に対して、重要度が中程度であると考えられる。また、ウェットウェルに放出された一部の FP による水の放射線分解に伴って水素及び酸素が発生し、ウェットウェル空間部の非凝縮性ガスの濃度分布に影響を与えるため、水素燃焼の評価指標である酸素濃度に対して、重要度が中程度であると考えられる。溶融炉心・コンクリート相互作用における評価指標であるコンクリート侵食量については、溶融炉心の持つ崩壊熱に影響があるものの、評価指標への影響は小さく、重要度が低いと考えられる。格納容器破損防止におけるその他の評価指標に対する影響は無い。

表 2.3-1 有効性評価の物理現象のランク (炉心損傷防止) (1/3)

| 分類 |     | 事故シーケンス<br>物理現象 |                  | 炉心損傷防止        |               |               |               |              |
|----|-----|-----------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
|    |     |                 |                  | 高圧・低圧注水機能喪失   | 高圧注水・減圧機能喪失   | 全交流動力電源喪失     | 崩壊熱除去機能喪失     | LOCA 時注水機能喪失 |
|    |     | 評価指標            | 原子炉格納容器圧力及び温度    | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉格納容器圧力及び温度 |              |
| 炉心 | 核   | (1)             | 核分裂出力            | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (2)             | 出力分布変化           | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (3)             | 反応度フィードバック効果     | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (4)             | 制御棒反応度効果         | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (5)             | 崩壊熱              | <b>H</b>      | <b>H</b>      | <b>H</b>      | <b>H</b>      | <b>H</b>     |
|    |     | (6)             | 三次元効果            | I             | I             | I             | I             | I            |
|    | 燃料  | (7)             | 燃料棒内温度変化         | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (8)             | 燃料棒表面熱伝達         | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (9)             | 沸騰遷移             | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (10)            | 燃料被覆管酸化          | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (11)            | 燃料被覆管変形          | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (12)            | 三次元効果            | L             | L             | L             | L             | L            |
|    | 熱流動 | (13)            | 沸騰・ボイド率変化        | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (14)            | 気液分離 (水位変化) ・対向流 | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (15)            | 気液熱非平衡           | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (16)            | 圧力損失             | L             | L             | L             | L             | L            |
|    |     | (17)            | 三次元効果            | L             | L             | L             | L             | L            |

表 2.3-1 有効性評価の物理現象のランク (炉心損傷防止) (2/3)

| 分類                    | 事故シーケンス |                        | 炉心損傷防止        |               |               |               |               |
|-----------------------|---------|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                       | 物理現象    | 評価指標                   | 高圧・低圧注水機能喪失   | 高圧注水・減圧機能喪失   | 全交流動力電源喪失     | 崩壊熱除去機能喪失     | LOCA 時注水機能喪失  |
|                       |         |                        | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉格納容器圧力及び温度 |
| 原子炉圧力容器<br>(逃がし安全弁含む) | (18)    | 冷却材流量変化                | L             | L             | L             | L             | L             |
|                       | (19)    | 冷却材放出 (臨界流・差圧流)        | L             | L             | L             | L             | L             |
|                       | (20)    | 沸騰・凝縮・ボイド率変化           | L             | L             | L             | L             | L             |
|                       | (21)    | 気液分離・対向流               | L             | L             | L             | L             | L             |
|                       | (22)    | 気液熱非平衡                 | I             | I             | I             | I             | I             |
|                       | (23)    | 圧力損失                   | L             | L             | L             | L             | L             |
|                       | (24)    | 構造材との熱伝達               | L             | L             | L             | L             | L             |
|                       | (25)    | ECCS 注水 (給水系・代替注水設備含む) | M             | M             | M             | M             | M             |
|                       | (26)    | ほう酸水の拡散                | I             | I             | I             | I             | I             |
|                       | (27)    | 三次元効果                  | L             | L             | L             | L             | L             |

表 2.3-1 有効性評価の物理現象のランク (炉心損傷防止) (3/3)

| 分類      | 事故シーケンス |                   | 炉心損傷防止        |               |               |               |               |
|---------|---------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|         | 物理現象    | 評価指標              | 高圧・低圧注水機能喪失   | 高圧注水・減圧機能喪失   | 全交流動力電源喪失     | 崩壊熱除去機能喪失     | LOCA 時注水機能喪失  |
|         |         |                   | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉格納容器圧力及び温度 |
| 原子炉格納容器 | (28)    | 冷却材放出             | L             | L             | L             | L             | L             |
|         | (29)    | 格納容器各領域間の流動       | <u>H</u>      | <u>H</u>      | <u>H</u>      | <u>H</u>      | <u>H</u>      |
|         | (30)    | サプレッション・プール冷却     | I             | <u>H</u>      | <u>H</u>      | <u>H</u>      | I             |
|         | (31)    | 気液界面の熱伝達          | M             | M             | M             | M             | M             |
|         | (32)    | 構造材との熱伝達及び内部熱伝導   | M             | M             | M             | M             | M             |
|         | (33)    | スプレイ冷却            | <u>H</u>      | I             | <u>H</u>      | <u>H</u>      | <u>H</u>      |
|         | (34)    | 放射線水分解等による水素・酸素発生 | I             | I             | I             | I             | I             |
|         | (35)    | 格納容器ベント           | <u>H</u>      | I             | <u>H</u>      | <u>H</u>      | <u>H</u>      |

表 2.3-2 有効性評価の物理現象のランク（格納容器破損防止）（1/5）

| 分類 | 事故シーケンス |                     | 格納容器破損防止      |                     |              |          |                 |
|----|---------|---------------------|---------------|---------------------|--------------|----------|-----------------|
|    |         |                     | 格納容器過圧・過温破損   | 高压溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱 | 溶融燃料-冷却材相互作用 | 水素燃焼     | 溶融炉心・コンクリート相互作用 |
|    | 物理現象    | 評価指標                | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉圧力               | 原子炉格納容器圧力    | 酸素濃度     | コンクリート侵食量       |
| 炉心 | 核       | (1) 核分裂出力           | I             | I                   | I            | I        | I               |
|    |         | (2) 出力分布変化          | I             | I                   | I            | I        | I               |
|    |         | (3) 反応度フィードバック効果    | I             | I                   | I            | I        | I               |
|    |         | (4) 制御棒反応度効果        | I             | I                   | I            | I        | I               |
|    |         | (5) 崩壊熱             | <u>H</u>      | <u>H</u>            | <u>H</u>     | <u>H</u> | <u>H</u>        |
|    |         | (6) 三次元効果           | I             | I                   | I            | I        | I               |
|    | 燃料      | (7) 燃料棒内温度変化        | <u>H</u>      | <u>H</u>            | <u>H</u>     | <u>H</u> | <u>H</u>        |
|    |         | (8) 燃料棒表面熱伝達        | <u>H</u>      | <u>H</u>            | <u>H</u>     | <u>H</u> | <u>H</u>        |
|    |         | (9) 沸騰遷移            | I             | I                   | I            | I        | I               |
|    |         | (10) 燃料被覆管酸化        | <u>H</u>      | <u>H</u>            | <u>H</u>     | <u>H</u> | <u>H</u>        |
|    |         | (11) 燃料被覆管変形        | <u>H</u>      | <u>H</u>            | <u>H</u>     | <u>H</u> | <u>H</u>        |
|    |         | (12) 三次元効果          | I             | I                   | I            | I        | I               |
|    | 熱流動     | (13) 沸騰・ボイド率変化      | <u>H</u>      | <u>H</u>            | <u>H</u>     | <u>H</u> | <u>H</u>        |
|    |         | (14) 気液分離（水位変化）・対向流 | <u>H</u>      | <u>H</u>            | <u>H</u>     | <u>H</u> | <u>H</u>        |
|    |         | (15) 気液熱非平衡         | L             | L                   | L            | L        | L               |
|    |         | (16) 圧力損失           | L             | L                   | L            | L        | L               |
|    |         | (17) 三次元効果          | I             | I                   | I            | I        | I               |



表 2.3-2 有効性評価の物理現象のランク（格納容器破損防止）（2/5）

| 分類                    | 事故シーケンス |                       | 格納容器破損防止      |                     |              |      |                 |
|-----------------------|---------|-----------------------|---------------|---------------------|--------------|------|-----------------|
|                       |         |                       | 格納容器過圧・過温破損   | 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱 | 溶融燃料－冷却材相互作用 | 水素燃焼 | 溶融炉心・コンクリート相互作用 |
|                       | 物理現象    | 評価指標                  | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉圧力               | 原子炉格納容器圧力    | 酸素濃度 | コンクリート侵食量       |
| 原子炉圧力容器<br>(逃がし安全弁含む) | (18)    | 冷却材流量変化               | L             | L                   | L            | L    | L               |
|                       | (19)    | 冷却材放出（臨界流・差圧流）        | L             | M                   | L            | L    | L               |
|                       | (20)    | 沸騰・凝縮・ボイド率変化          | L             | L                   | L            | L    | L               |
|                       | (21)    | 気液分離・対向流              | L             | L                   | L            | L    | L               |
|                       | (22)    | 気液熱非平衡                | L             | L                   | L            | L    | L               |
|                       | (23)    | 圧力損失                  | L             | L                   | L            | L    | L               |
|                       | (24)    | 構造材との熱伝達              | L             | L                   | L            | L    | L               |
|                       | (25)    | ECCS 注水（給水系・代替注水設備含む） | M             | I                   | I            | M    | <u>H</u>        |
|                       | (26)    | ほう酸水の拡散               | I             | I                   | I            | I    | I               |
|                       | (27)    | 三次元効果                 | I             | I                   | I            | I    | I               |

表 2.3-2 有効性評価の物理現象のランク（格納容器破損防止）（3/5）

| 分類      | 事故シーケンス |                   | 格納容器破損防止      |                     |              |          |                 |
|---------|---------|-------------------|---------------|---------------------|--------------|----------|-----------------|
|         |         |                   | 格納容器過圧・過温破損   | 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱 | 溶融燃料－冷却材相互作用 | 水素燃焼     | 溶融炉心・コンクリート相互作用 |
|         | 物理現象    | 評価指標              | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉圧力               | 原子炉格納容器圧力    | 酸素濃度     | コンクリート侵食量       |
| 原子炉格納容器 | (28)    | 冷却材放出             | L             | L                   | L            | L        | L               |
|         | (29)    | 格納容器各領域間の流動       | <u>H</u>      | L                   | <u>H</u>     | <u>H</u> | L               |
|         | (30)    | サブプレッション・プール冷却    | <u>H</u>      | I                   | I            | <u>H</u> | I               |
|         | (31)    | 気液界面の熱伝達          | M             | L                   | L            | L        | L               |
|         | (32)    | 構造材との熱伝達及び内部熱伝導   | M             | L                   | L            | L        | L               |
|         | (33)    | スプレイ冷却            | <u>H</u>      | I                   | I            | <u>H</u> | I               |
|         | (34)    | 放射線水分解等による水素・酸素発生 | M             | L                   | L            | <u>H</u> | L               |
|         | (35)    | 格納容器ベント           | <u>H</u>      | I                   | I            | <u>H</u> | I               |

表 2.3-2 有効性評価の物理現象のランク（格納容器破損防止）（4/5）

| 分類                               | 事故シーケンス |                        | 格納容器破損防止      |                     |              |          |                 |
|----------------------------------|---------|------------------------|---------------|---------------------|--------------|----------|-----------------|
|                                  | 物理現象    | 評価指標                   | 格納容器過圧・過温破損   | 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱 | 溶融燃料－冷却材相互作用 | 水素燃焼     | 溶融炉心・コンクリート相互作用 |
|                                  |         |                        | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉圧力               | 原子炉格納容器圧力    | 酸素濃度     | コンクリート侵食量       |
| 原子炉圧力容器<br>(逃がし安全弁含む)<br>(炉心損傷後) | (36)    | リロケーション                | <u>H</u>      | <u>H</u>            | <u>H</u>     | <u>H</u> | <u>H</u>        |
|                                  | (37)    | 原子炉圧力容器内 FCI(溶融炉心細粒化)  | L             | M                   | L            | I        | L               |
|                                  | (38)    | 原子炉圧力容器内 FCI(デブリ粒子熱伝達) | L             | M                   | L            | I        | L               |
|                                  | (39)    | 溶融炉心の再臨界               | I             | I                   | I            | I        | I               |
|                                  | (40)    | 構造材との熱伝達               | <u>H</u>      | <u>H</u>            | <u>H</u>     | <u>H</u> | <u>H</u>        |
|                                  | (41)    | 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達       | M             | <u>H</u>            | L            | I        | <u>H</u>        |
|                                  | (42)    | 原子炉圧力容器破損              | <u>H</u>      | <u>H</u>            | <u>H</u>     | <u>H</u> | <u>H</u>        |
|                                  | (43)    | 放射線水分解等による水素・酸素発生      | M             | L                   | L            | <u>H</u> | L               |
|                                  | (44)    | 原子炉圧力容器内 FP 挙動         | M             | I                   | I            | M        | M               |

表 2.3-2 有効性評価の物理現象のランク（格納容器破損防止）（5/5）

| 分類                 | 事故シーケンス |                        | 格納容器破損防止      |                     |              |      |                 |
|--------------------|---------|------------------------|---------------|---------------------|--------------|------|-----------------|
|                    |         |                        | 格納容器過圧・過温破損   | 高压溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱 | 溶融燃料-冷却材相互作用 | 水素燃焼 | 溶融炉心・コンクリート相互作用 |
|                    | 物理現象    | 評価指標                   | 原子炉格納容器圧力及び温度 | 原子炉圧力               | 原子炉格納容器圧力    | 酸素濃度 | コンクリート侵食量       |
| 原子炉格納容器<br>(炉心損傷後) | (45)    | 原子炉圧力容器破損後の高压溶融炉心放出    | —             | —                   | —            | —    | —               |
|                    | (46)    | 格納容器雰囲気直接加熱            | —             | —                   | —            | —    | —               |
|                    | (47)    | 格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり     | L             | I                   | I            | I    | <u>H</u>        |
|                    | (48)    | 内部構造物の溶融、破損            | I             | I                   | L            | I    | L               |
|                    | (49)    | 原子炉圧力容器外 FCI(溶融炉心細粒化)  | M             | I                   | <u>H</u>     | I    | <u>H</u>        |
|                    | (50)    | 原子炉圧力容器外 FCI(デブリ粒子熱伝達) | M             | I                   | <u>H</u>     | I    | <u>H</u>        |
|                    | (51)    | 格納容器直接接触               | I             | I                   | I            | I    | I               |
|                    | (52)    | 溶融炉心と格納容器下部プール水との伝熱    | M             | I                   | I            | I    | <u>H</u>        |
|                    | (53)    | 溶融炉心とコンクリートの伝熱         | M             | I                   | I            | I    | <u>H</u>        |
|                    | (54)    | コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生     | M             | I                   | I            | M    | <u>H</u>        |
|                    | (55)    | 溶融炉心の再臨界               | I             | I                   | I            | I    | I               |
|                    | (56)    | 原子炉格納容器内 FP 挙動         | M             | I                   | I            | M    | L               |

「—」：現象の発生防止を評価しており，現象モデルとしては考慮していないため，ランクの分類の対象としない。

### 3. 解析モデルについて

#### 3.1 コード概要

MAAP (Modular Accident Analysis Program) コードは、米国産業界が実施した IDCOR (Industry Degraded Core Rulemaking) プログラムにおいて、1980 年代の初めに米国 FAI 社 (Fauske & Associates, LLC.) によって開発されたコードであり、プログラムの完了に伴い、所有権が米国 EPRI (Electric Power Research Institute) に移管され、EPRI を中心とした MUG (MAAP User's Group) のもとで保守及び改良が進められている。MAAP コードは、軽水炉のシビアアクシデント時の原子炉圧力容器、原子炉格納容器及び原子炉建屋内の熱水力／核分裂生成物 (FP) の放出・移行挙動を同時に一貫して解析できることに特徴があり、PRA やシビアアクシデントマネジメントの策定等において、米国を始め、世界的に広く利用されている。

MAAP は、シビアアクシデントの事象進展の各段階を網羅し、炉心、原子炉圧力容器、原子炉格納容器内で起こると考えられる重要な事故時の物理現象をモデル化するとともに、工学的安全施設や炉心損傷防止対策あるいは格納容器破損防止対策で想定する各種の機器についてのモデルを備えている。また、FP に関する物理現象をモデル化しており、事故時に炉心溶融に伴って原子炉圧力容器や原子炉格納容器内に放出される FP の挙動についても取り扱うことが可能である。このように、広範囲の物理現象を取り扱うことが可能な総合解析コードであり、シビアアクシデントで想定される種々の事故シーケンスについて、起因事象から安定した状態、あるいは過圧・過温により格納容器健全性が失われる状態まで計算が可能であることが特徴である。

また、MAAP の BWR プラント用解析モデルは、原子炉型式及び格納容器型式の違いを考慮してプラントタイプごとに適用可能なように開発されたものであり、プラント設計や運転状態に基づいて設定される入力条件及びそれらに基づく過渡計算中のプロセスの値の変動範囲を考慮したものである。

MAAP の熱水力モデルでは、質量・エネルギー保存則を解く一方、運動量方程式を準静的な取扱いとしているが、系内の質量・エネルギーの収支を適切に取り扱っており、長期的な原子炉及び格納容器の応答の評価に対し、適用性を有する。

なお、事故シーケンスの解析においては、溶融炉心とコンクリートの相互作用のようなシビアアクシデント特有の現象等、現時点でも研究段階のものがあ、実機規模での現象が必ずしも解明しきれていない現象も含まれている。

### 3.2 重要現象に対する解析モデル

2章において、重要現象に分類された物理現象（表 2.3-1 及び表 2.3-2 における各事故シーケンスグループに対して、1つでも「H」又は「M」に分類された物理現象）について、その物理現象を評価するために必要となる解析モデルを表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 重要現象に対する解析モデル (1/2)

| 分類                    | 重要現象                   | 解析モデル   |
|-----------------------|------------------------|---|
| 炉心 (核)                | 崩壊熱                    | 炉心モデル (原子炉出力及び崩壊熱) (3.3.2(2))<br>核分裂生成物 (FP) 挙動モデル (FP の移動に伴う崩壊熱分配モデル) (3.3.7(3)) |
| 炉心 (燃料)               | 燃料棒内温度変化               | 炉心モデル (炉心熱水力モデル) (3.3.2(3))<br>熔融炉心の挙動モデル (炉心ヒートアップ) (3.3.6(1))                   |
|                       | 燃料棒表面熱伝達               |   |
|                       | 燃料被覆管酸化                |   |
|                       | 燃料被覆管変形                |   |
| 炉心 (熱流動)              | 沸騰・ボイド率変化              | 炉心モデル (炉心水位計算モデル) (3.3.2(4))  |
|                       | 気液分離 (水位変化)・対向流        |   |
| 原子炉圧力容器<br>(逃がし安全弁含む) | 冷却材放出 (臨界流・差圧流)        | 原子炉圧力容器モデル (破断流モデル) (3.3.3(3))  |
|                       | ECCS 注水 (給水系・代替注水設備含む) | 安全系モデル (非常用炉心冷却系) (3.3.5(1))<br>安全系モデル (代替注水設備) (3.3.5(4))                        |
| 原子炉格納容器               | 格納容器各領域間の流動            | 格納容器モデル (格納容器の熱水力モデル) (3.3.4(2))  |
|                       | サプレッション・プール冷却          | 安全系モデル (非常用炉心冷却系) (3.3.5(1))  |
|                       | 気液界面の熱伝達               | 格納容器モデル (格納容器の熱水力モデル) (3.3.4(2))  |
|                       | 構造材との熱伝達及び内部熱伝導        |   |
|                       | スプレイ冷却                 | 安全系モデル (格納容器スプレイ) (3.3.5(2))<br>安全系モデル (代替注水設備) (3.3.5(4))                        |
|                       | 放射線水分解等による水素・酸素発生      | 格納容器モデル (水素発生) (3.3.4(3))   |
|                       | 格納容器ベント                | 格納容器モデル (格納容器の熱水力モデル) (3.3.4(2))  |

表 3.2-1 重要現象に対する解析モデル (2/2)

| 分類                               | 重要現象                     | 解析モデル                                   |
|----------------------------------|--------------------------|---|
| 原子炉圧力容器<br>(炉心損傷後)<br>(逃がし安全弁含む) | リロケーション                  | 溶融炉心の挙動モデル (リロケーション) (3.3.6(2))         |
|                                  | 原子炉圧力容器内 FCI(溶融炉心細粒化)    | 溶融炉心の挙動モデル (下部プレナムでの溶融炉心の挙動) (3.3.6(3)) |
|                                  | 原子炉圧力容器内 FCI(デブリ粒子熱伝達)   |   |
|                                  | 構造材との熱伝達                 |   |
|                                  | 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達         |   |
|                                  | 原子炉圧力容器破損                | 溶融炉心の挙動モデル (原子炉圧力容器破損モデル) (3.3.6(4))    |
|                                  | 放射線水分解等による水素・酸素発生        | 格納容器モデル (水素発生) (3.3.4(3))               |
| 原子炉圧力容器内 FP 挙動                   | 核分裂生成物 (FP) 挙動モデル(3.3.7) |   |
| 原子炉格納容器<br>(炉心損傷後)               | 格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり       | 溶融炉心の挙動モデル (格納容器下部での溶融炉心の挙動) (3.3.6(5)) |
|                                  | 原子炉圧力容器外 FCI(溶融炉心細粒化)    |   |
|                                  | 原子炉圧力容器外 FCI(デブリ粒子熱伝達)   |   |
|                                  | 溶融炉心と格納容器下部プール水との伝熱      |   |
|                                  | 溶融炉心とコンクリートの伝熱           |   |
|                                  | コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生       |   |
|                                  | 原子炉格納容器内 FP 挙動           | 核分裂生成物 (FP) 挙動モデル(3.3.7)                |



### 3.3 解析モデル

#### 3.3.1 熱水力挙動に関する基礎方程式

MAAP の炉心，原子炉圧力容器，格納容器モデルは，ノードとジャンクションにより構成されており，各ノードにおいて，水，水蒸気，非凝縮性ガスの質量とエネルギーから状態方程式により圧力及び温度を計算し，ジャンクションにおいては流量を計算する。運動量バランスは準定常として扱われ，代数方程式で表されるため，運動量に関する微分方程式は無い。

質量とエネルギーの変化率は，各ノード（領域）における物質ごとの質量及びエネルギーバランスより求められる。図 3.3-1 に概念図を示す。領域  $i$  における物質  $j$  の質量変化率  $(\dot{M}_i)_j$  は，

$$(\dot{M}_i)_j = (W_{in})_j - (W_{out})_j \pm \left( \begin{array}{c} \text{相変化による} \\ \text{質量変化} \end{array} \right)_j \pm \left( \begin{array}{c} \text{化学反応による} \\ \text{質量変化} \end{array} \right)_j \quad (3.3.1-1)$$

により求める。ここで，質量変化率  $(W_{in})_j$  は物質  $j$  の対象領域  $i$  への流入量， $(W_{out})_j$  は物質  $j$  の領域  $i$  からの流出量である。

領域  $i$  のエネルギー変化率  $(\dot{U}_i)_j$  は，各物質の入出熱の合計であり，

$$(\dot{U}_i)_j = (W_{in}h_{in})_j - (W_{out}h_i)_j \pm \left( \begin{array}{c} \text{相変化} \\ \text{割合} \end{array} \times \text{潜熱} \right)_j \\ \pm \left( \begin{array}{c} \text{化学} \\ \text{反応熱} \end{array} \right)_j - \left( \begin{array}{c} \text{機器・壁への} \\ \text{熱伝達} \end{array} \right)_j \pm \left( \begin{array}{c} \text{物質間} \\ \text{熱伝達} \end{array} \right)_j + (\text{崩壊熱})_j \quad (3.3.1-2)$$

により求める。 $(h_{in})_j$  は対象領域  $i$  の上流側領域の物質  $j$  の比エンタルピ， $(h_i)_j$  は対象領域  $i$  の物質  $j$  の比エンタルピである。上式の化学反応熱とは，ジルコニウムの酸化反応熱等である。崩壊熱については，FP の気体中での浮遊，水中での沈着，ヒートシンクへの沈着，熔融炉心での沈着などの状態も含み，各ノードでの熱源として取り扱う。

領域間はジャンクションで結合されるが，ジャンクション  $j$  の流量  $W_j$  は運動量の定常のバランス式から評価される。

MAAP コードは，事故直後の原子炉圧力容器から格納容器へのブローダウン過程については，そのダイナミックな挙動の模擬には不確かさが大きいものの，冷却材流出を臨界流モデルで評価し，原子炉圧力容器や格納容器内の質量・エネルギー保存則を適切に考慮しており，冷却材流出に伴う炉心ヒートアップや格納容器内熱水力挙動を模擬できる。また，冷却材の流出が減少し，格納容器内の流動が緩やかにな

り、崩壊熱による静的な加圧・加熱が支配的となった以降は、諸現象を適切にモデル化しているため、長期間の格納容器圧力・温度応答評価に適用性を有する。

### 3.3.2 炉心モデル

炉心モデルは、あらゆる事故フェーズにおける熱水力的な挙動、炉内構造物の応答を考慮したモデルである。以下、炉心モデルに関して述べる。

#### (1) ノード分割

炉心モデルは、径方向及び高さ方向にノード分割した、R-Zの2次元モデルである。ノード分割の例を図3.3-2に示す。ノードごとに燃料、燃料被覆管、制御棒、ウォータロッド、チャンネルボックス、冷却材を模擬し、それぞれの間の熱伝達、冷却材の減少と回復、水素発生、自然対流、燃料被覆管の変形・膨れ、溶融プールの形成といった重要なプロセスについて計算している。

入力条件としては、燃料（FP組成含む）、燃料被覆管、制御棒、ウォータロッド、チャンネルボックスの質量や形状、流体の流路として炉心の流路面積及び炉心バイパス領域の流路面積を与え、これらに基づき熱水力挙動、炉内構造物応答を計算する。なお、FP組成については、元素ごとに質量を入力値で与える。

ノードの分割数は、入力値により与え、例えば、径方向に[ ]、高さ方向に[ ]としている。径方向は輻射熱伝達により温度勾配が小さく、分割数の影響は小さいが、軸方向の分割数は高さ方向の温度勾配がジルコニウム-水反応の速度や炉心溶融挙動に影響するため10以上としている。なお、径方向の分割は任意であるが、各ノードの体積割合はノードに含まれる燃料集合体を考慮して設定し、解析の安定性のため、各分割要素の差があまり大きくならないように設定している。

#### (2) 原子炉出力及び崩壊熱

初期の原子炉出力分布は入力値として与える。R-Z体系にノード分割された炉心に対して、個々のプラントの燃料特性を反映させた径方向・軸方向の炉心出力分布を入力値として与える。その炉心出力分布は各ノードの崩壊熱割合（熱出力割合）として表現され、炉心全出力が各ノードの崩壊熱割合に応じて分配される。炉心の溶融により炉心内の物質が移動しても、移動した質量に応じて崩壊熱割合も移動するため炉心溶融後の発熱分布を評価することができる。

事象初期から原子炉スクラムに至るまでの期間、原子炉出力は初期出力を維持し、原子炉がスクラムすると出力は崩壊熱レベルまで低下するとしている。この出力変化の模擬については、MAAPが適用される事故シーケンスでは原子炉出力及び出力分布の時間変化が顕著では無い、又は早期に原子炉スクラムに至るため、評価結果に与える影響は小さい。

崩壊熱については、コード内蔵の ANSI/ANS 5.1-1979<sup>[1]</sup>モデルによって評価する。炉心溶融後に炉心領域から移動した FP と溶融炉心については表 3.3-2 に示す核種グループごとに崩壊熱の割合を与えることで、崩壊熱の移動量を評価する。

### (3) 炉心熱水力モデル

炉心に特有な熱水力モデルとして、炉心が露出する場合の挙動がある。

炉心露出の判定は、(4)に示す炉心水位計算モデルにより行う。冠水領域では、沸騰挙動に応じて燃料棒から液相への熱伝達と蒸気発生量を計算し、露出領域では、炉心がヒートアップすると、炉心域で気体の密度差が生じ、炉心と上部プレナム間で自然循環による流れが発生するため、この自然循環を考慮した対流伝熱等による燃料棒の冷却を計算する。炉心露出部と冷却材の熱伝達については、Dittus-Boelter の相関式を用いた計算を行う。なお、これら炉心の領域ごとに計算された流体側への伝熱量と蒸気発生量等は炉心全体で合計され、3.3.1 に示した質量とエネルギーの保存則の右辺ソース項に反映される。

炉心がヒートアップするにつれて燃料被覆管が酸化し、酸化ジルコニウムと水素が発生するとともに、酸化反応により発熱し、炉心の露出部分をさらに加熱する。この酸化反応計算には  $T > 1875K$  において Baker-Just の相関式 (3.3.2-1)、 $T \leq 1850K$  において Cathcart の相関式 (3.3.2-2) を用い、 $1850K \leq T < 1875K$  の間は内挿によって求める。

$$\dot{x} = \frac{3330}{2\rho_{Zr}^2 x} e^{-1.9046 \times 10^8 / RT} \quad T > 1875K \quad (3.3.2-1)$$

$$\dot{x} = \frac{294}{2\rho_{Zr}^2 x} e^{-1.671 \times 10^8 / RT} \quad T \leq 1850K \quad (3.3.2-2)$$

ここで、 $T[K]$  は燃料被覆管温度、 $x [m]$  は酸化厚さ、 $\rho_{Zr} [kg/m^3]$  はジルコニウムの密度、 $R [J/kg \cdot mole \cdot K]$  は気体定数である。この反応による物質変化と反応熱は、質量とエネルギーの保存則で考慮される。

炉心の熱伝達に関しては、炉心の冠水・露出、炉心形状に応じて熱伝達の計算を行っており、炉心の損傷・溶融状態も含めると、以下のとおり整理される。

| 炉心状態    |     | 伝熱面積  | 熱伝達          |
|---------|-----|---|--------------|
| 燃料自立状態  | 冠水時 | 円柱形状から計算                                    | 水への対流・輻射熱伝達  |
|         | 露出時 |   | ガスへの対流・輻射熱伝達 |
| 損傷・溶融状態 | 冠水時 | 炉心損傷状態に応じて段階的に定義された炉心形状のタイプ及びノード内炉心質量割合から計算 | 限界熱流束        |
|         | 露出時 |   | ガスへの対流・輻射熱伝達 |

#### (4) 炉心水位計算モデル

原子炉圧力容器内の水位及び二相水位の概要を図 3.3-3 に示す。

ダウンコマ及び炉心内の二相水位は、炉心露出前には二相混合体積から求めるが、炉心露出後には炉心径方向ノード（以下「チャンネル」という。）ごとの出力分布に応じた二相水位をもつと仮定する。このとき、一つ前のタイムステップにおける炉心での蒸発量を径方向出力ピーキングに基づいて全チャンネルに振り分け、各チャンネルの二相水位を求める。

まず、チャンネル  $J$  のガス流量  $W_{st}(J)$  を以下の式から求める。

$$W_{st}(J) = F_A(J) \left( (F_{PR}(J) W_{st,CORE} + W_{st,LP}) \right) \quad (3.3.2-3)$$

ここで、 $F_A(J)$  はチャンネル  $J$  の面積割合、 $F_{PR}(J)$  はチャンネル  $J$  の径方向ピーキング、 $W_{st,CORE}$  は一つ前のタイムステップでの炉心領域の蒸発量、 $W_{st,LP}$  は一つ前のタイムステップにおける下部プレナム領域の蒸発量である。

次に、チャンネル  $J$  の二相水位  $x_{2\phi}(J)$ （圧力容器底部からの水位）を以下の式で与える。

$$x_{2\phi}(J) = \left[ M_{w,sub} v_{w,ps} + \frac{M_{w,sup} v_{w,sup}}{1 - \alpha(J)} \right] / A_{fl} + (Z_{cpl} - Z_{bv}) \quad (3.3.2-4)$$

ここで、 $M_{w,sub}$  はサブクール領域の水の全質量、 $v_{w,ps}$  は炉心部の水の平均比容積、 $M_{w,sup}$  は沸騰領域の水の全質量、 $v_{w,sup}$  は沸騰領域の水の比容積、 $A_{fl}$  はチャンネル内部全流路面積、 $Z_{cpl}$  は炉心支持板高さ、 $Z_{bv}$  はベッセル底部高さであり、平均ボイド率  $\alpha(J)$  はドリフトフラックスモデルにより以下の式で評価する。

$$\alpha(J) = \frac{\varphi}{2 + C_0 \varphi} \quad (3.3.2-5)$$

ここで、 $C_0$  は比例定数、 $\varphi$  は気相の見かけ流速とドリフト速度  $U_\infty$  の比であり、 $U_\infty$  は以下の式によって評価する。

$$U_{\infty} = 1.53 \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{1/4} \quad (3.3.2-6)$$

ここで、 $\sigma$  は液相の表面張力、 $g$  は重力加速度、 $\rho_l$  は液相密度、 $\rho_g$  は気相密度である。

### 3.3.3 原子炉圧力容器モデル

原子炉圧力容器モデルは原子炉圧力容器内をモデル化し、炉心、上部プレナム、スタンドパイプ/セパレータ、蒸気ドーム、上部ダウンカマ、下部ダウンカマ、下部プレナム、再循環ループから構成され、この領域における水、蒸気、非凝縮性ガスの挙動の計算を行う。図 3.3-4 に BWR-5 を例として原子炉圧力容器モデルの概要を示す。以下、原子炉圧力容器モデルについて述べる。

#### (1) ノード分割

原子炉圧力容器内は水と気体で占められており、水領域として、炉心領域、ダウンカマ、下部プレナム、CRD チューブの 4 つの領域を考慮する。有効燃料上端以上の上部プレナム及びスタンドパイプまでの領域にある水は炉心領域の水の一部とし、炉心領域ではサブクール領域と沸騰領域、炉心上部のスプレイ水の質量とエネルギーを分けて計算する。ジェットポンプを有するプラントの場合、ジェットポンプ及び再循環ループ内の水はダウンカマ領域の水の一部として扱う。ダウンカマ領域では、ジェットポンプの内側と外側のサブノードに分けて水の質量を扱い、再循環ループ内の水はジェットポンプの外側の水に含まれ、ダウンカマ領域の水位が再循環ポンプ吸込位置高さ以上になると再循環ループが最初に満たされる。

残りの空間部は単一の気体領域として扱い、気体の全エネルギー及び各気体成分はこの中にあるものとする。気体の成分として、蒸気、水素、酸素、窒素、一酸化炭素、二酸化炭素を考慮し、二相領域内の蒸気も気体の一部とする。気体の体積、エネルギー及び質量に基づき原子炉圧力容器の圧力及び温度が計算され、水の圧力は気体の圧力と等しいとしている。

気体領域は、図 3.3-5 に示すように、原子炉圧力容器内を炉心、上部プレナム、スタンドパイプ/セパレータ、蒸気ドーム、上部ダウンカマ、下部ダウンカマ、下部プレナム、再循環ループの 8 つのサブノードに分割している。各サブノードに対して、気体温度、水素質量割合、FP グループごとの質量を計算し、その他の非凝縮性ガスの質量分布や圧力は全サブノードで同一とするため、蒸気の質量割合はサブノードごとに一意に定まる。

このノード分割は、国内外の典型的な BWR プラントの原子炉圧力容器を模擬した

もので、コード内に設定されたプリセットとなっており、各炉型に対して適用性を有する。

## (2) 原子炉压力容器の熱水力モデル

原子炉压力容器の熱水力応答は 3.3.1 に示した基礎方程式により計算するが、気相部の流動に関しては、ジャンクション  $j$  の流量  $W_j$  に対する次のバランス式で評価する。

$$\sum_j K_j W_j |W_j| = \sum_i g \Delta z_i \rho_i \quad (3.3.3-1)$$

ここで、 $K_j$  は流路の抵抗係数、 $\Delta z_i$  はノード高さ、 $\rho_i$  はノード密度、 $g$  は重力加速度である。上式両辺の和は原子炉压力容器内の閉ループに沿って和をとるものとし、左辺は流動抵抗の合計、右辺は密度差による駆動力の合計となり、これがバランスすると仮定してジャンクションの流量  $W_j$  を計算する。閉ループとして、i) 炉心→上部プレナム→スタンドパイプ/セパレータ→蒸気ドーム→上部ダウンカム→下部ダウンカム→下部プレナム、ii) スタンドパイプ/セパレータ→蒸気ドーム→上部ダウンカム、iii) 下部ダウンカム→再循環ループ→下部プレナムの 3 つの経路に対して考慮する。

原子炉压力容器では図 3.3-5 に示すヒートシンク（原子炉压力容器、炉内構造物）がモデル化されており、原子炉压力容器内においては、これらのヒートシンクと図中にヒートシンク表面番号で示したノード内の水、蒸気との熱伝達が計算される。また、水と原子炉压力容器ヒートシンクの熱伝達係数は、強制対流時、自然循環時を個別に取り扱っている。蒸気と原子炉压力容器ヒートシンクの熱伝達は、輻射と対流熱伝達を考慮している。対流熱伝達について、自然循環時及び強制対流時に分けて取り扱い、熱伝達係数を求める。

再循環ポンプ流量は入力値として与え、その流量が再循環ポンプのトリップまで維持される。再循環ポンプのトリップに伴い、入力値として与えたコストダウン曲線にしたがって自然循環へと移行する。

逃がし安全弁が開放される場合、逃がし安全弁から放出された冷却材は、サプレッション・プールに導かれる。各弁の流量については、入力として与えた各弁の実効的な流路面積を元に計算している。

給水ライン及び主蒸気ラインについては、境界条件として取り扱っている。主蒸気流量は、内部計算により初期原子炉出力に相当した流量が設定され、主蒸気隔離弁の閉止による隔離を模擬している。給水流量は、入力値を与えており、原子炉水位高等の信号による給水ポンプトリップを模擬している。

### (3) 破断流モデル

原子炉圧力容器と格納容器との間の流れについては、差圧流又は臨界流にて計算する。

差圧流の場合は、流動の式 (3.3.3-1) に、原子炉圧力容器と格納容器の差圧を考慮して流量を計算する。

臨界流については、Henry-Fauske のモデル<sup>[2]</sup>を採用している。気液の流速が同じであると仮定して、気液それぞれの流量を計算している。参考文献<sup>[3]</sup>より、Henry-Fauske のモデルは Marviken 試験装置<sup>[4][5]</sup>による実験に対して臨界流量を過大評価する傾向にあり、破断流量に関して保守的なモデルである。

## 3.3.4 格納容器モデル

格納容器モデルは、原子炉格納容器内の熱流動として、水、蒸気、非凝縮性ガスの挙動の計算を行う。以下、格納容器モデルについて述べる

### (1) ノード分割

原子炉格納容器のノード分割として、壁などで囲まれた領域を模擬したノード (区画) と吹き抜けや扉などの開口部を模擬したジャンクションを組み合わせモデル化を行う。格納容器のノード分割は、原子炉圧力容器モデルのようなプリセットではなく、入力値によって分割数を与え、各区画に対しては自由体積、形状、高さ等を、各ジャンクションに対しては等価直径、長さ、ノードに対する接続位置等を与える。

ヒートシンクは、格納容器の壁面及び床、区画内部の金属機器等を模擬し、区画の境界に位置する壁面及び床については、ヒートシンクを介した両区画間での熱移動を考慮できる。

格納容器のノードと同一のモデルを用いて原子炉建屋をモデル化することができ、格納容器壁面を介した格納容器内外の熱移動を考慮することができる。格納容器内雰囲気から格納容器本体並びにその周囲のコンクリート製生体遮へい壁を介した原子炉建屋への放熱が評価されるモデルでは、生体遮へい壁のコンクリートは熱伝導率が低いために内部の温度勾配が大きく、原子炉建屋への放熱量そのものが小さいことから、格納容器温度・圧力への影響は小さい。また、原子炉建屋をモデル化することにより、ISLOCA を想定した原子炉建屋内の区画の環境評価を行うことも可能である。

格納容器のノード分割例を図 3.3-6 に示す。同じ特徴を有する空間を集約することを基本として、壁や床によって囲われた領域をノードとしてモデル化する。同じ特徴を有する空間では物理パラメータも同等となるため、緩やか又は長期的な応答を模擬することができ、各ノード間の接続条件を適切に与えることによって、格納容

器の型式によらず適用性を有する。標準的には、格納容器下部（下部ドライウエル、ペDESTAL）、ドライウエル、ベント管、ウェットウエルに分割される。

3.3.3 に示した原子炉圧力容器のノード分割との関係では、原子炉圧力容器はドライウエル区画に存在し、図 3.3-5 に示したヒートシンクのうち、上部ヘッド、上部ダウンカマ、下部ダウンカマ、下部ヘッド、さらに、再循環ループを有するプラントの場合は再循環ループの外表面と格納容器間の熱伝達が考慮される。

LOCA 事象では、破断流はドライウエルに放出される。炉心溶融後に原子炉圧力容器が破損する場合、下部プレナムからのデブリジェットは格納容器下部に放出される。

## (2) 格納容器の熱水力モデル

MAAP コードの格納容器内モデルは、区画内の代表する状態量を 1 点で模擬し、区画間の流動を解析する集中定数モデルである。格納容器の熱水力応答は 3.3.1 に示した基礎方程式により計算する。また、気相の流動に関しては、

$$K|W^{n-1}|W = P_1 - P_2 + \rho_2 g(Z_2 + L - Z_1) \quad (3.3.4-1)$$

を用いる。ここで、 $K$  はジャンクションの流動抵抗、 $W$  はジャンクションの流量、 $P$  はノード圧力、 $\rho$  はノード内の気相密度、 $n$  は流動状態に依存した乗数であり、 $Z$  と  $L$  はそれぞれジャンクションの接続高さ位置とジャンクション長さである（図 3.3-7）。

各ノードでは、区画間の気体・水の移動に伴う質量及びエネルギーの変化、気体と水の間の熱伝達、ヒートシンク（格納容器壁及び床、機器）の状態に基づき、質量とエネルギーの保存式を計算する。このとき、気液界面での水の蒸発と水蒸気の凝縮、破断口からの水と蒸気の放出、放出された水のフラッシング、スプレイ水の蒸発、スプレイ水による凝縮及び格納容器内のヒートシンク表面での凝縮を模擬する。

MAAPコードでは、原子炉格納容器破損や格納容器ベント等による、原子炉格納容器内から建屋や環境等への水・気体の放出流量も区画間と同様に計算される。

LOCA(液相破断)の場合、破断口からドライウエルに放出された水は格納容器圧力に応じて一部はフラッシングにより蒸気となり、破断口から放出された蒸気(水素ガスを含む)とあいまってドライウエル内の圧力を上昇させる。このため、ドライウエル内の気体の大部分はサプレッション・チェンバに押し出され、気体中の蒸気はサプレッション・チェンバ内の水により凝縮される一方で、非凝縮性ガスはサプレッション・チェンバの空間部に移行する。また、炉心溶融後に原子炉圧力容器が破損する場合、格納容器下部に放出（落下）したデブリジェットにより発生した多量の蒸気（水素ガスを含む）は、ドライウエルからサプレッション・チェンバへと流出する。



原子炉格納容器中に存在する水プールは、水位が開口部に到達すると他の区画に流出する。例えば、格納容器スプレイによりドライウェルに注入された水は、ベント管を経由して、サブプレッション・プールに流入する。

原子炉格納容器内には、1次元ヒートシンクモデルとランプトヒートシンクを配置できる。1次元ヒートシンクは、熱伝導率が小さく、内部の温度勾配が重要となるコンクリート壁等に適用し、片面又は両面において区画内の流体との熱伝達を行う。1次元ヒートシンクの分割は比較的溫度勾配の大きな表面近傍は細かいメッシュで、それ以外は粗いメッシュで分割される。ランプトヒートシンクは主に熱伝導率が大きく、内部の温度分布が一様と仮定できる金属ヒートシンクに適用し、温度を1点で代表する。

これらのヒートシンクの表面積及び材質の物性に加えて、高さ等の位置情報を与えることで、ヒートシンクの冠水／露出を判断する。冠水部分では水との対流熱伝達を考慮したモデルを、露出部分では気相との対流熱伝達、凝縮熱伝達及び輻射熱伝達を考慮したモデルを用いて熱伝達を評価する。

### (3) 水素発生

原子炉圧力容器内及び格納容器内の水素発生源として、以下を考慮する。

- ・ 炉心ヒートアップ及び溶融炉心のジルコニウム-水反応による水素発生 (3.3.6(1)参照)
- ・ 溶融炉心によるコンクリート分解等に伴う水素発生 (3.3.6(5)参照)

発生した水素のノード間の移動は、原子炉圧力容器及び格納容器の各熱水力モデルにより計算される。

なお、水の放射線分解による水素及び酸素の発生は、コード内にモデルを備えていないため、有効性評価では崩壊熱を用いた評価としている。

### (4) 格納容器破損モデル

格納容器内圧と限界圧力あるいは格納容器雰囲気温度と限界温度との比較により格納容器の破損を判定する。

## 3.3.5 安全系モデル

### (1) 非常用炉心冷却系

炉心注水系 (高圧・低圧)、炉心スプレイ系 (高圧・低圧)、原子炉隔離時冷却系等、原子炉の型式の特徴を考慮し、実プラントに即した各系統がモデル化されている。それぞれについて注入特性、作動設定圧、作動遅れ時間を入力値として与え、原子炉圧力に応じて注入流量が計算され、ダウンコマあるいは炉心領域へ注入する。

また、残留熱除去系によるサブプレッション・プール冷却モード運転もモデル化さ

れており、サブプレッション・プールから取水し、熱交換器を通じて冷却した後に、再びサブプレッション・プールへ戻される。

#### (2) 格納容器スプレイ

格納容器スプレイモデルは、入力として、台数、作動遅れ時間、注入特性等を与え、格納容器圧力に応じて注入流量が計算される。

#### (3) 逃がし安全弁

逃がし安全弁については、入力として、それぞれの弁個数、流路面積、作動設定圧力を与える。弁が作動する場合、その時刻の圧力に応じて流量が計算される。

#### (4) 代替注水設備

上記に加え、原子炉圧力容器内への注水が可能な代替注水系がモデル化されており、入力として、注入特性等を与え、原子炉圧力に応じて注入流量が計算される。また、原子炉格納容器内の各区画へスプレイが可能な代替スプレイもモデル化されており、注入特性等を入力値として与える。

### 3.3.6 溶融炉心の挙動モデル

溶融炉心の状態としてデブリベッド（粒子状堆積物）、溶融プール（液体状物質）、クラスト（固化状物質）を模擬し、溶融炉心の挙動モデルとして、炉心溶融及びリロケーション、下部プレナムでの挙動、原子炉格納容器下部での挙動を評価する。これらの挙動モデルの概要について以下に述べる。なお、有効性評価では高圧溶融物放出及びそれに続く格納容器雰囲気直接加熱は、その発生防止を評価するため、現象モデルとしては考慮しない。

#### (1) 炉心ヒートアップ

炉心は R-Z の 2 次元モデルで構成しており、炉心のヒートアップに伴って燃料、燃料被覆管、制御棒、ウォータロッド、チャンネルボックス等の構造材の溶融の計算を行い、ノード内で溶融が発生した場合にリロケーションの計算を行う。なお、炉心がヒートアップするまでの燃料棒と冷却材との伝熱挙動に関しては、3.3.2(3) に記載している。

炉心ヒートアップ・燃料の溶融の模式図を図 3.3-8 に示す。過熱した燃料棒は燃料棒内と原子炉圧力容器内の圧力差で膨れによる破損が開始する。露出し、過熱された燃料棒表面ではジルコニウムが水蒸気と酸化反応を行い酸化ジルコニウムの層が形成されるとともに水素が発生する。この酸化反応熱により燃料棒はさらに過熱さ

れる。酸化ジルコニウムの層厚さの変化率は Baker-Just の相関式（高温時）及び Cathcart の相関式（低温時）により評価される。ウォータロッド、チャンネルボックスにおけるジルコニウムの酸化反応も同様に評価される。

ペレットとジルコニウムの界面ではジルコニウムがペレット内部へ溶け込んだ層が形成される。この溶け込み深さの変化率も取り扱っており、ペレット及びペレットにジルコニウムの溶け込んだ層が融点に達すると熔融し、リロケーションを開始する。この際、混合物の組成に応じて共晶、偏晶反応を考慮して融点が計算される。

CORA 実験における共晶反応による熔融の知見を考慮して、制御棒の温度が 1,500K を超えた場合に制御棒中の  $B_4C$  の共晶反応が考慮される。まず、制御棒中の  $B_4C$  とステンレスの共晶反応が発生し、次に、この反応物とチャンネルボックスとの共晶反応が考慮される。チャンネルボックスは、Zr の融点到達、炉心ノードの流路閉塞及び制御棒の熔融物との反応によって破損が判定される。

## (2) リロケーション

熔融炉心のリロケーションは軸方向及び径方向における質量及びエネルギーの移動を考慮している。質量の移動には  $UO_2$  の他に炉内の構成物（Zr,  $ZrO_2$ , ステンレスなど）が含まれ、混合に応じた融点等が計算される。質量の移動に対応してエネルギーや FP の崩壊熱割合（初期炉心出力分布から評価）も移動する。これら質量、エネルギー及び崩壊熱割合の移動をもとに、リロケーション後の各ノード内の炉心熔融物のエネルギー保存式を計算する。

軸方向のリロケーションは燃料の熔融状態に応じて定常を仮定した液膜流あるいは管内流の速度で移動する。径方向のリロケーションは下部ノードが閉塞し、隣接ノードに空隙があり、かつ熔融物の液面に差がある場合に適用され、水頭差と流動抵抗がバランスした速度で流動する。この際、チャンネルボックスが健全な場合には、熔融燃料の径方向のリロケーションが起らないものとする。

MAAP では、炉心支持板から上部タイプレートまでを炉心領域としてモデル化し、炉心領域を軸方向及び径方向にユーザーがノード分割を行う（図 3.3-2 参照）。分割されたノードには、ユーザーが設定する軸方向及び径方向の出力分布にしたがった出力が設定される。これによって、各ノードにおける燃料のヒートアップ計算を行う。

ヒートアップ計算においては、燃料の温度上昇や、ジルコニウム-水反応による発熱及び水素ガスの発生が計算される。燃料の温度上昇に伴い、燃料被覆管の破損やチャンネルボックス、制御棒等の構造物の損傷やこれらを含めた、炉心を構成する物質の熔融が計算され、炉心ノードは、空隙率と熔融度に応じて、以下に示すような 6 つのタイプに分類される。

- タイプ 1 : 燃料が自立した状態
- タイプ 2 : 燃料が崩壊した状態
- タイプ 3 : 流路が減少した状態
- タイプ 4 : 流路が閉塞した状態
- タイプ 5 : 熔融プール状態
- (タイプ 0 : 空洞)

燃料の冷却形状変化について示す。一般には、炉心が露出し始めると燃料がヒートアップし、各炉心ノードでは、温度と破損時間の関係から燃料崩壊の有無の判定が行われる。燃料崩壊が判定されると、当該ノードはタイプ 2 へと遷移し、燃料崩壊位置から上の全ての燃料は下方へ落下し、一部空洞状態（炉心を構成する物質が無い状態: タイプ 0）となる。また、炉心熔融進展に従い、冷却水の流路が減少し(タイプ 1 又は 2 → タイプ 3 又は 4)、やがて炉心ノード内の燃料のほぼ全量が熔融した場合、熔融プールを形成する(タイプ 5)。

- ・ 燃料の崩壊(タイプ 1 → タイプ 2)
  - ヒートアップ開始から、各炉心ノードの状態（周辺ノードで崩壊発生なし、下部ノードが崩壊、隣接ノードが空洞、周辺全ノードが空洞）に応じて、燃料崩壊の有無の判定が行われる。MAAP のモデルでは Larson-Miller パラメータ手法（温度と破損時間の関係を整理した Larson-Miller パラメータを利用して燃料崩壊を予測する手法）により、各炉心ノードの累積損傷割合を計算する。累積損傷割合が 1 となれば、当該炉心ノードが崩壊し、タイプ 2 となる。
- ・ 流路の減少・閉塞(タイプ 1 又は 2 → タイプ 3 又は 4)
  - 流路の減少は、キャンドリングにより流下した熔融燃料及び崩壊により落下してくる固形物により、それを受け取るノードの空隙が減少することによって発生する。この時、炉心ノードの空隙率によってタイプ 3（流路が減少した状態）かタイプ 4（流路が閉塞した状態）が判定される。
- ・ 熔融プール(タイプ 5)
  - 炉心ノード内が熔融プールを形成しているかどうかは、炉心ノード内の熔融度で判定される。炉心ノード内のほぼ全量が熔融した場合は、当該ノードは熔融プール(タイプ 5)とみなす。

TMI 事故では、炉心熔融物が燃料被覆管表面に沿って流下し、炉心下部で閉塞領域が形成された後、熔融が径方向に進展して、側面のクラストを崩壊させて、下部



による原子炉圧力容器のクリープと共に大きくなり、このギャップに冷却材が浸入するとギャップの大きさに応じた熱除去が生じ、クラストから原子炉圧力容器壁への熱伝達が抑制される。MAAPでは、原子炉圧力容器のクリープ変形量に基づきギャップ幅を計算し、冷却材の浸入を考慮した熱除去を模擬している。下部プレナムでの溶融炉心の挙動モデルの概念を図 3.3-10 に示す。

下部プレナムでの伝熱は成層化したデブリベッドのそれぞれに対して次の模擬を行っている。上部の水への除熱量は Henry-Epstein-Fauske 相関式により計算する。デブリベッドに浸入した水による熱除去は、水の浸入を考慮した限界熱流束相関式を用いる。また、下部ヘッドと溶融炉心周りのクラスト間への水の浸入によるギャップ冷却については、門出らの相関式により、クラスト外面及び原子炉圧力容器壁からの熱除去を考慮している<sup>6)</sup>。

#### (4) 原子炉圧力容器破損モデル

下部プレナムに溶融炉心が堆積し、溶融炉心を冷却できない状態が継続すると、原子炉圧力容器が破損し、原子炉格納容器下部への落下を開始する。その落下量は、破損口の口径、原子炉圧力容器内外の圧力差、溶融炉心の水頭及び重力加速度により計算する。原子炉圧力容器の破損判定は、圧力、原子炉圧力容器壁・溶融炉心温度、材料物性及び形状から計算されるが、MAAPでは、原子炉圧力容器の破損について、原子炉圧力容器の貫通部（計装管又は制御棒駆動機構ハウジング溶接部）の破損、原子炉圧力容器下部ヘッドのクリープ破損等、複数の破損形態を模擬しており、最も早く判定される破損モードが適用される。下部ヘッドは径方向及び厚さ方向に分割しており、これにより破損位置を模擬している。なお、MAAPでは、原子炉圧力容器の最初の破損後、原子炉圧力容器内に残存した溶融炉心による2度目の破損も考慮可能である。

以下、MAAPにおいてモデル化されている破損モードの評価モデルについて述べる。

##### a) 下部ヘッド貫通部への溶融物流入による破損

溶融炉心が下部プレナムへ移行した後、計装管等を溶融させ、内部に溶融炉心が流入すると仮定する。このとき、内部に溶融炉心が流入し、構造物との熱伝達によって固化した場合には流路を塞ぐことになり、それ以上溶融炉心が流入できなくなる。このため、原子炉圧力容器外へ流出するためには溶融炉心が十分な過熱度を有している必要がある。溶融炉心が過熱度を持っている場合には、溶融炉心の固化によって流路が閉塞するまでの移動距離が求められる。溶融炉心の移動距離が入力によって与えるしきい値を超えた場合に原子炉圧力容器が破損したと判定される。この計算では、貫通部内部は空洞であると仮定している。また、ドレ

ン配管は通常原子炉圧力容器へ再接続されているので、溶融炉心の駆動圧力としては、溶融炉心の重量のみとなる。

#### b) 下部ヘッド貫通部の逸出

原子炉圧力容器の貫通部（制御棒駆動機構ハウジング等）の溶接部が溶融炉心により加熱されることで機械的強度が低下し、貫通部逸出により破損するモードである。MAAPでは、この破損モードについて以下の2種類の判定を行っている。

第一は、せん断応力による判定である。原子炉圧力容器と格納容器間の圧力差によって貫通部にかかるせん断応力が、限界せん断応力を超える場合に、破損が発生したと判定している。溶融炉心からの伝熱による溶接部の機械的強度の低下は、限界せん断応力を温度の関数とすることで考慮している。

第二は、ひずみによる判定である。溶融炉心が下部プレナムに落下することにより、高温かつ高圧の環境下にある原子炉圧力容器の壁にひずみを生じ、溶接部にも同様にひずみが発生し、溶接部のひずみ量がしきい値を超えた場合に、破損が発生したと判定している。

#### c) デブリジェットの影響による下部ヘッドの局所破損

本破損モードは、炉心溶融物が下部ヘッドへ最初に移行する際にのみ考慮される。これは、2回目以降では、下部ヘッド表面にクラストが形成されると考えられるためである。

最初にジェットの自由落下速度と水面に到達した際の直径を求める。続いて、水中を通過する際のジェット表面でのエントレインメント速度を求め、エントレインされたデブリは粒子状デブリとなってデブリベッドに沈降する。残りのジェットはある直径、過熱度、速度を持って下部ヘッドに衝突し、最終的にこのジェットによる下部ヘッドの侵食割合を評価する。この割合は、下部ヘッドの破損が起こるかどうかを評価するため、ジェットが消滅するまで積分される。

#### d) 金属層による原子炉圧力容器壁の破損

下部ヘッド内において溶融炉心上部に形成される金属層からの原子炉圧力容器壁への熱流束の集中は、金属層内で自然対流が起こり、溶融炉心の崩壊熱を上方へ移行させることにより、金属層と原子炉圧力容器壁面境界領域への側面方向に伝熱が生じる現象を考慮したものである。これによって金属層から側壁への熱流束が計算される。この熱流束は、金属層に接する原子炉圧力容器壁に伝えられる。この時の原子炉圧力容器壁の温度分布によって、壁面の応力分布の影響やクリープ破損の有無について評価している。

e) 原子炉圧力容器のクリープ破損

原子炉圧力容器が、加熱により不可逆のひずみが生じ、そのひずみが拡大することにより破損に至る、いわゆるクリープ破損を模擬している。MAAPでは、このクリープ現象を、Larson-Millerパラメータ手法により評価している。

溶融炉心が炉心部から下部プレナムに落下し、下部ヘッド上に堆積する場合における主要な過程は、これまで、(2) リロケーション、(3) 下部プレナムでの溶融炉心の挙動及び(4) 原子炉圧力容器破損モデルにおいて述べたとおり、以下のように分けられる。

- a) 下部プレナムへの溶融物移行
- b) 水中へ落下する溶融物の分散及び冷却
- c) 落下・堆積した溶融炉心と下部プレナム内構造物との熱的相互作用
- d) 堆積した溶融炉心上面からのプール水による冷却
- e) 溶融プール周囲のクラスト形成と溶融プール内での自然対流熱伝達
- f) 下部ヘッドと溶融炉心のギャップ形成及びギャップ冷却
- g) 原子炉圧力容器の破損

上記の一連の現象は、いわゆる原子炉圧力容器内容融物保持(IVR: In-Vessel Retention)<sup>\*</sup>としてMAAPコード内においてモデル化されている。

※: 炉心損傷後に溶融炉心が下部プレナム部に落下し、堆積した場合においても、原子炉圧力容器下部が早期に破損することはなく、原子炉注水系の手動操作等により、溶融炉心が原子炉圧力容器内に保持・冷却される現象。TMI-2事故の分析・評価を契機として、国際的に実験・解析的研究が進められてきた。

下部ヘッドの破損後は、破損口を溶融炉心が通過する際に、溶融炉心により破損口の側面が溶かされ、破損口が拡大する現象(アブレーション)も模擬している。アブレーション量に基づき格納容器下部へのデブリジェット径が決定され、これにより、格納容器下部への溶融炉心の落下量が変化し、原子炉圧力容器外FCIによる細粒化量に影響する。なお、格納容器下部には制御棒駆動装置等の構造物が存在するが、デブリジェットとの干渉は模擬していない。

なお、日本原子力学会やEURSAFE<sup>[7]</sup>等のシビアアクシデント研究において、実際に起こり得る原子炉圧力容器破損について、想定される破損モードは概ね把握されているが、その発生条件や破損面積の予測には困難さがあり、現象の不確かさが大きく、破損後の事象進展への影響もあることから、知見の拡充とともに、破損条



件の明確化や評価手法の検討が解決すべき課題として位置付けられている。

#### (5) 格納容器下部での溶融炉心の挙動

下部プレナムに溶融炉心が堆積し、溶融炉心を冷却できない状態が継続し、原子炉圧力容器が破損すると、溶融炉心は、原子炉圧力容器と格納容器の圧力差及び水頭に応じた速度で格納容器下部への落下を開始する(「デブリジェット」を形成する)。これら一連の現象の流れを図 3.3-11 に示す。

この溶融炉心の格納容器下部への落下過程及び落下後における床への堆積状態の挙動に関して、以下に示す現象がある。

- ・溶融炉心と冷却水の相互作用 (FCI)
- ・溶融炉心とコンクリートの相互作用 (MCCI)

溶融炉心と冷却水の相互作用 (FCI) は、デブリジェットと格納容器下部の冷却水が接触してエントレインされて形成される粒子状デブリが、周囲の冷却水と伝熱する際に多量の水蒸気を発生させ、格納容器圧力の上昇(圧力スパイク)をもたらす現象である。このため、本現象は格納容器圧力挙動に影響し、細粒化量が多い場合に圧力スパイクの規模が大きくなる傾向となる。一方、格納容器下部床面に堆積する溶融炉心の冷却の観点からは、細粒化することで水により冷却されやすくなることから、細粒化量が少ない場合にコンクリート侵食に対して厳しい傾向となる。なお、FCIに伴う水蒸気爆発については、MAAPではモデル化されていないが、国内外の知見から、発生可能性は小さいと判断されている。

溶融炉心とコンクリートの相互作用は、格納容器下部の底に堆積した溶融炉心の熱が床面のコンクリートを加熱し、コンクリートの温度がコンクリートの融点を上回る場合に、コンクリートが分解され侵食されるとともに、非凝縮性ガス(水素、一酸化炭素、二酸化炭素)が発生する現象である。このため、本モデルはコンクリート侵食挙動や水素発生挙動に影響する。

これらの現象に関する MAAP モデルについて以下に示す。

##### a) 溶融炉心と冷却水の相互作用モデル

溶融炉心が原子炉圧力容器下部プレナムあるいは、格納容器下部へ溶融物のジェットとして落下した時、溶融炉心は静止する水プールとの運動量交換に伴うエントレインメントにより急速に細粒化し、水プールに大きな伝熱量を与える。これらの挙動は MAAP では以下のモデルから構成され、急速な水蒸気発生とそれに伴う圧力上昇の評価が可能である。本モデルの概念を図 3.3-12 に示す。

##### ① デブリジェットの細粒化モデル

Ricou-Spalding モデル(式 3.3.5-1)をベースにしたモデルである。本モデル

により細粒化速度並びにジェット落下速度及び水位から細粒化する割合が評価される。細粒化径はウェーバー数（慣性力と表面張力の比を表す無次元数）に基づき決定される。

## ② 細粒化粒子と水との伝熱モデル

細粒化した粒子群と水との伝熱は、膜沸騰状態での対流及び輻射熱伝達を考慮したモデルが使用されている。細粒化した粒子群と水が相互作用する領域は発生水蒸気による二相状態を仮定する。この領域の伝熱は急速な水蒸気発生及びそれに伴う圧力上昇に影響する。

Ricou-Spalding モデルは、エントレインメント速度（細粒化量）を流入流体の速度（ジェット速度）と両流体の密度比に関連させたモデルであり、

$$m_{ent} = E_0 \cdot u_{jet} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_{jet}}} \quad (3.3.5-1)$$

で表され、 $m_{ent}$  はエントレインメント速度、 $E_0$  はエントレインメント係数、 $u_{jet}$  はジェット速度、 $\rho_w$  は静止側（格納容器下部）の流体密度、 $\rho_{jet}$  は噴出側の流体（デブリジェット）の密度である。エントレインメント係数  $E_0$  は、海外での大規模 FCI 実験に基づき設定している。ジェット速度  $u_{jet}$  は、破損口の差圧（原子炉圧力容器内圧と格納容器内圧の差）と熔融炉心の水頭により計算する。デブリジェットの径は、粒子化速度に基づいて深さ方向に減少していき、その減少を積分することで、全細粒化量が得られる。

細粒化したデブリ粒子の径は、デブリ粒子及び水の密度及び表面張力、重力加速度、ジェット速度並びにウェーバー数により計算する。

デブリ粒子から格納容器下部の水への伝熱量は、デブリ粒子の数と径（表面積）に影響される。落下した熔融炉心の温度は 3,000 K 程度と非常に高温であるのに対しプール水はサブクール水であっても飽和水であってもその差は数十℃と小さいため、水温が伝熱挙動には影響しにくいモデルになっている。ただし、次に述べるように、伝熱量が水の顕熱上昇と水蒸気発生に使用される場合は水温に影響される。

デブリ粒子は格納容器下部の水が飽和水になるまでエネルギーを与え、残りが水蒸気発生に使用される。発生した水蒸気の気泡は上昇過程でサブクール度に応じて凝縮が考慮され、残りが気相に放出されるといった、水蒸気の気泡が周囲の水を巻き込むことによる、水蒸気の凝縮を模擬している。

## b) 熔融炉心とコンクリートの相互作用モデル

本モデルの概要を図 3.3-13 及び図 3.3-14 に示す。本モデルは大きく次の 3 つのモデルから構成される

① 溶融プールモデル

- ・ 格納容器下部床上に落下した溶融炉心の質量とエネルギーは溶融プールに加算され瞬時に均質化すると仮定
- ・ 平坦な溶融プールを仮定(図 3.3-13)
- ・ 上部・下部・側部クラストを考慮し、下方及び側方への侵食を考慮
- ・ 内部の溶融プールの温度は1点で模擬
- ・ クラスト内の温度分布は崩壊熱を考慮して放物分布で近似 (図 3.3-13)
- ・ 侵食したコンクリートと炉心溶融物との混合割合から液化・固化温度を評価 (図 3.3-14)
- ・ 炉心材及びコンクリートの化学組成の化学平衡計算に基づき非凝縮性ガス(水素, 一酸化炭素, 二酸化炭素)の発生を評価
- ・ 溶融炉心内部の発生ガスによる溶融プールの伝熱挙動への影響は模擬しない

② 溶融プール伝熱モデル

- ・ 上部クラストから上部水プールへは Kutateladze の熱伝達相関式(式 3.3.5-2)を考慮
- ・ 水がない場合は上部クラストから対流及び輻射熱伝達を考慮
- ・ 内部の溶融物から上部・下部・側部クラストは対流熱伝達を考慮

③ コンクリート侵食モデル

- ・ コンクリートへは熱伝導で伝熱し、コンクリートの分解エネルギーを考慮
- ・ コンクリート内部の温度分布を考慮

ア) 溶融プールモデル

格納容器下部水中に落下した溶融炉心は、粒子化せず格納容器下部の床に達し、溶融プールを形成するものと、粒子状となって水中に拡散するものがある。MAAP のモデルでは、前者は、格納容器下部床面に達した時点で、床全面に均一に広がると仮定としている。後者は、水により冷却されつつ、格納容器下部床面に重力落下し、格納容器下部床面上の溶融プールに達するが、MAAP のモデルでは、溶融プールと一体化する仮定としている。

格納容器下部床面上の溶融プールは、組成が均質の平板として模擬しており、落下量と拡がり面積から堆積厚さが算出される。溶融プールの状態は、その温度に応じて、液相と固相の割合が計算され、液相は内部の溶融プール、固相は外側のクラストとして取り扱っている。溶融炉心の相変化の概念を図 3.3-14 に示す。縦軸は温度であり、液化温度 $T_L$ と固化温度 $T_S$ は、各物質の物性値及び混合割合から計算される。溶融炉心温度が液化温度 $T_L$ よりも高い場合は全て液体となり、固

化温度 $T_s$ よりも低い場合は固化した固体となり、その中間が二相の状態、すなわち、溶融プールとクラストを形成した状態であることを表す。横軸は、(酸化ウランウム、酸化ジルコニウム)とコンクリートスラグの混合割合である。

このように、溶融プールのクラスト量の変化は、溶融プール温度(及び組成)により計算されるが、言い換えれば、溶融プールからクラストに伝熱されるエネルギー、クラスト内で発生するエネルギー、クラストからコンクリートに伝達するエネルギーのエネルギーバランスにより計算される。

上述のとおり、MAAPの溶融プールモデルでは、床全面に均一に広がる均質平板となっているが、水張りによって溶融炉心の拡がりが増加抑制されることが考えられる。しかしながら、有効性評価で想定している制御棒駆動機構ハウジングの逸出を想定すると、ABWRで床上に水がある場合でも、床全面に溶融物が広がることを示されており<sup>8)</sup>、ABWR以外のBWRではペDESTAL床面積がABWRより小さいことを考慮すると、水張りを行っている場合でも溶融炉心は、床全面に広がる可能性が高いと考えられる。これは、溶融物の拡がりに影響する因子のうち、主に想定しているデブリ落下流量が大きいことによるものと考えられる。また、均一に広がった方が、側壁に接する溶融炉心の堆積高さが高くなるため、側壁侵食を評価する観点から保守的な扱いとなっている。

以上より、MAAPコードの均一堆積の扱いは妥当と考えられ、不確かさも小さいと考えられる。

#### イ) 溶融プールの伝熱モデル

溶融炉心は、崩壊熱や化学反応熱により発熱しつつ、クラストを介して周囲の物質(コンクリート、水、空気)に伝熱する過程で冷却されるが、ここでは伝熱について述べる。

溶融炉心と周囲の物質との伝熱の概念を図3.3-13に示す。溶融炉心は単一ノードとしているが、クラストは上面、下面、側面に分割して、それぞれ温度分布を持つ仮定としている。

まず、コンクリートと溶融炉心の伝熱について述べる。溶融プールとクラストの界面は対流熱伝達を仮定し、クラスト内部は2次関数の温度勾配を持つ熱伝導を仮定し、クラストとコンクリートの界面がコンクリート表面温度となる。コンクリート内では、深さ方向に準定常の1次元の熱伝導方程式により温度分布を持つ仮定としている。したがって、クラストからコンクリートへの熱流束が、コンクリート内部の熱伝導を上回る場合にコンクリート温度は上昇する。

次に溶融炉心上面の伝熱について述べる。クラストが気体と接触している場合は、輻射と対流熱伝達により周囲の物質と伝熱する。クラストが水と接触している場合は、Kutateladze 相関式型の限界熱流束モデルを使用している。

Kutateladze 相関式は、水平面から飽和水へのプール沸騰（自然対流条件下の沸騰）における限界熱流束の整理式であり、熔融炉心により加熱されることにより発生する水蒸気の上昇速度とプール水の落下速度のつり合う伝熱量を限界熱流束とする式である。Kutateladze の式は、

$$q_{CHF} = F_{CHF} h_{fg} \rho_g^{0.5} \left\{ \sigma g (\rho_l - \rho_g) \right\}^{0.25} \quad (3.3.5-2)$$

で表される。 $q_{CHF}$  は熱流束、 $h_{fg}$  は蒸発潜熱、 $\sigma$  は表面張力、 $g$  は重力加速度、 $\rho_l$  及び  $\rho_g$  は液体及び蒸気の密度である。ここで、 $F_{CHF}$  は係数であり、Kutateladze は 0.16 を、Zuber は 0.12~0.16 の範囲、あるいは、 $\pi/24 (=0.131)$  を与えている。係数  $F_{CHF}$  については、経験的に決定する必要があることから、有効性評価の解析では、米国国立サンディア研究所（SNL）で実施された熔融炉心とコンクリートの相互作用及び熔融炉心冷却に関する実験である SWISS 実験において報告されている熔融物から水プールへの熱流束が  $0.8 \text{ MW/m}^2$  であることに基づき  $F_{CHF} = 0.1$  としている。

前項で述べたように、水プール中の熔融炉心の挙動については種々の物理現象が関連した複雑な挙動である点で、その模擬性が課題であり、熔融プールの伝熱についても、格納容器下部床面での拡がり挙動、熔融プールの成層化の状態、水プールやコンクリートとの界面の状態等に影響を受け、不確かさが大きい現象のひとつである。したがって、更なる知見の拡充を行いつつ、現象の不確かさも踏まえ、感度解析等による影響評価を行う。

#### ウ) コンクリート侵食

熔融炉心からコンクリートへの伝熱により、コンクリート温度がコンクリート融解温度を超えると侵食が開始する。その際、コンクリートの融解熱及び化学反応熱の発生を取り扱っている。

コンクリートから放出されるガス（水蒸気及び二酸化炭素）は直ちに熔融プールに混入し、熔融プール中の金属との化学反応として炉内構造物や燃料を構成する金属（Zr, Cr, Fe など）の酸化反応が発生する。その結果発生する非凝縮性ガス（水素、一酸化炭素及び二酸化炭素）は、格納容器内に放出される。これらのガスによる熔融プールの伝熱挙動への影響は模擬していない。また、ガスによる影響として、コンクリートと熔融炉心の間にはクラックや空隙が形成され、熔融炉心の冷却を促進する効果があることが実験的に確認されているが、解析モデルでは考慮しない。

コンクリートスラグも熔融プールに混入し、ウラン・ジルコニウム等との混合物となる。スラグが混入することにより、熔融炉心の融点が低下する傾向となる。

### 3.3.7 核分裂生成物（FP）挙動モデル

FPは過熱された炉心からガス状として原子炉圧力容器内に放出される。なお、希ガス以外のほとんどのFPは単体を作らないため化合物の化学種として放出される。炉心から放出されたFPのうち希ガス以外のFPは揮発性の高いCsIにおいても沸点は1,277°Cであり、原子炉圧力容器あるいは原子炉格納容器内ではガス状態を維持できず、気相中で凝縮しエアロゾル（微粒子）化する。エアロゾルであるため気相中の落下速度は遅く、ガスの流動とともに移動する。ゆっくりと床に落下したFPエアロゾルは構造物表面に沈着あるいは水中へ移動する。水中の微粒子状FPは後述するよう素を除いて気相へ出てくることは無い。FPエアロゾルは重力沈降以外に微粒子特有の移動（熱泳動・拡散泳動）で構造物表面に付着し、また、サプレッション・プール水中のスクラビングやスプレーによっても気相から除去される。以上はMAAPのFP挙動モデルで模擬されている範囲である。

実際には、CsI等のような素化学種のエアロゾルでは、原子炉格納容器内に形成されるプール水中に溶解し、放射線により化学反応が促進され、揮発性の無機よう素 $I_2$ （沸点184.3°C）や水中に溶けた有機物（塗装材等）と反応し、有機よう素が生成され、一部が気相に時間をかけて移動する。なお、水中のよう素の反応はプール水のpHや放射線量、水中の多様な有機物の濃度に強く依存し専用コードを使用しても精度の良い予測が非常に難しいことがよう素反応のOECD国際標準問題等で示されている。このためMAAPではよう素反応モデルが試験的にオプションとして組み込まれているものの、よう素反応の結果は参照用としてFP計算にフィードバックされない。

本FP挙動モデルは主に以下のモデルから構成される。

#### 炉心燃料からのFP放出モデル

- ・ペレットが高温になり内部のFPが温度に依存してガス化し、ペレット外へ放出される。

#### FPの状態変化・輸送モデル

- ・FPが気相温度に依存して、気相中で凝固しエアロゾル化する。そのエアロゾルは気相と共に移動し、また各種のメカニズムで構造物表面やプール水に移動する。

#### FPの移動に伴う崩壊熱分配モデル

- ・FPは崩壊熱を有するので、FPの移動先でFP量に依存した崩壊熱を発生し流体や構造物の熱源になる。

また、本FPモデルにおける概要を以下に示す。

- ・ FPは炉心温度に対する放出速度の相違に基づき12グループに分類され、各FPグループの質量保存が考慮される。
- ・ 原子炉圧力容器及び原子炉格納容器内のFP形態は各グループに対しガス状、エアロゾル状、沈着を考慮する（希ガスはガス状のみ）。また、水中及び熔融炉心内のFPを考慮する。
- ・ 熔融炉心内に残存するFPは熔融炉心と共に移動する。
- ・ 水中のFPは区画間の水の流れと共に移動する。
- ・ 崩壊熱は各位置のFP量に応じて分配され、各エネルギー保存式に考慮される。
- ・ FPの崩壊による発生エネルギーは崩壊熱データで考慮する。
- ・ FPの崩壊による各FPグループの質量の変化は考慮しない。

#### (1) 炉心燃料からのFP放出モデル

炉心燃料からのFP放出モデルでは、炉心温度に対する放出速度の相違に基づいて表3.3-2のように12グループに分類される。MAAPはモデルの選択が可能であり、希ガス、CsI、CsOHに対しては $\square$ 、他の核種グループについては $\square$ のFP放出速度モデルを使用する。本モデルにより炉心各ノードの温度に対応した各FPの放出速度が計算される。ペレットと燃料被覆管の間隙部に蓄積したFPは、被覆管が破損すると原子炉圧力容器内に放出され、また、原子炉圧力容器破損後の熔融炉心・コンクリート相互作用に伴ってFPが原子炉格納容器内に放出される挙動も模擬している。

放出されたFPグループの内、希ガス以外は、雰囲気温度に依存してガス状からエアロゾル状へ遷移する。ガス状及びエアロゾル状のFPは原子炉圧力容器及び原子炉格納容器内のガス流動と共に移動する。これらFPの状態変化・移動挙動については後述する。

#### (2) FPの状態変化・輸送モデル

高温燃料から出た希ガス以外のFPは雰囲気温度に依存して凝固し、エアロゾルへ変化する。気相及び液相中のFPの輸送においては、熱水力計算から求まる体積流量からFP輸送量を計算する。FPがガス状とエアロゾル状の場合は、気体の流れに乗って、原子炉圧力容器内と原子炉格納容器内の各部に輸送される。水プール上に沈着したFPの場合は、区画内の水の領域間の移動に伴って輸送される。また、炉心あるいは熔融炉心中のFPの場合は、熔融炉心の移動量に基づいて輸送される。

FPの輸送モデルは上述の仮定に基づいており、炉心燃料から放出されてから原子炉格納容器に到達する経路としては、次のとおりである。燃料から原子炉圧力容器内に放出されたFPは、原子炉圧力容器破損前にはLOCA破損口あるいは逃がし安全弁から原子炉格納容器へ放出される。また、原子炉圧力容器破損後には原子炉圧

力容器破損口もしくは格納容器下部に落下した熔融炉心から FP が原子炉格納容器へ放出される。逃がし安全弁を通じて放出された FP はスクラビングによってサブレーション・チェンバ液相部へ移行する。原子炉格納容器の気相部へ放出された FP は、気体の流れに伴って原子炉格納容器内を移行する。

原子炉圧力容器及び原子炉格納容器内での気体、エアロゾル及び構造物表面上（沈着）の状態間の遷移を模擬している。原子炉格納容器内の FP 輸送モデル概要を図 3.3-15 に示す。

エアロゾルの沈着の種類としては、重力沈降、拡散泳動、熱泳動、慣性衝突、FP ガス凝縮、FP ガス再蒸発を模擬している。なお、沈着したエアロゾルの再浮遊は考慮していない。

重力沈降は、Stokes の重力沈降式と Smoluchowski 方程式（エアロゾルの粒径分布に対する保存式）の解から得られる無次元相関式を用いて、浮遊するエアロゾル質量濃度から沈着率を求める。なお、Smoluchowski 方程式を無次元相関式としているのは解析時間短縮のためであり、この相関式を使用した MAAP のモデルは様々な実験データと比較して検証が行われている。

拡散泳動による沈着は、水蒸気凝縮により生じる Stefan 流（壁面へ向かう流体力学的気流）のみを考慮して沈着率を求める。

熱泳動による沈着は、Epstein のモデルを用い、沈着面での温度勾配による沈着速度及び沈着率を求める。

慣性衝突による沈着は、原子炉格納容器内でのみ考慮され、流れの中にある構造物に、流線から外れたエアロゾルが衝突するものと仮定し、沈着率は重力沈降の場合と同様に Smoluchowski 方程式の解から得られる無次元相関式を用いて求める。

FP ガスの凝縮は、FP ガスの構造物表面への凝縮であり、雰囲気中の気体状 FP 圧力が FP 飽和蒸気圧を超えると構造物表面への凝縮を計算する。

FP ガスの再蒸発は、凝縮と逆であり、気体状 FP の圧力が FP の飽和蒸気圧を下回ると、蒸発が起こると仮定している。

エアロゾルのプール水によるスクラビング現象による除去効果の取り扱いに関しては、スクラビングによる除染係数(DF)を設定し、エアロゾル除去効果が計算される。DF の値は、クエンチャ、垂直ベント、水平ベントの 3 つの種類スクラビング機器に対し、詳細コード SUPRA<sup>®</sup>を用いて、圧力、プール水深、キャリアガス中の水蒸気質量割合、プール水のサブクール度及びエアロゾル粒子径をパラメータとして評価した結果を内蔵しており、これらのデータから求める。

また、格納容器スプレーによる FP 除去も模擬しており、スプレー液滴とエアロゾルとの衝突による除去率を衝突効率、スプレーの液滴径、流量及び落下高さから計算する。



### (3) FP の移動に伴う崩壊熱分配モデル

FP の崩壊に伴いエネルギーが発生する。ANSI/ANS 5.1-1979 モデルによって評価された崩壊熱はそれぞれの FP グループに分配され、気相、液相及び構造物に FP 量に応じたエネルギーを与える。

揮発性 FP (希ガス, CsI, RbI, CsO<sub>2</sub>, TeO<sub>2</sub>, Te<sub>2</sub> など) が炉心から放出されると、炉心の崩壊熱は減少する。炉心の温度が上昇して FP が放出されると、それらの崩壊熱は移動先の原子炉圧力容器又は原子炉格納容器で熱源としてエネルギー計算に用いられる。溶融炉心に含まれる FP もまた崩壊熱を持ち、溶融炉心のエネルギー計算において考慮される。原子炉格納容器内気相部の FP も崩壊熱を生成し、原子炉格納容器内の気相部のエネルギーに加えられ、原子炉格納容器の温度上昇に寄与する。

ガス状及びエアロゾル状の FP は、水プールへの落下や周辺のヒートシンクへの付着が考慮され、FP から発生した崩壊熱は水プールあるいはヒートシンクに加えられ、水プールが存在する場合、その温度が FP の再蒸発の判断に使用される。ヒートシンク上に沈着した FP はその崩壊熱をそのヒートシンクのエネルギーに付与する。その際、ヒートシンクの表面温度が再蒸発の判断に使用される。原子炉圧力容器内では図 3.3-5 に示すヒートシンクがモデル化されており、これらについて FP から発生した崩壊熱による温度変化が考慮される。

表 3.3-1 MAAP コードのモデル一覧 (1/5)

| 項目         |             | 計算モデル   |
|------------|-------------|---|
| 炉心モデル      | 原子炉出力       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 径方向及び軸方向の炉心出力分布の初期値を入力</li> <li>・ 原子炉スクラムまで初期値を維持</li> </ul>   |
|            | 崩壊熱         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 径方向及び軸方向の崩壊熱割合を入力</li> <li>・ リロケーションによる物質移動とともに崩壊熱も移動</li> <li>・ FP は 12 の核種グループを設定</li> </ul>   |
|            | 熱水力モデル (伝熱) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 燃料自立状態 (冠水時) : 水への対流・輻射熱伝達</li> <li>・ 燃料自立状態 (露出時) : ガスへの対流・輻射熱伝達</li> <li>・ 損傷・熔融状態 (冠水時) : 限界熱流束</li> <li>・ 損傷・熔融状態 (露出時) : ガスへの対流・輻射熱伝達</li> <li>・ 被覆管酸化 : Baker-Just 相関式 (高温時)<br/>Cathcart 相関式 (低温時)</li> <li>・ ジルコニウムのペレットへの溶け込みを考慮</li> </ul> |
|            | 水位計算モデル     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 二相混合体積よりダウンコマ部と炉心内の二相水位を計算</li> <li>・ 各チャンネル内の二相水位はドリフトフラックスモデルに基づき計算</li> </ul>   |
| 原子炉圧力容器モデル | 熱水力モデル (流動) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ノード及び物質ごとに以下を適用 <ul style="list-style-type: none"> <li>－ 質量保存則</li> <li>－ エネルギー保存則</li> <li>－ 流量は圧損, 静水頭バランスにより計算</li> </ul> </li> <li>・ 各ノードの水位はボイド率を考慮した液相体積から計算</li> </ul>  |
|            | 破断流モデル      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 差圧流</li> <li>・ 臨界流 (Henry-Fauske モデル)</li> </ul>   |

表 3.3-1 MAAP コードのモデル一覧 (2/5)

| 項目         |             | 計算モデル  |
|------------|-------------|--|
| 原子炉格納容器モデル | 熱水力モデル (流動) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ノード及び物質ごとに以下を適用               <ul style="list-style-type: none"> <li>－ 質量保存則</li> <li>－ エネルギー保存則</li> <li>－ 流量は圧損，静水頭バランス及び圧力差により計算</li> </ul> </li> <li>・ 原子炉圧力容器破断口からの水と蒸気の放出，放出された水のフラッシングを考慮</li> <li>・ 気液界面の水のフラッシング，蒸気の凝縮を考慮</li> </ul> |
|            | 熱水力モデル (伝熱) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 格納容器ヒートシンクとして，格納容器壁及び床，金属機器を考慮</li> <li>・ 水と格納容器ヒートシンク：強制対流熱伝達及び自然対流熱伝達</li> <li>・ 水蒸気と格納容器ヒートシンク：強制対流熱伝達，自然対流熱伝達，凝縮熱伝達及び輻射熱伝達</li> </ul>   |
|            | 水素発生        | 水素発生源として以下を考慮： <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉心ヒートアップ及び溶融炉心のジルコニウム-水反応 (Baker-Just 相関式 (高温時) 及び Cathcart 相関式 (低温))</li> <li>・ 溶融炉心によるコンクリート分解</li> </ul>  |
|            | 格納容器破損モデル   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 格納容器内圧と限界圧力あるいは格納容器雰囲気温度と限界温度との比較等により格納容器の破損を判定</li> </ul>  |
| 安全系モデル     | 非常用炉心冷却系    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 注入特性を入力し，原子炉圧力に応じて注入流量を計算</li> </ul>  |
|            | 格納容器スプレイ    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 注入特性を入力し格納容器圧力に応じて注入流量を計算</li> <li>・ スプレイ水による凝縮熱伝達により気相部冷却を計算</li> </ul>  |
|            | 逃がし安全弁      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 設計値に基づいて流量を計算</li> </ul>  |

表 3.3-1 MAAP コードのモデル一覧 (3/5)

| 項目              | 計算モデル   |
|-----------------|---|
| 溶融炉心の挙動モデル      | (炉心モデル (熱水力モデル (伝熱)) に記載)   |
| ヒートアップ          |   |
| リロケーション         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 軸方向及び径方向に質量及びエネルギーの移動を考慮</li> <li>・ 炉心ノード内の状態として、「燃料が自立した状態」、「燃料が崩壊した状態」、「流路が減少した状態」、「流路が閉塞した状態」及び「溶融プール状態」を考慮</li> <li>・ 軸方向のリロケーションは燃料の溶融状態に応じて定常を仮定した液膜流あるいは管内流の速度で移動</li> <li>・ 径方向のリロケーションは下部ノードが閉塞し、隣接ノードに空隙があり、かつ溶融物の液面に差がある場合に適用され、水頭差と流動抵抗がバランスした速度で流動</li> <li>・ 流路減少の進展、流路閉塞及び溶融プールの各状態において蒸気及びガスの流路の閉塞を模擬</li> <li>・ クラストのクリーブ破損を考慮</li> </ul> |
| 下部プレナムでの溶融炉心の挙動 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 下部プレナムからの溶融炉心の落下速度は、デブリジェットの密度、冷却材の密度、差圧、重力加速度により計算</li> <li>・ デブリジェットと水のエントレインを計算</li> <li>・ エントレイン量：Ricou-Spalding モデル</li> <li>・ 水との熱伝達：膜沸騰及び輻射熱伝達</li> <li>・ 成層化したデブリベッドを模擬</li> <li>・ 上部の水による熱除去は Henry-Epstein-Fauske 相関式</li> <li>・ デブリベッドに浸入した水による熱除去は、水の浸入を考慮した CHF 相関式</li> <li>・ 下部ヘッドと溶融炉心のギャップでの沸騰水による熱除去については、門出らの相関式</li> </ul>             |
| 原子炉圧力容器破損       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 制御棒駆動機構ハウジング溶接部等の貫通部の破損として、せん断応力あるいはひずみがしきい値を超える場合に破損を判定</li> <li>・ 原子炉圧力容器下部ヘッドの破損として、Larson-Miller パラメータ手法によるクリーブ破損を考慮</li> <li>・ 破損後、溶融炉心からの加熱による破損口拡大を模擬</li> </ul>  |

表 3.3-1 MAAP コードのモデル一覧 (4/5)

| 項目               |                               | 計算モデル  |
|------------------|-------------------------------|--|
| 溶融炉心の挙動モデル (つづき) | 原子炉压力容器破損後の<br>高压溶融物放出        | <ul style="list-style-type: none"> <li>高压溶融物放出の防止が評価目的であり，高压溶融物放出及びそれに引き続き発生する格納容器雰囲気直接加熱についてはモデル上考慮しない。</li> </ul>  |
|                  | 格納容器雰囲気直接加熱                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>高压溶融物放出の防止が評価目的であり，高压溶融物放出及びそれに引き続き発生する格納容器雰囲気直接加熱についてはモデル上考慮しない。</li> </ul>  |
|                  | 格納容器下部での溶融炉心の挙動 (落下及び溶融プール)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>デブリジェットと水のエントレインを計算<br/>エントレイン量：Ricou-Spalding モデル<br/>水との熱伝達：膜沸騰及び輻射熱伝達</li> <li>格納容器下部床上に落下した溶融炉心（連続体及び粒子状）の質量とエネルギーは溶融プールに加算され瞬時に均質化すると仮定</li> <li>格納容器下部床全面に均一に広がると仮定</li> <li>溶融プールは厚さ均一の平板を仮定，内部温度は1点で模擬</li> <li>上部・下部・側部クラストを考慮し，下方及び側方への侵食を考慮</li> <li>クラスト内の温度分布は崩壊熱を考慮して2次式で近似</li> <li>侵食したコンクリートと炉心溶融物との混合割合から液化・固化温度を評価</li> <li>炉心材及びコンクリートの化学組成の化学平衡計算に基づき非凝縮性ガス（水素，一酸化炭素，二酸化炭素）の発生を評価</li> </ul> |
|                  | 原子炉格納容器下部での溶融炉心の挙動 (溶融プールの伝熱) | <ul style="list-style-type: none"> <li>上部クラストから上部水プールへは Kutateladze の熱伝達相関式を考慮</li> <li>内部の溶融物から上部・下部・側部クラストは対流熱伝達を考慮</li> </ul>   |

表 3.3-1 MAAP コードのモデル一覧 (5/5)

| 項目               |                               | 計算モデル  |
|------------------|-------------------------------|--|
| 溶融炉心の挙動モデル (つづき) | 原子炉格納容器下部での溶融炉心の挙動 (コンクリート侵食) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート温度は、深さ方向に準定常の1次元の熱伝導方程式により温度分布を持つと仮定</li> <li>・コンクリート温度がコンクリート融解温度を超えると侵食開始。その際、コンクリート融解熱及び化学反応熱の発生を考慮。</li> <li>・コンクリートから放出されるガス (水蒸気及び二酸化炭素) は直ちに溶融プールに侵入すると仮定し、溶融プール中の金属との酸化反応を考慮</li> <li>・コンクリートのスラグも溶融プールに侵入し、ウラン・ジルコニウム等と混合すると仮定</li> </ul>   |
| FP 挙動モデル         | FP 放出                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・FP は炉心温度に対する放出速度の相違に基づき 12 グループに分類し、各 FP グループの質量保存を考慮</li> <li>・溶融炉心・コンクリート相互作用に伴う FP 放出を模擬</li> </ul>   |
|                  | 遷移・輸送                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉圧力容器及び格納容器内の FP 形態は各グループに対し、ガス状、エアロゾル状、沈着を考慮 (希ガスはガス状のみ)。また、水中及び溶融炉心内の FP を考慮</li> <li>・気相及び液相中の FP の輸送は、熱水力計算から求められる体積流量から FP 輸送量を計算</li> <li>・FP がガスとエアロゾルの場合は、気体の流れに乗って移動</li> <li>・溶融炉心内に残存する FP は溶融炉心と共に移動</li> <li>・水中の FP は区画間の水の流れと共に移動</li> <li>・格納容器及び原子炉圧力容器内での気体、エアロゾル及び構造表面上 (沈着) の状態間の遷移を模擬</li> <li>・エアロゾルの沈着は、重力沈降、拡散泳動、熱泳動、慣性衝突、FP ガス凝縮、FP ガス再蒸発を模擬。沈着したエアロゾルの再浮遊は考慮していない</li> </ul> |
|                  | 崩壊熱                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・崩壊熱は各位置の FP 量に応じて分配され、各エネルギー保存式に考慮</li> <li>・FP 崩壊による発生エネルギーは崩壊熱データで考慮</li> </ul>  |

表 3.3-2 MAAP コードの FP の核種グループ

| グループ | 代表核種                           | 説明   |
|------|--------------------------------|--|
| 1    | 希ガス                            | 希ガス (Xe, Kr)   |
| 2    | CsI                            | CsI 及び RbI。よう素は全てアルカリ FP と結合すると仮定。また、セシウムがほとんどであるため、CsI の物性を用いる。   |
| 3    | TeO <sub>2</sub>               | 酸化テルル (TeO <sub>2</sub> )。炉心内に放出されたテルルは直接 TeO <sub>2</sub> となると仮定。原子炉圧力容器外で放出されたテルルは元素状態にあると仮定するが、蒸気や酸素が存在する場合には酸化されて TeO <sub>2</sub> になるものと仮定。 |
| 4    | SrO                            | ストロンチウムは主として原子炉圧力容器外から元素状態で放出されるが、格納容器内で酸化されて SrO になるものと仮定。圧力容器内放出についても、酸化されて SrO になると仮定。  |
| 5    | MoO <sub>2</sub>               | 二酸化モリブデン (MoO <sub>2</sub> )。モリブデンが主にコンクリート接触時に放出されると考えられるためである。   |
| 6    | CsOH                           | CsOH 及び RbOH を表す。これは、よう素と結合した後に放出される Cs と Rb を表す。  |
| 7    | BaO                            | 酸化バリウム (BaO) を表す。Ba は化学的周期性から、Sr と同じような挙動を示す。  |
| 8    | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | La を表す。La 類の全三二酸化物の化学的挙動は同様であるので一つのグループとする。これらは不揮発性であるが、原子炉圧力容器内放出が許容されている。主として一酸化物の状態で原子炉圧力容器外に放出されるが、原子炉格納容器内で更に酸化する。                          |
| 9    | CeO <sub>2</sub>               | Ce の挙動は La と同様であるが、化学量及びガス分圧が異なるため、違うグループとしている。  |
| 10   | Sb                             | アンチモンは元素の形態のまま原子炉圧力容器内及び原子炉圧力容器外へ放出される。  |
| 11   | Te <sub>2</sub>                | 原子炉圧力容器外に放出された Te のうち酸化しないものは Te <sub>2</sub> のままとする。  |
| 12   | UO <sub>2</sub>                | ウラン及び超ウラン元素は特性が異なるため他の FP とは区別してグループ化する。これらは原子炉圧力容器外のみには放出され、原子炉格納容器内で二酸化物になるものと仮定。  |

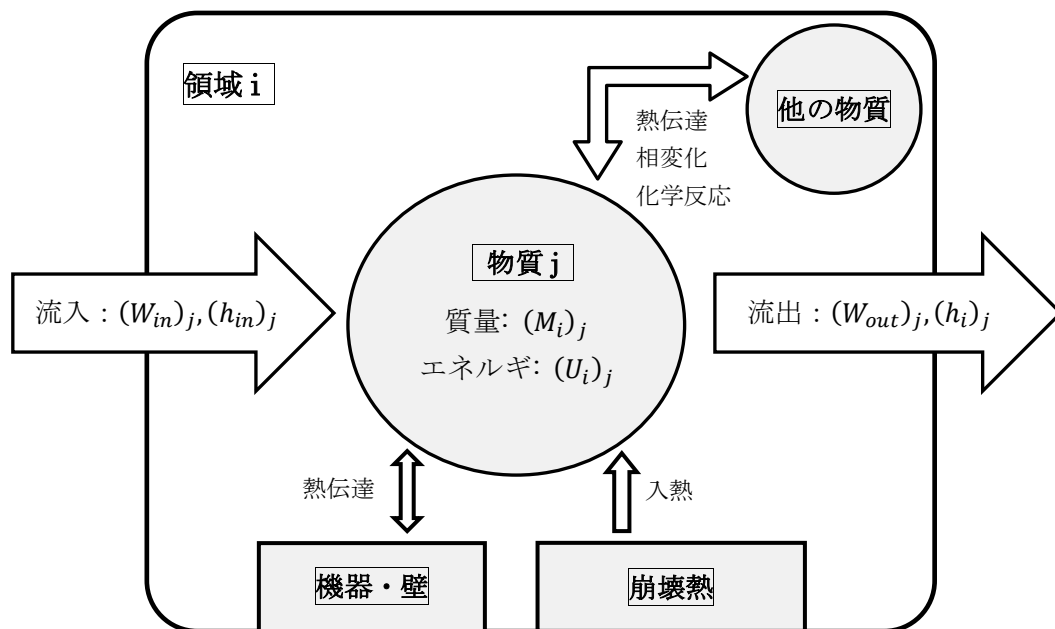


図 3.3-1 各ノード（領域）における物質ごとの質量及びエネルギーバランス



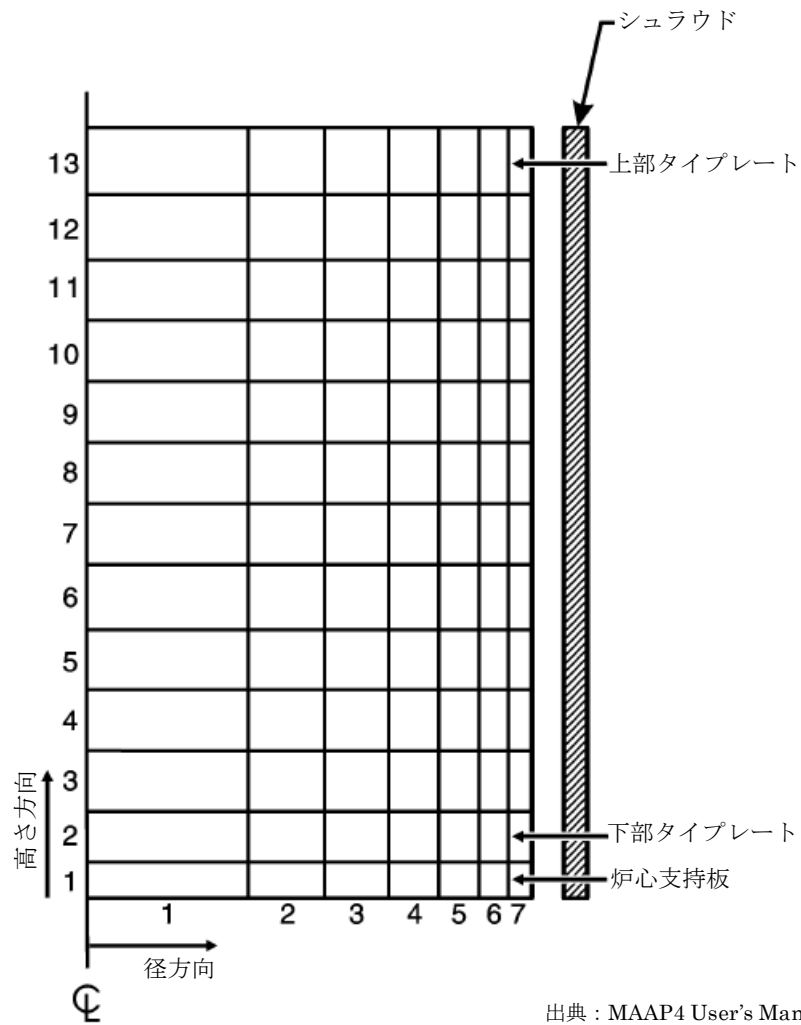
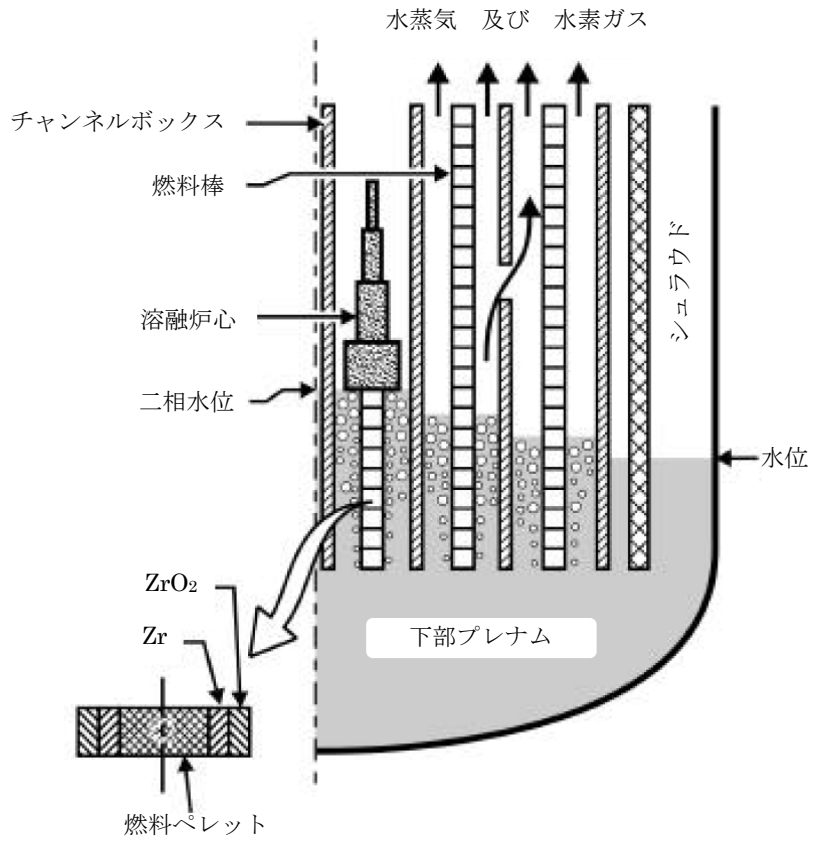


図 3.3-2 MAAP ノード分割例 (炉心モデル)



出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.3-3 炉心水位モデル

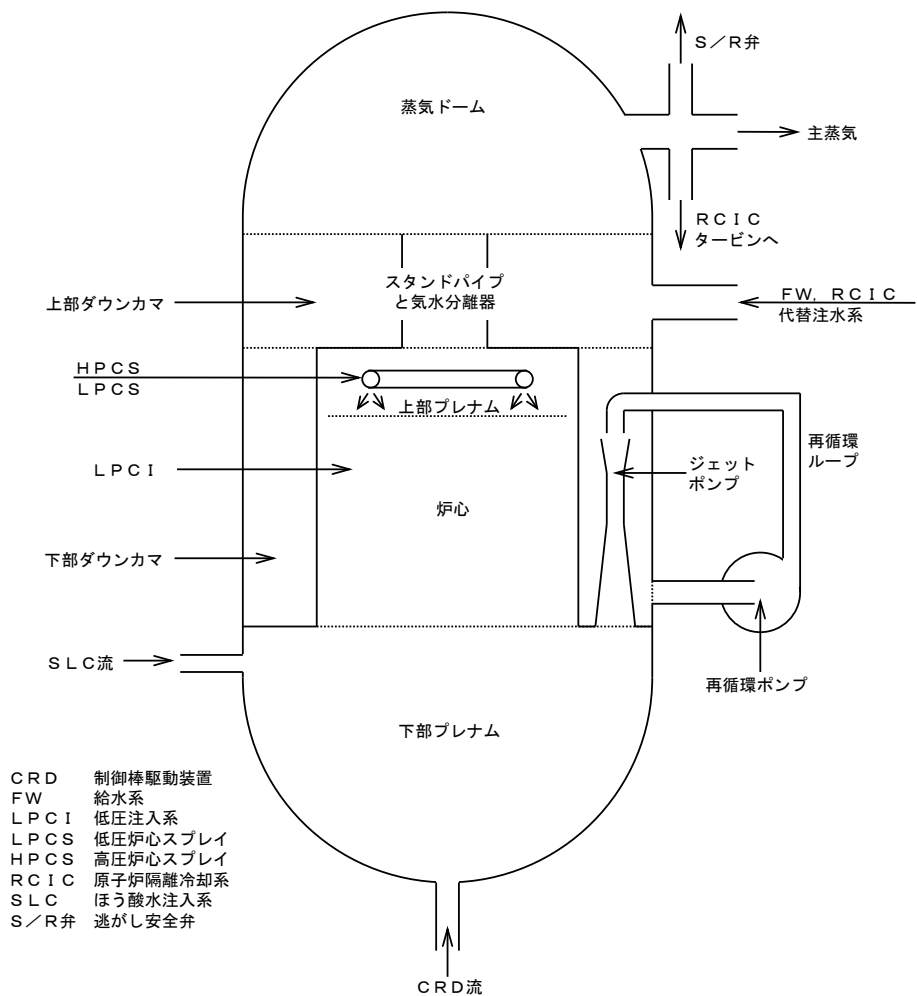
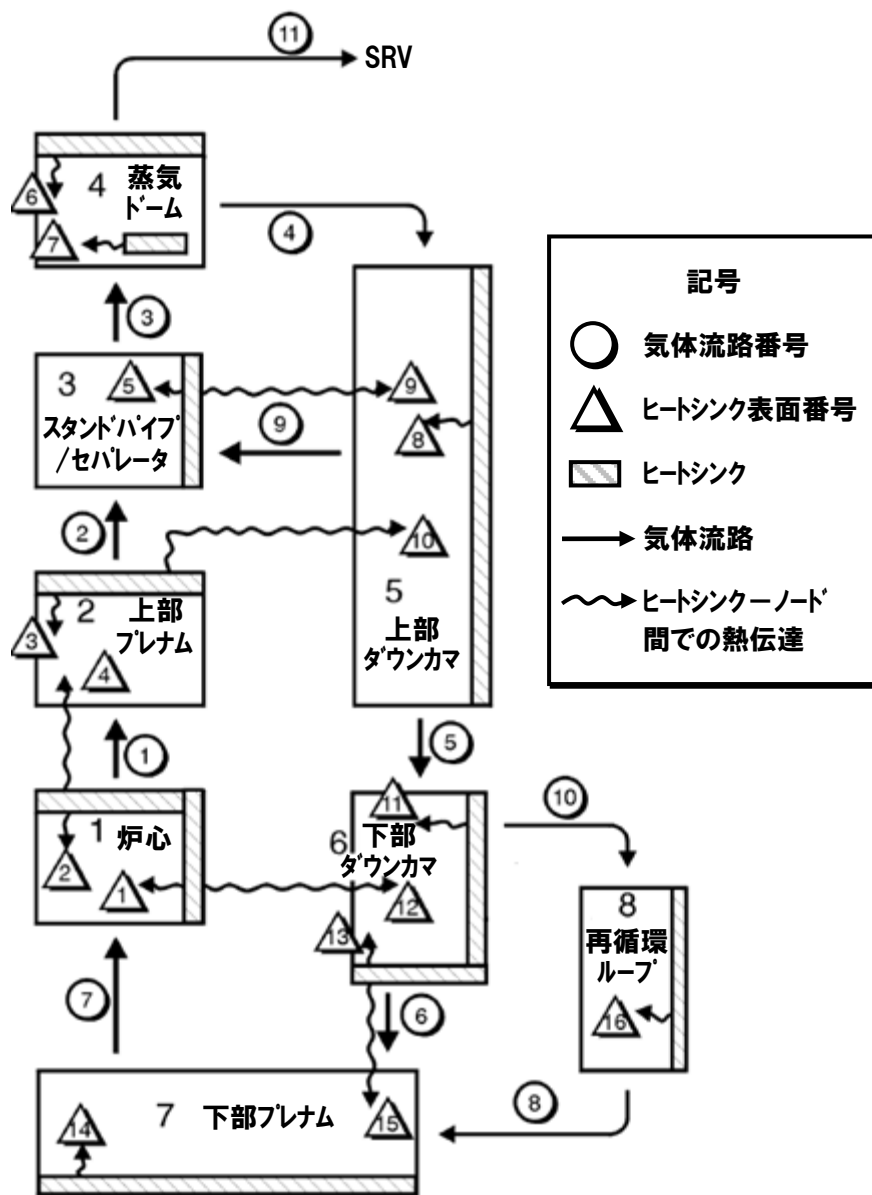


図 3.3-4 MAAP 原子炉圧力容器モデルの概要 (BWR-5 の例)



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.3-5 MAAP 原子炉圧力容器ノード分割図

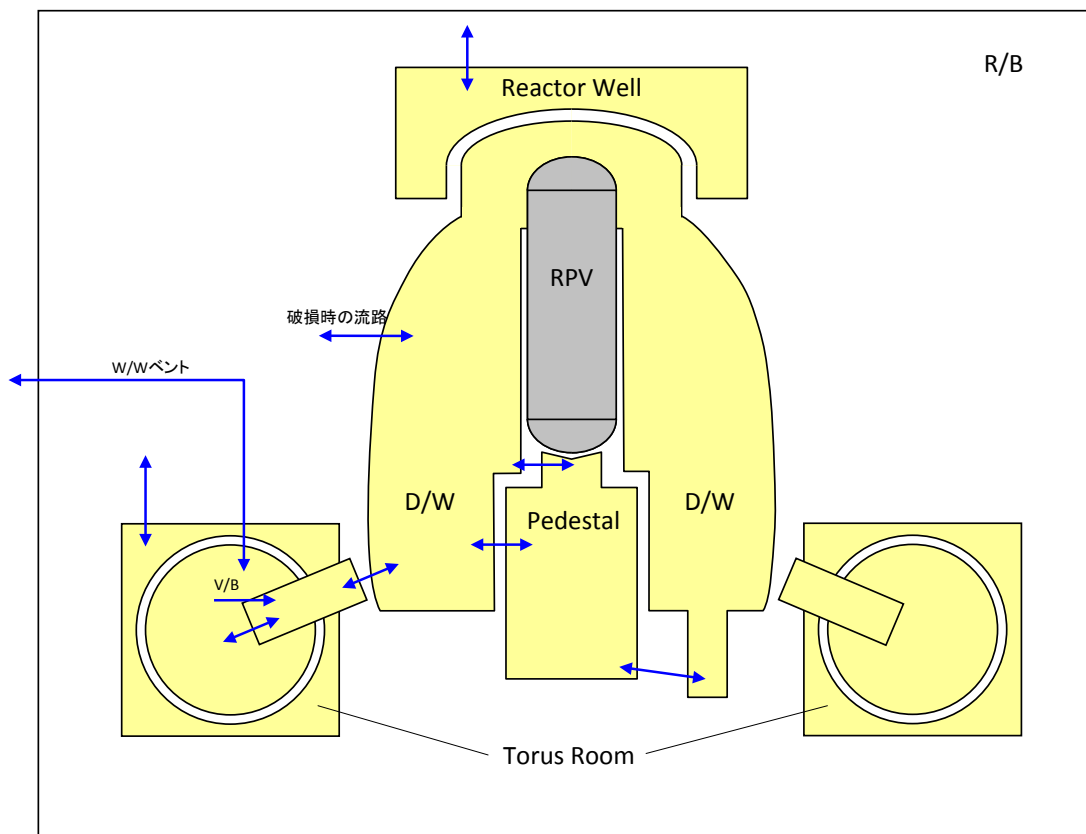


図 3.3-6 MAAP ノード分割図（格納容器モデル：Mark-I 改の例）

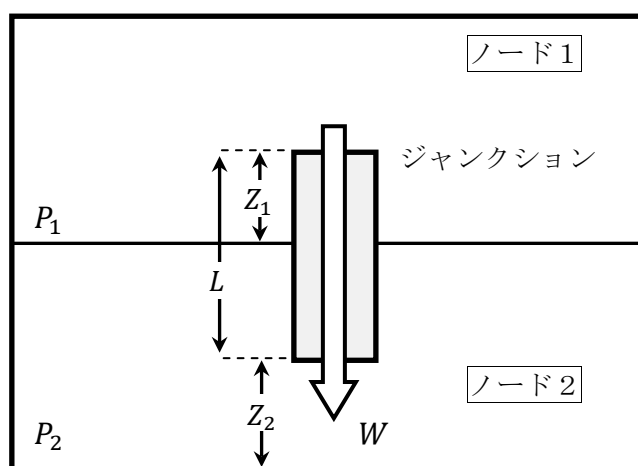


図 3.3-7 ジャンクションの接続関係

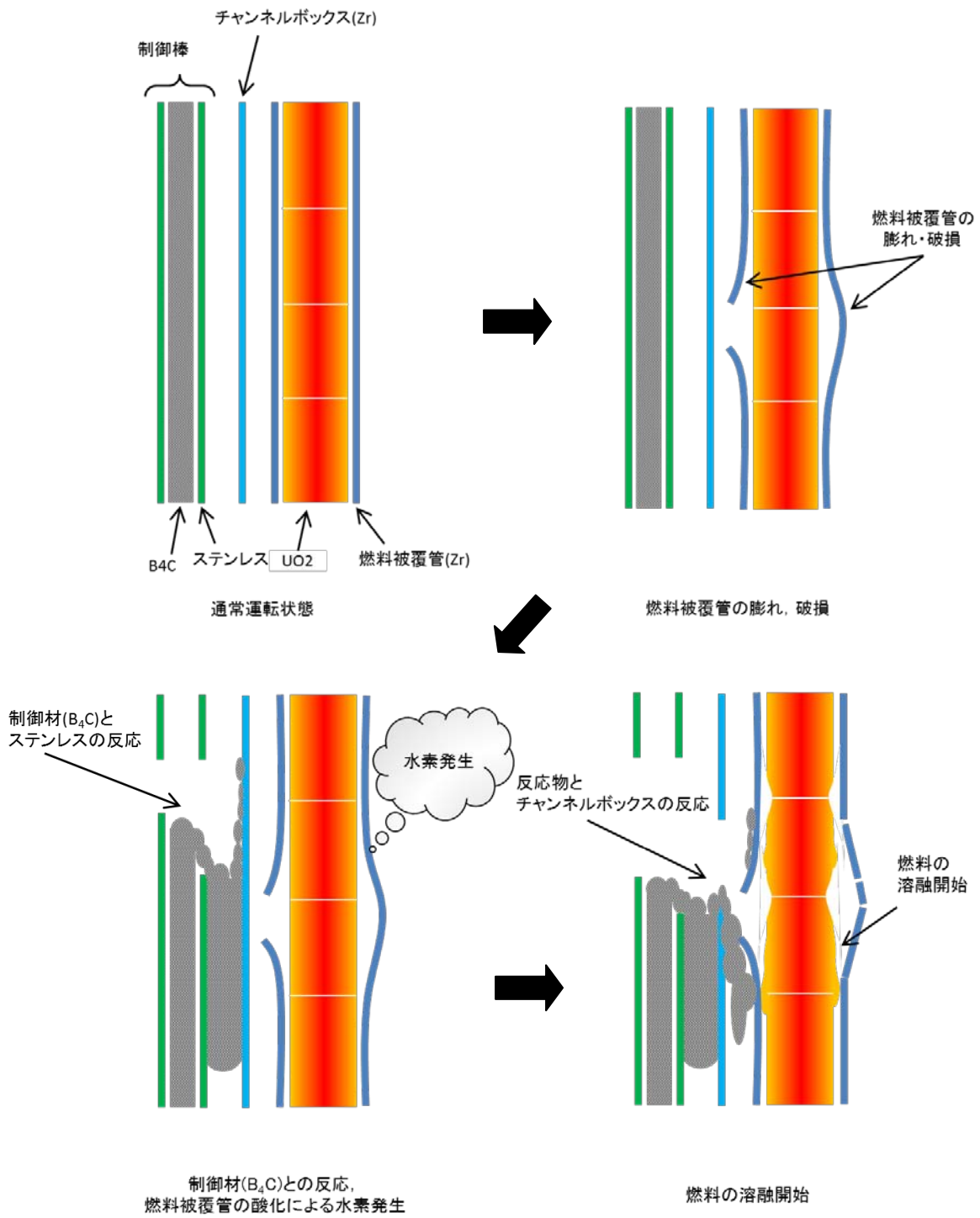
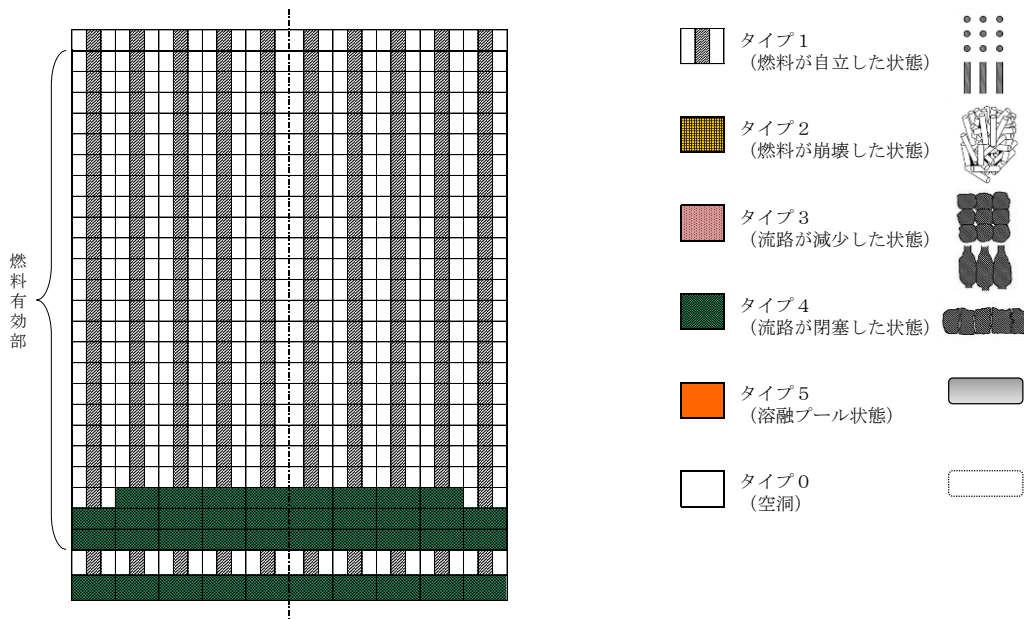
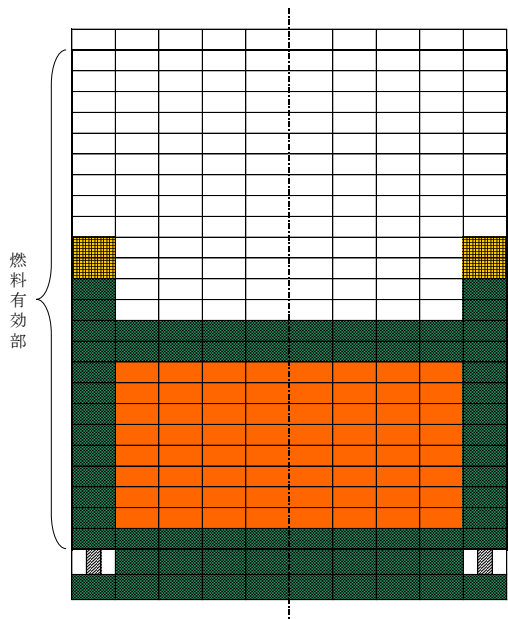


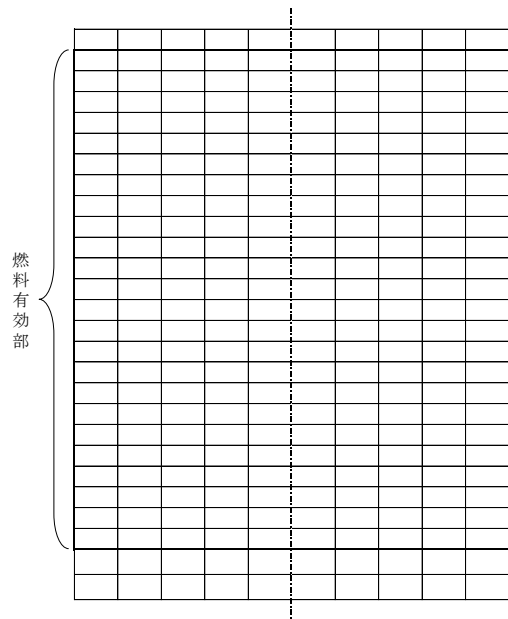
図 3.3-8 炉心ヒートアップ・燃料溶融の模式図



炉心溶融開始直後の状態。炉心溶融は炉心径方向中心から開始し、シュラウド側（径方向外側）の溶融は炉心中央に比べて進展が遅い。

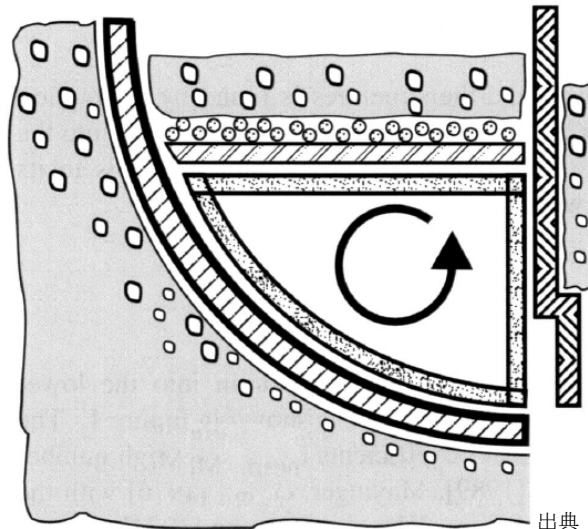
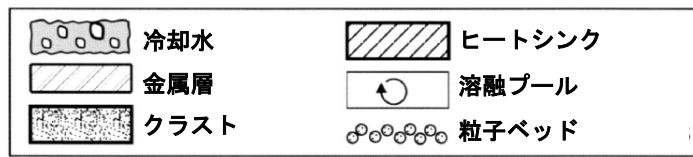


代替注水系による損傷炉心冷却後の状態。損傷炉心の冷却が行われているため、溶融プール状態のノードの周囲に流路が閉塞した状態のノードが形成され、シュラウド側（径方向外側）においても冷却されている。



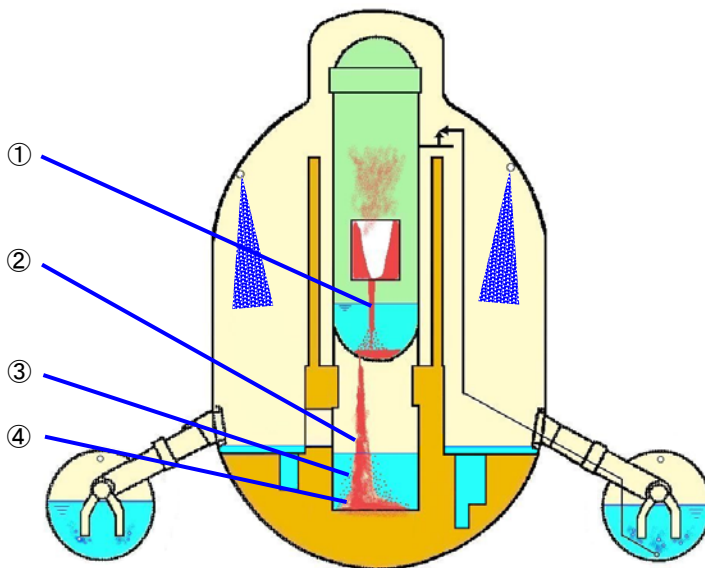
原子炉圧力容器破損後の状態。炉心支持板より上部に燃料は存在せず、空洞となっている。

図 3.3-9 炉心溶融進展における損傷炉心の形状の変化（例）



出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.3-10 下部プレナムでの溶融炉心の概念



- ① 炉心からのリロケーションにより下部プレナムに移行。冷却水との接触により、エントレイン及び冷却水の蒸発
- ② 制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損により、格納容器下部への落下を開始。破損口はアブレーションにより拡大
- ③ 格納容器下部プール水との接触によりエントレイン
- ④ 溶融炉心は格納容器下部へ落下

図 3.3-11 格納容器下部への溶融炉心の落下の例（格納容器モデル：Mark-I 改の例）



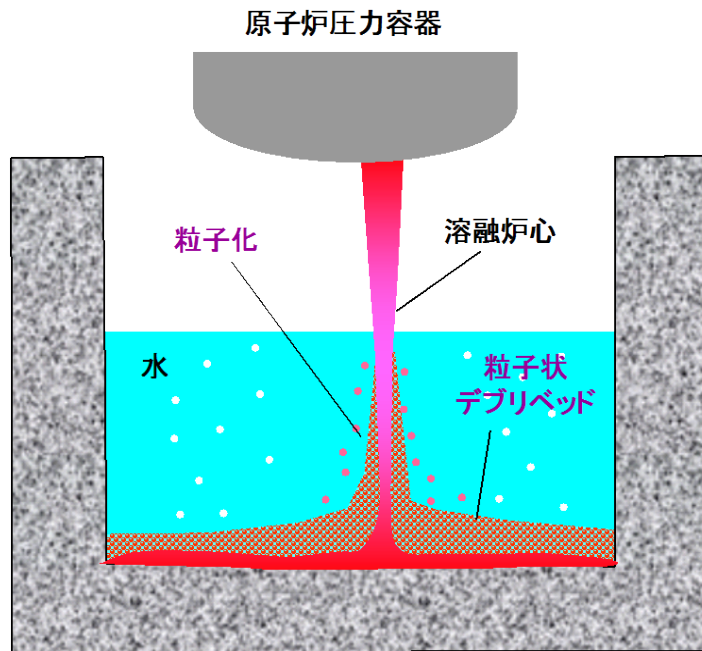
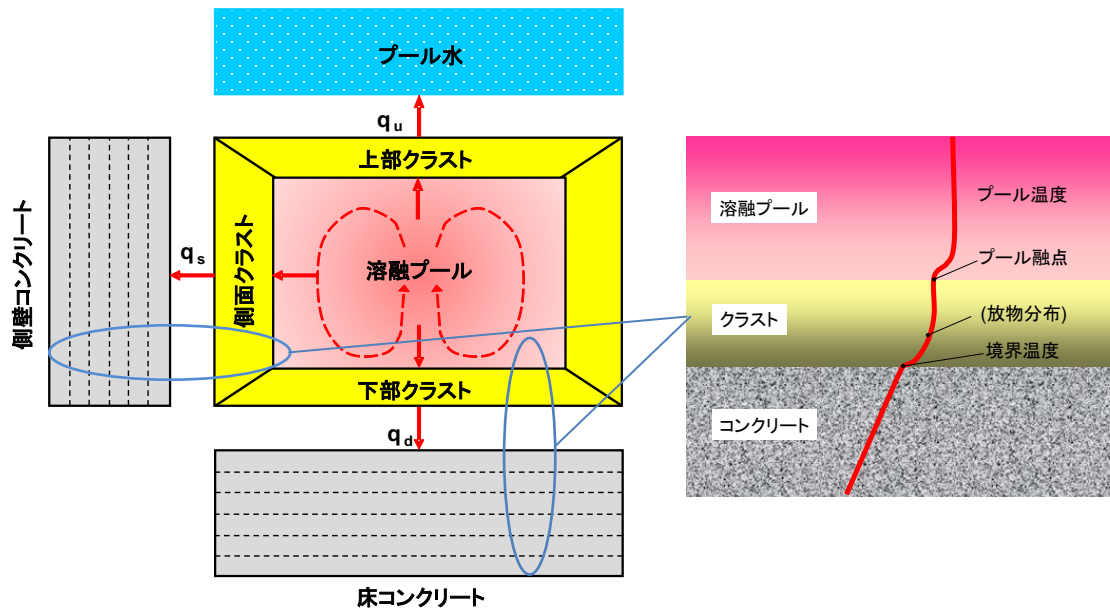
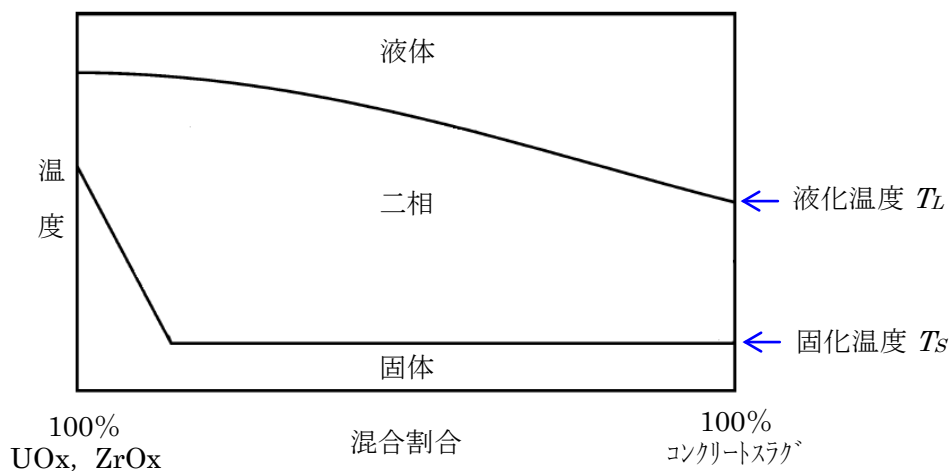


図 3.3-12 原子炉格納容器下部における溶融炉心の挙動の概念



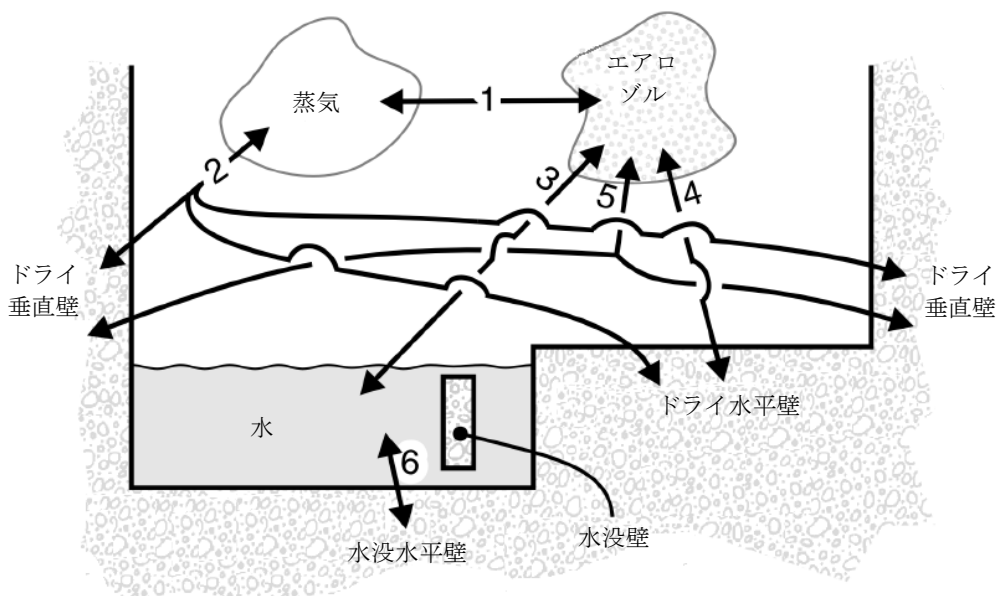
出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.3-13 溶融炉心の伝熱の概念



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.3-14 溶融プールの相変化の概念



FP 輸送パス：

1. 蒸気-エアロゾル (蒸発/凝縮)
2. 蒸気-ドライ壁 (蒸発/凝縮)
3. エアロゾル-水 (拡散泳動, 重力沈降, 熱泳動)
4. エアロゾル-ドライ水平壁 (重力沈降, 熱泳動)
5. エアロゾル-ドライ垂直壁 (慣性衝突, 熱泳動)
6. 水-水没水平壁 (溶解/沈着)

出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.3-15 格納容器内 FP 遷移モデル

### 3.4 ノード分割

実機解析に用いるノード分割の考え方を表 3.4-1 に示す。

炉心モデルは、**R-Z** の 2 次元モデルであり、各ノードの体積割合は燃料集合体単位で設定している。径方向は輻射熱伝達により温度勾配が小さく分割数の影響は小さいが、解析の安定性のため、各分割要素が断面積（体積）の差があまり大きくならないよう考慮している。軸方向の分割数は高さ方向の温度勾配がジルコニウム-水反応の速度や炉心溶融挙動に影響するため 10 以上としている。

原子炉压力容器のノードは、蒸気ドーム、スタンドパイプと気水分離器、上部プレナム、ダウンコマ、下部プレナム等の原子炉压力容器の構成要素ごとに分割された、コードプリセットの分割を用いている。

原子炉格納容器は、壁などの物理区画を模擬したノードと吹き抜けや扉などの開口部を模擬したジャンクションを組み合わせモデル化し、同じ特徴を有する空間を集約することを基本にして設定している。

ノード分割の考え方は、**BWR** プラントに共通して適用するものである。

表 3.4-1 MAAP コードのノード分割の考え方

| 項目      | ノード分割の考え方   |
|---------|---|
| 炉心      | <p>径方向及び高さ方向にノード分割した、R・Zの2次元モデルである。径方向は輻射熱伝達により温度勾配が小さく分割数の影響は小さいが、軸方向の分割数は高さ方向の温度勾配がジルコニウム-水反応の速度や炉心溶融挙動に影響するため10以上が推奨される。径方法の分割は任意であるが、各ノードの体積割合は燃料集合体単位で設定し、解析の安定性のため、各分割要素が断面積（体積）の差があまり大きくならないように設定することが推奨されている。</p>   |
| 原子炉圧力容器 | <p>蒸気ドーム、スタンドパイプと気水分離器、上部プレナム、ダウンカマ、下部プレナム等の原子炉圧力容器の構成要素ごとにノード分割される（コードのプリセット）。このノード分割は、国内外の典型的なBWRプラントの原子炉圧力容器を模擬したもので、コード内に設定されたプリセットのものとなっており、各炉型に対して適用性を有する。</p>  |
| 原子炉格納容器 | <p>壁などの物理区画を模擬したノードと吹き抜けや扉などの開口部を模擬したジャンクションを組み合わせ、標準的には、格納容器内部を格納容器下部（下部ドライウエル、ペDESTAL）、ドライウエル、ベント管、ウェットウエルに分割される。</p> <p>このノード分割は、同じ特徴を有する空間を集約することを基本として、壁や床によって囲われた領域をノード（区画）として設定し、同じ特徴を有する空間では物理パラメータも同等となるため、緩やか又は長期的な応答を模擬することができ、各ノード間の接続条件を適切に与えることによって、格納容器の型式によらず適用性を有する。</p> |

### 3.5 入出力

MAAP コードへの入力情報は、別紙 1 に示すとおりである。

主要な入出力は、図 3.5-1 に示すとおりであり、入力は、

- ① 燃料質量，被覆管質量等
- ② 核分裂生成物質量等
- ③ 原子炉压力容器圧力・温度，格納容器圧力・温度等の初期条件
- ④ 原子炉压力容器内の形状等
- ⑤ 工学的安全設備，格納容器スプレイの特性等
- ⑥ 格納容器内の区画形状，格納容器内の区画間の形状等
- ⑦ 格納容器内のヒートシンクの材質・形状等
- ⑧ 起因事象，緩和設備等の情報等

を与え，これらに基づきプラント全体の過渡解析を実施し，以下の出力を得る。

- ① 原子炉压力容器圧力
- ② 原子炉压力容器水位
- ③ 格納容器内圧力
- ④ 格納容器雰囲気温度
- ⑤ 格納容器内水素濃度
- ⑥ 格納容器内水量
- ⑦ コンクリート侵食深さ等

なお，上に示した入力情報のうち，核分裂生成物質量については核種生成崩壊計算コードにより求められたデータを初期値として用いる。この値は，炉心内蔵量を保守的に与えるため，1 サイクル 13 ヶ月(395 日)に余裕をみて 1 サイクル 1 万時間(416 日)の燃焼期間を仮定し、平衡炉心の燃料装荷体数の割合に基づいた条件で評価されたものである。

これらの入力作成の流れを図 3.5-2 に示す。

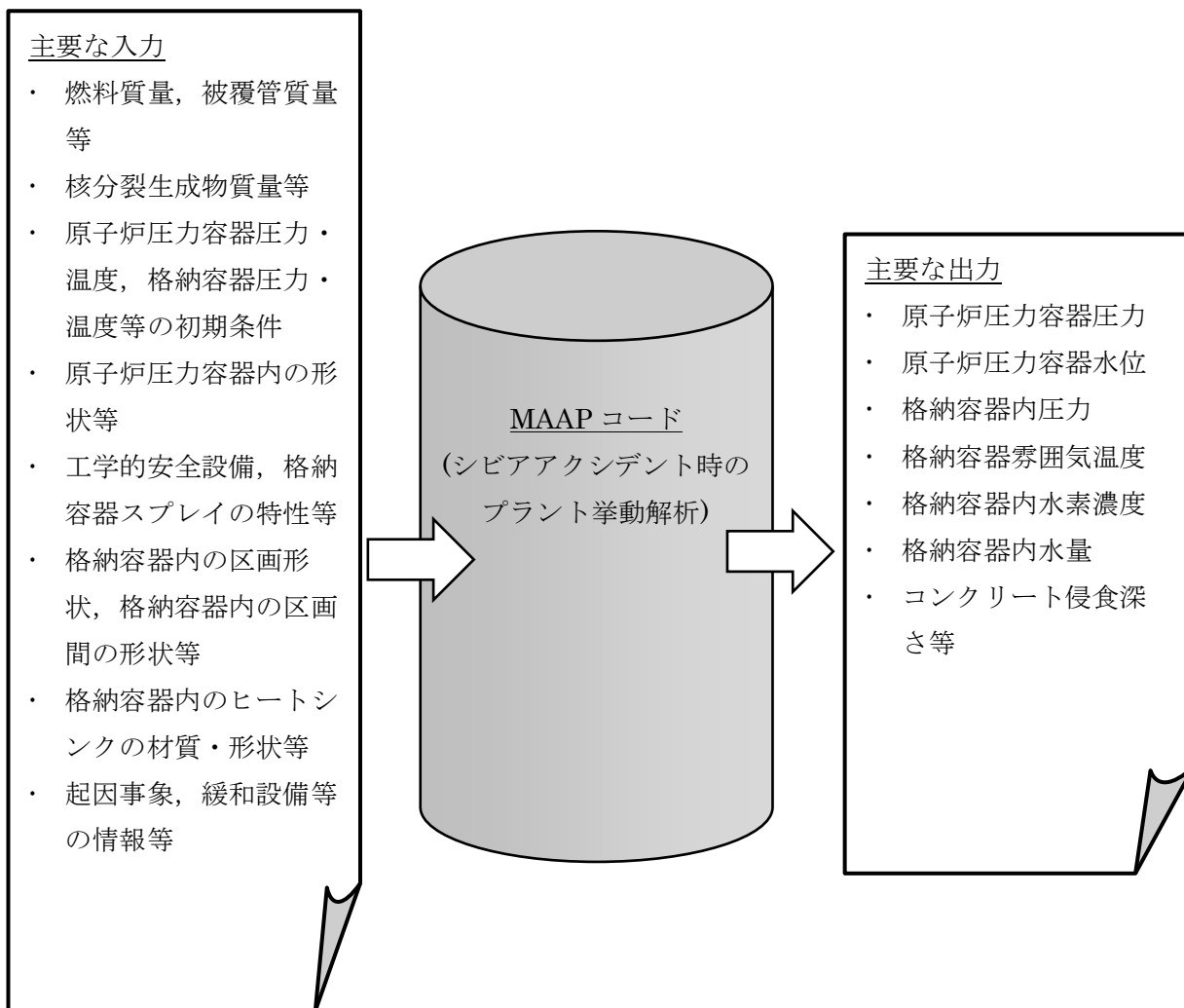


図 3.5-1 MAAP の入出力

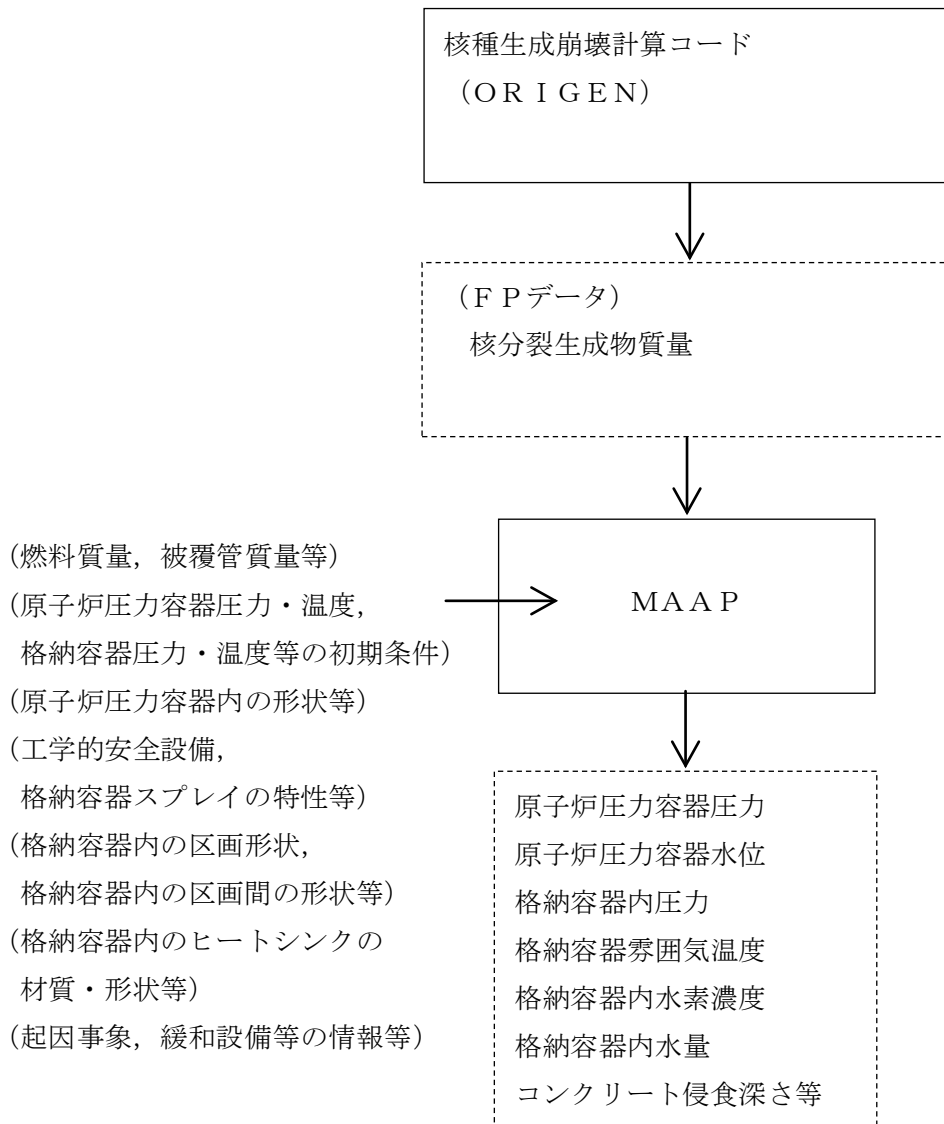


図 3.5-2 前処理コードによる MAAP 入力作成の流れ

## 4. 妥当性確認

### 4.1 妥当性確認方法

2.3 において分類した重要現象の妥当性確認方法を以下に記載する。各重要現象の妥当性確認においては、事故解析あるいは実験解析によって確認することを基本とするが、機器や設備の性能に基づいて物理現象の特性を与えているため、妥当性確認が不要となるものがある。

2章では「原子炉压力容器破損後の高压溶融物放出」及び「格納容器雰囲気直接加熱」を重要現象として抽出していないものの、その発生を防止するという観点からは、事象進展に影響する各モデルの不確かさに基づいた総合的な判断が必要なことから、添付1において不確かさの分析及び感度解析による影響評価をまとめる。

また、「原子炉压力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用 (FCI)」及び「溶融炉心・コンクリート相互作用 (MCCI)」については、国内外において現象の解明や評価に関する多くの活動が行われてきているが、現在においても研究段階にあり、不確かさが大きい現象であると言えることから、添付2及び添付3において、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価をまとめる。

#### 4.1.1 崩壊熱 [炉心 (核)]

重要現象に分類された物理現象のうち崩壊熱は、信頼性の高いモデルと現実的な条件を用いて評価された最確値をもとに、事象発生後の原子炉出力変化として計算される。このため、MAAPコードにおける崩壊熱の妥当性確認は不要であると考えられる。

#### 4.1.2 沸騰・ボイド率変化、気液分離 (水位変化)・対向流 [炉心 (熱流動)]

炉心の「沸騰・ボイド率変化」及び「気液分離 (水位変化)・対向流」については、原子炉压力容器内水位に関係する現象である。MAAPコードの炉心水位 (二相水位) は、3.3.2(4)で述べたモデルによって計算される。上部プレナム領域についても同様にドリフトフラックスモデルによるボイド率から二相水位が計算され、炉心水位と合わせて原子炉压力容器内水位として計算される。

炉心損傷防止対策の事故シーケンスにおいては、対象とする原子炉水位といった原子炉压力容器内挙動は SAFERコードによって評価されており、MAAPコードは格納容器内挙動の評価のみに用いられているが、格納容器破損防止対策の事故シーケンスにおいては、MAAPコードによって、原子炉压力容器内挙動を含めた全体挙動を評価している。原子炉水位は炉心冷却状態及び炉心溶融進展への影響が考えられるため、原子炉水位について SAFERコードと比較を行い、不確かさを確認する (4.3.1 参照)。



#### 4.1.3 冷却材放出（臨界流・差圧流）〔圧力容器〕

原子炉圧力容器と格納容器との間の流れとなる、LOCA破断口からの臨界流による流量については、3.3.3(3)で述べたとおり、保守的なモデルを用いている。逃がし安全弁からの流量については、3.3.5(3)で述べたとおり、設計値に基づいて流量が計算される。差圧流については一般的なモデルが用いられていることから解析モデルとしての不確かさは小さく、MAAPコードにおける「冷却材放出（臨界流・差圧流）」の妥当性確認は不要であると考えられる。

#### 4.1.4 格納容器各領域間の流動、構造材との熱伝達及び内部熱伝導、気液界面の熱伝達、格納容器ベント〔格納容器〕

「格納容器各領域間の流動」、「構造材との熱伝達及び内部熱伝導」、「気液界面の熱伝達」は、HDR実験に対するベンチマーク解析により妥当性の確認を行う。あわせて、「格納容器各領域間の流動」、「構造材との熱伝達及び内部熱伝導」は、CSTF実験に対するベンチマーク解析によって妥当性の確認を行う。「格納容器ベント」に関しては、3.3.4(2)で述べたとおり、「格納容器各領域間の流動」と同様の計算方法が用いられており、「格納容器各領域間の流動」の妥当性の確認に含まれる。なお、「構造材との熱伝達及び内部熱伝導」に関しては、直接的なデータが得られていないため、格納容器圧力や温度の過渡挙動を模擬した実験との比較から、所定の入熱があった場合の構造材への熱伝達及び内部熱伝導による放熱計算に関する考察を行うものとする（4.2.3及び4.2.4参照）。

#### 4.1.5 ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）〔圧力容器〕、スプレイ冷却、サプレッション・プール冷却〔格納容器〕

ECCS及びスプレイ注入特性は、設計値に基づいて、作動圧力及びポンプの圧力-流量特性を入力値として与えている。スプレイによる格納容器気相部の冷却に関しては、液滴径を入力し、液滴と気相部の界面熱伝達により気相部が冷却されるモデルが採用されている。液滴は質量に対して伝熱面積が大きいことより、スプレイされた水は気相部温度と等しくなって液相に落下する。スプレイの水滴温度が比較的短時間に周囲の雰囲気温度と平衡状態となることは良く知られているところであり、伝熱モデルの不確かさによる結果への影響は無いと考えられる。よって、「ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）」、「スプレイ冷却」の妥当性確認は不要であると考えられる。「サプレッション・プール冷却」においても、設計値に基づいて、ポンプ流量及び除熱量を入力値として与えており、妥当性確認は不要であると考えられる。

#### 4.1.6 燃料被覆管酸化 [炉心 (燃料)] , 放射線水分解等による水素・酸素発生 [格納容器] [圧力容器(炉心損傷後)]

炉心内の金属-水反応による水素発生量は、TMI事故に対するベンチマーク解析により妥当性の確認を行う。水の放射線分解による水素及び酸素の発生量は、コード内にモデルを備えていないため、崩壊熱を用いた評価としており、妥当性確認は不要である。

#### 4.1.7 炉心ヒートアップ (燃料棒内温度変化, 燃料棒表面熱伝達, 燃料被覆管変形 [炉心 (燃料)] ) , リロケーション, 構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達 [圧力容器(炉心損傷後)]

MAAPコードの炉心ヒートアップモデルについては、TMI事故に対するベンチマーク解析及びCORAX実験に対するベンチマーク解析により、構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心伝熱モデルについては、TMI事故に対するベンチマーク解析により妥当性の確認を行う。

TMI事故では炉心ヒートアップ (燃料棒内温度変化, 燃料棒表面熱伝達, 燃料被覆管酸化, 燃料被覆管変形), 構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達を直接示す測定値は無いものの、それらの挙動が間接的に影響する1次系及び2次系の挙動や、事故後の調査研究で各時刻の熔融進展状況が推定されており、それら調査結果との比較により本モデルの妥当性が確認できると考えられる(4.2.1参照)。

TMI事故は原子炉容器破損前に事象終息していること、炉心熔融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であり、不確かさが大きいと考えられることから、感度解析による影響の把握を行う(4.3.2, 4.3.3, 4.3.5参照)。

#### 4.1.8 原子炉圧力容器破損 [圧力容器(炉心損傷後)]

原子炉圧力容器破損挙動を熔融炉心挙動と合わせて実験した例は無いため、実験解析により直接的に妥当性評価を行うことは出来ない。以下のように、MAAPコードの原子炉圧力容器破損モデルはTMI事故の知見に基づき開発されており、妥当性評価は不要と考えられる。

TMI事故では、熔融炉心が下部プレナムへ落下したものの、原子炉圧力容器と熔融炉心のギャップに水が浸入することで原子炉圧力容器壁を冷却できたと推定されている。MAAPではTMI事故の調査研究や熔融炉心から原子炉圧力容器壁への伝熱挙動を模擬した実験に基づいて、原子炉圧力容器壁への伝熱挙動をモデル化している。また、原子炉圧力容器の破損形態として、原子炉圧力容器のクリープ破損及び制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損等が考慮されている。原子炉圧力容器破損

モデルは、工学分野でクリープ破損評価に広く使用されるLarson-Millerパラメータ手法に基づくものであり、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損は単純な熱伝導問題であり、これらモデルにはある程度の妥当性があるものと推測される。しかしながら、現象自体が持つ不確かさもあることを踏まえ、不確かさの整理を行うとともに、感度解析による影響の確認を行う。(4.3.6参照)

#### 4.1.9 原子炉压力容器内FP挙動 [压力容器(炉心損傷後)], 原子炉格納容器内FP挙動 [格納容器(炉心損傷後)]

炉心からのFP放出モデルについては、これまでに実験や検討がなされてきており、MAAPではその知見に基づくFP放出モデルが採用されている。燃料から原子炉压力容器及び原子炉压力容器から原子炉格納容器へ放出されるFP挙動についてPHEBUS-FP実験のベンチマーク解析によって妥当性を確認する(4.2.7参照)。また、格納容器内に放出されたエアロゾル挙動についてABCOVE実験のベンチマークによって妥当性を確認する(4.2.8参照)。

#### 4.1.10 原子炉压力容器内FCI (熔融炉心細粒化, デブリ粒子熱伝達) [压力容器(炉心損傷後)]

熔融炉心の細粒化及び粒子状デブリから水への熱伝達については、熔融物の粘性や冷却材条件に違いはあるものの、幅広く個別効果試験が実施されてきた。それらの知見をもとにMAAPのモデルは構成されているので、妥当性評価は不要と考えられる。また、原子炉压力容器内FCIにより生じる圧力スパイクについては、専門家間では原子炉冷却材圧力バウンダリや格納容器の破損に対する脅威とはならないと考えられている。

ただし、高圧熔融物放出を防止する観点から、原子炉压力容器内FCIによる原子炉圧力上昇は原子炉压力容器破損とあいまって、有効性の確認に影響するものと考えられることから、原子炉压力容器内FCIに関する現象について、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を添付2にまとめており、概要を4.3.4に示す。

#### 4.1.11 原子炉压力容器外FCI (熔融炉心細粒化, デブリ粒子熱伝達) [格納容器(炉心損傷後)]

原子炉压力容器外FCIに関する現象について、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行ったものを添付2にまとめており、概要を4.3.7に示す。

4.1.12 格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり，溶融炉心と格納容器下部プール水との伝熱，溶融炉心とコンクリートの伝熱，コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生  
[格納容器(炉心損傷後)]

「格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり」，「溶融炉心と格納容器下部プール水との伝熱」，「溶融炉心とコンクリートの伝熱」及び「コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生」を含めたMCCIに関する現象について，知見の整理，不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行ったものを添付3にまとめており，概要を4.3.8に示す。また，「溶融炉心とコンクリートの伝熱」，「コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生」については，ACE実験及びSURC-4実験に対するベンチマーク解析によっても妥当性の確認を行う（4.2.5及び4.2.6参照）。

表 4.1-1 重要現象に対する妥当性確認方法 (1/2)

| 物理現象            | 重要現象                  | 妥当性確認方法                       |                          |                                  |            |           |              |                  |              |       |       |       |
|-----------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------|-----------|--------------|------------------|--------------|-------|-------|-------|
|                 |                       | TMI<br>事故                     | CORA<br>実験               | HDR<br>実験                        | CSTF<br>実験 | ACE<br>実験 | SURC-4<br>実験 | PHEBUS<br>-FP 実験 | ABCOVE<br>実験 | 感度解析  | その他*  |       |
| 炉心(核)           | 崩壊熱                   | —                             | —                        | —                                | —          | —         | —            | —                | —            | —     | —     | 4.1.1 |
| 炉心<br>(燃料)      | 燃料棒内温度変化              | ☒ 4.2-1<br>☒ 4.2-2<br>☒ 4.2-4 | ☒ 4.2-9<br>~<br>☒ 4.2-16 | —                                | —          | —         | —            | —                | —            | 4.3.2 | —     |       |
|                 | 燃料棒表面熱伝達              |                               |                          | —                                | —          | —         | —            | —                | —            |       |       |       |
|                 | 燃料被覆管変形               |                               |                          | —                                | —          | —         | —            | —                | —            |       |       |       |
|                 | 燃料被覆管酸化               |                               |                          | —                                | —          | —         | —            | —                | —            |       |       |       |
| 炉心<br>(熱流動)     | 沸騰・ボイド率変化             | —                             | —                        | —                                | —          | —         | —            | —                | —            | 4.3.1 | —     |       |
|                 | 気液分離（水位変化）・対向流        | —                             | —                        | —                                | —          | —         | —            | —                | —            |       | —     |       |
| 原子炉<br>圧力<br>容器 | 冷却材放出（臨界流・差圧流）        | —                             | —                        | —                                | —          | —         | —            | —                | —            | —     | 4.1.3 |       |
|                 | ECCS 注水（給水系・代替注水設備含む） | —                             | —                        | —                                | —          | —         | —            | —                | —            | —     | 4.1.5 |       |
| 原子炉             | 格納容器各領域間の流動           | —                             | —                        | ☒ 4.2-19<br>☒ 4.2-26<br>☒ 4.2-27 | ☒ 4.2-31   | —         | —            | —                | —            | —     | —     |       |
|                 | 構造材との熱伝達及び内部熱伝導       | —                             | —                        |                                  | ☒ 4.2-32   | —         | —            | —                | —            | —     | —     |       |
|                 | 気液界面の熱伝達              | —                             | —                        |                                  | ☒ 4.2-33   | —         | —            | —                | —            | —     | —     |       |
| 格納<br>容器        | スプレイ冷却                | —                             | —                        | —                                | —          | —         | —            | —                | —            | —     | 4.1.5 |       |
|                 | 放射線水分解等による水素・酸素発生     | —                             | —                        | —                                | —          | —         | —            | —                | —            | —     | 4.1.6 |       |
|                 | 格納容器ベント               | —                             | —                        | —                                | —          | —         | —            | —                | —            | —     | 4.1.4 |       |
|                 | サプレッション・プール冷却         | —                             | —                        | —                                | —          | —         | —            | —                | —            | —     | 4.1.5 |       |

\* 4.1 で示した理由により妥当性確認が不要と考えられる現象

表 4.1-1 重要現象に対する妥当性確認方法 (2/2)

| 物理現象                           | 重要現象                   | 妥当性確認方法   |            |           |            |                                  |              |                      |              |       |       |
|--------------------------------|------------------------|-----------|------------|-----------|------------|----------------------------------|--------------|----------------------|--------------|-------|-------|
|                                |                        | TMI<br>事故 | CORA<br>実験 | HDR<br>実験 | CSTF<br>実験 | ACE<br>実験                        | SURC-4<br>実験 | PHEBUS<br>-FP 実験     | ABCOVE<br>実験 | 感度解析  | その他*  |
| 原子炉<br>圧力<br>容器<br>(炉心<br>損傷後) | リロケーション                | ☒ 4.2-2   | —          | —         | —          | —                                | —            | —                    | —            | 4.3.3 | —     |
|                                | 構造材との熱伝達               | ☒ 4.2-4   | —          | —         | —          | —                                | —            | —                    | —            |       | —     |
|                                | 原子炉圧力容器内 FCI(溶融炉心細粒化)  | —         | —          | —         | —          | —                                | —            | —                    | —            | 4.3.4 | —     |
|                                | 原子炉圧力容器内 FCI(デブリ粒子熱伝達) | —         | —          | —         | —          | —                                | —            | —                    | —            |       | —     |
|                                | 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達       | ☒ 4.2-3   | —          | —         | —          | —                                | —            | —                    | —            | 4.3.5 | —     |
|                                | 原子炉圧力容器破損              | —         | —          | —         | —          | —                                | —            | —                    | —            | 4.3.6 | —     |
|                                | 放射線水分解等による水素・酸素発生      | ☒ 4.2-1   | —          | —         | —          | —                                | —            | —                    | —            | —     | 4.1.6 |
| 原子炉圧力容器内 FP 挙動                 | —                      | —         | —          | —         | —          | —                                | —            | ☒ 4.2-53<br>☒ 4.2-54 | —            | —     | —     |
| 原子炉<br>格納<br>容器<br>(炉心<br>損傷後) | 原子炉格納容器内 FP 挙動         | —         | —          | —         | —          | —                                | —            | —                    | ☒ 4.2-58     | —     | —     |
|                                | 原子炉圧力容器外 FCI(溶融炉心細粒化)  | —         | —          | —         | —          | —                                | —            | —                    | —            | 4.3.7 | —     |
|                                | 原子炉圧力容器外 FCI(デブリ粒子熱伝達) | —         | —          | —         | —          | —                                | —            | —                    | —            |       | —     |
|                                | 格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり     | —         | —          | —         | —          | —                                | —            | —                    | —            | 4.3.8 | —     |
|                                | 溶融炉心と格納容器下部プール水との伝熱    | —         | —          | —         | —          | —                                | —            | —                    | —            |       | —     |
|                                | 溶融炉心とコンクリートの伝熱         | —         | —          | —         | —          | ☒ 4.2-36<br>☒ 4.2-37<br>☒ 4.2-38 | ☒ 4.2-40     | —                    | —            |       | —     |
| コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生             | —                      | —         | —          | —         | —          | —                                |              | —                    | —            |       | —     |

\* 4.1 で示した理由により妥当性確認が不要と考えられる現象

## 4.2 妥当性確認（事故解析及び実験解析）

### 4.2.1 TMI 事故解析

#### (1) 事故の概要

TMI 事故は、大きく 4 つのフェーズに分けることができる<sup>[10]</sup>。フェーズ 1 は、事故発生から全ての 1 次冷却材ポンプが停止するまでの過程であり、事故発生 0～100 分後に相当する。フェーズ 2 は、全ての 1 次冷却材ポンプが停止し、その後最初の 1 次冷却材ポンプ 2B が起動するまでの過程であり、事故発生 100～174 分後に相当する。このフェーズでは、1 次冷却材のボイルオフによって、炉心露出、ヒートアップ、さらには炉心損傷が生じた。フェーズ 3 は、1 次冷却材ポンプ 2B の起動から、高圧注入系が作動するまでの過程であり、事故発生 174～200 分後に相当する。1 次冷却材ポンプ 2B の起動によって炉心は一時的に冷却されるが、その後ヒートアップ及び炉心損傷は継続したと考えられる。フェーズ 4 は、高圧注入系が作動した事故発生 200 分後以降であり、炉心が再冠水するとともに熔融炉心が下部プレナムに落下することで冷却可能形状に至ったと考えられる。

#### (2) 解析条件

解析では、TMI-2 のプラント形状、システム挙動及び初期状態を入力として与える。ノード分割については、炉心を R-Z 系の 2 次元でモデル化し、径方向には 4 分割、軸方向には 16 分割する。1 次系及び蒸気発生器は、貫流型蒸気発生器の冷却ループを模擬したコード内蔵のノード分割が採用されている。

境界条件としては、2 次系のデータとして蒸気発生器水位、高圧注入系からの注入流量に加え、運転員の操作に関する入力として加圧器逃がし弁及び主蒸気隔離弁の開閉操作並びに 1 次冷却材ポンプの運転の時刻を与える。

#### (3) 解析結果

水素発生量の解析結果を図 4.2-1 に示す。MAAP による解析では、水素発生が事故発生約 145 分後に開始し、事故発生約 185 分後まで急激に増加する。その後、水素発生は事故発生約 230 分後まで継続し、この間に発生する水素量は合計で約 510kg（約 1,125lb）である。

事故発生約 220 分後における炉心状態の解析結果を図 4.2-2 に示す。炉心の外周部は下から 8 番目のノードにおいて固体クラストが形成され、この 6 分後（事故初期から 226 分後）に固体クラストが破損し、熔融炉心が下部プレナムへ流出する。解析では下部プレナムに流出した熔融炉心は約 25,000kg である。

原子炉容器壁温の解析結果を図 4.2-3 に示す。熔融炉心が下部プレナムに流入すると、最初は堆積した熔融炉心により原子炉容器壁が加熱される。一時的に約 1,200°C（約 2,200° F）まで急上昇し、その熱により原子炉容器壁がクリープ変形すること

で溶融炉心と原子炉容器壁との間にギャップが生じ成長する。その結果、ギャップに水が浸入し壁面が冷却される。

(4) 重要現象に関する不確かさの評価

有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいてMAAPの不確かさを評価する。

a) 燃料被覆管酸化，放射線水分解等による水素・酸素発生

TMI事故の分析では、約139分で水素の発生が開始し、ジルコニウム-水反応による水素発生率が約175分の時点で最大となった。約203分で炉心が冠水した以降は再露出することは無いが、クラスト内部の溶融炉心領域の温度は上昇しており、約224分で溶融炉心が下部プレナムに移行するまで水素が発生したと分析されている。全水素発生量は499～544kg (1,100～1,200lb)であったと分析されている。TMI事故の分析とMAAPコード解析の水素挙動の比較を表4.2-1に示す。

このように、MAAPによる解析で得られた水素発生期間及び水素発生量は、ともにTMI事故の分析結果と良く一致している。したがって、MAAPは放射線水分解等による水素・酸素発生及び燃料被覆管酸化に関して適切なモデルを有していると判断できる。なお、酸素生成については、MAAPによる解析において直接的に考慮されないが、格納容器の水素・酸素濃度を評価するにあたっては、MAAPによる事象進展解析に加えて、格納容器の初期酸素濃度、水の放射線分解によって発生する酸素を適切に考慮している。

b) 燃料棒内温度変化，燃料棒表面熱伝達，燃料被覆管変形，リロケーション，構造材との熱伝達及び下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達

TMI事故の分析より得られた事故発生約220分後の炉心状態を図4.2-4に示す。図4.2-2に示したMAAPによる解析結果と比較すると、軸方向位置に若干の相違はあるものの、炉心上部の空隙、デブリベッド、クラスト、溶融プール及び非破損領域の状態は良く一致している。

TMI事故で観察された下部プレナムへ流出した溶融炉心は、約19,000kgであり、MAAPによる解析結果と比較すると、MAAPの解析結果（約25,000kg）はやや多めの評価となっているが同等である。

また、原子炉容器壁温について考察すると、TMI-2 vessel inspection project<sup>[11]</sup>の分析では、炉心出口温度の急上昇による警報発信及び中性子源領域中性子検出器の指示値の急上昇から、事故発生約224分後に溶融炉心の下部プレナムへの流入が開始し、ECCSによる注入水等で約20分以内に冷却されたとされている。図4.2-3に示したMAAPによる原子炉容器壁温の解析結果は、事故発生約224分後で急上昇



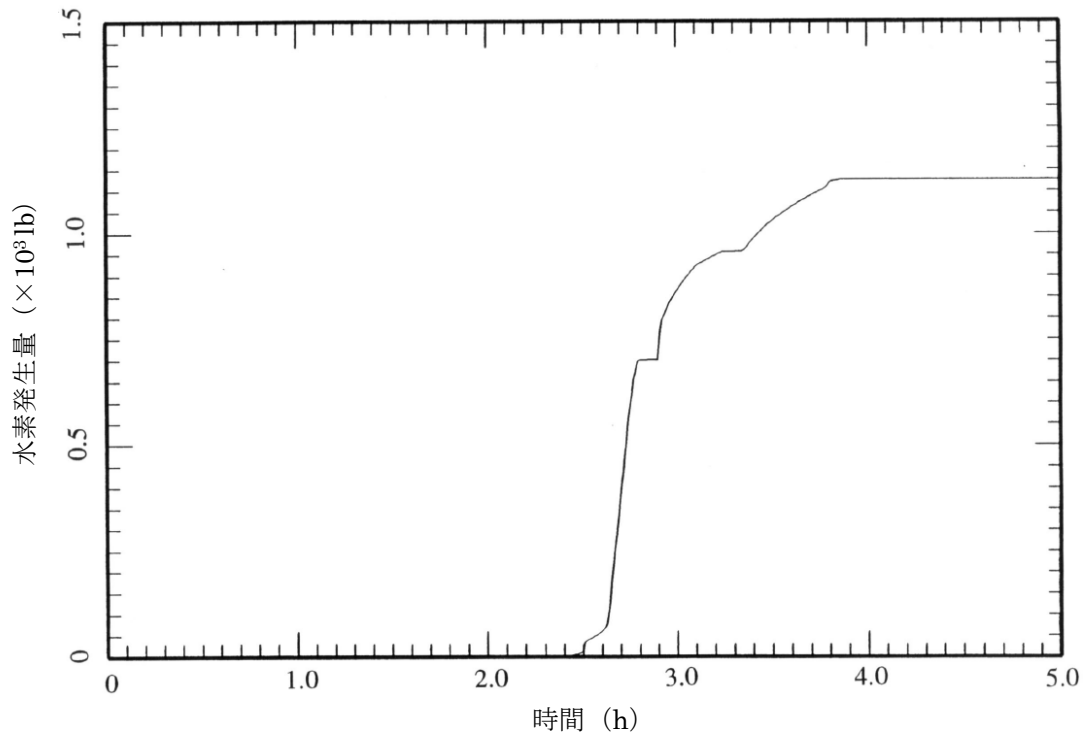
し、事故発生約240分後に低下することから、TMI事故の分析結果と一致している。また、原子炉容器壁温の最大値は、ステンレス鋼の融点（約1,350℃）より低い約1,200℃であり、原子炉容器に損傷がなかったという事実と整合している。

このように、MAAPによる解析で得られた炉心状態及び原子炉容器壁温は、TMI事故の分析結果との比較から、妥当であると考えられる。したがって、MAAPは炉心ヒートアップに関連する燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管変形、リロケーション、構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達に関して、適切なモデルを有していると判断できる。

表 4.2-1 水素挙動の比較

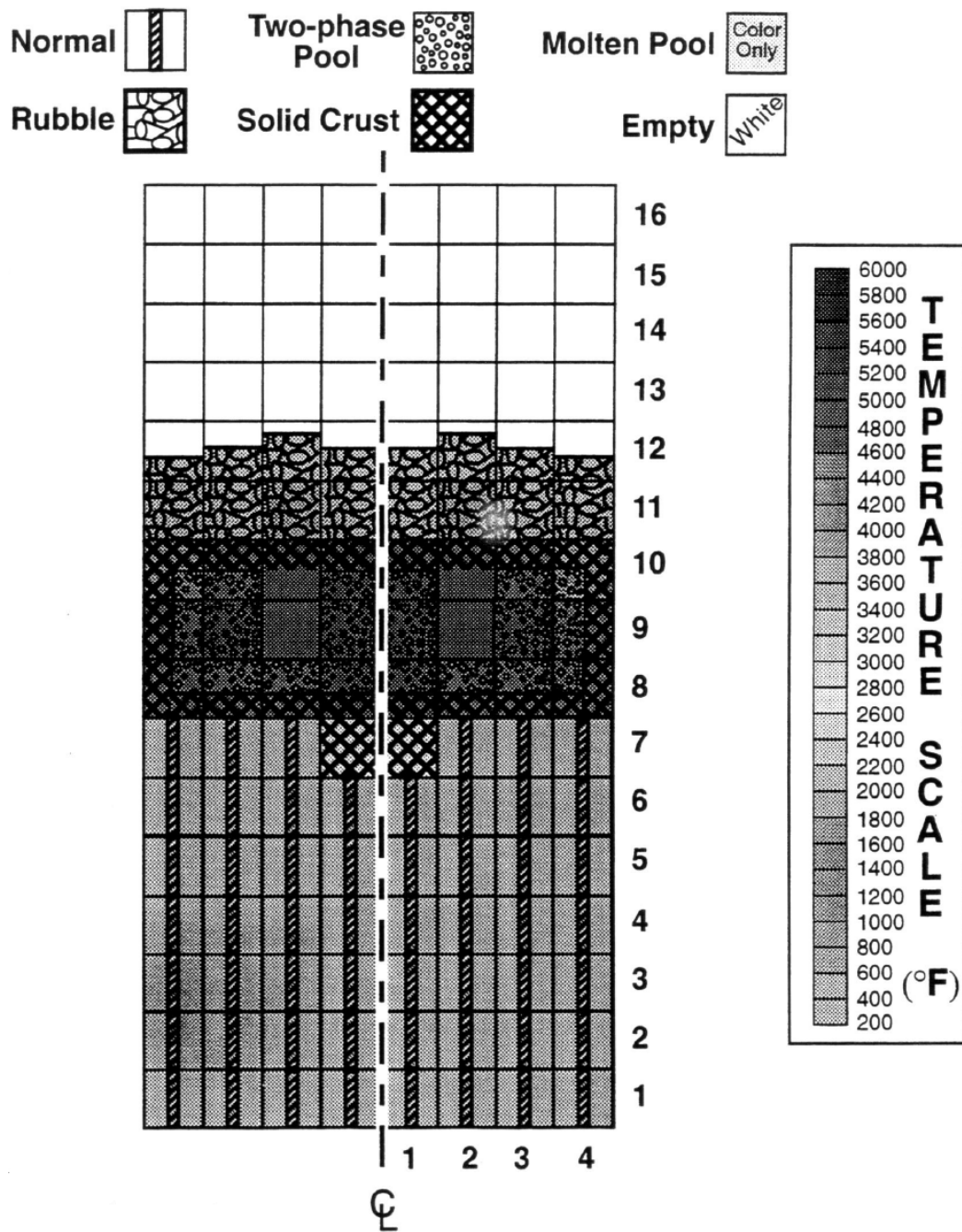
| 水素挙動の比較項目 | TMI 事故の分析                   | MAAP コード解析        |
|-----------|-----------------------------|-------------------|
| 水素発生開始時刻  | 139 分                       | 145 分             |
| 水素発生期間    | 139～224*分                   | 145～230 分         |
| 全水素発生量    | 1,100～1,200lb.<br>499～544kg | 1,125lb.<br>510kg |

※ 推定時間。224 分まで溶融固化領域は温度上昇しているため。



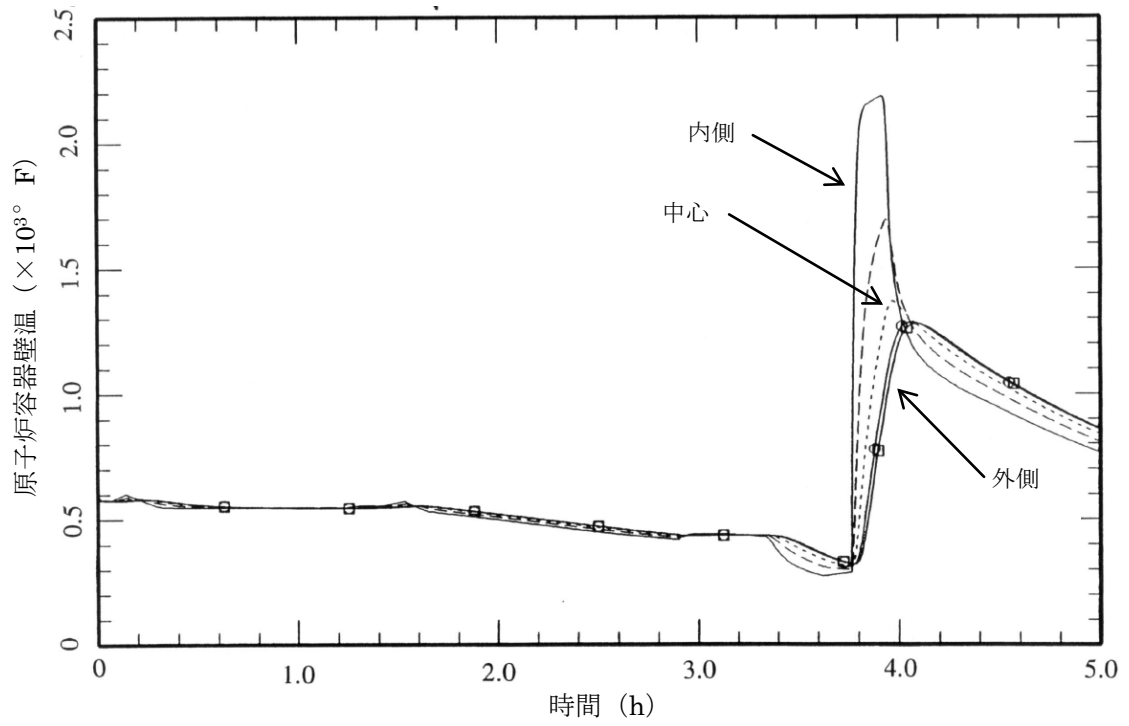
出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-1 TMI 事故の解析結果 (水素発生量)



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-2 TMI 事故の解析結果（事故発生約 220 分後の炉心状態）



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-3 TMI 事故の解析結果 (原子炉容器壁温)

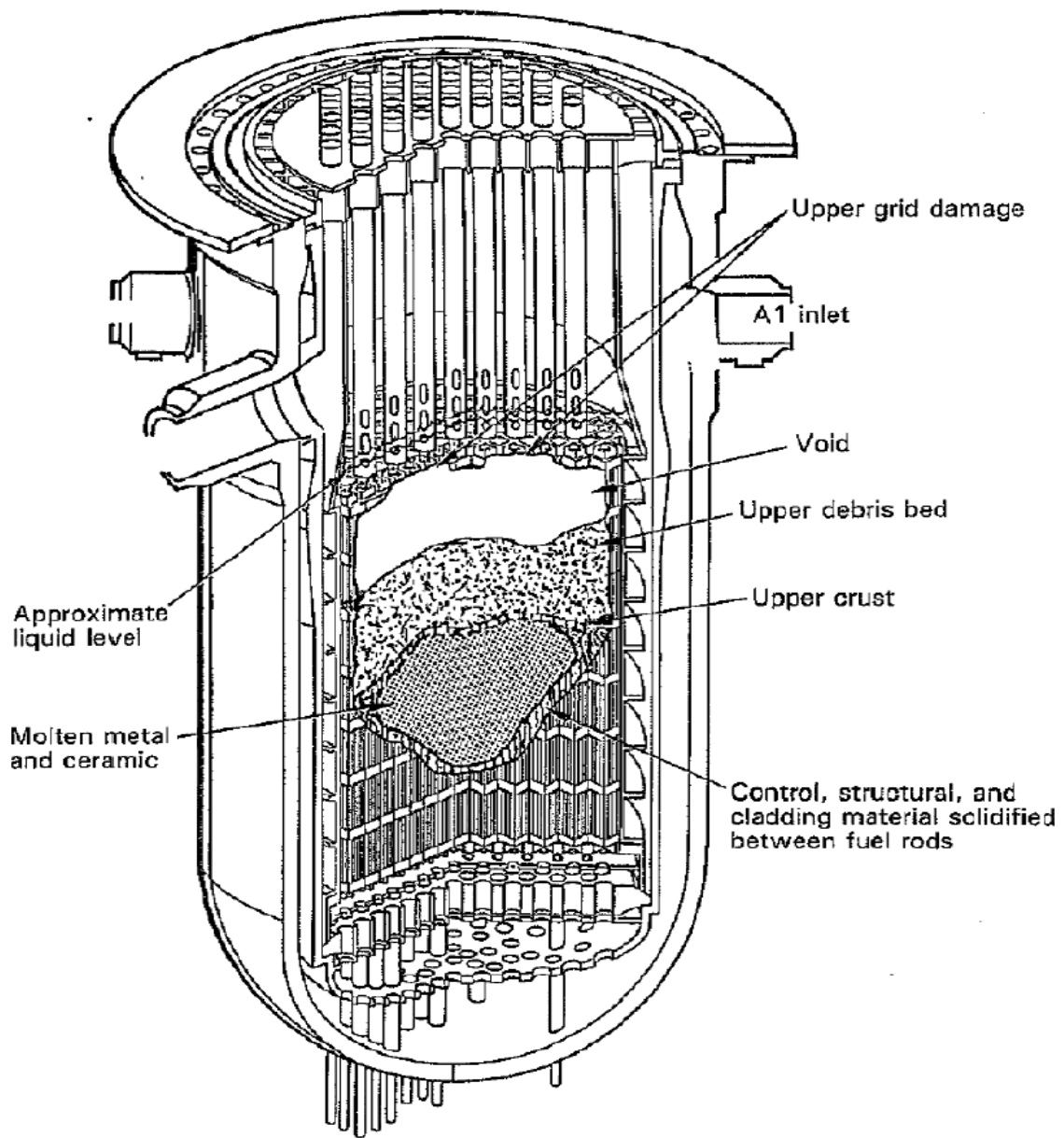


図 4.2-4 TMI 事故の炉心溶融状況の分析結果（事故発生約 220 分後）<sup>[12]</sup>

## 4.2.2 CORA 実験解析

### (1) 実験の概要

CORA 実験<sup>[13]</sup>は、シビアアクシデント条件下での燃料集合体の損傷・溶融進展を把握するために、国際的な協力の枠組みの中で、独カールスルーエ研究センター(KIT, 旧 FZK)にて実施された。

図 4.2-5 に CORA 実験装置の概要を示す。CORA 実験では、軽水炉の燃料バンドルを模擬し、燃料をヒーターによって電気加熱し、水蒸気とアルゴンガスの混合物を注入することによって、燃料の溶融進展挙動を模擬することができる。CORA-16, CORA-17 及び CORA-18 では、BWR の燃料集合体を模擬した試験が行われており、バンドルの材質と主要な形状を表 4.2-2 に示す。CORA-16 実験は、燃料、燃料被覆管、制御棒(B<sub>4</sub>C)及びチャンネルボックスを配置し、BWR の炉心を模擬している。CORA-17 実験は、CORA-16 実験をベースケースとしてクエンチさせたケース、CORA-18 実験は、バンドルサイズを大きくしたケースである。

### (2) 解析条件

CORA 実験装置に対応するベンチマーク解析のノード分割を図 4.2-6 に示す。炉心は、燃料、燃料被覆管、チャンネルボックス、制御棒及び流体(アルゴン、水蒸気及び水素)によって構成される。炉心は 2 つの径方向リングに分割され、各々のリングは軸方向に分割され、下から下部非燃料域、10 ノードの燃料有効部及び 2 ノードの上部非燃料域となっている。ノード間においては、軸方向の熱伝導、対流、リロケーション及び輻射が考慮され、最外周のリングでは、シュラウドへの輻射が考慮される。燃料バンドルの底部からアルゴンと水蒸気の混合ガスを注入し、燃料バンドルがヒートアップによって、燃料棒が急速に酸化し 2,100K から 2,300K になるまで、燃料棒ヒーターへの出力を直線的に増加させる。

### (3) 解析結果

CORA 実験のケース CORA-16, CORA-17 及び CORA-18 に対するベンチマーク解析の結果を以下に述べる。

#### CORA-16 実験

CORA-16 実験のバンドルの配置を図 4.2-7 に示す。この実験は制御棒中の B<sub>4</sub>C とステンレス及び制御棒のステンレスとチャンネルボックスの Zr の反応を確認する目的で実施された。バンドル中には 12 本の加熱燃料棒及び 6 本の非加熱燃料棒、ステンレス中の B<sub>4</sub>C 及び燃料棒を取り囲むチャンネルボックスで構成される。

図 4.2-9 から図 4.2-12 に燃料被覆管の温度変化、チャンネルボックスの温度変化及び制御棒の温度変化をそれぞれ示す。

燃料被覆管の温度は、約 1,800K における Zr の酸化によって 1,100 秒付近において急上昇する。加熱が停止されるまでの間、測定値に比べて、800K 程度高い解析結果となっているが、測定温度が低くなっている理由として、短い予熱時間や測定誤差による可能性が考えられる。加熱燃料棒、非加熱燃料棒共に同様の傾向を示している。

近接する制御棒と反応しているチャンネルボックスの温度の比較は、概ね一致している。制御棒の温度は、1,100 秒付近において熔融し、リロケーションするまで、解析結果は高い値を示しているが、これは、比較的低温な上部プレナム構造物への輻射熱伝達と、のぞき窓を介した対流熱伝達が模擬されていないためであると考えられる。

### CORA-17 実験

CORA-17 実験は、CORA-16 の実験条件と同様であるが、損傷炉心のクエンチの効果を確認する目的で実施された。実験開始後、2,000 秒から 2,125 秒まで、燃料棒をクエンチタンク内で水没させている。

図 4.2-13 に燃料被覆管の温度変化を示す。解析結果では、Zr の酸化反応によって温度は急上昇している。解析結果のピークは高温の U-Zr-O 共晶物が上方のノードからリロケーションしてきたことによる。1,500 秒から 1,800 秒において、解析結果は測定結果よりも高い温度を示しているが、この期間においては、上のノードからのリロケーションしてきた熔融物が熱電対に接触し、測定値に影響が出ているものと考えられる。なお、解析結果では、Zr は熔融し、バンドル底部にリロケーションしており、クエンチに付随した酸化による発熱は予測されていない。

### CORA-18 実験

CORA-18 実験のバンドルの配置を図 4.2-8 に示す。バンドル中には 48 本の燃料棒が配置されており、この実験は炉心熔融の進展過程におけるバンドルサイズの影響を確認する目的で実施された。

図 4.2-14 から図 4.2-16 に燃料被覆管の温度変化、チャンネルボックスの温度変化及び制御棒の温度変化をそれぞれ示すが、全体的な温度挙動は、実験期間全体において測定値とよく一致している。なお、実験ではバンドルの加熱割合や冷却材の流量といった境界条件に違いがあったものの、バンドルサイズの影響は直接的には確認できなかった。

#### (4) 重要現象に関する不確かさの評価

有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいて MAAP の不確かさを評価する。

燃料被覆管、制御棒及びチャンネルボックスの温度変化については、図 4.2-9～図 4.2-16 に示すとおり、CORA-16 及び CORA-17 実験において、Zr の急激な酸化の開始



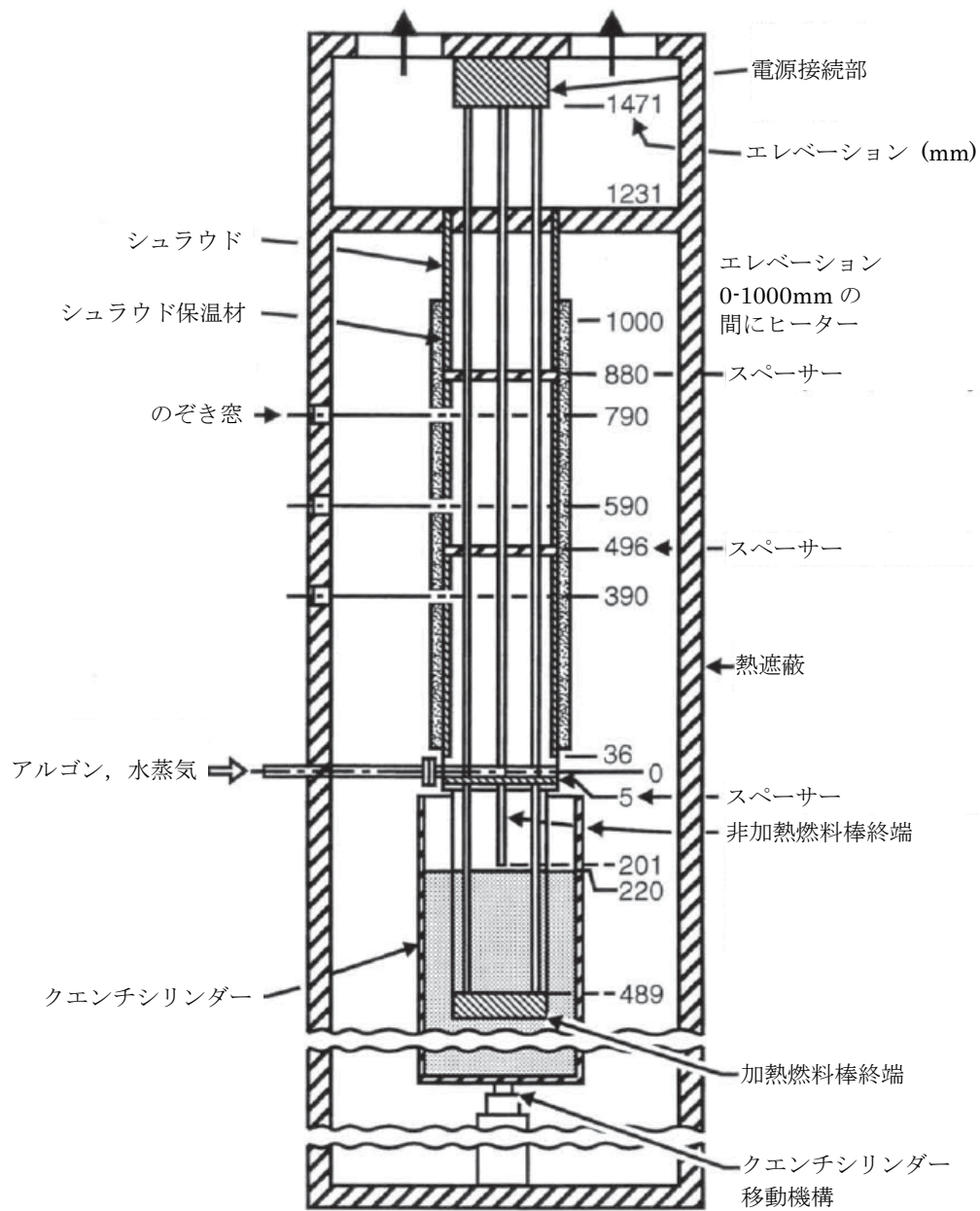
から加熱を停止するまでの間、温度を高く評価しているものの、実機の体系により近い CORA-18 実験においては、測定データと良く一致する解析結果が得られている。

このように、MAAP による解析で得られた燃料被覆管の温度変化、チャンネルボックスの温度変化及び制御棒の温度変化は、CORA 実験における測定データとの比較から妥当であると考えられる。したがって、MAAP は燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化及び燃料被覆管変形に関して、適切なモデルを有していると判断できる。

表 4.2-2 試験バンドルの材質と主要な形状

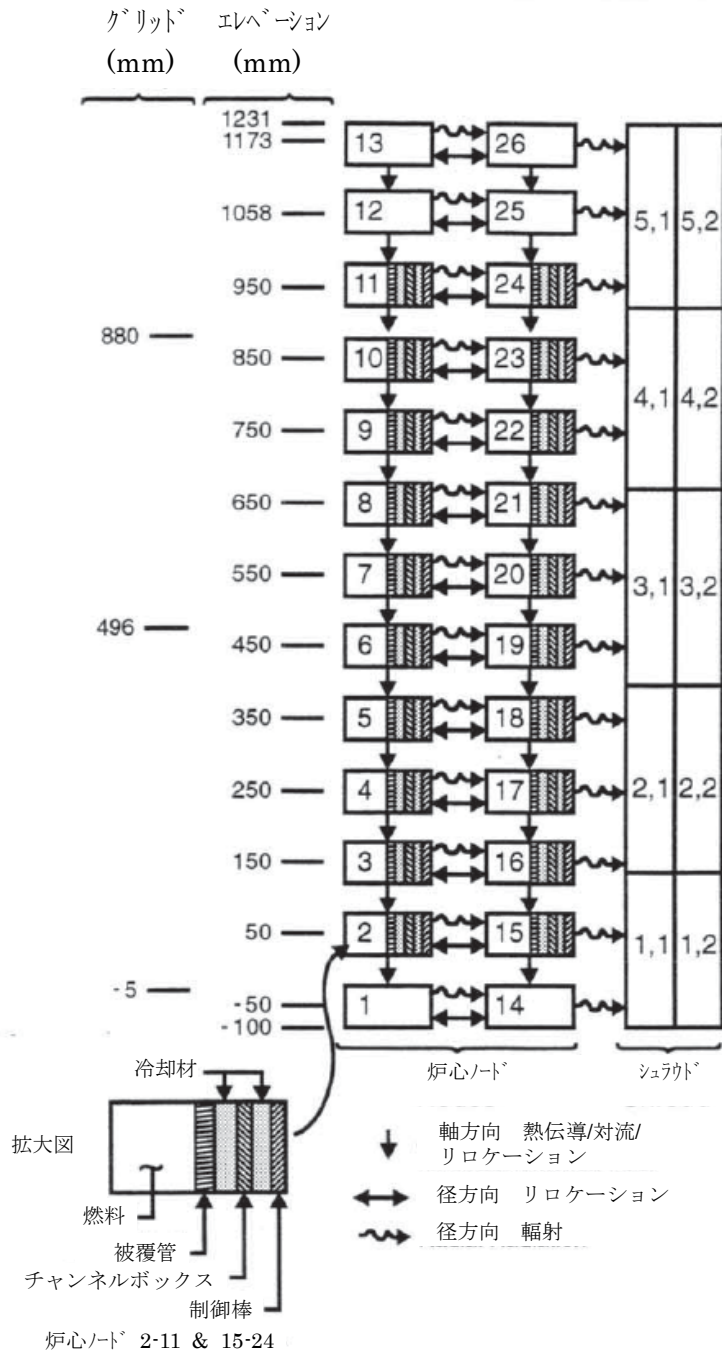
| バンドルデータ                 | 単位             | CORA-16 & 17 | CORA-18  |
|-------------------------|----------------|--------------|----------|
| 燃料 UO <sub>2</sub> 質量   | kg             | 9.14         | 25.63    |
| ヒーター質量                  | kg             | 6.57         | 15.32    |
| 炉心 Zr 質量                | kg             | 8.98         | 17.42    |
| 保温材 ZrO <sub>2</sub> 質量 | kg             | 3.50         | 5.38     |
| 制御棒 B <sub>4</sub> C 質量 | kg             | 0.54         | 0.54     |
| 制御棒ステンレス質量              | kg             | 1.67         | 1.67     |
| 非燃料域 Zr 質量              | kg             | 0.27         | 0.71     |
| 非燃料域ステンレス質量             | kg             | 0.94         | 2.15     |
| シュラウド Zr 質量             | m <sup>2</sup> | 0.423        | 0.599    |
| バンドル流路面積                | m <sup>2</sup> | 4.818E-3     | 9.957E-3 |
| チャンネル 1 燃料棒数            | -              | 8            | 18       |
| チャンネル 2 燃料棒数            | -              | 10           | 30       |

出典：MAAP4 User's Manual, EPRI



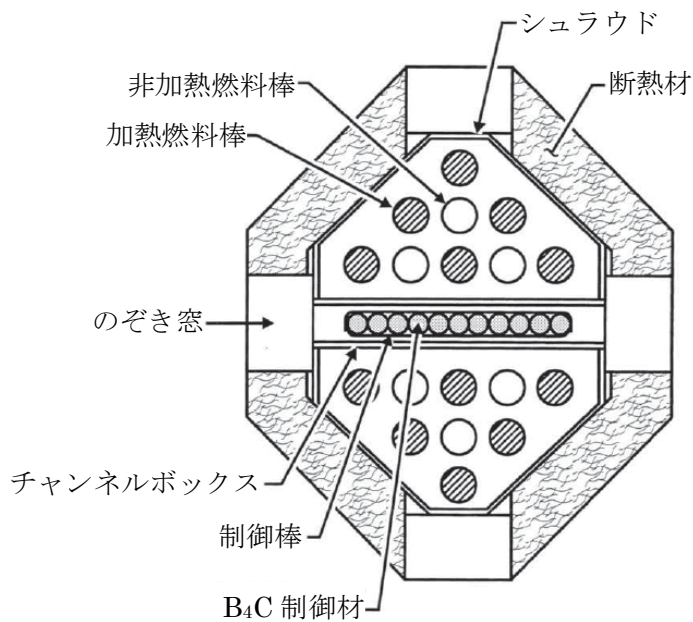
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-5 CORA 実験装置概要



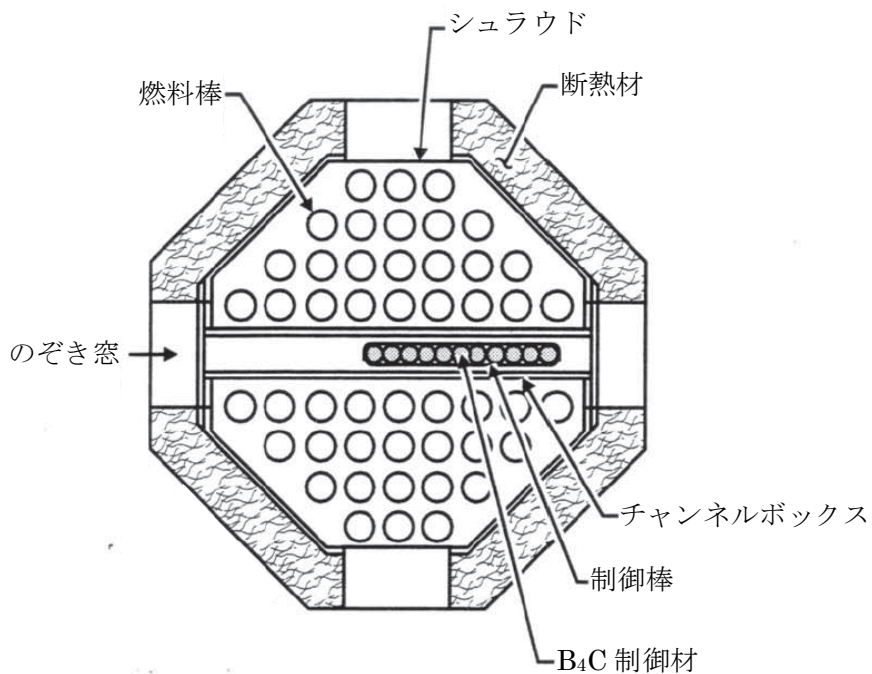
出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-6 CORA 実験ベンチマーク解析 MAAP ノード分割



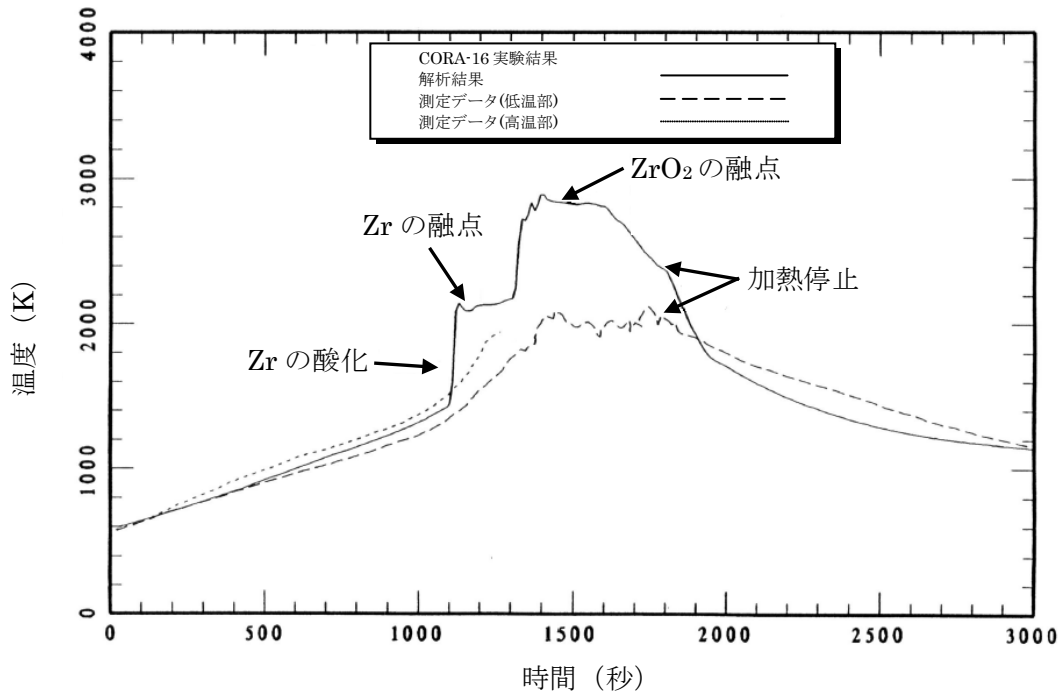
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-7 CORA-16 実験 試験バンドル形状



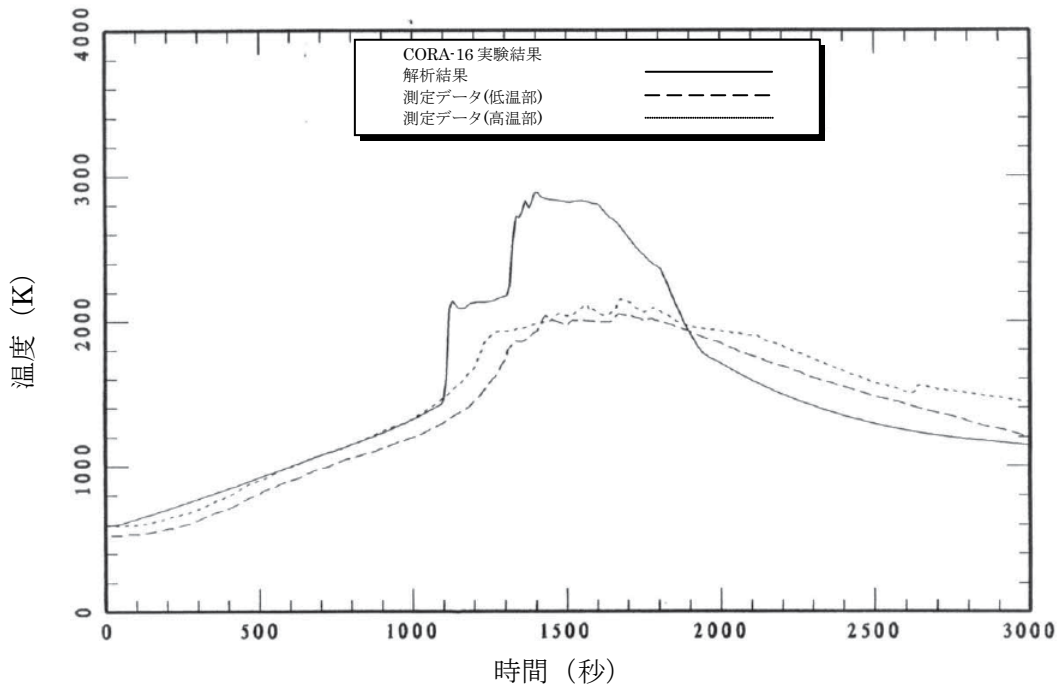
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-8 CORA-18 実験 試験バンドル形状



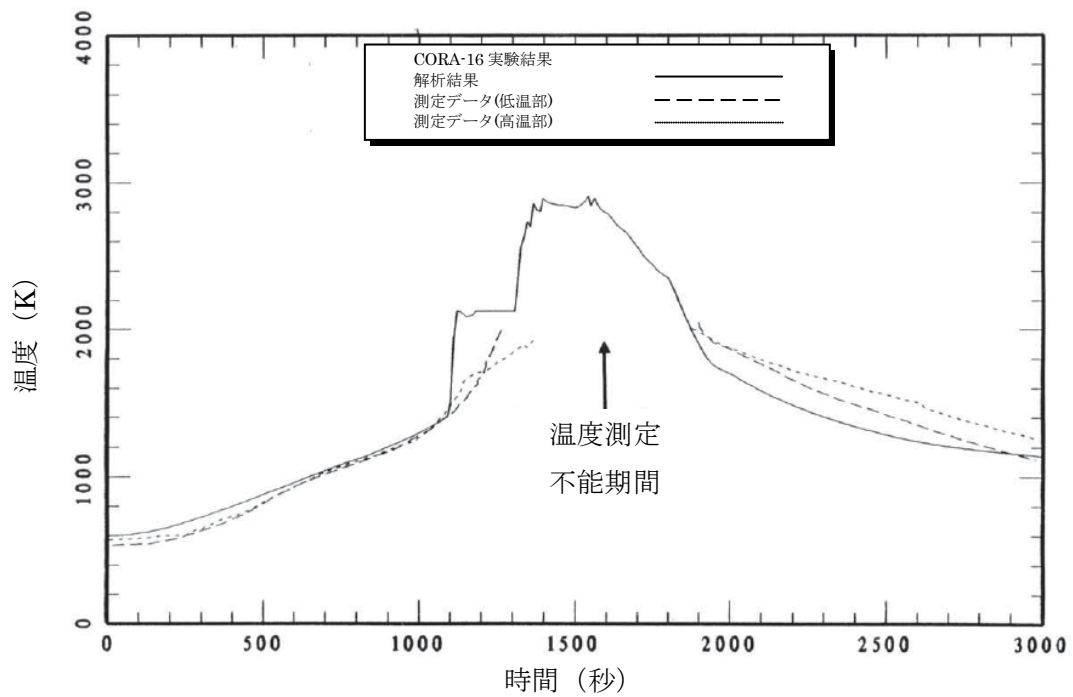
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-9 CORA-16 実験 燃料被覆管温度変化 (加熱燃料棒：エレベーション 550mm)



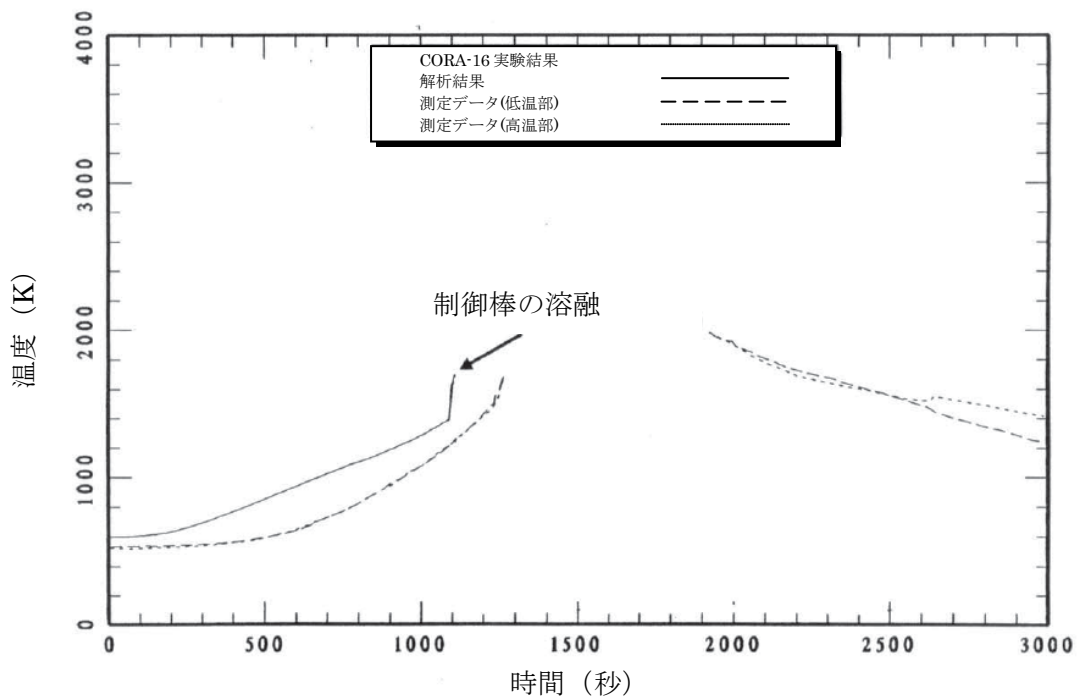
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-10 CORA-16 実験 燃料被覆管温度変化 (非加熱燃料棒：エレベーション 550mm)



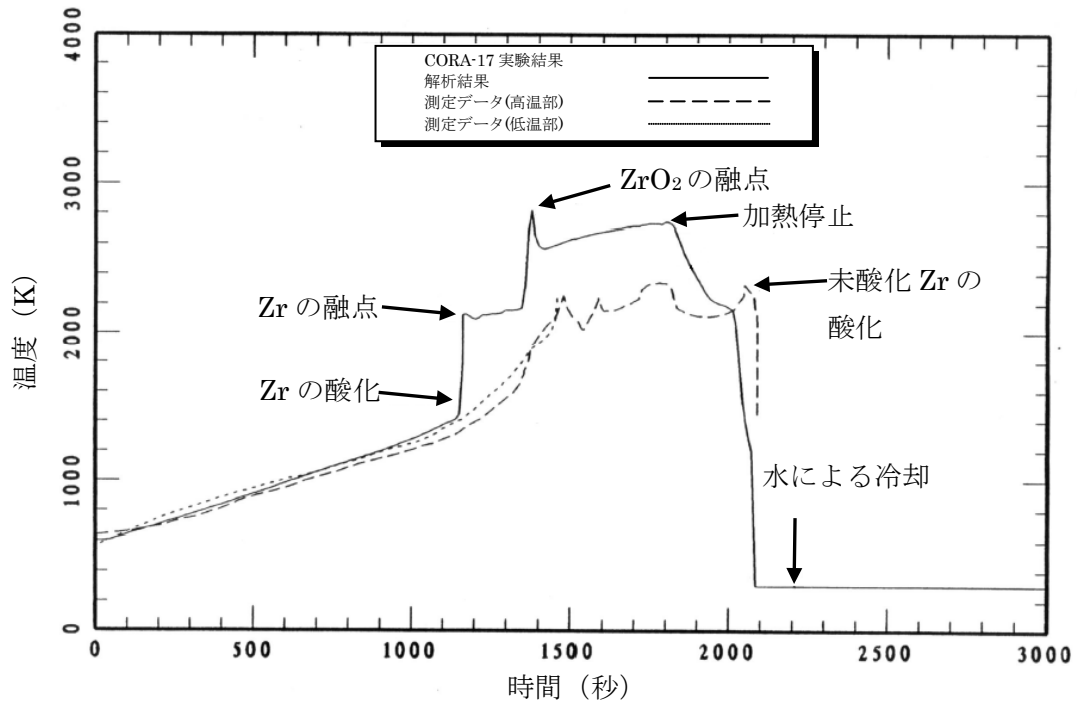
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-11 CORA-16 実験 チャンネルボックス温度変化 (エレベーション 550mm)



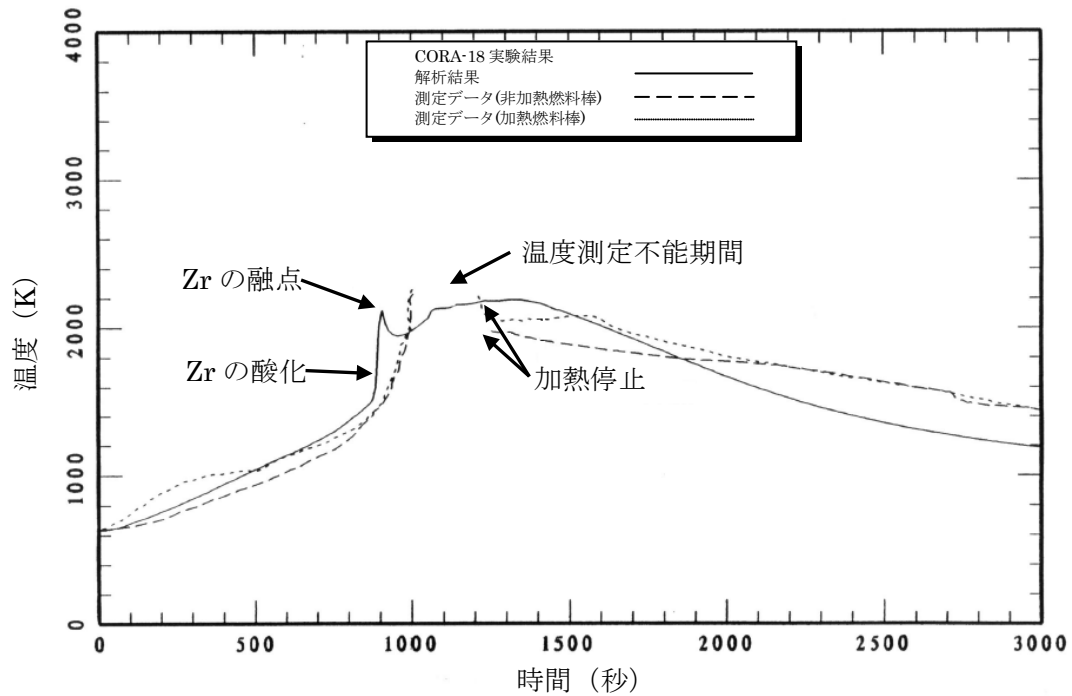
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-12 CORA-16 実験 制御棒温度変化 (エレベーション 550mm)



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

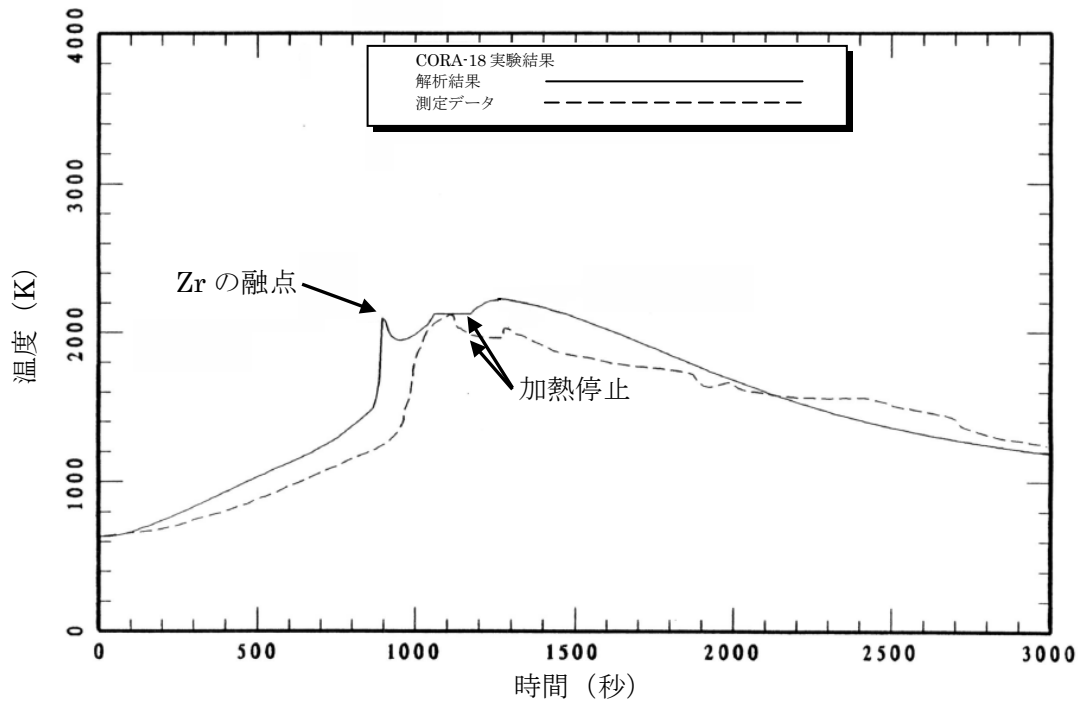
図 4.2-13 CORA-17 実験 燃料被覆管温度変化 (エレベーション 550mm)



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

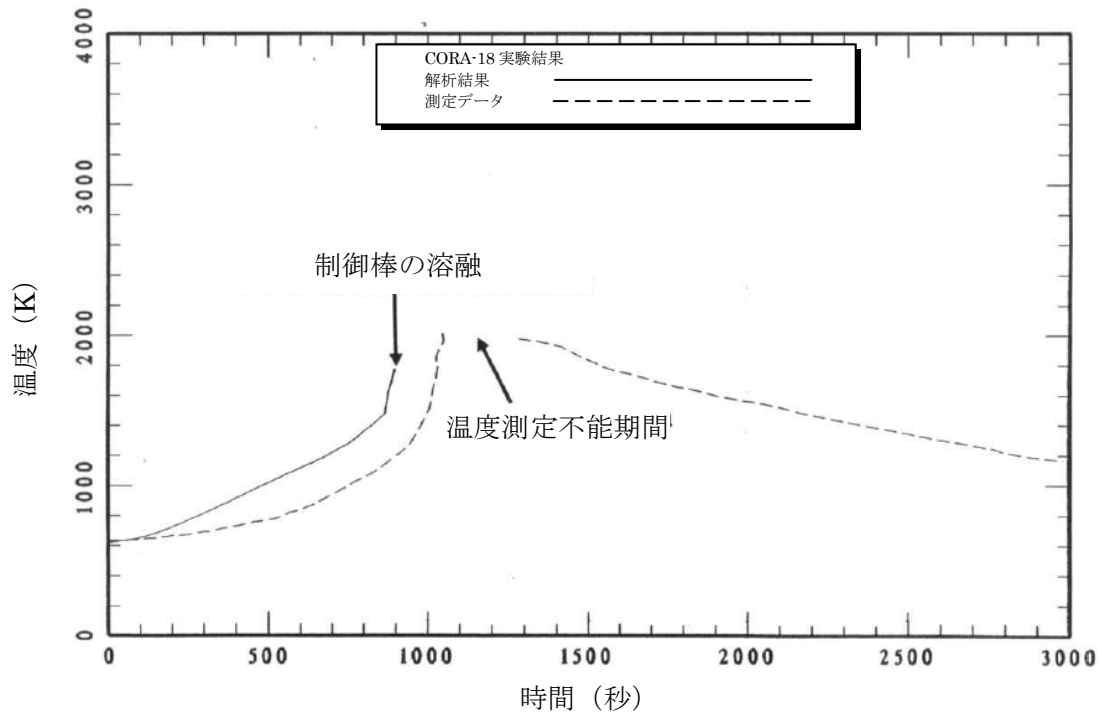
図 4.2-14 CORA-18 実験 燃料被覆管温度変化 (エレベーション 550mm)





出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-15 CORA-18 実験 チャンネルボックス温度変化 (エレベーション 550mm)



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-16 CORA-18 実験 制御棒温度変化 (エレベーション 550mm)

### 4.2.3 HDR 実験解析

#### (1) 実験の概要

HDR 実験<sup>[14][15]</sup>は、廃炉となったドイツの HDR で行われた実験であり、モデルの妥当性確認に利用できる大規模実験データが取得されている。代表的な実験ケースの一つである E11.2 実験では、小破断 LOCA による格納容器中への蒸気放出、それに続く水素及びヘリウムの放出並びに外部スプレイによる格納容器の冷却が模擬されている。

図 4.2-17 には HDR の格納容器の概略を示すが、格納容器は高さ 60m、直径 20m の円筒型である。また、比較的大きい自由空間を有するドーム部と、細かく区画化された空間を特徴としている。ドーム部の自由空間は、全自由体積 11,400 m<sup>3</sup>のうち 5,000 m<sup>3</sup>を占める。また、格納容器内には、多数の流路で繋がった約 70 の区画が存在するが、支配的な流路は格納容器下層からドームへ向かう 1 対の階段と設備シャフトと同定できる。また、格納容器圧力バウンダリは厚さ 17 mm のスチール・シェルであり、シェルとコンクリート外壁には約 0.6 m の間隙がある。

#### (2) 解析条件

解析では、図 4.2-18 に示すとおり、29 ノード及び 44 ジャンクションを設定しており、破断想定位置から近い区画は個別に、離れた区画はまとめてモデル化している。ドーム部は 2 ノードで、またシェルとコンクリート外壁の間隙は 3 ノードに分割している。

実験では、開始から約 750 分の間、23.5m 位置にある 1805 室に約 2.1kg/s（最後の約 1 時間は 1.1kg/s）の流量で水蒸気が注入される。水蒸気の注入終了の約 10 分前から、水素及びヘリウムの混合ガスが同じ位置に約 30 分間注入される。さらに、混合ガス注入後には、下方に位置する 1405 室に水蒸気が約 3 時間注入される。格納容器は約 15 分間自然冷却された後、外部スプレイにより冷却される。解析では、これら一連の操作を境界条件として与える。

#### (3) 解析結果

格納容器圧力の解析結果を測定データと比較して図 4.2-19 に示す。最初の水蒸気注入期間（試験開始 0～41,400 秒後）において、解析結果は測定データよりも速く上昇し、また最大値は 228kPa と測定データの 203kPa に比べて高い。その後、水蒸気流量を減少させガスを注入する期間（試験開始 41,400～46,200 秒後）においては、解析結果は測定データよりも速く減少する。2 度目の水蒸気注入期間（試験開始 46,200～57,600 秒後）では、期間を通じて MAAP は緩やかな圧力低下を正確に予測している。外部スプレイ冷却期間（試験開始 58,500～71,400 秒後）においては、解析結果は測定データよりも速く減少する傾向を示している。

格納容器の圧力上昇速度は、図 4.2-20 に示すようなエネルギー配分に依存する。表 4.2-3 には最初の水蒸気注入が終了した時点（試験開始 41,400 秒後）におけるエネルギー配分の主な内訳を示すが、圧力上昇に寄与する雰囲気への配分は、注入された水蒸気が保有するエネルギーのわずか約 7%であり、残りの大部分はヒートシンクに吸収される。したがって、圧力上昇を計算する上で、ヒートシンクへの熱伝達の観点から温度成層の予測性が重要となる。

図 4.2-21～図 4.2-23 に、それぞれ 10m 位置、階段横及び 0m 位置における雰囲気温度の解析結果を測定データと比較して示す。図 4.2-21 及び図 4.2-22 より、測定データでは、10m より低い位置においては最初の水蒸気注入の影響はほぼ認められないが、MAAP では 10m 位置における水蒸気注入の影響を大きく評価している。図 4.2-23 より、0m 位置においては、二度目の水蒸気注入までは雰囲気温度の上昇は見られない。図 4.2-22 における 16.5m 位置においては、解析結果が測定データを下回っており、測定データに比べて水蒸気注入の影響が及ぶ範囲をやや小さく評価しているものの、全体としては温度成層の様子を良く再現できている。図 4.2-24 及び図 4.2-25 に、それぞれドーム部及び蒸気発生器室の雰囲気温度の解析結果を測定データと比較して示す。ドーム部の雰囲気温度はやや高めに評価されており、測定データは水蒸気の飽和を示唆しているのに対し、解析結果は水蒸気の過熱を予測している。これは、MAAP において雰囲気からヒートシンクへの伝熱が過小に評価されている可能性を示唆している。蒸気発生器室については、解析結果は総じて測定データを良く再現できている。

これらの解析結果より、圧力上昇を大きめに予測する原因として、系内のヒートシンクを正確に模擬できていないことが考えられる。ヒートシンクの不確かさとしてコンクリートの物性が考えられるが、図 4.2-19 に示すとおり、コンクリートの熱伝導率を 2 倍にした解析結果は、測定データと良い一致を示している。

図 4.2-26 及び図 4.2-27 には、それぞれドーム部上部及びドーム部下部の水素・ヘリウム混合ガス濃度の解析結果を示す。二度目の水蒸気注入の期間では、空気を多く含むガスが格納容器下方から上方に向かい流れるが、ドーム部上部の混合ガス濃度は高い状態を維持する。その後、外部スプレーが開始されると、ドーム部上部において水蒸気の凝縮が顕著になり、ドーム部下部から空気を多く含むガスが流入する。同時に、スプレー冷却によってドーム部上部のガス密度が増加し、下方の区画との間で循環が生じる。このため、約 65,000 秒で変化の傾向が反転し、上部ドームの混合ガス濃度は低下を、ドーム部下部の混合ガス濃度は上昇を開始する。MAAP による解析結果は、これら一連の変化挙動を良く再現できている。

#### (4) 重要現象に関する不確かさの評価

有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づい

て MAAP の不確かさを評価する。

HDR実験（E11.2実験）では，格納容器内に水蒸気及び非凝縮ガスを注入し，外部スプレーを実施している。このため格納容器内のガスの移流挙動，外部スプレーによる効果を含めたヒートシンク面の凝縮熱伝達挙動等の効果が現れる実験である。

格納容器圧力及び温度については，図4.2-19及び図4.2-21～図4.2-25に示すとおり，雰囲気からヒートシンクへの伝熱が過小に評価されている可能性が示唆されており，それに起因して格納容器雰囲気温度を十数℃程度高めに，格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向が確認されたが，縦長格納容器形状や水蒸気注入位置といった実験体系に起因するものと考えられ，主要な傾向は再現できている。

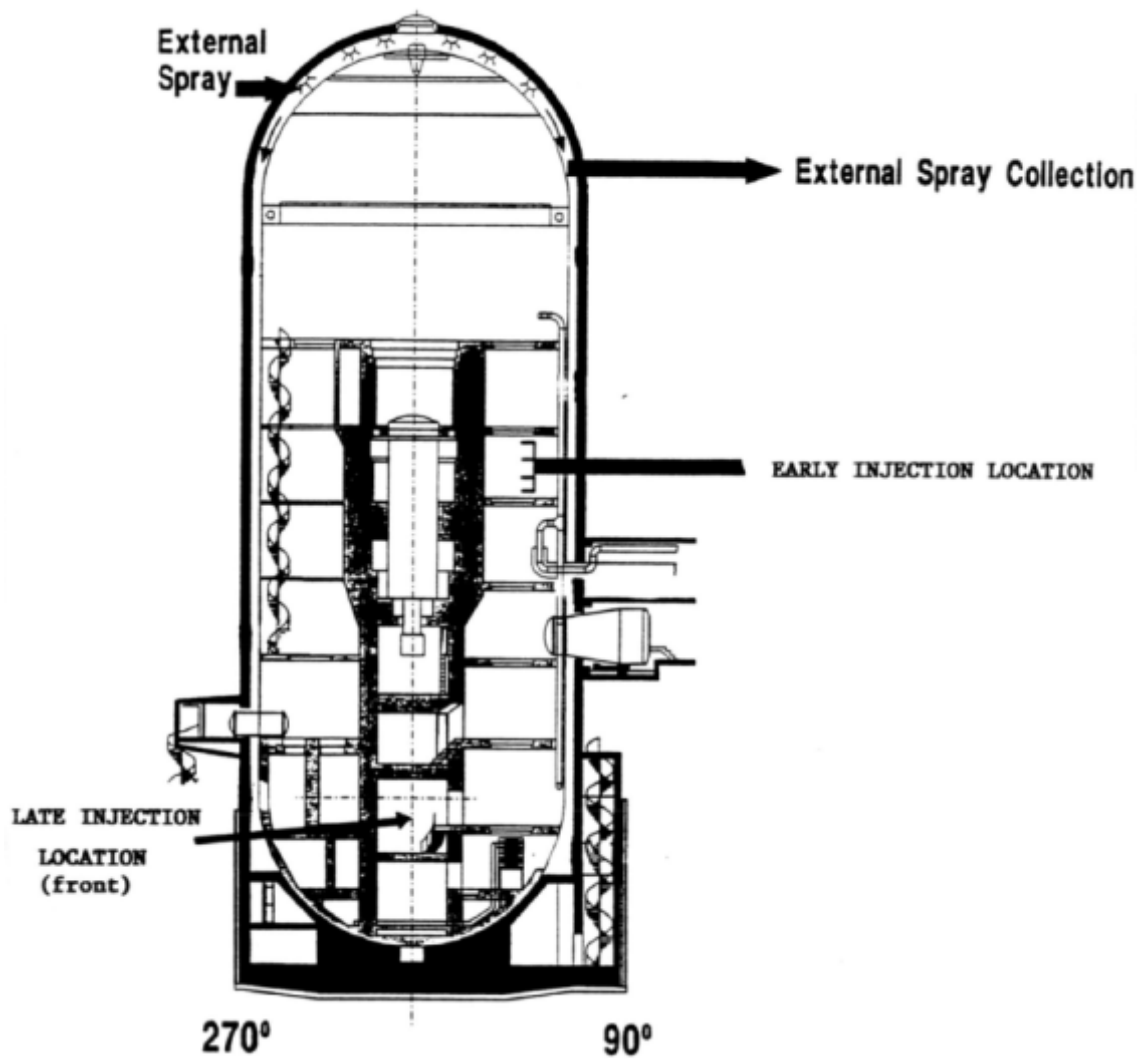
また，図4.2-26及び図4.2-27に示したドーム部上部及びドーム部下部の水素・ヘリウム混合ガス濃度については，水蒸気及び混合ガス注入過程における混合ガス濃度の変化挙動，外部スプレー冷却後における循環流による混合挙動等，測定データと良く一致する解析結果が得られている。

このように，MAAPによる解析で得られた格納容器圧力及び温度並びに格納容器内のガス濃度変化は，HDR実験における測定データとの比較から妥当であると考えられる。したがって，MAAPは格納容器各領域間の流動，構造材との熱伝達及び内部熱伝導及び気液界面の熱伝達に関して，適切なモデルを有していると判断できる。

表 4.2-3 HDR 実験解析における主なエネルギー配分の内訳

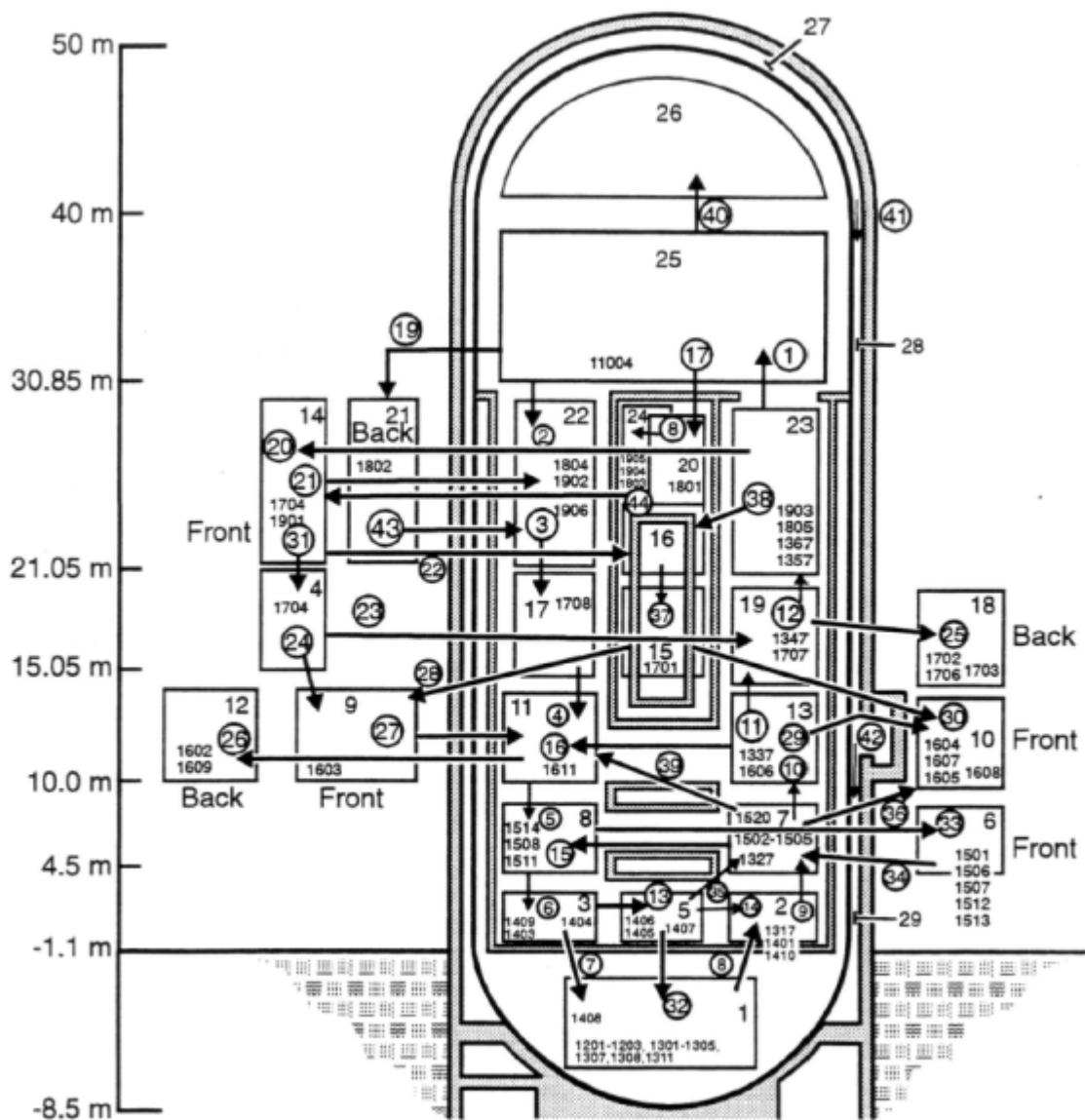
|           |       |
|-----------|-------|
| コンクリート壁   | 50.0% |
| 金属製設備     | 6.0%  |
| 冷却コイル     | 15.0% |
| シェルからの漏えい | 12.9% |
| 凝縮液       | 8.3%  |
| 雰囲気       | 7.3%  |

出典：MAAP4 User's Manual, EPRI



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-17 HDR の概略図



Total Containment Volume 11.400 m<sup>3</sup>

出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-18 HDR 実験解析におけるノード分割

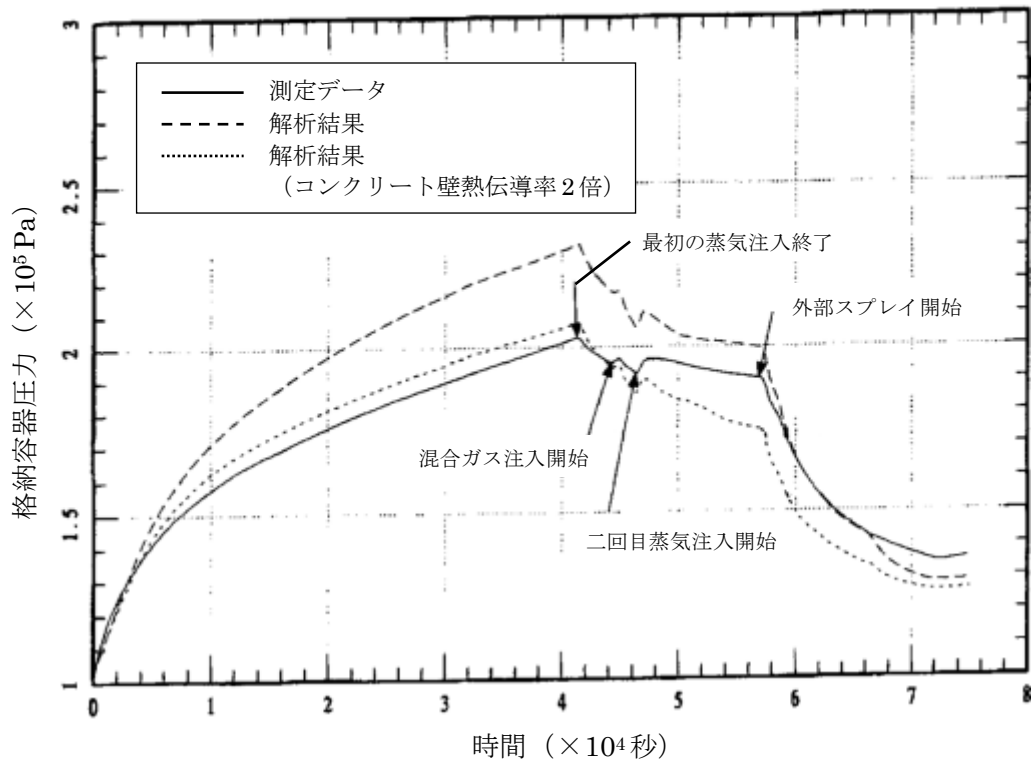
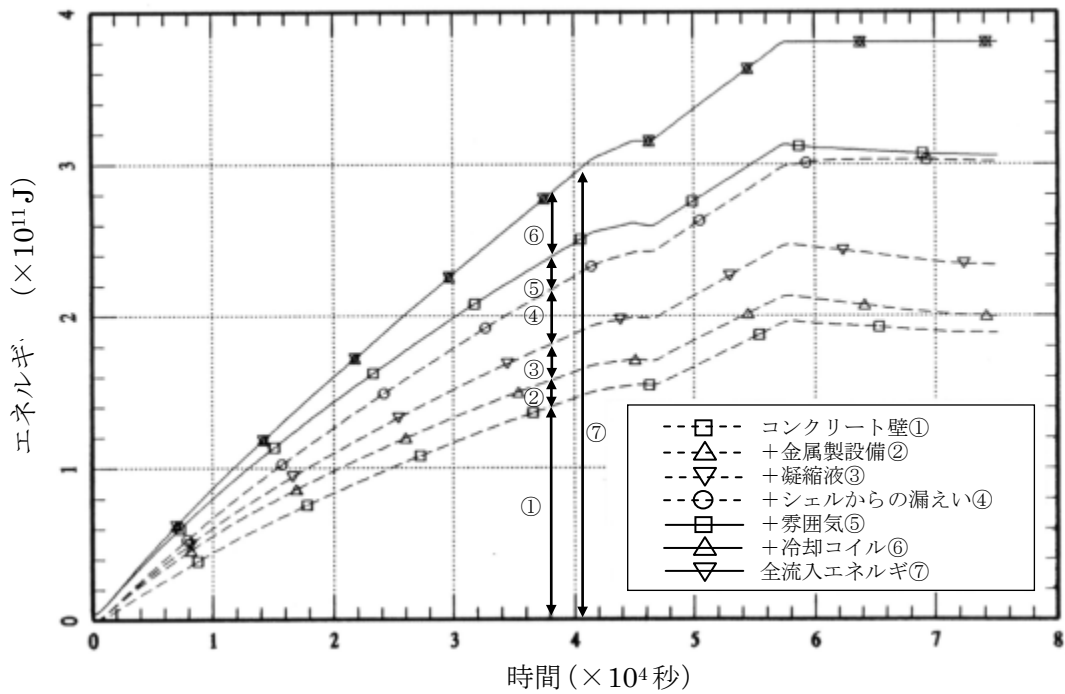


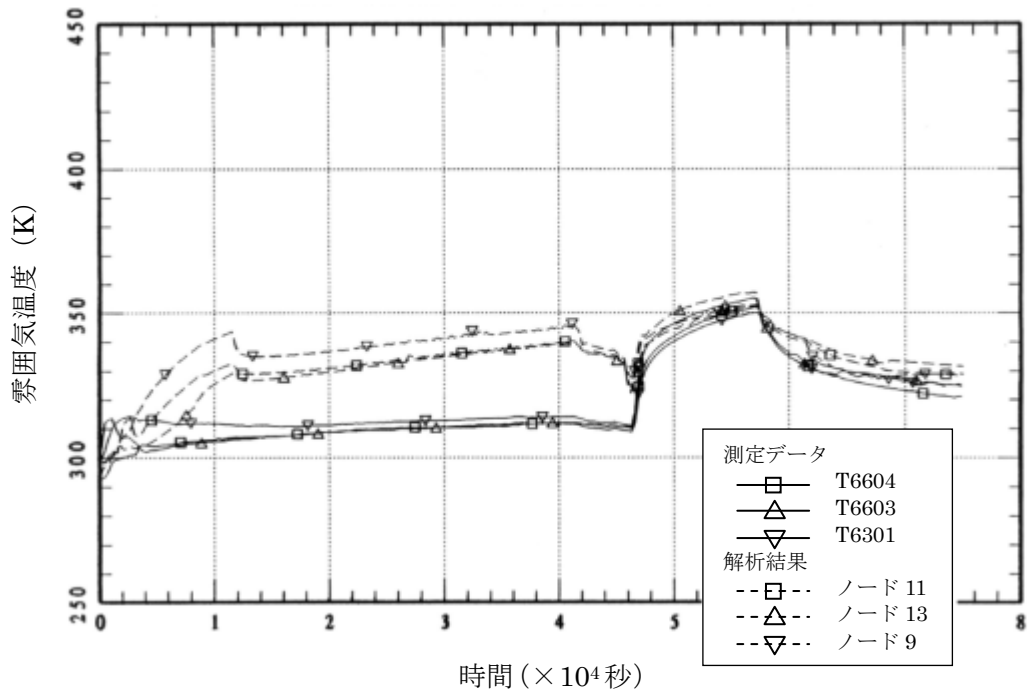
図 4.2-19 HDR 実験の解析結果 (格納容器圧力) [15]



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

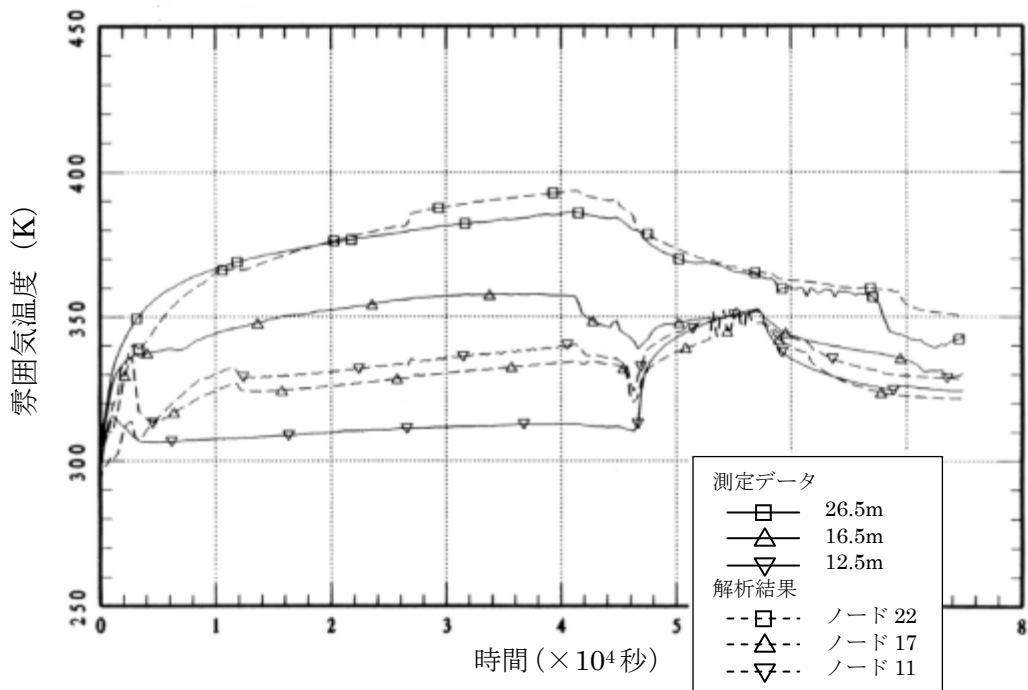
図 4.2-20 HDR 実験の解析結果 (エネルギー配分)





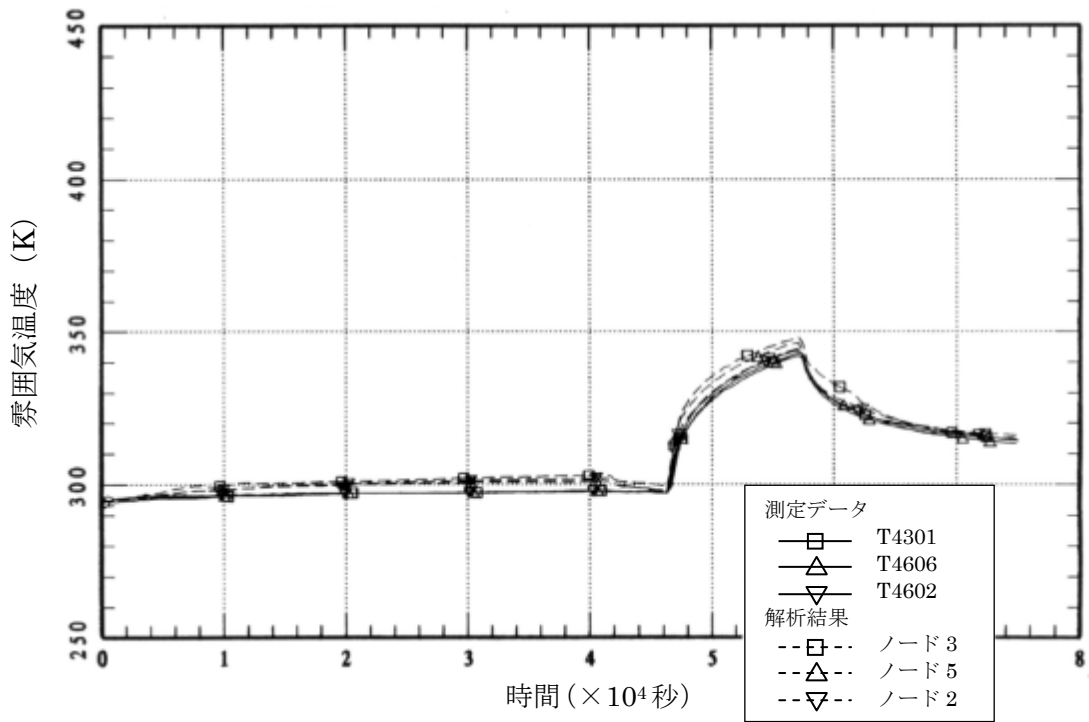
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-21 HDR 実験の解析結果 (10m 位置の雰囲気温度)



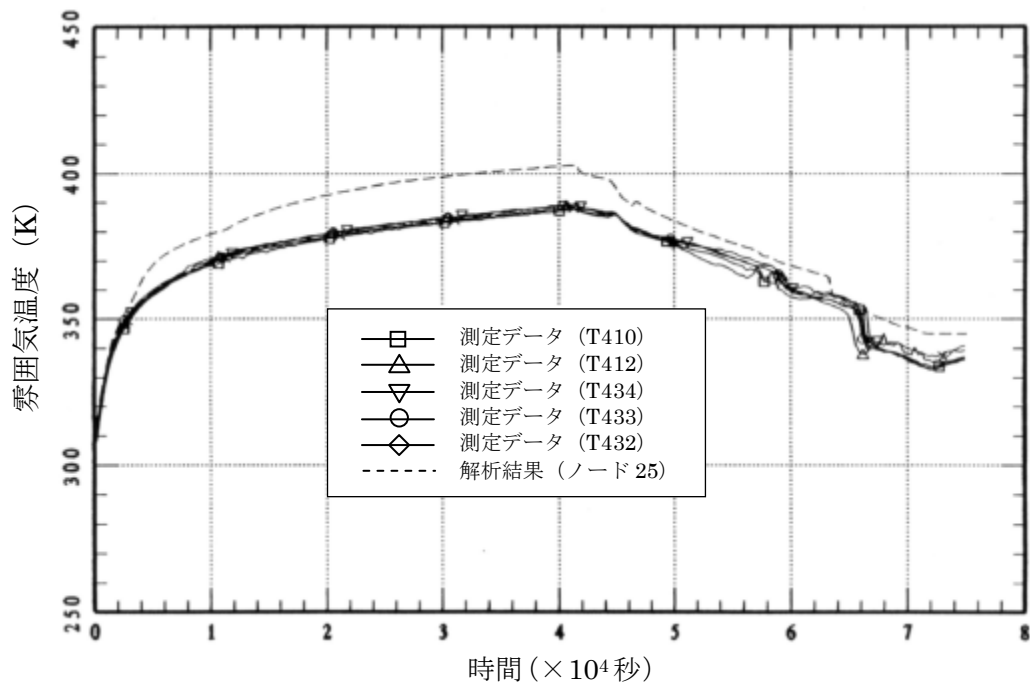
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-22 HDR 実験の解析結果 (階段横の雰囲気温度)



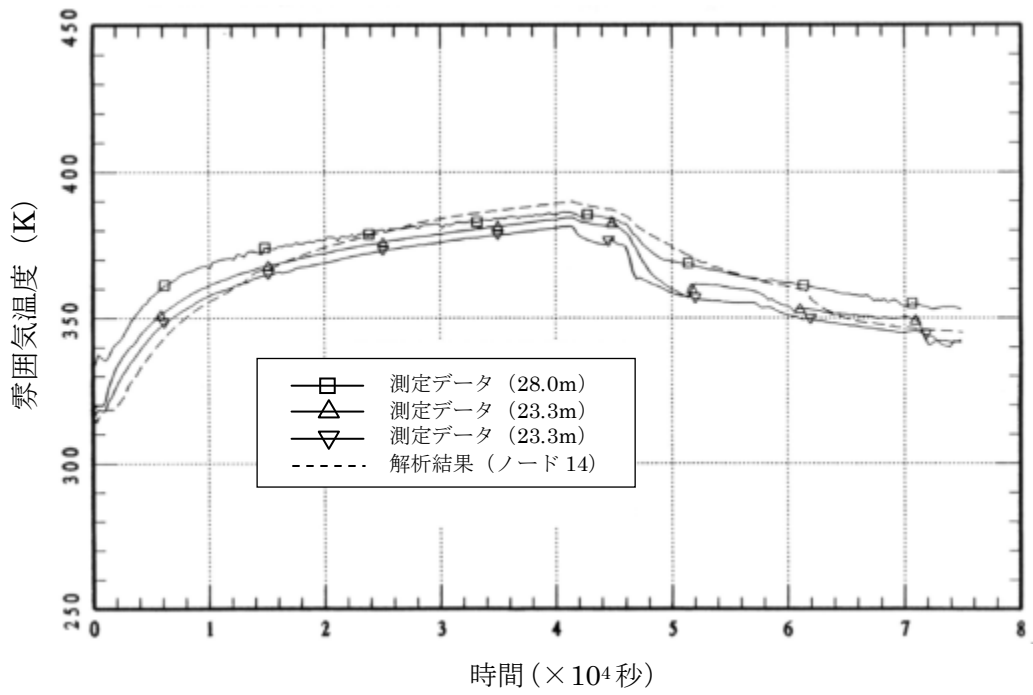
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-23 HDR 実験の解析結果 (0m 位置の雰囲気温度)



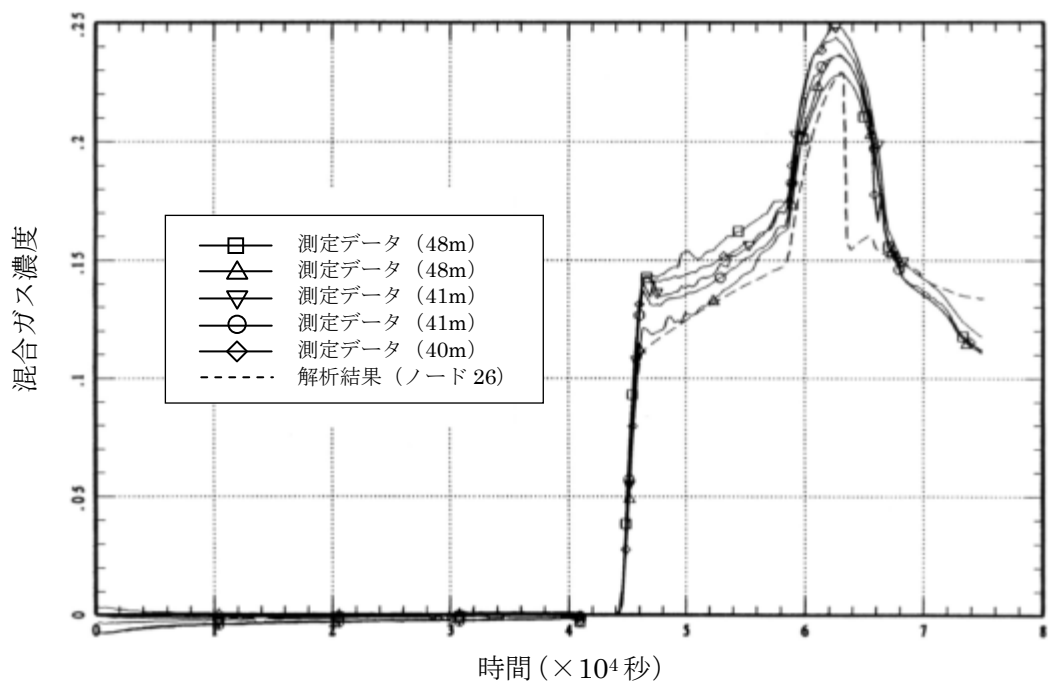
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-24 HDR 実験の解析結果 (ドーム部の雰囲気温度)



