

表 4-7 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析条件

項目	限界熱流束に係る 係数	設定根拠
ベースケース	<input type="checkbox"/>	MAAP 推奨範囲のノミナル値
感度解析ケース	<input type="checkbox"/>	水への熱伝達が制限される値

b. 解析結果

図 4-6-1, 図 4-6-2, 図 4-6-3, 図 4-6-4, 図 4-6-5, 図 4-6-6, 図 4-6-7, 図 4-6-8 に, 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析結果を示す。

本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心が下部プレナムにリロケーションした後は, 感度解析ケースにおいて溶融炉心と上面水プールの伝熱量が減少することになる。その結果, 感度解析ケースにおいて, 原子炉圧力容器の破損時間はわずかに早くなっているが, 感度は小さい。

c. 評価

下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の原子炉圧力容器の破損時刻に対する感度は小さく, その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいといえる。

(8) 溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達

a. 解析条件

溶融炉心と下部プレナムのギャップに存在する水による除熱量には不確かさがあり, ベースケースではギャップへの熱流束に係る係数として を与えている。この係数は, 下部プレナムギャップの水による除熱量に係るファクタとして定義され, ベースケースではギャップによる除熱量の評価式により計算された除熱量がそのまま適用される。有効性評価では最初に貫通部の溶接部破損が生じているが, 貫通部近傍でのギャップ冷却は実験例がなく, ギャップ水による除熱量が平板体系と比較してどの程度になるかには不確かさがある。以上より, 感度解析ケースでは, 溶融炉心と下部プレナムが接触している状態を模擬するための設定として係数を とした評価を実施する (表 4-8 参照)。

表 4-8 溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達の感度解析条件

項目	下部プレナムギャップの除熱量に係る係数	設定根拠
ベースケース	<input type="checkbox"/>	当該変数のノミナル値
感度解析ケース	<input type="checkbox"/>	溶融炉心と下部プレナムが接触

b. 解析結果

図 4-7-1, 図 4-7-2, 図 4-7-3, 図 4-7-4, 図 4-7-5, 図 4-7-6, 図 4-7-7 及び図 4-7-8 に, 下部プレナムギャップの除熱量に係る係数の感度解析結果を示す。

本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心が下部プレナムに移行した後, 感度解析ケースにおいては, 下部プレナムギャップによる除熱がないため, 下部ヘッドの温度が若干早く上昇し, クリープ破損割合や貫通部破損割合は感度解析ケースの方がわずかだが上昇が早い傾向となる。

ただし, このパラメータは下部プレナムの水がドライアウトするまでの間しか影響を及ぼさず, ドライアウト前においても, 下部プレナムギャップからの除熱量はクラストからの伝熱量と比較して十分小さいことから (付録 3 参照), 原子炉圧力及び原子炉圧力容器破損時刻に対する感度としては小さい。また, いずれのケースも原子炉圧力容器の破損時点において, 原子炉圧力は 2.0MPa[gage]を下回っている。

c. 評価

溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達の原子炉圧力容器の破損時刻に対する感度は小さく, その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいといえる。

(9) 溶接部破損時の最大ひずみ

a. 解析条件

溶接部破損は, 事象進展に伴う溶接部のひずみ量と最大ひずみを比較することで, その発生を判定している。ここで, 溶接部破損時の最大ひずみとして, ベースケースでは を与えているが, 不確かさがあると考えられることから, 感度を確認するためにその 1/10 倍の を設定する (表 4-9 参照)。

表 4-9 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析条件

項目	溶接部破損時の 最大ひずみ	設定根拠
ベースケース	<input type="checkbox"/>	MAAP 推奨範囲のノミナル値
感度解析ケース	<input type="checkbox"/>	実験の不確かさを大幅に上回る設定として 1/10 倍

b. 解析結果

図 4-8-1, 図 4-8-2, 図 4-8-3, 図 4-8-4, 図 4-8-5, 図 4-8-6, 図 4-8-7 及び図 4-8-8 に、溶接部破損時の最大ひずみの感度解析結果を示す。

