

# 第 1 部 S A F E R

## 目 次

### － S A F E R －

1. はじめに .....	1-4
2. 重要現象の特定 .....	1-5
2.1 事故シーケンスと評価指標 .....	1-5
2.2 ランクの定義 .....	1-13
2.3 物理現象に対するランク付け .....	1-14
3. 解析モデルについて .....	1-25
3.1 コード概要 .....	1-25
3.2 重要現象に対する解析モデル .....	1-27
3.3 解析モデル .....	1-28
3.4 入出力 .....	1-79
4. 妥当性確認 .....	1-82
4.1 重要現象に対する妥当性確認方法 .....	1-82
4.2 T B L 実験解析 .....	1-87
4.3 R O S A - III 実験解析 .....	1-99
4.4 F I S T - A B W R 実験解析 .....	1-110
4.5 実機解析への適用性 .....	1-120
5. 有効性評価への適用性 .....	1-131
5.1 不確かさの取扱いについて（評価指標の観点） .....	1-131
5.2 不確かさの取扱いについて（運転操作の観点） .....	1-134
6. 参考文献 .....	1-139

添付 1	入力項目リスト .....	1-143
添付 2	相関式, モデルの適用性 .....	1-147
添付 3	前処理コード .....	1-181
添付 4	炉心の過熱蒸気の影響評価 .....	1-184
添付 5	代替注水設備による炉心再冠水過程における熱伝達について .....	1-191
添付 6	原子炉隔離状態における原子炉圧力挙動について .....	1-199

## 1. はじめに

本資料は、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」という。）に適用するコードのうち、SAFER Ver.3（以下「SAFERコード」という。）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

S A F E Rコードが適用される炉心損傷防止対策における事故シーケンスグループについて、具体的な事故シーケンス及びその事象の推移と評価指標について記述する。S A F E Rコードが適用される炉心損傷防止対策における事故シーケンスグループは、出力運転中の発電用原子炉を対象とした以下の6グループである。

- ・ 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
- ・ L O C A時注水機能喪失
- ・ 格納容器バイパス（インターフェイスシステムL O C A）

#### (1) 高圧・低圧注水機能喪失

この事故シーケンスグループは、発電用原子炉の出力運転中に、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故（L O C A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した事象とする。

具体的な事故シナリオとして「給水流量の全喪失＋原子炉隔離時冷却系（以下「R C I C」という。）及び非常用炉心冷却系（以下「E C C S」という。）（高圧注水系及び低圧注水系）起動失敗」を想定する。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するため未臨界が確保される。しかし、原子炉水位低信号でR C I C及びE C C S（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（以下「MSIV」という。）が閉止すると原子炉圧力は上昇し，原子炉圧力が主蒸気逃がし安全弁（以下「SRV」という。）の設定値に到達すると断続的に弁から蒸気が放出され，これにより原子炉圧力はSRV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。

この事象に対する炉心損傷防止対策としては，代替注水設備等による炉心冷却機能の確保があげられる。

炉心損傷を防止するために，高圧代替注水設備を使用する場合には，高圧状態の原子炉へ注水を開始する。SRVからの冷却材の流出により原子炉水位は低下するが，高圧代替注水設備による原子炉注水開始により原子炉水位は回復し事象は収束する。低圧代替注水設備を使用する場合には，手動操作によりSRV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設備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，低圧代替注水設備による注水を開始すると原子炉水位が回復し，炉心は再冠水することにより事象収束に向かうことになる。

したがって，本事象では炉心露出・ヒートアップの可能性があるため，燃料被覆管温度が評価指標である。

## (2) 高圧注水・減圧機能喪失

この事故シーケンスグループは，発電用原子炉の出力運転中に，運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故（LOCAを除く）の発生後，高圧注水機能が喪失し，かつ，原子炉減圧機能が喪失することを想定する。

具体的な事故シナリオとして「給水流量の全喪失＋R C I C及びE C C S（高圧注水系）起動失敗＋原子炉の減圧失敗」を想定する。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するため未臨界が確保される。しかし、原子炉水位低信号でR C I C及びE C C S（高圧注水系）の起動に失敗する。原子炉水位低信号でM S I Vが閉止すると原子炉圧力は上昇し、原子炉圧力がS R V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S R V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、代替自動減圧ロジックによりS R Vが開き、原子炉を減圧し、原子炉の減圧後にE C C S（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を開始すると原子炉水位が回復し、炉心は再冠水することにより事象収束に向かうことになる。

したがって、本事象では炉心露出・ヒートアップの可能性があるため、燃料被覆管温度が評価指標である。

### (3) 全交流動力電源喪失

この事故シーケンスグループは、発電用原子炉の出力運転中に、送電系統又は所内主発電設備の故障等により、外部電源が喪失するとともに、非常用所内電源系統も機能喪失し、安全機能を有する系統及び機器の全交流動力電源が喪失することを想定する。

具体的な事故シナリオとして「外部電源喪失＋非常用ディーゼル発電機の機能喪失」を想定する。外部電源喪失後、タービン蒸気加減弁急速閉又は原子炉水位低信号で原子炉はスクラムするため未臨界が確保される。また、原子炉水位低信号でR C I Cが自動起動して原子炉水位は維持される。しかし、非常用ディーゼル発電機の起動失敗により全交流動力電源喪失となり、また、直流電源が枯渇し、R C I Cが機能喪失した場合に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、交流電源設備による給電ができない一定期間直流電源を確保し、R C I Cによって原子炉水位を適切に維持しつつ、代替電源設備、低圧代替注水設備の準備が完了したところで、原子炉の減圧及びE C C S（低圧注水系）又は低圧代替注水設備による原子炉注水を開始する。原子炉の減圧は、S R Vにより手動操作にて実施する。原子炉減圧を開始すると、冷却材の流出により原子炉水位は低下するが、低圧代替注水設備等による注水開始により原子炉水位が回復するため、事象収束に向かうことになる。

したがって、本事象では炉心露出・ヒートアップの可能性があるため、燃料被覆管温度が評価指標である。

#### (4) 崩壊熱除去機能喪失

##### ① 取水機能喪失

この事故シーケンスグループは、発電用原子炉の出力運転中に、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故（L O C Aを除く）の発生後、原子炉注水には成功するが、取水機能喪失により崩壊熱除去機能が喪失することを想定する。



具体的な事故シナリオとして「給水流量の全喪失＋取水機能喪失」を想定する。外部電源喪失後、タービン蒸気加減弁急速閉又は原子炉水位低信号により原子炉はスクラムするため未臨界が確保される。また、原子炉水位低信号でR C I Cが自動起動して水位は維持される。その後、原子炉を減圧し、低圧代替注水設備等による原子炉注水を開始する。

一方、原子炉内で崩壊熱により発生する蒸気がS R Vを介して徐々に流出するため、原子炉格納容器の圧力及び温度が上昇し、いずれは原子炉格納容器が先行破損し、その後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。

したがって、本事象では炉心露出・ヒートアップの可能性があるため、燃料被覆管温度が評価指標である。

## ② 残留熱除去系機能喪失

この事故シーケンスグループは、発電用原子炉の出力運転中に、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故（L O C Aを除く）の発生後、原子炉注水には成功するが、残留熱除去系（以下「R H R」という。）の故障により崩壊熱除去機能が喪失することを想定する。

具体的な事故シナリオとして「給水流量の全喪失＋R H R機能喪失」を想定する。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するため未臨界が確保される。また、原子炉水位低信号でR C I C等が自動起動して原子炉水位は維持される。その後、原子炉を減圧し、高圧注水設備等による原子炉注水を開始する。

一方、原子炉内で崩壊熱により発生する蒸気がS R Vを介して徐々に流出するため、原子炉格納容器の圧力及び温度が上昇し、いずれは原子炉格

納容器が先行破損し、その後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。

したがって、本事象では炉心露出・ヒートアップの可能性があるため、燃料被覆管温度が評価指標である。

#### (5) L O C A時注水機能喪失

この事故シーケンスグループは、発電用原子炉の出力運転中に、原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する配管の大規模な破断（大破断L O C A）あるいは中小規模の破断（中小破断L O C A）の発生後、高圧注水機能、低圧注水機能及び原子炉減圧機能が喪失することを想定する。

具体的な事故シナリオとして「中小破断L O C A + E C C S（高圧注水系、低圧注水系）起動失敗」を想定する。中小破断L O C A発生後、炉心流量急減信号又は原子炉水位低信号で原子炉はスクラムするため未臨界が確保される。しかし、高圧注水系、低圧注水系及び自動減圧系の起動失敗により、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。

この事象に対する炉心損傷防止対策としては、代替注水設備等による炉心冷却機能の確保があげられる。

炉心損傷を防止するために、高圧代替注水設備を使用する場合には、高圧状態の原子炉へ注水を開始する。S R Vからの冷却材の流出により原子炉水位は低下するが、高圧代替注水設備による原子炉注水開始により原子炉水位は回復し事象は収束する。低圧代替注水設備を使用する場合には、手動操作によりS R V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設備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、低圧代替注水設備に

よる注水を開始すると原子炉水位が回復し、炉心は再冠水することにより事象収束に向かうことになる。

したがって、本事象では炉心露出・ヒートアップの可能性があるため、燃料被覆管温度が評価指標である。

なお、大破断LOCA時は炉心の著しい損傷までの事象進展が早く、国内外の先進的な対策と同等のものを考慮しても、炉心損傷防止対策を有効に実施することはできないため、格納容器破損防止対策を講じて、その有効性を確認している。

#### (6) 格納容器バイパス（インターフェイスシステムLOCA）

この事故シーケンスグループは、原子炉冷却材圧力バウンダリと接続された系統で、高圧設計部分と低圧設計部分のインターフェイスとなる配管のうち、隔離弁の故障等により低圧設計部分が過圧され破損する事象を想定する。

具体的な事故シナリオとして、「高圧炉心注水系の吸込配管」等の破損を想定する。機器破損等の発生後、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するため未臨界が確保される。しかし、破損口から冷却材が流出するため原子炉圧力容器内の保有水が減少し、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、RCIC及びECCS（高圧注水系）により炉心を冷却することによって炉心損傷の防止を図り、また、逃がし安全弁による原子炉減圧に伴う冷却材漏えいの抑制及びインターフェイスシステムLOCAの発生箇所の隔離によって、原子炉格納容器外への冷却材の流出の防止を図る。原子炉減圧後は、低圧注水設備等による原子炉注水によって原子炉水位を維持することにより事象収束に向かうことになる。

したがって、本事象では炉心露出・ヒートアップの可能性があるため、燃料被覆管温度が評価指標である。

炉心損傷防止対策における事故シーケンスに対し、有効性評価上要求される評価項目は、以下の5点である。

- a. 燃料被覆管の温度（1200℃以下）
- b. 燃料被覆管の酸化量（15%以下）
- c. 原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力  
（最高使用圧力の1.2倍以下）
- d. 格納容器圧力バウンダリにかかる圧力（限界圧力以下）
- e. 格納容器圧力バウンダリにかかる温度（限界温度以下）

原子炉設置変更許可申請解析に記載した解析結果から、15%に対し十分な余裕があり評価指標として燃料被覆管の温度で代表できると考えられるb.を除く、a. c. d. e.を評価指標として取り上げる。このうち、c. はSRVの作動により原子炉圧力の上昇が抑えられ、SRVの設定圧力以下に抑えられるため評価指標から除外する。また、d. と e. はSAFERコードの評価範囲以外であるため除外する。

## 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S A F E Rコード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 2-1 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。

表 2-1 ランクの定義

ランク	ランクの定義	本資料での取扱い
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、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
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2.1節で述べた事象進展を踏まえ、2.2節のランクの定義に従い、評価指標及び運転操作への影響に応じて「H」及び「M」に分類することで物理現象の中から重要現象を特定する。この結果を表2-2に示す。

ランク付けに当たっては、燃料被覆管温度は炉心冷却、炉心水位、燃料被覆管のヒートアップから影響を受けるため、これらに関する物理現象も相対的に高いランクとしている。また、運転操作等により原子炉を強制的に減圧し、温度・圧力を低下させるシーケンスでは、原子炉の減圧により代替注水設備を含む注水系からの冷却水の注水による炉心冷却を期待するため、原子炉の減圧に寄与する物理現象も相対的に高いランクとしている。

以下に、物理現象ごとに考え方を示す。

#### (1) 核分裂出力 [炉心 (核)]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、事故後長期における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となる。また、減速材直接発熱は核分裂で発生するエネルギーのうち、減速材の発熱に寄与する割合はきわめて小さい。したがって、核分裂出力は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

#### (2) 出力分布変化 [炉心 (核)]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、事象発生後スクラムするまでの時間が短

く、通常運転時からの出力分布変化に対する影響が小さい。したがって、出力分布変化は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

(3) 反応度フィードバック効果 [炉心 (核)]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、事故後長期における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となる。したがって、反応度フィードバック効果は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

(4) 制御棒反応度効果 [炉心 (核)]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、事故後長期における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となる。したがって、制御棒反応度及び制御棒速度は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

(5) 崩壊熱 [炉心 (核)]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、事故後長期における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となる。したがって、崩壊熱は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。

(6) 三次元効果 [炉心 (核)]

評価する具体的な事故シーケンスは、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燃料被覆管温度に影響を与えない。

(7) 燃料棒内温度変化 [炉心 (燃料)]

評価する具体的な事故シーケンスは、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るため、事故直後における燃料棒内の熱を冷却材に放出する燃料ペレット径方向発熱密度分布、燃料ペレット・燃料被覆管内熱伝導及び燃料ペレット－燃料被覆管のギャップ熱伝達の影響は小さい。したがって、燃料棒内温度変化は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

(8) 燃料棒表面熱伝達 [炉心 (燃料)]

評価する具体的な事故シーケンスは、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るため、崩壊熱による燃料の発熱及び燃料棒表面から冷却材への熱伝達が燃料被覆管温度変化の支配的要因になる。原子炉減圧後の減圧沸騰により二相流動状態となった場合には、二相壁面熱伝達により冷却される。また、炉心が露出した場合には、蒸気単相流、燃料棒間の輻射熱伝達により冷却される。露出した燃料棒周囲の蒸気が過熱され気液熱非平衡状態となる可能性があり、燃料棒表面熱伝達に影響する。したがって、燃料棒表面熱伝達は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。

(9) 沸騰遷移 [炉心 (燃料)]

評価する具体的な事故シーケンスは、給水流量の全喪失あるいは小破断 L O C A を起因事象としており、炉心流量の減少は緩やかに変化し、事故直後に原子炉がスクラムし原子炉出力が低下するため、燃料集合体で核沸騰からの離脱が発生する可能性は低い。一方、事故後長期において炉心が



露出する場合には、燃料被覆管温度が上昇するが、原子炉注水により炉心が再冠水することによって、最終的には核沸騰状態に遷移して冷却される。したがって、沸騰遷移は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。

#### (10) 燃料被覆管酸化 [炉心 (燃料)]

評価する具体的な事故シーケンスは、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るため、燃料被覆管が高温になるとジルコニウム-水反応による発熱量が増加すると考えられる。しかし、代替注水設備等の原子炉注水により炉心が冷却され、燃料被覆管温度はジルコニウム-水反応が顕著になるほど上昇しない。したがって、燃料被覆管酸化は燃料被覆管温度に対し重要度が中程度と考えられる。

#### (11) 燃料被覆管変形 [炉心 (燃料)]

評価する具体的な事故シーケンスでは、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、燃料ペレットが膨張することなく P C M I は発生しない。燃料被覆管が高温になり、燃料棒内圧の上昇に伴う膨れ・破裂が発生する場合には、燃料棒間の輻射熱伝達への影響、燃料集合体内の流路減少による冷却への影響がある。破裂が発生する場合には、燃料被覆管内面酸化による反応熱への影響が考えられるが、崩壊熱に比べて燃料被覆管温度への寄与は小さい。燃料被覆管の破裂により核分裂生成物が原子炉格納容器内に放出されると、格納容器内雰囲気放射線モニタにより炉心損傷の判断を実施した場合、格納容器スプレイや格納容器ベントの操作タイミングに影響することとなる。ただし、この操作は事象発生後早期に行うものではない。したがって、燃料被覆管変形は燃料被覆管温度に対し重

要度は中程度と考えられる。

#### (12) 三次元効果 [炉心 (燃料)]

本物理現象は、横方向及び縦方向からの輻射熱伝達の効果を意味している。評価する具体的な事故シーケンスは、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るため、炉心が露出した場合には、燃料棒間及びチャンネルボックスとの輻射の寄与が大きくなる。輻射伝熱に関する三次元効果は、輻射伝熱量が増加するため、燃料被覆管温度に与える影響は結果を厳しくするものではなく、重要度が低いと考えられる。

#### (13) 沸騰・ボイド率変化 [炉心 (熱流動)]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、サブクールボイドの発生は燃料被覆管温度に影響しない。原子炉減圧操作を実施した場合には、下部プレナム等で減圧沸騰（フラッシング）が発生する。これに伴い発生したボイドにより形成された二相水位はボイド率変化に応じて変化する。したがって、沸騰・ボイド率変化は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。

再循環ポンプトリップ、代替注水設備等による原子炉注水により、原子炉圧力容器下部で温度成層化が発生する可能性があるが、事故後長期においては十分に混合され影響は無視できる。

#### (14) 気液分離（水位変化）・対向流 [炉心 (熱流動)]

評価する具体的な事故シーケンスは、原子炉減圧操作に伴う下部プレナ

ムフラッシングが発生する事象であり、フラッシングにより発生したボイドを含む二相水位の変化は、炉心露出時の燃料被覆管温度に影響がある。したがって、気液分離（水位変化）は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。

一方、炉心上部での気液対向流制限（以下「CCFL」という。）、CCFLブレークダウンは、事象進展が緩やかなこと、代替注水設備等による原子炉注水はダウンコマ又は炉心バイパス領域に注水されるため発生しない。炉心スプレイ系による原子炉注水が行われる場合には発生する可能性があるが、短期間であるため影響は小さい。また、炉心に冷却水が保持され水位が形成されている場合で、かつ、下部プレナムにも水位が形成される場合には、炉心下部でCCFLが発生する可能性があるが、原子炉減圧操作を経て炉心が再冠水する過程では事象進展が緩やかであり、下部プレナムに顕著な水位が形成されることはないため、炉心下部のCCFLは発生しない。したがって、対向流は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

#### (15) 気液熱非平衡 [炉心（熱流動）]

評価する具体的な事故シーケンスは、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るため、露出した燃料棒周囲の蒸気が過熱され気液熱非平衡状態となる可能性がある。炉心の一部で発生した過熱蒸気は、上部プレナムから炉心シュラウド外に至る経路において飽和蒸気になると考えられ、熱流動挙動への影響は小さいと考えられる。しかしながら、気液熱非平衡の影響は、(8)でも述べたように燃料棒表面熱伝達に影響するため燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。

(16) 圧力損失 [炉心 (熱流動)]

評価する具体的な事故シーケンスは、いずれも事故直後に再循環ポンプがトリップし炉心流量が早期に低下するため、炉心部の圧力損失の影響は小さい。また、炉心バイパス部は、局所的な圧力損失は小さい。したがって、圧力損失は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

(17) 三次元効果 [炉心 (熱流動)]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、露出した炉心が再冠水する過程においては、炉心中心部の一部の出力の高い燃料集合体では気液並行上昇流、周辺の出力の低い燃料集合体では下降流、その他多くの燃料集合体では気液対向流が生じる可能性がある。これらの炉心の三次元的な流動状態により燃料集合体の冷却状態に差異が生じる。したがって、三次元効果は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。

(18) 冷却材流量変化 [原子炉压力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、いずれも事故直後に再循環ポンプがトリップし炉心流量が早期に低下するため、強制循環時の冷却材流量変化の影響は小さい。また、事故後長期において炉心が露出する場合には、原子炉水位が低下して炉心シュラウド内外の自然循環が維持できないため、自然循環時の冷却材流量変化の影響は小さい。したがって、冷却材流量変化は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

(19) 冷却材放出（臨界流・差圧流）〔原子炉圧力容器〕

評価する具体的な事故シーケンスは、SRVを使用した原子炉の急速減圧あるいはLOCA後の冷却材放出により炉心露出が発生し、燃料被覆管温度が上昇する可能性がある。また、原子炉減圧に伴い低圧注水量が変化するため、炉心冷却への影響が大きい。したがって、冷却材放出は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。

(20) 沸騰・凝縮・ボイド率変化〔原子炉圧力容器〕

評価する具体的な事故シーケンスは、SRVを使用した原子炉の急速減圧あるいはLOCA後の冷却材放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が二相水位に影響する。また、原子炉への冷却水の注水により蒸気が凝縮される。炉心以外の領域の沸騰・凝縮・ボイド率変化は燃料被覆管温度に対し、重要度は中程度と考えられる。

(21) 気液分離（水位変化）・対向流〔原子炉圧力容器〕

評価する具体的な事故シーケンスは、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る。炉心以外の領域の気液分離（水位変化）・対向流は燃料被覆管温度に対し、重要度が中程度と考えられる。

(22) 気液熱非平衡〔原子炉圧力容器〕

評価する具体的な事故シーケンスは、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る。しかし、炉心以外の領域の気液熱非平衡は燃料被覆管温度に対し影響はない。

(23) 圧力損失 [原子炉圧力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、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る。しかし、炉心以外の領域の圧力損失は燃料被覆管温度に対し直接的な影響はないため、重要度が低いと考えられる。

(24) 構造材との熱伝達 [原子炉圧力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、SRVを使用した原子炉の急速減圧あるいはLOCA後の冷却材放出により原子炉が減圧され、構造材から冷却材への熱伝達が発生する。しかし、崩壊熱に比べて寄与は小さい。したがって、構造材との熱伝達は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

(25) ECCS注水（給水系・代替注水設備含む） [原子炉圧力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、ECCS又は代替注水設備による原子炉注水により炉心が冷却される事象である。したがって、ECCS（給水系・代替注水設備含む）による原子炉注水は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。

(26) ほう酸水による拡散 [原子炉圧力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、いずれもほう酸水の注入を考慮していないため、ほう酸水による拡散は燃料被覆管温度に影響を与えない。

(27) 三次元効果 [原子炉压力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、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場合があるが、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、三次元効果は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

表 2-2 炉心損傷防止対策の有効性評価の物理現象のランク

分類	事故シーケンスグループ		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	格納容器バイパス(インターフェイスシステムLOCA)
	物理現象	評価指標	燃料被覆管温度	燃料被覆管温度	燃料被覆管温度	燃料被覆管温度	燃料被覆管温度	燃料被覆管温度
炉心 (核)	(1)	核分裂出力	L	L	L	L	L	L
	(2)	出力分布変化	L	L	L	L	L	L
	(3)	反応度フィードバック効果	L	L	L	L	L	L
	(4)	制御棒反応度効果	L	L	L	L	L	L
	(5)	崩壊熱	<u>H</u>	<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	I
炉心 (燃料)	(7)	燃料棒内温度変化	L	L	L	L	L	L
	(8)	燃料棒表面熱伝達	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>
	(9)	沸騰遷移	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>
	(10)	燃料被覆管酸化	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>
	(11)	燃料被覆管変形	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>
	(12)	三次元効果	L	L	L	L	L	L
炉心 (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>	<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>	<u>H</u>
	(15)	気液熱非平衡	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>
	(16)	圧力損失	L	L	L	L	L	L
	(17)	三次元効果	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>
原子炉 圧力 容器 (逃がし安全弁を含む)	(18)	冷却材流量変化	L	L	L	L	L	L
	(19)	冷却材放出(臨界流・差圧流)	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>
	(20)	沸騰・凝縮・ボイド率変化	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>
	(21)	気液分離(水位変化)・対向流	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>M</u>
	(22)	気液熱非平衡	I	I	I	I	I	I
	(23)	圧力損失	L	L	L	L	L	L
	(24)	構造材との熱伝達	L	L	L	L	L	L
	(25)	ECCS注水(給水系・代替注水設備含む)	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>	<u>H</u>
(26)	ほう酸水による拡散	I	I	I	I	I	I	
(27)	三次元効果	L	L	L	L	L	L	



### 3. 解析モデルについて

#### 3.1 コード概要

S A F E Rコードは、長期間の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及び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。燃料被覆管温度上昇を伴う事故時の炉心部や原子炉圧力容器内を評価対象としているものにM A A Pコードがあげられるが、S A F E Rコードは、M A A Pコードに比べて、C C F Lや燃料棒表面の熱伝達等、原子炉内熱水力挙動及び燃料被覆管温度挙動を詳細に評価することが可能であるため、炉心損傷防止対策の有効性評価解析には適している。

本コードは仮想的な高出力燃料集合体1体を含めて原子炉圧力容器内を9ノードに分割し、原子炉圧力、各ノードの水位変化等を計算する。また、各種のE C C S、R C I C等の性能特性を入力することにより、それらの性能を評価することができる。原子炉内冷却材量の評価に当たっては、上部タイプレート、炉心入口オリフィス等でのC C F L及び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下部プレナムに落水する現象（C C F Lブレイクダウン現象）を考慮することができる。

また、本コードでは、平均出力燃料集合体及び高出力燃料集合体に対して燃料ペレット、燃料被覆管、チャンネルボックス等の温度計算を行う。燃料被覆管の温度計算においては、その冷却状態に応じた熱伝達係数を考慮でき、また、燃料棒間の輻射及び燃料棒とチャンネルボックスの輻射を、考慮することができる。

また、燃料被覆管と冷却水又は水蒸気との化学反応（ジルコニウム-水反応）を Baker-Just の式によって計算し、表面の酸化量を求める。さら

に、燃料棒内の圧力を計算することによって、燃料被覆管の膨れと破裂の有無を評価し、破裂が起きた場合には、燃料被覆管の内面に対してもジルコニウム-水反応を考慮する。

本コードの入力は、原子炉出力、原子炉圧力等の初期条件、原子炉の幾何学的形状及び水力学的諸量、燃料集合体及び炉心に関するデータ、プラント過渡特性パラメータ、ECCS等の特性、想定破断の位置、破断面積等であり、出力として、原子炉圧力、原子炉水位、燃料被覆管最高温度（以下「PCT」という。）、燃料被覆管酸化量等が求められる。

なお、SAFERコードは「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」（以下「ECCS性能評価指針」という。）で妥当性が認められているモデルを使用しており、BWRプラントの設計基準事故のLOCA解析（ECCS性能評価解析）に適用されている。

### 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 3-1 に示す。

表 3-1 重要現象に対する解析モデル

分類	重要現象	必要な解析モデル
炉心 (核)	崩壊熱	崩壊熱モデル
炉心 (燃料)	燃料棒表面熱伝達	燃料棒表面熱伝達モデル
	沸騰遷移	
	燃料被覆管酸化	ジルコニウム-水反応モデル
	燃料被覆管変形	膨れ・破裂評価モデル
炉心 (熱流動)	沸騰・ボイド率変化	二相流体の流動モデル
	気液分離（水位変化）・対向流	
	三次元効果	燃料棒表面熱伝達モデル
	気液熱非平衡	
原子炉 压力容器 (逃がし安全弁を 含む)	冷却材放出（臨界流・差圧流）	臨界流モデル
	沸騰・凝縮・ボイド率変化	二相流体の流動モデル
	気液分離（水位変化）・対向流	
	ECCS注水（給水系・代替注 水設備含む）	原子炉注水系モデル

### 3.3 解析モデル<sup>(1)(2)</sup>

S A F E Rコードの計算モデルは熱流動解析を実施する熱水力モデルと燃料棒熱解析を実施する炉心ヒートアップモデルに大別される。主要な計算モデルを表 3-2 に示す。

#### 3.3.1 熱水力モデル

S A F E Rコードは熱力学的に均質、平衡を仮定した熱水力モデルを持ち、原子炉压力容器内の冷却材体積を炉心シュラウド等の原子炉内構造物による物理的な境界にしたがって8ノードに区分する。また、仮想的な高出力燃料集合体1体を独立のノードとしてモデル化している。

原子炉圧力は、原子炉压力容器内を一点で近似し、原子炉压力容器全体の冷却材に対する質量及びエネルギーの保存式に基づき計算する。

各ノードの水位挙動や冷却材保有量の計算には、質量、運動量及びエネルギーの保存則を適用し、二相流体の流動モデルとしてドリフトフラックスモデル及び気液界面からの蒸気離脱流に対する気泡上昇流モデル、燃料上部等でのC C F Lモデルを用いている。なお、運動量保存式は下部プレナムが満水のとくに再循環流量及び炉心入口流量を求めるために用いられ、炉心シュラウド内外の圧力損失のバランスを考慮している。

また、大破断L O C A時の再冠水過程に下部プレナムと炉心に水位が別々に形成されるとき炉心各チャンネルの平行流路の流動挙動を、実験に基づいて近似的にモデル化している。

なお、破断口及びS R Vからの流出流量は臨界流モデルを用いて計算し、原子炉圧力が低下すると差圧流モデルに切り替わる。

## (1) ノード分割

実機解析に用いるノード分割を図 3-1 に示す。ノード間の矢印は流路を表し、その方向は通常運転状態の流れの向きを表している。

原子炉圧力容器内は、冷却材保有量計算のために 8 ノードに分割している。これらのノードは、BWR の典型的な領域を与えるように選んでおり、物理的な境界や流路抵抗等によって分けている。また、高出力燃料集合体 1 体を独立のノードとして設ける。このノード分割を適用した BWR の LOCA 模擬実験解析結果と実験結果との比較により、原子炉圧力容器内の冷却材保有量の分布及び炉心の水位、燃料被覆管温度の変化等を適切に評価することを確認している。

ノード間の冷却材の移動は流路を介して行い、LOCA 模擬実験で CCF L が確認された燃料集合体上部と下部及び炉心バイパス下部の流路については CCF L 計算を可能としている。

LOCA 模擬実験の結果によれば、露出した炉心が再冠水する過程において、燃料集合体の内部には異なる流れの状態が存在し得ることが示されている。下部プレナムに二相水位が形成されている場合、一部の出力の高い燃料集合体では蒸気と水の上昇流、大部分の燃料集合体では気液対向流、炉心周辺部の出力の低い燃料集合体では下降流が生じる。

これは、炉心周辺部の燃料集合体はボトムエントリーオリフィス、それ以外の燃料集合体はサイドエントリーオリフィスであるため、燃料集合体入口の条件が異なることによるとともに、炉心スプレイ注水後にスパーチャが水没している場合、上部プレナムの周辺領域にサブクール水が存在していることによる。

SAFER コードは、上述のノード分割と流路の設定に基づいて、次のようにその効果を取り込んでいる。

- a) 炉心中心部の一部の出力の高い燃料集合体で生じる気液並行上昇流については、炉心（ノード3）とは独立に設けた高出力燃料集合体（ノード9）で取り扱う。
- b) 炉心周辺の出力の低い燃料集合体で生じる下降流については、上部プレナム（ノード5）のプール水が下部プレナム（ノード1）に移動することで取り扱う。
- c) その他多くの燃料集合体で生じる気液対向流は、炉心（ノード3）及び高出力燃料集合体（ノード9）の入口と出口の流路で取り扱う。

以上のように、SAFERコードは、炉心の三次元的な流動状態を模擬している。なお、それぞれの取扱いのモデル化の詳細については、(4) 炉心内流動に記述する。

#### ① ノード1：下部プレナム

下部プレナムは、制御棒案内管外側の下部プレナム領域であり、原子炉圧力容器壁と炉心支持板によって仕切られている。ジェットポンプ内も下部プレナムの領域としているが、ジェットポンプ内の水位は、炉心シュラウド内の圧損とジェットポンプを通る圧損を考慮することにより、下部プレナム内の水位とは別に計算する。

定格出力時には、再循環ポンプによりダウンコマ領域の冷却水が下部プレナムに供給され、炉心入口オリフィスを介して燃料集合体下部に配分される。

#### ② ノード2：制御棒案内管

制御棒案内管は、制御棒案内管上部での燃料支持金具での流路抵抗によ

り、炉心バイパスノードとは切り離している。

このノードは、上部の燃料支持金具との間隙及び下部の制御棒駆動機構との間隙を介して炉心バイパス及び下部プレナムに通じている。

### ③ ノード3：炉心

炉心は、原子炉内の全燃料集合体とし、炉心内のボイド率分布をより詳細に計算するために、軸方向に12のサブノードに再分割する。これらのサブノードは、燃料集合体下部及び燃料集合体上部の非加熱ノード（各1ノード）、そして10の加熱ノードからなる。炉心内の燃料集合体下部の炉心入口オリフィスによって下部プレナムに通じており、また、燃料上部タイププレートによって上部プレナムに通じている。

### ④ ノード4：炉心バイパス

炉心バイパスは、燃料集合体間の領域（中心バイパス）及び炉心シュラウド壁と炉心最外周の燃料集合体との領域（周辺バイパス）とする。このノードは、制御棒案内管の上部にあり、種々の漏えい流路を通過して炉心下部に通じている。バイパス領域と下部プレナム間の小さな漏えい流路もまた考慮する。

### ⑤ ノード5：上部プレナム

上部プレナムは、炉心上部の二相混合プレナム領域と、プレナム上部の気水分離器を含む。炉心ノードと炉心バイパスノードからの出口流量はこのノードで混合する。炉心スプレイスパージャ及び炉心注水スパージャからの注入水とも、このノードで混合する。

上部プレナムから溢れた水と蒸気はそれぞれダウンコマと蒸気ドームに

移行する。

⑥ ノード6：下部ダウンカマ

下部ダウンカマは，給水スパーチャの下方に位置し，炉心シュラウド外側のダウンカマ部の領域である。定格出力時において，このノードは未飽和領域である。この未飽和水の水位は，給水が継続する間，給水スパーチャの高さに維持される。この未飽和水ノードの質量及びエネルギー変化が上部ダウンカマノードとは別に計算される。

⑦ ノード7：上部ダウンカマ

上部ダウンカマは，給水スパーチャとダウンカマ水位との間の領域であり，定格出力時においては，飽和領域である。このノードの上部の境界は二相混合水位として変動し，下部はノード6によって区別されている。

⑧ ノード8：蒸気ドーム

蒸気ドームは，ダウンカマと上部プレナムそれぞれの二相混合水位の上の全蒸気空間とする。このノードの空間部体積は，ダウンカマや上部プレナムの二相混合水位が変化するにつれて変わることになる。

⑨ ノード9：高出力燃料集合体

炉心の燃料集合体とは出力の異なる燃料集合体の冷却材保有量，ボイド率，水位，燃料棒温度等を計算する目的のために高出力燃料集合体1体が独立した仮想領域としてモデル化されている。このノードの熱水力挙動は，すでに計算されている炉心の圧力損失から計算され，燃料棒温度計算に反映される。高出力燃料集合体の計算結果は，他のノードの状態に影響



を与えない。

## (2) 質量及びエネルギー保存式

質量及びエネルギーの流れについて、図 3-2 に示す。流出量は、負の流入量として考える。なお、対象としているノードを明記する必要がある場合には、図 3-1 で用いられているノード番号を使用する。

### a. 未飽和ノードの質量及びエネルギー保存式

未飽和ノード  $i$  の質量保存式は、次式で与えられる。

$$\dot{M}_{\ell_i} = (\sum W_g)_i + (\sum W_f)_i + (\sum W_\ell)_i = (\sum W)_i \quad (3-1)$$

エネルギー保存式は、次式で与えられる。

$$\dot{Q}_i + (\sum hW)_i = \dot{M}_{\ell_i} h_{\ell_i} + M_{\ell_i} \dot{h}_{\ell_i} - \alpha' V_{\ell_i} \dot{P} \quad (3-2)$$

式 (3-1)、式 (3-2) より、エンタルピー変化率は、次式のようになる。

$$\dot{h}_{\ell_i} = \left[ \dot{Q}_i + (\sum hW)_i - h_{\ell_i} (\sum W)_i + \alpha' V_{\ell_i} \dot{P} \right] / M_{\ell_i} \quad (3-3)$$

ここで、

$M$  : 冷却材質量

$\dot{Q}$  : 伝熱又は発熱による流入エネルギー

$W$  : 冷却材流量

$h$  : エンタルピー

$\alpha'$  : 変換係数

$V$  : ノード体積

$P$  : 圧力

添字  $f$  は飽和液相,  $g$  は蒸気相,  $\ell$  は未飽和液相を示す。

b. 飽和ノードの質量及びエネルギー保存式

飽和ノード  $i$  の蒸気及び水の質量保存式は, それぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_{g_i} &= (\sum W_g)_i + \dot{m}'_{fg_i} \\ \dot{M}_{f_i} &= (\sum W_\ell)_i + (\sum W_f)_i - \dot{m}'_{fg_i} \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

ここで,

$\dot{m}'_{fg_i}$  : フラッシング率

エネルギー保存式は, 次式で表される。

$$\begin{aligned} \dot{Q}_i + (\sum hW)_i &= \frac{d}{dt}(M_i h_i) - \alpha' V_i \dot{P} \\ &= \dot{M}_{g_i} h_g + M_{g_i} \dot{h}_g + \dot{M}_{f_i} h_f + M_{f_i} \dot{h}_f - \alpha'(V_f - V_g) \dot{P} \end{aligned} \quad (3-5)$$

式 (3-5) の左辺の正味エネルギー流入量は, 次式で表される。

$$(\sum hW)_i = h_g (\sum W_g)_i + h_f (\sum W_f)_i + \sum_j h_{\ell_j} W_{\ell_{ji}} \quad (3-6)$$

さらに, 飽和水及び飽和蒸気のエンタルピが圧力変化に伴い飽和限界線上にそって変化することから,

$$\dot{h}_f = \frac{dh_f}{dP} \dot{P} \quad , \quad \dot{h}_g = \frac{dh_g}{dP} \dot{P} \quad (3-7)$$

の関係を用い、式 (3-4)、式 (3-5)、式 (3-6) 及び式 (3-7) により、フラッシング率は、次式のように求まる。

$$\dot{m}'_{fg_i} = \left\{ \dot{Q}_i + \sum_j (h_{\ell_j} - h_f) W_{\ell_{ji}} + \dot{P} \left[ (\alpha' v_f - \frac{dh_f}{dP}) M_{f_i} + (\alpha' v_g - \frac{dh_g}{dP}) M_{g_i} \right] \right\} / h_{fg} \quad (3-8)$$

ここで、

$v_g$  : 蒸気の比体積

$v_f$  : 液相の比体積

このフラッシング率は、以下に述べるような補正を加えて使用される。

### c. 蒸気ドーム内の質量及びエネルギー保存式

蒸気ドームには、ダウンコマ及び上部プレナムからの蒸気が全て流入する。その質量保存式は、次式で与えられる。

$$\dot{M}_{g_8} = (\sum W_g)_8 \quad (3-9)$$

蒸気ドームのエネルギー保存式より過熱エネルギーは次式で表される。

$$\dot{E}_{sh} = \dot{Q}_8 + \dot{P} (\alpha' v_g - \frac{dh_g}{dP}) M_{g_8} \quad (3-10)$$

この過熱エネルギー ( $\dot{E}_{sh}$ ) は、蒸気ドームに直接接しているノード、すなわち、上部プレナムとダウンカマのフラッシング率に補正項を加える形で配分される。これは、S A F E R コードは蒸気ドームの蒸気は飽和と仮定しているため、過熱エネルギーは蒸気ドームに接する水面での飽和水の蒸発に置き換え、フラッシング率を補正しているものである。

$$\dot{m}_{fg,i} = \frac{\dot{E}_{sh} / h_{fg}}{\sum_{i=5}^7 \dot{m}_{fg,i}} \left| \dot{m}'_{fg,i} \right| + \dot{m}'_{fg,i} \quad (3-11)$$

ここで、

$i=5$  : 上部プレナムノード

$i=6,7$  : ダウンカマノード

上記以外の、蒸気ドームに接していない炉心、高出力燃料集合体等のノードに関しては、過熱エネルギーによるフラッシング率の補正は行わない。

$$\dot{m}_{fg,i} = \dot{m}'_{fg,i} \quad (3-12)$$

ここで、

$i=1\sim4$ 及び $9$  : 上部プレナム及びダウンカマ以外のノード

#### d. 圧力変化率

S A F E R コードでは原子炉圧力容器内の圧力がほぼ一様であることを仮定しており、その圧力変化は、全原子炉圧力容器体積が一定であることから、次のように導かれる。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 0 \\ &= \dot{M}_g v_g + M_g \dot{v}_g + \dot{M}_f v_f + M_f \dot{v}_f + \dot{M}_\ell v_\ell + M_\ell \dot{v}_\ell \end{aligned} \quad (3-13)$$

ここで、原子炉压力容器全体の質量変化率は、高出力燃料集合体を除く原子炉压力容器内ノードの質量変化率を合計することにより計算される。これらは蒸気ドームを含めて、以下のようなになる。

$$\dot{M}_g = \sum_i \dot{M}_{g_i}, \quad \dot{M}_f = \sum_i \dot{M}_{f_i}, \quad \dot{M}_\ell = \sum_i \dot{M}_{\ell_i} \quad (3-14)$$

また、比容積の導関数は、次式で表される。

$$\dot{v}_g = \frac{dv_g}{dP} \dot{P}, \quad \dot{v}_f = \frac{dv_f}{dP} \dot{P}, \quad \dot{v}_\ell = \frac{dv_\ell}{dP} \dot{P} + \frac{dv_\ell}{dh_\ell} \dot{h} \quad (3-15)$$

正味の未飽和水エンタルピー変化率は、次式で表される。

$$\dot{h}_\ell = \sum_i \dot{h}_{\ell_i} M_{\ell_i} / \sum_i M_{\ell_i} \quad (3-16)$$

式 (3-14)、式 (3-15) 及び式 (3-16) により、式 (3-13) は、以下のようなになる。

$$\dot{P} = - \left[ \dot{M}_g v_g + \dot{M}_f v_f + \dot{M}_\ell v_\ell + \dot{h}_\ell \frac{\partial v_\ell}{\partial h_\ell} M_\ell \right] / \left[ M_g \frac{dv_g}{dP} + M_f \frac{dv_f}{dP} + M_\ell \frac{\partial v_\ell}{\partial P} \right] \quad (3-17)$$

式 (3-16) を式 (3-17) に代入すると、圧力変化率の最終的な式は、次のようになる。

$$\dot{P} = -X/Y \quad (3-18)$$

ここで、 $X$ 、 $Y$  は次式で表される。

$$X = \sum_{sat} \left\{ v_g \sum_i W_{g_i} + v_f \left[ \sum_i W_{f_i} + \sum_i W_{\ell_i} \right] + \frac{v_{fg}}{h_{fg}} \left[ \dot{Q}_i + \sum_j (h_{\ell_j} - h_f) W_{\ell_{ji}} \right] \right\} \\ + \sum_{sub} \left\{ \sum_i W_i \left[ v_{\ell_i} - h_{\ell_i} \left( \frac{\partial v_{\ell}}{\partial h_{\ell}} \right)_i \right] + \left( \frac{\partial v_{\ell}}{\partial h_{\ell}} \right) \left[ \dot{Q}_i + \sum_j (h W_{ji}) \right] \right\} \quad (3-19)$$

$$Y = \left[ \frac{\partial v_g}{\partial P} + \frac{v_{fg}}{h_{fg}} \left( \alpha v_g - \frac{dh_g}{dP} \right) \right] M_g + \left[ \frac{\partial v_f}{\partial P} + \frac{v_{fg}}{h_{fg}} \left( \alpha v_f - \frac{dh_f}{dP} \right) \right] M_f \\ + \sum_{sub} \left[ \left( \frac{\partial v_{\ell}}{\partial P} \right)_i + \alpha v_{\ell_i} \left( \frac{\partial v_{\ell}}{\partial h_{\ell}} \right)_i \right] M_{\ell_i} \quad (3-20)$$

#### e. 全体的な運動方程式

SAFERコードは下部プレナムと蒸気ドームの間で三つの経路を考えており、各ループの運動方程式を解いている。その三つの経路とは、炉心と健全側と破断側の二つに分けた冷却材再循環系である。

図 3-3 は、ジェットポンプ型BWRを例にして、原子炉压力容器内について運動方程式を解いているループを示した図である。それぞれのループは蒸気ドームからダウンカマを通り、ジェットポンプ

を経て下部プレナムに至る。そして、炉心、上部プレナムを通過して蒸気ドームに戻る。図 3-3 を参照してループ “a” 回りの運動方程式は次のようになる。

$$\Delta P_{1-2,s} + \Delta P_{2-3,s} + \Delta P_{JP,p} - \Delta P_{JP,f} - \Delta P_{3-4,s} - \Delta P_{3-4,f} = 0 \quad (3-21)$$

ここで、添字は、

$i-j$  :  $i$  から  $j$  への流路

$JP$  : ジェットポンプ

$s$  : 静圧差

$f$  : 摩擦又は局所損失による圧損

$p$  : 駆動流によるジェットポンプ部の圧力上昇

同様な式がループ “b” にも書ける。S A F E R コードは長時間の冷却材保有量の分布の計算を意図したコードであり、短時間の再循環ポンプの挙動の計算を意図しているものではない。後者の機能は L A M B コードによってなされる。したがって、S A F E R コードでは再循環ポンプはジェットポンプ内の圧力上昇分として簡単にモデル化されている。

各ループの再循環ポンプ流量は、コーストダウン時定数を用いて指数関数的に減衰するものとして、次式で与えられる。

$$W_p = W_{p_0} e^{-t/\tau} \quad (3-22)$$

ここで、

$W_p$  : 再循環ポンプ流量

$W_{p_0}$  : 初期再循環ポンプ流量

$\tau$  : コーストダウン時定数

この流量を用いて，ジェットポンプの圧力上昇分  $\Delta P_{JP,p}$  は次式で求められる。

$$\Delta P_{JP,p} = \Delta P_{JP,p_0} \left( \frac{W_p}{W_{p_0}} \right)^2 \quad (3-23)$$

ここで， $\Delta P_{JP,p_0}$  は，初期のジェットポンプの圧力上昇分を表す。

また，ジェットポンプの摩擦圧損は，それぞれのループに対して次のように計算される。

$$\Delta P_{JP,f} = \left( \frac{K}{A^2} \right)_{JP} \frac{(W_{RC} - W_p) |W_{RC} - W_p|}{\rho_f} \phi^2_{JP} \quad (3-24)$$

ここで，

$(K/A^2)$  : 圧損係数

$W_{RC}$  : ジェットポンプ出口流量

$\rho_f$  : 液相密度

$\phi^2_{JP}$  : 均質二相増倍係数

トランジェントの最初の数秒後，式（3-24）の  $W_p = 0$  ，  
 $W_{RC} - W_p \cong W_{RC}$  となり，両方のループは同一となる。炉心の摩擦圧損は三つの項の和で評価される。すなわち，炉心入口オリフィス部での局所圧損，燃料集合体の燃料棒部分の摩擦圧損，そしてスパーサと上部タイプレートによる一つにまとめた局所圧損（出口部で一つにまとめられている）である。



$$\Delta P_{3-4,f} = \left( \frac{K}{A^2} \right)_{SEO} \frac{W_{SEO}|W_{SEO}|}{\rho_f} \phi_{SEO}^2 + \left( \frac{fL}{D} \right)_{ch} \frac{W_{ch}|W_{ch}|}{2\rho_f} \phi_{\ell_0}^2 + \left( \frac{K}{A^2} \right)_{local} \frac{W_e|W_e|}{\rho_f} \phi_e^2 \quad (3-25)$$

ここで、

- $fL/D$  : 燃料集合体の燃料棒部分の摩擦圧損係数  
 $\phi_{\ell_0}^2, \phi_{SEO}^2, \phi_e^2$  : それぞれ、炉心平均、炉心入口オリフィス及び炉心出口の均質二相増倍係数  
 $A$  : 流路面積

添字  $e$  は炉心出口、 $ch$  は燃料集合体の燃料棒部分を示す。

対向流状態では、摩擦の項が非常に小さいため、 $\Delta P_{3-4,f}$  は次のように評価される。

$$\Delta P_{3-4,f} = \frac{1}{2} \left( \frac{fL}{D} \right)_{ch} \left[ \frac{W_{\ell,ch}|W_{\ell,ch}|}{\rho_f} + \frac{W_{g,ch}|W_{g,ch}|}{\rho_g} \right] \quad (3-26)$$

式 (3-24) と式 (3-25) を式 (3-21) に代入すると、それぞれのループの運動量保存式は、次のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta P_{1-2,s} + \Delta P_{2-3,s} + \Delta P_{JP,p} - \left( \frac{K}{A^2} \right)_{JP} \frac{(W_{RC} - W_p)(W_{RC} - W_p)}{\rho_f} \phi_{JP}^2 \\ - \Delta P_{3-4,s} - \left( \frac{K}{A^2} \right)_{SEO} \frac{W_{SEO}|W_{SEO}|}{\rho_f} \phi_{SEO}^2 - \left( \frac{fL}{D} \right)_{ch} \frac{W_{ch}|W_{ch}|}{2\rho_f} \phi_{\ell_0}^2 \\ - \left( \frac{K}{A^2} \right)_{local} \frac{W_e|W_e|}{\rho_f} \phi_e^2 = 0 \end{aligned} \quad (3-27)$$

さらに、下部プレナムの質量保存式より、次式が得られる。

$$\frac{W_{g,RC_a}}{\rho_g} + \frac{W_{\ell,RC_a}}{\rho_\ell} + \frac{W_{g,RC_b}}{\rho_g} + \frac{W_{\ell,RC_b}}{\rho_\ell} + \dot{m}_{fg} v_{fg}$$

$$- \frac{W_{\ell,SEO}}{\rho_\ell} - \frac{W_{g,SEO}}{\rho_g} - \frac{W_{L1} + W_{LEAK}}{\rho_\ell} - \frac{W_{brk}}{\rho_{brk}} + \dot{P} \left\{ M_f \frac{dv_f}{dP} + M_g \frac{dv_g}{dP} \right\} = 0$$

(3-28)

ここで、

$W_{L1}$  : 制御棒案内管から下部プレナムへの漏えい流量

$W_{LEAK}$  : バイパスから下部プレナムへの漏えい流量

$W_{brk}$  : 破断流量

$\rho_{brk}$  : 破断流の密度

式 (3-27) と式 (3-28) より下部プレナムが満水のときの再循環流量及び炉心入口流量が決定される。インターナルポンプ型 BWR に対しても同様に計算される。

### (3) 蒸気スリップ流

気液界面が存在する場合の気液界面に対する蒸気の相対速度は、Zuber-Findlay のドリフトフラックスモデル<sup>(3)</sup> あるいは Wilson の気泡上昇モデル<sup>(4)</sup>により求める。

SAFER コードでは蒸気泡上昇モデルとドリフトフラックスモデルによる蒸気スリップ流を両方計算し、それらのスリップ流のうち大きい方が、その領域から出る蒸気流量を決定する際に使用される。この場合、低

ボイド率低流量のときは気泡上昇相関式，高ボイド率高流量のときはドリフトフラックス相関式が自動的に使用されることになる。

a. ドリフトフラックスモデル

ドリフトフラックスモデルは，分布係数 $C_o$ 及びボイドで重み付けた蒸気ドリフト速度 $\bar{V}_{gj}$ を用いて蒸気の相対速度を求める。

水位面を通過する全体積流量 $j_{out}$ は，ノードの体積が一定であるという条件の下に質量保存式を解くと次式で与えられる。

$$j_{out} = j_{in} + \dot{m}_{fg} v_{fg} / A + \frac{\dot{P}}{A} \left\{ M_f \frac{dv_f}{dP} + M_g \frac{dv_g}{dP} \right\} \quad (3-29)$$

ここで，

- $j_{out}$  : 水位面の体積流束
- $j_{in}$  : ノード入口の体積流束

その時，水位面での気相及び液相の速度はそれぞれ次のようになる。

$$U_g = C_o j_{out} + \bar{V}_{gj} \quad (3-30)$$

$$U_f = \frac{j_{out} - \alpha_e U_g}{1 - \alpha_e} \quad (3-31)$$

ここで，

- $U_g$  : 気相速度
- $U_f$  : 液相速度
- $\alpha_e$  : 水位面でのボイド率

水位面を離れる蒸気流量  $W_{g,sw}$  は、次式で表される。

$$W_{g,sw} = \rho_g A \alpha_e (U_g - U_f) \quad (3-32)$$

b. 気泡上昇モデル

水の速度に対する蒸気泡の相対上昇速度は、Wilson の関係式を用いても計算される。この関係式により、圧力、ボイド率、及び水力直径の関数としての蒸気泡の相対上昇速度  $\bar{V}_R$  が得られる。

$$\bar{V}_R = \left[ \frac{\alpha_e}{0.136h(P)f(P)} \right]^{1/1.78} \left[ D_{H_i} f(P)^{1/0.19} g \right]^{0.5} \quad ; \quad \frac{\alpha_e}{h(P)f(P)} \leq 2.840852 \quad (3-33)$$

$$\bar{V}_R = \left[ \frac{\alpha_e}{0.75h(P)f(P)} \right]^{1/0.78} \left[ D_{H_i} f(P)^{1/0.19} g \right]^{0.5} \quad ; \quad \frac{\alpha_e}{h(P)f(P)} > 2.840852 \quad (3-34)$$

ここで、

$$h(P) = \left( \frac{\rho_g}{\rho_f - \rho_g} \right)^{0.32} \quad (3-35)$$

$$f(P) = \left[ \frac{1}{D_{H_i}} \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_f - \rho_g)g}} \right]^{0.19} \quad (3-36)$$

- $g$  : 重力加速度
- $D_H$  : 各ノードにおける水力直径
- $\alpha_e$  : 各ノードにおける出口ボイド率
- $\sigma$  : 表面張力

$\rho_g$  : 蒸気の密度

$\rho_f$  : 飽和水の密度

各ノードからの蒸気流量  $W_{g,sw}$  は、蒸気泡上昇モデルから次式のように計算される。

$$W_{g,sw} = \rho_g A_e \alpha_e V_R \quad (3-37)$$

#### (4) 炉心内流動

CCFLは、幾何学的に狭くなった流路において、重力による液体の下降流が、蒸気の上昇流により制限を受ける現象である。

SAFERコードでは、炉心入口オリフィス（炉心入口部）、上部タイププレート（炉心出口部）、炉心バイパス頂部及び炉心バイパス底部の4箇所でCCFLを考慮している。特に重要な場所は、燃料集合体の上部タイププレート（炉心上部）と炉心入口オリフィス（炉心下部）である。炉心上部におけるCCFLは、注入された炉心スプレイ水の炉心への下降流を遅らせるが、一方、炉心下部におけるCCFLは、燃料集合体からの下部プレナムへの落下水を減少させ、炉心の冷却材保有量を維持する効果がある。SAFERコードでは、これら炉心上部、下部において水の下降流を予測するのに、Wallis型の相関式<sup>(5)</sup>を用いている。この関係式を、以下に示す。

$$(j_g^*)^{1/2} D^{1/4} + K_1 (j_f^*)^{1/2} D^{1/4} = K_2 D^{1/4} \quad (3-38)$$

ここで、

$$j_g^* = j_g \left[ \frac{\rho_g}{g_c D (\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (3-39)$$

$$j_f^* = j_f \left[ \frac{\rho_f}{g_c D (\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (3-40)$$

$K_1$ ,  $K_2$  は定数であり,  $D$  は形状固有の値である。この関係式における  $K_1$  及び  $K_2 D^{1/4}$  は, 実験データから得られる。

また, 再冠水過程において下部プレナムに二相水位が形成されている場合, 炉心中心部の出力の高い燃料集合体では気液並行上昇流, 炉心周辺部の出力の低い燃料集合体では水の下降流 (CCFLブレイクダウン) が生じることが実験により示されている。これらの流動を次のようにモデル化している。

a. 気液並行上昇流モデル<sup>(6)(7)</sup>

炉心中心部の一部の出力の高い燃料集合体内では気液並行上昇流が生じる。下部プレナムの水面下で発生した蒸気は, ジェットポンプ, 又は, インターナルポンプを通過してダウンコマ部へ流れるものと炉心へ流れるものとに分けられる。SAFERコードでは, 多チャンネル効果を模擬するために, 炉心 (ノード3) と独立した高出力燃料集合体 (ノード9) を設けて気液並行上昇流を考慮する。

炉心及び高出力燃料集合体内の全圧損特性をもとに気液並行上昇流の生じる燃料集合体の体数を求めるとともに, 熱水力計算については, 炉心と高出力燃料集合体とに対して, 次式に示す差圧バランス並びに炉心入口オリフィスの蒸気量バランスを考慮し, 下部プレナムからの蒸気流入量を求める。

$$\Delta P_{CORE}^{AVE} = \Delta P_{CORE}^{HOT} \quad (3-41)$$

$$W_{g,LP} = W_{g,SEO}^{AVE} \cdot (N_T - N_{HOT}) + W_{g,SEO}^{HOT} \cdot N_{HOT} \quad (3-42)$$

ここで,

- $\Delta P_{CORE}^{AVE}$  : 炉心領域の全圧損  
 $\Delta P_{CORE}^{HOT}$  : 高出力燃料集合体の全圧損  
 $W_{g,LP}$  : 下部プレナムから炉心へ流入する総蒸気量  
 $W_{g,SEO}^{AVE}$  : 炉心領域の炉心入口オリフィスを通過する蒸気量  
 $W_{g,SEO}^{HOT}$  : 高出力燃料集合体の炉心入口オリフィスを通過する蒸気量  
 $N_T$  : 全燃料集合体数  
 $N_{HOT}$  : 気液並行上昇流が生じる燃料集合体数

b. CCF Lブレークダウンモデル

CCF Lブレークダウン現象は、炉心スプレイスパーチャが二相プール水で水没している場合、上部プレナムに注入されたスプレイ水により周辺燃料集合体上部にサブクール域の局在化が生じ、上部プレナムの冷却水が周辺燃料集合体を通して下部プレナムへ落下する現象である。SAFERコードでは、この現象をCCF Lブレークダウンモデルとして模擬しており、上部プレナムの冷却水を下部プレナムに移動する。すなわち、上部プレナムの水位がスプレイスパーチャ位置より高くなり、かつ、上部プレナム内に流入したサブクール水による蒸気凝縮割合がCCF Lブレークダウン条件を満足したときにブレークダウンが生じるとしている。

$$C_D = \frac{\sum W_g \cdot h_{fg}}{\sum W_\ell (h_f - h_\ell)} < C_{D\max} \quad (3-43)$$

ここで、

- $C_D$  : 凝縮係数  
 $W_g$  : 上部プレナムに流入する蒸気流量  
 $W_\ell$  : 上部プレナムに流入する未飽和水流量

- $h_\ell$  : 上部プレナムに流入する未飽和水のエンタルピ  
 $h_f$  : 飽和水のエンタルピ  
 $h_{fg}$  : 蒸発潜熱  
 $C_{D\max}$  : C C F L ブレークダウン条件を定める定数

上式における  $C_D$  は、上部プレナム内に流入した冷却水が、蒸気の凝縮に寄与する割合を示している。 $C_{D\max}$  は BWR プラントの炉心及び上部プレナムを実寸大で分割模擬した実験の結果に基づいて決められている。

#### c. 高出力燃料集合体モデル

出力の高い燃料集合体の熱水力挙動及び燃料棒ヒートアップ挙動を評価するため、高出力燃料集合体モデルを適用している。この高出力燃料集合体は、炉心（ノード3）と独立したノードとして扱う。炉心の熱水力挙動を知るための質量、エネルギー及び運動量保存式は、炉心の平均出力燃料集合体だけを用いて求める。これらの計算により、炉心の平均出力燃料集合体の水位及び燃料被覆管温度の他に、原子炉内各部に分配される冷却水の質量、炉心上部・下部プレナム間の差圧、下部プレナムの減圧沸騰による蒸気発生量等を求めている。

高出力燃料集合体モデルは、炉心の上部・下部プレナムの差圧に基づき高出力燃料集合体への流入蒸気量を求める。これをもとに、高出力燃料集合体の熱水力過渡変化及び燃料棒ヒートアップが計算される。なお、高出力燃料集合体の熱水力過渡変化は、炉心の平均出力燃料集合体計算で用いられるものと同じ熱水力モデルを用いて求めている。



## (5) 破断流

破断箇所は S A F E R モデルにおける任意のノードに、独立に、最大 5 箇所まで設定することができ、その破断面積は時間の関数として変化させることができる。破断流量は Moody のスリップ流モデル<sup>(8)</sup>又は平衡均質流モデル<sup>(9)</sup>に基づく臨界流を適用して計算する。

破断流の計算に用いる圧力は原子炉圧力と破断口中心より上の二相流の静水圧を加えたものを用いる。

また、破断流の計算に用いるエンタルピは、破断口が接続するノードのエンタルピとなるが、二つのノードが重なる場合は、混合長さの加重平均エンタルピが用いられる。

有効性評価では、設計基準事故の L O C A と同様に、破断口及び S R V からの流出流量の計算に平衡均質流モデルを使用する。

## (6) 注水系

BWR プラントには、冷却水を原子炉に直接注入できる注水系が多数ある。例えば、BWR-5 の E C C S は、炉心上部に注水する高圧炉心スプレイ系（以下「H P C S」という。）及び低圧炉心スプレイ系（以下「L P C S」という。）、炉心バイパスに注水する低圧注水系（以下「L P C I」という。）で構成されるが、他のプラントでは再循環配管やダウンカマに注水されるようになっているものもある。これらの E C C S に加えて、原子炉隔離時に崩壊熱を除去するための R C I C がある。S A F E R コードは、これらの注水系を模擬することができる。

注水流量は、原子炉圧力の関数となる。S A F E R コードでは、停止・再起動等の多重機能を設けている。図 3-4 にこのロジックを示す。

時刻  $t_1$  で原子炉圧力や原子炉水位、ドライウェル圧力による起動信号を

受ける。ディーゼル発電機の起動時間や弁開時間等の遅れを考慮して時刻  $t_2$  で注水が始まる。注水流量はポンプの  $Q-H$  特性で決まる。

原子炉圧力や原子炉水位等で注水停止信号を模擬でき、時刻  $t_3$  で停止信号が入ると、時間遅れを考慮した  $t_4$  で注水が停止する。

これらを用いていくつかの再起動や停止ロジックを模擬することができる。

有効性評価で考慮する原子炉代替注水設備は、運転操作を含めてこれらの注水系モデルを用いて取り扱うことができる。

### 3.3.2 炉心ヒートアップモデル

#### (1) ノード分割

SAFERコードでは、燃料や燃料被覆管の温度変化については径方向熱伝導モデルを用い、原子炉圧力容器や他の内部構造物については、ヒートスラブモデルを用いて模擬している。

##### a. 燃料と燃料被覆管

燃料棒は、径方向に燃料ペレットを3ノード及び燃料被覆管を2ノードに分割している。また、燃料棒発熱部の軸方向は、実験解析で妥当性を確認した10ノード分割とする。燃料棒の温度変化は、軸方向及び周方向の熱伝導を無視した円筒形モデルを用いた熱伝導方程式を解くことにより得られる。

##### b. 燃料集合体と燃料棒

燃料集合体は平均出力燃料集合体と高出力燃料集合体に分け、それぞれに対して平均出力燃料棒と高出力燃料棒の2種類の燃料棒を考慮して

いる。平均出力燃料棒は、燃料棒から冷却材への伝熱計算に使用し、燃料集合体内の熱水力挙動が求められる。高出力燃料棒は燃料集合体上部のCCFLを厳しく評価するため燃料集合体内蒸発量計算に使われる。

PCTは、高出力燃料集合体と平均出力燃料集合体のそれぞれの燃料棒の燃料被覆管温度の中の最大値とする。

### c. 原子炉压力容器と原子炉内構造物

原子炉压力容器は最大七つに区分されたヒートスラブで模擬しており、それぞれのヒートスラブの表面熱伝達はそのヒートスラブの面している各領域内のボイド率の関数で与えられる。

原子炉内構造物は六つのヒートスラブ；蒸気乾燥器，上部プレナムドーム，炉心シュラウド壁，制御棒案内管，チャンネルボックス，制御棒に分けて模擬する。

これらのヒートスラブのうち，四つ（上部プレナムドーム，炉心シュラウド壁，制御棒案内管，チャンネルボックス）は内壁と外壁が別の領域に面していることを模擬しているため，ヒートスラブの数は10となる。

## (2) 熱伝導方程式

燃料ペレット及び燃料被覆管の温度変化は，円筒座標の熱伝導方程式を解くことにより得られる。軸方向及び周方向の熱伝導は無視している。この方程式は次式で与えられる。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + Q''' \quad (3-44)$$

ここで，

- $\rho$  : 燃料ペレット又は燃料被覆管の密度  
 $C_p$  : 燃料ペレット又は燃料被覆管の比熱  
 $k$  : 燃料ペレット又は燃料被覆管の熱伝導率  
 $T$  : 燃料ペレット又は燃料被覆管の温度  
 $t$  : 時間  
 $r$  : 半径方向距離  
 $Q'''$  : 発熱量

なお、CHASTEコードにおいても同じ式が用いられている。

原子炉圧力容器及び内部構造物のヒートスラブの温度変化は次式で表せる。

$$\frac{dT_k}{dt} = -\frac{q_k}{C_k} = -\frac{1}{C_k} \sum_i \frac{(T_k - T_i) F_i}{R_k + \frac{1}{H_i A_k}} \quad (3-45)$$

ここで、

- $q_k$  : ヒートスラブ  $k$  の熱量  
 $C_k$  : ヒートスラブ  $k$  の熱容量  
 $R_k$  : ヒートスラブ  $k$  の熱抵抗  
 $A_k$  : ヒートスラブ  $k$  の伝熱面積  
 $H_i$  : 熱水力ノード  $i$  への熱伝達係数  
 $F_i$  : 熱水力ノード  $i$  に接するヒートスラブ  $k$  の伝熱面積のうち、水面以下の部分に接する割合  
 添字  $k$  は  $k$  番目のヒートスラブ、添字  $i$  は  $i$  番目の熱水力ノードを示す。

### (3) 熱源

SAFERコードでは熱源として、核分裂による出力、核分裂生成物の

崩壊熱，アクチニドの崩壊熱及びジルコニウム-水反応による発熱を考慮している。核分裂による出力，核分裂生成物の崩壊熱及びアクチニドの崩壊熱は，初期炉心出力に対する割合として時間の関数として入力する。各燃料棒での熱発生率は，炉心平均の熱発生率に各々対応するピーキング係数を乗じて決定される。

有効性評価では，核分裂による出力変化はREDDY等により計算される運転時の異常な過渡変化あるいは設計基準事故の出力変化，崩壊熱はANSI/ANS-5.1-1979<sup>(10)</sup>に基づく計算結果を使用する。

#### (4) 熱伝達

燃料棒から冷却材への熱伝達は，核沸騰，膜沸騰，そして遷移沸騰の適切な熱伝達事象から決定される熱伝達係数を用いて計算される。遷移沸騰は核沸騰と膜沸騰の間の円滑な遷移をモデル化したものである。また，露出部の冷却には，蒸気冷却，噴霧流冷却，落下水（スプレー）冷却，及び輻射熱伝達を考慮している。

なお，輻射熱伝達は，高出力燃料棒から平均出力燃料棒への輻射及び平均出力燃料棒からチャンネルボックスへの輻射のみが考慮されている。

熱伝達の沸騰事象を決める計算ロジックを図3-5に示す。また，熱伝達係数計算モデルの一覧を表3-3に示す。

##### a. 核沸騰熱伝達

核沸騰熱伝達係数は，冷却材のボイド率の関数として模擬している。

このモデルは，図3-6に示すように三つの領域に分け，それぞれの境界の値を入力する。図3-6のH3は強制対流核沸騰，H2は未飽和单相強制対流，そしてH1は蒸気单相強制対流に対する熱伝達係数の代表値である。

未飽和沸騰は考慮せず，飽和沸騰が生じるまで，未飽和単相強制対流の熱伝達係数を用いることにより，燃料棒の除熱量を保守的に評価する。

核沸騰熱伝達は，膜沸騰熱伝達等の他の熱伝達に比べて熱伝達係数が非常に大きく，核沸騰熱伝達係数が継続する期間に燃料被覆管温度が上昇することはない。したがって，核沸騰熱伝達係数の変化が P C T に与える影響は小さいため，核沸騰熱伝達の単純なモデル化が可能である。

#### b. 膜沸騰熱伝達

膜沸騰熱伝達係数は，対流膜沸騰に関しては e. 節で述べる噴霧流冷却熱伝達式，プール及び低流量膜沸騰に関しては，修正 Bromley の式<sup>(11)</sup>で計算する。

修正 Bromley の式は次式で表される。

$$H_{MB} = H_{FB} + H_R \quad (3-46)$$

プール膜沸騰熱伝達係数  $H_{FB}$  及び輻射熱伝達係数  $H_R$  は次のように計算される。

$$H_{FB} = 0.62 \left\{ \frac{K_g^3 \rho_g (\rho_f - \rho_g) h_{fg} g}{\mu_g (T_W - T_S) L_H} \right\}^{1/4} \quad (3-47)$$

$$H_R = \sigma_R \varepsilon \left( \frac{T_W^4 - T_S^4}{T_W - T_S} \right) \quad (3-48)$$

ここで，

- $K_g$  : 飽和蒸気の熱伝導率
- $\rho_f$  : 飽和水の密度
- $\rho_g$  : 飽和蒸気の密度
- $h_{fg}$  : 蒸発潜熱
- $g$  : 重力加速度

- $\mu_g$  : 飽和蒸気の粘性  
 $L_H$  : 膜の長さ  
 $T_w$  : 表面温度  
 $T_S$  : 冷却材の飽和温度  
 $\sigma_R$  : Stefan-Boltzmann 定数  
 $\varepsilon$  : 燃料被覆管の輻射率

膜沸騰熱伝達係数としては、噴霧流冷却熱伝達式を用いた値  $H_M$  と修正 Bromley 相関式を用いた値  $H_{MB}$  を両方計算し、ボイド率で以下のように重み付けをしている。

局所的なボイド率が 1 に近づいたときは、膜沸騰熱伝達係数は单相蒸気冷却モードへ連続的に移行するため、高流量時の膜沸騰に適用される  $H_M$  を使用する。一方、低ボイド率の領域では、プール膜沸騰又は低流量時の膜沸騰に適用される  $H_{MB}$  がより適切である。その中間の領域の膜沸騰熱伝達係数は、ボイド率により  $H_{MB}$  と  $H_M$  の間を内挿して求める。以上の膜沸騰熱伝達係数をまとめて図 3-7 に示す。

### c. 遷移沸騰熱伝達

遷移沸騰は、核沸騰と膜沸騰の間を連続的に変化させるためにモデル化されており、冷却材のクオリティが限界値以下で、かつ、燃料被覆管の過熱度が最小安定膜沸騰温度以下のときに適用される。冷却材クオリティが限界値以上になると、核沸騰から膜沸騰へ急激な変化がおこる。

遷移沸騰の熱伝達は、核沸騰と膜沸騰の熱伝達係数の対数値が直線的に変化するものとし、模擬している（図 3-8）。

$$\log H_{TB} = \log H_{NB} - \frac{\Delta T - \Delta T_{CHF}}{\Delta T_{MIN} - \Delta T_{CHF}} (\log H_{NB} - \log H_{FB}) \quad (3-49)$$

ここで,

- $H_{TB}$  : 遷移沸騰熱伝達係数
- $H_{NB}$  : 限界熱流束時の温度での核沸騰熱伝達係数
- $H_{FB}$  : 最小安定膜沸騰温度での膜沸騰熱伝達係数
- $\Delta T$  : 過熱度
- $\Delta T_{MIN}$  : 最小安定膜沸騰温度
- $\Delta T_{CHF}$  : 限界熱流束温度

遷移沸騰は比較的短い過渡期間で生じ、PCTに与える影響は小さいため、このような補間モデルが可能である。

#### d. 蒸気冷却熱伝達

SAFERコードでは、燃料棒が露出している部分で、下部プレナム及び燃料集合体からの蒸気による冷却効果を考慮している。蒸気冷却熱伝達係数は、蒸気単相流に対する Dittus-Boelter の式<sup>(12)</sup>を使用している。

$$H_v = 0.023 \frac{K_v}{D_h} \text{Re}_s^{0.8} \text{Pr}_s^{0.4} \quad (3-50)$$

ここで,

- $H_v$  : 蒸気冷却熱伝達係数
- $K_v$  : 蒸気の熱伝導率
- $D_h$  : 水力直径
- $\text{Re}_s$  : 蒸気のレイノルズ数



$Pr_s$  : 蒸気のプロントル数

蒸気の物性値は燃料集合体軸方向ノードごとに上流ノード出口の蒸気温度（過熱を考慮）を境界条件として評価する。

e. 噴霧流冷却熱伝達

蒸気に液滴が混入した噴霧流状態の熱伝達係数は、Sun のモデルと Saha のモデルを組み合わせたモデル<sup>(13)</sup>を適用する。

液滴による熱伝達の促進は Sun のモデル<sup>(14)</sup>に基づき以下のように表すことができる。

$$H_M = \frac{K_v}{D_h} \left[ 2X - 1 + \frac{(Nu_s + 1)^2}{Nu_s + 1 + 2X} \right] = \frac{K_v}{D_h} \left[ Nu_s + \frac{4X^2}{Nu_s + 1 + 2X} \right] \quad (3-51)$$

ここで、 $Nu_s$ は Dittus-Boelter の式による蒸気単相熱伝達のヌセルト数、 $X$ は液滴による熱伝達向上の程度を決めるパラメータであり、次式で与えられる。

$$Nu_s = 0.023 Re_s^{0.8} Pr_s^{0.4} \quad (3-52)$$

$$X = \frac{D_h}{2} \sqrt{\frac{\beta h_v}{K_v h_{fg}}} \quad (3-53)$$

$$\beta = \frac{6 H_{v,d} (1 - \alpha)}{d_d} \quad (3-54)$$

$$H_{v,d} = \frac{K_v}{d_d} \left[ 2 + 0.459 \left\{ \frac{\rho_v U_r d_d}{\mu_v} \right\}^{0.55} Pr_g^{1/3} \right] \quad (3-55)$$

$H_{v,d}$ は、蒸気と液滴間の界面熱伝達率であり、 $d_d$ は液滴の平均直径、 $U_r$ は相対速度である。

蒸気の物性値は燃料集合体軸方向ノードごとに上流ノード出口の蒸気温度（過熱を考慮）を境界条件として評価する。

噴霧流冷却熱伝達時においては蒸気の温度は一般に飽和温度よりも高くなる。そこで、この効果を考慮するため、蒸気温度は Saha の式<sup>(15)</sup>を用いて計算する。Saha によれば、単位体積あたりの液滴蒸発量 $\Gamma_v$ は次式で与えられる。

$$\Gamma_v = K_1 \frac{K_v (T_v - T_s)(1 - \alpha)}{D_h^2 h_{fg}} \quad (3-56)$$

$$K_1 = 6300 \left( 1 - \frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \left\{ \left( \frac{\rho_v j_v}{\alpha} \right)^2 \frac{D_h}{\rho_v \sigma} \right\}^{1/2} \quad (3-57)$$

ここで、

$K_v$  : 蒸気の熱伝導率

$T_v$  : 蒸気の温度

$T_s$  : 飽和温度

$\alpha$  : ボイド率

$D_h$  : 水力等価直径

$h_{fg}$  : 蒸発潜熱

$P$  : 圧力

$P_{cr}$  : 臨界圧力

$\rho_v$  : 蒸気の密度

$j_v$  : 蒸気の流速

$\sigma$  : 表面張力

Saha のモデルでは、上式をもとにして、加熱面から蒸気への伝熱量、過熱蒸気から液滴への伝熱量、さらに、軸方向のクオリティ変化等を連立させることにより蒸気の軸方向温度分布を求める。

液滴上昇流（エントレインメント）における液滴の平均直径は、臨界ウェーバー数  $We_c$  から次式で計算する。

$$d_d = \frac{\sigma We_c}{\rho_v U_r^2} \quad (3-58)$$

液滴が落下する場合は、2種類の液滴を考慮する。一つは、上部タイプレートにおける上昇蒸気流と液体の相互作用による液体の崩壊によって形成される液滴である。もう一つは、燃料棒及びチャンネルボックスの壁面を落下する液膜のクエンチフロントで形成される液滴であり、壁面からの急速な伝熱によりスパッタリングが起こる。液滴の平均直径は液滴の質量と液滴密度の保存式を使用して評価することができる。

$$d_d = \left[ \frac{W_{UTP} + W_{SPUTTER}}{\frac{W_{UTP}}{d_{d,UTP}^3} + \frac{W_{SPUTTER}}{d_{d,SPUTTER}^3}} \right]^{1/3} \quad (3-59)$$

ここで、 $W$ は液滴の質量流量であり、添字の  $UTP$  は上部タイプレートで発生する液滴、 $SPUTTER$  はスパッタリングで発生する液滴を表す。

SAFERコードでは、液滴界面の熱伝達係数は液滴の流れ方向に応じて、式 (3-53)、式 (3-56) あるいは式 (3-57) により計算する。

#### f. スペーサの効果

d. 節で述べた蒸気（単相）冷却熱伝達及び e. 節で述べた噴霧流冷却熱伝達においては、スペーサの直後で流れが乱されることにより熱伝

達がよくなる現象が実験により明らかになった<sup>(16)</sup>。このスぺーサの乱流促進効果を実寸大の電気加熱集合体による蒸気（単相）冷却実験装置 R R T F（Refill Reflood Test Facility）による実験データから求めた結果、次式が得られた。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left( 1 + \frac{1.72}{\ell/d} \right) \quad (3-60)$$

ここで、

$\ell$  : 各スぺーサ後端からの距離

$d$  : 水力等価直径

スぺーサの乱流促進効果による熱伝達の向上は、右辺の括弧内の係数で与えられる。

噴霧流冷却熱伝達に関しても乱流促進効果は、蒸気単相冷却熱伝達の場合と同様に上記括弧内の補正により与えられる。

なお、本モデルの使用はオプションで、有効性評価では保守的に使用しない。

#### g. 落水水（スプレイ）熱伝達

落水水（スプレイ）による熱伝達係数は、スプレイ熱伝達実験装置 S H T F（Spray Heat Transfer Test Facility）による実験データより得られ、高出力燃料棒と平均出力燃料棒のそれぞれに対して、燃料集合体内に落下する水量とロッド表面過熱度及び圧力の関数としてモデル化している<sup>(13)</sup>。また、炉心スプレイ開始以前でも C C F Lにより上部プレナムから液滴落下がある場合には落水水熱伝達を考慮する。

$$h_{SP} = \alpha W^\beta \cdot P^{(\gamma \Delta T_S + \delta)} \quad (3-61)$$

ここで,

- $h_{SP}$  : 熱伝達係数
- $W$  : 落水量
- $P$  : 圧力
- $\Delta T_s$  : ロッド表面過熱度
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  : 係数

#### h. 輻射熱伝達

SAFERコードの燃料棒及び燃料被覆管の熱伝達モデルは、ほとんどCHASTEコードと同じであるが、CHASTEコードではそれぞれの燃料棒と周囲のチャンネルボックス、燃料棒間の複雑な輻射熱伝達の経路をモデル化しているのに対し、SAFERコードでは高出力燃料棒と平均出力燃料棒の2本を扱っており、それぞれの周辺温度を考慮して輻射熱伝達をモデル化している。

周辺温度は、高出力燃料棒に対しては平均出力燃料棒の温度、平均出力燃料棒に対してはチャンネルボックスの温度としている(図3-9)。輻射による伝熱は、次式で与えられる輻射熱伝達係数を用いて計算される。

$$H_R = \sigma_R \varepsilon \left( \frac{T_W^4 - T_B^4}{T_W - T_{sat}} \right) \quad (3-62)$$

ここで,

- $H_R$  : 輻射熱伝達係数
- $T_W$  : 燃料被覆管表面温度
- $T_B$  : 周辺温度
- $T_{sat}$  : 飽和温度

$\varepsilon$  : 輻射率

$\sigma_R$  : Stefan-Boltzmann 定数

SAFERコードでは、周辺温度として用いる燃料棒とチャンネルの濡れも考慮している。

i. 燃料棒とチャンネルの濡れモデル

SAFERコードにおいては、落下水による壁面濡れ効果は燃料棒及びチャンネルで考慮される。燃料棒とチャンネルでは伝熱面の数が1面か2面かの違いはあるが、濡れモデルそのものは同様の考え方を採用している。モデルの概要は図 3-10 に示すとおりであり、先端でスパッタリングをおこす液膜が順次下方に進行していく。このクエンチフロントの進行速度を $U_{fr}$ として二次元（軸方向，半径方向）の熱伝導解析から得た Andersen による次式を用いる<sup>(17)</sup>。

$$U_{fr} = \frac{K_w}{\rho_w C_w d_w} \left\{ (Bi \cdot \theta^{-\sqrt{\pi}})^{1.5} + 2^{-\frac{3}{4}\sqrt{\pi}} (Bi \cdot \theta^{-\sqrt{\pi}})^3 \right\}^{1/3} \bigg/ \exp\left(1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2}\right) \quad (3-63)$$

ここで、

$K_w$  : 熱伝導率

$\rho_w$  : 密度

$C_w$  : 比熱

$d_w$  : 水力直径

また、無次元数は次式で定義されている。

$$Bi = \frac{h_{fr} d_w}{K_w} \quad (3-64)$$

$$\theta = \left[ \frac{(T - T_s)(T - T_0)}{(T_0 - T_s)^2} \right]^{1/2} \quad (3-65)$$

SAFERコードにおいては、濡れに関する熱伝達係数 $h_{fr}$ として、クエンチフロントについては $1.13 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ 、既に濡れた壁と流下液膜間については核沸騰の値 $3.0 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ をそれぞれ用いている。また、ライデンフロスト温度 $T_0$ は $T_{sat}$ （飽和温度）+65°Cを採用している。

#### (5) ジルコニウム－水反応

燃料被覆管と水との反応による反応熱及び酸化量の計算は Baker-Just の式<sup>(18)</sup>により計算し、蒸気の供給に制限がないものとする。また、蒸気を反応温度まで上げるためのエネルギーは必要としないものと仮定する。この二つの仮定により反応熱を大きく見積もる。

化学反応式は次式で与えられる。



ここで、 $\Delta H$ は反応熱であり、燃料被覆管温度の関数として次式で表される。

$$\Delta H = R_3 - R_4(T + 273) \quad (3-67)$$

ここで、

$R_3, R_4$  : Baker-Just に基づく定数

$T$  : 燃料被覆管温度

また、燃料被覆管の酸化割合は次式で表される。

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{R_1}{\delta} \exp\left(-\frac{R_2}{T+273}\right) \quad (3-68)$$

ここで,

- $\delta$  : 燃料被覆管酸化厚さ  
 $R_1, R_2$  : Baker-Just に基づく定数

酸化厚さは、式 (3-68) を積分し、次式で与えられる。

$$\delta_2 = \left\{ \delta_1^2 + 2R_1(t_2 - t_1) \exp\left(-\frac{R_2}{T_{av} + 273}\right) \right\}^{1/2} \quad (3-69)$$

ここで,

- $\delta_1$  : 時刻  $t_1$  における酸化厚さ  
 $\delta_2$  : 時刻  $t_2$  における酸化厚さ  
 $T_{av}$  : 時刻  $t_1$  から  $t_2$  までの間の燃料被覆管平均温度

発熱割合は、反応熱と燃料被覆管酸化割合の積であり、燃料被覆管酸化割合は燃料被覆管の密度、表面積、及び酸化膜成長割合の積である。

したがって、発熱割合は次式で与えられる。

$$\dot{Q}_R = \Delta H \cdot \dot{M}_{zr} = \Delta H \cdot \rho_{zr} \cdot A \cdot \left( \frac{d\delta}{dt} \right) \quad (3-70)$$

ここで,

- $\dot{Q}_R$  : 発熱割合  
 $\dot{M}_{zr}$  : 燃料被覆管酸化割合  
 $\rho_{zr}$  : 燃料被覆管密度  
 $A$  : 燃料被覆管表面積  
 $d\delta/dt$  : 燃料被覆管酸化膜成長割合



燃料被覆管が破裂すると計算される場合には、その時点以降破裂箇所近傍の内面も反応するとし、これも同様の方法で計算する。

#### (6) ギャップ熱伝達

過渡時の燃料ペレット－燃料被覆管ギャップ熱伝達係数は、定常時のギャップ熱伝達係数評価モデルと同じ、Ross and Stouteに基づくモデル<sup>(19)</sup>を用いて計算する。

ギャップ熱伝達係数は次の3成分からなるとする。

$$h_g = h_s + h_f + h_r \quad (3-71)$$

ここで、

$h_g$  : ギャップ熱伝達係数

$h_s$  : 燃料ペレットと燃料被覆管の接触による熱伝達成分

$h_f$  : ギャップ中のガスの熱伝導による熱伝達成分

$h_r$  : 燃料ペレットと燃料被覆管の間の輻射による熱伝達成分

なお、ギャップ熱伝達係数の初期値及び過渡計算に用いるギャップ内のガス組成等は、燃料棒熱機械設計コードPRIME Ver. 1（以下「PRIME」という。）<sup>(20)(21)</sup>から引き継ぐ。

##### a. 固体接触による熱伝達成分

燃料ペレットと燃料被覆管の接触による熱伝達係数 $h_s$ は次式により計算する。

$$h_s = \frac{K_m \cdot P_c}{A_0 \cdot H_m \left( \frac{R_c^2 + R_p^2}{2} \right)^{1/4}} \quad (3-72)$$

ここで、

$K_m$  : 燃料ペレットと燃料被覆管の平均熱伝導率

$$K_m = \frac{2K_c \cdot K_p}{K_c + K_p}$$

$K_c$  : 燃料被覆管熱伝導率

$K_p$  : 燃料ペレット熱伝導率

$P_c$  : 燃料ペレットと燃料被覆管の接触圧力

$A_0$  : 定数

$H_m$  : 燃料被覆管メイヤー硬さ

$R_c$  : 燃料被覆管内表面粗さ

$R_p$  : 燃料ペレット表面粗さ

b. ガスによる熱伝達成分

ギャップ中のガスの熱伝導による熱伝達係数  $h_f$  は次式により計算する。

$$h_f = \frac{K_f}{C(R_c + R_p) + (g_1 + g_2) + R_{eff}} \quad (3-73)$$

ここで、

$K_f$  : 混合ガスの熱伝導率

$C$  : 燃料ペレット－燃料被覆管接触圧の関数

$R_c, R_p$  : 燃料被覆管内表面粗さ及びペレット表面粗さ

$(g_1 + g_2)$  : 混合ガスの温度ジャンプ距離

$R_{eff}$  : 燃料ペレットと燃料被覆管の実効半径ギャップ

c. 輻射による熱伝達成分

燃料ペレットと燃料被覆管の間の輻射による熱伝達係数  $h_r$  は次式により計算する。

$$h_r = \frac{\sigma(T_p^4 - T_c^4)}{\left[ \frac{S_p}{S_c} \left( \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) + \left( \frac{1}{\varepsilon_p} - 1 \right) + G_g \right] (T_p - T_c)} \quad (3-74)$$

ここで、

- $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 定数
- $T_p$  : 燃料ペレット表面温度
- $T_c$  : 燃料被覆管内面温度
- $S_p$  : 燃料ペレット表面積
- $S_c$  : 燃料被覆管内面積
- $\varepsilon_c$  : 燃料被覆管内面の輻射率
- $\varepsilon_p$  : 燃料ペレット表面の輻射率
- $G_g$  : 形態係数

(7) 膨れ・破裂

燃料被覆管の膨れは、燃料棒プレナム部とギャップ部の温度及び体積から燃料棒内圧を評価し、燃料被覆管内外圧力差から燃料被覆管の周方向応力を求め、燃料被覆管の歪量をこの周方向応力に基づき求めている。

また、燃料被覆管の破裂は実験に基づく周方向応力のベストフィット曲線に基づいて判定する。図 3-11 に燃料棒に破裂が発生する時点の燃料被覆管温度と燃料被覆管応力の関係を示す。

a. 燃料棒内圧

燃料棒内圧  $P_g$  は、燃料棒プレナム部とギャップ部の圧力が等しいとして、温度及び体積の変化を考慮して次式で計算する。

$$P_g = \frac{N \cdot R}{\frac{V_F}{T_F} + \frac{V_P}{T_P}} \quad (3-75)$$

ここで、

- $P_g$  : 燃料棒内圧
- $V_F$  : 燃料棒ギャップ体積
- $V_P$  : 燃料棒プレナム体積
- $T_F$  : 燃料棒ギャップ温度
- $T_P$  : 燃料棒プレナム温度
- $N$  : 燃料棒内ガスのモル数
- $R$  : 気体定数

b. 燃料被覆管の周方向応力

燃料被覆管の周方向応力  $\sigma$  は、燃料棒内外圧差より次式で計算する。

$$\sigma = \frac{D}{2t} (P_g - P) \quad (3-76)$$

ここで、

- $\sigma$  : 周方向応力
- $D$  : 燃料被覆管内径
- $t$  : 燃料被覆管肉厚
- $P$  : 冷却材圧力

c. 燃料被覆管の歪

燃料被覆管の歪  $\varepsilon$  は、弾性領域では燃料被覆管の周方向応力から次式により計算する。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left( 1 - \frac{\nu}{2} \right) \quad (3-77)$$

ここで、

$\varepsilon$  : 燃料被覆管の歪

$E$  : ヤング率

$\nu$  : ポアソン比

また、塑性変形は、実験データに基づき燃料被覆管破裂を起こす温度より 200 °F 低い温度に達した時点から始まるとする。

表 3-2 S A F E R コードの計算モデル一覧

項 目		計算モデル
ノード 分割	原子炉圧力容器内	9 ノードに分割 (図 3-1)
	原子炉圧力容器及 び原子炉内構造物	原子炉圧力容器は七つ, 原子炉内構造物は 六つに区分したヒートスラブで模擬
	燃料ペレットと燃 料被覆管	径方向に燃料ペレットを 3 ノード及び燃料 被覆管を 2 ノードに分割 燃料ペレット及び燃料被覆管の径方向に対 し, 円筒一次元熱伝導方程式を用いる 軸方向は発熱部を 10 ノードに分割
熱水力 モデル	保存則	熱力学的に均質, 平衡を仮定 各ノード: 質量保存式, エネルギー保存式 流れの経路全体: 運動量保存式
	蒸気スリップ流	気泡上昇モデルとドリフトフラックスモデルに よる蒸気スリップ速度を計算し, 大きい方を使 用
	炉心内流動	気液対向流モデル (Wallis 型の相関式) CCFL ブレークダウンモデル 気液並行上昇流モデル
	破断流	臨界流モデル及び差圧流モデル
	注水系	ECCS, RCIC 及び代替注水設備を模擬 (図 3-4)
炉心 ヒート アップ モデル	熱伝達	以下の熱伝達モードを考慮 <ul style="list-style-type: none"> <li>・核沸騰</li> <li>・膜沸騰</li> <li>・遷移沸騰</li> <li>・蒸気单相</li> <li>・噴霧流</li> <li>・スプレイ (落下水)</li> <li>・濡れ</li> <li>・輻射</li> </ul>
	熱源	核分裂による発生熱, 崩壊熱及びジルコニ ウム-水反応による発熱を考慮 炉心出力は核分裂による発生熱と核分裂生 成物及びアクチノイドの崩壊熱を考慮した炉 心出力時間変化データを入力
	ジルコニウム-水反 応	Baker-Just の式
	ギャップ熱伝達	過渡変化は Ross and Stoute に基づくモデルを 用いる。なお, ギャップ熱伝達係数の初期値及 び過渡計算に用いるギャップ内のガス組成等は 燃料棒熱機械設計コード PRIME から引き継ぐ
	膨れ・破裂	膨れは燃料被覆管周方向応力に基づき計算し, 破裂は燃料被覆管周方向応力のベストフィット 曲線により判定する (図 3-11)

表 3-3 S A F E R コードの熱伝達係数計算モデル

熱伝達モード	熱伝達係数計算モデル
核沸騰	ボイド率の関数とする相関式
膜沸騰	噴霧流冷却の相関式と修正 Bromley の式をボイド率の関数として使用する相関式
遷移沸騰	核沸騰と膜沸騰の熱伝達係数を燃料被覆管過熱度で内挿した相関式
蒸気单相	Dittus-Boelter の式
噴霧流	Sun-Saha の式
スプレー（落水水）	スプレー冷却実験データに基づく相関式
濡れ	濡れた後の熱伝達係数は Andersen のモデルに基づく
輻射	高出力燃料棒と平均出力燃料棒間，平均出力燃料棒とチャンネルボックス間で考慮

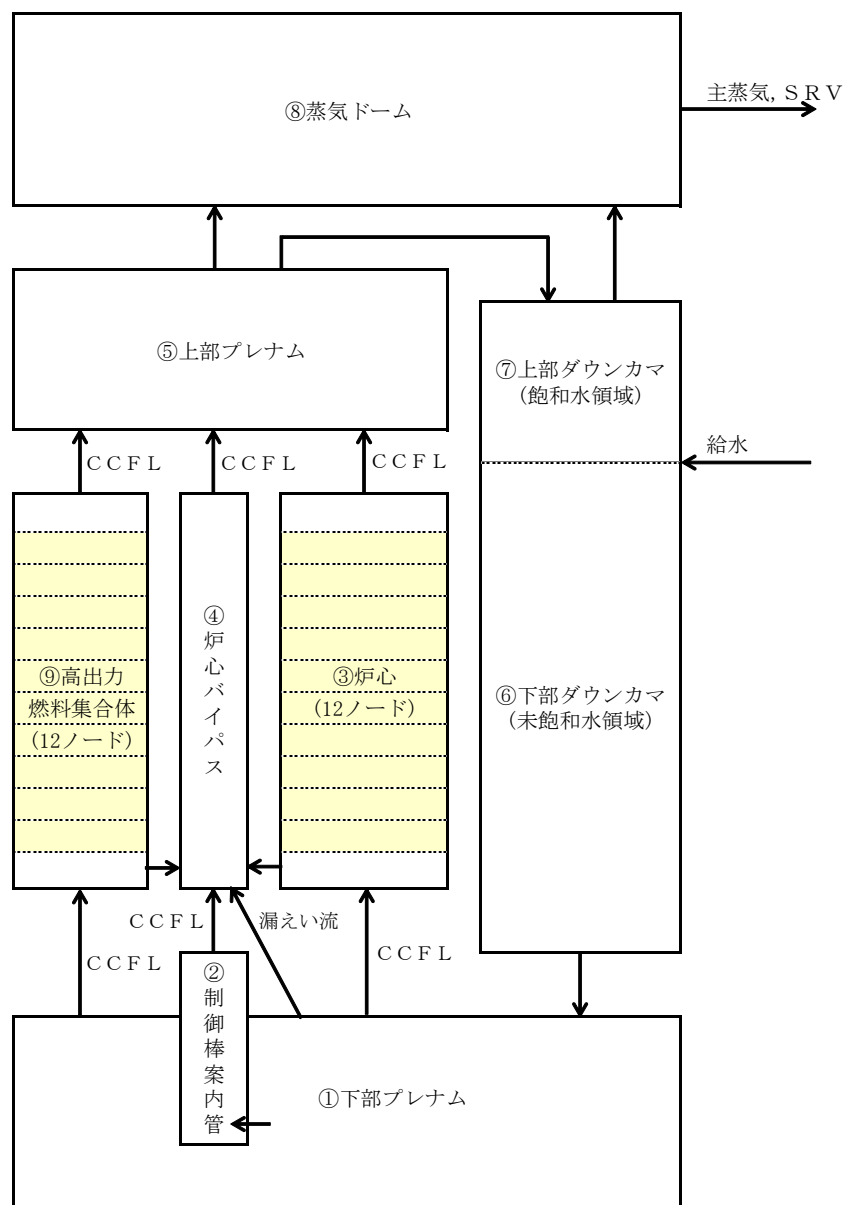


図 3-1 SAFERコードのノード分割図





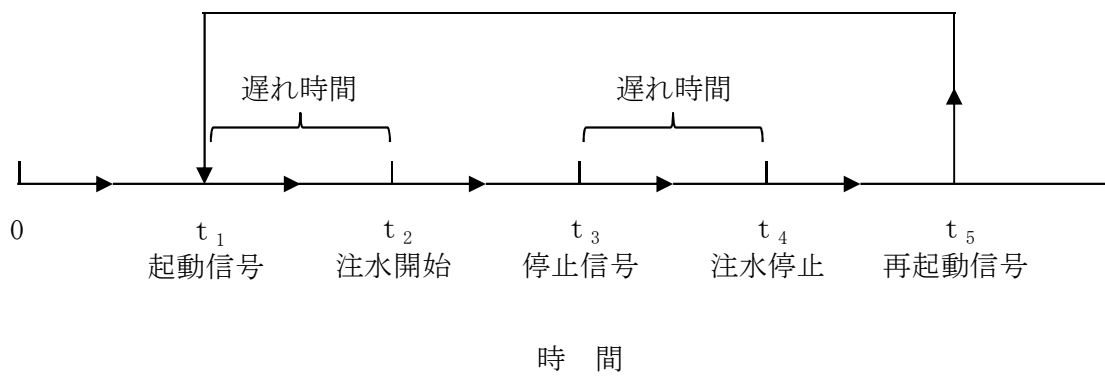
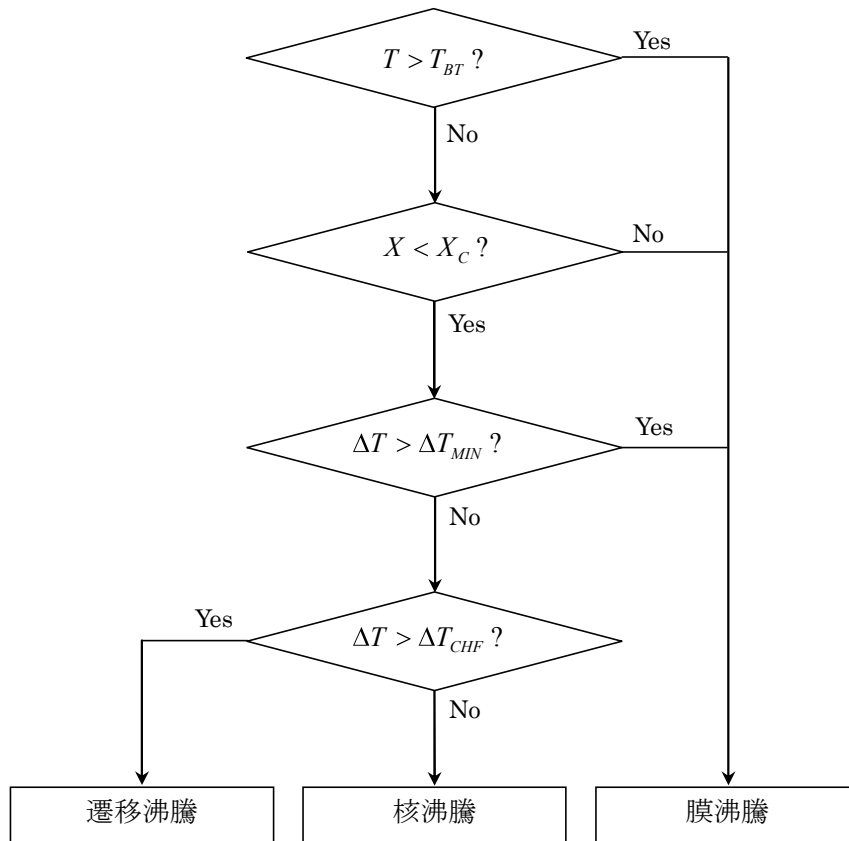


図 3-4 SAFERコードの注水系作動ロジック



- |                  |                   |
|------------------|-------------------|
| $T$              | : 事故後の時間          |
| $T_{BT}$         | : 沸騰遷移時間 (入力)     |
| $X$              | : クオリティ           |
| $X_C$            | : 膜沸騰限界クオリティ (入力) |
| $\Delta T$       | : 燃料被覆管過熱度        |
| $\Delta T_{MIN}$ | : 最小安定膜沸騰過熱度      |
| $\Delta T_{CHF}$ | : 限界熱流束過熱度 (入力)   |

図 3-5 SAFERコードの沸騰事象を決めるロジック

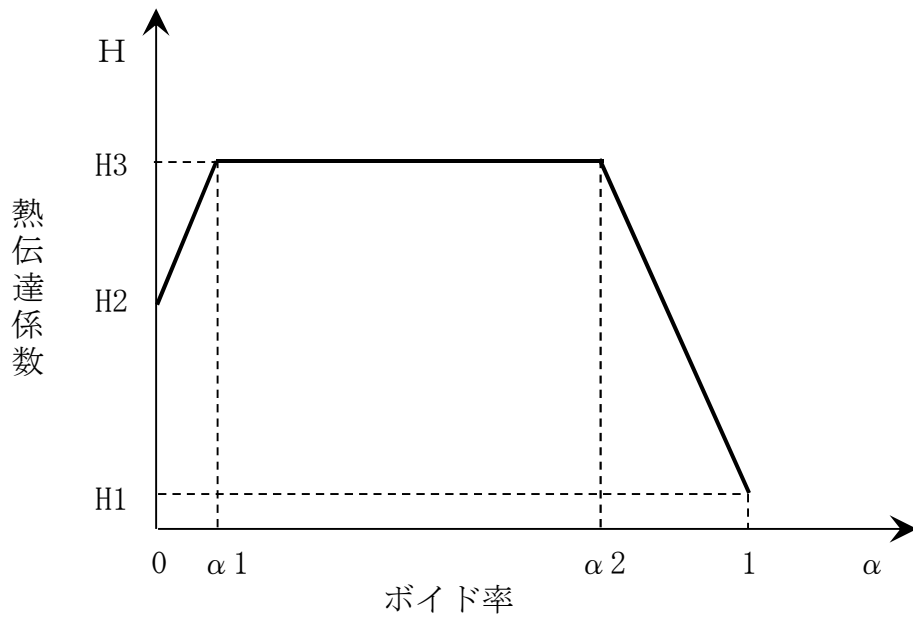


図 3-6 核沸騰熱伝達係数モデル

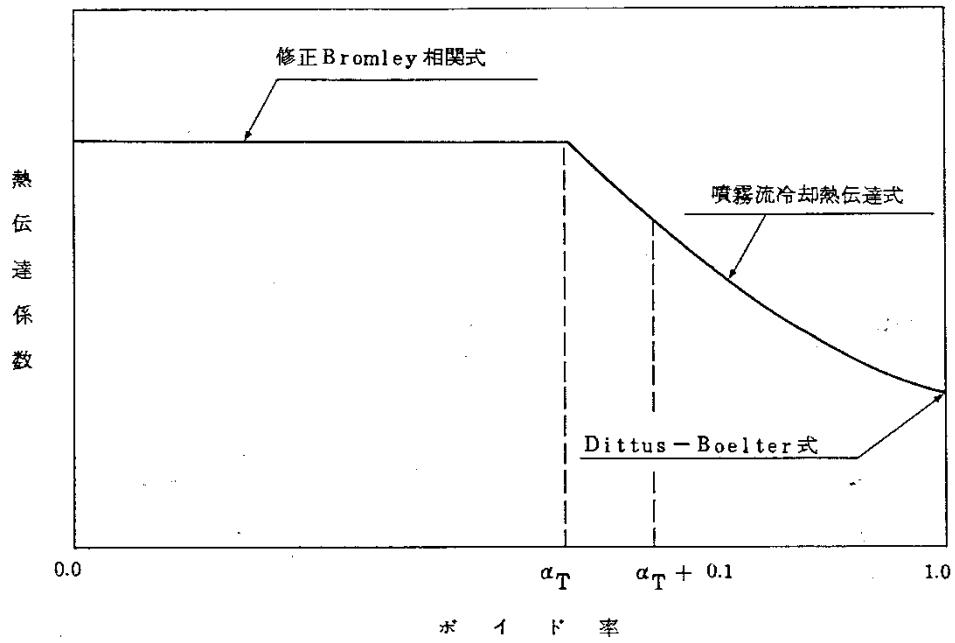


図 3-7 膜沸騰熱伝達係数モデル

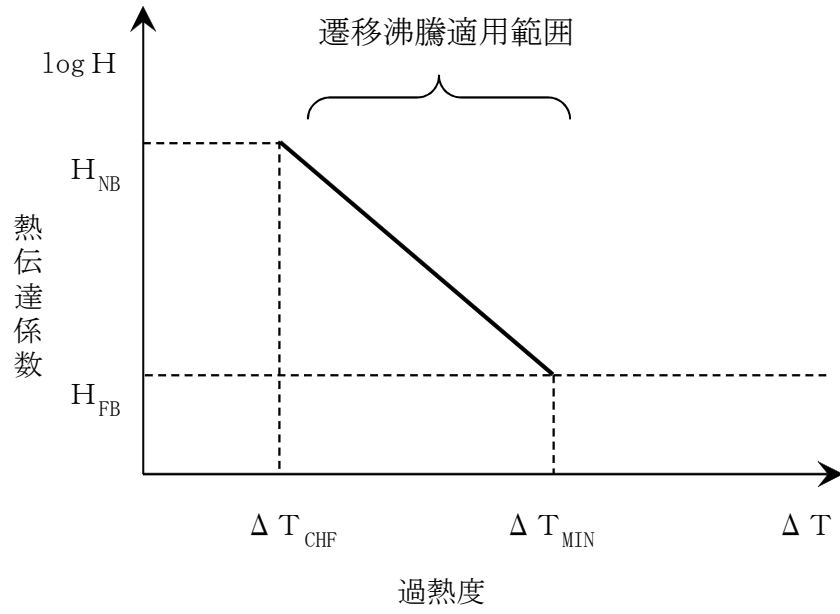


図 3-8 遷移沸騰熱伝達係数モデル

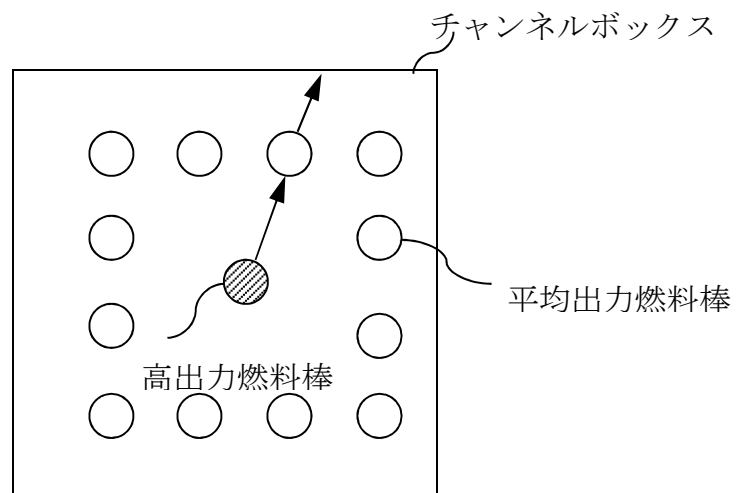
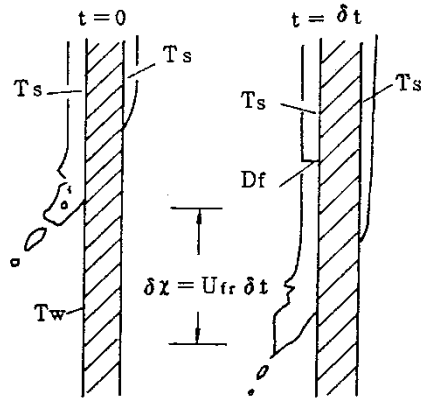


図 3-9 輻射熱伝達モデル



両側が伝熱面となるチャンネルの場合は先行流下する液膜のみでモデルを考慮

図 3-10 チャンネル濡れモデル

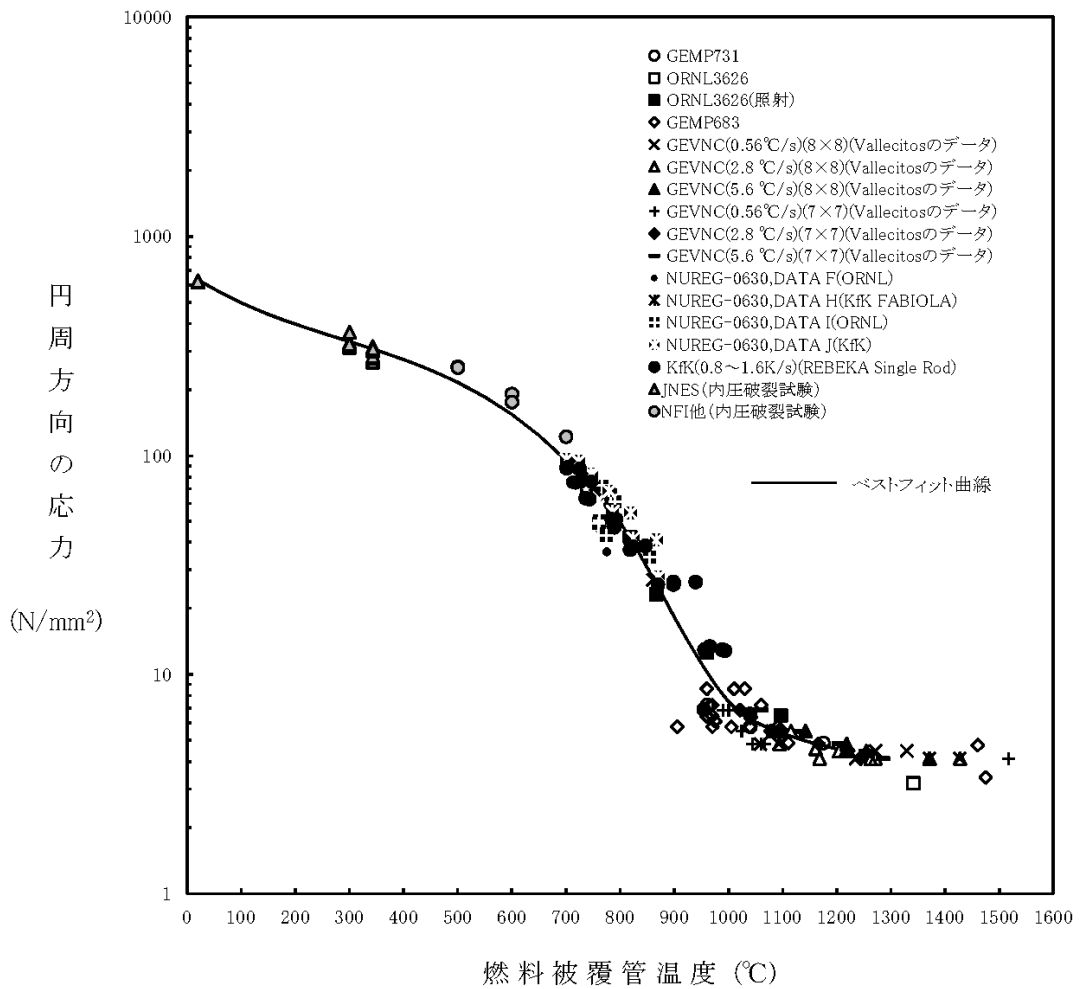


図 3-11 燃料棒に破裂が発生する時点の燃料被覆管温度と燃料被覆管応力の関係

### 3.4 入出力

SAFERコードの主要な入出力を図 3-12 に示す。SAFERコードのインプットデータは以下のとおり構成される。SAFERコードのインプットデータの元となるプラントデータ，事故条件，事故収束に重要な機器・操作等を整理した解析条件を添付 1 に示す。

- ① 原子炉圧力容器，内部構造物の幾何形状
- ② 初期条件（原子炉出力，原子炉圧力，炉心入口流量，原子炉水位）
- ③ 炉心仕様（幾何形状，炉心圧損，原子炉出力の時間変化）
- ④ 燃料仕様（幾何形状，燃料棒出力，初期状態，物性）
- ⑤ 機器，設備仕様（ECCS等の注水特性，SRV特性，MSIV閉止特性）
- ⑥ 外乱条件（破断条件等）

上記をインプットデータとして，原子炉内熱水力過渡解析及び炉心ヒートアップ解析を実施し，以下のアウトプットデータを得る。

- ① 原子炉圧力及び原子炉内水位の過渡変化
- ② 燃料被覆管温度
- ③ ジルコニウム-水反応量（燃料被覆管酸化割合）

また，SAFERコードにより求められた対流熱伝達係数と原子炉圧力の時間変化及び炉心露出・再冠水時間をCHASTEコードに用いる。

なお，SAFERコードは過渡変化の計算タイムステップをインプットデータとして与え，計算時間を通して一定としている。有効性評価解析は従来の設計基準事故解析に比べて解析時間が長くなるが，想定される事象の

原子炉内の熱水力的挙動及び炉心ヒートアップ挙動は設計基準事故（中小破断LOCA）と同様であることから、計算タイムステップは設計基準事故解析と同じ値を原則として適用する。



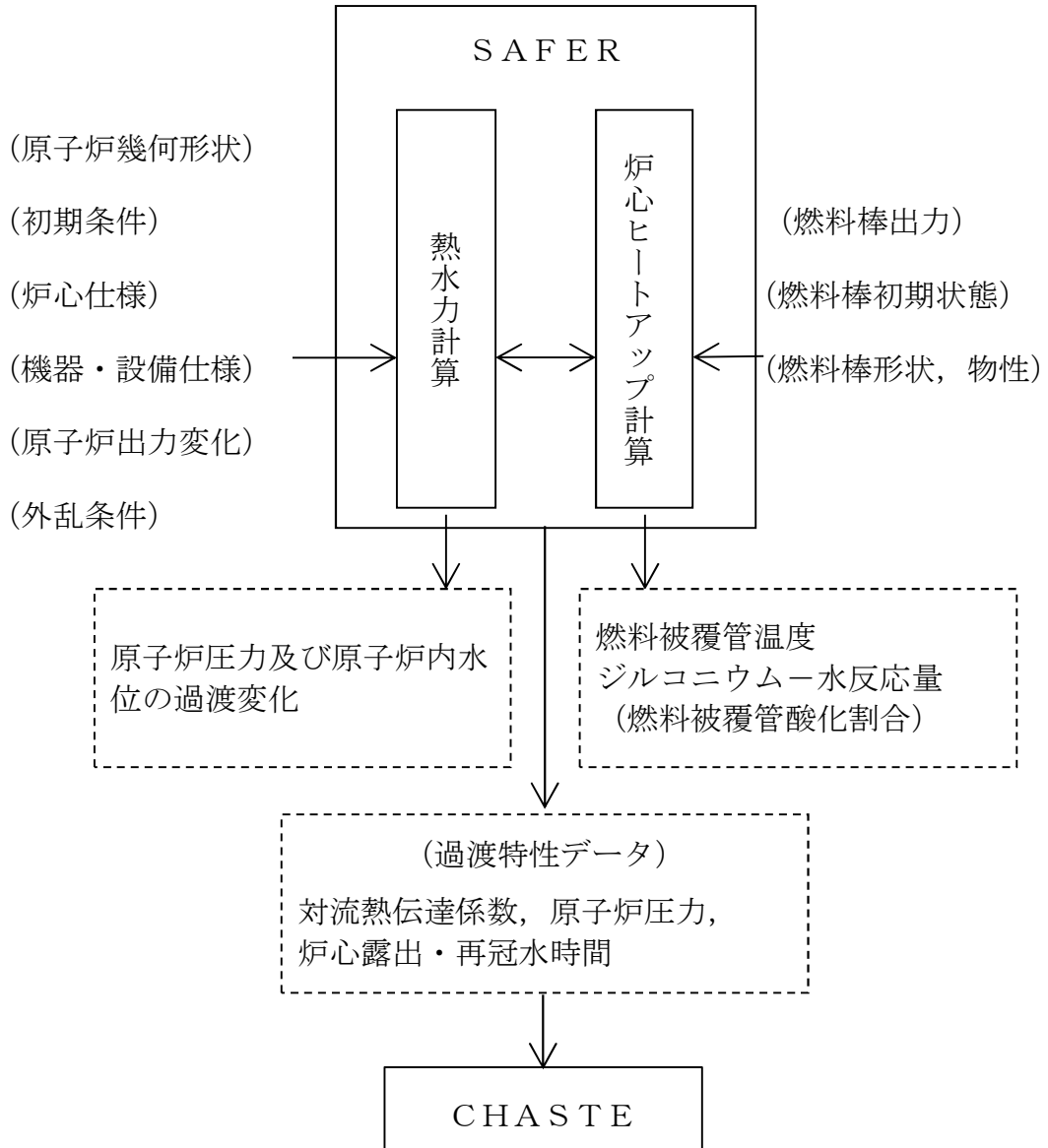


図 3-12 SAFERコードの入出力

## 4. 妥当性確認

### 4.1 重要現象に対する妥当性確認方法

S A F E Rコードの評価マトリックスを表4-1に示す。表4-1は2章で重要現象に分類された物理現象を列挙している。各実験解析の内容について詳細を4.2節以降に示すが、それらの要約を4.1.1, 4.1.2及び4.1.3に示す。

S A F E Rコードは、BWRのLOCAを模擬したシステム挙動実験結果と実験解析結果との比較により解析モデルの妥当性確認が行われており、BWRのLOCA時の燃料被覆管温度の評価に適用できることを確認している。したがって、2章で重要現象に分類された物理現象はLOCAを模擬したシステム挙動実験により、総合的に妥当性が確認されている。

ジェットポンプ型BWRに対しては、T B L (Two Bundle Loop) 及びR O S A - III (Rig of Safety Assessment) の実験解析が行われ、ABWRに対しては、F I S T (Full Integral Simulation Test) - ABWRの実験解析を行っている。S A F E Rコードによる実験解析結果は実験結果（蒸気ドーム圧力、水位）と良く一致し、模擬燃料被覆管最高温度は実験結果に比べ10℃～150℃程度高く予測することを確認した。<sup>(22)</sup>

なお、S A F E Rコードの妥当性は、当時の通産省原子力発電技術顧問会（基本設計）LOCA検討会及び原子炉安全基準専門部会（E C C S性能評価小委員会）においても審議され、LOCA時の燃料被覆管温度評価への適用の妥当性が確認されている。<sup>(23) (24)</sup>

重要現象に分類された物理現象のうち崩壊熱は、信頼性の高い評価モデルと現実的な評価条件を使用して評価した値を事象発生後の原子炉出力変化として入力している。このため、S A F E Rコードにおける崩壊熱の妥

当性確認は不要とした。

燃料棒表面熱伝達，沸騰遷移及び気液熱非平衡については，LOCAを模擬した実験結果における燃料被覆管温度とSAFERコードによる実験解析結果を比較することにより，SAFERコードの熱伝達モデルの妥当性を確認できる。

燃料被覆管酸化については，3.3.2(5)に記載したとおり，蒸気供給制限がなく，蒸気を反応温度まで上げるためのエネルギーは必要としないものと仮定し，反応量及び反応熱を過大に評価するように選定した酸化反応速度式を採用している。そのため，SAFERコードにおける燃料被覆管酸化の妥当性確認は不要とした。

燃料被覆管変形については，3.3.2(7)に記載したとおり，燃料被覆管の歪量を計算し，燃料被覆管の破裂を判定する破裂限界曲線には実験値と良く一致するベストフィット曲線に基づき現実的な条件を適用していることから，SAFERコードにおける燃料被覆管変形の妥当性確認は不要とした。

沸騰・凝縮・ボイド率変化，気液分離（水位変化）・対向流及び三次元効果については，有効性評価解析においては炉心が露出する可能性のあるシナシナケンスでの炉心・原子炉水位を評価する上で重要な物理現象として選定しており，炉心・原子炉水位を確認することでその妥当性を確認できる。

冷却材放出（臨界流・差圧流）は，LOCAを模擬した実験結果におけるシステム圧力変化とSAFERコードによる実験解析結果を比較することによりその妥当性を確認できる。

ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）は，動作を期待する系統の作動圧力や流量を入力するが，有効性評価解析では，設計での不確かさを考慮し，設備設計における設計条件を仮定する。このように，設計に基づ

く作動圧力や流量を条件として与えることから、S A F E Rコードにおいてはこれらに対する妥当性確認は不要とした。

以上より、重要現象に対する妥当性確認については、BWRのL O C Aを模擬したシステム挙動実験結果と実験解析結果との比較において、システム圧力、炉心水位、燃料被覆管温度に着目してS A F E Rコードの妥当性を確認する。

#### 4.1.1 T B L実験解析

T B L実験は、1100MW級BWRプラントを2/764に縮尺模擬し、電気加熱の実寸大模擬燃料集合体2体、再循環系2系統及びE C C Sを装備した実験装置を用い、配管破断による冷却材放出開始からE C C Sの作動により炉心が冷却するまでの圧力容器内熱水力挙動を実時間で模擬した実験である。S A F E Rコードによる実験解析により、実験結果との比較から熱水力計算モデル及び燃料被覆管温度計算モデルの妥当性を確認する。

#### 4.1.2 R O S A - III実験解析

R O S A - III実験は、BWR体系を1/424に縮尺模擬したシステムであり、電気加熱の実長の1/2長さの模擬燃料集合体4体と二つの再循環系、E C C Sからなる実験装置を用い、配管破断による冷却材放出開始からE C C Sの作動により炉心が冷却するまでの圧力容器内熱水力挙動を実時間で模擬した実験である。S A F E Rコードによる実験解析により、実験結果との比較から熱水力計算モデル及び燃料被覆管温度計算モデルの妥当性を確認する。

#### 4.1.3 F I S T - A B W R 実験解析

F I S T - A B W R 実験は、A B W R プラントを 1/872 で縮尺模擬し、電気加熱の実寸大模擬燃料集合体 1 体とダウンカマの下端にインターナルポンプを模擬するループとポンプを装備した実験装置を用い、配管破断による冷却材放出開始から E C C S の作動により炉心が冷却するまでの压力容器内熱水力挙動を実時間で模擬した実験である。S A F E R コードによる実験解析により、実験結果との比較から熱水力計算モデルの妥当性を確認する。

表 4-1 重要現象に対する妥当性確認方法

分類	重要現象	解析モデル	実験解析 TBL	実験解析 ROSA-III	FIST-ABWR 実験解析
炉心 (核)	崩壊熱 *	崩壊熱モデル	—	—	—
炉心 (燃料)	燃料棒表面熱伝達 沸騰遷移	燃料棒表面熱 伝達モデル	図 4-6 図 4-9 図 4-12 図 4-15 図 4-34	図 4-23 図 4-34	図 4-32 図 4-33
	燃料被覆管酸化*	ジルコニウム -水反応モデル	—	—	—
	燃料被覆管変形*	膨れ・破裂評 価モデル	—	—	—
炉心 (熱流動)	沸騰・ボイド率変化 気液分離 (水位変化)・対向流 三次元効果	二相流体の流 動モデル	図 4-4 図 4-5 図 4-8 図 4-11 図 4-14	図 4-20 図 4-21 図 4-22	図 4-31
	気液熱非平衡	燃料棒表面熱 伝達モデル	図 4-6 図 4-9 図 4-12 図 4-15 図 4-34	図 4-23 図 4-34	—
原子炉 圧力 容器 (逃が し安全 弁を含 む)	冷却材放出 (臨界流・差圧 流)	臨界流モデル	図 4-3 図 4-7 図 4-10 図 4-13	図 4-19	図 4-26 図 4-27 図 4-28
	沸騰・凝縮・ボイド率変化 気液分離 (水位変化)・対向流	二相流体の流 動モデル	—	—	図 4-29 図 4-30
	ECCS注水 (給水系・代替 注水設備含む) *	原子炉注水系 モデル	—	—	—

\* 4.1 節に記載の理由により，妥当性確認が不要である重要現象

## 4.2 T B L 実験解析<sup>(25) (26) (27)</sup>

T B L は、1100MW級 B W R プラントを 2/764 に縮尺模擬し、電気加熱の実寸大模擬燃料集合体 2 体からなる L O C A 模擬実験装置であり、実験は L O C A 時の熱水力現象及び炉心の冷却挙動を総合的に把握するため、配管破断による冷却材放出開始から E C C S の作動により炉心が冷却するまでの圧力容器内熱水力挙動及び炉心冷却挙動を実時間で模擬する L O C A 総合模擬実験である。図 4-1 に T B L 実験装置の系統図を示す。

### 4.2.1 解析条件

表 4-2 に S A F E R コードによる実験解析の対象とした T B L 実験条件を示す。解析は再循環配管の大破断 (Run No. 1)、中小破断 (Run No. 2)、主蒸気配管の完全破断 (Run No. 3) 及び高圧炉心スプレイ配管の完全破断 (Run No. 4) の 4 ケースについて実施した。

図 4-2 に実験解析で用いた S A F E R コードのノード分割を示す。S A F E R コードでは圧力容器を八つの熱水力ノードに分割しているとともに、高出力バンドルを設けている。また、ノード 3 と 9 の模擬燃料集合体は、ボイド分布を解析するため、更に軸方向に細分化した。分割数は、模擬燃料棒の軸方向温度計測位置を考慮して有効発熱部を 9 分割とし、その上下の非加熱部を含めて全 11 分割とした。

破断流は均質臨界流モデルを用いて計算した。E C C S 流量は実験データを時間の関数として入力した。また、崩壊熱模擬曲線には実験データ (ANS+20%相当) と同等のものを用いた。

### 4.2.2 解析結果

S A F E R コードによる T B L 実験解析の各解析結果について説明す

る。

#### (1) 再循環配管の大破断 (Run No. 1)

Run No. 1 は、再循環配管の完全両端破断 ( $2 \times 100\%$ ) 模擬実験であり、ECCSとしてLPCS及び3LPCI (3台のLPCIポンプの作動) を想定している。

図 4-3 に圧力変化を示す。また、図 4-4 に炉心シュラウド内各部の混合水位変化を示す。SAFERコードの解析結果は、実験結果と良く一致することがわかる。また、SAFERコードは、下部プレナムの水位形成後の炉心入口オリフィス (以下「SEO」という。) でのCCFL現象及びCCFL現象に伴う冷却水の分配挙動を良く再現している。図 4-5 に約 50 秒時点における平均出力バンドル及び高出力バンドル内のボイド率分布の比較を示す。SAFERコードは出力差に伴って生じる流動挙動の違いを良く表現している。図 4-6 に高出力バンドルの燃料被覆管温度変化を示す。SAFERコードのPCTは、実験結果に対し、約  $150^{\circ}\text{C}$  高く評価した。

後述する他ケースに比べてPCTを高めにより予測するのは、高出力バンドルを吹き上げる蒸気による冷却を過小評価しているためと考えられ、適用している蒸気及び噴霧流の熱伝達相関式に依存している。蒸気単相熱伝達相関式は、蒸気流量が増加するほど熱伝達係数を過小評価する傾向にあり、また、噴霧流熱伝達相関式も熱伝達係数を過小評価する (添付 2 の II. 熱伝達相関式, モデルの適用性に記載の添付図 2-7 及び添付図 2-9)。再循環配管の両端破断を模擬した本ケースは、他ケースに比べて冷却材放出量が多く減圧が急激であるため下部プレナムの蒸気発生量が多い。すなわち、高出力バンドルを吹き上げる蒸気流量が多く、蒸気及び噴霧流の熱伝達係数の過小評価の影響が他ケースに比べて大きいため、実験結果に対し温度が高くなっていると考えられる。



## (2) 再循環配管の中小破断 (Run No. 2)

Run No. 2 は、再循環ポンプ入口配管の 3.4%破断実験であり、ECCS として LPCS, 3LPCI 及び自動減圧系 (以下「ADS」という。) の作動を想定している。

図 4-7 に圧力変化を示す。圧力は、MSIV 閉により直ちに上昇し、SRV 開閉によって変化した後、ADS 作動によって急激な減圧過程に移行する。SAFER コードの解析結果は、破断開始から炉心再冠水に至る全期間を通して実験結果を良く模擬している。図 4-8 に炉心シュラウド内各部の二相混合水位変化を示す。実験で見られる炉心露出及び LPCI 注水後の炉心再冠水の挙動について、解析は良く再現している。図 4-9 に高出力バンドルの燃料被覆管温度変化を示す。図 4-8 に示したように解析結果の炉心上部の露出が早いため、ヒートアップ開始時間が早い。炉心露出後の温度上昇率はほぼ同じであるが、LPCS 作動後は、実測値の温度上昇率がわずかに小さい。これは、SAFER コードのスプレー熱伝達モデルがやや保守的な傾向にあることを示している。また、図 4-8 から約 550 秒で炉心再冠水されたことが実験、解析の両方から判断できる。しかし、図 4-9 に示したように、最終的な温度低下は、実験の約 550 秒に対して解析は約 580 秒となっている。これは、炉心再冠水後に適用される SAFER コードの膜沸騰熱伝達モデルが保守的なモデルになっていることを示している。SAFER コードの PCT は、実験結果に対し、約 60°C 高く評価した。

## (3) 主蒸気配管の完全破断 (Run No. 3)

Run No. 3 は、主蒸気配管の完全破断を模擬している。作動 ECCS としては LPCS, 3LPCI 及び ADS であるが本実験は主蒸気管の完全破

断であり，ADSは作動しない。

図 4-10 に圧力変化を示す。本実験は主蒸気配管破断であるので，破断口を通して蒸気が流出し，急激な減圧過程となる。SAFERコードの解析結果は，全般的な圧力変化を良く模擬した。図 4-11 に炉心シュラウド内各部の混合水位変化を示す。解析における炉心露出及びLPCI注入後の急激な水位回復挙動は実験結果と良い一致を示した。図 4-12 に高出力バンドルの燃料被覆管温度変化を示す。図 4-11 に示したように解析結果の炉心上部の露出が早いため，ヒートアップ開始時間が早い。LPCS注水後，実測値の温度上昇率が小さくなるが，解析では実測値ほど温度変化が見られなかった。これは，SAFERコードの熱伝達モデルがやや保守的な傾向にあることを示している。また，解析結果は，LPCIによる炉心再冠水がわずかに遅いため，燃料被覆管温度の低下開始時間も実測値に比べて約 20～30 秒遅くなった。SAFERコードのPCTは，実験結果に対し，約 70℃高く評価した。

#### (4) 高圧炉心スプレイ系配管の破断 (Run No. 4)

Run No. 4 はHPCS配管の完全破断模擬実験であり，ECCSとして2LPCI及びADS作動を想定している。

図 4-13 に圧力変化を示す。また，図 4-14 に炉心シュラウド内各部の水位変化を示す。圧力は，ADSが約 290 秒で作動することにより急減圧するが，大破断で見られたSEOでの顕著なCCFLはなく，実験と同様の結果を得た。圧力，水位ともにSAFERコードの解析結果は実験結果を良く模擬した。図 4-15 に高出力バンドルの燃料被覆管温度変化を示す。SAFERコードのPCTは，実験結果に対し，約 50℃高く評価した。

#### 4.2.3 まとめ

表 4-6 に S A F E R コードによる実験解析結果と実験結果の P C T の比較を示す。

S A F E R コードによる T B L 実験解析結果と実験データとの比較に基づき S A F E R コードを評価した結果、S A F E R コードは、BWR の L O C A 時の冷却材放出開始から E C C S の作動により炉心が冷却するまでの圧力容器内熱水力挙動を適切に評価し、炉心ヒートアップ挙動については P C T を安全側に評価することを確認した。

表 4-2 S A F E Rコードによる実験解析の対象としたT B L実験条件

Run No.	1	2	3	4
条件				
破断位置	再循環配管 吸込口	同左	主蒸気配管	H P C S 配管
破断面積 (%)	2 × 100	3.4	100	100
作動 ECCS	LPCS+3LPCI	LPCS+3LPCI +ADS	LPCS+3LPCI +ADS	2LPCI+ADS
初期バンドル出力 (MW)	4.1/5.9	4.05/5.45	4.04/5.7	4.0/5.7
初期ドーム圧力 (MPa[gage])	7.1	7.0	7.0	7.1