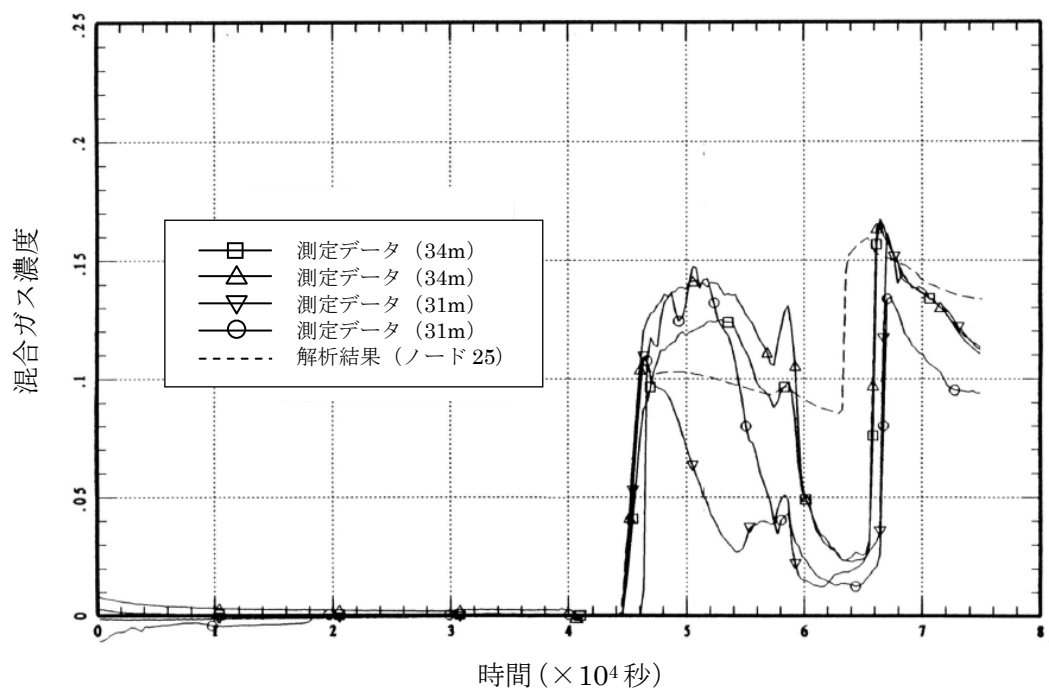
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-25 HDR 実験の解析結果 (蒸気発生器室の雰囲気温度)



出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-26 HDR 実験の解析結果 (ドーム部上部混合ガス濃度)



出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-27 HDR 実験の解析結果 (ドーム部下部混合ガス濃度)

#### 4.2.4 CSTF 実験解析

##### (1) 実験の概要

CSTF 実験<sup>[16]</sup>は、米国 Hanford Engineering Developing Laboratory においてアイスコンデンサ型格納容器を模擬した Containment Systems Test Facility (CSTF) 実験装置を用いて、原子力発電所におけるシビアアクシデント時の水素制御に関する研究を行ったものである。この実験では、水素混合挙動や水素ポケット又は水素リッチな混合ガスの成層化の可能性を調査している。CSTF 実験では、小破断 LOCA 時の破断口及び破損した加圧器逃がしタンクのラプチャ・ディスク経由の冷却材放出を想定して、水素と水蒸気又はヘリウムと水蒸気の混合ガス放出を模擬している。窒素雰囲気において水素が用いられた 1 つの実験を除いて水素の代わりにヘリウムが用いられた。

CSTF 実験装置の概要を図 4.2-28 及び図 4.2-29 に示す。高さ約 20.4m、外径約 7.6m、体積は約 850m<sup>3</sup>、160°Cにおいて 0.52MPa の設計圧力の圧力容器であり、CSTF 容器は下部と上部に分かれ、アイスコンデンサ下部扉と再循環ファンを模擬している。また、異なった事故シナリオにおける水素の蓄積の可能性を調査するために、強制対流が有る場合と無い場合の実験が実施された。

##### (2) 解析条件

ベンチマーク解析に用いた MAAP のノード分割を図 4.2-30 に示す。V3 は上部区画全体を模擬しており、遮へい壁と燃料取替キャビティより外側の下部区画を V1 と V2 に分けている。V4 は燃料交換キャビティである。

ジャンクション J2 は、物理的な壁は無いが、ノード V1 とノード V2 を均等に分割する流路である。ドアを持った 2 つの異なるジャンクション J3 と J1 をノード V1 と V3 の間、ノード V2 と V3 の間にそれぞれ配置することによってアイスコンデンサ下部扉を模擬する。ジャンクション J4 及び J7 は、それぞれノード V4 とノード V2、V1 間の漏えいパスを模擬している。ジャンクション J5 及び J6 は、それぞれノード V3 とノード V1、V2 間の強制対流のための再循環ファンの流路を模擬している。また、各区画におけるヒートシンクは、構造材の厚さ、伝熱面積、構造物ごとの物性値を考慮している。

表 4.2-4 に実験ケースの一覧を示す。HM-P1～P4 は自然対流及び強制対流における混合挙動を確認するための予備実験である。HM-1～5 は小破断 LOCA による水蒸気と水素の放出を模擬し、HM-6～7 は、加圧器逃がしタンクのラプチャ・ディスク破損による水蒸気と水素の放出を模擬している。HM-1～2 は再循環ファンの作動無しを想定しており、HM-3～7 は再循環ファンの作動有りを想定している。ベンチマーク解析として、再循環ファンの作動の無い HM-1、HM-2 及び窒素雰囲気の水素を注入した HM-5 の解析を示す。

### (3) 解析結果

CSTF 実験のケース HM-1, HM-2 及び HM-5 に対するベンチマーク解析の結果を以下に述べる。

#### HM-1 実験

この実験は、水平方向ジェットノズルによって小破断 LOCA を模擬しているが、再循環ファンは考慮していないため、気相の混合に寄与するのは、ジェットノズルからの注入による強制対流と自然対流のみである。下部区画のガス温度及びヘリウム濃度について、解析結果と実験データの比較を図 4.2-31 に示す。

実験開始後の緩やかな温度の低下は、ヒートシンクの影響による。約 14 分後に急激な温度低下があるが、これは、アイスコンデンサ下部扉の開放によって、比較的温度的の高い下部区画と比較的温度的の低い上部区画での自然対流によるものと考えられる。混合ガスの注入の開始から注入完了までの温度上昇傾向はよく一致している。

注入完了からの約 10 分間においては、解析結果のほうが急峻な低下を示しているが、これは解析では下部区画から上部区画への自然循環流量を大きく評価しているためと考えられる。全体としては、実験開始後の温度低下、アイスコンデンサ下部扉の開放による急激な温度低下、注入開始による温度上昇、注入完了時のピーク温度及び完了後の温度低下等、解析結果と実験データにおいて一連の挙動は良く一致している。また、下部区画のヘリウムガス濃度に関しても解析結果は実験データと良い一致を示している。

#### HM-2 実験

この実験は、HM-1 実験と同様に、水平方向ジェットノズルによって小破断 LOCA を模擬し、再循環ファンは考慮しておらず、気相の混合に寄与するのは、ジェットノズルからの注入による強制対流と自然対流のみである。HM-1 実験との違いは、ジェットノズルからの注入流量であり、ガス流量及び水蒸気流量共に約 2 倍の質量流量となっている。下部区画のガス温度及びヘリウム濃度について、解析結果と実験データの比較を図 4.2-32 に示す。

HM-1 実験と同様に、混合ガス注入完了後の温度低下は、解析の方が実験より若干急峻であるものの、実験開始後の温度低下、アイスコンデンサ下部扉の開放による急激な温度低下、注入開始による温度上昇、注入完了時のピーク温度及び完了後の温度低下等、解析結果と実験データにおいて一連の挙動は良く一致している。また、下部区画のヘリウムガス濃度に関しても解析結果は実験データと良い一致を示している。

#### HM-5 実験

この実験では、水平方向ジェットノズルにより小破断 LOCA を想定して、実験開始前に CSTF 容器に空気の代わりに窒素を封入し、水素が注入されている。再循環ファンが模擬されており、HM-1 や HM-2 と比較して再循環ファンによる強制対流も気相混

合に寄与する。下部区画のガス温度及び下部区画の水素濃度について、解析結果と実験データの比較を図 4.2-33 に示す。

HM-1 実験及び HM-2 実験と同様に、実験開始後の温度低下、アイスコンデンサ下部扉の開放による急激な温度低下、注入開始による温度上昇、注入完了時のピーク温度及び完了後の温度低下等、解析結果と実験データにおいて一連の挙動は良く一致している。また、下部区画の水素濃度に関しても解析結果は実験データと良い一致を示している。

#### (4) 重要現象に関する不確かさの評価

有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいて MAAP の不確かさを評価する。

CSTF 実験は、上部区画と下部区画で仕切られた区画を持つ格納容器の下部区画に水平あるいは垂直ジェットにより水蒸気及び水素又はヘリウムを注入し、再循環ファンあるいはアイスコンデンサ扉による強制対流と自然対流による混合を確認した実験である。HM-1 実験及び HM-2 実験は空気雰囲気に対し、ヘリウム及び水蒸気の水平方向ジェットによる強制対流とアイスコンデンサ扉開放による自然対流を考慮し、HM-5 実験は窒素雰囲気に対し、水素及び水蒸気の水平方向ジェットによる強制対流、アイスコンデンサ扉開放による自然対流及び再循環ファンによる強制対流を考慮している。

格納容器内のガス温度や非凝縮性ガスの濃度については、図 4.2-31～図 4.2-33 に示すとおり、すべての実験条件において、自然循環及び強制対流下で、測定データと良く一致する解析結果が得られている。

このように、MAAP による解析で得られた格納容器温度及び非凝縮性ガスの濃度変化は、CSTF 実験における測定データとの比較から妥当であると考えられる。したがって、MAAP は格納容器各領域間の流動及び構造材との熱伝達及び内部熱伝導に関して、適切なモデルを有していると判断できる。

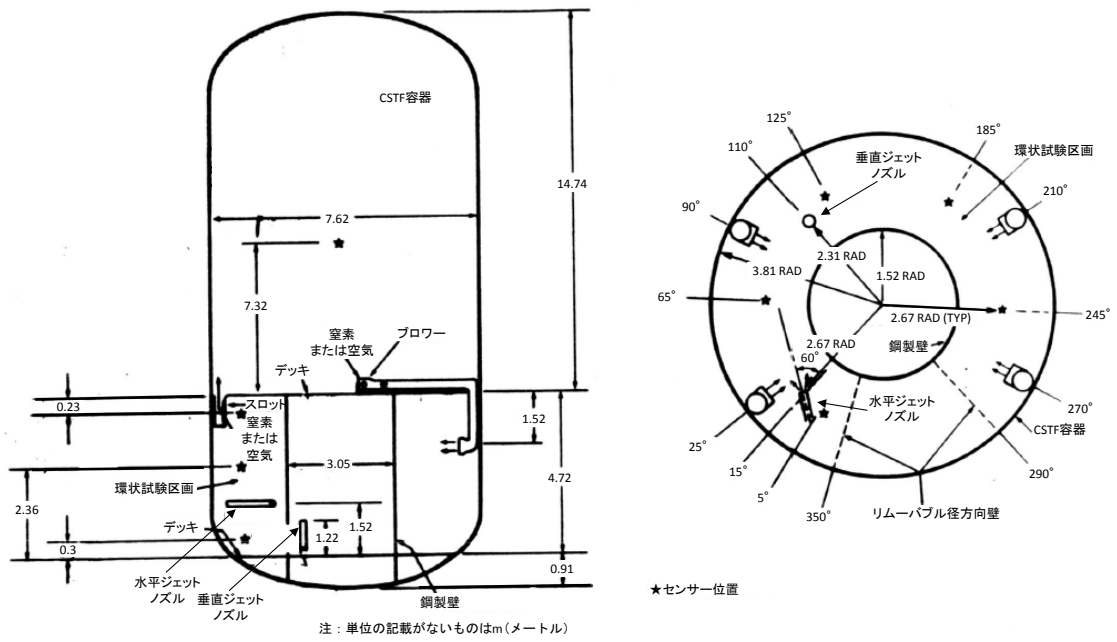
表 4.2-4 CSTF 水素混合実験 実験ケース一覧

| 実験<br>ケース       | 雰囲気<br>ガス      | 再循環流量                |                        | 注入ガス<br>組成            | ガス流量<br>(ヘリウム又は水素) |          | 水蒸気流量   |          | 下部区画<br>ガス初期温度 |     |
|-----------------|----------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|----------|---------|----------|----------------|-----|
|                 |                | m <sup>3</sup> /min. | ft. <sup>3</sup> /min. |                       | kg/min.            | lb./min. | kg/min. | lb./min. | °C             | °F  |
| 予備試験            |                |                      |                        |                       |                    |          |         |          |                |     |
| HM-P1           | Air            | 0                    | 0                      | -                     | -                  | -        | -       | -        | 29             | 85  |
| HM-P2           | Air            | 104                  | 3700                   | -                     | -                  | -        | -       | -        | 29             | 85  |
| HM-P3           | Air            | 0                    | 0                      | -                     | -                  | -        | -       | -        | 66             | 150 |
| HM-P4           | Air            | 104                  | 3700                   | -                     | -                  | -        | -       | -        | 66             | 150 |
| 高速ジェット試験 (水平方向) |                |                      |                        |                       |                    |          |         |          |                |     |
| <u>HM-1</u>     | Air            | 0                    | 0                      | He-Steam              | 0.41               | 0.9      | 12.3    | 27       | 66             | 150 |
| <u>HM-2</u>     | Air            | 0                    | 0                      | He-Steam              | 0.82               | 1.8      | 24.5    | 54       | 66             | 150 |
| HM-3            | Air            | 104                  | 3700                   | He-Steam              | 0.41               | 0.9      | 12.3    | 27       | 66             | 150 |
| HM-4            | Air            | 104                  | 3700                   | He-Steam              | 0.82               | 1.8      | 24.5    | 54       | 66             | 150 |
| <u>HM-5</u>     | N <sub>2</sub> | 104                  | 3700                   | H <sub>2</sub> -Steam | 0.41               | 0.9      | 24.5    | 54       | 66             | 150 |
| 高速ジェット試験 (垂直方向) |                |                      |                        |                       |                    |          |         |          |                |     |
| HM-6            | Air            | 104                  | 3700                   | He-Steam              | 0.41               | 0.9      | 12.3    | 27       | 66             | 150 |
| HM-7            | Air            | 104                  | 3700                   | He-Steam              | 0.82               | 1.8      | 24.5    | 54       | 66             | 150 |

※下線部は、ベンチマーク解析ケース

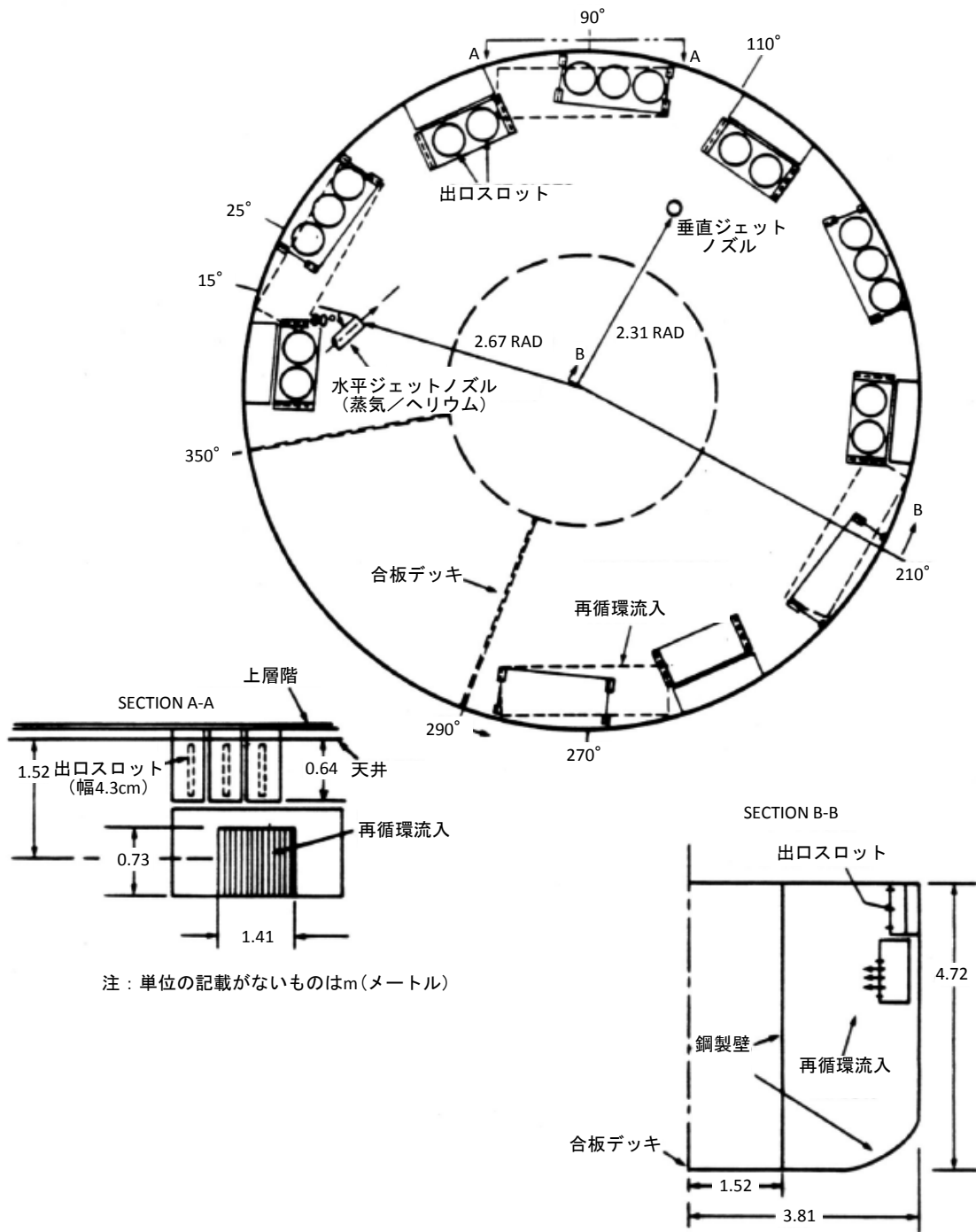
出典：MAAP4User'sManual,EPRI





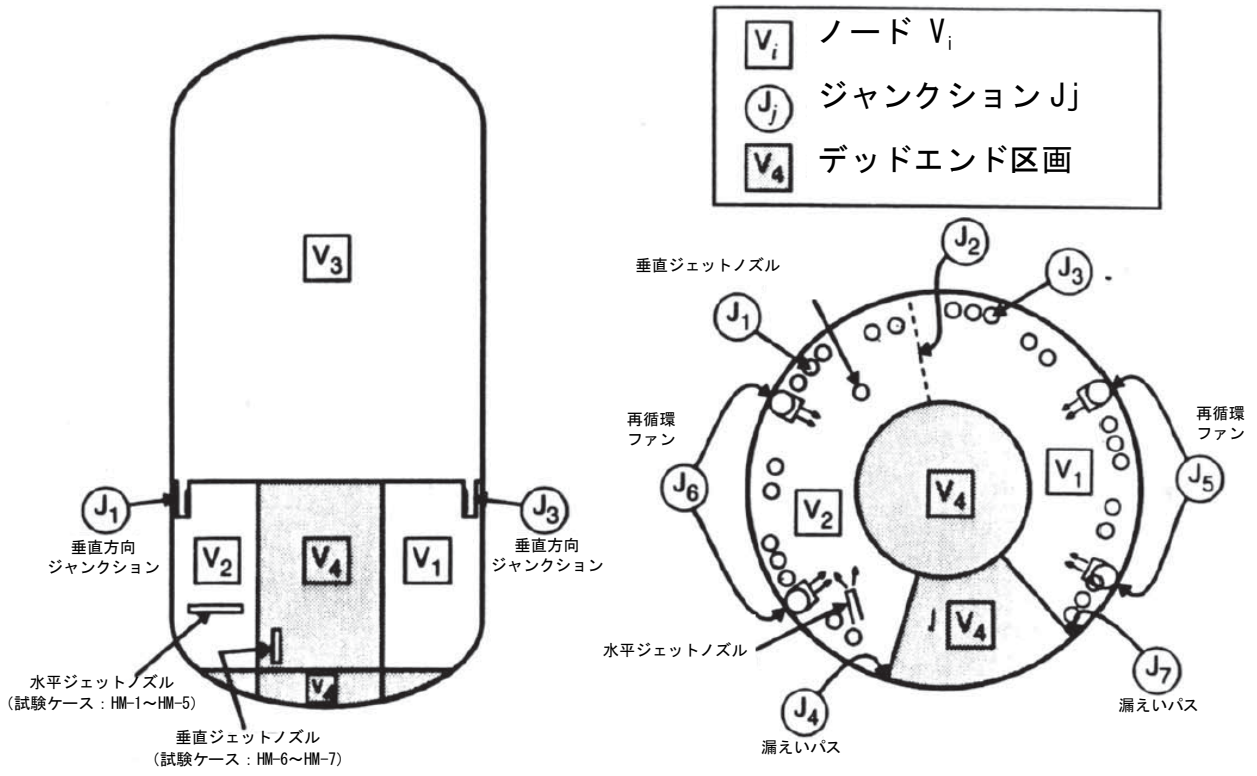
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-28 CSTF 実験装置



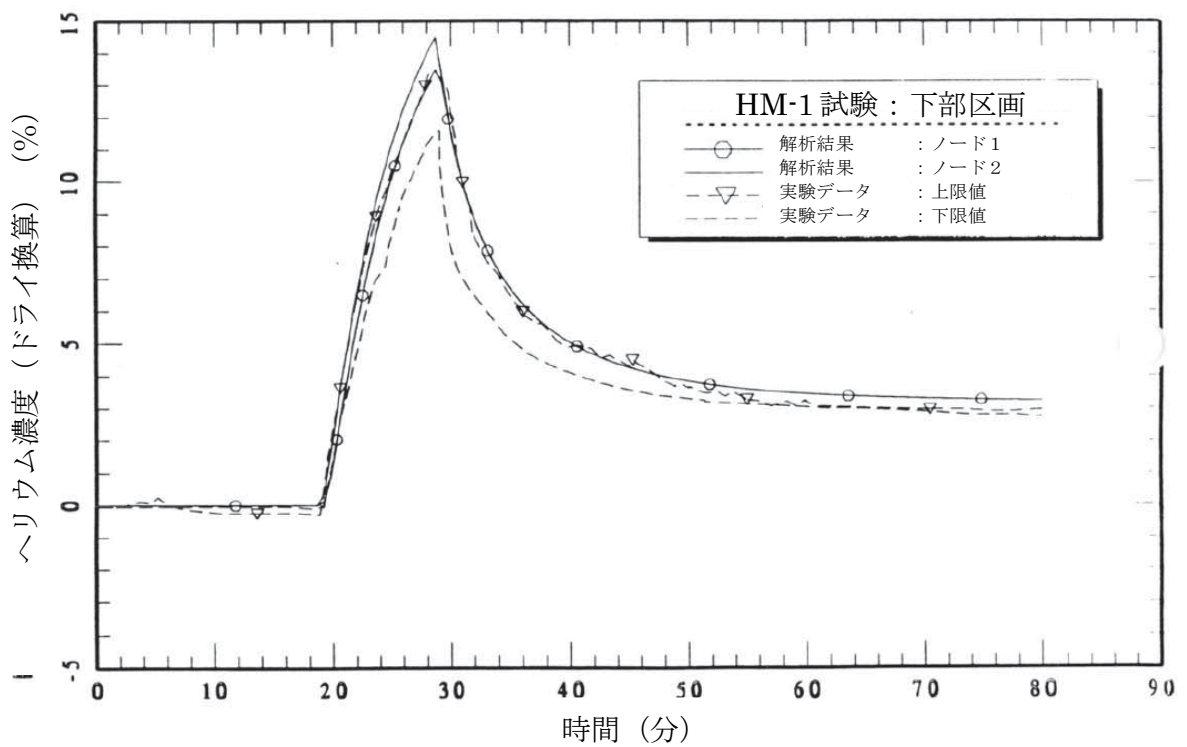
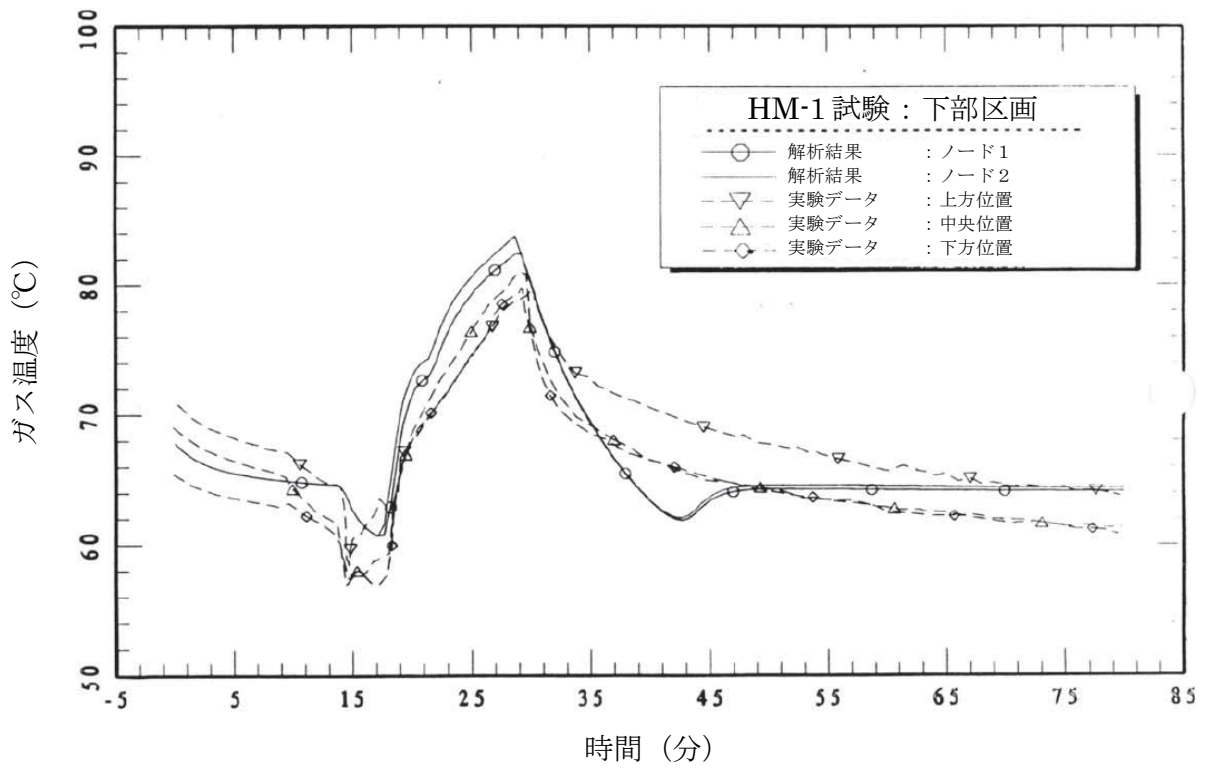
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-29 CSTF 実験装置における空気再循環の詳細



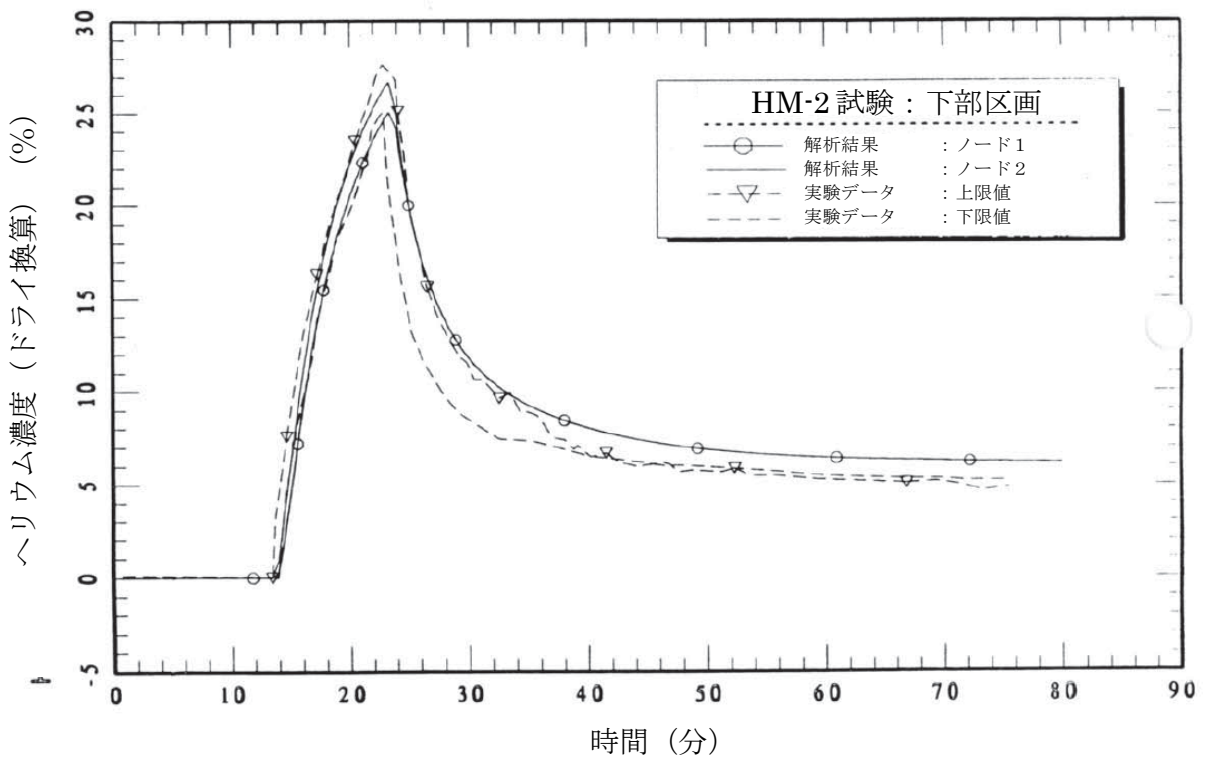
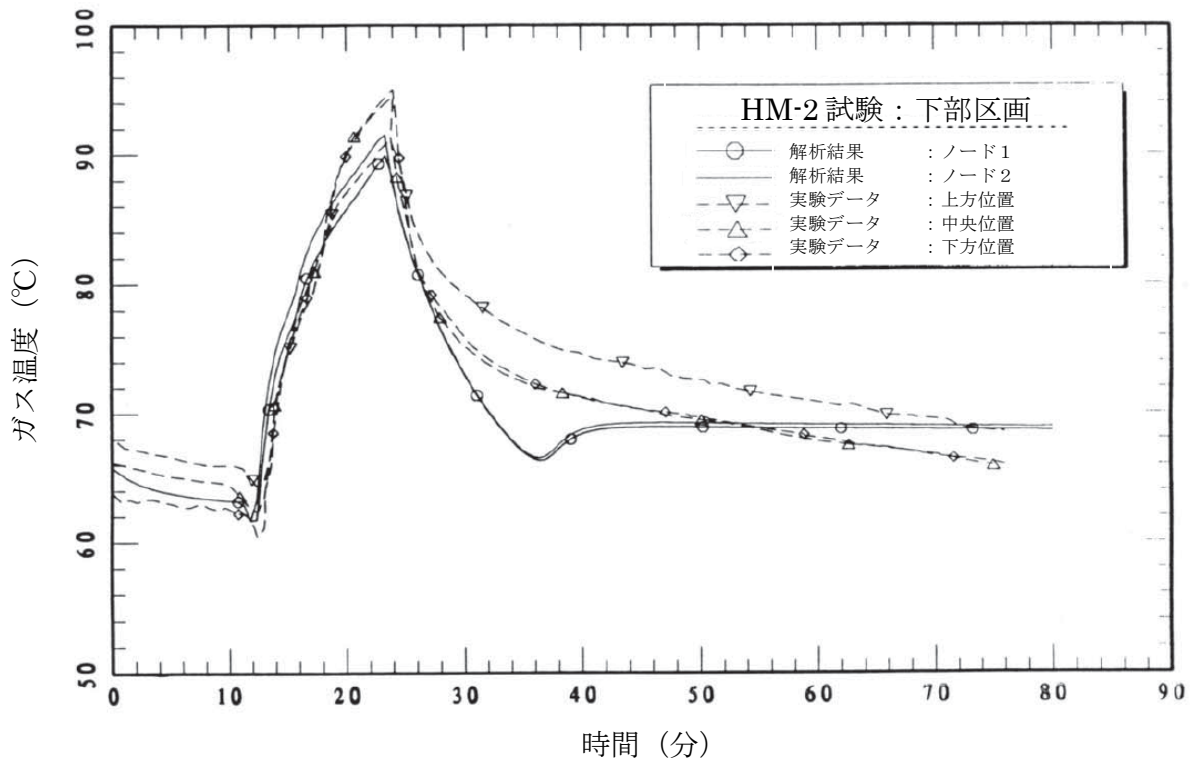
出典: MAAP4User'sManual, EPRI

図 4.2-30 CSTF 実験ベンチマーク解析 MAAP ノード分割



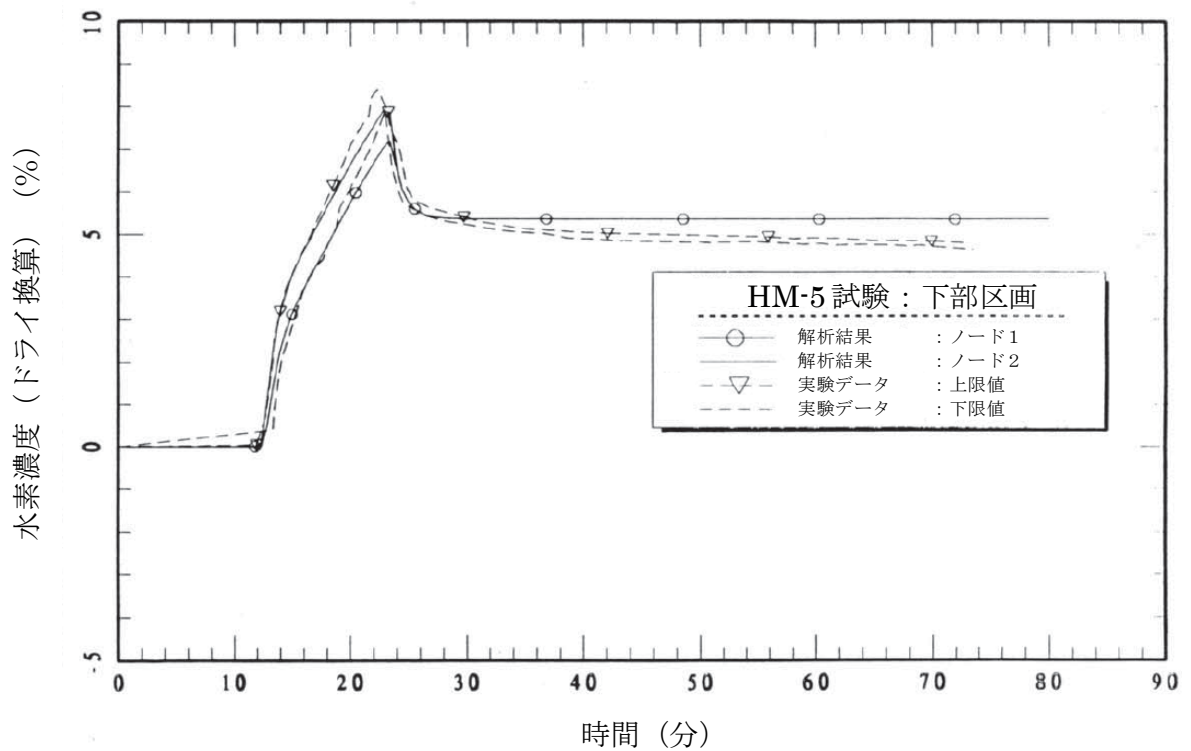
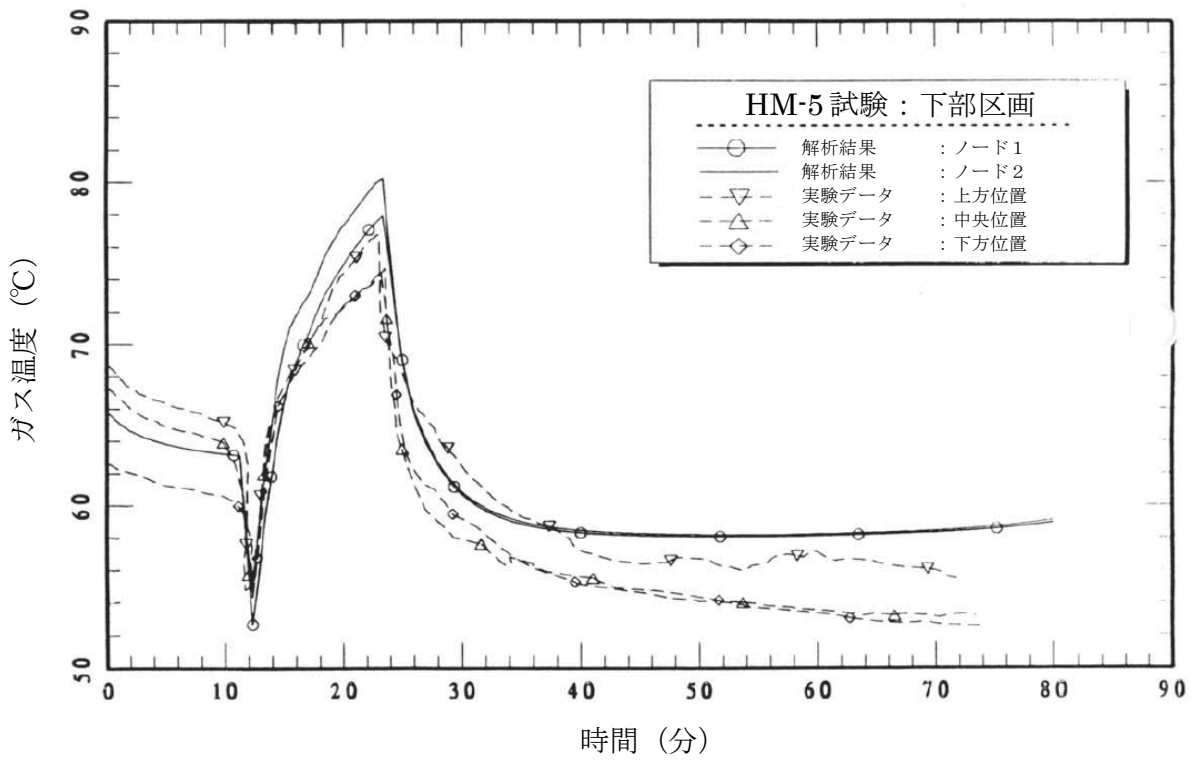
出典：MAAP4User'sManual,EPRI

図 4.2-31 CSTF 実験ベンチマーク解析結果 (ケース HM-1)



出典：MAAP4User'sManual,EPRI

図 4.2-32 CSTF 実験ベンチマーク解析結果 (ケース HM-2)



出典：MAAP4User'sManual,EPRI

図 4.2-33 CSTF 実験ベンチマーク解析結果 (ケース HM-5)

## 4.2.5 ACE 実験解析

### (1) 実験の概要

米国アルゴンヌ国立研究所で実施された ACE 実験<sup>[17]</sup>では、MCCI の大規模な実験が行われている。この試験の目的は、MCCI の熱水力学的及び化学的プロセスの調査と、計算コードの開発及び妥当性確認に向けたデータベース拡充である。試験装置の概要を図 4.2-34 に示す。試験装置は、8 枚の水冷式パネルを対にして四方の壁を構成しており、その中にコンクリート床、コンクリート/金属製の内挿物、コリウムを内蔵している。2 つの壁の内面には、25 本のタングステン電極棒集合体が設置されており、それらはタングステンコイルによりコリウム頂部付近に接続され、コリウムが溶融して誘導加熱を開始できるまで加熱する。試験装置の大きさは 53.0 cm×50.2 cm である。また、試験装置は二枚式の蓋で覆われており、蓋を通じて主ガス管と接続されている。蓋には 4 つの窓が設置されており、1 つはエアロゾルの収集、ガスのサンプリング及び排出に、残りの 3 つは光学温度計及びビデオカメラによるコリウムの観察に用いられる。

UO<sub>2</sub> を含む全てのコリウム成分は粉末状であり、均一に混合されている。また、コリウム及びコンクリート成分は、複数の条件について実験が行われている。表 4.2-5 及び表 4.2-6 に、L2 実験、L6 実験及び L7 実験におけるコリウム及びコンクリートの成分を示す。実験中、コリウムはタングステン電極で加熱され溶融プールを形成する。コンクリートの侵食は内部に設置された熱電対により観測される。

### (2) 解析条件

解析では、図 4.2-35 に示すとおり、試験部を 1 つのノードとしてモデル化している。水冷式パネルで構成される側壁、コンクリート床及び蓋はヒートシンクとしてモデル化し、試験部と外部環境の間にジャンクションを設定している。

実験ではコリウムを室温から加熱するが、解析ではコンクリートの侵食が開始した時間を零と定義し、その時点における各部の温度等を境界条件として与える。コリウムの初期温度は、L2 実験で 2,400K、L6 実験及び L7 実験で 2,500K である。また、コンクリート床の初期温度は、コリウムとの界面ではコンクリート融点、底面では室温としている。

### (3) 解析結果

#### L2 実験

L2 実験では、部分的に酸化した PWR 燃料のコリウム溶融物とケイ土系コンクリートとの相互作用が調査されている。電気加熱の出力は平均で約 220kW、水冷式パネルでの熱損失は平均で約 120kW であり、解析ではこれらを境界条件として与えている。溶融プール温度は侵食開始時において約 2,400K であり、その後もその温度を

維持している。垂直方向へのコンクリート侵食量は2,000秒において約10cmである。侵食深さとコリウム温度の解析結果を測定データと比較して図 4.2-36 に示すが、いずれも良い一致を示している。

#### L6 実験

L6 実験では、部分的に酸化した PWR 燃料のコリウム溶融物とケイ土系コンクリートの相互作用を調査している。この実験ではコンクリート製ベースマットの上に7cmのコンクリート/金属製の内挿物が設置されているが、解析では侵食開始時にコリウム成分と合わせて考慮することで実験を模擬している。電気加熱出力は約200kW、水冷式パネルでの熱損失は約125kWである。侵食率は試験開始時には低く、試験終了時には高い値となり、最終的な侵食深さは約13cmであった。コリウム温度と侵食深さの解析結果を測定データと比較して図 4.2-37 に示すが、コリウム温度については良い一致を示している。侵食率については、侵食開始時において解析結果が実測データをやや上回っているが、これはコンクリート床への熱損失をわずかに大きく評価しているためである。

#### L7 実験

L7 実験では、部分的に酸化した BWR 燃料のコリウム溶融物（70%の Zr が酸化）と石灰岩/砂系コンクリートが用いられており、電気加熱出力は約130kWである。L6 実験と同様に、コンクリート床上に5.7cmのコンクリート/金属製内挿物を設置しており、解析では侵食開始時にコリウム成分と合わせて考慮することで実験を模擬している。実験では、1,500秒で約2.5cmの侵食が観測されている。BWR 燃料のコリウム溶融物における低い出力密度と、石灰岩/砂系コンクリートが有する高い分解エンタルピに起因して、侵食深さが小さくなっている。コリウム温度と侵食深さの解析結果を測定データと比較して図 4.2-38 に示すが、いずれも良い一致を示している。

#### (4) 重要現象に関する不確かさの評価

有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいて MAAP の不確かさを評価する。

ACE 実験では、冷却水の注水がなく、かつコリウム及びコンクリートの配置が既知である。したがって、冷却水の熱水力的挙動や幾何形状の不確かさを最小化した条件においてコンクリート侵食挙動を確認することができ、溶融炉心とコンクリートの伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生の不確かさを評価する上で有効である。

MAAP 解析では、実験で観測されたコンクリート侵食速度を良く再現した結果と



なっており、MAAPによる解析で得られたコリウム温度及び侵食速度は、ACE実験における測定データとの比較から妥当である。また、非凝縮性ガスの発生量については直接的な測定データとの比較をしていないものの、コンクリート侵食速度を問題なく予測できていることから一定の妥当性を有していると考えられる。したがって、MAAPは溶融炉心とコンクリートの伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生に関して、適切なモデルを有していると判断できる。

表 4.2-5 ACE 実験におけるコリウム成分

| 成分(kg)                         | L2   | L6   | L7    |
|--------------------------------|------|------|-------|
| UO <sub>2</sub>                | 216  | 219  | 188.5 |
| ZrO <sub>2</sub>               | 42.5 | 18.5 | 59.4  |
| Zr                             | 13.4 | 21.1 | 17.7  |
| Zirc-4                         |      | 1.8  | 1.1   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -    | -    | -     |
| NiO                            | -    | -    | -     |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -    | -    | -     |
| SS-304                         | -    | 9.1  | 0.6   |
| CaO                            | 3.0  | 7.3  | 11.5  |
| SiO <sub>2</sub>               | 20.9 | 16.9 | 12.5  |
| BaO                            | 0.8  | 0.79 | 1.4   |
| La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.6  | 0.6  | 1.14  |
| SrO                            | 0.5  | 0.5  | 0.96  |
| CeO <sub>2</sub>               | 1.3  | 1.3  | 2.32  |
| MoO <sub>2</sub>               | 0.9  | 0.94 | 1.7   |
| SnTe                           | 0.2  | -    | -     |
| ZrTe <sub>2</sub>              | -    | 0.2  | 0.18  |
| Ru                             | -    | 0.38 | -     |
| B <sub>4</sub> C               | -    | -    | 1.0   |
| Ag                             | -    | 1.19 | -     |
| In                             | -    | 0.22 | -     |

出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

表 4.2-6 ACE 実験におけるコンクリート成分

| 成分(kg)                           | L2   | L6    | L7     |
|----------------------------------|------|-------|--------|
| SiO <sub>2</sub>                 | 69   | 69    | 28.3   |
| CaO                              | 13.5 | 13.5  | 26.0   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 4    | 4     | 3.5    |
| K <sub>2</sub> O                 | 1.4  | 1.4   | 0.6    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 1    | 1     | 1.6    |
| TiO <sub>2</sub>                 | 0.8  | 0.8   | 0.14   |
| MgO                              | 0.7  | 0.7   | 9.6    |
| Na <sub>2</sub> O                | 0.7  | 0.7   | 1.1    |
| MnO                              | 0.03 | 0.03  | 0.05   |
| BaO                              | 0.02 | 0.02  | 0.03   |
| SrO                              | 0.02 | 0.02  | 0.03   |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 0.01 | 0.01  | 0.009  |
| H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub> | 7.9  | 7.9   | 27.5   |
| コンクリートの種類※                       | S    | S     | L/S    |
| 合計                               | 99.1 | 99.08 | 98.459 |

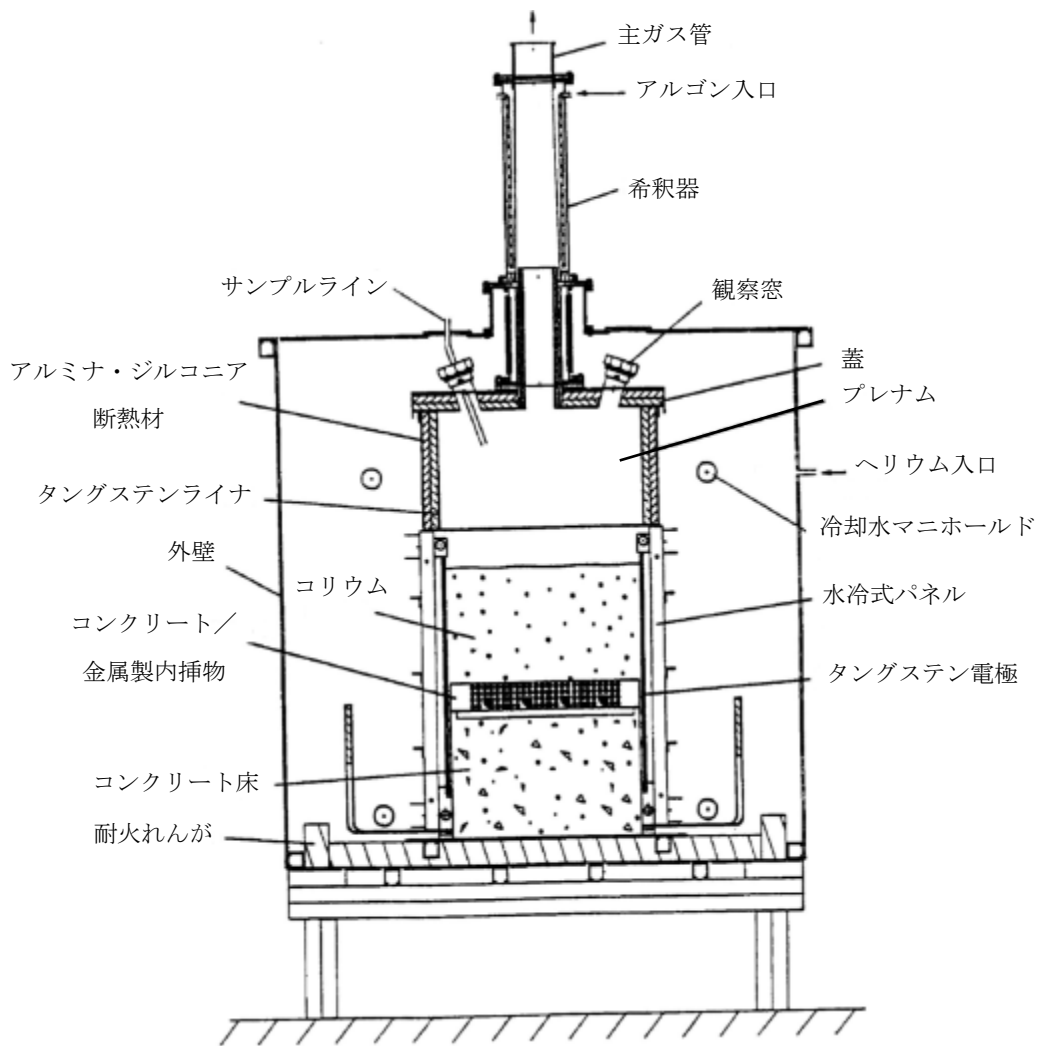
※ コンクリートの種類

S : ケイ土系

L/S : 石灰岩・砂系

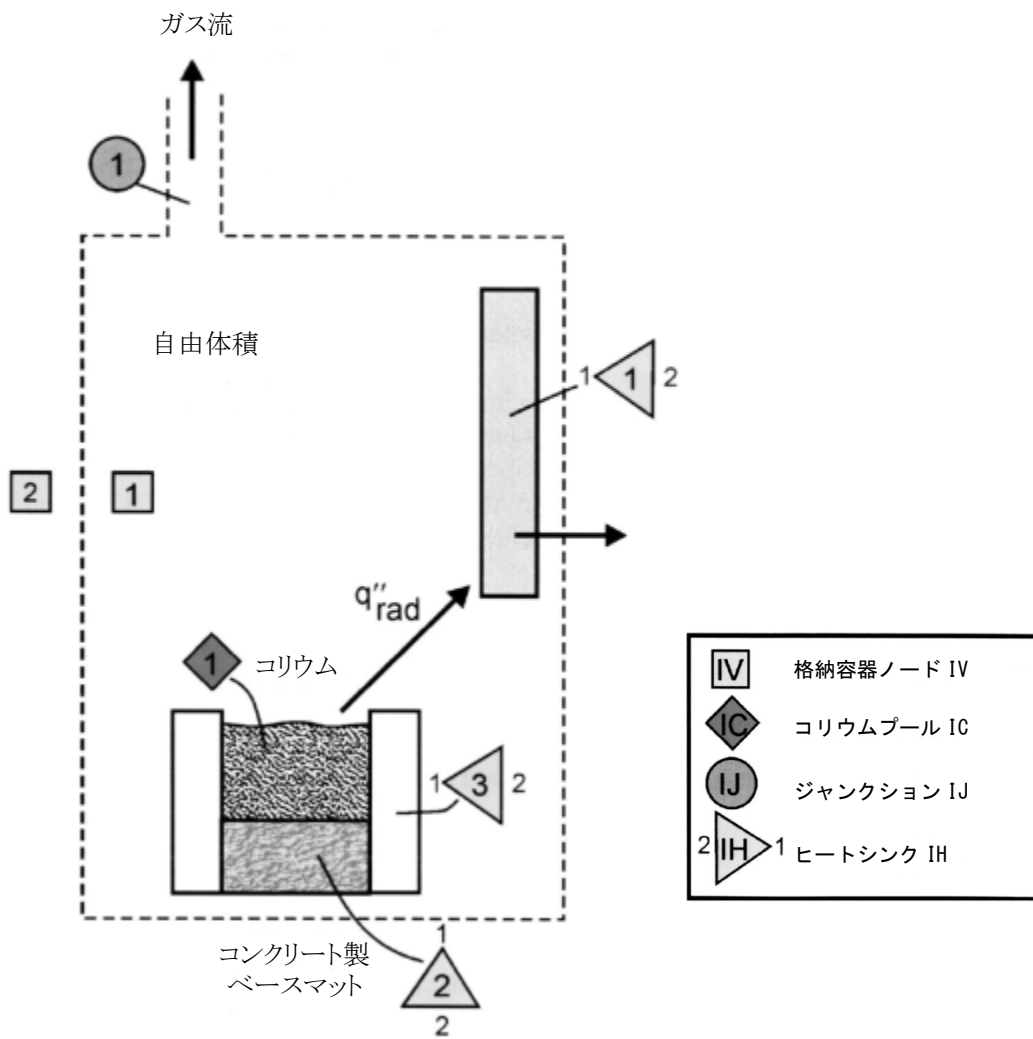
出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

エアロゾル収集  
ガスサンプリング



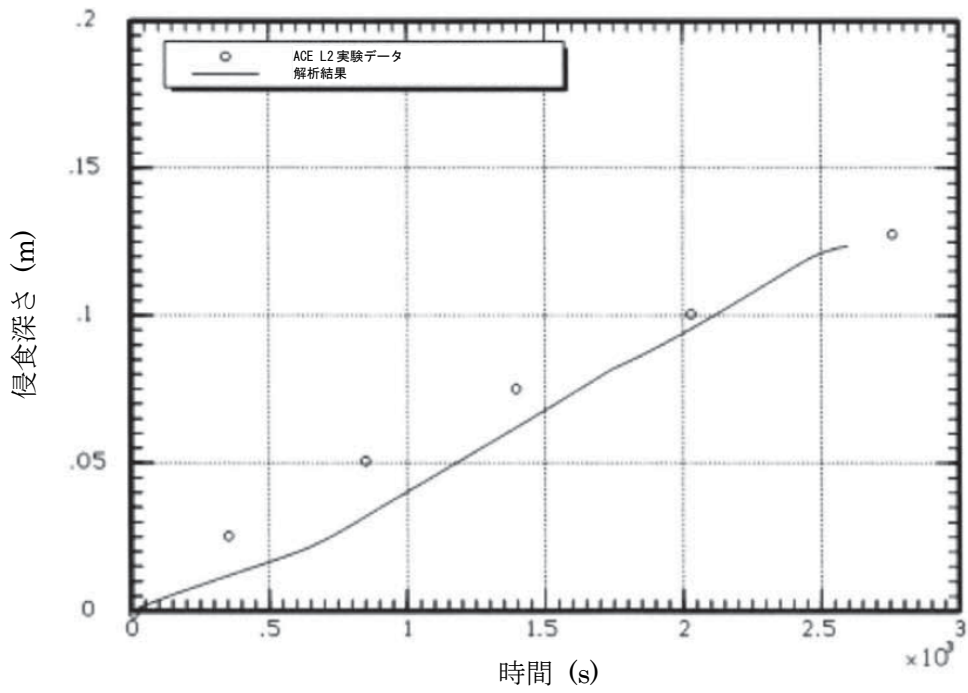
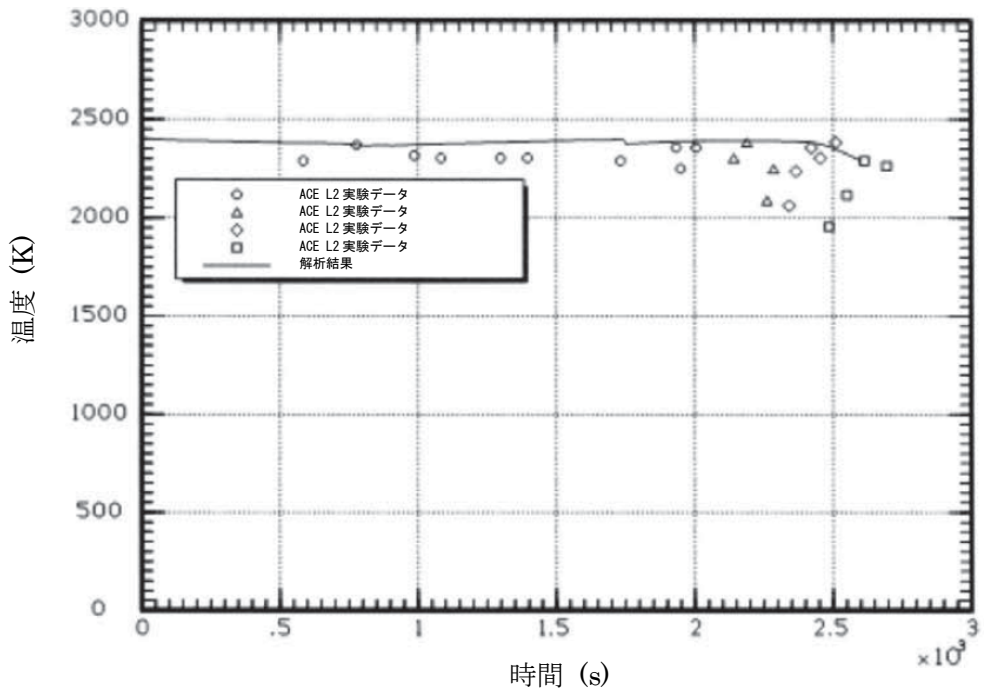
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-34 ACE 実験装置の概要



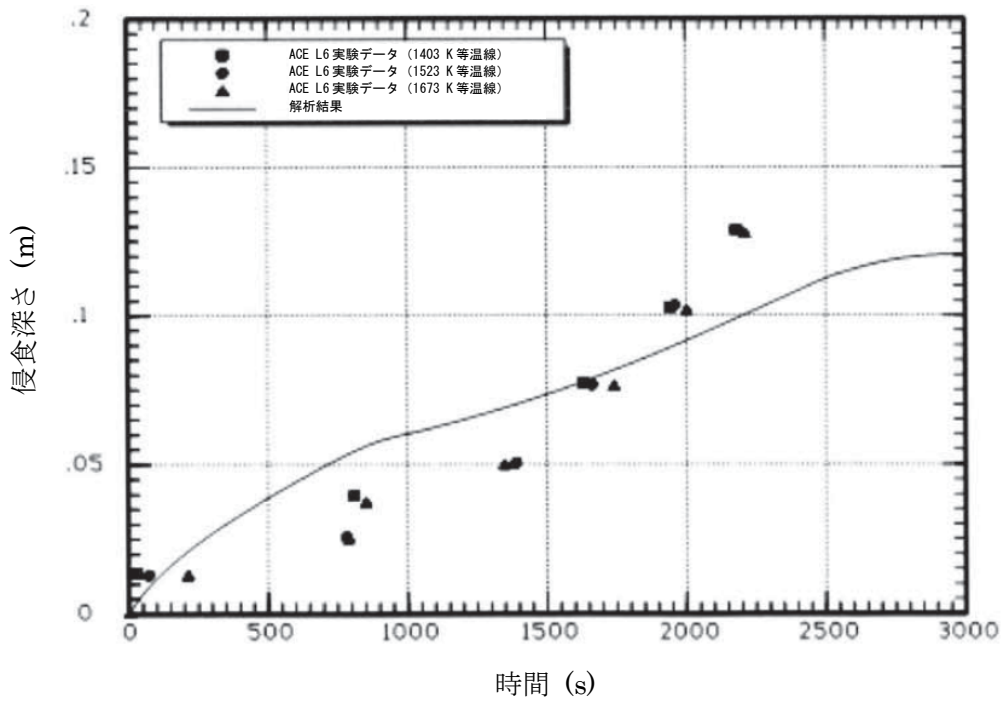
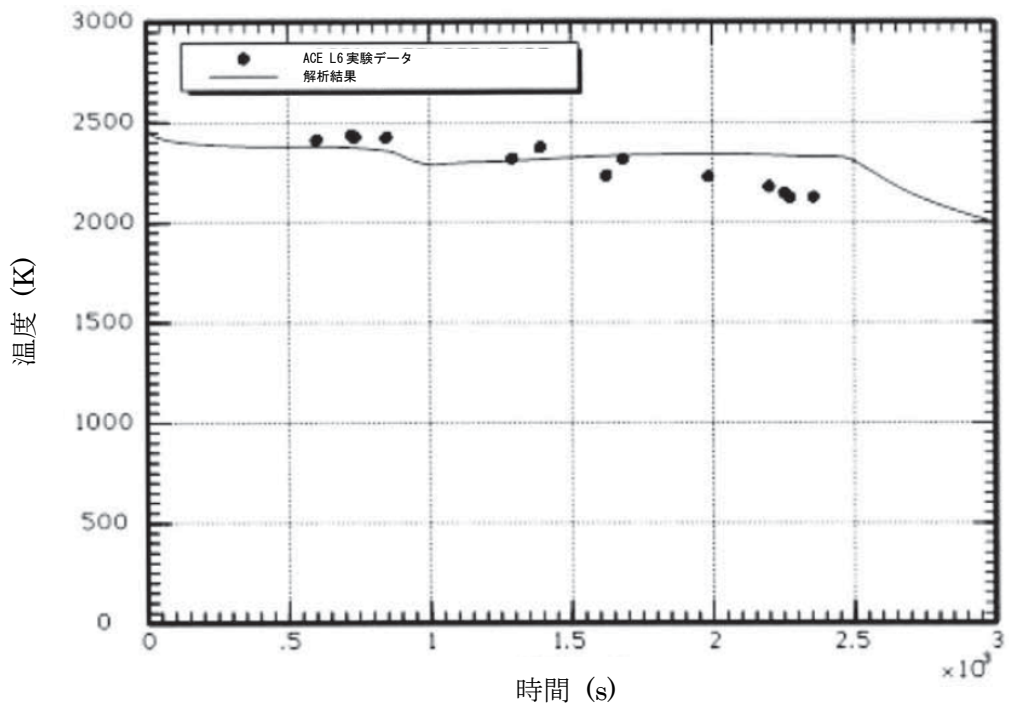
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-35 ACE 実験解析におけるノード分割



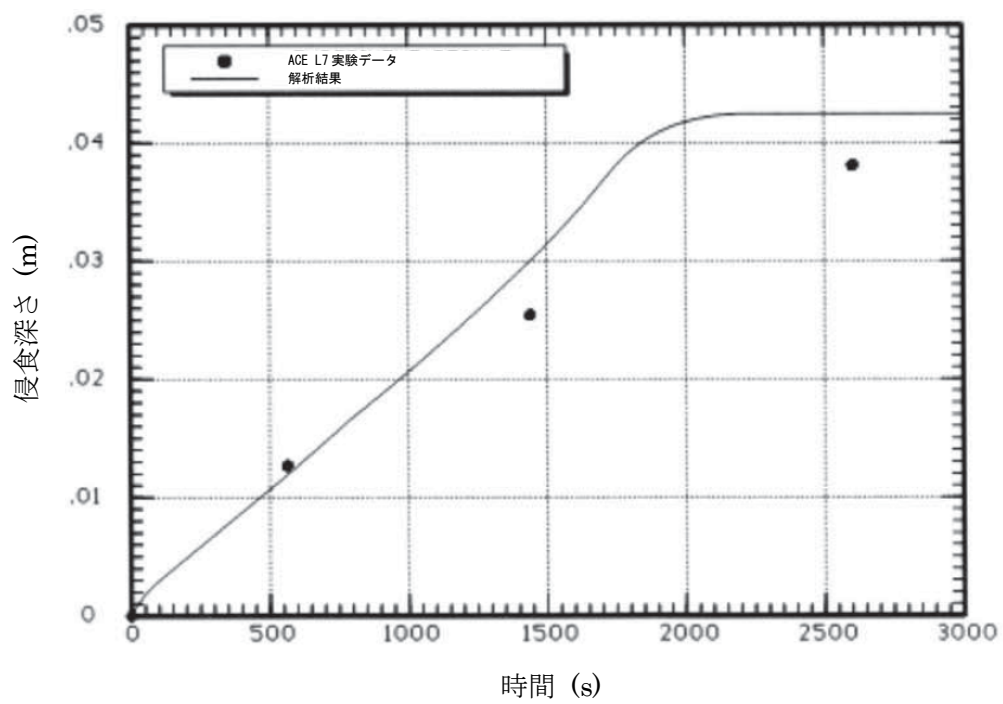
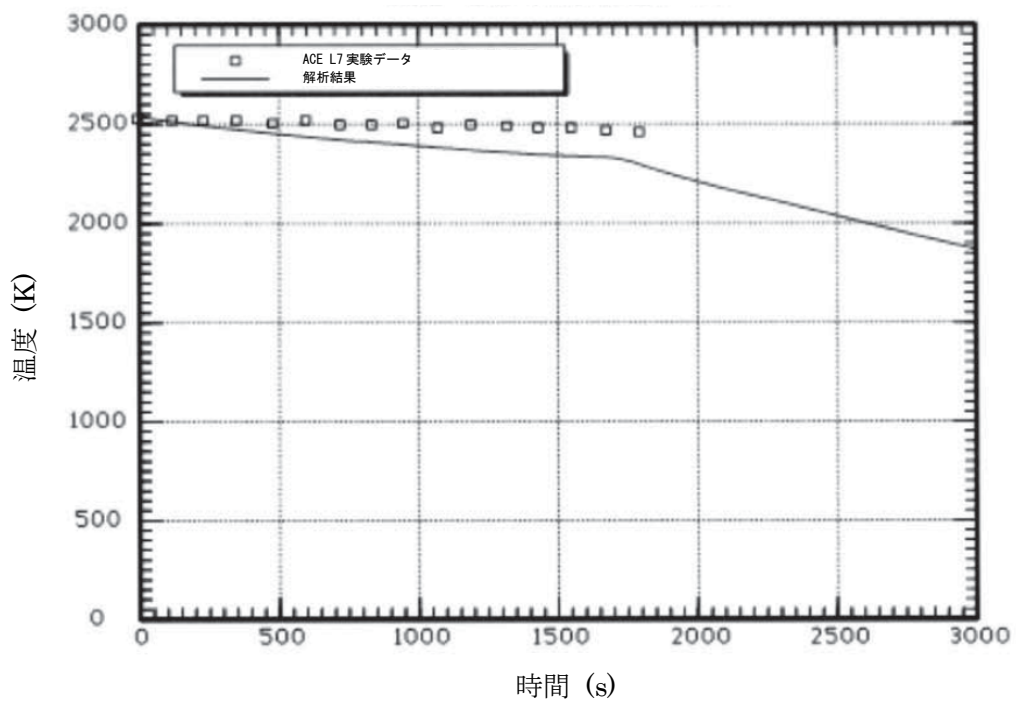
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-36 ACE 実験の解析結果 (L2 実験)



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-37 ACE 実験の解析結果 (L6 実験)



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-38 ACE 実験の解析結果 (L7 実験)



#### 4.2.6 SURC-4 実験解析

##### (1) 実験の概要

SURC-4 実験<sup>[8]</sup>は米国サンディヤ国立研究所で行われた MCCI 実験であり、OECD/NEA の国際標準問題 (ISP-24) にも選定されている。

実験装置の概要を図 4.2-39 に示す。試験装置は、アルミニウム製格納容器とその内部に設置された円筒状のるつぼから構成される。るつぼの側壁及び蓋は厚さ約 10cm の MgO 製铸造物であり、るつぼ全体の大きさは直径約 60cm、高さ約 100cm である。るつぼの下部には、厚さ約 40cm の玄武岩系コンクリート床が設置され、コンクリートの侵食は内部に設置された熱電対により観測される。

実験では、コンクリート侵食が開始するまで、約 200kg のステンレス鋼と模擬 FP から成るコリウムを約 60kW の電気出力で誘導加熱し、それによるコンクリート侵食及びコリウム温度が測定されている。また、化学反応とガス放出への影響を調査するため、コンクリート侵食開始から約 14 分後に約 20kg のジルコニウムをコリウムに投入している。最終的な侵食深さは約 24.5～27.5cm であった。

##### (2) 解析条件

SURC-4 実験は、ACE 実験と同様のモデルで模擬できることから、図 4.2-35 に示したモデルを用いている。

解析ではコンクリートの侵食が開始した時間を零と定義し、その時点における各部の温度等を境界条件として与える。コリウムの初期温度は 1,750K であり、コンクリート床の初期温度は、コリウムとの界面ではコンクリート融点、底面では室温としている。

##### (3) 解析結果

図 4.2-40 に侵食深さの解析結果を測定データと比較して示す。解析による侵食率は、測定データとの良好な一致を得ている。なお、SURC-4 実験では外周部のコンクリート侵食深さが大きくなっており、解析結果と相違が見られるが、これは、実験では外周部からの誘導加熱によって溶融物を加熱しているため、外周部への入熱量が大きくなる試験体系によるものと考えられる。

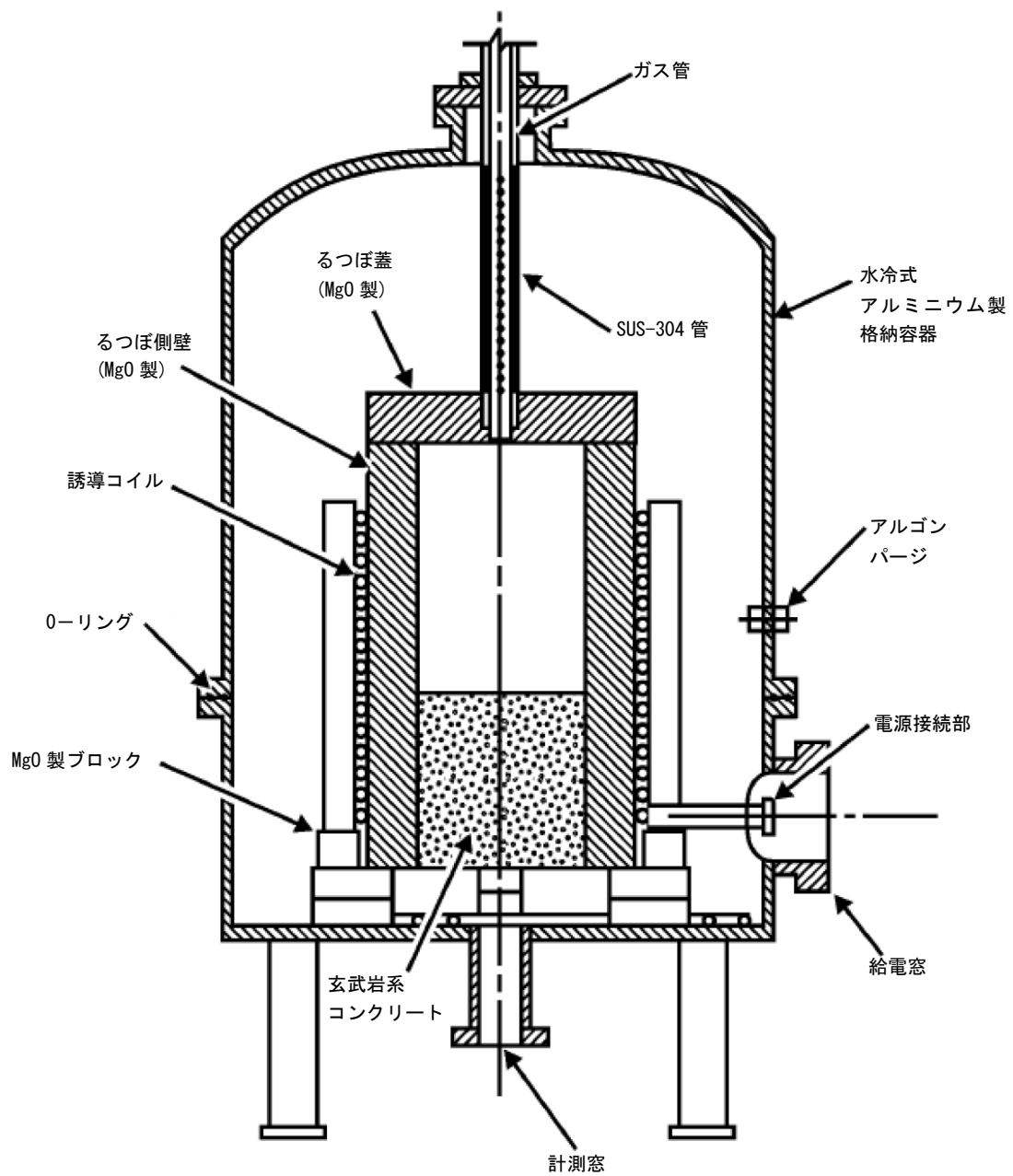
##### (4) 重要現象に関する不確かさの評価

有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいて MAAP の不確かさを評価する。

SURC-4 実験では、冷却水の注水がなく、かつコリウム及びコンクリートの配置が既知である。したがって、冷却水の熱水力的挙動や幾何形状の不確かさを最小化した条件においてコンクリート侵食挙動を確認することができ、溶融炉心とコンク

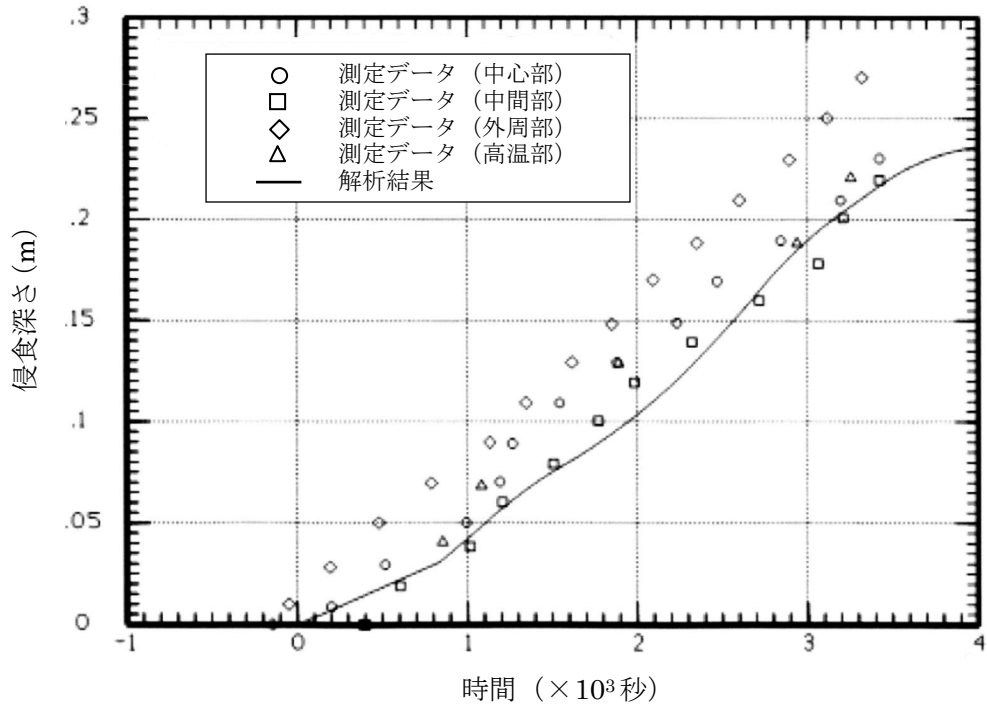
リークの伝熱，コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生の不確かさを評価する上で有効である。

MAAP 解析では，実験で観測されたコンクリート侵食速度を良く再現した結果となっており，MAAP による解析で得られた侵食速度は，SURC-4 実験における測定データとの比較から妥当である。また，非凝縮性ガスの発生量については直接的な測定データとの比較をしていないものの，コンクリート侵食速度を問題なく予測できていることから一定の妥当性を有していると考えられる。したがって，MAAP は熔融炉心とコンクリートの伝熱及びコンクリート分解及び非凝縮性ガス発生に関して，適切なモデルを有していると判断できる。



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-39 SURC-4 実験装置図



出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-40 SURC-4 実験の解析結果

#### 4.2.7 PHEBUS-FP 実験解析

##### (1) 実験の概要

PHEBUS-FP 計画<sup>[19][20]</sup>は、フランス放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN)、フランス電力庁及び EU を中核とする国際協力プログラムであり、燃料から放出される FP の種類、量、1 次系及び格納容器内への移行と除去挙動に関する知見を取得し、シビアアクシデント解析コードの改良及び検証に資することを目的として実施されている。

PHEBUS-FP 計画は、FPT0, 1, 2, 3 及び 4 の計 5 つの実験から構成されており、各実験では実燃料 (酸化ウラン燃料) を炉心内で熔融させ、放出される FP などの挙動を調査している。FPT0 実験は未照射燃料を対象とし、FPT4 実験は燃料デブリを対象としていること、FPT2 実験及び FPT3 実験はいずれも水蒸気枯渇状態で実施されていることを考慮し、ここでは水蒸気雰囲気下で照射済燃料を対象に実施された FPT1 実験を取り上げる。なお、同実験は、OECD/NEA の国際標準問題 (ISP-46) にも選定されている。

図 4.2-41 には実験設備の概要を示すが、装置は大きく 3 領域に分かれており、それぞれ炉心、1 次系及び格納容器を模擬している。炉心には長さ約 1m の実燃料 20 本と制御棒で構成される試験体が設置され、中性子束によって加熱される。炉心部には図 4.2-42 に示す軸方向位置に熱電対が配置されており、温度が測定される。また、放出された FP は燃料を取り囲むシュラウド内に試験体下部より供給される水蒸気によって上部垂直ラインに導かれる。FPT1 実験における水蒸気流量及び炉心の加熱出力を図 4.2-43 に示す。

1 次系はホットレグ及びコールドレグを模擬する内径 3cm、長さ約 13.3m の水平配管と、SG 伝熱管を模擬する内径約 2cm、長さ約 10m の U 字管で構成される。

模擬格納容器は約 10m<sup>3</sup> の容積を有しており、内部に備えられたコンデンサは、実機の格納容器壁面における水蒸気の凝縮及びエアロゾルの沈着を模擬するように、雰囲気温度より低い温度に設定されている。また、下部にはエアロゾルを含んだ洗浄水を溜めるサンプルが設けられている。

##### (2) 解析条件

解析では、図 4.2-44 に示すとおり、炉心部を径方向に 2 領域、軸方向に 11 ノードでモデル化している。径方向中心領域は、8本の燃料棒と1本の制御棒を含んでおり、径方向外周領域は 12本の燃料棒を含んでいる。1 次系は図 4.2-45 の破線で囲んだ領域、すなわち炉心、上部プレナム、ホットレグ、SG 伝熱管 (ホットレグ管及びコールドレグ管)、中間レグでモデル化している。格納容器は、図 4.2-46 に示すように、上部区画と下部区画に分割してモデル化している。解析では図 4.2-43 に示した水蒸気流量及び炉心の加熱出力の時間変化を境界条件として与えている。

### (3) 実験及び解析の考察

被覆管温度、水素流量及び水素発生量、希ガス及びイオウの格納容器への放出割合について、測定データと解析結果の比較を図 4.2-47～図 4.2-54 に示す。

#### A) 実験結果の考察

FPT1 実験では、実験開始後約 8,000 秒から、水蒸気流量及び炉心の加熱出力を増加させ、炉心崩壊や FP 放出のデータを取得している。図 4.2-47～図 4.2-50 には下端からそれぞれ 700mm, 600mm, 400mm 及び 300mm の高さにおける外周部燃料の被覆管温度を示している。被覆管温度は、実験開始後約 8,000 秒から炉心の加熱の増加にしたがって大きく上昇し、実験開始後約 11,000 秒には急上昇が見られる。その後も炉心の加熱出力が増加することにより被覆管温度は高温を維持し、加熱出力がなくなる実験開始後約 17,000 秒で減少に転じる。

図 4.2-51 には水素流量を示すが、実験開始後約 8,000 秒から徐々に上昇し、被覆管温度と同じく実験開始後約 11,000 秒に急上昇が生じている。したがって、同時刻における被覆管温度の急上昇は、ジルコニウム酸化反応による発熱が原因と考えられる。被覆管温度及び水素発生量はピークを過ぎるとすぐに減少する。これは、熔融燃料のキャンドリングが開始することで被覆管と水蒸気の接触面積が減少し、酸化反応も減少したためと推測される。高さ 300mm の場合に、約 1,500°C に到達した時点で急激な温度上昇が発生していないことも、上部からのキャンドリングにより酸化反応が顕著にならなかったものと推測される。ジルコニウム酸化反応の進展により被覆管外面には酸化ジルコニウム層が形成されるが、被覆管内面の金属部は 1,800°C 程度で熔融するため、それ以上の温度になると酸化ジルコニウム層のみで燃料棒としての形状を維持することになる。約 2,200°C を超えると熔融した被覆管による二酸化ウランの溶解現象が進み、被覆管内部は熔融物割合が高まる。そのような状況では酸化ジルコニウム層では被覆管形状を維持できずに破損し、熔融物が流下することになると考えられている。同時に上部に残っていた燃料も落下すると考えられている。図 4.2-52 には水素発生量の積算値を示しているが、最終的に発生した水素量は  $96 \pm 13\text{g}$  と推定されており、これは初期ジルカロイの 64% が酸化したことに相当する。

図 4.2-53 及び図 4.2-54 には、一次系及び格納容器内に放出された希ガス及びイオウの割合を示す。オンライン計測によると、実験開始後約 6,000 秒には被覆管破損にともなう少量の FP 放出が確認されているが、希ガス及びイオウの放出が顕著になるのは、ジルコニウム酸化反応にともなう発熱により燃料温度が急上昇する実験開始後約 11,000 秒である。その後、燃料温度は高温を維持するため、希ガス及びイオウの放出は継続されるが、実験開始後約 17,000 秒で加熱がなくなると、積算放出割合はほぼ一定となる。図 4.2-55 に実験結果の分析から得られたイオウ

の回路内マスバランスを示す。よう素のバンドル内残存割合は約 13%であり、したがって最終的にはバンドル外へ約 87%が放出された。一方、1次系（コールドレグ）内質量流量の測定値からは、1次系を通過して格納容器内に放出された希ガスの割合は約 77%となるが、PHEBUS-FPT1 実験最終報告書<sup>[20]</sup>においては、燃料の損傷度合いやよう素等の揮発性核種の放出量との比較結果から、この値はやや過小評価であり、実際はよう素と同等の 80～85 %程度であったと推定されている。

## B) 解析結果の考察

被覆管温度の解析結果を図 4.2-47～図 4.2-50 に示すが、炉心の加熱出力が増加する実験開始後約 8,000 秒まで、解析結果と測定データは良く一致している。その後、解析結果は測定データをやや上回る傾向を示しており、急上昇が生じる時刻は測定データに比べて 500 秒程度早くなっている。図 4.2-51 には水素流量の解析結果を示しているが、実験開始後約 8,000 秒から水素流量はやや大きく予測されており、このためジルコニウム水反応による発熱量が実験に比べて大きくなったと考えられる。この結果は、被覆管温度の解析結果が測定データを上回り、また被覆管温度の急上昇を早く予測した結果と整合する。図 4.2-52 には、積算水素量を示すが、最終的な水素発生量の解析結果は測定データに比べて 3 割程度多くなっている。

MAAP の解析では被覆管温度が約 1,600°C 以上で Baker-Just モデル、それより低温では Cathcart モデルを使用しているが、被覆管温度が 1,500°C 程度から急上昇した後の挙動は実験と解析ともに同程度であることから、Cathcart モデルによる酸化速度が大きい傾向を持つことが考えられうる。解析結果と測定データの差異については、実験体系のモデル化が要因の一つと考えられる。すなわち、図 4.2-44 に示すとおり実験のバンドル形状は 5×5 配列であり、燃料棒間及び外周構造体との輻射熱伝達や、水蒸気による対流熱伝達による影響を考慮すると、半径方向には比較的大きな温度分布が生じると考えられる。実際に図 4.2-56 に示す実験後の燃料バンドルの X 線トモグラフィでは、半径方向にかなり強い非均質性が見られている。一方、解析においては、バンドルを内側 12 本、外側 8 本の 2 領域で模擬しているため、半径方向の温度分布が実験に比べて均質化されることにより、被覆管温度の予測性に影響を与えている可能性がある。

約 11,000 秒付近の被覆管温度のピーク値については、解析結果が実験結果より数十°C 高めになっている。また、高さ 300mm の場合は実験に見られない急上昇が見られる。これはキャンドリング開始タイミングに関係している。キャンドリング開始タイミングは、燃料棒内で溶融した被覆管による二酸化ウランの溶解速度と、酸化ジルコニウム層による形状維持の限界タイミングに依存しており、後者の酸化ジルコニウム層の破損は振動や流れによる外力の影響が大きい。解析では

2,500K (約 2,227°C) にて溶融ジルカロイによる二酸化ウランの溶解が開始するとともに酸化ジルコニウム層の破損による CANDU ドリング開始をモデル化している。この温度が実験での観察結果より若干高い設定となっており、CANDU ドリング開始タイミングが遅れたため、CANDU ドリングによって酸化反応が阻害されていないことになるが、二酸化ウランの融点 (約 2,800°C) より低い温度で液化するという観点からは妥当であるといえる。

図 4.2-53 及び図 4.2-54 に FP 積算放出割合の解析結果を示す。FP 放出が開始される時間は、解析結果と測定データで良く一致している。これは、被覆管破損が生じる実験開始後約 6,000 秒まで、被覆管温度を良く再現できていることから妥当な結果と考えられる。一方、FP 放出が顕著になる実験開始後約 11,000 秒以降は、測定データが時間とともに一定の割合で増加するのに対し、解析結果は約 0.5 まで急激に増加した後、緩やかな増加を示す。この原因は、解析において燃料温度が測定データに比べて高く予測され、FP の放出が促進されたためと考えられる。

実験終了時の積算放出割合については、解析結果は実験と同程度の 0.8 前後となっているが、図 4.2-53 に示した希ガスの積算放出割合については、解析結果が実験結果を若干上回り、図 4.2-54 に示したよう素の積算放出割合については解析結果が実験結果を若干下回っている。MAAP の解析においては、径方向を 2 チャンネル、軸方向を 11 ノードに分割した各セルでは温度や溶融状況は均一であり、温度分布及び質量移行による空洞化部分は左右対称となる。一方で、実験後の燃料の X 線トモグラフィ (図 4.2-56) では、温度分布及び空洞化部分は左右非対称である。MAAP の炉心モデルは、1 つのチャンネルに多数の燃料棒を含んだ実機の体系を対象としており、本実験のように個々の燃料棒の形態が影響する場合には輻射熱伝達の計算などに誤差が生じやすく、放出割合に若干の差が生じたと推定される。

PHEBUS-FP 実験では、実機の炉心と比較すると小規模な体系を扱っているため、解析における炉心のチャンネル分割方法が結果に影響を及ぼしたと考えられる。

#### (4) 重要現象に関する不確かさの評価

有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいて MAAP の不確かさを評価する。

PHEBUS-FP 実験においては、燃料バンドルの加熱にともなう被覆管温度の上昇、ジルコニウム酸化反応による被覆管温度の急上昇及び炉心溶融といった事象進展の中で、FP 放出の挙動が確認されている。

FP 放出割合の解析結果と測定データの比較から、FP 放出の開始時間を良く再現



できることを確認している。

解析結果と測定データの差異については、実験体系のモデル化が要因の一つと考えられる。PHEBUS-FP 実験では、実機の炉心に比較して小規模な体系を扱っており、個々の燃料棒の形態が大きく影響するが、実機体系では、局所的な挙動による影響は相対的に小さくなるため、この種の不確かさは小さくなると考えられる。

以上のことから、MAAP による解析で得られた FP 放出割合は、PHEBUS-FP 実験における測定データとの比較から妥当であると考えられる。したがって、MAAP は原子炉圧力容器内 FP 挙動及び原子炉格納容器内 FP 挙動に関して、適切なモデルを有していると判断できる。

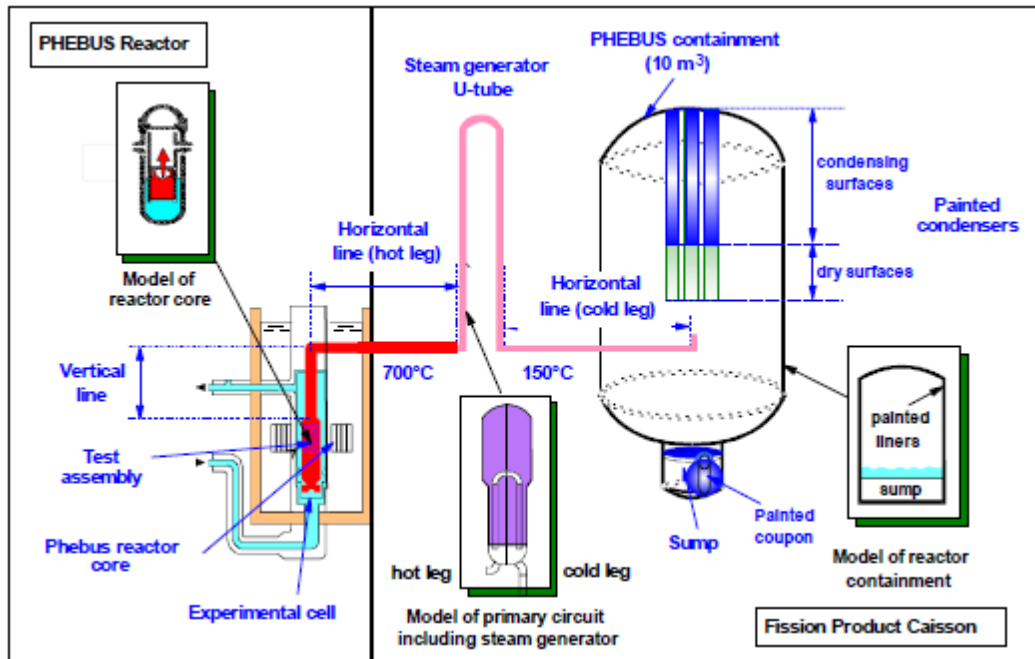


図 4.2-41 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) における設備概要<sup>[21]</sup>

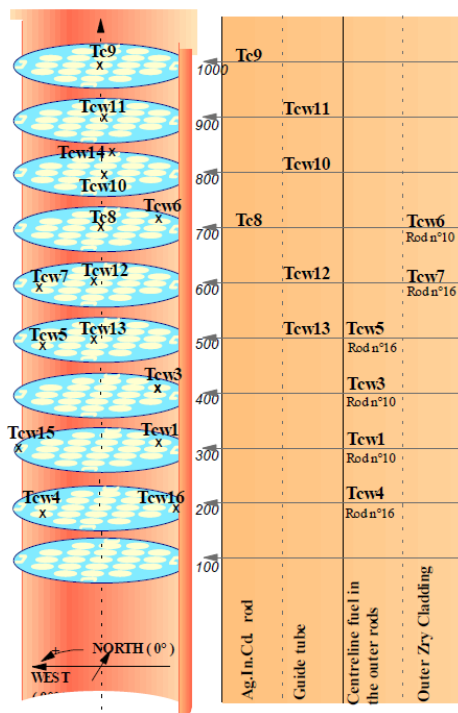


図 4.2-42 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) における炉心部の熱電対位置<sup>[21]</sup>

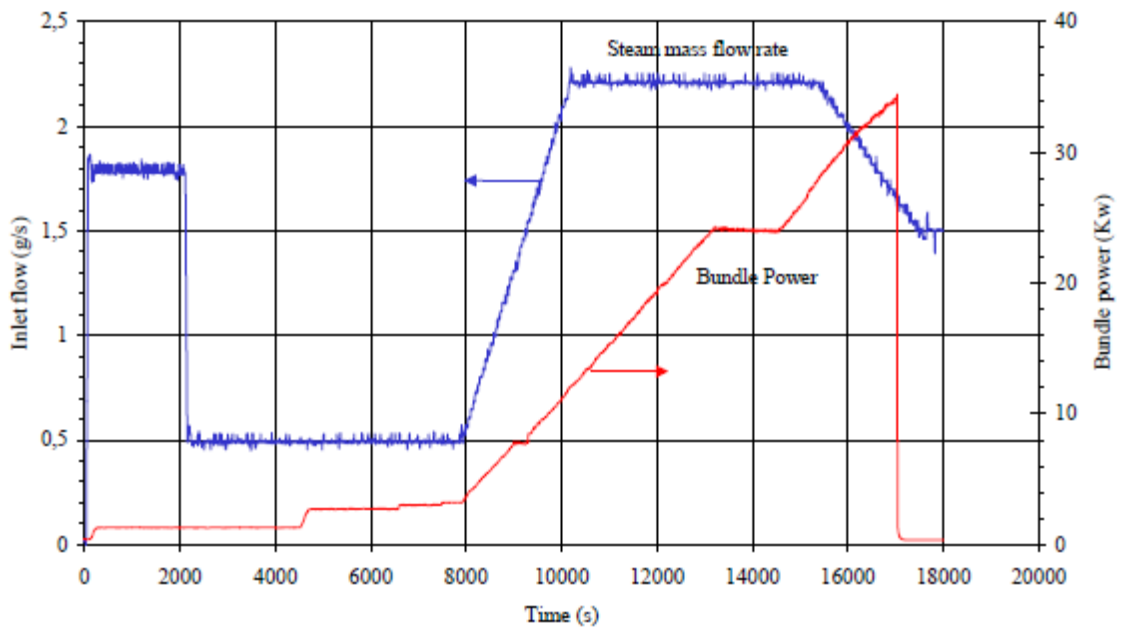


図 4.2-43 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) におけるバンドル出力と蒸気流量<sup>[21]</sup>

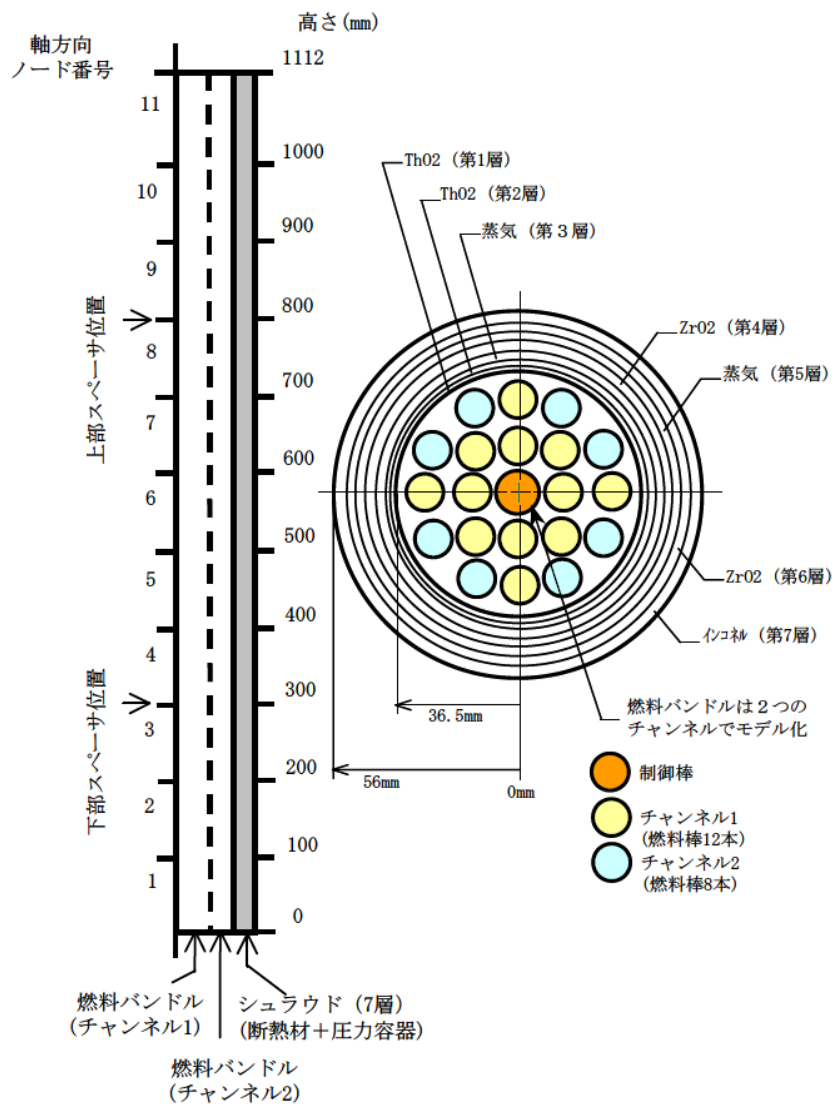


図 4.2-44 PHEBUS-FP 実験解析における炉心（燃料バンドル）モデル<sup>[21]</sup>

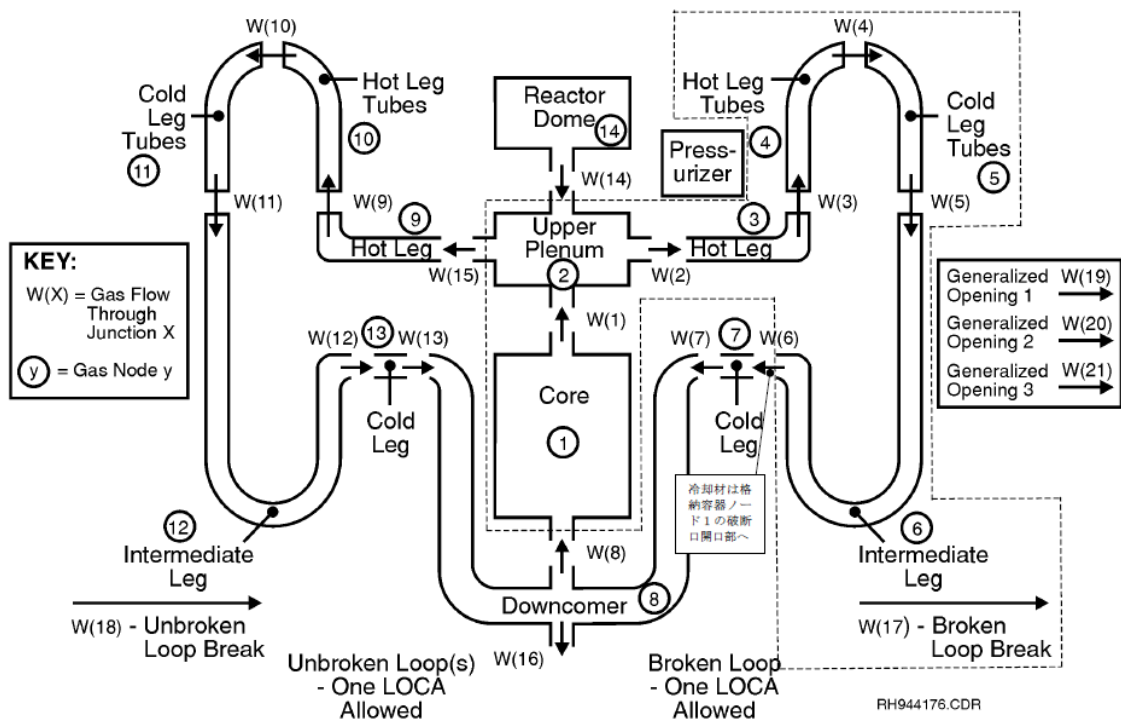


図 4.2-45 PHEBUS-FP 実験解析における 1 次系モデル[21]

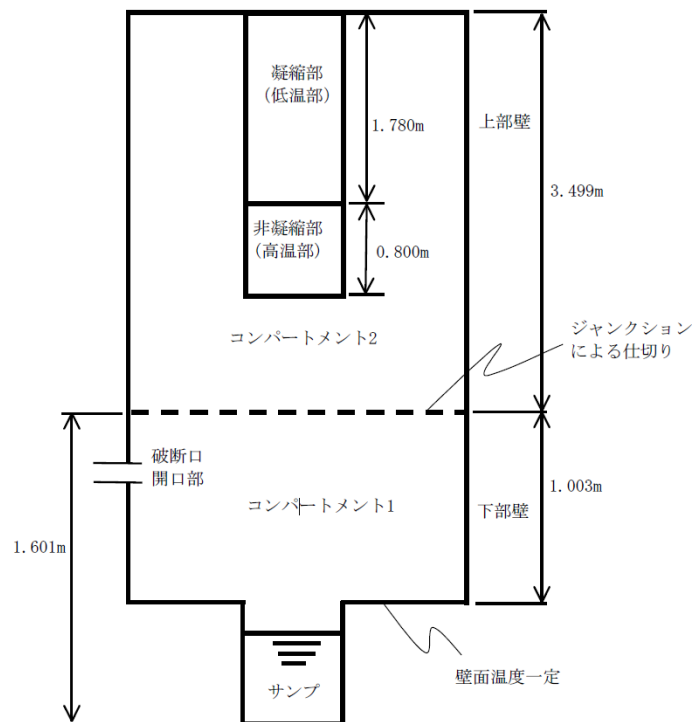


図 4.2-46 PHEBUS-FP 実験解析における格納容器モデル[21]

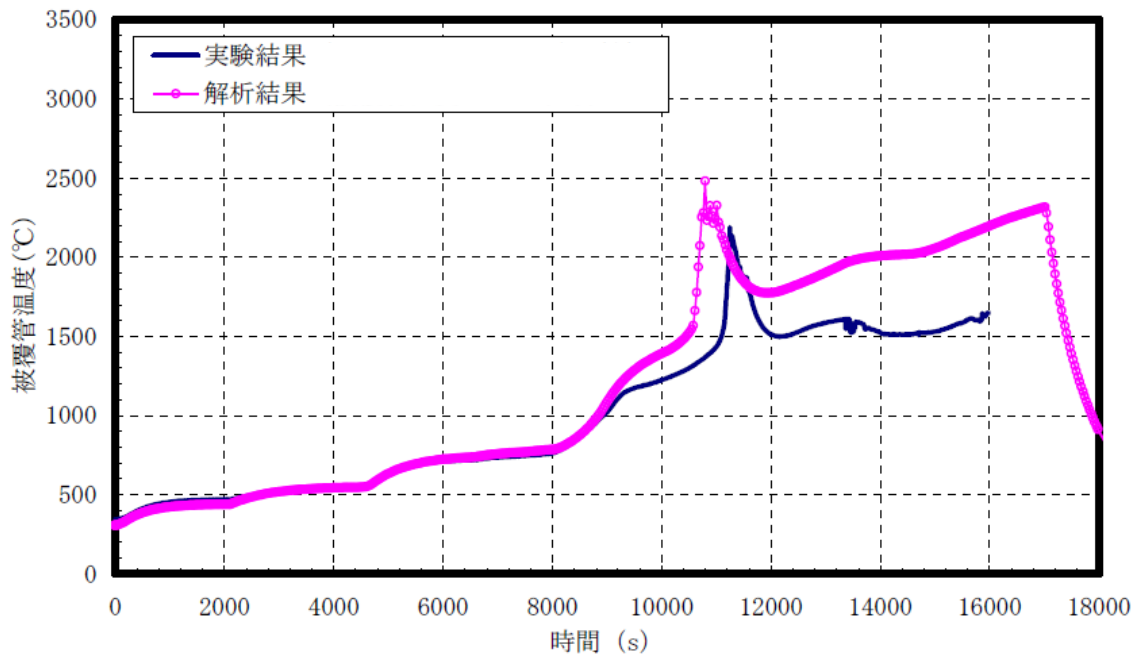


図 4.2-47 PHEBUS-FP 実験の解析結果 (被覆管温度, 下端から 700mm) [21]

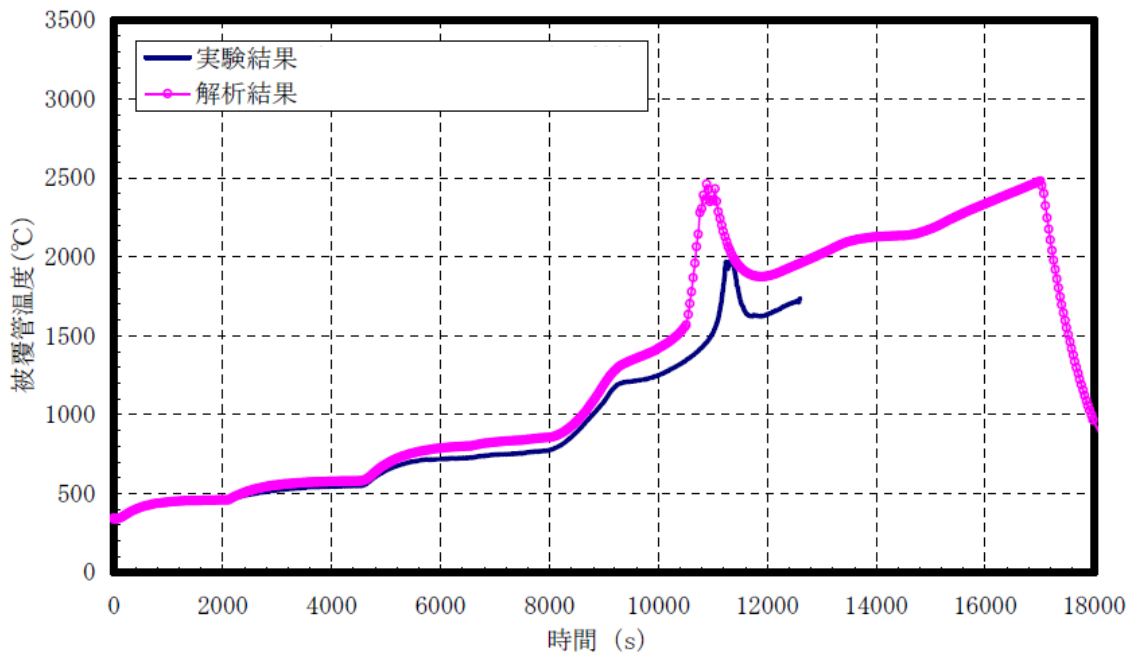


図 4.2-48 PHEBUS-FP 実験の解析結果 (被覆管温度, 下端から 600mm) [21]

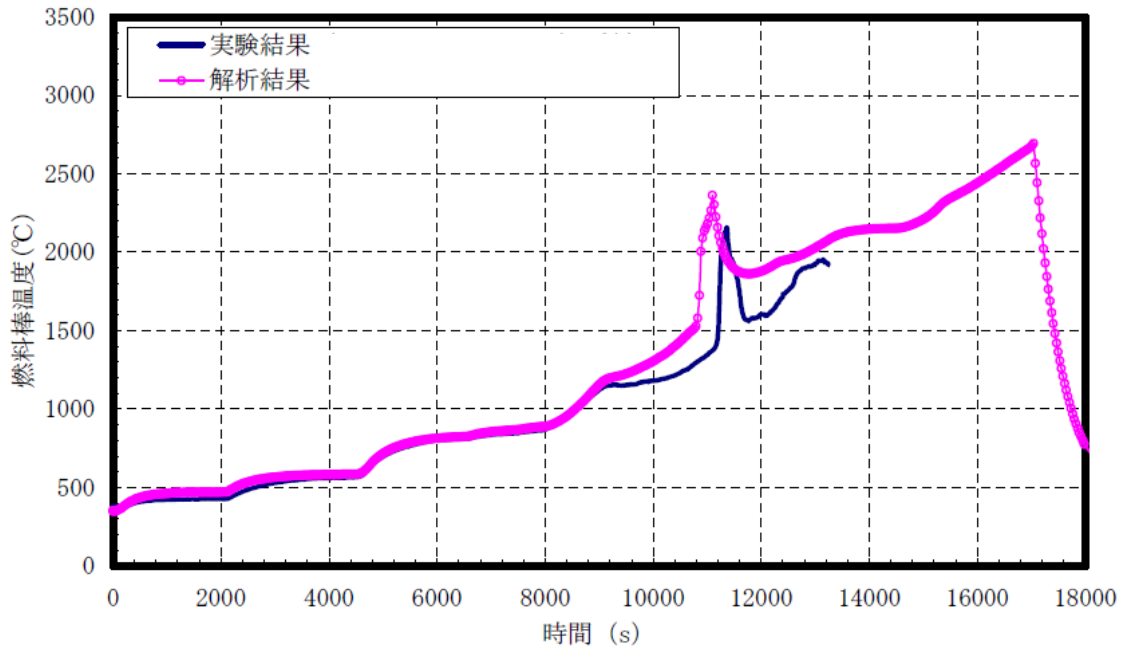


図 4.2-49 PHEBUS-FP 実験の解析結果（被覆管温度，下端から 400mm）<sup>[21]</sup>

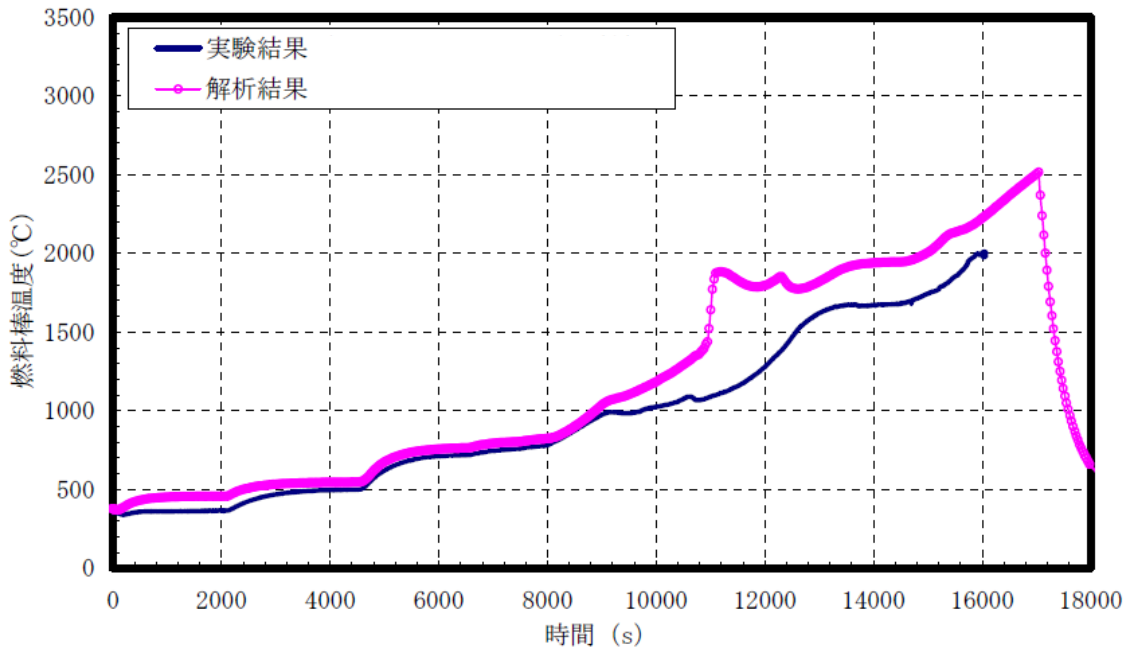


図 4.2-50 PHEBUS-FP 実験の解析結果（被覆管温度，下端から 300mm）<sup>[21]</sup>

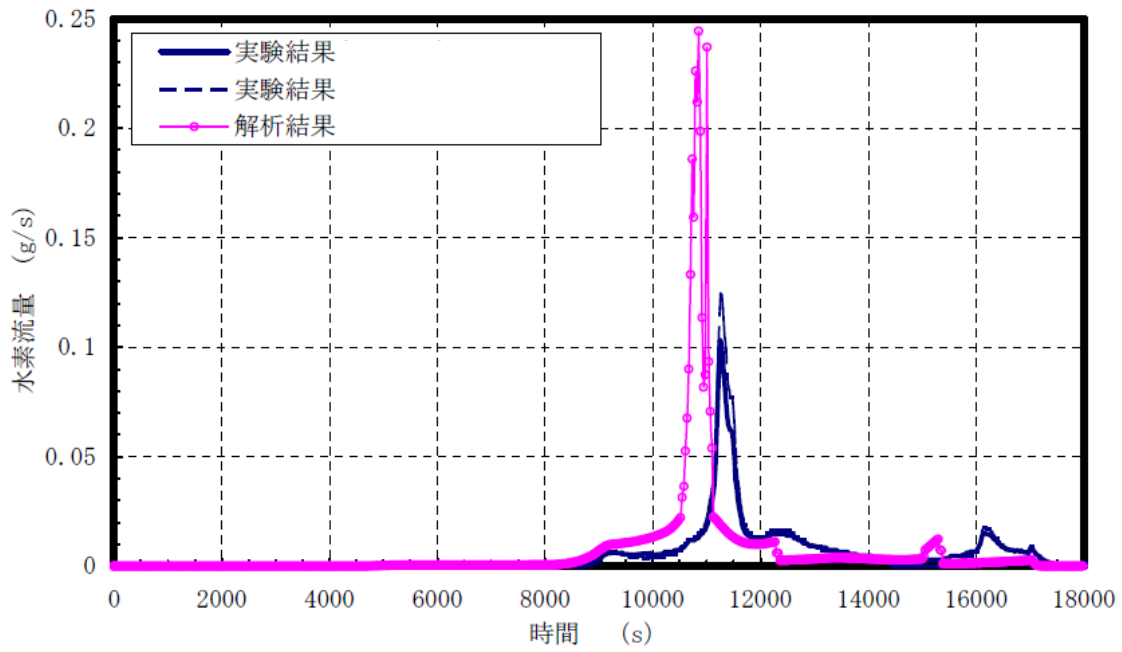


図 4.2-51 PHEBUS-FP 実験の解析結果（水素流量）<sup>[21]</sup>

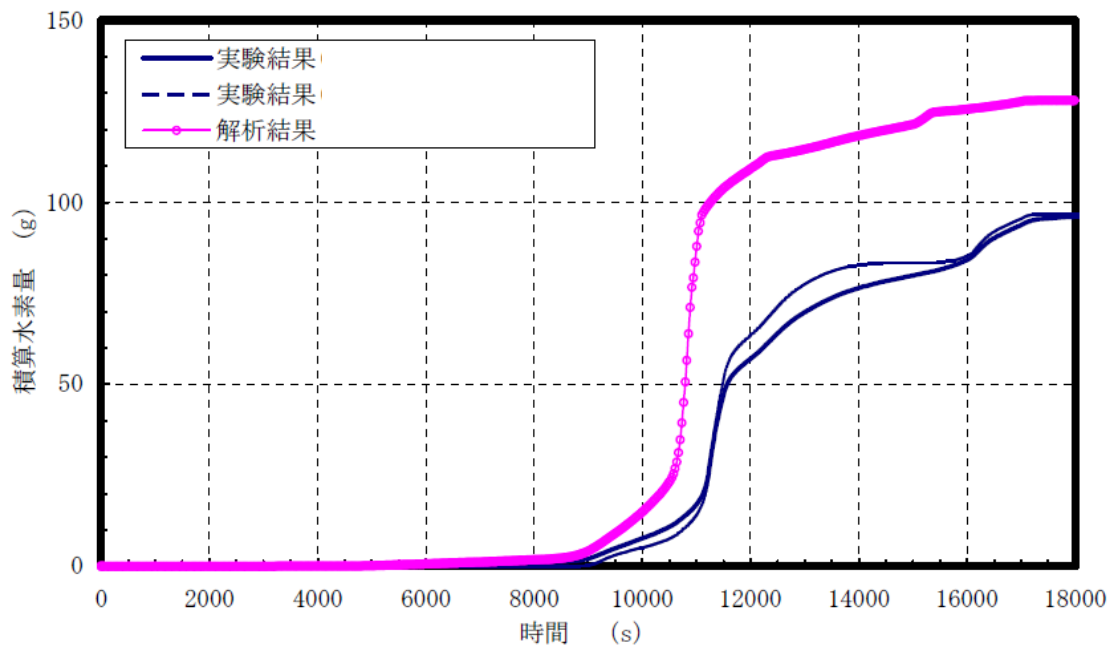


図 4.2-52 PHEBUS-FP 実験の解析結果（積算水素量）<sup>[21]</sup>



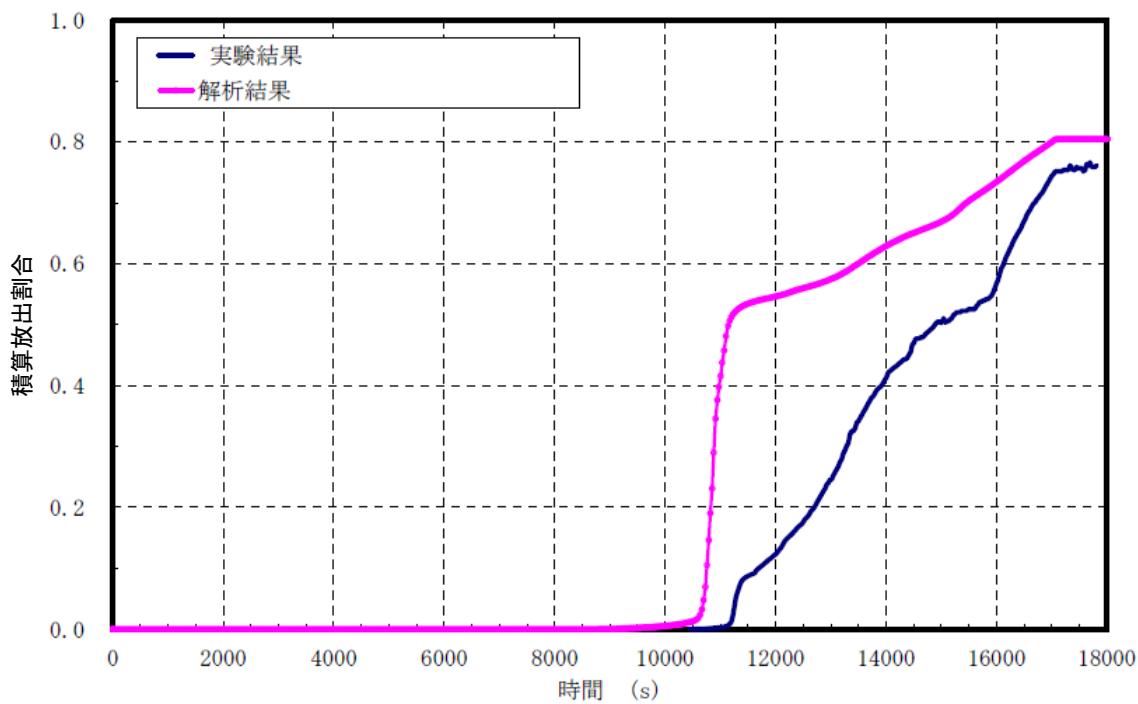


図 4.2-53 PHEBUS-FP 実験の解析結果（希ガス積算放出割合）<sup>[21]</sup>

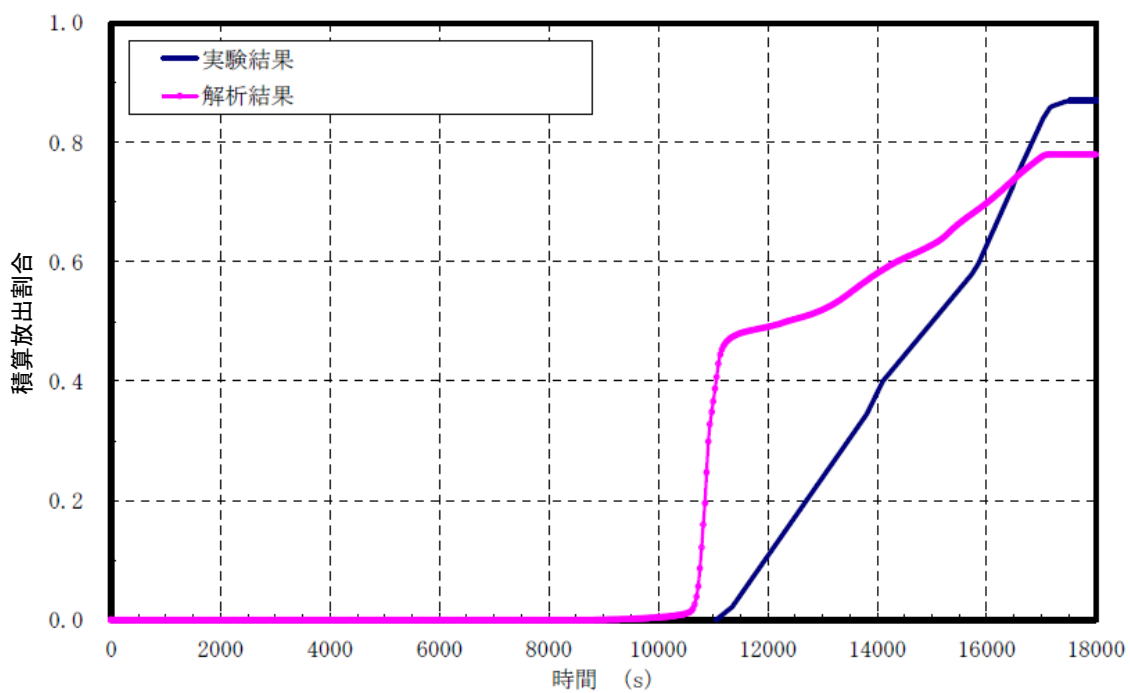


図 4.2-54 PHEBUS-FP 実験の解析結果（よう素積算放出割合）<sup>[21]</sup>

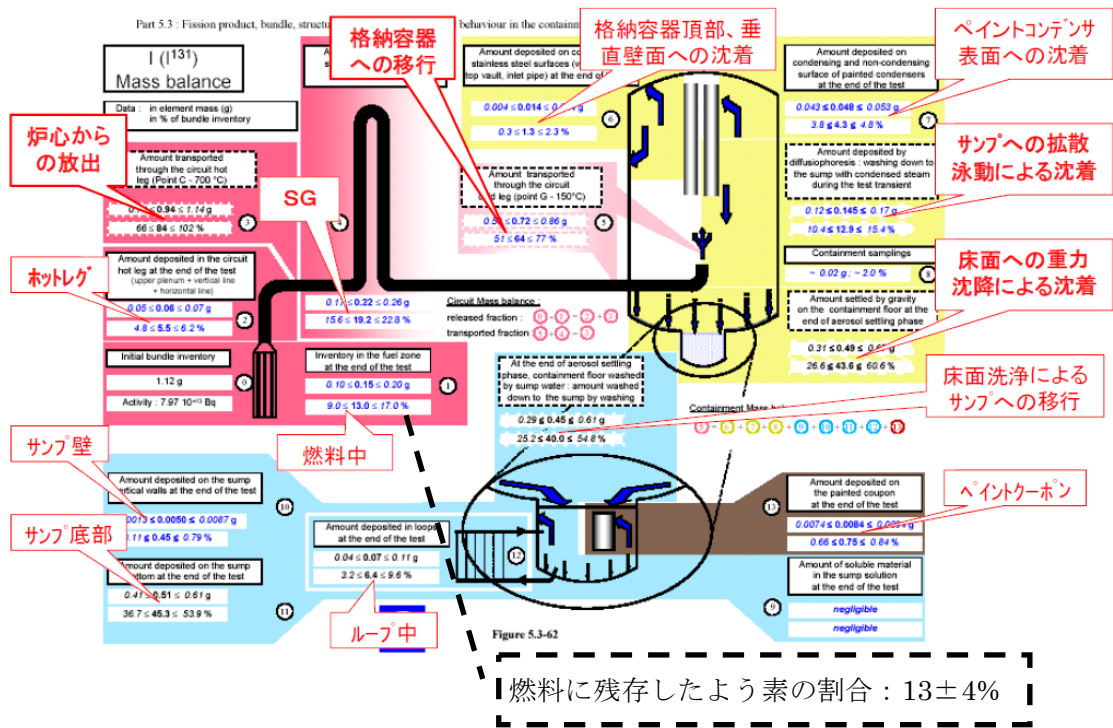


図 4.2-55 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) におけるよう素の回路内マスバランス<sup>[21]</sup>

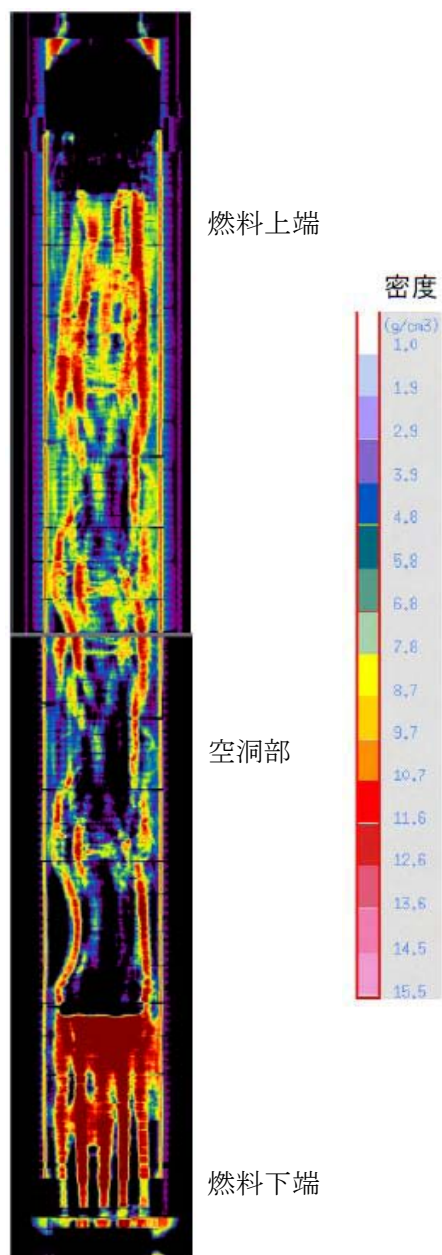


図 4.2-56 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) における燃料バンドルの X 線トモグラフィ<sup>[21]</sup>

#### 4.2.8 ABCOVE 実験解析

##### (1) 実験の概要

米国 Hanford Engineering Developing Laboratory で実施された ABCOVE (AB5) 実験<sup>[22]</sup>では、計算コードの妥当性確認を目的に、エアロゾル挙動に関するデータが取得されている。実験では、図 4.2-57 に示すようにコンクリートピットに設置された容積約 852m<sup>3</sup>の格納容器内にエアロゾルを発生させ、凝集及び沈着にともなう気相中のエアロゾル濃度の減少挙動が調査された。

主な試験条件を表 4.2-7 に示す。エアロゾルは、スプレインノズルから格納容器内に噴出させたナトリウムを燃焼させることにより生成される。実験では、約 223kg のナトリウムが約 872 秒間スプレイされ、全てのナトリウムが酸化ナトリウム約 60%、水酸化ナトリウム約 40% から成るエアロゾルに変化している。エアロゾルの濃度はエアロゾルの生成にともなって増大し、スプレイ開始後約 383 秒で最大となり、約  $1.7 \times 10^{-4}$  g/cc (約 170g/m<sup>3</sup>) に到達した。エアロゾル生成が継続する約 900 秒後まで高い濃度が維持され、その後は凝集及び重力沈降によって約 10<sup>5</sup> 秒後には約  $5 \times 10^{-9}$  g/cc 程度にまで減少している。

##### (2) 解析条件

AB-5 実験におけるエアロゾル特性及び実験体系を考慮し、エアロゾル濃度の推移を解析している。なお、MAAP の解析手法とは異なる数値解についてもあわせて評価している。

##### (3) 解析結果

MAAP によるエアロゾル濃度の解析結果を測定データと比較して図 4.2-58 に示す。MAAP による解析結果は測定データの挙動を良く再現できている。

##### (4) 重要現象に関する不確かさの検討

有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいて MAAP の不確かさを評価する。

高温の炉心から格納容器にガス状で放出された揮発性 FP は、気相中で冷却されエアロゾルを形成する。エアロゾル粒子が凝集して粒子径が大きくなると、重力沈降等によって気相中から格納容器内の構造材表面へ移動することにより、気相中の FP 濃度が低下する。MAAP ではこれらの格納容器内エアロゾル挙動を良く模擬できている。

MAAP による解析で得られたエアロゾル濃度は、ABCOVE (AB5) 実験における測定データとの比較から妥当であると考えられる。したがって、MAAP は原子炉格納容器内 FP 挙動に関して、適切なモデルを有していると判断できる。

表 4.2-7 ABCOVE 実験 (AB5) の主要な条件<sup>[23]</sup>

|           |                    |
|-----------|--------------------|
| 格納容器直径    | 7.62 m             |
| 格納容器高さ    | 20.3 m             |
| 格納容器体積    | 852 m <sup>3</sup> |
| 初期酸素濃度    | 23.3 %             |
| 初期温度      | 302.25 K           |
| 初期圧力      | 0.122 MPa          |
| Na スプレー流量 | 256 g/s            |
| スプレー期間    | 試験開始後 13~885 秒     |
| エアロゾル生成速度 | 445 g/s            |
| 生成粒子の平均半径 | 0.25 μm            |

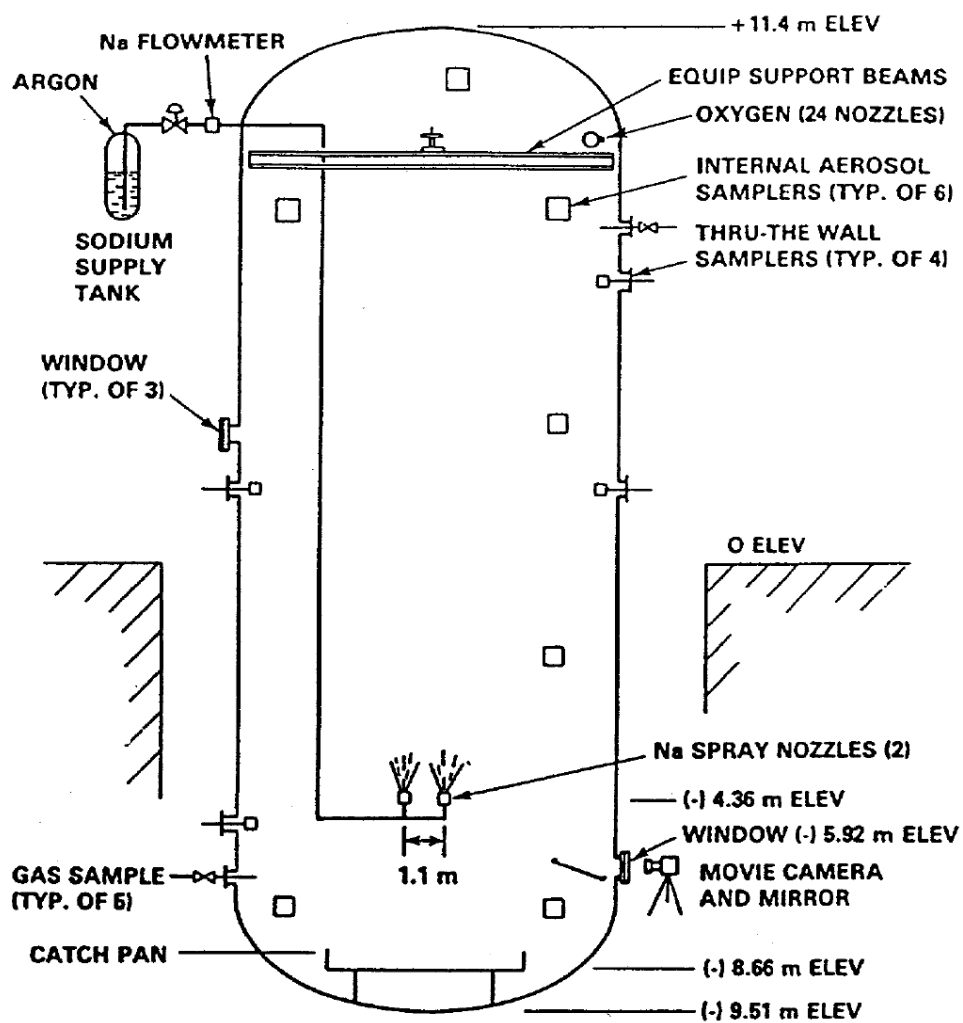
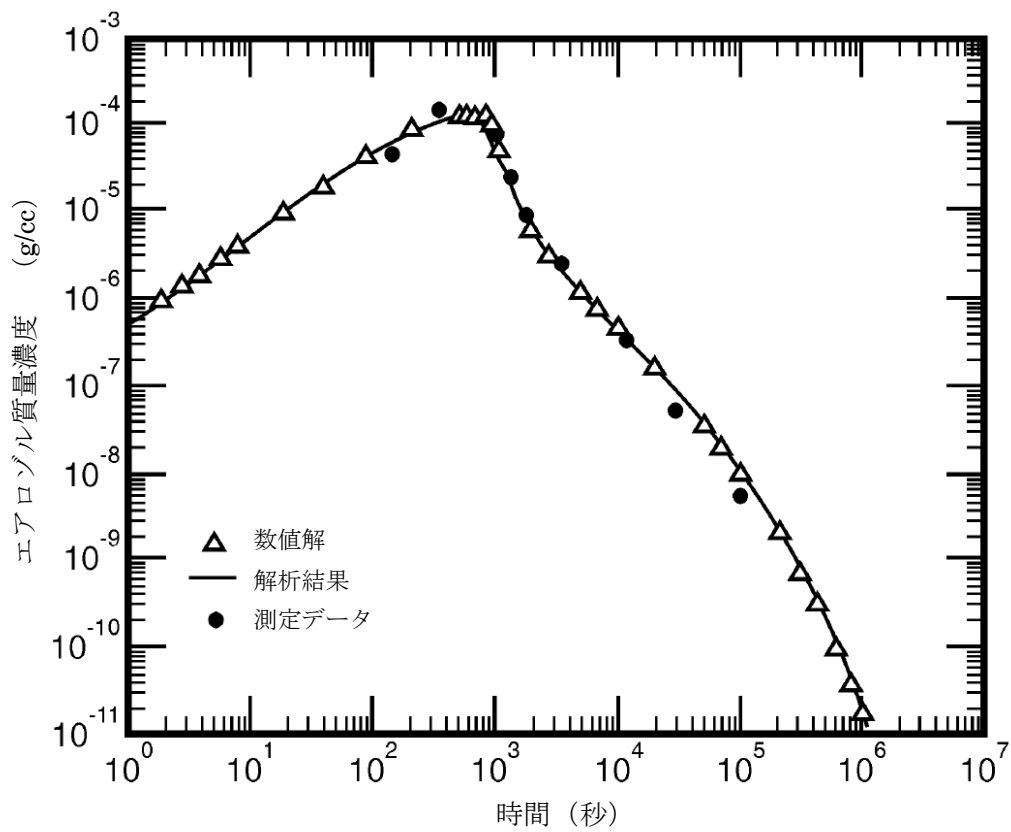


図 4.2-57 ABCOVE 実験 (AB5) における装置概要<sup>[23]</sup>



出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

図 4.2-58 ABCOVE 実験解析結果 (エアロゾル質量濃度)

#### 4.3 妥当性確認（感度解析）

##### 4.3.1 沸騰・ボイド率変化，気液分離（水位変化）・対向流〔炉心（熱流動）〕

炉心の「沸騰・ボイド率変化」及び「気液分離（水位変化）・対向流」については，原子炉圧力容器内水位に関係する現象である。

炉心損傷防止対策の事故シーケンスにおいては，対象とする原子炉水位といった原子炉圧力容器内挙動は SAFER コードによって評価されており，MAAP コードは格納容器内挙動の評価のみに用いられているが，格納容器破損防止対策の事故シーケンスにおいては，MAAP コードによって，原子炉圧力容器内挙動を含めた全体挙動を評価している。原子炉水位は炉心冷却状態及び炉心溶融進展への影響が考えられるため，原子炉水位について SAFER コードと比較を行い，不確かさを確認する。

##### (1) 解析条件

SAFER コードは，原子炉内熱水力過渡変化及び炉心ヒートアップを解析するコードであり，原子炉圧力容器に接続する各種一次系配管の破断事故，原子炉冷却材流量の喪失事故，原子炉冷却材保有量の異常な変化等を取り扱うことができる。また，SAFER コードは，MAAP コードと比較し原子炉圧力容器内のモデルが精緻であり，上部タイププレート及び炉心入口オリフィス等での気液対向流制限現象（CCFL 現象）及び炉心上部プレナムにおけるサブクール域の局在化により冷却材が炉心下部プレナムに落水する現象（CCFL ブレークダウン現象）などを考慮することができる。

SAFER コードは炉心損傷防止対策における事故シーケンスグループのうち以下の 6 グループで使用され，原子炉圧力，原子炉水位，燃料被覆管温度等の評価に使用されている。

- ・ 高圧・低圧注水機能喪失
- ・ 高圧注水・減圧機能喪失
- ・ 全交流動力電源喪失
- ・ 崩壊熱除去機能喪失
- ・ LOCA 時注水機能喪失（中小破断 LOCA）
- ・ 格納容器バイパス（インターフェイスシステム LOCA）

そこで，これらのシーケンスグループのうち，原子炉水位の低下が比較的緩慢な「高圧注水・減圧機能喪失」（以下，TQUX シーケンス）及び比較的速い「LOCA 時注水機能喪失（中小破断 LOCA）」（以下，中小破断 LOCA シーケンス）の 2 グループを対象として比較評価を行った。

##### (2) 解析結果

原子炉水位について，原子炉圧力容器内挙動をより精緻に評価可能な SAFER コード



との比較を通じて確認した。BWR-5, Mark-I 改良型格納容器プラントを例とし、炉心損傷防止対策の有効性評価で評価している TQUX シーケンス及び中小破断 LOCA シーケンスを対象とした。

#### A) TQUX シーケンス

解析結果を図 4.3-1 に示す。SAFER コード, MAAP コードとも給水流量の全喪失に伴い原子炉水位は急速に低下する。初期値が異なるのは、上部プレナムノードの定義の違いによる。すなわち、SAFER コードは気水分離器第一段上端までとしているのに対し、MAAP コードでは気水分離器の上端までとしているためである。原子炉水位低（レベル 1）に到達して 10 分後に作動する原子炉代替減圧系による急速減圧開始時刻は、約 4 分の差異が生じている。また、SAFER コードでは急速減圧後の水位上昇が大きく評価され、その後の蒸気流出の継続による水位低下が顕著に確認される。また、急速減圧後、SAFER コードでは炉心入口での CCFL の発生により炉心から下部プレナムへの落下水量が抑えられるため、炉心水位は MAAP コードよりも高めとなる。MAAP コードでは、有効燃料棒底部まで低下しており、その後の低圧注入による注水による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻は約 4 分 MAAP コードの方が遅くなる。

#### B) 中小破断 LOCA シーケンス

解析結果を図 4.3-2 に示す。5cm<sup>2</sup>の破損を想定するとともに、給水流量の全喪失に伴い原子炉水位は急速に低下する。TQUX シーケンスと同様、上部プレナム内の水位の初期値は異なる。25 分後の急速減圧と注水開始以降は、TQUX シーケンスとほぼ同様な傾向を示す。MAAP コードでは、炉心入口の CCFL を考慮していないために水位低下幅は SAFER コードよりも大きく、その後の補給水系の注水による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻は約 2 分早い。

### (3) まとめ

原子炉水位変化について、原子炉圧力容器内挙動をより精緻に評価可能な SAFER コードと比較を行った。CCFL の取り扱い等により水位変化に差異が生じたが、水位低下幅は MAAP コードの方が保守的であり、その後の注水操作による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻に関しては、TQUX シーケンス、中小破断 LOCA シーケンスとも SAFER コードとの差異は小さく、短期的な挙動をよく模擬できており、崩壊熱の影響が支配的となる長期的な挙動を評価対象とした、有効性評価における格納容器挙動評価への適用性に問題は無いと判断した。

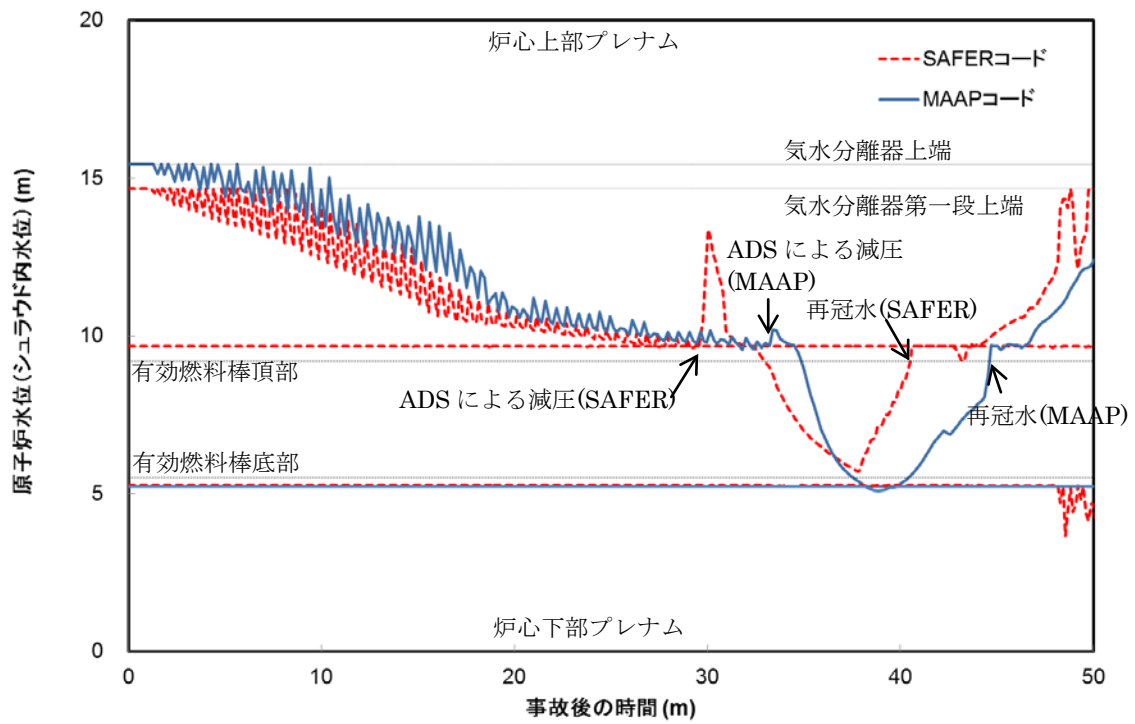


図4.3-1 原子炉水位に関するコード間比較 (TQUXシーケンス)

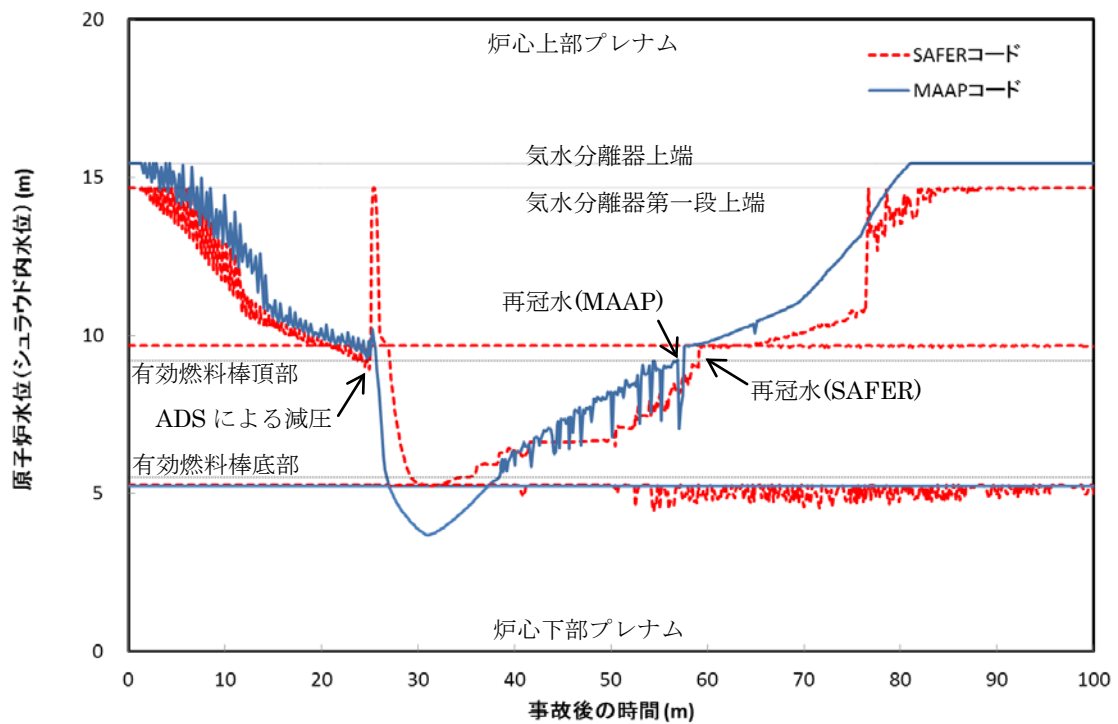


図4.3-2 原子炉水位に関するコード間比較 (中小破断LOCAシーケンス)

#### 4.3.2 炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化，燃料棒表面熱伝達，燃料被覆管酸化，被覆管変形 [炉心（燃料）]

炉心ヒートアップに関する解析モデル（燃料棒内温度変化，燃料棒表面熱伝達，被覆管酸化，被覆管変形）については，4.2.1 に示したように，TMI 事故の分析結果と比較し，妥当な結果が得られている。また，MAAP コードの解析モデルが TMI 事故あるいはその後の検討により得られた知見をもとに開発されていることも踏まえると，MAAP コードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかし，炉心溶融時の実機の挙動に関しては，現段階では十分な知見が得られていない状況であることから，ここでは，炉心ヒートアップに関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により，その影響程度を把握する。

##### (1) 解析条件

原子炉水位が低下すると，燃料表面からの除熱が低下し崩壊熱によって炉心がヒートアップする。その際，被覆管温度が上昇すると崩壊熱にジルコニウム-水反応の酸化発熱反応が加わりヒートアップが加速される。また，炉心ヒートアップの過程で燃料棒内が加圧され被覆管破裂が発生する可能性がある。これらの挙動が炉心ヒートアップ速度に与える影響については十分な知見が得られていないことから，BWR-5，Mark-I 改良型格納容器プラントを例として，炉心ヒートアップ速度に関する感度解析を実施して，その影響程度を確認する。

この感度解析では，ジルコニウム-水反応が一旦開始すると，この反応熱は崩壊熱よりも大きく，ヒートアップに最も寄与することから，ジルコニウム-水反応の速度に着目する。ジルコニウム-水反応速度の感度をみるため，ジルコニウム-水反応の起きる面積を変化させた感度解析を実施する。反応の起きる面積に乗じる係数（ジルコニウム-水反応速度の係数）はジルコニウム-水反応の計算のみに使用され，熱水力挙動の計算に使用される燃料被覆管の直径，長さ等の幾何形状を変えるものではない。この係数を増加させることにより，酸化反応熱の発生速度，水素発生速度，酸化ジルコニウム生成速度が速くなる方向に影響する。これらは炉心溶融進展が速くなる方向へ作用する。この係数は，ベースケースでは燃料被覆管表面積に基づき 1 倍を与えている。これは，ヒートアップ時には燃料被覆管破裂が発生する場合に破裂部の燃料被覆管内面の酸化もあるが，燃料被覆管内面の酸化は，限定された破裂部のみで生じること，炉心形状が健全な状態は溶融過程の比較的短期間であることから，炉心全体が溶融する状況では内面の反応は無視できると考えられることに基づいている。これに対し，感度解析のパラメータの振り幅としては，炉心ヒートアップ速度が速くなる場合の応答の確認として，仮想的な厳しい想定ではあるが，2 倍とする。

| 項目      | ジルコニウム-水<br>反応速度の係数 | 設定根拠               |
|---------|---------------------|--------------------|
| ベースケース  | 1 倍                 | 燃料被覆管表面積に基づく値      |
| 感度解析ケース | 2 倍                 | 燃料被覆管表面積に基づく値の 2 倍 |

## (2) 解析結果

炉心ヒートアップの進展は、炉心領域の冷却材による除熱の効果により差が生じることから、格納容器破損防止対策の有効性評価のうち、「高圧・低圧注水機能喪失（原子炉圧力容器破損）」（以下、TQUV シーケンス）及び「大破断 LOCA 時注水機能喪失（原子炉圧力容器破損）」（以下、大破断 LOCA シーケンス）について、感度解析を実施した。以下に結果を述べる。

### A) TQUV シーケンス（添付 1 に詳細を記載）

解析結果を図 4.3-3 に示す。ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は炉心露出以降に現れる。ヒートアップ時のジルコニウム-水反応速度の係数を 2 倍にしたことで、金属-水反応による酸化反応熱が増加することから、炉心溶融は感度解析ケースにおいて約 5 分早くなっている。原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力はわずかに高くなるが 2.0MPa[gage]以下である。また、格納容器圧力・格納容器雰囲気温度に対しては、酸化反応熱が増加することから、格納容器に放出された熱量の増加によりベースケースより高めになるが、その差はわずかである。

### B) 大破断 LOCA シーケンス

解析結果を図 4.3-4 に示す。大破断 LOCA シーケンスでは、原子炉圧力容器内の冷却材インベントリが急激に減少し除熱が悪化することから、TQUV シーケンスと比較してより早い時間からヒートアップが進展する。感度解析ケースにおいてはヒートアップ時の被覆管表面積を 2 倍にしたが、大破断 LOCA 事象と同時に原子炉冷却材が喪失するため、炉内の限られたインベントリに対する酸化反応は限定的であり、反応表面積を増加した場合の方が炉心溶融までの時間を遅くする。炉心溶融は、感度解析ケースにおいて約 4 分遅くなっている。TQUV シーケンスでは、原子炉圧力容器内の冷却材インベントリの減少がより緩やかであることから、炉心部への蒸気供給が継続される。このため、ヒートアップ時の被覆管表面積の感度は TQUV シーケンスの方が大きくなったものである。

## (3) まとめ

ヒートアップに関してジルコニウム-水反応が促進される場合の影響を確認するため、仮想的な厳しい振り幅ではあるが、ジルコニウム-水反応速度の係数を 2 倍とし

た感度解析を行った。炉心溶融のタイミングについては、TQUV、大破断 LOCA シーケンスのいずれも感度は小さい。また、下部プレナムへのリロケーションの開始時刻は、両シーケンスともベースケースとほとんど同時であり、炉心溶融開始から原子炉圧力容器破損までは 3~4 時間程度の時間があることから、原子炉圧力容器破損時点で原子炉格納容器下部に十分な注水がなされており、実機解析への影響は無い。さらに、TQUV シーケンスでは、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力も 2.0MPa[gage]以下であり、格納容器圧力への影響もわずかとなることから、実機解析への影響は無い。水素発生観点では、感度解析においては被覆管酸化反応熱の増加を想定して仮想的に被覆管表面積（ジルコニウム-水反応速度の係数）を大きくしているものであり、実機の被覆管表面積は形状により決まることから影響しない。また、原子炉圧力容器破損時刻への感度は小さくなく、格納容器下部への注水量に大きな差は生じないことから、コンクリート侵食量への影響は小さいと考えられる。

以上より、有効性評価への適用性に問題は無いと判断した。

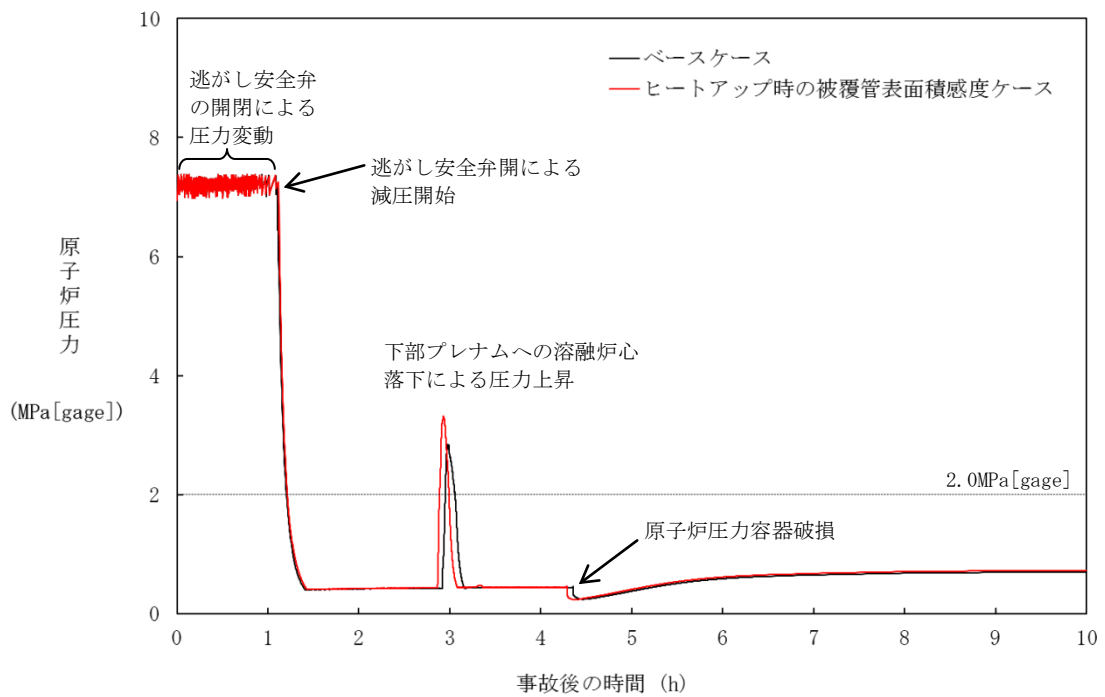
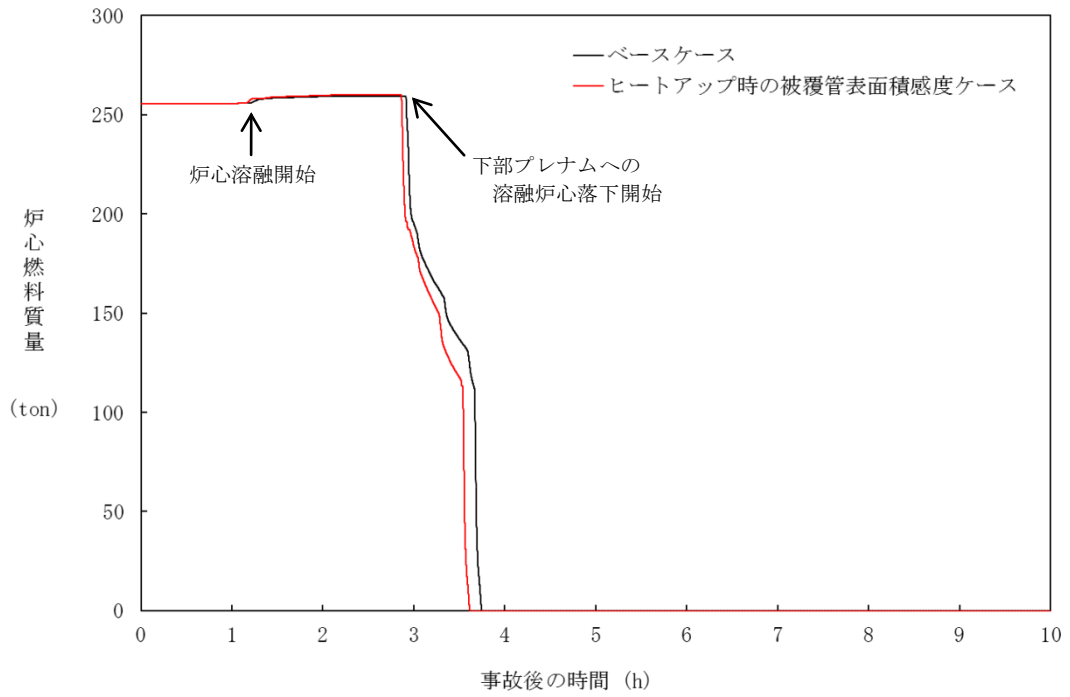


図 4.3-3 炉心ヒートアップに関する感度解析結果 (TQUV シーケンス) (1/2)

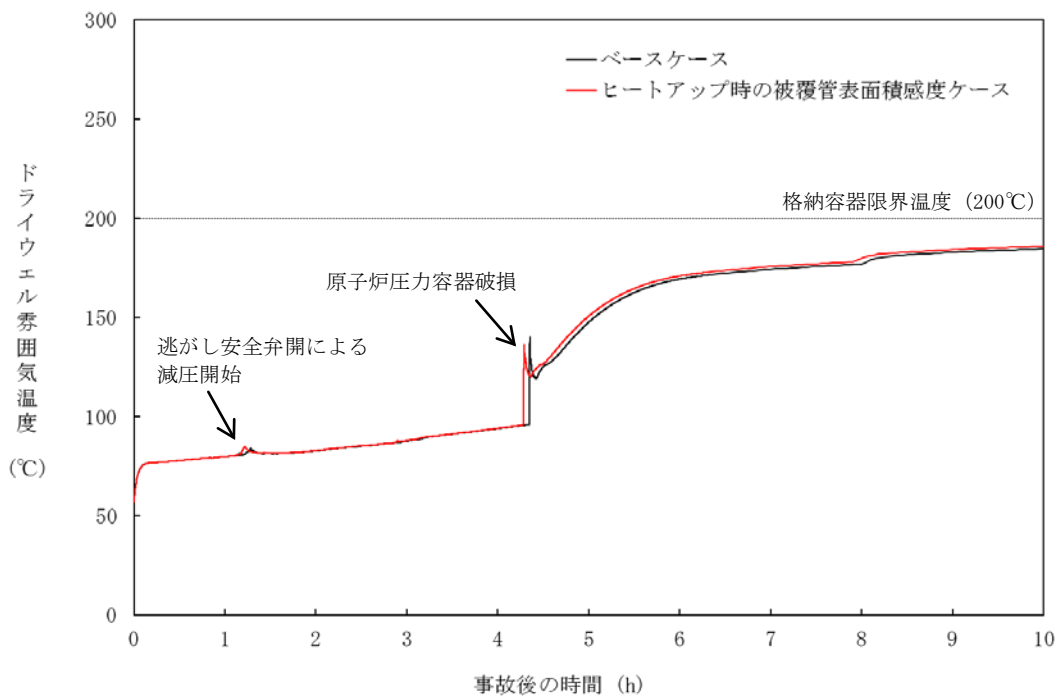
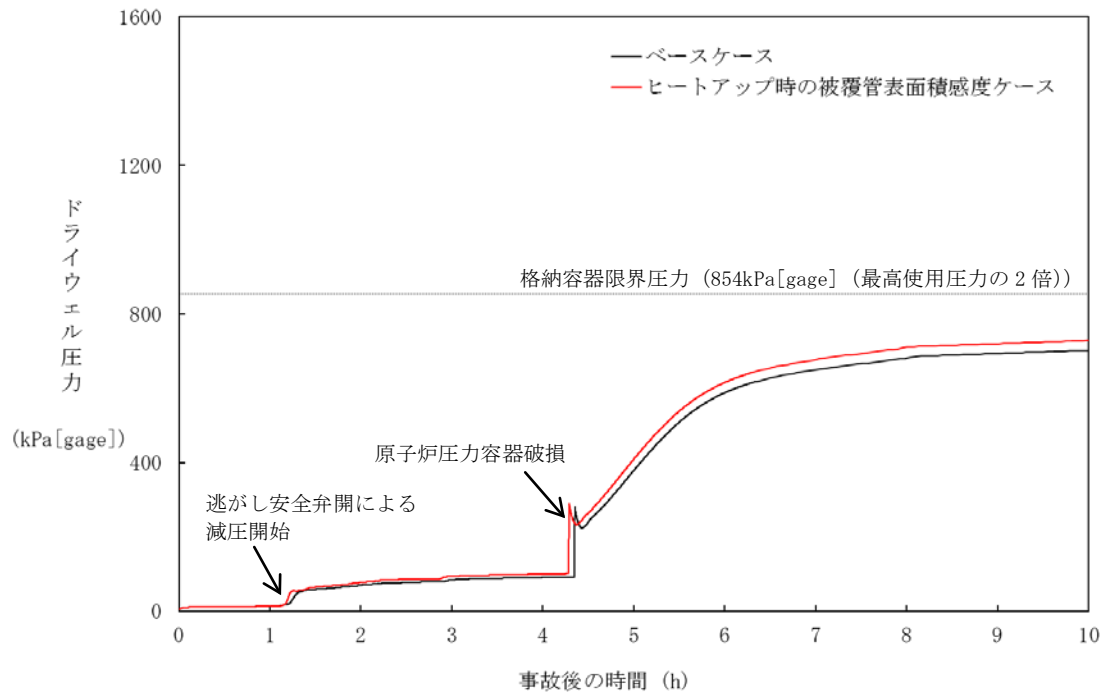


図 4.3-3 炉心ヒートアップに関する感度解析結果 (TQUV シーケンス) (2/2)

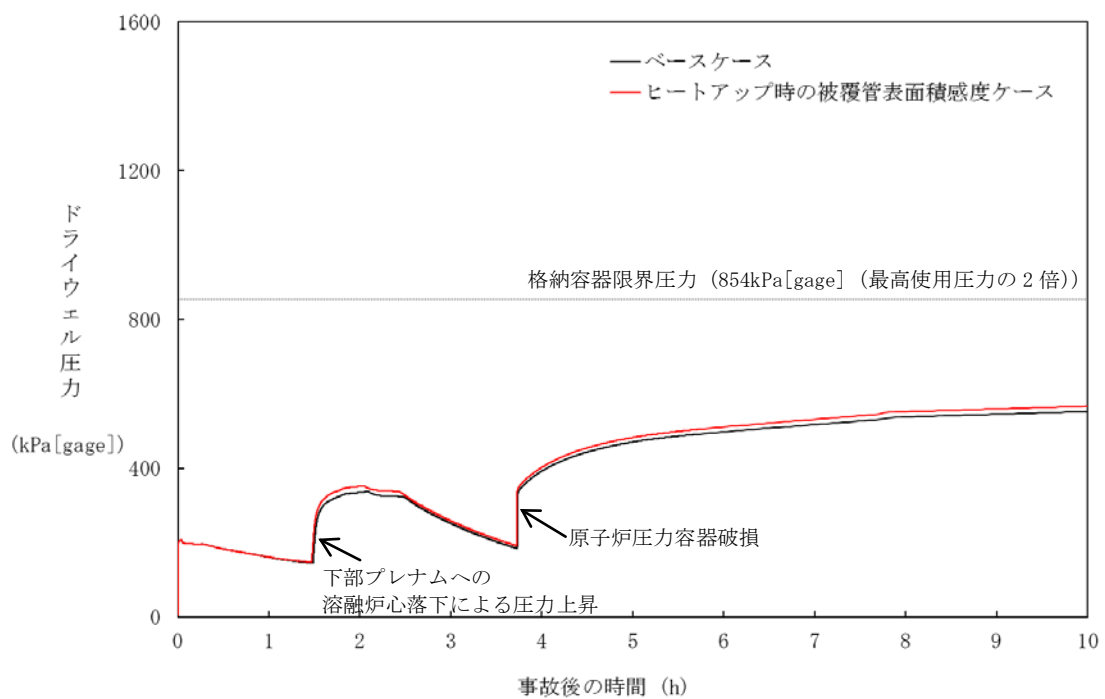
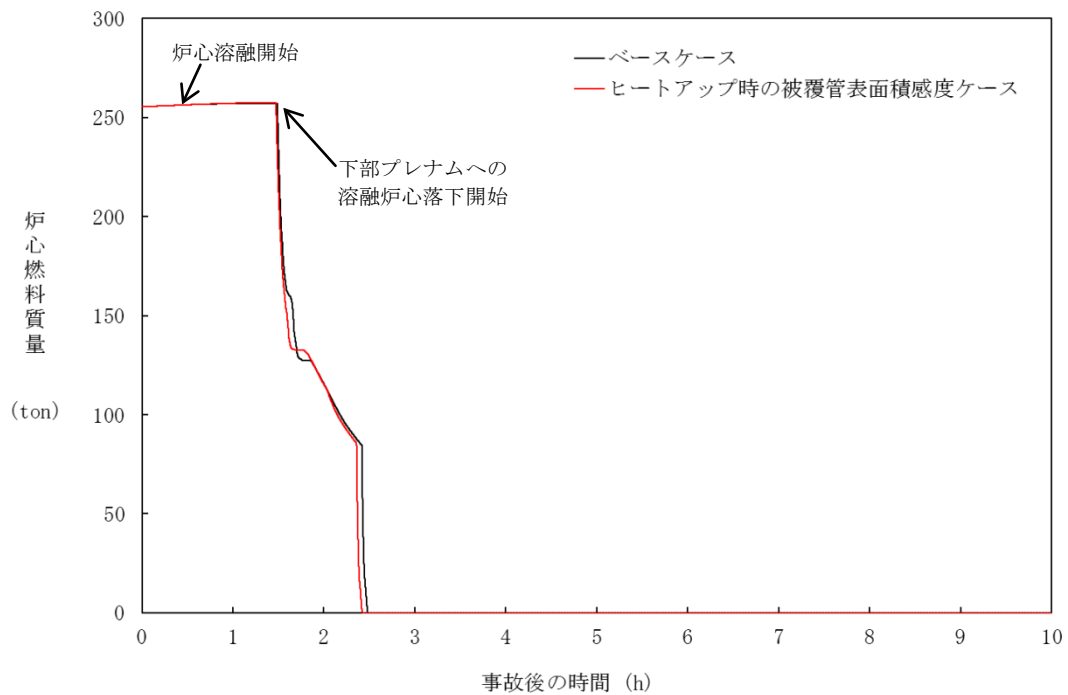


図4.3-4 炉心ヒートアップに関する感度解析結果（大破断LOCAシーケンス）



#### 4.3.3 リロケーション [圧力容器(炉心損傷後)]

炉心のリロケーションに関する解析モデルについては、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果と比較し、妥当な結果が得られている。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故あるいはその後の検討により得られた知見をもとに開発されていることも踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかし、炉心熔融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、炉心のリロケーションに関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により、その影響程度を把握する。

##### (1) 解析条件

炉心がヒートアップすると、燃料が自立した状態から、燃料が崩壊した状態となる。燃料が崩壊すると、燃料が自立した状態に比べて水蒸気による冷却が困難となり、熔融状態へ至る事象進展が早くなる。MAAPコードでは、炉心温度と破損時間の関係を整理したLarson-Millerパラメータを利用して、炉心ノード崩壊の判定を行っており、この条件がリロケーションに与える影響については十分な知見が得られていないことから、BWR-5、Mark-I改良型格納容器プラントを例として、燃料崩壊によるリロケーションに関する感度解析を実施して、その影響程度を確認する。

ベースケースでは、炉心ノードの崩壊について、炉心ノード温度 [ ]K と [ ]時間の関係からLarson-Millerパラメータを設定しているが、感度解析では、さらに炉心ノードの崩壊が早く進むことを想定し、炉心ノード温度 [ ]K と [ ]時間（あるいは [ ]K で [ ]秒）からLarson-Millerパラメータを設定した場合の影響を確認する。これは、炉心ノード崩壊のパラメータを [ ]K 低くするものであり、炉心ヒートアップ時の燃料及び被覆管の融点は精度よく予測できるため、 [ ]K 低く評価することは実現象に対しては仮想的かつ厳しいものであるが、リロケーションが早く進む場合の影響の把握を目的としたものである。なお、実際には炉心ノードの温度履歴に応じて、炉心ノードが崩壊するまでの時間を計算している。

| 項目      | 炉心ノード崩壊のパラメータ (炉心温度) | 設定根拠                  |
|---------|----------------------|-----------------------|
| ベースケース  | [ ]K                 | 当該変数設定範囲のノミナル値        |
| 感度解析ケース | [ ]K                 | 炉心ノードが崩壊する時間を早めるように設定 |

## (2) 解析結果

炉心のリロケーションは、炉心領域の冷却材が失われ、崩壊熱及び被覆管酸化反応により燃料温度が上昇して発生するが、TQUV シーケンスと大破断 LOCA シーケンスについて、感度解析を実施した。以下に結果を述べる。

### A) TQUV シーケンス（添付 1 に詳細を記載）

解析結果を図 4.3-5 に示す。ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は炉心露出以降に現れる。感度解析ケースにおいては、炉心ノードが崩壊する判定を厳しくしたことで、より早期に炉心ノードの崩壊及び炉心溶融が進展することになるものの、その影響は限定的であり、事象全体の進展に大きな影響は無い。原子炉压力容器破損時刻に関してもほぼ同時刻である。このときの原子炉圧力は、ベースケースとほぼ同じであり、2.0MPa[gage]以下である。また、格納容器圧力に対しても、到達する圧力や温度の差はわずかである。

### B) 大破断 LOCA シーケンス

解析結果を図 4.3-6 に示す。大破断 LOCA シーケンスでは、原子炉压力容器内のインベントリが減少し除熱が悪化することから炉心のヒートアップが促進され、TQUV シーケンスと比較して早い時間でリロケーションが進展する。感度解析ケースにおいては、炉心ノードが崩壊する判定を厳しくしたことで、より早期に炉心ノードの崩壊及び炉心溶融が進展することになるものの、TQUV シーケンスと同様、事象全体の進展に大きな影響は無い。また、格納容器圧力に対しても、到達する圧力や温度の差はわずかである。

## (3) まとめ

リロケーションが早く進む場合の確認として、非常に厳しい条件ながら、炉心ノード崩壊の判定温度を低下させた感度解析を行った。炉心溶融のタイミングについては、TQUV、大破断 LOCA シーケンスのいずれも感度は小さい。なお、原子炉压力容器破損の時点についても両シーケンスで感度はなく、実機解析への影響は無い。さらに、原子炉压力容器破損時の原子炉圧力も 2.0MPa[gage]以下であり、実機解析への影響は無い。コンクリート侵食量については、原子炉压力容器破損時刻への感度は大きくなく、格納容器下部への注水量に大きな差は生じないことから、影響は小さいと考えられる。

以上より、有効性評価への適用性に問題は無いと判断した。

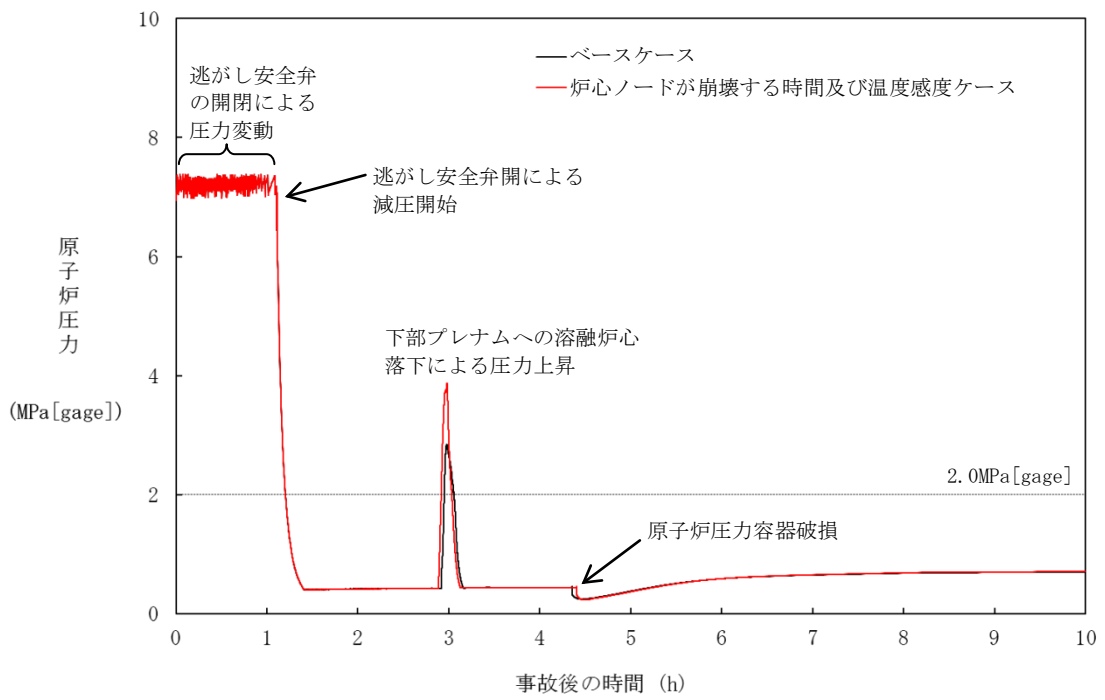
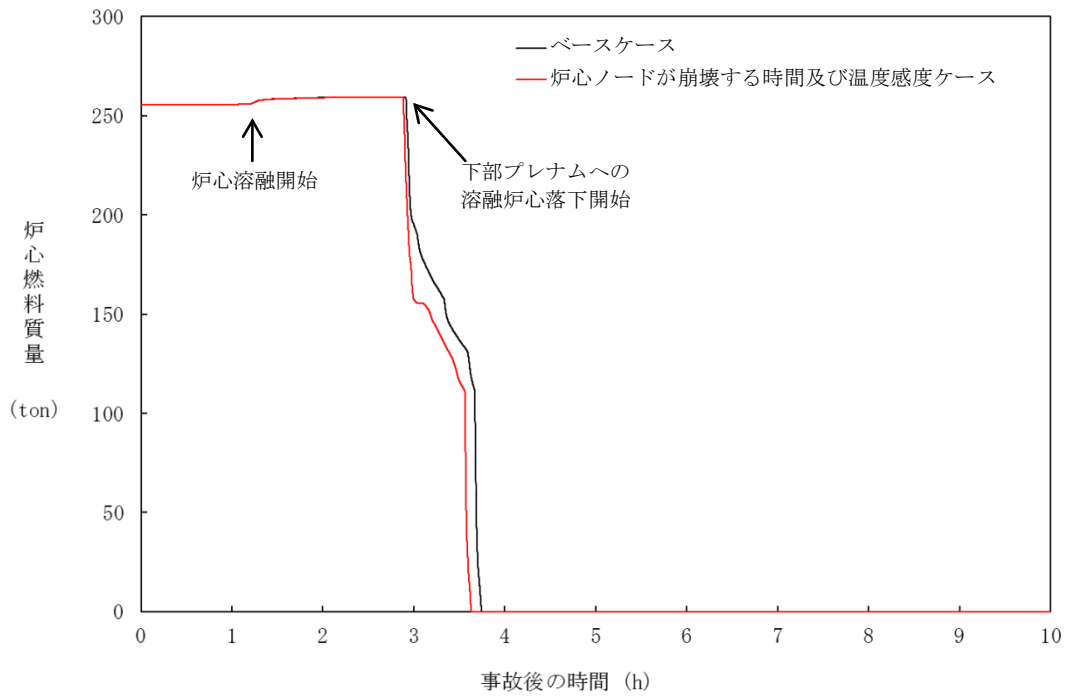


図 4.3-5 リロケーションに関する感度解析結果 (TQUV シーケンス) (1/2)

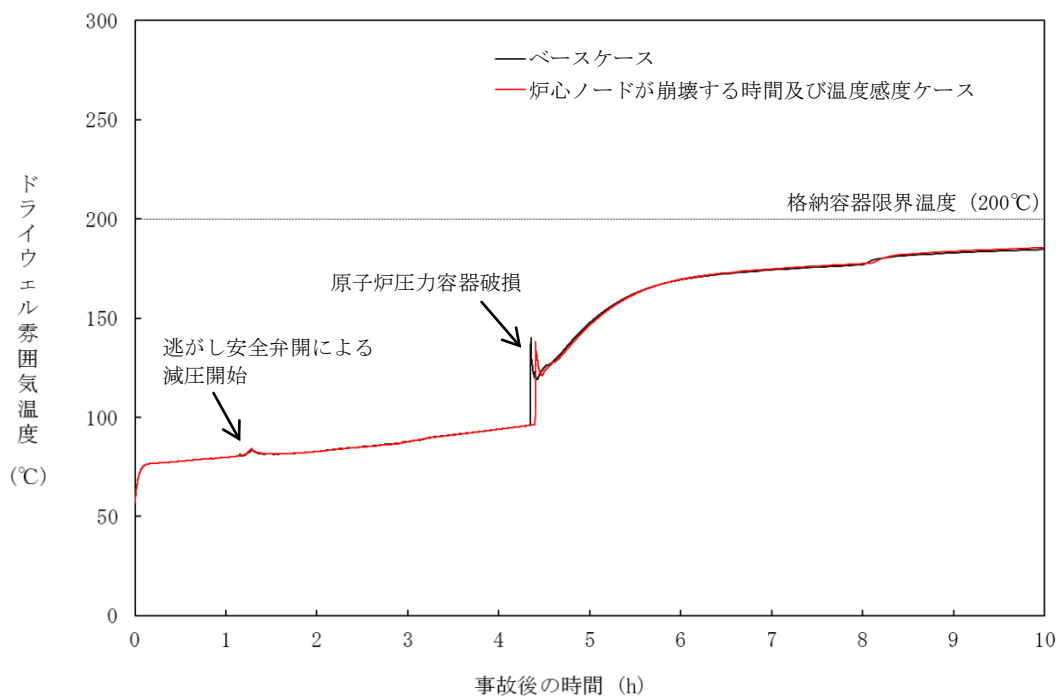
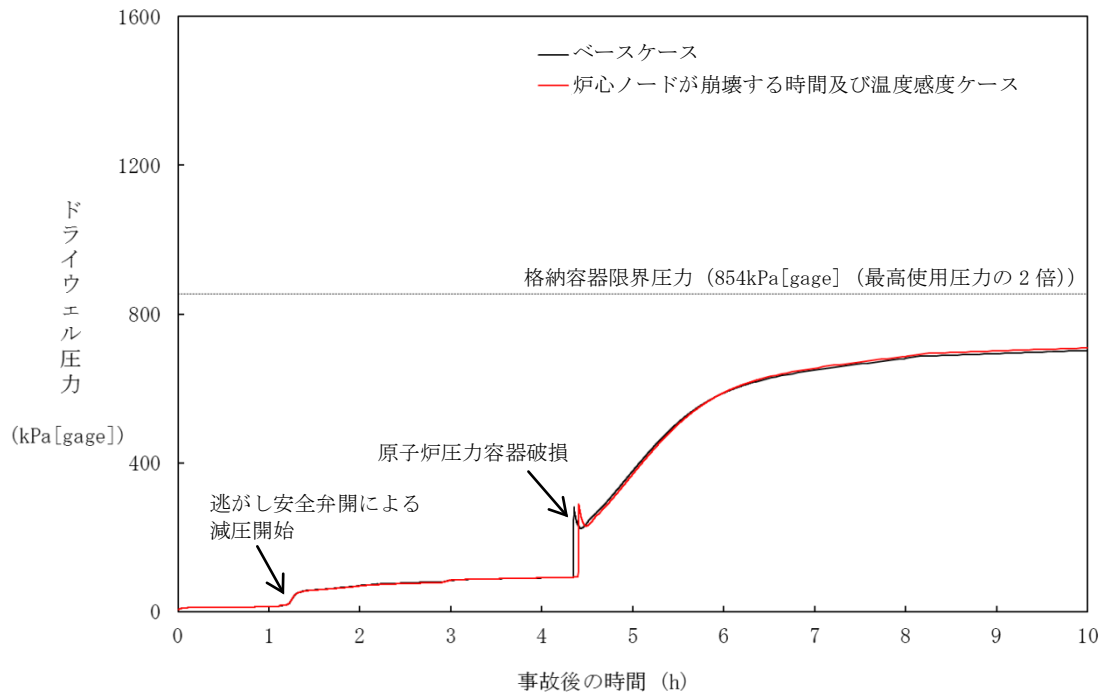


図 4.3-5 リロケーションに関する感度解析結果 (TQUV シーケンス) (2/2)

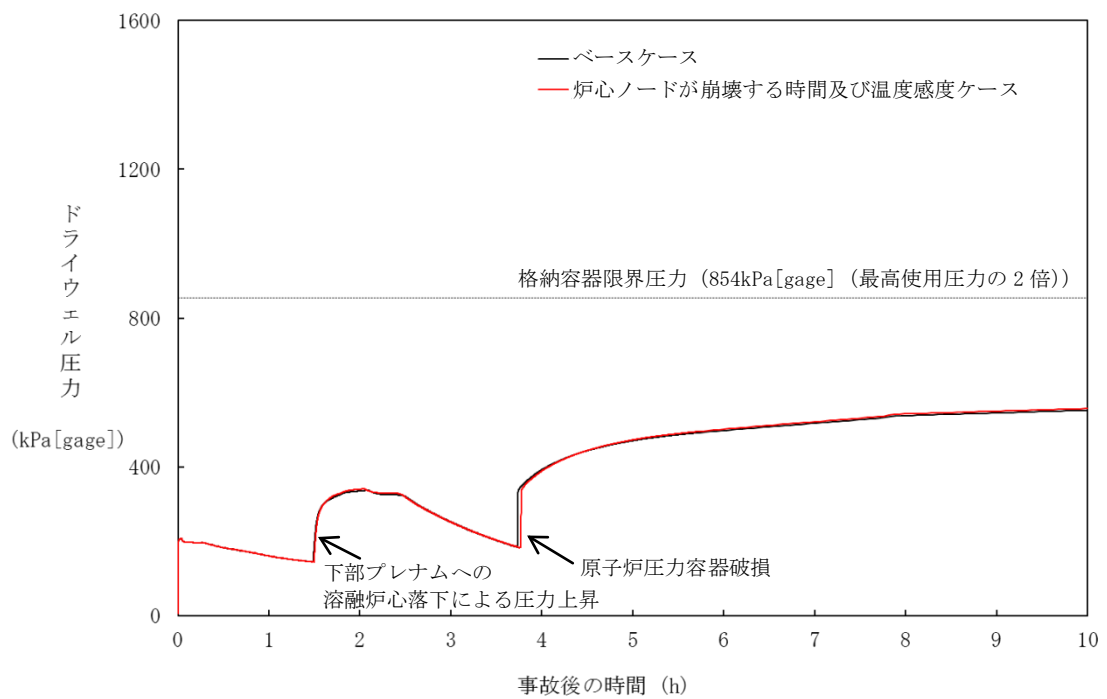
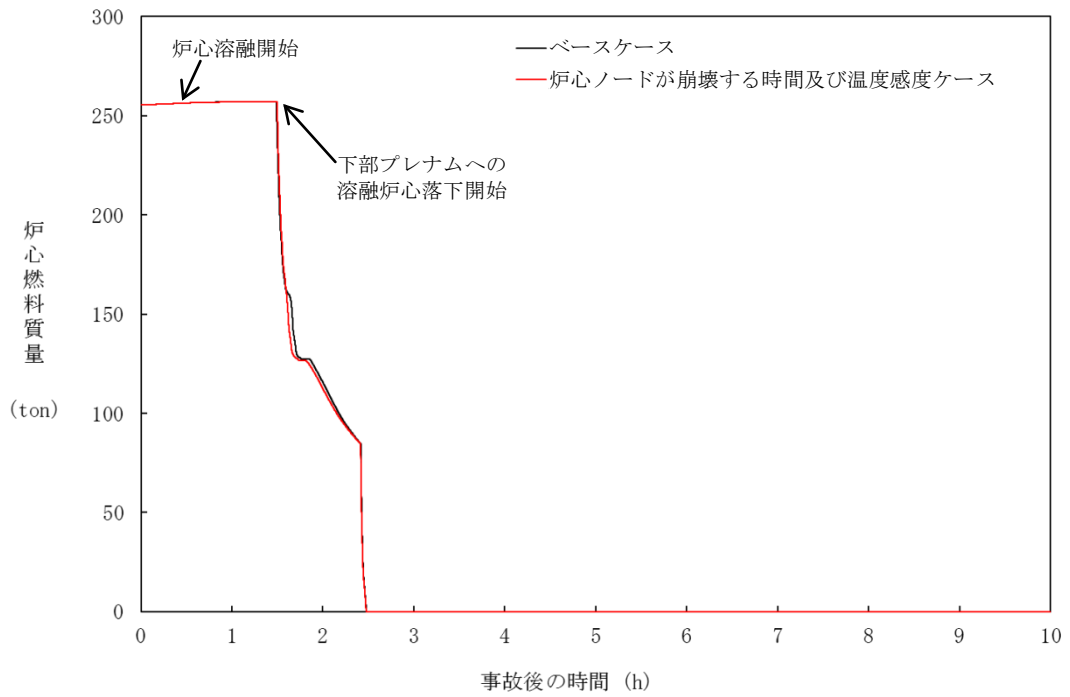


図 4.3-6 リロケーションに関する感度解析結果（大破断 LOCA シーケンス）

#### 4.3.4 原子炉圧力容器内FCI（溶融炉心細粒化，デブリ粒子熱伝達）〔圧力容器（炉心損傷後）〕

原子炉圧力容器内 FCIにより生じる圧力スパイクは、冷却材圧力バウンダリや格納容器の破損に対する脅威とはならないと考えられるが、高圧溶融物放出を防止する観点で、原子炉圧力容器破損のタイミングにおける原子炉圧力に影響を与えるものと考えられることから、添付 1「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の防止について」において不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行っている。

以下に概要をまとめる。

##### (1) 不確かさの整理

原子炉圧力容器内 FCI は、溶融炉心が炉心から下部プレナムに落下する際に、溶融炉心と冷却材の伝熱により、短期間に水蒸気が発生し、原子炉圧力が急上昇する現象である。したがって、現象に影響する要因として、①下部プレナムの冷却水の状態（温度）、②溶融ジェット径、③エントレイン量、④冷却水とデブリ粒子の伝熱が挙げられる。このうち、①については、崩壊熱と減圧沸騰により決まり、一般的な質量・エネルギー保存則に基づき計算されることから、現象としての不確かさは小さいものと考えられる。よって、②～④について感度解析を行う。

##### (2) 感度解析及び結果

###### A) 溶融ジェット径

溶融炉心の下部プレナムへの落下は、物理現象としては、炉心支持板上に堆積した溶融炉心によって炉心支持板が破損するか、又は炉心領域最外周境界のクラストが破損することにより、溶融炉心が下部プレナムへ落下する過程である。これに対し、解析モデルでは、溶融ジェット径は、炉心支持板の開口部の面積の等価直径相当を入力条件として与えたものから計算される。したがって、実現象では解析よりも溶融ジェット径が小さい場合が考えられるため、感度解析としては、その 1/10 倍を設定した。

解析結果を図 4.3-7 に示す。感度解析ケースでは、溶融ジェット径を小さくしたことにより、細粒化割合が大きくなり、粒子ベッドの質量が増加しているため、圧力スパイクによる圧力上昇幅がわずかながら大きくなっている。しかし、原子炉圧力容器の減圧維持を継続していることから、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力は 2.0MPa[gage]以下であり大きな感度は無いことが確認された。

なお、感度解析ケースでは溶融ジェットのほぼ全量が細粒化することから、これ以上ジェット径が小さくなくても、細粒化量はほとんど変化しない。

###### B) エントレイン量

原子炉圧力容器内 FCI により生じる圧力スパイクは、エントレインされたデブリ粒

子と冷却水との伝熱により生じることから、エントレイン量による感度を確認する。

エントレイン量は Ricou-Spalding モデルにより計算しており、その比例係数（エントレインメント係数）を変化させる。エントレインメント係数は、大規模実験（FARO 実験）に対するベンチマーク解析により検討された設定範囲があり、有効性評価の解析ではその最確値を設定している。よって、感度解析としては、エントレイン量が最大となるよう、設定範囲の最大値とする。また、参考として最小値の結果も示す。

解析結果を図 4.3-8 に示す。感度解析ケースでは、エントレインメント係数を大きくしたことにより、細粒化割合が大きくなり、粒子ベッドの質量が増加しているため、圧カスパイクによる圧力上昇幅がわずかに大きくなっている。しかし、原子炉圧力容器の減圧維持を継続していることから、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力は 2.0MPa[gage]以下であり大きな感度は無いことが確認された。

### C) 冷却水とデブリ粒子の伝熱

冷却水とデブリ粒子の伝熱は、膜沸騰熱伝達と輻射熱伝達により計算するが、その伝熱量は、デブリ粒子の表面積、すなわち、粒子径に依存する。有効性評価の解析では、デブリ粒子の径を、(UO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>) を用いた大規模実験に基づき、その平均的な値を使用しているが、実験ケースによってばらつきが存在していることから、この粒子径を小さくする場合の感度を確認する。よって、感度解析ケースでは、大規模実験（FARO 試験）に基づき検討された設定範囲の最小値とする。また、参考として最大値の結果も示す。

解析結果を図 4.3-9 に示す。感度解析ケースでは、粒子径を小さくしたことにより、冷却水とデブリ粒子の伝熱が促進されることにより、圧カスパイクによる圧力上昇幅がわずかに大きくなっている。しかし、原子炉圧力容器の減圧維持を継続していることから、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力は 2.0MPa[gage]以下であり大きな感度は無いことが確認された。

### (3) まとめ

以上、熔融ジェット径、エントレイン量及び冷却水とデブリ粒子の伝熱に関して感度解析を行った結果、圧カスパイクのピーク値及び原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力への影響はわずかであることが確認された。

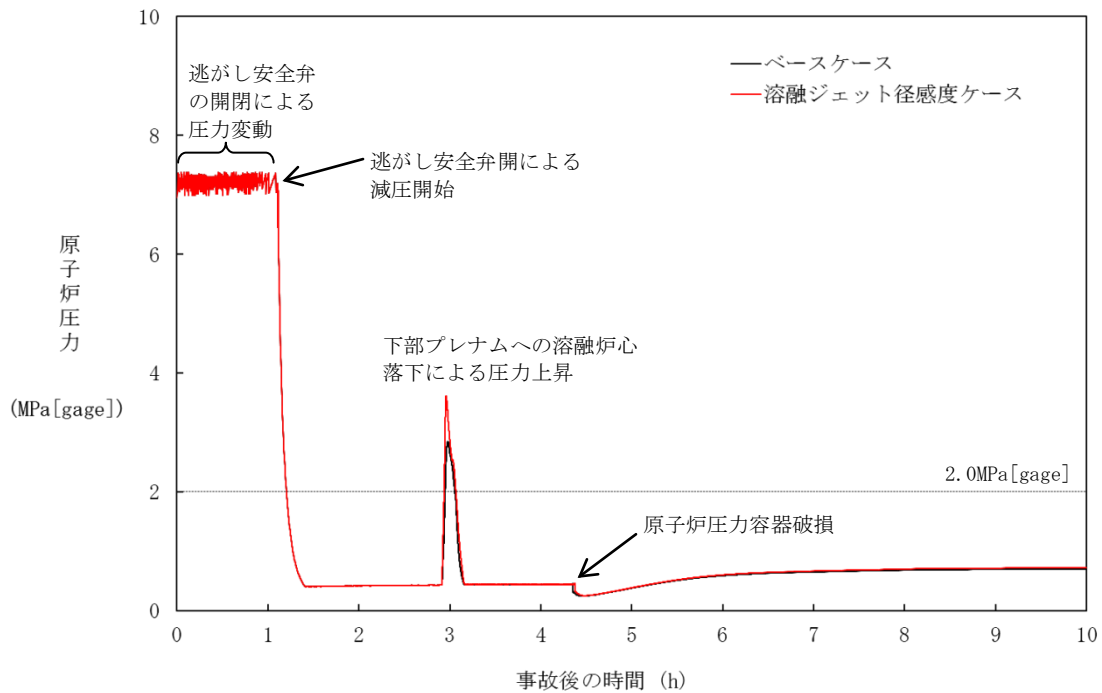


図4.3-7 原子炉圧力容器内FCIに関する感度解析結果（溶融ジェット径）

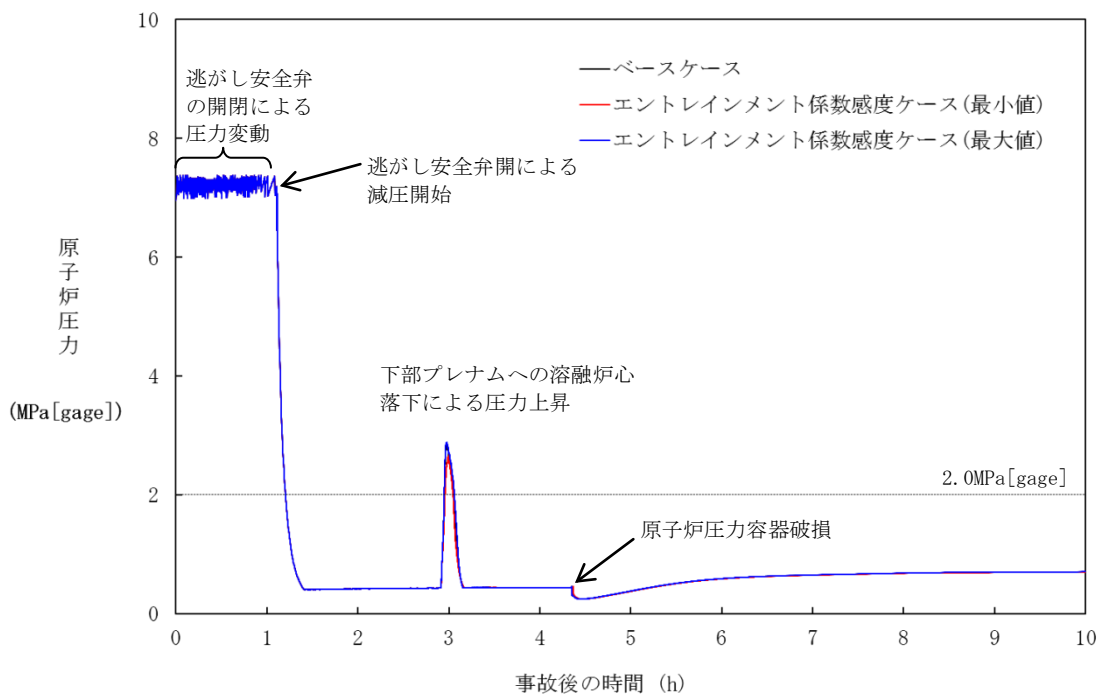


図4.3-8 原子炉圧力容器内FCIに関する感度解析結果（エントレイン量）



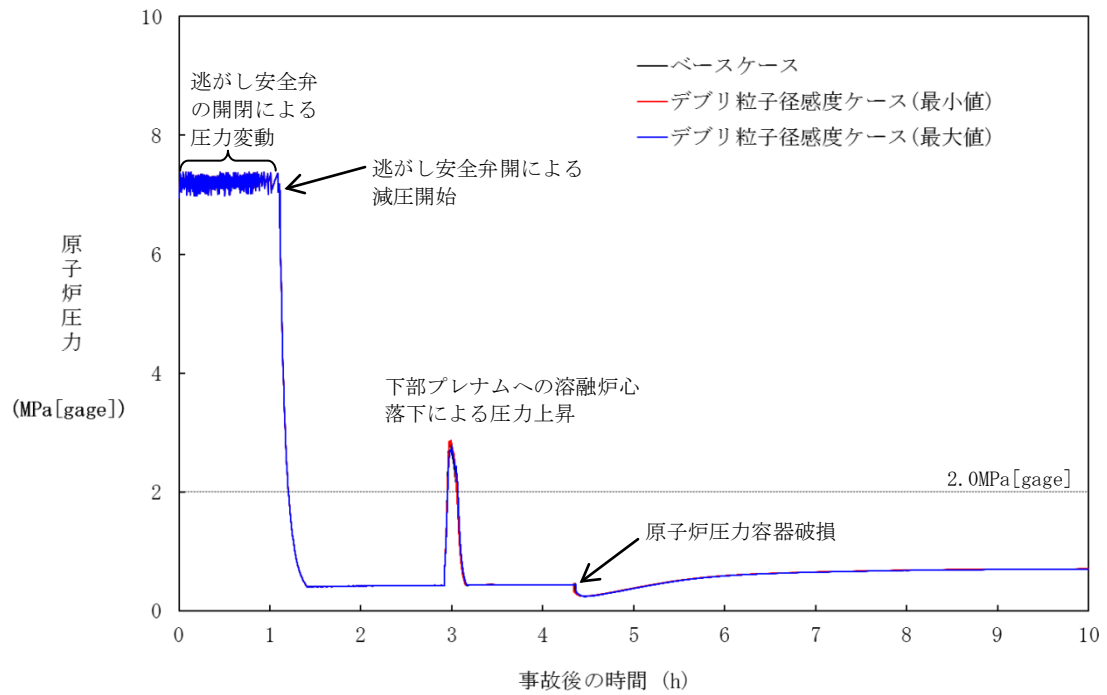


図4.3-9 原子炉圧力容器内FCIに関する感度解析結果 (冷却水とデブリ粒子の伝熱)

#### 4.3.5 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達 [圧力容器(炉心損傷後)]

下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達モデルについては、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果と比較し、妥当な結果が得られている。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故あるいはその後の検討により得られた知見をもとに開発されていることも踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかし、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、添付1「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の防止について」において、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行っている。以下に概要をまとめる。

##### (1) 解析条件及び解析結果

###### A) 溶融炉心と上面水プールとの伝熱

溶融炉心が下部プレナムに堆積し、上面が水プールで覆われる状況では、溶融炉心は冷却され、そのときの熱流束は限界熱流束で制限される。上部クラスト形態には不確かさがあり、クラストのひび割れが無い場合には、溶融炉心が冷却されにくくなり、原子炉圧力容器破損へ至る事象進展も早くなる。したがって、下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の限界熱流束に関する感度解析を実施する。

ベースケースでは、限界熱流束に係る係数として最確値を与え、感度解析ケースでは水への熱伝達が制限される値を設定する。

図 4.3-10 に、下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の限界熱流束の感度解析結果を示す。

ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心が下部プレナムにリロケーションした後は、感度解析ケースにおいて溶融炉心と上面水プールの伝熱量が減少する事になる。その結果、感度解析ケースにおいて原子炉圧力容器破損時間はわずかに早くなっている。ただし、原子炉圧力容器破損割合及び破損時刻のいずれについても、感度の大きさとしてはわずかである。

###### B) 溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達

原子炉圧力容器がクリープすることで、溶融炉心の下部クラストと原子炉圧力容器の間にギャップが生じ、そのギャップに水が浸入して冷却される。MAAPの解析モデルでは、ギャップに浸入した水と溶融炉心の熱流束は限界熱流束で制限される。この現象は実験的に確認されているものの、溶融炉心重量が大きい場合にはギャップ幅が小さくなり、気液対向流制限現象によりギャップに十分な水が流れ込まないことも報告されている<sup>[24]</sup>。また、制御棒駆動機構ハウジング等の貫通部及びその溶接部を持つ体系での実験はこれまでなされていない。このように、ギャップによる冷却には不確かさがあり、これが小さい場合には、溶融炉心が冷却されにくくなり、原子炉圧力容

器破損へ至る事象進展も早くなる。

したがって、下部プレナム内の溶融炉心とギャップに浸入した水との間の限界熱流束に関する感度解析を行い、その影響を把握する。溶融炉心と下部プレナムのギャップに存在する水による除熱量には不確かさがあり、ベースケースではギャップへの熱流束に係る係数として最確値を与えている。この係数は、下部プレナムギャップの水による除熱量に係る係数として定義され、ベースケースではギャップによる除熱量の評価式により計算された除熱量がそのまま適用される。一方、係数を小さくすることは、ギャップに十分な水が流れ込まないことによる、ギャップに存在する水による除熱量の低下を模擬するものである。また、有効性評価では最初に貫通部の溶接部破損が生じているが、貫通部近傍でのギャップ冷却は実験例がなく、ギャップ水による除熱量が平板体系と比較してどの程度になるかには不確かさがある。

以上より、感度解析ケースでは、溶融炉心と下部プレナムが接触している状態を模擬するための設定とした評価を実施する。

図 4.3-11 に、下部プレナムギャップの除熱量に係る係数の感度解析結果を示す。ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心が下部プレナムに移行した後は、感度解析ケースにおいて下部プレナムギャップの水による除熱が無いため、下部プレナムの温度がより早く上昇するが、下部プレナムの水がドライアウトするまでの間しか影響を及ぼさないことから、原子炉圧力及び原子炉圧力容器破損時刻に対する感度としては非常に小さい。また、いずれのケースも原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力は 2.0MPa[gage]以下であり大きな感度は無いことが確認された。

## (2) まとめ

以上、溶融炉心と上面水プールとの伝熱、溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達に関して感度解析を行った結果、原子炉圧力容器破損時刻への影響はわずかであることが確認された。

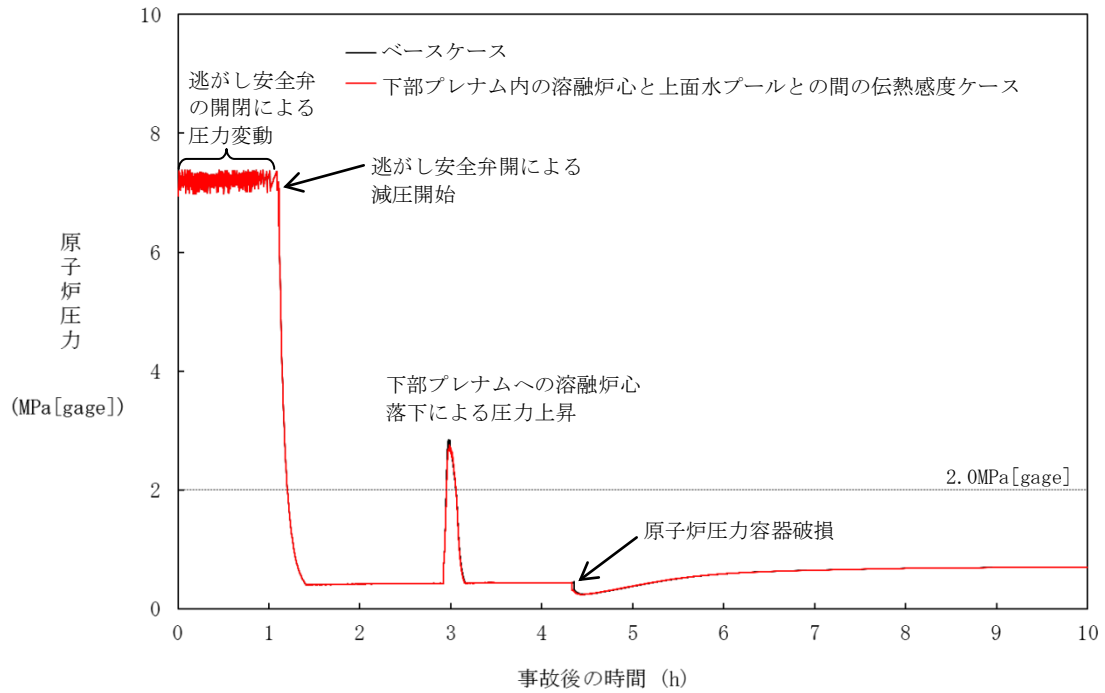


図4.3-10 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する感度解析結果  
(溶融炉心と上面水プールとの伝熱)

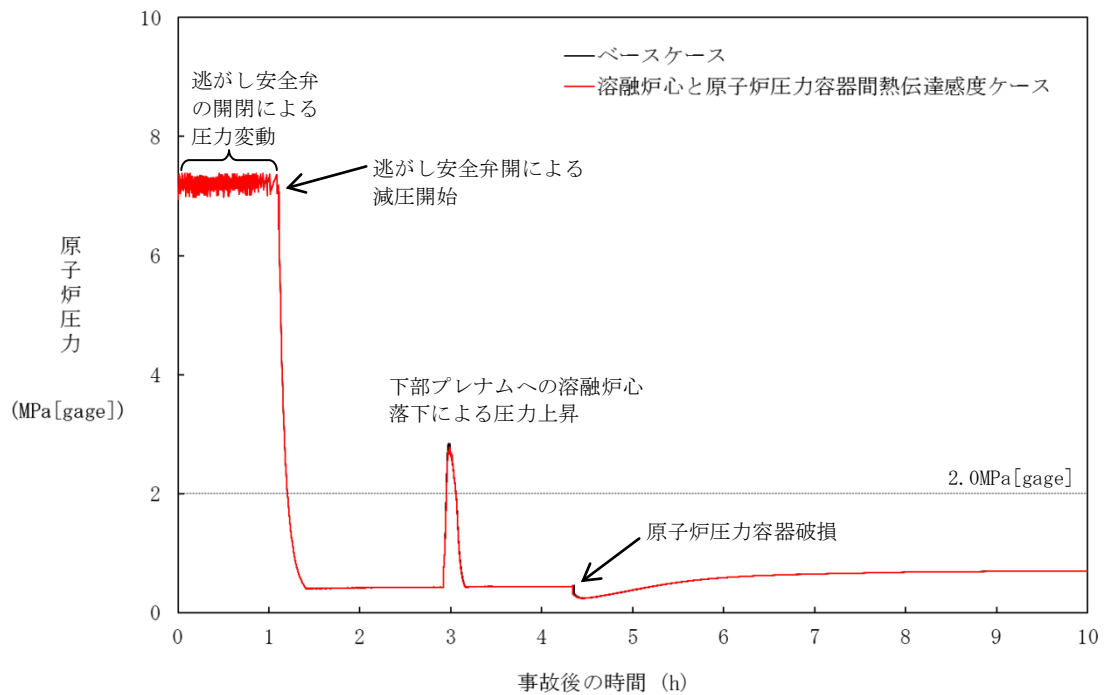


図4.3-11 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する感度解析結果  
(溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達)

#### 4.3.6 原子炉圧力容器破損 [圧力容器(炉心損傷後)]

原子炉圧力容器破損及びそれに伴う熔融炉心の流出挙動に関しては、体系的な実験等による研究がなく、特に実機スケール現象について有効なデータが得られていない状況であり、ベンチマーク解析による妥当性確認が困難であるが、海外での考察等による知見に基づいて MAAP コードの解析モデルが開発されていることから、一定の妥当性は有すると判断できる。しかしながら、現象自体が持つ不確かさもあることを踏まえ、原子炉圧力容器破損に関わる一連の現象を取り扱っている添付 1「高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の防止について」において、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行っている。以下に概要を示す。

##### (1) 原子炉圧力容器破損

###### A) 原子炉圧力容器破損について

下部プレナムに熔融炉心が堆積し、熔融炉心が冷却されない状態が継続すると、原子炉圧力容器の破損に至る。原子炉圧力容器は、原子炉圧力、原子炉圧力容器壁・熔融炉心温度、材料物性及び形状等に応じて様々なモードで破損すると考えられる。

###### B) 解析モデルに関する考察

MAAP コードでは、原子炉圧力容器の破損について、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損、原子炉圧力容器のクリープ破損等、複数の破損モードを模擬しており、最も早く判定される破損モードが適用される。以下に、有効性評価における原子炉圧力容器破損の主要因である制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損、クリープ破損への影響因子について、MAAP コードの解析モデルの妥当性を考察する。

###### a) 限界せん断応力 (制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損)

貫通部の溶接部が熔融炉心によって加熱されることで強度を失い、貫通部が飛び出すことによって原子炉圧力容器が破損する。具体的には、貫通部の溶接部のせん断応力は、原子炉圧力容器と格納容器の圧力差とつり合った状態になっているが、せん断応力が限界せん断応力を超えると貫通部が飛び出し、原子炉圧力容器が破損する。この限界せん断応力は温度に依存しており、MAAP コードでもこの温度依存性がデータとして考慮されているため、MAAP コードのモデルは妥当と判断できる。

###### b) ひずみ (制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損)

熔融炉心が下部プレナムに落下することにより、高温かつ高圧の環境下にある原子炉圧力容器の壁にひずみを生じ、溶接部にも同様にひずみが発生し、溶接部のひずみ量がしきい値を超えた場合に、破損が発生したと判定している。このしきい値は実験によって妥当性が確認されたものであるが、実験結果のばらつきも考慮し、ひずみの

しきい値に関する感度を確認する。

#### c) Larson-Miller パラメータ（クリープ破損）

Larson-Miller パラメータ手法は、応力と破損時間の関係を整理した Larson-Miller パラメータを利用しクリープ破損寿命を予測する一般的な手法である。MAAP コードでは、応力として圧力、温度、熔融炉心の荷重を考慮し、Larson-Miller パラメータを使用してクリープ破損寿命を予測しており、そのモデル化は妥当と判断できる。

#### C) 原子炉压力容器破損に関する感度解析

溶接部破損時のひずみのしきい値に関する感度解析を実施した。図 4.3-12 に溶接部破損時の最大ひずみの感度解析結果を示す。

感度解析では、ひずみのしきい値の有意な感度を確認する目的で、早期に破損に至る条件として、溶接部破損時のひずみのしきい値を 1/10 に低下させ、その場合、原子炉压力容器破損が 13 分程度早くなる結果を得た。したがって、ひずみのしきい値が原子炉压力容器破損の時期に与える感度は小さいと言える。

#### D) 原子炉压力容器破損に関するまとめ

熔融炉心の格納容器下部への落下時期は原子炉压力容器破損モデルに依存する。原子炉压力容器破損モデルには、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損、原子炉压力容器のクリープ破損等があり、これらは原子炉压力容器内外圧力差、熔融炉心の水頭、原子炉压力容器壁温度等の評価パラメータによって計算される。原子炉压力容器破損モデルについては、「限界せん断応力」、「ひずみ」及び「Larson-Miller パラメータ」に関して、MAAP コードの解析モデルにおいて、実現象に即した模擬を行っているため、いずれも構造強度の一般的な評価式を用いており、不確かさは小さい。

また、評価パラメータについては、同じ事故シーケンスであれば大きくは変わらないことから、不確かさは小さい。以上から、原子炉压力容器破損に関するモデルは有効性評価に適用することは妥当と判断できる。

### (2) 熔融炉心流出

#### A) 熔融炉心流出について

原子炉压力容器が破損すると、その破損口から熔融炉心（熔融プール、粒子状熔融炉心、熔融スチール）が格納容器下部へ流出する。熔融炉心が流出する際、原子炉压力容器破損口は侵食によって拡大する。

なお、MAAP コードでは制御棒駆動機構貫通部破損や原子炉压力容器下部のクリープ破損等の種々の原子炉压力容器下部破損モードがモデル化されており、最も早く破損条件に至った破損モードにより破損が生じるが、有効性評価においては制御棒駆

動機構ハウジング溶接部の破損による制御棒駆動機構ハウジング逸出が最も早く発生する。これにより約 15cm 径の破断口が原子炉圧力容器下部に開き、下部プレナム内の溶融炉心が格納容器下部に落下することになる。他の原子炉圧力容器下部貫通配管が破損してもこれ以上の破損サイズにはならないことから、制御棒駆動機構ハウジングの逸出が最も厳しい条件となっている。

## B) 解析モデルに関する考察

MAAP コードでは前述した原子炉圧力容器破損後の溶融炉心流出挙動をモデル化しており、原子炉圧力容器破損時の溶融炉心の流出挙動への影響因子について、MAAP コードのモデルの妥当性を考察する。

### a) 開口部の閉塞

溶融炉心が流出する際、粒子状溶融炉心も一緒に原子炉圧力容器外に流出するモデルとなっているが、実現象では開口部が粒子状溶融炉心によって閉塞し、溶融炉心が格納容器下部へ流出しない可能性がある。しかしながら、MAAP コードでは粒子状溶融炉心の溶融も同時にモデル化しており、また、実現象においても、冷却ができずに原子炉圧力容器が破損する状況では粒子状溶融炉心は崩壊熱によって再溶融するため、開口部での閉塞の可能性は小さく、したがって、破損口より上部に堆積している溶融炉心が流出する MAAP コードのモデルは妥当と判断できる。

### b) 破損口の侵食による拡大

破損口を溶融炉心が通過する際に、破損口の側面が溶融炉心により溶かされ、破損口が拡大する現象も考えられ、MAAP コードの原子炉圧力容器の破損モデルにおいては、溶融炉心と破損口側面の伝熱計算に基づき、破損口が溶融し拡大するモデルを備えていることから、実現象に即しており、妥当と判断出来る。

### c) 原子炉圧力容器 2 次破損

最初の原子炉圧力容器破損が発生した後、溶融炉心は水頭圧により流れることから、破損口よりも高い部分の溶融炉心のみが格納容器下部に落下し、残りの溶融炉心は残存する。また、冷却がなければ、残存した溶融炉心が原子炉圧力容器を加熱し、溶融炉心の自重も加わることによって、原子炉圧力容器がクリープ破損することが、実機において考えられ、MAAP コードのモデルはこの挙動を模擬できるものであり、妥当と判断できる。

## C) 溶融炉心流出に関するまとめ

溶融炉心の落下量は原子炉圧力容器破損位置に依存する。原子炉圧力容器破損位置

は、原子炉圧力容器下部のノードの代表点を基準にそれよりも上に存在する溶融炉心が落下するモデルとなっている。ノード内の破損位置には不確かさがあるが、破損口は溶融炉心によって拡大し、原子炉圧力容器の底部の方向に開口部が広がることから、開口部の下端の高さの不確かさは小さくなる。以上から、溶融炉心の流出に関するモデルを有効性評価に適用することは妥当と判断できる。



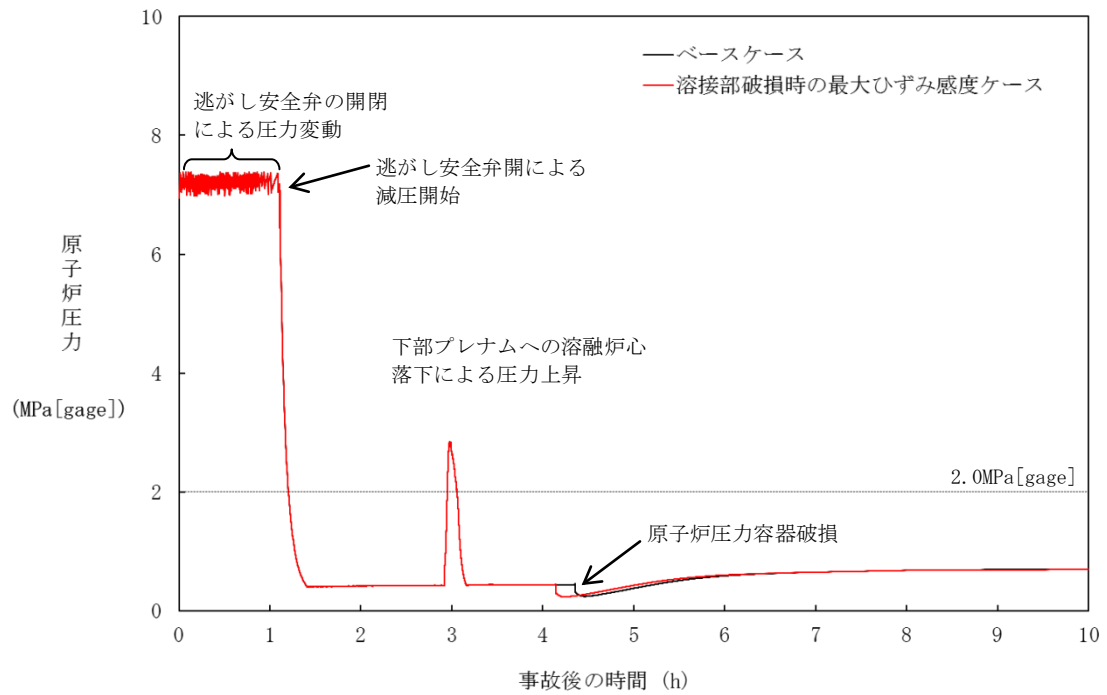


図4.3-12 制御棒駆動機構ハウジング破損時の最大ひずみに関する感度解析結果

#### 4.3.7 原子炉圧力容器外FCI（溶融炉心細粒化，デブリ粒子熱伝達）〔格納容器（炉心損傷後）〕

FCI現象に関しては、国内外において現象の解明や評価に関する多くの活動が行われてきているが、現在においても研究段階にあり、また、実機規模での現象についてほとんど経験がなく、有効なデータが得られていないのが現状であり、不確かさが大きい現象であると言える。

そこで、添付2「溶融炉心と冷却材の相互作用について」では、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行っている。以下に概要を示す。

##### (1) 知見の整理

###### A) FCI 実験

国内外の FCI 実験として、

- ・ ALPHA 実験(旧原子力研究所 JAERI)
- ・ KROTOS 実験(欧州 JRC(Joint Research Center), イスプラ研究所)
- ・ FARO 実験(欧州 JRC(Joint Research Center), イスプラ研究所)
- ・ COTELS 実験(カザフスタン国立原子力センター(NNC : National Nuclear Center))
- ・ TROI 実験(韓国原子力研究所(KAERI))

について調査を行い、知見を整理した。

###### B) 原子炉圧力容器外 FCI における水蒸気爆発の発生可能性

UO<sub>2</sub>を用いた大規模 FCI 実験である KROTOS 実験、FARO 実験、COTELS 実験及び TROI 実験の結果から、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて小さいと結論付けた。

なお、参考として、水蒸気爆発の発生を仮定した場合の影響についても、水蒸気爆発解析コード（JASMINE<sup>[25]</sup>）及び構造応答解析コード（AUTODYN<sup>[26]</sup>もしくは LS-DYNA<sup>[27]</sup>）を用いて、水蒸気爆発のトリガを解析的条件として与えることで水蒸気爆発の発生を模擬した解析を行うことにより、水蒸気爆発による格納容器ペDESTAL構造部への影響を評価し、格納容器の健全性に影響を及ぼさないことを確認している。

##### (2) 不確かさの整理

原子炉圧力容器外 FCI について、実現象と解析モデルの差に着目しつつ、不確かさの整理を行い、原子炉圧力容器外 FCI による格納容器圧力に影響する要因として、

- ・ 格納容器下部（ペDESTAL）領域のプール水の状態（サブクール度、水位）
- ・ 溶融炉心の落下量及び粒子化（破損口径，粒子化割合，落下速度）
- ・ プール水とデブリ粒子との伝熱（デブリ粒子径）
- ・ 格納容器内での水蒸気の流動

を抽出し、それぞれについて不確かさ及びその取り扱いを以下のとおり整理した。

A) 格納容器下部（ペDESTAL）領域のプール水の状態（サブクール度，水位）

ペDESTAL領域の水温が高い場合には、水蒸気発生量が多くなり圧力スパイクは厳しくなる。なお、MAAPでは、蒸気の上昇速度がフラッティング臨界速度よりも大きい場合には、周囲の水が蒸気の流れによって巻き込まれ、巻き込まれた水による蒸気の凝縮により蒸気発生量が減少する効果がモデル化されている。ペDESTAL領域の水は、ペDESTALへの注水によって形成されるので、その水温はペDESTAL注水温度に影響される。有効性評価では、ペDESTAL注水は外部水源から注水され、その水温は水源温度の実績値に対して高めの温度を設定している。したがって、圧力スパイクを厳しくする保守的な水温を設定しているが、本影響因子は解析モデルパラメータではないため、不確かさ評価は行わない。

ペDESTAL領域の水位に関しては、水深が深い方が溶融炉心の細粒化量が大きくなる傾向がある。この場合、細粒化した粒子から水への伝熱量が多くなるので、圧力スパイクは厳しくなる方向である。本影響因子は解析モデルパラメータではないため、ここでは感度解析による確認は行わない。

B) 溶融燃料の落下量及び粒子化（破損口径，粒子化割合，落下速度）

溶融炉心の落下量は、原子炉圧力容器の破損口径に依存する。原子炉圧力容器の破損は、原子炉圧力容器下部の制御棒駆動機構ハウジングの溶接部が破損し、制御棒駆動機構ハウジングが逸出することを想定している。原子炉圧力容器底部の口径が大きい貫通部として制御棒駆動機構ハウジングを想定している。なお、MAAPでは溶融物流出に伴う破損口の径方向侵食による破損口拡大も考慮されている。

細粒化量に関して、MAAPコードでは Ricou-Spalding 式で評価される。Ricou-Spalding 式では、デブリ粒子化割合に影響するパラメータは、エントレインメント係数、溶融ジェット径、圧力（わずかではあるが水の密度に影響）及びプール水深である。このうち溶融ジェット径は保守的に設定しており、また、プール水深は解析モデルパラメータでは無い。

エントレインメント係数については、MAAPでは代表的な FCI の大規模実験である FARO 試験に対するベンチマーク解析によってその設定値及び不確かさ範囲を設定している。FARO のベンチマーク解析でのエントレインメント係数の不確かさ範囲は、 ～ となっている。以上より、粒子化量の不確かさとしてエントレインメント係数の感度を確認する。

溶融炉心の落下速度は、原子炉圧力容器内外の圧力差、溶融炉心の高さ（水頭）及び溶融炉心の落下距離に依存する。原子炉減圧により原子炉圧力容器内外の圧力差が十分小さくなることから、圧力差の不確かさの影響は小さい。また、有効性評価では

原子炉圧力容器の下部プレナム部に全量に近い溶融炉心が堆積しており、原子炉圧力容器の破損位置も原子炉圧力容器底部中心となっているため、溶融炉心の水頭が高い状態となっている。この場合、溶融炉心の流出速度が大きく落下量も多くなるため、圧力スパイクの評価も厳しくなる。したがって、溶融炉心の水頭の不確かさ評価は必要ない。一方、落下距離については、プール水深に不確かさがある。

BWR-5,Mark-I 改良型格納容器プラントの例では、落下距離の不確かさをプール水位の最大変動幅（3.4m）と仮定すると、ペDESTAL底部から原子炉圧力容器底部までの距離（約 9.5m）の 4 割程度である。溶融炉心の落下速度が、落下距離の平方根に比例すると考えると、落下速度の不確かさは 2 割程度である。溶融炉心の落下速度（ジェット速度）の不確かさはエントレインメント係数の不確かさとして評価できる。また、落下速度の不確かさはエントレインメント係数の不確かさ幅に包絡されている。したがって、溶融炉心の落下速度の不確かさの影響は、エントレインメント係数の不確かさ評価で確認できるため、落下速度の不確かさ評価は行わない。

#### C) プール水とデブリ粒子との伝熱（デブリ粒子径）

水中でエントレインされた高温のデブリ粒子は、その周囲を蒸気膜が覆う状態となり、デブリ粒子の熱伝達は膜沸騰熱伝達と輻射熱伝達に支配される。MAAP ではエントレインしたデブリ粒子の温度を、これらの熱伝達を考慮した機構論的モデルにより計算する。また、デブリ粒子から水への伝熱は、デブリ粒子の径に直接依存する。MAAP では、デブリ粒子径はジェットの表面張力に依存するモデルにより計算される。デブリ粒子径の導出式には、粒子径ファクタ（モデルパラメータ）が乗じられている。MAAP では代表的な FCI の大規模実験に対するベンチマーク解析によってその設定値及び不確かさ範囲を設定しているため、デブリ粒子の伝熱の不確かさは粒子径の不確かさとして考慮する。FARO のベンチマーク解析でのデブリの粒子径ファクタの不確かさ範囲は、～となっている。

#### D) 格納容器内での水蒸気の流動

FCI による圧力スパイクの評価の観点では、ペDESTAL領域の開口部からドライウェル側への気体の流れのモデルも不確かさの要因として考えられる。MAAP では、格納容器内の流動は、ノード・ジャンクションモデルを適用しており、格納容器下部領域からドライウェル領域への流れは、ノードの圧力、ジャンクションの圧力損失により、差圧流や臨界流として扱われる。ジャンクションの圧力損失は、一般的な流動モデルを扱っていることから、不確かさは小さいと考えられる。

### (3) 感度解析による確認

上記の検討により、原子炉圧力容器外 FCI における圧力スパイクに関して、解析モデルでの不確かさは、

- ・ Ricou-Spalding モデルのエントレインメント係数
- ・ デブリ粒子径

に代表され、それぞれの不確かさ幅を考慮した感度解析を実施した（解析条件及び結果は添付 2 参照）。

その結果、いずれのパラメータにおいても、原子炉圧力容器外 FCI により生じる圧力スパイクへの感度は小さく、有効性評価の結果に影響を与えないことを確認した。

#### 4.3.8 格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり，溶融炉心と格納容器下部プール水との伝熱，溶融炉心とコンクリートの伝熱，コンクリート分解及び非凝縮性ガスの発生 [格納容器(炉心損傷後)]

これらは，MCCIに関する物理現象である。MCCIは重要な格納容器破損モードと考えられ，これまで種々の実験や解析モデルの開発が行われてきている。そこで，添付3「溶融炉心とコンクリートの相互作用について」では，知見の整理，不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行っている。以下に概要を示す。

##### (1) 知見の整理

###### A) MCCI 実験

国内外での MCCI に関する実験及び研究として，

- ・ ACE 実験 (アルゴンヌ国立研究所 (ANL))
- ・ SURC-4 実験 (サンディア国立研究所 (SNL)) (国際標準問題 ISP-24)
- ・ BETA 実験 (カールスルーエ研究所 (KfK))
- ・ SWISS 実験 (サンディア国立研究所 (SNL))
- ・ WETCOR 実験 (サンディア国立研究所 (SNL))
- ・ MACE 実験 (米国電力研究所 (EPRI))
- ・ COTELS 実験 (テスト B/C 及び A) (原子力発電技術機構 (NUPEC))
- ・ MCCI 実験 (アルゴンヌ国立研究所 (ANL))
- ・ KROTOS 実験 (欧州 JRC (Joint Research Center), イスプラ研究所)
- ・ FARO 実験 (欧州 JRC (Joint Research Center), イスプラ研究所)
- ・ DEFOR 実験 (スウェーデン王立工科大学 (KTH))
- ・ SPREAD 実験 (国内 BWR 産業界)
- ・ PULiMS 実験 (スウェーデン王立工科大学 (KTH))
- ・ KATS 実験 (カールスルーエ研究センター (KIT, 旧 FZK))
- ・ セルフレベリング実験 (アルゴンヌ国立研究所 (ANL))
- ・ SSWICS 実験 (OECD-MCCI プロジェクト)
- ・ MET 実験 (OECD-MCCI プロジェクト)
- ・ CCI 実験 (OECD-MCCI プロジェクト)
- ・ クラスト破損実験 (OECD-MCCI プロジェクト)

について調査し，知見を整理した。

###### B) 得られた知見

- ・ ドライ条件でのコンクリート侵食

溶融炉心に注水が行われない場合の侵食速度は，ACE 実験や SURC-4 実験で確認されている。また，MAAP コードによる SURC-4 実験解析が行われており，解析で得ら

れた侵食速度は実験結果と良く一致している（1時間あたり 20cm 程度）。

- ・ ウェット条件（Top Flooding）でのコンクリート侵食

SWISS 実験，WETCOR 実験及び MACE 実験では，熔融炉心上面へ注水をした場合（Top Flooding）のコンクリート侵食実験が行われたが，結果として，熔融炉心上面に安定なハードクラストが形成されて熔融炉心内への水の浸入を妨げ，コンクリート侵食が継続する結果が得られた。コンクリート侵食が停止しなかった主な原因は，熔融炉心模擬物上面に形成されたクラストが側壁（側壁に耐火物を採用した次元侵食実験）あるいは電極と側壁の両者に固着し，クラストとその下の熔融炉心模擬物とが分離したことにより，熔融炉心模擬物の効果的な除熱がなされなかったためであるとされている。

COTELS 実験では，熔融物の落下過程を含めて模擬した MCCI 実験が実施され，結果として，側壁侵食部に水が浸入し，コンクリート侵食が停止する結果が得られた。

実機規模で安定化クラストが形成されるか否かを解明するため，OECD/MCCI プロジェクトが行われ，クラスト強度，クラスト浸水，二次元コンクリート侵食挙動等を分離効果的に調べる実験が実施された。その結果，実炉スケールでは，安定クラストは形成されず，ハードクラストは割れて水が内部に浸入し，MCCI により発生したガスにより熔融物がクラストの割れ目から噴出する火山型のクラストが形成されるとの結果が得られている。また，CCI 試験の結果から玄武岩系コンクリートに侵食の異方性が見られる結果が得られている。

これらの知見は，MCCI 評価のためにはデブリから水プールやコンクリートへの熱伝達の扱いが重要であることを示唆している。

- ・ 水張りによる熔融物の粒子化

熔融物ジェットが水中へ落下する場合の粒子化挙動については，FCI実験等により確認されている。粒子化割合は，主に水深やジェット径に依存する。粒径（質量中央径）は，比較的大きく，実験条件（初期圧力，水深，コリウム落下速度，サブクール度）に対する依存性は低いと報告されている。各UO<sub>2</sub>混合物実験の平均的な粒子径は，熔融物量の多いFARO実験では 2.6～4.8mm，COTELS実験では 6mm程度である。また，粒子化割合を評価する解析モデルが提案されている。（Ricou-Spalding式やSaito式等）

- ・ 熔融物の拡がり

Mark-I のシェルアタックに関わる実験や評価により，初期水張りによるシェルアタック防止の有効性が確認されるとともに，熔融物の拡がりや評価する解析コードが作成されている。熔融物の拡がりには，デブリ落下流量，デブリ成分，デブリ過熱度が主に影響することが示されている。KTH では，水中での熔融物の拡がり挙動と固化性状を調べ

る PULiMS 実験が実施され、溶融物の拡がる過程は、流体力学と固化の 2 つの競合プロセスに支配されるとして、流体力学には重力、慣性力、粘性力及び表面張力が影響し、固化には溶融物から周囲への熱伝達、崩壊熱発生及び溶融物の相変化が影響するとしている。また、独カールスルーエ研究センター (KIT, 旧 FZK) において KATS 実験が実施され、溶融物の放出速度が比較的高い場合は、冷却材の有無によらず同様な拡がり挙動になることが示されている。溶融物の拡がり挙動の解析のために、種々の解析コードが提案されており、実験データをもとに検証が行われている。

また、ANL でのセルフレベリング実験により、水プール中に不均質に堆積させた粒子状ベッドにおいて、内部沸騰によって短時間にベッドの厚さが均一化されることが示されている。

#### ・粒子状ベッドの冷却性

粒子状ベッドの冷却性については、ドライアウト熱流束が種々の実験で確認されており、主に粒子径に依存するとの結果が得られている。また、ドライアウト熱流束を評価する解析モデルがいくつか提案されているが、Lipinski 0-Dモデル<sup>28)</sup>が広く使われている。

## (2) 不確かさの整理

MCCI の過程ごとに不確かさ要因を整理する。MCCI は以下の過程で段階的に進展する。

- ・ 原子炉圧力容器下部ヘッド破損過程
- ・ 溶融物の落下・堆積過程
- ・ MCCI 進行と注水によるデブリ冷却過程

各過程での物理現象及び解析モデルに関し、不確かさ要因を整理し、感度解析が必要なパラメータを確認する。

### A) 原子炉圧力容器下部ヘッド破損過程

この過程の不確かさは、下部ヘッドの破損面積や溶融炉心の流出量となる。それぞれについて、評価モデルと評価条件の考え方を示す。

下部ヘッドの破損面積は、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損や下部ヘッドクリープ破損等の種々の下部ヘッド破損モードがモデル化されており、最も早く破損条件に至った破損モードにより破損が生じる。破損面積は、溶融物流出に伴う破損口の径方向侵食による拡大も考慮されている。

MAAP コードによる有効性評価の解析結果から、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損による制御棒駆動機構ハウジング配管逸出が最も早く発生する。これにより約 15cm 径の破損口が下部ヘッドに開き、下部プレナム内の溶融炉心が格納容器下部に流



出することになる。他の下部ヘッド貫通配管が破損してもこれ以上の破損サイズにはならないことから、制御棒駆動機構ハウジングの逸出が最も厳しい条件となっている。なお、制御棒駆動機構ハウジング溶接部が破損しても外部サポートが設置されている場合には、制御棒駆動機構ハウジングの逸出は起きにくいと考えられるため、この扱いは保守的である。

溶融炉心流出流量は駆動差圧として圧力容器内とペDESTALとの圧力差に水及び溶融炉心の水頭圧を考慮して計算されている。MAAP コードによる解析結果から、最終的な流出総量は、全炉心相当と評価されており、厳しい条件となっている。

以上に示したように、下部ヘッドの破損面積や溶融炉心の流出量について、いずれも厳しい条件が使用されているため、感度解析を行う必要は無い。

## B) 溶融物の落下・堆積過程

この過程では、原子炉圧力容器下部ヘッドが破損し、溶融炉心が事前水張りされたペDESTALへ落下するため、溶融物が水中で粒子化することが想定され、粒子化されない溶融炉心はペDESTAL床に溶融プールとして堆積する。この過程では、溶融炉心の水中での粒子化に不確かさが想定される。

MAAP コードでは、粒子化割合は、Ricou-Spalding モデルで計算される。Ricou-Spalding モデルは、エントレインメント量（細粒化量）を流入流体の速度（ジェット速度）と両流体の密度比に関連させたモデルであり、液-液混合問題において広く利用されている相関式である。落下する溶融炉心は円柱ジェットで冷却水中に突入することを想定し、円柱ジェット外周部の浸食として粒子化割合を評価している。

溶融炉心粒子化割合に影響するパラメータは、エントレインメント係数、溶融ジェット径及びプール水深であり、このうちモデルパラメータとしてエントレインメント係数と溶融物ジェット径に不確かさが想定される。

エントレインメント係数については、MAAP コードでは代表的な FCI の大規模実験である FARO 実験に対するベンチマーク解析によってその設定値及び不確かさ範囲を設定している。FARO 実験のベンチマーク解析でのエントレインメント係数の不確かさ範囲は、～となっている。MAAP 解析ではエントレインメント係数としてが使用されており、実験解析により、実験結果の粒子化割合をよく再現するか、又は小さめに評価する入力となっている。溶融ジェット径は、下部ヘッド破損口径により決まることから、前述のように大きい値としている。これは、粒子化割合を小さめにする扱いをしていることになる。

ちなみに、Ricou-Spalding モデルを使用して、実機で想定される水張り水深 2m、溶融物ジェット径 0.15m の条件の場合で約 63%程度が粒子化される。

以上のことから、エントレインメント係数については、不確かさ幅が設定されており、溶融炉心が水中に落下した際の粒子化割合とその過程での蒸気発生やデブリ粒子

の酸化による水素発生に影響することから、不確かさ幅の範囲で感度解析を実施する。

### C) MCCI 進行と注水によるデブリ冷却過程

この過程では、熔融炉心の拡がり、デブリベッドの冷却性、コンクリート侵食に不確かさが想定される。

熔融炉心の拡がり、MAAP コードでは落下した熔融炉心はペDESTAL 床上に均一に広がると仮定している。

Mark- I 型格納容器のライナーアタックに関する研究によれば、水張りが無いと熔融炉心は格納容器シェル壁（拡がり距離 7m 程度）まで到達するが、水張りがあれば熔融炉心の拡がりは抑えられ、拡がり距離は落下量等にも依存するが 5m 程度となる結果が得られている。有効性評価で想定している制御棒駆動機構ハウジングの逸出を想定すると、ABWR（ペDESTAL 直径約 11m）で床上に水がある場合でも、床全面に熔融物が拡がること示されており、ABWR 以外の BWR ではペDESTAL 床面積が ABWR より小さいこと（Mark- I 改良型格納容器の場合、ペDESTAL 直径は約 6.4m）を考慮すると、水張りをしている場合でも熔融炉心は、床全面に拡がる可能性が高いと考えられる。これは、熔融物の拡がりに影響する因子のうち、主に想定しているデブリ落下流量が大きい（全炉心相当の熔融炉心が 1 分程度で落下することを想定）ことによるものと考えられる。また、均一に拡がった方が、側壁に接する熔融炉心の堆積高さが高くなるため、側壁侵食を評価する観点から保守的な扱いとなっている。

以上より、MAAP コードの均一堆積の扱いは妥当と考えられる。

熔融ベッドから水への熱流束は、熔融炉心上面の性状により大きく影響されるため、大きな不確かさが想定される。

熔融炉心上面から水への熱流束は、上部クラストー水プール間の熱伝達モデルである Kutateladze 型の平板限界熱流束相関式の係数を調整することにより評価可能である。

前述のように事前水張り対策により熔融炉心の一部は粒子化して、熔融炉心上部に粒子状ベッドを形成し、下部には粒子化しなかった熔融炉心が熔融プールを形成すると想定される。これは、水中に熔融炉心を落下させた実験的知見から、安定クラストは形成されず、粒子状ベッドが形成されていることから妥当と考えられる。熔融炉心上面は粒子状ベッドが形成されることを想定し、MAAP コードの熔融炉心上面から水への熱伝達のモデルパラメータである Kutateladze 係数を変えることにより、粒子状ベッドの冷却性の不確かさ評価を行う。ここでは、Lipinski 0-D モデルを使用して粒子状ベッドのドライアウト熱流束の不確かさを評価した。主なパラメータは、粒子径、ポロシティ、堆積高さ、圧力であり、以下のように想定する。

- ・ 粒子径は、これまでの実験等の知見により 3～7mm と報告されているため<sup>[29]</sup>、この範囲を不確かさの範囲と想定する。

- ・ ポロシティは、概ね 0.3 以上が報告されているが、粒子の充填状態の幅を考慮して、0.26（面心立方格子，最稠密），0.32（体心立方格子），0.4（MAAP 標準値），0.48（単純立方格子）の範囲を想定する。
- ・ 粒子状ベッドの堆積高さは、全炉心相当が落下した場合 1m 以上となるが、破損口径の拡大を考慮しても 33%以上の粒子化が想定されるため、30cm 以上とする。
- ・ 圧力は、MCCI が発生する時間では格納容器圧力は 0.4MPa[abs]以上となっているため、0.4MPa[abs]以上とする。

Lipinski 0-D モデルによる評価結果を以下に示す。

- ・ 圧力が 0.4MPa[abs]以上では、ポロシティの最も小さい 0.26 のケースでも 800 kW/m<sup>2</sup>以上のドライアウト熱流束となる。この場合、大気圧状態では 400 kW/m<sup>2</sup>程度となっている。また、ポロシティの最も大きい 0.48 のケースでは、大気圧状態では 2000 kW/m<sup>2</sup>程度となっている。
- ・ 粒子径が 3mm以上では、ポロシティの最も小さい 0.26 のケースでも 800 kW/m<sup>2</sup>以上のドライアウト熱流束となる。
- ・ 粒子ベッド高さが 30cm以上ではドライアウト熱流束はほとんど変化がなく、ポロシティの最も小さい 0.26 のケースでも 800 kW/m<sup>2</sup>以上のドライアウト熱流束となる。

以上の評価結果より、デブリ上面熱流束として 800 kW/m<sup>2</sup>を想定することは、粒子状ベッドの熱伝達の不確かさを考慮しても妥当と考えられる。ただし、粒子径やポロシティ等の不確かさによる粒子状ベッドから水への熱伝達の不確かさの影響を確認するため、感度解析を実施する。

コンクリートの種類（玄武岩系や石灰岩系）により、侵食挙動やガス発生挙動が異なる。また、玄武岩系コンクリートに関しては、壁方向と床方向の侵食量に相違が見られる知見が出ている。この侵食の異方性は、未だ十分な理解が得られておらず、現状モデルでも扱われていないが、モデルパラメータの感度解析により、この侵食異方性の影響を検討する。

評価モデルは以下のとおりである。

- ・ コンクリート表面から深さ方向に 1 次元熱伝導を解き温度分布を計算している。
- ・ クラスト-コンクリート界面の温度がコンクリート融点以上である場合にコンクリート侵食が計算される。
- ・ コリウムからの伝熱量と分解／溶融潜熱により侵食量が評価される。
- ・ コンクリート分解による自由水・結合水・CO<sub>2</sub>の発生を考慮し、溶融コリウム中での化学熱力学平衡計算による未酸化金属との反応により H<sub>2</sub>及び CO 発生が計算される。反応熱は、溶融炉心の崩壊熱に加算される。

コンクリートの種類は、国内プラントでは玄武岩系コンクリートが主流であるが、一部のプラントでは石灰岩系コンクリートが使用されている。コンクリートの種類により物性値を使い分けている。これらのコンクリートの侵食モデルは、ACE 実験、SURC-4 実験等のドライ実験に対する MAAP モデルの実験解析により妥当性確認が行われている。

OECD/MCCI プロジェクトの CCI 実験で確認された玄武岩系コンクリートの侵食の異方性について、この原因について明確な理解は得られていないが、溶融炉心から壁方向と床方向への熱伝達に関してコンクリート種類により相違があることを示唆している。この侵食の異方性の影響を確認するため、MAAP コードでは、溶融プールから横方向と下方向の対流熱伝達係数を調整して熱伝達の配分を変更することにより感度解析を実施する。対流熱伝達係数の幅は、CCI-3 の試験結果を考慮し、底部を側壁のモデルパラメータの推奨値の 1/4 とした場合、側壁を底部のモデルパラメータの推奨値の 1/4 とした場合を想定する。

### (3) 感度解析による確認

上記の検討により、MCCI に関して、解析モデルでの不確かさは、

- ・ エントレインメント係数
- ・ 上面熱流束係数
- ・ 溶融プールのクラスト間の熱伝達係数

に代表され、これらをパラメータとした感度解析を実施した。また、参考としてコンクリートの種類の違いについても解析を実施した（解析条件及び結果は添付 3 参照）。

評価の結果、コンクリート侵食量に対して上面熱流束の感度が支配的であることが確認された。上面熱流束を想定される下限値とした場合でも、コンクリート侵食量は、22.5cm 程度に収まることが確認された。また、実験で確認されている侵食面における侵食の不均一性については、MAAP モデルのベンチマーク解析結果から、実験の侵食面における侵食のばらつきが、MAAP コードの予測侵食量の 20% の範囲内に収まっていることから、上面熱流束の感度に比べて影響が小さいことを確認した。

なお、この分野は複雑な多成分・多相熱伝達現象であり知見が十分であるとは言えず、また事前水張り時の落下デブリの冷却性を直接調べた実験例がほとんどないことから、今後も継続して検討を進め、新たな知見が出た場合には適宜評価に反映するように努めることが重要であると考えられる。

#### 4.4 実機解析への適用性

##### 4.4.1 事故解析及び実験解析の実機への適用性

4.3において実施した各種の事故解析及び実験解析に基づき、各解析モデルの実機への適用性について評価する。

- (1) 放射線水分解等による水素・酸素発生 [圧力容器(炉心損傷後)], 燃料被覆管酸化, 燃料棒内温度変化, 燃料棒表面熱伝達, 燃料被覆管変形 [炉心(燃料)], リロケーション, 構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達 [圧力容器(炉心損傷後)]

炉心ヒートアップの解析において重要な燃料被覆管酸化, 放射線水分解等による水素・酸素発生, 燃料棒内温度変化, 燃料棒表面熱伝達, 燃料被覆管変形, リロケーション, 構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達に関するモデルの妥当性は, TMI 事故解析及び CORA 実験解析を通じて確認した。

解析により得られた炉心ヒートアップ時の水素発生量及びその発生期間は, TMI 事故の分析結果と概ね一致することを確認した。また, 事故発生後 220 分における炉心状態について, 解析結果が TMI 事故の分析結果と良く一致することを確認した。さらに, 原子炉容器壁面温度についても, 解析において TMI 事故の分析結果と同等な結果が得られていることを確認した。また, CORA 実験解析における, 燃料被覆管, 制御棒及びチャンネルボックスの温度変化について, 測定データと良く一致することを確認した。

TMI及びCORA実験とBWR実機において, 燃料被覆管酸化, 放射線水分解等による水素・酸素発生, 燃料棒内温度変化, 燃料棒表面熱伝達, 燃料被覆管変形, リロケーション, 構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達に関する基本的な現象に有意な差はなく, したがってこれらの現象に関するモデルについて, 実機解析への適用性を有すると判断できる。

- (2) 格納容器各領域間の流動, 構造材との熱伝達及び内部熱伝導, 気液界面の熱伝達 [格納容器]

格納容器各領域間の流動並びに構造材との熱伝達及び内部熱伝導に関するモデルの妥当性は, HDR実験解析及びCSTF実験解析を通じて確認した。また, 気液界面の熱伝達に関するモデルの妥当性は, HDR実験解析を通じて確認した。

HDR実験解析(E11.2実験)では, 格納容器圧力及び温度について解析結果と測定データの比較を行った。評価の結果, 雰囲気からヒートシンクへの伝熱が過小に予測されている可能性が示唆されており, それに起因して格納容器雰囲気温度を十数°C程度高めに, 格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向が確認されたが, 縦長格納容器形状や水蒸気注入位置といった実験体系に起因するものと考えられ, 主

要な傾向を再現できることを確認した。実機体系においてはこの種の不確かさは小さくなると考えられ、より適切に模擬する方向になると考えられる。また、非凝縮性ガス濃度変化の解析結果が測定データと良く一致することを確認した。CSTF実験解析では、格納容器温度及び非凝縮性ガス濃度変化について解析結果と測定データの比較を行った。解析結果が測定データと良く一致することを確認した。

HDR及びCSTFの格納容器はBWR実機と異なるものの、実験解析を通じて格納容器各領域間の流動、構造材との熱伝達及び内部熱伝導並びに気液界面の熱伝達に関する基本的な妥当性を確認しており、これらのモデルは実機解析への適用性を有すると判断できる。

(3) 熔融炉心とコンクリートの伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生 [格納容器(炉心損傷後)]

熔融炉心とコンクリートの伝熱並びにコンクリート分解及び非凝縮性ガス発生に関するモデルの妥当性は、ACE実験解析及びSURC-4実験解析を通じて確認した。

ACE実験解析及びSURC-4実験解析では、コリウム温度及びコンクリート侵食深さについて、解析結果が測定データと良く一致することを確認した。

ACE実験及びSURC-4実験は、冷却水の注水がなく、かつコリウム及びコンクリートの配置があらかじめ決められている。したがって、熔融炉心とコンクリートの伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生に関するモデルの妥当性を確認する上で、冷却水の挙動や幾何形状といった要因の影響が小さい状態でのコンクリート侵食挙動が確認できる。さらに、ACE実験のうちL7実験では、部分的に酸化したBWR燃料を模擬したコリウム溶融物が用いられており、コリウムの熱的物性もBWR実機と同等である。したがって、ACE実験解析及びSURC-4実験解析による妥当性確認に基づき、実機解析への適用性を有すると判断できる。

なお、実機におけるコンクリート侵食挙動に関しては、格納容器下部におけるFCI現象も含めた熔融炉心の堆積の仕方や水による冷却などがコンクリートへの伝熱挙動にも影響する複合的な現象であることから、添付3において知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行っている。

(4) 原子炉压力容器内FP挙動 [压力容器(炉心損傷後)]，原子炉格納容器内FP挙動 [格納容器(炉心損傷後)]

原子炉压力容器内FP挙動及び原子炉格納容器内FP挙動に関するモデルの妥当性は、PHEBUS-FP実験解析及びABCOVE実験解析を通じて確認した。

PHEBUS-FP実験解析では、FP放出割合の解析結果と測定データの比較から、FP放出の開始時刻を良く再現できることを確認している。炉心の加熱出力が増加した後は、測定データに比べて被覆管温度を高めに評価するとともに、より急激なFP放

出を予測している。FP放出が顕著になる実験開始後、約11,000秒以降は、測定データが時間とともに一定の割合で増加するのに対し、解析結果は約0.5まで急激に増加した後、緩やかな増加を示している。解析結果と測定データの差異は、実験における小規模な炉心体系の模擬に起因していると考えられるが、実機体系では、局所的な挙動による影響は相対的に小さくなるため、この種の不確かさは小さくなると考えられ、実機解析への適用性を有すると判断できる。

ABCOVE実験解析では、格納容器中に発生させたエアロゾルについて気相中の濃度変化を評価した。解析結果は、エアロゾルの生成にともなう濃度の増加、その後の凝集及び沈着による濃度の減衰を良く模擬していることを確認した。エアロゾルの凝集に伴い沈降速度が増大する挙動は区画の大きさに依存しないので、スケールの観点においても実機解析への適用性を有すると判断できる。

#### 4.4.2 感度解析による検討の整理

重要現象に関連したパラメータの不確かさを分析し、その不確かさが重要現象に与える影響を感度解析に基づき評価することで、実機解析への適用性を確認する。

##### (1) 沸騰・ボイド率変化、気液分離（水位変化）・対向流 [炉心（熱流動）]

これらは原子炉压力容器内の炉心水位挙動に関連する現象であり、原子炉压力容器内水位の低下が比較的緩慢な TQUX シーケンス及び比較的速い中小破断 LOCA シーケンスを対象として SAFER コードとの比較評価を行った。