本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。感度解析ケースは、原子炉圧力容器破損に至る判定の基準を変更したものであるため、溶接部が破損する時点までの原子炉圧力の挙動は同等である。溶接部破損割合は、貫通部溶接部に係るせん断応力とそれに対する最大引張強度の関係、及び溶融炉心からの伝熱による溶接部ひずみと許容できる最大ひずみの関係から計算される。リロケーション時には原子炉圧力が過渡的に上昇することから、内外圧差によるせん断応力が大きくなり、溶接部破損割合が増加している。原子炉圧力が低下した後は、せん断応力は低下するが、溶接サポート部の最大引張強度が、溶融炉心からの伝熱により低下するため、溶接部破損割合はゼロにはならない。その後、下部プレナムの溶融炉心からの伝熱により、下部ヘッドにひずみが生じ始めた時点でベースケースと感度解析ケースでは差異が生じる。感度解析ケースにおいては、溶接部破損時の最大ひずみを 1/10 倍としたことで、溶接部破損割合がベースケースよりも早く上昇し、原子炉圧力容器の破損時刻が早まっている。ただし、原子炉圧力容器の破損時間の変化としては約 13 分と小さく、感度解析ケースにおいても溶接部破損時点での原子炉圧力は 2.0MPa[gage]を下回っている。

c. 評価

溶接部破損時の最大ひずみの原子炉圧力容器の破損時刻に対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

(10) 感度解析パラメータの組み合わせ

a. 解析条件

これまで解析したケースでは、原子炉圧力容器下部プレナムに溶融炉心が落下した

過程で大量の水蒸気が生成され、原子炉圧力は短時間に高いピークが発生した。これは、溶融炉心が水中に落下した過程で粒子化が進み、水への伝熱面積が増大したことが支配的な要因である。この過程で溶融炉心の冷却は進み、下部プレナムに堆積した溶融炉心の温度は低下する。その後、下部プレナムに溜まっていた水がドライアウトすることで蒸気発生が収まる。組み合わせケースでは、原子炉内 F C I に係る影響因子については、下部プレナムへの溶融炉心落下後の原子炉圧力上昇が大きくなるように、原子炉圧力容器の破損時期に係る影響因子については原子炉圧力容器の破損時期が早くなるように、これまでに実施した感度解析パラメータを組み合わせる条件とした。表 4-10 に組み合わせケースの条件の一覧を示す。

表 4-10 感度解析パラメータの組み合わせ条件

項目	ベースケース	組み合わせケース	設定根拠
炉心ノード崩壊のパラメータ (炉心温度)	<input type="checkbox"/> K	<input type="checkbox"/> K	炉心ノードが崩壊する時間を早めるように設定
溶融ジェット径	<input type="checkbox"/> m	<input type="checkbox"/> m	クラスト破損面積が小さい場合を想定
エントレインメント係数	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MAAP 推奨範囲の最大値
デブリ粒子径ファクタ	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MAAP 推奨範囲の最小値
ジルコニウム-水反応速度の係数	1 倍	2 倍	燃料被覆管表面積に基づく値の 2 倍
限界熱流束に係る係数	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	水への熱伝達が制限される値
溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	溶融炉心と下部プレナムが接触する場合を想定
溶接部破損時の最大ひずみ	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	実験の不確かさを大幅に上回る設定として 1/10 倍

b. 解析結果

図 4-9-1 にこれまでの感度解析と感度解析パラメータの組み合わせケースについて主要な事象進展を示す。図 4-9-2, 図 4-9-3, 図 4-9-4, 図 4-9-5, 図 4-9-6, 図 4-9-7,

図 4-9-8 及び図 4-9-9 に、感度解析パラメータを組み合わせた場合の感度解析結果を示す。

図 4-9-1 より、組み合わせケースでは、原子炉压力容器の破損時刻は、ベースケースに比べて約 19 分早くなっており、他の感度解析結果と比較しても、最も早く原子炉压力容器破損に至っているが、原子炉压力容器破損時の圧力は、逃がし安全弁の開放により原子炉減圧されていることにより 2.0MPa[gage]を十分下回る約 0.5MPa[gage]となっている。これらの挙動について以下のとおり考察する。