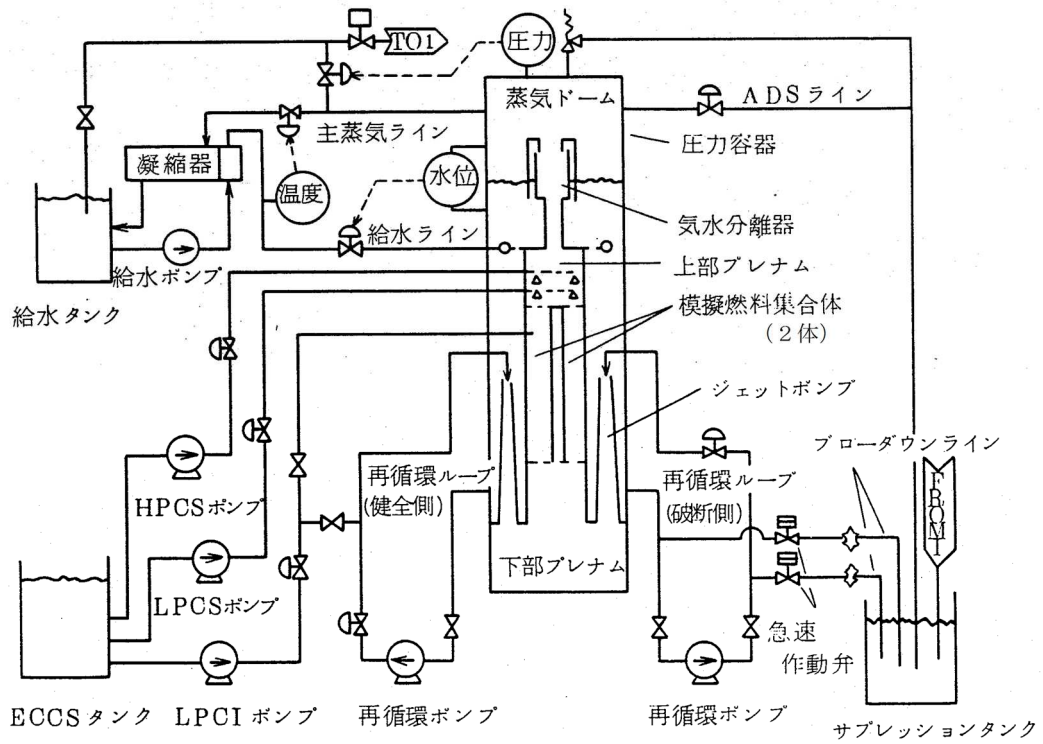


図 4-1 TBL 系統図

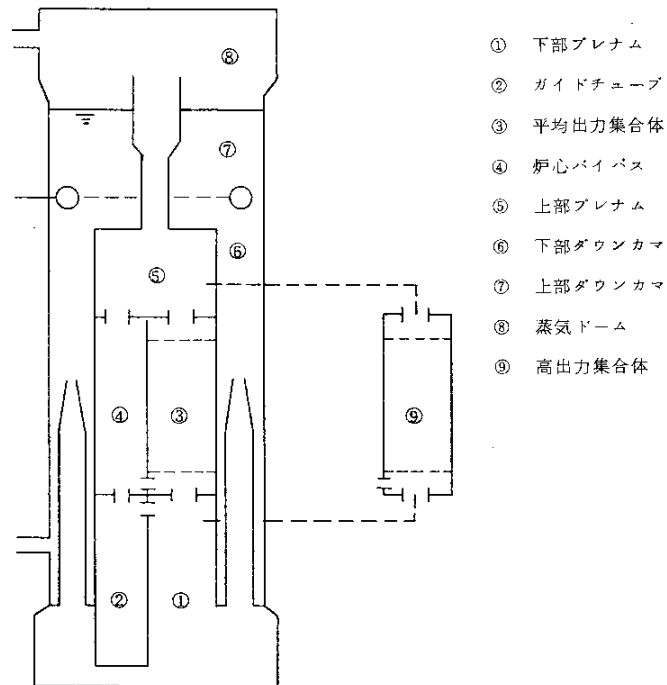


図 4-2 TBL 実験解析のノード分割図

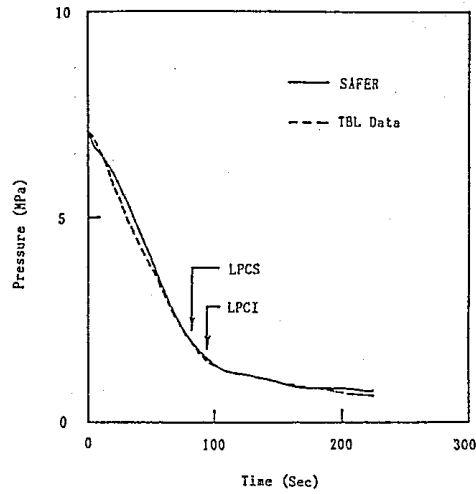


図 4-3 圧力変化 (T B L Run No. 1, 再循環配管の大破断)

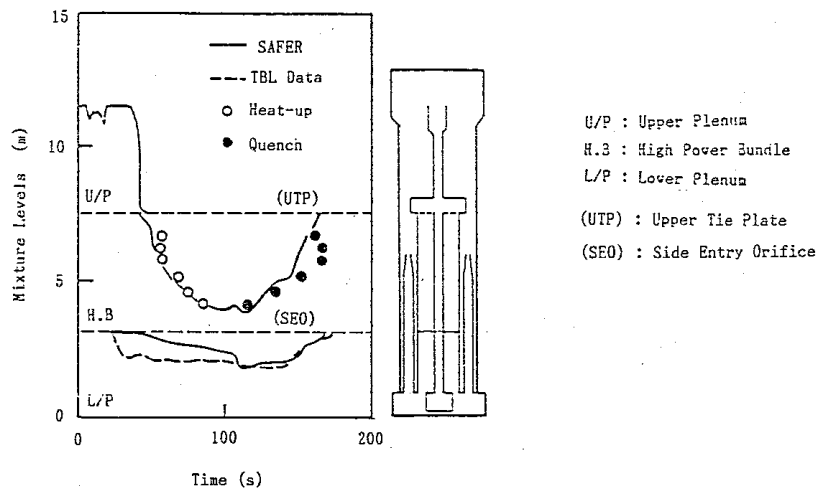


図 4-4 炉心シュラウド内水位変化 (T B L Run No. 1, 再循環配管の大破断)

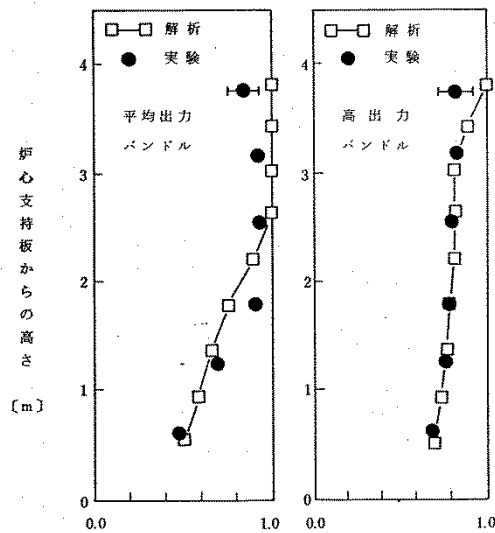


図 4-5 ボイド率の分布 (T B L Run No. 1, 再循環配管の大破断)

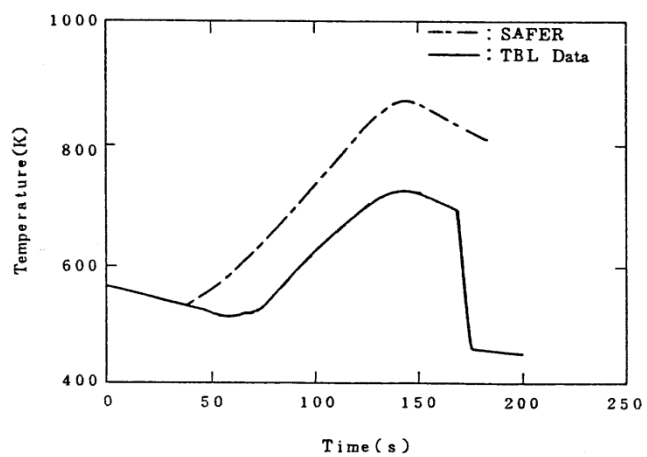


図 4-6 燃料被覆管温度変化 (T B L Run No. 1, 再循環配管の大破断)

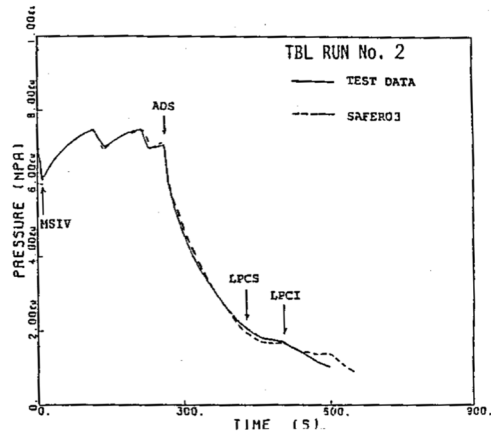


図 4-7 圧力変化 (T B L Run No. 2, 再循環配管の中小破断)

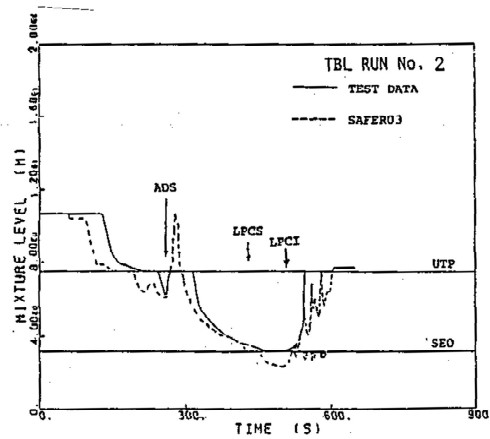


図 4-8 炉心シュラウド内水位変化 (T B L Run No. 2, 再循環配管の中小破断)

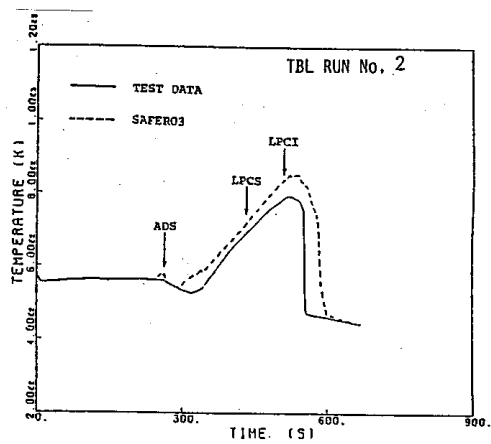


図 4-9 燃料被覆管温度変化 (T B L Run No. 2, 再循環配管の中小破断)



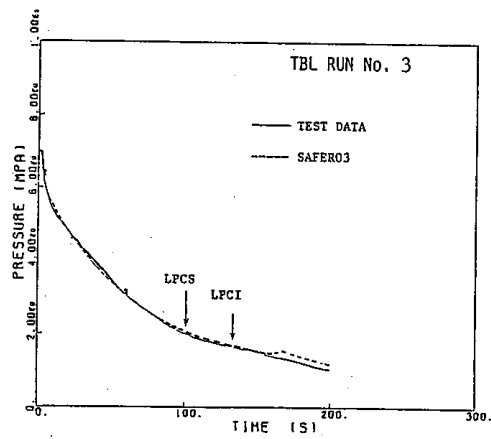


図 4-10 圧力変化 (T B L Run No. 3, 主蒸気配管の完全破断)

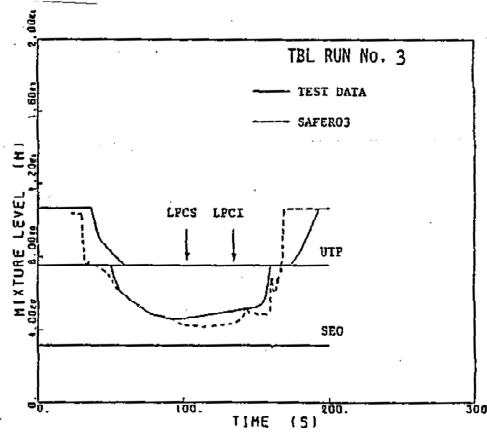


図 4-11 炉心シュラウド内水位変化 (T B L Run No. 3, 主蒸気配管の完全破断)

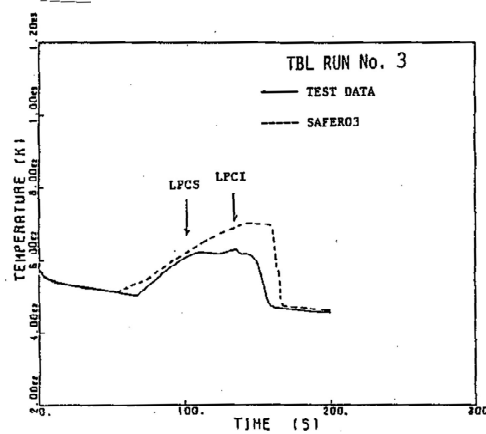


図 4-12 燃料被覆管温度変化 (T B L Run No. 3, 主蒸気配管の完全破断)

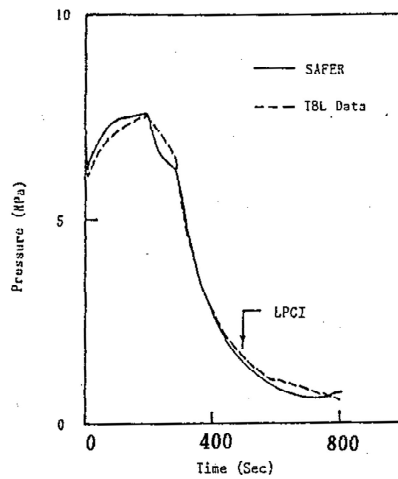


図 4-13 圧力変化 (T B L Run No. 4, 高圧炉心スプレイ配管の破断)

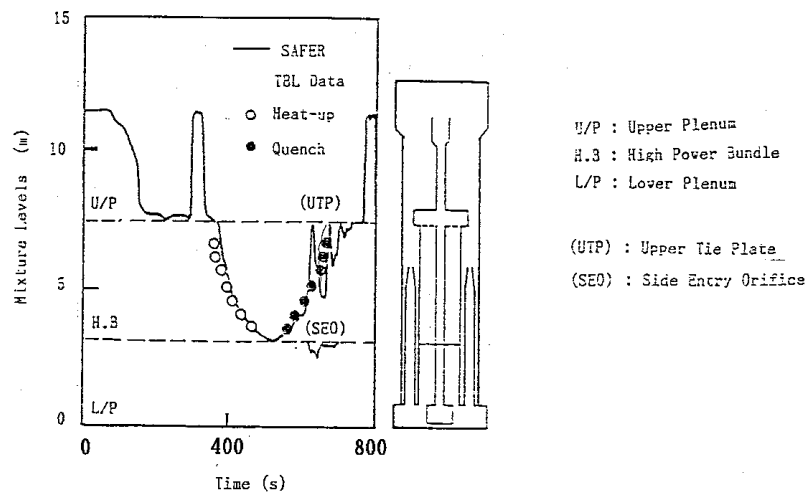


図 4-14 炉心シュラウド内水位変化 (T B L Run No. 4, 高圧炉心スプレイ配管の破断)

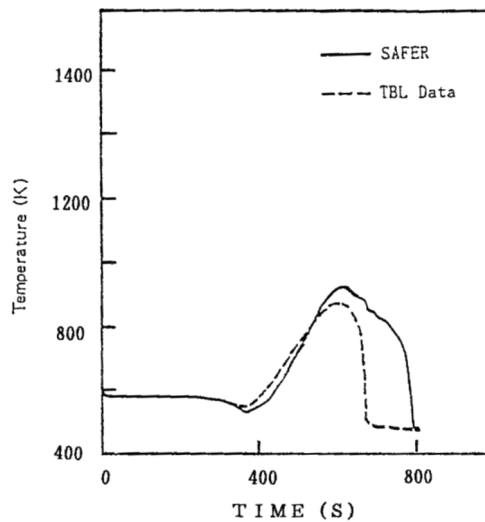


図 4-15 燃料被覆管温度変化 (T B L Run No. 4, 高圧炉心スプレイ配管の破断)

### 4.3 ROSA-III実験解析<sup>(28)(29)</sup>

ROSA-IIIは、BWR体系を1/424に縮約模擬したシステムであり、電気加熱の実長の1/2長さの模擬燃料集合体4体と、二つの再循環ループ、ECCS及び蒸気・給水系を備えている。ROSA-III実験は、BWRのLOCA時の熱水力挙動及びECCSの有効性に関する総合模擬実験であり、図4-16に実験装置、図4-17に系統図を示す。

#### 4.3.1 解析条件

表4-3にSAFERコードによる実験解析の対象としたROSA-III実験ケース及び条件を示す。解析は、再循環ポンプ入口配管での2×100%両端破断実験（Run No. 1）から破断なし（Run No. 7）まで破断面積をパラメータとした7ケースについて実施した。

図4-18に実験解析で用いたSAFERコードのノード分割を示す。SAFERコードでは圧力容器を八つの熱水力ノードに分割している。ROSA-IIIの燃料集合体は4体であり、これらをノード3で模擬した。また、炉心内ボイド分布を解析するためにノード3を更に軸方向に細分化した。分割数は、模擬燃料棒の軸方向温度計測位置を考慮して有効発熱部を7分割とし、その上下の非加熱部を含めて全9分割とした。ノード9は高出力燃料集合体であり、PCTの計算を行うためのノードである。

破断流は均質臨界流モデルを用いて計算した。ECCS流量は実験データを時間の関数として入力した。また、崩壊熱模擬曲線には実験データ（ANS5.1相当）と同等のものを用いた。

#### 4.3.2 解析結果

SAFERコードによるROSA-III実験解析の例として大破断（Run

No. 1, Run No. 2), 小破断 (Run No. 5) 及び破断なし (Run No. 7) の解析結果について説明する。図 4-19, 図 4-20, 図 4-21, 図 4-22 及び図 4-23 に, 実験結果と S A F E R コードによる解析結果の比較を, 蒸気ドーム圧力変化, 平均出力チャンネル内の水位変化, 高出力チャンネル内の水位変化及び燃料被覆管温度変化について示す。

#### (1) 蒸気ドーム圧力

図 4-19 に蒸気ドーム圧力変化の比較を示す。

Run No. 1, Run No. 2 はともに大破断実験であるために, ダウンカム内の水位低下は早く, Run No. 1 は 13 秒, Run No. 2 は 15 秒に再循環ポンプ吸込ノズルが露出し, 急激な減圧が生じる。Run No. 5 は小破断実験であり, Run No. 7 は破断なしであるので, M S I V 閉後の圧力は上昇し続け, S R V の作動によって圧力がほぼ一定に保たれた後, A D S の作動により急激な減圧となる。図 4-19 から分かるように, S A F E R コードはこれらの圧力変化を良く模擬している。

#### (2) 炉心シュラウド内水位

図 4-20 に平均出力チャンネル, 図 4-21 及び図 4-22 に高出力チャンネル内の混合水位変化の比較を示す。

各実験ケースのうち特に大破断実験解析では, 上部タイプレート, 炉心入口部での C C F L 現象が顕著に生じており, これに伴う炉心内の水位変化は S A F E R コードの解析結果と実験データで良く一致している。また, 小破断実験である Run No. 5 と破断なし実験である Run No. 7 については, A D S の作動により急激にチャンネル内水位が低下して露出する様子を解析結果は良く表している。

図 4-20, 図 4-21 及び図 4-22 により, 大破断, 小破断及び破断なしの炉心シュラウド内水位変化を S A F E R コードはおおむね良く模擬していることがわかる。

### (3) 燃料被覆管温度

図 4-23 に燃料被覆管温度変化の比較を示す。図 4-23 に示した燃料被覆管温度変化は P C T 位置の燃料被覆管温度変化を示しており, 破断なし実験 (Run No. 7) の場合のみ実験と解析で P C T ノードが異なっているため, ヒートアップ開始が実験と解析で大きな差となった。しかし, P C T は実験結果に対し約 20°C 高く評価している程度である。

大破断実験での P C T は実験結果に比べ, 約 20°C から 100°C 高く評価されている。これは, S A F E R コードの炉心露出時に適用される蒸気冷却及び噴霧流冷却の熱伝達モデルが保守的なモデルであり, また, 炉心再冠水後に適用される膜沸騰熱伝達モデルも保守的なモデルになっているためである。

### 4.3.3 まとめ

R O S A - III 実験装置で行われた再循環配管破断の実験データを用いて, S A F E R コードの妥当性確認を行った。2 × 100% 両端破断, 100%, 50%, 15%, 5%, 2% のスプリット破断及び 0% (破断なし) の模擬実験についての実験データと S A F E R コードによる解析結果の比較により, 以下のことを確認した。

- ・破断口径によらず圧力変化を良く予測した。
- ・大破断実験で見られる炉心上部, 下部での C C F L 現象を予測できた。

これにより, 炉心シュラウド内水位変化を良く予測した。また, 小破断

実験解析も同様に炉心シュラウド内水位変化を良く予測した。

- ・燃料被覆管最高温度は実験値に比べ 10～100℃程度高めに評価した。

(表 4-6 参照)

また、ROSA-IIIにおける破断なしの実験結果 (Run No. 7) は、実機の有効性評価事象で想定される原子炉急速減圧、炉心の露出に伴う炉心ヒー  
トアップ及び冷却水注水による炉心の再冠水の過程がよく類似している。  
このような破断のない過渡変化に対しても、SAFERコードは、表 4-6 に  
示すように炉心の再冠水時間を遅く、PCTを高めに予測できることが確  
認された。したがって、実機の有効性評価解析にもSAFERコードを適  
用できると考える。

表 4-3 S A F E Rコードによる実験解析の対象とした ROSA-III 実験条件

Run No. 条件	1	2	3	4	5	6	7
破断位置	再循環配管吸込口						破断 なし
破断面積 (%)	2×100	100	50	15	5	2	0
作動 ECCS	LPCS+3L PCI+ADS	同左	同左	同左	同左	同左	同左
初期全出力 (MW)	3.967	3.972	3.963	3.964	3.969	3.962	3.962
初期ドーム圧力 (MPa[gage])	7.37	7.29	7.3	7.3	7.35	7.35	7.3

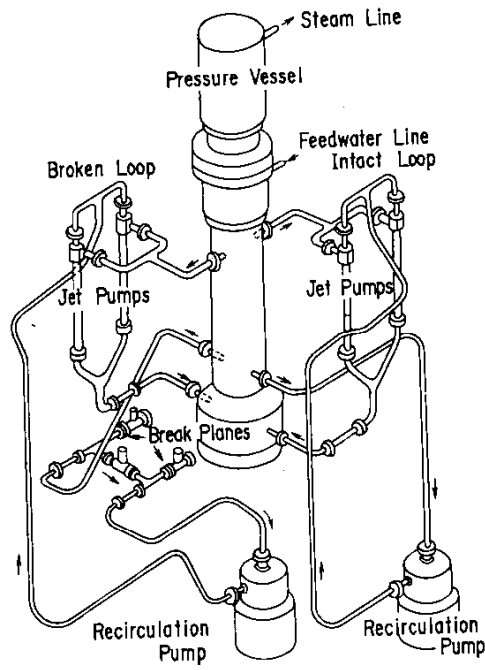


图 4-16 ROSA-III 实验装置

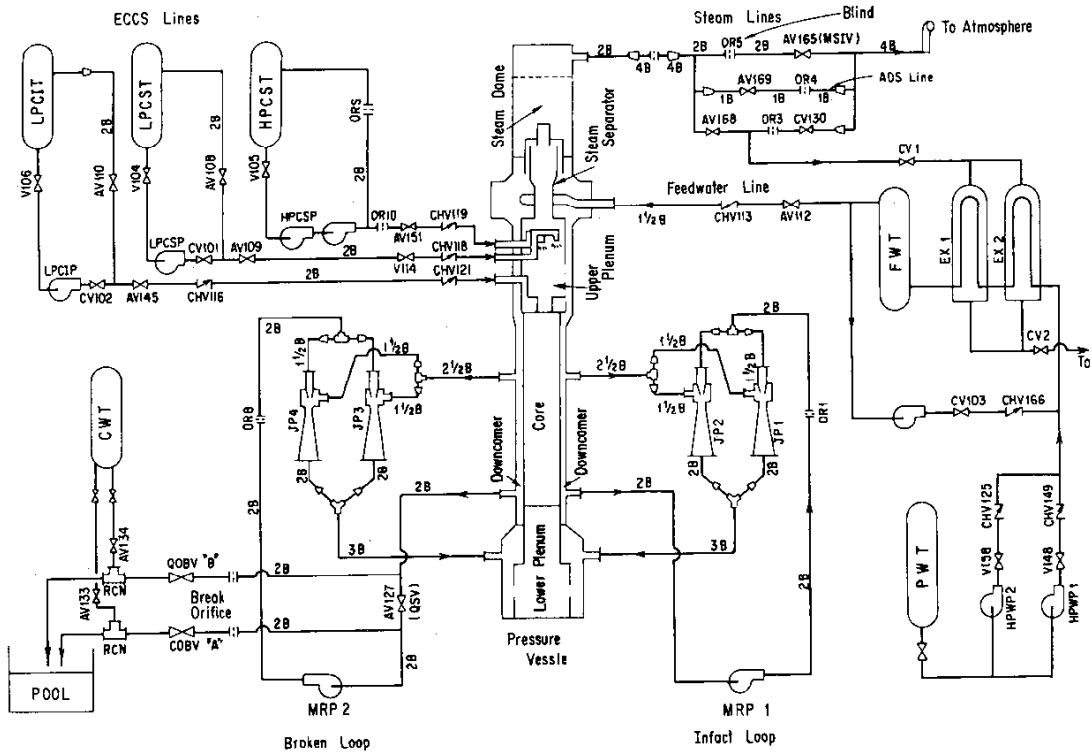


图 4-17 ROSA-III 系统图



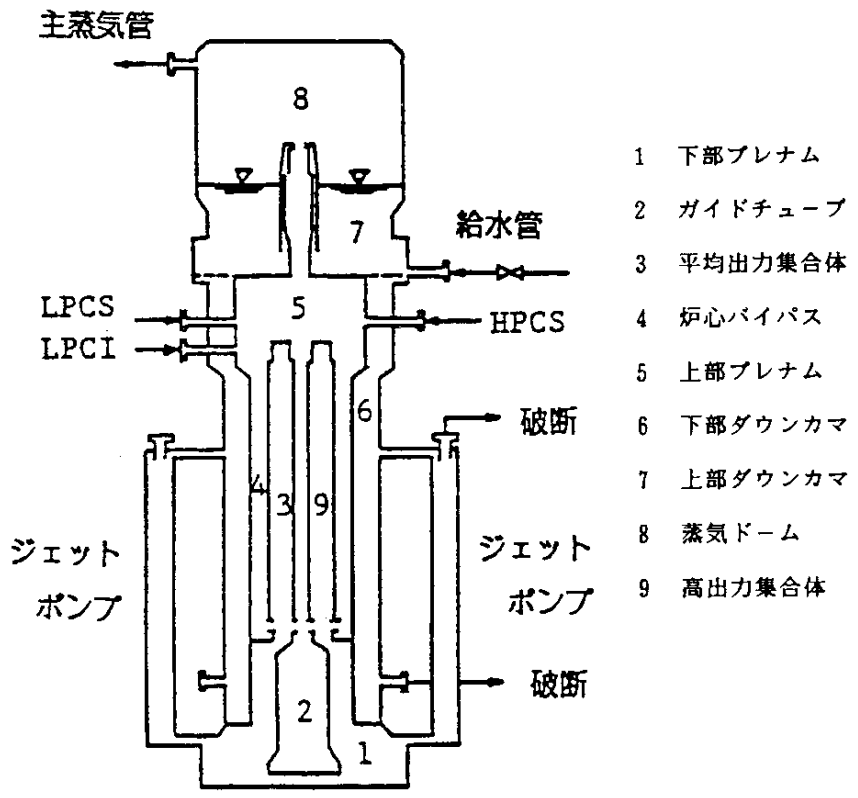


図 4-18 ROSA-III 実験解析のノード分割図

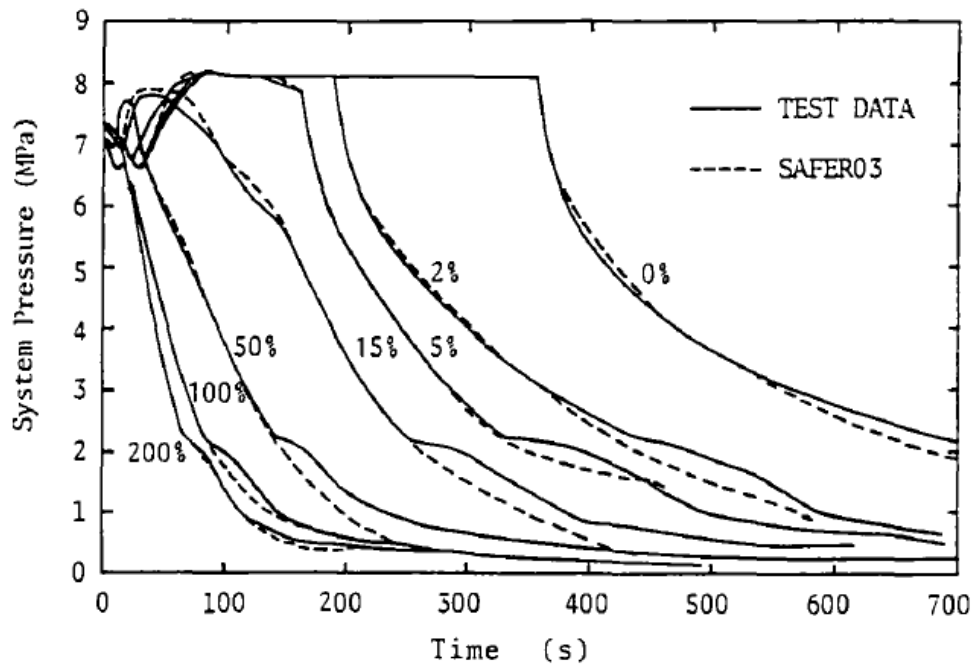


図 4-19 蒸気ドーム圧力変化  
 (ROSA-III, 再循環配管大/中/小破断, 破断なし)

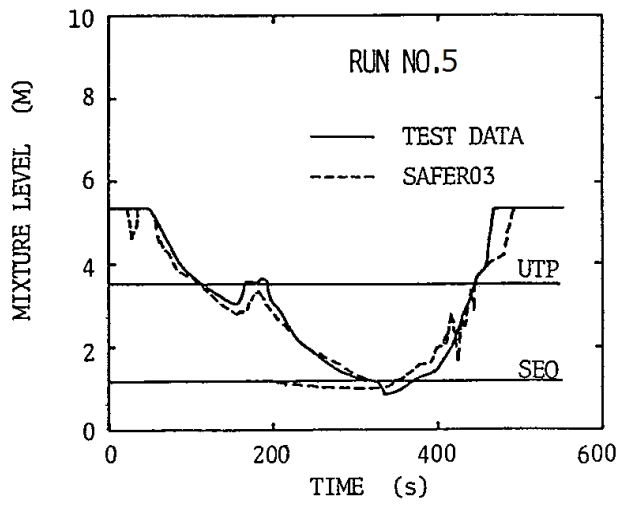
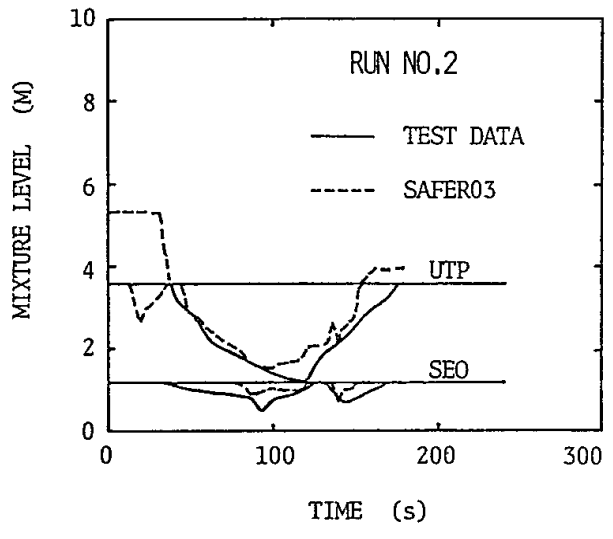
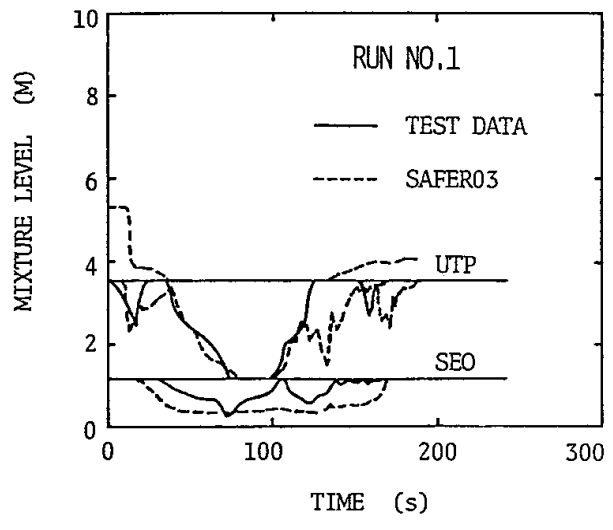


図 4-20 平均出力チャンネル内水位変化 (ROSA-III, 再循環配管大破断, 小破断)

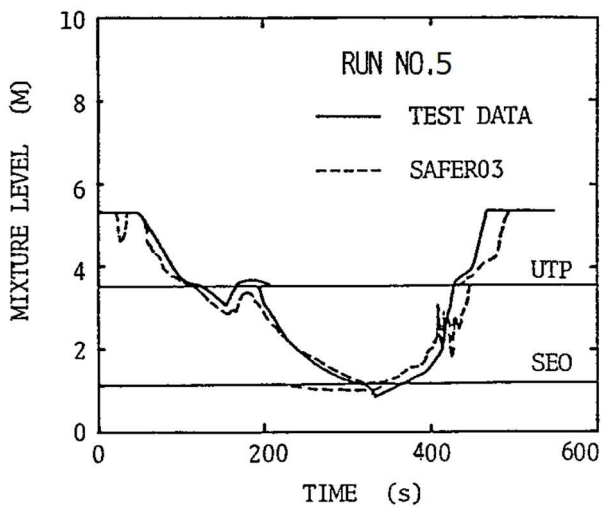
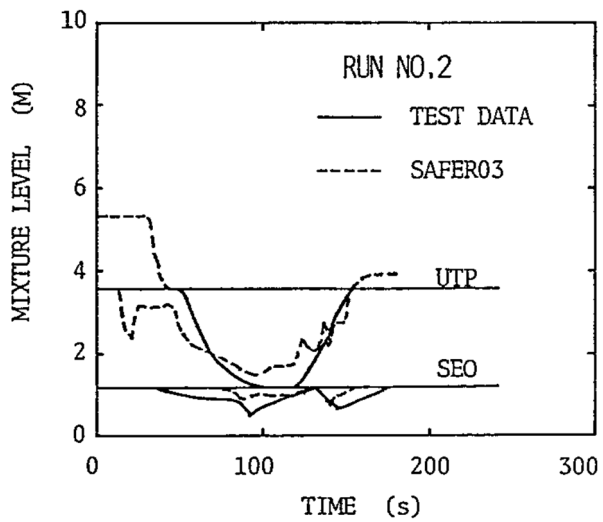
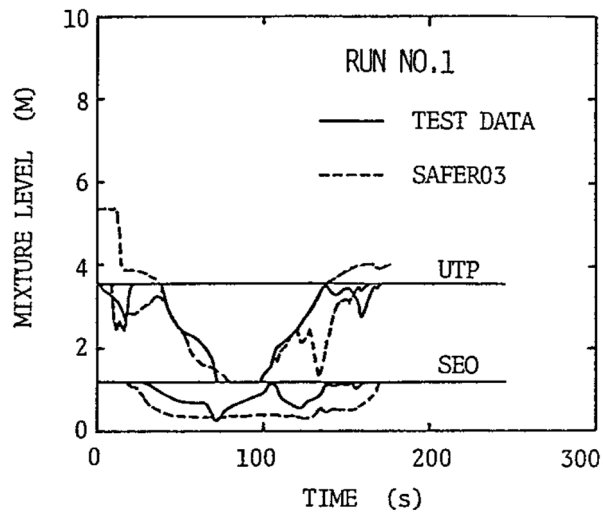


図 4-21 高出力チャンネル内水位変化  
(ROSA-III, 再循環配管大破断, 小破断)

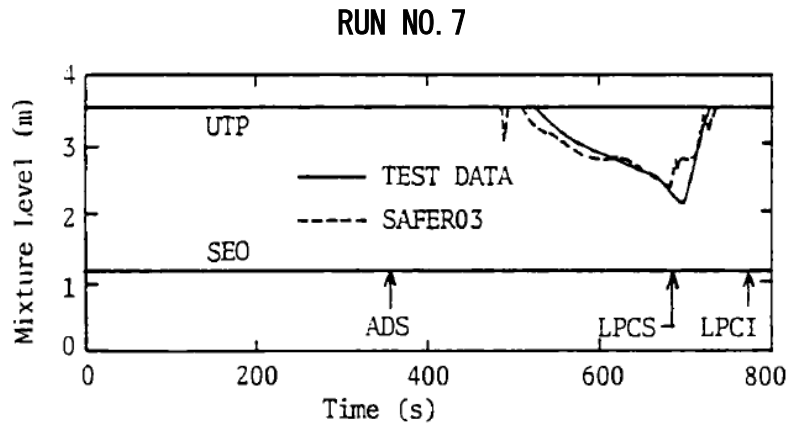


図 4-22 高出力チャンネル内水位変化 (ROSA-III, 破断なし)

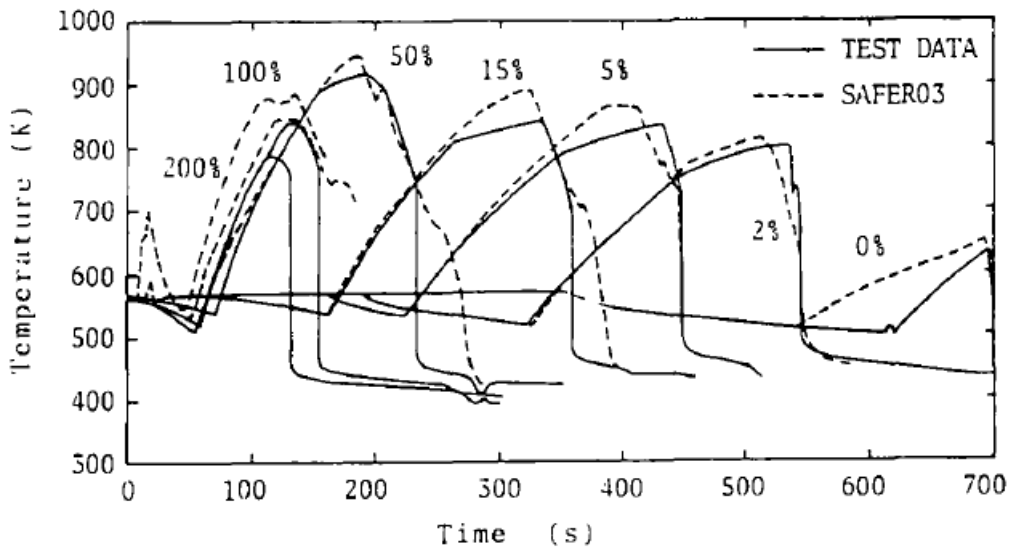


図 4-23 燃料被覆管温度変化  
(ROSA-III, 再循環配管大/中/小破断, 破断なし)

#### 4.4 F I S T－A B W R 実験解析<sup>(30)</sup>

F I S T－A B W Rは、A B W Rプラントを1/872で縮尺模擬しており、電気加熱の実寸大模擬燃料集合体1体と、ダウンカマの下端にインターナルポンプを模擬するループとポンプを装備している。また、主蒸気系、給水系、E C C S、配管等の破断を模擬している。実験は、A B W RのL O C A時の冷却材ブローダウン現象の把握、E C C Sの炉心冷却能力の確認及びS A F E Rコードの妥当性確認を目的に行われた。図 4-24 に系統図を示す。

##### 4.4.1 解析条件

表 4-4 にS A F E Rコードによる実験解析の対象としたF I S T－A B W R実験ケース及び条件を示す。解析は、炉心スプレイ（以下「C S」という。）配管の完全破断（Run No.1）、主蒸気（以下「M S」という。）配管の完全破断（Run No.2）、給水（以下「F W」という。）配管の完全破断（Run No.3）及び压力容器底部（以下「B B」という。）の80cm<sup>2</sup>相当配管破断（Run No.4）を模擬した4ケースについて実施した。

図 4-25 にF I S T－A B W R実験装置の压力容器内領域と実験解析で用いたS A F E Rコードのノード分割を示す。S A F E Rコードでは压力容器を八つの熱水力ノードに分割している。ノード3の模擬燃料集合体は、ボイド分布を解析するため、更に軸方向に細分化した。分割数は、有効発熱部を5分割とし、その上下の非加熱部を含めて全7分割とした。

破断流量及びA D S流量は均質臨界流モデルを用いて計算した。また、E C C Sの起動とM S I V閉止はダウンカマ領域の水位信号を用いた（主蒸気配管の完全破断（Run No.2）を除く）。

#### 4.4.2 解析結果

S A F E RコードによるF I S T－A B W R実験解析の結果について説明する。表 4-5 には、主要な事象の発生時刻を実験データとS A F E R解析結果を比較して示している。また、図 4-26、図 4-27、図 4-28、図 4-29、図 4-30、図 4-31、図 4-32 及び図 4-33 には、実験結果とS A F E R解析結果の比較を、蒸気ドーム圧力変化、破断流量変化、ダウンカマ領域水位変化、炉心シュラウド内水位変化及び燃料被覆管温度変化について示す。

##### (1) 蒸気ドーム圧力

図 4-26 及び図 4-27 に蒸気ドーム圧力変化を示す。

C S 配管破断実験は、ダウンカマ領域の水位低信号によりM S I Vが閉止する約 80 秒までは圧力制御されるため圧力は維持されている。M S I V閉止後に圧力が上昇するが、約 150 秒でのA D S作動により急速減圧する。S A F E Rコードは、M S I V閉止後わずかに圧力を高めに評価しているが、A D S作動による減圧過程全体を通して実験と良く一致している。

M S 配管破断実験は、破断後直ちに減圧するが、M S I Vが約 3 秒で閉止すると、冷却材放出流量は破断配管 1 本のみ減少するため、圧力は上昇している。しかし、約 5 秒以降はバンドル出力の低下により単調に減少する。減圧過程では減圧沸騰、高圧注水系（以下「H P F L」という。）サブクール水の注入による蒸気凝縮が発生しているが、S A F E Rコードは実験の圧力挙動を良く予測している。また、図 4-28 に破断流量変化を示す。S A F E R解析結果は実験結果と良く一致している。

F W 配管破断実験についても、S A F E Rコードは実験の圧力挙動を良く予測している。実験では、破断後の減圧に伴い約 40 秒で下部プレナムの沸騰により減圧が緩やかになり、H P F Lの注入による蒸気凝縮により減

圧が加速している。S A F E Rコードはこれらの挙動を再現している。

B B (80cm<sup>2</sup>相当)配管破断実験は、M S I V閉止する約 52 秒までは圧力制御されるため圧力は維持されている。M S I V閉止後に圧力が上昇するが、H P F L及びH P C Sの注水により圧力上昇は抑制され、約 98 秒でA D Sが作動すると急速に減圧する。S A F E Rコードは実験の圧力挙動を良く予測しており、特に、A D S作動後の減圧過程は実験と良く一致している。

## (2) ダウンカマ領域水位

図 4-29 及び図 4-30 にダウンカマ領域の水位変化を示す。

C S 配管破断実験と B B (80cm<sup>2</sup>相当)配管破断実験については、A D Sが作動する前の水位変化を比較して図 4-29 に示す。実験結果とS A F E R解析結果は非常に良く一致していることから、水位低信号によって作動しているM S I V、E C C Sの起動のタイミングも良く合っている。

M S 配管破断については、S A F E RコードはH P F Lが注入を開始するまでは実験結果を良く再現している。実験ではダウンカマ上部でC C F L現象が発生しており、これにより注入されたH P F L水がダウンカマ上方に維持され水位を形成している。このような現象はS A F E Rコードではモデル化されていないため、実験結果と解析結果に差が生じている。しかし、ダウンカマ上部でのC C F L現象はF I S T-ABWR固有の現象であり、実機においては発生しないので特に問題とはならない。

F W配管破断実験については、実験結果に対してS A F E Rコードが水位を高めにより予測している。これは、実験結果はコラプス水位であるのに対して、S A F E R解析結果は二相水位を示しているためである。



### (3) 炉心シュラウド内水位

図 4-31 に C S 配管破断実験及び B B (80cm<sup>2</sup> 相当)配管破断実験の炉心シュラウド内のバンドル及び上部プレナム (図 4-25 における領域 3 及び領域 5) の水位変化を示す。

C S 破断実験の上部プレナム水位は、A D S 作動前に C S 破断位置まで低下し、破断位置が露出する。A D S 作動により急速減圧すると、沸騰により二相水が上部プレナムに流入するため一時的に二相水位は増加するが、水位は再び低下して約 300 秒で C S 破断位置が露出する。A D S 作動及び破断位置の露出のタイミングは S A F E R コードで良く予測している。A D S 作動後の水位変化において、S A F E R コードの解析結果が高めとなっている部分があるが、水位変化の全体挙動は一致しているといえる。なお、バンドル内は常に二相水で満たされており、S A F E R コードも同じ結果となっている。

B B (80cm<sup>2</sup> 相当) 配管破断実験の上部プレナム水位は、M S I V 閉止後のシステム圧力上昇によりボイド率が減少するため低下するが、H P C S 注水により上昇し、さらに A D S 作動による減圧沸騰により二相水が増加して満水となる。この間、バンドル内は常に二相水で満たされている。S A F E R コードはこれらの挙動を良く予測している。

M S 配管破断実験と F W 配管破断実験については、バンドル内は全期間にわたり二相水で冠水されており、また、上部プレナム領域も二相水で満水である。このため、炉心シュラウド内に水位は形成されない。

### (4) 燃料被覆管温度

実験では、4 ケースのいずれもバンドル内が二相水位で冠水維持されているため燃料被覆管温度上昇はなく、システム圧力に対する飽和温度近傍

を維持している。S A F E R解析結果も実験結果を良く再現している。図 4-32 にC S 配管破断，また，図 4-33 にB B (80cm<sup>2</sup> 相当)配管破断の燃料被覆管温度変化の比較を示す。

#### 4.4.3 まとめ

以上より，A B W RプラントのL O C A模擬実験であるF I S T-A B W RのC S 配管，M S 配管，F W 配管の破断実験及びB B 配管破断実験について，S A F E Rコードによる実験解析を行い，S A F E RコードがA B W Rプラントに対しても適用可能であることを確認した。

- ・ 四つの異なるL O C A実験における模擬バンドルは二相水位により冠水が維持され，模擬燃料棒はヒートアップすることなく，冷却材の自然循環により冷却された。S A F E Rコードはこれらの四つの実験の挙動を予測できた。
- ・ S A F E RコードはA B W RのL O C A事象の圧力変化の全体的な傾向を予測できることを確認した。
- ・ S A F E Rコードはダウンコマ領域の水位変化を良く予測したことにより，M S I V閉止，E C C S注水及びA D S作動のタイミングを正しく取り込むことができた。

また，F I S T-A B W RにおけるM S 配管破断の実験結果 (Run No. 2) は，実機の有効性評価事象で想定される原子炉急速減圧過程と類似している。このような過渡変化に対してS A F E Rコードの適用性が確認されたことから，実機の有効性評価解析にもS A F E Rコードを適用できると考える。

表 4-4 S A F E R コードによる実験解析の対象とした F I S T - A B W R

実験条件

Run No.	1 (CSLB)	2 (MSLB)	3 (FWLB)	4 (BB(80cm <sup>2</sup> ))
条件				
破断位置	炉心スプレイ 配管	主蒸気(MS) 配管	給水(FW) 配管	压力容器 底部(BB)
破断面積 (%)	100	100	100	80cm <sup>2</sup> 相当
作動 ECCS	1HPCS+ADS	2HPFL+ADS	2HPFL+ADS	1HPCS+2HPFL+ADS
初期出力 (MW)	約 4.6	約 4.6	約 4.6	約 4.6
初期ドーム圧力 (MPa[gage])	7.32	7.29	7.30	7.31

表 4-5 F I S T - A B W R 実験における主要事象の発生時刻

(実験データ / SAFER 解析結果, 単位 : s)

Run No.	1 (CSLB)	2 (MSLB)	3 (FWLB)	4 (BB(80cm <sup>2</sup> ))
事象				
破断発生, 給水流量及び 再循環ポンプ停止, バン ドル出力変化開始	0/0	0/0	0/0	0/0
破断位置露出(F W L B)	—	—	6/7	—
M S I V 閉止	80/80	3/3	10/10	52/52
H P F L - 1 注入開始	不作動仮定	37/37	127/126	62/63
H P F L - 2 注入開始	不作動仮定	37/37	217/217	87/89
H P C S - 2 注入開始	119/113	不作動仮定	不作動仮定	87/89
破断位置露出(C S L B)	119/113	—	—	—
A D S 作動	150/157	—	—	98/102
破断位置露出(C S L B)	300/300	—	—	—

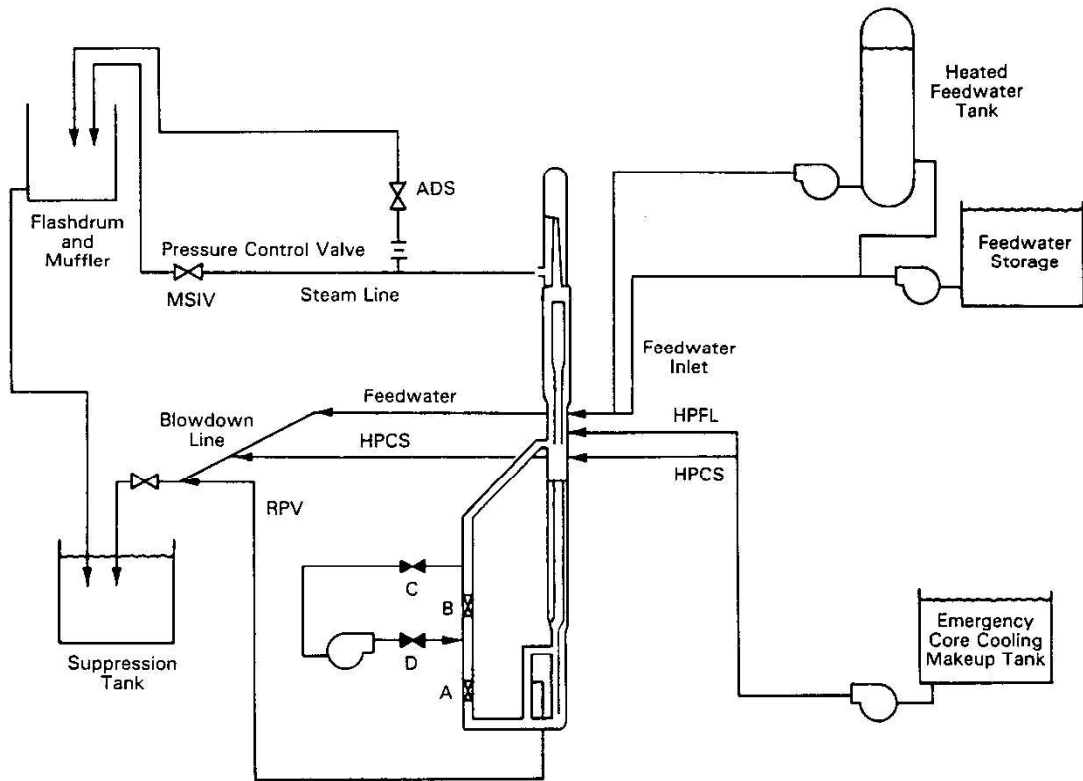


図 4-24 F I S T - A B W R 系統図

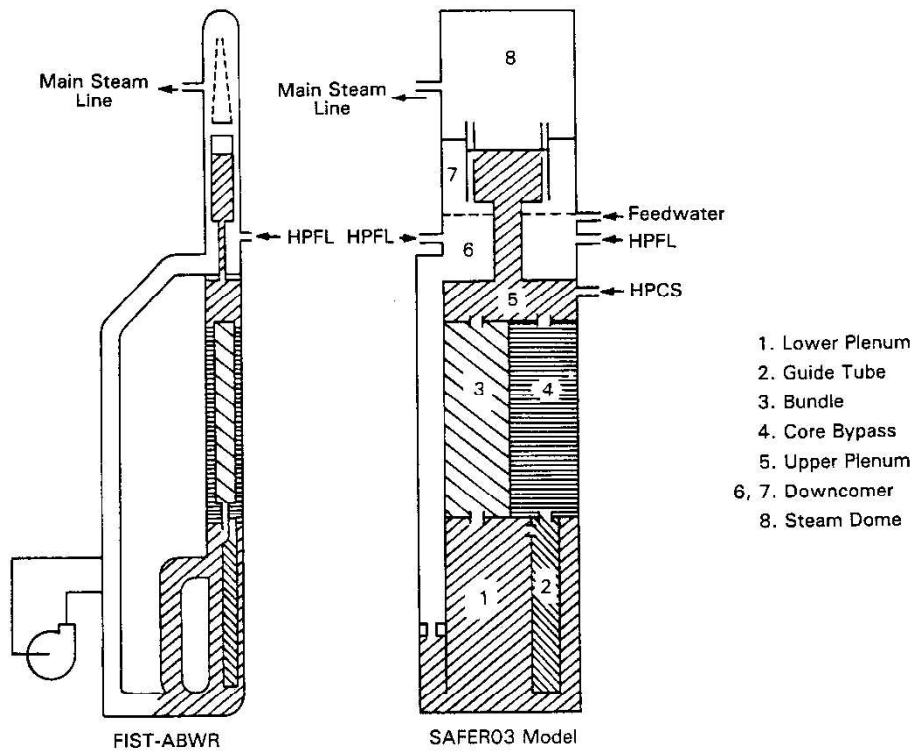


図 4-25 F I S T - A B W R 実験解析ノード分割図

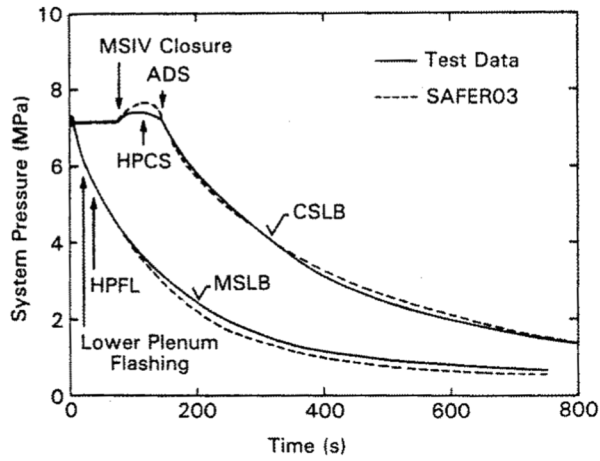


図 4-26 蒸気ドーム圧力変化  
(F I S T - A B W R, C S 配管破断, M S 配管破断)

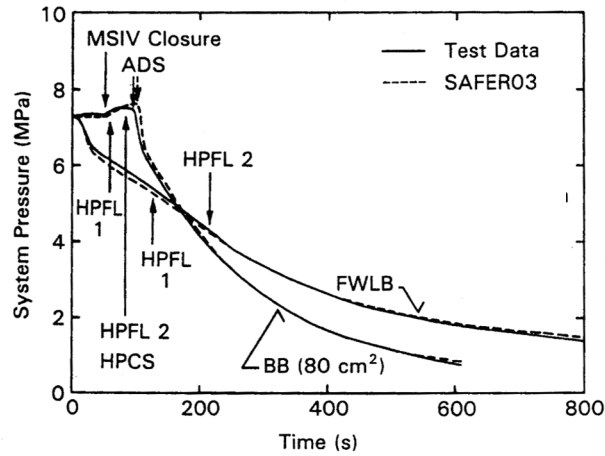


図 4-27 蒸気ドーム圧力変化  
(F I S T - A B W R, F W 配管破断, B B (80cm<sup>2</sup>) 破断)

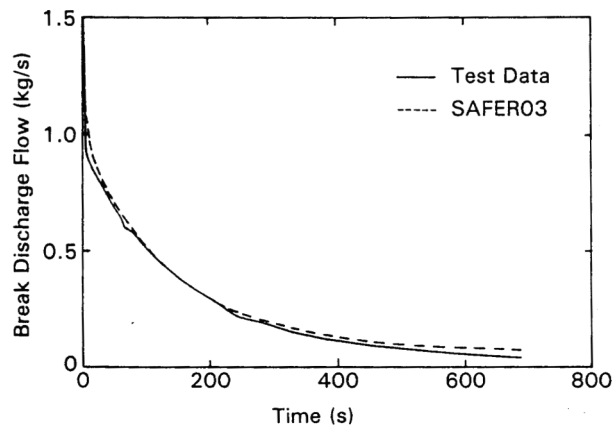


図 4-28 破断流量変化 (F I S T - A B W R, M S 配管破断)

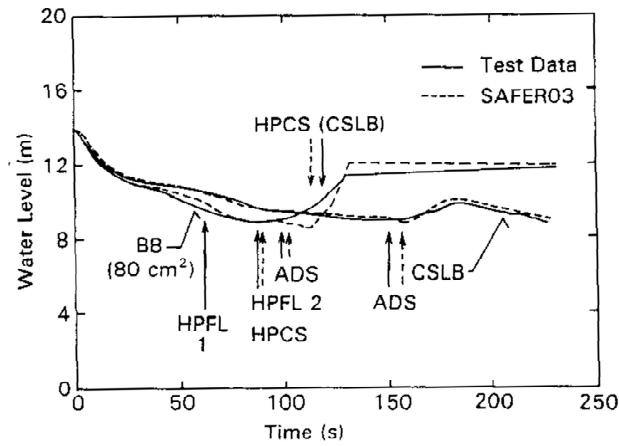


図 4-29 ダウンカマ領域水位変化  
(F I S T - A B W R, C S 配管破断, B B (80cm<sup>2</sup>)破断)

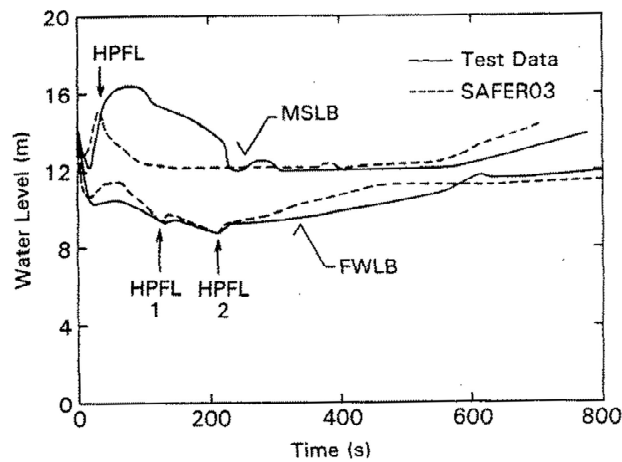


図 4-30 ダウンカマ領域水位変化  
(F I S T - A B W R, F W 配管破断, M S 配管破断)

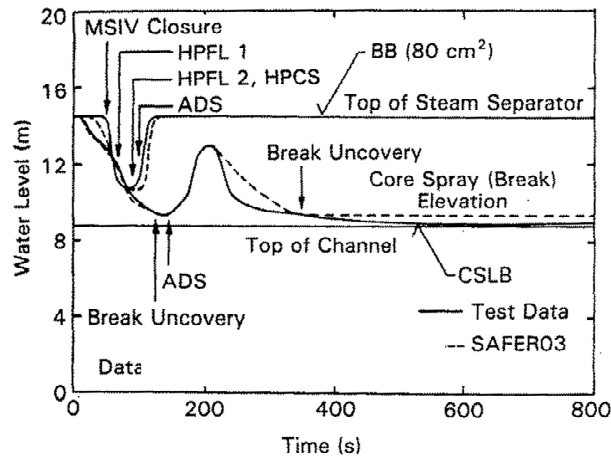


図 4-31 炉心シュラウド内水位変化  
(F I S T - A B W R, C S 配管破断, B B (80cm<sup>2</sup>)破断)

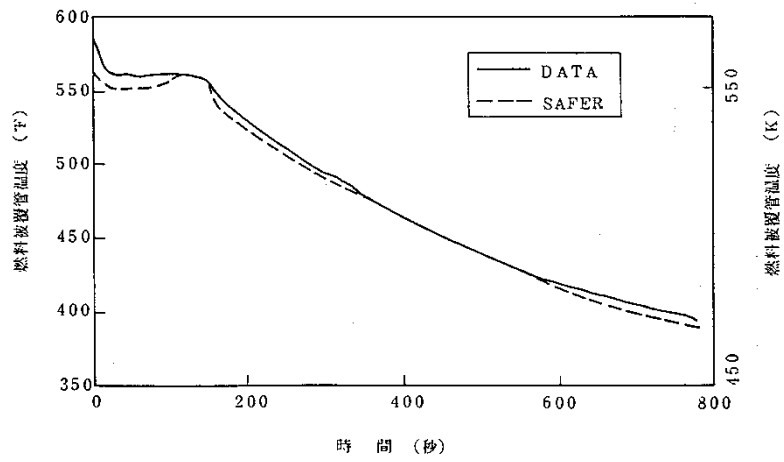


图 4-32 燃料被覆管温度变化 (F I S T - A B W R, C S 配管破断)

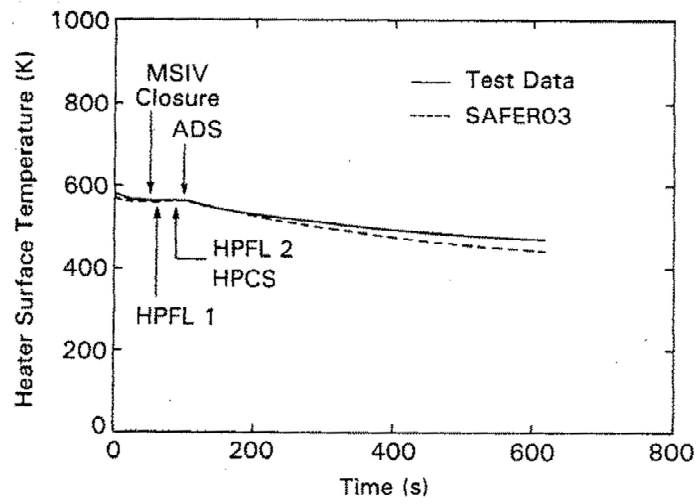


图 4-33 燃料被覆管温度变化 (F I S T - A B W R, B B (80cm<sup>2</sup>)破断)

#### 4.5 実機解析への適用性

##### 4.5.1 重要現象への適用性

S A F E Rコードによる実験解析結果と主要な実験結果の比較を表 4-6 に示す。また、図 4-34 に燃料被覆管最高温度の比較を示す。

以下に、S A F E Rコードの重要現象への適用性の妥当性確認について述べる。

#### (1) 炉心水位（沸騰・ボイド率変化，気液分離（水位変化）・対向流，三次元効果）

T B L，R O S A - III及びF I S T - A B W Rの実験解析により，S A F E Rコードの二相水位変化は解析結果に重畳する水位振動成分を除いて，実験結果とおおむね同等の結果が得られている。なお，炉心が露出する事象についての炉心再冠水時刻を遅く評価する傾向にあるが，その差は，表 4-6 に示すように±0～+54 秒の範囲で実験結果と一致している。これらの試験では注水手段としてE C C Sを想定しており，一方，有効性評価で注水系として使用するのはいずれも注水能力の小さい代替注水系であるが，「5. 有効性評価への適用性」に記載する，再冠水過程における水位変動が燃料棒冷却に及ぼす影響の不確かさを考慮することにより，S A F E Rコードは，沸騰・ボイド率変化及び気液分離（水位変化）・対向流に適用できる。

#### (2) 燃料被覆管温度（燃料棒表面熱伝達，気液熱非平衡）

T B L及びR O S A - IIIの実験解析により，S A F E Rコードが噴霧流熱伝達モデルにSun-Sahaの式を用いているため，炉心露出時の熱伝達係数を低く予測し，燃料被覆管温度を高く予測していることを確認した。P C



Tは表 4-6 に示すように+10°C～+150°C程度高めに評価する。なお、スプレイ冷却のない実験結果（T B L実験 Run No. 4）では，+50°C程度高めに評価する。

S A F E Rコードでは，燃料棒表面熱伝達モデルで採用している個々の熱伝達相関式は，それぞれ実験結果を保守的に予測するか，あるいは，よく一致することが確認されていることから，「5. 有効性評価への適用性」に記載する，T B L，R O S A－Ⅲ実験で想定している注水手段と有効性評価で使用している注水手段での注水能力の相違が燃料棒表面熱伝達に及ぼす影響の不確かさを考慮することにより，S A F E Rコードは燃料棒表面熱伝達に適用できる。

### (3) 原子炉圧力（冷却材放出，沸騰・凝縮・ボイド率変化）

T B L，R O S A－Ⅲ及びF I S T－A B W Rの実験解析により，S A F E Rコードが系の圧力変化及び圧力容器の水位変化を良く予測することを確認しており，有効性評価におけるM S I Vの閉止による圧力上昇挙動から急速減圧時の圧力低下挙動は実験解析と同等である。

したがって，圧力変化は実験結果とおおむね同等の解析結果が得られていることから，S A F E Rコードは冷却材放出及び沸騰・凝縮・ボイド率変化に適用できる。

### (4) 原子炉水位（沸騰・凝縮・ボイド率変化，気液分離（水位変化）・対向流）

F I S T－A B W Rの実験解析により，S A F E Rコードが原子炉水位（ダウンコマ領域水位）の低下を良く予測し，水位低下によるM S I Vの閉止，E C C Sの起動のタイミングを予測できることを確認した。E C C

S 起動のタイミングは表 4-5 に示すように、- 6 秒～+ 7 秒の範囲で実験結果と一致している。炉心シュラウド外水位については、燃料被覆管温度及び運転員操作のどちらに対しても、二相水位及びこれを決定する二相流動モデルの妥当性の有無は重要ではなく、質量及び水頭のバランスだけで定まるコラプス水位が取り扱えれば十分である。

したがって、炉心シュラウド外のコラプス水位を適切に評価することから、S A F E R コードは沸騰・凝縮・ボイド率変化及び気液分離（水位変化）・対向流に適用できる。

#### 4.5.2 実験装置のスケーリング及びE C C S構成の異なるプラントへの適用性

S A F E R コードの妥当性確認に使用したT B L，R O S A - III及びF I S T - A B W R 実験装置は、表 4-7 に示すように、それぞれ実機を縮尺模擬し、実機と同等のE C C S構成としている。

実験装置と実機の差異については、特に、燃料集合体の体数と軸方向長さ及びE C C S構成が重要と考えられるため、これらについて、実験結果の実機適用性についての考え方を以下に述べる。

##### (1) 燃料集合体の体数及び軸方向長さの影響

T B Lは熱出力 3293MW，燃料集合体 764 体を装荷したBWRを対象としており、出力の異なる複数の燃料集合体が存在する系において、E C C Sの作動及び炉心の温度上昇に密接に関連する原子炉圧力及び原子炉水位の変化を実時間で模擬することを目的として設計されている。このため、T B Lは電気加熱の実寸大模擬燃料集合体 2 体を用い、原子炉圧力容器内の熱水力挙動を模擬するために各領域の容積，E C C S注水量を実機の燃

燃料集合体数との比 (2/764) で縮尺模擬している。また、圧力容器及び内部構造物の寸法は、事故後の原子炉水位変化を実時間で模擬するようジェットポンプ下端から気水分離器下端までの高さ方向の長さを実機と同一としている。

T B L 実験では低出力燃料集合体と高出力燃料集合体の熱水力挙動の差異、いわゆる多チャンネル効果が現れた。減圧過程において、高出力燃料集合体では下部プレナムから燃料集合体内に吹き上げる蒸気流量が大きく気液上昇流を生じ、低出力燃料集合体では蒸気流量が少ないため燃料集合体上部からの落下水が多くて気液対向流になり流動分離が生じていることが差圧計測より推定された。この流動様式の差異は、別途行われた、実機の炉心シュラウド内を実寸大で分割模擬した実規模多チャンネルの再冠水システム実験<sup>(31)</sup>の結果でも確認されている。

したがって、T B L は B W R の事故後の熱水力挙動を模擬することが可能であり、実験解析で得られた結論は B W R へ適用できると考える。

R O S A - III 及び F I S T - A B W R の基本的なスケーリングの考え方は T B L と同様であり、実機の L O C A 時の炉内熱水力挙動を実時間で模擬することを目的として設計されている。R O S A - III は燃料集合体 848 体からなる熱出力 3800MW の B W R の炉心を実機の 1/2 の軸方向長さの電気加熱の燃料集合体 4 体で模擬しており、各部の体積は実機の 1/424 となっている。R O S A - III 実験結果の実機適用性に関しては、R O S A - III 実験と B W R の L O C A の熱水力挙動との類似性が主要な R O S A - III 実験に対して確認されている<sup>(32)</sup>。R O S A - III 実験データと計算コードによる R O S A - III 及び B W R 両体系の解析結果をもとに評価が行われ、小破断 L O C A についても、圧力挙動、流動挙動、炉心水位挙動及び燃料棒表面温

度挙動について、基本的挙動を良く模擬していることが確認されている<sup>(33)</sup>。また、炉心の軸方向長さは実機の 1/2 であるが、炉心シュラウド内側と外側の相対的な高さと容積の関係を良く模擬していることから、全炉心露出及び再冠水に要する時間は、実機の結果と一致している。

したがって、R O S A - III は B W R の事故後の熱水力挙動を模擬することが可能であり、実験解析で得られた結論は B W R へ適用できると考える。

また、F I S T - A B W R は燃料集合体 872 体からなる熱出力 3926MW の A B W R の炉心を電気加熱の実寸大模擬燃料集合体 1 体で模擬しており、各部の体積は実機の 1/872 となっている。したがって、実験は実寸大模擬燃料集合体 1 体を用いた炉心の平均的な挙動を示している。A B W R は設計基準事故時には炉心が冠水維持される設計になっており、炉心が露出、再冠水する過程がないため炉心の三次元的流動様式の差異は重要ではない。なお、A B W R で炉心露出が発生する場合は、B W R と同様の炉心ヒートアップが発生するため、前述の T B L 及び R O S A - III における実験結果が適用できると考える。

したがって、F I S T - A B W R は A B W R の事故後の熱水力挙動を模擬することが可能であり、実験解析で得られた結論は A B W R へ適用できると考える。

## (2) E C C S 構成の影響

T B L 及び R O S A - III は外部再循環系及びジェットポンプを有するプラントを模擬し、また、E C C S は炉心上部に注水する炉心スプレイ系 (H P C S 及び L P C S)、炉心バイパス部に注水する L P C I で構成する

ECCSを模擬しており、実プラントの構成と相違はない。

また、ABWR実プラントは炉心上部に注水するHPCF、RCIC及び低圧注水系（以下「LPFL」という。）で構成されるが、FIST-ABWRは炉心上部に注水するHPCSとダウンカマ部に注水するHPFLで構成されており、実プラントと相違する。しかし、原子炉内注水位置は同等であることから、HPCFとHPCSの相違、LPFLとHPFLの相違は原子炉圧力容器内の保有水の分布の観点からは問題にならない。したがって、実機解析へ適用できると考える。

なお、ABWRの設計基準事故解析及びFIST-ABWR実験では、炉心が冠水維持され、炉心のヒートアップはない。しかし、有効性評価解析では炉心が露出し、燃料被覆管温度が上昇する。ABWRにおいて炉心が露出し、燃料被覆管温度が上昇する事象については、炉心の熱水力的挙動はBWRの中小LOCAの挙動と同様と考えられる。ABWRは低圧注水系が炉心シュラウド外のダウンカマ部に注水されるが、冷却水は下部プレナムに流入し、さらに燃料集合体下部から燃料集合体内に流入して炉心を再冠水冷却する。これは、低圧注水系が炉心シュラウド内に注水されるBWRも同様であり、炉心バイパス領域の上部に注水された冷却水はバイパス部に蓄積し、燃料集合体下部から燃料集合体内に流入して炉心を再冠水冷却する。したがって、BWRの炉心ヒートアップ挙動を模擬した実験結果により妥当性を確認されたSAFERコードは、ABWRの炉心露出及びヒートアップ解析にも適用できると考える。

#### 4.5.3 実機解析（9×9燃料）への適用性

SAFERコードの妥当性確認に使用したTBL、ROSA-III及びFIST-ABWR各実験の模擬燃料集合体は、表 4-7 に示すとおり、いずれ

も実機の8×8燃料集合体を模擬している。一方、実機の有効性評価解析は、9×9燃料を装荷した炉心について解析、評価していることから、SAFERコードの9×9燃料への適用性について以下に述べる。

SAFERコードの熱水力モデル及び炉心ヒートアップモデルは、3.3節に述べたように、一般的な式を用いている。また、9×9燃料は従来燃料との共存性を考慮して、従来の炉型でも使用し得るよう燃料集合体の改良が行われており、燃料の相違による熱水力的特性の差は小さい。したがって、SAFERコードを9×9燃料に適用する場合は、添付1に示した解析条件のうち、燃料及び炉心に係るデータを9×9燃料及び炉心の設計に基づいて適切に入力することにより、その炉心の長期間の原子炉内熱水力過渡変化を適切に評価することができる。

なお、燃料の相違により変更する具体的な解析条件を、添付1より抜粋して表4-8に示す。9×9燃料(A型)は、燃料集合体の有効燃料長下端から約2/3の高さまで部分長燃料棒が存在するため、燃料集合体の水力等価直径と流路面積は、部分長燃料棒上端の上下で変化する。この影響として、部分長燃料棒上端より上の領域では、空間が存在するため流速が低下して熱伝達率が低下する可能性が考えられる。SAFERコードは、炉心(全燃料集合体)の水力等価直径と流路面積を軸方向で一様としてモデル化しているため、9×9燃料(A型)装荷炉心の解析に際しては、部分長燃料棒上端より上の領域の水力等価直径と流路面積で代表している。炉心の水力等価直径と流路面積の入力データの解析結果への影響は小さいが、部分長燃料棒上端より上の領域の形状で代表する場合の方が水力等価直径が大きくなり、その結果として炉心露出時の蒸気单相熱伝達係数を小さめに見積もるように取り扱っている。一方、部分長燃料棒上端より上の領域の形状で

代表した場合、過渡時の燃料集合体の圧力損失が低減され、炉心流量が増加する傾向になると考えられるが、炉心冷却上、その影響は小さい。

#### 4.5.4 まとめ

以上より、本章に記載している妥当性確認結果は、ECCS構成等の異なるBWRプラント共通の妥当性確認として適用性を有するとともに、実機BWRの有効性評価解析に適用できるといえる。

なお、有効性評価解析における原子炉内ノード分割は、LOCAと同様の物理現象が想定されることから、BWRのLOCA模擬実験解析と同様の分割とする。また、有効性評価解析が対象とするシーケンスでは、炉心露出による燃料被覆管のヒートアップの可能性があるため、炉心及び高出力燃料集合体に関しては軸方向に更に細分化し、有効発熱部を10分割、その上下の非加熱部を含めて全12分割とする。

表 4-6 S A F E R コードによる実験解析結果と実験結果の比較<sup>(22)</sup>

実験		最高温度(°C)		最高温度時刻(s)		再冠水時刻(s)	
		実験	解析	実験	解析	実験	解析
TBL	(1)	446	599	135	152	162	165
	(2)	533	591	524	536	550	604
	(3)	351	421	134	143	156	167
	(4)	598	654	612	620	668	722
ROSA-III	(1)	511	612	119	136	171	182
	(2)	559	581	133	135	177	182
	(3)	644	674	190	184	210	210
	(4)	573	627	336	328	366	368
	(5)	566	594	410	383	440	447
	(6)	531	542	531	512	548	553
	(7)	364	382	696	691	734	738
FIST-ABWR	(1)	温度上昇なし	温度上昇なし	—	—	露出なし	露出なし
	(2)	同上	同上	—	—	同上	同上
	(3)	同上	同上	—	—	同上	同上
	(4)	同上	同上	—	—	同上	同上

表 4-7 実験装置のスケーリング及びE C C S構成

項目	TBL	ROSA-III	FIST-ABWR
模擬したプラント	BWR 熱出力 3293MW 集合体数 764 体 HPCS/LPCS/LPCI	BWR 熱出力 3800MW 集合体数 848 体 HPCS/LPCS/LPCI	ABWR 熱出力 3926MW 集合体数 872 体 HPCF/LPFL/RCIC
実験装置	体積比：2/764 熱出力：約 10MW 集合体数：8×8燃料 2 体（実寸大） HPCS/LPCS/LPCI	体積比：1/424 熱出力：約 4 MW 集合体数：8×8燃料 4 体（1/2 長） HPCS/LPCS/LPCI	体積比：1/872 熱出力：約 4.6MW 集合体数：8×8燃料 1 体（実寸大） HPCS/HPFL



表 4-8 燃料の相違により変更する S A F E R 解析条件

分類	解析条件	
定格出力運転条件 パラメータ及び幾 何形状データ	冷却材体積	炉心
	流路形状データ（各領域の水 力的等価直径，流路断面積）	炉心
		上部タイプレート
	圧力損失データ	炉心
炉心データ	炉心核分裂出力時間変化	
	炉心崩壊熱時間変化	
燃料データ	燃料集合体あたりの燃料棒数	
	燃料棒配列	
	燃料棒ピッチ	
	燃料棒有効長	
	燃料被覆管外径，燃料被覆管肉厚	
	燃料被覆管物性（熱伝導率，比熱，密度）	
	燃料ペレット直径	
	燃料ペレット－燃料被覆管ギャップ条件（ガス圧力，ガ ス組成，ギャップ熱伝達係数）	
	燃料ペレット物性（熱伝導率，比熱，密度）	
	燃料ペレット径方向出力分布	
	燃料棒最大線出力密度	
	燃料棒軸方向出力分布	
	局所出力ピーキング	
燃料集合体断面平均燃焼度		

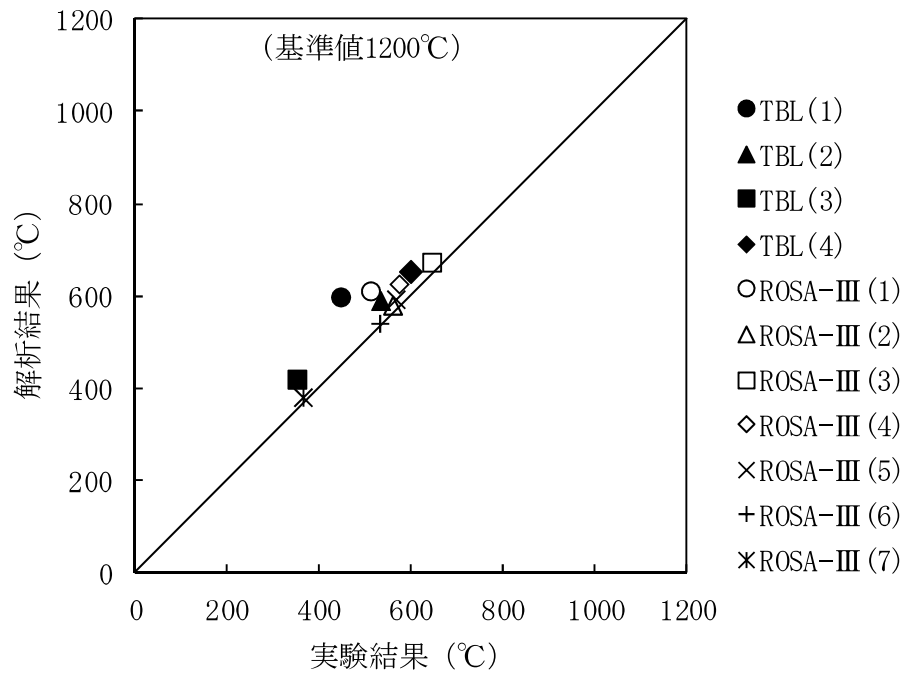


図 4-34 燃料被覆管最高温度の比較<sup>(22)</sup>

## 5. 有効性評価への適用性

4 章に記載した実験解析を踏まえ、重要現象についての不確かさ及びその不確かさが評価指標の観点と運転員操作の観点から有効性評価解析へ与える影響について表 5-1 にまとめた。以下にその不確かさについて記述する。

### 5.1 不確かさの取扱いについて（評価指標の観点）

S A F E R コードで取り扱う評価指標は、燃料被覆管温度であるため、燃料被覆管温度への重要現象の不確かさの影響について以下に記載する。

#### (1) 崩壊熱

崩壊熱は信頼性の高い評価モデルと最確条件を包絡できる条件を使用して大きくなるように評価した値を S A F E R コードの入力として使用しているため、有効性評価では燃料被覆管温度を高く評価する。

#### (2) 燃料棒表面熱伝達，沸騰遷移，気液熱非平衡

燃料棒表面熱伝達，沸騰遷移及び気液熱非平衡については，実験解析において，熱伝達係数を低めに評価する可能性があり，他の解析モデルの不確かさともあいまってコード全体として，炉心が露出する場合は，実験結果の燃料被覆管最高温度に比べて高めに評価することから，有効性評価解析においても燃料被覆管温度は高めに評価される。また，炉心が冠水維持する場合は，燃料被覆管温度の上昇はなく，不確かさは小さい。

#### (3) 燃料被覆管酸化

燃料被覆管の酸化量の計算は，燃料被覆管温度が高温となる場合に酸化量，酸化反応熱を高めに評価する Baker-Just の式を適用しているため，燃

料被覆管温度は高めに評価される。

#### (4) 燃料被覆管変形

燃料被覆管温度計算と燃料棒内圧の計算から、内圧による応力が破裂限界応力を超えた場合には、燃料被覆管が破裂を起こすとみなし、燃料被覆管の内側にもジルコニウム-水反応を計算する。破裂を判定する限界応力は、図 3-11 に示したように、実験データのベストフィット曲線を仮定し、現実的な条件としている。

#### (5) 沸騰・ボイド率変化，気液分離（水位変化）・対向流，三次元効果

炉心の二相水位は、解析結果に重畳する水位振動成分を除いて、実験結果とおおむね同等の結果が得られていることから、有効性評価解析における燃料被覆管温度への影響は小さい。また、低圧代替注水設備の注水による炉心内の二相水位変化に起因する燃料棒冷却（蒸気単相冷却又は噴霧流冷却）の不確かさは $20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 程度である（添付5参照）。

なお、原子炉圧力の評価において、炉心スプレイを用いる一部の実験解析では実験結果に比べて圧力低下を早めに予測する不確かさがあるが、低圧注水系を注水手段として用いる事故シーケンスでは考慮する必要はない。

#### (6) 冷却材放出（臨界流・差圧流）

S R Vからの冷却材放出については、設定圧力で設計流量が放出されるように入力で設定するため、不確かさの影響はない。破断口からの冷却材放出は、実験データと良く一致する現実的な臨界流モデルを適用しており、有効性評価解析における燃料被覆管温度への影響は小さい。

冷却材圧力変化については、原子炉へ注水する系統の注水開始時間や流量に影響するが、圧力変化は実験結果とおおむね同等の解析結果が得られていることから、有効性評価解析における燃料被覆管温度への影響は小さい。

(7) ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）

ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）の原子炉注水については、各系統の設計条件に基づく原子炉圧力と注水流量の関係を使用しており、実機設備仕様に対して注水流量を少なめに与え、燃料被覆管温度を高め評価する。

(8) 沸騰・凝縮・ボイド率変化，気液分離（水位変化）・対向流

炉心シュラウド外水位については、二相流動モデルの妥当性の有無は重要でなく、質量及び水頭のバランスだけで定まるコラプス水位が取り扱えれば十分であることから、有効性評価解析における燃料被覆管温度への影響は小さい。

以上より、重要現象の不確かさは、燃料被覆管温度を過大評価又は過大評価する方向に寄与し、有効性評価解析は評価指標の観点で厳しい評価となっている。

## 5.2 不確かさの取扱いについて（運転操作の観点）

S A F E Rコードで取り扱う運転操作は、S R Vを使用した原子炉減圧操作及びE C C S又は代替注水設備を使用した原子炉注水操作、注水停止操作である。これらの運転操作へのコードの不確かさの影響を以下に記載する。

### (1) 運転操作の起点への影響

S R Vを使用した原子炉減圧操作及びE C C S、代替注水設備を使用した原子炉注水操作は、代替電源あるいは代替注水設備の準備が完了したタイミング又は原子炉水位低信号の発信を起点に実施する。代替電源あるいは代替注水の準備の完了のタイミングは訓練実績等に基づく時間に余裕をみて設定されるため、不確かさの影響は安全側に評価される。また、原子炉水位低信号の発信はE C C S起動用設定水位を採用しており、事象発生後の原子炉水位の低下過程で発信される。事象発生後の原子炉水位変化は崩壊熱及び臨界流モデルの不確かさの影響があるが、これらの評価モデル及び評価条件の選定には信頼性の高い評価モデル及び現実的な評価条件を採用しているため、不確かさの影響は小さい。

なお、燃料被覆管の破裂判定に対しては、格納容器ベント操作への影響が考えられるが、格納容器ベント開始タイミングまでの時間的余裕が十分あることから、コードの不確かさが運転操作の可否に影響することはない。

また、解析上の取扱いとして、破裂判定は燃料被覆管温度が最も高くなる燃料集合体の値を代表として用いるが、現実的な炉心における燃焼度の分布を踏まえると、その影響は更に小さくなる。

## (2) 運転操作後の影響

原子炉減圧操作後は、原子炉圧力変化に対応して原子炉への注水が行われ、原子炉水位の回復及び維持がなされる。その後、注水系の停止、再起動等の運転操作が考えられるが、原子炉圧力が低下し、かつ、原子炉水位が維持された状態であるため、コードの不確かさはその後の運転操作の可否に影響しない。

表 5-1 重要現象の不確かさ (1/3)

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 (核)	崩壊熱	崩壊熱モデル	入力値に含まれる。最悪条件を包絡でききる条件を設定することにより崩壊熱を大きくするよう考慮している。	崩壊熱を大きく設定するため、燃料被覆管温度を高く評価する。
	燃料棒表面熱伝達、沸騰遷移	燃料棒表面熱伝達モデル	TBL, ROSA-IIIの実験解析において、熱伝達係数を低めに評価する可能性があり、他の解析モデルの不確かさもあいまってコード全体として、炉心が露出し、スプレイ冷却のない場合には実験結果の燃料被覆管最高温度に比べて+50°C程度高めに評価し、スプレイ冷却のある場合には実験結果に比べて10°C~150°C程度高めに評価する。また、炉心が冠水維持する場合には、FIST-ABWRの実験解析において燃料被覆管温度の上昇はないため、不確かさは小さい。また、低圧代替注水設備による注水での燃料棒冷却過程における蒸気单相冷却又は噴霧流冷却の不確かさは20°C~40°C程度である。	実験解析では熱伝達モデルの保守性により燃料被覆管温度を高く評価することから、有効性評価解析でも燃料被覆管温度を高く評価する。
炉心 (燃料)	燃料被覆管酸化	ジルコニウム-水反応モデル	酸化量及び酸化反応に伴う発熱量をより大きく見積もる Baker-Just 式による計算モデルを採用しており、保守的な結果を与える。	燃料被覆管温度を高く評価する。
	燃料被覆管変形	膨れ・破裂評価モデル	膨れ・破裂は、燃料被覆管温度と円周方向応力に基づいて評価され、燃料被覆管温度は上述のように高めに評価され、円周方向応力は燃焼期間中の変化を考慮して燃料棒内圧を大きく設定し保守的に評価している。したがって、バストフィット曲線を用いる場合も破裂の判定はおおむね保守的となる。	破裂発生前の燃料被覆管の膨れ及び破裂発生の有無は、伝熱面積やギヤップ熱伝達係数、破裂後のジルコニウム-水反応熱に影響を与え、燃料被覆管最高温度及び酸化割合に影響を与えることとなる。解析コードでは、前述の判定を行うための燃料被覆管温度を高めに評価することから、おおむね保守的な結果を与えるものと考ええる。



表 5-1 重要現象の不確かさ (2/3)

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 (熱流動)	沸騰・ボイド率変化、 気液分離 (水位変化) ・対向流、三次元効果	二相流体の 流動モデル	TBL, ROSA-III, FIST-ABWRの実験解析において、二相水位変化は解析結果に重畳する水位振動成分を除いて、実験結果とおおむね同等の結果が得られている。低圧代替注水設備の注水による燃料棒冷却(蒸気単相冷却又は噴霧流冷却)の不確かさは20°C~40°C程度である。また、原子炉圧力の評価において、ROSA-IIIでは2MPaより低い圧力で系統的に圧力低下を早めに予測する傾向を呈しており、解析上、低圧注水系の起動タイムラグを早める可能性が示される。しかし、実験で圧力低下が遅れた理由は、水面上に露出した上部支持格子等の構造材の温度が燃料被覆管からの輻射や過熱蒸気により上昇し、LPCSスプレイの液滴で冷却された際に蒸気が発生したためであり、低圧注水系を注水手段として用いる事故シナケンスでは考慮する必要のない不確かさである。このため、燃料被覆管温度に大きな影響を及ぼす低圧代替注水設備の注水タイムラグに特段の差異を生じる可能性はないと考えられる。	炉心内の二相水位変化をおおむね同等に適切に評価することから、有効性評価解析では燃料被覆管温度への影響は小さい。なお、解析に対して実機の注水量が多いため、燃料露出期間が短くなり、有効性評価解析では燃料被覆管温度を高めに評価する。
気液熱非平衡	燃料棒表面 熱伝達モデル	燃料棒表面 熱伝達モデル	TBL, ROSA-IIIの実験解析において、熱伝達係数を低めに評価する可能性があり、他の解析モデルの不確かさともあいまってコード全体として、炉心が露出し、スプレイ冷却のない場合には実験結果の燃料被覆管最高温度に比べて+50°C程度高めに評価し、スプレイ冷却のある場合には実験結果に比べて10°C~150°C程度高めに評価する。また、炉心が冠水維持する場合には、FIST-ABWRの実験解析において燃料被覆管温度の上昇はないため、不確かさは小さい。また、低圧代替注水設備による注水での燃料棒冷却過程における蒸気単相冷却又は噴霧流冷却の不確かさは20°C~40°C程度である。	実験解析では熱伝達モデルの保守性により燃料被覆管温度を高く評価することから、有効性評価解析でも燃料被覆管温度を高く評価する。

表 5-1 重要現象の不確かさ (3/3)

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
	冷却材放出 (臨界流・ 差圧流)	臨界流モデル	TBL, ROSA-III, FIST-ABWRの実験解析において、圧力変化は実験結果とおおむね同等の解析結果が得られており、臨界流モデルに關して特段の不確かさを考慮する必要はない。	SRV流量は、設定圧力で設計流量が放出されるように入力で設定するため、不確かさの影響はない。破断口からの放出は実験結果と良い一致を示す臨界流モデルを適用している。有効性評価解析でも圧力変化を適切に評価し、原子炉への注水のタイミミング及び注水流量を適切に評価するため、燃料被覆管温度への影響は小さい。
原子炉圧力容器 (逃がし安全弁を含む)	沸騰・凝縮・ボイド率変化 気液分離 (水位変化)・対向流	二相流体の流動モデル	下部プレナムの二相水位を除き、ダウンカマの二相水位(炉心シュラウド外水位)に關する不確かさを取り扱う。炉心シュラウド外水位については、燃料被覆管温度及び運転員操作のどちらに対しても二相水位及びこれを決定する二相流動モデルの妥当性の有無は重要でなく、質量及び水頭のバランスだけで定まるコロシアス水位が取り扱えれば十分である。このため、特段の不確かさを考慮する必要はない。	炉心シュラウド外水位を適切に評価することから、有効性評価解析では燃料被覆管温度への影響は小さい。
	ECS注水 (給水系・代替注水設備含む)	原子炉注水系モデル	入力値に含まれる。各系統の設計条件に基づく原子炉圧力と注水流量の關係を使用しており、実機設備仕様に對して注水流量を少なめに与え、燃料被覆管温度を高めに評価する。	注水特性は、それぞれの系統の設計条件に基づく原子炉圧力と注水流量の關係を入力する。実機設備に對して注入流量を少なめに与えるため、有効性評価解析では燃料被覆管温度を高めに評価する。

## 6. 参考文献

- (1) 「沸騰水型原子力発電所 非常用炉心冷却系 (ECCS) の新性能評価手法について」, 株式会社日立製作所, HLR-032 訂3, 平成10年5月
- (2) 「沸騰水型原子力発電所 非常用炉心冷却系解析モデル (SAFER)」, 株式会社東芝, TLR-044 改訂4, 平成10年5月
- (3) N. Zuber and J. A. Findlay, “Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems”, Trans. ASME J. of Heat Transfer, November 1965.
- (4) J. F. Wilson et al. , “The Velocity of Rising Steam in a Bubbling Two-Phase Mixture”, Trans. of ANS, 5(1), June 1962.
- (5) G. B. Wallis, “One-dimensional Two-Phase Flow”, McGraw-Hill, New York, 1969.
- (6) M. Murase and H. Suzuki, “Evaluation of Countercurrent Gas / Liquid Flow in Parallel Channels with Restricted Ends”, Nucl. Technol., 68, 408, 1985.
- (7) M. Murase and S. Suzuki, “Countercurrent Gas-Liquid Flow in Parallel Channels Simulating a Boiling Water Reactor Core”, Proc. Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, No. C3, Lake Placi., New York, 1984.
- (8) F. J. Moody, “Maximum Flow Rate of a Single Component, Two-Phase Mixture”, J. of Heat Transfer, Trans. ASME, Series C, Vol. 87, No. 1, PP. 134-142, February 1965.
- (9) F. J. Moody, “Maximum Discharge Rate of Liquid-Vapor Mixtures from Vessel”, NEDO-21052, September 1975.

- (10) American Nuclear Society, "American National Standard for Decay Heat Power in Light Water Reactors," ANSI/ANS-5.1-1979, August 1979.
- (11) J.E.Leonard et al. , "Calculation of Low Flow Film Boiling Heat Transfer for BWR LOCA Analysis" , NEDO-20566-1-A Revision 1, October 1982.
- (12) F.W.Dittus and L.M.K.Boelter, "Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type" , University of California Publications in Engineering, Vol.2,1930.
- (13) H.Nagasaka, "New Japanese Correlations on Core Cooling and CCFL Characteristics during BWR LOCA" , NUREG/CP-0072, Vol.5, Feb.1986.
- (14) K.H. Sun, J.M. Gonzalez and C.L. Tien, "Calculation of Combined Radiation and Convection Heat Transfer in Rod Bundles Under Emergency Cooling Conditions" , Journal of Heat Transfer, 414, August 1976.
- (15) P. Saha, "A Post-Dryout Heat Transfer Model Based on Actual Vapor Generation Rate in Dispersed Droplet Regime" , NEDE-13443, May 1976.
- (16) H.Nagasaka, K.Yamada, and A.Kuwako, "BWR Core Cooling in Refill / Reflood Phase" , NUREG/CP-0058, Vol.3, 1984.
- (17) J.G.M.Andersen, "CORECOOL : A Model for the Temperature Distribution and Two-Phase Flow in a Fuel Element under LOCA Conditions" , NEDO-21325, July 1976.

- (18) L. Baker and L. C. Just, “Studies of Metal-Water Reactions at High Temperatures III. Experimental and Theoretical Studies of the Zirconium-Water Reaction”, ANL-6548, 1962.
- (19) A. M. Ross and R. L. Stoute, “Heat Transfer Coefficients Between UO<sub>2</sub> and Zircaloy-2”, CRFD-1075, AECL-1552, 1962.
- (20) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について」, 株式会社日立製作所, HLR-033 訂1, 平成10年2月
- (21) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について」, 株式会社東芝, TLR-045 改訂1, 平成10年1月
- (22) S. Itoya, H. Nagasaka, K. Moriya and S. Miura, “Overview of SAFER03 Assessment Studies”, Journal of Nuclear Science and Technology, 25(3), Mar. 1988.
- (23) 「沸騰水型原子炉のLOCA/ECCS性能評価コード(SAFER)について」, 原子力発電技術顧問会(基本設計) LOCA検討会, 昭和61年7月
- (24) 「軽水型動力炉におけるLOCA時ECCS性能評価コードについて」, 原子炉安全基準専門部会 ECCS性能評価小委員会, 昭和63年4月
- (25) S. Miura, K. Moriya, and T. Sugisaki, “SAFER Qualification by TBL Test Analysis”, NUREG/CP-0072, Vol. 5, Feb. 1986.
- (26) S. Itoya and N. Abe, “Analyses of TBL main steam line break test by SAFER03 and TRAC-BD1”, Proceedings of Second International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, Apr. 1986.

- (27) S. Itoya and N. Abe, "SAFER03 and TRAC-BD1 analyses of TBL experiments on a boiling water reactor loss-of-coolant accident," Nuclear Engineering and Design, 97(3), Nov. 1986
- (28) S. Itoya, J. Otonari and K. Tasaka, "SAFER03 Qualification Against ROSA-III Recirculation Line Break Spectram Tests", NUREG/CP-0072, Vol. 5, Feb. 1986.
- (29) S. Itoya, H. Nagasaka and K. Tasaka, "Assessment of SAFER03 Code Using ROSA-III Break Area Spectrum Tests on Boiling Water Reactor Loss-of-Coolant Accidents", Journal of Nuclear Science and Technology, 24(8), Aug. 1987.
- (30) S. Itoya, F. D. Shum, J. Otonari and H. Nagasaka, "Assessment of the SAFER03 computer code using advanced boiling water reactor test data on a loss-of-coolant accident", Nuclear Technology Vol. 80, Mar. 1988.
- (31) H. Nagasaka, M. Katoh, S. Yokobori, "18 Degree Sector System Test (ESTA II)", NUREG / CP-0058, Vol. 3, 1984.
- (32) 田坂完二他, "ROSA-IIIによる BWR 冷却材喪失事故に関する総合模擬実験研究", JAERI 1307, 1987 年 11 月
- (33) 与能本泰介他, "小破断 LOCA における ROSA-III と BWR/6 の相似性の検討", JAERI-M 84-030, 1984 年 2 月

添付1 入力項目リスト

入力項目リスト (1/4)

分類	入力項目		
定格出力運転条件パラメータ及び幾何形状データ	原子炉熱出力		
	炉心流量		
	主蒸気流量		
	給水流量		
	再循環ポンプ流量		
	原子炉ドーム圧力		
	原子炉水位		
	冷却材体積	炉心	
		上部プレナム	
		下部プレナム	
		炉心バイパス	
		制御棒案内管	
		ダウンカマ	
		蒸気ドーム	
		主蒸気配管	
		再循環配管	
		原子炉各部の寸法 (原子炉压力容器下端からの高さ)	燃料有効部上端, 下端
	炉心シュラウドヘッド上端, 下端		
	給水スパーチャノズル		
	炉心シュラウドサポートプレート		
	ジェットポンプ上端, 下端		
	気水分離器出口		
	制御棒案内管下端		
	炉心支持板上端		
	チャンネルボックス上端		
	ECCS注水位置		
	水位計ノズル		
主蒸気出口ノズル			
原子炉压力容器頂部			

入力項目リスト (2/4)

分類	入力項目	
定格出力運転条件パラメータ及び幾何形状データ	流路形状データ (各領域の水力的等価直径, 流路断面積)	炉心
		上部プレナム
		下部プレナム
		ダウンカマ
		上部タイプレート
		炉心入口オリフィス
		ジェットポンプ入口
	原子炉圧力容器及び内部構造材データ (質量, 熱容量, 表面積)	原子炉圧力容器
		炉心シュラウド
		炉心支持板
		上部格子板
		チャンネルボックス
		制御棒案内管
		制御棒
		気水分離器
		蒸気乾燥器
	圧力損失データ	主蒸気配管
		炉心
		気水分離器



入力項目リスト (3/4)

分類	入力項目
炉心データ	炉心核分裂出力時間変化
	炉心崩壊熱時間変化
	燃料集合体数
燃料データ	燃料集合体あたりの燃料棒数
	燃料棒配列
	燃料棒ピッチ
	燃料棒有効長
	燃料被覆管外径, 燃料被覆管肉厚
	燃料被覆管物性 (熱伝導率, 比熱, 密度)
	燃料ペレット直径
	燃料ペレット-燃料被覆管ギャップ条件 (ガス圧力, ガス組成, ギャップ熱伝達係数)
	燃料ペレット物性 (熱伝導率, 比熱, 密度)
	燃料ペレット径方向出力分布
	燃料棒最大線出力密度
	燃料棒軸方向出力分布
	局所出力ピーキング
燃料集合体断面平均燃焼度	

入力項目リスト (4/4)

分類	入力項目
S R V	段数及び個数
	吹き出し圧力
	吹き出し容量
再循環ポンプ	ポンプ台数
	停止トリップ設定点
	慣性時定数
主蒸気隔離弁	閉トリップ設定点
	全閉時間
事故収束に重要な機器，操作関連	E C C S 及び R C I C (自動起動・停止設定点，作動遅れ時間，台数，容量，原子炉注水特性，冷却水温度，注水・停止手動操作条件)
	代替注水設備 (注水・停止手動操作条件，台数，容量，原子炉注水特性，冷却水温度)
	自動減圧系 (A D S) (弁個数，吹き出し圧力，吹き出し容量，自動起動設定点，作動遅れ時間)
	S R V (手動開操作条件，個数)
事故条件	破断条件 (位置，口径)
	格納容器圧力

## 添付2 相関式，モデルの適用性

### I. 平衡均質臨界流モデルの適用性

#### 1. はじめに

炉心損傷防止対策の有効性評価に使用している平衡均質臨界流モデル<sup>(1)</sup>は，二相流を飽和平衡の均質流とみなし，摩擦を考慮しない单相の臨界流理論を適用したモデルである。本モデルは「ECCS性能評価指針」で使用を認められているものである。

#### 2. 平衡均質臨界流モデルの適用性

平衡均質臨界流モデルによる計算値は実験データとの比較によりその妥当性が確認されている。

##### (1) 飽和水のブローダウン実験データとの比較<sup>(1)</sup>

添付図 2-1 に，内田，Fauske，Henry，そして Sozzi らの異なる研究者による飽和水のブローダウン実験結果を示す。これらの実験における管内径は 0.4～1.31cm (0.158～0.513in.) である。また，Allemann は，内径 17.3cm (6.8in.) までの管を介して容器からのブローダウン実験を行っている。図には，流量が均質に近くなるパイプ長さ 10cm (4 in.) 以上のデータのみを示す。

図は管入口部が飽和水の場合の臨界流量と入口圧力の関係を示しており，臨界流量は管入口圧力とともに増加する。図には管径，管長の異なる実験データが含まれているが，管長はすべて 10cm 以上であり，管入口付近の非平衡の影響は少ないと考えられ，この場合の臨界流量は実線で示す平

平衡均質臨界流モデルによる計算値と一致している。

## (2) 飽和水及び未飽和水のブローダウン実験データとの比較<sup>(1)</sup>

添付図 2-2 は、Henry のブローダウン実験による流出流量であり、長さ 90cm (3ft)、内径 0.8cm (0.313in.) の管からの流出である。図は、管入口部が飽和水及び未飽和水の状態における臨界流量を管入口部エンタルピに対して示している。管入口部が飽和水及び未飽和水のいずれの状態においても、実線で示す平衡均質臨界流モデルによる計算値は実験データと良い一致を示している。

## (3) ノズル形状の影響<sup>(2) (3)</sup>

Sozzi らの実験では、管長、管径、管入口・出口形状、入口サブクール度等臨界流量に対する主要な影響因子の効果が系統的に調べられている。添付図 2-3 は滑らかな管入口部をもつ直管から流出する臨界流量を管長  $L$  に対して示したもので、臨界流量は管長の増加につれて最初急激に、その後緩やかに減少している。また、図中には各入口クオリティについて、 $L=0$  すなわち管の摩擦がないものとし、熱平衡状態を仮定した平衡均質臨界流モデルによる計算値が示されている。管長が 0.127m(約 5 in.) の点で計算値と実験値は良く一致し、この点よりも短い場合には管入口部での急激な状態変化により生じる気液間の非平衡のため臨界流量は平衡均質臨界流モデルによる計算値より大きく、一方、この管入口部での非平衡が緩和する 0.127m(約 5 in.) よりも長い場合には  $L$  すなわち管摩擦の影響により臨界流量は小さくなる。

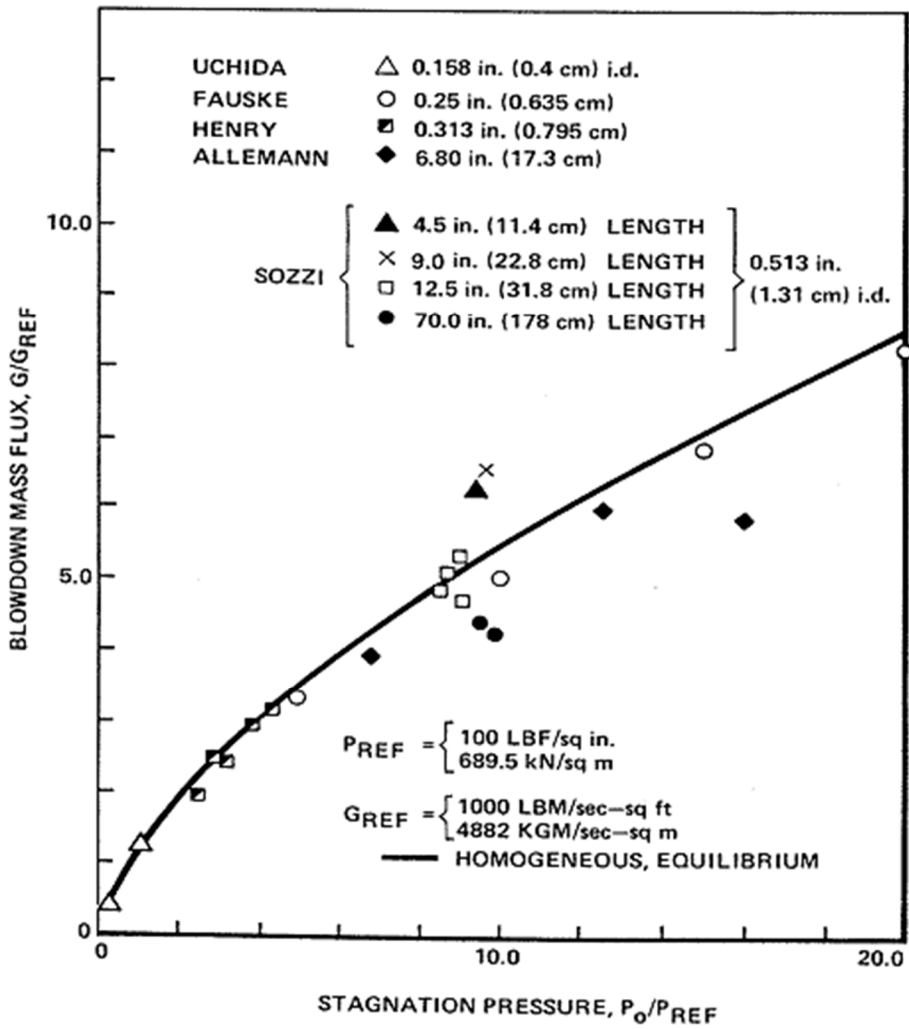
### 3. まとめ

熱平衡状態を仮定した平衡均質臨界流モデルにより、管入口条件を適用し、容器に接続する管からの冷却材流出流量を予測した。平衡に達するのに十分な長さ (0.127m(約 5 in.)) をもつ場合の流出流量は、管入口状態が飽和水及び未飽和水ともに、計算結果と実験データは良く一致しており、流出流量は管入口近傍の均質流により制限されること示している。

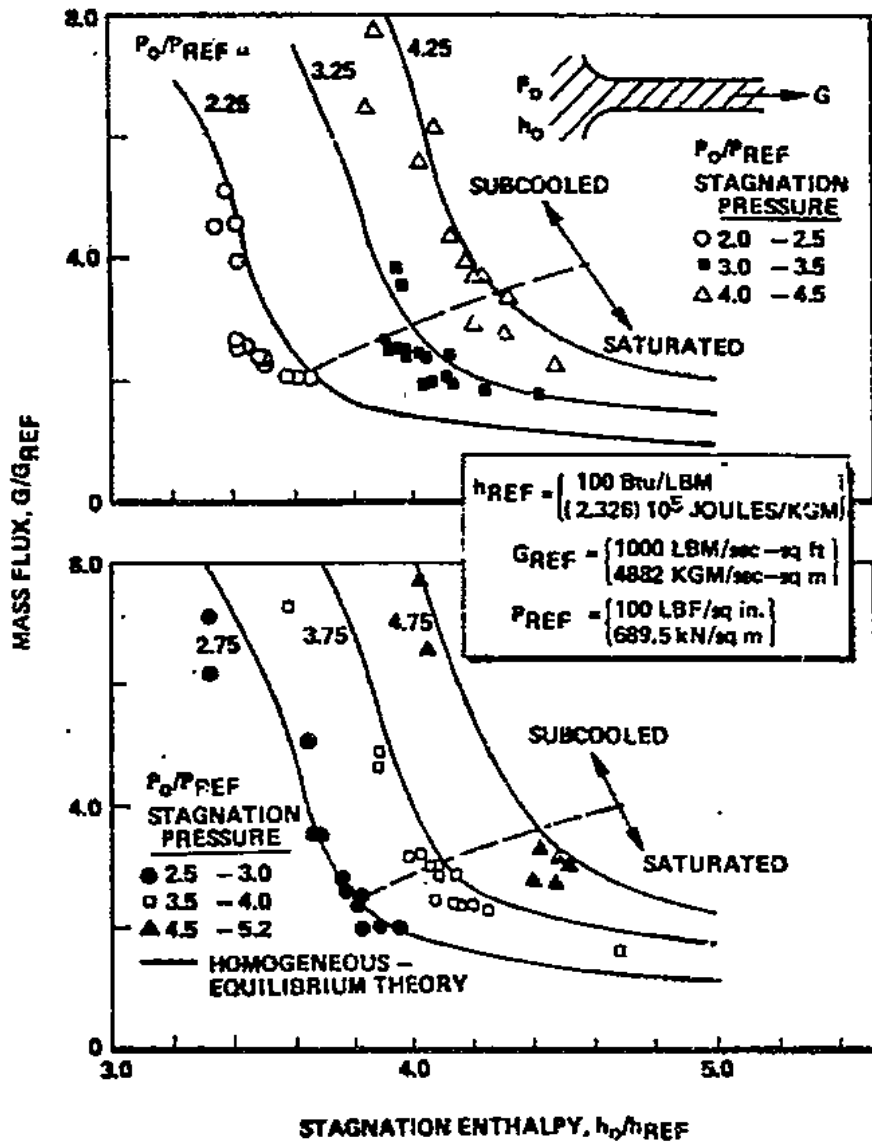
BWRプラントで仮定する破断口及びSRVからの流出流量は、原子炉圧力容器ノズル又はノズルに接続する配管を通過し、その長さは 0.127m(約 5 in.) より長い。したがって、管入口付近の非平衡の影響は無視できると考えられ、平衡均質臨界流モデルを炉心損傷防止対策の有効性評価に適用することは妥当である。

#### [参考文献]

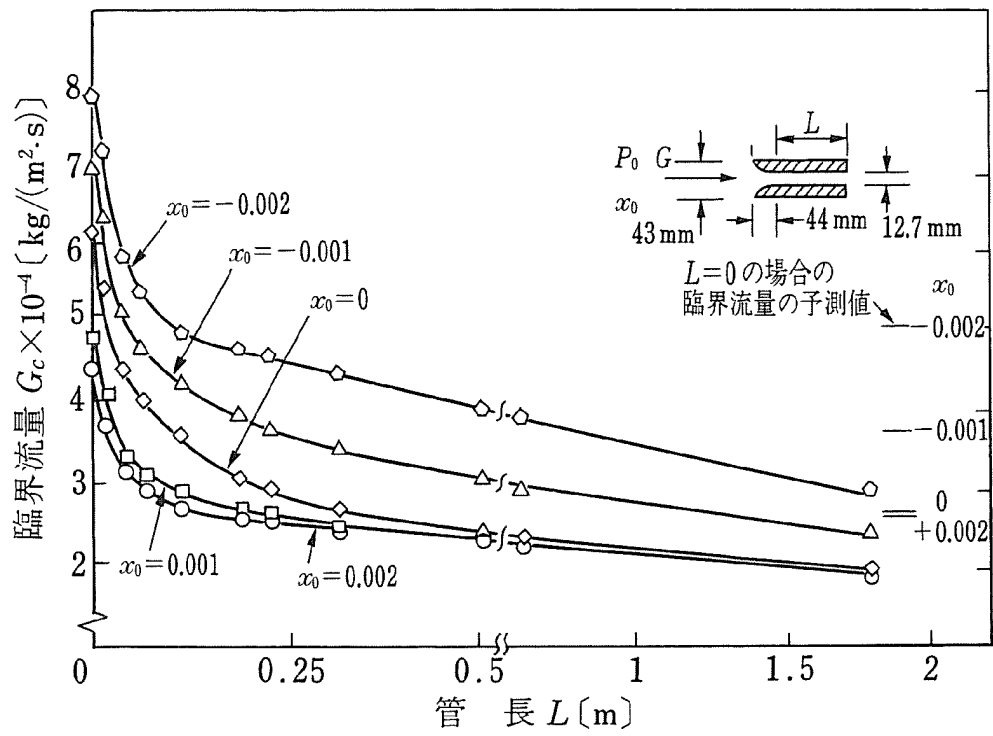
- (1) F. J. Moody, “Maximum Discharge Rate of Liquid-Vapor Mixtures from Vessel”, NEDO-21052, September 1975.
- (2) G. L. Sozzi and W. A. Sutherland, “Critical Flow of Saturated and Subcooled Water at High Pressure”, NEDO-13418, July 1975.
- (3) 日本機械学会 編, 改訂 気液二相流技術ハンドブック, コロナ社 2006 年



添付図 2-1 飽和水の臨界流実験データ<sup>(1)</sup>



添付図 2-2 未飽和水及び飽和水の臨界流実験データ<sup>(1)</sup>



添付図 2-3 臨界流量の管長による変化<sup>(3)</sup>



## II. 熱伝達相関式，モデルの適用性

### 1. 炉心損傷防止対策の有効性評価における熱伝達相関式の選定

炉心損傷防止対策の有効性評価における事故シーケンスグループのうち，高圧・低圧注水機能喪失（T Q U V）を例にすると，給水流量の全喪失後，原子炉水位が急速に低下し，原子炉水位低（レベル3）信号が発生して原子炉はスクラムするが，原子炉水位低（レベル2及びレベル1）で高圧注水系及び低圧注水系の起動に失敗する。原子炉の減圧をS R Vにより手動操作にて実施すると，冷却材の流出により原子炉水位が低下し，有効燃料棒頂部を下回るが，原子炉の減圧後に低圧代替注水設備による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。原子炉水位が回復するまでの間に炉心が一時的に露出するために燃料被覆管の温度が上昇するが，再冠水により燃料棒は冷却されて燃料被覆管温度は低下する。

事故期間中の燃料棒ヒートアップ挙動は，事象発生から炉心露出するまでの冠水状態，露出状態及び水位回復後の再冠水状態を経験することから，燃料棒表面熱伝達を適切に評価するためS A F E Rコードでは添付表2-1に示す熱伝達相関式，モデルを適用している。これらのモデルは，「E C C S性能評価指針」において妥当性が認められたものである。添付表2-1にはこれらの相関式，モデル選定の基本的な考え方も併せて示す。また，添付図2-4に，T Q U V評価における熱伝達係数の適用例を示す。

### 2. S A F E Rコードの熱伝達相関式の適用方法

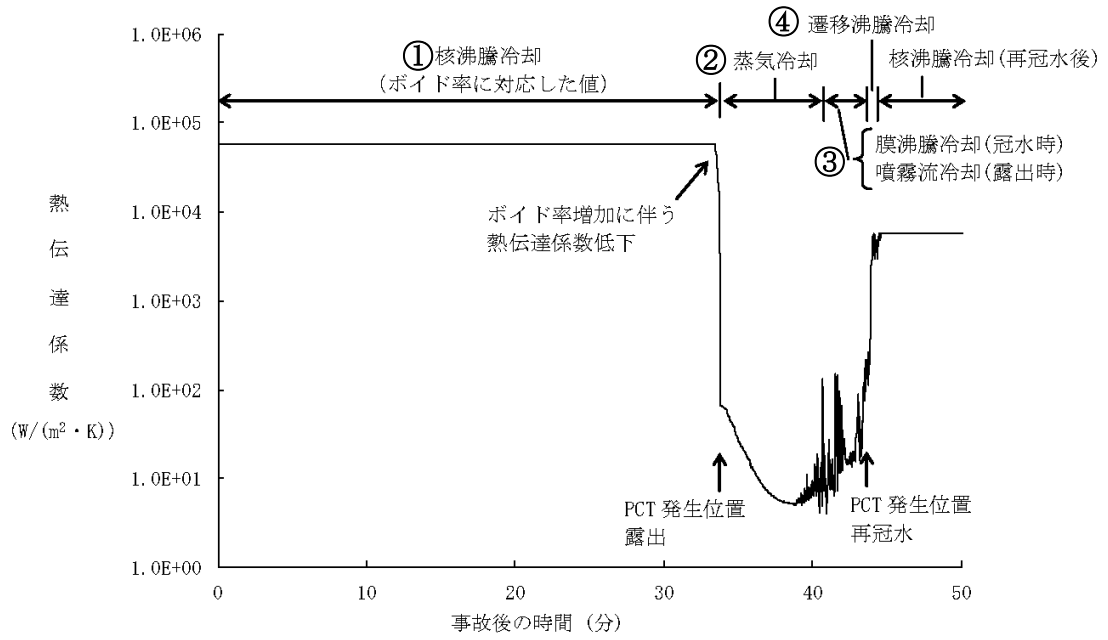
S A F E Rコードは，燃料棒の軸方向ノードが二相混合水で冠水しているときは，核沸騰，遷移沸騰，膜沸騰から熱伝達係数が計算され，熱伝達様式を決める選択ロジックは添付図2-5に従っている。沸騰遷移開始時間

$T_{BT}$  は別途 S C A T コードで評価された結果を入力する。また、蒸気クオリティが膜沸騰限界クオリティ  $X_c$  以上になった場合、又は、燃料被覆管過熱度が安定膜沸騰状態における最小過熱度  $\Delta T_{MIN}$  以上になった場合には膜沸騰を適用する。燃料被覆管過熱度が  $\Delta T_{MIN}$  を下回り、さらに限界熱流束過熱度  $\Delta T_{CHF}$  以下のときはリウエットと判定し、核沸騰に復帰する。また、 $\Delta T_{CHF}$  より大きい場合には遷移沸騰とし、膜沸騰と核沸騰の熱伝達係数を内挿計算する。

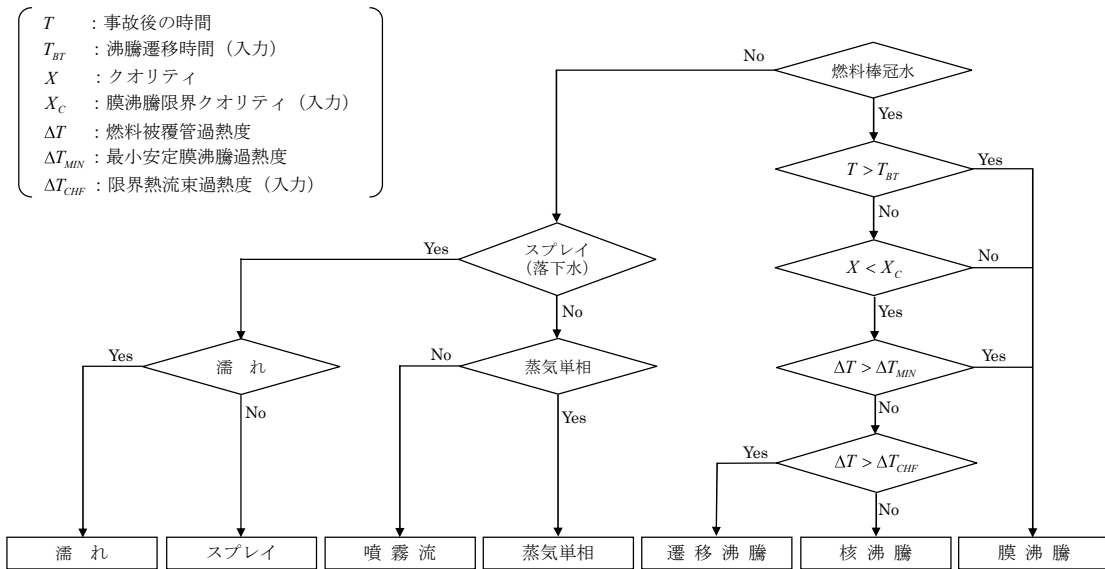
燃料棒の軸方向ノードが二相混合水で冠水していないときは、輻射熱伝達と蒸気冷却又は噴霧流冷却から熱伝達係数が決まる。上部プレナムからの落下水が存在する場合は、落下水（スプレー）熱伝達と輻射熱伝達が組み合わされる。また、燃料棒及びチャンネルの濡れによる冷却も考慮されている。

添付表 2-1 有効性評価で用いる S A F E R コードの熱伝達相関式，モデル

添付図 2-4 番号	熱伝達様式	熱伝達相関式，モデル	選定の基本的な考え方
①	核沸騰	ボイド率の関数とする相関式	核沸騰熱伝達係数は他の熱伝達係数に比べて非常に大きく，この熱伝達係数の変化に対し，燃料被覆管温度の感度が非常に小さいため簡便化したモデルとしている。
②	蒸気单相	Dittus-Boelter の式	单相流の相関式として広く認められている評価式を採用している。
③	膜沸騰	噴霧流冷却の相関式と修正 Bromley の式をボイド率の関数として使用する相関式	過渡事象発生直後の高流量，高圧条件から E C C S 等の注水による炉心再冠水後の低流量，低圧条件まで適用可能なモデルとして採用している。
		(低ボイド率；低流量) 修正 Bromley の式	低ボイド率では，管壁を薄い気相膜が覆い，チャンネルの中心を二相混合相が流れる逆環状流の形態の流れとなる。気相への熱伝達及び気相から液相への熱伝達是对流によって行われ，修正 Bromley の式により実験データを良く予測できることから採用している。
		(高ボイド率；高流量) Sun-Saha の式	蒸気に液滴が混入した場合の噴霧流冷却は，上記の蒸気单相熱伝達相関式をもとに液滴を考慮した補正項及び過熱蒸気中の液滴の蒸発量を定める相関式を組み合わせたモデルであり，模擬燃料集合体冷却実験におけるロッド表面温度を実験値よりも高く評価することから採用している。
④	遷移沸騰	核沸騰と膜沸騰の熱伝達係数を燃料被覆管過熱度で内挿した相関式	核沸騰と膜沸騰の間を連続的に変化させるためにモデル化しており，燃料棒上での遷移沸騰が比較的短い過渡期間で生じるため，このような補間モデルが容認可能と考えられる。



添付図 2-4 熱伝達係数の推移 (TQUV の例)



添付図 2-5 SAFERコードの熱伝達様式選択ロジック

3. 有効性評価において適用する熱伝達相関式，モデルの適用性

S A F E Rコードに採用した個々の熱伝達相関式は実験結果との比較により妥当性を確認し，これらの熱伝達相関式を適用した燃料被覆管温度の計算結果の妥当性は，炉心露出，原子炉注水及び炉心再冠水の一連の過程を模擬したL O C A模擬システム実験結果との比較により確認している。

また，添付表 2-2 に熱伝達相関式のデータベース又は妥当性確認実験のパラメータ範囲と有効性評価におけるパラメータ変化範囲を示す。

以下に，有効性評価において適用する熱伝達相関式，モデルの適用性を示す。

添付表 2-2 熱伝達相関式の実験範囲と有効性評価における変化範囲

熱伝達相関式	実験パラメータ範囲	有効性評価解析の パラメータ変化範囲例
Jens-Lottes の式 (核沸騰熱伝達)	圧力； 0.6～17.2MPa[abs]	圧力； 0.7～7.7 MPa[abs]
	熱流束； ～ $7.9 \times 10^6$ W/m <sup>2</sup>	熱流束； ～ $1.3 \times 10^6$ W/m <sup>2</sup>
Dittus-Boelter の式 (蒸気単相熱伝達)	バンドル蒸気流量； 100～1200 kg/h	バンドル蒸気流量； ～600kg/h
	バンドル出力； 30～280 kW	バンドル出力； ～170kW
	加熱面最高温度； 400～700℃	加熱面最高温度； ～約 1100℃
修正 Bromley の式 (低流量膜沸騰熱伝達)	圧力； 8.3MPa[gage]以下	圧力； ～1.6 MPa[gage]
	加熱面温度； 1260℃以下	加熱面温度； ～約 1100℃
Sun-Saha の式 (噴霧流熱伝達)	バンドル蒸気流量； 200～1000 kg/h	バンドル蒸気流量； ～600kg/h
	バンドル出力； 60～300 kW	バンドル出力； ～170kW

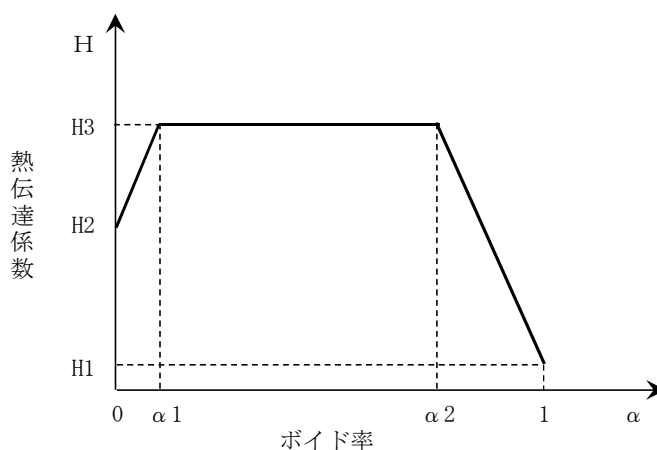
## (1) 核沸騰

燃料が露出するまでの核沸騰領域については、Jens-Lottes の式<sup>(1)</sup>及び単相流については Dittus-Boelter の式<sup>(2)</sup>に基づいた熱伝達係数を、ボイド率の関数とするモデルを適用している。

このモデルは添付図 2-6 に示すように三つの領域に分け、それぞれの境界の値を入力として与える。H3 は強制対流核沸騰，H2 は未飽和単相強制対流，そして H1 は蒸気単相強制対流に対する熱伝達係数の代表値である。

Jens-Lottes の式のデータベースは単管で、圧力範囲は 85～2500 psia (約 0.6～17.2 MPa[abs]) である。有効性評価解析における核沸騰熱伝達適用時の圧力変動範囲は、添付表 2-2 に示すように S R V 作動圧力約 7.7 MPa[abs]から原子炉減圧後の約 0.7 MPa[abs]の範囲であり、Jens-Lottes の式のデータベースの圧力範囲に含まれる。また、有効性評価解析における核沸騰熱伝達適用時の熱流束変化範囲についても参考文献(1)に示される条件の範囲内にある。

以上より、Jens-Lottes の式に基づく熱伝達係数を適用した核沸騰熱伝達モデルは有効性評価解析にも適用可能である。



添付図 2-6 核沸騰熱伝達係数モデル

## (2) 蒸気単相

燃料が露出した後の蒸気単相状態には単管試験データに基づく Dittus-Boelter の式<sup>(2)</sup>を適用している。

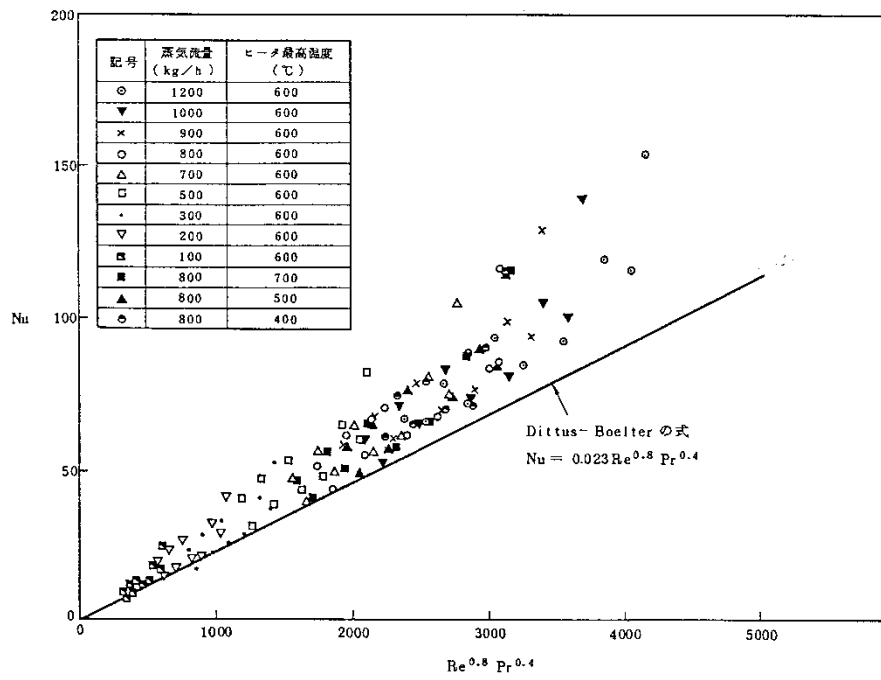
BWRの実寸大8×8型模擬燃料集合体1体を用いた蒸気単相冷却実験の実験データと Dittus-Boelter の式による計算結果の比較を添付図 2-7 に示す<sup>(3)(4)</sup>。Dittus-Boelter の式による計算結果が燃料集合体形状を模擬した実験結果より熱伝達が小さくなるのは、Dittus-Boelter の式は滑らかな管内乱流に対し開発された式であり入口部の助走区間の効果を見逃しているのに対し、燃料集合体形状を模擬した実験結果はスペーサによる乱流促進効果及び入口部の助走区間の効果により熱伝達特性が向上するためである。SAFERコードには、燃料集合体形状を模擬した実験結果に基づき、スペーサによる乱流促進効果を反映した修正式を備えているが、有効性評価解析では、これらの熱伝達の改善効果は考慮していないため、実際の熱伝達を過小評価する。

この蒸気単相冷却実験における実験範囲は、模擬燃料集合体の蒸気流量 100～1200kg/h、出力 30～280kW、加熱面最高温度 400～700℃である。一方、有効性評価解析におけるこれらの変化範囲は添付表 2-2 に示すように、加熱面最高温度を除いて実験条件の範囲内にある。加熱面最高温度については実験条件を上回るが、本実験において、模擬燃料棒表面温度によって熱伝達特性はほとんど変わらないことが確認されている。

また、PWR 模擬燃料集合体による蒸気冷却実験データ（模擬燃料棒最高温度が約 800℃程度の ORNL - THTF (Oak Ridge National Laboratory - Thermal Hydraulic Test Facility) の蒸気冷却実験 (PWR の 17×17 型燃料と同じ形状の有効発熱長約 3.66m の模擬燃料棒を 8×8 型に 64 本配列した集合体を使用し、中小破断 LOCA 時の燃料露出を想定し



て圧力 2.6MPa から 8.5MPa, 模擬燃料棒温度は最大約 800°Cの範囲で蒸気単相熱伝達特性を調べた実験) 及び F L E C H T - S E A S E T データ (Full Length Emergency Core Cooling Heat Transfer - Separate Effects Tests And System Effects Tests) の蒸気冷却実験 (PWR燃料と同じ形状の有効発熱長約 3.66m の模擬燃料棒を 161 本有する集合体と 21 本有する集合体の 2 種類を使用し, 圧力 0.14MPa から 0.28MPa, 模擬燃料棒温度は最大約 220°Cの範囲で蒸気単相熱伝達特性を調べた実験) の約 1100 点のデータを使用して Dittus-Boelter の式による計算結果と比較, 評価されている<sup>(5)</sup>。この結果によると, Dittus-Boelter の式は少なくとも保守的であると結論されている。なお, Dittus-Boelter の式はプラントル数が 0.7 以上の単相流に適用可能とされている。圧力 0.5MPa[abs]及び温度 1000°Cの過熱蒸気のプラントル数を求めると 0.8 以上であることから, このような高温状態も Dittus-Boelter の式の適用範囲にあると考える。したがって, Dittus-Boelter の式は有効性評価解析に適用可能である。



添付図 2-7 蒸気単相熱伝達係数の無次元整理<sup>(3)(4)</sup>

### (3) 膜沸騰及び噴霧流

代替注水設備による注水が開始された以降の再冠水過程では、燃料棒が二相水位以下の高流量状態においては Sun-Saha の式に基づく噴霧流熱伝達相関式<sup>(3)(4)</sup>、低流量状態においては修正 Bromley の式<sup>(6)</sup>の二つの相関式をボイド率の関数として使用するモデルを適用している。

膜沸騰熱伝達係数モデルを図示すると添付図 2-8 のようになる。遷移ボイド率  $\alpha_T$  は、レイノルズ数の関数として実験相関式で与えられる。ボイド率が  $\alpha_T$  より小さい範囲では、熱伝達係数は修正 Bromley の式が成り立つ。一方、高ボイド率では流れは噴霧流になるので熱伝達係数は Sun-Saha の式に基づく噴霧流熱伝達式を用いる。熱伝達相関式は、蒸気単相熱伝達に液滴による熱伝達向上を考慮した Sun のモデルを適用する。また、噴霧流冷却熱伝達時においては蒸気の温度は一般に飽和温度よりも高くなる。そこで、この効果を考慮するため、蒸気温度を Saha のモデルを用いて計算する。