比較評価においては、CCFL の取り扱い等により、水位変化に差異が生じるものの、水位低下幅は MAAP コードの方が保守的であり、その後の注水操作による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻は両コードで同等である。なお、感度解析は BWR-5、Mark-I 改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他の BWR プラントにおいても現象のメカニズムは同じであり、同様の傾向が得られる。したがって、MAAP コードのこれらの現象に対する解析モデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。

##### (2) 燃料被覆管酸化 [炉心（燃料）]

炉心ヒートアップに関する解析モデルについては、4.2.1に示したTMI事故の分析結果との比較を通じて、その妥当性を確認した。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故及びその後の検討により得られた知見をもとに開発されていることを踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかしながら、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、炉心ヒートアップに関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により、その影響を評価した。

炉心ヒートアップは、崩壊熱及びジルコニウム-水反応の酸化反応熱により進展することから、酸化反応が促進されることを模擬してジルコニウム-水反応速度の係数を変化させた場合の感度解析を行った。感度解析においては、仮想的な厳しい想定ではあるが、ベースケースの2倍とした。感度解析は代表的にBWR-5、Mark-I改良型格納容器プラントを対象とし、炉心部への蒸気供給の差が生じることから、TQUVシーケンス及び大破断LOCAシーケンスについて実施した。

その結果、炉心溶融時刻については、TQUV、大破断LOCAシーケンスのいずれも感度が小さいことを確認した。また、炉心溶融後の事象進展として、下部プレナムへのリロケーション開始時刻は、両シーケンスともベースケースとほぼ同時であり、炉心溶融開始から原子炉压力容器破損までは3～4時間程度の時間を要することから、原子炉压力容器破損時点で格納容器下部に十分な注水がなされており、実機解析への影響は無い。さらに、TQUVシーケンスでは、原子炉压力容器破損時の原子炉圧力も2.0MPa [gage] 以下であり、格納容器圧力への影響もわずかとなることから、実機解析への影響は無い。水素発生の観点では、感度解析においては被覆管酸化反応熱の増加を想定して仮想的に被覆管表面積を大きくしているものであり、実機の被覆管表面積は形状により決まることから影響しない。

以上、酸化反応が促進されることを模擬し、仮想的な条件としてジルコニウム-水反応速度の係数を2倍とした場合の影響を評価した。なお、感度解析はBWR-5、Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他のBWRプラントにおいても現象のメカニズムは同じであり、同様の傾向が得られる。また、コンクリート侵食量については、原子炉压力容器破損時刻への感度は小さく、格納容器下部への注水量に大きな差は生じないことから、影響は小さいと考えられる。したがって、MAAPコードの炉心ヒートアップに関する解析モデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。

### (3) リロケーション [压力容器(炉心損傷後)]

炉心のリロケーションに関する解析モデルについては、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果との比較を通じて、その妥当性を確認した。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故及びその後の検討により得られた知見をもとに開発されていることを踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかしながら、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、炉心のリロケーションに関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により、その影響を評価した。

MAAPコードでは、燃料の温度履歴に応じて炉心ノードが崩壊するまでの時間を計算しており、炉心ノード崩壊のパラメータをベースケースから  K引き下げるこ



とで、リロケーションが早く進展する状態を模擬した。感度解析は代表的にBWR-5, Mark-I改良型格納容器プラントを対象とし、炉心領域の冷却材による除熱の効果により差が生じることから、TQUVシーケンス及び大破断LOCAシーケンスについて実施した。

炉心溶融時刻については、TQUV、大破断LOCAシーケンスのいずれも感度は小さい。なお、原子炉圧力容器破損時刻についても、両シーケンスで感度は小さく、実機解析への影響は無い。さらに、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力も2.0MPa [gage]以下であり、実機解析への影響は無い。コンクリート侵食量については、原子炉圧力容器破損時刻への感度は小さく、格納容器下部への注水量に大きな差は生じないことから、影響は小さいと考えられる。

以上、炉心ノード崩壊のパラメータを、大幅ながら $\square$ K引き下げることでリロケーションが早く進展する状態を模擬した感度解析を行い、TQUV及び大破断LOCAシーケンスのいずれについても感度が小さいことを確認した。また、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力は2.0MPa [gage]以下であり、かつ格納容器下部には十分な注水があることから、実機解析での評価に影響を与えるものではない。なお、感度解析はBWR-5, Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他のBWRプラントにおいても現象のメカニズムは同じであり、同様の傾向が得られる。したがって、MAAPコードのリロケーションに関する解析モデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。

#### (4) 原子炉圧力容器内 FCI (溶融炉心細粒化、デブリ粒子熱伝達) [圧力容器(炉心損傷後)]

原子炉圧力容器内FCIにより生じる圧カスパイクは、冷却材圧力バウンダリや格納容器の破損に対する脅威とはならないと考えられるが、高圧溶融物放出を防止する観点で、原子炉圧力容器破損時刻とあいまって影響することが考えられる。圧カスパイクの大きさは溶融炉心の細粒化割合及び粒子径の影響が大きいため、ここでは溶融ジェット径、細粒化モデルにおけるエントレインメント係数及びデブリ粒子径をパラメータとして感度解析を実施した。

いずれのパラメータに対する感度解析においても、圧カスパイクは原子炉圧力容器破損までに終息する結果となっており、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力に対する感度は小さい。このことは、原子炉圧力容器内FCIは下部プレナムの冷却材がすべて蒸発すると終息するが、その後、冷却材による溶融炉心からの除熱量の減少によって下部ヘッドへの伝熱量が大きくなることで原子炉圧力容器破損が発生するため、両者が重畳しにくいことを示している。なお、感度解析はBWR-5, Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他のBWRプラントにおいても炉心質量と冷却材体積の比は大きく変わらないため、同様の傾向が得られ

る。したがって、MAAPコードの原子炉圧力容器内FCIに関するモデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。

(5) 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達 [圧力容器(炉心損傷後)]

下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する解析モデルについては、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果との比較を通じて、その妥当性を確認した。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故及びその後の検討により得られた知見を基に開発されていることを踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかしながら、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により、その影響を評価した。

溶融炉心と上面水プールとの伝熱は限界熱流束により制限されるが、この制限を低下させた条件で感度解析を実施した。その結果、原子炉圧力容器破損時刻にほとんど感度が無いことが確認された。

一方、溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達については、ギャップにおける限界熱流束で制限される。この制限を低下させた条件で感度解析を実施した結果についても、原子炉圧力及び原子炉圧力容器破損時刻にほとんど感度が無いことが確認された。

溶融炉心と上面水プールとの伝熱及び溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達ともに感度が小さい結果となっているが、この理由はこれらの現象による影響が下部プレナムにおいてドライアウトが生じるまでの期間に限定されることによる。

なお、感度解析はBWR-5、Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他のBWRプラントにおいても現象のメカニズムは同じであり、同様の傾向が得られる。したがって、MAAPコードにおける下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する解析モデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。

(6) 原子炉圧力容器破損 [圧力容器(炉心損傷後)]

有効性評価の解析において、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損は、溶接部のひずみ量としきい値の比較により判定される。そこで、このしきい値をベースケースの1/10に低下させた解析を実施し、原子炉圧力容器破損時刻の感度を評価した。評価の結果、原子炉圧力容器破損時刻は約13分早まることを確認した。また、評価では有意な影響を検知する目的から、しきい値を仮想的にベースケースの1/10まで低下させたが、実機において破断ひずみがここまで大幅に低下することは考えにくい。ため、溶接部のひずみ量しきい値の影響は十分に小さいと判断される。

なお、感度解析はBWR-5、Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したもの

であるが、その他のBWRプラントにおいても制御棒駆動機構ハウジングの構造は大きく変わらないため同様の傾向が得られる。したがって、MAAPコードの原子炉圧力容器破損に関するモデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。

(7) 原子炉圧力容器外 FCI (溶融炉心細粒化, デブリ粒子熱伝達) [格納容器(炉心損傷後)]

原子炉圧力容器外FCIについては、添付2において国内外で実施された実験等による知見を整理するとともに、解析モデルに関する不確かさの整理を行い、感度解析により有効性評価への影響を確認した。

原子炉圧力容器外FCIにおける水蒸気爆発に関しては、 $UO_2$ を用いた大規模FCI実験であるFARO実験、KROTOS実験、COTELS実験及びTROI実験の結果から、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて小さいと結論付けた。

なお、参考として、水蒸気爆発の発生を仮定した場合の影響についても、水蒸気爆発解析コード(JASMINE<sup>[25]</sup>)及び構造応答解析コード(AUTODYN<sup>[26]</sup>もしくはLS-DYNA<sup>[27]</sup>)を用いて、水蒸気爆発のトリガを解析的条件として与えることで水蒸気爆発の発生を模擬した解析を行うことにより、水蒸気爆発による格納容器ペDESTAL構造部への影響を評価し、格納容器の健全性に影響を及ぼさないことを確認している。以上より、有効性評価において、原子炉圧力容器外FCIにおける水蒸気爆発に関しては発生可能性が低く、水蒸気爆発挙動及びその後の格納容器の動的挙動に関する評価は必須とはならない。

原子炉圧力容器外FCIにおける圧カスパイクに関しては、解析モデルでの不確かさはRicou-Spaldingモデルのエントレインメント係数及び溶融粒子の径に代表され、それぞれをパラメータとした感度解析を実施した。その結果、いずれのパラメータについても、原子炉圧力容器外FCIにより生じる圧カスパイクへの感度が小さいことを確認した。

なお、感度解析はBWR-5、Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したものであり、原子炉圧力容器外FCIによる圧カスパイクは、格納容器下部に落下する溶融炉心の量や格納容器下部プール水位等の条件に依存して変化し得るものの、その他のBWRプラントにおいても現象のメカニズムは同じであり、同様の傾向が得られる。したがって、MAAPにおける原子炉圧力容器外FCIに関する解析モデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。

(8) 格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり, 溶融炉心と格納容器下部プール水との伝熱, 溶融炉心とコンクリートの伝熱 [格納容器(炉心損傷後)]

MCCIに関する種々の実験から得られた知見等に基づき不確かさの要因の分析を行い、エントレインメント係数、上面熱流束及び溶融プールからクラストへの熱伝

達係数をパラメータとした感度解析を行い、コンクリート侵食への影響を評価した。評価の結果、コンクリート侵食量に対して上面熱流束の感度が支配的であることが確認された。上面熱流束を想定される下限値とした場合でも、コンクリート侵食量は、22.5cm程度に収まることが確認された。また、実験で確認されている侵食面における侵食の不均一性については、MAAPモデルのベンチマーク解析結果から、実験の侵食面における侵食のばらつきが、MAAPコードの予測侵食量の20%の範囲内に収まっていることから、上面熱流束の感度に比べて影響が小さいことを確認した。

なお、感度解析はBWR-5、Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他のBWRプラントにおいても現象のメカニズムは同じであり、同様の傾向が得られる。しかしながら、熔融炉心・コンクリート相互作用については、複雑な多成分・多相熱伝達現象であり知見が不十分であること、また直接的な実験例が少ないことから、今後も継続して検討を進め、知見の拡充に努めることが重要であると考えられる。

表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (1/6)

| 分類          | 重要現象                    | 解析モデル   | 妥当性確認   | 不確かさ   |
|-------------|-------------------------|---|---|--|
| 炉心<br>(核)   | 崩壊熱                     | 炉心モデル(原子炉出力及び崩壊熱) (3.3.2(2))                                  | 不要  | ○ 入力値に含まれる。  |
| 炉心<br>(燃料)  | 燃料棒内<br>温度変化            | 炉心モデル(炉心熱水力モデル) (3.3.2(3))<br>溶融炉心の挙動モデル(炉心ヒートアップ) (3.3.6(1)) | TMI 事故解析(4.2.1)<br>CORA 実験解析(4.2.2)<br>感度解析(4.3.2 及び添付 1) | ○ TMI 事故解析における炉心ヒートアップ時の水素発生, 炉心領域での溶融進展状態について, TMI 事故分析結果と良く一致することを確認した。<br>○ CORA 実験解析における, 燃料被覆管, 制御棒及びチャンネルボックスの温度変化について, 測定データと良く一致することを確認した。<br>○ 炉心ヒートアップ速度の増加(被覆管酸化の促進)を想定し, 仮想的な厳しい振り幅ではあるが, ジルコニウム-水反応速度の係数を 2 倍とした感度解析により影響を確認した(BWR-5, Mark-I 改良型格納容器プラント対象)。<br>・ TQUV, 大破断 LOCA シーケンスとともに, 炉心溶融の開始時刻への影響は小さい。<br>・ 下部プレナムへのリロケーションの開始時刻は, ほぼ変化しない。 |
|             | 燃料棒表面<br>熱伝達            |   |   |  |
|             | 燃料被覆管<br>酸化             |   |   |  |
|             | 燃料被覆管<br>変形             |   |   |  |
| 炉心<br>(熱流動) | 沸騰・ボイド<br>率変化           | 炉心モデル(炉心水位計算モデル) (3.3.2(4))                                   | 感度解析(4.3.1)   | ○ TQUX シーケンス及び中小破断 LOCA シーケンスに対して, MAAP コードと SAFER コードの比較を行い, 以下の傾向を確認した。<br>・ MAAP コードでは SAFER コードで考慮している CCFL を取り扱っていないこと等から, 水位変化に差異が生じたものの水位低下幅は MAAP コードの方が保守的であり, その後の注水操作による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻は両コードで同等である。  |
|             | 気液分離<br>(水位変化)<br>・ 対向流 |   |   |  |

表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (2/6)

| 分類                    | 重要現象                              | 解析モデル  | 妥当性確認                      |                               | 不確かさ   |
|-----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|-------------------------------|--|
| 原子炉圧力容器<br>(逃がし安全弁含む) | 冷却材放出<br>(臨界流・差<br>圧流)            | 原子炉圧力容器モデル(破<br>断流モデル) (3.3.3(3))                                | 不要                         |                               | ○ 逃がし安全弁からの流量は、設計値に基づいて計算される。  |
|                       | ECCS 注水<br>(給水系・代<br>替注水設備<br>含む) | 安全系モデル(非常用炉心<br>冷却系) (3.3.5(1))<br>安全系モデル(代替注水設<br>備) (3.3.5(4)) | 不要                         |                               | ○ 入力値に含まれる。  |
| 原子炉格納容器               | 格納容器<br>各領域間<br>の流動               | 格納容器モデル(格納容器<br>の熱水力モデル)<br>(3.3.4(2))                           | HDR<br>実験解<br>析<br>(4.2.3) | CSTF<br>実 験<br>解 析<br>(4.2.4) | ○ HDR 実験解析では、格納容器圧力及び温度について、温度成層化を含めて傾向を良く再現できることを確認した。格納容器雰囲気温度を十数℃程度高めに、格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向が確認されたが、実験体系に起因するものと考えられ、実機体系においてはこの種の不確かさは小さくなるものと考えられる。また、非凝縮性ガス濃度の挙動について、解析結果が測定データと良く一致することを確認した。<br>○ CSTF 実験解析では、格納容器温度及び非凝縮性ガス濃度の挙動について、解析結果が測定データと良く一致することを確認した。 |
|                       | 構造材との<br>熱伝達及び<br>内部熱伝導           |  |                            | —                             |  |
|                       | 気液界面の<br>熱伝達                      |  | —                          |                               |  |
|                       | スプレイ冷<br>却                        | 安全系モデル(格納容器ス<br>プレイ) (3.3.5(2))<br>安全系モデル(代替注水設<br>備) (3.3.5(4)) | 不要                         |                               | ○ 入力値に含まれる。<br>○ スプレイの水滴温度は短時間で雰囲気温度と平衡に至ることから伝熱モデルの不確かさは無い。   |
|                       | 放射線水分<br>解等による<br>水素・酸素発<br>生     | —  | 不要                         |                               | ○ 窒素置換による格納容器雰囲気の不活性化が行われており、酸素発生は水の放射線分解に起因する。  |

表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (3/6)

| 分類                 | 重要現象                   | 解析モデル                                     | 妥当性確認                                 | 不確かさ  |
|--------------------|------------------------|---|---------------------------------------|---|
| 原子炉格納容器            | 格納容器ベント                | 格納容器モデル(格納容器の熱水力モデル)<br>(3.3.4(2))        | 不要                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 入力値に含まれる。</li> <li>○ MAAP コードでは格納容器ベントについては、設計流量に基づいて流路面積を入力値として与え、格納容器各領域間の流動と同様の計算方法が用いられている。</li> </ul>   |
|                    | サプレッション・プール冷却          | 安全系モデル(非常用炉心冷却系) (3.3.5(1))               | 不要                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 入力値に含まれる。</li> </ul>   |
| 原子炉圧力容器<br>(炉心損傷後) | リロケーション                | 溶融炉心の挙動モデル(リロケーション) (3.3.6(2))            | TMI 事故解析(4.2.1)<br>感度解析(4.3.3 及び添付 1) | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ TMI事故解析における炉心領域での溶融進展状態について、TMI事故分析結果と良く一致することを確認した。</li> <li>○ リロケーションの進展が早まることを想定し、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により影響を確認した(BWR-5, Mark-I改良型格納容器プラント対象)。</li> <li>・ TQUV, 大破断LOCAシーケンスとともに、炉心溶融時刻、原子炉圧力容器の破損時刻への影響が小さいことを確認した。</li> </ul> |
|                    | 構造材との熱伝達               |   |                                       |   |
|                    | 原子炉圧力容器内 FCI(溶融炉心細粒化)  | 溶融炉心の挙動モデル(下部プレナムでの溶融炉心の挙動)<br>(3.3.6(3)) | 感度解析(4.3.4 及び添付 1)                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 原子炉圧力容器内FCIに影響する項目として、溶融ジェット径, エントレインメント係数及びデブリ粒子径をパラメータとして感度解析を行い、いずれについても、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力に対する感度が小さいことを確認した。</li> </ul>  |
|                    | 原子炉圧力容器内 FCI(デブリ粒子熱伝達) |   |                                       |   |

表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (4/6)

| 分類                 | 重要現象              | 解析モデル                                     | 妥当性確認                              |   | 不確かさ  |
|--------------------|-------------------|---|------------------------------------|---|---|
| 原子炉圧力容器<br>(炉心損傷後) | 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達  | 溶融炉心の挙動モデル(下部プレナムでの溶融炉心の挙動)<br>(3.3.6(3)) | TMI事故解析(4.2.1)<br>感度解析(4.3.5及び添付1) |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ TMI事故解析における下部プレナムの温度挙動について、TMI事故分析結果と良く一致することを確認した。</li> <li>○ 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の限界熱流束、下部プレナムギャップ除熱量に係る係数に対する感度解析を行い、原子炉圧力容器破損時刻等の事象進展に対する影響が小さいことを確認した(BWR-5, Mark-I改良型格納容器プラント対象)。</li> </ul>                     |
|                    | 原子炉圧力容器破損         | 溶融炉心の挙動モデル(原子炉圧力容器破損モデル)<br>(3.3.6(4))    | 感度解析(4.3.6及び添付1)                   |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 原子炉圧力容器破損に影響する項目として制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ(しきい値)をパラメータとした感度解析を行い、原子炉圧力容器破損時刻が約13分早まることを確認した。ただし、仮想的な厳しい条件に基づく解析結果でありであり、実機における影響は十分小さいと判断される。</li> </ul>   |
|                    | 放射線水分解等による水素・酸素発生 | 格納容器モデル(水素発生)<br>(3.3.4(3))               | TMI事故解析(4.2.1)                     |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 炉心内のジルコニウム-水反応による水素発生量は、TMI事故解析を通じて分析結果と良く一致することを確認した。</li> </ul>  |
|                    | 原子炉圧力容器内FP挙動      | 核分裂生成物(FP)挙動モデル(3.3.7)                    | PHEBUS                             | — | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ PHEBUS-FP実験解析により、FP放出の開始時刻を良く再現できているものの、燃料棒被覆管温度を高め評価することにより、急激なFP放出を示す結果となった。ただし、この原因は実験における小規模な炉心体系の模擬によるものであり、実機の大規模な体系においてこの種の不確かさは小さくなると考えられる。</li> <li>○ ABCOVE実験解析により、格納容器内のエアロゾル沈着挙動を適正に評価できることを確認した。</li> </ul> |
| 原子炉格納容器内FP挙動       | -FP実験解析(4.2.7)    |   | ABCOVE実験解析(4.2.8)                  |   |   |



表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (5/6)

| 分類                 | 重要現象                   | 解析モデル                                  | 妥当性確認                                      | 不確かさ  |
|--------------------|------------------------|--|--|---|
| 原子炉格納容器<br>(炉心損傷後) | 原子炉圧力容器外 FCI(溶融炉心細粒化)  | 溶融炉心の挙動モデル(格納容器下部での溶融炉心の挙動) (3.3.6(5)) | 感度解析<br>(4.3.7,<br>4.3.8,<br>添付2及び<br>添付3) | ○ 原子炉圧力容器外FCI現象に関する項目としてエントレインメント係数及びデブリ粒子径をパラメータとして感度解析を行い, 原子炉圧力容器外FCIによって生じる圧力スパイクへの感度が小さいことを確認した。 |
|                    | 原子炉圧力容器外 FCI(デブリ粒子熱伝達) |  |  |   |

表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (6/6)

| 分類                         | 重要現象   | 解析モデル   | 妥当性確認  | 不確かさ   |
|----------------------------|--|---|--|--|
| 原子炉格納容器<br>(炉心損傷後)         | 格納容器下部<br>床面での熔融<br>炉心の拡がり   | 熔融炉心の挙動モデル(格<br>納容器下部での熔融炉心<br>挙動) (3.3.6(5)) | 感度解析<br>(4.3.8及び<br>添付3)   | ○ MAAPコードでは熔融炉心の拡がり実験や評価に関する知見に基づき、落下した熔融炉心は床上全体に均一に拡がると仮定し、それを入力で与えている。 |
|                            | ○ MCCI現象への影響の観点で、エントレインメント係数、上面熱流束及び熔融プールからクラストへの熱伝達係数をパラメータとした感度解析を行った。評価の結果、コンクリート侵食量に対して上面熱流束の感度が支配的であることを確認した。また、上面熱流束を下限値とした場合でも、コンクリート侵食量が22.5cm程度に収まることを確認した。 |   |  |  |
|                            | ○ 上記の感度解析は、想定される範囲で厳しい条件を与えるものであり、実機でのコンクリート侵食量は、感度解析よりも厳しくなることはないと考えられ、これを不確かさとして設定する。  |   |  |  |
|                            | ACE実験解析 (4.2.5)<br>SURC-4実験解析 (4.2.6)  |   | ○ ACE実験解析及びSURC-4実験解析より、熔融炉心堆積状態が既知である場合の熔融炉心とコンクリートの伝熱及びそれに伴うコンクリート侵食挙動について妥当に評価できることを確認した。       |  |
| 熔融炉心とコ<br>ンクリートの<br>伝熱     |  | 感度解析<br>(4.3.8及び<br>添付3)                      | ○ 実験で確認されている侵食の不均一性については、実験における侵食のばらつきがMAAPコードの予測侵食量の20%の範囲内に収まっていることから、上面熱流束の感度に比べて影響が小さいことを確認した。 |  |
| コンクリート<br>分解及び非凝<br>縮性ガス発生 |  |   |  |  |

## 5. 有効性評価への適用性

4章の妥当性確認において得られた重要現象に対する不確かさと、その不確かさが有効性評価に与える影響を表 5-1 に示す。

### 5.1 不確かさの取り扱いについて（評価指標の観点）

#### 5.1.1 崩壊熱 [炉心（核）]

有効性評価で用いている崩壊熱として、ANSI/ANS-5.1-1979 を用いている。ANSI/ANS-5.1-1979 は ANS の軽水炉向け標準規格として発行されたものであり、設計値等に基づく信頼性の高い評価モデルである。有効性評価においては、平衡炉心のサイクル末期燃焼度に対し 1.1 倍したものを使用しており、崩壊熱を大きくするよう考慮している。

炉心損傷防止の観点では、大きめの崩壊熱を与えることで、原子炉格納容器圧力及び温度に対して厳しい結果を与える。

格納容器破損防止の観点でも、大きめの崩壊熱を与えることで、いずれの格納容器破損モードでも、炉心ヒートアップ、溶融進展を早める傾向となる。「格納容器過圧・過温破損」の場合、原子炉格納容器圧力及び温度に対して厳しい結果を与える。「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気気直接加熱」の場合、原子炉圧力容器破損までの事象進展を早める傾向となり、高圧溶融物放出防止に対して厳しい結果を与える。「溶融燃料－冷却材相互作用」の場合、溶融炉心と冷却材の相互作用に伴う圧力スパイクを大きめに評価する結果を与える。「水素燃焼」の場合、酸素の発生量について崩壊熱を用いた評価を行っており、酸素濃度に対して厳しい結果を与える。「溶融炉心・コンクリート相互作用」の場合、溶融炉心の冷却がされにくくなり、コンクリート侵食に対して厳しい結果を与える。

以上、いずれについても、厳しい結果を与えるものの、炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性の判断には影響しない。

#### 5.1.2 沸騰・ボイド率変化、気液分離（水位変化）・対向流 [炉心（熱流動）]

これらは原子炉圧力容器内の炉心水位挙動に関する現象であり、原子炉圧力容器内水位の低下が比較的緩慢な TQUX シーケンス及び比較的速い中小破断 LOCA シーケンスを対象として SAFER コードとの比較評価を行った。

MAAP コードは SAFER コードで考慮している CCFL 現象を取り扱っていないこと等から水位変化に差異が生じたものの、水位低下幅は MAAP コードの方が保守的であり、その後の注水操作による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻は両コードで同等であることから、原子炉圧力容器内挙動を含めた全体挙動を適正に評価していると判断できる。

#### 5.1.3 冷却材放出（臨界流・差圧流） [圧力容器]

逃がし安全弁からの冷却材放出については、設計値に基づき流量が適正に計算されている。

#### 5.1.4 格納容器各領域間の流動, 構造材との熱伝達及び内部熱伝導, 気液界面の熱伝達, 格納容器ベント [格納容器]

格納容器各領域間の流動及び気液界面の熱伝達については、挙動が適正に評価され、不確かさは小さい。構造材との熱伝達及び内部熱伝導については、HDRの縦長格納容器形状や水蒸気注入位置といった実験体系に起因するものと考えられ、短期的な応答として格納容器雰囲気温度を十数℃程度高めに、原子炉格納容器圧力を1割程度高めに評価する結果となった。実機体系においてはこの種の不確かさは小さくなると考えられるが、原子炉格納容器圧力及び温度の上昇を実際の挙動よりも大きめに評価する可能性がある。なお、格納容器ベントについては、設計流量に基づいて流路面積を入力値として与え、格納容器各領域間の流動と同様の計算方法が用いられている。

#### 5.1.5 ECCS注水(給水系・代替注水設備含む) [圧力容器], スプレイ冷却, サプレッション・プール冷却 [格納容器]

ECCS注水及びスプレイ冷却については、設計値に基づき注入特性を与えることで、冷却に対して保守的な条件となるよう設定している。スプレイによる混合挙動については、液滴径を入力し、液滴と気相部の界面熱伝達により気相部が冷却されるモデルであるが、液滴の伝熱面積が大きいことにより、スプレイされた水は気相部温度と等しくなって液相に落下する結果となる。したがって、モデルの不確かさによる影響は無いと考えられる。

サプレッション・プール冷却については、ポンプ流量及び除熱量を設計値に基づき与えており、適正に評価される。

#### 5.1.6 放射線水分解等による水素・酸素発生 [格納容器] [圧力容器(炉心損傷後)]

炉心内のジルコニウム-水反応による水素発生量はBaker-Justの相関式(高温)又はCathcartの相関式(低温)を用いて計算され、これらのモデルはTMI事故解析により妥当性が確認されている。なお、BWRでは窒素置換による格納容器雰囲気の不活性化が行われることにより、酸素濃度が低いため、短期的に爆轟が生じることは無い。長期的には水の放射線分解により酸素が発生するが、電力共通研究の実験結果<sup>[30]</sup>に基づいたG値を用いて酸素発生量を評価している。BWRでは格納容器内がウェット環境にあるが、酸素濃度の判定基準への適合性について、水蒸気濃度を除いたドライ条件下で行うことにより、保守的に評価している。これらのことから、有効性評価の結果に与える影響は無い。

#### 5.1.7 炉心ヒートアップ(燃料棒内温度変化, 燃料棒表面熱伝達, 燃料被覆管酸化, 燃料被覆管変形 [炉心(燃料)], リロケーション, 構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達 [圧力容器(炉心損傷後)])

炉心ヒートアップ(燃料棒内温度変化, 燃料棒表面熱伝達, 燃料被覆管酸化, 燃料被覆管変形)に関する現象については、実機スケールで確認された例が少ない。しかしながら、

MAAP コードの解析モデルは、TMI 事故や CORA 実験等のその後の実験の知見に基づいて開発され、そのモデルを用いて実施された TMI 事故のベンチマーク解析及び CORA 実験解析において再現性も確認されていることから、妥当性があると判断でき、各事故シーケンスの評価に適用できる。

また、炉心ヒートアップ現象に関し、ジルコニウム-水反応速度に対する感度解析を実施し、影響を確認した。TQUV, 大破断 LOCA シーケンスともに、炉心溶融開始時刻及び下部プレナムへのリロケーションの開始時刻等の事象進展への影響は小さく、「格納容器過圧・過温破損」及び「原子炉圧力容器外の溶融炉心-冷却材相互作用」の評価指標に与える影響は小さい。また、「高圧溶融物・格納容器雰囲気直接加熱」については、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力が 2.0MPa[gage]を上回ることなく、格納容器破損防止対策の有効性に与える影響は無い。「溶融炉心・コンクリート相互作用」については、原子炉圧力容器破損時間への影響が小さく、原子炉圧力容器破損時点で格納容器下部に十分な注水がなされていることから、コンクリート侵食量への影響は小さいと考えられる。「水素燃焼」については、酸素の発生量について崩壊熱を用いた評価を行っており、評価指標に与える影響は無い。

リロケーションに関する現象については、実機スケールで確認された例が少ない。しかしながら、MAAP コードの解析モデルは、TMI 事故やその後の実験等の知見に基づいて開発され、その解析モデルを用いて実施された TMI 事故のベンチマーク解析において再現性も確認されていることから、妥当性があると判断でき、各事故シーケンスの評価に適用できる。

また、リロケーションに関する感度を確認するために、炉心ノード崩壊のパラメータに対し、感度解析を行った。TQUV, 大破断 LOCA シーケンスともに、炉心溶融やリロケーション後の原子炉圧力容器の破損時刻に与える感度は小さく、事象進展への影響は限定的であり、「格納容器過圧・過温破損」及び「原子炉圧力容器外の溶融炉心-冷却材相互作用」の評価指標に与える影響は無い。「高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」については、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力は 2.0MPa[gage]を上回ることなく、格納容器破損防止対策の有効性に与える影響は無い。「水素燃焼」については、酸素の発生量について崩壊熱を用いた評価を行っており、評価指標に与える影響は無い。「溶融炉心・コンクリート相互作用」については、原子炉圧力容器破損時点で格納容器下部に十分な注水がなされていることから、コンクリート侵食量への影響は小さいと考えられる。

下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する現象に関しては、実機スケールで確認された例が少なく、現象自体に不確かさが大きいと考えられる。しかしながら、MAAP コードの解析モデルは、TMI 事故やその後の実験等の知見に基づいて開発され、その解析モデルを用いて実施された TMI 事故のベンチマーク解析において再現性も確認されていることから、MAAP コードによる解析結果は一定の妥当性を有するものと考えられる。

また、下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の限界熱流束、下部プレナムギ

ギャップ除熱量に係る係数に対する感度解析を実施し、影響を確認した。原子炉压力容器破損時刻等の事象進展に大きな相違は無いため、不確かさによる原子炉压力容器破損時刻等の事象進展への影響は小さく、各事故シーケンスの評価指標への影響は小さいと考えられる。

#### 5.1.8 原子炉压力容器破損 [压力容器 (炉心損傷後)]

原子炉压力容器破損に影響する項目として「制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ (しきい値)」をパラメータとした場合の感度解析を行い、原子炉压力容器破損時刻が約 13 分早まることを確認した。ただし、この結果は仮想的な厳しい条件を与えたケースであり、実機における影響は十分小さいと判断され、各事故シーケンスの評価指標への影響は小さいと考えられる。

#### 5.1.9 原子炉压力容器内FP挙動 [压力容器 (炉心損傷後)], 原子炉格納容器内FP挙動 [格納容器 (炉心損傷後)]

PHEBUS-FP 実験解析において、ギャップ放出のタイミングについては適切に評価されることを確認している。その後の実験解析における燃料破損後の FP 放出開始のタイミング及び放出挙動については、被覆管酸化反応熱を大きく、燃料棒被覆管温度が高めに推移することにより早めに評価する傾向があったが、実験における小規模な炉心体系の模擬に起因していると考えられ、実機体系では、局所的な挙動による影響は相対的に小さくなるため、この種の不確かさは小さくなると考えられる。なお、最終的な FP 放出割合は実験と同程度となっている。

ABCOVE 実験解析により、格納容器へ放出されたエアロゾルの沈着挙動について、ほぼ適正に評価できることを確認しており、各事故シーケンスの評価への影響は小さい。

#### 5.1.10 原子炉压力容器内FCI (熔融炉心細粒化, デブリ粒子熱伝達) [压力容器 (炉心損傷後)]

原子炉压力容器内 FCI に影響する項目として、熔融ジェット径、エントレインメント係数及びデブリ粒子径をパラメータとして感度解析を行い、いずれについても、原子炉压力容器破損時点での原子炉圧力に対する感度が小さいことを確認した。

「高圧熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」では、高圧熔融物放出を防止する観点で、原子炉压力容器破損時刻とあいまって、原子炉压力容器内 FCI による原子炉圧力変化が原子炉压力容器破損時点での原子炉圧力に影響すると考えられるが、上記のとおり、原子炉压力容器破損時点での原子炉圧力に対する感度は小さく、2.0MPa[gage]を上回ることは無い。

#### 5.1.11 原子炉圧力容器外FCI（溶融炉心細粒化，デブリ粒子熱伝達）〔格納容器（炉心損傷後）〕

原子炉圧力容器外 FCI における水蒸気爆発に関しては，実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて小さく，有効性評価においては，水蒸気爆発挙動及びその後の格納容器の動的挙動に関する評価は必須ではなく，各事故シーケンスの評価に対して影響するものではない。

原子炉圧力容器外 FCI における圧力スパイクに関しては，解析モデルでの不確かさがエントレインメント係数及びデブリ粒子径に代表され，感度解析により原子炉圧力容器外 FCI により生じる圧力スパイクへの感度は小さいことを確認しており，「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」の評価指標への影響は小さい。

また，MCCI 現象への影響の観点で，エントレインメント係数に関して感度解析を実施し，MCCI によるコンクリート侵食量への感度が小さいことを確認した。

#### 5.1.12 格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり，溶融炉心と格納容器下部プール水との伝熱，溶融炉心とコンクリートの伝熱，コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生〔格納容器（炉心損傷後）〕

MCCI に関する種々の実験から得られた知見等に基づき不確かさの要因の分析を行い，MCCI 現象への影響の観点で感度解析を行った。評価の結果，コンクリート侵食量に対して上面熱流束の感度が支配的であることが確認された。上面熱流束を想定される下限値とした場合でも，コンクリート侵食量は 22.5cm 程度に収まることが確認された。

溶融炉心とコンクリートの伝熱，コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生はコンクリート侵食量に影響のある重要現象として抽出されるが，コンクリート侵食モデルは ACE 実験解析や SURC-4 実験解析により妥当性が確認されており，不確かさは限定されているため適用性を有するものと考えられる。また，実験で確認されている侵食面における侵食の不均一性については，MAAP モデルのベンチマーク解析結果から，実験における侵食のばらつきが，MAAP コードの予測侵食量の 20%の範囲内に収まっていることから，上面熱流束の感度に比べて影響が小さいことを確認した。

## 5.2 不確かさの取り扱いについて（運転操作の観点）

有効性評価において、MAAP を適用する事象で仮定する運転操作は、

- ① 逃がし安全弁の開弁による原子炉の減圧
- ② 低圧代替注水系による原子炉への注水
- ③ 格納容器代替スプレイ系による格納容器スプレイ
- ④ 格納容器圧力逃がし装置による格納容器除熱
- ⑤ 残留熱除去系による格納容器除熱
- ⑥ サプレッション・プール水位制限値到達による格納容器スプレイ停止
- ⑦ 高圧代替注水系による原子炉への注水
- ⑧ 格納容器下部注水系による格納容器下部注水
- ⑨ 外部水源からの総注水量制限到達による格納容器スプレイ停止

である。以下、各運転操作に対する MAAP コードでモデル化されている重要現象の不確かさの影響を整理する。

### 5.2.1 逃がし安全弁の開弁による原子炉の減圧

各事故シーケンスに対して、原子炉を減圧するために、時間・原子炉水位・サプレッション・プール水温等のパラメータに応じて逃がし安全弁の手動開弁操作を適宜実施する。

MAAP コードでモデル化されている重要現象の不確かさが本運転操作に与える影響として、「崩壊熱」「沸騰・ボイド率変化、気液分離（水位変化）・対向流（炉心（熱流動））」「冷却材放出（臨界流・差圧流）」「炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、被覆管酸化、被覆管変形）」等の不確かさに起因する原子炉水位挙動・サプレッション・プール水温挙動の違いが挙げられるが、4章に示した各重要現象に対する感度解析・実験解析の結果から、本運転操作に対して、上記重要現象の不確かさが与える影響は小さいと考えられる。

### 5.2.2 低圧代替注水系による原子炉への注水

各事故シーケンスに対して、炉心を冷却するために、時間・原子炉水位等のパラメータに応じて低圧代替注水系による注水を適宜実施する。

MAAP コードでモデル化されている重要現象の不確かさが本運転操作に与える影響として、「崩壊熱」「沸騰・ボイド率変化、気液分離（水位変化）・対向流（炉心（熱流動））」「冷却材放出（臨界流・差圧流）」「炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、被覆管酸化、被覆管変形）」等の不確かさに起因する原子炉水位挙動等の違いが挙げられるが、4章に示した各重要現象に対する感度解析・実験解析の結果から、本運転操作に対して、上記重要現象の不確かさが与える影響は小さいと考えられる。



### 5.2.3 格納容器代替スプレイ系による格納容器スプレイ

各事故シーケンスに対して、格納容器雰囲気冷却のために、格納容器圧力あるいは格納容器雰囲気温度が設定値に到達した時点で格納容器代替スプレイ系による格納容器スプレイを適宜実施する。

MAAP コードでモデル化されている重要現象の不確かさが本運転操作に与える影響として、「崩壊熱」「冷却材放出（臨界流・差圧流）」「構造材との熱伝達及び内部熱伝導」「炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化，燃料棒表面熱伝達，被覆管酸化，被覆管変形）」「リロケーション」等の不確かさに起因する格納容器圧力あるいは格納容器雰囲気温度の設定値到達時間の違いが挙げられるが、4章に示した各重要現象に対する感度解析・実験解析の結果から、本運転操作に対して、上記重要現象の不確かさが与える影響は小さいと考えられる。

### 5.2.4 格納容器圧力逃がし装置による格納容器除熱

各事故シーケンスに対して、格納容器から除熱するために、格納容器圧力が限界圧力等の設定値に到達した時点で格納容器圧力逃がし装置によるベントを適宜実施する。

MAAP コードでモデル化されている重要現象の不確かさが本運転操作に与える影響として、「崩壊熱」「構造材との熱伝達及び内部熱伝導」等の不確かさに起因する格納容器圧力の設定値到達時間の違いが挙げられるが、4章に示した各重要現象に対する感度解析・実験解析の結果から、本運転操作に対して、上記重要現象の不確かさが与える影響は小さいと考えられる。

### 5.2.5 残留熱除去系による格納容器除熱

「高圧注水・減圧機能喪失」「崩壊熱除去機能喪失（取水機能が喪失した場合）」シーケンスに対して、時間・原子炉水位等のパラメータに応じて残留熱除去系等による格納容器除熱を実施する。

MAAP コードでモデル化されている重要現象の不確かさが本運転操作に与える影響として、「崩壊熱」「沸騰・ボイド率変化，気液分離（水位変化）・対向流（炉心（熱流動））」「炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化，燃料棒表面熱伝達，燃料被覆管酸化，燃料被覆管変形）」等の不確かさに起因する原子炉水位挙動の違いが挙げられるが、4章に示した各重要現象に対する感度解析・実験解析の結果から、本運転操作に対して、上記重要現象の不確かさが与える影響は小さいと考えられる。

### 5.2.6 サプレッション・プール水位制限値到達による格納容器スプレイ停止

各事故シーケンスに対して、サプレッション・プール水位が制限値まで到達した場合に格納容器スプレイを停止させる。

MAAP コードでモデル化されている重要現象の不確かさが本運転操作に与える影響とし

て、「崩壊熱」「冷却材放出（臨界流・差圧流）」「構造材との熱伝達及び内部熱伝導」「炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化，燃料棒表面熱伝達，燃料被覆管酸化，燃料被覆管変形）」「リロケーション」等の不確かさに起因するサプレッション・プール水位の設定値到達時間の違いが挙げられるが，4章に示した各重要現象に対する感度解析・実験解析の結果から，本運転操作に対して，上記重要現象の不確かさが与える影響は小さいと考えられる。

#### 5.2.7 高圧代替注水系による原子炉への注水

「高圧・低圧注水機能喪失」「崩壊熱除去機能喪失」「LOCA時注水機能喪失」に対して，高圧代替注水系による原子炉への注水を適宜実施する。

本運転操作は水位・温度・圧力等の物理パラメータを検知して実施するものではないため，MAAPコードでモデル化されている重要現象の不確かさが本運転操作に与える影響は無い。

#### 5.2.8 格納容器下部注水系による格納容器下部注水

熔融炉心・コンクリート相互作用を緩和するために，熔融炉心の下部プレナムへのリロケーション後，原子炉圧力容器下鏡温度が設定値に到達した場合に格納容器下部注水系による格納容器下部注水を実施する。

MAAPコードでモデル化されている重要現象の不確かさが本運転操作に与える影響として，「炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化，燃料棒表面熱伝達，燃料被覆管酸化，燃料被覆管変形）」「リロケーション」「下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達」等の不確かさに起因する原子炉圧力容器下鏡温度の設定値到達時間の違いが挙げられるが，4章に示した各重要現象に対する感度解析・実験解析の結果から，本運転操作に対して，上記重要現象の不確かさが与える影響は小さいと考えられる。

#### 5.2.9 外部水源からの総注水量制限到達による格納容器スプレイ停止

「格納容器過圧・過温破損」では，外部水源からの総注水量制限到達により格納容器スプレイを停止させる。格納容器スプレイ停止後には，格納容器圧力が限界圧力等の設定値に達した時点で格納容器圧力逃がし装置によるベントを実施する。

MAAPコードでモデル化されている重要現象の不確かさが本運転操作に与える影響として，「崩壊熱」「冷却材放出（臨界流・差圧流）」「構造材との熱伝達及び内部熱伝導」「炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化，燃料棒表面熱伝達，燃料被覆管酸化，燃料被覆管変形）」「リロケーション」等の不確かさに起因する外部水源からの注水開始時間・総注水量制限到達時間の違いが挙げられる。総注水制限に到達する時間が早ければ（遅ければ），格納容器スプレイの停止が早く（遅く）なると考えられるが，格納容器除熱に寄与する注水量の総量に変化はなく，長期的な格納容器圧力挙動の観点では影響が小さいと考えられる。したがって，本運転操作に対して，上記重要現象の不確かさが与える影響は小さいと考えられる。

表 5-1 重要現象の不確かさの有効性評価解析への影響の整理 (1/9)

| 分類         | 重要現象     | 解析モデル  | 不確かさ   | 有効性評価解析への影響  |
|------------|----------|--|--|--|
| 炉心<br>(核)  | 崩壊熱      | 炉心モデル (原子炉出力及び崩壊熱)<br>(3.3.2(2))                                   | ○入力値に含まれる。   | ○有効性評価では、大きめの崩壊熱を使用することから、いずれの事象についても厳しい結果を与えるものの、重大事故等対策の有効性の判断には影響しない。   |
| 炉心<br>(燃料) | 燃料棒内温度変化 | 炉心モデル (炉心熱水力モデル) (3.3.2(3))<br>溶融炉心の挙動モデル (炉心ヒートアップ)<br>(3.3.6(1)) | <p>○TMI 事故解析における炉心ヒートアップ時の水素発生、炉心領域での溶融進展状態について、TMI 事故分析結果と良く一致することを確認した。</p> <p>○CORR 実験解析における、燃料被覆管、制御棒及びチャンネルボックスの温度変化について、測定データと良く一致することを確認した。</p> <p>○炉心ヒートアップ速度の増加 (被覆管酸化の促進) を想定し、仮想的な厳しい振幅ではあるが、ジルコニウム水反応速度の係数を 2 倍とした感度解析により影響を確認した (BWR-5, Mark-I 改良型格納容器プラント対象)。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・TQUV, 大破断 LOCA シーケンスとともに、炉心溶融の開始時刻への影響は小さい。</li> <li>・下部プレナムへのリロケーション開始時刻は、ほぼ変化しない。</li> </ul> | <p>○TMI 事故の再現性を確認しており、炉心ヒートアップに係る基本的なモデルについては妥当性があると判断でき、各事故シーケンスの評価に適用できる。</p> <p>○感度解析では、下部プレナムへのリロケーションの開始時刻等の事象進展への影響は小さい。</p> <p>○「格納容器過圧・過温破損」及び「原子炉圧力容器外の溶融炉心-冷却材相互作用」の評価指標に与える影響は小さい。</p> <p>○「高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」については、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力が 2.0MPa[gage]を上回ることはなく、格納容器破損防止対策の有効性に与える影響は無い。</p> <p>○「溶融炉心・コンクリート相互作用」については、原子炉圧力容器破損時間への影響が小さく、コンクリート侵食量への影響は小さいと考えられる。</p> <p>○「水素燃焼」については、酸素の発生量について崩壊熱を用いた評価を行っており、評価指標に与える影響は無い。</p> |
|            | 燃料棒表面熱伝達 |  |  |  |
|            | 燃料被覆管酸化  |  |  |  |
|            | 燃料被覆管変形  |  |  |  |

表 5-1 重要現象の不確かさの有効性評価解析への影響の整理 (2/9)

| 分類                    | 重要現象                  | 解析モデル  | 不確かさ   | 有効性評価解析への影響  |
|-----------------------|-----------------------|--|--|--|
| 炉心<br>(熱流動)           | 沸騰・ボイド率変化             | 炉心モデル(炉心水位計算モデル)(3.3.2(4))                             | <p>○TQUX シーケンス及び中小破断 LOCA シーケンスに対して、MAAP コードと SAFER コードの比較を行い、以下の傾向を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・MAAP コードでは SAFER コードで考慮している CCFL を取り扱っていないこと等から水位変化に差異が生じたものの水位低下幅は MAAP コードの方が保守的であり、その後の注水操作による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻は両コードで同等である。</li> </ul> | <p>○原子炉水位に関し、原子炉圧力容器内挙動をより精緻に評価可能な SAFER コードとの比較において、その挙動の差異は小さく、MAAP コードでは原子炉圧力容器内挙動を含めた全体挙動を適正に評価していると判断できる。</p> |
|                       | 気液分離(水位変化)・対向流        |  |  |  |
| 原子炉圧力容器<br>(逃がし安全弁含む) | 冷却材放出(臨界流・差圧流)        | 原子炉圧力容器モデル(破断流モデル)(3.3.3(3))                           | ○逃がし安全弁からの流量は、設計値に基づいて計算される。   | ○設計値に基づき流量が適正に計算されており、有効性評価への適用性に問題はなく、重大事故等対策の有効性の判断には影響しない。  |
|                       | ECCS 注水(給水系・代替注水設備含む) | 安全系モデル(非常用炉心冷却系)(3.3.5(1))<br>安全系モデル(代替注水設備)(3.3.5(4)) | ○入力値に含まれる。   | ○設計値に基づいて注入特性を与えることで、冷却に対して保守的な条件となるよう設定されており、いずれの事象についても厳しい結果を与えるものの、重大事故等対策の有効性の判断には影響しない。                       |

表 5-1 重要現象の不確かさの有効性評価解析への影響の整理 (3/9)

| 分類      | 重要現象            | 解析モデル                           | 不確かさ  |  | 有効性評価解析への影響   |
|---------|-----------------|---------------------------------|---|--|---|
| 原子炉格納容器 | 格納容器各領域間の流動     | 格納容器モデル(格納容器の熱水力モデル) (3.3.4(2)) | ○HDR 実験解析では、格納容器圧力及び温度について、温度成層化を含めて傾向を良く再現できることを確認した。格納容器雰囲気温度を十数℃程度高め、格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向が確認されたが、実験体系に起因するものと考えられ、実機体系においてはこの種の不確かさは小さくなるものと考えられる。また、非凝縮性ガス濃度の挙動について、解析結果が測定データと良く一致することを確認した。 | ○CSTF 実験解析では、格納容器温度及び非凝縮性ガス濃度の挙動について、解析結果が測定データと良く一致することを確認した。 | ○短期的な応答として雰囲気からヒートシンクへの伝熱が過小に予測されている可能性が示唆されていることから、原子炉格納容器圧力及び温度の上昇を実際の挙動よりも大きめに評価する可能性があるが、実機体系においてはこの種の不確かさは小さくなると考えられる。 |
|         | 構造材との熱伝達及び内部熱伝導 |                                 |   | —  |   |
|         | 気液界面の熱伝達        |                                 | —   | —  |   |
|         | スプレー冷却          |                                 | 安全系モデル(格納容器スプレー) (3.3.5(2))<br>安全系モデル(代替注水設備) (3.3.5(4))  | ○入力値に含まれる。   |   |

表 5-1 重要現象の不確かさの有効性評価解析への影響の整理 (4/9)

| 分類      | 重要現象              | 解析モデル                           | 不確かさ  | 有効性評価解析への影響   |
|---------|-------------------|---------------------------------|---|---|
| 原子炉格納容器 | 放射線水分解等による水素・酸素発生 | —                               | ○窒素置換による格納容器雰囲気の不活性化が行われており、酸素発生は水の放射線分解に起因する。  | ○窒素置換により酸素発生は水の放射線分解に起因するが、電力共通研究の実験結果 <sup>130)</sup> に基づいたG値を用いている。<br>○酸素濃度の判断基準として水蒸気濃度を除くドライ条件において確認することにより保守性を与えている。<br>○「水素燃焼」に対する有効性評価では、これらの保守的な設定により、不確かさが与える影響は無い。 |
|         | 格納容器ベント           | 格納容器モデル(格納容器の熱水力モデル) (3.3.4(2)) | ○入力値に含まれる。<br>○MAAP コードでは格納容器ベントについては、設計流量に基づいて流路面積を入力値として与え、格納容器各領域間の流動と同様の計算方法が用いられている。 | ○格納容器の熱水力モデルについて、適用性に問題はなく、重大事故等対策の有効性の判断には影響しない。   |
|         | サブプレッション・プール冷却    | 安全系モデル(非常用炉心冷却系) (3.3.5(1))     | ○入力値に含まれる。  | ○設計値に基づいて冷却特性を与えることで、冷却に対して保守的な条件となるよう設定されており、いずれの事象についても厳しい結果を与えるものの、重大事故等対策の有効性の判断には影響しない。  |

表 5-1 重要現象の不確かさの有効性評価解析への影響の整理 (5/9)

| 分類                           | 重要現象                   | 解析モデル   | 不確かさ  | 有効性評価解析への影響  |
|------------------------------|------------------------|---|---|--|
| 原子炉圧力容器(逃がし安全弁含む)<br>(炉心損傷後) | リロケーション                | 熔融炉心の挙動モデル<br>(リロケーション)<br>(3.3.6(2))         | <ul style="list-style-type: none"> <li>○TMI 事故解析における炉心領域での熔融進展状態について、事故分析結果と良く一致することを確認した。</li> <li>○リロケーションの進展が早まることを想定し、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により影響を確認した (BWR-5, Mark-I 改良型格納容器プラント対象)。</li> <li>・TQUV, 大破断 LOCA シーケンスとともに、炉心熔融時刻, 原子炉圧力容器の破損時刻への影響が小さいことを確認した。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○炉心損傷挙動について、実機に対する妥当性が確認されており、有効性評価への適用性に問題は無い。</li> <li>○感度解析では、下部プレナムへのリロケーションの開始時刻等の事象進展への影響は小さい。</li> <li>○「格納容器過圧・過温破損」及び「原子炉圧力容器外の熔融炉心-冷却材相互作用」の評価指標に与える影響は無い。</li> <li>○「高圧熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」については、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力が 2.0MPa[gage]を上回ることなく、格納容器破損防止対策の有効性に与える影響は無い。</li> <li>○「熔融炉心・コンクリート相互作用」については、原子炉圧力容器破損時間への影響が小さく、コンクリート侵食量への影響は小さいと考えられる。</li> <li>○「水素燃焼」については、酸素の発生量について崩壊熱を用いた評価を行っており、評価指標に与える影響は無い。</li> </ul> |
|                              | 構造材との熱伝達               |   |   |  |
|                              | 原子炉圧力容器内 FCI(熔融炉心細粒化)  | 熔融炉心の挙動モデル<br>(下部プレナムでの熔融炉心の挙動)<br>(3.3.6(3)) | ○原子炉圧力容器内 FCI に影響する項目として、熔融ジェット径, エントレインメント係数及びデブリ粒子径をパラメータとして感度解析を行い、いずれについても、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力に対する感度が小さいことを確認した。   | ○「高圧熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」では、高圧熔融物放出を防止する観点で、原子炉圧力容器破損の時期とあいまって、原子炉圧力容器内 FCI による原子炉圧力変化が影響すると考えられるが、感度解析の結果、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力に対する感度は小さく、2.0MPa[gage]を上回ることが無く、重大事故等対策の有効性の判断に影響しない。   |
|                              | 原子炉圧力容器内 FCI(デブリ粒子熱伝達) |   |   |  |

表 5-1 重要現象の不確かさの有効性評価解析への影響の整理 (6/9)

| 分類                               | 重要現象              | 解析モデル                                     | 不確かさ  | 有効性評価解析への影響  |
|----------------------------------|-------------------|---|---|--|
| 原子炉圧力容器<br>(逃がし安全弁含む)<br>(炉心損傷後) | 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達  | 溶融炉心の挙動モデル<br>(下部プレナムでの溶融炉心挙動) (3.3.6(3)) | <ul style="list-style-type: none"> <li>○TMI 事故解析における下部プレナムの温度挙動について、TMI 事故分析結果と良く一致することを確認した。</li> <li>○下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の限界熱流束、下部プレナムギャップ除熱量に係る係数に対する感度解析を行い、原子炉圧力容器破損時刻等の事象進展に対する影響が小さいことを確認した (BWR-5, Mark-I 改良型格納容器プラント対象)。</li> </ul> | ○感度解析の結果、原子炉圧力容器破損時刻等の事象進展への影響は小さく、各事故シーケンスの評価指標への影響は小さいと考えられる。      |
|                                  | 原子炉圧力容器破損         | 溶融炉心の挙動モデル<br>(原子炉圧力容器破損モデル) (3.3.6(4))   | ○原子炉圧力容器破損に影響するパラメータとして、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ(しきい値)に対する感度解析を行い、原子炉圧力容器破損が約 13 分早まることを確認した。ただし、仮想的な厳しい条件に基づく解析結果であり、実機における解析への影響は十分小さいと判断される。  | ○原子炉圧力容器破損モデルに関する感度解析により、原子炉圧力容器破損時刻に大きな感度はなく、各事故シーケンスの評価指標への影響は小さい。 |
|                                  | 放射線水分解等による水素・酸素発生 | 格納容器モデル(水素発生) (3.3.4(3))                  | ○炉心内のジルコニウム-水反応による水素発生量は、TMI 事故解析を通じて分析結果と良く一致することを確認した。  | ○炉心内の水素発生量は実機に対する妥当性が確認されており、有効性評価への適用性に問題は無い。                       |



表 5-1 重要現象の不確かさの有効性評価解析への影響の整理 (7/9)

| 分類                               | 重要現象               | 解析モデル                     | 不確かさ  | 有効性評価解析への影響   |
|----------------------------------|--------------------|---------------------------|---|---|
| 原子炉圧力容器<br>(逃がし安全弁含む)<br>(炉心損傷後) | 原子炉圧力容器内 FP 挙動     | 核分裂生成物 (FP) 挙動モデル (3.3.7) | <p>○ PHEBUS-FP 実験解析により、FP 放出の開始時間を良く再現できているものの、燃料被覆管温度を高めにより、急激な FP 放出を示す結果となった。ただし、この原因は実験における小規模な炉心体系の模擬によるものであり、実機の大規模な体系においてこの種の不確かさは小さくなると考えられる。</p> | <p>○ FP 放出の開始時間に関する基本的なモデルについては実験体系により妥当性が確認されている。燃料破損後の FP 放出挙動に関しては小規模体系の模擬性が原因と推測され、実機規模の体系の適用性に問題はなく、重大事故等対策の有効性の判断には影響しない。</p> <p>○ 格納容器内エアロゾル沈着挙動は適正に評価され、有効性評価への適用性に問題はなく、重大事故等対策の有効性の判断には影響しない。</p> |
|                                  | 原子炉格納容器<br>(炉心損傷後) |                           | 原子炉格納容器内 FP 挙動  |   |

表 5-1 重要現象の不確かさの有効性評価解析への影響の整理 (8/9)

| 分類              | 重要現象                   | 解析モデル                                   | 不確かさ  | 有効性評価解析への影響  |
|-----------------|------------------------|---|---|--|
| 原子炉格納容器 (炉心損傷後) | 原子炉圧力容器外 FCI(溶融炉心細粒化)  | 溶融炉心の挙動モデル (格納容器下部での溶融炉心の挙動) (3.3.6(5)) | ○原子炉圧力容器外 FCI に影響する項目として、エントレインメント係数及びデブリ粒子径をパラメータとして感度解析を行い、原子炉圧力容器外 FCI によって生じる圧力スパイクへの感度が小さいことを確認した。 | ○原子炉圧力容器外 FCI における水蒸気爆発に関しては、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて小さく、有効性評価においては、水蒸気爆発挙動及びその後の格納容器の動的挙動に関する評価は必須では無く、各事故シーケンスの評価指標に対して影響するものではない。<br>○感度解析の結果、原子炉圧力容器外 FCI によって生じる圧力スパイクへの感度が小さいことから、「原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用」の評価指標への影響は小さい。 |
|                 | 原子炉圧力容器外 FCI(デブリ粒子熱伝達) |   |   |  |

表 5-1 重要現象の不確かさの有効性評価解析への影響の整理 (9/9)

| 分類              | 重要現象                | 解析モデル                                   | 不確かさ   | 有効性評価解析への影響   |
|-----------------|---------------------|---|--|---|
| 原子炉格納容器 (炉心損傷後) | 格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり  | 溶融炉心の挙動モデル (格納容器下部での溶融炉心の挙動) (3.3.6(5)) | ○MAAP コードでは溶融炉心の拡がり実験や評価に関する知見に基づき、落下した溶融炉心は床上全体に均一に拡がると仮定し、それを入力で与えている。   | ○「溶融炉心・コンクリート相互作用」では、上面熱流束を主要因としてコンクリート侵食量の予測に与える不確かさがあり、MAAP で得られた結果に対し、不確かさを考慮することで、格納容器破損防止対策の有効性を確認できる。 |
|                 | 溶融炉心と格納容器下部プール水との伝熱 |   | ○MCCI 現象への影響の観点で、エントレインメント係数、上面熱流束及び溶融プールからクラストへの熱伝達係数をパラメータとした感度解析を行った。評価の結果、コンクリート侵食量に対して上面熱流束の感度が支配的であることを確認した。また、上面熱流束を下限値とした場合でも、コンクリート侵食量が 22.5cm 程度に収まることを確認した。<br>○上記の感度解析は、想定される範囲で厳しい条件を与えるものであり、実機でのコンクリート侵食量は、感度解析よりも厳しくなることはないと考えられ、これを不確かさとして設定する。 |   |
|                 | 溶融炉心とコンクリートの伝熱      |   | ○ACE 実験解析及び SURC-4 実験解析により、炉心デブリ堆積状態が既知である場合の炉心デブリとコンクリートの伝熱及びそれに伴うコンクリート侵食挙動について妥当に評価できることを確認した。  |   |
|                 | コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生  |   | ○実験で確認されている侵食の不均一性については、実験における侵食のばらつきが MAAP コードの予測侵食量の 20%の範囲内に収まっていることから、上面熱流束の感度に比べて影響が小さいことを確認した。   |   |

6. 参考文献

- [1] American Nuclear Society Standard, ANSI/ANS-5.1-1979, American National Standard for Decay Heat Power in Light Water Reactors, ANSI/ANS-5.1-1979, August 1979.
- [2] R. E. Henry and H. K. Fauske, “The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices and Short Tubes,” J. Heat Transfer, Trans. ASME, 1971
- [3] “Critical Flow Data Review and Analysis” EPRI NP-2192, 1982.
- [4] “The Marviken Full Scale Critical Flow Tests, Third Series, Description of the Test Facility,” MXC-101, December 1979.
- [5] “The Marviken Full Scale Critical Flow Tests, Description of the Test Facility,” MXC-102, December 1979.
- [6] Kwang-hahn(KAERI) et al., “A State-of-art review of the reactor lower head models employed in three representative U.S. Severe Accident Codes,” Progress in Nuclear Energy, Vol. 42, No.3, p361-382, 2003.
- [7] D. Magallon et al., “European expert network for the reduction of uncertainties in severe accident safety issues (EURSAFE)”, Nuclear Engineering and Design 235 (2005) 309–346.
- [8] 中島 他, 「SAMPSON コードによる ABWR 格納容器ペデスタル上の炉心デブリの 3 次元拡がり評価」, 日本原子力学会「2013 年秋の大会」, H12, 2013 年 9 月
- [9] A.T.Wassel, J.L.Farr, and M.S.Hoseyni, ”SUPRA: A Code for Simulating Removal of Radionuclides by Water Pools Under Severe Accident Conditions,” EPRI/NP-3886-CCMP, February 1985.
- [10] “TMI-2 Analysis Exercise Final Report”, NEA/CSNI/R(91)8,1992
- [11] TMI-2 vessel inspection project Integration Report, NUREG/CR-6197
- [12] “A Scenario of the Three Mile Island Unit 2 Accident, “Nuclear Technology Vol.87, 1989.
- [13] Peter Hofmann, Siegfried J. L. Hagen, Volker Noack, Gerhard Schanz, Leo K. Sepold, “Chemical-Physical Behavior of Light Water Reactor Core Components Tested Under Severe Reactor Accident Conditions in the CORA Facility,” Nucl. Technol., 118, 200 (1997),
- [14] “International standard problem 29: distribution of hydrogen within the HDR containment under severe accident conditions: final comparison report,” NEA/CSNI/R(93)4, 1993.
- [15] S. J. Lee, C. Y. Paik, R. E. Henry, M. E. Epstein, and M. G. Plys, “Benchmark of

- the Heiss Dampf Reaktor E11.2 Containment hydrogen-Mixing Experiment using the MAAP4 Code”, Nucl. Technol., 125, 182 (1999).
- [16] G. R. Bloom, et al., “Hydrogen mixing and distribution in containment atmospheres,” EPRI Report NP-2669, 1983.
  - [17] OECD/NEA “Second OECD (NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions,” NEA/CSNI/R(92)10.
  - [18] “International standard problem No 24: ISP-24: SURC-4 experiment on core-concrete interactions,” NEA/CSNI-155, 1988.
  - [19] Clement and Haste (IRSN, Cadarache), “Thematic Network for a PHEBUS FPT-1 International Standard Problem,” OECD/NEA, July 2003.
  - [20] D. Jacquemain, et al., “FPT1 Final Report Final Version,” December 2000.
  - [21] 社団法人 日本原子力学会 「シビアアクシデント時の格納容器内の現実的ソースターム評価」 (平成 22 年 4 月)
  - [22] R.K. Hilliard et al. “Aerosol Behavior Code Validation and Evaluation (ABCOVE) Preliminary Results of Test AB5,” HEDL-SA-2854FP, Feb. 1983.
  - [23] Francisco J. Souto, F. Eric Haskin, Lubomyra N. Kmetyk, “MELCOR 1.8.2 Assessment: Aerosol Experiments ABCOVE AB5, AB6, AB7, and LACE LA2,” SAND-94-2166
  - [24] K. Kang, et, al. “Experimental Investigations on In-Vessel Corium Retention through Inherent Gap Cooling Mechanisms,” Journal of Nuclear Science and Technology, 2006
  - [25] K. Moriyama, et al, Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA-Data/Code 2008-014, 2008
  - [26] 片山, 高速衝突と爆発問題を中心とした諸分野における衝撃解析, 「第 7 回衝撃工学フォーラム (中級者のための衝撃工学入門)」, 日本材料学会, 平成 20 年 11 月
  - [27] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I, 2007
  - [28] Lipinski, “A Model for Boiling and Dryout in Particle Bed,” NUREG/CR-2646, SAND82-0765 (1982).
  - [29] (財) 原子力安全研究協会, 「シビアアクシデント対策評価のための格納容器イベントツリーに関する検討」, 平成 13 年 7 月
  - [30] 「事故時放射線分解に関する研究」 BWR 電力共通研究 昭和 63 年 3 月

## 参考 1

### MAAP と NUREG-1465 のソースタームについて

#### 1. まえがき

MAAP では、炉心溶融に伴う燃料からの核分裂生成物(FP)の放出及び FP の状態変化・輸送モデル等がモデル化されており、炉心溶融時の格納容器内への FP の放出及び格納容器内の FP の移行挙動を事象進展に応じて評価することができる。

一方で、炉心溶融を考慮した場合の格納容器内への FP の放出及び FP の状態変化・輸送モデルとしては、米国 NRC で整備された NUREG-1465<sup>[A-1]</sup>のソースタームがあり、海外での規制等に活用されている。

本参考資料は、MAAP のソースタームと NUREG-1465 のソースタームの比較検討を行うことで、MAAP による格納容器内ソースターム評価の特徴について考察したものである。

#### 2. NUREG-1465 の代替ソースターム

NUREG-1465 では、格納容器への放出過程を以下の 4 つのフェーズごとに分けて評価している。これらの放出フェーズには継続時間が設定され、各放出フェーズにおける放出率は一定としている。

##### ギャップ放出（被覆管破損から 0.5 時間）

燃料被覆管の破損が生じ、燃料ペレットと燃料被覆管との間のギャップに存在する FP が放出される。

##### 早期原子炉圧力容器内放出（炉心損傷から 1.5 時間）

炉心損傷開始から、溶融炉心が原子炉圧力容器底部へ落下して原子炉圧力容器底部が破損するまでの期間に燃料から FP が放出される。

##### 原子炉圧力容器外放出（原子炉圧力容器破損から 3.0 時間）

原子炉圧力容器底部の破損後、格納容器下部区画に落下した溶融炉心がコンクリートと反応し、FP が放出される。この放出は溶融炉心が十分冷却されたときに終了する。

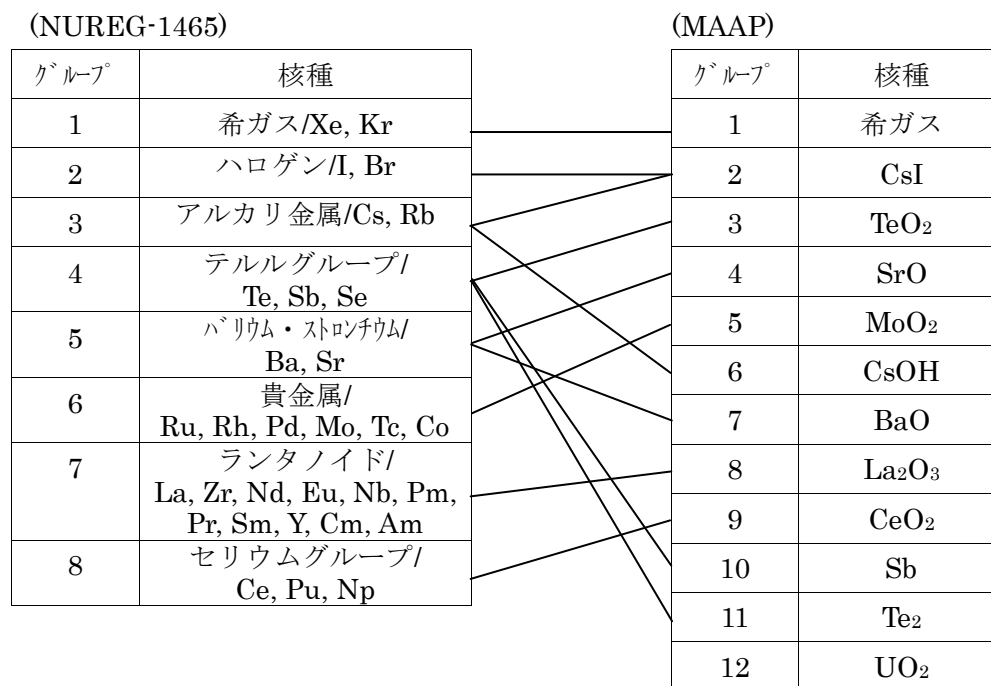
##### 後期原子炉圧力容器内放出（原子炉圧力容器破損から 10 時間）

早期原子炉圧力容器内放出期間に原子炉圧力容器内に沈着していた揮発性核種

(ハロゲン, アルカリ金属, テルルグループ) が再蒸発し, 格納容器へ放出される。

FP 組成については, 物理・化学的挙動の類似性や放射線学的影響の重要度等に基づき, 各核種の放射エネルギーを求める用途に用いることから, 以下の 8 つの元素ごとのグループに分類している。一方, MAAP では化学的形態を考慮して, FP を 12 のグループに分類し, 炉心からの放出速度と原子炉圧力容器内及び格納容器内での移行挙動を評価している。NUREG-1465 における FP グループの分類は, WASH-1400<sup>[A-2]</sup>における FP グループ分けをもとに, その後の検討を反映したものであり, MAAP における分類と直接的な関連は無い。しかしながら, 以下の図に示すように, MAAP で分類されている放射性物質のうち, 放出に寄与するものは NUREG-1465 のソースタームにおいても網羅されており, 格納容器内ソースタームの評価を行うにあたって, 取り扱われている核種は同等となっている。

[FP の核種グループ]



NUREG-1465 の FP の放出割合については, 上述の FP 核種グループごとに平均的な放出割合を「代替ソースターム」としてまとめている。代替ソースタームでは, 炉型 (BWR プラントと PWR プラント) ごとのソースタームが設定されているが, これは, BWR と PWR では炉心出力密度や Zr 酸化量の違いにより, FP 放出量や放出タイミン

グに相違が生じると評価されたためである。

なお、ソースタームの放出割合は、保守的に設定された損傷燃料からの初期 FP 放出（ギャップ放出）を除き、原子炉圧力容器が低圧で破損する事故について、保守的あるいは限界的な値というより、代表的又は典型的な値を示しており、全てのシビアアクシデントの事故シーケンスを包絡しているわけではなく、ある単一の事故シーケンスを表しているものでもない。NUREG-1465 で提案された BWR プラントに対する代替ソースタームを以下に示す。

[代替ソースターム (BWR プラント)]

(初期炉内インベントリに対する割合)

| グループ | 名称      | ギャップ放出 | 早期原子炉圧力容器内放出 | 原子炉圧力容器外放出 | 後期原子炉圧力容器内放出 |
|------|---------|--------|--------------|------------|--------------|
| 1    | 希ガス     | 0.05   | 0.95         | 0          | 0            |
| 2    | ハロゲン    | 0.05   | 0.25         | 0.30       | 0.01         |
| 3    | アルカリ金属  | 0.05   | 0.20         | 0.35       | 0.01         |
| 4    | Te グループ | 0      | 0.05         | 0.25       | 0.005        |
| 5    | Ba, Sr  | 0      | 0.02         | 0.1        | 0            |
| 6    | 貴金属     | 0      | 0.0025       | 0.0025     | 0            |
| 7    | ランタノイド  | 0      | 0.0002       | 0.005      | 0            |
| 8    | Ce グループ | 0      | 0.0005       | 0.005      | 0            |

### 3. MAAP と NUREG-1465 のソースタームの比較

参考文献<sup>[A-3]</sup>において、米国 Peach Bottom プラント(Mark-I 型格納容器/BWR-4)を対象に、下記に示した 3つの事故シーケンスに対して、MAAP によるシビアアクシデント解析結果から得られた格納容器内ソースタームと NUREG-1465 で示されている BWR プラントの格納容器内のソースタームが比較されており、以下に概要を示す。

[事故シーケンス]

- ・ TB1 シーケンス (全交流電源喪失) + 10 時間でバッテリー枯渇
- ・ TC2 シーケンス (ATWS) + 圧力容器減圧なし
- ・ S2E1 シーケンス (2 インチ破断)

図 1 に、NUREG-1465, MAAP 及び従来の立地評価における仮想事故相当について、原子炉圧力容器破損後 1 時間時点における格納容器内ソースターム放出割合の比較を示す。希ガスについては、すべてのシーケンスにおいてほぼ全量を放出しきっており、



NUREG-1465 及び仮想事故相当と同程度の放出割合となっている。高揮発性の核種であるよう素については、TB1 シーケンスを除いて NUREG-1465 及び仮想事故相当と同程度の放出割合となっており、Cs, Te 共に同様の傾向を示している。TB1 シーケンスにおいて放出割合が少なくなっている理由としては、原子炉圧力容器の破損時刻が他の事象に比べて遅く、原子炉圧力容器内への FP 沈着量が多くなっているためと考えられる。また、低揮発性の核種である Sr については、NUREG-1465 に比べて MAAP の方が 1 桁程度少ない結果となっているものの、核種ごとの全体的な放出割合は同様の傾向を示している。

図 2 に、NUREG-1465, MAAP 及び従来の立地評価における仮想事故相当について、事故収束後における格納容器内ソースターム放出割合の比較を示す。図 1 に示した原子炉圧力容器破損後 1 時間の時点において、格納容器側へ FP をほぼ放出しきっており、原子炉圧力容器破損後 1 時間時点の放出割合と同様となっている。なお、仮想事故では、瞬時放出の扱いとなっており、放出割合の時間変化は考慮されていない。

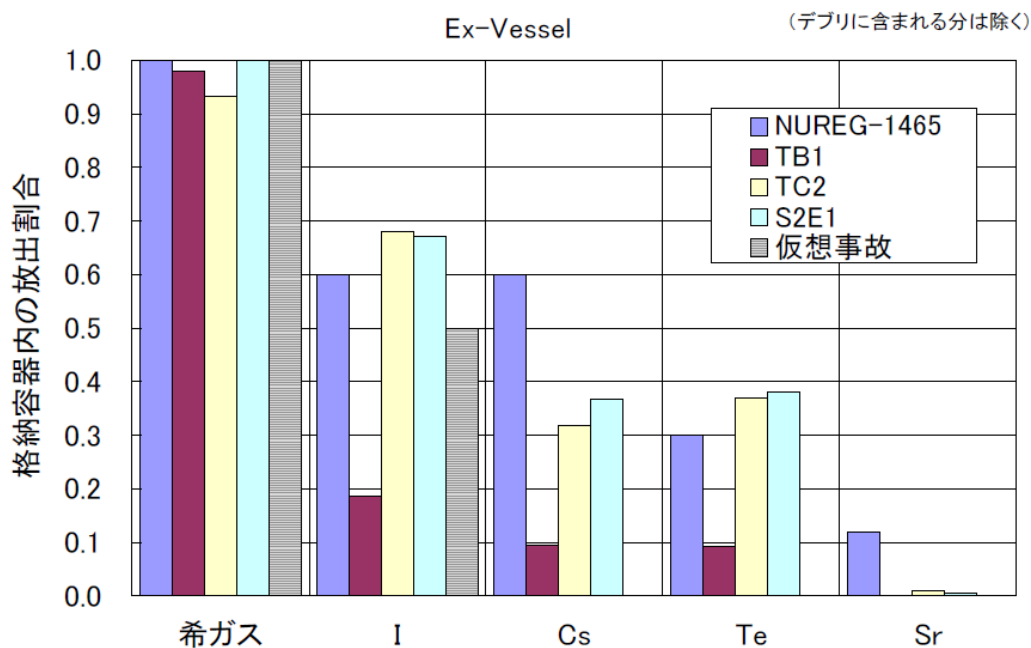


図 1 格納容器ソースターム比較 (圧力容器破損後 1 時間) [A-3]

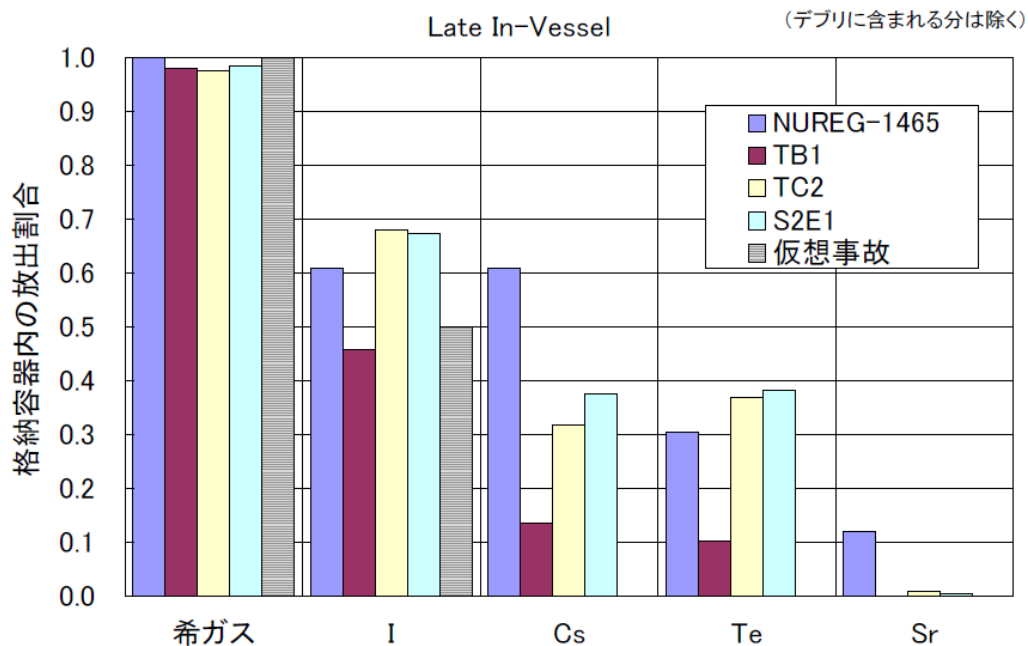


図2 格納容器ソースターム比較 (事故収束後) [A-3]

#### 4. まとめ

MAAP のソースタームと NUREG-1465 のソースタームの比較検討を行った。NUREG-1465 では、物理・化学的挙動の類似性等から 8 つの核種グループに分類されているのに対し、MAAP では炉心からの放出速度の相違に基づき 12 グループに分類されているが、両者の比較から、放出に寄与するものは網羅されており、格納容器ソースタームの評価にあたって、取り扱われている核種は同等であることを確認した。また、NUREG-1465 における格納容器内ソースタームと MAAP における解析結果の比較を行い、MAAP における格納容器内ソースタームは、シーケンスによって違いがあるものの、NUREG-1465 のソースタームとほぼ同等であることを確認した。

#### 5. 参考文献

- [A-1] "Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants," NUREG-1465, 1995.
- [A-2] "Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, NRC, WASH-1400(NUREG-75/014)
- [A-3] 社団法人 日本原子力学会「シビアアクシデント時の格納容器内の現実的ソースターム評価」(平成 22 年 4 月)

入力項目リスト (1/3)

| 分 類                            | 入力項目  |                           |  |
|--------------------------------|---|---------------------------|--|
| 定格出力運転条件<br>パラメータ及び幾<br>何形状データ | 炉心熱出力   |                           |  |
|                                | 炉心流量  |                           |  |
|                                | 原子炉圧力   |                           |  |
|                                | 原子炉冷却材温度  |                           |  |
|                                | 原子炉水位   |                           |  |
|                                | 給水流量 (初期), エンタルピ  |                           |  |
|                                | 原子炉冷却材容積  | 炉心                        |  |
|                                |   | シュラウドヘッド                  |  |
|                                |   | スタンドパイプ及び気水分離器            |  |
|                                |   | 上部ヘッド                     |  |
|                                |   | 上部ダウンカマ                   |  |
|                                |   | 下部ダウンカマ                   |  |
|                                |   | 下部ヘッド                     |  |
|                                |   | 再循環ループ                    |  |
|                                | 流路形状データ (流<br>路断面積, 流路長さ,<br>流路高さ)  | 下部ヘッド下端から炉心支持板まで          |  |
|                                |   | 炉心支持板から上部格子板まで            |  |
|                                |   | 上部格子板からシュラウドヘッド上端まで       |  |
|                                |   | シュラウドヘッド上端から気水分離器上端<br>まで |  |
|                                |   | 下部ダウンカマ                   |  |
|                                |   | 上部ダウンカマ                   |  |
|                                |   | 上部ヘッド                     |  |
|                                |   | 原子炉圧力容器内径                 |  |
|                                |   | シュラウド内径                   |  |
|                                | 原子炉圧力容器本体肉厚   |                           |  |
| 熱構造材データ (材<br>質, 体積, 表面積)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉圧力容器内</li> <li>シュラウド, シュラウドヘッド, シュラウドサポート, 上部格子板, 気水分離器, スタンドパイプ, 蒸気乾燥器, 上部ヘッド, ダウンカマ, 制御棒案内管及びハウジング, 下部ヘッド, 再循環ループ</li> </ul> |                           |  |

入力項目リスト (2/3)

| 分 類          | 入力項目                               |                        |  |
|--------------|------------------------------------|------------------------|--|
| 炉心データ        | 炉心流路面積                             | 炉心流路面積                 |  |
|              |                                    | バイパス流路面積               |  |
|              | 炉心崩壊熱                              |                        |  |
| 燃料データ        | 燃料集合体数                             |                        |  |
|              | 集合体あたりの燃料棒数                        |                        |  |
|              | 燃料棒配列                              |                        |  |
|              | 燃料棒有効長                             |                        |  |
|              | 燃料被覆管外径                            |                        |  |
|              | 燃料被覆管肉厚                            |                        |  |
|              | ペレット直径                             |                        |  |
|              | ペレット一被覆管ギャップ条件 (ガス圧力, ガス組成, 熱伝達係数) |                        |  |
|              | スペーサ位置                             |                        |  |
| 再循環ポンプ関連データ  | コーストダウン特性                          |                        |  |
|              | 再循環ポンプ定格流量                         |                        |  |
|              | ジェットポンプ台数                          |                        |  |
| 原子炉格納容器関連データ | 区画データ                              | 自由体積                   |  |
|              |                                    | 底部高さ                   |  |
|              |                                    | 区画高さ                   |  |
|              |                                    | 初期圧力                   |  |
|              |                                    | 初期温度                   |  |
|              |                                    | 初期湿度                   |  |
|              | 区画間データ                             | 底部高さ                   |  |
|              |                                    | 流路幅                    |  |
|              |                                    | 流路高さ                   |  |
|              |                                    | 流路長さ                   |  |
|              |                                    | 流路面積                   |  |
|              | ヒートシンク (伝熱面, 表面積, 厚さ, 材質の物性及び初期温度) | 格納容器各区画壁面 (側壁, 床, 天井等) |  |
|              |                                    | 格納容器内構造物               |  |

入力項目リスト (3/3)

| 分類                  | 入力項目                                     |
|---------------------|--|
| デブリ挙動関連             | デブリ初期条件 (燃料, 構造材, FP の材質別質量)             |
|                     | 原子炉圧力容器破損判定条件                            |
|                     | FCI 現象におけるデブリジェットの落下条件                   |
|                     | FCI 現象における細粒化条件                          |
|                     | FCI 現象における細粒化デブリと水の伝熱条件                  |
|                     | MCCI 現象におけるデブリのキャビティ床面での拡がり条件            |
|                     | MCCI 現象におけるデブリと水の伝熱条件                    |
|                     | MCCI 現象におけるデブリとコンクリートの伝熱条件               |
| 原子炉保護設備             | 原子炉スクラム (設定点, 応答遅れ)                      |
|                     | 原子炉スクラム (設定点, 応答遅れ)                      |
| 事象収束に重要な<br>機器・操作関連 | ECCS 作動設定点                               |
|                     | ECCS 注入ポンプ (注入開始 (起動遅れ時間), 台数, 容量, 停止条件) |
|                     | 崩壊熱除去系 (台数, 容量)                          |
|                     | 格納容器スプレイポンプ (操作タイミング, 台数, 容量)            |
|                     | 逃がし安全弁 (開操作開始条件 (原子炉圧力), 個数, 容量)         |
|                     | 代替注水系 (注入開始 (起動遅れ時間), 台数, 容量, 停止条件)      |
|                     | 格納容器ベント (操作タイミング, 面積)                    |
| 復水貯蔵タンク (保有水量, 温度)  |  |
| 事故条件                | 配管破断条件 (位置, 面積)                          |

## 別添 1 新知見への対応について

### 1. はじめに

MAAP コードは、福島第一原子力発電所 1～3 号機の事故進展解析に適用されている<sup>[1]</sup>。これらの解析では、システムの応答や外部注水流量等の不確かさの大きな境界条件については、当時の記録に基づいた分析や一部推定を行った上で設定されており、解析結果と実測データとの比較が行われている。この比較結果から、相違点があるプラント挙動や物理現象については検討課題として抽出し、個別に評価・検討が行われている。

以下では、この検討を通じて得られた課題や知見のうち、MAAP コードで対象とする現象評価に関連する内容と有効性評価への影響について検討する。また、MAAP コードの改良は米国 EPRI を中心とした MAAP User's Group のもとで継続的に進められており、改良の動向と有効性評価への影響について検討する。

### 2. 福島第一原子力発電所事故における未確認・未解明事項と有効性評価への影響

#### 2.1 未確認・未解明事項について

福島第一原子力発電所事故における未確認・未解明事項<sup>[2]</sup>のうち、有効性評価に対して影響し得る項目を抽出し、MAAP コードによる有効性評価で留意すべき事項を以下の 4 項目に大別した。

#### (1) 原子炉圧力容器からの気相漏えいの発生について

原子炉圧力容器の水位が低下し炉心が露出すると、過熱した炉心から発生する高温ガスや過熱蒸気により、圧力容器バウンダリが通常よりも高い温度となる。1 号機の MAAP 解析においては、この炉内温度の上昇によって炉内核計装のドライチューブや主蒸気管フランジ等の原子炉圧力容器上部からドライウェル (D/W) への気相漏えいが発生したと仮定している。この現象によって、原子炉圧力容器破損タイミングや格納容器圧力・温度の上昇などの事象進展に影響を及ぼす可能性がある。

#### (2) 溶融炉心の下部プレナム落下挙動

1 号機の MAAP 解析において、原子炉圧力は 3 月 11 日 22 時頃に急峻なピークを示している。MAAP コードでは、炉心損傷の進展に伴って、固化クラストによって閉塞領域が形成されると溶融炉心は一旦保持されるものの、クラストの破損に伴って、溶融炉心が下部プレナムへの落下を開始するというモデルを採用していることに起因すると考えられる。一方、複雑な下部構造を持つ BWR では、燃料支持金具の冷却水の通過口から溶融した炉心が降下し、下部プレナムに流れ落ちる経路や、溶融プールが炉心の径方向に拡大し、外周部のバイパス領域へ流出し、下部プレナムへ流れ落ちる経路、さらにシュラウドと接触・破損させることによってダウンカマへ流出する経路等、流出経路に

は様々な形態が考えられる。溶融炉心の下部プレナムへの落下挙動は、それ以降の原子炉圧力容器破損などの事故進展に影響を与える可能性がある。

### (3) 圧力抑制プールの温度成層化について

3号機では、RCICによる注水期間において、原子炉格納容器圧力のMAAP解析結果と実測値に差があり、圧力抑制プールにおいて温度成層化が起きた可能性が指摘されている<sup>3)</sup>。MAAPコードによる有効性評価では、圧力抑制プールのプール水を単一ノードで模擬し、プール水温は均一に上昇する仮定としているのに対し、温度成層化を考慮した場合、格納容器の圧力及び温度上昇が速くなる可能性がある。

### (4) 原子炉格納容器の気相漏えいについて

1号機及び2号機のMAAP解析では、格納容器圧力等の実測値を再現するために格納容器の気相部からの漏えいを仮定しているものの、計測されたパラメータや観測事実からは、漏えい箇所やその規模については直接的な推定が得られていない。一つの要因として格納容器内部で生じた局所的な過温状態による損傷が挙げられている。一方、MAAPコードによる有効性評価では、格納容器内を代表的な区画にノード分割し、ノード内温度は均一と仮定し、温度分布を評価することはできない。

## 2.2 有効性評価に対する影響について

2.1で挙げられた留意すべき事項に対して、有効性評価に対する影響について以下に考察する。これらの考察より、有効性評価で対象とする事象進展に対しては、MAAPコードによる解析への影響は小さく適用性に問題は無いと判断される。

### (1) 原子炉圧力容器からの気相漏えいの発生について

炉心損傷に伴って発生する高温ガスにより、原子炉圧力容器からの漏えいが生じた場合、原子炉圧力の減圧を促進する。しかしながら、有効性評価において、大破断LOCAを起因事象とするシーケンスについては、起因事象発生の時点で大規模な一次冷却材圧力バウンダリの喪失を仮定していることから、これらの事象による格納容器内事故進展への影響は無い。別図1-2.2-1及び別図1-2.2-2に、炉心損傷に伴う計装用案内管破損を模擬した場合の原子炉圧力及び格納容器温度の比較を示す。これらの図から明らかなように、事象進展への影響は小さい。

また、過渡事象(TQUV)起因のシーケンスでは、原子炉圧力容器からの気相漏えいは、原子炉減圧挙動と水位低下挙動に影響する。

高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱の防止に係る評価においては、高温ガス発生による気相部漏えいが生じる場合には、原子炉の減圧が促進されるため、高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱の回避に対して有効に寄与する。さらに、原子炉圧力容

器破損前に運転員による減圧操作が必須となるが、破損までには十分な時間余裕があり、気相漏えいを想定しても破損時間への影響は小さい。別図 1-2.2-3 に、炉心損傷に伴う計装用案内管破損を模擬した場合の原子炉圧力の比較を示す。計装用案内管温度が融点に到達した時点で損傷するとした本感度解析では、その損傷は原子炉減圧後に発生しており、減圧操作への影響は無い。

熔融炉心と冷却材の相互作用及び熔融炉心とコンクリートの相互作用においては、原子炉減圧後の現象を評価するため、原子炉圧力容器破損前のペDESTAL注水操作完了が必須となる。しかしながら、上述のように十分な時間余裕があり、かつ、評価においては、原子炉水位が有効燃料棒底部まで低下する以前に減圧操作を実施しており、炉心損傷初期の段階であることから、原子炉圧力容器の気相漏えいを仮定しても破損時間に対する影響は小さく、運転操作に対する影響は無い。

## (2) 熔融炉心の下部プレナム落下挙動

有効性評価のうち、「格納容器過圧・過温破損」の評価において、原子炉圧力容器が破損しないシーケンスを想定するシナリオでは、熔融炉心の下部プレナム落下前に冷却される状態を対象としているため、本現象の影響は無い。

下部プレナムへの熔融炉心落下が発生するシーケンスについては、本文「3.3.6 熔融炉心の挙動モデル」で述べたように、MAAP コードでは、熔融炉心の下部プレナムへの落下は、炉心支持板が破損するか、クラストが破損して熔融炉心を保持できなくなった場合に開始され、落下する熔融炉心の量は、仮想的なデブリジェット径等により計算されている。一方、燃料支持金具等の炉心下部構造物を介した熔融炉心の移行は、別図 1-2.2-4 に示す経路が想定され、熔融炉心が下部プレナムへ移行する場合、これらの構造物との熱的な相互作用によって、その経路で一部が固化し、落下流量が低減されるなどの影響が想定される。従って、これらを考慮していない現行評価は、原子炉圧力容器下部ヘッドへの熱負荷を計算する上で、保守的な扱いと言える。

また、同じく「3.3.6 熔融炉心の挙動モデル」で述べたように、MAAP コードでは、熔融炉心の径方向のリロケーションは下部ノードが閉塞した以降に発生し、熔融領域は炉心シュラウドまで到達しない想定としている。熔融炉心が炉心シュラウドと接触した場合、シュラウドを熔融貫通する可能性はあるものの、その径方向への進展は下部ノードの閉塞挙動等に依存した極めて不確かさの大きな現象と考えられる。さらに、熔融炉心がシュラウドを熔融貫通した場合の下部プレナムへの移行は、ジェットポンプ等の貫通後に発生するが、ジェットポンプ内部に冷却材が存在している場合には、熔融炉心が一時的に冷却されるなどの効果も期待される。このようなことから、炉心下部構造物を介した移行に比べて、主要なリロケーション経路となり得るとは考えにくく、有効性評価への影響は小さいと考えられる。



### (3) 圧力抑制プールの温度成層化について（別添 1（補足）参照）

原子炉隔離時冷却系の運転方法として、3号機と同様にテストラインを使用し注水流量を制御するような運転方法とした場合、圧力抑制プールの温度成層化による原子炉格納容器の圧力上昇が生じる可能性がある。しかしながら、原子炉隔離時冷却系が間欠運転（L-2 と L-8 の自動制御）の場合、原子炉隔離時冷却系が停止している間に原子炉圧力が上昇し、逃がし安全弁が動作することにより温度成層化の発生の可能性は小さくなる。また、原子炉隔離時冷却系の注水流量調整のみによる制御とした場合においても、消費される駆動蒸気量の減少により逃がし安全弁の動作回数が増え、温度成層化の発生可能性は小さくなる可能性がある。

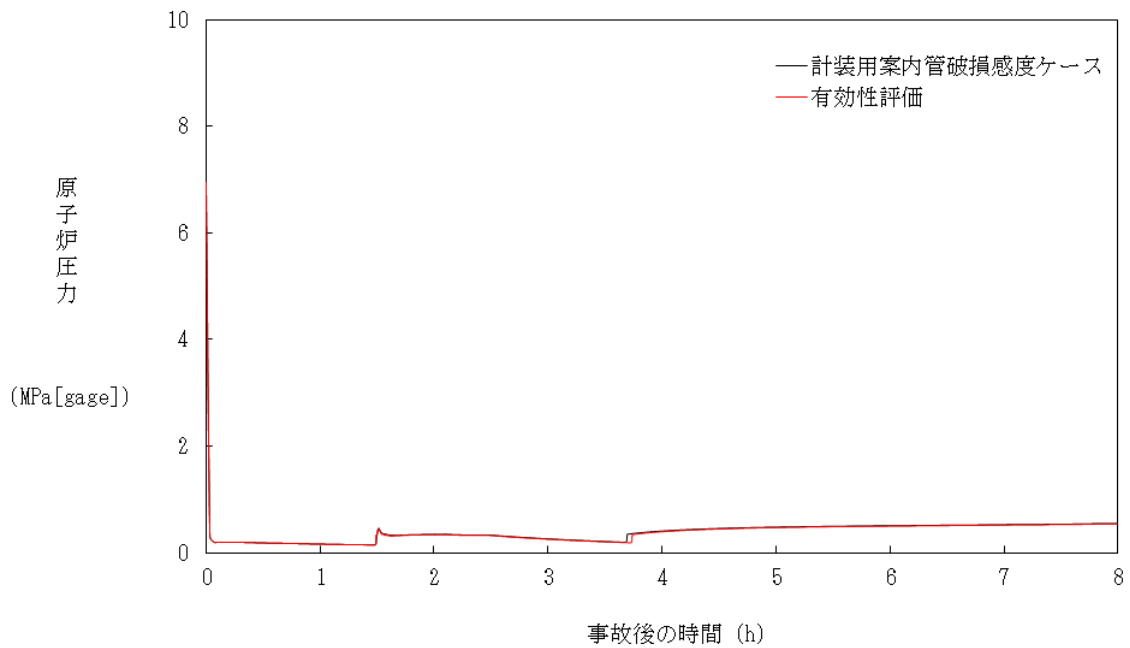
一方、代替低圧注水系を用いた原子炉注水時において成層化の発生可能性はあるものの、原子炉格納容器圧力に対する影響は小さいものと考えられる。

### (4) 原子炉格納容器の気相漏えいについて

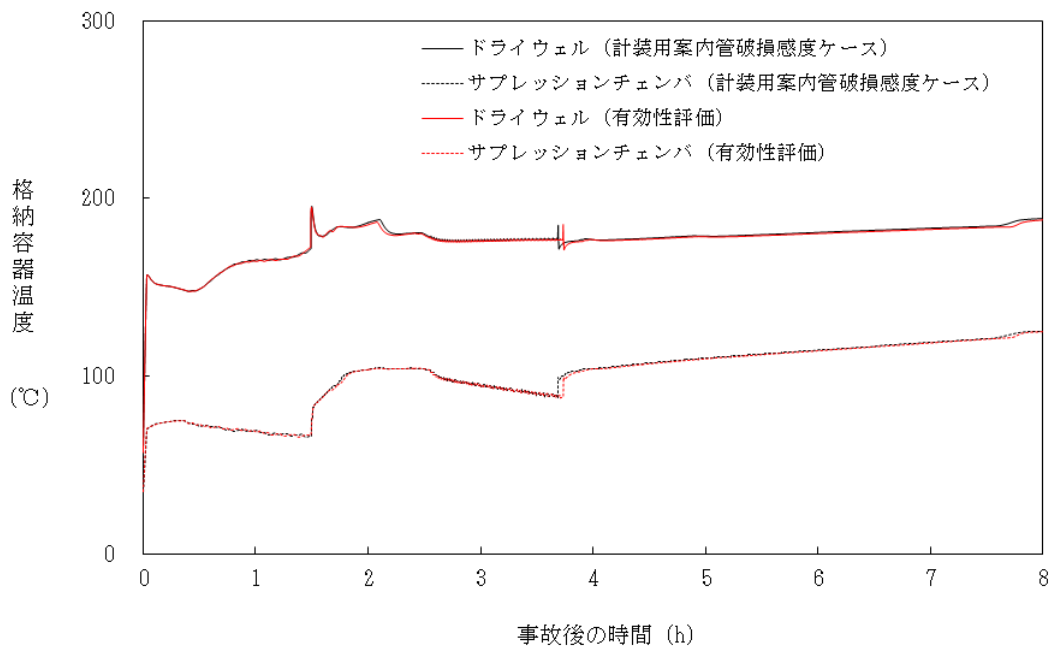
福島第一原子力発電所事故においては、原子炉格納容器内で局所的な過温状態となつて、気相部に漏えいが生じた可能性が指摘されている。重大事故時の原子炉格納容器内温度分布は、損傷炉心及び核分裂生成物の分布やその冷却状態、また、格納容器への注水等によるガス攪拌に資する駆動力の有無にも依存することから、MAAP の評価体系で格納容器内の温度分布を精度よく評価することは困難である。

一方、福島第一原子力発電所事故で推定されている局所的な過温状態の発生を回避するため、重大事故等対策として、原子炉及び格納容器への代替注水等を整備し、その有効性を確認することが有効性評価の目的となっている。すなわち、これらの対策によって、原子炉圧力容器内損傷炉心の非冷却状態長期化を防止でき、また、格納容器への注水によって、雰囲気をも十分に攪拌させて高温気体の局所的な滞留を防止できるため、局所的な過温は回避可能と考えられる。

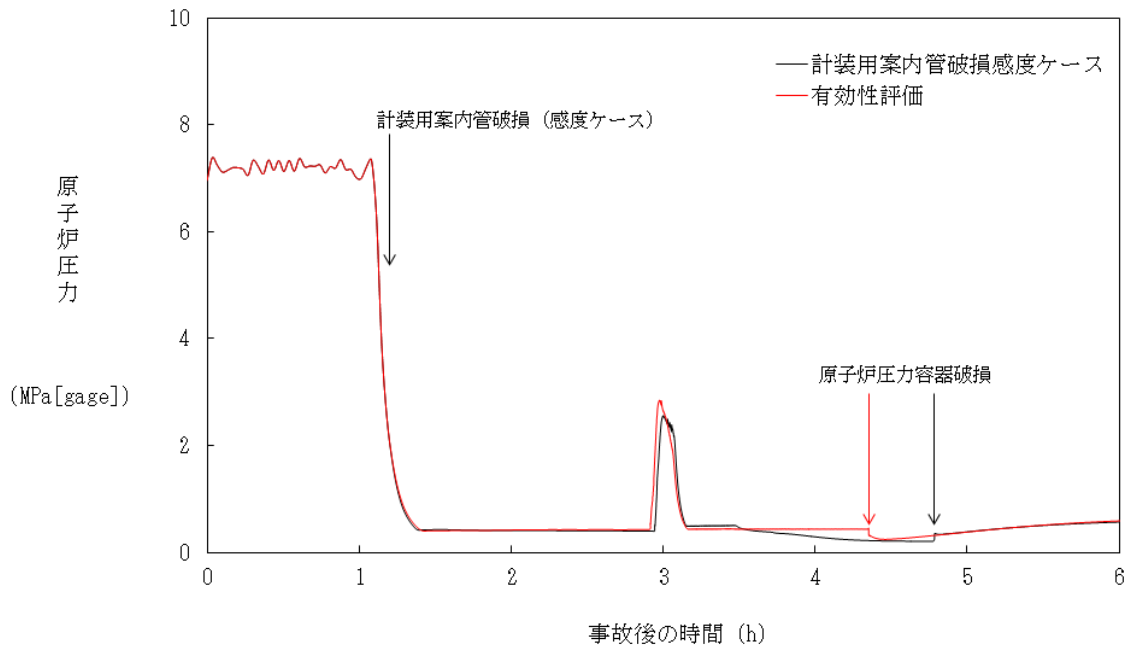
このような観点から、本文「3.3.4 格納容器モデル」の図 3.3-6 に例示した原子炉格納容器のノード分割方法は、格納容器の過圧・過温に対する有効性評価に適用可能である。



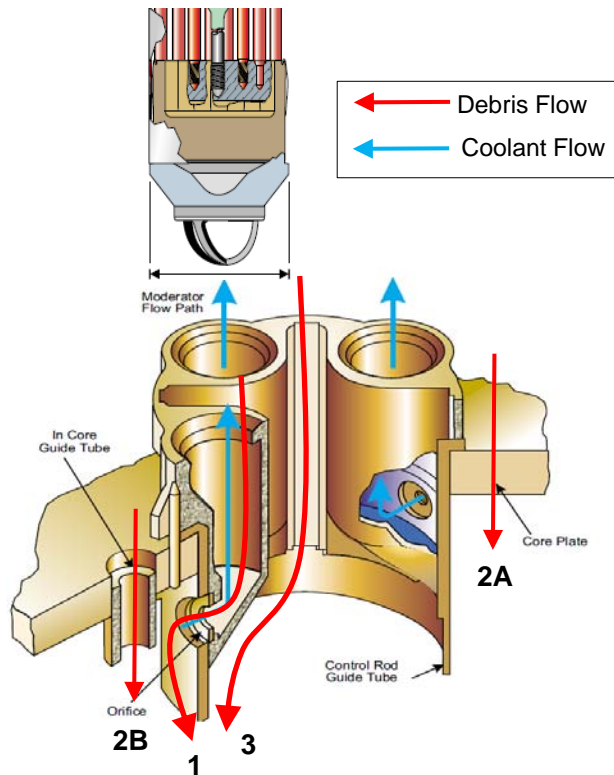
別図 1-2.2-1 大破断 LOCA 時注水機能喪失（原子炉圧力容器破損）  
における原子炉圧力変化の比較



別図 1-2.2-2 大破断 LOCA 時注水機能喪失（原子炉圧力容器破損）  
における格納容器温度変化の比較



別図 1-2.2-3 高圧注水・低圧注水機能喪失における原子炉圧力変化の比較



別図 1-2.2-4 炉心下部構造物を介した溶融炉心の移行経路<sup>[4]</sup>

### 3. MAAP コード改良の動向について

#### 3.1 MAAP コードの改良<sup>5)</sup>

MAAP コード最新バージョンで追加された物理現象モデル<sup>6)</sup>のうち、有効性評価に関連すると考えられる主要なモデルについて、推定される影響を整理する。

##### (1) 炉心モデル

MAAP コード最新バージョンでは、制御材である B<sub>4</sub>C の酸化モデルが追加されている。B<sub>4</sub>C 酸化については、QUENCH 実験において、B<sub>4</sub>C 酸化による H<sub>2</sub> 発生量全体に寄与する割合は QUENCH-07 で 2.4%、QUENCH-09 で 2.2% と小さいことが確認されている。すなわち、炉心損傷進展に伴う不確かさに比べればその影響は小さく、有効性評価への影響は小さいと考えられる。

##### (2) 一次系モデル

###### (a) 主蒸気管ノードの追加

MAAP コード最新バージョンでは、主蒸気管ノードが一次系ノードに追加され、高温ガスによるクリープ損傷がモデル化されている。本現象は、炉心損傷後に原子炉圧力容器内が長時間高温・高圧状態に維持される場合に生じ得るが、有効性評価では、運転員操作による炉心損傷の初期段階での原子炉減圧を想定しているため、主蒸気管のクリープ損傷が発生する可能性は小さいと考えられる。

また、仮にクリープ損傷が生じた場合にも、2.2 における原子炉圧力容器からの気相漏えいと同様に事象進展への影響は小さいと推定される。

###### (b) 計装管損傷モデルの追加

MAAP コード最新バージョンでは、炉内核計装等の計装管の損傷がモデル化されており、損傷した計装管への熔融炉心の侵入と固化挙動が評価可能となっている。計装管損傷の影響は、2.1 及び 2.2 で述べたように原子炉圧力容器からの気相漏えいとして現れるが、上述のように有効性評価で対象とする事故シーケンスへの影響は小さいと考えられる。

##### (3) 下部プレナム内デブリモデル

MAAP コード最新バージョンでは、OECD/NEA 国際プロジェクト RASPLAV<sup>6)</sup>及び MASCA<sup>7)</sup>計画の知見を反映し、下部プレナム内で重金属層（金属ウラン）が酸化物層（二酸化ウラン、酸化ジルコニウム）の下方に成層化するモデルが追加されている。しかしながら、本現象は、原子炉圧力容器を外部から冠水させて熔融炉心を下部プレナム内に長期間保持する対策をとる際に重要となるものであり、有効性評価では下部プレナム内に熔融炉心を保持して事故終息させるシーケンスを対象としていないため、影響は無い。

#### (4)格納容器モデル

##### (a)圧力抑制プールの多ノード化

MAAP コード最新バージョンでは、圧力抑制プールの多ノードモデルが追加されており、逃がし安全弁排気管からの入熱等による温度分布を評価することが可能となっている。これにより、圧力抑制プール水の温度成層化の模擬が可能である。

本モデルについては、2.2 で述べたように、圧力抑制プールの温度成層化は、逃がし安全弁の動作状況に依存するものの、原子炉格納容器圧力に対する影響は小さいと考えられる。

##### (b)溶融炉心とコンクリート相互作用モデルの改良

MAAP コード最新バージョンでは、OECD/NEA 国際プロジェクト MCCI 計画<sup>[8][9][10]</sup>の知見を反映して、溶融炉心の上部クラストに形成された亀裂への水浸入による冷却効果、コンクリート分解気体がクラスト開口部を通過する際に気体に随伴されて溶融物が噴出することによって形成される粒子状デブリの堆積とその冷却効果及び連続層の減少、溶融炉心のコンクリート含有に伴う上面水プールへのドライアウト熱流束低下等がモデル化されており、MCCI 試験結果との比較による妥当性確認が行われている<sup>[11]</sup>。これらの物理現象モデルの根拠となった試験では、溶融物落下後にドライ条件である程度コンクリート侵食が進んだ後に上部から注水（Top Flooding）する条件で行われており、有効性評価で対象としている、溶融炉心が水中へ落下し、粒子化した後、床面に粒子状ベッドとして堆積する場合の伝熱挙動とは異なるため、このモデル改良が、有効性評価にそのまま適用されるわけではない。しかしながら、溶融炉心の挙動に係る知見の拡充については継続的に進め、有効性評価に影響するような新たな知見が出た場合には適宜評価に反映するように努めることが重要と考える。

### 3.2 福島第一原子力発電所事故を踏まえた MAAP コードの改良

福島第一原子力発電所の事故進展解明や燃料デブリ位置推定・炉内状況把握を目的とした MAAP コード高度化が推進されている<sup>[4]</sup>。主要な項目としては、下記のとおり、溶融炉心の挙動に重点を置いたものとなっている。

- ・下部プレナムへの溶融炉心リロケーション経路の追加
- ・下部プレナム内構造物と溶融炉心との相互作用
- ・格納容器内デブリ拡がりモデルの追加

#### (1)下部プレナムへの溶融炉心リロケーション経路の追加

BWR の炉心下部構造を模擬した溶融炉心の下部プレナムへの落下経路が追加された。2.1 及び 2.2 にて示したように、本モデルによって、下部プレナムへの落下流量が低減されるため、下部ヘッドへの熱負荷も軽減され、原子炉圧力容器破損時間も遅延されると推

定される。従って、有効性評価に適用している現行 MAAP は保守的な扱いとなっていると考えられる。

### (2)下部プレナム内構造物と溶融炉心との相互作用

BWR 下部プレナムは制御棒 (CR) 案内管・制御棒駆動機構 (CRD) ハウジング等の構造物を有している。有効性評価に適用している現行 MAAP では、これらを 1 個のヒートシンクとしてモデル化しているが、径方向に複数のグループに分類して、下部プレナム内溶融炉心との接触面積の相違を考慮し、CR 案内管・CRD ハウジング内冷却水保有量とそれらの溶融をグループごとに評価するモデルが追加された。これによって、炉心部から下部プレナムへの溶融炉心の落下が段階的に発生する。すなわち、(1)と同様に、下部プレナムへの落下流量が低減されるため、下部ヘッドへの熱負荷も軽減され、原子炉圧力容器破損時間も遅延されると推定される。

### (3)格納容器内デブリ拡がりモデルの追加

有効性評価に適用している現行 MAAP では、原子炉圧力容器破損後に格納容器床に落下する溶融炉心は、ユーザーが指定する床面積まで直ちに拡がるモデルとなっている。この拡がり挙動を現実的に評価することを目的として、拡がり速度を指定可能とするデブリ拡がりモデルが追加されている。本モデルは、原子炉圧力容器から段階的に溶融炉心が落下する場合に拡がり制限される可能性があるが、BWR で支配的な CRD ハウジング逸出による破損モードの場合、瞬時に大量の溶融物が落下するため、拡がり挙動の影響は小さいと考えられる。

[参考文献]

- [1] 東京電力株式会社, “MAAP コードによる炉心・格納容器の状態の推定,” 平成 24 年 3 月 12 日
- [2] 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所 1~3 号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第 3 回進捗報告,” 平成 27 年 5 月 20 日
- [3] 独立行政法人 原子力安全基盤機構, “圧力抑制室保有水の温度成層化による原子炉格納容器圧力等への影響等の検討,” 平成 24 年 2 月 1 日
- [4] Y. Kojima, et al., “MAAP Enhancements for Ascertaining and Analyzing Reactor Core Status in Fukushima Daiichi NPP,” Proceedings of ICAPP 2014, Charlotte, USA, April 6-9, 2014, Paper 14209.
- [5] Electric Power Research Institute, “Modular Accident Analysis Program 5 (MAAP5) Applications Guidance,” May 2015.
- [6] “IN-VESSEL CORE DEBRIS RETENTION AND COOLABILITY Workshop Proceedings,” 3-6 March 1998, Garching, Germany (NEA/CSNI/R(98)18)
- [7] D. F. Tsurikov, et al., "Main Results of the MASCA 1 and 2 Projects", Russian Research Centre “KURCHATOV INSTITUTE” OECD MASCA Project (2007).
- [8] M. T. Farmer, et al., “Corium Coolability under Ex-Vessel Debris Cooling Tests,” Proc. Of OECD/CSNI Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany (1999).
- [9] M. T. Farmer, et al., “OECD MCCI Project Final Report,” OECD/MCCI-2005-TR06 (2006).
- [10] M. T. Farmer, et al., “OECD MCCI-2 Project Final Report,” OECD/MCCI-2010-TR07 (2010).
- [11] Q. Zhou, et al., “Benchmark of MCCI Model in MAAP5.02 against OECD CCI Experiment Series,” Proceedings of ICAPP 2014, ICAPP-14352, Charlotte, USA, (2014).

## 圧力抑制プール (S/C) の温度成層化の影響について

## 1. はじめに

福島第一原子力発電所 3 号機 (1F-3) は津波到達後の原子炉隔離時冷却系 (RCIC) 運転期間中、RCIC 及び主蒸気逃がし安全弁 (SRV) からの排気蒸気により、ドライウェル (D/W) 圧力が上昇傾向にあった。この D/W 圧力の変化 (実測値) を MAAP 解析の結果と比較すると実測値の上昇の方が大きく、MAAP 解析では 3 月 12 日の 12 時頃までに観察されている D/W 圧力の変化を再現できていない (図 1) \*<sup>1</sup>。この理由として、「圧力抑制室保有水の温度成層化による原子炉格納容器圧力等への影響等の検討」(独立行政法人原子力安全基盤機構, 平成 24 年 2 月 1 日)によれば、RCIC のタービン排気蒸気により排出管近傍におけるサプレッションチェンバ (S/C) のプール水温が上昇し、高温水が水面近傍を周方向に広がることでプール上部が高温になり、温度成層化が発生した可能性が示唆されている。

また、福島第二原子力発電所 4 号機においても事故調査・検証委員会最終報告で圧力抑制プール (S/P) の上部と下部で温度差が発生していたことが報告されている\*<sup>2</sup>。

これらのプラント状況等を比較し、温度成層化の発生する可能性及び発生した際の影響について考察した。

なお、福島第一原子力発電所 2 号機 (1F-2) も長期間、RCIC が動作していたが、S/C が収められているトラス室が浸水し、格納容器圧力の上昇を抑制するのに十分な除熱ができていた可能性があること、また、原子炉水位が制御されずに、RCIC タービンの抽気レベル (主蒸気管) 付近まで水位が上昇し、蒸気と水の二相流が RCIC タービンへ流入した可能性等あることから、本検討対象には含めないこととした。

## 2. 福島第二原子力発電所 2,4 号機圧力抑制プール水の温度

福島第二原子力発電所 2,4 号機 (2F-2,4) では、津波による浸水の影響により全台又は一部の非常用 D/G が喪失し、RCIC によって原子炉水位を維持しつつ、SRV で原子炉圧力の制御 (減圧操作) を実施した。そのときの S/P 水の温度のチャートを図 2~9 に示す (A 系と B 系で同様の挙動を示すため、A 系を例示)。

なお、福島第二原子力発電所の 1 号機については 2F-2,4 と同様 RCIC による水位維持を実施していたが計器用電源喪失に伴い対象の記録計が停止していた等の理由により対象外とした。また、福島第二原子力発電所の 3 号機については B 系の交流電源母線が機能を維持しており、事象初期から RHR による S/C クーリングを実施しているため、2F-2,4 を対象とした。

これらのチャートから、RCIC によって原子炉水位を維持しつつ、SRV で原子炉圧力の制御 (減圧操作) を行う事象初期では、S/P の上部と下部の水温の差はほとんどなく、ほぼ一様に温度上昇していることが確認されている。



また、事象後半（2F-2 3/12 2 時頃、2F-4 3/12 1 時頃）では S/P の上部と下部において温度差が発生しているが、S/C クーリングや HPCS, LPCI の起動により温度差は減少した（図 7, 図 9）。

### 3. MAAP による福島第二原子力発電所 4 号機のトレース解析

2F-4 を対象に MAAP により事象進展解析（トレース解析）を実施した。図 10 及び図 11 に格納容器圧力及び S/P 水温の実測値（S/P 上部温度）と MAAP 解析結果の比較を示す。解析結果と実測値との比較により以下の傾向が確認された。

- －RCIC 運転期間中は実測値（S/P 上部温度）に対して MAAP 解析結果はこれを良く再現している（この間、S/P 上部と下部の温度差は観測されていない）
- －RCIC 注水停止以降の MUWC による注水期間中は、実測値（S/P 上部温度）に対して解析結果は僅かに低い値となったが概ね実測値は再現されている（この間、上部と下部で温度差が観測されている）

### 4. 福島第一原子力発電所 3 号機と福島第二原子力発電所 2,4 号機の差異

1F-3 の S/C 圧力の MAAP4 による解析結果と実測値との差異が温度成層化の影響によるものとした場合、RCIC 運転時の比較的初期（差異が大きくなる 3/11 20 時頃より以前）から発生していたと考えられる。一方、2F-2,4 においては RCIC 運転時の後半又は RCIC 隔離後（2F-2 3/12 2 時頃、2F-4 3/12 1 時頃）まで大きな温度差は発生しておらず、また MAAP でのトレース解析を実施したところ、S/P 水温や格納容器圧力の評価結果と計測値の間に大きな差異は生じていない。

格納容器の型式の差異（1F-3：MARK-I，2F-2,4：MARK-II 改良型）、SRV 排気管のクエンチャのアーム部は異なるものの、RCIC 排気スパージャ、SRV 排気管のクエンチャの寸法や配置の高さに大きな差異は無いことから各々の原子炉圧力、RCIC や SRV の運転状況と、それらの排気ラインからの蒸気の流入量が大きく関与しているものと推定される。

1F-3 は RCIC が自動停止に至らないよう原子炉注水ライン及びテストラインの両ラインを通水するライン構成とした上で、原子炉水位を緩やかな変化となるように流量を設定しており、これにより RCIC 排気スパージャから継続的に S/P へ蒸気が流入していたものと推定される。一方、2F-2,4 では原子炉圧力を SRV により減圧させながら RCIC 運転を行っており、逃がし安全弁排気管からの S/P への蒸気流入が比較的多かったものと推定される。これらについて整理し、表 1,2 及び図 12,13,14 にまとめた。

以上の関連について整理すると以下の可能性が示唆される。

- ・原子炉が高圧の状態では SRV より多くの蒸気が S/P に流入している状態では温度成層化は発生しない（2F-2,4 事象初期より）。
- ・原子炉が低圧の状態では SRV から S/P への蒸気の流入が少なく、温度成層化が発生する（2F-2,4 事象後半より）。
- ・原子炉の圧力状態にかかわらず、SRV をほとんど使用せず、RCIC による連続運転を

実施した場合は温度成層化が発生する（1F-3より）。

#### 5. 想定される温度成層化の状況

1F-3ではRCIC運転中に解析結果に対して比較的大きな温度差が発生している一方で、2F-4のRCIC注水停止以降のMUWCによる注水期間中はトレース解析と測定値との差異は大きくない。これは以下の理由によるものと推定される。

- ・2F-4のMUWCによる注水期間中は、原子炉で発生する蒸気はSRVを通じてS/Pへ流入するが、SRVクエンチャの排気孔はS/Pの底部から約□m程度の下部の位置にあることから、この付近を境に上下の温度差が発生したと考えられ、S/P水の多くを上部の温度が高い層が占めるため、S/P水温を一律の温度としているMAAP評価と差異が大きくなかったと考えられる。これは図9の温度差が解消された後の温度にも現れている\*。
- ・1F-3のS/C圧力は事象の早くから解析結果と測定値との差異が大きいが、主な蒸気の排出口として考えられるRCICスパージャは図15に示すようにS/P水面近くに排気孔が設置されており、蒸気凝縮した高温水が水面近傍を周方向に広がることでプール上部が高温になり、S/C圧力を大きく上昇させる要因となったと考えられる。

\*発生したS/P水の上部と下部の温度差は、S/CクーリングやHPCS、LPCIの起動により2F-2：3/14 7時頃、2F-4：3/12 11時頃に減少している。このときの上部と下部の温度のそれぞれの変化を確認すると下部の温度計の上昇に比べて上部の温度計の下降が小さいことが確認される。よって、温度差の境は上部と下部の中心ではなく比較的下部の位置にある可能性があることを示している。

#### 6. まとめ

RCICの運転方法として、1F-3と同様にテストラインを使用し注水流量を制御するような運転方法とした場合、S/Pの温度成層化による格納容器の圧力上昇が生じる可能性がある。しかしながら、RCICが間欠運転（L2とL8の自動制御）の場合、RCICが停止している間にSRVが動作することにより温度成層化の発生の可能性は小さくなる。また、RCICの注水流量調整のみによる制御とした場合においても、RCICで消費される駆動蒸気量の減少によりSRVの動作回数が増え、温度成層化の発生可能性は小さくなる可能性がある。

一方、代替低圧注水系を用いた原子炉注水時において成層化の発生可能性はあるものの、格納容器圧力に対する影響は小さいものと考えられる。

表 1. 1F-3, 2F-2,4 のプラントの状態と運転  
(RCIC 運転時の初期 (3/12 0:00 迄))

|      | 原子炉圧力<br>(図 12,13,14<br>参照) | RCIC 運転                  | RCIC 排気ラ<br>インからの<br>蒸気量*1 | SRV<br>の動作              | SRV<br>排気管ク<br>エンチャ<br>からの蒸<br>気量*1 | S/P 水温計の上<br>部と下<br>部の温度差 | 解析結果との<br>差異(S/C 圧力) |
|------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------|
| 1F-3 | 高压維持<br>(7MPa 程度)           | 連続運転<br>(16:03~)*2       | 大                          | 逃がし弁機<br>能 (推定)         | 小*3                                 | —                         | 3/11 20 時頃よ<br>り発生   |
| 2F-2 | 原子炉減圧<br>(7MPa→1M<br>Pa 程度) | 間欠運転<br>(15:43~)         | 中                          | 減圧のため<br>に適宜手動<br>開操作実施 | 大                                   | 大きな差異無し                   | —                    |
| 2F-4 | 原子炉減圧<br>(7MPa→1M<br>Pa 程度) | 間欠及び<br>連続運転<br>(15:54~) | 中                          | 減圧のため<br>に適宜手動<br>開操作実施 | 大                                   | 大きな差異無し                   | 大きな差異無<br>し          |

\*1 原子炉圧力や RCIC, SRV の動作状況から推定

\*2 RCIC が自動停止に至らないよう原子炉注水ライン及びテストラインの両ラインを通水するライン構成とした上で、  
原子炉水位を緩やかな変化となるように流量を設定

\*3 原子炉圧力の推移及び RCIC の連続運転により SRV の動作や排気される蒸気量は少なかつたと推定

表 2. 1F-3, 2F-2,4 のプラントの状態と運転  
(RCIC 運転時の後半 (3/12 0:00~))

|      | 原子炉圧力<br>(図 12,13,14<br>参照) | RCIC 運転                      | RCIC 排気ラ<br>インからの<br>蒸気量*1 | SRV<br>の動作       | SRV<br>排気管ク<br>エンチャ<br>からの蒸<br>気量*1 | S/P 水温計の上<br>部と下<br>部の温度差 | 解析結果との<br>差異(S/C 圧力) |
|------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------|
| 1F-3 | —*2                         |                              |                            |                  |                                     |                           |                      |
| 2F-2 | 低压維持<br>1MPa 以下             | RCIC が隔<br>離するま<br>で間欠運<br>転 | 小                          | 原子炉の低<br>圧維持のため開 | 小*3                                 | 3/12 2 時頃より<br>温度差発生*4    | —                    |
| 2F-4 | 低压維持<br>1MPa 以下             | RCIC が隔<br>離                 | 無                          | 原子炉の低<br>圧維持のため開 | 小*3                                 | 3/12 1 時頃より<br>温度差発生*4    | 大きな差異無<br>し          |

\*1 原子炉圧力や RCIC, SRV の動作状況から推定

\*2 3/12 12:00 以降については S/C スプレイや HPCI への切り替えを実施しているため、対象外とする

\*3 原子炉圧力が低いことから SRV 排気管クエンチャからの蒸気量は少量であつたと推定

\*4 2F-4 は RCIC 隔離とほぼ同じ時期に S/P 上部・下部の温度差が発生し始めているが、2F-2 は RCIC 隔離より前(2~3 時間前)に S/P 上部・下部の温度差が発生している。これは各々のプラントの原子炉減圧過程が影響しているものと推定され(図 13, 図 14), 2F-2 では比較的早い段間で減圧が開始され、温度差が発生する時点では原子炉圧力は 0.5MPa 程度となっている。一方、2F-4 は RCIC 隔離と同じ時期に原子炉圧力が 0.5MPa 程度となっており、この程度の原子力圧力下では SRV からの蒸気量が少なく、S/P の流況を変化させる程度の攪拌力は得られないものと推定される

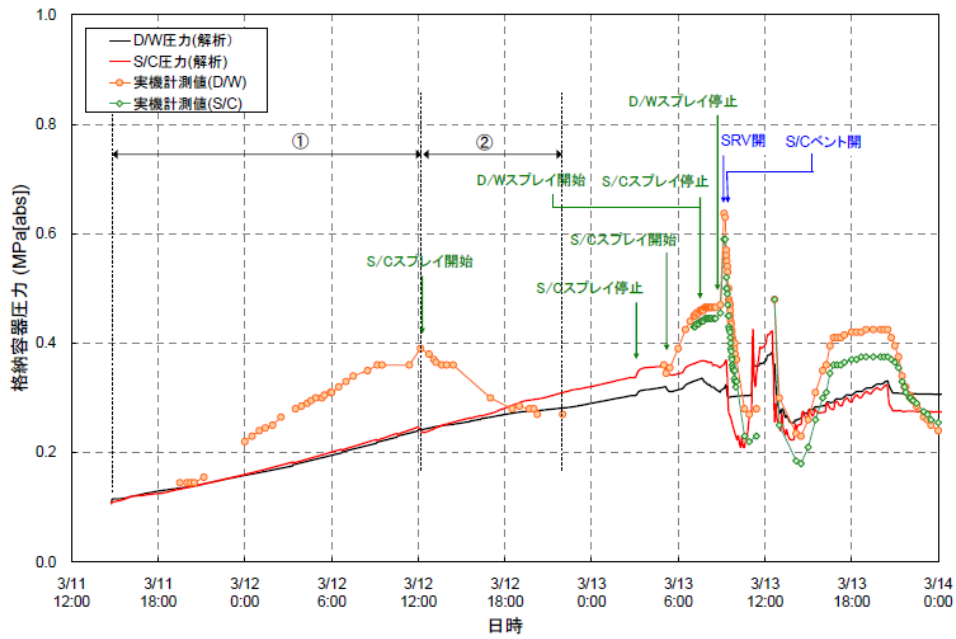


図 1. 福島第一原子力発電所 3 号機の格納容器圧力の実測値と MAAP 評価結果※1

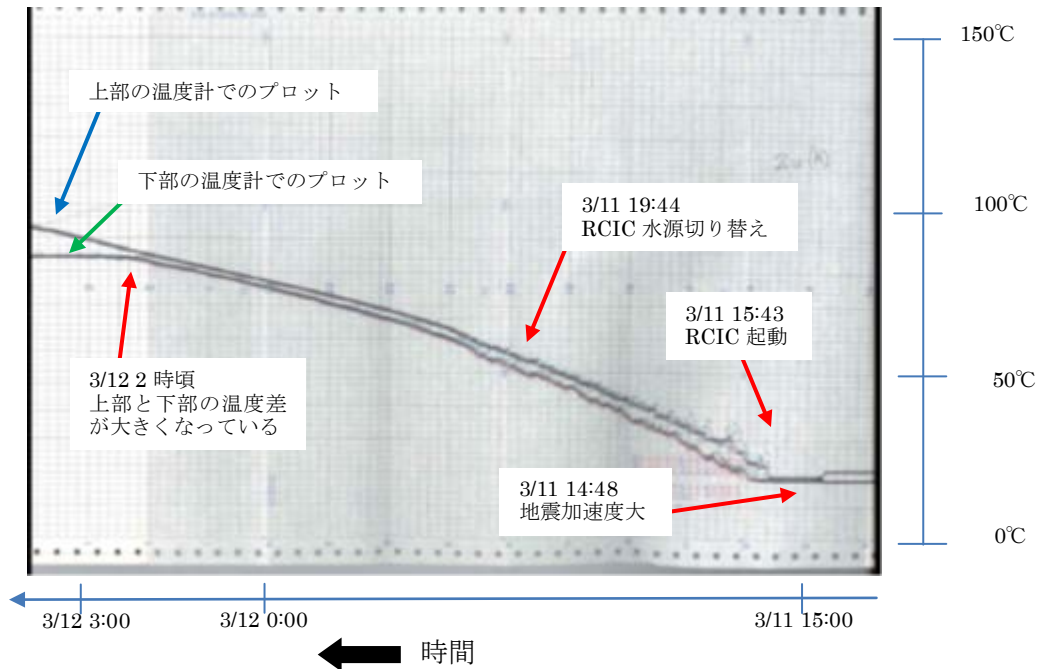


図 2. 福島第二原子力発電所 2 号 S/P 温度計 A 系 (1 / 6)

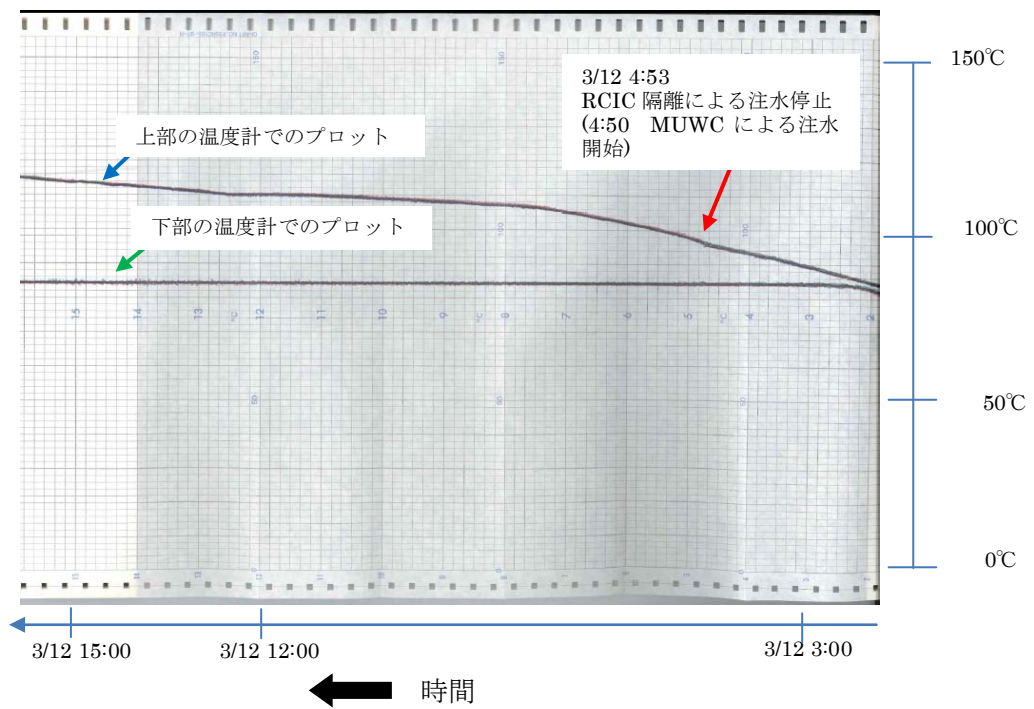


図 3. 福島第二原子力発電所 2 号 S/P 温度計 A 系 (2 / 6)

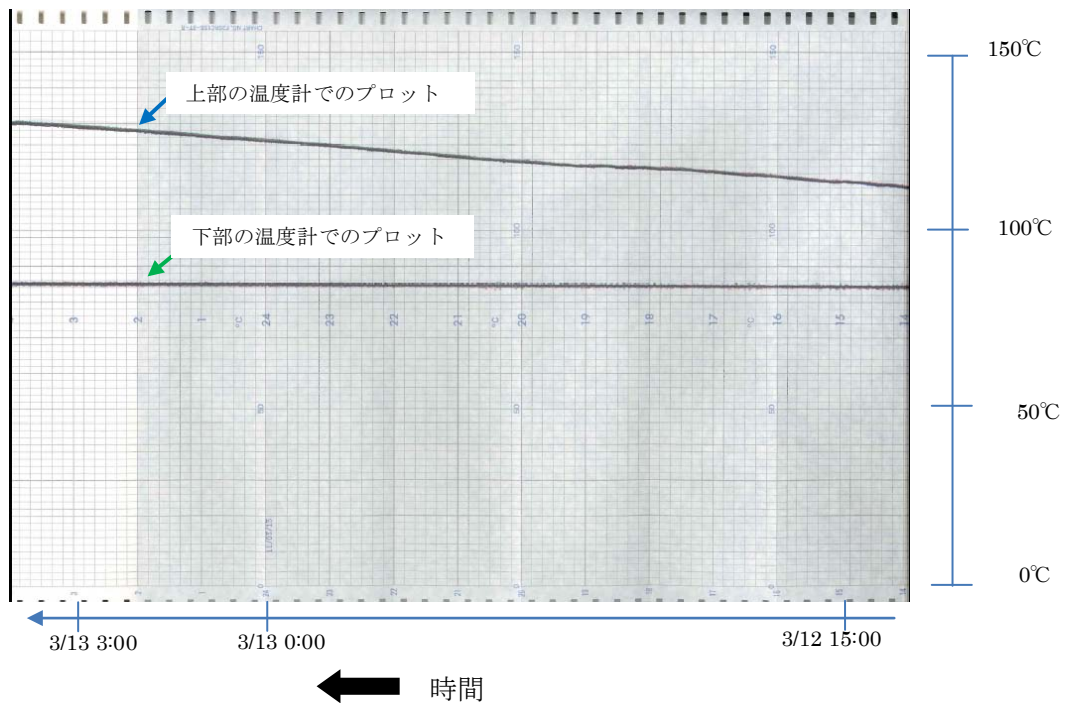


図 4. 福島第二原子力発電所 2 号 S/P 温度計 A 系 (3 / 6)

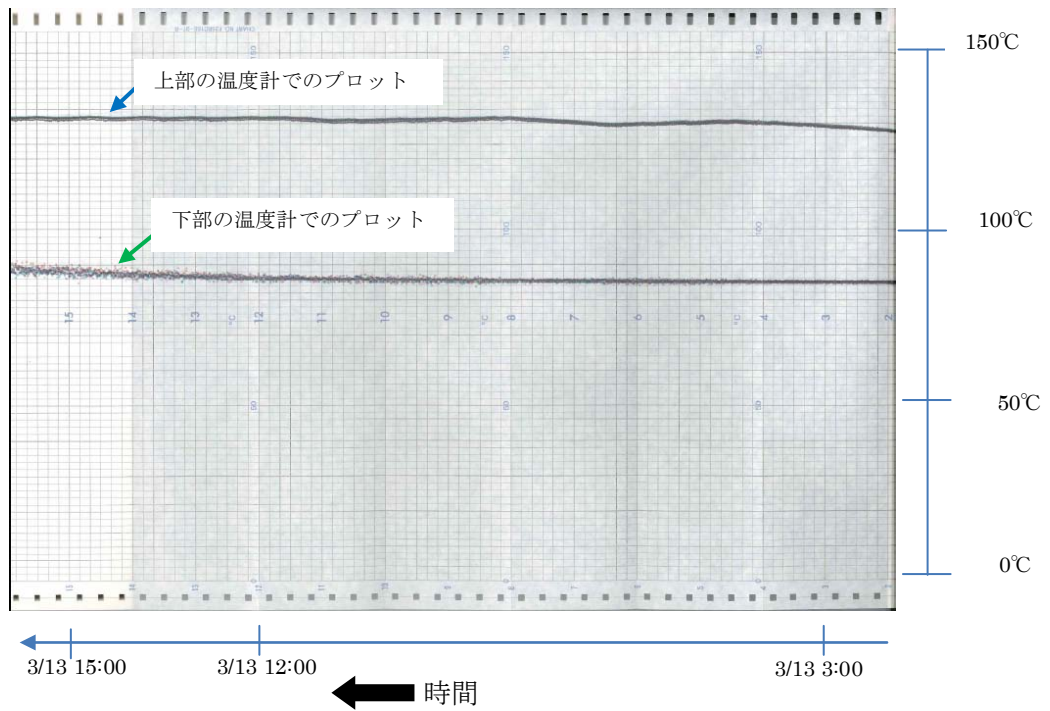


図 5. 福島第二原子力発電所 2 号 S/P 温度計 A 系 (4 / 6)

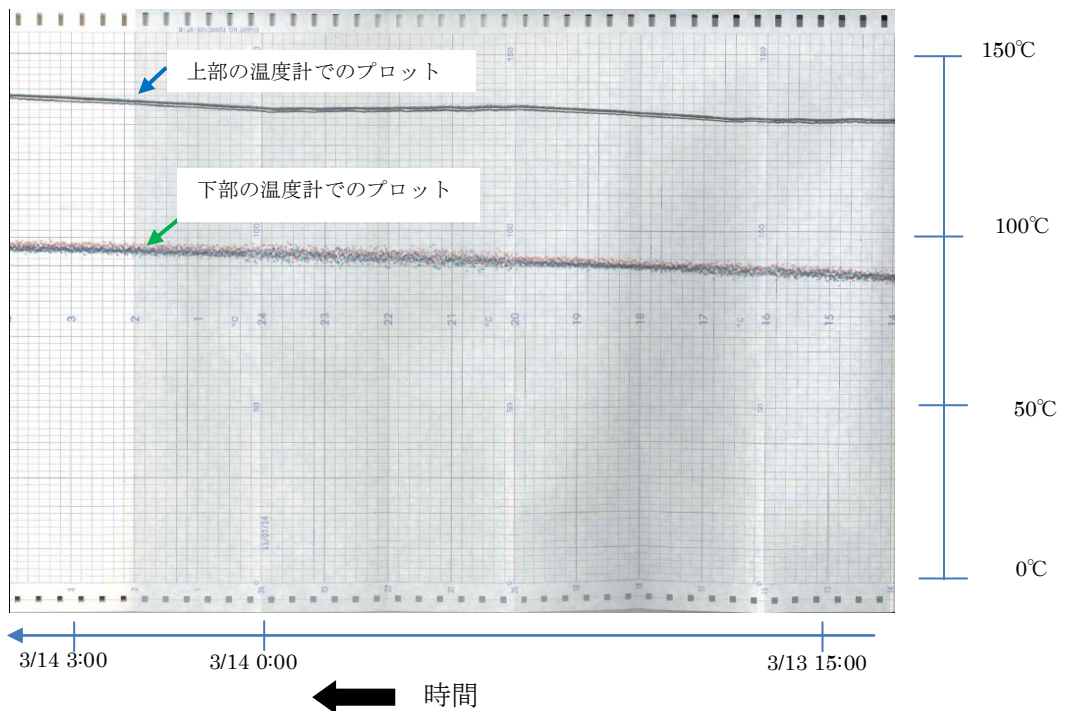


図 6. 福島第二原子力発電所 2 号 S/P 温度計 A 系 (5 / 6)



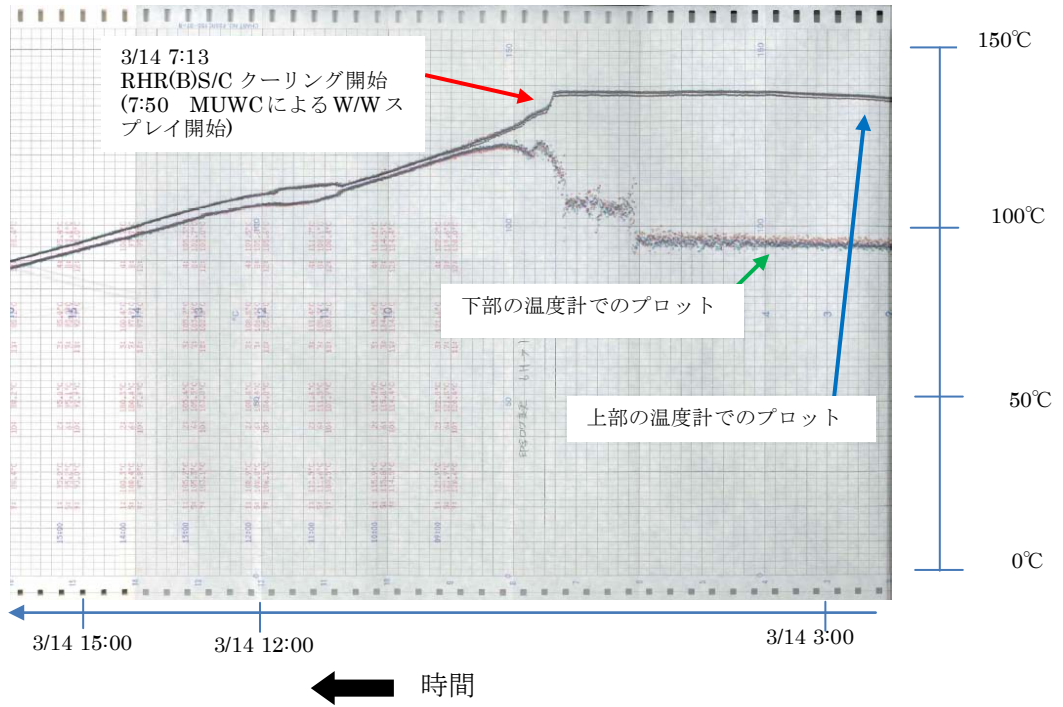


図 7. 福島第二原子力発電所 2号 S/P 温度計 A系 (6/6)

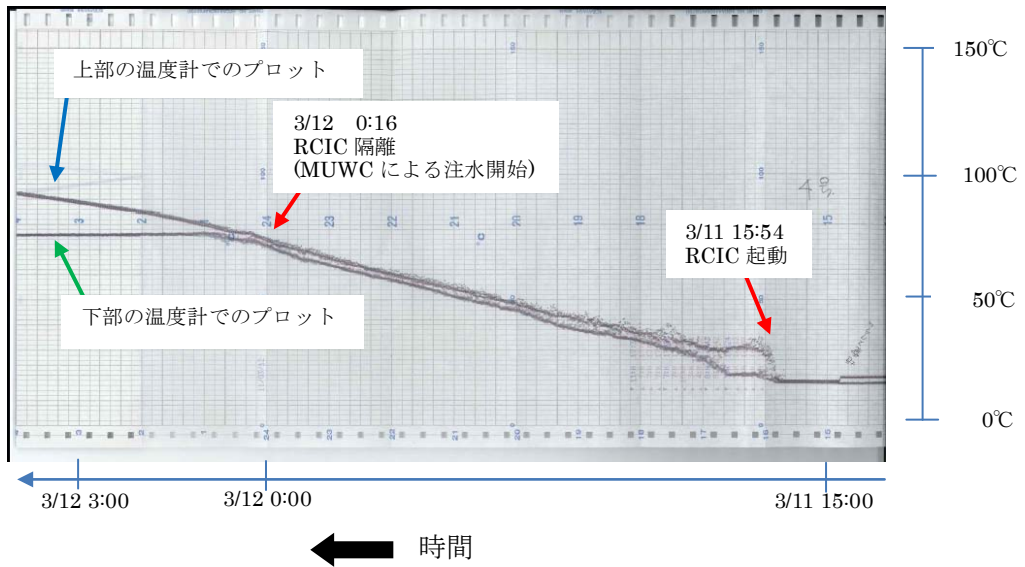


図 8. 福島第二原子力発電所 4号 S/P 温度計 A 系 (1 / 2)

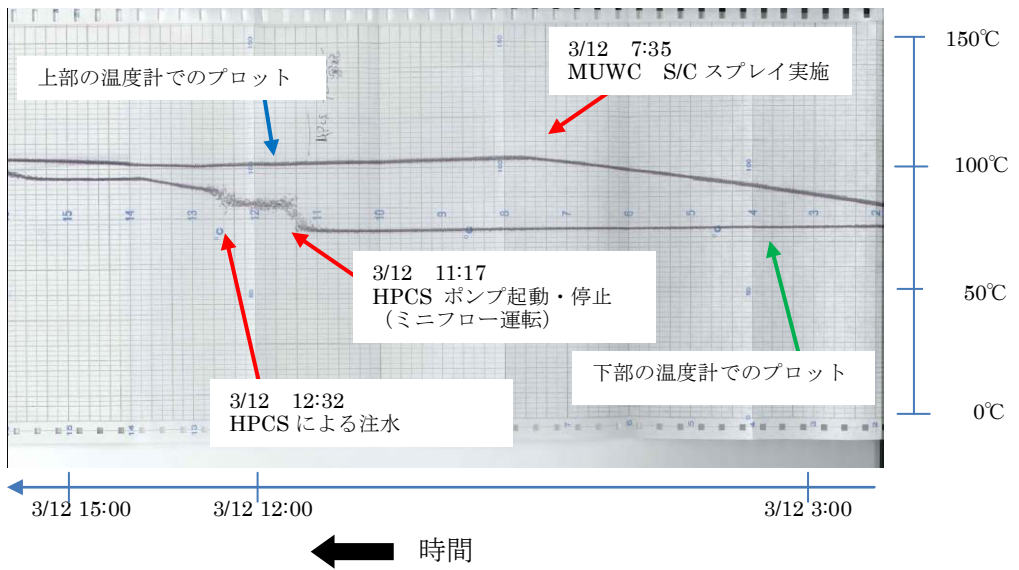


図 9. 福島第二原子力発電所 4号 S/P 温度計 A 系 (2 / 2)



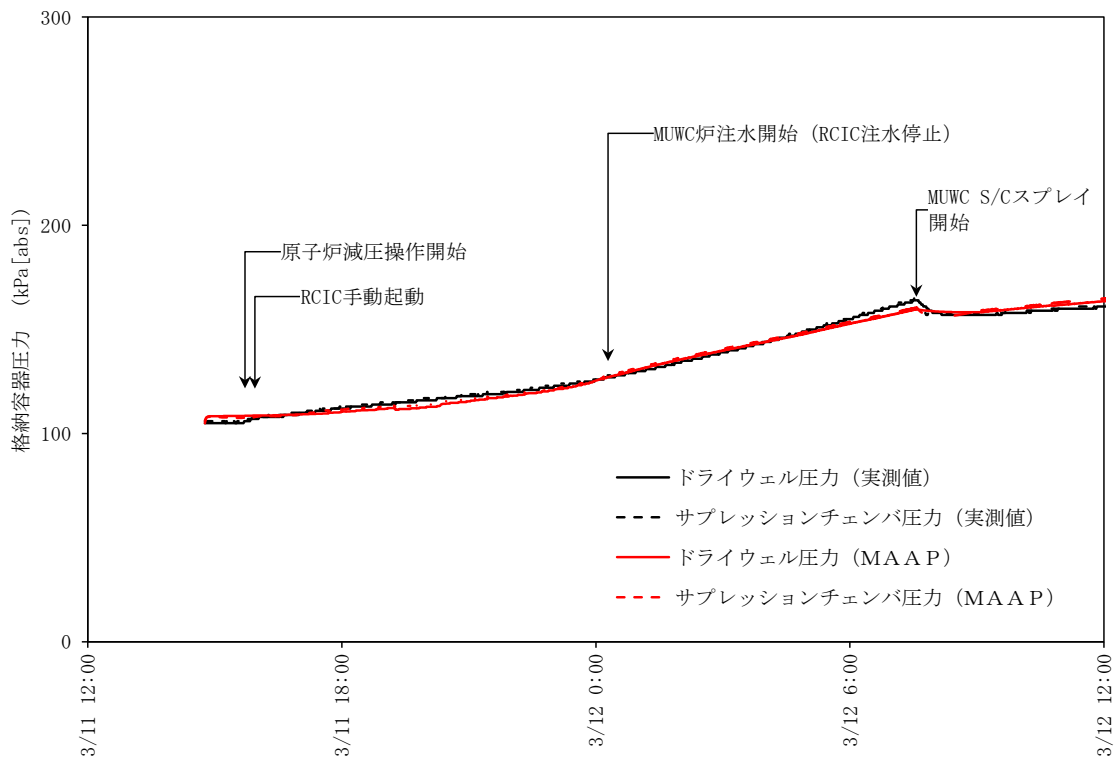


図 10. 福島第二原子力発電所 4号機 格納容器圧力変化

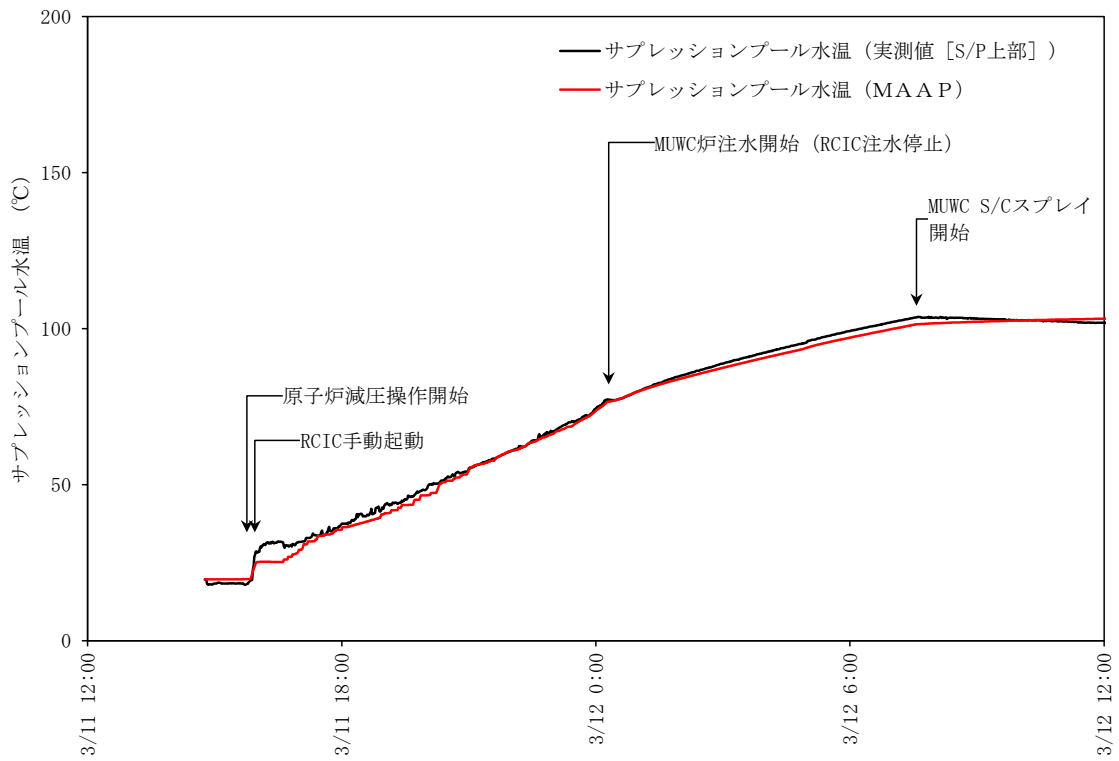


図 11. 福島第二原子力発電所 4号機 圧力抑制プール水温変化

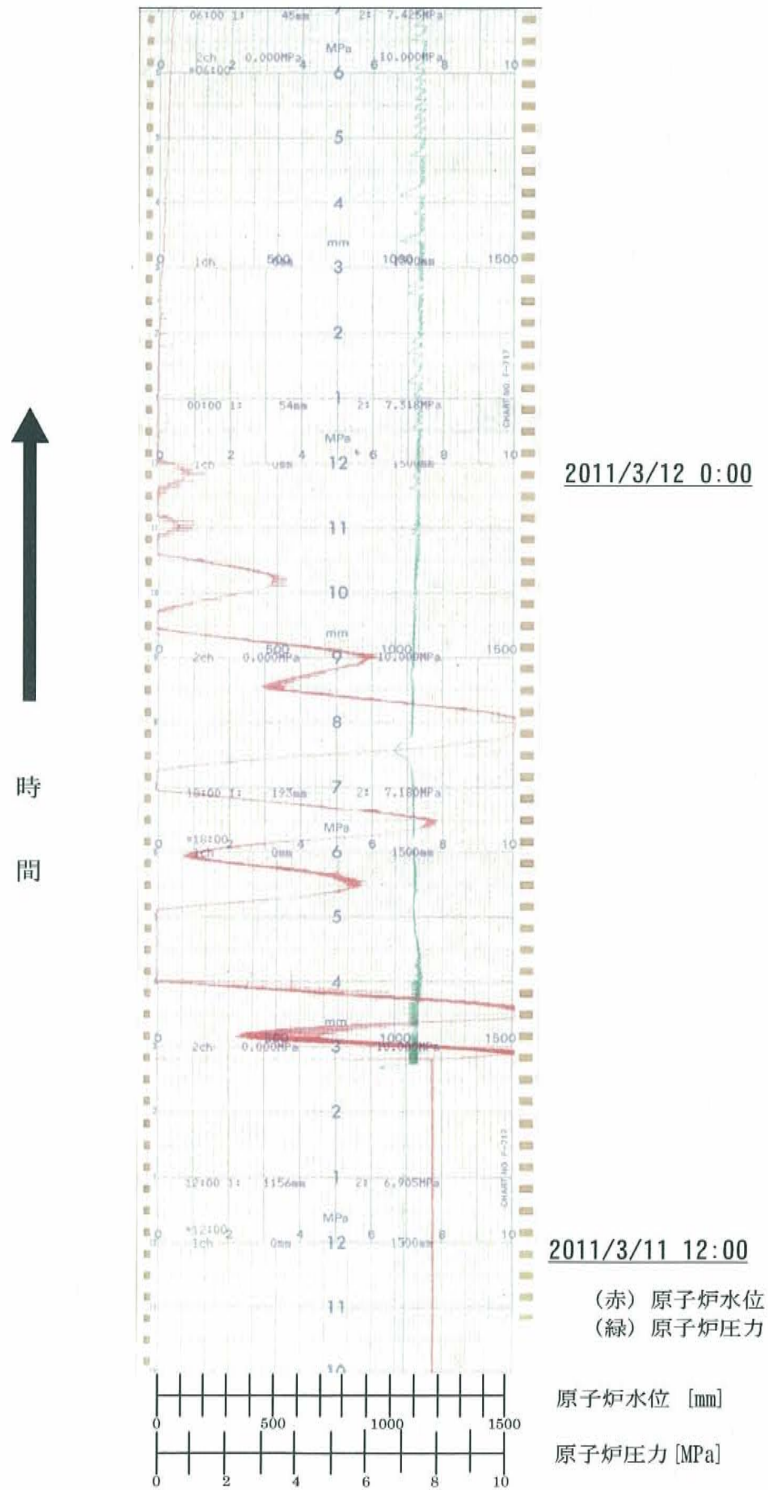


図 12. 福島第一原子力発電所 3号機 原子炉水位と原子炉圧力の変化<sup>※3</sup>

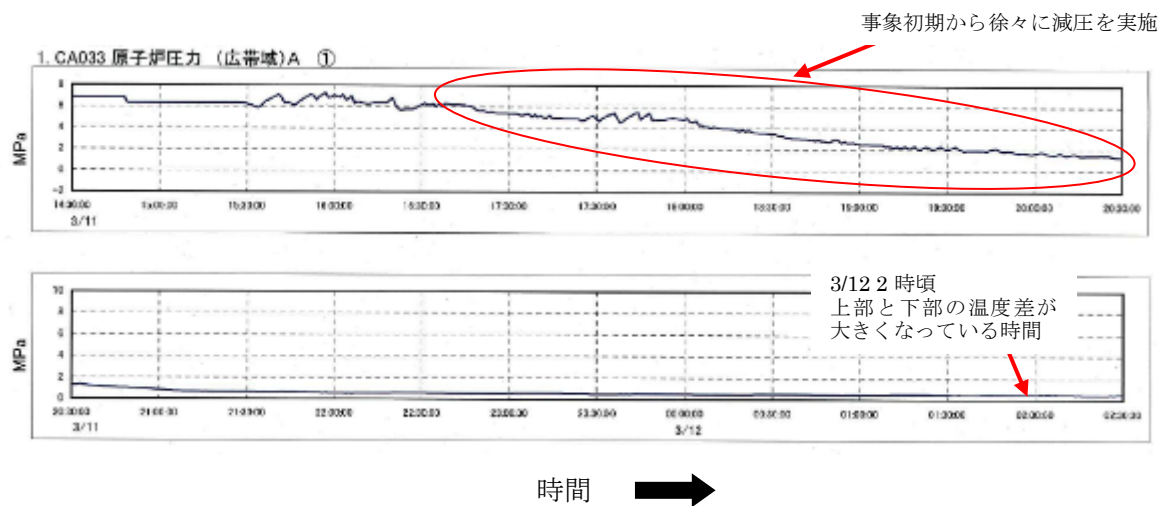


図 13. 福島第二原子力発電所 2 号 原子炉圧力の変化(プロセス計算機データ) ※3

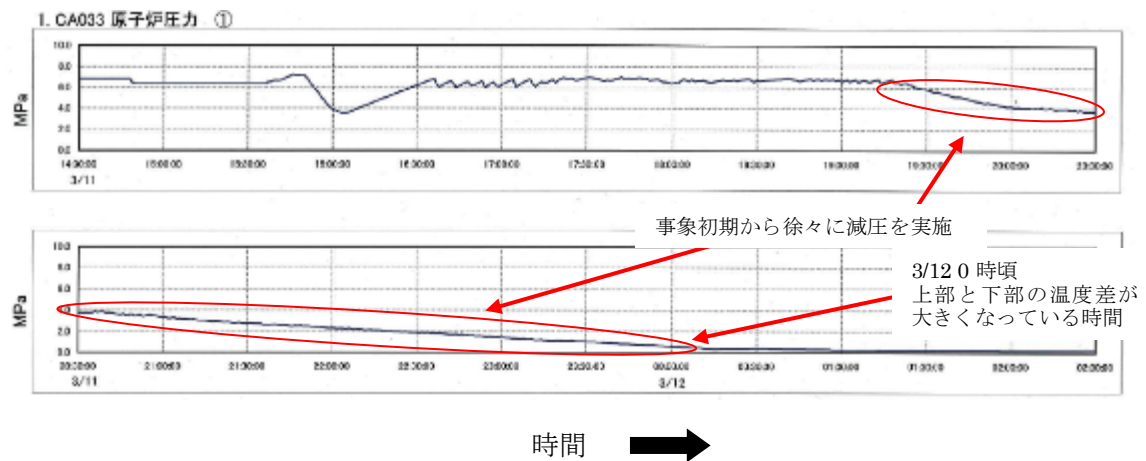


図 14. 福島第二原子力発電所 4 号 原子炉圧力の変化(プロセス計算機データ) ※3

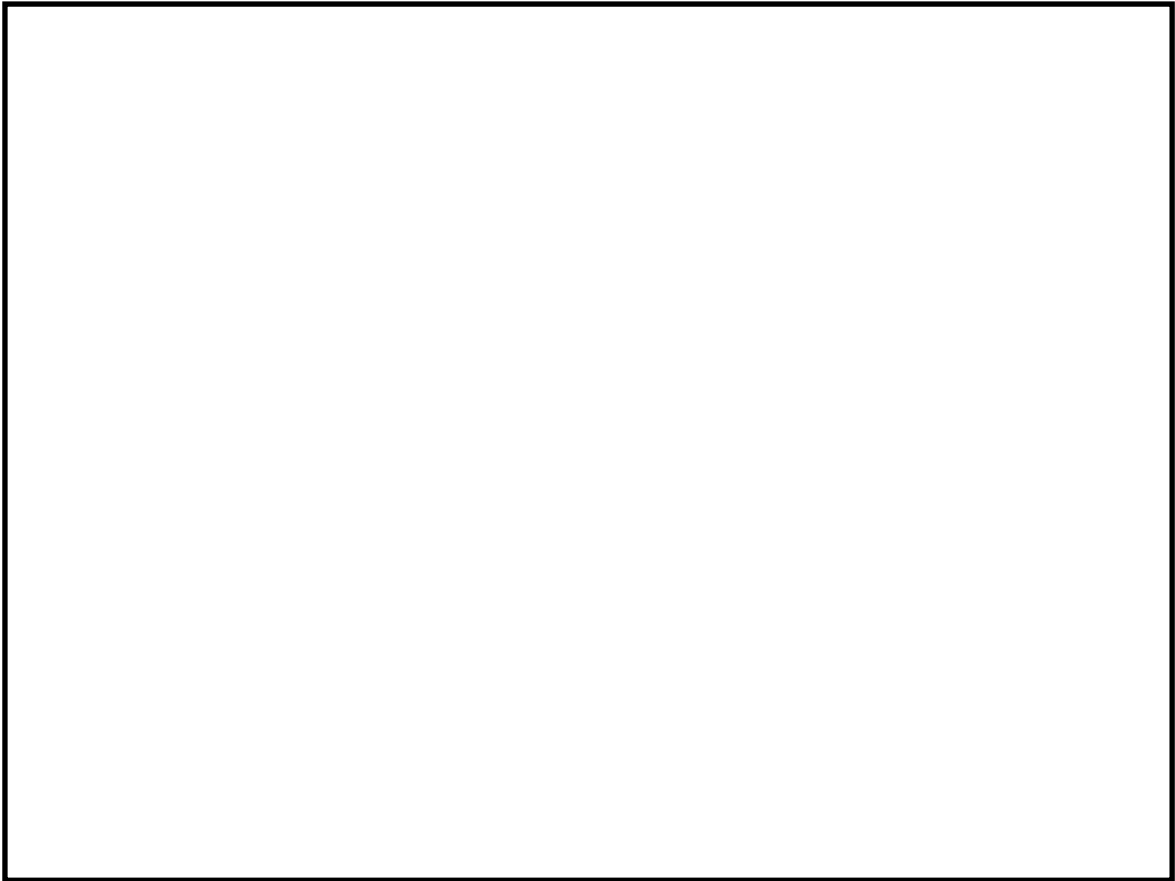


図 15. S/P 温度計各検出器（熱電対）等の概要図（例：2F-4）

※1：福島原子力事故調査報告書（平成 24 年 6 月 20 日）

8. 4 福島第一 3 号機の対応とプラントの動き

[http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1205628\\_1834.html](http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1205628_1834.html)

※2：東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会最終報告  
（平成 24 年 7 月 23 日）II .5 福島第二原子力発電所における事故対処

<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/>

※3：福島第一・第二原子力発電所の状況

<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/index-j.html>

## 別添 2 実験知見を踏まえた MAAP コードの有効性評価への適用性について

### 1. はじめに

MAAP コードのモデルは国内外で実施されたシビアアクシデントに関わる実験に対するベンチマーク解析によって妥当性が確認されているが、MAAP コードの BWR への適用性を確認するため、BWR 特有の現象に関連した実験について調査し、得られた知見を整理する。

BWR の炉心は以下の特徴を有している。

- ・ 燃料チャンネルや十字型制御棒を含む構成である。
- ・ 制御棒駆動機構の存在により炉心下部構造が複雑である。
- ・ 制御棒の制御材として B<sub>4</sub>C が採用されている。

これらの特徴がシビアアクシデント時の事象進展に及ぼす影響について調べるため、これまでに実施されたシビアアクシデント関連の実験の中で、炉心損傷過程に関わるものに着目し、BWR 体系を模擬した実験や B<sub>4</sub>C 制御棒を用いた実験について概要をまとめるとともに、MAAP コードの有効性評価への適用性を確認する。

### 2. BWR 関連実験

BWR の B<sub>4</sub>C 制御棒ブレードや燃料チャンネルを模擬した体系による実験としては、米国サンディア研究所 (SNL) の DF-4 実験と XR 実験やドイツのカールスルーエ原子力研究センター (KIT, 旧 FZK) の CORA 実験などの炉心溶融挙動実験がある。この中で XR 実験では BWR 炉心の下部構造を模擬した体系での実験が行われている。

また、B<sub>4</sub>C ペレット制御棒を用いた試験としては、ドイツのカールスルーエ原子力研究センター (KIT, 旧 FZK) の QUENCH-07, -09 実験やフランス放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN) の PHEBUS-FPT3 実験, BECARRE 実験がある。これらの実験は EPR で採用される B<sub>4</sub>C ペレット制御棒を対象とした実験であるが、B<sub>4</sub>C の影響評価の観点からここに含めることとする。

以下で各実験について概要をまとめる。

## (1) DF-4 実験

DF-4 実験は 1986 年に SNL の ACRR (Annular Core Research Reactor) で実施された BWR に対する最初の炉心損傷実験であり、炉心損傷過程についての情報全般を得ることを目的として行われた。

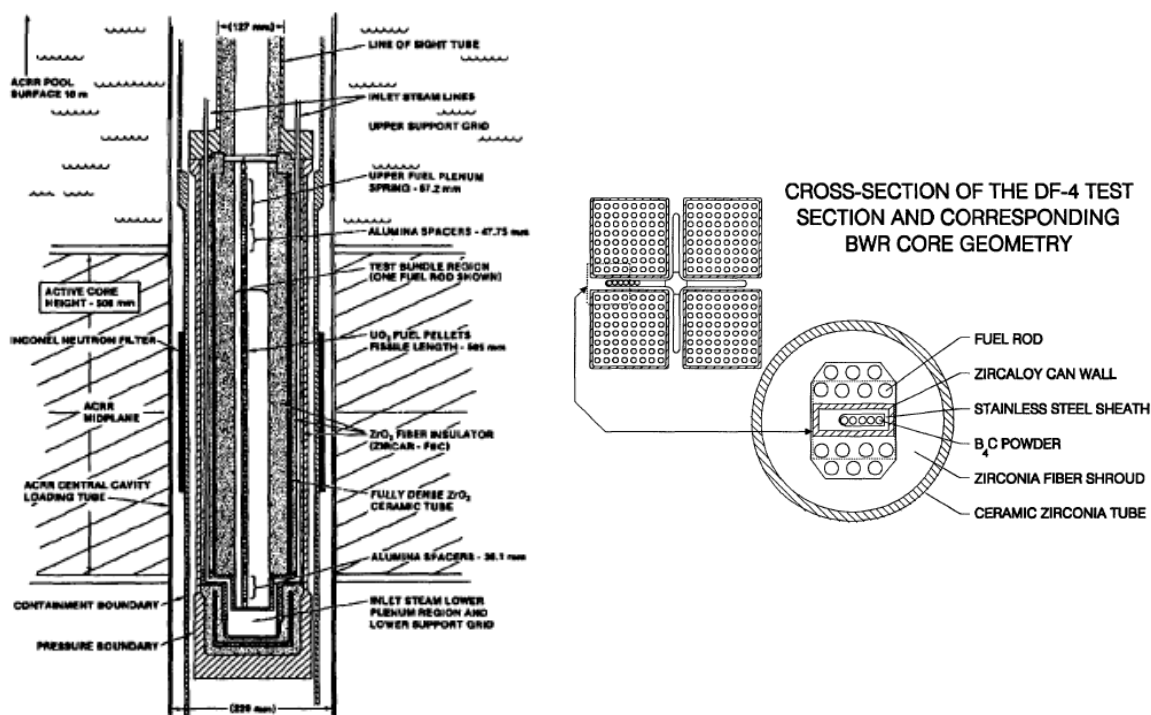
### ①実験の内容

DF-4 実験装置とテストセクションの断面を別図 2-1 に示す。

テストバンドルは長さ 0.5m の燃料棒 14 本、 $B_4C$  制御棒、チャンネルボックスで構成され、ACRR の円筒状のテスト部に設置された後に下部から供給される水蒸気雰囲気下で核加熱することにより炉心損傷を模擬する。

### ②実験結果の概要

制御棒は  $B_4C$  とステンレスの共晶反応によりステンレスの融点以下で早期に溶融した。燃料棒に関しては、温度上昇に伴いほとんどの被覆管は融点を越えた温度で溶融し下方に流下したが一部は酸化されて溶融せずに炉心に残った。また、燃料はほとんどが炉心に残った。制御棒とチャンネルボックス壁の 90% が溶融して下方にリロケーションした。



別図 2-1 DF-4 実験装置とテストセクション断面の概要

## (2) XR 実験

XR 実験は SNL の Ex-Reactor(XR)プログラムにおいて実施された炉心熔融実験で XR1-1, -2 と XR2-1 の 3 つの実験が行われた。XR1-1, -2 は燃料棒を含まないシンプルチャンネル実験であり、XR2-1 は燃料棒も含んだフルジオメトリ実験である。これらの実験は BWR の炉心下部構造を模擬した体系で炉心上部が熔融した場合の炉心下部の損傷進展を調べることを目的として行われた。ここでは XR2-1 実験について概要をまとめる。

### ①実験の内容

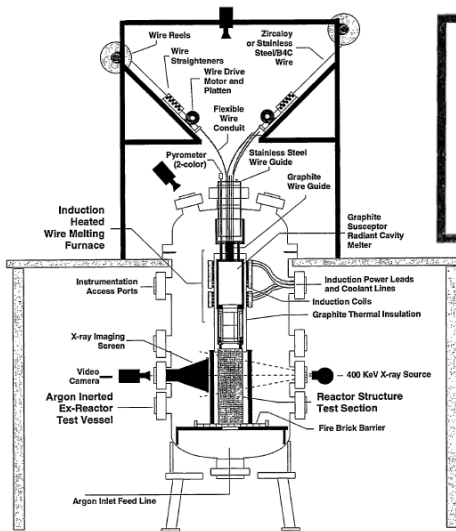
XR2-1 実験装置と炉心模擬部断面の概要を別図 2-2-1 に示す。

テストセクションは、長さ 0.5m の燃料棒 64 本、B<sub>4</sub>C 制御棒、チャンネル壁で構成される炉心模擬部とその下部に配置された BWR 炉心下部構造模擬部とで構成されている。

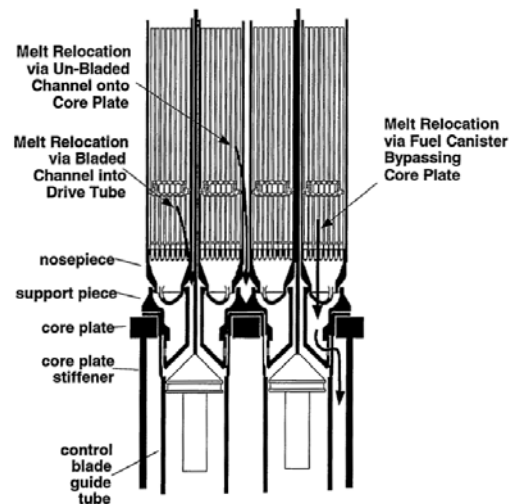
実験は、Ar ガスで不活性化された状態でテストセクション上部から誘導加熱により生成された模擬熔融物 (B<sub>4</sub>C, ステンレス, Zr) を流入させることにより炉心上部が熔融した場合の熔融物の下部へのリロケーションとその後の炉心下部の損傷進展を模擬している。

### ②実験結果の概要

制御棒成分との共晶反応によりチャンネル壁が損傷し、炉心熔融早期に燃料やバイパス部の形状が崩壊した。炉心下部構造には大規模な破損は発生せず、また、小規模なものを除いては流路閉塞も発生しなかったため熔融物 (流入熔融物と一部テストセクションの熔融物) の 70% 以上は構造物の隙間の流出経路 (別図 2-2-2) を通って継続的に下部プレナムに落下した。



別図 2-2-1 XR2-1 実験装置と炉心模擬部断面の概要



別図 2-2-2 炉心熔融物の流出経路の概要

### (3) CORA 実験

CORA 実験はシビアアクシデント条件下での燃料集合体の損傷・溶融進展を把握するために国際的な協力の枠組みの中で KIT にて実施された。19 の実験のうちの 6 つの実験が B<sub>4</sub>C 制御棒を用いて BWR の炉心を模擬したテストバンドルを用いて実施された。

#### ①実験の内容

CORA 実験装置と BWR 模擬実験のベースとなる CORA-16 実験のテストバンドルの概要を別図 2-3 に示す。テストバンドル下部には水で満たされたクエンチシリンダーが設置されており、このシリンダーの上部挿入によりテストバンドルを冠水させることができる。

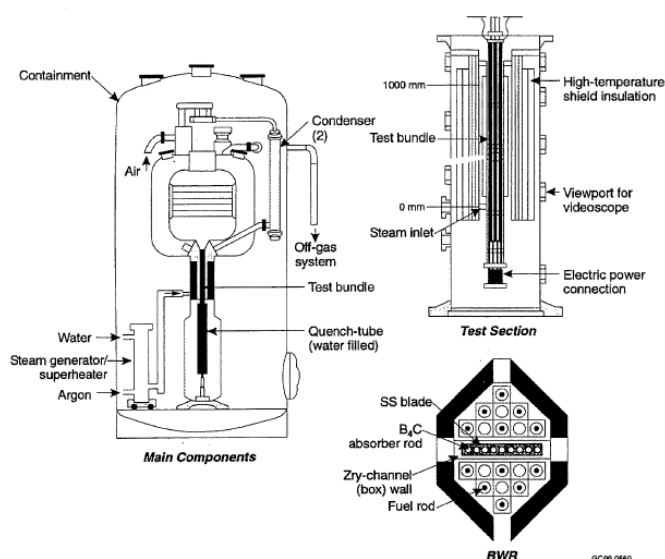
実験では燃料棒を内蔵ヒーターによって電気加熱すると共に下部から水蒸気とアルゴンガスの混合物を注入することにより炉心の溶融進展挙動を模擬する。

他の 5 つの実験は CORA-16 実験をベースケースとしてパラメータを変化させたもので、クエンチさせたケース (CORA-17)、バンドルサイズを大きくしたケース (CORA-18)、事前にジルカロイ表面を酸化させておいたケース (CORA-28)、スローヒートアップケース (CORA-31)、スローヒートアップで水蒸気量を減少させたケース (CORA-33) である。

#### ②実験結果の概要

CORA-16 実験では、最初に加熱領域の頂部で B<sub>4</sub>C とステンレスの共晶反応によりステンレスの融点以下で制御棒が溶融した。この溶融物とチャンネルボックスとの共晶反応によりジルカロイが液化し、引き続いて溶融したジルカロイが UO<sub>2</sub> 燃料を液化するとの事象進展が見られた。テストバンドルの上半分ではチャンネルボックスが残っておらず、これらの溶融物が下部でリロケーションし径方向に広がって冷却材流路をブロックした。なお、テストバンドル下部では制御棒は焼結状態で残った。この事象進展プロセスは他のケースでも基本的に同様であった。CORA-17 実験ではクエンチ時に水素が発生しているが、これはクエンチ時に表面の酸化された Zr が剥がれ落ちることによって、未酸化の Zr が水蒸気と反応したためと考えられる。

CORA-18 実験ではバンドルサイズの影響は小さいことが示された。CORA-28 実験では酸化膜が共晶反応を抑制すること、CORA-31 実験では温度上昇が遅いこととその間の酸化膜の形成により共に事象進展が抑制された。CORA-33 実験では CORA-31 実験よりも温度や水素発生量が小さい結果が得られた。



別図 2-3 CORA 実験装置とテストセクション (CORA-16 実験) 断面の概要



#### (4) QUENCH-07/09 実験

QUENCH 実験は独カールスルーエ原子力研究センター (KIT, 旧 FZK) によって燃料棒再冠水時の水素発生挙動を調べるために実施された一連の実験である。ここでは B<sub>4</sub>C 制御棒が用いられた QUENCH-07/09 実験についてまとめる。

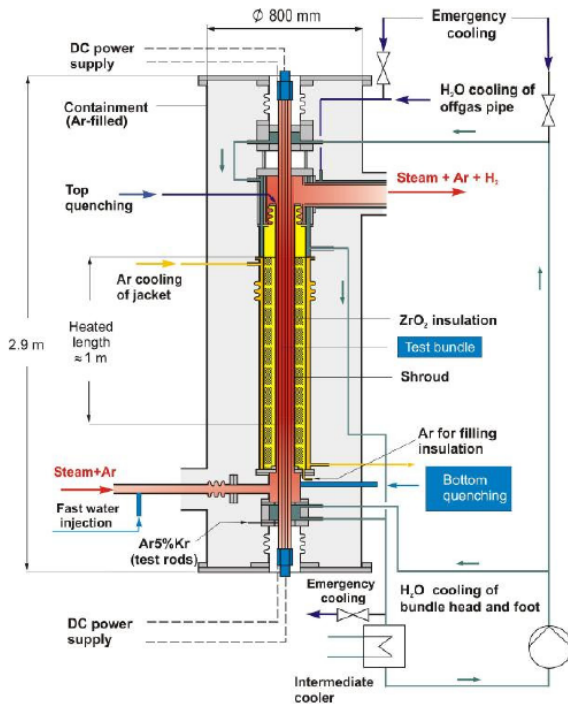
##### ①実験の内容

QUENCH-07/09 実験装置の概要とテストセクションの断面図を別図 2-4-1, 別図 2-4-2 に示す。テストセクションは燃料棒 20 本と中央に位置する 1 本の B<sub>4</sub>C 制御棒により構成される。

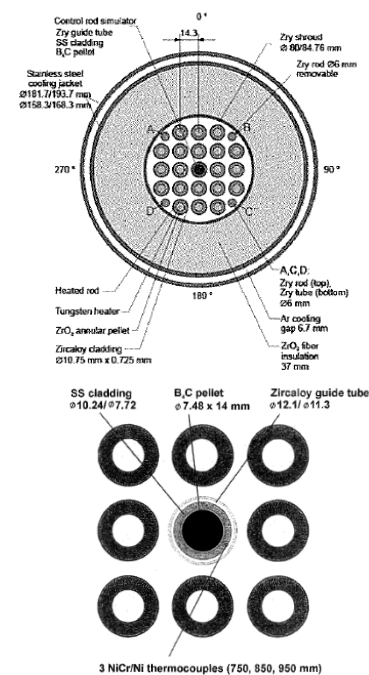
実験では事前に燃料棒を～2,000K に昇温した後に底部から水又は水蒸気を注入して再冠水状態を模擬している。なお、QUENCH-09 実験は再冠水前に 11 分間水蒸気流量を減少させて水蒸気枯渇状態を模擬している。

##### ②実験結果の概要

B<sub>4</sub>C はステンレスやジルカロイとの共晶反応によりジルカロイの融点より低い温度で B/C/Zr を含んだ溶融物が生成され、B<sub>4</sub>C を用いない実験に比べて溶融が促進すること、及び、溶融物の酸化に起因すると考えられる H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> の生成が確認された。B<sub>4</sub>C 酸化割合は QUENCH-07 実験で 20%, QUENCH-09 実験で 50%であり、B<sub>4</sub>C 酸化が H<sub>2</sub> 発生量全体に寄与した割合は各々 2.4%, 2.2%であった。また、再冠水時の H<sub>2</sub> 発生量は各々 0.12kg, 0.4kg であった。両実験での H<sub>2</sub> 発生量の差は、酸化した燃料棒が水蒸気枯渇状態に置かれると被覆管表面の ZrO<sub>2</sub> 相が減少して酸素を取り込みやすい状態となったため再冠水時に H<sub>2</sub> 発生量が増加したと考えられている。



別図 2-4-1 QUENCH 実験装置の概要



別図 2-4-2 QUENCH-07/09 実験のテストセクション断面の概要

(5) PHEBUS-FPT3 実験

PHEBUS-FPT3 実験はフランス放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN), フランス電力庁及び EU を中核とする国際協力プログラムである PHEBUS-FP 計画の中でシビアアクシデント時の燃料溶融, FP の放出, 移行挙動を調べる目的で実施された 5 つの実験の中の 1 つであり, B<sub>4</sub>C 制御棒を用いて行われた。

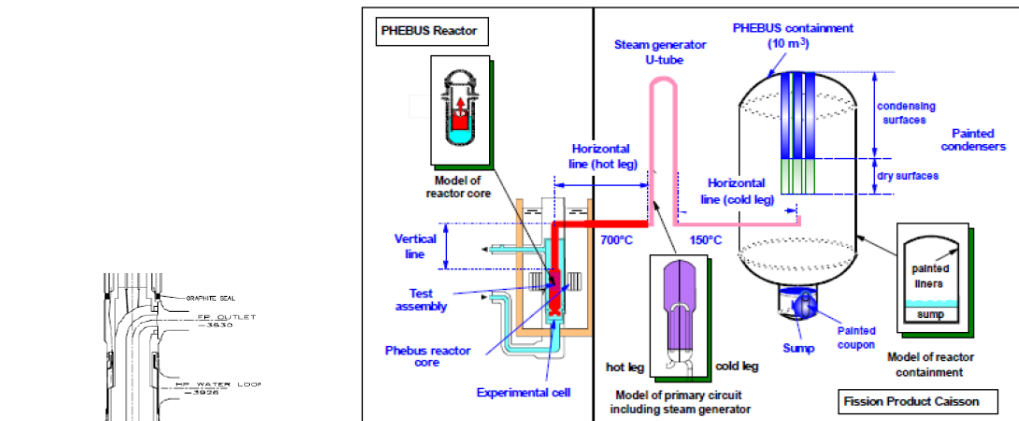
①実験の内容

PHEBUS-FP 実験設備全体の概要を別図 2-5-1 に示す。また, 実験用セルの概要とテストセクション断面図を各々別図 2-5-2, 別図 2-5-3 に示す。テストセクションは燃料棒 20 本と中央に位置する 1 本の制御棒で構成される。FPT3 では B<sub>4</sub>C 制御棒が用いられた。

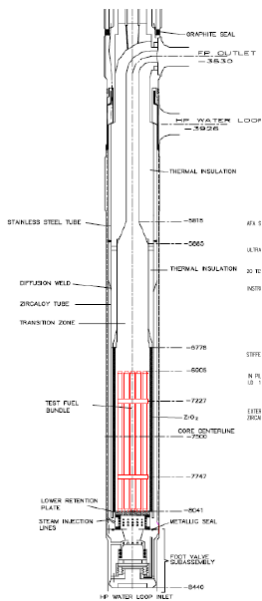
実験では実験用セル内に設置したテストセクションを PHEBUS 炉で核加熱し, 放出された放射性物質を蒸気発生器や格納容器で捕集する。

②実験結果の概要

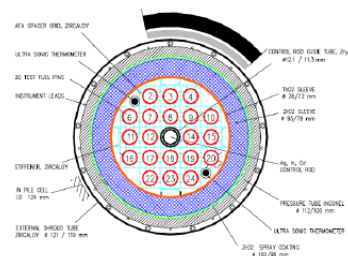
FPT-3 実験では他の Ag-In-Cd 制御棒を用いた実験に比べて格納容器中における有機よう素割合が大幅に増加することが確認された。格納容器内のガス状よう素中の有機よう素の割合は燃料損傷時期が約 5%で, その後最大 30%となった後も長期にわたって約 10~20%に保たれた。



別図 2-5-1 PHEBUS-FP 実験設備の概要



別図 2-5-2 PHEBUS-FP の実験用セルの概要



別図 2-5-3 PHEBUS-FP の  
テストセクション断面の概要

## (6) BECARRE 実験

BECARRE 実験はフランス放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN) の国際ソースターム計画 (ISTP) の中で、シビアアクシデント時の  $B_4C$  制御棒の崩壊過程や PHEBUS-FPT3 実験の課題であった  $B_4C$  の酸化による有機炭素の生成挙動を調べることを目的として行われた。

### ①実験の内容

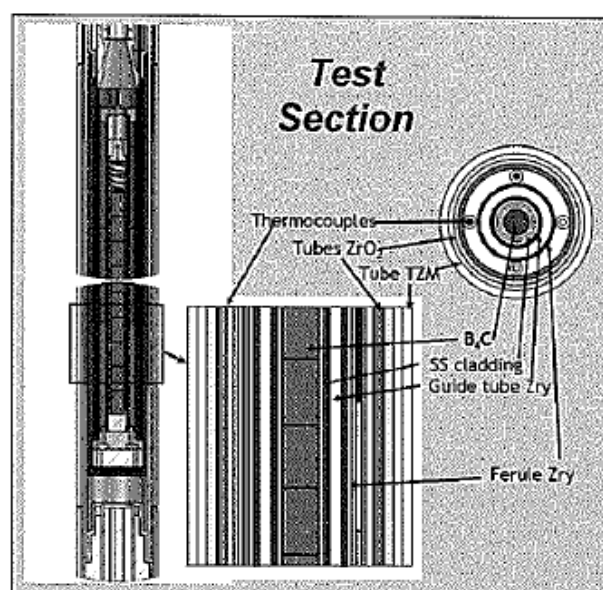
BECARRE 実験装置の概要とテストセクションの断面を別図 2-6 に示す。

テストセクションは長さ 0.6m の  $B_4C$  制御棒のみで構成されており、実験では下部から水蒸気を供給する条件下でテストセクションを加熱し制御棒の崩壊過程を模擬する。

### ②実験結果の概要

$B_4C$  の酸化により  $CO_2$  や  $CO$  の発生量は増加した。これにより水蒸気中の酸素が消費された結果ステンレスの酸化による  $H_2$  発生量は減少した。また、PHEBUS-FPT3 で観測された  $B_4C$  の酸化による  $CH_4$  の生成はほとんど観測されなかった。

その後の原因検討により、BECARRE 実験のような低圧条件 (~2bar) においては  $B_4C$  の酸化によって  $CH_4$  は生成しにくく、高圧条件 (100bar 以上) で  $CH_4$  が生成しやすくなることが確認されている。



別図 2-6 BECARRE 実験装置の概要とテストセクションの断面

### 3. 得られた知見のまとめ

BWR 特有の現象に関連したシビアアクシデント関連実験として、BWR 体系を模擬した実験や B<sub>4</sub>C 制御棒を用いた実験について調査した結果から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 炉心溶融は最初に B<sub>4</sub>C とステンレスの共晶反応によりステンレスの融点以下で制御棒が溶融し、この溶融物とチャンネルボックスとの共晶反応によりジルカロイが液化し、引き続いて溶融したジルカロイが UO<sub>2</sub> 燃料を液化するとの順で事象進展する。
- 2) XR2-1 実験では炉心下部構造には大規模な破損は発生せず、また、小規模なものを除いては流路閉塞も発生しなかったが、溶融物の流出経路については今後の福島第一原子力発電所事故の検証評価を待つ必要があると考えられる。
- 3) B<sub>4</sub>C や B/C/Zr を含んだ溶融物の酸化により H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> が生成される。
- 4) CH<sub>4</sub> は低圧条件(~2bar)においては生成しにくく、高圧条件(100bar 以上)で生成しやすい。

### 4. 有効性評価への適用性

1)に示した、制御材(B<sub>4</sub>C)との共晶反応によるステンレスやジルカロイの融点低下については、本文「3.3.6 溶融炉心の挙動モデル」において述べたとおり、MAAP コードではこれらの実験の知見に基づいてモデル化がなされている。また、CORAX 実験におけるベンチマーク解析において再現性も確認されていることから、妥当性があると判断できる。

2)における溶融物の流出経路については、MAAP コードでは、溶融炉心の下部プレナムへの落下は、炉心支持板が破損するか、クラストが破損して溶融炉心を保持できなくなった場合に開始する。一方、燃料支持金具等の炉心下部構造物を介して溶融炉心が下部プレナムへ移行する場合、これらの構造物との熱的な相互作用によって、その経路で一部が固化するなどの現象が想定される。したがって、これらの現象を考慮していない現状の評価は、原子炉压力容器下部ヘッドへの熱負荷を計算する上で、保守的な扱いと言える。

3)及び 4)における、制御材(B<sub>4</sub>C)の反応による非凝縮性ガスの発生については、QUENCH 実験では EPR(PWR)における体系を模擬し、ステンレスの被覆管に入れられた B<sub>4</sub>C が Zr 製の案内管中に収まる構造となっているのに対し、BWR 実機の炉心では、制御棒は十字型をしており、B<sub>4</sub>C に対するステンレスの割合が多い。このため、B<sub>4</sub>C がステンレスとの共晶反応によって溶融して混ざり合い、水蒸気との接触による酸化反応が阻害され、非凝縮性ガスの発生量はさらに少なくなると考えられる。また、BECARRE 実験において確認されているように、減圧されている場合には B<sub>4</sub>C の酸化によって CH<sub>4</sub> は生成しにくいと考えられ、PHEBUS-FPT3 実験で観測されたような有機よう素の大量発生は起きない可能性が高い。

以上より、BWR 特有の現象に関連した実験から得られた知見を踏まえた場合にも、評価結果に与える影響は小さく、有効性評価への適用性を有するものと考えられる。

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。

|       |                  |
|-------|------------------|
| 改訂番号  | 改訂 5             |
| 提出年月日 | 平成 28 年 2 月 24 日 |

重大事故等対策の有効性評価に係る  
シビアアクシデント解析コードについて

審査会合における指摘事項の回答

(第 5 部 M A A P)

平成 28 年 2 月

東北電力株式会社

東京電力株式会社

中部電力株式会社

中国電力株式会社

ISLOCA の有効性評価において、原子炉建屋の作業環境評価で考慮している物理事象を説明するとともに、どのようにモデル化しているか説明すること。また、原子炉建屋のモデル化の格納容器温度・圧力の評価への影響を説明すること。

## 【回答】

### (1) ISLOCA の評価について

ISLOCA を想定して、原子炉建屋の作業環境評価を行う場合には、冷却材の流出とそれに伴う原子炉建屋内の圧力・温度の上昇、並びに蒸気等の気体の建屋内の移動を評価する。この評価に対しては、例えば下記の方法が適用できる。

- ・対象とする原子炉建屋内の各作業区画をノードとしてモデル化
- ・漏えいを想定する区画に対して、冷却材の流出を考慮
- ・空調ダクトやハッチ等によって他区画への開口部がある場合にはジャンクションで接続し、気体・水の移動を考慮

上記の方法に基づいた MAAP による原子炉建屋モデル化の概要（例）を図に示す。原子炉建屋及び建屋内の各作業区画をモデル化し、余熱除去系(B)熱交換器室における漏えいを考慮している。また、図中の赤及び青の矢印は、それぞれドレン配管及びダクト、ハッチによる他区画への開口部を示している。

原子炉建屋内各区画間のジャンクションを介した気体・水の移動とそれに伴う質量及びエネルギーの変化、気体と水の間熱伝達等の熱水力挙動は、MAAP コードでは、原子炉格納容器に適用されるモデル (3.3.4 格納容器モデル (2) 格納容器の熱水力モデル) と同じ計算モデルによって評価している。

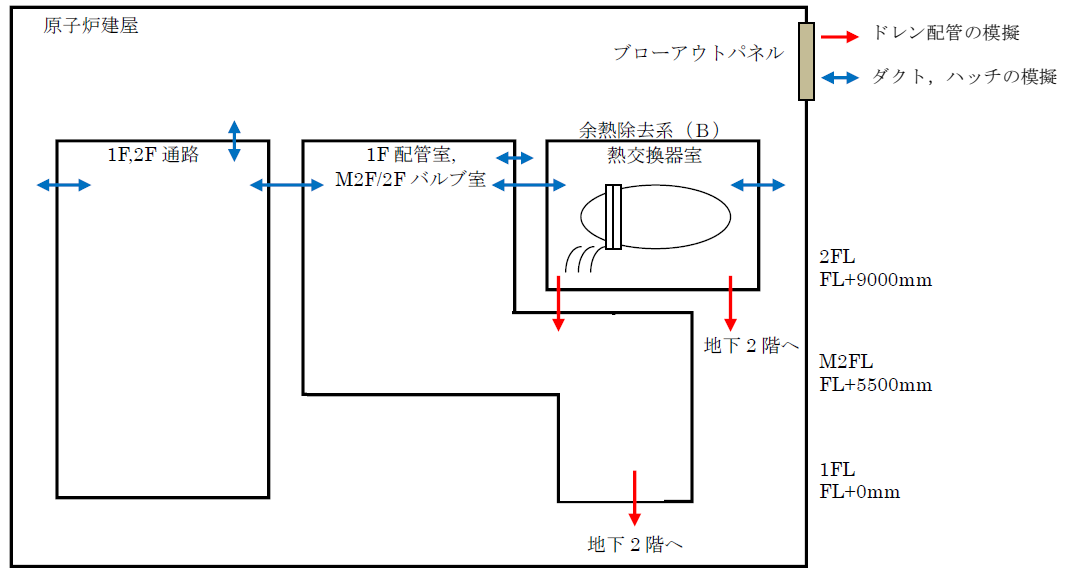


図 MAAP による原子炉建屋モデル化の概要 (例)

## (2) 原子炉建屋のモデル化について

原子炉建屋のモデル化により，原子炉格納容器から原子炉建屋への放熱評価が可能となり，放熱に伴う原子炉格納容器内の熱水力挙動の現実的評価が可能となる。この際，格納容器内雰囲気から原子炉格納容器本体並びにその周囲のコンクリート製生体遮へい壁を介した原子炉建屋への放熱が評価されるモデルとしているが，生体遮へい壁のコンクリートは熱伝導率が低いため内部の温度勾配が大きく，厚さが約 2m あるため，原子炉建屋への放熱量そのものが小さいことから，格納容器温度・圧力への影響は小さい。

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。


資料 No.MAAP-2

解析モデルのエネルギー方程式について、非線形性の強い式の場合にどのように解決されているか説明すること。

**【回答】**

MAAP コードでは、状態変数とその時間変化率を用いた時間積分にて算出しており、この過程で使用するタイムステップは、誤差を抑えるため、状態変化が急激となる場合には短くなるように、変化率が大きい状態変数によって調整される。非線形性が強い式に対しても、その式による状態変化が急激となる場合にタイムステップを短くすることにより対応している。





同様の考え方で設定した許容変化率を用いている「4.2.1 TMI 事故解析」及び「4.2.2 CORA 実験解析」にて、燃料被覆管酸化モデルの妥当性を確認しており、MAAPによる解析で得られた水素発生量、燃料被覆管の温度変化は、それぞれ TMI 事故の分析結果、CORA 実験における測定データと良く一致している。以上より、非線形性が強くなる化学反応の評価においても現状のタイムステップの設定で評価可能と考えられる。

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

格納容器スプレイの効果について、代替設備における注水量を到達する距離等による局所的な差異を考慮した上で1ノードで評価することの妥当性を説明すること。

**【回答】**

## 1. NUPEC で実施された低流量スプレイ試験について

シビアアクシデント時を想定した低流量での格納容器代替スプレイによる FP 除去について、(財)原子力発電技術機構による検討「重要構造物安全評価に関する総括報告書」(2003年3月)において、BWRの格納容器を模擬した試験が行われている。

試験装置はスプレイ落下高さが実機相当となる大型容器にて実施し、一般的なスプレイ試験の模擬方法と同様に試験容器と実機との体積比に応じた低流量スプレイを試験条件としている。この試験条件は、スプレイによる熱交換効率が極めて高いためノズル近傍で急速に凝縮が進み、試験容器内に十分なミキシングの駆動力が生ずるとの考え<sup>[1]</sup>に基づいている。なお、凝縮に影響を及ぼす液滴径も適切に模擬するため試験装置のスプレイノズルは実機のものを使用し、ノズル個数は実機と同様のスプレイ流量を模擬できるように実機との体積比に応じた個数としている。

試験では、このような体系下において試験容器底部からエアロゾル(CsI)が連続的に供給され、試験容器頂部から連続的にスプレイされる状況において、試験容器内のエアロゾルの濃度変化の測定を行っている。図1に示されるように実験結果から、スプレイ流量が低流量であっても、試験容器頂部・胴部・底部いずれのエアロゾル濃度も速やかに低下することが確認されている。スプレイが直接カバーする範囲の狭い頂部においても短時間でエアロゾル濃度が低下するのは、慣性衝突だけでなく、蒸気凝縮に伴う拡散泳動によりエアロゾル除去効果が促進されるためとされている。

[1] Kitani, S., "Containment Spray Experiments for Pressure Suppression," ICLAS '78 (the 1st International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems)

## 2. 実験解析による比較について

MAAP コードで見込まれるスプレーによるエアロゾルの除去効果を実験結果の図にプロットしたものを図 2 示す。実験結果との比較により、MAAP コードでも実験結果と同様の除去効果が見込むことが出来る。

また、上述の比較は試験容器全体に対して行ったものであるが、スプレーによる直接のエアロゾルの除去効果を見込みにくい（非スプレー領域の多い）試験容器頂部（直径 1.8m）部分のみに着目した場合の MAAP コードとの比較を図 3 に示す。この場合、MAAP コードで見込まれるスプレーによるエアロゾルの除去効果は保守側の結果を与えている。

これらのことから、低流量での格納容器代替スプレー時においても、格納容器（ドライウェル）内を 1 ノードとして扱い、MAAP コードで用いているスプレー効果を見込むことは妥当と考える。

### 【補足：実験体系と実機の比較について】

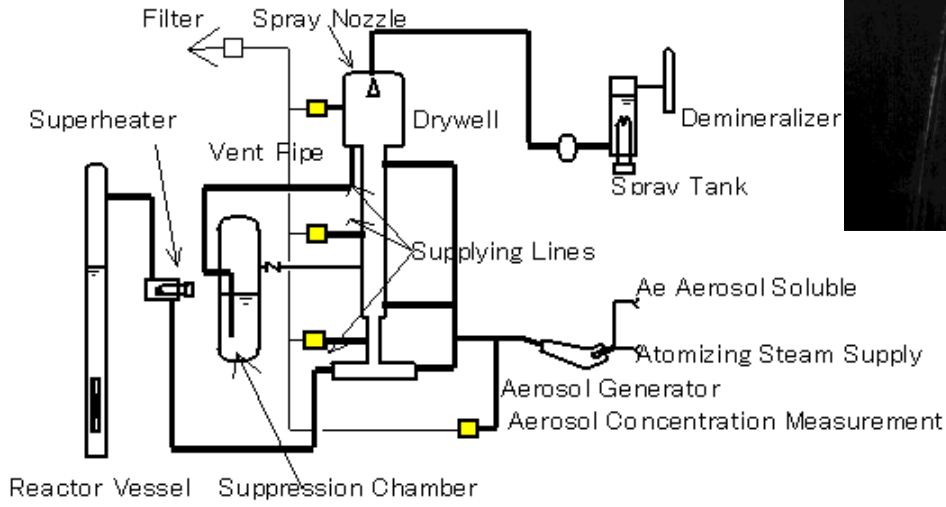
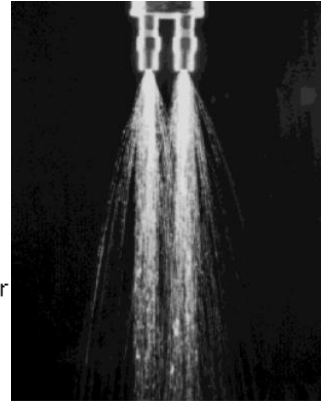
低流量時のスプレーは図 1（右上写真）に示すようにスプレーの拡がり小さく、流下液滴は試験容器壁には衝突することなく落下する状態となっている。この観測結果から、スプレーノズルからのスプレーの拡がり範囲を試験容器壁に到達しない程度である 0.3m と仮定すると、全断面積に対するスプレーがカバーする断面積の比は、試験容器頂部において約 3% となる。一方、実機において同様にスプレーの広がり 0.3m と仮定すると、全断面積に対するスプレーがカバーする断面積の比は約 6% と見積もられる（スプレーヘッドの大直径が最も大きい Mark-I 改良型格納容器の場合。図 4 参照）。さらに、実機におけるスプレーはノズルの各吹出口が相互に角度をもって設けられているため下方向だけでなく斜め方向にもスプレーされ、低流量時の拡がり径は約  $\square$  m<sup>[2]</sup> との知見も得られている（図 5 参照）。

また、実験体系では試験容器の中心部にまとめたスプレー体系となっているのに対して、実機では容器外側壁近傍から分散させたスプレーを行う体系となっており、スプレーにより不均一さが生じにくい体系になっていると考えられる。

これらのことから、実機の方がスプレーによるエアロゾル除去効果が得られる体系と  
なっていると考ええる。

[2] 共同研究報告書「放射能放出低減装置に関する開発研究」(Phase 2)、  
平成4年度下半期(最終報告書), 平成5年3月

スプレイは試験容器（胴部直径 0.5 m）の  
内壁にかからない状態



試験容器

高さ : 18 m  
 頂部直径 : 1.8 m  
 胴部直径 : 0.5 m  
 底部直径 : 2 m

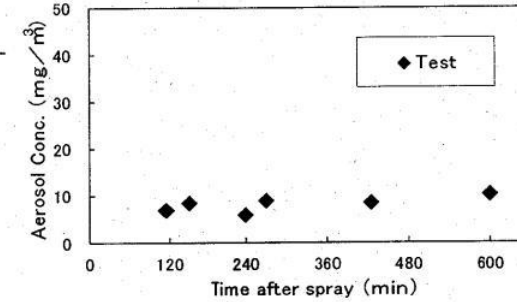
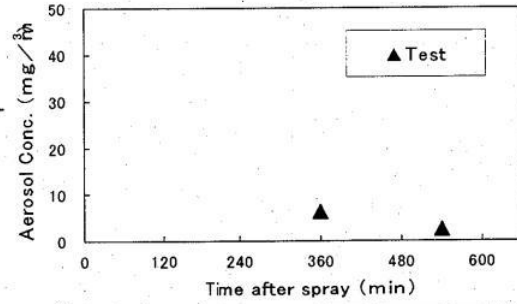
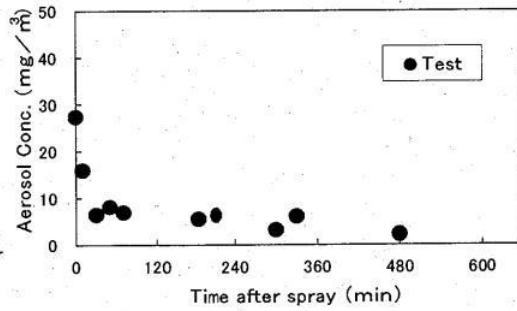
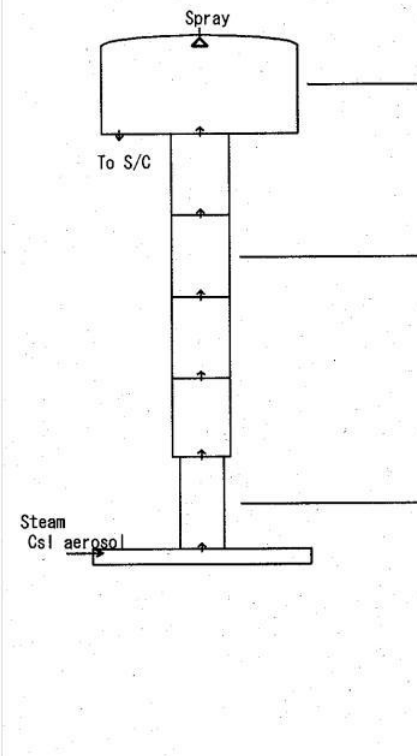


図 1 格納容器代替スプレイによるエアロゾル除去効果の例

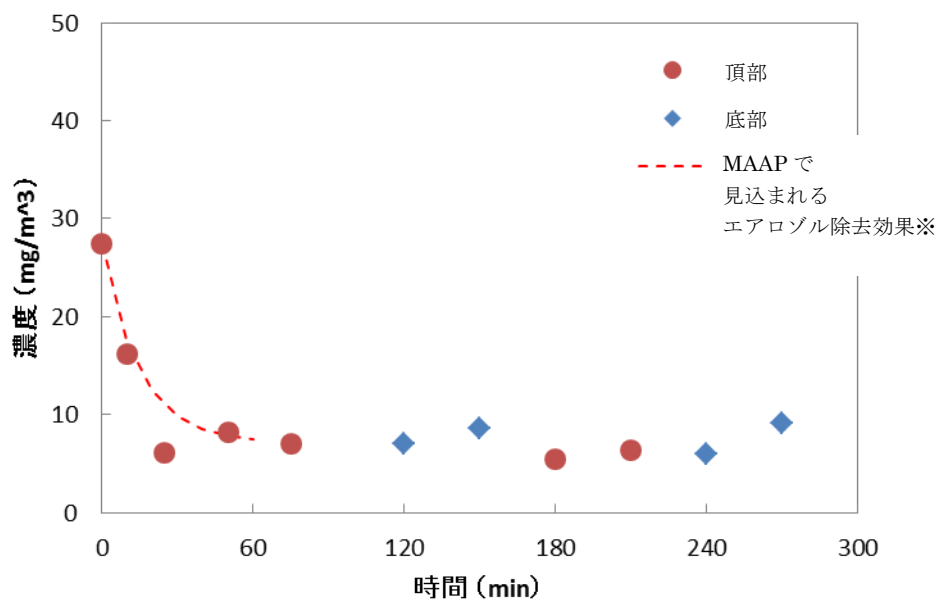


図2 実験結果と MAAP で見込まれるエアロゾル除去効果の比較

※：エアロゾルが連続供給される実験体系であることから、  
 スprayにより、エアロゾル濃度は静定時エアロゾル濃度  
 (60分から300分の平均値)に漸近すると仮定

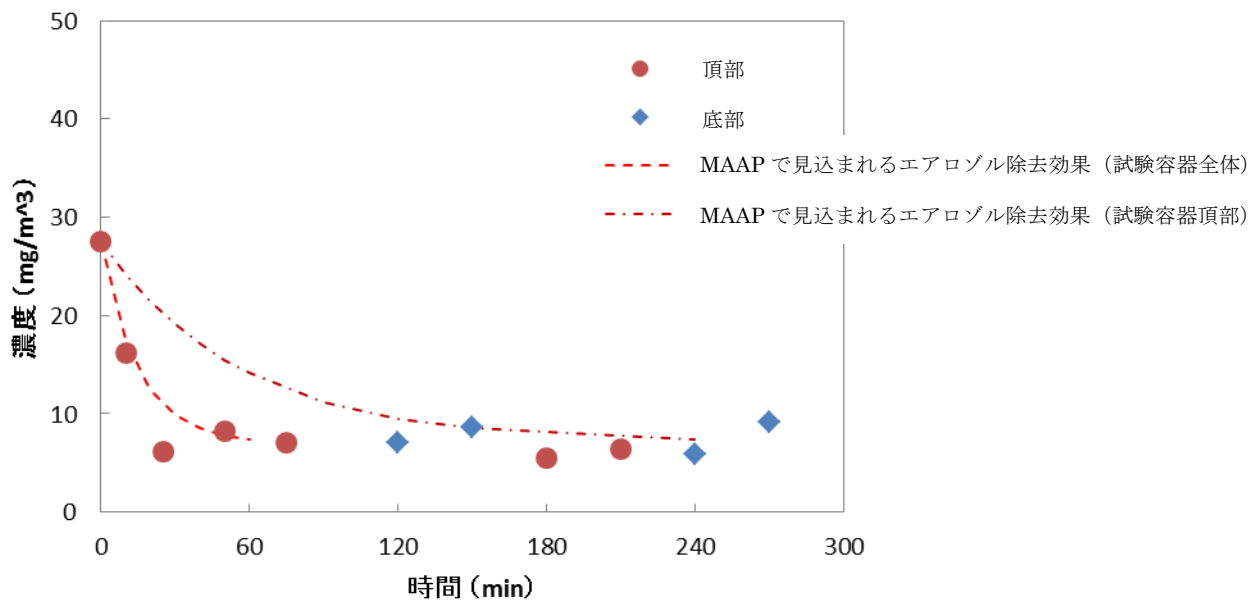


図3 実験結果と MAAP で見込まれるエアロゾル除去効果の比較  
 (試験容器頂部に着目した場合)

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

散布距離

■ : 0.3m

■ : 実機における  
拡がりを考慮

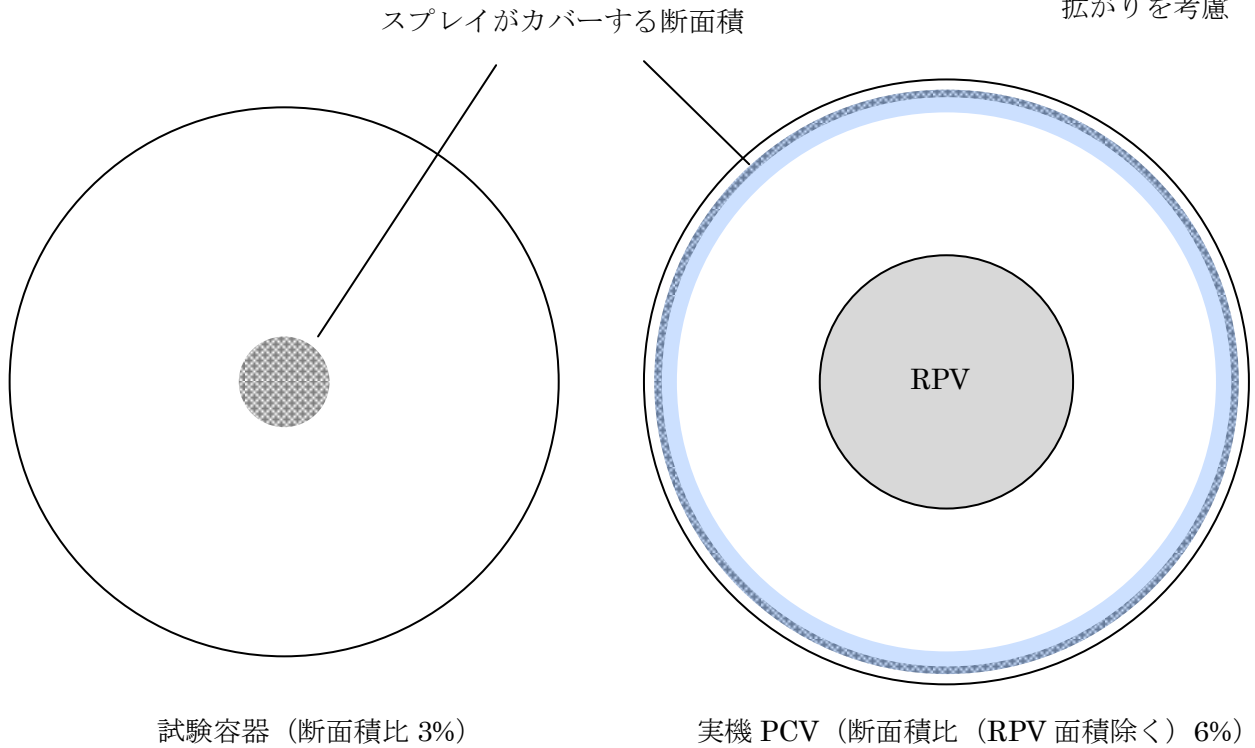


図4 実験体系と実機のスプレイカバー範囲 (断面積) の比較 (概念図)

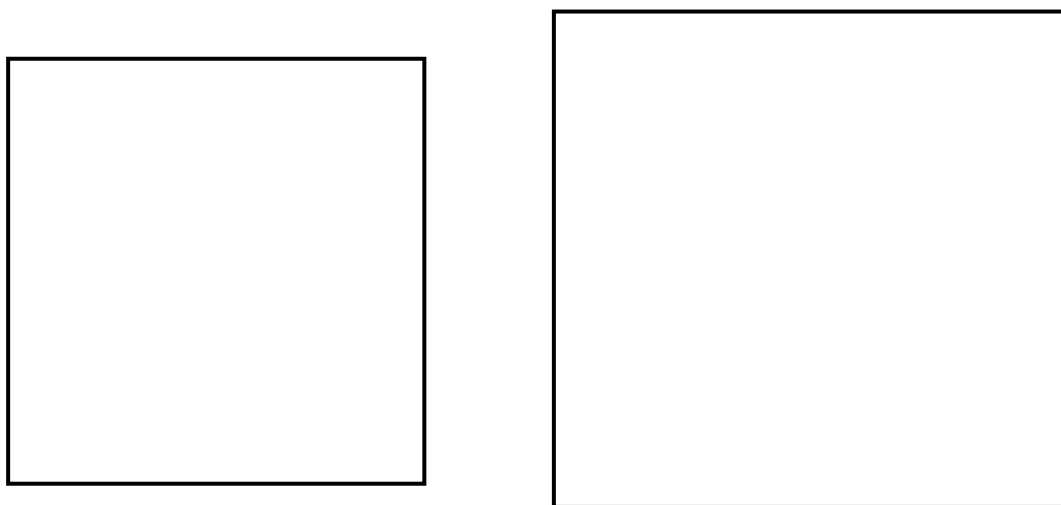


図5 実機格納容器スプレイノズルと低流量スプレイ散水状態<sup>[2]</sup>

リロケーションモデルにおいて炉心溶融の過程（溶融，崩落等）における力学的なバランスをどのように扱っているか温度別に整理して説明すること。

【回答】

MAAP コードでは，炉心部を多数のノードに分割し，燃料崩壊や溶融といった状態変化，およびそれらに伴うノード間の質量・エネルギー移動がモデル化されている。基本的には隣接するノード間の質量・エネルギーバランスに基づくモデルとなっている。

以下に，MAAP コードが想定するリロケーションモデルを示すとともに，力学的なバランスについても説明する。

a. MAAP コードが想定する炉心ノード状態

MAAP コードでは，空隙率と炉心ノード内の溶融度に応じ，図 1 に示す 6 つの炉心ノード状態（タイプ）が考慮されている。燃料破損，燃料溶融，溶融物の流下（キャンドリング），固化による燃料径の増加により，空隙率は次第に小さくなる。また，ノード内の燃料のほぼ全量が溶融した場合，溶融プールが形成される。



本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



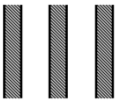
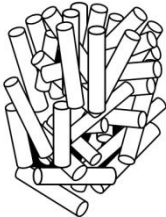

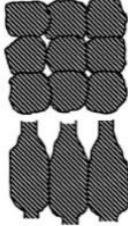


| 空隙率   | 溶融度   |  |
|---|---|--|
|   | 溶融無し又は部分溶融状態  | 全量溶融状態   |
| 1   | <br>空洞<br>(タイプ0)      |  |
| 1未満<br>~<br>    | <br>燃料が自立<br>(タイプ1)   | <br>燃料が崩壊<br>(タイプ2)      |
| <br>~<br>0.1以上 | <br>流路減少状態<br>(タイプ3) |  |
| 0.1未満   | <br>流路閉塞状態<br>(タイプ4) | <br>溶融プール状態<br>(タイプ5) |

図1 MAAPコードにおける炉心ノード状態

b. 炉心ノード状態の変化と燃料の移動について

MAAP コードでは、各炉心ノードの損傷の段階（崩壊、溶融等）を以下により判定し、各ノードは各タイプへ変化し、下部または径方向に移動する。

・キャンドリングの発生

炉心温度上昇により、燃料被覆管表面で溶融が発生すると、溶融物は液膜となって燃料に沿って流下し、下部ノードへと移動する。この様子は、蝋燭が融けていくプロセスに類似していることから、キャンドリングと呼ばれている。

溶融物は、重力と粘性力を考慮した速度で流下し、温度の低い燃料被覆管表面で完全に固化するか、閉塞ノード（タイプ4）に達するまで流れる。

・燃料崩壊

ヒートアップ開始から、各炉心ノードでは、温度と破損時間の関係から燃料崩壊の有無の判定が行われる（ K と  時間から Larson-Miller パラメータを設定）。燃料崩壊が判定されると、その位置より上方のノードに存在する燃料は支えがなくなり、本来の形状を維持できなくなることから瓦礫状となり、燃料崩壊位置から下の各ノードの空隙を埋めるような形で落下する（タイプ2）。その際、燃料崩壊位置から上のノードは全て燃料が落下し空洞状態となる（タイプ0）。

なお、燃料崩壊の判定は、温度と時間を変数とした関数であらわされており、位置による荷重は考慮されていない。

・閉塞ノードの形成

キャンドリングにより流下した溶融燃料および落下してくる固形物により、それを受け取るノードの空隙が減少する（タイプ3）。

さらにノード内が詰まる（空隙率 0.1）と、閉塞した状態が発生する（タイプ4）。この状態になったノードは、蒸気やガス流を通さなくなる（閉塞ノードの形成）。

ただし、タイプ3だけでなく、 溶融は発生し、直下のノードに空隙が存在する限り、その溶融物は下方へ流下する（キャンドリング）。

なお、タイプ3やタイプ4は空隙率で分類されているもので、いずれも固形物と溶融物が混在している状態にある。

更なる温度上昇により、ノード内燃料がすべて溶融すると、溶融プール状態（タイ

プ5)となる。タイプ5は、溶融した燃料が完全にノードを満たしている状態であるため、上方から溶融物、固形物がタイプ5のノードに入り込んでくることはない。

- ・閉塞ノードの破損

一つもしくは複数の閉塞したノード（タイプ4）が発生すると、

この判定により、固体層が破損すると、その直下のノードに溶融物が落下する。その結果として、直下のノードが閉塞すれば、同様の判定が行われることになり、次第に溶融物が下方へと移動していく。

なお、炉心最下端ノードである炉心支持板位置については、後述の炉心支持板破損判定が行われる。

- c. 半径方向への溶融物移動

MAAP コードでは、直下のノードに空隙がないなど、軸方向へ流ることができない場合で、かつ径方向の隣接ノードに空隙が存在する場合にのみ径方向への溶融物の移動が発生する。溶融物は水頭差と径方向流動に対する摩擦抵抗がバランスする速度で流れる。

- d. 炉心境界の破損と溶融物の流出

炉心境界（下方向：炉心支持板、横方向：炉心最外周境界）の MAAP における取り扱いを以下に示す。

- ・炉心支持板の破損

炉心支持板の破損は、温度と破損時間の関係式から判定される。

- ・炉心領域最外周境界の破損

TMI において、溶融プールが側面クラストの破損により、下部プレナムへ落下したとする分析に基づき、炉心側面の破損がモデル化されている。

- ・下部プレナムへのリロケーション

炉心支持板の破損もしくは、炉心領域最外周境界の破損が発生すると、溶融物の下部プレナムへのリロケーションが発生する。下部プレナムへのリロケーションが発生すると、炉心支持板が CRDハウジング/CR案内管によって支えられるモデルとなっ

ていることから、下部プレナムに落下した溶融炉心によって CRDハウジング/CR 案内管が溶融すると、炉心支持板の保持機能喪失により、炉心領域の燃料がその損傷形状にかかわらず下部プレナムへ移動する。

#### e. 事故進展挙動

以下、MAAP コードで、時間経過に伴って、こういった物理現象に伴い、状態変化が生じるかについての BWR-5, Mark-I 改良型格納容器プラントの TQUV シーケンスにおける解析例を示す。

##### <炉心損傷初期>

炉心損傷初期の状態変化について、炉心中央部の軸方向への移動に着目して説明する。図 2 は事故後約 1.3 時間において、上部からのキャンドリングによる溶融物を受け、いくつかのノードで流路が狭まった状態（タイプ 3）を示している。流路が狭くなると、下からの蒸気流・ガス流が制限されることで、その上部のノードの温度が上昇し、燃料崩壊を起こす（タイプ 2）。これにより、それより上方の炉心が瓦礫状となり下方に移動しながら堆積している。その結果、最上段ノードでは空洞（タイプ 0）が発生している。この状態が図 3 に示す状態である。

更なる溶融物の降下および崩壊燃料が下方の空隙を埋めていくことで、流路が閉塞したノード（タイプ 4）が複数発生する。この状態が図 4 である。

図 5 は、炉心全体において、閉塞領域が下方方向に更に進展した状態を表している。

##### <炉心損傷後期>

図 6 は炉心損傷が更に進展した状態を表している（事故後約 2.7 時間）。炉心損傷後期になると、固体物の落下およびキャンドリングによる更なる溶融炉心の下方方向への移動が進展し、空隙を更に埋めることで、燃料が存在するすべてのノードで閉塞した状態（タイプ 4）となっている。その結果、上半分のノードはほぼ空洞状態（タイプ 0）となっている。

図 6 に示す状態では中心部分で温度が上昇することにより、中心部分で完全に溶融した状態（タイプ 5）が発生する。図 7 がこの状態を表している。

#### f. まとめ

MAAP コードにおけるリロケーションモデルは以上のとおりである。MAAP コードでは、炉心ノード状態をタイプ別に分け、それぞれのタイプの変化を空隙率、溶融度、燃料崩壊判定などにより模擬している。TMI の知見を適宜取り込むことにより、必要に応じて力学的バランスを考慮したモデルとしている。

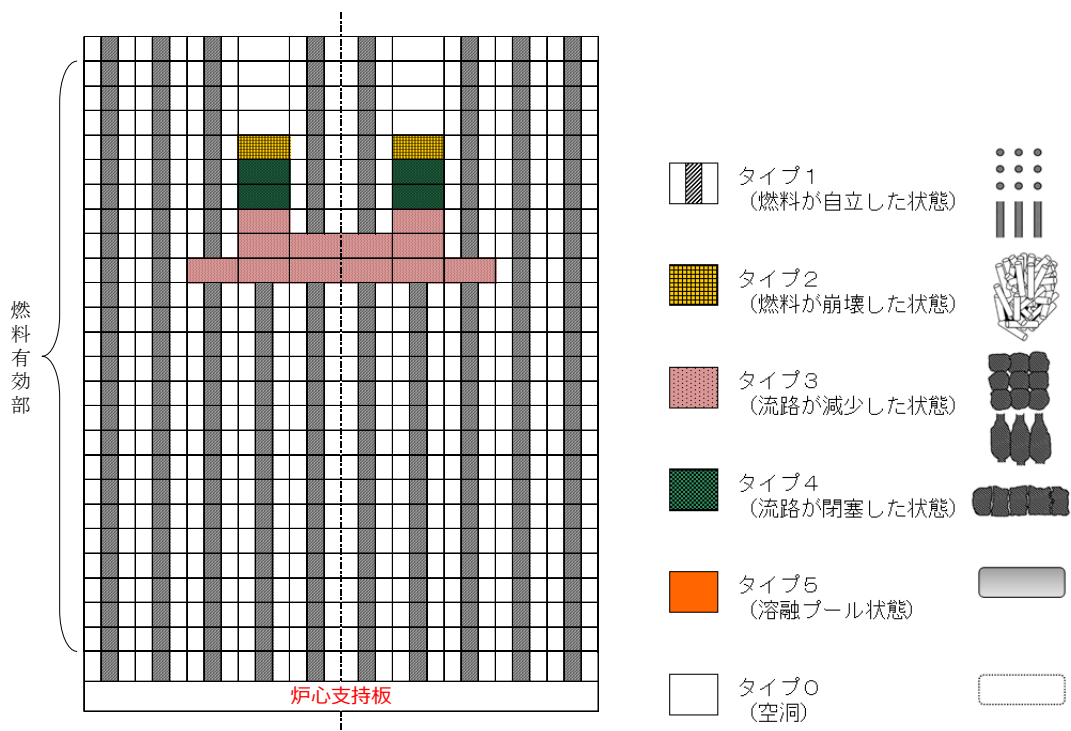


図2 炉心損傷状態 (事故後約 1.3 時間)  
(キャンドリングにより流路が減少した状態)

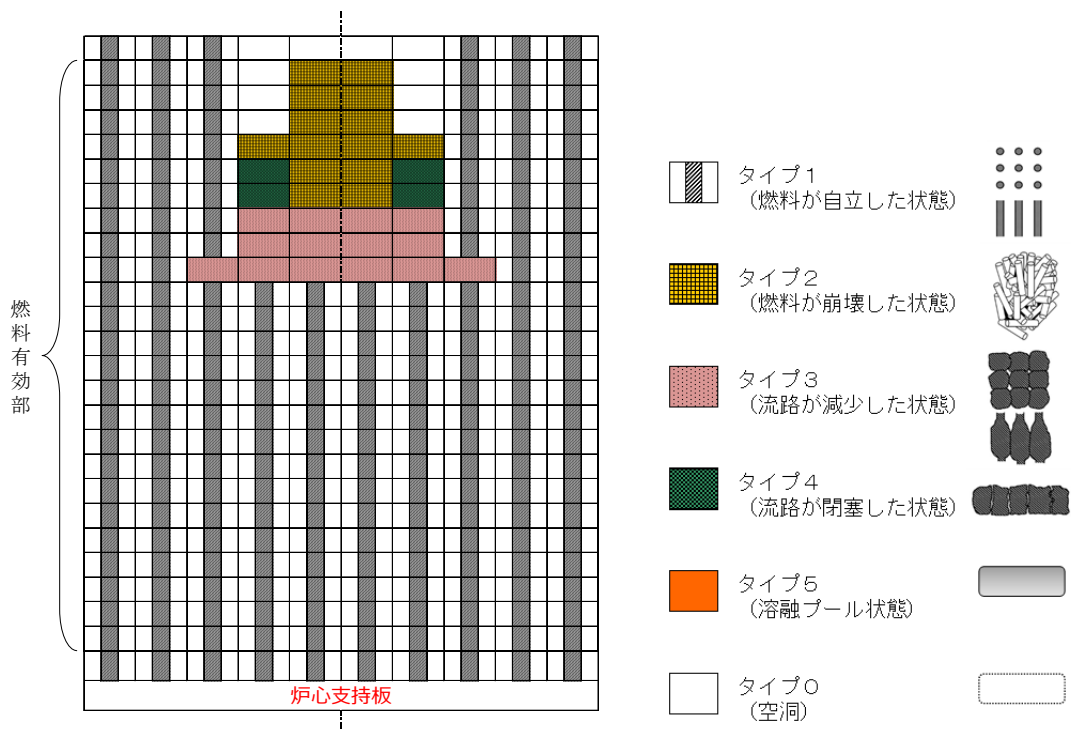


図3 炉心損傷状態 (図2の状態から 2 秒経過後)  
(燃料崩壊が生じた状態)

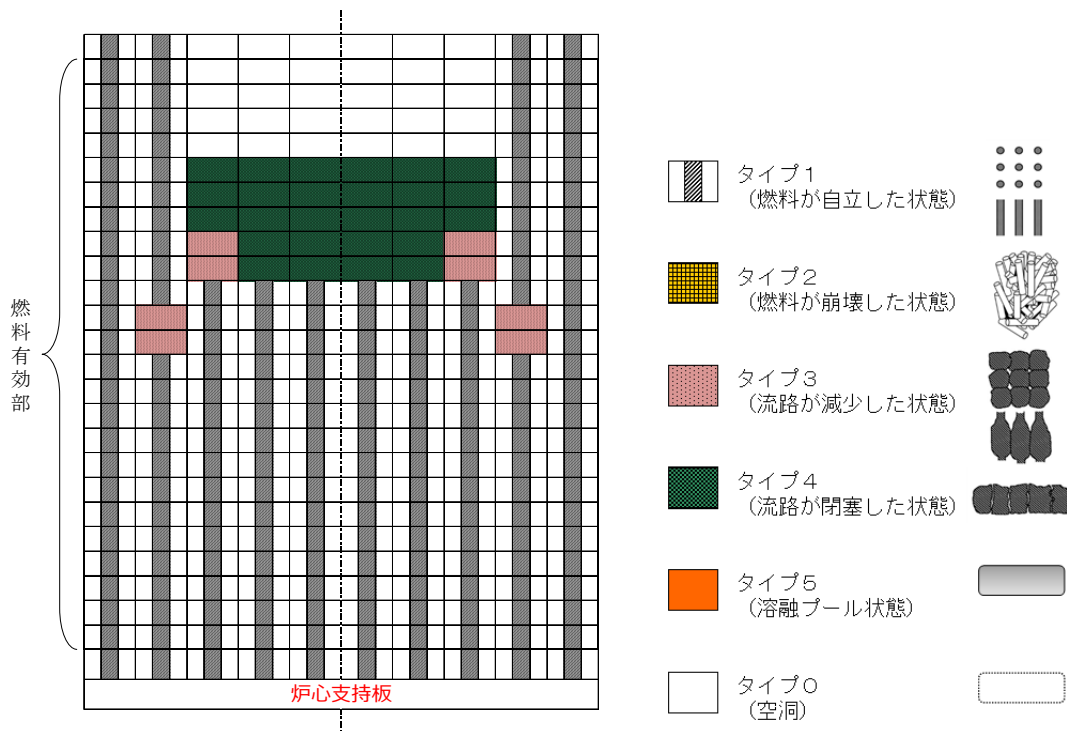


図4 炉心損傷状態 (図3から約200秒経過後)  
(崩壊した燃料によりノードが閉塞した状態)

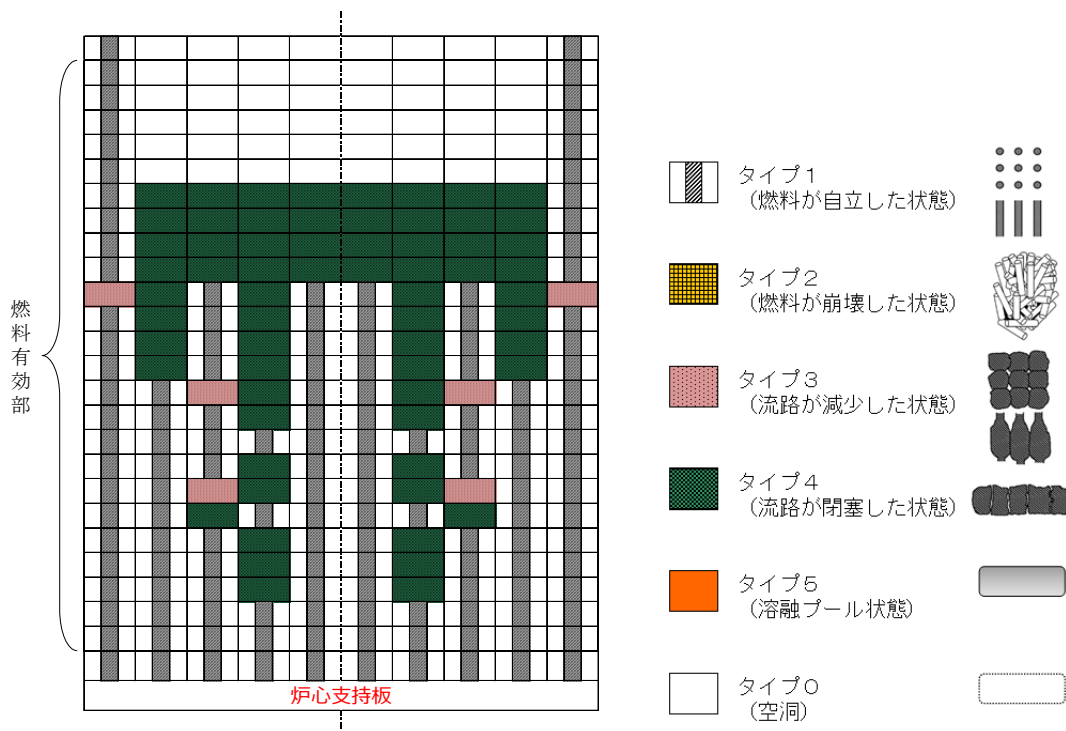


図5 炉心損傷状態 (事故後約1.6時間)  
(流路閉塞が進展した状態)

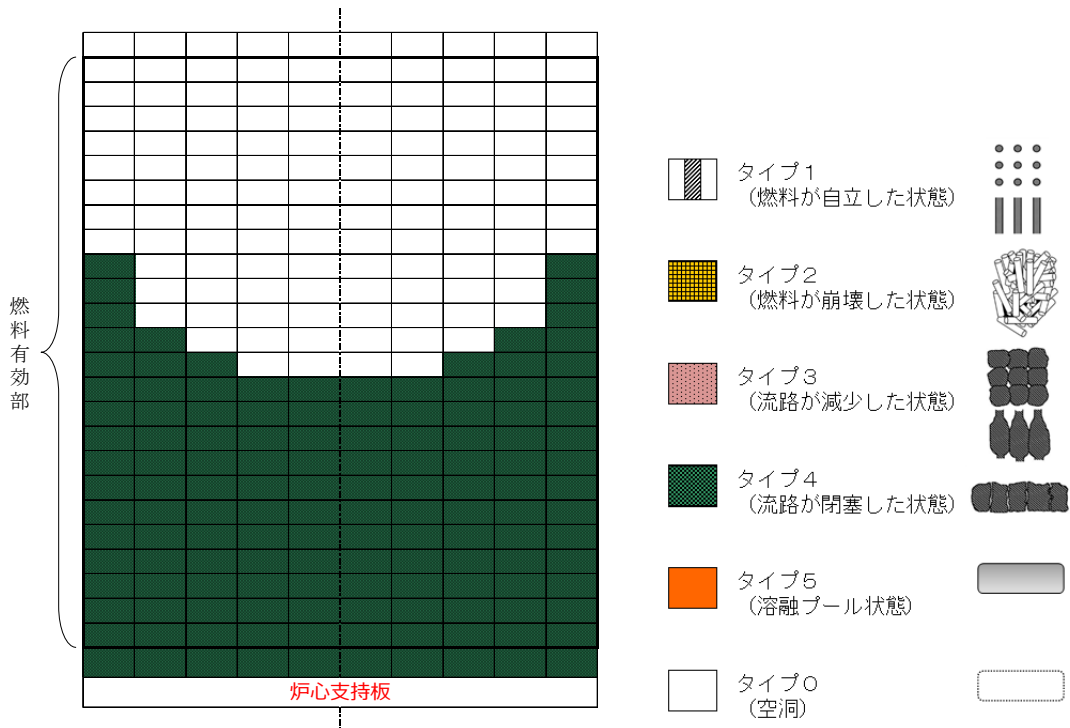


図6 炉心損傷状態（事故後約 2.7 時間）  
（炉心全体の流路が閉塞した状態）

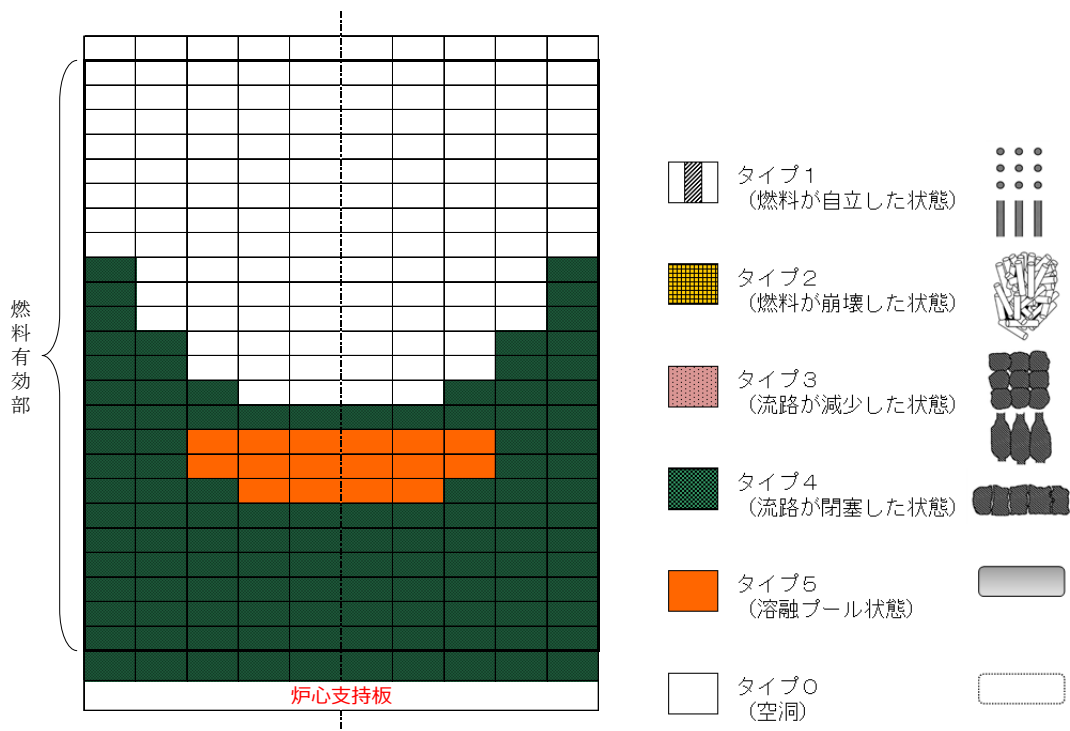


図7 炉心損傷状態後期（事故後約 2.9 時間）  
（熔融プールが形成された状態）

ハフニウム CR の影響をどのように扱っているか説明すること。

【回答】

MAAP コードでは、制御棒において用いられるハフニウム (Hf) の制御材はモデル中で取り扱っていない。Hf は周期表において第 4 族元素に属し、核的特性を除いた、化学的性質は同じ族に属し、燃料被覆管やチャンネルボックスに用いられているジルコニウム (Zr) と非常によく似かよったものとなっている。表に Hf と Zr の物理特性を示す。

密度、比熱及び融点は Zr に比べて高いことから、炉心の溶融進展挙動への影響が考えられるものの、化学的には高温でのハロゲンとの反応を含め、Zr と非常によく似ていることや、Hf 制御棒を採用しているプラントにおいても、その本数の割合は 1/8 程度であることから、寄与としての影響は小さいと考えられる。

表 1 ハフニウム(Hf)とジルコニウム(Zr)の物理特性<sup>[2]</sup>

|      | Hf                             | Zr                            |
|------|--------------------------------|-------------------------------|
| 密度   | 13.28 g/cm <sup>3</sup> (25°C) | 6.51 g/cm <sup>3</sup> (20°C) |
| 熱伝導率 | 23 W/(m·K)                     | 22.7 W/(m·K)                  |
| 比熱   | 155.4 J/(mol·K) (25 °C)        | 25.2 J/(mol·K) (25 °C)        |
| 融点   | 2222 °C                        | 1857 °C                       |

[参考文献]

- [1] TLR-046 Rev.2, “沸騰水型原子力発電所 ハフニウム型制御棒について(改良炉心用)”,  
平成 18 年 11 月,株式会社 東芝
- [2] 村上 雅人, “元素を知る事典” 第 1 版, 株式会社 海鳴社, 2004 年
- [3] 馬淵 久夫, “元素の事典” 第 1 版, 株式会社 朝倉書店, 1994 年



事業者自身が行った実験解析の結果の例をどこかで説明すること。

### 【回答】

MAAP コードの妥当性確認のための実験解析は、MAAP コードの保守・改良を行う米国 EPRI が実施し、MAAP ユーザーズマニュアルにその結果を記載して、ユーザーに提供している。また、実験解析、ベンチマーク解析等については MAAP ユーザーズグループ会議にて議論を行う機会が設けられている。

新規バージョンが配布された際に事業者側では、付属のインプットデータを用いて解析を実施し、付属のアウトプットデータとの一致を確認するとともに、一部の代表的なケースについて、確認解析も実施している。これらに加えて、MAAP ユーザーズグループを通じて、コードに係る最新情報を入手している。

事業者側での確認解析においては、入手可能な入力データを用いた代表的なベンチマーク解析を実施し、MAAP ユーザーズマニュアルの実験解析結果や公開されている実験結果との比較を実施しているが、ここでは、4.2 章に示した実験解析のうち、BWR において特徴的な炉心構成を模擬した実験である CORA 実験の中から、試験バンドルのサイズが大きく、より実機の体系に近い CORA-18 実験を対象として解析結果を示す。

図 1 から図 3 に CORA-18 実験でのエレベーション 550mm における燃料被覆管の温度変化、チャンネルボックスの温度変化及び制御棒の温度変化をそれぞれ示す。温度挙動は実験結果に比べて高い温度で推移するものの、全体的な温度挙動は、実験期間全体において測定値の温度挙動をよく再現している。

### [参考文献]

- [1] FZKA-6030, S. Hagen, P. Hofmann, V. Noack, L. Sepold, G. Schanz, G. Schumacher, “Large Bundle PWR Test CORA-18: Test Results”, April 1980
- [2] MAAP4 User’s Manual

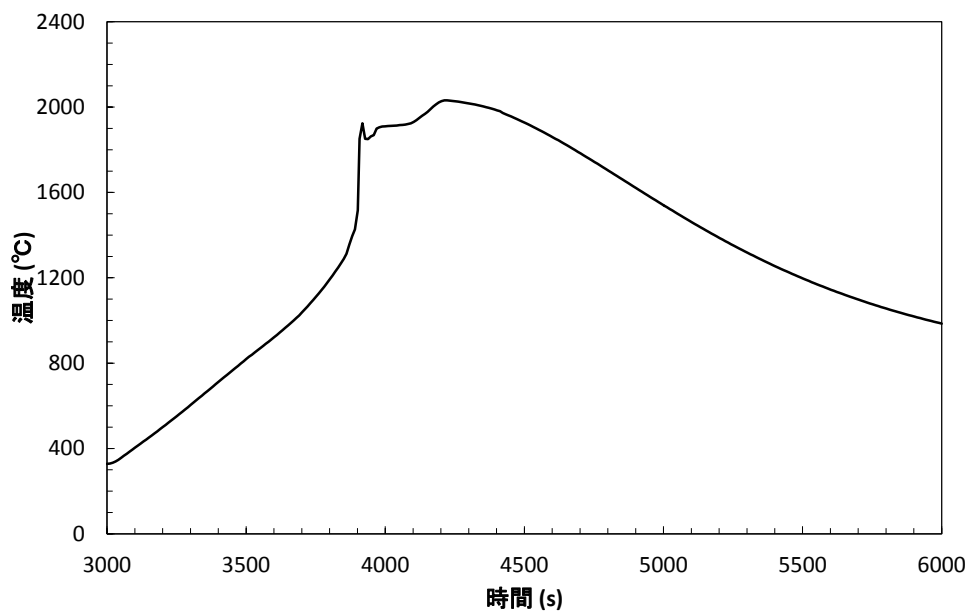
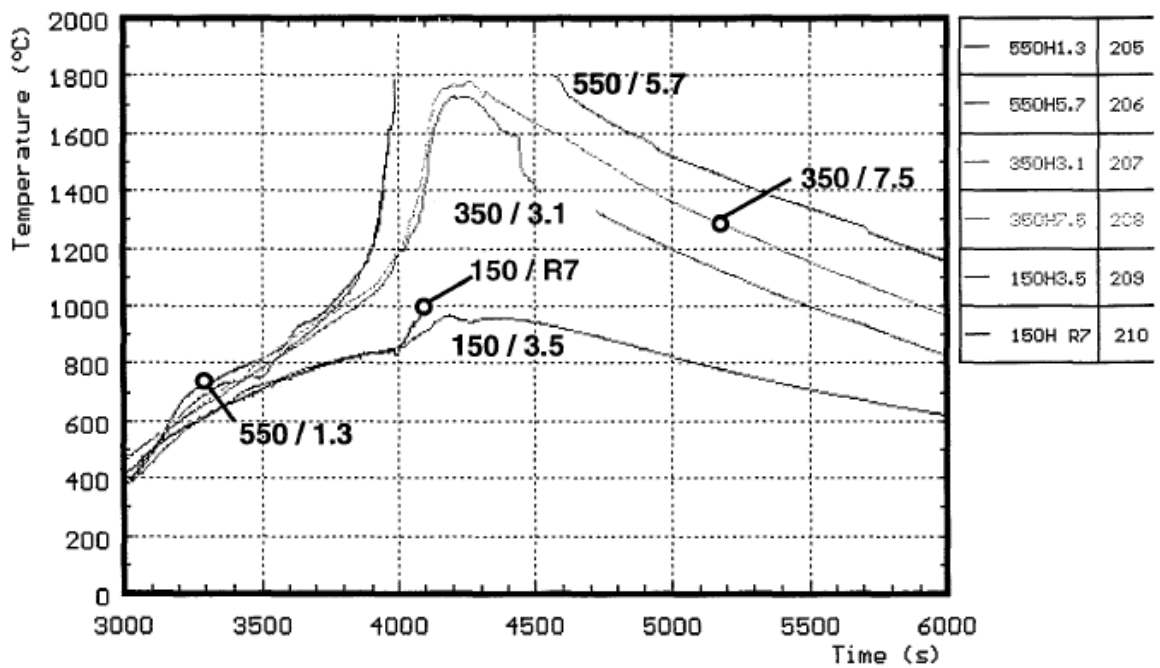


図1 CORA-18 実験 燃料被覆管温度変化 (エレベーション 550mm)

(上：参考文献[1] / 下：事業者による解析結果)

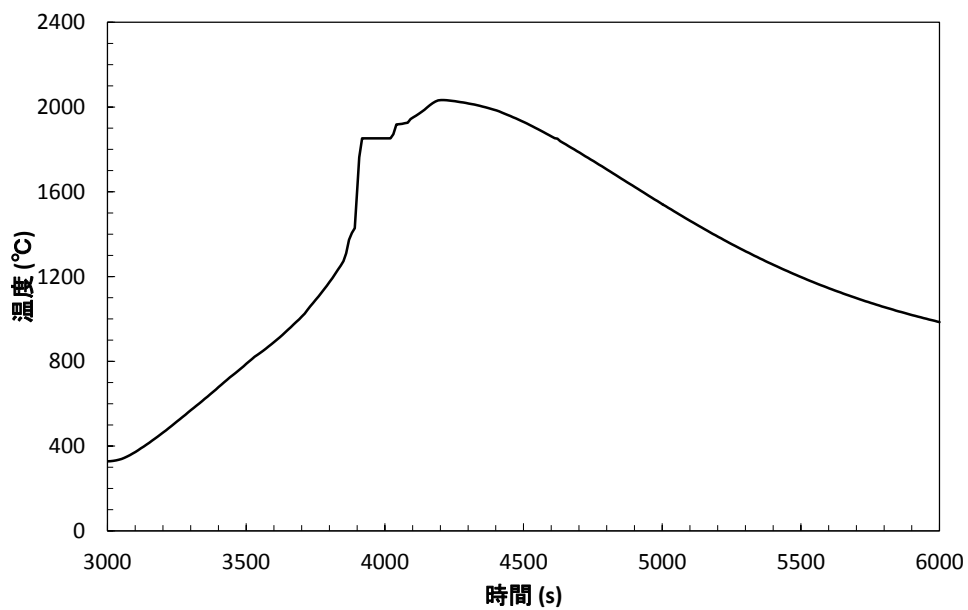
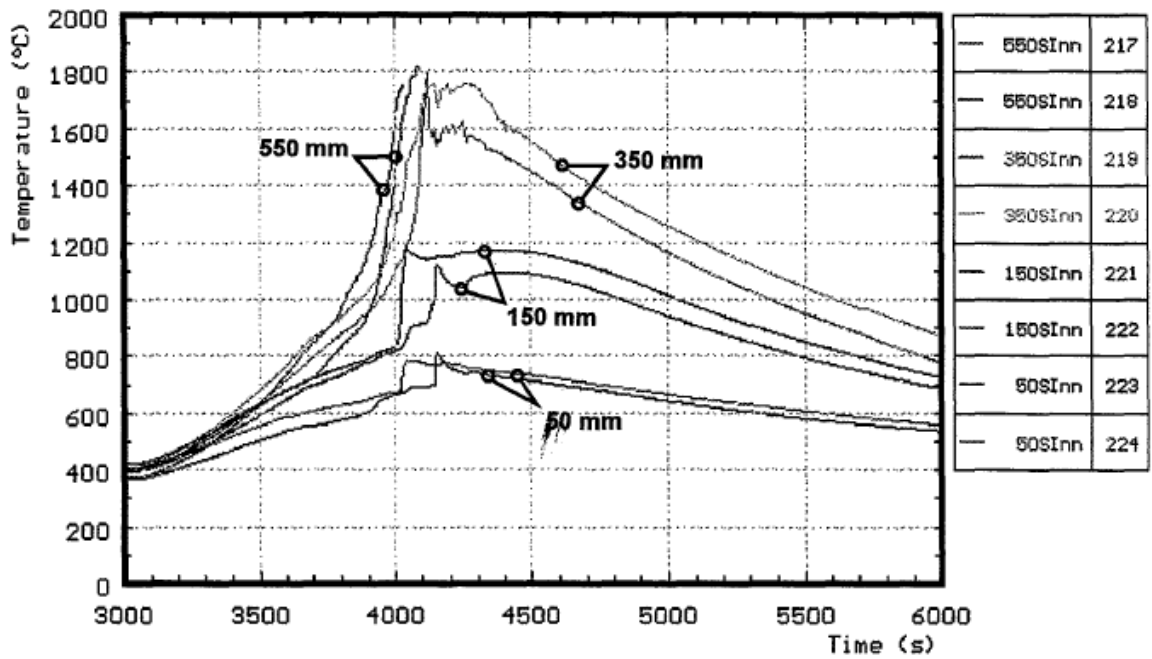


図 2 CORA-18 実験 チャンネルボックス温度変化 (エレベーション 550mm)

(上：参考文献[1] / 下：事業者による解析結果)

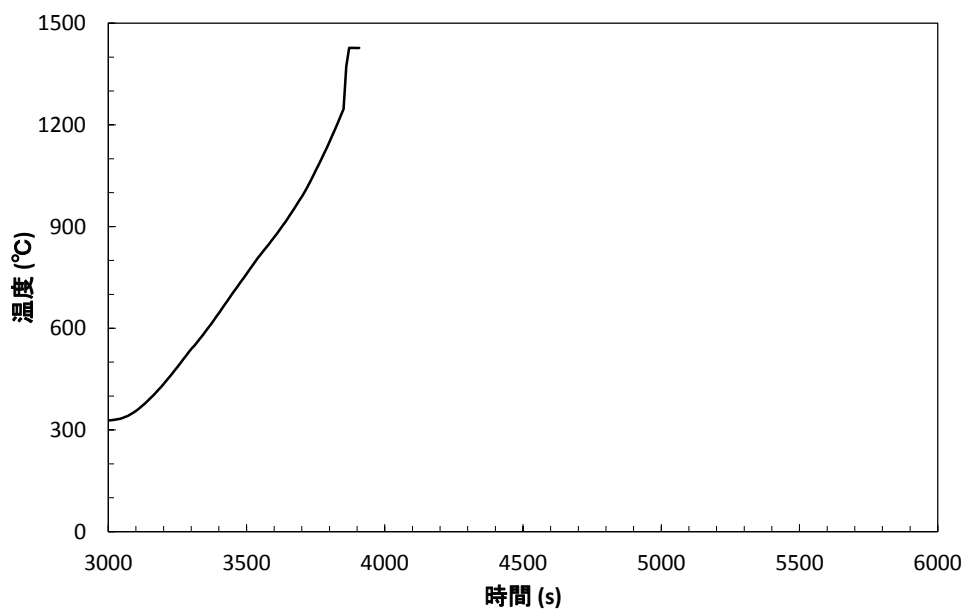
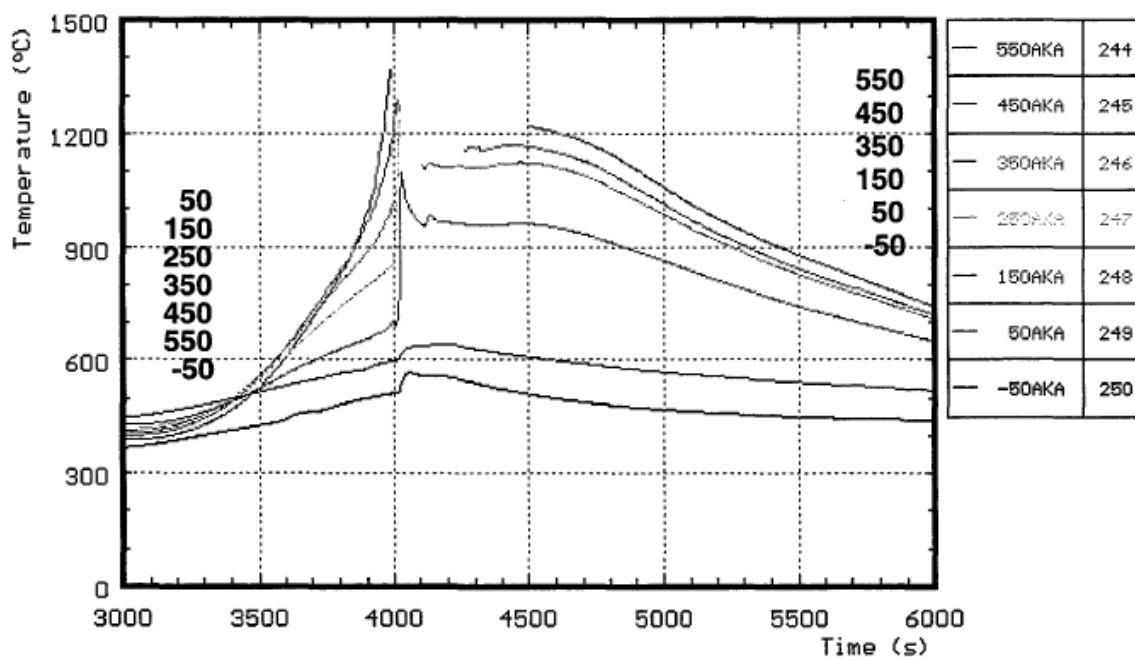


図3 CORA-18 実験 制御棒温度変化 (エレベーション 550mm)

(上：参考文献[1] / 下：事業者による解析結果)

CORA 実験解析の条件と有効性評価の条件の違いを説明すること。

【回答】

CORA-18 実験を対象として、有効性評価の条件との比較を示す。

表に有効性評価と CORA-18 実験に用いられた燃料集合体の主要諸元を示す。解析条件はこれらの主要諸元に基づいて与えており、燃料棒の形状や材質に関しては同様の条件となっている。

表 燃料集合体の主要諸元

|            | 有効性評価<br>9×9 燃料(A型) | CORA-18         |
|------------|---------------------|-----------------|
| ペレット直径(cm) | 約 0.96              | 約 0.91          |
| ペレット材      | UO <sub>2</sub>     | UO <sub>2</sub> |
| 被覆管外径(cm)  | 約 1.12              | 約 1.075         |
| 被覆管厚さ(mm)  | 約 0.71              | 約 0.725         |
| 被覆管材料      | Zr(ジルカロイ-2)         | Zr(ジルカロイ-4)     |
| 燃料棒有効長さ(m) | 約 3.71              | 約 1.0           |

[参考文献]

- [1] FZKA-6030, S. Hagen, P. Hofmann, V. Noack, L. Sepold, G. Schanz, G. Schumacher, “Large Bundle PWR Test CORA-18: Test Results”, April 1980

「4.2 妥当性確認（事故解析及び実験解析）」において各重要現象の妥当性確認で示した実験解析における主要実験条件と有効性評価における条件の比較を別表に示す。

別表 主要実験条件と有効性評価における条件の比較

| 実験                                   | 主要実験条件                     |                           | 有効性評価における条件<br>(BWR-5/Mark-I改良型)                           | 備考  |
|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------|--|---|
| CORA<br>(4.2.2)                      | 燃料集合体                      | 表 4.2-2                   | 9×9 燃料(A)型   | BWR の燃料体系を模擬しており、バンドルサイズがより実機体系に近い CORA-18 実験では、測定データと良く一致。         |
|                                      | 温度条件                       | 図 4.2-9<br>～<br>図 4.2-16  | 実験条件と同様<br>(3.3.6 章に示したモデルにより評価)                           | 反応温度、熔融温度は物質によって決まるが、実機相当の物質を使用。                                    |
| HDR<br>(4.2.3)                       | 格納容器内自由体積(m <sup>3</sup> ) | 約 11,400                  | D/W 約 8,800<br>W/W 空間部 約 5,300                             | 実機スケール相当。   |
| CSTF<br>(4.2.4)<br>ABCOVE<br>(4.2.8) | 格納容器内自由体積(m <sup>3</sup> ) | 約 850                     | D/W 約 8,800<br>W/W 空間部 約 5,300                             | 体積は 1/10 程度と小規模であるが、高さに大きな相違はない。(ABCOVE 実験では、CSTF 実験の格納容器体系試験装置を使用) |
|                                      | 格納容器高さ(m)                  | 約 20                      | D/W 約 38<br>S/C 円管部断面直径 約 10                               |   |
| ACE<br>(4.2.5)                       | 温度条件                       | 図 4.2-36,<br>37, 38       | 添付 3 図 5-1-1b 等  | コンクリート侵食時の温度条件は同様。  |
|                                      | コンクリート組成                   | 表 4.2-6                   | 添付 3 表 4-2   | プラントに用いられているコンクリートの種類によって、組成や物性値を指定。                                |
|                                      | 熔融物組成                      | 表 4.2-5                   | UO <sub>2</sub> , Zr, ZrO <sub>2</sub> , SUS 等全炉心相当の構造物が熔融 | L7 実験では、BWR 相当の熔融炉心を模擬。   |
| SURC-4<br>(4.2.6)                    | 温度条件                       | 図 4.2-40                  | 添付 3 図 5-1-1b 等  | コンクリート侵食時の温度条件は同様。  |
|                                      | コンクリート組成                   | 玄武岩系                      | 添付 3 表 4-2   | プラントに用いられているコンクリートの種類によって、組成や物性値を指定。                                |
|                                      | 熔融物組成                      | ステンレス、<br>模擬 FP,Zr        | UO <sub>2</sub> , Zr, ZrO <sub>2</sub> , SUS 等全炉心相当の構造物が熔融 | 実機の組成と異なるが、熱的に実機に近い条件となっており、コンクリートへの熱移動、侵食挙動は同様。                    |
| PHEBUS-FP<br>(4.2.7)                 | 被覆管温度                      | 図 4.2-47<br>～<br>図 4.2-50 | 実験条件と同様<br>(3.3.6 章に示したモデルにより評価)                           | 反応温度、熔融温度は物質によって決まるが、実機相当の物質を使用。                                    |

TMI の結果から考えられた溶融炉心ブロッケージなど、MAAP 固有モデルについて説明すること。

## 【回答】

TMI 事故後の分析・評価によれば、以下のような推定がなされている<sup>14)</sup>。

- ・ 一次冷却材ポンプ停止後、一次冷却材のボイルオフによって炉心損傷が生じ、炉心の約 50%が溶融した。溶融物は下方向に流れ、炉心底部付近で閉塞領域を形成した。
- ・ 一次冷却材ポンプの再起動による原子炉への注水によって、溶融物は急冷によって微細化し、デブリベッドが形成された。このデブリベッドのうち、20ton が再溶融した後、側面のクラストを崩壊させて、下部プレナムへ落下した。

MAAP コードでは、このような分析に基づいた以下のような物理現象モデルを採用している。

### (1) 炉心損傷進展に伴う炉心閉塞

TMI において、炉心底部付近で閉塞領域を形成したとする分析に基づき、炉心溶融物の流下による燃料外径の増加や燃料棒の膨れによる炉心流路の減少をタイプ 3 (冷却材流路が減少した状態) とタイプ 4 (冷却材流路が閉塞した状態) でモデル化し、タイプ 4 となった炉心ノードでは、炉心流路が閉塞され、蒸気及び非凝縮性ガスが通過しない状態を模擬している。

### (2) 側面クラストの崩壊

TMI において、溶融プールが側面クラストの破損により、下部プレナムへ落下したとする分析に基づき、炉心側面の破損がモデル化されている。

また、側面の破損が発生した場合、溶融物は下部プレナムへ移行する。

また、上記の物理現象モデルを採用した上で、TMI 事故とのベンチマーク結果に基づいたモデルとしては以下が挙げられる<sup>15)</sup>。

(a) 炉心崩壊挙動

MAAP コードでは、炉心ノードがある温度に達してから崩壊（タイプ 1（燃料自立）からタイプ 2（燃料崩壊）への遷移）するまでの時間を Larson-Miller パラメータ手法による累積損傷割合の計算に基づいて判定している。TMI 事故とのベンチマーク結果に基づき、炉心ノードの崩壊について、炉心ノード温度□□K と□時間から Larson-Miller パラメータを設定している。

(b) 炉心損傷進展に伴う炉心閉塞挙動

上述のタイプ 3（冷却材流路が減少した状態）から炉心流路が閉塞するタイプ 4（冷却材流路が閉塞した状態）への遷移には、TMI 事故とのベンチマーク結果に基づき、炉心ノードの空隙率 0.1 で判定している。一方、MELCOR コードでは、炉心ノードの空隙率の最小値を 0.05 とした上で全閉塞しないモデルとしており、炉心閉塞モデルは MAAP コードの特徴である。

[参考文献]

- [1] B. R. Sehgal, “NUCLEAR SAFETY IN LIGHT WATER REACTORS”
- [2] Electric Power Research Institute, “Modular Accident Analysis Program (MAAP) –MELCOR Crosswalk Phase 1 Study,” November 2014
- [3] 電力中央研究所, MAAP5.01 及び MELCOR2.1 を用いた軽水炉代表プラントの過酷事故解析 平成 26 年 6 月



複雑かつ表面積の大きいセパレータ、ドライヤにおける FP 沈着の考え方(知見・検証・モデル化) およびミラーインシュレイターによる断熱効果の扱いについて説明すること。

## 【回答】

### (1) セパレータ，ドライヤにおける FP 沈着について

MAAP コードでは，原子炉圧力容器 (RPV) 内 FP の RPV 内構造物 (ヒートシンク) への沈着は「(a) FP 蒸気の構造物表面への凝縮」「(b) FP エアロゾルの構造物への重力沈降」としてモデル化されている。これらの沈着率は，沈着面の等価沈着長さ (=FP の存在する RPV 内ノード体積/沈着面積) から求められ，この等価沈着長さが短くなると沈着率が大きくなる。

#### (a) FP 蒸気の構造物表面への凝縮

構造物の形状を考慮できるように，構造物の全表面積を沈着面積として等価沈着長さを算出するようモデル化されている。これにより，セパレータ，ドライヤといった複雑形状の構造物では，単純形状の構造物と比べて等価沈着長さが短くなる (沈着率が大きくなる)。

#### (b) FP エアロゾルの構造物への重力沈降

RPV 内構造物 (ヒートシンク) の水平面の面積から等価沈着長さが算出されるようモデル化されている。

MAAP コードの FP エアロゾルの沈着モデルの妥当性は ABCOVE 実験 (4.2.8 参照) との比較により妥当性確認が行われており，FP 蒸気の沈着モデルは CSE 実験<sup>[1]</sup>の知見に基づいている。

### (2) ミラーインシュレイターによる断熱効果について

RPV 廻りのミラーインシュレイター (保温材) は，複数枚の層状の金属プレートによってモデル化されており，それぞれの金属プレートの表面温度から輻射熱伝達を計算し，最終的に RPV 外面から格納容器雰囲気への輻射熱伝達係数が求められる。また，RPV 本体と保温材のギャップ部等からの対流による格納容器雰囲気への熱伝達も考慮されており，ヒートシンクに沈着した FP の崩壊熱から格納容器雰囲気への伝熱は，RPV 外面温度及び格納容器雰囲気温度をもとに，これらの輻射及び対流の熱伝達を考慮して計算される。

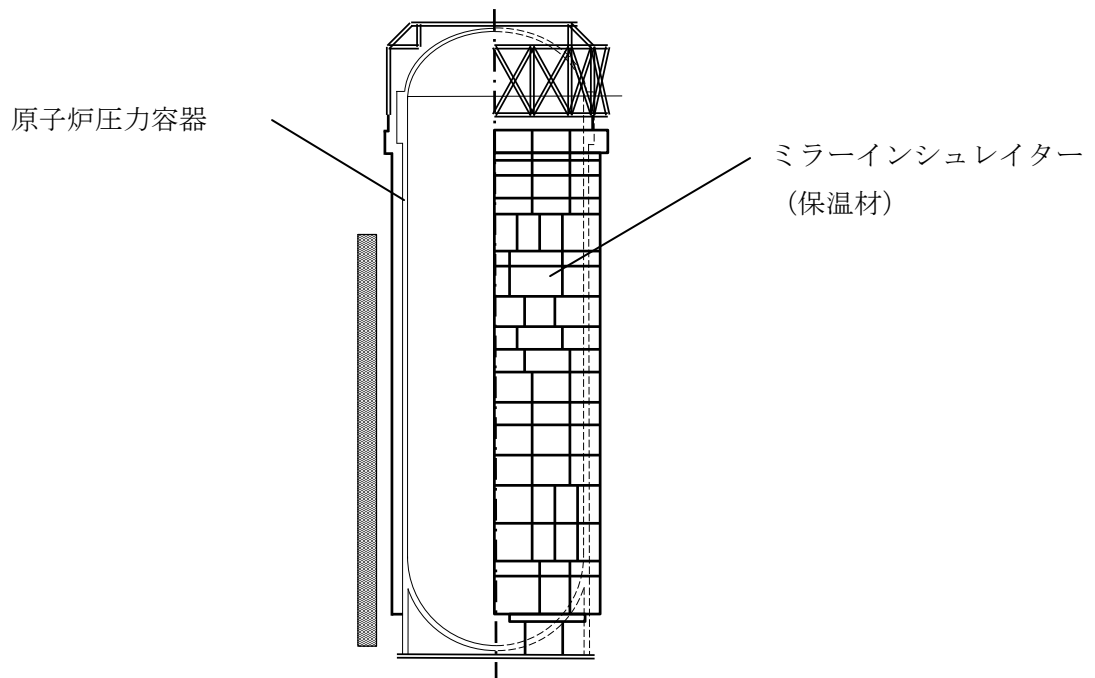


図 ミラーインシュレーター (保温材) の概要図

[参考文献]

- [1] R. K. Hilliard and L. F. Coleman. "Natural Transport Effects on Fission Product Behavior in the Containment Systems Experiments". BNWL-1457, December, 1970.