①原子炉の加圧事象

下部プレナムへのリロケーション時の原子炉の加圧挙動は、熔融炉心と水の接触による急激な水蒸気生成により支配され、これらに影響するパラメータとして、熔融ジェット径、エントレインメント係数、デブリ粒子径等がある。これらの不確かさを感度解析により考慮した結果、原子炉圧力のピーク圧は、ベースケースよりわずかに上昇しているが、リロケーション時の圧力上昇は一時的なものであり、原子炉压力容器破損時には原子炉圧力は 2.0MPa[gage]を大きく下回っている点でベースケースと同等である。

②原子炉压力容器破損（原子炉压力容器破損タイミング）

原子炉压力容器破損（原子炉压力容器破損タイミング）については、熔融炉心からの熱負荷、破損形態等により支配され、これらに影響するパラメータとして、ジルコニウム-水反応速度、燃料ペレットが崩壊する時間及び温度、下部プレナム内の熔融炉心と上面水プールとの間の伝熱、溶接部破損時の最大ひずみがある。これらの不確かさを感度解析により考慮した結果、原子炉压力容器破損のタイミングは、ベースケースよりも約 19 分早く原子炉压力容器破損に至る結果となったが、原子炉圧力は原子炉压力容器破損時間に対して十分早い段階で 2.0MPa[gage]を下回っている結果に変わりはない。

以上のとおり、パラメータの組み合わせを考慮した感度解析ケースでは、圧力スパイクが大きく現れ、原子炉压力容器破損タイミングが早くなるが、原子炉压力容器破損の前に原子炉圧力が 2.0MPa[gage]を十分下回る結果となった。

c. 評価

下部プレナムへの熔融炉心落下挙動の不確かさにより、原子炉の圧力挙動にも不確かさがある。加圧現象が短時間に大きく現れる場合についても、原子炉压力容器破損前には原子炉圧力が 2.0MPa[gage]を十分に下回ることを確認した。

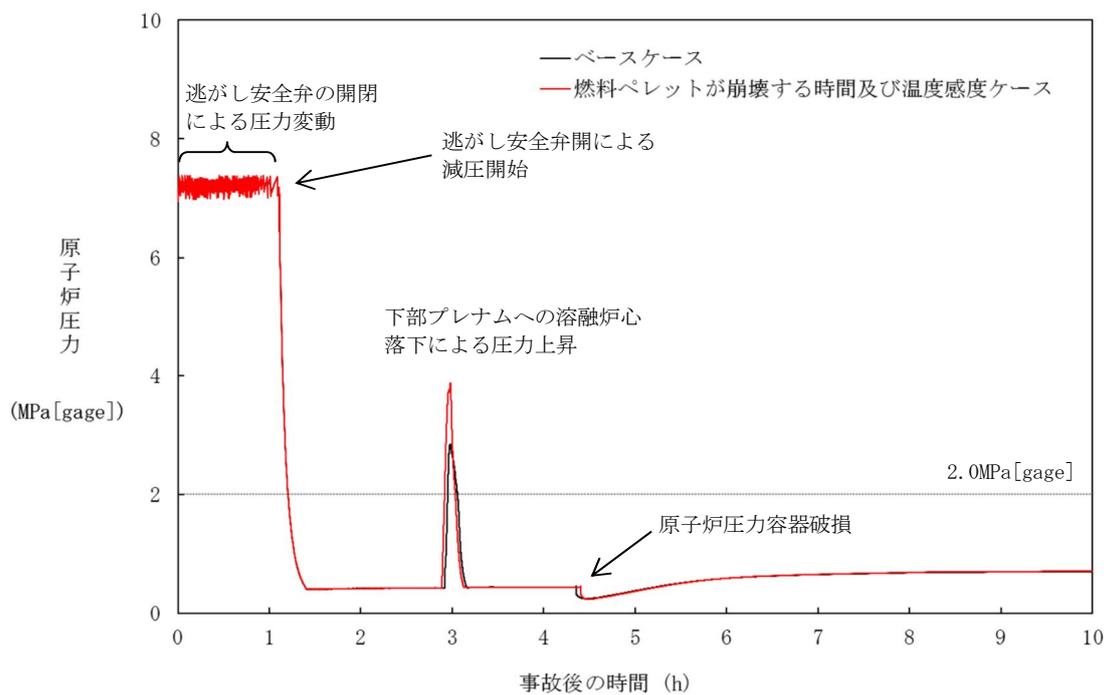


図 4-1-1 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (1)