Sun のモデルと Saha のモデルを組み合わせた噴霧流熱伝達モデルによる計算値を、実寸大の電気加熱集合体を使用した噴霧流熱伝達実験結果と比較した結果を添付図 2-9 に示す。図に示すように、計算によるロッド表面温度は実験値よりも高くなっている<sup>(3)(4)</sup>。このことから、噴霧流冷却モデルの保守性が示された。

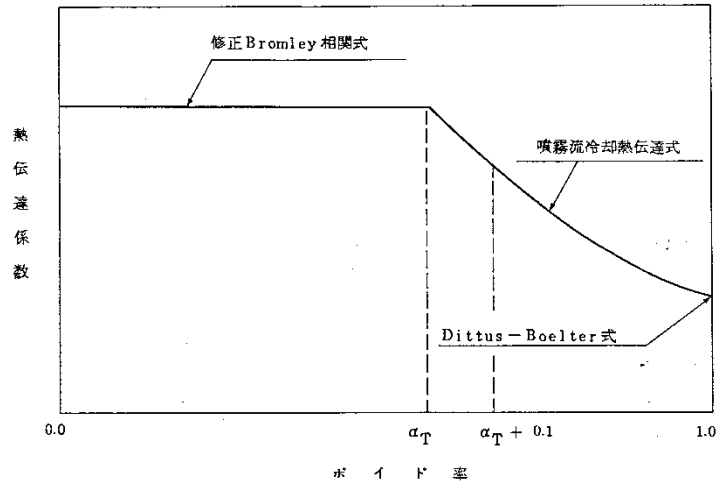
この噴霧流熱伝達実験における噴霧流パラメータ範囲は、模擬燃料集合体の蒸気流量 200~1000kg/h, 出力 60~300kW である。一方、有効性評価解析におけるこれらの変化範囲は、添付表 2-2 に示すように、実験条件の範囲内にある。

また、KWU 社の実規模大模擬燃料集合体 (340 本ロッド) を使用した再冠水過渡試験における二相水位下の熱伝達係数を修正 Bromley の式で予測した結果を添付図 2-10 に示す。修正 Bromley の式は、過渡時の膜沸騰領域にお

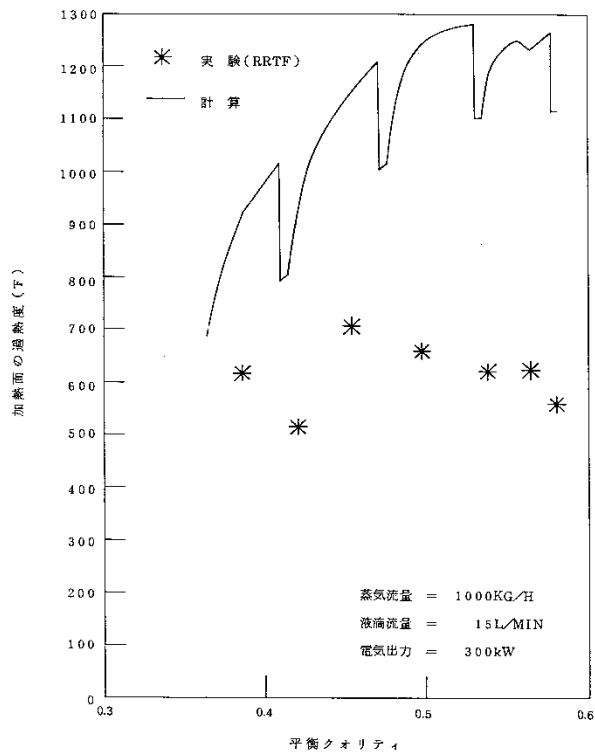
いて試験データと極めて良く一致する<sup>(6)</sup>。

修正 Bromley の式の適用範囲は，参考文献(6)によれば，圧力 1200psig (約 8.3MPa[gage]) 以下，加熱面温度 2300 °F (約 1260°C) 以下である。一方，有効性評価解析における膜沸騰熱伝達適用時のこれらの変化範囲は，添付表 2-2 に示すように，修正 Bromley の式の適用範囲に含まれている。

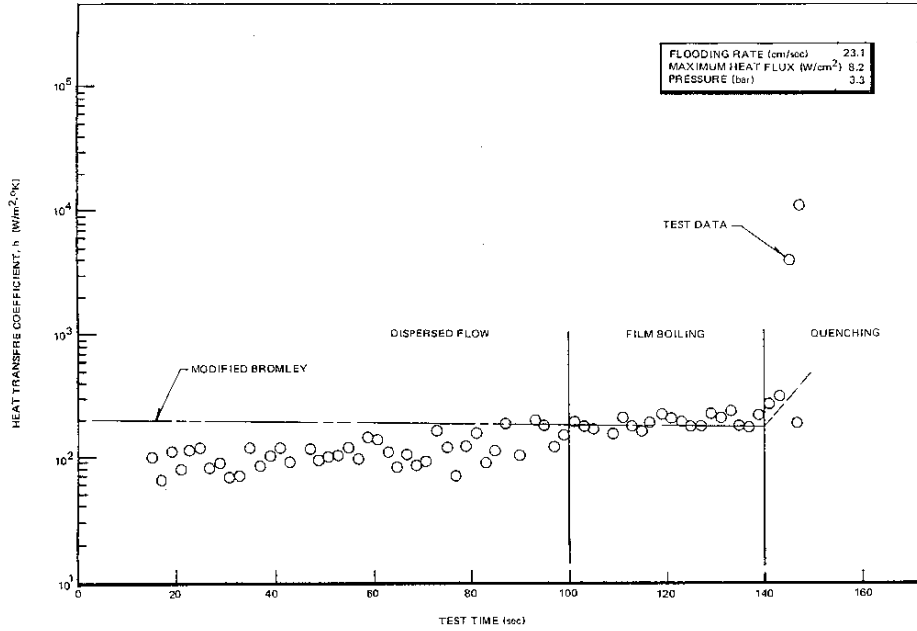
以上により，Sun-Saha の式に基づく噴霧流熱伝達の相関式及び修正 Bromley の式は有効性評価解析に適用可能である。



添付図 2-8 膜沸騰熱伝達係数モデル



添付図 2-9 Sun-Saha の噴霧流冷却モデルと実験値の比較<sup>(3)(4)</sup>

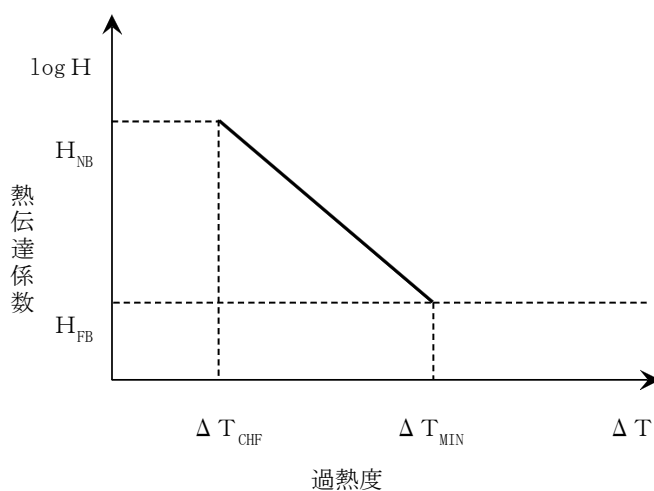


添付図 2-10 修正 Bromley の式と実験値の比較<sup>(6)</sup>

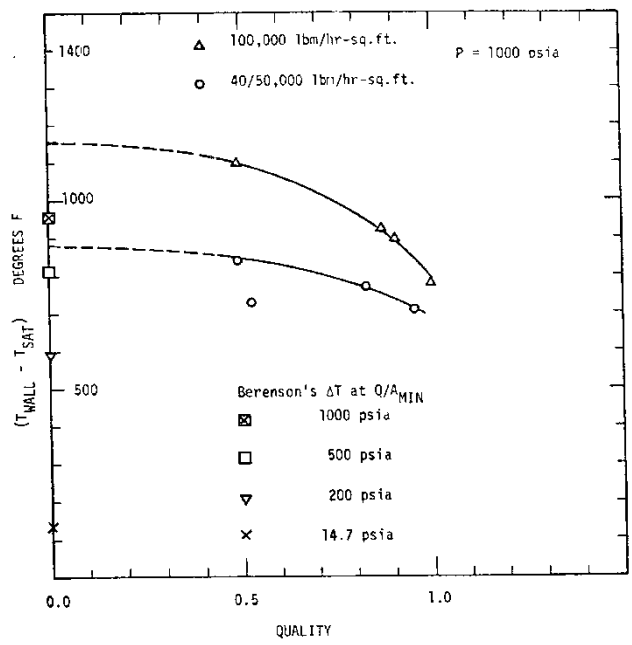
#### (4) 遷移沸騰

燃料が再冠水し、燃料棒表面温度が最小安定膜沸騰温度より降下した後、膜沸騰から遷移沸騰への遷移が生じる。SAFERコードは、安定膜沸騰状態での最小過熱度  $\Delta T_{\text{MIN}}$  における膜沸騰熱伝達係数  $H_{\text{FB}}$  と沸騰遷移点に対する燃料被覆管過熱度  $\Delta T_{\text{CHF}}$  における核沸騰熱伝達係数  $H_{\text{NB}}$  を内挿する相関式を適用している。添付図 2-11 に遷移沸騰熱伝達係数モデルを示す。安定膜沸騰状態における最小過熱度  $\Delta T_{\text{MIN}}$  は Iloeje の式<sup>(7)</sup> を使用して計算する。

Iloeje の式の実験データベースは、1000psia (6.9MPa) の単一圧力における過渡沸騰実験であるが、異なる圧力への外挿性を具備させるため Berenson の最小プール膜沸騰温度相関式に基づき、質量流束及び熱平衡クオリティの効果に対応できるように拡張している。実験データと Iloeje の式を添付図 2-12 に示すが、Iloeje の式は実験条件下において良く一致している。



添付図 2-11 遷移沸騰熱伝達係数モデル



添付図 2-12 最小安定膜沸騰温度に関する Iloeje の式<sup>(7)</sup>



#### 4. 各解析コードによる熱伝達相関式の比較

添付表 2-3 に S A F E R コード以外の燃料被覆管温度評価に使用されている熱伝達相関式を比較して示す。これらの熱伝達評価手法を比較すると、膜沸騰の熱伝達相関式にそれぞれ特徴があり、S A F E R 及び R E L A P 4 は沸騰遷移後及び炉心再冠水後の膜沸騰も対象にしており、S C A T は沸騰遷移後のみを対象にして相関式を採用している。

- ・ S A F E R 沸騰遷移後及び炉心再冠水後の熱伝達の予測として噴霧流冷却の相関式と修正 Bromley の式をボイド率の関数として使用する相関式を採用している。沸騰遷移後の高ボイド率領域には過熱蒸気中に液滴が分散した噴霧流に対する熱伝達相関式を、炉心再冠水後の低流量膜沸騰及びプール膜沸騰に対しては修正 Bromley 式を採用している。
- ・ R E L A P 4 強制対流膜沸騰に対しては Groeneveld 5.9 あるいは Dougall-Rohsenow を採用している。いずれも蒸気の強制対流が主要な伝熱機構であるという仮定のもとに得られたものである。
- ・ S C A T 沸騰遷移後のドライアウト領域における熱伝達の予測式としては、本コードは修正 Dougall-Rohsenow 式を採用している。

なお、膜沸騰の熱伝達相関式 Dougall-Rohsenow 式は、蒸気単相流の乱流熱伝達の式である Dittus-Boelter 式を二相流に適用した式であるが、米国 10CFR50 Appendix K においては、Dougall-Rohsenow 式の適用条件によっては熱伝達率を非保守的に評価するとされており、参考文献(10)では、添付

図 2-13 に示すように高圧かつ高クオリティ条件下において熱伝達率を過大評価する傾向にあるとしている。また、日本原子力研究所（JAERI）で行われた定常ポスト限界熱流束（CHF）試験<sup>(11)</sup>によると、高過熱度で Dougall-Rohsenow 式による予測値が実験値を上回るとの知見もある。S A F E R コードは、Dougall-Rohsenow 式を使用していないが、その基礎となった Dittus-Boelter 式に基づく噴霧流熱伝達率モデルを使用しているため、Dougall-Rohsenow 式の適用方法を確認することにより、S A F E R コードにおける噴霧流熱伝達の Sun-Saha のモデルの適用方法の妥当性を確認する。

参考文献（10）によると、非保守性の要因は蒸気温度を飽和としているためであるとしている。また、JAERI で行われた定常ポスト CHF 試験データにおいても、添付図 2-14 の上段の図に示すように物性値を飽和温度条件で評価すると高過熱度で予測値が実験値を上回る結果になっている。JAERI の実験から、ポスト CHF 熱伝達係数を保守的に予測するには、ヌセルト数及びプラントル数は蒸気温度を膜温度として求め、レイノルズ数中の密度は飽和温度、粘性は膜温度としてレイノルズ数を求めて、Dougall-Rohsenow 式を用いるとしている<sup>(11)</sup>。

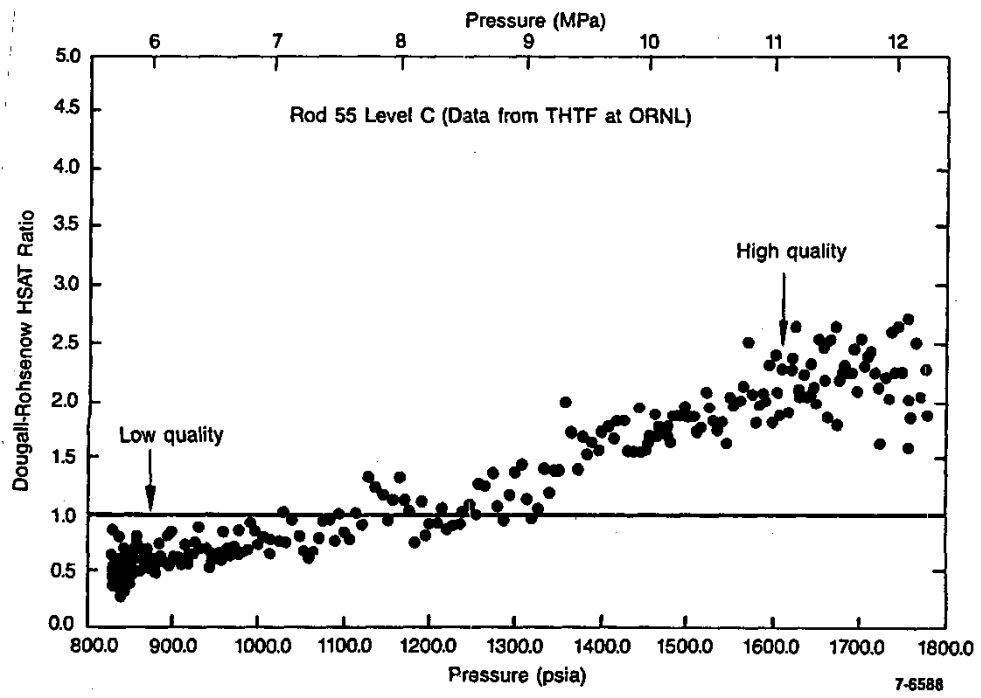
この予測法による熱伝達係数の予測値と実験データの比較を伝熱面過熱度に対して整理した結果を添付図 2-15(1)に示す。この図によれば、伝熱面過熱度が十分に大きくなれば、熱伝達係数の予測値は実験データに漸近するが、高過熱度まで結果を保守的に評価する。また、添付図 2-15(2)及び添付図 2-15(3)に示されているように、本予測法が広い条件範囲（2 MPa～18MPa, 33～1100kg/(m<sup>2</sup>s)）で、蒸気流のヌセルト数を十分保守的に予測することが分かる。

一方、S A F E R コードは、単相蒸気熱伝達の Dittus-Boelter 式及び噴

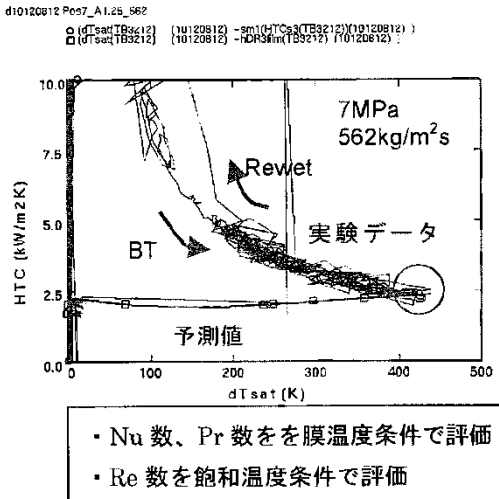
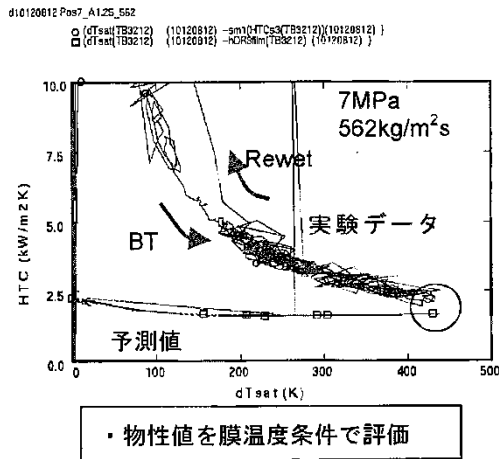
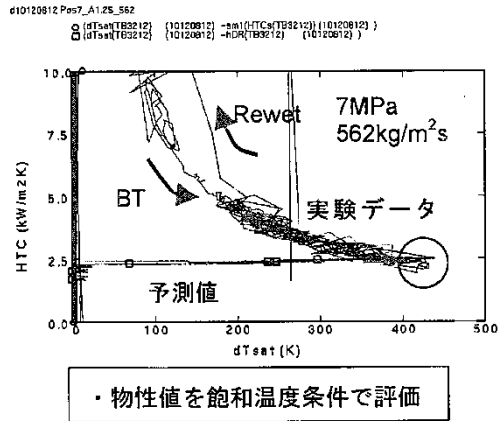
霧流熱伝達の Sun-Saha のモデルの適用においては、蒸気の過熱を考慮した蒸気温度に基づく物性値を使用しており、これらの式の適用方法は添付図 2-7 及び添付図 2-9 に示したように保守的であることを確認している。また、JAERI の実験データにおいても、物性値を膜温度で求めた場合の予測値は、添付図 2-14 の中段の図に示すように、実験結果より小さい値になっている。したがって、SAFERコードにおけるこれらの相関式の適用方法は妥当である。

添付表 2-3 燃料被覆管温度評価に使用されている熱伝達相関式

解析コード 流動様式	SAFER	RELAP4/MOD6 /U4/J3 <sup>(8)</sup> <sup>(9)</sup> (WREM-JINS/B コード システム)	SCAT
核沸騰	Jens-Lottes	Thom	Jens-Lottes
強制対流蒸発流	—	Schrock-Grossman	—
遷移沸騰	—	McDonough-Milich -King	—
膜沸騰	Sun-Saha 及び 修正 Bromley	Groeneveld 5.9, Dougall-Rohsenow	修正 Dougall- Rohsenow
単相蒸気流	Dittus-Boelter	Dittus-Boelter	—
噴霧流	Sun-Saha	—	—



添付図 2-13 Dougall-Rohsenow の式による熱伝達係数評価値（計算値／実験値）<sup>(10)</sup>



添付図 2-14 伝熱面表面過熱度とポスト CHF 熱伝達率の関係<sup>(11)</sup>  
 (試験 10120812 ; 7MPa, 562kg/m<sup>2</sup>s, 2.9m)

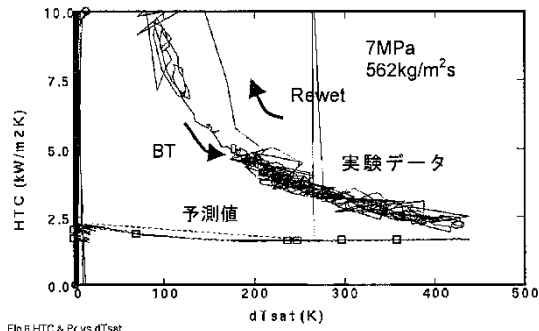
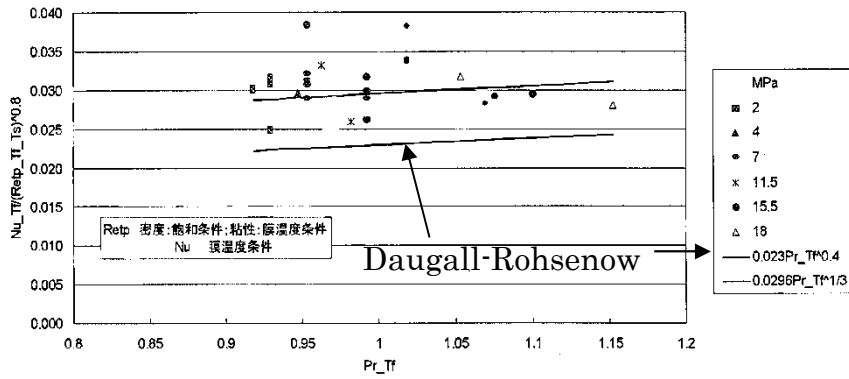


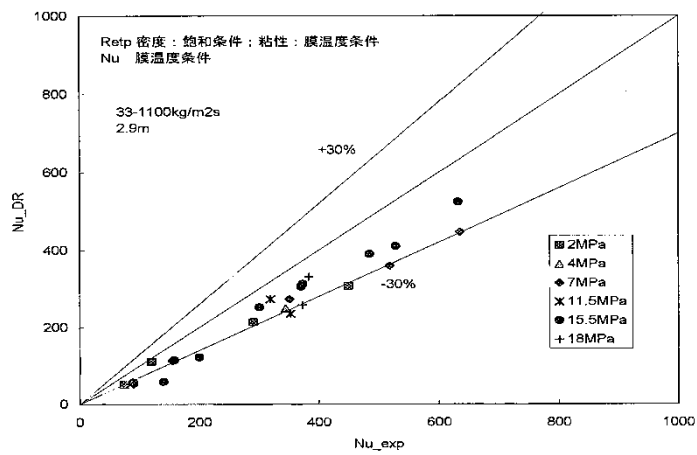
Fig.6 HTC & Pr vs dTsat

- ・Nu 数、Pr 数を膜温度条件で評価
- ・Re 数：粘性係数を膜温度、密度を飽和温度で評価

添付図 2-15(1) 伝熱面表面過熱度とポスト CHF 熱伝達率の関係 <sup>(11)</sup>



添付図 2-15(2)  $Nu/Re^{0.8}$  と Pr の関係 (高過熱度データ) <sup>(11)</sup>



添付図 2-15(3) Nu 数の実験値と予測値との比較 <sup>(11)</sup>

[参考文献]

- (1) W.H. Jens and P.A. Lottes, “Analysis of Heat Transfer, Burnout, Pressure Drop and Density Data for High-Pressure Water”, Argonne National Laboratory, ANL-4627, 1951.
- (2) F.W. Dittus and L.M.K. Boelter, “Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type”, University of California Publications in Engineering, Vol.2, No.13, 443-461, 1930.
- (3) 「沸騰水型原子力発電所 非常用炉心冷却系解析モデル (SAFER)」, 株式会社東芝, TLR-044 改訂3, 平成10年2月
- (4) 「沸騰水型原子力発電所 非常用炉心冷却系 (ECCS) の新性能評価手法について」, 株式会社日立製作所, HLR-032 訂3, 平成10年5月
- (5) G.L.Yoder, “Rod bundle film boiling and steam cooling data base and correlation evaluation”, NUREG/CR-4394; ORNL/TM-9628, August 1986.
- (6) J.E.Leonard et al. , “Calculation of Low Flow Film Boiling Heat Transfer for BWR LOCA Analysis”, NEDO-20566-1-A Revision 1, October 1982.
- (7) O.C.Iloeje et al. , “An Investigation of the Collapse and Surface Rewet in Film Boiling in Forced Vertical Flow”, Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer, May 1975.
- (8) 平成8年度 東通原子力発電所の原子炉冷却材喪失事故 (大破断) 解析に関する報告書, (財) 原子力発電技術機構 原子力安全解析所, INS/M96-40, 平成9年3月



- (9) ABWR の冷却材流量喪失事故解析及び主蒸気管破断事故解析 成果報告書, (財) 原子力工学試験センター 原子力発電総合安全センター 原子力安全解析所, JINS-0955 M87-H2-H01, 昭和 63 年 3 月
- (10) “Compendium of ECCS Research for Realistic LOCA Analysis”, NUREG-1230 R4, December 1988.
- (11) 井口 他, “BWR 定常ポスト CHF 試験結果—限界熱流束及びポスト CHF 熱伝達率—”, JAERI—Research 2001-060, 2002 年 2 月

### Ⅲ. 燃料棒破裂判定曲線の適用性

#### 1. 事故時の燃料破損につながる要因分析

事故時の燃料破損につながる要因分析結果を添付表 2-4 に示す。添付表 2-4 より、有効性評価における燃料破損の要因は L O C A と同様に、炉心露出に伴う燃料被覆管温度上昇，原子炉減圧に伴う燃料棒内外圧力の逆転によるものであり，新たな要因はない。

添付表 2-4 事故時の燃料破損につながる要因分析結果

燃料破損の要因	有効性評価における分析
給水喪失，冷却材放出による炉心露出に伴う燃料被覆管温度上昇，原子炉減圧に伴う燃料棒内外圧力の逆転による燃料被覆管破裂	炉心露出による燃料被覆管温度の上昇，原子炉手動減圧により燃料棒外圧が低下することにより，燃料棒内圧が高くなることに伴う燃料被覆管破裂に至る可能性がある。
反応度投入事象に伴う急激な出力上昇による高温破裂破損，P C M I 破損	出力運転中の事故では，1 ドルを超える急激な反応度は投入されないため除外できる。
高熱流束下での沸騰遷移（B T）に伴う燃料被覆管の高温酸化による脆性破壊	有効性評価で仮定している起因事象の全給水流量喪失及び外部電源喪失事象では B T は発生しない。仮に，事象初期に B T が発生した場合でも，燃料被覆管温度評価は従来設置許可申請書添付書類十設計基準事故解析では最大でも 600℃程度であること，また，温度上昇は短期間で収まるため燃料被覆管酸化層の増加は無視できる程度であることから，脆化による破損はないと考えられるため除外できる。

## 2. 破裂判定曲線の適用性

有効性評価では、従来の設計基準事故（LOCA）解析と比較して炉心露出開始時間が遅く、また、炉心露出時間が長くなる。従来の設計基準事故（LOCA）評価及び有効性評価において、同じ燃料棒破裂判定曲線を適用することについて、燃料被覆管の膨れ・破裂に及ぼす影響を検討した結果を以下に示す。

### （1）燃料棒内圧と原子炉圧力の差圧（燃料棒内外圧差）

燃料棒内圧の計算に用いられる燃料プレナム部ガス温度は燃料被覆管温度に依存するため、長時間露出時の温度上昇は燃料棒内圧の計算に考慮される。また、原子炉圧力は、従来の設計基準事故（LOCA）解析も大気圧近傍にまで減圧され、有効性評価でも事故後長期は大気圧近傍まで減圧される。

したがって、有効性評価における燃料棒内外圧差は、従来の設計基準事故（LOCA）の想定範囲と同等である。

### （2）燃料被覆管最高温度（温度上昇率）

炉心露出開始時間が遅くなる場合、定性的には、崩壊熱が低いことにより燃料被覆管の温度上昇率が小さくなる傾向になる。また、炉心露出期間が長くなると燃料被覆管最高温度が高くなる傾向になる。BWRプラントの有効性評価における燃料被覆管温度上昇率はおおむね $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 程度であり、燃料被覆管の最高温度は $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度以下となっている。

一方、燃料棒破裂判定曲線の策定に際しては、温度上昇率が $0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ から $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 、また、破裂温度は $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ から約 $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ の実験データを使用して、破裂判定曲線を策定している。<sup>(1)</sup>

したがって、有効性評価における燃料被覆管温度上昇率及び燃料被覆管最高温度は燃料棒破裂判定曲線の実験データの範囲内である。

### (3) ジルコニウム-水反応による燃料被覆管酸化

炉心露出期間が長くなるとジルコニウム-水反応が長時間継続し、燃料被覆管の酸化により燃料被覆管の延性が低下する可能性がある。有効性評価における燃料被覆管の最高温度は 1100℃程度以下であり、燃料被覆管の酸化割合も大きくはない。

したがって、有効性評価における燃料被覆管酸化の範囲は、約 1500℃の高温まで加熱した破裂実験データの範囲内にあると考える。

以上より、有効性評価においても従来の設計基準事故（LOCA）評価と同じ燃料棒破裂曲線を適用できると考える。

### [参考文献]

- (1) 「沸騰水型原子力発電所 非常用炉心冷却系（ECCS）性能解析モデルについて」、日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社、HLR-018 訂4、平成 26 年 6 月

### 添付3 前処理コード

S A F E Rコードのインプットデータ作成に使用される前処理コードとS A F E Rコードにインプットされるパラメータを以下に示す。これらの関係を添付図3に示す。

#### (1) 燃料棒熱・機械設計コード (P R I M E) による燃料物性データ

- ① ギャップ熱伝達係数
- ② 燃料棒内圧
- ③ 燃料棒内の核分裂生成ガス及び初期封入ガスの量

#### (2) 炉心熱水力解析コード (I S C O R) による熱水力データ

- ① 炉心圧損
- ② 高出力燃料集合体入口流量

#### (3) プラント動特性解析コード (R E D Y) による炉心出力データ

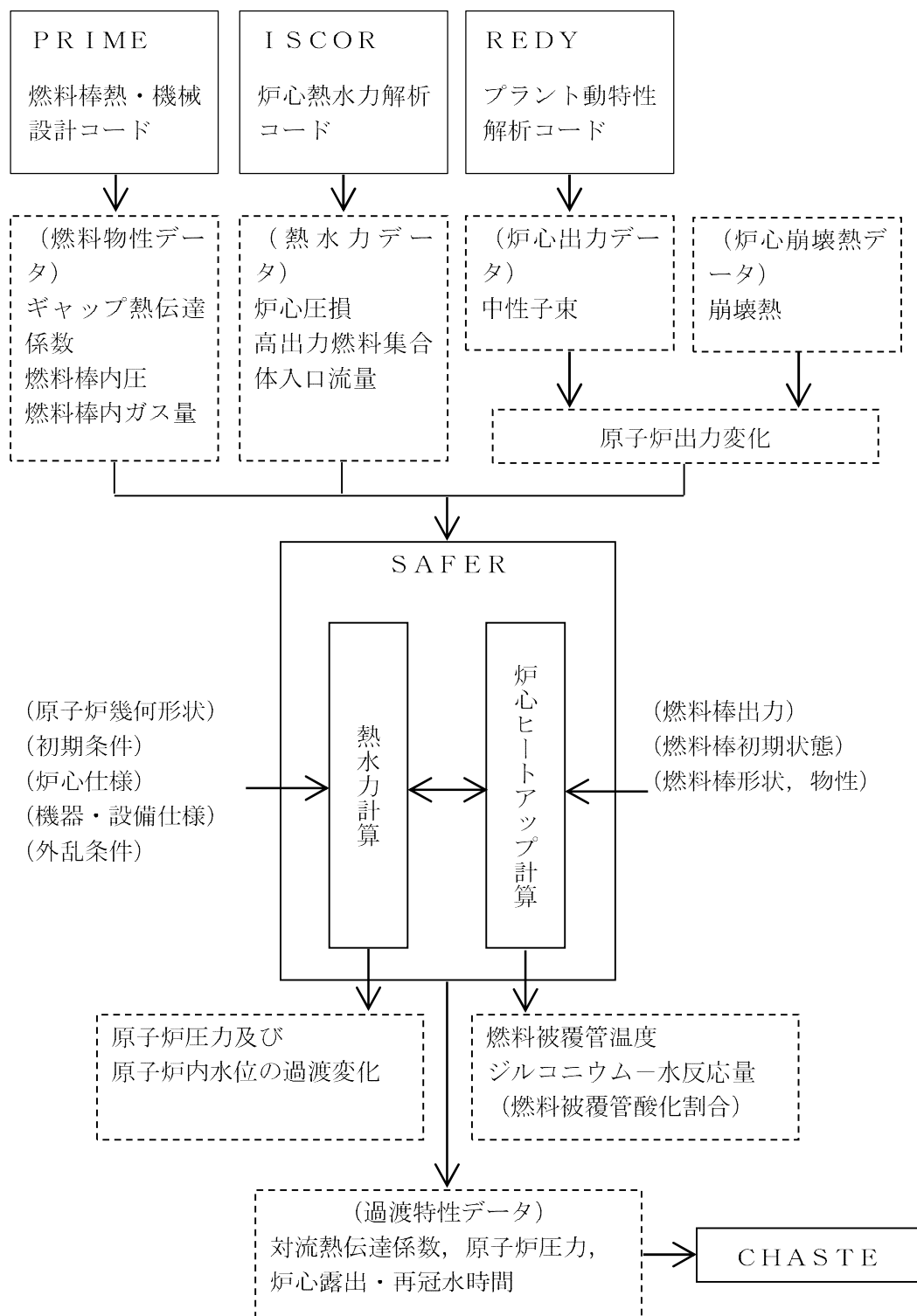
- ① 中性子束

P R I M Eコードにより求められた燃料物性データをS A F E Rコードにおける初期値として用いる。燃料被覆管とペレット間のギャップ熱伝達係数は、燃料被覆管温度上昇を厳しくするように、燃焼期間中の変化を考慮して最小となる値を与える。ギャップ熱伝達係数の初期値を小さく設定することで、燃料ペレットの初期保有熱量を高めに見積もり、炉心ヒートアップ時の燃料被覆管温度上昇率が大きくなる。また、燃料棒の内圧とガス量は、燃料棒の膨れ・破裂を厳しくするように、燃焼期間中の変化を考慮して最大となる値を与える。燃料棒の内圧とガス量の初期値を大きく設定することで、炉心ヒートアップ時の燃料棒内圧及び燃料被覆管周方向応力を大きく見積もり、燃料被覆管の膨れ・破裂を厳しく評価する。

I S C O Rコードにより求められた炉心圧損と高出力燃料集合体入口流量をS A F E Rコードにおける初期値として用いる。事象発生後早期に再循環ポンプがトリップし炉心流量が早期に低下するため、これらのパラメータが事象進展に及ぼす影響は小さい。

R E D Yコードにより求められた事象発生直後の中性子束と原子炉停止後の崩壊熱から、原子炉出力変化を求め、S A F E Rコードで用いる。有効性評価において影響を与える崩壊熱については、サイクル末期の燃焼度のばらつきを考慮し、10%の保守性を確保することで最確条件を包絡できる条件を設定している。そのため、有効性評価解析では燃料被覆管温度は高めに評価される。

なお、S A F E Rコードにより求められた対流熱伝達係数と原子炉圧力の時間変化及び炉心露出・再冠水時間をC H A S T Eコードに用いる。



添付図3 SAFERコードの入出力

## 添付4 炉心の過熱蒸気の影響評価

### 1. はじめに

S A F E Rコードは、炉心露出時の燃料被覆管温度上昇に伴う蒸気の過熱を燃料棒表面熱伝達の計算において考慮しているが、炉心及び高出力燃料集合体の流量を評価する熱流動計算では、蒸気密度は常に飽和蒸気密度としている。そこで、飽和蒸気密度を利用することの妥当性を確認するため、熱流動計算においても過熱蒸気密度を利用して炉心の圧力損失、流量配分を解析した感度解析を実施し、P C Tへの影響を評価した。

感度解析の結果、炉心露出時の燃料被覆管温度上昇に伴う蒸気の過熱による炉心及び高出力燃料集合体の流量への影響は小さく、P C Tへの影響は無視できることを確認した。

感度解析の方法、条件、結果及び評価について以下に述べる。

### 2. 解析方法及び条件

感度解析は、S A F E Rコードの燃料集合体の圧力損失及び流量計算において、飽和蒸気密度に代わり、燃料棒表面熱伝達の計算において求められた過熱蒸気温度に基づき求めた密度を適用することにより、過熱蒸気の体積膨張の影響を取り込んで計算結果に対する影響を調査した。

具体的には、炉心及び高出力燃料集合体の露出部の過熱蒸気の条件として露出部の蒸気温度が最大になる燃料棒有効発熱部上端の蒸気温度に基づき過熱蒸気の密度を求め、燃料集合体出口における圧力損失及び流量計算に適用した。また、燃料集合体内の露出部の圧力損失及び流量計算には、前記の過熱蒸気密度と飽和蒸気密度を算術平均した密度を適用した。なお、この感度解析は、一時的にプログラムを変更することにより行った。



感度解析による影響評価は、炉心及び高出力燃料集合体がともに露出し、燃料被覆管温度が高くなる BWR-5 プラントの高圧注水・減圧機能喪失を例に実施した。

### 3. 解析結果

燃料集合体内の熱流動計算において過熱蒸気を考慮した感度解析結果（添付図中の凡例では「過熱蒸気密度利用」という。）を、飽和蒸気を仮定した現行のモデルによる解析結果（添付図中の凡例では「飽和蒸気密度(現行)」という。）と比較した。

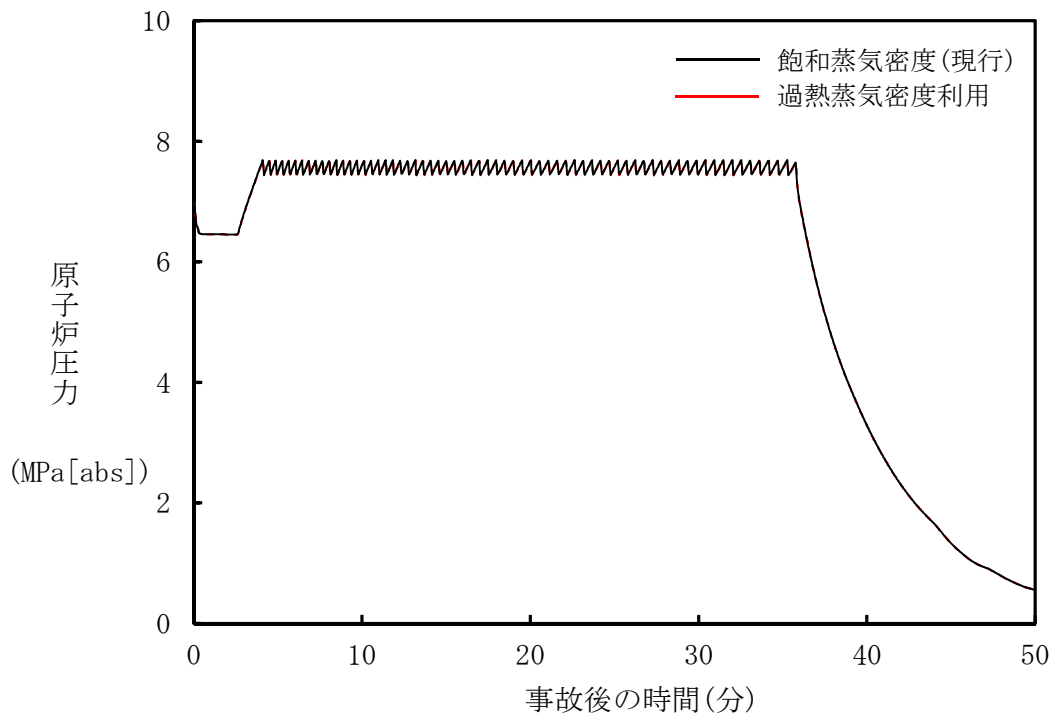
添付図 4-1 に原子炉圧力変化、添付図 4-2 に原子炉水位変化の比較を示す。また、添付図 4-3 に炉心の水位変化、添付図 4-4 に炉心の燃料被覆管及び蒸気の温度変化、添付図 4-7 に炉心平均出力燃料集合体の入口流量変化の比較を示す。さらに、添付図 4-5 に高出力燃料集合体の水位変化、添付図 4-6 に高出力燃料集合体の燃料被覆管及び蒸気の温度変化、添付図 4-8 に高出力燃料集合体の入口流量変化の比較を示す。

添付図 4-3 及び添付図 4-5 に示すように、炉心及び高出力燃料集合体の水位は有意な差はない。これは、燃料集合体内の蒸気流による圧力損失は静水頭に比べて小さいため、飽和蒸気で考えたときと過熱蒸気の密度を考慮したときで、ほとんど流量配分や水位に差が生じないためと考える。

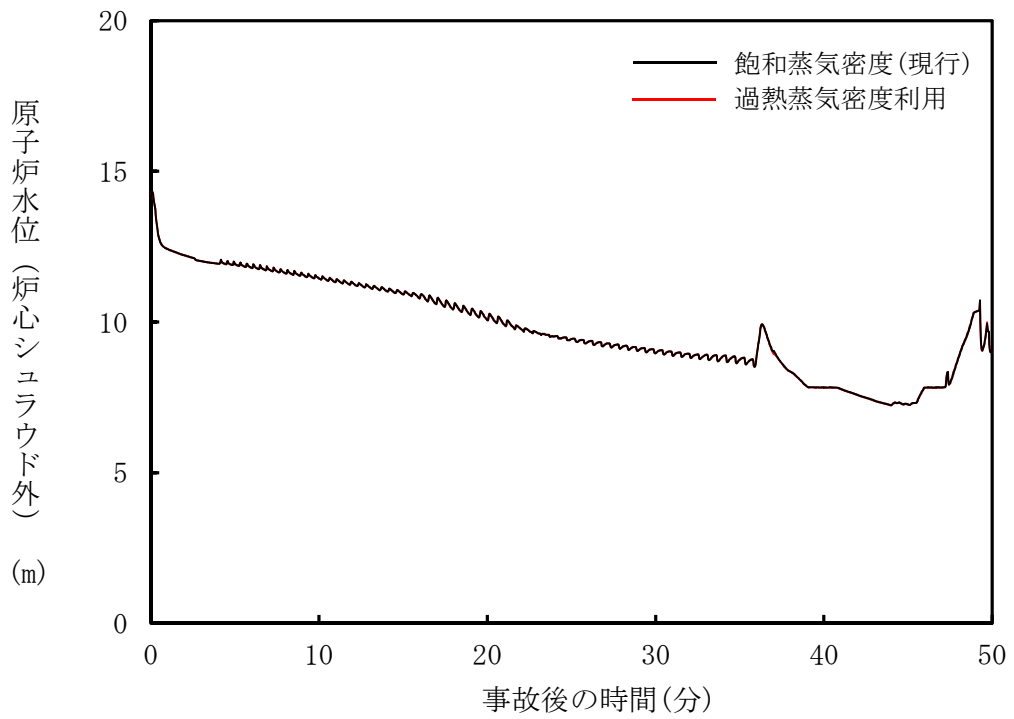
また、PCTは、飽和蒸気を仮定した現行解析の 705°C に対し、過熱蒸気を考慮した場合も同じとなり、影響がない結果になった。

#### 4. まとめ

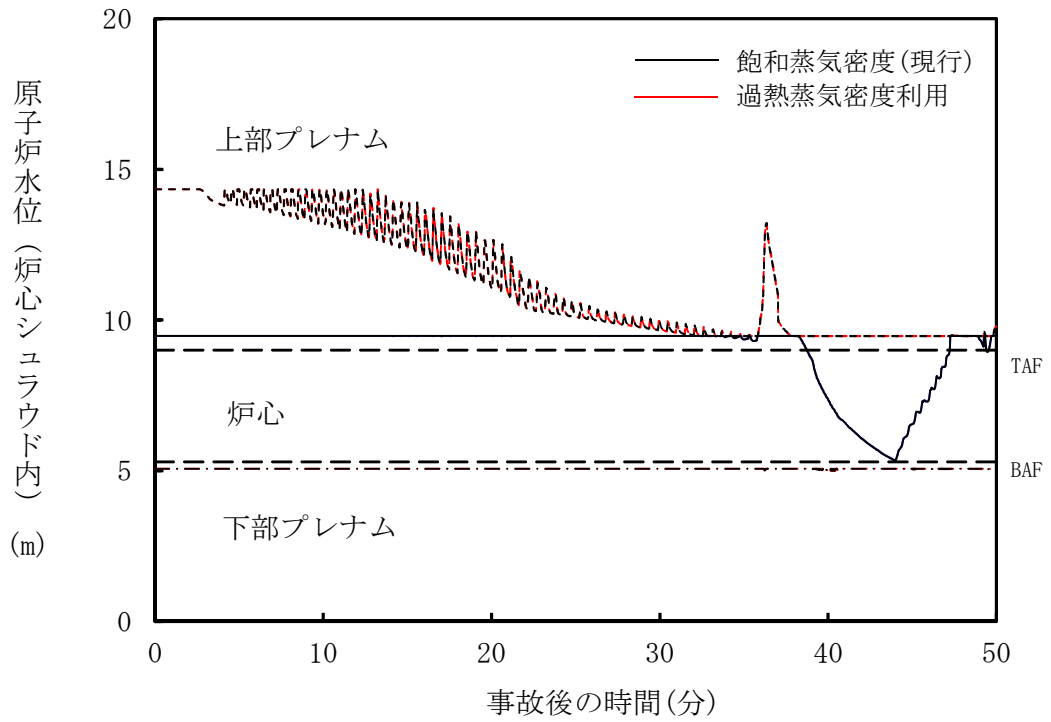
以上の検討から、炉心露出時の燃料被覆管温度上昇に伴う蒸気の過熱による密度変化が、有効性評価の熱流動計算に及ぼす影響は無視できる程度と考えられ、S A F E Rコードを適用することは問題ないとする。



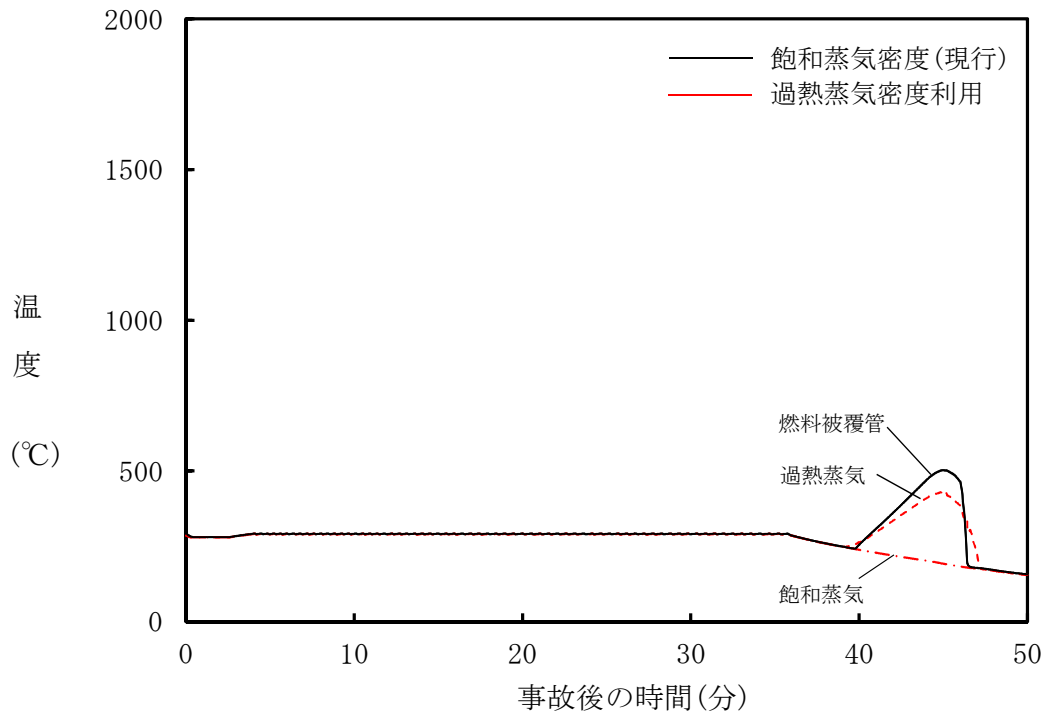
添付図 4-1 原子炉圧力変化の比較



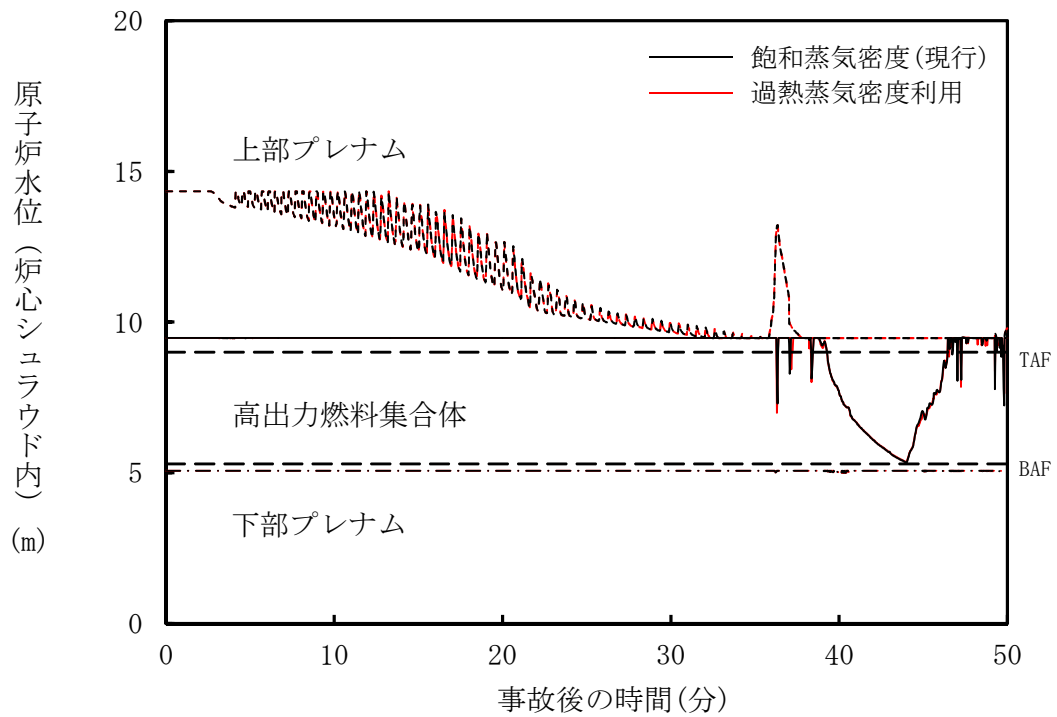
添付図 4-2 原子炉水位変化の比較



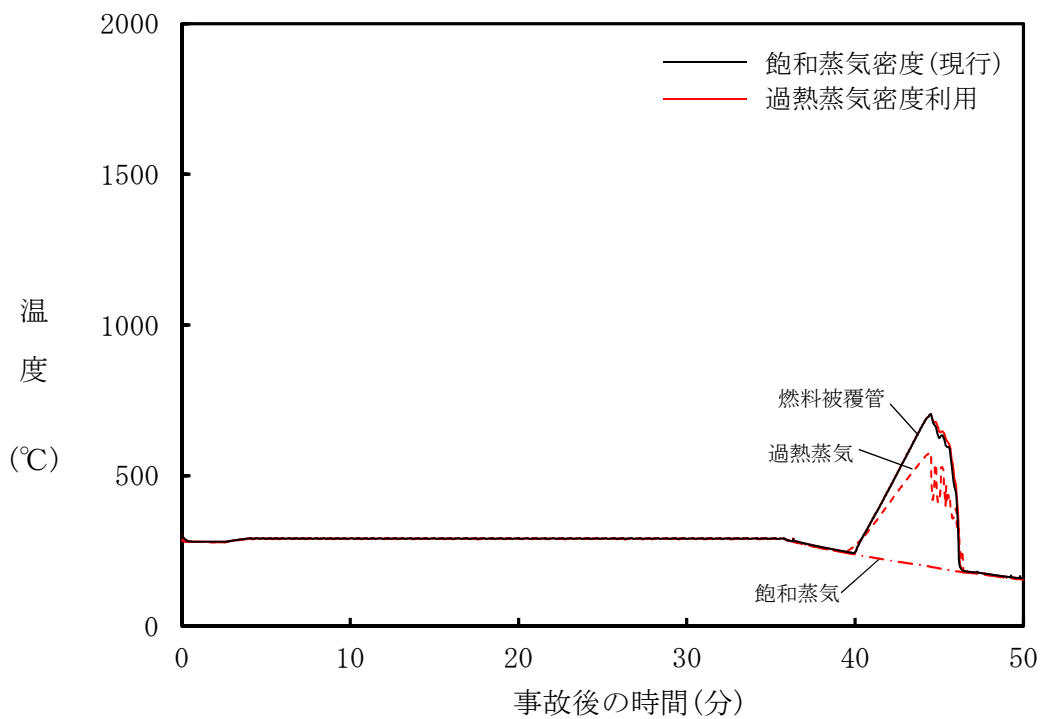
添付図 4-3 炉心シュラウド内水位変化の比較 (炉心)



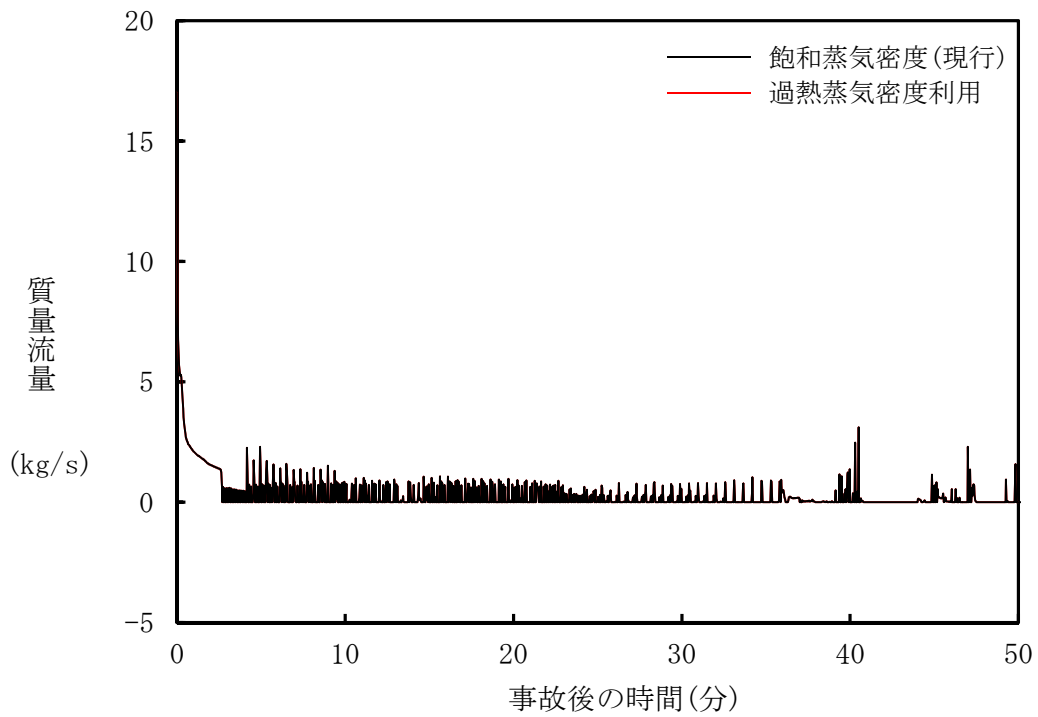
添付図 4-4 燃料被覆管及び蒸気の温度変化の比較 (炉心)



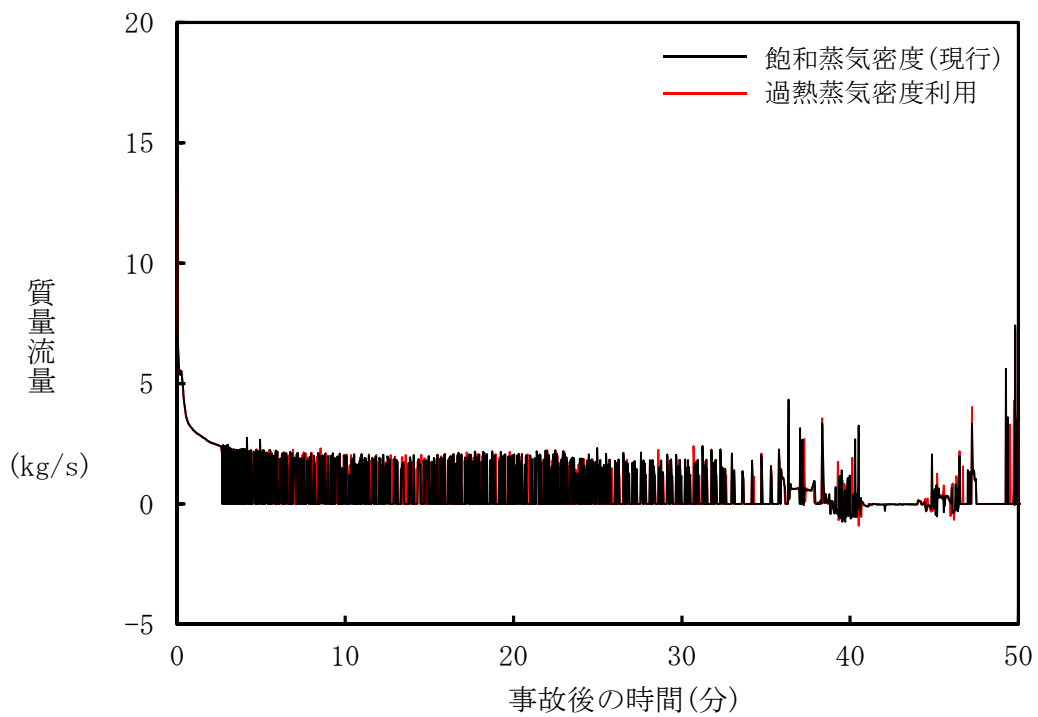
添付図 4-5 炉心シュラウド内水位変化の比較 (高出力燃料集合体)



添付図 4-6 燃料被覆管及び蒸気の温度変化の比較 (高出力燃料集合体)



添付図 4-7 燃料集合体入口流量変化の比較 (炉心, 集合体 1 体あたり)



添付図 4-8 燃料集合体入口流量変化の比較 (高出力燃料集合体)

## 添付5 代替注水設備による炉心再冠水過程における熱伝達について

### 1. はじめに

有効性評価の炉心損傷防止解析において、高圧・低圧注水機能喪失及びL O C A時注水機能喪失（中小L O C A）時は、注水系として使用するの代替注水設備であり、E C C Sに比べて注水能力は小さく、炉心再冠水までには設計基準事故解析に比べて長時間を要することとなる。

代表A B W Rプラントの有効性評価における高圧・低圧注水機能喪失の解析では、原子炉減圧に伴う冷却材の流出により炉心が露出し、代替注水設備が注水を開始すると徐々に原子炉水位が上昇し始め、これに伴う冷却材の蒸発量増加等により熱伝達係数が向上するため、燃料被覆管温度は低下に転じる。

有効性評価における解析では、露出した燃料集合体内の蒸気流に液滴が混入した場合には噴霧流冷却熱伝達を適用して燃料被覆管温度を評価している。しかしながら、有効性評価では冠水速度が小さいため、噴霧流冷却熱伝達による冷却効果には不確かさが残ることから、この不確かさの程度を確認することを目的として噴霧流冷却熱伝達のP C Tへの影響を感度解析により評価した。また、高出力燃料集合体水位の振動がP C Tに及ぼす影響の不確かさについても概略評価した。

### 2. 感度解析条件及び解析結果

噴霧流冷却熱伝達のP C Tへの影響を確認するため、噴霧流冷却熱伝達を除外して蒸気单相流熱伝達を適用した感度解析を実施した。また、炉心軸方向ノード分割数の影響を確認するため、現行申請解析（ベースケース）の10分割から48分割に増加させた場合の感度解析を併せて実施した。主な解析結

果を添付図 5-1, 添付図 5-2, 添付図 5-3 及び添付図 5-4 に示す。

本感度解析より, 噴霧流冷却熱伝達を考慮した場合 (ベースケース) の P C T は約 969°C であるのに対して, 噴霧流冷却熱伝達を除外した場合の P C T は約 972°C となり, ベースケースに対して約 3°C 上昇する結果となった。また, 炉心軸方向ノード分割を 48 分割にした場合の P C T は約 982°C となり, 約 13°C 上昇する結果となった。

また, 上記感度解析結果によると, 再冠水時の熱伝達係数の改善過程において, 軸方向中心位置 (ノード 5) の冠水と露出の繰り返しに対応する熱伝達係数の変化がみられることから, その不確かさについても評価した。

有効性評価解析のように崩壊熱が低下した状況下での二相水位の振動的な現象に関しては, 実機 BWR 燃料集合体を模擬した 5 × 5 格子配列集合体を用いた実験において現象が確認されている<sup>(1)</sup>。実験によれば, 大気圧条件下で崩壊熱が 1 % 程度の場合, 燃料集合体部保有水の蒸発に伴う緩やかな水位低下過程における二相水位は, 大きな蒸気スラグの通過により最大で約 150 mm の振幅で上下動すると報告されている。有効性評価解析における炉心再冠水過程では, 原子炉圧力は 0.2 MPa 程度と本実験条件である大気圧より高い圧力下であるため, 気液密度差が減少し, 水位の振動は抑制される方向となると考えられるものの, 本実験結果で確認された二相水位の振動的な現象は発生する可能性はあるものと考えられる。一方で, このような二相水位の振動による影響の程度を把握することを目的として, 感度解析 (噴霧流冷却熱伝達除外, 炉心軸方向 10 分割) に対して, 軸方向中心位置 (ノード 5) が完全に冠水するまで燃料被覆管温度が低下しないと仮定し, ノード 5 の冠水前の蒸気冷却期間のヒートアップ過程における燃料被覆管温度変化を基に設定した近似曲線を外挿することにより P C T の概略評価を行った。

添付図 5-5 に原子炉水位 (炉心シュラウド内水位) 変化, 添付図 5-6 に P C



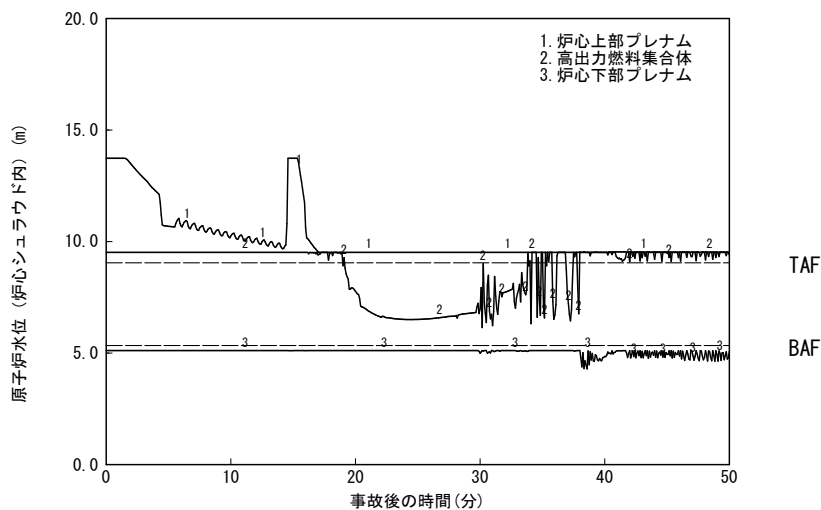
T発生位置の燃料被覆管温度変化を示す。軸方向中心位置冠水時の燃料被覆管温度は約 1000℃となり，ベースケースの約 969℃に対して約 31℃上昇する結果となった。

### 3. まとめ

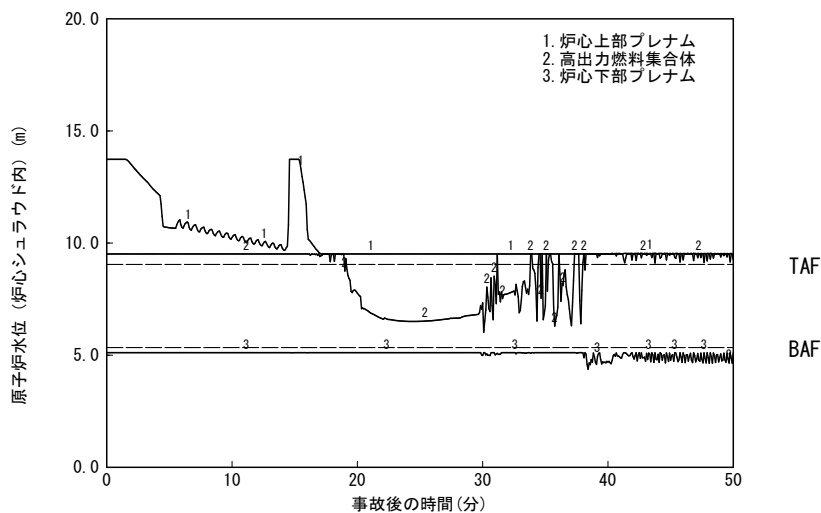
以上より，低圧代替注水設備のようなECCSと比較して注水能力が小さい注水系による炉心再冠水過程においては，噴霧流冷却熱伝達の不確かさ，また，解析における水位及び熱伝達係数の不確かさを踏まえると，全体として20℃～40℃程度の不確かさがあると推定できる。

#### [参考文献]

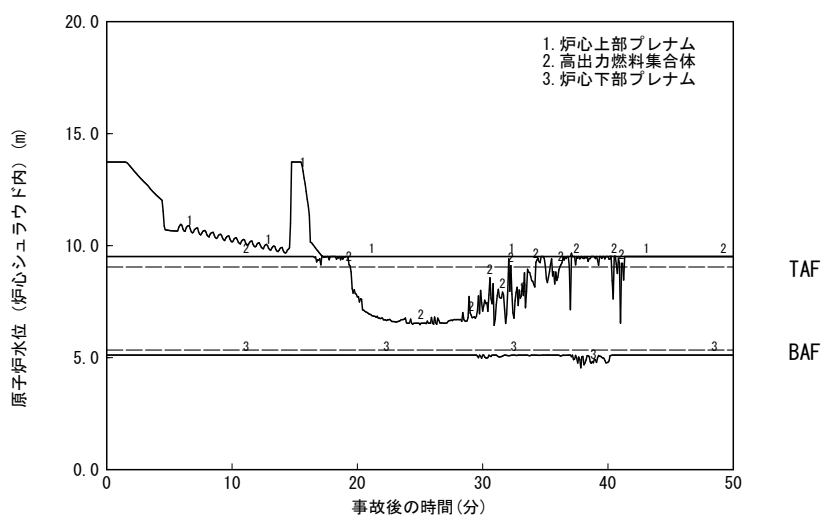
- (1) T. Arai, M. Furuya, T. Kanai, K. Shirakawa and Y. Nishi, “Coolability height of 5x5 heated rod bundle in reference to collapsed level and boiling two-phase flow dynamics,” 23rd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-23), Chiba, Japan, May 17-21, 2015.



(噴霧流冷却熱伝達考慮, 炉心軸方向 10 分割)

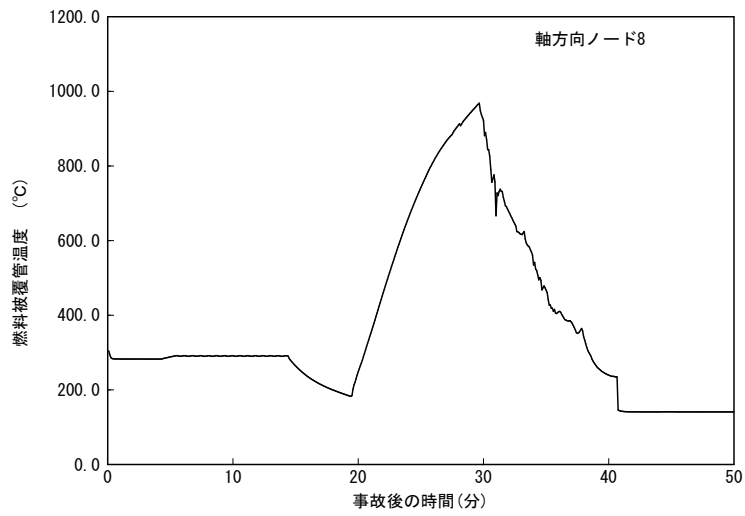


(噴霧流冷却熱伝達除外, 炉心軸方向 10 分割)

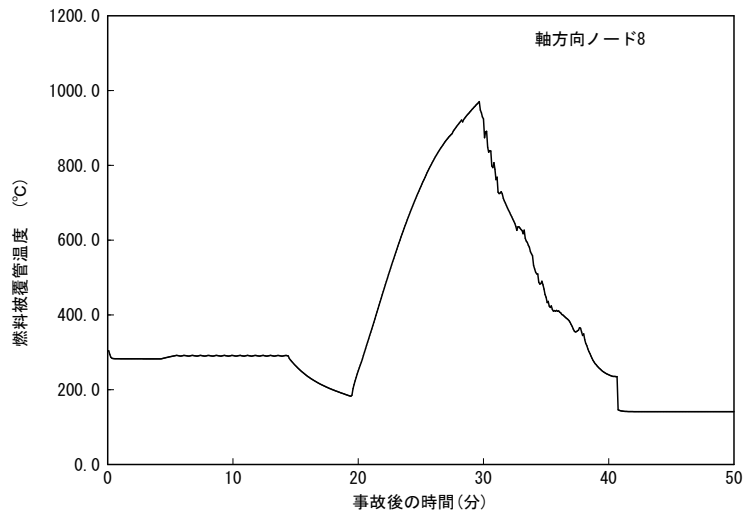


(噴霧流冷却熱伝達除外, 炉心軸方向 48 分割)

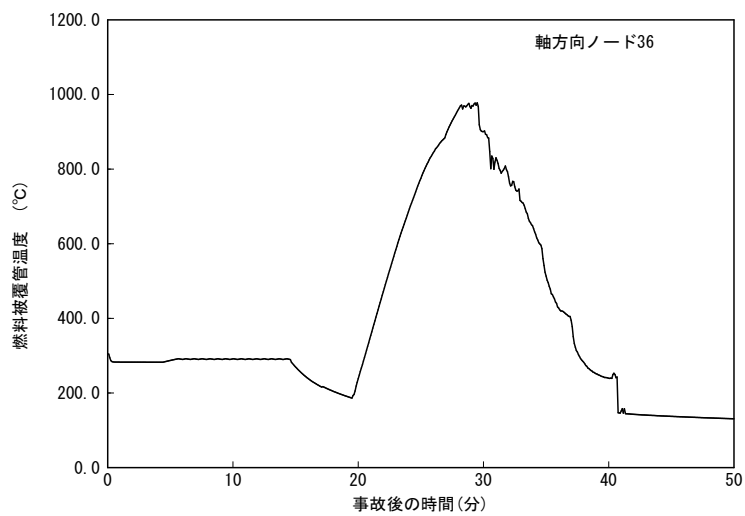
添付図 5-1 原子炉水位変化の比較



(噴霧流冷却熱伝達考慮, 炉心軸方向 10 分割)

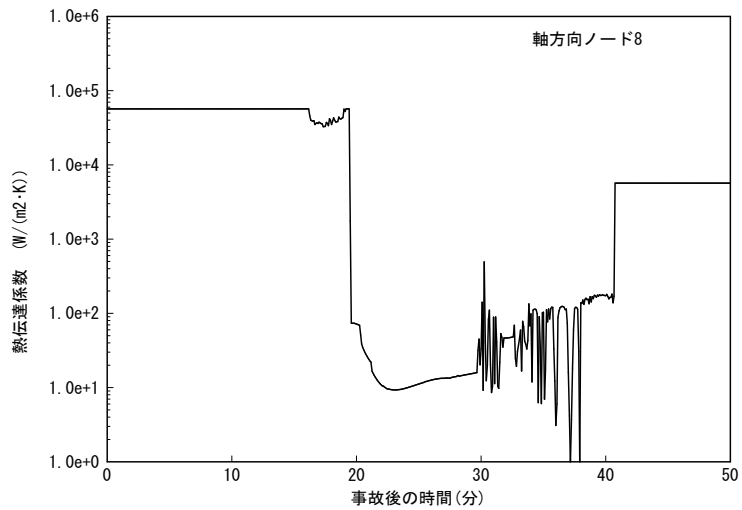


(噴霧流冷却熱伝達除外, 炉心軸方向 10 分割)

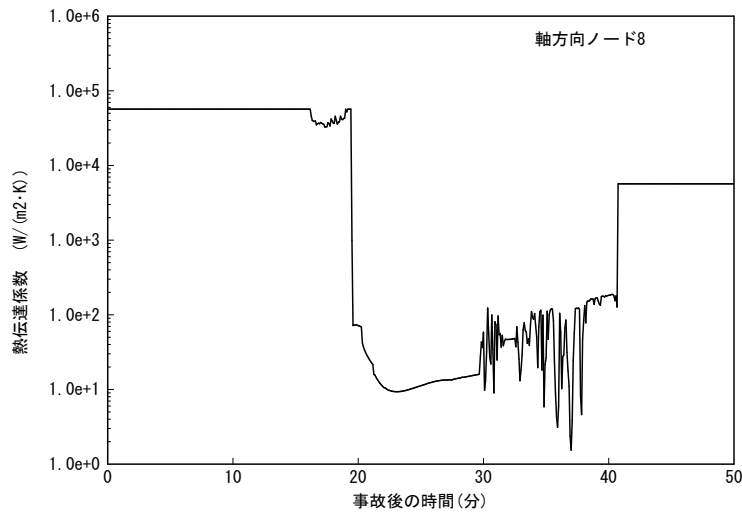


(噴霧流冷却熱伝達除外, 炉心軸方向 48 分割)

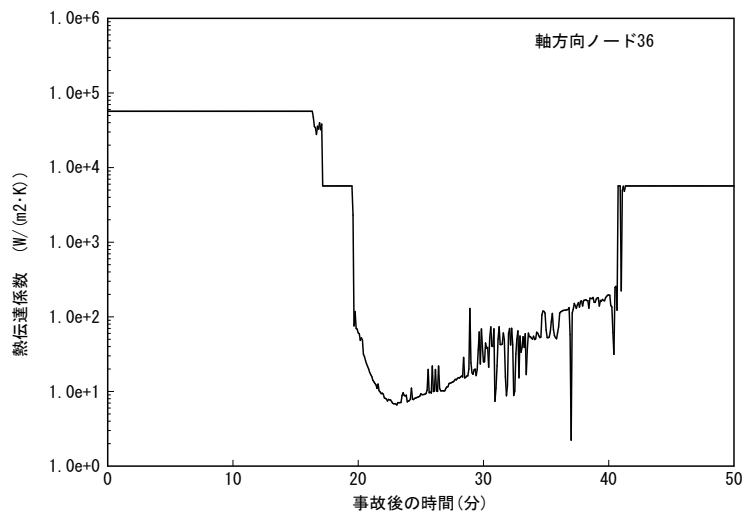
添付図 5-2 P C T発生位置の燃料被覆管温度変化の比較



(噴霧流冷却熱伝達考慮, 炉心軸方向 10 分割)

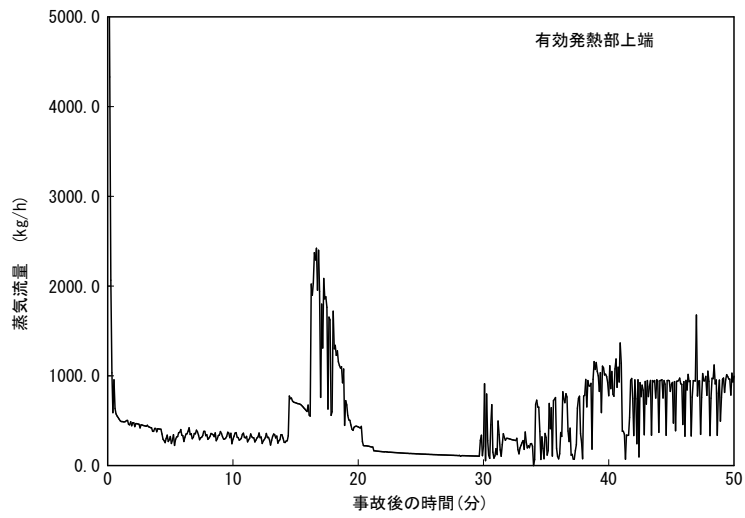


(噴霧流冷却熱伝達除外, 炉心軸方向 10 分割)

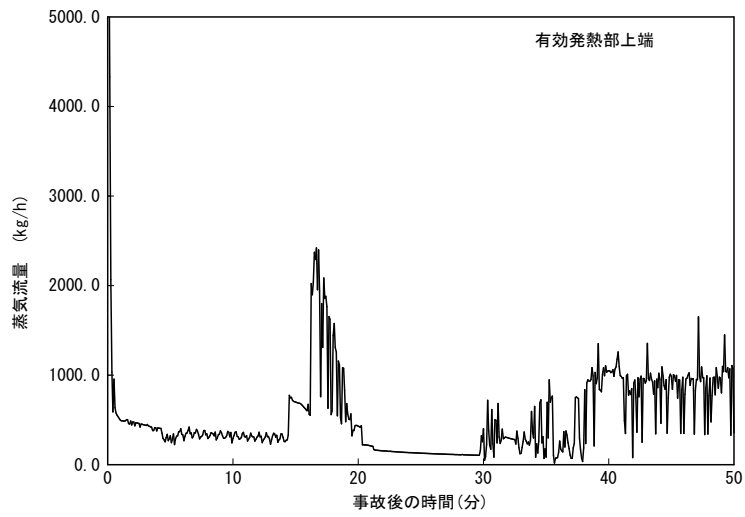


(噴霧流冷却熱伝達除外, 炉心軸方向 48 分割)

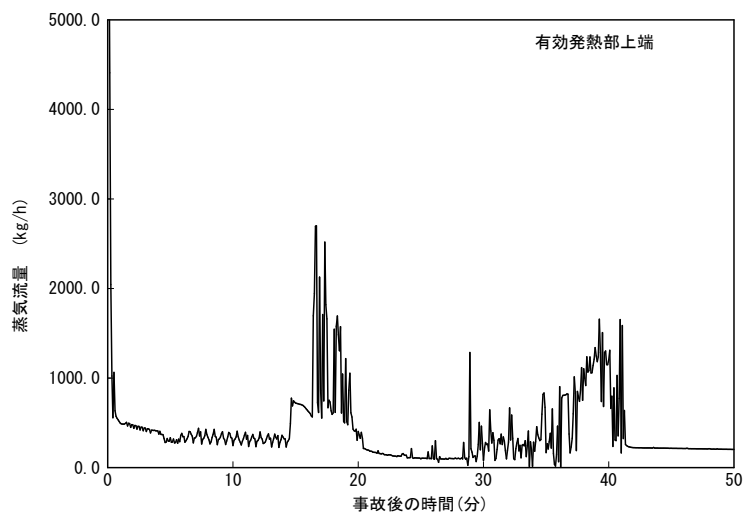
添付図 5-3 P C T発生位置の熱伝達係数変化の比較



(噴霧流冷却熱伝達考慮, 炉心軸方向 10 分割)

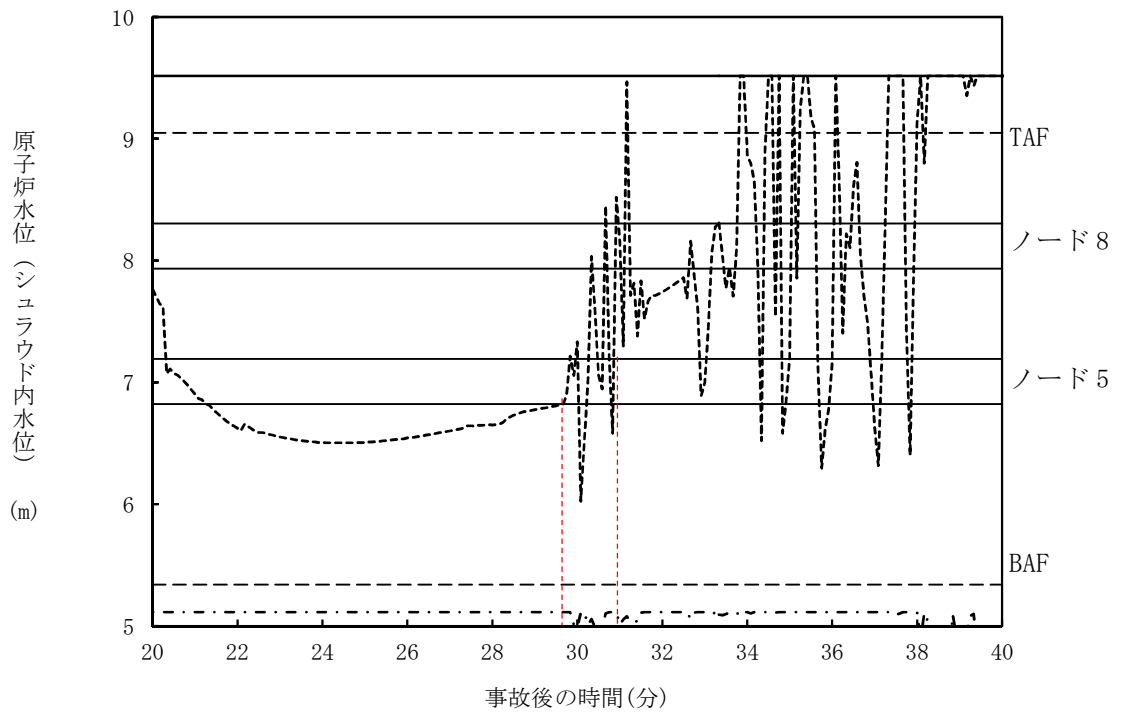


(噴霧流冷却熱伝達除外, 炉心軸方向 10 分割)

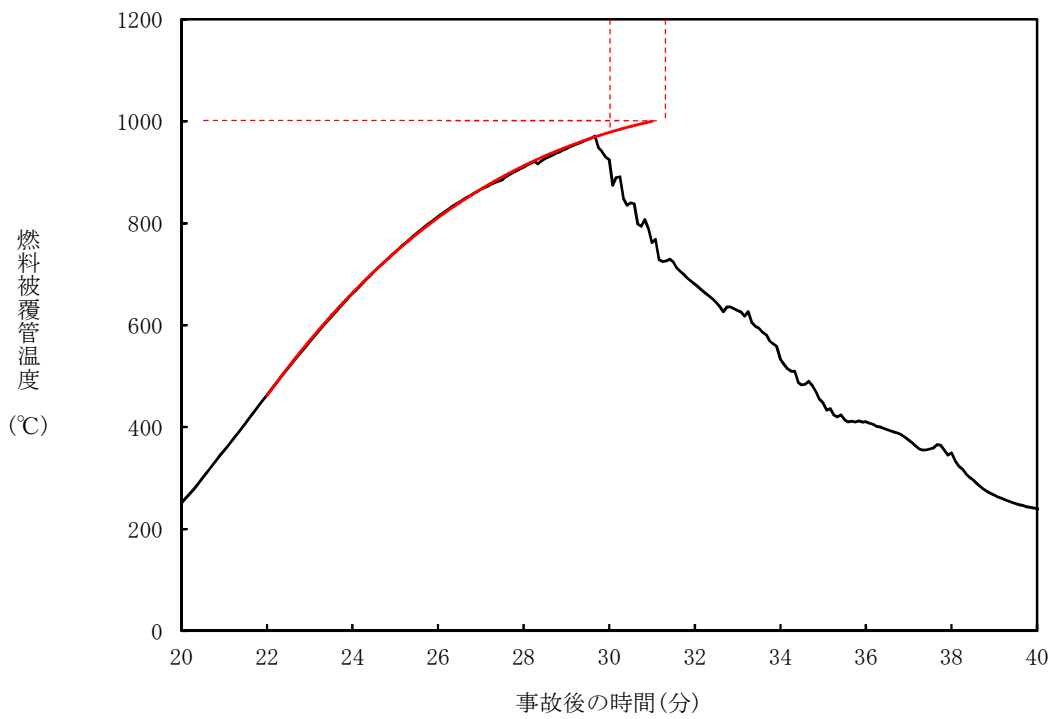


(噴霧流冷却熱伝達除外, 炉心軸方向 48 分割)

添付図 5-4 高出力燃料集合体の蒸気流量変化の比較



添付図 5-5 原子炉水位（炉心シュラウド内水位）変化  
 （噴霧流冷却熱伝達除外，炉心軸方向 10 分割）



添付図 5-6 P C T 発生位置での燃料被覆管温度変化  
 （噴霧流冷却熱伝達除外，炉心軸方向 10 分割）

## 添付6 原子炉隔離状態における原子炉圧力挙動について

### 1. はじめに

炉心損傷防止有効性評価のうち、全交流動力電源喪失及び崩壊熱除去機能喪失時では、事象発生後、主蒸気隔離弁が閉止し、原子炉は高圧状態に維持されるが、原子炉水位低信号により自動起動したR C I Cによる原子炉注水により、炉心は露出することなく原子炉水位は回復し、冠水を維持する。

BWRのR C I Cには、原子炉圧力容器の頂部から注水する方式と給水系から注水する方式の2種類があり、プラントにより異なる。いずれの方式でも、炉心は冠水維持されるため、炉心冷却が問題となることはないが、このうち、給水系から注水する場合の解析では、R C I Cによる注水開始から原子炉が減圧されるまでに時間遅れが生じ、その後大きな圧力低下を示す結果となっていることから、これらの原子炉圧力変化挙動について以下に説明する。

### 2. 解析モデル

給水系から注水する方式の場合、R C I Cからの注水は、給水ノズルを通じて炉心シュラウド外領域に注水され、給水ノズルが水中に水没している場合には、未飽和の注入水は炉心シュラウド外領域の冷却水と混合し、炉心シュラウド外領域の冷却水の未飽和度が増加する。しかしながら、炉心シュラウド外領域の水面と蒸気ドーム領域の蒸気は断熱としているため、炉心シュラウド外領域の冷却水の未飽和度の増加が原子炉圧力に直接影響することはない。このため、混合水の未飽和度の増加が原子炉圧力への影響として現れるのは、混合水が下部プレナムを經由して炉心に達し、炉心の蒸気発生を抑制し、さらに上部プレナム領域ボイドを潰した後、蒸気ドーム内蒸気を凝縮

する計算に切り替わったときとなる。ただし、この計算の切替えは、冷却材が全て未飽和となっても未飽和水の注入が継続したとき、すなわち、炉心が過冷却状態のときにのみ行われる。

### 3. 解析結果の説明

代表BWRの崩壊熱除去機能喪失（取水機能喪失）時の解析結果から、添付図6に原子炉圧力、RCICの注水流量、上部プレナム領域水位及び各領域のボイド率の推移を示す。ここで、各領域のボイド率については、下記定義による負のボイド率により各領域冷却材の未飽和度を表す。

$$\text{負のボイド率} = \frac{(\text{各部水の比容積} - \text{飽和水比容積})}{(\text{飽和水比容積} - \text{注水比容積})}$$

なお、添付図6のボイド率は、RCIC注入水の原子炉内流入経路に従い、下から、炉心シュラウド外領域、炉心（軸方向ノード1）、炉心（軸方向ノード12）及び上部プレナム領域の順に示す。

RCICを給水系から注水した場合、炉心シュラウド外領域の冷却水は、ほぼ飽和にある状態からRCIC注入水と混合して未飽和となり、未飽和度が徐々に増加することを添付図6は示している。また、RCICの注水が継続されることによる原子炉内の冷却水の未飽和度の増加に伴い、炉心領域（軸方向ノード12）及び上部プレナム領域のボイド率が減少していることを示している。

炉心領域での蒸気発生が減少してボイド率がゼロに漸近する過程で逃がし安全弁の開閉間隔が徐々に広がっていき、さらに、未飽和水が上部プレナム領域に到達して上部プレナム領域ボイドを潰して蒸気ドーム領域内蒸気を凝縮することで、前項記載の解析モデルの特性とあいまって原子炉圧力が大きく低下する。



#### 4. 実機における原子炉圧力挙動について

上記に示した、炉心が過冷却となったときに生じる大きな原子炉圧力低下は、実機にて生じ得る減圧幅を過剰に見積もっている可能性がある。これは、実機では炉心内の蒸気が消失した後に自然循環流量がほぼゼロとなるため、上部プレナム内の冷却水が滞留し、特に蒸気ドーム部と接する領域に高温水が滞留すると見込まれることから、蒸気ドーム内蒸気の凝縮が抑制され、原子炉圧力の低下が大きく緩和されると考えられるためである。

また、炉心シュラウド外領域の冷却水と蒸気ドーム部蒸気との間の熱交換による原子炉圧力挙動への影響については次のように考えられる。すなわち、実機プラントにおいても、R C I Cが給水系から注水され、かつ給水ノズルが水中に水没している場合には、未飽和の注入水が炉心シュラウド外領域の冷却水と混合し、炉心シュラウド外領域の冷却水の未飽和度が増加すると考えられる。このとき、前々項記載の断熱仮定とは異なり、実機では未飽和水水面と蒸気ドーム領域の蒸気との熱交換による蒸気凝縮に伴って原子炉圧力が低下する可能性がある。しかし、R C I Cが水面下に注水されたときには蒸気ドーム内で大規模な蒸気の対流場が形成されることはなく、水面近くで局所的かつ限定的な蒸気流れが生じ得るだけであることから、実機においても未飽和水水面は断熱に近く、炉心シュラウド外領域の冷却水の未飽和度増加による圧力低下は小さいものと考えられる。

なお、R C I Cはこれらの原子炉圧力範囲では、原子炉圧力によらず十分な注水能力を有すること、当該事象ではR C I Cの自動起動により原子炉水位は炉心より十分高い位置で維持されることから、実機と解析の差異が炉心冷却に及ぼす影響は小さいと考えられる。

## 5. 炉心露出が発生する事象における挙動について

例えば、高圧・低圧注水機能喪失の評価では、逃がし安全弁を用いて原子炉減圧操作を行った後、低圧代替注水系により原子炉注水を行い、炉心露出により燃料被覆管温度が上昇した炉心を再冠水して冷却するが、上記にて説明した原子炉の圧力低下挙動は、炉心が過冷却となった時に発生する特異な挙動であり、炉心が露出するような炉心冷却が問題となる状態では過冷却状態とはならないため、発生するものではない。

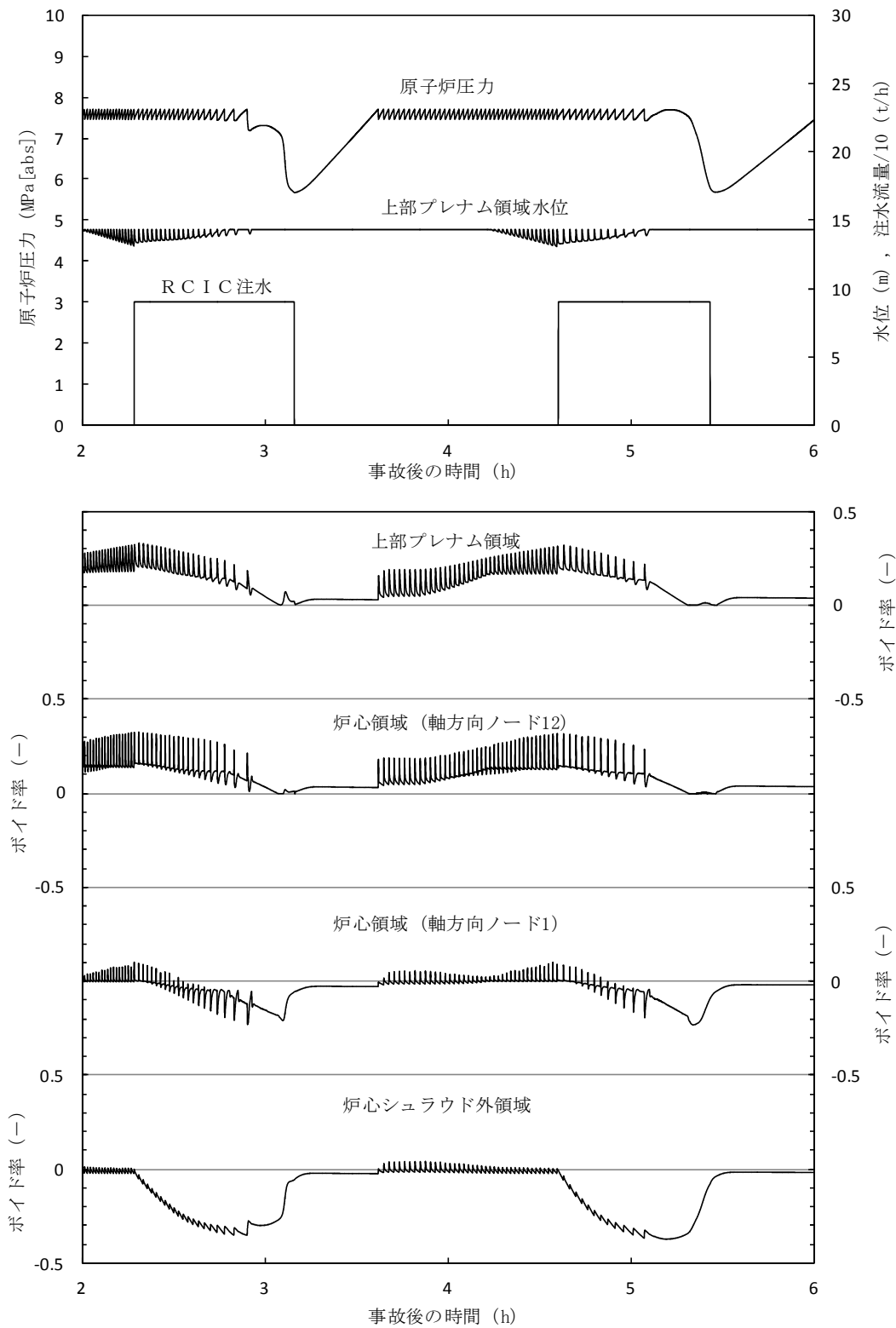
また、低圧代替注水系で低圧注水系配管を介して注水する場合、注水ノズルが蒸気雰囲気中に露出しているときには、未飽和の注入水が水面より上部にある注入水の経路上の蒸気を部分的に凝縮させる。逃がし安全弁による原子炉減圧挙動を評価する際に重畳する現象として蒸気雰囲気中への注水による蒸気凝縮現象を考慮した評価がなされていることから、低圧代替注水系の注水に伴う主要な蒸気凝縮効果を取り込まれた解析がなされていると結論できる。

なお、残る蒸気凝縮現象として未飽和水からなる水面への蒸気凝縮があるが、これについては、前項4.にて説明したとおりであり、これによる圧力低下は小さいものと考えられる。

## 6. まとめ

SAFERコードでの解析では、RCICが給水系から注水される場合、注入された冷却水が炉心シュラウド外領域の冷却水と混合することにより未飽和水となり、未飽和水の流入により炉心領域の蒸気発生が抑制され、上部プレナム領域ボイドを潰したのち、蒸気ドーム領域内蒸気を凝縮することで原子炉圧力が大きく低下することとなる。しかしながら、これらの挙動は、炉心が露出するような状態で発生するものではなく、また、当該事象ではR

C I Cの自動起動により原子炉水位は炉心より十分高い位置で維持されるため、これらの原子炉圧力変化挙動が評価項目に及ぼす影響は小さいものと考ええる。



添付図6 原子炉圧力，R C I C流量，上部プレナム水位及びボイド率の推移

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。

## 第2部 CHASTE

## 目 次

### － CHASTE －

1. はじめに .....	2-4
2. 重要現象の特定 .....	2-5
2.1 事故シーケンスと評価指標 .....	2-5
2.2 ランクの定義 .....	2-6
2.3 物理現象に対するランク付け .....	2-7
3. 解析モデルについて .....	2-19
3.1 コード概要 .....	2-19
3.2 重要現象に対する解析モデル .....	2-20
3.3 解析モデル .....	2-22
3.4 入出力 .....	2-45
4. 妥当性確認 .....	2-47
4.1 重要現象に対する妥当性確認方法 .....	2-47
4.2 BWR－FLECHT実験解析 .....	2-51
4.3 炉心冷却実験解析 .....	2-58
4.4 スpray冷却特性実験解析 .....	2-69
4.5 実機解析への適用性 .....	2-75
5. 有効性評価への適用性 .....	2-76
5.1 不確かさの取扱いについて（評価指標の観点） .....	2-76
5.2 不確かさの取扱いについて（運転操作の観点） .....	2-77
6. 参考文献 .....	2-81

添付 1	入力項目リスト .....	2-83
添付 2	輻射率の妥当性について .....	2-84
添付 3	輻射伝熱モデルの妥当性について .....	2-87
添付 4	前処理コード .....	2-92
添付 5	有効性評価における $9 \times 9$ 燃料 (A 型) の代表性 .....	2-95

## 1. はじめに

本資料は、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」という。）に適用するコードのうち、CHASTE Ver.7 及び CHASTE Ver.8（以下「CHASTEコード」という。）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。

なお、CHASTE Ver.7 と CHASTE Ver.8 との相違は、 $9 \times 9$ 燃料格子配列の入力方法のみであり、今回の有効性評価において適用している輻射伝熱モデルは同一であるため、解析結果に影響を及ぼすものではない。



## 2. 重要現象の特定

### 2.1 事故シーケンスと評価指標

CHASTEコードが適用される有効性評価における事故シーケンスグループは既定ではなく、SAFERコードによる炉心ヒートアップ解析結果において、燃料被覆管の温度が高温となり燃料棒やチャンネルボックスの幾何学的配置を考慮したより詳細な輻射熱伝達計算が必要となる場合にCHASTEコードが用いられる。

したがって、炉心露出・ヒートアップが発生して燃料被覆管温度が高温になる場合を評価するため、設計基準事故のLOCAの炉心冷却の判断基準と同様に、燃料被覆管温度が評価指標である。

炉心損傷防止対策における事故シーケンスに対し、有効性評価上要求される評価項目は、以下の5点である。

- a. 燃料被覆管の温度（1200℃以下）
- b. 燃料被覆管の酸化量（15%以下）
- c. 原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力  
（最高使用圧力の1.2倍以下）
- d. 格納容器圧力バウンダリにかかる圧力（限界圧力以下）
- e. 格納容器圧力バウンダリにかかる温度（限界温度以下）

原子炉設置変更許可申請解析に記載した解析結果から、15%に対し十分な余裕があり評価指標として燃料被覆管の温度で代表できると考えられるbを除く、a. c. d. e.を評価指標として取り上げる。このうち、c. d. e.はCHASTEコードの評価範囲以外であるため除外する。

## 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CHASTEコード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 2-1 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。

表 2-1 ランクの定義

ランク	ランクの定義	本資料での取扱い
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、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
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、2.1 節で述べた事象を踏まえ、2.2 節記載のランクの定義に従い、評価指標及び運転操作への影響に応じて「H」及び「M」に分類することで物理現象の中から重要現象を特定する。この結果を表 2-2 に示す。

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るため、S A F E R コードの解析結果を引き継ぐ物理現象を含んでいる。そのような物理現象は、S A F E R コードの説明資料で示す。

以下に、物理現象ごとに考え方を示す。

#### (1) 核分裂出力 [炉心 (核) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、事故後長期における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となる。また、減速材直接発熱は核分裂で発生するエネルギーのうち、減速材の発熱に寄与する割合はきわめて小さい。したがって、核分裂出力は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

#### (2) 出力分布変化 [炉心 (核) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、事象発生後スクラムするまでの時間が短く、通常運転時からの出力分布変化に対する影響が小さい。したがって、出力分布変化は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

(3) 反応度フィードバック効果 [炉心 (核) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、事故後長期における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となる。したがって、反応度フィードバック効果は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

(4) 制御棒反応度効果 [炉心 (核) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、事故後長期における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となる。したがって、制御棒反応度及び制御棒速度は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

(5) 崩壊熱 [炉心 (核) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、事故後長期における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となる。したがって、崩壊熱は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。

(6) 三次元効果 [炉心 (核) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、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燃料被覆管温度に影響を与えない。

(7) 燃料棒内温度変化 [炉心 (燃料) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、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るため、事故直後における燃料棒内の熱を冷却材に放出する燃料ペレット径方向発熱密度分布、燃料ペレット・燃料被覆管内熱伝導及び燃料ペレット－燃料被覆管のギャップ熱伝達の影響は小さい。したがって、燃料棒内温度変化は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。

(8) 燃料棒表面熱伝達 [炉心 (燃料) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、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るため、崩壊熱による燃料の発熱及び燃料棒表面から冷却材への熱伝達が燃料被覆管温度変化の支配的要因になる。原子炉減圧後の減圧沸騰により二相流動状態となった場合には、二相壁面熱伝達により冷却される。また、炉心が露出した場合には、蒸気単相流、燃料棒間の輻射熱伝達により冷却される。露出した燃料棒周囲の蒸気が過熱され気液熱非平衡状態となる可能性があり、燃料棒表面熱伝達に影響する。燃料被覆管温度が高温になり、燃料棒の膨れ・破裂が発生する場合は、燃料棒やチャンネルボックスの幾何学的配置を考慮したより詳細な輻射熱伝達計算が必要となる。したがって、燃料棒表面熱伝達は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。

(9) 沸騰遷移 [炉心 (燃料) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、給水流量の全喪失あるいは小破断 L O C A を起因事象としており、炉心流量の減少は緩やかに変化し、事故直後に原子炉がスクラムし原子炉出力が低下するため、燃料集合体で核沸

騰からの離脱が発生する可能性は低い。一方、事故後長期において炉心が露出する場合には、燃料被覆管温度が上昇するが、原子炉注水により炉心が再冠水することによって、最終的には核沸騰状態に遷移して冷却される。したがって、沸騰遷移は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。なお、沸騰遷移は、輻射熱伝達を除き、原子炉冷却材と燃料被覆管表面の熱伝達としてS A F E Rコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

#### (10) 燃料被覆管酸化 [炉心 (燃料) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、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るため、燃料被覆管が高温になるとジルコニウム-水反応による発熱量が増加すると考えられる。しかし、代替注水設備等の原子炉注水により炉心が冷却され、燃料被覆管温度はジルコニウム-水反応が顕著になるほど上昇しない。したがって、燃料被覆管酸化は燃料被覆管温度に対し重要度が中程度と考えられる。

#### (11) 燃料被覆管変形 [炉心 (燃料) ]

評価する具体的な事故シーケンスでは、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、燃料ペレットが膨張することなくP C M Iは発生しない。燃料被覆管が高温になり、燃料棒内圧の上昇に伴う膨れ・破裂が発生する場合には、燃料棒間の輻射熱伝達への影響、燃料集合体内の流路減少による冷却への影響がある。破裂が発生する場合には、燃料被覆管内面酸化による反応熱への影響が考えられるが、崩壊熱に比べて燃料被覆管温度への寄与は小さい。燃料被覆管の破裂により核分裂生成物が原子炉格納容器内に放出されると、格納容器内雰囲気放射線モニタにより炉心

損傷の判断を実施した場合、格納容器スプレイや格納容器ベントの操作タイミングに影響することとなる。ただし、この操作は事象発生後早期に行うものではない。したがって、燃料被覆管変形は燃料被覆管温度に対し重要度は中程度と考えられる。

#### (12) 三次元効果 [炉心 (燃料) ]

本物理現象は、横方向及び縦方向からの輻射熱伝達の効果を意味している。評価する具体的な事故シーケンスは、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るため、炉心が露出した場合には、燃料棒間及びチャンネルボックスとの輻射による冷却の寄与が大きくなる。有効性評価で用いるCHASTEコードでは、SAFERコードの解析結果から燃料被覆管温度が最も厳しくなるノードを含む一断面について横方向の輻射熱伝達のみを考慮して評価しており、縦方向の輻射熱伝達を考慮するよりも燃料被覆管最高温度を高く評価する。したがって、輻射伝熱に関する三次元効果は、輻射伝熱量が増加するため、燃料被覆管温度に与える影響は結果を厳しくするものではなく重要度が低いと考えられる。

#### (13) 沸騰・ボイド率変化 [炉心 (熱流動) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、サブクールボイドの発生は燃料被覆管温度に影響しない。原子炉減圧操作を実施した場合には、下部プレナム等で減圧沸騰（フラッシング）が発生する。これに伴い発生したボイドにより形成された二相水位はボイド率変化に応じて変化する。したがって、沸騰・ボイド率変化は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考

えられる。

再循環ポンプトリップ及び代替注水設備等による原子炉注水により，原子炉圧力容器下部で温度成層化が発生する可能性があるが，事故後長期においては十分に混合され影響は無視できる。なお，沸騰・ボイド率変化は，輻射熱伝達を除き，原子炉冷却材と燃料被覆管表面の熱伝達としてS A F E Rコードから引き継がれる物理現象である。

#### (14) 気液分離（水位変化）・対向流〔炉心（熱流動）〕

評価する具体的な事故シーケンスは，原子炉減圧操作に伴う下部プレナムフラッシングが発生する事象であり，フラッシングにより発生したボイドを含む二相水位の変化は，炉心露出時の燃料被覆管温度に影響がある。したがって，気液分離（水位変化）は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。

一方，炉心上部での気液対向流制限（以下「C C F L」という。），C C F Lブレークダウンは，事象進展が緩やかなこと及び代替注水設備等による原子炉注水はダウンコマ又は炉心バイパス領域に注水されるため発生しない。炉心スプレイ系による原子炉注水が行われる場合には発生する可能性があるが，短期間であるため影響は小さい。また，炉心に冷却水が保持され水位が形成されている場合で，かつ，下部プレナムにも水位が形成される場合には，炉心下部でC C F Lが発生する可能性があるが，原子炉減圧操作を経て炉心が再冠水する過程では事象進展が緩やかであり，下部プレナムに顕著な水位が形成されることはないため，炉心下部のC C F Lは発生しない。したがって，対向流は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。なお，気液分離（水位変化）・対向流は，炉心露出開始時間及び炉心再冠水時間としてS A F E Rコードの解析結果から引き継がれ



る物理現象である。

#### (15) 気液熱非平衡 [炉心 (熱流動) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、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るため、露出した燃料棒周囲の蒸気が過熱され気液熱非平衡状態となる可能性がある。炉心の一部で発生した過熱蒸気は、上部プレナムから炉心シュラウド外に至る経路において飽和蒸気になると考えられ、熱流動挙動への影響は小さいと考えられる。しかしながら、気液熱非平衡の影響は、(8)でも述べたように燃料棒表面熱伝達に影響するため燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。なお、気液熱非平衡は、原子炉冷却材と燃料被覆管表面熱伝達として S A F E R コードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

#### (16) 圧力損失 [炉心 (熱流動) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、いずれも事故直後に再循環ポンプがトリップし炉心流量が早期に低下するため、炉心部の圧力損失の影響は小さい。また、炉心バイパス部は、局所的な圧力損失は小さい。したがって、圧力損失は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。なお、圧力損失は熱流動特性である原子炉圧力として S A F E R コードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

#### (17) 三次元効果 [炉心 (熱流動) ]

評価する具体的な事故シーケンスは、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、露出した炉心が再冠水する過程においては、炉心中心部の一部の出力の高い燃料集合体では気液並

行上昇流，周辺の出力の低い燃料集合体では下降流，その他多くの燃料集合体では気液対向流が生じる可能性がある。これらの炉心の三次元的な流動状態により燃料集合体の冷却状態に差異が生じる。したがって，三次元効果は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。なお，三次元効果は熱流動特性である原子炉圧力としてS A F E Rコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

#### (18) 冷却材流量変化 [原子炉压力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは，いずれも事故直後に再循環ポンプがトリップし炉心流量が早期に低下するため，強制循環時の冷却材流量変化の影響は小さい。また，事故後長期において炉心が露出する場合には，原子炉水位が低下して炉心シュラウド内外の自然循環が維持できないため，自然循環時の冷却材流量変化の影響は小さい。したがって，冷却材流量変化は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。なお，冷却材流量変化は原子炉压力容器内挙動である原子炉圧力としてS A F E Rコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

#### (19) 冷却材放出（臨界流・差圧流） [原子炉压力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは，主蒸気逃がし安全弁（以下「S R V」という。）を使用した原子炉の急速減圧あるいはL O C A後の冷却材放出により炉心露出が発生し，燃料被覆管温度が上昇する可能性がある。また，原子炉減圧に伴い低圧注水量が変化するため，炉心冷却への影響が大きい。したがって，冷却材放出は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。なお，冷却材放出（臨界流・差圧流）は原子炉压力容器内挙動である原子炉圧力としてS A F E Rコードの解析結果から引き継がれる

物理現象である。

(20) 沸騰・凝縮・ボイド率変化 [原子炉压力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、SRVを使用した原子炉の急速減圧あるいはLOCA後の冷却材放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が二相水位に影響する。また、原子炉への冷却水の注水により蒸気が凝縮される。炉心以外の領域の沸騰・凝縮・ボイド率変化は燃料被覆管温度に対し、重要度は中程度と考えられる。なお、沸騰・凝縮・ボイド率変化は原子炉压力容器内挙動である原子炉圧力としてSAFERコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

(21) 気液分離（水位変化）・対向流 [原子炉压力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、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る。炉心以外の領域の気液分離（水位変化）・対向流は燃料被覆管温度に対し、重要度が中程度と考えられる。なお、気液分離（水位変化）・対向流は原子炉压力容器内挙動である原子炉圧力としてSAFERコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

(22) 気液熱非平衡 [原子炉压力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、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る。しかし、炉心以外の領域の気液熱非平衡は燃料被覆管温度に対し影響はない。なお、気液熱非平衡は原子炉压力容器内挙動である原子炉圧力としてSAFERコードの解析

結果から引き継がれる物理現象である。

(23) 圧力損失 [原子炉圧力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、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る。しかし、炉心以外の領域の圧力損失は燃料被覆管温度に対し直接的な影響はないため、重要度が低いと考えられる。なお、圧力損失は原子炉圧力容器内挙動である原子炉圧力としてS A F E Rコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

(24) 構造材との熱伝達 [原子炉圧力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、S R Vを使用した原子炉の急速減圧あるいはL O C A後の冷却材放出により原子炉が減圧され、構造材から冷却材への熱伝達が発生する。しかし、崩壊熱に比べて寄与は小さい。したがって、構造材との熱伝達は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。なお、構造材との熱伝達は原子炉圧力容器内挙動である原子炉圧力としてS A F E Rコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

(25) 非常用炉心冷却系（以下「E C C S」という。）注水（給水系・代替注水設備含む） [原子炉圧力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、E C C S又は代替注水設備による原子炉注水により炉心が冷却される事象である。したがって、E C C S（給水系・代替注水設備含む）による原子炉注水は燃料被覆管温度に対し重要度が高いと考えられる。なお、E C C S注水（給水系・代替注水設備含む）は原子炉圧力容器内挙動である原子炉圧力としてS A F E Rコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

(26) ほう酸水による拡散 [原子炉圧力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、いずれもほう酸水による注入を考慮していないため、ほう酸水による拡散は燃料被覆管温度に影響を与えない。

(27) 三次元効果 [原子炉圧力容器]

評価する具体的な事故シーケンスは、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場合があるが、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、三次元効果は燃料被覆管温度に対し重要度が低いと考えられる。なお、三次元効果は原子炉圧力容器内挙動である原子炉圧力としてS A F E Rコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

表 2-2 炉心損傷防止対策の有効性評価の物理現象のランク

分類	事故シーケンス		燃料被覆管の温度が高温となる事象
	物理現象		評価指標
			燃料被覆管温度
炉心 (核)	(1)	核分裂出力	L
	(2)	出力分布変化	L
	(3)	反応度フィードバック効果	L
	(4)	制御棒反応度効果	L
	(5)	崩壊熱	<u>H</u>
	(6)	三次元効果	I
炉心 (燃料)	(7)	燃料棒内温度変化	L
	(8)	燃料棒表面熱伝達	<u>H</u> *
	(9)	沸騰遷移	H*
	(10)	燃料被覆管酸化	<u>M</u>
	(11)	燃料被覆管変形	<u>M</u>
	(12)	三次元効果	L
炉心 (熱流動)	(13)	沸騰・ボイド率変化	H*
	(14)	気液分離（水位変化）・対向流	H*
	(15)	気液熱非平衡	H*
	(16)	圧力損失	L
	(17)	三次元効果	H*
原子炉 圧力 容器 (逃がし 安全弁を 含む)	(18)	冷却材流量変化	L
	(19)	冷却材放出（臨界流・差圧流）	H*
	(20)	沸騰・凝縮・ボイド率変化	M*
	(21)	気液分離（水位変化）・対向流	M*
	(22)	気液熱非平衡	I
	(23)	圧力損失	L
	(24)	構造材との熱伝達	L
	(25)	E C C S 注水（給水系・代替注水 設備含む）	H*
	(26)	ほう酸水による拡散	I
(27)	三次元効果	L	

※ S A F E R コードから引き継ぐ物理現象についての解析モデル，妥当性確認等については S A F E R コードに記載する。

### 3. 解析モデルについて

#### 3.1 コード概要

CHASTEコードは、燃料集合体軸方向の任意の一断面で燃料ペレット、燃料被覆管、チャンネルボックス等の温度計算を行うコードである。本コードは、燃料ペレットを半径方向に最大9ノードに分割し、燃料集合体内燃料棒を全て1本ごとに取り扱い、その熱的相互作用（輻射）も考慮している。また、ジルコニウム-水反応を Baker-Just の式によって計算し、表面の酸化量を求める。さらに、燃料棒内の圧力を計算することによって、燃料被覆管の膨れと破裂の有無を評価し、破裂が起きた場合には、燃料被覆管の内面に対してもジルコニウム-水反応を考慮する。

炉心のヒートアップ解析には通常SAFERコードが用いられるが、CHASTEコードは、燃料被覆管の温度が高温となり、より詳細な温度計算が必要な場合に用いられる。SAFERコードでは燃料集合体内の燃料棒は平均出力燃料棒と高出力燃料棒の2種類しか取り扱わないが、CHASTEコードでは燃料棒やウォータロッドとチャンネルボックスの幾何学的配置（7×7，8×8，9×9格子配列に適用可能）を考慮しているため、燃料集合体内の全ての燃料棒を1本ごとに取り扱うことが可能であり、燃料棒間及び燃料棒-チャンネルボックス間の詳細な輻射熱伝達計算を実施して、燃料棒1本ごとの温度評価が可能である。

本コードは燃料集合体の一断面での温度評価を行うコードのため、プラントの挙動はSAFERコードから境界条件として引き継ぐ。

本コードの入力は、燃料集合体及び炉心に関するデータ、過渡特性（原子炉出力の時間変化、原子炉圧力の時間変化、炉心露出時間及び再冠水時間、炉心スプレイ系による冷却開始時間、対流熱伝達係数変化等）がある。燃料被覆管温度は、SAFERコードから引き継がれる対流熱伝達と

CHASTEコードにより計算される輻射熱伝達の合計の熱伝達係数に基づいて計算される。対流熱伝達係数変化等がSAFERコードから引き継がれて入力されることに伴い、SAFERコードでのモデル及び解析条件の保守性が境界条件として引き継がれる。出力として、燃料被覆管最高温度、燃料被覆管酸化量等が求められる。

なお、CHASTEコードは「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」で妥当性が認められているモデルを使用しており、BWR型プラントのECCS性能評価解析（LOCA解析）に適用されている。

### 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2-2で「H」及び「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3-1に示す。



表 3-1 重要現象に対する解析モデル

分類	重要現象	必要な解析モデル	
炉心 (核)	崩壊熱	崩壊熱モデル	
炉心 (燃料)	燃料棒表面熱伝達	対流熱伝達モデル	S A F E R コードの解析結果を引き継ぐため対象外
		輻射熱伝達モデル	燃料棒間，燃料棒－チャンネルボックス間の輻射熱伝達評価モデル（燃料被覆管の変形も考慮）※
	燃料被覆管酸化	ジルコニウム－水反応モデル	
	燃料被覆管変形	膨れ・破裂評価モデル	

※ S A F E R コードでは，高出力燃料棒から平均出力燃料棒及び平均出力燃料棒からチャンネルボックスへの輻射熱伝達のみを評価している。

### 3.3 解析モデル<sup>(1)(2)</sup>

CHASTEコードの主要な計算モデルを表 3-2 に示す。

#### 3.3.1 計算モデル

##### 3.3.1.1 ノード分割

ヒートアップ計算は，燃料集合体の軸方向の任意の一断面について行う。この断面はさらに，次のようにノード分割する。

##### (1) 燃料棒グループ

燃料棒は，1本ごとに取り扱う。燃料集合体断面における燃料棒及びウオータロッドを全て考慮し図 3-1 のように燃料棒グループに分けて取り扱う。9×9配列型燃料集合体の場合，対称性から45グループに分けることができる。

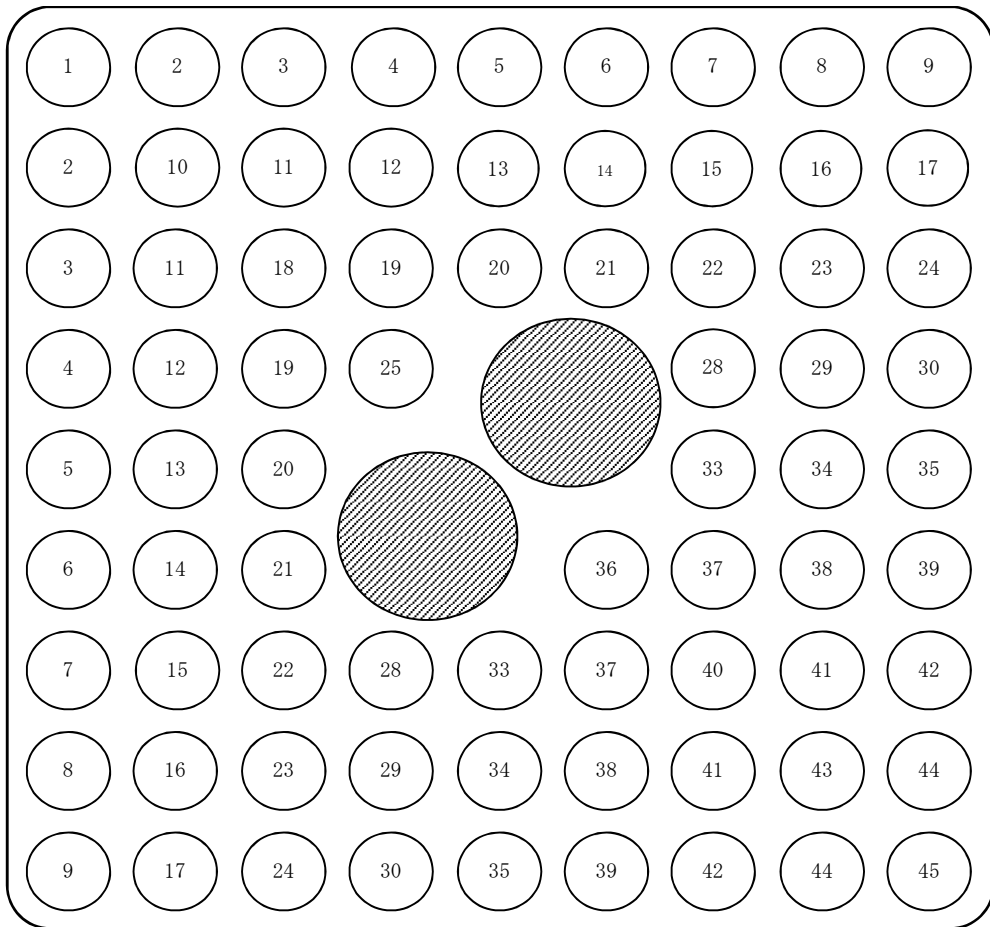


図 3-1 燃料集合体の燃料棒グループ分け  
 (9×9燃料 (A型) の例, 斜線はウォーターロッド)

## (2) 燃料ペレット

燃料棒は、燃料ペレットとジルカロイ製被覆管からなる。燃料ペレットは、ペレット中心とペレット表面を含め、半径方向に等間隔で最大9ノードに分け、温度分布、熱伝導を計算する。図3-2に燃料ペレットのノード分割を示す。

## (3) 燃料被覆管

燃料被覆管は、図3-2のように、燃料被覆管の内表面と外表面の二つにノード分割する。燃料被覆管温度は、両表面温度の平均とする。なお、燃料被覆管は、酸化層及び非酸化層に区別して熱伝導を計算する。

## (4) チャンネルボックス

チャンネルボックスは、図3-2のように、内表面と外表面の二つにノード分割する。

## (5) ウォータロッド

ウォータロッドは、燃料被覆管と同様に内表面と外表面の二つにノード分割する。

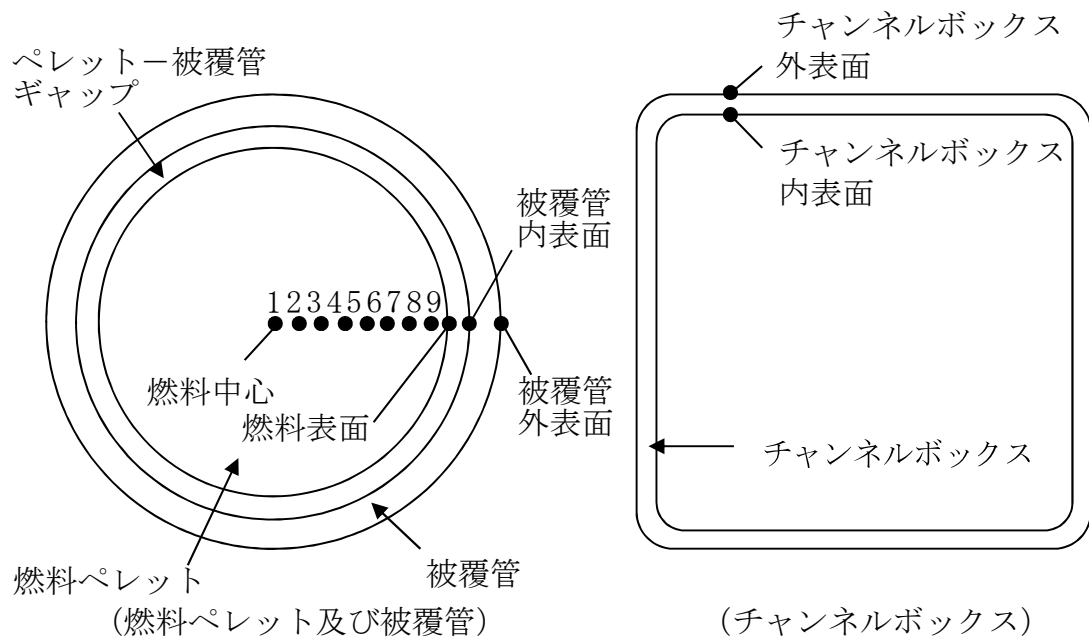


図 3-2 燃料棒及びチャンネルボックスのノード分割

### 3.3.1.2 熱伝導方程式

燃料棒内の温度分布の計算は、燃料ペレット、燃料被覆管及びチャンネルボックスの径方向に対して円筒一次元熱伝導方程式を用いる。ただし、これは径方向のみで、軸方向及び周方向の熱伝導は無視している。この方程式は次式で与えられる。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ k \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + Q \quad (3.3.1.2-1)$$

ここで、

- $\rho$  : 密度
- $C$  : 比熱
- $T$  : 温度
- $t$  : 時間
- $r$  : 半径方向距離
- $k$  : 熱伝導率
- $Q$  : 発熱量

この式はS A F E Rコードで用いられているものと同じである。

### 3.3.1.3 ギャップ熱伝達

過渡時の燃料ペレット－燃料被覆管ギャップ熱伝達係数は、定常時のギャップ熱伝達係数評価モデルと同じ、Ross and Stoute に基づくモデル<sup>(4)</sup>を用いて計算する。ギャップ熱伝達係数は次の3成分からなるとする。

$$h_g = h_s + h_f + h_r \quad (3.3.1.3-1)$$

ここで、

- $h_g$  : ギャップ熱伝達係数
- $h_s$  : 燃料と燃料被覆管の接触による熱伝達成分
- $h_f$  : ギャップ中のガスの熱伝導による熱伝達成分
- $h_r$  : 燃料と燃料被覆管の間の輻射による熱伝達成分

なお、ギャップ熱伝達係数の初期値及び過渡計算に用いるギャップ内のガス組成等は、燃料棒熱機械設計コードPRIME Ver.1（以下「PRIME」という。）<sup>(5)(6)</sup>から引き継ぐ。

#### (1) 固体接触による熱伝達成分 ( $h_s$ )

燃料ペレットと燃料被覆管の接触による熱伝達係数は次式により計算する。

$$h_s = \frac{K_m \cdot P_c}{A_0 \cdot H_m \cdot R_4} \quad (3.3.1.3-2)$$

ここで、

- $P_c$  : 燃料ペレットと燃料被覆管の接触圧力
- $A_0$  : 定数
- $H_m$  : 燃料被覆管メイヤー硬さ
- $K_m$  : 燃料ペレットと燃料被覆管の平均熱伝導率

$$K_m = \frac{2K_c \cdot K_p}{K_c + K_p}$$

$K_c$  : 燃料被覆管熱伝導率

$K_p$  : 燃料ペレット熱伝導率

$R_4$  : 表面粗さ係数

$$R_4 = \left( \frac{R_c^2 + R_p^2}{2} \right)^{1/4}$$

$R_c$  : 燃料被覆管内表面粗さ

$R_p$  : 燃料ペレット表面粗さ

## (2) ガスによる熱伝達成分 ( $h_f$ )

ギャップ中のガスの熱伝導による熱伝達係数は次式により計算する。

$$h_f = \frac{K_f}{C(R_c + R_p) + (g_1 + g_2) + R_{eff}} \quad (3.3.1.3-3)$$

ここで、

$K_f$  : 混合ガスの熱伝導率

$C$  : 燃料ペレット－燃料被覆管接触圧に関する定数

$R_c, R_p$  : 燃料被覆管内表面粗さ及び燃料ペレット外表面粗さ

$(g_1 + g_2)$  : 混合ガスの温度ジャンプ距離

$R_{eff}$  : 燃料ペレットと燃料被覆管の実効半径ギャップ

## (3) 輻射による熱伝達成分 ( $h_r$ )

燃料ペレットと燃料被覆管の間の輻射による熱伝達係数は次式により計算する。

$$h_r = \frac{\sigma(T_p^4 - T_c^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1\right)(T_p - T_c)} \quad (3.3.1.3-4)$$

ここで、



- $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 定数
- $T_p$  : 燃料ペレット外表面温度
- $T_c$  : 燃料被覆管内表面温度
- $\varepsilon_c$  : 燃料被覆管表面の輻射率
- $\varepsilon_p$  : 燃料ペレット表面の輻射率

#### 3.3.1.4 対流熱伝達

各燃料棒表面の対流熱伝達係数は、S A F E R コードの解析結果から時間の関数として引き継いで用いる。

#### 3.3.1.5 輻射熱伝達

輻射熱伝達モデルは、以下のような仮定としている。

- ① 輻射伝熱は、水平方向二次元体系として、物体間の輻射伝熱を評価する。
- ② 全ての物体の表面は灰色として、灰色体輻射係数を物体間の輻射率と形態係数から設定する。
- ③ 各物体の表面温度は一様とする。
- ④ 物体から他の物体への輻射、及び、物体から他の物体に反射する輻射熱は、水平方向二次元体系で等方的に反射される。
- ⑤ 輻射率は、燃料棒間又は燃料棒-チャンネルボックス間に対し、ジルコニウム合金の値を設定する。
- ⑥ 形態係数は、幾何形状配置における全ての燃料棒に着目し、近接する燃料棒、ウォータロッド及びチャンネルボックスに対して設定し、燃料棒の膨れが生じた場合には、形状の変化に応じて再設定される。
- ⑦ 部分長燃料棒は、部分長燃料棒の上部にも出力燃料棒\*が存在すると

仮定することで、発熱体からの放射及び輻射熱の反射効果が大きくなり、除熱量が減少するため、輻射伝熱量は保守的に評価される。

- ⑧ 炉心スプレイ等の作動により、蒸気が存在する場合には、蒸気又は液滴による輻射熱の吸収は考慮しない。

※ 部分長燃料棒の上部の出力設定として、部分長燃料棒の有効発熱部上端を含む断面の出力分布を仮定する方法や、平均出力燃料棒の出力を仮定する方法がある。

#### (1) 輻射熱伝達係数

燃料棒間及び燃料棒—チャンネルボックス間の輻射による熱伝達を次のように評価する。

物体*i*から系内の全ての物体*j*に対する等価輻射熱伝達係数は次式となる。

$$h_{r,i} = \frac{\sigma}{T_i - T_{sat}} \sum_{j=1}^{JMAX} F_{i-j} (T_i^4 - T_j^4) \quad (3.3.1.5-1)$$

ここで、

- $h_{r,i}$  : 物体*i*の等価輻射熱伝達係数
- $JMAX$  : 系内の物体*j*の数
- $F_{i-j}$  : 物体*i*から物体*j*への灰色体輻射係数  
(形態係数と輻射率から求まる)
- $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 定数
- $T_i$  : 物体*i*の表面温度 (絶対温度)
- $T_j$  : 物体*j*の表面温度 (絶対温度)
- $T_{sat}$  : 飽和温度 (絶対温度)

## (2) 灰色体輻射係数

(3.3.1.5-1) 式中の灰色体輻射係数の算出法を記載する。

物体  $i$  からの輻射に起因して、物体  $j$  に到達する輻射熱流束割合を  $H_{ij}$  とおく。物体  $j$  での吸収される熱流束割合は  $H_{ij}\varepsilon_j$ 、物体  $j$  で反射される熱流束割合は  $H_{ij}(1-\varepsilon_j)$  である。

物体  $i$  からの輻射に起因して、物体  $j$  の単位面積から反射される熱流束割合を  ${}_iR_j$  とおくと、 ${}_iR_j \equiv H_{ij}(1-\varepsilon_j)$  より以下のように表される。

$$H_{ij} = \frac{{}_iR_j}{1-\varepsilon_j} \quad (3.3.1.5-2)$$

ここで、輻射率と吸収率は同一であるため、物体  $i$  からの輻射に起因して、物体  $j$  で吸収される熱流束割合は (3.3.1.5-2) より以下のように表される。

$$H_{ij}\varepsilon_j = {}_iR_j \frac{\varepsilon_j}{1-\varepsilon_j} \quad (3.3.1.5-3)$$

灰色体輻射係数  $F_{i-j}$  は、物体  $i$  からの輻射熱流束が物体  $j$  で吸収される割合であり、(3.3.1.5-3) 式より次式が成立する。

$$A_i F_{i-j} = {}_iR_j A_j \frac{\varepsilon_j}{1-\varepsilon_j} \quad (3.3.1.5-4)$$

ここで、

- $A_i$  : 物体  $i$  の表面積
- $A_j$  : 物体  $j$  の表面積
- ${}_iR_j$  : 物体  $i$  からの輻射に起因して、物体  $j$  の単位面積から反射される熱流束割合
- $\varepsilon_j$  : 物体  $j$  の輻射率  
(燃料被覆管及びチャンネルボックスの乾いた状態の輻射率として 0.67, 水膜で濡れた状態の輻射率として 0.96 を用いる。添付 2 に輻射率の妥当性を示す。)

$F_{i-j}$  : 物体*i*から物体*j*への灰色体輻射係数  
(形態係数と輻射率から求まる)

${}_iR_j$ が決まれば、物体*i*から物体*j*への灰色体輻射係数 $F_{i-j}$ が求まる。 ${}_iR_j$ は物体*i*から直接物体*j*に到達する輻射、及び、物体*i*から他の物体で反射して物体*j*に到達する輻射を考慮して、熱バランスから次のように求められる。

$$\{ {}_iR \} = -\varepsilon_i [K']^{-1} \{ f_i \} \quad (3.3.1.5-5)$$

N個の物体についての表面積、輻射率及びN×N個の形態係数がわかれば、N個の行列方程式を解くことにより、全ての*i*と*j*について、輻射による熱流束割合 ${}_iR_j$ が求まる。そして、灰色体輻射係数は(3.3.1.5-4)式から求めることができる。