実験解析におけるジャンクションの設定値の決め方について説明するとともに、実機における設定値の決め方について考え方を説明すること。

### 【回答】

MAAP コードでは、原子炉压力容器、原子炉格納容器及び原子炉建屋をノードと呼ばれる領域で分割しており、これら各領域間を結合するために、ジャンクションと呼ばれる流体の流れを評価できるモデルを用いて評価している。このうち、原子炉压力容器内や逃がし安全弁による原子炉压力容器から原子炉格納容器への流路などは、MAAP コードにて個別にモデル化されている。ここでは、原子炉格納容器及び原子炉建屋におけるジャンクションについて説明を行う

#### (1)ジャンクションの設定値について

ジャンクションは、原子炉格納容器や原子炉建屋のノード間の流体の移動を考慮する場合に設定し、気体及び液体の流れを評価する。これらジャンクションを介した流量は、気体では圧力差及び密度差、液体では圧力差及び密度差に加えて水頭差による駆動力と流動抵抗が釣り合うように求められる。ジャンクション内に水位が形成されると、気相、液相それぞれで流体の流れを評価する。ここでは代表して、気体の流れについて説明する。気体の流れについては、以下の式(1)によって流量を計算する。

$$K|W^{n-1}|W = P_1 - P_2 + \rho_2 g(Z_2 + L - Z_1) \quad (1)$$

$K$  : ジャンクションの流動抵抗

( $n = 2$  のとき  $(1/m \cdot kg)$ ,  $n = 1$  のとき  $(1/m \cdot s)$ )

$W$  : ジャンクションの流量 (kg/s)

$n$  : 流動状態に依存した乗数 (-)

$P$  : ノード圧力 (Pa)

$\rho$  : ノード内の気相密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$Z$  : ジャンクションの接続高さ (m)

$L$  : ジャンクション長さ (m)

ジャンクションに関連する入力として以下を与えることとなる。

- ・ 流れ方向（「水平」, 「垂直」）
- ・ 接続位置（接続高さ  $Z$ ）
- ・ 開口部形状（幅  $X_W$ , 高さ  $X_H$ ）
- ・ 長さ  $L$
- ・ 流路面積  $A$

なお、流れ方向を「水平」と選択した場合は、接続位置がノード間で同じとなり、また、ジャンクション長さは評価に使用されないため、右辺第三項は0となる。

実機におけるノード分割では、壁などに囲まれた物理区画を模擬したノード（区画）として設定し、吹き抜けや扉などの開口部を模擬したジャンクションを組み合わせ、同じ特徴を有する空間を集約することを基本にして設定している。図1に実機におけるジャンクションの設定例を示す。

入力については、実機的设计情報に基づいて与えている。ジャンクションの入力の与え方の一例として、図1に○で示した、ペDESTALからドライウエルへの開口部を模擬したジャンクションの入力の設定方法について以下に述べる。

この開口部はペDESTALからドライウエルに繋がる水平の流路となっているため、流れ方向を水平とする。ペDESTALの床から、開口部下端までの高さを接続高さとして入力するが、水平ジャンクションの場合は、先述した通り式(1)で使用している項は0となる。開口部は矩形であり、実際の形状からジャンクションの幅、高さを与える。この開口部が貫通するペDESTAL壁の厚みをジャンクションの長さとして与えるが、水平ジャンクションの場合は、先述した通り評価には使用されない。さらに、開口部の面積をジャンクションの流路面積として与え、これらの入力に基づき、式(1)によってジャンクションの流量が評価される。

なお、ジャンクションの流動抵抗  $K$ については、MAAPの実験解析から導出されたものではなく、一般的な知見<sup>[4]</sup>に従っているものである。通常の流れにおいては、流動状態に依存した乗数  $n$ は2となり、この場合の流動抵抗は以下の式から算出される。



(2)

(3)

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



ここで、 $w$ は理想気体を仮定したモデルによる流量であり、以下の式(4)によって求められる。



(4)

ここで、である。

また、対向置換流\*が発生するような場合には  $n$  を 1 として、このときの流動抵抗  $K$  は以下の式(5)で与えられる。



(5)

※：密度差のある場合の流れの現象を考慮したもの。差圧の小さな2つの区画の間に大きな開口部があるような状況において、重い相が流路の下方から軽い相側に流れ、軽い相を押すと、圧力のバランスをとるために、軽い相の一部が重い相の上部から逆に流れ込むような状態を想定している。

## (2)実験解析によるジャンクションの模擬について

CSTF 実験解析 (4.2.4 章) においても実機と同様の考え方にに基づき、上部区画全体、遮へい壁と燃料取替キャビティより外側となる下部区画、及び燃料交換キャビティにノード分割し、アイスコンデンサ下部扉、漏えいパス及び再循環ファン流路等をジャンクションとして設定している。これらのジャンクションの入力についても実験装置の形状に従って

入力を与えている。本実験解析に用いたノード分割数やジャンクションの数は有効性評価における実機解析と同等であるが、実験解析結果は実験結果をよく再現している。

なお、HDR 実験解析（4.2.3 章）では、壁に囲まれた複数の区画を有する格納容器を模擬するためにノード分割数が多くなっているが、ノード分割やジャンクションの設定は基本的に実機と同様の考え方に基づいており、このような複雑な体系においても、実験結果はよく再現されている。

#### [参考文献]

[1]機械工学便覧基礎編 流体工学（日本機械学会）

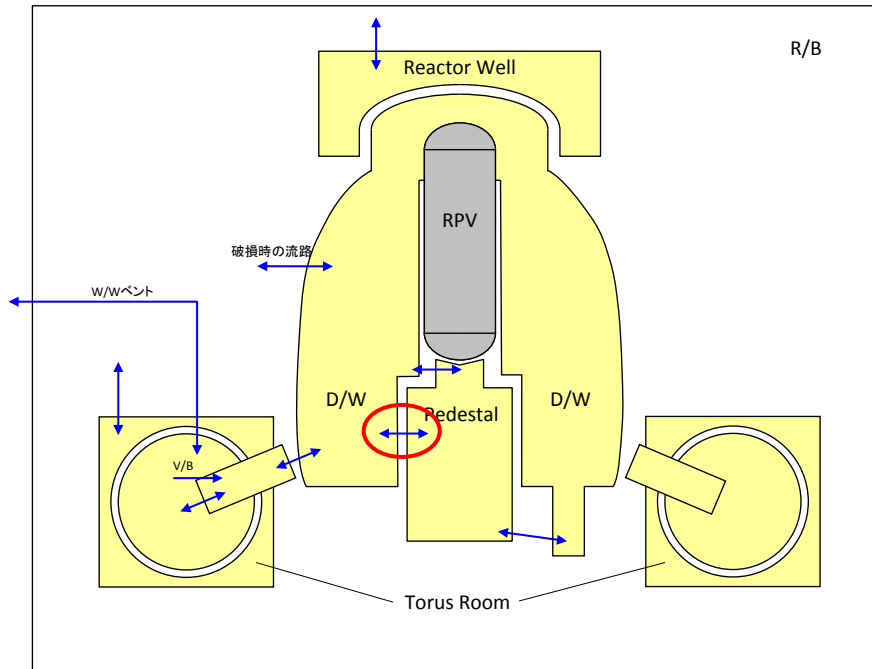
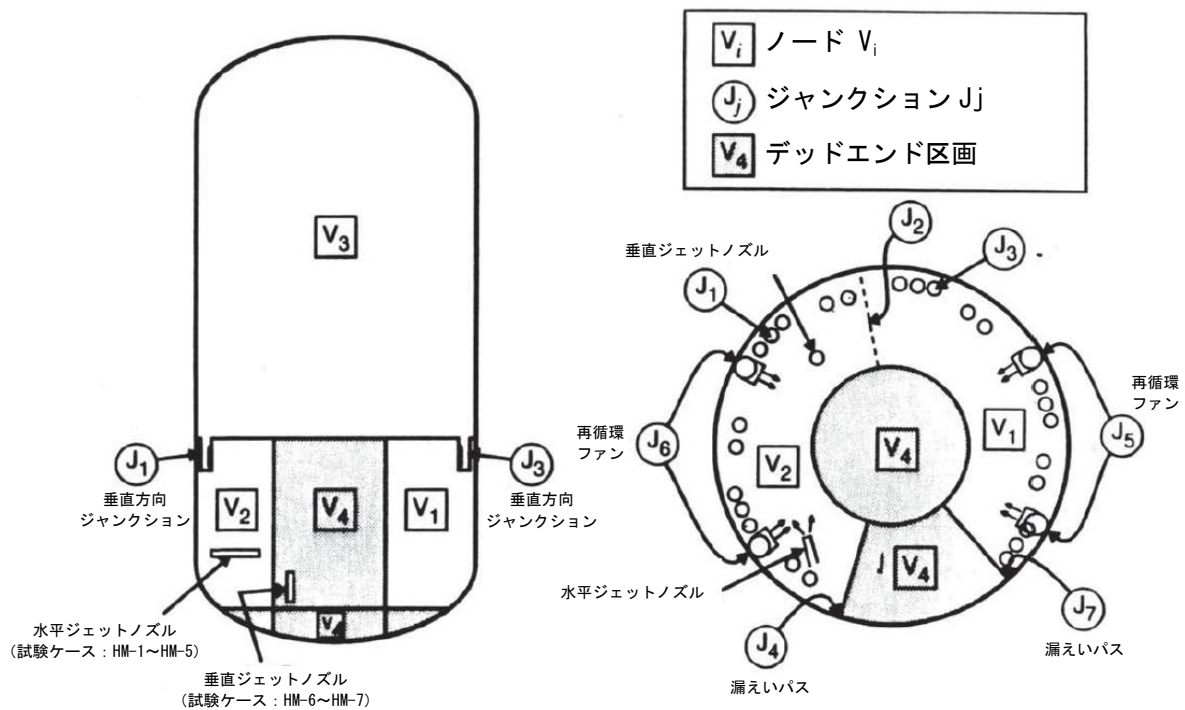
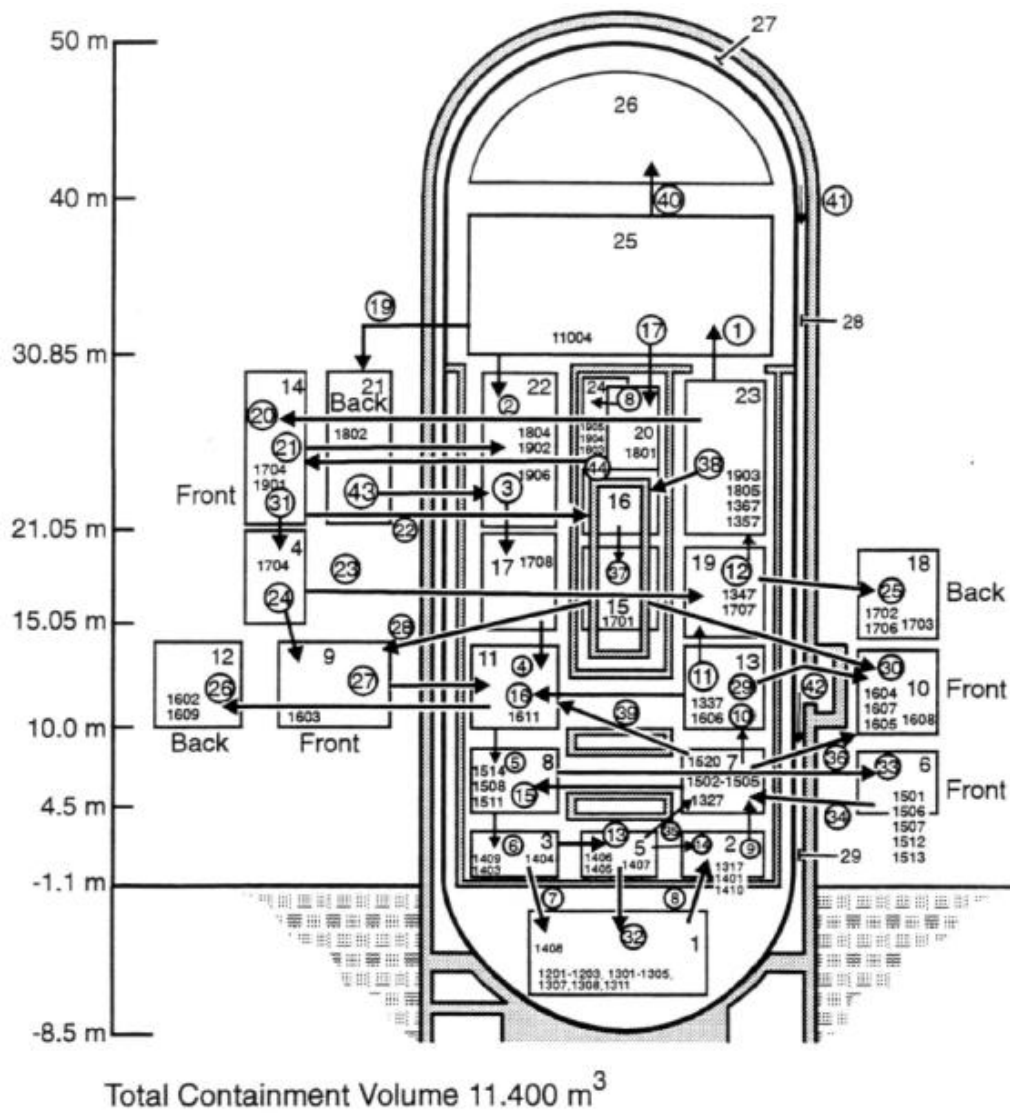


図1 MAAP ノード分割図の例 (図 3.3-6)



出典：MAAP4User'sManual,EPRI

図2 CSTF 実験ベンチマーク解析 MAAP ノード分割 (図 4.2-30)



出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

図3 HDR 実験解析におけるノード分割 (図 4.2-18)



本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

Rev.10

添付1

## 高圧溶融物放出

／格納容器雰囲気直接加熱の防止について

# 目次

|   |        |
|---|--------|
| 1. まえがき.....                              | 5-1-1  |
| 2. 現象の概要.....                             | 5-1-1  |
| 3. 不確かさに関する整理.....                        | 5-1-1  |
| 4. 感度解析と評価.....                           | 5-1-14 |
| 5. まとめ.....                               | 5-1-64 |
| 付録1 Surry 型原子炉下部キャビティの 1/ 42 スケール実験.....  | 5-1-65 |
| 付録2 熔融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析条件に用いる係数の妥当性... | 5-1-67 |
| 付録3 熔融デブリと原子炉圧力容器間の熱伝達におけるギャップ冷却について ...  | 5-1-69 |
| 参考文献 .....                                | 5-1-70 |

## 1. まえがき

高压熔融物放出（HPME：High Pressure Melt Ejection，以下「HPME」と称す。）／格納容器雰囲気直接加熱（DCH：Direct Containment Heating，以下「DCH」と称す。）の防止に関して、解析モデルに関する不確かさの整理を行い、感度解析により有効性評価への影響を確認した。

## 2. 現象の概要

熔融炉心が原子炉圧力容器下部プレナムに落下し、原子炉が高压の状態、原子炉圧力容器下部ヘッドが破損すると、熔融炉心が破損口から噴出し、その後、高速のガス流によって、熔融炉心が微粒子化して原子炉格納容器内に飛散放出されるため、原子炉格納容器内雰囲気を直接加熱し、原子炉格納容器圧力及び温度が急上昇する。

熔融炉心の飛散は、高压条件下で熔融炉心が原子炉圧力容器外に噴出される場合に発生するが、その圧力にはしきい値があり、原子炉を減圧させることにより、熔融炉心の飛散を抑制あるいは緩和できることが知られている（付録 1 参照）。そこで、BWR プラントでは、HPME/DCH 発生の防止のための対策として、逃がし安全弁を手動で開放することにより原子炉圧力を 2.0MPa[gage]以下まで減圧させることとしており、その効果が重大事故等対策の有効性評価において確認できる。

## 3. 不確かさに関する整理

格納容器破損防止対策の有効性評価においては、HPME/DCH 発生防止策の有効性を評価するために原子炉圧力が高く維持されるシーケンスを選定し、逃がし安全弁による手動開放により、熔融炉心の飛散が生じないとされている原子炉圧力約 2.0MPa[gage]以下まで減圧できることを示している。

本事故シーケンスにて想定する事象進展を図 3-1 に示す。また、本シーケンスにおける BWR-5, Mark-I 改良型格納容器プラントの原子炉圧力の応答例を図 3-2 に示す。事象発生時には炉心は冠水状態にあるが、給水喪失、逃がし安全弁からの冷却材流出により炉水位が低下し、事象発生から約 1.1 時間後に逃がし安全弁 2 弁により原子炉の減圧を行う。炉心燃料や構造材は熔融を開始し、熔融プールを形成しつつ、熔融炉心は炉心部下方へ落下する。約 2.9 時間後に熔融炉心が炉心支持板から下部プレナムへ落下し始め、熔融炉心と冷却材の相互作用（原子炉圧力容器内 FCI）により発生した水蒸気により原子炉圧力容器内は加圧されるが、逃がし安全弁は 2 弁開維持されているため、速やかに減圧する。約 4.3 時間後に原子炉圧力容器が破損に至るが、この時原子炉圧力は約 0.4MPa[gage]であり、2.0MPa[gage]を大きく下回っている。原子炉圧力容器破損後は、格納容器圧力と均圧する。

なお、炉内構造材は共晶体を形成し、燃料ペレットより低い融点で溶融することから、溶融炉心に先行して炉心下部にリロケーションする可能性が考えられるが<sup>[1]</sup>、下部プレナムには冷却材が存在することから、早期に溶融した金属成分は炉心下部で固化すると考えられる。しかし、事象が進展し、溶融炉心が下部プレナムにリロケーションする場合には、金属成分は下部プレナムでの溶融プール形成過程で再溶融して取り込まれると考えられることから、炉内構造物が先行溶融したとしても、原子炉压力容器破損のタイミングが大きく変わることはないと言える。

上記の事象進展において、原子炉压力容器破損の時点での原子炉圧力に影響する要因としては、①原子炉の減圧挙動、②原子炉圧力の上昇に係る物理挙動、③原子炉压力容器の破損時期が挙げられる。原子炉の減圧挙動については、逃がし安全弁による原子炉の減圧操作を実施することから、逃がし安全弁による圧力変化の不確かさの影響を受ける可能性がある。原子炉圧力の上昇に係る物理挙動としては、炉内での蒸気及び非凝縮性ガスの発生による加圧が考えられる。原子炉压力容器破損前に、これらの物理挙動の影響が顕著に現れる下部プレナムでの溶融炉心と冷却材の相互作用について、不確かさの影響を確認する。原子炉压力容器の破損時期に関しては、原子炉压力容器の破損時期が早まることで、破損時の原子炉圧力が高くなる可能性があるため、その不確かさの影響を確認する。

以上を踏まえて、次の項目について不確かさを整理する。

- ・逃がし安全弁による圧力変化
- ・下部プレナム部での溶融炉心と冷却材の相互作用（原子炉压力容器内 FCI）
- ・原子炉压力容器の破損時期

HPME/DCH の不確かさを確認するために、上記項目に係る影響因子を図 3-3 及び表 3-1 にまとめる。

#### (1) 逃がし安全弁による圧力変化

逃がし安全弁による原子炉の減圧挙動は、逃がし安全弁の容量、開放時の質量流量により決まる。弁容量は、プラント設計として設計圧力及び質量流量（気相）が定まっているため、設計圧力に近い高圧での弁質量流量の不確かさは小さい。

原子炉圧力 2.0MPa [gage] 以上では、逃がし安全弁から放出されるガス単相流は臨界流になることから、低圧での弁質量流量の不確かさについては、臨界流に着目し、以下のとおり整理する。

原子炉減圧時、逃がし安全弁からはガス単相が放出される。ガス単相流の臨界流現象は、次のように説明できる。

原子炉压力容器の圧力  $P_1$  と逃がし安全弁からの放出先の圧力  $P_2$  に対して、質量流量  $G$  は以下のように表すことができる。ここで、 $\rho_1$  は圧力  $P_1$  での流体の密度、 $\kappa$  は比熱比を示す。

$$G = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} P_1 \rho_1} \sqrt{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\kappa+1)/\kappa}}$$

臨界状態では、背圧  $P_2$  が低下しても質量流量が一定であることから、 $\delta G / \delta P_2 = 0$  より、

$$\frac{P_c}{P_1} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\kappa/(\kappa-1)}$$

となり、臨界流量  $G_c$  と臨界流速  $U_c$  は以下となる<sup>[2]</sup>。

$$G_c = \sqrt{\kappa P_c \rho_c}$$

$$U_c = \sqrt{\frac{\partial P}{\partial \rho}}$$

MAAP に組み込まれている臨界流モデル (Henry-Fauske モデル) においても、蒸気単相の場合は上式が使用されている。

図 3-4 に Henry-Fauske モデルでの圧力対臨界流量の計算結果を実験と比較した結果を示す。図 3-4 に示すとおり、この式で計算された臨界流量は実験と良く一致しており<sup>[3]</sup>、不確かさは小さい。

したがって、蒸気単相流の弁質量流量の不確かさは小さいと言える。

## (2) 下部プレナム部での熔融炉心と冷却材の相互作用 (原子炉压力容器内 FCI)

下部プレナム部での原子炉压力容器内 FCI は、細粒化した熔融炉心 (デブリ粒子) により下部プレナム部に存在する冷却材が加熱され、急速な水蒸気発生により、原子炉压力容器内の圧力上昇 (圧カスパイク) を引き起こす現象である。冷却材の状態、熔融炉心の状態及びこれらの相互作用として分けて考えることができることから、不確かさの要因は以下に分けて考える。

- ・ 下部プレナム部の冷却材の状態
- ・ 熔融炉心の落下量及び粒子化
- ・ 冷却材とデブリ粒子との伝熱

a. 下部プレナム部の冷却材の状態（サブクール度，水位）

原子炉圧力容器内 FCI による水蒸気発生のは易さは冷却材のサブクール度に依存するが、逃がし安全弁開放により原子炉は減圧沸騰するため、下部プレナム部の冷却材は飽和水である。したがって、水蒸気発生のは易さの観点では、不確かさは小さいと言える。

また、炉内の冷却材の量に関しては、評価事故シーケンスでは原子炉注水に失敗するため、冷却材の変動要因は、崩壊熱と減圧に伴う減少のみであり、解析モデルは、一般的な質量及びエネルギー保存則に基づいているため、不確かさは小さいと言える。

b. 溶融炉心の落下量及び粒子化（溶融落下流量，溶融ジェット径，溶融炉心粒子化割合）

溶融炉心が下部プレナムに落下する際の急激な水蒸気発生は、溶融炉心と水の接触面積に依存するため、その要因となる以下について、それぞれの観点で検討する。

- ・ 溶融落下流量
- ・ 溶融ジェット径
- ・ 溶融炉心粒子化割合

なお、上記に加えて「デブリ粒子径」についても接触面積に影響する要因であるが、冷却材とデブリ粒子の伝熱の観点で検討する。

(a) 溶融落下流量

溶融炉心の下部プレナムへの落下は、溶融炉心のリロケーションにより炉心支持板にまで拡がった溶融プールを保持している溶融プールのクラストが融解し、溶融炉心が炉心支持板の開口部を通過して下部プレナムへ落下していく過程であり、粒子化割合が一定で落下流量が大きい場合には、落下時の水蒸気発生量が増加し、圧力スパイクが大きくなる。下部プレナムへの溶融落下流量は、炉心部溶融デブリの下方への落下流量を最大として、炉心支持板の開口面積が小さい場合には開口面積に応じた落下流量に制限される。これに対し、解析モデルでは、溶融落下流量は、炉心支持板の開口面積には依存せず、炉心部の溶融デブリの下方ノードへの落下流量により計算される。リロケーション時の落下流量は、炉心部のデブリの溶融挙動に依存し、不確かさが存在する。MAAP では溶融落下流量に対して直接感度を与えることができないため、溶融落下流量に影響のあるパラメータとして、燃料ペレットが崩壊する時間及び温度を選定して、感度解析を実施する。

(b) 溶融ジェット径

溶融炉心の下部プレナムへの落下は、溶融炉心のリロケーションにより炉心支持板にまで拡がった溶融プールを保持している溶融プールのクラストが融解し、溶融炉心が炉心支持板

の開口部を通して下部プレナムへ落下する過程である。これに対し、解析モデルでは、ノード単位でクラストの融解を取り扱い、溶融ジェット径は、炉心支持板の開口部の面積の等価直径相当を入力条件として与えたものから計算される。したがって、実現象では解析よりも溶融ジェット径が小さい場合が考えられる。この観点で不確かさが存在し、溶融ジェット径により、溶融炉心と水の接触面積が左右され、水蒸気発生の観点で影響があることから、溶融ジェット径の感度を確認する。

(c) 溶融炉心粒子化割合

溶融炉心が冷却材に落下する際に、エントレインメントにより溶融炉心の一部が細粒化する。細粒化量に関して、MAAP では、Ricou-Spalding 式で評価される。Ricou-Spalding 式は、エントレインメント量（細粒化量）を流入流体の速度（ジェット速度）と両流体の密度比に関連させたモデルであり、液液混合問題において広く利用されている相関式である。落下する炉心溶融物は円柱ジェットで冷却材中に突入することを想定し、円柱ジェット外周部の侵食として粒子化割合を評価している。円柱ジェットのエントレインメント速度 (m/s) は、次式で与えている。

$$m_{ent} = E_o \left( \frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} u_{dj} \quad (1)$$

ここで、 $E_o$  : エントレインメント係数

$u_{dj}$  : ジェット速度 [m/s]

$\rho_{dj}$  : ジェット密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_w$  : 水密度 [kg/m<sup>3</sup>]

水中でのジェット速度を一定と仮定し、水面から垂直方向に積分すると、プール底部（水深； $\Delta H_{pool}$ ）におけるジェット直径が(2)式のように得られる。

$$d_{dj} = d_{dj,o} - 2E_o \left( \frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} \Delta H_{pool} \quad (2)$$

(2)式を用いて、溶融ジェット断面の減少分が粒子化割合であるため、粒子化割合  $\Phi_{ent}$  は次式のように計算される。

$$\Phi_{ent} = \frac{d_{dj,o}^2 - d_{dj}^2}{d_{dj,o}^2} \quad (3)$$

以上の評価式において、デブリ粒子化割合に影響するパラメータは、エントレインメント係数、溶融ジェット径、圧力（わずかではあるが水の密度に影響）及びプール水深である。この

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

うち溶融ジェット径については前項により感度を確認する。また、下部プレナム水位（水量）は、不確かさが小さいと考えられる。

エントレインメント係数については、MAAP では代表的な FCI の大規模実験である FARO 実験に対するベンチマーク解析によってその設定値及び不確かさ範囲を設定しており、推奨範囲は、～となっているため、粒子化量の不確かさとしてエントレインメント係数の感度を確認する。FARO 実験条件は、水プールの水深は 0.87～2.05m、水プールのサブクール度は飽和～124K、雰囲気圧力条件は 2～5.8MPa（高压条件）、0.2～0.5MPa（低压条件）の範囲で行われており、一方、実機条件では、下部プレナムの水位は 2～3m 程度、原子炉压力容器内の冷却材は飽和温度、雰囲気圧力は 0.4MPa[gage]程度であることを考慮すると、実験条件は有効性評価解析の特徴的な条件を概ね包絡しており、ベンチマーク解析で検討された範囲で感度を確認すれば十分と言える。

### c. 冷却材とデブリ粒子との伝熱

水中にエントレインされた高温のデブリ粒子は、その周囲を蒸気膜が覆う状態となり、デブリ粒子の熱伝達は膜沸騰熱伝達と輻射熱伝達に支配される。MAAP では、エントレインメントしたデブリ粒子の温度を、これら熱伝達を考慮した機構論的モデルにより計算する。また、デブリ粒子から水への伝熱は、デブリ粒子の径に直接依存する。MAAP では、デブリ粒子径はジェットの表面張力に依存するモデルにより計算される。デブリ粒子径の導出式には、粒子径ファクタ（モデルパラメータ）が乗じられている。

デブリ粒子ファクタについては、MAAP では代表的な FCI の大規模実験である FARO 実験に対するベンチマーク解析によってその設定値及び不確かさ範囲を設定しており、推奨範囲は ～となっているため、デブリ粒子の伝熱の不確かさは粒子径の不確かさとして考慮する。FARO 実験条件は、水プールの水深は 0.87～2.05m、水プールのサブクール度は飽和～124K、雰囲気圧力条件は 2～5.8MPa（高压条件）、0.2～0.5MPa（低压条件）の範囲で行われており、一方、実機条件では、下部プレナムの水位は 2～3m 程度、原子炉压力容器内の冷却材は飽和温度、雰囲気圧力は 0.4MPa[gage]程度であり、実験条件は有効性解析の特徴的な条件を概ね包絡しており、ベンチマーク解析で検討された範囲で感度を確認すれば十分と言える。

### (3) 原子炉压力容器の破損時期

HPME/DCH 防止の観点では、原子炉压力容器が破損する時点で、逃がし安全弁の開放により原子炉圧力が 2.0MPa[gage]を下回っていれば達成されると言える。減圧挙動については、(1) で考察済みであり、ここでは原子炉压力容器が破損する時間について考える。原子炉压力容器の破損が早まる場合には、その時点での原子炉圧力が 2.0MPa[gage] を超えた状態となる可能性がある。



原子炉圧力容器が破損する時期に係る物理現象としては、炉心溶融進展や溶融炉心のリロケーションがある。炉心水位の低下及びジルコニウム-水反応により炉心上部からヒートアップして燃料被覆管や燃料が溶融して下部へ移動し、そこで冷却されてクラストを形成する。あるいは、燃料被覆管が損傷すると燃料ペレットが崩壊して堆積する。その後、クラストや堆積した燃料ペレットが溶融し、溶融領域が拡大する。その際、炉内構造材の一部が溶融プールの中に溶け込む。さらに、溶融プールのクラストが破損し、溶融炉心が下部プレナムへ移行する。MAAPではこれらの物理現象を詳細に模擬しているが、現象自体に不確かさが存在する。原子炉圧力容器破損時期に間接的に影響を与える要因としては、炉心ヒートアップ、炉心崩壊挙動、溶融炉心の伝熱が挙げられる。MAAPでは原子炉圧力容器の破損モードとして、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損、計装配管、クリーブ破損等の複数の破損形態を模擬している。有効性評価では制御棒駆動機構ハウジングの溶接部の破損が最初に発生するため、それ以外の破損形態を仮定することは原子炉圧力容器破損を遅らせる方向となる。ここでは制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損に関する不確かさに着目し、感度解析を実施する。これらの不確かさ要因について以下のとおり検討する。

#### a. 炉心ヒートアップ

炉心水位が低下すると、燃料表面からの除熱が低下し崩壊熱によって炉心がヒートアップする。その際、燃料被覆管温度が上昇すると崩壊熱にジルコニウム-水反応による酸化反応熱が加わりヒートアップが加速される。また、炉心ヒートアップの過程で燃料棒内が加圧され燃料被覆管バーストが発生し、さらに酸化反応を促進させる可能性がある。これらの挙動は原子炉圧力容器破損時期に影響を与えるため、炉心ヒートアップ速度に関する感度解析を実施する。しかしながら、MAAPでは炉心ヒートアップ速度に対して直接感度を与えることができないため、炉心ヒートアップ速度に直接影響のあるパラメータとして、ジルコニウム-水反応速度を選定した。

#### b. 炉心崩壊挙動

炉心がヒートアップすると、燃料棒の体系から、燃料ペレットが崩壊した状態となる。燃料ペレットが崩壊すると、燃料棒体系の場合に比べて水蒸気による冷却が困難となり、溶融状態へ至る事象進展が早くなる。燃料棒の体系から燃料ペレットが崩壊した状態に移行する時間や温度には不確かさが存在することから、燃料ペレットが崩壊する時間及び温度に関する感度解析を実施する。本感度解析は、溶融落下流量の感度解析の感度パラメータと同じであることから、溶融落下流量の感度解析とともに実施する。

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

#### c. 溶融炉心と上面水プールとの伝熱

溶融炉心が下部プレナムに堆積し、上面が水プールで覆われる状況では、溶融炉心は冷却され、そのときの熱流束は限界熱流束で制限される。

MAAP では、下部プレナムに落下した溶融炉心について、上部に金属層が形成される成層化状態を模擬し、また溶融プールは周囲にクラストを形成することを模擬している。金属層は上面水プールが透過しにくいと考えられることから、金属層の下部に位置する溶融炉心の冷却における伝熱には不確かさがあり、MAAP ではこの不確かさを示すパラメータとして限界熱流束に乘じられた感度係数を設定することができる。

感度係数については、MAAP では不確かさ解析等の知見<sup>[4]</sup>から  ～  の範囲での設定が想定されており、その範囲の中間値がデフォルトとして設定されている（付録2参照）。感度係数が小さい場合には、溶融炉心が冷却されにくくなり、原子炉压力容器破損へ至る事象進展も早くなる。したがって、下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱に関する感度解析を実施する。

#### d. 溶融炉心と原子炉压力容器間の熱伝達

溶融炉心が下部プレナムに堆積し原子炉压力容器との間にギャップが生じている状況では、そのギャップに水が浸入するため溶融炉心が冷却され、そのときの熱流束は限界熱流束で制限される。この現象は実験的に確認されているものの、溶融炉心重量が多い場合にはギャップ幅が小さくなり、気液対向流現象によりギャップに十分な水が流れ込まないことも報告されている<sup>[5]</sup>。また、制御棒駆動機構ガイドチューブ等の貫通部及びその溶接部を持つ体系での実験はこれまでなされていない。このように、ギャップによる冷却には不確かさがあり、これが小さい場合には、溶融炉心が冷却されにくくなり、原子炉压力容器破損へ至る事象進展も早くなる。したがって、下部プレナム内の溶融炉心とのギャップでの除熱量に関する感度解析を実施する。

#### e. 原子炉压力容器破損判定

制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損については、せん断応力による判定とひずみによる判定を併用している。せん断応力による判定では、データに基づく温度依存の限界せん断応力との比較によって破損判定を行っており、不確かさは小さいと判断している。一方、ひずみによる判定では、破損時の最大ひずみをインプットとして与え、これとの比較によって破損判定を行っている。したがって、溶接部破損時の最大ひずみに関する感度解析を実施する。

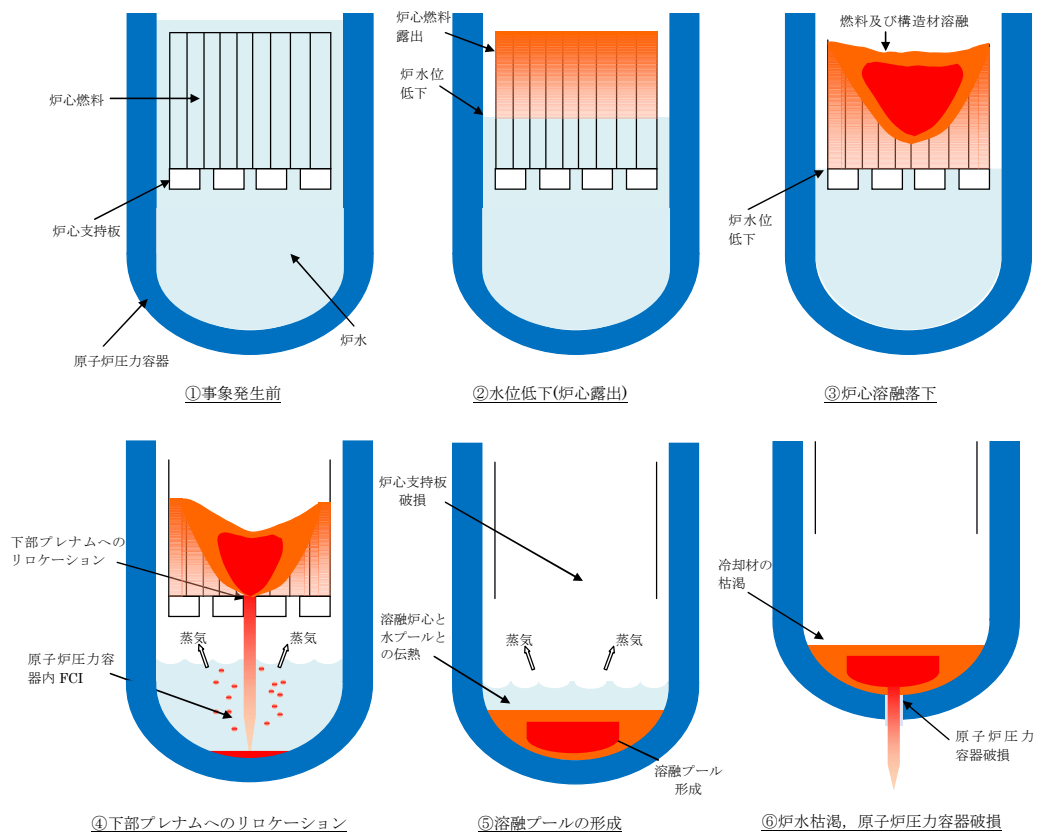


図 3-1 HPME/DCH 防止の有効性評価において想定する事象

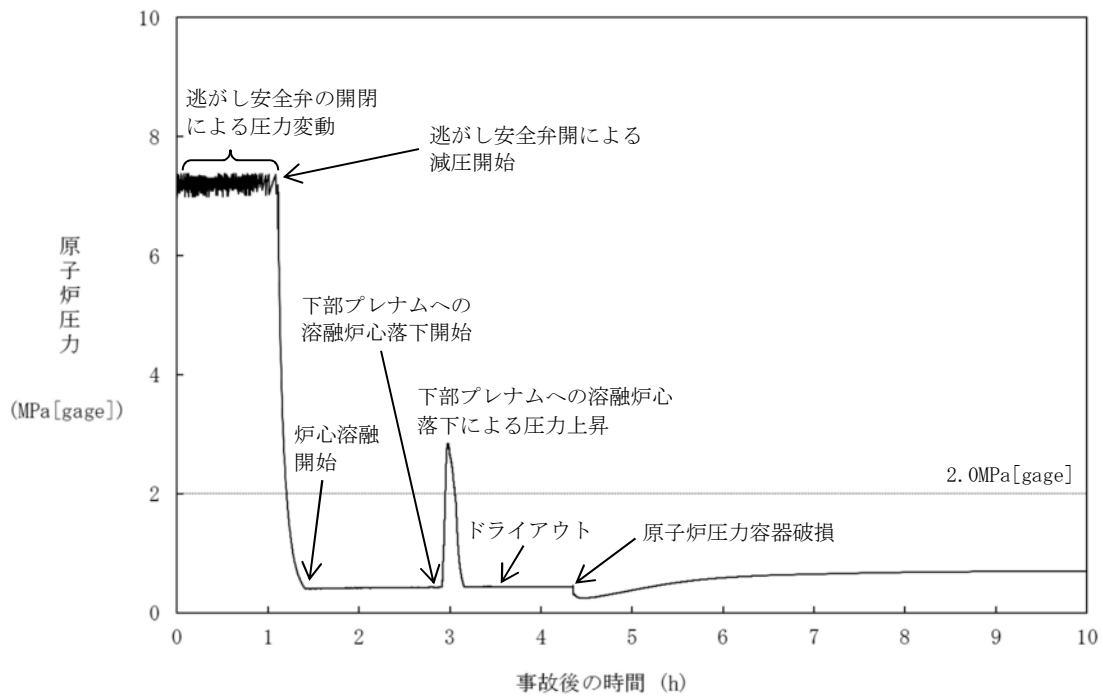


図 3-2 原子炉圧力の挙動

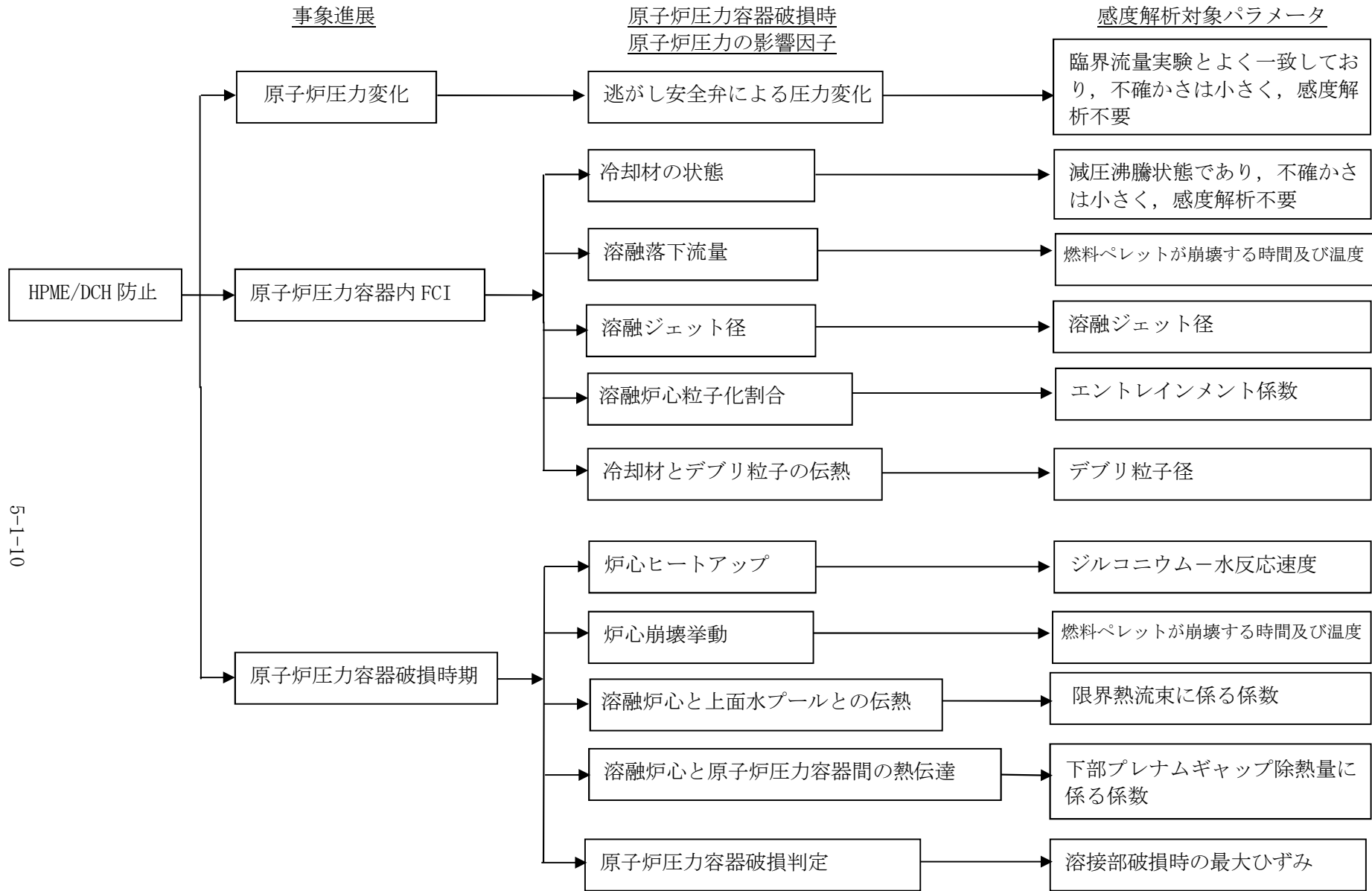


図 3-3 HPME/ DCH 防止における不確かさに関する流れ図

表 3-1 HPME/DCH 防止の不確かさに関する整理結果 (1/2)

| 影響因子              | 実機での実現象   | 有効性評価上の取扱い   | 感度解析条件                          |
|-------------------|---|--|---------------------------------|
| 逃がし安全弁による<br>圧力変化 | 逃がし安全弁開によって、炉内冷却材が放出され、その過程において、原子炉压力容器内で減圧沸騰が発生すると想定される。     | サブクールから二相状態まで適用可能な臨界流モデル及び臨界流にならない場合は差圧に基づく質量流量を計算するモデルを使用して評価される。 | 臨界流量実験とよく一致しており、不確かさは小さく、感度解析不要 |
| 下部プレナム部の冷却材の状態    | 原子炉圧力の手動減圧によって、原子炉は減圧沸騰し、下部プレナム部の冷却材は飽和状態を維持すると想定される。         | 一般的な質量及びエネルギー保存則に基づいて評価される。  | 減圧沸騰状態であり、不確かさは小さく、感度解析不要       |
| 溶融落下流量            | 下部プレナムへの溶融落下流量は、炉心部溶融デブリの下方への落下流量により決まると想定される。                | 炉心部溶融デブリの下方への落下流量により評価される。   | 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度               |
| 溶融ジェット径           | 溶融プールのクラストが破損し、炉心支持板の開口部に沿って、溶融炉心が下部プレナムに落下すると想定される。          | 溶融ジェット径は炉心支持板の開口部面積の等価直径相当として入力。                                   | 溶融ジェット径                         |
| 溶融炉心粒子化割合         | 溶融ジェット径が大きいため、水中に落下する溶融炉心の内、エントレインされる部分はジェットの表面近傍に限られると想定される。 | 逆円錐型の溶融ジェットに対して、Ricou-Spalding の式によって評価される。                        | エントレインメント係数                     |
| 冷却材とデブリ粒子の伝熱      | デブリ粒子から水へ膜沸騰伝熱及び輻射熱伝達から伝熱量が決まる。                               | デブリ粒子から水への膜沸騰伝熱及び輻射熱伝達による熱流束によって評価される。                             | デブリ粒子径                          |

表 3-1 HPME/DCH 防止の不確かさに関する整理結果 (2/2)

| 影響因子              | 実機での実現象  | 有効性評価上の取扱い  | 感度解析条件             |
|-------------------|--|---|--------------------|
| 炉心ヒートアップ          | 炉心露出状態において、崩壊熱及び燃料被覆管酸化反応によって炉心の温度が上昇すると想定される。   | 炉心露出状態において、崩壊熱及び燃料被覆管酸化反応によって炉心の温度上昇が評価される。                     | ジルコニウム-水反応速度       |
| 炉心崩壊挙動            | 燃料被覆管が酸化反応によって脆化し、燃料ペレットが崩壊して流路に堆積すると想定される。  | 炉心の温度履歴に応じて、燃料ペレットが崩壊した状態として評価される。                              | 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度  |
| 熔融炉心と上面水プールとの伝熱   | 熔融プール、クラスト、金属層の上に粒子ベッドが堆積するが、炉内への注水に失敗することから、粒子ベッドはいずれ熔融すると想定される。                                      | 熔融炉心と上面水プールとの伝熱によって評価される。                                       | 限界熱流束に係る係数         |
| 熔融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達 | 原子炉圧力容器がクリープしているため、熔融炉心の下部クラストと原子炉圧力容器の間にギャップが生じ、そのギャップに水が浸入して冷却されるが、浸入量は限られるため、原子炉圧力容器はいずれ破損すると想定される。 | 熔融炉心と原子炉圧力容器の間のギャップでの除熱量に係る係数を入力。                               | 下部プレナムギャップ除熱量に係る係数 |
| 原子炉圧力容器破損判定       | 貫通部のせん断応力、貫通部のひずみ、原子炉圧力容器本体のクリープ等によって原子炉圧力容器が破損すると想定される。   | 貫通部のせん断応力、貫通部のひずみ、原子炉圧力容器本体のクリープ破損判定基準に対する割合等から原子炉圧力容器破損が評価される。 | 溶接部破損時の最大ひずみ       |

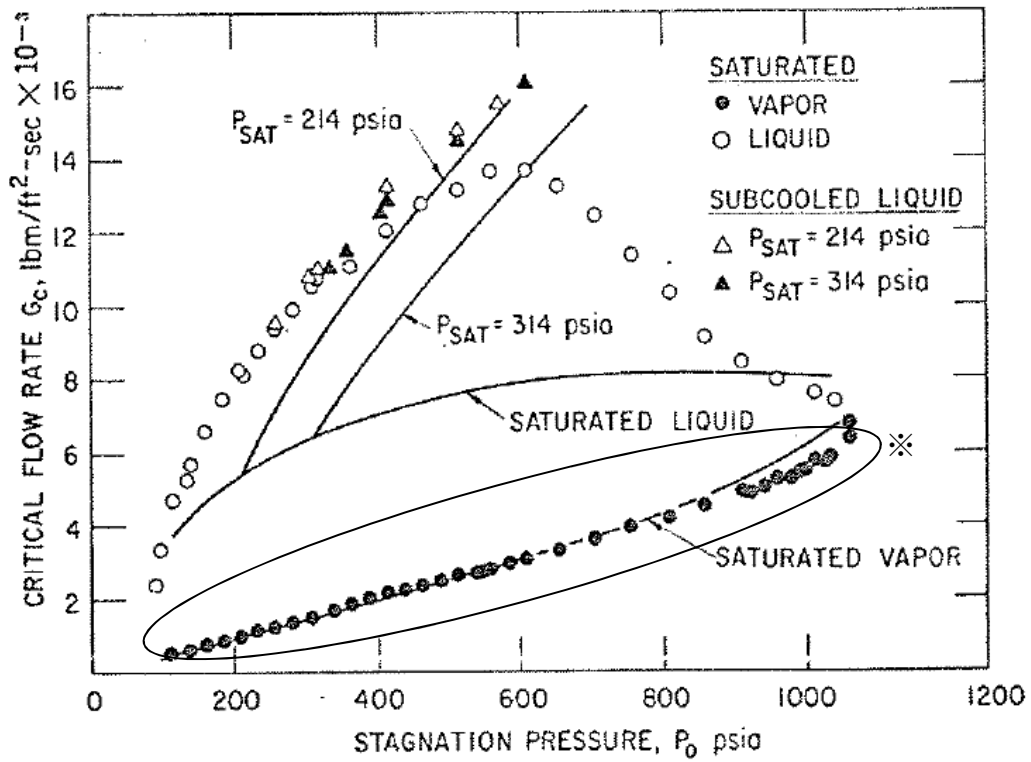


図 3-4 Henry-Fauske モデルと実験の圧力対臨界流量の比較<sup>[3]</sup>

※：囲み部分は蒸気単相の実験結果との比較を示す。

#### 4. 感度解析と評価

##### 4.1 パラメータ感度解析

3章では、原子炉圧力容器破損の時点での原子炉圧力に影響する因子を表 3-1 にまとめた。これらの影響因子に係る不確かさは、主に溶融炉心の落下挙動及び他の物質との相互作用に起因するものであり、プラント型式には依存しないと考えられる。ここでは、代表プラントを BWR-5, Mark-I 改良型格納容器プラントとして、不確かさを評価するためのパラメータ感度解析を実施する。対象シーケンスは「高圧注水・減圧機能喪失 (TQUX)」とする。

#### (1) 溶融落下流量 (燃料ペレットが崩壊する時間及び温度)

##### a. 解析条件

下部プレナムへの溶融落下流量は、炉心部溶融デブリの下方への落下流量に影響を受ける。下部プレナムへの落下時の開口面積も、落下流量に影響するが、開口面積としては、炉心支持板に存在する開口部の水力等価直径相当である  $\square$  m が与えられている。実際には溶融進展は炉心領域によって相違があり、炉心全体からのデブリの溶融落下が同時には発生しないことを考えると、 $\square$  m より小さくなる可能性はあるものの、さらに大きな漏えいが発生する可能性は低いと考えられる。なお、開口直径  $\square$  m とした場合、開口面積と堆積デブリ圧力から決まる溶融落下流量は約 600kg/s 程度と推定されるが、この値はベースケースの溶融落下流量と同等である。

炉心部溶融デブリの下方への落下流量については、炉心崩壊挙動に伴う不確かさがあると考えられる。MAAP では溶融落下流量に対して直接感度を与えることができないため、溶融落下流量に影響のあるパラメータとして、燃料ペレットが崩壊する時間及び温度を選定する。

ベースケースでは、炉心ノードの崩壊について、炉心ノード温度  $\square$  K と  $\square$  時間の関係から Larson-Miller パラメータを設定しているが、感度解析では、さらに炉心ノードの崩壊が早く進むことを想定し、炉心ノード温度  $\square$  K と  $\square$  時間 (あるいは  $\square$  K と  $\square$  秒) から Larson-Miller パラメータを設定した場合の影響を確認する (表 4-1 参照)。なお、実際には炉心ノードの温度履歴に応じて、炉心ノードが崩壊するまでの時間を計算している。



本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

表 4-1 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析条件

| 項目      | 炉心ノード崩壊の<br>パラメータ (炉心温度) | 設定根拠                      |
|---------|--------------------------|---------------------------|
| ベースケース  | □ K                      | MAAP 推奨範囲のノミナル値           |
| 感度解析ケース | □ K                      | 炉心ノードが崩壊する時間を早める<br>ように設定 |

#### b. 解析結果

図 4-1-1～4-1-8 に、燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析結果を示す。

本パラメータの影響は炉心露出以降の燃料溶融時に現れる。感度解析ケースにおいては、燃料ペレットの崩壊を判定する温度を低くしたことで、より早期に燃料ペレットの崩壊及び炉心溶融が進展する。感度解析ケースでは、リロケーション時の溶融落下流量が大きくなるのに伴い下部プレナムに落下する溶融炉心量の増加率も大きくなる（図 4-1-6 参照）ため、圧力スパイクのピーク値もベースケースと比較してわずかに高くなっている。なお、溶融落下流量は、ベースケースではピーク値約 850kg/s であるのに対して、感度解析ケースではピーク値約 1160kg/s となった。

このように、溶融落下流量（炉心崩壊挙動）は圧力スパイクに感度があるものの、感度解析ケースにおいても、圧力スパイクにより原子炉压力容器破損に至ることはなく、また、原子炉压力容器破損時点での原子炉圧力についても 2.0MPa[gage]を十分下回っている。

#### c. 評価

燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の圧力スパイクに対する感度はわずかであり、原子炉压力容器破損の時点での原子炉圧力に対する感度は小さいため、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

### (2) 溶融ジェット径

#### a. 解析条件

下部プレナムでの水深が一定で、溶融ジェット径が小さくなる場合には、粒子化割合が増加し、粒子化デブリと冷却材との伝熱速度が増加することから、圧力スパイクが大きくなると考えられる。溶融ジェット初期径として、ベースケースでは炉心支持板の水力等価直径相当である □ m を与えているが、感度解析としてクラスト破損面積が小さ

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

くなる場合を想定し、その1/10倍の  m を設定する（表 4-2 参照）。感度を確認する上ではベースケースの1/10倍のジェット径を確認すれば十分と言える。

表 4-2 溶融ジェット径の感度解析条件

| 項目      | 破損口の初期径                | 設定根拠              |
|---------|------------------------|-------------------|
| ベースケース  | <input type="text"/> m | 炉心支持板の水力等価直径相当    |
| 感度解析ケース | <input type="text"/> m | クラスト破損面積が小さい場合を想定 |

## b. 解析結果

図 4-2-1～4-2-8 に、溶融ジェット径の感度解析結果を示す。

本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心が下部プレナムへ移行するのは、溶融プールに形成されたクラストが破損し、炉心支持板の流路から溶融炉心が下部プレナムへ流れ落ちるためである。溶融ジェット径の最大値は炉心支持板の水力等価直径となる。溶融炉心の下部プレナムへの移行後は、溶融ジェット径を小さくしたケースにおいて、細粒化割合が大きくなる。粒子化割合が増加した結果圧カスパイクも大きくなり、圧力上昇幅は感度解析ケースの方がわずかながら高くなっているが、差は小さい。原子炉圧力容器の減圧維持を継続していることから、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力はどちらも約 0.4MPa [gage] であり感度は無い。

また、原子炉圧力容器破損の判定基準に対する割合は、下部プレナムへの溶融炉心落下後、制御棒駆動機構ハウジング溶接部破損とクリーブ破損の割合がともに増加していくが、ベースケース及び感度解析ケースのいずれにおいても制御棒駆動機構ハウジング溶接部破損の割合の方がクリーブ破損の割合よりも先に 1 に到達し、制御棒駆動機構ハウジング溶接部が破損している。

## c. 評価

溶融ジェット径の圧カスパイクに対する感度はわずかであり、原子炉圧力容器破損の時点での原子炉圧力に対する感度は小さいため、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

## (3) エントレインメント係数

### a. 解析条件

細粒化割合には不確かさがあり、細粒化割合が大きい場合に圧カスパイクが大きくな

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

と考えられる。エントレインメント係数は、ベースケースでは MAAP 推奨範囲 (  ~  ) のうちおよそ中間となる  を設定しているが、感度解析ケースでは、MAAP の当該変数の推奨範囲のうち最大値と最小値  ,  を設定する (表 4-3 参照)。

表 4-3 エントレインメント係数の感度解析条件

| 項目      | エントレインメント係数          | 設定根拠            |
|---------|----------------------|-----------------|
| ベースケース  | <input type="text"/> | MAAP 推奨範囲のノミナル値 |
| 感度解析ケース | <input type="text"/> | MAAP 推奨範囲の最小値   |
|         | <input type="text"/> | MAAP 推奨範囲の最大値   |

#### b. 解析結果

図 4-3-1~4-3-8 に、エントレインメント係数の感度解析結果を示す。

本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心の下部プレナムへの移行時、原子炉圧力の上昇は、感度解析ケース (最大値) の方がわずかながら高い結果となっているが、差は小さい。原子炉圧力容器の減圧維持を継続していることから、原子炉圧力容器破損の時点では原子炉圧力は約 0.4MPa[gage]と同程度の値となっている。また、原子炉圧力容器破損の時期はほぼ同等である。

また、原子炉圧力容器破損の判定基準に対する割合は、下部プレナムへの溶融炉心落下後、制御棒駆動機構ハウジング溶接部破損とクリーブ破損の割合がともに増加していくが、ベースケース及び感度解析ケースの 2 ケースのいずれにおいても制御棒駆動機構ハウジング溶接部破損の割合の方がクリーブ破損の割合よりも先に 1 に到達し、制御棒駆動機構ハウジング溶接部が破損している。

#### c. 評価

エントレインメント係数の圧カスパイクに対する感度はわずかであり、原子炉圧力容器破損の時点での原子炉圧力に対する感度は小さいため、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

### (4) デブリ粒子径

#### a. 解析条件

デブリ粒子径には不確かさがあり、デブリ粒子径が小さい場合に圧カスパイクが大き

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

くなると考えられる。デブリ粒子径に係る係数は、ベースケースでは MAAP 推奨範囲 (□~□) のうちおよそ中間となる □ を設定しているが、感度解析ケースでは、MAAP の当該変数の推奨範囲のうち最小値と最大値 □, □ を設定する (表 4-4 参照)。

表 4-4 デブリ粒子径の感度解析条件

| 項目      | 粒子径ファクタ | 設定根拠            |
|---------|---------|-----------------|
| ベースケース  | □       | MAAP 推奨範囲のノミナル値 |
| 感度解析ケース | □       | MAAP 推奨範囲の最小値   |
|         | □       | MAAP 推奨範囲の最大値   |

## b. 解析結果

図 4-4-1~4-4-8 に、デブリ粒子径の感度解析結果を示す。

本パラメータは、熔融炉心の下部プレナムへの落下時 (約 2.9 時間後) に挙動に影響する。感度解析ケース (最小値) においては粒子径が小さくなっていることから、圧力スパイクによる上昇幅はベースケースに比較してわずかに大きくなっているものの、感度としてはわずかである。また、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力についても、ほぼ感度は無くどちらのケースも約 0.4MPa[gage] である。また、ベースケースと感度解析ケースの 2 ケースでは原子炉圧力容器破損の時期はほぼ同じ結果となっている。これは、熔融炉心が下部プレナムへ移行した時の圧力上昇挙動が同等であるためである。

また、原子炉圧力容器破損の判定基準に対する割合は、下部プレナムへの熔融炉心落下後、制御棒駆動機構ハウジング溶接部破損とクリープ破損の割合がともに増加していくが、ベースケース及び感度解析ケースの 2 ケースのいずれにおいても制御棒駆動機構ハウジング溶接部破損の割合の方がクリープ破損の割合よりも先に 1 に到達し、制御棒駆動機構ハウジング溶接部が破損している。

## c. 評価

デブリ粒子径の圧力スパイクに対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

## (5) ジルコニウム-水反応速度

### a. 解析条件

炉心のヒートアップ速度には不確かさがあるため、ヒートアップ時のジルコニウム-水反応速度を選定した。ジルコニウム-水反応速度の感度をみるため、ジルコニウム-水反応の起きる面積を変化させた感度解析を実施する。反応の起きる面積に乗じる係数（ジルコニウム-水反応速度の係数）は、ジルコニウム-水反応の計算のみに使用され、熱水力挙動の計算に使用される燃料被覆管の直径、長さ等の幾何形状を変えるものではない。この係数を増加させることにより、酸化反応熱の発生速度、水素発生速度、酸化ジルコニウム生成速度が大きくなる方向に影響する。これらは炉心溶融進展が早まる方向へ作用する。この係数は、ベースケースでは燃料被覆管表面積に基づき1倍を与えている。これは、ヒートアップ時には燃料被覆管破裂が発生する場合に破裂部の燃料被覆管内面の酸化もあるが、燃料被覆管内面の酸化は、限定された破裂部のみで生じること、炉心形状が健全な状態は溶融過程の比較的短期間であることから、炉心全体が溶融する状況では内面の反応は無視できると考えられることに基づいている。これに対し、感度解析のパラメータの振り幅としては、炉心ヒートアップ速度が速くなる場合の応答の確認として、仮想的な厳しい想定ではあるが、2倍とする（表4-5参照）。

表4-5 ジルコニウム-水反応速度の感度解析条件

| 項目      | ジルコニウム-水反応速度の係数 | 設定根拠             |
|---------|-----------------|------------------|
| ベースケース  | 1倍              | 燃料被覆管表面積に基づく値    |
| 感度解析ケース | 2倍              | 燃料被覆管表面積に基づく値の2倍 |

### b. 解析結果

図4-5-1～4-5-8に、ヒートアップ時のジルコニウム-水反応速度の感度解析結果を示す。

本パラメータの影響は炉心露出以降の燃料ヒートアップ時に現れる。ヒートアップ時のジルコニウム-水反応速度の係数を2倍にしたことで、ジルコニウム-水反応による酸化反応熱が増加することから、下部プレナムへのリロケーションはわずかに早くなっている。以上のように、感度解析ケースにおいては事象の進展がわずかに早くなるものの、原子炉圧力容器破損の時点での原子炉圧力は2.0MPa[gage]を下回っている。

なお、燃料被覆管酸化反応の特徴についてJAERI文献<sup>[6]</sup>によると、雰囲気の変化が燃料被覆管酸化反応に与える影響として、ジルコニウム-水反応によって生じた水素濃度が

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

高くなると、燃料被覆管酸化反応速度が著しく低下することが報告されている。これは水素濃度が増大することによって水蒸気濃度が低下することで、燃料被覆管酸化反応が遅くなるという負のフィードバックが働くためである。MAAPでもこの挙動は模擬されており、水蒸気の金属表面への拡散速度は、雰囲気中の水蒸気質量割合に依存する取扱いとなっている。水素が発生し、水素質量割合が大きくなることにより、相対的に水蒸気質量割合が小さくなり、金属表面への水蒸気の拡散速度も小さくなることから、ジルコニウム-水反応速度が抑制される取扱いとなっている。

以上から、炉心ヒートアップ速度が速くなると、初期には水素生成が進むが、水素濃度が高くなると、燃料被覆管酸化反応は抑制される方向になる。

### c. 評価

ヒートアップ時のジルコニウム-水反応速度は、2 倍の振り幅でも事象進展の速さに対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

## (6) 炉心崩壊挙動 (燃料ペレットが崩壊する時間及び温度)

### a. 解析条件

炉心がある温度に達してから、燃料ペレットが崩壊するまでの時間（あるいは、一定時間のうちに燃料ペレットが崩壊する温度）には、不確かさがあると考えられるため、その感度を確認する。

ベースケースでは、炉心ノードの崩壊について、炉心ノード温度  K と  時間の関係から Larson-Miller パラメータを設定しているが、感度解析では、さらに炉心ノードの崩壊が早く進むことを想定し、炉心ノード温度が  K と  時間（あるいは  K と  秒）から Larson-Miller パラメータを設定した場合の影響を確認する（表 4-6 参照）。なお、実際には炉心ノードの温度履歴に応じて、炉心ノードが崩壊するまでの時間を計算している。

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

表 4-6 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析条件

| 項目      | 炉心ノード崩壊の<br>パラメータ (炉心温度) | 設定根拠                      |
|---------|--------------------------|---------------------------|
| ベースケース  | □ K                      | MAAP 推奨範囲のノミナル値           |
| 感度解析ケース | □ K                      | 炉心ノードが崩壊する時間を早める<br>ように設定 |

b. 解析結果

図 4-1-1~4-1-8 に、燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析結果を示す。

本パラメータの影響は炉心露出以降の燃料溶融時に現れる。感度解析ケースにおいては、燃料ペレットの崩壊を判定する温度を低くしたことで、より早期に燃料ペレットの崩壊及び炉心溶融が進展することから、下部プレナムへのリロケーション開始時刻が早く、初期に落下するデブリ量も多くなるため、圧スパイクのピーク値もベースケースと比較してわずかに高くなっている。また、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力は、ほぼ感度はなくどちらのケースも約 0.4MPa[gage]である。

このように、燃料ペレットの崩壊の判定は圧スパイクにわずかに感度があるものの、感度解析ケースにおいても原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力は 2.0MPa[gage]を十分下回っている。

(7) 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱

a. 解析条件

下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の熱伝達には不確かさがあり、ベースケースでは、限界熱流束にかかる係数として、パラメータの取りうる推奨範囲である □~□ の中間値 □ を与えている。感度解析ケースでは水への熱伝達が制限される値としてベースケースの 1/2 倍である □ を設定する (表 4-7 参照)。

表 4-7 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析条件

| 項目      | 限界熱流束にかかる<br>係数 | 設定根拠            |
|---------|-----------------|-----------------|
| ベースケース  | □               | MAAP 推奨範囲のノミナル値 |
| 感度解析ケース | □               | 水への熱伝達が制限される値   |

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

### b. 解析結果

図 4-6-1～4-6-8 に、下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析結果を示す。

本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心が下部プレナムにリロケーションした後は、感度解析ケースにおいて溶融炉心と上面水プールの伝熱量が減少することになる。その結果、感度解析ケースにおいて、原子炉圧力容器破損時間はわずかに早くなっているが、感度は小さい。

### c. 評価

下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の原子炉圧力容器破損時刻に対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

## (8) 溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達

### a. 解析条件

溶融炉心と下部プレナムのギャップに存在する水による除熱量には不確かさがあり、ベースケースではギャップへの熱流束にかかる係数として□を与えている。この係数は、下部プレナムギャップの水による除熱量にかかるファクタとして定義され、ベースケースではギャップによる除熱量の評価式により計算された除熱量がそのまま適用される。有効性評価では最初に貫通部の溶接部破損が生じているが、貫通部近傍でのギャップ冷却は実験例がなく、ギャップ水による除熱量が平板体系と比較してどの程度になるかには不確かさがある。以上より、感度解析ケースでは、溶融炉心と下部プレナムが接触している状態を模擬するための設定として係数を□とした評価を実施する（表 4-8 参照）。

表 4-8 溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達の感度解析条件

| 項目      | 下部プレナムギャップの除熱量にかかる係数 | 設定根拠           |
|---------|----------------------|----------------|
| ベースケース  | □                    | 当該変数のノミナル値     |
| 感度解析ケース | □                    | 溶融炉心と下部プレナムが接触 |

### b. 解析結果

図 4-7-1～4-7-8 に、下部プレナムギャップの除熱量にかかる係数の感度解析結果を



本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

示す。

本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心が下部プレナムに移行した後、感度解析ケースにおいては、下部プレナムギャップによる除熱が無い場合、下部ヘッドの温度が若干早く上昇し、クリープ破損割合や貫通部破損割合は感度解析ケースの方がわずかだが上昇が早い傾向となる。

ただし、このパラメータは下部プレナムの水がドライアウトするまでの間しか影響を及ぼさず、ドライアウト前においても、下部プレナムギャップからの除熱量はクラストからの伝熱量と比較して十分小さいことから（付録3参照）、原子炉圧力及び原子炉圧力容器破損時刻に対する感度としては小さい。また、いずれのケースも原子炉圧力容器破損時点において、原子炉圧力は2.0MPa[gage]を下回っている。

### c. 評価

溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達の原子炉圧力容器破損時刻に対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

## (9) 溶接部破損時の最大ひずみ

### a. 解析条件

溶接部破損は、事象進展に伴う溶接部のひずみ量と最大ひずみを比較することで、その発生を判定している。ここで、溶接部破損時の最大ひずみとして、ベースケースでは□を与えているが、不確かさがあると考えられることから、感度を確認するためにその1/10倍の□を設定する（表4-9参照）。

表 4-9 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析条件

| 項目      | 溶接部破損時の最大ひずみ | 設定根拠                     |
|---------|--------------|--------------------------|
| ベースケース  | □            | MAAP 推奨範囲のノミナル値          |
| 感度解析ケース | □            | 実験の不確かさを大幅に上回る設定として1/10倍 |

### b. 解析結果

図4-8-1～4-8-8に、溶接部破損時の最大ひずみの感度解析結果を示す。

本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。感度解析ケー

スは、原子炉圧力容器破損に至る判定の基準を変更したものであるため、溶接部が破損する時点までの原子炉圧力の挙動は同等である。溶接部破損割合は、貫通部溶接部にかかるせん断応力とそれに対する最大引張強度の関係、および溶融炉心からの伝熱による溶接部ひずみと許容できる最大ひずみの関係から計算される。リロケーション時には原子炉圧力が過渡的に上昇することから、内外圧差によるせん断応力が大きくなり、溶接部破損割合が増加している。原子炉圧力が低下した後は、せん断応力は低下するが、溶接サポート部の最大引張強度が、溶融炉心からの伝熱により低下するため、溶接部破損割合はゼロにはならない。その後、下部プレナムの溶融炉心からの伝熱により、下部ヘッドにひずみが生じ始めた時点でベースケースと感度解析ケースでは差異が生じる。感度解析ケースにおいては、溶接部破損時の最大ひずみを 1/10 倍としたことで、溶接部破損割合がベースケースよりも早く上昇し、原子炉圧力容器破損の時刻が早まっている。ただし、原子炉圧力容器破損時間の変化としては約 13 分と小さく、感度解析ケースにおいても溶接部破損時点での原子炉圧力は 2.0MPa[gage]を下回っている。

### c. 評価

溶接部破損時の最大ひずみの原子炉圧力容器破損時刻に対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

## (10) 感度解析パラメータの組み合わせ

### a. 解析条件

これまで解析したケースでは、原子炉圧力容器下部プレナムに溶融炉心が落下した過程で大量の水蒸気が生成され、原子炉圧力は短時間に高いピークが発生した。これは、溶融炉心が水中に落下した過程で粒子化が進み、水への伝熱面積が増大したことが支配的な要因である。この過程で溶融炉心の冷却は進み、下部プレナムに堆積した溶融炉心の温度は低下する。その後、下部プレナムに溜まっていた水がドライアウトすることで蒸気発生が収まる。組み合わせケースでは、炉内 FCI に係る影響因子については、下部プレナムへの溶融炉心落下後の原子炉圧力上昇が大きくなるように、原子炉圧力容器破損時期に係る影響因子については原子炉圧力容器破損時期が早くなるように、これまでに実施した感度解析パラメータを組み合わせる条件とした。表 4-10 に組み合わせケースの条件の一覧を示す。

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

表 4-10 感度解析パラメータの組み合わせ条件

| 項目                      | ベースケース                     | 組み合わせケース                   | 設定根拠                       |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 炉心ノード崩壊のパラメータ<br>(炉心温度) | <input type="checkbox"/> K | <input type="checkbox"/> K | 炉心ノードが崩壊する時間を早めるように設定      |
| 溶融ジェット径                 | <input type="checkbox"/> m | <input type="checkbox"/> m | クラスト破損面積が小さい場合を想定          |
| エントレインメント係数             | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   | MAAP 推奨範囲の最大値              |
| デブリ粒子径ファクタ              | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   | MAAP 推奨範囲の最小値              |
| ジルコニウム-水反応速度の係数         | 1 倍                        | 2 倍                        | 燃料被覆管表面積に基づく値の 2 倍         |
| 限界熱流束にかかる係数             | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   | 水への熱伝達が制限される値              |
| 溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達       | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   | 溶融炉心と下部プレナムが接触する場合を想定      |
| 溶接部破損時の最大ひずみ            | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   | 実験の不確かさを大幅に上回る設定として 1/10 倍 |

## b. 解析結果

図 4-9-1 にこれまでの感度解析と感度解析パラメータの組み合わせケースについて主要な事象進展を示す。図 4-9-2～4-9-9 に、感度解析パラメータを組み合わせた場合の感度解析結果を示す。

図 4-9-1 より、組み合わせケースでは、原子炉圧力容器破損時刻は、ベースケースに比べて約 19 分早くなっており、他の感度解析結果と比較しても、最も早く原子炉圧力容器破損に至っているが、原子炉圧力容器破損時の圧力は、逃がし安全弁の開放により減圧されていることにより 2.0MPa[gage]を十分下回る約 0.5MPa[gage]となっている。これらの挙動について以下のとおり考察する。

### ①原子炉の加圧事象

下部プレナムへのリロケーション時の原子炉の加圧挙動は、溶融炉心と水の接触

による急激な水蒸気生成により支配され、これらに影響するパラメータとして、熔融ジェット径、エントレインメント係数、デブリ粒子径などがある。これらの不確かさを感度解析により考慮した結果、原子炉圧力のピーク圧は、ベースケースよりわずかに上昇しているが、リロケーション時の圧力上昇は一時的なものであり、原子炉圧力容器破損時には原子炉圧力は2.0MPa[gage]を大きく下回っている点でベースケースと同等である。

#### ②原子炉圧力容器破損（原子炉圧力容器破損タイミング）

原子炉圧力容器破損（原子炉圧力容器破損タイミング）については、熔融炉心からの熱負荷、破損形態などにより支配され、これらに影響するパラメータとして、ジルコニウム-水反応速度、燃料ペレットが崩壊する時間及び温度、下部プレナム内の熔融炉心と上面水プールとの間の伝熱、溶接部破損時の最大ひずみがある。これらの不確かさを感度解析により考慮した結果、原子炉圧力容器破損のタイミングは、ベースケースよりも約19分早く原子炉圧力容器破損に至る結果となったが、原子炉圧力は原子炉圧力容器破損時間に対して十分早い段階で2.0MPa[gage]を下回っている結果に変わりはない。

以上の通り、パラメータの組み合わせを考慮した感度解析ケースでは、圧力スパイクが大きく現れ、原子炉圧力容器破損タイミングが早くなるが、原子炉圧力容器破損の前に原子炉圧力が2.0MPa[gage]を十分下回る結果となった。

#### c. 評価

下部プレナムへの熔融炉心落下挙動の不確かさにより、原子炉の圧力挙動にも不確かさがある。加圧現象が短時間に大きく現れる場合についても、原子炉圧力容器破損前には原子炉圧力が2.0MPa[gage]を十分に下回ることを確認した。

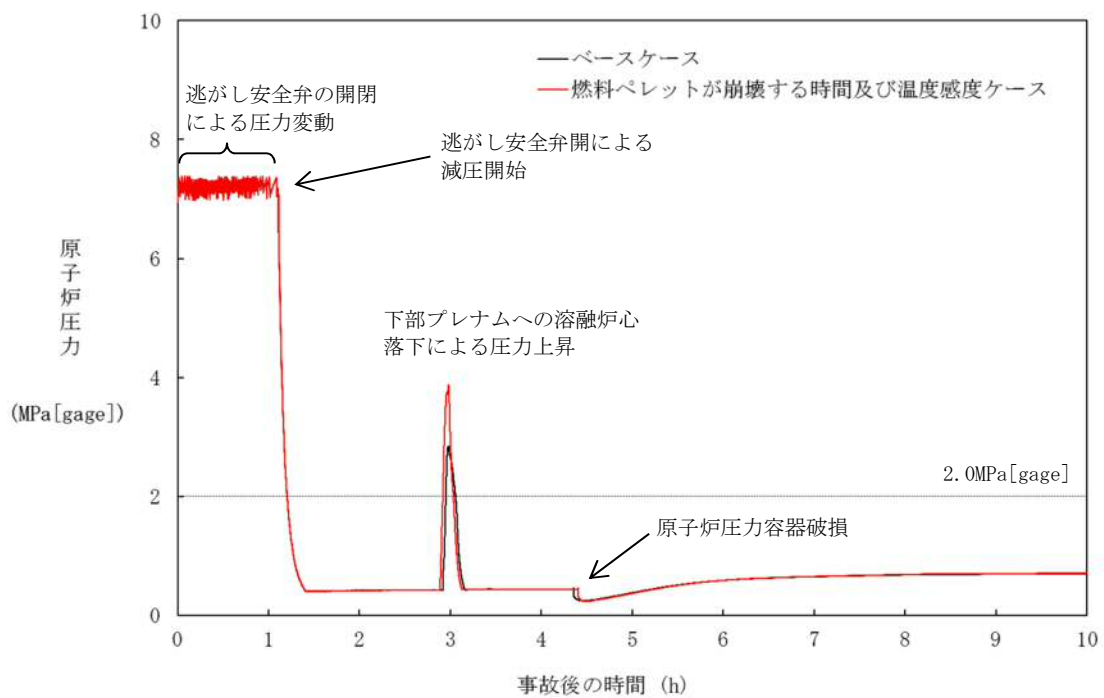


図4-1-1 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析（1）

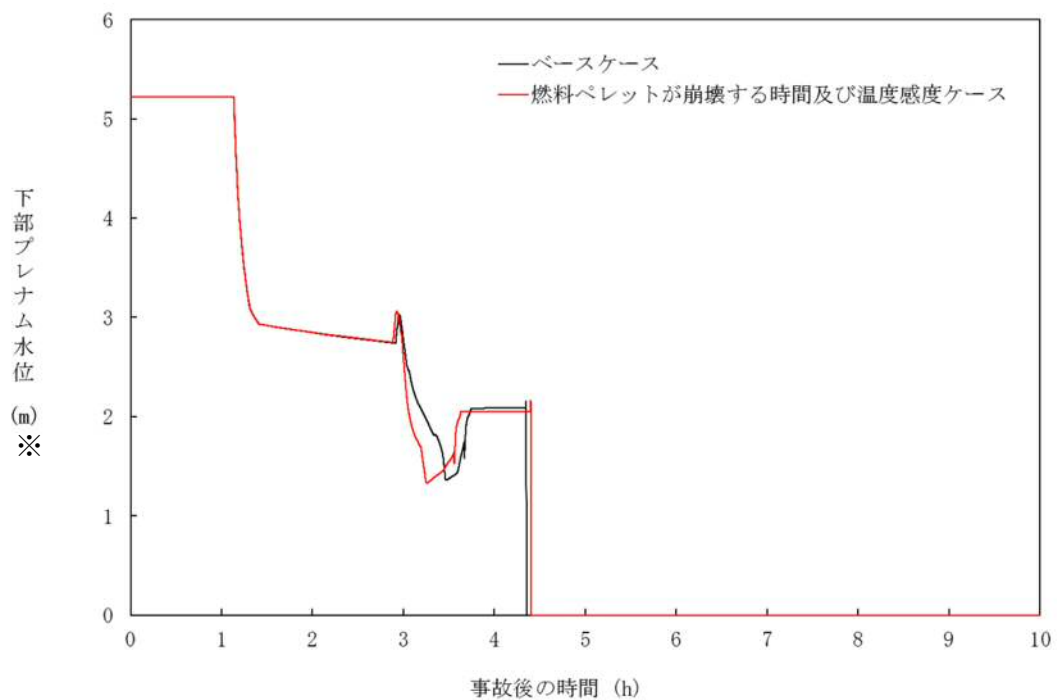


図4-1-2 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析（2）

※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

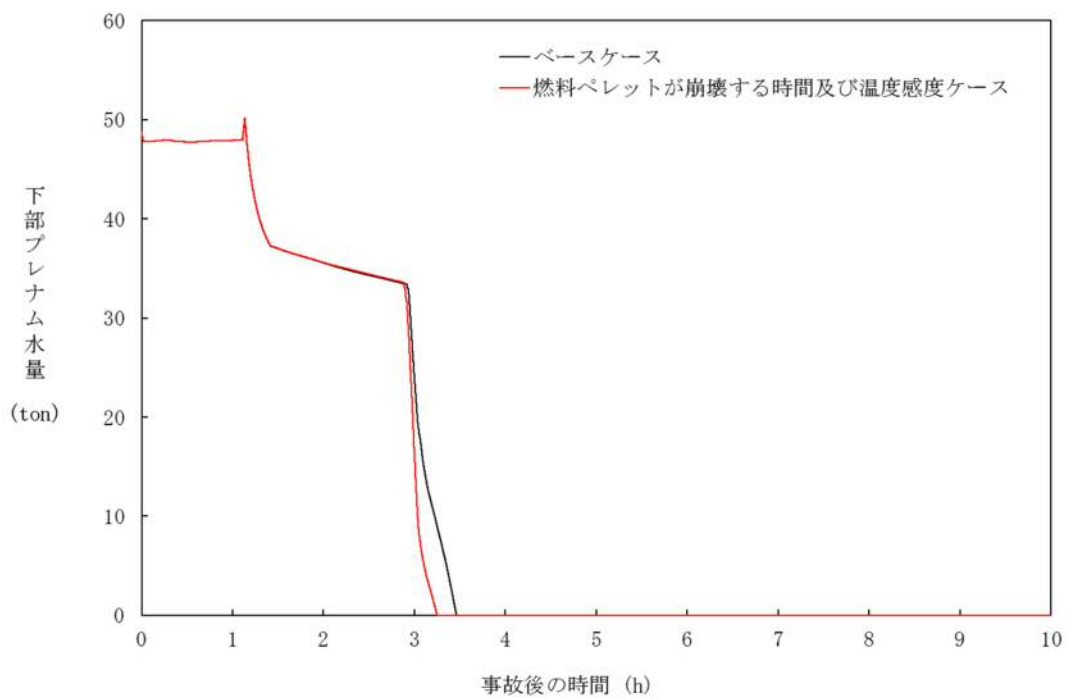


図 4-1-3 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (3)

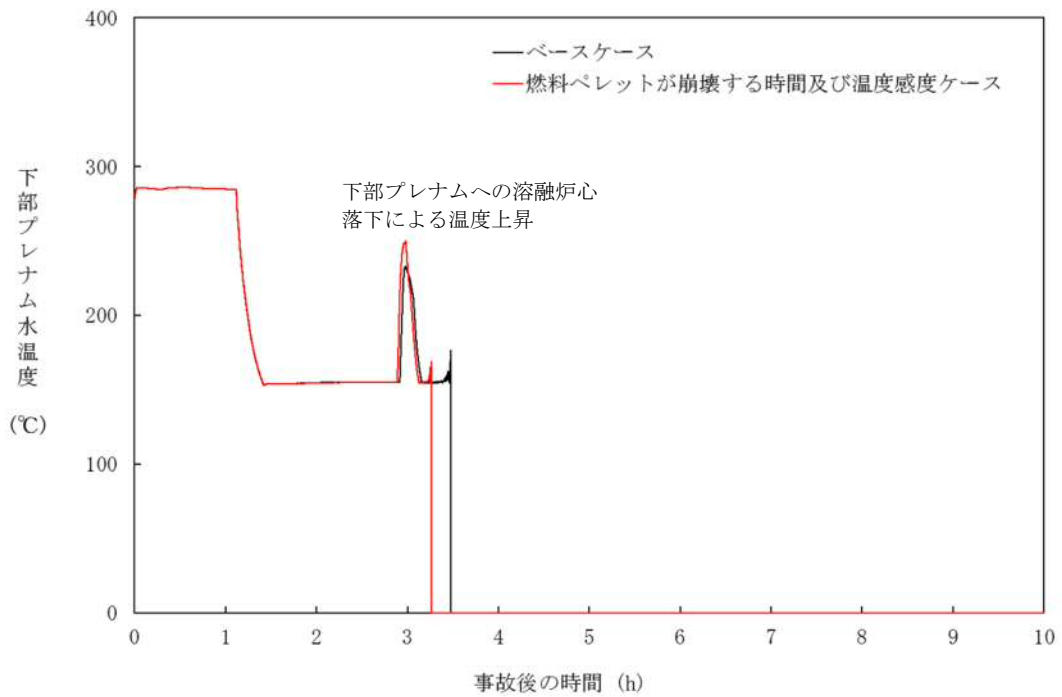


図 4-1-4 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (4)

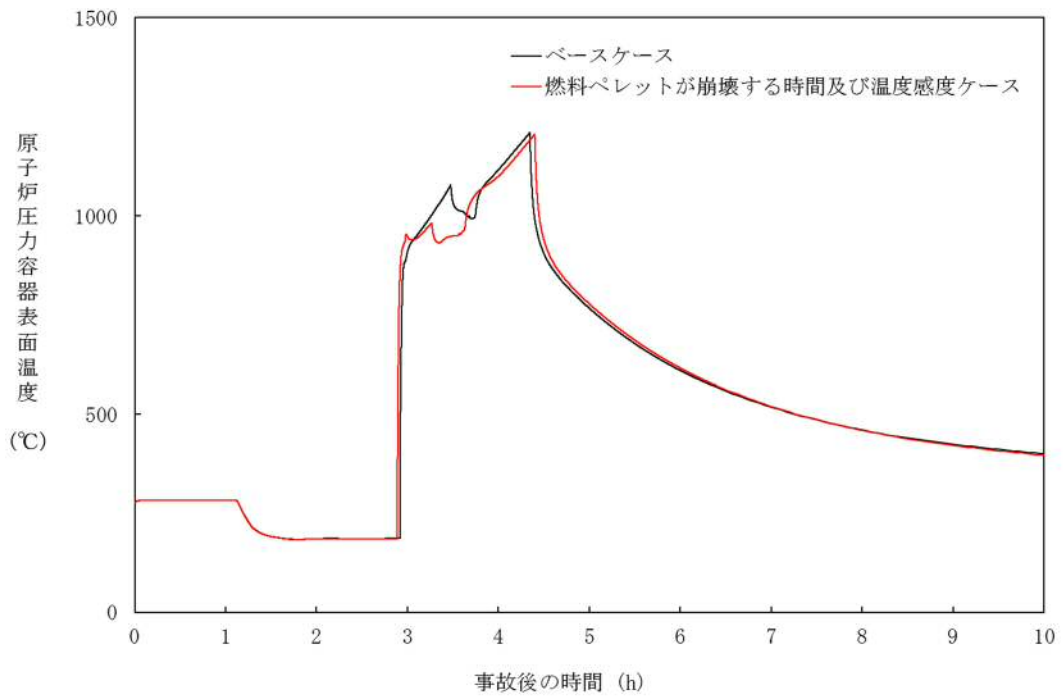


図4-1-5 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (5)

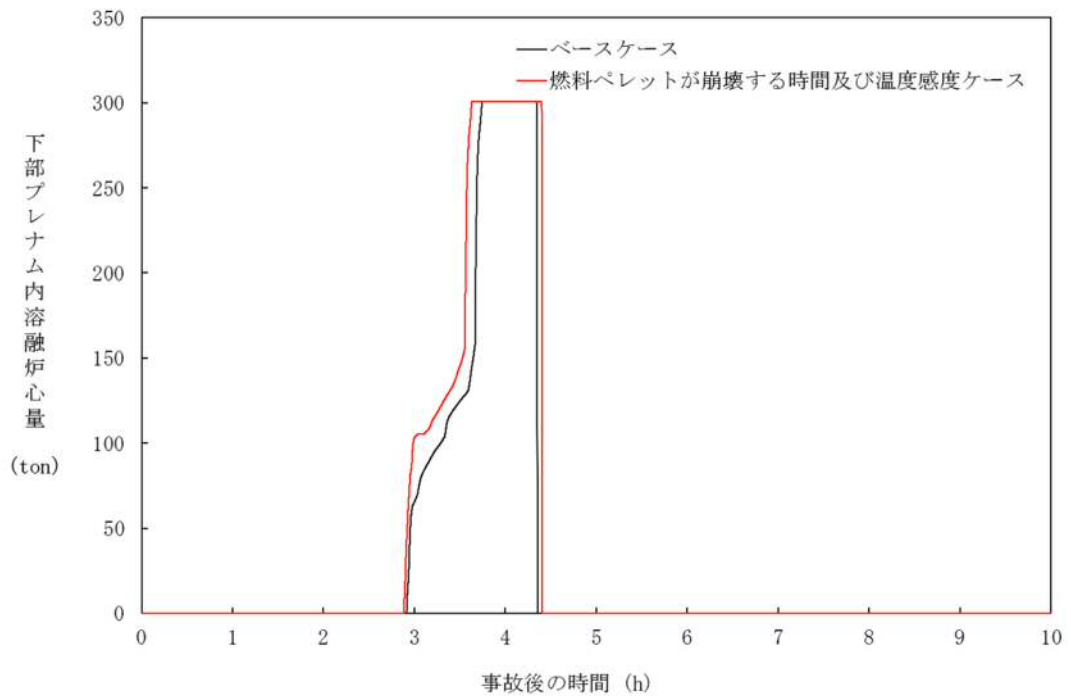


図4-1-6 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (6)

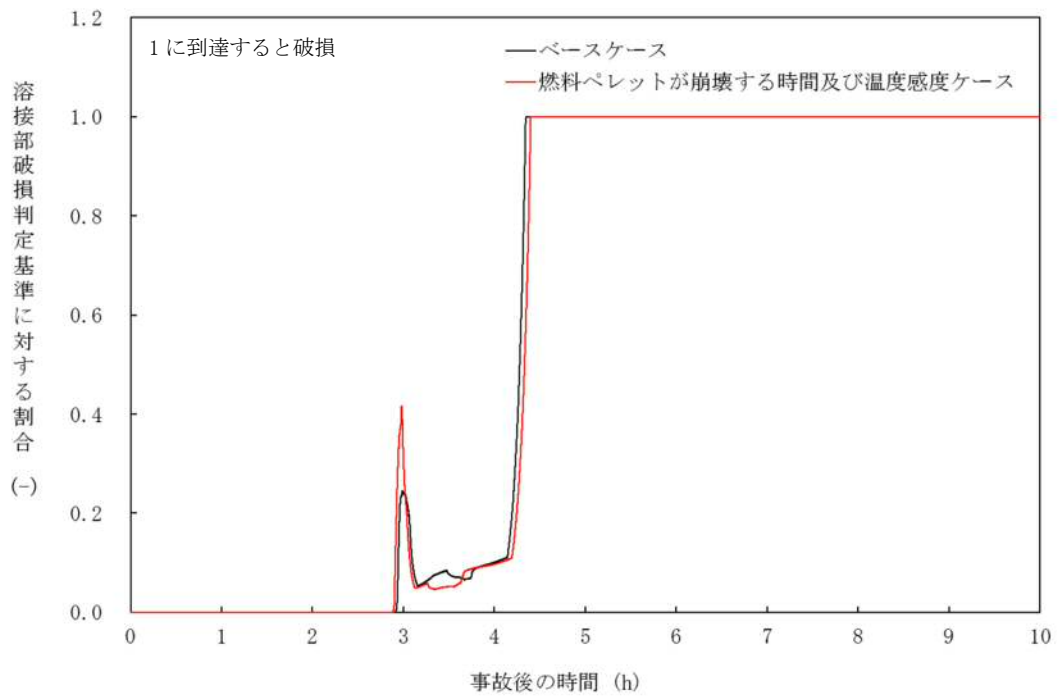


図4-1-7 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (7)

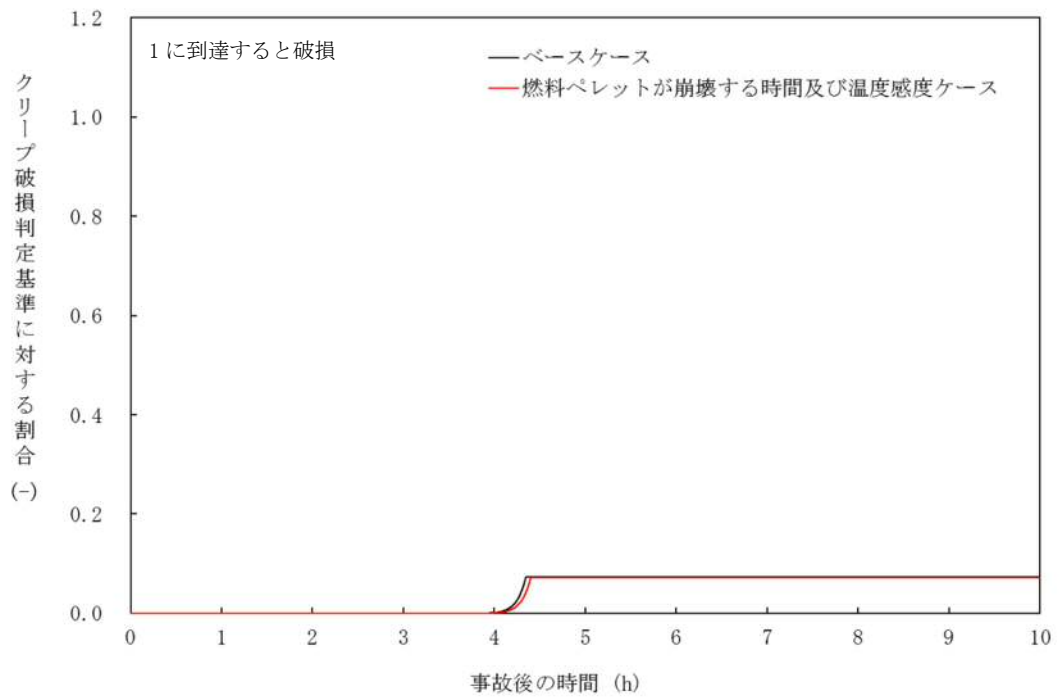


図4-1-8 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (8)



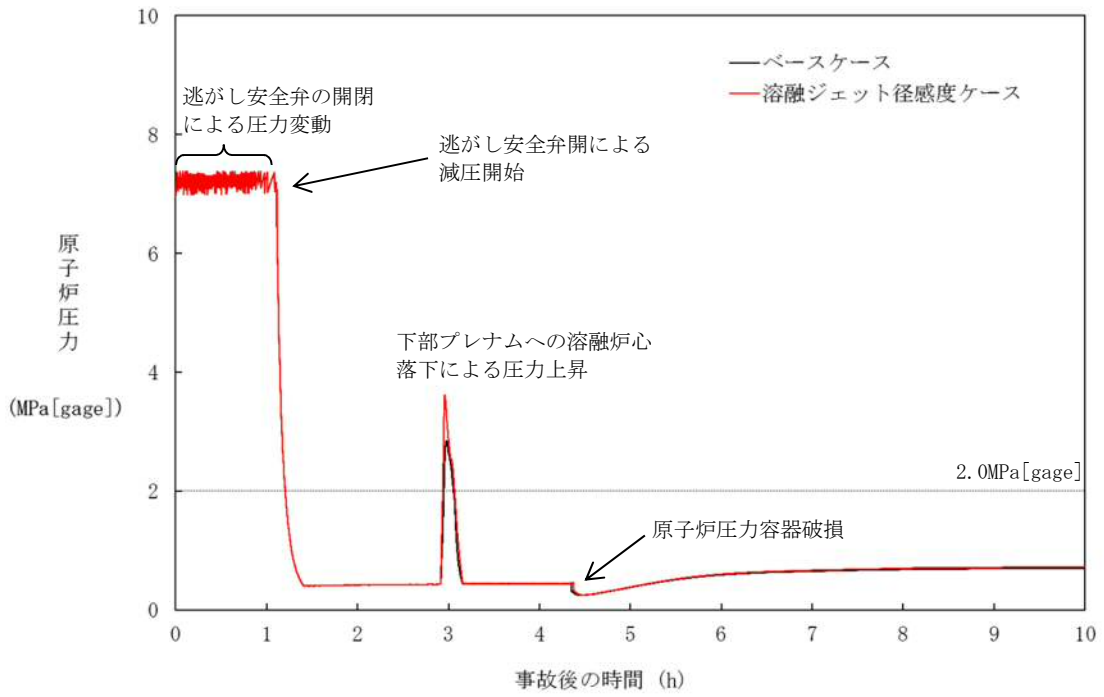


図 4-2-1 熔融ジェット径の感度解析 (1)

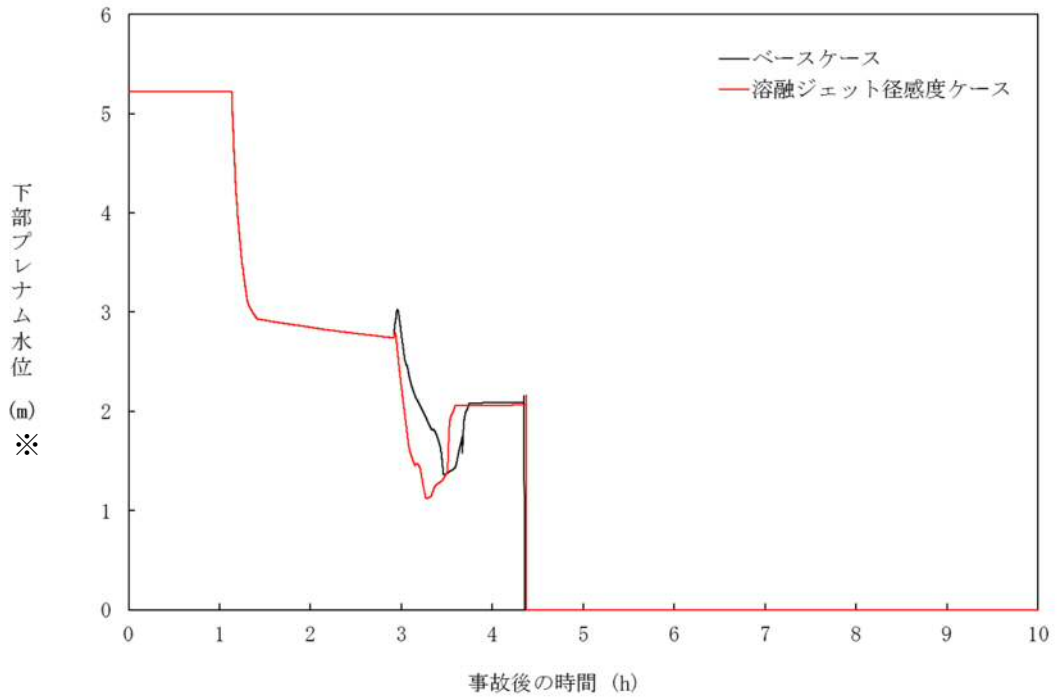


図 4-2-2 熔融ジェット径の感度解析 (2)

※リロケーション後は、下部プレナム水位に熔融デブリ高さを含む。

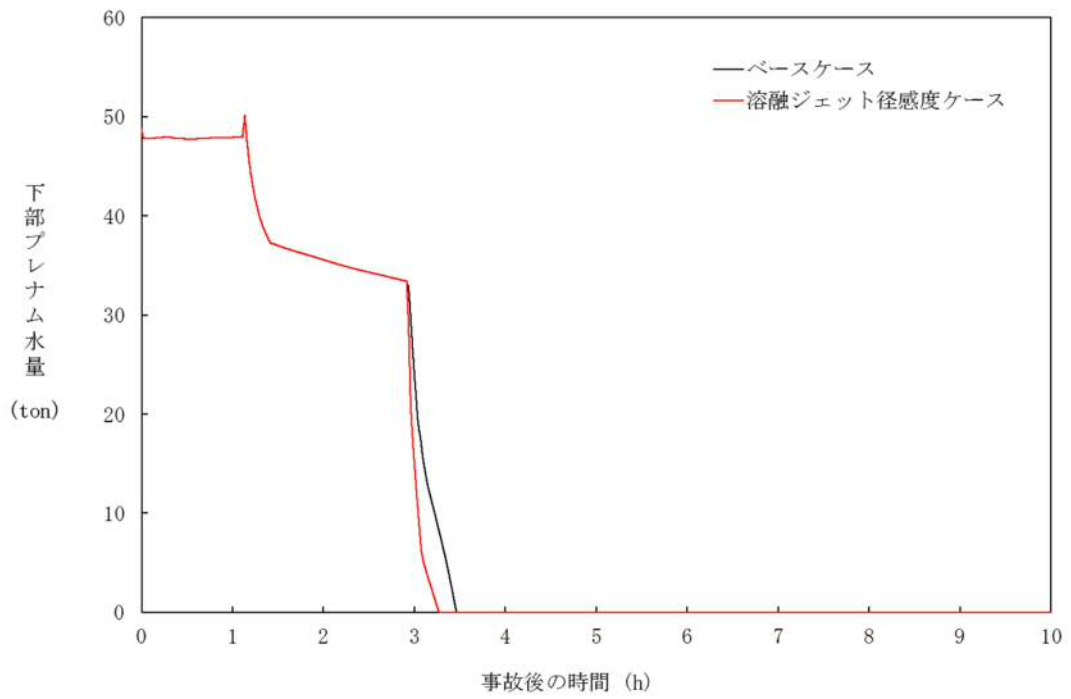


図 4-2-3 溶融ジェット径の感度解析 (3)

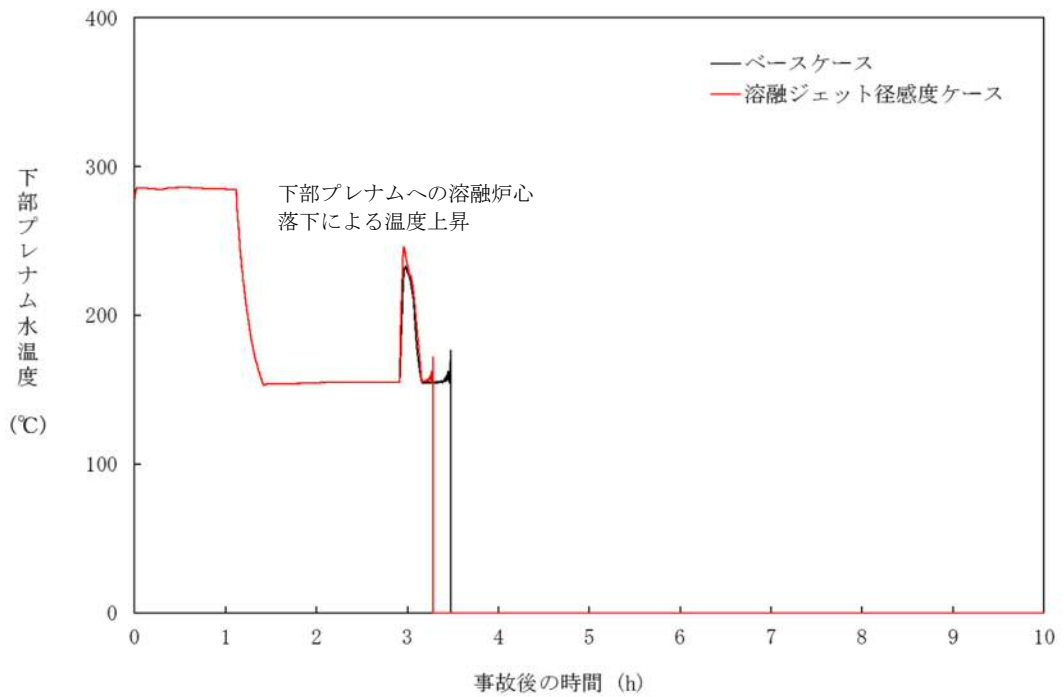


図 4-2-4 溶融ジェット径の感度解析 (4)

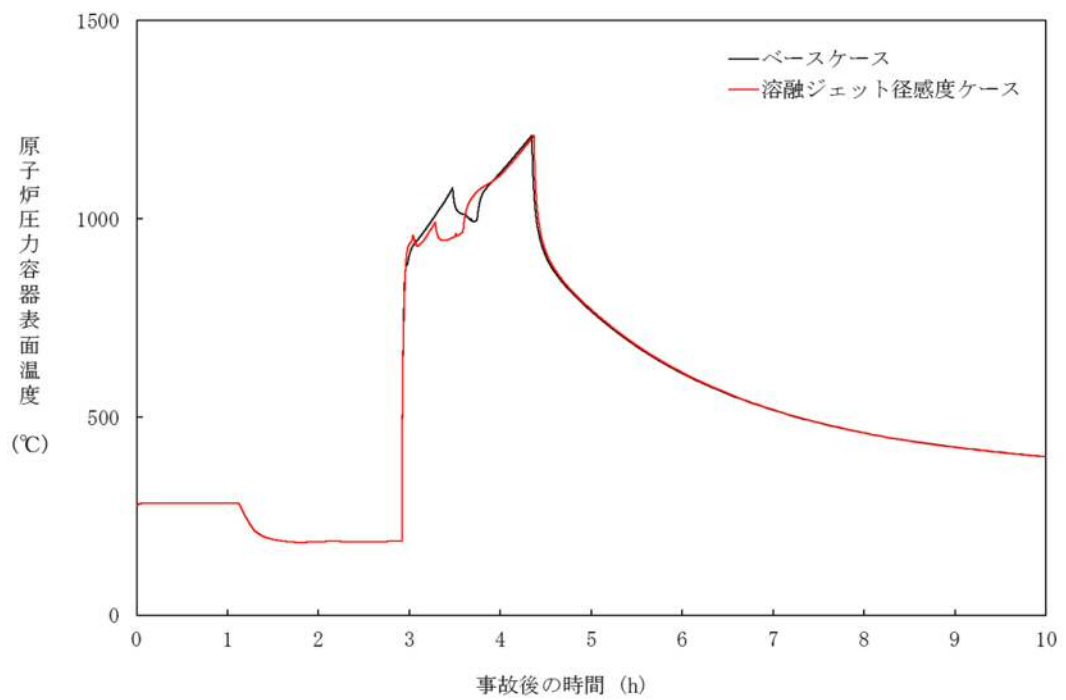


図 4-2-5 溶融ジェット径の感度解析 (5)

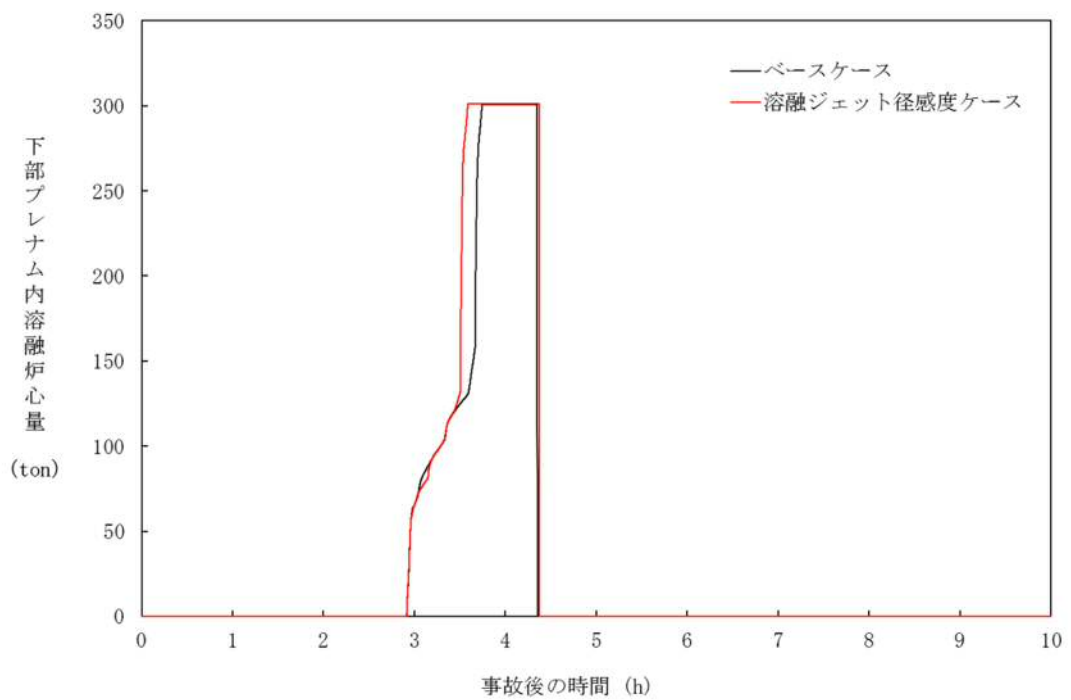


図 4-2-6 溶融ジェット径の感度解析 (6)

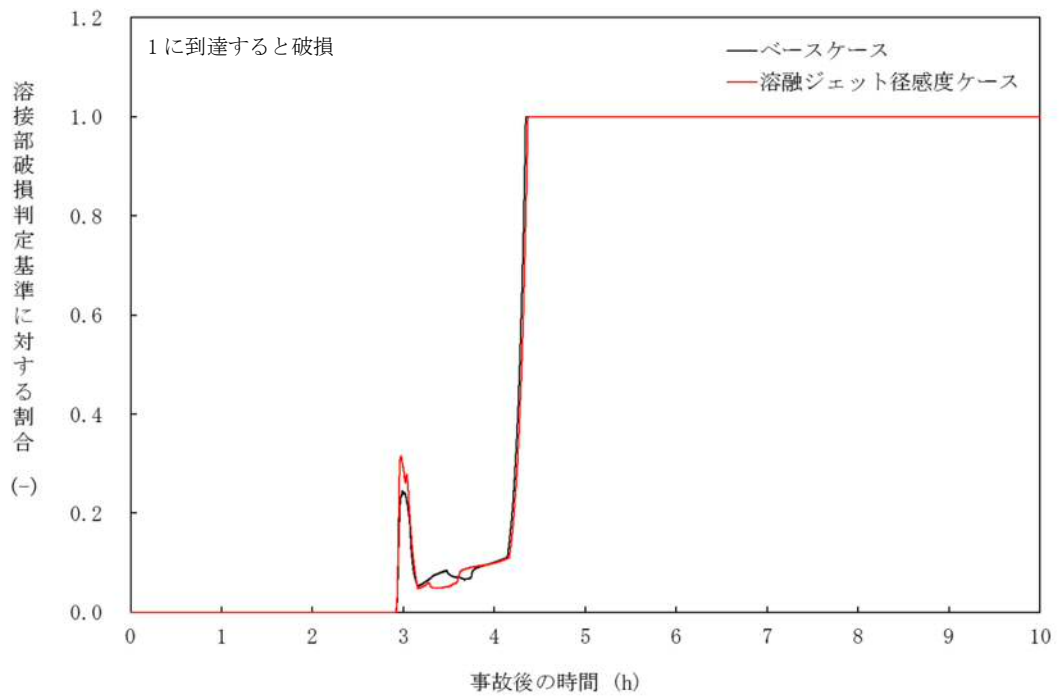


図4-2-7 溶融ジェット径の感度解析(7)

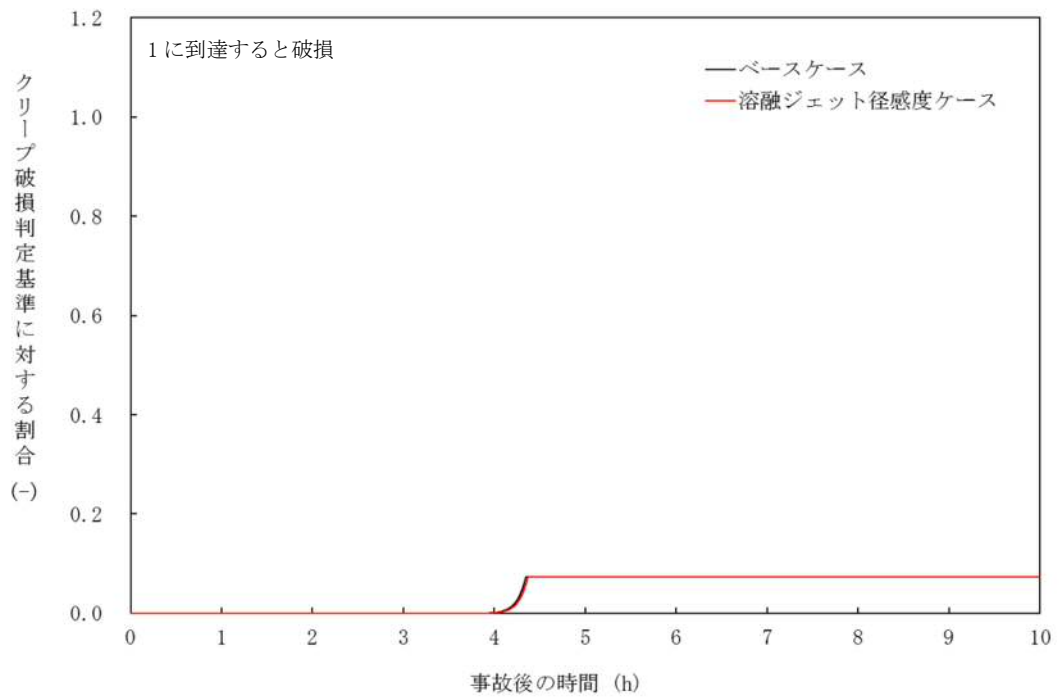


図4-2-8 溶融ジェット径の感度解析(8)

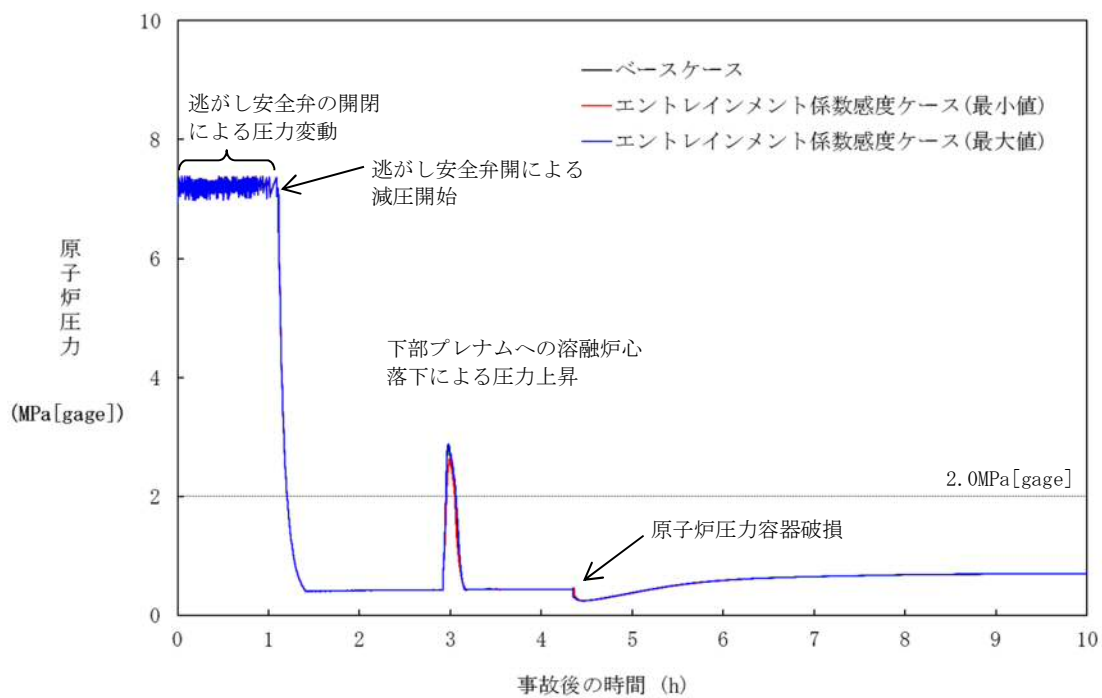


図4-3-1 エントレインメント係数の感度解析(1)

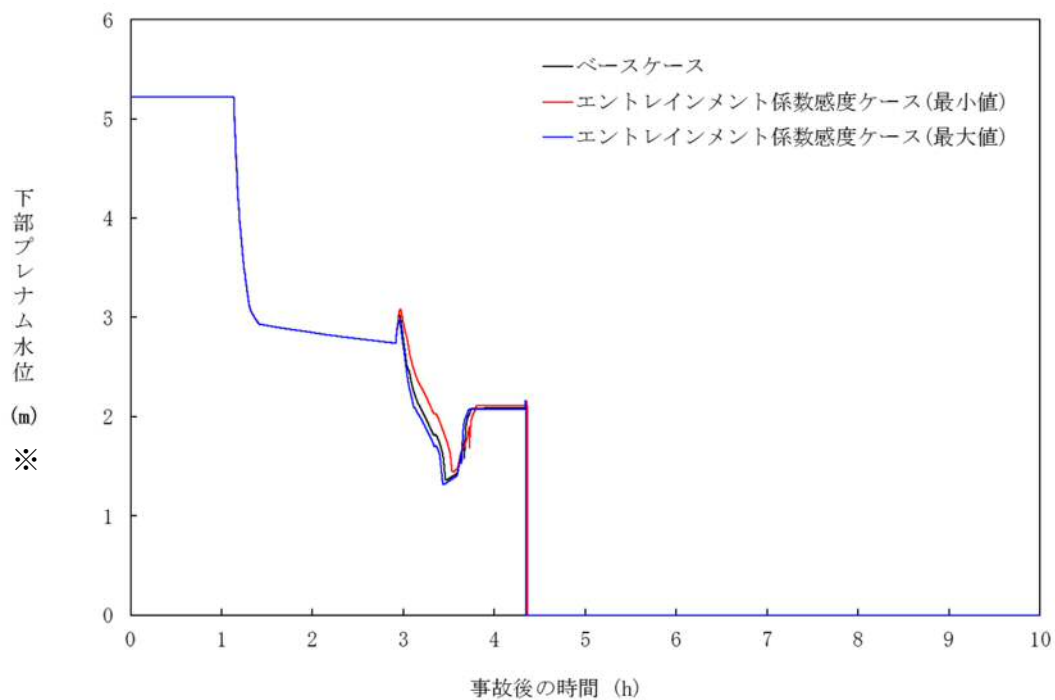


図4-3-2 エントレインメント係数の感度解析(2)  
 ※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

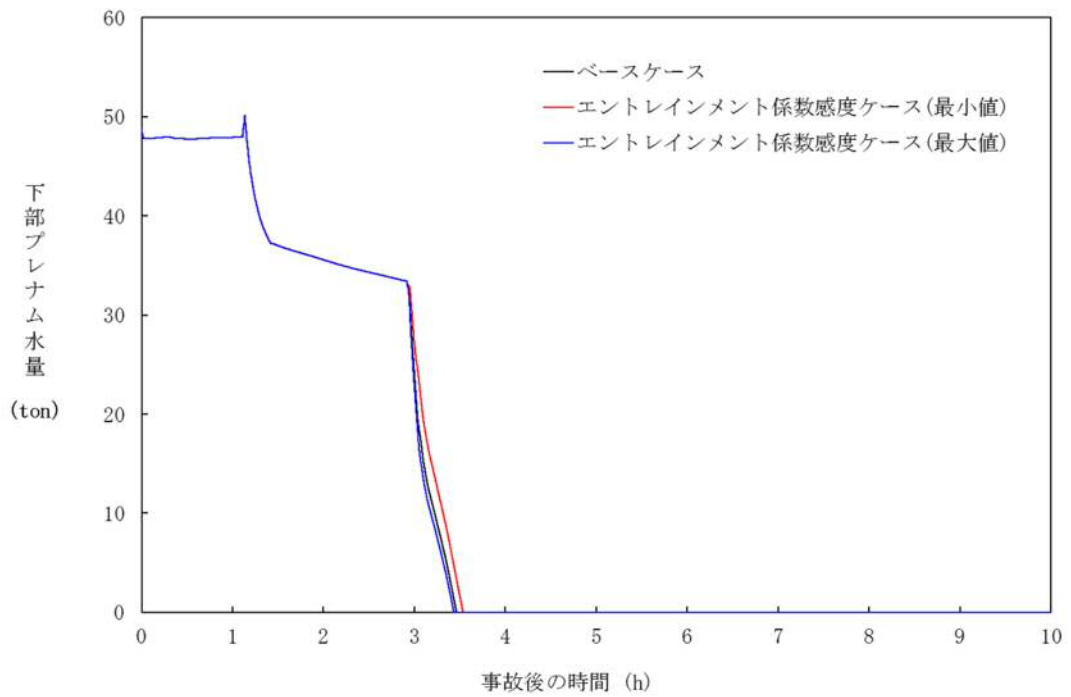


図4-3-3 エントレインメント係数の感度解析 (3)

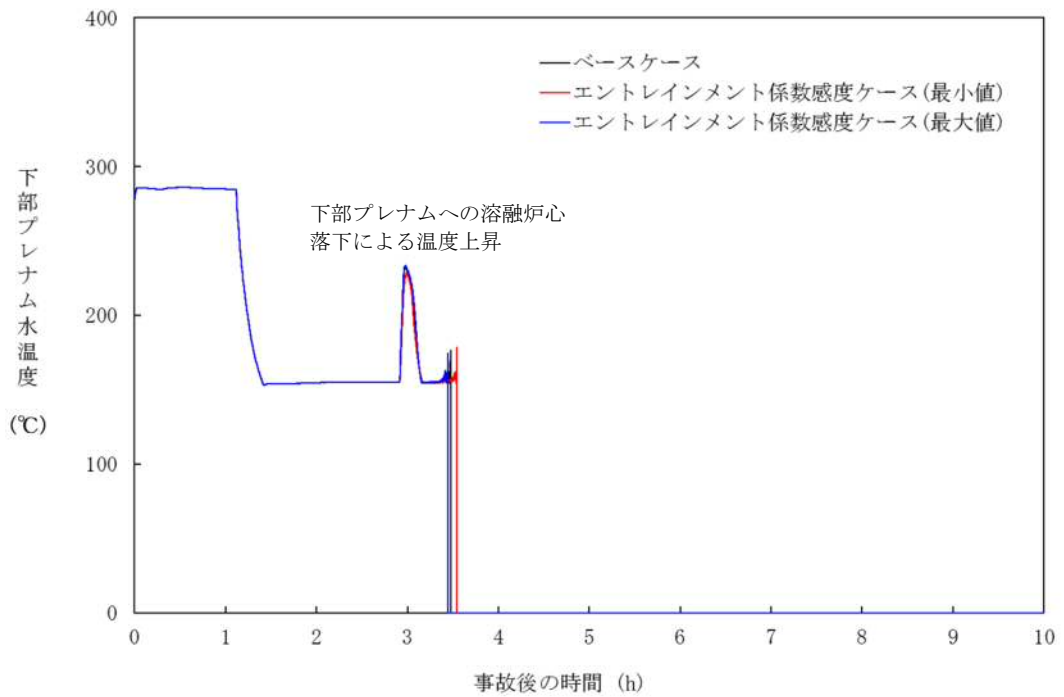


図4-3-4 エントレインメント係数の感度解析 (4)

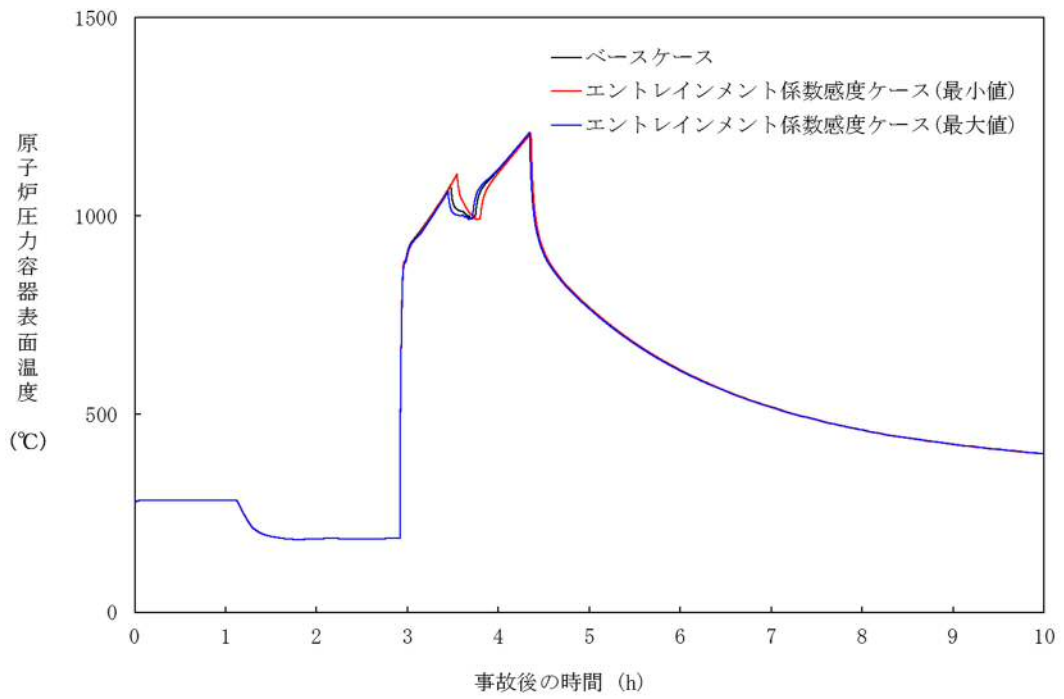


図4-3-5 エントレインメント係数の感度解析 (5)

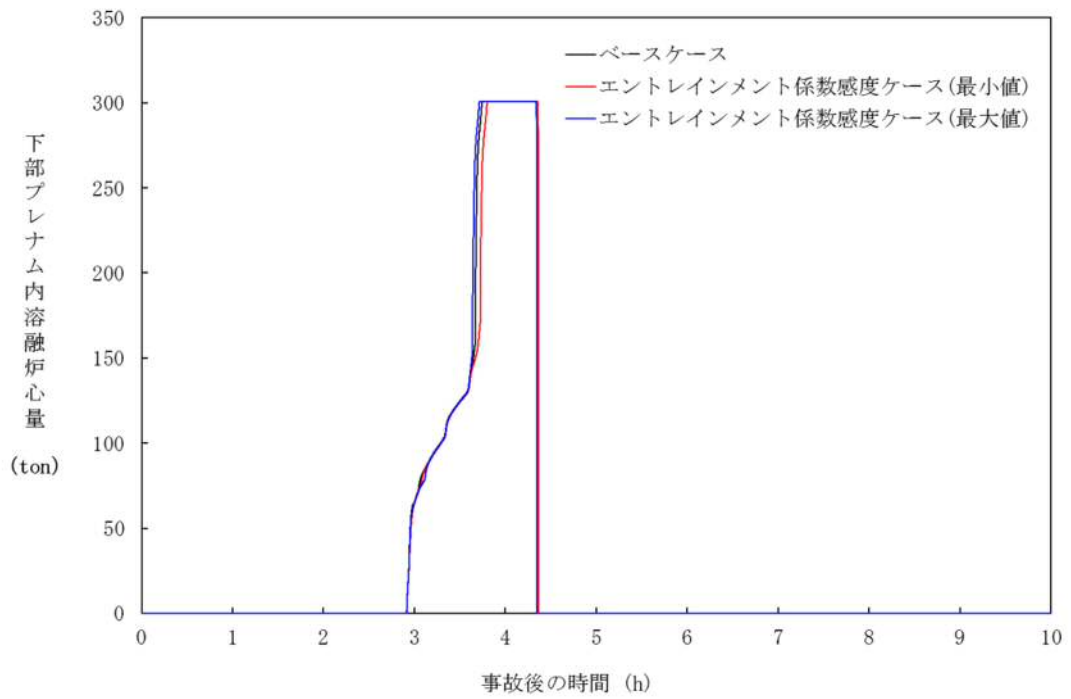


図4-3-6 エントレインメント係数の感度解析 (6)

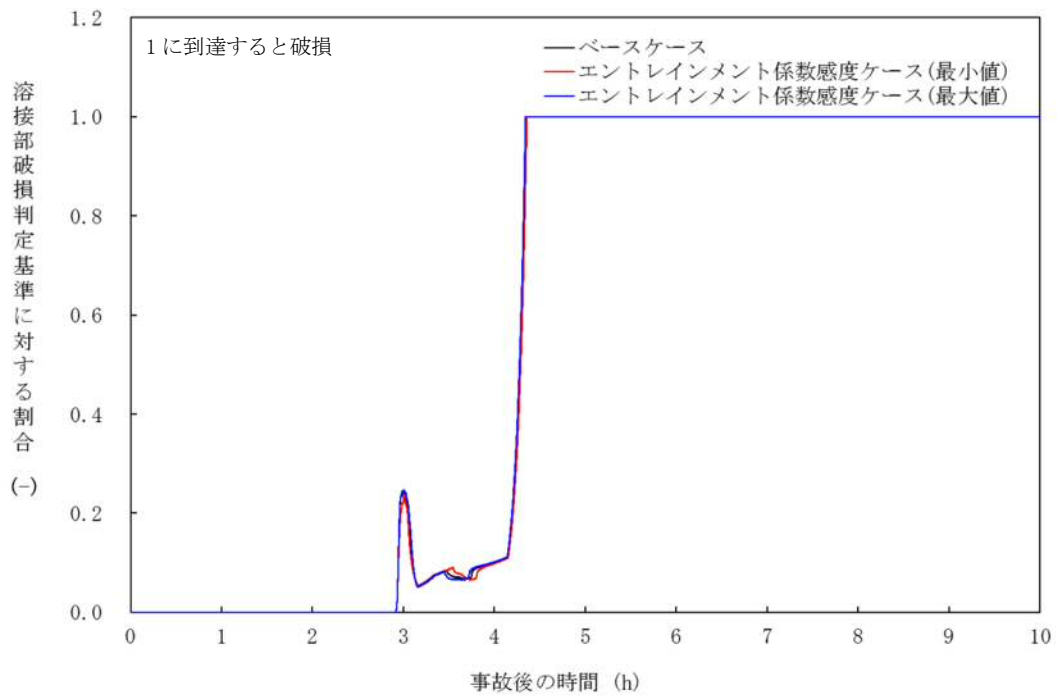


図4-3-7 エントレインメント係数の感度解析(7)

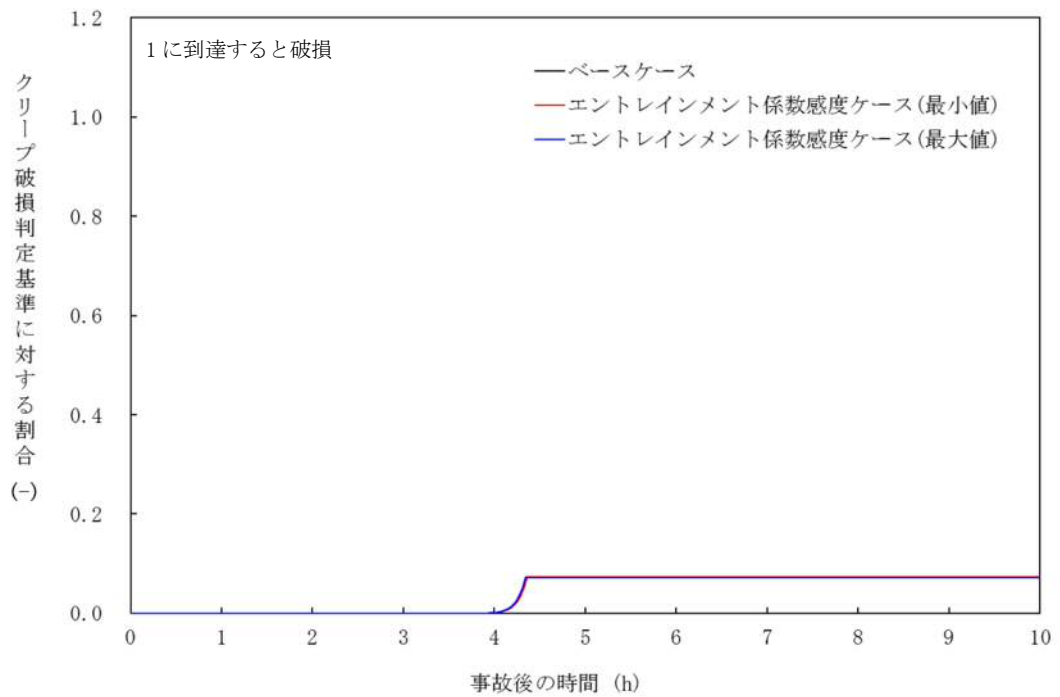


図4-3-8 エントレインメント係数の感度解析(8)



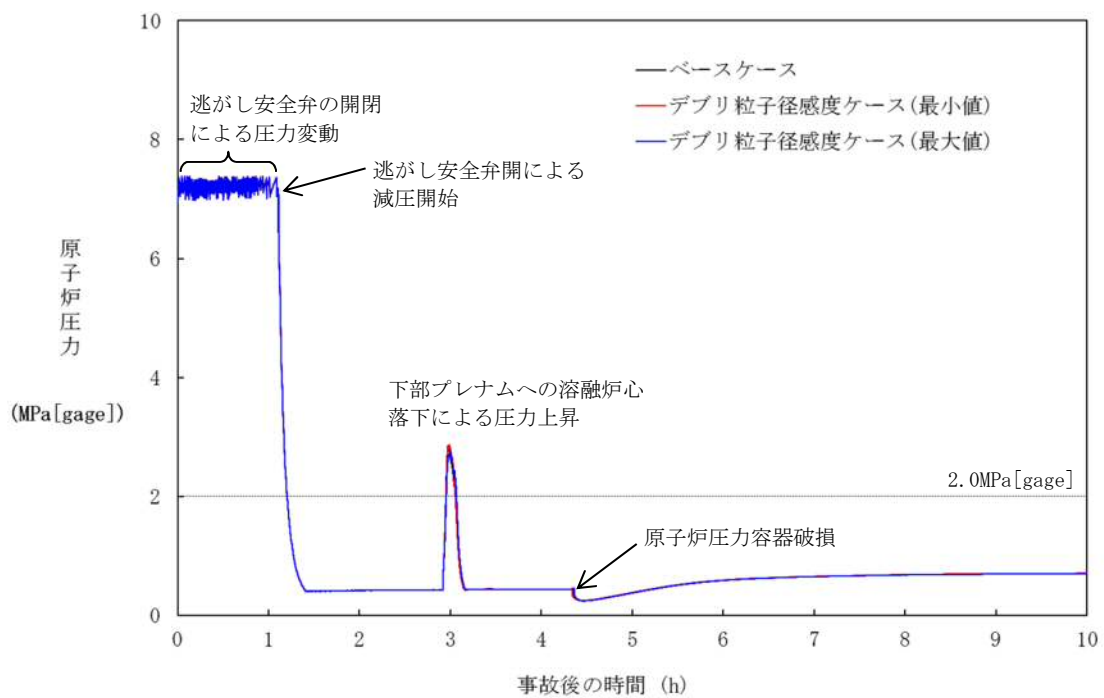


図 4-4-1 デブリ粒子径の感度解析 (1)

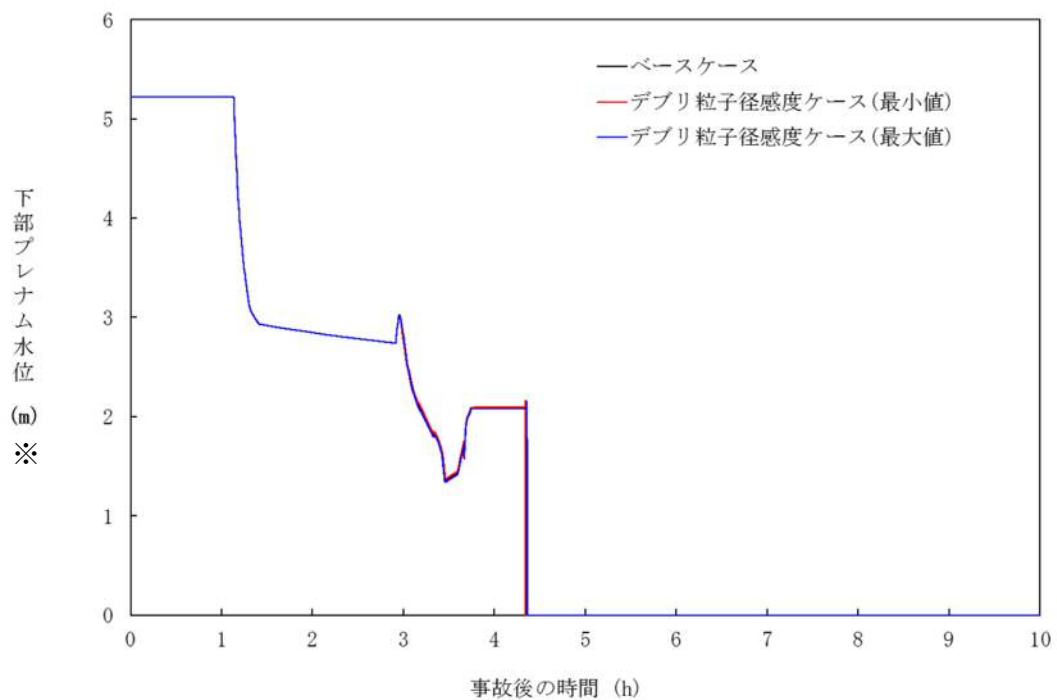


図 4-4-2 デブリ粒子径の感度解析 (2)

※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

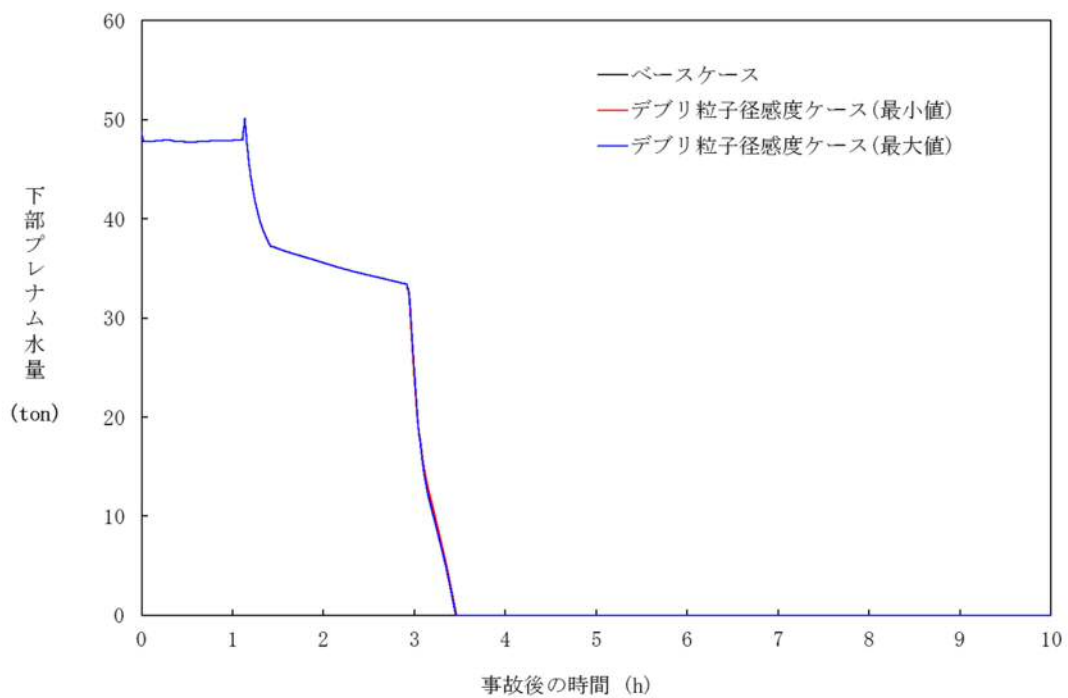


図 4-4-3 デブリ粒子径の感度解析 (3)

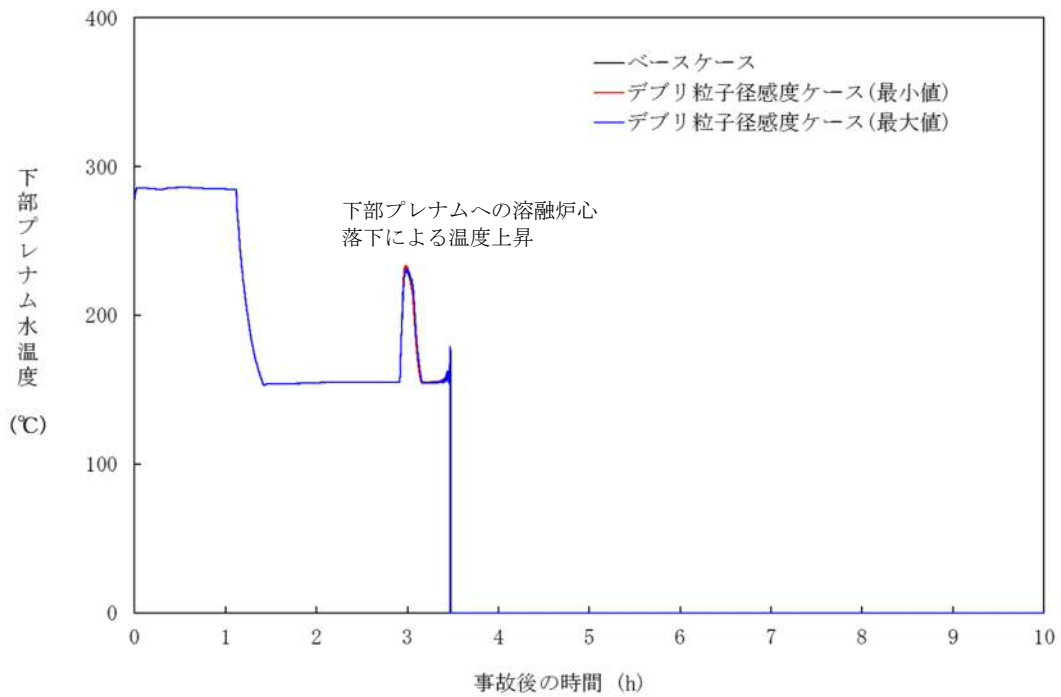


図 4-4-4 デブリ粒子径の感度解析 (4)

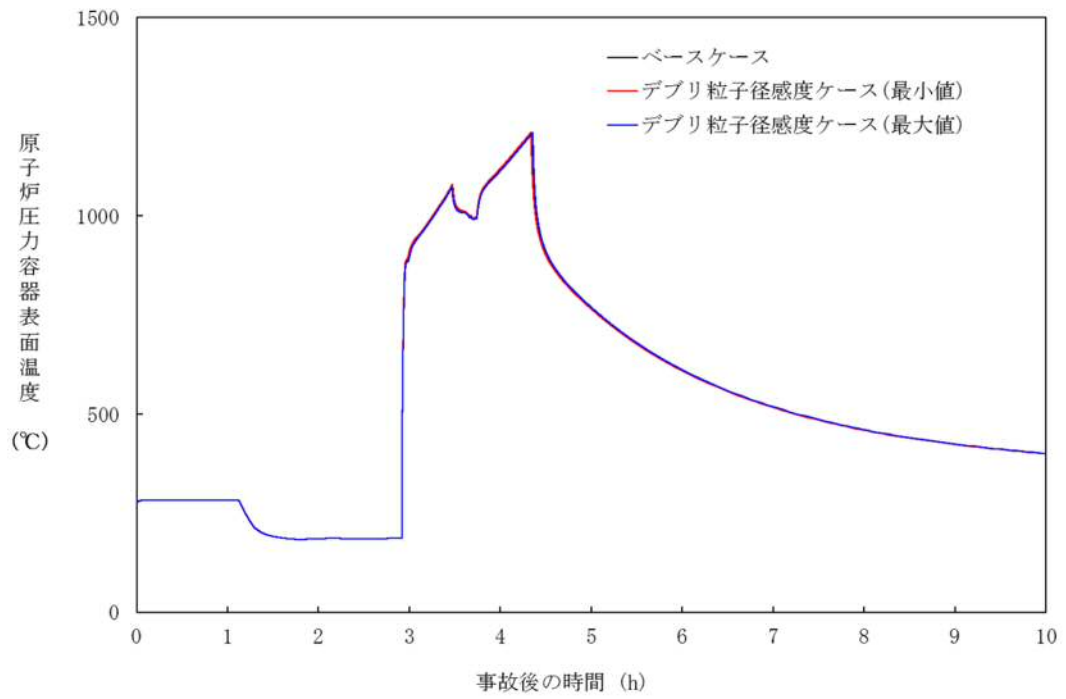


図 4-4-5 デブリ粒子径の感度解析 (5)

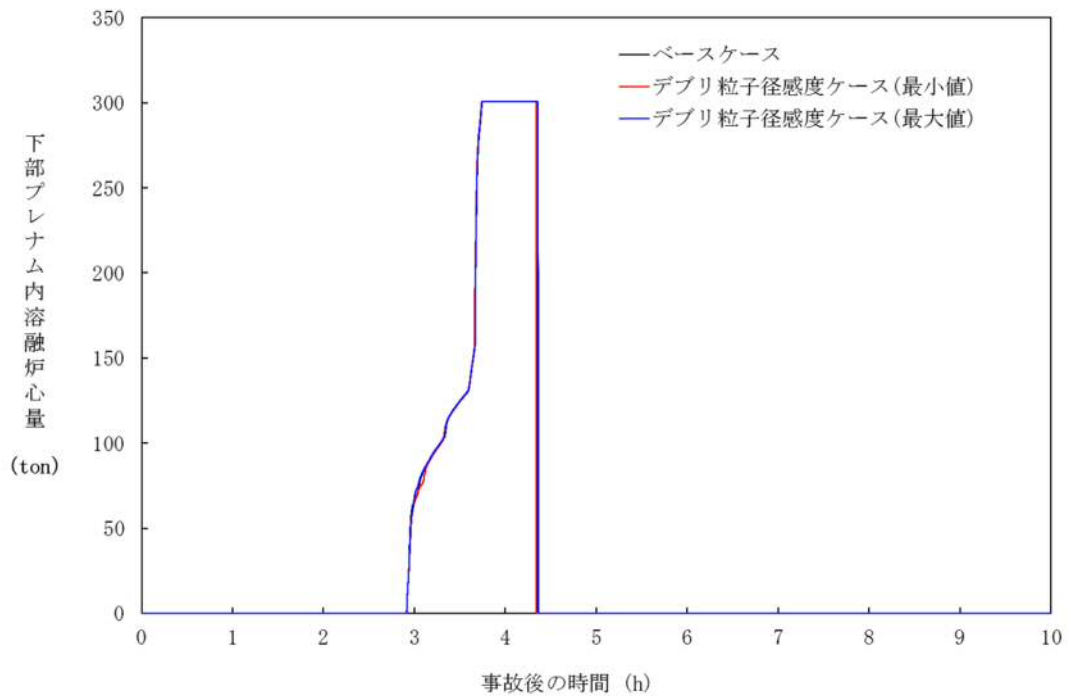


図 4-4-6 デブリ粒子径の感度解析 (6)

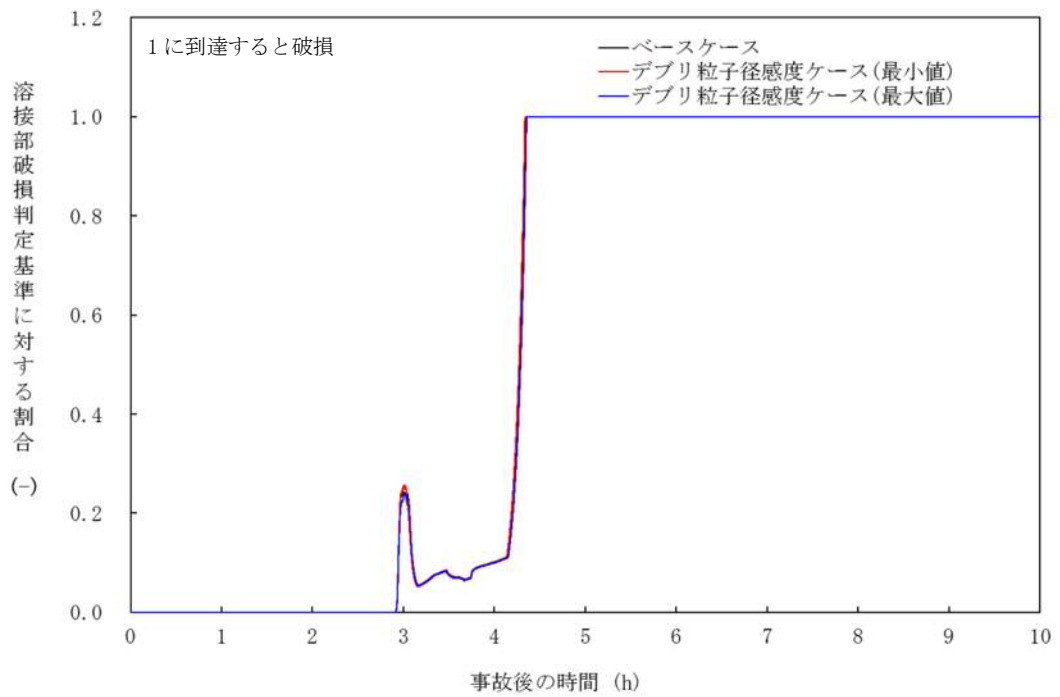


図 4-4-7 デブリ粒子径の感度解析 (7)

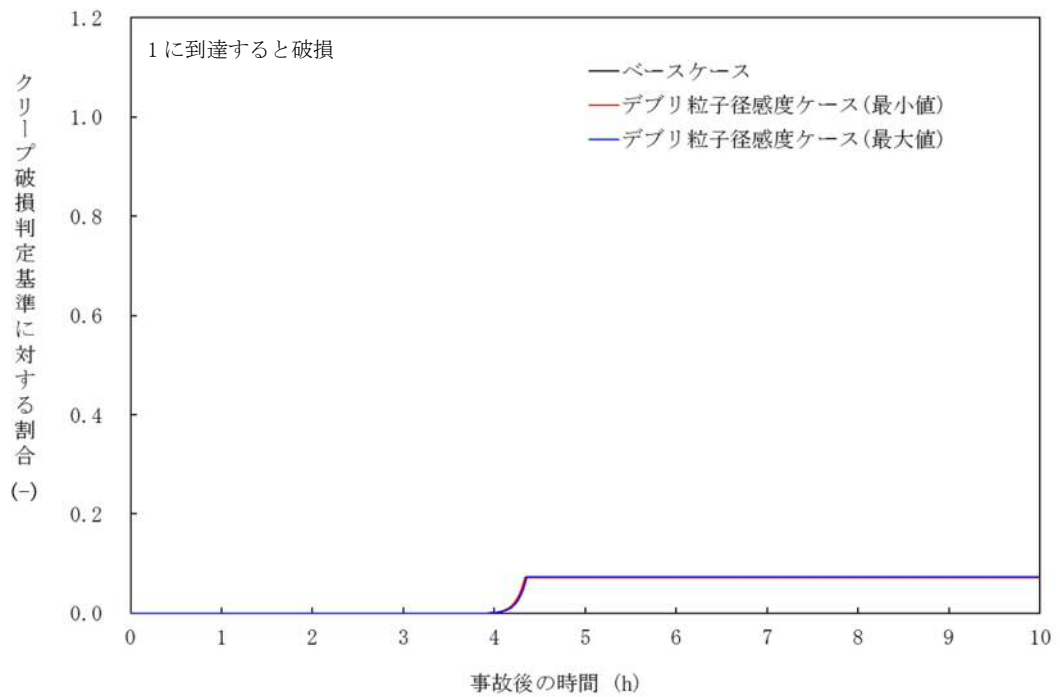


図 4-4-8 デブリ粒子径の感度解析 (8)

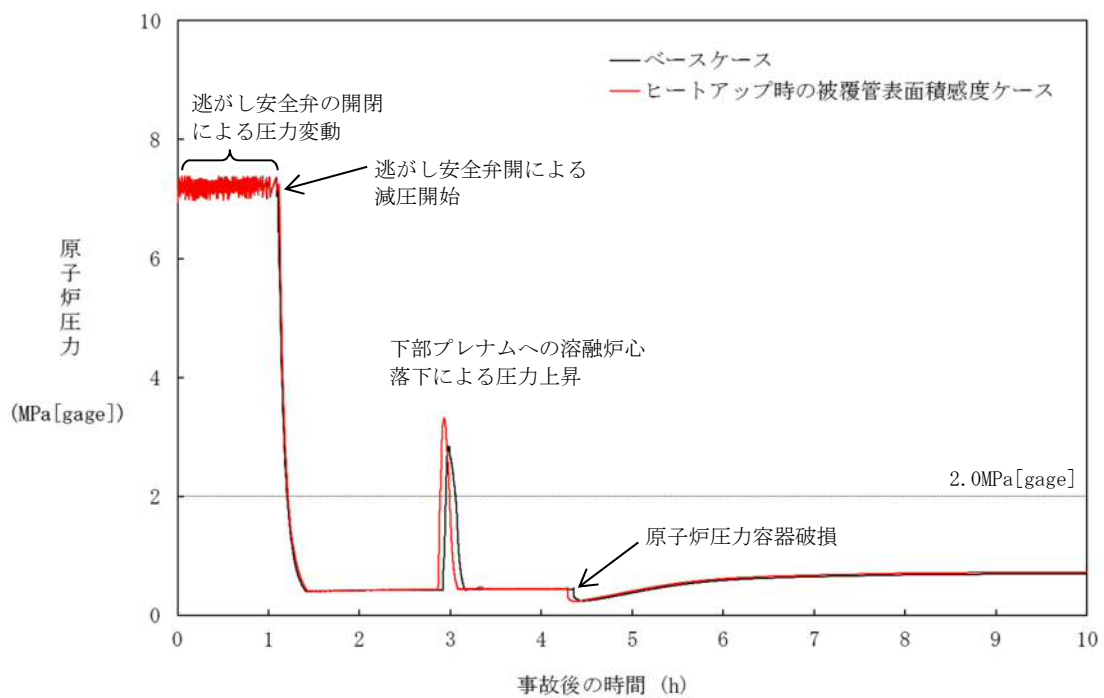


図 4-5-1 ヒートアップ時の被覆管表面積の感度解析 (1)

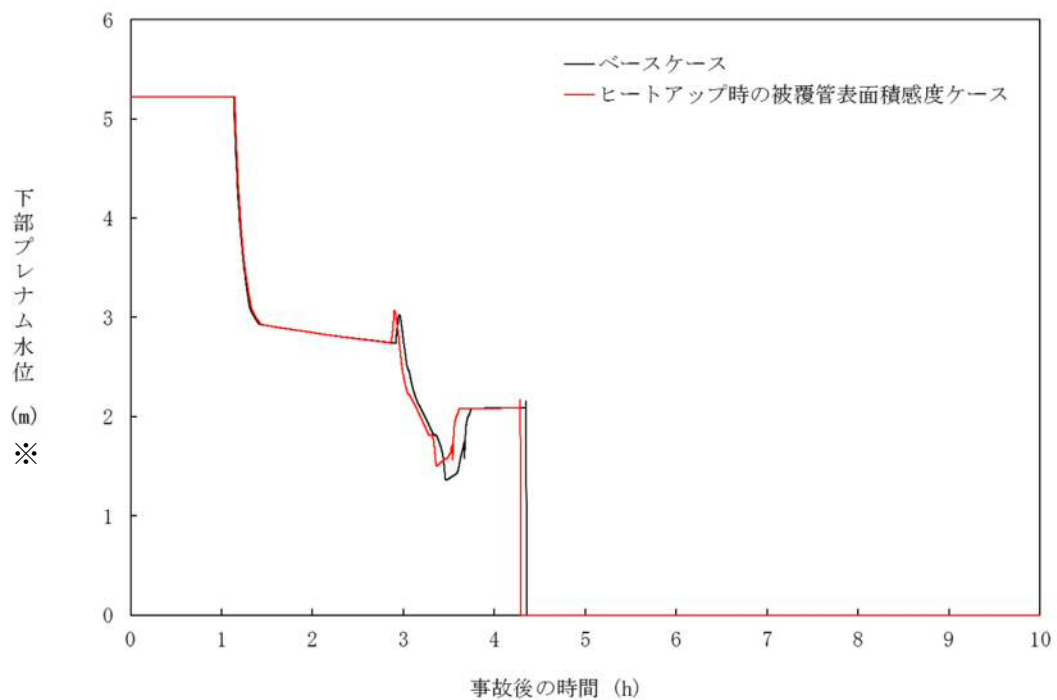


図 4-5-2 ヒートアップ時の被覆管表面積の感度解析 (2)  
 ※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

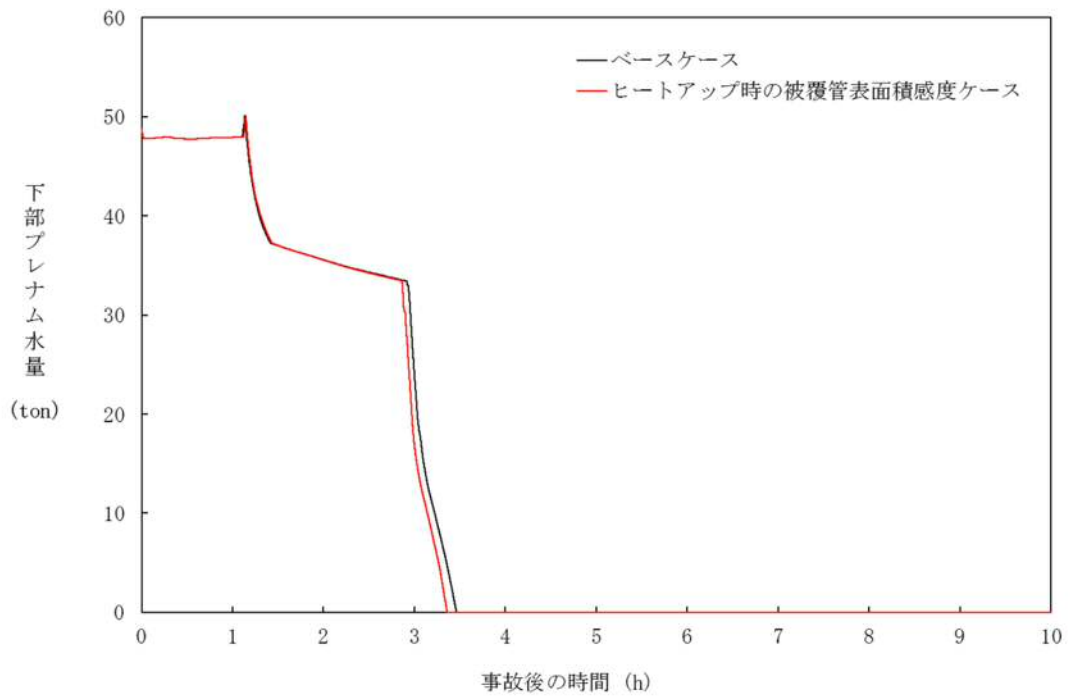


図 4-5-3 ヒートアップ時の被覆管表面積の感度解析 (3)

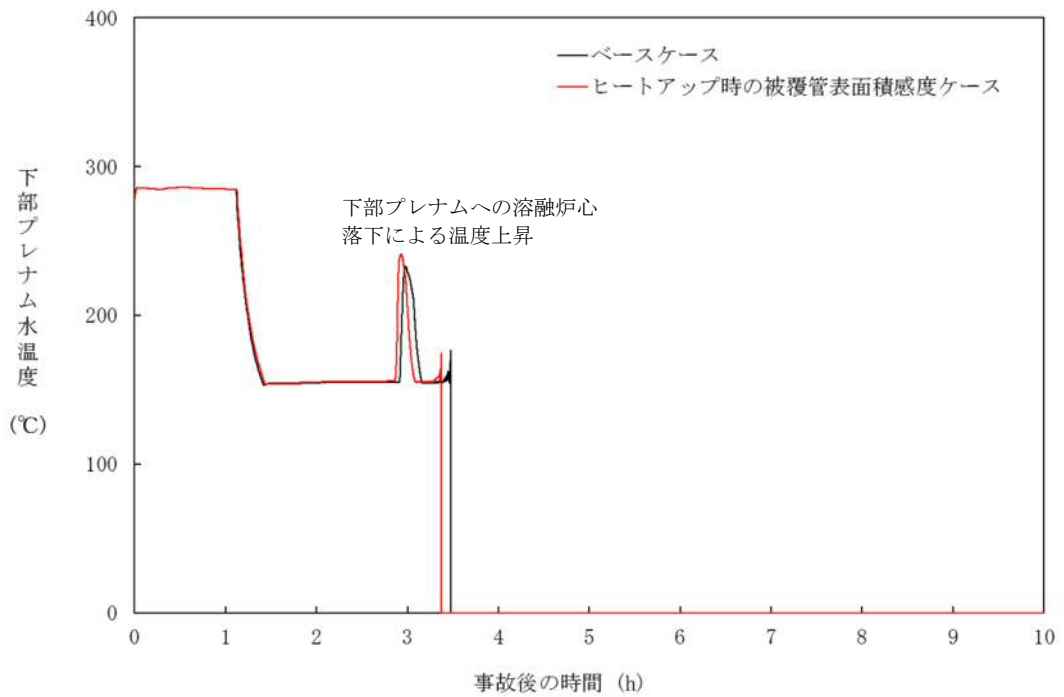


図 4-5-4 ヒートアップ時の被覆管表面積の感度解析 (4)

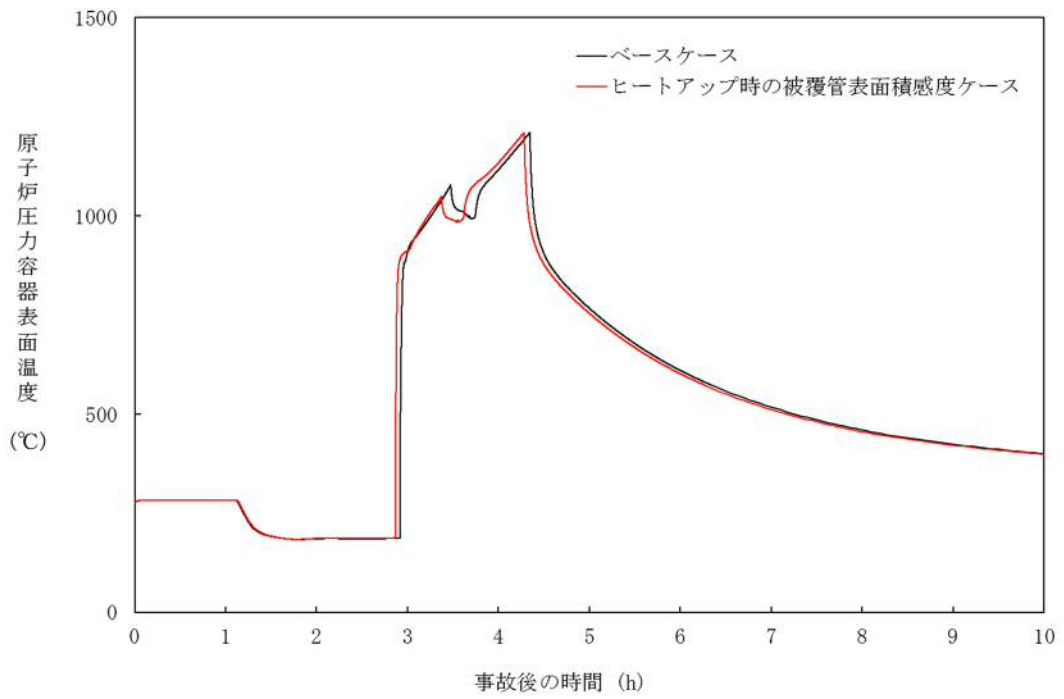


図 4-5-5 ヒートアップ時の被覆管表面積の感度解析 (5)

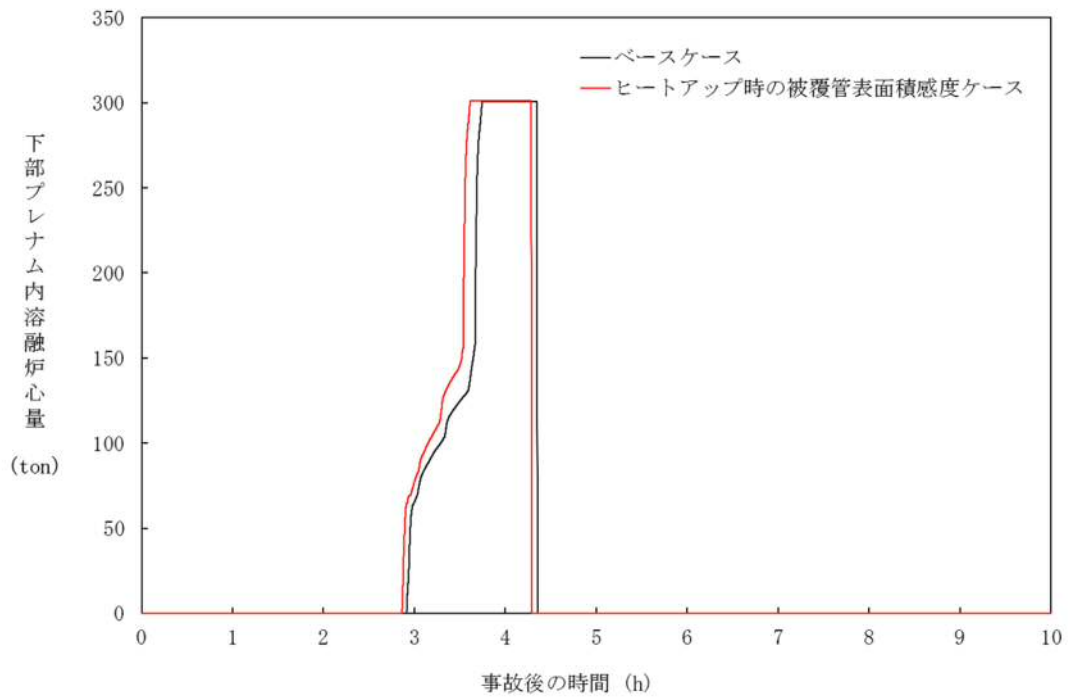


図 4-5-6 ヒートアップ時の被覆管表面積の感度解析 (6)

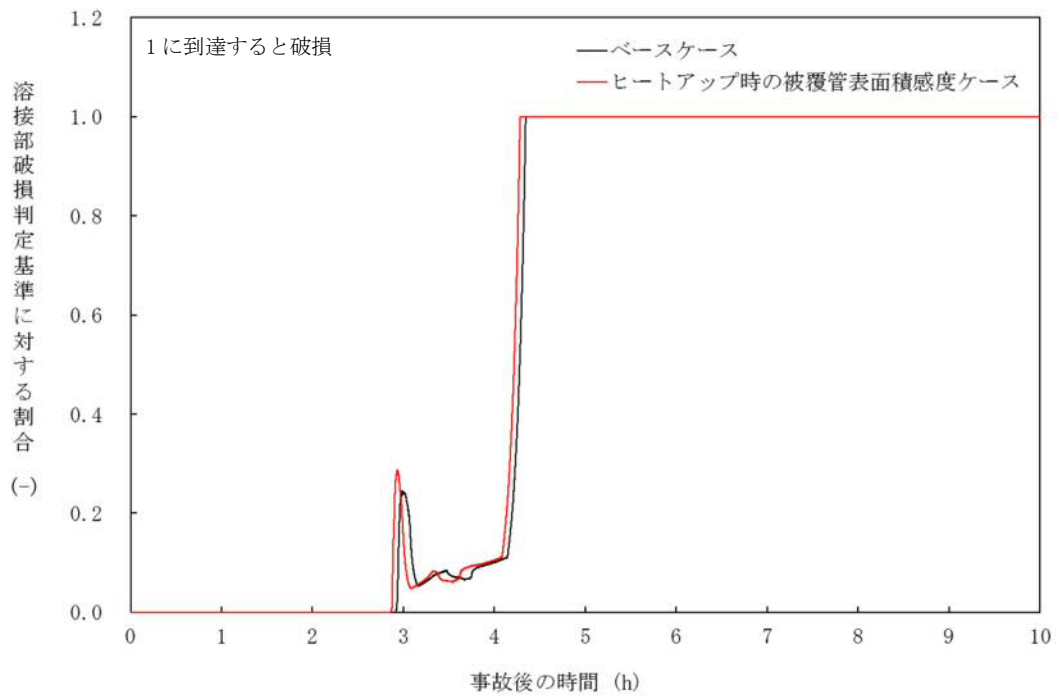


図 4-5-7 ヒートアップ時の被覆管表面積の感度解析 (7)

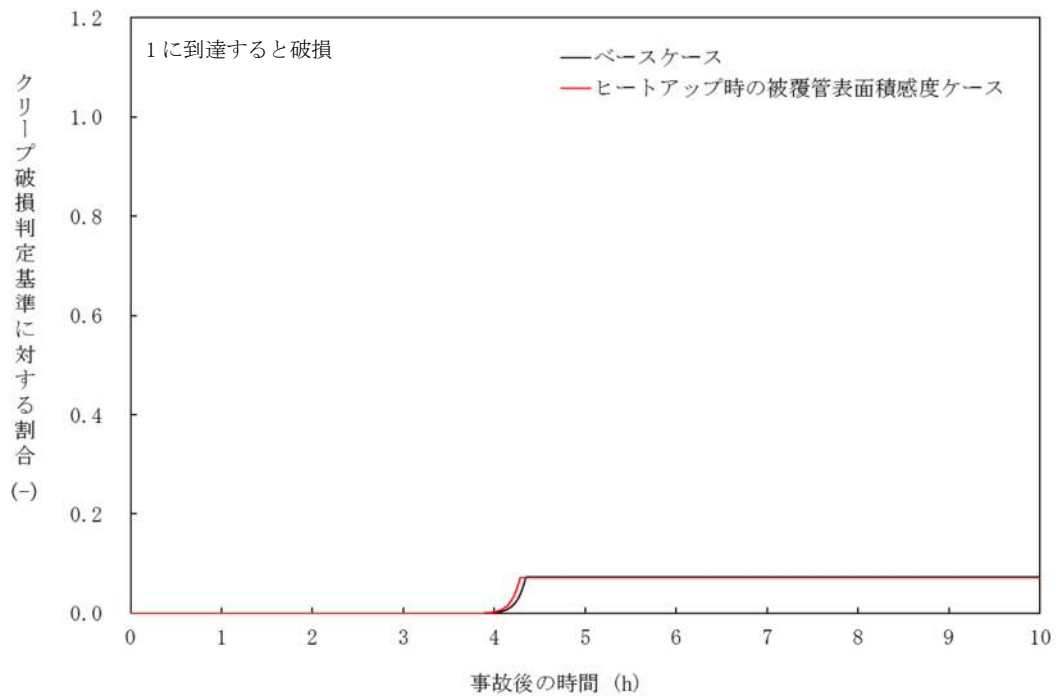


図 4-5-8 ヒートアップ時の被覆管表面積の感度解析 (8)



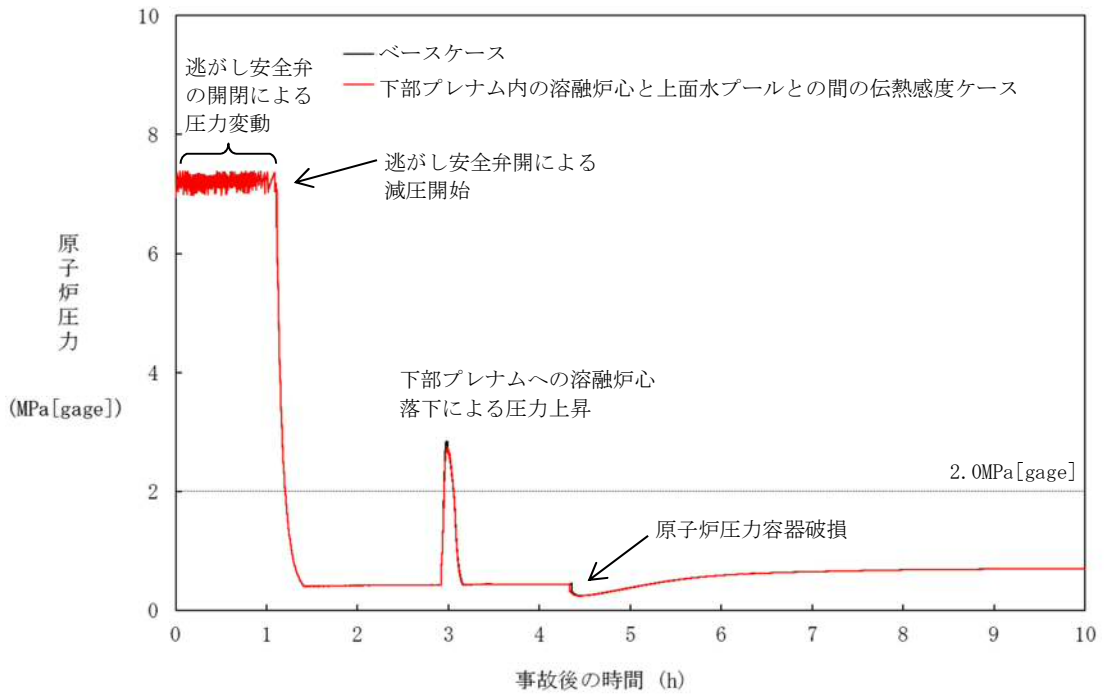


図 4-6-1 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (1)

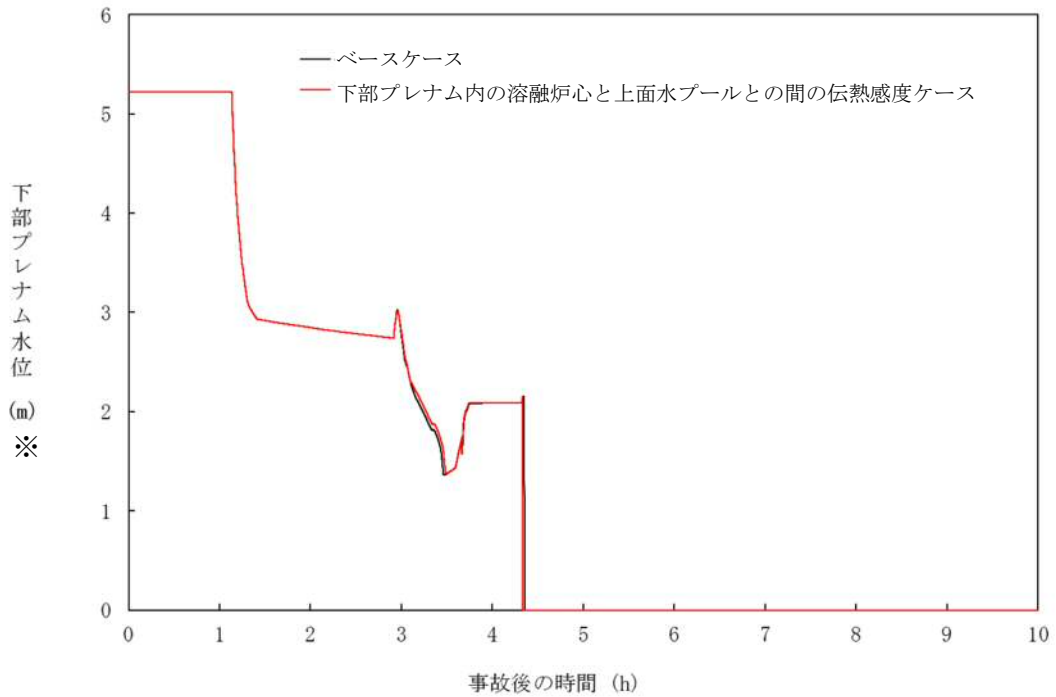


図 4-6-2 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (2)  
 ※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

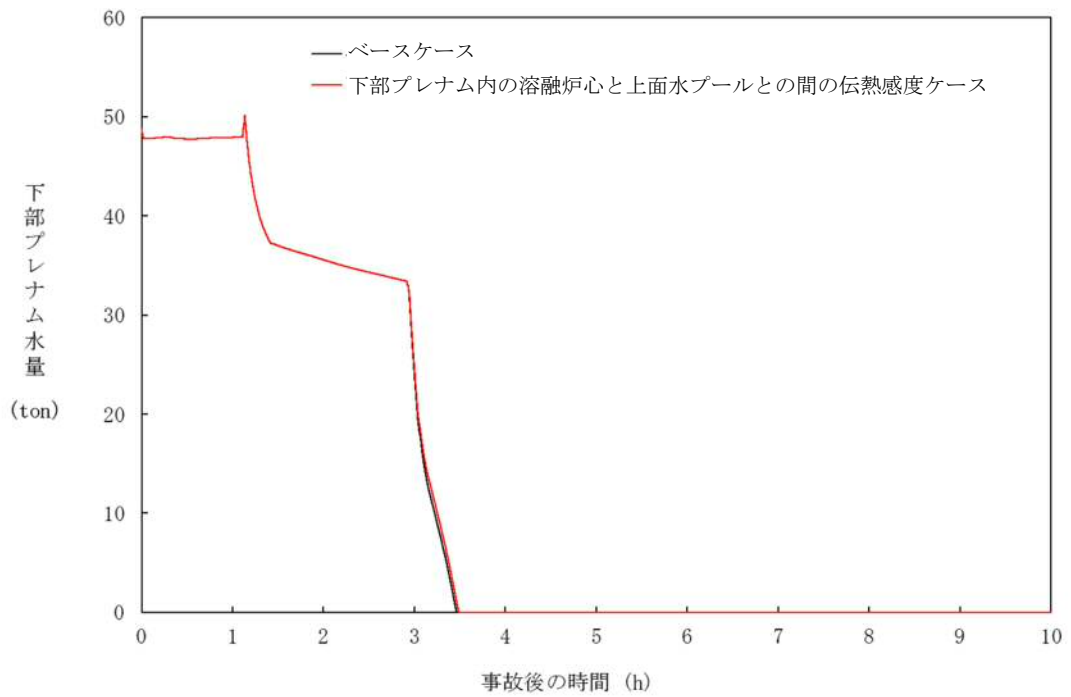


図 4-6-3 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (3)

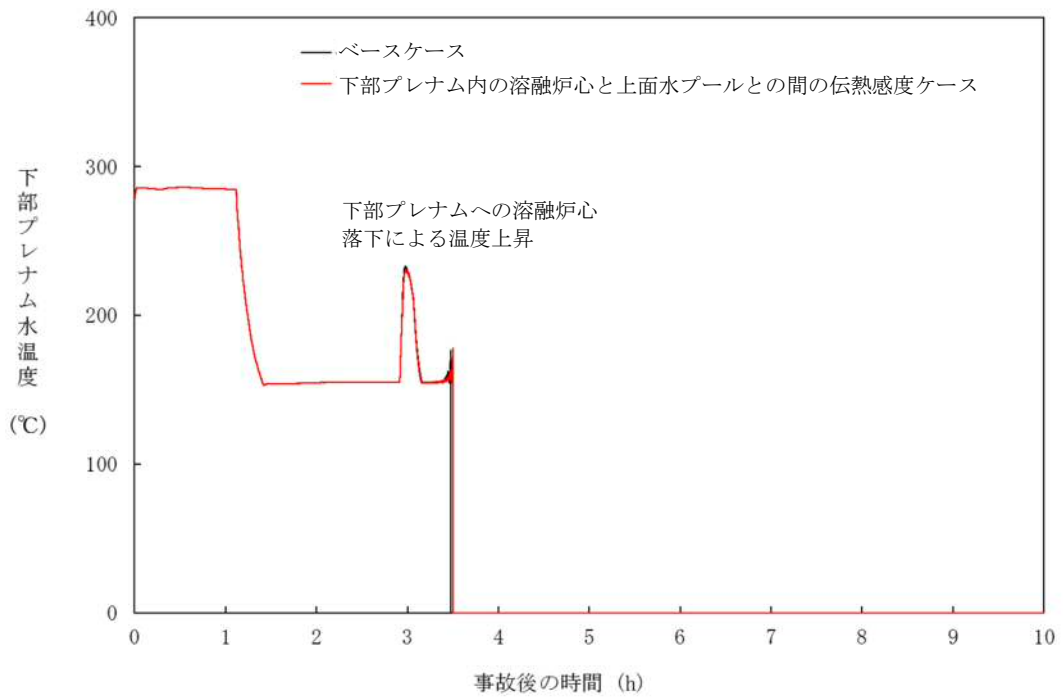


図 4-6-4 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (4)

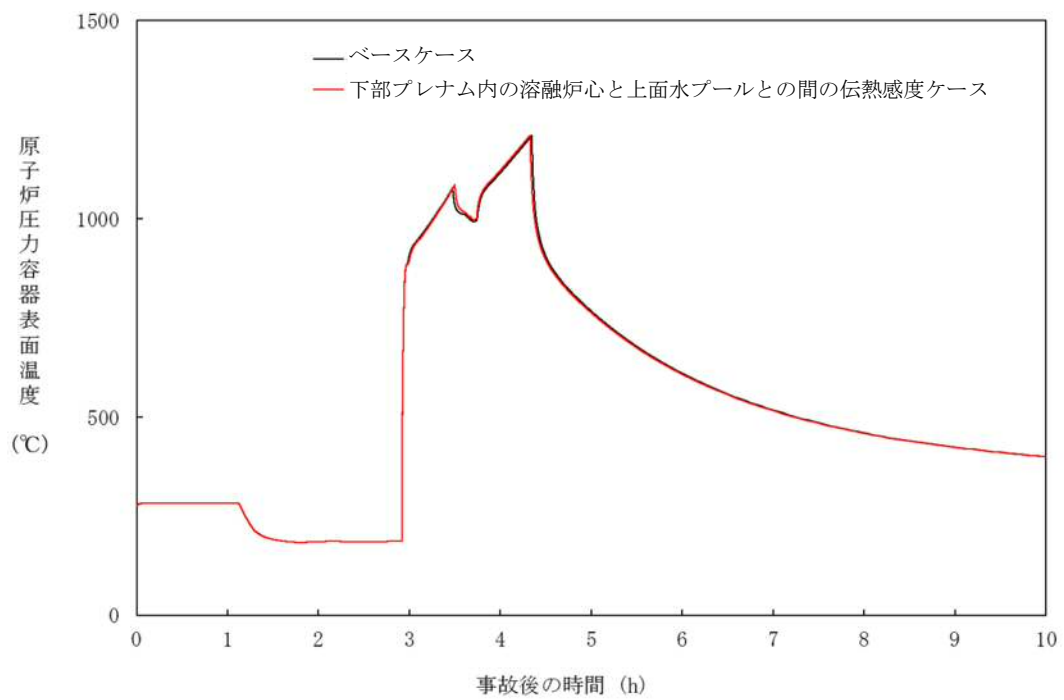


図 4-6-5 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (5)

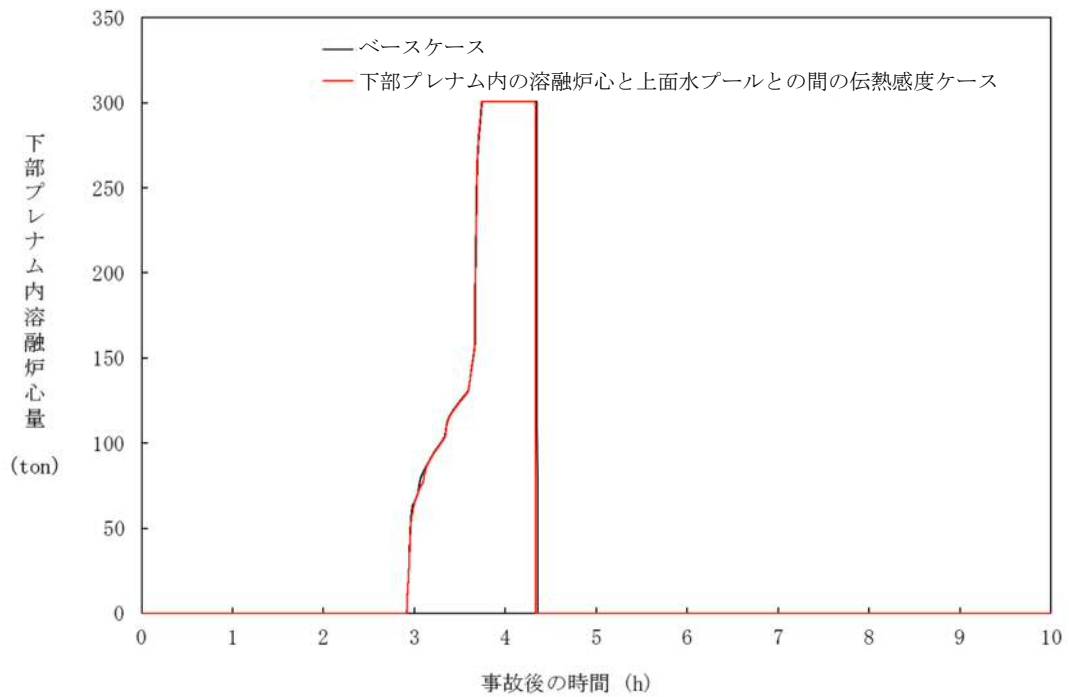


図 4-6-6 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (6)

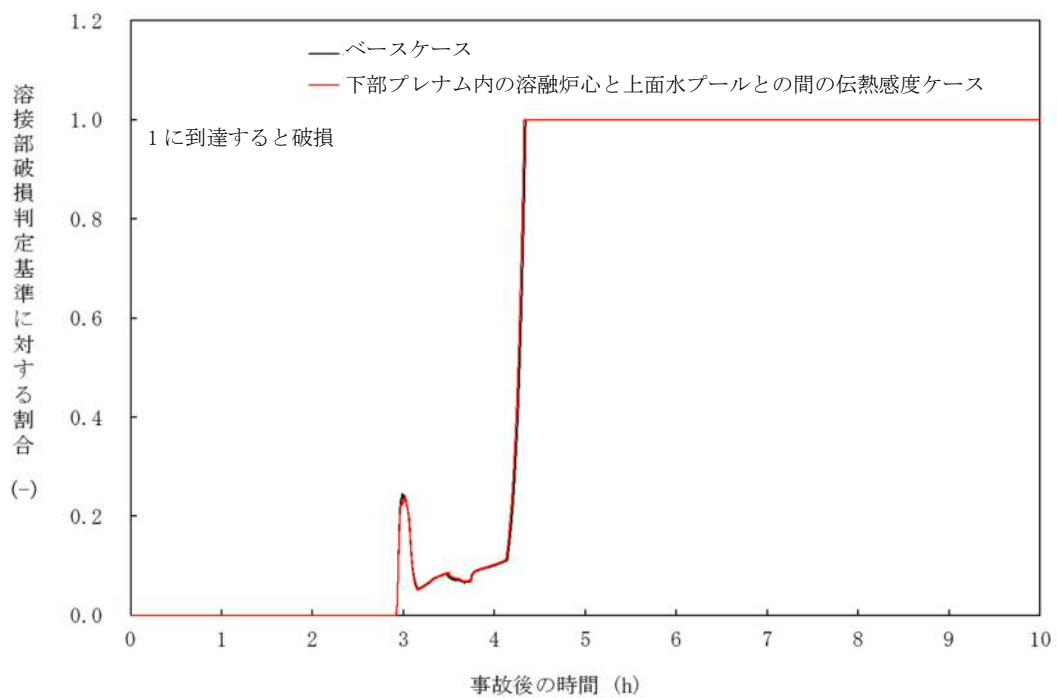


図 4-6-7 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (7)

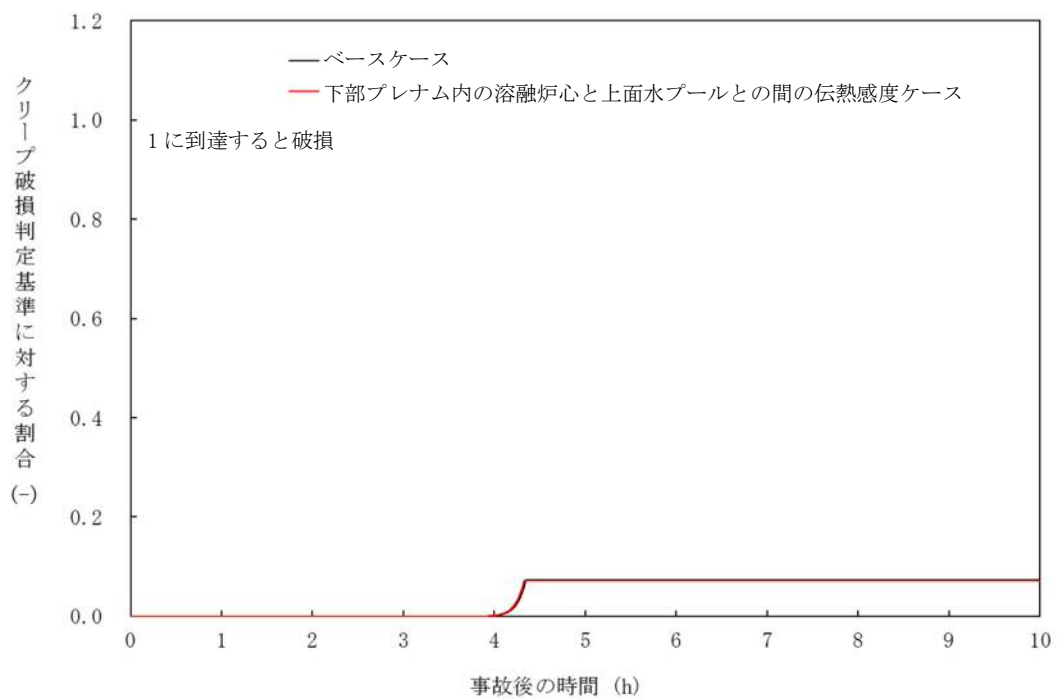


図 4-6-8 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (8)

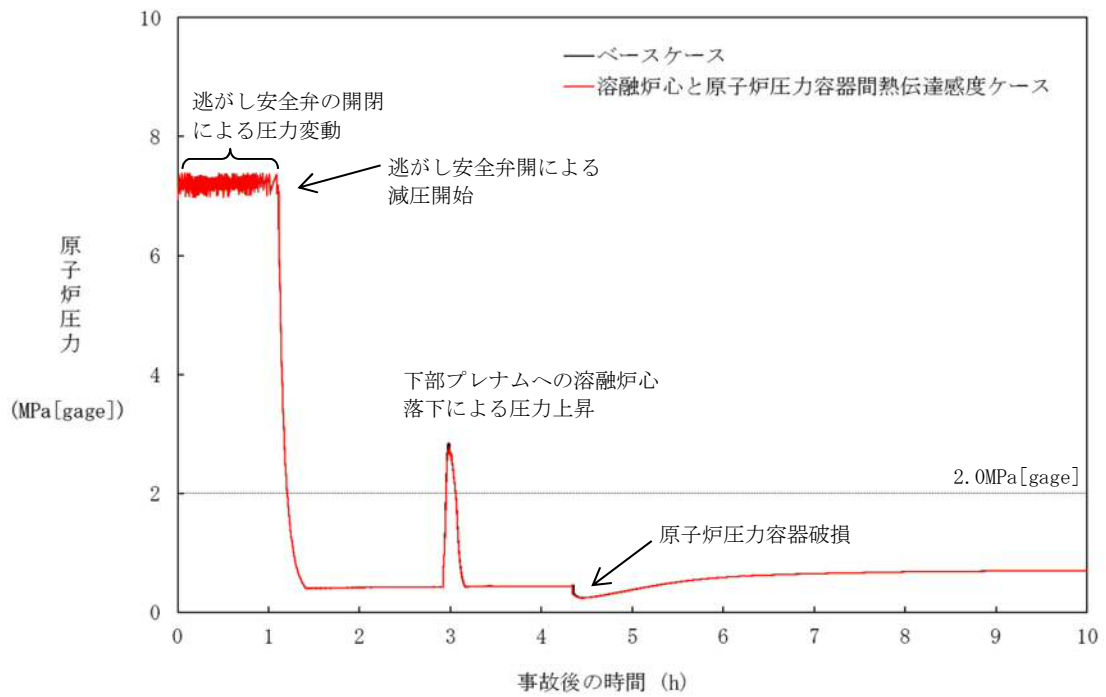


図 4-7-1 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (1)

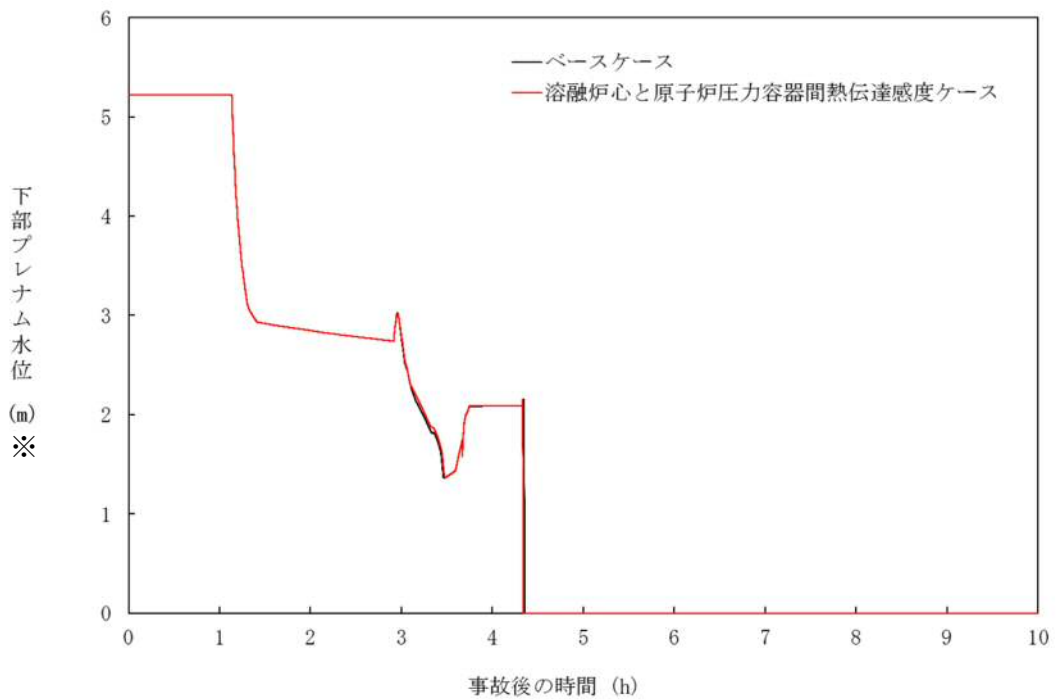


図 4-7-2 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (2)

※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

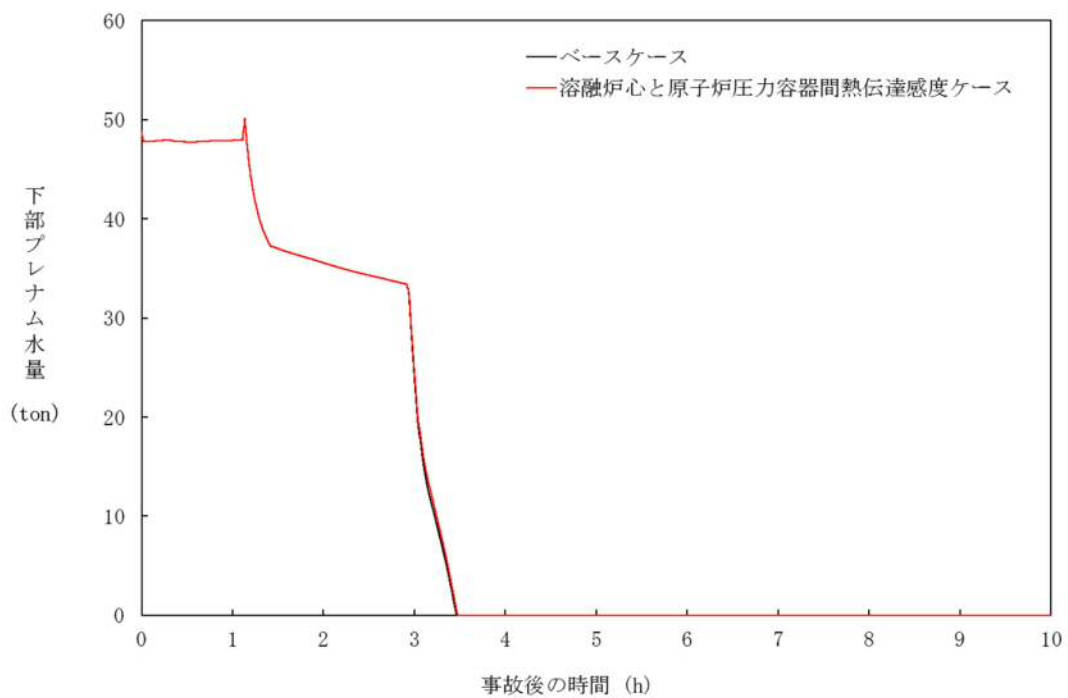


図 4-7-3 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (3)

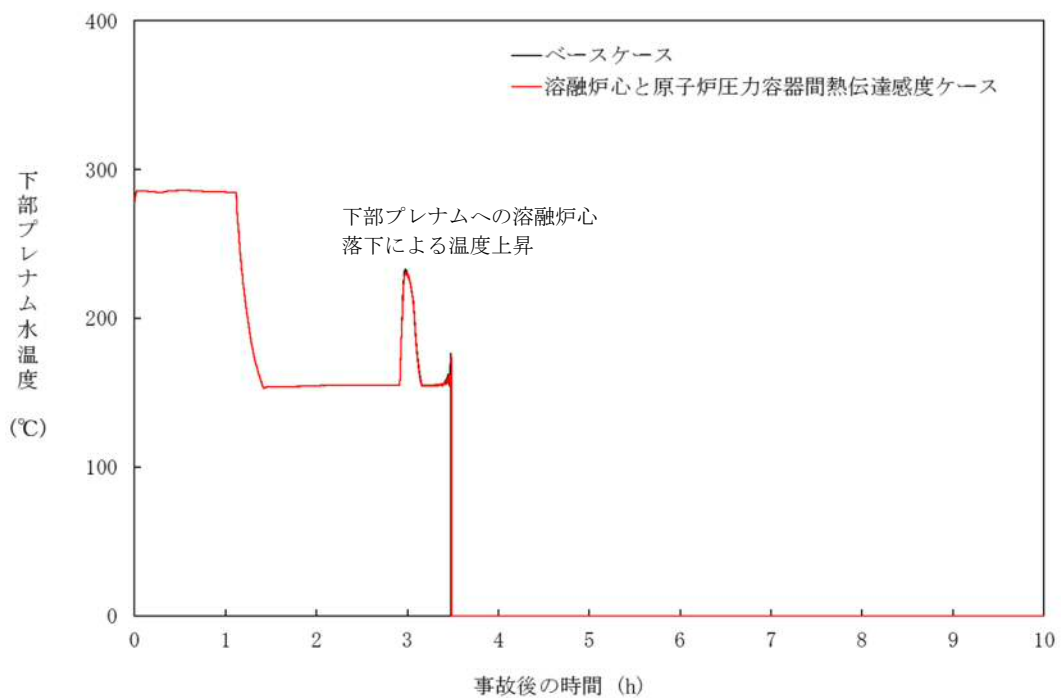


図 4-7-4 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (4)

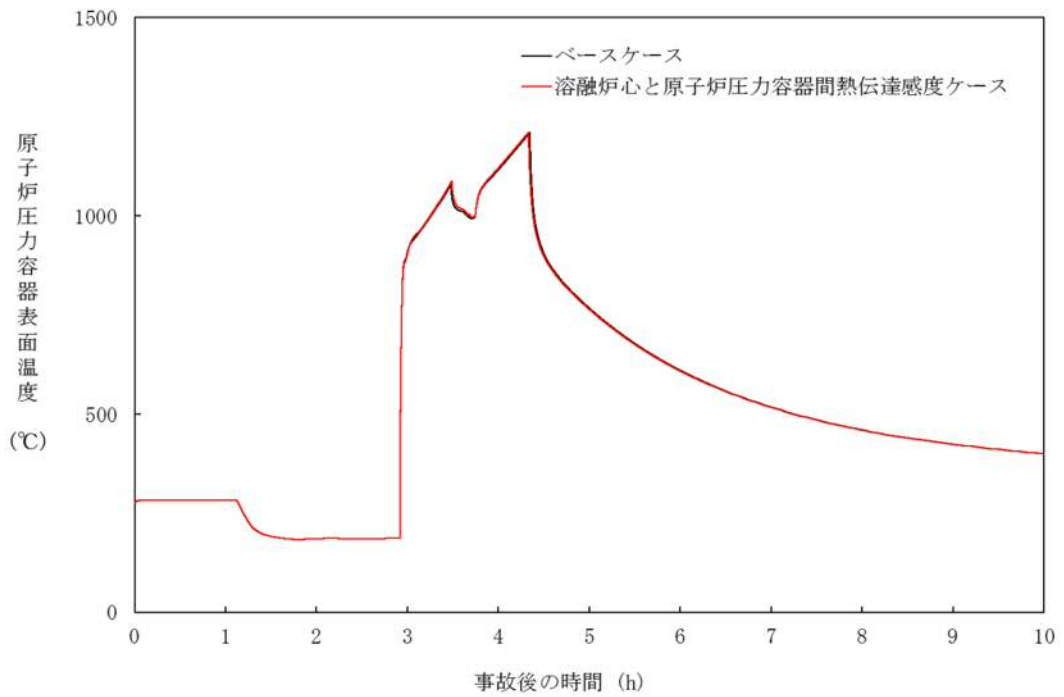


図 4-7-5 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (5)

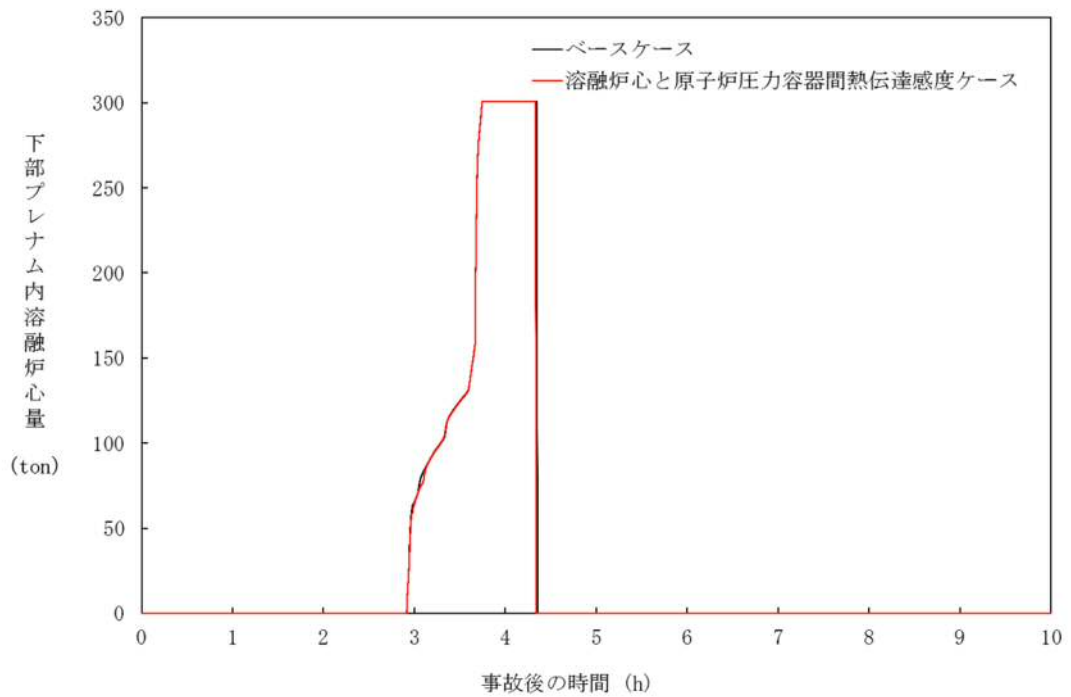


図 4-7-6 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (6)

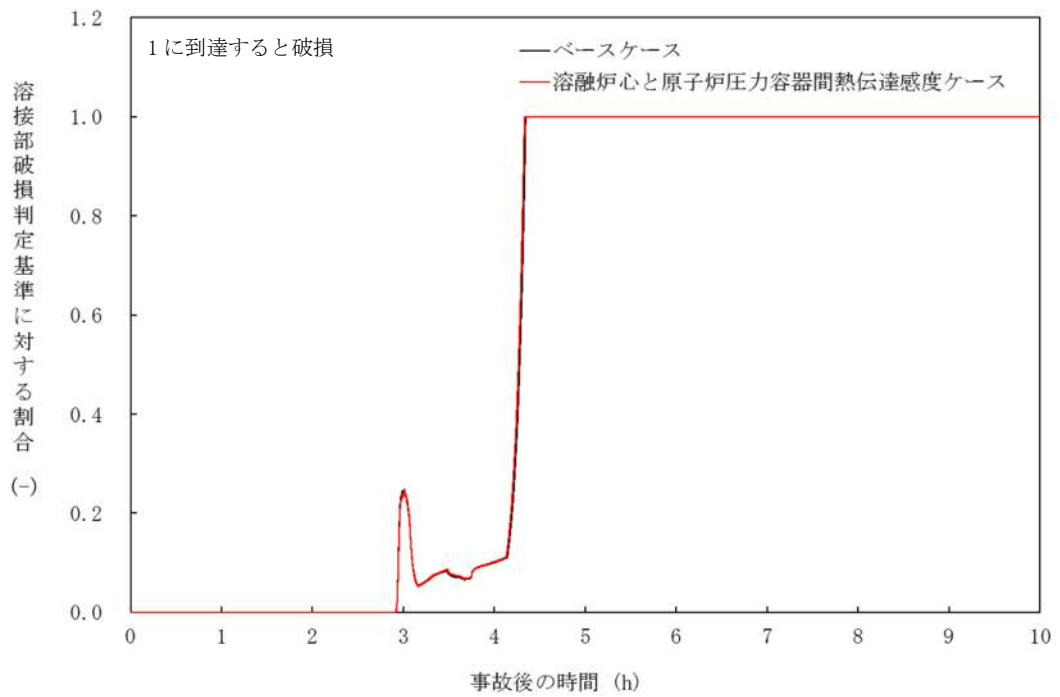


図 4-7-7 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (7)

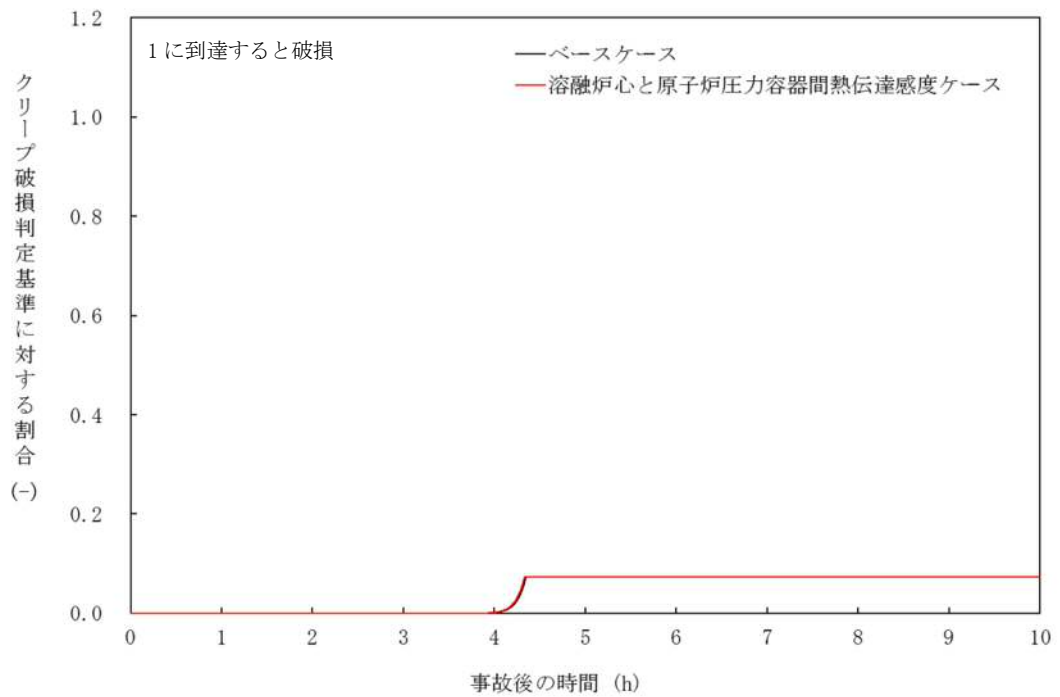


図 4-7-8 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (8)



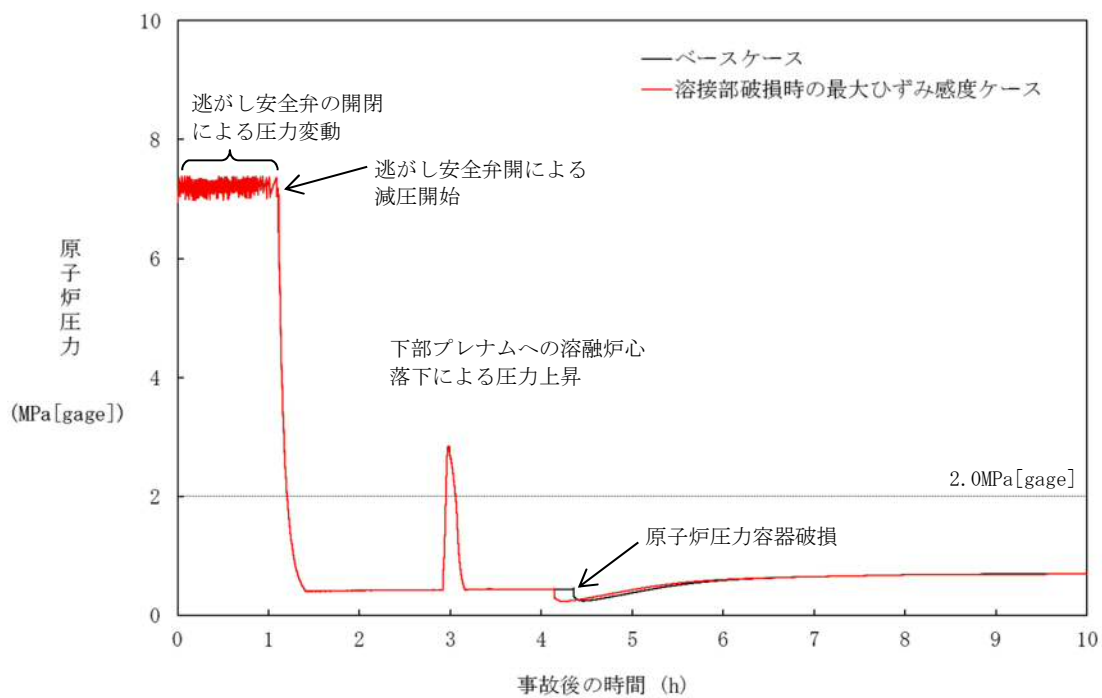


図 4-8-1 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (1)

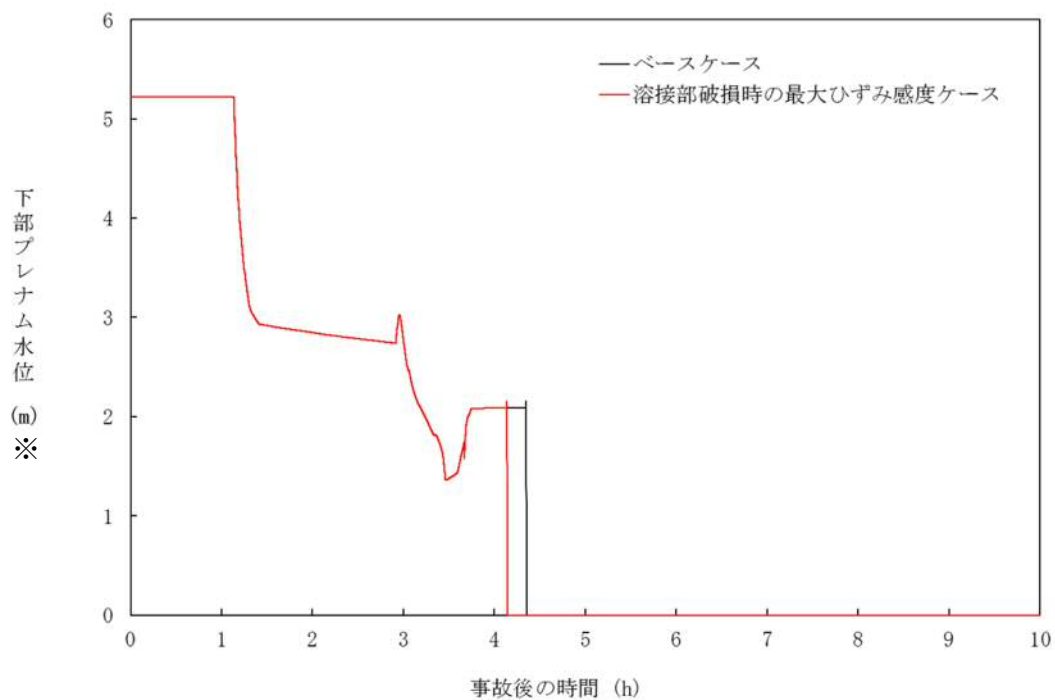


図 4-8-2 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (2)  
 ※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

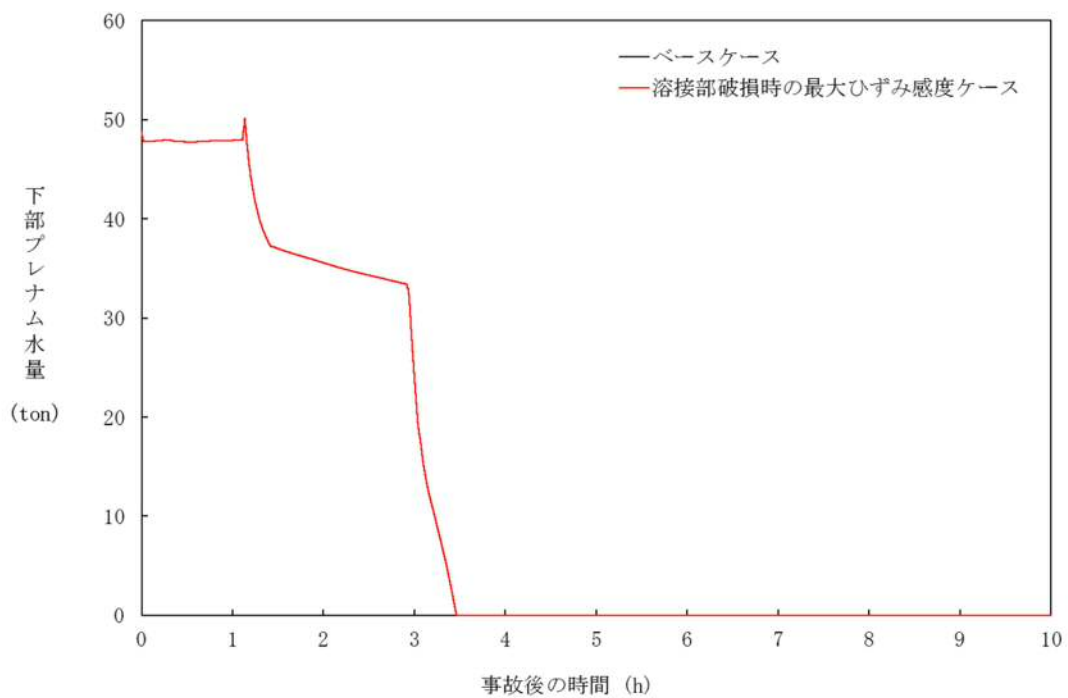


図 4-8-3 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (3)

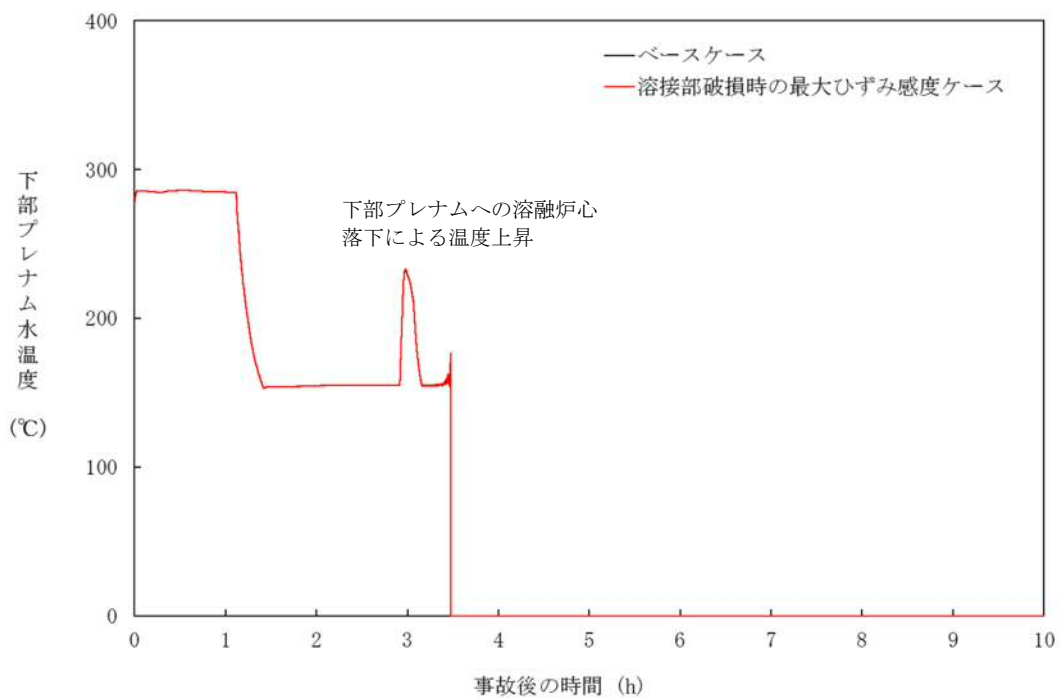


図 4-8-4 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (4)

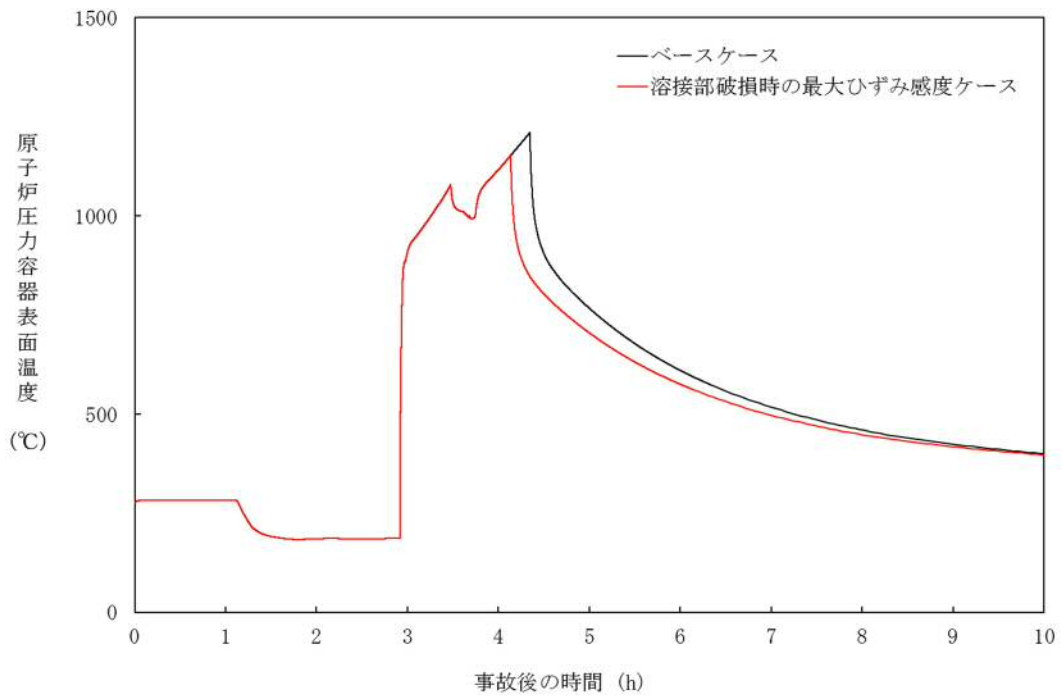


図 4-8-5 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (5)

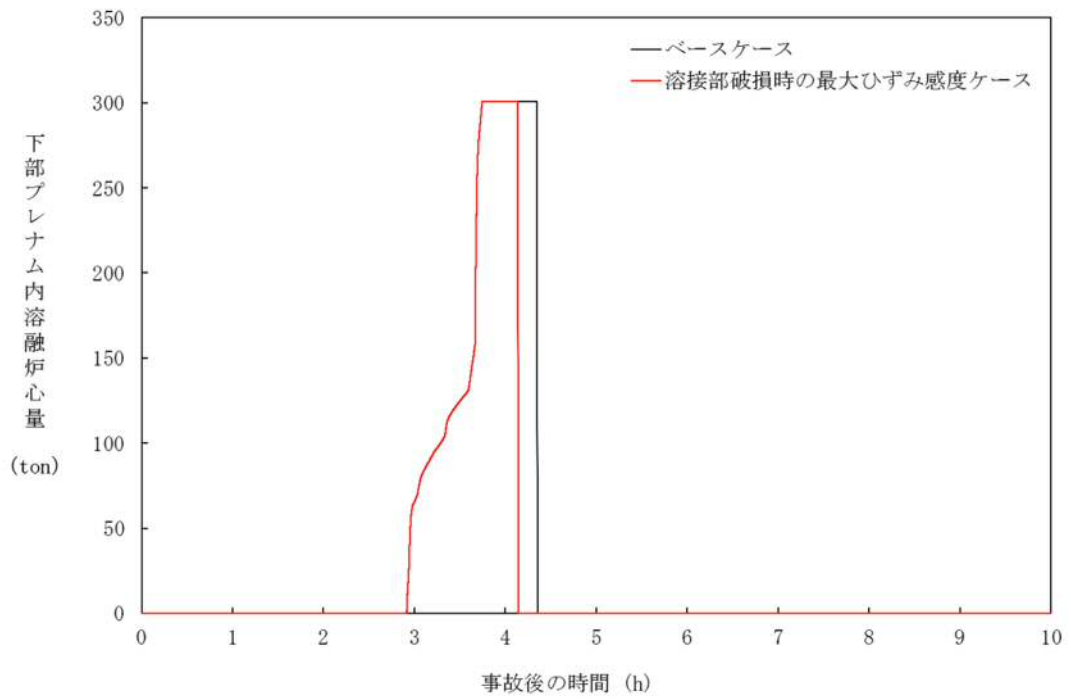


図 4-8-6 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (6)

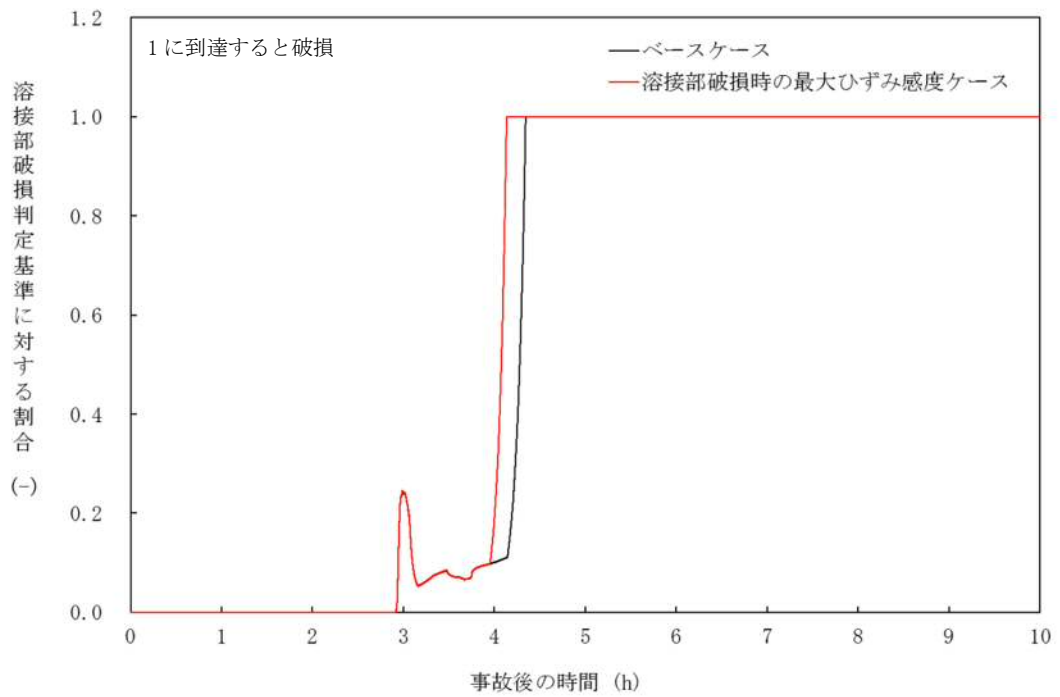


図4-8-7 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (7)

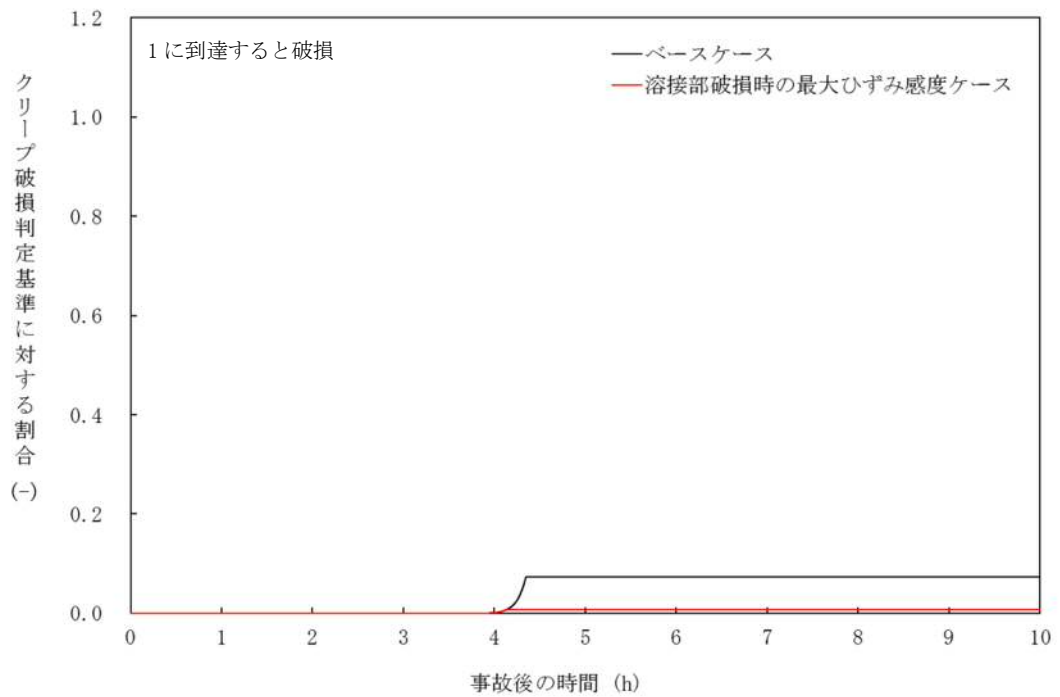


図4-8-8 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (8)

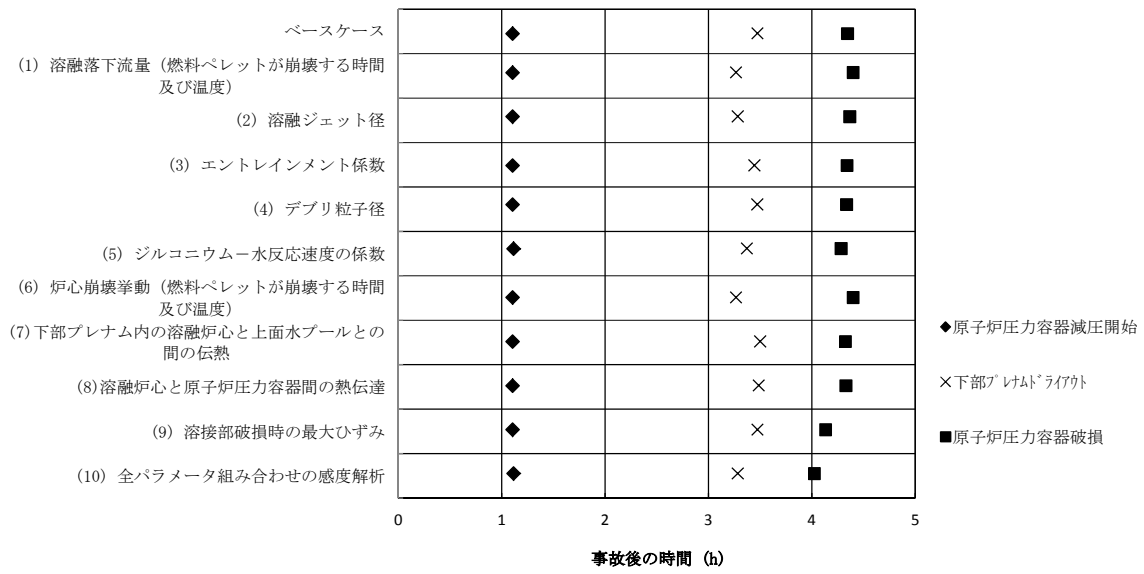


図 4-9-1 感度解析における原子炉压力容器破損等の整理

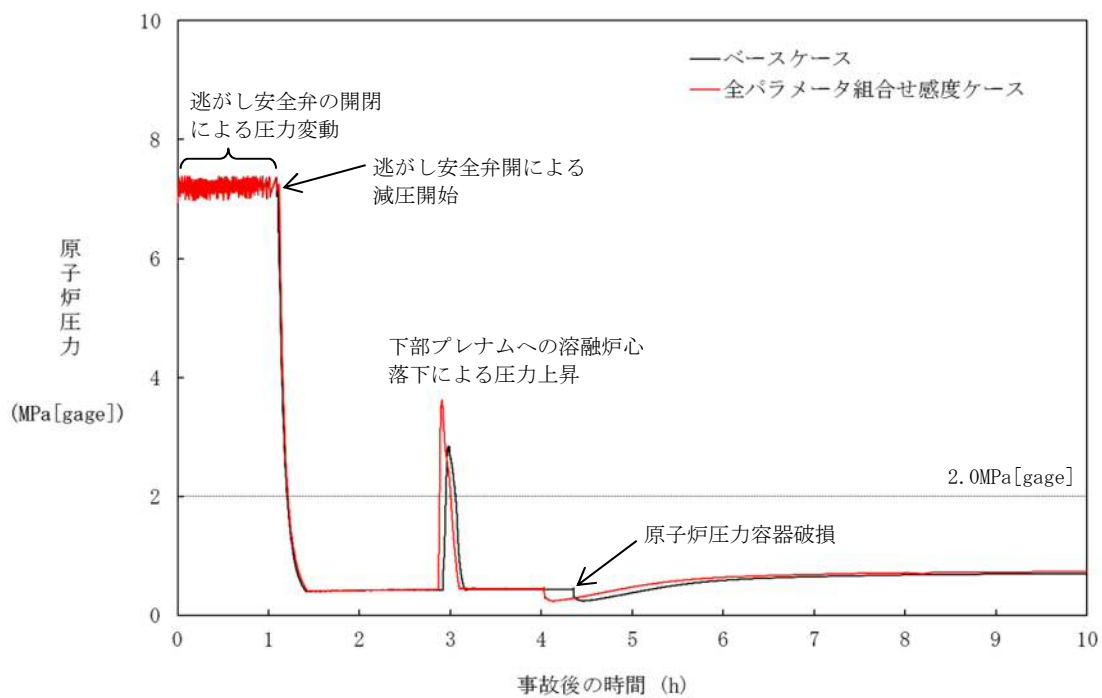


図4-9-2 全パラメータ組み合わせの感度解析 (1)

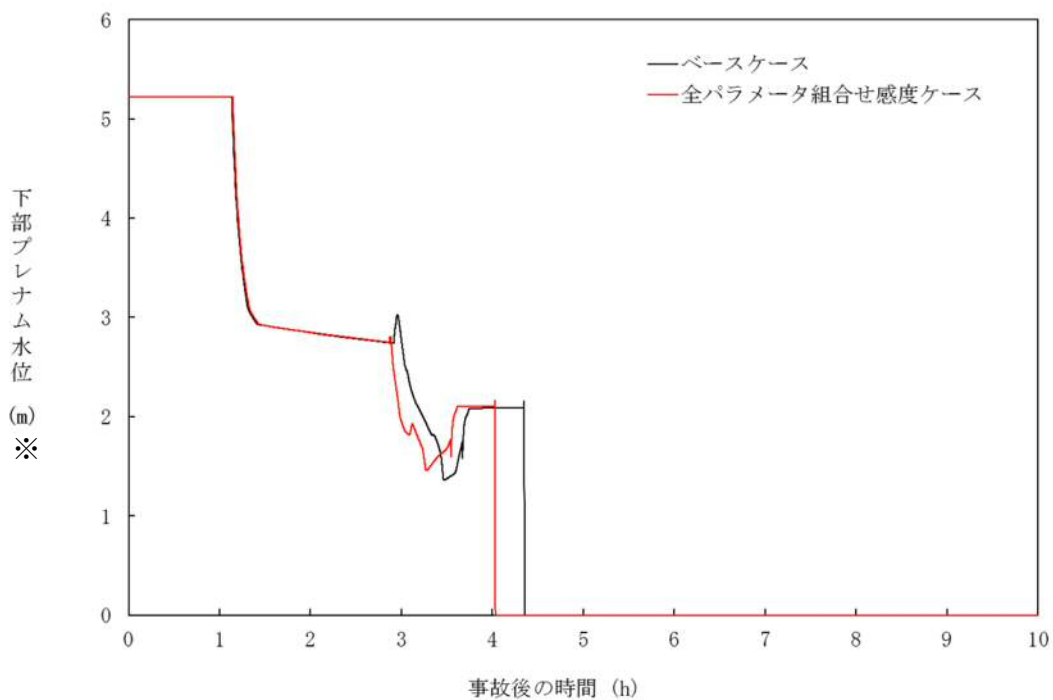


図4-9-3 全パラメータ組み合わせの感度解析 (2)  
 ※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

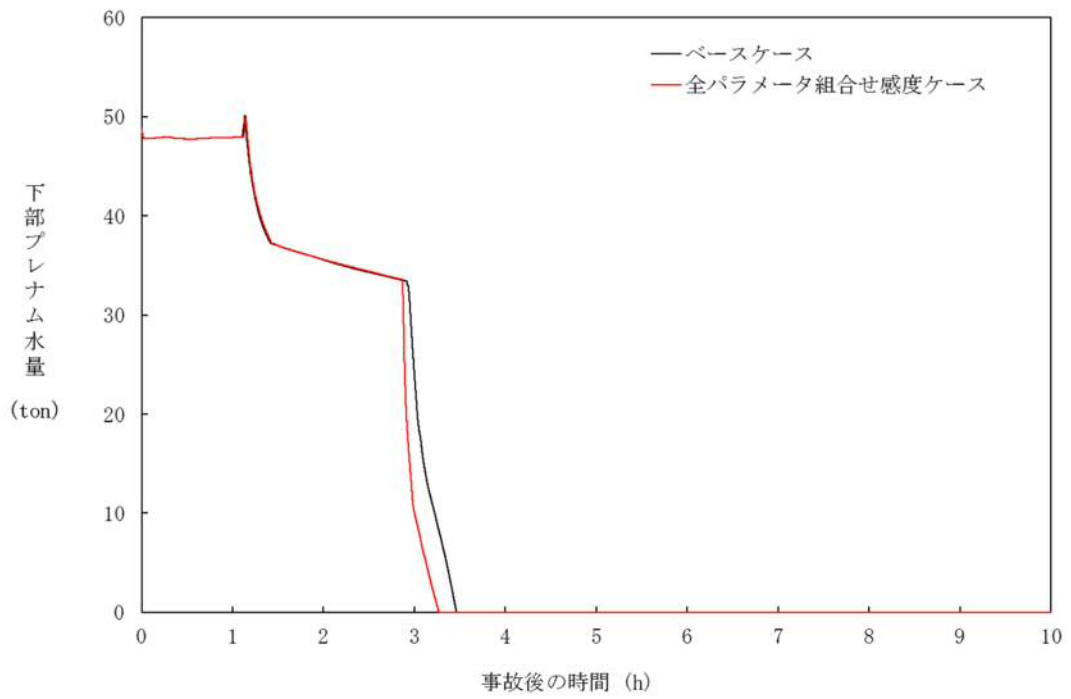


図4-9-4 全パラメータ組み合わせの感度解析 (3)

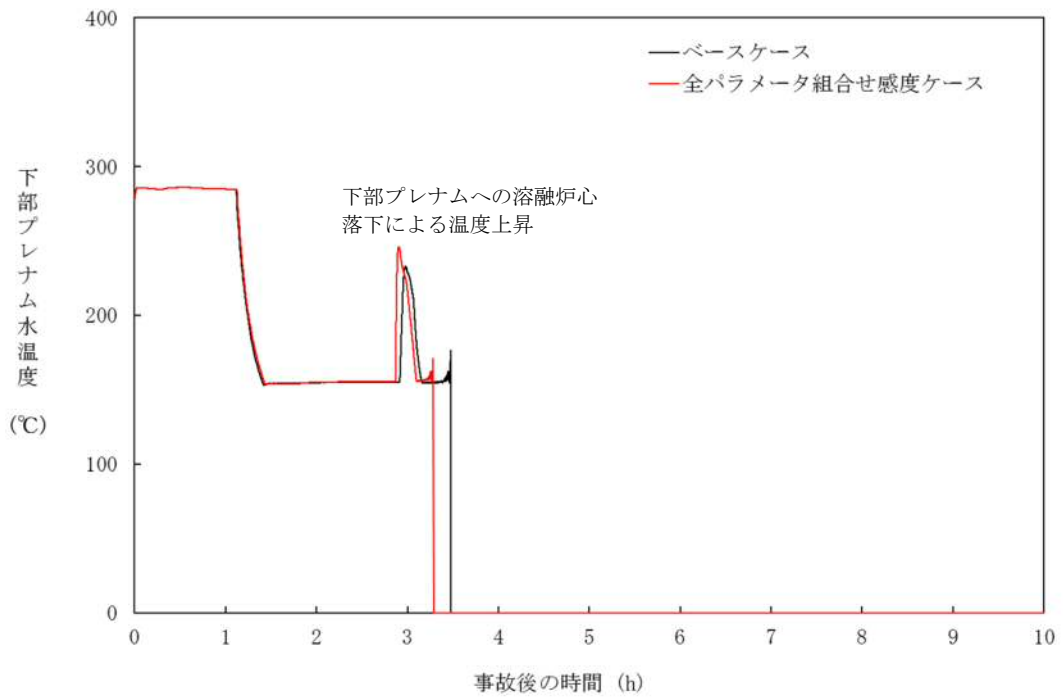


図4-9-5 全パラメータ組み合わせの感度解析 (4)

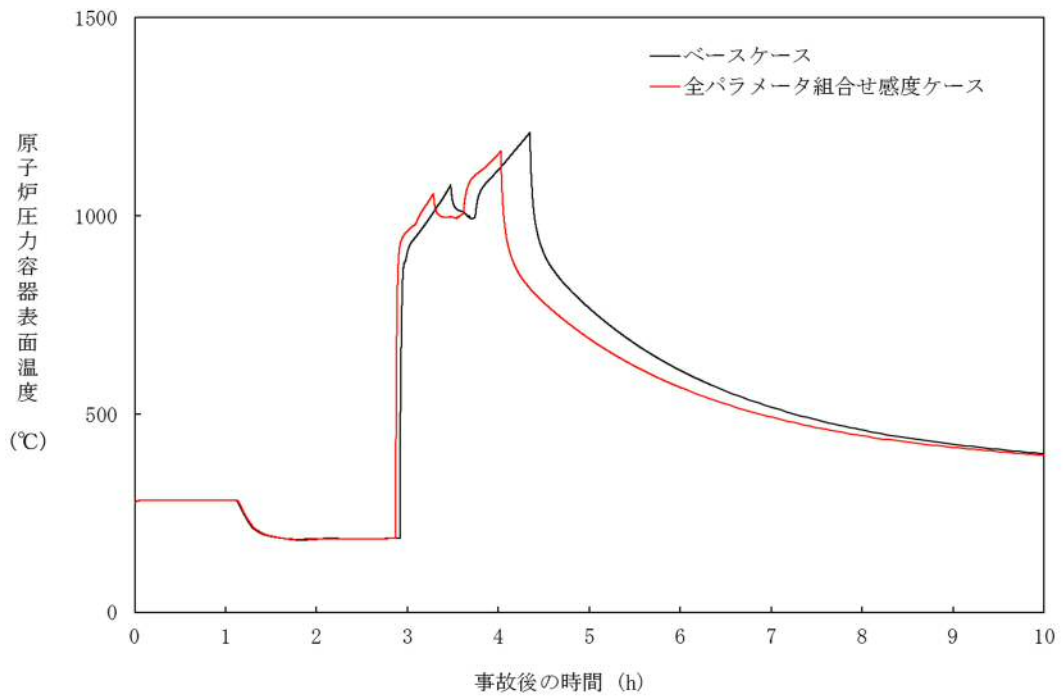


図4-9-6 全パラメータ組み合わせの感度解析 (5)

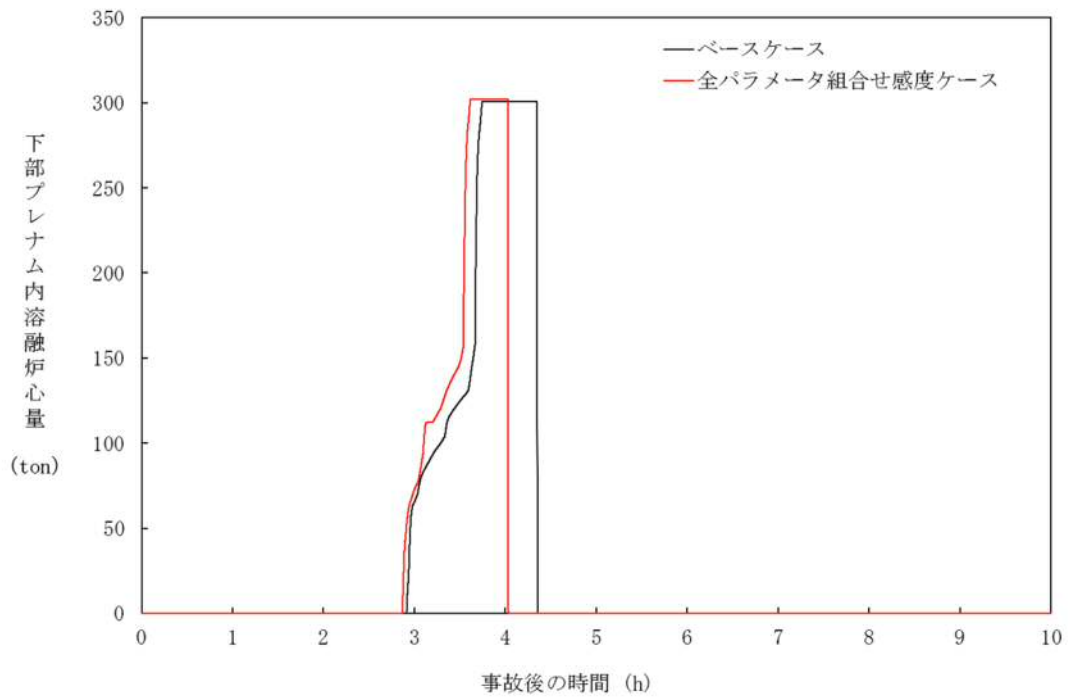


図4-9-7 全パラメータ組み合わせの感度解析 (6)



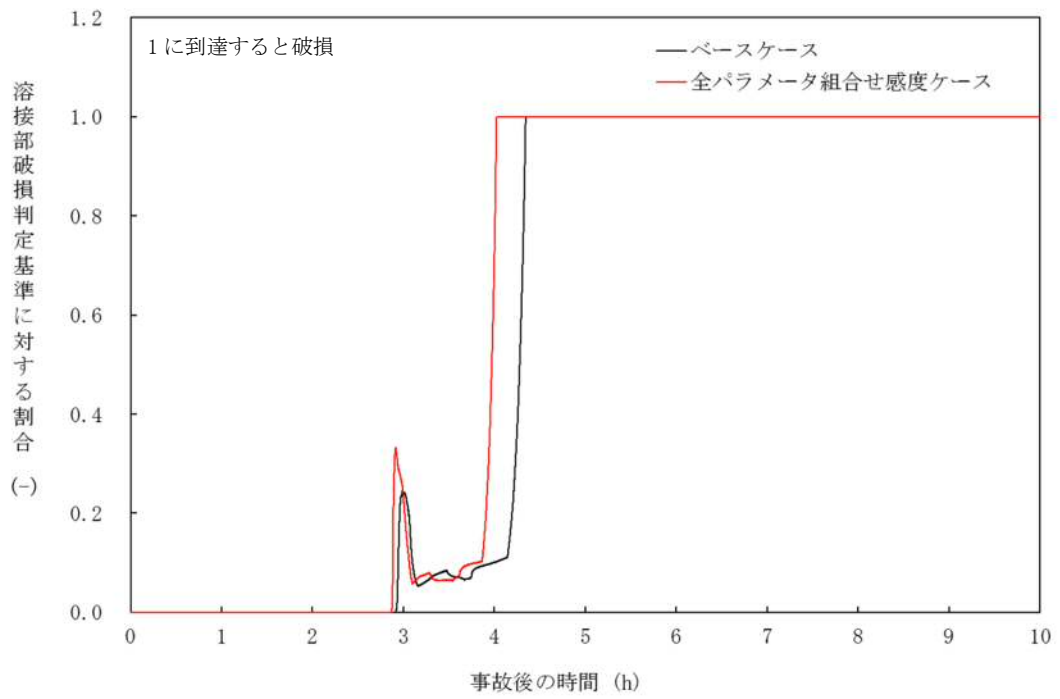


図4-9-8 全パラメータ組み合わせの感度解析 (7)

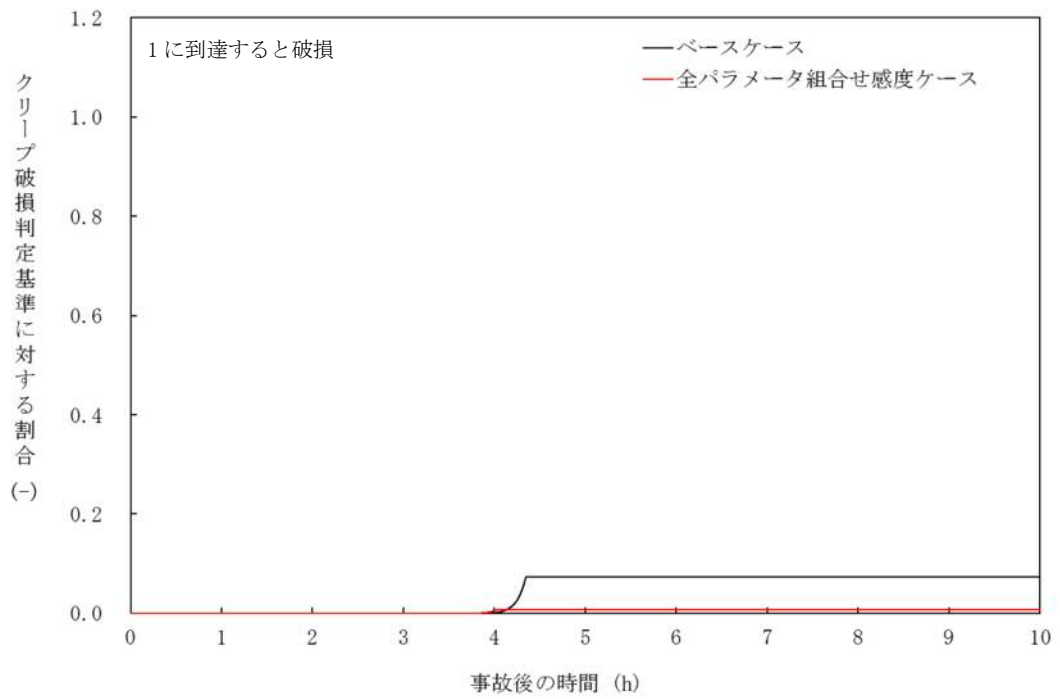


図4-9-9 全パラメータ組み合わせの感度解析 (8)

## 5. まとめ

HPME/DCH 防止に関する不確かさの要因として抽出した以下の項目について、感度解析を実施し、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力への感度を確認した。

- ・燃料ペレットが崩壊する時間及び温度
- ・溶融ジェット径
- ・Ricou-Spalding のエントレインメント係数
- ・デブリ粒子径
- ・ジルコニウム-水反応速度の係数
- ・下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱
- ・溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達
- ・溶接部破損時の最大ひずみ

その結果、いずれの項目についても、圧カスパイクに対する感度は限定的であり、原子炉圧力容器破損時期の観点でも、原子炉圧力減圧時からの時間余裕が十分大きい結果となった。これらのパラメータの組み合わせた感度解析ケースにおいても、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力は2.0MPa[gage]を十分下回っている。

以上のことから、HPME/DCH の防止に関して、MAAP の解析モデルに関する不確かさは小さいと言える。

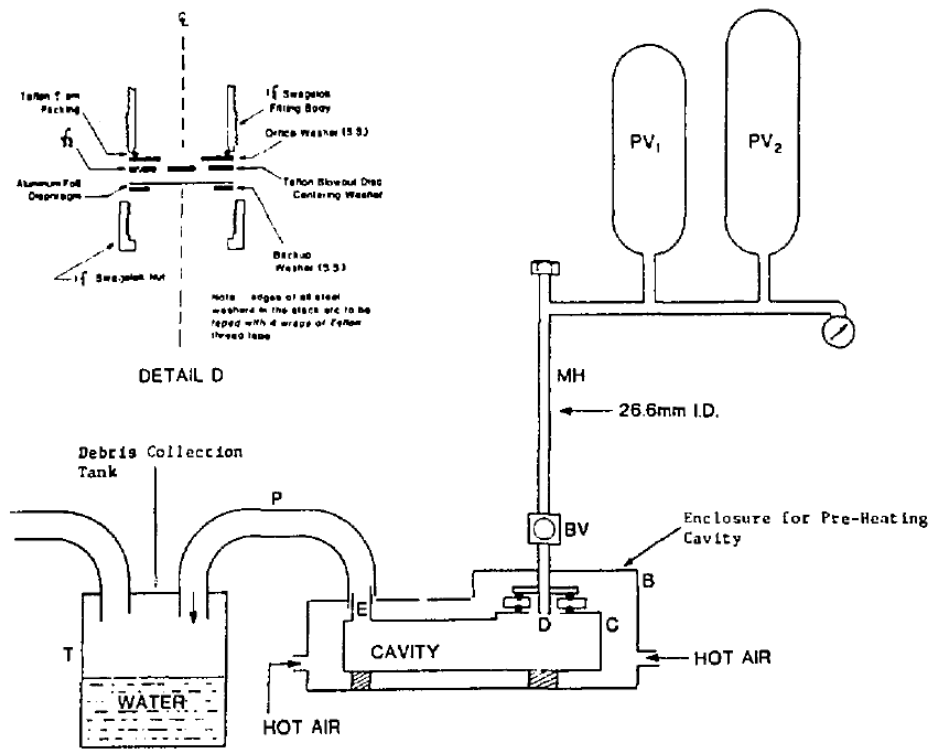
## 付録1 Surry 型原子炉下部キャビティの 1/42 スケール実験

BNL では、Surry 型原子炉下部キャビティの 1/42 スケールモデルを用いた模擬物質の分散放出実験<sup>[7]</sup>を実施し、原子炉下部キャビティ内に残存する物質の測定結果を整理して、実機において分散放出が生じない圧力を評価している。

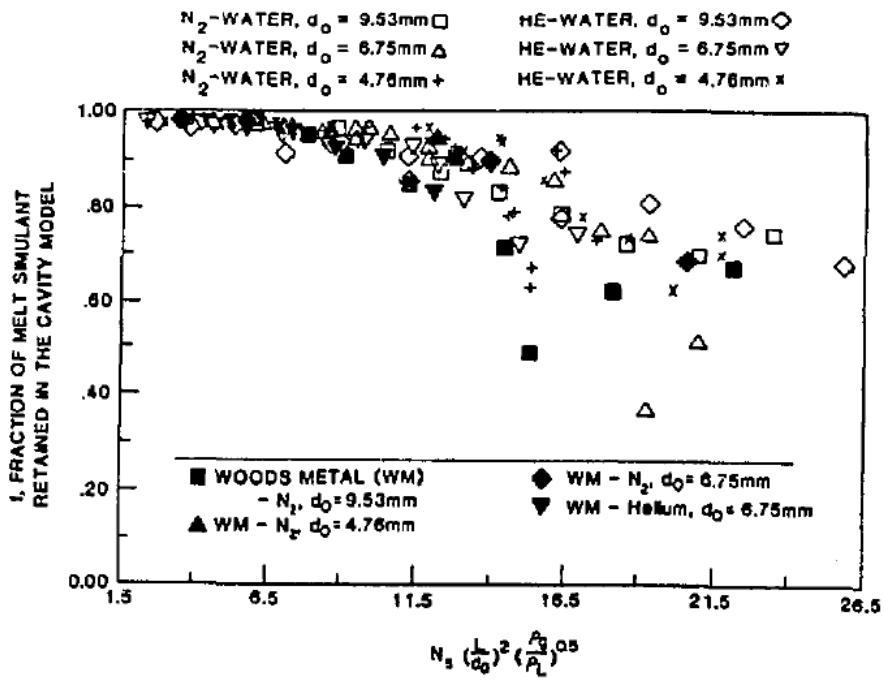
実験装置の概要を付図 1-1 に示す。模擬物質は弁の上のメタルホルダに保持され、弁を開放すると、模擬気体の圧力によって、模擬物質が原子炉下部キャビティに噴出する。その後、模擬気体のブローダウンによって模擬物質の一部が配管やタンクにエントレインされ、原子炉下部キャビティに残った模擬物質を測定する。

模擬物質を用いた分散放出実験では、様々な初期圧力、様々な開口径に対して、原子炉下部キャビティ内に残存する模擬物質の割合を測定している。模擬物質としては水とウッド合金を使用し、模擬気体としては窒素とヘリウムを使用している。付図 1-2 に測定結果を示す。原子炉下部キャビティ内に残存する模擬物質の割合の測定結果 ( $f$ ) は Kutateladze 数に関する無次元数 ( $G$ ) の関数として整理されており、 $f \sim 1/(1+0.001G^2)$  でよく近似できる。

この関係式を用いて、分散放出が無視できる 1 次系圧力を評価することができる。具体的には、Kutateladze 数に関する無次元数が 7 以下の場合に熔融炉心の分散放出が無視できるとしている。このとき、原子炉下部キャビティに残存する模擬物質の割合は、すべてのデータについて 0.9 以上、平均値では約 0.95 である。実機条件（水蒸気温度 500K、原子炉圧力容器破損口径 0.4m）に対しては、熔融炉心の分散放出が無視できる 1 次系圧力は 2.38MPa と評価される。



付図 1-1 Surry 型原子炉下部キャビティの 1/42 スケール実験装置



付図 1-2 Kutateladze 数に関する無次元数と原子炉下部キャビティに残存する模擬物質との関係

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

## 付録 2 溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析条件に用いる係数の妥当性

### (1) 感度係数の位置づけ

本感度解析に使用した係数は、下部プレナムに落下した溶融デブリ表面の金属層と上面水プールへの限界熱流束の乗数である。

付図 2-1 に、MAAP におけるデブリベッドへの冷却材浸入による冷却の状態図を示す。MAAP パラメータ内で本係数の適用する下限値「0」は、金属層が水に対して不透過性であり、熱は金属層表面で対流または熱伝導のみで水に伝わることを意味し、上限値「1」は水が金属層に浸入し、限界熱流束によって制限された速度で冷却され、かつ表面からも対流または熱伝導で除熱されることを意味する。本係数を調整することにより、金属層への水の浸入に伴う熱伝達の不確かさの影響を確認することができる。

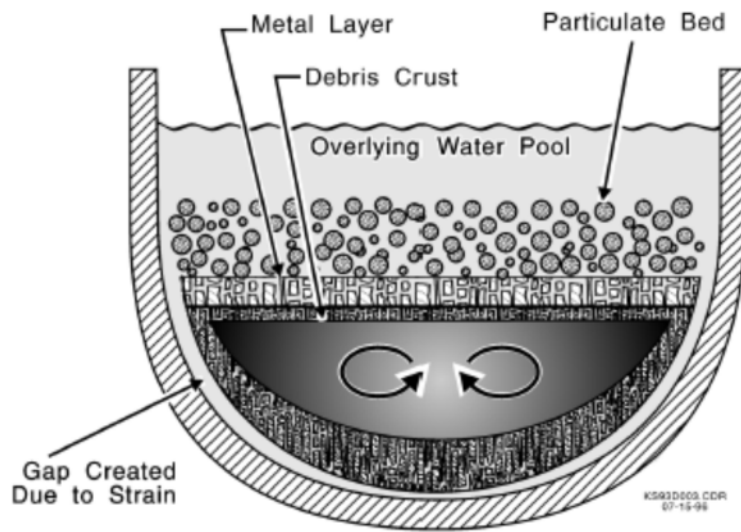
MAAP パラメータでデフォルト値として使用している値は、金属層への水の浸入が少ない場合を想定して、下限としてグリムスヴォトン溶岩での実験<sup>[4]※1</sup> で得られた除熱量を参考にした設定値( )、上限として MAAP の感度解析によりサーベイした、代表的な崩壊熱レベルの溶融デブリが冷却できる最小の除熱量に対応する設定値( ) を考慮し、その中間値( ) をデフォルト値としている。このとおり本係数は、不確かさを有するパラメータであるが、下記の感度解析にて示すとおり、デブリ冷却への影響は限定的であることから、推奨範囲の中間値をベースケース解析に用いることは妥当と考える。

#### ※1：グリムスヴォトン溶岩 (Grimsvotn lava field) での実験

グリムスヴォトン溶岩に広範囲にスプレイ散布することで、熱伝達のみを除熱よりも早く溶岩が固化する現象が確認された。この実験ではスプレイ水の溶岩への浸入による除熱量(約 40kW/m<sup>2</sup>) が評価されている。

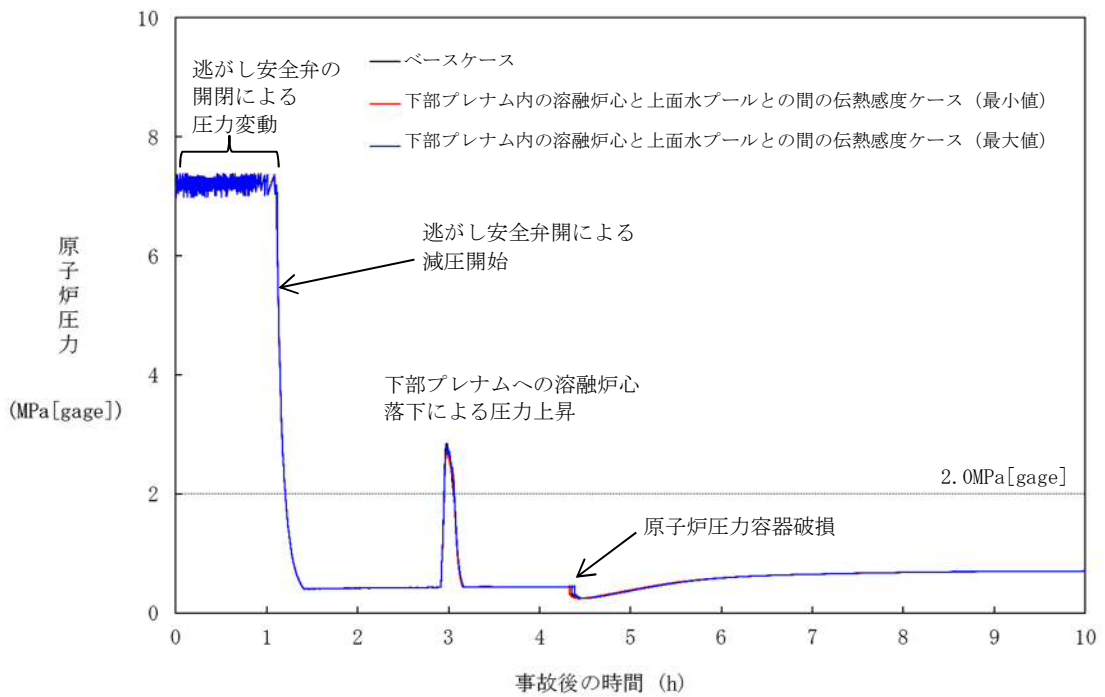
### (2) 感度係数の影響

付図 2-2 に、係数を ( ) ～ ( ) の範囲で変化させた解析結果を示す。溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱は、原子炉压力容器破損時間にほとんど影響を与えない結果となっている。このことから、推奨範囲の中間値( ) をベースケース解析において使用することは妥当と考える。



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

付図 2-1 デブリベッドへの冷却材浸入による冷却



付図 2-2 原子炉圧力の時間変化



## 参考文献

- [1] R. O. Gauntt and L. L. Humphries, “Final Results of the XR2-1 BWR Metallic Melt Relocation Experiment”, NUREG/CR-6527, Aug. 1997
- [2] 日本原子力学会 熱流動部会 編, 気液二相流の数値解析, 朝倉書店, 1993 年
- [3] R. E. Henry and H. K. Fauske, “The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices and Short Tubes,” J. Heat Transfer, Trans. ASME, 1971.
- [4] Uncertainty Working Group of the MAAP User’ s Group, “MAAP4 UNCERTAINTY AND SENSITIVITY ANALYSES”
- [5] K. Kang, et, al,. Experimental Investigations on In-Vessel Corium Retention through Inherent Gap Cooling Mechanisms, Journal of Nuclear Science and Technology, 2006
- [6] JAERI-M 84-055 「炉心損傷事故解析及び研究の現状 -炉心損傷事故調査解析タスクフォース報告書-」1984 年 3 月
- [7] N. K. Tutu, et al., “Low Pressure Cutoff for Melt Dispersal from Reactor Cavities”, Fourth Proceedings of Nuclear Thermal Hydraulics, ANS Meeting, October 30 . November 4, 1988.