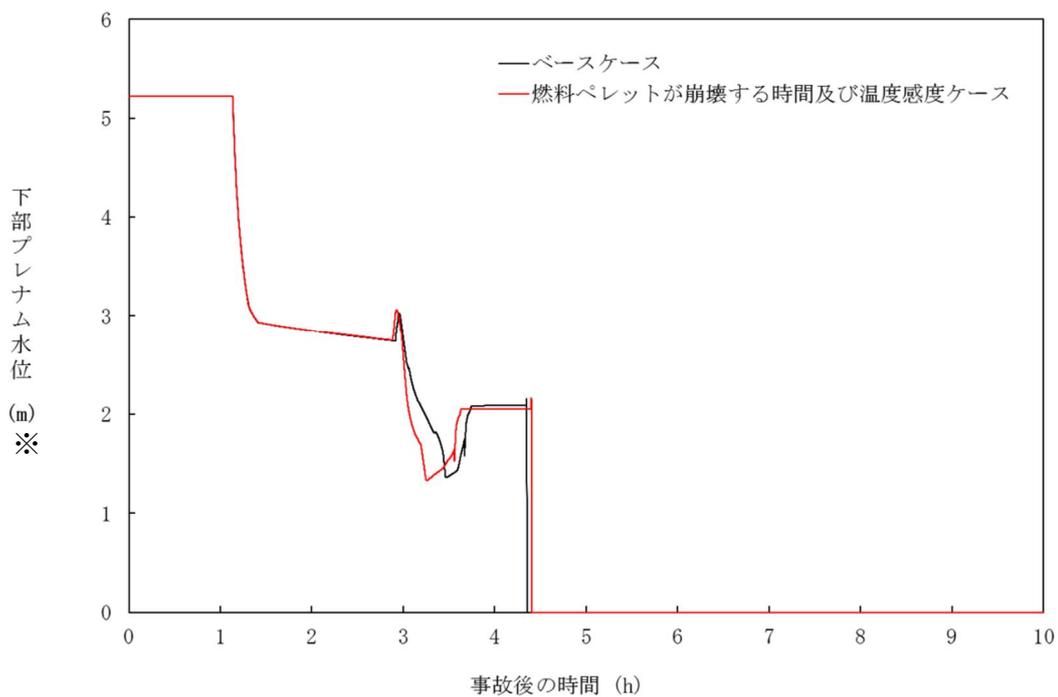


図 4-1-2 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (2)