ここで、

$$\{ {}_iR \} \equiv \begin{Bmatrix} {}_iR_1 \\ {}_iR_2 \\ {}_iR_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ {}_iR_N \end{Bmatrix}, \quad \{ f_i \} \equiv \begin{Bmatrix} f_{i1} \\ f_{i2} \\ f_{i3} \\ \vdots \\ \vdots \\ f_{iN} \end{Bmatrix}$$

$$K' = \begin{bmatrix} (f_{11} - \rho_1) & f_{12} & f_{13} & \dots & f_{1N} \\ f_{12} & (f_{22} - \rho_2) & f_{23} & \dots & f_{2N} \\ f_{13} & f_{23} & (f_{33} - \rho_3) & \dots & f_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ f_{1N} & f_{2N} & f_{3N} & \dots & (f_{NN} - \rho_N) \end{bmatrix}$$

$$\rho_i \equiv 1/(1 - \varepsilon_i)$$

$f_{ij}$  : 物体*i*から物体*j*への形態係数

### (3) 形態係数

形態係数の計算は、燃料集合体の燃料棒配列に基づき四つのグループに分類して行う。図 3-3 に形態係数計算体系を示す。

#### a. 第 1 近接（隣接）燃料棒

図 3-3 における燃料棒①と②の関係であり、燃料棒間に障害となる他の燃料棒はない。対象となる燃料棒は着目燃料棒の位置により異なるが、最大 4 本である。

#### b. 第 2 近接燃料棒

図 3-3 における燃料棒①と③の関係であり、燃料棒間には障害となる燃料棒が 2 本（第 1 近接燃料棒②と⑤）存在する。対象となる燃料棒は最大 4 本である。

#### c. 第 3 近接燃料棒

図 3-3 における燃料棒①と④の関係であり、燃料棒間には障害となる燃料棒が 2 本（第 1 近接燃料棒⑤と第 2 近接燃料棒③）存在する。対象となる燃料棒は最大 8 本である。

#### d. チャンネルボックス

チャンネルボックスは、4 本の第 1 近接（隣接）燃料棒、4 本の第 2 近接燃料棒及び 8 本の第 3 近接燃料棒が全て揃わない位置の燃料棒との関係になる。チャンネルボックスは 1 ノードとして扱い、自身への形態係数も含める。

#### e. ウォータロッド

ウォータロッドは、燃料棒と同様に形態係数を求める。太径ウォータロッドについても、その座標及び径から形態係数が求められる。

#### f. 部分長燃料棒

輻射伝熱の観点からは、稠密体系の方が燃料被覆管温度を高め評価するため、部分長燃料棒より上部にも出力燃料棒が存在すると仮定する。

着目燃料棒と第1近接燃料棒及び第2近接燃料棒間の形態係数は、円筒形のピンの形態係数を計算するVIEWPINコード<sup>(7)</sup>のモデルを使用して計算する。また、着目燃料棒と第3近接燃料棒又はチャンネルボックス間の形態係数は、着目燃料棒の形態係数の総和が1.0となることから逆算して求められる。

以上から、CHASTEコードの輻射熱伝達モデルは、有効性評価解析で必要となる燃料集合体断面の幾何学的配置を考慮した、燃料被覆管、チャンネルボックスのより詳細な温度評価が可能であり、燃料棒の膨れによる変形も考慮することができる。したがって、有効性評価解析に適用可能なものであると考えている。

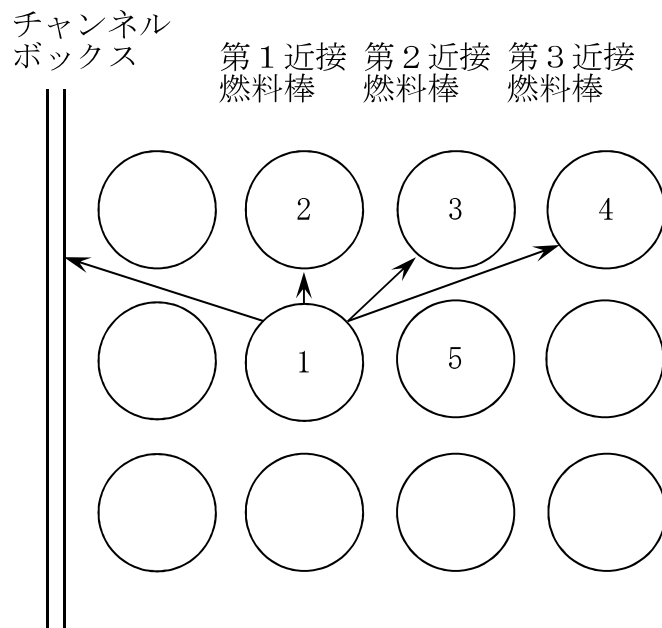


図 3-3 CHASTEコードの輻射熱伝達計算における形態係数計算体系

### 3.3.1.6 熱源

燃料内での熱発生量は、崩壊熱の時間変化により変わり、次式で与えられる。

$$\dot{Q} = V_f P_0 F_f \left( \dot{Q} / \dot{Q}_0 \right) \quad (3.3.1.6-1)$$

ここで、

- $\dot{Q}$  : 燃料の崩壊熱
- $V_f$  : 燃料ノードの体積
- $P_0$  : 燃料棒線出力密度
- $F_f$  : 出力ピーキング
- $\dot{Q} / \dot{Q}_0$  : 規格化した崩壊熱

なお、上式の規格化した崩壊熱は、核分裂による発生熱、核分裂生成物の崩壊熱及びアクチノイドの崩壊熱を含み、初期出力に対する割合を時間の関数として入力する。

有効性評価では、核分裂による出力変化はREDDY等により計算される運転時の異常な過渡変化あるいは設計基準事故の出力変化、崩壊熱はANSI/ANS-5.1-1979<sup>(3)</sup>に基づく計算結果を使用する。

### 3.3.1.7 ジルコニウム-水反応

燃料被覆管温度が高くなると、ジルコニウム-水反応による発熱が顕著になるが、これによる発熱量及び酸化量は、以下のBaker-Justの式<sup>(8)</sup>により計算する。この場合、燃料被覆管の温度上昇に伴う膨れを計算し、燃料被覆管に破裂が発生する場合は、その時点以降、燃料被覆管の外表面だけでなく内面においてもジルコニウム-水反応が生じるものとし、Baker-Just



の式を適用する。

### (1) 酸化割合

ジルコニウム－水反応は、蒸気の供給不足により制限されることがないものと仮定する。燃料被覆管の酸化厚さの割合は、次式で計算する。

$$\dot{th}_{ox} = \frac{R_1}{th_{ox}} \exp\left(-\frac{R_2}{T_R}\right) \quad (3.3.1.7-1)$$

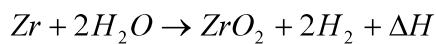
ここで、

- $\dot{th}_{ox}$  : 酸化厚さの割合
- $th_{ox}$  : 酸化厚さ
- $T_R$  : 燃料被覆管温度
- $R_1, R_2$  : Baker-Just の式に基づく定数

### (2) 発熱割合

ジルコニウム－水反応による反応熱は水や蒸気が持続的に供給され得ると仮定する。この二つの仮定により反応熱を大きく見積もる。

化学反応式は次式で与えられる。



ここで、 $\Delta H$  は反応熱であり、燃料被覆管温度の関数として次式で表わされる。

$$\Delta H = R_3 - R_4(T + 273) \quad (3.3.1.7-2)$$

ここで、

- $R_3, R_4$  : Baker-Just の式に基づく定数
- $T$  : 燃料被覆管温度

発熱割合は、反応熱と燃料被覆管酸化量割合の積であり、燃料被覆管酸化量割合は燃料被覆管の密度、表面積及び酸化厚さ割合の積である。

したがって、発熱割合は次式で与えられる。

$$\dot{Q}_R = \Delta H \cdot \dot{M}_{zr} = \Delta H \cdot \rho_{zr} \cdot A \cdot \dot{t}h_{ox} \quad (3.3.1.7-3)$$

ここで、

- $\dot{Q}_R$  : 発熱割合
- $\Delta H$  : 反応熱
- $\dot{M}_{zr}$  : 燃料被覆管酸化量割合
- $\rho_{zr}$  : 燃料被覆管密度
- $A$  : 燃料被覆管表面積
- $\dot{t}h_{ox}$  : 酸化厚さ割合

### 3.3.1.8 燃料被覆管の膨れ，破裂

CHASTEコードは、過渡時の燃料被覆管の膨れ，破裂を考慮している。燃料被覆管の膨れは、燃料棒プレナム部とギャップ部の温度及び体積から燃料棒内圧を評価し、燃料被覆管内外圧力差から燃料被覆管の周方向応力を求め、燃料被覆管の歪量をこの周方向応力に基づき求めている。また、燃料被覆管の破裂は実験に基づく周方向応力の限界曲線に基づいて判定する。

#### (1) 燃料棒内圧

燃料棒内圧は、燃料棒プレナム部とギャップ部の圧力が等しいとして、温度及び体積の変化を考慮して次式で計算する。

$$P_g = \frac{N \cdot R}{\frac{V_F}{T_F} + \frac{V_P}{T_P}} \quad (3.3.1.8-1)$$

ここで、

$P_g$	:	燃料棒内圧
$V_F$	:	燃料棒ギャップ体積
$V_p$	:	燃料棒プレナム体積
$T_F$	:	燃料棒ギャップ温度
$T_p$	:	燃料棒プレナム温度
$N$	:	燃料棒内ガスのモル数
$R$	:	気体定数

## (2) 燃料被覆管の周方向応力

燃料被覆管の周方向応力は、燃料棒内外圧差より次式で計算する。ここで、冷却材圧力は S A F E R コードの解析結果から時間の関数として引き継いで用いる。

$$\sigma = \frac{D_i}{2t} (P_g - P) \quad (3.3.1.8-2)$$

ここで、

$\sigma$	:	周方向応力
$D_i$	:	燃料被覆管内径
$t$	:	燃料被覆管肉厚
$P_g$	:	燃料棒内圧
$P$	:	冷却材圧力

## (3) 燃料被覆管の歪

燃料被覆管の歪は、弾性領域では燃料被覆管の周方向応力から次式により計算する。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left( 1 - \frac{\nu}{2} \right) \quad (3.3.1.8-3)$$

ここで、

- $\varepsilon$  : 燃料被覆管の歪
- $\sigma$  : 燃料被覆管の周方向応力
- $E$  : ヤング率
- $\nu$  : ポアソン比

また、塑性変形は、Hardy 等の実験データに基づき燃料被覆管破裂を起こす温度より 200° F 低い温度に達した時点から始まるとする。図 3-4 に破裂前の燃料被覆管の歪を温度（破裂温度－燃料被覆管温度）の関数として示す。図中の実線より、燃料被覆管温度での歪量が求まる。

#### (4) 燃料被覆管の破裂

燃料被覆管の破裂は、燃料被覆管の温度が上昇して燃料被覆管の内圧による周方向応力がその温度における引張り強さを越えた時点で発生する。図 3-5 に燃料被覆管に破裂が発生する時点の燃料被覆管温度と燃料被覆管周方向応力の関係を示す。燃料被覆管の破裂は、実験データのベストフィット曲線に基づいて判定する。

破裂後の最終的な変形量は、破裂以前の燃料棒内外圧差によって異なる。したがって、実験データを燃料被覆管の周方向応力で整理することにより以下の値としている。

低応力領域 ( $\sigma \leq 1500 \text{ psi}$ ) ;	$E_L = 0.23$	(内側燃料棒)
	$E_L = 0.16$	(外側燃料棒)
高応力領域 ( $\sigma > 1500 \text{ psi}$ ) ;	$E_L = 0.15$	(内側燃料棒)
	$E_L = 0.11$	(外側燃料棒)

ここで、 $\sigma$ は燃料被覆管の周方向応力、 $E_L$ は半径方向の歪量を初期の半径で割ったものである。

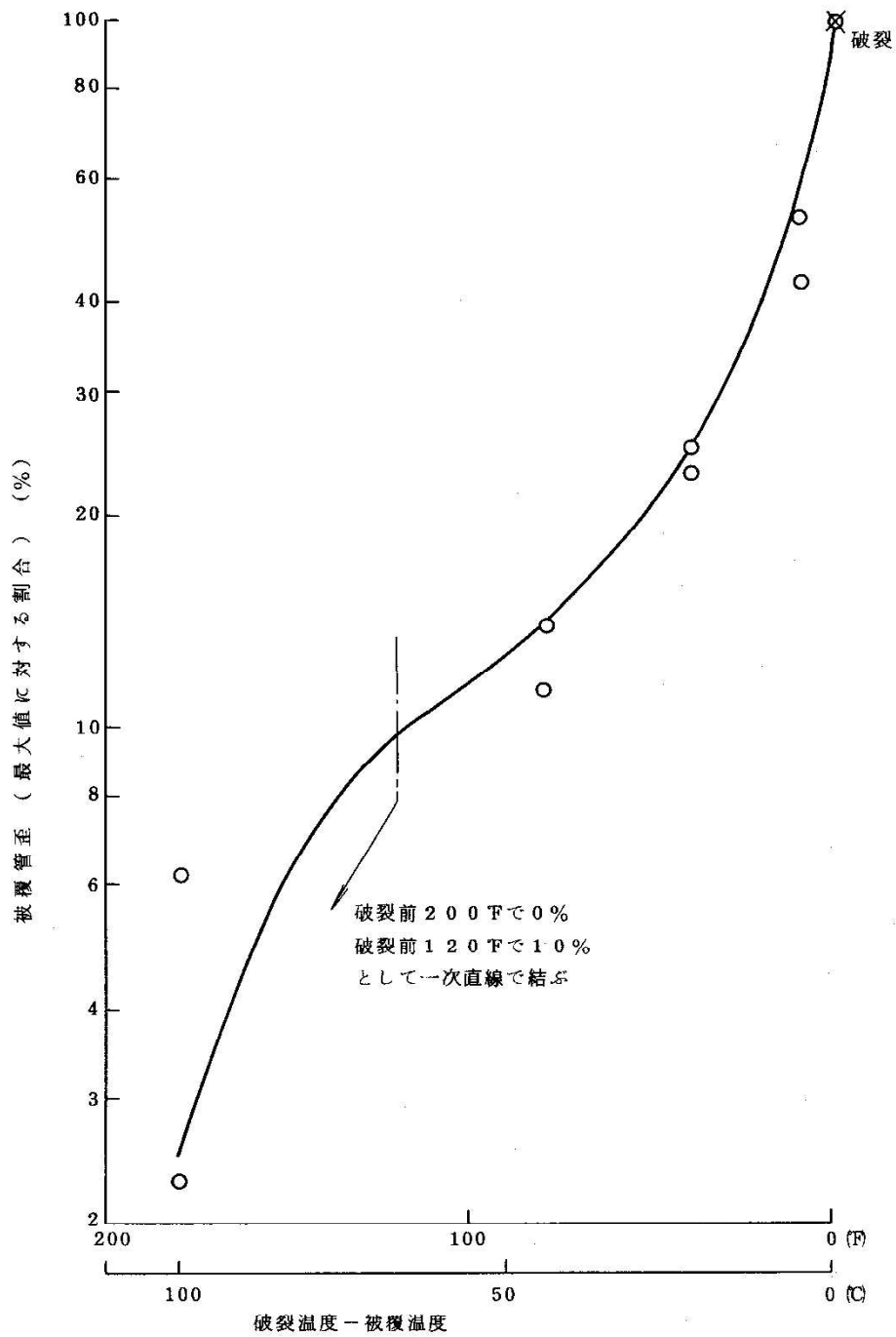


図 3-4 塑性変形量と破裂前の燃料被覆管温度の関係

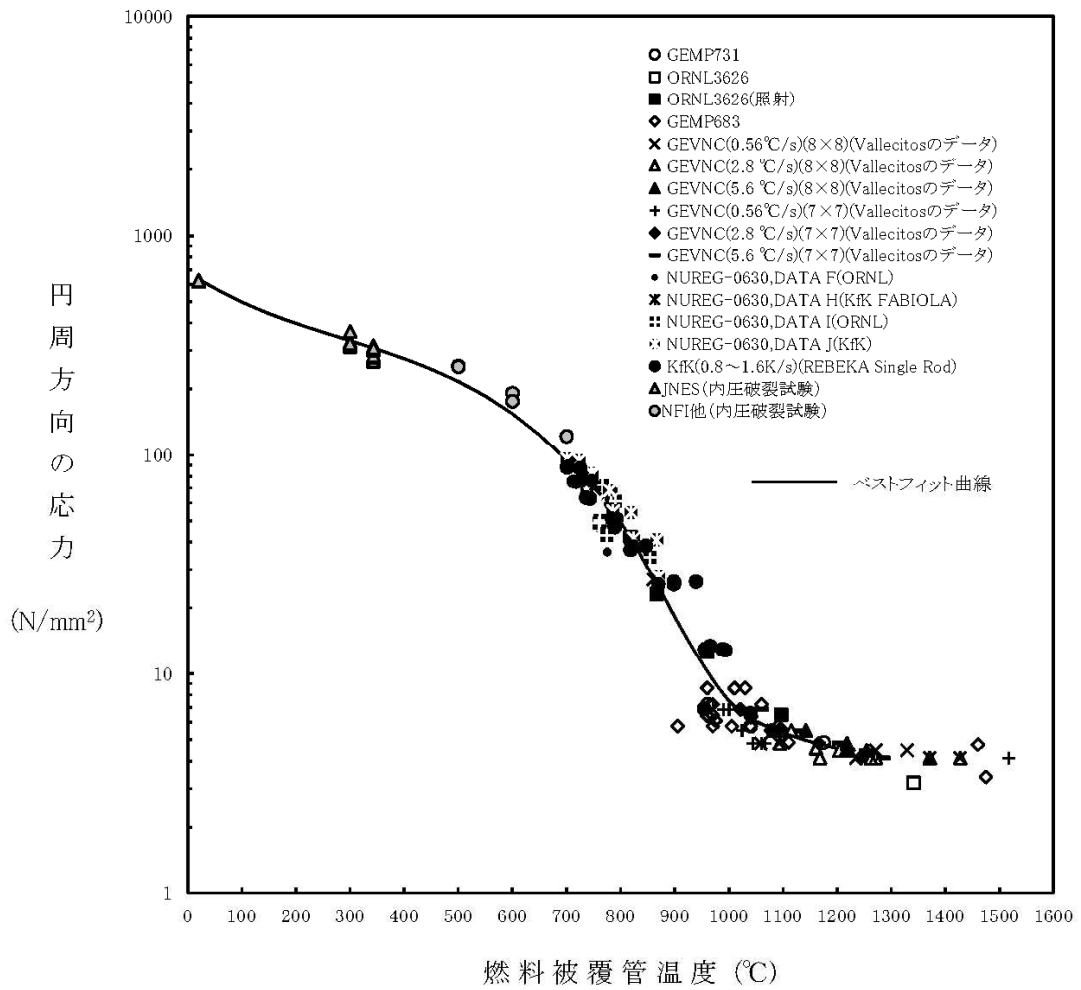


図 3-5 燃料棒に破裂が発生する時点の燃料被覆管温度と燃料被覆管応力の関係

表 3-2 CHASTEコードの計算モデル一覧

項 目		計算モデル
ノード 分割	燃料集合体	軸方向の任意の一断面の燃料棒，ウォータロッド及びチャンネルボックスを模擬し，燃料棒を全て1本ごとに取り扱う（図 3-1）
	燃料棒	燃料ペレットを半径方向に最大9ノードに分割（図 3-2） 燃料ペレット及び燃料被覆管の径方向に対し，円筒一次元熱伝導方程式を用いる
熱伝達 モデル	ギャップ熱伝達	過渡変化は Ross and Stoute に基づくモデルを用いる なお，ギャップ熱伝達係数の初期値及び過渡計算に用いるギャップ内のガス組成等は燃料棒熱機械設計コードPRIMEから引き継ぐ
	対流熱伝達	SAFERコードの解析結果から時間の関数として引き継ぐ
	輻射熱伝達	解析対象の評価位置断面が露出した以降は，燃料棒間及び燃料棒-チャンネルボックス壁間の輻射熱伝達を考慮
その他	熱源	核分裂による発生熱，崩壊熱及びジルコニウム-水反応による発熱を考慮 燃料棒出力は核分裂による発生熱と核分裂生成物及びアクチニドの崩壊熱を考慮した燃料棒出力時間変化データを入力
	ジルコニウム-水反応	Baker-Just の式
	膨れ・破裂	膨れは燃料被覆管周方向応力に基づき計算し，破裂は燃料被覆管周方向応力のベストフィット曲線により判定する（図 3-5）



### 3.4 入出力

CHASTEコードの主要な入出力を図3-6に示す。CHASTEコードのインプットデータは以下のとおり構成される。CHASTEコードのインプットデータ元となる燃料データ、過渡特性を整理した解析条件を添付1に示す。

- ① 燃料データ（幾何形状，燃料棒出力，初期状態，局所出力及び燃焼度分布，断面平均燃焼度，物性）
- ② 過渡特性（原子炉出力，原子炉圧力及び燃料被覆管表面对流熱伝達係数の時間変化，炉心露出及び再冠水時間）

上記をインプットデータとして，炉心ヒートアップ解析を実施し，以下のアウトプットデータを得る。

- ① 燃料被覆管温度
- ② ジルコニウム-水反応量（燃料被覆管酸化割合）

(燃料データ)

- ・ 幾何形状
- ・ 燃料棒出力
- ・ 初期状態
- ・ 局所出力及び燃焼度分布
- ・ 断面平均燃焼度
- ・ 物性

(過渡特性)

- ・ 原子炉出力時間変化
- ・ 原子炉圧力時間変化
- ・ 対流熱伝達係数時間変化
- ・ 炉心露出, 再冠水時間

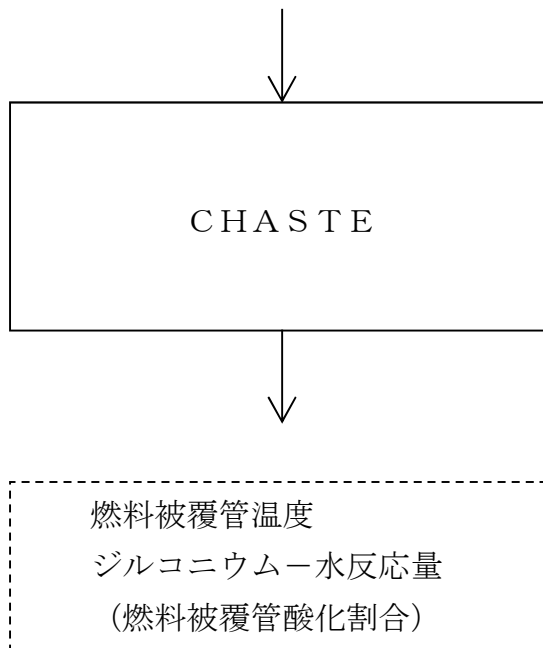


図 3-6 CHASTEコードの入出力

## 4. 妥当性確認

### 4.1 重要現象に対する妥当性確認方法

CHASTEコードの評価マトリックスを表4-1に示す。表4-1は2章で重要現象に分類された物理現象を列挙している。各実験解析の内容について詳細を4.2以降に示すが、それらの要約を4.1.1、4.1.2及び4.1.3に示す。

CHASTEコードは、BWRのLOCAを模擬したECCS冷却実験結果と実験解析結果との比較により解析モデルの妥当性が確認されている。

重要現象に分類された物理現象のうち崩壊熱は、信頼性の高い評価モデルと現実的な評価条件を使用して評価した値を事象発生後の原子炉出力変化として入力している。このため、CHASTEコードにおける崩壊熱の妥当性確認は不要とした。

燃料棒表面熱伝達については、対流熱伝達はSAFERコードの解析結果より引き継いでおり、LOCAを模擬した実験結果における燃料被覆管温度とSAFERコードによる実験解析結果を比較することにより、SAFERコードの熱伝達モデルの妥当性を確認していることから、CHASTEコードにおける燃料棒表面熱伝達のうち対流熱伝達の妥当性確認は不要とした。

燃料被覆管酸化については、3.3.1.7に記載したとおり、蒸気供給制限がなく、反応温度まで上げるためのエネルギーはないものと仮定し、反応量及び反応熱を過大に評価するように選定した酸化反応速度式を採用している。そのため、CHASTEコードにおける燃料被覆管酸化の妥当性確認は不要とした。

燃料被覆管変形については、3.3.1.8に記載したとおり、燃料被覆管の歪量を計算し、燃料被覆管の破裂を判定する破裂限界曲線には実験値とよく一致するベストフィット曲線に基づき現実的な条件を適用していることから、CHASTEコードにおける燃料被覆管変形の妥当性確認は不要とした。

以上から、重要現象に対する妥当性確認については、BWRのLOCAを模擬したECCS冷却実験結果と実験解析結果との比較において、燃料被覆管温度に着目してCHASTEコードの妥当性を確認する。

#### 4.1.1 BWR-FLECHT実験解析

米国AEC（現NRC）の出資のもとに行われたBWR-FLECHT実験により、BWRのLOCA時のECCSによる炉心冷却メカニズムの解明と燃料被覆管温度を予測する炉心ヒートアップモデルの妥当性確認が行われた。その結果、スプレイ冷却及び輻射の組み合わせによる熱伝達モデルにより、実験解析の結果は実験結果を上回ることを確認している。

#### 4.1.2 炉心冷却実験解析

GE社による炉心スプレイ冷却と炉心再冠水冷却実験に基づき、炉心ヒートアップ計算モデルの妥当性確認を行い、実験解析の大部分の結果が実験結果を上回ることが確認された。また、実験と解析結果の主要な差は、実験のスプレイ冷却が解析のスプレイ冷却に対して上回っていることによる。

#### 4.1.3 スプレイ冷却特性実験解析

実機9×9燃料を模擬した実寸大の模擬燃料集合体実験装置を用いたスプレイ冷却特性実験に基づき、炉心ヒートアップ計算モデルの妥当性確認

が行われた。その結果、スプレー冷却及び輻射の組み合わせによる熱伝達モデルにより、実験解析の結果は実験結果を上回ることを確認している。

表 4-1 重要現象に対する妥当性確認方法

分類	重要現象	解析モデル		BWR   FLECHT 実験解析	炉心冷却実験解析	スプレイ冷却特性 実験解析	BWRのLOCA 模擬試験
炉心 (核)	崩壊熱 <sup>※1</sup>	崩壊熱モデル		—	—	—	—
炉心 (燃料)	燃料棒表面熱 伝達	対流熱 伝達モデル <sup>※1</sup>	SAFERコード の解析結果を引き 継ぐ	—	—	—	— <sup>※2</sup>
		輻射熱 伝達モデル	燃料棒間、燃料棒 —チャンネルボッ クス間の輻射熱伝 達評価モデル（燃 料被覆管の変形も 考慮）	表 4-2 図 4-4 図 4-5 図 4-6	表 4-3 表 4-4 図 4-9	図 4-14 図 4-15	—
	燃料被覆管酸化 <sup>※1</sup>	ジルコニウム—水反応モデル		—	—	—	—
	燃料被覆管変 形 <sup>※1</sup>	膨れ・破裂評価モデル		—	—	—	—
炉心 (熱流動)	沸騰・ボイド 率変化 気液分離（水 位変化）・対 向流	二相流体の流動モデル		—	—	—	— <sup>※2</sup>
	気液熱非平衡	対流熱 伝達モデル <sup>※1</sup>	SAFERコード の解析結果を引き 継ぐ	—	—	—	— <sup>※2</sup>
原子炉 圧力 容器	冷却材放出 （臨界流・差 圧流）	臨界流モデル		—	—	—	— <sup>※2</sup>
	沸騰・凝縮・ ボイド率変化 気液分離（水 位変化）・対 向流	二相流体の流動モデル		—	—	—	— <sup>※2</sup>
	ECCS注水 （給水系・代 替注水設備含 む）	原子炉注水系モデル		—	—	—	— <sup>※2</sup>

※1 4.1に記載の理由により、妥当性確認が不要である重要現象

※2 SAFERコードの評価範囲による物理現象であり、SAFERコードに記載する。

## 4.2 BWR－FLECHT実験解析<sup>(9)</sup>

### (1) 概要

米国AEC（現在のNRC）の出資のもとにGE社が行った実験であり、BWR実機の7×7燃料集合体1体を実寸大で模擬し、ジルカロイ被覆管を用いた5種類の集合体とステンレス製被覆管を用いた5種類の集合体を電気加熱して、BWRのLOCA時の条件を模擬した実験及び定常実験を約150ケース行った。実験は、集合体上部からのスプレイ冷却実験、集合体下部からの冷却材流入による再冠水冷却実験及び両者を模擬した実験の3種類が行われた。図4-1に実験装置を示す。

本実験から、BWRのLOCA時のECCS作動期間中の熱伝達メカニズムの解明と被覆管温度を適切に予測可能な炉心ヒートアップ計算モデルを開発した。また、モデルの妥当性確認も行われ、スプレイ冷却及び輻射の組み合わせによる熱伝達モデルにより、実験解析の結果は実験結果を上回ることを確認している。

(BWR-FLECHT : The Boiling Water Reactor Full Length Emergency Cooling Heat Transfer test program)

### (2) 実験条件

BWR－FLECHT実験の主要な条件を以下に示す。

- |             |  |
|-------------|--|
| ① 冷却モード     | 上部スプレイ，再冠水，スプレイと再冠水  |
| ② 模擬燃料集合体形状 | 実機BWRの実寸大7×7型  |
| ③ 模擬燃料被覆管材質 | ステンレス鋼，ジルカロイ-2   |
| ④ 冷却材流量     | 集合体当たりスプレイ流量：2.45～5.0 gpm<br>冠水速度：1～6 inch/s<br>スプレイと冠水：3.25 gpm, 6.0 inch/s |

- ⑤ 冷却開始時の被覆管温度 875～2250° F (約 468～1232°C)
- ⑥ 集合体出力 100～325 kW
- ⑦ 被覆管最高温度 1300～2700° F (約 704～1482°C)
- ⑧ 模擬燃料棒内ガス圧力 加圧なし
- ⑨ 系統圧力 15～300 psia

なお、ジルカロイ被覆管の集合体は、4種類の集合体がスプレイ冷却の条件下で実験され、ステンレス鋼被覆管の集合体はスプレイ及び再冠水冷却の条件下で実験された。

### (3) 妥当性確認結果

炉心ヒートアップ計算モデルによる解析は、ジルカロイ被覆管を用いたスプレイ冷却実験3ケースについて実施している。実験解析の例として、表4-2に集合体(Zr2K)を使用した実験結果(最高温度及び発生時間)と解析結果の比較を示す。炉心ヒートアップ計算モデルは、ジルコニウム-水反応量(被覆管の酸化量)計算として Baker-Just の式が組み込まれているが、FLECHT実験から、Baker-Just の式で計算される酸化量は、実験値の約2倍大きい値となることが分かった。したがって、実験解析では許可解析用の計算条件(100%MWR)の他に、ジルコニウム-水反応量を1/2としたケース(50%MWR)についても解析している。

なお、集合体の模擬燃料棒配置は図4-2に示すとおりであり、グループ5の20本及びグループ18の9本は温度計測のない模擬燃料棒である。また、グループ19は熱電対の故障がある。また、図4-3に局所出力分布を示す。

図4-2に示した集合体の燃料棒配置における代表的な燃料棒グループについて、スプレイ冷却開始後の被覆管温度変化を図4-4、図4-5及び図4-6に



示す。図中の○印が実験結果，破線が炉心ヒートアップ計算モデルによる予測値である。

- ・ 図 4-4 に集合体内の最外周（チャンネルボックスに接する，ロッド 2）に位置する模擬燃料棒の温度変化を示す。炉心ヒートアップ計算モデルによる予測値は，実験結果に比べて 100%MWR 時で約 90° F（約 50°C），50%MWR 時で約 60° F（約 33°C）高くなる。本燃料棒は，局所出力分布では，以下のロッド 30 及び 31 よりも大きな出力ピーキングを有しているが最高温度は低くなっている。これは，本燃料棒が最外周でチャンネルボックスに隣接し，内側の燃料棒よりも冷却が促進されていることによると考えられる。（なお，時刻 5 分以降の実験結果については，ヒーター又は熱電対の不良によるものとして記載されていない）
- ・ 図 4-5 に集合体内の最外周から 2 列目（ロッド 30）に位置する模擬燃料棒の温度変化を示す。炉心ヒートアップ計算モデルによる予測値は，実験結果に比べて 100%MWR 時は約 90° F（約 50°C），50%MWR 時は 50° F（約 28°C）高くなる。
- ・ 図 4-6 に集合体内の最外周から 3 列目（ロッド 31）に位置する模擬燃料棒の温度変化を示す。炉心ヒートアップ計算モデルによる予測値は，実験結果に比べて 100%MWR 時は約 200° F（約 111°C），50%MWR 時は 150° F（約 83°C）高くなる。本燃料棒はロッド 30 と同様に内側の燃料棒である。実験結果で最高温度がロッド 30 より低くなっているのは，局所出力分布の違いによるものと考えられる。（なお，時刻 7 分以降の実験データの変動は，模擬燃料棒のヒーターの故障に起因するものである。しかし，すでに温度が低下した後であり最高温度の妥当性確認結果には影響ないものである）

表 4-2 BWR-FLECHT 実験結果 (Zr2K バンドル, スプレー冷却実験)

Rod	Maximum Temperature (°F)					Time of Maximum Temperature (min)				
	Observed	Predicted		Error <sup>1</sup>		Observed	Predicted		Error <sup>2</sup>	
		MWR		MWR			MWR		MWR	
		50%	100%	50%	100%		50%	100%	50%	100%
1	1780	1810	1830	+30	+50	3.5	2.8	3.0	-0.7	-0.5
2	1830	1890	1920	+60	+90	4.2	3.0	3.0	-1.2	-1.2
3	1700	1890	1930	+190	+230	0.3	3.0	3.0	+2.7	+2.7
4	1740 <sup>3</sup>	1910	1940	+170	+200	1.2 <sup>3</sup>	3.5	3.8	+2.3	+2.6
9	1990	2030	2060	+40	+70	3.8	3.0	3.0	-0.8	-0.8
10 (4.5) <sup>4</sup>	1940	2040	2070	+100	+130	4.0	3.0	3.5	-1.0	-0.5
23	2180 <sup>3</sup>	2070	2120	-110	-60	3.4	3.5	4.0	+0.1	+0.6
30	2010	2060	2100	+50	+90	3.4	4.0	4.0	+0.6	+0.6
17	2180 <sup>3</sup>	2120	2180	-60	~0	7.0	4.0	4.0	-3.0	-3.0
24	2240 <sup>3</sup>	2130 <sup>5</sup>	2170 <sup>5</sup>	-110	-70	5.1	4.0	4.0	-1.1	-1.1
31	1930	2080	2130	+150	+200	3.7	4.0	4.0	+0.3	+0.3
18(4.5) <sup>4</sup>	2060	2120	2160	+60	+100	7.2	3.8	4.0	-3.4	-3.2
26(5.5) <sup>4</sup>	1920	2060	2110	+140	+190	8.1	3.8	4.0	-4.3	-4.1
32(5.5) <sup>4</sup>	1970	1950	2010	-20	+40	8.3	3.8	4.0	-4.5	-4.3

NOTES

- 1 Maximum temperature error = predicted minus observed.  
Thus, + indicates overprediction of maximum temperature.
- 2 Time of maximum temperature error = predicted minus observed.  
Thus, + indicates maximum predicted temperature occurred later than the data indicated.
- 3 Erratic thermocouple.
- 4 Observed temperatures are from thermocouples at elevations noted.
- 5 A current increase may have increased the local power at the midplane of rod 24.  
Calculations which include such a local power increase result in maximum temperature predicting approximately 100°F higher than those shown here.

注記

1. 最高温度偏差：予測値－実験値  
ここで+は最高温度の過大評価を示す。
2. 最高温度発生時間：予測値－実験値  
ここで+は最高温度の発生時間予測値が実験値より遅いことを示す。
3. 熱電対異常
4. ( )内は6 ft 以外の熱電対の位置を示す。
5. 電流増加によりロッド No. 24 の中間面での局所出力が増加していたと考えられる。局所的出力増加を含む計算では、最高温度でここで示す値よりも約 100° F 高く予測する。

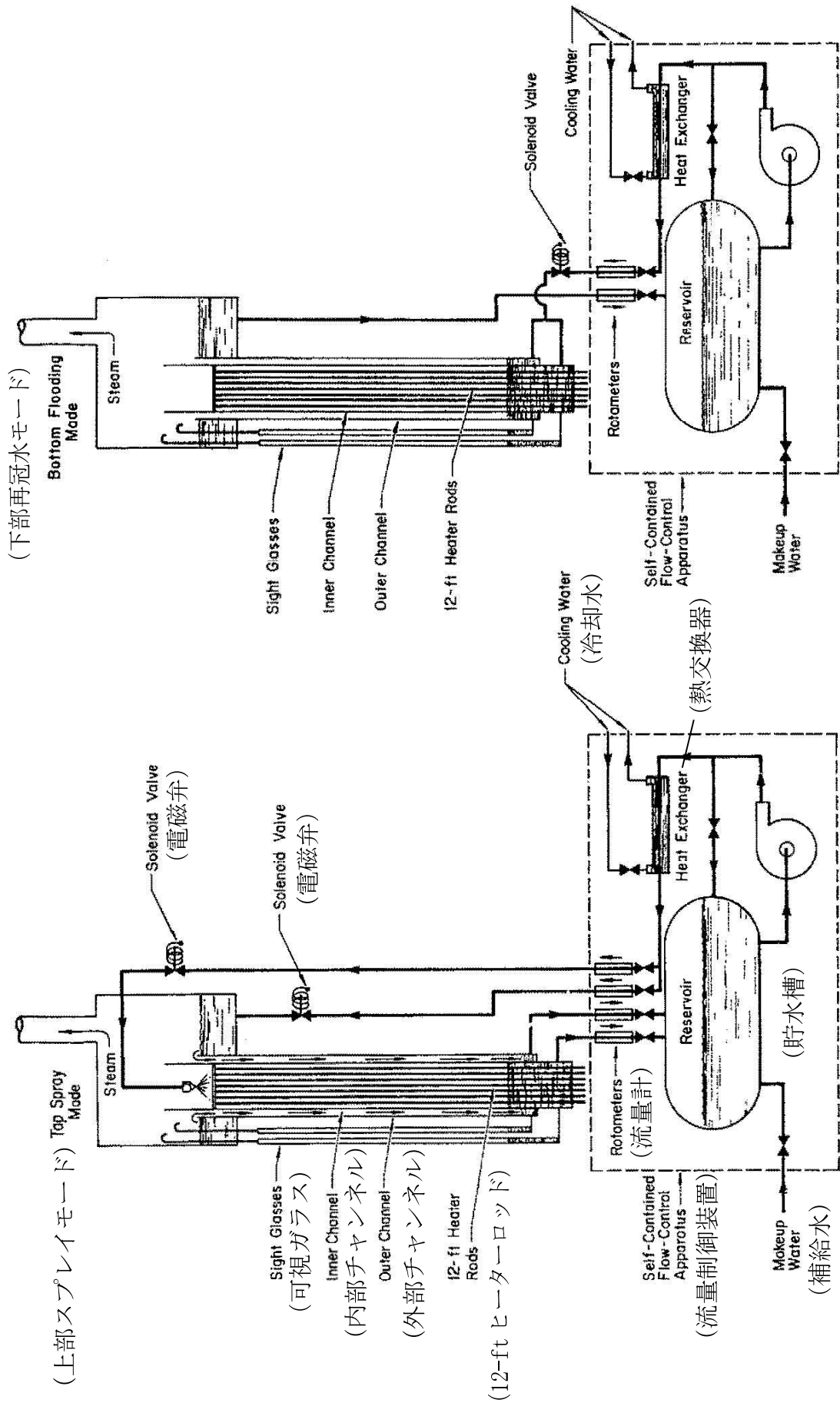


図 4-1 BWR-1 FLECHT 実験装置

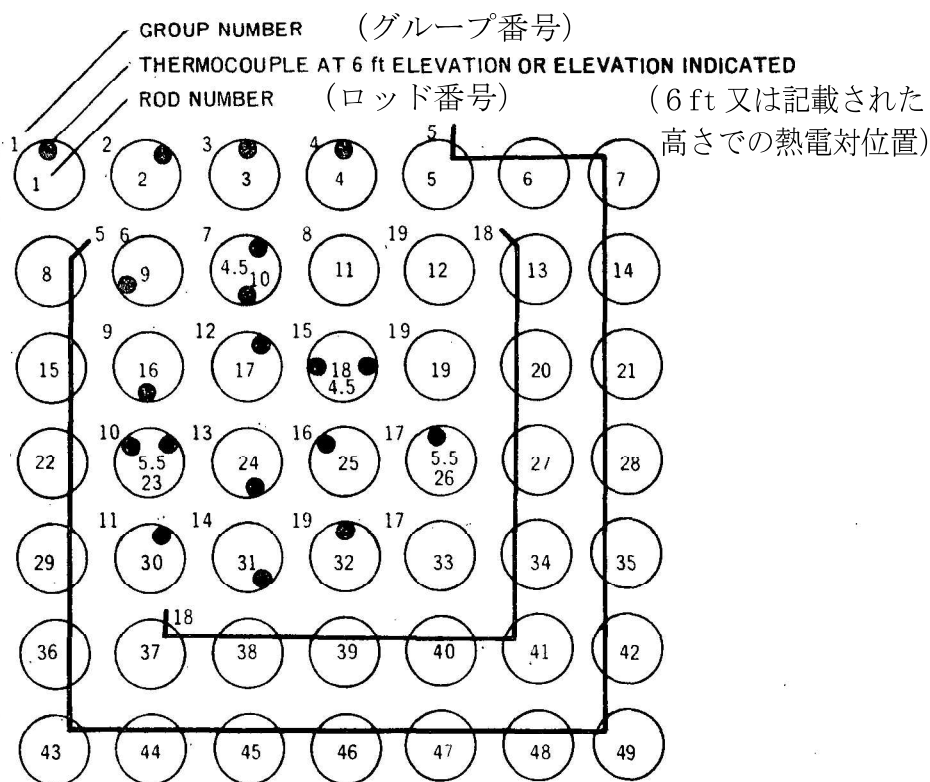


図 4-2 BWR-FLECHT 実験, Zr2K バンドル配置



図 4-3 局所出力分布

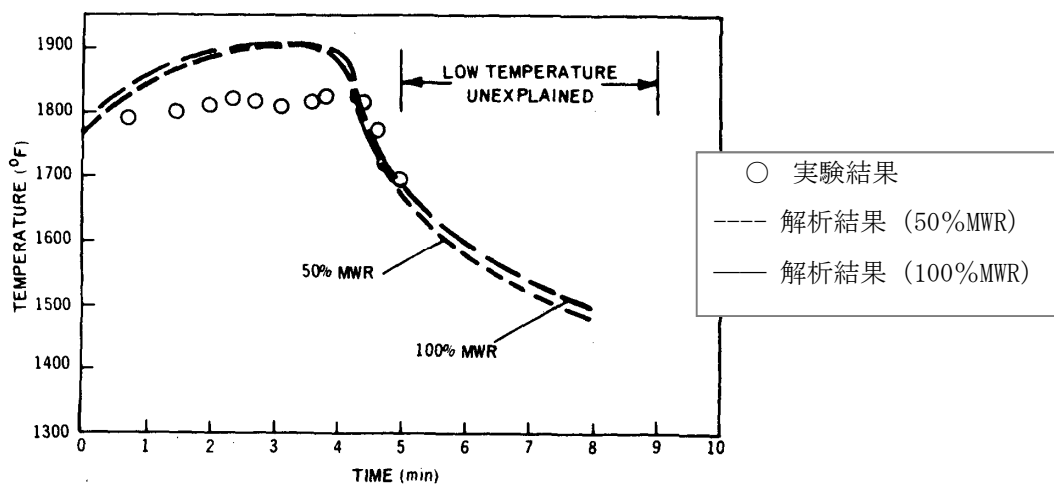


図 4-4 BWR-FLECHT 実験解析結果 (Zr2K バンドル, ロッド 2)

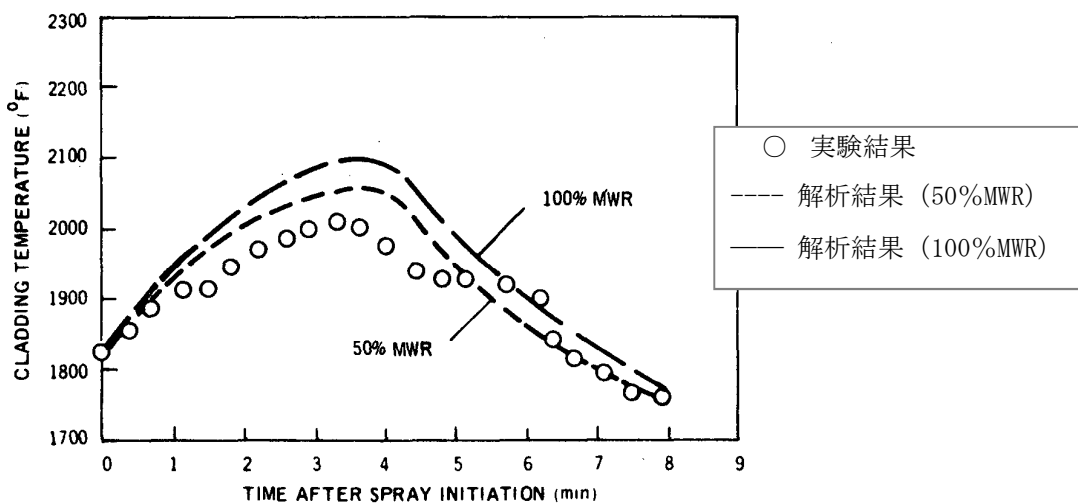


図 4-5 BWR-FLECHT 実験解析結果 (Zr2K バンドル, ロッド 30)

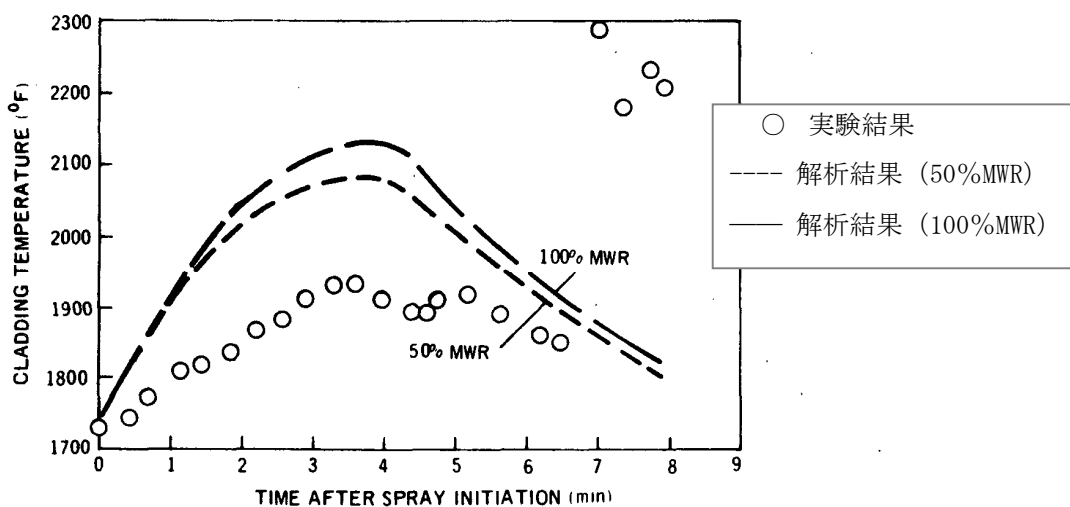


図 4-6 BWR-FLECHT 実験解析結果 (Zr2K バンドル, ロッド 31)

### 4.3 炉心冷却実験解析

#### 4.3.1 8×8燃料集合体の炉心スプレイと冠水の冷却効果確認実験<sup>(10)</sup>

##### (1) 概要

8×8燃料集合体のLOCA時炉心ヒートアップ計算モデルの妥当性を確認するため、BWR実機の8×8燃料集合体1体を実寸大で模擬した電気加熱、ステンレス鋼被覆管による実験装置を用いたECCSによる炉心冷却実験である。図4-7に実験装置を示す。

本実験では、炉心スプレイによる冷却効果及び炉心スプレイの集合体下部からの冷却材流入（再冠水）効果を確認し、スプレイ流量、冠水速度及び再冠水開始時間をパラメータとした実験を行い、炉心ヒートアップ計算モデルの妥当性確認を行っている。計算モデルによる実験解析の結果は、実験の被覆管最高温度と比較して、 $-30^{\circ}\text{F}$  から $+100^{\circ}\text{F}$  ( $-17^{\circ}\text{C}$  から $+56^{\circ}\text{C}$ ) の範囲に入っていることを確認した。

##### (2) 実験条件

実機BWRの燃料集合体出力及びスプレイ流量等を仮定し、炉心スプレイ作動開始から再冠水までの期間の被覆管温度を計測した。主な実験条件は下記である。

- |             |  |
|-------------|--|
| ① 冷却モード     | 上部スプレイ，スプレイと再冠水                                |
| ② 模擬燃料集合体形状 | 実機BWRの実寸大8×8型                                  |
| ③ 模擬燃料被覆管材質 | ステンレス鋼   |
| ④ 冷却材流量     | 集合体当たりスプレイ流量：0.5～11.8 gpm<br>冠水速度：0.5～6 inch/s |
| ⑤ スプレイ開始時間  | 事故後30秒を模擬                                      |

- ⑥ 再冠水開始時間 45～515 秒  
(スプレー開始後)
- ⑦ 冷却開始時の被覆管温度 1040～1825° F (約 560～996°C)
- ⑧ 集合体出力 200～300 kW
- ⑨ 軸方向ピーキング係数 1.4
- ⑩ 局所出力分布 BWR 6 プラントの代表例 (図 4-8)
- ⑪ 模擬燃料棒内ガス圧力 加圧なし
- ⑫ 系統圧力 大気圧

### (3) 妥当性確認結果

炉心ヒートアップ計算モデルの妥当性確認は、スプレー冷却と再冠水冷却を組み合わせた実験、及びスプレー冷却のみの実験について行われた。スプレー冷却と再冠水冷却を組み合わせた実験の結果と解析結果の比較を図 4-9 に示す。

図 4-9 は、集合体内で最高温度を示す燃料棒について、スプレー及び再冠水による冷却を模擬した実験結果と炉心ヒートアップ計算モデルによる実験解析結果を比較したものである。図中の水平線は集合体内最高温度の予測値を示している。

この結果から、実験解析の結果は実験の最高温度 (1327° F (約 720°C) ～2084° F (約 1140°C) ) と比較して -30° F (約 17°C) から +100° F (約 56°C) の範囲に入っており、大部分の実験結果の最高温度を上回っていることが分かる。

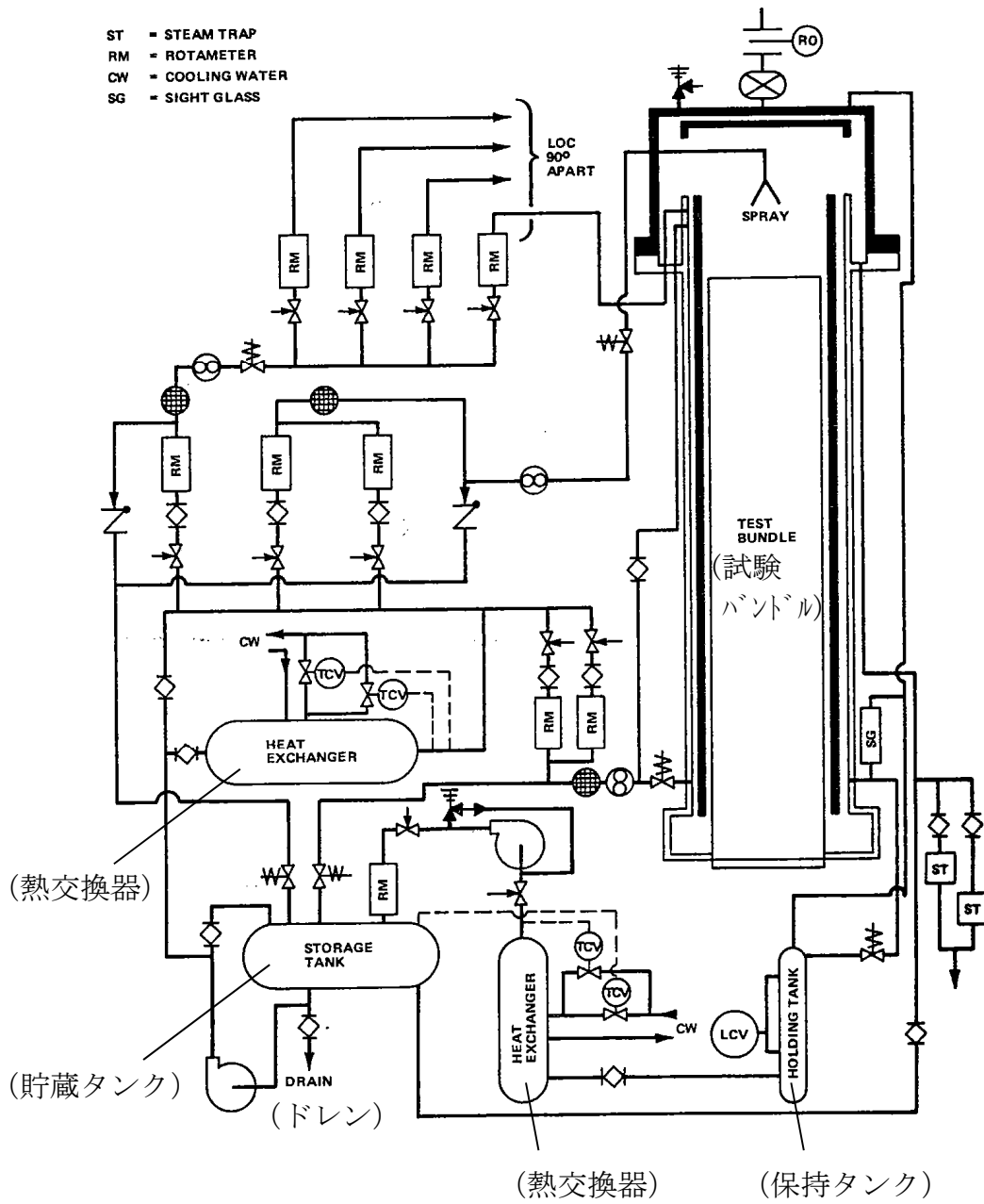


図 4-7 8 × 8 燃料集合体冷却効果確認実験装置



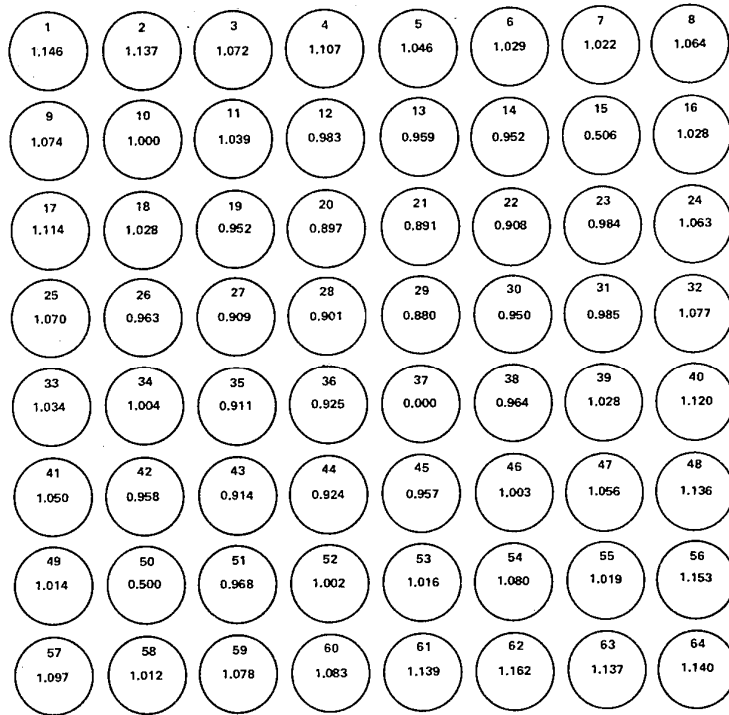


図 4-8 局所出力分布

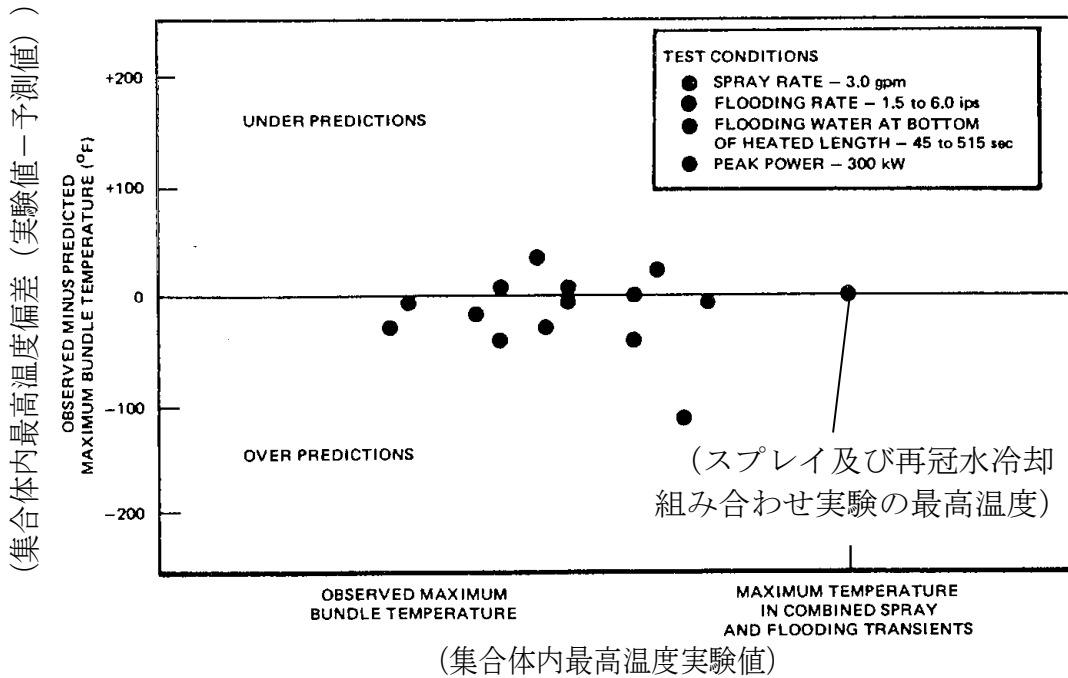


図 4-9 8 × 8 燃料集合体冷却効果確認実験

実験条件	
・ スプレー流量	: 3.0gpm
・ 冠水速度	: 1.5 - 6.0ips
・ 加熱部下端の冠水時間	: 45 - 515sec
・ ピーク出力	: 300kW

#### 4.3.2 8×8燃料集合体の内圧下ECCS冷却実験<sup>(11)</sup>

##### (1) 概要

本実験は、8×8燃料集合体、内圧加圧燃料棒、ジルカロイ被覆管のLOCA時冷却特性の妥当性を確認するため、BWR実機の8×8燃料集合体1体を実寸大で模擬した実験装置を用いたECCSによる炉心冷却実験である。4.3.1節に述べた実験と異なる点としては、燃料棒内のFPガスインベントリを模擬するためアルゴンガスで初期に加圧した点とジルカロイ被覆管を用いた点である。図4-10に実験装置を示す。

本実験では、BWR6プラント用8×8燃料集合体と取替用8×8燃料集合体の2種類の燃料集合体について実験が行われ、炉心ヒートアップ計算モデルによる実験解析と実験結果の比較から、モデルの妥当性を確認している。炉心ヒートアップ計算モデルによる実験解析結果は、BWR6用燃料集合体では350°F(約194°C)、取替用燃料集合体では600°F(約333°C)高く、過小評価はわずかであるとの結果を得た。これより、炉心ヒートアップ計算モデルの妥当性を確認した。

##### (2) 実験条件

本実験では、炉心スプレイ流量、集合体初期出力等プラントの違いを考慮した実験を行うため、BWR6用燃料集合体及び取替用燃料集合体の2種類について実験を行い、集合体内全燃料棒の被覆管温度を計測した。主な実験条件は以下である。

	<u>BWR 6用燃料集合体</u>	<u>取替用燃料集合体</u>
① 冷却モード	炉心スプレイと再冠水	同左
② 模擬燃料集合体形状	BWR 6用8×8型	取替用8×8型
③ 模擬燃料被覆管材質	ジルカロイ	同左
④ 集合体当たりスプレイ流量	3.25 gpm	2.45 gpm
⑤ 再冠水速度	3.5 inch/s	2.0 inch/s
⑥ スプレイ開始時間	事故後 45 秒	事故後 30 秒
⑦ 再冠水開始時間	スプレイ開始後 50 秒	同 174 秒
⑧ 冷却開始時の被覆管温度	1183° F (約 639°C)	1490° F (約 810°C)
⑨ 集合体出力	367 kW	355 kW
⑩ 軸方向ピーキング係数	1.4	同左
⑪ 局所出力分布	図 4-11	図 4-12
⑫ 模擬燃料棒内ガス圧力	95~113 psig	90~117 psig
⑬ 系統圧力	大気圧	同左

### (3) 妥当性確認結果

実験結果における被覆管最高温度に対する炉心ヒートアップ計算モデルによる実験解析の被覆管最高温度の差を、集合体内の代表的な燃料棒について表 4-3 及び表 4-4 に示す。なお、ロッド番号 37 はウォータロッドであるため温度評価の対象外とする。

- ・表 4-3 に示す BWR 6 用燃料集合体の実験解析では、集合体内被覆管最高温度（以下「PCT」という。）は実験値に対して 6° F（約 3°C）\*高くなり、良い一致を示した。また、集合体内の 3 本の燃料棒のみ実験結果より低い温度（15~20° F（約 8~11°C））を示しているがその差は小さく、その他大部分が実験結果を上回っておりその最大値は約 390° F（約 199°C）である。
- ・表 4-4 に示す取替用燃料集合体の実験解析では、PCTは実験値より 103° F（約 57°C）\*高い値を示した。また、集合体内の 3 本の燃料棒のみ

実験結果より低い温度（4～50° F（約2～28°C））を示しているがその差は小さく，その他大部分が実験結果を上回っておりその最大値は約600° F（約333°C）である。

- ・実験と解析結果の主要な差は，実験のスプレイ冷却が解析のスプレイ冷却に対して上回っていることによる。

※6° F（約3°C）及び103° F（約57°C）は表に示されていない燃料棒で生じている。

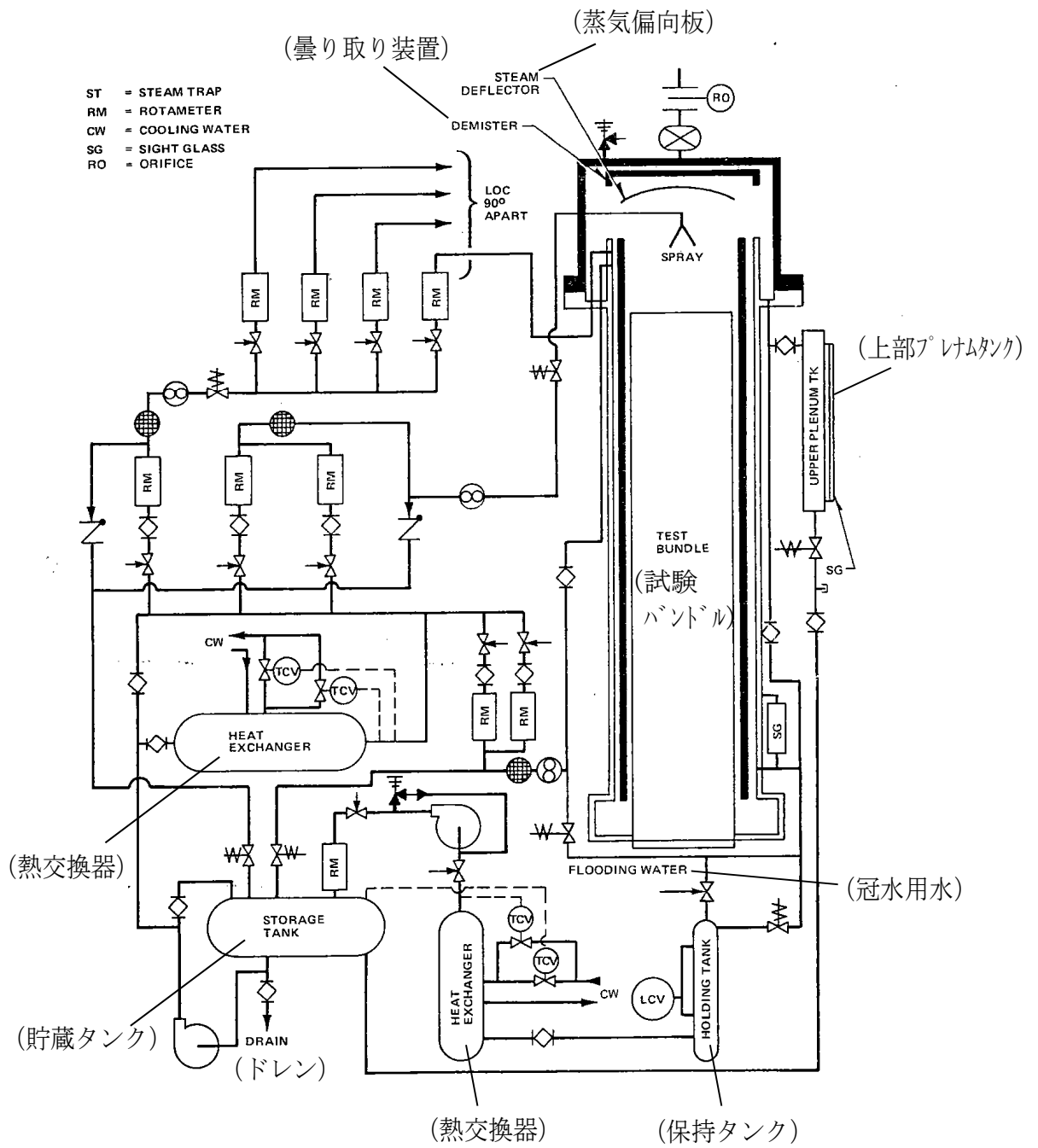


図 4-10 8 × 8 燃料集合体の内圧下 ECCS 冷却実験装置

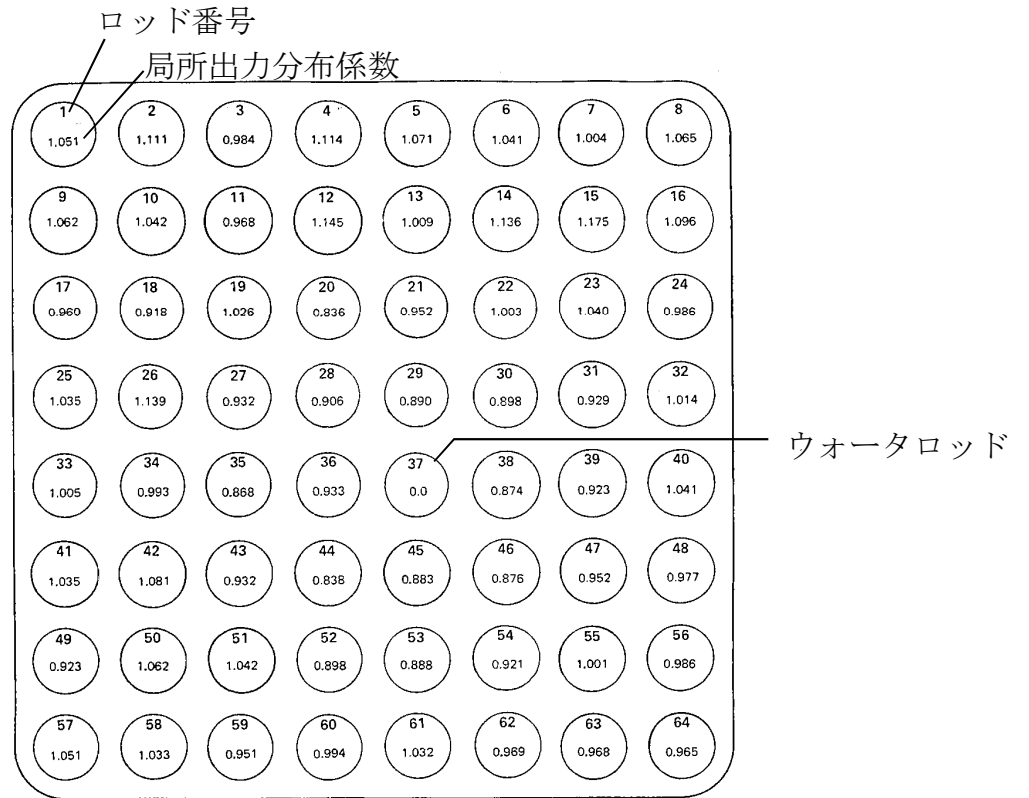


図 4-11 局所出力分布 (BWR 6 用)

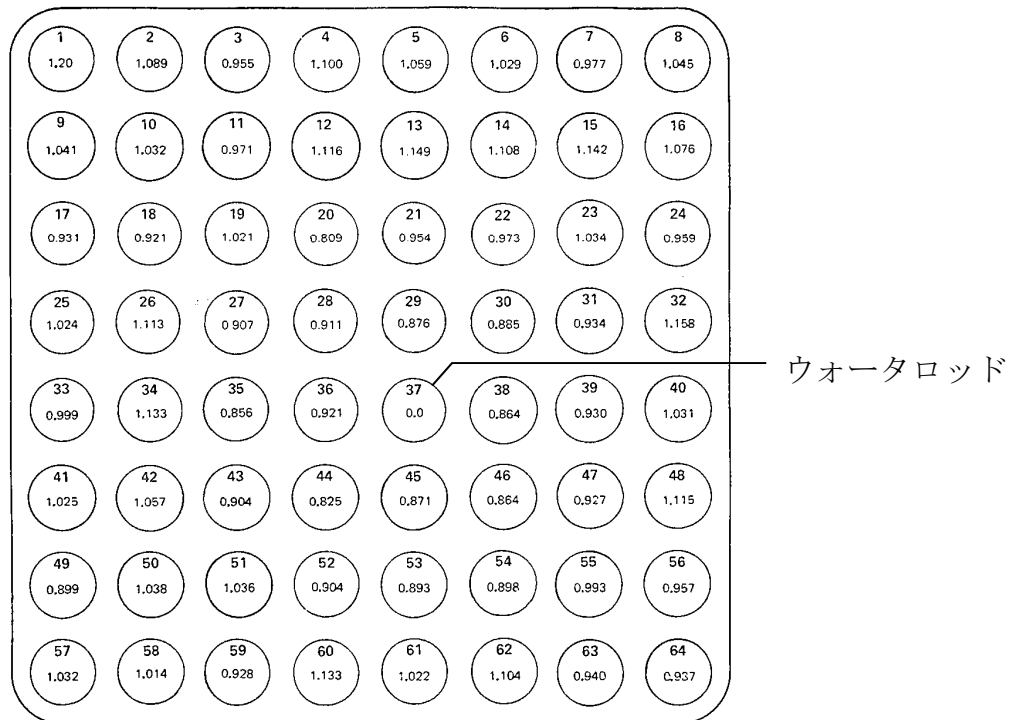


図 4-12 局所出力分布 (取替用)

表 4-3 実験結果と解析結果の比較 (BWR 6 用燃料集合体)

Rod	スプレイ 開始時温度 Temperature at Spray Initiation (°F)	最高温度偏差 (予測値-実験値) Overprediction of Peak Temperature — Predicted Minus Observed (°F)
1.....	920	181
3.....	975	81
5.....	1050	6
8.....	1022	287
10.....	1025	98
11.....	995	114
12.....	1120	-19
14.....	1140	370
15.....	1183	40
17.....	930	18
18.....	875	353
19.....	1022	52
20.....	1004	-15
21.....	985	21
22.....	965	82
26.....	1045	26
27.....	975	69
28.....	943	29
29.....	1004	354
30.....	950	375
31.....	985	246
32.....	935	297
33.....	905	116
34.....	960	307
35.....	900	138
36.....	880	193
37.....	440	635 (ウォータロッド)
38.....	865	118
39.....	920	383
42.....	1010	289
44.....	830	386
45.....	880	297
46.....	820	8
47.....	940	124
48.....	955	134
50.....	1095	-20
51.....	1060	271
52.....	920	54
53.....	970	79
54.....	1030	236
55.....	960	216
57.....	912	113
59.....	910	137
61.....	970	105
64.....	890	305
Channel.....	300	-58

表 4-4 実験結果と解析結果の比較 (取替用燃料集合体)

Rod	スプレイ 開始時温度 Temperature at Spray Initiation (°F)	最高温度偏差 (予測値－実験値) Overprediction of Peak Temperature — Predicted Minus Observed (°F)
1.....	1295	272
3.....	1240	480
5.....	1350	405
8.....	1300	261
10.....	1330	444
11.....	1340	464
12.....	1450	320
14.....	1420	564
15.....	1455	325
17.....	1210	321
18.....	1280	488
19.....	1350	268
20.....	1365	217
21.....	1400	164
22.....	1300	447
26.....	1300	101
27.....	1270	180
28.....	1250	52
29.....	1290	226
30.....	1230	443
31.....	1300	506
32.....	1340	424
33.....	1230	218
34.....	1400	151
35.....	1200	44
36.....	1148	170
37.....	815	155 (ウォータロッド)
38.....	1150	332
39.....	1250	603
42.....	1350	126
44.....	1120	89
45.....	1180	125
46.....	1115	133
47.....	1240	403
50.....	1407	-4
51.....	1360	56
52.....	1220	1
53.....	1250	-13
54.....	1330	72
55.....	1270	557
57.....	1218	43
59.....	1280	37
61.....	1310	-50
64.....	1112	354
Channel.....	500	-271

NOTE: The highest cladding temperature at spray initiation was 1490°F at the 80-inch elevation of Rod 22.



#### 4.4 スプレー冷却特性実験解析<sup>(12)</sup>

##### (1) 概要

本実験装置は、実機 9 × 9 燃料を模擬した実寸大の模擬燃料集合体（チャンネルボックス装着）、模擬燃料集合体を格納した圧力容器、圧力容器内へのスプレー水供給系、圧力容器への蒸気供給系及び圧力容器内で発生する蒸気の排出系から構成されている。模擬燃料集合体は電気加熱され、炉心スプレー系を模擬した冷却状態での冷却特性実験を行った。実験は、実機の再循環配管両端破断事故を模擬したシステム実験として、スプレー熱伝達実験及び大破断 L O C A 模擬実験を行った。図 4-13 に実験装置を示す。

大破断 L O C A 模擬実験から、実機の燃料被覆管温度を実験的に確認するとともに非発熱体となるウォータロッドの濡れ特性について評価し、C H A S T E コードの妥当性確認を行い、スプレー冷却及び輻射の組み合わせによる熱伝達モデルにより、実験解析の結果は実験結果を上回ることを確認している。

##### (2) 実験条件

大破断 L O C A 模擬実験では、実機大破断 L O C A において炉圧が大気圧となる事故後 40 秒以降の状態を模擬するために、実験条件を以下のように設定している。また、表 4-5 に実験条件を示す。

###### ①スプレー流量

実機の最低スプレー流量である 3 gpm/バンドルを設定した。

###### ②バンドル出力

初期出力を実機の事故後 40 秒での値とし、その後の崩壊熱の時間変化も GE（平均）+ 3 σにより考慮している。また、実機燃料と模擬燃料の

熱容量の違いを反映するために、出力を更に厳しく 1.2 倍した実験も行っている。

### ③初期燃料棒表面温度

ベースケースではスプレイ熱伝達実験と同様に 500°Cとしたが、出力を 1.2 倍したケースでは実機で想定される 700°Cの条件とした。

## (3) 妥当性確認結果

炉心ヒートアップ解析に用いる CHASTE コードの妥当性及び保守性を確認するため、表 4-5 の実験条件に示した T1, T2 実験の実験解析を実施した。図 4-14, 図 4-15 に最高出力断面の各燃料棒表面温度について実験値と解析結果の比較を示す。

いずれの実験においても、CHASTE コードによる解析は実験結果を良く模擬している。また、解析値は実験値よりも高めとなっており、燃料被覆管温度の最高値の比較ではCHASTEコードが T1 実験で約 34°C, T2 実験で約 93°C高めとなっている。

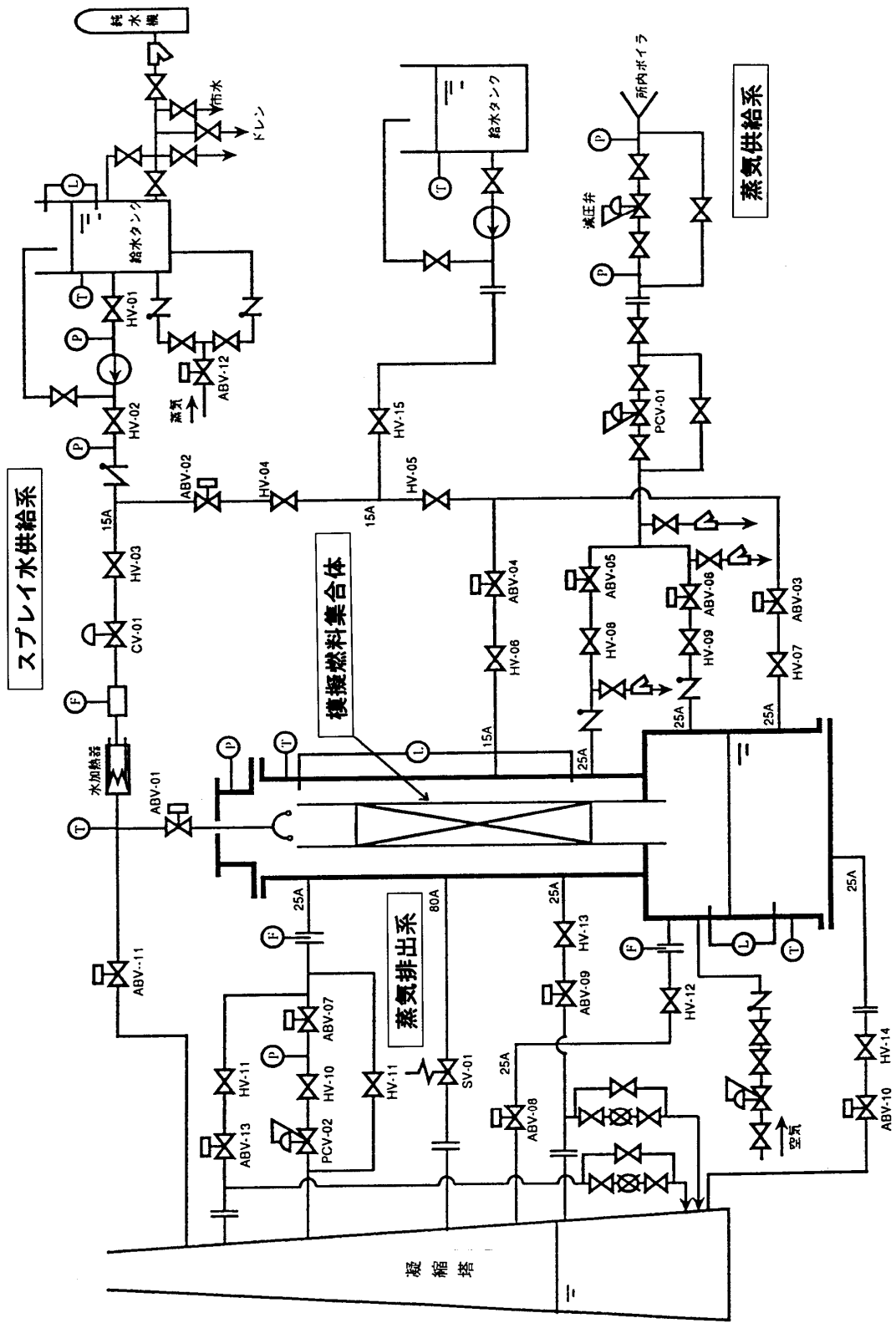


図 4-13 スプレー冷却特性実験装置

表 4-5 実験条件

No.	圧力 (kPa)	スプレイ流量 (gpm)	初期バンドル 出力 (kW)	初期燃料棒 表面温度 (°C)
T1	100	3.0	260	500
T2	100	3.0	310	700

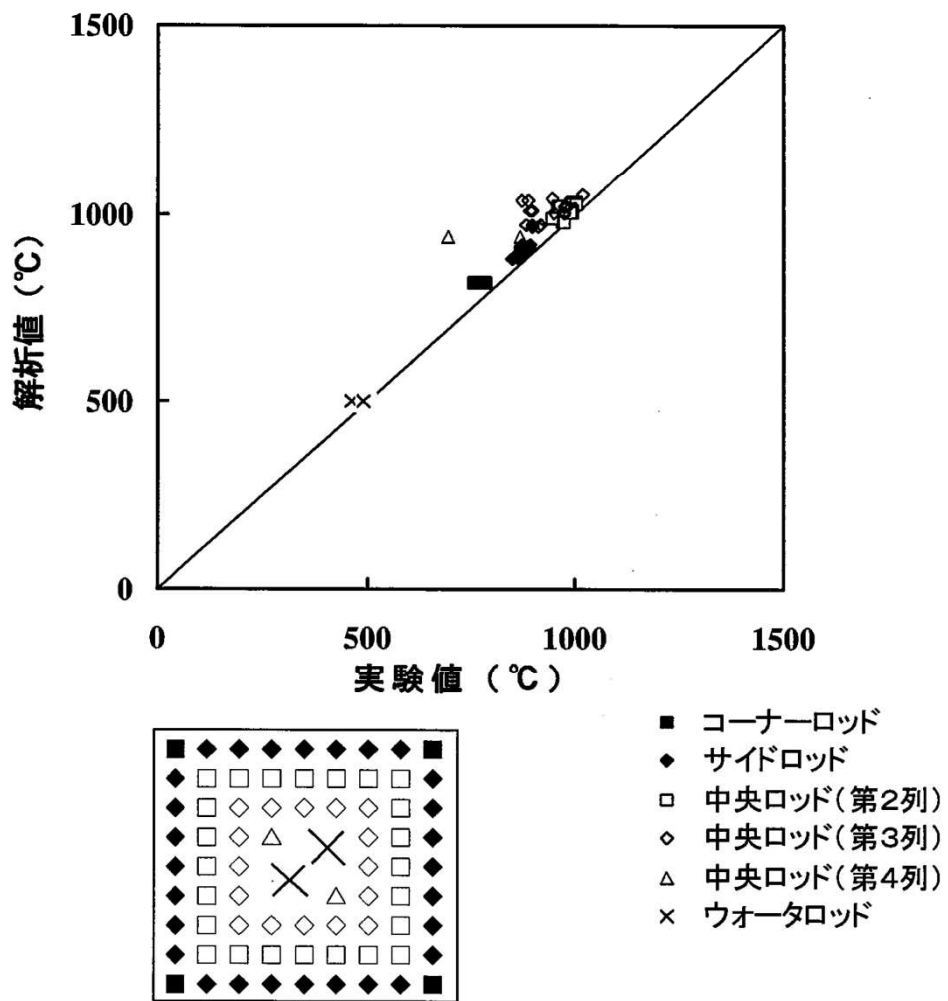
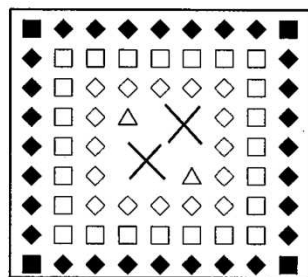
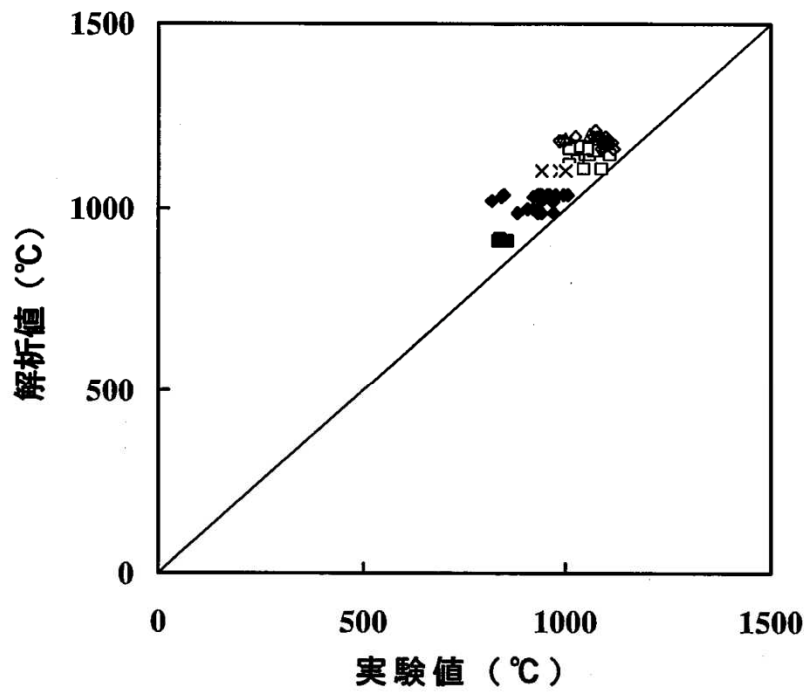


図 4-14 T1 実験と CHASTE 解析の比較



- コーナーロッド
- ◆ サイドロッド
- 中央ロッド(第2列)
- ◇ 中央ロッド(第3列)
- △ 中央ロッド(第4列)
- × ウォータロッド

図 4-15 T2 実験と CHASTE 解析の比較

#### 4.5 実機解析への適用性

BWRのLOCAを模擬した燃料集合体冷却実験は、実機の燃料集合体1体を実寸大で模擬しており、集合体出力、出力分布、炉心スプレイ流量、炉心再冠水速度等の実験条件も実機条件に設定して実施されている。これらの実験結果と実験解析結果を比較すると、燃料被覆管最高温度は、前節に述べたように、実験解析結果の大部分が高く予測することを確認した。

有効性評価における重要現象は、2章に述べたように、設計基準事故のLOCAと同様であり、燃料被覆管温度が評価指標であることから、それを安全側に予測できるCHASTEコードは有効性評価に適用できる。

## 5. 有効性評価への適用性

4 章に記載した実験解析を踏まえ、重要現象についての不確かさ、及びその不確かさが評価指標の観点と運転員操作の観点から有効性評価解析へ与える影響について表 5-1 にまとめた。以下にその不確かさについて記述する。

### 5.1 不確かさの取扱いについて（評価指標の観点）

CHASTEコードで取り扱う評価指標は、燃料被覆管温度である。燃料被覆管温度は熱伝達係数に依存する。主に燃料被覆管温度への重要現象の不確かさの影響について以下に記載する。

#### (1) 崩壊熱

崩壊熱は信頼性の高い評価モデルと最確条件を包絡できる条件を使用して大きくなるように評価した値をCHASTEコードの入力として使用しているため、有効性評価では燃料被覆管温度を高く評価する。

#### (2) 燃料棒表面熱伝達

対流熱伝達は、SAFERコードの実験解析において、熱伝達係数を低めに評価する可能性があり、他の解析モデルの不確かさともあいまってコード全体として、スプレイ冷却のない実験結果の燃料被覆管最高温度に比べて高めに評価する。

輻射熱伝達は、燃料集合体断面の幾何学的配置に基づいて、燃料被覆管、チャンネルボックスの温度を詳細に評価する。高温となる場合の輻射率に比べて小さい値を用いていること、また、部分長燃料棒より上部にも出力燃料棒が存在すると仮定して輻射伝熱を小さくするよう設定するた



め、燃料被覆管温度を高く評価する。

### (3) 燃料被覆管酸化

燃料被覆管の酸化量の計算は、燃料被覆管温度が高温となる場合に酸化量、酸化反応熱を高め評価する Baker-Just の式を適用しているため、燃料被覆管温度は高め評価される。

### (4) 燃料被覆管変形

燃料被覆管温度計算と燃料棒内圧の計算から、内圧による応力が破裂限界応力を超えた場合には、燃料被覆管が破裂を起こすとみなし、燃料被覆管の内側にもジルコニウム-水反応を計算する。破裂を判定する限界応力は、図 3-5 に示したように、実験データのベストフィット曲線を仮定し、現実的な条件としている。

以上から、重要現象の不確かさは、燃料被覆管温度を過大評価又は過大評価する方向に寄与し、有効性評価解析は評価指標の観点で厳しい評価となっている。

## 5.2 不確かさの取扱いについて（運転操作の観点）

CHASTE コードが適用される可能性のある有効性評価で取り扱う運転操作は、SRV を使用した原子炉減圧操作及び代替注水系等を使用した原子炉注水操作である。

この操作は原子炉圧力を低下させ、低圧注水系による原子炉注水を促進させるために実施する。この運転員等操作は、代替注水系及び代替電源の準備の完了のタイミング又は原子炉水位低信号の発信を起点に実施するた

め、燃料被覆管温度を起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作に与える影響はない。

なお、燃料被覆管の破裂判定に対しては、格納容器ベント操作への影響が考えられるが、格納容器ベント開始タイミングまでの時間的余裕が十分あることから、コードの不確かさが運転操作の可否に影響することはない。

また、解析上の取扱いとして、破裂判定は燃料被覆管温度が最も高くなるバンドルの値を代表として用いるが、現実的な炉心における燃焼度の分布を踏まえると、その影響は更に小さくなる。

表 5-1 重要現象の不確かさ (1/2)

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 (核)	崩壊熱	崩壊熱モデル	入力値に含まれる。最確条件を包絡できる条件を設定することにより崩壊熱を大きくするよう考慮している。	崩壊熱を大きく設定するため、燃料被覆管温度を高く評価する。
炉心 (燃料)	燃料棒表面 熱伝達	対流熱伝達モデル	SAFERコードに記載	SAFERコードに記載
		輻射熱伝達モデル	入力値に含まれる。 輻射率は、1200℃付近のジルカロイ被覆管の酸化面における輻射率(0.7~0.8)を踏まえて0.67を用いることで、輻射伝熱を小さくするよう考慮している。なお、輻射率0.67を用いた場合のPCTは、輻射率0.75を用いた場合に比べて数℃程度高くなる(添付2参照)。また、部分長燃料棒より上部にも出力燃料棒が存在すると仮定して輻射伝熱を小さくするよう考慮している。	燃料集合体断面の幾何学的配置に基づいて、燃料被覆管、チャンネルボックスの温度を詳細に評価する。 SAFERコードから引き継ぐ対流熱伝達係数、燃料の最大線出力密度等の解析条件により、全体として保守的に評価する。
	燃料被覆管酸化	ジルコニウム-水反応モデル	酸化量及び酸化反応に伴う発熱量をより大きく見積もるBaker-Just式による計算モデルを採用しており、保守的な結果を与える。	燃料被覆管温度を高く評価する。

表 5-1 重要現象の不確かさ (2/2)

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 (燃料)	燃料被覆管 変形	膨れ・破裂評 価モデル	膨れ・破裂は、燃料被覆管温度と円周方向応力に基づいて評価され、SAFE Rコードから引き継ぐ対流熱伝達係数、及び燃料の最大線出力密度等の解析条件を保守的に取り扱うことにより燃料被覆管温度は高めに評価され、円周方向応力は燃焼期間中の変化を考慮して燃料棒内圧を大きく設定し保守的に評価している。ベストフィット曲線を用いる場合も破裂の判定はおおむね保守的となる。	破裂発生前の被覆管の膨れ及び破裂発生の有無は、伝熱面積やギャップ熱伝達係数、破裂後のジルコニウム-水反応熱に影響を与え、燃料被覆管最高温度及び酸化割合に影響を与えることとなる。解析コードでは、前述の判定を行うための燃料被覆管温度を高めに評価することから、おおむね保守的な結果を与えるものとする。

## 6. 参考文献

- (1) 「沸騰水型原子力発電所 非常用炉心冷却系 (E C C S) 性能解析モデルについて」, 日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社, HLR-018 訂 4, 平成 26 年 6 月
- (2) 「沸騰水型原子力発電所 非常用炉心冷却系解析モデル」, 株式会社東芝, TLR-028 改訂 3, 平成 10 年 5 月
- (3) American Nuclear Society, “American National Standard for Decay Heat Power in Light Water Reactors”, ANSI/ANS-5.1-1979, August 1979.
- (4) A. M. Ross and R. L. Stoute, “Heat Transfer Coefficients Between  $UO_2$  and Zircaloy-2”, CRFD-1075, AECL-1552, June 1962.
- (5) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について」株式会社日立製作所, HLR-033 訂 1, 平成 10 年 2 月
- (6) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について」株式会社東芝, TLR-045 改訂 1, 平成 10 年 1 月
- (7) G. L. Singer, “VIEWPIN A Fortran Program to Calculate View Factors For Cylindrical Pins”, Aerojet Nuclear Co., ANCR-1054, March 1972.
- (8) L. Baker and L. C. Just, “Studies of Metal-Water Reactions at High Temperatures III. Experimental and Theoretical Studies of the Zirconium-Water Reaction”, ANL-6548.
- (9) J. D. Duncan and J. E. Leonard, “Emergency Cooling in Boiling Water Reactors under Simulated Loss-of-Coolant Conditions (BWR-FLECHT Final Report)”, GEAP-13197, June 1971.
- (10) J. D. Duncan and J. E. Leonard, “Core Spray and Bottom Flooding Effectiveness in the BWR/6”, NEDO-10993, September 1973.

- (11) J.E.Leonard, et. al., “Emergency Core Cooling Tests of an Internally Pressurized, Zircaloy-Clad, 8x8 Simulated BWR Fuel Bundle”, NEDO-20231, December 1973.
- (12) 「敦賀発電所 1 号炉 スプレー冷却特性実験について」, 日本原子力発電株式会社, General Electric Company, 株式会社東芝, 平成 11 年 1 月

添付1 入力項目リスト

分類	入力項目
燃料データ	燃料集合体当たりの燃料棒数
	燃料棒配列
	燃料棒ピッチ
	チャンネルボックス内幅
	燃料被覆管外径, 燃料被覆管肉厚
	燃料被覆管物性 (熱伝導率, 比熱, 密度)
	燃料ペレット直径
	燃料ペレット-燃料被覆管ギャップ条件 (ガス圧力, ガス組成, ギャップ熱伝達係数)
	燃料ペレット物性 (熱伝導率, 比熱, 密度)
	燃料ペレット径方向出力分布
	燃料棒最大線出力密度
	燃料棒軸方向出力分布
	局所出力及び燃焼度分布
	断面平均燃焼度
過渡特性	炉心核分裂出力変化
	炉心崩壊熱時間変化
	原子炉圧力変化
	燃料棒表面对流熱伝達係数変化
	炉心露出時間, 再冠水時間

## 添付2 輻射率の妥当性について

CHASTEコードでは、燃料被覆管及びチャンネルボックスの乾いた状態での輻射率は0.67としている。

ジルカロイ被覆管を用いた物性評価試験<sup>(1)</sup>において、1200°C付近の酸化面における輻射率は0.7~0.8の範囲であると報告されている。解析に用いる輻射率である0.67は、約800°Cの酸化膜を有するジルカロイに相当する値<sup>(2)</sup>であり、BWR-FLECHT実験等で用いられてきた実績のある値である。

輻射率の感度解析<sup>(3)</sup>として、BWR2プラントの原子炉冷却材喪失事故について、輻射率を0.67とした場合のPCTは、輻射率を0.75とした場合より、PCTが1400°C程度において約30°C高くなることが確認されている。この感度解析ではPCTが高く輻射率の効果が大きくなり、また燃料形状も異なることから、有効性評価解析の条件における輻射率の感度を確認するため、BWR5代表プラントについて輻射率の感度解析を行った。1.に解析条件及び解析結果を示す。感度解析の結果、PCTが900°C程度となる有効性評価解析において、輻射率を0.67とした場合のPCTは、輻射率を0.75とした場合より約3°C高くなることを確認した。

また、有効性評価解析で用いるCHASTEコードでは、SAFERコードの解析結果から燃料被覆管温度が最も厳しくなるノードを含む一断面について、水平方向二次元体系で横方向の輻射熱伝達のみを考慮して評価しており、縦方向の輻射熱伝達を考慮するよりもPCTを高く評価している。

したがって、PCTが900°C程度となっている有効性評価解析において、輻射率0.67を用いてCHASTEコードを使用して、PCTを評価することは可能と考える。



また、濡れた状態の輻射率は、水の輻射率の代表的な値として 0.96 を用いている。

#### 1. 有効性評価解析における輻射率の感度について

有効性評価解析における輻射率の感度を確認するため、BWR 5 代表プラントについて、燃料棒及びチャンネルボックスに適用している輻射率に関する感度解析を実施し、PCT への影響を確認した。以下に、解析条件及び解析結果を示す。

##### (1) 解析条件

対象プラント : BWR 5 代表プラント  
事故シーケンス : 高圧・低圧注水機能喪失  
解析条件 : 燃料棒及びチャンネルボックスの輻射率を 0.67 から 0.75 に変更する。

##### (2) 解析結果

添付表 2 に解析結果を示す。

添付表 2 輻射率感度解析結果

評価項目	ベースケース (輻射率 : 0.67)	感度解析 (輻射率 : 0.75)
燃料被覆管最高温度 (℃)	約 890	約 887

##### (3) まとめ

BWR 5 代表プラントの高圧・低圧注水機能喪失シーケンスについて、輻

射率の影響を確認する感度解析を実施し、PCTが約3℃低下する結果であった。

[参考文献]

- (1) “AEC FUELS AND MATERIALS DEVELOPMENT PROGRAM PROGRESS REPORT NO. 76” , GEMP-1008, September 30, 1968.
- (2) “ZIRCONIUM DATA MANUAL PROPERTIES OF INTEREST IN REACTOR DESIGN” , TRG Report 108, 1962.
- (3) “LOSS-OF-COOLANT ACCIDENT & EMERGENCY CORE COOLING MODELS FOR GENERAL ELECTRIC BOILING WATER REACTORS” , NEDO-10329, APRIL 1971.



② 模擬燃料集合体	実機BWRの実寸大8×8型
③ 模擬燃料棒材質	インコネル600
④ 模擬チャンネルボックス材質	SUS304
⑤ 集合体出力	4.7～26.3 kW
⑥ 系統圧力	大気圧～約0.8 MPa[abs]

### (3) 妥当性確認結果

実験解析では、模擬燃料棒にインコネル600を、模擬チャンネルボックスにSUS304を用いていることから、模擬燃料棒及び模擬チャンネルボックスの材質に応じて、模擬燃料棒の輻射率を0.50、模擬チャンネルボックスの輻射率を0.75と設定して計算している。

輻射伝熱実験で、燃料集合体の対角線方向にある模擬燃料棒の軸方向最高出力部で測定された被覆管表面温度分布と、CHASTEコードを用いた実験解析の計算値との比較を添付図3-2に示す。対角線方向の被覆管表面温度分布の計算値は実測値の傾向とおおむね一致している。

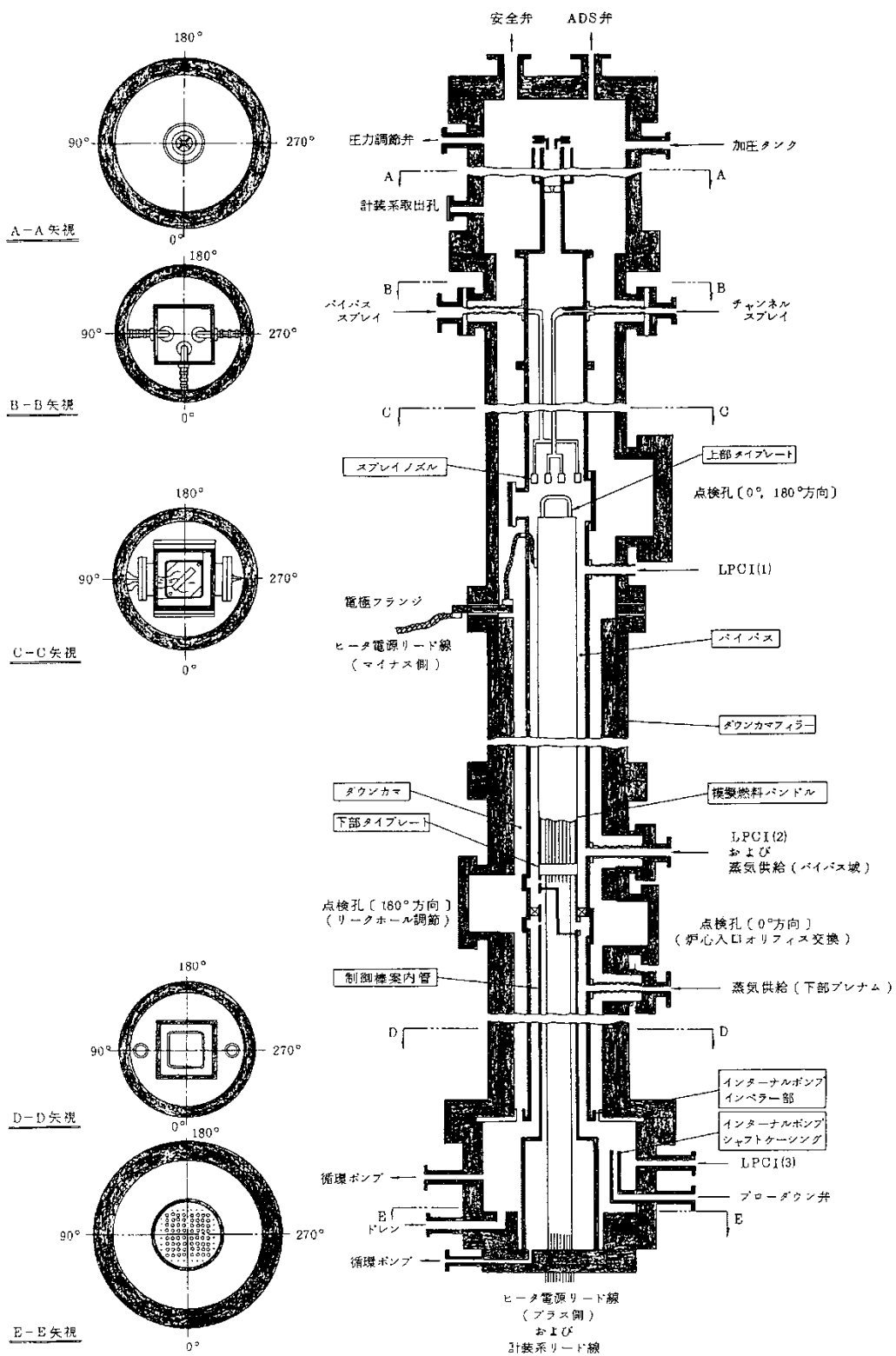
上述の実験及び実験解析では、模擬燃料棒と模擬チャンネルボックスで材質が異なることから、輻射率についても異なる値を設定して計算しており、被覆管表面温度分布は実機と必ずしも同じではないものの、模擬チャンネルボックスへの輻射の寄与が大きい模擬チャンネルボックスに隣接する模擬燃料棒の温度は、被覆管最高温度が発生する中央領域の模擬燃料棒に比べて低く、輻射率が異なることの影響は小さいと考えられる。

したがって、実験での実測値と計算値の傾向がおおむね一致していること、また、添付2で示したとおり、有効性評価でCHASTEコードを用いている解析の状況においては、輻射が被覆管最高温度を高く評価するような

保守的な設定となっていることから、有効性評価におけるCHASTEコードの輻射伝熱モデルは適用可能なものであると考える。また、有効性評価におけるCHASTEコードの妥当性確認に当たってスプレイの影響を考慮する必要はないものとする。

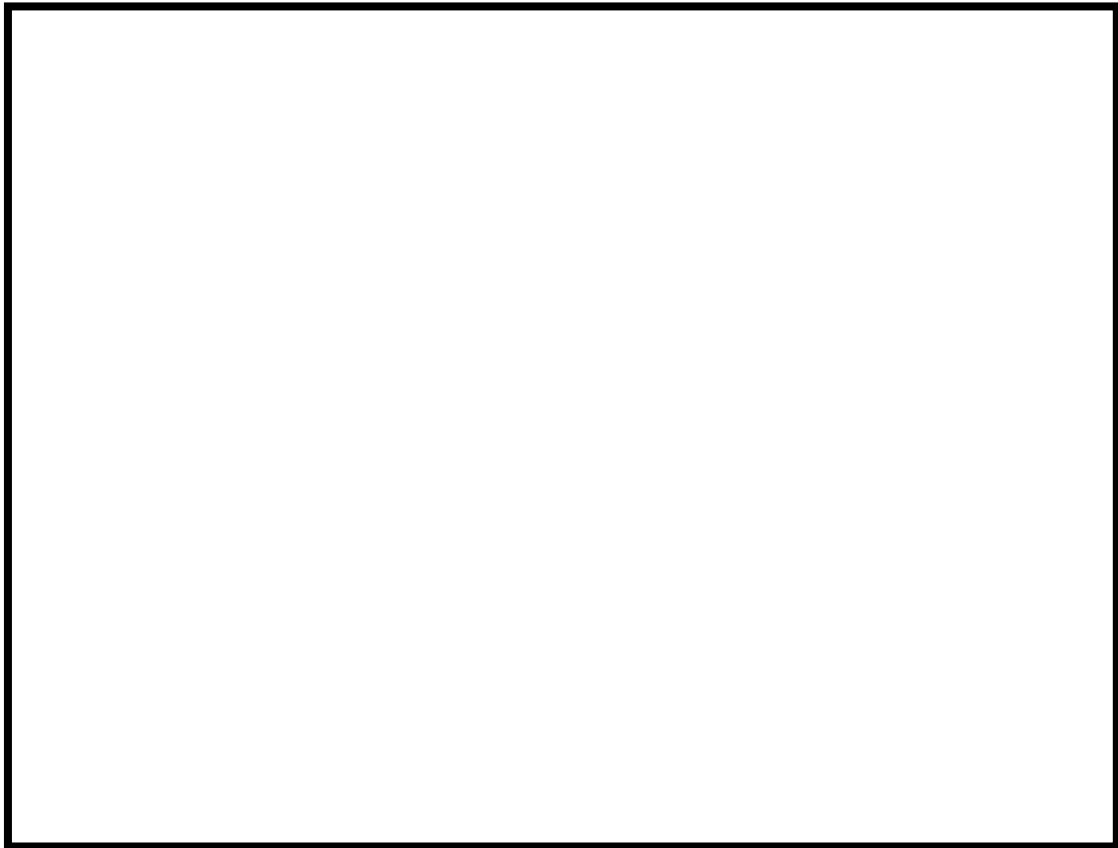
[参考文献]

- (1) 共同研究報告書，炉心スプレイ低流量時の熱伝達に関する研究，  
昭和60年度下半期（最終報告書），昭和61年3月



添付図 3-1 スpray熱伝達実験装置

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。



添付図 3-2 輻射伝熱実験における燃料集合体内温度分布の実測値と計算値

#### 添付4 前処理コード

CHASTEコードのインプットデータ作成に使用される前処理コードとCHASTEコードにインプットされるパラメータを以下に示す。これらの関係を添付図4に示す。

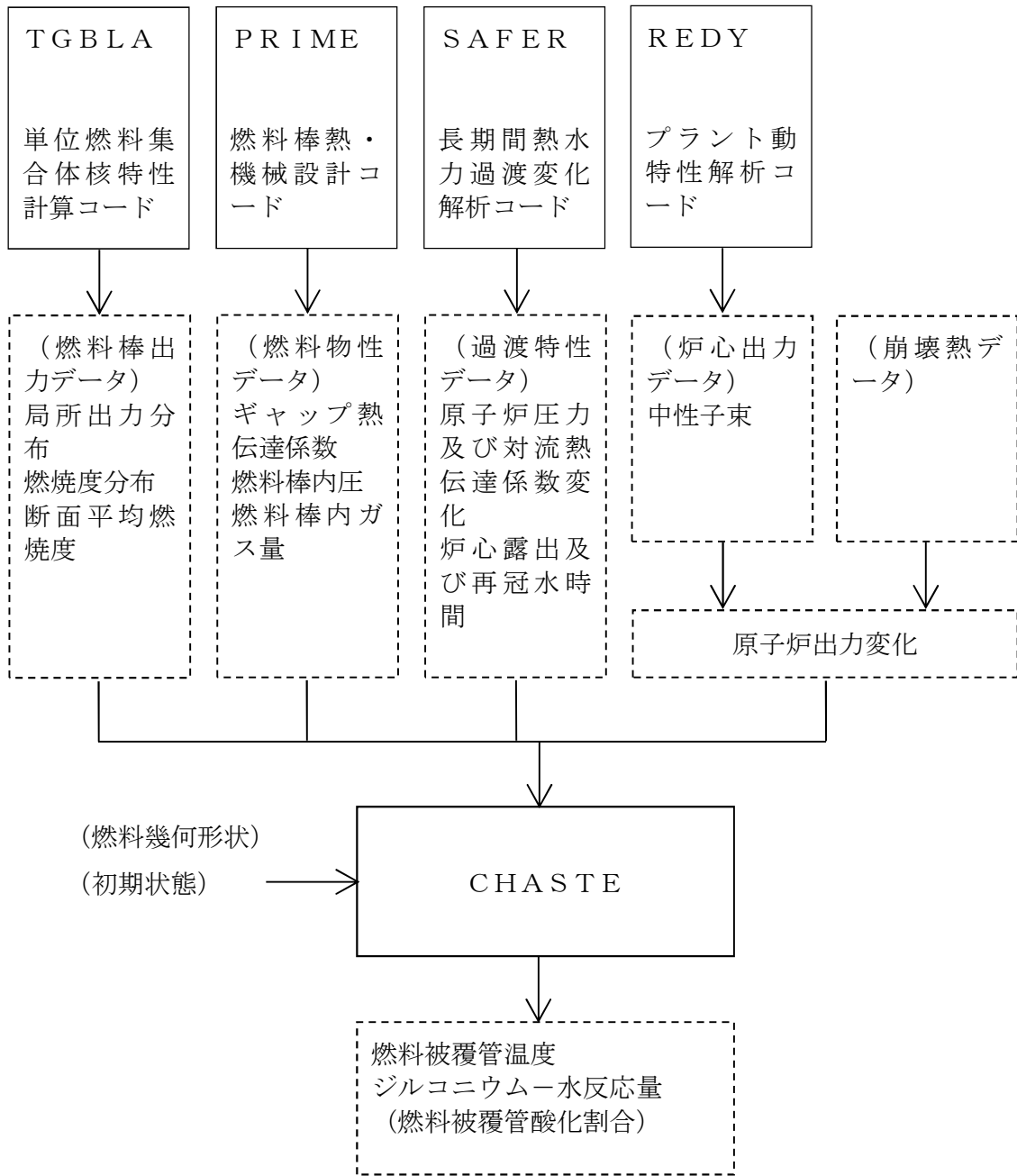
- (1) 単位燃料集合体核特性計算コード (TGBLA) による燃料棒出力データ
  - ① 局所出力分布
  - ② 燃焼度分布
  - ③ 断面平均燃焼度
- (2) 燃料棒熱・機械設計コード (PRIME) による燃料物性データ
  - ① ギャップ熱伝達係数
  - ② 燃料棒内圧
  - ③ 燃料棒内の核分裂生成ガス及び初期封入ガスの量
- (3) 長期間熱水力過渡変化解析コード (SAFER) による過渡特性データ
  - ① 原子炉圧力
  - ② 軸方向各ノードの対流熱伝達係数
- (4) プラント動特性解析コード (REDY) による核分裂出力変化
  - ① 中性子束

TGBLAコードにより求められた各燃料棒の出力分布、燃焼度分布及び燃料集合体断面平均燃焼度をCHASTEコードに用いる。これらのデータは、次に述べるギャップ熱伝達係数の設定にあわせ、燃焼期間中の変化を考慮して設定する。



PRIMEコードにより求められた燃料物性データをCHASTEコードにおける初期値として用いる。燃料被覆管とペレット間のギャップ熱伝達係数は、燃料被覆管温度上昇を厳しくするように、燃焼期間中の変化を考慮して最小となる値を与える。ギャップ熱伝達係数の初期値を小さく設定することで、燃料ペレットの初期保有熱量を高めに見積もり、炉心ヒートアップ時の燃料被覆管温度上昇率が大きくなる。また、燃料棒の内圧とガス量は、燃料棒の膨れ・破裂を厳しくするように、燃焼期間中の変化を考慮して最大となる値を与える。燃料棒の内圧とガス量の初期値を大きく設定することで、炉心ヒートアップ時の燃料棒内圧及び燃料被覆管周方向応力を大きく見積もり、燃料被覆管の膨れ・破裂を厳しく評価する。

REDYコードにより求められた事象発生直後の中性子束と原子炉停止後の崩壊熱から原子炉出力変化を求め、CHASTEコードで用いる。有効性評価において影響を与える崩壊熱については、燃焼度にサイクル末期のばらつきを考慮し、10%の保守性を確保することで最確条件を包絡できる条件を設定している。そのため、有効性評価解析では燃料被覆管温度は高めに評価される。



添付図4 CHASTEコードの入出力

## 添付5 有効性評価における9×9燃料（A型）の代表性

### 1. はじめに

炉心損傷防止対策の有効性評価は9×9燃料（A型）（以下「A型燃料」という。）を代表燃料として評価しており、有効性評価に用いるCHASTEコードの適用性は、主としてA型燃料を対象に確認されている。一方、実炉には9×9燃料（B型）（以下「B型燃料」という。）も装荷されていることから、CHASTEコードにB型燃料が適用できることを確認する。ここでは、CHASTEコードに入力される燃料データを整理した上で、対応する解析モデルがB型燃料の評価に適用できることを示す。

また、B型燃料の燃料データを入力した解析を行い、その影響を確認することで、A型燃料で代表することができることを示す。

### 2. 解析手法

対象とする燃料集合体をB型燃料とし、A型燃料で代表した申請解析と同様にCHASTEコードで解析評価する。CHASTEコードに入力する燃料棒、ウォータチャンネル、チャンネルボックスの幾何学的配置及び燃料特性（ギャップ熱伝達係数、燃料物性等）にB型燃料の燃料データを反映し、CHASTEコードでの燃料形状の差が結果に及ぼす影響を明確にするため、SAFERコードから引き継ぐ対流熱伝達係数はA型燃料で評価した値を用いて燃料被覆管最高温度及び燃料被覆管の酸化量を評価する。

### 3. 燃料に関連する解析入力と解析モデルの整理

燃料に関連する解析入力とそれに対応する解析モデルを添付表5-1に示す。

A型燃料と比べたB型燃料の特徴として、ウォータチャンネルの採用、燃料棒の径が小さい、標準長燃料棒のみで構成される、スペーサ形状が異なるといった点があげられる。しかし、CHASTEコードを使用する上でこれらの相違は問題とはならず、B型燃料についてもCHASTEコードの解析モデルは適用可能である。以下に各解析入力とモデルに対するB型燃料の適用性を示す。

### 3.1 B型燃料への適用性

CHASTEコードにおいては、燃料棒、ウォータロッド、チャンネルボックスの幾何学的配置や熱容量等を入力し、燃料棒表面熱伝達モデルの輻射熱伝達を評価するため、B型燃料の幾何学的配置等を入力することで適切に評価できる。CHASTEコードは、矩形のウォータチャンネルの形状を直接的に扱うことはできない。CHASTEコードと同一の輻射計算モデルを持つCHARMコード<sup>(1)</sup>において、B型模擬燃料のスプレイ実験解析結果（別添）のとおり、B型燃料のウォータチャンネルを複数の丸型ロッドで模擬しており、B型燃料を適切に模擬することができることを確認している。このため、CHASTEコードにおいてCHARMコードと同様に丸型ウォータロッドでウォータチャンネルを模擬することでB型燃料の輻射の評価が可能である。

### 3.2 燃料特性の入力

CHASTEコードでは、燃料ペレット・燃料被覆管の比熱、密度等及びギャップ熱伝達係数を入力として、燃料棒の半径方向次元熱伝導（燃料棒熱伝導）、ギャップ熱伝達、ジルコニウム-水反応及び燃料被覆管の膨れ・破裂を評価する。これらの入力にB型燃料の特性を反映する。

## 4. B型燃料による解析評価

### 4.1 評価内容

対象プラント : BWR 5 代表炉

対象燃料集合体 : B型燃料

事故シーケンス : 高圧・低圧注水機能喪失 (MUWCによる注水ケース)

解析条件 : B型燃料の燃料データを入力する。S A F E Rコードから引き継ぐ対流熱伝達係数は、A型燃料で評価した値を入力する。その他の解析条件はA型燃料で代表した有効性評価のベース解析と同じとする。

### 4.2 解析結果

A型燃料と比較したB型燃料の解析結果を添付表 5-2 に示す。

燃料被覆管最高温度については、B型燃料の方が 30℃程度と数%高くなっている。

## 5. 代表燃料評価の適切性

B型燃料の方がA型燃料に比べて燃料被覆管最高温度が 30℃程度と数%高い結果 (約 921℃) となるものの、1200℃に対しては余裕があり、また、S A F E Rコードから引き継ぐ対流熱伝達係数、燃料の最大線出力密度等の解析条件が全体として保守的になっていることを考慮すれば、C H A S T Eコードについても有効性評価においてはA型燃料の解析結果で代表しても問題ないと考える。

## 6. まとめ

CHASTEコードにB型燃料が適用できることを確認した。また，B型燃料の燃料データを用いて解析を行った。A型燃料とB型燃料の解析結果に大きな差はなく，有効性評価におけるCHASTEコードにおいてもA型燃料で代表することができると思う。

### [参考文献]

- (1) 「BWRプラントのLOCA/ECCS性能評価コードの検討について」平成3年12月，通商産業省原子力発電技術顧問会 安全解析コード検討会

添付表 5-1 CHASTEコードの燃料に係る入力と解析モデルの対応

解析入力	解析モデル
燃料棒，ウォータロッド／ウォータチャンネル，チャンネルボックスの幾何学的配置	・炉心ヒートアップモデル（燃料棒表面熱伝達（輻射））
燃料特性（ギャップ熱伝達係数，燃料物性等）	・炉心ヒートアップモデル（燃料棒熱伝導，ギャップ熱伝達，燃料被覆管熱伝導，ジルコニウム－水反応，膨れ・破裂）

添付表 5-2 A型燃料とB型燃料の解析結果の比較

評価項目	B型燃料に対する解析結果	A型燃料に対する解析結果
燃料被覆管最高温度 (°C)	約 921	約 890
燃料被覆管の酸化量 (%)	約 3	約 1

## CHARMコードによる9×9燃料（B型）ヒートアップ実験解析

## 1. はじめに

9×9燃料（B型）を対象に実施されたヒートアップ試験を対象に実験解析を行い，角型ウォータチャンネル（W/C）を丸型ウォータロッド（W/R）で模擬する妥当性を確認した。実験解析では，炉心ヒートアップ解析コードCHARMコードを用いた。

## 2. 試験の概要

試験は，9×9燃料（B型）を模擬した実規模試験体を用いたスプレイ熱伝達試験であり，ヒータロッドを電気加熱し昇温させた後に，燃料上部からスプレイを投入している。試験体の形状寸法を表1に示す。被覆管，チャンネルボックス及びウォータチャンネルの材質はステンレス鋼である。出力分布等の試験条件を表2に示す。

表1 試験体形状

項目	値（単位：cm）
発熱長さ	約 380
ヒータシース内径	約 0.95
ヒータシース外径	約 1.1
チャンネルボックス内寸	約 13.4
ウォータチャンネル外寸	約 4

表2 主要な試験条件

項目	値	
バンドル出力	216kW	325kW
軸方向出力分布	コサイン分布（ピーキング最大値約 1.4）	
出力変化	図 1	



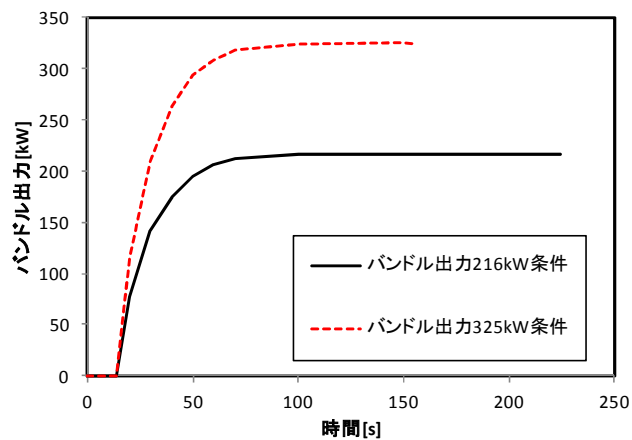


図1 バンドル出力の時間変化

### 3. CHARMコードによる実験解析

図2に9×9燃料（B型）の断面概略図を示す。実験解析では，試験体中央部の3×3ロッド領域における角型ウォータチャンネルを9本のウォータロッドで模擬した。ここで，輻射の評価で影響する3×3ロッド領域における外周部8本のウォータロッドの構造材断面積は，熱容量が同等となるように肉厚を調整し，実機の角型ウォータチャンネルの構造材断面積と合わせ，これらの8本のウォータロッドの外径（中心間距離）は燃料棒ピッチと同一とした。ステンレス鋼である被覆管，チャンネルボックス及びウォータチャンネル表面の輻射における輻射率は0.45に設定した。ヒータロッド温度測定値との比較対象は，高さ方向については軸方向出力分布の最大位置である中央部とし，径方向は対角部（3箇所），外周部，外周部より2層目及びウォータチャンネル隣接位置とした。

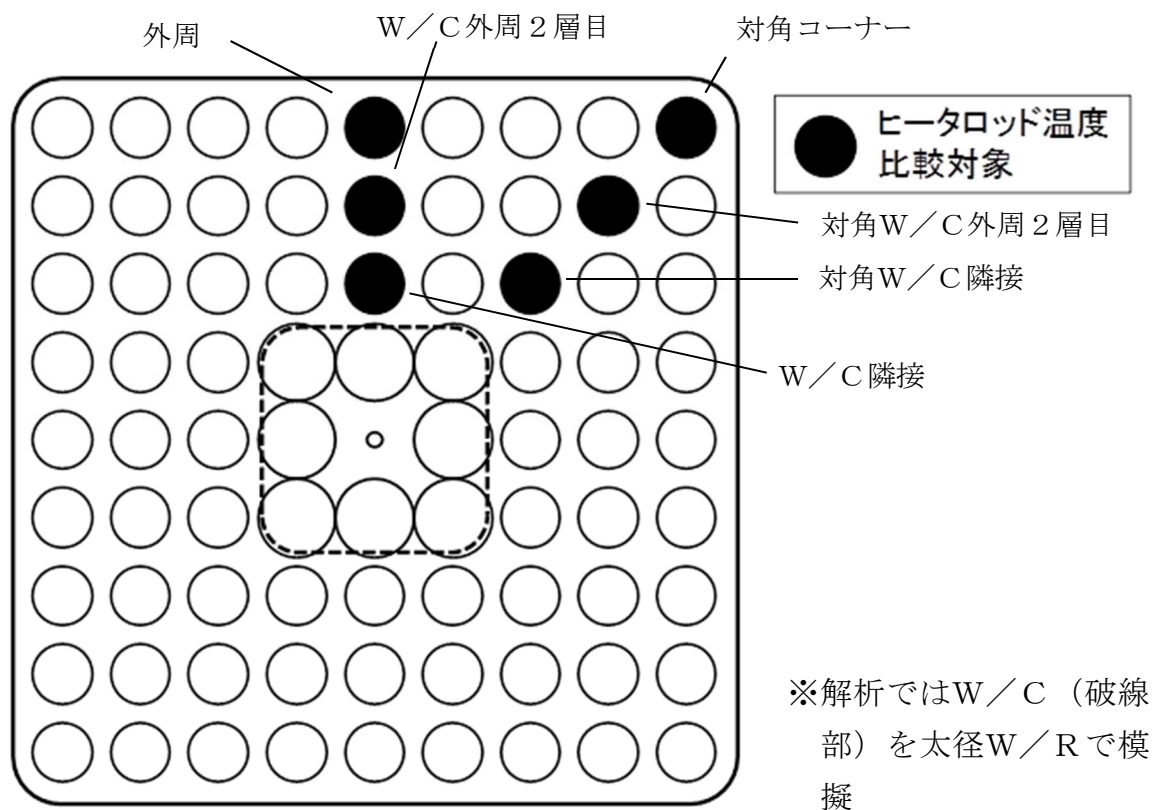


図2 9×9燃料（B型）の断面概略図

CHARMコードによるヒータロッド温度挙動の測定値との比較例を図3に示す。本検討では、9×9燃料（B型）体系における輻射効果を確認することから、ヒータロッド温度挙動はスプレイ投入開始時点までとした。216kW及び325kW条件でのヒータロッド温度は測定値を±20℃の範囲で予測しており、角型ウォータチャンネルをウォータロッドで模擬することは妥当であると考えている。

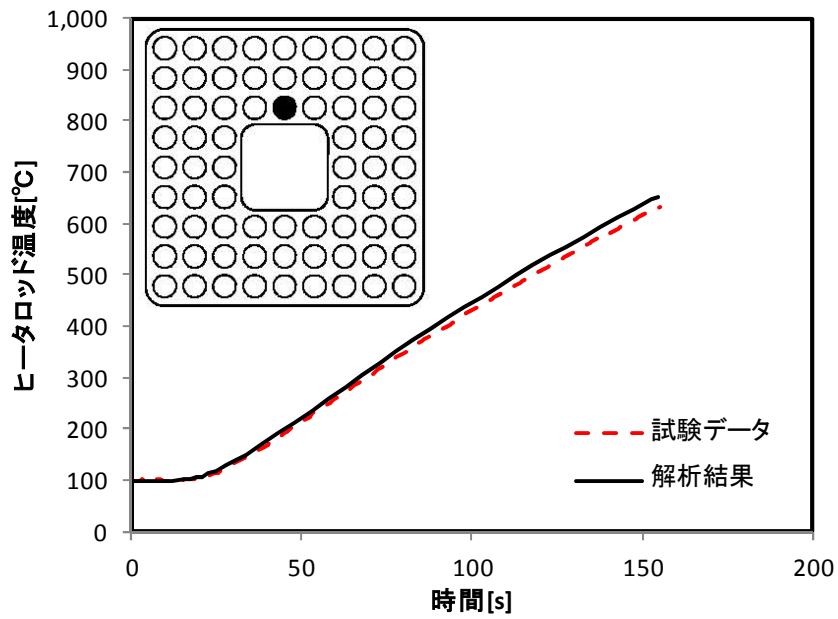


図3 ヒータロッド温度の時間変化の例 (325kW 条件, W/C隣接ヒータロッド)

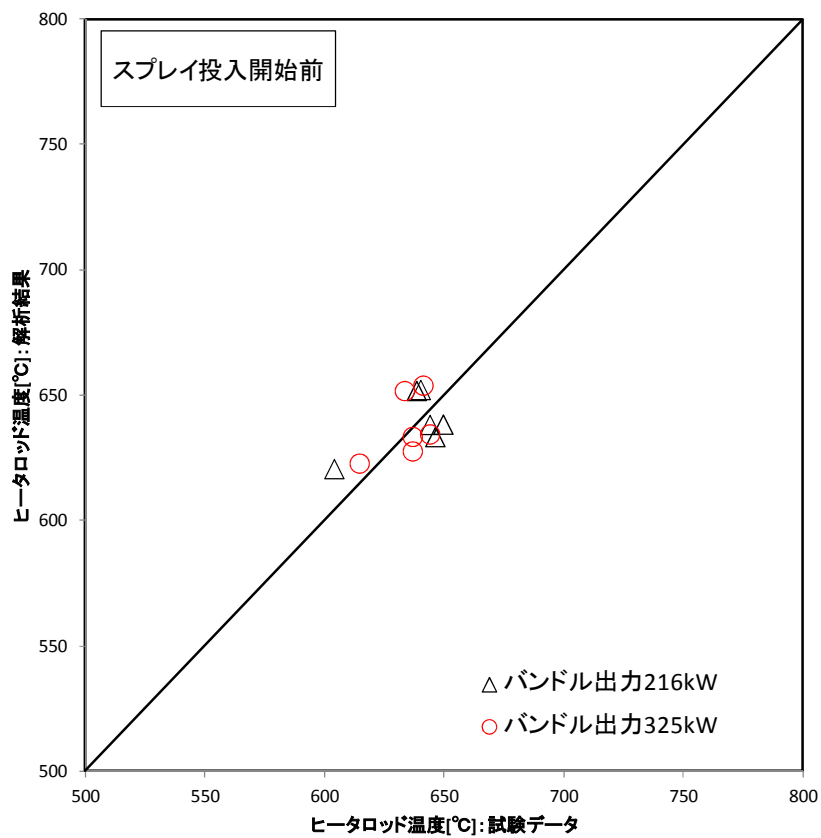


図4 ヒータロッド温度最高値の計算値と測定値の比較

## 第 3 部 R E D Y

## 目次

### － R E D Y －

1. はじめに	3-4
1.1 解析コード	3-5
1.2 妥当性確認の方針	3-5
2. 重要現象の特定	3-7
2.1 事故シーケンスと評価指標	3-7
2.2 ランクの定義	3-10
2.3 物理現象に対するランク付け	3-11
3. 解析モデルについて	3-25
3.1 コード概要	3-25
3.2 重要現象に対する解析モデル	3-25
3.3 解析モデル	3-27
3.4 入出力	3-48
4. 妥当性確認	3-52
4.1 重要現象に対する妥当性確認方法	3-52
4.2 炉心（核）における重要現象の妥当性確認	3-66
4.3 炉心（熱流動）における重要現象の妥当性確認	3-70
4.4 原子炉圧力容器（逃がし安全弁含む）における重要現象の妥当性確認	3-81
4.5 原子炉格納容器における重要現象の妥当性確認	3-100
4.6 実機解析への適用性	3-103
5. 有効性評価への適用性	3-106

5.1 不確かさの取り扱いについて（評価指標の観点）	3-106
5.2 不確かさの取り扱いについて（運転操作の観点）	3-116
6. 参考文献	3-118
添付1 入力項目リスト	3-120
添付2 軸方向出力分布の変化について	3-122
添付3 軸方向出力分布変化を考慮したボイドマップの影響について	3-125
添付4 短時間領域を細分割しての重要現象のランクの検討	3-128
添付5 原子炉停止機能喪失事象での反応度係数（REDYコード用）の 保守因子について	3-135
添付6 ボロン反応度添加率について	3-157
添付7 最適評価コードによる解析結果との全体的挙動比較	3-163

## 1. はじめに

本資料は、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」という。）に適用するコードのうち、REDY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。

## 1.1 解析コード

本資料で使用する解析コードは、ABWR用の“REDY Ver.2”と従来型BWR用の“REDY Ver.1(ATWS 用)”の二つであり、これらを以下「REDYコード」という。ただし、従来型BWRに対する実機試験の再現解析では“REDY Ver.1”を使用している。一部の評価でREDYコードの計算結果をインプットとする“SCAT Ver.3”(以下「SCATコード」という。)を併用するが、SCATコードの説明は別資料(第4部SCAT)にて行う。

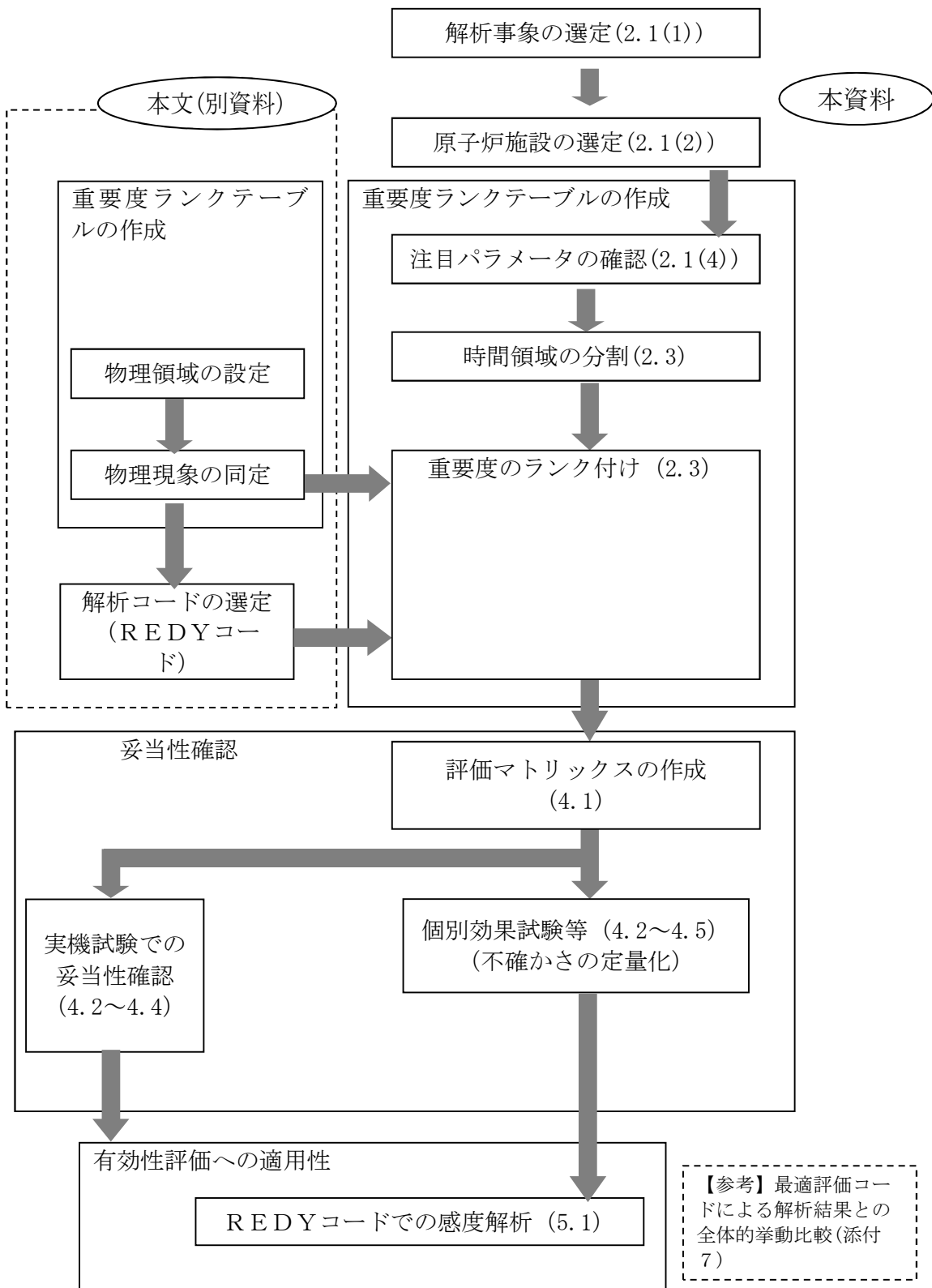
なお、本資料で引用している最適評価コードは、“TRACG Ver.5”であり、これを以下「TRACコード」という。