本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

Rev.11

添付 2

溶融炉心と冷却材の相互作用について

# 目次

|   |        |
|---|--------|
| 1. まえがき .....                             | 5-2-1  |
| 2. 現象の概要 .....                            | 5-2-1  |
| 3. これまでの知見の整理.....                        | 5-2-2  |
| 4. 不確かさに関する整理.....                        | 5-2-25 |
| 5. 感度解析と評価 .....                          | 5-2-32 |
| 6. まとめ .....                              | 5-2-37 |
| 付録1 FARO 実験による MAAP の圧カスパイクモデル妥当性確認 ..... | 5-2-38 |
| 参考文献 .....                                | 5-2-47 |

## 1. まえがき

溶融炉心と冷却材の相互作用（FCI：Fuel-Coolant Interaction，以下「FCI」と称す。）に関しては，国内外において現象の解明や評価に関する多くの活動が行われてきている。しかしながら，現在においてもその現象の解明は研究段階にあり，現象全体の十分な理解には至っていない。また，多くの FCI 実験が行われているものの，実機規模での現象については，有効なデータが十分には得られていないといえる。このようなことから，国内外で実施された実験結果の知見から解析モデルに関する不確かさを検討し，これを基にした感度解析により有効性評価への影響を確認する。

## 2. 現象の概要

溶融燃料と冷却材が接触して一時的な圧力の急上昇が生じる可能性がある。このときに発生するエネルギーが大きいと構造物が破壊され格納容器が破損する場合がある。溶融炉心と冷却材との接触及びそれに伴って引き起こされる現象のことを”溶融炉心と冷却材の相互作用（FCI）”と呼ぶ。また，FCI のうち衝撃波を伴うものを”水蒸気爆発”と呼び，冷却材への伝熱による水蒸気発生に伴う圧力変化を”圧力スパイク”と呼ぶ。さらに，原子炉圧力容器の下部プレナムで発生する FCI を原子炉圧力容器内 FCI と呼び，格納容器下部で発生する FCI を原子炉圧力容器外 FCI と呼ぶ。

これまでの研究では，水蒸気爆発現象を以下のような段階的な過程によって説明するモデルが提唱されている。

- ① 炉心あるいは原子炉圧力容器から落下する溶融炉心（デブリジェット）が冷却材中に落下する。水と接触した溶融炉心は，その界面の不安定性により細粒化して水中に分散する（エントレイン）。細粒化した溶融炉心（以下「デブリ粒子」と称す。）は，蒸気膜に覆われた状態で膜沸騰を伴う水との混合状態となる（粗混合）。
- ② さらに，自発的もしくは外部からの圧力パルス等の外乱により，膜沸騰が不安定化し（トリガリング），デブリ粒子と冷却材が直接接触する。
- ③ デブリ粒子と冷却材の直接接触により，急速な熱の移動が発生し，急速な蒸気発生・溶融炉心の微細化により，さらにデブリ粒子と冷却材の接触を促進し（伝播），蒸気発生を促進する。この蒸気発生により圧力波が発生する。
- ④ 発生した圧力波が通過した後の高温高圧領域（元々は粗混合領域）の膨張により運動エネルギーが発生し，構造材を破壊する要因となる。

水蒸気爆発が発生するためには，トリガリングが働く必要があり，さらにデブリ粒子と冷却材の接触が瞬時に粗混合領域全体に伝播する必要がある。水蒸気爆発に至らない場合でも，急速な蒸気発生による圧力上昇（圧力スパイク）が発生する。

### 3. これまでの知見の整理

原子炉压力容器内水蒸気爆発による格納容器破損は $\alpha$ モード破損と呼ばれ、WASH-1400<sup>[1]</sup>でそのリスクが提起されたことを機に多くの調査、研究が続けられてきた。この現象は、溶融炉心が原子炉压力容器下部の水中に落下して水蒸気爆発が発生し、それによる水塊がミサイルとなって炉内構造物を破壊し、原子炉压力容器上蓋に衝突することで上蓋がミサイルとなって格納容器に衝突し破損に至るものである。水蒸気爆発については、国際的な専門家会議による結論がまとめられており、特に BWR の原子炉压力容器内水蒸気爆発による $\alpha$ モード破損については、格納容器破損の脅威とはならないとされている。表 3-1 に BWR の原子炉压力容器内水蒸気爆発に関する専門家会議の見解をまとめる。また、原子炉压力容器内 FCI の圧力スパイクについても、原子炉压力容器内での圧力上昇のため、格納容器破損の直接的な脅威とはならない。

一方、原子炉压力容器外 FCI については、緩和策による注水によって形成された格納容器下部の水中に溶融炉心が落下するため、原子炉压力容器内の下部プレナム水に比較して、サブクール度が大きくなり、水蒸気爆発が発生し易い可能性がある。また、原子炉压力容器外 FCI の圧力スパイクは、格納容器内の圧力を直接上昇させるため、格納容器破損の評価対象となる。

以上より、原子炉压力容器内 FCI は格納容器破損の脅威とは考えられないため、原子炉压力容器外 FCI の観点から、国内外で実施された FCI 実験の知見を以下にまとめる。

#### 3.1 FCI 実験の概要

過去に実施された代表的な FCI の実験研究として、(旧)日本原子力研究所で実施された ALPHA 実験、JRC イスプラ研究所で実施された KROTOS 実験、FARO 実験、(旧)原子力発電技術機構で実施された COTELS 実験、韓国原子力研究所 (KAERI) で実施された TROI 実験及び SERENA 実験がある。これらの実験では模擬溶融物として  $UO_2$  混合物を用いた実験とアルミナ等を用いた実験がある。以下では、各実験の概要とそこで得られた知見について整理する。

##### (1) ALPHA 実験

ALPHA 実験<sup>[2]</sup>では、テルミット反応による酸化アルミニウムと鉄からなる模擬溶融物を用いた実験が実施されている。ALPHA 実験装置を図 3-1 に示す。実験容器は、内径 3.9m、高さ 5.7m、容積  $50m^3$  である。模擬格納容器に設置した冷却水プールに高温溶融物を落下させ、水蒸気爆発に関する特性データを計測する実験装置である。表 3-2 に ALPHA 実験の実験結果のまとめを示す。高雰囲気圧力 (STX008, STX012, STX015)、サブクール度が小さい場合 (STX014) は、水蒸気爆発の発生が抑制される実験結果が知見として得られている。溶融物を半減させた 3 ケース (STX001, STX010, STX013) のうち、2 ケース (STX001, STX013) では、水蒸気爆発が発生していない。また、水蒸気爆発のエネルギー変換効率は 1~6%程度となっている。ALPHA 実験の代表的実験 (STX016) の圧力変化の例を図 3-2 に示す。

## (2) KROTOS 実験

KROTOS 実験<sup>[3][4][5]</sup>では、FARO 実験が大型実験装置であるのに対して小型の実験装置であるが、低圧・サブクール水を主として実験を実施している (図 3-3)。KROTOS 実験の代表的実験 (K37, K42) の圧力変化の例を図 3-4 に示す。KROTOS 実験では模擬コリウムとして  $UO_2$  混合物を用いた実験とアルミナを用いた実験を実施している。表 3-3 に KROTOS 実験の実験結果のまとめを示す。アルミナ実験では、サブクール度が大きい実験ケース (K38, K40, K42, K43, K49) では、外部トリガー無しで水蒸気爆発が発生しているが、サブクール度が小さい実験ケース (K41, K44, K50, K51) では、外部トリガー無しでは水蒸気爆発は発生していない。一方、 $UO_2$  混合物実験では、外部トリガー無しでは水蒸気爆発は発生していない。また、 $UO_2$  混合物実験でも外部トリガー有りでは水蒸気爆発が発生している (K52, K53, K46) が、これらのケースはサブクール度が大きい実験ケースである。また、 $UO_2$  混合物実験の水蒸気爆発のエネルギー変換効率は、アルミナ実験の水蒸気爆発に比較して低い結果となっている。アルミナ実験と  $UO_2$  混合物の相違については以下のように考察されている。

- ・ アルミナはプール水面近傍でブレイクアップし、粗混合時に粒子が半径方向に広がり、水蒸気爆発の伝播がし易くなった可能性がある。
- ・  $UO_2$  混合物実験では、外部トリガー無しでは水蒸気爆発は発生していない。 $UO_2$  混合物の方が一般的に過熱度は小さく、 $UO_2$  混合物粒子表面が水と接触した直後に表面が固化し易く、これが水蒸気爆発の発生を抑制した可能性がある。 $UO_2$  混合物実験では水素が発生し、これにより蒸気膜の崩壊による水蒸気爆発の発生を抑制した可能性がある。

## (3) FARO 実験

FARO 実験<sup>[4][6]</sup>では、酸化物コリウム及び金属 Zr を含むコリウムが用いられ、多くの実験は高圧・飽和水条件で実施されているが、低圧・サブクール水条件の実験も実施されている。FARO 実験装置の概要を図 3-5 に示す。表 3-4 に FARO 実験の実験結果のまとめを示す。また、圧力変化の例として L-14 と L-19 圧力挙動を図 3-6 に示す。FARO 実験のいずれの実験ケースでも水蒸気爆発は発生していない。FARO 実験で得られた主な知見は以下である。

- ・ 高圧・飽和水実験、低圧・サブクール実験の何れにおいても水蒸気爆発は発生していない。
- ・ 高圧・飽和水の酸化物コリウム実験の場合は一部が粒子化し、一部はパンケーキ状でプール底部に堆積した。高圧・飽和水のコリウムに金属 Zr 成分を含んだ実験及び低圧・サブクール実験では全てのコリウムは粒子化した。
- ・ 粒子の質量中央径は比較的大きかったが、実験条件 (初期圧力、水深、コリウム落下速度、サブクール度) に依存していない。
- ・ Zr 金属を含めた実験ケース (L-11) では、Zr 金属の酸化により、Zr 金属を含めない実験ケース (L-14) よりも圧力上昇が大きくなる。

#### (4) COTELS 実験

COTELS 実験<sup>[7]</sup>では、模擬溶融物として  $UO_2$ -Zr-ZrO<sub>2</sub>-SS 混合物を用いており、コリウムに金属成分が含まれている。COTELS 実験装置の概要を図 3-7 に示す。表 3-5 に COTELS 実験の実験結果のまとめを示す。COTELS 実験の代表的な実験ケース (A1) の圧力挙動を図 3-8、各実験ケースの圧力変化を図 3-9 に示す。溶融混合物がプール水に接触した直後 (Region 1) は急激な圧力上昇となる。その後、サブクール水では蒸気凝縮が発生し、一時的に圧力が減少する (Region 2) が、溶融混合物からの熱伝達による蒸気発生により、準定常的な状態まで徐々に圧力が上昇する (Region 3)。COTELS 実験で得られた主な知見は以下である。

- ・ サブクール度が大きいケースも含め、全ての実験で水蒸気爆発は発生していない。
- ・ プールに落下した溶融コリウムは、ほとんどがプール水中で粒子化した。
- ・ 粒子径は、コリウム落下速度の大きいケースを除いて、質量中央径で 6mm 程度である。コリウム落下速度の大きいケースの粒子径は小さくなっている。
- ・ コリウム落下速度の大きいケースで、粒子径が小さく初期圧力上昇幅も大きくなる傾向がある。また、準定常的な状態での圧力は、溶融物量が多く、サブクール度が小さく、プール水量が少ない程高くなる傾向である。

#### (5) TROI 実験

TROI 実験<sup>[8]</sup>は、韓国原子力研究所 (KAERI) で実施されている実験であり、2007 年から 2012 年までは、KROTOS 実験とともに OECD/NEA の SERENA プロジェクトとして実施された実験である。実験装置の概要図を図 3-10 に示す。また、実験条件及び実験結果を表 3-6 に示す。

ZrO<sub>2</sub> を用いた実験では外部トリガリングを与えていないが、圧力スパイクや水蒸気爆発が発生した実験がある。一方、 $UO_2$ /ZrO<sub>2</sub> の混合物を用いた実験では、異なった条件による内部トリガリングを発生させるため又は外部トリガリングによる水蒸気爆発時の発生エネルギーを変えるため、混合物の割合、水深及び混合物量等の様々な条件により実験を実施し、数ケースでは水蒸気爆発が発生している。TROI 実験で得られた主な知見は以下のとおりである。

- ・ 自発的な水蒸気爆発が生じた実験は、融点を大きく上回る過熱度を溶融物に対して与えるなどの実機と異なる条件であり、その他の実験では自発的な水蒸気爆発は生じていない。
- ・ 水深が深い場合 (130cm) には、内部トリガリングによる水蒸気爆発は発生していない。水深が深いことにより、溶融物粒子が底部に到達するまでの沈降時間が長くなり、溶融物粒子が固化しやすい状況となる。このため、溶融物粒子が底部に接触することで発生するトリガリングの可能性は低減する可能性がある<sup>[9]</sup>。

## (6) SERENA 実験

SERENA 実験は、OECD/NEA 主導のもと実施されている実験であり、2001 年から 2006 年にかけて実施されたフェーズ 1 と、2007 年から 2012 年にかけて実施されたフェーズ 2 に分かれている。フェーズ 1 では既存の実験に対する再現解析が行われた。また、フェーズ 2 では KROTOS 及び TROI 装置を使用した実験と、その再現解析が行われた。さらに、両フェーズにおいて実機原子炉を想定した解析が行われた。フェーズ 2 で行われた実験の実験条件及び実験結果を表 3-7 に示す。

フェーズ 1、フェーズ 2 においてそれぞれ得られた知見は以下の通りである。

### フェーズ 1

- ・ (解析) 解析コードはアルミナを用いた実験によって調整されており、 $UO_2 \cdot ZrO_2$  コリウムの爆発による機械的エネルギー変換効率を過大評価する傾向にある。
- ・ (解析) 予測される炉内水蒸気爆発の最大荷重は原子炉圧力容器の破損強度と比べて十分小さい。
- ・ (解析) 予測される炉外水蒸気爆発の最大荷重は原子炉格納容器に影響を与える可能性があるが、解析コードの不確かさとばらつきが大きく、その程度を推定することは難しい。

### フェーズ 2

- ・ (実験)  $80\%UO_2 \cdot 20\%ZrO_2$  コリウムは、 $70\%UO_2 \cdot 30\%ZrO_2$  コリウムに比べて、やや爆発のエネルギーが大きい。これはフェーズ 1 の結果と逆の傾向であり、さらに考察が必要。
- ・ (実験)  $UO_2 \cdot ZrO_2$  のみで構成されるコリウムは、アルミナと比べて爆発のエネルギーは小さい。
- ・ (実験) コリウムの組成に酸化物以外(金属の単体など)が含まれる場合について、酸化と水素生成による影響は定量化できなかった。
- ・ (実験) 全ての観測された爆発の機械的エネルギー変換率は、従来観測されていたエネルギー変換率と同様に、比較的小さい。これは、 $UO_2$  の密度が高いために溶融コリウムの粒子径が小さくなり、固化が促進されて水蒸気爆発への寄与が小さくなったことと、粗混合段階のボイド率が上昇して爆発のエネルギーを低減したことによると推測されている。

## 3.2 FCI 実験の知見の整理

前項で示した FCI 実験の知見を整理し、原子炉圧力容器外水蒸気爆発の可能性及び原子炉圧力容器外 FCI の圧力スパイクの影響因子について考察する。

### (1) 原子炉圧力容器外 FCI の水蒸気爆発の可能性

酸化アルミニウムと鉄からなる模擬溶融物を用いた ALPHA 実験及びアルミナを用いた

KROTOS 実験では、外部トリガーなしで水蒸気爆発が発生しているが、 $UO_2$ を用いた KROTOS, FARO, COTELS 実験では外部トリガーなしでは水蒸気爆発は発生していない。 $UO_2$ 混合物では一般的に過熱度が小さいため、粗混合粒子表面が早期に固化し、蒸気膜が崩壊しても溶融物の微細化が起きにくく、水蒸気爆発の発生が抑制されるためと考えられる。

TROI 実験では  $UO_2$ 混合物を用いた場合でもトリガーなしで水蒸気爆発が発生している例 (TROI-10, 12, 13, 14) が報告されている。TROI-10, 12 は、溶融物温度が 3800K 程度の高い温度での実験条件である。また、TROI-13, 14 の溶融物温度は、それぞれ 2600K, 3000K であるが、TROI-13 では、温度計測に問題があり実際には 3500K 以上と推測されている。また、TROI-14 では、二つの温度計が異なる最高温度 (4000K, 3200K) を示しており、温度計測の不確かさが大きいとされている。以上を踏まえると、TROI 実験の溶融物温度はかなり高い実験条件と考えられ、他の実験で想定しているような実機条件に近い溶融物温度では水蒸気爆発の発生可能性は十分小さいと考えられる。

TROI 実験と実機条件の比較を検討するために、模擬溶融物にコリウム ( $UO_2/ZrO_2$ ) を用いた TROI-10, 12, 23, 25 と実機条件の比較を表 3-8 に示す。この表では、図 3-11 に示す Ricou-Spalding 式による粒子化割合<sup>[10]</sup>の概算値を示している。溶融物温度が高く過熱度が大きい TROI-10, 12 では、自発的水蒸気爆発が観測されている。これに対して、溶融物温度が高く過熱度が大きい水深が 1.3m と深い TROI-23 では、水蒸気爆発は発生していない。これは、水深が深いことにより、溶融物粒子が底部に到達するまでの沈降時間が長くなり、溶融物粒子が固化しやすいため、溶融物粒子が底部に接触することで発生するトリガリングを抑制したと考えられる<sup>[9]</sup>。

水蒸気爆発が発生した TROI-10, 12 の粒子化割合は約 60%であるが、水深がより深い TROI-23 では、粒子化割合が約 80%と比較的大きい値となっており、底部に到達する前に固化する溶融物粒子が比較的多いと考えられる。一方、水深及び粒子化割合は TROI-10, 12 と同程度であるが、溶融物温度がやや低い TROI-25 では、蒸気発生による圧力上昇 (Steam Spike) は生じているが、水蒸気爆発は発生していない。溶融物温度が低い場合、過熱度が小さく粒子が固化しやすいため、水蒸気爆発が抑制されたものと考えられる。

実機条件では、溶融ジェットの初期直径は計装配管口径 (5cm) ~ 制御棒駆動機構ハウジングの直径 (15cm) 程度と想定されるが、ペDESTAL 注水対策により水深は 2.0m 以上となる。これより、粒子化割合は約 60%~100%となるが、溶融物温度が 2600K 以下と水蒸気爆発が発生した TROI 実験よりも十分低いと考えられ、大規模な水蒸気爆発の発生の可能性は十分小さいと考えられる。

また、いくつかの TROI 実験では水蒸気爆発が発生したときの機械的エネルギー変換効率が報告されている (表 3-6)。これらの中で自発的に水蒸気爆発が発生したとされる TROI-13 の機械的エネルギー変換効率は 0.4%である。これは、ALPHA 実験 (表 3-2) や KROTOS 実験 (表 3-3) で観測されているように、アルミナによる金属模擬溶融物実験の値に対して比較的小さい値となっている。

また、KROTOS 実験 (K52, K53, K46) では、 $UO_2$ 混合物を用いた実験でも外部トリガーを



与えた場合は水蒸気爆発が観測されているが、これらの実験ケースはサブクール度が大きい実験ケースである(K52のサブクール度：102K, K53のサブクール度：122K, K46のサブクール度：83K)。したがって、サブクール度が大きい場合には、UO<sub>2</sub>混合物を用いた場合でも、水蒸気爆発の可能性が高くなることが考えられる。これは、サブクール度が大きい場合には、粗混合粒子の蒸気膜の安定度が低下し、蒸気膜の崩壊が発生しやすいことが要因と考えられる。

しかし、KROTOS実験のK52, K53と同程度の高サブクール度の条件であるFARO実験のL-31(サブクール度：104K), L-33(サブクール度：124K)では、水蒸気爆発が発生していない。これらの実験のUO<sub>2</sub>混合物量は、KROTOS実験が数kgであるのに対して100kg程度であり、より実機条件に近い。

また、COTELS実験の高サブクール実験(A11)でも水蒸気爆発は発生していない。COTELS実験は、BWRの原子炉圧力容器外FCIを模擬した実験であり、熔融物に圧力容器内の構造物を想定したステンレススチールを含んでいる。また、熔融物量も50kg程度であり、KROTOS実験よりも実機条件に近い。

以上より、UO<sub>2</sub>混合物の熔融物量が少ないKROTOS実験では、水蒸気爆発が発生しているが、熔融物量が多くより実機体系に近い大規模実験であるFARO実験、COTELS実験では、水蒸気爆発は発生していない。

FCI実験では、水蒸気爆発のトリガーを発生させるために、高圧ガスを封入した装置(KROTOS実験では最大20MPaのガスを封入可能な装置)を用いている。水蒸気爆発のトリガーは粗混合粒子の周囲に形成される蒸気膜の崩壊に起因すると考えられており、トリガー装置により圧力パルスを発生させ蒸気膜を不安定化させる効果があると考えられる。実機条件では、このようなトリガー装置で発生させているような圧力外乱となる要因は考えられない。また、熔融物がプール底部に接触することでトリガー要因となることが考えられるが、BWRの原子炉圧力容器外FCIを模擬したCOTELS実験の実験装置では、BWRのペDESTAL底部と同様に平板コンクリートを模擬した実験装置としており、実機条件と同様であるが水蒸気爆発は観測されていない。

また、実機条件では、水深が実験条件よりも深くなる可能性があるが、水深が深いことにより、熔融物粒子が底部に到達するまでの沈降時間が長くなり、熔融物粒子が固化しやすい状況となる。このため、熔融物粒子が底部に接触することで発生するトリガリングのリスクは低減する可能性がある。

以上より、BWRの実機条件において水蒸気爆発のトリガーとなる特段の要因は考えられないため、実機条件でも水蒸気爆発の発生リスクは十分小さいと考えられる。

上記の実験条件と実機条件の検討より、実機においては、格納容器の損傷に至る大規模な原子炉圧力容器外水蒸気爆発の可能性は十分に小さいと考えられる。このため、原子炉圧力容器外FCIの有効性評価では、蒸気発生による圧力上昇(圧カスパイク)を評価する。なお、参考として、水蒸気爆発の発生を仮定した場合の影響についても、水蒸気爆発解析

コード (JASMINE<sup>[1 1]</sup>) 及び構造応答解析コード (AUTODYN<sup>[1 2]</sup>もしくはLS-DYNA<sup>[1 3]</sup>) を用いて、水蒸気爆発のトリガーを解析的条件として与えることで水蒸気爆発の発生を模擬した解析を行うことにより、水蒸気爆発による格納容器ペDESTAL構造部への影響を評価し、格納容器の健全性に影響を及ぼさないことを確認している。

## (2) 原子炉压力容器外 FCI の圧カスパイクの影響因子

水蒸気爆発が発生しない場合でも、熔融炉心の冷却材への伝熱による水蒸気発生により圧カスパイクが生じる。ここでは、原子炉压力容器外 FCI の圧カスパイク影響因子について、BWR の原子炉压力容器外 FCI を模擬した COTELS 実験の実験結果を中心に検討する。各ケースの圧力変化を図 3-9 に示す。COTELS 実験では、基本実験ケース (A1) に比較してコリウム量が少ない実験ケース (A4) では、デブリ保有熱量が少なく圧力上昇も低くなる傾向がある。また、COTELS 実験では、サブクール度が大きいケース (A5, A6)、プール水深が大きいケース (A9) では、蒸気凝縮により圧力上昇が低くなる傾向がある。

粒子化割合については、COTELS 実験では水深は 0.4m であるが、ほとんどがプール水中で粒子化した。また、FARO 実験では、水深が 1~2m であるが、高圧・飽和水の酸化コリウム実験では一部が粒子化し、高圧・飽和水のコリウムに金属成分を含んだ実験では全てコリウムが粒子化している。粒子化割合が大きいほうがプール水への伝熱量が多くなるため、圧力上昇は高くなると考えられる。

粒子径については、COTELS 実験結果ではコリウム落下速度の大きいケース (A8, A10) では、基本実験ケース (A1) に比較して、粒子径が小さく初期圧力上昇幅も大きくなる傾向がある。一方、FARO 実験では、粒子の質量中央径は比較的大きかったが、実験条件 (初期圧力、水深、コリウム落下速度、サブクール度) に対する依存性は低いと報告されている。各 UO<sub>2</sub> 混合物実験の平均的な粒子径は、熔融物量の多い FARO 実験では 2.6~4.8mm<sup>[4]</sup>、COTELS 実験では 6mm 程度<sup>[7]</sup>である。

以上の影響因子を BWR プラント体系で考えた場合、以下に分類できる。

- ・ 格納容器下部 (ペDESTAL) 領域のプール水の状態 (サブクール度、水位)
- ・ 熔融炉心の落下量及び粒子化 (破損口径、粒子化割合、落下速度)
- ・ プール水とデブリ粒子との伝熱 (デブリ粒子径)

## (3) FCI と MCCI を考慮した格納容器下部水張りの考え方

炉心熔融が進展し炉外に熔融燃料が流出する場合、FCI と MCCI の影響緩和において、格納容器下部への初期水張りが重要なマネジメントとなる。以下では格納容器下部への注水による初期水張りの考え方について示す。

FCI の観点では、これまでの FCI 実験結果の知見から、BWR の実機条件では水蒸気爆発の発生リスクは十分小さいと考えられる。しかし、万が一水蒸気爆発が発生したと想定する

と、水深が深いと粗混合が促進され、水蒸気爆発の規模が大きくなる可能性がある。

MCCI の観点では、種々の実験結果から、デブリ上面から除熱を向上させるため、原子炉格納容器下部への水張り水深を深くすることにより、熔融炉心が落下時に粒子化され、粒子状ベッドとして堆積することにより、デブリ冷却性を向上させることが影響緩和のために重要である。

以上より、水深が深い場合は、万が一水蒸気爆発が発生した場合の影響が大きくなる可能性があるが、MCCI の影響を緩和する観点からは有利である。したがって、水蒸気爆発の評価により格納容器の健全性に影響を与えないことを十分確認できる範囲で初期水張りの水深を深くし、熔融炉心の粒子化を促進し、MCCI を緩和する運用とすることが得策と考えられる。

表 3-1 BWR 体系における原子炉圧力容器内水蒸気爆発の発生確率に関する見解

| 原子炉圧力容器内水蒸気爆発に関する国際会議，文献                   | BWR の原子炉圧力容器内水蒸気爆発に関する議論   |
|--|--|
| OECD/CSNI FCI 専門家会議 (1993) <sup>[14]</sup> | BWR の圧力容器下部プレナムは，制御棒案内管で密に占められている。そして，炉心の広範囲でのコヒーレントなリロケーションは，炉心支持板の存在により起こりにくいと考えられる。このような特徴によって，燃料-冷却材の粗混合のポテンシャルが制限され，水蒸気爆発に起因する水-溶融物スラグの運動エネルギーを消失させる可能性がある。従って，スラグにより破壊された圧力容器ヘッドのミサイルに伴う格納容器破損は，PWR よりも BWR の方が起こりにくいと評価される。(T. Okkonen 等) |
| NUREG/CR-5960 (1994) <sup>[15]</sup>       | BWR の下部プレナムには，密に詰められた制御棒案内管があるため，炉内水蒸気爆発問題の対象とならない。(T. G. Theofanous 等)  |
| SERG-2 ワークショップ (1996) <sup>[16]</sup>      | 物理的なジオメトリは爆発的事象の発生に寄与しないため，BWR の $\alpha$ モード格納容器破損確率は，おそらく PWR より小さい。(M. Corradini)   |
| OECD/CSNI FCI 専門家会議 (1997) <sup>[17]</sup> | 下部プレナム構造物の存在により，水蒸気爆発の影響を緩和する。<br>現在の知見は，一般に BWR では炉内水蒸気爆発は格納容器への脅威とならない。<br>(O. Zuchuat 等)  |

表 3-2 ALPHA 実験の主要な実験条件及び実験結果<sup>[2]</sup>

| 実験名    | 実験ケース                             | 溶融物組成                             | 溶融物質量 (kg) | 圧力(MPa) | 水温度(K) | 水深 (m) | 外部トリガー | 水蒸気爆発発生 | 機械的エネルギー変換効率(%) |
|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------|---------|--------|--------|--------|---------|-----------------|
| ALPHA  | STX002                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 0.10    | 289    | 1.0    | No     | Yes     | -               |
|        | STX003                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 0.10    | 292    | 1.0    | No     | Yes     | -               |
|        | STX005                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 0.10    | 300    | 1.0    | No     | Yes     | -               |
|        | STX009                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 0.10    | 289    | 1.0    | No     | Yes     | -               |
|        | STX016                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 0.10    | 295    | 0.9    | No     | Yes     | 0.86            |
|        | STX017                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 0.10    | 286    | 0.9    | No     | Yes     | 0.66            |
|        | STX018                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 0.10    | 283    | 0.9    | No     | Yes     | 3.33            |
|        | STX001                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10         | 0.10    | 293    | 1.0    | No     | No      | -               |
|        | STX010                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10         | 0.10    | 297    | 1.0    | No     | Yes     | -               |
|        | STX013                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10         | 0.10    | 284    | 1.0    | No     | No      | -               |
|        | STX014                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 0.10    | 372    | 1.0    | No     | No      | -               |
|        | STX008                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 1.60    | 288    | 1.0    | No     | No      | -               |
|        | STX012                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 1.60    | 290    | 1.0    | No     | No      | -               |
|        | STX015                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 1.00    | 282    | 1.0    | No     | No      | -               |
|        | STX006                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 0.10    | 298    | 1.0    | No     | No      | -               |
|        | STX011                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 0.10    | 290    | 1.0    | No     | Yes     | -               |
|        | STX019                            | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20         | 0.10    | 281    | 0.9    | No     | Yes     | 5.67            |
| STX020 | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20                                | 0.10       | 281     | 1.0    | No     | No     | -       |                 |
| STX021 | Fe-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20                                | 0.10       | 281     | 0.9    | No     | Yes    | 4.05    |                 |

表 3-3 KROTOS 実験の主要な実験条件及び実験結果<sup>[3][4][5]</sup>

| 実験名    | 実験ケース   | 溶融物組成   | 溶融物質量 (kg) | 溶融物温度 (K) | 圧力 (MPa) | サブクール度 (K) | 水深 (m) | 外部トリガー | 水蒸気爆発発生 | 機械的エネルギー変換効率(%) |
|--------|---|---|------------|-----------|----------|------------|--------|--------|---------|-----------------|
| KROTOS | K38   | Alumina                                       | 1.5        | 2665      | 0.1      | 79         | 1.11   | No     | Yes     | 1.45            |
|        | K40   | Alumina                                       | 1.5        | 3073      | 0.1      | 83         | 1.11   | No     | Yes     | 0.9             |
|        | K41   | Alumina                                       | 1.4        | 3073      | 0.1      | 5          | 1.11   | No     | No      | -               |
|        | K42   | Alumina                                       | 1.5        | 2465      | 0.1      | 80         | 1.11   | No     | Yes     | 1.9             |
|        | K43   | Alumina                                       | 1.5        | 2625      | 0.21     | 100        | 1.11   | No     | Yes     | 1.3             |
|        | K44   | Alumina                                       | 1.5        | 2673      | 0.1      | 10         | 1.11   | Yes    | Yes     | 2.6             |
|        | K49   | Alumina                                       | 1.5        | 2688      | 0.37     | 120        | 1.11   | No     | Yes     | 2.2             |
|        | K50   | Alumina                                       | 1.7        | 2473      | 0.1      | 13         | 1.11   | No     | No      | -               |
|        | K51   | Alumina                                       | 1.7        | 2748      | 0.1      | 5          | 1.11   | No     | No      | -               |
|        | K32   | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub> | 3.0        | 3063      | 0.1      | 22         | 1.08   | No     | No      | -               |
|        | K33   | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub> | 3.2        | 3063      | 0.1      | 75         | 1.08   | No     | No      | -               |
|        | K35   | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub> | 3.1        | 3023      | 0.1      | 10         | 1.08   | Yes    | No      | -               |
|        | K36   | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub> | 3.0        | 3025      | 0.1      | 79         | 1.08   | Yes    | No      | -               |
|        | K37   | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub> | 3.2        | 3018      | 0.1      | 77         | 1.11   | Yes    | No      | -               |
|        | K45   | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub> | 3.1        | 3106      | 0.1      | 4          | 1.14   | Yes    | No      | -               |
|        | K46   | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub> | 5.4        | 3086      | 0.1      | 83         | 1.11   | Yes    | Yes     | -               |
|        | K47   | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub> | 5.4        | 3023      | 0.1      | 82         | 1.11   | Yes    | No      | -               |
|        | K52   | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub> | 2.6        | 3133      | 0.2      | 102        | 1.11   | Yes    | Yes     | 0.02            |
| K53    | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub> | 3.6   | 3129       | 0.36      | 122      | 1.11       | Yes    | Yes    | 0.05    |                 |

表 3-4 FARO 実験の主要な実験条件及び実験結果<sup>[4]</sup>

| 実験名  | 実験ケース   | 溶融物組成  | 溶融物質量 (kg) | 溶融物温度 (K) | 圧力 (MPa) | サブクール度 (K) | 水深 (m) | 外部トリガー | 水蒸気爆発発生 | 機械的エネルギー変換効率 (%) |
|------|---|--|------------|-----------|----------|------------|--------|--------|---------|------------------|
| FARO | L-06  | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub>          | 18         | 2923      | 5        | 0          | 0.87   | No     | No      | -                |
|      | L-08  | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub>          | 44         | 3023      | 5.8      | 12         | 1.00   | No     | No      | -                |
|      | L-11  | 77wt.%UO <sub>2</sub> -19wt.%ZrO <sub>2</sub> -4wt.%Zr | 151        | 2823      | 5        | 2          | 2.00   | No     | No      | -                |
|      | L-14  | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub>          | 125        | 3123      | 5        | 0          | 2.05   | No     | No      | -                |
|      | L-19  | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub>          | 157        | 3073      | 5        | 1          | 1.10   | No     | No      | -                |
|      | L-20  | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub>          | 96         | 3173      | 2        | 0          | 1.97   | No     | No      | -                |
|      | L-24  | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub>          | 177        | 3023      | 0.5      | 0          | 2.02   | No     | No      | -                |
|      | L-27  | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub>          | 117        | 3023      | 0.5      | 1          | 1.47   | No     | No      | -                |
|      | L-28  | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub>          | 175        | 3052      | 0.5      | 1          | 1.44   | No     | No      | -                |
|      | L-29  | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub>          | 39         | 3070      | 0.2      | 97         | 1.48   | No     | No      | -                |
| L-31 | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub> | 92   | 2990       | 0.2       | 104      | 1.45       | No     | No     | -       |                  |
| L-33 | 80wt.%UO <sub>2</sub> -20wt.%ZrO <sub>2</sub> | 100  | 3070       | 0.4       | 124      | 1.60       | Yes    | No     | -       |                  |

表 3-5 COTELS 実験の主要な実験条件及び実験結果<sup>[7]</sup>

| 実験名    | 実験ケース | 溶融物組成   | 溶融物質量 (kg) | 圧力 (MPa) | サブクール度 (K) | 水深 (m) | 外部トリガー | 水蒸気爆発発生 | 機械的エネルギー変換効率 (%) |
|--------|-------|---|------------|----------|------------|--------|--------|---------|------------------|
| COTELS | A1    | 55wt.%UO <sub>2</sub> -25wt.%Zr-5wt.%ZrO <sub>2</sub> -15wt.%SS | 56.3       | 0.20     | 0          | 0.4    | No     | No      | -                |
|        | A4    | 55wt.%UO <sub>2</sub> -25wt.%Zr-5wt.%ZrO <sub>2</sub> -15wt.%SS | 27.0       | 0.30     | 8          | 0.4    | No     | No      | -                |
|        | A5    | 55wt.%UO <sub>2</sub> -25wt.%Zr-5wt.%ZrO <sub>2</sub> -15wt.%SS | 55.4       | 0.25     | 12         | 0.4    | No     | No      | -                |
|        | A6    | 55wt.%UO <sub>2</sub> -25wt.%Zr-5wt.%ZrO <sub>2</sub> -15wt.%SS | 53.1       | 0.21     | 21         | 0.4    | No     | No      | -                |
|        | A8    | 55wt.%UO <sub>2</sub> -25wt.%Zr-5wt.%ZrO <sub>2</sub> -15wt.%SS | 47.7       | 0.45     | 24         | 0.4    | No     | No      | -                |
|        | A9    | 55wt.%UO <sub>2</sub> -25wt.%Zr-5wt.%ZrO <sub>2</sub> -15wt.%SS | 57.1       | 0.21     | 0          | 0.9    | No     | No      | -                |
|        | A10   | 55wt.%UO <sub>2</sub> -25wt.%Zr-5wt.%ZrO <sub>2</sub> -15wt.%SS | 55.0       | 0.47     | 21         | 0.4    | No     | No      | -                |
|        | A11   | 55wt.%UO <sub>2</sub> -25wt.%Zr-5wt.%ZrO <sub>2</sub> -15wt.%SS | 53.0       | 0.27     | 86         | 0.8    | No     | No      | -                |

表 3-6 TROI 実験の主要な実験条件及び実験結果(1/2) [8] [9][18][19]

| 実験名  | 実験ケース                                     | 溶融物組成 (%)                                 | 溶融物質量 (kg) | 溶融物温度 (K)            | 圧力 (MPa) | 水温度 (K) | 水深 (m) | 外部トリガー      | 水蒸気爆発発生     | 機械的エネルギー変換効率(%) |
|------|---|---|------------|----------------------|----------|---------|--------|-------------|-------------|-----------------|
| TROI | 1   | ZrO <sub>2</sub> /Zr (99/1)               | 5          | >3373                | 0.1      | 365     | 0.67   | -           | Steam Spike | -               |
|      | 2   | ZrO <sub>2</sub> /Zr (99/1)               | 5.5        | >3373                | 0.1      | 365     | 0.67   | -           | No          | -               |
|      | 3   | ZrO <sub>2</sub> /Zr (99/1)               | 4.88       | >3373                | 0.1      | 323     | 0.67   | -           | No          | -               |
|      | 4   | ZrO <sub>2</sub> /Zr (99/1)               | 4.2        | >3373                | 0.1      | 292     | 0.67   | -           | Yes         | -               |
|      | 5   | ZrO <sub>2</sub> /Zr (98.5/1.5)           | 2.9        | 3373                 | 0.1      | 337     | 0.67   | -           | Yes         | -               |
|      | 9   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70/30) | 4.3        | 3200                 | 0.1      | 296     | 0.90   | -           | No          | -               |
|      | 10  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70/30) | 8.7        | 3800                 | 0.117    | 298     | 0.67   | -           | Yes         | -               |
|      | 11  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70/30) | 9.2        | >3800                | 0.111    | 296     | 0.67   | -           | No          | -               |
|      | 12  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70/30) | 8.4        | 3800                 | 0.11     | 293     | 0.67   | -           | Yes         | -               |
|      | 13  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70/30) | 7.7        | 2600 <sup>(注1)</sup> | 0.108    | 292     | 0.67   | -           | Yes         | 0.40%           |
|      | 14  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70/30) | 6.5        | 3000 <sup>(注2)</sup> | 0.105    | 285     | 0.67   | -           | Yes         | -               |
|      | 17  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70/30) |            |                      |          |         |        | -           | No          | -               |
|      | 18  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (78/22) | 9.1        |                      |          |         |        | -           | -           | -               |
|      | 21  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (80/20) | 17.0       | 3000                 | 0.110    | 298     | 1.30   | No          | No          | -               |
|      | 22  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (80/20) | 17.0       | 2900                 | 0.110    | 297     | 1.30   | No          | No          | -               |
|      | 23  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (80/20) | 17.0       | 3600                 | 0.110    | 293     | 1.30   | No          | No          | -               |
| 24   | ZrO <sub>2</sub>                          | 9.5                                       | 3600       | 0.110                | 288      | 0.67    | No     | Yes         | -           |                 |
| 25   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70/30) | 15.0                                      | 3500       | 0.110                | 287      | 0.67    | No     | Steam Spike | -           |                 |
| 26   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (80/20) | 17.0                                      | 3300       | 0.106                | 283      | 0.67    | No     | Steam Spike | -           |                 |

(注1) 参考文献[18]によれば温度計測に問題があり、実際には3500K程度以上と推測されている。

(注2) 参考文献[18]によれば二つの温度計が異なる最高温度(4000K, 3200K)を示しており、計測の不確かさが大きいとされている。



表 3-6 TROI 実験の主要な実験条件及び実験結果(2/2)<sup>[8][9][18][19]</sup>

| 実験名  | 実験ケース  | 溶融物組成 (%)  | 溶融物質量 (kg)      | 溶融物温度 (K)  | 圧力 (MPa) | 水温度 (K) | 水深 (m) | 外部トリガー      | 水蒸気爆発発生 | 機械的エネルギー変換効率(%) |   |
|------|--|--|-----------------|------------|----------|---------|--------|-------------|---------|-----------------|---|
| TROI | 29   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (50/50)                      | 11.5            |            |          |         |        | -           | No      | -               |   |
|      | 32   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (87/13)                      |                 |            |          |         |        | -           | No      | -               |   |
|      | 34   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70/30)                      | 10.5            | ~3000      |          | 341     | 0.67   | Yes         | Yes     | 0.63            |   |
|      | 35   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70/30)                      | 8               | ~3000      | 0.110    | 334     | 1.30   | Yes         | Yes     | 0.21            |   |
|      | 36   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70/30)                      | 5.3             | ~3000      |          | 305     | 0.95   | Yes         | Yes     | 0.50            |   |
|      | 37   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (78/22)                      | 8.1             | ~3000      | 0.104    | 313     | 0.95   | Yes         | Yes     | 0.01            |   |
|      | 38   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (78/22)                      | 5.3             | ~3000      | 0.105    | 288     | 1.30   | -           | No      | -               |   |
|      | 39   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (78/22)                      | 3.4             | ~3000      | 0.106    | 285     | 1.30   | -           | No      | -               |   |
|      | 40   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70/30)                      | 11.1            | ~3000      | 0.312    | 287     | 1.30   | -           | No      | -               |   |
|      | 49   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /Zr/Fe (62.3/15/11.7/11)     | 15.96           | 2730(3360) |          |         |        |             | -       | -               | - |
|      | 50   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /Zr/Fe (59.5/18/11.9/10.6)   | 14.46           |            |          |         |        |             | -       | -               | - |
|      | 51   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /Zr/Fe (60.5/16.7/12.1/10.7) | 6.3 (14.2 load) | 2695(3420) | 0.115    | 294     | 1.30   | Yes         | Yes     | -               |   |
| 52   | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /Zr/Fe (61/16/12/11) | 8.6 (14.1 load)  | 2650            | 0.116      | 285      | 1.30    | Yes    | Steam Spike | -       |                 |   |

(注1) 参考文献[18]によれば温度計測に問題があり、実際には3500K程度以上と推測されている。

(注2) 参考文献[18]によれば二つの温度計が異なる最高温度(4000K, 3200K)を示しており、計測の不確かさが大きいとされている。

表 3-7 SERENA 実験（フェーズ2）の主要な実験条件及び実験結果<sup>[21]</sup>

| 実験名                         | 実験ケース | 溶融物組成<br>(wt%)   | 溶融物質<br>量<br>(kg) | 溶融物温度<br>(K) | 圧力<br>(MPa) | 水温度<br>(K) | 水深<br>(m) | 外部トリガー | 水蒸気爆発発生                         | 機械的エネルギー<br>変換効率(%) |
|-----------------------------|-------|--|-------------------|--------------|-------------|------------|-----------|--------|---------------------------------|---------------------|
| SERENA<br>(TROI/<br>KROTOS) | TS-1  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (73.4/26.6)  | 15.4              | ~3000        | 0.4         | 301        | 1.0       | Yes    | Yes                             | 0.12                |
|                             | TS-2  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (68.0/32.0)  | 12.5              | 3063         | 0.2         | 334        | 1.0       | Yes    | Yes                             | 0.28                |
|                             | TS-3  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (71.0/29.0)  | 15.9              | 3107         | 0.2         | 331        | 1.0       | Yes    | Yes                             | 0.22                |
|                             | TS-4  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (81.0/19.0)  | 14.3              | 3011         | 0.2         | 333        | 1.0       | Yes    | Yes                             | 0.35                |
|                             | TS-5  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /Zr/U<br>(76.0/18.3/5.0/0.7)                               | 17.9              | 2940         | 0.2         | 337        | 1.0       | Yes    | Steam Spike                     | 0.06                |
|                             | TS-6  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FP<br>(73.3/18.5/4.9/3.3) | 9.3               | 2910         | 0.2         | 338        | 1.0       | Yes    | Yes                             | 0.66                |
|                             | KS-1  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70.0/30.0)  | 2.4               | 2969         | 0.4         | 302        | 1.1       | Yes    | Yes                             | 0.10                |
|                             | KS-2  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70.0/30.0)  | 3.9               | 3049         | 0.2         | 333        | 1.1       | Yes    | Yes                             | 0.08                |
|                             | KS-3  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (70.0/30.0)  | 0.8               | 2850         | -           | 332        | 1.1       | Yes    | _(注1)                           | _(注1)               |
|                             | KS-4  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> (80.0/20.0)  | 2.3               | 2958         | 0.2         | 332        | 1.1       | Yes    | Yes                             | 0.18                |
|                             | KS-5  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /Zr<br>(80.1/11.4/8.5)                                     | 1.7               | 2864         | 0.2         | 327        | 1.1       | Yes    | Energetic event <sup>(注2)</sup> | _(注2)               |
|                             | KS-6  | UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FP<br>(73.0/20.4/4.1/2.5) | 1.7               | 2853         | 0.2         | 340        | 1.1       | Yes    | Yes                             | ~0                  |

(注 1) 実験失敗

(注 2) 計測失敗

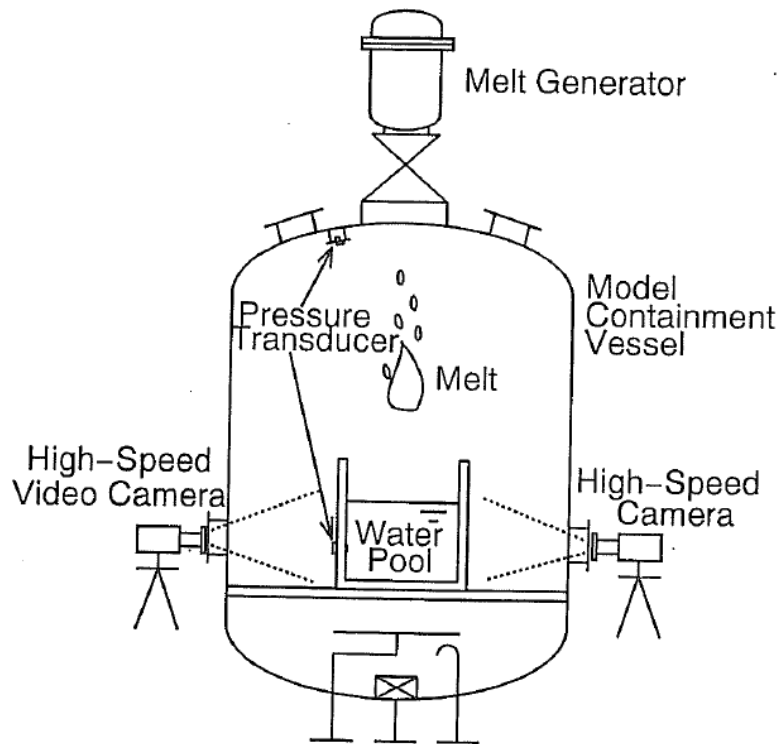
表 3-8 TROI 実験と実機条件の比較

| 実験ケース   | 溶融物温度<br>(過熱度) <sup>(注1)</sup> | 溶融<br>ジェット径 | 水深    | 粒子化割合 <sup>(注2)</sup> | 水蒸気爆発       |
|---------|--------------------------------|-------------|-------|-----------------------|-------------|
| TROI-10 | 3800K<br>(900K)                | 6.5cm       | 0.67m | 約 60%                 | Yes         |
| TROI-12 | 3800K<br>(900K)                | 6.5cm       | 0.67m | 約 60%                 | Yes         |
| TROI-23 | 3600K<br>(700K)                | 7.4cm       | 1.30m | 約 80%                 | No          |
| TROI-25 | 3500K<br>(600K)                | 8.0cm       | 0.67m | 約 50%                 | Steam Spike |
| 実機条件    | ~2600K<br>(~300K)              | 5~15cm      | 2.0m~ | 約 60~100%             | -           |

(注1) 実験条件の過熱度は  $UO_2/ZrO_2$  の相図<sup>[20]</sup>より固相線温度を約 2900K とした場合の概算値

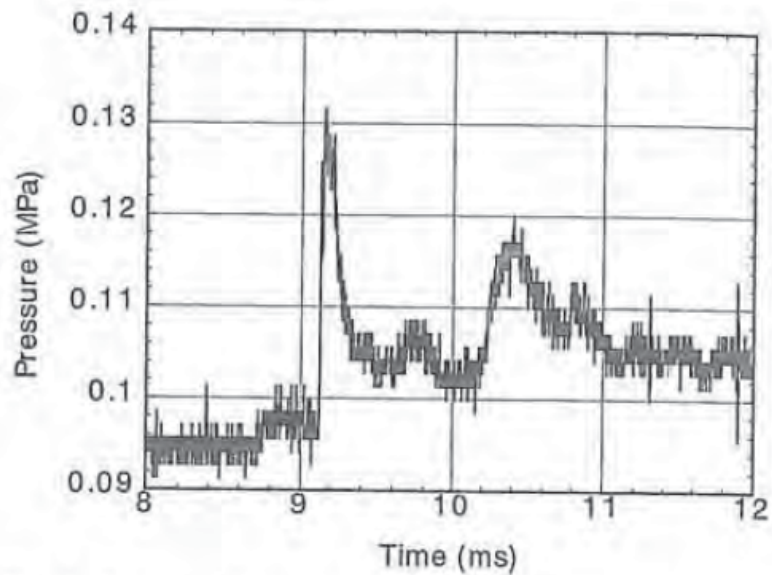
実機条件の過熱度は事故解析結果による下部プレナム部の溶融物（酸化層）の過熱度の概算値

(注2) Ricou-Spalding 相関式（図 3-11）による概算評価値



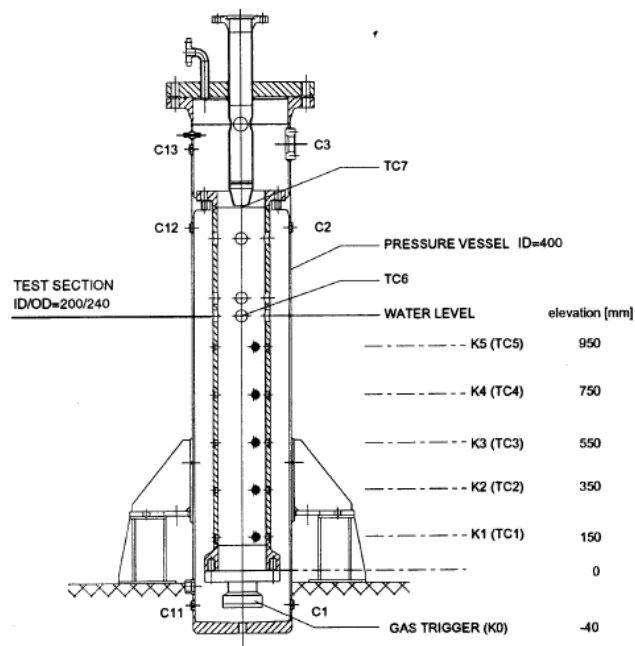
出典：参考文献<sup>[2]</sup> p. 371 Fig.1

図 3-1 ALPHA 実験装置の概要



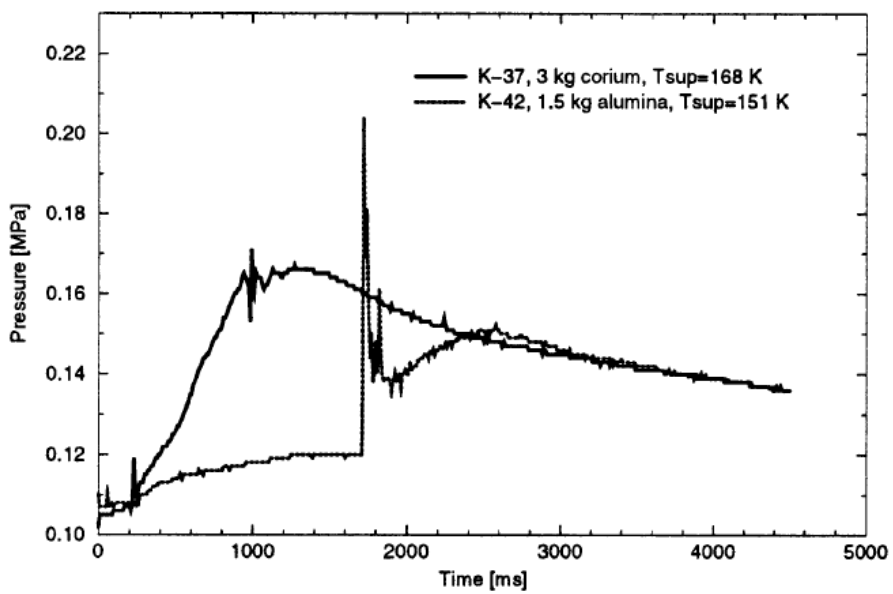
出典：参考文献<sup>[2]</sup> p. 380 Fig.8

図 3-2 ALPHA 実験の圧力評価の例 (STX016)



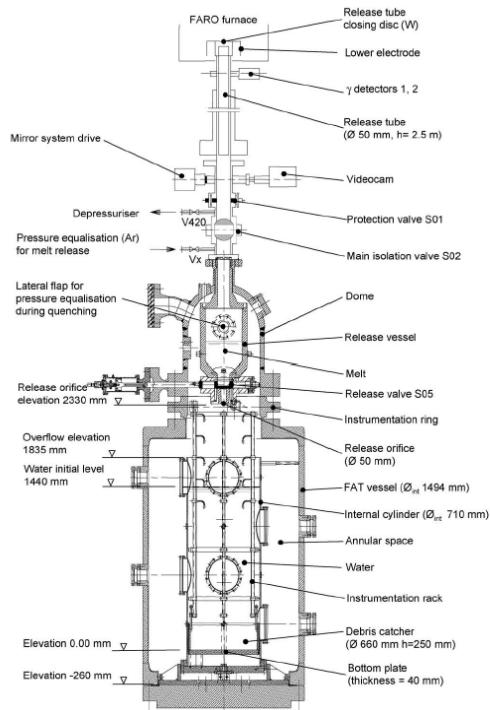
出典：参考文献<sup>[3]</sup> p. 380 Fig. 1

図 3-3 KROTOS 実験装置の概要



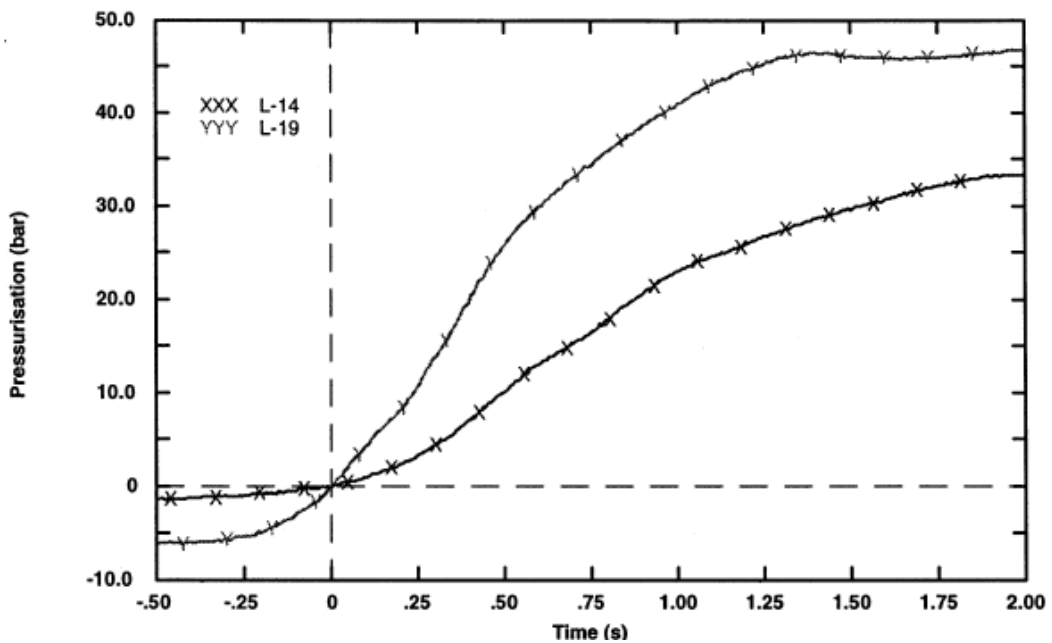
出典：参考文献<sup>[3]</sup> p. 385 Fig. 3

図 3-4 KROTOS 実験の代表的圧力変化の例 (K-37, K-42)



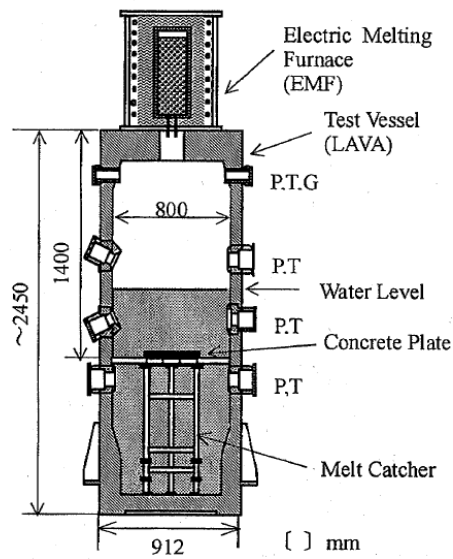
出典：参考文献<sup>[4]</sup> p.1999 Fig.1

図 3-5 FARO 実験装置の概要



出典：参考文献<sup>[6]</sup> p.229 Fig.6

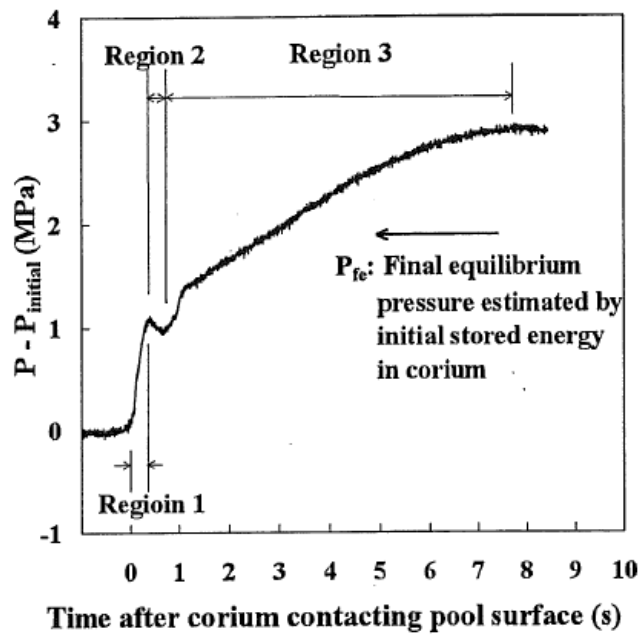
図 3-6 FARO 実験の圧力変化の例 (L-14, L-19)



P: Pressure, T: Temperature,  
G: Gas sampling line

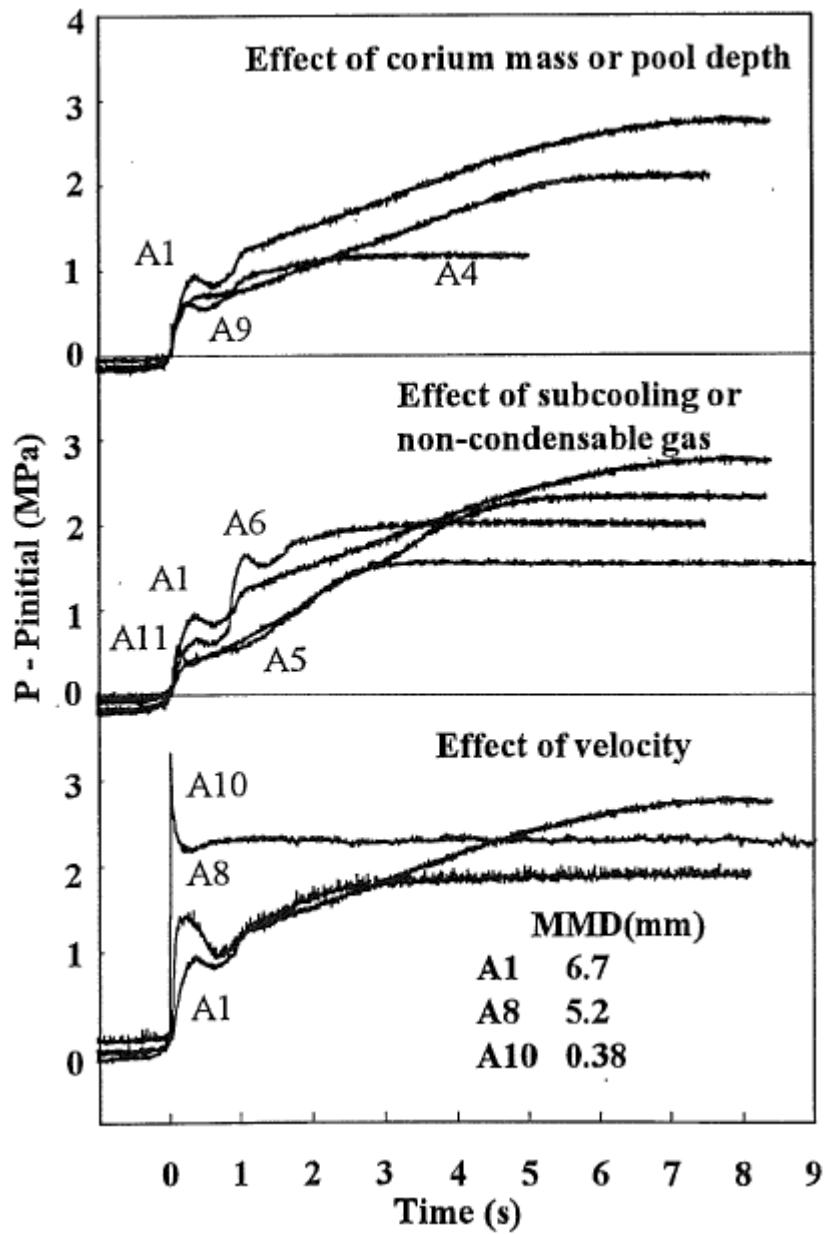
出典：参考文献<sup>[7]</sup> p. 37 Fig. 1

図 3-7 COTELS 実験装置の概要



出典：参考文献<sup>[7]</sup> p. 38 Fig. 2

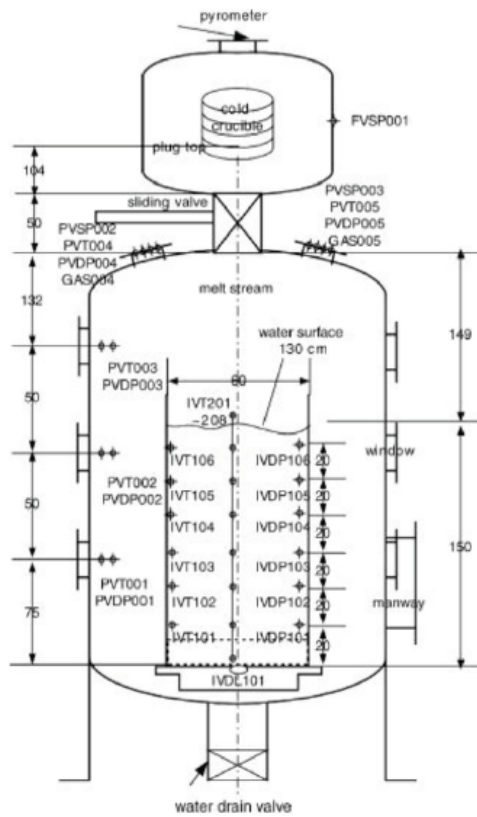
図 3-8 COTELS 実験の圧力変化の例 (A1)



出典：参考文献<sup>[7]</sup> p. 38 Fig. 3

図 3-9 COTELS 実験の各実験ケースの圧力変化





Expl.:  
 IVDP - water dynamic pressure  
 PVT - pressure vessel temperature  
 PVDP - pressure vessel dyn. pressure  
 PVSP - pressure vessel static press.  
 IVDL - bottom dynamic load  
 IVT - water temperature

2. set up  
 (surely from TROI-50  
 experiment)

出典：参考文献<sup>[8]</sup> Appendix B. p.202

図 3-10 TROI 実験装置の概要

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。



図 3-11 Ricou-Spalding 相関式による粒子化割合のマップ

#### 4. 不確かさに関する整理

ここでは原子炉圧力容器外 FCI について、有効性評価の不確かさ評価を行う。なお、前項で述べたように、原子炉圧力容器外 FCI における水蒸気爆発の発生可能性は低いことから、ここでは圧カスパイクの評価について検討する。

前項で示した既存 FCI 実験の知見の整理より、原子炉圧力容器外 FCI の圧カスパイクに影響する因子の分類として以下が考えられる。

- ・ 格納容器下部（ペDESTAL）領域のプール水の状態（サブクール度，水位）
- ・ 熔融炉心の落下量及び粒子化（破損口径，粒子化割合，落下速度）
- ・ プール水とデブリ粒子との伝熱（デブリ粒子径）

また、実機体系では原子炉圧力容器下部領域の圧力変化が格納容器のドライウェル空間に伝播される現象を伴うことから、影響因子として以下を追加する。

- ・ 格納容器内での水蒸気の流動

上記の影響因子の不確かさに対する感度解析を行うために、各影響因子の不確かさを解析モデルで考慮する方法について以下に示す。

##### (1) 格納容器下部（ペDESTAL）領域のプール水の状態（サブクール度，水位）

圧力容器下部のペDESTAL領域の水温が高い場合には、水蒸気発生量が多くなり圧カスパイクは厳しくなる。なお、MAAP では、蒸気の上昇速度がフラッディング臨界速度よりも大きい場合には、周囲の水が蒸気の流れによって巻き込まれ、巻き込まれた水蒸気の凝縮により蒸気発生量が減少する効果がモデル化されている。ペDESTAL領域の水は、ペDESTALへの注水によって形成されるので、その水温はペDESTAL注水温度に影響される。有効性評価では、ペDESTAL注水は外部水源から注水され、その水温は水源温度の実績値に対して高めの温度を設定している。したがって、圧カスパイクを厳しくする保守的な水温を設定しているが、本影響因子は解析モデルパラメータではないため、不確かさ評価は行わない。

ペDESTAL領域の水位に対しては、水深が深いほうが熔融炉心の細粒化量が大きくなる傾向がある。この場合、細粒化した粒子から水への伝熱量が多くなるので、圧カスパイクは厳しくなる方向である。本影響因子は解析モデルパラメータではないため、不確かさ評価は行わない。

##### (2) 熔融炉心の落下量及び粒子化（破損口径，粒子化割合，落下速度）

熔融炉心の落下量は、原子炉圧力容器の破損口径に依存する。原子炉圧力容器の破損は、原子炉圧力容器下部の制御棒駆動機構ハウジングの溶接部が破損し、制御棒駆動機構ハウジングが逸出することを想定している。原子炉圧力容器底部の口径が大きい貫通部として制御棒駆動機構ハウジングを想定している。なお、MAAP では熔融物流出に伴う破損口の径

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

方向侵食による破損口拡大も考慮されている。

細粒化量に関して、MAAP では Ricou-Spalding 式で評価される。Ricou-Spalding 式では、エントレインメント量（細粒化量）を流入流体の速度（ジェット速度）と両流体の密度比に関連させたモデルであり、液-液混合問題において広く利用されている相関式である。落下する炉心溶融物は円柱ジェットで冷却材中に突入することを想定し、円柱ジェット外周部の侵食として粒子化割合を評価している。円柱ジェットのエントレインメント速度 (m/s) は、次式で与えている。

$$m_{ent} = E_o \left( \frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} u_{dj} \quad (1)$$

ここで、 $E_o$  : エントレインメント係数

$u_{dj}$  : ジェット速度 [m/s]

$\rho_{dj}$  : ジェット密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_w$  : 水密度 [kg/m<sup>3</sup>]

水中でのジェット速度を一定と仮定し、水面から垂直方向に積分すると、プール底部（水深； $\Delta H_{pool}$ ）におけるジェット直径が(2)式のように得られる。

$$d_{dj} = d_{dj,o} - 2E_o \left( \frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} \Delta H_{pool} \quad (2)$$

(2)式を用いて、溶融ジェット断面の減少分が粒子化割合であるため、粒子化割合  $\Phi_{ent}$  は次式のように計算される。

$$\Phi_{ent} = \frac{d_{dj,o}^2 - d_{dj}^2}{d_{dj,o}^2} \quad (3)$$

以上の評価式において、デブリ粒子化割合に影響するパラメータは、エントレインメント係数、初期デブリ直径、圧力（僅かではあるが水の密度に影響）及びプール水深である。このうち溶融物ジェット径は保守的に設定しており、また、プール水深は解析モデルパラメータではない。

エントレインメント係数については、MAAP では代表的な FCI の大規模実験である FARO 実験に対するベンチマーク解析によって範囲を設定しており、推奨範囲は ～となっているため、粒子化量の不確かさとしてエントレインメント係数の感度を確認する。FARO 実験条件は、水プールの水深は 0.87～2.05m、水プールのサブクール度は飽和～124K、雰囲気圧力条件は 2～5.8MPa（高压条件）、0.2～0.5MPa（低压条件）の範囲で行われており、一方、実機条件では、格納容器下部の水位は 2～4m 程度、格納容器下部内の冷却材のサブク

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

ール度は、飽和～90K程度、雰囲気圧力は0.2MPa[abs]程度であることを考慮すると、実験条件は有効性評価解析の特徴的な条件を概ね包絡しており、ベンチマーク解析で検討されたエントレインメント係数の範囲で感度を確認すれば十分といえる。

溶融炉心の落下速度は、原子炉圧力容器内外の圧力差、溶融炉心の高さ（水頭）及び溶融炉心の落下距離に依存する。原子炉減圧により原子炉圧力容器内外の圧力差が十分小さくなることから、圧力差の不確かさの影響は小さい。また、有効性評価では原子炉圧力容器の下部プレナム部に全量に近い溶融炉心が堆積しており、原子炉圧力容器の破損位置も原子炉圧力容器底部中心となっているため、溶融炉心の水頭が高い状態となっている。この場合、溶融炉心の流出速度が大きく落下量も多くなるため、圧力スパイクの評価も厳しくなる。したがって、溶融炉心の水頭の不確かさ評価は必要ない。一方、落下距離については、プール水位に不確かさがある。BWR-5, Mark-I 改良型格納容器プラントの例では、落下距離の不確かさをプール水位の最大変動幅（3.4m）と仮定すると、ペDESTAL底部から原子炉圧力容器底部までの距離（約9.5m）の4割程度である。溶融炉心の落下速度が、落下距離の平方根に比例すると考えると、落下速度の不確かさは2割程度である。式（1）より溶融炉心の落下速度（ジェット速度）の不確かさはエントレインメント係数の不確かさとして評価できる。また、落下速度の不確かさはエントレインメント係数の不確かさ幅に包絡されている。したがって、溶融炉心の落下速度の不確かさの影響は、エントレインメント係数の不確かさ評価で確認できるため、落下速度の不確かさ評価は行わない。

### （3） プール水とデブリ粒子との伝熱（デブリ粒子径）

水中でエントレインされた高温のデブリ粒子は、その周囲を蒸気膜が覆う状態となり、デブリ粒子の熱伝達は膜沸騰熱伝達と輻射熱伝達に支配される。MAAPではエントレインメントしたデブリ粒子の温度を、これらの熱伝達を考慮した機構論的モデルにより計算する。また、デブリ粒子から水への伝熱は、デブリ粒子の径に直接依存する。MAAPでは、デブリ粒子径はジェットの表面張力に依存するモデルにより計算される。デブリ粒子径の導出式には、粒子径ファクタ（モデルパラメータ）が乗じられている。

デブリの粒子径ファクタについては、MAAPでは代表的なFCIの大規模実験に対するベンチマーク解析によって範囲を設定しており、推奨範囲は□～□となっているため、デブリ粒子の伝熱の不確かさは粒子径の不確かさとして考慮する。FARO実験条件は、水プールの水深は0.87～2.05m、水プールのサブクール度は飽和～124K、雰囲気圧力条件は2～5.8MPa（高圧条件）、0.2～0.5MPa（低圧条件）の範囲で行われており、一方、実機条件では、格納容器下部の水位は2～4m程度、格納容器下部内の冷却材のサブクール度は、飽和～90K程度、雰囲気圧力は0.2MPa[abs]程度であることを考慮すると、実験条件は有効性評価解析の特徴的な条件を概ね包絡しており、ベンチマーク解析で検討された範囲で感度を確認すれば十分といえる。

### （4） 格納容器内での水蒸気の流動

FCIによる圧力スパイクの評価の観点では、ペDESTAL領域の開口部からドライウエル側への気体の流れのモデルも不確かさの要因として考えられる。MAAPでは、格納容器内の流

動は、ノード・ジャンクションモデルを適用しており、ペDESTAL領域からドライウエル領域への流れは、ノードの圧力、ジャンクションの圧力損失により、差圧流や臨界流として扱われる。ジャンクションの圧力損失は、一般的な流動モデルを扱っていることから、不確かさは小さいと考えられる。

以上のFCIの不確かさに関する整理結果を表4-1に示す。また、FCIにおける不確かさに関するフローを図4-1に示す。

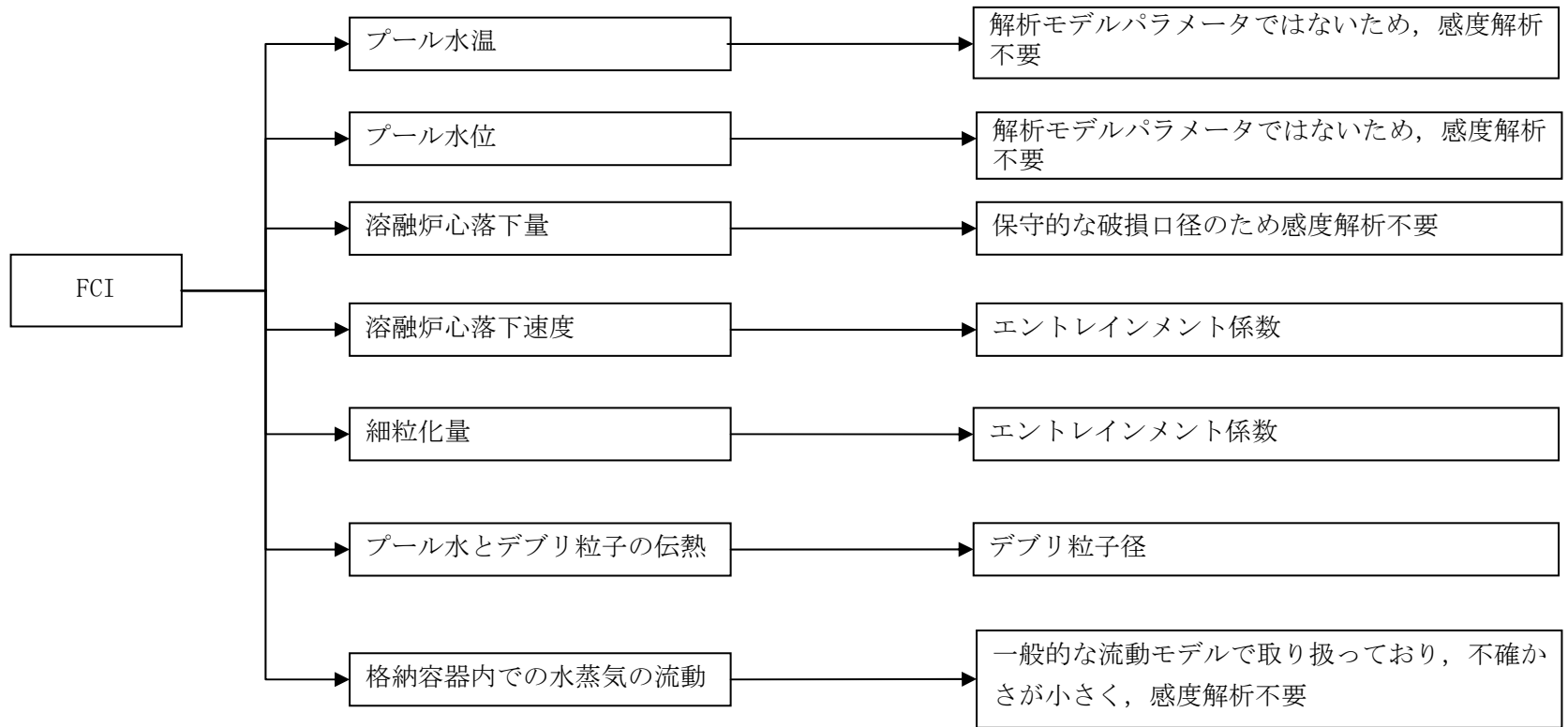


図 4-1 FCI における不確かさに関する流れ図

表 4-1 FCI の不確かさに関する整理結果(1/2)

| 影響因子     | 実機での実現象   | 解析上の取り扱い   | 感度解析条件  |
|----------|---|--|---|
| プール水温    | ペDESTAL注水の水温によりペDESTAL領域のプール水温が決まる。   | ペDESTAL注水の水温は、水源温度の実績値に対して高めの温度を設定している。                                      | 解析モデルパラメータではないため、感度解析は行わない。                     |
| プール水位    | ペDESTAL部の注水により水位が上昇するが、水位がペDESTAL部からドライウェル部への開口部に到達すると、プール水はドライウェル側に流出するため水位はこれ以上上昇しない。 | 有効性評価では、保守的に高めの水位としてペDESTAL部の開口部下端まで水位があるとしている（BWR-5, Mark-I 改良型格納容器プラントの例）。 | 解析モデルパラメータではないため、感度解析は行わない。                     |
| 溶融炉心落下量  | 破損口径と同じ径の大きさで炉心デブリが流出し、破損口も侵食すると想定される。  | 破損口径と同じ径で炉心デブリが流出する。破損口の侵食も考慮される。  | 原子炉圧力容器底部の口径が大きい貫通部として制御棒ハウジングを想定しているため感度解析は不要。 |
| 溶融炉心落下速度 | 原子炉圧力容器内外圧力差、溶融炉心の水頭、落下距離によって落下速度が決まる。  | 原子炉圧力容器内外圧力差、溶融炉心の水頭、落下距離によって落下速度が決まる。                                       | エントレインメント係数                                     |



表 4-1 FCI の不確かさに関する整理結果(2/2)

| 影響因子          | 実機での実現象  | 解析上の取り扱い                               | 感度解析条件                             |
|---------------|--|--|------------------------------------|
| 細粒化量          | デブリジェット径が大きいため、水中に落下する炉心デブリの内、エントレインメントされる部分はジェットの表面近傍に限られると想定される。 | デブリジェットに対して、Ricou-Spalding 式によって評価される。 | エントレインメント係数                        |
| プール水とデブリ粒子の伝熱 | デブリ粒子から水へ膜沸騰伝熱及び輻射熱伝達から伝熱量が決まる。                                    | デブリ粒子から膜沸騰伝熱及び輻射熱伝達を考慮したモデルによって評価される。  | デブリ粒子径                             |
| 格納容器内での水蒸気の流動 | ペDESTAL領域で発生した水蒸気が圧力差と流動抵抗によりドライウェル領域へ移行すると想定される。                  | ノード・ジャンクションモデルに従い、格納容器内を流れる水蒸気量が評価される。 | 一般的な流動モデルで取り扱っており、不確かさが小さく、感度解析不要。 |

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

## 5. 感度解析と評価

4章において抽出したパラメータに関し、感度解析を実施し、有効性評価に対する影響度合いを確認する。

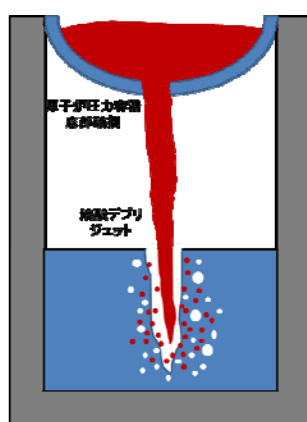
感度解析のベースケースは、BWR-5, Mark-I 改良型格納容器プラントにおける「高圧・低圧注水機能喪失（原子炉圧力容器破損）」である。

### (1) Ricou-Spalding のエントレインメント係数

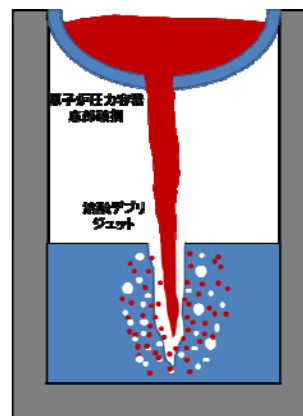
#### a. 解析条件

Ricou-Spalding のエントレインメント係数は、ベースケースでは MAAP 推奨範囲（～）のうちおよそ中間となる  を設定しているが、感度解析ケースでは、MAAP の当該変数の推奨範囲のうち最大値と最小値   を設定する。

| 項目      | エントレインメント係数          | 設定根拠            |
|---------|----------------------|-----------------|
| ベースケース  | <input type="text"/> | MAAP 推奨範囲のノミナル値 |
| 感度解析ケース | <input type="text"/> | MAAP 推奨範囲の最小値   |
|         | <input type="text"/> | MAAP 推奨範囲の最大値   |



ベースケース



感度解析ケース

エントレインメント係数を大きく（小さく）して細粒化割合が大きく（小さく）なるように設定

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

b. 解析結果

図 5-1-1～5-1-2 にエントレインメント係数の感度解析結果を示す。

ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は原子炉圧力容器破損以降に現れる。約 4.3 時間の時点で原子炉圧力容器の破損が発生しており、そのときの格納容器圧力の上昇は、感度解析ケース（最大値）の方が僅かに大きい結果となっている。また、格納容器下部水温については、原子炉圧力容器の破損に伴う溶融炉心の落下時点での温度上昇は感度解析ケース（最大値）の方が僅かに高い結果となっている。これは、エントレインメント係数を大きくすることで細粒化が進み、水との接触面積が大きくなり、水蒸気を短期間に発生させる効果があるためである。

c. 評価

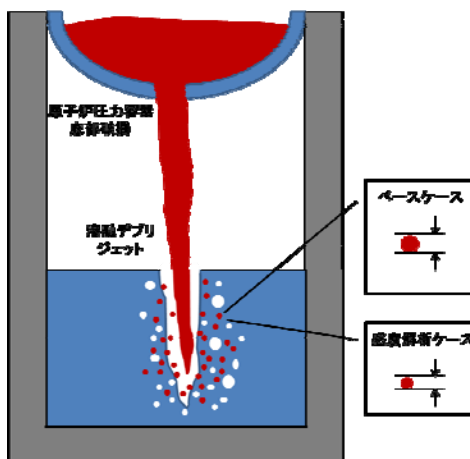
エントレインメント係数の圧カスパイクに対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さい。

(2) デブリ粒子径

a. 解析条件

デブリ粒子径には不確かさがあり、粒子径が小さい場合に圧カスパイクが大きくなると考えられる。粒子径ファクタは、ベースケースでは MAAP 推奨範囲 (  ~  ) のうちおよそ中間となる  を設定しているが、感度解析ケースでは、MAAP の当該変数の推奨範囲のうち最小値と最大値  ,  を設定する。

| 項目      | 粒子径ファクタ              | 設定根拠            |
|---------|----------------------|-----------------|
| ベースケース  | <input type="text"/> | MAAP 推奨範囲のノミナル値 |
| 感度解析ケース | <input type="text"/> | MAAP 推奨範囲の最小値   |
|         | <input type="text"/> | MAAP 推奨範囲の最大値   |



## b. 解析結果

図 5-2-1～5-2-2 に、デブリ粒子径の感度解析結果を示す。

粒子径ファクタは、原子炉圧力容器下部プレナム部の細粒化にも適用されていることから、本解析には、原子炉圧力容器下部プレナム部の細粒化効果も含まれる。原子炉圧力容器下部プレナム部に関する考察は添付 1 にて行っており、原子炉圧力への影響は僅かであることが確認されている。原子炉圧力容器の破損時刻は、感度解析ケース（最小値）の方が僅かに早い結果となっている。これは、デブリ粒子の径が小さくなることで下部プレナムに残留している冷却材の蒸発が早くなり、結果として原子炉圧力容器の破損が早まっている。約 4.3 時間で原子炉圧力容器の破損に至り、熔融炉心が格納容器下部に落下し、水蒸気発生に伴う圧力上昇となり、感度解析ケース（最小値）の方が早く上昇する結果となっている。これは、前述のとおり、感度解析ケース（最小値）の方が原子炉圧力容器の破損が早くなるためであり、この時の圧力上昇幅を比較すると、ベースケースと感度解析ケースとで大きな差はない。また、格納容器下部水温についても、原子炉圧力容器の破損後の温度上昇幅はベースケースと感度解析ケースとで大きな差はない。

## c. 評価

デブリ粒子径の圧カスパイクに対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さい。

### (3) 感度解析パラメータの組み合わせ

(2) で示したようにデブリ粒子径の圧カスパイクへの感度はほとんどない。このため、エントレインメント係数とデブリ粒子径の感度解析パラメータを組み合わせた解析は、エントレインメント係数の保守側のパラメータの感度解析とほぼ同じとなる。

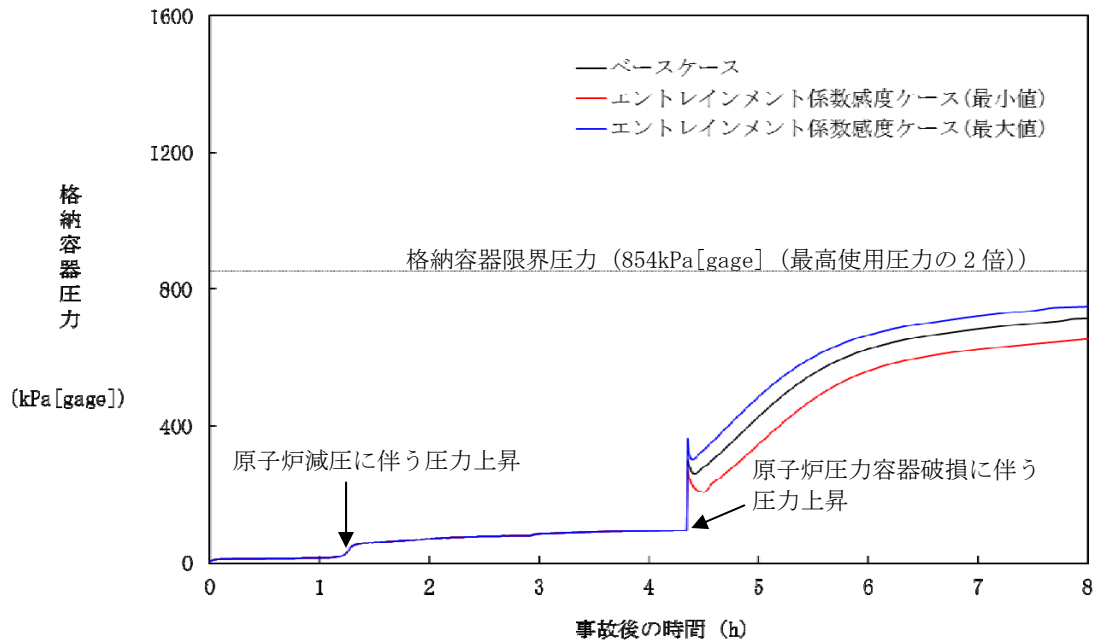


図 5-1-1 エントレインメント係数の感度解析 (ドライウェル圧力)

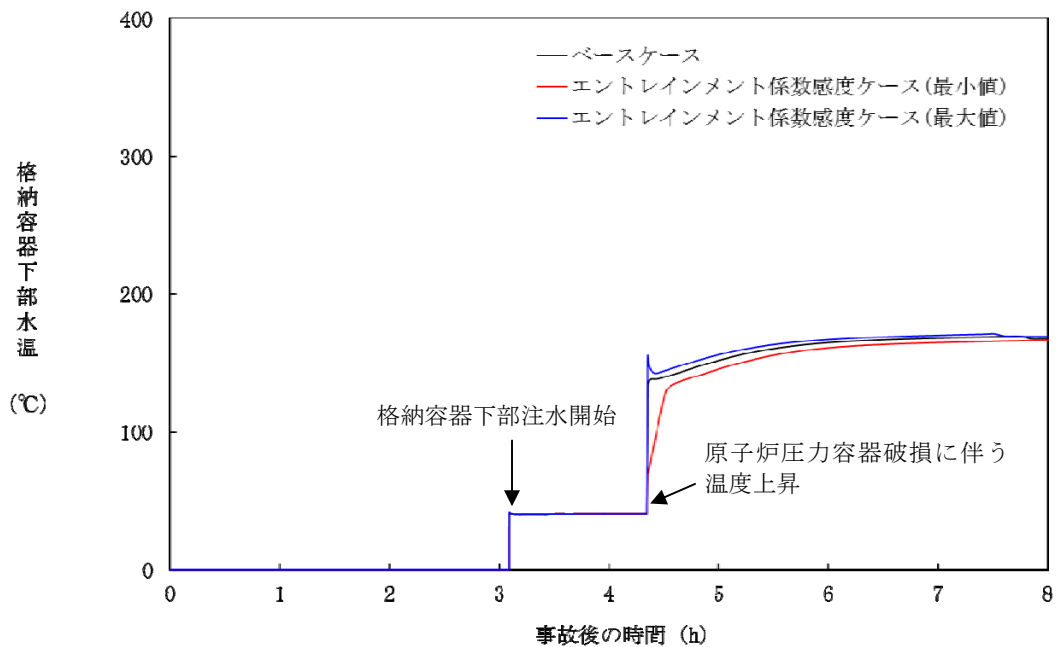


図 5-1-2 エントレインメント係数の感度解析 (格納容器下部水温)

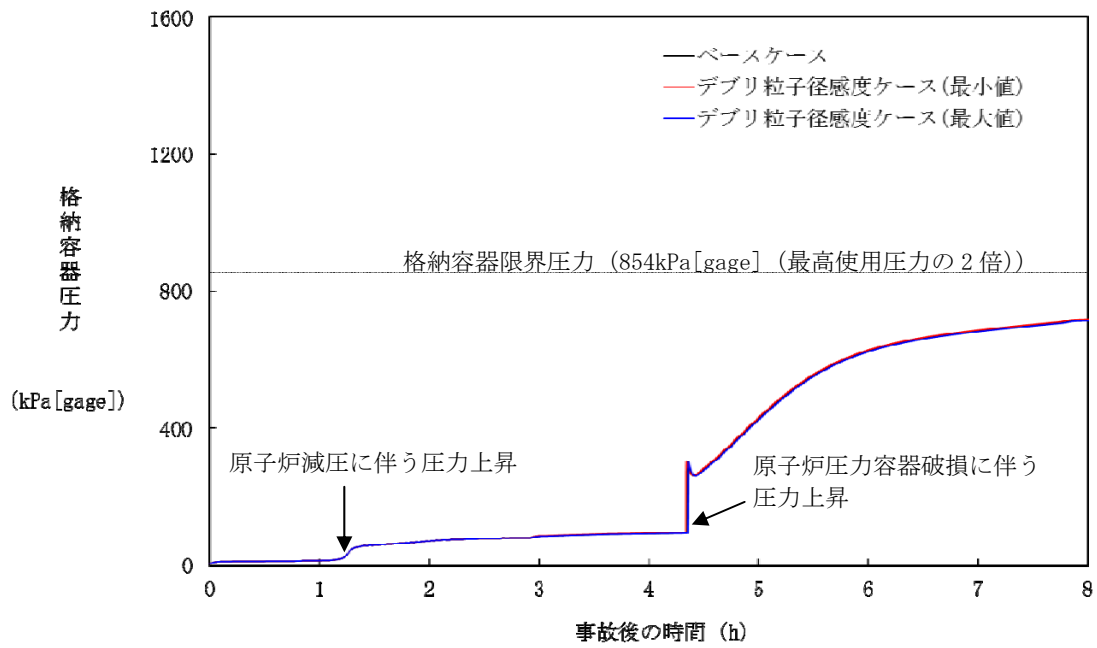


図 5-2-1 デブリ粒子径の感度解析 (ドライウェル圧力)

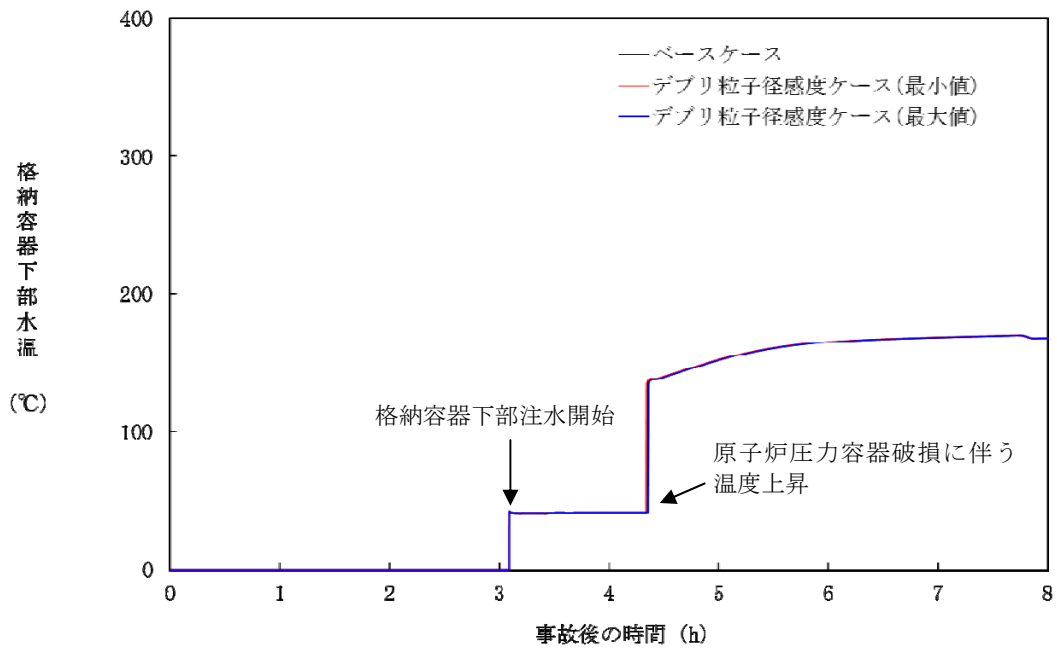


図 5-2-2 デブリ粒子径の感度解析 (格納容器下部水温)

## 6. まとめ

原子炉压力容器外における溶融燃料-冷却材相互作用については、これまでに実ウランを用いて種々の実験が行われているが、外部からの強制的なトリガーを与えない場合には水蒸気爆発は発生しないという結果が得られている。外部トリガーを与えた場合でも水蒸気爆発に至らなかったケースが複数確認されており、また、水蒸気爆発が発生した場合においても機械的エネルギーへの変換効率は小さく、大規模な水蒸気爆発には至っていない。したがって、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて小さいと考えられる。

原子炉容器外 FCI のうち、圧力スパイクへの影響因子について、実現象と解析モデルにおける取り扱いに着目し、以下に挙げるものを抽出した。

- ・ 格納容器下部（ペDESTAL）領域のプール水の状態（サブクール度，水位）
- ・ 溶融燃料の落下量及び粒子化（破損口径，落下速度，粒子化割合）
- ・ プール水とデブリ粒子との伝熱（デブリ粒子径）
- ・ 格納容器内での水蒸気の流動

これらの項目について、不確かさの幅を考慮した感度解析を実施し、圧力スパイクに対する影響を評価した結果、いずれの項目においても圧力スパイクに対する感度は小さく、重大事故等対策の有効性評価に影響を与えないことを確認した。

## 付録1 FARO 実験による MAAP の圧力スパイクモデル妥当性確認

### 1. FARO 実験の概要

FCI の代表的実験である FARO 実験は、 $UO_2/ZrO_2/Zr$  熔融混合物を噴出させ、装置下部の冷却材との相互作用を検証する実験である。実験装置、実験条件及び実験結果の概要は 3.1 章 (3) FARO 実験に記載している。

### 2. MAAP コードによる FARO 実験の検証解析

MAAP コードでは、熔融炉心と冷却材の相互作用を計算し、圧力スパイクを取り扱うモデルに関するパラメータのうち、3つのモデルパラメータが FARO 実験のベンチマーク解析によって妥当性を評価されている。熔融炉心のエントレインメント係数、及び粒子径ファクタである。

エントレインメント係数は、ジェット速度と密度比から熔融炉心のエントレインメント量を計算する際の係数であり、細粒化モデル (Ricou-Spalding モデル) に使用される。エントレインメント量はプール水への伝熱量に寄与する。また、エントレインメント速度 (m/s) を求める下式からは、プール底部におけるジェット直径、ジェットの粒子化割合が求められる。

$$m_{ent} = E_o \left( \frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} u_{dj}$$

$E_o$  : エントレインメント係数

$u_{dj}$  : ジェット速度 [m/s]

$\rho_{dj}$  : ジェット密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_w$  : 水密度 [kg/m<sup>3</sup>]

粒子径ファクタは、ジェット表面からエントレインメントを受けた粒子の直径を計算する際の係数である。計算された粒子径は、粒子の沈降速度やデブリ温度の計算に用いられる。

圧力スパイクモデルのベンチマーク解析における仮定を以下に示す。



本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



上記の仮定によって、解析結果と実験結果の比較には制限があるが、ピーク圧力の上昇（すなわち、圧力スパイク挙動）と圧力の上昇速度については、比較が可能である。

付図 1～付図 12 に L-06, L-08, L-14, L-11 実験の圧力及びデブリ粒子径及び堆積デブリ質量の実験結果と、MAAP 解析結果の比較図を示す。MAAP 解析結果は、3つのパラメータに対して、最適値、最大値、最小値の組み合わせを用いて評価されている。また、付表 1 に L-06, L-08, L-14, L-11 実験の過熱度を示す。

付表 1 FARO 実験における過熱度<sup>[2 3]</sup>

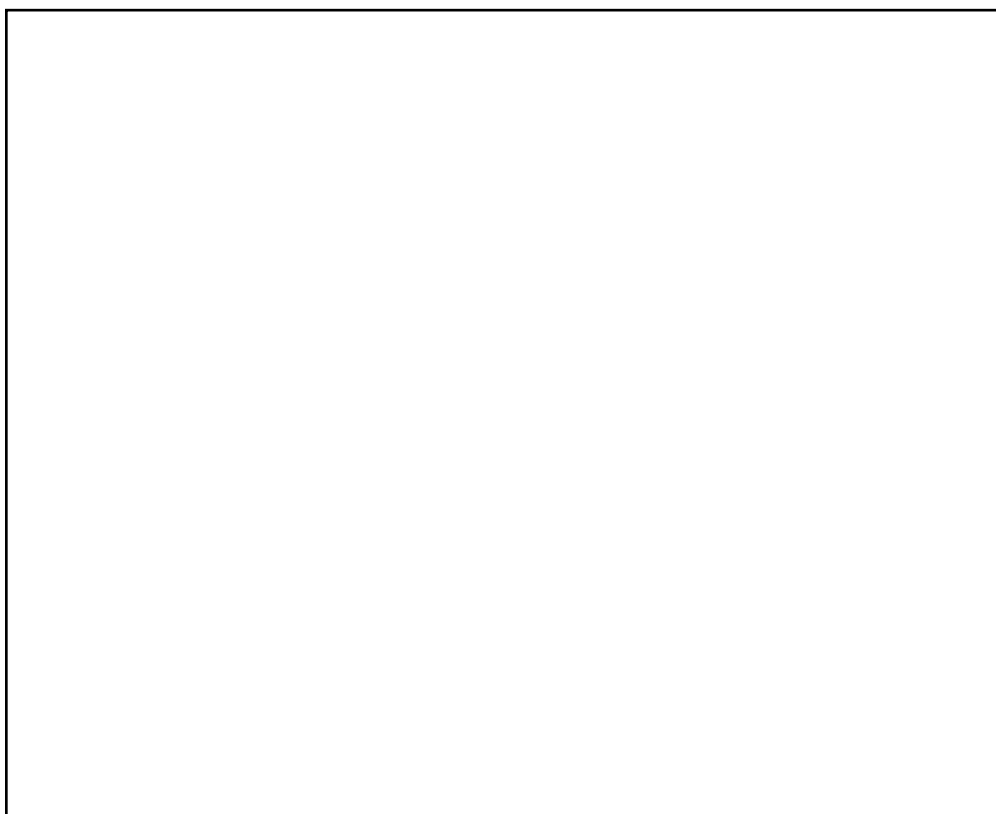
| 実験ケース  | L-06 | L-08 | L-14 | L-11 |
|--------|------|------|------|------|
| 過熱度[K] | 63   | 163  | 263  | 100  |

いずれの実験の圧力挙動も、MAAP 解析結果では再現をみた。



また、デブリ粒子径及び堆積デブリ質量についても、実験結果のデータは、エントレインメント係数及び粒子径ファクタを変化させた場合の MAAP 解析結果の範囲内によく再現されている。

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



付図 1 L-06 実験結果/解析結果比較 (圧カスパイク) [22]

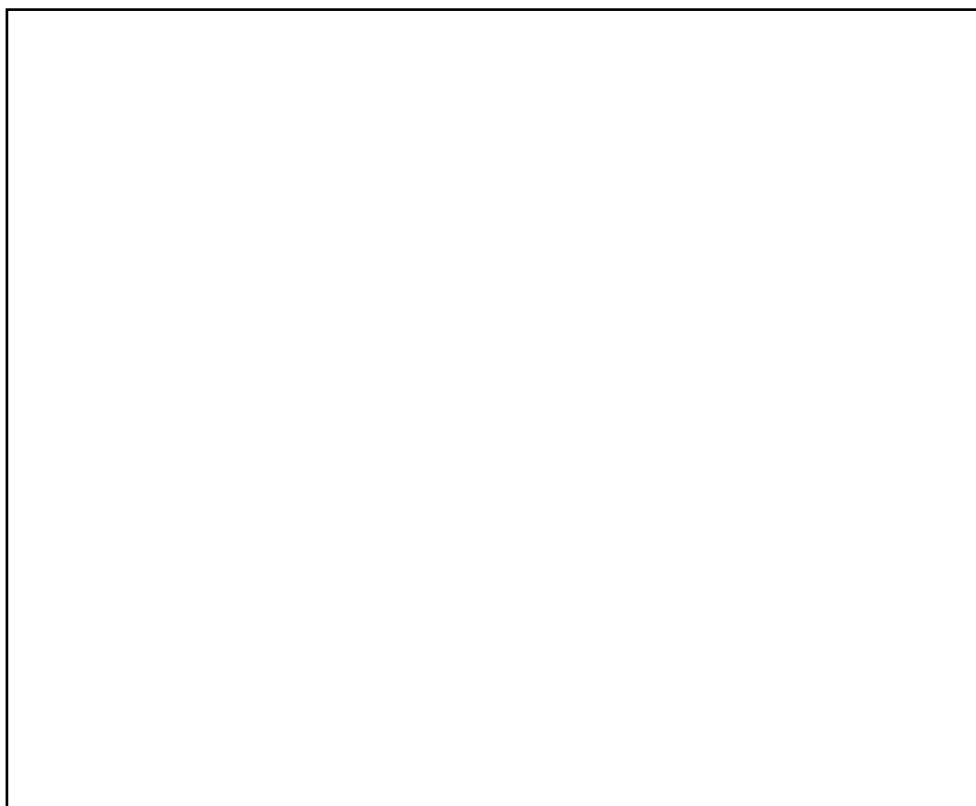


付図 2 L-08 実験結果/解析結果比較 (圧カスパイク) [22]

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。

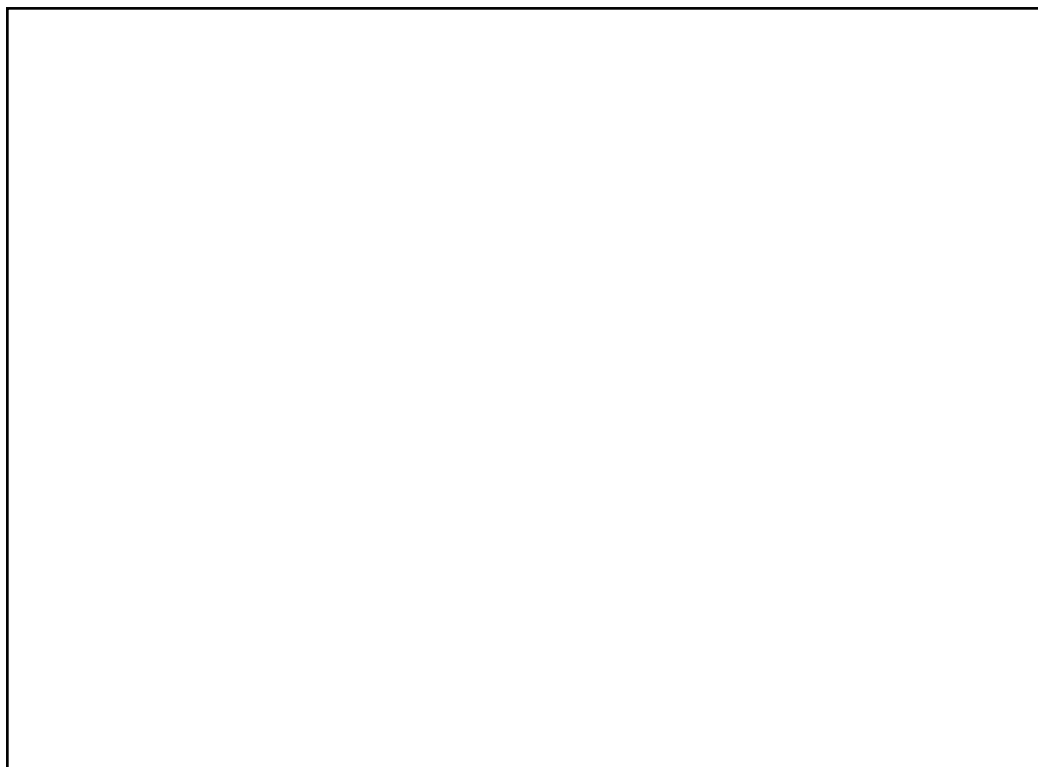


付図 3 L-14 実験結果/解析結果比較 (圧カスパイク) [22]



付図 4 L-11 実験結果/解析結果比較 (圧カスパイク) [22]

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

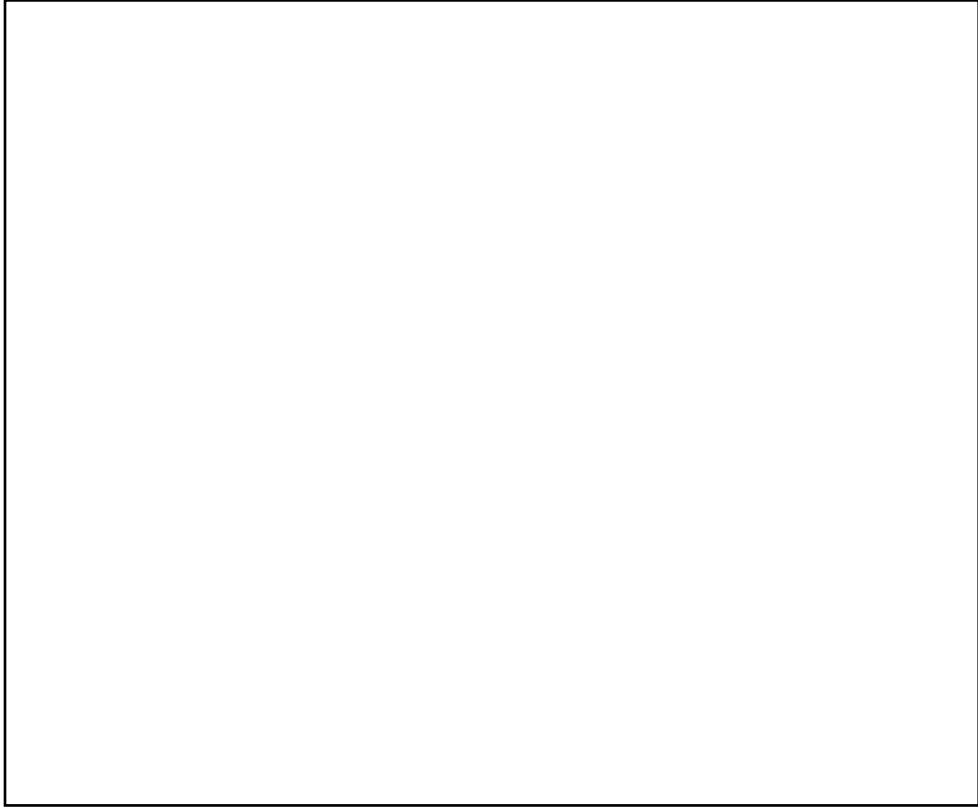


付図 5 L-06 実験結果/解析結果比較 (デブリ粒子径) <sup>[22]</sup>

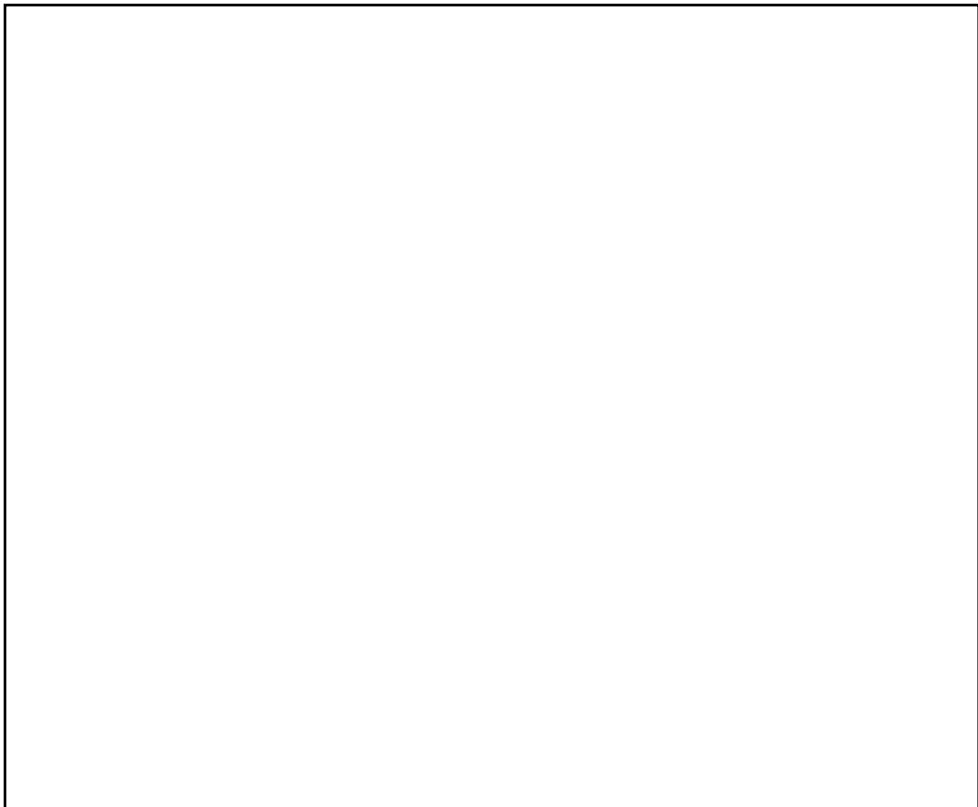


付図 6 L-08 実験結果/解析結果比較 (デブリ粒子径) <sup>[22]</sup>

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。

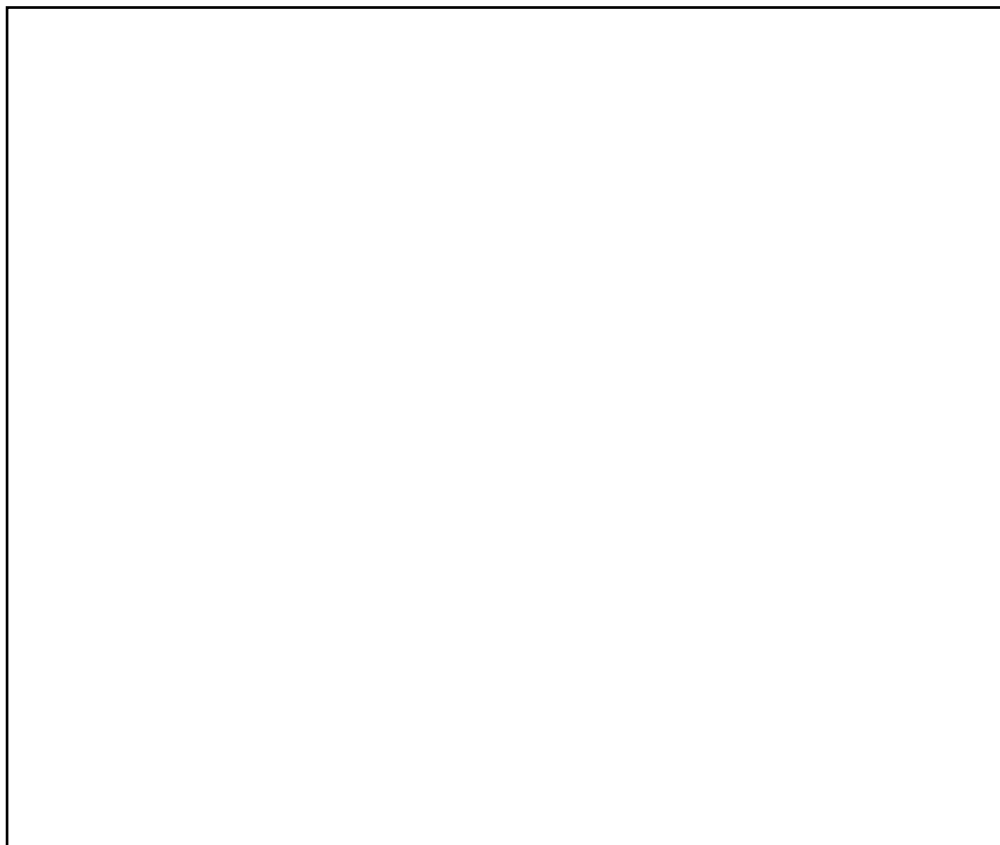


付図7 L-14 実験結果/解析結果比較 (デブリ粒子径) <sup>[22]</sup>

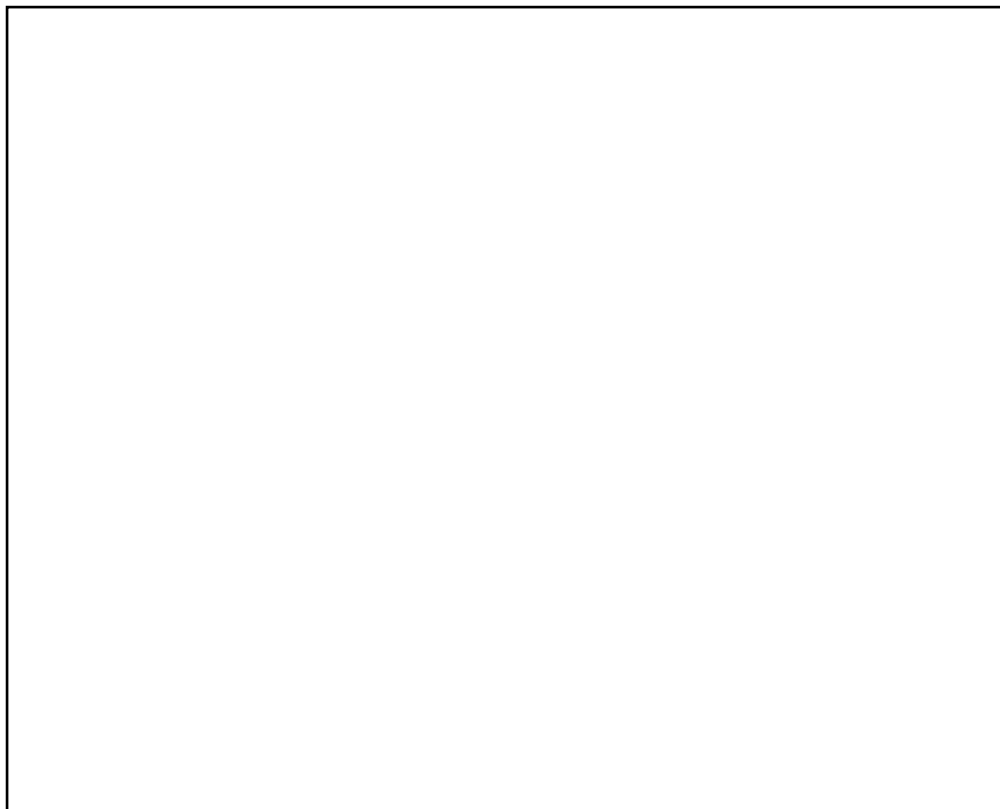


付図8 L-11 実験結果/解析結果比較 (デブリ粒子径) <sup>[22]</sup>

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

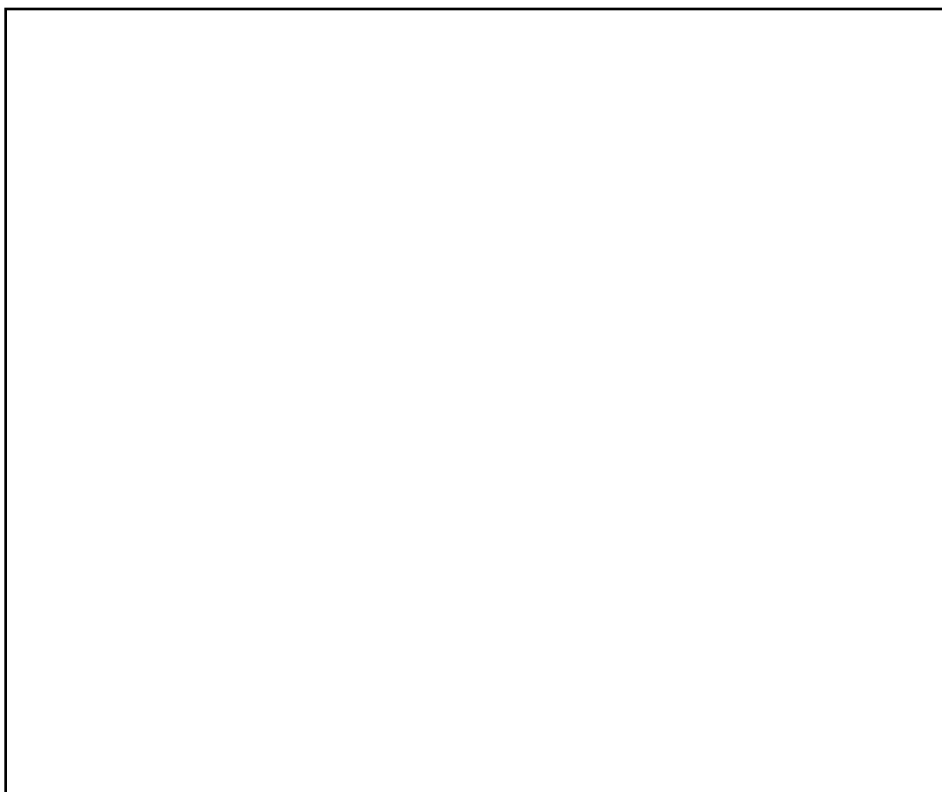


付図 9 L-06 実験結果/解析結果比較 (堆積デブリ質量) [22]

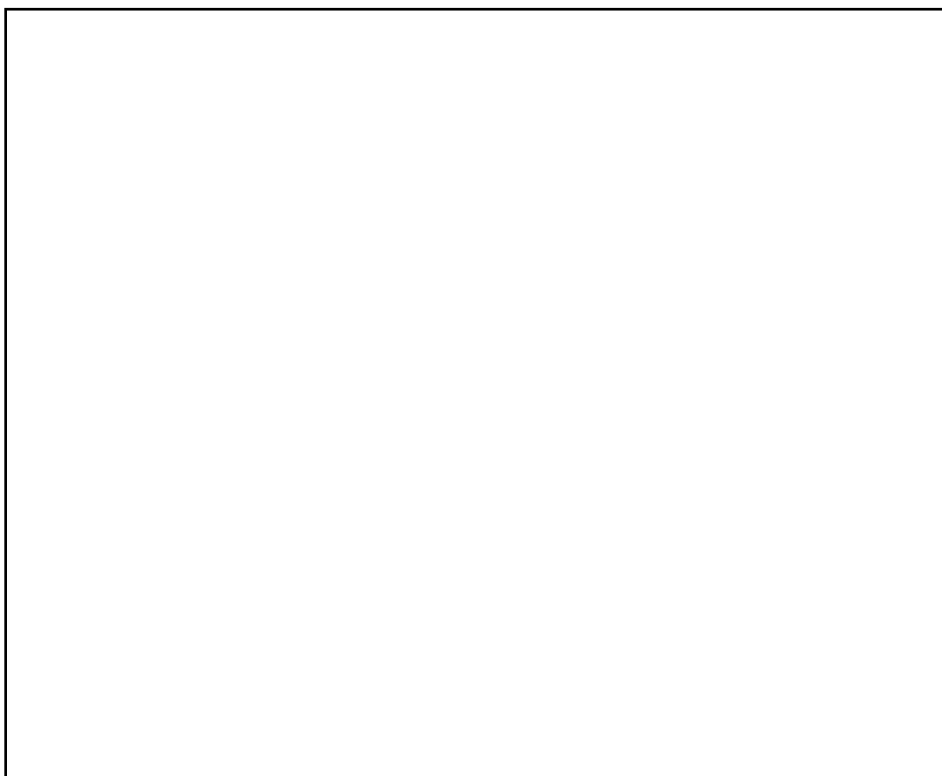


付図 10 L-08 実験結果/解析結果比較 (堆積デブリ質量) [22]

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



付図 11 L-14 実験結果/解析結果比較 (堆積デブリ質量) <sup>[22]</sup>



付図 12 L-11 実験結果/解析結果比較 (堆積デブリ質量) <sup>[22]</sup>

### 3. 結論

MAAP コードでは、FCI に関わる圧カスパイク挙動はデブリジェットモデルで制御されており、その妥当性確認は FARO 実験結果とのベンチマーク解析によって行われている。FARO 実験結果の示す圧カスパイク挙動のピーク圧力、圧カ上昇及びデブリ粒子径について、MAAP コードはよく再現されており、その妥当性が確認されている。



## 参考文献

---

- [ 1 ] U. S. NRC, Reactor Safety Study, An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400, NUREG-75/014, Oct. 1975
- [ 2 ] N. Yamano, Y. Maruyama, T. Kudo, A. Hidaka, J. Sugimoto, Phenomenological studies on melt-coolant interactions in the ALPHA program, Nucl. Eng. Des. 155 369-389, 1995
- [ 3 ] I. Huhtiniemi, D. Magallon, H. Hohmann, Results of recent KROTOS FCI tests: alumina versus corium melts, Nucl. Eng. Des. 189 379-389, 1999
- [ 4 ] D. Magallon, Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments, Nucl. Eng. Des. 236 1998-2009, 2006
- [ 5 ] H. S. Park, R. Chapman, M. L. Corradini, Vapor Explosions in a One-Dimensional Large-Scale Geometry With Simulant Melts, NUREG/CR-6623, 1999
- [ 6 ] D. Magallon, et al, Lessons learnt from FARO/TERMOS corium melt quenching experiments, Nucl. Eng. Des. 189 223-238, 1999
- [ 7 ] M. Kato, H. Nagasaka, COTELS Fuel Coolant Interaction Tests under Ex-Vessel Conditions, JAERI-Conf 2000-015, 2000
- [ 8 ] V. Tyrpekl, Material effect in the fuel - coolant interaction : structural characterization and solidification mechanism, 2012
- [ 9 ] J.H.Kim, et al, The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments, Proceedings of ICAPP' 04
- [ 1 0 ] (財) 原子力安全研究協会, 「シビアアクシデント対策評価のための格納容器イベントツリーに関する検討」, 平成 13 年 7 月
- [ 1 1 ] K.Moriyama, et al, Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA-Data/Code 2008-014, 2008
- [ 1 2 ] 片山, 高速衝突と爆発問題を中心とした諸分野における衝撃解析, 「第 7 回衝撃工学フォーラム (中級者のための衝撃工学入門)」, 日本材料学会, 平成 20 年 11 月
- [ 1 3 ] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA KEYWORD USER' S MANUAL VOLUME I, 2007
- [ 1 4 ] T. Okkonen, et al, Safety Issues Related to Fuel-Coolant Interactions in BWR' S, NUREG/CP-0127, 1994
- [ 1 5 ] T. G. Theofanous, et al, Steam Explosions: Fundamentals and Energetic Behavior, NUREG/CR-5960, 1994
- [ 1 6 ] S. Basu, T. Ginsberg, A Reassessment of the Potential for an Alpha-Mode Containment Failure and a Review of the Current understanding of Broader Fuel-Coolant Interaction (FCI) issues, Report of the Second Steam Explosion Review Group Workshop (SERG-2), NUREG-1524, 1996

- 
- [ 1 7 ] O.Zuchuat, et al, Steam Explosions-Induced Containment Failure Studies for Swiss Nuclear Power Plants, JAERI-Conf 97-011, 1998
- [ 1 8 ] J.H. Song, Fuel Coolant Interaction Experiments in TROI using a UO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> mixture, Nucl. Eng. Des., 222, 1-15, 2003
- [ 1 9 ] J.H. Kim, Results of the Triggered Steam Explosions from the TROI Experiment, Nucl. Tech., Vol.158 378-395, 2007
- [ 2 0 ] NUCLEA Nuclear Thermodynamic Database, Version 2005-01
- [ 2 1 ] NEA/CSNI/R, OECD/SERENA Project Report Summary and Conclusions, 2015
- [ 2 2 ] Electric Power Research Institute (EPRI), MAAP4, Modular Accident Analysis Program User' s Manual, EPRI Report prepared by Fauske & Associates, Inc
- [ 2 3 ] D. Magallon, Experimental investigation of 150-kg-scale corium melt jet quenching in water, Nucl. Eng. Des. 177 321-337, 1997

Rev.12

添付 3

溶融炉心とコンクリートの相互作用について

# 目次

|                                 |         |
|---------------------------------|---------|
| 1. まえがき .....                   | 5-3-1   |
| 2. 現象の概要 .....                  | 5-3-2   |
| 3. これまでの知見の整理.....              | 5-3-3   |
| 4. 評価モデルと不確かさに関する整理.....        | 5-3-6   |
| 5. 感度解析と評価 .....                | 5-3-27  |
| 6. まとめ .....                    | 5-3-39  |
| 付録 .....                        | 5-3-40  |
| 付録1 ドライ条件での MCCI 実験 .....       | 5-3-40  |
| 付録2 注水を伴った MCCI 実験 .....        | 5-3-47  |
| 付録3 溶融物の水中落下時の粒子化実験と解析モデル ..... | 5-3-72  |
| 付録4 溶融物の拡がり実験 .....             | 5-3-89  |
| 付録5 粒子状ベッドの冷却性実験と解析モデル .....    | 5-3-103 |
| 参考文献 .....                      | 5-3-105 |

## 1. まえがき

溶融炉心-コンクリート相互作用 (MCCI) は、炉心溶融が進展し、溶融炉心が原子炉圧力容器底部を溶融貫通し、格納容器下部のペDESTAL床に落下した場合に発生する現象である。MCCI が継続すると、格納容器構造の侵食や非凝縮性ガス（水素等）発生による格納容器過圧により格納容器破損に至る可能性があり、重要な格納容器破損モードと考えられてきており、これまで種々の実験や解析モデルの開発が行われてきている。これまでは、注水が無いドライ条件での MCCI 挙動や溶融炉心上に注水した場合（Top Flooding）の MCCI 抑制効果を調べる研究が主に行われてきた。

MCCI の緩和対策として、溶融炉心落下後に注水する以外に、溶融炉心落下前にペDESTALに事前水張りするマネジメントが効果的とされており<sup>[1]</sup>、本有効性評価ではこの対策を前提としている。事前水張りにより、溶融炉心が落下時に水中で粒子化され、溶融炉心が粒子状ベッドとして堆積し、デブリ冷却性の向上が期待されるためである（図 1-1 参照）。

本資料では、国内外で実施された実験等による知見を整理するとともに、解析モデルに関する不確かさの整理を行い、感度解析により有効性評価への影響を確認した。

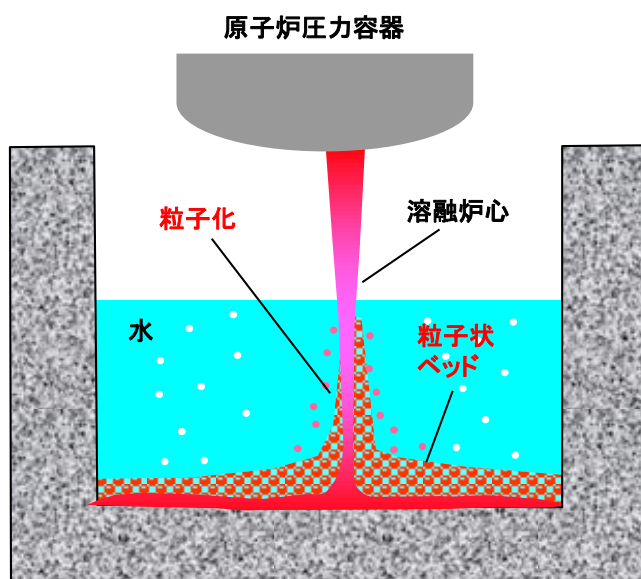


図1-1 ペDESTAL事前水張りによるデブリ粒子化の概念

## 2. 現象の概要

MCCI は、溶融炉心が原子炉压力容器下部を溶融貫通して格納容器床面に落下し、床面のコンクリートと接触した場合に発生し、高温の溶融炉心によりコンクリートが加熱され熱分解し溶融侵食される現象である。侵食が継続した場合、格納容器バウンダリの破損や格納容器内支持構造の強度低下に至る可能性がある。また、コンクリートの熱分解により発生する水蒸気及び二酸化炭素が溶融炉心内を通過する間に未酸化金属成分と反応して水素や一酸化炭素等の非凝縮性の可燃性ガスが発生し、格納容器内の過圧や燃焼に至る可能性がある。このような要因により格納容器破損に至る可能性があり、MCCI は重要な格納容器破損モードと考えられている。MCCI を停止するためには、落下した溶融物（コリウム）を冷却することにより、侵食限界に至る前にコリウムと接しているコンクリート温度を溶融温度(約 1500 K)以下にすることが必要となる。

国内 BWR では、原子炉压力容器破損前にペDESTALへ水張りをを行い、下部ヘッドが破損し溶融炉心が落下した際の溶融炉心の冷却を促進することにより、MCCI を緩和する対策を採っている。ペDESTALに落下した溶融炉心は、水プール中を落下する際に、一部は粒子化して水中にエントレインされ、残りは床面に落下して堆積し溶融プールを形成する。エントレインされたデブリ粒子は、水中を浮遊しながら水へ膜沸騰による熱伝達が行われて冷却され、クエンチし、溶融プール上に堆積し、粒子状ベッドを形成する。

ペDESTAL床に堆積した溶融炉心は、崩壊熱や化学反応熱により発熱しているが、水やコンクリートへの伝熱により徐々に冷却され、溶融炉心温度が固化温度を下回ると固化する。溶融炉心の冷却の過程では、中心に溶融プール(液相)、外周部にクラスト(固相)が形成される。溶融炉心上のプール水との伝熱は粒子状ベッドを介して行われるため、冷却効果は、粒子状ベッドの冷却性に依存する。

ペDESTALの溶融炉心と接触しているコンクリートは、溶融炉心からの熱伝達により加熱され、その温度が融点を上回ると溶融し侵食される。この際にガス(水蒸気及び二酸化炭素)及びコンクリートスラグが発生し、溶融炉心に混入されて化学反応(未酸化 Zr による還元反応)により、反応熱とともに水素や一酸化炭素が発生する。

MCCI によるコンクリート侵食量は、溶融炉心から上部水プール、壁方向及び床方向のコンクリートへの熱分配に支配される。国内 BWR の MCCI 対策としている事前水張りをしている場合には、溶融炉心上面からの除熱が支配的となるため、相対的にコンクリートへの熱移行は抑えられ、コンクリート侵食量は抑えられる。この場合には、上面熱流束が重要となる。また、万一事前水張りできず、溶融炉心上面からの除熱が十分でない場合は、コンクリートへの熱移行量が増え、コンクリート侵食量は大きくなる。この場合には、コンクリートへの熱伝達が重要となる。

### 3. これまでの知見の整理

本章では、MCCIに関する実験の概要及びそこで得られた知見に関して整理を行う。

MCCIに関する実験としては、水による冷却を伴わない実験として米国アルゴンヌ国立研究所（ANL）で実施されたACE実験<sup>[2][3]</sup>、米国サンディア国立研究所（SNL）で実施されたSURC実験<sup>[4]</sup>（国際標準問題ISP-24<sup>[5]</sup>）及び独カールスルーエ研究所（KfK）で実施されたBETA実験<sup>[6]</sup>がある（付録1参照）。水による冷却を伴う実験（熔融物上に冷却水を注水した実験）としては、SNLで実施されたSWISS実験<sup>[7]</sup>及びWETCOR実験<sup>[8]</sup>、米国電力研究所（EPRI）の主催で実施されたMACE実験<sup>[3][9][10]</sup>、我が国の原子力発電技術機構（NUPEC）により実施されたCOTELS実験<sup>[1][11]</sup>、OECDプロジェクトとしてANLにて行われたMCCI実験<sup>[10][12][13][41]</sup>がある（付録2参照）。

また、水中に熔融デブリを落下させ熔融物の粒子化を調べた実験としては、JRC-ISPRAにて実施したKROTOS実験<sup>[14]</sup>やFARO実験<sup>[14]</sup>、NUPECにて実施したCOTELS-FCI実験<sup>[1][15]</sup>、スウェーデン王立工科大学（KTH）で実施されたDEFOR実験<sup>[16]</sup>がある（付録3参照）。

ペDESTALでの熔融物の拡がり実験としては、水による冷却を伴わないドライ条件での実験として、国内BWRを対象にBWR産業界が実施したSPREAD実験<sup>[19][20]</sup>や、EPRを対象とした実験が複数実施されており、ウェット条件での実験については実施例が少ないが、前述のSPREAD実験やKTHのPULiMS実験<sup>[21]</sup>、ANLにて不均質に堆積させたデブリベッドの拡がりを確認したセルフレベリング実験<sup>[22]</sup>が行われている。

各実験の詳細は付録資料にて示す。以下に、実機評価に関連する知見の概要を纏める。

#### ・ドライ条件でのコンクリート侵食（付録1参照）

熔融炉心に注水が行われない場合の侵食速度は、ACE実験、SURC実験及びBETA実験で確認されている。また、MAAPコードによる実験解析が行われており、解析で得られた侵食速度は実験結果と良く一致している（1時間あたり20cm程度）<sup>[23][34]</sup>。

#### ・ウェット条件（Top Flooding）でのコンクリート侵食（付録2参照）

SWISS実験、WETCOR実験、MACE実験では、熔融デブリ上面へ注水をした場合（Top Flooding）のコンクリート侵食実験が行われたが、結果として、デブリ上面に安定なハードクラストが形成されてデブリ内への水の浸入を妨げ、コンクリート侵食が継続する結果が得られた。コンクリート侵食が停止しなかった主な原因は、デブリ模擬物上面に形成されたクラストが側壁（側壁に耐火物を採用した1次元侵食実験）あるいは電極と側壁の両者に固着し、クラストとその下のデブリ模擬物とが分離したことにより、デブリ模擬物の効果的な除熱がなされなかったためであるとされている。

COTELS実験では、熔融物の落下過程を含めて模擬したMCCI実験が実施され、結果として、側壁侵食部に水が浸入し、コンクリート侵食が停止する結果が得られた。

実機スケールで安定クラストが形成されるか否かを解明するため、OECD/MCCIプロジェ

クトが行われ、クラスト強度、クラスト浸水、2次元コンクリート侵食挙動等を分離し、効果的に調べる実験が実施された。その結果、実機スケールでは、安定クラストは形成されず、ハードクラストは割れて水が内部に浸入し、MCCIにより発生したガスにより溶融物がクラストの割れ目から噴出する火山型のクラストが形成されるとの結果が得られている。また、CCI 実験結果から玄武岩系コンクリートに侵食の異方性が見られる結果が得られている。

これらの知見は、MCCI 評価のためにはデブリから水プールやコンクリートへの熱伝達の扱いが重要であることを示唆している。

- ・ 水張りによる溶融物の粒子化 (付録3 参照)

溶融物ジェットが水中へ落下する場合の粒子化挙動については、FCI 実験等により確認されている。粒子化割合は、主に水深やジェット径に依存し、粒径(質量中央径)は、比較的大きく、実験条件(初期圧力、水深、コリウム落下速度、サブクール度)に対する依存性は低いと報告されている。各 UO<sub>2</sub> 混合物実験の平均的な粒子径は、溶融物量の多い FARO 実験では 2.6~4.8mm<sup>[14]</sup>、COTELS 実験では 6mm 程度<sup>[15]</sup>である。また、粒子化割合を評価する解析モデルが提案されている(Ricou-Spalding 相関式<sup>[25]</sup>や Saito の相関式<sup>[26]</sup>等)。

- ・ 溶融物の拡がり (付録4 参照)

Mark-I 型格納容器のシェルアタックに関する研究<sup>[17][18][19][20]</sup>により、事前水張りが、溶融物の拡がりを抑制し、シェルアタック防止に有効であることが確認されるとともに、溶融物の拡がりを評価する解析コードが作成されている。溶融物の拡がりには、デブリ落下流量、デブリ成分、デブリ過熱度が主に影響することが示されている。KTH では、水中での溶融物の拡がり挙動と固化性状を調べる PULiMS 実験<sup>[21]</sup>が実施され、溶融物の拡がる過程は、流体力学と固化の2つの競合プロセスに支配されるとして、流体力学には重力、慣性力、粘性力及び表面張力が影響し、固化には溶融物から周囲への熱伝達、崩壊熱発生及び溶融物の相変化が影響するとして、実験と実機条件とを関連づけるスケールリング則の提案<sup>[20][27][28]</sup>が行われている。また、独カールスルーエ研究センター(FZK)において KATS 実験<sup>[23][29][30]</sup>が実施され、溶融物の放出速度が比較的高い場合は、冷却材の有無によらず同様な拡がり挙動になることが示されている。溶融物の拡がり挙動の解析のために、種々の解析コードが提案されており、実験データを元に検証が行われている。3次元の拡がり評価も行われており、比較的広いペDESTALをもつ ABWR(ペDESTAL半径約 5.3m)の溶融物拡がり評価が実施され、床上に水がある場合でも、床全面に溶融物が拡がること示されている<sup>[40]</sup>。

また、ANLでのセルフレベリング実験<sup>[22]</sup>により、水プール中に不均質に堆積させた粒子状ベッドにおいて、内部沸騰によって短時間でベッドの厚さが均一化されることが示さ



れている。

- 粒子状ベッドの冷却性 (付録5 参照)

粒子状ベッドの冷却性については、ドライアウト熱流束が種々の実験で確認されており、主に粒子径に依存するとの結果が得られている。また、ドライアウト熱流束を評価する解析モデルがいくつか提案されているが、Lipinski0-D モデル<sup>[24][31][32][33]</sup>が広く使われている。

#### 4. 評価モデルと不確かさに関する整理

本章では、MCCI 評価に使用している解析モデルと想定される不確かさについて整理する。

##### 4.1 MCCI 評価モデル

MCCI 評価には、MCCI 現象を扱え、熔融炉心落下や注水によるデブリ冷却効果を評価できる MAAP コード<sup>[34]</sup>を使用している。以下に、MCCI 伝熱モデルの概要を示す（図 4-1 参照）。

##### コリウムの構成

- ・ 均質に熔融したプールを形成すると仮定。
- ・ 上部、下部及び側面にクラスト層を仮定。

##### クラストの生成

- ・ クラストのエネルギーバランス（熔融プールからの伝熱、水プール・コンクリートへの伝熱）によりクラスト厚さの変化率を計算。

##### コンクリートの侵食

- ・ コンクリート表面から侵食深さ方向に 1 次元熱伝導を解き温度分布を計算。
- ・ コンクリート熔融温度（入力値：1500K）以上で侵食開始。
- ・ 熔融炉心からの伝熱量と分解／熔融潜熱により侵食量を評価。
- ・ コンクリート分解による自由水・結合水・CO<sub>2</sub>の発生を考慮し、熔融コリウム中での化学熱力学平衡計算により金属との反応、H<sub>2</sub>およびCO発生を評価。反応熱は、熔融炉心の崩壊熱に加算される。

##### 伝熱モデル

- ・ 熔融炉心ーコンクリート間の熱伝達； 熔融プールからクラスト層への対流熱伝達量とクラスト内崩壊熱の和で熱流束が与えられる。熔融プールからクラスト層への対流熱伝達は、粘性に影響されるため、固化割合に応じて補正されている。熔融炉心から床方向及び側面方向のコンクリートへの熱流束を以下に示す。

$$\text{床方向の熱流束} \quad q_d = h_d (T_f - T_{F,m}) + q_v \cdot X_{cd}$$

$$h_d = h_{d0}(1 - f_s)^n$$

$$\text{壁方向の熱流束} \quad q_s = h_s (T_f - T_{F,m}) + q_v \cdot X_{cs}$$

$$h_s = h_{s0}(1 - f_s)^n$$

ここで、

$q_d, q_s$  : 床方向及び側面方向の熱流束 [W/m<sup>2</sup>]

$h_d, h_s$  : 熔融プールからクラスト層への対流熱伝達係数 [W/m<sup>2</sup>·K]

$h_{d0}, h_{s0}$  : 熔融プールが完全な液相の場合の対流熱伝達係数 [W/m<sup>2</sup>·K]

$f_s$  : 固化割合 [-]

$n$  : 固化効果項の指数 [-]

$T_f$  : 熔融プールの温度 [K]

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。

$T_{F,m}$  : デブリ融点 [K]

$q_v$  : 体積発熱率 [W/m<sup>3</sup>]

$X_{cd}$ ,  $X_{cs}$  : 床面及び壁面のクラスト厚さ [m]

対流熱伝達係数 $h_{d0}$ 及び $h_{s0}$ は、BETA実験(2次元侵食実験)のベンチマーク解析<sup>[23][34]</sup>を元に、それぞれ [ ] と [ ] が、固化効果項の指数 $n$ は、 [ ] が推奨されている。

- ・ クラストの伝熱と厚さ； クラストのエネルギーバランス(溶融プールからの伝熱、水プール・コンクリートへの伝熱)によりクラスト厚さの変化率が計算されている。側面方向及び床方向の溶融プールからの対流熱伝達係数が異なるため、下部クラストと側面クラストの厚さも異なる。内部発熱を考慮し、下部クラスト、側面クラスト、上部クラストは放物線状の温度分布が仮定されている。クラスト成長の結果、溶融プールからの熱とクラスト内発生熱をコンクリートへ伝達できなくなると、クラスト内側で溶融が生じ、クラストは薄くなる。逆に、クラストが十分に薄く、溶融プールからの熱とクラスト内発生熱以上を伝達できれば、凝固が生じ、クラストは厚くなる。
- ・ 上部クラストー水プール間の熱伝達； デブリが冠水されて表面温度が十分低下すると、上部クラストはクエンチ層として扱われ、以下の Kutateladze型の水平平板限界熱流束相関式が適用される。このクエンチ熱流束は、デブリ平均温度が水の飽和温度以上である場合に適用される。

$$q_{chf} = F_{chf} h_{fg} \rho_g^{0.5} \{ \sigma g (\rho_l - \rho_g) \}^{0.25}$$

ここで、

$q_{chf}$  : 熱流束 [W/m<sup>2</sup>]

$F_{chf}$  : 係数 [-] (ユーザー入力)

$h_{fg}$  : 蒸発潜熱 [J/kg]

$\rho_g$  : 蒸気の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_l$  : 水の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma$  : 表面張力 [N/m]

$g$  : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]

係数 $F_{chf}$ と熱流束 $q_{chf}$ の関係を図4-2に示す。係数 $F_{chf}$ のデフォルトは0.1が使われており、この場合熱流束 $q_{chf}$ は大気圧状態で800kW/m<sup>2</sup>程度となる。

デブリ平均温度が水の飽和温度と等しくなると(デブリクエンチ)、水プールへの熱流束は、デブリの崩壊熱が全て水プールへ伝達されるとして計算され、上記限界熱流束相関式は適用されない。デブリクエンチ後は、デブリからコンクリートへの熱伝達は発生しなくなるため、デブリと接しているコンクリート温度が侵食温度以

下となり、コンクリートの侵食は停止する。

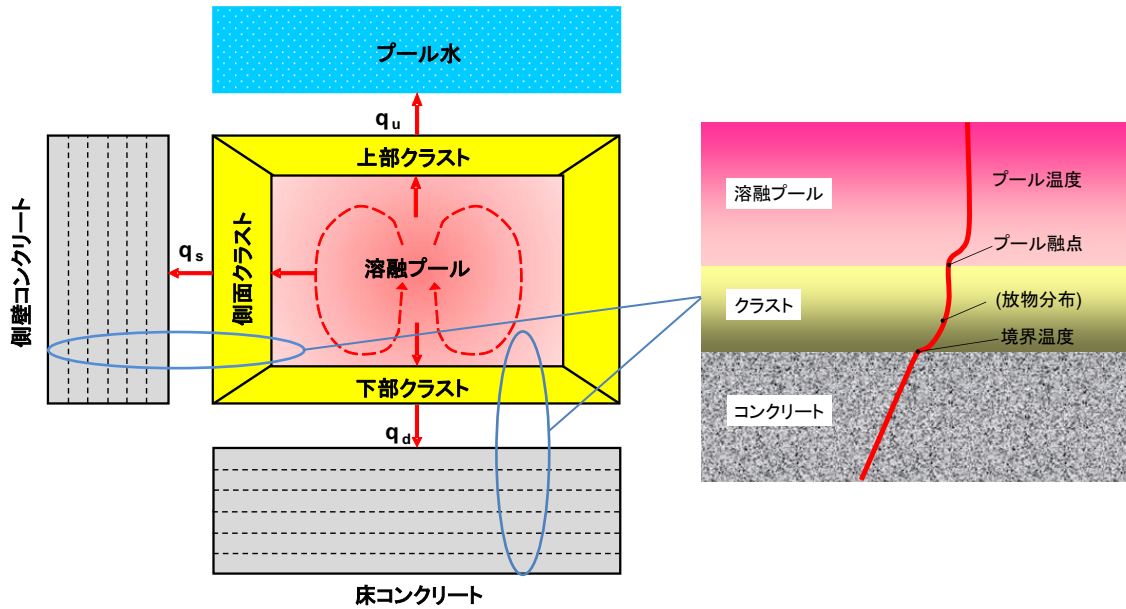


図 4-1 MAAP コードの MCCI 伝熱モデル概要

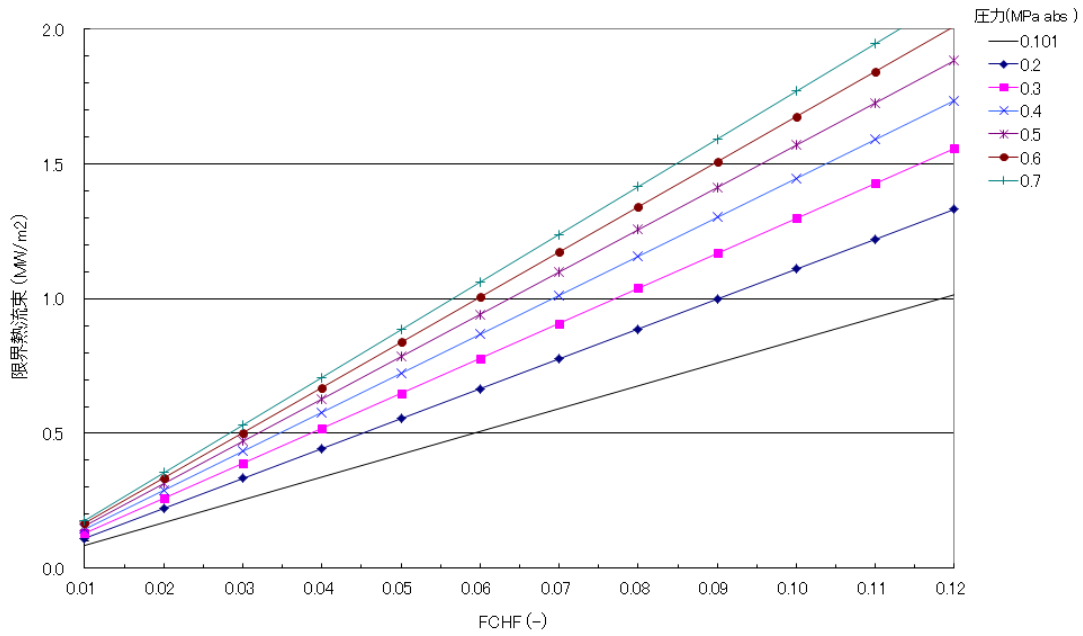


図 4-2 MAAP コードのデブリ上面の熱流束を与える  $F_{chf}$  入力と限界熱流束の関係

## 4.2 MCCI評価における不確かさの整理

MCCI の過程毎に不確かさ要因を整理する。MCCI は以下の過程で段階的に進展する。

- ① 原子炉圧力容器下部ヘッド破損過程
- ② 溶融物の落下・堆積過程
- ③ MCCI 進行と注水によるデブリ冷却過程

各過程での物理現象及び解析モデルに関し、不確かさ要因を整理し、感度解析が必要なパラメータを確認する。

### (1) 原子炉圧力容器下部ヘッド破損過程

この過程の不確かさは、下部ヘッドの破損面積や溶融炉心の流出量となる。それぞれについて、評価モデルと評価条件の考え方を示す。

#### 下部ヘッド破損面積

**評価モデル：** MAAP コードでは、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損や下部ヘッドクリーブ破損等の種々の下部ヘッド破損モードがモデル化されており、最も早く破損条件に至った破損モードにより破損が生じる。破損面積は、溶融物流出に伴う破損口の径方向侵食による拡大も考慮されている。

**評価条件：** MAAP 解析結果から、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損による制御棒駆動機構ハウジングの逸出が最も早く発生する。これにより約 15cm 径の破断口が下部ヘッドに開き、下部プレナム内の溶融炉心がペデスタルに落下することになる。他の下部ヘッド貫通部が破損してもこれ以上の破損サイズにはならないことから、制御棒駆動機構ハウジングの逸出が最も厳しい条件となっている。なお、制御棒駆動機構ハウジング溶接部が破損しても外部サポートが設置されている場合には、制御棒駆動機構ハウジングの逸出は起きにくいと考えられるため、この扱いは保守的である。

#### 溶融炉心の落下量

**評価モデル：** 溶融炉心流出流量は駆動差圧として原子炉圧力容器内とペデスタルとの圧力差に水および溶融炉心の水頭圧を考慮して計算されている。

**評価条件：** MAAP 解析結果から、下部ヘッド破損前には全炉心相当の溶融炉心が下部プレナム内に堆積した状態になっている。この状態に至る前には、以下の過程が起こる。即ち、溶融炉心が下部プレナムへ落下を開始すると、下部プレナム水により溶融炉心が冷却される。また、制御棒案内管内にも水が溜まっており、溶融炉心の冷却のヒートシンクになる（図 4-3 参照）。下部プレナムや制御棒案内管内の水が蒸発して喪失すると、制御棒案内管の温度が上昇し溶融に至る。制御棒案内管は炉心重量を支持しているために、制御棒案内管の溶融が起こると、炉心の支持機能が喪失し、全炉心が下部プレナムへ落下する。その後、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損が起こり、溶融炉心の放出が開始する。

以上のような過程の結果、下部ヘッド破損時に、下部プレナム内に堆積している全炉心相当の溶融炉心が流出することになり、溶融炉心の落下流量としては、最も厳しい条件となっている。

以上に示したように、下部ヘッドの破損面積や溶融炉心の流出量について、いずれも最も厳しい条件が使用されているため、特に感度解析を行う必要はない。

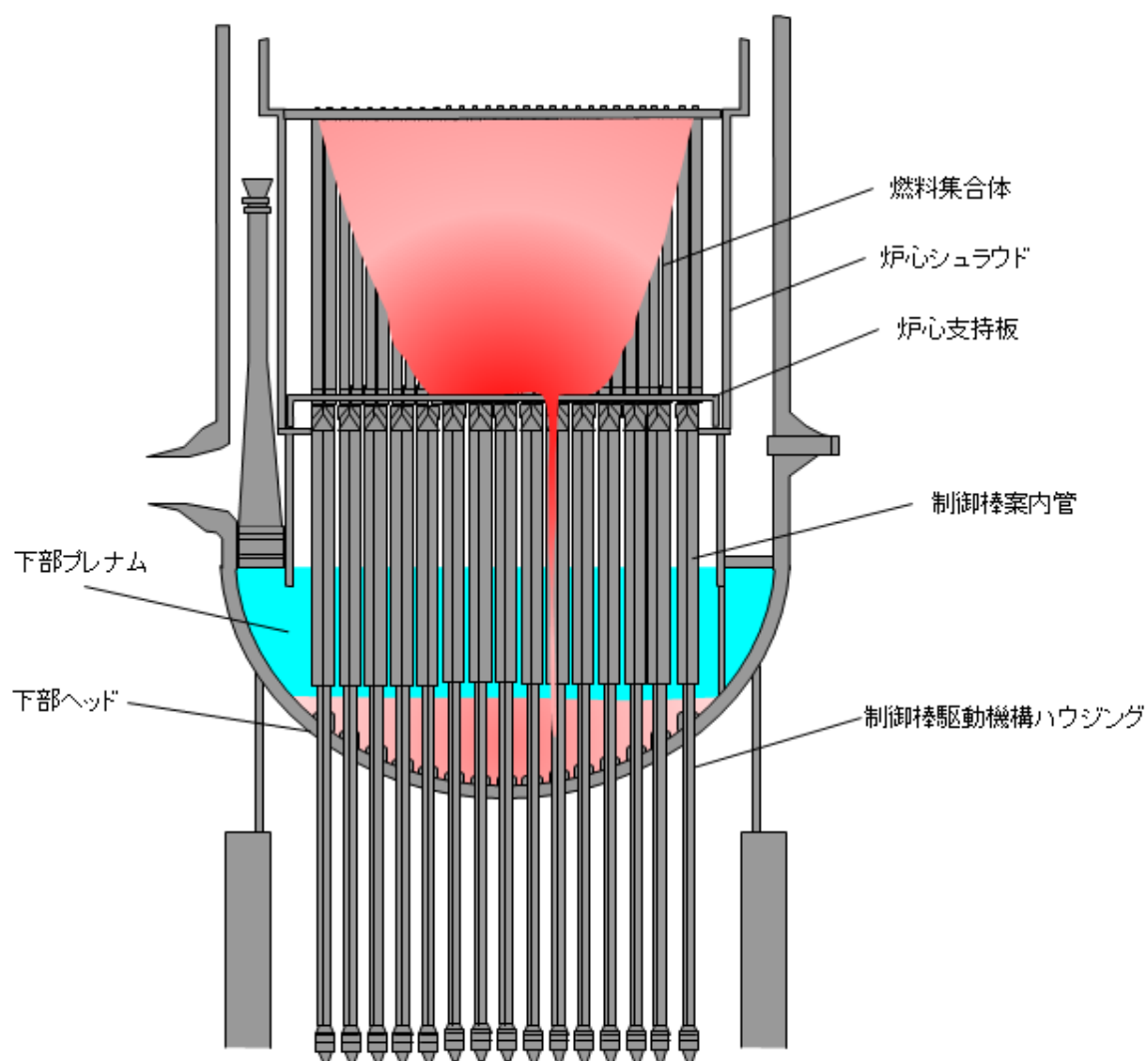


図 4-3 炉心部から下部プレナム内への溶融炉心の移行状態を示す模式図

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。

## (2) 溶融物の落下・堆積過程

この過程では、下部ヘッドが破損し、溶融炉心が事前水張りされたペDESTALへ落下するため、溶融炉心が水中で粒子化することが想定され、粒子化されない溶融炉心はペDESTAL床に溶融プールとして堆積する。この過程では、溶融炉心の水中での粒子化に不確かさが想定される。

### 溶融炉心の粒子化

**評価モデル：** MAAP コードでは、粒子化割合は、Ricou-Spalding モデル<sup>[25]</sup>で計算される。Ricou-Spalding モデルは、エントレインメント量（粒子化量）を流入流体の速度（ジェット速度）と両流体の密度比に関連させたモデルであり、液液混合問題において広く利用されている相関式である。落下する溶融炉心は円柱ジェットで冷却水中に突入することを想定し、円柱ジェット外周部の侵食として粒子化割合を評価している。

円柱ジェットのエントレインメント速度  $m_{ent}$  (m/s) は、次式で与えている。

$$m_{ent} = E_o \left( \frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} u_{dj} \quad (1)$$

ここで、 $E_o$  : エントレインメント係数

$u_{dj}$  : ジェット速度 [m/s]

$\rho_{dj}$  : ジェット密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_w$  : 水密度 [kg/m<sup>3</sup>]

水中でのジェット速度を一定と仮定し、水面から垂直方向に積分すると、プール底部（水深： $\Delta H_{pool}$ ）におけるジェット直径が(2)式のように得られる。

$$d_{dj} = d_{dj,o} - 2E_o \left( \frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} \Delta H_{pool} \quad (2)$$

(2)式を用いて、溶融ジェット断面の減少分が粒子化割合であるため、次式のように計算される。

$$\Phi_{ent} = \frac{d_{dj,o}^2 - d_{dj}^2}{d_{dj,o}^2} \quad (3)$$

ここで、 $d_{dj}$  : プール底部におけるジェット径 [m]

$d_{dj,o}$  : プール水面におけるジェット径 [m]

$\Phi_{ent}$  : 水中における粒子化割合 [-]

以上の評価式において、デブリ粒子化割合に影響するパラメータは、エントレインメント係数、溶融ジェット径及びプール水深であり、このうちモデルパラメータとしてエントレインメント係数と溶融物ジェット径に不確かさが想定される。

エントレインメント係数については、MAAP では代表的な FCI の大規模実験である FARO 実験に対するベンチマーク解析<sup>[34]</sup>によって範囲を設定しており、不確かさ範囲は、 ～  となっている。FARO 実験条件<sup>[14]</sup>は、水プールの水深は 0.87～2.05m、水プールのサブクール度は 0（飽和）～124K、雰囲気気圧条件は 2～5.8MPa（高圧条件）、0.2～0.5MPa（低

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

圧条件) の範囲で行われており、一方、実機条件では、水深は 2~4m 程度、水プールサブクール度は飽和~90K 程度、雰囲気圧力は 0.2MPa[abs]程度であることを考慮すると、実験条件は有効性評価の特徴的な条件を包絡しており、ベンチマーク解析で検討されたエントレインメント係数の範囲内で感度を確認すれば十分といえる。

**評価条件：** MAAP 解析ではエントレインメント係数のデフォルト値として  が使用されており、これは実験解析により確認された不確かさ範囲の代表値となっている。

溶融物ジェット径は、下部ヘッド破損口径により決まることから、前述のように大きい値としている。これは、粒子化割合を小さめにする扱いをしていることになる。

因みに、Ricou-Spalding 相関式を使用して、実機で想定される水張り水深 2m、溶融物ジェット径 0.15m の条件の場合で 63%程度が粒子化される (図 4-4 参照)。<sup>[33]</sup>

以上のことから、エントレインメント係数については、不確かさ範囲が設定されており、溶融炉心が水中に落下した際の粒子化割合とその過程での蒸気発生やデブリ粒子の酸化による水素発生に影響することから、不確かさ範囲内で感度解析を実施する。



図 4-4 Ricou-Spalding 相関式による粒子化割合のマップ<sup>[33]</sup>



### (3) MCCI 進行と注水によるデブリ冷却過程

この過程では、溶融炉心の拡がり、デブリベッドの冷却性、コンクリート侵食に不確かさが想定される。

#### 溶融炉心の拡がり

**評価モデル：** MAAP コードでは、落下した溶融炉心はペDESTAL 床上に均一に拡がると仮定している。

**評価条件：** Mark-I 型格納容器のシェルアタックに関する研究<sup>[17][18][19][20]</sup>によれば、水張りが無いと溶融炉心は格納容器シェル壁（拡がり距離 7m 程度）まで到達するが、水張りがあれば溶融炉心の拡がりは抑えられ、拡がり距離は落下量等にも依存するが 5m 程度となる結果が得られている。有効性評価で想定している制御棒駆動機構ハウジングの逸出を想定すると、ABWR（ペDESTAL 半径約 5.3m）で床上に水がある場合でも、床全面に溶融物が拡がること示されている<sup>[40]</sup>（付録 4 (5)a 参照）。また、PULiMS 実験より妥当性が確認されているスケーリング則に BWR の溶融炉心落下条件を適用して、水中での溶融物の拡がり距離を評価すると、約 18m となる（付録 4 (5)b 参照）。ペDESTAL 半径が、ABWR が約 5.3m、Mark-I 改良型格納容器が約 3.2m であることを考慮すると、水張りをしている場合でも溶融炉心は、床全面に拡がる可能性が高いと考えられる。これは、溶融物の拡がりに影響する因子のうち、主に溶融炉心落下流量が大きい（全炉心相当の溶融炉心が 1 分程度で落下することを想定）ことによるものと考えられる。また、均一に拡がった方が、側壁に接する溶融炉心の堆積高さが高くなるため、側壁侵食を評価する観点から保守的な扱いとなっている。

以上より、MAAP コードの均一堆積の扱いは妥当と考えられ、不確かさも小さいと考えられるため、感度解析は行わない。

## デブリから水への熱伝達

デブリベッドから水への熱流束は、溶融炉心上面の性状により大きく影響されるため、大きな不確かさが想定される。

**評価モデル：** 溶融炉心上面から水への熱流束は、上部クラスト-水プール間の熱伝達モデルである Kutateladze 型の水平平板限界熱流束相関式の係数  $F_{\text{CHF}}$  を調整することにより評価可能である。

**評価条件：** 事前水張り対策により溶融炉心の一部は粒子化して、デブリ上部に粒子状ベッドを形成し、下部には粒子化しなかった溶融炉心が溶融プールを形成すると想定される。これは、水中に溶融炉心を落下させた実験的知見<sup>[14][15][16]</sup>（付録3参照）から、安定クラストは形成されず、粒子状ベッドが形成されていることから妥当と考えられる。なお、SSWICS 実験では、コンクリートがデブリに含有されると上面熱流束が低下する結果が得られているが、これは火山型クラストが形成された場合の知見であり、粒子状ベッドに対する知見ではないと判断される。

デブリ上面に粒子状ベッドが形成されることを想定し、MAAP コードのデブリ上面から水への熱伝達のモデルパラメータである Kutateladze 係数  $F_{\text{CHF}}$  を変えることにより、粒子状ベッドの冷却性の不確かさの評価を行う。ここでは、Lipinski 0-D モデル<sup>[24]</sup>を使用して粒子状ベッドのドライアウト熱流束の不確かさを評価した。主なパラメータは、粒子径、ポロシティ、堆積高さ、圧力であり、以下のように想定する。

- ・ 粒子径は、これまでの実験等の知見により 3~7mm と報告されているため<sup>[33]</sup>、この範囲を不確かさの範囲と想定する。
- ・ ポロシティは、概ね 0.3 以上が報告されているが<sup>[33]</sup>、粒子の充填状態の幅を考慮して、0.26（面心立方格子、最稠密）、0.32（体心立方格子）、0.4（MAAP 標準値）、0.48（単純立方格子）の範囲を想定する（図 4-5 参照）。
- ・ 粒子状ベッドの堆積高さは、全炉心相当が落下した場合の堆積高さは 1m 以上となるが、破損口径の拡大を考慮しても 33%以上の粒子化が想定されるため、0.3m 以上とする。
- ・ 圧力は、MCCI が発生する時間では格納容器圧力は 0.4MPa[abs]以上となっているため（図 4-6a, 図 4-6b 参照）、0.4MPa[abs]以上とする。

Lipinski 0-D モデルによる評価結果を以下に示す。

- ・ 図 4-7a にドライアウト熱流束の圧力依存性を示す。上記のパラメータの範囲から、粒子径 3mm、ポロシティ 0.32 の熱流束特性が、現実的な範囲内で保守側の特性と想定され、そのときの熱流束は、大気圧状態で 800 kW/m<sup>2</sup> 程度となる。また、圧力が 0.4MPa[abs]以上での下限値としては、ポロシティの最も小さい 0.26 のケースで 800 kW/m<sup>2</sup> 程度のドライアウト熱流束となっている。
- ・ 図 4-7b にドライアウト熱流束の粒子径依存性を示す。粒子径が 3mm 以上での下限値としては、ポロシティの最も小さい 0.26 のケースで 800 kW/m<sup>2</sup> 程度のドライアウト

熱流束となっている。

- ・ 図 4-7c にドライアウト熱流束の粒子ベッド高さ依存性を示す。粒子ベッド高さが、0.3m 以上ではドライアウト熱流束はほとんど変化がなく、下限値としては、ポロシティの最も小さい 0.26 のケースで  $800 \text{ kW/m}^2$  程度のドライアウト熱流束となっている。

以上の評価結果より、有効性評価条件として、大気圧状態で  $800 \text{ kW/m}^2$  で圧力依存性を考慮した上面熱流束を使用することは、妥当と判断される。また、デブリ上面熱流束の不確かさの下限値は、 $800 \text{ kW/m}^2$  程度と考えられるため、粒子径やポロシティ等の不確かさによる上面熱流束の不確かさの影響を確認するため、 $800 \text{ kW/m}^2$  一定を仮定した感度解析を実施する。

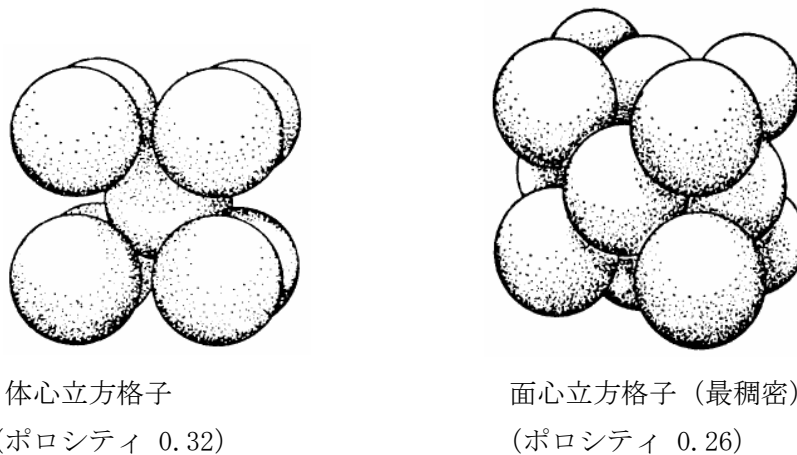


図 4-5 粒子の格子配列とポロシティ

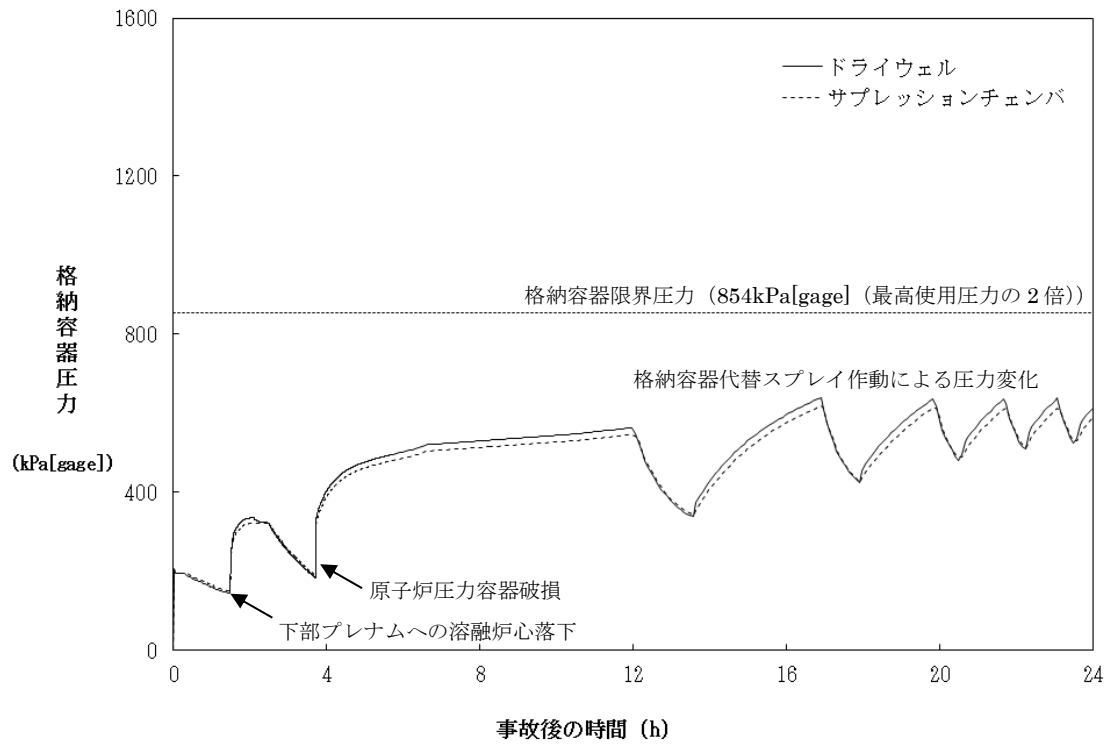


図 4-6a MCCI 評価時の格納容器圧力

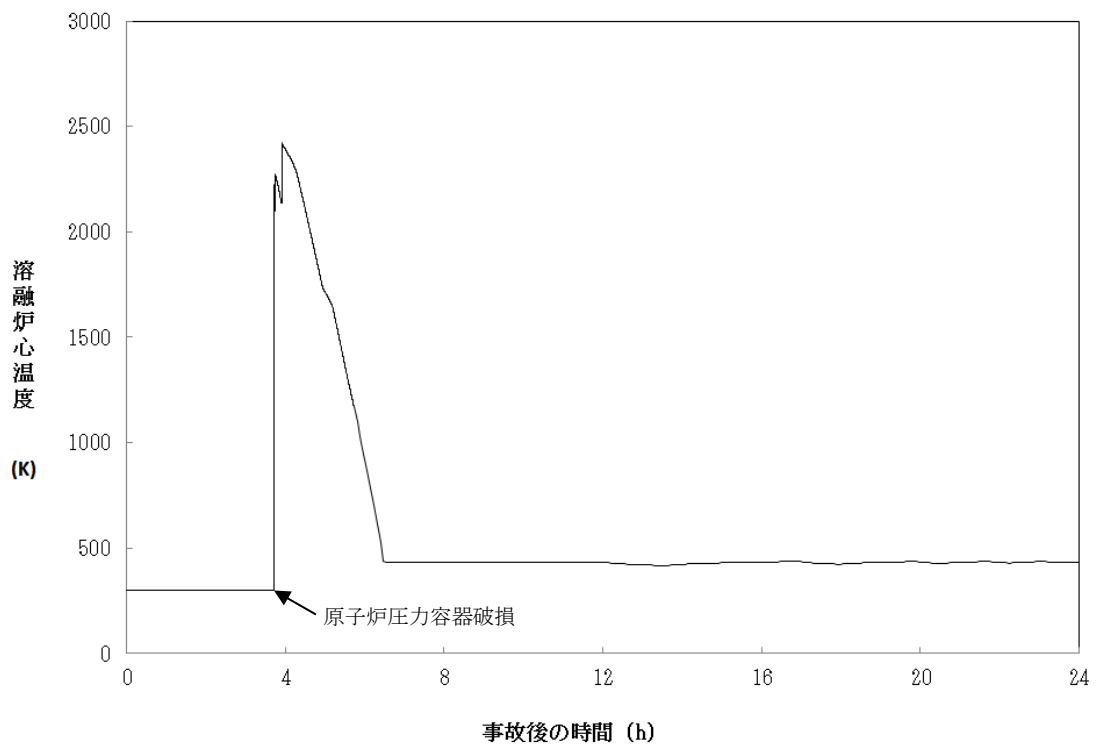


図 4-6b MCCI 評価時の溶融炉心温度

Lipinski 0-D モデル, 粒子径: 3mm, 粒子状ベッド高さ: 0.5m

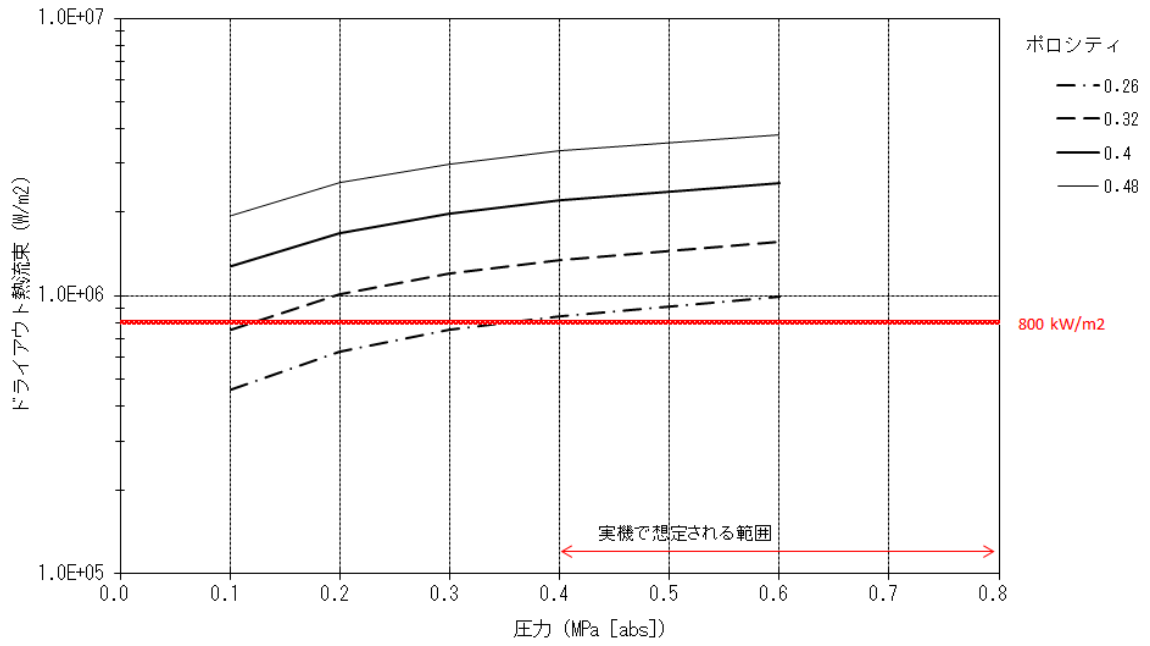


図 4-7a 圧力とドライアウト熱流束の関係  
(Lipinski 0-D モデル)

Lipinski 0-D モデル, 圧力: 0.4 MPa(abs), 粒子状ベッド高さ: 0.5m

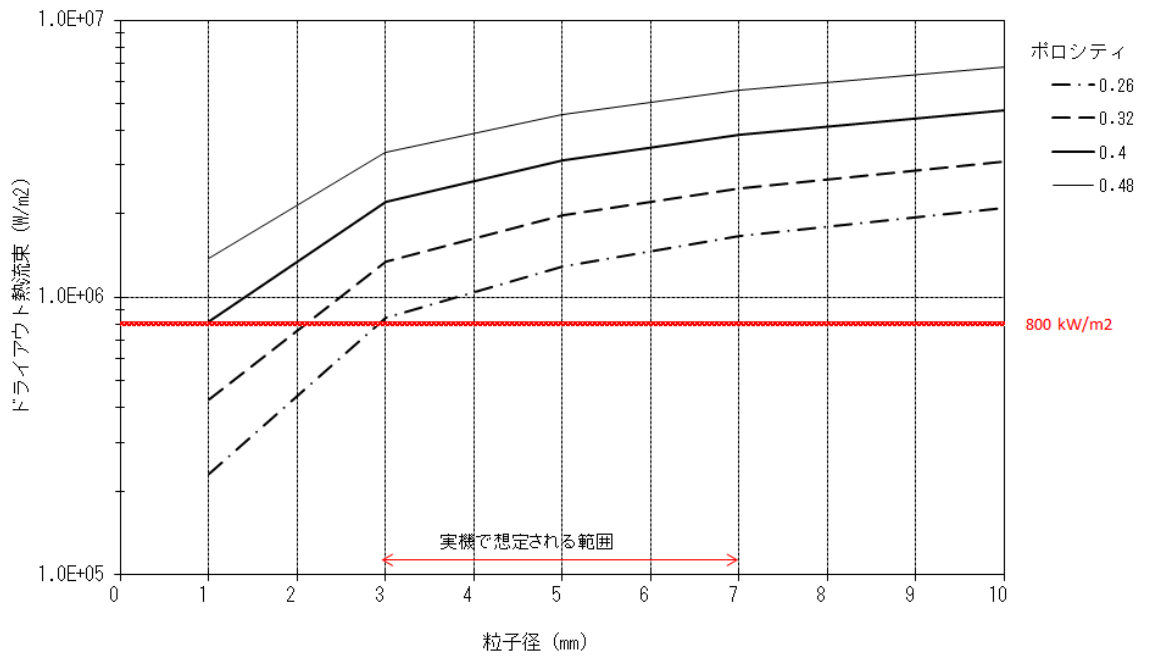


図 4-7b 粒子径とドライアウト熱流束の関係  
(Lipinski 0-D モデル)

Lipinski 0-D モデル, 圧力: 0.4 MPa(abs)、粒子径: 3 mm

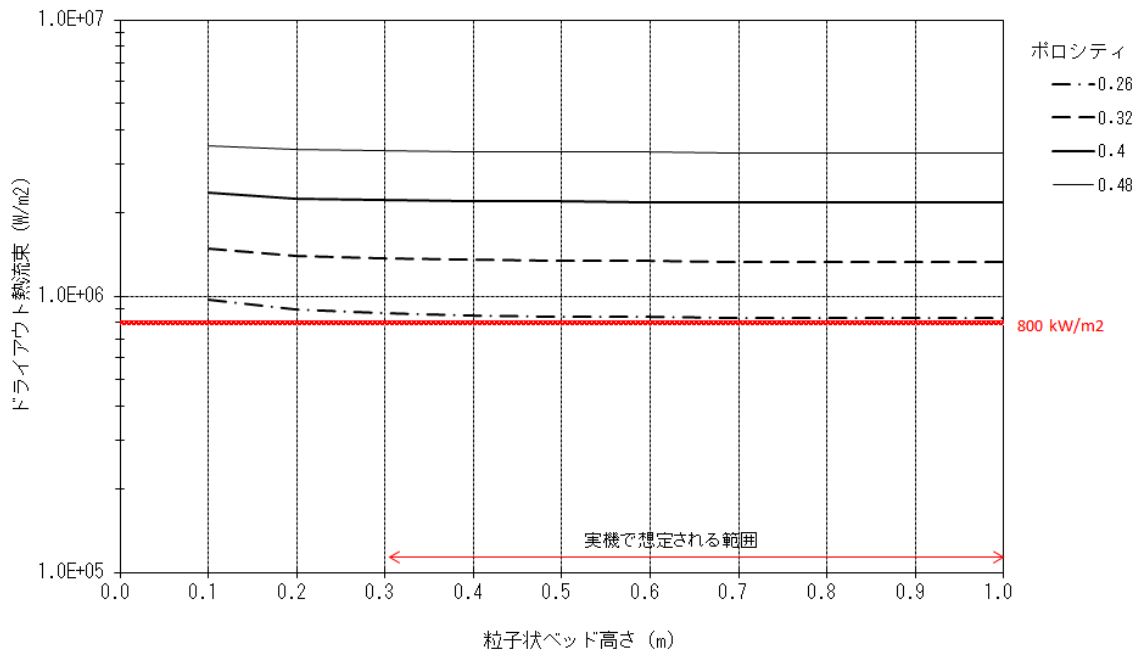


図 4-7c 粒子状ベッド高さ とドライアウト熱流束の関係  
(Lipinski 0-D モデル)

## コンクリート侵食

コンクリートの種類（玄武岩系や石灰岩系）により，侵食挙動やガス発生挙動が異なる。また，玄武岩系コンクリートに関しては，壁方向と床方向の侵食量に相違が見られる知見が出ている。床方向に大きく侵食する結果（付録1(3) BETA 実験参照）と壁方向に大きく侵食する結果（付録2(5) OECD/MCCI 実験の CCI-1/3 実験参照）があり，この侵食の異方性は，未だ十分な理解が得られておらず，現状モデルでも扱われていない。また，実験ではドライ条件において侵食の異方性が確認されており（CCI-1/3 実験では，最初ドライ条件で侵食させている），実機のウェット条件でもこの侵食の異方性が発生するかは不明であるが，念のためモデルパラメータの感度解析により，この侵食異方性の影響を検討する。

### 評価モデル：

- ・ コンクリート表面から深さ方向に1次元熱伝導を解き温度分布を計算している。
- ・ クラスト- コンクリート界面の温度がコンクリート融点以上である場合にコンクリート侵食が計算される。
- ・ コリウムからの伝熱量と分解/溶融潜熱により侵食量を評価する。
- ・ コンクリート分解による自由水・結合水・CO<sub>2</sub>の発生を考慮し，溶融コリウム中での化学熱力学平衡計算による未酸化金属との反応によりH<sub>2</sub>およびCO発生が計算される。反応熱は，溶融炉心の崩壊熱に加算される。

### 評価条件：

コンクリートの種類には，玄武岩系や石灰岩系があり，プラントに使用されているコンクリートの種類により組成や物性値を使い分けている。表4-1にコンクリートの物性値，表4-2にコンクリートの組成例を示しており，これらをMAAPの入力としている。融点は石灰岩系コンクリートの方が高いが，比熱は石灰岩系コンクリートの方が小さい。コンクリート成分は骨材（aggregate）の種類に影響され，玄武岩系コンクリート（Basaltic）の成分はSiO<sub>2</sub>が主体であるが，石灰岩系コンクリート（Limestone）では，CaCO<sub>3</sub>が主体である。

コンクリートの侵食モデルは，主にSURC 実験やACE/MCCI 実験の1次元侵食の実験や，BETA 実験の2次元侵食のドライ実験に対して検証されている（付録1参照）。なお，コンクリート侵食モデルは，コンクリート表面から侵食深さ方向に一樣に侵食する扱いをしているのに対し，実験で得られた侵食深さは，一般的に侵食面で一樣ではない。このため，コンクリート侵食モデルの検証では，実験の平均的な侵食深さと比較して侵食速度が良く一致していることが確認されている。

侵食面での侵食の不均一性とMAAPコードの一樣侵食との関係を見るため，SURC-4 実験（1次元侵食）に対するMAAPコードのベンチマーク解析で得られた侵食深さに対して，実験で得られた侵食深さがどの程度の幅にあるかを確認した結果を図4-8に示すが，実験で得られた侵食深さは，MAAPコードによる予測侵食量に対して概ね±20%程度の範囲にある。同様にBETA-V5.1 実験（2次元侵食）に対して確認した結果を同図に示すが，この場合も概ね±20%程度の範囲にある。従って，実験における侵食面での侵食深さは，MAAPコードによる予

測侵食量の概ね±20%程度の範囲にあると考えられる。

また、壁方向と床方向の2次元侵食を調べる OECD/MCCI プロジェクトの CCI 実験では、石灰岩系コンクリート (CCI-2 実験) と玄武岩系コンクリート (CCI-1 実験, CCI-3 実験) の侵食挙動が調べられている。

石灰岩系コンクリート (CCI-2 実験) では、壁方向と床方向に等方的に侵食している。一方、玄武岩系コンクリート (CCI-3 実験) では、壁方向と床方向の侵食の異方性が確認されており (付録2 参照), 玄武岩系コンクリートの壁方向と床方向の侵食速度の相違から、壁方向の熱流束が、床方向の熱流束の約 4 倍程度大きいと推定されている。なお、同様に玄武岩系コンクリートが使われた CCI-1 実験では、加熱条件が他の実験と異なり高く設定されていたため、代表性があるとは見なされず、侵食挙動の分析やベンチマーク解析には、CCI-3 実験の結果の方が使われている。玄武岩系コンクリートの壁方向と床方向の侵食の異方性のメカニズムに関しては、明確な理解は得られていないが、CCI-3 実験に対する MAAP コードのベンチマーク解析<sup>[35]</sup>において、壁方向への熱流束が床方向の 4 倍程度大きくなるように溶融プールからの対流熱伝達係数を設定することにより、実験の侵食挙動と良く一致する解析結果が得られている (図 4-9 参照)。この場合も、実験の侵食深さは、MAAP コードの予測侵食量に対して、上記の SURC-4 実験及び BETA-V5.1 実験のベンチマーク解析で設定した 20%以内の侵食深さに収まっている。

以上の MAAP コードのベンチマーク解析の分析から、コンクリート侵食の不確かさについて、以下のことが言える。

- ・ 侵食面における侵食深さのばらつきの範囲は、MAAP コードの予測侵食量の 20%以内に入っている。
- ・ 玄武岩系コンクリートの壁方向と床方向の侵食の異方性は、MAAP コードにおいて溶融プールからの対流熱伝達係数を変更することにより予測可能である。その場合も侵食のばらつきの範囲は、MAAP コードの予測侵食量の 20%以内に入っている。

以上のことから、コンクリート侵食の不確かさに関して、侵食面における侵食深さの不均一性については、概ね MAAP コードによる予測侵食量の 20%の範囲内であることがわかった。一方、玄武岩系コンクリートの壁方向と床方向の侵食の異方性については、実機における影響の確認のため感度解析が必要と考えられ、CCI-3 実験のベンチマーク解析を参考にして、溶融プールから壁方向と床方向の対流熱伝達係数を調整して感度解析を実施する。壁方向の熱配分の最大ケースとして、床方向の 4 倍として感度解析を行い、コンクリート侵食の壁方向と床方向の異方性の影響を確認する。

以上の各過程での、MCCI 現象の影響因子と感度解析パラメータの関係を図 4-10 に示し、不確かさ要因、有効性評価の扱い及び感度解析の要否を表 4-3 に整理する。

また、溶融炉心とコンクリートの相互作用における実機で想定される現象と解析上の取扱いの比較を図 4-11 に示す。



本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。

表 4-1 コンクリートの物性比較 (MAAP 入力)

| 項目          | 玄武岩系コンクリート           | 石灰岩系コンクリート            |
|-------------|----------------------|-----------------------|
| コンクリート組成    | SiO <sub>2</sub> が主体 | CaCO <sub>3</sub> が主体 |
| 液相線温度 (K)   | <input type="text"/> | <input type="text"/>  |
| 固相線温度 (K)   | <input type="text"/> | <input type="text"/>  |
| 比熱 (J/kg-K) | <input type="text"/> | <input type="text"/>  |
| 熔融潜熱 (J/kg) | <input type="text"/> | <input type="text"/>  |

表 4-2 代表的なコンクリートの組成例(重量%) [37]

| 成分                             | 玄武岩系コンクリート | 石灰岩系コンクリート |
|--------------------------------|------------|------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 54.84      | 3.60       |
| TiO <sub>2</sub> , MnO, MgO    | 7.21       | 5.80       |
| CaO                            | 8.82       | 45.40      |
| Na <sub>2</sub> O              | 1.80       | 0.0078     |
| K <sub>2</sub> O               | 5.39       | 0.68       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.26       | 1.20       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.32       | 1.60       |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.00       | 0.004      |
| CO <sub>2</sub>                | 1.50       | 35.698     |
| H <sub>2</sub> O (自由水, 結合水)    | 5.86       | 5.94       |

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

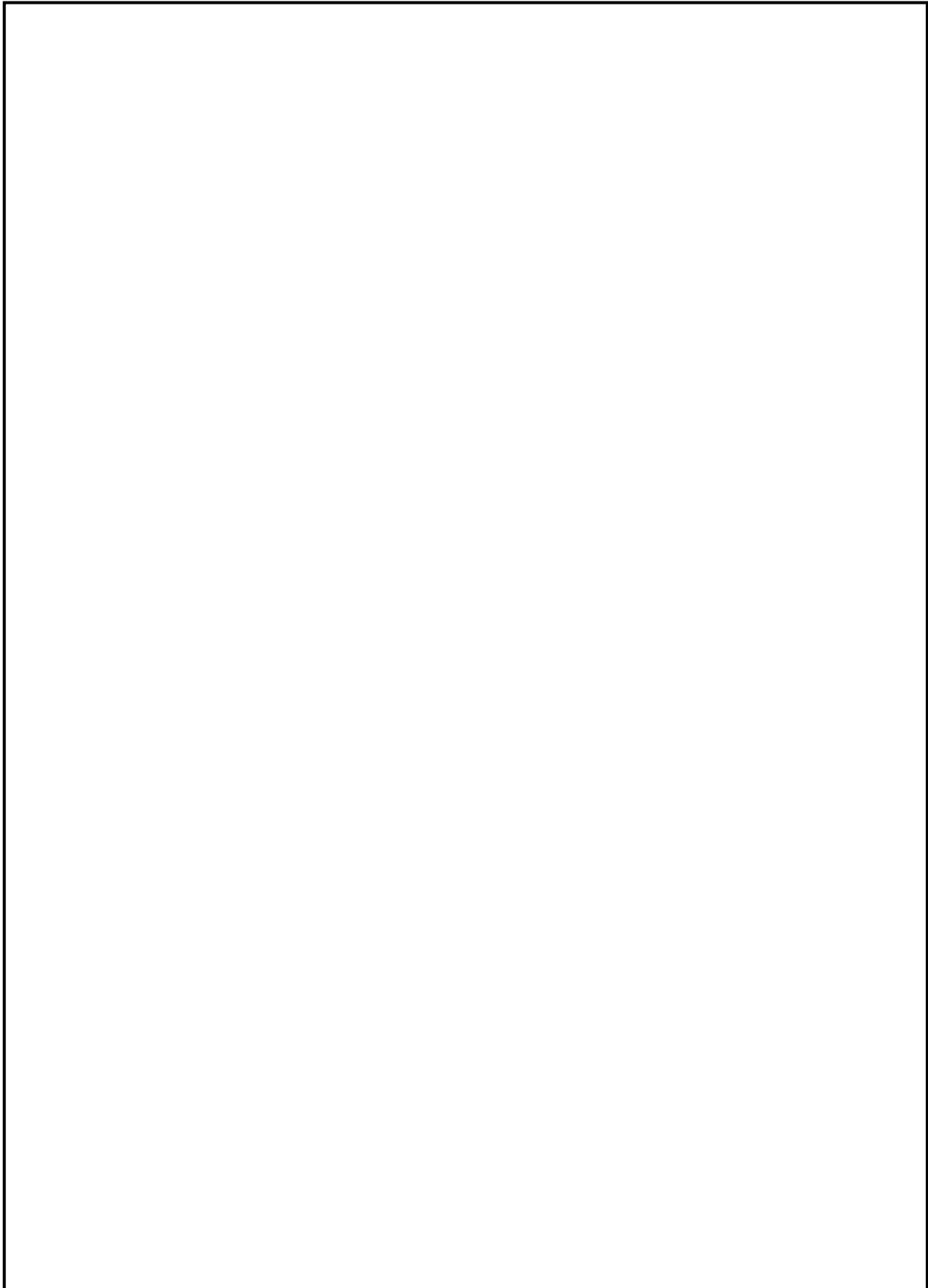


図 4-8 SURC-4 と BETA-V5.1 実験と MAAP4 コード予測の侵食量の比較<sup>[23]</sup>

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。

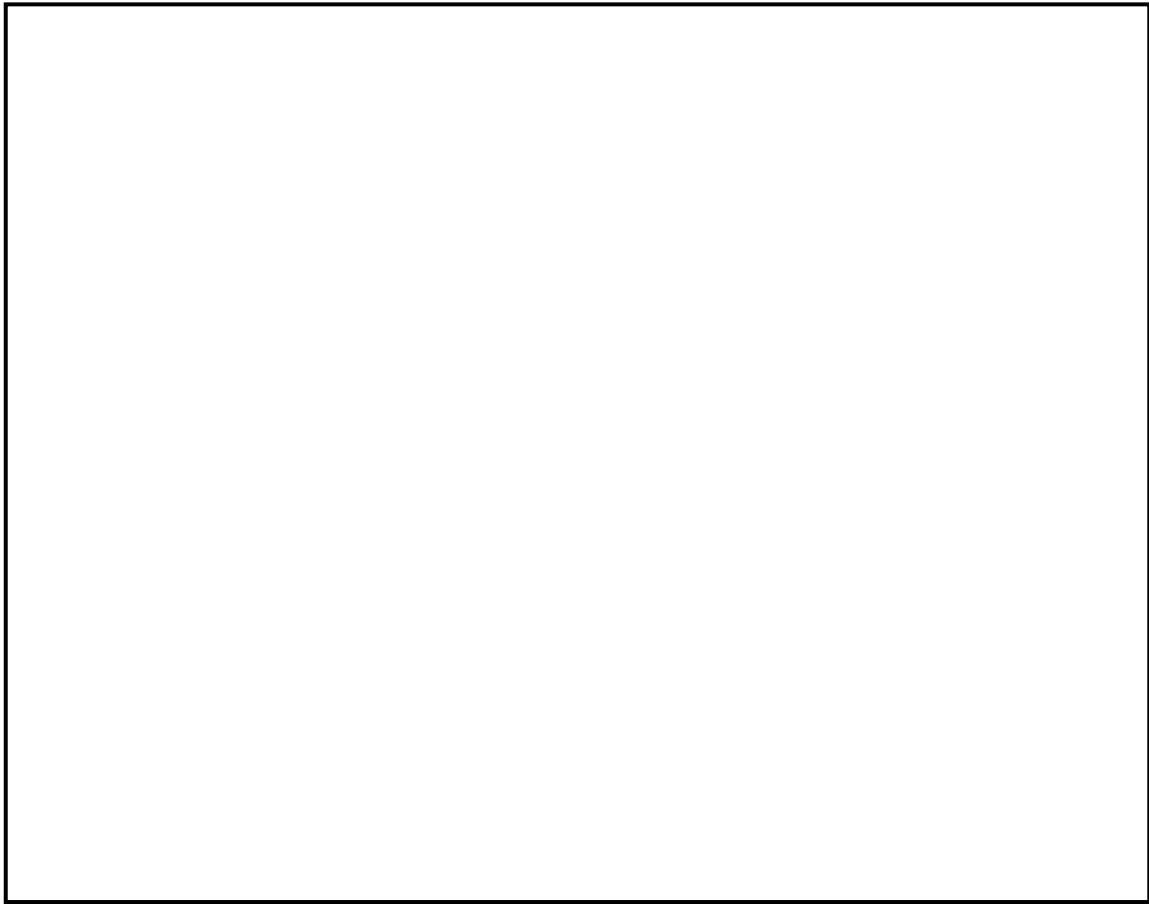


図 4-9 CCI-3 実験（玄武岩系コンクリート）の MAAP ベンチマーク解析の結果<sup>[35]</sup>

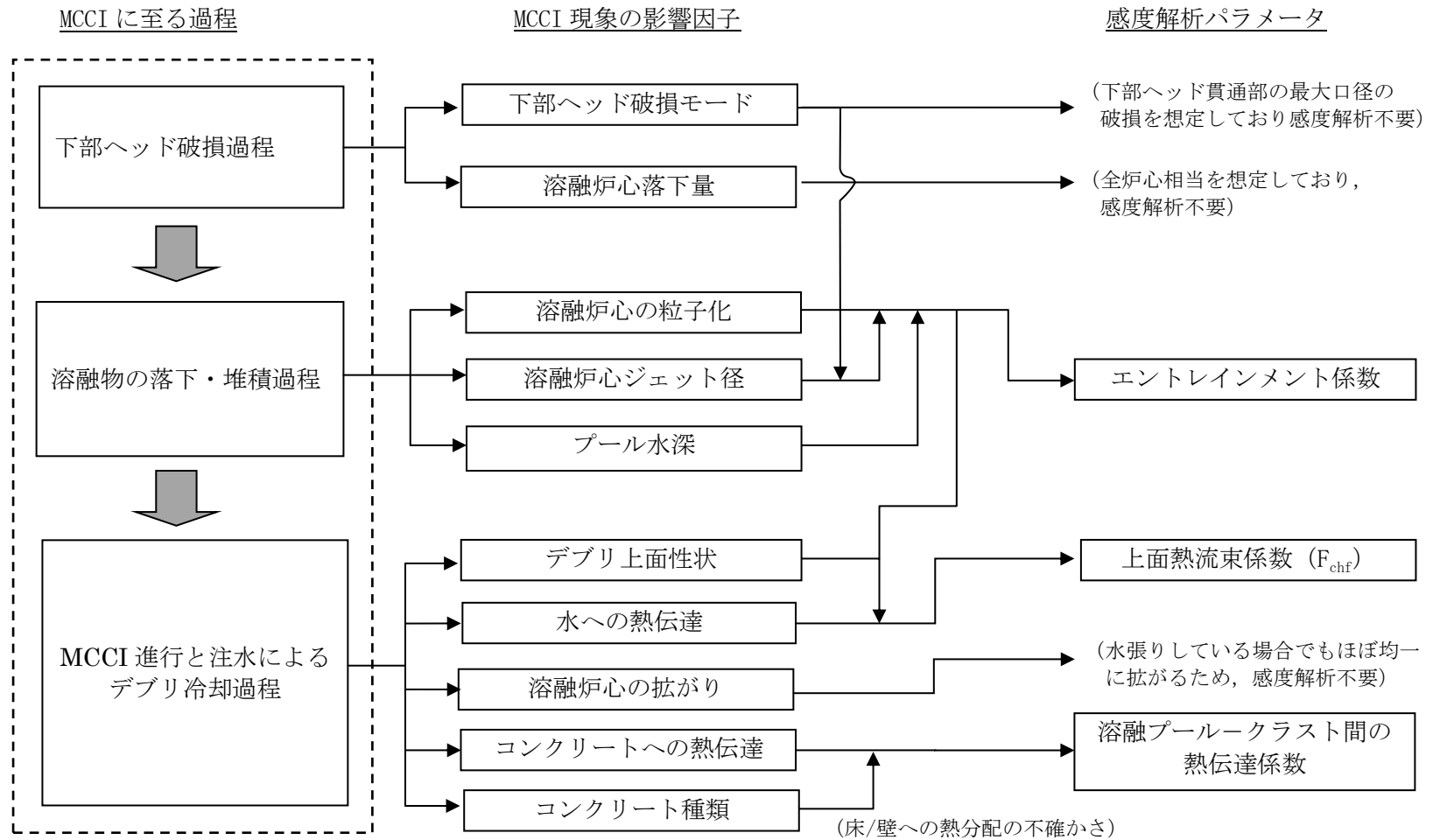


図 4-10 MCCI における不確かさに関する流れ図

実機で想定される現象

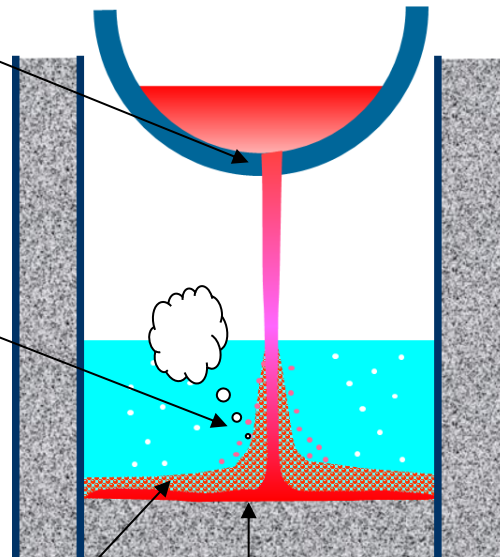
解析上の取扱い

下部ヘッド破損口を熔融炉心が通過する際に破損口側面が溶かされ、破損口が拡大する。

熔融物が水中を落下する過程で粒子化する。この際デブリ粒子のクエンチにより水蒸気が発生し、デブリ粒子の酸化により水素が発生する。

水深が浅い場合は、熔融物は完全には粒子化せず、床上に熔融炉心が拡がり、その上に粒子状ベッドが堆積する。水により拡がりや抑制され、不均一に堆積する。上面の性状により水への熱伝達が大きく影響される。

コンクリートの種類により、侵食挙動やガスの発生挙動が異なる。



下部ヘッド破損口を熔融炉心が通過する際の破損口側面の溶融による破損口拡大を模擬。

熔融物が水中を落下する過程での粒子化を模擬。粒子化割合は Ricou-Spalding モデルにより評価。この際デブリ粒子のクエンチによる水蒸気発生と、デブリ粒子の酸化による水素発生を模擬。

コンクリート種類に応じて玄武岩系や石灰岩系を模擬可能。熔融プールからクラストへの対流熱伝達係数を変更することにより熱移行の異方性を評価可能。

熔融炉心は、床上で均一に堆積し、均一に混合して外周部のクラスト層と中心部の熔融プールから構成される平板の発熱体として模擬。上面熱流束は Kutateladze の水平平板限界熱流束相関式で与えているが、入力により変更可能。

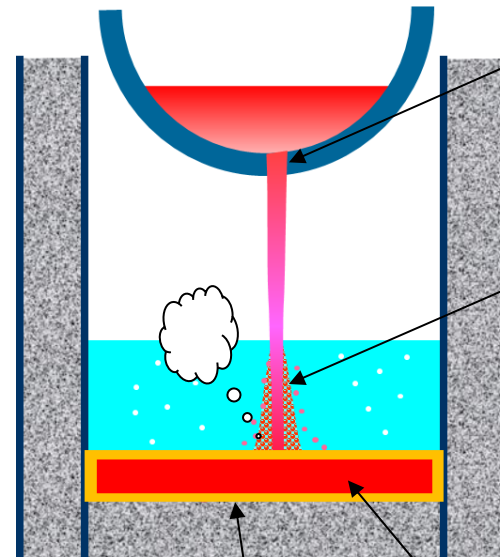


図 4-11 熔融炉心とコンクリートの相互作用における実機で想定される現象と解析上の取扱いの比較

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

表 4-3 MCCI 評価の不確かさに関する整理結果

| MCCI 現象への影響因子                   | 不確かさ要因          | 有効性評価の扱い   | 感度解析の要否   |  |  |  |   |
|---------------------------------|-----------------|--|---|--|--|--|---|
| 下部ヘッド破損モード                      | 破損部位<br>破損口侵食拡大 | 下部ヘッド貫通部の中で最も大口径の制御棒駆動機構ハウジングの瞬時破損を想定し、破損口径の拡大を考慮  | 下部ヘッド貫通部の中で最も大口径の貫通部の破損を想定し、破損口径の拡大も考慮しているため、感度解析不要。  |  |  |  |   |
| 溶融炉心落下量                         | 原子炉圧力容器内溶融進展    | 全炉心相当を想定   | 全炉心相当の最も厳しい落下量を想定しているため、感度解析不要。   |  |  |  |   |
| 溶融炉心の粒子化                        | プール水深           | ペDESTALの注水開始条件及び注水流量について、手順書規定に準じた操作を想定  | 解析モデルパラメータではないため、感度解析不要。  |  |  |  |   |
|                                 | エントレインメント係数     | 実験解析を元に、粒子化割合を少ない側に評価する値を使用  | エントレインメント係数に不確かさがあるため、MAAP コードの不確かさ範囲内 (FARO 実験解析に基づく) で感度解析を実施。                                    |  |  |  |   |
|                                 | 溶融炉心ジェット径       | 破損口径に対応した径を考慮  | 最も大きい径を想定して、粒子化割合を小さくし、水に落下した際のデブリクエンチ量を小さくして厳しい側の扱いをしているため、感度解析不要。                                 |  |  |  |   |
| 溶融炉心の拡がり                        | 水による拡がり抑制       | 拡がりの知見から、全面に拡がることを想定し、均一堆積モデルを使用   | 溶融物の拡がり挙動評価例 (ABWR) を参考に、水張りをしている場合でも想定している溶融炉心落下流量では、ほぼ全面に拡がる結果を得ているため、拡がりの不確かさは小さいと判断し、感度解析は行わない。 |  |  |  |   |
| デブリから水への熱伝達                     | デブリ上面の性状        | 粒子状ベッドの熱流束として、現実的な範囲内で保守側の想定をして、大気圧状態で $800\text{kW/m}^2$ として圧力依存性を考慮  | 粒径やポロシティの不確かさを考慮して、下限の熱流束に対して感度解析を実施。   |  |  |  |   |
| コンクリート種類<br>(玄武岩系コンクリートの侵食の異方性) | 壁方向と床方向の熱分配     | 溶融プールが完全な液相の場合の対流熱伝達係数として、床方向クラストへは <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td> </td></tr><tr><td> </td></tr></table> 、壁方向クラストへは <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td> </td></tr><tr><td> </td></tr></table> を使用 |   |  |  |  | 床方向と壁方向の侵食の異方性の影響を見るため、CCI-3 実験で確認された熱分配比率を想定した感度解析を実施。 |
|                                 |                 |  |   |  |  |  |   |
|                                 |                 |  |   |  |  |  |   |
|                                 |                 |  |   |  |  |  |   |
|                                 |                 |  |   |  |  |  |   |

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

## 5. 感度解析と評価

ペDESTAL床上の溶融炉心の堆積高さが高い方が、溶融炉心の冷却性が悪くなり、MCCIの影響が厳しくなる。国内BWRでは、全炉心が落下した場合には、溶融炉心の堆積高さはMark-I改やMark-IIで約1m程度であり、ABWRでは約0.5m程度である。このため、ここでは、溶融炉心の堆積高さの高いBWR-5、Mark-I改プラントを対象に感度解析を行う。前節の検討を踏まえ、BWR-5、Mark-I改プラントの大LOCAシーケンスを対象に抽出されたパラメータの感度解析を実施した。

また、ガスの発生の影響を見るために参考解析として石灰岩系コンクリートを想定した解析も実施した。

### (1) エントレインメント係数の感度解析

エントレインメント係数は、ベースケースでは $\square$ を設定しているが、感度解析ケースでは、MAAPコードのFARO実験解析を元に設定されている当該変数の不確かさ範囲のうち、最小値である $\square$ と最大値である $\square$ の感度解析を実施する。感度解析ケースを表5-1に示す。解析結果を図5-1-1a～図5-1-2b及び表5-5に示す。

エントレインメント係数が小さいと粒子化割合が減り、落下時のクエンチによる除熱量が減るため、床に堆積する溶融炉心の温度はベースケースより高めに推移し、コンクリートへの伝熱量も増加するため、侵食量は若干増えている。エントレインメント係数が大きいと粒子化割合が増えて逆のことが起こり、侵食量は若干減少している。

エントレインメント係数の不確かさ幅の範囲では、コンクリート侵食量への影響は小さい。

表 5-1 エントレインメント係数のベースケースと感度解析ケース

| パラメータ         | ベースケース<br>(有効性評価) | 感度解析ケース                                | 根拠  |
|---------------|-------------------|--|---|
| ① エントレインメント係数 | $\square$         | (1) $\square$ (小)<br>(2) $\square$ (大) | (1)MAAP 不確かさ範囲*の最小値<br>(2)MAAP 不確かさ範囲*の最大値<br>*FARO 実験解析を元に設定 |

(2) 上面熱流束の感度解析

感度解析ケースを表 5-2 に示す。上面熱流束の不確かさを考慮した下限値として、Lipinski 0-D モデルにより評価される粒子状ベッドのドライアウト熱流束において、想定される範囲でドライアウト熱流束を小さくする条件の値を選定することとし、圧力 0.4MPa[abs]、粒子径 3mm、及びポロシティ 0.26 を条件とした場合の熱流束である 800kW/m<sup>2</sup>（一定）を選定した。解析結果を図 5-2a～図 5-2b 及び表 5-5 に示す。

上面熱流束が小さいと水への熱伝達量が減少するため、熔融炉心の温度はベースケースより高めに推移し、コンクリートへの伝熱量も増加するため、侵食量は増えている。

上面熱流束の不確かさ幅の範囲では、コンクリート侵食量への影響は大きい。

表 5-2 上面熱流束係数のベースケースと感度解析ケース

| パラメータ                              | ベースケース<br>(有効性評価)   | 感度解析ケース                 | 根拠  |
|------------------------------------|---|-------------------------|---|
| ② 上面熱流束<br>係数 ( $F_{\text{CHF}}$ ) | $F_{\text{CHF}}=0.1$ (default)<br>圧力依存性あり<br>(大気圧状態で約<br>800kW/m <sup>2</sup> ) | 800kW/m <sup>2</sup> 一定 | Lipinski 0-D モデルによる<br>評価において、圧力<br>0.4MPa[abs]、粒子径 3mm、<br>ポロシティ 0.26 のドライア<br>ウト熱流束 |



本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

(3) 溶融プールークラスト間の熱伝達係数の感度解析

感度解析ケースを表 5-3 に示す。熱伝達係数の不確かさ幅の中で、床方向への熱伝達を大きくしたケースと壁方向への熱伝達を大きくしたケースの解析結果を図 5-3-1a～図 5-3-2b 及び表 5-5 に示す。

床方向への熱伝達を大きくすると、床方向へ侵食量は増えており、壁方向の侵食は若干減少している。壁方向への熱伝達を大きくすると、壁方向へ侵食量は増えており、床方向の侵食はあまり変わらない。

溶融プールの熱伝達係数の不確かさ幅の範囲では、コンクリート侵食量への影響は小さい。

表 5-3 溶融プールークラスト間の熱伝達係数のベースケースと感度解析ケース

| パラメータ               | ベースケース<br>(有効性評価)  | 感度解析ケース  | 根拠   |
|---------------------|--|--|--|
| ③ 溶融プールークラスト間の熱伝達係数 | 溶融プールが完全な液相の場合の対流熱伝達係数として;<br>床方向 <input type="text"/><br>壁方向 <input type="text"/> | (1) 床: <input type="text"/><br>壁: <input type="text"/><br><br>(2) 床: <input type="text"/><br>壁: <input type="text"/> | (1)<br>床: 壁の 1/4<br>(CCI-3 実験反映)<br>壁: 推奨入力値<br>(2)<br>床: 推奨入力値<br>壁: 床の 1/4<br>( (1) の逆とした。 ) |

(4) 石灰岩系コンクリートを想定した参考解析

解析条件を表 5-4 に示す。コンクリートの組成や物性は、表 4-1 及び表 4-2 に示す値を使用している。石灰岩系コンクリートを想定した場合の解析結果を図 5-4a～図 5-4d 及び表 5-5 に示す。石灰岩系コンクリートの場合の、床方向及び壁方向の侵食量は若干増加しているが、感度は小さい。また、格納容器内のガスモル分率もベースケースと同様な結果となる。このケースのようにコンクリート侵食量が小さい場合は、石灰岩系コンクリートの影響は小さい。

表 5-4 コンクリート種類を変えた参考解析条件

| パラメータ    | ベースケース<br>(有効性評価) | 参考解析ケース | 根拠            |
|----------|-------------------|---------|---------------|
| コンクリート種類 | 玄武岩系              | 石灰岩系    | ガス発生の影響を確認する。 |

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。

表 5-5 MCCI 感度解析結果の一覧

| ケース                   | パラメータ設定  | コンクリート侵食量                |
|-----------------------|--|--------------------------|
| 有効性評価<br>(ベースケース)     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・エントレインメント係数: <input type="text"/></li> <li>・上面熱流束: 約 800kW/m<sup>2</sup> @ 1ata<br/>(F<sub>CHF</sub>=0.1 デフォルト)<br/>圧力依存性考慮</li> <li>・溶融プールからクラストへの熱伝達<br/>係数<br/>床 <input type="text"/><br/>壁 <input type="text"/></li> <li>・コンクリート組成及び物性値:<br/>玄武岩系</li> </ul> | 床面: 2.4cm<br>壁面: 2.3cm   |
| ①-1 エントレインメン<br>ト係数 小 | エントレインメント係数: <input type="text"/>  | 床面: 3.6cm<br>壁面: 3.5cm   |
| ①-2 エントレインメン<br>ト係数 大 | エントレインメント係数: <input type="text"/>  | 床面: 1.7cm<br>壁面: 1.7cm   |
| ② 上面熱流束 下限            | 800kW/m <sup>2</sup> 一定  | 床面: 22.5cm<br>壁面: 21.6cm |
| ③-1 溶融プール熱伝達<br>床方向大  | 溶融プール熱伝達係数:<br>床 <input type="text"/><br>壁 <input type="text"/>  | 床面: 2.4cm<br>壁面: 2.2cm   |
| ③-2 溶融プール熱伝達<br>壁方向大  | 溶融プール熱伝達係数:<br>床 <input type="text"/><br>壁 <input type="text"/>  | 床面: 2.1cm<br>壁面: 2.4cm   |
| (参考解析)<br>石灰岩系コンクリート  | コンクリート組成及び物性値:<br>石灰岩系   | 床面: 2.8cm<br>壁面: 2.8cm   |

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

「本製品（又はサービス）には、米国電力研究所（The Electric Power Research Institute）の出資により電力産業用に開発された技術が取り入れられています。」

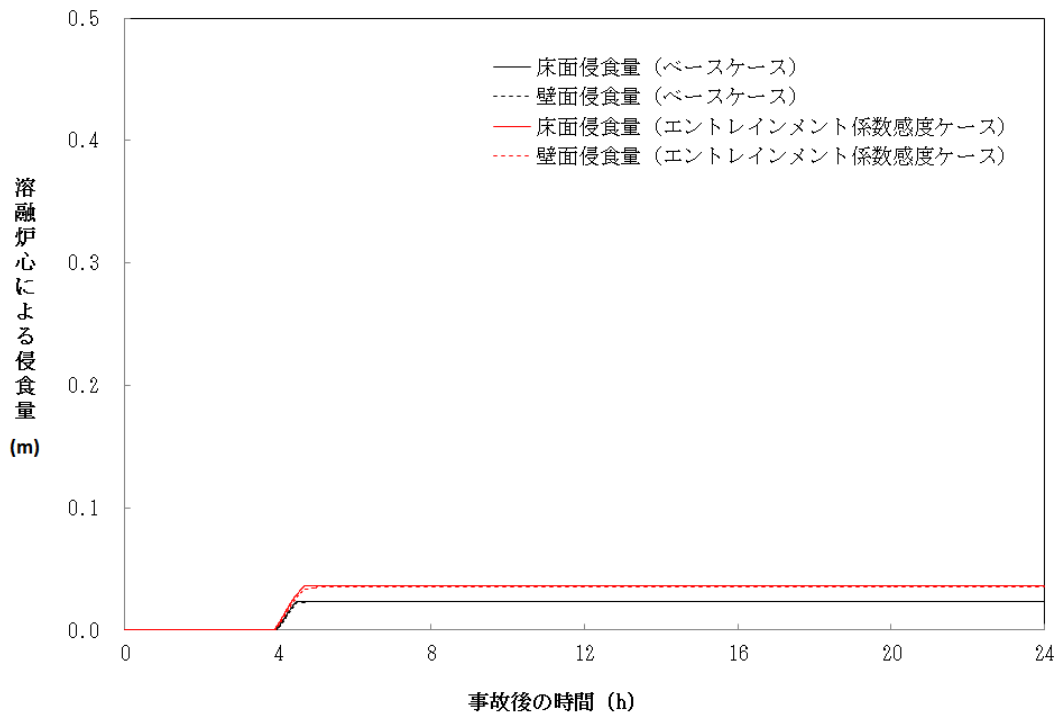


図 5-1-1a コンクリート侵食量の比較 (エントレインメント係数 )

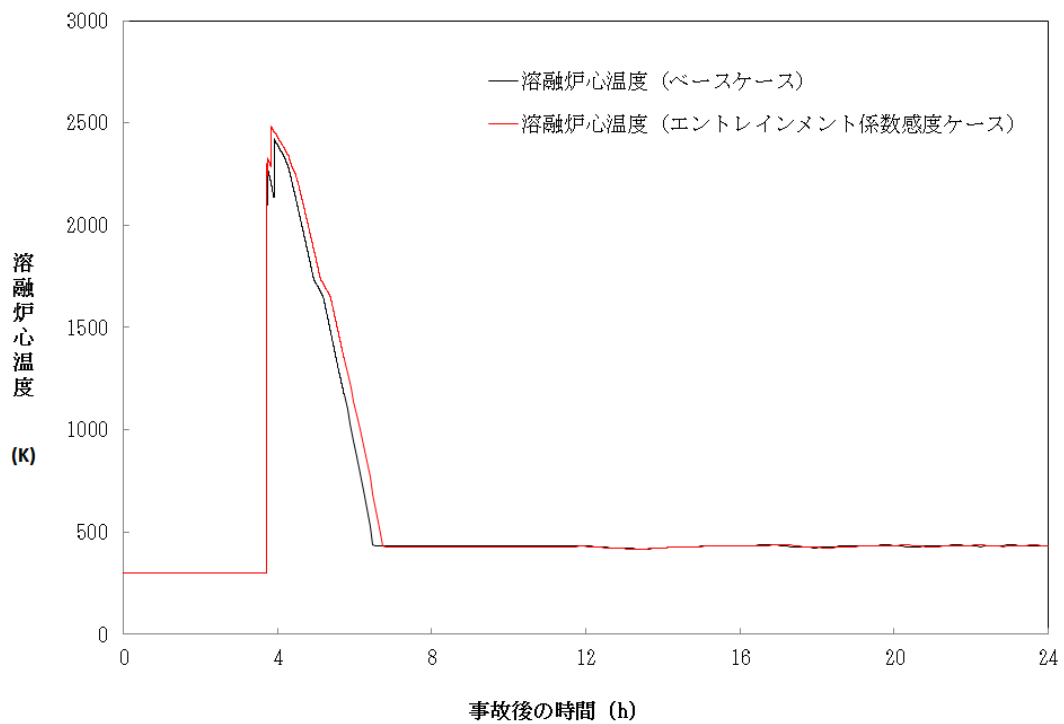


図 5-1-1b 溶融炉心温度の比較 (エントレインメント係数 )

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。

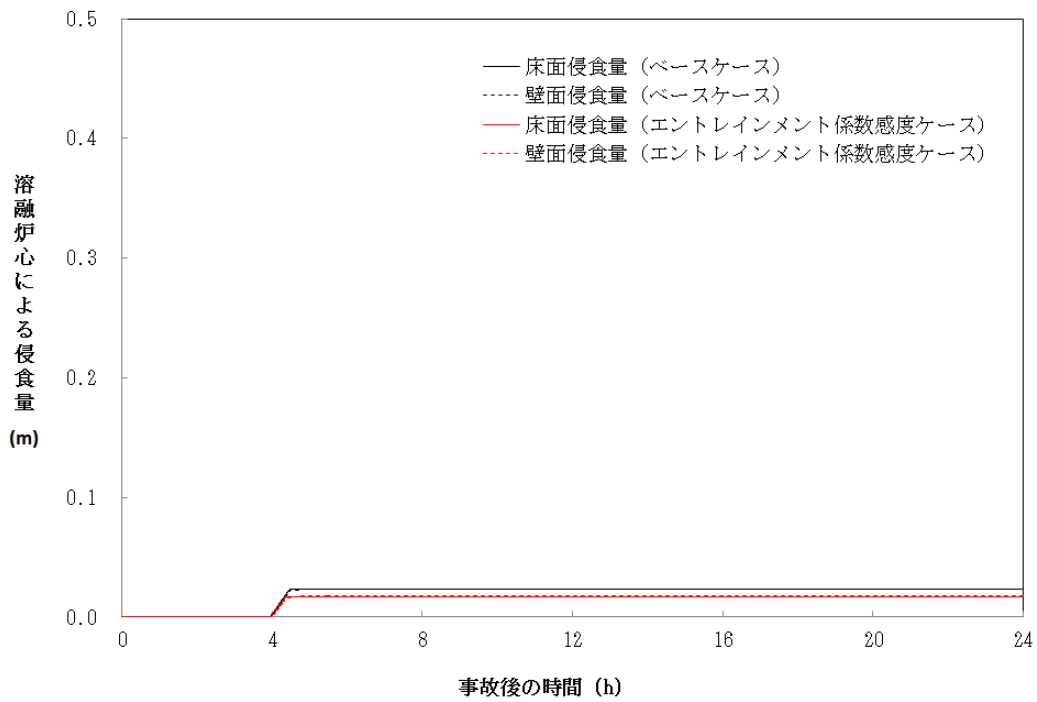


図 5-1-2a コンクリート侵食量の比較 (エントレインメント係数 )