※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

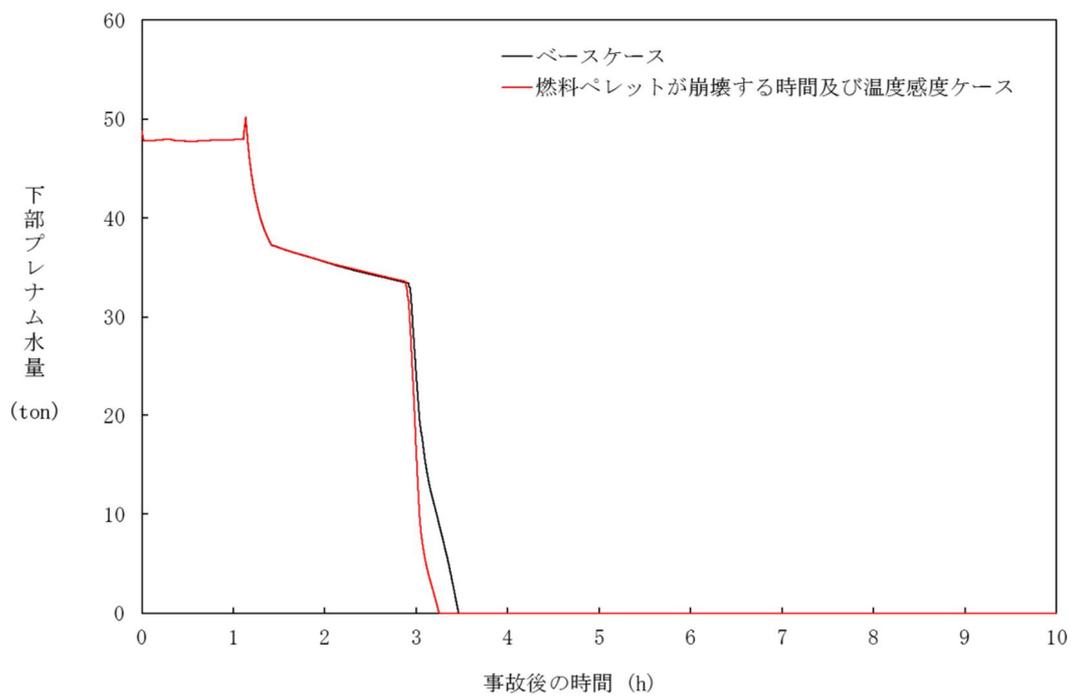


図 4-1-3 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (3)

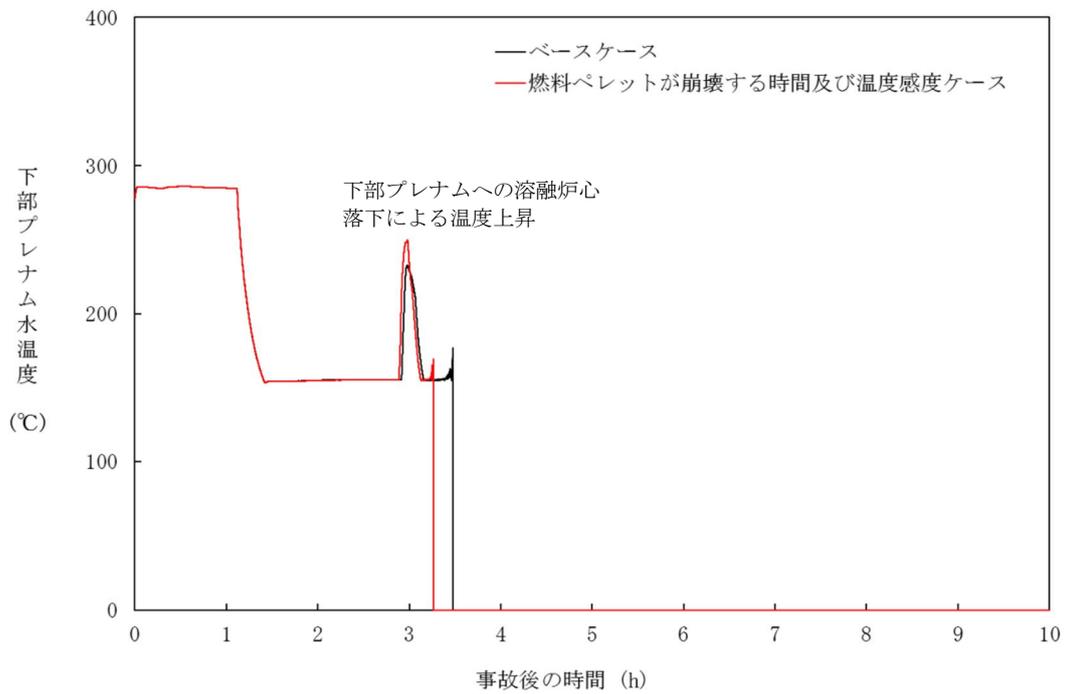


図 4-1-4 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (4)