## 1.2 妥当性確認の方針

重大事故等対策の有効性評価にREDYコードを適用することの妥当性確認の方針を以下に述べる。

- (1) REDYコードの妥当性確認は、原子力学会標準「統計的安全評価の実施基準：2008」を参考にした図 1-1 REDYコードにおける検討手順に従う。
- (2) REDYコードは、プラント安定性や運転時の異常な過渡変化を評価する目的で開発されたコードであり、起動試験等の予測解析や再現解析に使用されて来た経緯を持つ。このため実機試験結果で妥当性確認が示せる範囲については、これを積極的に活用し、モデルの妥当性を示す。
- (3) 本資料は、原子炉停止機能喪失事象に対して抽出された物理現象に対してREDYコードを用いることの妥当性を示すことが目的である。なお、補足として最適評価コード(ここではTRACコードが該当)による参考解析結果を必要に応じて参照する。





(注)次章以降では、最適評価コードをTRACコードと呼ぶ。

図 1-1 REDYコードにおける検討手順

## 2. 重要現象の特定

### 2.1 事故シーケンスと評価指標

#### (1) 解析事象の選定

RE DYコードが適用される炉心損傷防止対策における事故シーケンスグループである原子炉停止機能喪失は、運転時の異常な過渡変化の発生時において原子炉のスクラム失敗を想定する事象であり、事故シーケンスとして主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失が選定されている。

#### (2) 原子炉施設の選定

本事故シーケンスが生じる可能性はBWR型式により相違はないが、ABWRと従来型BWRとの主な違いである再循環系の違い（インターナルポンプか外部設置の再循環ポンプか）は、本事故シーケンスでは早期にポンプがトリップすることからシナリオ上大きな違いはない。このことから、ここでは原子炉施設としてABWRを選定した。ただし、有意に異なる場合は従来型BWRに関する説明を併記している。

#### (3) 事故シーケンス

運転時の異常な過渡変化では、主蒸気隔離弁の誤閉止により、原子炉スクラム信号が発生し、全制御棒が急速挿入され原子炉は停止する。主蒸気隔離弁の誤閉止は原子炉からタービンへ流れる主蒸気流量を遮断することになるため、原子炉圧力は上昇するものの、原子炉がスクラムされていることと、圧力が定められた値を超えた場合は逃がし安全弁が作動するため、圧力上昇は抑制される。なお、主蒸気隔離弁の誤閉止により、タービン駆動給水ポンプは停止し、さらに原子炉水位低下を厳しめに評価する目的で、モータ駆動給水ポンプも不作動を仮定しているが、運転時の異常な

過渡変化の判断基準に照らして、この仮定が影響を与えるものではない。

一方、原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止では、原子炉圧力が上昇し、炉心内ボイドが減少することに起因した正のボイド反応度が印加され、原子炉出力が増加する。原子炉圧力が上昇して、原子炉圧力高信号で再循環ポンプ（インターナルポンプ4台）がトリップし、炉心流量を低下させる。このとき、同時にインターロックで作動する代替制御棒挿入は失敗を仮定する。再循環ポンプトリップにより、原子炉出力は低めに抑制される。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、原子炉圧力の上昇は抑制される。逃がし安全弁が断続して開動作するため、原子炉から発生した蒸気は原子炉格納容器内のプール水へ放出され、プール水温及び格納容器圧力が上昇する。なお、主蒸気隔離弁の誤閉止により、タービン駆動給水ポンプが停止するが、モータ駆動給水ポンプの自動起動は考慮する（従来型BWRでも原子炉出力が厳しくなるように起動を仮定する）。主蒸気隔離弁の閉止により、給水加熱器への加熱蒸気がなくなるため、給水温度は低下し、炉心入口サブクーリングが大きくなることから原子炉出力は次第に上昇する。これにより燃料は沸騰遷移状態となり燃料被覆管温度が上昇する。

一方、制御棒が挿入されないことから、原子炉を未臨界にするために手動操作により、ほう酸水注入系が起動され、負のボロン反応度が徐々に印加されると、原子炉出力は次第に低下する。

原子炉格納容器のプール水温上昇率は原子炉出力の低下とともに緩やかとなり、残留熱除去系起動によるサプレッション・プール冷却効果と相まって、事象は収束に向かうことになる。

#### (4) 注目パラメータの確認

原子炉停止機能喪失事象に対して適用される判断基準は、以下のとおりである。

- a. 燃料被覆管の温度（1200℃以下）
- b. 燃料被覆管の酸化量（15%以下）
- c. 原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力（最高使用圧力の1.2倍未満）
- d. 格納容器圧力バウンダリにかかる圧力（限界圧力未満）
- e. 格納容器圧力バウンダリにかかる温度（限界温度未満）

原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止では、原子炉設置変更許可申請解析に記載した解析結果から、判断基準に対し十分な余裕があり評価指標として燃料被覆管の温度で代表できると考えられる b. を除く、a. c. d. e. を評価指標として取り上げる。したがって、本事象では燃料被覆管の温度（以下「燃料被覆管温度」という。）、原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力（以下「原子炉圧力」という。）、格納容器圧力バウンダリにかかる圧力及び温度（以下「格納容器圧力」及び「原子炉格納容器のプール水温度」という。）が注目パラメータとなる。このうち、燃料被覆管温度は、REDYコードでの計算結果を使用して、SCATコードで評価される。

## 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RE DYコード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2-1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。

表 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、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／妥当性評価は記載しない
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／妥当性評価は記載しない

### 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、2.1 節で述べた事象進展を踏まえ、2.2 節記載のランクの定義に従い、評価指標及び運転操作への影響に応じて「H」及び「M」に分類することで物理現象の中から重要現象を特定する。この結果を表 2-2 に示す。

本事故シーケンスでは、事故発生初期の約 5 分以内に原子炉圧力、燃料被覆管温度の順で注目パラメータがピークを迎える。それ以降は、手動起動したほう酸水注入系による負のボロン反応度効果によって次第に原子炉出力が抑制され、また残留熱除去系による除熱が行われることから、数十分後に格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度はピークを迎え、最終的には事象は収束する。以上より、炉心内挙動を評価する短時間領域と、原子炉格納容器側挙動を評価する長時間領域の二つに時間領域を分割して考えるものとした。

原子炉圧力と燃料被覆管温度を支配する物理現象の同定とその重要度評価は、上述したように一つの短時間領域でまとめている。この理由は燃料被覆管温度が異なる時間で二度のピークを生じ、かつ一度目の燃料被覆管温度のピークは原子炉圧力のピーク時間と前後するためである。本資料では、このランク付けの妥当性を裏付けるため、短時間領域を時間経過に伴って変化するプラント挙動を考慮した三つのサブ時間領域に細分割し、このサブ時間領域ごとでの重要現象のランク付けを行っている（添付 4 参照）。なお、このサブ時間領域は短時間領域における反応度係数の不確かさ評価にも適用している（添付 5 参照）。

上記において、SCATコードで評価する燃料被覆管温度に係わる物理現象のランクは、SCATコードへのインプット値となる炉心入口流量、

出力、炉心圧力及び炉心入口エンタルピに影響を与えるものについて注目して選定している。

以下に、物理現象ごとに考え方を示す。

(1) 核分裂出力 [炉心 (核)]

原子炉スクラム失敗を仮定した事象では、ボロンによって原子炉が未臨界になるまで臨界状態が継続する。すなわち、事象発生後も継続した核分裂出力が原子炉出力や発生蒸気量に影響を及ぼすため、核分裂出力はどの評価指標に対しても重要度が高いと考えられる。

(2) 出力分布変化 [炉心 (核)]

再循環ポンプがトリップした後の給水加熱喪失状態では、軸方向出力分布が下方ピークになることが知られており、注目パラメータに影響を与える可能性がある。ただし、この場合でも炉心平均ボイド率は増加することになるため、原子炉出力は低めに推移すると考えられ、燃料被覆管温度（主に、SCATコードのインプットとしての炉心流量、原子炉出力）、格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度の評価指標に与える影響は、結果を厳しくするものではなく重要度は低いと考えられる。

(3) 反応度フィードバック効果 [炉心 (核)]

(ボイド反応度 (減速材密度反応度) とドップラ反応度)

本事故シーケンスでは、反応度の変化が長時間にわたって原子炉出力や発生蒸気量に影響を及ぼす。短時間領域では、原子炉スクラム失敗を

仮定した事象でも原子炉圧力の評価指標に対して（ここで選択した原子炉施設では）余裕があり，反応度フィードバック効果の重要度は低いが，燃料被覆管温度（主に，SCATコードのインプットとしての原子炉出力）の評価指標に対しての重要度は高いと考えられる。一方，長時間領域では，低出力状態が継続するものの，格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度へ与える影響は後述するボロン反応度が支配的な変化要因となり，重要度は中程度だと考えられる。

（ボロン反応度）

事象収束に必要なほう酸水注入系の起動は，事故発生後約 10 分以降であり，これ以降はボロン反応度の印加が出力の抑制に重要な役割を果たす。したがって，長時間領域の格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度の評価指標に与える重要度が高いと考えられる。

（その他）

上述以外に，反応度フィードバック効果として知られている減速材温度反応度は，起動時のボイド反応度やドップラ反応度の影響がほとんどない状態では考慮する必要があるが，本事故シーケンスのような高い出力が継続する事象では評価指標に与える重要度は低い。なお，遅発中性子生成割合，中性子寿命といったパラメータは上記の反応度評価に含まれる。

#### (4) 制御棒反応度効果 [炉心 (核)]

本事故シーケンスでは，原子炉スクラムに失敗する評価を実施することが目的であるため，制御棒反応度や制御棒速度のような制御棒反応度効果は考慮不要である。



#### (5) 崩壊熱 [炉心 (核)]

崩壊熱はプラント停止後の事象進展では主要な熱発生源となるが、本事故シーケンスでは高い出力で臨界状態が維持される。このため、全出力に占める崩壊熱の割合が小さい短時間領域では、評価指標である原子炉圧力や燃料被覆管温度に与える影響はほとんどない。一方、核分裂出力が急速に低下した後の長時間領域では、変化の遅い崩壊熱が原子炉全出力に占める割合が大きく、格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度の評価指標に与える重要度が中程度になると考えられる。

#### (6) 三次元効果 [炉心 (核)]

本事故シーケンスでは、制御棒反応度や制御棒速度のような制御棒反応度効果を考慮しないため、事象進展において高出力で低炉心流量状態となった場合、沸騰二相流における密度波不安定現象（熱水力的要因）とボイド反応度フィードバック効果（核的要因）が結合して中性子束振動（三次元効果）が生じ、評価指標である燃料被覆管温度に影響を与える（SCATコードで評価）可能性がある。

この中性子束振動現象が生じる際には、給水加熱喪失により原子炉出力が上昇するが、このときの軸方向出力分布は下方ピークになると、冷却材はより上流側から沸騰を開始し、炉心平均のボイド率の減少幅を小さめに抑制する。これにより、原子炉出力の上昇は低めに抑制されることになる。しかしながら、原子炉出力の上昇と核熱水力不安定事象による中性子束振動が重畳した場合、評価指標である燃料被覆管温度へ与える影響が大きくなる可能性も考えられる。このため、三次元効果は燃料被覆管温度変化に対して重要度は中程度になると考えられる。

時間平均では炉心全体の挙動としての中性子束振動が、原子炉圧力、

格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度の評価指標に与える影響は、逃がし安全弁開閉による圧力制御と相まって重要度は低いと考えられる。

なお、REDYコードでは、中性子束振動現象を模擬することが困難であるため、中性子束振動が局所的な燃料被覆管温度に与える影響に関しては、米国において中性子束振動の評価実績がある異なる解析コード（TRACコード）による参考解析結果を参照する（添付7参照）。

#### (7) 燃料棒内温度変化 [炉心 (燃料)]

燃料棒内で発生した熱は、燃料棒表面から熱伝達により冷却材に伝わり蒸気となる。燃料棒内の熱移動は、燃料ペレットや燃料被覆管内での熱伝導度、燃料ギャップでの熱伝達率に影響されるが、燃料棒内の出力分布や物性値はこの事象を通じて大きく変わることがなく、どの評価指標に与える重要度も低いと考えられる。

#### (8) 燃料棒表面熱伝達 [炉心 (燃料)]

燃料で発生した熱は、燃料棒表面から単相壁面熱伝達や二相壁面熱伝達により冷却材に伝わり蒸気となる。この速さは、燃料棒表面の熱伝達率にも影響されるが、原子炉スクラム失敗を仮定した事象では平均炉心で見れば沸騰状態が継続しており、熱伝達の速さが評価指標へ与える重要度は低いと考えられる。

#### (9) 沸騰遷移 [炉心 (燃料)]

沸騰遷移が生じるのは原子炉出力が高く炉心流量が低い短時間領域である。沸騰遷移が生じるとドライアウトやリウエット現象が起こるが、

これらの現象は高出力燃料バンドルが対象となる局所的な現象であり、プラント全体の挙動としては、どの評価指標に対しても主要な現象とはならない。ただし、高出力燃料バンドルにおける沸騰遷移現象は、SCATコードで評価している。

(10) 燃料被覆管酸化 [炉心 (燃料)]

(11) 燃料被覆管変形 [炉心 (燃料)]

これらの物理現象については、主蒸気隔離弁の誤閉止による圧力上昇により原子炉出力が一時的に上昇するが、早期の再循環ポンプトリップによる出力抑制効果により、プラント全体の平均応答としてはどの評価指標に対しても影響を与えない。ただし、SCATコードで評価する燃料被覆管温度に関しては、それぞれ重要度を検討する必要がある。

(12) 沸騰・ボイド率変化 [炉心 (熱流動)]

燃料から冷却材に伝えられる熱により、炉心平均ボイド率が増加するが、一方、炉心入口サブクーリングの増加や非常用炉心冷却系（以下「ECCS」という。）の炉心上部への注水等による凝縮が生じると、炉心平均ボイド率は減少する。炉心平均ボイド率は核熱水力計算に使用されるため、どの評価指標に与える重要度も高いと考えられる。なお、本事故シーケンスでは、LOCAとは異なり、炉心は冠水が継続されており、炉心部の二相水位を考慮する必要はない。

(13) 気液分離（水位変化）・対向流 [炉心 (熱流動)]

(14) 気液熱非平衡 [炉心 (熱流動)]

これらの物理現象は、LOCAにおける炉心内水位低下事象を想定し

たものであり、原子炉スクラム失敗を仮定する事象では炉内保有水は十分に保たれ、炉心は冠水が維持されることから、どの評価指標に対しても主要な物理現象とはならない。

(15) 圧力損失 [炉心 (熱流動)]

炉心圧力損失が大きい場合、再循環ポンプトリップ時の炉心流量の低下速度が大きくなり、出力抑制効果に影響する。また、再循環ポンプトリップ後では、炉心圧力損失は自然循環流量に影響する。よって、本件に関しては(17)に含まれるものとする。

(16) 三次元効果 [炉心 (熱流動)]

本事故シーケンスでは、制御棒挿入失敗を仮定していることから、高い出力が長期にわたって継続する。本物理現象は、炉心流量の変化、炉心入口サブクーリングの変化、ECCSによる上部プレナムへの注水等によって、原子炉内での径方向の燃料集合体間流量配分が時間を追って変化する現象も指している。しかしながら、プラント全体としての原子炉出力は炉心平均ボイド率の変化でほぼ決まることが、これまでの多くのREDYコードによる実機試験結果の再現解析から確認されており、さらに、本事故シーケンスでは径方向出力分布の変化は小さく、流量配分による冷却材流量変化への影響は小さいと考えられるため、どの評価指標に与える重要度も低いと考えられる。

また、本事故シーケンスでは、出力が高く炉心流量が低い運転領域を経過する期間があり、この期間に中性子束振動現象((6)参照)及び炉心流量の振動現象(高出力チャンネルでの流量振動現象を含む)が生じる可能性がある。この期間では炉心流量を支配するのは強制循環力又は

自然循環力であり、中性子束振動が炉心流量の振動現象へ及ぼす影響は小さいと考えられるが、核と熱水力現象は相互に関連する事象であることを鑑み、評価指標である燃料被覆管温度に与える重要度を三次元効果 [炉心 (核)] と同じ中程度とし、三次元効果 [炉心 (核)] に含めて検討する。

(17) 冷却材流量変化 [原子炉压力容器 (逃がし安全弁含む)]

再循環ポンプトリップにより炉心流量を低下させることで原子炉出力を抑制するが、冷却材流量変化の速さ (コーストダウン特性) は原子炉出力の抑制の速さに影響する。原子炉圧力は評価指標に対して余裕があるため重要度は低いと考えられるが、短時間領域での評価指標である燃料被覆管温度 (主に、SCATコードのインプットとしての炉心入口流量変化) に与える重要度は高いと考えられる。

本事故シーケンスでは、再循環ポンプトリップ後に自然循環状態で高出力状態が継続する。このため、自然循環流量が原子炉出力変化に与える影響は無視できない。自然循環状態時に燃料被覆管温度が厳しくなる従来型BWRプラントの場合 (主に、SCATコードのインプットとしての炉心入口流量、原子炉出力)、長時間領域での格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度の評価指標に与える重要度は高いと考えられる。

(18) 冷却材放出 (臨界流・差圧流) [原子炉压力容器 (逃がし安全弁含む)]

原子炉圧力が逃がし安全弁の設定値に到達すると逃がし安全弁から蒸気が放出され、圧力上昇を緩和する。短時間領域では、逃がし安全弁から放出される蒸気流量は、原子炉圧力最大値を左右するものであり、原

子炉圧力の評価指標に与える重要度は中程度と考えられるが、燃料被覆管温度の評価指標に与える重要度は低いと考えられる。

一方、長時間領域では、逃がし安全弁から放出される蒸気流量が多いと格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度へ与える重要度が高いと考えられるが、これに伴い原子炉圧力が低下し、早く逃がし安全弁が閉鎖することになることから、総合すると重要度は低いと考えられる。

(19) 沸騰・凝縮・ボイド率変化 [原子炉圧力容器 (逃がし安全弁含む)]

ここで取り扱うべき沸騰・凝縮・ボイド率変化の物理現象は、炉心シェラウド外の状態である。短時間領域の注目パラメータである原子炉圧力及び燃料被覆管温度は炉心内の出力変動に伴うものであり、また長時間領域の注目パラメータである格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度は、原子炉から放出される蒸気量に起因したものである。このため本事故シーケンスでは炉心以外の沸騰・凝縮・ボイド率変化は炉心内の状態変化に直接的な影響はないことから評価指標に与える重要度は低いと考えられる。

(20) 気液分離 (水位変化)・対向流 [原子炉圧力容器 (逃がし安全弁含む)]

(21) 気液熱非平衡 [原子炉圧力容器 (逃がし安全弁含む)]

これらの物理現象については、炉心流量変化に影響する要因は、炉心外領域と炉心内領域におけるマスバランス (圧力バランス) であるため、炉心外領域での気液分離 (水位変化)・対向流、気液熱非平衡が、原子炉出力に与える影響は小さく、どの評価指標に対しても主要な物理現象とはならない。

(22) 圧力損失 [原子炉圧力容器 (逃がし安全弁含む)]

炉心シュラウド外の圧力損失は、(15)の炉心圧力損失と同様に、再循環ポンプトリップ時の流量変化速度、トリップ後の自然循環流量に影響する。よって、本件に関しては、(17)で考慮する。

(23) 構造材との熱伝達 [原子炉圧力容器 (逃がし安全弁含む)]

原子炉スクラム失敗を仮定しているため、原子炉出力はほう酸水注入によって抑制されるまで高い値を維持する。このため、原子炉ドーム部を含む炉心シュラウド外領域の構造材と冷却材間との熱伝達は、どの評価指標に対しても主要な物理現象とはならない。

(24) ECCS注水 (給水系・代替注水設備含む) [原子炉圧力容器 (逃がし安全弁含む)]

本事故シーケンスでは、給水ポンプの停止、予備給水ポンプ等も考慮しており、これらは炉心入口サブクーリングの変化に起因した原子炉内ボイドの変化、原子炉水位の変化に起因した炉心流量の変化となって原子炉出力に影響を及ぼす。また、原子炉水位低下等によりECCSの起動を想定しているため、ECCSの注水量は原子炉水位の上昇及び炉心流量の変化に影響する。また、主蒸気隔離弁が誤閉止して給水加熱器への加熱蒸気が遮断されると、給水温度が低下して原子炉出力上昇につながる。

短時間領域での原子炉圧力の評価指標への影響はないと考えられるが、燃料被覆管温度 (主に、SCATコードのインプットとしての炉心入口エンタルピ)、長時間領域での格納容器圧力及び原子炉格納容器のプ

ール水温度の評価指標に与える重要度は高いと考えられる。

(25) ほう酸水の拡散 [原子炉压力容器 (逃がし安全弁含む)]

過去のほう酸水の拡散に係わる試験により得られている知見から、上部プレナム部から注入されるほう酸水は、炉心流量が小さい場合は一度炉心周辺部を下降した後に炉心に戻るルートを通して拡散する。炉心流量が増加してくると、上記に加え、上部プレナム部から注入されたほう酸水が炉心に直接入ることなく、一度炉心シュラウド外を循環し混合されてから、下方から炉心に入るほう酸水の割合が増えてくる。炉心流量がさらに増加すると全量が炉心流量と共に一度上昇し、炉心シュラウド外を循環し混合されてからダウンカムを下降し下方から炉心に入る。なお、ほう酸水が下部プレナムから注入される従来型BWRプラントの場合は、炉心流量に係らず、常に下方から炉心に入る。原子炉スクラム失敗を仮定した事象では、長期的な事象収束において、ボロン反応度により出力を抑制するためのほう酸水注入系の起動による炉心内のほう酸水拡散は重要な現象である。したがって、長時間領域の格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度の評価指標に与える重要度は高いと考えられる。

なお、REDYコードでは、三次元的な炉心挙動は模擬できないが、試験結果を反映したモデルにしていることで、物理現象に対応している。

(26) 三次元効果 [原子炉压力容器 (逃がし安全弁含む)]

本物理現象は、炉心以外の領域における周方向流量配分を意味しているが、炉心シュラウド外での周方向流量分布、下部プレナムでの周方向



流量分布とも、原子炉内の構造物の配置や、給水スパーージャ等の構造からして、重要な物理現象とはならない。

(27) 冷却材放出 [原子炉格納容器]

本物理現象自体は、原子炉格納容器側から見た逃がし安全弁から放出される蒸気に関わる事象であり、原子炉から見た(18)と同じものである。

(28) 格納容器各領域間の流動 [原子炉格納容器]

逃がし安全弁から原子炉格納容器のプール水に断続的に蒸気が放出される場合でも、原子炉格納容器内の空間部の温度は、保守的に常にプール水温度と同じになると仮定することで、格納容器各領域間の流動は、長時間領域の評価を行う上で重要現象とはならない。

(29) サプレッション・プール冷却 [原子炉格納容器]

本物理現象が短時間領域で評価指標に与える影響はないが、原子炉圧力が逃がし安全弁の設定値に達すると、逃がし安全弁から原子炉格納容器のプール水へ蒸気が放出され、格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度が上昇することになる。残留熱除去系がこの熱を除去することでこれらの上昇は抑制されるものの、長時間領域の格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度の評価指標に与える重要度は高いと考えられる。

(30) 気液界面の熱伝達 [原子炉格納容器]

逃がし安全弁から原子炉格納容器のプール水に断続的に蒸気が放出さ

れる場合でも、原子炉格納容器内の空間部の温度は保守的に常にプール水温度と同じになると仮定することで、気液界面の熱伝達は、長時間領域の評価を行う上で重要現象とはならない。

(31) 構造材との熱伝達及び内部熱伝導 [原子炉格納容器]

長時間領域の評価指標である格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度を厳しめに評価するためには、これらの物理現象は考慮しない方が保守的である。

(32) スプレイ冷却 [原子炉格納容器]

本事故シーケンスでは、評価指標である格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度を厳しめに評価するために、スプレイ冷却は考慮していない。

(33) 放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生 [原子炉格納容器]

本事故シーケンスでは、原子炉が冠水維持されていることから放射線水分解等による水素ガス及び酸素ガス発生は重要な物理現象とはならない。

(34) 格納容器ベント [原子炉格納容器]

本事故シーケンスでは、長時間領域の評価指標である格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度を厳しめに評価するために、格納容器ベントは考慮していない。

表 2-2 炉心損傷防止対策の有効性評価における重要現象のランク

分類	事故シーケンスグループ		原子炉停止機能喪失			
	物理現象	評価指標	短時間領域		長時間領域	
			原子炉 圧力	燃料被覆管温度 REDY	燃料被覆管温度 SCAT*3	格納容 器圧力
炉心 (核)	(1)	核分裂出力	H	H	(H)*4	H
	(2)	出力分布変化	I	L	H	L
	(3)	反応度フィードバック効果 (ボイド, ドップラ, ボロン)	L/I	H/I	(H)*4	M/H
	(4)	制御棒反応度効果	I	I	I	I
	(5)	崩壊熱	I	I	(I)*4	M
	(6)	三次元効果	L	M*5	M*5	L
炉心 (燃料)	(7)	燃料棒内温度変化	L	L	H	L
	(8)	燃料棒表面熱伝達	L	L	H	L
	(9)	沸騰遷移	I	I	H	I
	(10)	燃料被覆管酸化	I	I	L	I
	(11)	燃料被覆管変形	I	I	I	I
炉心 (熱流動)	(12)	沸騰・ボイド率変化	H	H	L	H
	(13)	気液分離(水位変化)・対向流	I	I	I	I
	(14)	気液熱非平衡	I	I	M	I
	(15)	圧力損失	*1	*1	(L)*4	*1
	(16)	三次元効果	L	M*5	M*5	L
原子炉圧 力容器 (逃がし 安全弁含 む)	(17)	冷却材流量変化	L	H	(H)*4	H
	(18)	冷却材放出(臨界流・差圧流)	M	L	(L)*4	L
	(19)	沸騰・凝縮・ボイド率変化	L	L	I	L
	(20)	気液分離(水位変化)・対向流	I	I	I	I
	(21)	気液熱非平衡	I	I	I	I
	(22)	圧力損失	*1	*1	I	*1
	(23)	構造材との熱伝達	I	I	I	I
	(24)	ECCS注水 (給水系・代替注水設備含む)	I	H	(H)*4	H
	(25)	ほう酸水の拡散	I	I	I	H
	(26)	三次元効果	I	I	I	I
原子炉格 納容器	(27)	冷却材放出	*2	*2	*2	*2
	(28)	格納容器各領域間の流動	I	I	I	I
	(29)	サブプレッション・プール冷却	I	I	I	H
	(30)	気液界面の熱伝達	I	I	I	I
	(31)	構造材との熱伝達及び内部熱伝導	I	I	I	I
	(32)	スプレイ冷却	I	I	I	I
	(33)	放射線水分解等による水素ガス・ 酸素ガス発生	I	I	I	I
	(34)	格納容器ベント	I	I	I	I

\*1 No. 17 で評価 \*2 No. 18 と同一物理現象 \*3 事故シーケンスグループに対して抽出されたものであるが、SCATコードで評価する物理事象であり、ここでは参考記載。

\*4 SCATコードで評価する場合に、REDYコードの結果を引き継ぐ。

\*5 三次元効果の模擬はREDY/SCATコード体系では困難であるため、米国において中性子束振動の評価実績のあるTRACコードを使用して参考的に解析して参照する。

### 3. 解析モデルについて

#### 3.1 コード概要

REDYコードは、制御棒の異常な引き抜きを除く運転時の異常な過渡変化解析及び冷却材流量の喪失の事故解析を評価するコードである。炉心、原子炉压力容器、原子炉压力容器内部構造物、原子炉冷却材再循環系、主蒸気管、タービン系、原子炉格納容器等プラント全体を模擬している。炉心核特性は6群の遅発中性子を考慮した一点近似動特性方程式を適用し、中性子エネルギーは1群としている。反応度モデルには制御棒、ボイド、ドップラ、スクラム及びボロンの各反応度を考慮している。また、燃料棒の熱的動特性及び冷却材の熱水力的挙動を計算する。制御系としては、圧力制御系、給水制御系及び再循環流量制御系を模擬し、また、安全保護系も模擬している。

本コードの入力は、原子炉出力、炉心流量等の初期条件、原子炉、主蒸気管等のデータ、核データ、燃料棒データ、原子炉格納容器データ、各種制御系データ等であり、出力として、原子炉出力、原子炉圧力、炉心流量、原子炉水位、格納容器圧力、原子炉格納容器のプール水温度等の時間変化が求められる。

#### 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3-1に示す。

表 3-1 重要現象に対する解析モデル

分類	重要現象	必要な解析モデル
炉心 (核)	核分裂出力	核特性モデル
	出力分布変化(*1)	核特性モデル
	反応度フィードバック効果	反応度モデル(*2)
	崩壊熱	崩壊熱モデル(*2)
炉心 (燃料)	燃料棒内温度変化(*1)	燃料棒モデル
	燃料棒表面熱伝達(*1)	
炉心 (熱流動)	沸騰・ボイド率変化	炉心ボイドモデル
	圧力損失(*1)	
原子炉圧力容器 (逃がし安全弁含む)	冷却材流量変化	再循環系モデル
	冷却材放出(臨界流・差圧流)	逃がし安全弁モデル
	沸騰・凝縮・ボイド率変化(*1)	再循環系モデル
	圧力損失(*1)	
	ECCS注水 (給水系・代替注水設備含む)	給水系モデル
	ほう酸水の拡散	ほう酸水拡散モデル (*3)
原子炉格納容器	冷却材放出	逃がし安全弁モデル
	サプレッション・プール冷却	格納容器モデル(*3)

(注 1) 重要現象の欄で、(\*1)をつけた現象は、2章でどの評価指標に対してもランクLとされた現象、又は他の現象に含むとした現象である。ここでは、見易さを考えて参考までに再掲している。

(注 2) 必要な解析モデルの欄で、(\*2)をつけたモデルは原子炉停止機能喪失事象のために拡充されたモデル、(\*3)をつけたモデルは、現行の原子炉設置変更許可申請解析では特に必要とされなかったモデルである。

### 3.3 解析モデル<sup>(1) (2) (3)</sup>

REDYコードは、3.2 節で述べた重要現象を評価するための解析モデルを有しており、妥当な数値解法をもつことはこれまでの実機プラントの起動試験等でも確認され、従来の原子炉設置変更許可申請にも適用されている設計解析コードである。

各モデルの説明を以下に示す。なお、ここで説明している解析モデルは、表 3-1 に示した重要現象に分類された物理現象を評価するための解析モデルと、新適用モデルを中心に記述している。

#### (1) プラント動特性コード解析モデル（全体）

図 3-1 に、プラント動特性コード解析モデルの全体図を示す。

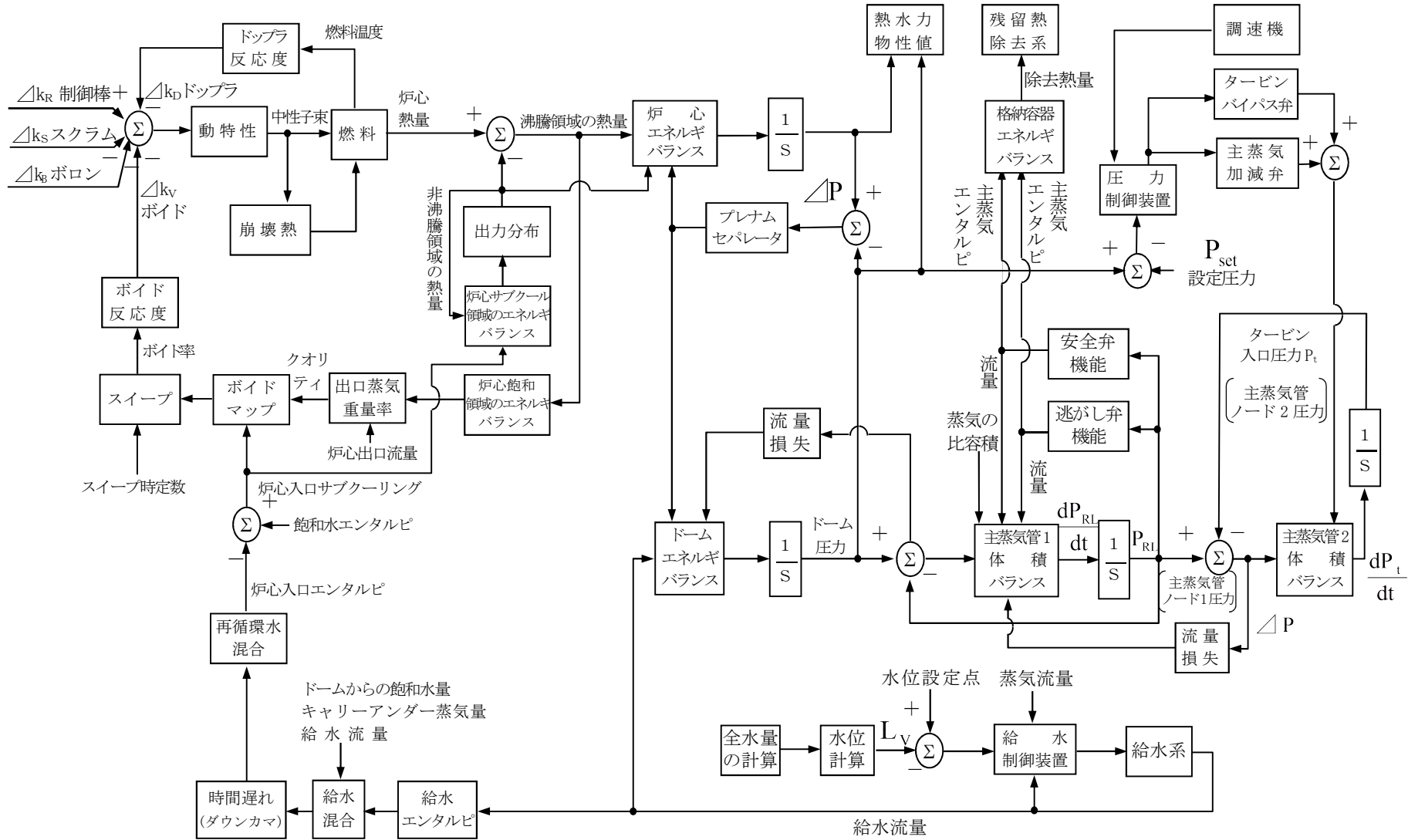


図 3-1 プラント動特性コード解析モデル (ABWR)

## (2) 核特性モデル

一点近似動特性モデルを用いて、中性子動特性挙動を評価する。

入力として「(3) 反応度モデル」から得られる各種反応度を用いる。

- a. 中性子エネルギーは1群とする。
- b. 中性子束は時間と空間で変数分離可能であり、中性子束の空間分布は一定である。
- c. 反応度フィードバックは、平均出力の代表燃料チャンネルに基づいて計算する。

一点近似動特性モデルは次の式で表される。

$$\frac{dn}{dt} = \left( \frac{\delta_k - \beta}{\ell^*} \right) n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell^*} n - \lambda_i C_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

- $n$  : 中性子数  
 $\delta_k$  : 反応度  
 $\beta$  : 全遅発中性子割合  
 $\lambda_i$  : 各遅発中性子先行核崩壊定数  
 $C_i$  : 各遅発中性子先行核密度  
 $\beta_i$  : 各遅発中性子割合  
 $\ell^*$  : 即発中性子生成時間

ここで

$$\tau_0 = \frac{\ell^*}{\beta}, \quad \Delta k_N = \frac{\delta_k}{\beta}, \quad f_i = \frac{\beta_i}{\beta}, \quad y_i = \tau_0 C_i$$

とおき、前述の式に代入すると、REDYコードでモデル化している次式



が得られる。

$$\tau_0 \frac{dn}{dt} = (\Delta k_N - 1)n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i y_i$$

$$\frac{dy_i}{dt} = f_i n - \lambda_i y_i \quad (i=1,2,\dots,6)$$

- $\tau_0$  : 即発中性子炉周期
- $\Delta k_N$  : 正味の反応度 (反応度総和)
- $f_i$  : 全遅発中性子割合に対する各遅発中性子割合
- $y_i$  : 遅発中性子群

### (3) 反応度モデル

5種類の反応度（制御棒反応度，ボイド反応度，ドップラ反応度，スクラム反応度，ボロン反応度）が，「(2) 核特性モデル」で示した動特性方程式の入力となる。

制御棒反応度，スクラム反応度は外部入力として与えられる。ボイド反応度は「(6) 炉心ボイドモデル」より得られる炉心平均ボイド率の関数として，ドップラ反応度は「(5) 燃料棒モデル」より得られる燃料平均温度の関数としてテーブルで与えられる。ボロン反応度は，「(12) ほう酸水拡散モデル」より得られる。

正味の反応度  $\Delta K_N$  は次式で表される。

$$\Delta K_N = \Delta K_R - \Delta K_V - \Delta K_D - \Delta K_S - \Delta K_B$$

- $\Delta K_R$  : 制御棒反応度
- $\Delta K_V$  : ボイド反応度
- $\Delta K_D$  : ドップラ反応度

$\Delta K_S$  : スクラム反応度

$\Delta K_B$  : ボロン反応度

#### (4) 崩壊熱モデル

原子炉出力の全てが核分裂によって直接生じるわけではない。出力の約94%は核分裂から直接生じるが、残りの約6%は燃料内に生成された放射性分裂生成物の崩壊によるものである。原子炉の全出力はj群の崩壊熱を仮定すると次式で表わされる。

$$n_f = \left\{ \left( 1 - \sum_{i=1}^j K_{di} \right) + \sum_{i=1}^j \frac{K_{di}}{T_{di}S+1} \right\} n$$

$n_f$  : 原子炉全出力

$K_{di}$  : 崩壊熱生成割合 (i群)

$T_{di}$  : 崩壊熱等価時定数 (i群)

$n$  : 核分裂出力, 中性子個数

図3-2に11群及び4群モデルの時間変化をANSI/ANS-5.1-1979で表した曲線と比較して示す。

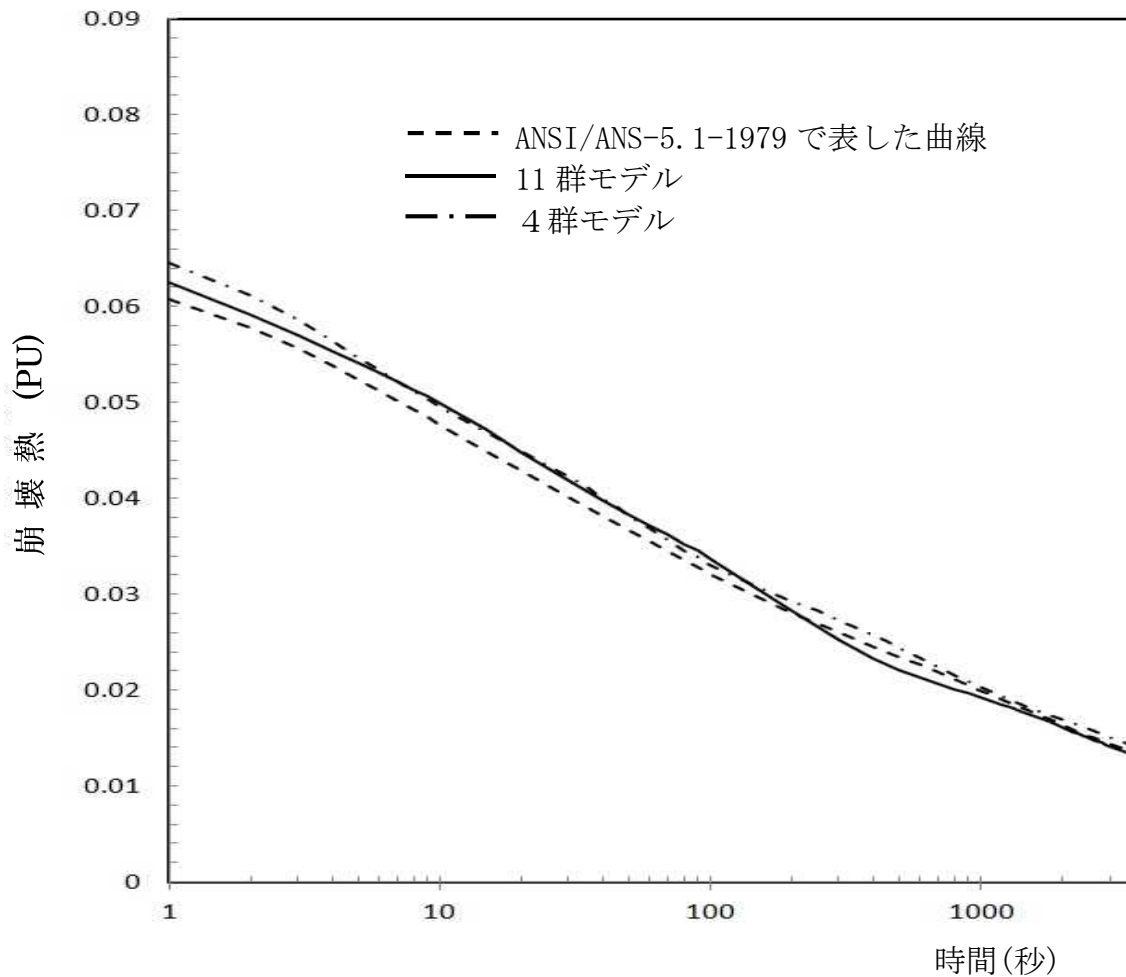


図 3-2 崩壊熱特性の比較

(5) 燃料棒モデル

原子炉内の平均的な燃料棒で代表させ、図 3-3 に示すようにその燃料棒表面を同心円状に分割し、それぞれのノードに熱伝導方程式を適用して、燃料温度、平均表面熱流束を計算する。入力としての生成熱（核分裂による即発分と崩壊熱による遅発分を考慮）は、「(2) 核特性モデル」より得られる中性子束と、「(4) 崩壊熱モデル」より得られる崩壊熱により算出している。

- a. 燃料ペレット 4 ノード，燃料被覆管 1 ノード及びギャップ部 1 ノードとする。

- b. 温度分布の空間依存性は半径方向のみとする。
- c. 燃料の熱伝導度はノードの平均温度の関数とし、ノード内では一定とする。
- d. 燃料の密度及び比熱は温度によらず一定とする。
- e. 各ノードの温度はそのノードについて体積平均したものとする。
- f. 燃料被覆管での熱発生は無視する。

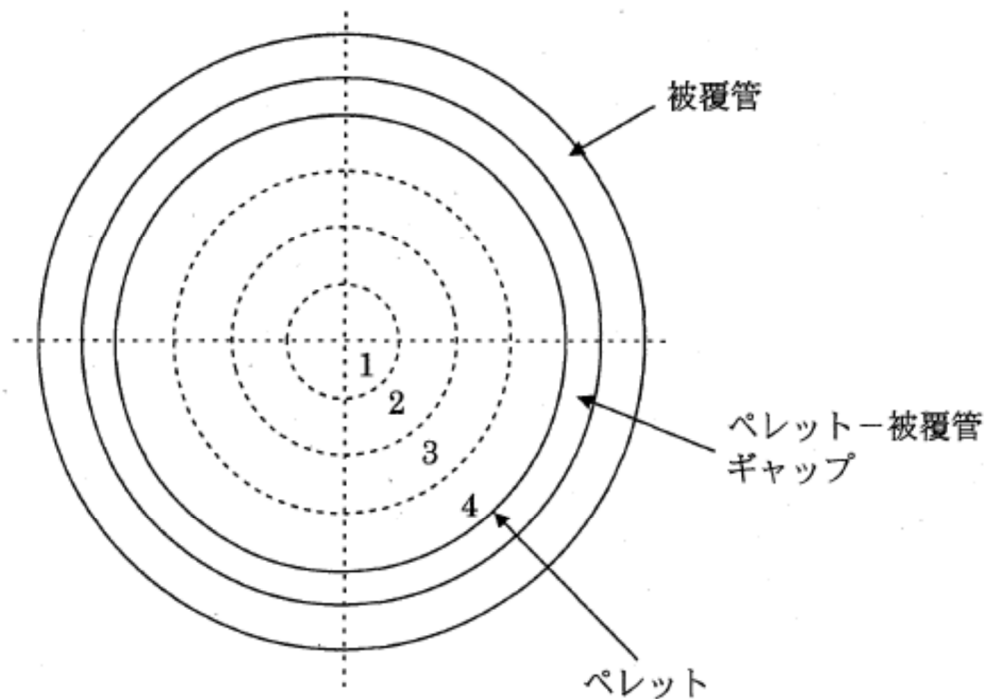


図 3-3 燃料棒モデル

ここで、燃料棒中心  $R_h (=0)$  で、径方向の温度  $T$  の変化は、以下の式で与えられ、

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_h} = 0$$

となる。

燃料棒と燃料被覆管のギャップ間の熱流束  $q_G$  は、燃料ギャップ実効面積  $A_g$ 、燃料ギャップコンダクタンス  $h_g$ 、ペレット表面の温度  $T_{f0}$  及び燃料被覆管内面の温度  $T_{Ci}$  の温度から、

$$q_G = A_g h_g (T_{f0} - T_{Ci})$$

となる。

燃料被覆管と冷却材の境界で、燃料棒被覆管熱伝導率  $K_{CL}$ 、燃料表面平均熱伝達率  $h_B$ 、燃料棒被覆管外側表面温度  $T_{C0}$  及び炉心の飽和温度  $T_{B1}$  とすると、

$$(-K_{CL} \frac{\partial T}{\partial r})_{r=R_r} = h_B (T_{C0} - T_{B1})$$

となる。

なお、 $i$  番目のノードにおける熱収支は次のようになる。

$$\rho_f V_i C_{pf} \frac{\partial T_i}{\partial t} = (\text{流入熱量})_i - (\text{流出熱量})_i + (\text{発生熱量})_i$$

燃料棒内での熱輸送は、熱伝導が支配的であるため、 $q/A_r$  はフーリエの法則で表せる。

$$\frac{q}{A_r} = -K \frac{\partial T}{\partial r} \quad \text{又は} \quad q = -KA_r \frac{\partial T}{\partial r}$$

$r$  : 径方向長さ

$q$  : 単位時間当たりの通過熱量

$K$  : 熱伝導率

$A_r$  : 燃料棒表面積

$T$  : 温度

$V_i$  : 各ノードの体積

$\rho_f$  : 燃料棒密度

$C_{pf}$  : 燃料棒比熱

(6) 炉心ボイドモデル

炉心部はサブクール領域と飽和領域に分けて質量及びエネルギーバランスを解き、炉心出口クオリティ、炉心部圧力の変化を求める。

入力としては「(5) 燃料棒モデル」から得られる熱量、「(9) 再循環系モデル」等から得られる炉心流量、炉心入口エンタルピを用いる。

- a. 飽和水、飽和蒸気は熱平衡状態にあるとする。
- b. サブクール領域の流体の圧縮性は無視する。
- c. 炉心バイパス流（チャンネルボックス外を流れる冷却水）は炉心入口でエンタルピを保ったまま出口に達するものとする。

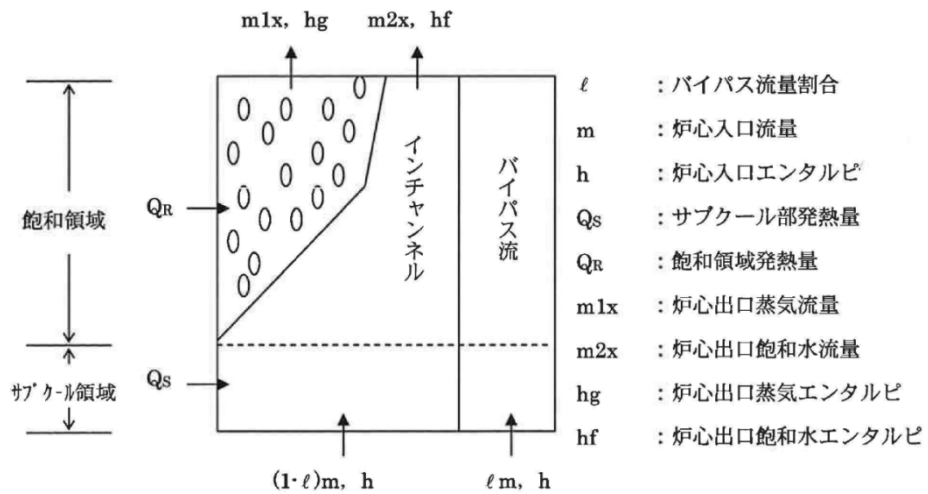


図 3-4 炉心部モデル図

上記モデルから得られる炉心出口クオリティを基に、過渡状態の炉心平均ボイド率を求める。

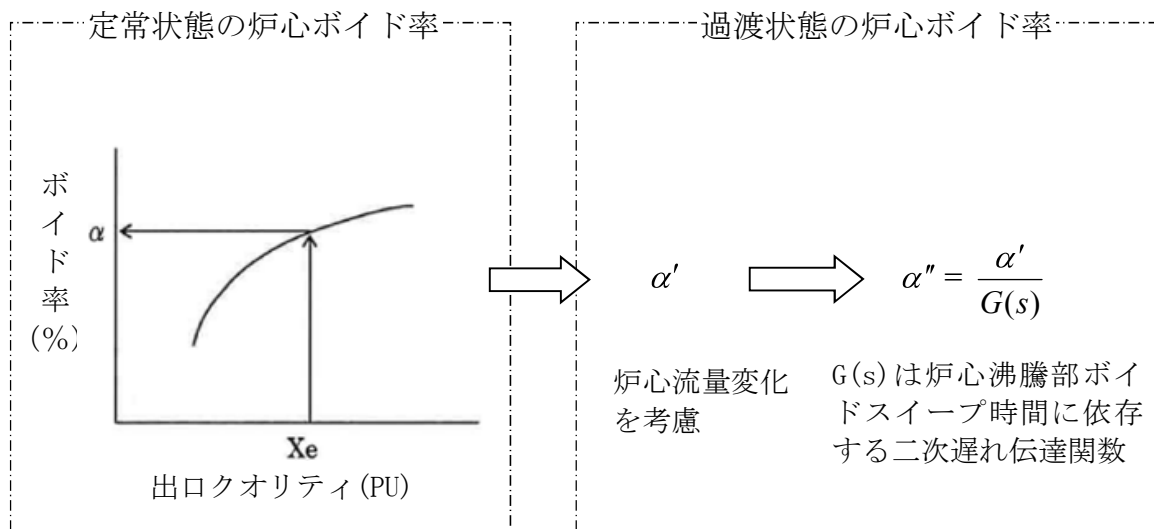
- a. ボイドモデルは炉心を一点に近似した集中定数モデルとする。
- b. 定常状態の炉心平均ボイド率  $\alpha$  を出口クオリティ等の関数として求める。

- c. 過渡変動に伴う炉心平均ボイド率は、炉心流量 $m$ の変化を考慮した補正後のボイド率 ( $\alpha'$ ) として次式で求める。

$$\alpha' = \alpha - (A + Bm + Cm^2) \quad (A, B, C \text{ は定数})$$

さらに、これに二次遅れ伝達関数で模擬しボイド率 ( $\alpha''$ ) とする。

- d. 炉心圧力変化を考慮する。



## (7) 蒸気ドーム部モデル

ベッセル圧力ノードについてのセパレータ流量，キャリアアンダー流量を考慮して質量及びエネルギーバランスを解いてその圧力変化を求め，ドーム部圧力と主蒸気管圧力から主蒸気流量を計算する。

入力として「(11) 給水系モデル」からの給水流量，またセパレータモデルからセパレータ流量，キャリアアンダー流量を用いる。

- 給水とバルク水の混合には時間遅れはないものとする。
- バルク領域の液体は圧力が上昇過程にあり，キャリアアンダー質量がゼロの時を除いて飽和状態にあるものとする。
- セパレータ内の液体は常に飽和状態にあるものとする。

## (8) 主蒸気管モデル

主蒸気管部のベッセル出口から主蒸気隔離弁までと、主蒸気隔離弁から主蒸気加減弁までの2ノードに分割する。主蒸気管内では蒸発、凝縮のいずれも生じないと仮定して質量及び体積バランスを解き、各ノードの圧力変化を求める。入力として「(7) 蒸気ドーム部モデル」で得られる主蒸気流量、圧力制御系モデルから得られるタービンバイパス弁開度や主蒸気加減弁開度を用い、また、主蒸気隔離弁が閉止する場合は主蒸気隔離弁閉止特性を外部入力として与える。

- a. 逃がし安全弁（逃がし弁機能）は設定圧に達すると開放し始める。
- b. 主蒸気加減弁及びタービンバイパス弁は圧力制御系モデルで制御される。

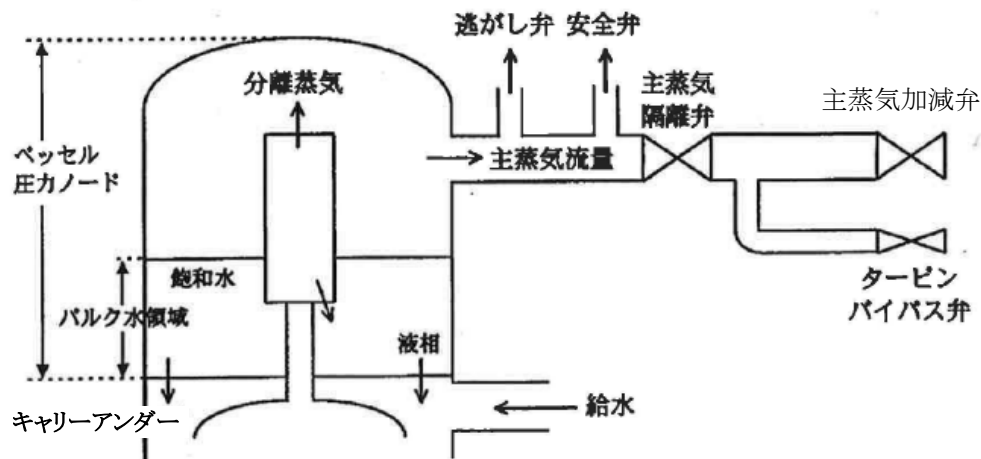


図 3-5 主蒸気管モデル

ここで、逃がし安全弁が設置されている主蒸気管部の圧力の変化率を表わす式は、主蒸気管中では凝縮も蒸発も起こらないと仮定したときの質量と体積バランスの式から得られ、主蒸気隔離弁流量は弁開度変化に伴う時間関数で与えられる。なお、逃がし安全弁流量は「(10) 逃がし安全弁(逃



がし弁機能)モデル」から求められる。

$$\dot{P}_{RL} = \dot{P}_2 - \frac{1}{V_{LI}} \frac{dP}{d\rho_{gR}} (m_{13} - m_{RV} - m_{ISO})$$

$P_{RL}$  : 主蒸気管圧力

$P_2$  : 原子炉ドーム圧力

$V_{LI}$  : 主蒸気管体積

$\rho_{gR}$  : 密度

$m_{13}$  : 原子炉出口流量

$m_{RV}$  : 逃がし安全弁 (逃がし弁機能) 流量

$m_{ISO}$  : 主蒸気隔離弁流量

#### (9) 再循環系モデル

ダウンコマ、下部プレナム、再循環ポンプ、炉心部、セパレータ等原子炉一巡の圧力損失係数、再循環ポンプ吐出圧力、炉心シュラウド内外のヘッド差及び慣性に従って再循環流量を計算する。また、ポンプ慣性とトルクよりポンプの運動方程式を解き、ポンプ回転速度を計算する。再循環流量とポンプ回転速度は、ポンプ流量に依存する吐出圧特性及び負荷トルク特性を通じて相互に関連する。また、再循環ポンプの回転速度は、再循環流量制御系モデルから得られる速度要求信号が本モデルのインプットとなる。

#### (10) 逃がし安全弁 (逃がし弁機能) モデル

逃がし安全弁は原子炉圧力容器内の圧力が設定点を超えた時に作動し、原子炉内圧力が高くなることを防ぐ。その位置は主蒸気隔離弁よりも原子炉側に位置する。逃がし安全弁は、開く圧力と再び閉じる圧力とは異なる。

る。代表的な逃がし安全弁特性を図 3-6 に示す。

定格の逃がし安全弁容量（逃がし弁機能動作時）の合計  $m_{RC}$  は、初期圧における個々の逃がし安全弁容量から得られる。

$$m_{RC} = \sum_i N_{RVi} C_{RV}(P_{RL,0}) \quad (\text{全ての開いている設定圧グループの総和})$$

弁を流れる蒸気流量は次式で表わされる。

$$\dot{m}_{RV} = (m_{RC} - m_{RU}) / \tau_{RV}$$

$$m_{RV} = \begin{cases} m_{RU} \left( \frac{P_{RL}}{P_{RL,0}} \right) & : P_{RL} > P_{RSi} \text{ か、} P_{RL} > P_{RRi} \text{ かつ } \dot{P}_{RL} < 0 \text{ のとき} \\ 0 & : \text{上記以外} \end{cases}$$

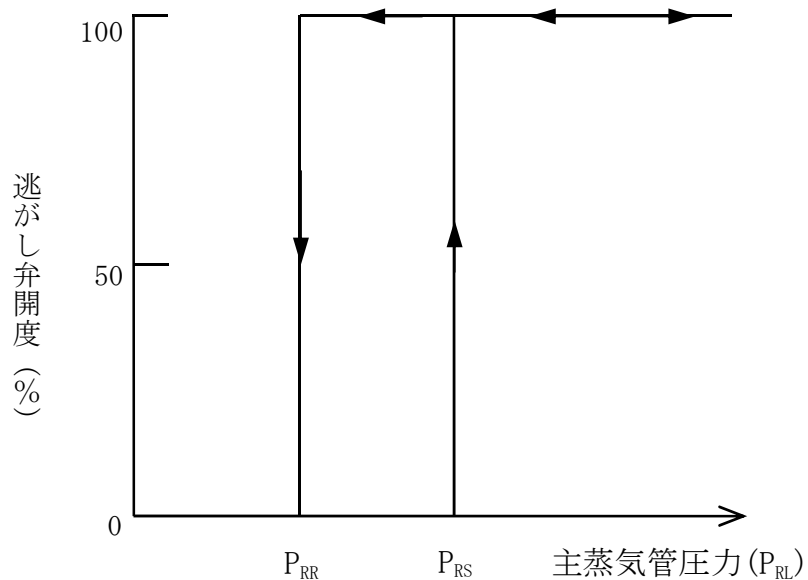


図 3-6 逃がし安全弁開度特性

$m_{RC}$	: 逃がし安全弁流量
$N_{RV}$	: 逃がし安全弁（逃がし弁機能）個数
$C_{RV}(P_{RL,0})$	: 圧力 $P_{RL,0}$ における個々の逃がし安全弁容量（逃がし弁機能）
$m_{RU}$	: 補正前の逃がし安全弁流量
$\tau_{RV}$	: 逃がし安全弁時定数
$m_{RV}$	: 補正後の逃がし安全弁流量
$P_{RL}$	: 主蒸気管ノード 1 圧力
$P_{RL,0}$	: 主蒸気管ノード 1 初期圧力
$P_{RSi}$	: 各逃がし安全弁吹出し圧力
$P_{RRi}$	: 各逃がし安全弁吹止まり圧力

### (11) 給水系モデル

給水流量は図 3-7 に示すように、給水制御系と給水ポンプを模擬し、原子炉水位、主蒸気流量及び給水流量の三要素の変化から求める。給水エンタルピは、「(8) 主蒸気管モデル」から得られる主蒸気流量の変化から遅れ要素を考慮して図 3-8 のように求める方法と、ヒートバランスによる給復水系各部の給水エンタルピと配管体積及び給水流量から算出し、一次遅れを考慮して図 3-9 に示す方法のいずれかを選択できる。主蒸気流量の遮断時には、どちらも給水エンタルピの低下を一次遅れと輸送遅れで模擬している点では同等であるが、図 3-8 のモデルでは給水加熱器を一つで模擬し、図 3-9 のモデルでは多段で模擬している点異なる。

また、ECCS はインターロックに従って設計流量が原子炉に注水され、そのエンタルピは、注入源が復水貯蔵タンクの場合は復水貯蔵タンク水温に基づくエンタルピ、原子炉格納容器のプール水の場合は「(13) 格納容器モデル」のエンタルピとなる。

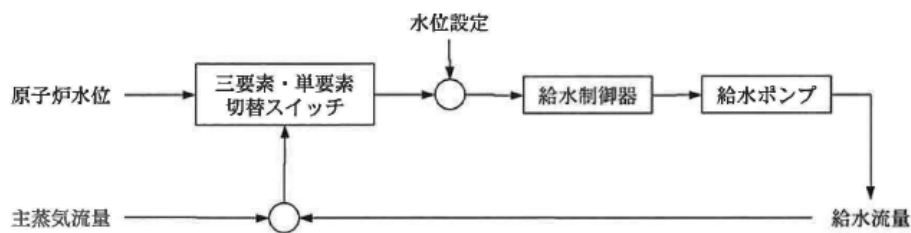


図 3-7 給水系モデル

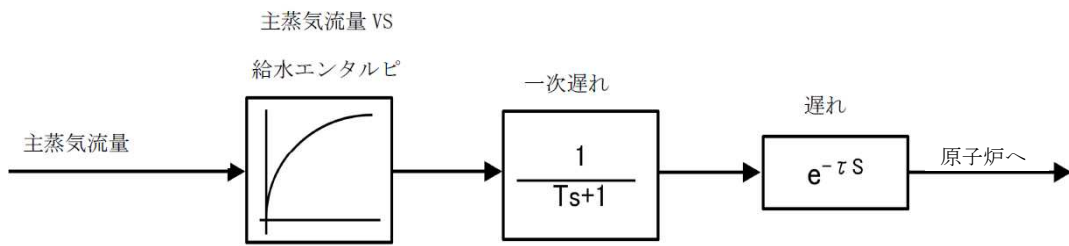


図 3-8 給水エンタルピモデル (1)

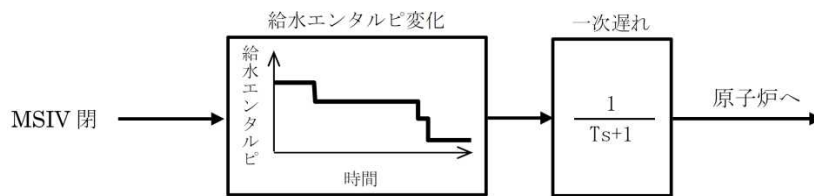


図 3-9 給水エンタルピモデル (2)

## (12) ほう酸水拡散モデル

ABWRでは、ほう酸水は、ほう酸水貯蔵タンクからほう酸水注入系配管と高圧炉心注水系（以下「HPCF」という。）配管を経由して、HPCFスパーチャから炉心上部に注入される。一方、従来型BWRでは、ほう酸水は、ほう酸水貯蔵タンクから配管を経由してスタンドパイプから炉心下部に注入される。

これらのモデルでは次の仮定を設ける。

- a. 起動判定遅れ時間、配管でのほう酸水の輸送遅れ時間を考慮する。
- b. ボロン反応度は、有効炉心（有効燃料下端から上端まで）の単位体積あたりに存在するボロンの重量（炉心内ボロン濃度）に比例する。
- c. 炉心に到達するほう酸水は、炉心上部に注入されるABWRでは炉心流量には依存せず、時間の一次関数で増加するものとする。一方炉心下部に注入される従来型BWRでは炉心流量依存（ミキシング効率）

で変わるものとし、これを図 3-10 に示す。

ボロンが炉心下部に到達した後の炉心内のボロン反応度は次式で表わされる。

$$\Delta K_B(t) = \frac{\int_0^t m_B(t) \eta_B dt}{M_0 K_{\text{mass}}} \times \frac{\rho_C}{\rho_{C0}} 10^6 \left( \frac{\Delta K_{B\text{-hot}}}{C_{B\text{-hot}}} \right)$$

なお、 $\frac{\int_0^t m_B(t) \eta_B dt}{M_0 K_{\text{mass}}} \times \frac{\rho_C}{\rho_{C0}} 10^6$  が炉心のボロン濃度  $C_B$  である。

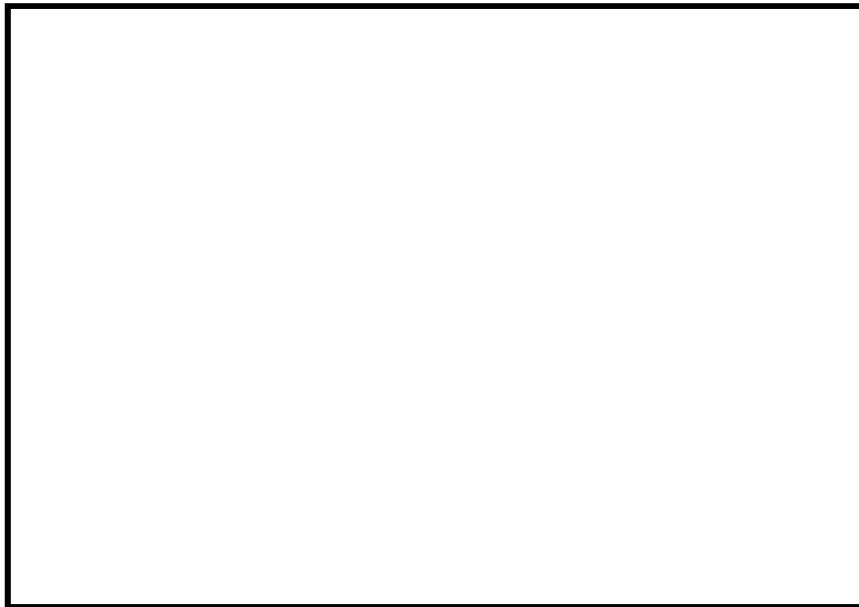


図3-10 ボロンミキシング効率（従来型BWR）

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。

- $\Delta K_B$  : ボロン反応度
- $m_B$  : 下部プレナムに注入されるボロン流量
- $\eta_B$  : 下部プレナムでのボロンミキシング効率
- $M_0$  : 初期冷却材合計量
- $\rho_C$  : 炉心内冷却材の平均密度
- $\rho_{C0}$  : 初期炉心内冷却材の密度
- $K_{\text{mass}}$  : 原子炉水位変化を考慮した冷却材量の変化比

(主蒸気管や逃がし安全弁から蒸気が流出することにより、初期冷却材合計量  $M_0$  が時間を追って変化することを考慮した無次元ファクタであり、ボロンが濃縮・希釈される影響を表す)

- $\Delta K_{B\text{-hot}}$  : 初期状態から高温停止までに必要なボロン反応度の合計
- $C_{B\text{-hot}}$  : 高温停止を達成するために必要なボロン濃度
- $C_B$  : 炉心内ボロン濃度

### (13) 格納容器モデル

図 3-11 に格納容器モデルを示す。ここでは以下のことを仮定する。

ドライウエルとウェットウエル（サプレッション・プール（以下「S/P」という。）含む）は、空間的に一体と仮定する。これは、本モデルが原子炉スクラム失敗を仮定した事象の解析で使用されることを前提としており、原子炉スクラム失敗を仮定した事象の場合、原子炉の圧力上昇によって開いた逃がし安全弁から、蒸気が S/P の水中に放出されウェットウエルの圧力がドライウエルの圧力上昇に先行し、真空破壊装置が早期に開き、開いたままになるためである。

- a. 原子炉格納容器からの放熱による熱喪失は保守的に考慮しない。
- b. 原子炉格納容器内の空間部の温度は、保守的に常にプール水温度と同じとする。
- c. 原子炉格納容器内の空間部は、保守的に常に水蒸気で飽和しているものとする。

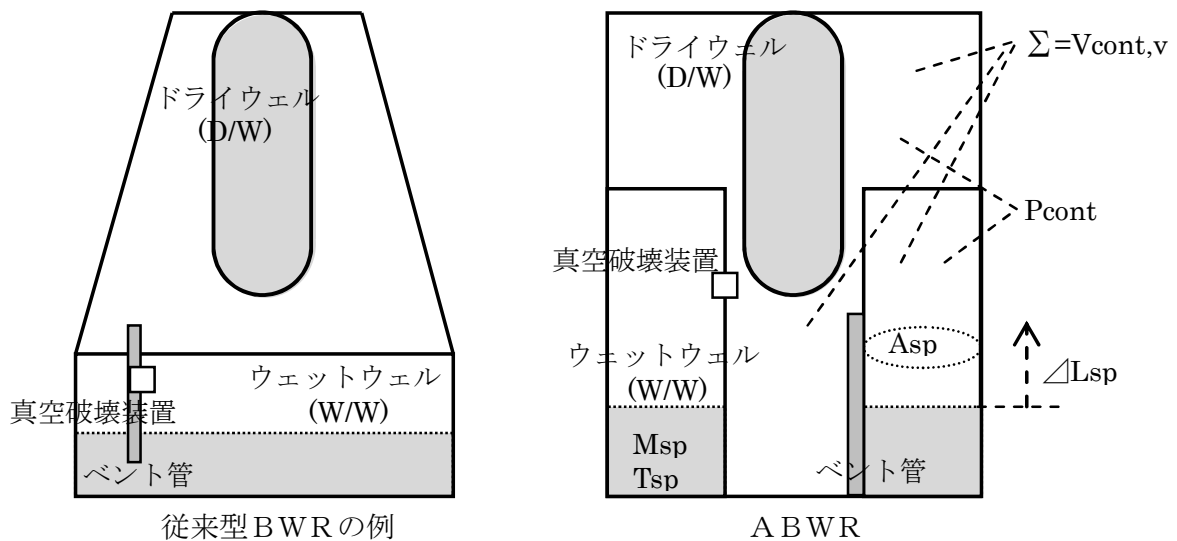


図 3-11 格納容器モデル

原子炉格納容器の質量バランスとエネルギーバランスは次の式のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{M}_{sp} = & m_{RV} + m_{SV} + m_{RCICG} + m_{HPCIG} \\ & - (m_{RCIC} + m_{HPCS} + m_{HPCI} + m_{HPCF}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{sp} = & (m_{RV} + m_{SV}) h_{g2} + m_{RCICG} h_{RCICG} + m_{HPCIG} h_{HPCIG} \\ & - (m_{RCIC} + m_{HPCS} + m_{HPCI} + m_{HPCF}) h_{pool} - Q_{ex} (T_{sp} - T_{cool}) \end{aligned} \quad (2)$$

格納容器圧力  $P_{cont}$  は、ガスと蒸気に分圧の合計に等しいので



$$P_{\text{cont}} = P_{\text{cont,a}} + P_{\text{cont,s}} \quad (3)$$

ここでガスの分圧はボイルシャルルの法則から

$$P_{\text{cont,a}} = n_m R (T_{\text{sp}} + 273) / V_{\text{cont,v}} \quad (4)$$

で計算できる。

$P_{\text{cont,s}}$  は,

$$T_{\text{sp}} = (E_{\text{sp}} / M_{\text{sp}}) / C \quad (5)$$

であるので、仮定b. から、 $P_{\text{cont,s}}$  は次式のように求まる。

$$P_{\text{cont,s}} = f_1(T_{\text{sp}}) \quad : \text{蒸気表より} \quad (6)$$

よって、(3)、(4)、(6)から、格納容器圧力  $P_{\text{cont}}$  が求まる。

なお、格納容器モデルは R E D Y コードの一部として組み込んでいる。

この理由は次の通りである。

原子炉スクラム失敗を仮定した本事故シーケンスでは、逃がし安全弁から放出された蒸気は原子炉格納容器のプール水中に放出され、これを受けてプール水のエンタルピは次第に大きくなる。一方、残留熱除去系によるプール水の除熱はプール水のエンタルピ上昇を抑制し、ボロンの反応度抑制が支配的になってからはプール水のエンタルピを低下させる。

本事故シーケンスでは、この原子炉格納容器のプール水が E C C S により原子炉に注入され、炉内水の温度低下に寄与することから、このような原子炉内保有水と原子炉格納容器のプール水とが連携して巡回する物理現象を解く必要があった。

$M_{\text{sp}}$  : S / P 保有水量

$m_{\text{RV}}$  : 逃がし弁流量

$m_{\text{SV}}$  : 安全弁流量

$m_{RCICG}$	: S/Pに排出される原子炉隔離時冷却系（以下「RCIC」という。）タービン排気流量
$m_{HPCIG}$	: S/Pに排出される高圧炉心注水系（以下「HPCI」という。）タービン排気流量
$m_{RCIC}$	: RCIC流量
$m_{HPCS}$	: 高圧炉心スプレイ系（以下「HPCS」という。）流量
$m_{HPCI}$	: HPCI流量
$m_{HPCF}$	: HPCF流量
$E_{sp}$	: 原子炉格納容器内の水と蒸気の保有エネルギー
$h_{g2}$	: 逃がし安全弁から排出される蒸気エンタルピ
$h_{HPCIG}$	: S/Pに排出されるHPCIタービン排気エンタルピ
$h_{RCICG}$	: S/Pに排出されるRCICタービン排気エンタルピ
$h_{pool}$	: S/P水エンタルピ
$Q_{ex}$	: 残留熱除去系等の熱除去割合
$T_{sp}$	: S/P水温度
$T_{cool}$	: 残留熱除去系熱交換後の二次側温度
$P_{cont}$	: 格納容器圧力
$P_{cont,a}$	: 格納容器圧力 空気分圧
$P_{cont,s}$	: 格納容器圧力 蒸気分圧
$C$	: S/P水の比熱
$n_m$	: モル数
$R$	: 気体定数
$V_{cont,v}$	: 原子炉格納容器の空間体積（S/Pの水が占める部分を除く）

### 3.4 入出力

REDYコードの主要な入出力パラメータを図 3-12 に示す。REDYコードのインプットデータは以下のとおり構成される。

#### (1) 前処理コードからREDYコードへのインプット

(核データ)

- ① ボイド反応度
- ② ドップラ反応度
- ③ ボロン反応度
- ④ その他の動特性パラメータ

(燃料物性データ)

- ① 炉心平均ギャップ熱伝達係数

(熱水力データ)

- ① 炉心圧損係数
- ② ボイドマップ

#### (2) 前処理コードを用いないインプット

(原子炉幾何形状)

- ① 原子炉，原子炉内部構造物，主蒸気管等の寸法

(炉心仕様)

- ② 燃料棒に関するデータ（外径，内径，熱伝導度，比熱等）
- ③ 出力分布，蒸気表等の熱水力関係データ

(機器・設備仕様)

- ④ 各種の弁の特性

⑤ 再循環ポンプ等のデータ

⑥ ほう酸水注入系に関するデータ

(制御系仕様)

⑦ 各種の制御系に関するデータ

(格納容器形状)

⑧ S/P水温度，ドライウェル空間容積等の原子炉格納容器に関するデータ

(初期運転条件)

⑨ 運転条件データ（原子炉出力，主蒸気流量，炉心流量，原子炉圧力等）

(外乱条件)

⑩ 外乱条件（過渡変化起因条件等）

(3) REDYコードのアウトプットその1

プラント動特性解析を実施し，以下のアウトプットデータを得る。

① 中性子束

② 平均表面熱流束

③ 主蒸気流量

④ タービン蒸気流量

⑤ 給水流量

⑥ 炉心流量

⑦ 再循環ポンプ流量

⑧ 原子炉圧力

⑨ 原子炉水位

⑩ 逃がし安全弁流量

- ⑪ タービンバイパス弁流量
- ⑫ 炉心入口エンタルピ
- ⑬ 炉心平均ボイド率
- ⑭ 格納容器圧力
- ⑮ 原子炉格納容器のプール水温度

(4) REDYコードのアウトプットその2

SCATコードへ以下のデータを渡すことにより，燃料被覆管温度評価を実施する。

- ① 炉心入口流量
- ② 出力
- ③ 炉心圧力
- ④ 炉心入口エンタルピ

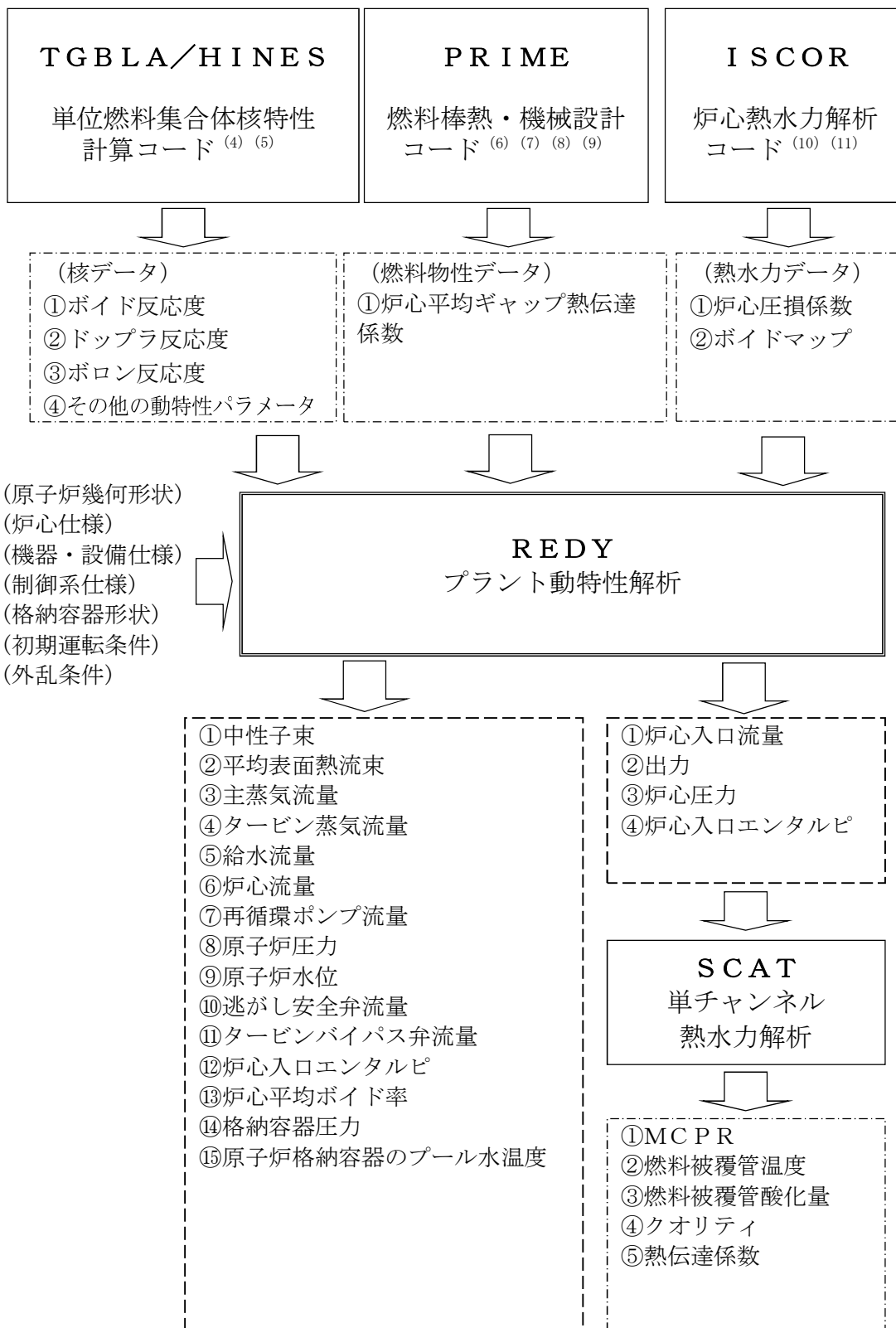


図 3-12 REDYコードの主要な入出力

## 4. 妥当性確認

### 4.1 重要現象に対する妥当性確認方法

2章で重要現象に分類された物理現象の妥当性確認方法を表4-1の評価マトリックスに示す。REDYコードは、運転時の異常な過渡変化におけるプラント全体の挙動を評価する解析コードであり、実機プラントの起動試験（以下「実機試験」という。）の結果との比較によっても妥当性確認が行われているが、本資料ではこれを含めて原子炉スクラム失敗を仮定した評価に着目して妥当性を確認する。

以下の各節にて適宜参照する国内ABWRに対する実機試験結果とREDYコード（REDY Ver. 2）による解析結果との比較を初めに列挙しておく。ただし、必要に応じて従来型BWRの実機試験結果とREDYコード（REDY Ver. 1）による解析結果との比較も併用している。

これらの実機試験解析では、初装荷燃料炉心（BOC-1）の核定数やボイドマップ、実機試験の結果から得られた各種の機器・弁特性（開度特性やポンプ慣性含む）、制御ロジックで使用するデータに実機セット値等を使用している点が、原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止での解析条件とは異なる。しかしながら、これらの違いがパラメータの変化の大きい原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止解析に与える影響は無視できる。また、主蒸気隔離弁が初期に閉鎖することから圧力制御系は評価結果に影響を与えず、給水流量制御系の動作も、本評価解析のように給水ポンプトリップや予備機が起動（その後ランアウト流量制限がかかる）する場合には期待されない。再循環流量制御系に関しては、実機試験は手動モードであるが本事象では自動としている。これは、手動モードにすると、出力が高く維持され放出蒸気が多く原子炉水位低で早期に再循環ポンプがトリップし、結果として出力が小さく評価されるためであ

る。

図 4-1 インターナルポンプ 3 台トリップ時の過渡変化

図 4-2 発電機負荷遮断時の過渡変化

図 4-3 主蒸気隔離弁全閉時の過渡変化

図 4-4 給水ポンプトリップ予備機不起動時の過渡変化

図 4-5 再循環流量制御系速度設定点変更試験

図 4-6 給水制御系水位設定点変更試験

図 4-7 圧力制御系圧力設定点変更試験



表 4-1 重要現象に対する妥当性確認方法（評価マトリックス）

分類	重要現象		計算モデル	妥当性確認 (着目パラメータ)
炉心 (核)	核分裂出力		核特性モデル	図 4-1, 図 4-4～図 4-7 (中性子束変化)
	反応度フィードバック 効果		反応度モデル (ボイド・ドップラ)	
			反応度モデル (ボロン)	図 4-26～図 4-33
	崩壊熱		崩壊熱モデル	図 4-8
炉心 (熱流動)	沸騰・ボイド率変化		炉心ボイドモデル	図 4-1, 図 4-3 図 4-5～図 4-7 (中性子束, 水位変化) 図 4-9～図 4-16
原子炉圧力 容器 (逃がし安 全弁含む)	冷却材 流量変 化	コーストダ ウン特性	再循環系モデル	図 4-1～図 4-2 (炉心流量変化)
		自然循環流 量		図 4-2, 図 4-17, 図 4-18 (炉心流量)
	冷却材放出 (臨界流・差圧流)		逃がし安全弁モデル	図 4-3 (逃がし安全弁流量)
	ECCS注水 (給水系・代替注水設 備含む)		給水系モデル	図 4-4, 図 4-6 (給水流量変化時の中性子 束) 図 4-19～図 4-21
	ほう酸水の拡散		ほう酸水拡散モデル	図 4-22～図 4-33
原子炉格納 容器	サプレッション・プー ル冷却		格納容器モデル	基礎的な物理法則を適用 したモデルであるため式 確認とした。

(1) 実機インターナルポンプ 3 台トリップ試験

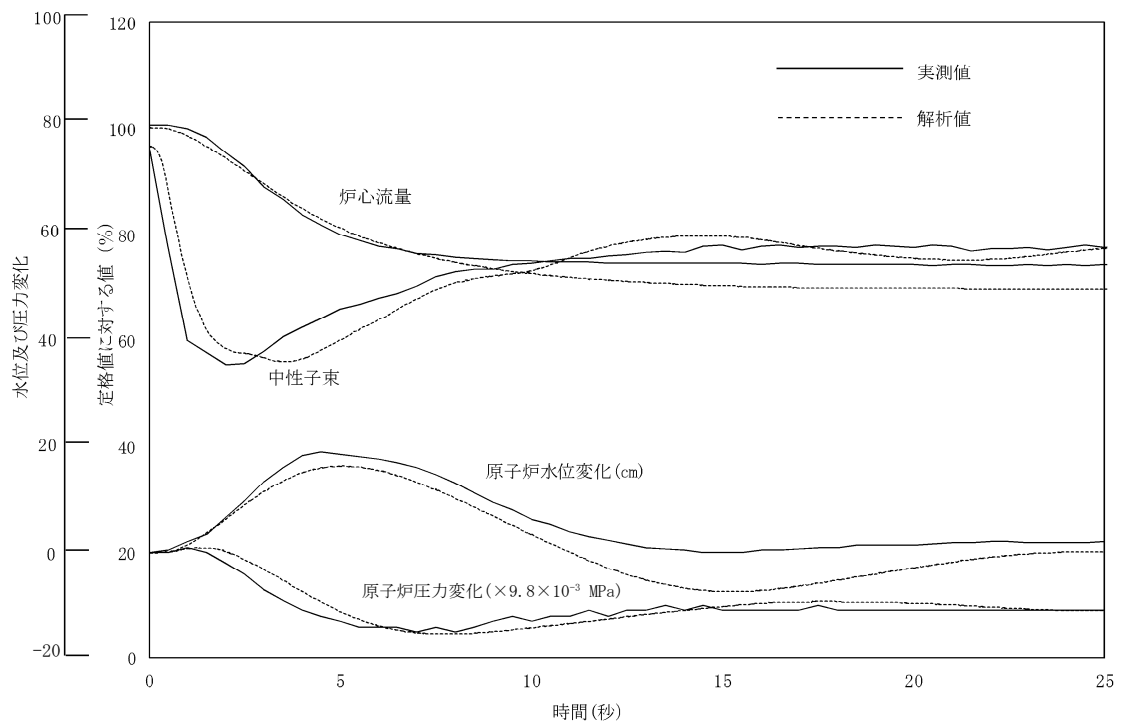


図 4-1 インターナルポンプ 3 台トリップ時の過渡変化

a. 実機試験概要

定格出力／定格炉心流量試験点において、常用高圧母線の故障等の発生を模擬し、常用高圧母線に接続するインターナルポンプを 3 台同時にトリップさせている。

b. 実機試験結果の挙動

インターナルポンプ 3 台トリップにより炉心流量が急減し、再循環系が手動モードであることから、流量は回復することなく、約 70% で整定する。炉心流量の低下により中性子束も低下するが、この間プラントはスクラムしないため運転は継続している。水位は一時的に約 20cm 上昇するが、給水制御系により通常水位に制御される。

c. 実機試験結果との比較

REDYコードの解析結果は、炉心流量、中性子束、原子炉圧力及び原子炉水位とも実機挙動の変化傾向とはどの時点でも一致している。なお、原子炉水位は過渡的に実機との変化幅の差が大きくなっているが、プラント状態が整定しつつある25秒付近ではその差は小さくなってきている。

## (2) 実機発電機負荷遮断試験

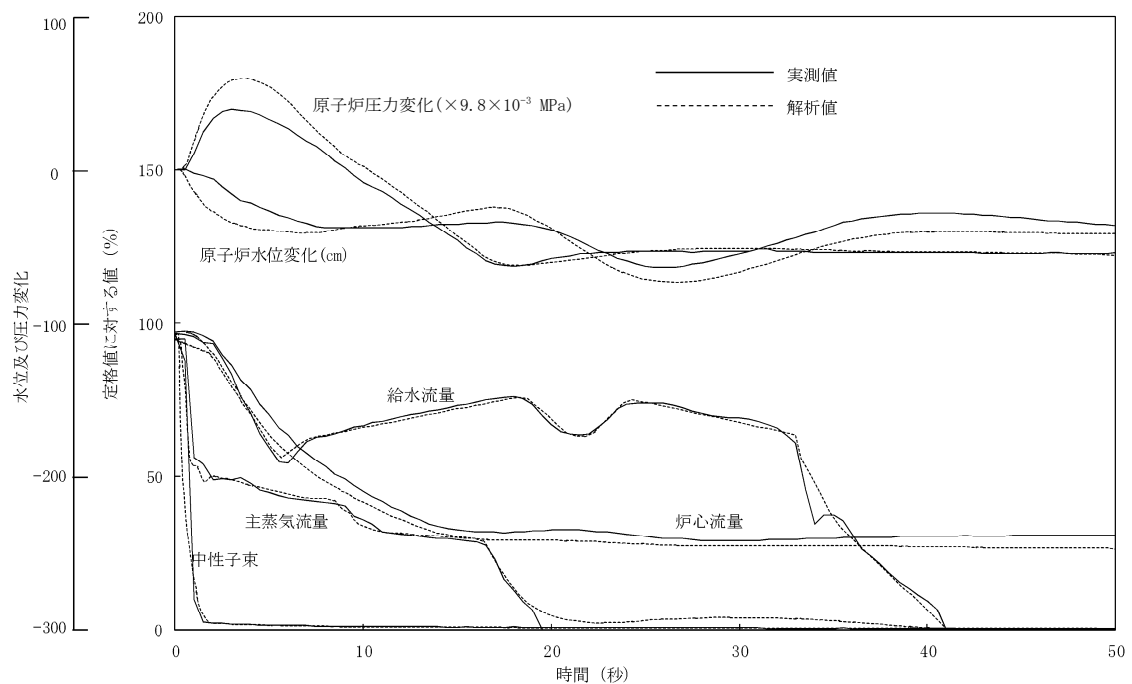


図 4-2 発電機負荷遮断時の過渡変化

### a. 実機試験概要

定格出力／定格炉心流量試験点において，送電系統の故障等により，負荷が急激に遮断された場合を模擬し，発電機負荷遮断を行っている。

### b. 実機試験結果の挙動

発電機負荷遮断信号により，主蒸気加減弁の急閉，タービンバイパス弁の急開が生じ，原子炉は直ちにスクラムしている。スクラムすることにより中性子束は急激に減少してほぼゼロとなる。なお，図には示していないが，バイパス弁容量が定格蒸気流量の 33%であるため，圧力が上昇し逃がし安全弁が 3 弁開放している。

### c. 実機試験結果との比較

REDYコードの解析結果は，中性子束，主蒸気流量，原子炉圧力及び原子炉水位とも実機試験と同様な変化となっている。原子炉圧力は解析の

方がやや高めとなっており、解析結果が保守的な評価を与えている。なお、本事象においては、給水ポンプにトリップ、予備機起動、ランアウト流量制限等が生じており、過渡的に給水制御指令信号から切り離される。こうした条件下でも実機試験の給水流量挙動を模擬するため、起動停止の流量変化がある部分では解析で得られる流量に補正をかけて再現している。

### (3) 実機主蒸気隔離弁全閉試験

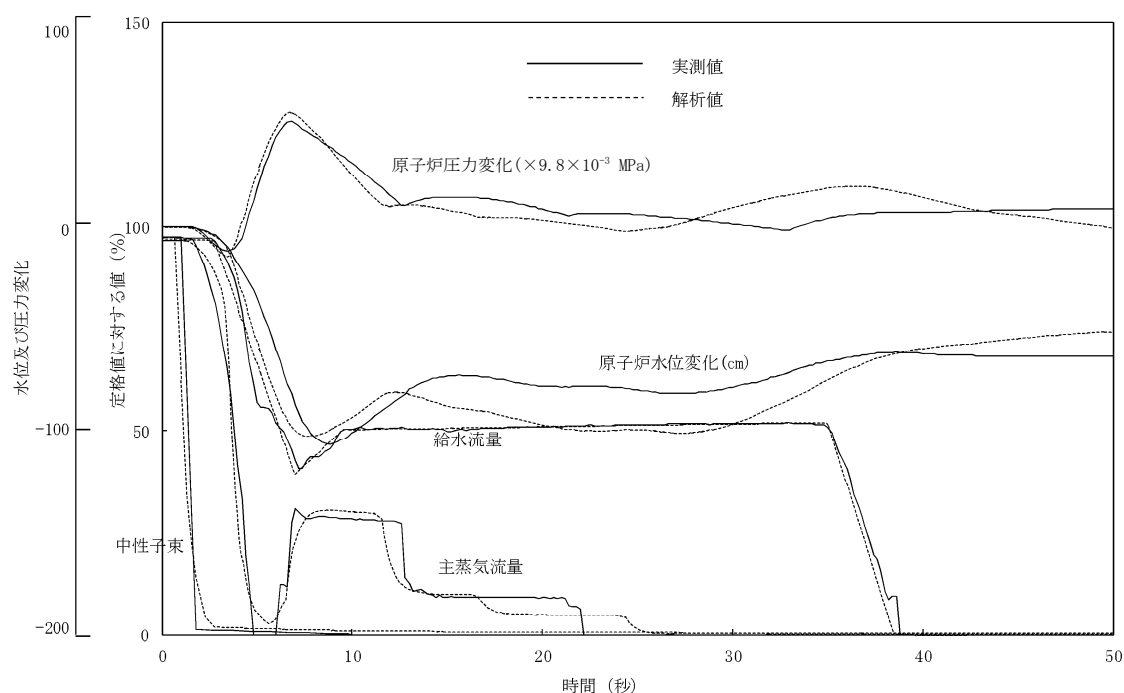


図 4-3 主蒸気隔離弁全閉時の過渡変化

#### a. 実機試験概要

定格出力／定格炉心流量試験点において，原子炉水位，主蒸気流量等の原子炉系の異常，あるいは運転員の誤操作等により主蒸気隔離弁が全閉することを模擬している。

#### b. 実機試験結果の挙動

主蒸気隔離弁全閉により直ちに原子炉はスクラムし，主蒸気流量はゼロに，中性子束もほぼゼロになる。原子炉圧力は約 0.51MPa 上昇しているが，逃がし安全弁が 6 弁開放することにより圧力上昇が抑えられている。

#### c. 実機試験結果との比較

REDYコードの解析結果は，中性子束，主蒸気流量及び原子炉圧力とも実機の増減方向を良く模擬しており，その変化幅の差も小さい。

なお，本事象においては，事象発生直後から給水ポンプにトリップ，予

備機起動，ランアウト流量制限等が生じ，過渡的に給水制御指令信号から切り離されている。こうした条件下で実機試験の給水流量挙動を模擬するため，解析における給水流量変化を入力としている。

#### (4) 実機給水ポンプトリップ予備機不起動試験

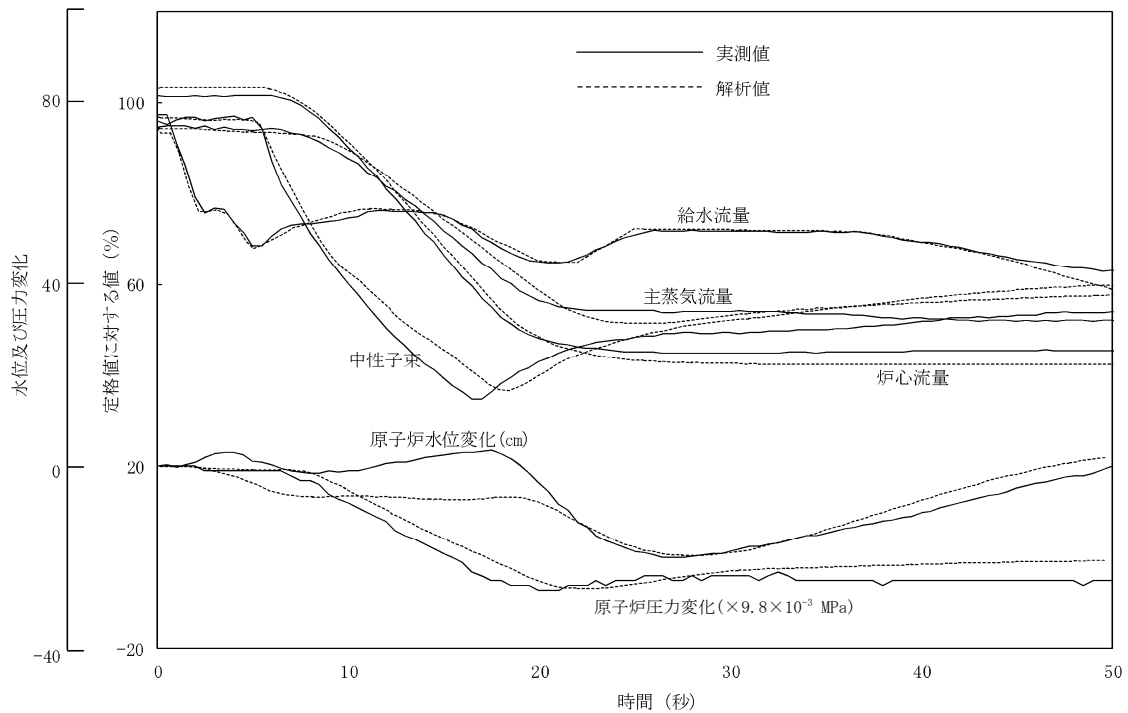


図 4-4 給水ポンプトリップ予備機不起動時の過渡変化

##### a. 実機試験概要

定格出力／定格炉心流量試験点において、給復水系ポンプがトリップし、予備機が自動起動しなかった場合を模擬した。なお、水位低下を抑えるために再循環ポンプをランバックさせることで出力を低下させ、運転継続が図られている。

##### b. 実機試験結果の挙動

タービン駆動給水ポンプの1台がトリップし、予備のモータ駆動給水ポンプが起動しないため、給水流量が低下するが、インターナルポンプを自動ランバックさせ出力を低下させることで水位低下を抑えている。原子炉水位は約20cm低下した後に回復傾向となり、運転継続している。

##### c. 実機試験結果との比較

REDYコードの解析結果は、中性子束、主蒸気流量及び原子炉圧力と



も良く実機と一致している。原子炉水位は、解析の方の低下が速いが、最低水位及びその後の回復傾向は良く一致している。なお、解析における給水流量変化は、給水ポンプにトリップ及びランアウト状態が生じ、過渡的に給水制御指令信号から切り離されているため、実機に合わせた給水流量変化を入力している。

(5) 実機再循環流量制御系速度設定点変更試験

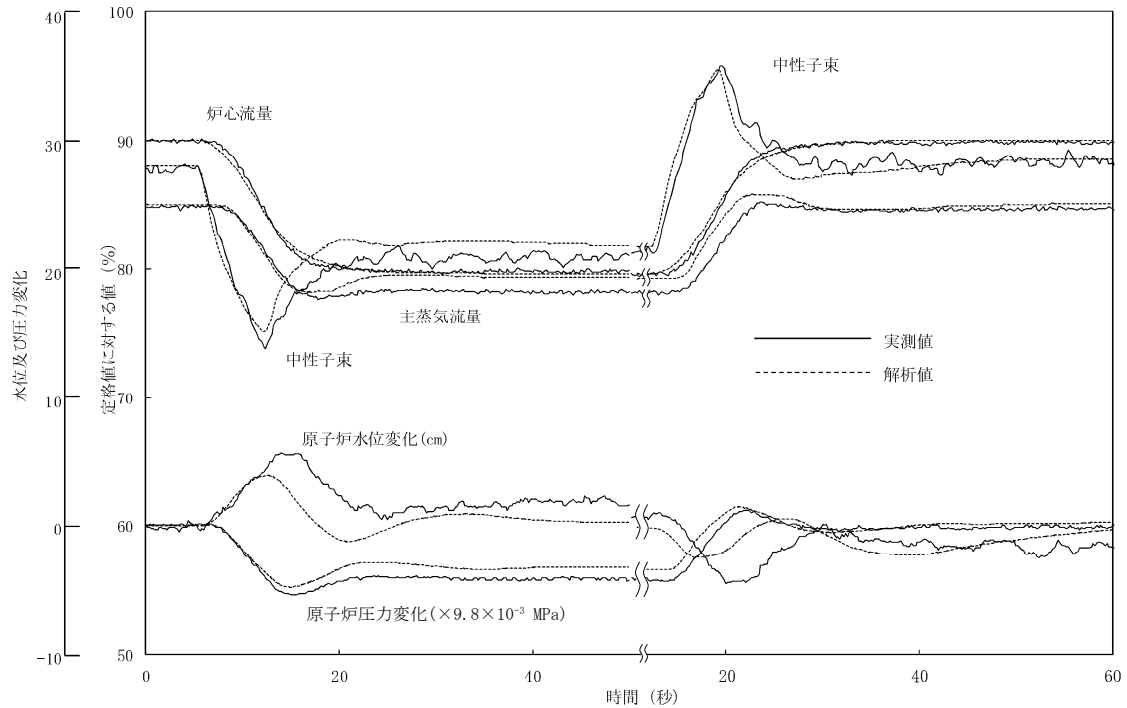


図 4-5 再循環流量制御系速度設定点変更試験  
(定格出力：±10%設定点変更)

a. 実機試験概要

90%出力/90%炉心流量試験点において、再循環流量制御系の再循環ポンプ速度設定を-10%、+10%ステップ状に変化させている。

b. 実機試験結果の挙動

炉心流量の-10%の変化に対して、中性子束は低下して過渡的にアンダースhootした後、炉心流量の整定に伴い一定となる。原子炉水位、原子炉圧力等のパラメータも過渡的に変化するがその後安定状態となっている。炉心流量+10%も同様である。

c. 実機試験結果との比較

再循環流量を±10%変化させた例である。炉心流量の増減により中性子束は急激に変化しているが、炉心流量の整定に伴い安定に整定している。

REDYコードの解析結果は、実機試験結果と良く一致している。

## (6) 実機給水制御系水位設定点変更試験

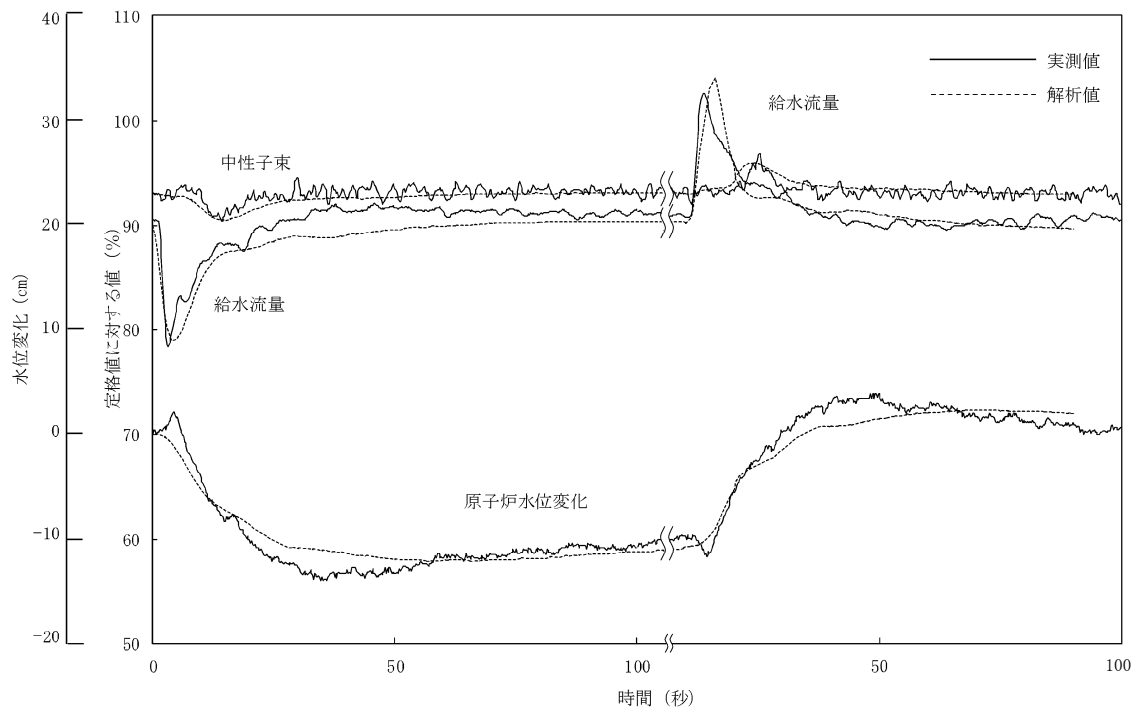


図 4-6 給水制御系水位設定点変更試験  
(定格出力：±10cm 設定点変更)

### a. 実機試験概要

90%出力/90%炉心流量試験点において、給水制御系の水位設定値を-10cm、+10cm ステップ状に変化させている。

### b. 実機試験結果の挙動

水位設定値の-10cm 変更に対して、給水流量が減少して原子炉水位が低下する。その後目標水位に達すると各パラメータは一定となる。水位設定値+10cm 変更も同様である。

### c. 実機試験結果との比較

原子炉水位を±10cm 変化させた例であり、REDYコードの解析結果は、実機試験結果と良く一致している。

## (7) 実機圧力制御系圧力設定点変更試験

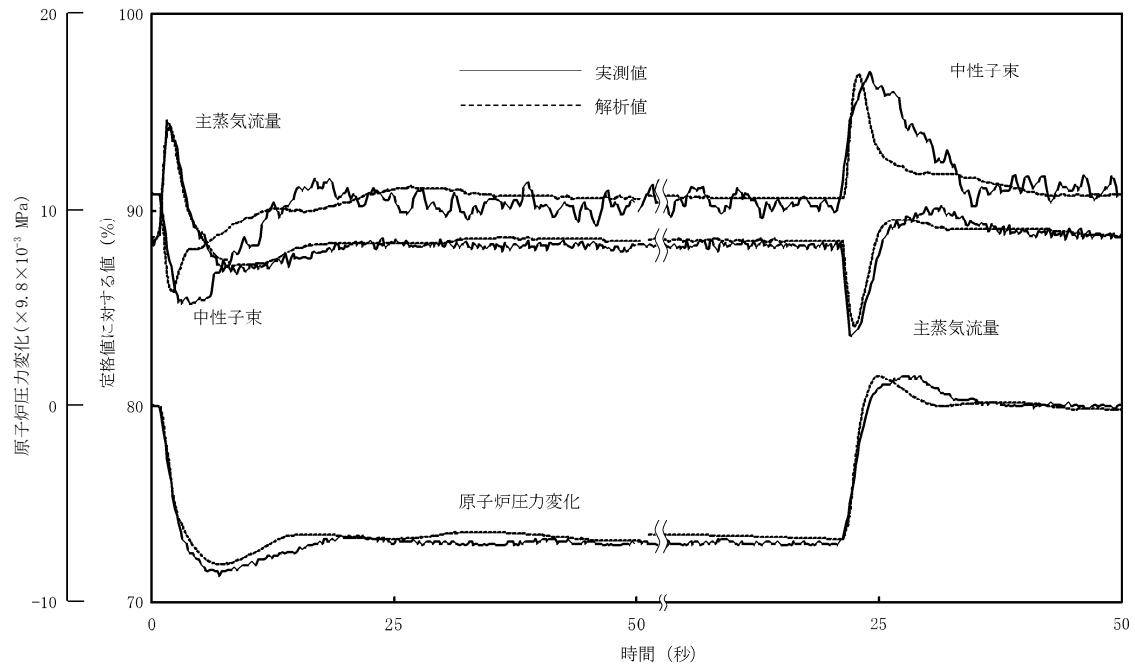


図 4-7 圧力制御系圧力設定点変更試験  
(定格出力：±0.069MPa 設定点変更)

### a. 実機試験概要

90%出力/90%炉心流量試験点において、圧力制御系の圧力設定値を－0.069MPa、+0.069MPa ステップ状に変化させている。

### b. 実機試験結果の挙動

原子炉圧力の－0.069MPa の変化に対して、主蒸気流量、中性子束は過渡的に変化した後、原子炉圧力の整定に伴い一定となる。原子炉圧力+0.069MPa も同様である。

### c. 実機試験結果との比較

原子炉圧力を±0.069MPa 変化させた例であり、REDYコードの解析結果は、実機試験結果と良く一致している。

## 4.2 炉心（核）における重要現象の妥当性確認

炉心（核）に対する重要現象は、核分裂出力、反応度フィードバック効果及び崩壊熱であり、RE DYコードでは、これらを評価するモデルとして、

- ・核特性モデル（一点近似動特性モデル）
- ・反応度モデル（ボイド、ドップラ及びボロン）
- ・崩壊熱モデル

を採用している。

### 4.2.1 核特性モデルと反応度モデル（ボイド、ドップラ）の妥当性確認

#### (1) 実機試験結果との比較による妥当性確認

RE DYコードの核特性モデルは一点近似動特性モデルを採用しており、方程式自体は机上又は実験解析で検証されている公知のものである。実機の原子力発電プラントに、この一点近似動特性モデルを適用した場合、正しい核定数及び適切な反応度フィードバックが与えられた条件下において、実機試験の中性子束応答を良く模擬できることは、これまで国内外での多数の実機試験との比較で確認されている。この妥当性確認は核特性単独モデルではできず、核特性モデル、反応度モデルに加え他の熱水力モデル等との総合効果として確認される。

核特性モデルの妥当性を確認することが目的であるため、ここで引用する実機試験結果は、原子炉がスクラムしない場合の以下の事象が参照対象となる。

図 4-1 インターナルポンプ 3 台トリップ時の過渡変化

図 4-4 給水ポンプトリップ予備機不起動時の過渡変化

図 4-5 再循環流量制御系速度設定点変更試験

図 4-6 給水制御系水位設定点変更試験

図 4-7 圧力制御系圧力設定点変更試験

本事故シーケンスで作動する再循環ポンプトリップ時の炉心流量急減による炉心内ボイド率増加に伴う出力抑制模擬能力は図 4-1, 図 4-5 から, 給水流量変化 (ECCS 注水) から生じる炉心入口サブクーリング変化に伴う炉心内ボイド率増減に伴う出力変化の模擬能力は図 4-4, 図 4-6 から, 圧力変更に対する出力変動模擬能力は図 4-7 からその妥当性が確認できる。

## (2) 反応度モデル (ボイド, ドップラ) の妥当性確認

申請解析における R E D Y コードの反応度フィードバックは, 単位燃料集合体核特性計算コードによる評価から求められた反応度係数に不確かさ等を考慮し, 本事故シーケンスにおける全ての解析時間を通して同一値の保守因子として動的ボイド係数 1.25, 動的ドップラ係数 0.9 を掛けて評価している。これは, 本事故シーケンスの初期における現象 (圧力上昇によりボイドが減少することによる出力上昇) が支配的であるためである。しかしながら, 本事故シーケンスは, 事象進展に伴ってプラント状態が大きく変化するため, 本資料でこの妥当性を確認する。手法としては, 原子炉内の物理現象が主な評価対象となる短時間領域をプラント挙動に従ってさらに三つのサブ時間領域に細分割し (添付 4 参照), それぞれの領域での反応度フィードバック (ボイド, ドップラ) の不確かさを求め, サブ時間領域ごとの不確かさを事象進展に伴って変更可能な機能を R E D Y コードに追加して行う。

サブ短時間領域ごとの動的ボイド係数, 動的ドップラ係数のそれぞれに求めた不確かさ (下限値・ノミナル値・上限値の組み合わせ) を添付 5 に

示す。

#### 4.2.2 反応度モデル（ボロン）の妥当性確認

実機試験からは確認できない反応度フィードバックモデルのうち、ボロン反応度に関しては、後述する「4.4.6 ほう酸水拡散モデルの妥当性確認」でそのモデルの妥当性確認を実施している（図 4-26～図 4-33）。このモデルでは、反応度抑制に寄与する炉心内のボロン濃度変化を計算し、この濃度にインプット定数としての、高温停止に必要な「ボロン反応度／ボロン濃度（ボロン反応度添加率）」を乗じてボロン反応度に換算している。なお、ボロン反応度添加率に関する妥当性確認結果を添付 6 に示す。

高温停止に必要なボロン反応度は、三次元未臨界性評価を考慮しているため、その不確かさは、ほう酸水注入系の三次元未臨界性評価における停止余裕基準の  $1.5\% \Delta k^{(12)(13)}$  とする。なお、本評価は、定格運転時に臨界を保った状態を起点としており、高温停止に必要なボロン所要量は炉心の違いで大きく変化することはないため、代表的に平衡炉心で評価しているが、ここでは、炉心変更及び MOX 混在炉心の場合における装荷遅れ等に伴う高温停止に必要なボロン反応度の不確かさについても考慮し、十分余裕がある値として停止余裕基準と同等の  $1.5\% \Delta k$  とした。

よって、これらの合計から  $3\% \Delta k$  を不確かさとした。

#### 4.2.3 崩壊熱モデルの妥当性確認

REDYコードの崩壊熱は、11 群又は 4 群モデルで模擬し、両モデルは同等であることを 3.3 節で確認している。

以下、11 群モデルについて説明する。11 群モデルは 1979 年に米国の NUREG-1335<sup>(14)</sup> で参照され、Idaho National Engineering Laboratory が採

用した 11 群モデルとデータを採用している。日本では、1992 年 4 月 28 日の原子力安全委員会、原子炉安全基準専門部会 原子力崩壊熱評価小委員会での論議により、AESJ 推奨値を用いることも妥当との結論が得られている。本資料の図に REDY コードで使用している崩壊熱曲線を重ね合わせたものが図 4-8 である。11 群モデルと現状のデータは GE モデル

(1973) + 3 $\sigma$  とほぼ同等であり、新 ANS (1979) + 2 $\sigma$  や AESJ 推奨値よりは、わずかに高めに評価していることが確認できた。なお、図 4-8 から REDY コードで使用している崩壊熱計算の不確かさは、1 秒の時点で最大 +0.8%、-0.1% である。

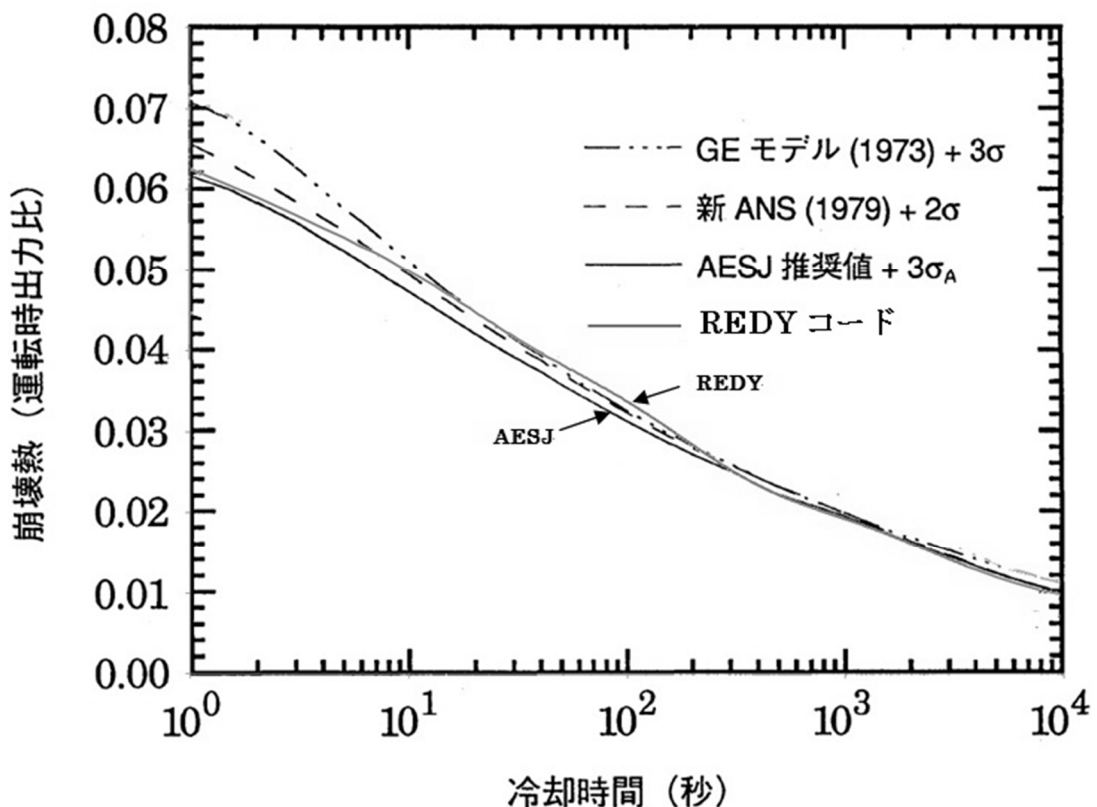


図 4-8 REDY コードの崩壊熱曲線と各種推奨値との比較



#### 4.3 炉心（熱流動）における重要現象の妥当性確認

炉心（熱流動）に対する重要現象は、沸騰・ボイド率変化であり、RE  
DYコードでは、炉心ボイドマップとそのスweepモデルのことである。

炉心ボイドマップは図4-9に示すように、定格炉心流量における炉心出口  
クオリティと炉心平均ボイド率との関係を、炉心入口サブクーリングをパ  
ラメータとしてまとめた関数である。過渡時の状態は、ここから得られる  
炉心平均ボイド率に、炉心流量補正、さらにはスweepモデルを適用して  
模擬している。炉心平均ボイド率へのスweep効果は炉心入口流量の変化  
等を考慮した二次遅れモデル近似である。

##### (1) 炉心ボイドマップの妥当性

炉心ボイドマップは、定格状態において設計軸方向出力分布（平衡炉心  
に相当する下方ピーク）を仮定し、炉心熱水力解析コードを用いて求めて  
いる。後述の4.3.1節で参照している「炉心ボイドマップ確認試験」におい  
ては、実際は軸方向出力分布を下方分布、均一分布、中央分布として試験  
を実施している。その結果、軸方向出力分布の違いによるボイド率に与え  
る影響の明確な差はないと結論付けている。本事故シーケンスでは、給水  
加熱喪失の影響を受けている間、より下方ピークとなることが知られてお  
り、設計軸方向出力分布を仮定していることの妥当性を確認するために、  
仮により下方ピークとなった場合のボイドマップを作成して比較した。こ  
の結果、より下方ピークを想定した場合は、同じ炉心入口サブクーリング  
であれば沸騰開始が早くなり、本事故シーケンス範囲での炉心ボイドマッ  
プ全体がボイド率の大きい方に並行移動する（初期の炉心ボイド率が多少  
高くなる）ことを確認している。ここで、プラント全体の挙動に影響を及  
ぼすボイド反応度の変化は、初期運転点でのボイド率の相違による影響よ

りも、主にそこからのボイド率の変化幅と変化速度による影響が支配的である。このことから軸方向出力分布の違いによる影響はボイド率の変化幅や変化速度に大きく影響するものではないため、結果としてプラント全体への影響に有意な差を与えることはないといえる。実際、添付3に示したように、本事故シーケンス解析で初期の軸方向出力分布をより下方ピークに変更した解析を実施した場合でも、評価結果に与える影響は小さいことを確認している(\*1)。また、本事故シーケンス解析での高炉心入口サブクーリング側の炉心入口サブクーリング変動範囲は、従来の高温高圧での実バンドル体系での試験範囲外である。しかしながら、炉心入口サブクーリングが高まるにつれて、サブクール沸騰及び飽和沸騰開始点が下流側に移動するものの、サブクール沸騰開始後の下流側の流動状態は通常の炉心入口サブクーリング時と特に変わるものではないため、平均ボイド率を対象とした炉心ボイドマップの高炉心入口サブクーリングでの不確かさに対する影響は小さいと考えられる。

(\*1) R E D Yコードでは模擬できないが、短時間領域では給水加熱喪失により軸方向出力分布が下方ピークとなると想定される(添付2参照)。これに伴いボイドマップも変わるものと推測され、この過渡時のボイドマップを初期炉心状態として作成し、その影響を参考解析してみると、短時間の評価パラメータは小さめに評価されることが確認できた(添付3参照)。

## (2) 炉心流量補正モデルの妥当性

過渡時の炉心平均ボイド率の変化は、上記(1)の炉心ボイドマップから得られた炉心平均ボイド率に対し、炉心流量補正を加えて求める。後述の図

4-15 の試験解析結果により軸方向出力分布の影響が小さいこと, 図 4-16 の試験解析結果により炉心入口サブクーリングの影響が小さいことも確認していることから, 本事故シーケンスにこのモデルを適用することの妥当性が確認された。

なお, 炉心流量補正モデルの妥当性は「4.3.3 実機試験結果との比較による妥当性確認」でも示している。

### (3) ボイドスweepモデルの妥当性

ボイドスweepモデルは, 炉心入口流量, 沸騰長等をパラメータとし, 過渡時の軸方向の炉心内ボイド伝播変化を考慮したものである。ボイドスweepモデルの妥当性は, 後述の 4.3.1 図 4-13 で参照している時間領域での試験結果, 図 4-14 で参照している周波数特性での試験結果より確認している。さらに前述の 4.1 で示した実機試験結果 (ボイドスweepのモデルのパラメータである炉心入口流量等を変えた場合) に対する模擬能力が十分高いことを, 計測可能な中性子束変化を通して総合的に確認している。

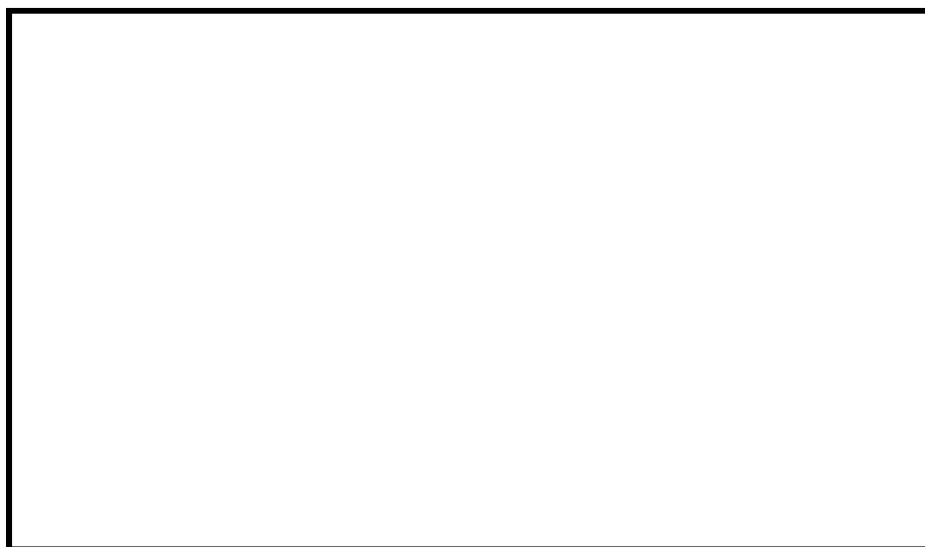


図 4-9 ボイドマップの例<sup>(15)</sup>

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。

#### 4.3.1 炉心ボイドマップ確認試験

図 4-10 及び図 4-11 に，日本国内で実施された試験装置系統図及び試験部を示す。□

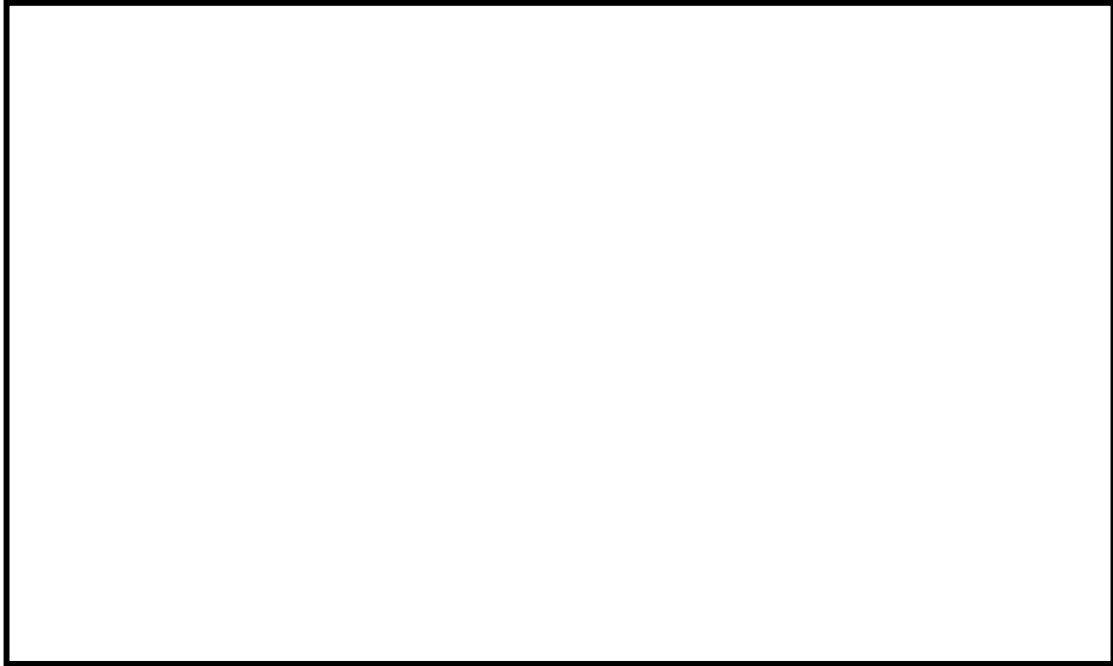


図 4-10 試験装置系統図 □

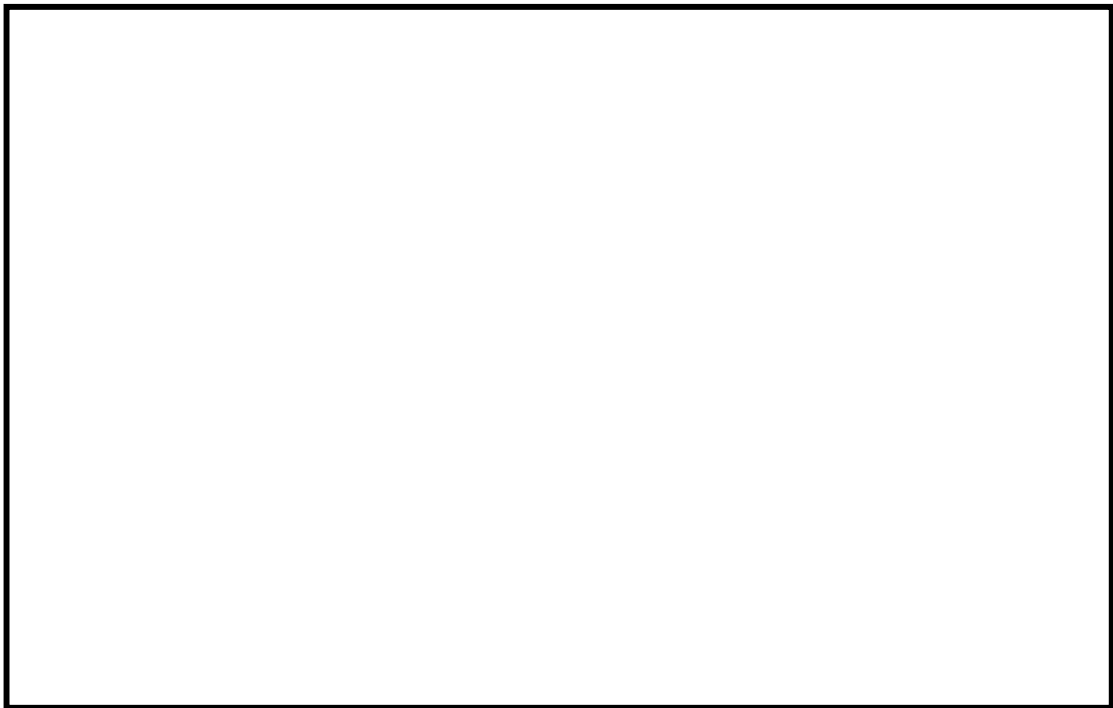


図 4-11 試験部概要図と解説 □

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 4-12 に、実機定格流量相当における定常状態のボイド試験結果について、試験結果で得られた炉心出口クオリティとボイド率との関係を示す。図中、REDYコードにおける設計式の値を実線で示すが、試験結果と良く一致していることが確認されている。

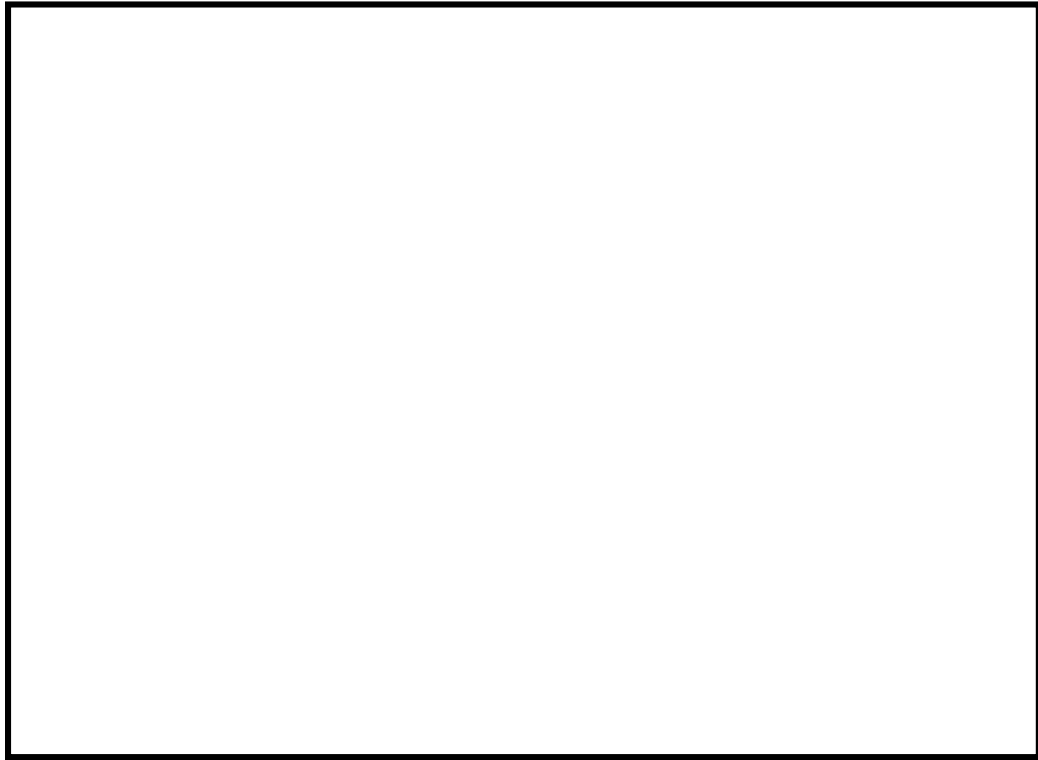


図 4-12 ボイドマップの確認結果（実機定格流量相当）<sup>(15)</sup>

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。

また、同試験装置で過渡時のスweepモデルの妥当性も確認しており、この結果を図 4-13 に示す。

REDYコードのボイドスweepモデルによる計算値についても同図に示すが、両者の時間変化挙動は良く一致している。また、この妥当性は、実機試験結果との比較でも確認されている。