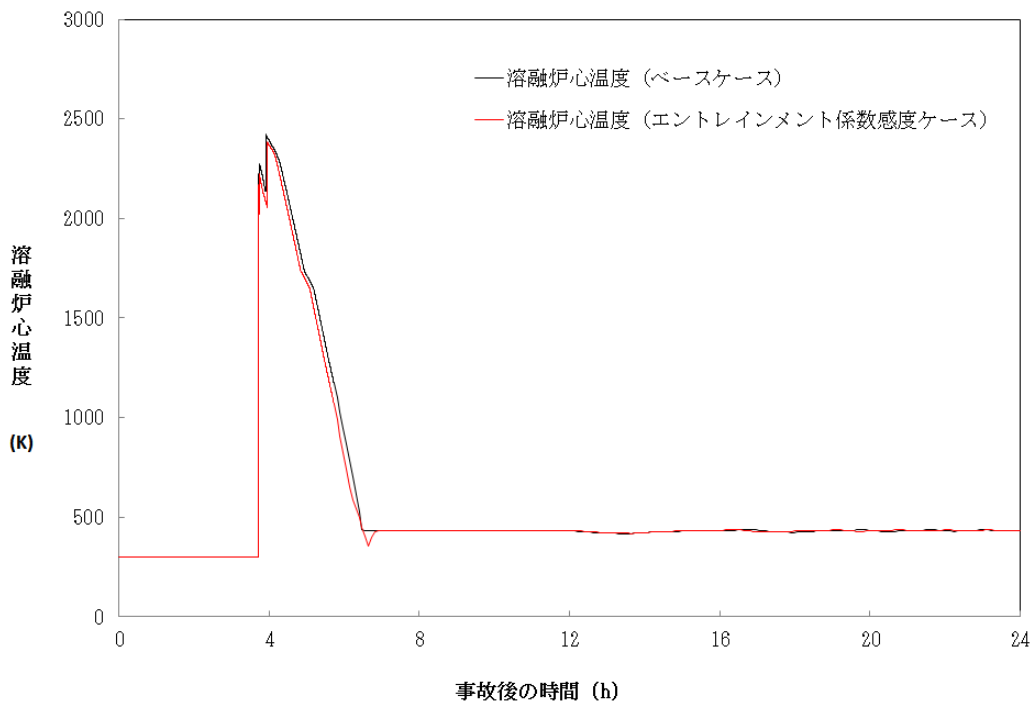


図 5-1-2b 溶融炉心温度の比較 (エントレインメント係数 )

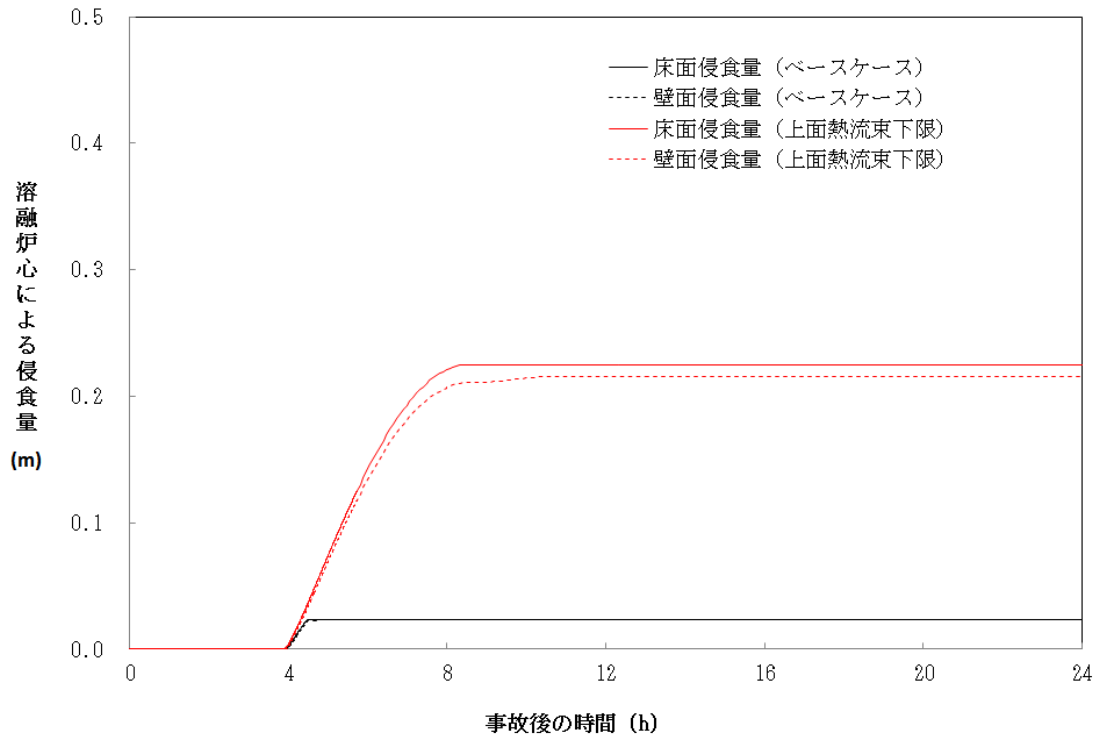


図 5-2a コンクリート侵食量の比較 (上面熱流束 800kW/m<sup>2</sup> 一定)

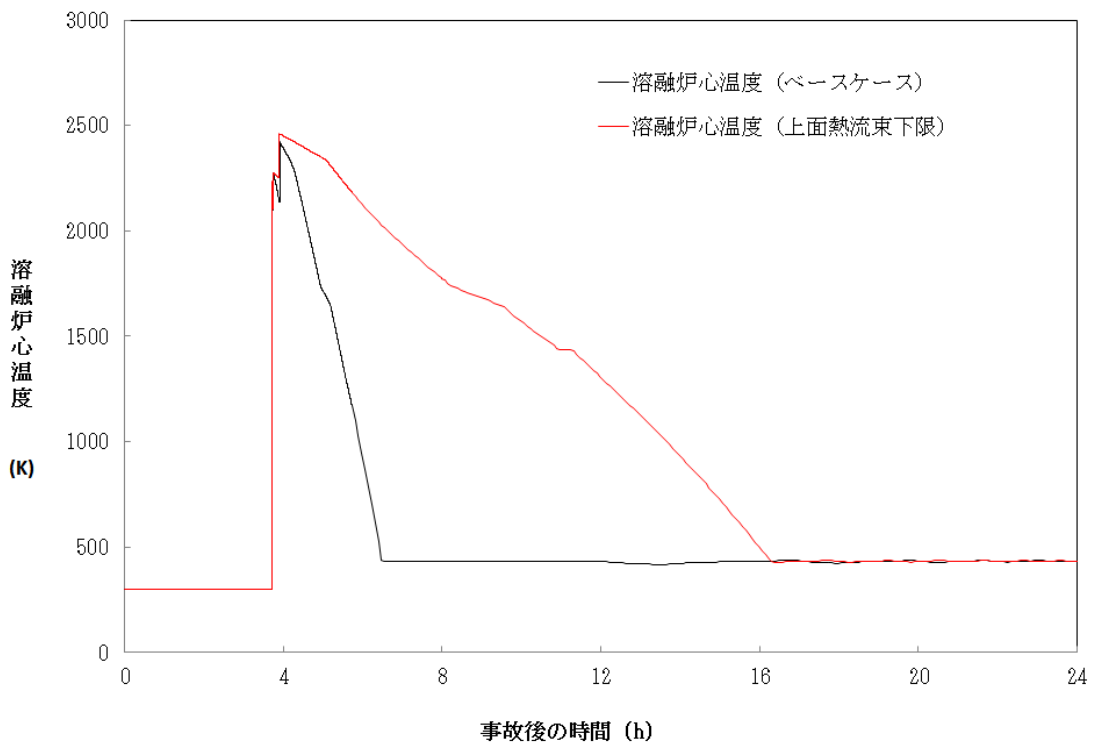


図 5-2b 熔融炉心温度の比較 (上面熱流束 800kW/m<sup>2</sup> 一定)

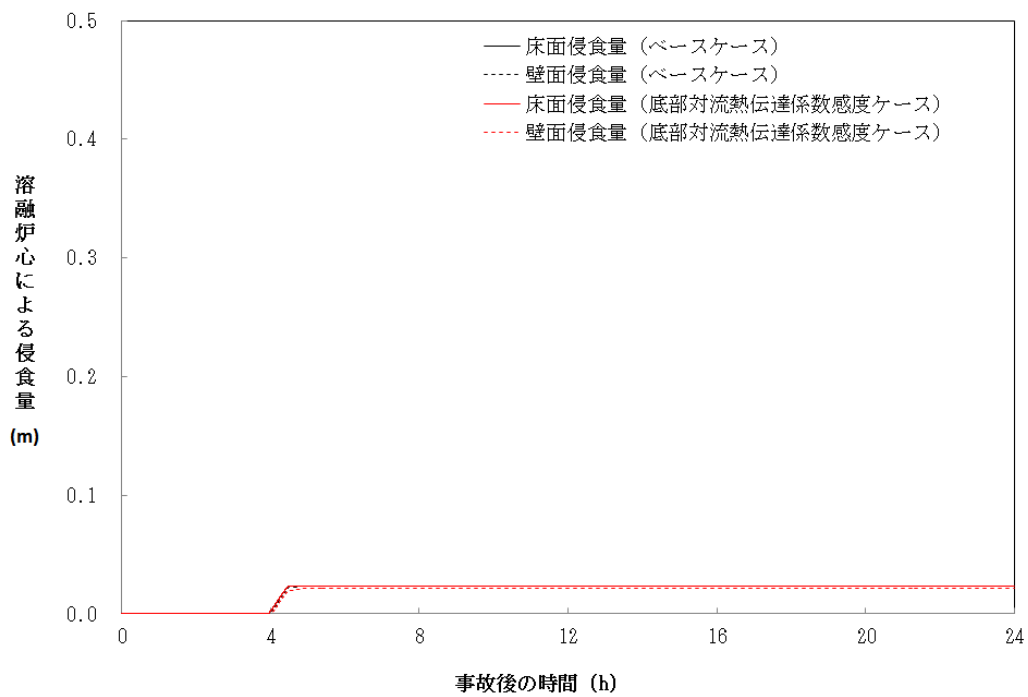


図 5-3-1a コンクリート侵食量の比較 (床方向対流熱伝達係数大)

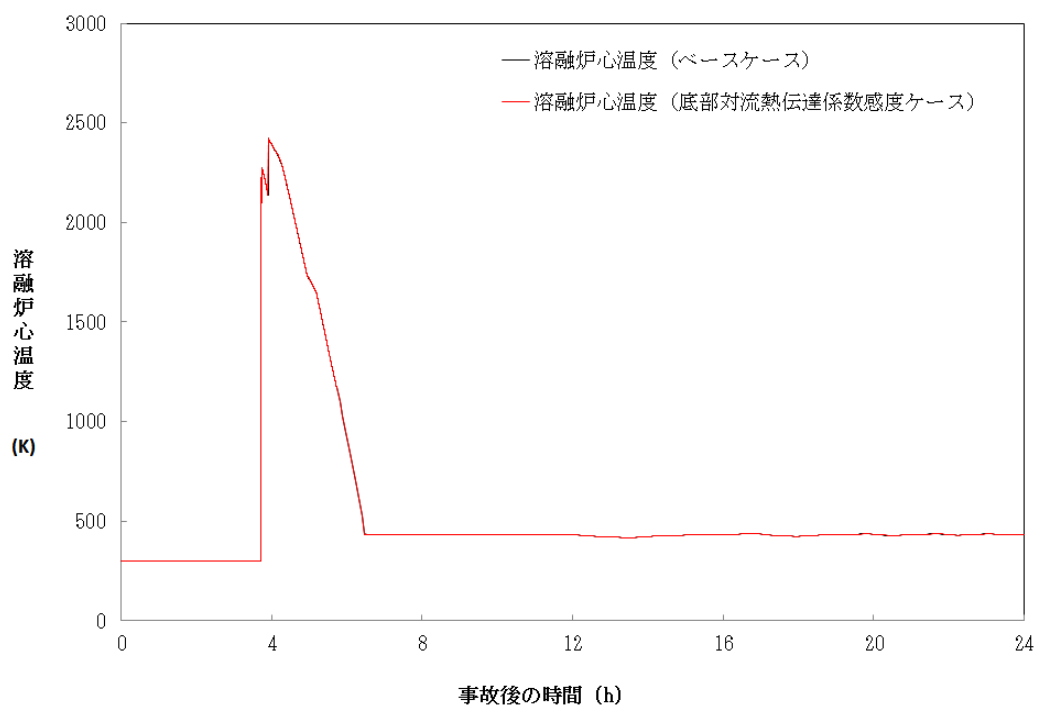


図 5-3-1b 溶融炉心温度の比較 (床方向対流熱伝達係数大)

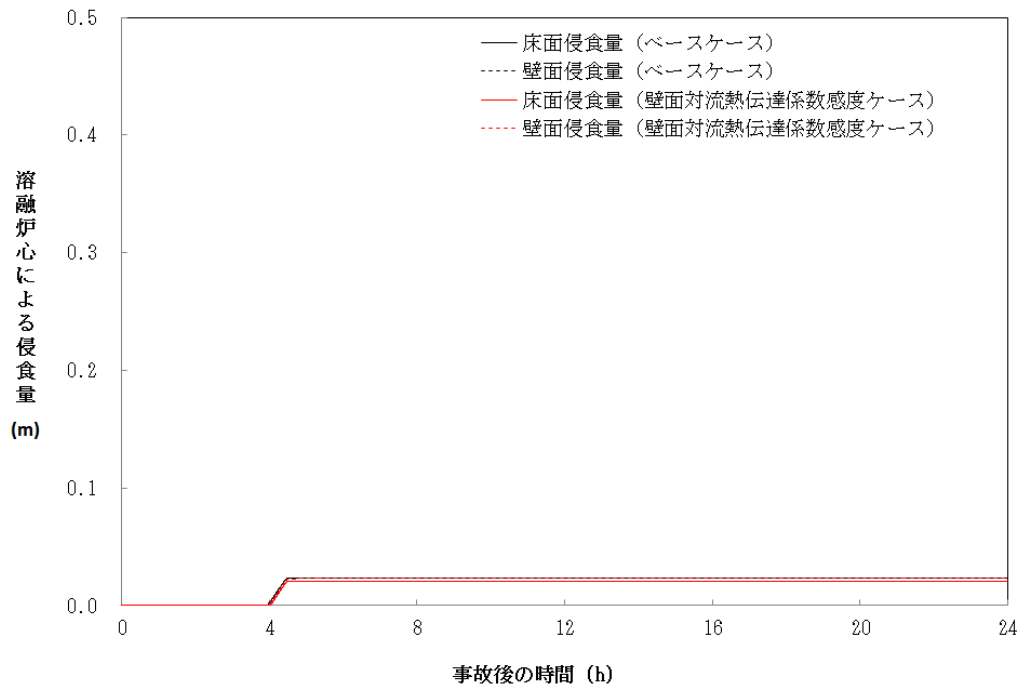


図 5-3-2a コンクリート侵食量の比較 (壁方向対流熱伝達係数大)

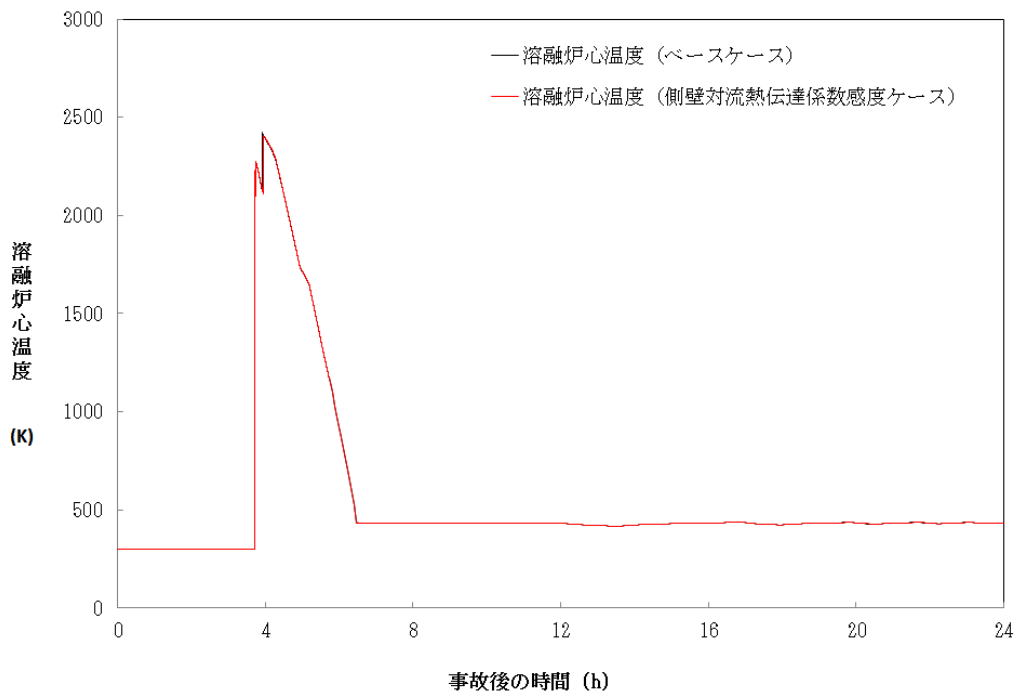


図 5-3-2b 溶融炉心温度の比較 (壁方向対流熱伝達係数大)



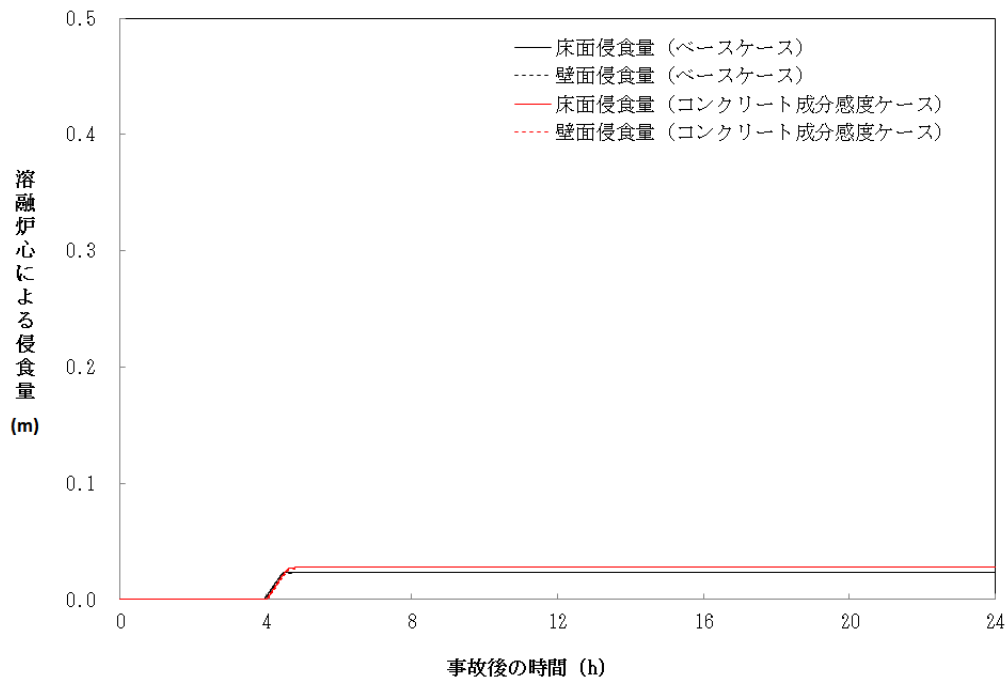


図 5-4a コンクリート侵食量の比較 (石灰岩系コンクリート)

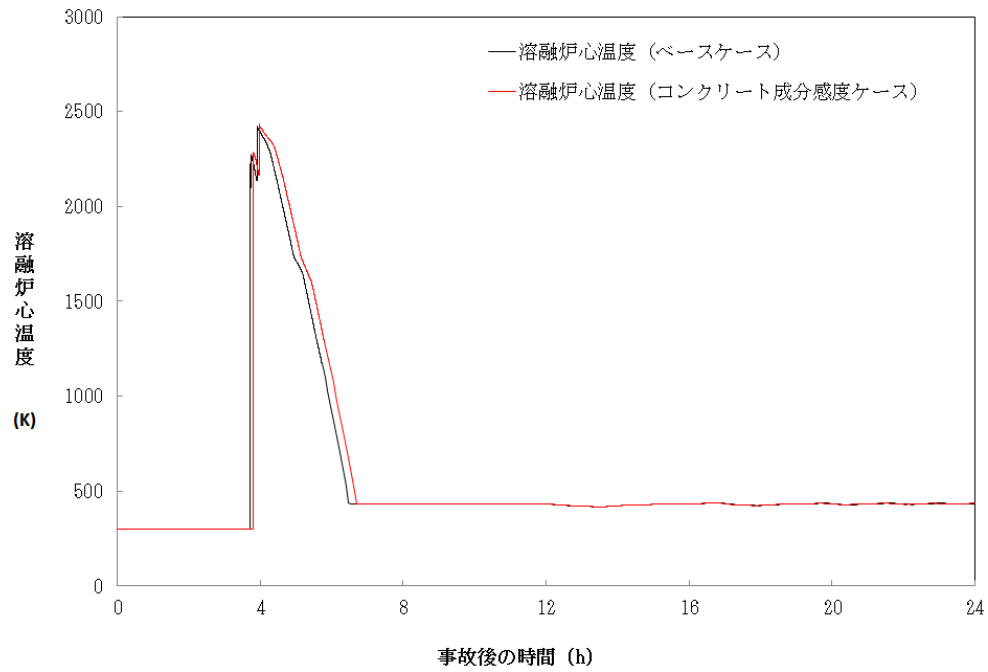


図 5-4b 溶融炉心温度の比較 (石灰岩系コンクリート)

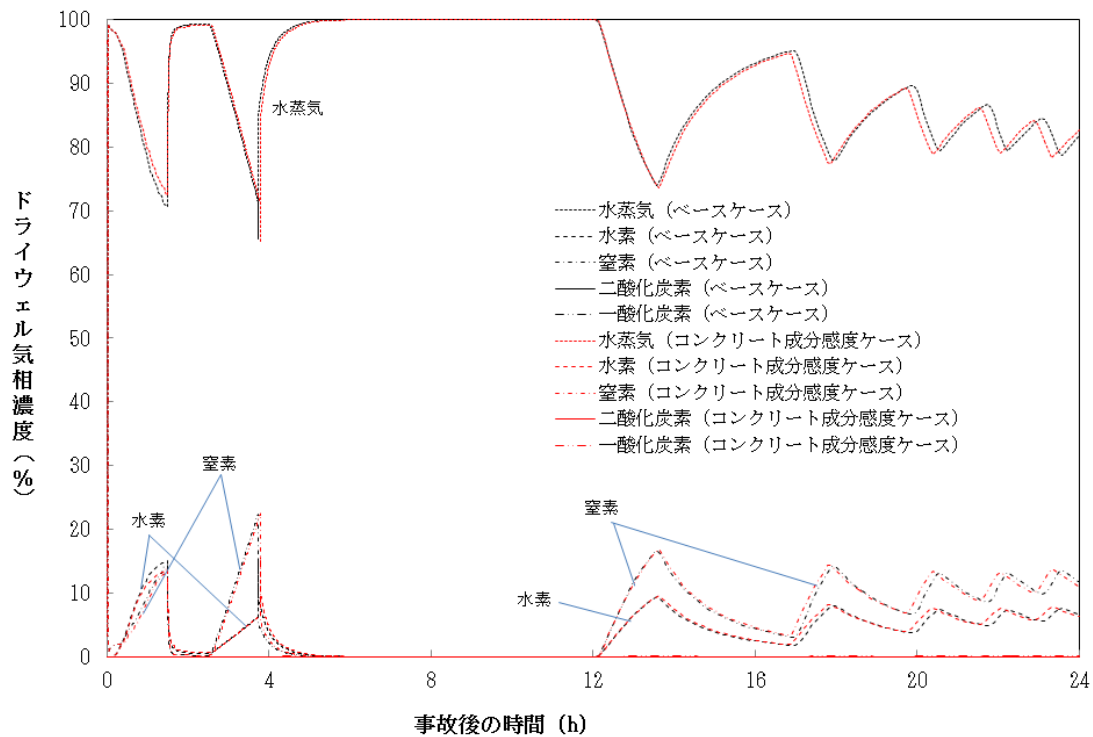


図 5-4c ドライウェルガスモル分率 (石灰岩系コンクリート)

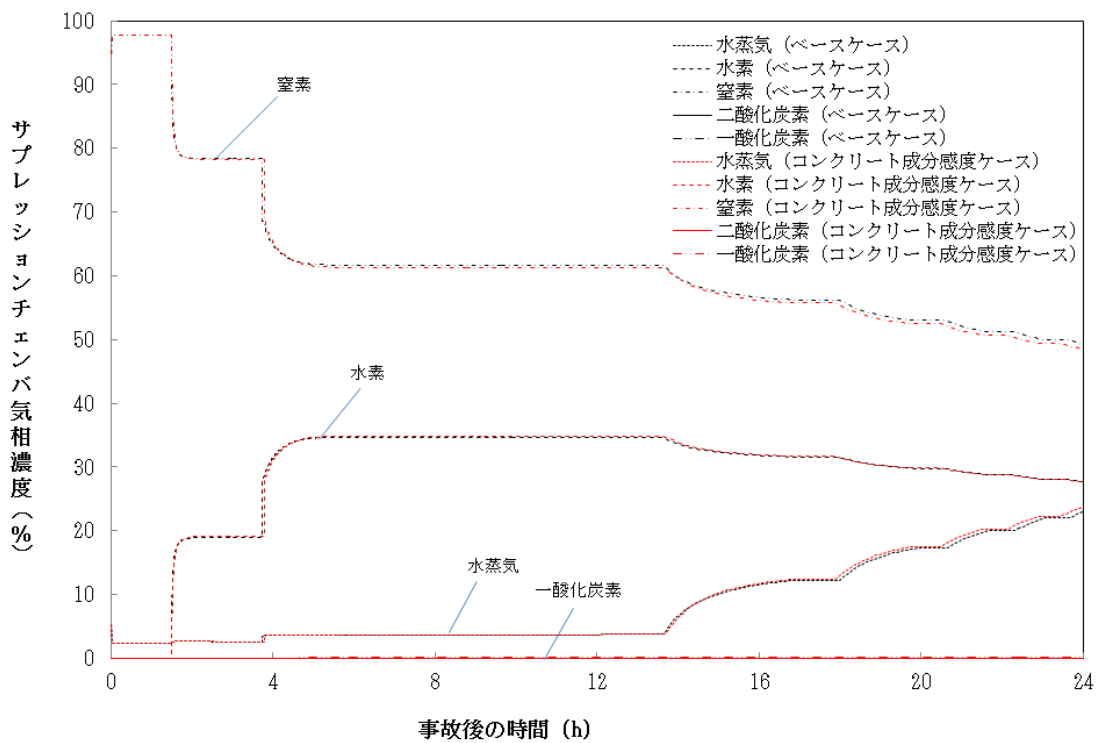


図 5-4d サプレッションチェンバガスモル分率 (石灰岩系コンクリート)

## 6. まとめ

MCCIに関する種々の実験から得られた知見等に基づきMCCIの各過程における不確かさの分析を行い、不確かさがあり、評価結果に影響するモデルパラメータとして、エントレインメント係数、上面熱流束を抽出した。また、2次元侵食実験結果で確認されている侵食の異方性については、未だ十分な解明が行われておらず、実機のウェット条件でも起こるのかは不明であるが、念のために異方性の影響をみるために、溶融プールから床方向と壁方向への熱伝達係数の感度解析を行った。これらのパラメータの感度解析以外に、コンクリート種類を玄武岩系コンクリートから石灰岩系コンクリートに変更した場合の解析も参考に実施し、コンクリート侵食量への影響を確認した。

BWR-5, Mark-I 改プラントの有効性評価に使用しているノミナル条件を設定したベースケースでは、コンクリート侵食量は2.4cmであった。

エントレインメント係数の感度解析結果より、水中での粒子化によるクエンチ効果に差が出て、床上に堆積した溶融炉心温度に影響し、コンクリート侵食量に影響するが、その影響は小さかった。

上面熱流束の感度解析結果より、上面熱流束は、床上に堆積した溶融炉心温度に大きく影響し、コンクリート侵食量に大きく影響する結果となった。

玄武岩系コンクリートに見られる床方向と壁方向のコンクリート侵食の異方性の影響を確認するため、溶融プールから床方向と壁方向への熱分配の異方性として扱い、溶融プールのクラスト間の熱伝達係数を変えて、床方向への熱伝達が大きい場合と壁方向への熱伝達が大きい場合の感度を調べた。その結果、熱伝達の大きい方向の侵食量が大きくなり、侵食の異方性が確認された。但し、ノミナル条件の場合のように侵食量が小さい場合は、侵食量に大きな感度がないことがわかった。

感度解析の結果、コンクリート侵食量に対して上面熱流束の感度が支配的であることが確認された。上面熱流束を想定される下限値とした場合でも、コンクリート侵食量は、22.5cm程度に収まることが確認された。

また、実験で確認されている侵食面における侵食の不均一性については、MAAPモデルの検証解析結果から、実験の侵食面における侵食のばらつきが、MAAPコードによる予測侵食量の20%の範囲内に収まっていることが確認され、上面熱流束の感度に比べて影響が小さいことが確認された。

また参考として、他の条件を同一として玄武岩系コンクリートから石灰岩系コンクリートに変更した解析も実施したところ、侵食量に大きな感度は無かった。また、ガス発生の影響も顕著には見られなかった。

最後に、MCCIに関係する現象は、複雑な多成分・多相熱伝達現象であり、現状でも知見が十分であるとは言えない。また事前水張り時の落下デブリの冷却性を直接調べた実験例が殆どないことから、今後も継続して検討を進め、新たな知見が出た場合には適宜評価に反映するように努めることが重要であると考えられる。

## 付録

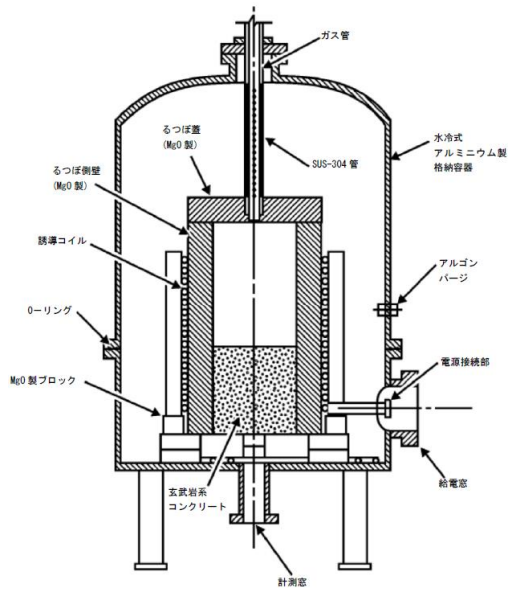
### 付録1 ドライ条件での MCCI 実験

デブリとして  $UO_2$  コリウムを用い、崩壊熱を模擬し、注水を行っていないドライ条件の実験として、米国サンディア国立研究所 (SNL) の SURC 実験、米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) の ACE 実験及び独カールスルーエ研究所 (KfK) で実施された BETA 実験がある。以下にそれぞれの実験について説明する。これらの実験は、実機における MCCI 継続の影響の検討に参考となる。

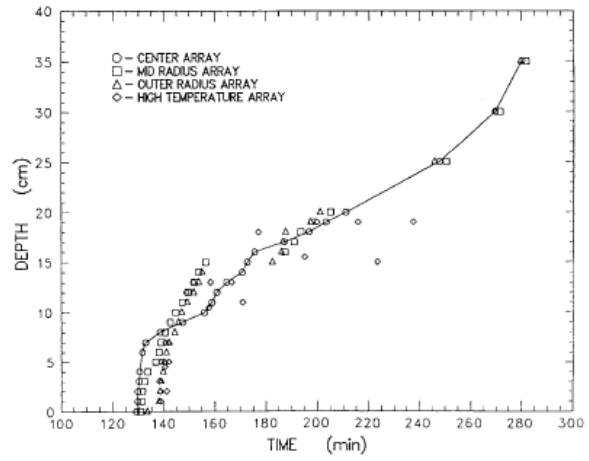
#### (1) SURC 実験 (米国 SNL) <sup>[4][23][34]</sup>

MCCI 時の伝熱、化学反応、ガスおよびエアロゾルの放出等を調べ、CORCON 等の解析コードを検証・改良することを目的に SNL にて 4 回実験が実施された。そのうち実機と同様の組成の  $UO_2$  デブリを使用した実験は 2 回実施された (SURC-1, 2。他の 2 回の実験は模擬デブリとして SUS304 が使用された)。実験装置の概要を図付 1-1 に示すが、直径 40cm のコンクリート試験体 (SURC-1 実験では石灰岩系 (米国で使用されている)、SURC-2 実験では玄武岩系のコンクリートを使用) を入れた MgO 製の円筒容器に約 250kg の模擬デブリ (組成:  $UO_2$  69%,  $ZrO_2$  22%, Zr 9%) を誘導加熱して熔融させてコンクリートとの反応を継続させた。SURC-2 のコンクリートの侵食深さの変化を図付 1-2 に示すが、侵食速度は 1 時間に 20cm 程度となっている。

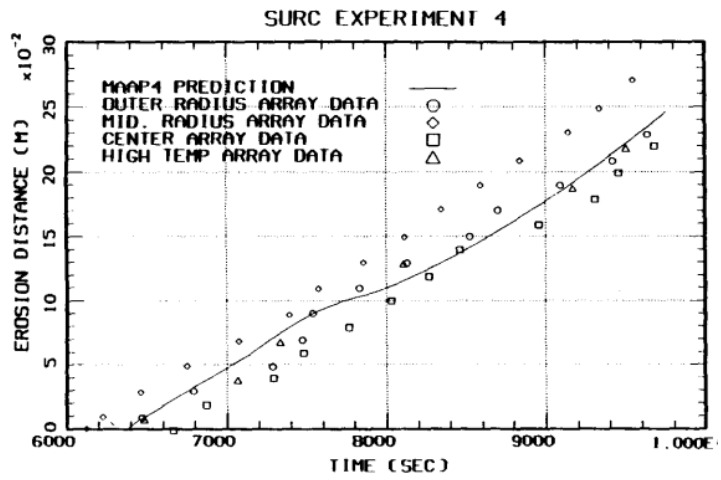
また、SURC-4 は、コード比較のための国際標準問題 (ISP-24) <sup>[5]</sup> に選定され、実験データと種々の解析の比較が行われている。200kg のステンレス鋼と模擬 FP (Te: 0.5 kg,  $La_2O_3$ : 1.17 kg,  $CeO_2$  : 1.23 kg, BaO : 1.1 kg) が、コンクリート侵食が開始するまで加熱され、侵食開始後 14 分経ってから約 0.5 秒間に追加的に 20kg のジルコニウムが溶融物に添加されている。SURC-4 のコンクリートの侵食深さの変化を図付 1-3 に示すが、侵食速度は約 55 分の時点で 24.5~27.5cm で、MAAP 解析結果とよい一致を示している。なお、SURC-4 実験では外周部のコンクリート侵食深さが大きくなっており、MAAP 解析結果と若干相違が見られるが、これは実験では外周部から誘導加熱して溶融物を加熱しているため、外周部の溶融物への入熱量が大きくなることが原因と考えられる。従って、MAAP との相違は、実験固有の原因と考えられるため、ベンチマーク解析の観点からは問題とはならないと考えられる。



図付 1-1 SURC 実験装置<sup>[23]</sup>



図付 1-2 SURC-2 実験の侵食深さ<sup>[23]</sup>



図付 1-3 SURC-4 実験の侵食深さと MAAP 解析との比較<sup>[23]</sup>

(2) ACE 実験 (米国 ANL) [3][23][34]

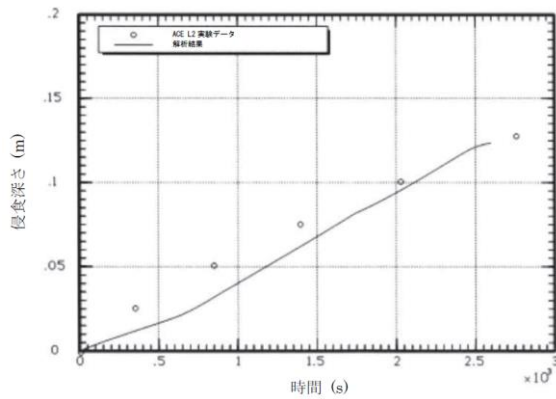
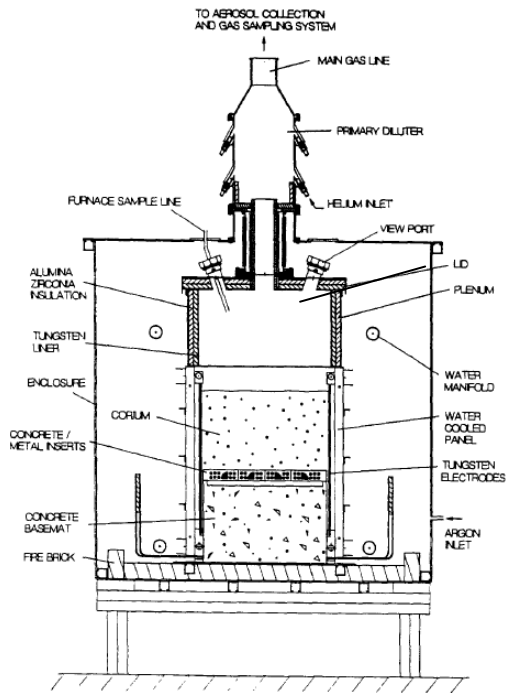
MCCI における熱水学的及び化学的プロセスを検証し関連コードのデータベースを拡充することを目的に、国際プログラムとして ACE (Advanced Containment Experiments) 計画の一部として実施された。Phase-C で MCCI 時の FP エアロゾル放出の定量化の目的で実験が実施された。実験装置の概要を図付 1-4 に示す。実炉組成の約 300kg の模擬デブリを使用し、タングステン電極により直接通電により加熱し熔融させている。コンクリート侵食はベースマット中にある熱電対によりモニターされている。実験マトリックスを表付 1-1 に示すが、実験はコンクリートの種類やデブリの組成を替えて実施された。

L2 実験のコンクリートの侵食深さの MAAP 解析との比較を図付 1-5 に示すが、MAAP 解析結果とよい一致を示している。

表付 1-1 ACE/MCCI 実験マトリックス<sup>[23]</sup>

| Test | Concrete Type <sup>a</sup> | Decay Heat Generation W/kg of UO <sub>2</sub> | Corium Mixture | Initial Zr Oxidation % | Absorber Material |
|------|----------------------------|---|----------------|------------------------|-------------------|
| L5   | L/S                        | 325   | PWR            | 100                    | none              |
| L2   | S                          | 450   | PWR            | 70                     | none              |
| L1   | L/S                        | 350   | PWR            | 70                     | none              |
| L6   | S                          | 350   | PWR            | 30                     | Ag, In            |
| L4   | Serp/S <sup>b</sup>        | 250   | BWR            | 50                     | B <sub>4</sub> C  |
| L7   | L/S                        | 250   | BWR            | 70                     | B <sub>4</sub> C  |
| L8   | L/L                        | 350/150 <sup>c</sup>                          | PWR            | 70                     | Ag, In            |

a. Concrete type: L/S: limestone/common sand  
 S: siliceous  
 L/L: limestone/limestone



出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

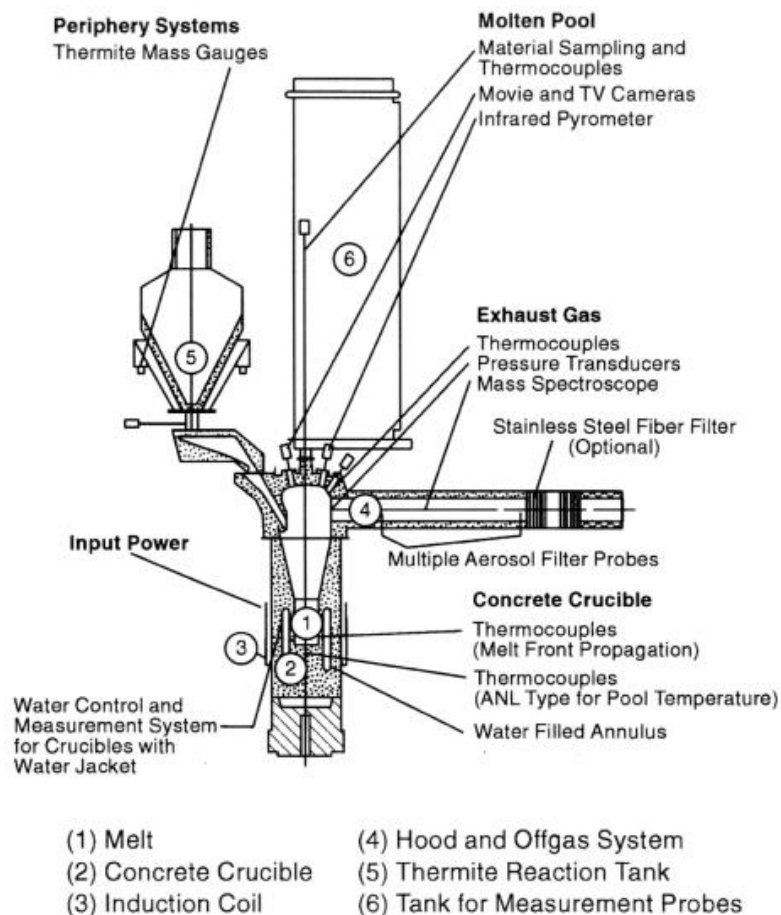
図付 1-4 ACE/MCCI 実験装置<sup>[3]</sup>

図付 1-5 ACE-L2 実験と MAAP 解析の  
 侵食深さの比較<sup>[34]</sup>

(3) BETA 実験 (独 KfK) [6][34]

MCCI 解析コードの侵食挙動やエアロゾル生成挙動の検証用のデータベースを拡充することを目的として、独 KfK で実施された。実験装置の概要を図付 1-6 に示す。テルミット反応により金属溶融物(Fe, Cr, Ni, Zr)と酸化物溶融物( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , CaO) を生成させて、玄武岩系コンクリート製のるつぼに落下させて、るつぼ内の溶融物は、誘導加熱により加熱している。ベースマット中にある熱電対により 2次元のコンクリート侵食挙動が確認できるようになっている。溶融物として Zr を多く含む溶融物を用いた実験シリーズの実験マトリックス (V5.1~V5.3) を表付 1-2 に示す。

実験後のコンクリート侵食状況を示す模式図を、図付 1-7 に示す。壁方向よりは、床方向の侵食量が大きくなっている。溶融物に含まれる Zr によりコンクリート成分の  $SiO_2$  が還元され、Si や SiO の生成が確認されている。V5.1 実験と V5.2 実験のコンクリートの侵食深さの MAAP 解析との比較<sup>[34]</sup>を図付 1-8 及び図付 1-9 に示すが、MAAP 解析結果とよい一致を示している。この MAAP のベンチマーク解析により、2次元侵食に関わるパラメータ設定の妥当性が判断されている。

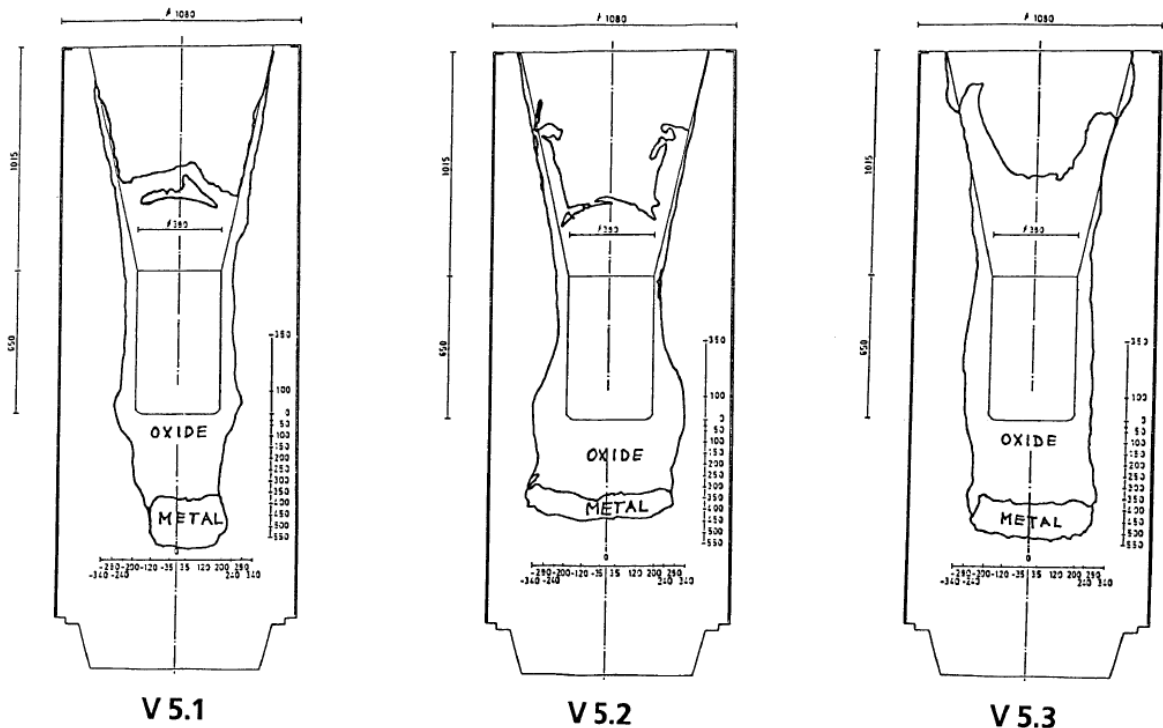


図付 1-6 BETA 実験装置 [34]



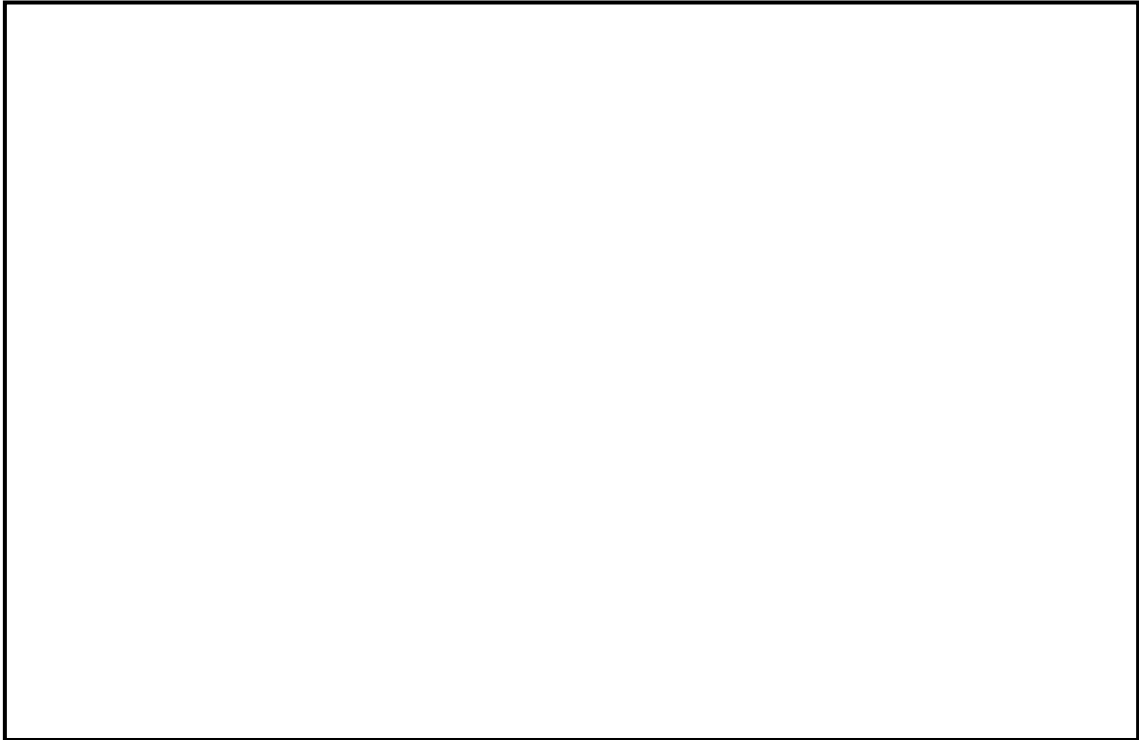
表付 1-2 BETA 実験マトリックス<sup>[6]</sup>

| BETA Test | Initial Melt, ~ 2200 K   | Fission Product Mock-ups and Additives   | Planned Heating Power | Main Objectives  |
|-----------|--|--|-----------------------|--|
| V 5.1     | 300 kg Fe+Cr+Ni<br>80 kg Zry-4<br>50 kg Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>+ SiO <sub>2</sub> + CaO | none   | 400 kW                | PWR: Zr chemistry, consequences on erosion and aerosol release                     |
| V 5.2     | as V 5.1   | 1 kg Mo, 0.5 kg ZrTe <sub>2</sub> ,<br>1.5 kg CeO <sub>2</sub> , 1 kg BaO,<br>0.5 kg La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 0.5 kg SrO,<br>6 kg B <sub>4</sub> C in steel containers | 200 kW                | BWR with B <sub>4</sub> C absorber, low power: Zr chemistry and related processes  |
| V 5.3     | as V 5.1   | 1 kg Mo, 1 kg CeO <sub>2</sub> ,<br>1 kg BaO, 0.5 kg La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,<br>0.5 kg SrO,<br>6 kg B <sub>4</sub> C in steel containers                              | 800 kW                | BWR with B <sub>4</sub> C absorber, high power: Zr chemistry and related processes |

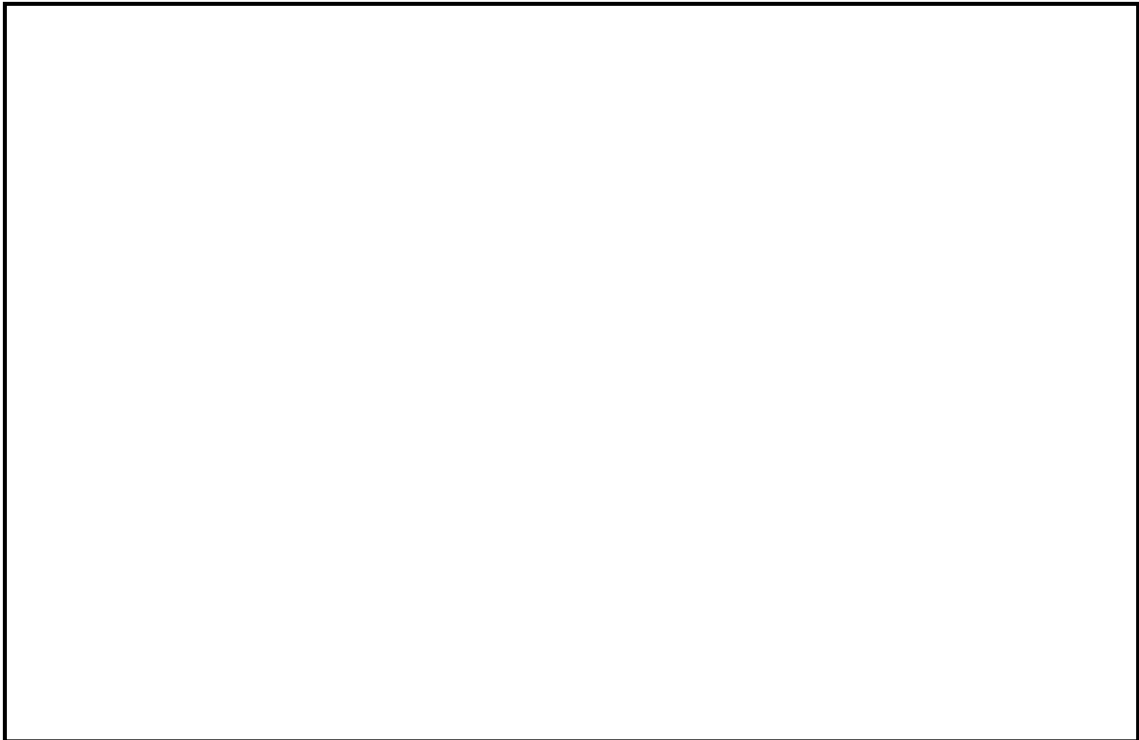


図付 1-7 BETA 実験後のコンクリート侵食状況を示す模式図<sup>[6]</sup>

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。



図付 1-8 BETA-V5.1 実験と MAAP 解析の侵食深さの比較 <sup>[34]</sup>



図付 1-9 BETA-V5.2 実験と MAAP 解析の侵食深さの比較 <sup>[34]</sup>

## 付録2 注水を伴った MCCI 実験

注水を伴う実験（溶融物上に冷却水を注水した実験）としては、SNL で実施された SWISS 実験及び WETCOR 実験、ANL (EPRI) の主催で実施された MACE 実験及び OECD/MCCI 実験、原子力発電技術機構 (NUPEC) により実施された COTELS 実験がある。

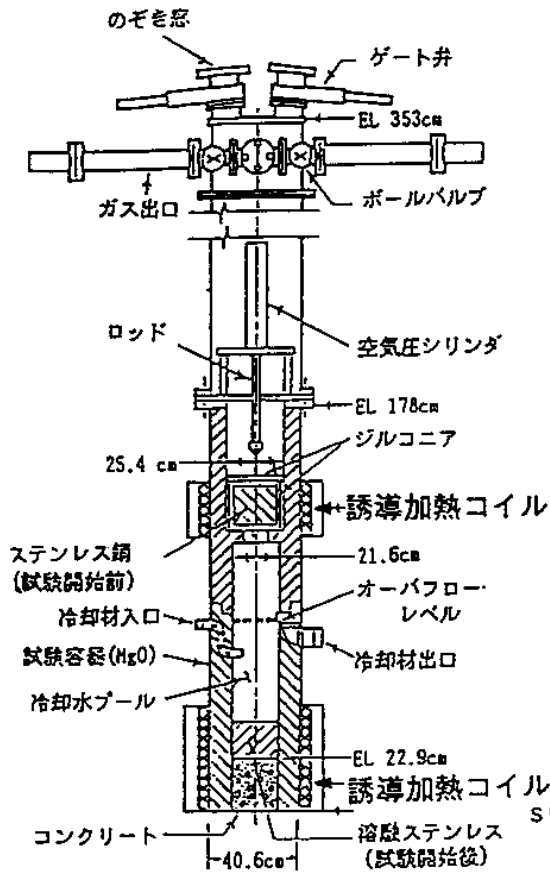
以下の実験の知見を示す。

- ① SWISS 実験（米国サンディア研究所(SNL)）
- ② WETCOR 実験（米国サンディア研究所(SNL)）
- ③ MACE 実験（米国アルゴンヌ研究所(ANL)）
- ④ COTELS 実験（日本 原子力発電技術機構 (NUPEC)）
- ⑤ OECD/MCCI 実験（米国アルゴンヌ研究所(ANL)）

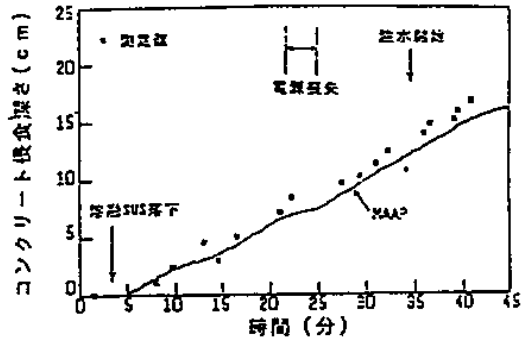
### (1) SWISS 実験（米国 SNL）<sup>[7]</sup>

高周波加熱によりステンレスを溶融させ、溶融したステンレスとコンクリートとの反応中に注水し、溶融物の冷却性を調べる実験が 2 回行われた。実験結果 2 回とも同様の結果となっており、メルト上面に安定なクラストが形成されてメルト内部に冷却水が浸入しにくくなり、メルトによりコンクリートの侵食が継続した（図付 2-1 参照）。但し、本実験はメルトの発熱が実機で想定される値より 1 桁程度大きいことや 100%ステンレスであるため模擬崩壊熱に加え、水-金属反応の発熱が加わったことも一因と分析されている。またコリウムより上方水プールへの熱流束は約 800kW/m<sup>2</sup> 程度であった（図付 2-2 参照）。

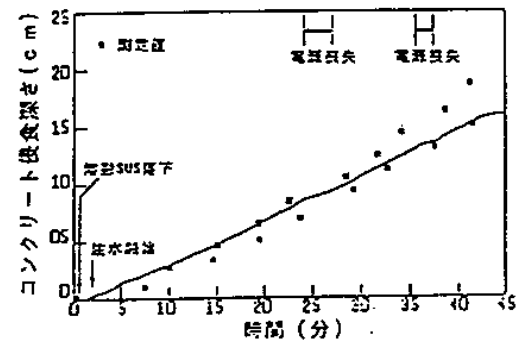
実験条件：45kgのSUSを内径21.6cmのコンクリート上に溶融させた状態で落下して注水を実施。比出力1.6kW/kg SUS



実験装置の概要 (SWISS実験)



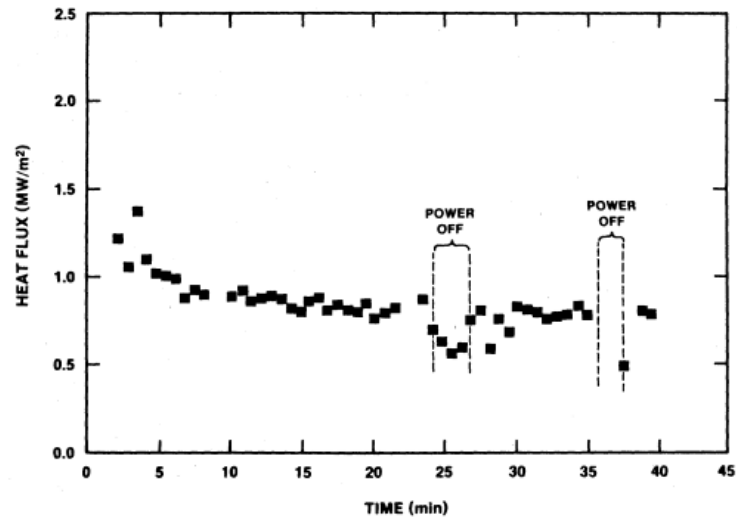
SWISS-1実験におけるコンクリート侵食深さの比較



SWISS-2実験におけるコンクリート侵食深さの比較

実験結果および解析結果の比較 (SWISS実験)

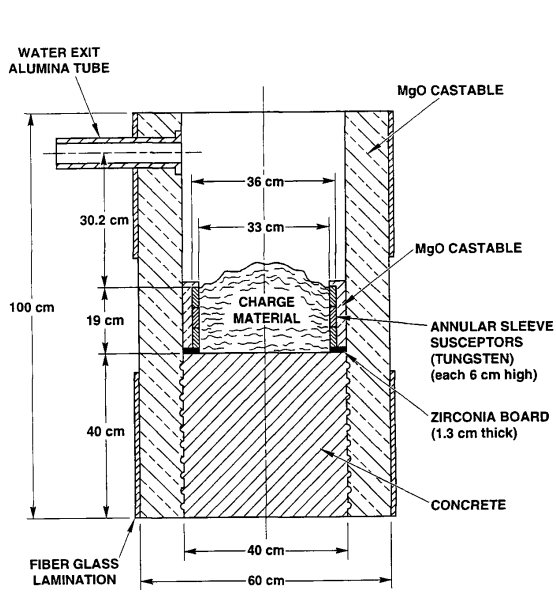
図付 2-1 SWISS 実験の実験装置とコンクリート侵食深さの実験と解析 (MAAP) の比較<sup>[7]</sup>



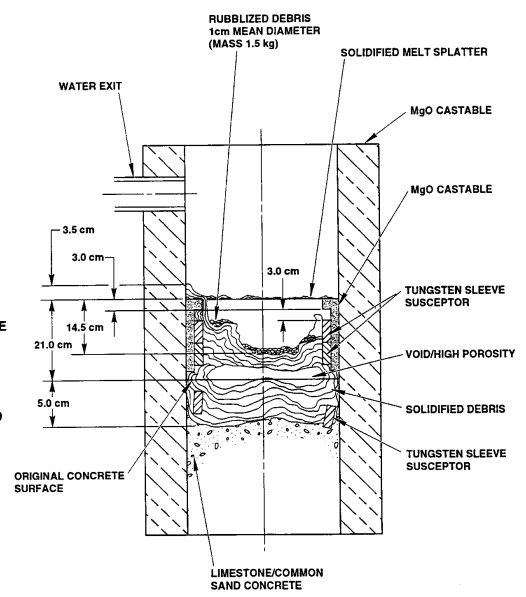
図付 2-2 SWISS-2 実験の水プールへの熱流束<sup>[7]</sup>

(2) WETCOR 実験 (米国 SNL) <sup>[8]</sup>

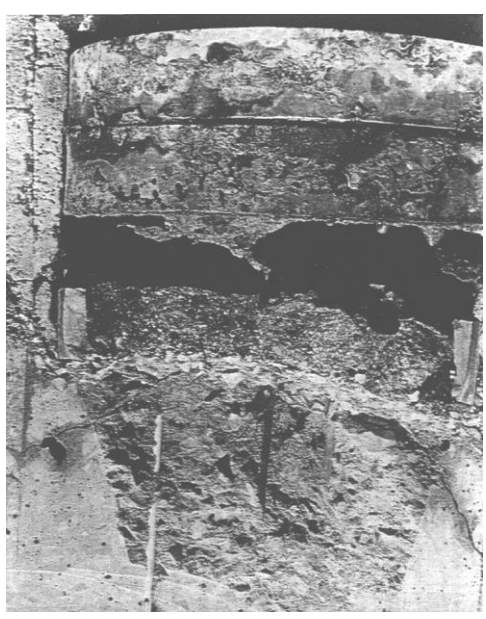
$Al_2O_3$  と  $CaO$  の酸化物混合溶融物 34 kg を用いてコンクリートとの反応中に注水し溶融物の冷却性を調べる実験が行われた (図付 2-3 参照)。SWISS 実験と同様の理由によりコンクリートの侵食が継続した。コンクリート侵食速度は SWISS 実験と比べて約 1/3 に低下している。水プールへの熱流束は溶融時に  $520kW/m^2$  程度、凝固時に  $200kW/m^2$  程度であった。



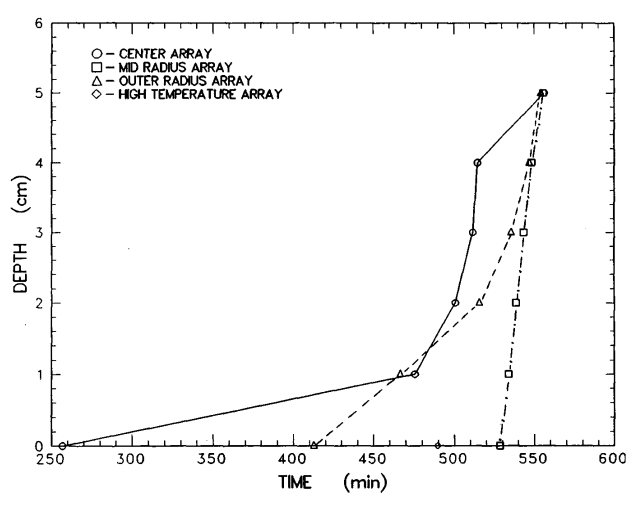
(実験装置の概要)



(実験後の状態の模式図)



(上部クラストの様子)



(コンクリート侵食の時間変化)

図付 2-3 WETCOR 実験結果<sup>[8]</sup>

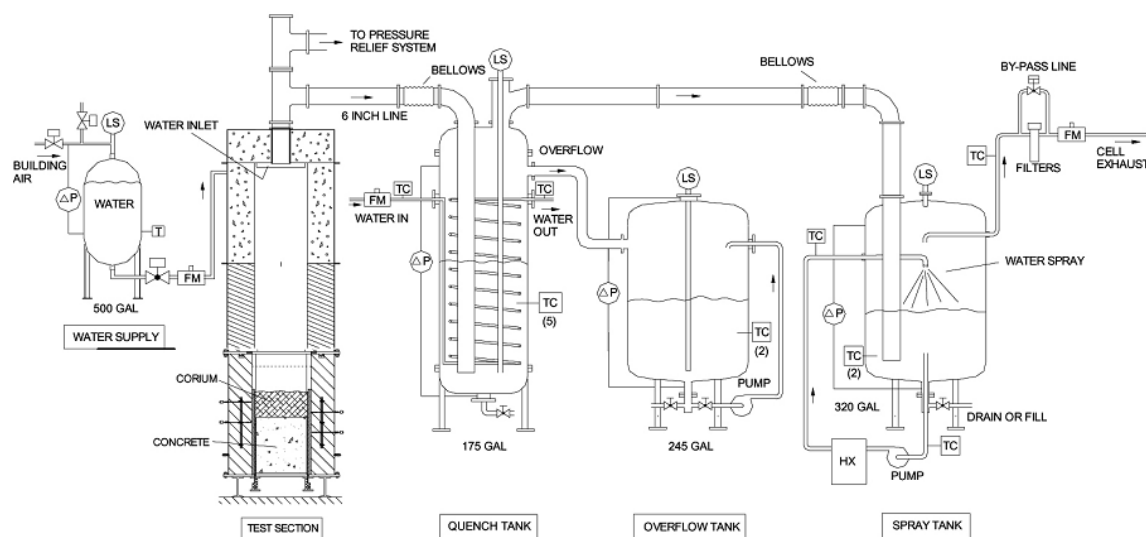
(3) MACE 実験 (米国 ANL) <sup>[3][9][10][20]</sup>

MACE 実験 (Melt Attack and Coolability Experiment) は、米国電力研究所 (EPRI) が主催する格納容器内溶融炉心冷却性に関する国際協力計画である。この実験では、溶融炉心がコンクリート床に落下した後に、溶融炉心の上に注水する状況を模擬しており、大規模実験が含まれていることと、実機相当の  $UO_2$  及び  $ZrO_2$  を主成分とする溶融炉心模擬物を用いて、さらに、直接通電加熱により崩壊熱の発生を模擬していることが特徴である。実験装置の概要を図付 2-4 に示す。MACE 実験では規模の異なる M0, M1b, M3b, M4 の 4 回の実験が実施されており、その主要条件を表付 2-1 に示す。M0 実験のみコンクリートの側壁で、その他は  $MgO$  が用いられている。

M3b と M4 の実験結果を図付 2-5 及び図付 2-6 に示す。いずれのケースもコンクリート侵食が継続する結果となっている。実験後の溶融炉心模擬物の固化状況を見ると、メルト上部に安定クラストが形成され側壁に固定化されており、クラスト下部に空洞が見られ、クラストと溶融物とが分離した状態になっている。メルトから冷却水への熱流束を見ると、注水直後の短期間は、大きい熱流束となっているが、安定クラストが形成されクラストと溶融物が分離したと想定される状況では、熱流束は低下している。安定クラストの形成とメルトとの分離によりクラストの下にあるデブリの冷却が阻害される結果となったと分析されている。しかしながら、デブリの長期的な冷却に関与し得るメカニズムとして、クラストに生じる亀裂等への浸水及びコンクリート分解ガスによるクラスト開口部からのデブリの噴出が確認されている。

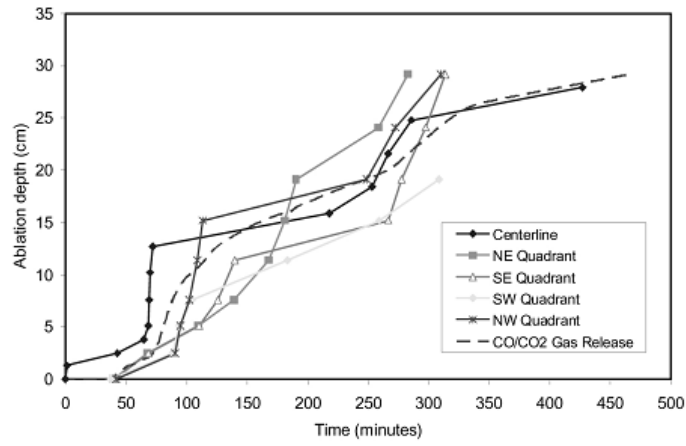
表付 2-1 MACE 実験の主要条件<sup>[20]</sup>

|                                  | M0                     | M1b     | M3      | M4      |
|----------------------------------|------------------------|---------|---------|---------|
| 熔融炉心模擬物重量 (kg)                   | 130                    | 480     | 1800    | 480     |
| コンクリート床<br>浸食開始時熔融炉心<br>模擬物組成(%) | UO <sub>2</sub>        | 56      | 65      | 57      |
|                                  | ZrO <sub>2</sub>       | 11      | 13      | 29      |
|                                  | Zr                     | 4       | 3       | -       |
|                                  | その他<br>(コンクリート<br>成分等) | 29      | 19      | 14      |
| 熔融炉心模擬物深さ (m)                    | 0.15                   | 0.25    | 0.2     | 0.3     |
| 熔融炉心模擬物初期温度 (K)                  | 2000                   | 2350    | 2250    | 2280    |
| 熔融炉心模擬物初期発熱量 (kW)                | 100                    | 130     | 300     | 130     |
| コンクリートの種類                        | 石灰岩系                   | 石灰岩系    | 石灰岩系    | ケイ酸系    |
| コンクリート床面積 (m <sup>2</sup> )      | 0.3×0.3                | 0.5×0.5 | 1.2×1.2 | 0.5×0.5 |
| コンクリート床の深さ (m)                   | 0.35                   | 0.55    | 0.55    | 0.55    |
| 水位 (m)                           | 0.5                    | 0.5     | 0.5     | 0.5     |

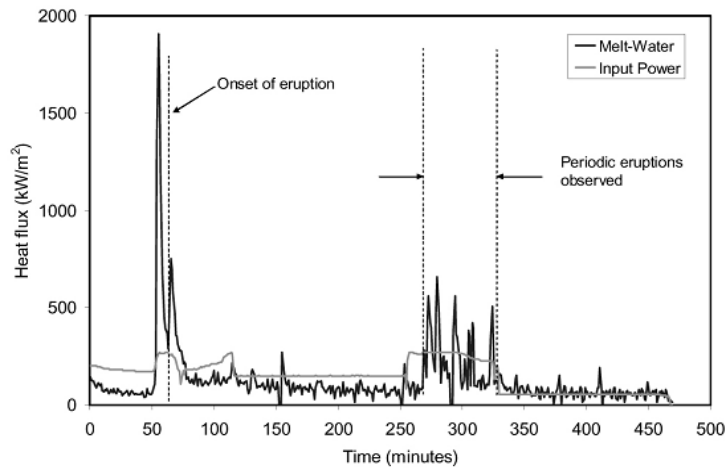


図付 2-4 MACE 及び OECD/MCCI 実験装置<sup>[9]</sup>

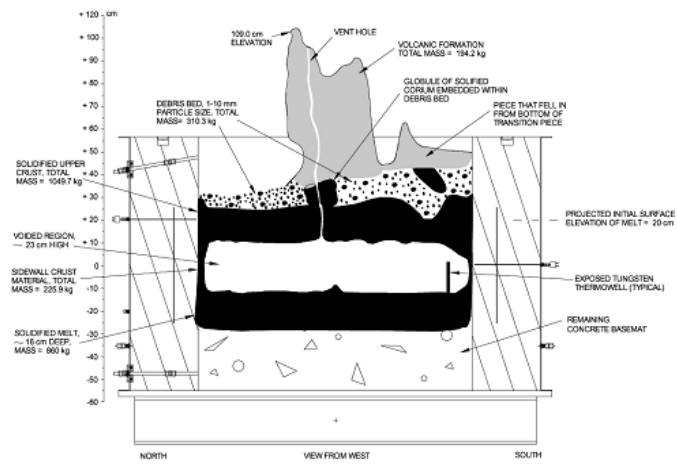




(軸方向侵食データ)

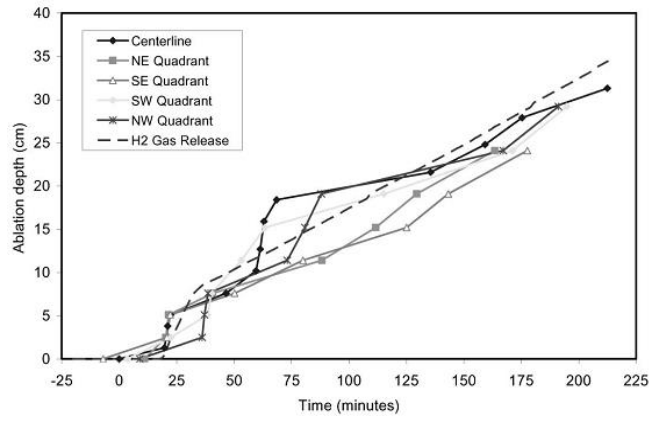


(メルトから水への熱流束)

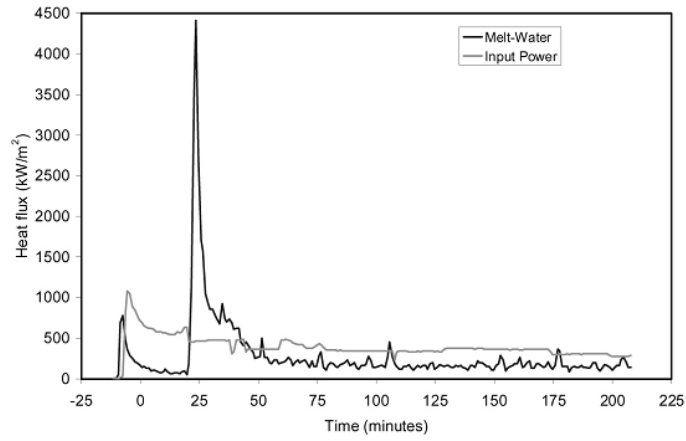


(実験後状態の模式)

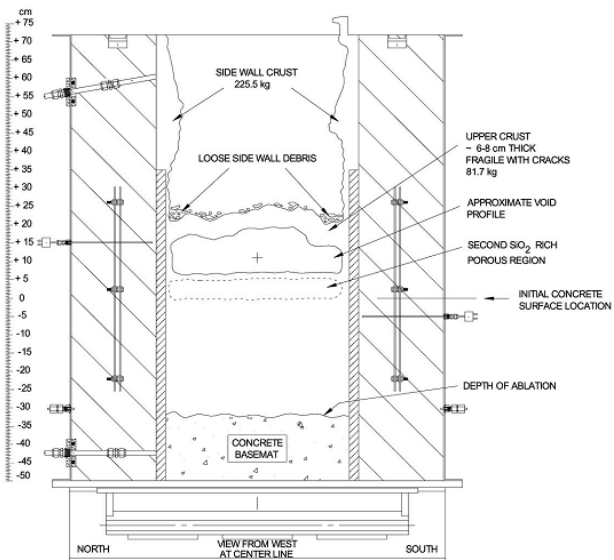
図付 2-5 MACE-M3b 実験結果<sup>[10]</sup>



(軸方向侵食データ)



(メルトから水への熱流束)



(実験後状態の模式)

図付 2-6 MACE-M4 実験結果<sup>[10]</sup>

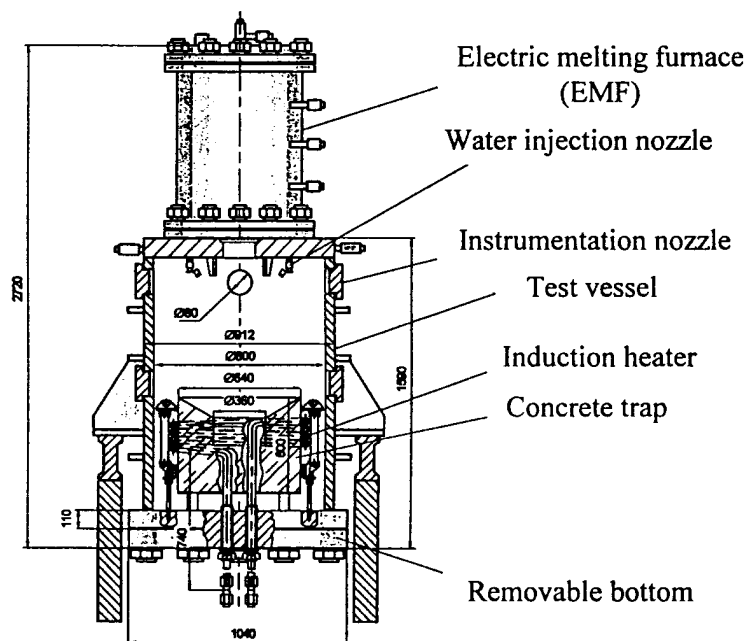
(4) COTELS 実験 (日本 NUPEC) [1][11]

プール水中に実機組成の  $UO_2$  コリウムを落下させる実験 (FCI) とコンクリート上に落下した  $UO_2$  コリウムに注水する実験 (MCCI) を実施している。図付 2-7 にコンクリート上の  $UO_2$  コリウムに注水する実験の実験装置を示す。約 60kg の実機組成の  $UO_2$  コリウムを電気炉で加熱溶融させ、玄武岩系のコンクリート床上に落下させ、その後高周波誘導加熱によりコンクリート上のコリウムを加熱して崩壊熱を模擬している。側壁と床面の両方の侵食を考慮しており、コリウムの高さや直径の比を実験パラメータとしている。注水後にコンクリート温度は低下している。また、侵食深さは 2cm 程度であった。また、図付 2-8 に実験後に固化したコリウムの断面を観察した結果を示すが、上部は粒子状になっており、下部はインゴット状になっているのが観察されている。また、インゴット状の部分にはひび割れや流路が見られる。

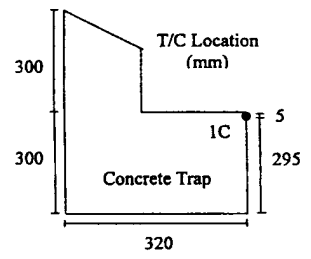
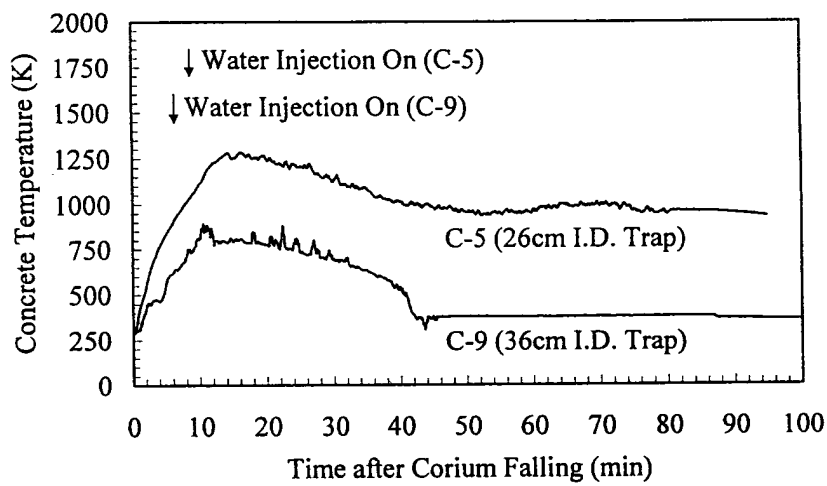
COTELS 実験では、いずれもデブリによるコンクリート侵食が生じているが、先行の SWISS, WETCOR, MACE とは異なり、コンクリート侵食は停止している。これは、以下の理由と分析されている。

- ・デブリの粒子化と塊状デブリ上への粒子化デブリの堆積
- ・デブリとコンクリートとの境界における粗骨材を主体とする多孔質層の形成
- ・粗骨材層及び塊状デブリに形成された流路への浸水

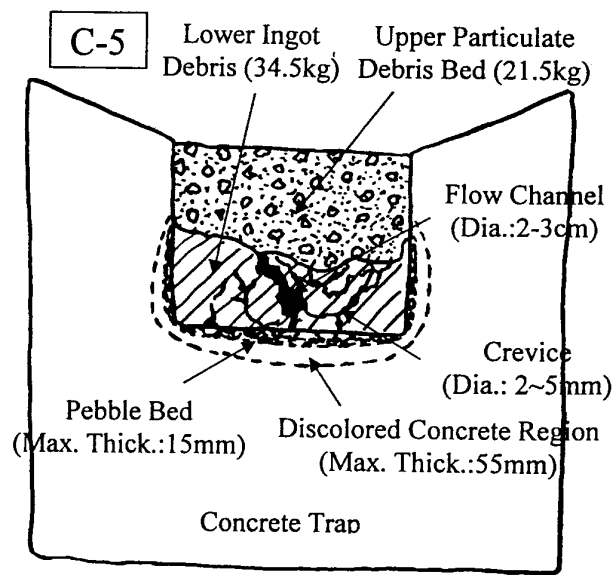
溶融物から水プールへの熱流束は水プールへの熱流束は  $100\sim 650\text{kW/m}^2$  程度であったが、これらの熱流束は限界熱流束よりも低く、水がさらに高い除熱能力を有する可能性があることが示唆されている。



図付 2-7 COTELS 実験装置 (コンクリート上の  $UO_2$  コリウムに注水する実験) [11]



(コンクリート床温度変化)



(実験後のコリウム断面の模式図)

図付 2-8 COTELS C-5 実験の結果<sup>[11]</sup>

(5) OECD/MCCI 実験 (米国 ANL)<sup>[10][12][13][35][38][41]</sup>

OECD/MCCI 実験は、MACE 実験や COTELS 実験の注水を伴う MCCI 実験で同定された個々のデブリ冷却メカニズムや火山型クラストの冷却性 (図付 2-9 及び図付 2-10 参照) を定量的に解明することを目的として、以下の実験が実施された。

① クラスト浸水・強度実験 (SSWICS 実験)

SSWICS 実験は、クラスト内への浸水メカニズムと浸水による除熱量、さらにクラスト強度を調べるために実施された。実験装置の構造を図付 2-11 に示し、実験条件一覧を表付 2-2 に示す。テスト部内の非侵食性の床面上で、テルミット反応により  $UO_2$ 、 $ZrO_2$  及びコンクリート成分を主成分とするデブリ模擬溶融物を生成しその上に注水する。崩壊熱とコンクリート分解気体の発生は模擬しない過渡クエンチ実験である。最大除熱量はクラスト上面におけるドライアウト熱流束により評価される。実験結果より、安定なクラストは形成されず、クラスト内に冷却材が浸入することにより、熱伝導律速以上の熱流束を期待することができるとしている。更に、SSWICS 実験で得られたドライアウト熱流束を実機の事故シーケンス解析において直接的に適用できるよう、Lister/Epstein のドライアウト熱流束モデルへの適応が行われた。実験結果とこれに基づいた Lister/Epstein モデルによる予測の比較を図付 2-12 に示す。この実験結果およびこれらに基づいた予測値によれば、コンクリートを全く含有しないデブリに対する上面水プールへのドライアウト熱流束は、約  $400\text{kW/m}^2$  であり、コンクリート含有とともに熱流束は低下し、含有率 15%程度以上では約  $100\text{kW/m}^2$  となっている。

② 溶融物噴出実験 (MET 実験)

コンクリート分解気体がクラストの開口部を通過する際に、気体に随伴されてクラスト上に噴出するデブリ量の定量化を目的としている。クラスト浸水実験と同様に、テスト部内の非侵食性の床面上で、テルミット反応により  $UO_2$ 、 $ZrO_2$  及びコンクリート成分を主成分とするデブリ模擬溶融物を生成しその上に注水する。クラスト浸水実験との違いは、本実験においては直接通電加熱により崩壊熱を模擬すること及び非侵食性床面に設けた多数の細孔からコンクリート分解気体を模擬する非凝縮性気体を供給している。テスト部で発生する水蒸気量の変化と実験後分析から得られるデブリ噴出量に基づいて、供給気体流量と噴出量の関係性を評価している。

③ 長期 2 次元コンクリート侵食実験 (CCI 実験)

デブリによる長期的な床部及び側壁の侵食挙動を明らかにすることを目的に実施された。実験装置のテスト部の構造を図付 2-13 に示し、実験条件一覧を表付 2-3 に示す。テルミット反応により生成した  $UO_2$ 、 $ZrO_2$  及びコンクリート成分を主成分とするデブリ模擬溶融物を直接通電により加熱している。電極がある 2 面は非侵食性の側壁を採用し、残りの 2 面をコンクリートにより製作している。使用するコンクリートは実験により種類が変えられている。注水なしの条件で、側壁のコンクリートの最大侵食深さが 30cm に達するまで侵食を継続した後注水を行い、注水後、最大侵食深さが 35cm

に到達した時点で実験を終了している。実験装置に荷重負荷装置を設置し、注水後に形成されるクラストに荷重を与えて、クラストの機械的強度に関するデータを得ている（図付 2-14 参照）。コンクリート種類を変えて 3 回実験が行われている。CCI 実験のコンクリート組成を表付 2-4 に示す。CCI 実験のデブリ-水間の熱流束を図付 2-15 に示し、溶融物の平均温度を図付 2-16 に示す。また、実験後の侵食状態の模式図を図付 2-17 に示す。石灰岩系コンクリートの場合、床方向と側壁方向の侵食は同程度となっているのに対し、玄武岩系コンクリートの場合、側壁方向の侵食が床方向より大きくなっており、侵食に異方性があることが示されている。表付 2-5 に示すように、侵食率から側壁方向と床方向の熱流束が推定されている。CCI-2 実験（石灰岩系コンクリート）の場合、側壁方向と床方向は同程度と推定されているのに対し、CCI-3 実験（玄武岩系コンクリート）の場合、側壁方向の熱流束は、床方向より 4 倍程度大きいと推定されている。

#### ④ クラスト破損実験

本実験は上記①③の実験に付随して実施されており、①の SSWICS 実験で形成されたクラストの冷却後破損強度を調べる実験と、③の 2 次元侵食実験の間に高温状態で破損させる実験の 2 種の実験が行われている。

前者の実験では、クラスト浸水実験で形成された直径約 30cm のクラストに荷重を加えて、クラストの強度を測定している。低温クラスト破損実験装置の概要を図付 2-18 に示す。クラスト上面の中央部に集中荷重を与え、クラスト破損時の荷重からクラストの機械的強度（破損時にクラストに発生する最大の応力）を評価している。クラスト上に堆積する冷却水層及び噴出デブリの荷重に起因してクラスト内に発生する応力と、本実験から得られるクラストの機械的強度を比較することにより、実機規模においては、クラストは破損し下部の溶融物と接触する可能性が高いことが示されている。

後者の 2 次元侵食実験では、注水前の高温状態で突き棒 (lance) によりクラストが破損する荷重を測定し、注水後も再度突き棒によりクラストが破損する荷重を測定している。これにより、現実に近い状態でのクエンチ前後のクラスト強度が確認され、クエンチ後は、クラスト強度が大きく低下することが確認された。

OECD/MCCI 実験結果から以下の知見が得られている。

- ・ガス噴出は、安定なクラストの形成を阻害し、熱伝達を促進する。
- ・クラストが冷却されると、亀裂が生じクラスト強度は大幅に低下する。
- ・クラストの亀裂により冷却水が内部に浸入し得る。
- ・溶融物の噴出により、多孔質の粒子状ベッドが形成される。
- ・コンクリートタイプにより侵食異方性がみられる。

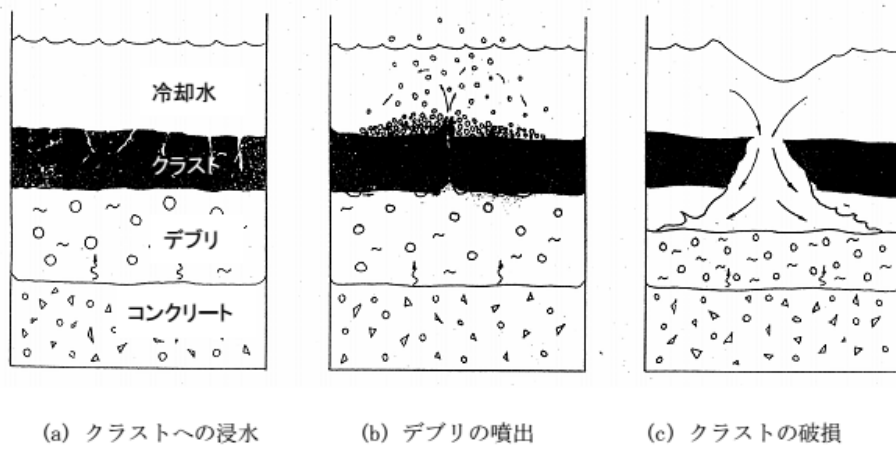
これらの知見は、CORQUENCH コード等に反映される予定である。

また、CCI 実験について、MAAP コードによりベンチマーク解析が行われている<sup>[35]</sup>。

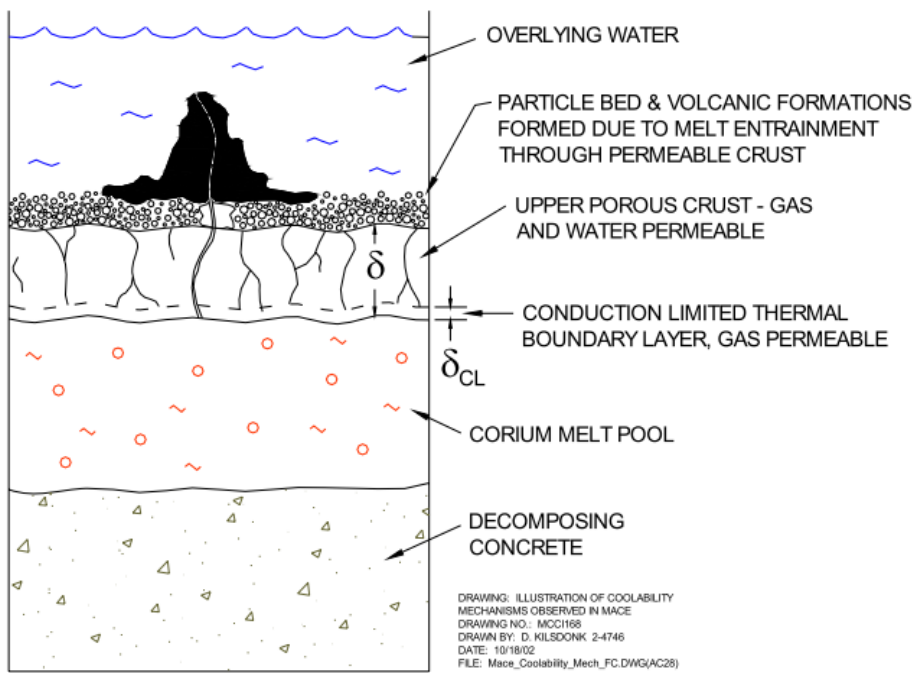
CCI-2 実験（石灰岩系コンクリート）のベンチマーク解析では、固化効果項の影響を除いて対流熱伝達係数のサーベイが可能のように、対流熱伝達係数として床方向と側壁方向ともに  $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ 、固化効果項の指数  $n$  に 0 が設定されている。ここで  $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$  は、実際の MCCI 時の対流熱伝達係数は、固化割合を考慮すると、完全液相状態の値よりも 1 桁程度小さい値（図付 2-19 において固化割合が 60%程度値）になることを考慮して設定されている。また、CCI-2 実験では、床方向と側壁方向の熱流束が同程度と推定されていることから、対流熱伝達係数も同じ値が設定されている。この設定を用いた解析により、コリウム温度の変化（図付 2-20 参照）は、実験データと良く合っている。また、床方向の侵食量は（図付 2-21 参照）、実験では注水前には 25cm 程度侵食されているのに対し、MAAP 解析では 33cm 程度の侵食量となっている。側壁方向の侵食量は（図付 2-22 参照）、実験では注水前には 29cm 程度侵食されているのに対し、MAAP 解析では 33cm 程度の侵食量となっている。

CCI-3 実験（玄武岩系コンクリート）のベンチマーク解析では、対流熱伝達係数として床方向に  $80\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ 、側壁方向に  $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ 、 $n$  に 0 が設定されている。ここで、 $80\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$  は、CCI-3 実験では、床方向の熱流束が側壁方向の 1/4 程度と推定されていることから、床方向の対流熱伝達係数を側壁方向の 1/4 程度として設定されている。この設定により、コリウム温度の変化（図付 2-23 参照）は、より実験データに近くなっている。また、床方向の侵食量は（図付 2-24 参照）、実験では注水前には 5cm 程度侵食されているのに対し、MAAP 解析では 5.7cm 程度の侵食量となっている。側壁方向の侵食量は（図付 2-25 参照）、実験では注水前には 29cm 程度侵食されているのに対し、MAAP 解析では 27cm 程度の侵食量となっている。

CCI 実験を対象にした MAAP ベンチマーク解析により、対流熱伝達係数を適切に設定することにより侵食量が概ね合うことが確認されている。また、侵食の異方性を扱うためには、床方向と側壁方向の対流熱伝達係数の比率の設定が重要であることが示されている。



図付 2-9 想定されているデブリ冷却メカニズム<sup>[38]</sup>

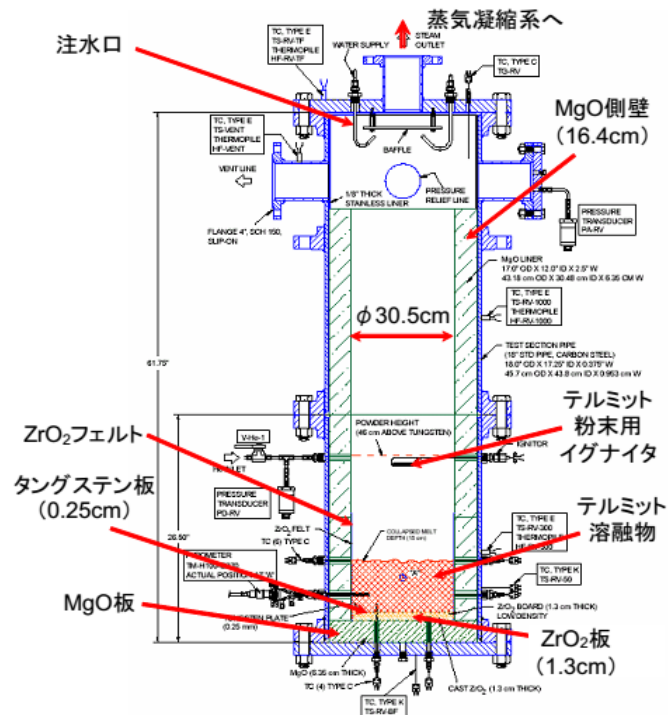


図付 2-10 想定されている火山型クラストの模式図<sup>[12]</sup>

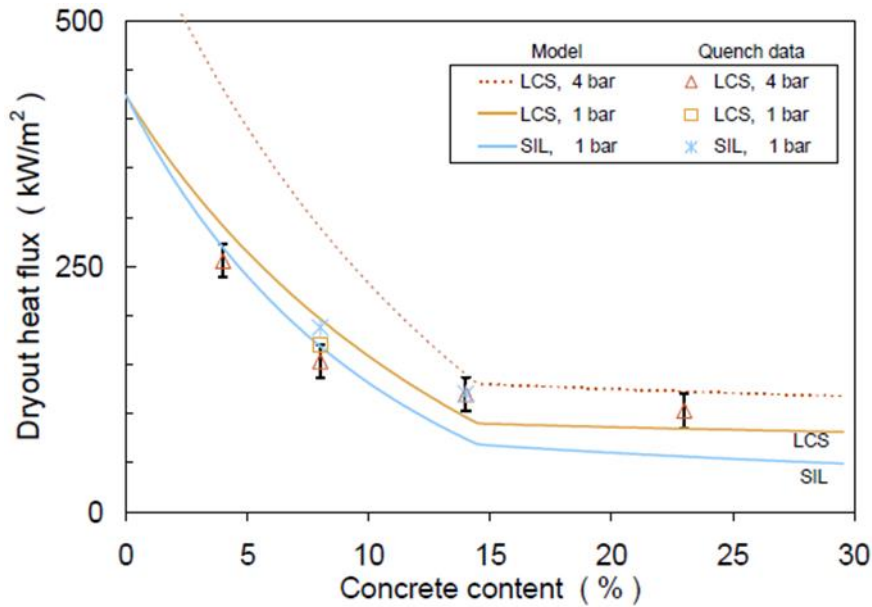


表付 2-2 SSWICS 実験 (デブリ冷却実験) 条件一覧<sup>[12]</sup>

| Parameter   | Test Number |           |           |            |            |            |           |
|---|-------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|
|   | 1           | 2         | 3         | 4          | 5          | 6          | 7         |
| Melt composition<br>(wt % UO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /Cr/concrete) | 61/25/6/8   | 61/25/6/8 | 61/25/6/8 | 48/20/9/23 | 56/23/7/14 | 56/23/6/14 | 64/26/6/4 |
| Concrete type   | LCS         | SIL       | LCS       | LCS        | LCS        | SIL        | LCS       |
| Melt mass (kg)  | 75          | 75        | 75        | 60         | 68         | 68         | 80        |
| Melt diameter / depth (cm)  | 30 / 15     | 30 / 15   | 30 / 15   | 30 / 15    | 30 / 15    | 30 / 15    | 30 / 15   |
| Basemat type  | Inert       | Inert     | Inert     | Inert      | Inert      | Inert      | Inert     |
| Initial melt temperature (°C)   | ~2300       | ~2100     | ~2100     | ~2100      | ~2100      | ~1950      | ~2100     |
| Initial vessel and<br>coolant temperature (°C)                            | 20          | 20        | 100       | 100        | 100        | 100        | 100       |
| System pressure (bar)   | 1           | 1         | 4         | 4          | 4          | 1          | 4         |
| Water injection period (sec)  | 665         | 760       | 183       | 195        | 622        | 215        | 194       |
| Water injection flowrate (lpm)  | 4           | 4         | 12        | 13         | 6          | 14         | 13        |
| Water injected (liters)   | 33          | 39        | 34        | 40         | 61         | 47         | 40        |
| Condensate collected<br>over course of test ( kg )                        | 24.7        | 16.1      | 28.9      | 21.9       | 22.7       | 27.6       | 31.4      |
| Test duration (hours)   | 2.2         | 1.2       | 1.8       | 2.4        | 2.6        | 3.9        | 1.4       |



図付 2-11 小規模浸水・クラスト強度実験 (SSWICS) 装置<sup>[12]</sup>



図付 2-12 SSWICS 実験データと Lister/Epstein モデルのドライアウト熱流束の比較<sup>[12]</sup>

表付 2-3 CCI 実験 (2次元コンクリート侵食実験) 条件一覧<sup>[12]</sup>

| Parameter                                      | Specification for Test:   |   |   |
|--|---|---|---|
|  | CCI-1   | CCI-2   | CCI-3   |
| Corium   | PWR + 8 wt% SIL   | PWR + 8 wt% LCS   | PWR + 15 wt% SIL  |
| Concrete type <sup>a</sup>                     | SIL (US-type)   | LCS   | SIL (EU-type)   |
| Basemat cross-section                          | 50 cm x 50 cm   | 50 cm x 50 cm   | 50 cm x 50 cm   |
| Initial melt mass (depth)                      | 400 kg (25 cm)  | 400 kg (25 cm)  | 375 kg (25 cm)  |
| Test section sidewall construction             | Nonelectrode walls: concrete<br>Electrode walls: Inert  | Nonelectrode walls: concrete<br>Electrode walls: Inert  | Nonelectrode walls: concrete<br>Electrode walls: Inert  |
| Lateral/Axial ablation limit                   | 35/35 cm  | 35/35 cm  | 35/35 cm  |
| System pressure                                | Atmospheric   | Atmospheric   | Atmospheric   |
| Melt formation tech.                           | Chemical reaction (~30 s)   | Chemical reaction (~30 s)   | Chemical reaction (~30 s)   |
| Initial melt temperature                       | 1950 °C   | 1880 °C   | 1950 °C   |
| Melt heating technique                         | DEH   | DEH   | DEH   |
| Power supply operation prior to water addition | Constant @ 150 kW   | Constant @ 120 kW   | Constant @ 120 kW   |
| Criteria for water addition                    | 1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm                              | 1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm                              | 1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm                              |
| Inlet water flowrate/temp.                     | 2 lps/20 °C   | 2 lps/20 °C   | 2 lps/20 °C   |
| Water depth over melt                          | 50 ± 5 cm   | 50 ± 5 cm   | 50 ± 5 cm   |
| Power supply operation after water addition    | Constant voltage  | Constant voltage  | Constant voltage  |
| Test termination criteria                      | 1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached. | 1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached. | 1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached. |
| Operational Summary                            | Successful: non-symmetrical ablation behavior   | Successful: symmetrical ablation behavior   | Successful: symmetrical ablation behavior   |

<sup>a</sup>SIL denotes siliceous concrete, LCS denotes Limestone/Common Sand concrete.

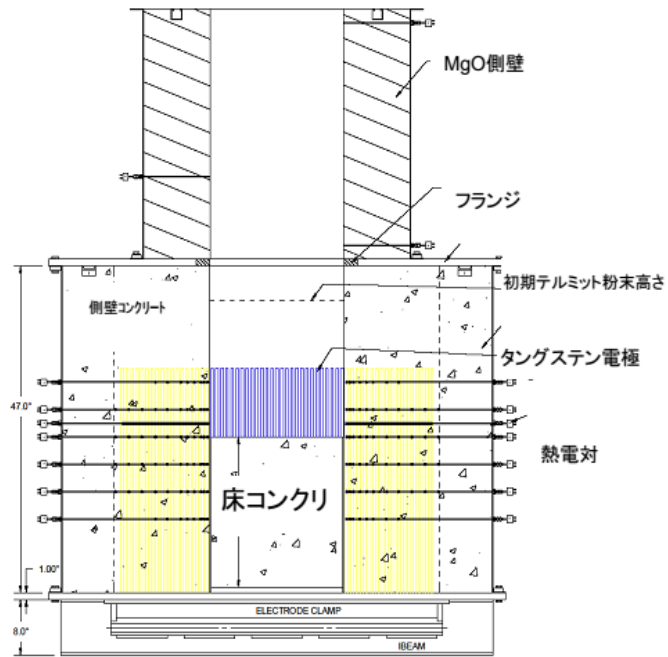
表付 2-4 CCI 実験に使用されたコンクリートの組成 [12]

| Oxide                          | CCI-1<br>Wt% | CCI-2<br>Wt% | CCI-3<br>Wt% |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.77         | 2.49         | 3.53         |
| CaO                            | 8.54         | 25.88        | 16.79        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.79         | 1.39         | 1.49         |
| MgO                            | 0.60         | 11.47        | 0.85         |
| MnO                            | 0.00         | 0.03         | 0.04         |
| K <sub>2</sub> O               | 0.12         | 0.55         | 0.81         |
| SiO <sub>2</sub>               | 82.48        | 21.61        | 59.91        |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.00         | 0.31         | 0.66         |
| SrO                            | 0.00         | 0.00         | 0.04         |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.051        | 0.135        | 0.155        |
| SO <sub>3</sub>                | 0.514        | 0.505        | 0.434        |
| CO <sub>2</sub>                | 0.901        | 29.71        | 9.80         |
| H <sub>2</sub> O, Free         | 1.808        | 3.255        | 2.293        |
| H <sub>2</sub> O, Bound        | 1.92         | 1.11         | 1.40         |
| Total                          | 98.48        | 98.47        | 98.19        |

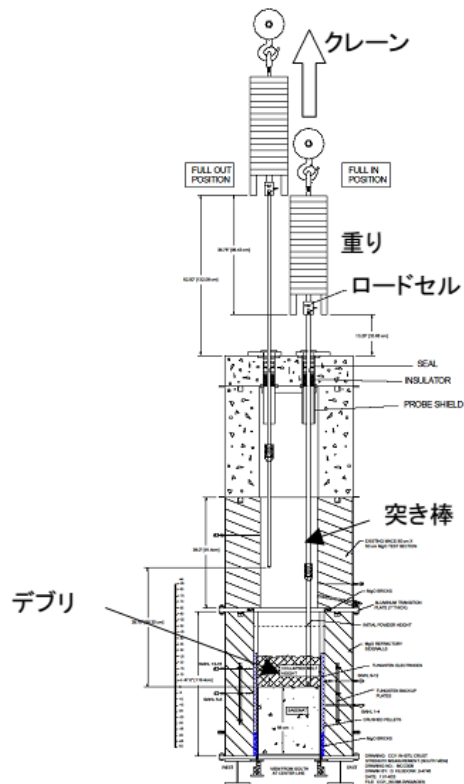
表付 2-5 CCI 実験の側壁方向／床方向の侵食率と熱流束の推定値 [12]

| Test  | Concr. Type | Lateral Ablation      |                                | Axial Ablation        |                                | Lateral -Axial Heat Flux Ratio | Data Points Utilized for Ablation Rate Estimates  |
|-------|-------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|
|       |             | Ablation Rate (cm/hr) | Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> ) | Ablation Rate (cm/hr) | Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> ) |                                |   |
| CCI-1 | SIL (US)    | N: 39.1               | 395                            | 26.1                  | 265                            | - <sup>a</sup>                 | N Lateral: (19.1 cm, 51 min)<br>(29.2 cm, 66 min)<br>S Lateral: (7.6 cm, 54 min)<br>(5.1 cm, 35 min)<br>Axial: (7.6 cm, 53 min)<br>(1.3 cm, 39 min) |
|       |             | S: 8.4                | 86                             |                       |                                |                                |   |
| CCI-2 | LCS         | 4.0                   | 58                             | 4.0                   | 59                             | 1.0                            | Lateral: (19.1 cm, 148 min)<br>(29.2 cm, 302 min)<br>Axial: (15.2 cm, 107 min)<br>(24.1 cm, 240 min)  |
| CCI-3 | SIL (EU)    | 10.0                  | 97                             | 2.5                   | 25                             | 4.0                            | Lateral: (19.1 cm, 47 min)<br>(29.2 cm, 107 min)<br>Axial: (2.5 cm, 117 min)<br>(5.1 cm, 178 min)   |

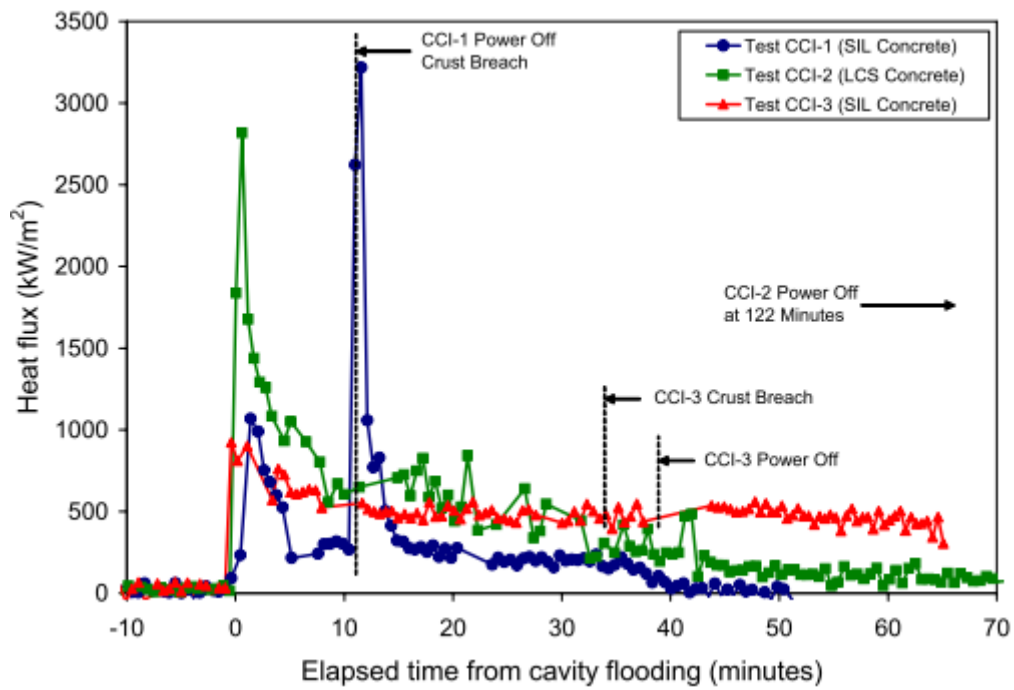
<sup>a</sup>Heat flux ratio not evaluated for this test due to large asymmetry in lateral cavity erosion.



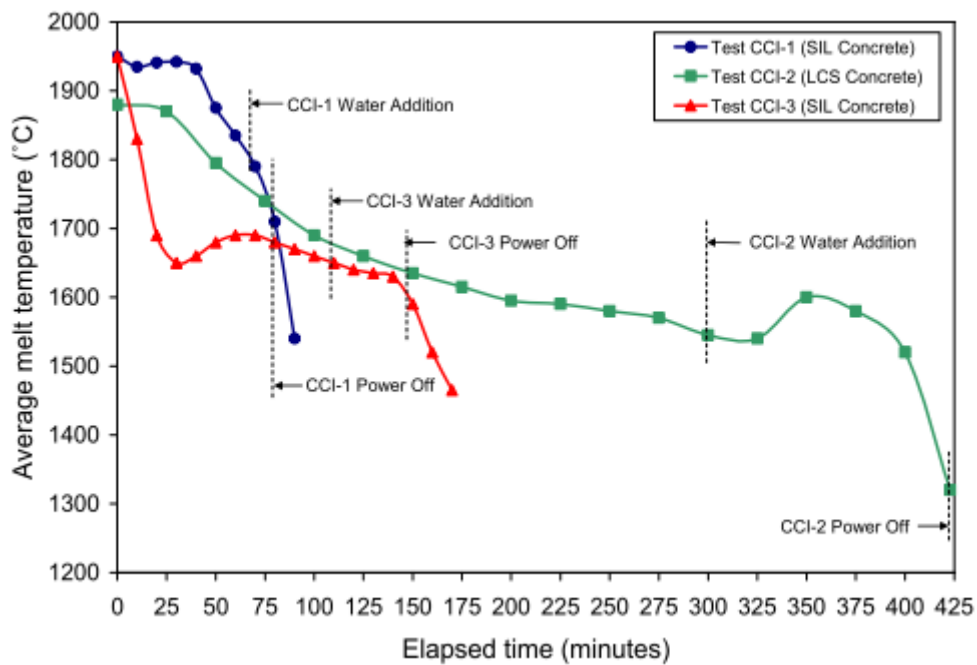
図付 2-13 CCI 実験のテスト部<sup>[12]</sup>



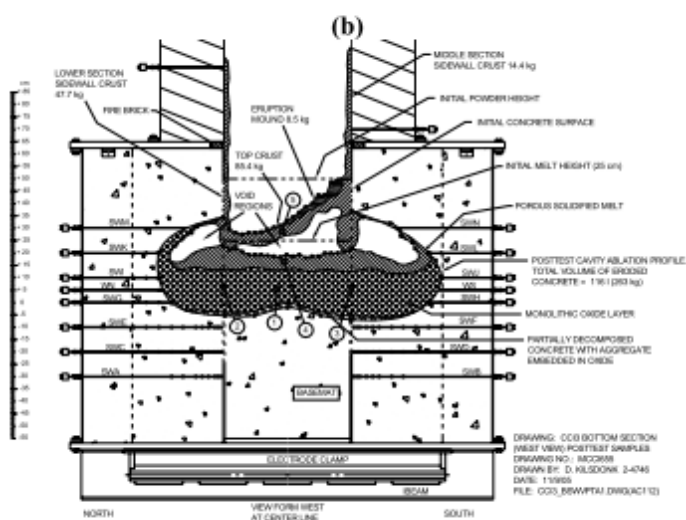
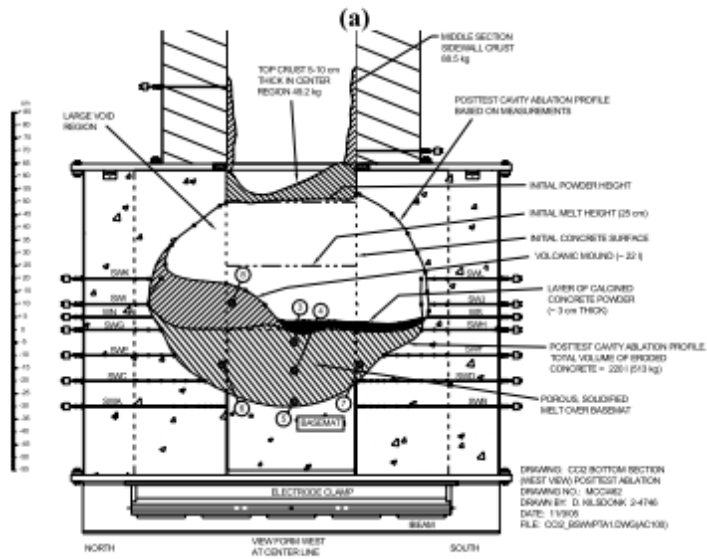
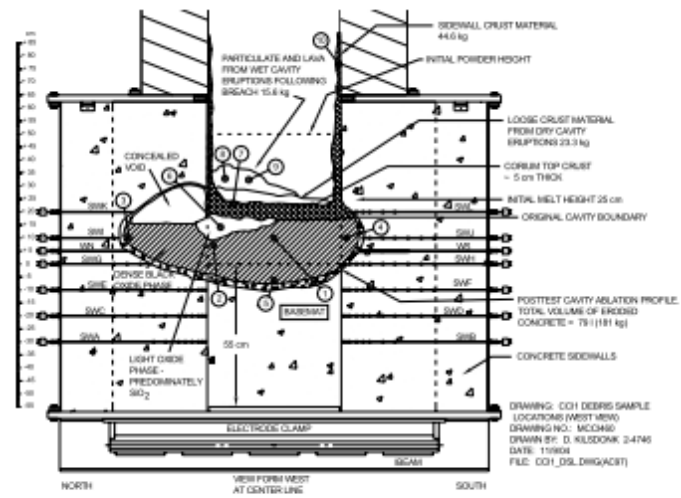
図付 2-14 長期 2 次元侵食実験におけるクラスト破壊／強度測定装置<sup>[41]</sup>



図付 2-15 CCI 実験におけるデブリ-水間の熱流束 [12]



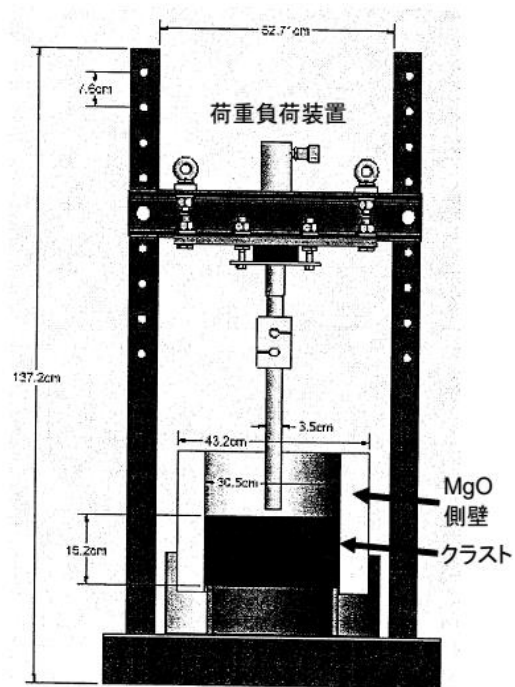
図付 2-16 CCI 実験における溶融物平均温度 [12]



(c)

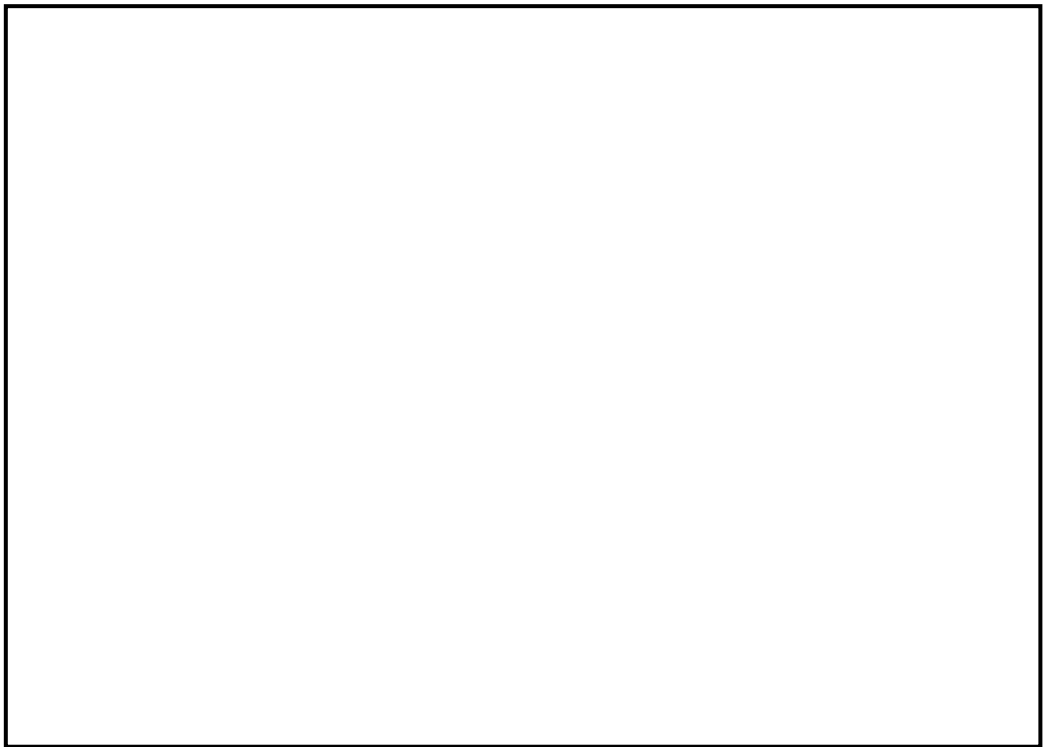
図付 2-17 CCI 実験における侵食状態の模式図 [12]

(a) CCI-1, (b) CCI-2, (c) CCI-3

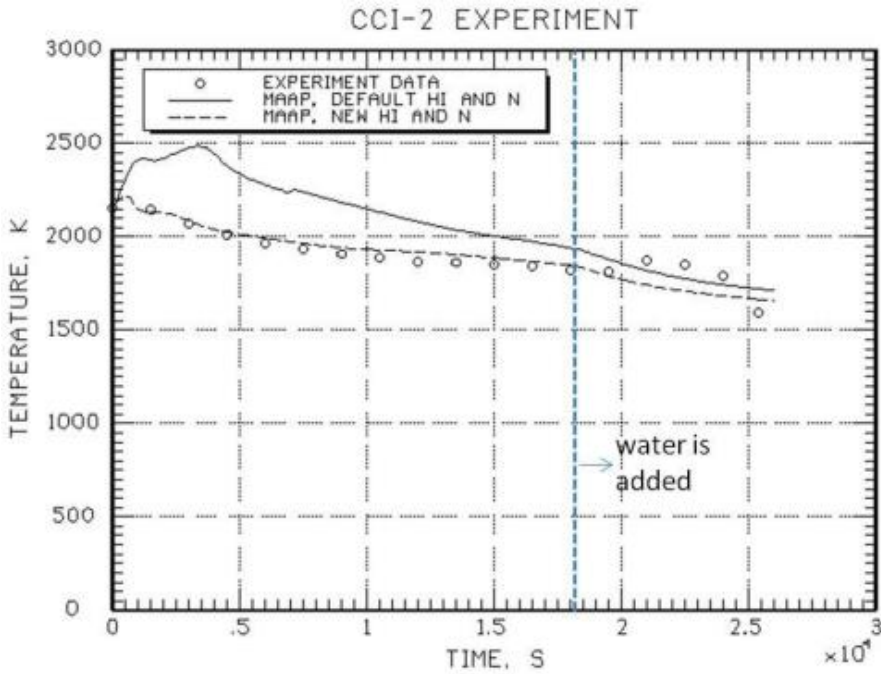


図付 2-18 クラスト浸水実験の実験後の低温クラスト強度測定装置<sup>[38]</sup>

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

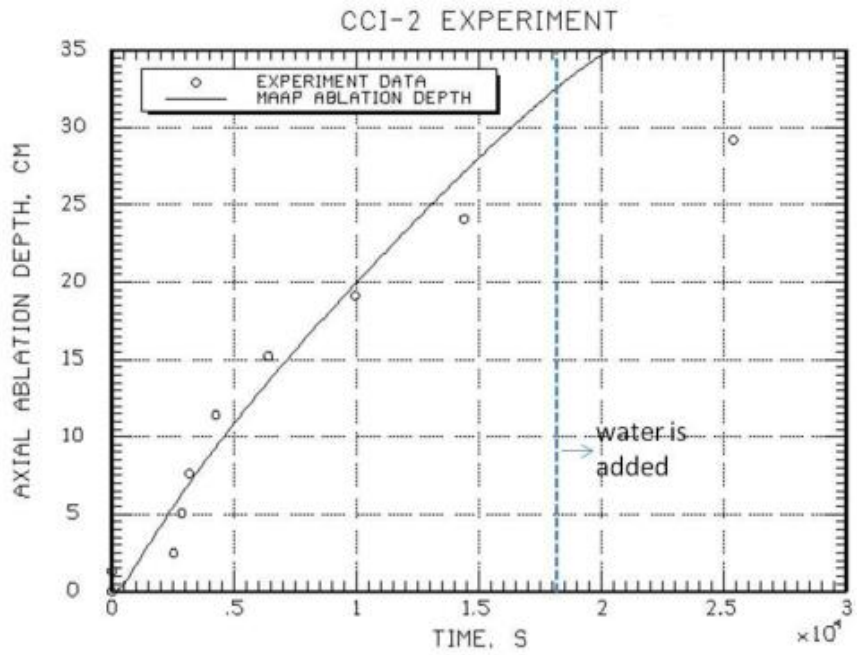


図付 2-19 溶融プールからクラストへの対流熱伝達係数

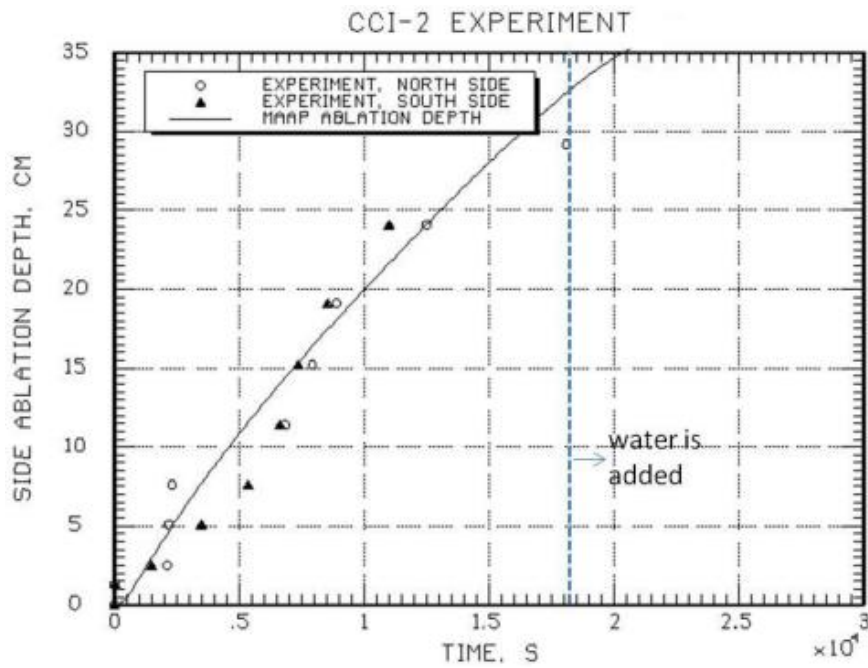


図付 2-20 CCI-2 実験のコリウム温度の実験データと MAAP 解析結果の比較<sup>[35]</sup>  
(MAAP New 熱伝達係数 (破線) : 床方向 300W/m<sup>2</sup>-K, 側壁方向 300W/m<sup>2</sup>-K, n=0)

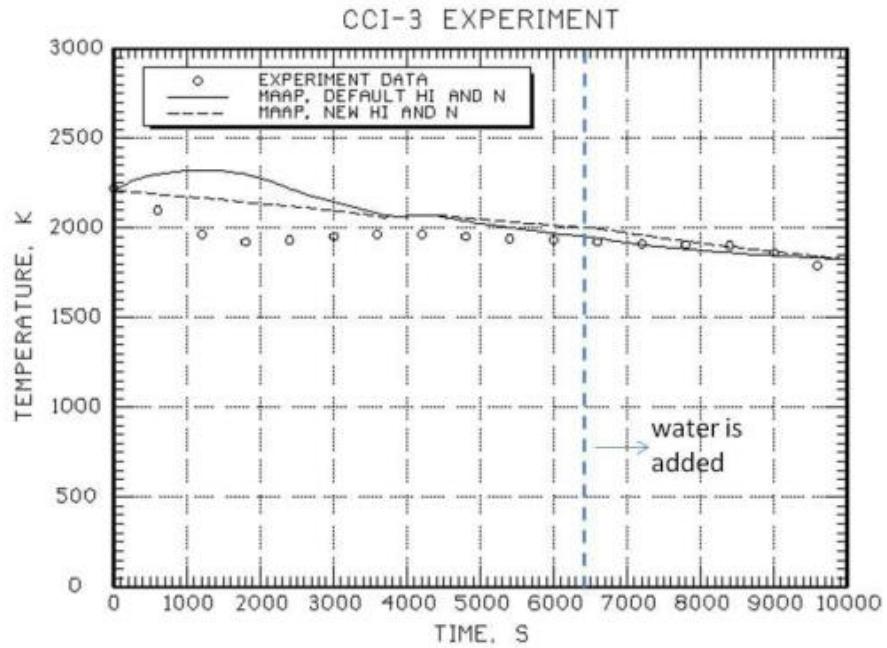




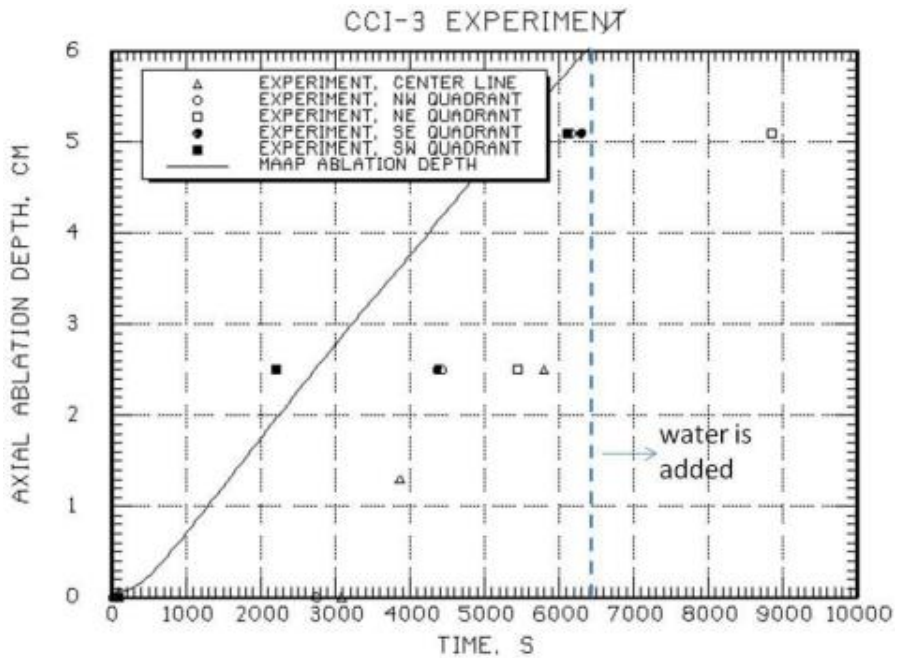
図付 2-21 CCI-2 実験の床方向侵食の実験データと MAAP 解析結果の比較<sup>[35]</sup>



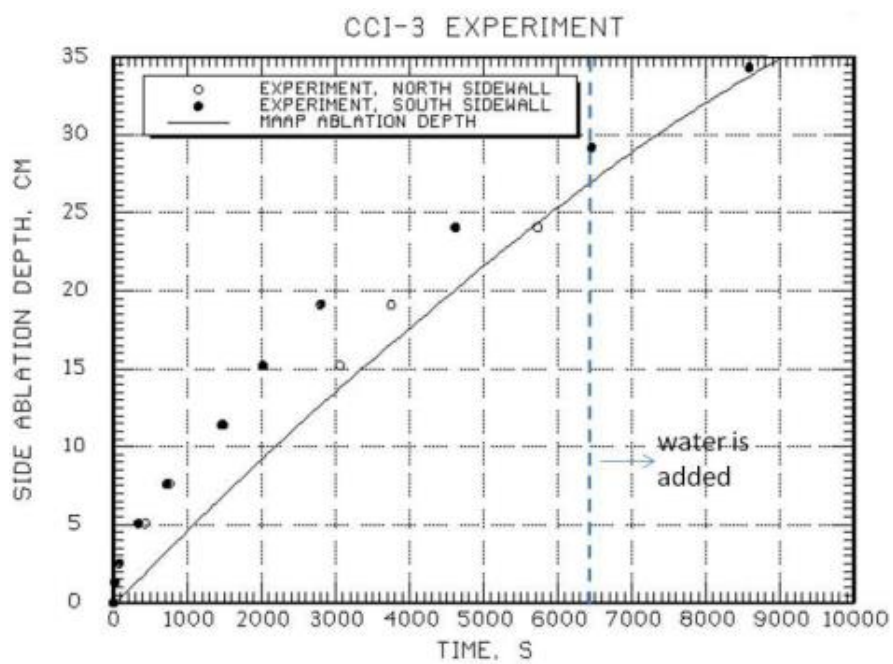
図付 2-22 CCI-2 実験の側壁方向侵食の実験データと MAAP 解析結果の比較<sup>[35]</sup>



図付 2-23 CCI-3 実験のコリウム温度の実験データと MAAP 解析結果の比較<sup>[35]</sup>  
 (MAAP New 熱伝達係数 (破線) : 床方向  $80\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ , 側壁方向  $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ ,  $n=0$ )



図付 2-24 CCI-3 実験の床方向侵食の実験データと MAAP 解析結果の比較<sup>[35]</sup>



図付 2-25 CCI-3 実験の側壁向侵食の実験データと MAAP 解析結果の比較<sup>[35]</sup>

### 付録3 溶融物の水中落下時の粒子化実験と解析モデル

溶融物が水中に落下した場合の粒子化現象については、主に溶融燃料-冷却材相互作用 (FCI) を調べるために行われてきた。ここでは、以下の実験についての知見を述べる。

- ① FARO 実験 (イタリア JRC-ISPRA)
- ② COTELS-FCI 実験 (日本 NUPEC)
- ③ DEFOR 実験 (スウェーデン KTH)

また、MAAP コードでは、溶融炉心が圧力容器下部プレナム水等に落下する場合の粒子化割合を評価しており、Ricou-Spalding 相関式または Saito の相関式が用いられている。ここではこれらの相関式の元になった実験についても説明する。

#### (1) FARO 実験 (イタリア JRC-ISPRA) [1][14]

主に圧力容器内で溶融物が炉心から下部プレナムの水プールに落下した場合の水蒸気爆発発生の可能性を調べることを目的とした実験で、当初は高圧での実験を対象としてきたが、後に低圧での実験が3ケース実施された。高圧実験装置の構成は、FARO るつぼと実験容器 TERMOS (内径 ; 710mm, 体積 ; 1.5m<sup>3</sup>) である (図付 3-1 参照)。低圧実験装置では FAT と呼ばれる実験容器の中に TERMOS と同一内径の円筒容器が置かれ、観測窓が設置された。実験手順は原則的に高圧実験も低圧実験も同様で、FARO るつぼで生成された溶融コリウムは一度リリースベッセルに保持し、その底部にあるフラップ又は弁を開放して溶融物を水プールに落下させる。高圧実験ではリリースベッセルは溶融物落下速度を調整するために加圧可能である。ほとんどの実験は酸化物コリウム (80wt%UO<sub>2</sub>+20wt%ZrO<sub>2</sub>) で実施され、テスト L11 のみが金属 Zr を含むコリウム (77wt%UO<sub>2</sub>+19wt%ZrO<sub>2</sub>+4wt%Zr) が用いられた。また、多くの実験は高圧・飽和水条件で実施されたが、近年は低圧・サブクール水条件でも3ケース実施されてきている。主な実験パラメータは、初期圧力 (0.2~6MPa)、コリウム質量 (18~177kg)、水深 (87cm~2.05m)、サブクール度 (飽和~124K)、コリウム組成 (1ケースのみ金属 Zr を 4.1wt%追加) である (表付 3-1 参照)。

実験からの主な知見は以下のとおりである。

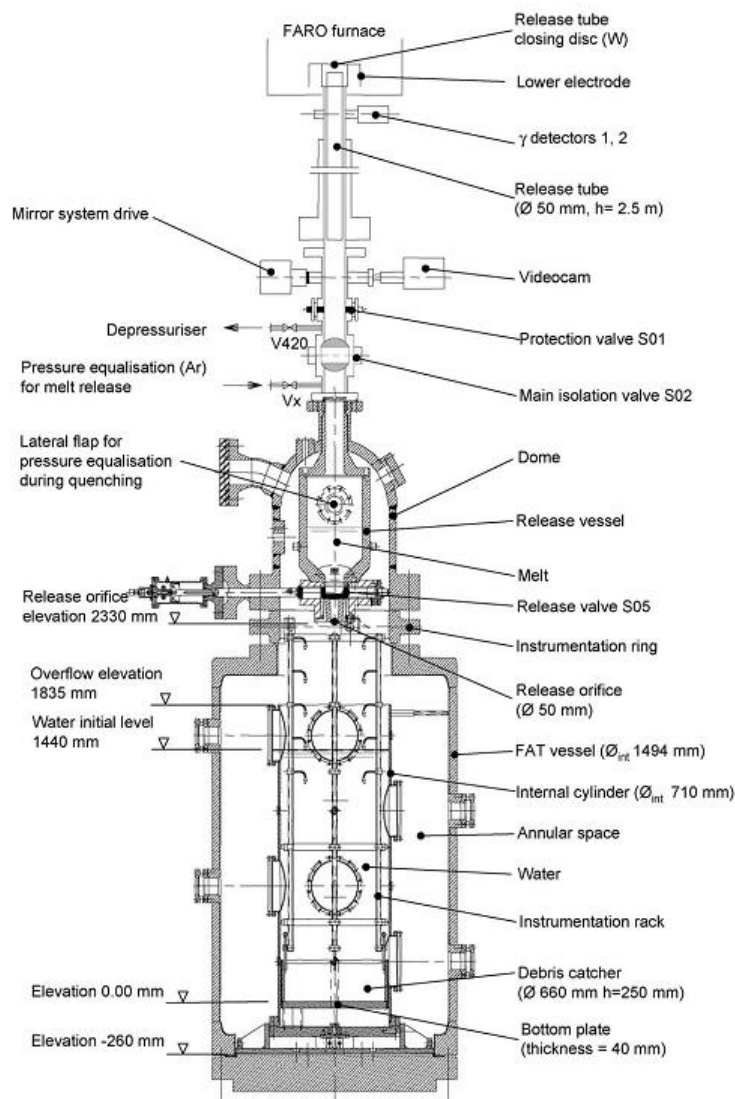
- ・ 高圧・飽和水実験、低圧・サブクール実験の何れにおいても水蒸気爆発は発生していなかった。
- ・ いずれの実験においても、コリウムの一部が粒子化し、一部はパンケーキ状としてプール底部に堆積した。プール水中に設置した熱電対の測定結果より、一部のコリウムはジェット状でプール底面に衝突したと推定されている (図付 3-2 参照)。
- ・ 粒子化割合は、ほとんどの実験でプール水深に依存し、高圧飽和水実験の水深 1m 程度で落下コリウムの約 50%が粒子化したが、コリウムに少量の金属 Zr (4.1wt%) を添加した場合と低圧のサブクール水の実験では 100%近くが粒子化した (図付 3-3 参照)。
- ・ 粒子の質量中央径は比較的大きく、3.2~4.8mm の範囲であり、実験パラメータ (初期圧力、水深、コリウム落下速度、サブクール度) に依存していない。

表付 3-1 FARO 実験マトリックス<sup>[14]</sup>

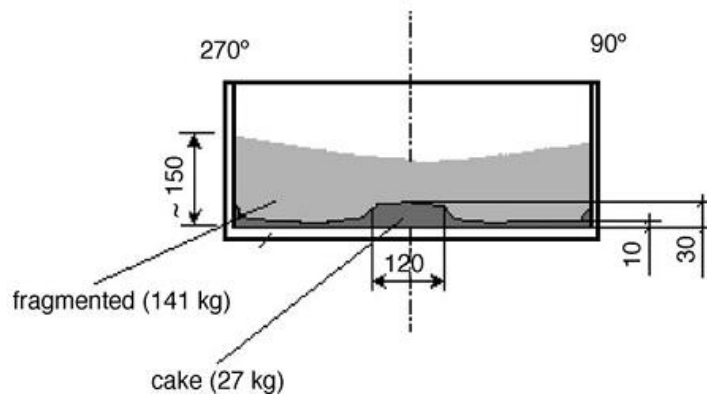
FARO LWR test series—main experimental conditions and debris data

| Test                                    | L-06     | L-08     | L-11     | L-14     | L-19               | L-20               | L-24               | L-27               | L-28               | L-29    | L-31    | L-33             |
|---|----------|----------|----------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|------------------|
| Experimental conditions                 |          |          |          |          |                    |                    |                    |                    |                    |         |         |                  |
| Corium composition <sup>a</sup>         | A        | A        | B        | A        | A                  | A                  | A                  | A                  | A                  | A       | A       | A                |
| Melt mass <sup>b</sup> (kg)             | 18       | 44       | 151      | 125      | 157                | 96                 | 177                | 117                | 175                | 39      | 92      | 100 <sup>c</sup> |
| Melt temperature (K)                    | 2923     | 3023     | 2823     | 3123     | 3073               | 3173               | 3023               | 3023               | 3052               | 3070    | 2990    | 3070             |
| Melt release diameter <sup>d</sup> (mm) | 100      | 100      | 100      | 100      | 100                | 100                | 100                | 100                | 50                 | 50      | 50      | 50               |
| Melt fall height in gas (m)             | 1.83     | 1.53     | 1.09     | 1.04     | 1.99               | 1.12               | 1.07               | 0.73               | 0.89               | 0.74    | 0.77    | 0.77             |
| System pressure (MPa)                   | 5        | 5.8      | 5        | 5        | 5                  | 2                  | 0.5                | 0.5                | 0.5                | 0.2     | 0.2     | 0.4              |
| Gas phase                               | Steam/Ar | Steam/Ar | Steam/Ar | Steam/Ar | Steam <sup>e</sup> | Steam <sup>e</sup> | Steam <sup>e</sup> | Steam <sup>e</sup> | Steam <sup>e</sup> | Argon   | Argon   | Argon            |
| Water depth (m)                         | 0.87     | 1.00     | 2.00     | 2.05     | 1.10               | 1.97               | 2.02               | 1.47               | 1.44               | 1.48    | 1.45    | 1.60             |
| Water temperature (K)                   | 539      | 536      | 535      | 537      | 536                | 486                | 425                | 424                | 424                | 297     | 291     | 293              |
| Water subcooling (K)                    | 0        | 12       | 2        | 0        | 1                  | 0                  | 0                  | 1                  | 1                  | 97      | 104     | 124              |
| Water Mass (kg)                         | 120      | 255      | 608      | 623      | 330                | 660                | 719                | 536                | 517                | 492     | 481     | 625              |
| Debris bed data <sup>f</sup>            |          |          |          |          |                    |                    |                    |                    |                    |         |         |                  |
| Hard debris, cake (kg, %)               | 6, 33    | 14, 32   | 0, 0     | 20, 16   | 77, 49             | 21, 22             | 27, 16             | 26, 23             | 77, 48             | 39, 100 | 0, 0    | 8, 8             |
| Loose debris (kg, %)                    | 12, 67   | 30, 68   | 146, 100 | 105, 84  | 80, 51             | 73, 78             | 141, 84            | 70, 77             | 84, 52             | 0, 0    | 83, 100 | 89, 92           |
| Mean loose debris size (mm)             | 4.5      | 3.8      | 3.5      | 4.8      | 3.7                | 4.4                | 2.6                | Na <sup>g</sup>    | 3.0                | —       | 3.4     | 2.6 <sup>h</sup> |

<sup>a</sup> A: 80 wt.% UO<sub>2</sub>-20 wt.% ZrO<sub>2</sub>; B: 77 wt.% UO<sub>2</sub>-19 wt.% ZrO<sub>2</sub>-4 wt.% Zr.



図付 3-1 FARO 実験装置 (L-27 実験) <sup>[14]</sup>



図付 3-2 FARO L-24 実験後のデブリの堆積状態 (数値単位 mm) [14]



(a) View of the debris as found



(b) View of the cake after partial removal of loose debris



(c) View of blocks after breaking the cake

図付 3-3 FARO/ L-33 実験後のデブリ取り出し段階毎のデブリ状態 [14]  
(低圧, サブクール水)

(2) COTELS-FCI 実験 (日本 NUPEC) [1][15]

本実験は、圧力容器外での FCI 挙動を調べるために実施された。UO<sub>2</sub> 混合物を溶融物として用い、その成分は炉内構造物のみならず、圧力容器下部ヘッド内の下部構造物も考慮して設定されている。図付 3-4 に COTELS-FCI 実験装置の概要を示す。実験装置は、UO<sub>2</sub> 混合物を溶融させる電気炉とその下に溶融物と水との相互作用を調べるメルトレシーバより構成されている。電気炉は、グラファイト製のつぼと高周波誘導加熱コイルにより構成されている。グラファイト製のつぼは最高温度 3200K で、60kg の UO<sub>2</sub> 混合物を加熱溶融可能である。つぼ下部には、溶融物を落下させるための穴を設けるプラグ破壊装置が設置され、UO<sub>2</sub> 混合物が溶融後、瞬時に直径 5 cm の穴が作ることが可能である。メルトレシーバは、高さ約 2.5m、外径約 90cm で円筒状をしており、メルトレシーバの中には、高さが可変のメルトキャッチャーが設置されており、メルトキャッチャーの高さを変化させることによりプール水深を変化させる実験を実施しており、雰囲気体積は変化させないように考慮されている。メルトキャッチャーの中心部は、実炉の格納容器床面を模擬するために厚さ 3 cm のコンクリートが設置され、溶融コリウム/水/コンクリート間の相互作用を調べることが可能となっている。なお、コンクリートの成分は日本と同じ玄武岩系である。実験マトリックスと主な結果を表付 3-2 に示す。

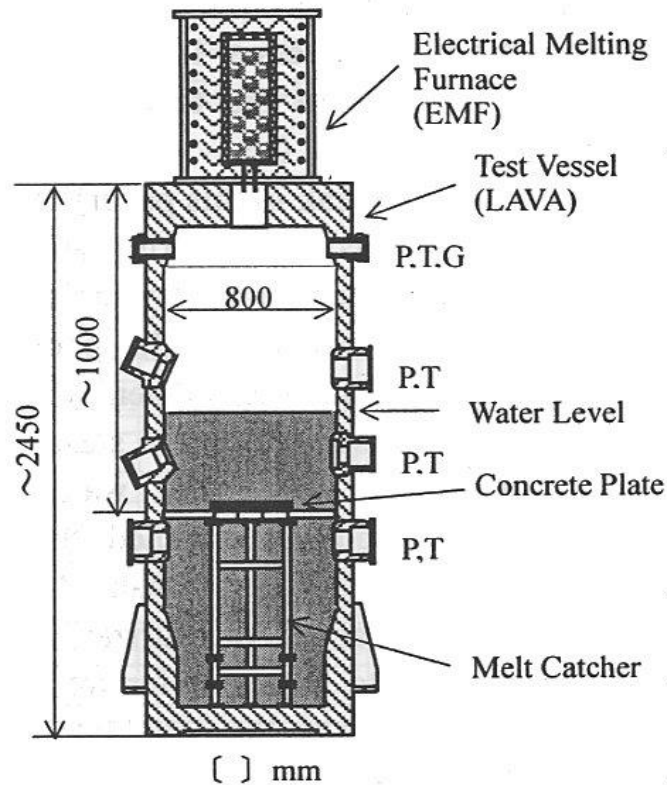
表付 3-2 COTELS-FCI 実験マトリックス<sup>[1]</sup>

| Run No.       | A1    | A4    | A5                          | A6    | A7    | A8       | A9    | A10   | A11  |
|---------------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|----------|-------|-------|------|
| コリウム組成(*1)    | B     | B     | B                           | B     | B     | B        | B     | B     | B    |
| 落下コリウム量, kg   | 56.3  | 27.0  | 55.4                        | 53.1  | 24.9  | 47.7     | 57.1  | 55.0  | 53   |
| プール水深, m      | 0.4   | 0.4   | 0.4                         | 0.4   | 1.0   | 0.4      | 0.9   | 0.4   | 0.8  |
| 水サブクール度, K    | 0     | 8     | 12                          | 21    | 0     | 21       | 0     | 21    | 86   |
| 初気圧, MPa      | 0.20  | 0.30  | 0.25                        | 0.21  | 0.18  | 0.45     | 0.21  | 0.47  | 0.27 |
| 雰囲気ガス組成       | Steam | Steam | Steam<br>N <sub>2</sub> 20% | Steam | Steam | Steam    | Steam | Steam | Ar   |
| 差圧, MPa (*2)  | 0.03  | 0.03  | 0.01                        | ~0    | ~0    | 0.67(*3) | 0.02  | 0.14  | 0.13 |
| ピーク圧力, MPa    | 1.34  | 1.04  | 0.62                        | 0.88  | (*4)  | 1.83     | 0.92  | 3.85  | 1.08 |
| インゴットコリウム, kg | 5     | 2.5   | 4.2                         | 6.5   | 0     | 0        | 3.8   | 0     | 4    |
| 質量中央径, mm     | 6.7   | 6.2   | 7.5                         | 7.2   | 8.2   | 5.2      | 7.0   | 0.38  | 4.8  |

\*1)コリウム組成

B; UO<sub>2</sub>:55wt%+Zr:25%+ZrO<sub>2</sub>:5%+SS:15%





P: Pressure, T: Temperature,  
G: Gas sampling line

図付 3-4 COTELS-FCI 実験装置<sup>[15]</sup>

(3) DEFOR 実験 (スウェーデン KTH) <sup>[16]</sup>

水張り時のデブリ冷却性を調べる目的で実施されている。熔融物の粒子化について、水サブクール、水深、メルト成分、過熱度等の影響を調べるために、熔融物の落下実験が実施されている。実験装置を図付 3-5 に示すが、上から、誘導加熱炉、メルト容器、冷却タンクより成り、冷却タンクはガラス張りで粒子化の観察が可能となっている。熔融物はメルト容器下部のノズルから重力落下により水中に落下する。DEFOR-E 実験の実験マトリックスを表付 3-3 に示すが、6 ケースの熔融物は  $\text{CaO-B}_2\text{O}_3$  (密度  $2500\text{kg/m}^3$ ) の酸化物が使用されており、1 ケースはより重量の大きい  $\text{WO}_3\text{-CaO}$  (密度  $5000\sim 8000\text{kg/m}^3$ ) が使用されている。

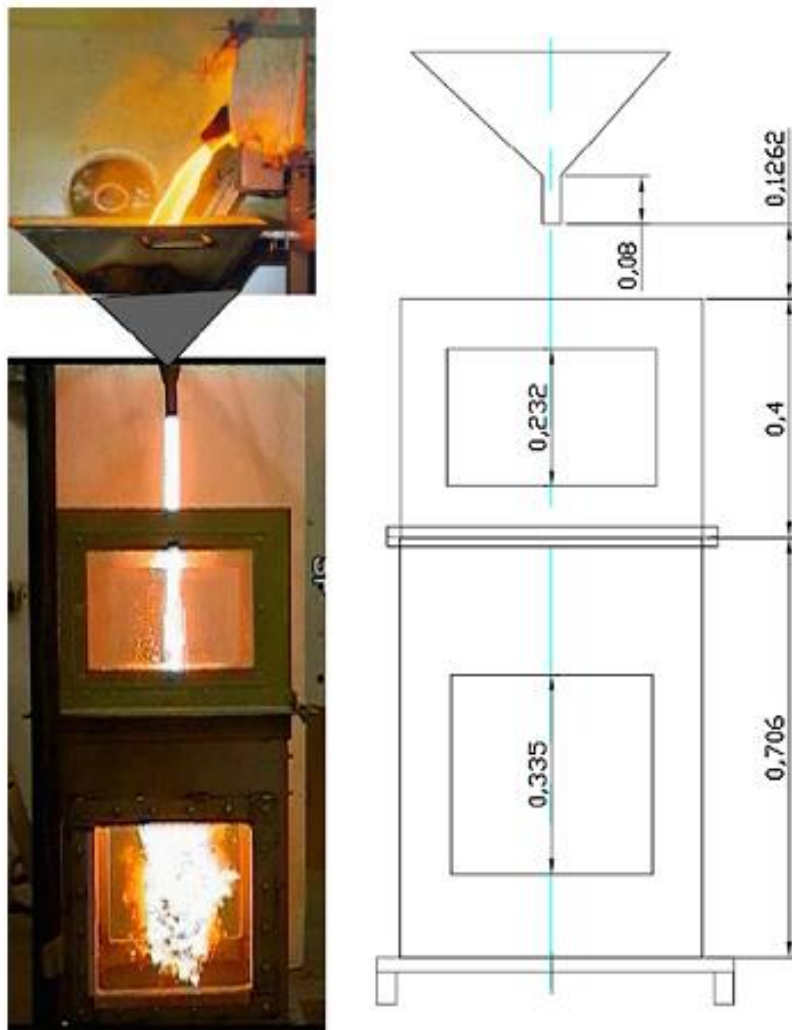
実験結果より、粒子化挙動は、水サブクールと水深の影響が大きいとしている。実験後のデブリ状態例を図付 3-6 に示すが、平均ポロシティは  $0.55\sim 0.7$  程度と大きい値が得られている。主な結果を表付 3-3 に併せて示す。



表付 3-3 DEFOR-E 実験マトリックス<sup>[16]</sup>

Experimental conditions and the measured porosity in the DEFOR-E tests.

| Parameter/property        | No.  |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                           | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
| Melt volume, l            | 3.5  | 7.0  | 3.5  | 3.5  | 3.5  | 3.5  | 2.5  |
| Melt initial temp., °C    | 1200 | 1300 | 1350 | 1350 | 1200 | 1250 | 1280 |
| Coolant volume, l         | 163  | 163  | 163  | 100  | 100  | 163  | 163  |
| Coolant initial temp., °C | 13   | 11   | 85   | 15   | 83   | 88   | 7    |
| Water pool depth, cm      | 65   | 65   | 65   | 40   | 40   | 65   | 65   |
| Measured porosity, %      | 60   | 77   | 74   | 56   | 50   | 68   | 65   |



図付 3-5 DEFOR-E 実験装置<sup>[16]</sup>



DEFOR- E1



DEFOR- E4



DEFOR- E7

図付 3-6 DEFOR-E 実験後のデブリ状態<sup>[16]</sup>

(4) 溶融物落下時の水中での粒子化割合の解析モデル

水中落下時の溶融物の粒子化現象について、これまで種々の実験的研究が行われており、また粒子化割合については相関式も提案されている。ここでは、粒子化現象に関する相関式を用いて、溶融炉心ジェットのパデスタル水プールの条件に対する粒子化割合を評価した。相関式として、MAAP コードで使用されている以下の2つの式を用いて計算を行った。

- ・ Ricou-Spalding の相関式
- ・ Saito の相関式

a) Ricou-Spalding の粒子化相関式<sup>[25][34]</sup>

Ricou-Spalding の相関式は、空気中へガスジェットを噴出させたエントレインメント実験から得られたもので（実験装置は図付 3-7 参照）、周囲の流体（空気）がガスジェットによってエントレインされ（巻き込まれ）、ジェット質量流量が距離とともに増加することを相関づけた整理式である。式の検証例を図付 3-8 に示す。

これをメルトジェットのブレイクアップに適用するため、周囲の流体（水）がメルトジェットにエントレインされると考え、そのエントレインされた分だけメルトジェットが侵食され粒子化するとして、円柱ジェットのエントレインメント速度 (m/s) を、次式で与えている（図付 3-9 参照）。

$$m_{ent} = E_o \left( \frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} u_{dj}$$

ここで、  $E_o$  : エントレインメント係数

$u_{dj}$  : ジェット速度 [m/s]

$\rho_{dj}$  : ジェット密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_w$  : 水密度 [kg/m<sup>3</sup>]

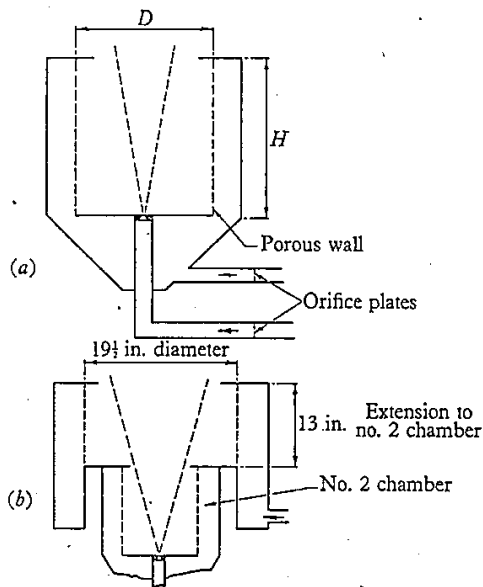


FIGURE 1. (a) Leading dimensions of three chambers.  
(b) Dimensions of extension to no. 2 chamber.

| No.          | Entrainment chamber |     |     |
|--------------|---------------------|-----|-----|
|              | 1                   | 2   | 3   |
| <i>H</i> in. | 8.7                 | 13  | 3   |
| <i>D</i> in. | 5.8                 | 8.9 | 8.9 |

図付 3-7 Ricou-Spalding のエントレイメント実験装置<sup>[25]</sup>

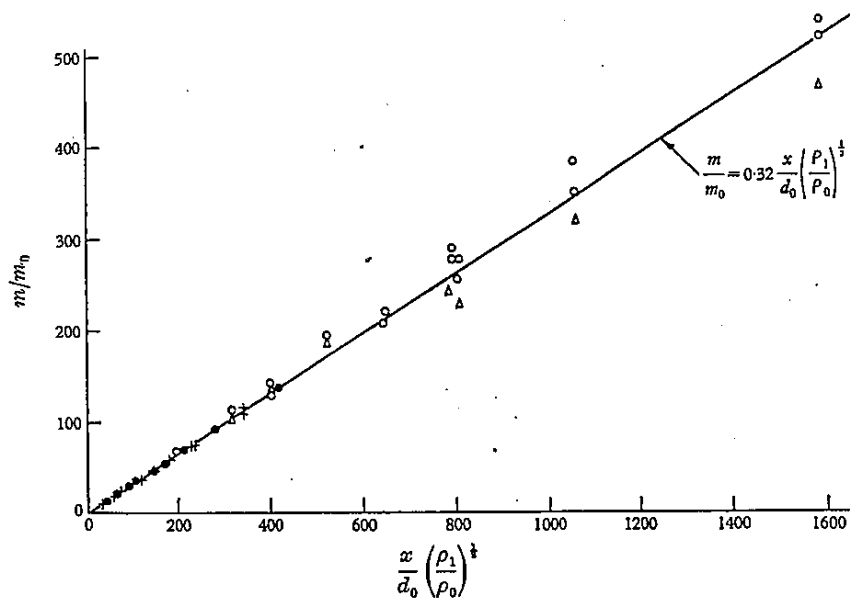


FIGURE 5. Entrainment rate for isothermal jets. Experimental results: (a) ●, air into air; (b) +, propane and carbon dioxide into air; (c), ○, hydrogen into air; (Δ, entrainment chamber inverted).

図付 3-8 Ricou-Spalding の相関式の検証例<sup>[25]</sup>

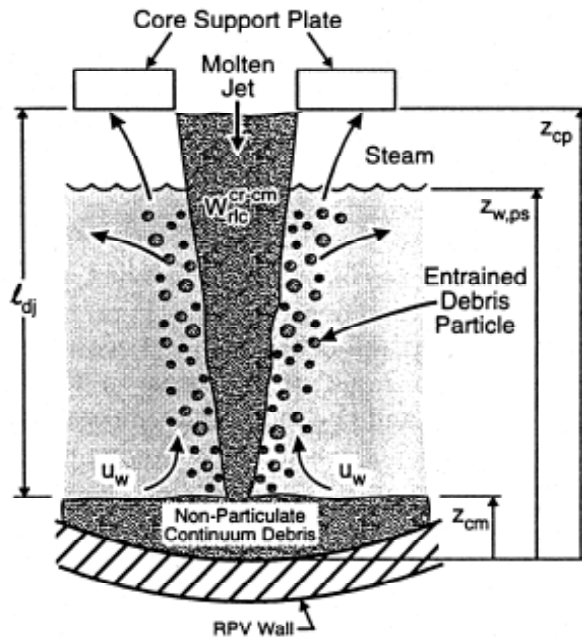


Fig. 3. Molten debris jet breakup and quenching.

図付 3-9 溶融デブリのジェットブレイクアップとクエンチの概念<sup>[34]</sup>

b) Saito の相関式<sup>[26]</sup>

フレオン 11 あるいは液体窒素の中に高温水ジェットを吹き込む実験により、ジェットのブレイクアップ長さに関する相関式を導出している。実験装置を図付 3-10 に示す。実験条件は、ノズル直径 5~40mm, ジェット速度 2.5~15m/s である。実験結果は、図付 3-11 に纏められ、それに基づき下記相関式が導かれた。

$$\frac{L}{D_j} = 2.1 \times \left(\frac{\rho_j}{\rho_c}\right)^{0.5} \times F_r^{0.5}$$

ここで,  $F_r$  : フルード数  $= \frac{V_j^2}{(g \times D_j)}$

$L$  : ジェットのブレイクアップ長さ [m]

$D_j$  : ジェット直径 [m]

$\rho_j$  : ジェット密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_c$  : 冷却材密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$V_j$  : ジェット速度 [m/s]

$g$  : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]

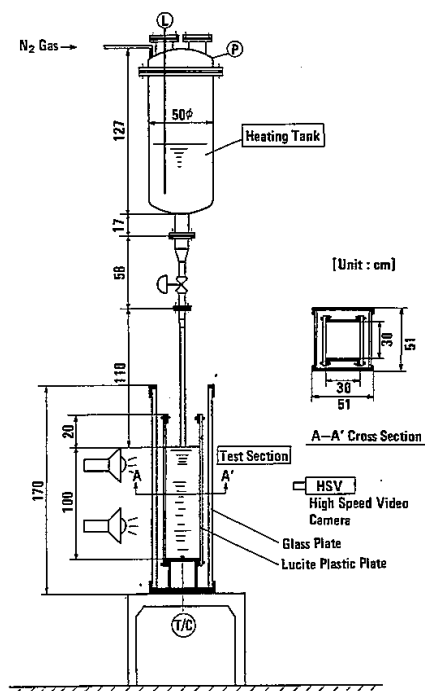


Fig. 1 JET-I experimental facility

図付 3-10 Saito らの実験装置<sup>[33]</sup>

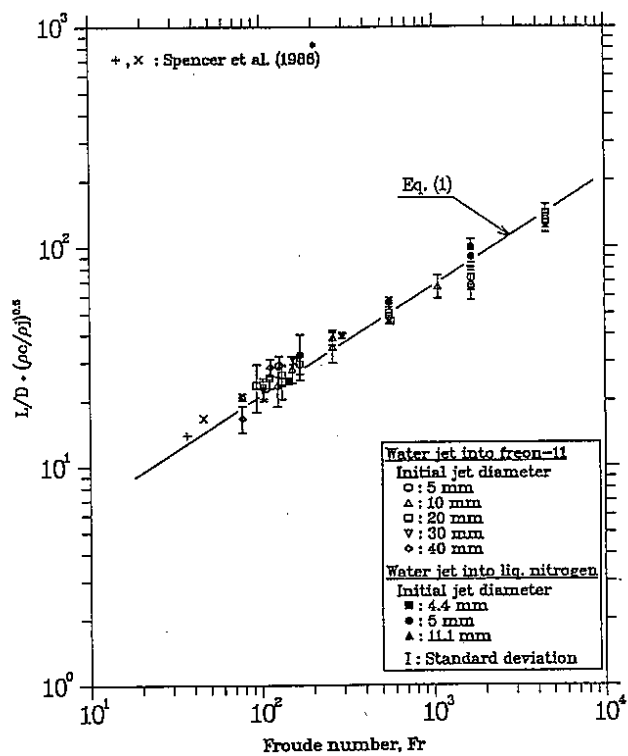


Fig. 8 Experimental correlation for jet mean penetration length

図付 3-11 Saito らの実験結果<sup>[33]</sup>

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

c) 相関式の適用性に関する検討<sup>[33]</sup>

Ricou-Spalding の相関式は、ガスジェットの大気中でのガス巻き込み現象に基づき作成された相関式であるため、溶融炉心物質ジェットの水中での粒子化現象への適用性の確認のため、ALPHA-MJB 実験、FARO-TERMOS 実験を対象に比較計算された結果を示す。

合わせて Saito の相関式との比較も示す。Saito の相関式ではジェットのブレイクアップ長さが与えられるので、ジェットの突入から消滅までジェット径が直線的に減少すると仮定して粒子化割合が求められている。

(a) ALPHA-MJB 実験

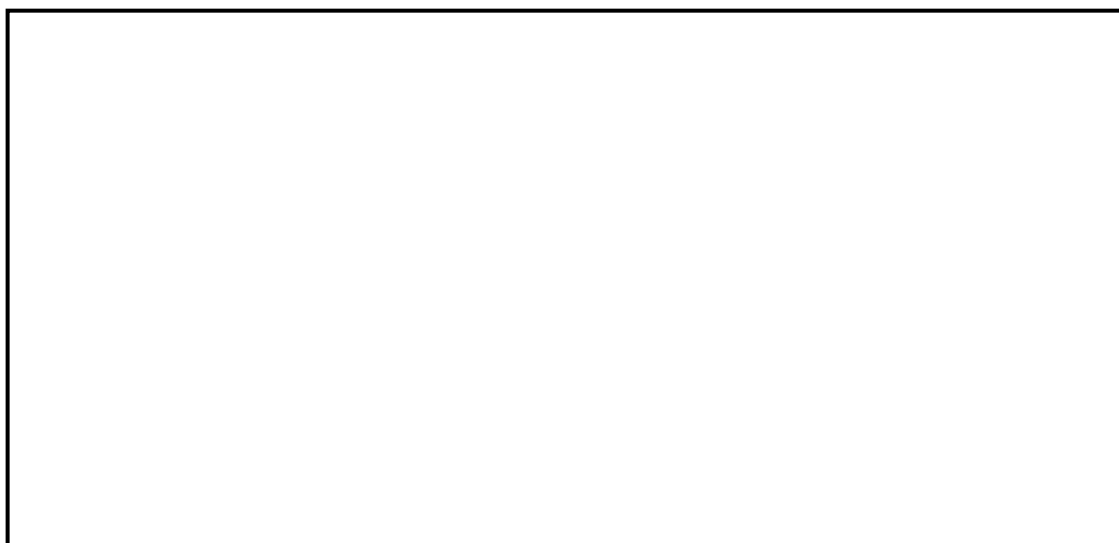
水中に鉛-ビスマスの溶融物を落下させた実験であり、密度や速度といった計算条件は表付 3-4 の値が用いられている。実験結果と計算結果の比較を図付 3-12, 13 に示す。実験結果は、ジェットブレイクアップ長さとして記載されている水深を、粒子化割合 100%として記す。

Ricou-Spalding 相関式における係数 C の値は、MAAP 推奨値  を使用することで、実験結果および Saito の相関式とよく一致する結果が得られている。

表付 3-4 ALPHA-MJB 実験の検証解析条件<sup>[33]</sup>

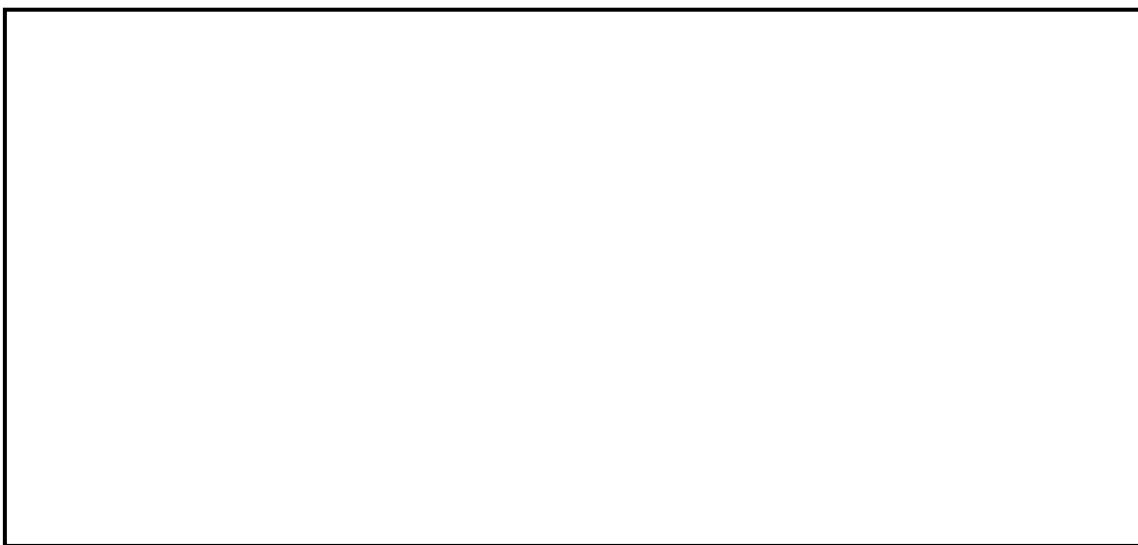
| ケース   | 溶融物密度<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 水密度<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | ジェット径<br>(m) | ジェット速度<br>(m/s) |
|-------|-------------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------|
| MJB01 | 10453                         | 958                         | 0.03         | 3.05            |
| MJB02 | ↑                             | ↑                           | 0.021        | 2.86            |

(補足) 溶融物密度は鉛-ビスマス 500K での値を使用



図付 3-12 ALPHA-MJB01 実験結果との比較<sup>[33]</sup>

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



図付 3-13 ALPHA-MJB02 実験結果との比較<sup>[33]</sup>

(b) FARO-TERMOS 実験

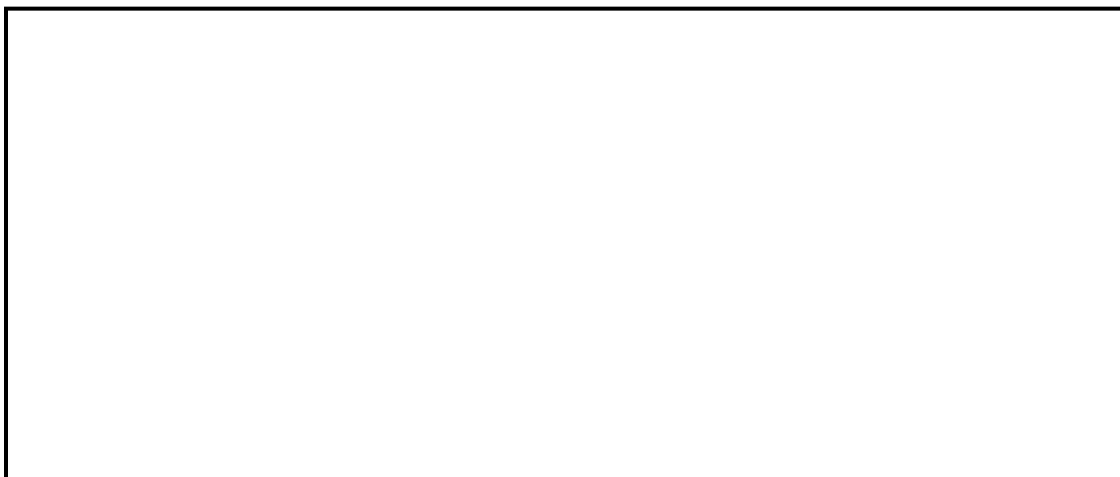
水中に実機燃料組成を模擬した溶融物を落下させた実験であり、密度や速度等の条件は表付 3-5 の値が用いられている。実験結果と計算結果の比較を図付 3-14～19 に示す。実験結果は水プール水深に対する粒子化割合として示されている。計算結果は、実験結果とよく合っているか粒子化割合を小さく評価している。なお、Ricou-Spalding 相関式における係数 C の値は  が使用されている。

表付 3-5 FARO-TERMOS 実験の検証解析条件<sup>[33]</sup>

|  |
|--|
|  |
|--|



本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。



図付 3-14 FARO-L06 実験結果との比較<sup>[33]</sup>

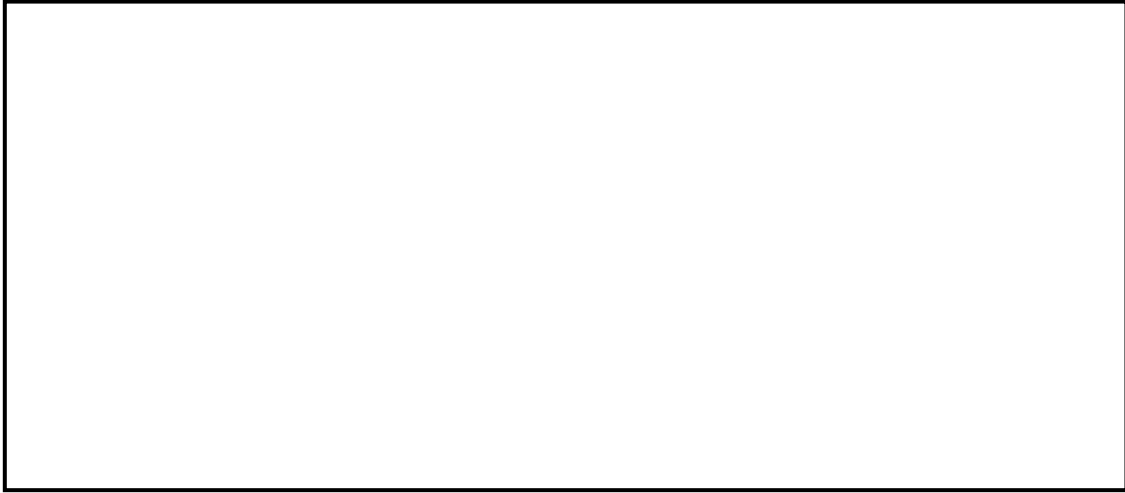


図付 3-15 FARO-L08 実験結果との比較<sup>[33]</sup>

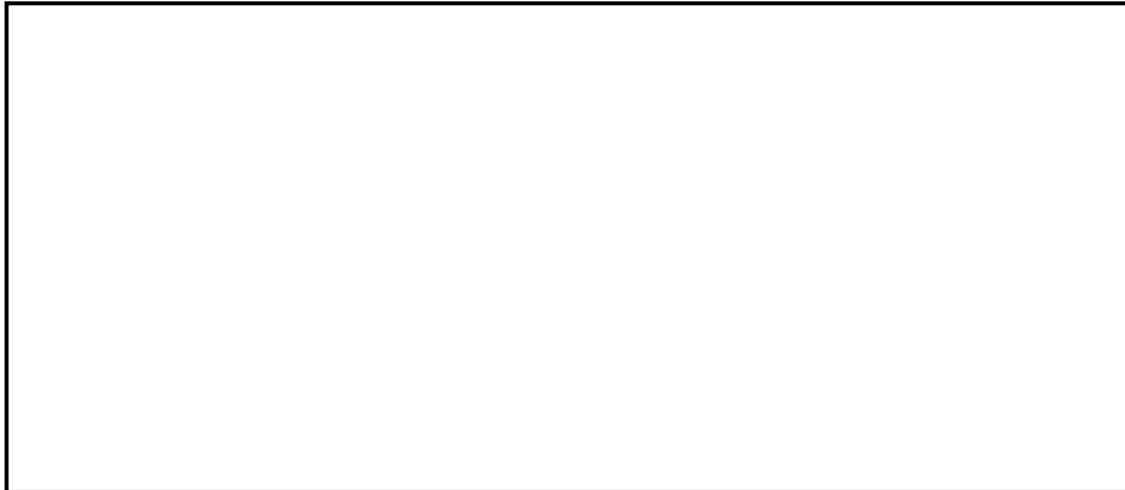


図付 3-16 FARO-L11 実験結果との比較<sup>[33]</sup>

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



図付 3-17 FARO-L14 実験結果との比較<sup>[33]</sup>



図付 3-18 FARO-L19 実験結果との比較<sup>[33]</sup>

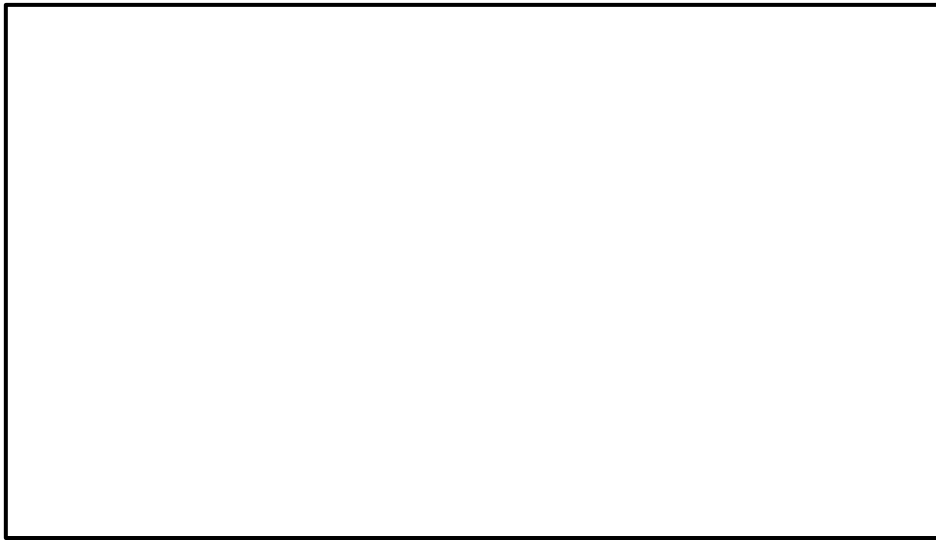


図付 3-19 FARO-L20 実験結果との比較<sup>[33]</sup>

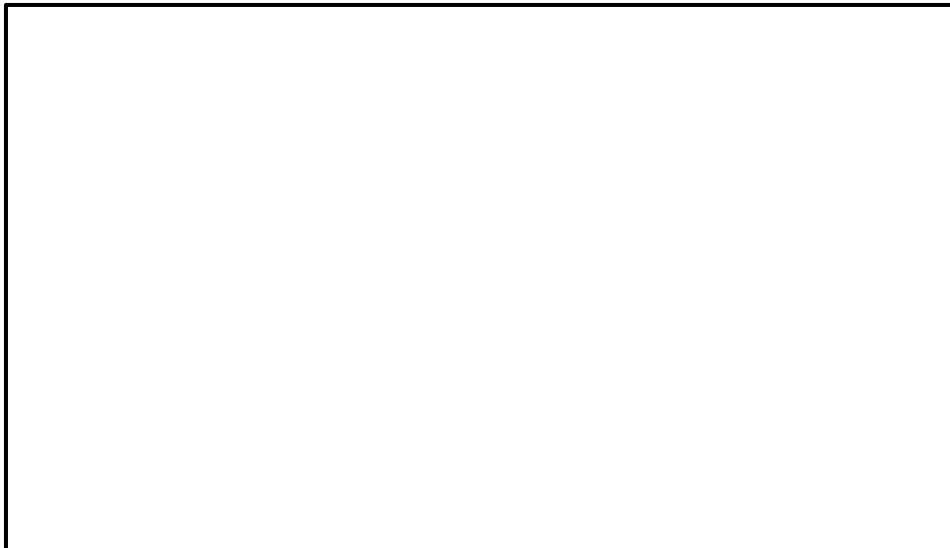
本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。

d) 格納容器ペデスタル水張り水深に対する粒子化割合の評価<sup>[33]</sup>

Ricou-Spalding の相関式ならびに Saito の相関式に基づき、大気圧飽和状態の水ブールを想定し、水深とジェット直径ならびにジェット速度をパラメータとして粒子化割合を整理されたものを図付 3-20～22 に示す。

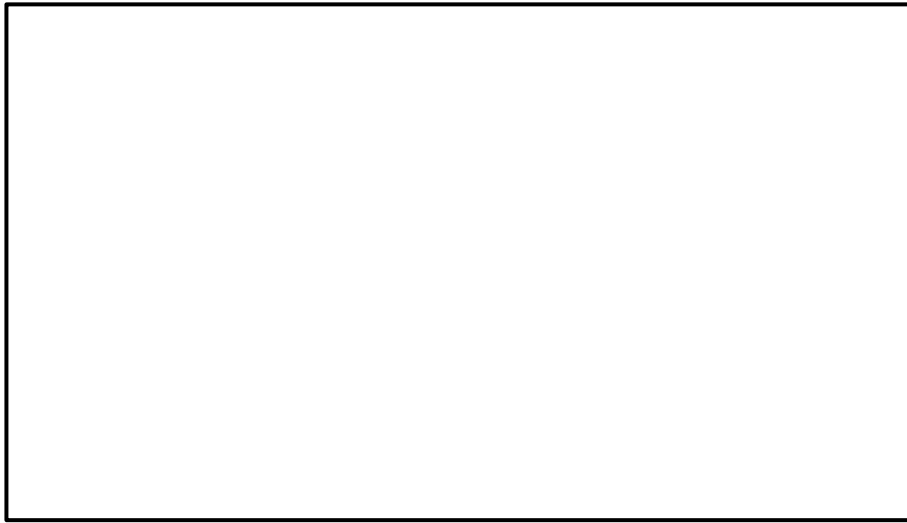


図付 3-20 Ricou-Spalding 相関式による粒子化割合のマップ<sup>[33]</sup>



図付 3-21 Saito の相関式による粒子化割合のマップ ( $V_j=5.0\text{m/s}$ )<sup>[33]</sup>

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に  
属しますので公開できません。



図付 3-22 Saito の相関式による粒子化割合のマップ ( $V_j=10.0\text{m/s}$ ) [33]

#### 付録4 溶融物の拡がり実験

溶融物の拡がり挙動に関して、表付 4-1 に示す実験的研究が実施されている。この中で水が存在する場合の溶融物の拡がりに関する主要な知見について以下に整理する。

表付 4-1 溶融物拡がりに関する主な実験<sup>[27]</sup>

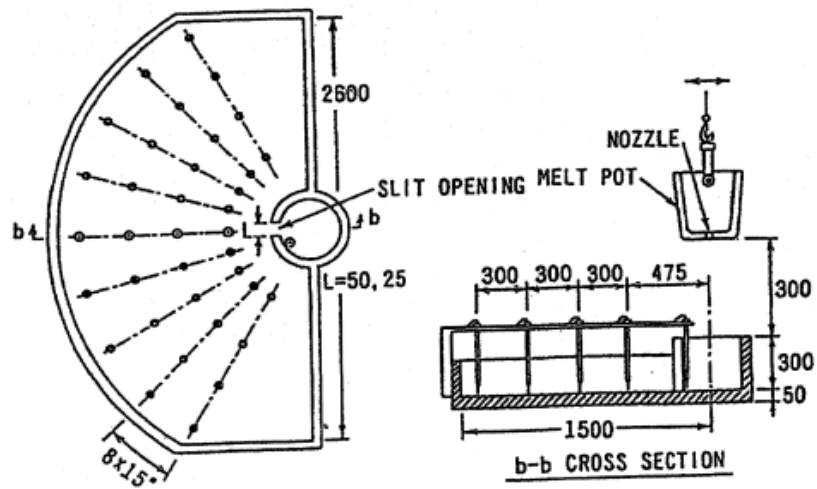
| 実験名   | 実施国     | 拡がり形状        | 溶融物   | その他               |
|---|---------|--------------|---|-------------------|
| BNL <sup>[18]</sup>                           | 米国      | 2D           | Pb  | ドライ, ウエット         |
| SPREAD <sup>[19]</sup>                        | 日本      | 1D, 2D       | ステンレススチール   | ドライ, ウエット         |
| CORINE <sup>[36]</sup>                        | フランス    | 2D           | グリセロール他   | ドライ, ウエット         |
| VULCANO                                       | フランス    | 2D           | コリウム  | ドライ               |
| KATS <sup>[23]</sup>                          | ドイツ     | 1D, 2D       | テルミット   | ドライ, ウエット         |
| COMAS   | ドイツ     | 1D, 2D       | コリウム  | ドライ               |
| ISPRA   | EU JRAC | 2D           | コリウム  | ドライ               |
| S3E <sup>[27]</sup><br>PULiMS <sup>[21]</sup> | スウェーデン  | 1D, 2D<br>2D | 模擬物(ウッズメタル等)<br>模擬物(B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub> 等) | ドライ, ウエット<br>ウエット |

##### (1) Mark-I 型格納容器のシェルアタックに関する研究<sup>[17][18][19][20]</sup>

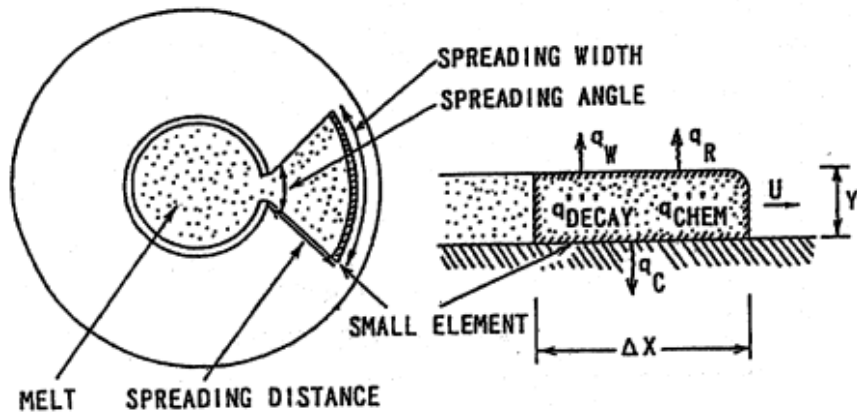
Mark-I 型格納容器のシェルアタックに関して ROAAM 手法による確率論的評価<sup>[17]</sup>が行われており、その中で水張り時のデブリの拡がりの評価が行われている。溶融物拡がり挙動解析には、MELTS SPREAD コードが使用されている。溶融物の拡がり挙動には、溶融物落下流量、溶融物成分、溶融物過熱度が主に影響するとされている。

米国 BNL では、溶融物として鉛を使用した小規模な拡がり実験を、ドライ条件とウエット条件で行っている<sup>[18]</sup>。溶融物の過熱度と水深が、デブリ拡がり挙動において重要であること、溶融物の拡がりは、水への熱伝達による溶融物の温度挙動と、溶融物の流体力学的挙動により制限されることが示されている。

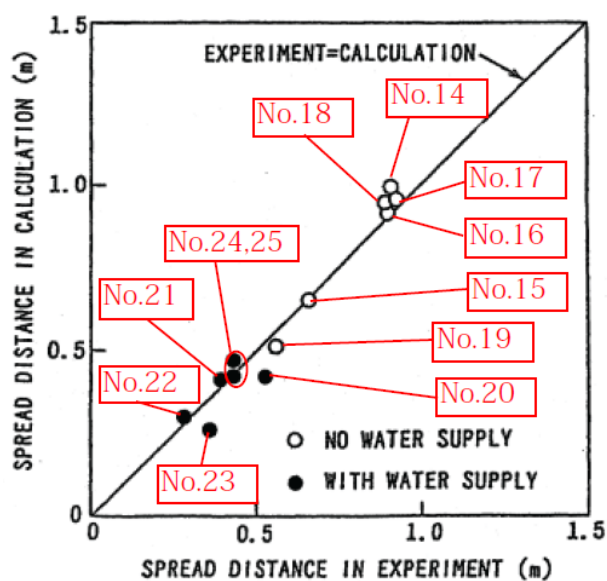
国内 BWR 産業界では、SPREAD 実験<sup>[19][20]</sup>が実施されている。溶融物として約 2000K に加熱したステンレススチールを用い、溶融物落下流量、水深、溶融物過熱度等を変化させて、格納容器模擬試験体（1次元形状と2次元形状の2種類、2次元形状は図付 4-1 を参照）に放出し、溶融物の拡がり挙動に関する基礎的なデータを収集した。実験条件を表付 4-2 に示す。また、溶融物の拡がりを解析する SPREAD コードが開発されている。溶融物が重力で拡がると仮定し、熱源として崩壊熱及び化学反応を考慮し、床コンクリートや上面の水プールへの伝熱を考慮し、質量、運動量及びエネルギーのバランスを解くことにより、溶融物の移動速度と溶融物厚さを求めている。（図付 4-2 参照）このモデルでは、流動限界固相率を超えた時点で流動が停止すると仮定されており、実験データを再現する流動限界固相率として 55%が使用されている。2次元体系に対する実験結果と解析結果の比較を図付 4-3 に示すが、よい一致が示されている。



図付 4-1 溶融物拡がり実験の試験体 (2次元形状) [20]



図付 4-2 SPREAD コードの概念図 [20]



図付 4-3 溶融物拡がり距離の実験値と解析値の比較 [20]

表付 4-2 SPREAD 実験条件 [19]

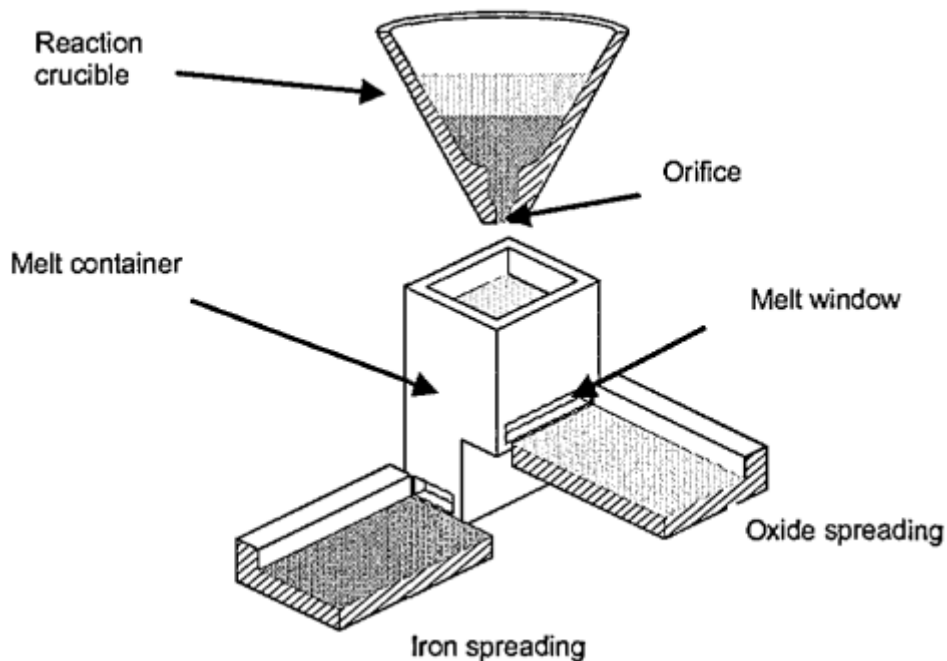
| Test No. | Melt Mass (kg) | Super Heat (K) | Slit Width (m) | Floor Material | Nozzle Diam. (mm) | Water Depth (mm) | Water Added Position * |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|------------------|------------------------|
| 1        | 95.0           | 133            | 0.15           | Concrete       | 70                | 0                | -                      |
| 2        | 7.5            | 77             | ↑              | ↑              | ↑                 | 0                | -                      |
| 3        | 24.0           | 149            | ↑              | ↑              | 30                | 0                | -                      |
| 4        | 43.0           | 115            | 0.05           | ↑              | ↑                 | 0                | -                      |
| 5        | 19.0           | 110            | ↑              | ↑              | ↑                 | 0                | -                      |
| 6        | 66.0           | 107            | ↑              | ↑              | ↑                 | 40               | O/C                    |
| 7        | 115.0          | 135            | ↑              | ↑              | ↑                 | 0                | -                      |
| 8        | 66.0           | 112            | ↑              | ↑              | ↑                 | 0                | -                      |
| 9        | 94.2           | 110            | 0.025          | ↑              | ↑                 | 0                | -                      |
| 10       | 60.2           | 86             | 0.05           | MgO            | ↑                 | 0                | -                      |
| 11       | 93.4           | 122            | ↑              | Concrete       | ↑                 | 40               | O/C                    |
| 12       | 67.0           | 115            | ↑              | ↑              | ↑                 | 40               | O/C                    |
| 13       | 93.1           | 116            | 0.025          | ↑              | ↑                 | 40               | O/C                    |
| 14       | 68.1           | 130            | 0.05           | ↑              | 70                | 0                | -                      |
| 15       | 63.6           | 133            | ↑              | ↑              | 30                | 0                | -                      |
| 16       | 116.0          | 131            | ↑              | ↑              | ↑                 | 0                | -                      |
| 17       | 106.2          | 171            | ↑              | ↑              | ↑                 | 0                | -                      |
| 18       | 108.8          | 158            | ↑              | ↑              | ↑                 | 0                | -                      |
| 19       | 61.9           | 108            | 0.025          | ↑              | ↑                 | 0                | -                      |
| 20       | 64.0           | 91             | 0.05           | ↑              | ↑                 | 10               | O/C                    |
| 21       | 69.1           | 107            | ↑              | ↑              | ↑                 | 40               | O/C                    |
| 22       | 65.0           | 90             | ↑              | ↑              | ↑                 | 70               | O/C                    |
| 23       | 60.0           | 94             | 0.025          | ↑              | ↑                 | 40               | O/C                    |
| 24       | 65.0           | 125            | 0.05           | ↑              | ↑                 | 40               | O/C,I/C                |
| 25       | 63.8           | 94             | ↑              | ↑              | ↑                 | Spray            | O/C                    |

\* O/C: Outside of Cylindrical Region I/C: Inside of Cylindrical Region

(2) EPR コアキャッチャの溶融物拡がりに関わる実験<sup>[23][29][30][36]</sup>

CEA/DRN/DTP で行われた CORINE 実験<sup>[36]</sup>では、低融点物質（グリセロール他）を模擬物質として使用して、水中での拡がり挙動を調べる実験が実施され、拡がり先端の移動速度や底部に形成されるクラストの影響が調べられた。

独カールスルーエ研究センター（FZK）で実施された KATS 実験<sup>[23][29][30]</sup>では、溶融物としてテルミット（ $\text{Al}_2\text{O}_3$  約 150kg, Fe 約 150kg）が使用され、溶融物の放出速度や温度、拡がり形状（1D, 2D）、床の材質（コンクリート、セラミック、コーティング）、水の有無をパラメータに溶融物の拡がり実験が行われている。実験装置を図付 4-4 及び図付 4-5 に示す。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  と Fe では密度が異なり成層化するため、溶融物の出口を 2 箇所設け、最初に  $\text{Al}_2\text{O}_3$  が放出し、最後に Fe を放出することにより酸化物溶融物の拡がり と 金属溶融物の拡がりを分けて実験が可能となっている。実験条件を表付 4-3 に示す。KATS-10 と KATS-11 の実験条件はほぼ同様であるが、KATS-10 の方は 1mm の水張りをしてあり、KATS-11 の方はドライ条件となっている。両者の拡がり結果を図付 4-6 に示すが、両ケースのように溶融物の放出速度が比較的高い場合は、冷却材の有無によらず同様な拡がり挙動になる結果となっている。



図付 4-4 KATS 実験装置の概要図<sup>[29]</sup>





(1D)



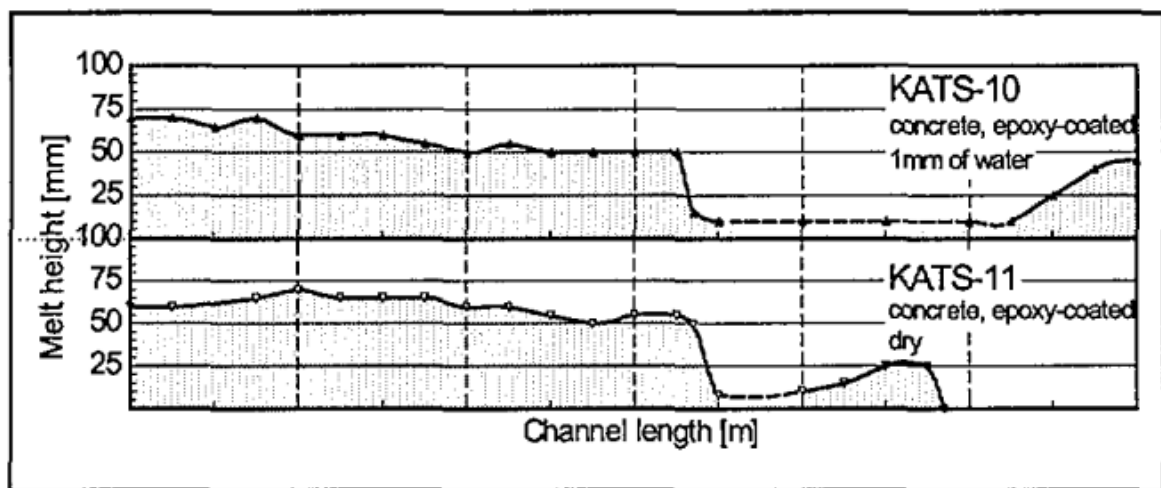
(2D)

図付 4-5 KATS 実験の 1D と 2D の拵り形状の写真<sup>[30]</sup>

表付 4-3 KATS 実験条件と拡がり距離 (酸化物溶融物, 1D 拡がり) [29]

| Test #  | Substratum                       | Mass in channel (kg) | Temperature Melt (°C) | Pouring rate (l/s) / Length in Time(s) | Spreading length (m)                  |
|---------|----------------------------------|----------------------|-----------------------|--|---------------------------------------|
| KATS-12 | Ceramics*)                       | 186                  | 2027                  | 12.7 - 0 l/s in 10 s                   | 11.7                                  |
| KATS-14 | Ceramics*)                       | 176                  | 1967                  | 2 → 1.2 l/s in 37 s                    | 7.2                                   |
| KATS-10 | Concrete<br>1mm Water<br>(Epoxy) | 179                  | 2037                  | 12.4 → 0 l/s in 10s                    | >12 first front<br>6.5 m main front   |
| KATS-11 | Concrete<br>Dry (Epoxy)          | 183                  | 2062                  | 12.7 → 0 l/s in 10s                    | 9.5 m first Front<br>6.8 m main front |
| KATS-13 | Concrete<br>Dry                  | 185                  | 2052                  | 12.7 → 0 l/s in 10s                    | 7.5                                   |

\*) Cordierite (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 37 wt%, SiO<sub>2</sub> 52 wt%, MgO 6,5 wt%)



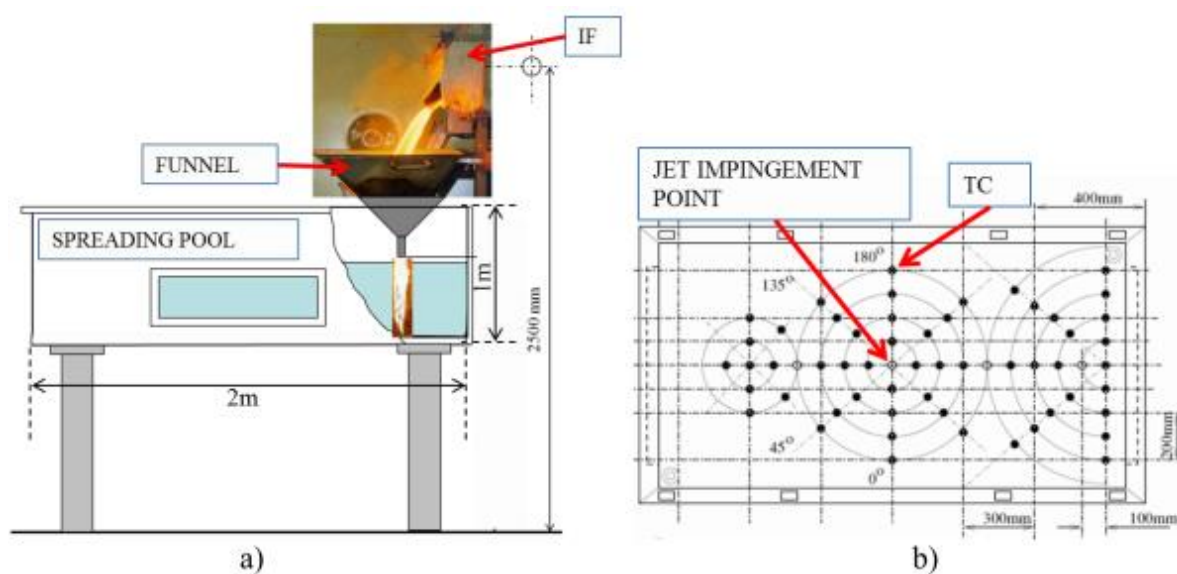
図付 4-6 KATS 実験の水の有無の影響 (酸化物溶融物, 1D 拡がり) [29]

### (3) KTH の溶融物拡がり研究 [21][27]

スウェーデン KTH では、溶融物拡がりの小規模実験として、S3E 実験 [27] が行われている。種々の溶融物と冷却材の組合せ (例 ウッズメタル-水, 塩 (NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>) -パラフィン) で溶融物温度や溶融物流量等をパラメータに、溶融物の拡がり挙動に関するデータが取られている。溶融物が冷却される過程において、低密度の多孔質の層が形成される結果が得られており、溶融物の流れにより、この多孔質層が持ち上げられ、流量 (慣性力) によって決定される距離まで拡がる挙動を示した。

また、水中での溶融物拡がり挙動を調べる PULiMS 実験 [21] が実施されている。この実験では、浅い水プール (水深 20cm) へ溶融した Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-W<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金を流入させ、その拡がり挙動が観察された。実験装置を図付 4-7 に示し、実験条件を表付 4-4 に示す。水中へ流入した溶融

物の拡がりの様子を図付 4-8 に示す。また、固化したデブリ層の性状を図付 4-9 に示す。固化したデブリ層は3層を形成し、デブリ層下面とコンクリートは密着せずギャップが存在しており、水または蒸気が存在していた可能性がある。3層の最下層は薄い 1.5-2mm のケーキ（クラスト）層で空隙は無く、中間層は割れ目や細長い孔が含まれている。最上部は不規則な構造で高多孔性である。



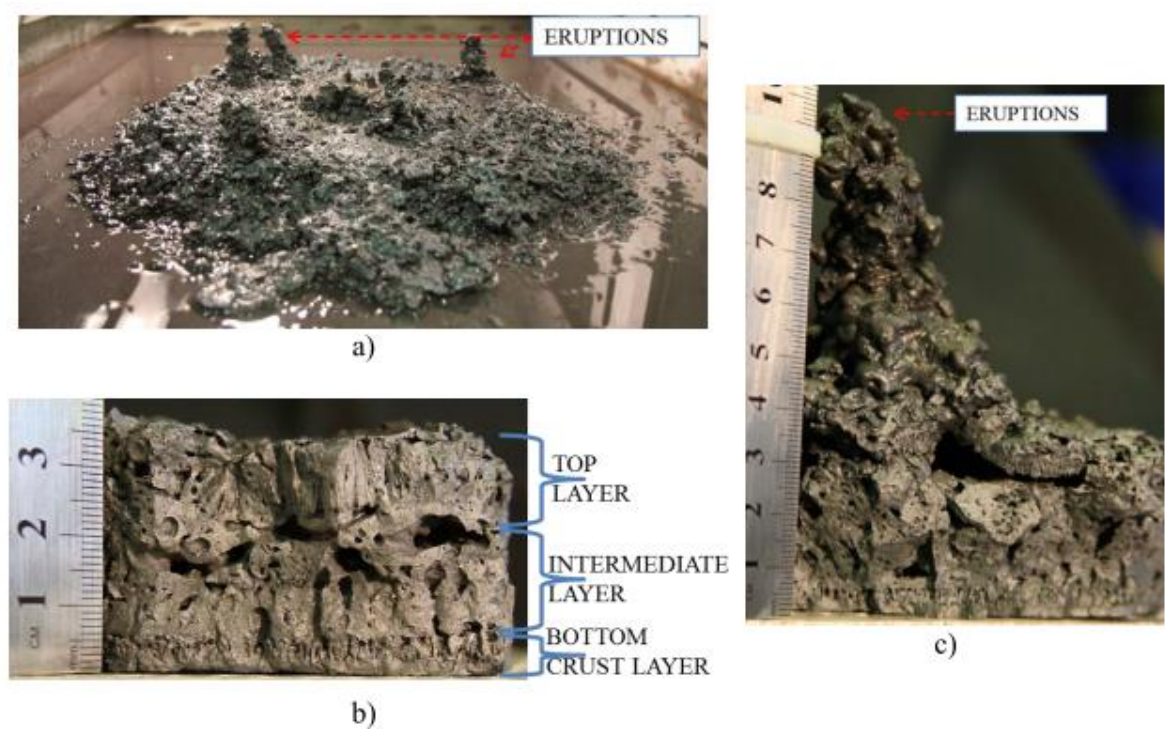
図付 4-7 PULiMS 実験装置の概要図<sup>[21]</sup>

表付 4-4 PULiMS 実験条件<sup>[21]</sup>

| Parameter                                       | PULiMS tests                                    |                                    |   |   |                                   |
|---|---|------------------------------------|---|---|-----------------------------------|
|   | E1  | E2                                 | E3  | E4  | E5                                |
| Melt material                                   | Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub> | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -CaO | Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub> | Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub> | ZrO <sub>2</sub> -WO <sub>3</sub> |
| Melt mass composition, %                        | 42.64-57.36<br>eutectic                         | 30-70<br>non-eutectic              | 42.64-57.36<br>eutectic                         | 42.64-57.36<br>eutectic                         | 15.74-84.26<br>eutectic           |
| Melt jet diameter, mm                           | 20  | 20                                 | 20  | 20  | 20                                |
| Jet free fall height, mm                        | 400   | 400                                | 400   | 400   | 400                               |
| Initial melt volume, L                          | 3   | 3                                  | 10  | 6   | 6                                 |
| Initial melt mass, kg                           | 23.4  | 7.5                                | 78.1  | 46.9  | 41.2                              |
| T <sub>sol</sub> , °C                           | 870   | 1027                               | 870   | 870   | 1231                              |
| T <sub>liq</sub> , °C                           | 870   | 1027                               | 870   | 870   | 1231                              |
| Melt temperature in the funnel upon pouring, °C | 1006  | 1350                               | 1076  | 940   | 1531                              |
| Water pool depth, mm                            | 200   | 200                                | 200   | 200   | 200                               |
| Water temperature, °C                           | 79  | 78                                 | 75  | 77  | 72                                |



図付 4-8 PULiMS 実験 E4 ケースの溶融物拡がり挙動のスナップ写真 [21]

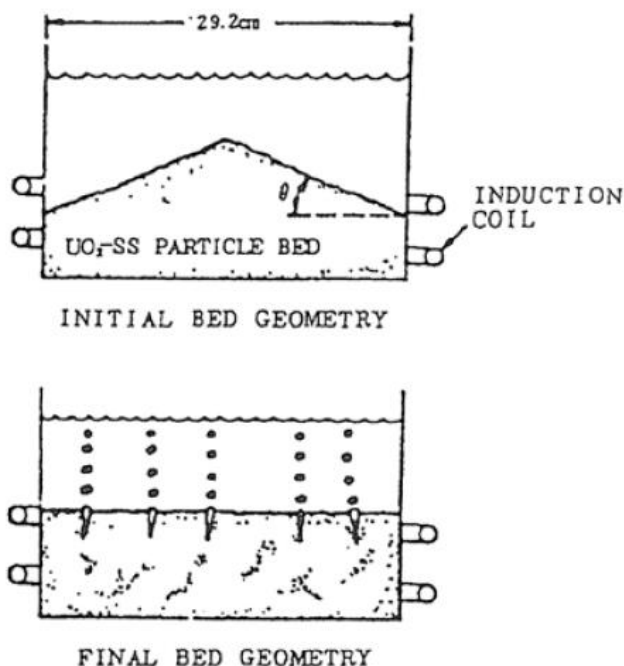


図付 4-9 PULiMS-E4 実験の固化デブリの性状写真 [21]

(4) 粒子状ベッドの拡がり [22]

ANL では、水プール中に不均質に堆積させたデブリベッドが、内部の沸騰により均一化する様子を確認するため、水プール中に  $UO_2$ 、SUS、Cu の 0.2~1mm 程度の粒子ベッドを非均一の厚さに堆積させ、誘導加熱により崩壊熱発生を模擬させた実験 [22] を行っている。図付 4-10 に粒子ベッド厚さの均一化の概念図を示す。非均一の厚さに堆積した粒子ベッドは、

誘導加熱により粒子ベッド内に沸騰が生じ、粒子が吹き上げられて再堆積する過程で厚さが均一化し、均一化に要した時間は2~3分程度であると報告されている。



図付 4-10 セルフレベリング実験におけるデブリベッドの均一化の概念図 [22]

(5) 溶融物の拡がり解析<sup>[20][27][28][39][40]</sup>

溶融物の拡がり挙動の解析のために、種々の解析コードが提案されている。主要なものを表付 4-5 に示す。これらの解析コードは、実験データを元に検証が行われている。また、実験と実機条件とを関連づけるスケーリング則の提案も行われている。<sup>[20][27][28]</sup>

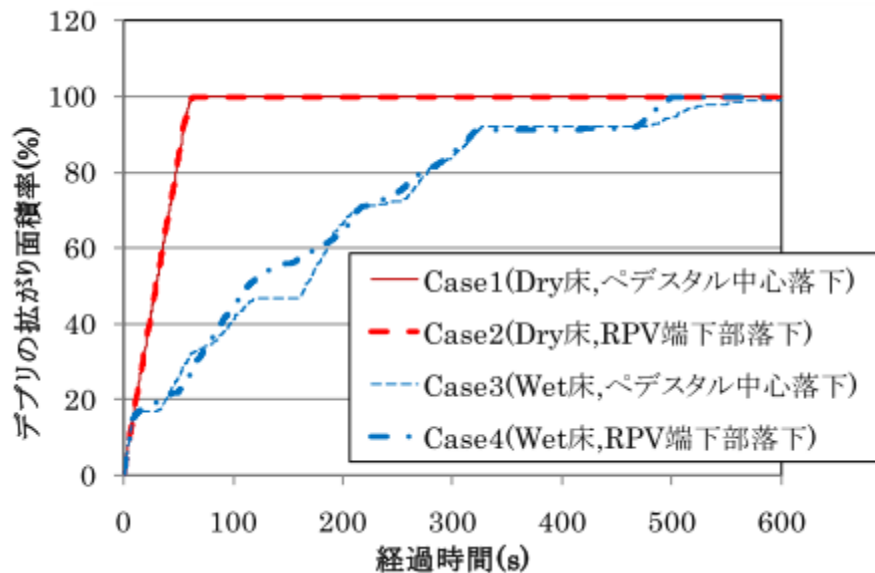
表付 4-5 溶融物拡がり挙動の主な解析コード<sup>[27]</sup>

| Code             | Country                                    | Model characteristics              |
|------------------|--|------------------------------------|
| CORFLOW *        | Germany                                    | 2D - mechanistic                   |
| CROCO            | France                                     | Simplified (ISPN)                  |
| LAVA *           | Japan                                      | 2D - Bingham fluid                 |
| MELTSREAD *      | USA  | 1D - complex physics and chemistry |
| MECO             | Germany                                    | Mechanistic (Ruhr Univ.)           |
| RASPLAV / SPREAD | Russia                                     | 2D - hydrodynamic                  |
| SPREAD           | Japan                                      | simplified                         |
| THEMA *          | France                                     | phenomenological (CEA/DRN)         |
| Footnote         | * Code receiving International recognition |                                    |



a) 3次元溶融物拡がり解析例

溶融物の拡がり挙動を3次元で評価した例もある。図付4-11に示すとおり過酷事故解析コードSAMPSONのデブリ拡がりモジュール(DSA)<sup>[39]</sup>を使用して、ABWRの格納容器ペデスタル上におけるデブリ拡がり評価を実施している。<sup>[40]</sup>床面に200mmの水位がある条件(Wet床条件)で、制御棒駆動機構ハウジング1本の破損を想定して、全炉心相当の溶融炉心がペデスタル(半径約5.3m)へ落下する場合の溶融炉心の床上の拡がり面積を評価している。床面に水が存在する場合でも、溶融炉心は落下位置に依らずペデスタルのほぼ全面に拡がり、最終的な堆積高さは400~500mm程度となる結果を得ている。



図付4-11 ABWRを対象にした3次元溶融炉心拡がり評価結果例(SAMPSONコード)<sup>[40]</sup>

b) スケーリング則を用いた溶融物拡がり相関式

(3)に示したPULiMS実験の結果を元に、水中での溶融物の拡がり距離を求めるスケーリング則が提案されている<sup>[28]</sup>。これは、障害物の無い水平な床面に落下した溶融物の拡がり停止後の平均厚さや拡がり距離を求める相関式である。一般的に、溶融物の拡がり挙動は、溶融物の堆積高さに対応した重力による拡がり、溶融物冷却に伴う粘性増加による流動性低下の競合する2つのプロセスにより支配される。(図付4-12参照)

スケーリング則では、競合する2つのプロセスの時間スケールとして、流体力学的拡がり時間 $\tau_{conv}$ を、拡がり停止後の平均厚さ $\delta_v$ に達するまでの時間と定義し、固化時

間  $\tau_{solid}$  を、溶融物が冷却され固化するまでの時間と定義し、これらの時間の比を、拡がりの無次元時間スケール  $T (= \tau_{conv}/\tau_{solid})$  と定義している。また、拡がり停止後の平均厚さ  $\delta_v$  と表面張力とのバランスで決まる厚さ  $\delta_{cap}$  の比を、無次元長さスケール  $L (= \delta_v/\delta_{cap})$  と定義している。

障害物の無い水平な床を想定し、落下した溶融物が軸対称に拡がると仮定すると、無次元長さスケール  $L$  は、無次元時間スケール  $T$  を用いて(1)式で表されるとしている。添え字の  $i$  は 慣性力支配流れの値を示し、 $v$  は粘性力支配流れの値を示している。

$$L_v = C_v \cdot T^{1/2} \cdot N^{1/2} \quad (1)$$

また、拡がり距離  $r(t)$  と拡がり時間  $t$  の関係は、以下のように表されるとしている。

$$\text{慣性力支配流れの場合} \quad r_i(t) = \beta_i \cdot t^{3/4} \quad (2)$$

$$\text{粘性力支配流れの場合} \quad r_v(t) = \beta_v \cdot t^{1/2} \quad (3)$$

ここで、

$$\delta_{cap} : \text{表面張力とバランスする厚さ} \quad (= 2\sqrt{\sigma/\rho_m g'})$$

$C_v$  : 比例定数。PULiMS 実験より、 $C_v=1.30$  が得られている。

$$N : \text{粘性因子} \quad (= \frac{\tau_{conv,v}}{\tau_{conv,i}} \cdot \frac{\delta_v}{\delta_{cap}})$$

$$\beta : \text{拡がり係数} \quad \beta_i = 0.84(g' G)^{1/4}, \quad \beta_v = 0.67\left(\frac{g' G^3}{v}\right)^{1/8}$$

$$\tau_{solid} : \text{デブリ固化特性時間(s)} \quad (= \delta_{cap} \cdot \rho_m \cdot \frac{C_{p,m} \cdot \Delta T_{sup} + \eta \cdot H_f}{q''_{up} + q''_{dn} - q_v \cdot \delta_{cap}})$$

$\Delta T_{sup}$  : デブリ過熱度(K) ,  $C_{p,m}$  : デブリ比熱(J/kg/K)

$q''_{up}$  : デブリ上面の熱流束(放射および対流熱伝達) (W/m<sup>2</sup>)

$q''_{dn}$  : デブリ下面の熱流束(対流熱伝達) (W/m<sup>2</sup>)

$q_v$  : 単位体積当たりの崩壊熱(W/m<sup>3</sup>)

$H_f$  : デブリの溶融潜熱(J/kg) ,  $\eta$  : 流動停止までの有効潜熱割合(-)

$\sigma$  : デブリ表面張力(N/m) ,  $\rho_m$  : デブリ密度(kg/m<sup>3</sup>) ,  $\rho_w$  : 水の密度(kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度(m/s<sup>2</sup>) ,  $v$  : デブリの動粘性係数(m<sup>2</sup>/s)

$g'$  : 水中における重力加速度の補正  $(= g(\rho_m - \rho_w)/\rho_m)$  (m/s<sup>2</sup>)

$$V_{tot} : \text{デブリ体積(m}^3) \quad (= \frac{m(1-f_m)}{\rho_m}), \quad m : \text{デブリ質量(kg)}$$

$$G : \text{エントレインされなかった連続体デブリの体積流量(m}^3/\text{s)} \quad (= \frac{V_{tot}}{t_{rel}})$$

$t_{rel}$  : 原子炉压力容器からの溶融炉心放出時間(s)

$f_m$  : デブリ落下時のエントレイン割合(-)

$\rho'_m$  : 有効デブリ密度 (kg/m<sup>3</sup>) ( $= \rho_m(1 - \varepsilon_m)$ ),  $\varepsilon_m$  : デブリポイド分率(-)

(1)式は、拡がり停止時のデブリ平均厚さが、無次元時間スケール (= 溶融物の拡がり時間 / 固化時間) の平方根に比例することを意味しており、溶融物の拡がりが遅いほど、固化するまでの時間が短いほど、無次元時間は大きくなり、結果として、拡がり停止時の平均厚さが大きく、拡がり面積は小さくなる傾向を示している。逆に、溶融物の拡がり早いほど、固化までの時間が長いほど、無次元時間は小さくなり、平均厚さが薄くなり、拡がり距離は大きくなる。このスケーリング則について、PULiMS 実験との比較が行われており、図付 4-13 に、実験結果とスケーリング則による評価との比較を示すが、概ね一致している結果が得られている。

上記のスケーリング則の式より、 $\tau_{conv,v}$  及び  $N$  は次式のように得られる。

$$\tau_{conv,v} = \left( \frac{V_{tot} \cdot \tau_{solid}^{1/2}}{\pi \cdot \beta_v^2 \cdot \delta_{cap} \cdot C_v \cdot N^{1/2}} \right)^{2/3} \quad (4)$$

$$N = \left( \frac{V_{tot}}{\pi \delta_{cap}} \right)^{1/3} \frac{\beta_i^{4/3}}{\beta_v^2} \quad (5)$$

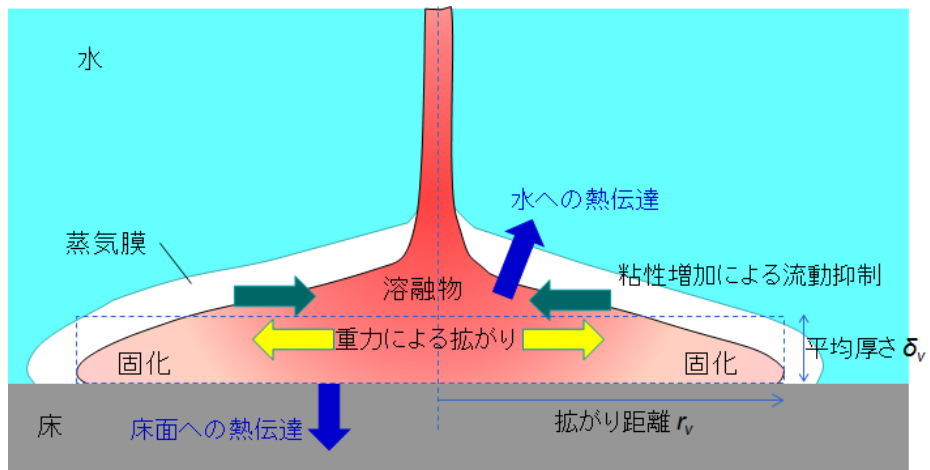
(4)式及び(5)式により  $\tau_{conv,v}$  が求まり、次式で拡がり距離が得られる。

$$r_v(\tau_{conv,v}) = \beta_v \cdot \tau_{conv,v}^{1/2} \quad (6)$$

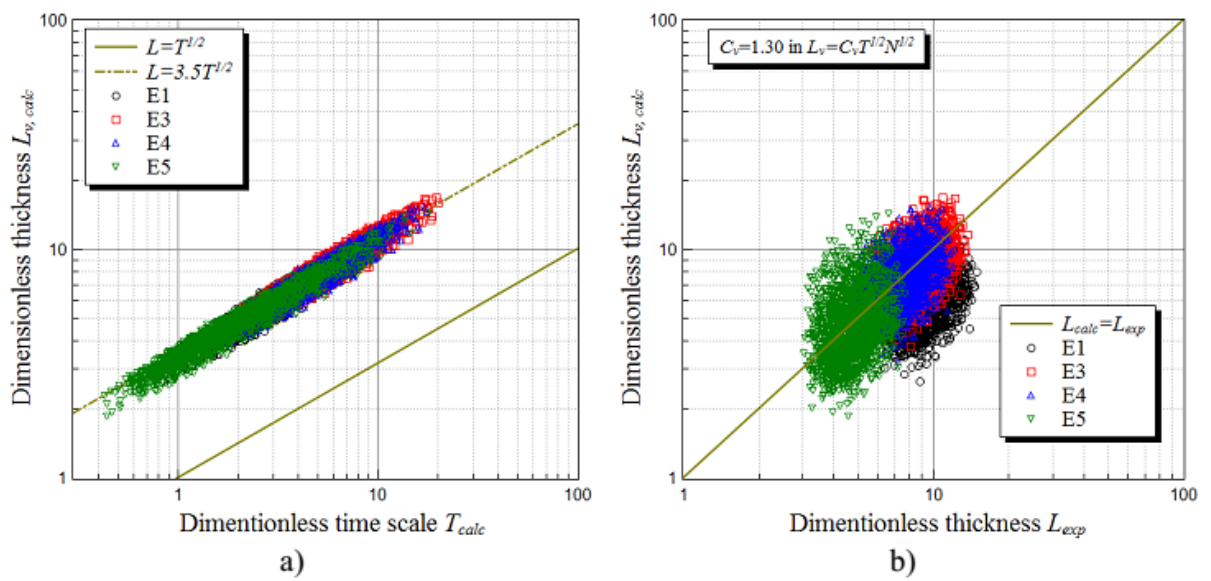
BWR の溶融物条件 (表付 4-6 参照) を用いて、上記の PULiMS スケーリング則を適用し、(6)式により溶融物の拡がり半径を評価した。図付 4-14 に評価結果を示す。制御棒駆動機構ハウジング破損時の溶融物落下質量速度である約 8500 kg/s の場合、約 18m の拡がり半径を得る。溶融物質量を減らして落下質量速度を減らすと、拡がり距離は減少するが、BWR 条件の落下質量速度の 1/10 にしても、まだ、ペDESTAL半径 (Mark-I 改の場合約 3.2m) を超えた拡がり半径を得る。

従って、PULiMS スケーリング則を適用しても、BWR の溶融物条件では、溶融物はペDESTAL床全面に拡がる結果となる。





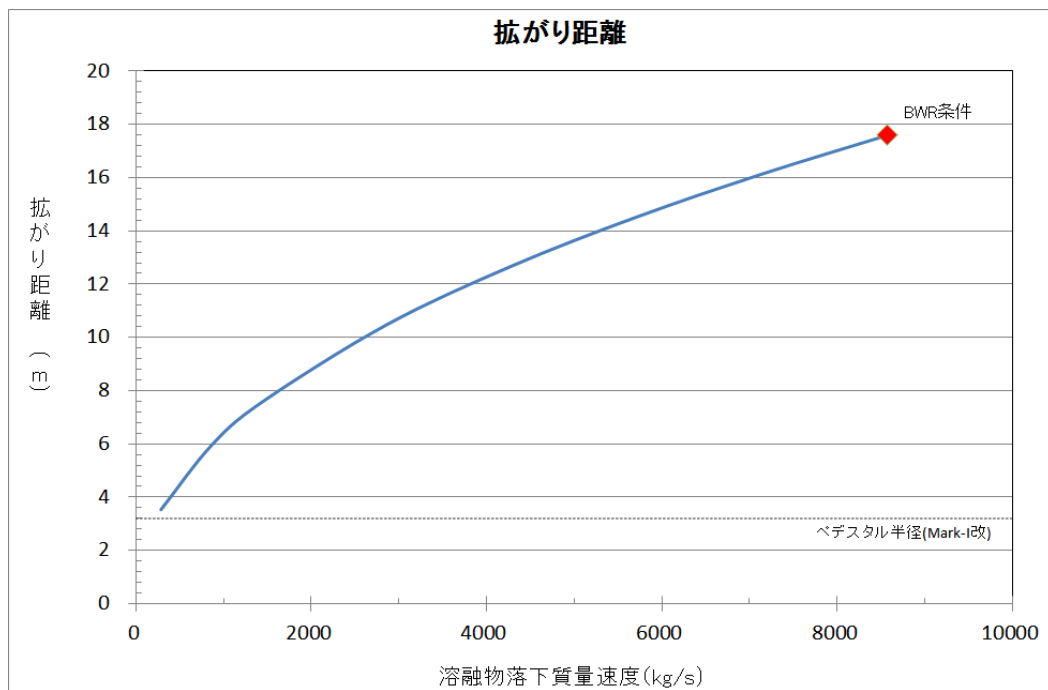
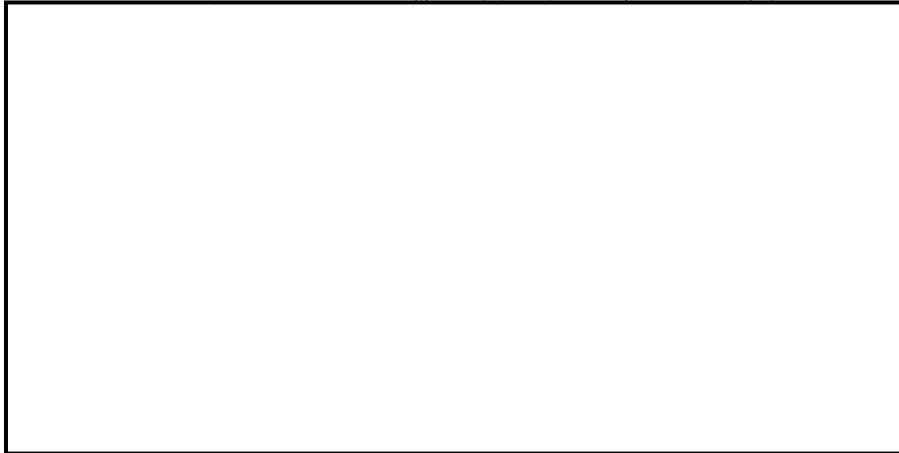
図付 4-12 溶融炉心の拡がりに関わる熱伝達及び流体力学的な力を示す模式図



図付 4-13 PULiMS 実験を対象にしたスケーリング則による評価と実験結果の比較<sup>[28]</sup>

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

表付 4-6 BWR 溶融物条件 (BWR-5, Mark-I 改)

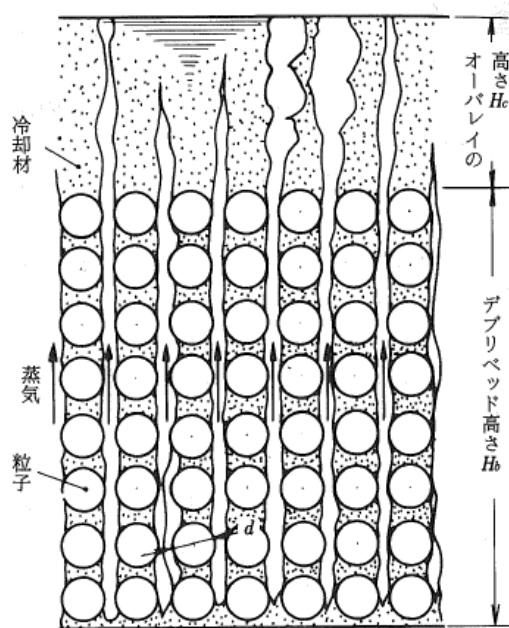


図付 4-14 溶融物落下質量速度と拡がり距離の関係 (PULiMS スケーリング則適用)

## 付録5 粒子状ベッドの冷却性実験と解析モデル

粒子状ベッドの冷却性については、高速増殖炉の炉心損傷事故の評価において重要な評価となることから、従来から多くの実験的及び解析的研究が行われてきている<sup>[32]</sup>。また、TMI-2 事故以降は、軽水炉を対象とした研究も進められている。

デブリベッド冷却に関する研究の主要な焦点の一つは、デブリベッドの冷却限界が、崩壊熱を上回るかどうかであり、判断基準のパラメータはデブリベッドのドライアウト熱流束と考えられている。発熱する粒子状ベッドの内を流下する冷却水と上昇する蒸気の対向二相流がデブリベッド内で形成される。粒子状デブリベッドの流動状態の模式図を図付 5-1 に示す。崩壊熱が高いと、局所的にデブリベッド内でドライアウトが生じ、デブリベッドの温度が急激に高くなる。この時の熱流束がドライアウト熱流束となる。粒子状デブリベッドのドライアウト熱流束は、種々の実験が行われ、種々の相関式が提案されている。その中でも Lipinski 0-D モデル<sup>[24]</sup>（次頁参照）は、小さい粒径から大きい粒径まで適用可能とされており、広く使われている。MAAP コード内でも圧力容器下部プレナムの粒子状ベッドの冷却の評価に使用されている。Lipinski 0-D モデルでは、ドライアウト熱流束は、主に粒径、ポロシティ、堆積高さ、圧力に依存する。



図付 5-1 粒子状デブリベッドの流動状態の模式図<sup>[32]</sup>

Lipinski 0-D モデルについて (日本機械学会編「沸騰熱伝達と冷却」より抜粋) [32]

c. Lipinskiの0-Dモデル<sup>(11)</sup>

Lipinskiは多孔質の対向二相流の気液各相で、層流及び乱流に適用できる運動量の式を、連続の式、エネルギーの式と共に連立して解いた。

連続の式

$$\rho_v U_v = \rho_l U_l \quad \dots(8.14)$$

運動量の式 (気相)

$$\rho_v U_v^2 / \eta \eta_v + \mu_v U_v / \kappa \kappa_v + \rho_v g = \Delta P_v / H_b \quad \dots(8.15)$$

運動量の式 (液相)

$$-\rho_l U_l^2 / \eta \eta_l - \mu_l U_l / \kappa \kappa_l + \rho_l g = \Delta P_l / H_b \quad \dots(8.16)$$

エネルギー式

$$\rho_v U_v \Delta h_v = \dot{Q} H_b \quad \dots(8.17)$$

圧力の釣合<sup>(15)</sup>

$$\Delta P_v - \Delta P_l = \sigma (\epsilon / 5 \kappa)^{1/2} \quad \dots(8.18)$$

ここで、

$U$  : 見掛け流速

$\kappa$  : 層流での浸透率

$\eta$  : 乱流での浸透率

$\kappa_v, \kappa_l, \eta_v, \eta_l$  : 各々層流及び乱流での気液の比浸透率 (無次元)

でデブリベッド内の平均液体存在割合  $s$  の関数で、以下のように表わしている<sup>(15)</sup>。

$$\kappa = (d^2 / 180) \epsilon^3 / (1 - \epsilon)^2$$

$$\eta = (d / 1.75) \epsilon^3 / (1 - \epsilon)$$

$$\kappa_v = 1 - 1.11s, \quad \kappa_l = s^3$$

$$\eta_v = (1 - s)^3, \quad \eta_l = s^3$$

上述の関係を用いると、式(8.14)~式(8.18)からデブリベッド上面での熱流束  $q$  ( $= \dot{Q} H_b$ ) は下式で与えられる。

$$q = \rho_v \Delta h_v u_1 \{ 1 + (u_2 / u_1)^2 \}^{1/2} - 1 \quad \dots(8.19)$$

$$u_1 = \frac{90(1-\epsilon)}{1.75d} \left\{ \frac{\mu_v}{\rho_v(1-1.11s)} + \frac{\mu_l}{\rho_l s^3} \right\} / \left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\}$$

$$u_2 = \left[ \frac{d\epsilon^3(\rho_l - \rho_g)g}{1.75(1-\epsilon)} \left\{ 1 + \frac{6\sigma(1-\epsilon)}{\epsilon d(\rho_l - \rho_g)gH_b} \right\} / \left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\} \right]^{1/2}$$

ドライアウト熱流束は、式(8.19)が  $s$  ( $0 \leq s \leq 1$ ) に関して極大値をとる条件として求まる。

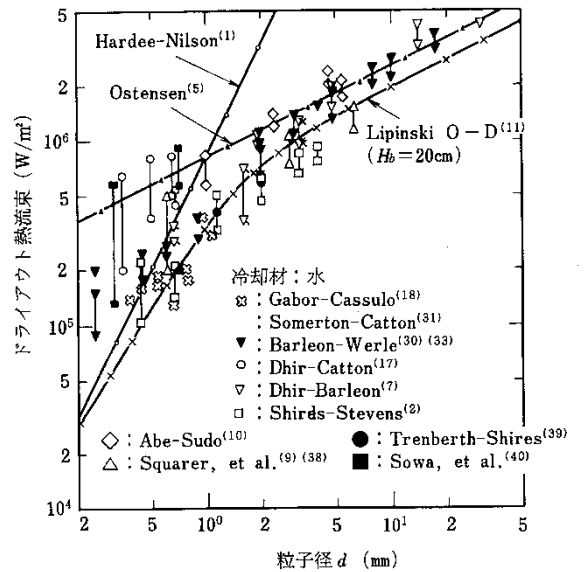


図8・6 冷却材が水の場合の理論式・半実験式と実験結果との比較

## 参考文献:

- [1] (財) 原子力発電技術機構 (NUPEC), 「重要構造物安全評価 (原子炉格納容器信頼性実証事業) に関する 総括報告書」 (2003).
- [2] EPRI, Technical Foundation of Reactor Safety, Revision 1, Knowledge Base for Resolving Severe Accident Issues, 1022186 (2010).
- [3] B. R. Sehgal, et al., “ACE Project Phases C & D : ACE/MCCI and MACE Tests,” Proceedings of the U.S. Nuclear Regulatory Commission, 19th Water Reactor Safety Information Meeting, NUREG/CP-0119, Vol. 2 (1991).
- [4] E. R. Copus, et al., “Sustained Uranium-Concrete Interactions (SURC)” , Reactor Safety Research Semiannual Report, NUREG/CR-4805 (1986).
- [5] G. A. Greene, R. A. Bari, ” ISP-24 International Standard Problem No 24, SURC-4 Experiment On Core-Concrete Interactions, Final Workshop Summary Report,” CSNI Report No 155, Volume 2 (1989).
- [6] H. Alsmeyer, et al., ” BETA experiments on Zirconium Oxidation and Aerosol Release during Melt-Concrete interaction,” Proceedings of the Second OECD (NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions, NEA/CSNI/R(92)10, Karlsruhe, Germany (1992).
- [7] R. E. Blose, et al., “SWISS: Sustained Heated Metallic Melt/Concrete Interactions With Overlying Water Pools,” NUREG/CR-4727 (1987).
- [8] R. E. Blose, et al., “Core-Concrete Interactions with Overlying Water Pools - The WETCOR-1 Test,” NUREG/CR-5907 (1993).
- [9] M. T. Farmer, et al., ”Status of Large Scale MACE Core Coolability Experiments,” OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany (1999).
- [10] M. T. Farmer, et al., ” Corium Coolability under Ex-Vessel Accident Conditions for LWRs,” Nuc. Eng. and Technol., 41, 5 (2009).
- [11] H. Nagasaka, et al., “COTELS Project (3): Ex-vessel Debris Cooling Tests,” OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany (1999).
- [12] M. T. Farmer, et al., “OECD MCCI Project Final Report,” OECD/MCCI-2005-TR06 (2006).
- [13] M. T. Farmer, et al., “OECD MCCI-2 Project Final Report,” OECD/MCCI-2010-TR07 (2010).
- [14] D. Magallon, ” Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments,” Nucl. Eng. Design, 236 1998-2009 (2006).
- [15] M. Kato, H. Nagasaka, et al., “COTELS Fuel Coolant Interaction Tests under Ex-Vessel Conditions,” JAERI-Conf 2000-015 (2000).
- [16] A. Karbojian, et al., ” A scoping study of debris bed formation in the DEFOR

- test facility,” Nucl. Eng. Design 239 1653-1659, (2009).
- [17] T.G.Theofanous, et al.,” The Probability of Liner Failure in a Mark-I Containment,” NUREG/CR-5423, (1991).
- [18] G.A.Greene, et al., ”Experimental Studies on Melt Spreading, Bubbling Heat Transfer and Coolant Layer Boiling,” Proceedings of 16th Water Reactor Safety Information Meeting, NUREG/CP-0096, pp. 341-358 (1988).
- [19] H.Suzuki, et al., ” Fundamental Experiment and Analysis for Melt Spreading on Concrete Floor,” Proceedings of 2nd ASME/JSME Nuclear Engineering Conference, Vol. 1, pp. 403-407 (1993).
- [20] (社) 日本原子力学会, シビアアクシデント熱流動現象評価 (2001)
- [21] A.Konovalenko, et al.,” Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-Coolant Interaction,” Proceedings of NUTHOS-9, N9P0303, Taiwan (2012).
- [22] J. D. Gabor, L. Baker, Jr., and J. C. Cassulo, (ANL), “Studies on Heat Removal and Bed Leveling of Induction-heated Materials Simulating Fuel Debris,” SAND76-9008 (1976).
- [23] Proceedings of the Second OECD(NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions, NEA/CSNI/R(92)10, Karlsruhe, Germany (1992).
- [24] R. J. Lipinski,” A Model for Boiling and Dryout in Particle Beds, “ NUREG/CR-2646, SAND82-0765 (1982).
- [25] F. P. Ricou, D. B. Spalding, “Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets,” Journal of Fluid Mechanics, Vol. 11, pp. 21-32 (1961).
- [26] M. Saito, K. Sato, S. Imahori,” Experimental Study on Penetration Behaviors of Water Jet into Freon-11 and Liquid Nitrogen,” ANS Proc. of National Heat Transfer Conference, Houston, Texas, USA, (1988).
- [27] T. N. Dinh, et al.,” Core Melt Spreading on a Reactor Containment Floor,” Progress in Nuclear Energy, Vol. 36, No. 4, pp. 405-468 (2000).
- [28] A. Konovalenko, P. Kudinov,” Development of Scaling Approach for Prediction of Terminal Spread Thickness of Melt Poured into a Pool of Water,” Proceedings of NUTHOS-9, N9P0302, Taiwan (2012).
- [29] B. Eppinger, et al., ” KATS Experiments to Simulate Corium Spreading in the EPR Core Catcher Concept,” FzK, Karlsruhe, Germany.
- [30] B. Eppinger, et al., ” Simulationsexperimente zum Ausbreitungsverhalten von Kernschmelzen: KATS-8 bis KATS-17,” FZKA 6589 (2001).
- [31] I. Lindholm, “A Review of Dryout Heat Fluxes and Coolability of Particle Beds,” SKI Report 02:17 (2002).

- [32] 日本機械学会編, 「沸騰熱伝達と冷却: 第 8 章 デブリベッドの冷却」, 日本工業出版, 平成元年
- [33] (財) 原子力安全研究協会, 「シビアアクシデント対策評価のための格納容器イベントツリーに関する検討」, 平成 13 年 7 月  
付録 7-4 熔融炉心の粒子化割合, 付録 7-5 粒子状物質ベッドの冷却性  
付録 7-6 粒子状物質の粒子径
- [34] EPRI/FAI, MAAP4 Computer Code Manual (2007).
- [35] Q. Zhou, et al., "Benchmark of MCCI Model in MAAP5.02 against OECD CCI Experiment Series," Proceedings of ICAPP 2014, ICAPP-14352, Charlotte, USA, (2014).
- [36] J. M. Veteau and R. Wittmaack., "CORINE Experiments and Theoretical Modeling," Proceedings of FISA-95, Luxemburg EUR 16896 EN, pp.271-285 (1996).
- [37] R. K. Cole, et al., "CORCON-Mod2: A Computer Program for Analysis of Molten Core-Concrete Interactions," NUREG/CR-3920, SAND84-1246, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (1984).
- [38] 独立行政法人原子力安全基盤機構, 「平成 17 年度 原子炉施設のアクシデントマネージメントに係る知識ベースの整備に関する報告書 = 環境への影響緩和 (デブリ冷却) =」, 06 基シ報-0003, 平成 18 年 7 月
- [39] M. Hidaka, et al., "Verification for Flow Analysis Capability in the Model of Three-Dimensional Natural Convection with Simultaneous Spreading, Melting and Solidification for the Debris Coolability Analysis Module in the Severe Accident Analysis Code 'SAMPSON' , (II)," Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 39, No. 5, p. 520-530 (2002).
- [40] 中島 他, SAMPSON コードによる ABWR 格納容器ペデスタル上の炉心デブリの 3 次元拡がり評価, 日本原子力学会「2013 年秋の大会」, H12, 2013 年 9 月
- [41] M. T. Farmer, et al., "OECD MCCI Project 2-D Core Concrete Interaction (CCI) Tests: Final Report," OECD/MCCI-2005-TR05 (2006).