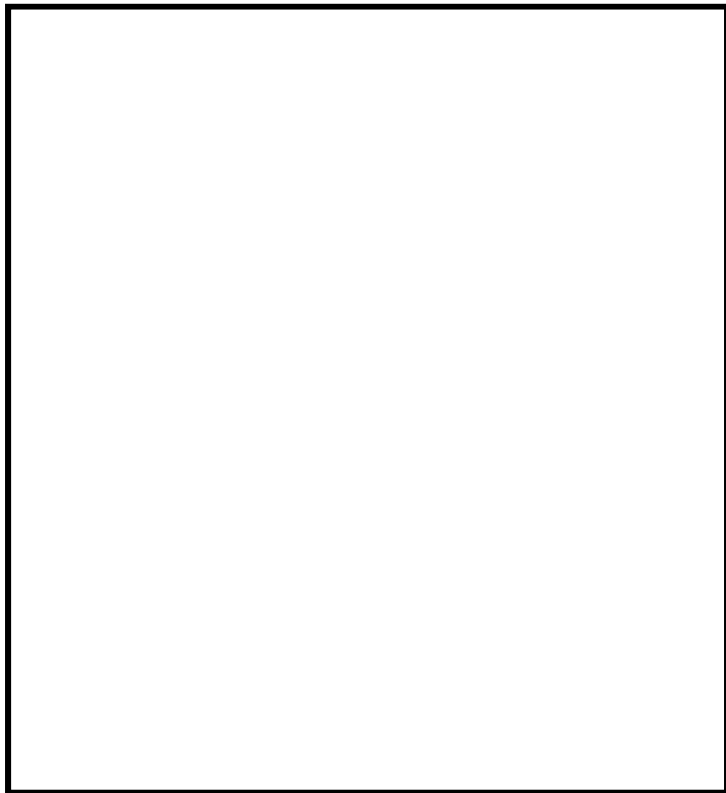


図 4-13 流量減少時のボイド率変化<sup>(15)</sup>

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。

GE社から報告されているボイドスweepモデルの妥当性確認結果では、試験装置は実機との相似性を考慮した設備とし、電気入力を正弦状に変化させて、出力と平均ボイド率の周波数伝達関数を求めている。この実験解析をREDYコードの可変二次遅れスweepモデルと比較した結果を図4-14に示すが、実炉で重要な0.1Hzから1Hzの周波数範囲で実験結果と解析結果とは、良く一致していることが確認されている。



図4-14 過渡時ボイド率の解析結果と実験結果との比較<sup>(15)</sup>  
(出力—平均ボイド伝達関数の周波数応答)

#### 4.3.2 炉心平均ボイド率の炉心流量補正モデルに係わる妥当性確認

REDYコードでは定格炉心流量で定めた炉心平均ボイドマップを用いており、炉心流量が低下した場合に相対的蒸気ドリフト量が増えて炉心内の平均ボイド率が増えることを炉心流量の二次関数でマイナス補正している。本事故シーケンスでは、再循環ポンプトリップ後に低炉心流量や自然循環状態で高出力状態が継続することからこのモデルの重要度が高い。

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。

図 4-15 は、「4.3.1 炉心ボイドマップ確認試験」の中で報告している日本国内で実施された試験結果を、炉心入口流量の変化に伴うボイド率補正率（PU）（=定格炉心流量でのボイド率に対する補正割合）の関係として整理したものである。試験装置は、8×8燃料を模擬しており、出力分布が均一の場合（かつ、炉心出口クオリティ 25%）と下方ピーク（かつ、炉心出口クオリティ 20%）の場合の試験結果（それぞれ4点と2点）をプロットしている。これによると、炉心ボイド率の炉心流量補正率は、軸方向出力分布の違いに係らず、REDYモデルの二次関数とほぼ一致しており、その妥当性が確認できた。

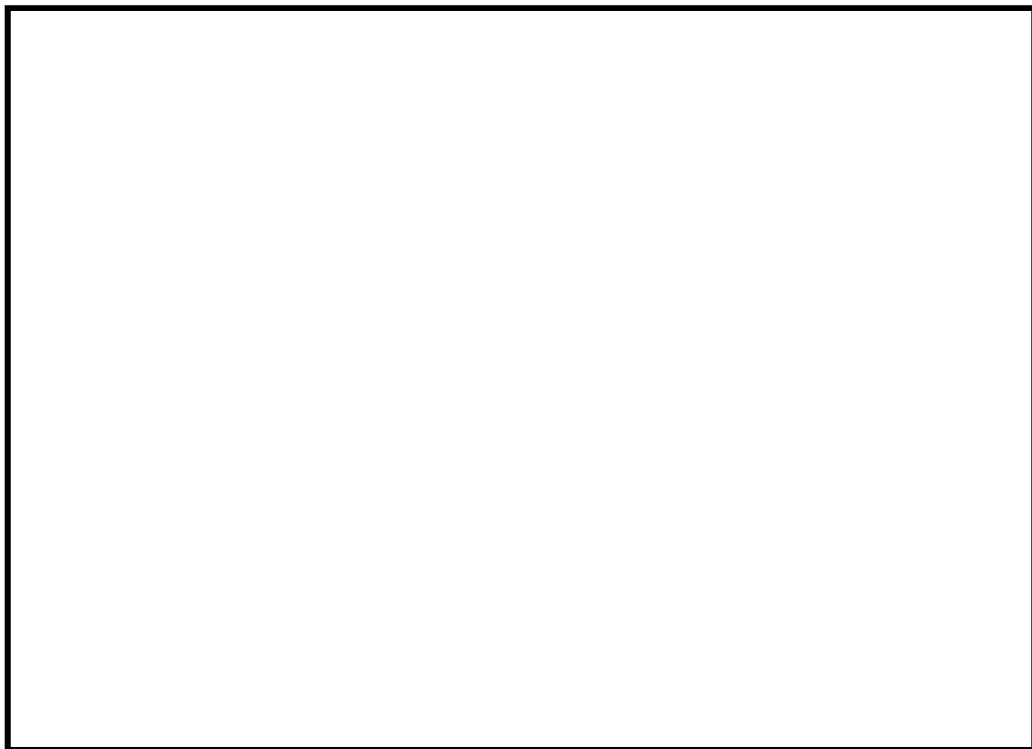


図 4-15 炉心ボイドマップの流量依存性（国内試験結果との比較）

上記の試験で模擬した燃料は8×8燃料であること、試験点数が必ずしも十分とはいえないことから、炉心ボイド率の炉心流量補正モデルの妥当性確認の方法として、設計データとの比較手法（炉心熱水力解析コードで多数のボイドマップデータを作成し、炉心流量の違いによる影響を整理する



手法)を用いる。

図 4-16 は、炉心流量を 15%、40%、70%、100%とし、それぞれに対して炉心出口クオリティを 30%、40%、60%、80%かつ6種類の炉心入口サブクーリングを変えた場合の試験解析を行い、ボイド率補正率 (PU) を求めて図にまとめたものである。図では試験点が重なっているが、同じ炉心流量における試験解析点数は上記より各 24 個存在する。なお、燃料は 9 × 9 燃料 (A型) の平衡炉心を想定している。

同図に、REDYコードモデルで使用している二次関数を実線で併記しているが、炉心出口クオリティや炉心入口サブクーリングの違いに係らず、ボイド率補正率 (PU) は炉心流量の二次関数でフィッティングできることが示されている。なお、約 40%流量付近では、試験解析点より REDYモデルのデータの方がボイド率を少なめに評価しており、これは短時間領域での原子炉出力を高め評価していることを意味する。

本図から、破線で示したような炉心流量に依存しない場合 (補正なし) を不確かさ下限とし、15%炉心流量での試験解析点も包含する二次関数を不確かさ上限とする。

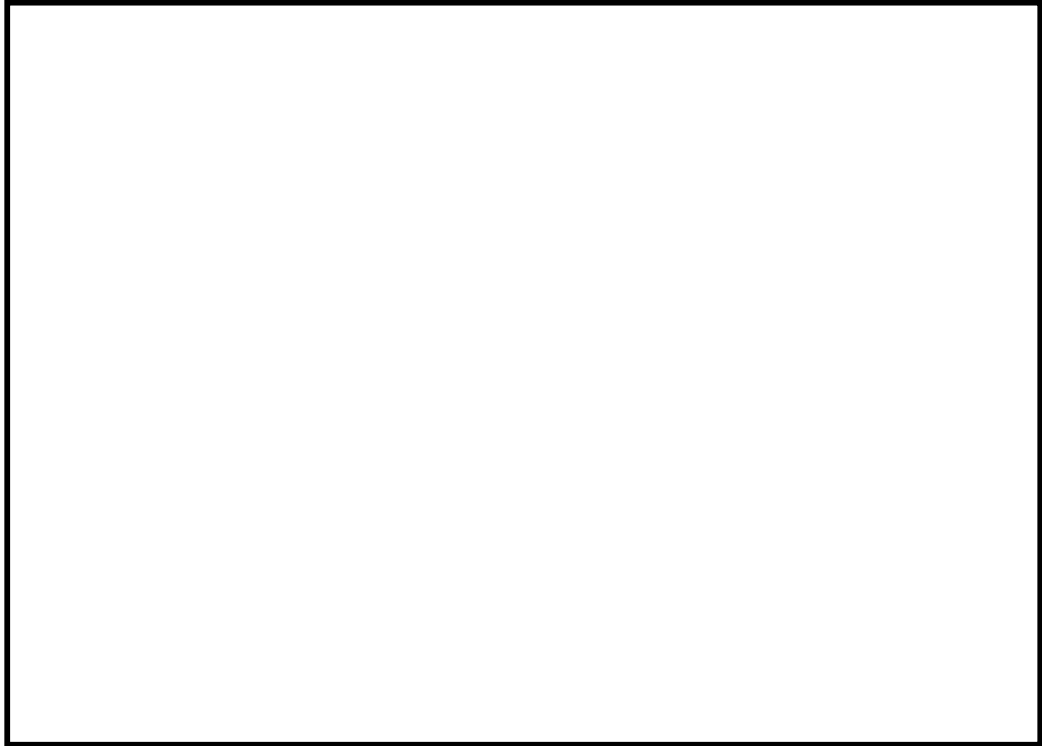


図 4-16 炉心ボイドマップの流量依存性（試験解析結果との比較）

#### 4.3.3 実機試験結果との比較による妥当性確認

炉心ボイドの挙動は実機では直接確認することができない。ただし、核分裂出力変化の妥当性を実機試験結果で確認した 4.2.1 節と同様に、RED Yコードのボイドマップが実機の過渡変化挙動を模擬できないと、

- ・ これによって生じるボイドフィードバック起因の中性子束変化
- ・ 炉心内ボイド率が変化することでの炉心シュラウド外水位変化（検出水位）

が模擬できないことになる。

以上より、これらの中性子束、検出水位を着目パラメータとして、以下の事象について実機試験結果とRED Yコードの解析結果を比較した。

図 4-1 インターナルポンプ 3 台トリップ時の過渡変化

図 4-3 主蒸気隔離弁全閉時の過渡変化

図 4-5 再循環流量制御系速度設定点変更試験

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 4-6 給水制御系水位設定点変更試験

図 4-7 圧力制御系圧力設定点変更試験

図 4-1 の R E D Y コードの解析結果は、炉心流量急減に伴う実機の中性子束変化を良く模擬しており、結果的に本事故シーケンスでの再循環ポンプトリップ時の炉心流量急減に伴う炉心ボイド率の増加現象が模擬できることを意味している。

図 4-3 の R E D Y コードの解析結果は、実機の原子炉水位変化を良く模擬しており、スクラム失敗を仮定した原子炉隔離に伴う圧力上昇によって（この場合はスクラムも併用）生じる炉心ボイド率の減少現象を十分模擬できることが確認できたといえる。

図 4-5 の再循環流量の増減変化に対する中性子束の変化は良く実機を模擬できているが、これにより、炉心流量の変化に伴うボイドスイープのモデルの妥当性が確認できる。

図 4-6 は給水流量を試験で増減させたものであるが、中性子束の変化が良く実機を模擬できている。この場合、給水流量の変化は炉心入口サブクーリングを増減させるが、炉心入口サブクーリングをパラメータとしているボイドマップの妥当性が示されている。

図 4-7 は原子炉圧力を増減させた試験結果であるが、中性子束の変化は良く実機を模擬できている。すなわち、ボイドマップの圧力変化に対する模擬モデルの妥当性が確認できる。

#### 4.4 原子炉压力容器（逃がし安全弁含む）における重要現象の妥当性確認

原子炉压力容器（逃がし安全弁含む）に対する重要現象は、冷却材流量変化（強制循環時）、冷却材流量変化（自然循環時）、冷却材放出（臨界流・差圧流）、ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）及びほう酸水の拡散であり、REDYコードでは、これら进行评估するモデルとして、

- ・再循環系モデル
- ・逃がし安全弁モデル
- ・給水系モデル
- ・ほう酸水拡散モデル

を採用している。

##### 4.4.1 再循環系モデルの実機試験結果との比較による妥当性確認その1

（冷却材流量変化（強制循環時））

重要な物理現象である、冷却材流量変化（強制循環時）の妥当性確認を実機試験結果との比較によって行う。

再循環ポンプトリップによる炉心流量低下速度は、炉心のボイド挙動、炉心を含む過渡流れの圧力損失係数、再循環ポンプの慣性定数や初期回転速度といった多くのパラメータによって複合的に影響を受ける。

よって、ここでは再循環ポンプトリップ、又はそれ相当の炉心流量変化がどの程度REDYコードで模擬できているのかを実機試験結果で確認する。

図 4-1 インターナルポンプ 3 台トリップ時の過渡変化

図 4-2 発電機負荷遮断時の過渡変化

図 4-1 の実機試験結果は全 10 台のインターナルポンプのうち、3 台のボ

ンプがトリップした場合であるが、R E D Yコードは炉心流量急減の変化を良く模擬できている。また、図 4-2 の実機試験結果はインターロックにより 4 台のインターナルポンプトリップ（+ 6 台のインターナルポンプランバック）が行われた事象であるが、こちらも R E D Yコードは炉心流量急減の変化を良く模擬できている。

以上より、本事故シーケンスでの再循環ポンプトリップ時の炉心流量急減に伴う再循環系モデルの妥当性が確認できた。

なお、再循環ポンプの炉心流量低下率はポンプの時定数が支配的要因となり、時定数の不確かさはポンプの設計仕様から+10%、-10%である。

#### 4.4.2 再循環系モデルの実機試験結果との比較による妥当性確認その 2

##### （冷却材流量変化（自然循環時））

重要な物理現象である、冷却材流量変化（自然循環時）の妥当性確認を実機試験結果との比較によって行う。

再循環ポンプトリップにより、自然循環状態で高出力状態が継続する原子炉スクラム失敗を仮定した事象では、炉心流量の整定値が高い場合に炉心内ボイド率が小さくなり出力が大きくなると想定される。よって、ここでは再循環ポンプトリップ後の自然循環流量がどの程度 R E D Yコードで模擬できているのかを実機試験結果で確認する。

##### 図 4-2 発電機負荷遮断時の過渡変化

BWRプラントの起動停止の運転では、最低ポンプ速度状態を経由するも自然循環流量での運転は行わない運用としている。このため、通常運転時の自然循環状態の実機データは存在しないが、図 4-2 の過渡事象はこれに近いものとなっている。

図 4-2 に示した実機の発電機負荷遮断試験結果では、インターロックにより 4 台のインターナルポンプトリップが行われ、残りの 6 台のポンプが最低ポンプ速度運転となった炉心流量状態が実現されており、低炉心流量状態を模擬したデータであるとみなすことができる。

この場合は、原子炉がスクラムされていることから炉心のボイド率も次第に低下していく過程にあるが、REDYコードはこの過程を含めて低炉心流量状態を模擬できることが示されている。

#### 4.4.3 再循環系モデルの実機試験結果との比較による妥当性確認その 3

(冷却材流量変化 (自然循環時))

上述した ABWR の実機試験結果での妥当性確認結果は、自然循環状態に近いものとして 6 台のインターナルポンプが最低ポンプ速度となった場合であるが、これを補足する目的で、従来型 BWR での試験結果との比較結果を示す。なお、解析コードは“REDY Ver. 1”を使用しているが、ここで確認している主要なモデルは“REDY Ver. 1(ATWS 用)”と同等である。

図 4-17 は、460MWe の従来型 BWR プラントにおいて、2 台の再循環ポンプ M/G セットを手動でトリップさせた試験結果を REDY コードで再現解析したものである。再循環ポンプ M/G セットトリップにより、ポンプ回転速度が徐々に低下し、これにつれて炉心流量も低下し、自然循環状態になっている。これによれば、炉心流量、中性子束及び主蒸気流量変化とも 20 秒後の整定値は約 2 % 以内で一致している。

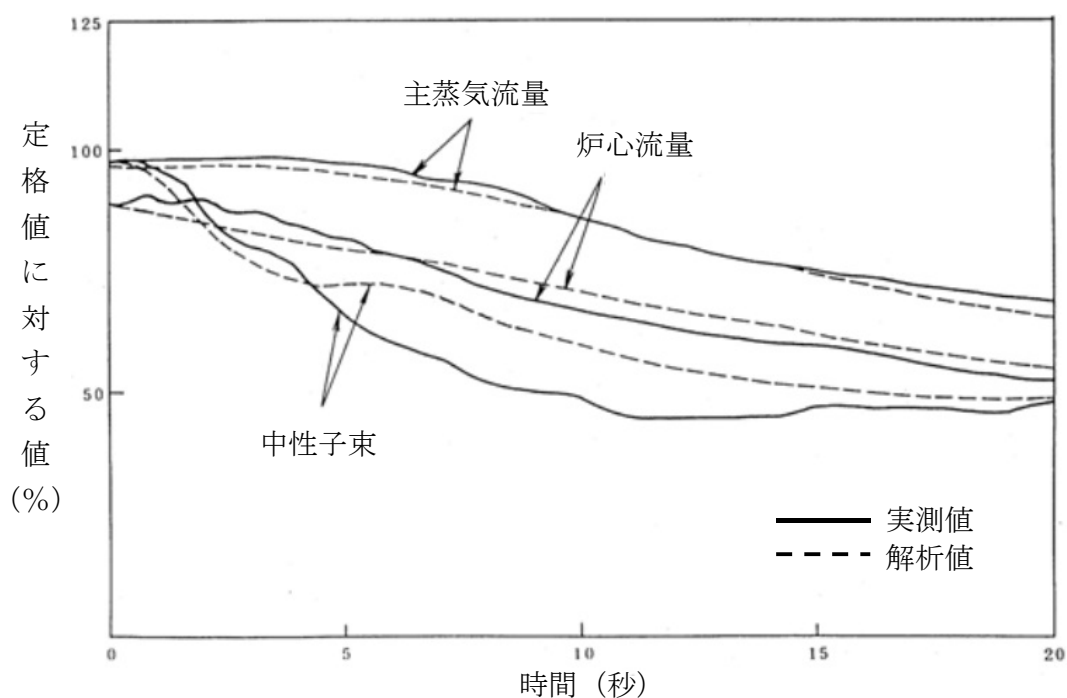


図 4-17 再循環ポンプM/Gセット2台トリップ試験<sup>(1)</sup>

図 4-18 は、1100MWe の従来型BWRプラントにおいて、2台の再循環ポンプを手動でトリップさせた場合の試験結果をREDYコードで再現したものである。この場合も20秒後の自然循環状態に着目すると、原子炉水位変化、原子炉圧力変化、中性子束変化も整定値で数%以内の差で一致しており、ここで着目したい自然循環流量の値は精度良く模擬できることが確認できた。

本事故シーケンスでは、原子炉水位が大きく低下し、さらにECCSも注水されることから、上述の実機試験結果における自然循環流量の状態とは多少異なる。しかしながら、いずれにせよ自然循環状態は、インターナルポンプまたは再循環ポンプによる強制循環力がなくなった状態であり、REDYコードが採用している単純な運動量保存則(\*1)において、摩擦圧損等の占める影響力は流量の二乗に比例して小さくなることから、炉心シュ

ラウド内外の位置ヘッド差（マスバランス）が支配的な駆動力となる。なお、炉心摩擦損失係数自体は、炉心熱水力解析コードにより炉心平均ボイド率の関数として求めているが、本事故シーケンスを通してボイド率の変化が小さいことから、炉心摩擦損失係数の変化も小さい。以上より、本事故シーケンスにおける自然循環流量を模擬する場合、一次元の運動量保存則を適用することは妥当であると考ええる。

(\*1) R E D Yコードでは、一次元流れの運動量保存則により、各圧力評価点間の圧力差、位置損失（位置ヘッド）、摩擦圧損、局所圧損、加速圧損、ポンプ昇圧（強制循環力）から過渡時の流量変化を求めている。



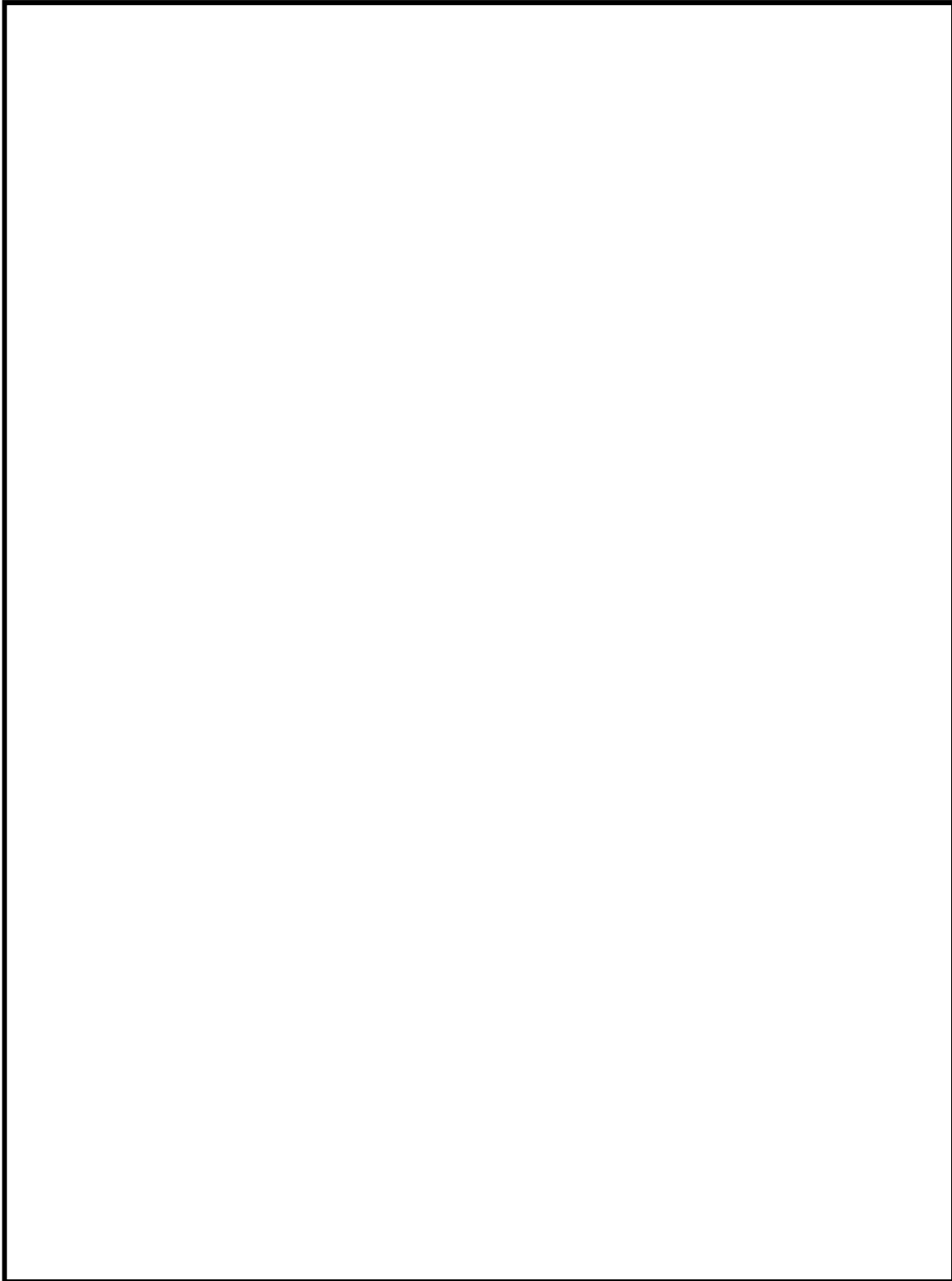


図 4-18 再循環ポンプ 2 台トリップ試験<sup>(15)</sup>

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。

#### 4.4.4 逃がし安全弁モデルの実機試験結果との比較による妥当性確認

原子炉圧力の評価にとって重要な物理現象である冷却材放出は、本事故シーケンスでは逃がし安全弁からの蒸気放出に該当する。実機ではこれに対応した試験結果が存在することから、これを R E D Y コードの流量変化（自然循環時）との比較によって行う。

図 4-3 主蒸気隔離弁全閉時の過渡変化

図 4-3 の主蒸気隔離弁全閉時の実機試験結果にある主蒸気流量は、原子炉が隔離した後は全て逃がし安全弁から放出される蒸気流量である。ここにおいて、R E D Y コードの解析結果と実機試験結果の挙動は開閉タイミングを含めてほぼ一致しており、原子炉スクラム失敗を仮定した事象に対して、逃がし安全弁モデルを使うことの妥当性が確認された。

なお、モデルにおける吹き出し容量は、「日本工業規格 JISB8210」付属書記載の算出式により計算された値をインプットデータとして用いており、吹き出し容量の不確かさは $-0\%$ 、 $+16.6\%$ であることが分かっている。

#### 4.4.5 給水系モデルの妥当性確認

（総合的な妥当性確認、主に給水流量）

原子炉への給水流量が変化すると、例えば増加した場合には、炉心入口サブクーリングが増加するために炉心のボイドが減少し、正のボイド反応度が印加されることで原子炉出力が増加する。また、給水の温度が変化すると、例えば低くなった場合には給水流量が同じでも、前述と同じ理由で出力が増加する。

実機試験結果の中から給水流量変化が主導となる以下の事象にて、R E D Y コードの妥当性確認を行う。なお、E C C S 流量変化に伴う実機デー

タは存在しないが、原子炉に注水された場合の原子炉内全体の減圧効果や炉心入口サブクーリングに与える影響は同等と考え、ここでの妥当性確認に含めるものとする。

図 4-4 給水ポンプトリップ予備機不起動時の過渡変化

図 4-6 給水制御系水位設定点変更試験

図 4-4 の実機試験は給水ポンプトリップにより給水流量が急激に低下した場合のプラント挙動であり、給水流量の減少による炉心入口サブクーリング減少が炉心のボイド率増加を引き起こし、時間遅れの後に中性子束減少として表れている。実機試験では再循環ポンプランバックによる炉心流量低下も並行して炉心ボイド率増加を引き起こしているため、炉心入口サブクーリング減少のみの影響ではないが、総合してどのパラメータの挙動も REDYコードは良く模擬できている。

図 4-6 は、給水流量が増減した場合のプラント挙動であり、こちらの実機試験結果では給水流量が減少した場合、増加した場合の中性子束の挙動が REDYコードにて良く模擬されている。

このように、REDYコードの解析結果と実機試験結果の挙動は良く一致しており、原子炉スクラム失敗を仮定した事象での給水流量変化に対する模擬能力の妥当性が確認された。

(給水エンタルピモデルの妥当性確認)

給水エンタルピモデルは 3.3 節の解析モデルに示したように、二つのモデルから選択できる。

図 4-19 は、給水エンタルピモデル (1) の REDYコードで使用している主蒸気流量と給水エンタルピとの相関テーブルを、実機試験データと比

較したものである。これによると、モデルで使用しているデータの方が給水エンタルピを多少小さめに評価しており、全般的に良く一致している。ただし、原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止では、早期に主蒸気流量が遮断されゼロとなるが、この点での給水エンタルピはモデルの方が約 60kJ/kg (約 14°C) 程高めであり、これを主蒸気流量がゼロの点での不確かさとする。



図 4-19 給水エンタルピモデル (1) の主蒸気流量と給水エンタルピとの関係

図 4-20 は、給水エンタルピモデルにおける一次遅れ特性を確認したものである。REDYコードでは 60 秒の時定数を使用しているが、実機試験結果を良く再現できるのは 80 秒の時定数である。このことから、本事故シナリオでは給水エンタルピの低下を早めに評価していることとなり、モデルの保守性が確認できた。

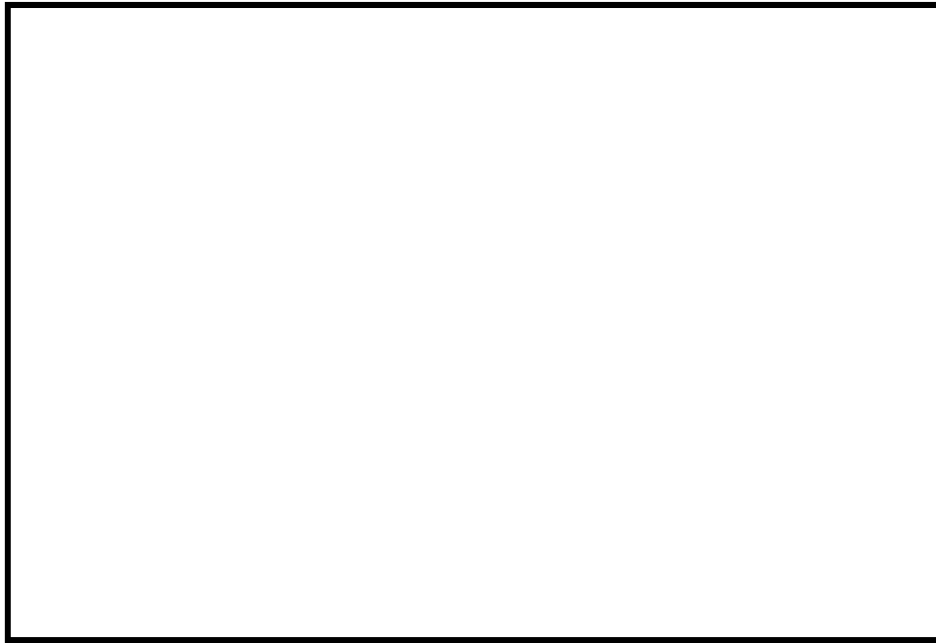


図 4-20 給水エンタルピモデル（1）における一次遅れ特性

給水エンタルピの低下は，主蒸気隔離弁の誤閉止に伴って生じる給水加熱蒸気喪失に起因して生じ，エンタルピが低下した給水が原子炉圧力容器に到達するには時間遅れがある。RE DYコードではこの遅れ時間を考慮できるようになっているが，本事故シーケンスでは厳しめに遅れ時間を0秒として評価している。よって，この遅れ時間50秒（給水流量68%相当で評価）を不確かさ下限とする。

図 4-21 は，給水エンタルピモデル（2）で入力する給水エンタルピ変化の保守性を確認したものである。有効性評価では，インプットデータとしての輸送遅れ時間算出の際に給水流量を上限値一定と仮定している。このため解析では，給水流量の変動を考慮した場合よりも輸送遅れ時間が短くなり，給水エンタルピの低下を速めに模擬している。

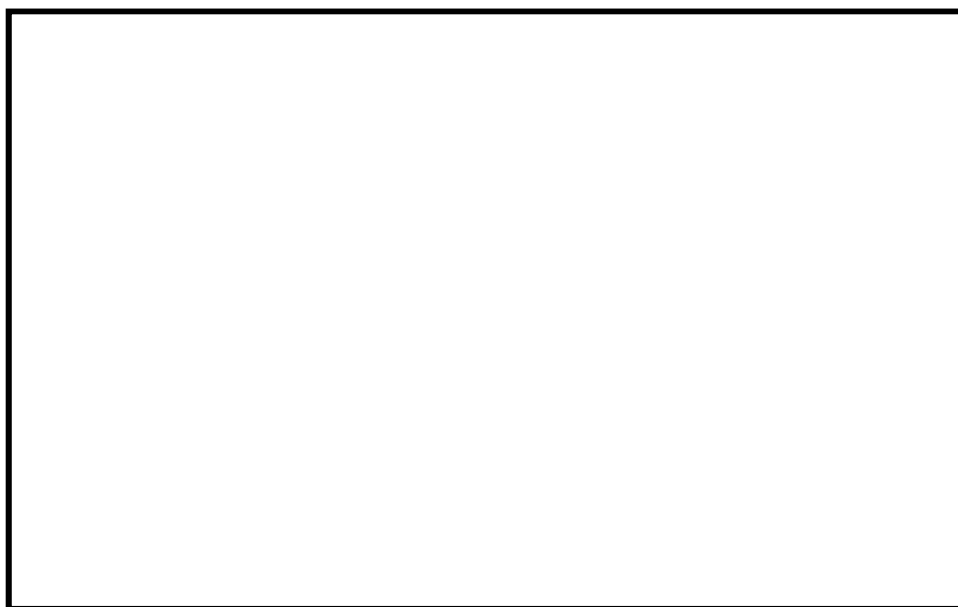


図 4-21 給水エンタルピモデル（2）に入力する給水エンタルピ変化

（ECCSエンタルピの妥当性確認）

本事故シーケンスで期待しているECCS（HPCFとRCIC）の流量は安全要求の下限値を使用し，原子炉格納容器のプール水又は復水貯蔵槽を水源としている。基本ケースでは，それぞれの設計流量（HPCFで $182\text{m}^3/\text{h}$ ）を用いているが，流量制御をしているRCICは別として，HPCFの場合にはプラス側の不確かさがあり，制御棒挿入失敗を仮定した本事象では，炉心を冷却する作用によりどの評価指標に与える影響も厳しくなる可能性がある。HPCFでは実力値として+137%（ $250\text{m}^3/\text{h}$ ）の能力があり，これを不確かさとする。

また，制御棒挿入失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止では，長時間領域での評価指標である格納容器圧力と原子炉格納容器のプール水温度を高めめに評価する目的で，原子炉格納容器のプール水温度は保安規定で定めた上限値  $35^\circ\text{C}$ を基本ケースとしている。しかしながら，一方で，ECCSはこの原子炉格納容器のプール水も使用しており，より冷たいプール水が結

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。


果を厳しくする可能性も考えられる。よって、ここでは設計仕様の常用温度下限である 10℃を不確かさの下限とする。

#### 4.4.6 ほう酸水拡散モデルの妥当性確認

ほう酸水注入系によって原子炉に注入されたほう酸水は、炉心内冷却材内に拡散されることによりボロン反応度効果として作用し、原子炉を停止させる。

ほう酸水が原子炉に到達するまでの遅れ時間は単純な移送計算で求められるが、到達後の原子炉内拡散は複雑であり、これを詳細に模擬することは困難である。このため、ほう酸水拡散モデルでは、その入力データを試験結果から得られた結果に基づいて厳しめに設定又は補正することで安全側の評価となっていることを確認する。

ボロンミキシングの試験設備は 1/6 縮尺で模擬した試験設備であり、ほう酸水流量及び炉心流量をパラメータとして原子炉内ボロン濃度の時間変化を計測している。

図 4-22、図 4-23 及び図 4-24 に米国で実施された 1/6 スケール三次元試験装置(バレストス試験装置)構成図及び炉心部測定位置を示す 。試験は制御棒挿入失敗を仮定した時の炉心流量範囲でのミキシング条件を考慮し、以下の試験条件で行っている。

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。



A BWR用には，炉心上部からの注水試験が該当し，自然循環状態では，ボロンは主に炉心バイパス部を下降し，燃料下部タイプレートのリーク流路から燃料チャンネル内に流入している。ボロンは上部プレナムで一様に混合されている。なお，従来型BWRプラントでは，ボロンは下部プレナムで一様な混合が得られることが確認されている。

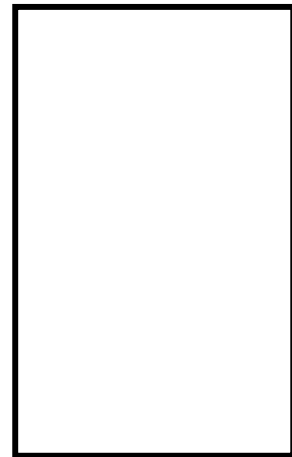


図 4-22 全体構成図

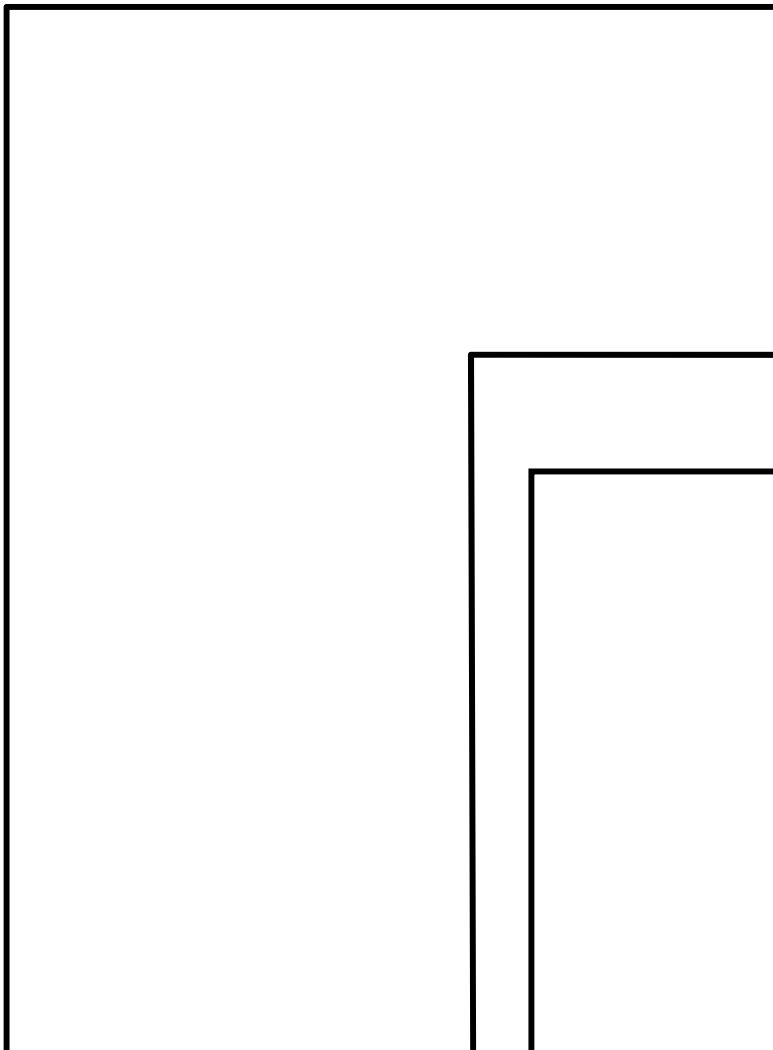


図 4-23 軸方向測定位置

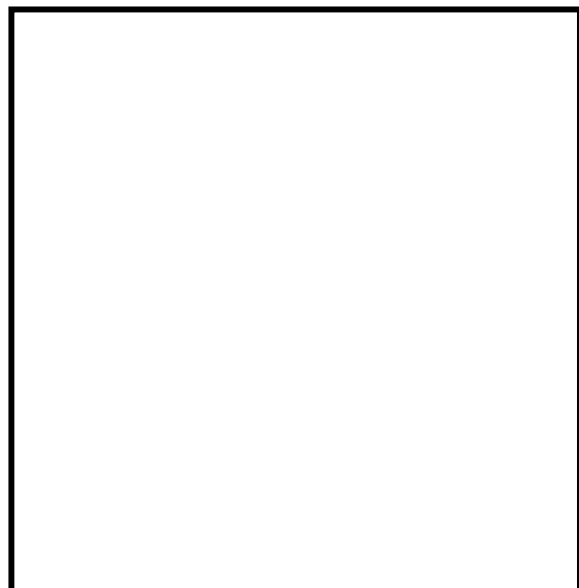


図 4-24 径方向測定位置 (図の■の部分)



(1) ABWRの場合

炉心上部のHPCFスパーチャから注入されるABWRでは、例えば炉心流量がゼロの場合は原子炉内に注入されたボロンは全量が炉心内に下降し、遅れなく反応度に寄与する。このほう酸水の注入位置によって、ABWRのほう酸水拡散モデルで使用するボロンのミキシング効率<sup>1)</sup>は炉心流量には依存しないものと見なされるので、炉内拡散遅れを考慮し、ほう酸水の注入速度を保守的な時間遅れでインプットするモデルとしている。

ABWR向けの試験結果を図4-26、図4-27、図4-28及び図4-29に示す。また、モデル化の検討図を図4-30及び図4-31に示す。



最も保守側の結果を包含する値を注入速度として用いることは妥当である。

なお、個々の計測値の一例として、燃料集合体内の混合率の変化を図4-25に示す。試験結果からは時間とともに位置によるバラツキは小さくなっている。

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。

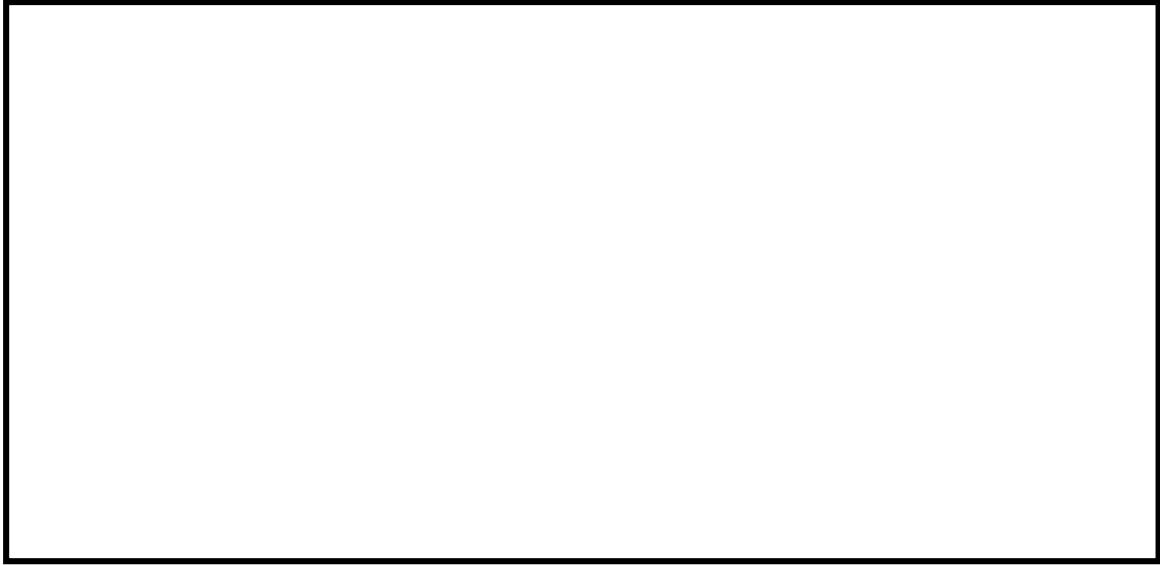


図 4-25 計測点ごとのボロン軸方向測定結果

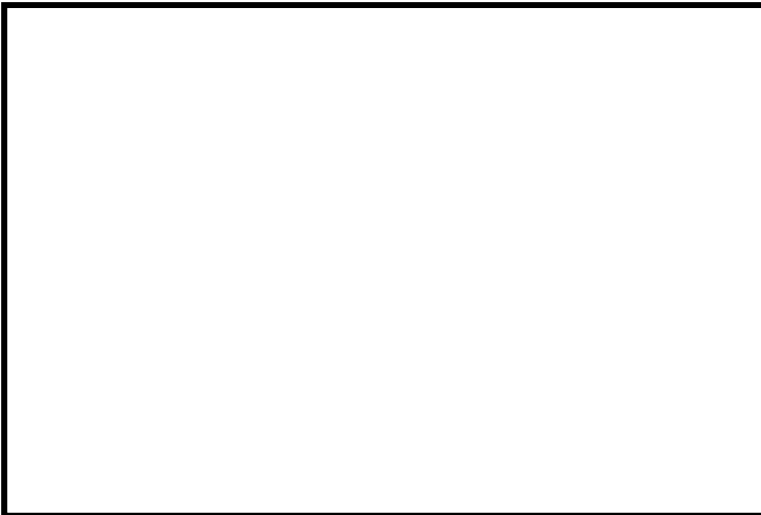


図 4-26 ボロン濃度の時間変化(1)

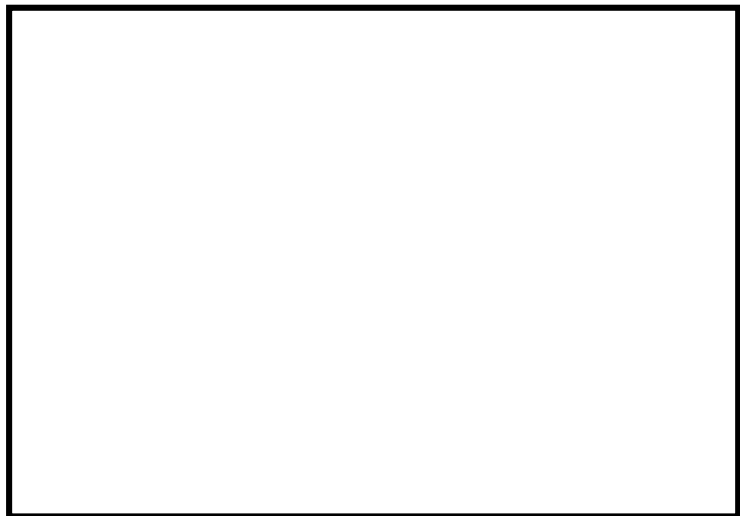


図 4-27 ボロン濃度の時間変化(2)

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 4-28 ボロン濃度の時間変化(3)



図 4-29 ボロン濃度の時間変化(4)

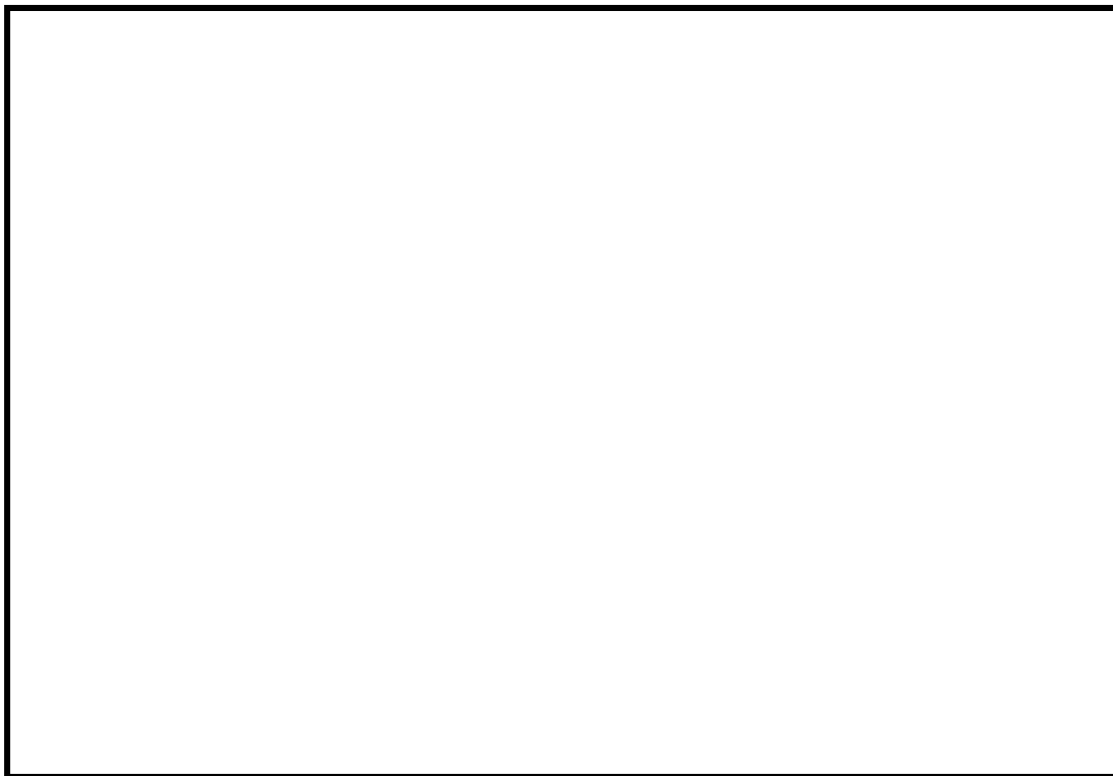


図 4-30 S L C 流量と目標濃度到達時間の関係

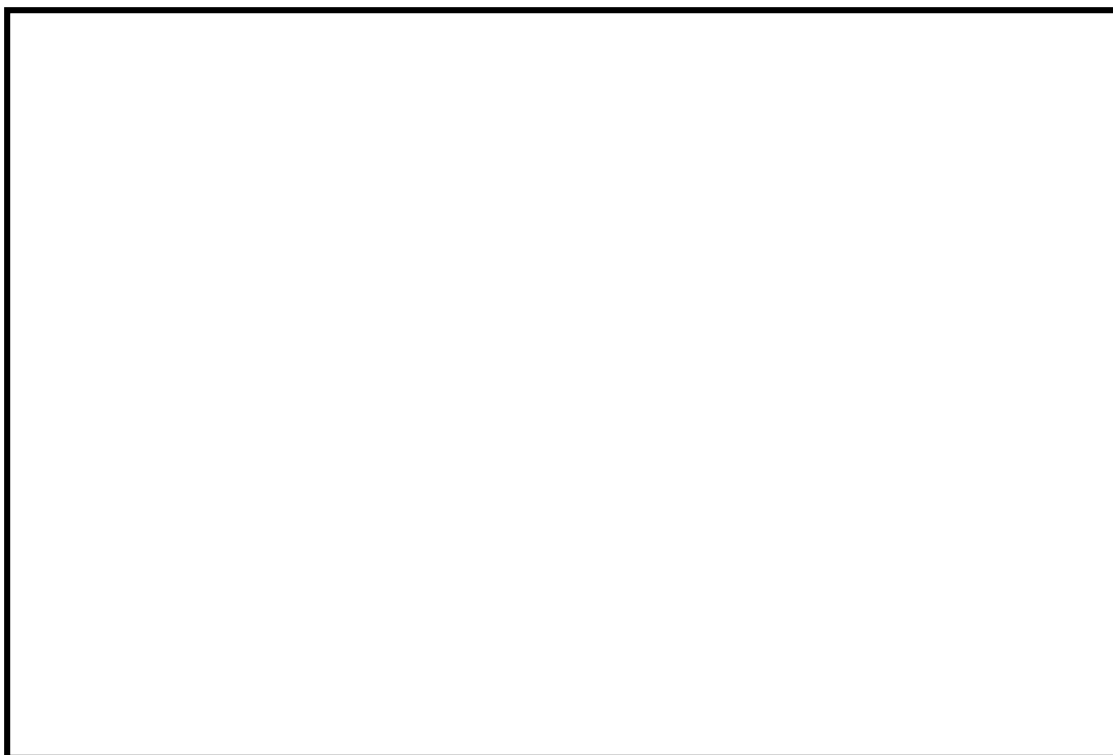


図 4-31 実機ほう酸水流量におけるボロン濃度時間変化のモデル

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) 従来型BWRの場合

炉心下部の下部プレナムスタンドパイプから注入される従来型BWRでは、原子炉に一定速度で注入されるほう酸水は、炉心流量が小さい場合にはその一部が下部プレナムに滞留し反応度に寄与できないことが考えられる。これを模擬するためにほう酸水拡散モデルでは、注入速度に炉心流量依存のボロンミキシング効率を掛けている。このボロンのミキシング効率は図 4-32 のようにモデル化されている。



図 4-32 従来型BWRのボロンミキシング効率



図 4-33 従来型BWRのボロン混合試験結果

従来型BWR向けの試験結果を図 4-33 に示す。なお、ミキシング効率は「反応度に寄与する領域の濃度」を「原子炉内全領域で十分に混合した時の濃度」で割った無次元数で定義される。試験の結果から以下がいえる。



これにより、従来型BWRにおいて、



することは妥当である。

以上より，ほう酸水拡散モデルは妥当であることが確認された。なお，拡散モデルにおけるボイドの影響を添付6に示す。

原子炉スクラム失敗を仮定した事象が発生し，ほう酸水注入系が作動する時点では，ある程度の変動はあるものの，燃料棒での中性子発生及び中性子吸収，減速材による中性子減速及び中性子吸収等がバランスしている。この状態でほう酸水注入系が作動すると，炉心が沸騰状態であっても減速材中にはボロンが含まれ，吸収効果が増加する。このため，前述の状態よりも反応度は低下する。ボロン濃度が一定であれば，上記状態よりも出力が低下したところで再びバランスするが，ボロン濃度は増加し続けるため，沸騰状態においても確実に出力は低下して原子炉停止に至ると考える。

#### 4.5 原子炉格納容器における重要現象の妥当性確認

3.3 節で示した格納容器モデルは、質量バランスとエネルギーバランスに、基礎的な物理法則を適用したものであり、この妥当性はこれを適用するモデル構築上の仮定確認と、インプットとしての逃がし安全弁からの蒸気流量及び熱交換係数で決まる。以下、モデルが保守的で妥当であることを確認する。

原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止では、圧力上昇によって開いた逃がし安全弁からの蒸気は排気管を經由し、原子炉格納容器のプール水中に放出され冷却される。この時、状態によっては一部の蒸気はウェットウェルの空間部に移行する。つまり、事故解析のLOCAとは異なり最初に圧力の上昇が始まるのはウェットウェルであり、真空破壊装置が開いて初めてドライウェルの圧力も上昇を開始する。原子炉格納容器を一つの圧力ノードとして評価できるのは、このように、本事故シーケンスでは基本的に真空破壊装置は早期に開き、開いたままとなるためである。

ここで、原子炉格納容器内の空間部の温度は常にプール水温度と同じと仮定しているが、実際には、原子炉格納容器内の気体温度はプール水温度に遅れて、かつ吸熱して変化するため、気体温度を時間遅れなくプール水温度に追随させることは、格納容器圧力を高く評価することになり、この仮定は保守的である。また、原子炉格納容器内の空間部は常に水蒸気で飽和しているものとする仮定しているが、原子炉格納容器内の気体空間が水蒸気で飽和していなければ、蒸気分圧はより低い値となるためこの仮定も保守的である。

以上のとおり、モデルは空間的に原子炉格納容器を一体とし、単純な計算で保守性を確保しており、原子炉格納容器における重要現象を保守的に

評価できるモデルであることが確認された。

以上にて確認してきた妥当性確認結果と重要現象に対する不確かさを表 4-2  
にまとめる。

[参考文献 (4 章関連)]



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 4-2 解析モデルの妥当性確認結果と重要現象に対する不確かさのまとめ

分類	重要現象	解析モデル	妥当性確認	不確かさ
炉心(核)	核分裂出力	核特性モデル	A B W R 実機試験	反応度フィードバック効果に含める
	反応度フィードバック効果	反応度モデル (ボイド・ドブブラ)	A B W R 実機試験 設計解析での確認	添付5の添付表 5-5 参照
		反応度モデル (ボロン)	設計値の確認(ほう酸水拡散 モデル自体は以下)	高温停止に必要なボロン反応度： -3%Δk
炉心(熱流動)	崩壊熱	崩壊熱モデル	学会推奨曲線, モデル式確認	1秒経過で最大+0.8%/ -0.1%
	沸騰・ボイド率変化	炉心ボイドモデル	試験装置, A B W R 実機試験 設計解析での確認	反応度フィードバック効果に含める 炉心流量補正なし/最大補正二次関数
原子炉圧力容器 (逃がし安全弁 含む)	冷却材流量 変化	コーストダウ ン特性 自然循環流量	A B W R 実機試験, 設計値	ポンプの時定数：+10%/ -10%
			A B W R 実機試験	モデルの仮定に含まれる
	冷却材放出(臨界流・差圧流)	逃がし安全弁モデル	A B W R 実機試験, 設計値	逃がし弁流量：+16.6%
		E C C S 注水 (給水系・代替注水設備含む)	給水系モデル (給水エンタルピ) 給水系モデル (H P C F 流量) 給水系モデル (E C C S エンタルピ)	(1) 給水温度(主蒸気流量ゼロで)： -60 kJ/kg (-14°C) (2) 遅れ時間 +50 秒 H P C F 流量： +137%
原子炉格納容器	ほう酸水の拡散	ほう酸水拡散モデル	設計値等の確認 試験装置	原子炉格納容器のプールの初期エンタル ピ：-104 kJ/kg (-25°C) 入力値に含まれる
	サブレーション・プールの冷却	格納容器モデル	モデル式確認	入力値に含まれる

#### 4.6 実機解析への適用性

重要現象に対して実施した R E D Y コードの妥当性確認が、実機解析に適用可能であることを述べる。

##### 4.6.1 重要現象への適用性

R E D Y コードを用いた有効性評価における重要現象は、核分裂出力、反応度フィードバック効果、沸騰・ボイド率変化、冷却材流量変化（強制循環流量）、冷却材流量変化（自然循環流量）、冷却材放出（臨界流・差圧流）、E C C S 注水（給水系・代替注水設備含む）、ほう酸水の拡散及びサプレッション・プール冷却である。

R E D Y コードは元々実際に起こり得るプラント挙動（プラント安定性や運転時の異常な過渡変化）を評価する目的で開発されており、4.1 節から 4.5 節で確認したように、重要現象を模擬した各モデルの妥当性は実在する実機試験結果との比較によりほぼ確認可能である。さらに、直接確認できない炉心ボイドモデルについては、実機を模擬した試験装置での試験によっても確認されており、また、崩壊熱については学会等で公的に認められた特性を模擬していることが確認できた。なお、ボイドマップは、炉心熱水力解析コードから得られた炉心出口クオリティとボイド率との関係から静的に求めたものであることから、多少各パラメータの変動が大きくなる原子炉スクラム失敗を仮定した事象の評価においても適用可能であると考ええる。

実機試験で確認できない、原子炉スクラム失敗を仮定した事象として特有なほう酸水注入によるボロン反応度変化については、三次元コードから得られた実機を想定した高温停止に必要なボロン反応度とボロン濃度をデータとし、これに試験によって裏付けられた炉心内平均ボロン濃度の変化

を考慮している。したがって、ほう酸水拡散モデルも、原子炉スクラム失敗を仮定した実機の適用において問題がない。

原子炉格納容器内への逃がし安全弁からの蒸気放出に伴う圧力と温度の評価に関しては、質量及びエネルギーをバランス式から計算し、保守的な結果を与える仮定の下で構築された単純な物理方程式を採用していることを4.5節で説明した。したがって、原子炉格納容器の評価においてこのモデルを実機に適用することに問題はない。

#### 4.6.2 出力等が異なるプラントへの適用性

出力等が異なるプラントにおいて、原子炉停止機能喪失事象評価に影響する設備の相違箇所は、以下のとおりである。

- ・再循環系
- ・ほう酸水注入箇所
- ・ECCSの構成

再循環系については、ABWRはインターナルポンプを採用しているが、定格原子炉出力がより小さい従来型BWRでは外部ループとジェットポンプにより構成されている。この相違は、再循環ポンプがトリップして炉心流量が低下する際の炉心流量の低下速度に影響し、炉心からの冷却材への熱交換に影響するが、それぞれ実機試験結果で確認された異なる再循環系モデルを選択する。

ほう酸水の注入箇所については、ABWRでは炉心上部への注入となるが、定格原子炉出力がより小さい従来型BWRでは炉心下部へ注入する。この相違に対しては、それぞれ試験装置により確認された異なるデータを適用できる。

ECCSの構成については、原子炉スクラム失敗を仮定した事象時には原子炉圧力が高めに推移するため、高圧系のECCSを使用するが、炉型や定格原子炉出力によらず基本的な構成は相違ない。

以上より、出力等が異なるプラントへも適用可能である。

#### 4.6.3 まとめ

以上より、本章に記載している妥当性確認結果は、出力等が異なるプラントと共通の確認結果として適用性を有するとともに、実機BWRの有効性評価解析に適用できると考える。

## 5. 有効性評価への適用性

4章に記載した実機比較解析等を踏まえ、重要現象についての不確かさ、及びその不確かさが評価指標の観点と運転員操作の観点から有効性評価解析へ与える影響について表5-1にまとめた。以下にその不確かさについて記述する。

### 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 重要現象に対する不確かさが評価指標に与える影響

REDYコードで取り扱う評価指標は、原子炉圧力、燃料被覆管温度、格納容器圧力、原子炉格納容器のプール水温度である。このうち燃料被覆管温度については、REDYコードの解析結果をSCATコードに受け渡し評価を実施する。

以下に重要現象の不確かさがこれらの評価指標に与える影響について示す。

#### (1) 核分裂出力

核分裂出力は3.3節に示す一点近似動特性の核特性モデルを解くことにより求めている。核分裂出力の不確かさは、核特性モデルで使用する反応度フィードバック効果（ボイド反応度、ドップラ反応度、ボロン反応度）の不確かさに含まれる。核定数の不確かさに対しては原子炉スクラム失敗を仮定した事象が保守的な結果を与えるような燃焼度時点の炉心データを組み合わせて使用しており、反応度フィードバック効果については後述の(2)に示す。

## (2) 反応度フィードバック効果

ボイド反応度及びドップラ反応度の不確かさについては、運転時の異常な過渡変化評価と同様に、ボイド反応度に保守ファクタを考慮して計算することにより、加圧事象時の出力上昇が大きくなるように評価している。しかし、本事故シーケンスは、原子炉圧力や炉心入口サブクールが時間経過につれて増減する長期事象であることから、運転時の異常な過渡変化のような短時間の事象を評価する場合とは異なり保守因子が変化するため、ボイド反応度及びドップラ反応度の不確かさ評価で設定した範囲に対して感度解析にて確認する必要がある。なお、感度解析のための単位燃料集合体核特性計算コードの不確かさを含めた反応度フィードバック係数の不確かさ評価については、添付5にて説明する。また、感度解析実施のためにサブ時間領域ごと（添付4参照）に反応度係数を変更可能な機能をREDYコードに追加して評価を実施する。

ボロン反応度の不確かさについては、その不確かさについて感度解析を行い、評価指標に対する影響を5.1.2節で確認する。

## (3) 崩壊熱

発生熱源としての崩壊熱が大きい場合は、長時間領域で評価指標に影響があるものと想定された。崩壊熱の不確かさ幅は時間とその時点までの核分裂出力の変遷で決まるが、不確かさについて感度解析を行い、評価指標に対する影響を5.1.2節で確認する。

## (4) 沸騰・ボイド率変化

沸騰・ボイド率変化現象の不確かさは、REDYコードでは3.3節に示

した炉心ボイドモデルとそのデータの不確かさによる。データは炉心熱水力解析コードの解析結果を元に一点近似用に作成しており，現実的に評価していることから，ボイドマップが評価指標に与える影響は小さい。ただし，ボイドマップの炉心流量補正の不確かさについては感度解析を行い，評価指標に対する影響を 5.1.2 節で確認する。

#### (5) 冷却材流量変化（コーストダウン特性）

再循環ポンプトリップ時，ポンプ速度の低下が遅いほど原子炉出力の抑制も遅くなり，原子炉圧力が高めに評価される。また，炉心流量の低下が速いと，燃料被覆管温度が高くなる可能性がある。

この冷却材流量低下速度が燃料被覆管温度の評価指標に与える不確かさは感度解析にて確認する必要がある。

#### (6) 冷却材流量変化（自然循環流量）

再循環ポンプトリップにより炉心流量が低下し，自然循環状態となるが，その際，炉心流量が小さいと燃料被覆管温度が高くなる可能性がある。また，炉心流量が大きいと原子炉出力が高くなり，逃がし安全弁の開閉により原子炉格納容器側に放出される蒸気流量が多くなることから，格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度が高くなると考えられる。

自然循環流量は，再循環ポンプの駆動力（A B W R で数台運転中の期間），核特性と，これに起因した炉心内の熱水学的挙動変化，炉心シュラウド内外挙動やE C C S注水（給水系を含む）等に総合的に影響される物理現象である。このためこれを単独で切り出して不確かさを感度解析することは困難である。しかしながら，4.4.3 節で説明しているように

自然循環状態は炉心シュラウド内外の位置ヘッド差（マスバランス）が支配的であり原子炉内ボイドによる摩擦圧損等の炉心流量への影響は小さいこと、実機試験での挙動をおおむね再現できることを確認していることから、炉心流量の不確かさによる影響は評価指標に対する安全裕度を有意に小さくするものではない。さらに、解析モデルの異なるコード（TRACコード）により参考的に解析評価を行い、REDYコードによる解析結果とプラントの全体挙動が同様であることを確認する（添付7参照）。

#### (7) 冷却材放出（臨界流・差圧流）（原子炉圧力容器）

短時間領域では、逃がし安全弁から放出される蒸気流量が少ないほど、事象初期の圧力上昇が緩和されにくく、原子炉圧力が高めに評価されるとともに、炉心出力及び炉心圧力も高くなり、燃料被覆管温度も高くなると考えられる。解析で使用している逃がし安全弁容量は安全率を考慮して決定した下限値であるが、この吹出し容量の違いが評価指標に与える不確かさは感度解析にて確認する必要がある。

#### (8) ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）

給水温度の変化やECCSの水源としての原子炉格納容器のプール水温度の初期値は、炉心入口サブクーリングの変化となって原子炉出力を変化させるため、燃料被覆管温度や長時間領域の格納容器圧力、原子炉格納容器のプール水温度の評価指標に影響する可能性がある。以上より、給水温度の変化や原子炉格納容器のプール水温度の初期値の不確かさについて確認する必要がある。

なお、炉心に注入されるECCS流量が多いほど、原子炉水位が高く



なり自然循環状態における炉心流量が大きくなるため、原子炉出力が高くなる効果があると考えられる。ただし、R C I Cについては流量制御しており、不確かさの考慮は不要である。また、H P C F（H P C S）流量については、安全要求値を下限値として使用しているが、プラス側の不確かさは感度解析にて確認する必要がある。

#### (9) ほう酸水の拡散

ほう酸水の拡散に係わる不確かさは、ボロン反応度の不確かさとして原子炉出力の抑制に影響することから、長時間領域の格納容器圧力や原子炉格納容器のプール水温度の評価指標に影響する。これについては、試験装置で得られたほう酸水の混合特性を考慮して保守的に設定しており、厳しい評価となっている。

#### (10) サプレッション・プール冷却

3.3 節にて示したとおり、R E D Yコードにおける格納容器モデルでは、放熱による熱損失を考慮せず、かつ空間部が飽和状態にある等、温度及び圧力評価において保守的な仮定を置き、質量バランスとエネルギーバランスの式等により格納容器圧力や原子炉格納容器のプール水温度を計算している。これにより、格納容器圧力や原子炉格納容器のプール水温度を保守的に評価しており、コードの不確かさ要因としては考慮しないことにする。また、残留熱除去系の除熱量については、除熱量が小さい場合はサプレッション・プールの冷却速度が遅くなり格納容器圧力や原子炉格納容器のプール水温度が高くなる可能性があるが、残留熱除去系の除熱量は最小値を用いていることから、コードの不確かさ要因としては考慮しないことにする。

## 5.1.2 重要現象の不確かさに対する感度解析

5.1.1 節に示した重要現象に対する不確かさについて、評価指標に与える影響が大きい、もしくは影響の大きさの確認が必要であるとした重要現象について、REDYコードを用いた感度解析を実施した。なお、対象とした重要現象は、反応度フィードバック効果（ボイド反応度、ドップラ反応度、ボロン反応度）、崩壊熱、沸騰・ボイド率変化（炉心流量補正）、冷却材流量変化、冷却材放出（臨界流・差圧流）（原子炉圧力容器）及びECCS注水（給水系・代替注水設備含む）である。

各重要現象に対するREDYコードによる感度解析結果を表5-2に示す。対象プラントはABWRとし、主蒸気隔離弁の誤閉止を起因事象とした。また、これらのパラメータを最確値としたケースをベースケースとし、各感度解析における評価指標の値を、ベースケースからの偏差の形で示した。

評価指標の中で、制限値に対する裕度が小さいのは燃料被覆管温度だけである。このため、以下はこの燃料被覆管温度に絞っての考察を行う。

表5-2に示した感度解析結果をみると、不確かさが燃料被覆管温度にプラス側の感度（結果を厳しくする感度）を与えることはない。例えば、ボイド係数とドップラ係数の保守因子に関しては、申請解析条件では代表的にボイド係数1.25とドップラ係数0.9（解析時間を通して一定）を使用しているが、事故シーケンスに沿って不確かさを評価し、これをサブ時間領域ごとに変えた感度解析結果によると、各組合せにおいて結果を有意に厳しくすることはなく、加圧事象時の反応度係数の保守因子を申請解析条件で用いることの代表性が確認された。また、不確かさ幅を特定できないこと

から、表 5-2 に含めずに添付 2 と添付 3 で補足している軸方向出力分布が下方ピークになる場合を想定した場合は、燃料被覆管温度がより小さく評価される傾向が見られることが確認されている。

以上を総合すると、申請解析における R E D Y コードによる解析結果は評価指標である燃料被覆管温度を保守的に評価していると考ええる。

なお、R E D Y コードでは模擬できない、核熱水力不安定事象に起因した中性子束振動現象が燃料被覆管温度に与える影響は、参考解析の T R A C コードによる解析結果を参照しても、その影響は小さくかつ判断基準に対しても十分裕度があることを別途確認している。

表 5-1 重要現象の不確かさ (1/2)

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(核)	核分裂出力	核特性モデル	考慮しない	反応度フィードバック効果の不確かさに含まれる。	
	反応度フィードバック効果	反応度モデル(ボイド, ドップラ)	添付 5 の添付表 5-5 参照	反応度係数の不確かさが評価指標に影響を及ぼす。	
		反応度モデル(ボロン)	高温停止に必要なボロン反応度： - 3% Δk	ボロン反応度が小さい方が格納容器圧力と原子炉格納容器のプール水温度を厳しく評価する。	
	崩壊熱	崩壊熱モデル	崩壊熱： 1 秒後+0.8% / -0.1%	崩壊熱が大きい方が格納容器圧力と原子炉格納容器のプール水温度を厳しく評価する。	
炉心(熱流動)	沸騰・ボイド率変化	炉心ボイドモデル	炉心流量補正： 補正なし / 最大補正二次関数	補正量が大きい方が、炉心流量が小さくなった場合に炉心ボイド率を少なめに模擬することから、原子炉出力を高めに出し、燃料被覆管温度を厳しく評価する。	
原子炉圧力容器(逃がし安全弁含む)	冷却材流量変化	コーストダウン特性	再循環系モデル	再循環ポンプ慣性時定数： +10% / -10%	冷却材流量変化(強制循環時)速度が小さいと原子炉圧力が高く評価され、大きいと燃料被覆管温度が高く評価される。
		自然循環流量		モデルの仮定に含まれる	冷却材流量変化(自然循環時)が大きいと燃料被覆管温度が高くなる可能性があり、小さいと格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度が高くなる。
	冷却材放出(臨界流・差圧流)	逃がし安全弁モデル	逃がし弁流量： +16.6%	冷却材放出量が小さいと、原子炉圧力及び燃料被覆管温度が高く評価されるが、下限値を使用しているため不確かさについては考慮不要。冷却材放出量が大きいと、格納容器圧力及び原子炉格納容器のプール水温度が高く評価される可能性がある。	

表 5-1 重要現象の不確かさ (2/2)

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)	ECCS注水 (給水系・代替注水設備含む)	給水系モデル	給水エンタルピ (1)給水温度 (主蒸気流量ゼロで) -60 kJ/kg (-14°C) (2)遅れ時間 +50 秒	事象発生初期の給水温度低下による出力上昇により燃料被覆管温度が高くなる可能性がある。また、給水流量やECCS流量が多いと格納容器圧力と原子炉格納容器のプール水温度に影響を与える可能性がある。
			HPCF流量： +137%	
原子炉格納容器のプール水初期エンタルピ： -104 kJ/kg (-25°C)				
	ほう酸水の拡散	ほう酸水拡散モデル	保守的な値を使用	ほう酸水の変化を保守的に設定しており、格納容器圧力と原子炉格納容器のプール水温度も保守側の結果となる。
原子炉格納容器	サプレッション・プール冷却	格納容器モデル	保守的モデルに含まれる	単純な物理式を用いること及び保守的仮定により、保守的に評価している。

表 5-2 重要現象の不確かさに対する R E D Y 感度解析結果

重要現象	不確かさ幅	ベースケースからの感度			
		原子炉圧力 (MPa)	燃料被覆管 温度(°C)	原子炉格納容器の プール水温度(°C)	格納容器圧力 (MPa)
		9.08 <sup>(*)</sup>	1060 <sup>(*)</sup>	113 <sup>(*)</sup>	0.19 <sup>(*)</sup>
反応度フィードバック効果	添付 5 の添付表 5-5 参照	-0.44/0.01 <sup>(*1)</sup>	0/0 <sup>(*1)</sup>	(ボロン反応度が支配的な期間であり詳細不確かさは評価しない)	
	ボロン反応度：-3%Δk	0.00 (評価対象外)	0 (評価対象外)	+7	+0.04
崩壊熱	崩壊熱曲線：初期値で+1%/-2% (1秒後で+0.8%/-0.1%を包含)	0.00/0.00	0/0	0/0	0.00/0.00
沸騰・ボイド率変化	炉心流量補正： 補正なし/最大補正二次関数	-0.18/0.00	-170/0	-4/2	-0.02/0.01
冷却材流量変化(コースト ダウン特性)	再循環ポンプ慣性時定数： +10%/-10%	0.00/-0.01	0/0	0/0	0.00/0.00
冷却材放出(臨界流・差圧流)	逃がし弁流量：+16.6%	-0.39	0	0	0.00
E C C S 注水 (給水系・代替注水設備含む)	給水エンタルピ <sup>o</sup> (1)給水温度(主蒸気流量ゼロで) -60 kJ/kg (-14°C) (2)遅れ時間 +50 秒	0.00	-110 <sup>(*2)</sup>	0	0.00
	H P C F 流量：+137%	0.00	0	+4	+0.03
	原子炉格納容器のプール水初期エンタルピ： -104kJ/kg (-25°C)	0.00	0	-18	-0.06

(\*) ベースケースでの評価結果

(\*1) 本評価は、添付 5 の (動的ボイド係数, 動的ドップラ係数) の保守因子から五つの組合せ (ノミナル値, ノミナル値) (下限値, 下限値) (下限値, 上限値) (上限値, 下限値) (上限値, 上限値) を実施し、その結果から最大値と最小値を記載したものである。

(\*2) 給水温度 (+要因) と遅れ時間 (-要因) を同時に考慮した感度。仮に遅れ時間は考慮しない (0 秒) とした場合は 10°C となる。

## 5.2 不確かさの取り扱いについて（運転操作の観点）

原子炉スクラム失敗を仮定した事象において R E D Y コードで取り扱う運転操作は、ほう酸水注入系及び残留熱除去系の手動起動操作、自動減圧系（以下「A D S」という。）作動阻止操作、E C C Sによる水位低下維持操作である。

これらの運転操作へのコードの不確かさの影響を以下に記載する。

### (1) 運転操作の起点への影響

ほう酸水注入系及び残留熱除去系の手動起動操作は、事象発生時点から又は原子炉格納容器のプール水温度高の発信を起点に実施している。プラントの運転操作としては、制御棒が全挿入されない状態で、原子炉格納容器のプール水温度が高くなった場合、ほう酸水注入系及び残留熱除去系を起動することになるが、状態確認等の運転員操作の余裕時間を考慮しているため、不確かさの影響は保守的に評価される。

A D Sは作動条件成立後時間遅れをもって作動する。手動阻止操作は原子炉水位低下を確認して、A D S作動条件成立前に阻止操作を実施している。運転員は原子炉水位を確認して手動操作を実施するとともに、条件成立後であっても時間遅れがあるため、解析コードの不確かさは運転員操作に影響を与えない。

水位低下維持操作は、ボロン濃度上昇に伴い原子炉出力が低下し原子炉水位が上昇してくるために、原子炉水位を低めに維持する操作である。運転員は原子炉水位を確認して手動操作を実施するため、解析コードの不確かさは運転員操作に影響を与えない。

## (2) 運転操作後の影響

ほう酸水注入系及び残留熱除去系の手動起動操作後は、炉心部でのボロン濃度増加により原子炉出力が低下するため、原子炉水位が回復してくる。原子炉水位が上昇するとボロン濃度上昇割合が減少する可能性があるが、高温停止に必要なボロン濃度に至る時間の評価において定常水位を仮定しているため、コードの不確かさは水位低下維持操作に影響を与えない。

以上より、REDDYコードの不確かさの運転操作への影響を考慮すると、実機運用上は時間余裕が増える方向又は影響を与えないため、有効性評価で確認できた運転操作の妥当性については実機運転においても適用できる。



## 6. 参考文献

- (1) 「沸騰水型原子力発電所 プラント動特性解析手法について」  
(株式会社日立製作所, HLR-014 訂 2, 昭和 63 年 3 月)
- (2) 「沸騰水型原子力発電所 プラント動特性解析手法について」  
(株式会社東芝, TLR-012 改訂 1, 昭和 63 年 3 月)
- (3) Linford, R. B., “Analytical Methods of Plant Transient Evaluations for the General Electric Boiling Water Reactor”, NEDO-10802, February 1973.
- (4) 「沸騰水形原子力発電所 2次元単位セル計算手法について」  
(日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社, HLR-005 訂 1 平成 20 年 4 月)
- (5) 「沸騰水型原子力発電所 燃料集合体核特性計算手法」  
(株式会社東芝, TLR-006 改訂 1, 平成 20 年 9 月)
- (6) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について」  
(株式会社日立製作所, HLR-033 訂 1, 平成 10 年 2 月)
- (7) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について」  
(株式会社東芝, TLR-045 改訂 1, 平成 10 年 1 月)
- (8) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について (MOX 燃料への適用)」 (株式会社日立製作所, HLR-053 訂 2, 平成 11 年 2 月)
- (9) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について (MOX 燃料への適用)」 (株式会社東芝, TLR-045A 改訂 2, 平成 11 年 2 月)
- (10) 「沸騰水形原子力発電所 原子炉の熱設計手法について」  
(株式会社日立製作所, HLR-008, 昭和 52 年 4 月)
- (11) 「沸騰水形原子力発電所 熱水力設計計算手法について」  
(東京芝浦電気株式会社, TLR-008, 昭和 51 年 9 月)
- (12) 「沸騰水型原子力発電所 ほう酸水注入系における未臨界性評価手法

の高度化について」(TGBLA/LOGOS 版) (平成 19 年 10 月)

(13) 「沸騰水型原子力発電所 ほう酸水注入系における未臨界性評価手法  
の高度化について」(HINES/PANACH 版) (平成 19 年 10 月)

(14) ANCR-NUREG-1335 “RELAP4/MOD5 A Computer program for  
transient thermal-hydraulic analysis of nuclear reactors and  
related systems user's manual”, Volume I, September, 1976.

(15) 「BWR プラント過渡解析コード REDY のレビュー結果について」  
(昭和 60 年 2 月, 通商産業省原子力発電技術顧問会 安全解析コード  
検討会)

添付1 入力項目リスト

入力項目リスト (1/2)

分類	入力項目
定格出力運転条件パラメータ及び 幾何形状データ	原子炉熱出力
	炉心流量
	主蒸気流量
	給水流量
	再循環ポンプ流量
	原子炉圧力
	原子炉水位
	原子炉各部寸法
	各種圧力損失データ
	格納容器容積
炉心データ	ボイド反応度
	ドップラ反応度
	ボロン反応度
	炉心圧力損失
燃料データ	燃料棒本数
	燃料有効長
	燃料被覆管外径
	燃料被覆管物性
	燃料ギャップコンダクタンス
	軸方向出力分布

入力項目リスト (2/2)

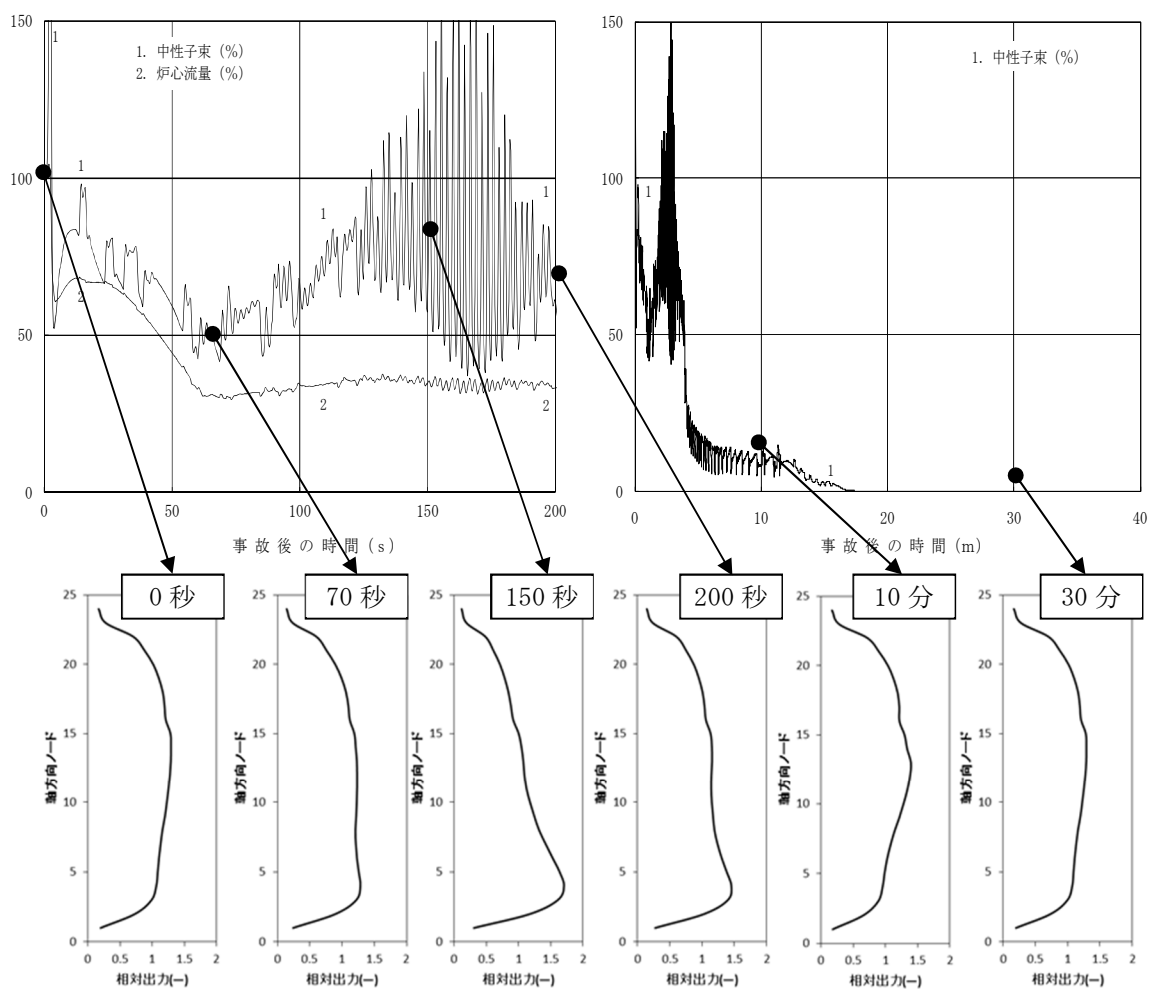
分類	入力項目
逃がし安全弁	段数及び個数
	吹き出し圧力
	吹き出し容量
給水系	容量 (予備機含む)
	停止条件
	給水温度低下特性
主蒸気隔離弁	閉トリップ設定点
	全閉時間
事故収束に重要な機器, 操作関連	代替原子炉再循環ポンプトリップ機能 (自動作動設定点, 作動遅れ時間, 台数, 再循環ポンプ慣性時定数)
	高圧注水系 (自動起動・停止設定点, 作動遅れ時間, 台数, 容量, 原子炉注水特性, 冷却水温度, 注水量調整手動操作条件)
	ほう酸水注入系 (注水遅れ時間, 注水流量, 高温停止濃度, 起動手動操作条件)
	残留熱除去系 (手動起動操作条件, 台数, 容量)

## 添付2 軸方向出力分布の変化について

REDYコードの軸方向出力分布のデータは、固定のインプットデータであり、時間変化で変わることの模擬はできない。

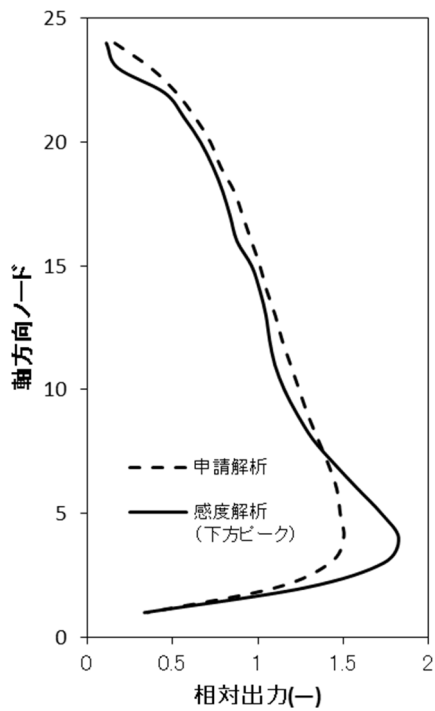
一方、添付図2-1に示すTRACコードの解析結果（代表チャンネルの軸方向出力分布の変化）によると、事象発生前（初期状態）は上方ピークであった軸方向出力分布は主蒸気隔離弁の誤閉止後給水加熱喪失状態になると、炉心入口のサブクールが増加し炉心下部を中心に正の反応度が投入されるため、軸方向出力分布は下方ピークとなっている。ただし、この下方ピークにシフトしている時間帯は約70秒から約200秒であり、この時期を過ぎると初期の軸方向出力分布に戻っている。

ここでは、REDYにおける“下方ピークの軸方向出力分布データ”の影響を確認するために、一貫して下方ピーク出力分布とした場合（異なる炉心进行评估するのが目的ではないことから、核特性やボイドマップ等は変更していない単独効果）の影響を確認する。

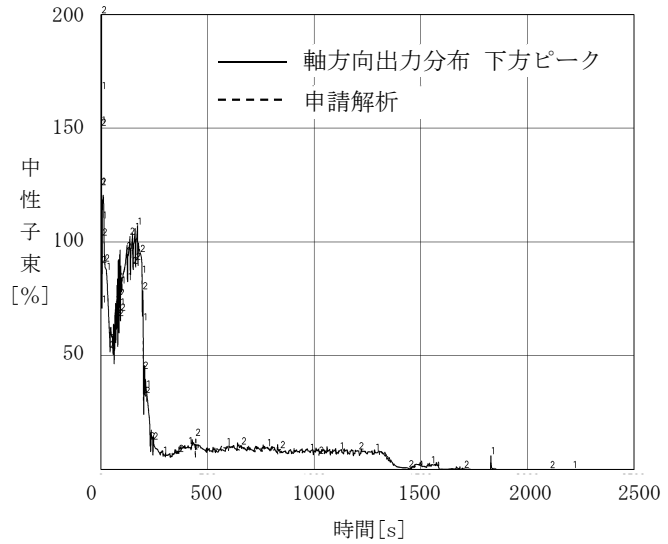


添付図 2-1 TRACコードによる軸方向出力分布の時間変化

添付図 2-2 のように軸方向出力分布を変えた場合の確認結果を添付図 2-3, 添付表 2-1 に示すが, これによると本事象で一時的に生じる下方ピーク状態を仮定しても, REDYコードでは炉心全体に及ぼす影響はほとんどないことが確認された。



添付図 2-2 R E D Yコードにおける解析条件



添付図 2-3 R E D Yコード解析結果（下方ピーク）

添付表 2-1 軸方向出力分布を変えた場合の解析結果

評価指標	R E D Yコード (申請解析)	R E D Yコード (下方ピーク軸方向出力分布)
原子炉圧力 (MPa [gage])	9.08	9.08
燃料被覆管温度 (°C)	1060	1060
格納容器圧力 (MPa [gage])	0.19	0.19
原子炉格納容器のプール水温 度 (°C)	113	113

(注) 燃料被覆管温度を求める S C A Tコードでは、中央ピークとしている。

### 添付3 軸方向出力分布変化を考慮したボイドマップの影響について

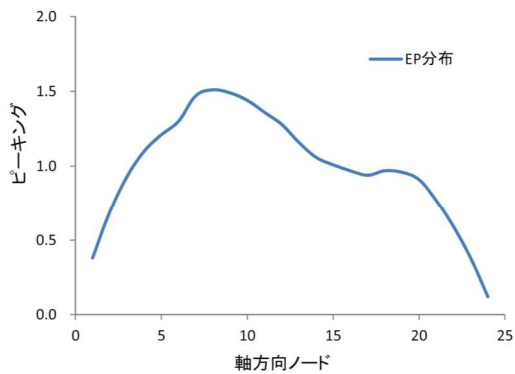
REDYコードでは、定格炉心流量でのボイドマップデータに基づき、これに過渡状態の変化を加えることで炉心のボイド率を模擬しており、このボイドマップモデルの妥当性は、広い範囲の実機試験等で確認されている。ただし、REDYコードの定格炉心流量でのボイドマップデータ自体は、固定のインプットデータであり、REDYコードの軸方向出力分布変化と同様、時間で変わることの模擬はできない。

原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止解析では、主蒸気隔離弁の誤閉止に伴う給水加熱喪失により、過渡的に軸方向出力分布が大きく下方ピークとなることがわかっており、これがREDYコードで用いている定格ボイドマップに与える影響を確認する。

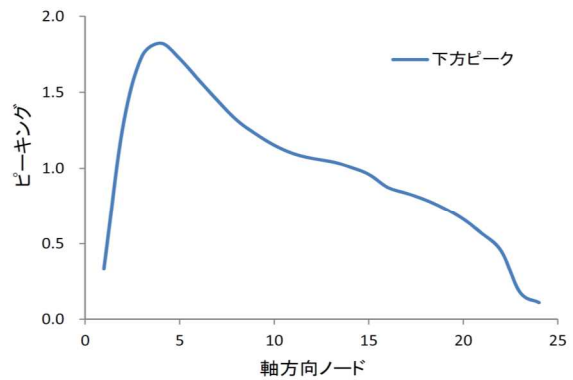
ここでは、TRACコードによる解析結果から得られる下方ピークとなった時点での軸方向出力分布を用い、炉心熱水力解析コードを用いて下方ピーク時の軸方向出力分布でのボイドマップを作成し、“下方ピークを想定した場合のボイドマップデータ”の影響を確認するために、一貫して下方ピークのボイドマップとした場合（異なる炉心を評価するのが目的ではないことから、核や軸方向出力分布は変更していない単独効果）の影響を確認する。

今回の申請解析で用いたボイドマップ作成用軸方向出力分布を添付図 3-1 に、今回の感度解析で用いたボイドマップ作成用軸方向出力分布（TRACコードによる代表的な下方ピーク）を添付図 3-2 に示す。





添付図 3-1 申請解析に用いる設計ボイドマップ作成における軸方向出力分布



添付図 3-2 TRACの「原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止」の軸方向出力分布

今回実施した影響解析の主な条件を以下に示す。

- ・プラント：代表ABWR
- ・評価事象：原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止
- ・初期条件：100%出力/100%炉心流量
- ・炉心：9×9燃料（A型）単一炉心
- ・ボイドマップ：原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止

時の給水加熱喪失状態における軸方向出力分布（下方ピーク）を考慮したボイドマップ

添付表 3-1 に示すとおり、給水加熱喪失に伴う軸方向出力分布の変化を考慮したボイドマップにより解析を実施した結果、評価指標に及ぼす影響は比較的小さいことが確認できた。

添付表 3-1 ボイドマップを変えた場合の解析結果

評価指標	REDYコード (申請解析) (設計ボイドマップ)	REDYコード (TRACコードによる代表的な 下方ピークに対応したボイドマッ プ)
原子炉圧力(MPa[gage])	9.08	8.94
燃料被覆管温度(°C)	1060	970
格納容器圧力(MPa[gage])	0.19	0.19
原子炉格納容器のプール水温 度(°C)	113	114

(注) 燃料被覆管温度を求めるSCATコードでは、中央ピークとしている。

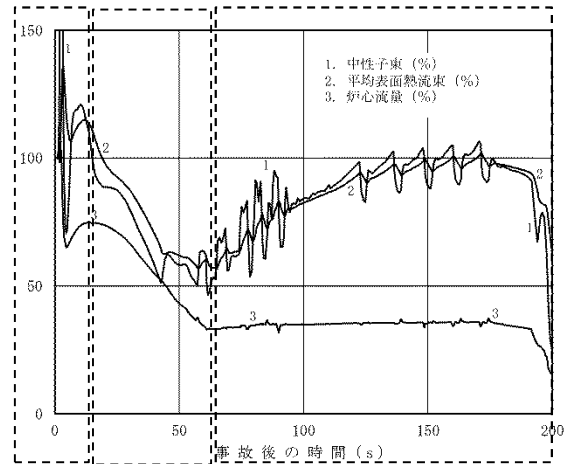
添付4 短時間領域を細分割しての重要現象のランクの検討

1. 短時間領域の細分割

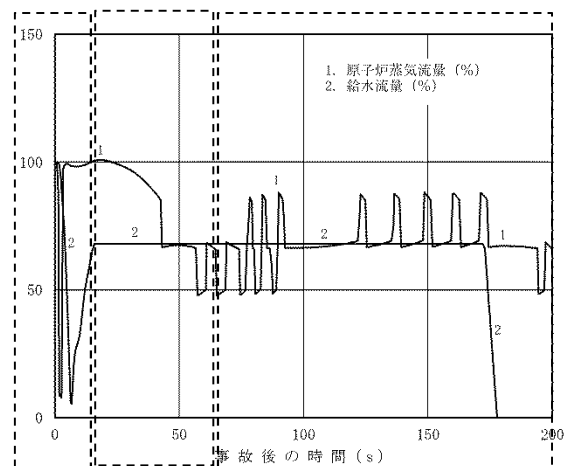
短時間領域をサブ時間領域1（出力変動期）、サブ時間領域2（出力抑制期）、サブ時間領域3（出力再上昇期）の三つのサブ時間領域に細分割した場合の重要現象のランクを検討する。なお、短時間領域での評価指標は、原子炉圧力と燃料被覆管最高温度（以下「PCT」という。）である。

(1) サブ時間領域1（0秒から約10秒）

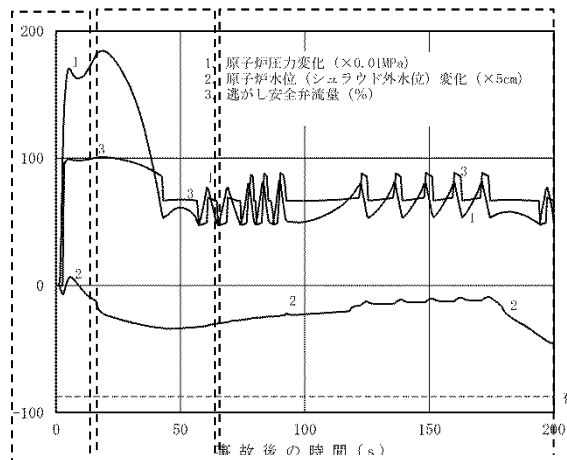
原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止により原子炉圧力が上昇するために、炉心平均ボイド率が減少し、これにより正のボイド反応度が印加され中性子束が上昇する。ただし、中性子束上昇に伴って燃料温度と熱出力も増加するため、負のドップラ反応度印加、発生熱に伴う炉心内ボイド率増加による負のボイド反応度印加により中性子



(a) 中性子束, 平均表面熱流束, 炉心流量



(b) 原子炉蒸気流量, 給水流量



(c) 原子炉圧力変化, 原子炉水位変化, 逃がし安全弁流量

添付図 4-1 原子炉停止機能喪失

束の過度な上昇は抑制される（BWRの自己制御性）。同時期に、原子炉圧力高のインターロック信号が2秒で作動し4台の再循環インターナルポンプ（以下「R I P」という。）トリップが炉心流量を急減させ負のボイド反応度を印加することにより、中性子束は2秒後に306%のピークを迎えた後、一時的に定格値以下にまで低下する。その後は継続する圧力上昇によって中性子束が再度上昇する。なお、本期間内で給水ポンプはタービン駆動給水ポンプからモータ駆動給水ポンプに切り替わる。

以上に述べた時間領域は、中性子束が定格値近傍で増減する領域であり、これをサブ時間領域1（出力変動期）とした。

#### (2) サブ時間領域2（約10秒～約60秒）

この時間領域では、再循環流量制御系自動モードにより、トリップしていない6台のR I Pポンプ速度が次第に最低速度まで低下し、炉心流量が一定になるまで、炉心のボイド率が増加する。このため、徐々に負のボイド反応度が投入され出力は約50%まで低下する。この時間領域の初期ではまだ出力が高く、炉心流量減少開始による冷却能力低下により、燃料被覆管温度が15秒で820℃となり（一次ピーク）、原子炉圧力は19秒後に最大値8.92MPa[gage]となるが、その後はいずれも継続的な炉心流量低下により徐々に抑制される。これをサブ時間領域2（出力抑制期）とした。なお、図示してはいないが、格納容器圧力高により34秒後にH P C FとR C I Cが起動し、原子炉水位の異常な低下を抑制している。

#### (3) サブ時間領域3（約60秒～約200秒）

トリップしなかった6台のR I Pは最低速度で運転を継続し、炉心流量はほぼ一定となる。この間、主蒸気隔離弁が閉鎖することに起因して給水

加熱能力が喪失し、給水流量のエンタルピが次第に低下することにより、炉心入口サブクーリングが増加する。このため、炉心平均ボイド率が減少し、出力が次第に上昇し150秒前後に定格出力近傍で平衡状態となる。この間の原子炉圧力は逃がし安全弁の開閉によりほぼ一定に制御される。173秒で復水器ホットウェル水位低で給水ポンプトリップ、191秒で原子炉水位低で運転中の6台のR I Pトリップが生じ、再循環流量は自然循環流量状態に移行するとともに、原子炉出力は低下し、燃料被覆管温度も175秒で1060℃となった（二次ピーク）のち低下する。以上に述べた時間領域は、給水加熱喪失により中性子束が再上昇する領域であり、これをサブ時間領域3（出力再上昇期）とした。

## 2. 重要現象のランク付け

原子炉圧力の最大値と燃料被覆管温度（一次ピーク）の最大値はサブ時間領域2で、燃料被覆管温度（二次ピーク）は給水加熱喪失により中性子束が再上昇するサブ時間領域3で決まる。短時間領域で重要と考えられる物理現象は、核分裂出力、出力分布変化、反応度フィードバック効果、三次元効果（核）、沸騰・ボイド率変化、三次元効果（熱流動）、冷却材流量変化、冷却材流量放出、E C C S流量（給水系含む）であるが、これらの物理現象を前述の三つのサブ時間領域ごとに当てはめて、評価指標へのランクと不確かさを検討した。

### (1)核分裂出力

反応度フィードバック効果との総合事象として評価するものであり、プラント挙動に関わらず、どのサブ時間領域でも評価指標に与える重要度は高いと考える。

## (2) 出力分布変化

サブ時間領域 1 とサブ時間領域 2 では、軸方向出力分布は形状がそれほど変わらずに一様に変化する。一方、サブ時間領域 3 では給水加熱喪失により軸方向出力分布が下方ピークとなることが従来から知られている。

原子炉圧力は冷却材流量放出（逃がし安全弁）により制御され、本物理現象はどのサブ時間領域でも評価指標である原子炉圧力を評価する上で重要現象とはならない。燃料被覆管温度は、サブ時間領域 3 において軸方向出力分布が下方ピークに変化することから、炉心ボイド率の変化を通して評価指標である燃料被覆管温度へ影響を与える。本物理現象はむしろ燃料被覆管温度を小さくする方向である。この下方ピークへの変化を考慮しない評価は厳しめの結果を与えることになることから、評価指標である燃料被覆管温度に与える重要度は低い。ただし、これを確認するために添付 2 及び 3 にてサブ時間領域 3 で軸方向出力分布が下方ピークとなることの影響を確認するための感度解析を実施している。

## (3) 反応度フィードバック効果（ボイド反応度，ドップラ反応度）

原子炉圧力は冷却材流量放出（逃がし安全弁）により制御され、本物理現象はどのサブ時間領域でも評価指標である原子炉圧力に与える重要度は低いと考えられる。

一方、本物理現象が評価指標である燃料被覆管温度に与える重要度は、サブ時間領域 2 及びサブ時間領域 3 で高い。詳細化したサブ時間領域ごとのプラント状態を見てみると、各サブ時間領域のボイド率変化、燃料温度変化、炉心入口サブクーリング変化はプラント挙動に大きく左右され、各サブ時間領域に対して実施した不確かさ評価結果（添付 5 参照）を、それぞれのサブ時間領域に別々に適用してその影響を確認することがより現実

的であると考え。以上より、サブ時間領域ごとに反応度フィードバック効果（ボイド反応度，ドップラ反応度）の不確かさを変えて，燃料被覆管温度に与える影響を評価する。

#### (4) 三次元効果（核）

核熱水力不安定事象により中性子束振動が生じる可能性のある期間は，サブ時間領域 3 であり，本物理現象が評価指標である燃料被覆管温度に与える重要度は中程度と考えられる。ただし，RE DYコードでは中性子束振動（三次元効果）を再現することはモデル上困難であり，TRACコードを参照している。

#### (5) 沸騰・ボイド率変化

沸騰・ボイド率変化は反応度フィードバック効果（ボイド反応度）に直接影響を与えることから，評価指標である原子炉圧力に対しては，サブ時間領域 1 及びサブ時間領域 2 で重要度が高い。評価指標である燃料被覆管温度に対してはサブ時間領域 2 及びサブ時間領域 3 で重要度が高く，サブ時間領域 1 は出力変動期間ではあるが，ボイド率の炉心流量依存性並びにその後のサブ時間領域 2 及び 3 へ与える影響の重要度を考慮すると，重要度は中程度になると考えられる。

この場合，RE DYコードで使用しているボイドマップの炉心流量依存性の不確かさはどのサブ時間領域でも適用でき，RE DYコード説明書にて不確かさを評価している。なお，サブ時間領域 3 において下方ピークに対応したボイドマップとなることの検討は前述(2)の出力分布変化に含めて検討・考察している。

#### (6) 三次元効果(熱流動)

上記、(4)の三次元効果(核)と同様、サブ時間領域3(出力再上昇期)を対象とした核熱水力不安定事象に起因した中性子束振動が、評価指標である燃料被覆管温度に与える重要度は中程度と考える。

#### (7) 冷却材流量変化

ポンプトリップによるコストダウン特性は、サブ時間領域1で評価指標である燃料被覆管温度に与える重要度が高いと考えられ、RE DYコード説明書本文にて不確かさの感度解析を実施している。

#### (8) 冷却材流量放出

冷却材流量放出(逃がし安全弁流量)は、原子炉内で発生する熱を原子炉から原子炉格納容器へ放出する上でサブ時間領域1及び2において、評価指標である原子炉圧力に与える影響は中程度と考えられる。一方、本事象が評価指標である燃料被覆管温度に与える重要度はどのサブ時間領域においても小さいと考えられる。

#### (9) E C C S 流量(給水系含む)

時間遅れを持って炉心に影響を与える給水加熱喪失は、サブ時間領域3において炉心入口サブクールを減少として出力に影響するため、燃料被覆管温度に対して重要度が高いと考えられ、RE DYコード説明書本文にて感度解析を実施している。

以上、短時間領域におけるプラント挙動を考慮した上で各重要物理現象のランク付けを再検討した結果を添付表4-1に示す。ここで、太線で囲んだものが、本文の短時間領域で報告しているものであり、短時間領域でのラ



ランク（三つのサブ時間領域の中で一番高いランク）付けは妥当であることが示されている。

添付表4-1 短時間領域を細分割した場合のランク評価結果

細分割区分 (全体は短時間領域)	サブ時間領域1		サブ時間領域2		サブ時間領域3		短時間領域	
	出力変動期		出力抑制期		出力再上昇期		—	
評価指標 物理現象	原子炉 圧力	PCT	原子炉 圧力	PCT	原子炉 圧力	PCT	原子炉 圧力	PCT
核分裂出力	H	H	H	H	H	H	H	H
出力分布変化	I	I	I	I	I	L	I	L
反応度フィードバック 効果 (ボイド, ドップラ)	L	M	L	H	L	H	L	H
三次元効果 「炉心(核)」	L	L	L	L	L	M	L	M
沸騰・ボイド率変化 「炉心(熱流動)」	H	M	H	H	L	H	H	H
三次元効果 「炉心(熱流動)」	L	L	L	L	L	M	L	M
冷却材流量変化 「原子炉圧力容器」	L	H	L	L	L	L	L	H
冷却材流量放出 「原子炉圧力容器」	M	L	M	L	L	L	M	L
ECCS注水 (給水系含む)	I	I	I	I	I	H	I	H

## 添付5 原子炉停止機能喪失事象での反応度係数（REDYコード用）の保守因子について

原子炉停止機能喪失事象に対する炉心損傷防止対策の有効性評価において、REDYコードに原子炉設置変更許可申請書の添付書類に記載の平衡炉心サイクル末期の反応度係数に一律の保守因子（減速材ボイド係数は1.25倍、ドップラ係数は0.9倍）を掛けた反応度係数を用いている。

一方、本事象では、事象の進展に伴い、初期の運転状態から炉心流量、原子炉圧力、炉心入口エンタルピ、軸方向出力分布等が時間とともに変化し、ボイド係数、ドップラ係数が影響を受け、保守因子は一定ではない。

そこで有効性評価手法が適切であることを確認するために、前述のとおり5.1.2節の「重要現象の不確かさに対する感度解析」において本事象を三つのサブ時間領域に細分割した上で、それぞれに反応度係数に対する保守因子を設定してREDYコードによる評価を行っている。

ここでは、①、②において5.1.2節の「重要現象の不確かさに対する感度解析」で用いる反応度係数に対する保守因子を求め、③において5.1.2節の感度解析結果より有効性評価の一律の保守因子の手法が適用できることを確認した。

- ① 炉心一点近似縮約による反応度係数評価は、圧力変化、流量変化等の摂動による炉心状態変化及び事象進展に伴う炉心状態変化を扱うことができない。原子炉停止機能喪失事象では、この炉心状態変化の変化に伴う不確かさが大きくなる可能性があるため、静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードにより、各サブ時間領域に対するボイド係数、ドップラ係数を評価し、炉心一点近似手法による反応度係数（添

付書類八記載の値) に対する比として各時間領域の反応度係数の保守因子のノミナル値を評価した。

- ② ①で求めた保守因子のノミナル値に，静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードにより評価したボイド係数，ドップラ係数の不確かさ及び取替炉心設計段階における不確かさ（補足参照）を加えることで，5.1.2 節の「重要現象の不確かさに対する感度解析」で用いる反応度係数の保守因子変動幅を求めた。
- ③ ①及び②の検討より，原子炉停止機能喪失事象に対する炉心損傷防止対策の有効性評価において，事象を通じた一律の保守因子として，ボイド係数は 1.25 及びドップラ係数は 0.9 が適用できることを確認した。

## 1. 原子炉停止機能喪失事象での各時間領域の反応度係数の保守因子のノミナル値

### (1) 評価方法

原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止発生事象の短時間領域を，以下の三つのサブ時間領域に細分割し，

- ・出力変動期（サブ時間領域 1）
- ・出力抑制期（サブ時間領域 2）
- ・出力再上昇期（サブ時間領域 3）

各サブ時間領域の代表的な炉心状態における炉心パラメータを用い，静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードにより，ボイド係数，ドップラ係数を評価し，原子炉設置変更許可申請書の添付書類八に記載の反応度係数（保守因子1.0倍に相当）と比較した。

ボイド係数は，各解析点に応じた微小な摂動を与え実効増倍率の変化量を

求め、炉心平均のボイド率の変化量で除することで求めた。各解析点での摂動は、添付表5-2、添付表5-3に示すように、サブ時間領域1では圧力摂動、サブ時間領域2では流量摂動、サブ時間領域3では入口エンタルピ摂動を与えた。

ドップラ係数は、各解析点における摂動計算により炉心平均値を求めた。

## (2) 解析条件

解析は二つの代表プラントを対象として行い、この主な解析条件を添付表5-1に示す。

添付表 5-1 主な解析条件

プラント	代表ABWR	代表従来型BWR
評価条件	原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止	
初期条件	100%出力/100%炉心流量	100%出力/85%炉心流量
炉心	9×9燃料 (A型) 単一炉心	9×9 (A型) +標準組成MOX燃料混在炉心
解析コード	HINES/PANACH	TGBLA/LOGOS

(注) HINES, TGBLA : 単位燃料集合体核特性計算コード

PANACH, LOGOS : 三次元沸騰水型原子炉模擬計算コード

### (3) 解析結果

各解析点における，三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードによる反応度係数と一点近似モデルの反応度係数<sup>(\*)</sup>の比（以下「三次元／炉心一点近似（保守因子 1.0）」という。）を添付表 5-2 及び添付表 5-3 に示す。これによると，摂動及び事象進展に伴い軸方向の出力分布及びボイド分布が変化するためボイド係数は変化するが，ドップラ係数は主に U-238 の共鳴吸収が支配的であることから変化は小さくなっている。

(\*)原子炉設置変更許可申請書の添付書類八に記載の減速材ボイド係数，ドップラ係数

冒頭に述べたように，炉心一点近似縮約による反応度係数評価は，圧力変化，流量変化等の摂動及び事象進展に伴う炉心状態の変化を扱えないため，三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードを用いて炉心状態変化を取り込んで評価しているが，ボイド係数において特にその影響が大きいことが分かる。

このように三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードを用いることで，炉心状態変化を取り込むことができるものの，静的評価であることによる不確かさが含まれると考えられる。そこで，静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードによりボイド係数を評価できることを含めて，サブ時間領域ごとに保守因子の設定について以下のとおり確認した。

サブ時間領域 1 では，圧力増加による正のボイド反応度印加による中性子束の上昇が支配的である。圧力摂動においては，軸方向ボイド率分布変化に伴う軸方向出力分布への影響は，流量摂動，エンタルピ摂動に比較して小さく，また，炉心一体型の摂動であり，特に軸方向にほぼ時間遅れなく摂動が

与えられるため、事象開始時点の炉心状態に対して静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードを用いてボイド係数を評価することは可能であると考えられる。

サブ時間領域2における支配的要因は流量摂動であり、炉心出力だけでなく、軸方向ボイド率分布、軸方向出力分布もこの影響を受ける。炉心入口流量が減少すると、この流量摂動の影響が時間遅れを伴って動的に下方から上方に伝わり、上部のボイド率が変化する前に下方のボイド率が増加することとなる。このため、静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードによるボイド係数評価では現実の軸方向ボイド率分布、軸方向出力分布と異なった状態を評価していることになる。この流れによる時間遅れがボイド率変化に及ぼす影響を確認するため、SCATコードにより、サブ時間領域2の流量減少の時間変化を模擬した場合と定常解析に相当する準静的に流量が減少した場合について、軸方向ボイド率分布を評価したところ、両者の差はほとんどないことが確認された。以上より、サブ時間領域2における流量減少は緩やかであり、流れによる時間遅れによる軸方向ボイド率分布への影響は小さく、ボイド係数への影響は小さいといえる。なお、5.1.2節の「重要現象の不確かさに対する感度解析」において本事象を三つのサブ時間領域に細分割した上で、反応度係数に対する保守因子の上限値、下限値を添付表5-2に基づき設定してREDYコード/SCATコードによる評価を行っており、一律の保守因子を用いた有効性評価における燃料被覆管温度よりも高くないとの結果を得ている。このようにボイド係数の有効性評価結果への感度が小さいことから、不確かさを大きめに考慮することで、静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードによりボイド係数を評価することは可能であると考えられる。

サブ時間領域3においては、給水温度低下に伴うエンタルピ摂動が支配的であるが、逃がし安全弁開閉に伴う圧力摂動もボイド係数に影響を及ぼす。圧力摂動については軸方向ボイド率分布変化に伴う軸方向出力分布への影響は小さいが、エンタルピ摂動では影響が大きく、ボイド係数自体として絶対値が大きくなる。サブ時間領域3において給水温度が低下し、さらに逃がし安全弁が閉じられた場合は、両者ともボイド率を低下させる方向に働くため正のボイド反応度が印加されることになる。この場合、ボイド反応度変化量としては両者の効果が重畳するものの、ボイド率変化量も両者の効果が重畳するので、単位ボイド率変化量に対するボイド反応度変化量で定義されるボイド係数は、エンタルピ摂動単独で変化したボイド係数と圧力摂動単独で変化したボイド係数の中間的な値となる。以上より、エンタルピ摂動単独で変化したボイド係数を用いた方が出力を高め（保守的）に評価することにもなるため、エンタルピ摂動によるボイド係数で代表させている。

エンタルピ摂動による影響は、流量摂動と同様に時間遅れをもって炉心軸方向下方から上方に伝わるが、サブ時間領域2の炉心流量減少に比較して事象進展がゆっくりしていることから、静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードで評価することは可能であると考えられる。一方、サブ時間領域3は、当該時点までの事象進展に伴う炉心状態変化による不確かさがより大きくなると考えられるため、保守因子を設定する上で不確かさを大きめに見る必要がある。この不確かさの定量化は困難であるが、5.1.2節の「重要現象の不確かさに対する感度解析」より、ボイド係数の有効性評価結果への感度が小さいことから、静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードによりボイド係数を評価することは可能であると考えられる。

なお、中性子束振動状態での静的反応度係数は定義できないため、本手法の適用対象外である。中性子束振動が局所的な燃料被覆管温度に与える影響に関しては、米国において中性子束振動の評価実績がある異なる解析コード（TRACコード）による参考解析結果を参照する。

添付表 5-2 代表ABWRの原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止事象の代表点における反応度係数の比（三次元／炉心一点近似（保守因子1.0））

細分割区分	摂動の種類	ボイド係数	ドップラ係数
サブ時間領域1	圧力摂動		
サブ時間領域2	流量摂動		
サブ時間領域3 <sup>(*)</sup>	入口エンタルピ摂動		

(\*) 中性子束振動に対しては適用外

添付表 5-3 代表従来型BWRの原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止事象の代表点における反応度係数の比（三次元／炉心一点近似（保守因子1.0））

細分割区分	摂動の種類	ボイド係数	ドップラ係数
サブ時間領域1	圧力摂動		
サブ時間領域2	流量摂動		
サブ時間領域3 <sup>(*)</sup>	入口エンタルピ摂動		

(\*) 中性子束振動に対しては適用外

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. 原子炉停止機能喪失事象での反応度係数の保守因子の変動範囲

前節で求めた各サブ時間領域の保守因子のノミナル値と、補足に記載した三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードによるボイド係数、ドップラ係数の不確かさ及び取替炉心設計段階における不確かさを用いて、5.1.2 節の「重要現象の不確かさに対する感度解析」で用いる反応度係数の保守因子を求めた。

具体的には、添付表 5-2，添付表 5-3 の値に，以下の添付表 5-4（補足表 5-9 より転載）の不確かさを加えて，添付表 5-5，添付表 5-6 のようになる。

なお，ここでは遅発中性子割合の不確かさも含めて，動的反応度係数としてまとめている。

添付表 5-4 平衡炉心末期の動的反応度係数の不確かさ（まとめ）

不確かさの要因	動的ボイド係数	動的ドップラ係数
原子炉停止機能喪失事象解析での不確かさ（合計）		

（補足表 5-9 より転載）

（\*） 1. で前述したような静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードを用いることによる不確かさ，事象進展に伴う炉心状態変化による不確かさの増加が考えられることから，「その他の要因に対する安全余裕」として，ボイド係数 ，ドップラ係数  の安全余裕を採用している。

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。

添付表 5-5 代表 A BWR の原子炉スクラム失敗を仮定した  
主蒸気隔離弁の誤閉止事象中の動的反応度係数の  
保守因子（平衡炉心サイクル末期）

反応度係数 細分割区分	動的ボイド係数			動的ドップラ係数		
	下限値	ノミナル	上限値	下限値	ノミナル	上限値
サブ時間領域 1						
サブ時間領域 2						
サブ時間領域 3						

添付表 5-6 代表従来型 BWR の原子炉スクラム失敗を仮定した  
主蒸気隔離弁の誤閉止事象中の動的反応度係数の  
保守因子（平衡炉心サイクル末期）

反応度係数 細分割区分	動的ボイド係数			動的ドップラ係数		
	下限値	ノミナル	上限値	下限値	ノミナル	上限値
サブ時間領域 1						
サブ時間領域 2						
サブ時間領域 3						

(\*) サブ時間領域 1 は事象進展に伴う炉心状態変化による不確かさの増加は小さいと考えられることから、添付表 5-5、添付表 5-6 では「その他の要因に対する安全余裕」を含まず記載している。

ただし、5.1.2 の「重要現象の不確かさに対する感度解析」では、保守側評価として、サブ時間領域 1 に対してもサブ時間領域 2、3 と同じボイド係数

、ドップラ係数  の安全余裕を採用している。

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。

添付表 5-6 に示した代表従来型 BWR プラントの検討結果は、標準組成 MOX 燃料混在炉心の場合を想定しているが、ここに初期 Pu 組成変動、及び装荷遅れの影響を考慮すれば、添付表 5-6 の結果に対して、更に動的ボイド係数で [ ] 倍、動的ドップラ係数で [ ] 倍を見込む必要がある。

動的反応度係数の保守因子の変動による有効性評価への影響を確認するため、添付表 5-5 及び添付表 5-6 に示した保守因子の上下限値を組み合わせた感度解析を実施した。添付表 5-7 及び添付表 5-8 に感度解析結果を示す。代表 A BWR の場合は、給水温度低下によって原子炉出力が準静的に増加するサブ時間領域 3 において燃料被覆管温度が最高温度となるため、各ケースとも有意な差は生じていない。一方、代表従来型 BWR の場合は、原子炉圧力上昇によって原子炉出力が急増するサブ時間領域 1、及び流量減少によって原子炉出力が急減するサブ時間領域 2 において燃料被覆管温度が最高温度となるため、保守因子の影響を比較的受けやすいものの、ベースケースに比較して過度に温度が上昇するものはない。以上より、不確かさが燃料被覆管温度に有意な影響を及ぼすものではないことを確認した。

添付表 5-7 代表 A B W R の動的反応度係数の保守因子の

不確かさを考慮した場合の感度解析

	保守因子 <sup>(*1)</sup>		燃料被覆管温度	
	動的ボイド係数	動的ドップラ係数	最高温度 (°C)	最高温度の偏差 <sup>(*2)</sup> (°C)
ベースケース	1.25	0.9	約 1060	-
ケース 1	ノミナル値	ノミナル値	約 1060	0
ケース 2	下限値	下限値	約 1060	0
ケース 3	下限値	上限値	約 1060	0
ケース 4	上限値	下限値	約 1060	0
ケース 5	上限値	上限値	約 1060	0

(\*1) ノミナル値／上限値／下限値については、添付表 5-5 参照

(\*2) ベースケースとの偏差

添付表 5-8 代表従来型 B W R の動的反応度係数の保守因子の

不確かさを考慮した場合の感度解析

	保守因子 <sup>(*1)</sup>		燃料被覆管温度	
	動的ボイド係数	動的ドップラ係数	最高温度 (°C)	最高温度の偏差 <sup>(*2)</sup> (°C)
ベースケース	1.25	0.9	約 1030	-
ケース 1	ノミナル値	ノミナル値	約 930	-100
ケース 2	下限値	下限値	約 920	-110
ケース 3	下限値	上限値	約 870	-160
ケース 4	上限値	下限値	約 1010	-20
ケース 5	上限値	上限値	約 940	-90

(\*1) ノミナル値／上限値／下限値については、添付表 5-6 参照

(\*2) ベースケースとの偏差

### 3. 原子炉停止機能喪失事象に対する炉心損傷防止対策の有効性評価における反応度係数の保守因子について

有効性評価において反応度係数に一律の保守因子（減速材ボイド係数は1.25倍，ドップラ係数は0.9倍）を用いていることについて，以下に検討した結果をまとめる。

サブ時間領域1は，1. で述べたとおり，圧力摂動が支配的な期間であり，静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードにより保守因子を評価することが可能である。また，ボイド係数は2. に示した保守因子変動範囲よりも保守的な値（1.25）を有効性評価で用いている。ドップラ係数は保守因子変動範囲の下限値が有効性評価で用いている値よりも下回っているものの，サブ時間領域1の出力ピークに起因した燃料被覆管温度への影響は，ドップラ係数が下限値の場合でも有意に厳しくなるケースはなく，ドップラ係数の感度は小さいことが分かった。

従って，サブ時間領域1において，反応度係数の保守因子は，動的ボイド係数は1.25倍，動的ドップラ係数は0.9倍を適用できると考えられる。

サブ時間領域2は，流量摂動が支配的な期間ではあるが，静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードで評価する保守因子には，流れによる時間遅れが軸方向ボイド率分布，軸方向出力分布へ及ぼす影響は考慮されていない。しかしながら，流量減少は緩やかであり，SCATコードによる評価により，流れの時間遅れによる軸方向ボイド率分布への影響は小さいことが確認されたため，この現象のボイド係数への影響は小さいといえる。不確かさを考慮して設定した保守因子の上限値及び下限値を用いたREDYコード/SCATコードによる評価結果は，一律の保守因子を用いた有効性評価における燃

燃料被覆管温度よりも有意に厳しくなることはなく、サブ時間領域2においても、反応度係数の保守因子は、動的ボイド係数は1.25倍、動的ドップラ係数は0.9倍を適用できると考えられる。

サブ時間領域3は、給水温度低下に伴うエンタルピ摂動及び逃がし安全弁開閉に伴う圧力摂動が支配的な期間ではあるが、保守的にエンタルピ摂動が支配的であるとして保守因子を評価している。サブ時間領域3におけるエンタルピ摂動は事象進展が遅いため、静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードにより保守因子を評価することは可能と考えられるが、2.に示したように保守因子変動範囲は有効性評価で用いた一律の保守因子よりも非保守的なものがある。しかしながら、不確かさを考慮して設定した保守因子の上限値及び下限値を用いたREDYコード/SCATコードによる評価を行っているが、一律の保守因子を用いた有効性評価における燃料被覆管温度よりも有意に厳しくなることはないとの結果を得ており、サブ時間領域3においても、反応度係数の保守因子は、動的ボイド係数は1.25倍、動的ドップラ係数は0.9倍を適用できると考えられる。

以上より、反応度係数の保守因子として、動的ボイド係数は1.25倍、動的ドップラ係数は0.9倍を適用できると考える。

#### [参考文献]

- (1) ミクロ炉物理学 I. 連続エネルギーモンテカルロ法によるドップラ反応度の検証 (原子力学会 2000年春の年会)
- (2) ミクロ炉物理学 1999年日本原子力学会誌 Vol. 41, No. 11 (1999) p. 37-41
- (3) 熱中性子散乱カーネルを修正したMCNP5による上方散乱効果の確認

(原子力学会 2012 年春の年会)

- (4) 重核種の熱振動を考慮できる共鳴散乱モデルを組み込んだ改良 MCNP5 の  
妥当性確認と Monteburns2 への組み込み

(原子力学会 2012 年秋の大会)

- (5) 軽水炉燃料の Doppler 反応度計算における評価モデル詳細化の検討

(原子力学会 2015 年秋の大会)

- (6) Effect of Subchannel Void Fraction Distribution on Lattice Physics  
Parameters for Boiling Water Reactor Fuel Bundles

(Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, vol.45, No.12,  
p. 1237-1251, 2008)

## 添付 5 補足 反応度係数評価の不確かさ要因について

反応度係数の評価を以下の四つの段階に分けて、不確かさ要因を抽出し整理した。

[1]～[3]は、反応度係数計算の不確かさと取替設計段階における不確かさであり、[4]は[1]～[3]で述べた炉心一点近似手法による R E D Y コードの反応度係数の不確かさである。

[1] 燃料集合体計算より上流側で生じる不確かさ

[2] 燃料集合体計算に由来する不確かさ

[3] 三次元炉心計算の不確かさ（取替炉心の詳細設計段階の不確かさも含む）

[4] R E D Y コードの反応度係数の不確かさ（[1]～[3]で記載）

以下に、[1]～[3]の反応度係数の主要な不確かさ要因を挙げる。なお、サブ時間領域 2 及びサブ時間領域 3 においては、静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードにより反応度係数を評価するのに当たり有意な不確かさが生じる可能性があり、さらに補足表 5-2 にあるように、その他の要因も幾つか考えられることから、これらを「その他の要因に対する安全余裕」として、動的ボイド係数に 、変動量の小さい動的ドップラ係数に  の安全余裕を加える。5.1.2 で重要現象の不確かさに対する感度解析を行うのにおいては、保守側にサブ時間領域 1 に対しても、同じ安全余裕を加えることとする。

[1] 燃料集合体計算より上流側で生じる不確かさ

燃料集合体計算より上流側で生じる不確かさ要因としては、補足表 5-1 に示す核データライブラリ中に含まれる種々の不確かさに起因した不確かさが挙げられる。

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。



補足表 5-1 燃料集合体計算より上流側で生じる不確かさ要因

	不確かさ要因	備 考
1.1	核データライブラリ中に含まれる種々の不確かさに起因した不確かさ	臨界試験によりライブラリまで含めて妥当性が確認される。 実機の運転により実効増倍率等が確認される。

現行の単位燃料集合体核特性計算コードの核データライブラリは ENDF-B4, B5 で、最新 (ENDF-B7) のものではないが、臨界試験 (ボイド反応度 : EPICURE, BASALA 試験, ドップラ反応度 : Hellstrand の実験式, 実効遅発中性子割合  $\beta$  : TCA, MISTRAL 試験) との比較で、核データ断面積ライブラリまで含めた燃料集合体計算コードの不確かさが確認されている。

[2] 燃料集合体計算に由来する不確かさ

燃料集合体計算に由来する不確かさ要因を補足表 5-2 に整理する。これらは、試験との比較により不確かさが確認されている。

なお、ドップラ係数に対しては、ペレット内温度分布の影響は有意だが、重核種の熱振動の影響を無視していることで相殺する方向 (両者合計でやや more negative 側の評価, 参考文献の文献 1 ~ 文献 5 参照) となっており、現行コードでは考慮されていない。

補足表 5-2 燃料集合体計算に由来する不確かさ要因

	不確かさ要因	備考
2.1	概念モデルに由来する不確かさ ・実験又は連続群モンテカルロ計算手法との相違に由来する不確かさ	臨界試験との比較で確認解析
2.2	数学的モデルに由来する不確かさ ・種々の数学モデル（拡散近似，燃焼チェイン，共鳴計算等）に由来する不確かさ	臨界試験との比較で確認 ドップラ係数については，重核種の熱振動の影響（more negative 側）は有意(*)
2.3	入力データ，計算条件等に由来する不確かさ ・実験体系との妥当性確認時と設計計算時又は連続群モンテカルロ計算との比較計算時とで異なる種々の条件，設定，計算体系のモデル化等に由来する不確かさ ・減速材の密度及び温度の分布，燃料温度分布が実機燃料と異なることに由来する不確かさ	チャンネル曲り，製造公差の影響は炉心全体で平均化され影響は小さいと考えられる(*) 集合体内ボイド分布の影響は Gd が存在する領域では有意（参考文献の文献 6）だが，平衡炉心では新燃料体数が少なく炉心全体への影響は小さいと考えられる(*) ドップラ係数については，燃料棒ペレット内温度分布の影響（less negative 側）は有意(*)
2.4	下流側コードへのデータ受け渡しの方法論・モデルに由来する不確かさ	影響の大きな要因はないと考えられる(*)
2.5	その他の不確かさ ・妥当性確認に用いる実験データの不確かさ	試験の測定誤差が大きい場合（ドップラ係数）は考慮

(\*)その他の要因として考えられるもの（追加の安全余裕にて考慮）

燃料集合体計算に由来する不確かさ（補足表 5-2 の (\*)を除く要因）は，試験データとの比較により，補足表 5-3 のようになっている。

補足表 5-3 単位燃料集合体核特性計算コードの不確かさ

	動的ボイド係数	動的ドップラ係数
試験データを基準とした不確かさ		

- ・動的ボイド係数の不確かさは，ボイド反応度試験（EPICURE，BASALA 試験）の不確かさと  $\beta$  測定試験（TCA，MISTRAL 試験）の不確かさより

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。

程度としている。

- ・動的ドップラ係数の不確かさは、現行コードの評価値は Hellstrand の実効共鳴積分との比較で同等かやや less negative 側の評価となっているが、不確かさとしては、Hellstrand の実験式の誤差の [ ] に  $\beta$  の不確かさ [ ] を独立事象として加えて [ ] としている。

### [3] 三次元炉心計算に由来する不確かさ

三次元炉心計算に由来する不確かさ要因を補足表 5-4 に整理する。これらの要因は、最終的に、三次元出力分布、三次元燃焼度分布の三次元炉心計算の不確かさに由来した反応度係数の不確かさと、取替炉心の詳細設計段階において炉心状態が異なることに由来した反応度係数の不確かさの二つに集約できる。

補足表 5-4 三次元炉心計算に由来する不確かさ要因

	不確かさ要因	備考
3.1	概念モデルに由来する不確かさ ・無限格子を対象としたマクロ断面積評価法に由来する不確かさ  ・設計想定炉心の包絡性に由来する不確かさ	三次元出力分布等に不確かさが生じるが、 $\gamma$ スキャン測定結果、照射後試験の燃焼度測定により影響を把握している HBB/UB や1ヶ月運転期間変動等、包絡的な炉心条件を考慮している
3.2	数学的モデルに由来する不確かさ ・少数群の粗メッシュ体系における定常固有値計算の解析結果と実機との相違に由来する初期炉心条件の不確かさ ・炉心燃焼計算の不確かさから生じる炉心条件の不確かさに由来する不確かさ	これらの数学的モデル、入力データ、計算条件等に由来する不確かさが原因で、初期炉心条件である三次元出力分布、三次元燃焼度分布に不確かさが生じている これらについては、 $\gamma$ スキャン測定結果、照射後試験の燃焼度測定により不確かさを把握し、反応度係数への影響を評価している
3.3	入力データ、計算条件等に由来する不確かさ ・原子炉圧力、入口エンタルピ、炉心流量等のパラメータの入力データと実機との相違に由来する不確かさ	
3.4	下流側コードへのデータ受渡しの方法論・モデルに由来する不確かさ ・平衡サイクル早期及び末期等の特定の炉心状態の選定に由来する設計想定炉心の代表性にかかわる不確かさ	動的ボイド係数の大きいサイクル末期を選定している(*) HBB/UB や1ヶ月運転期間変動等、包絡的な炉心条件を考慮している
3.5	その他の不確かさ ・妥当性確認に用いる実験データの不確かさ	$\gamma$ スキャン測定、燃焼度測定による実験データの不確かさは小さいので無視する

(\*) 起動時等にキセノンの蓄積が少ない場合は、制御棒が多く挿入され、動的ボイド係数の絶対値が増加する。サイクル末期の動的ボイド係数の絶対値はサイクル初期より大きく、サイクル初期の起動時に制御棒が多く挿入された場合の動的ボイド係数の絶対値を制御棒密度を変えた感度解析により評価すると、サイクル末期の絶対値に包含される程度となる。仮に、サイクル初期の起動時において、サイクル末期の動的ボイド係数の絶対値の範囲を超えたとしても、その他の不確かさ要因として考慮できる程度である。

補足表 5-4 の 3.2, 3.3 において,  $\gamma$  スキャン測定結果よりノード出力の平均二乗誤差 (RMS) で  程度あり, 照射後試験の燃焼度測定との比較で相対偏差 ( $1\sigma$ ) で  程度ある。これらの不確かさは大部分ばらつきの成分であるので, 炉心平均のボイド係数, ドップラ係数への影響はノード間の影響が相殺され大きくないと考えられるが, ここでは軸方向の出力分布が  程度ずれた場合と, 燃焼度が  一律ずれた場合の反応度係数の解析結果に基づき, 補足表 5-5 の反応度係数の不確かさを考慮する。

補足表 5-5 三次元出力分布, 三次元燃焼度分布に由来した三次元炉心計算の不確かさ

	ボイド係数	ドップラ係数
三次元炉心計算の不確かさ	<input type="text"/>	<input type="text"/>

一方, 補足表 5-4 の 3.4 に記載のように, 取替炉心設計段階における不確かさとして, 運転期間, 燃料装荷位置, 制御棒挿入位置の変動に由来した不確かさを考慮する必要がある。

運転期間については, 13 ヶ月運転の平衡炉心の反応度係数を基準に,  $\pm 1$  ヶ月程度変動させた平衡炉心における反応度係数を評価し, 変動の影響を評価した。

燃料装荷位置については, 炉心の熱的制限値を満足する範囲で, 特定サイクルの燃料装荷位置における集合体燃焼度を, 炉心の内側から燃焼度の大きい燃料を配置した平衡炉心と, 炉心の外側から燃焼度の大きい燃料を配置した場合の平衡炉心における反応度係数を評価し, 変動の影響を評価した。

制御棒挿入位置については, サイクルを通じて制御棒を深めに挿入して運転した平衡炉心と, 制御棒を浅めに挿入して運転した平衡炉心における

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。

反応度係数を評価し、変動の影響を評価した。

これらより、補足表 5-6 の反応度係数の不確かさを考慮する。

補足表 5-6 取替炉心の詳細設計段階における不確かさ

	ボイド係数	ドップラ係数
詳細設計段階の不確かさの影響		

#### [4] REDYコードの反応度係数の不確かさ

REDYコードのボイド係数の不確かさ、ドップラ係数の不確かさについては、炉心一点近似モデルに由来した不確かさが挙げられるが、個々の不確かさ要因に分解するのではなく、静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードによるボイド係数、ドップラ係数と直接比較することにより、全体の不確かさを一括して評価する。

なお、静的な三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードによる反応度係数の評価には、事象進展に伴う炉心状態変化に起因した不確かさが含まれていると考えられる。

そこで、サブ時間領域 1 については出力ピークまで圧力摂動の幅を増加させ、サブ時間領域 2 及びサブ時間領域 3 については別の時刻の異なる炉心状態で、ボイド係数を評価したところ  程度の変化に留まり、表 5-2 の感度解析で考慮した  の不確かさに対して問題ないことを確認した。この影響は、「その他の要因に対する安全余裕」の中で考慮する。

以上をまとめると、平衡炉心末期の動的ボイド係数、動的ドップラ係数の不確かさは、補足表 5-7 及び補足表 5-8 のようになる。

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。

補足表 5-7 平衡炉心末期の動的ボイド係数の不確かさ

不確かさの主要因	不確かさ
[1] 燃料集合体計算より上流側で生じる不確かさ	
[2] 燃料集合体計算に由来する不確かさ	
[3] 三次元炉心計算に由来する不確かさ	
[3] 取替炉心の詳細設計段階の不確かさ	
その他の要因に対する安全余裕	
合計	

補足表 5-8 平衡炉心末期の動的ドップラ係数の不確かさ

不確かさの主要因	不確かさ
[1] 燃料集合体計算より上流側で生じる不確かさ	
[2] 燃料集合体計算に由来する不確かさ	
[3] 三次元炉心計算に由来する不確かさ	
[3] 取替炉心の詳細設計段階の不確かさ	
その他の要因に対する安全余裕	
合計	

以上より、平衡炉心末期の反応度係数の不確かさは、補足表 5-9 のようになる。

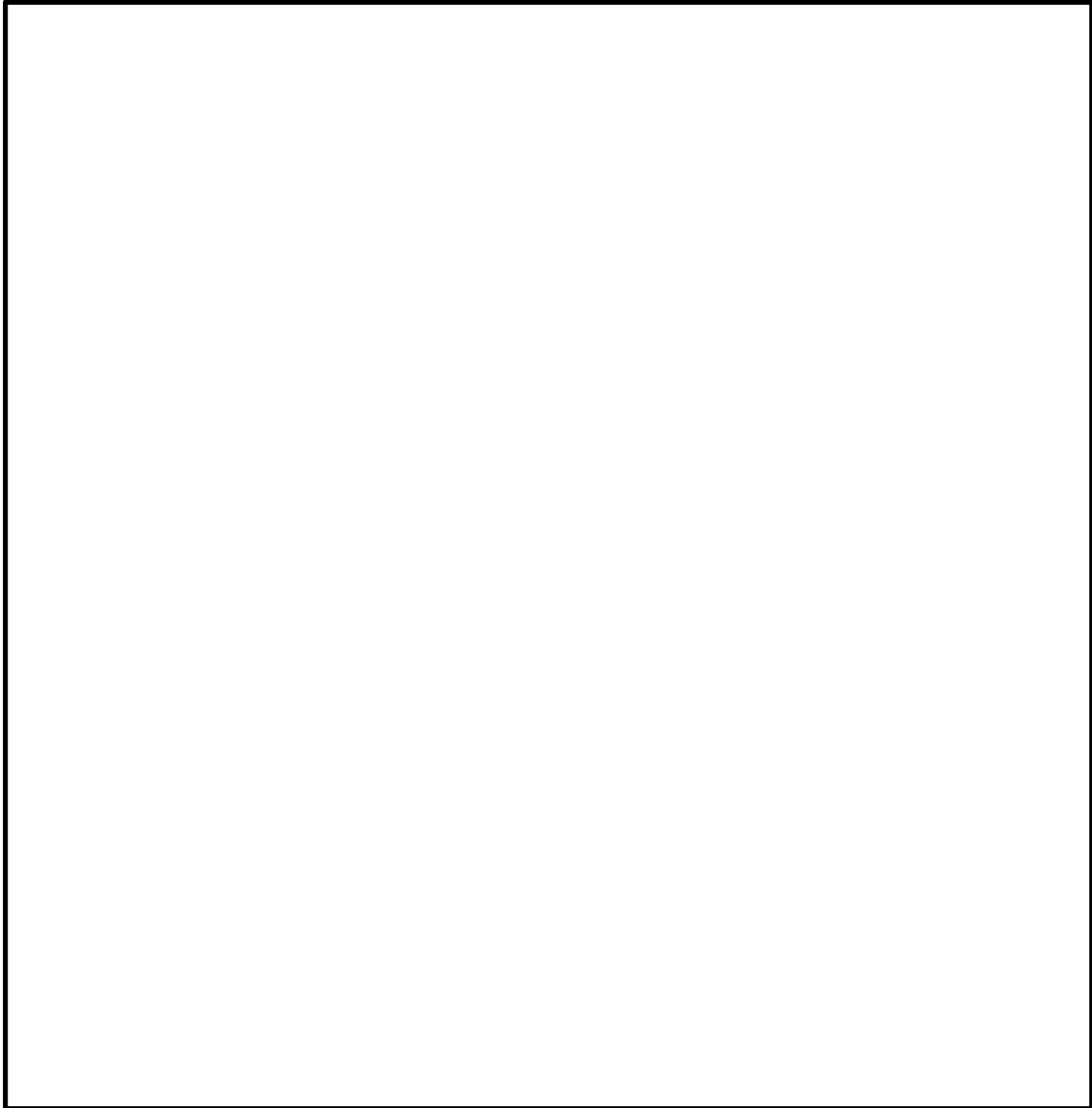
補足表 5-9 平衡炉心末期の動的反応度係数の不確かさ（まとめ）

不確かさの要因	動的ボイド係数	動的ドップラ係数
原子炉停止機能喪失事象解析での不確かさ（合計）		

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。

## 添付6 ボロン反応度添加率について

### 1. ほう酸水拡散モデルの妥当性確認において参照した試験について



炉心を一点近似で模擬しているREDYコードでは、次式のようにボロン反応度は有効炉心内のボロン濃度に比例し、ベッセル内にゆっくりと蓄積され一様に混合すると仮定している。

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。



$$\Delta K_B = C_B \times \left( \frac{\Delta K_{B-hot}}{C_{B-hot}} \right)$$

$\Delta K_B$  : ボロン反応度

$C_B$  : 炉心内ボロン濃度

$\Delta K_{B-hot}$  : 高温停止に必要なボロン反応度

$C_{B-hot}$  : 高温停止に必要なボロン濃度

$\left( \frac{\Delta K_{B-hot}}{C_{B-hot}} \right)$  : ボロン反応度添加率

制御棒挿入失敗を仮定した本事象では、徐々に注入されるボロンが原子炉格納容器の評価指標に与える影響を評価することが目的であり、数十分の長時間解析であることからしても、ボイドが発生する炉心内でもボロンが一様に混合すると仮定し、ボロン濃度の変化からボロン反応度を求めていることは妥当であると考えられる。

一方、実機を考えると、原子炉の発熱によって炉心内でボイド（蒸気）が発生するが、反応度に寄与するのは、有効炉心内に存在するボロン量である。この観点から、前述の試験もREDYコードのモデルも「有効炉心内のボロン濃度変化」に着目している。

ただし、前述の試験には核的な検討は含んでいない。このため、前述のボロン反応度添加率に与えるボイドの核的影響と不確かさについては、次章で説明する。

なお、高温停止に必要なボロン反応度は、三次元沸騰水型原子炉模擬計算コード（LOGOS）により、高温待機時の過剰反応度を打ち消すための反応度として求めている。高温停止に必要なボロン濃度は、高温停止に必要なボロン反応度を投入するのに必要なボロン濃度である。前述の仮定をもとに高温停止に必要なボロン濃度とボロン反応度を使用してREDY

コードによる評価を実施している。

## 2. ボイドがボロン反応度添加率に与える核的影響評価

前章のボロン反応度添加率 ( $\Delta K_{B-hot}/C_{B-hot}$ ) については、ボイド発生に伴う中性子スペクトル変化による影響を受ける可能性があるため、以下で検討する。

ここでは、ABWRの9×9（A型）ウラン燃料を対象として、ボイド率を0%、40%、70%と変え、ボロンを注入した場合の無限増倍率を評価し、ボイドがボロン反応度添加率に与える核的影響を調べた。

燃料集合体核特性評価の評価条件は以下のとおりである。

- 対象領域 : 9×9（A型）ウラン低Gd燃料の中央部領域  
(軸方向9～15ノード)  
ただし、ノードは、燃料有効長を24分割し燃料  
下端から数えた値で、燃料集合体と燃料集合体間  
の水領域を含む領域
- 解析コード : 単位燃料集合体核特性計算コード(TGBLA)
- 炉心状態 : 高温待機時
- 燃焼度 : サイクル末期相当(9×9(A型)ウラン燃料 25GWd/st)
- 履歴ボイド率 : 40% (BWR炉心の代表的な値)
- ボロン濃度 : 0, 300, 600ppm (水に含まれるボロン濃度)

評価の結果、対象領域の体積平均のボロン濃度と無限増倍率の関係は添付図6のようになった。対象領域の体積平均のボロン濃度は、ボイド率0%の場合は0, 300, 600ppmであり、ボイド率40%、70%の場合は水の量が減少しているため、対象領域の体積平均のボロン濃度が減少している。



添付図 6 無限増倍率のボロン濃度依存性

上図より、ポイド率によらず傾きはほとんど変わらない結果となった。

添付図 6 より、ボロン濃度が 0 ppm と 300ppm（無限増倍率の二次内挿値）の無限増倍率の差より、ボロン反応度添加率 [ $\Delta$ k/ppm] を求めると、添付表 6 のようになる。

添付表 6 ボロン反応度添加率のポイド率依存性

	0-300ppm の傾き	0-600ppm の傾き
ポイド率[%]		
ボロン反応度添加率 [ $\Delta$ k/ppm]		

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。

添付表 6 より、0-300ppm のボロン濃度のボロン反応度添加率はボイド率によらずほとんど変わらないことがわかる。

したがって、ボイドが発生した場合のボロン反応度添加率に、高温待機時のボイド率 0 % のボロン反応度添加率を用いる R E D Y のモデルには問題ないと考える。

### 3. ボロン反応度添加率に与える不確かさ

添付図 6 及び添付表 6 は代表領域の燃料集合体計算による評価結果であるが、炉心計算においても、ボロン反応度添加率はボイド率の違いにはほとんど影響されないものと考えられる。

一方、三次元沸騰水型原子炉模擬計算コード ( L O G O S ) によるボロン反応度添加率 ( $\Delta k$ /ppm) は、高温待機時において、ボロンなしの場合と 600ppm の場合の実効増倍率の差を 600 で除すことにより求めている。高温停止に必要なボロン濃度は 600ppm より小さいので、ボロン反応度添加率は若干保守側の設定となっている。

以上より、ボロン反応度添加率にはボイド率の違いによる影響はほとんど見られず、LOGOS によるボロン反応度添加率は若干保守側の設定となっていることが確認できた。

なお、実際の炉心では、炉心流量は炉心上部に移行するに従い、炉心で発生する熱により水が蒸気になり、ボロンが濃縮され、水中のボロン濃度が高くなる効果が考えられるので、添付表 6 の評価値自体も保守性を有している。

#### 4. その他

以上、ボロン反応度添加率について補足説明したが、ボロン反応度の不確かさに関しては、これ以外に次のことがいえる。

- ・ 5.1.2 の感度解析において、高温停止に必要なボロン反応度について  $3\% \Delta k$  の不確かさを考慮した場合でも、格納容器圧力へ与える影響は  $+0.04\text{MPa}$ 、原子炉格納容器のプール水温度への影響は高々  $+7^\circ\text{C}$  であり、影響は小さいことを確認している。

なお、ボロン反応度の不確かさに直接係わる事項ではないが、評価指標である格納容器温度圧力と原子炉格納容器のプール水温度に係わる事項として、次の事項についても留意しておく必要がある。

- ・ 原子炉格納容器の判断基準は、それぞれ  $0.62\text{MPa}[\text{gage}]$  及び  $200^\circ\text{C}$  であるが、これに対して申請解析による最大値は  $0.19\text{MPa}[\text{gage}]$  及び  $113^\circ\text{C}$  と小さく、どちらも判断基準に対して十分な裕度がある。
- ・ 格納容器モデルは 3.3(13) に示したように、「原子炉格納容器内の空間部の温度は、保守的に常にプール水温度と同じとする」等の非常に保守的な仮定を設けており、評価結果を厳しくしている。

## 添付7 最適評価コードによる解析結果との全体的挙動比較

プラントの全体的挙動については、本資料の4章「妥当性確認」で実機試験結果との比較を実施しているが、原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止では、より広い適用範囲（高出力かつ低炉心流量状態、スクラムが生じない給水加熱喪失状態、ほう酸水の注入による出力抑制事象等）での解析が必要とされる。さらに、原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止では、REDYコードでは模擬されない核熱水力不安定事象（中性子束振動現象）、高出力バンドルのリウエット現象がプラントにフィードバックされる影響も生じ得る可能性がある。

以上より、他のコードでの解析結果を参照し、プラント挙動に大きな差異がないことを確認するという目的で、原子炉の熱水力挙動を評価する多次元二流体モデル及び炉心の中性子動特性を評価する三次元中性子動特性モデルを使用し、米国において運転時の異常な過渡変化評価や原子炉スクラム失敗事象評価、安定性評価での適用実績がある（各LTR（Licensing Topical Report）に対してNRCの承認が得られている）TRACコードを用い、本事故シーケンスにおける原子炉スクラム失敗事象でのプラント全体的挙動をREDYコードのものと比較する。両解析コードによる共通解析条件を添付表7-1に示す。

添付表 7-1 REDYコード, TRACコードの共通解析条件

(原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止-ABWRの例)

項目	解析条件
原子炉熱出力	3926 MW (定格原子炉熱出力の 100%)
原子炉圧力	7.07 MPa[gage]
炉心流量	$52.2 \times 10^3$ t/h (定格炉心流量の 100%)
主蒸気流量	$7.64 \times 10^3$ t/h (定格主蒸気流量の 100%)
原子炉水位	通常運転水位
R C I C 流量	182 m <sup>3</sup> /h
H P C F 流量	182~727 m <sup>3</sup> /h
原子炉水位低(L3)設定点	+62 cm
原子炉水位低(L2)設定点	-58 cm
原子炉水位低(L1.5)設定点	-203 cm
原子炉圧力高設定点	7.48 MPa[gage]
主蒸気隔離弁閉鎖時間	3 秒
主蒸気隔離弁閉鎖特性	
逃がし安全弁設定圧力	逃がし弁機能 (公称値) を使用
第 1 段	7.51 MPa[gage] × 1 個, 363 t/h/個
第 2 段	7.58 MPa[gage] × 1 個, 367 t/h/個
第 3 段	7.65 MPa[gage] × 4 個, 370 t/h/個
第 4 段	7.72 MPa[gage] × 4 個, 373 t/h/個
第 5 段	7.79 MPa[gage] × 4 個, 377 t/h/個
第 6 段	7.86 MPa[gage] × 4 個, 380 t/h/個
格納容器限界圧力	0.62MPa[gage]
格納容器限界温度	200℃

TRACコードと比較するREDYコードの解析結果は、申請解析に加え、後述する理由により、“下方ピーク軸方向出力分布炉心”の場合も比較する。これらの違いを添付表 7-2 に示す。

添付表 7-2 REDYコード解析条件の比較

	申請解析	下方ピーク軸方向出力分布炉心を仮定
REDYの軸方向出力分布	設計下方ピーク	下方ピーク (*1)
REDYのボイドマップ	設計ボイドマップ	上記の軸方向出力分布 (*1) に対応したボイドマップ

(\*1) TRACコードによる原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気  
 隔離弁の誤閉止事象の解析結果で、給水加熱喪失が生じている  
 時の代表的な下方ピーク軸方向出力分布。

両解析コードによる比較を添付図 7-1（短時間領域）及び添付図 7-2（長時間領域）に、評価指標との比較結果を添付表 7-3 に示す。

(1) 短時間領域での考察

短時間領域では、添付図 7-1 に示すように、REDYコードによる申請解析結果（左側の図）をTRACコードの解析結果（右側の図）と比較すると、全体的な挙動は良く一致している。特に、評価指標の一つである燃料被覆管温度が厳しくなる約 70 秒から約 200 秒では、炉心流量はほぼ同一となっており、給水加熱喪失に伴って変化する中性子束の増加傾向、それが高い値で平衡する傾向等も類似の挙動を示している。ただし、平衡時の値はREDYコードの方が若干高めであり、“炉心の核熱水力モデルの相違”に起因しているものと推定される。このため、添付表 7-3 に示したように、



燃料被覆管温度はTRACコードでの解析結果 550°Cに対し、REDYコードでは 1060°Cと高めに評価されている。また、他の三つの評価パラメータ最大値も同様にREDYコードの方が大きい。

上述に推定した、REDYコード（炉心一点近似）とTRACコード（炉心三次元）の“炉心の核熱水力モデルの相違”について確認するためにREDYコードで“下方ピーク軸方向出力分布炉心”を仮定した場合の結果を添付図7-1に併記した（添付図7-2及び添付表7-3にも併せて記載）。これによると、評価指標の一つである燃料被覆管温度が厳しくなる約150秒前後の原子炉出力は、添付図7-1(1)の中性子束変化図（中央の図）に示したように申請解析結果（左側の図）より約10%低くなっており、TRACコードの解析結果（右側の図）に近くなっている。また、この時の燃料被覆管温度は添付表7-3に示したように、970°Cと小さくなる結果が得られている。以上より、“炉心の核熱水力モデル”の差がREDYコードとTRACコードとの結果に与える一要因であることがREDYコードでの解析結果から確認できる。

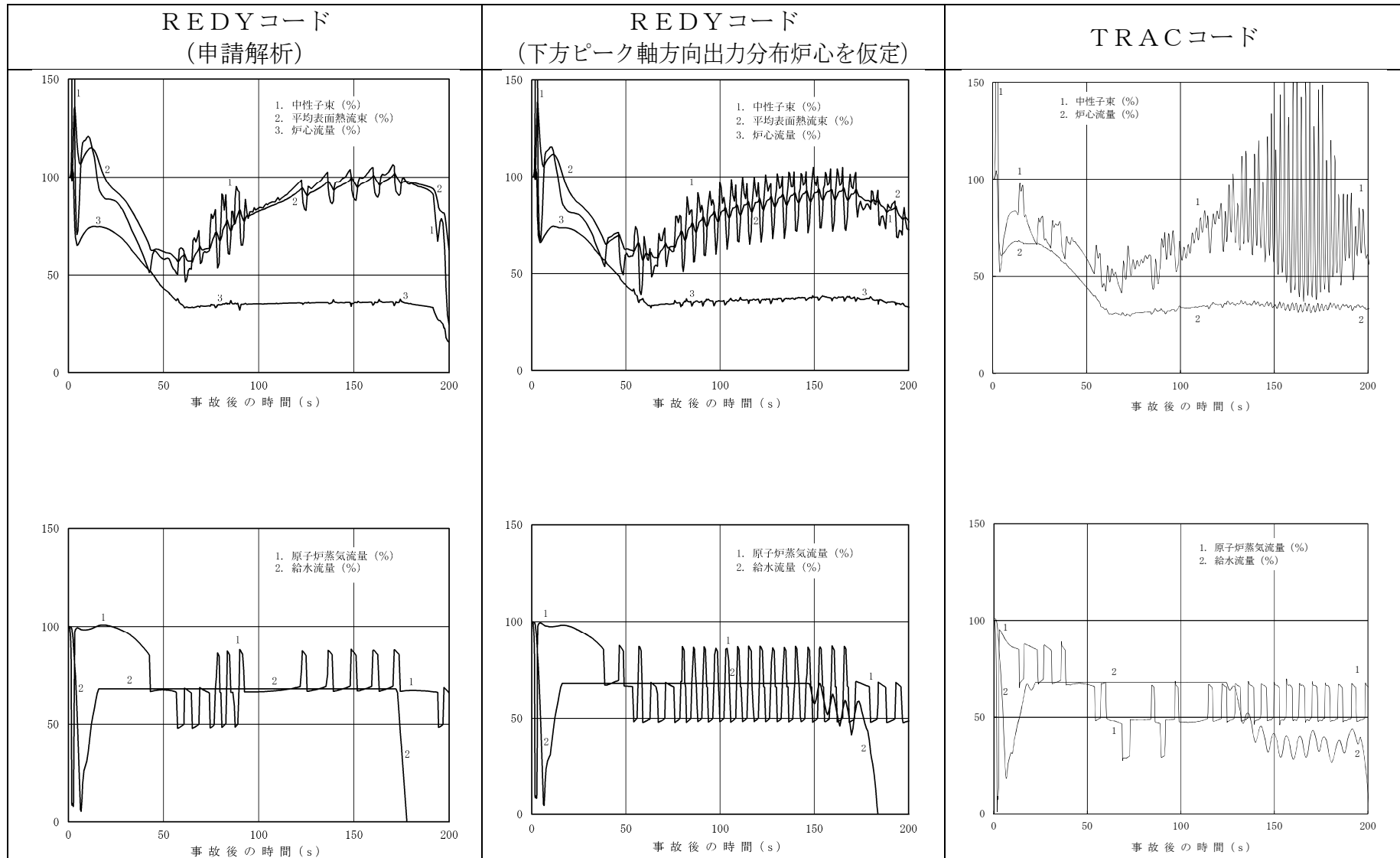
なお、TRACコードでは約70秒から約200秒の注目すべき期間で、物理現象のランクをMとした三次元効果（中性子束振動現象）が見られる。これに対し、REDYコードの解析では振動現象は見られず、REDYコードの軸方向出力分布のみ下方ピークを仮定した場合の解析（中央の図）で多少顕著に見られる中性子束振動も、逃がし安全弁の開閉に起因した中性子束変動である。これは、REDYコードでは、炉心を一点近似の集中定数系のモデルで模擬していることから、炉心内での局所的挙動を考慮する必要があるチャンネル安定性を含んでいる炉心安定性を模擬するのが困難なためである。

しかしながら、TRACコードの解析結果では、中性子束振動により燃

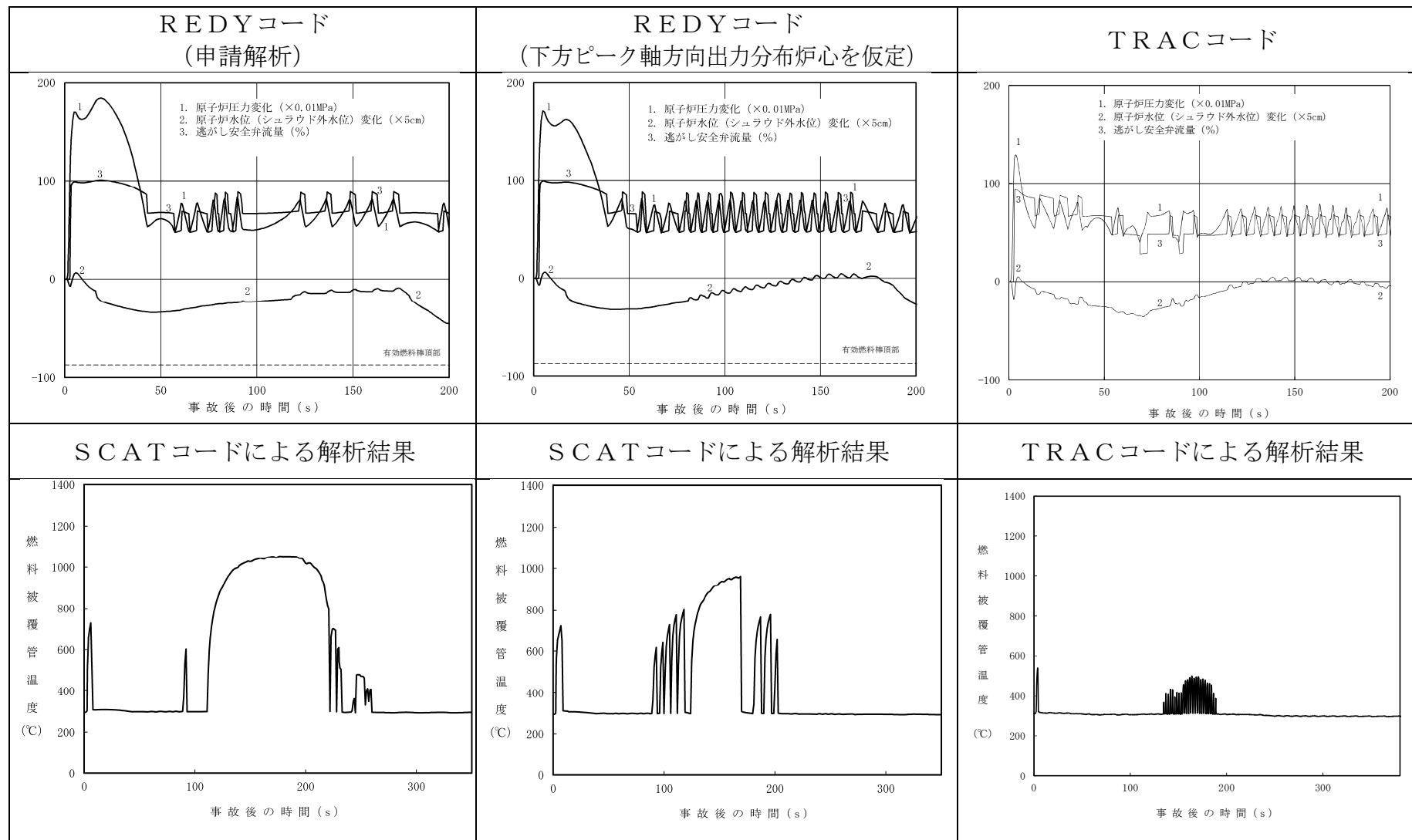
燃料被覆管温度も振動しているものの、その最大値はむしろREDYコードの解析結果より十分小さくなっている。さらに、前述の逃がし安全弁の開閉に起因する中性子束振動現象と三次元効果による中性子束振動現象の影響で上昇する燃料被覆管温度分を、SCATコードによる核沸騰状態における燃料被覆管温度に加算したとしても、判断基準を下回る結果となっている。

## (2) 長時間領域での考察

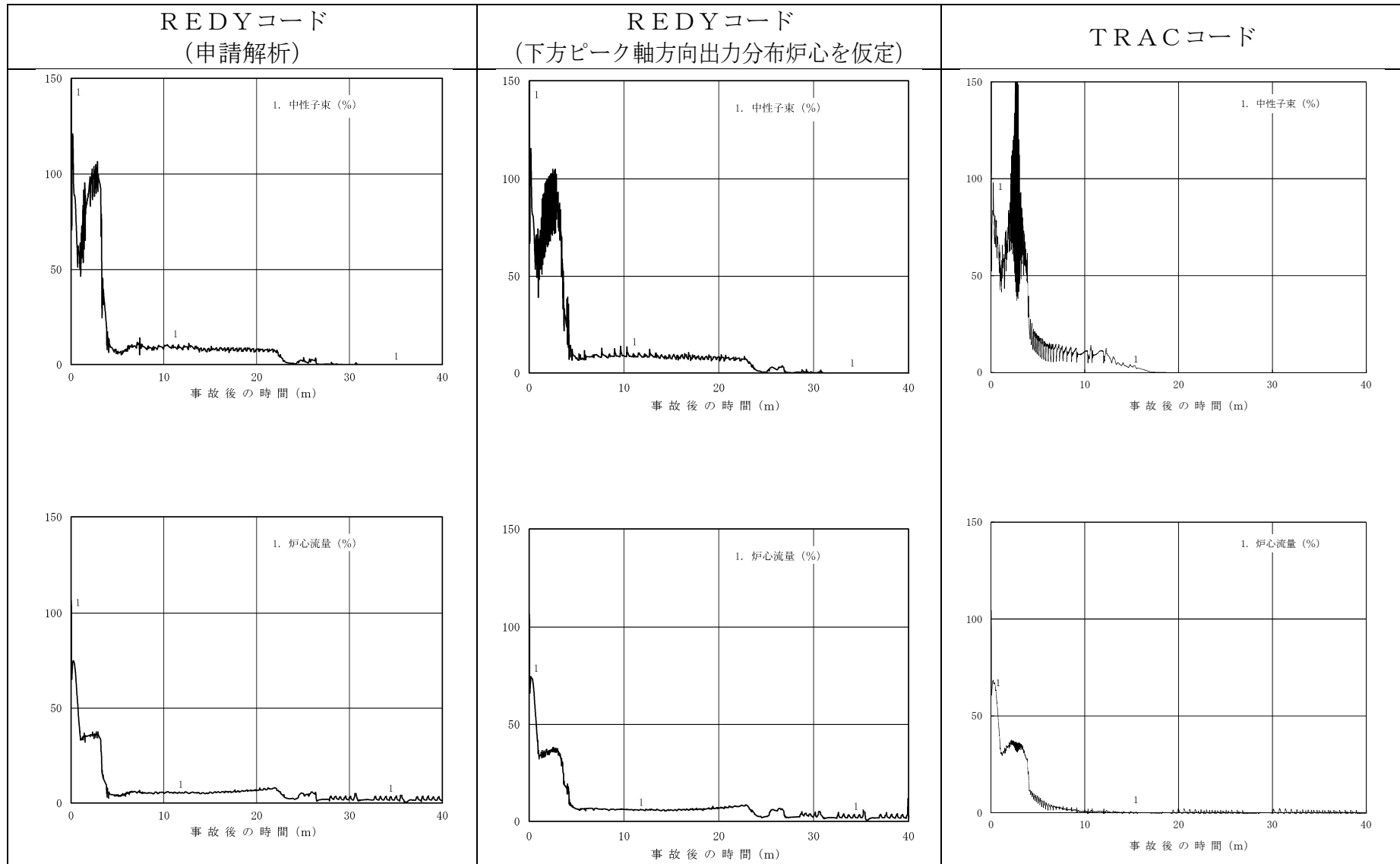
長時間領域では、添付図 7-2 に示すように、13 分以降の自然循環流量に違いが見られるが、駆動源の一つである原子炉水位の変化もほぼ合っていることから、この数パーセントの自然循環流量の差は、炉心の核熱水力モデルの相違に起因しているものと推定される。しかしながら、REDYコードでは、自然循環流量が大きいことで、中性子束が高めの値に維持され、評価指標である格納容器圧力や原子炉格納容器のプール水温度に対する評価結果を厳しくしている。なお、格納容器圧力や原子炉格納容器のプール水温度といったパラメータの増加は類似の挙動を示している。



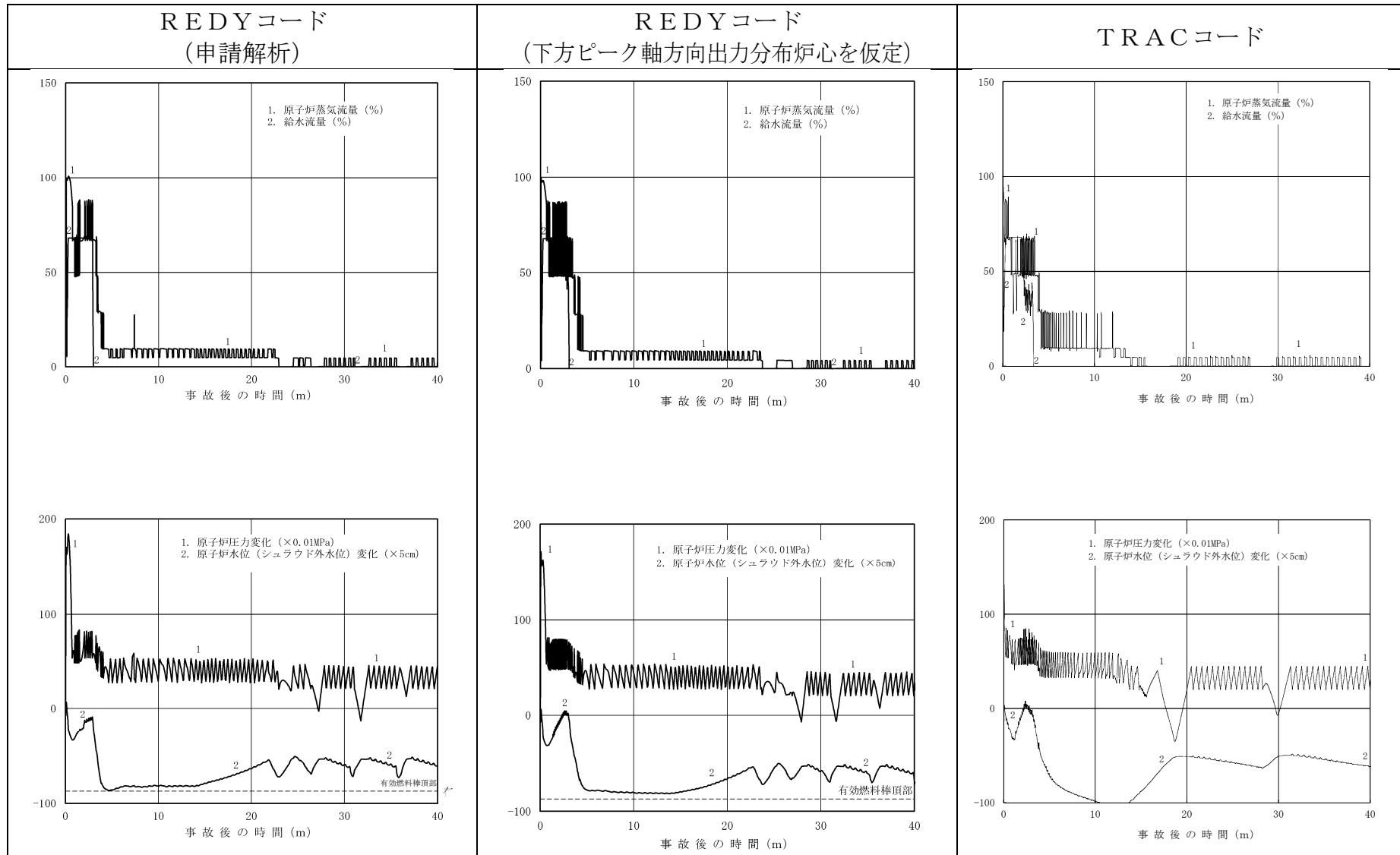
添付図 7-1(1) 原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止の解析結果比較 (短時間領域)



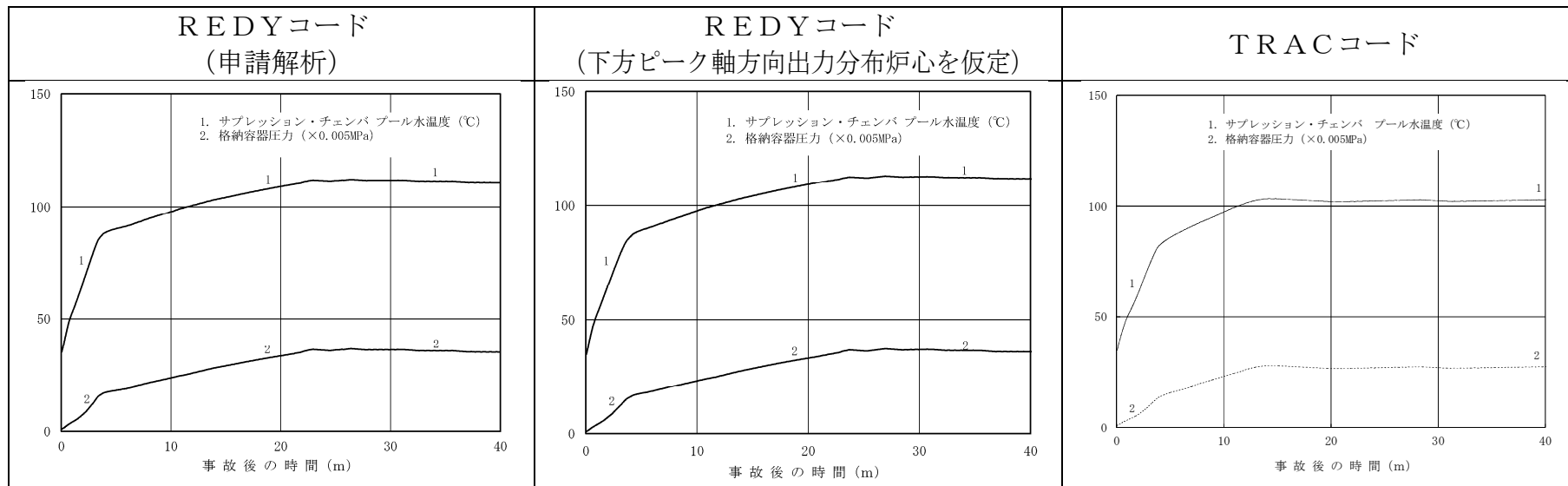
添付図 7-1(2) 原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止の解析結果比較 (短時間領域)



添付図 7-2(1)原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止の解析結果比較 (長時間領域)



添付図 7-2(2) 原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止の解析結果比較 (長時間領域)



添付図 7-2(3)原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止の解析結果比較 (長時間領域)

添付表 7-3 ABWRを例とした解析結果の比較

評価指標		REDYコード (申請解析)	REDYコード (下方ピーク軸方向出力分布炉心を仮定)	TRACコード 解析結果
原子炉圧力	10.34MPa[gage]	9.08	8.94	8.53
燃料被覆管温度	1200°C	1060	970	550
格納容器圧力	0.62MPa[gage]	0.19	0.19	0.14
原子炉格納容器のプール水温度	200°C	113	114	103

(注) 燃料被覆管温度を求めるSCATコードでは、中央ピークとしている。

## 添付7補足 TRACコードによる三次元核熱結合不安定の影響評価について

### 1. 目的

「原子炉スクラム失敗を仮定した主蒸気隔離弁の誤閉止」事象における三次元核熱結合不安定による出力振動の影響を確認するため、TRACコードによる参考解析を実施している。しかしながら、本参考解析では、給水加熱喪失後の炉出力解析結果がREDYコードの解析結果より低めに推移している。このため、TRACコードによる参考解析において、給水加熱喪失後の出力上昇をREDYコードと同程度になるように調整した感度解析を実施し、逃がし安全弁閉による出力上昇に加え、三次元核熱結合不安定による出力振動（上昇）が重畳した場合の燃料被覆管温度の上昇幅を検討した。

### 2. 感度解析条件

TRACコードによる解析において、給水加熱喪失後の出力上昇をREDYコードと同程度になるように解析条件を設定する方法としては以下が考えられる。

- (1) 初期炉心流量を流量制御幅下限より更に低流量側にシフトさせ、再循環ポンプトリップ後の出力を全体的に高めに推移させる。
- (2) ボイド／ドップラ反応度係数を調整し、給水加熱喪失後の正の反応度投入量を大きくすることにより、出力上昇量を高めにする。
- (3) 給水温度低下幅をより大きくし、給水加熱喪失後の炉心入口サブクーリングの増加量を大きくする。これにより、給水加熱喪失後の正の反応度投入量を大きくし、出力上昇量を高めにする。



これらのうち（２）の場合、整定出力をREDYコードと同程度とするため、ボイド反応度係数の絶対値をノミナルより大きめに設定することになる。このとき、三次元核熱結合不安定による出力振動発生時のボイドフィードバックの影響が過度に保守側に評価される可能性がある。

また、（３）の場合、給水加熱喪失時の給水温度低下を想定し得る温度より更に低めに設定することになる。このため、給水加熱喪失後の炉心軸方向出力分布がノミナルより更に下方ピークとなり、三次元核熱結合不安定及び燃料被覆管温度の評価に影響する可能性がある。

一方、（１）の場合、炉心反応度係数及び給水温度低下はノミナルのままとし、他の手法と同様に整定出力及び炉心ボイド率はREDYコードと同程度とすることができる。したがって、REDYコードの整定出力に合わせることを以外の要素を極力取り除くため、初期炉心流量を流量制御幅下限より更に低流量側にシフトさせた運転点から解析する方法を採用し、感度解析を実施した。

なお、この初期運転点は、あくまでも意図的に整定出力を高めるために設定した仮の運転点である。

### 3. 解析結果

補足表 7 に解析結果を、以下の図に解析結果の比較を示す。

補足図 7-1 REDY/SCATコード（申請解析）

補足図 7-2 TRACコード（ベースケース解析）

補足図 7-3 TRACコード（意図的に整定出力を高めた解析）

ここで、補足図 7-1 及び補足図 7-2 の初期運転点は定格出力／定格炉心流量である。

補足図 7-2 及び補足図 7-3 の T R A C コードによる解析結果では、補足図 7-1 の R E D Y コードの解析結果には見られない核熱不安定による出力振動が、逃がし安全弁閉による出力上昇と重畳して模擬されている。一般に低炉心流量かつ高出力運転点の方が核熱不安定に対する余裕が小さくなることが知られており、補足図 7-2 の T R A C コードによる解析結果（ベースケース解析）に比べ、補足図 7-3 に示す T R A C コードによる解析結果（意図的に整定出力を高めた解析）の方が出力の振動幅は大きくなっている。しかしながら、整定出力レベルを R E D Y コードの解析結果に合わせた T R A C コードによる解析（補足図 7-3）においても、燃料被覆管温度の最大値は 620°C 程度で、R E D Y / S C A T コードによる燃料被覆管温度の最大値を下回る結果となっている（補足表 7 参照）。

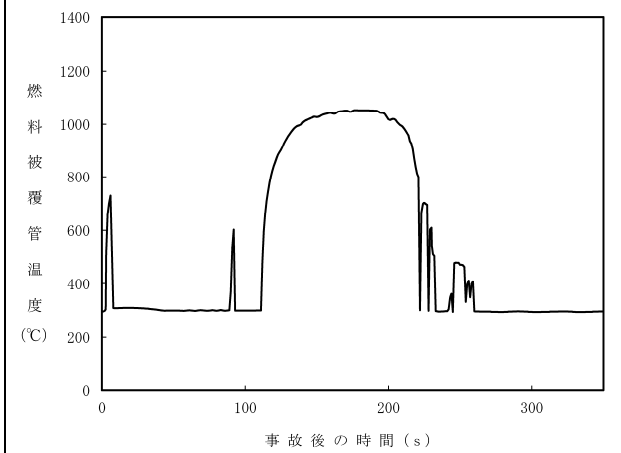
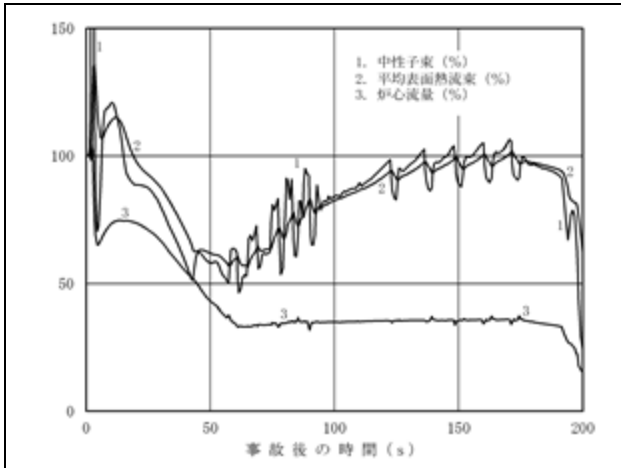
なお、補足図 7-3 において約 190 秒付近で燃料被覆管温度が近傍のピーク値に比べ高くなっている。補足図 7-4 に示すように、逃がし安全弁閉による圧力上昇と核熱不安定による出力上昇のタイミングが比較的一致しているためと考えられるが、この場合においても燃料被覆管温度の更なる上昇は 80°C 程度に留まる。これは数百°C の燃料被覆管温度の上昇は、沸騰遷移の発生による燃料被覆管と原子炉冷却材間の熱伝達の低下によるものであり、逃がし安全弁閉に伴い沸騰遷移が発生した状態（熱伝達係数が低下した状態）から核熱不安定による出力振動により再度出力が上昇したとしても、熱伝達状態の変化はなく、熱流束の上昇も短時間で限定的であるためである。

以上より、参考解析の位置付けではあるが T R A C コードを用いて逃がし安全弁閉による出力上昇と、三次元核熱結合不安定による出力振動が重畳した事象が発生した場合の影響を検討した結果、逃がし安全弁閉による出力上

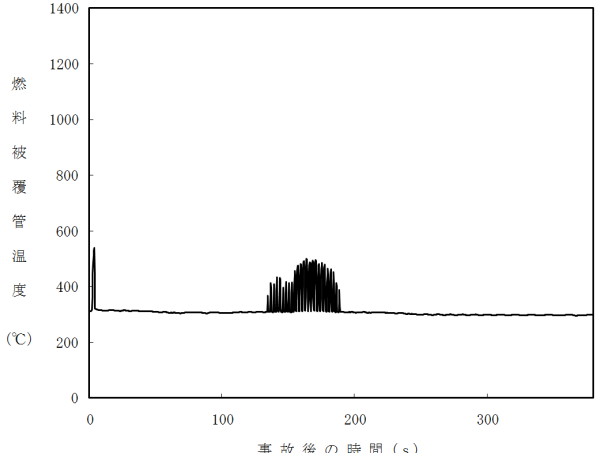
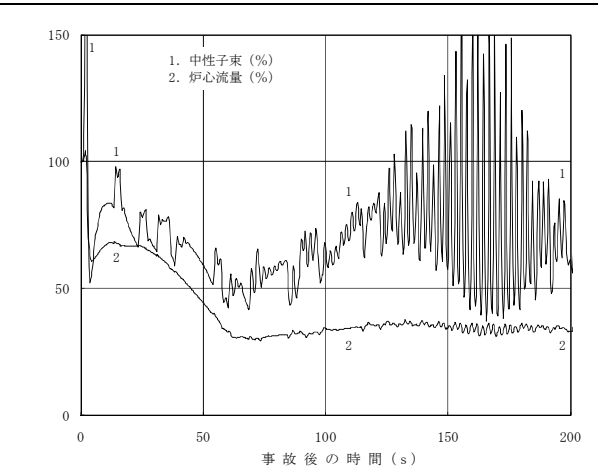
昇に加え、三次元核熱結合不安定による出力振動（上昇）が重畳した場合の燃料被覆管温度の上昇幅は数十℃程度であると推定される。したがって、REDY/SCATコードによる評価において核熱不安定による出力振動の影響を考慮しても燃料被覆管温度は判断基準を満足すると考えられる。

補足表 7 感度解析結果のサマリ

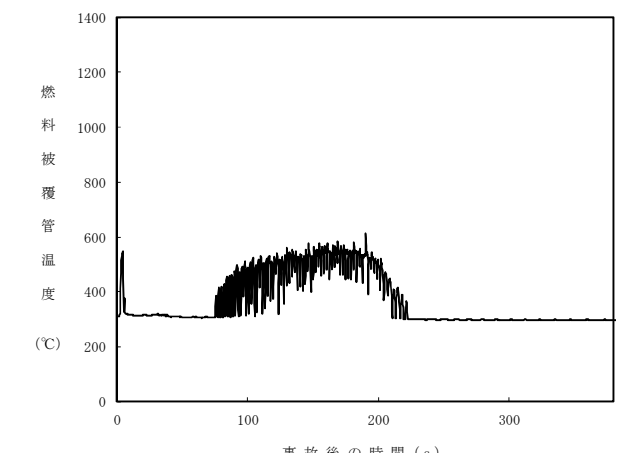
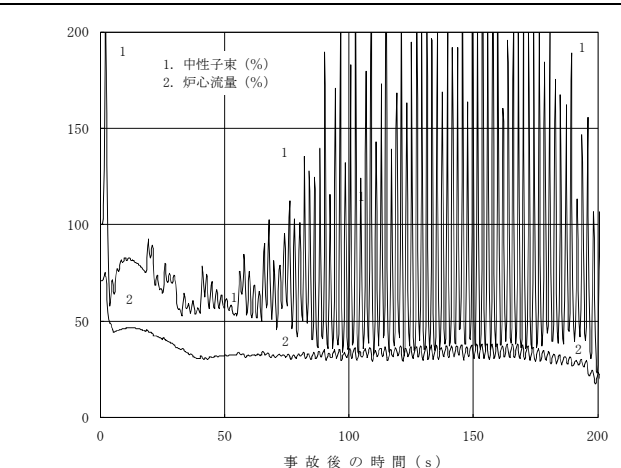
項目	REDY/SCATコード (申請解析)	TRACコード (ベースケース解析)	TRACコード (意図的に整定出力を高めた解析)	判断基準
燃料被覆管 最高温度	約 1060℃	約 550℃	約 620℃	1200℃



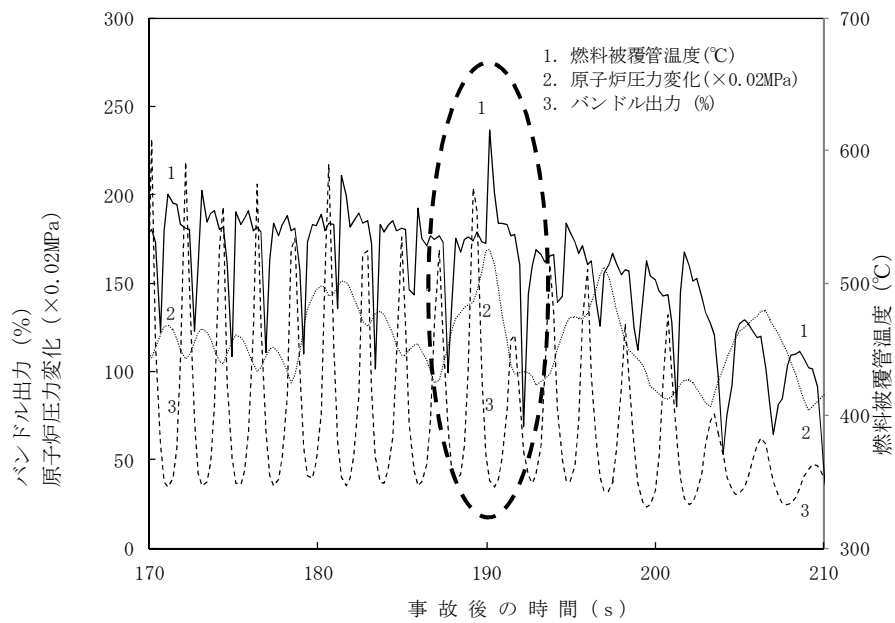
補足図 7-1 REDI/SCATコード  
(申請解析)



補足図 7-2 TRACコード  
(ベースケース)



補足図 7-3 TRACコード  
(意図的に整定出力を高めた解析)

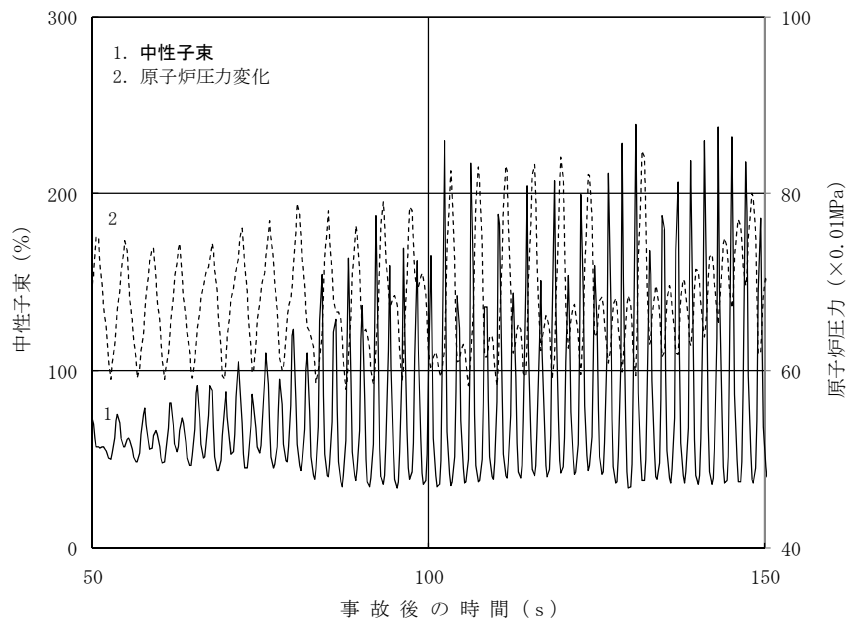


補足図 7-4 バンドル出力，原子炉圧力及び燃料被覆管温度の時間変化  
(TRAC解析)

## 付録

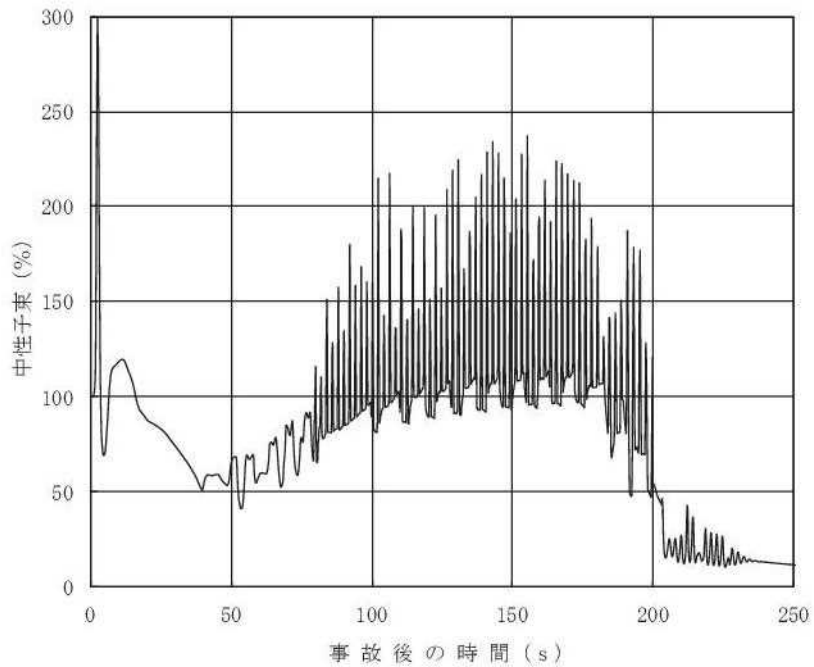
参考に、TRACコードによる解析（意図的に整定出力を高めた解析）において逃がし安全弁閉のタイミングを調整し、三次元核熱不安定による出力振動に伴う出力上昇のタイミングと、逃がし安全弁閉による圧力上昇のタイミングを合わせた解析を実施し（付録図1参照）、解析結果とREDY解析の中性子束、炉心入口流量を比較し、出力振動が大きくなる時間領域についてTRACコードの挙動（中性子束及びバンドル入口流量）を、初期運転点を100%出力/90%炉心流量としたREDY解析（低流量解析）に反映してSCAT解析を実施した。低流量解析をベースにしたのは、低流量の方が三次元核熱結合不安定に対する余裕が小さくなるためである。なお、TRACコードによる出力振動はREDYコードに対して上下しているが、本解析では保守的に出力が上昇する側の変動のみを重ね合わせた（付録図2参照）。なお、TRACコードによる出力振動は、2～3秒間隔であることから、0.5秒ごとにタイミングをずらした感度解析も併せて実施した。

付録表1及び付録表2に示すように、出力振動に伴う出力上昇と逃がし安全弁閉による圧力上昇を重畳させたTRACコードによる解析結果をREDYコードの解析結果に反映して作成したデータを使用したSCATコードによる解析では、REDY/SCATコードの解析結果（低流量解析）に比べ最大で70℃程度高い結果となる。



付録図1 中性子束と原子炉圧力の時間変化

(出力振動に伴う出力上昇と逃がし安全弁による圧力上昇のタイミングを合わせたTRAC解析)



付録図2 REDYコードにTRACコードの出力振動を重畳させた中性子束 (SCAT 感度解析用の入力として使用)

付録表 1 解析結果サマリ

項目	REDY/SCATコード (出力振動に伴う出力上昇と逃がし安全弁による圧力 上昇を重畳させたTRAC解析の結果をREDYデ ータに反映した解析結果との比較：ベースケース)
燃料被覆管温度の上昇 幅の変化	約 20℃

付録表 2 感度解析結果サマリ

項目	REDY/SCATコード (REDYデータに反映させるTRAC解析のタイミ ングをずらした感度解析結果)
燃料被覆管温度の上昇幅 の変化	約 70℃ (0.5 秒ずらした解析) 約 30℃ (1.0 秒ずらした解析) 約 30℃ (1.5 秒ずらした解析) 約 60℃ (2.0 秒ずらした解析) 約 50℃ (2.5 秒ずらした解析)



## 第4部 SCAT

## 目 次

### S C A T

1. はじめに .....	4-3
2. 重要現象の特定 .....	4-4
2.1 事故シーケンスと評価指標 .....	4-4
2.2 ランクの定義 .....	4-4
2.3 物理現象に対するランク付け .....	4-6
3. 解析モデルについて .....	4-20
3.1 コード概要 .....	4-20
3.2 重要現象に対する解析モデル .....	4-21
3.3 解析モデル .....	4-22
3.4 入出力 .....	4-45
4. 妥当性確認 .....	4-48
4.1 重要現象に対する妥当性確認方法 .....	4-48
4.2 A T L A S 試験 .....	4-51
4.3 N U P E C BWR燃料集合体熱水力試験 .....	4-66
4.4 実機解析への適用性 .....	4-82
5. 有効性評価への適用性 .....	4-84
5.1 不確かさの取り扱いについて（評価指標の観点） .....	4-84
5.2 不確かさの取り扱いについて（運転員操作の観点） .....	4-87
6. 参考文献 .....	4-88
添付1 入力項目リスト .....	4-91
添付2 ボイドモデル，サブクールボイドモデル，圧力損失モデルの適切性 . .....	4-92
添付3 沸騰遷移後の被覆管表面熱伝達モデルの適用性 .....	4-94
添付4 リウエットモデルの適用性 .....	4-105
添付5 9×9燃料（A型）部分長燃料棒を考慮した評価の適用性 ....	4-110
添付6 有効性評価における9×9燃料（A型）の代表性 .....	4-116

## 1. はじめに

本資料は、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」という。）に適用するコードのうち、S C A Tコード（SCAT Ver. 3）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。

なお、R E D Yコードの計算結果をインプットとする必要があるが、このR E D Yコードに対する説明は別資料（第3部R E D Y）にて行う。

また、本資料で引用している最適評価コードはT R A Cコード（TRACG Ver. 5）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

S C A Tコードが適用される炉心損傷防止対策における事故シーケンスグループである原子炉停止機能喪失は、運転時の異常な過渡変化の発生時において原子炉のスクラム失敗を想定する事象であり、事故シーケンスとして主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失が選定されている。

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、主蒸気隔離弁閉止時の原子炉圧力上昇によるボイド減少で炉心に正の反応度が投入されることにより生じる沸騰遷移、及び給水加熱喪失の状態で出力が増加することにより生じる沸騰遷移によって燃料被覆管の温度（以下「燃料被覆管温度」という。）が上昇し高温になる。それに伴い燃料被覆管の酸化量（以下「燃料被覆管酸化量」という。）も増加するが、判断基準（15%以下）に十分余裕があるため、評価指標は燃料被覆管温度で代表できると考えられる。

したがって、燃料被覆管温度が評価指標である。炉心損傷防止対策の有効性を確認するその他の評価指標についてはR E D Yコードによる解析で確認する。

### 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」で抽出された原子炉停止機能喪失で取り扱う物理現象について、表 2-1 の定義に従い「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。

表 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、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／妥当性評価は記載しない。
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／妥当性評価は記載しない。

### 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、2.1 節で述べた事象進展を踏まえ、2.2 節記載のランクの定義に従い、評価指標及び運転操作への影響に応じて「H」及び「M」に分類する事で物理現象の中から重要現象を特定する。この結果を表 2-2 に示す。

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るため、REDYコードの解析結果を引き継ぐ物理現象を含んでいる。そのような物理現象は、SCATコードで評価する事象において考慮すべき物理現象の対象外としてREDYコードの説明資料で示す。

以下に、物理現象ごとに考え方を示す。

#### (1) 核分裂出力 [炉心 (核)]

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、核分裂出力と崩壊熱の和である原子炉出力の変化によって燃料ペレットの発熱挙動及び燃料被覆管温度挙動に影響を与える。したがって、核分裂出力は燃料被覆管温度変化に対して重要度は高いと考えられる。なお、原子炉出力変化はREDYコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

#### (2) 出力分布変化 [炉心 (核)]

出力分布には、径方向出力分布及び軸方向出力分布がある。主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、原子炉スクラム失敗を仮定していることから、径方向出力分布の変化は小さい。一方、給水温度の変化等から軸方向出力分布は変化する。軸方向出力分布の変化は、沸騰遷移の生じた位置の局所の出力によって燃料被覆管温度挙動に影響を与える。したがっ

て、出力分布変化は燃料被覆管温度の変化に対して重要度は高いと考えられる。

### (3) 反応度フィードバック効果 [炉心 (核)]

(ボイド反応度 (減速材密度反応度) とドップラ反応度)

主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象では、原子炉出力がボイド・ドップラ反応度フィードバック効果によって変動し、燃料ペレットの発熱挙動及び燃料被覆管温度挙動に影響を与える。したがって、ボイド・ドップラ反応度フィードバック効果は燃料被覆管温度変化に対して重要度は高いと考えられる。なお、反応度フィードバック効果は原子炉出力変化として R E D Yコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

(ボロン反応度)

事象収束に必要なほう酸水注入系の手動起動はボロン反応度の印加が出力の抑制に重要な役割を果たす。燃料被覆管温度の上昇は事象初期であり、ほう酸水注入系による出力抑制の効果が現れる段階より早いため、ボロンの反応度フィードバック効果が燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(その他)

上述以外に、反応度フィードバック効果として知られている減速材温度反応度は、起動時のボイド反応度やドップラ反応度の影響が殆どない状態では考慮する必要があるが、本事故シーケンスのような高い出力が継続する事象では評価指標に与える重要度は低い。なお、遅発中性子生成割合、中性子寿命といったパラメータは上記の反応度評価に含まれる。

#### (4) 制御棒反応度効果 [炉心 (核)]

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、スクラム失敗及び代替制御棒挿入機能が作動しないことを仮定しているため、制御棒反応度及び制御棒速度による効果が燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

#### (5) 崩壊熱 [炉心 (核)]

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、核分裂出力と崩壊熱の和である原子炉出力の変化による燃料ペレットの発熱挙動及び燃料被覆管温度挙動に影響を与えるが、スクラムが失敗した状態で崩壊熱は核分裂出力に比べて小さい。したがって、崩壊熱が燃料被覆管温度変化に与える影響は殆どないと考えられる。なお、原子炉出力変化はR E D Yコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

#### (6) 三次元効果 [炉心 (核)]

中性子束振動（三次元効果）が発生すると、中性子束と冷却材流量の振動によって沸騰遷移及びリウエットの発生に影響を与えることから、燃料被覆管温度挙動に影響を与える可能性がある。

流量振動によって沸騰遷移を発生させる試験では、流量振幅が大きくなると数秒の周期で燃料被覆管温度が鋸歯状的に上昇と降下を繰り返し、温度上昇幅は僅かであることが確認されている<sup>(1)</sup>。これは中性子束の振動周期が数秒であることに対して熱流束の時間変化が小さいためと考えられる。しかし、スクラム失敗を仮定した原子炉停止機能喪失の事象のように、原子炉出力の増加に伴い中性子束と熱流束が大きい状態で中性子束振動が発生すると、燃



燃料被覆管温度の上昇幅が有意に大きくなる可能性も考えられる。したがって、三次元効果は燃料被覆管温度変化に対して重要度は中程度と考えられる。なお、原子炉出力変化及び炉心入口流量の変化はREDYコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

ここでスクラム失敗を仮定した原子炉停止機能喪失の事象において、原子炉出力の増加に伴い中性子束と熱流束が大きい状態で中性子束振動が発生しても燃料被覆管温度の上昇幅が有意に大きくなることは、米国において中性子束振動の評価実績のあるTRACコードによる参考解析結果を参照する（第3部REDY添付7参照）。

#### (7) 燃料棒内温度変化 [炉心 (燃料)]

燃料棒内温度変化は、燃料ペレット内発熱により燃料ペレット熱伝導とギャップ部の熱伝達及び燃料被覆管熱伝導を通して燃料被覆管温度挙動に影響を与える。したがって、燃料棒内温度変化は燃料被覆管温度変化に対して重要度は高いと考えられる。

#### (8) 燃料棒表面熱伝達 [炉心 (燃料)]

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、沸騰遷移が生じて燃料被覆管温度は上昇する。沸騰遷移後、冷却材への熱伝達に関わる燃料棒表面熱伝達は燃料被覆管温度挙動に影響を与える。特に膜沸騰状態の下では、過熱蒸気により燃料棒表面熱伝達が変化すること、更に高温に至る場合には、輻射熱伝達の寄与が次第に大きくなること等により燃料被覆管温度挙動に大きな影響を与える。したがって、燃料棒表面熱伝達は燃料被覆管温度変化に対して重要度は高いと考えられる。

(9) 沸騰遷移 [炉心 (燃料)]

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、沸騰遷移が生じて核沸騰から膜沸騰状態に移行し、原子炉出力の低下によってリウエットに至ることで核沸騰状態に移行する。ドライアウト領域では、燃料被覆管温度は急上昇する。その後リウエットによって核沸騰時の温度まで低下する。したがって、沸騰遷移は燃料被覆管温度変化に対して重要度は高いと考えられる。

(10) 燃料被覆管酸化 [炉心 (燃料)]

燃料被覆管酸化はジルコニウム－水反応によって発熱量が増加するが、出力の高い主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では核反応による発熱量に比べて影響は小さいと考えられる。したがって、燃料被覆管酸化は燃料被覆管温度変化に対して重要度は低いと考えられる。

(11) 燃料被覆管変形 [炉心 (燃料)]

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、炉心は冠水状態及び原子炉圧力が維持されることから燃料被覆管変形は生じないため、燃料被覆管変形が燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(12) 沸騰・ボイド率変化 [炉心 (熱流動)]

沸騰遷移が生じる高クォリテイの状態では軸方向ボイド率変化を含むボイド率変化は小さく、また膜沸騰状態での表面熱伝達の変化は主にクォリテイの変化に依存することから、ボイド率変化による表面熱伝達の変化は小さい。また、炉心は冠水状態が維持されて炉心部に二相水位が形成されないため、水面変動による大きなボイド率変化はない。そのため燃料被覆管温度挙

動への影響は小さいと考えられる。したがって、沸騰・ボイド率変化は燃料被覆管温度変化に対して重要度は低いと考えられる。

#### (13) 気液分離（水位変化）・対向流 [炉心（熱流動）]

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、炉心は冠水状態が維持されて炉心部に二相水位が形成されないため、気液分離（水位変化）・対向流が燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

#### (14) 気液熱非平衡 [炉心（熱流動）]

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、原子炉压力容器内の保有水は十分に保たれ、炉心は冠水が維持されている。高出力燃料集合体の一部で高温の過熱蒸気が発生したとしても、当該蒸気流は炉心出口近傍で他の燃料集合体から流出する二相流との混合により飽和になると考えられ、炉心外の熱流動挙動への影響は小さいと考えられる。しかし、発生した過熱蒸気の影響が当該燃料集合体内の隣接する燃料棒に波及する可能性がある。したがって、気液熱非平衡による熱流動の変化は燃料被覆管温度変化に対して重要度は中程度と考えられる。なお、発生した過熱蒸気による燃料被覆管温度への影響、すなわち燃料被覆管と冷却材との温度差が低下することの影響は、膜沸騰状態における燃料棒表面熱伝達係数の物性値等をモデル化することで得られる保守性によっておおむね相殺されることで実効的に取り込まれており、(8)項の燃料棒表面熱伝達 [炉心（燃料）] で相応に考慮できるとしてよいと考えられる。

#### (15) 圧力損失 [炉心（熱流動）]

チャンネル内の圧力損失は、チャンネルを流れる冷却材流量を介して表面

熱伝達の変化に影響を与える。しかし、沸騰遷移後は冷却材流量の変化による表面熱伝達の変化は小さく、燃料被覆管温度挙動への影響は小さいと考えられる。したがって、圧力損失は燃料被覆管温度変化に対して重要度は低いと考えられる。なお、炉心入口流量の変化はR E D Yコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

#### (16) 三次元効果 [炉心 (熱流動)]

三次元効果による燃料集合体間の流量配分は、冷却材流量が変化することから、燃料被覆管温度挙動に影響を与える。しかし、主蒸気隔離弁の誤閉止 + 原子炉停止機能喪失の事象では、径方向出力分布の変化は小さく、流量配分による冷却材流量変化への影響は小さいと考えられる。また、高出力燃料集合体は平均出力燃料集合体に比べてボイド率が高く流量低下が早くなるが、冷却材流量が減少すれば二相部の圧力損失による流量配分の寄与が相対的に小さくなるので、高出力燃料集合体の流量低下は緩和されると考えられる。したがって、三次元効果による燃料集合体間の流量配分は燃料被覆管温度変化に対して重要度は低いと考えられる。

ただし、中性子束と冷却材流量の振動現象（高出力チャンネルの流量振動現象を含む）は、沸騰遷移及びリウエットの発生に影響を与えることから、燃料被覆管温度挙動に影響を与える可能性がある。そのため、三次元効果 [炉心 (熱流動)] は(6)項の三次元効果 [炉心 (核)] と同様に燃料被覆管温度変化に対して重要度は中程度とし、三次元効果 [炉心 (核)] に含めて検討する。

#### (17) 冷却材流量変化 [原子炉压力容器]

再循環ポンプトリップにより炉心流量を減少させることで原子炉出力を抑

制することから、再循環ポンプのコストダウン特性と流路慣性による冷却材流量変化の速さは原子炉出力の抑制の速さに影響する。また、事象発生直後に再循環ポンプトリップするため、燃料被覆管温度上昇時の冷却材流量は自然循環流量相当である。したがって、冷却材流量変化は燃料被覆管温度に対して重要度は高いと考えられる。なお、炉心入口流量の変化はR E D Yコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

#### (18) 冷却材放出（臨界流・差圧流）〔原子炉压力容器〕

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、主蒸気隔離弁の誤閉止による原子炉圧力の上昇によって逃がし安全弁が作動する。逃がし安全弁から放出される蒸気流量の変化によって原子炉圧力が変化し、ボイドの生成・凝縮に影響するため反応度フィードバック効果に影響する。反応度フィードバック効果は(3)項の反応度フィードバック効果〔炉心（核）〕で考慮する。したがって、冷却材放出（臨界流・差圧流）は燃料被覆管温度変化に対して重要度は低いと考えられる。なお、原子炉圧力変化及び原子炉出力変化はR E D Yコードの解析結果を引き継がれる物理現象である。

#### (19) 沸騰・凝縮・ボイド率変化〔原子炉压力容器〕

ここで取り扱う物理現象は、炉心以外での領域の状態である。主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、沸騰・凝縮・ボイド率変化（減圧沸騰（フラッシング）、二相水位、二相流動）が炉心内の領域に与える影響は小さく、燃料被覆管温度挙動への影響はないと考えられる。したがって、沸騰・凝縮・ボイド率変化が燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(20) 気液分離（水位変化）・対向流 [原子炉压力容器]

ここで取り扱う物理現象は、炉心以外での領域の状態である。主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、炉心以外の領域で気液分離（水位変化）・対向流が生じないため、燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(21) 気液熱非平衡 [原子炉压力容器]

ここで取り扱う物理現象は、炉心以外での領域の状態である。主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、炉心以外の領域で気液熱非平衡が生じないため、燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(22) 圧力損失 [原子炉压力容器]

ここで取り扱う物理現象は、炉心以外での領域の状態である。主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象での燃料被覆管温度を評価する上で、(15)項の圧力損失 [炉心（熱流動）] の物理現象を考慮する。したがって、圧力損失が燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(23) 構造材との熱伝達 [原子炉压力容器]

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、原子炉出力はほう酸水注入によって抑制されるまで高い値を維持する。このため、原子炉ドーム部を含む炉心シュラウド外領域の構造材と冷却材間との熱伝達は影響を与えないと考えられる。したがって、構造材との熱伝達が燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(24) 非常用炉心冷却系（以下「ECCS」という。）注水（給水系・代替注水設備含む）〔原子炉压力容器〕

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）により冷却材を注入し、炉心入口流量及び炉心入口エンタルピの変化によって燃料被覆管温度挙動に影響を与える。したがって、ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）は燃料被覆管温度変化に対して重要度は高いと考えられる。なお、炉心入口流量変化及び炉心入口エンタルピ変化はREDYコードの解析結果から引き継がれる物理現象である。

(25) ほう酸水の拡散〔原子炉压力容器〕

事象収束に必要なほう酸水注入系の手動起動はボロン反応度の印加が出力の抑制に重要な役割を果たす。燃料被覆管温度の上昇は事象初期であり、ほう酸水注入系による出力抑制の効果が現れる段階より早いため、ほう酸水の拡散が燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(26) 三次元効果〔原子炉压力容器〕

燃料被覆管温度の上昇は事象初期であり、ほう酸水注入系による出力抑制の効果が現れる段階より早いため、ほう酸水の輸送・拡散における三次元効果が燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(27) 冷却材放出（臨界流・差圧流）〔原子炉格納容器〕

本物理現象自体は、格納容器側から見た逃がし安全弁から放出される蒸気流に係る事象であり、原子炉から見た(18)項の冷却材放出（臨界流・差圧流）〔原子炉压力容器〕と同じである。

(28) 格納容器各領域間の流動 [原子炉格納容器]

格納容器各領域間の流動は原子炉側への影響はなく，燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(29) サプレッション・プール冷却 [原子炉格納容器]

サプレッション・プール冷却は，ECCSの高圧注水による冷却材の温度が変化するため，燃料被覆管温度挙動に影響を与える可能性がある。燃料被覆管温度の上昇は事象初期であり，残留熱除去系によるサプレッション・プール冷却の効果が現れる段階より早いため，燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(30) 気液界面の熱伝達 [原子炉格納容器]

気液界面の熱伝達は原子炉側への影響はなく，燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(31) 構造材との熱伝達及び内部熱伝導 [原子炉格納容器]

構造材との熱伝達及び内部熱伝導は原子炉側への影響はなく，燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(32) スpray冷却 [原子炉格納容器]

Spray冷却は，サプレッション・プール水温の低下によってECCSの高圧注水による冷却材の温度が変化するため，燃料被覆管温度挙動に影響を与える可能性がある。主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象では，Spray冷却の実施を仮定していないため，燃料被覆管温度変化に与え



る影響はないと考えられる。

(33) 放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生 [原子炉格納容器]

放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生は原子炉側への影響はなく、燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

(34) 格納容器ベント [原子炉格納容器]

格納容器ベントは、サプレッション・プール水温の低下によってECCSの高圧注水による冷却材の温度が変化するため、燃料被覆管温度挙動に影響を与える可能性がある。主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象では、格納容器ベントの実施を仮定していないため、燃料被覆管温度変化に与える影響はないと考えられる。

表 2-2 原子炉停止機能喪失における物理現象のランク (SCATコード)  
(1/2)

分類	事故シーケンス		主蒸気隔離弁の誤閉止 + 原子炉停止機能喪失
	物理現象	評価指標	燃料被覆管温度
炉心 (核)	(1)	核分裂出力	(H) *1
	(2)	出力分布変化	<u>H</u>
	(3)	反応度フィードバック効果	(H) *1
	(4)	制御棒反応度効果	I
	(5)	崩壊熱	(I) *1
	(6)	三次元効果	<u>M</u> *2
炉心 (燃料)	(7)	燃料棒内温度変化	<u>H</u>
	(8)	燃料棒表面熱伝達	<u>H</u>
	(9)	沸騰遷移	<u>H</u>
	(10)	燃料被覆管酸化	L
	(11)	燃料被覆管変形	I
炉心 (熱流動)	(12)	沸騰・ボイド率変化	L
	(13)	気液分離 (水位変化)・対向流	I
	(14)	気液熱非平衡	<u>M</u>
	(15)	圧力損失	(L) *1
	(16)	三次元効果	<u>M</u> *2
原子炉圧力 容器 (逃がし安 全弁含む)	(17)	冷却材流量変化	(H) *1
	(18)	冷却材放出 (臨界流・差圧流)	(L) *1
	(19)	沸騰・凝縮・ボイド率変化	I
	(20)	気液分離 (水位変化)・対向流	I
	(21)	気液熱非平衡	I
	(22)	圧力損失	I
	(23)	構造材との熱伝達	I
	(24)	ECCS注水 (給水系・代替注水設備含 む)	(H) *1
	(25)	ほう酸水の拡散	I
	(26)	三次元効果	I

\*1 事故シーケンスグループに対して抽出されたものであるため、REDYコードの解析結果を引き継ぐ物理現象も含んでいる。そのような物理現象は、SCATコードで評価する事象において考慮すべき物理現象の対象外とする。

\*2 三次元効果の模擬はREDY/SCATコード体系では困難であるため、米国において中性子束振動の評価実績のあるTRACコードによる参考解析結果を参照する。

表 2-2 原子炉停止機能喪失における物理現象のランク (S C A Tコード)  
(2/2)

分類	事故シーケンス		主蒸気隔離弁の誤閉止 + 原子炉停止機能喪失
	物理現象		評価指標 燃料被覆管温度
原子炉格納容器	(27)	冷却材放出 (臨界流・差圧流)	(18)と同一物理現象
	(28)	格納容器各領域間の流動	I
	(29)	サプレッション・プール冷却	I
	(30)	気液界面の熱伝達	I
	(31)	構造材との熱伝達及び内部熱伝導	I
	(32)	スプレイ冷却	I
	(33)	放射線水分解等による水素ガス・酸素 ガス発生	I
	(34)	格納容器ベント	I

### 3. 解析モデルについて

#### 3.1 コード概要

SCATコードは、燃料の熱的余裕及び燃料被覆管温度を解析するコードである。本コードは、単一チャンネルを模擬し、これを軸方向一次元に多ノード分割する。各ノードについて、燃料棒には半径方向だけの熱伝導方程式を適用して冷却材への熱伝達を計算し、チャンネル内冷却材には、質量及びエネルギー保存則を適用して冷却材の熱水力挙動を計算する。

なお、本コードは、従来の原子炉設置変更許可申請書において適用実績のある「運転時の異常な過渡変化の解析」及び「事故解析」における最小限界出力比（以下「MCPR」という。）の評価に加え、原子炉停止機能喪失の事象で生じる沸騰遷移後の燃料被覆管温度及び燃料被覆管表面の酸化量を評価する。そのため、沸騰遷移後の燃料被覆管－冷却材間の熱伝達相関式とリウエット相関式を適用する。また、燃料被覆管と冷却水又は水蒸気との化学反応（以下「ジルコニウム－水反応」という。）に「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」（以下「ECCS性能評価指針」という。）に示されている Baker-Just の式<sup>(2)</sup>を適用する。

本コードの入力は、燃料集合体の幾何学的形状、軸方向出力分布等の炉心データ、燃料集合体出力、チャンネル入口流量等の初期条件、REDYコードの出力から得られた燃料集合体出力、チャンネル入口流量等の過渡変化のデータ等であり、出力として、GEXL相関式<sup>(3)(4)</sup>に基づく限界出力比、各ノードでの冷却材流量、クォリティ、燃料被覆管温度等の時間変化が求められる。また、燃料被覆管温度から燃料被覆管酸化量の時間変化が求められる。

### 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 2-2 で「H」及び「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 3-1 に示す。

表 3-1 重要現象に対する解析モデル

分類	重要現象	必要な解析モデル	
炉心（核）	出力分布変化	燃料モデル	出力分布モデル
炉心（燃料）	燃料棒内温度変化	燃料モデル	熱伝導モデル 燃料ペレット-被覆管ギャップ 熱伝達モデル
	燃料棒表面熱伝達	チャンネル内 熱流動モデル	被覆管表面熱伝達モデル (サブクール熱伝達，サブクール 沸騰熱伝達，核沸騰熱伝 達，膜沸騰熱伝達，輻射熱伝 達*) リウエットモデル
	沸騰遷移	チャンネル内 熱流動モデル	沸騰遷移評価モデル
炉心 (熱流動)	気液熱非平衡	チャンネル内 熱流動モデル	被覆管表面熱伝達モデル リウエットモデル

\* 燃料被覆管温度を厳しい側に評価する観点から，輻射熱伝達の寄与を解析コード中で取り扱わない。

### 3.3 解析モデル<sup>(5)(6)</sup>

SCATコードは、REDYコードにより求められた原子炉停止機能喪失時の炉心へ与えられる外乱を用いて、燃料のMCPR及び燃料被覆管温度を評価する。またREDYコードから求まる中性子束、炉心流量、炉心入口エンタルピ、炉心圧力の時間変化を境界条件とする。重要現象に対するSCATコードの計算モデルを表3-2に示す。

表 3-2 S C A Tコードのモデル一覧

項 目		計算モデル
チャンネル内 熱流動モデル	流動の基本式 (非平衡ドリフトフラックス モデル)	気液各相に対して質量保存式とエネルギー保存式, 及び気液混相の運動量保存式を適用
	ボイドモデル	を適用した Zuber-Findlay の式
	サブクールボイドモデル	
	圧力損失モデル	
	被覆管表面熱伝達モデル	以下の熱伝達モードを考慮 ・サブクール熱伝達 Dittus-Boelter の式 ・サブクール沸騰・核沸騰熱伝達 Jens-Lottes の式 ・膜沸騰熱伝達 修正 Dougall-Rohsenow 式 <sup>(注2)</sup>
	沸騰遷移評価モデル	G E X L 相関式を適用
	リウエットモデル	リウエットクオリティをモデル化した相関式を適用 <sup>(注2)</sup>
燃料モデル	出力分布モデル	初期値で固定した軸方向出力分布を適用
	熱伝導モデル	燃料棒径方向に一次元熱伝導方程式を適用
	燃料ペレット-被覆管ギャップ熱伝達モデル	初期値で固定した軸方向ギャップ熱伝達係数を適用

(注 1) 現行の原子炉設置許可申請解析では特に必要とされなかったモデル

(注 2) 原子炉停止機能喪失事象のために拡充されたモデル

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。

### 3.3.1 チャンネル内熱流動モデル

SCATコードは、燃料棒、ウォータロッド、チャンネルボックスで構成される燃料集合体の冷却材挙動を評価するモデルである。燃料集合体の冷却材流路は軸方向に複数のノードに分割して冷却材の熱水力挙動を計算する。

#### (1) 保存則

冷却材流路の軸方向各ノードについて保存則を適用して熱水力状態を計算する。二相流モデルには、気液各相の質量保存式とエネルギー保存式、及び気液混相の運動量保存式の五つの保存式を適用し、ドリフトフラックスモデルに基づく気液各相の速度差を考慮する。

目的のノードの冷却材の沸騰状態（サブクール、サブクール沸騰、核沸騰、膜沸騰）を判定し、それに対して与えられる質量保存式とエネルギー保存式を解くことでクォリティ、エンタルピ等を求める。ボイド率を求めるために、ボイド率とクォリティの相関式を用いる。

ノードの熱水力状態が求められると、燃料棒から冷却材に伝わる熱を計算する。

保存式は下式である。

#### (a) 質量保存式

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_v) + \frac{\partial G_v}{\partial z} &= \Gamma_g \\ \frac{\partial}{\partial t}[(1-\alpha)\rho_l] + \frac{\partial G_l}{\partial z} &= -\Gamma_g\end{aligned}$$

#### (b) エネルギー保存式

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_v h_v) + \frac{\partial}{\partial z}(G_v h_v) &= Q_v + \alpha \frac{\partial P}{\partial t} + h_g \Gamma_g \\ \frac{\partial}{\partial t}[(1-\alpha)\rho_l h_l] + \frac{\partial}{\partial z}(G_l h_l) &= Q_l + (1-\alpha) \frac{\partial P}{\partial t} - h_f \Gamma_g\end{aligned}$$



なお、質量保存式及びエネルギー保存式から求められた全ノードの熱水力状態を用いて、運動量保存式を解くことでチャンネル内の圧力損失を求めることができる。

運動量保存式は下式である。

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}(G_v u_v + G_l u_l) + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{(f/\rho_l)G^2}{2D_H} + \bar{\rho}g = 0$$

ここで、

$$G = G_l + G_v$$

$$\bar{\rho} = \rho_l(1 - \alpha) + \rho_g \alpha$$

記号は以下のとおりである。

$\alpha$  : ボイド率

$\rho$  : 密度

$G$  : 質量流束

$u$  : 相速度

$\Gamma_g$  : 蒸気生成率

$h$  : エンタルピ

$Q$  : 熱伝達量

$P$  : 冷却材圧力

$g$  : 重力加速度

$f$  : 摩擦抵抗係数

$D_H$  : 水力等価直径

(添字) v : 蒸気相  
l : 液相  
g : 飽和蒸気  
f : 飽和水

(2) 構成式

①ボイドモデル, サブクールボイドモデル



②圧力損失モデル



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①②のモデルが適切に評価できていることを添付2に示す。

### ③被覆管表面熱伝達モデル

冷却材の沸騰状態（サブクール、サブクール沸騰、核沸騰、膜沸騰）に基づいた熱伝達の相関式を適用する。

冷却材の沸騰状態の選択ロジックを図3-1に示す。サブクール沸騰開始位置は単相液相エンタルピを示す曲線と気泡離脱時のエンタルピを示す曲線の交点より求まる。すなわち、単相液相エンタルピが気泡離脱時のエンタルピ以上となった時にサブクール沸騰が始まるとする。また、核沸騰は液相エンタルピが飽和状態に達した時に始まるとする。核沸騰から膜沸騰への移行については、限界クオリティと沸騰長さの関係等に基づき整理されたGEXL相関式を用いて判定する。リウエットによる膜沸騰状態から核沸騰状態への移行については、日本原子力学会標準「BWRにおける過渡的な沸騰遷移後の燃料健全性評価基準：2003」<sup>(8)</sup>で推奨される相関式を用い

て判定する。G E X L 相関式を用いた沸騰遷移判定の詳細は④で、リウエット判定については⑤に示す。

各流動状態に対して設定される熱伝達モデルの一覧を表 3-2 に示す。サブクール領域の単相流には Dittus-Boelter の式<sup>(9)</sup>を、サブクール沸騰及び核沸騰領域には Jens-Lottes の式<sup>(10)</sup>を、膜沸騰領域には修正 Dougall-Rohsenow 式<sup>(8)(11)</sup>を適用する。

なお、過渡的な沸騰遷移後の熱伝達相関式について、日本原子力学会標準「BWRにおける過渡的な沸騰遷移後の燃料健全性評価基準：2003」では、その適用範囲内において修正 Dougall-Rohsenow 式を使用することが妥当であるとしている。また、燃料被覆管温度が 800°C程度を超える高温範囲では、輻射熱伝達が温度の増加とともに増大して燃料集合体内の燃料被覆管温度を平坦化するように作用するが、S C A Tコードにおいては輻射熱伝達の影響を考慮せず、出力の大きな燃料棒の燃料被覆管温度を高め評価する方法を採っている。

相関式は下式である。ただし、飽和核沸騰時及び沸騰遷移後においては、冷却材の温度を飽和温度として冷却材への熱流束を評価する。

(a) Dittus-Boelter の式<sup>(9)</sup>

$$h = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \frac{k}{D_H}$$

(b) Jens-Lottes の式<sup>(10)</sup>

$$h = \frac{Q/A}{\Delta T_{JL}}$$

$$\Delta T_{JL} = 60e^{-\frac{P}{900}} \left[ \frac{Q/A}{10^6} \right]^{1/4}$$

(c) 修正 Dougall-Rohsenow 式<sup>(8)(11)</sup>

$$h = 0.023 \left\{ \frac{GD_H}{\mu_{g,f}} \left[ x_e + \frac{\rho_{g,s}}{\rho_{l,s}} (1 - x_e) \right] \right\}^{0.8} Pr_{g,f}^{0.4} \frac{k_{g,f}}{D_H}$$

各物性値に用いる過熱蒸気の温度は、蒸気膜温度（燃料被覆管表面温度と飽和温度の平均温度）を用いる。

記号は以下のとおりである。

$h$  : 熱伝達率

$Q$  : 熱伝達量

$\Delta T_{JL}$  : 燃料被覆管表面温度と冷却材温度（飽和温度）との差

$x_e$  : 断面平均熱平衡クオリティ

$D_H$  : 水力等価直径

$G$  : 冷却材の質量流束

$P$  : 冷却材圧力

$A$  : 伝熱面積

$k$  : 冷却材の熱伝導率

$\rho$  : 冷却材の密度

$\mu$  : 冷却材の粘性係数

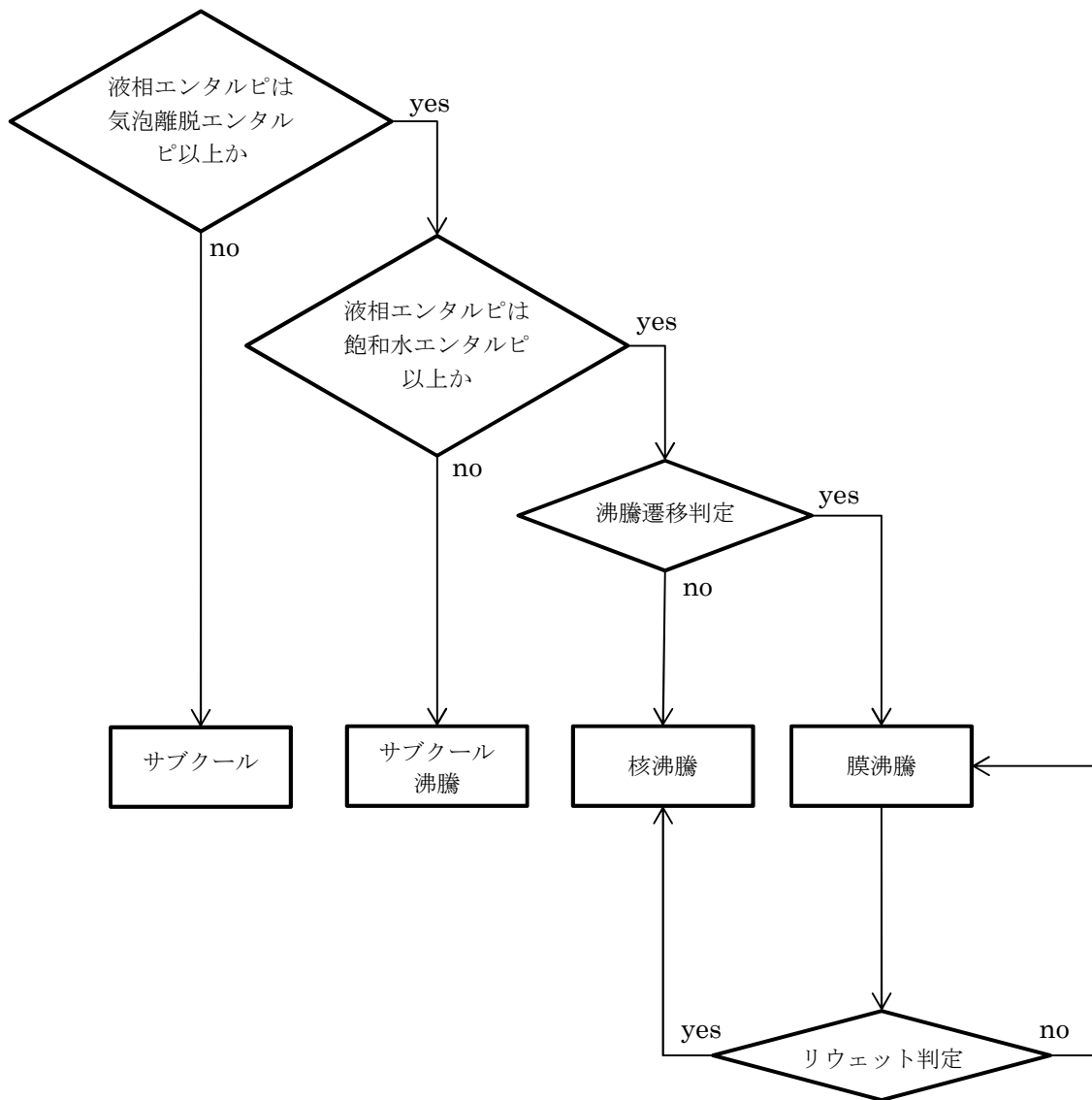
$Re$  : 冷却材のレイノルズ数

$Pr$  : 冷却材のプラントル数

(添字)  $g,s$  : 飽和蒸気

l,s : 飽和水

g,f : 過熱蒸氣



沸騰遷移判定：G E X L 相関式による沸騰遷移判定  
 リウエット判定：相関式 2 によるリウエット判定

図 3-1 流動状態の選択ロジック

#### ④沸騰遷移評価モデル

燃料集合体が沸騰遷移に至る状況はG E X L 相関式を用いて計算する。有効性評価解析における沸騰遷移の判定は，G E X L 相関式から得られるM C P R がM C P R に関する燃料の許容設計限界（以下「S L M C P R」という。）を下回った時点とする。

G E X L 相関式は沸騰遷移の開始を予測する式で，B W R 炉心で出現することが予想される種々の軸方向出力分布を条件とした豊富な試験データに基づいて作成されており，以下の特徴を有する。

- ・出力分布依存性を考慮する手段として，「限界クォリテイ（ $X_C$ ）対沸騰長さ（ $L_B$ ）」の関係を導入している。
- ・局所出力分布の関数を取り込んでいる。
- ・実形状の模擬燃料集合体により得られたデータをベストフィットしていることが大きな特徴として挙げられる。

G E X L 相関式は次式で表現される。

$$X_C = f (L_B, D_Q, G, L, P, R)$$

記号は以下のとおりである。

$X_C$ ：断面平均の限界クォリテイ

$L_B$ ：沸騰長さ

$D_Q$ ：熱的等価直径

$G$ ：質量流束

$L$ ：加熱長さ

$P$ ：圧力

$R$ ：局所出力分布に関する係数

以下に，G E X L 相関式から得られるM C P R の計算と，沸騰遷移の生



じる位置を判定する計算について述べる。

(a) MCPRの計算方法

GEXL 相関式を用いた限界出力（燃料集合体のある点において沸騰遷移を生じさせる燃料集合体出力）の計算は、次に述べる手法によって行う。

- (i) 注目するバンドルの質量速度、圧力、局所出力関数等を求める。
- (ii) (i)の条件下でGEXL相関式を用いて「限界クオリティ ( $X_c$ ) 対沸騰長さ ( $L_B$ )」を計算する。
- (iii) 注目するバンドルの出力を上昇させ、(i)の条件下で「運転クオリティ ( $X$ ) 対沸騰長さ ( $L_B$ )」を計算する。
- (iv) (ii)と(iii)で得られた曲線を比較し、(ii)の曲線に(iii)の曲線がある点で接する場合の出力を求める。これが求める限界出力である。

もし(ii)(iii)で得られた曲線が接しない場合、出力を変えて(iii)の計算を反復し、接する場合のバンドル出力を求める。この関係を図 3-2 に示す。

運転出力に対しGEXL相関式から得られる限界出力の比がMCPRとなる。有効性評価解析では、MCPRがSLMCPRを下回った時点で沸騰遷移が発生したと判断する。SLMCPRは、GEXL相関式が持つ不確かさ等を考慮して保守的に設定する。

過渡時のMCPRについては、主に限界クオリティと運転クオリティの比に基づく値で評価する。

(b) 沸騰遷移位置判定の計算方法

沸騰遷移の判定後，沸騰遷移の生じる位置を判定する。有効性評価解析における沸騰遷移の生じる位置を判定する計算は，次に述べる手法によって行う。

- (i) GEXL 相関式を用いて限界クオリティ ( $X_c$ ) を計算する。
- (ii) (i)での限界クオリティを用いて SLMCPR に相当する限界クオリティを求める。
- (iii) 軸方向沸騰遷移位置を表すために，(ii)での SLMCPR に相当する限界クオリティを補正する。
- (iv) この補正した限界クオリティと運転クオリティとを比較し，交点の軸方向ノード位置を沸騰遷移が生じた位置と判定する。

この関係を図 3-3 に示す。

沸騰遷移を判定した位置では，沸騰遷移後の熱伝達相関式によって求めた熱伝達係数を用いて燃料被覆管温度を計算する。

燃料集合体断面平均クオリティ (X)

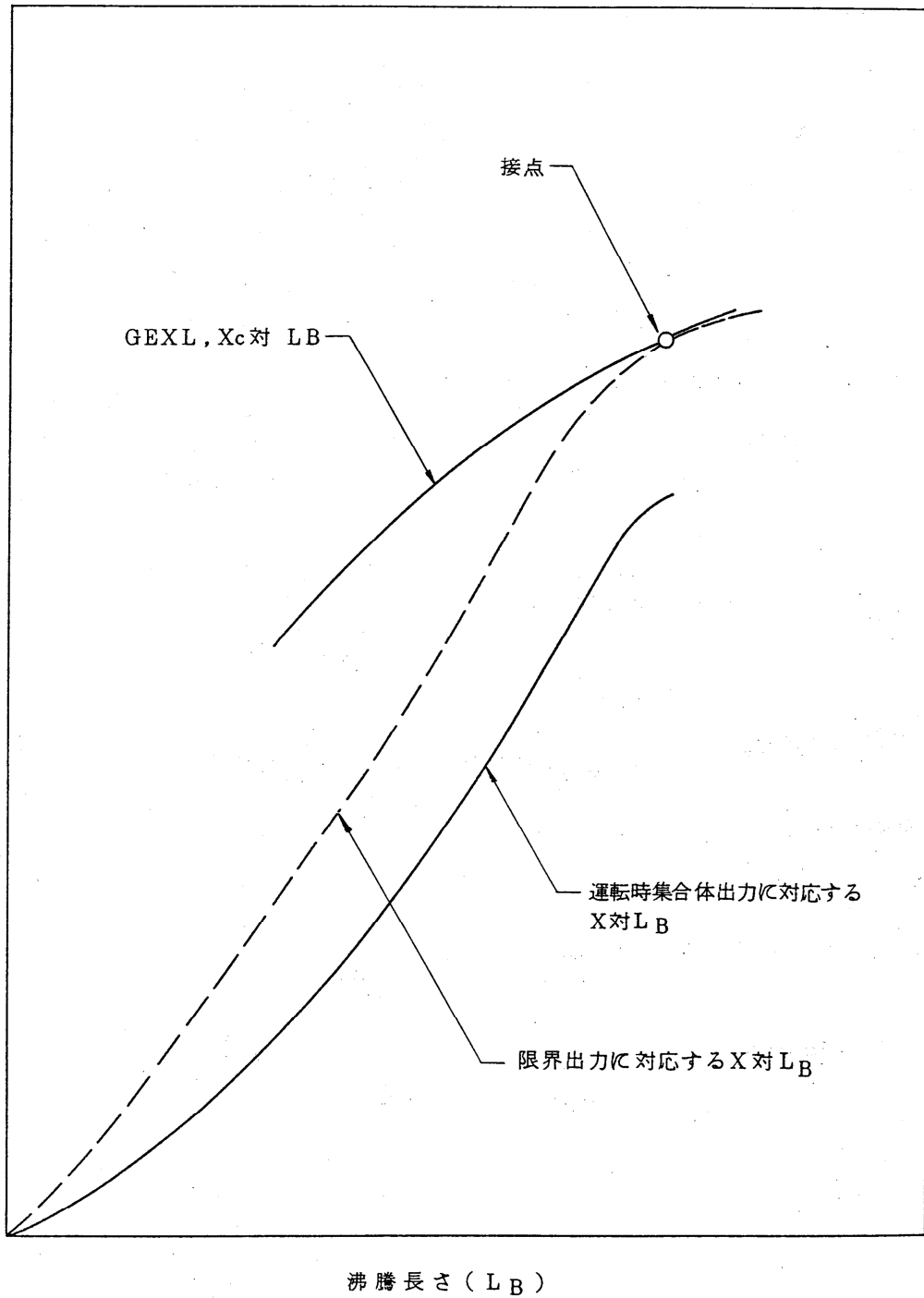
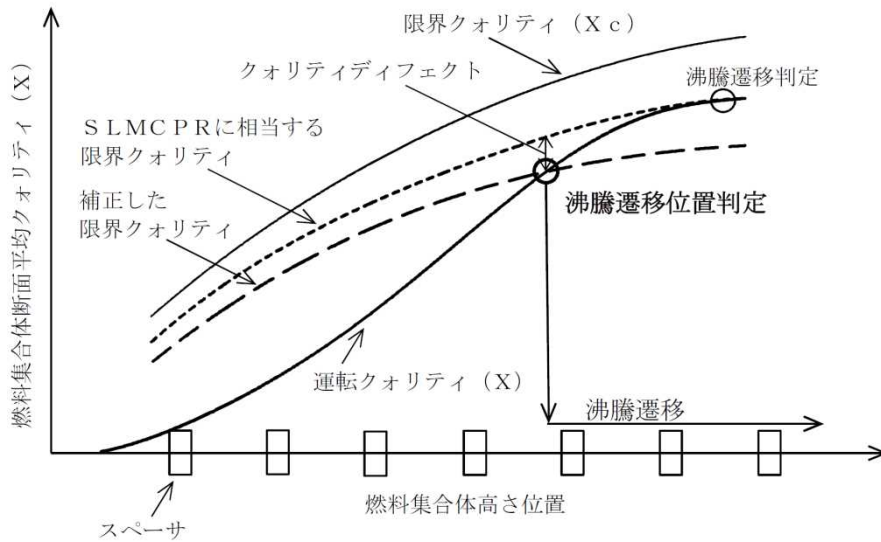


図 3-2 限界出力の評価手法<sup>(3)(4)</sup>



沸騰遷移判定位置におけるクオリティディフェクト  
 $= \text{限界クオリティ} * \text{運転クオリティ}$

\*)有効性評価解析ではSLMCP Rに  
 相当する限界クオリティ

図 3-3 沸騰遷移位置判定の評価手法

## ⑤リウエットモデル

沸騰遷移後のリウエット時刻の予測方法について、日本原子力学会標準「BWRにおける過渡的な沸騰遷移後の燃料健全性評価基準：2003」では、相関式1<sup>(8)(12)</sup>と相関式2<sup>(8)(13)</sup>のリウエット相関式のいずれかを使用することが妥当であるとしている。相関式1は単管試験データに基づいて作成した相関式で、相関式2は管群試験データに基づいて現象論的に作成した相関式である。

相関式2は、相関式1よりもドライアウト持続時間を長く評価する傾向があるため、燃料被覆管温度を高めにより評価する。そのため、相関式2をリウエット時刻の予測方法に適用する。

なお、相関式2は、燃料集合体内の軸方向着目位置の流路断面平均クオリティがリウエットクオリティを下回ったときにリウエットが発生するという考えに基づいている。実機的设计及び運転条件を対象とした熱水力試験によれば、準定常状態におけるリウエットクオリティは沸騰遷移を生じる限界クオリティに一致するが、過渡状態におけるリウエットクオリティは限界クオリティを下回る傾向にある。相関式2は、リウエット時点における流路断面平均クオリティと限界クオリティの偏差をモデル化したものである。

相関式は下式である<sup>(8)(13)</sup>。

$$x_{\text{rewet}} = x_c + \Delta x$$

$$\Delta x = \left\{ 0.0635 \frac{D_w F h_{fg}}{u_{lf}^0} \left[ \frac{G(x - x_c)}{q''} \right]_{t=t_m} - \frac{G_0}{G} \left( \frac{\Delta T_w - \Delta T_0}{\Delta T_0} \right) - \Delta t_0 \right\} \overline{\frac{dx}{dt}}$$

記号は以下のとおりである。

$x_{\text{rewet}}$ : 燃料集合体内の流路で断面平均したリウエットクオリティ

- $x_c$  : 燃料集合体内の流路で断面平均した限界クオリティ  
 $x$  : 燃料集合体内の流路で断面平均したクオリティ  
 $\Delta x$  : 過渡時におけるリウエットクオリティの限界クオリティからの偏差  
 $\Delta T_w$  : 壁面過熱度  
 $\Delta T_0$  : 液膜先端固気液三相界面の過熱度  
 $q''$  : ドライアウト部の熱流束  
 $F$  : 断面平均燃料棒出力に対するピーキング係数  
 $G$  : 冷却材の質量流束  
 $D_w$  : 熱的等価直径  
 $h_{fg}$  : 蒸発潜熱  
 $t_m$  :  $x-x_c$  が最大となる時刻  
 $\Delta t_0$  :  $x-x_c$  が最大となる時刻から  $x$  が  $x_c$  まで復帰するまでの経過時間  
 $\frac{\overline{dx}}{dt}$  :  $x$  が  $x_c$  まで復帰した時刻からリウエット時刻までの  $x$  の平均変化率  
 $G_0$  : 質量流束規格化基準値  
 $u_{lf}^0$  : 液膜進展速度規格化基準値

### 3.3.2 燃料モデル

S C A Tコードの燃料モデルは、燃料集合体（燃料棒、ウォータロッド等）やチャンネルボックスで構成される。燃料棒熱伝達計算は、最大5グループに分けることができ、各々の燃料棒ごとに行うことができる。

実機解析に用いるグルーピング及びノーディングを図3-4及び図3-5に、考え方を表3-3に示す。9×9燃料（A型）の場合は、図3-4に示すようにホットロッド（標準長）、平均出力ロッド（標準長）、部分長ロッド、ウォータロッドの四つのグループに分けて模擬している。

#### (1) 出力分布モデル

燃料の軸方向出力分布の初期状態一定値として入力している。

#### (2) 熱伝導モデル

燃料棒は、燃料ペレット、ペレットと被覆管の間の空隙部であるギャップ部、被覆管で構成され、図3-5に示すように軸方向に複数のノードに分割し、それぞれのノードに径方向に熱伝導方程式を適用して、冷却材への熱伝達を計算する。

- ① 燃料ペレットは径方向に複数のノードに分割し、被覆管は通常内側と外側の二つのノードに分割して取り扱う。
- ② 燃料ペレットでは、ペレット中心部よりペレット周辺部が相対的に局所出力が大きくなる傾向があり、この特性を取り込めるように径方向出力分布を考慮することができる。
- ③ ペレットと被覆管のギャップ部の熱の授受には、ギャップ熱伝達係数を用い、一般に軸方向中央部のギャップ熱伝達係数が大きくなる傾向があり、このため、ギャップ熱伝達係数は軸方向分布を考慮できる。

ギャップ熱伝達については時間変化をしない一定値とする場合と、出力上昇に伴う燃料ペレットの熱特性の変化を考慮に入れた時間的に変化する場合の取り扱いが可能である。

- ④ 熱伝導率，熱容量等，燃料ペレット及び被覆管の物性については，関係式若しくはテーブル形式で温度依存を考慮する。

### (3) 燃料ペレット－被覆管ギャップ熱伝達モデル

燃料ペレットと被覆管の間のギャップ熱伝達係数は，熱放出率を考慮した輻射伝導係数，燃料ペレットと被覆管相互の接触圧力を考慮した熱伝達係数，熱膨張の影響を考慮した気相部の熱伝導係数から求められる。

MCPRを計算する解析では，燃料棒機械設計コードPRIME<sup>(14)(15)(16)(17)</sup>で計算された結果に基づき，軸方向ギャップ熱伝達係数は一定値を用いている。

燃料棒の温度分布を示す方程式は下式である<sup>(5)(6)</sup>。

#### (a) 燃料ペレット

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r K_F \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \rho_F C_F \frac{\partial T}{\partial t} - Q_g$$

#### (b) 燃料ペレット－被覆管ギャップ部

$$\left[ K_F \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{\text{燃料表面}} = H_g \Delta T_{\text{gap}}$$

#### (c) 燃料被覆管

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r K_c \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \rho_c C_c \frac{\partial T}{\partial t}$$



記号は以下のとおりである。

$T$  : 温度

$\Delta T_{\text{gap}}$  : 燃料ペレット-燃料被覆管ギャップの温度差

$K_F$  : 燃料ペレットの熱伝導率

$K_c$  : 燃料被覆管の熱伝導率

$H_g$  : 燃料ペレット-燃料被覆管の熱伝達率

$\rho_F$  : 燃料ペレット密度

$\rho_c$  : 燃料被覆管密度

$C_F$  : 燃料ペレット比熱

$C_c$  : 燃料被覆管比熱

$Q_g$  : 燃料ペレットの発熱量

表 3-3 SCATコードのノーディングの考え方（9×9燃料（A型）の例）

領域	考え方
燃料棒グループ	燃料集合体の燃料棒及びウオータロッドを考慮するため、ホットテスト出力標準長燃料棒，平均出力標準長燃料棒，部分長燃料棒，ウオータロッドのグループに分ける。
燃料棒（軸方向）	燃料集合体内の熱水力挙動を詳細に計算するために，核計算に合わせて燃料部を 24 ノードに分割している。また燃料上部に燃料プレナム部を設ける。
燃料棒（径方向）	燃料ペレット内の熱挙動を詳細に計算するために燃料ペレット部は 12 ノード，燃料ペレットと被覆管の間のギャップ部を 1 ノード，また，被覆管部を燃料ペレット側と冷却材側に分けた 2 ノードに分割している。

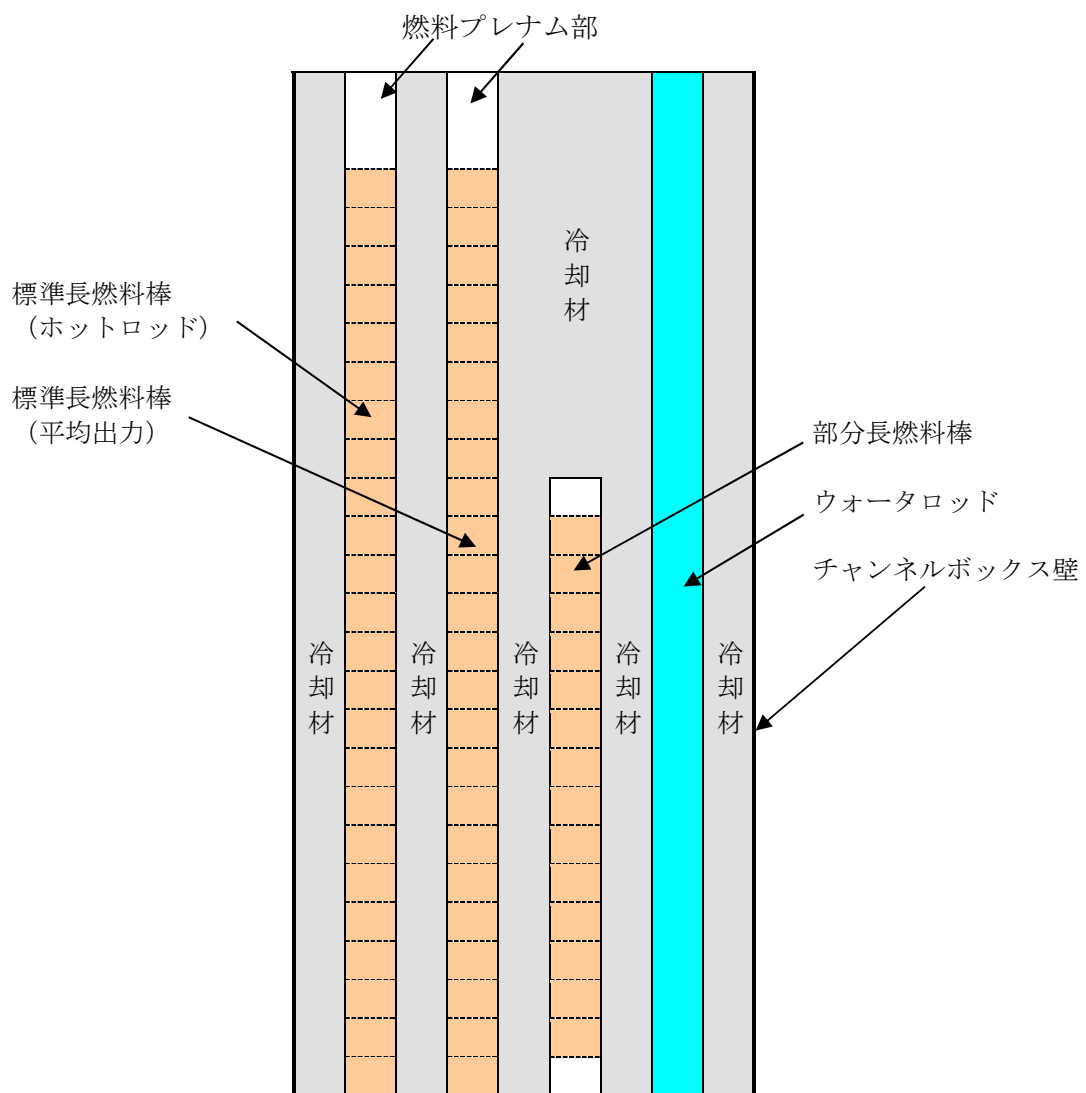


図 3-4 燃料集合体モデル (9 × 9 燃料 (A型) の例)

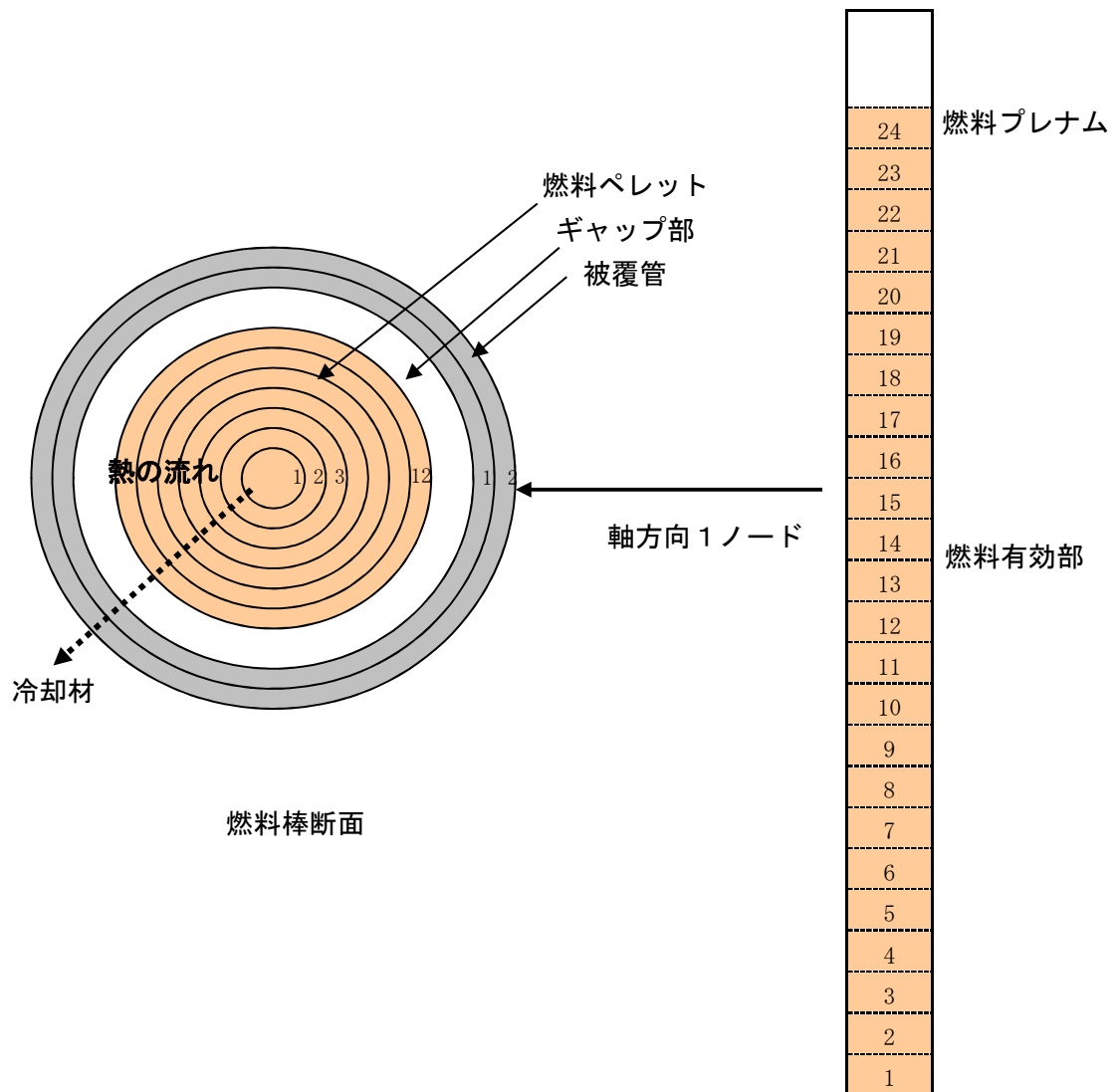


図 3-5 燃料棒モデル（9 × 9 燃料（A型）の例）

### 3.4 入出力

SCATコードはREDYコードにより求められた原子炉停止機能喪失時の炉心へ与えられる外乱を用いて評価する。SCATコードの主要な入出力を図3-6に示す。各インプットデータの詳細な入力情報については添付1に示す。

①炉心データ

②燃料データ

なお、SCATコードの入口流量及びバンドル出力の時間変化は、REDYコードにより求められた規格化した炉心入口流量及び出力の時間変化がインプットとなる。初期値は、初期MCP Rに合わせた入口流量及びバンドル出力を与える。

初期入口流量は、炉心熱水力解析コードISCOR<sup>(18)(19)</sup>を用いて、MCP Rの初期値が通常運転時の制限値（以下「OLMCP R」という。）になるように初期バンドル出力とともに求められる。具体的には、高出力燃料集合体及び平均出力燃料集合体の入口流量は全燃料集合体の入口と出口間の圧力差が等しくなるように計算され、また、計算された入口流量を用いて求められた高出力燃料集合体のMCP RがOLMCP Rとなるように、入口流量とバンドル出力の繰り返し計算が行われることで、初期バンドル出力と初期入口流量が得られる。

OLMCP Rに相当する高出力燃料集合体は、平均出力燃料集合体よりも出力が高く、ボイド率が大きいため、高出力燃料集合体の初期入口流量は炉心平均の初期入口流量よりも小さい。

上記をインプットデータとして、単チャンネル熱水力解析を実施し、以下

のアウトプットデータを得る。

①MCPR

②燃料被覆管温度

③燃料被覆管酸化量（ジルコニウム－水反応量）

④クオリティ

⑤熱伝達係数

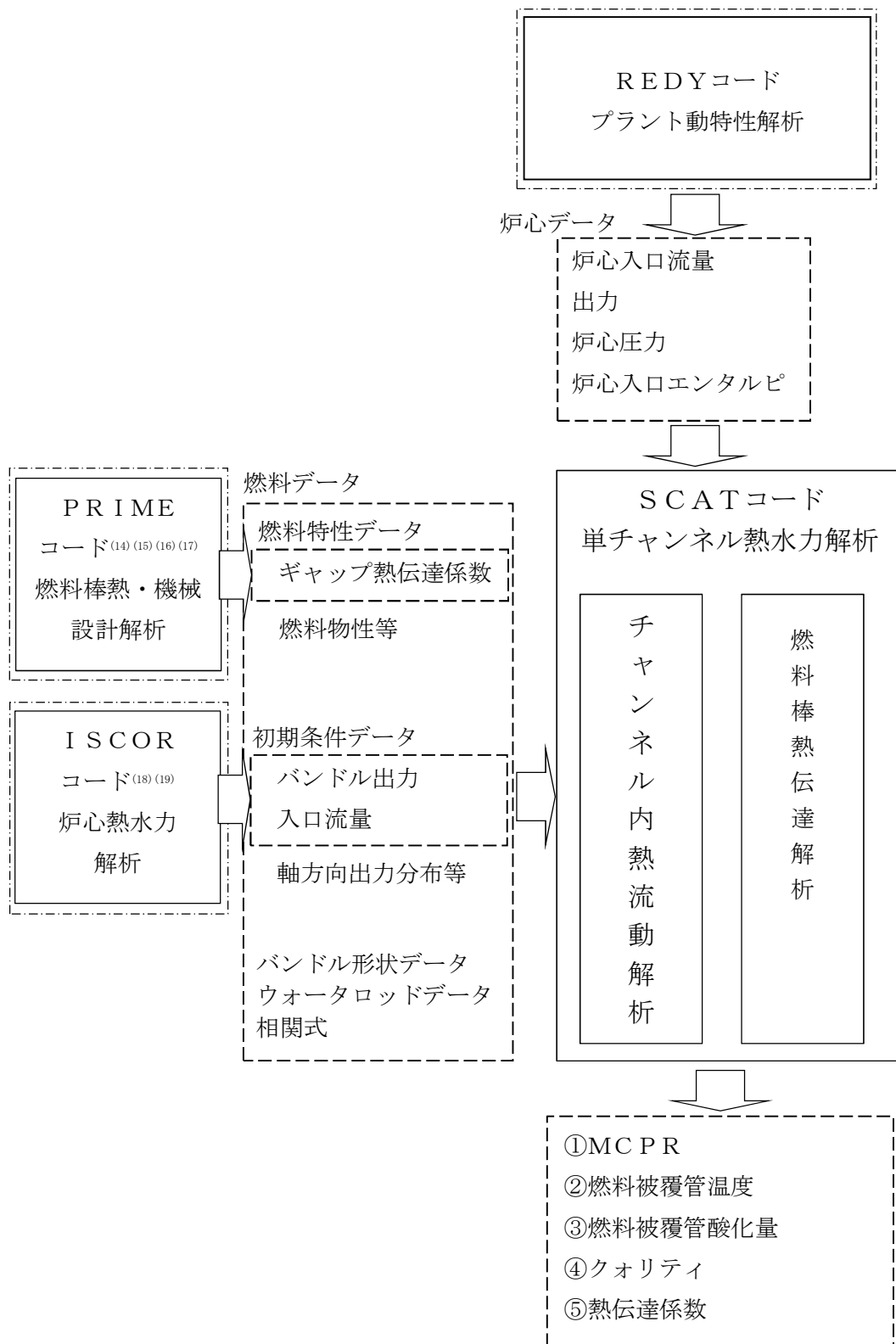


図 3-6 SCATコードの入出力

## 4. 妥当性確認

### 4.1 重要現象に対する妥当性確認方法

SCATコードの評価マトリックスを表4-1に示す。表4-1は2章で重要現象に分類された物理現象を列挙しており、出力分布変化、燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、沸騰遷移及び気液熱非平衡である。

出力分布変化については、中央ピークに基づく軸方向出力分布を代表として設定する。主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、再循環ポンプトリップや主蒸気遮断による給水加熱喪失の状態では軸方向出力分布は下部ピークに変化する。下部ピークでは、沸騰遷移が発生する燃料集合体上部において局所の出力が小さいため燃料被覆管温度上昇が小さくなる。そのため、軸方向出力分布を中央ピークに設定することで、燃料被覆管温度は高めに評価される。よって、出力分布変化における解析モデルの妥当性評価は不要とした。なお、沸騰遷移位置については以下の沸騰遷移の重要現象で取り扱う。

燃料棒内温度変化については、燃料ペレットと燃料被覆管間のギャップ熱伝達係数を高めに設定する。主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象において、主蒸気隔離弁閉止によって原子炉出力が急増する状態では、燃料ペレットから冷却材へ伝達される熱量が大きいほどMCP Rが小さくなって、沸騰遷移位置が深く予測される。そのため、燃料ペレット熱伝導率及びギャップ熱伝達係数によって表面熱流束に対する熱伝達の遅れを小さくすることで燃料被覆管温度は高めに評価される。また給水加熱喪失によって原子炉出力が準静的に増加する状態では、表面熱流束に対する熱伝達の遅れによる燃料被覆管温度への影響は大きくないと考えられる。よって、燃料棒内温度変化における解析モデルの妥当性評価は不要とした。

燃料棒表面熱伝達及び気液熱非平衡については、BWR燃料の沸騰遷移を



模擬したNUPEC BWR燃料集合体熱水力試験<sup>(20)(21)(22)</sup>の燃料被覆管温度測定値との比較により、燃料棒表面熱伝達及び気液熱非平衡の解析モデルの妥当性を確認する。

沸騰遷移については、GEXL相関式がATLAS試験データ<sup>(3)(4)</sup>を基に作成されていることを確認することに加え、上述のNUPEC BWR燃料集合体熱水力試験においてドライアウト持続時間の測定値と比較することにより、沸騰遷移の解析モデルの妥当性を確認する。

表 4-1 重要現象に対する妥当性確認方法

分類	重要現象	解析モデル	A T L A S 試験	N U P E C B W R 燃料 集合体熱水力試験
炉心 (核)	出力分布変化*	出力分布モデル	—	—
炉心 (燃料)	燃料棒内温度変化*	熱伝導モデル 燃料ペレット-被覆管ギャップ熱 伝達モデル	—	—
	燃料棒表面熱伝達	被覆管表面熱伝達モデル リウエットモデル	—	図 4-15 図 4-16
	沸騰遷移	沸騰遷移評価モデル	図 4-3 図 4-5 図 4-6	図 4-12 図 4-13 図 4-14
炉心 (熱流動)	気液熱非平衡	被覆管表面熱伝達モデル リウエットモデル	—	図 4-15 図 4-16

\*4.1 に記載の理由により，妥当性確認が不要である重要現象

## 4.2 ATLAS試験

### (1) ATLAS試験設備の概要<sup>(3)(4)</sup>

米国GE社ATLAS試験設備の仕様を表4-2に、系統構成図を図4-1に示す。

実験は循環ポンプにより流体を循環させ、混合器で温度差のある水（循環ポンプからの水と空冷熱交からの水）を混合し、目的のサブクール水を得る。サブクール水の一部は凝縮器に流されるが、残りは流量制御弁を通り、オリフィス流量計、タービン流量計を経て試験部に入る。試験部で発生した蒸気は凝縮器で凝縮され、循環ポンプに戻る。蒸気ドラムの圧力は、冷水をドラム中にスプレーして蒸気を凝縮させることにより制御される。

試験部容器の模式図を図4-2に示す。試験部は高温高圧流水中において実寸大規模燃料集合体に直接通電し、原子炉内の発熱状態を模擬して沸騰二相流の伝熱流動特性を測定するためのもので、模擬燃料集合体、圧力容器、接続電極等から構成される。

また、試験条件を表4-3に、試験パラメータの範囲を表4-4に示す。試験条件はBWRの通常運転時の値に対応し、出力の上昇、流量の減少は沸騰遷移を生ずる範囲までを含んでいる。

### (2) 妥当性確認結果

#### ①定常状態における予測能力

9×9燃料集合体のGEXL相関式で予測した限界出力と測定された限界出力の比較を図4-3に示す。これらの比較によれば90%以上のデータについて、予測値が測定値の±6%以内に入る。GEXL相関式の予測能力を統計的に評価するため、実験限界出力比（以下「ECPR」という。）なる量を次のように定義する。

$$E C P R = \frac{\text{予測限界出力 (G E X L 相関式による)}}{\text{測定限界出力 (A T L A S 試験による)}}$$

A T L A S 試験で得られた 9 × 9 燃料のヒストグラムを作ると図 4-4 のようになり、G E X L 相関式は B W R 運転範囲を含む広範囲の運転条件で優れた一致を示していると考えられる。

## ② 過渡状態における予測能力

過渡状態の沸騰遷移について、沸騰遷移予測時間の比較を図 4-5 に示す。沸騰遷移発生時間の計算値の多くは、±0.35 秒以内に入っていた。また、この範囲に入らなかったものについては、予測時間は実測より早くなっており、保守的な結果を与えている。

次に 7 × 7 燃料における沸騰遷移予測位置の比較を図 4-6 に示す。各位置に対する沸騰遷移予測時間は実測より早く、また沸騰遷移予測位置は深くなっており、保守的な結果を与えている。

## (3) 入口サブクーリングに対する G E X L 相関式の適用性

主蒸気隔離弁の誤閉止 + 原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析では、給水加熱喪失の状態が継続するため入口サブクーリングが大きくなる。代表的な A B W R 及び B W R 5 における入口サブクーリングは 320 kJ/kg 以下の範囲で変化し、A T L A S 試験の範囲以上となることから、この範囲の入口サブクーリングに対する G E X L 相関式の適用性を確認する必要がある。ただし、この確認は、第 1 ~ 第 3 スペーサの範囲に対してのみ行う。

A T L A S 試験 4 × 4 格子における入口サブクーリングと限界出力測定値との関係を図 4-7 に示す。限界出力測定値はおよそ 320kJ/kg 近くまで、ほぼ直線的に上昇することが示されている。この 4 × 4 格子は 7 × 7 燃料の形状

を模擬したものであり、入口サブクーリングと限界出力との関係のような基本的な熱水力特性を同等に再現できる。同様に、 $9 \times 9$  燃料（A型）における関係を図 4-8 に示す。これらの直線傾向は、環状流又は環状噴霧流（以下、総称して「環状流」という。）で発生する液膜ドライアウトに起因する CHF（Critical heat flux）発生機構において、入口サブクーリング増加、すなわち入口サブクールクォリティの増加に応じて下流側に移動する環状流開始高さとの相関関係に由来すると考えられる。

これは次のように説明できる。まず、同一の燃料集合体内冷却水流量の下では、環状流に流動様式が遷移する環状流開始点の高さが蒸気クォリティの大きさに従って定まる。環状流開始高さは液膜ドライアウトの直前で生じる流動様式の遷移位置に相当し、これに至るまでに必要となる冷却材への総熱伝達量は、燃料集合体出力の大小にかかわらず、入口サブクールクォリティの大きさに比例して増加する。特に、同一の燃料集合体出力の下では、入口サブクールクォリティが増加すると、環状流開始高さはその大きさに比例して下流側に移動する。また、環状流開始点から燃料集合体出口までの加熱量は、同一出力の下では環状流開始点が下流側に移動するにつれて小さくなる。一方、入口サブクーリングが大きくなる給水加熱喪失期間は、炉心流量が低下するため燃料集合体内の冷却水流量が定格の 3～4 割程度となり、このような低流量条件下ではドライアウトは主に液膜の蒸発により生じるため、第 1～第 3 スペーサ位置でドライアウトが生じるためには、環状流開始点の下流側への移動に応じて、各スペーサ位置と環状流開始点との距離（以下「環状流長さ」という。）の減少量を相殺させる量だけ燃料集合体の線出力密度が増加する必要がある。このとき、環状流長さが十分に大きいことから、この相殺量は入口サブクールクォリティの増分に対しておおむね線形で近似できる。以上から、液膜ドライアウトによる沸騰遷移を生じさせるため

の冷却材への熱伝達量，すなわち限界出力値が入口サブクールクォリティ又は入口サブクーリングに応じておおむね直線的に上昇することになる。

一方で， $7 \times 7$ 燃料を模擬した $4 \times 4$ 格子に比べて， $9 \times 9$ 燃料（A型）は細径燃料棒を採用しながら燃料棒本数を増やすことで伝熱面積を増加させ，限界出力を向上させている。さらに， $9 \times 9$ 燃料（A型）の丸セル型スペーサは， $4 \times 4$ 格子の試験で採用された格子型スペーサに比べてドライアウトの抑制効果が高いことが知られている。燃料格子形状等が限界出力値に影響を及ぼし， $9 \times 9$ 燃料（A型）では限界出力性能も改善されているため，第1～第3スペーサ位置で環状流が維持されていることを確認する必要がある。給水加熱喪失期間は液膜から液滴が生じにくい低流量条件にあり，加えて第3スペーサから下流側における蒸気クォリティは0.3を超えるため，十分に環状流に至っていると評価される。したがって， $9 \times 9$ 燃料（A型）においても検討範囲の第1～第3スペーサ位置に対しては， $4 \times 4$ 格子と同等の入口サブクーリングまで安定した直線性が確保されると考えられる。

なお，図4-9に $9 \times 9$ 燃料（A型）における入口サブクーリングとGEXL相関式による限界出力計算値との関係（炉心流量は定格流量の約30%）を示す。限界出力計算値は入口サブクーリングが増加するにつれて直線的に上昇し，ATLAS試験の範囲外の外挿領域まで直線傾向を維持していることが確認できる。

4.3(3)で述べる柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉における主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析（感度解析）では，燃料被覆管最高温度（以下「PCT」という。）が厳しくなる給水加熱喪失後の原子炉出力が高い状態で保持される期間において，GEXL相関式は第4スペーサ位置まで沸騰遷移が及ぶと評価している。入口サブクーリングが大きいと飽和沸騰開始高さが燃料集合体中央付近まで上昇し，沸騰長さ

(飽和沸騰開始位置から沸騰遷移を生じる位置までの軸方向距離) が極端に短くなる。しかし、このような条件下でも、上流側のサブクール領域においてドライアウト以外の現象が生じるような熱水力的に不安定な状態には至らないと考えられる。主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析における条件において、広い範囲の試験データを整理した甲藤のCHF特性領域線図<sup>(23)</sup>ではドライアウト領域に相当している。さらに、提唱されている気泡充満モデルや蒸気ブランケットモデルが対象とする現象はいずれも加熱面近傍にボイド率が集中する状況下でのCHF発生機構であるが、解析上では、4.1節のように中央ピークに基づく軸方向出力分布を設定していることと相まって、中央ピークから下流側で発生するドライアウトに起因するCHF発生機構であるため、上流側で高熱流束条件下において生じるCHF発生機構に至る可能性は十分小さいと考えられる。4.3(3)に後述するとおり、実際に第4スペーサで沸騰遷移が生じる可能性は極めて小さく、GEXL関連式の判定は十分保守側といえる。