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

(参考資料 1 TRACG)



目次

|          |                              |            |
|----------|------------------------------|------------|
| <b>1</b> | <b>はじめに</b> .....            | <b>1-1</b> |
| <b>2</b> | <b>使用実績及び解析モデルについて</b> ..... | <b>2-1</b> |
| 2.1      | 使用実績.....                    | 2-2        |
| 2.2      | 解析モデル.....                   | 2-11       |
| <b>3</b> | <b>解析結果の例示</b> .....         | <b>3-1</b> |
| 3.1      | PEACH BOTTOM タービントリップ試験..... | 3-2        |
| 3.2      | LASALLE 不安定事象.....           | 3-10       |
| 3.3      | 福島第二原子力発電所 2号炉 起動試験.....     | 3-22       |
| 3.4      | 柏崎刈羽原子力発電所 7号炉 起動試験.....     | 3-29       |
| 3.5      | SLC 試験.....                  | 3-36       |
| <b>4</b> | <b>ATWS 解析への適用例</b> .....    | <b>4-1</b> |
| 4.1      | ABWR 平衡炉心の MSIV 誤閉止.....     | 4-1        |

添付 1 TRACGコードによる中性子束振動に係る解析結果を参考として用いる理由について… 付 1-1

表一覧

|         |  |      |
|---------|--|------|
| 表 2.1-1 | TRACG コードの米国における使用実績                         | 2-7  |
| 表 2.1-2 | TRACG コードの妥当性確認実績(個別効果試験, 機器性能評価試験)          | 2-9  |
| 表 2.1-3 | TRACG コードの妥当性確認実績(総合効果試験, BWR プラント試験)        | 2-10 |
| 表 3.1-1 | Peach Bottom タービントリップ試験の条件                   | 3-2  |
| 表 3.1-2 | Peach Bottom タービントリップ試験 TRACG 解析用燃料集合体グループ分割 | 3-5  |
| 表 3.1-3 | Peach Bottom タービントリップ試験における中性子束の比較           | 3-5  |
| 表 3.2-1 | LaSalle2 不安定事象の初期条件                          | 3-13 |
| 表 3.2-2 | APRM の比較                                     | 3-13 |
| 表 3.3-1 | 福島第二原子力発電所 2 号炉の諸元表                          | 3-24 |
| 表 3.4-1 | 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉の諸元表                          | 3-30 |

図一覧

|          |  |      |
|----------|--|------|
| 図 2.2-1  | TRACG による BWR5 の模擬                                 | 2-12 |
| 図 2.2-2  | TRACG のモデル間でのデータの流れ                                | 2-18 |
| 図 3.1-1  | Peach Bottom タービントリップ試験 1 に対する核分裂出力応答              | 3-6  |
| 図 3.1-2  | Peach Bottom タービントリップ試験 2 に対する核分裂出力応答              | 3-6  |
| 図 3.1-3  | Peach Bottom タービントリップ試験 3 に対する核分裂出力応答              | 3-7  |
| 図 3.1-4  | Peach Bottom タービントリップ試験 1, 2 及び 3 に対する核分裂出力の積分量の応答 | 3-7  |
| 図 3.1-5  | Peach Bottom タービントリップ試験 1 に対するドーム圧変化               | 3-8  |
| 図 3.1-6  | Peach Bottom タービントリップ試験 2 に対するドーム圧変化               | 3-9  |
| 図 3.1-7  | Peach Bottom タービントリップ試験 3 に対するドーム圧変化               | 3-9  |
| 図 3.2-1  | LaSalle-2 不安定事象模擬のための TRACG によるチャンネルグルーピング         | 3-14 |
| 図 3.2-2  | TRACG による炉心出力の時間変化                                 | 3-15 |
| 図 3.2-3  | TRACG による APRM の時間変化                               | 3-15 |
| 図 3.2-4  | TRACG による炉心流量時間変化とプラントデータとの比較                      | 3-16 |
| 図 3.2-5  | TRACG によるドーム圧力時間変化とプラントデータとの比較                     | 3-16 |
| 図 3.2-6  | TRACG による給水温度時間変化とプラントデータとの比較                      | 3-17 |
| 図 3.2-7  | TRACG による給水流量時間変化とプラントデータとの比較                      | 3-17 |
| 図 3.2-8  | TRACG による主蒸気管流量時間変化とプラントデータとの比較                    | 3-18 |
| 図 3.2-9  | TRACG による炉水位時間変化とプラントデータとの比較                       | 3-18 |
| 図 3.2-10 | TRACG による APRM とプラントデータとの詳細比較                      | 3-19 |
| 図 3.2-11 | TRACG による給水流量とプラントデータとの詳細比較                        | 3-19 |
| 図 3.2-12 | TRACG による炉心流量とプラントデータとの詳細比較                        | 3-20 |
| 図 3.2-13 | TRACG による炉水位とプラントデータとの詳細比較                         | 3-20 |
| 図 3.2-14 | TRACG による炉心入口温度の時間変化                               | 3-21 |

|          |  |      |
|----------|--|------|
| 図 3.3-1  | 福島第二原子力発電所 2 号炉における LRWB 事象進展図.....                  | 3-24 |
| 図 3.3-2  | 福島第二原子力発電所 2 号炉における 1RPT 事象進展図.....                  | 3-24 |
| 図 3.3-3  | 福島第二原子力発電所 2 号炉の原子炉圧力容器ノーディング図.....                  | 3-25 |
| 図 3.3-4  | 福島第二原子力発電所 2 号炉の燃料チャンネルノーディング図.....                  | 3-25 |
| 図 3.3-5  | 福島第二原子力発電所 2 号炉の主蒸気管ノーディング図.....                     | 3-26 |
| 図 3.3-6  | 福島第二原子力発電所 2 号炉の LRWB と解析結果の比較.....                  | 3-27 |
| 図 3.3-7  | 福島第二原子力発電所 2 号炉の 1RPT と解析結果の比較.....                  | 3-28 |
| 図 3.4-1  | 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉における LRWB 事象進展図.....                  | 3-30 |
| 図 3.4-2  | 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉における 3RPT 事象進展図.....                  | 3-31 |
| 図 3.4-3  | 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉の原子炉圧力容器ノーディング図.....                  | 3-32 |
| 図 3.4-4  | 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉の燃料チャンネルノーディング図.....                  | 3-32 |
| 図 3.4-5  | 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉の主蒸気管ノーディング図.....                     | 3-33 |
| 図 3.4-6  | 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉の LRWB と解析結果の比較.....                  | 3-34 |
| 図 3.4-7  | 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉の 3RPT と解析結果の比較.....                  | 3-35 |
| 図 3.5-1  | Vallecitos 試験 125 における下部プレナムのほう酸混合係数 (5%炉心流量) .....  | 3-38 |
| 図 3.5-2  | Vallecitos 試験 125 における炉心のほう酸混合係数 (5%炉心流量) .....      | 3-38 |
| 図 3.5-3  | Vallecitos 試験 122 における下部プレナムのほう酸混合係数 (10%炉心流量) ..... | 3-39 |
| 図 3.5-4  | Vallecitos 試験 122 における炉心のほう酸混合係数 (10%炉心流量) .....     | 3-39 |
| 図 3.5-5  | Vallecitos 試験 327 における下部プレナムのほう酸混合係数 (10%炉心流量) ..... | 3-40 |
| 図 3.5-6  | Vallecitos 試験 327 における炉心のほう酸混合係数 (10%炉心流量) .....     | 3-40 |
| 図 4.1-1  | ATWS 時の中性子束の時間推移 (ABWR, 平衡炉心) .....                  | 4-2  |
| 図 4.1-2  | ATWS 時の炉心流量の時間推移 (ABWR, 平衡炉心) .....                  | 4-3  |
| 図 4.1-3  | ATWS 時の原子炉蒸気流量の時間推移 (ABWR, 平衡炉心) .....               | 4-4  |
| 図 4.1-4  | ATWS 時の給水流量の時間推移 (ABWR, 平衡炉心) .....                  | 4-5  |
| 図 4.1-5  | ATWS 時の原子炉圧力変化の時間推移 (ABWR, 平衡炉心) .....               | 4-6  |
| 図 4.1-6  | ATWS 時の逃がし安全弁流量の時間推移 (ABWR, 平衡炉心) .....              | 4-7  |
| 図 4.1-7  | ATWS 時の原子炉水位変化の時間推移 (ABWR, 平衡炉心) .....               | 4-8  |
| 図 4.1-8  | ATWS 時の燃料被覆管最高温度の時間推移 (ABWR, 平衡炉心) .....             | 4-9  |
| 図 4.1-9  | ATWS 時の中性子束の時間推移 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更) .....          | 4-10 |
| 図 4.1-10 | ATWS 時の炉心流量の時間推移 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更) .....          | 4-11 |
| 図 4.1-11 | ATWS 時の原子炉蒸気流量の時間推移 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更) .....       | 4-12 |
| 図 4.1-12 | ATWS 時の給水流量の時間推移 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更) .....          | 4-13 |
| 図 4.1-13 | ATWS 時の原子炉圧力変化の時間推移 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更) .....       | 4-14 |
| 図 4.1-14 | ATWS 時の逃がし安全弁流量の時間推移 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更) .....      | 4-15 |
| 図 4.1-15 | ATWS 時の原子炉水位変化の時間推移 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更) .....       | 4-16 |
| 図 4.1-16 | ATWS 時の燃料被覆管最高温度の時間推移 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更) .....     | 4-17 |

## 1 はじめに

現行の過渡解析（主蒸気隔離弁の誤閉止等）では，事象発生後短時間で原子炉スクラムするため中性子束振動現象は生じることがないが，今回の重大事故等対策の有効性評価のうち原子炉停止機能喪失では，原子炉がスクラムせず，高出力・低流量の状態に至るために中性子束振動が生じる可能性がある。この中性子束振動現象については，REDY コード及び SCAT コードでは取り扱うことができないことから，この取り扱いが可能な解析コードとして米国の設計認証申請においても適用例を有する TRACG コードによる解析を参照する（添付 1）。

以上を踏まえ，本資料では，炉心損傷防止に関する重大事故等対策の有効性評価（以下，「有効性評価」と称す。）に適用する REDY コード（REDY Ver.1（ATWS 用），REDY Ver.2）及び SCAT コード（SCAT Ver.3）に対する参考として使用する TRACG コード（TRACG Ver.5）について

- ・ 使用実績及び解析モデル
- ・ 解析結果の例示
- ・ ATWS 解析への適用例

に関してまとめる。

## 2 使用実績及び解析モデルについて

TRACG は、オリジナルの原子炉過渡解析コード (TRAC) <sup>[1]</sup>の GE Hitachi Nuclear Energy 社 (GEH 社) が所有権をもつバージョンである。この解析コードは、単純な運転時の異常な過渡変化 (AOO) 及び設計基準事故である冷却材喪失事故 (LOCA) から過渡時のスクラム失敗事象 (ATWS) に至るまでの沸騰水型原子炉 (BWR) の過渡変化を解析するための最適評価コードである。この章では、TRACG コードの使用実績及び解析モデルについて記述する。

なお、以降での TRACG に関する記述は、米国での適用実績については旧バージョンに関するものであるが、それ以外の記述については最新バージョンである TRACG Ver.5 に関するものである。

最新バージョンである TRACG Ver.5 と前バージョンの TRACG Ver.4 との相違点は、核動特性モデルがエネルギー修正 1 群からエネルギー 3 群解析的多項式ノード法モデルに改良された点であり、熱水力モデルは同じである。

## 2.1 使用実績

この節では TRACG コードの開発の経緯，全体のスコープ及び評価性能，米国での適用例について説明する。

### 2.1.1 背景

TRAC は，元々加圧水型原子炉 (PWR) の解析のため，ロスアラモス国立研究所 (LANL) で開発されたものである。TRAC の最初の PWR バージョンは，TRAC-P1A<sup>[2]</sup>と呼ばれた。TRAC の BWR バージョンの開発は，GEH とアイダホ国立工学研究所 (INEL) の協同的取り組みとして 1979 年に開始された。この取り組みの目的は，BWR の 冷却材喪失事故 (LOCA) を模擬できる TRAC のバージョンを開発することにあった。主な作業として，BWR への適用のため，TRAC の基本モデルの改良及び BWR 固有のコンポーネントのためのモデル開発がなされた。GEH でのこの作業には，GEH，原子力規制委員会 (NRC) 及び電力研究所 (EPRI) が，リフィル/再冠水及び FIST プログラムの下で共同出資した。作業は，1980 年代半ばに頂点に達し，INEL<sup>[3]</sup>での TRAC-BD1/MOD1 の開発，及び GEH<sup>[4]~[10]</sup>での TRACB04 の開発に結実した。これらは BWR の LOCA 解析能力を有する TRAC の最初の主要バージョンであった。共同開発したことから，二つの BWR 用 TRAC バージョンの基本構造及びコンポーネントモデルは，実質的に同一であった。この開発期間中，TRACG は，BWR の LOCA 及び過渡を模擬した個別効果試験データ，機器性能評価データ及び総合効果試験に対し，広範に妥当性が確認された。妥当性確認の詳細文書は，参考文献[4]，[5]，[10]に含まれる。

TRAC の BWR バージョンの開発に関する次の段階では，1985 年に始まり，過渡及び ATWS への適用を含むようにコードの解析能力を向上させる目的に注力した。この期間中の主な成果は，3 次元核動特性モデルの実装，熱水力モデルのための陰解法を用いた数値積分法の開発及び BWR 燃料模擬法の改良であった。1990 年代を通して進展した開発活動の結果，コードバージョンを TRACG と改名した。この期間中，試験装置及び BWR プラント<sup>[11]</sup>，のみならず制御棒落下試験も含めた過渡及び安定性データに対し，TRACG の妥当性が広範に確認された。参考文献[12]に，これらの妥当性確認を包括的に記述した。TRACG は，ESBWR<sup>[13],[14]</sup>の開発を支援するため実施した広範囲のシステム効果，機器性能評価及び総合効果試験に対し，さらなる妥当性が確認されている。

### 2.1.2 コード全体のスコープ及び評価性能

TRACG は，原子炉の熱水力挙動を評価する多次元 2 流体モデル，及び炉心の中性子動特性を評価する 3 次元中性子動特性モデルに基づいている。

熱水力挙動を取り扱うために TRACG で用いる 2 流体モデルは，TRAC-PF1 及び TRAC-BF1<sup>[1]</sup>に使用されている 2 流体モデルと基本的に同じである。この 2 流体モデルは，気相及び液相に対し，質量，運動量及びエネルギーの保存式を基礎式として解く。TRACG の基礎式では，二相間の熱的及び力学的な平衡について，いかなる仮定も含めていない。ま

た、気相は蒸気及び非凝縮性ガスの混合気体から構成することが可能であり、液相には水溶性ほう素を含めてもよい。熱水力モデルは、ベッセルコンポーネントを多次元、その他すべてのコンポーネントを1次元で定式化している。

質量、運動量及びエネルギーの保存式は、気液界面及び壁面におけるせん断応力及び熱伝達に対する構成式からなる付加的なモデルを用いることで閉じることができる。構成式は流動様式に依存しており、コード全体で首尾一貫して使用する単一の流動様式マップに基づいて選定する。

基本的な熱水力モデルに加えて、TRACG では再循環ポンプ、ジェットポンプ、燃料チャンネル、気水分離器及び蒸気乾燥器のような BWR 機器のための一連のコンポーネントモデルも備えている。TRACG では、さらに、圧力、水位及び再循環流量制御系のような主要な BWR 制御系を模擬することのできる制御系モデルを備えている。

3次元核動特性モデルは3次元沸騰水型原子炉模擬計算コード AETNA<sup>[15],[17]</sup>と同一のモデルであり、エネルギー3群の時間依存拡散方程式、及び6群の遅発中性子先行核濃度の動特性方程式を解く。制御棒位置及び熱水力モデルから求められた減速材密度、燃料温度、ほう素濃度に基づき反応度フィードバックが求められる。

TRACG の構成はモジュール化手法に基づいている。TRACG の熱水力モデルは、パイプ、ポンプ、弁、T字配管、チャンネル、ジェットポンプ、気水分離器、熱交換器及びベッセルコンポーネントのような一連の基本コンポーネントをモジュールとして含んでいる。これらのコンポーネントを構成要素として使用し組み立てることで解析対象を模擬する。解析に際しては、任意の数のコンポーネントを組み合わせていることが可能である。コンポーネントの数、それらの相互関係及び各コンポーネントの詳細は、入力データを通して特定される。TRACG は、このようにして、単純な個別効果試験から完全な BWR プラントまでの広い範囲の設備を模擬できる能力を有している<sup>[18],[41]</sup>。

TRACG では、個別効果試験、機器性能データ、総合効果試験及び実規模の BWR プラントデータに対し、広範にその妥当性を確認してきている。個別効果試験に対する基本モデルの妥当性確認、総合効果試験に対する妥当性確認及び実プラントデータに対する妥当性確認の中で実施した代表的な結果を本資料で説明する。この妥当性確認の目的は、TRACG の基本モデルの適用性を実証すること及びモデルの不確かさを定量化することにある。

### 2.1.3 米国での適用実績

TRACG の旧バージョンである Ver.2 及び Ver.4 について、米国の NRC(Nuclear Regulatory Commission)に承認された LTR(Licensing Topical Report)をもとに AOO, ATWS, 安定性, LOCA に関する使用実績を説明する。

表 2.1-1 に米国の NRC に承認された AOO, ATWS, 安定性, LOCA に関する主な LTR を示す。No.1 から No.5 は AOO または ATWS に関する LTR を、No.6 から No.9 は安定性に関する LTR を、No.10 は LOCA に関する LTR を示しており、それぞれに NRC の SER(Safety

Evaluation Report : 安全評価報告書)が添付されている。No.11 は TRACG で使用されている解析モデルについて記述されており, No.12 は試験データとの比較による TRACG の妥当性確認結果について記述されている。No.11 及び No.12 は, 各プラントタイプ, 各適用事象に対して TRACG の適用性を示した No.1 から No.10 の LTR を審査するときに参照され, その妥当性が評価されている。

#### 2.1.3.1 AOO への適用実績

AOO については, No.1, No.3, No.4 に解析例が提示されている。No.1 では, 代表的な BWR4 プラントを対象として, 圧力増加過渡事象についてはタービントリップ(バイパス弁不作動), 給水制御系の故障, 主蒸気隔離弁の誤閉止を, 圧力減少過渡事象については圧力制御系の故障を, 流量増加/減少過渡事象については再循環ポンプトリップ, 再循環流量制御系の故障を, サブクール過渡事象については給水加熱喪失を, 水位減少過渡事象については給水流量の全喪失を, TRACG Ver.2 を用いて炉心出力, 炉心流量, ドーム圧力, 圧力容器入口及び出口の流量, CPR(Critical Power Ratio : 限界出力比)の時間変化等について評価した結果を示している。No.3 では, No.1 とは異なる BWR4 プラントを対象として, 圧力増加過渡事象についてはタービントリップ(バイパス弁不作動), 給水制御系の故障, 主蒸気隔離弁の誤閉止を, 流量増加/減少過渡事象については再循環流量制御系の故障を, サブクール過渡事象については給水加熱喪失を選択し, TRACG Ver.4 及び Ver.2 の結果を炉心出力, 炉心流量, 給水流量, 入口サブクール度, ドーム圧力変化,  $\Delta$  CPR/ICPR の時間変化等について比較して示している。TRACG Ver.4 の結果は Ver.2 の結果に対して保守的な結果を生じるとしている。No.4 では, ESBWR を対象として, 圧力増加過渡事象については負荷遮断(バイパス弁不作動), タービントリップ(バイパス弁不作動), 主蒸気隔離弁の誤閉止を, サブクール過渡事象については給水加熱喪失を, 水位減少過渡については給水流量の全喪失を, TRACG Ver.4 を用いて炉心出力, 炉心流量, ドーム圧力, 圧力容器入口及び出口の流量, CPR の時間変化等について評価した結果を示している。

#### 2.1.3.2 ATWS への適用実績

ATWS については, No.2, No.3, No.5 に解析例が提示されている。No.2 では, 代表的な BWR プラントを対象として, 圧力増加過渡事象については主蒸気隔離弁の誤閉止に対するスクラム失敗を, 圧力減少過渡事象については圧力制御系の故障に対するスクラム失敗を, TRACG Ver.2 を用いて炉心出力, 炉心流量, ドーム圧力, 圧力容器入口及び出口の流量の時間変化等について評価した結果を示している。No.3 では, BWR4 プラントを対象として圧力増加過渡事象である主蒸気隔離弁の誤閉止に対するスクラム失敗を選択し, TRACG Ver.4 及び Ver.2 の結果を炉心出力, 炉心流量, 給水流量, 入口サブクール度, ドーム圧力変化,  $\Delta$  CPR/ICPR の時間変化等について比較して示している。TRACG Ver.4 の結果は Ver.2 の結果に対して保守的な結果を生じるとしている。No.5 では, ESBWR を対象として, 圧力増加



過渡事象については主蒸気隔離弁の誤閉止，復水器真空度の喪失(LCV : Loss of Condenser Vacuum)に対するスクラム失敗を，サブクール過渡事象については給水加熱喪失に対するスクラム失敗を TRACG Ver.4 を用いて，中性子束，炉心流量，給水流量，蒸気流量，ドーム圧力，ダウンカマの水位，ボロン濃度の時間変化等について評価した結果を示している。また，No.5 ではタービントリップ(バイパス弁作動)に対するスクラム失敗において，核及び熱水力の相互作用による不安定性から生じる出力振動の時間変化について評価した結果を示している。

### 2.1.3.3 安定性への適用実績

安定性については，No.6 から No.9 に解析例が示されている。No.6 では，代表的な BWR プラントを対象として，TRACG Ver.4 を用いた不安定事象を解析し MCPR(Minimum CPR : 最小限界出力比)の時間変化及び SLMCPR(Safety Limit MCPR)に対する裕度を評価している。No.7 では，炉心サイズの異なる 2 つの BWR4 プラント並びに BWR5 及び BWR6 プラントを対象として，高出力/低流量における炉心出力の振動を TRACG Ver.2 を用いて解析し，DIVOM(Delta CPR over Initial MCPR Versus Oscillation Magnitude)の評価を行った結果が示されている。No.8 では，代表的な BWR を対象として，TRACG Ver.4 及び Ver.2 を用いて不安定事象を解析し，チャンネルの出力，流量，及び MCPR の時間変化，DIVOM について両コードの比較結果が示されている。DIVOM の評価において TRACG Ver.4 の結果は，Ver.2 の結果に対して本質的に同等であるか，より保守的な結果となるとしている。No.9 では，ESBWR を対象として，チャンネル安定性，炉心安定性，領域安定性に関する TRACG Ver.4 の解析結果が示されている。

### 2.1.3.4 LOCA への適用実績

LOCA については，No.10 に解析例が示されている。No.10 では，ESBWR を対象として，ECCS/LOCA，格納容器/LOCA 及び主蒸気管破断 LOCA に関する TRACG Ver.4 の解析結果が示されている。

### 2.1.3.5 審査で参照・評価された LTR

NRC の審査では，上記で説明した各事象評価への TRACG の適用を申請した No.1 から No.10 の LTR の審査に No.11 及び No.12 の LTR が参照されて適用範囲に応じた内容が評価されている。No.11 は TRACG のモデル解説書の最新版であり，中性子動特性及び熱水力挙動を解析するために必要な基礎方程式，物理モデル又は構成式，機器・コンポーネントモデル，数値解法について記載されている。No.12 は TRACG の妥当性確認結果の最新版であり，試験データとの比較により TRACG モデルの妥当性を示している。表 2.1-2 及び表 2.1-3 に TRACG の妥当性確認に関する実績を示す。

TRACG の妥当性確認では，下記の主要な妥当性確認カテゴリで構成される系統的な方

法に従い、個別効果試験及び機器性能評価試験にて解析モデルの不確かさを評価し、総合効果試験にて解析コードの適用性及び解析モデルの総合的な妥当性が確認されている。また、BWR プラント試験にて、解析コードの BWR 実規模体系への適用性が確認されている<sup>[12],[16]</sup>。

- **個別効果試験** 基本モデル及び現象の妥当性確認を特別に指向した十分に制御された試験である。ここに含まれるのは、(1) 界面せん断力及びサブクール沸騰モデルを評価するボイド率データ<sup>[19]-[23]</sup>、(2) 熱伝達データ<sup>[24],[25]</sup>、(3) 対向流制限 (CCFL) 及び臨界流などの流れ制限データ<sup>[26]-[28]</sup>、(4) 壁面摩擦モデルを評価する圧力損失データ<sup>[29],[30]</sup>、(5) 限界出力データ<sup>[31]</sup>、(6) 核動特性モデル化手法を評価する制御棒落下試験データ<sup>[32]</sup>、(7) 密度波伝搬などの現象のモデル化手法を評価する熱水力安定性データである。
- **機器性能評価試験** 特定の BWR 機器の性能を予測するために、TRACG の能力を評価する根拠を提供する試験である。ここに含まれるのは、(1) 順流及び逆流に対するジェットポンプデータ、(2) 気液分離及び圧力損失に関する気水分離器データ、(3) BWR 上部プレナムの緊急炉心冷却注水及びその分布に関するデータ、(4) 炉心スプレイ分布データである。
- **総合効果試験** BWR の縮小模擬結果で構成される試験である。これらの試験の主目的は、システム全体の性能及びシステム中の異なる機器間の相互作用を評価することである。これらの試験には、ジェットポンプ付き BWR に対する TLTA<sup>[34]-[36]</sup>、FIST、SSTF 及び ROSA 試験装置、ジェットポンプなしの外部ポンププラントに対する FIX 試験装置、並びに ESBWR に対する GIST 試験装置で実施された LOCA 模擬試験を含む。
- **BWR プラント試験** このカテゴリには、BWR プラントの過渡試験及び安定性試験が含まれる。

表 2.1-1 TRACG コードの米国における使用実績

| No. | NRC から承認された LTR (Licensing Topical Report)   | 適用範囲  | 解析コード       |
|-----|--|---|-------------|
| 1   | GE Nuclear Energy, “TRACG Application for Anticipated Operational Occurrences (AOO) Transient Analyses,” NEDO-32906-A, Revision 3, September 2006.   | BWR2～6,<br>AOO                                    | TRACG Ver.2 |
| 2   | GE Nuclear Energy, “TRACG Application for Anticipated Transient Without Scram Overpressure Transient Analyses,” NEDO-32906 Supplement 1-A, November 2003.  | BWR2～6,<br>ATWS                                   | TRACG Ver.2 |
| 3   | GE Hitachi Nuclear Energy, “Migration to TRACG04/PANAC11 from TRACG02/PANAC10 for TRACG AOO and ATWS Overpressure Transients,” NEDO-32906 Supplement 3-A, Revision 1, April 2010.  | BWR2～6 ,<br>AOO 及び ATWS<br>圧力増加過渡                 | TRACG Ver.4 |
| 4   | GE Hitachi Nuclear Energy, “TRACG Application for ESBWR Transient Analysis,” NEDO-33083 Supplement 3-A, Revision 1, September 2010.  | ESBWR , AOO                                       | TRACG Ver.4 |
| 5   | GE Hitachi Nuclear Energy, “TRACG Application for ESBWR Anticipated Transient Without Scram Analyses,” NEDO-33083 Supplement 2-A, Revision 2, October 2010.  | ESBWR, ATWS                                       | TRACG Ver.4 |
| 6   | GE Hitachi Nuclear Energy, “DSS-CD TRACG APPLICATION,” NEDO-33147-A, Revision 4, August 2013.  | BWR3～6,<br>安定性                                    | TRACG Ver.4 |
| 7   | GE Nuclear Energy, “Reactor Stability Detect and Suppress Solutions Licensing Basis Methodology for Reload Applications,” NEDO-32465-A, August 1996.   | 安定性解決策オ<br>プション I-D, II,<br>III を使用する<br>BWR, 安定性 | TRACG Ver.2 |
| 8   | GE Hitachi Nuclear Energy, “Migration to TRACG04/PANAC11 from TRACG02/PANAC10 for Reactor Stability Detect and Suppress Solutions Licensing Basis Methodology for Reload Applications,” NEDO-32465 Supplement 1-A, Revision 1, October 2014. | 安定性解決策オ<br>プション I-D, II,<br>III を使用する<br>BWR, 安定性 | TRACG Ver.4 |
| 9   | GE Hitachi Nuclear Energy, “TRACG Application for ESBWR Stability Analysis,” NEDO-33083 Supplement 1-A, Revision 2, September 2010.  | ESBWR, 安定性  | TRACG Ver.4 |
| 10  | GE Hitachi Nuclear Energy, “TRACG Application for ESBWR,” NEDO-33083-A, Revision 1, September 2010.  | ESBWR, LOCA                                       | TRACG Ver.4 |
|     | 上記 LTR の審査で参照・評価された LTR  |   |             |
| 11  | GE Hitachi Nuclear Energy, “TRACG MODEL DESCRIPTION,” NEDO-32176, Revision 4, January 2008.  |   | TRACG Ver.4 |
| 12  | GE Nuclear Energy, “TRACG Qualification,” NEDO-32177, Revision 3, August 2007.   |   | TRACG Ver.4 |

表 2.1-2 TRACG コードの妥当性確認実績(個別効果試験, 機器性能評価試験)

| 試験項目      |                            |                             |
|-----------|----------------------------|-----------------------------|
| 個別効果試験    | ボイド率                       | Frigg of -64 試験             |
|           |                            | Christensen サブクールボイド試験      |
|           |                            | Wilson 及び Bartolomei 気泡上昇試験 |
|           |                            | EBWR 試験                     |
|           |                            | PSTF レベルスウェル試験              |
|           |                            | 東芝低圧ボイド試験                   |
|           |                            | OntarioHydro ボイド試験          |
|           |                            | CISE 水密度試験                  |
|           | 熱伝達                        | THTF 膜沸騰試験                  |
|           |                            | 炉心スプレイ熱伝達(CSHT)             |
| 対向流制限     | CSHT 試験                    |                             |
| 臨界流       | Marviken 臨界流試験             |                             |
|           | PSTF 臨界流試験                 |                             |
|           | Edwards ブローダウン             |                             |
| 圧力降下      | ATLAS での圧力降下試験             |                             |
| 限界出力      | 流動振動試験                     |                             |
|           | 加圧事象及び ABWR 再循環ポンプ全台トリップ試験 |                             |
| 自然循環及び安定性 | FRIGG 試験                   |                             |
| 反応度投入     | SPERTIII 試験                |                             |
| 機器性能評価試験  | ジェットポンプ性能                  | INEL 1/6 スケールのジェットポンプデータ    |
|           |                            | BWR4 実規模 1 本ノズルジェットポンプデータ   |
|           |                            | BWR5 実規模 5 本ノズルジェットポンプデータ   |
|           | 気水分離器                      | 実規模 2 段/3 段気水分離器データ         |
| 上部プレナム効果  | SSTF 試験                    |                             |
| 炉心スプレイ分布  | SSTF 試験                    |                             |

表 2.1-3 TRACG コードの妥当性確認実績(総合効果試験, BWR プラント試験)

|                    | 試 験 項 目                   |
|--------------------|---------------------------|
| 総合効果試験             | TLTA 試験                   |
|                    | FIST 試験                   |
|                    | SSTF 試験                   |
|                    | ROSA-III 試験               |
|                    | FIX-II 試験                 |
|                    | GIST 試験                   |
| BWR<br>プラント<br>試験  | PEACH BOTTOM タービントリップ試験   |
|                    | HATCH 2台ポンプトリップ試験         |
|                    | HATCH 主蒸気隔離弁の閉止試験         |
|                    | LASALLE 不安定事象             |
|                    | LEIBSTADT 安定性試験           |
|                    | NINE MILE POINT 不安定事象     |
|                    | PEACH BOTTOM 安定性試験        |
|                    | NINE MILE POINT ポンプ流量増加試験 |
| LEIBSTADT 給水流量喪失試験 |                           |

## 2.2 解析モデル

この章では、BWR の原子炉内で生じる過渡変化において、過渡時のスクラム失敗事象 (ATWS) を対象とした重要な物理現象の評価に必要な基礎方程式及び解析モデルについて説明する。

### 2.2.1 モジュール構造

TRACG は物理領域を主な単位としたモジュール構造を有し、モジュールを組み合わせることによる柔軟な形状模擬能力を持っている。このために、TRACG には、モジュール化した基本的な熱水力コンポーネント、例えばベッセル、チャンネル、パイプ、T 字管及び弁などがある。また、これらのコンポーネントを活用した気水分離器、ジェットポンプ及びポンプなどの炉内機器用のコンポーネントも用意されている。これらのコンポーネントは、システム模擬に当たっての構成要素として使用され、互いを組み合わせて接続する。これにより、BWR プラント又は試験体系のように、物理領域の内部で種々の熱流動現象が生起し、領域間の接続を通してそれらが輸送されるシステムを構成する。また、炉心においては、3 次元中性子動特性モデルによる解析機能も有しており、BWR プラントの現実的な解析が可能となっている。

一例を図 2.2-1 に示す。この図では、BWR5 の圧力容器を TRACG コンポーネントで模擬している。コンポーネント群は流路又は熱伝達経路を通して互いに結合することができる。また、TRACG には、複数の制御ブロックから構成されるモジュール化された制御系システムがある。制御ブロックは、互い同士又は熱水力コンポーネントと結合して BWR の水位制御系のような複雑な制御系を構成できる。

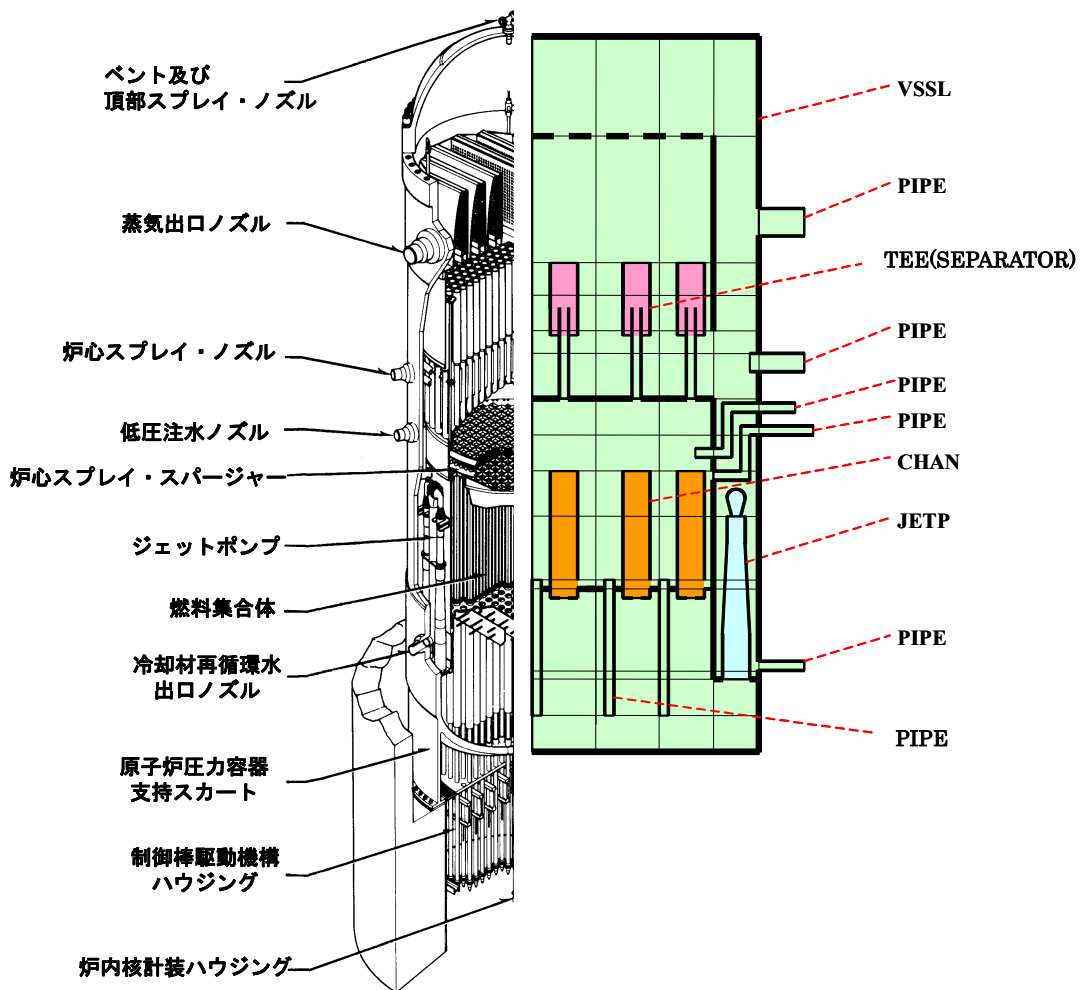


図 2.2-1 TRACG による BWR5 の模擬

TRACG は次に示すような熱水力コンポーネントを内蔵している。

- PIPE** パイプ (PIPE) コンポーネントは、TRACG 中で最も簡単なコンポーネントであり、管路中の流れに対する 1 次元熱水力モデル、及び管路壁における径方向熱伝導モデルを有している。
- PUMP** ポンプ (PUMP) コンポーネントは、コンポーネント中のセル境界の一つにポンプモデルが含まれる点を除けば、パイプコンポーネントに類似している。ポンプモデルは、ポンプ速度及び流れに対しポンプが与える揚程を計算する。
- VLVE** バルブ (VLVE) コンポーネントは、セル境界の一つの流路面積が弁の開閉を模擬するよう変化できる点を除けば、パイプコンポーネントに類似している。

**TEE** T字配管（TEE）コンポーネントは、T字配管又はY字配管を構成するため、互いに連結した二つのパイプコンポーネントからなる。

気水分離器は、T字配管コンポーネントのオプションの一つである。1次分岐部はBWR気水分離器のスタンドパイプ及び胴部を構成する。一方、2次分岐部は液の排水流路を模擬する。気水分離器オプションが選択された場合、当該コンポーネント中の蒸気と液との分離を模擬するための特別なモデルが使用される。

**JETP** ジェットポンプ（JETP）コンポーネントは、駆動流と吸込み流との相互作用及び混合を模擬するための特別なモデルを含む点を除けば、T字配管コンポーネントに類似している。

**CHAN** チャンネル（CHAN）コンポーネントは、T字配管コンポーネントに基づき、燃料棒の模擬機能を有する。1次分岐部は加熱チャンネルを模擬し、燃料棒を含む。2次分岐部は、BWR燃料チャンネル下部からの漏洩流路を模擬する。また、オプションの一つとして、内部分岐部で当該チャンネル内のウォータロッドを模擬できる。さらに、燃料棒内径方向熱伝導を解くための1次元モデルを有する。当該チャンネル中の発熱及び熱伝達に関する特別なモデルも有している。

**HEAT** 熱交換器（HEAT）は給水加熱器などを対象とする合成コンポーネントであり、その1次系側を構成するT字配管コンポーネントを基本要素とする。2次系側はパイプコンポーネントにより模擬される。熱交換器の1次側と2次側との間の熱伝達を模擬する特別なモデルを有する。熱交換器コンポーネントは、入力データ作成を容易にするために設けたものである。なお、熱交換器は、1次側及び2次側を模擬するよう入力データにより二つのコンポーネントを定義すれば、両者のセル間の熱伝達結合を用いて構成することもできる。

**VSSL** ベッセル（VSSL）コンポーネントは、TRACGにおける唯一の多次元コンポーネントである。2次元直交座標系、並びに2次元及び3次元の円柱座標系にてノード分割を行うことができる。ベッセルコンポーネント中の多次元流れを取り扱うため、多次元熱水力モデルが使用される。また、構造物を模擬する熱平板をベッセルコンポーネント中の種々の位置に組み込むことができる。例えば、集中定数化熱平板モデルについてはベッセルコンポーネント中のすべてのセル内に、1次元熱平板モデルについては軸方向又は半径方向に隣接するセル間境界面上に設置することができる。

TRACG中のすべてのコンポーネントは、同一の基本モデルを利用する。すなわち、すべての1次元コンポーネントが使用する共通の1次元熱水力モデルがある。多次元熱水力モデルはベッセルコンポーネントのみで使用されるが、このモデルは、1次元に縮約すると1次



元モデルと同一になる。また、すべての1次元コンポーネント中の壁面熱伝達、及びベッセルコンポーネント中の径方向ヒートスラブモデルで、一つの共通な熱伝導モデルを使用する。ベッセルコンポーネント内で軸方向ヒートスラブに対し使用する1次元熱伝導モデルも、離散化方法を除けば同様である。最後になるが、TRACG中には、ただ一組のせん断力及び熱伝達に対する構成式群があり、すべてのコンポーネントでこれを使用している。

## 2.2.2 基礎方程式とモデルの概要

ここでは、重要現象を評価するために必要となる解析モデルで、特に重要である基礎方程式、物理モデル又は構成式について説明する。

### 2.2.2.1 流体場の方程式

BWRの原子炉内で生じる過渡変化は、冷却水及び蒸気を流体成分とする二相流の下で生じる現象であるため、気液二相流からなる流体場を解く必要がある。また、運転時の異常な過渡変化及びスクラム失敗事象(ATWS)では、特に炉心中での重要現象がサブクール状態を含む熱的非平衡及び沸騰系であるため、主に界面せん断力に規定される気液間相対速度が位置によって大きく変化する非均質系を対象とし、さらに過渡変化の時定数に沿って状態が変化して行くため、これに追従できる流体場の方程式が必要とされる。

このような適用対象に対して適合する流体場の方程式には、2流体場に対する保存式が適切であることが知られており、対象とする質量、エネルギー及び運動量にかかわる物理量の輸送量を決定するに際し、二相流2流体場の6個の方程式を解くことになる。TRACGは、このような場の保存式に基づいて作成された解析コードである。

TRACGでは、このような定式化により非平衡、非均質な二相流を直接取り扱うことができ、熱的平衡性及び相速度に先験的な仮定を導入しない定式化が可能となる。ただし、BWRの過渡及び事故に適用するに当たって問題とならない範囲で、場の保存式を簡略化する。例えば運動量保存式において、圧力に関し気相及び液相の圧力を等しく置く1圧力モデルを導入し、また、気液間の質量輸送に伴って生じる気液界面力を界面せん断力に対して無視する。さらにエネルギー保存式において、位置エネルギー、及び変動速度の平均化の過程で生じる変動エネルギー項を無視する。

空間次元に関しては、原子炉圧力容器を除くと1次元的な取扱いで十分であり、原子炉圧力容器のみ唯一3次元的な取扱いが必要となる。時間解法については完全陰解法の使用を推奨しているが、数値粘性による解析解の忠実度低下を抑制する観点から、オプションとして半陰解法を用いることもできる。

気相質量保存式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_v) = -\nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{v}_v) + \Gamma_g \quad (2.2-1)$$

液相質量保存式：

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\alpha)\rho_l] = -\nabla \cdot [(1-\alpha)\rho_l \vec{v}_l] - \Gamma_g \quad (2.2-2)$$

気相運動量保存式：

$$\alpha\rho_v \frac{\partial \vec{v}_v}{\partial t} + \alpha\rho_v \vec{v}_v \cdot \nabla \vec{v}_v = -\alpha\nabla P - \vec{F}_{wv} + \alpha\rho_v \vec{g} - \vec{f}_{lv} - \vec{f}_{VM} \quad (2.2-3)$$

液相運動量保存式：

$$(1-\alpha)\rho_l \frac{\partial \vec{v}_l}{\partial t} + (1-\alpha)\rho_l \vec{v}_l \cdot \nabla \vec{v}_l = -(1-\alpha)\nabla P - F_{wl} \\ + (1-\alpha)\rho_l \vec{g} + \vec{f}_{lv} + \vec{f}_{VM} \quad (2.2-4)$$

気相エネルギー保存式：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \alpha\rho_v \left( e_v + \frac{v_v^2}{2} \right) \right] + P \frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[ \alpha\rho_v \vec{v}_v \left( e_v + \frac{v_v^2}{2} \right) \right] \\ - \nabla \cdot (P\alpha \vec{v}_v) + q_{wv}''' + q_{iv}''' + \Gamma_g h_g \quad (2.2-5)$$

液相エネルギー保存式：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ (1-\alpha)\rho_l \left( e_l + \frac{v_l^2}{2} \right) \right] - P \frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[ (1-\alpha)\rho_l \vec{v}_l \left( e_l + \frac{v_l^2}{2} \right) \right] \\ - \nabla \cdot [P(1-\alpha)\vec{v}_l] + q_{wl}''' + q_{il}''' - \Gamma_g h_f \quad (2.2-6)$$

ここで

- $\alpha$  : ボイド率
- $\rho_v, \rho_l$  : 気相密度, 液相密度
- $v_v, v_l$  : 気相速度, 液相速度
- $\Gamma_g$  : 界面を通じた質量生成率
- $P$  : 圧力
- $F_{wv}, F_{wl}$  : 気相及び液相へ作用する壁面摩擦力の成分
- $g$  : 重力加速度
- $f_{lv}$  : 界面せん断力
- $f_{VM}$  : 仮想質量
- $e_v, e_l$  : 気相の内部エネルギー, 液相の内部エネルギー
- $q_{wv}, q_{wl}$  : 壁面から気相及び液相への熱流量

$q_{iv}$ ,  $q_{il}$  : 界面から気相及び液相への熱流量  
 $h_g$ ,  $h_f$  : 飽和蒸気の比エンタルピ, 飽和水の比エンタルピ  
 $t$  : 時間

### 2.2.2.2 構造物についての場の方程式

TRACG では、体系中の燃料棒及び他の構造物に対する場の方程式として、熱伝導方程式を解く。構造物には、1次元コンポーネントに対するパイプコンポーネント壁、並びにベッセルコンポーネントの外壁及びベッセルコンポーネント中の内部熱平板が含まれる。1次元コンポーネントの壁において、内壁からの熱伝達は当該コンポーネント中の流体に向かう。一方、外壁からの熱輸送は、他の任意コンポーネント中の流体に向かうことができる。ベッセルコンポーネント中の内部熱平板は、ベッセル中の一つのセル内部に完全に含まれるか、軸方向又は径方向に位置する二つのセル間でその境界上に配置される。

TRACG は直交座標系及び円柱座標系の1次元熱伝導モデルを用いており、燃料棒、二つのベッセル内径方向リングに接する二つの境界面をもつ2面ヒートスラブ、1次元コンポーネントの壁には円柱座標系を用いている。

直交座標系：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' \quad (2.2-7)$$

円柱座標系：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q''' \quad (2.2-8)$$

ここで

$\rho$  : 密度  
 $C_p$  : 定圧比熱  
 $T$  : 温度  
 $r, z$  : 径方向位置, 軸方向位置  
 $k$  : 熱伝導率  
 $q'''$  : 体積熱生成率

### 2.2.2.3 物理モデル又は構成式

二相流流動様式、サブクール沸騰、界面せん断力、界面熱伝達、界面積濃度、壁面摩擦、壁面熱伝達、臨界流、局所圧力損失、限界出力及びリウエットの物理モデル又は構成式については、旧バージョンである TRACG Ver.4 と同じであるため、ここでの説明は省略する<sup>[41]</sup>。物理モデル又は構成式は、米国において AOO、安定性及び ATWS 等へ適用されており、十分な実績を有している。

### 2.2.2.4 中性子動特性方程式

TRACG は、中性子エネルギー3 群、遅発中性子先行核 6 群の 3 次元の時間依存中性子拡散方程式を解く。中性子束及び遅発中性子先行核濃度は、減速材密度、燃料温度、ほう素濃度及び/又は制御棒の変化に応じて、あらゆる  $(i, j, k)$  ノードで時間について求められる。ただし、燃焼度及びキセノン濃度分布は、過渡期間中で一定を仮定する。

TRACG で使用する 3 次元中性子動特性モデルは、3 次元沸騰水型原子炉模擬計算コード AETNA<sup>[15],[17]</sup> と同一のモデルを組み込んでおり、炉心の過渡解析を目的として時間依存の多群拡散方程式を解く。空間解法には静特性解析と同じ解析的多項式拡散ノード法を用い、時間解法には完全陰解法後退差分スキームを標準解法として周波数変換法とともに用いている。この時間解法は、無条件安定で大きな時間ステップを可能とする。過渡時の拡散方程式を解く際に時間ステップを比較的大きく取れるようにするため、遅発中性子先行核濃度は時間ステップ内で核分裂源が線形的に変化することを仮定して解析的に解かれる。非線形反復におけるノード法結合補正係数の更新ステップを大きくとることで更なる計算時間短縮が実現できる。

3 次元時間依存中性子拡散方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_g^i} \frac{\partial}{\partial t} \phi_g^i(x, y, z, t) = & \nabla \cdot D_g^i(x, y, z, t) \nabla \phi_g^i(x, y, z, t) - \Sigma_{rg}^i(x, y, z, t) \phi_g^i(x, y, z, t) \\ & + \frac{\chi_g^p}{k_{eff}^p} (1 - \beta^i) \sum_{g'} \nu \Sigma_{fg'}^i(x, y, z, t) \phi_{g'}^i(x, y, z, t) + \sum_{g' < g} \Sigma_{sg' \rightarrow g}^i(x, y, z, t) \phi_{g'}^i(x, y, z, t) \quad (2.2-9) \\ & + \sum_{m=1}^6 \chi_g^m \lambda_m^i C_m^i(x, y, z, t) + \chi_g^{ext} q_{ext}^i(x, y, z, t) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} C_m^i(x, y, z, t) = \frac{\beta_m^i}{k_{eff}^i} \sum_{g'} \nu \Sigma_{fg'}^i(x, y, z, t) \phi_{g'}^i(x, y, z, t) - \lambda_m^i C_m^i(x, y, z, t) \quad (2.2-10)$$

ここで

- $D_g^i(x, y, z, t)$  : 時刻  $t$  におけるノード  $i$  の第  $g$  群拡散係数
- $\Sigma_{rg}^i(x, y, z, t)$  : 時刻  $t$  におけるノード  $i$  の第  $g$  群除去断面積
- $\Sigma_{fg}^i(x, y, z, t)$  : 時刻  $t$  におけるノード  $i$  の第  $g$  群核分裂断面積
- $\nu$  : 核分裂当たりの発生中性子数
- $\Sigma_{sg' \rightarrow g}^i(x, y, z, t)$  : 時刻  $t$  におけるノード  $i$  の第  $g'$  群から  $g$  群への散乱断面積
- $C_m^i(x, y, z, t)$  : 時刻  $t$  におけるノード  $i$  の第  $m$  群遅発中性子先行核濃度
- $\phi_g^i(x, y, z, t)$  : 時刻  $t$  におけるノード  $i$  の第  $g$  群中性子束
- $q_{ext}^i(x, y, z, t)$  : 時刻  $t$  におけるノード  $i$  の第  $g$  群外部中性子源
- $v_g^i$  : 時刻  $t$  におけるノード  $i$  の第  $g$  群中性子速度
- $\chi_g^p$  : 第  $g$  群即発中性子核分裂スペクトル
- $k_{eff}$  : 初期定常時の実効増倍率

- $\beta_m^i$  : ノード  $i$  の第  $m$  群遅発中性子生成率 ( $\beta^i = \sum_{m=1}^6 \beta_m^i$ )  
 $\lambda_g^m$  : 第  $m$  群遅発中性子核分裂スペクトル  
 $\lambda_m^i$  : ノード  $i$  の第  $m$  群遅発中性子先行核崩壊定数  
 $\lambda_g^{ext}$  : 第  $g$  群外部中性子源核分裂スペクトル

中性子動特性モデルでは、炉心中の出力分布を直交 3 次元(x-y-z)系で計算するが、その際に燃料温度及び冷却材密度の変化、並びに制御棒移動を考慮する。チャンネル熱水力及び燃料熱伝達にかかわるモデルでは、炉心を並行多チャンネルとして模擬し、それぞれのチャンネルが複数の燃料集合体をもつように関係付ける。また、状態量は各チャンネルの各軸方向ノードで解く。チャンネル群の水力的な境界条件は、解析コード中の炉心外モデルにて定める。各コンポーネントは、図 2.2-2 に示したデータを通じて結合される。

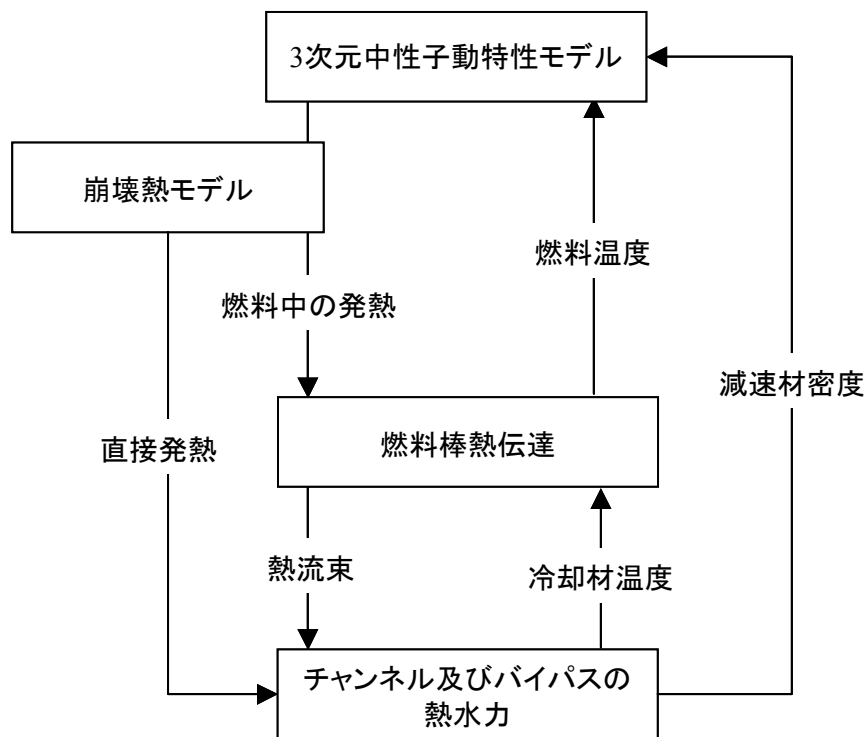


図 2.2-2 TRACG のモデル間でのデータの流れ

中性子動特性モデルにおけるノード分割は、径方向には1燃料集合体当たり1ノード、軸方向には24又は25ノードをとる。しかし、熱水力及び熱伝達に対するチャンネル、つまりTRACG中のチャンネルコンポーネントに対するノード分割は、水平の(x-y)方向で、中性子動特性モデルのそれと比較して粗い。すなわち、熱水力的及び幾何形状的に類似した状態量をグループにまとめ平均化して一つのコンポーネントとしている。このため、チャンネルコンポーネント数は燃料集合体数より少なくなる。中性子動特性モデルからチャンネルモデルへのデータの流れは平均化を通じてなされる。また、熱水力から中性子動特性モデルへのデータの流れは図 2.2-2 に示したように減速材密度及び燃料温度である。

TRACGの3次元中性子動特性モデルにおける計算では、減速材密度及び燃料温度の変化をチャンネルモデルが与える。バイパス水密度はベッセルコンポーネントから得られるが、チャンネル及びウォータロッドの水密度を体積で重み付けして組み合わせ、ノード平均の相対水密度を与える。

TRACGのほう素モデルでは、ほう素の微視的断面積及び数密度を用いて吸収断面積を補正することによりボロン反応度を考慮し、ほう素の混合については質量保存式を取り扱うことにより、液相の流れ場とともに移動する溶質として考慮している。

TRACGでは、核モデル及び熱水力モデルで原子炉压力容器内を3次元的に取り扱い、熱水力モデルでは二相流2流体場の6個の方程式により、質量、運動量及びエネルギーについて液相及び気相を個別に取り扱うことができるので、核熱結合による密度波振動から生じる中性子束振動を評価することが可能である。

### 3 解析結果の例示

この章では、ATWS を対象とした評価で重要な物理現象を考慮に入れて、TRACG Ver.5 が前バージョンの TRACG Ver.4 から改良された核動特性モデルの確認、REDY/SCAT で取り扱うことができない振動現象の評価、国内の BWR 及び ABWR の評価、並びに ATWS において特徴的な事象である SLC の評価に関する観点で、参考解析結果を例示する。

### 3.1 PEACH BOTTOM タービントリップ試験

1977年4月、Peach Bottom 原子力発電所2号機において、特別に計装された3件のタービントリップバイパス弁作動試験が、低出力レベルで実施された<sup>[37]</sup>。試験は、過渡解析コードのための妥当性確認データを取得するために設計されており、米国電力中央研究所が後援する中で、GEH 及びフィラデルフィア電力会社により実施された。試験条件は、モデルの妥当性確認用データの量を最大化しつつ、許容可能な設計値の範囲内の燃料の運転を確実にするように選定された。試験の主目的は、急速加圧事象時における主蒸気配管の動力学的效果についての高品質の試験データを取得することにあった。試験は、中性子束高でスクラムが開始するよう直接スクラム(タービン止め弁開度スイッチにより開始されることになるスクラム)を無効化して実施された。原子炉の通常運転と異なるこの条件は、モデルと試験データとの間で有意な比較が行えるよう、中性子束を十分に大きく増加させるために必要であった。

#### 3.1.1 試験の説明

表 3.1-1 に、3件のタービントリップ試験の初期条件及びスクラム設定点を示す。試験の初期条件は、定格炉心流量近傍で一連の出力を増加させる形で選定された。2回目の試験に先立ってキセノン過渡現象のため、計画出力レベルの1%以内に出力を保持するのに、炉心流量を減少させることが必要となった。各々のタービントリップ試験はタービン止め弁(TSV)の急閉で開始され、TSV 閉によるスクラム信号をバイパスして中性子束スパイクが得られた。再循環ポンプのトリップはTT3を除いて防止された。中性子束が中性子束高スクラムのセットポイントに到達したとき、スクラムが生じ中性子束の減少が起こった。TSV 閉後すぐにタービンバイパス弁が開き始め、圧力容器からの蒸気インベントリの開放により圧力上昇が徐々に軽減された。

表 3.1-1 Peach Bottom タービントリップ試験の条件

| 条件  | 炉心出力  |        | 炉心流量   |        | 中性子束高スクラム設定 |
|-----|-------|--------|--------|--------|-------------|
|     | (MWt) | (定格比%) | (kg/s) | (定格比%) | (定格出力比%)    |
| 定格  | 3293  | 100    | 12,915 | 100    | —           |
| TT1 | 1562  | 47.4   | 12,764 | 98.8   | 85          |
| TT2 | 2030  | 61.6   | 10,445 | 80.9   | 95          |
| TT3 | 2275  | 69.1   | 12,839 | 99.4   | 77          |



### 3.1.2 解析モデル

Peach Bottom 2 号機のタービントリップ試験の TRACG 解析は、標準的なノード分割手法を使用して実施した<sup>[16]</sup>。試験が実施された時点で、炉心には 576 体の 7×7 及び 188 体の 8×8 燃料集合体が装荷されていた。炉心は上部及び／又は下部プレナムにおける熱水力的特徴の変化を模擬するために径方向に 3 つのリングに分割した。TRACG 計算では、燃料集合体を 8 個の CHAN コンポーネントで模擬した。燃料集合体のグループ分割を表 3.1-2 に示す。3 件の試験の模擬解析で燃料集合体のグループ分割は異なっている。各 CHAN コンポーネントでは、同じタイプ（すなわち 7×7 又は 8×8）、類似した出力、及び同様な径方向位置（TRACG VSSL コンポーネント中の同じリング）の一群の燃料集合体を模擬した。初期の定常状態は、燃料集合体核特性計算コード LANCR<sup>[33],[38]</sup>及び 3 次元沸騰水型原子炉模擬計算コード AETNA<sup>[15],[17]</sup>によってプラントのトラッキング計算により作成した<sup>[42]</sup>。TRACG の中性子束計算モデルは AETNA と同じである。このように、本解析は炉心設計コードを含むコードシステムとして行われており、より高品質な安全評価パラメータの評価を可能としている。

### 3.1.3 試験データとの比較

コードの妥当性確認の観点からすると、Peach Bottom タービントリップ試験での測定値と TRACG 解析結果との比較では、中性子束が最も重要な変数である。中性子束は過渡時の限界出力比及びその予測に必要なパラメータを決定する上で、また、炉心圧力の正確な計算、並びにドブプラ、スクラム及びボイド反応度フィードバック現象を正確に表す上で、第一に重要なパラメータである。

全中性子束について、測定値と計算値を 3 試験で比較して図 3.1-1 から図 3.1-3 に示すとともに、表 3.1-3 にまとめる。ここで、全中性子束は核分裂断面積を重みとして中性子束をエネルギーについて積分したものを意味しており、核分裂出力と同じである。

表 3.1-3 は、中性子束ピーク値について TRACG 計算値と試験の測定値とを比較している。中性子束の測定値は、文献[37]の図 6-7 から図 6-9 までの“炉心平均 LPRM 信号”をデジタル化して得た。中性子束ピークの計算値は、試験値に対して約  高い TT2 から約  高い TT1 までの範囲にある。3 試験に対し、TRACG は標準偏差約  で平均約  ピーク中性子束を過大評価する。

中性子束の時間積分値は、過渡時の限界出力比を正確に予測するための TRACG の能力を測るには、中性子束ピーク値よりもよい指標である。図 3.1-4 に数値的に積分した中性子束を時間に対しプロットして示す。すべての試験において MCPR は 1 秒前後で最小値となることから、計算値と測定値間の 1 秒前後の積分値に注目すると、TT1 では計算値が測定値と大変よく一致している。一方、TT2 及び TT3 では計算値が過大評価している。すべての試験において流量はほぼ一定に保たれ、着目する時間領域において同等であることから、核分裂出力積分値の評価が MCPR の評価に影響のある唯一の因子である。

Peach Bottom タービントリップ試験に対し、原子炉ドーム圧についての測定値と計算値の比較を図 3.1-5 から図 3.1-7 に示す。3 試験の全てに対し、過渡変化の全域にわたって、TRACG が原子炉ドーム圧を妥当な範囲で予測している。中性子束は炉心圧力増加に伴うボイドの消滅により増加する。信頼性のある安全評価パラメータの評価のために、事象開始から 1 秒後に MCPR が最小値に達することから、1 秒前までの圧力上昇の再現も重要である。初期の圧力上昇、最初及び引き続く圧力振動の大きさ及びタイミング、並びにドーム圧のピーク値を、いずれも妥当な範囲で予測している。圧力振動を正確に予測することは、蒸気配管内の動的応答の詳細を、TRACG の蒸気配管モデルが正しく模擬することを示している。ドーム圧ピーク値を妥当な範囲で予測することで、バイパス弁特性について、TRACG モデルの妥当性が確認される。

#### 3.1.4 結論

Peach Bottom 2 号機での 3 件のタービントリップ試験において、原子炉の加圧及び中性子束の応答を TRACG の解析結果と比較し、試験結果を十分に再現できることを確認した。また、MCPR の計算にとって重要なパラメータである中性子束の時間積分量が、適切に、又は幾分か保守的に予測されることを確認した。これらの結果より、運転中の BWR の過渡的な挙動を予測するために TRACG を使用することは妥当であることが示された。

表 3.1-2 Peach Bottom タービントリップ試験 TRACG 解析用燃料集合体グループ分割

|  |
|--|
|  |
|--|

表 3.1-3 Peach Bottom タービントリップ試験における中性子束の比較

|  |
|--|
|  |
|--|

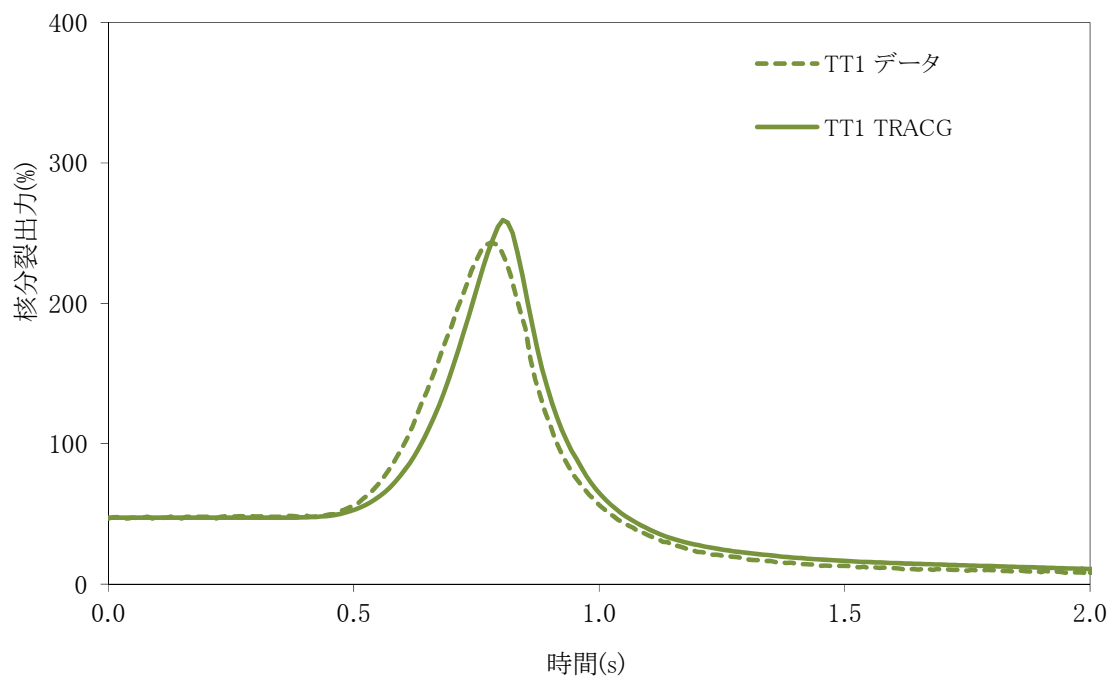


図 3.1-1 Peach Bottom タービントリップ試験 1 に対する核分裂出力応答

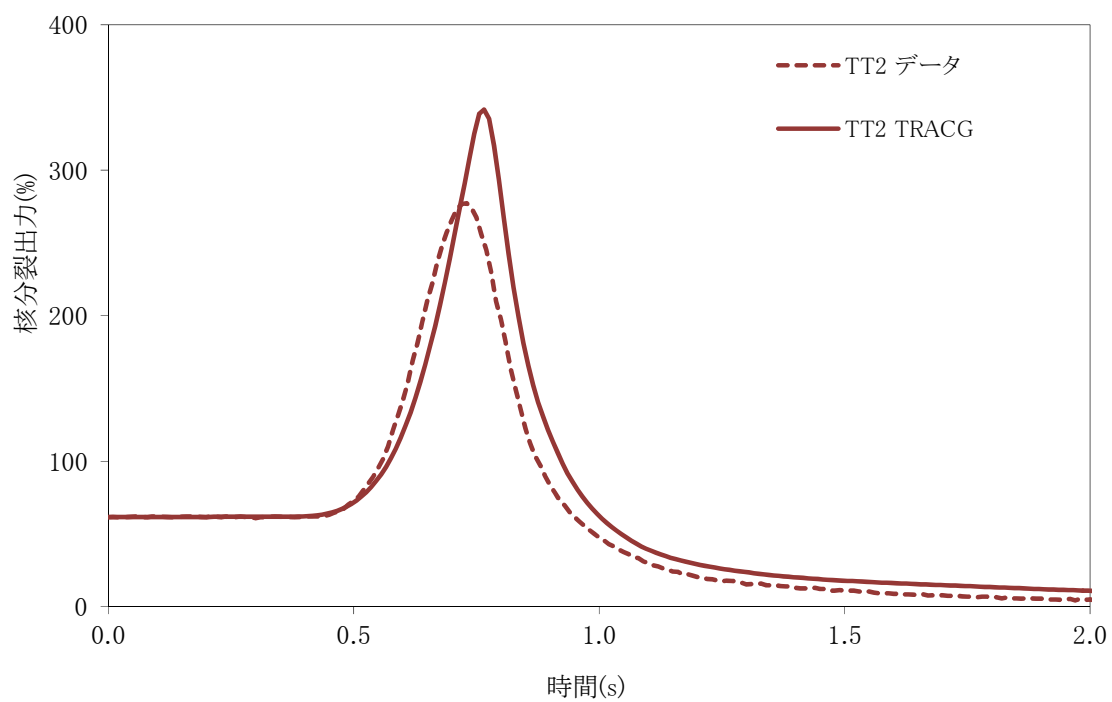


図 3.1-2 Peach Bottom タービントリップ試験 2 に対する核分裂出力応答

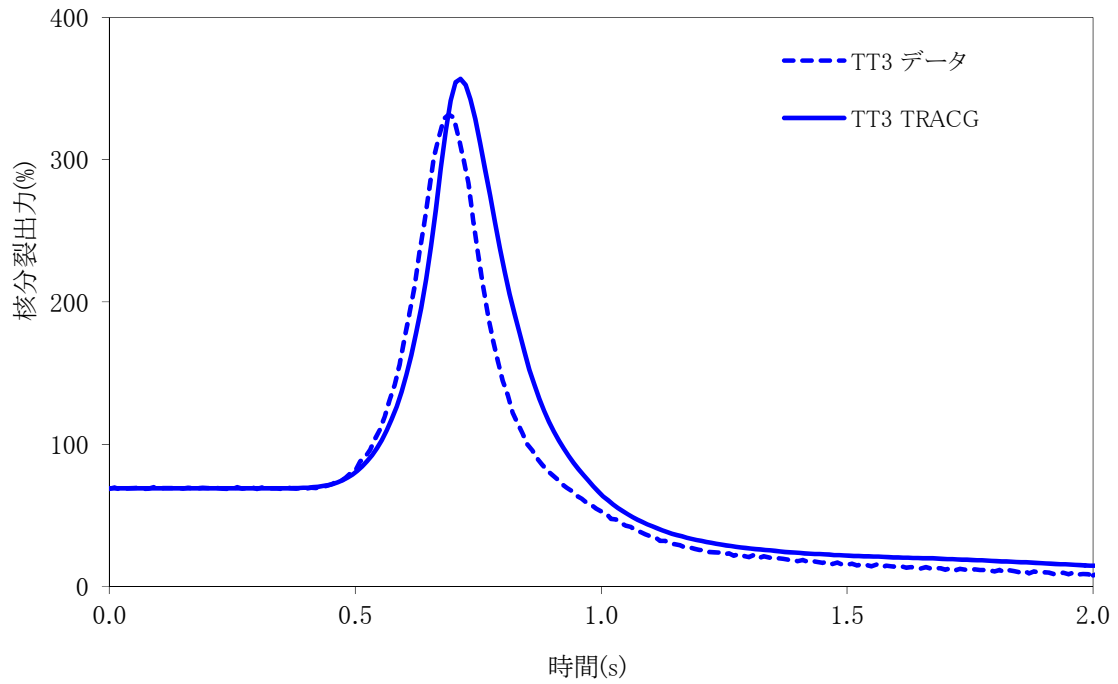


図 3.1-3 Peach Bottom タービントリップ試験 3 に対する核分裂出力応答

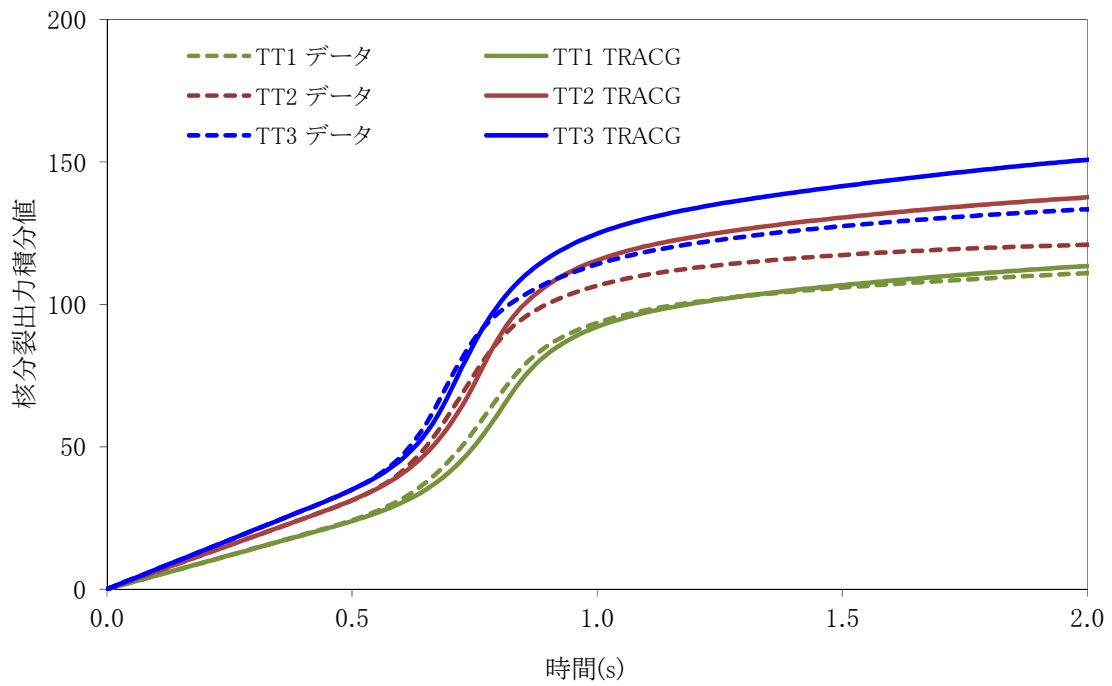


図 3.1-4 Peach Bottom タービントリップ試験 1, 2 及び 3 に対する核分裂出力の積分量の応答

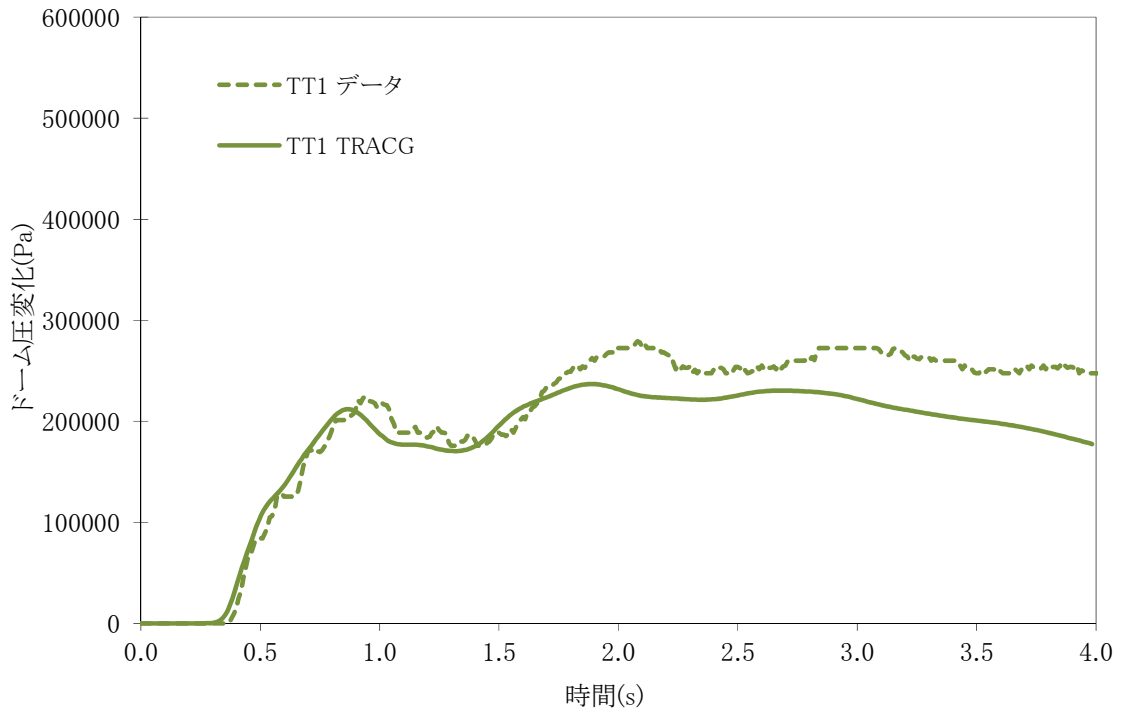


図 3.1-5 Peach Bottom タービントリップ試験 1 に対するドーム圧変化

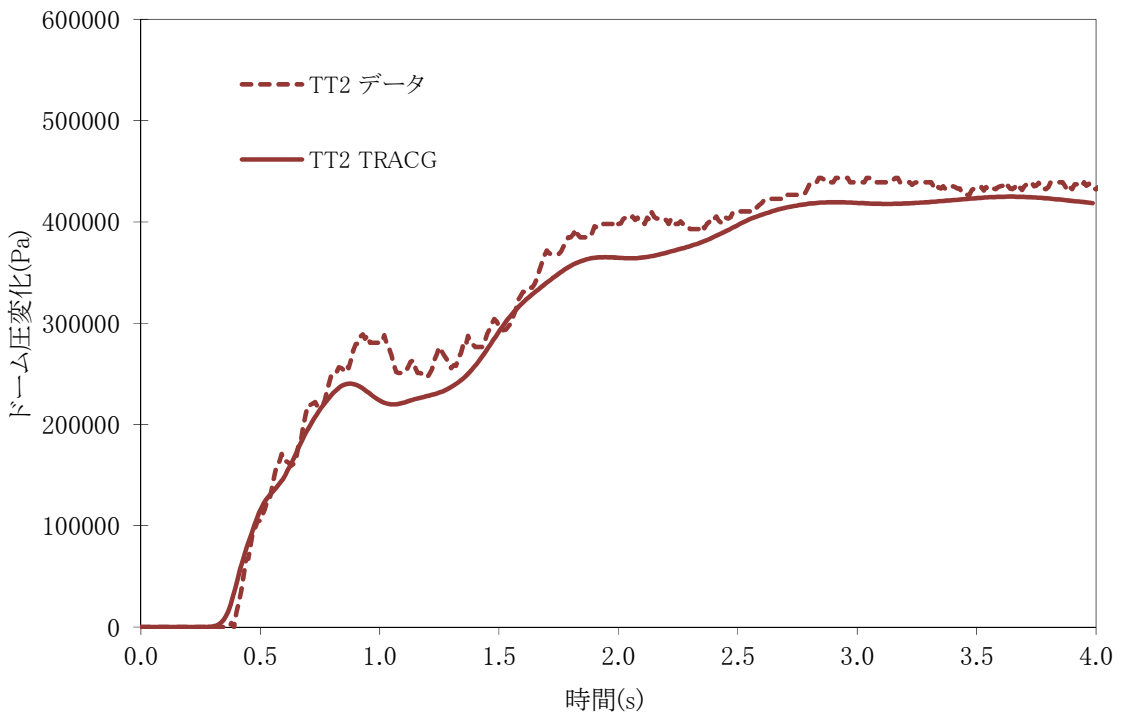


図 3.1-6 Peach Bottom タービントリップ試験 2 に対するドーム圧変化

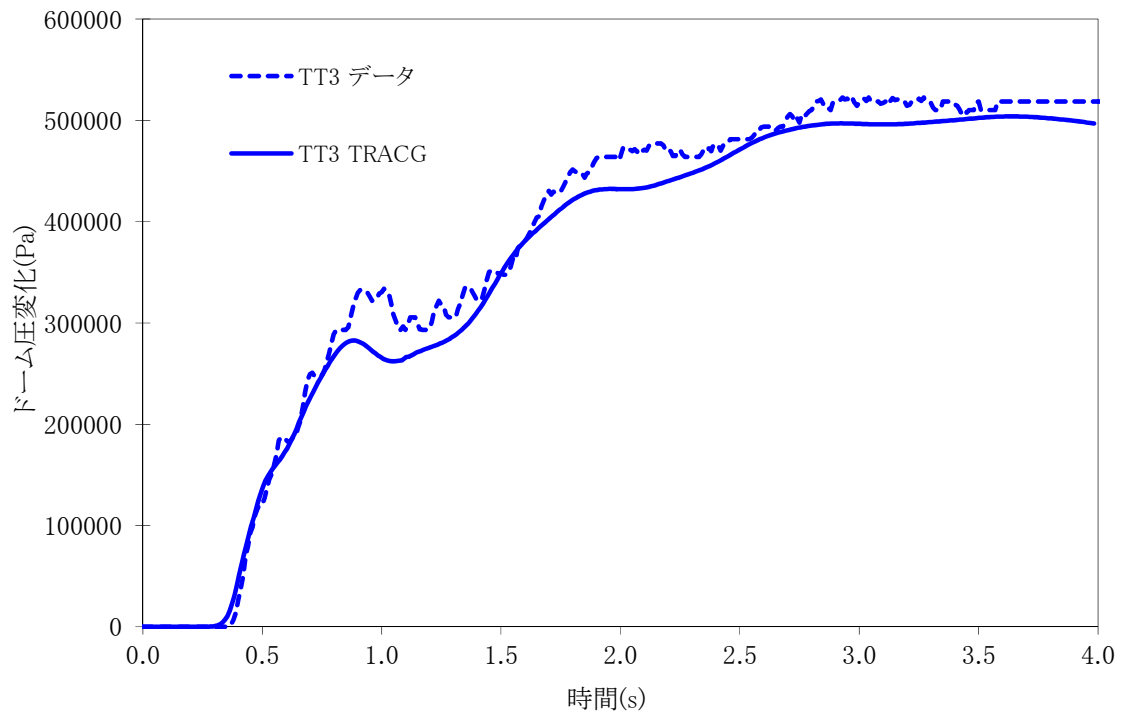


図 3.1-7 Peach Bottom タービントリップ試験 3 に対するドーム圧変化

### 3.2 LASALLE 不安定事象

1988年3月に米国 LaSalle-2 号機で発生した不安定事象<sup>[39]</sup>からは、炉心一体での振動（corewide oscillation）に関する安定性解析、及び、プラント過渡応答解析の妥当性を確認するために有効なデータが得られている。表 3.2-1 に事象発生時のプラント条件が示されている。原子炉は 84%定格出力/76%定格流量で運転されていた。本事象は、再循環ポンプが両系トリップしたことで流量が減少し、自然循環状態となったときに発生した。流量の減少により炉心平均出力は 40%近くまで減少し、この影響による主蒸気管流量の減少は給水加熱の減少に繋がった。給水加熱の減少により、炉心平均出力は 45%まで上昇すると同時に、炉心下部での出力ピーキングは増大した。炉心全体での振動は、ポンプトリップから約 5 分後に検知され、APRM 高スクラムが約 7 分後（事象発生から 410 秒）に発生した。

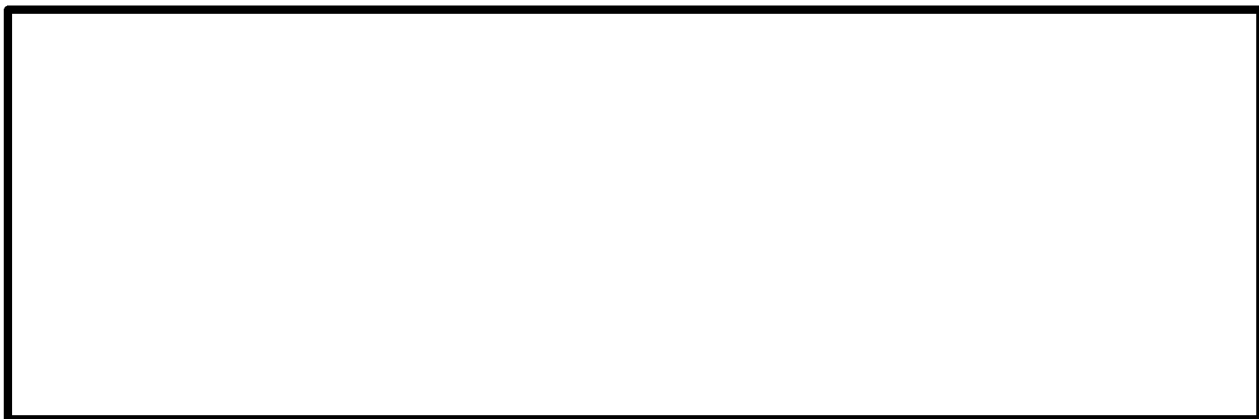
本事象に関する TRACG 模擬性能の評価に利用されたデータは、次の 2 つに分類される。第 1 の分類は、事象開始後の 6 分間に亘り 1 分毎に記録された主蒸気管流量、炉心流量、ドーム圧力、炉水位、給水流量、給水温度である。第 2 の分類は、スクラム直前の 1 分間、連続的に記録された出力、炉心流量、炉水位、給水流量である。給水制御弁（actuator valve）が故障していたことが事象発生後に確認されている。これは、事象発生中に観測された給水流量の 35 秒間の大きな揺れと整合しているばかりでなく、原子炉スクラム直前の 1 分間に記録された出力、炉心流量、炉水位の変動とも対応している。

#### 3.2.1 TRACG 解析モデル

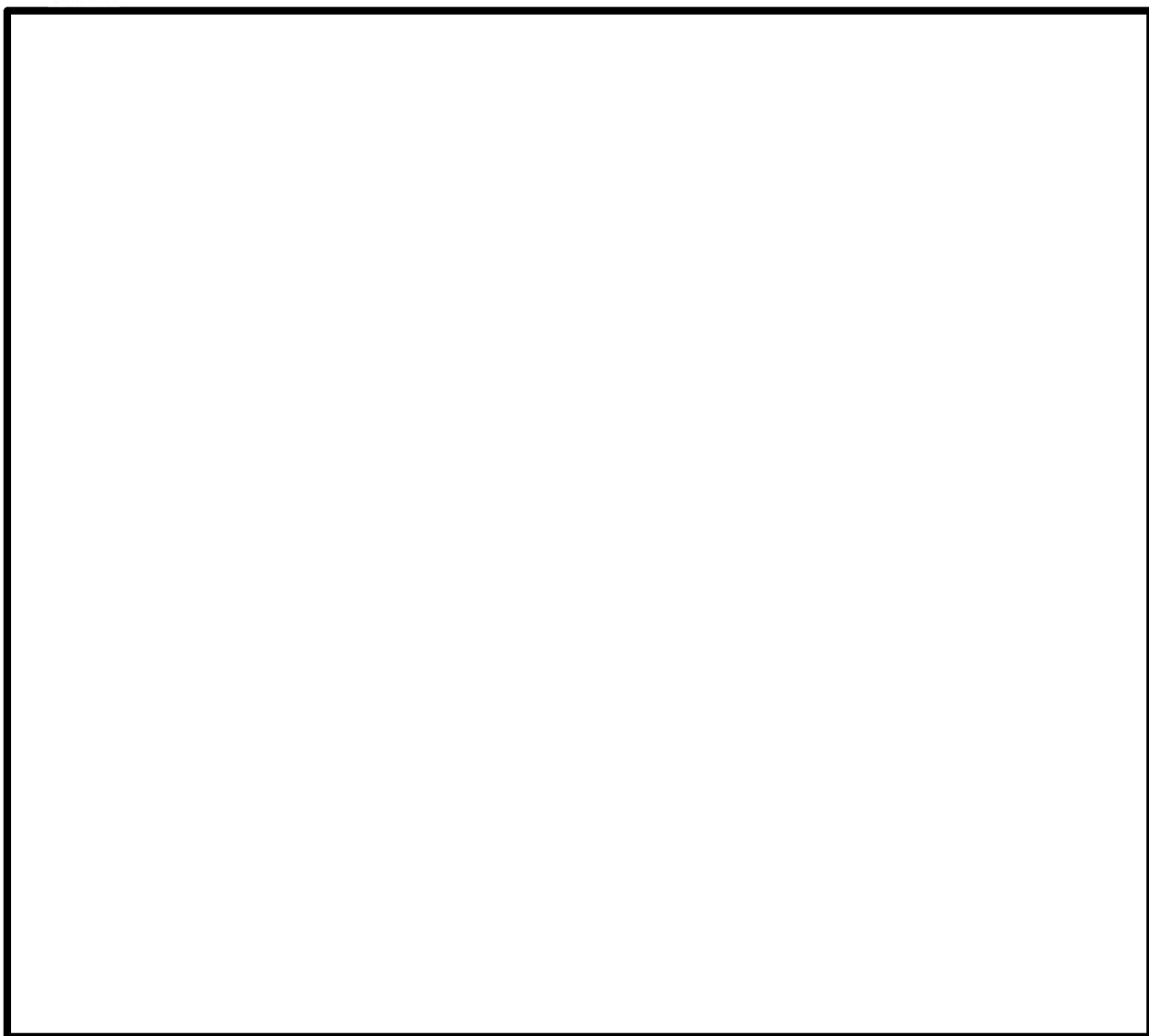
BWR5 である LaSalle-2 不安定事象についての TRACG 解析は、標準的なノード分割（燃料有効部を軸方向 25 ノードに均等分割する）を修正することにより行われた。安定性への適用であることを考慮に入れ、燃料チャンネルのノード分割は、下部加熱 4 ノードをそれぞれ 4 つのサブノードに分割し、それより下流側 6 ノードをそれぞれ 2 つのサブノードに分割する（燃料有効部を軸方向 43 ノードに非均等分割する：ノード高さが上流側から下流側にかけて 3 段階で大きくなる）ように修正された。この修正により、沸騰境界における密度波についての解析精度が改善された。図 3.2-1 に本事象の模擬に用いられたチャンネルグルーピングが示されている。炉心内の 764 体の燃料集合体は、それぞれが 8 つの平均的な水力特性を有するチャンネル（CHAN コンポーネント）に振り分けられた。燃料集合体のグループ化は、集合体タイプ及び出力ピーキングに基づいて行われた。実炉での 3 次元出力分布の変化を推定することを目的として、APRM と LPRM の応答模擬が TRACG 制御系モデルを利用することにより行われた。







### 3.2.2 試験データとの比較



### 3.2.3 結果の考察





#### 3.2.4 結論

LaSalle 不安定事象についての TRACG 模擬計算により，TRACG は REDY/SCAT で取り扱うことができない炉心一体振動を再現することができた。

表 3.2-1 LaSalle2 不安定事象の初期条件

| 出力<br>(MW) | 炉心流量<br>(kg/s) | ドーム圧力<br>(MPa) | 給水温度<br>(K) | 給水流量<br>(kg/s) |
|------------|----------------|----------------|-------------|----------------|
| 2801       | 10332          | 6.878          | 478         | 1460           |

表 3.2-2 APRM の比較

|  |
|--|
|  |
|--|

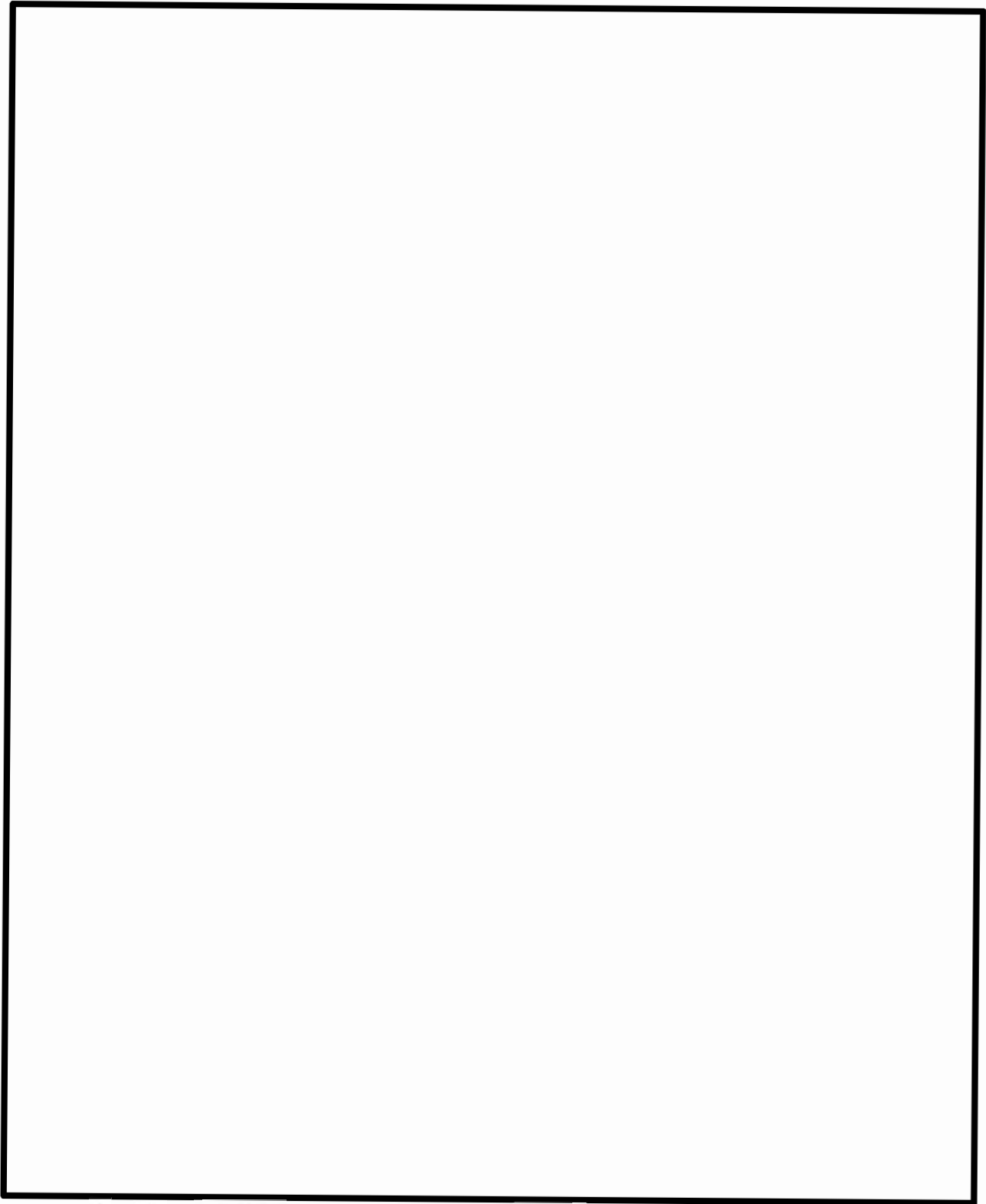


図 3.2-1 LaSalle-2 不安定事象模擬のための TRACG によるチャンネルグループピング

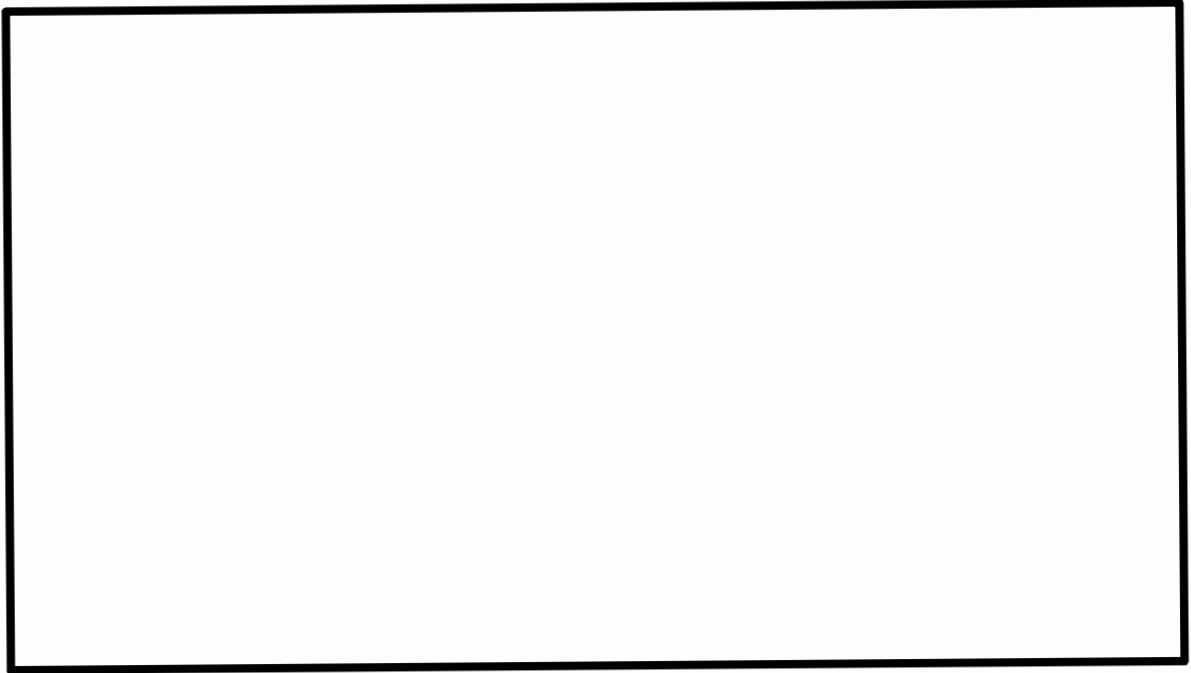


図 3.2-2 TRACGによる炉心出力の時間変化

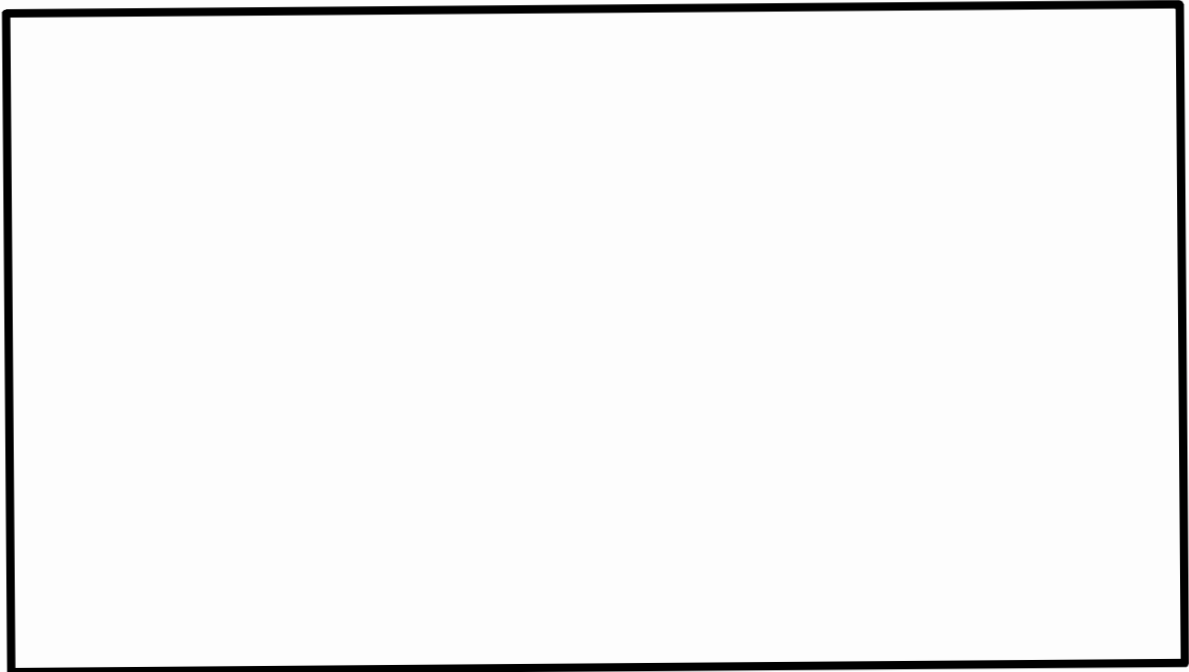


図 3.2-3 TRACGによるAPRMの時間変化

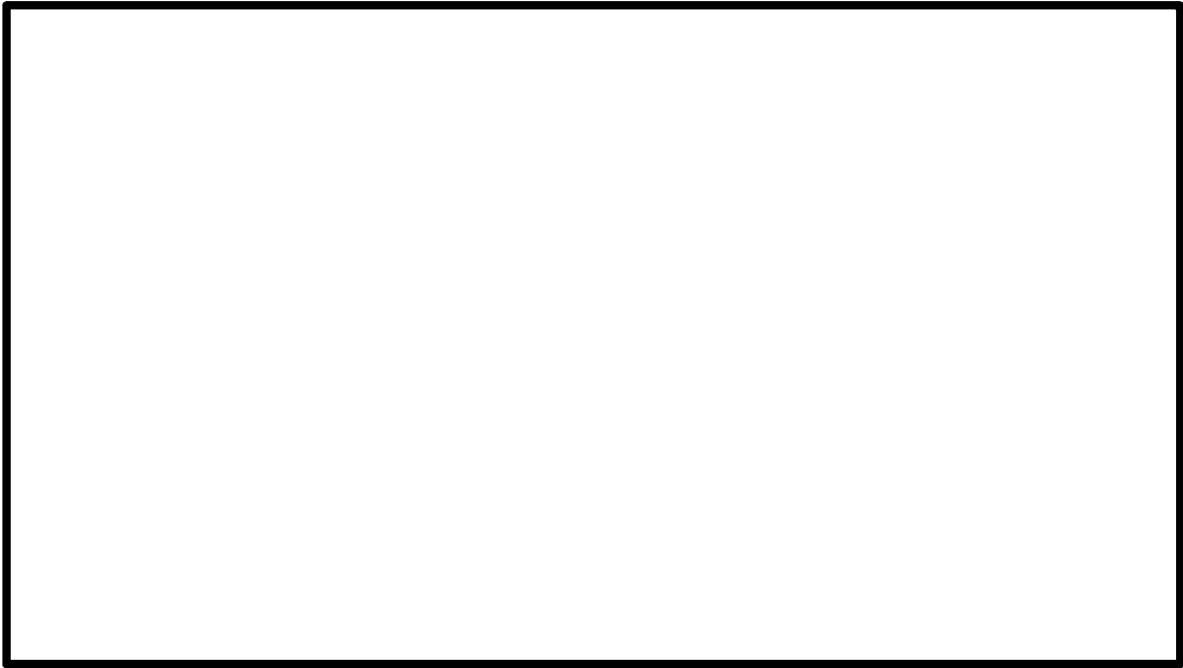


図 3.2-4 TRACG による炉心流量時間変化とプラントデータとの比較



図 3.2-5 TRACG によるドーム圧力時間変化とプラントデータとの比較



図 3.2-6 TRACG による給水温度時間変化とプラントデータとの比較



図 3.2-7 TRACG による給水流量時間変化とプラントデータとの比較

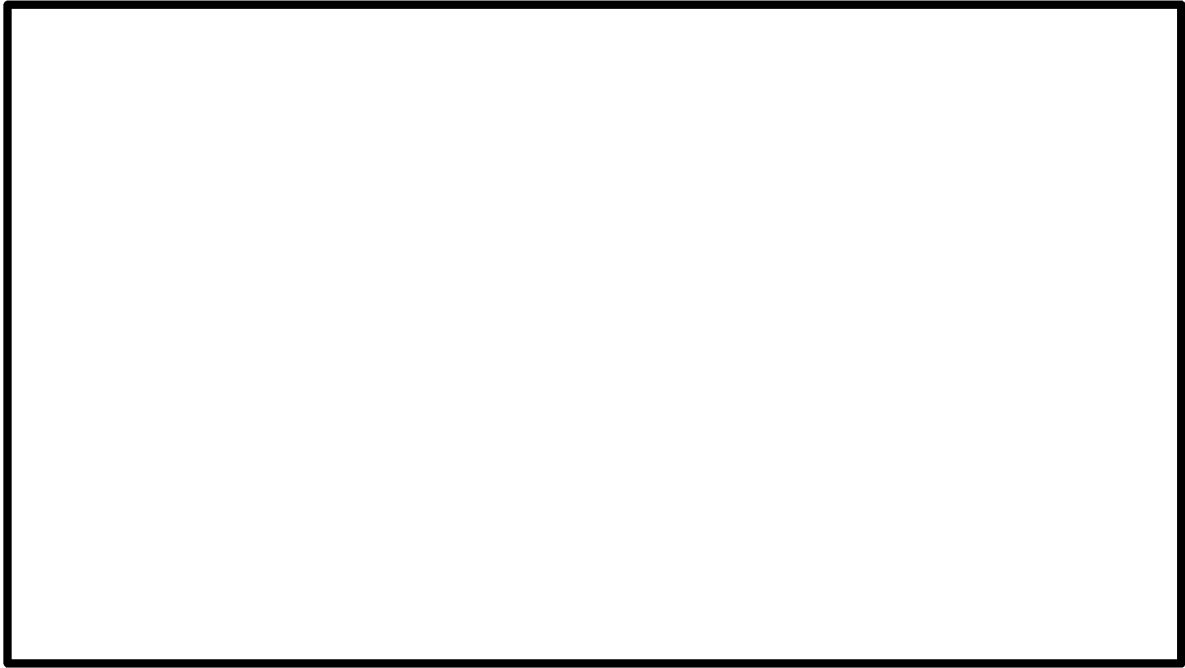


図 3.2-8 TRACG による主蒸気管流量時間変化とプラントデータとの比較



図 3.2-9 TRACG による炉水位時間変化とプラントデータとの比較



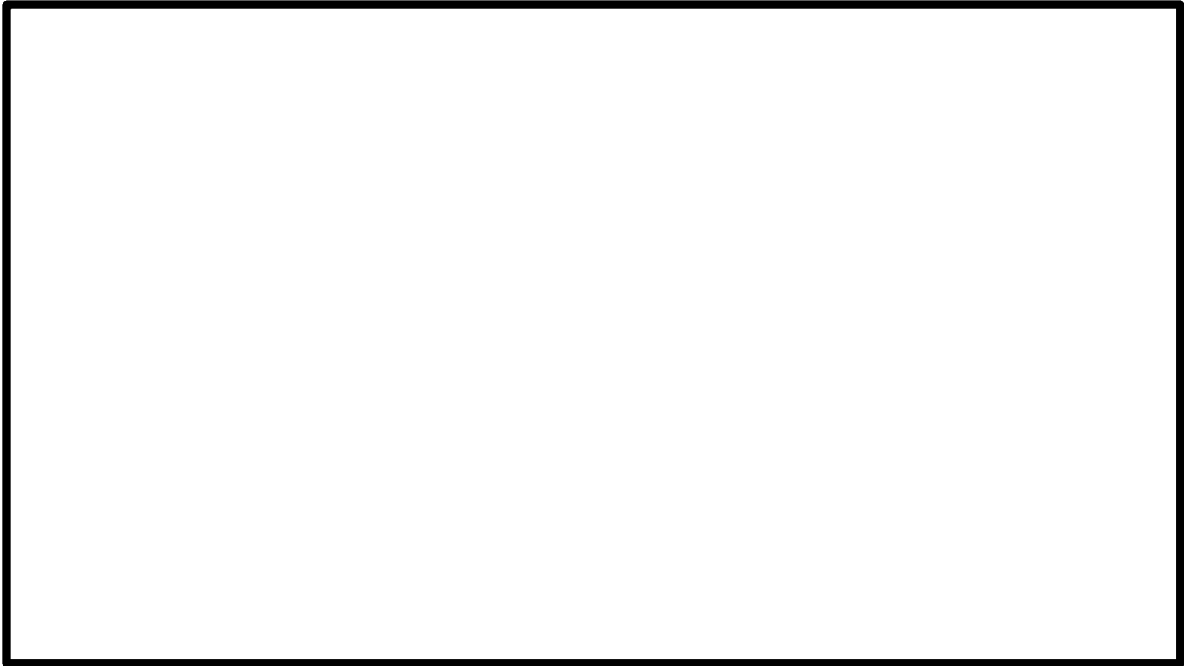


図 3.2-10 TRACG による APRM とプラントデータとの詳細比較

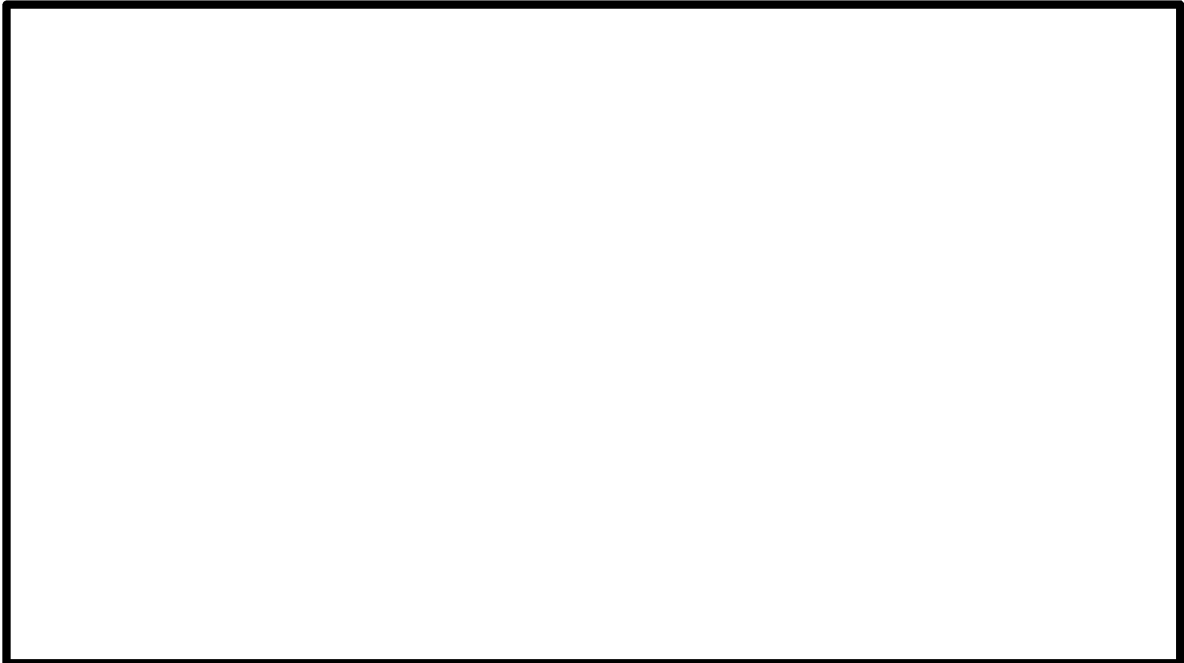


図 3.2-11 TRACG による給水流量とプラントデータとの詳細比較

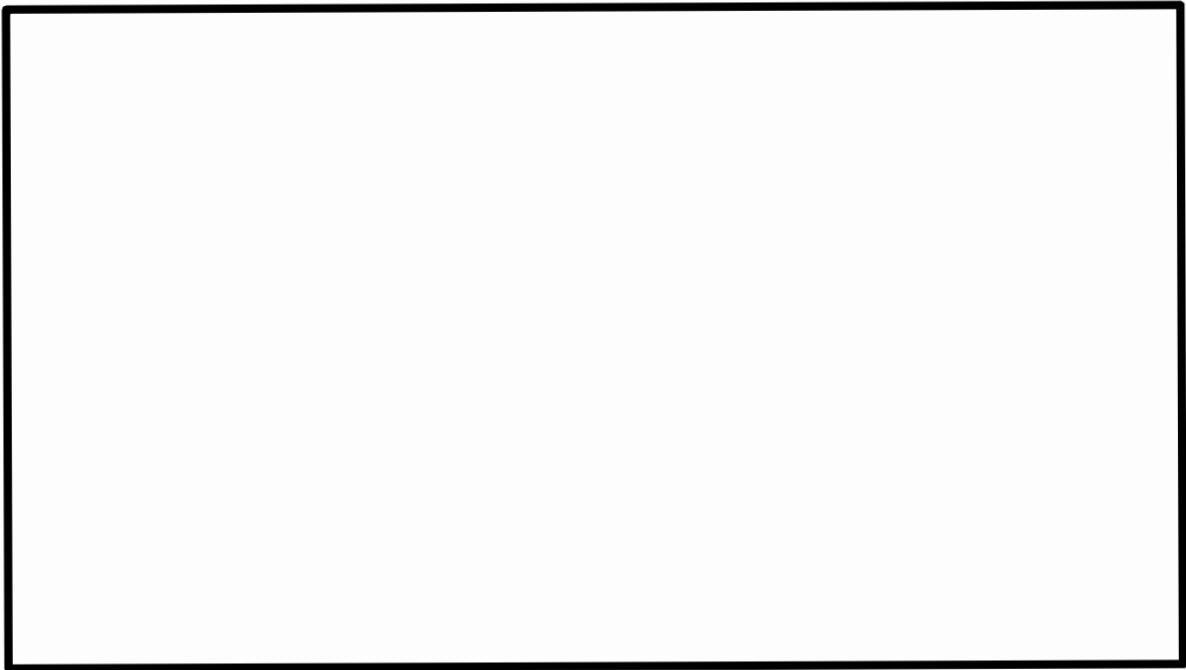


図 3.2-12 TRACG による炉心流量とプラントデータとの詳細比較

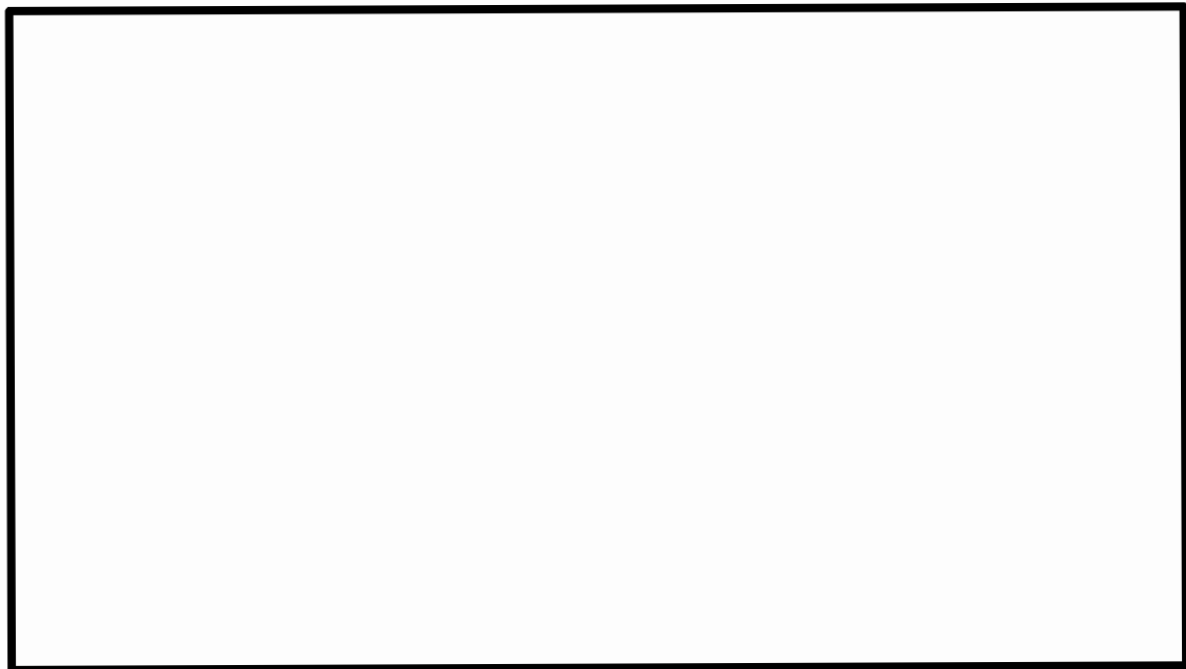


図 3.2-13 TRACG による炉水位とプラントデータとの詳細比較

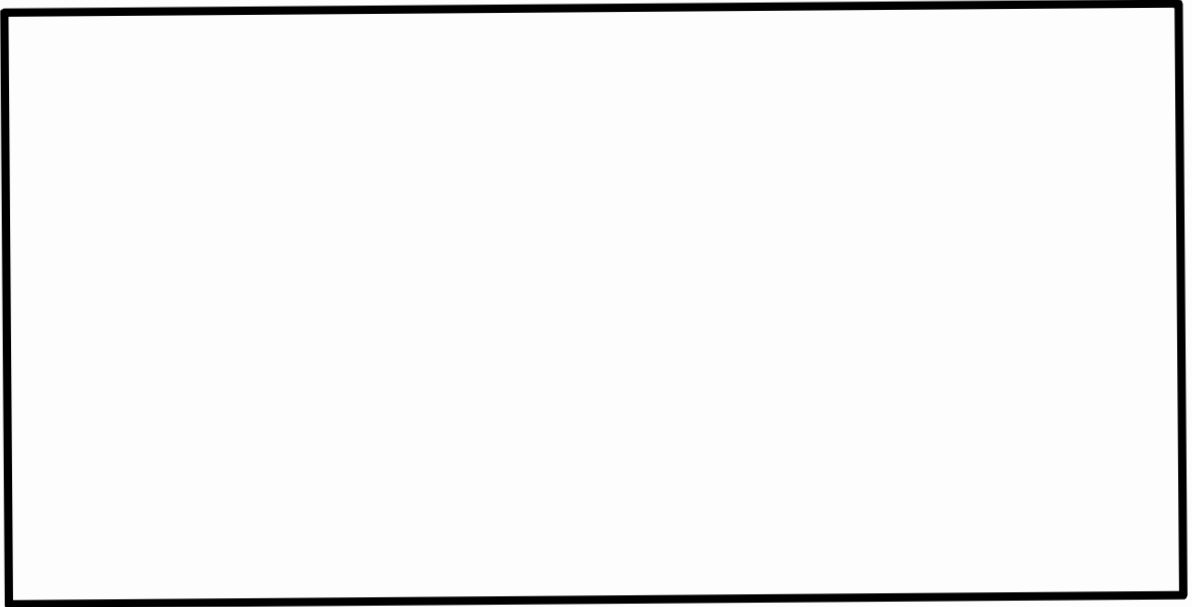


図 3.2-14 TRACG による炉心入口温度の時間変化

### 3.3 福島第二原子力発電所 2号炉 起動試験

日本国内の BWR は従来型 BWR と ABWR に大別することができる。両者は主に再循環系の構成が異なるため、AOO 挙動も異なり個別に検証することが必要である。本節では従来型 BWR の代表例として熱出力 3293MW の福島第二原子力発電所 2号炉 (2F-2) について取り上げる。2F-2 の諸元表を表 3.3-1 に示す。

対象とした試験は、圧力上昇過渡時の発電機負荷遮断試験 (LRWB)、流量減少過渡時の再循環ポンプトリップ試験 (再循環ポンプ 2 台中 1 台トリップ: 1RPT) の 2 ケースとした。図 3.3-1、図 3.3-2 に各試験の事象進展図を示す。

#### 3.3.1 TRACG 解析モデル

TRACG では VSSL コンポーネントによって原子炉圧力容器のモデル化を三次元的に行うことができる。従って本解析における原子炉圧力容器のモデル化は軸方向を 15 領域、径方向を円柱状に 4 領域に分割した。また、燃料チャンネルについては CHAN コンポーネント、主蒸気管は一次元コンポーネントの TEE, VLVE, FILL, BREK などにより行った。従来型 BWR の原子炉圧力容器のノーディングを図 3.3-3 に、燃料チャンネルのノーディングを図 3.3-4 に、主蒸気管のノーディングを図 3.3-5 に示す。これらのノーディングに従い TRACG の解析を実施した。

TRACG の炉心状態は AETNA により初期化され、過渡計算では TRACG 自身の三次元核動特性モデルによって計算される。燃料チャンネルについて、核計算は全チャンネルが独立に計算されるが、熱水力計算は燃料チャンネルの出力に応じて幾つかのグループに分け、複数の燃料チャンネルをまとめて計算する。

再循環流量制御、給水流量制御、炉心圧力制御などのコントロールシステム、及び安全保護系などについてはコントロールブロックによってモデル化を行う。

#### 3.3.2 試験データとの比較

発電機負荷遮断試験に関する比較を図 3.3-6 に、再循環ポンプトリップ試験に関する比較を図 3.3-7 に示す。

#### 3.3.3 結果の考察

発電機負荷遮断試験については、中性子束、炉心流量、主蒸気流量、給水流量、原子炉圧力、原子炉水位それぞれの時間変化を TRACG の解析結果と比較した。中性子束 (APRM 応答) について見ると、スクラムにより速やかな低下傾向を示し、 の範囲で一致する。また、各パラメータの変化傾向、最大値の発生時間などが同等であり、試験結果を十分に再現できることを確認した。

再循環ポンプトリップ試験についても、中性子束、主蒸気流量、給水流量、原子炉圧力、原子炉水位、再循環ループ流量それぞれの時間変化を TRACG の解析結果と比較した。中性

子束（APRM 応答）は、再循環ポンプトリップによる流量低下により速やかな低下傾向を示し、その後整定する。中性子束の変動が大きい事象初期において [ ] 其後の出力が整定する時間領域では [ ] の範囲で一致する。また、各パラメータの変化傾向、最大値の発生時間などが同等であり、試験結果を十分に再現できることを確認した。

#### 3.3.4 結論

上記で提示した発電機負荷遮断試験及び再循環ポンプトリップ試験について TRACG では十分に試験結果を再現できることを確認した。これらの結果より過渡的な挙動解析に TRACG を使用することは妥当である。

表 3.3-1 福島第二原子力発電所 2 号炉の諸元表

|                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| 原子炉タイプ               | BWR5               |
| 電気出力(MWe)            | 1100               |
| 熱出力 (MWt)            | 3293               |
| 燃料集合体体数              | 764                |
| 炉心流量(t/h)            | $48.3 \times 10^3$ |
| 原子炉ドーム圧力 (MPa(gage)) | 6.93               |
| 再循環ポンプ台数             | 2 (External loop)  |

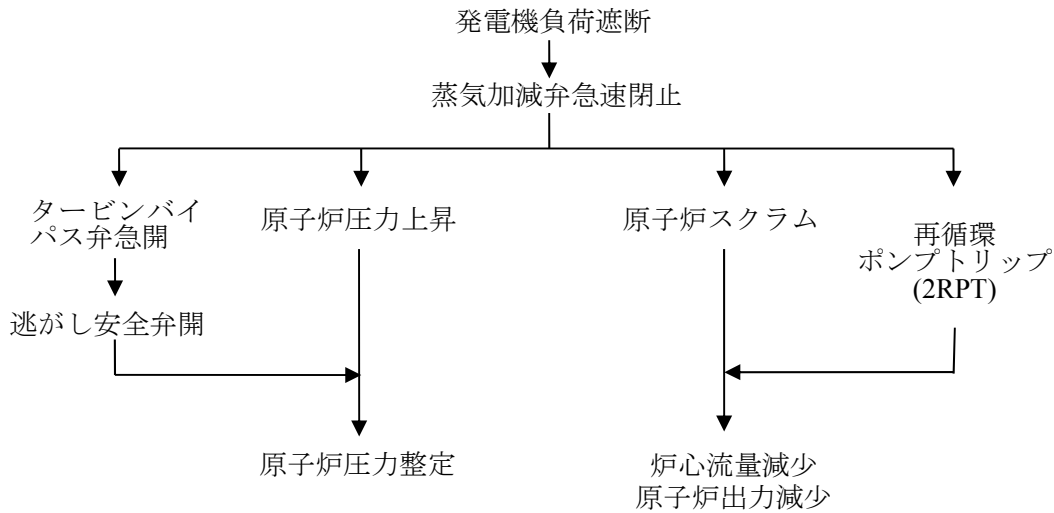


図 3.3-1 福島第二原子力発電所 2 号炉における LRWB 事象進展図

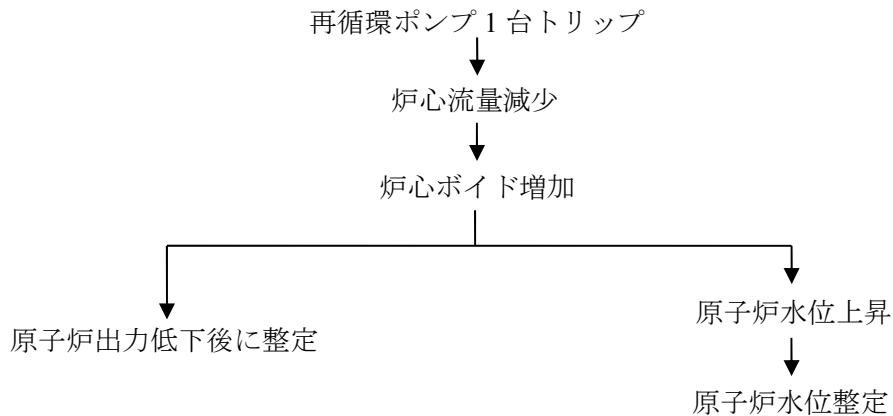


図 3.3-2 福島第二原子力発電所 2 号炉における 1RPT 事象進展図

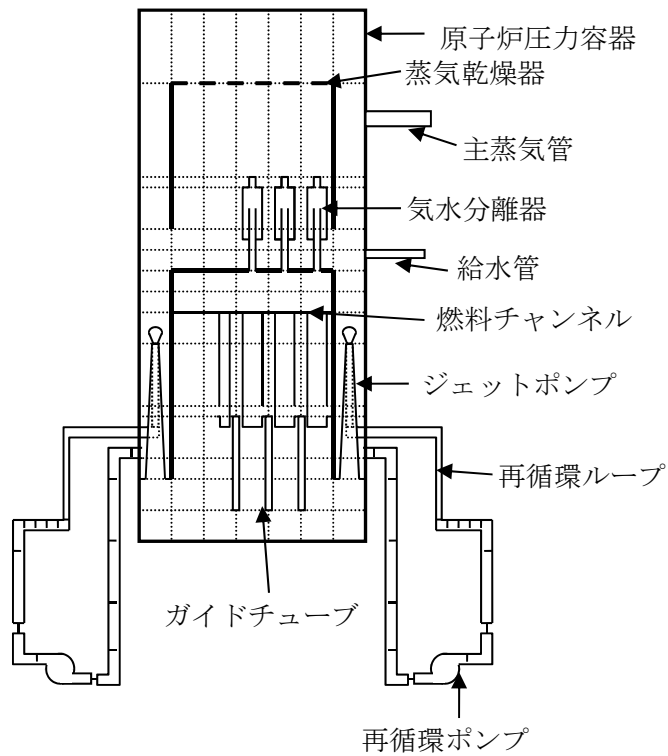


図 3.3-3 福島第二原子力発電所 2号炉の原子炉压力容器ノーディング図

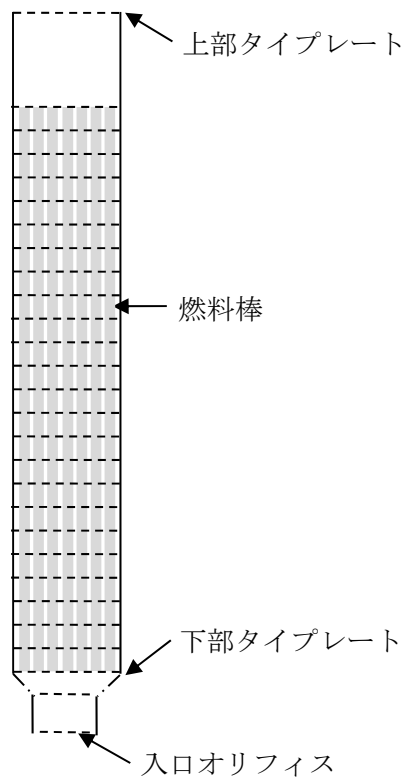


図 3.3-4 福島第二原子力発電所 2号炉の燃料チャンネルノーディング図

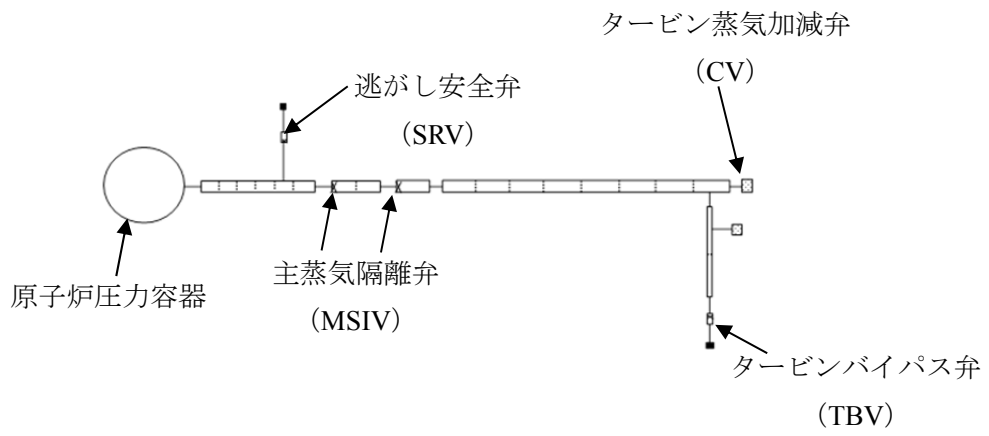


図 3.3-5 福島第二原子力発電所 2号炉の主蒸気管ノーディング図



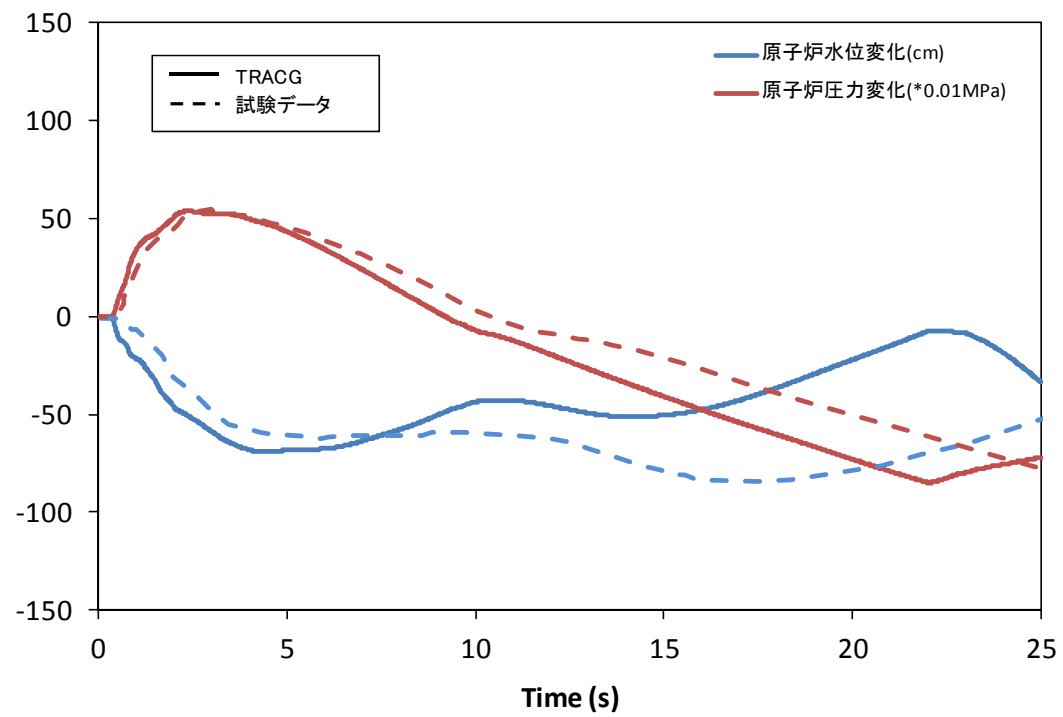
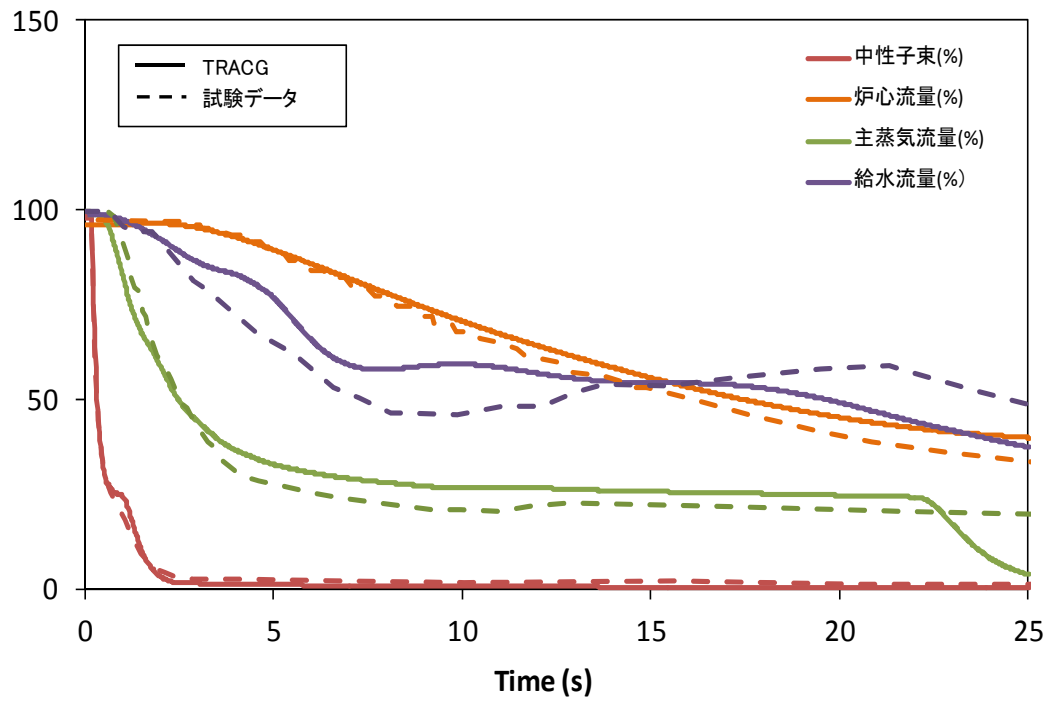


図 3.3-6 福島第二原子力発電所 2号炉の LRWB と解析結果の比較

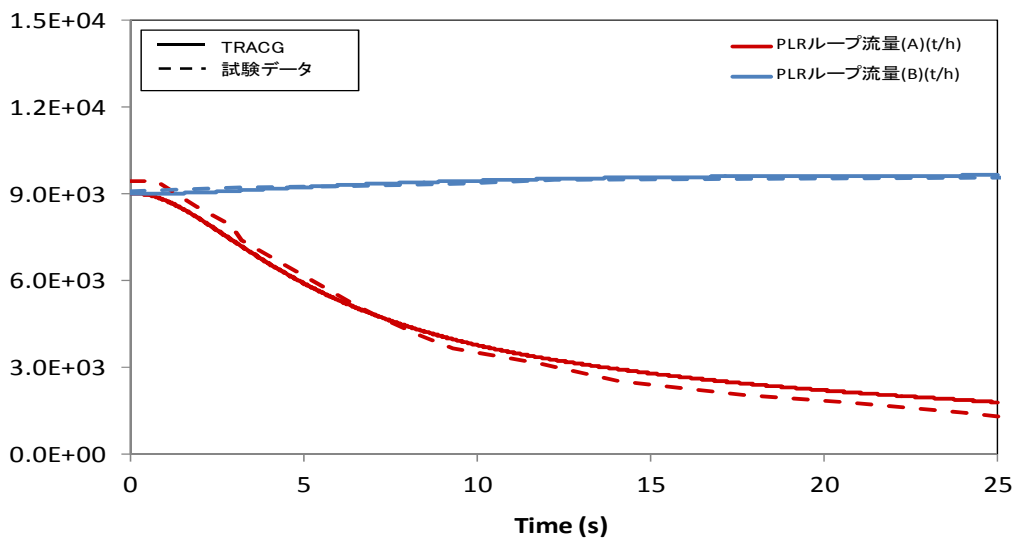
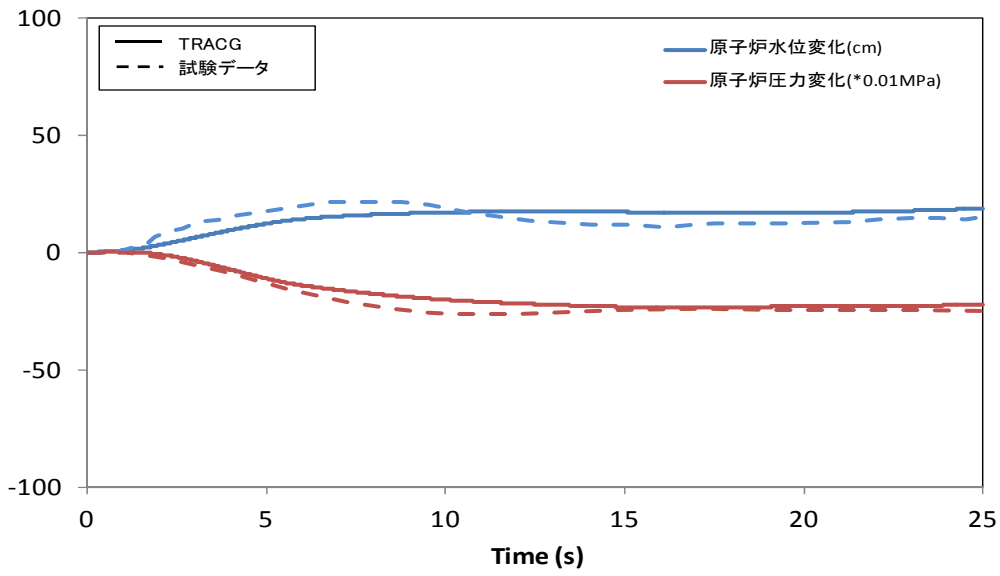
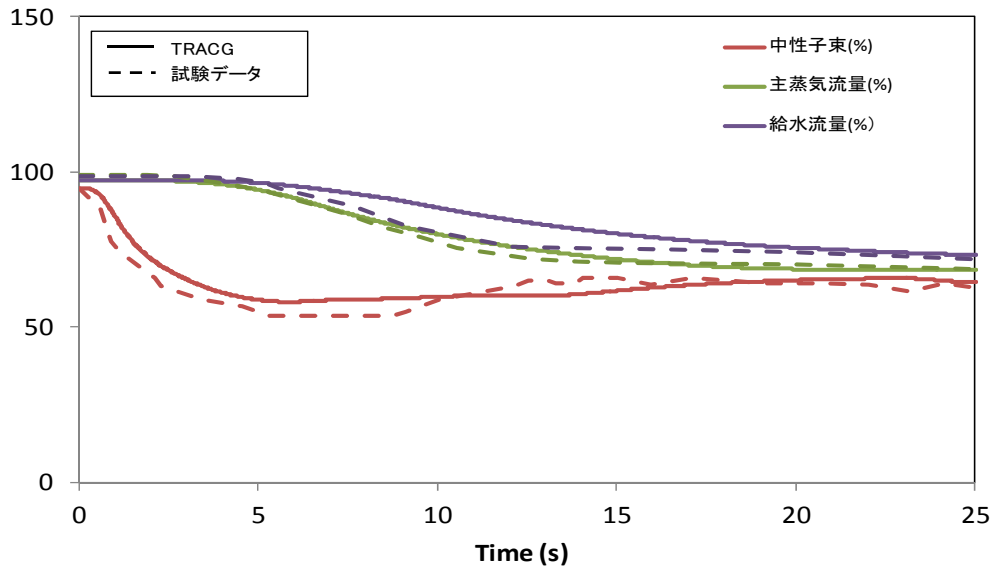


図 3.3-7 福島第二原子力発電所 2号炉の 1RPT と解析結果の比較

### 3.4 柏崎刈羽原子力発電所 7号炉 起動試験

本節では ABWR の代表例として熱出力 3926MW の柏崎刈羽原子力発電所 7号炉 (K-7) について取り上げる。K-7 の諸元表を表 3.4-1 に示す。

対象とした試験は、圧力上昇過渡時の発電機負荷遮断試験 (LRWB)、流量減少過渡時のインターナルポンプトリップ試験 (インターナルポンプ 10 台中 3 台トリップ: 3RPT) の 2 ケースとした。図 3.4-1、図 3.4-2 に各試験の事象進展図を示す。

#### 3.4.1 TRACG 解析モデル

原子炉圧力容器、燃料チャンネル、主蒸気管のモデル化は前節 3.3 と同様に行った。ABWR の原子炉圧力容器のノーディングを図 3.4-3 に、燃料チャンネルのノーディングを図 3.4-4 に、主蒸気管のノーディングを図 3.4-5 に示す。これらのノーディングに従い TRACG の解析を実施した。

TRACG の炉心状態は AETNA により初期化され、過渡計算では TRACG 自身の三次元核動特性モデルによって計算される。燃料チャンネルについて、核計算は全チャンネルが独立に計算されるが、熱水力計算は燃料チャンネルの出力に応じて幾つかのグループに分け、複数の燃料チャンネルをまとめて計算する。

再循環流量制御、給水流量制御、炉心圧力制御などのコントロールシステム、及び安全保護系などについてはコントロールブロックによってモデル化を行う。

#### 3.4.2 試験データとの比較

発電機負荷遮断試験に関する比較を図 3.4-6 に、インターナルポンプトリップ試験に関する比較を図 3.4-7 に示す。

#### 3.4.3 結果の考察

発電機負荷遮断試験については、中性子束、炉心流量、主蒸気流量、給水流量、原子炉圧力、原子炉水位それぞれの時間変化を TRACG の解析結果と比較した。中性子束 (APRM 応答) について見ると、スクラムにより速やかな低下傾向を示し、 の範囲で一致する。また、各パラメータの変化傾向、最大値の発生時間などが同等であり、試験結果を十分に再現できることを確認した。

インターナルポンプトリップ試験についても、中性子束、炉心流量、主蒸気流量、給水流量、原子炉圧力、原子炉水位、インターナルポンプ回転数それぞれの時間変化を TRACG の解析結果と比較した。中性子束 (APRM 応答) は、インターナルポンプトリップによる流量低下により速やかな低下傾向を示し、その後整定する。中性子束の変動が大きい事象初期において 、その後の出力が整定する時間領域では  の範囲で一致する。また、各パラメータの変化傾向、最大値の発生時間などが同等であり、試験結果を十分に再現できることを確認した。

### 3.4.4 結論

上記で提示した発電機負荷遮断試験及びインターナルポンプトリップ試験について TRACG では十分に試験結果を再現できることを確認した。これらの結果より過渡的な挙動解析に TRACG を使用することは妥当である。

表 3.4-1 柏崎刈羽原子力発電所 7号炉の諸元表

|                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| 原子炉タイプ               | ABWR               |
| 電気出力(MWe)            | 1356               |
| 熱出力 (MWt)            | 3926               |
| 燃料集合体体数              | 872                |
| 炉心流量(t/h)            | $52.2 \times 10^3$ |
| 原子炉ドーム圧力 (MPa(gage)) | 7.07               |
| インターナルポンプ台数          | 10 (Internal loop) |

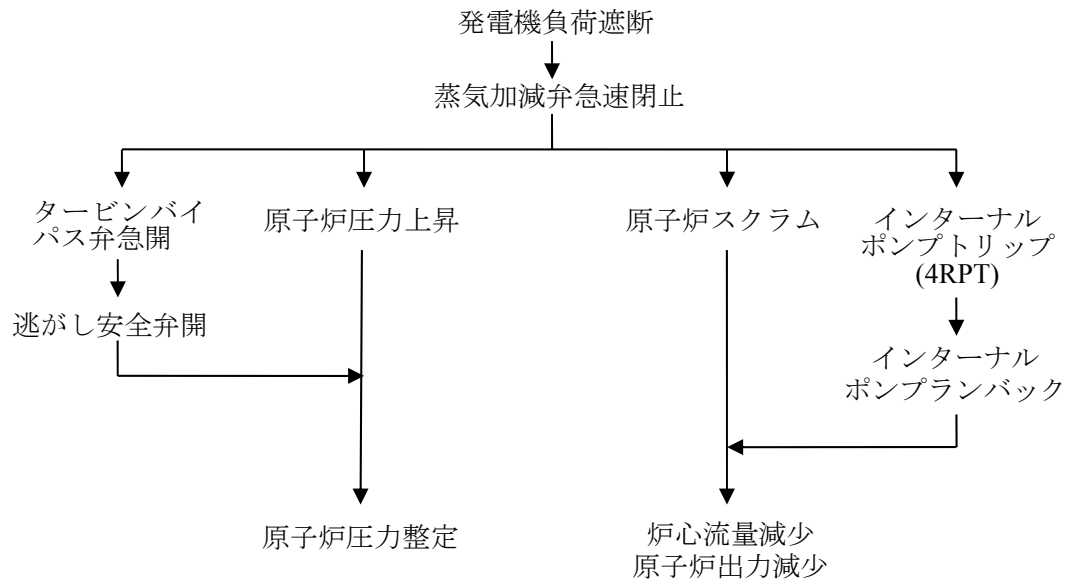


図 3.4-1 柏崎刈羽原子力発電所 7号炉における LRWB 事象進展図

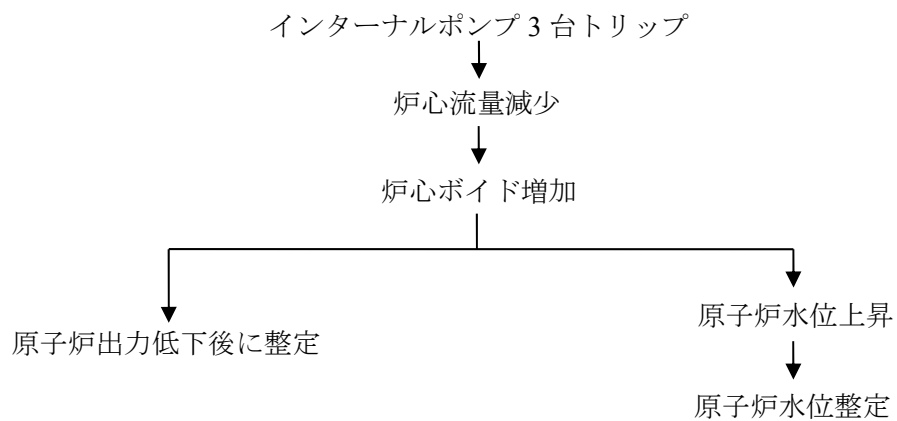


図 3.4-2 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉における 3RPT 事象進展図

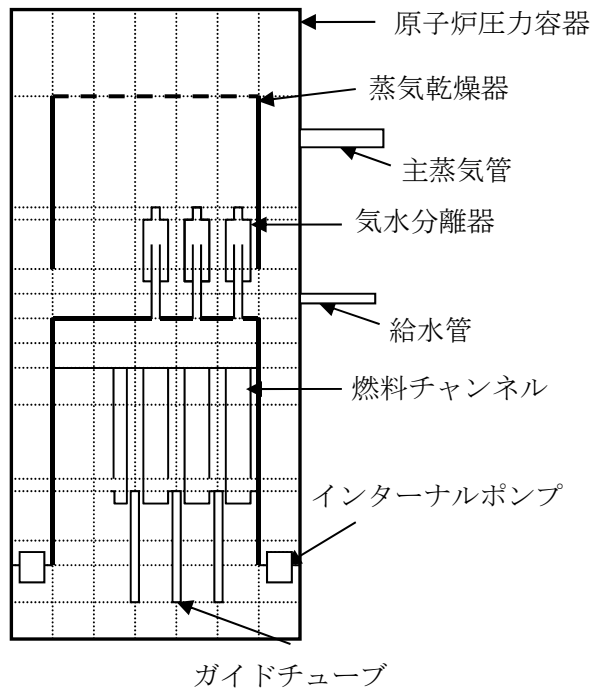


図 3.4-3 柏崎刈羽原子力発電所 7号炉の原子炉圧力容器ノーディング図

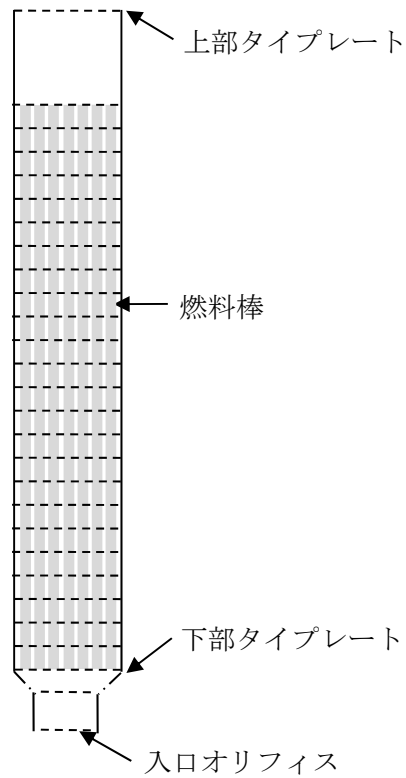


図 3.4-4 柏崎刈羽原子力発電所 7号炉の燃料チャンネルノーディング図

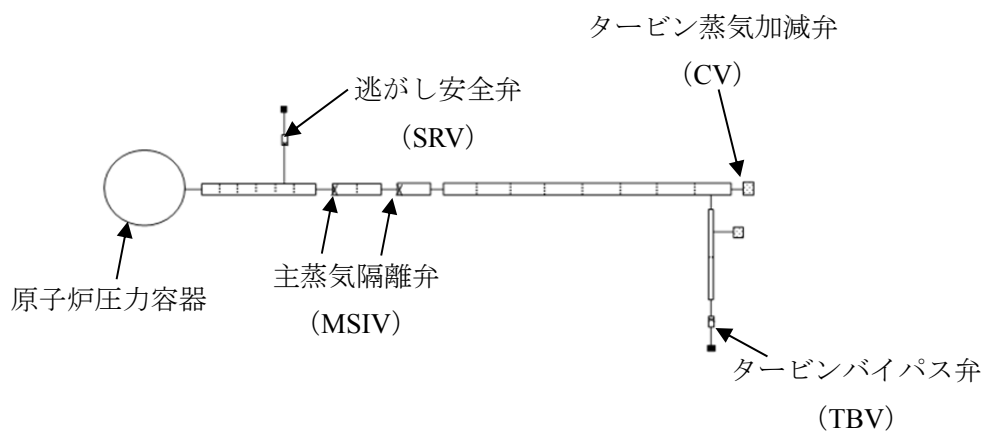


図 3.4-5 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉の主蒸気管ノーディング図

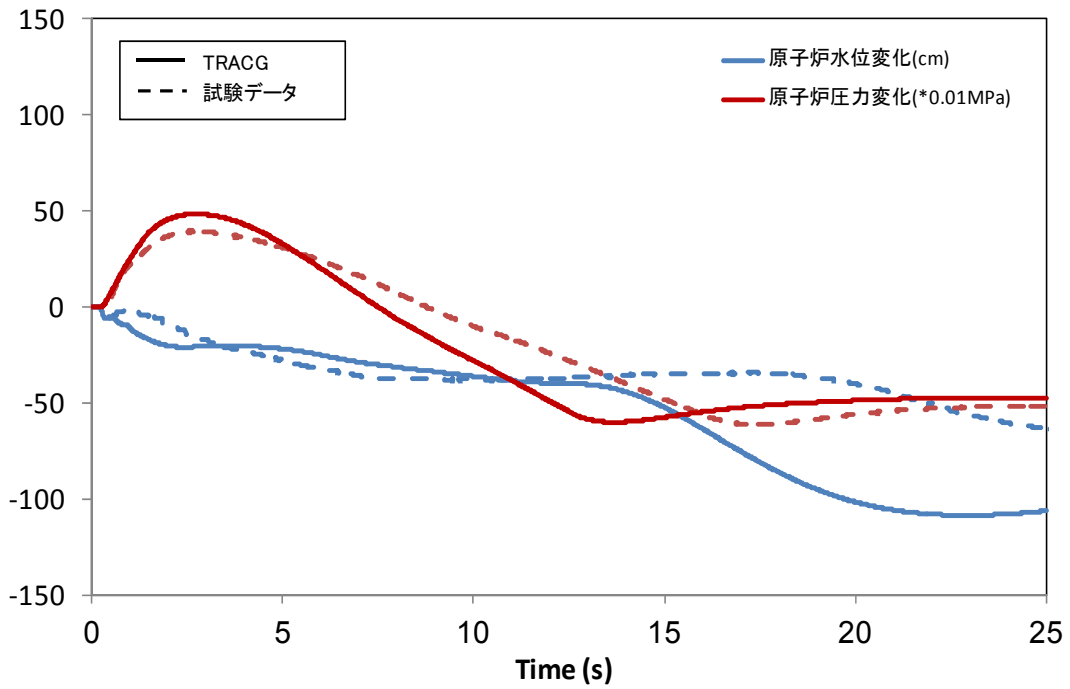
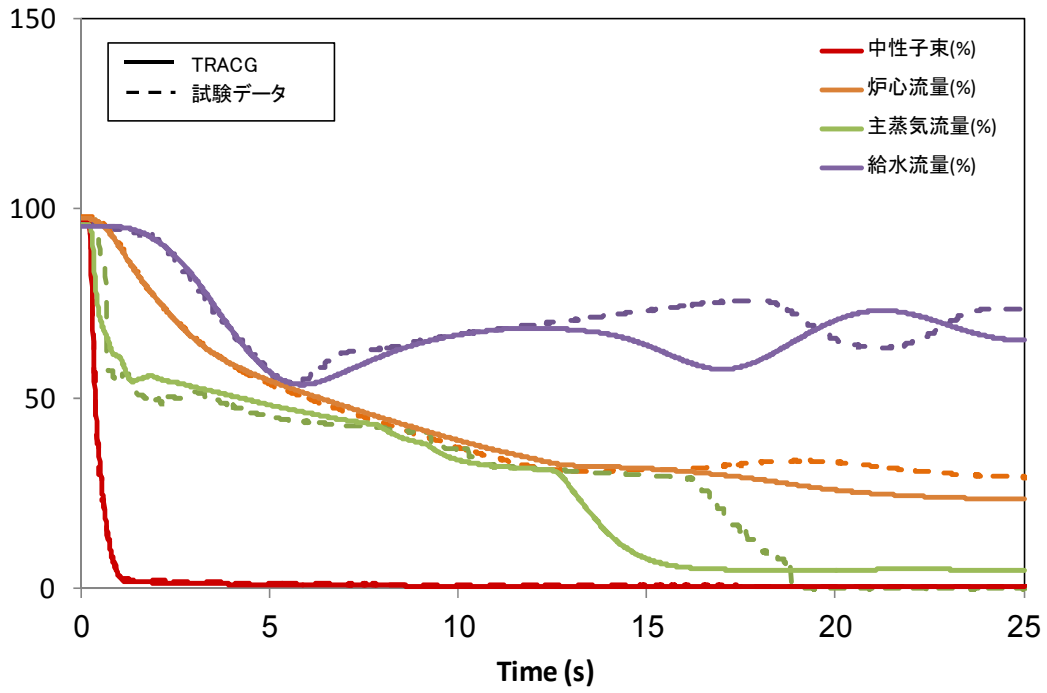


図 3.4-6 柏崎刈羽原子力発電所 7号炉の LRWB と解析結果の比較



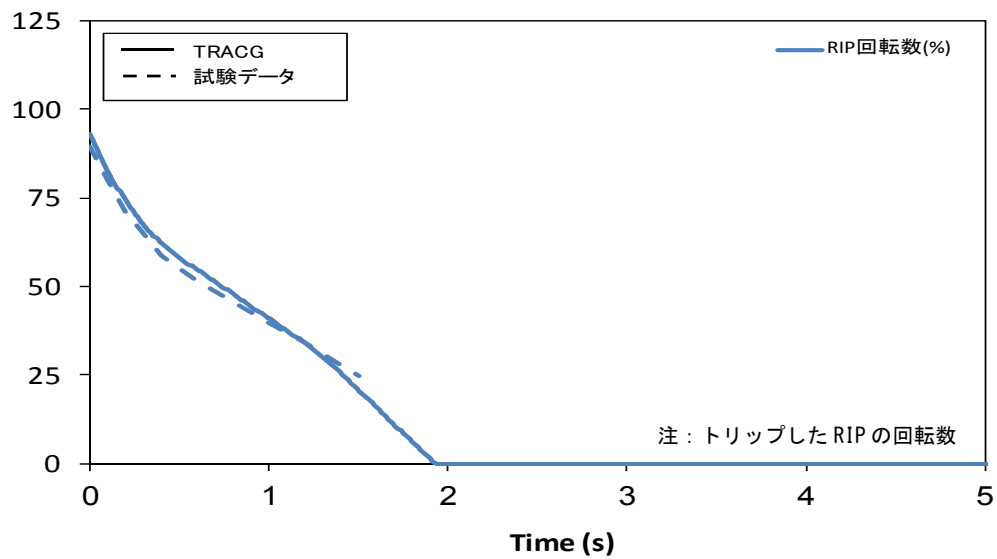
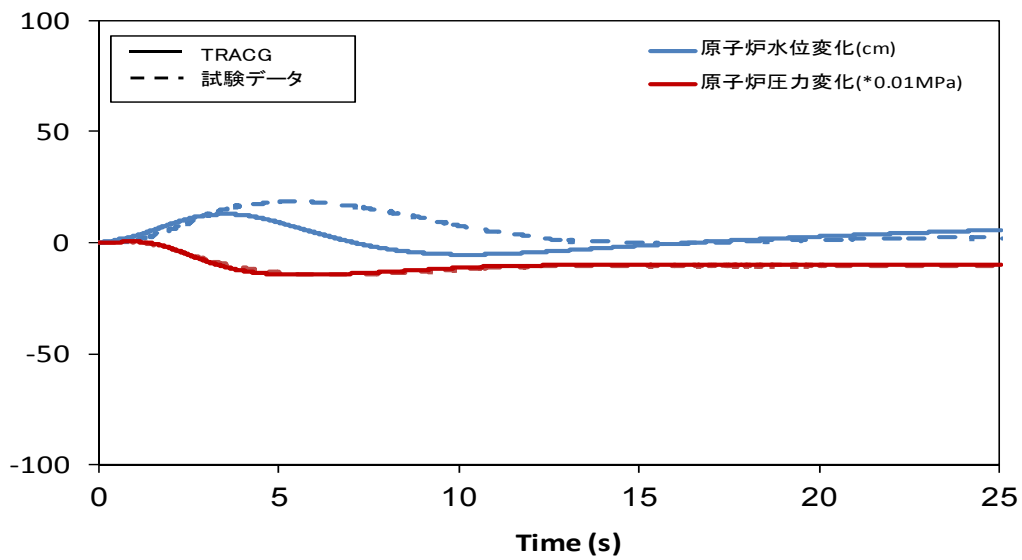
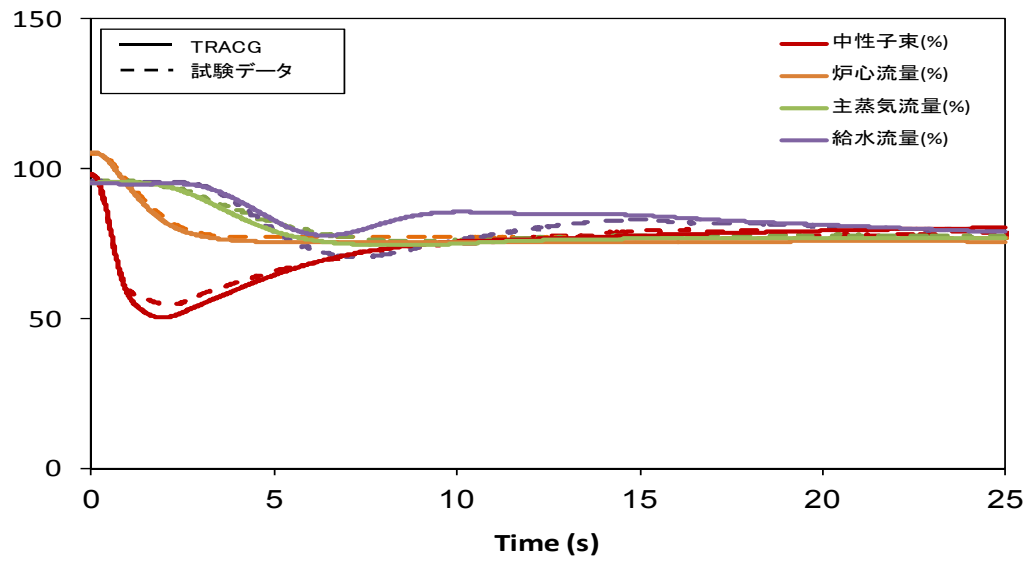


図 3.4-7 柏崎刈羽原子力発電所 7号炉の 3RPT と解析結果の比較

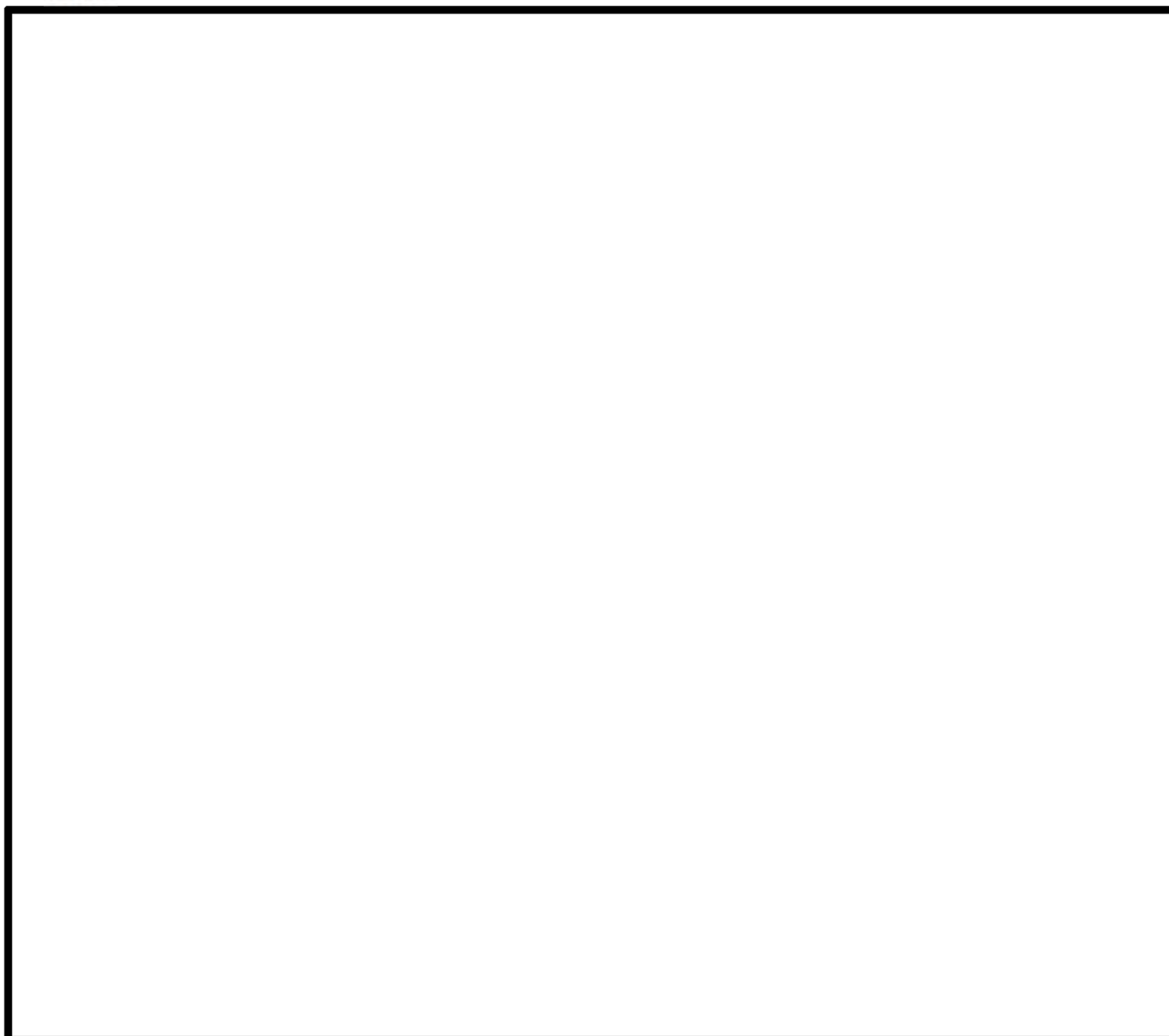
### 3.5 SLC 試験

GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) 社で実施された SLCS (Stand-by Liquid Control System) に関する Vallecitos 試験<sup>[40]</sup>について説明する。

#### 3.5.1 試験の説明

1980 年頃に、GEH 社は Vallecitos 試験装置を用いて、一連のほう酸溶液混合試験を実施した。Vallecitos 試験装置は、実機 BWR の詳細な 1/6 規模モデルであり、ほう酸溶液の注入位置を変更することが可能であった。Vallecitos 試験は大気圧及び室温の下で実施され、低温時のほう酸溶液の相対密度を模擬した代替溶液が使用された。試験は、原子炉定格炉心流量の 5%、10%及び 15%などの流量と等価な条件で実施された。試験装置には、制御棒案内管、燃料集合体、ジェットポンプ、気水分離器等の原子炉圧力容器の底部から上部までの BWR のすべての機器、及び 2 つの外部再循環ループが含まれていた。

#### 3.5.2 試験データとの比較





### 3.5.3 結論

Vallecitos 試験装置を用いて実施されたほう酸溶液混合試験に関する TRACG の解析結果が妥当な範囲で測定値を再現できることから、TRACG のほう素モデルの妥当性が確認された。

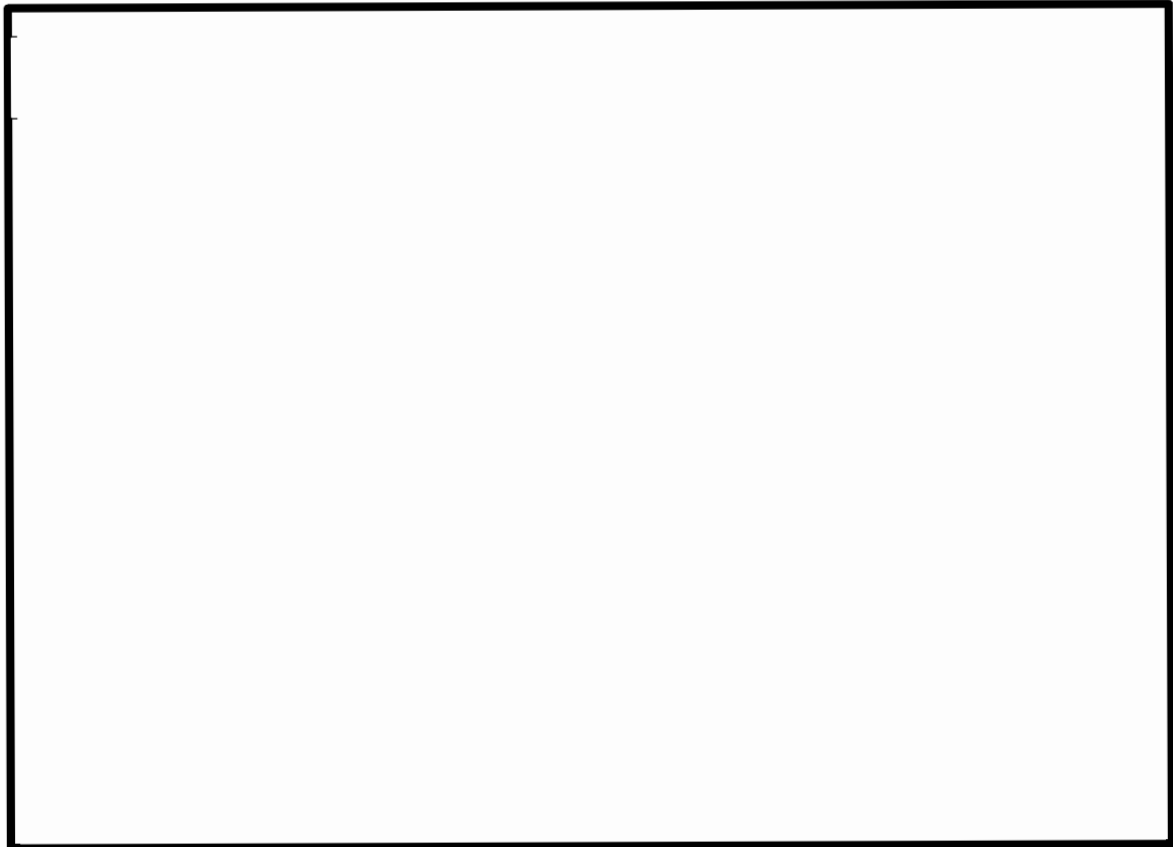


図 3.5-1 Vallecitos 試験 125 における下部プレナムのほう酸混合係数 (5%炉心流量)

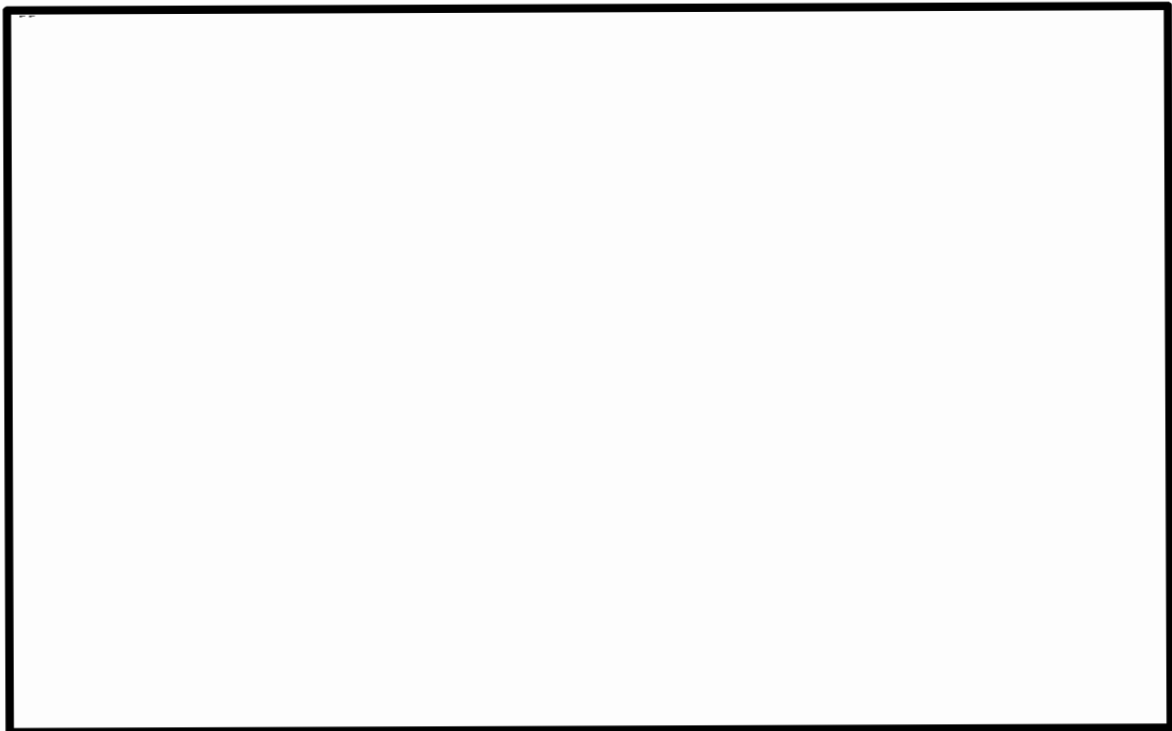


図 3.5-2 Vallecitos 試験 125 における炉心のほう酸混合係数 (5%炉心流量)

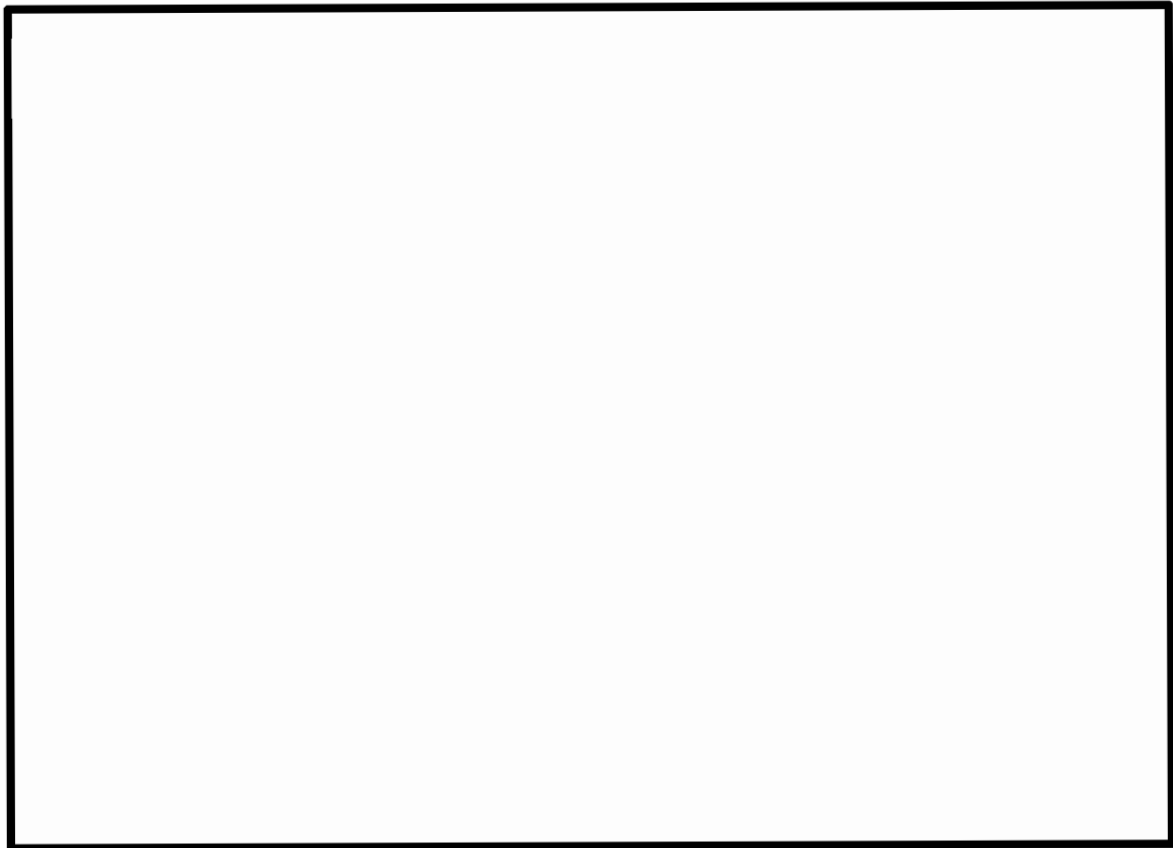


図 3.5-3 Vallecitos 試験 122 における下部プレナムのほう酸混合係数 (10%炉心流量)

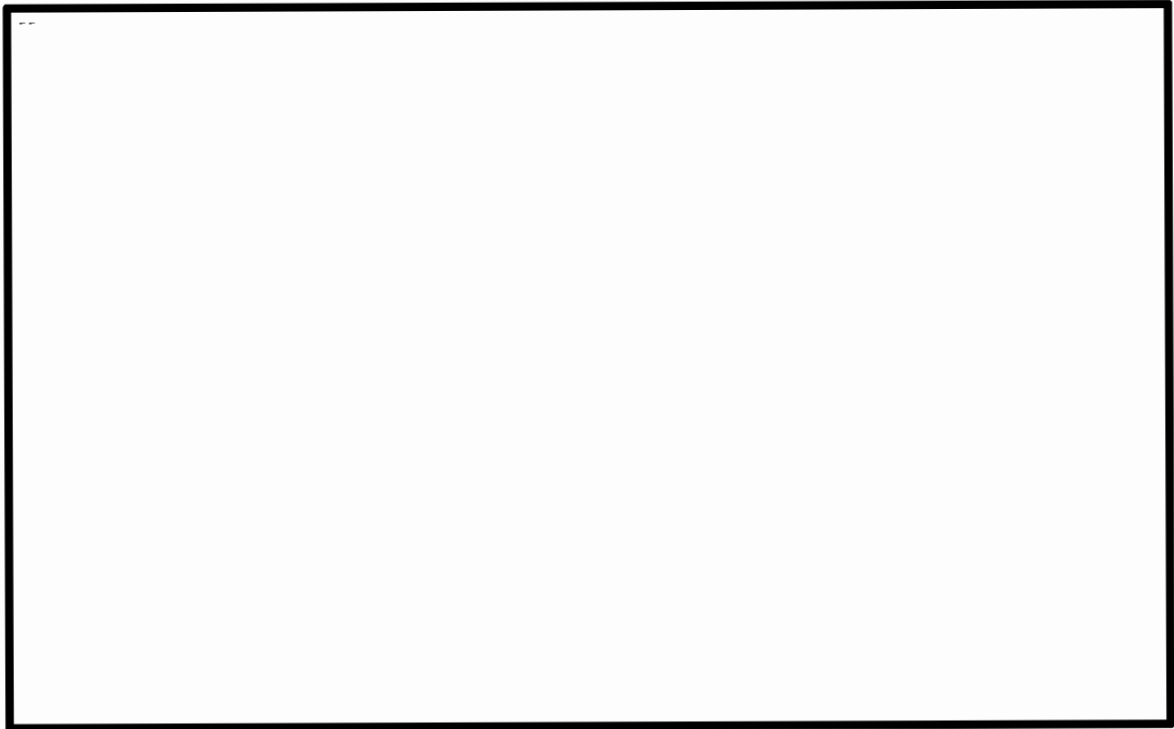


図 3.5-4 Vallecitos 試験 122 における炉心のほう酸混合係数 (10%炉心流量)

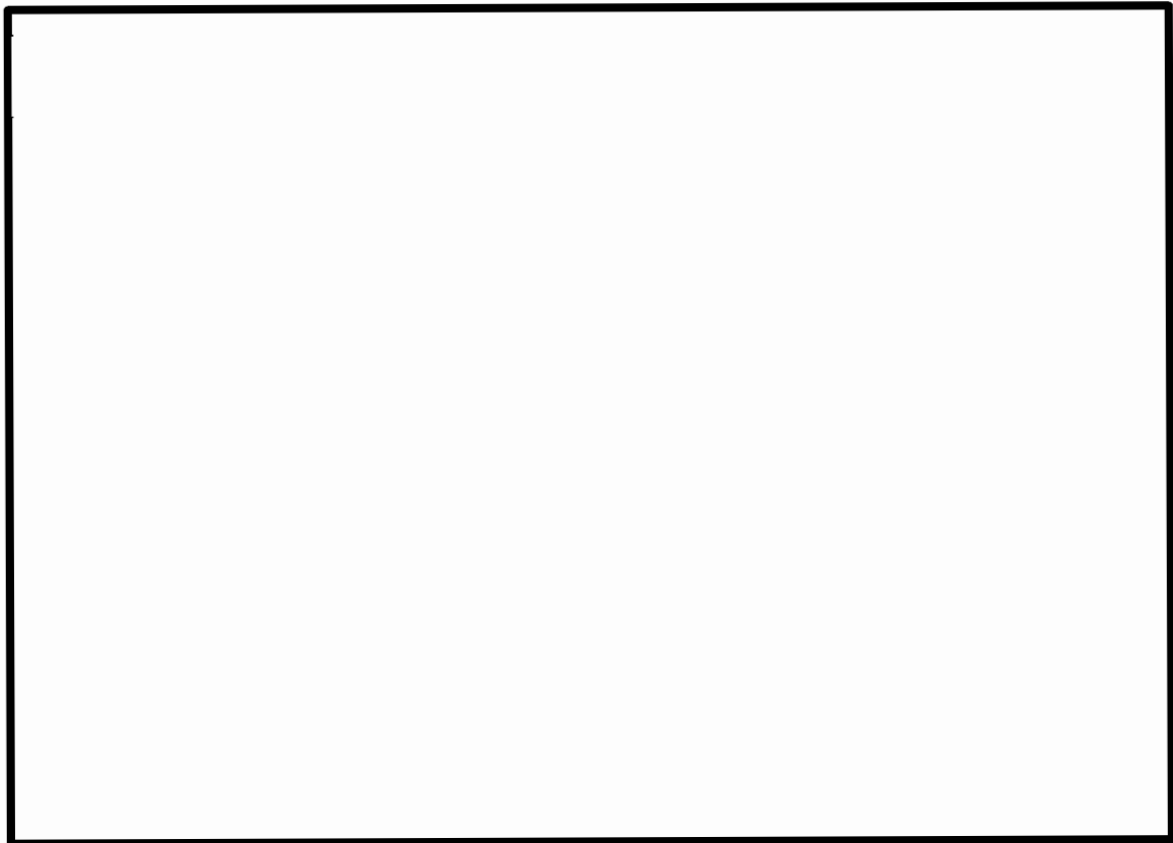


図 3.5-5 Vallecitos 試験 327 における下部プレナムのほう酸混合係数 (10%炉心流量)

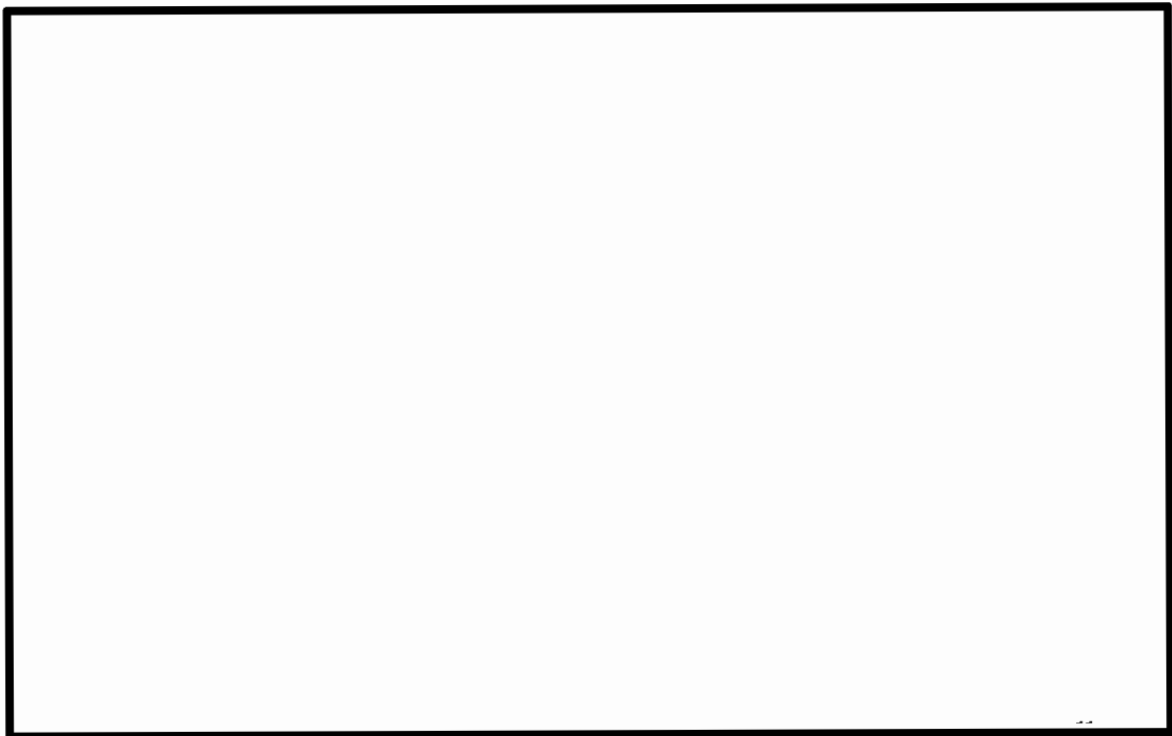


図 3.5-6 Vallecitos 試験 327 における炉心のほう酸混合係数 (10%炉心流量)

## 4 ATWS 解析への適用例

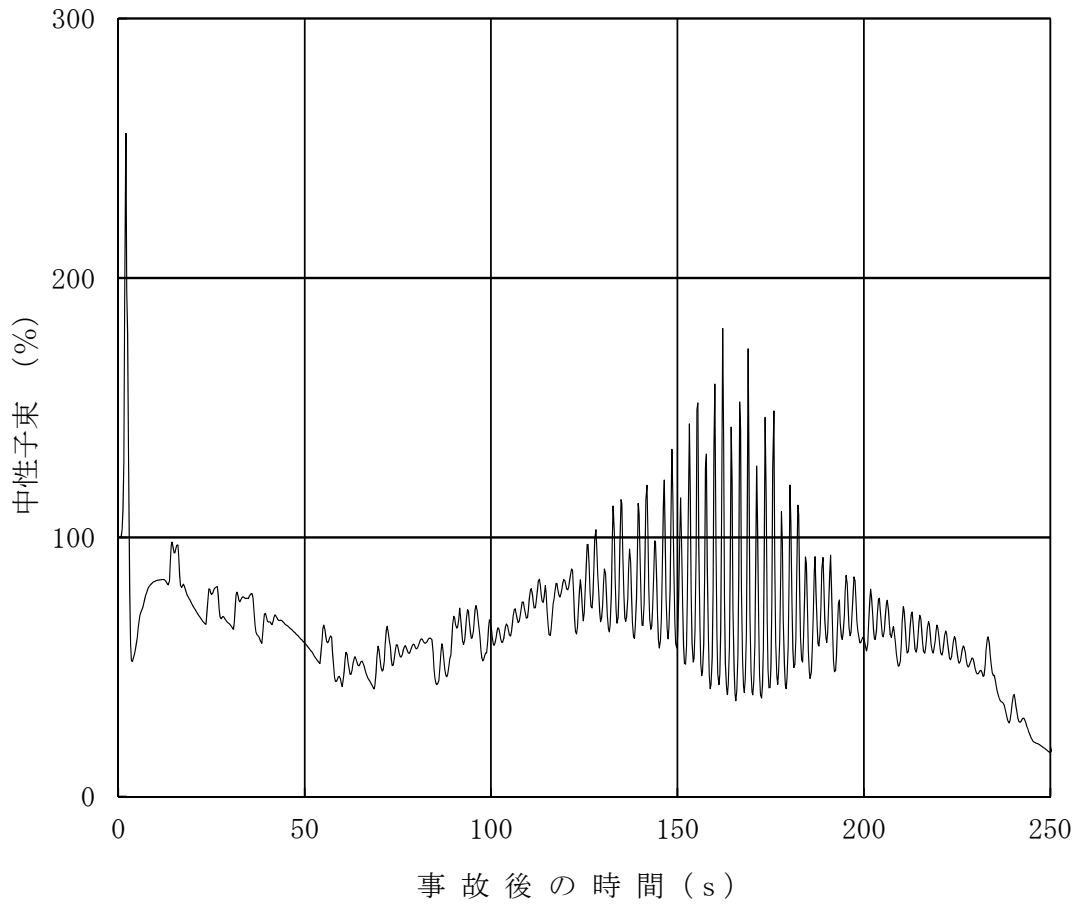
REDY コード (REDY Ver.1 (ATWS 用), REDY Ver.2) 及び SCAT コード (SCAT Ver.3) の有効性評価に対して, 比較用の参考解析として TRACG コードを ATWS 解析に適用した結果について例示する。

なお, ATWS 解析では, 前章で説明した LASALLE 不安定事象で検討した結果を反映して, チャンネルコンポーネントについて同じノード分割を用いた。

### 4.1 ABWR 平衡炉心の MSIV 誤閉止

図 4.1-1～図 4.1-8 に ABWR の平衡炉心において MSIV の誤閉止を想定した場合の ATWS 解析結果を示す。燃料被覆管温度は最高で約 550℃であり, 燃料被覆管最高温度は判断基準に対して十分な余裕があることが分かる。

参考に, 軸方向出力分布, 燃焼度点及び初期炉心流量が異なる条件についても確認した。評価した中で厳しい結果を与える下部ピーク炉心, サイクル末期, 初期炉心流量 90% の場合であっても, 燃料被覆管温度は最高で約 560℃であり, 燃料被覆管最高温度は判断基準に対して十分な余裕があることを確認した。図 4.1-9～図 4.1-16 に ATWS 解析結果を示す。



**図 4.1-1 ATWS 時の中性子束の時間推移  
(ABWR, 平衡炉心)**



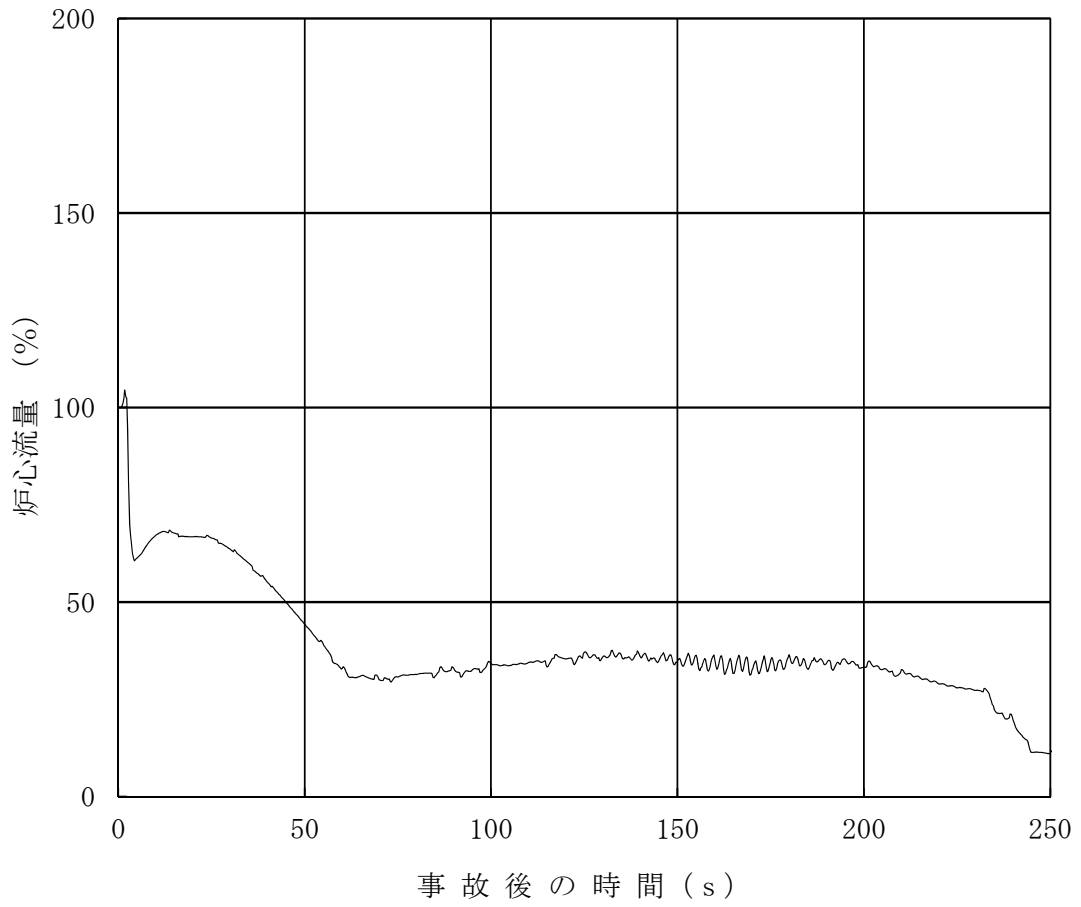


図 4.1-2 ATWS 時の炉心流量の時間推移  
(ABWR, 平衡炉心)

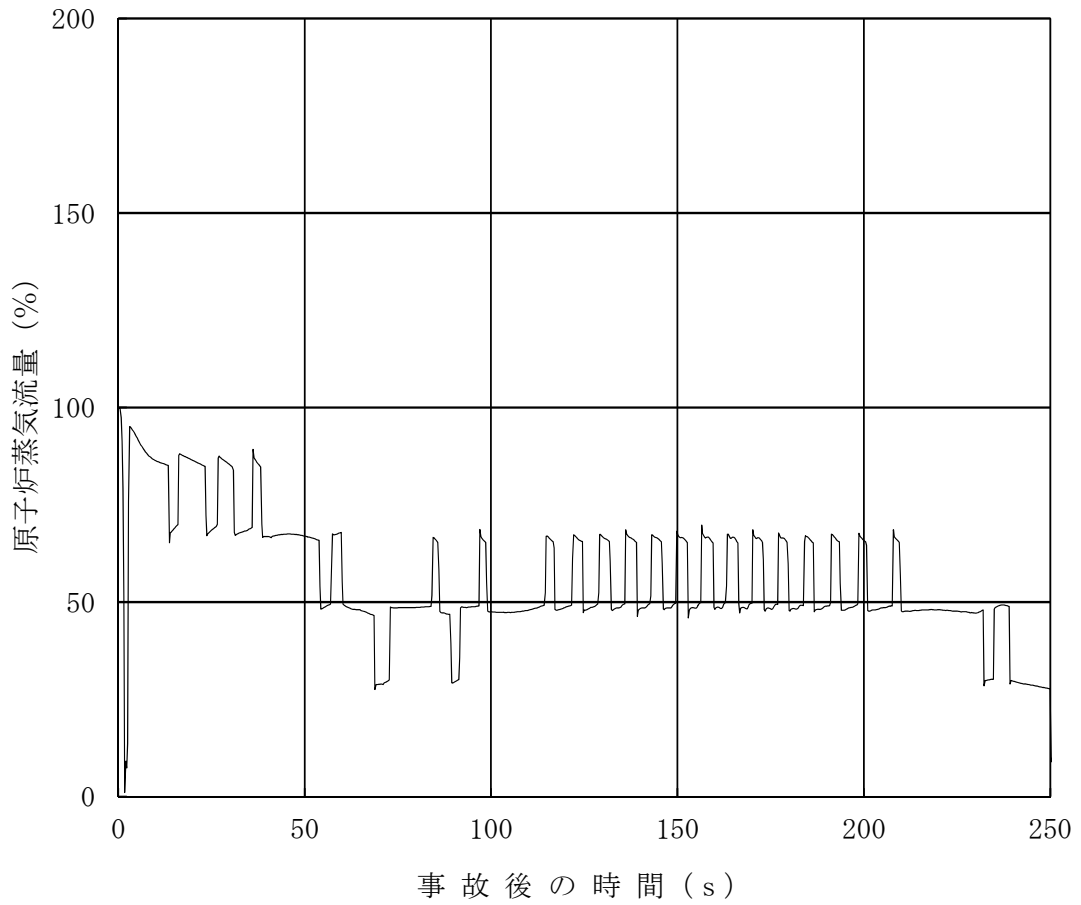


図 4.1-3 ATWS 時の原子炉蒸気流量の時間推移  
(ABWR, 平衡炉心)

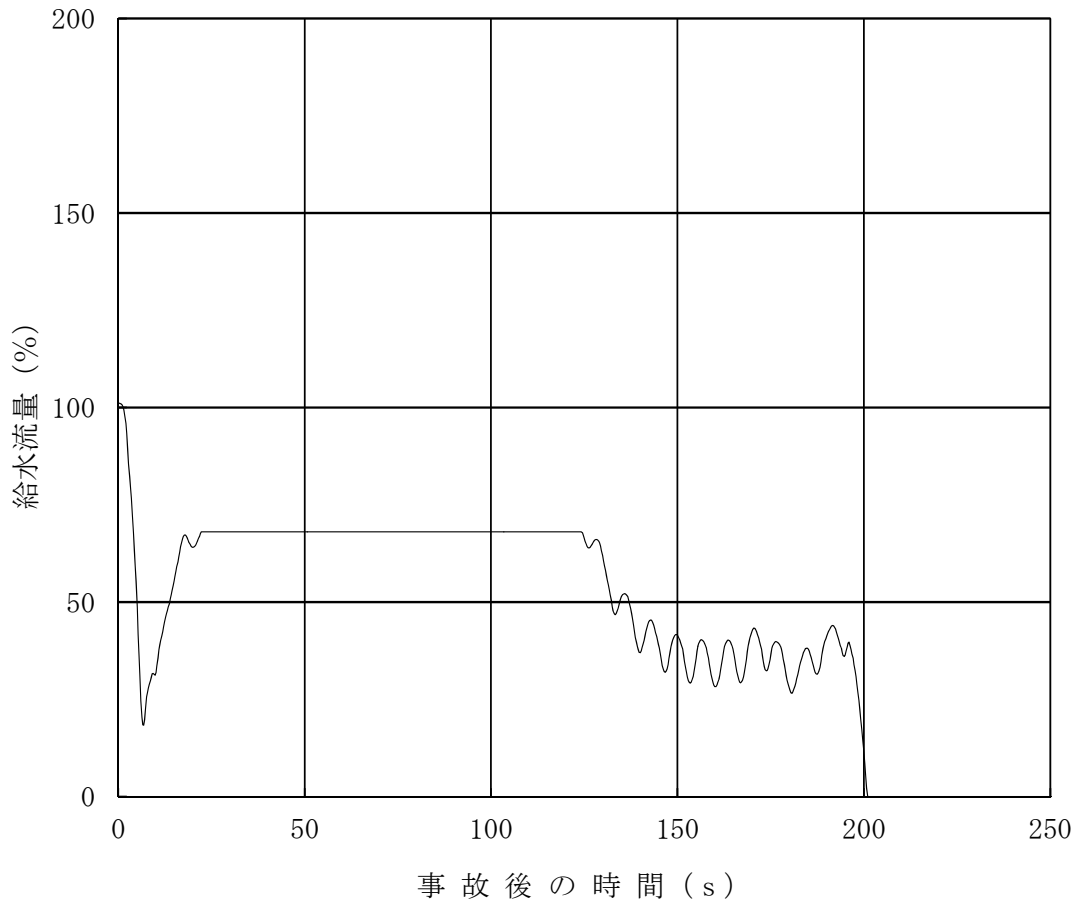


図 4.1-4 ATWS 時の給水流量の時間推移  
(ABWR, 平衡炉心)

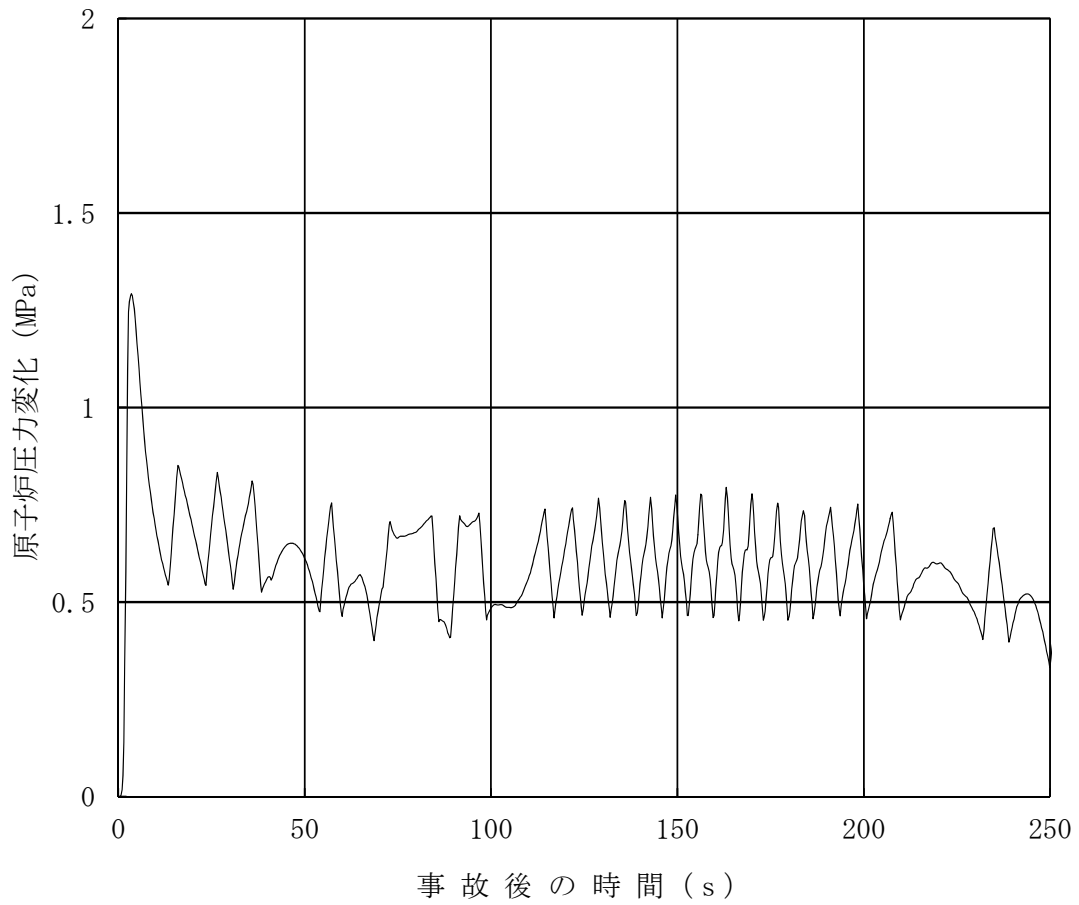


図 4.1-5 ATWS 時の原子炉圧力変化の時間推移  
(ABWR, 平衡炉心)

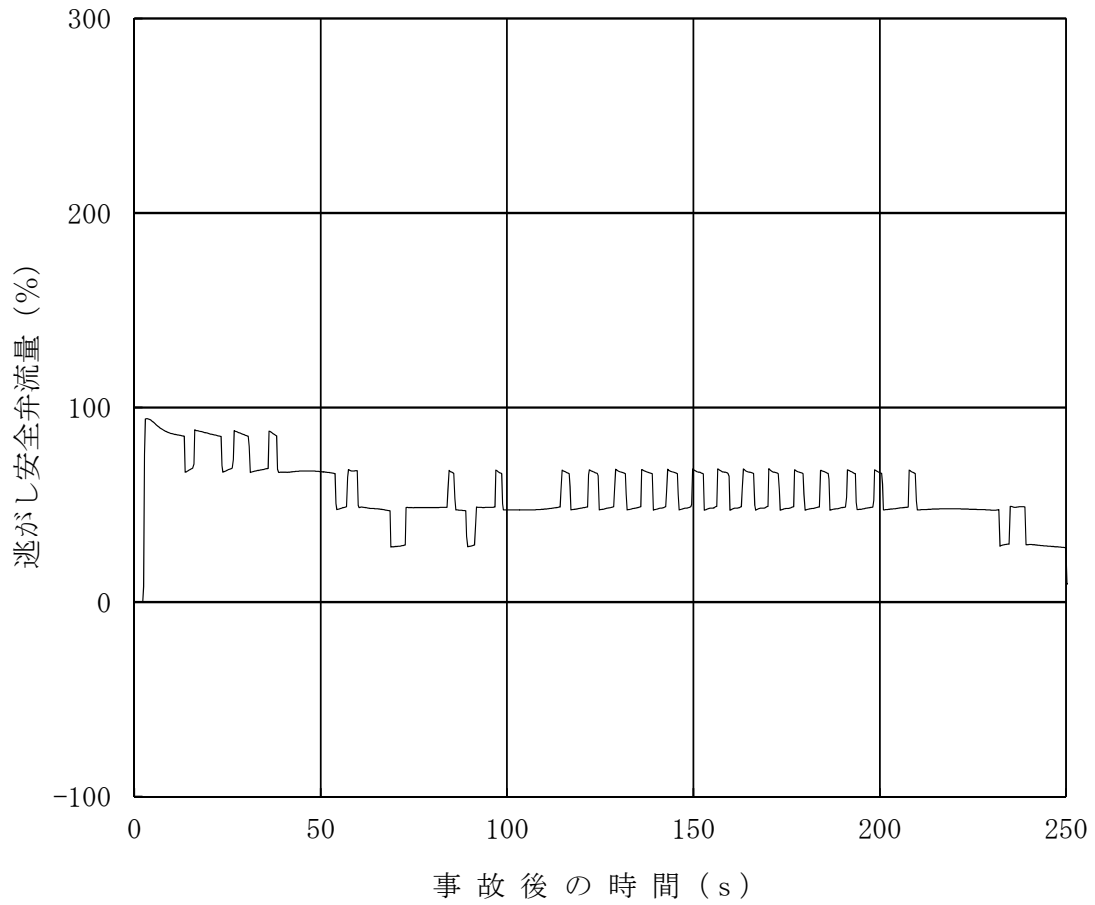


図 4.1-6 ATWS 時の逃がし安全弁流量の時間推移  
(ABWR, 平衡炉心)

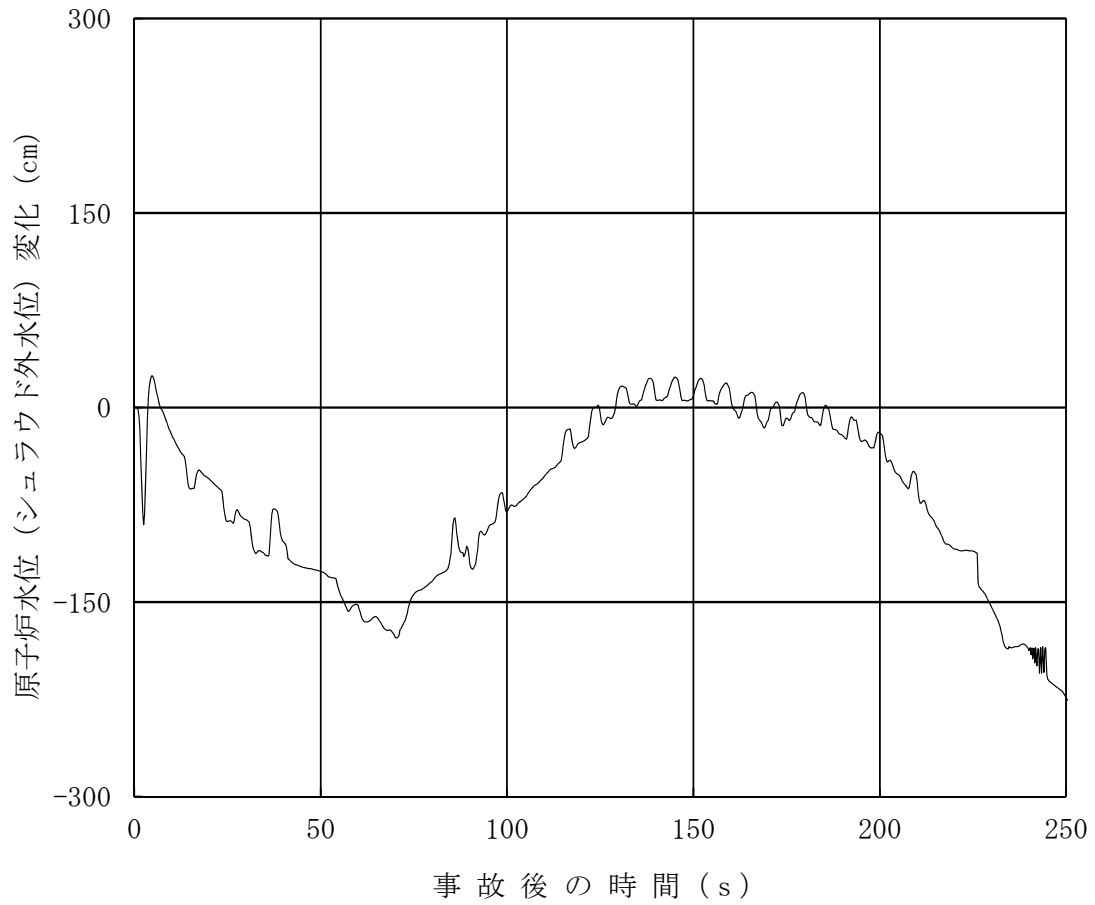


図 4.1-7 ATWS 時の原子炉水位変化の時間推移  
(ABWR, 平衡炉心)

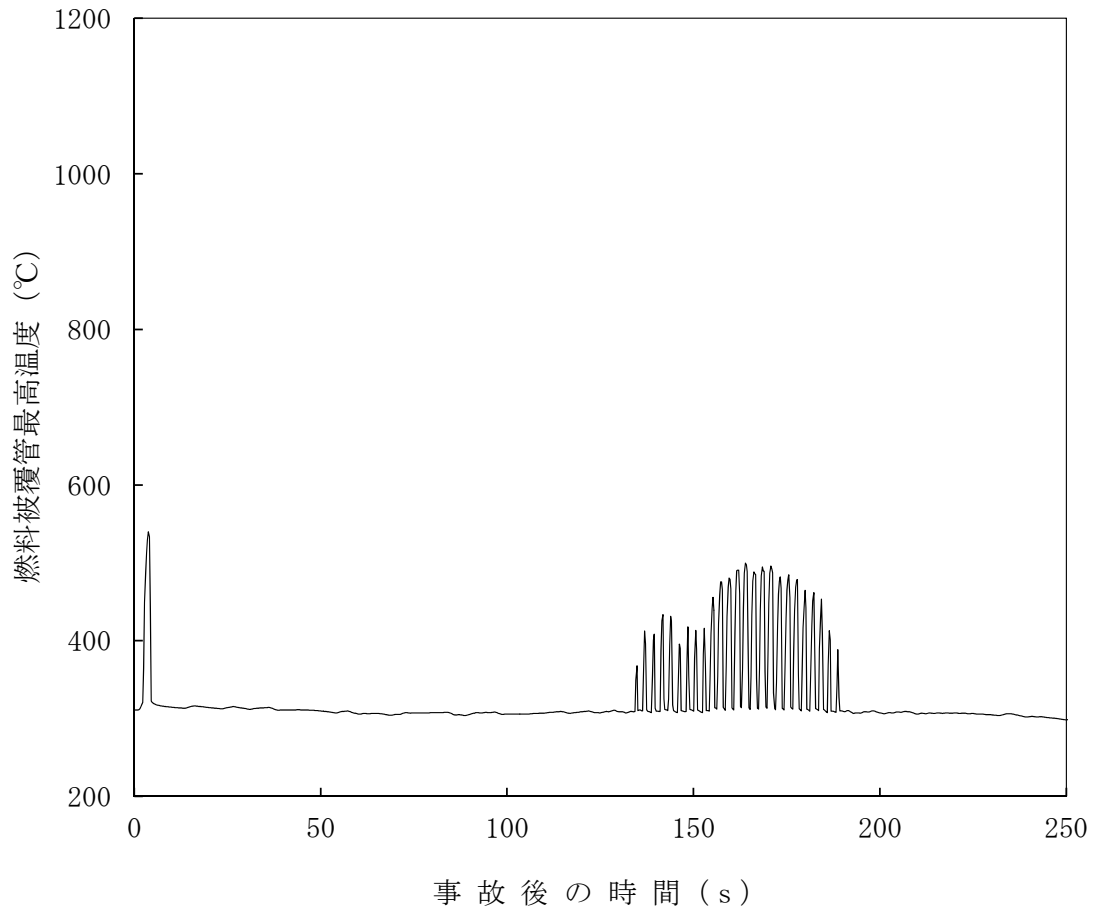
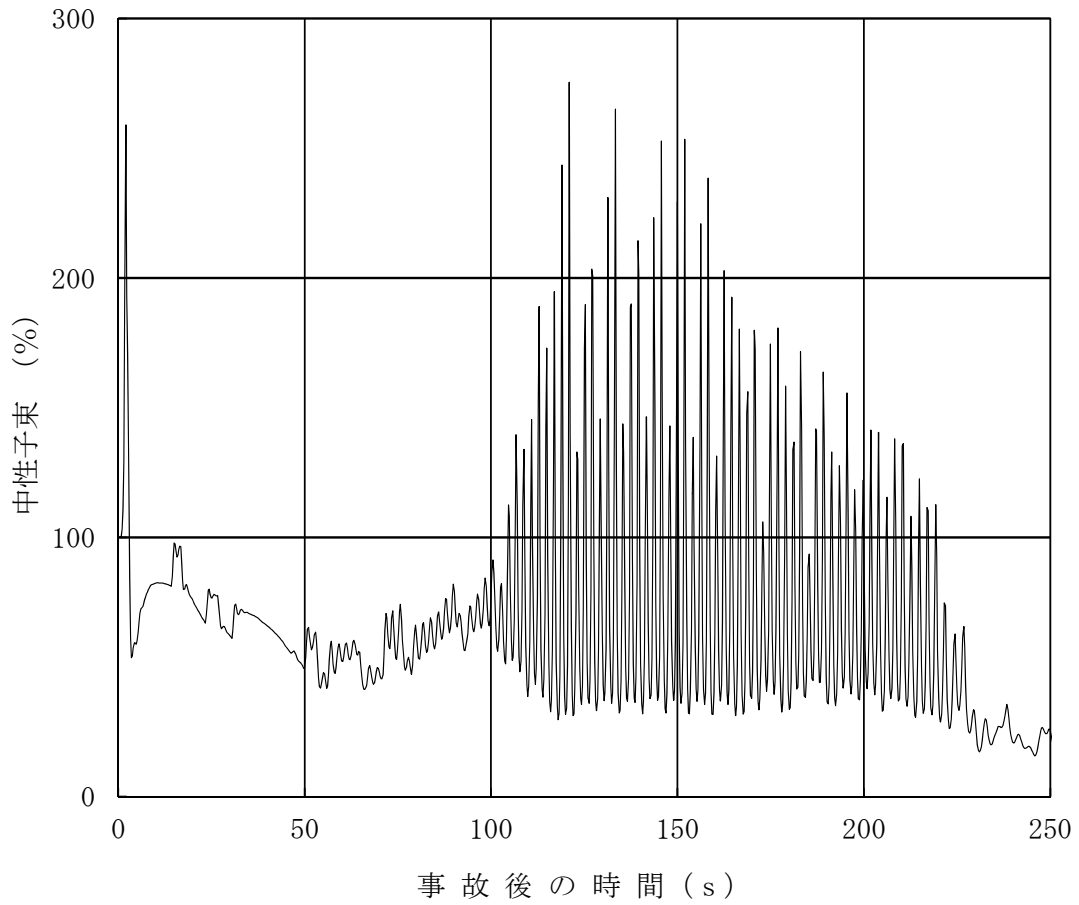
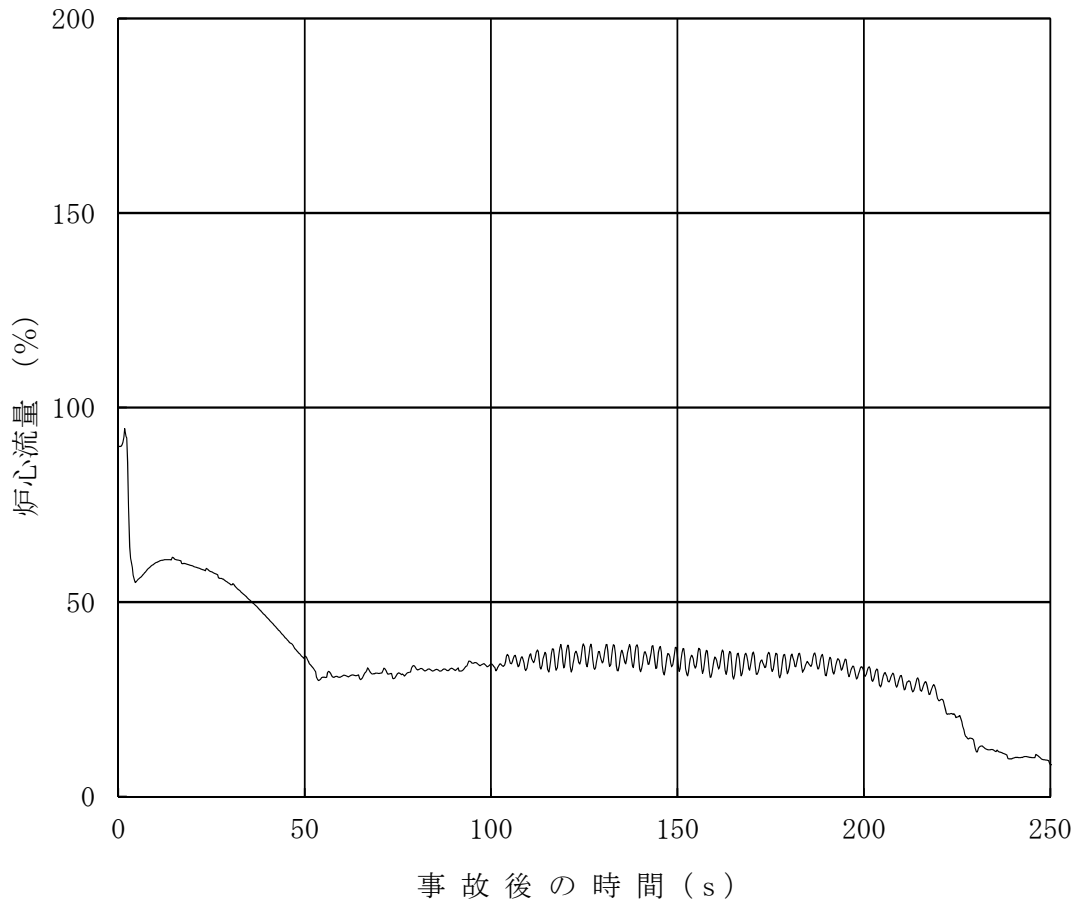


図 4.1-8 ATWS 時の燃料被覆管最高温度の時間推移  
(ABWR, 平衡炉心)

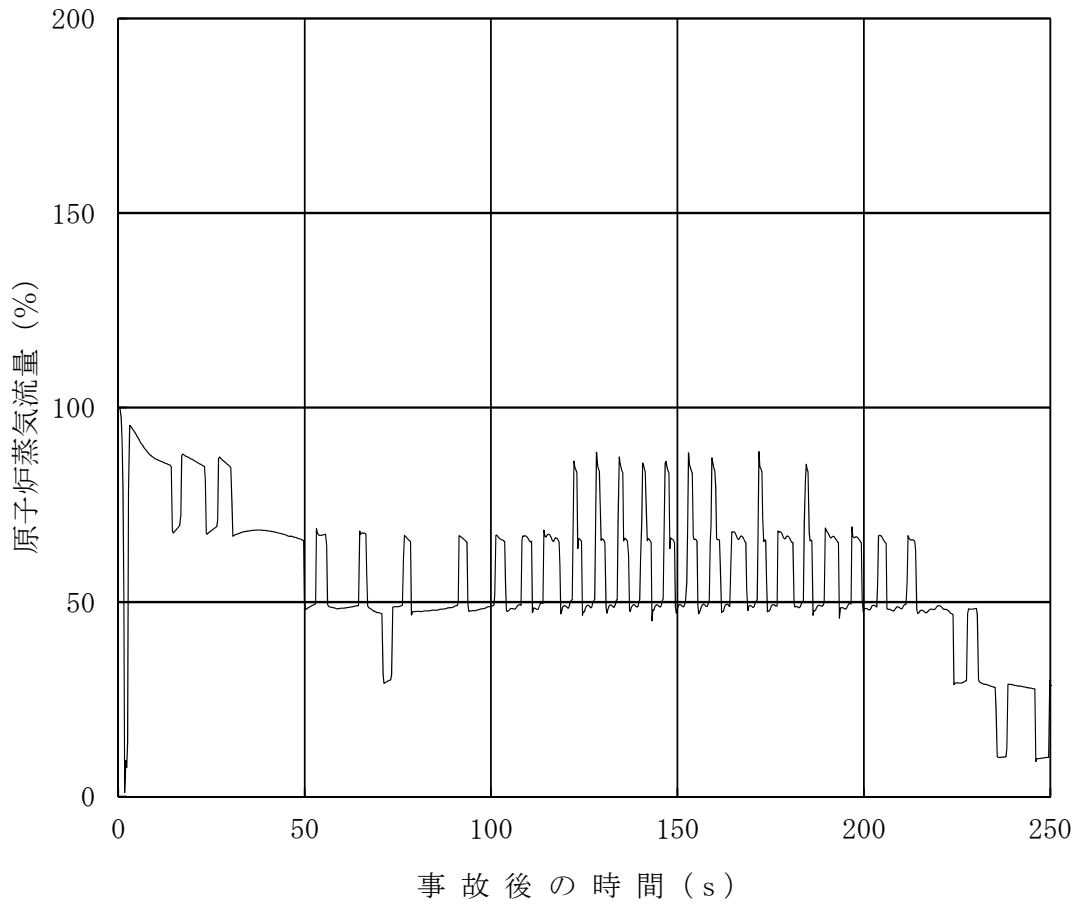


**図 4.1-9 ATWS 時の中性子束の時間推移**  
**(ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)**

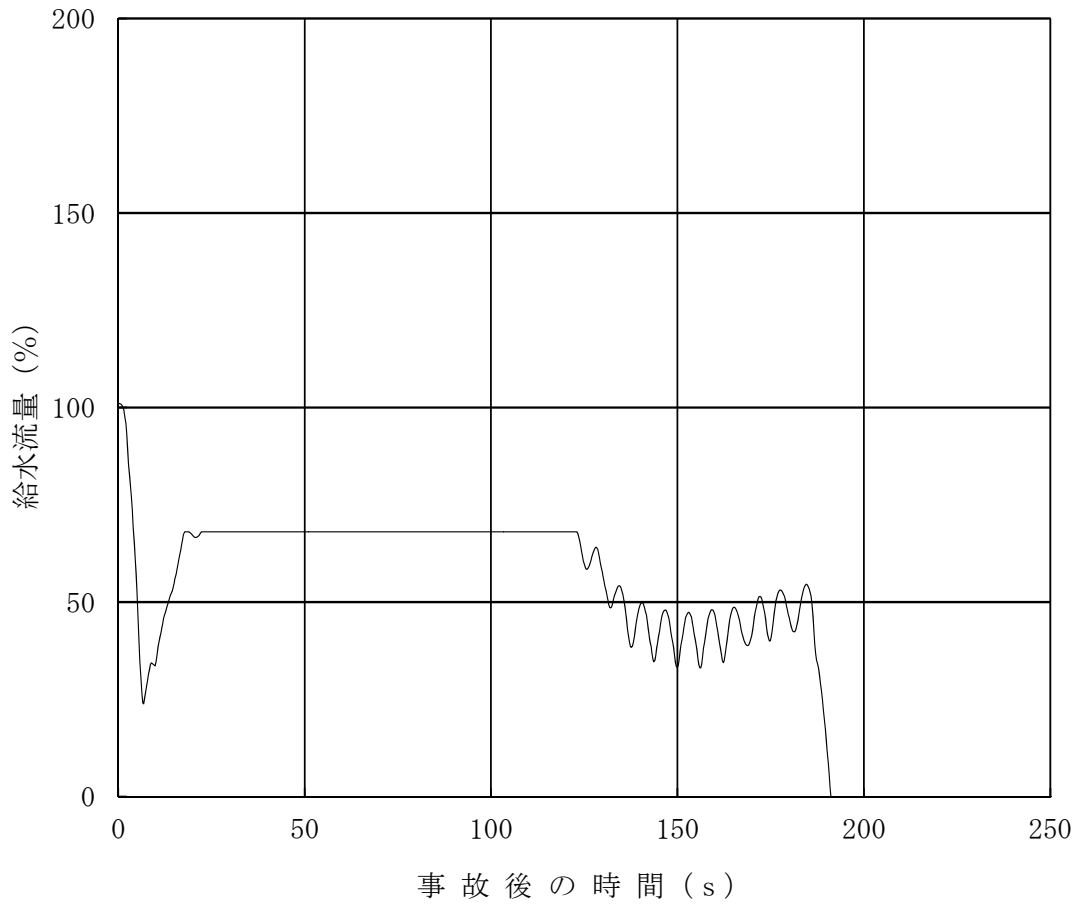




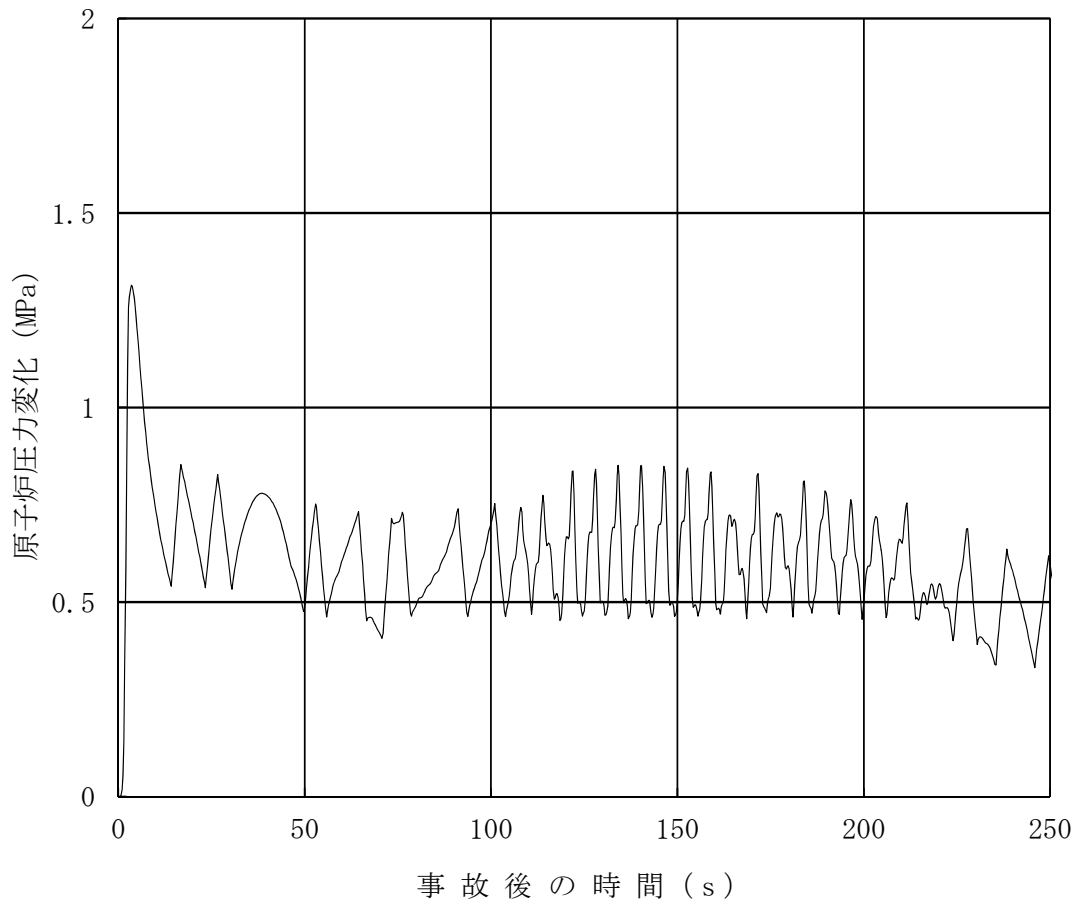
**図 4.1-10 ATWS 時の炉心流量の時間推移**  
 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)



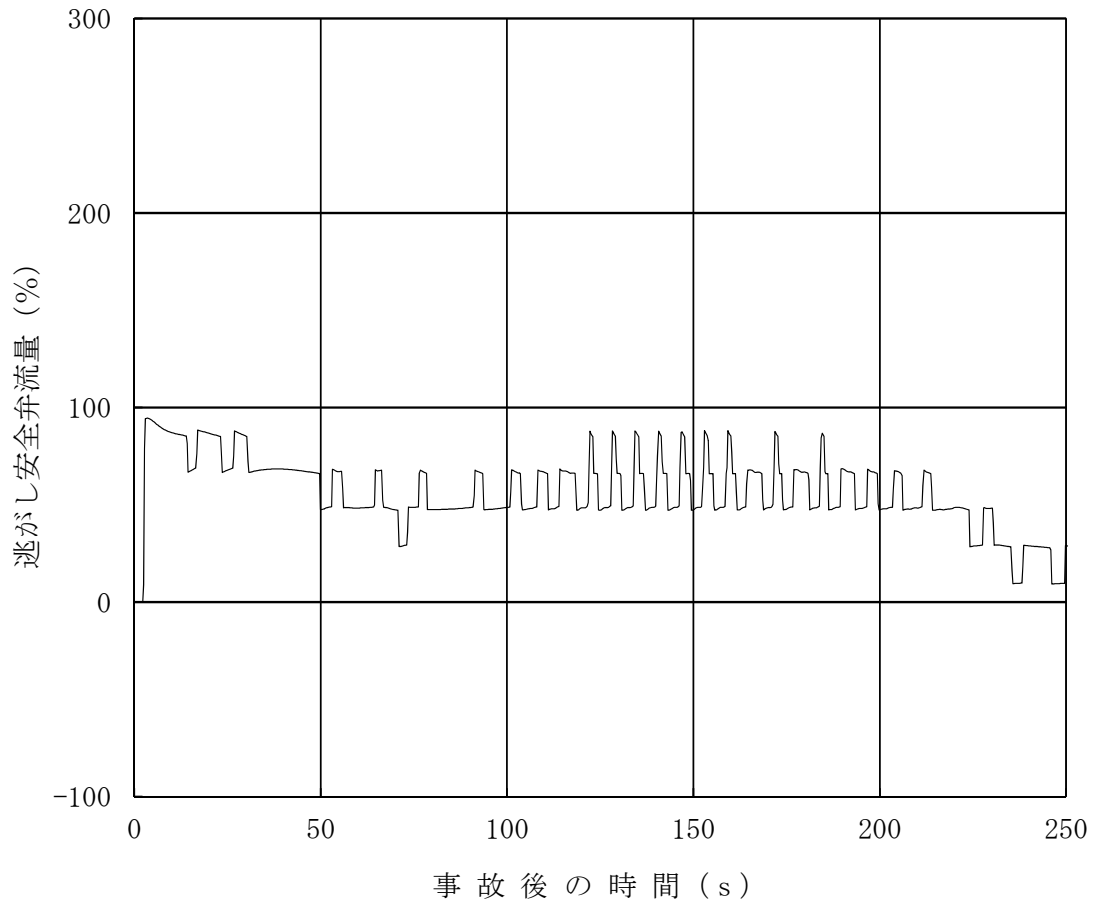
**図 4.1-11 ATWS 時の原子炉蒸気流量の時間推移**  
**(ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)**



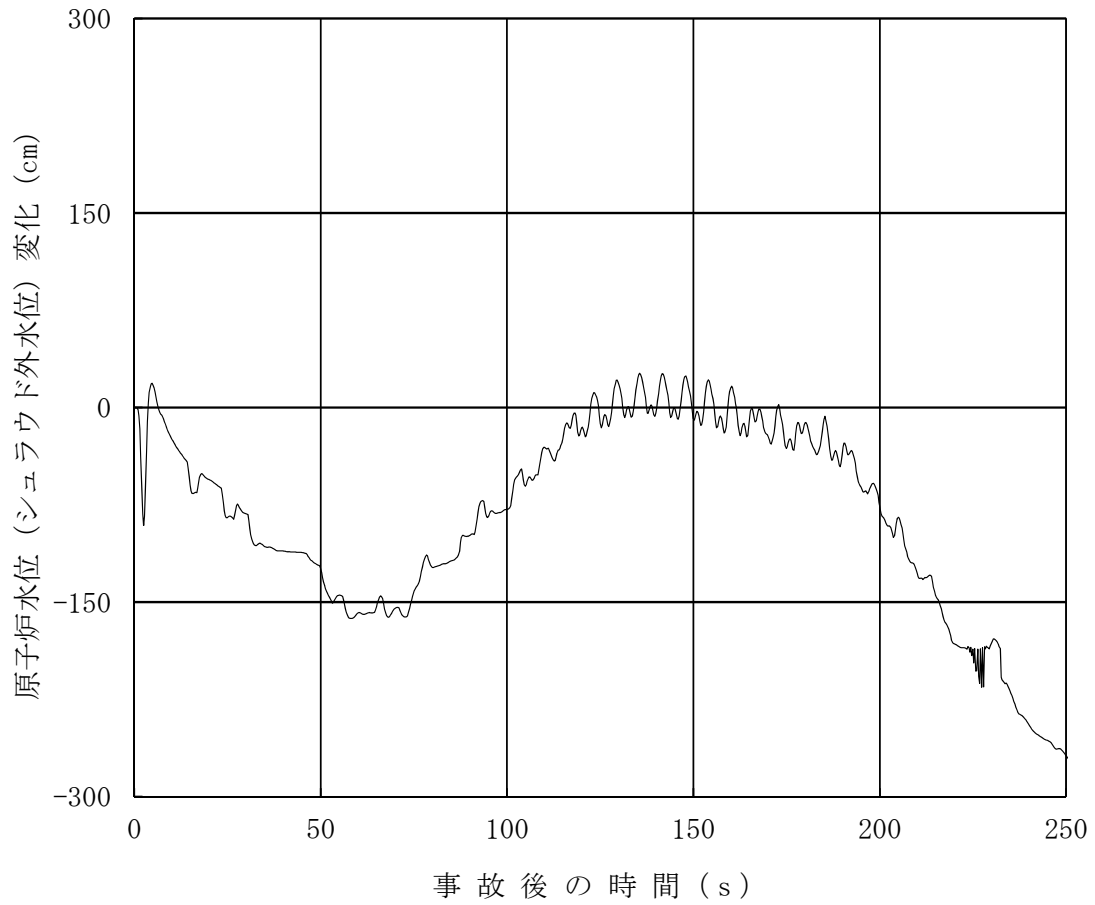
**図 4.1-12 ATWS 時の給水流量の時間推移**  
 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)



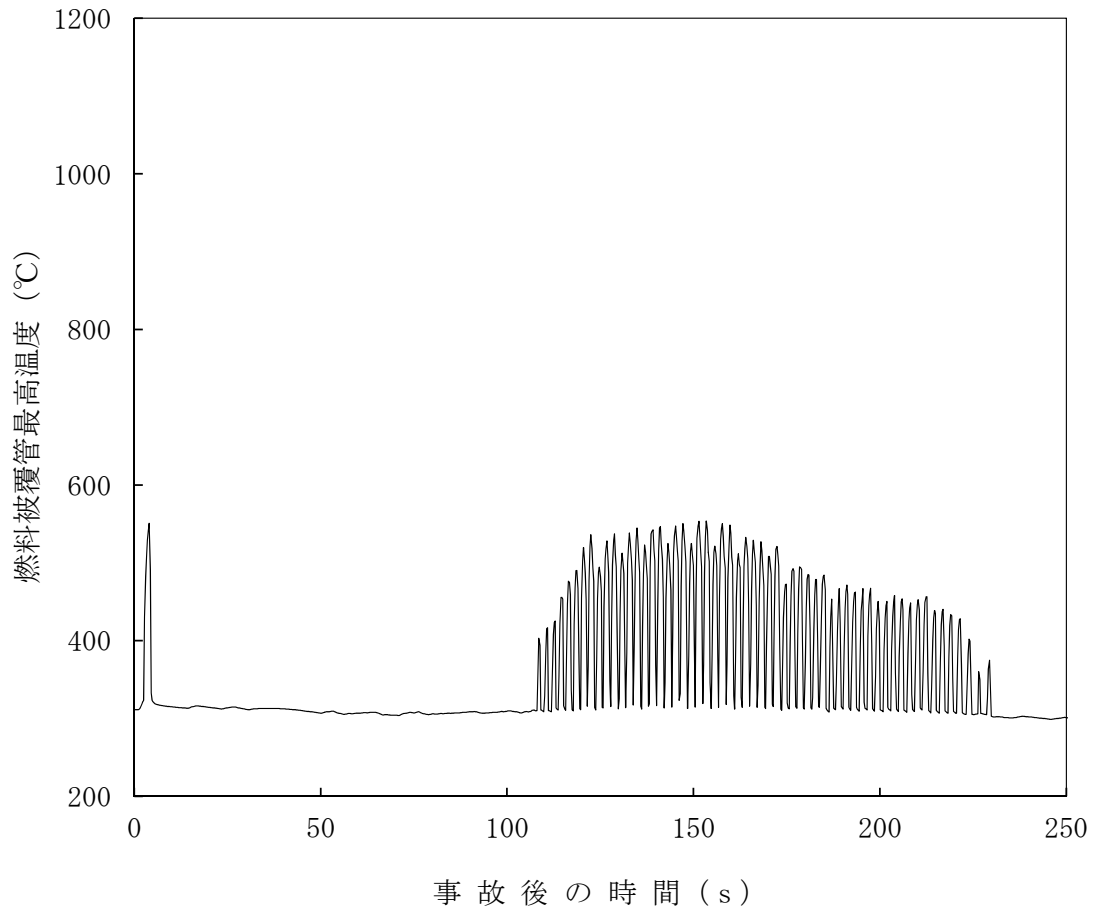
**図 4.1-13 ATWS 時の原子炉圧力変化の時間推移**  
**(ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)**



**図 4.1-14 ATWS 時の逃がし安全弁流量の時間推移**  
 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)



**図 4.1-15 ATWS 時の原子炉水位変化の時間推移**  
**(ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)**



**図 4.1-16 ATWS 時の燃料被覆管最高温度の時間推移  
(ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)**

## 参考文献

- [1] J. A. Borkowski, et al., *TRAC-BF1/MOD1: An Advanced Best Estimate Computer Program for Boiling Water Reactor Accident Analysis*, NUREG/CR-4356, Idaho National Engineering Laboratory, 1992.
- [2] R. J. Pryor, et al., *TRAC-PIA An Advanced Best-Estimate Computer Program for PWR LOCA Analysis*, Los Alamos Scientific Laboratory, NUREG/CR-0665, May 1979.
- [3] D. D. Taylor, et al., *TRAC-BD1/MOD1: An Advanced Best Estimate Computer Program for Boiling Water Reactor Transient Analysis*, Volumes 1-4, NUREG/CR-3633, Idaho National Engineering Laboratory, April 1984.
- [4] J. G. M. Andersen, K. H. Chu and J. C. Shaug, *BWR REFILL-REFLOOD Program, Task 4.7 - Model Development, Basic Models for the BWR Version of TRAC*, GEAP-22051, NUREG/CR-2573, EPRI NP-2375, April 1983.
- [5] Y. K. Cheung, V. Parameswaran and J. C. Shaug, *BWR REFILL-REFLOOD Program, Task 4.7 - Model Development, TRAC-BWR Component Models*, GEAP-22052, NUREG/CR-2574, EPRI NP-2376, April 1983.
- [6] Md. Alamgir, *BWR REFILL-REFLOOD Program Task 4.8 - TRAC-BWR Model Qualification for BWR Safety Analysis*, Final Report, GEAP-22049, NUREG/CR-2571, EPRI NP-2377, July 1983.
- [7] J. G. M. Andersen and C. L. Heck, *BWR Full Integral Simulation Test (FIST) Program, TRAC-BWR Model Development, Volume 1 - Numerical Methods*, GEAP-30875-1, NUREG/CR-4127-1, EPRI NP-3987-1, April 1985.
- [8] K. H. Chu, J. G. M. Andersen, Y. K. Cheung and J. C. Shaug, *BWR Full Integral Simulation Test (FIST) Program, TRAC-BWR Model Development, Volume 2 – Models*, GEAP-30875-2, NUREG/CR-4127-2, EPRI NP-3987-2, May 1985.
- [9] Y. K. Cheung, J. G. M. Andersen, K. H. Chu and J. C. Shaug, *BWR Full Integral Simulation Test (FIST) Program, TRAC-BWR Model Development, Volume 3 - Developmental Assessment for Plant Application*, GEAP-30875-3, NUREG/CR-4127-3, EPRI NP-3987-3, June 1985.
- [10] W. A. Sutherland, Md. Alamgir, J. A. Findlay and W. S. Hwang, *BWR Full Integral Simulation Test (FIST), Phase II Test Results and TRAC-BWR Model Qualification*, GEAP-30876, NUREG/CR-4128, EPRI NP-3988, June 1985.
- [11] J. G. M. Andersen, J. K. Garrett and J. C. Shaug, *TRACG Analysis of BWR Plant Stability Data*, Proceedings from the International Workshop on Boiling Water Reactor Stability, Brookhaven, New York, October 1990.



- [12] J. G. M. Andersen, et al., *TRACG Qualification*, NEDE-32177P, Rev. 2, January 2000.
- [13] J. R. Fitch, et al., *TRACG Qualification for SBWR*, NEDC-32725P, Rev. 1 August 2002.
- [14] J. R. Fitch, et al., *TRACG Qualification for ESBWR*, NEDC-33080P, Rev. 1, May 2005.
- [15] T. Iwamoto, M. Tamitani and B. R. Moore, *Methods, Benchmarking and Applications of BWR Core Simulator AETNA*, Advances in Nuclear Fuel Management III (ANFM 2003), Hilton Head Island, South Carolina, USA, Oct. 5-8, 2003.
- [16] J. G. M. Andersen, et al., *TRACG Qualification*, NEDE-32177P, Rev. 3, August 2007.
- [17] M. Tamitani, T. Iwamoto and B. R. Moore, *Development of Kinetics Model for BWR Core Simulator AETNA*, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol.40, No.4, p. 201-202, April 2003.
- [18] J. G. M. Andersen et al., *TRACG Model Description*, NEDE-32176P, Rev. 3, April 2006.
- [19] H.Christensen, *Power-to-Void Transfer Functions*, ANL-6385, July 1961.
- [20] J.F. Wilson, R.J. Grenda and J.F. Patterson, *Steam Volume Fraction in a Bubbling Two-Phase Mixture*, Trans. Am. Nucl. Soc. 4(2), P 356-357, 1961.
- [21] S. Morooka, T.Ishizuka, M.Iizuka and K.Yoshimura, *Experimental Study on Void Fraction in a Simulated BWR Fuel Assembly (Evaluation of Cross-Sectional Averaged Void Fraction)*, Nuclear Engineering and Design 114, pp.91-98 (1989).
- [22] T. Mitsutake, S. Morooka, K.Suzuki, S. Tsunoyama and K.Yoshimura, *Void Fraction Estimation Within Rod Bundles Based on Three-Fluid Model and Comparison with X-ray CT Void Data*, Nuclear Engineering and Design 120, pp. 203-212 (1990).
- [23] G. Agostini, A. Era and A. Premoli, *Density Measurements of Steam-Water Mixtures Flowing in a Tubular Channel Under Adiabatic and Heated Conditions*, CISE-R-291, December 1969.
- [24] D. K. Felde, et al., *Facility Description-THTF MOD 3 ORNL PWR BDHT Separate-Effects Program*, NUREG/CR-2640 (ORNL/TM-7842), September 1982.
- [25] D. G. Morris, et al., *An Analysis of Transient Film Boiling of High-Pressure Water in a Rod Bundle*, NUREG/CR-2469 (ORNL/NUREG-85), March 1982.
- [26] *The Marviken Full-Scale Critical-Flow Tests - Description of the Test Facility*, MXC-101, Marviken, Sweden, May 1982.
- [27] *The Marviken Full-Scale Critical-Flow Tests - Results from Test 15*, MXC-215, Marviken, Sweden, May 1982.
- [28] *The Marviken Full-Scale Critical-Flow Tests - Results from Test 24*, MXC-224, Marviken, Sweden, May 1982.
- [29] B. Matzner and D. A. Wilhelmson, *Critical Power and Pressure Drop Tests – Step II Fuel Design Standardization Program for BWR/2–5 Reload Fuel*, NEDC-31499P, 1987.
- [30] GE Nuclear Energy, *Critical Power and Pressure Drop Tests of Simulated 10X10 Bundle Designs Applicable to GE14*, NEDC-32874P, March 2000.