ただし、それに続く給水ポンプトリップによる原子炉水位低下により、再循環ポンプがトリップして炉心流量が減少する過程は、入口サブクーリングが回復するため本項の説明対象外となる。この過程におけるGEXL関連式の適用性については、4.3(3)に後述することとする。

以上の検討から、主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析で現れる9×9燃料(A型)のATLAS試験の範囲以上の入口サブクーリングに対しても、第1～第3スペーサの範囲ではGEXL関連式は適用可能であることを確認した。一方、第4スペーサに対しては、GEXL関連式の適用が保守的であることを確認した。ただし、柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉の感度解析で見られるような給水ポンプ及び再循環ポンプトリップ後に炉心流量と原子炉出力が急減する過程に現れる出力-流量

のミスマッチ期間においては、GEXL相関式による評価が必ずしも保守側ではない可能性がある。しかしながら、SCATコードによるPCT評価を過度に非保守側に導くものではないことから、この期間にGEXL相関式を適用しても安全評価上の問題にはならないと考えられる。

#### (4) GEXL相関式における重要現象（沸騰遷移）の不確かさ

ATLAS試験の測定限界出力とGEXL相関式の予測限界出力とから求められる標準偏差は3.6%以下であり、これが沸騰遷移におけるGEXL相関式の不確かさに相当する。しかし、3.3.1(2)④に記載したとおり、MCPRがSLMCPRを下回った時点で沸騰遷移が発生したと判断するように保守的に設定しているため、不確かさの影響はこの設定に含まれる。



表 4-2 A T L A S 試験ループの仕様<sup>(3)(4)</sup>

項目	仕様
試験部最大熱入力	17.2 MW
ループ最大圧力	158 kg/cm <sup>2</sup> a (15.5 MPa[abs])
ループ最高温度	346 °C
試験部最大流量	3,790 l/min (6.31×10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> /s)
試験部容器	BWR 実寸大模擬燃料集合体収納可

表 4-3 A T L A S 試験条件<sup>(5)(6)</sup>

項目	出力上昇事象	流量減少事象
圧力	1,000 psia (6.9 MPa[abs])	
流量	1.0×10 <sup>6</sup> lb/h-ft <sup>2</sup> (1,356 kg/m <sup>2</sup> -s)	
入口温度	510~525 °F (266~274 °C)	500~530 °F (260~277 °C)
出力	1.34~5.40 MW	1.00~6.65 MW

表 4-4 試験パラメータ範囲<sup>(3)(4)</sup>

項目	範囲
圧力	800~1,400 psia (5.5~9.7 MPa[abs])
質量速度	0.10~1.35 Mlb/h-ft <sup>2</sup> (140~1,830 kg/m <sup>2</sup> -s)
入口サブクーリング	0~100 Btu/lb (0~223 kJ/kg)

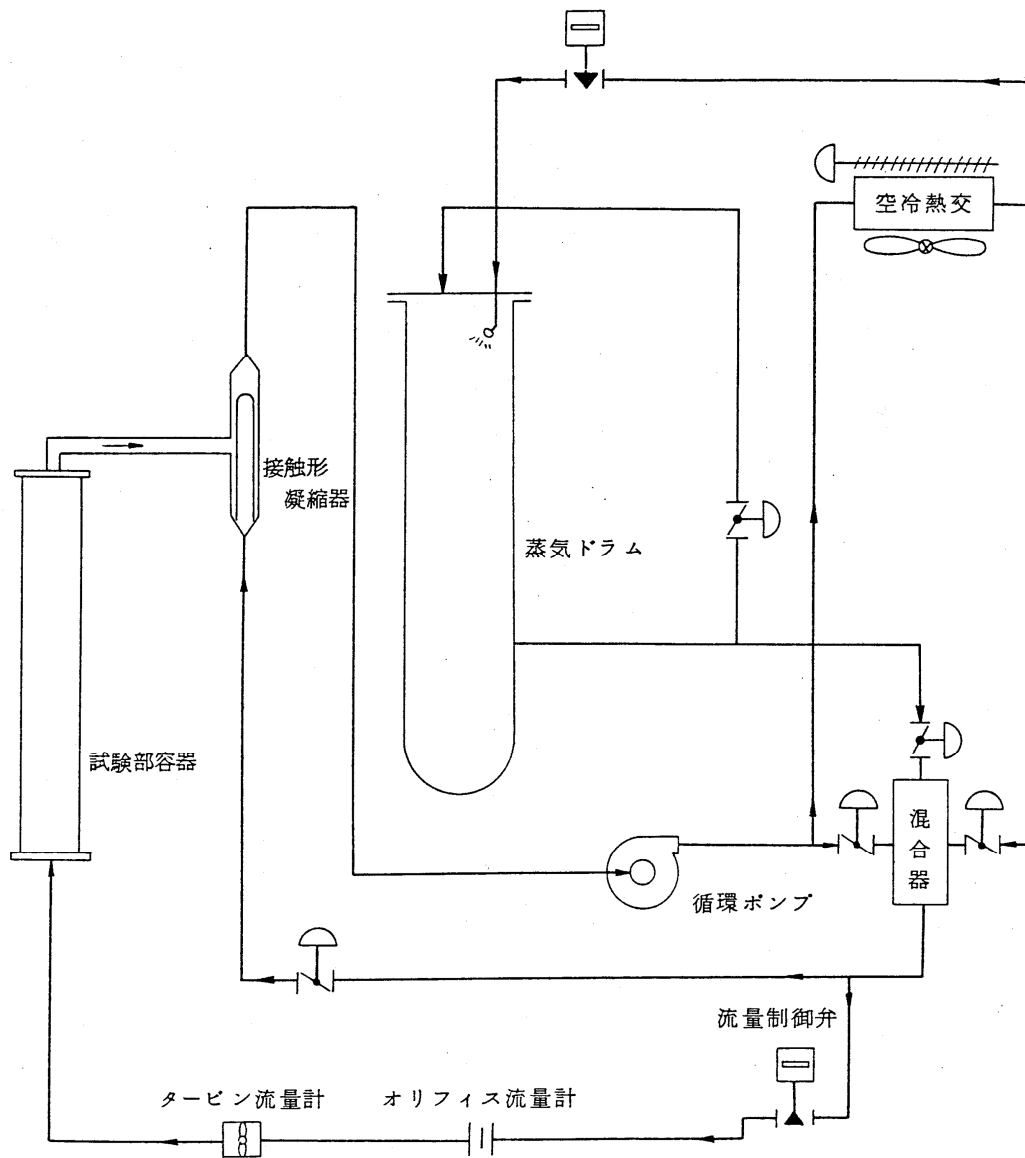


図 4-1 ATLASループ系統構成図<sup>(3)(4)</sup>

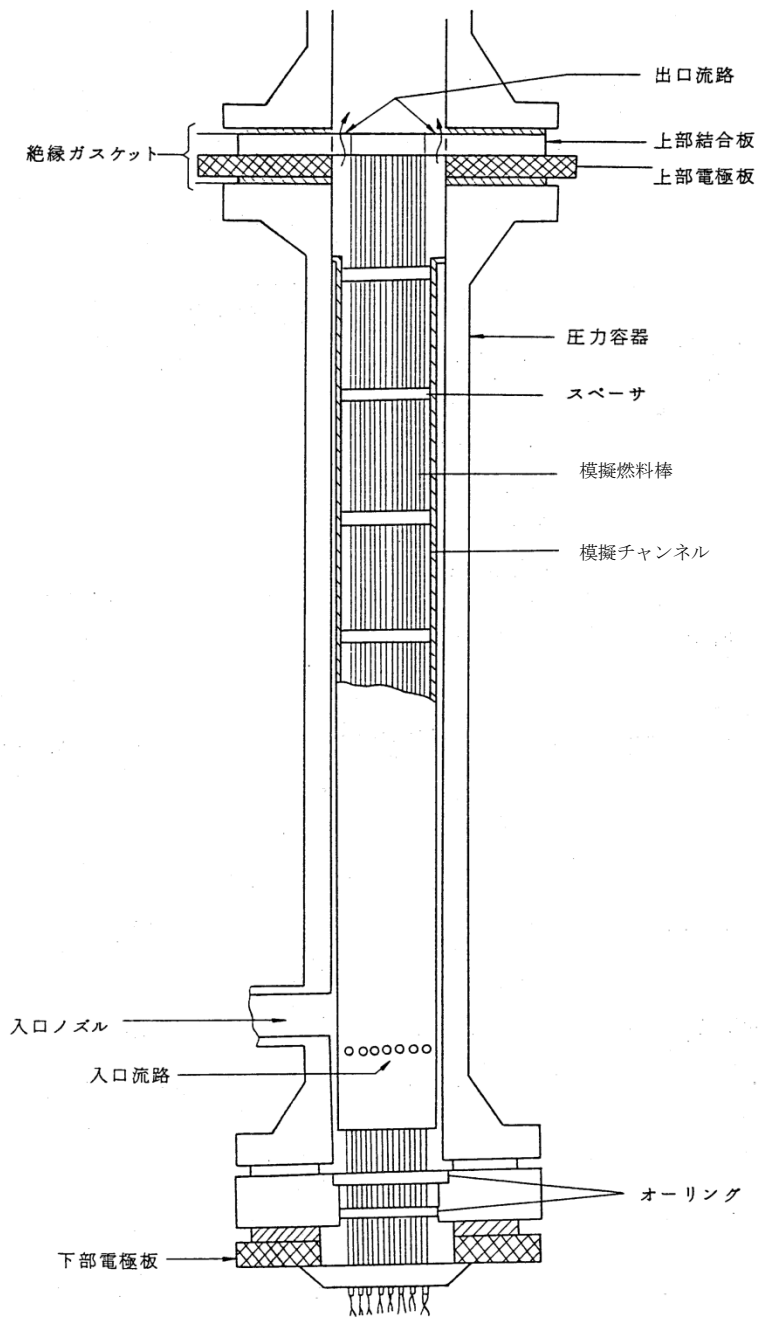


図 4-2 試験部<sup>(3)(4)</sup>

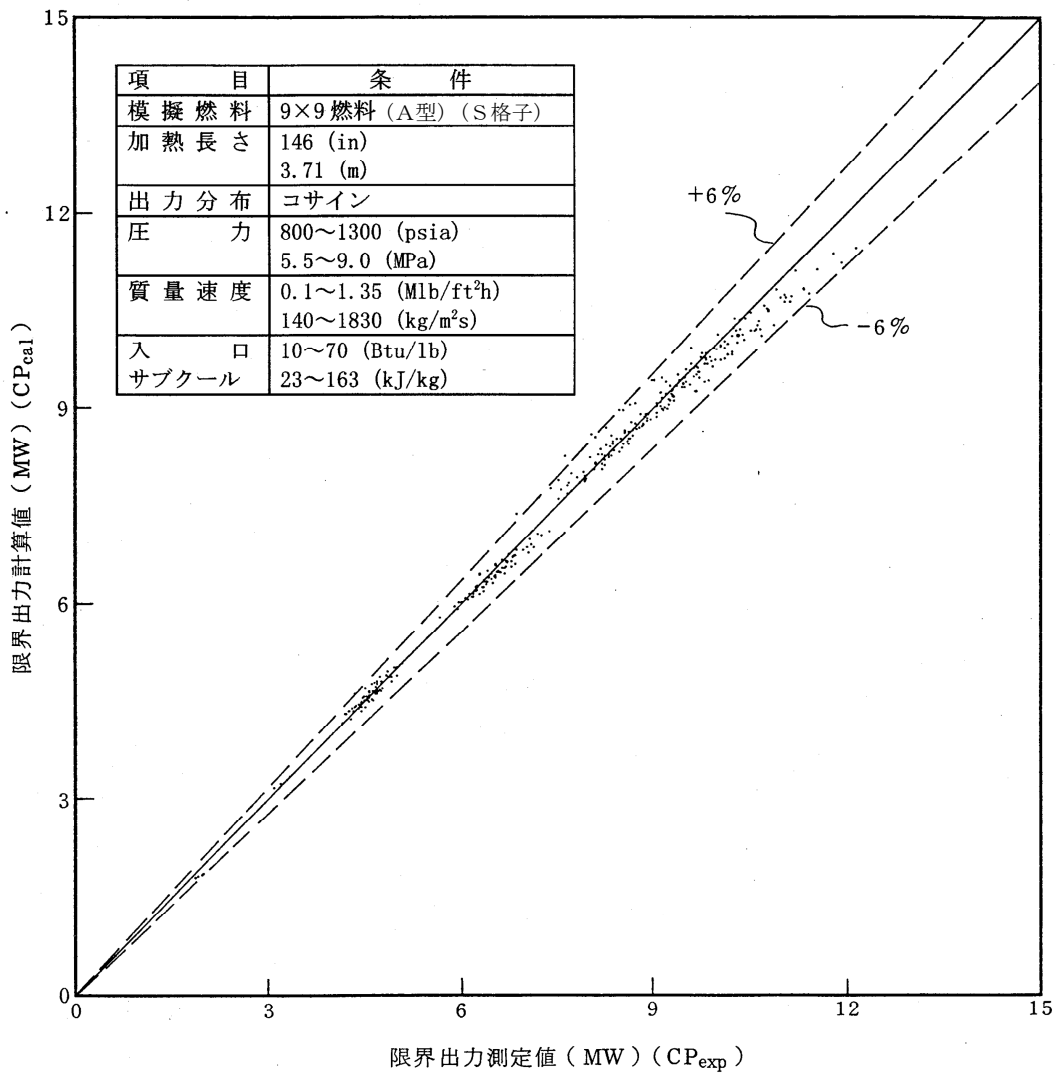


図 4-3 限界出力計算値と測定値の関係<sup>(3)(4)</sup>

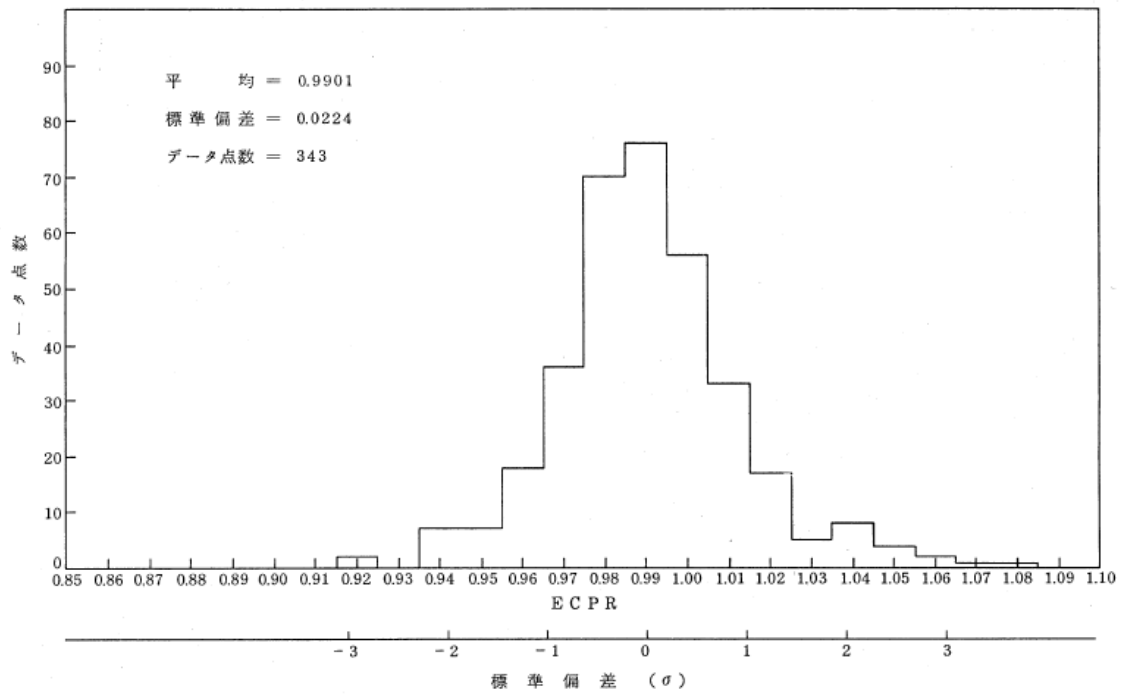


図 4-4 ECPRヒストグラム<sup>(3)(4)</sup>

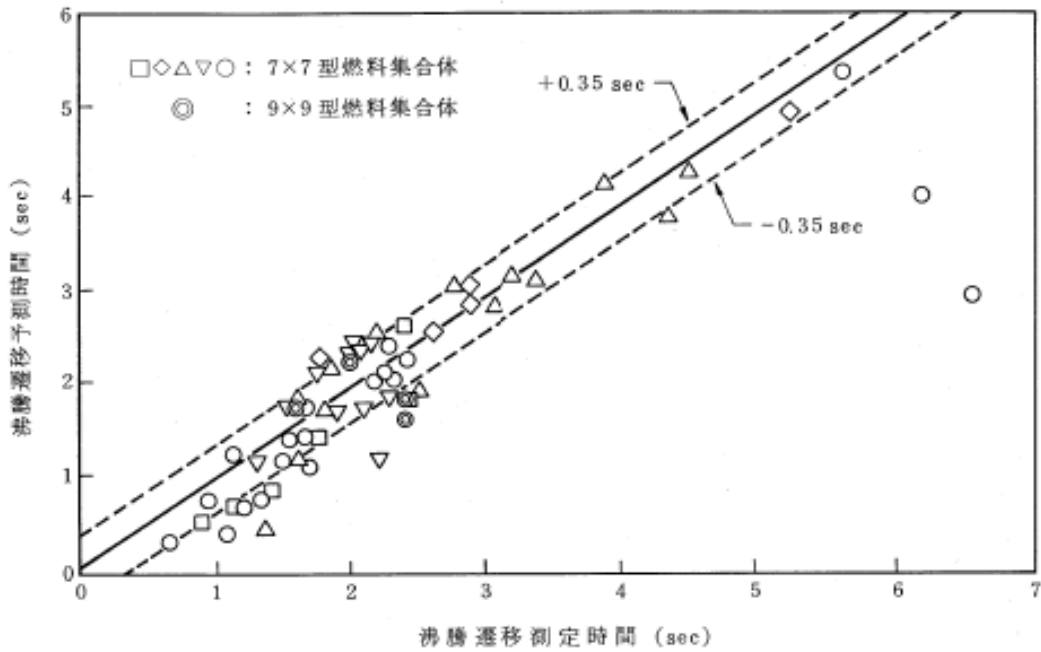


図 4-5 初期沸騰遷移予測時間対測定時間<sup>(3)(4)</sup>

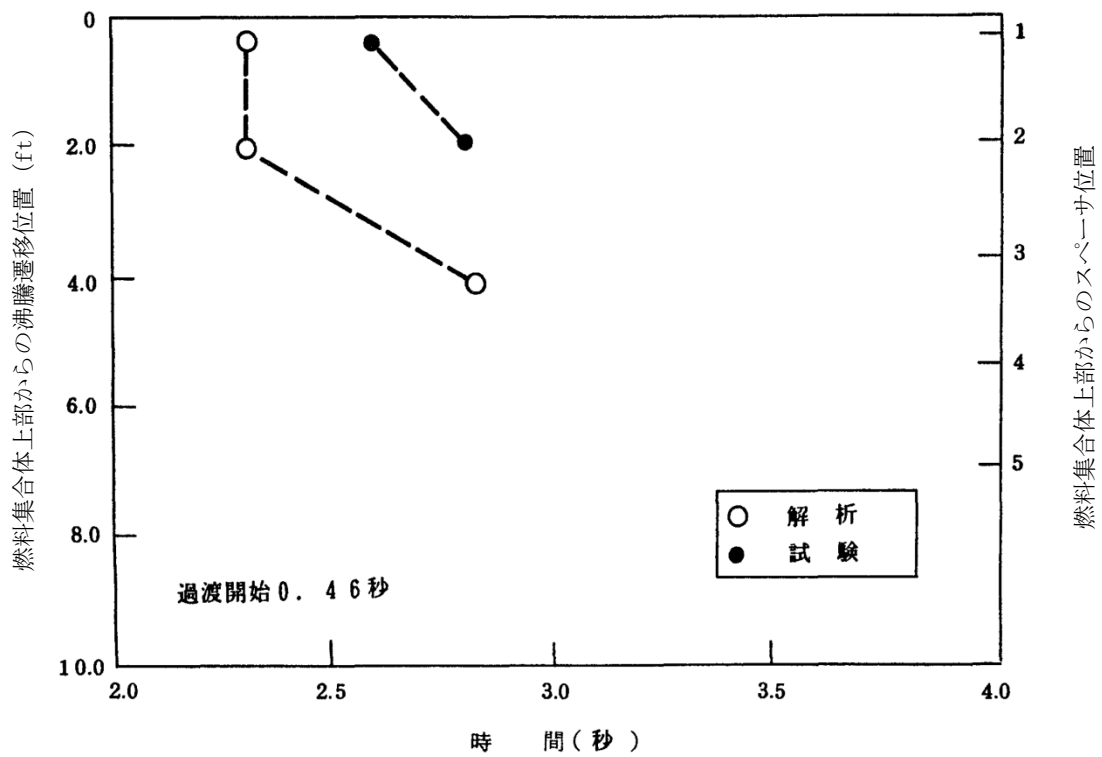


図 4-6 沸騰遷移位置の時間変化 (7 × 7 燃料) <sup>(6)</sup>

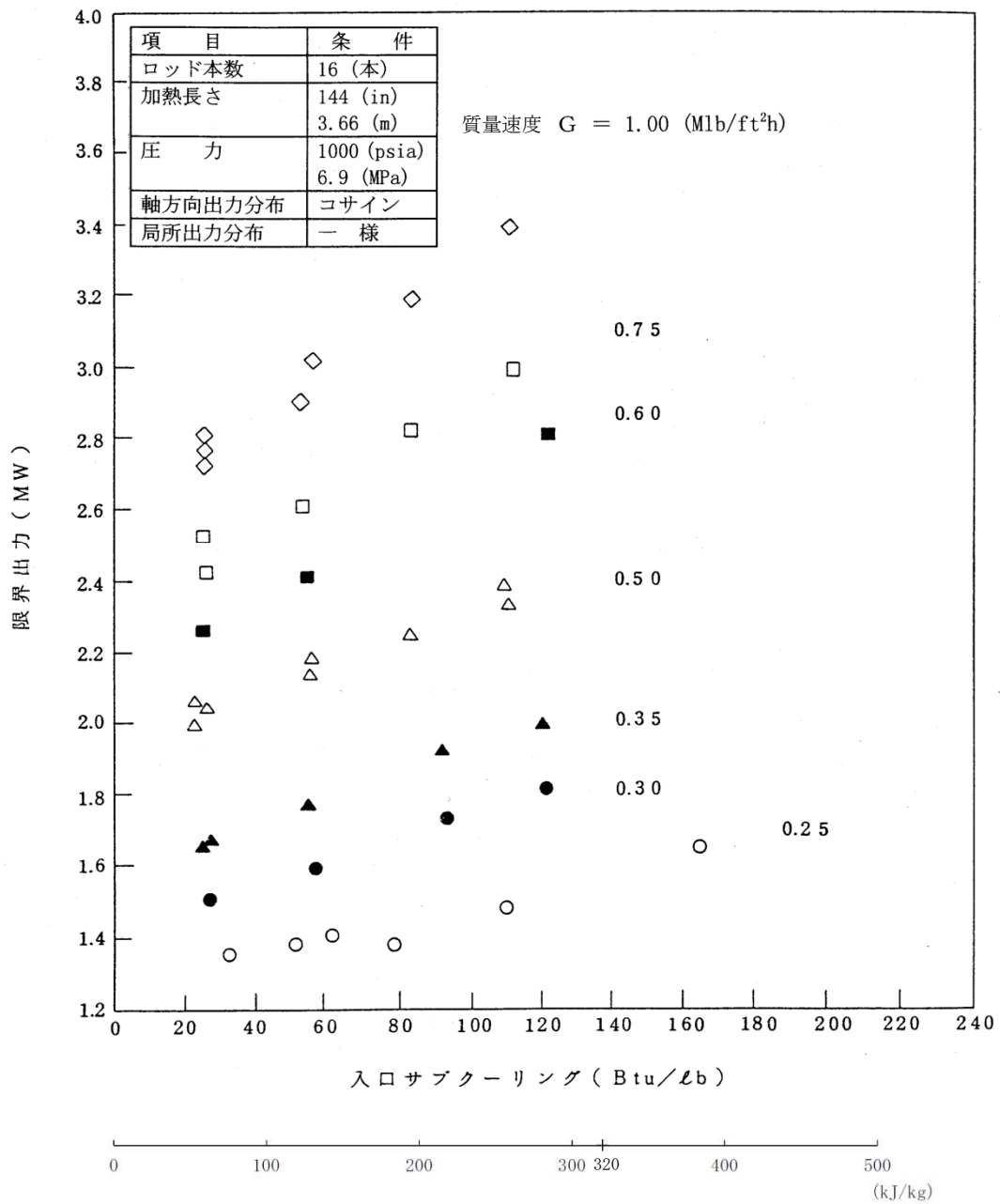


図 4-7 入口サブクーリングと限界出力測定値の関係 (4 × 4 格子) <sup>(3)(4)</sup>

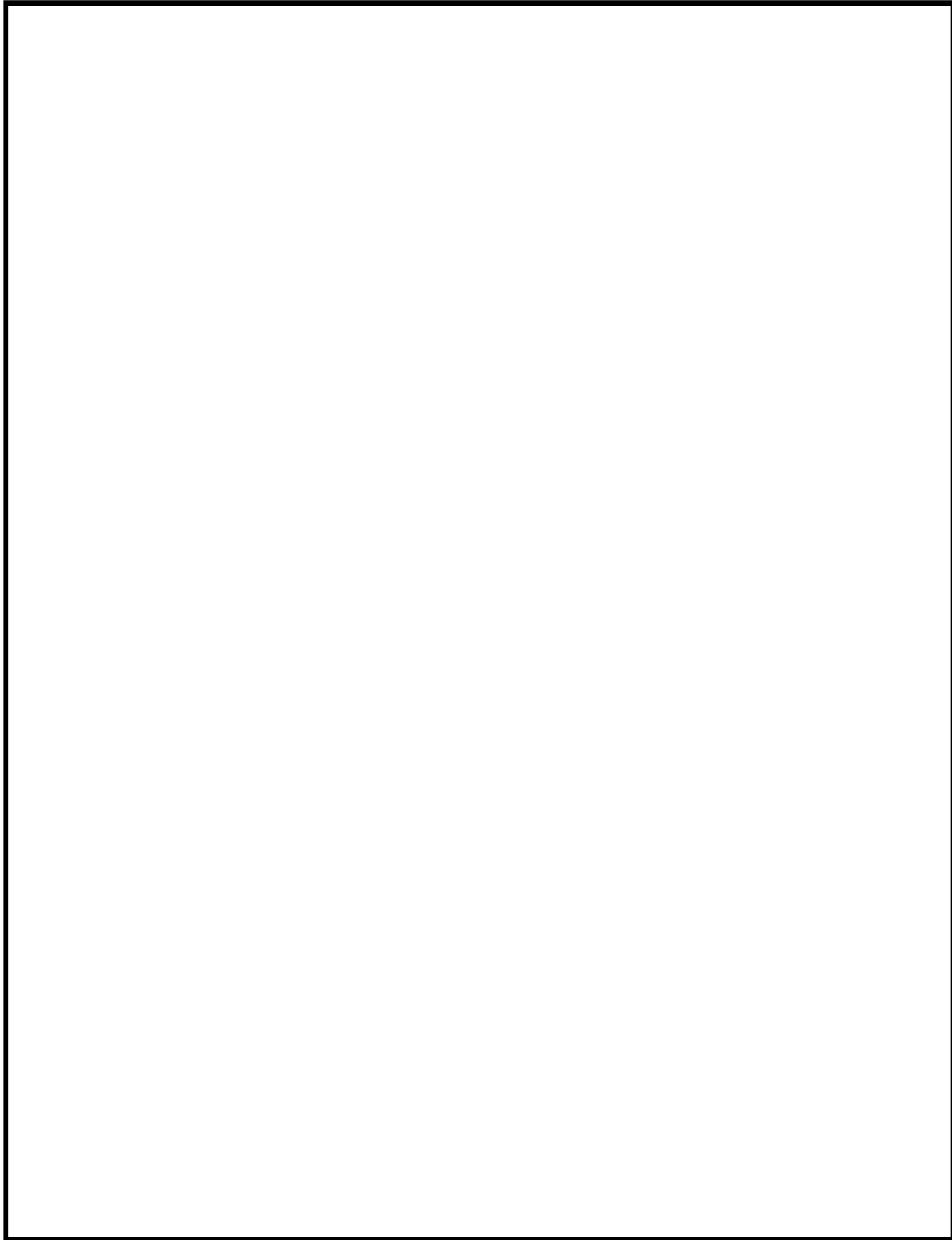


図 4-8 入口サブクーリングと限界出力測定値の関係（9×9燃料（A型））

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。



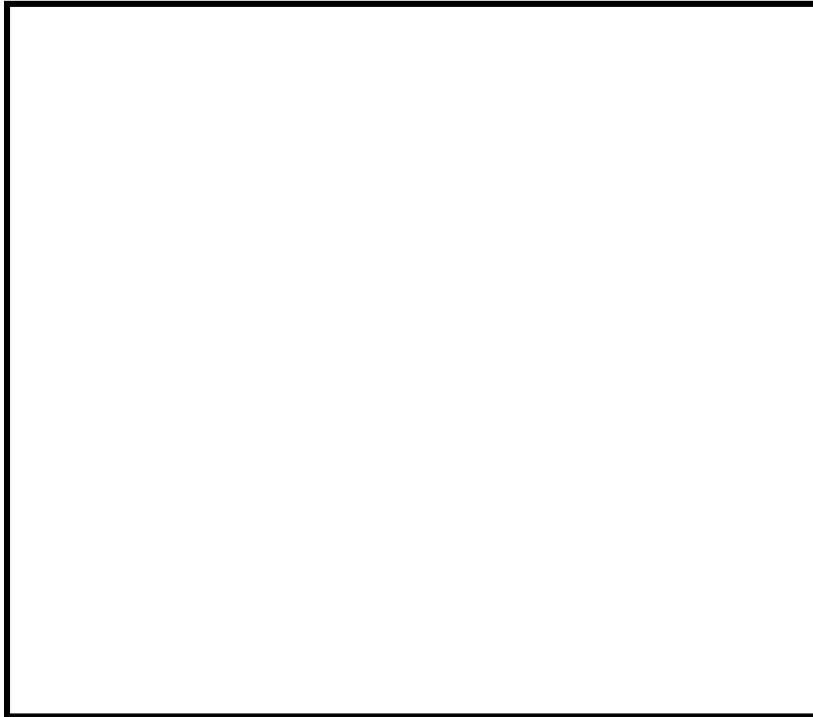


図 4-9 入口サブクーリングと限界出力計算値の関係例

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。

### 4.3 NUPEC BWR燃料集合体熱水力試験

#### (1) NUPEC BWR燃料集合体熱水力試験の概要<sup>(20) (21) (22)</sup>

(財)原子力発電技術機構（NUPEC）において過渡沸騰遷移試験が実施されている。

試験に用いる試験体は実寸大の9×9燃料（A型）模擬燃料集合体であり、表4-5に燃料集合体の仕様を、表4-6に試験条件を、図4-10に試験体を、図4-11に試験体の径方向出力分布を示す。模擬燃料棒表面温度は模擬燃料棒被覆管表面に埋め込んだ熱電対により測定し、その測定位置はスパーサの直上流である。

検証で用いる被覆管温度測定試験では、流量、出力を変化させて沸騰遷移前後の被覆管温度を測定している。

#### (2) 妥当性確認結果

沸騰遷移発生時間について、試験とGEXL相関式による解析結果との比較を図4-12に示す。4.2項のATLAS試験の妥当性確認と同様に、GEXL相関式による沸騰遷移発生時間の計算値は±0.35秒以内に入っていて、良好に予測できる。

沸騰遷移位置について、試験とGEXL相関式による解析結果との比較を図4-13及び図4-14に示す。各位置に対する沸騰遷移予測時間は実測より早く、また沸騰遷移予測位置は深く予測する傾向となっており、保守的な予測結果を与えている。

また、沸騰遷移後の熱伝達相関式に修正Dougall-Rohsenow式、リウエット相関式に相関式2を用いた場合の結果として、図4-15に燃料被覆管温度の最大値の比較を、図4-16にドライアウト持続時間の比較を示す。修正Dougall-Rohsenow式及び相関式2の組み合わせは総じて保守的な解析結果を与えてい

て、燃料棒表面熱伝達を低く予測して燃料被覆管温度を高く評価するといえる。

S C A Tコードは沸騰遷移後の膜沸騰状態で修正 Dougall-Rohsenow 式及び相関式 2 を適用することにより、燃料被覆管温度を高め評価する傾向がある。

そのため、重要現象（燃料棒表面熱伝達）の不確かさの影響は修正 Dougall-Rohsenow 式及び相関式 2 に含まれる。

### (3) 沸騰遷移深さに対する G E X L 相関式の保守性

柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉における主蒸気隔離弁の誤閉止 + 原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析（感度解析）では、P C T が厳しくなる給水加熱喪失後の原子炉出力が高い状態で保持される期間において、沸騰遷移が及ぶ最深位置を集合体上部から数えて第 4 スペーサ位置までと評価している。沸騰遷移深さは、軸方向の熱流束分布と相まって P C T に影響する。ここでは、G E X L 相関式による沸騰遷移深さ評価位置の保守性について検討する。ただし、保守性を検討する対象期間を、上述の P C T が厳しくなる給水加熱喪失後の原子炉出力が高い状態で保持される期間とする。

主蒸気隔離弁の誤閉止 + 原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析では、燃料被覆管温度を高め評価するように、中央ピークに基づく軸方向出力分布を設定している。中央ピークの場合、9 × 9 燃料の沸騰遷移は集合体上部から数えて第 1 ~ 第 3 スペーサの直上流位置で生じることが実験から確認されている。例えば、N U P E C の B W R 燃料集合体熱水力試験<sup>(20) (21) (22)</sup>では、図 4-10 に示すとおり第 1 ~ 第 4 スペーサの直上流位置（A ~ D 断面）に熱電対が設置されているが、第 4 スペーサ位置（D 断面）では沸騰遷移は報告されていない。

GEXL 相関式の適用に当たっては、3.3.1(2)④(b)の沸騰遷移位置判定の計算方法に基づいて、SLMCP R 相当の限界クオリティで沸騰遷移するものとし、更に沸騰遷移位置を厳しい側（上流側）に評価するために保守的に整理した補正クオリティを用いることで、早めにかつより上流側の位置で沸騰遷移を予測する方法をとっている。

主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象では、再循環ポンプの部分台数トリップ及びその後のポンプ流量の制御により炉心流量を低下させるため、ホットチャンネルを流れる冷却水の流量は定格炉心流量の約 30%相当の低流量条件となる。このような流量（及び出力）の減少過渡において生じる沸騰遷移は、環状流において燃料棒表面を流れる液膜流のドライアウトに起因すると考えられ、スぺーサの直上流位置で生じることが一般に知られている。スぺーサは環状噴霧流中の冷却水流れに種々の影響を及ぼすが、蒸気乱流の促進作用等により蒸气流中の液滴を液膜流へ付着させる効果があるといわれており、実際にスぺーサの下流側で液膜流量が増加することが実験から確認されている。燃料棒の発熱の影響で液膜流量は下流へ行くほど減少するものの、スぺーサの直下流側では液膜流量が増加して熱的余裕が増す。このようなスぺーサ効果によるCHFの軸方向変化を模式的に表すと図 4-17 のように描画できる<sup>(26)</sup>。スぺーサ直上流位置においてCHFが極小となるため、スぺーサ間の領域ではこれらの極小位置において沸騰遷移が初生することになり、極小位置から上流側のスぺーサ間の領域では通常、沸騰遷移は初生しない。

一方、沸騰遷移が発生する可能性のあるスぺーサ位置に着目すると、炉心入口サブクール度が非常に大きいことから集合体の中央高さ付近までサブクール沸騰状態にあり、第5～第7スぺーサの範囲では軸方向のボイド率の増加が十分でなく、発達した環状噴霧流に遷移し安定した液膜流が形成される

流動状態には程遠い流動様式にとどまる。この結果、この範囲においては、軸方向出力分布が中央ピークのため加熱量が小さいことと相まって、4.2(3)に示したように沸騰遷移は発生しない。

以上から、発熱のピーク高さ位置に最も近く、前述の熱水力試験で沸騰遷移が報告されなかった第4スペーサ及び第4スペーサと第5スペーサとの間の領域に対してGEXL相関式を適用した評価の保守性に着目して以下に説明を加える。

さて、第4スペーサ直上流位置から第5スペーサの間の領域（以下「中央高さ領域」という。）は中央ピークに基づく軸方向出力分布のため軸方向で加熱量が最も大きな領域である。一方で、前述したようにサブクール度が非常に大きいために、サブクール沸騰から飽和沸騰に移行し始める領域でもある。しかし厳しい側の想定として、敢えてドライアウトが生じ得る流動様式である環状噴霧流に遷移する領域に至っていることを仮定して、以下、沸騰遷移が生じる可能性を検討する。

このため、この中央高さ領域では、単管の場合なら環状噴霧流に遷移し安定した液膜流が形成され始める流動様式に到達し得ると仮定する。一方、燃料集合体は管群流路であるため、このような流動様式遷移は燃料棒の出力が最も高いこと等により、熱的に最も厳しい条件の燃料棒の周り（以下「ホットサブチャンネル」という。）で初生する。この時、ホットサブチャンネルに隣接するサブチャンネルでは、環状噴霧流様式遷移前のチャーン流等の間欠的な流れが生じる領域にあること、ホットサブチャンネルが環状噴霧流に遷移することで界面せん断力が減少してホットサブチャンネルに周囲から流れが流入し周囲の流れの影響を受けやすくなること等から、ホットサブチャンネルの流動様式が環状噴霧流に遷移したとしても、その流れは隣接サブチャンネルの間欠的な流れの影響を受けて不安定化する。さらに、前述したよう

に飽和沸騰長さが過度に短いことと相まって安定した液膜流が形成されにくく、この点からも液膜流が脈動的な流れとなる。このため、仮にドライアウトに至っても燃料被覆管温度の上昇が生じるほどドライアウト状態が継続するとは考えられない。したがって、中央高さ領域では、仮に厳しい側に環状噴霧流に遷移することを仮定したとしても、CHFが極小となる第4スペーサ直上流位置以外の領域はおろか、第4スペーサ直上流位置においてさえも沸騰遷移が生じる可能性は極めて小さい。

したがって、SLMCP R相当条件で生じるとした沸騰遷移及び沸騰遷移位置を厳しい側に評価する補正クォリティを導入することの二つの保守的な評価手法とすることで、第1～第3スペーサだけでなく、更に一段上流側の第4スペーサ直上流位置及び中央高さ領域内の他のノード位置に沸騰遷移が及ぶと判定するGEXL相関式を用いた沸騰遷移条件の評価は十分に保守的であると考えられる。

なお、沸騰遷移の評価に当たっては、一点近似炉心動特性評価時のボイド反応度の取扱い等、炉心出力を過大に評価するようにして得た結果を用いることで、熱的に厳しい側の解析を実施していることから、GEXL相関式による上記の沸騰遷移深さに対する保守性は十分なものと評価できる。

以上で、PCTが厳しくなる給水加熱喪失後の原子炉出力が高い状態で保持される期間において、GEXL相関式による沸騰遷移条件の評価が十分に保守的であることを示した。一方、その後、給水ポンプトリップによる原子炉水位低下により、再循環ポンプ6台がトリップして、炉心流量が減少する。炉心流量減少によるボイド率の増加により、若干の時間遅れを持って原子炉出力が低下する。この過程において、短い時間であるが出力と流量のミスマッチ（比較的高い原子炉出力でありながら非常に低い炉心流量となる期

間)が生じ、ホットチャンネル内の蒸気クオリティが一時的に増加する。このときGEXL相関式は、沸騰遷移が及ぶ最深位置を更に上流側の第5スぺーサ位置までと評価している。以下では、この出力ー流量の mismatch を生じる期間に対して、沸騰遷移が生じる可能性について検討を加える。

出力ー流量の mismatch が大きくなる初期炉心流量 90%の解析ケースを検討の対象とする。再循環ポンプの停止により、炉心流量は定格時の約7%相当まで急減する。これに追随して原子炉出力も低下するが、炉心流量が定格の7%相当に至った時点でホットチャンネルの熱流束は定格時の約50%程度を保持している。このため、飽和沸騰の開始高さは第7スぺーサ付近まで低下し、第5スぺーサ位置の蒸気クオリティは約50%に及ぶ。第5スぺーサから下流側は膜沸騰に至っており、燃料集合体上部では蒸気単相流となる。以下、各スぺーサ位置に着目して沸騰遷移が生じる可能性を検討する。

第7スぺーサ位置はほぼ飽和沸騰開始高さに位置する。本項前半で検討した原子炉出力が高い状態で保持される期間の中央高さ領域と同等のクオリティ条件であることから沸騰遷移が生じる可能性は小さい。ただし、ごく低流量のため流動様式の発達が早く、チャーン流に近い乱れた様相を呈する可能性がある。しかしながら、この位置の加熱量が小さいことと相まって、仮に燃料棒表面に一時的なドライパッチ（液膜消失部）が生じたとしても、乱れた流れの中ですぐに消滅するため、燃料被覆管温度が上昇するには至らない。次に、第6スぺーサ位置はGEXL相関式では沸騰遷移を生じないと判定されるが、急速な沸騰により燃料棒表面に安定した液膜は形成されず、通常の二相流の流動様式の発達過程とは異なる逆環状流的な流動様式へと移行する可能性がある。しかし、第7スぺーサ位置と同様に不安定で乱れた流動状態であることに変わり無く、間欠的なドライパッチを生じたとしても、燃料被覆管温度が有意に増加するほど(※)長時間持続しないと考えられる。

また、激しい核沸騰により燃料棒表面から吹き飛ばされた液膜が比較的大きな液塊となってチャンネル内を浮遊し、小さな液滴に分裂しないまま、乱れによって燃料棒へ衝突する冷却形態も生じ得る。これは、噴霧流冷却よりもはるかに大きな冷却効果を期待できる。さらに、ホットチャンネルの熱流束は急速な減少過程にあり、10秒足らずで半減して定格時の25%以下へと低下するため、出力ー流量のミスマッチは早期に緩和される。以上の理由から、第6スぺーサ位置でドライパッチを生じる懸念はあるものの、燃料被覆管温度が大きく上昇する可能性は小さいと考えられる。第5スぺーサは第4スぺーサとともに、中央ピークの軸方向出力分布において最も発熱量が大きい領域に位置する。第4スぺーサ位置では蒸気クォリティが1.0に近い状態となる。ここで熱的に厳しい条件として、中央ピーク位置において飽和蒸気単相となる場合を想定し、定格時の50%相当の原子炉出力と7%相当の炉心流量が維持されると仮定する。この条件では、厳しめの評価を行うため、液滴冷却の影響を無視した蒸気単相流のDittus-Boelter式を用い、さらにリウエットなしの静定状態として評価すると、ホットサブチャンネルの燃料被覆管温度最大値は約900℃となる。実際には、熱流束は減少過程にあり、出力ー流量のミスマッチがほどなく緩和されるため、このような高温に至る可能性は小さい。したがって、この期間におけるSCATコードの燃料被覆管最高温度評価値（約900℃）は、結果として保守側の評価といえる。第4スぺーサから下流側は、上部へ行くほど発熱量が低下するものの、蒸気温度が上昇して過熱蒸気となるため、熱的に厳しい状態が十数秒間持続することが予想される。しかし、熱流束は急速な減少過程にあることから、燃料被覆管温度の上昇が過度に大きくなることはないと考えられる。

以上、給水ポンプ及び再循環ポンプトリップ後に出現する出力ー流量のミ



スマッチ期間に対して、沸騰遷移を生じる可能性を検討した。この期間に限っては、GEXL 相関式による沸騰遷移深さの評価は必ずしも保守的とはいえないことが推測された。しかし、解析で仮定している再循環ポンプ 6 台が同時に停止する可能性は低く、炉心流量の低下は、より緩やかになると考えられること、また、中央ピークから下部に位置する第 5～第 7 スペーサ位置の出力は小さいことから、GEXL 相関式の評価に非保守性があったとしても、SCAT コードによる燃料被覆管温度評価結果を過度に非保守側へ導くものではないと判断でき、PCT 評価上の問題となるものではないと結論できる。

(※) 熱流束が低下しているため、燃料被覆管温度の顕著な上昇には十秒程度の時間を要すると見込まれる。

#### (4) 重要現象（気液熱非平衡）の不確かさ

図 4-11 に示す試験体の径方向出力分布から、熱的に最も厳しい燃料棒（以下「ホットピン」という。）に着目すると、ホットピンが 3 本直線状に配置、3 本を L 字型に配置されており、ホットピンに隣接して同様なホットピンが 2 本配置された体系とみなせる。この体系において、上記のように修正 Dougall-Rohsenow 式及び相関式 2 の組み合わせは総じて保守的な解析結果を与えている。3.3.1(2)項のように、修正 Dougall-Rohsenow 式では過熱蒸気の温度を蒸気膜温度（燃料被覆管表面温度と飽和温度の平均温度）とした物性値を用いている。これを踏まえると、燃料被覆管温度を高く評価していることは、バルク温度が飽和又は少なくとも飽和温度から有意に上昇しないことを意味することが分かる。これは、沸騰遷移においても、隣接燃料棒との間に飽和温度の蒸気が介在することを示すため、ホットピンの影響が隣接した

燃料棒に波及しないことを示唆していると考えられる。

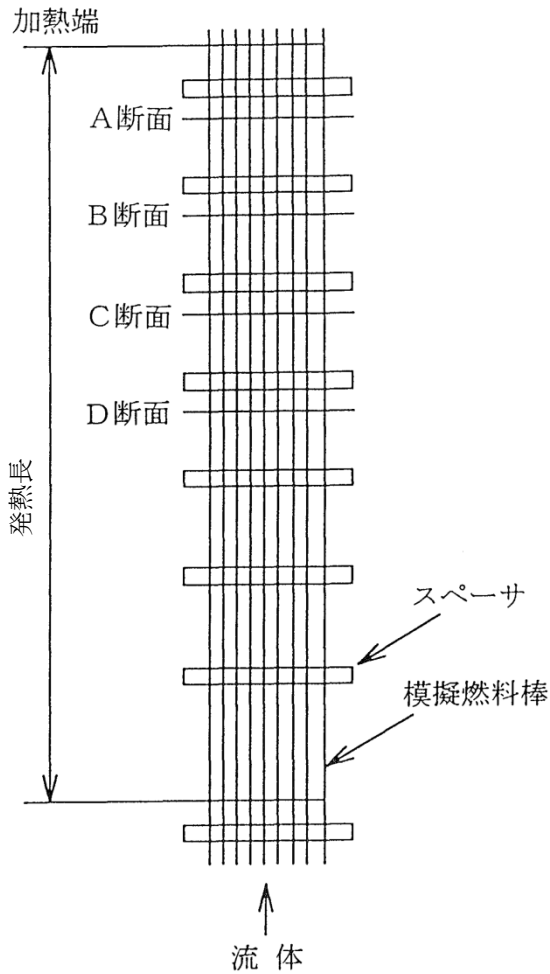
したがって、重要現象（気液熱非平衡）の不確かさの影響は修正 Dougall-Rohsenow 式に含まれると考えられる。

表 4-5 模擬燃料集合体の仕様<sup>(8)</sup>

項目	仕様
燃料タイプ	9 × 9 燃料 (A型)
燃料棒本数 (ヒータロッド)	74
・標準燃料棒	66
・部分長燃料棒	8
加熱長	
・標準燃料棒	約 3,710mm
燃料棒外径	φ 11.2mm
ウォータロッド本数	2
燃料棒ピッチ	14.3mm
チャンネルボックス内幅	132.5mm
スペーサ個数	7 (丸セル型)
軸方向出力分布	コサイン

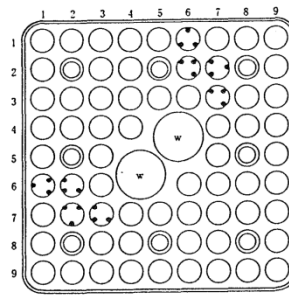
表 4-6 試験条件<sup>(8)</sup>

項目		出力上昇事象	流量減少事象
初期条件	圧力	約 7.2 MPa[abs]	
	流量	約 40 t/h	約 45 t/h
	入口サブクール	約 50 kJ/kg	
	出力	約 6 ~ 8 MW	

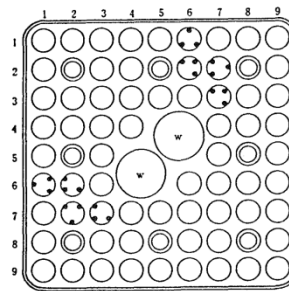


[試験体側面模式図]

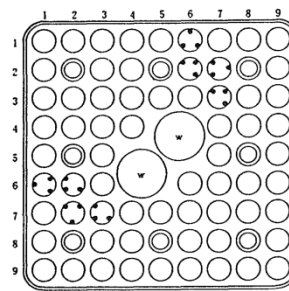
A断面 熱電対本数24本



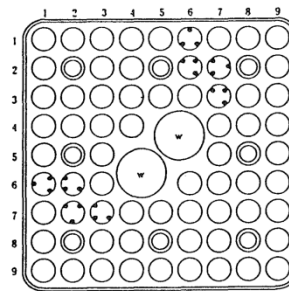
B断面 熱電対本数24本



C断面 熱電対本数24本



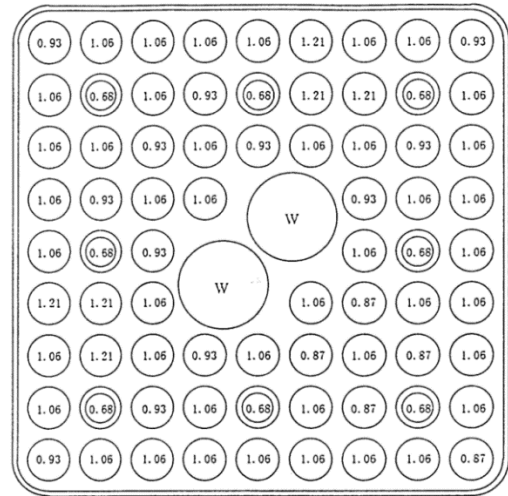
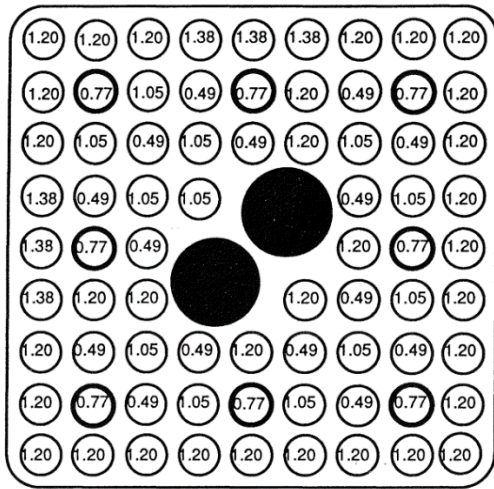
D断面 熱電対本数24本



- : 標準燃料棒
- ◎ : 部分長燃料棒
- : 熱電対位置

[熱電対取付け位置]

図 4-10 試験体の例<sup>(21)</sup>



○ 内数字は径方向出力比率を示す。  
 ● 水ロッド  
 ⊙ 部分長ロッド

○内の数字は、(ロッド全出力での) 相対出力を示す。  
 ⊙は部分長を示す。  
 Wは模擬ウオータロッドを示す。

試験体 (燃焼初期)

試験体 (燃焼の進んだ分布)

図 4-11 試験体の径方向出力分布<sup>(21)</sup>

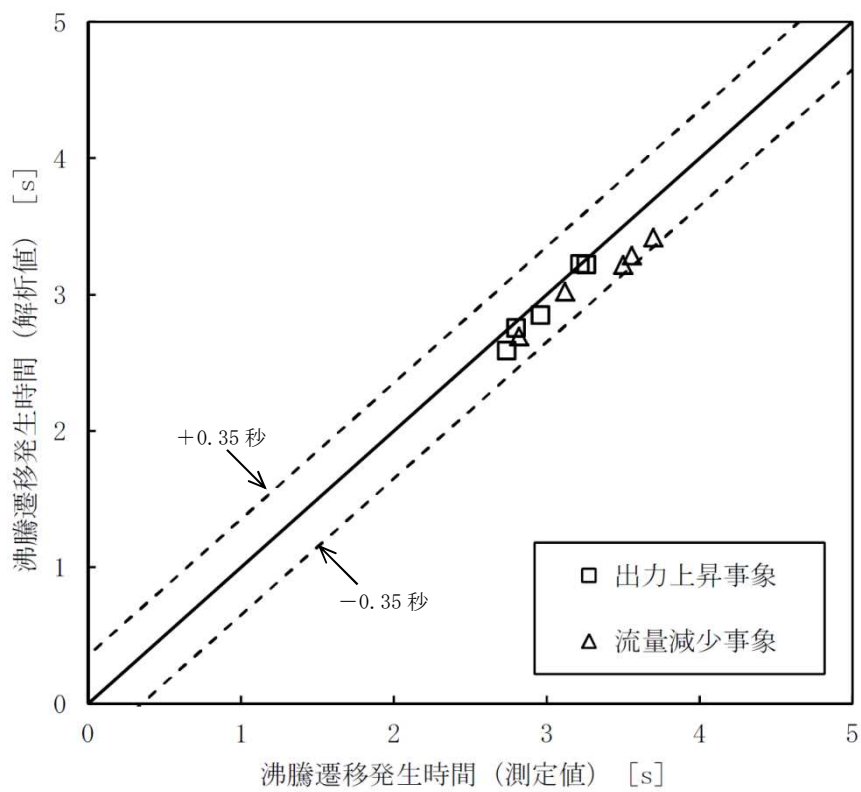


図 4-12 沸騰遷移発生時間の比較

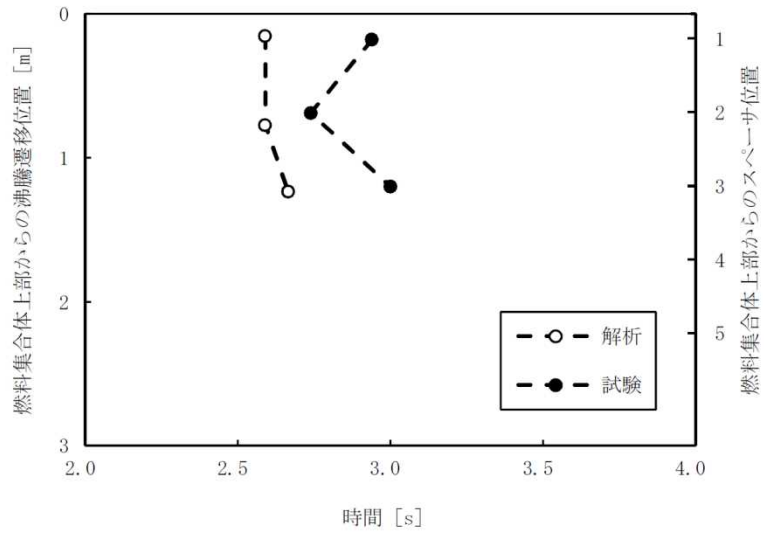


図 4-13 沸騰遷移位置の時間変化（出力上昇事象）

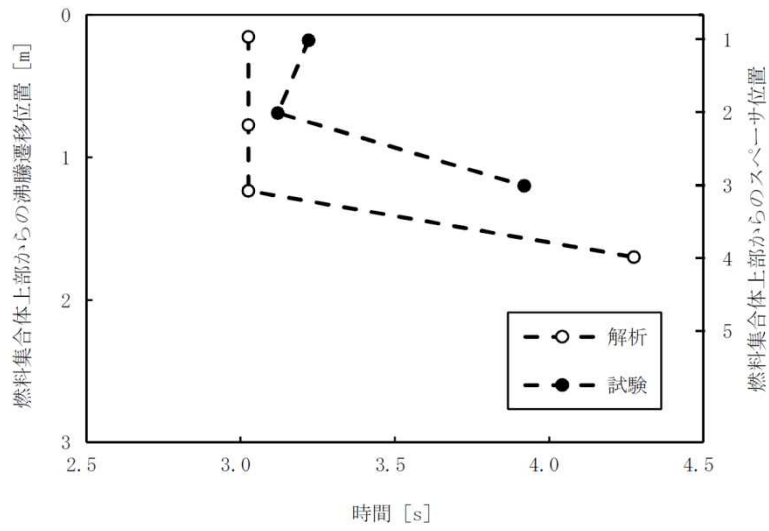


図 4-14 沸騰遷移位置の時間変化（流量減少事象）

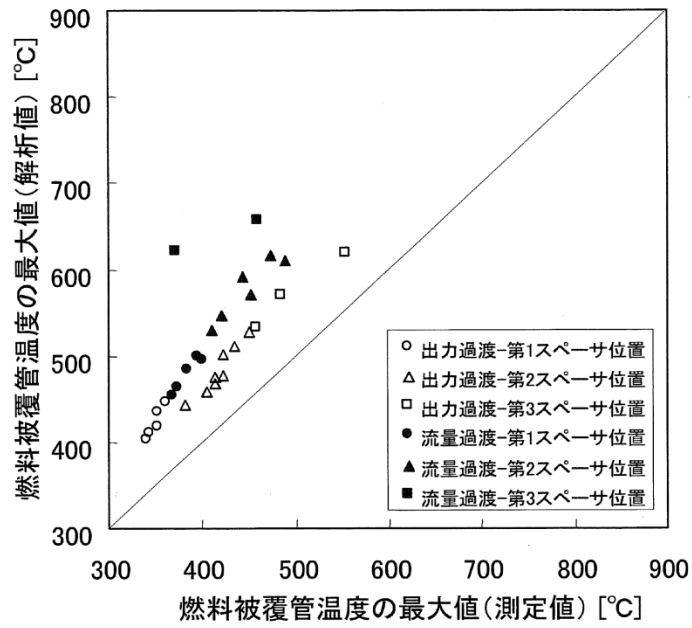


図 4-15 燃料被覆管温度の最大値の比較<sup>(8)</sup>

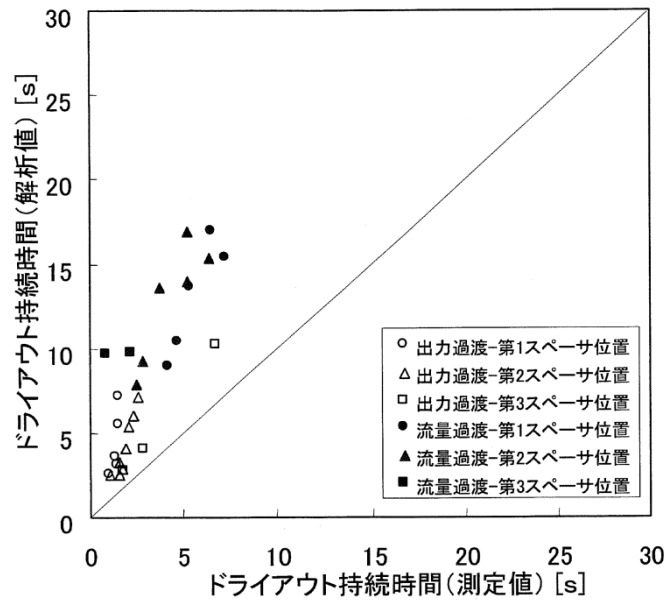


図 4-16 ドライアウト持続時間の比較<sup>(8)</sup>



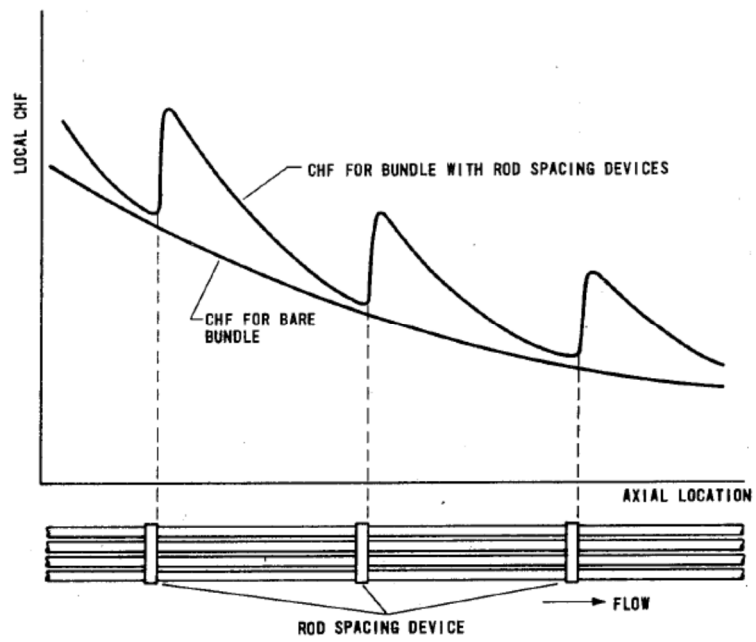


図 4-17 軸方向CHFへのスペーサの影響<sup>(26)</sup>

#### 4.4 実機解析への適用性

##### 4.4.1 重要現象への適用性

原子炉停止機能喪失の重要現象に対して実施したSCATコードの妥当性確認が、実機解析に適用可能であることを本節で述べる。

燃料棒表面熱伝達については、沸騰遷移後の膜沸騰状態で修正 Dougall-Rohsenow 式及び相関式 2 を適用することにより、燃料被覆管温度を高く評価していることを 4.3 節に示す実寸大の模擬燃料を用いたNUPEC BWR燃料集合体熱水力試験の解析で確認した。

沸騰遷移については、4.2 節に示す実寸大の模擬燃料を用いたATLAS試験の解析と、4.3 節に示すNUPEC BWR燃料集合体熱水力試験の解析により、沸騰遷移の状態を精度良く予測することを確認した。

したがって、SCATコードは重要現象の燃料棒表面熱伝達及び沸騰遷移評価に適用できる。

##### 4.4.2 有効性評価解析のノーディングの妥当性

実機解析に用いるノーディングは、3.3 節で述べた考え方にに基づき設定したものである。

燃料棒グループ、燃料棒の軸方向のノード分割は、実寸大の模擬燃料を用いたATLAS試験とNUPEC BWR燃料集合体熱水力試験の解析により、重要現象を適切に評価でき、評価指標である燃料被覆管温度は高めに評価されることを確認した。なお、軸方向 24 ノードの分割は、従来からBWRプラントに幅広く用いられている三次元沸騰水型原子炉模擬計算コード<sup>(24) (25)</sup>の分割と同じである。

また、主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析における燃料ペレット部の径方向ノード分割数は、約 10 ノード以上の分割

とすれば燃料被覆管温度はほぼ一定であると考えられる。一例として、主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析において、2，3ノード変化させても燃料被覆管最高温度の変化は1℃以内であることから、12ノードの径方向ノード分割数は妥当である。

したがって、ノード分割による不確かさは、本章の妥当性確認により得られた不確かさに包含されているものと考えられる。

#### 4.4.3 まとめ

以上より、本章に記載している妥当性確認結果は、BWRプラントの妥当性確認として適用性を有するとともに、実機BWRの有効性評価解析に適用できるといえる。

## 5. 有効性評価への適用性

4章の妥当性確認をふまえ、重要現象についての不確かさ及びその不確かさが評価指標の視点と運転員操作の視点から有効性評価解析へ与える影響について表5-1にまとめた。以下にその不確かさについて記述する。

### 5.1 不確かさの取り扱いについて（評価指標の観点）

S C A Tコードで取り扱う評価指標は燃料被覆管温度である。燃料被覆管温度への重要現象の不確かさの影響について以下に記載する。

#### (1) 出力分布変化

中央ピークに基づく軸方向出力分布を設定することで、主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象で起こる下部ピークの軸方向出力分布よりも燃料被覆管温度上昇が大きくなる。また、G E X L 相関式で計算することにより保守的に沸騰遷移予測時間を早く、沸騰遷移予測位置を深く予測できる傾向であることを4.2節及び4.3節で確認している。そのため、中央ピークに基づく軸方向出力分布及び深く予測する沸騰遷移位置によって、有効性評価解析では燃料被覆管温度は高めに評価される。

#### (2) 燃料棒内温度変化

燃料ペレットと燃料被覆管間のギャップ熱伝達係数を高めに設定することで、原子炉出力が上昇する時の表面熱流束に対する熱伝達の遅れが小さくなり上昇量が大きくなる。そのため有効性評価解析において主蒸気隔離弁閉止によって原子炉出力が急増する状態では、燃料被覆管温度は高めに評価される。また給水加熱喪失によって原子炉出力が準静的に増加する状態では、表面熱流束に対する熱伝達の遅れによる燃料被覆管温度への影響は大きくないと考えられる。

### (3) 燃料棒表面熱伝達

沸騰遷移後の膜沸騰状態では修正 Dougall-Rohsenow 式及び相関式 2 を適用することにより、保守的に燃料被覆管温度を高めに評価することを 4.3 節で確認しているため、有効性評価解析では燃料被覆管温度は高めに評価される。

なお、有効性評価解析による燃料被覆管温度の解析結果が高温となる範囲での修正 Dougall-Rohsenow 式及び相関式 2 の適用性について、添付 3、添付 4 及び添付 5 で述べる。

### (4) 沸騰遷移

沸騰遷移に至る状況を 4.2 節の結果から作成した G E X L 相関式で計算することにより沸騰遷移の状態を予測できることを 4.3 節で確認している。4.2 節で不確かさを 3.6%としているが、M C P R が S L M C P R を下回った時点で沸騰遷移が発生するように保守的に設定しているため、不確かさの影響はこの設定に含まれる。

なお一例として、主蒸気隔離弁の誤閉止 + 原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析において、沸騰遷移が発生する M C P R の設定を S L M C P R とした解析の燃料被覆管最高温度は、1.0 とした解析よりも 50°C 程度高めに評価される。

### (5) 気液熱非平衡

上記(4)項のように、沸騰遷移後の膜沸騰状態において有効性評価解析では燃料被覆管温度は高めに評価される。また、発生した過熱蒸気の影響が隣接する燃料棒に波及しないことを 4.3 節で確認しており、不確かさの影響は修正 Dougall-Rohsenow 式に含まれる。

なお、図 3-6 のように S C A T コードの入力設定に前処理コードを用いているが、燃料被覆管温度が高めに評価されるように設定しているため、前処理コードの不確かさが与える影響は小さいと考えられる。

以上から有効性評価解析では燃料被覆管温度は高めに評価される。

## 5.2 不確かさの取り扱いについて（運転員操作の観点）

SCATコードで取り扱う運転操作はない。また、有効性評価解析で考慮する運転操作は解析結果となる燃料被覆管温度の影響を受けない。したがって、SCATコードの不確かさが運転操作に影響を与えることはない。

表 5-1 重要現象の不確かさ

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 (核)	出力分布 変化	出力分布モデル	入力値に含まれる	燃料被覆管温度を高め評価する。
炉心 (燃料)	燃料棒内 温度変化	熱伝導モデル，燃料ペレット-被覆管ギャップ熱伝達モデル	入力値に含まれる	主蒸気隔離弁閉止によって原子炉出力が急増する状態で燃料被覆管温度を高め評価する。給水加熱喪失によって原子炉出力が増加する状態で燃料被覆管温度への影響は大きくない。
	燃料棒表面 熱伝達	被覆管表面熱伝達モデル，リウエットモデル	相関式に含まれる	保守的に評価する相関式を適用するため，燃料被覆管温度を高め評価する。
	沸騰遷移	沸騰遷移評価モデル	3.6%	沸騰遷移をSLMCP Rで発生するように保守的に設定しているため，不確かさの影響は含まれる。
炉心 (熱流動)	気液熱非平衡	被覆管表面熱伝達モデル，リウエットモデル	相関式に含まれる	保守的に評価する相関式を適用するため，燃料被覆管温度を高め評価する。

## 6. 参考文献

- (1) 「BWR核熱水力安定性評価の現状と課題」, (社)日本原子力学会, 2001年12月
- (2) L. Baker and L. C. Just, "Studies of Metal-Water Reactions at High Temperatures III. Experimental and Theoretical Studies of the Zirconium-Water Reaction", ANL-6548, 1962.
- (3) 「沸騰水型原子力発電所 原子炉の熱特性評価法 (GETAB) について」, 株式会社日立製作所, HLR-007 訂4, 平成9年12月
- (4) 「沸騰水型原子力発電所 GETABの概要」, 株式会社東芝, TLR-009 改訂4, 平成10年1月
- (5) 「沸騰水型原子力発電所 プラント動特性解析手法について」, 株式会社日立製作所, HLR-014 訂2, 昭和63年3月
- (6) 「沸騰水型原子力発電所 プラント動特性解析手法について」, 株式会社東芝, TLR-012 改訂1, 昭和63年3月
- (7) N. Zuber and J. A. Findlay, "Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems", J. Heat Transfer, November 1965.
- (8) 「BWRにおける過渡的な沸騰遷移後の燃料健全性評価基準:2003」, (社)日本原子力学会, AESJ-SC-P002:2003, 2003年6月
- (9) Dittus, F. W. and Boelter, L. M. K., "Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type", University of California Publ. Eng. Vol.2, October 1930.
- (10) Jens, W. H. and Lottes, P. A., "Analysis of Heat Transfer, Burnout, Pressure Drop and Density Data for High-Pressure Water", ANL-4627, May 1951.



- (11) 井口 他, 「BWR 定常ポスト CHF 試験結果—限界熱流束及びポスト CHF 熱伝達率—」, JAERI-Research 2001-060, 2002 年 2 月
- (12) Sakae MUTO et al., "An Experimental Study on Rewetting Phenomena in Transient Conditions of BWRs", Nuclear Engineering and Design 120, 311-321 (1990).
- (13) 工藤, 原, 「BWR 燃料集合体の現象論的リウエット相関式の開発」, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 2-No. 2, 121-129, 2003 年 6 月
- (14) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について」, 株式会社日立製作所, H L R - 033 訂 1, 平成 10 年 2 月
- (15) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について」, 株式会社東芝, T L R - 045 改訂 1, 平成 10 年 1 月
- (16) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について (MOX 燃料への適用)」, 株式会社日立製作所, H L R - 053 訂 2, 平成 11 年 2 月
- (17) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について (MOX 燃料への適用)」, 株式会社東芝, T L R - 045A 改訂 2, 平成 11 年 2 月
- (18) 「沸騰水形原子力発電所 原子炉の熱設計手法について」, 株式会社日立製作所, H L R - 008, 昭和 52 年 4 月
- (19) 「沸騰水形原子力発電所 熱水力設計計算手法について」, 東京芝浦電気株式会社, T L R - 008, 昭和 51 年 9 月
- (20) 「平成 8 年度 燃料集合体信頼性実証試験に関する報告書 (BWR 新型燃料集合体熱水力試験編)」, (財)原子力発電技術機構, 平成 9 年 3 月
- (21) 「平成 9 年度 燃料集合体信頼性実証試験に関する報告書 (BWR 新型燃料集合体熱水力試験編)」, (財)原子力発電技術機構, 平成 10 年 3 月
- (22) 「平成 10 年度 燃料集合体信頼性実証試験に関する報告書 (BWR 新型燃料集合体熱水力試験編)」, (財)原子力発電技術機構, 平成 11 年 3 月

- (23) 甲藤, 「一様加熱垂直円管内の強制流動沸騰の限界熱流束 (高圧領域の研究と CHF 特性領域線図)」, 日本機械学会論文集 (B 編), 47 巻 413 号 (昭 56-1), 139
- (24) 「沸騰水型原子力発電所 3次元核熱水力計算手法について」, 日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社, H L R - 006 訂 3, 平成 22 年 10 月
- (25) 「沸騰水型原子力発電所 三次元核熱水力計算コードの概要」, 株式会社東芝, T L R - 007 改訂 1, 平成 20 年 9 月
- (26) D. C. Groeneveld and W. W. Yousef, “Spacing Devices for Nuclear Fuel Bundles: A Survey of Their Effect on CHF, Post-CHF Heat Transfer and Pressure Drop”, Proceedings of ANS/ASME/NRC Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, 1980.

添付1 入力項目リスト

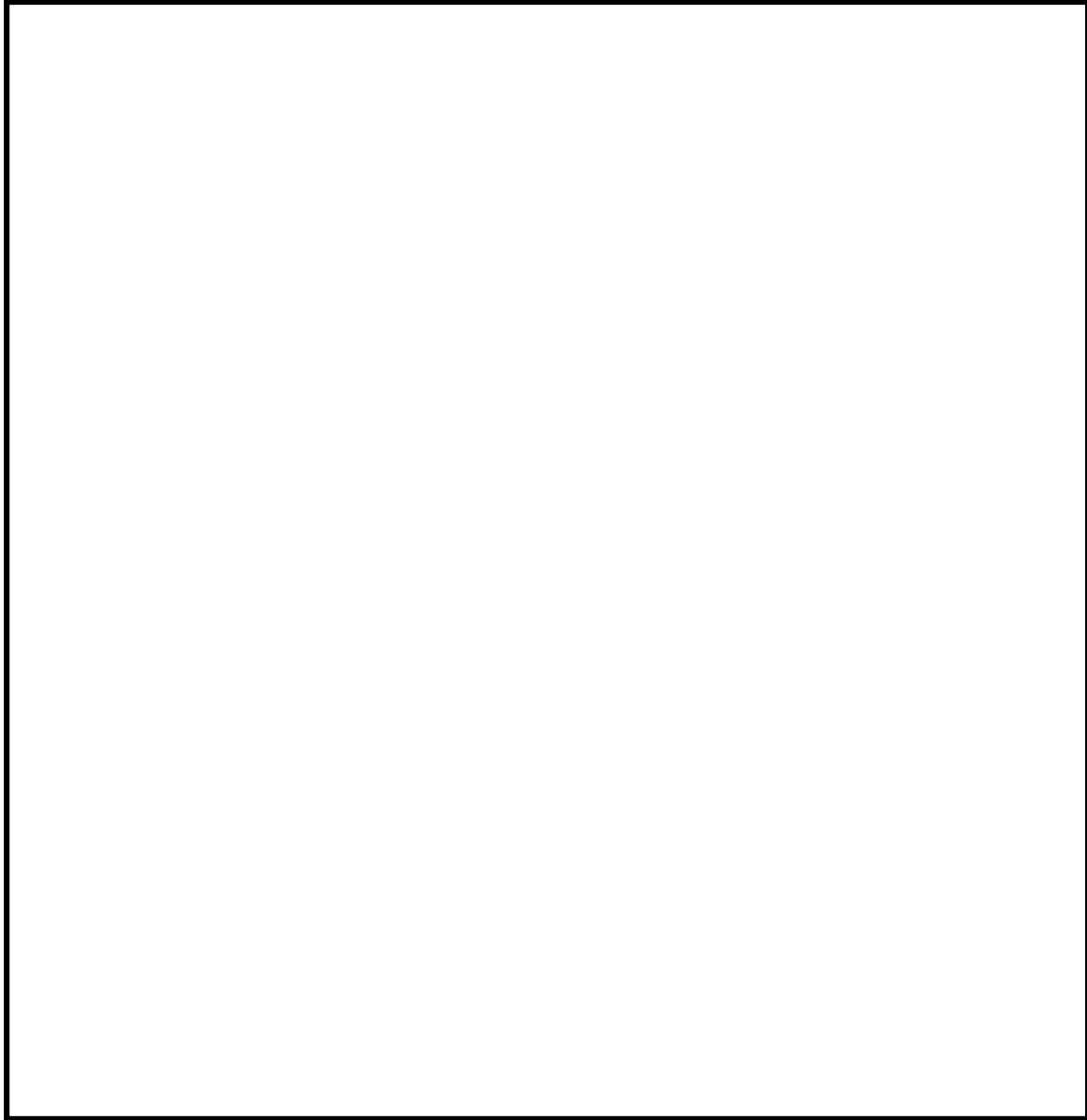
入力項目リスト

分 類	入力項目
炉心データ*	出力時間変化
	炉心入口流量時間変化
	炉心入口エンタルピ時間変化
	炉心圧力時間変化
燃料データ	バンドル形状データ (標準長/部分長燃料棒本数, 流路面積等)
	ウォータロッドデータ (本数, 外径等)
	燃料特性データ (ギャップ熱伝達係数, 燃料物性等)
	相関式 (GEXL相関式, 熱伝達相関式, リウエット相関式等)
	初期条件データ (バンドル出力, 入口流量, 軸方向出力分布等)

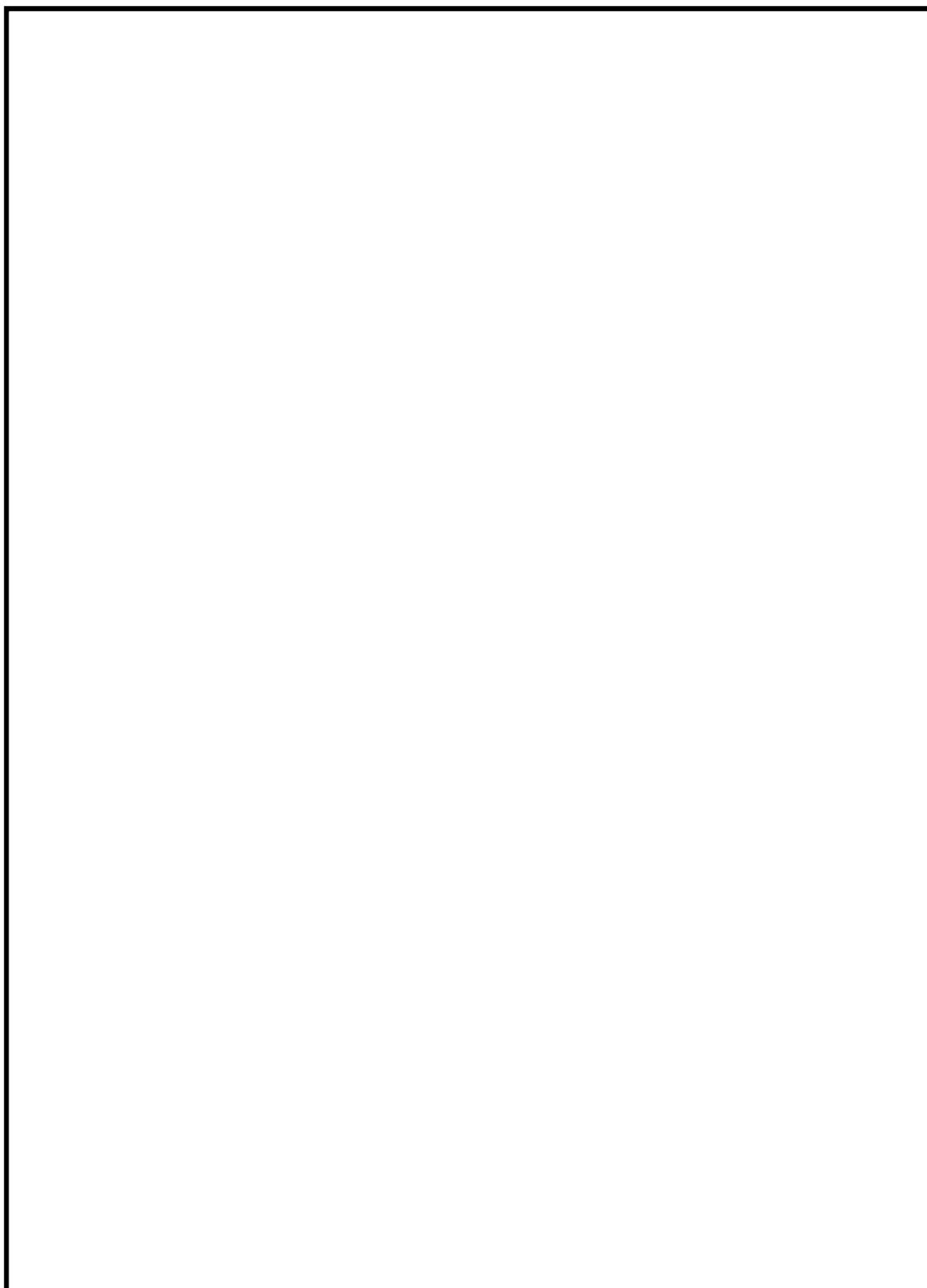
\*REDYコードにより求められたデータを引き継いで用いる

## 添付2 ボイドモデル，サブクールボイドモデル，圧力損失モデルの適切性

本添付では，3.3.1 項に示したボイドモデル，サブクールボイドモデル及び圧力損失モデルの適切性について述べる。



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。



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。

### 添付3 沸騰遷移後の被覆管表面熱伝達モデルの適用性

#### 1. はじめに

3.3.1 項に示したように、沸騰遷移後の燃料被覆管温度挙動を評価するモデルのうち、沸騰遷移評価モデルは SLMCPR を下回った時点で沸騰遷移の発生とみなし、また被覆管表面熱伝達モデルでは燃料被覆管温度を高め評価する修正 Dougall-Rohsenow 式を適用することで、保守的な設定としている。

4.3 節に示したように、燃料被覆管温度 500℃程度までの試験結果を用いて、修正 Dougall-Rohsenow 式による燃料被覆管温度の評価の妥当性を確認している。

本添付では、修正 Dougall-Rohsenow 式による燃料被覆管温度の評価において、4.3 節の妥当性確認に加えて、BWR 燃料の沸騰遷移を模擬した 5×5 高温ポスト B T 試験の燃料被覆管温度測定値との比較により、修正 Dougall-Rohsenow 式の妥当性を確認し、原子炉停止機能喪失事象のような燃料被覆管温度の解析結果が高温となる範囲での適用性について述べる。

#### 2. 5×5 高温ポスト B T 試験を用いた妥当性確認

##### (1) 5×5 高温ポスト B T 試験の概要<sup>(1)</sup>

(株) グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパンにおいて過渡沸騰遷移試験が実施されている。

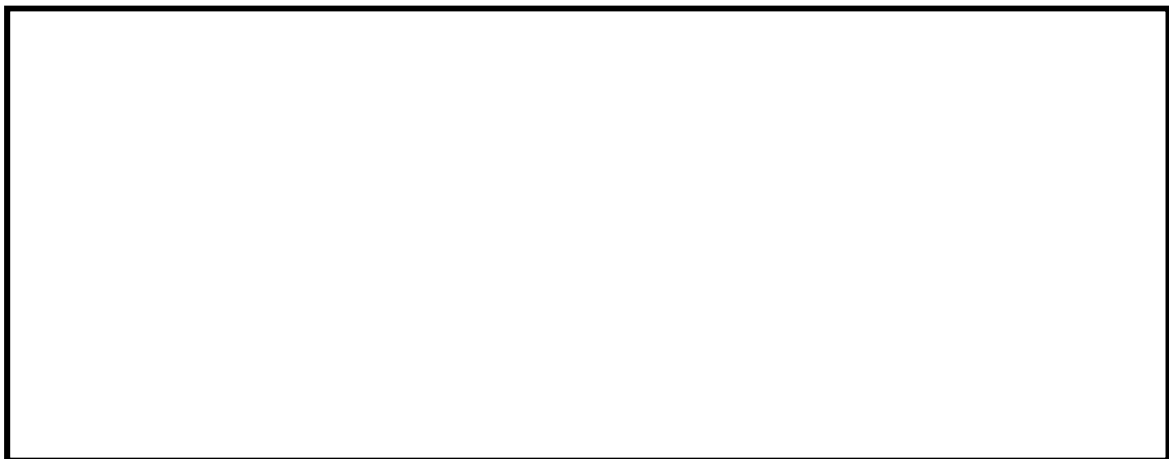
試験に用いる試験体は 10×10 燃料模擬の 5×5 部分バンドルであり、添付表 3-1 に燃料集合体の仕様を、添付表 3-2 に試験条件を、添付図 3-1 に試験体を示す。模擬燃料棒表面温度は、高出力ロッド及び低出力ロッドの模擬燃料棒被覆管表面に埋め込んだ熱電対により測定し、その測定位置はスペーサの

直上流とスパーサ中間である。

検証で用いる被覆管温度測定試験では、流量、出力を変化させて沸騰遷移前後の被覆管温度を測定している。

## (2) 妥当性確認結果

試験と解析の比較結果について、沸騰遷移後の熱伝達相関式に修正 Dougall-Rohsenow 式を用いた燃料被覆管温度の最大値の比較を添付図 3-2 に示す。



なお、いずれの比較点についても、燃料被覆管温度が急激に上昇し、測定値は燃料被覆管温度が低下に転じたのちにリウエットする挙動となっており、解析値は測定値と同様、又は上昇が緩やかになったところでリウエットしていることから、燃料被覆管温度の最大値の比較結果は修正 Dougall-Rohsenow 式の影響していると考えられる。解析値と測定値の比較は、上流側で燃料被覆管温度は高く評価されて保守的な解析結果を与えていることに対し、クオリティが 90%程度となる下流側ではその保守性は小さくなることを示している。

これは、沸騰遷移後において蒸気中の液滴が燃料被覆管表面に付着して蒸発すると伝熱が良好になるが、修正 Dougall-Rohsenow 式は液滴蒸発の影響を無視しており、燃料被覆管温度を高めめに評価する傾向<sup>(2)(3)</sup>が影響しているもの

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。

と考えられ、蒸気中の液滴の割合が大きいほど燃料被覆管温度を高め評価する傾向があると考えられる。

したがって、クォリティが大きくなると修正 Dougall-Rohsenow 式の評価の保守性は小さくなる傾向であると考えられるが、上流側位置の燃料被覆管温度 700～800℃程度の範囲においては、修正 Dougall-Rohsenow 式は保守的な解析結果を与えていて、燃料棒表面熱伝達を低く予測して燃料被覆管温度を高め評価すると考えられる。

### 3. 高温範囲における修正 Dougall-Rohsenow 式の適用性

上記 2. (2)によって、修正 Dougall-Rohsenow 式はクォリティが大きくなると保守性が小さくなる傾向であると考えられるが、燃料被覆管温度 700～800℃程度の範囲においても燃料被覆管温度を高め評価することを確認した。

また、燃料被覆管温度を高め評価する保守性は、4.3 節に示した燃料被覆管温度 500℃程度までの試験と解析の比較結果と大きく変わらないと考えられる。

代表的な A BWR 及び BWR 5 において、主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析による燃料被覆管温度の最大値は 800℃を上回る。一方、燃料被覆管温度が最大となる時間帯における高さ位置のクォリティは、上記 2. (2)で述べた燃料被覆管温度の評価の保守性が小さくなったクォリティには至らない。

なお、燃料被覆管温度が 800℃を大きく超えると蒸気流の過熱度が増加し、燃料棒表面熱流束の低下が影響を及ぼすようになると考えられる。修正 Dougall-Rohsenow 式では蒸気膜温度（燃料被覆管表面温度と飽和温度の平均温度）を用いており、また、伝熱面と蒸気流の温度差の評価には、蒸気流の



温度に過熱蒸気温度ではなく飽和温度を用いているため、過熱蒸気が発生した場合、同式を用いた熱流束の予測精度が低下する可能性がある。そこで、過熱蒸気の影響を厳しい側に考慮した蒸気単相状態を想定<sup>(注1)</sup>して Dittus-Boelter の式<sup>(4)</sup>と比較した。蒸気単相状態において Dittus-Boelter の式は熱伝達を低く評価する<sup>(5)(6)</sup>。また、Dittus-Boelter の式はプラントル数が 0.7 以上の単相状態について適用可能とされており、圧力 7 MPa[abs]及び 800°C の蒸気単相流にも適用可能と考えられる。比較の結果、燃料被覆管温度が最大となる領域を含む第 3 - 第 4 スペーサ付近において、修正 Dougall-Rohsenow 式は燃料被覆管温度を Dittus-Boelter の式より高めに評価することを確認した。

したがって、燃料被覆管温度 800°C を上回り評価の保守性は小さくなる傾向であると考えられるものの、保守性が小さくなることを確認したクォリティに至っていないこと、並びに 1,000°C を超える燃料被覆管温度及び過熱蒸気を考慮した蒸気単相状態の過度に厳しい条件においても Dittus-Boelter の式より、主蒸気隔離弁の誤閉止 + 原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析における燃料被覆管温度を高めに評価することを確認したことから、修正 Dougall-Rohsenow 式は適用できると考えられる。

(注 1)

第 4 スペーサ位置についてはクォリティが比較的低いことから、蒸気相はほぼ飽和と考えられる。ここでの修正 Dougall-Rohsenow 式による評価結果は、燃料被覆管温度 1,200°C までのどのような温度条件であっても、蒸気流のみを考慮した Dittus-Boelter の式を適用することで得られる保守的な評価結果よりも小さく、より保守的な評価結果となることを確認した。

第 3 スペーサ位置以降（上部）について、比較対象となる Dittus-Boelter の式で得られる熱流束をより厳しい側に評価することを目的として、以下の

ように過度に厳しい熱水力条件を設定して評価し、第3スペーサ位置について燃料被覆管温度1,000℃までのどのような温度条件であっても修正 Dougall-Rohsenow 式は保守的な評価結果を与えることを確認した。

- ・ 第3 - 第4スペーサ間に厳しいクオリティ、流量、液滴蒸発条件を与え、燃料集合体の低い位置で蒸気単相となるように想定
- ・ 高温燃料棒4本に囲まれたサブチャンネル流路を想定し、その燃料被覆管温度には、集合体出口までスペーサごとに有効性評価で評価された燃料被覆管温度を包絡する温度（最大1,000℃）を設定して過熱蒸気温度を評価
- ・ 隣接するサブチャンネルからの蒸気及び液滴の流入を考慮せず、評価対象のサブチャンネルの燃料被覆管からの熱は全て蒸気の加熱に使用

また、SCATコードの特徴として、燃料被覆管温度800℃程度を超える状態で有意となり、1,000℃を超えると重要な熱伝達機構となる輻射熱伝達を無視していることも、保守的な評価を与える一因となると考えられる。

#### 4. 高温範囲における隣接燃料棒の影響

3.3.1項に示したように、修正 Dougall-Rohsenow 式では、物性値に用いる過熱蒸気の温度に蒸気膜温度（燃料被覆管表面温度と飽和温度の平均温度）を用いている。そのため、燃料被覆管温度が高温となり、隣接燃料棒との間に飽和温度の蒸気が介在しない場合、修正 Dougall-Rohsenow 式による予測精度は悪化する可能性がある。

燃料被覆管温度700~800℃程度の試験結果である上記2. 5×5高温ポストBT試験において、添付図3-1の試験体の平面模式図から、ホットピンが2本直線状に配置されており、ホットピンに隣接して同様なホットピンが配置された体系とみなせる。この体系において試験と解析の比較結果とでは、修正

Dougall-Rohsenow 式は保守的な解析結果を与えており、隣接燃料棒の影響は修正 Dougall-Rohsenow 式の保守性に含まれると考えられる。これは、燃料被覆管温度 700～800℃程度の範囲においても、当該位置における隣接燃料棒との間には飽和蒸気が介在することによるものと考えられる。また、800℃を上回る範囲においても、上記 3. のように修正 Dougall-Rohsenow 式は適用できると考えられ、隣接燃料棒の影響は修正 Dougall-Rohsenow 式に含まれる傾向と考えられる。そのため、主蒸気隔離弁の誤閉止＋原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析において、修正 Dougall-Rohsenow 式は適用できると考えられる。

#### 5. 過熱蒸気の扱いに対する影響

修正 Dougall-Rohsenow 式では、3.3.1 項に示したように、物性値に用いる過熱蒸気の温度に蒸気膜温度（燃料被覆管表面温度と飽和温度の平均温度）を用いており、また、伝熱面と蒸気流の温度差の評価には、蒸気流の温度に過熱蒸気温度ではなく飽和温度を用いていることから、高温範囲における過熱蒸気の影響を確認する必要がある。

過熱蒸気を考慮した熱伝達関連式に Groeneveld 5.9 式<sup>(3)(7)</sup>があり、物性値に用いる過熱蒸気の温度は燃料被覆管表面温度としている。同式は単管及び二重管の試験データに基づいて開発され、米国で実績がある。

燃料被覆管温度 500℃以上における両式による熱伝達率の低下幅は、燃料被覆管温度 500℃の熱伝達率に対して Groeneveld 5.9 式の方が 5%以上低く予測する。そのため、Groeneveld 5.9 式の方が燃料被覆管温度を高く評価する。

一方、添付図 3-2 のように、700～800℃程度の試験結果において修正 Dougall-Rohsenow 式は保守的な解析結果を与えている。これは、高温範囲に

において過熱蒸気の影響は考えられるものの、修正 Dougall-Rohsenow 式による燃料被覆管温度の評価に及ぼす影響は大きくなく、保守性は維持されて燃料被覆管温度を高く評価する傾向を示していると考えられる。

さらに、1,000°Cを超える燃料被覆管温度においても、上記 3. で示したように、このような温度領域が第3スペーサより上流側から燃料集合体出口まで一様に続く厳しい側の条件を設定し、その上で過熱蒸気の温度を厳しい側に評価する手法を用いて検討した結果、このような温度領域に至った時に重要な熱伝達機構となる輻射熱伝達を S C A T コードが無視していることと相まって、燃料被覆管温度をおおむね保守的に評価できることが確認されている。

## 6. まとめ

燃料被覆管温度 700～800°C程度の範囲において、試験との比較結果から修正 Dougall-Rohsenow 式は燃料被覆管温度を高く評価することを確認し、また、主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象にて燃料被覆管温度が 800°Cを上回る範囲においても適用可能と考えられる。

以上より、修正 Dougall-Rohsenow 式は主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象のような燃料被覆管温度の解析結果が高温となる範囲でも適用することは妥当であると考えられる。

## 7. 参考文献

- (1) 工藤, 秋葉他, 「過渡的な沸騰遷移後の燃料被覆管温度挙動の実験的研究  
(2)  $-5 \times 5$  管群体系における高温時のポスト BT 特性」, 日本原子力学会 2009 年秋の大会予稿集, C36, 2009 年
- (2) 井口 他, 「BWR 定常ポスト CHF 試験結果—限界熱流束及びポスト CHF 熱伝達率—」, JAERI-Research 2001-060, 2002 年 2 月
- (3) 「BWR における過渡的な沸騰遷移後の燃料健全性評価基準:2003」, (社)日本原子力学会, AESJ-SC-P002:2003, 2003 年 6 月
- (4) Dittus, F. W. and Boelter, L. M. K., "Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type", University of California Publ. Eng. Vol.2, October 1930.
- (5) 「沸騰水型原子力発電所 非常用炉心冷却系 (E C C S) の新性能評価手法について」, 株式会社日立製作所, H L R -032 訂 3, 平成 10 年 5 月
- (6) 「沸騰水型原子力発電所 非常用炉心冷却系解析モデル (S A F E R)」, 株式会社東芝, T L R -044 改訂 4, 平成 10 年 5 月
- (7) D. C. Groeneveld, "Post-Dryout Heat Transfer at Reactor Operating Conditions", Proc. Topl. Mtg. Water-Reactor Safety, CONF-730304, U.S. Atomic Energy Commission (1973).

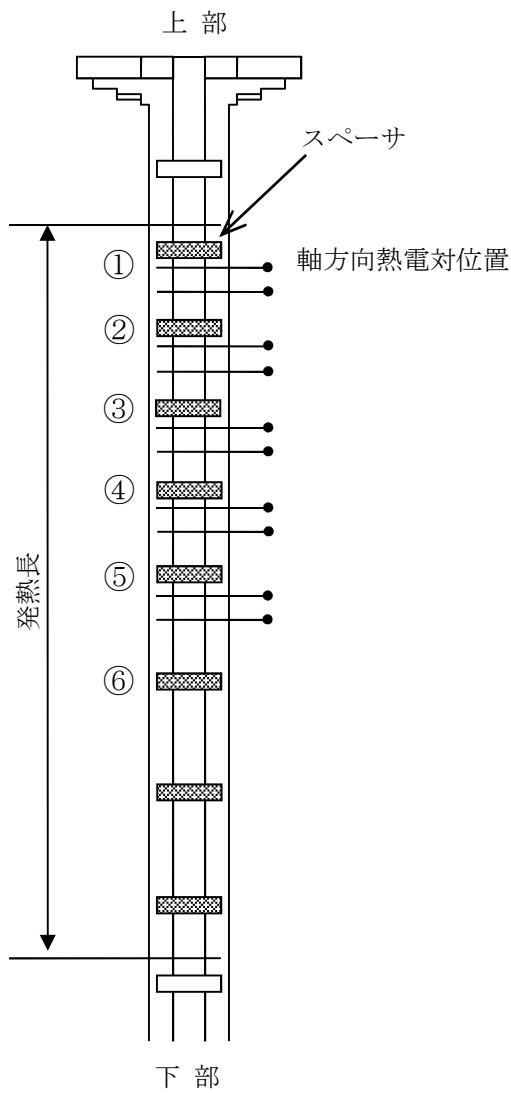
添付表 3-1 模擬燃料集合体の仕様

項目	仕様
燃料タイプ	5 × 5 燃料
燃料棒本数 (ヒータロッド)	25
加熱長	約 3,710mm
燃料棒外径	
燃料棒ピッチ	
スペーサ個数	8 (丸セル型)

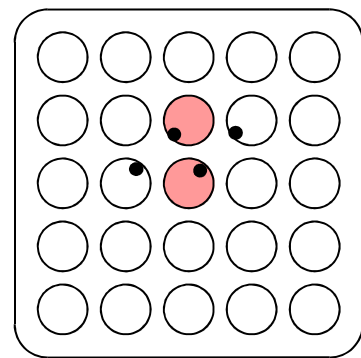
添付表 3-2 試験条件

項目		流量減少事象
初期条件	圧力	約 7 MPa [abs]
	質量流束	約 $5 \times 10^6$ kg/m <sup>2</sup> /h
	入口サブクール	約 60 kJ/kg
	出力	約 2.5 MW

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。



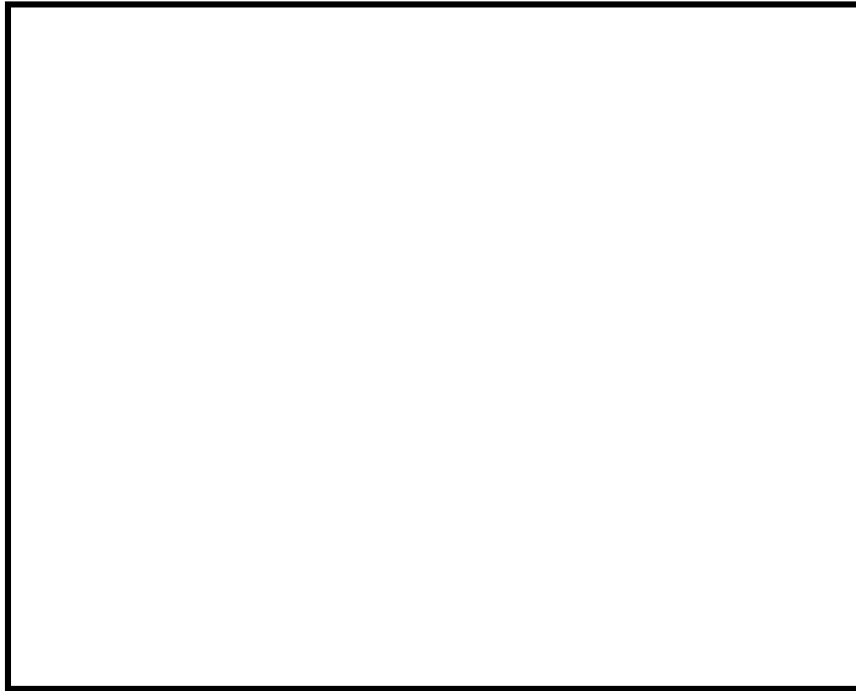
[試験体側面模式図]



- 高出力ロッド
- 低出力ロッド
- 熱電対位置

[試験体平面模式図]

添付図 3-1 試験体の例



添付図 3-2 燃料被覆管温度の最大値の比較

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。



## 添付4 リウエットモデルの適用性

### 1. はじめに

3.3.1 項に示したように、沸騰遷移後の燃料被覆管温度挙動を評価するモデルのうち、沸騰遷移評価モデルはSLMCP Rを下回った時点で沸騰遷移の発生とみなし、また被覆管表面熱伝達モデルでは燃料被覆管温度を高めにより評価する修正 Dougall-Rohsenow 式を適用することで、保守的な設定としている。このような設定も含め、解析手法の保守性によって燃料被覆管温度を高めにより評価している。

一方、4.3 節に示したように、燃料被覆管温度 500℃程度までの試験結果を用いて、相関式2によるリウエット時刻の予測の妥当性を確認している。

本添付では、相関式2によるリウエット時刻の予測において、4.3 節の妥当性確認に加えて原子炉停止機能喪失事象のような燃料被覆管温度の解析結果が高温となる範囲での適用性について述べる。

### 2. 相関式2適用性の考え方

相関式2によって予測するリウエット時刻は燃料被覆管温度に依存する。リウエット時刻を早めに予測すると、温度上昇の過程でリウエットする場合、燃料被覆管温度を低く評価する可能性がある。

原子炉停止機能喪失の有効性評価解析では、燃料被覆管温度を高めにより評価することから、相関式2はリウエット時刻を遅く予測する傾向となる。そのため、温度上昇の過程でリウエット時刻が遅ければ燃料被覆管温度を高めにより評価する傾向となる。

したがって、有効性評価の解析手法によって、燃料被覆管温度の解析結果が高温となる範囲でも相関式2の保守性は維持されることが考えられる。

### 3. リウエット時刻の感度解析

燃料被覆管温度が高温の範囲でも相関式2の保守性は維持されることが考えられるが、相関式2によるリウエット時刻の予測が及ぼす影響を確認しておくことは重要と考えられる。

そこで、主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象における燃料被覆管温度の時間変化について、相関式2を用いた解析例を添付図4-1に、リウエット時刻を遅らせた解析例を添付図4-2に示す。

沸騰遷移発生直後、熱伝達係数が低下して燃料被覆管温度が急激に上昇する。その後、原子炉出力の低下に合わせて燃料被覆管温度の上昇は徐々に緩やかになり、更に原子炉出力が低下すると緩やかな上昇から減少に転じる。このように、燃料被覆管温度がいずれ減少に転じることから、燃料被覆管温度が緩やかな上昇を示した以降の状態において、相関式2によるリウエット時刻の予測精度が燃料被覆管温度へ及ぼす影響は大きくないことを確認できる。

主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象における原子炉出力は、再循環ポンプトリップや、復水器水位低下による給水流量喪失に伴う炉心ボイド率の増加によって低下する。そのため、燃料被覆管温度の上昇は抑制されていずれ減少に転じる。

### 4. スペーサ間のノードのリウエット特性について

9×9燃料（A型）等においては、主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象の時のように、熱流束が高いまま炉心入口流量が定格条件の約30%程度の低流量条件に至った炉心状態では、液膜ドライアウトに基づく沸騰遷移が生じる。このとき沸騰遷移は、軸方向（上下）に隣り合った二つのスペ

ーサ間で、燃料棒を冷却する液膜の流量が最小となる下流側のスパーサ（以下「スパーサA」という。）の直上流位置（直下）で初生する。流量の低下及び／又は熱流束の増加により除熱性能が更に低下して出力ー冷却間の不整合が拡大すると、液膜は上流側スパーサ（以下「スパーサB」という。）に向けて後退する。一方、事象の収束等により出力ー冷却間の不整合が回復すると、液膜の後退が止まり、次いで再進展してスパーサAの直上流位置まで戻る。液膜が再進展する過程で液膜の先端部が到達するとリウエットが生じるため、リウエット部が下流側に進展しスパーサAの直上流位置まで戻ることになる。

このように、スパーサA、Bの間で液膜の後退及び再進展が生じることから、ドライアウト持続時間はスパーサAの直上流位置で最も長くなり、最も液膜が後退した位置（以下、この位置までのスパーサAからの距離を「最大液膜後退距離」という。）に近づくほど短くなる。

一方、相関式2は、スパーサ直上流位置から最大液膜後退距離及び液膜再進展速度をモデル化してリウエット時刻を評価することでドライアウト持続時間を予測する。本資料の本文「4.3 NUPEC BWR燃料集合体熱水力試験」に示されるように、試験値を厳しい側に解析することが確認されている。

ただし、スパーサ間の位置（ノード位置）におけるドライアウト持続時間は、スパーサ直上流位置におけるドライアウト持続時間より短いことが現象論的に明らかであるものの、必ずしも定量的に十分な実験データが揃っていないものではない。このため、スパーサ間の任意の位置において、あたかもその位置がスパーサ直上流位置であるとして相関式2をそのまま適用して仮想的な液膜の最大後退距離を評価することで、より長いドライアウト持続時間が得られるようにした厳しい側の解析を実施している。

したがって、スペーサ間のノード位置における相関式 2 によるリウエット時刻を用いたときのドライアウト持続時間予測値は、実際よりも一層保守的なものとなり、その保守性の度合いはスペーサ A から当該位置までの距離が増加し、スペーサ B に近づくほど大きくなる。

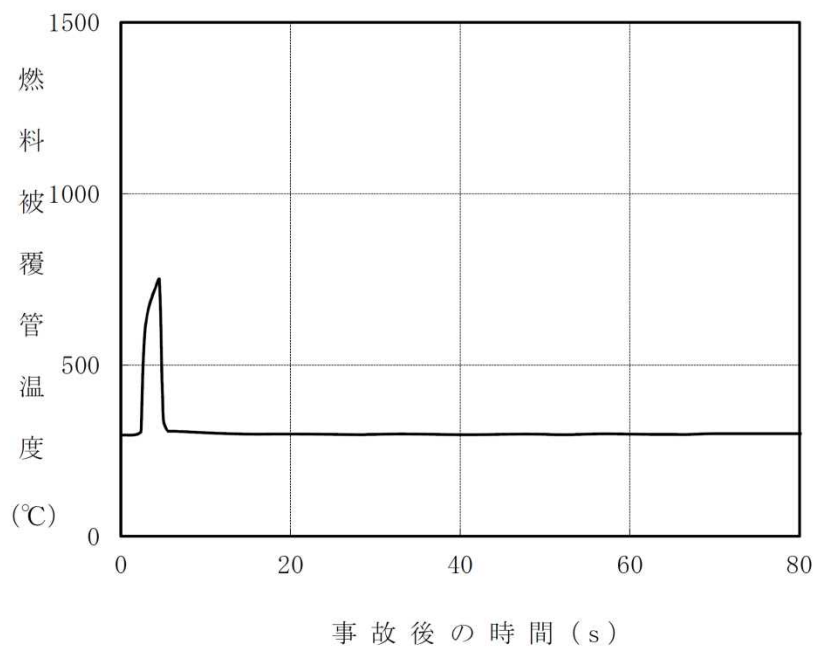
なお、相関式 2 を用いた P C T 解析は本資料の「添付 3 沸騰遷移後の被覆管表面熱伝達モデルの適用性」に示されるように燃料被覆管温度が 800°C に及ぶ実験に対してもおおむね保守的であることが確認されているが、主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象においては前項「3. リウエット時刻の感度解析」における評価に従い、リウエットなしの極端な計算を実施することで、相関式 2 によるドライアウト持続時間の予測の不確かさの影響を排除した評価も実施しているため、スペーサ直上流位置だけでなく、スペーサ間のノード位置においても、P C T の上限値を押さえた評価がなされている。

## 5. まとめ

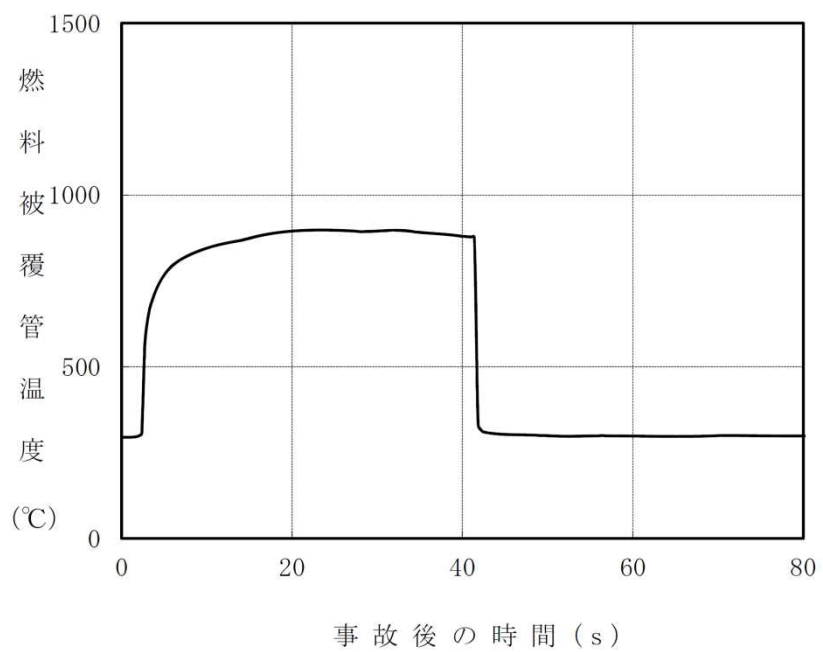
解析手法の保守性によって燃料被覆管温度を高め評価するため、相関式 2 はリウエット時刻を遅く予測する傾向となる。

また、リウエット時刻を遅らせた感度解析から、燃料被覆管温度が緩やかな上昇を示した以降の状態において、相関式 2 によるリウエット時刻の予測精度が及ばず影響は大きくないことを確認した。

以上より、相関式 2 は原子炉停止機能喪失事象のような燃料被覆管温度の解析結果が高温となる範囲でも適用することは妥当であると考えられる。



添付図 4-1 燃料被覆管温度の変化例



添付図 4-2 リウエット時刻を遅らせた場合の燃料被覆管温度の変化例

## 添付5 9×9燃料（A型）部分長燃料棒を考慮した評価の適用性

### 1. はじめに

3.3.1 項に示したように、沸騰遷移後の燃料被覆管温度挙動を評価するモデルのうち、沸騰遷移評価モデルはSLMCP Rを下回った時点で沸騰遷移の発生とみなし、また被覆管表面熱伝達モデルでは燃料被覆管温度を高め評価する修正 Dougall-Rohsenow 式を適用することで、保守的な設定としている。このような設定も含め、解析手法の保守性によって燃料被覆管温度を高め評価している。

一方、4.3 節に示したように、9×9燃料（A型）模擬燃料集合体を用いた燃料被覆管温度 500℃程度までの試験結果を用いて、修正 Dougall-Rohsenow 式による燃料被覆管温度の評価及び相関式2によるリウエット時刻の予測の妥当性を確認している。

また、添付3及び添付4では、原子炉停止機能喪失事象のような燃料被覆管温度の解析結果が高温となる範囲における沸騰遷移後の被覆管表面熱伝達モデル及びリウエットモデルの適用性を示している。

本添付では、修正 Dougall-Rohsenow 式による燃料被覆管温度の評価及び相関式2によるリウエット時刻の予測において、9×9燃料（A型）の部分長燃料棒（以下「PLR」という。）の影響を考慮した試験との比較により、PLRが与える影響を確認し、原子炉停止機能喪失事象のような燃料被覆管温度の解析結果が高温となる範囲での適用性について述べる。

### 2. PLRの影響を考慮したポストBT試験を用いた適用性の確認

#### (1) 試験の概要と試験結果<sup>(1)</sup>

9×9燃料（A型）を模擬した4×4バンドル試験を対象として、PLR

の影響を考慮した沸騰遷移後の特性に関する試験が実施されている。

添付図 5-1 に試験体の概略図と試験結果の例を示す。試験結果の全般的な傾向として、沸騰遷移開始時刻と沸騰遷移後の燃料被覆管温度の最大値に関しては、PLRからの遠近の影響は小さいものの、リウエット時刻に関しては影響があることを示唆しており、これはPLRによる局所的な気相流速の変化が影響しているものと考えられる。

## (2) 解析結果

試験と解析の比較結果について、添付図 5-2 に燃料被覆管温度の最大値の比較を、添付図 5-3 にドライアウト持続時間の比較を示す。修正 Dougall-Rohsenow 式及び相関式 2 の組合せは総じて保守的な解析結果を与えていて、PLRからの遠近によらず燃料棒表面熱伝達を低く予測して燃料被覆管温度を高く評価するといえる。

PLRによる局所的な気相流速の変化は、温度によらず同様に生じると考えられることから、高温範囲においても、修正 Dougall-Rohsenow 式及び相関式 2 を適用することで、燃料被覆管温度は高めに評価されることが考えられる。また、PLRの存在により相関式 2 によるリウエット時刻の予測精度に影響があったとしても、添付 4 に示すように、燃料被覆管温度が緩やかな上昇を示した以降の状態において、リウエット時刻の予測精度が燃料被覆管温度に与える影響は大きくない。

## 3. まとめ

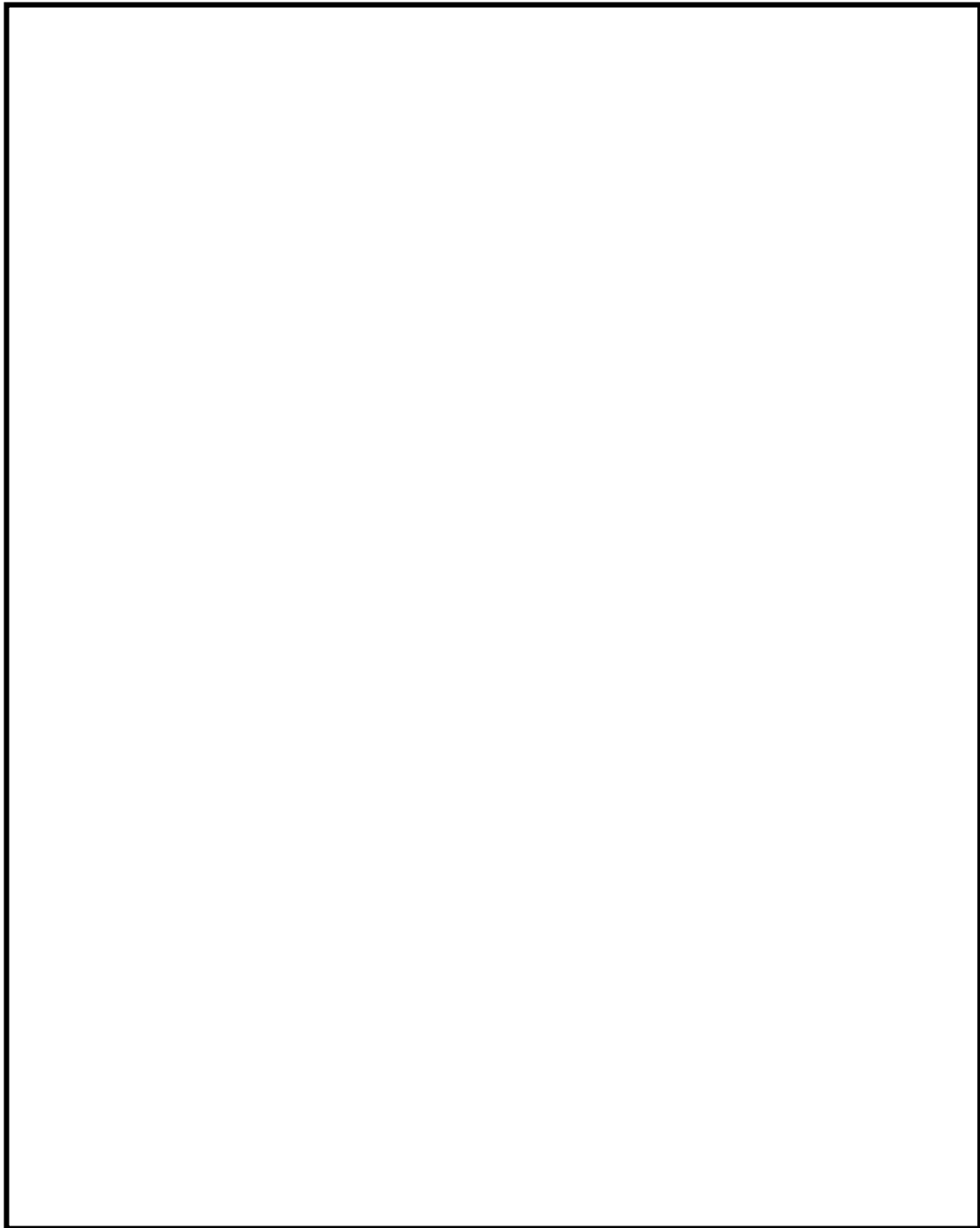
PLRの影響を考慮した試験との比較結果から、修正 Dougall-Rohsenow 式及び相関式 2 の組合せは保守的な解析結果を与えることを確認し、また、高温範囲においても適用可能と考えられる。

以上より、修正 Dougall-Rohsenow 式による燃料被覆管温度の評価及び相関式 2 によるリウエット時刻の予測は、 $9 \times 9$  燃料 (A 型) の P L R 有無に関わらず、主蒸気隔離弁の誤閉止 + 原子炉停止機能喪失の事象のような燃料被覆管温度の解析結果が高温となる範囲でも適用することは妥当であると考えられる。

#### 4. 参考文献

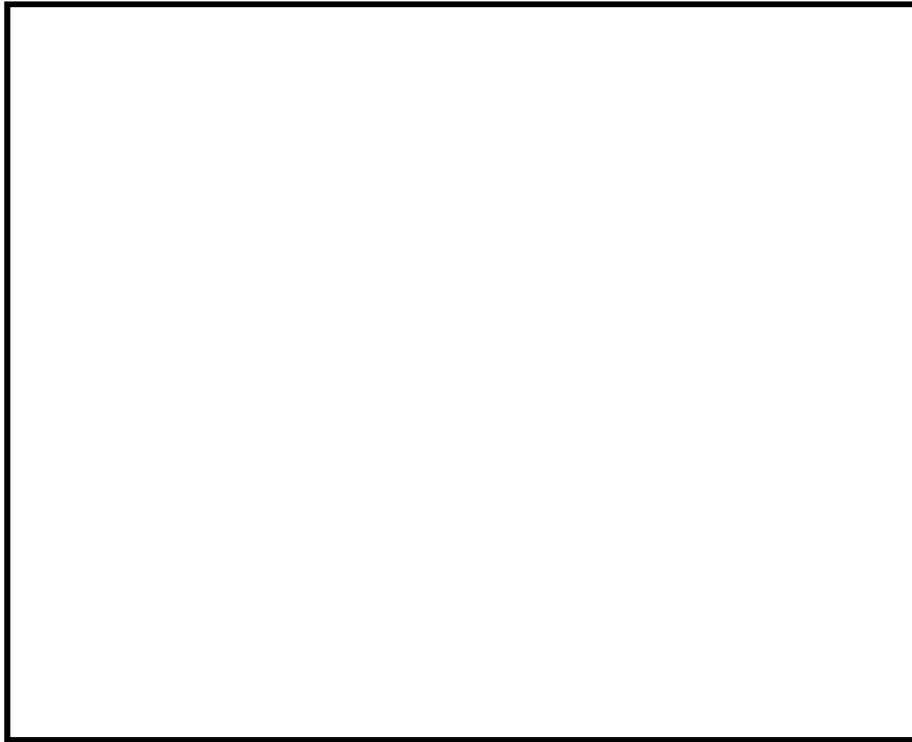
- (1) 共同研究報告書「高性能  $9 \times 9$  燃料 (A 型) のポスト B T 特性に関する研究 平成 17 年度報告書 (最終報告書)」, 東京電力株式会社他, 2006 年 3 月





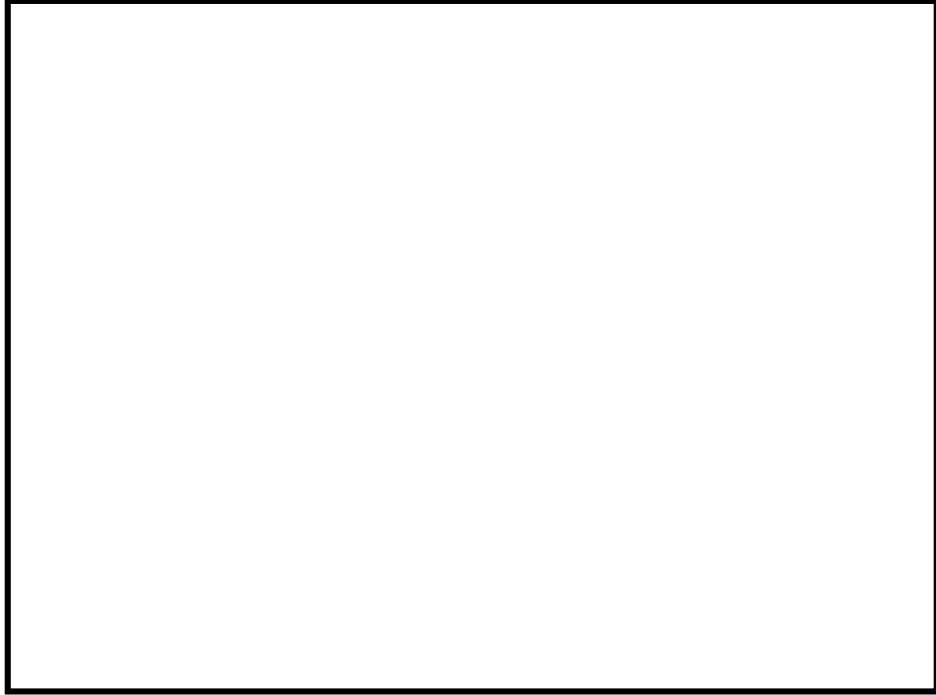
添付図 5-1 試験体の概略図及び試験結果の例<sup>(1)</sup>

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。



添付図 5-2 燃料被覆管温度の最大値の比較<sup>(1)</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。



添付図 5-3 ドライアウト持続時間の比較<sup>(1)</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。

## 添付6 有効性評価における9×9燃料（A型）の代表性

### 1. はじめに

有効性評価は9×9燃料（A型）（以下「A型燃料」という。）を代表燃料として評価しており，原子炉停止機能喪失事象に対するREDY/SCATコードの適用性は，主としてA型燃料を対象に確認されている。一方，実炉には9×9燃料（B型）（以下「B型燃料」という。）も装荷されていることから，REDY/SCATコードにB型燃料が適用できることを確認することが重要である。本添付では，REDY/SCATコードに入力される燃料データを整理した上で，対応する解析モデルがB型燃料で評価できることを示す。またB型燃料のデータを入力した解析を行い，その影響を確認することで，A型燃料で代表できることを示す。

### 2. 解析手法

対象とする燃料をB型燃料とし，A型燃料で代表した申請解析と同様にREDY/SCATコードで解析評価を行う。REDYコードに入力する核特性や炉心の燃料データ，またSCATコードに入力する燃料集合体の燃料データ，沸騰遷移相関式等にB型燃料のデータを反映し，判断基準パラメータである原子炉冷却材圧力バウンダリ圧力，燃料被覆管温度，格納容器圧力，サプレッション・プール水温度を評価する。

### 3. 燃料に関連する解析入力と解析モデルの整理

燃料に関連する解析入力とそれに対応する解析モデルを添付表6-1に示す。A型と比べたB型燃料の特徴として，燃料棒の径が小さい，標準長燃料棒のみで構成される，ウォータチャンネルを採用している，スペーサ形状が異なる

るといった点が挙げられる。しかし、RE DY / SC ATコードを使用する上でこれらの相違は問題とならず、B型燃料についても解析モデルは適用可能である。以下に各解析入力とモデルに対するB型燃料の適用性を示す。

### 3.1 核特性

RE DYコードへは、ボイド係数やドップラ係数、ボロン反応度、遅発中性子割合等のパラメータを入力する。RE DYコードは一点近似モデルを採用していることから、B型燃料に基づくデータを入力することで適切に評価できる。

### 3.2 バンドル形状，ウォータロッド／ウォータチャンネル

SC ATコードでは、軸方向一次元の流れを断面で平均化し等価直径及び流路面積として取り扱っている。したがって、B型燃料の形状データに基づき入力を作成することで適切に評価できる。水力等価直径は熱伝達係数の相関式に、熱的等価直径は沸騰遷移相関式やリウエット相関式に用いる。また、沸騰遷移後の熱伝達相関式やリウエット相関式は、A型とB型燃料の試験結果に基づくものであり、B型燃料にも適用可能である<sup>(1)</sup>。

### 3.3 燃料特性

RE DY / SC ATコードでは、ペレット及び被覆管の比熱や密度、ギャップ部の熱伝達係数を入力し、燃料棒の径方向の熱伝達を計算する。この計算はA型とB型の違いが無く、B型燃料に基づくデータを入力することで適切に評価できる。

### 3.4 熱水力特性

REDYコードへは、ボイドマップ（出口クオリティとボイド率の関係）や圧損係数の形で入力する。これら入力をB型燃料の形状データに基づき作成することで適切に評価できる。SCATコードにおける、ボイドモデル、サブクールボイドモデル、圧力損失モデルについては、A型燃料と同じモデルを適用する。

### 3.5 沸騰遷移後の熱伝達相関式及びリウエット相関式の予測特性

4.3 節と同様に、B型燃料を対象にNUPECにおいて過渡沸騰遷移試験が実施されている<sup>(2)(3)</sup>。沸騰遷移後の熱伝達相関式に修正 Dougall-Rohsenow 式、リウエット相関式に相関式2を用いた場合の解析値と測定値との比較結果ではドライアウト持続時間は一部非保守的な予測結果が見られるが、燃料被覆管温度は総じて保守的な解析結果を与えていることが確認されている<sup>(1)</sup>。

この相関式2によるリウエット時刻の予測の非保守性は、試験の初期出力が過度に厳しいデータや試験の出力挙動（出力持続時間）が過度に長いデータにおいて確認されており、A型とB型燃料の試験条件の相違が主な原因と考えられる<sup>(1)(4)</sup>。

よって、A型とB型燃料の形状の相違による影響はあると考えられるが、燃料被覆管温度500℃程度までの試験結果を用いて、修正Dougall-Rohsenow式及び相関式2の組合せは燃料被覆管温度を高め評価することを確認しており、B型燃料に基づくデータを入力することで同様に評価できる。

### 3.6 燃料被覆管温度の高温範囲におけるB型燃料評価の適用性

原子炉停止機能喪失事象のような燃料被覆管温度の解析結果が高温となる範囲において、添付3で修正 Dougall-Rohsenow 式の適用性の考えを示してお

り、1,000°Cを超える燃料被覆管温度及び過熱蒸気を考慮した蒸気単相状態の過度に厳しい条件においても Dittus-Boelter の式より、主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失の事象の有効性評価解析における燃料被覆管温度を高めに評価することを確認している。A型とB型燃料の相違によって異なる修正 Dougall-Rohsenow 式の変数は、燃料の形状データに関する変数で水力等価直径であるが、A型とB型燃料の水力等価直径の差はわずかであり、燃料被覆管温度挙動を評価する上で有意な差異はないと考えられる。そのため、高温となる範囲においてB型燃料にも修正 Dougall-Rohsenow 式は適用できると考えられる。

また、添付4で高温となる範囲における相関式2の適用性の考えを示している。A型とB型燃料の形状の相違によってリウエット時刻の予測に影響を与える可能性が考えられるが、燃料被覆管温度が緩やかな上昇を示した以降の状態において、相関式2によるリウエット時刻の予測精度が及ぼす影響は大きくないと考えられる。

以上より、高温となる範囲においてSCATコードはB型燃料に適用できると考えられる。

#### 4. B型燃料による解析評価

##### 4.1 評価内容

対象プラント	: BWR 5 代表炉
対象炉心燃料	: 9×9 燃料 (B型) 平衡炉心サイクル末期
事故シーケンス	: 主蒸気隔離弁の誤閉止+原子炉停止機能喪失
解析コード	: REDY Ver. 1 (ATWS 用), SCAT Ver. 3

解析条件:

添付表 6-1 で示した核特性、バンドル形状・ウォータチャンネル、燃料棒特

性、熱水力特性にB型燃料のデータを入力する。沸騰遷移相関式にはB型燃料の限界出力特性に基づきフィッティングした係数を入力する。その他の相関式はA型燃料で代表した有効性評価の申請解析と同じである。

## 4.2 解析結果

A型燃料と比較したB型燃料の解析結果を添付表 6-2 に示す。B型燃料においても判断基準を十分満足することが確認できる。以下に、A型燃料と比較したB型燃料の評価結果を示す。

### (1) 原子炉挙動

B型燃料の方が中性子束と原子炉冷却材圧力バウンダリ圧力の最大値が小さくなっている。これは、B型燃料の平衡炉心サイクル末期での動的ボイド係数の値が、A型燃料の値に比べて負の絶対値が小さく、原子炉圧力上昇に伴う正の反応度印加量が小さいためと考えられる。

### (2) 燃料挙動

PCTは、主蒸気隔離弁全閉直後の出力上昇時（第1ピーク）で、B型燃料の方が約90℃低くなっている。これは(1)原子炉挙動で示したとおり、中性子束の最大値が小さいためと考えられる。また、給水加熱喪失後の出力上昇時（第2ピーク）についても、B型燃料の方が約40℃低くなっている。これは給水加熱喪失時では自然循環状態にあり、限界出力の流量依存性の小さいB型燃料の方が相対的に限界出力は高くなりMCP Rは大きめに維持される傾向となるためと考えられる。

### (3) 格納容器挙動

格納容器圧力及びサプレッション・プール水温度の最大値については、B型燃料の解析結果はA型燃料とほぼ同等である。両燃料のボロン価値に大きな違いがないためと考えられる。



## 5. 代表燃料評価の適切性

上記 4. B型燃料による解析評価で示すとおり，B型燃料の方が原子炉冷却材圧力バウンダリ圧力及び燃料被覆管温度の最大値は小さく，また格納容器バウンダリにかかる圧力及び温度の最大値は同等の結果が得られた。B型燃料の評価結果はA型燃料の場合と同程度であり，判断基準に対する余裕も十分あることから，A型燃料で代表できるといえる。

## 6. まとめ

REDY/SCATコードにB型燃料が適用できることを確認し，B型燃料で解析評価を行った。A型燃料とB型燃料の解析結果を比較し，A型燃料で代表できることを確認した。

## 7. 参考文献

- (1) 「BWRにおける過渡的な沸騰遷移後の燃料健全性評価基準:2003」，(社)日本原子力学会，AESJ-SC-P002:2003，2003年6月
- (2) 「平成10年度 燃料集合体信頼性実証試験に関する報告書（BWR 新型燃料集合体熱水力試験編）」，(財)原子力発電技術機構，平成11年3月
- (3) 「平成11年度 燃料集合体信頼性実証試験に関する報告書（BWR 新型燃料集合体熱水力試験編）」，(財)原子力発電技術機構，平成12年3月
- (4) 「沸騰遷移後燃料健全性評価報告書」，基指専第2-5-1号，原子力安全委員会 原子力安全基準・指針専門部会 沸騰遷移後燃料健全性評価分科会，平成18年5月

添付表 6-1 REDY/SCATコードの燃料に係る入力と解析モデルの対応

解析入力		解析モデル
炉心データ	核特性 (ボイド, ドップラ, ボロン反応度等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>核特性モデル (REDY)</li> <li>反応度モデル (REDY)</li> </ul>
燃料データ	バンドル形状 (標準長/部分長燃料棒本数, 燃料棒径, 流路面積等), ウォータロッド/ウォータチャンネル (本数, 外径等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>チャンネル内熱流動モデル (流動の基本式, 沸騰遷移評価モデル, 被覆管表面熱伝達モデル, リウエットモデル) (SCAT)</li> </ul>
	燃料特性 (ギャップ熱伝達係数, 燃料物性等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料棒モデル (熱伝導モデル, ギャップ熱伝達モデル) (REDY/SCAT)</li> </ul>
	熱水力特性 (ボイド率, 圧損)	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉心ボイドモデル (REDY)</li> <li>チャンネル内熱流動モデル (ボイドモデル, サブクールボイドモデル, 圧力損失モデル) (SCAT)</li> </ul>

添付表 6-2 A型燃料とB型燃料の解析結果の比較

評価項目	B型燃料平衡炉心の解析結果	A型燃料平衡炉心の解析結果 (申請解析)	判断基準
中性子束 (%)	約 565	約 754	—
原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力 (MPa[gage])	約 9.35	約 9.43	10.34
格納容器圧力 (kPa[gage])	約 269	約 274	854
サプレッション・プール水温度 (°C)	約 127	約 127	200
燃料被覆管温度 (第1ピーク) (PCT) (°C)	約 914	約 1,004	1,200
燃料被覆管温度 (第2ピーク) (°C)	約 766	約 806	