- [31] GE Nuclear Energy, *TASC-03A – A Computer Program for Transient Analysis of a Single Channel*, NEDC-32084P-A, Rev. 2, July 2002.
- [32] R. K. McCardell, D. I. Herborn and J. E. Houghtailing, *Reactivity Accident Test Results and Analyses for the SPERT III E-Core – A Small, Oxide-Fueled, Pressurized-Water Reactor*, IDO-17281, AEC Research and Development Report, March 1969.
- [33] K. Azekura, et al., *Development of a BWR Lattice Analysis Code LANCER Based on an Improved CCCP Method*, Advances in Nuclear Fuel Management III (ANFM 2003), Hilton Head Island, South Carolina, USA, Oct. 5-8, 2003.
- [34] W. J. Letzring, *Preliminary Facility Description Report for the BD/ECC 1A Test Phase*, GEAP-23592/NRC-2, December 1977.
- [35] D. Seely, and R. Muralidharan, *BWR Low Flow Bundle Uncovery Test and Analysis*, General Electric Company, GEAP-24964, NUREG/CR-2231, EPRI NP-1781, August 1981.
- [36] L. S. Lee, G. L. Sozzi and S. A. Allison, *BWR Large Break Simulation Tests – BWR Blowdown/Emergency Core Cooling Program*, Volumes 1 & 2, General Electric Company, GEAP-24962-1, NUREG/CR-2229, EPRI NP-1783, March 1981.
- [37] *Transient and Stability Tests at Peach Bottom Atomic Power Station Unit 2 at End of Cycle2*, EPRI NP-564, June 1978.
- [38] T. Iwamoto, et al., *Validation of LANCR01/AETNA01 BWR Code Package against FUBILA MOX Experiments and Fukushima Daiichi Nucleare Power Plant Unit 3 MOX Core*, PHYSOR 2014 – The Role of Reactor Physics Toward a Sustainable Future, The Westin Miyako, Kyoto, Japan, September 28 – October 3, 2014.
- [39] USNRC, *AEOD Concerns Regarding The Power Oscillation Event at LaSalle 2(BWR-5)*, AEOD Special Report S803, 1988.
- [40] J. M. Dotson, et al., *Three-dimensional Boron Mixing Model*, NEDE-22267, October 1982.
- [41] GE Hitachi Nuclear Energy, *TRACG Model Description*, NEDE-32176P, Rev. 4, January 2008.
- [42] 株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン「炉心核熱水力特性解析システム システム全般」, GLR-005 システム編 (平成 27 年 4 月)

## 添付1 TRACGコードによる中性子束振動に係る解析結果を参考として用いる理由について

BWRにおいて高出力・低炉心流量状態となった場合、以下に示すような中性子束振動及び流量振動が発生することがある。

### (1) チャンネル安定性

BWRの炉心は上下に共通のプレナム部を有する多数の燃料チャンネルが配置されている。各チャンネル内では、チャンネル入口から流入する冷却材が、非沸騰、サブクール沸騰、飽和沸騰へとチャンネル出口に向かって連続的な変化を示す。何らかの要因により摂動（例えば、冷却材流量の増加）が加えられると、チャンネルの入口と出口の間の差圧が変化するが、上下プレナム間の差圧は一定であるため、摂動は抑制される。この際、摂動の影響が大きいチャンネル下流側（二相流領域）に摂動を受けた流れが到達するのに時間遅れがあるため、流量振動が起きることがある。これをチャンネル安定性という。

### (2) 炉心安定性、領域安定性

BWRにおいて例えば出力が上昇した場合、ボイド率が増加して負の反応度が投入され、出力が抑制される。その後、出力低下によりボイド率が減少して正の反応度が投入されるが、ボイド率の変化に時間遅れがあることにより出力振動（中性子束振動）が起きることがある。このようなボイド率変動に伴う反応度フィードバック以外に、燃料棒温度変動に伴う反応度フィードバック、炉心流量変化がチャンネル入口部から炉内構造物（上部プレナム、セパレータ、再循環系、下部プレナム）を経て炉心入口部に戻ることに伴う流量フィードバック及び(1)に述べたチャンネル安定性も重畳して、中性子束振動が起きる。

このようなメカニズムにより炉心全体の中性子束振動が発生するものを炉心安定性、空間的に高次モードでの中性子束振動が起きるものを領域安定性という。

上記(1)、(2)に関して、REDYコードでは、核特性は一点近似動特性モデルを用い、ボイド率、圧力損失などの熱水力特性は炉心を一点に近似した集中定数モデルを用いているため、チャンネル安定性、チャンネル安定性を含んでいる炉心安定性、チャンネル安定性に加え炉心内の領域間の振動を取扱う領域安定性のいずれも模擬することは困難である。

一方、TRACGコードでは、核特性モデル及び熱水力モデルで圧力容器内を3次元的に取り扱い、熱水力モデルでは二相流2流体場の6個の方程式により、質量、運動量及びエネルギーについて液相及び気相を個別に取り扱うことができるので、チャンネル安定性、炉心安定性、領域安定性のいずれの安定性も評価することが可能である。

このため、短時間領域での中性子束振動が局所的な燃料被覆管温度に与える影響を確認するために、参考としてTRACGコードによる評価を行っている。

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

(参考資料2 J A S M I N E)

# 目 次

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 1. はじめに.....            | 1  |
| 2. 使用実績及び解析モデルについて..... | 2  |
| 2.1. 使用実績.....          | 2  |
| 2.2. 解析モデル.....         | 4  |
| 2.2.1. 背景.....          | 4  |
| 2.2.2. 解析モデルの構成.....    | 4  |
| 2.2.3. 解析モデルの説明.....    | 7  |
| 2.3. 入出力.....           | 19 |
| 2.3.1. 入力例.....         | 20 |
| 2.3.2. 出力例.....         | 26 |
| 3. 解析結果の例示.....         | 27 |
| 4. 水蒸気爆発実験への適用例.....    | 29 |
| 4.1. 粗混合実験解析.....       | 29 |
| 4.1.1. 解析条件.....        | 29 |
| 4.1.2. 解析結果.....        | 33 |
| 4.2. 爆発実験解析.....        | 35 |
| 4.2.1. 解析条件.....        | 35 |
| 4.2.2. 解析結果.....        | 40 |
| 5. 参考文献.....            | 47 |

添付 1. 水蒸気爆発時のウォーターハンマーについて

## 1. はじめに

格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」では，運転時の異常な過渡変化，原子炉冷却材喪失事故又は全交流動力電源喪失が発生するとともに，非常用炉心冷却系等の安全機能の喪失が重畳する。このため，緩和措置がとられない場合には，溶融炉心と原子炉圧力容器外の原子炉冷却材が接触し，このときに発生するエネルギーが大きい場合に構造物が破壊され原子炉格納容器破損に至る可能性がある。

この原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用による水蒸気爆発事象発生の可能性は，これまでの知見からも極めて低いと考えられる。しかしながら，水蒸気爆発が発生した場合についても考慮し，ペDESTAL等の原子炉格納容器の構造部材の支持機能に対する影響を確認しておくことは，原子炉格納容器下部への水張り等の格納容器破損防止対策の適切性を確認する上でも有益な参考情報になると考える。

本資料では，水蒸気爆発の現象を評価する解析コードである JASMINE コードについて，以下の内容をまとめる。

- ・ 使用実績及び解析モデル
- ・ 試験結果とのベンチマーク

## 2. 使用実績及び解析モデルについて

### 2.1. 使用実績

水蒸気爆発解析コード JASMINE (JAEA Simulator for Multiphase Interactions and Explosions) <sup>[1]</sup>は、日本原子力研究開発機構(JAEA)にて開発された水蒸気爆発の現象を評価する解析コードであり、水蒸気爆発の粗混合過程及び伝播膨張過程(爆発過程)における伝熱流動現象のシミュレーションを行うことができる。

表 2.1.1 に JASMINE の主な適用実績を示す。JASMINE コードは、FARO および KROTOS における各種試験結果とのベンチマークにより水蒸気爆発時の挙動を適切に模擬できることが確認されているほか、SERENA 試験解析への適用<sup>[2]</sup>、炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率評価への適用実績<sup>[3]</sup>がある。

#### (1) 格納容器破損確率評価への適用

BWR および PWR モデルプラントにおける炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率を、水蒸気爆発の解析コードである JASMINE コードと確率論的手法を組み合わせ、評価した事例が文献<sup>[3]</sup>にて示されている。

BWR モデルプラント (Mark-II 型格納容器) を対象としたペDESTAL 領域水蒸気爆発解析の概要は以下のとおりである。

既存の確率論的安全評価より、ペDESTAL 領域における水蒸気爆発に対する寄与の大きい事故シーケンスとして「中破断 LOCA 時炉心冷却失敗、自動減圧成功」、「中破断 LOCA 時低圧注入作動、崩壊熱除去失敗」の各シーケンスグループが選定され、事故解析コードによる解析等に基づき原子炉圧力容器破損時の格納容器内熱水力条件および熔融炉心条件が設定されている。

解析体系は 2 次元円筒座標系であり、径方向 13×軸方向 33 セルの解析格子でペDESTAL 領域が模擬されている。爆発解析では、体系の中心軸上で底から 2 番目のセルに爆発源を置き、トリガリングを与えている。

JASMINE コードは炉外水蒸気爆発による負荷の確率分布を評価するために用いられている。評価の入力条件である水蒸気爆発の初期・境界条件、及び解析モデルに含まれるパラメータは、それぞれの不確かさを表す確率分布関数で与えられ、JASMINE 解析により、その不確かさを伝播させ、水蒸気爆発による負荷の確率分布が評価される。負荷を示す指標としては、プール水に与えられる運動エネルギーのピーク値、壁面の力積の飽和値がそれぞれ評価され、水蒸気爆発による負荷の累積確率分布が評価されている。

#### (2) SERENA 試験解析への適用

国際協力プロジェクトとして実施されている最新の OECD-NEA/SERENA 試験データを用いて、JASMINE を用い、SERENA 試験 TROI 装置体系を対象にメッシュモデルを作成し、試験体

系内での粗混合過程及び細粒化過程における熱流動解析が実施<sup>[2]</sup>されている。

SERENA 試験装置は炉容器と圧力容器の 2 つに大別され、試験時には、炉容器内で融解した溶融デブリが開放弁及びノズルを通じて圧力容器内に設置された試験容器に流入する。試験容器は、直径 600mm、高さ 1.5m の円筒容器であり、水面高さが 1m となるように水が溜められている。解析体系は、圧力容器、圧力容器内の試験容器、メルト流入位置としてノズルが考慮されており、試験容器形状が軸対称形状であることから、2次元軸対称としてモデル化されている。

表 2.1.1 JASMINE の主な適用実績

|   |       |  |
|---|-------|--|
| 1 | 研究名称  | 軽水炉シビアアクシデント時の炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率の評価  |
|   | 解析実施者 | 日本原子力研究開発機構  |
|   | 実施時期  | 2007 年 11 月  |
|   | 研究概要  | BWR 及び PWR モデルプラントにおける炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率を評価した。水蒸気爆発による負荷の確率分布を評価するために、ラテン超方格サンプリング (LHS) による確率論的手法を用い、その中で水蒸気爆発コード JASMINE を物理モデルとして使用した。評価対象は BWR Mk-II 型のペDESTAL 及び圧力抑制プール、PWR のキャビティにおける水蒸気爆発である。 |
| 2 | 研究名称  | 改良型軽水炉のシビアアクシデント対策に係る検討  |
|   | 解析実施者 | 独立行政法人 原子力安全基盤機構   |
|   | 実施時期  | 平成 21 年度   |
|   | 研究概要  | FCI 解析コード JASMINE Ver. 3 を用いて、SERENA 試験体系を対象にメッシュモデルを作成し、容器内熱流動解析を実施することによりその適用性について検討を実施。また作成したモデルを適用して感度解析を実施し、模擬溶融デブリ及びプール水の温度、プールの形状、模擬溶融デブリの組成について水蒸気爆発に対する影響を確認した。                             |



## 2.2. 解析モデル

### 2.2.1. 背景

図 2.2.1 で示す通り，水蒸気爆発は，熱的デトネーションモデル<sup>[4]</sup>において，4つの段階があると考えられている。それぞれの過程に関する現象を以下に示す。

- ・粗混合 低温冷却材内で高温の融体が粗い粒子として分散し，混合しながら蒸気膜によって断熱されている状態。（タイムスケール：0.1秒～数秒）
- ・トリガリング 蒸気膜の不安定化による急速な冷却材の蒸発および溶融した液滴の細粒化の開始
- ・伝播 衝撃波の伝播に伴う溶融液滴の細粒化および急速な熱伝達が生じる状態。（タイムスケール：数ミリ秒単位）
- ・膨張（爆発） 冷却材の蒸発と，周囲に負荷を生じさせる可能性のある混合物の膨張（爆発）

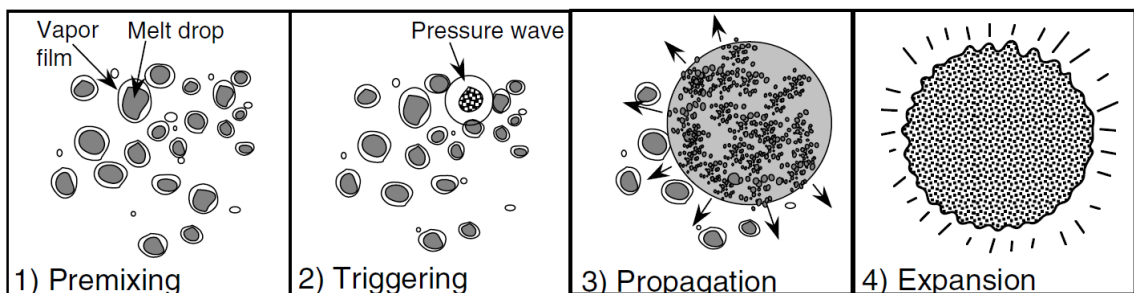


図 2.2.1 水蒸気爆発の現象論的な4つの段階<sup>[1]</sup>

上で示した現象論的な4つの段階の仮定に基づくと，水蒸気爆発による発生エネルギーの評価は，通常次の2ステップを通して行われる。

- ・冷却材と粗混合状態にあり，続く爆発過程に関与する高温液体がもつ内部エネルギーの評価
- ・伝播と膨張（爆発）の過程を介する力学的エネルギーの評価

### 2.2.2. 解析モデルの構成

原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用（FCI）で想定される現象と JASMINE コードの概念と構成を図 2.2.2 に示す。JASMINE コードは溶融炉心挙動モデルと冷却材の多相流動モデルの2つで構成される。溶融炉心モデルは融体ジェット，融体プール，融体粒子の3つのサブモデルを含む。冷却材の熱水力挙動を扱う多相流動モデルは，日本原子力研究所（JAERI）で開発された ACE-3D コード<sup>[5]</sup>の修正版である。

JASMINE は、粗混合過程と爆発過程の 2 段階に分けて水蒸気爆発の全過程を解析する。初めに、流動体系や流入する溶解物に関する初期/境界条件を与えることで粗混合過程が解析され、次に、解析時刻における粗混合計算の出力データに、爆発モデルオプションの指定を与えることで、爆発過程、即ち伝播と膨張過程が解析される。

粗混合過程と爆発過程の物理特性を表 2.2.1 にまとめる。

表 2.2.1 粗混合過程及び爆発過程の物理特性

|           | 粗混合           | 爆発 (伝播, 膨張)   |
|-----------|---------------|---------------|
| 物理特性      |               |               |
| 支配的な物理過程  | 重力 (浮力) による対流 | 衝撃波の伝播        |
| 時間スケール    | 0.1-10s       | 0.1-10ms      |
| 融体サイズスケール | 1-10mm        | 1-100 $\mu$ m |

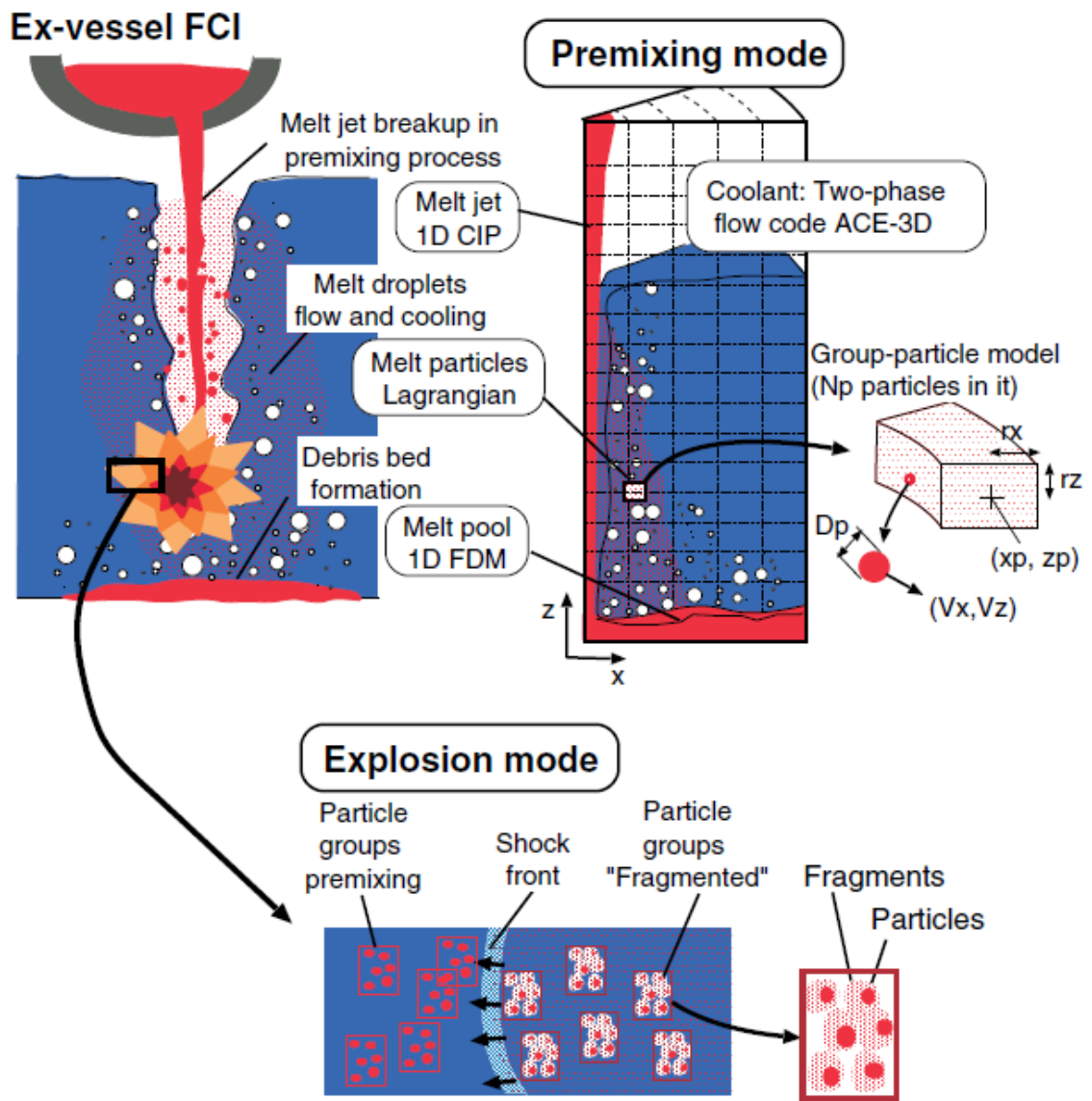


図 2.2.2 JASMINE コードの概念と構成 <sup>[1]</sup>

### 2.2.3. 解析モデルの説明

#### (1) 融体ジェットモデル

融体ジェットに対しては、z 方向一次元の質量、内部エネルギーおよび運動量保存則が解かれる。融体ジェット表面からの液滴の発生（融体ジェットからの質量エントレインメント）は、ジェット分裂長に対する実験相関式と融体ジェットの質量保存則に基づき求められる。図 2.2.3 は、融体ジェットがプール水で侵食され、下方に進むに従ってジェット直径が減少する様を表している。ジェットが完全に消失する水深をジェット分裂長  $L_{brk}$  と呼ぶ。

ジェット分裂長は、Bond 数  $Bo_J > 50$  の条件では Taylor 型相関式<sup>[6]</sup>が用いられ、それ以外の場合は Saito らの相関式<sup>[7]</sup>によって次の通り算出される。

$$\frac{L_{brk}}{D_{ji}} = \begin{cases} 10 \left( \frac{\rho_J}{\rho_l} \right)^{1/2} & Bo_J = \frac{\rho_J \cdot g \cdot D_{ji}^2}{\sigma_J} \geq 50 \\ 2.1 \left( \frac{\rho_J}{\rho_l} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{V_{ji}^2}{g \cdot D_{ji}} \right)^{1/2} & Bo_J = \frac{\rho_J \cdot g \cdot D_{ji}^2}{\sigma_J} < 50 \end{cases} \quad (2.2-1)$$

ここで、 $\rho_J$  と  $\rho_l$  はそれぞれジェットと水の密度、 $\sigma_J$  はジェットの表面張力、 $D_{ji}$  は水面でのジェットの直径、 $V_{ji}$  は水面でのジェット流速、 $g$  は重力加速度である。

融体液滴発生量、すなわち質量エントレインメントに対応する体積エントレインメント流量 ( $V_e$ ) は、ジェット直径が水深と共に線形的に減少するという仮定で計算される。

$$V_e = \frac{V_J}{2} \cdot \left( \frac{D_{ji}}{L_{brk}} \right) \cdot \sqrt{\frac{H_{pl}}{\max(L_{brk}, H_{pl})}} \quad (2.2-2)$$

ここで、 $H_{pl}$  はプール深さ、 $V_J$  はジェットの流速である。

質量エントレインメント流量  $\dot{m}_e$  は、次のように求められる。

$$\dot{m}_e = C_{ent} \cdot \rho_J \cdot V_e \quad (2.2-3)$$

ここで、 $C_{ent}$  は定数である。定数  $C_{ent}$  を 1 として設定した場合、ジェットは実験に基づく相関式によって決定されたジェット分裂長で崩壊する。 $C_{ent}$  を大きくするにつれ、ジェット分裂長は短くなる。

本融体ジェットモデルでは、ジェットからの伝熱は、表面積と冷却水内の移動時間のどちらにおいても、融体粒子や融体プールの場合と比較して小さいので、現在のところ考慮されていない。従って、ジェットから冷却水への熱流束は 0 と設定される。

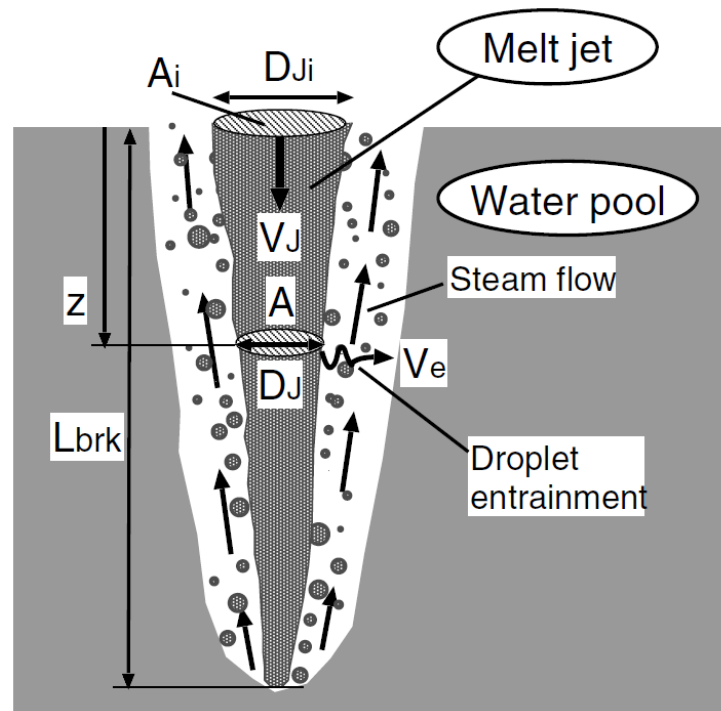


図 2.2.3 ジェット分裂モデルの概要 [1]

## (2) 融体プールモデル

ジェット又は粒子群が底面に到達する際には、連続した融体を形成する可能性がある。図 2.2.4 に、融体プールモデルの模式図を示す。融体プールモデルの概要を以下に示す。

- $x$  方向一次元の質量、エネルギーおよび運動量保存則を解く。
- ジェットや粒子群から加わった融体質量を考慮する。
- 融体プール表面における二相流および床との摩擦影響は無視する。
- 融体プール端の凝固を取り扱う。
- 二相流と融体プール間の伝熱を考慮する。(図 2.2.5)
- 流動様式が気泡流以外、すなわち核沸騰、膜沸騰状態となって気相体積が増加することによる熱流束緩和効果（ボイド効果）は、ベース熱流束にボイド率の関数としての係数を乗じることで考慮する。

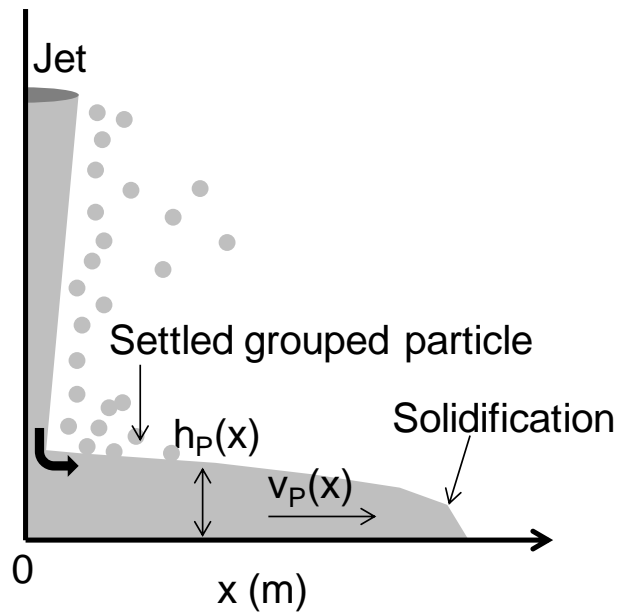


図 2.2.4 融体プールモデル模式図 [1]

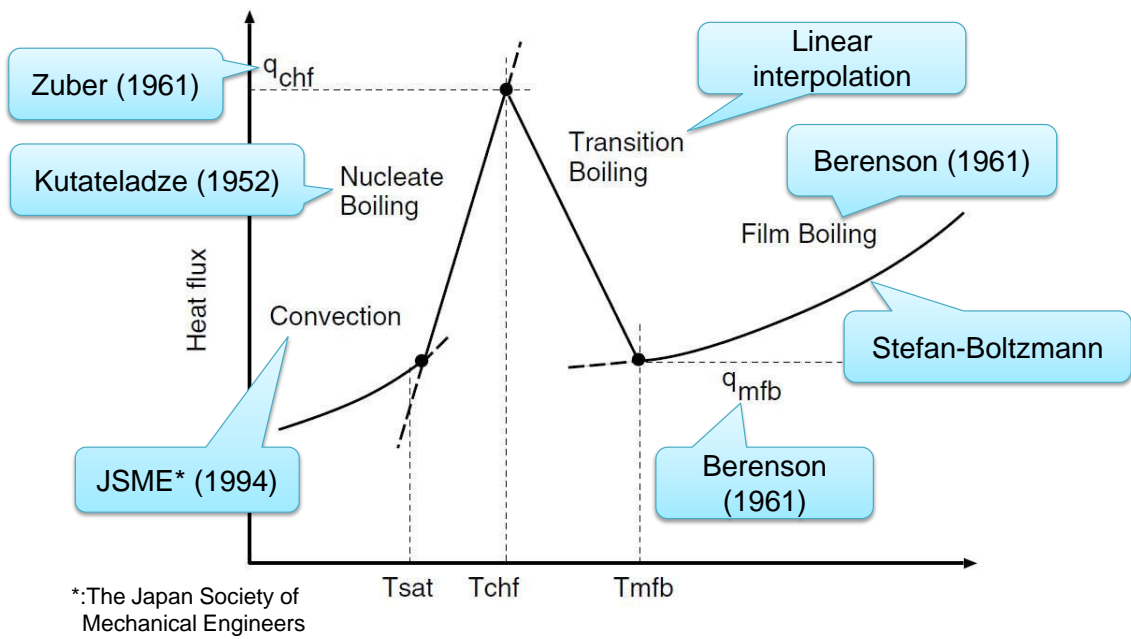


図 2.2.5 各沸騰状態において用いられる伝熱モデル (融体プール)

### (3) 融体粒子モデル

実機体系のような大規模シミュレーションを可能とするために、グループ化された粒子（粒子群）の概念が導入された。図 2.2.6 に融体粒子モデルの概要図を示す。融体粒子モデルの概要を以下に示す。

- “粒子群”とは、同じ特性を持ち、 $x$ - $z$  平面上の有限な空間を占める粒子のグループである。
- 粒子群の実際の形状、回転、拡散特性のような属性は無視される。
- それぞれの粒子群の代表粒子の動きやヒートバランスは、ラグランジュ方程式によって計算される。
- ジェット表面から粒子群が離れる前に、一定量以上の粒子を蓄える“前粒子群”概念が導入されている。前粒子群の融体ジェット表面からの放出基準を以下に示す。
  - 粒子群質量  $> 0$  , かつ下記に示す少なくとも1つの状況に該当すること。
    - 粒子数が  $N_{\text{per}}$  の値を超える。
    - 前粒子群の  $x$  方向のサイズが、格子の  $x$  方向サイズの4分の1より大きい。
    - 前粒子群の  $x$  方向の外側のエッジ位置が最初のセル境界を超える。
    - 存続時間が時間制限値  $n_{\text{hist}}$  を超える。

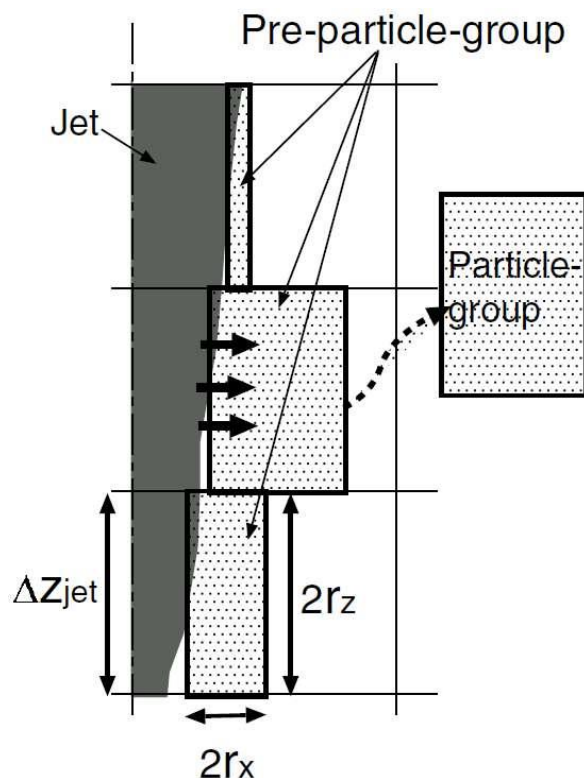


図 2.2.6 融体粒子モデル概要図 [1]

次に、粒子群の取り扱い手法について説明する。

図 2.2.7 に、物理的に非現実的な状況の発生を回避するために設けられた粒子群間のインターフェースにおける三つのモデルを示す。これらのモデルの特徴を以下に示す。

1. 接触する二つの粒子群の粒子の体積割合の総和が融合制限  $\alpha_{\text{pack}} (= 0.6)$  以上となる場合は、二つの粒子群は減衰係数 0.5 の条件で反発する。
2. 上記の条件を満たさず、かつ二つの接する粒子群が同じような特性を持つ場合、すなわち温度、粒子径、速度が 20%以内の差で一致する場合は、それらは融合して一つの粒子群となる。
3. 上記二つの条件を満たさない場合、二つの粒子群は干渉を起こさずにすり抜ける。

図 2.2.8 に、解析体系の境界において粒子群に適用する取扱い条件を示す。

1. 粒子群が中心境界に到達した場合、境界内側へ弾性衝突する。
2. 粒子群が頂部または側部の境界に達した際は、減衰係数 0.1 の条件で境界内側へと反発する。
3. 粒子群が底へ到達した際、デブリプールと粒子群のどちらかが溶融している場合には粒子群はデブリプールと融合する。そうでない場合には、粒子群は冷え固まったデブリプール上に堆積し、デブリベッドを形成する。

図 2.2.9 に粒子に対する抗力係数の評価条件を示す。抗力係数は球体に対する一般的な評価式を用いる。

融体粒子に対する伝熱モデルの概要を以下に示す。

- ・ 粒子表面における熱伝達率は、図 2.2.10 に示す相関式により評価される。粒子が固化するかどうかは、その粒子の表面温度により判断される。
- ・ 粒子群周囲のボイドおよび床への粒子群堆積に伴う伝熱効果の劣化の影響が考慮される。



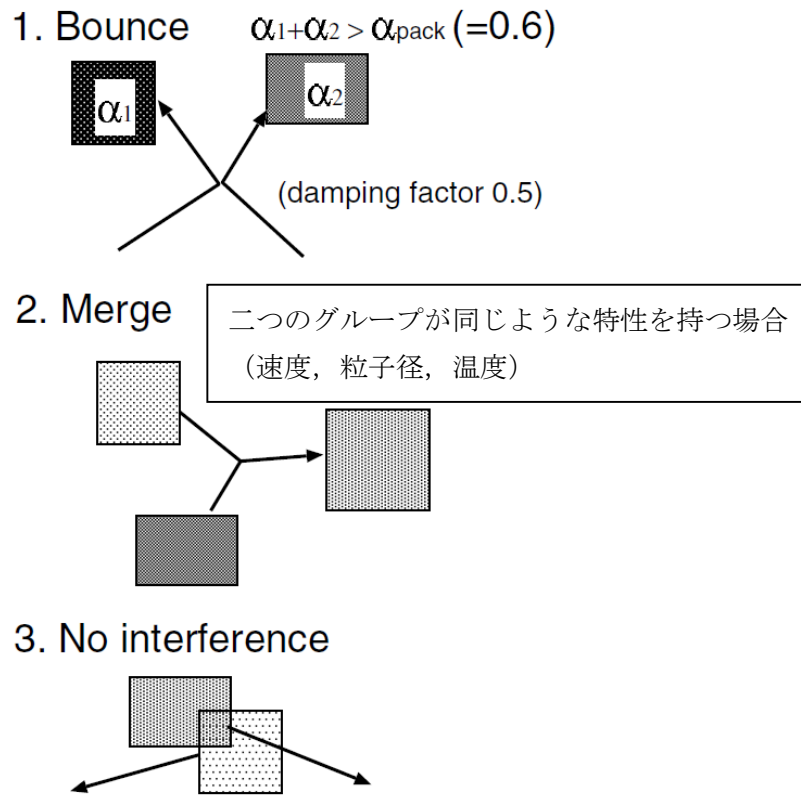


図 2.2.7 粒子群間のインターフェースモデル [1]

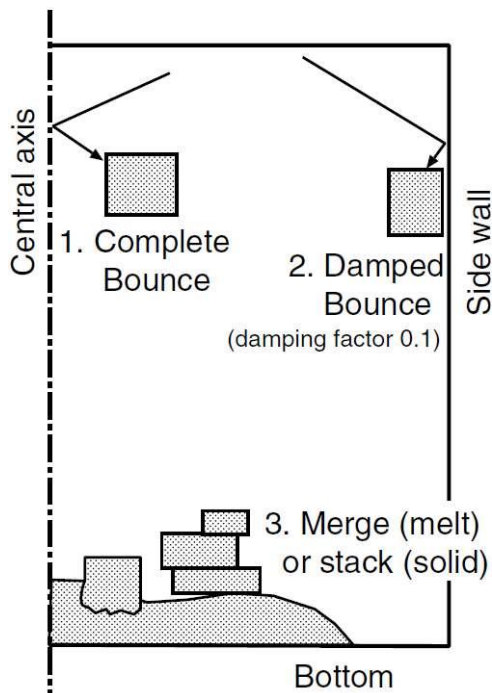


図 2.2.8 粒子群の境界での取扱い [1]

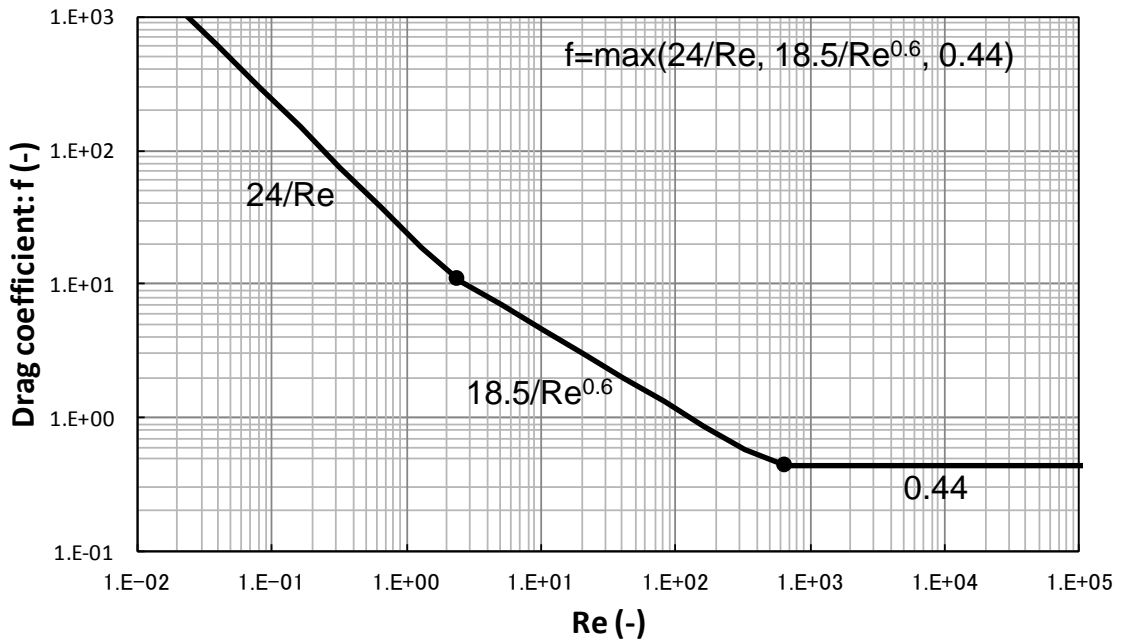


図 2.2.9 融体粒子の流体抗力係数

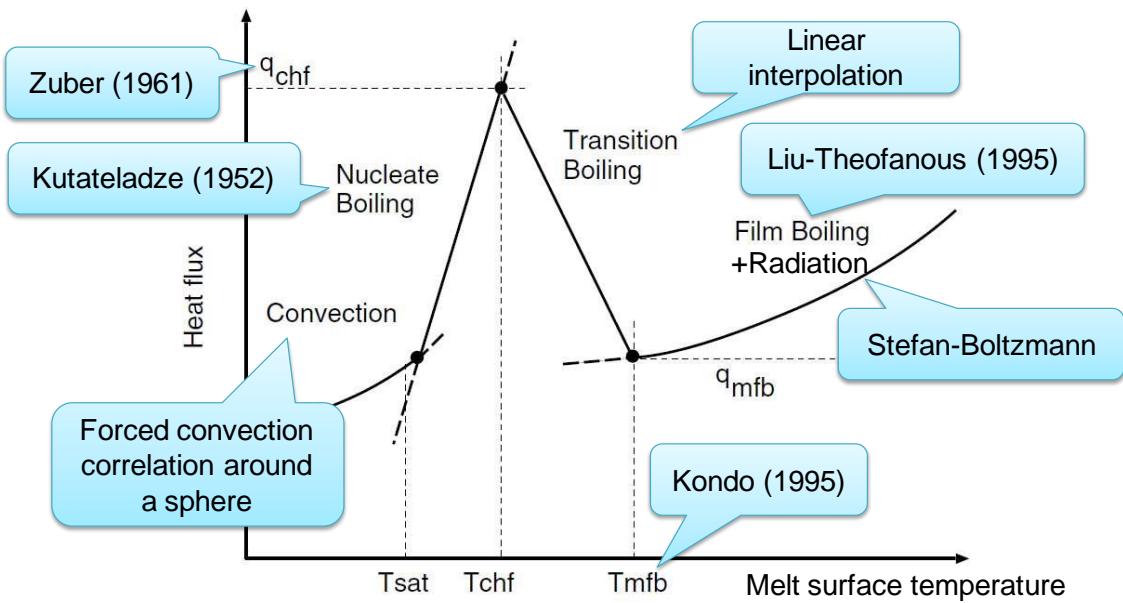


図 2.2.10 各沸騰状態において用いられる伝熱モデル (粒子群)

#### (4) トリガリングモデル

JASMINE コードを用いた解析では、粗混合計算結果を爆発計算に引き継ぐ際に、トリガリングと呼ばれる爆発のきっかけをユーザーが任意のタイミングで与えることにより、爆発解析を実施する。トリガリングモデルの特徴を以下に示す。

- ・ 局所的な圧力上昇と瞬時のガス膨張によりトリガリングを与える。
- ・ 圧力伝播は細粒化を誘発する。

#### (5) 細粒化モデル

爆発過程は以下の概念を基本としてモデル化されている。

- ・ 粗混合で発生した粒子が衝撃波、即ち周囲冷却材の極端に大きな相対速度に晒されると、流体力により粒子表面の融体が細粒化する。
- ・ 細粒は  $\mu\text{m}$  オーダーで熱放出が非常に早く、瞬時に水を蒸発させることで、衝撃波を増幅させる。熱放出は細粒の発生率に依存する。

上記過程を評価するために、図 2.2.11 に示す粒子群モデルにおいて、融体モデル構成要素として”細粒群”が追加された。

細粒群は粒子群から発生した細粒の集合体である。細粒群は以下のように扱われる。

- ・ 細粒の発生：細粒質量は母粒子群から水力的な相互作用により分離される。質量保存則は次のように表せる。

$$\frac{dm_p}{dt} = -\dot{m}_f \quad (2.2-4)$$

$$\frac{dM_f}{dt} = n_p \dot{m}_f \quad (2.2-5)$$

ここで、 $m_p$  は粒子群中の一粒子の質量、 $m_f$  は一粒子から生成する細粒群の質量、 $M_f$  は粒子群全体から生成する細粒群の質量、 $n_p$  は粒子群の粒子数である。一粒子からの細粒化率  $\dot{m}_f$  は構成式(2.2-7)により与えられる。

- ・ 伝熱とエネルギー保存：

細粒表面の熱伝達率は非常に大きいと考えられることから、細粒内の熱伝導が、この過程における伝熱量の律速となる。細粒の外部の熱伝達率は非常に大きいと考えられ、定常状態でのいかなる伝熱式もこの特異に過度的な状況には適用できない。細粒の単位質量当たりの熱放出量  $\dot{q}_f$  を用いて、細粒のエネルギー保存は以下のよう表せる。

$$\frac{de_f}{dt} = e_p \frac{n_p \dot{m}_f}{M_f} - \dot{q}_f \quad (2.2-6)$$

ここで、 $e_f$ と $e_p$ は細粒と粒子の比内部エネルギーである。母粒子の比内部エネルギーは爆発過程では一定であると仮定する。

細粒の主要な作用は急速熱放出で、運動論的な観点は重要ではないことから、細粒に対する運動方程式は解かず、細粒は母粒子群に付随すると仮定する。

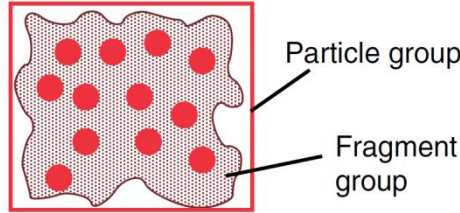


図 2.2.11 粒子群と細粒群 [1]

一融体粒子からの細粒化率 $\dot{m}_f$ は以下のように求める。

$$\dot{m}_f = C_{frg} \cdot \frac{1}{t_b^*} \frac{\pi}{6} D_p^2 v_r (\rho_c \rho_p)^{1/2} \quad (2.2-7)$$

$$t_b^* = \begin{cases} 1 & \text{:Carachario set al.model} \\ 13.7/Bo^{1/4} & \text{:Yuen et al.model} \end{cases} \quad (2.2-8)$$

$$Bo = \frac{3}{16} \frac{C_D \rho_c D_p v_r^2}{\sigma_p} \quad (2.2-9)$$

$$t_b = t_b^* \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_c} \frac{D_p}{v_r}} \quad (2.2-10)$$

ここで、 $t_b$ は分裂時間、 $t_b^*$ は分裂の無次元時間、 $D_p$ は粒子径、 $v_r$ は粒子と冷却材間の相対速度、 $\rho_c$ と $\rho_p$ は冷却材と融体粒子の密度、 $\sigma_p$ は融体粒子の表面張力である。抗力係数 $C_D$ はニュートン域の値0.44を使用する。 $C_{frg}$ は実験定数である。

#### (6) 二相流モデル

JASMINEにおける二相流モデルは、二相流コードACE-3D<sup>[5]</sup>を基に開発された。二相流モデルの特徴を以下に示す。

- ACE-3D は円筒座標系の 3 次元保存方程式を解くことができるが、JASMINE コードでは二次元座標系での計算機能が適用されている。
- 水、蒸気、非凝縮性ガスの質量および内部エネルギー方程式が解かれる。対して、運動量方程式においては、蒸気と非凝縮性ガスは平衡状態であると仮定して、水、混合性ガスの質量および内部エネルギー方程式を解く。
- 融体プールと融体粒子、細粒からの伝熱を扱うことができる。
- 水-ガス間の熱伝達係数 (図 2.2.12 参照) は、TRAC-PF1 コードの気泡流と液滴流のモデルを採用
- 二相間の相対速度が終端速度に等しいと仮定 (図 2.2.13 参照)
- 水滴/気泡径は臨界 We 数を用いて評価。臨界 We 数は、水滴は 4.0, 気泡は 7.5 (図 2.2.13 参照)
- 抗力係数は融体粒子の場合とほぼ同じ。(図 2.2.14 参照)
- 融体粒子から二相流への伝熱量分配機構を図 2.2.15(a) に示す。図 2.2.15(a) において  $f_{htint}$ ,  $f_{hilkill}$ ,  $f_{higkill}$  は粗混合解析にて冷却材の蒸発を制御するパラメータである。 $f_{htint}$  は、融体からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合を示す。 $f_{hilkill}$ ,  $f_{higkill}$  は、それぞれサブクール水と気液界面の熱伝達係数、過熱蒸気と気液界面の熱伝達係数の乗数である。
- 細粒から二相流への伝熱量分配機構を図 2.2.15(b) に示す。 $K_{ev}$  は爆発解析にて細粒からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合を表す。

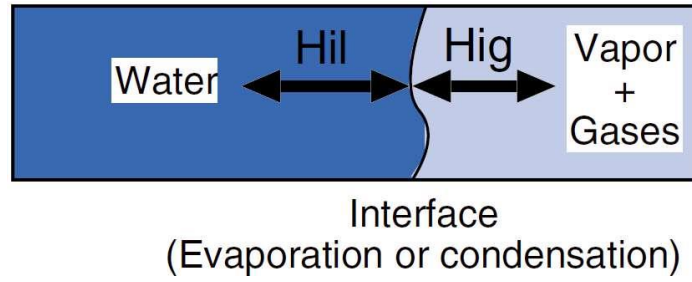
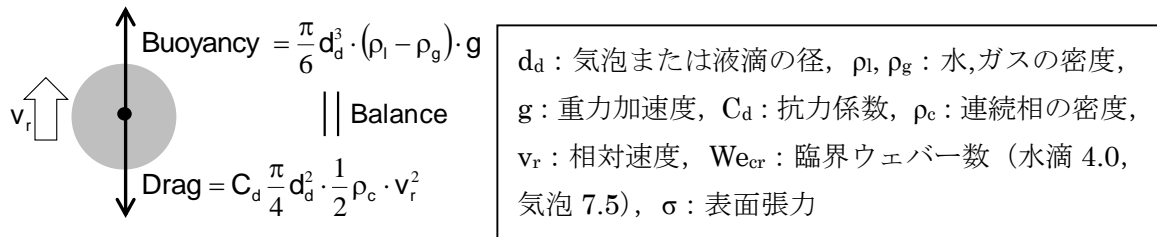


図 2.2.12 水とガスの界面における熱伝達 [1]



$$d_d = \frac{We_{cr} \cdot \sigma}{\rho_c \cdot v_r^2}$$

図 2.2.13 水滴および気泡における力のつり合い

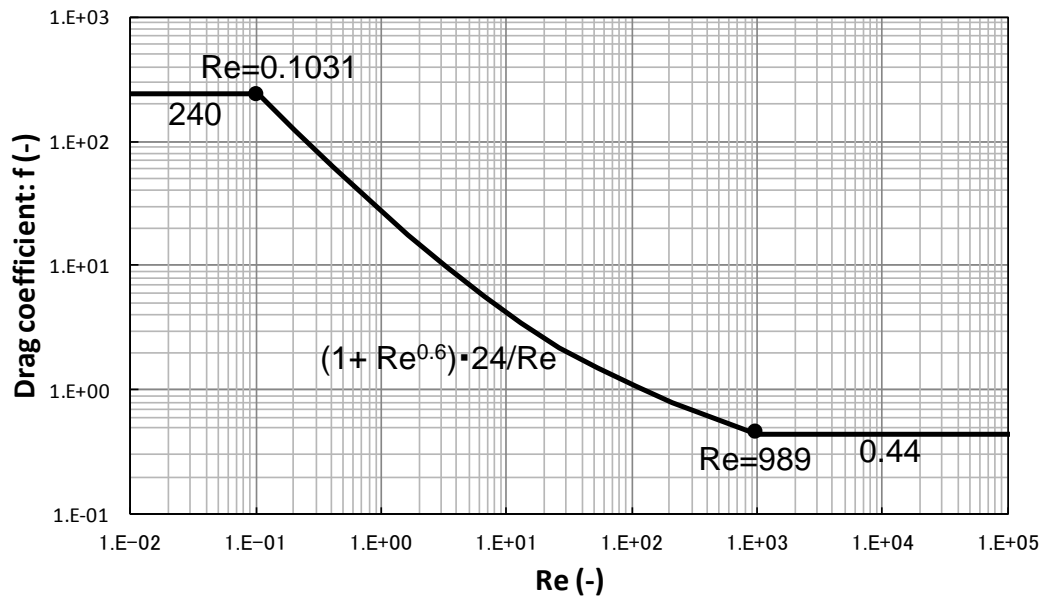
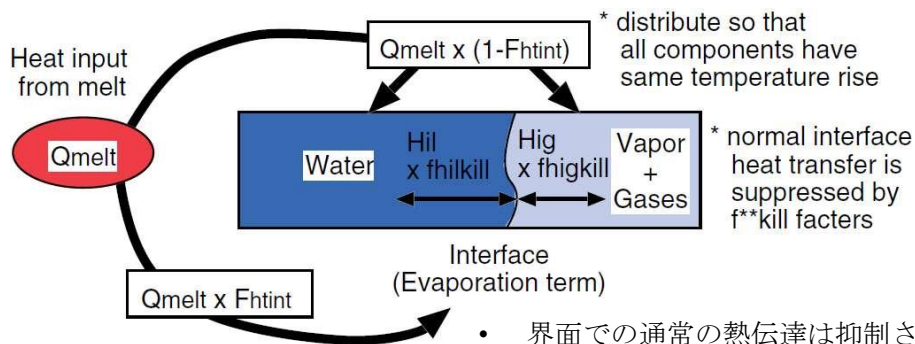
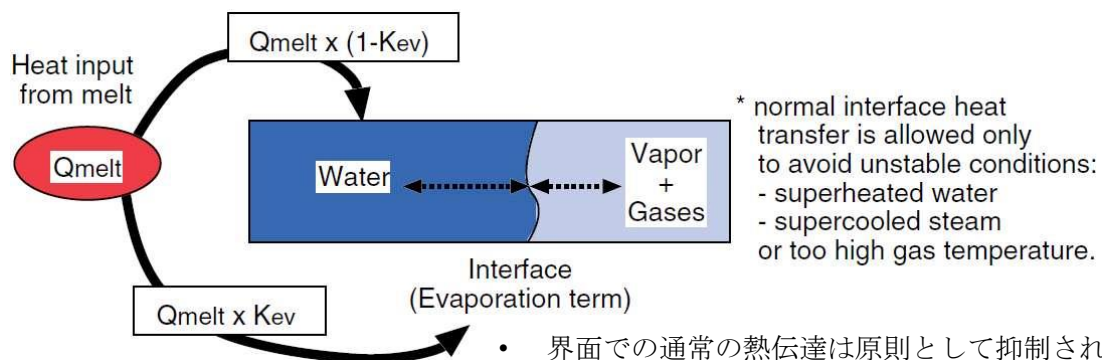


図 2.2.14 水滴および気泡の流体抗力係数



- 界面での通常の熱伝達は抑制される。
- $f_{htint}, f_{hilkill}, f_{ihgkill}$  は粗混合解析にて冷却材の蒸発を制御するパラメータ。

(a) 融体粒子から二相流への伝熱量分配機構 [1]



- 界面での通常の熱伝達は原則として抑制される。
- $K_{ev}$  は爆発解析にて、細粒からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合。

(b) 細粒から二相流への伝熱量分配機構

図 2. 2. 15 二相流への伝熱量分配機構 [1]

### 2.3. 入出力

本章では、JASMINE による水蒸気爆発解析時の入出力例を示す。

図 2.3.1 に水蒸気爆発解析のフロー図を示す。幾何形状等のプラント固有条件や事象進展解析 (MAAP) に基づく溶融燃料条件等に基づき JASMINE 入力条件の設定を行う。

JASMINE 解析の評価結果は、水蒸気爆発時の格納容器の健全性評価を実施するための構造応答評価コードの負荷条件として用いられる。水蒸気爆発負荷として、高圧気泡を膨張させるモデルを用いる場合には、水蒸気爆発時の発生エネルギー条件や爆発時の圧力条件が構造応答評価コードに引き渡される。

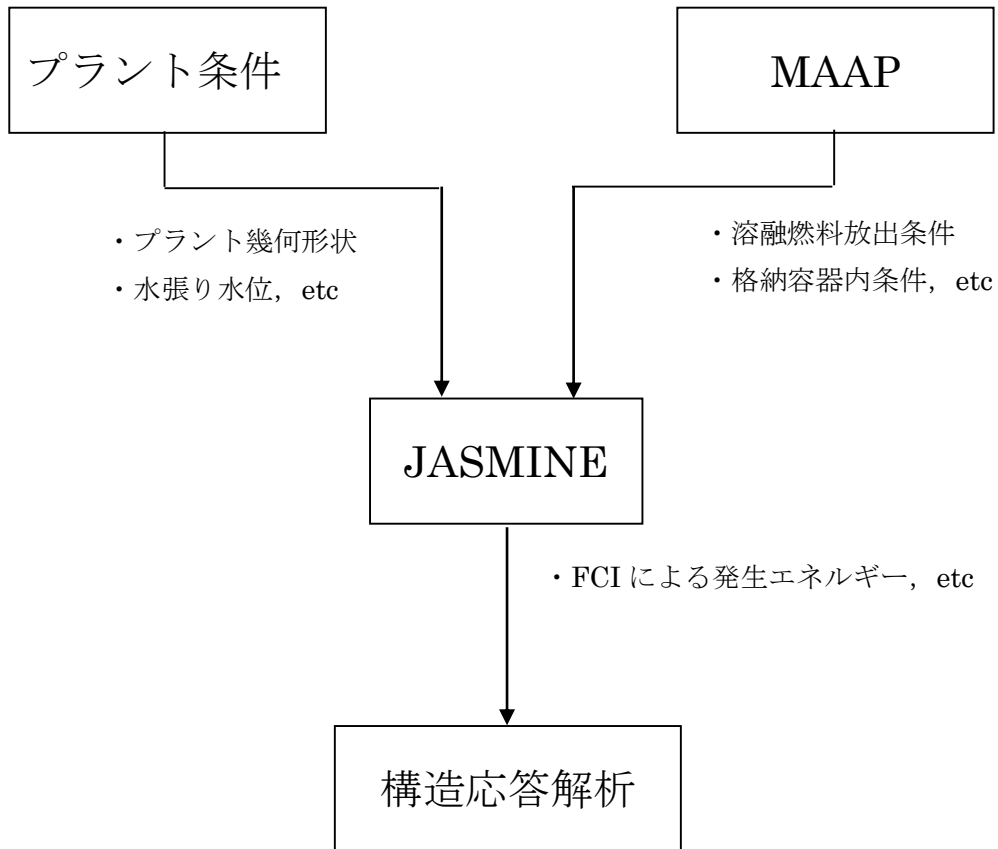


図 2.3.1 水蒸気爆発解析の流れ



### 2.3.1. 入力例

#### (1) 計算体系の幾何形状

計算領域は，図 2.3.2 に示す通り，円筒座標系における角度 $\theta$ のセクターとして定義され，体積はX-Z平面のグリッドとして離散化される。

原子炉圧力容器破損時におけるペDESTAL領域での水蒸気爆発解析を実施する場合，計算体系を圧力容器，ペDESTAL壁面，床面で形成される原形状の中からモデル化することができる。

X-Z平面でのメッシュ分割は，JASMINE コードの制限値【X方向(=30)，Z方向(=40)】以内で任意に設定することができ，ペDESTAL領域について，ベッセル，ペDESTAL空間(液相，気相)，ペDESTAL壁面等を定義することが可能である。図 2.3.3 にメッシュ分割の例を示す。

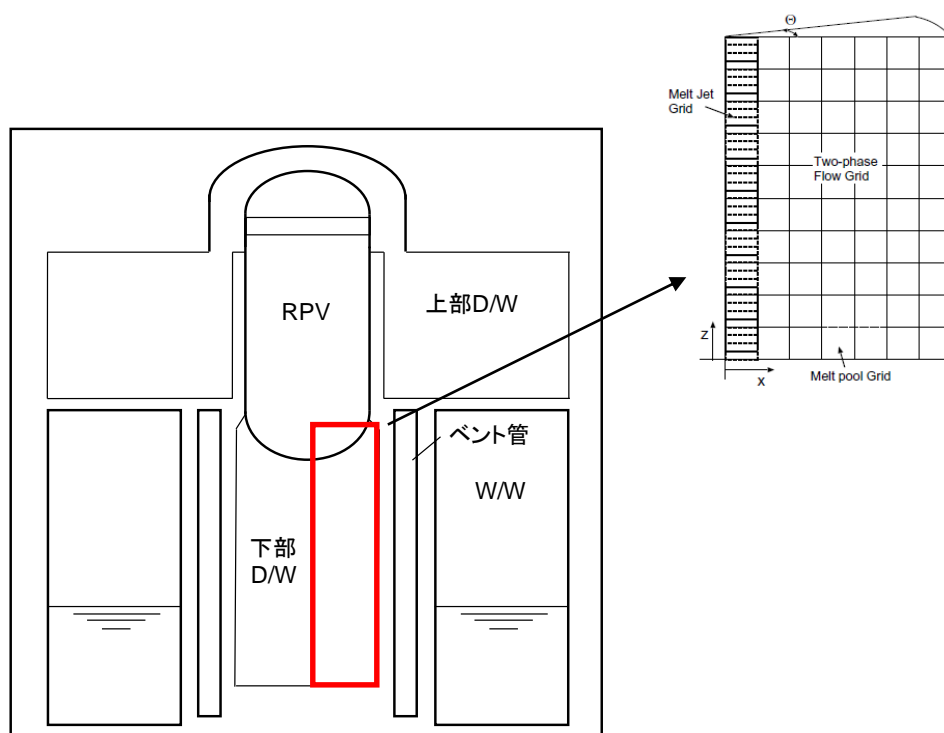


図 2.3.2 計算体系の幾何形状の例

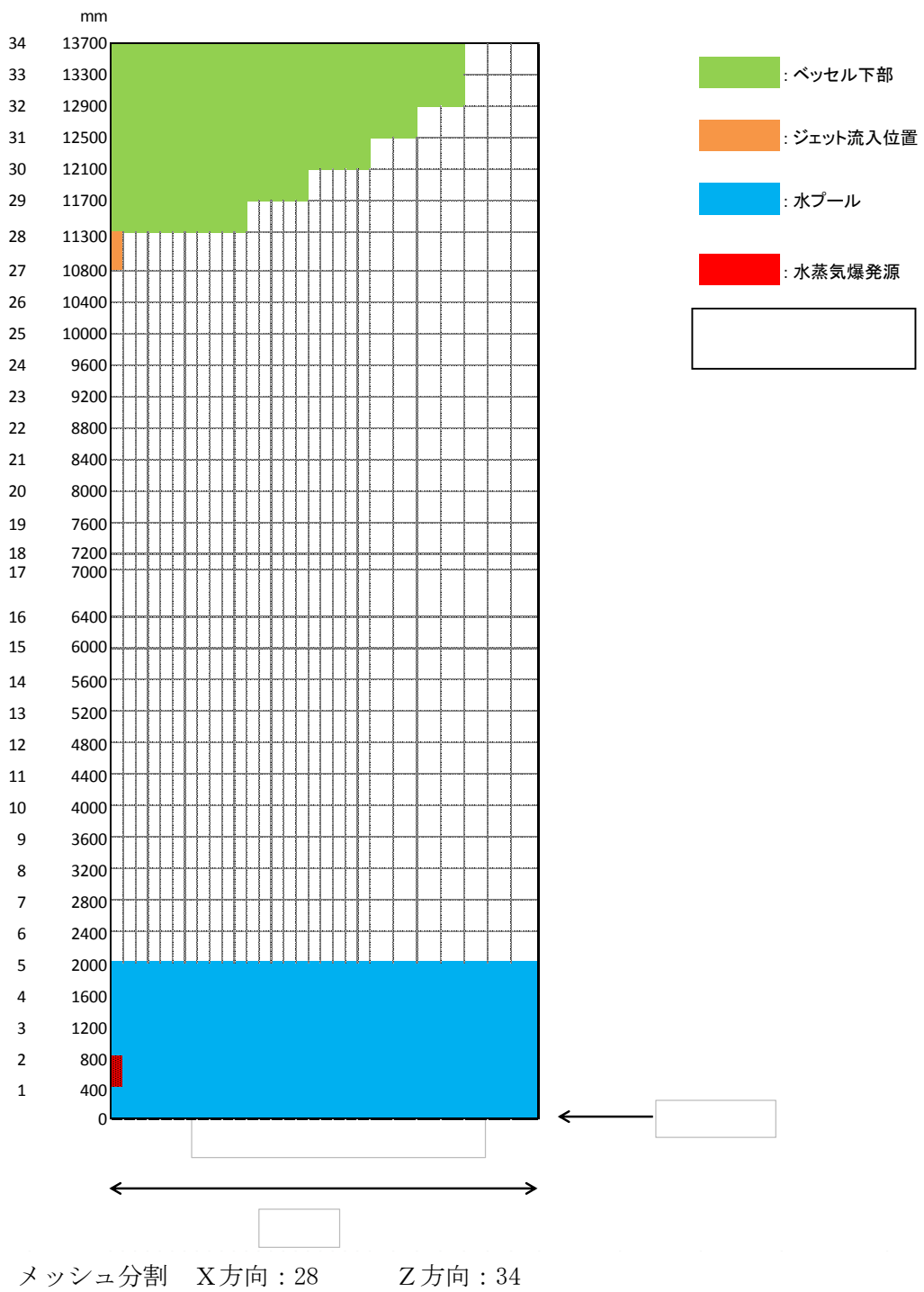


図 2.3.3 JASMINE のメッシュ分割の例

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属  
しますので公開できません。

## (2) 溶融炉心物性値

溶融炉心物性値については、溶融コリウムの物性値ライブラリ (jasmine.corium, jasmine.corium2, jasmine.corium3) が、JASMINE コード付属されており、ユーザーは目的に応じてこれらを活用することができる。各物性値ライブラリの主要な特性は以下のとおりである。表 2.3.1 に jasmine.corium2 の物性値を例示する。

jasmine.corium : FARO/KROTOS 試験条件 ( $UO_2/ZrO_2=80/20wt\%$ )  
jasmine.corium2 : FARO/KROTOS 試験条件 ( $UO_2/ZrO_2=80/20wt\%$ ), 融点, リキダス,  
ソリダスを実機相当条件に設定  
jasmine.corium3 : TROI 試験条件 ( $UO_2/ZrO_2=70/30wt\%$ )

## (3) 主要入力値

表 2.3.2 に(1), (2)以外の主要な入力例を示す。

## (4) 入力条件の設定の考え方

入力条件は、表 2.3.2 に示された入力条件の例で示すように、代表的な水蒸気爆発実験を最適に再現するために設定した入力値をベースとし、水蒸気爆発事象に伴う不確かさを踏まえて、以下の保守性を考慮して設定している。

- ・メルト放出速度：メルト放出速度は、破損口にかかるデブリ堆積圧等の圧力から計算される。メルト放出速度としては、原子炉圧力容器の低圧破損時に最も大きくなる条件である溶融デブリ全量が下部プレナムに堆積した場合を想定した値を設定。
- ・メルト放出口径：粗混合融体質量を保守的に評価するために、RPV 底部の貫通配管で最も大きい口径 0.15m の値を保守的に丸めて  として設定。
- ・粗混合時液滴径：既存の FCI 試験 (KROTOS, FARO, TROI, CCM) のザウター平均粒径は 0~3mm 程度<sup>[8]</sup>とされている。一般に粗混合時液滴径が大きい程、粒子から冷却材への伝熱が低下して粒子が固化しにくくなり、冷却材ボイド率も低下することで、粗混合融体質量が大きい傾向があると考えられ、この傾向は感度解析により確認されている。これらを踏まえ、爆発の強度が大きくなりやすい条件として、上述のザウター平均粒径を包絡する  を設定。
- ・トリガリング位置：爆発に関与し得る融体の質量が最大に近く、爆発の強度が大きくなりやすい条件として、中心軸上の底部から軸方向 2 セル目を選定。
- ・トリガリング：  
タイミング：水蒸気爆発により発生する運動エネルギーが最も大きくなると考えられる条件として設定。

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属  
しますので公開できません。

表 2.3.1 JASMINE 解析における物性値

| No. | 項目    | 物性値 |                      | 備考                                      |
|-----|-------|-----|----------------------|---|
|     |       | 数値  | 単位                   |   |
| 1   | 溶融点   |     | [K]                  | 組み込みライブラリ<br>(jasmine.corium2)<br>に基づく値 |
| 2   | 固相線温度 |     | [K]                  |   |
| 3   | 液相線温度 |     | [K]                  |   |
| 4   | 固相密度  |     | [kg/m <sup>3</sup> ] |   |
| 5   | 液相密度  |     | [kg/m <sup>3</sup> ] |   |
| 6   | 液相比熱  |     | [J/(kg・K)]           |   |
| 7   | 固相比熱  |     | [J/(kg・K)]           |   |
| 8   | 溶融潜熱  |     | [J/kg]               |   |
| 9   | 熱伝導率  |     | [W/(m・K)]            |   |
| 10  | 粘性係数  |     | [Pa・s]               |   |
| 11  | 表面張力  |     | [N/m]                |   |
| 12  | 輻射率   |     | [-]                  |   |

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属  
しますので公開できません。

表 2.3.2 JASMINE 解析における主な入力条件の例(1/2)

| No. | 入力          | 値(定義)                       | 単位    | 備考   |
|-----|-------------|-----------------------------|-------|--|
| 1   | 初期圧力        |                             | [Pa]  | MAAP 解析結果に基づき設定。   |
| 2   | プール水温       |                             | [K]   | MAAP 解析結果に基づき設定。   |
| 3   | 落下メルト総重量    |                             | [kg]  | MAAP 解析結果に基づき設定。   |
| 4   | メルトジェット温度   |                             | [K]   | MAAP 解析によると下部プレナム内の熔融<br>デブリの酸化物層の過熱度は約 [ ] である<br>ことから、熔融デブリの融点は jasmine 付属<br>のメルトの物性値パッケージ jasmine.corium2<br>のリキダス [ ] に過熱度 [ ] を考慮した値を設定。 |
| 5   | メルト放出速度     |                             | [m/s] | MAAP 解析に基づく RPV 破損時のデブリ流<br>入速度の最大値を設定。  |
| 6   | メルト放出口径     |                             | [m]   | RPV 底部の貫通配管で最も口径の大きい<br>CRD チューブ径 0.15m を保守的に丸めて<br>[ ] を設定。   |
| 7   | プール水深       | 2                           | [m]   | 手順上定める値を設定。  |
| 8   | 粗混合時液滴径     | [ ]                         | [m]   | 大規模 FCI 実験結果 (FARO, COTELS 等)<br>の粒径分布から代表粒子径として設定。  |
| 9   | 爆発後粒子径      | 0.00005                     | [m]   | 文献 <sup>[1]</sup> 記載の JAEA が実施した検証解析に<br>用いられる条件を採用。   |
| 10  | ブレイクアップ係数   | 1.0                         | [-]   | 文献 <sup>[1]</sup> 記載の JAEA が実施した検証解析に<br>用いられる条件を採用。   |
| 11  | 液滴速度ファクタ    | 5                           | [-]   | 文献 <sup>[1]</sup> 記載の JAEA が実施した検証解析に<br>用いられる条件を採用。   |
| 12  | トリガリング位置    | ベデスタルの<br>中心,<br>底から 0.6m   | [m]   | トリガ位置には中心軸上の底部付近とし<br>て底部から軸方向 2 セル目を選定。これ<br>は爆発に関与し得る融体の質量が最大に<br>近く、爆発の強度が大きくなりやすい条<br>件を選定したものである。   |
| 13  | トリガリングタイミング | 粗混合融体質<br>量の最初のピー<br>クとなる時刻 | [sec] | 水蒸気爆発により発生する運動エネルギー<br>が最も大きくなると考えられる条件とし<br>て設定。  |
| 14  | トリガ閾値       | $5 \times 10^5$             | [Pa]  | マニュアルによるトリガ圧力の設定範囲<br>500kPa-10MPa より、500kPa を設定。  |

表 2.3.2 JASMINE 解析における主な入力条件の例 (2/2)

| No. | 入力                    | 値(定義)                             | 単位    | 備考   |
|-----|-----------------------|-----------------------------------|-------|--|
| 15  | フラグメンテーションモデル         | Caracharios(1983)モデル              | [-]   | -  |
| 16  | フラグメンテーション条件          | 粒子温度の平均温度が融点以上                    | [-]   | -  |
| 17  | フラグメンテーション係数          | 0.35                              | [-]   | 文献 <sup>[1]</sup> 記載の JAEA が実施した検証解析に用いられる条件を採用。 |
| 18  | フラグメンテーション時間          | $10^{-3}$                         | [sec] |  |
| 19  | 蒸発に用いられるエネルギー割合       | 融体の寄与 : 0.02<br>フラグメント放熱の寄与 : 0.7 | [-]   |  |
| 20  | フラグメンテーションにおけるボイド緩和係数 | ボイド率 0.3~0.75 でカットオフ              | [-]   | 文献 <sup>[1]</sup> 記載の JAEA が実施した検証解析に用いられる条件を採用。 |
| 21  | トリガ点圧力                | $1 \times 10^7$                   | [Pa]  | ピーク圧力よりも低くかつトリガ閾値圧力 500kPa よりも十分大きい圧力として設定       |
| 22  | トリガ点ガス割合              | 粗混合解析結果の引継ぎ                       | [-]   | トリガ気相割合は、粗混合解析結果に基づきトリガ発生時点でのトリガセルでの気相割合を設定。     |
| 23  | トリガ点ガス温度              | 1000                              | [K]   | 文献 <sup>[1]</sup> 記載の JAEA が実施した検証解析に用いられる条件を採用。 |

### 2.3.2. 出力例

JASMINE 解析は、「粗混合過程」と「爆発過程」の2段階に分かれている。それぞれの解析における主要な出力を以下に示す。

#### (1)粗混合過程

- ・放出されたメルト及び粗混合領域におけるメルト粒子の全質量

粗混合解析は、爆発解析の初期条件を評価するために実施する。重要な物理量は、粗混合過程において熔融状態で水中に分散した融体の質量であり、この物理量に基づきトリガリングタイミングを設定する。

JASMINE ではこの物理量を定量化する指標として、粗混合融体質量（ボイド率 0.75 以下の領域に存在し、温度が融点以上の融体質量）の時間変化を出力することができる。爆発の強度が大きくなるように粗混合融体質量が最初にピークとなったタイミングでトリガリングタイミングを設定する。

#### (2)爆発過程

- ・流体の運動エネルギーの時間変化

流体の運動エネルギーを用いて構造健全性評価を実施する場合には、水蒸気爆発発生時にトリガセルから周囲へ圧力波が伝播し、その発生エネルギーの大部分が流体の運動エネルギーに変換されると想定し、全領域の流体の運動エネルギーの時間変化からその最大値を設定することが考えられる。

### 3. 解析結果の例示

本項では，ABWR 代表プラントにおける JASMINE 解析結果例を示す。

評価条件はそれぞれ以下の通りである。

- ・評価体系 : 図 2.3.3
- ・主な評価条件 : 表 2.3.1, 表 2.3.2

#### (1) 粗混合過程

放出されたメルト及び粗混合領域におけるメルト粒子の全質量を図 3.1 に示す。図 3.1 により，粗混合融体質量が最初にピークとなる約 0.9 秒後にトリガリングタイミングを設定している。

#### (2) 爆発過程

流体の運動エネルギーの時間変化を図 3.2 に示す。図 3.2 より，流体の運動エネルギーのピーク値約 7MJ が水蒸気爆発時に発生するエネルギーと設定することができる。



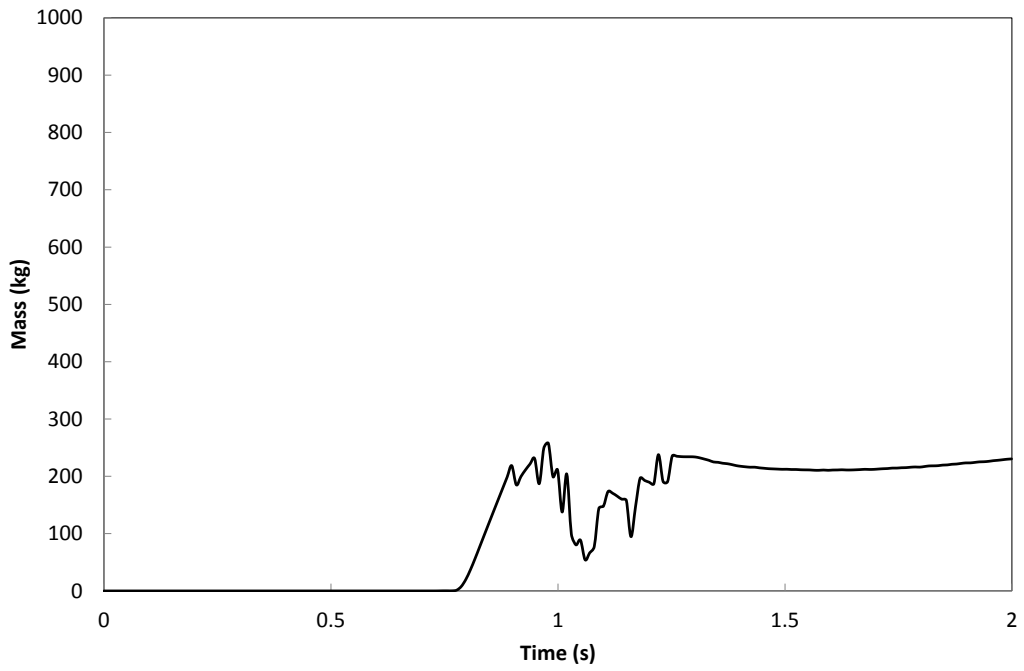


図 3.1 粗混合融体質量（温度が融点以上かつボイド率 0.75 以下の領域に存在する融体質量）の時間的推移

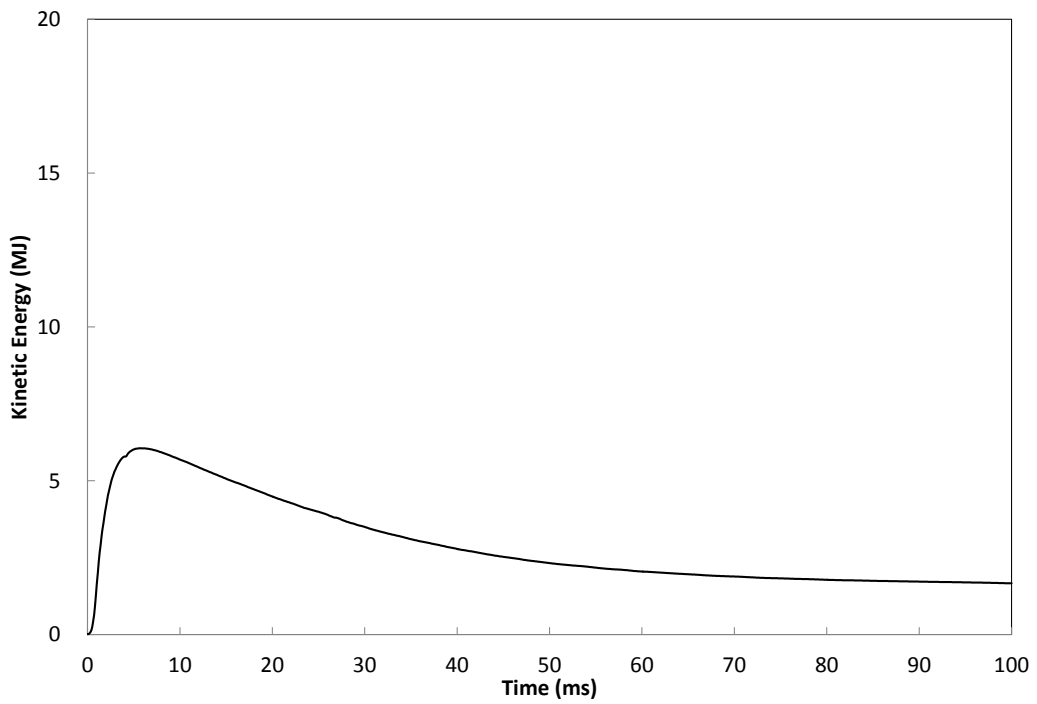


図 3.2 流体運動エネルギーの時間的推移

## 4. 水蒸気爆発実験への適用例

### 4.1. 粗混合実験解析

粗混合に関するモデルの機能を確認するためおよび実験を最適に再現することを目的としたパラメータ調整のために、JRC-Ispra 研究所で実施された FARO 試験に関するシミュレーションを、日本原子力研究開発機構が実施している<sup>[1]</sup>。FARO 試験では、溶融燃料としてウラン ( $UO_2$  と  $ZrO_2$  の混合物) を使用し、これらを水プールに落下させたときの、融体ジェット分裂やクエンチ時の加圧および水蒸気発生によるプール水位上昇などのデータが得られている。FARO 試験における試験装置の概要を図 4.1.1 に示す。JASMINE におけるベンチマークでは、サブクール度、圧力、ジェット径などのパラメータの異なる 3 種類の試験ケースを選択している。これらの実験では水蒸気爆発が発生せず、かつ粗混合状態が確認できたため、粗混合に関するベンチマーク実験として選定された。以下に各ケースの特徴を簡単に述べる。

L14 ケース : デブリの温度は 3073K, 水位は 2.05m, サブクール度は 1K と小さく, 圧力は高圧 (5MPa) であり, ジェット径は 92mm と大きい。雰囲気ガスは蒸気である。

L28 ケース : デブリの温度は 3053K, 水位は 1.44m, サブクール度は 1K と小さく, 圧力は低圧 (0.51MPa) であり, ジェット径は 44mm と小さい。雰囲気ガスは蒸気である。

L31 ケース : デブリの温度は 2990K, 水位は 1.45M, サブクール度は 104K と大きく, 圧力は最も低圧 (0.22MPa) であり, ジェット径は 48mm と小さい。雰囲気ガスはアルゴンである。

#### 4.1.1. 解析条件

ベンチマーク対象の実験ケース (L14, L28, L31) の実験条件およびそれぞれのベンチマーク解析条件を表 4.1.1.1 に示す。また, 試験装置を模擬した解析モデルを図 4.1.1.1 に示す。

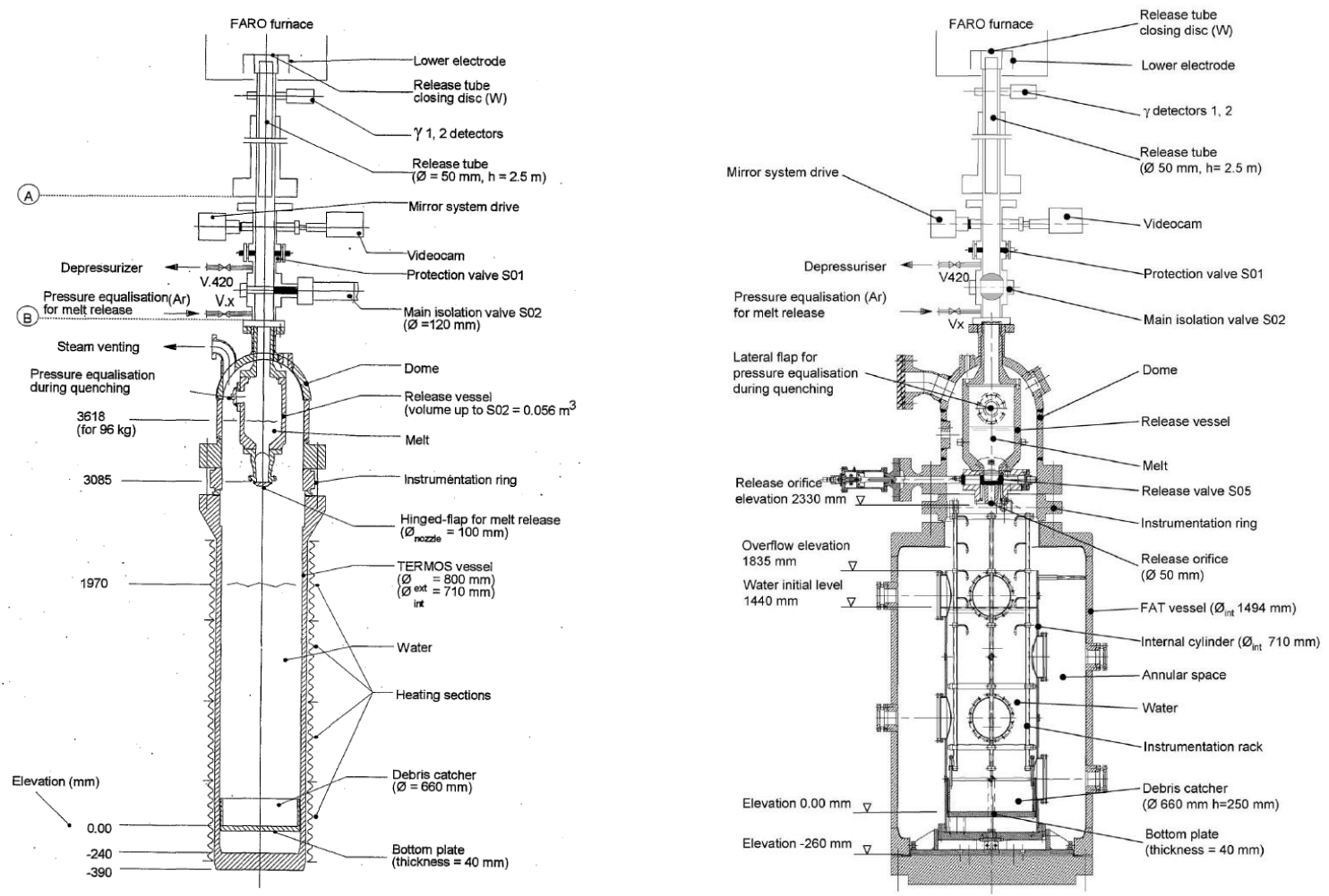
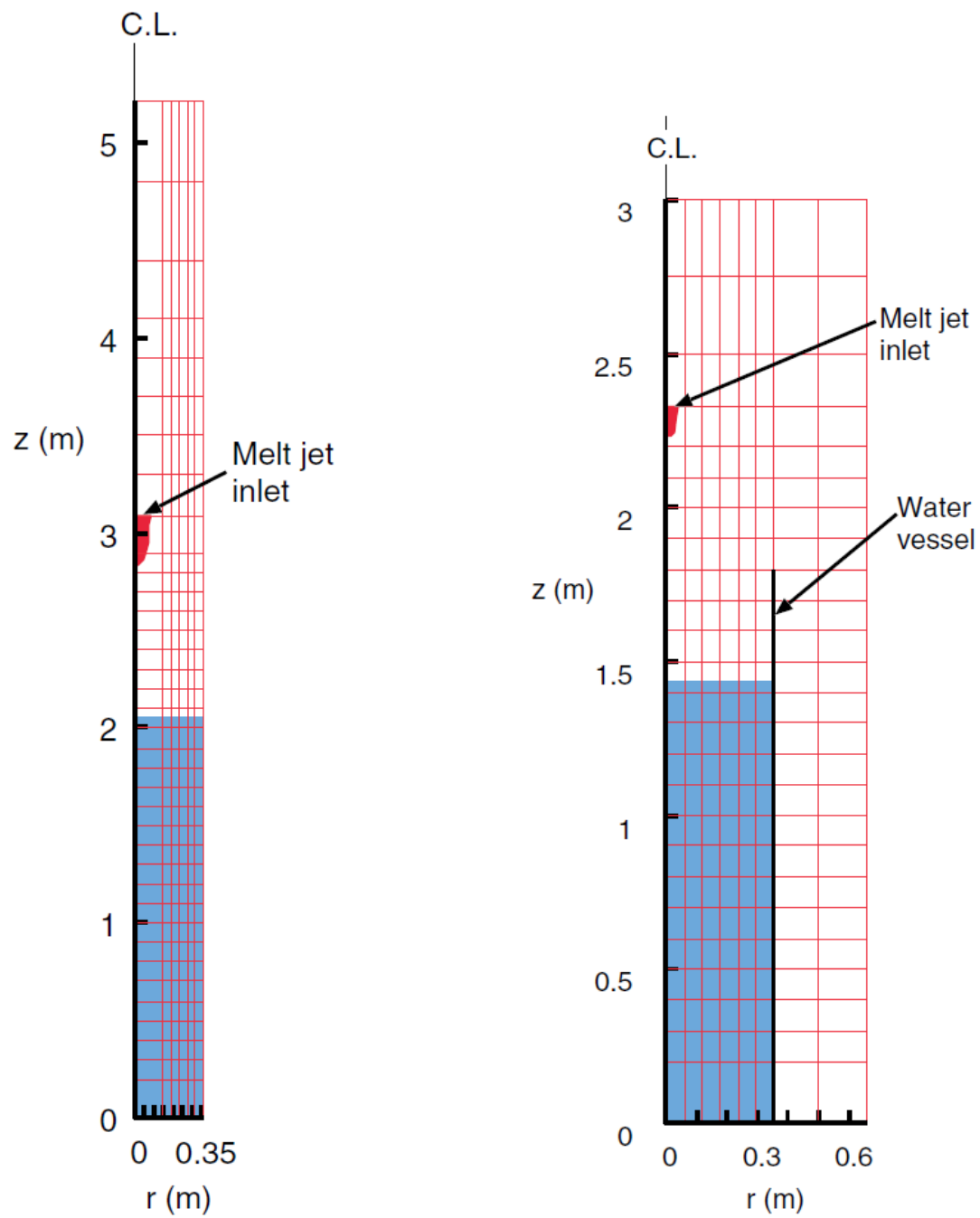


図 4.1.1 FARO 試験装置 [9][10]

表 4.1.1.1 FARO 試験 (L14, L28 および L31) の試験条件及び解析条件

|   | L14  | L28        | L31       |
|---|--|------------|-----------|
| <b>Melt</b>                             |  |            |           |
| Material                                | Corium ( $T_{sol}/T_{liq} = 2830/2850(K)$ ,<br>80wt% $UO_2$ -20wt% $ZrO_2$ ) |            |           |
| Released mass (kg)                      | 125  | 175        | 92        |
| Temperature (K)                         | 3073   | 3053       | 2990      |
| Jet diameter at inlet (mm)              | 92   | 44         | 48        |
| <b>Water</b>                            |  |            |           |
| Temperature (Subcool) (K)               | 537 (1)  | 424 (1)    | 291 (104) |
| Pool depth (m)                          | 2.05   | 1.44       | 1.45      |
| Water vessel diameter (m)               | 0.71   | 0.71       | 0.71      |
| <b>Cover gas</b>                        |  |            |           |
| Atmosphere                              | Steam  | Steam      | Argon     |
| Initial pressure (MPa)                  | 5.0  | 0.51       | 0.22      |
| Cover gas volume(m <sup>3</sup> )       | 1.26   | 3.53       | 3.49      |
| <b>Results</b>                          |  |            |           |
| Pressure rise at plateau (MPa)          | 2.5  | 1.2        | 0.04      |
| Level swell (m)                         | ~1.4   | ~0.6       | ~0.3      |
| Agglomerated mass (kg)                  | 20 (16%)   | 77 (44%)   | 0         |
| Debris mean dia. <sup>a)</sup> (mm)     | 5.0  | 3.0        | 3.3       |
| <b>Analytical</b>                       |  |            |           |
| Grid (Water pool zone)                  | 6×37(6×20)   | 8×25(6×14) |           |
| Central column radius (m)               | 0.15   | 0.10       | 0.10      |
| Time step (ms)                          |  | ~0.5       |           |
| Jet initial velocity(m/s)               | 3.0  | ~3.0       | ~2.7      |
| Jet flow-in duration(s)                 | 0.80   | 5.2        | 2.5       |
| Melt particle dia.(const.)(mm)          | 5.0  | 3.0        | 3.0       |
| Jet break-up length model <sup>b)</sup> | Taylor type, $C_{ent} = 1$   |            |           |
| Surface temperature drop model          | Use  |            |           |
| $N_{pcr}$ <sup>c)</sup>                 | 1000   |            |           |
| $n_{hist}$ <sup>c)</sup>                | 1000   |            |           |
| $F_{htint}$ <sup>d)</sup>               | 0.02   |            |           |

a) mass median diameter b) see 2.2.1 c) see 2.2.3 d) see 2.3.2

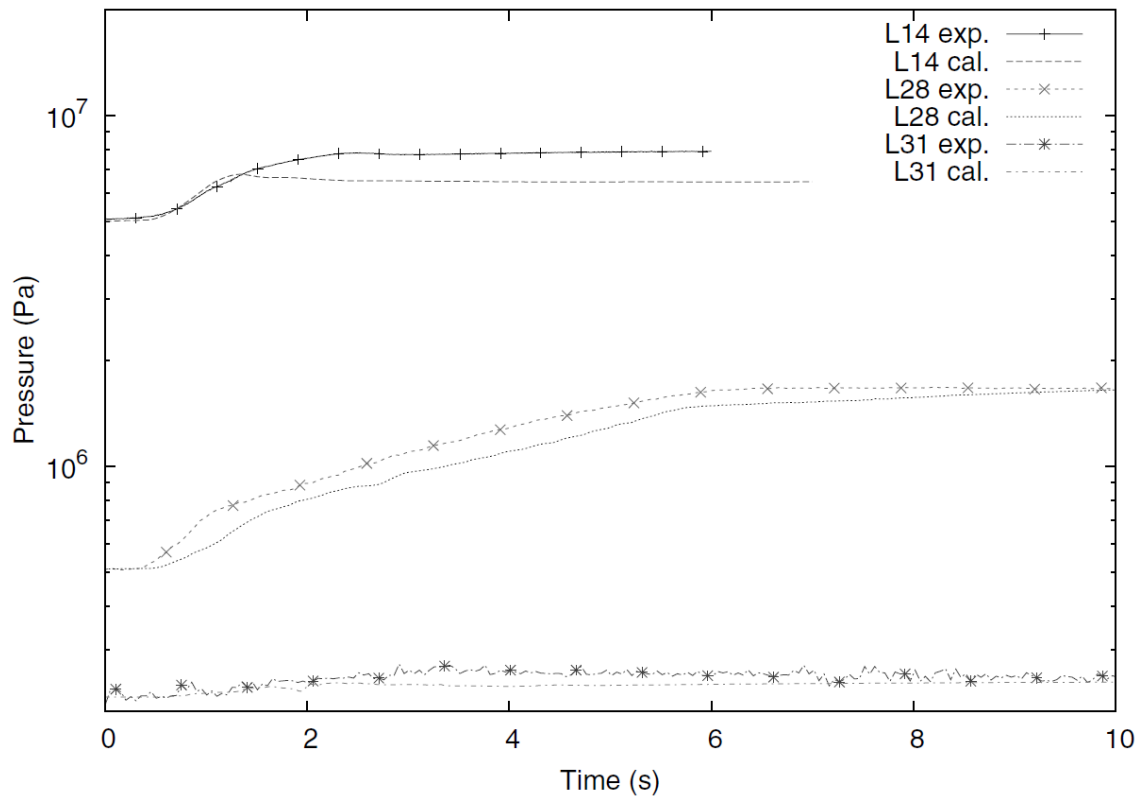


出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

図 4.1.1.1 FARO L-14(左)および FARO L28, L31(右)の解析モデル

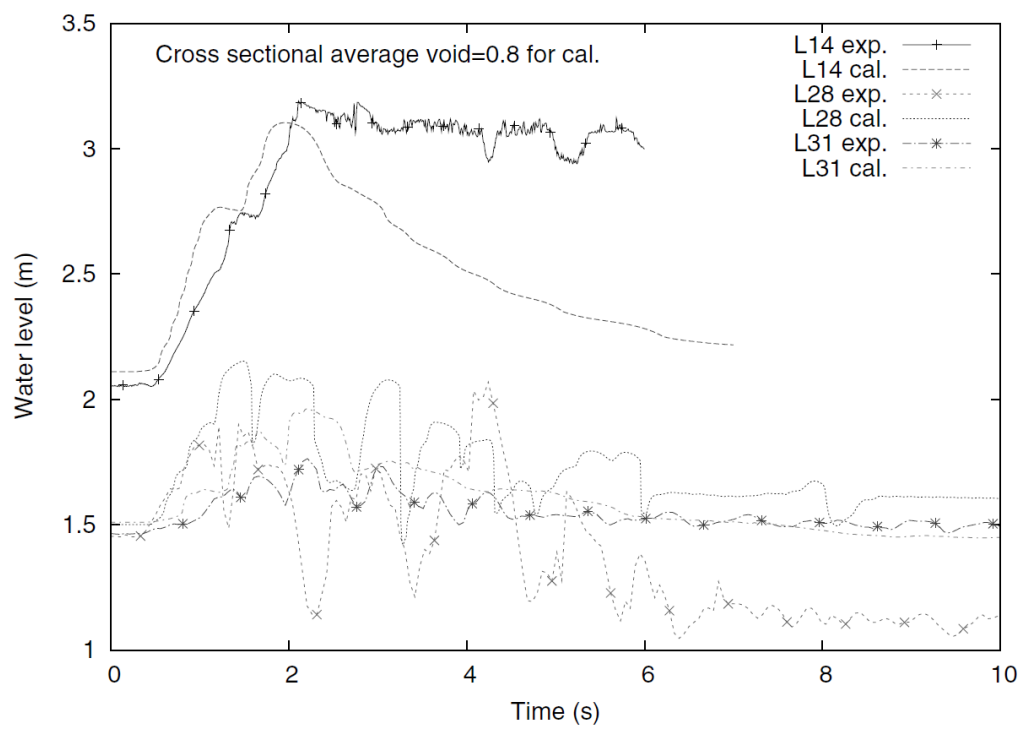
#### 4.1.2. 解析結果

圧力履歴の解析結果を図 4.1.2.1 に、プール水位挙動の解析結果を図 4.1.2.2 に示す。図において、exp. が試験結果で、cal. が解析結果である。全体として試験結果は概ね良く再現されている。詳細にみると、圧力がやや低めに評価されているのに対し、特に低圧試験（L28 と L31）において水位は高めに評価されている。



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

図 4.1.2.1 圧力履歴比較



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

図 4.1.2.2 プール水位挙動比較

## 4.2. 爆発実験解析

爆発に関するモデルの機能を確認するため及び実験を最適に再現することを目的としたパラメータ調整のため、JRC-Ispra 研究所にて実施された実験のうち、FCIに伴うエネルギーの発生が確認された KROTOS-44, 42 実験及び FARO-L33 実験に加え、エネルギーの発生が確認できなかった KROTOS-37 実験についても解析対象として選定した。これらの検証解析は、日本原子力研究開発機構にて実施されている。<sup>[1]</sup>

KROTOS 実験では、1~3kg 程度の熔融アルミナまたはコリウム ( $UO_2$  と  $ZrO_2$  の混合物) を円柱形状の水槽に落下させ、圧縮アルゴンガスによる圧力パルスによってトリガがかけられている。FARO 実験は、大規模スケールの実験であり、100kg の熔融コリウムを水プールに落下させ、起爆装置からの圧力パルスによってトリガがかけられている。これらの実験結果から、各位置での圧力過渡変化及び細粒化粒子の粒子径分布に関するデータに対する検証を実施した。

### 4.2.1. 解析条件

解析条件を表4.2.1.1に、KROTOS及びFARO実験の解析メッシュモデル図を、図4.2.1.1に示す。水蒸気爆発解析では粗混合過程と爆発過程の2つの過程を解析する。粗混合過程では、計算モデルを調整することで実験結果を適切に模擬することが可能である。具体的には、ジェット分裂長さの相関式と調整係数は、同等の状況で水蒸気爆発が発生しない場合のジェット分裂長さを再現できるよう選択される。

トリガ時刻における全体のボイド率などの実験パラメータの一致性を確認し、粗混合過程の解析結果が妥当であることを確認した。そして、それらの結果を爆発過程の初期条件に設定した。

爆発解析では融体物質やその他の実験条件に関係なくモデルパラメータの値を一定とする。これらは、解析値がKROTOSのアルミナ実験での圧力パルス、水蒸気爆発により発生した微粒子の質量分率と一致するように設定している。爆発過程でのモデルパラメータの調整にアルミナを用いた実験を採用した理由を以下に示す。図4.2.1.2に、KROTOS実験のアルミナとコリウムの総質量、融体質量及びボイド率 0.75 以下の融体質量についての比較結果を示す。アルミナでは粗混合過程において常に熔融状態であり、過度に水蒸気が発生することはない。その為、理想的な粗混合条件（融体物質の大部分が固化せず、水と十分に混合されている）が達成できている。一方、コリウムではトリガ時刻における融体の大部分が固化あるいは高ボイド率領域に含まれている為、水蒸気爆発に寄与する融体量はわずかとなる。この相違は物質の物理的特性や初期温度に関係する。アルミナはコリウムと比較して、融点、初期温度及び密度が低く、潜熱が大きい。その為、液滴径が大きくなり、融体が冷却されるまでに要する時間が長くなる。また、アルミナの融体温度が低く、体積当たりの表面積が小さいため、水への熱伝達は小さくなる。これらの理由により、コリウ



ムではアルミナほど大規模な水蒸気爆発は発生しない。以上より、理想的な粗混合状態が得られるアルミナを用いた実験のほうが、爆発過程の微粒化モデルパラメータの調整には適切と考えられる。

外部トリガは、中心底部のセルに与える。外部トリガ条件は、KROTOSでは、実験で使  
用したガス室の条件（15cm<sup>3</sup>，14MPa，pV=約220kJ）から設定する。また、FARO-L33では、起爆  
エネルギー 1 kJと等価な体積と圧力（28.6 cm<sup>3</sup>，35MPa）から設定する。

表 4.2.1.1 KROTOS-37, 42, 44 及び FARO-L33 の実験条件及び解析条件

|                              |   | K44                       | K42     | K37                  | L33                     |
|------------------------------|---|---------------------------|---------|----------------------|-------------------------|
| <b>Melt</b>                  | Material                                | Alumina <sup>a)</sup>     |         | Corium <sup>b)</sup> |                         |
|                              | Released mass (kg)                      | 1.50                      | 1.54    | 3.22                 | 100                     |
|                              | Temperature(K)                          | 2673                      | 2465    | 3018                 | 3070                    |
|                              | Jet release dia. (mm)                   | 30                        |         |                      | 48                      |
|                              | Free fall height(m)                     | 0.44                      |         |                      | 0.77                    |
| <b>Water</b>                 | Temperature(Subcool) (K)                | 363(10)                   | 293(80) | 296(77)              | 294(124)                |
|                              | Depth (m)                               | 1.105                     |         |                      | 1.62                    |
|                              | Vessel diameter (m)                     | 0.20                      |         |                      | 0.71                    |
| <b>Cover gas</b>             | Atmosphere                              | Steam                     | Argon   |                      |                         |
|                              | Pressure (MPa)                          | 0.10                      |         |                      | 0.41                    |
|                              | Cover gas volume(m <sup>3</sup> )       | 0.290                     |         |                      | 3.496                   |
| <b>Premixing results</b>     | Level swell (cm)                        | 12                        | 3       | 30                   | 9                       |
|                              | Jet break-up length (m)                 | ~0.3                      |         | ~0.8                 | ~1.1                    |
| <b>Explosion results</b>     | Pressure peaks (MPa)                    | ~50                       | ~50     | NA <sup>c)</sup>     | ~6                      |
|                              | Half height width (ms)                  | ~1.5                      | ~1      | NA <sup>c)</sup>     | ~3                      |
|                              | Debris <0.106mm (%)                     | 47                        | 31      | 1.4                  | ~8 <sup>d)</sup>        |
| <b>Analytical conditions</b> | Time step ( $\mu$ s)                    | ~2                        |         |                      |                         |
|                              | Jet initial velocity(m/s)               | 3.0                       |         |                      | ~2.9                    |
|                              | Jet flow-in duration(s)                 | 0.270                     | 0.255   | 0.191                | 2.6                     |
|                              | Melt Particle dia.(mm)                  | 10                        |         | 2                    | 3                       |
|                              | Jet break-up length model <sup>e)</sup> | S: $C_{ent} = 2.5$        |         | S: $C_{ent} = 1.7$   | T: $C_{ent} = 1$        |
|                              | Surface temperature drop model          | Use                       |         |                      |                         |
|                              | $N_{pcr}$ <sup>f)</sup>                 | 100                       |         |                      | 1000                    |
|                              | $n_{hist}$ <sup>f)</sup>                | 500                       |         |                      | 1000                    |
|                              | External trigger                        | 14.8MPa-15cm <sup>3</sup> |         |                      | 35MPa-29cm <sup>3</sup> |
|                              | Trigger time (s)                        | 0.9                       |         | 0.5                  | 1.12                    |
|                              | $C_{frg}$ <sup>g)</sup>                 | 0.35                      |         |                      |                         |
|                              | $d_{frg}$ ( $\mu$ m) <sup>g)</sup>      | 50                        |         |                      |                         |
|                              | $t_{triglifc}$ (ms) <sup>g)</sup>       | 1.0                       |         |                      |                         |
|                              | $p_{trig}$ (MPa) <sup>g)</sup>          | 0.2                       |         |                      | 0.5                     |
|                              | Fragmentation criterion                 | $T_{av} \geq T_{mp}$      |         |                      |                         |
| $K_{ev}$ <sup>h)</sup>       | 0.7                                     |                           |         |                      |                         |

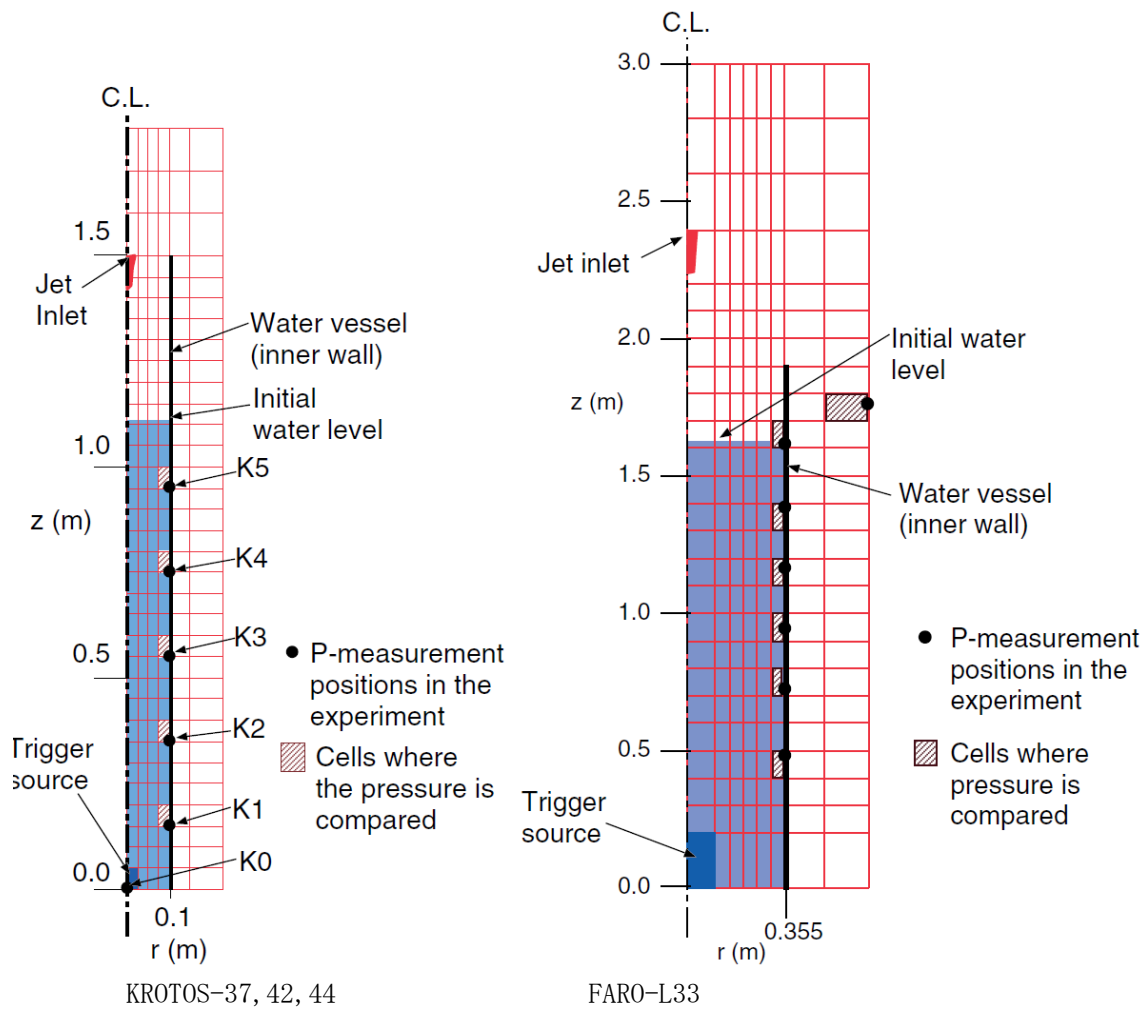
a)  $T_{melt} = 2300(K)$  b)  $UO_2(80)-ZrO_2(20)$  (wt%),  $T_{sol}/T_{liq} = 2830/2850(K)$

c) Reportedly “no propagating energetic explosions” [37].

d) Extrapolated from the size distribution reported in [41]. The ratio to the melt mass in the system at the triggering time, ~40kg, is ~20%.

e) S: Saito et al. correlation, T: Taylor type correlation (see 2.2.1)

f) see 2.2.3 g) see 2.2.4 h) see 2.3.2

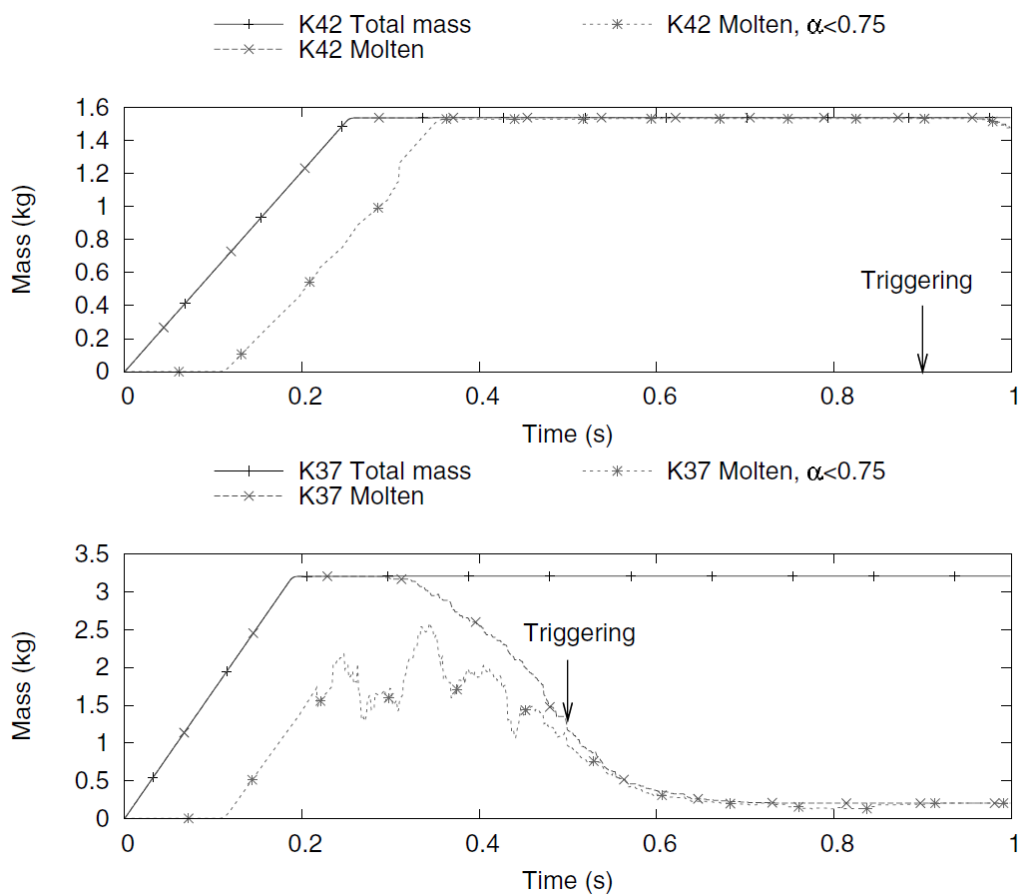


KROTOS-37, 42, 44

FARO-L33

出典 : Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

図 4.2.1.1 解析モデル (KROTOS-37, 42, 44 及び FARO-L33)



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

図4.2.1.2 粗混合過程での融体質量  
(上：アルミナ(K42)，下：コリウム(K37))

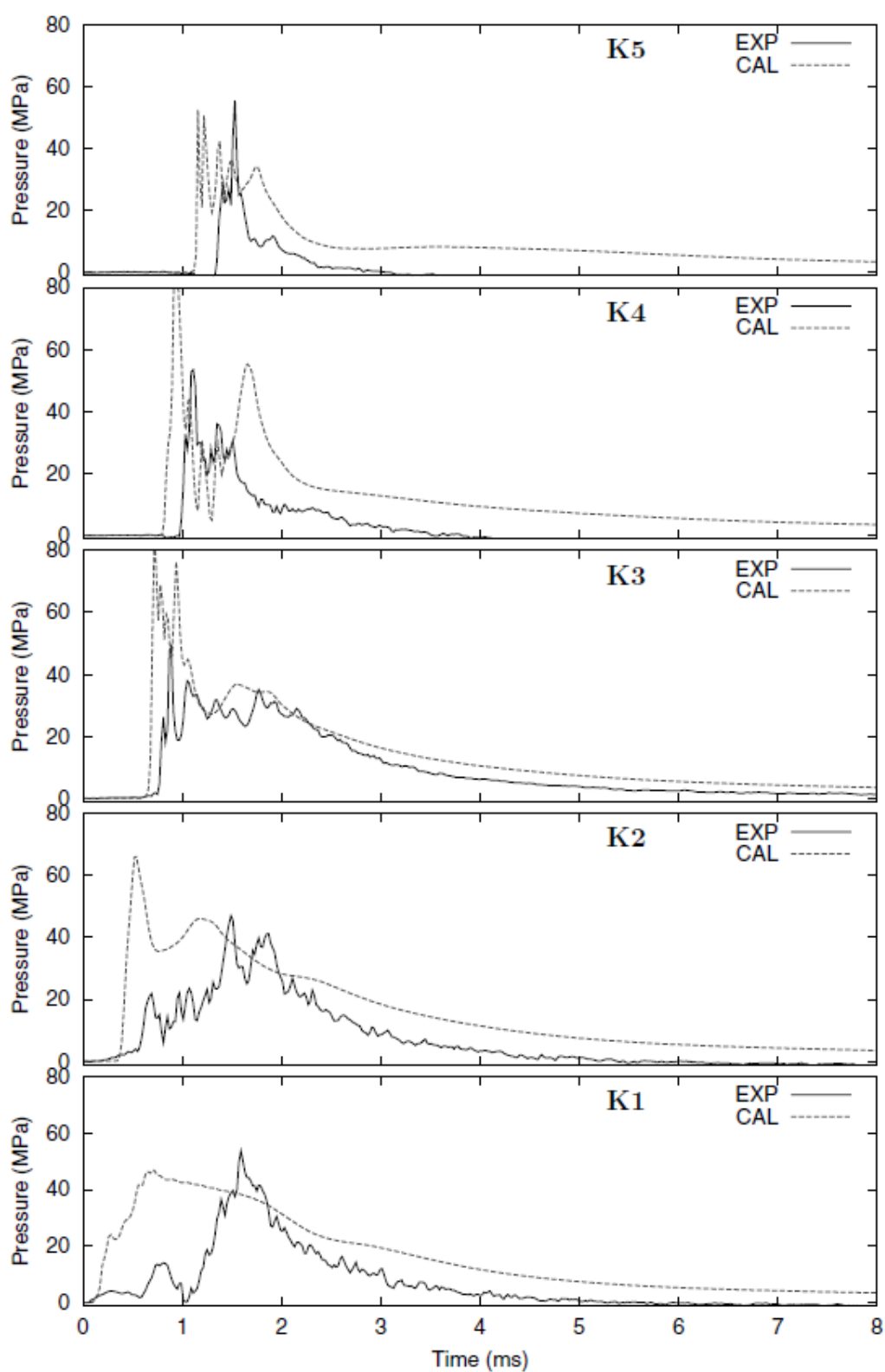
#### 4.2.2 解析結果

図4.2.2.1及び図4.2.2.2に、KROTOSのアルミナ実験(KROTOS-44, 42)における垂直に位置した各測定点での圧力履歴の実験結果と解析結果の比較を示す。解析結果は実験結果とよく一致していることが確認できる。また、水のサブクール度が相違するKROTOS-44, 42の解析・実験結果の傾向が一致していることより、サブクールの影響は小さいものと考えられる。

図4.2.2.3に、KROTOSのコリウム実験(KROTOS-37)の解析結果を示す。この実験では水蒸気爆発が生じていないことが報告されている。解析では、トリガリング圧力パルスは爆発源に近い底部のK1及びK2のみで局所的にピークとなるが、それ以外の測定点ではピーク値はない。また、K1及びK2のピーク値を過ぎるとそれ以降は減衰している。

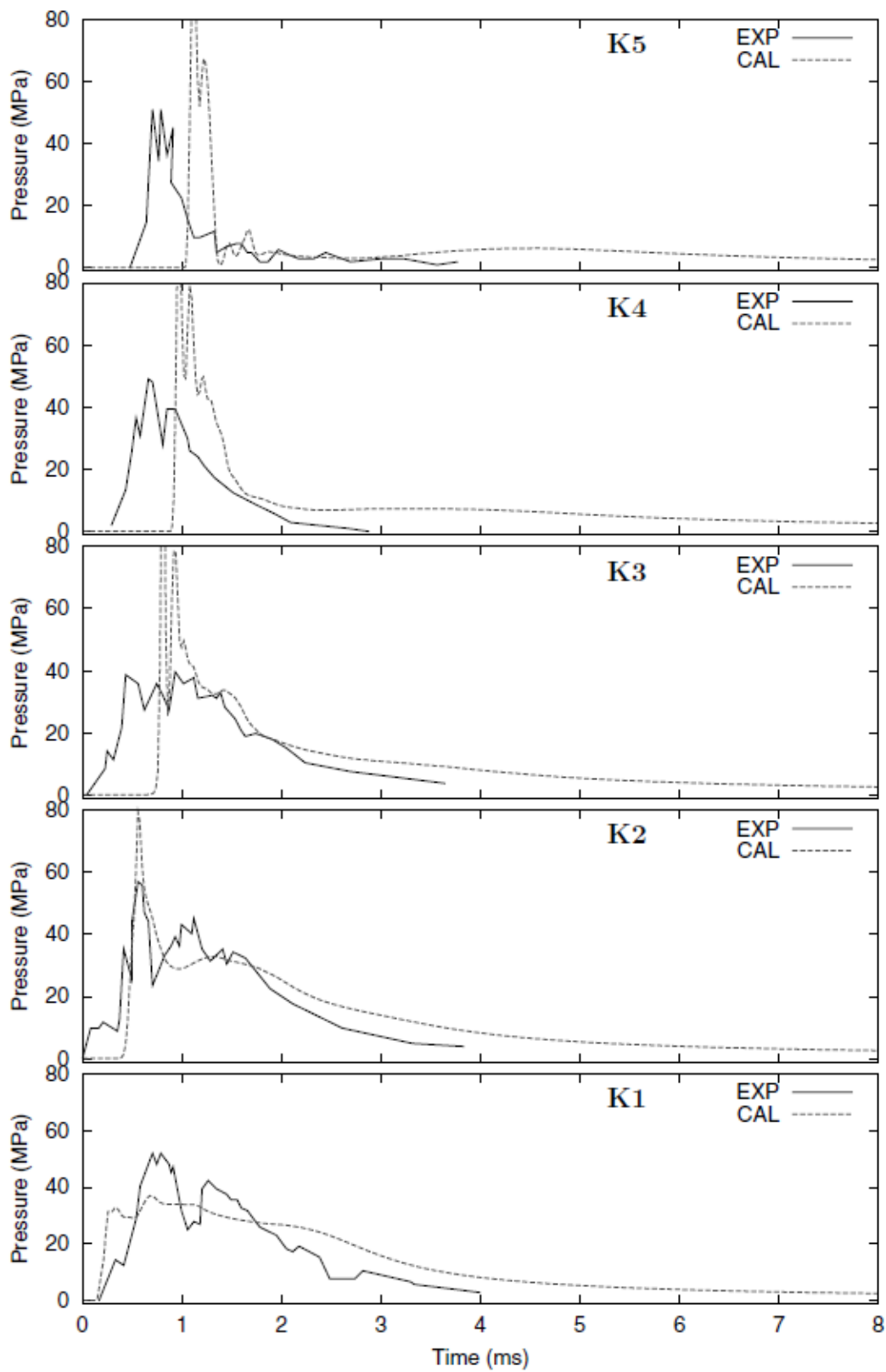
図4.2.2.4に、FARO-L33における垂直に位置した各測定点での圧力履歴の実験結果と解析結果の比較図を示す。図4.2.2.4より、圧力パルスの傾向が良く一致していることがわかる。なお、水面近傍である $Z=1615\text{mm}$ での圧力挙動について、実験結果では大きな圧力上昇は確認されておらず、解析結果との差異が生じているが、これは解析による爆発時の水位挙動と実験結果との相違が圧力伝播挙動に影響している可能性が考えられる。図4.2.2.5及び図4.2.2.6に、KROTOS実験(44, 42, 37)及びFARO実験(L33)の流体運動エネルギーの解析結果と実験結果の比較図を示す。KROTOSのアルミナ実験(44, 42)とFARO-L33において、解析結果と実験結果はよく一致していることがわかる。KROTOS-37では流体運動エネルギーが小さくなっており、これは実験において、水蒸気爆発が生じていない事実と一致している。

一般的に、水蒸気爆発により粒子径 $0.1\text{mm}$ より小さい微粒子が発生する。解析では、この粒子径を $50\mu\text{m}$ としている図4.2.2.7及び図4.2.2.8に、KROTOS実験(44, 42)及びFARO実験(L33)の微粒子の質量分率の比較結果を示す。実験と解析で粒子径が異なる為、正確な比較はできないが、解析結果の微粒子の質量分率は実験結果と同程度となることが確認できる。



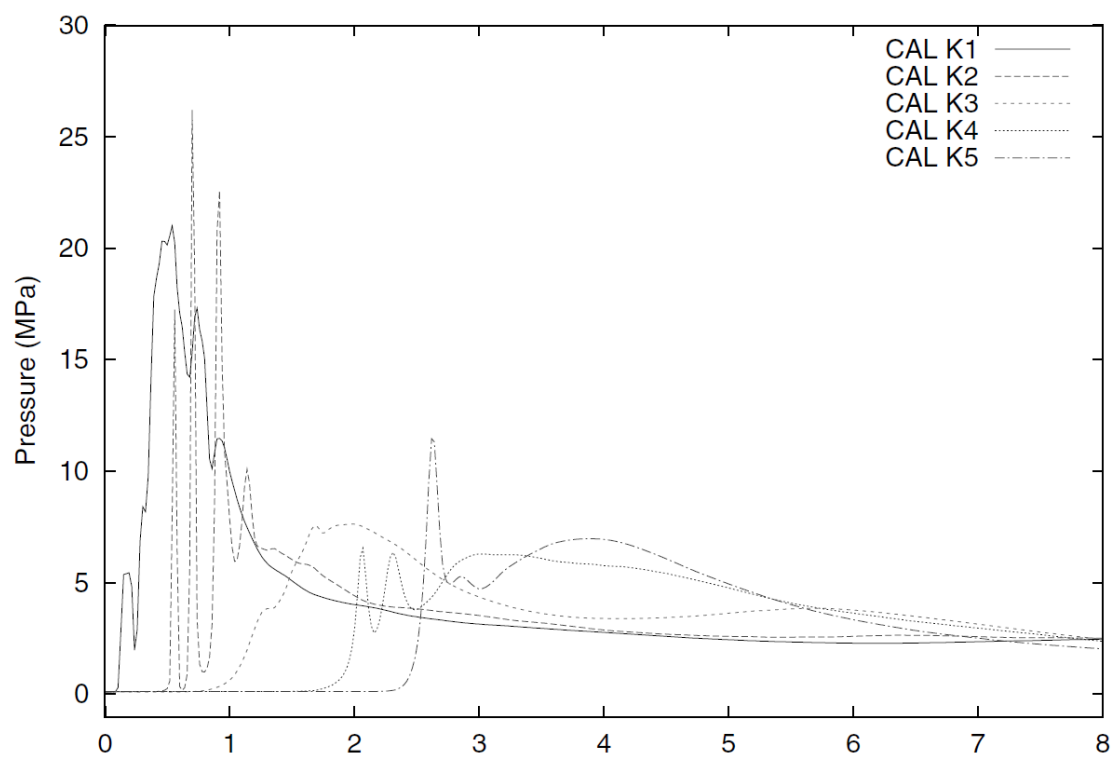
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

図 4.2.2.1 圧力履歴(KROTOS-44)



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

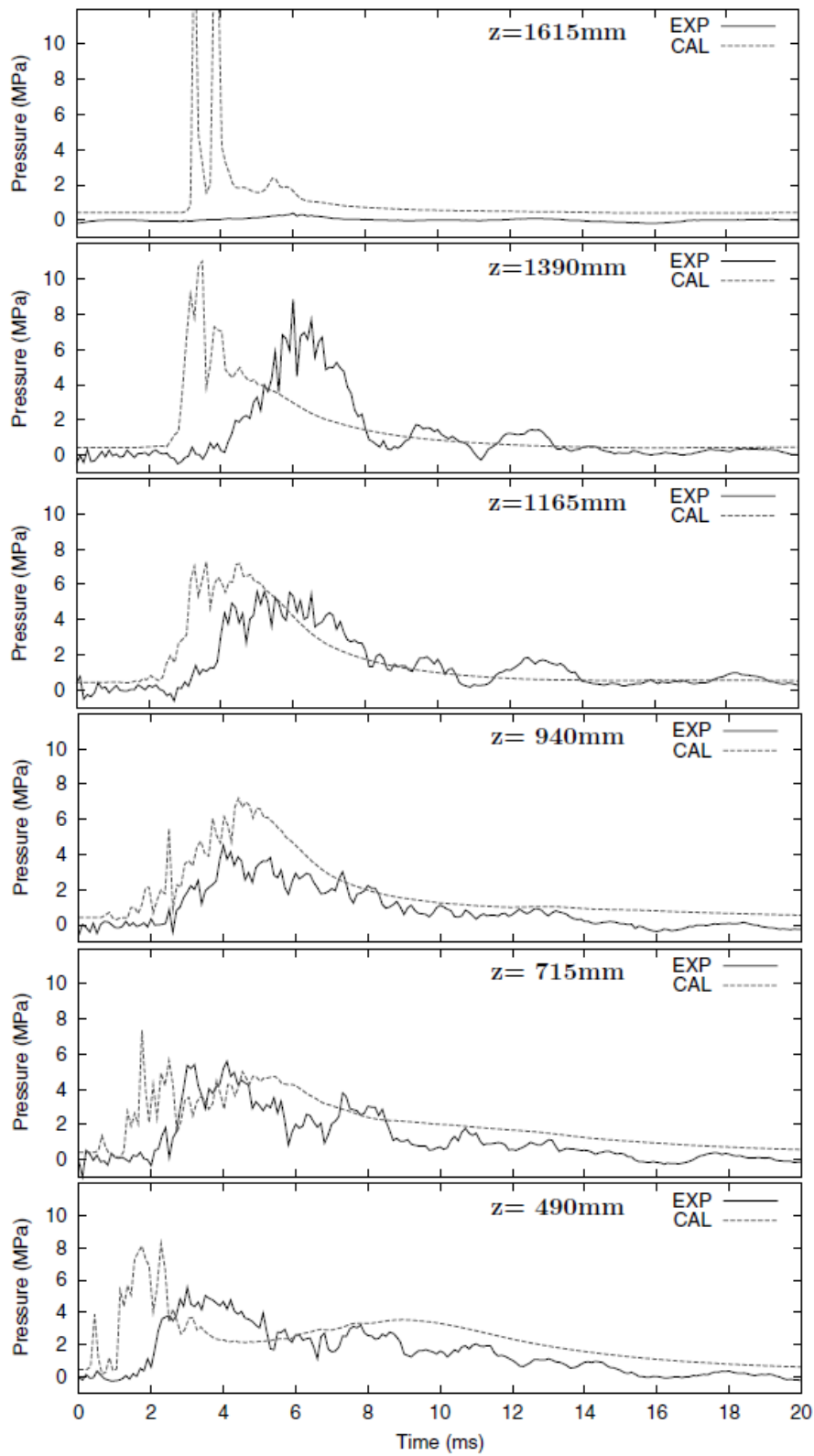
図 4.2.2.2 圧力履歴 (KROTOS-42)



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

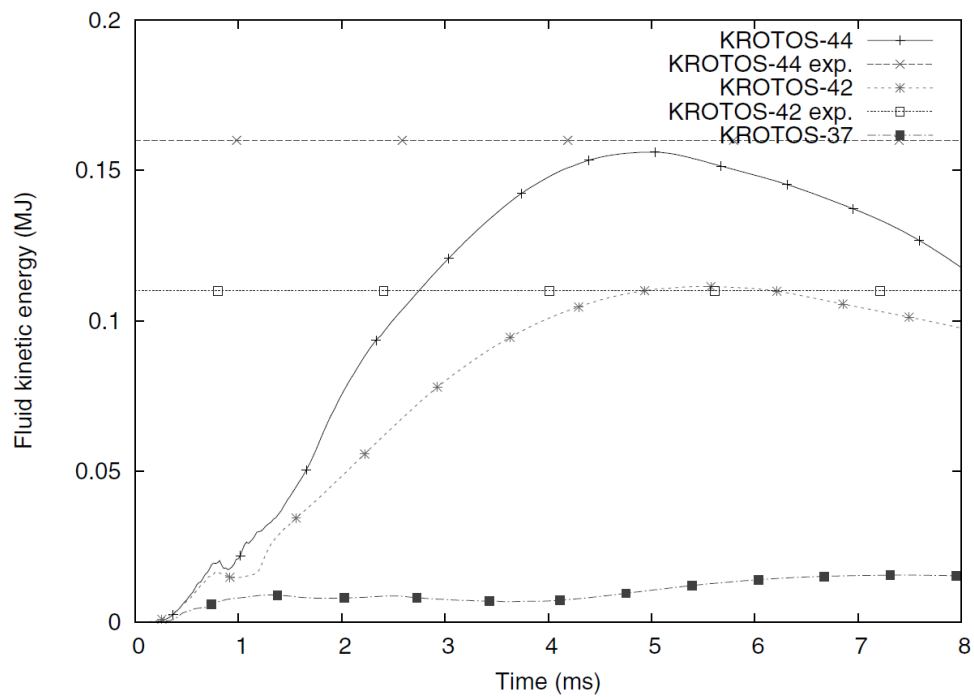
図 4.2.2.3 圧力履歴(KROTOS-37)





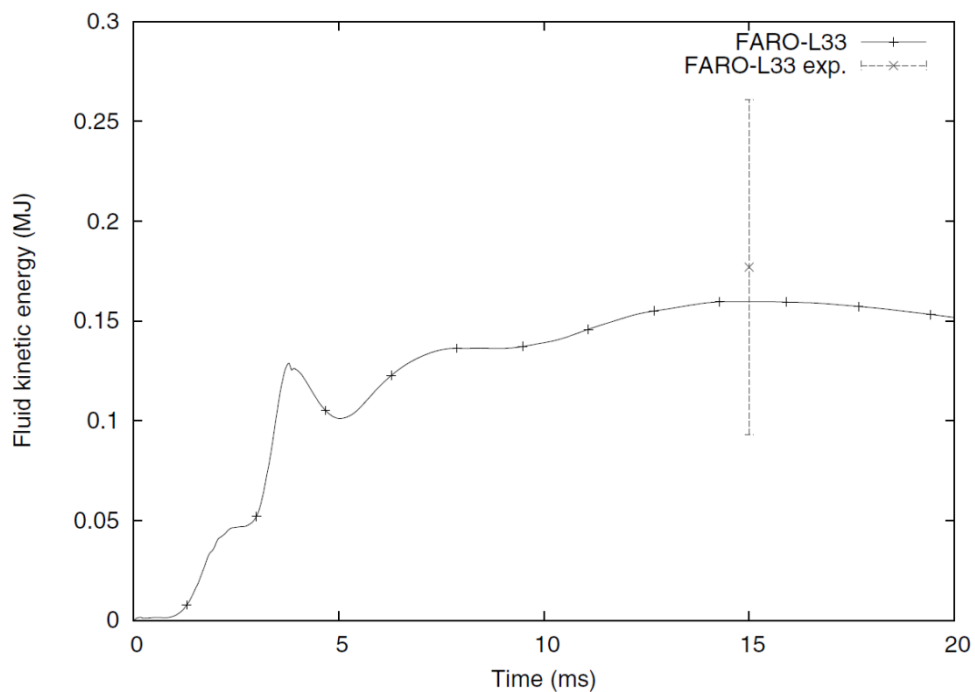
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

図 4.2.2.4 圧力履歴(FARO-L33)



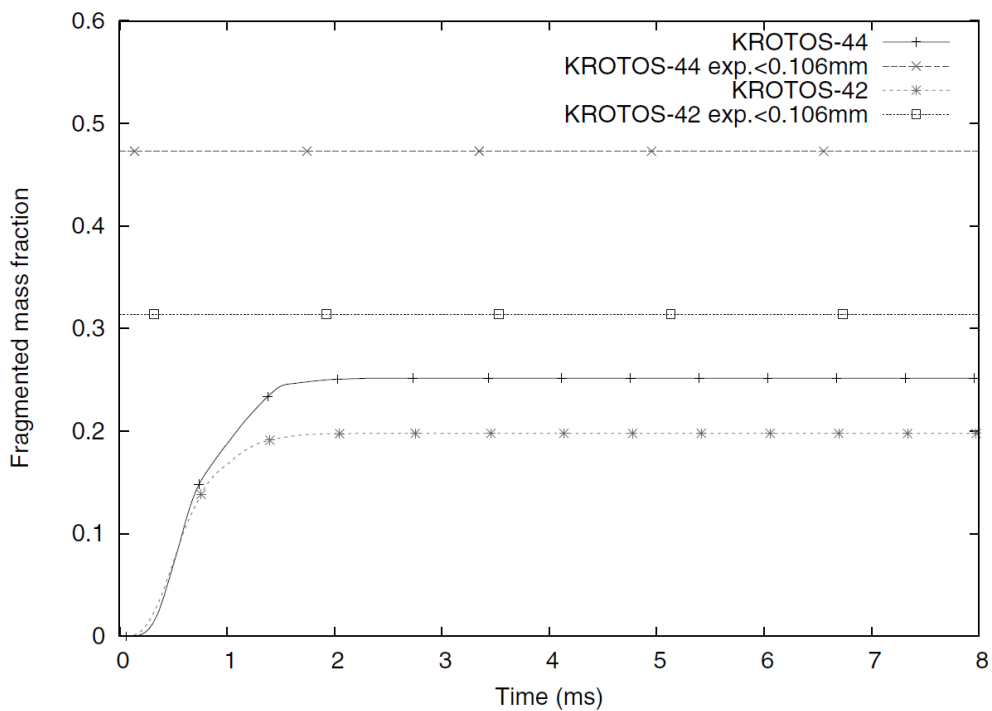
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

図 4.2.2.5 流体運動エネルギー (KROTOS)



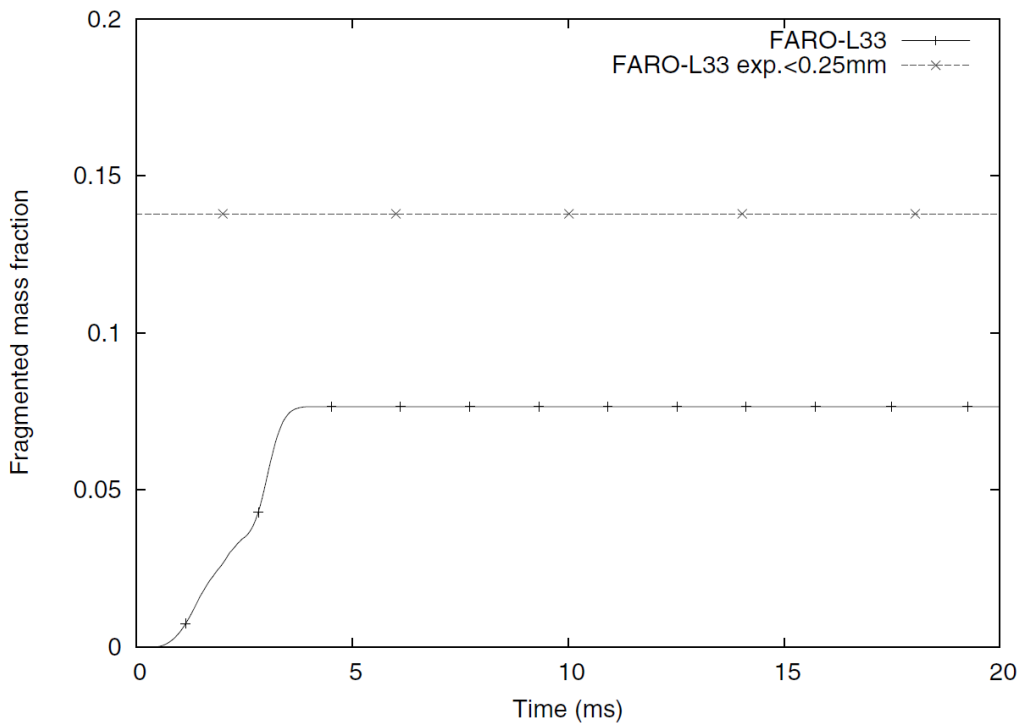
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

図 4.2.2.6 流体運動エネルギー (FARO-L33)



出典 : Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

図 4.2.2.7 微粒子の質量分布 (KROTOS)



出典 : Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA<sup>[1]</sup>

図 4.2.2.8 微粒子の質量分布 (FARO-L33)

## 5. 参考文献

- [1] K.Moriyama, et al, Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA-Data/Code 2008-014, July 2008.
- [2] 改良型軽水炉のシビアアクシデント対策に係る検討, 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成 21 年度
- [3] 森山 清史 他, 軽水炉シビアアクシデント時の炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率の評価, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Reserch-2007-072.
- [4] S. J. BOARD, R. W. HALL, R. S. HALL, Detonation of fuel coolant explosions, Nature 254, 319-321, 1975.
- [5] 大貫 晃 他, 多次元二流体モデル構成方程式評価用コード ACE-3D の開発, JAERI-Data/Code 96-033, 1996 年 11 月
- [6] G. I. Taylor. The dispersion of jets of metals of low melting point in water. G. K. Batchelor, editor, The scientific papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor, vol.3 Aerodynamics and the mechanics of projectiles and explosion, pp.304-305. Cambridge University Press, Cambridge, 1963.
- [7] M. Saito, K. Sato, S. Imahori, Experimental study on penetration behaviors of water jet into freon-11 and liquid nitrogen, ANS Proc. National Heat Transfer Conference, Houston, U.S., vol.3, pp.173--183, 1988.
- [8] R.Meignen, et al, The challenge of modeling fuel-coolant interaction: Part I - Premixing, Nucl.Eng.Des. 280 511-527, 2014.
- [9] A. Annunziato, et al, FARO TEST L-14 ON FUEL COOLANT INTERACTION AND QUENCHING Comparison Report, Volume I: Analysis of the Results, OECD/CSNI International Standaard Problem 39, 1998.
- [10] D. Magallon, Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments, Nuclear Engineering and Design 236, 1998-2009, 2006.

## 水蒸気爆発時のウォーターハンマーについて

炉外において水蒸気爆発が発生した場合、発生した気体によって水塊が急加速を受けながらピストン上に押し上げられ、この水塊衝突による衝撃力が構造物の健全性に影響を及ぼす可能性が考えられる。ウォーターハンマーは、この水塊衝突と圧力波の 2 つの効果に分けられるが、ペDESTALにおいては水面の上に気相部があり圧力波は問題とならないため、水塊衝突について以下に考察を示す。

この水塊の上昇について、軽水炉の SA 時を想定した気泡急成長に伴う水撃力に関する研究（稲坂ら、2004）では容器下部から注入した気泡によって、水位がピストン状に押し上げられ、気泡が水面に達して吹き抜けるまで水塊として上昇する様子が観察されている。水塊による水位上昇は、主に容器の径、 $D$ と初期水位、 $H_0$ のアスペクト比（ $H_0/D$ ）によって整理できるとされており、構造物をこの水塊の到達範囲外に配置することにより水撃力の影響を回避できると結論付けている。添付図 1 に実験装置、添付図 2 に水塊の到達範囲の整理結果、添付図 3 に水塊挙動の実験結果を示す。

女川 2 号機、浜岡 4 号機、島根 2 号機及び柏崎刈羽 6/7 号機では、ペDESTAL径と初期水位のアスペクト比による無次元水位はそれぞれ 0.6、0.5、0.65 および 0.2 程度である。この知見を適用した場合、添付図 2 より上記のアスペクト比において水塊群到達範囲が最も大きくなるのは島根 2 号機のアスペクト比 0.65 であり、そのときの水塊の上昇を含む最大水位は約 7.5m（ペDESTALの径の 1.25 倍程度）となる。これより、島根 2 号機の場合、水塊はペDESTAL床から約 7.5m まで上昇する可能性があるが、これはペDESTAL床面からの RPV 底部高さ約 9m よりも低いことから、RPV 支持機能の健全性に与える影響は無いといえる。

本実験では、水蒸気爆発時の水塊運動の主要パラメータとして、容器径、初期水位、気泡圧力を変更したケースについて実験を実施している。これらの実験パラメータ範囲の実機条件への適用性は以下の通りである。

容器径については、大型容器（内径 1.0m）と小型容器（内径 0.428m）の実験を行い、容器径のスケール効果を考慮している。実験結果より、容器径で規格化した無次元水面上昇距離は、小型容器と大型容器で同一のアスペクト比条件における実験結果の観察結果から、ほぼ一致すると評価されている。添付図 2 の水塊到達範囲の実験相関式は、これらの実験装置のデータより整理されたものである。したがって、実機の格納容器下部領域の径は本実験装置の容器径よりも大きくなるが、実験相関式は容器のスケール効果を考慮しており、実機条件にも適用できると考えられる。

また、この実験では、圧縮空気を水張り容器の底部から供給して水蒸気爆発による気泡運動の水位上昇への影響を調査しているが、実機では必ずしも底部から気泡が成長を始めるわけではない。しかしながら、底部から供給される気泡は 1 次元軸方向への運動が支配

的となる一方で、実機では蒸気泡がより 3 次元的に運動できるため、軸方向への水位上昇を評価する観点では、この実験方法は実機と比較して保守的であると考えられる。

初期水位は、無次元初期水位を変更したケース (0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4) の実験を行っているが、実験の実水位は最大 1.4m (容器径 1.0m の場合) となる。実機条件では、実験条件の実水位より高くなると想定される。しかし、初期水位と水位上昇の関係は、容器径で規格化された無次元初期水位 (容器径と初期水位の比) 及び無次元水塊到達範囲 (容器径と水位上昇の比) で整理される (添付図 2)。この無次元水位でみると実機条件は、実験範囲にあり、実機条件に適用できると考えられる。

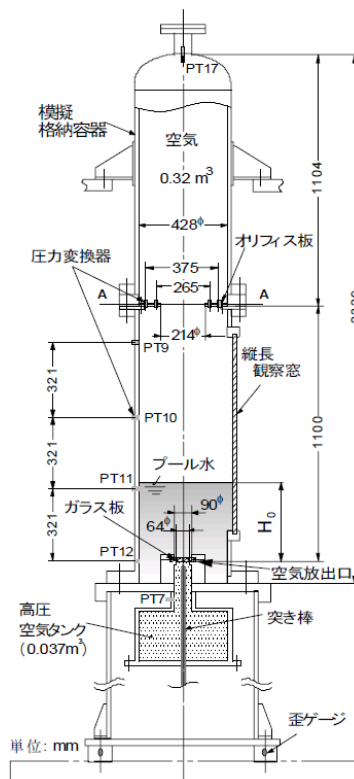
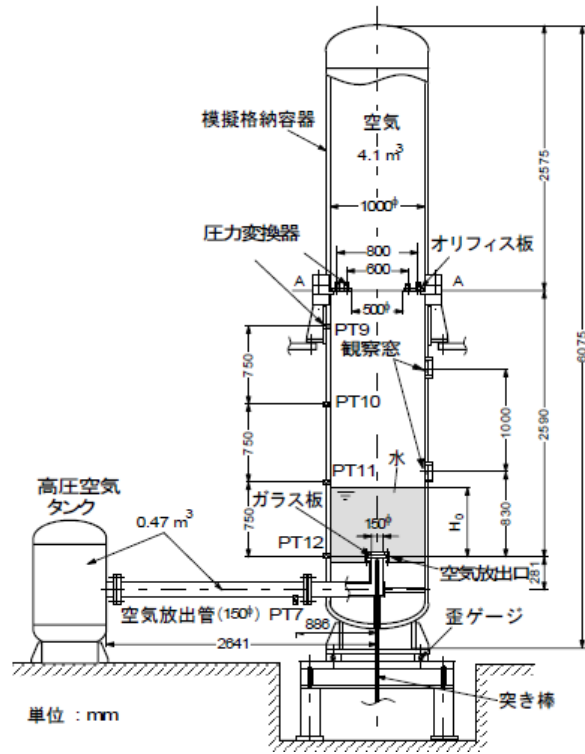
気泡の圧力条件は、気泡圧力を変更したケース (0.5MPa, 1.0MPa, 2.0MPa) を行っている。実験結果より、圧力が大きくなると気泡が吹き抜けやすくなり、水塊が押し上げられる範囲は圧力に依存しなくなる傾向がある。このため、高圧条件 (10MPa 以上) での水塊到達範囲はほぼ同じになるとされている。これより、実機での水蒸気爆発では、実験条件よりも圧力が高くなることが想定されるが、添付図 2 の水塊到達範囲は実機条件にも適用できると考えられる。

また、この実験研究は空気を対象としたものであるが、水蒸気を対象とした場合には、蒸気泡に対する凝縮効果のため、水塊の上昇と水撃力が抑制されるとする知見がある (稲坂ら, 2007)。

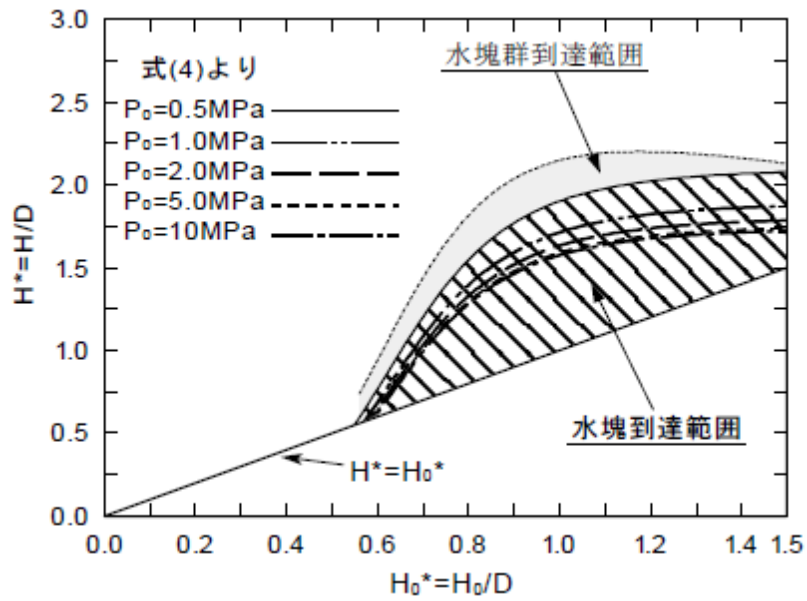
以上より、本実験結果による水塊運動の範囲の結果は、実機条件でも適用できると考えられる。

#### 【参考文献】

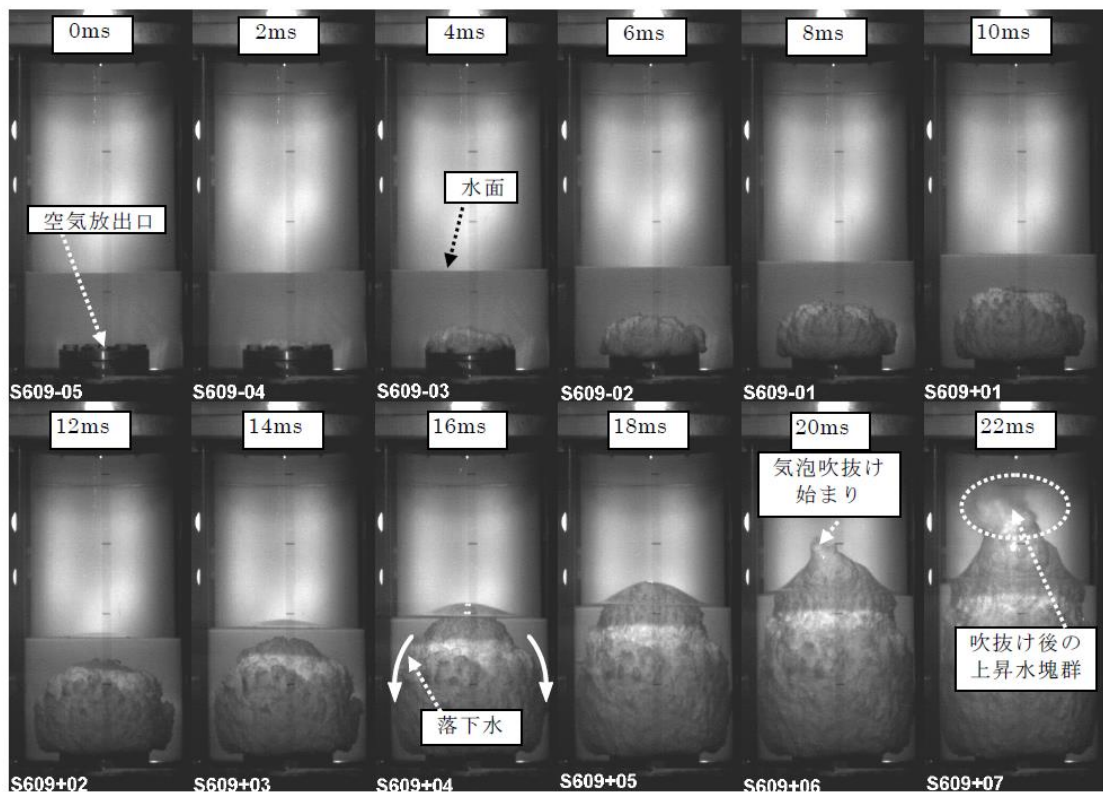
- ・稲坂, 安達, 汐崎, 綾, 成合, 2004. 「軽水炉のシビアアクシデント時における気泡急成長による水撃力の研究」, 海上技術安全研究報告書 第4巻 第3号, p. 323-343.
- ・稲坂, 安達, 村田, 綾, 2007. 「軽水炉のシビアアクシデント時における蒸気急発生による水撃力」, 日本原子力学会和文論文誌 6, p. 289-297.



添付図 1 水撃実験装置（上：大型容器、下：小型容器）（稲坂ら，2004）



添付図2 水塊がコヒーレント性を保ったまま上昇する範囲 (稲坂ら, 2004)



添付図3 気泡の成長と水塊挙動の実験結果 ( $P_0=0.5\text{MPa}$ ,  $H_0^*=0.6$ ) (稲坂ら, 2004)



本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

(参考資料3 AUTODYN)

## 目 次

### AUTODYN

|      |                                 |       |
|------|---------------------------------|-------|
| 1.   | はじめに.....                       | 1     |
| 2.   | 適用対象事象及び適用実績.....               | 2     |
| 3.   | 解析モデルと解析結果の例示.....              | 4     |
| 3.1  | 計算要素.....                       | 5     |
| 3.2  | 境界条件.....                       | 8     |
| 3.3  | 材料モデル.....                      | 9     |
| 3.4  | 爆発源の設定方法.....                   | 12    |
| 3.5  | 解析フロー.....                      | 14    |
| 3.6  | 入出力.....                        | 15    |
| 3.7  | 解析結果の例示.....                    | 16    |
| 4.   | 解析結果の検証.....                    | 24    |
| 5.   | 参考文献.....                       | 36    |
| 添付 1 | 運動エネルギーから圧力として伝わる時の考え方について..... | 添 1-1 |
| 添付 2 | 反射波の考慮について.....                 | 添 2-1 |
| 添付 3 | ペDESTAL構造応答評価における判定基準について.....  | 添 3-1 |

## 1. はじめに

本資料は、格納容器破損防止対策に関する重大事故等対策の有効性評価（以下、「有効性評価」と称す。）に関連して、原子炉圧力容器外の熔融燃料－冷却材相互作用（以下、「FCI」と称す。）発生時における原子炉本体基礎（以下、「ペDESTAL」と称す。）の構造応答評価に適用する汎用衝撃解析コードAUTODYNを対象とし、

- ・適用対象事象及び適用実績
- ・解析モデルと解析結果についての説明
- ・解析結果の検証

に関してまとめたものである。

### (1) 解析コードの概要

AUTODYNは爆発・衝撃問題といった非線形時刻歴応答解析の専用ツールとして、1980年代に開発された解析コードであり、陰解法ソルバを採用した有限要素法解析ツールとは異なり、収束計算を必要としない陽解法(\*)ソルバを採用しているため、爆発・衝撃のような非線形性の強い問題の解析に適している。

- (\*) 時刻歴応答解析には「陰解法」と「陽解法」の2種類の手法があり、陰解法は解を求めるために収束計算を必要とすることから、非線形性の強い問題の場合には解が発散して計算が継続できなくなる場合がある。一方、陽解法は収束計算の必要がないことから、比較的短時間で安定して解が得られる。

### (2) 解析コードの特徴

AUTODYNには後述する複数の要素タイプが用意されており、気体／液体／固体等の解析対象に応じた要素の使い分けや、異なる要素タイプ間での連成解析が可能である。

これにより、変形レベルの大きい流体部分と比較的変形レベルの小さい構造物部分の要素を使い分けてモデル化し、それらを連成させて計算することで、衝撃荷重を伴う流体－構造連成問題を解くことができる。

## 2. 適用対象事象及び適用実績

### (1) 事象の概要

AUTODYNによる構造応答解析は、原子炉圧力容器外でのFCIに伴う荷重に対して、ペDESTALの構造健全性を確認することを目的に実施する。

FCIとは熔融炉心と冷却材との接触及びそれに伴って引き起こされる現象を指し、FCIのうち衝撃波を伴うものを「水蒸気爆発」と呼ぶ。

これまでの研究では、水蒸気爆発現象を以下のような段階的な過程によって説明するモデルが提唱されている。

- ① 炉心あるいは原子炉圧力容器から落下する熔融炉心（デブリジェット）が冷却材中に落下する。水と接触した熔融炉心は、その界面の不安定性により細粒化して水中に分散する（エントレイン）。細粒化した熔融炉心（以下、「デブリ粒子」と称す。）は、蒸気膜に覆われた状態で膜沸騰を伴う水との混合状態となる（粗混合）。
- ② 上記の状態では、自発的もしくは外部からの圧力パルス等の外乱により、膜沸騰が不安定化し（トリガリング）、デブリ粒子と冷却材が直接接触する。
- ③ デブリ粒子と冷却材の直接接触により急速な熱の移動が発生し、急速な蒸気発生・熔融炉心の微細化によってさらにデブリ粒子と冷却材の接触が促進され（伝播）、蒸気発生が促進される。この蒸気発生により圧力波が発生する。
- ④ 発生した圧力波が通過した後の高温高圧領域（元々は粗混合領域）の膨張により運動エネルギーが発生し、構造材に機械的荷重が作用する。

上述の通り、水蒸気爆発が発生するためにはトリガリングが働く必要があり、さらにデブリ粒子と冷却材の接触が瞬時に粗混合領域全体に伝播する必要がある。

一方で、国内外の実験的知見に基づく評価において、BWRの実機条件下では水蒸気爆発のトリガとなり得る要因は考えられないことから、水蒸気爆発の発生可能性は十分に低いものと結論付けられている。

本書にて説明するAUTODYNを用いた構造応答解析では、仮に水蒸気爆発が起こった場合を想定し、最も爆発による影響が大きいペDESTALの構造健全性を確認する。

水蒸気爆発に伴う荷重条件については、上記①～④の事象を解析コードJASMIN Eを用いて解析的に模擬し、算出する。（詳細は3.4参照）

(2) 適用実績

高速衝突や爆発問題などを対象とする高速衝撃解析に用いられる計算コードは、ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) によって 1950 年代に開発された HEMP コードを起源としている。HEMP コードをはじめとする、それまでの多くの衝撃解析コードは有限差分法によって定式化されていたが、その後、DYN A を代表とする有限要素法衝撃解析コードが開発され、さらに計算処理能力の向上を背景として、1980 年代に商用衝撃解析コードとして AUTODYN が開発された。

AUTODYN は、高速衝突問題や爆発問題をはじめとした、物質の大変形を伴い、かつ非常に過渡的な現象に対して有効なコードである。また、多くの衝撃解析コードと同様、連続体力学によって定式化され、質量、運動量、エネルギーの各保存形式と、連続体の特性を表す状態方程式及び構成方程式が陽解法によって連立して解かれる。

AUTODYN は、例えば航空宇宙分野にて、スペースデブリ衝突、複合材の衝撃応答、燃料タンクの安全評価に適用されている。また、前述の通り爆発・衝撃問題に適したコードであるため、FCI によるペDESTAL 構造材への荷重応答評価にも適しており、既往研究において適用した実績もある。この中で、代表的な研究概要を表 2-1 に示す。

表 2-1 AUTODYN の主な適用実績

|   |       |   |
|---|-------|---|
| 1 | 研究名称  | シビアアクシデント時構造バウンダリ健全性評価<br>＝動的構造応答解析＝  |
|   | 解析実施者 | 財団法人 原子力発電技術機構 原子力安全解析所   |
|   | 実施時期  | 平成 12～13 年度<br>(平成 12 年度は「環境影響評価手法の調査検討等」の一部として実施)  |
|   | 研究概要  | PWR プラントにおける炉心損傷後の格納容器破損防止対策 (格納容器内注水) の有効性評価として、FCI 現象を模擬した解析を実施。水中での熔融炉心の粗混合反応の解析は VESVIUS コードを用い、ガスバグモデルを用いた AUTODYN 2 次元モデルによる応答解析に加え 3 次元モデルによる解析も実施。熔融物のエネルギー放出挙動に関しては、代表的な FCI の試験である KROTOS 試験の結果を参照している。 |
| 2 | 研究名称  | コンクリート建造物の衝撃破壊挙動解析に係るコード整備  |
|   | 解析実施者 | 独立行政法人 原子力安全基盤機構  |
|   | 実施時期  | 平成 15 年度  |
|   | 研究概要  | コンクリート建造物に対する航空機衝突の影響を評価するためのコンクリート構成則の改良及び検証解析を実施。低速域から高速域にわたる複数のコンクリート実験の再現解析を AUTODYN で行い、解析結果との良い一致を得た。   |

### 3. 解析モデルと解析結果の例示

AUTODYNは非線形時刻歴応答解析の専用ツールであり、陰解法ソルバを採用した有限要素法解析ツールとは異なり、収束計算を必要としない陽解法ソルバを採用しているため、特に爆発荷重・衝撃荷重のような非線形性の強い問題を扱うことが可能である。時刻歴応答解析では、時間積分に中央差分による収束計算が不要な陽解法を用いて解析するため、落下・衝突のような非線形性の強い問題でも解が発散せず、安定して解が得られる。またAUTODYNの使用実績としては、航空宇宙・防衛などの産業で製品の安全性対応や高品質化などに幅広く活用されている。

陽解法の特徴は、着目している要素の隣接する過去の要素情報しか現在の状態に影響を与えないということである。したがって衝撃解析では、波動の伝搬速度である音速  $c$  が重要な意味を持っており、いま着目する要素（要素サイズ  $\Delta_e$ ）で、音速  $c$  の影響による現象を陽解法で安定に実行するためには、時間積分の刻み幅（ $\Delta_t$ ）に Courant 条件と言われる制約がある。

$$\Delta_t = \frac{\Delta_e}{c}$$

ここで連続体が構造体の場合、ヤング率  $E$ 、密度  $\rho$  とすると、構造体内での音速  $c$  は、

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

連続体が流体の場合、体積弾性率  $K$ 、密度  $\rho$  とすると、流体内部での音速  $c$  は、

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

である。F C I 時の構造応答解析で取扱う連続体のおよその音速  $c$  は、鋼材で 5000 m/s、コンクリートで 3200 m/s、水中で 1560 m/s、空気中で 340 m/s である。

AUTODYNでは、時間積分の刻み幅  $\Delta_t$  としてすべての要素で決定される時間積分の中で最小のものを自動的に用いている。

### 3.1 計算要素

AUTODYNで使用可能な要素タイプの種類とその概要を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 AUTODYNで使用可能な要素タイプの種類とその概要

| 要素タイプ                             | 概要  |
|-----------------------------------|---|
| Lagrange<br>(Solid)               | 物質とともに要素が移動・変形する計算方法。主として固体に対して適用性がある。  |
| Shell                             | 薄板 Shell 要素。厚さ方向に要素分割できないような薄肉構造物に対して適用性がある。2次元軸対称系の場合は計算領域を線分（2次元）の集合に分割する。                          |
| Euler                             | 要素は空間に固定され、この要素間を物質が移動する計算方法。主として気体・流体に対して適用性がある。本解析では複数の物質を取り扱うことができる Multi-Material Euler 法を適用している。 |
| ALE<br>(Arbitrary Lagrange Euler) | 物質とともに要素が移動・変形する Lagrange において、内部セルに対しては物質とは別に要素を任意に移動させて、要素の歪みによる計算精度の低下を防ぐことができる。                   |

今回の F C I 時の構造応答解析では、AUTODYNで使用可能な上記の要素タイプのうち、Lagrange、Shell 及び Euler を用いている。

ここで、Lagrange 要素及び Shell 要素の幅は、ペDESTALの構造応答の観点から、爆発荷重に対する変形挙動を精度よく模擬できるよう、高さ方向及び壁厚方向に十分な分割数（曲げ変形を適切に模擬する観点から壁厚方向に最低3分割）が確保できる寸法として設定する。一方、Euler 要素は、Lagrange 要素との力のやり取りの関係から Lagrange 要素よりも小さく設定することが推奨されていることに配慮し、設定する。

F C I時の構造応答解析に用いる解析モデルの例を図 3.1-1 に，当該モデルの要素分割の例を図 3.1-2 にそれぞれ示す。

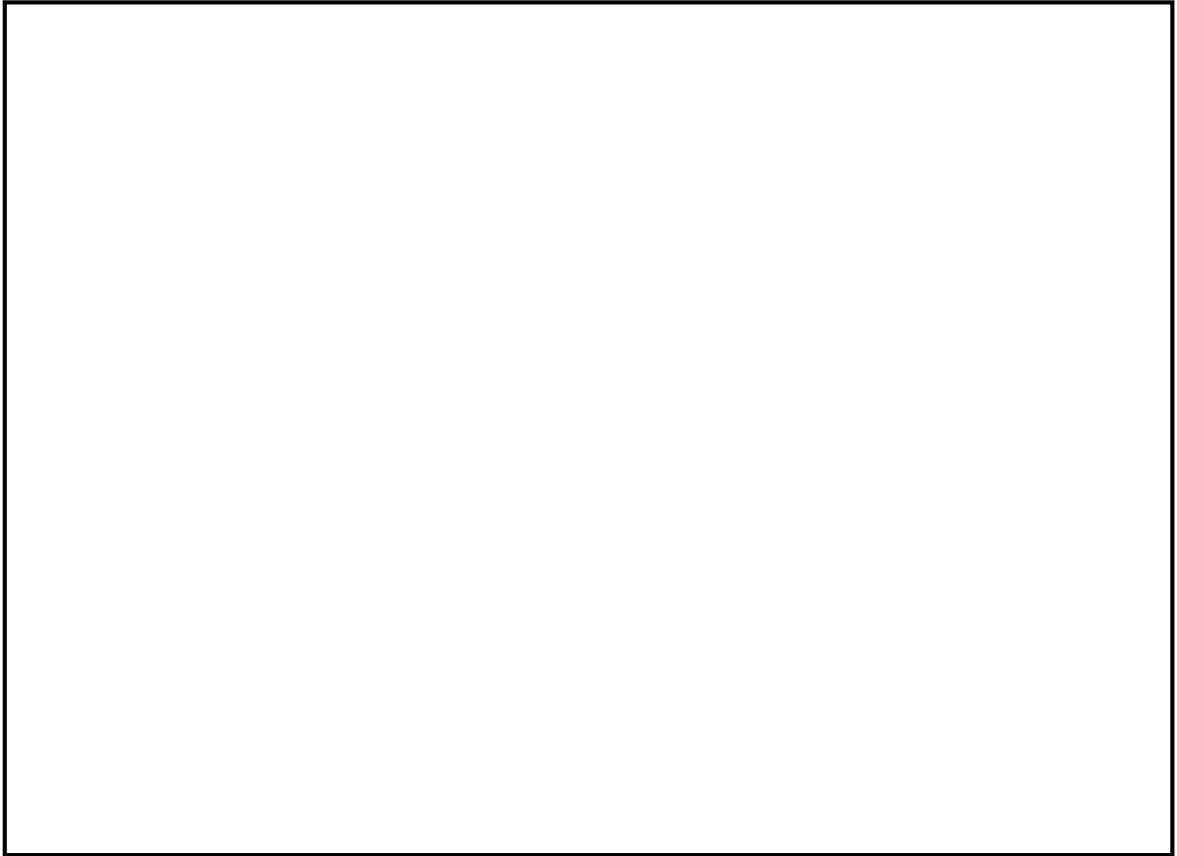


図 3.1-1 解析モデル図



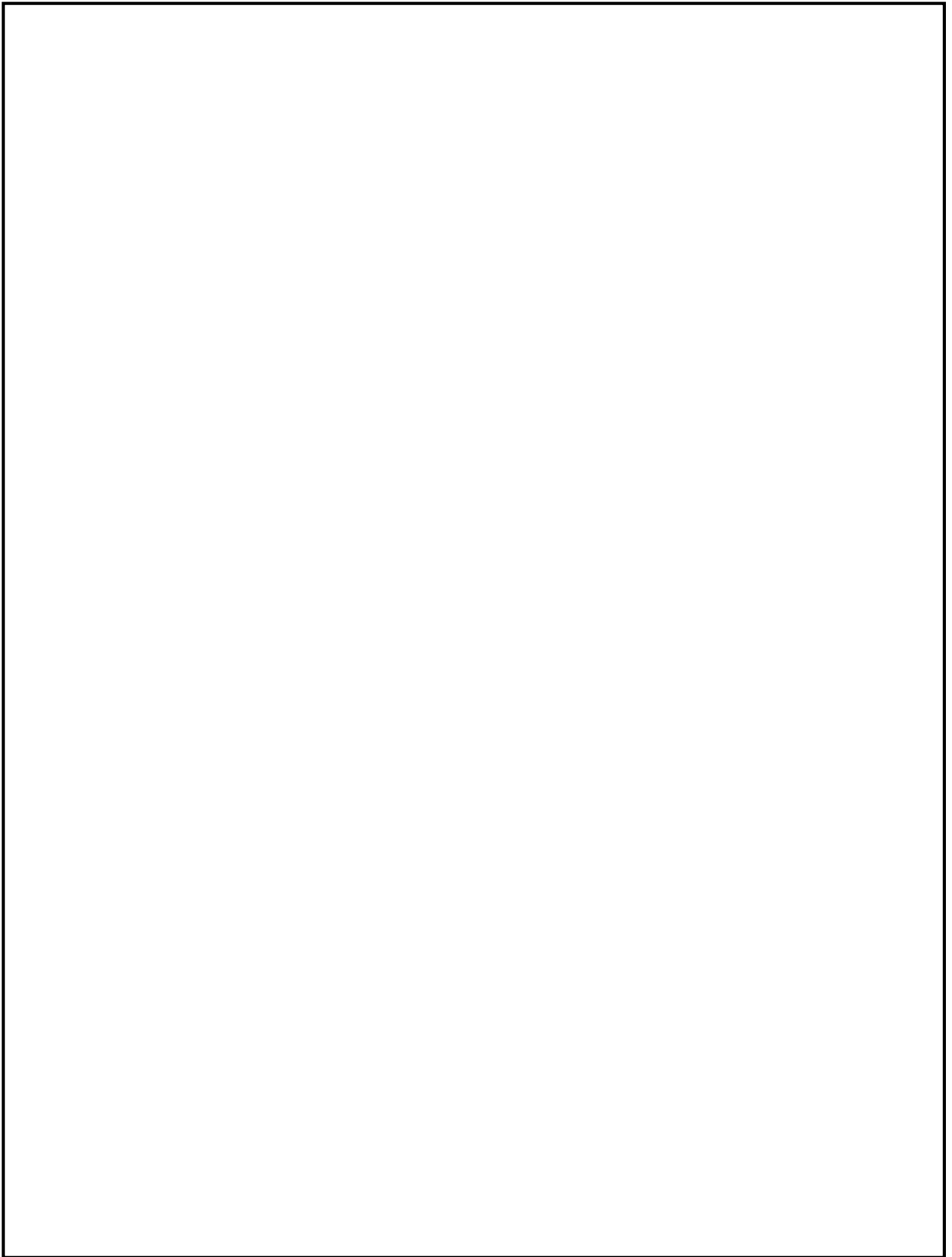


图 3.1-2 要素分割图

### 3.2 境界条件

ペDESTALは原子炉圧力容器を支持する構築物であり、鋼板製の内筒・外筒からなる二重円筒構造である。実機には内筒と外筒の間に等間隔に縦リブが配置されており、これら内筒、外筒及び縦リブの鋼材部分を強度部材として設計している。また、内筒、外筒及び縦リブで区切られた領域にはコンクリートが充填されている。

解析は2次元軸対称モデルを用い、気相部、液相部、爆発源、鋼板部及びコンクリートをモデル化している。なお、当該モデルは2次元軸対称体系であるため、縦リブ鋼板及び人員アクセス用の開口等は模擬していない。

ペDESTALは基部の格納容器との取り付け部を介して、原子炉圧力容器等から作用する荷重を基礎マットに伝達する構造であることから、格納容器との取り付け部を完全固定境界とする。ペDESTAL内及びペDESTAL外の領域にはコンクリート床等の周辺構造物が存在するが、保守的に変形を大きく評価する観点から、これらの周辺構造物による拘束効果は考慮しない。また、ペDESTAL上部に作用する原子炉圧力容器の自重等による荷重の効果についても上記と同様の理由により、考慮しない。

境界条件を示した解析モデル図を図 3.2-1 に示す。

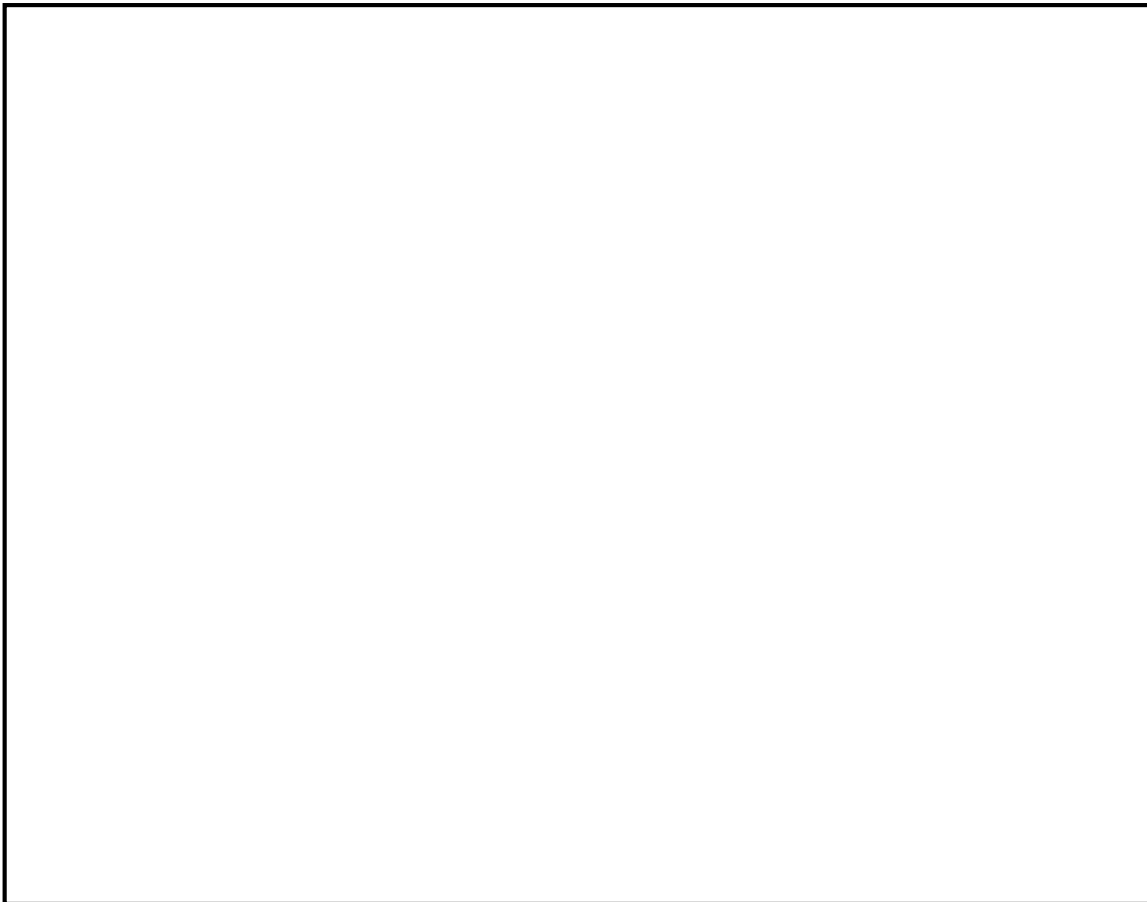


図 3.2-1 解析モデル図

### 3.3 材料モデル

AUTODYNでは、物質の材料特性を「状態方程式」「構成則」「破壊則」のモデルで定義している。それぞれの概要は以下の通りである。

状態方程式：熱力学的平衡状態における静水圧と内部エネルギーと密度の関係を示す。

構成則：せん断応力とひずみの関係及び／または降伏基準を示す。

破壊則：物質の破断基準を示す。

以下に本解析における構造部材の材料特性を示す。

#### (1) 鋼板

表 3.3-1 に鋼板の材料特性を示す。表 3.3-1 の設定に基づき、解析にあたっては個別プラントの鋼板の密度、体積弾性率、横弾性率、降伏応力及び限界相当塑性ひずみを入力する。

表 3.3-1 鋼板の材料特性

| 項目        | 設定         |
|-----------|------------|
| 状態方程式     | 線形         |
| 構成則       | 等方硬化則      |
| 破壊則       | 限界相当塑性ひずみ則 |
| 密度        | 個別プラントの値   |
| 体積弾性率     |            |
| 横弾性率      |            |
| 降伏応力      |            |
| 限界相当塑性ひずみ |            |

(2) コンクリート

表 3.3-2 にコンクリートの材料特性を示す。表 3.3-2 の設定に基づき，解析にあたっては個別プラントの鋼板の密度，体積弾性率，横弾性率等を入力する。

表 3.3-2 コンクリートの材料特性

| 項目    | 設定             |
|-------|----------------|
| 状態方程式 | 線形             |
| 構成則   | Drucker-Prager |
| 破壊則   | スポール破壊         |
| 密度    | 個別プラントの値       |
| 体積弾性率 |                |
| 横弾性率  |                |

ここで，本解析ではコンクリートの衝撃解析で一般的な構成則として Drucker-Prager 構成則を用いる。

この構成則における降伏応力は，圧力の関数として一般的に式(1)のように表される。

$$Y = ap + b \quad (\text{ただし } a, b \text{ は定数}) \quad (1)$$

ただし， $Y$  が無限に大きくなることを避けるために上限値  $Y_{\max}$  を定める。(式(2)及び図 3.3-1 参照)

$$Y = \min(Y_{\max}, ap + b) \quad (2)$$

ここで，定数  $a, b$  は下式で与えられる。

$$a = \frac{3(n-1)}{n+2} \quad (3)$$

$$b = \frac{3}{n+2} f_c \quad (4)$$

$$n = \frac{f_c}{f_t} \quad (5)$$

ここで， $f_c$  及び  $f_t$  は以下の通り。

$f_c$  : コンクリートの圧縮強度

$f_t$  : コンクリートの引張強度であり，下式で計算する。

$$f_t = 0.23 \times f_c^{2/3} \quad (6)$$

また、 $Y_{\max}$  は次式で与えられる。

$$Y_{\max} = c + f_c \tan \phi \quad (7)$$

ここで、

$$c = \frac{\sqrt{n} \cdot f_t}{2} \quad (8)$$

$$\cos \phi = \frac{2\sqrt{n}}{n+1} \quad (9)$$

$$\sin \phi = \frac{n-1}{n+1} \quad (10)$$

上述の計算式と、個別プラントのコンクリートの圧縮強度  $f_c$  に基づき、式(2)の降伏応力と圧力の関係を求め、AUTODYNのインプットとする。

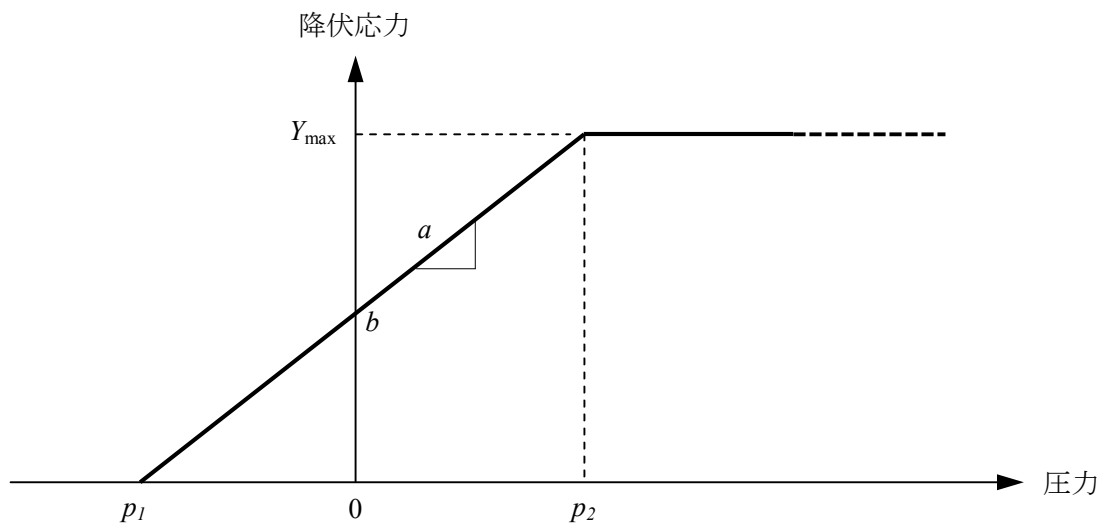


図 3. 3-1 Drucker-Prager 構成則の降伏応力-圧力関係の概念図

### 3.4 爆発源の設定方法

水蒸気爆発に対する構造応答を解析的に求めるため、爆発源をAUTODYNのガスバグモデルを用いて模擬する。

ガスバグモデルは、任意の液体・気体物質に対して適用性のあるモデルであり、対象の物質が周囲の系に対してする仕事量（＝開放エネルギー量）を圧力  $P$  と体積変化量  $\Delta V$  の関係で定義するものである。

図 3.4-1 にガスバグモデルの概念図を示す。

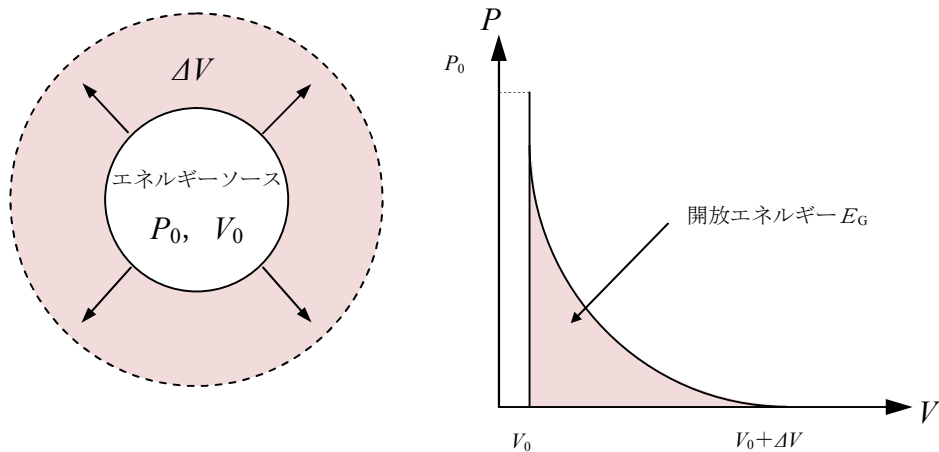


図 3.4-1 ガスバグモデルの概念図

図 3.4-1 に示すように、ガスバグモデルではエネルギーソースに対して圧力  $P$  と体積変化量  $\Delta V$  の関係で水蒸気爆発によって開放されるエネルギー総量を定義する。ガスバグモデルにおける開放エネルギーは、下式で与えられる。

$$E_G = \int_{V_0}^{V_0+\Delta V} P dV \quad (12)$$

ここで、爆発源の開放エネルギーは水蒸気爆発解析コード JASMIN E の結果（流体の運動エネルギー）に基づき設定している。

水蒸気爆発発生時には、トリガセルから周囲へ圧力波が伝播し、その発生エネルギーの大部分が流体の運動エネルギーに変換されると想定し、JASMIN E の解析結果から得られた全領域の流体の運動エネルギーの最大値を引き継いでガスバグモデルのインプット条件として設定している。図 3.4-2 に流体運動エネルギーの設定方法を示す。

なお、爆発源の設定位置は、JASMIN E 解析におけるトリガリングの発生位置と同様の位置とする。

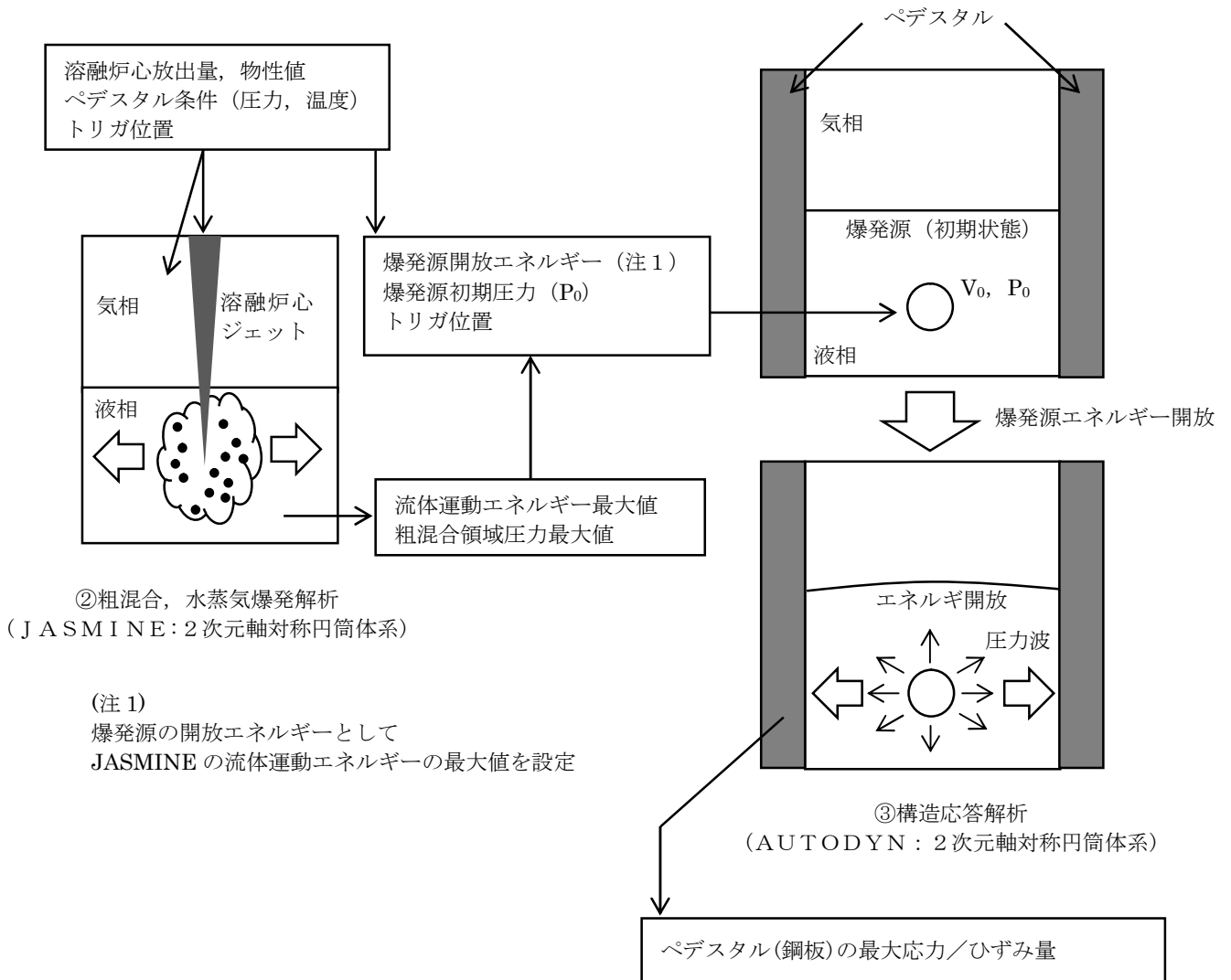


図 3.4-2 AUTODYNにおけるエネルギーの設定方法

### 3.5 解析フロー

AUTODYNの解析フローを図 3.5-1 に示す。

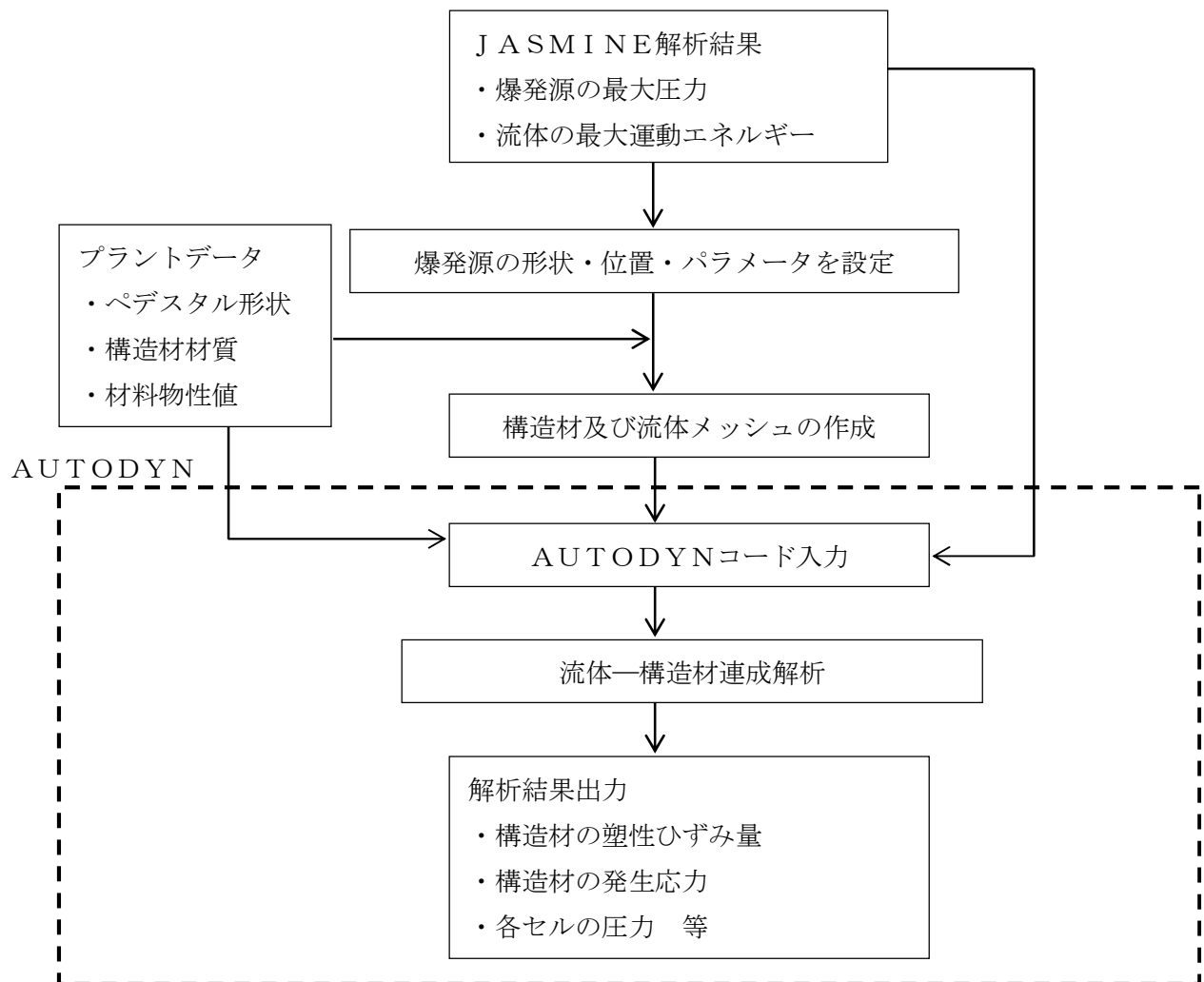


図 3.5-1 AUTODYNの解析フロー



### 3.6 入出力

AUTODYNコードの主要な入出力は図 3.5-1 に示した解析フロー図にも示されるとおりである。AUTODYNコードのインプットデータは以下のとおり構成される。

<入力>

- ① ペDESTAL構造物の幾何形状
- ② 各構造物に対する拘束条件
- ③ 材料の物性値
- ④ 流体及び構造材のメッシュデータ
- ⑤ 流体及び構造材の要素タイプ (Lagrange / Euler, 等)
- ⑥ 爆発源の形状・位置 (JASMIN Eコードの評価条件・結果に基づく)
- ⑦ 爆発源の初期圧力及びエネルギー  
(JASMIN Eコードによる評価結果に基づく)

上記をインプットとして、水蒸気爆発発生時の構造材衝撃荷重応答を評価し、以下の主要なアウトプットデータを得る。

<出力>

- ① 材料分布図
- ② 塑性ひずみ
- ③ 構造材の発生応力

### 3.7 解析結果の例示

本項では、代表プラントの解析入力条件と解析結果について例示する。

#### (1) 解析モデル及び境界条件

図 3.2-1 に示す解析モデルとする。要素分割の詳細を表 3.7-1 に示す。

表 3.7-1 要素分割の詳細

| 部位                 | 要素タイプ               | 要素幅 | 要素数 |
|--------------------|---------------------|-----|-----|
| コンクリート             | Lagrange<br>(Solid) |     |     |
| 内外鋼板               | Shell               |     |     |
| 空気, 水,<br>エネルギーソース | Euler               |     |     |

#### (2) 材料物性

代表プラントのペDESTALの構成材料を以下に示す。

コンクリート：普通コンクリート（設計基準強度：29.4N/mm<sup>2</sup>）

鋼板：SPV490

材料物性の詳細を表 3.7-2 及び図 3.7-1 に示す。

表 3.7-2 材料特性一覧

| 材料     | 密度※1 | 体積<br>弾性率※2 | 横弾性率<br>※2 | 降伏応力<br>※1        | 最大引張<br>強さ※1 | 限界ひずみ<br>※1 |
|--------|------|-------------|------------|-------------------|--------------|-------------|
| コンクリート |      |             |            | (図 3.7-1 の関係式による) |              |             |
| SPV490 |      |             |            |                   |              |             |

※1 ノミナル物性値である。

※2 ノミナル物性値であり、下式に基づき算出したもの

$$\text{体積弾性率 } K = E / (3 \times (1 - 2 \cdot \nu))$$

$$\text{横弾性率 } G = E / (2 \cdot (1 + \nu))$$

ここで、

Eは縦弾性係数で

$\nu$ はポアソン比で



図 3.7-1 Drucker-Prager 構成則に基づくコンクリートの圧力-降伏応力関係

(3) 爆発源の荷重仕様

ガスバグモデルの入力条件を表 3.7-3 に示す。

また、体積変化と圧力の関係を図 3.7-2 に示す。

表 3.7-3 ガスバグモデルの入力条件

| 項目      | 値 | 備考 |
|---------|---|----|
| 運動エネルギー |   |    |
| 初期半径    |   |    |
| 初期圧力    |   |    |
| 体積変化    |   |    |

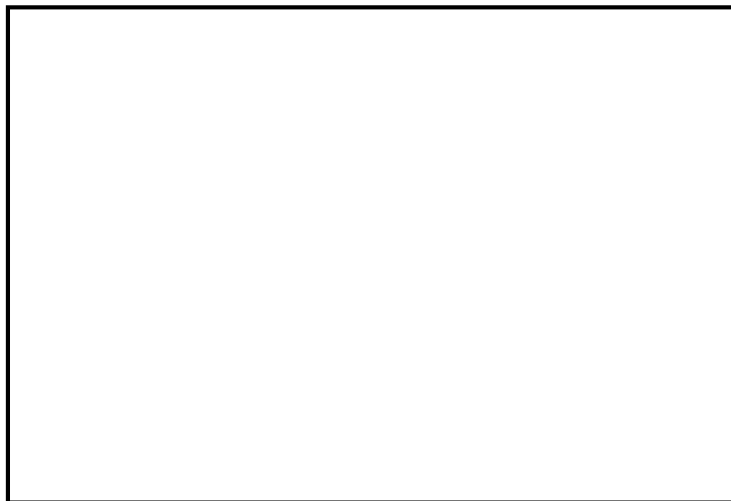


図 3.7-2 体積変化と圧力の関係

(4) 解析結果

(1)から(3)の入力条件に基づき解析を実施した結果を以下に示す。

ガスバグモデルの圧力の時刻歴を図 3.7-3 に，開放エネルギーの時刻歴を図 3.7-4 にそれぞれ示す。

下図に示す通り，圧力と体積変化による仕事量が所定の開放エネルギーに達する時刻は，約  であった。

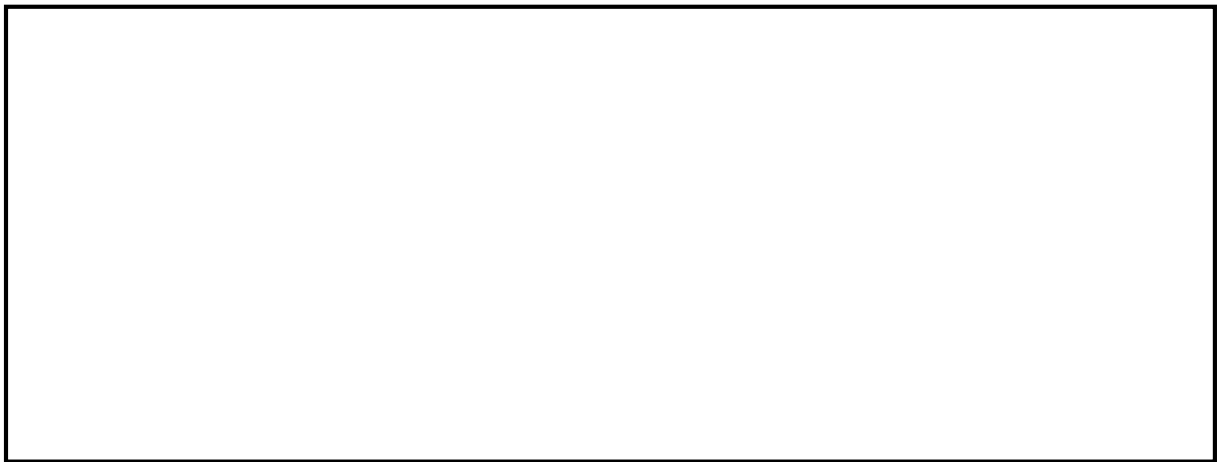


図 3.7-3 ガスバグモデルの圧力の時刻歴

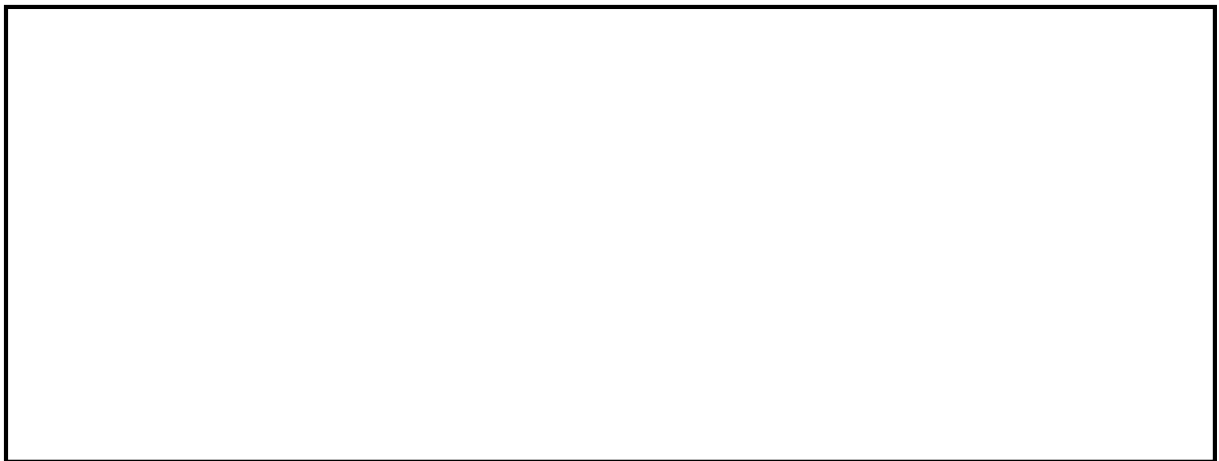


図 3.7-4 ガスバグモデルの開放エネルギーの時刻歴

次に，主要な時刻における材料分布図を図 3.7-5～図 3.7-8 に示す。

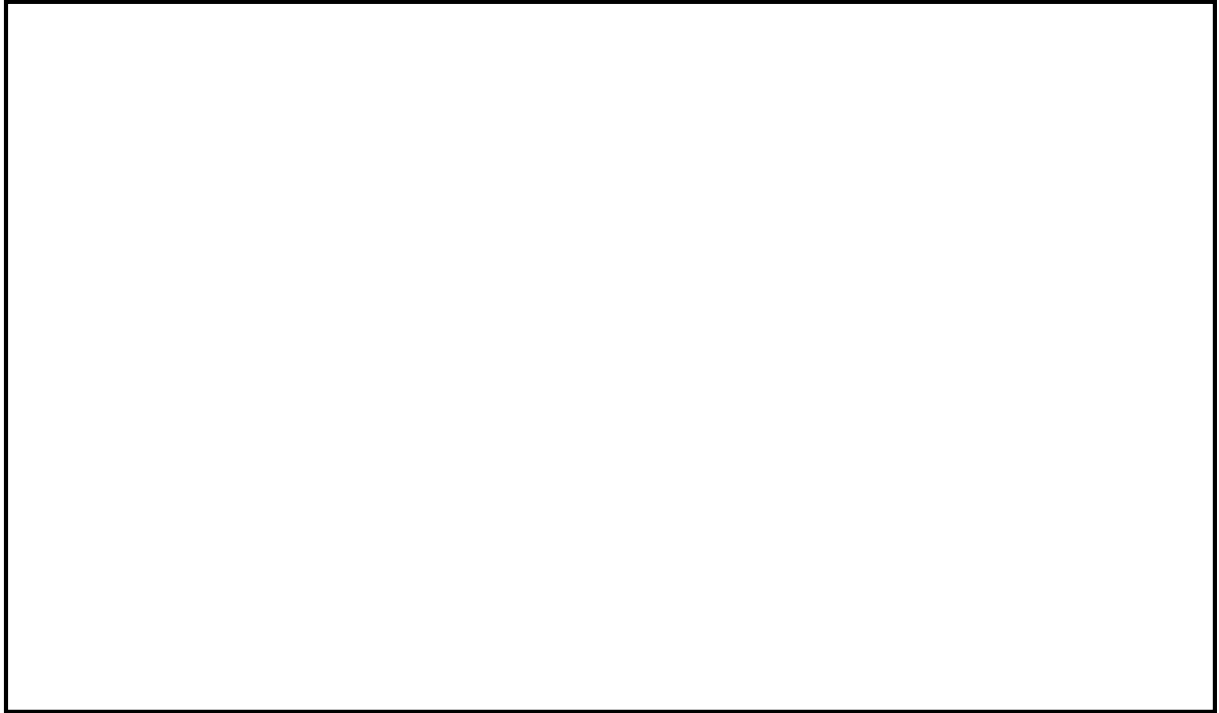


図 3.7-5 材料分布図 (5ms)

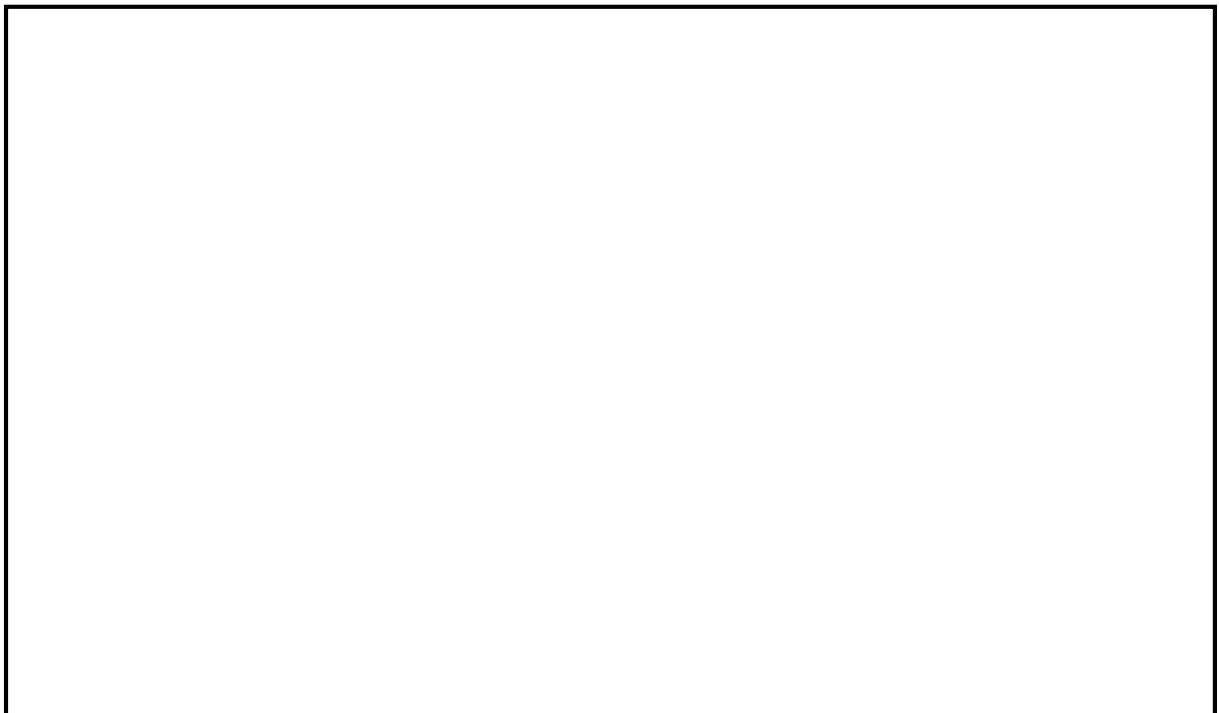


図 3.7-6 材料分布図 (10ms)

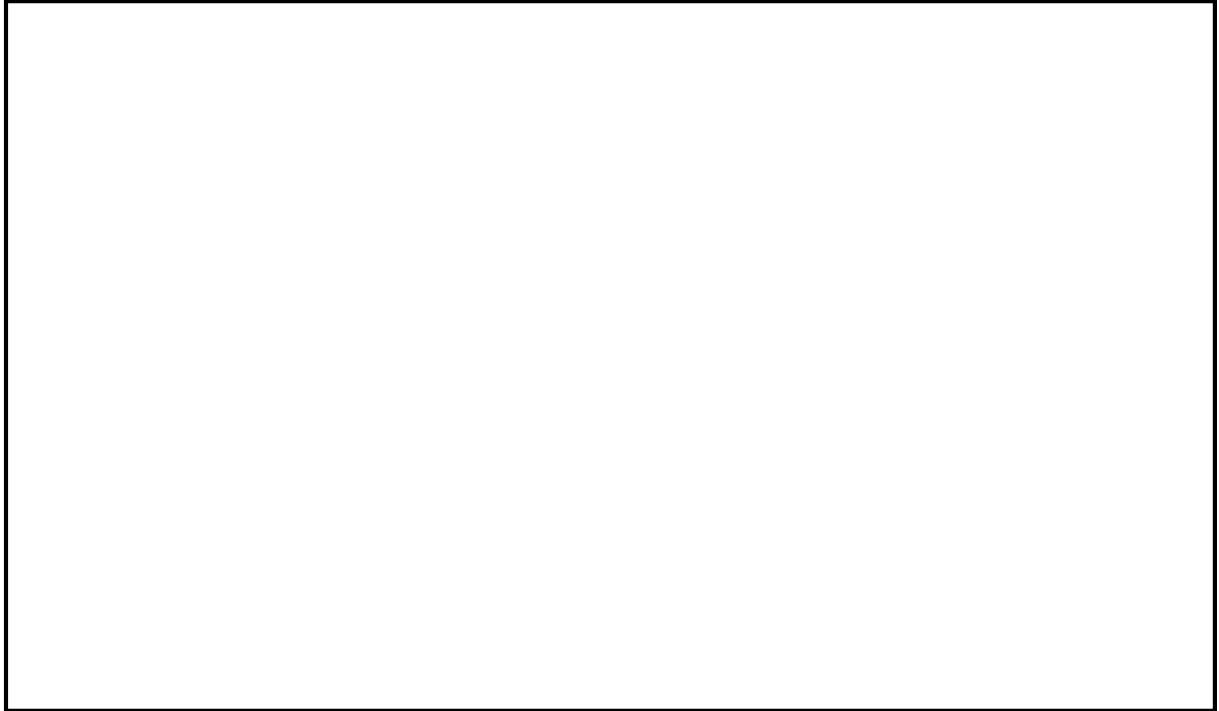


图 3.7-7 材料分布图 (15ms)

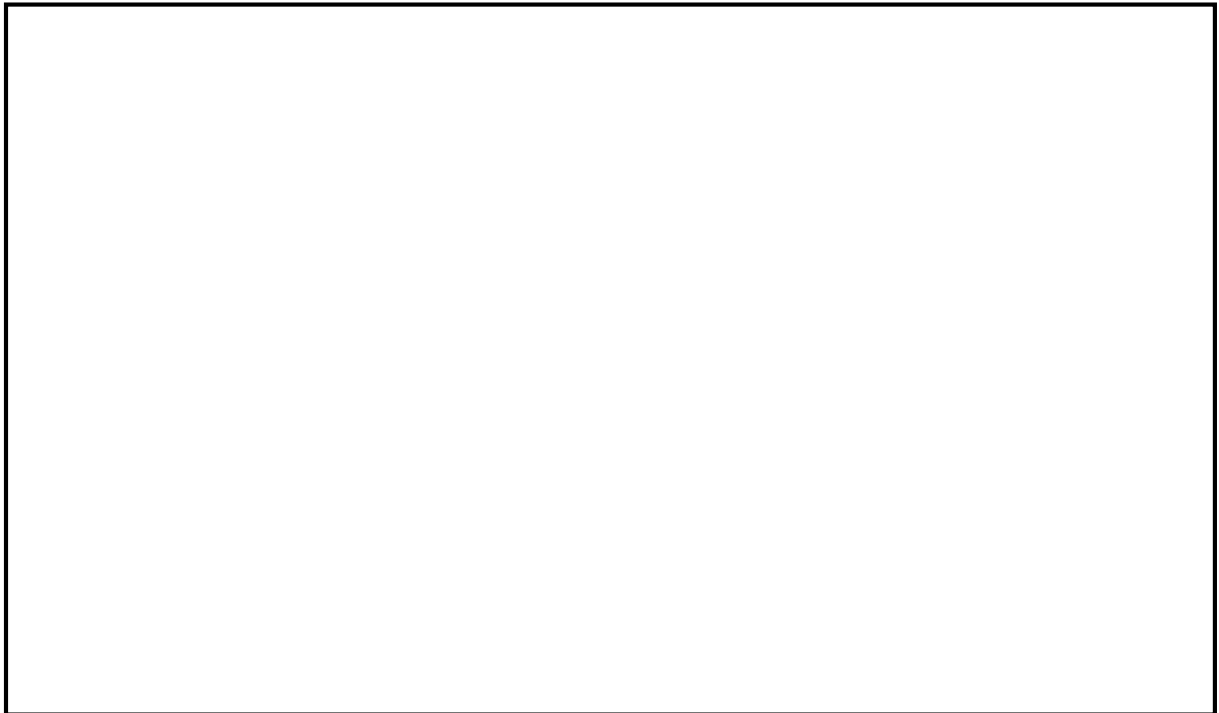


图 3.7-8 材料分布图 (20ms)

次に，爆発発生から 5ms 後の内外鋼板の塑性ひずみの分布を図 3.7-9 に示す。

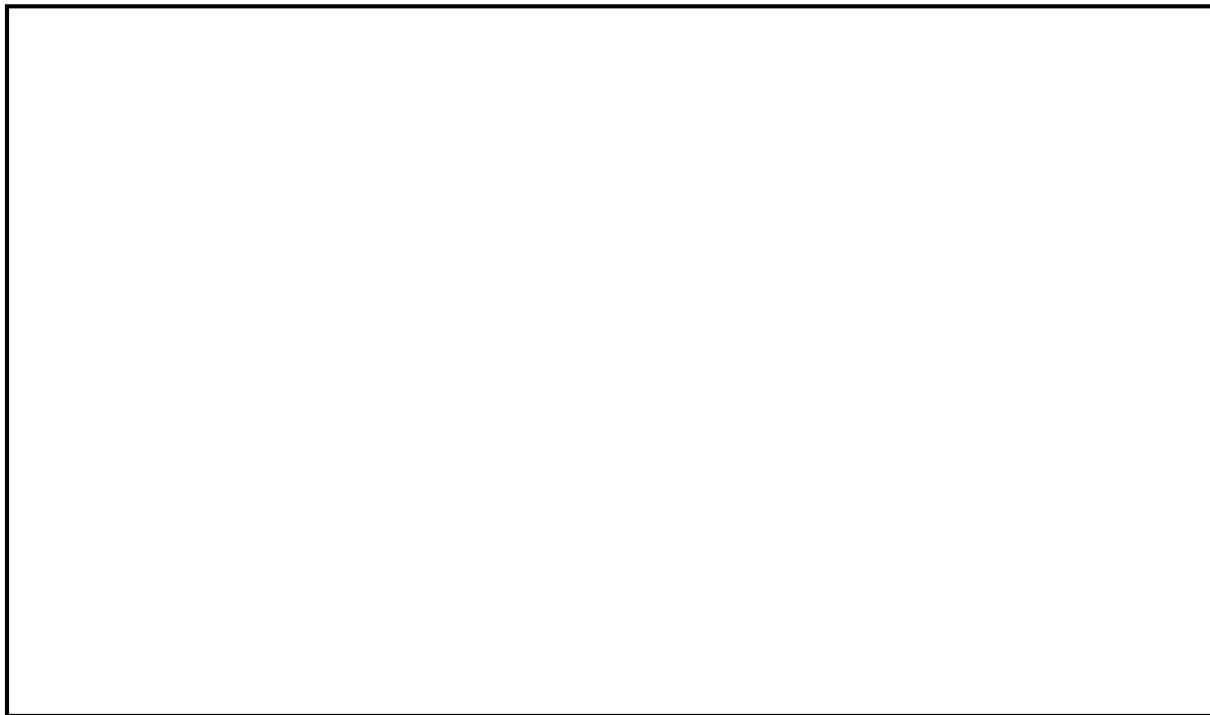


図 3.7-9 爆発発生から 5ms 後の内外鋼板の塑性ひずみの分布  
(最大塑性ひずみ : 0.0%)



次に、強度部材である鋼板（内側及び外側）に発生する最大ミーゼス応力の時刻歴を  
図 3. 7-10 及び図 3. 7-11 に示す。

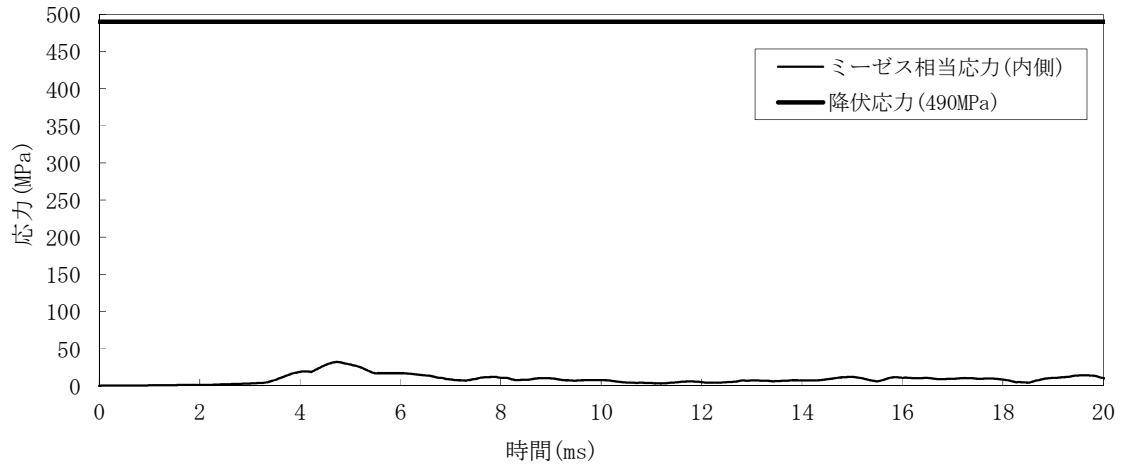


図 3. 7-10 内側鋼板の最大ミーゼス応力の時刻歴

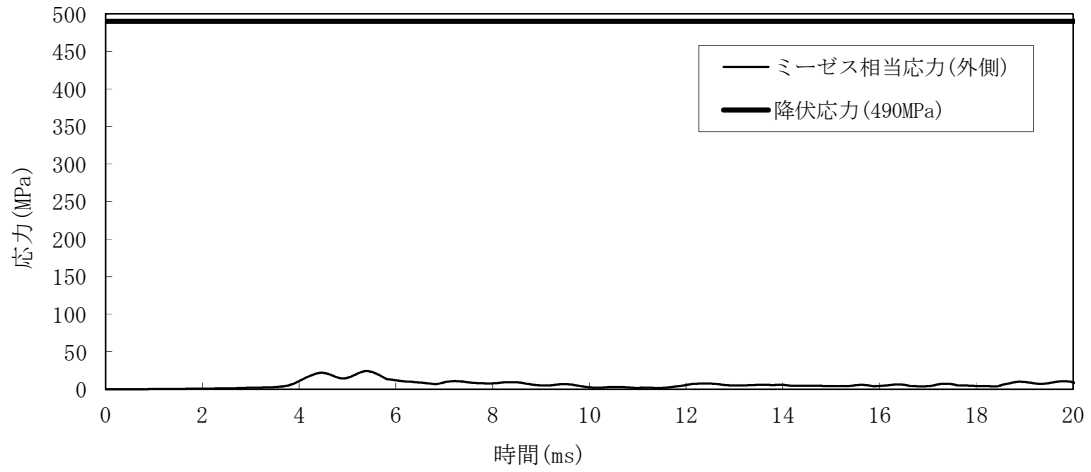


図 3. 7-11 外側鋼板の最大ミーゼス応力の時刻歴

#### 4. 解析結果の検証

本章では、AUTODYNを用いた解析解と理論解の比較検証結果を示す。

AUTODYNを用いたペDESTALの構造応答解析は、鋼板（または鉄筋）部を2次元軸対称 Shell 要素で、コンクリート部を2次元軸対称 Lagrange 要素でそれぞれモデル化して実施していることから、検証は Shell 要素及び Lagrange 要素の両方で実施する。

##### (1) 2次元軸対称 Shell 要素を用いた解析

図 4-1 に示すように単純な円筒形状の構造物を2次元軸対称 Shell 要素でモデル化し、内面に圧力衝撃荷重（台形波：図 4-2 参照）が作用した際の変位動的倍率（静的な解に対する倍率）を解析的に求め、理論解との比較評価を実施する。

なお、図 4-2 に示す圧力荷重履歴は、最大圧力荷重を1としたときの荷重比の履歴として表している。

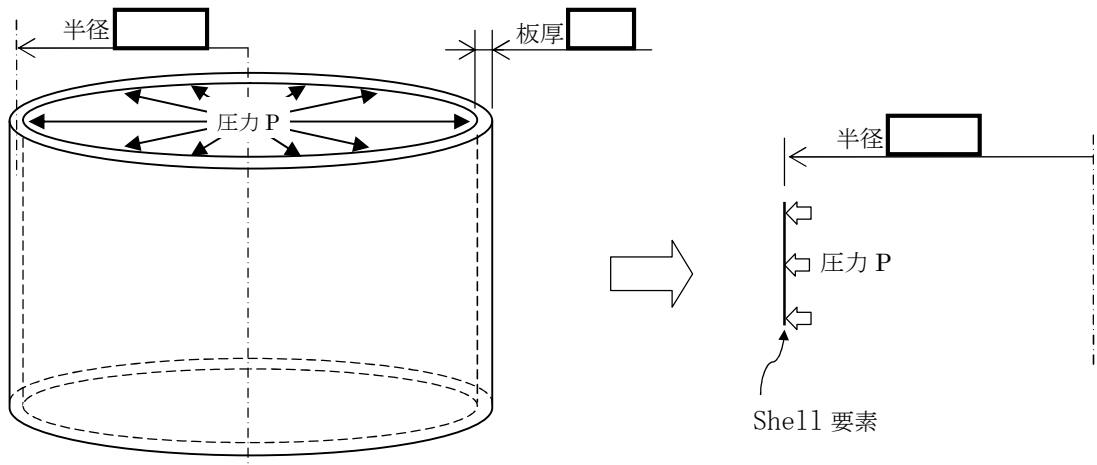


図 4-1 対象形状

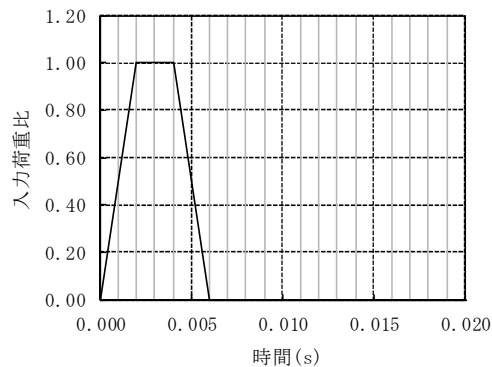


図 4-2 圧力衝撃荷重の荷重履歴

計算に用いる物性値を表 4-1 に示す。

表 4-1 計算に用いる物性値

| 項目    | 単位                | 値 |
|-------|-------------------|---|
| ヤング率  | MPa               |   |
| ポアソン比 | —                 |   |
| 密度    | kg/m <sup>3</sup> |   |
| 圧力    | MPa               |   |

上述の条件より，円筒構造物の台形荷重に対する応答を解析的に求め，理論解との比較を試みる。理論解は参考文献[1]及び参考文献[2]により求めた。以下に理論解の概要を示す。

(a) 円形リングの面内振動の固有振動数

参考文献[1]：機械工学便覧 α2 機械力学より

$$f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ここで，

$R$ ：リング中央線の半径

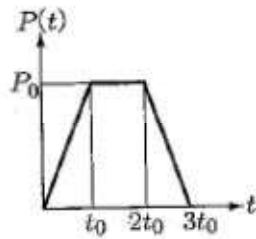
$E$ ：ヤング率

$\rho$ ：単位体積あたりの質量

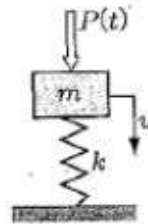
(b) 台形荷重に対する応答

参考文献[2]：基礎からの衝撃工学 森北出版 4.1.6 より

| 時間区分                         | 動的倍率 (動的変位/静的変位)   |
|------------------------------|--|
| i) $0 \leq t \leq t_0$       | $L = \frac{u}{\delta_{st}} = \frac{t}{t_0} - \frac{\sin \omega t}{\omega t_0}$   |
| ii) $t_0 \leq t \leq 2t_0$   | $L = \frac{u}{\delta_{st}} = 1 + \frac{1}{\omega t_0} (\sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t)$   |
| iii) $2t_0 \leq t \leq 3t_0$ | $L = \frac{u}{\delta_{st}} = 3 - \frac{t}{t_0} + \frac{1}{\omega t_0} (\sin \omega (t - 2t_0) + \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t)$      |
| iv) $3t_0 \leq t$            | $L = \frac{u}{\delta_{st}} = \frac{1}{\omega t_0} (\sin \omega (t - t_0) - \sin \omega (t - 3t_0) + \sin \omega (t - 2t_0) - \sin \omega t)$ |



台形荷重



一質点モデル

ここで,

$$\omega = 2\pi f$$

$f$  : (a) で求めた円形リングの固有振動数

(b)による理論解と解析結果の変位動的倍率を比較した結果を図 4-3 に示す。

理論解による最大変位動的倍率 1.833 に対し、解析による変位動的倍率は 1.836 であり、理論解と解析結果は良い一致を示している。

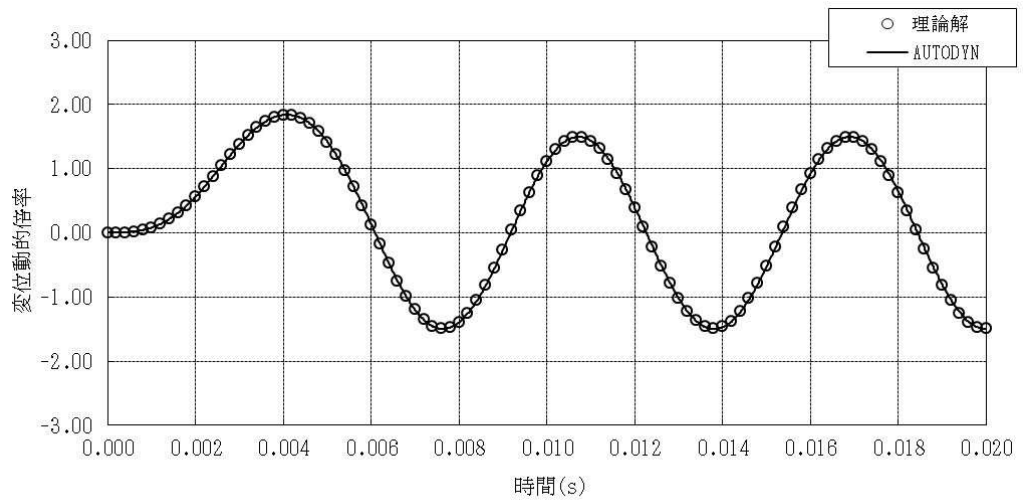


図 4-3 理論解とAUTODYNによる解析結果の比較  
(2次元軸対称 Shell を用いた解析)

(2) 2次元軸対称 Lagrange 要素を用いた解析

図 4-4 に示すように単純な円筒形状の構造物を 2次元軸対称 Lagrange 要素でモデル化し、内面に圧力衝撃荷重（台形波：図 4-5 参照）が作用した際の変位動的倍率（静的な解に対する倍率）を解析的に求め、理論解との比較評価を実施する。

なお、図 4-5 に示す圧力荷重履歴は、最大圧力荷重を 1 としたときの荷重比の履歴として表している。

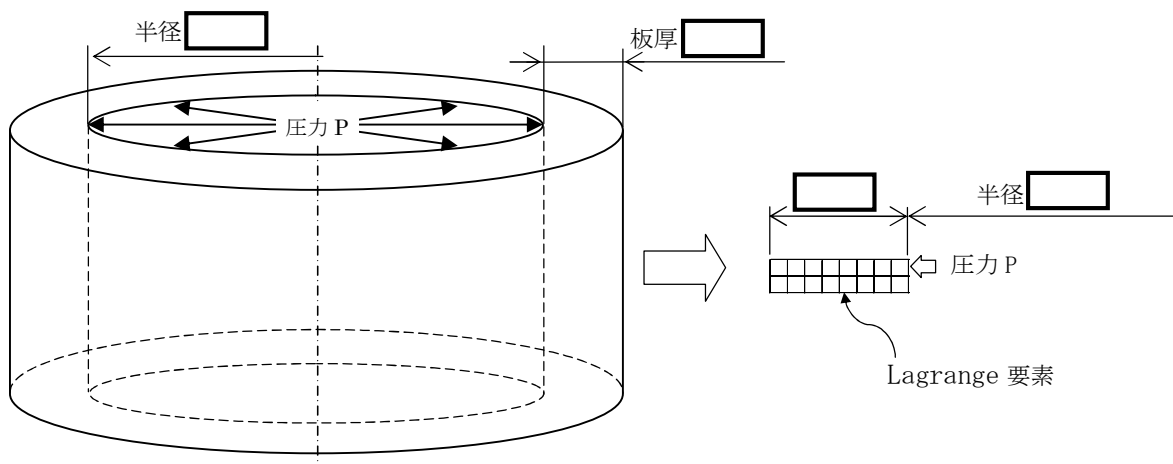


図 4-4 対象形状

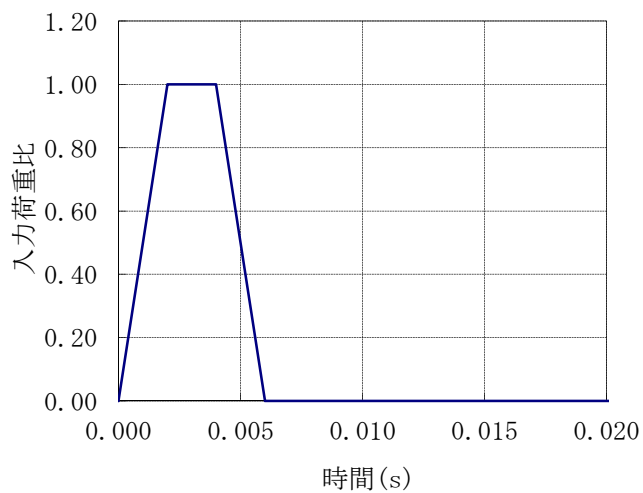


図 4-5 圧力衝撃荷重の荷重履歴

計算に用いる物性値を表 4-2 に示す。

表 4-2 計算に用いる物性値

| 項目    | 単位                | 値 |
|-------|-------------------|---|
| ヤング率  | MPa               |   |
| ポアソン比 | —                 |   |
| 密度    | kg/m <sup>3</sup> |   |
| 圧力    | MPa               |   |

上述の条件より，円筒構造物の台形荷重に対する応答を解析的に求め，理論解との比較を試みる。理論解は参考文献[1]及び参考文献[2]により求めた。以下に理論解の概要を示す。

(a) 円形リングの面内振動の固有振動数

参考文献[1]：機械工学便覧 α2 機械力学より

$$f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ここで，

$R$ ：リング中央線の半径

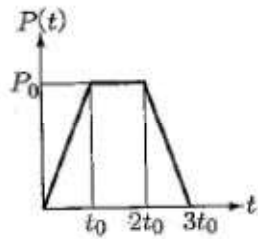
$E$ ：ヤング率

$\rho$ ：単位体積あたりの質量

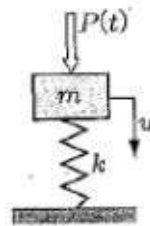
(b) 台形荷重に対する応答

参考文献[2]：基礎からの衝撃工学 森北出版 4.1.6 より

| 時間区分                         | 動的倍率 (動的変位/静的変位)   |
|------------------------------|--|
| i) $0 \leq t \leq t_0$       | $L = \frac{u}{\delta_{st}} = \frac{t}{t_0} - \frac{\sin \omega t}{\omega t_0}$   |
| ii) $t_0 \leq t \leq 2t_0$   | $L = \frac{u}{\delta_{st}} = 1 + \frac{1}{\omega t_0} (\sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t)$   |
| iii) $2t_0 \leq t \leq 3t_0$ | $L = \frac{u}{\delta_{st}} = 3 - \frac{t}{t_0} + \frac{1}{\omega t_0} (\sin \omega (t - 2t_0) + \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t)$      |
| iv) $3t_0 \leq t$            | $L = \frac{u}{\delta_{st}} = \frac{1}{\omega t_0} (\sin \omega (t - t_0) - \sin \omega (t - 3t_0) + \sin \omega (t - 2t_0) - \sin \omega t)$ |



台形荷重



一質点モデル

ここで,

$$\omega = 2\pi f$$

$f$  : (a) で求めた円形リングの固有振動数



(b)による理論解と解析結果の変位動的倍率を比較した結果を図 4-6 に示す。

理論解による最大変位動的倍率 1.863 に対し、解析による変位動的倍率は板厚内面位置で 1.840、中央位置で 1.875、及び外面位置で 1.884 であり、理論解と解析結果は良い一致を示している。

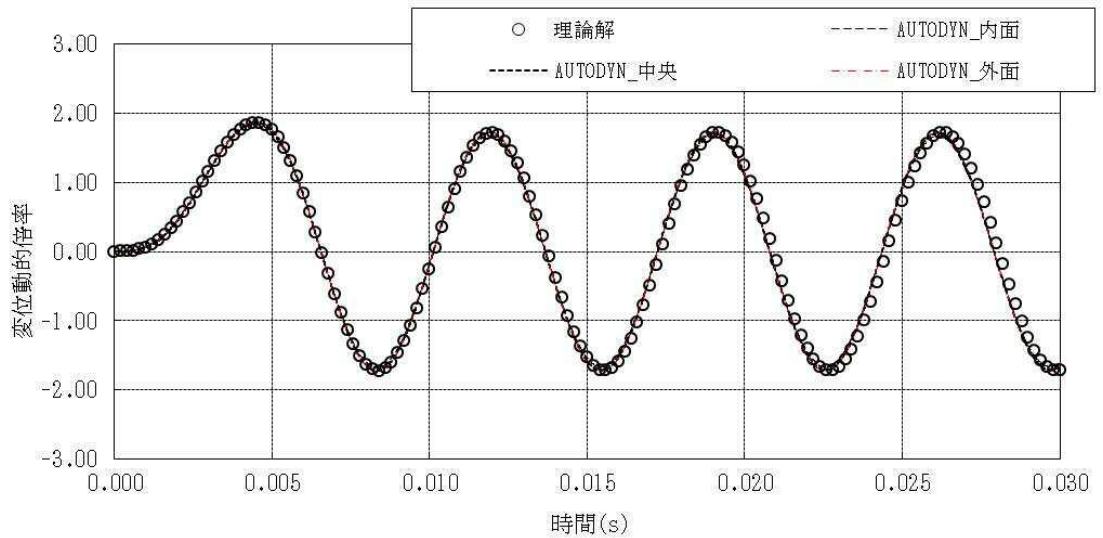


図 4-6 理論解とAUTODYNによる解析結果の比較  
(2次元軸対称 Lagrange を用いた解析)

### (3) 要素サイズの妥当性検証解析

設定した要素サイズの妥当性を確認するために、(2)で用いた2次元軸対称 Lagrange 要素のモデルを対象とし、要素サイズの異なる二つのモデルに対して動的解析を行い、解析結果を比較した。図 4-7 に検討した円筒モデルの概要、図 4-8 及び図 4-9 に解析結果の比較を示す。

図 4-8 及び図 4-9 に示すように、F C I 解析に適用している要素サイズ (モデル 1) と、各要素辺長さを 1/2 とした詳細モデル (モデル 2) の内外壁面における径方向変位の数値誤差\*) は内外面で-1%程度、周方向応力の解析結果の数値誤差は内面で-1%程度、外面で-1%程度であり、解析結果に対して影響を与えるような大きな差は無く、F C I 解析に使用する解析モデルの要素分割は妥当である。

\*) 数値誤差の定義は、(モデル 1-モデル 2) /モデル 2

+ (プラス) は、モデル 1 の方が解析結果の数値が大きいことを示す。

検討した円筒の概略寸法

内径：

壁厚：

高さ：

検討した円筒の物性

ヤング率：

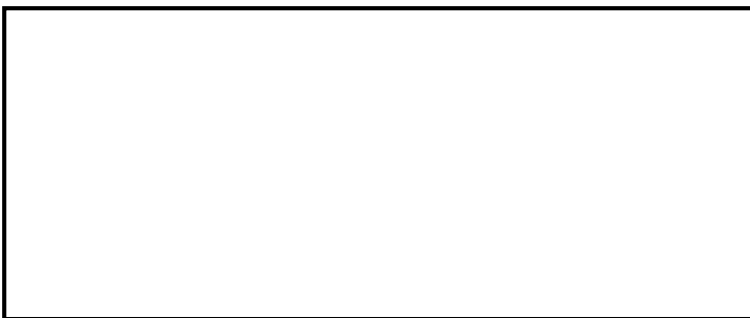
密度：

ポアソン比：

(モデル1)： F C I 解析と同等の要素サイズ



(モデル2)： F C I 解析の約 1/2 の要素サイズ



荷重条件

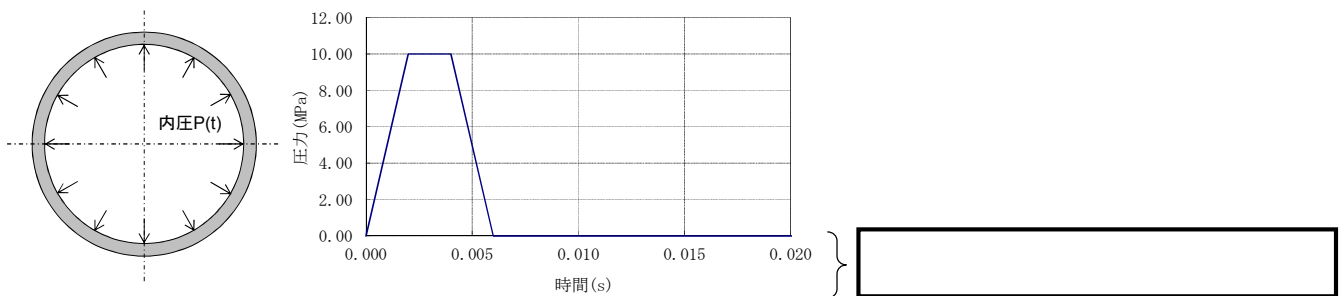


図 4-7 要素サイズの比較検討に用いた 2 次元軸対称円筒体系モデルの概要

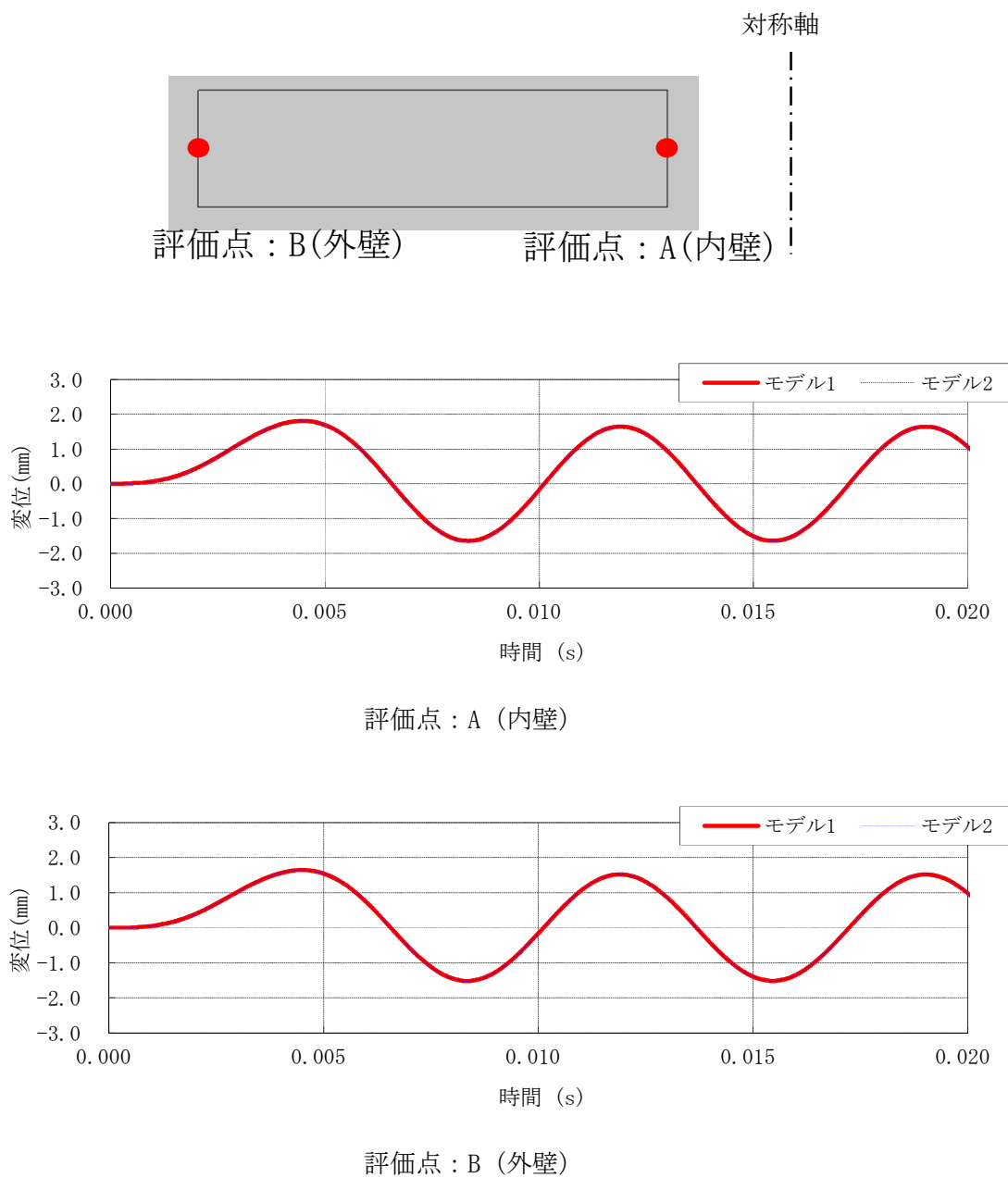
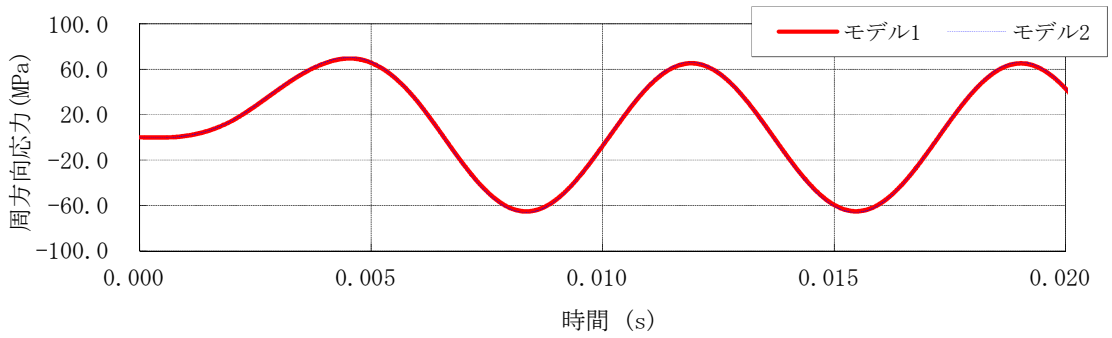
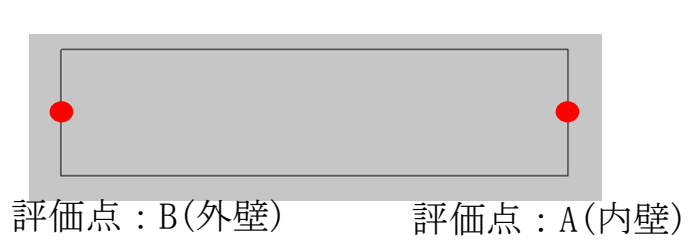
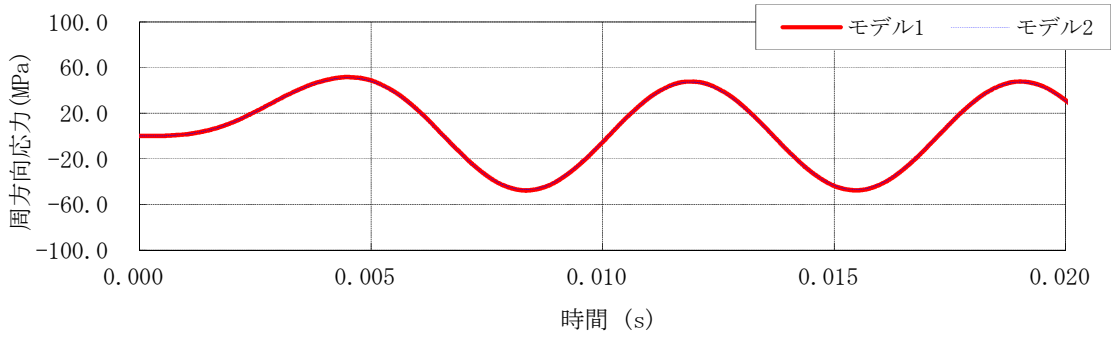


図 4-8 要素サイズの異なるモデルの動的解析結果の比較（径方向変位）



評価点：A (内壁)



評価点：B (外壁)

図 4-9 要素サイズの異なるモデルの動的解析結果の比較 (周方向応力)

5. 参考文献

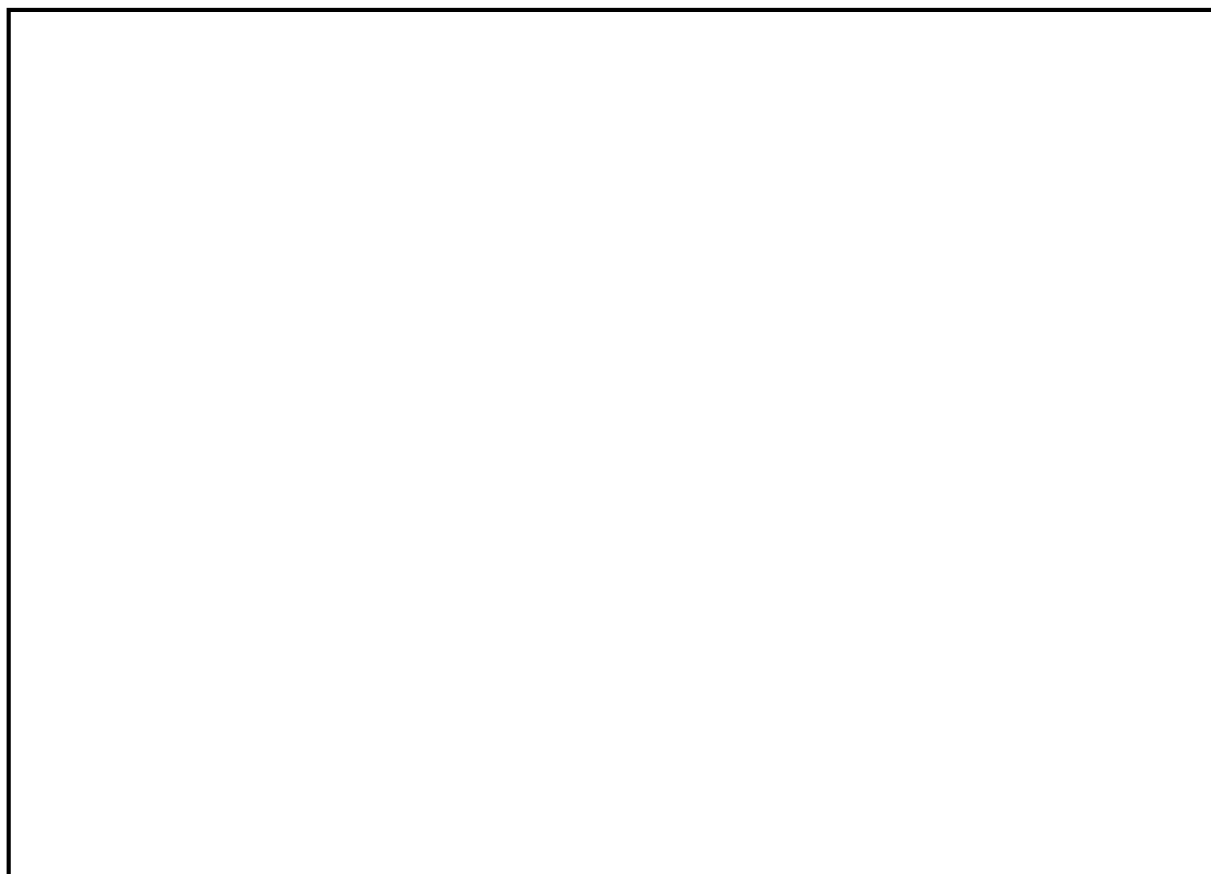
- [1] 機械工学便覧 基礎編  $\alpha 2$  機械力学（日本機械学会編）
- [2] 基礎からの衝撃工学－構造物の衝撃設計の基礎－（森北出版株式会社）

#### 添付1 運動エネルギーから圧力として伝わる時の考え方について

3.4節に示したように、AUTODYNの構造応答評価は、JASMIN解析結果により求まる水蒸気爆発時の流体の最大運動エネルギーに基づき実施している。すなわち、AUTODYN評価での爆発源の開放エネルギーをJASMIN評価における全領域の流体運動エネルギーと同等となるように設定している。

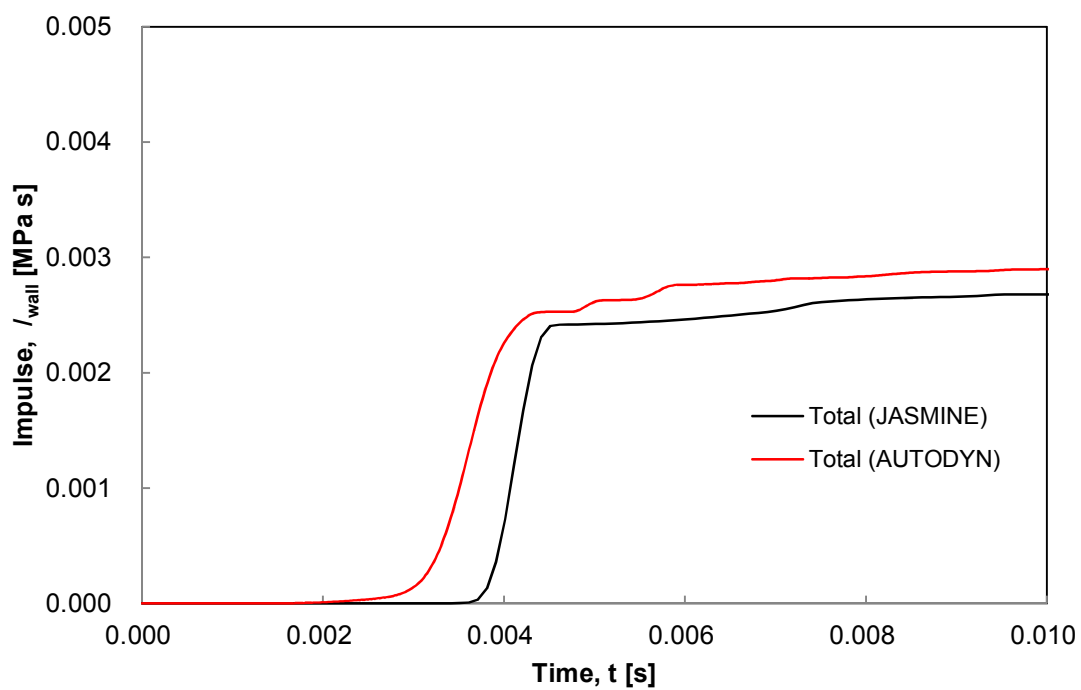
これは、水蒸気爆発発生時には溶融デブリからの熱エネルギーが爆発による圧力波を介して流体側に運動エネルギーとして伝わり、これが構造材のペDESTAL壁に作用するためであり、この運動エネルギーの最大値を解析条件としてAUTODYN評価に引き渡すことにより、ペDESTALの構造健全性を適切に評価できると考えられるためである。

上記の考え方の妥当性を確認するために、JASMIN解析とAUTODYN解析における代表点の圧力履歴を比較した。下図に示すとおり、AUTODYN解析における代表点の圧力履歴はJASMIN解析とほぼ同等であることから、AUTODYN解析条件の設定手法が妥当であることが確認できる。



添付図 1-1 AUTODYN解析とJASMIN解析の壁面圧力の比較

また、J A S M I N Eコードの解析による水蒸気爆発時の壁面力積履歴とA U T O D Y Nコードの解析による壁面力積履歴を比較した。添付図 1-2 に示す通り、J A S M I N EコードとA U T O D Y Nコードの解析結果から得られる壁面の力積はほぼ同等である。このことから、A U T O D Y N解析条件の設定手法が妥当であると考えられる。



添付図 1-2 AUTODYN解析と J A S M I N E解析の壁面の力積比較



## 添付2 反射波の考慮について

AUTODYNは非線形時刻歴応答解析の専用ツールであり、陰解法ソルバを採用した有限要素法解析ツールとは異なり、収束計算を必要としない陽解法ソルバを採用しているため、特に爆発荷重・衝撃荷重のような非線形性の強い問題を扱うことが可能である。

今回のF C I時のRPVペDESTALの構造応答は、構造体を模擬するLagrange要素 [ ] ( [ ] のSolid要素と幅 [ ] のShell要素)と流体を模擬するEuler要素 [ ]を設定し、両者の相互作用による流体-構造連成解析によって計算している。Lagrange要素(Solid要素及びShell要素)の幅は、ペDESTALの構造応答の観点から、爆発荷重に対する変形挙動を精度よく模擬できるように、高さ方向及び壁厚方向に十分な分割数が確保できる寸法として設定したものである。一方、Euler要素は、Lagrange要素との力のやり取りの関係からLagrange要素よりも小さく設定することが推奨されており、要素幅を [ ]と設定している。

なお、一般的に陽解法ソルバでは、荷重等の伝播速度と要素サイズから自動的に時間刻みを計算することで、解析の精度を確保している。

したがって、今回の解析体系においても、要素サイズ、時間刻みは適切に設定されており、流体-構造間、及び構造体内部での圧力伝播や反射の影響については適切に模擬できているものと考えている。

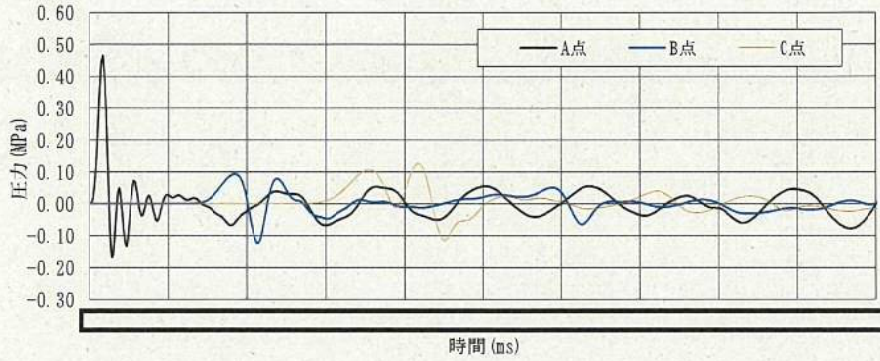
ここで、反射波の影響確認を目的として、単純なLagrange要素のモデルにパルス状の荷重を付加した場合の構造物内部の圧力履歴を調査した。解析体系と荷重条件を添付図2-1に示す。



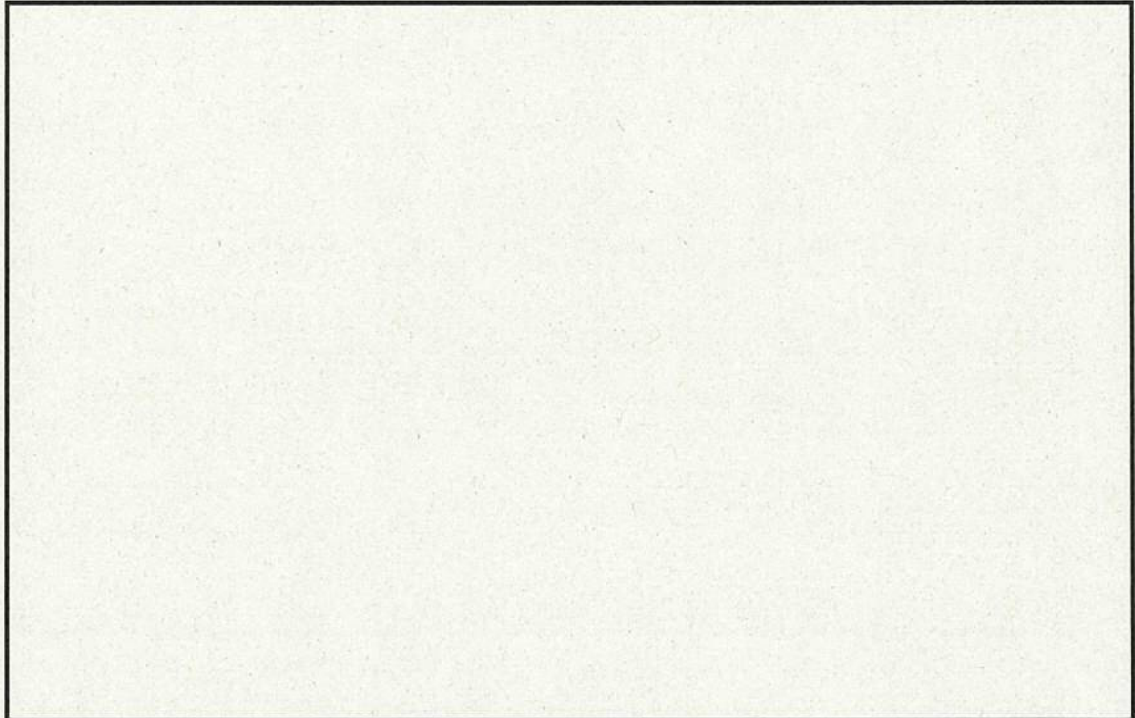
添付図 2-1 解析モデルと荷重条件

添付図 2-1 に示す条件で圧力伝播挙動を解析した結果として、代表点の Lagrange 要素の圧力時刻歴を抽出した結果を添付図 2-2 に、時刻毎の圧力分布を添付図 2-3 に示す。

添付図 2-2 に示す通り、圧力履歴は周期的に変動しており、圧力伝播と反射が繰り返される挙動が模擬されていることを確認した。



添付図 2-2 Lagrange 要素の代表点における圧力履歴



添付図 2-3 圧力分布の推移

また、同様のモデルを用いて、反射波の重畳の効果についても確認した。  
解析モデルと荷重条件を添付図 2-4 に示す。



添付図 2-4 解析モデルと荷重条件

添付図 2-4 に示す条件で圧力伝播挙動を解析した結果として、圧力測定点の Lagrange 要素の圧力時刻歴を抽出した結果の比較を添付図 2-5 に示す。

添付図 2-5 に示す通り、ケース 1 とケース 2 の入力を重ね合わせたケース 3 の解析結果は、ケース 1 とケース 2 の解析で得られた個々の圧力波形の重ね合わせとして表現されていることが確認された。これにより、AUTODYN コードでは圧力伝播と反射、及び反射波の重畳が適切に模擬されていることを確認した。



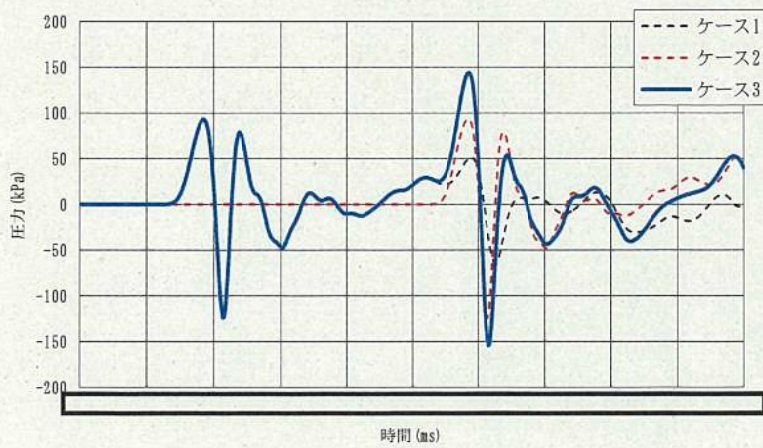
<ケース 1>



<ケース 2>



<ケース 3>

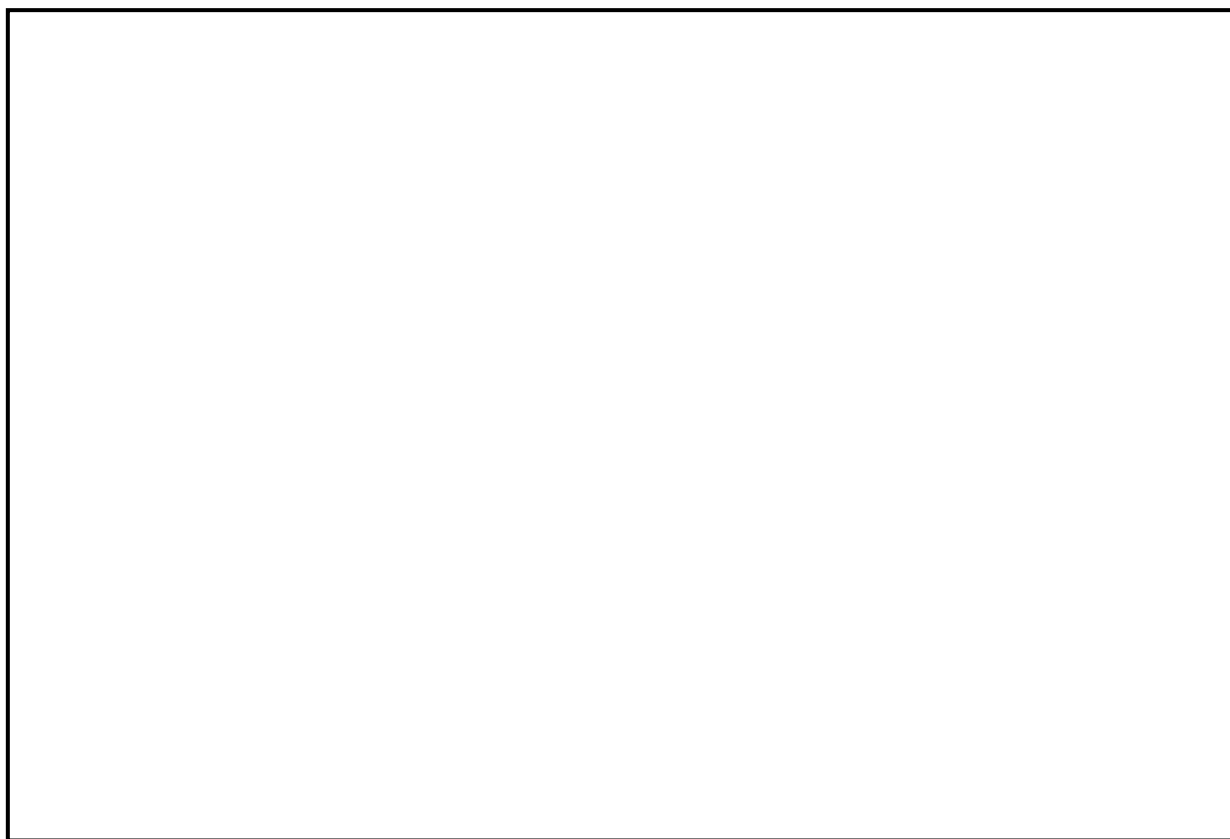


添付図 2-5 各ケースの圧力履歴

また、3章に示すペDESTALの構造解析において、水蒸気爆発によって没水部のペDESTAL外側壁面に負荷される圧力荷重の総和を添付図 2-6 に示す。

今回の解析対象である水蒸気爆発は、高い圧力の荷重がごくわずかな時間(ミリ秒単位)で作用する事象であり、この圧力による荷重の総和が没水部のペDESTALへ負荷される際に、伝播荷重による反射波が有意な影響を及ぼすか確認した。

添付図 2-6 より、爆発エネルギーの解放直後の発生荷重が支配的であり、その後は伝播荷重が減衰し、仮に反射波が重畳した場合でも解放直後の荷重を上回ることは無いものと考えられる。



添付図 2-6 圧力によってペDESTAL外側壁面に作用する荷重

### 添付3 ペDESTAL構造応答評価における判定基準について

本章では、ペDESTAL構造応答評価における判定基準の考え方について述べる。

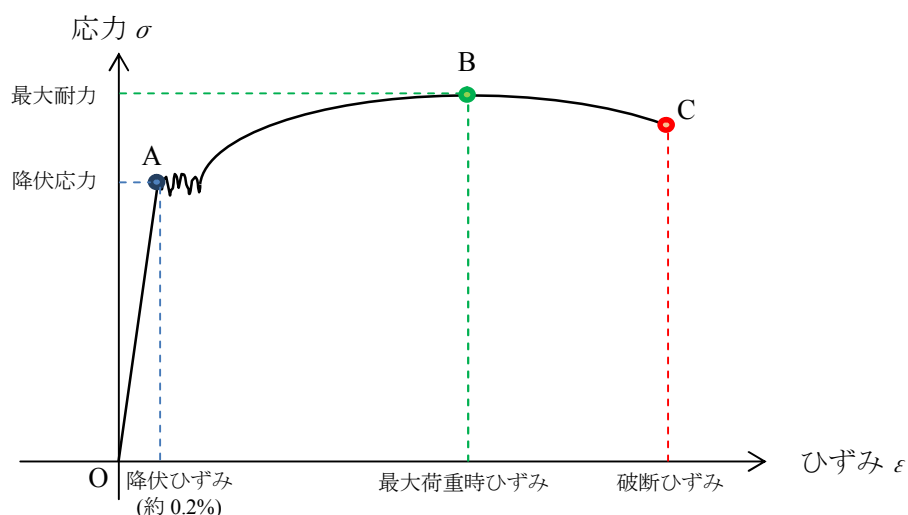
F C I時の荷重に対するペDESTALの機能喪失モードとして、強度部材の破損によるRPV支持機能の喪失が考えられる。本解析では、構築物としてのペDESTAL全体でのRPV支持機能の確認を目的とし、主たる強度部材としての鋼板の発生応力を保守的に見積もる観点から、内外鋼板の間に設置されている縦リブをモデル化せず、2次元軸対称体系での構造応答を評価する。したがって、主たる強度部材である鋼板がF C I時の荷重に対して破断せず、ペDESTAL全体として荷重負担能力を維持していることが機能維持評価の判定基準となる。

一般に鉄鋼材料の負荷荷重とひずみの関係は、添付図3-1の通りに表される。

原点Oから点Aまでの領域は、外力によってなされた仕事に変形によって弾性エネルギーとして材料内に蓄えられ、外力を除くと変形の回復とともにエネルギーが放出される領域である。すなわち、永久変形が生じない弾性範囲であり、点Aは「降伏点」、点Aの応力は「降伏応力」と呼ばれている。

外力により材料に生じる応力が降伏応力を超える場合、材料には塑性変形が生じるものの、ひずみ硬化によって外力の増加に応じて応力はなだらかに上昇する。その後、さらに外力を増加させると、応力の最大点（点B）を経て、徐々にひずみが進展し、最終的にはあるひずみ量となった時点で破断する。（点C）

ここで、点Bを「最大荷重点」、点Bの応力を「最大耐力」、点Bのひずみを「最大荷重点時ひずみ」と称する。また、点Cを「破断点」、点Cのひずみを「破断ひずみ」と称する。



添付図3-1 鉄鋼材料の応力-ひずみ線図の例

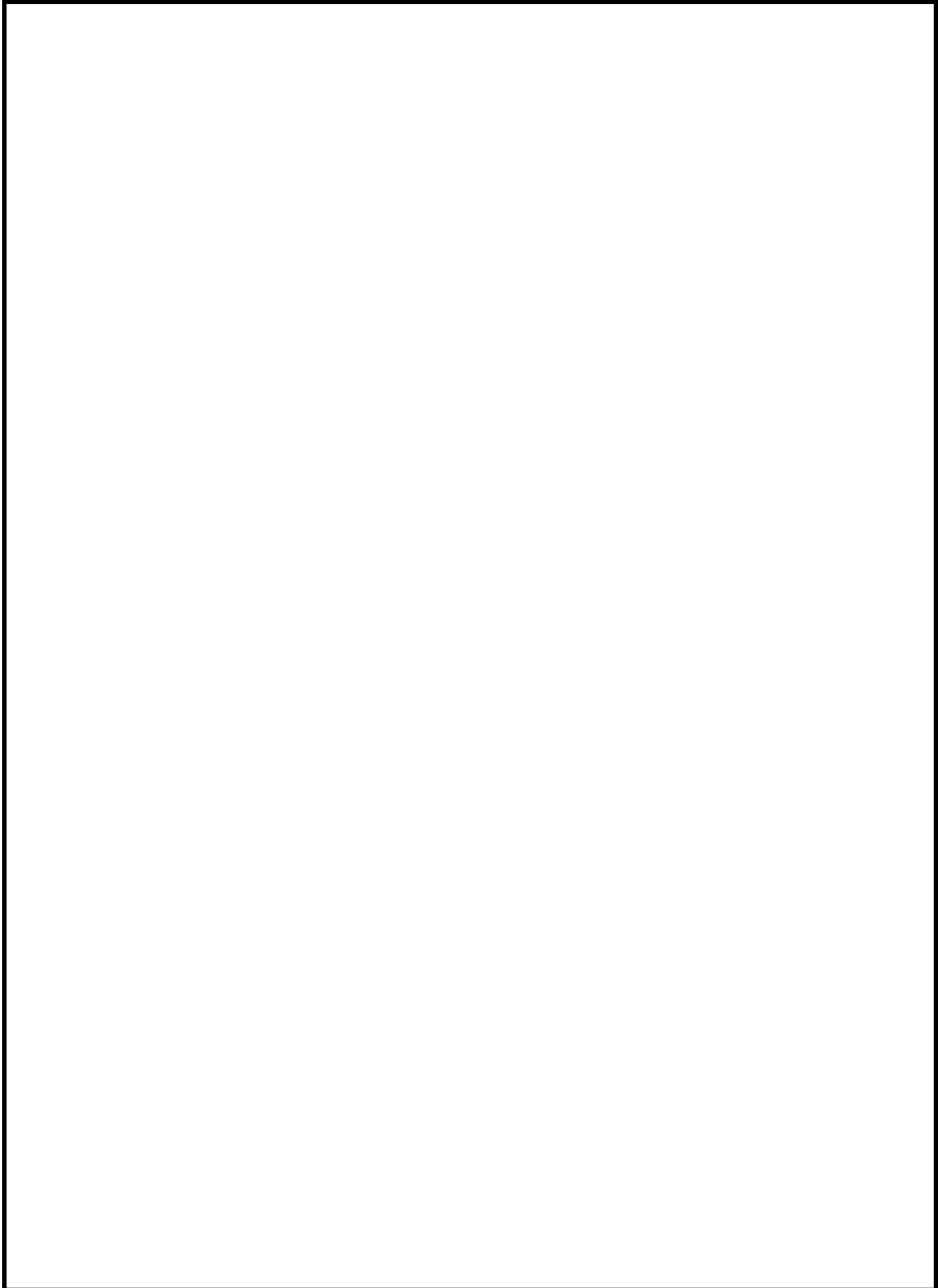
ペDESTALの機能維持の観点からは、耐力が低下せず、外力の増加に対応できる範囲

であれば荷重負担能力が維持できることから、F C I 時の荷重に対して発生するひずみが最大荷重時ひずみ未満であることが機能維持の一つの判断基準であると考えることが出来る。

ここで、代表プラントにおけるペデスタル鋼板の材質である SPV490 の材料試験データの例を既往知見<sup>[1]</sup>から引用し、添付図 3-2 に示す。

添付図 3-2 によれば、SPV490 の最大荷重時ひずみは 10%程度であり、代表プラントの解析結果(降伏応力未満)は、ひずみ量の判断基準と比較しても十分に余裕のある結果であることが分かる。

参考文献[1]：平成 7 年度 溶接部等熱影響部信頼性実証試験（原子炉格納容器）に関する報告書，原子力安全基盤機構，平成 8 年 3 月



添付図 3-2 参考文献[1]抜粋