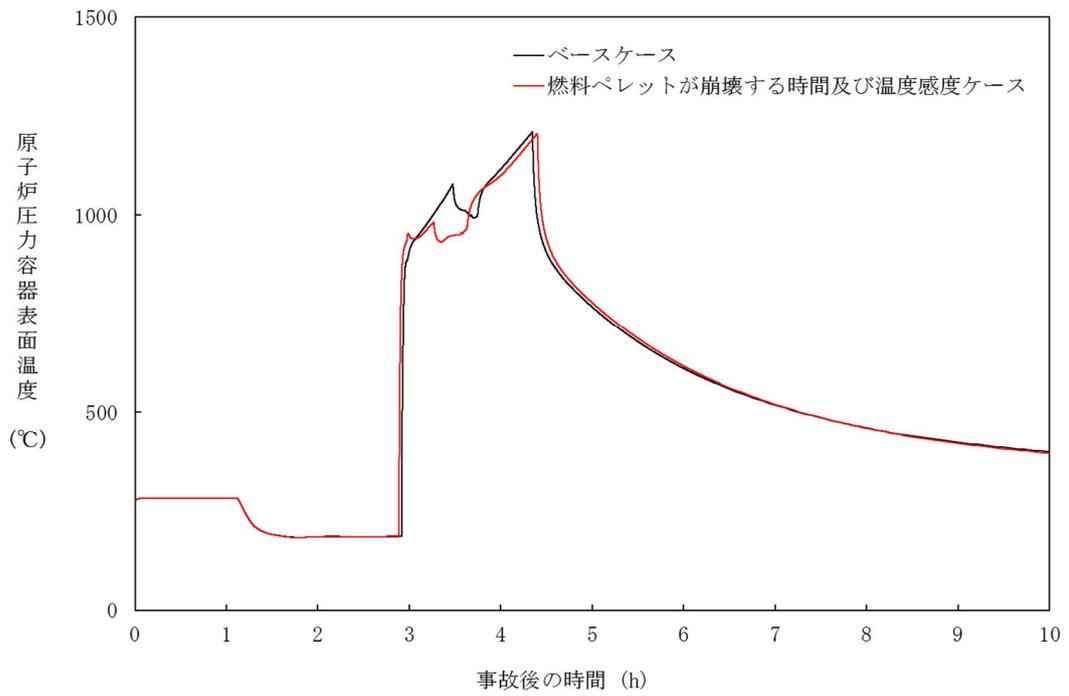


図 4-1-5 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (5)

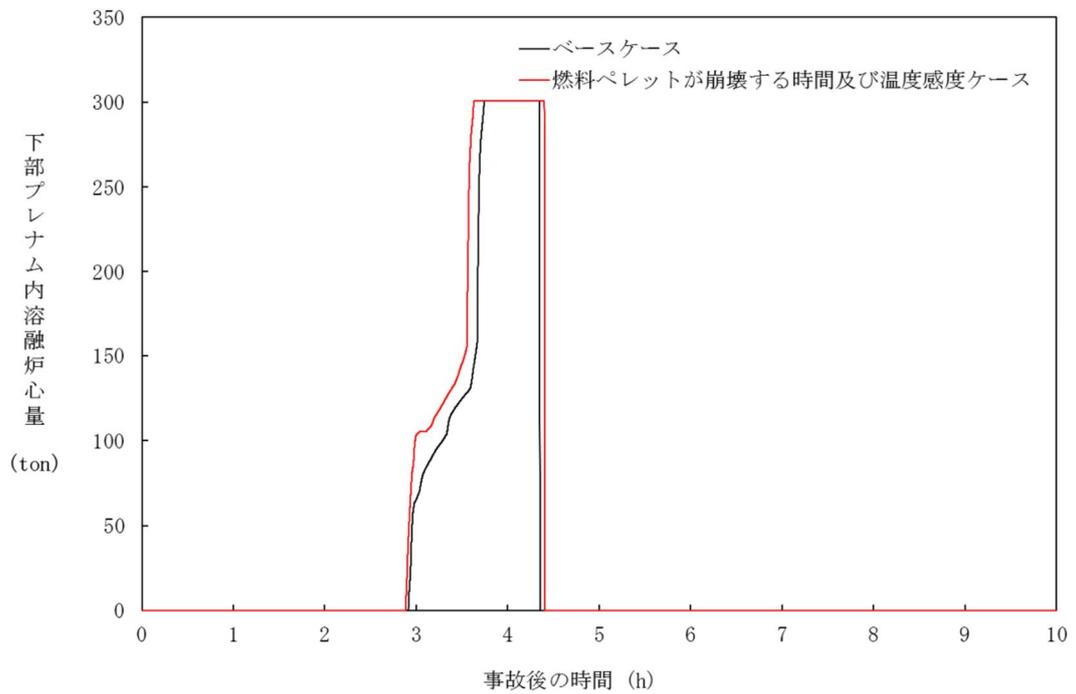


図 4-1-6 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (6)

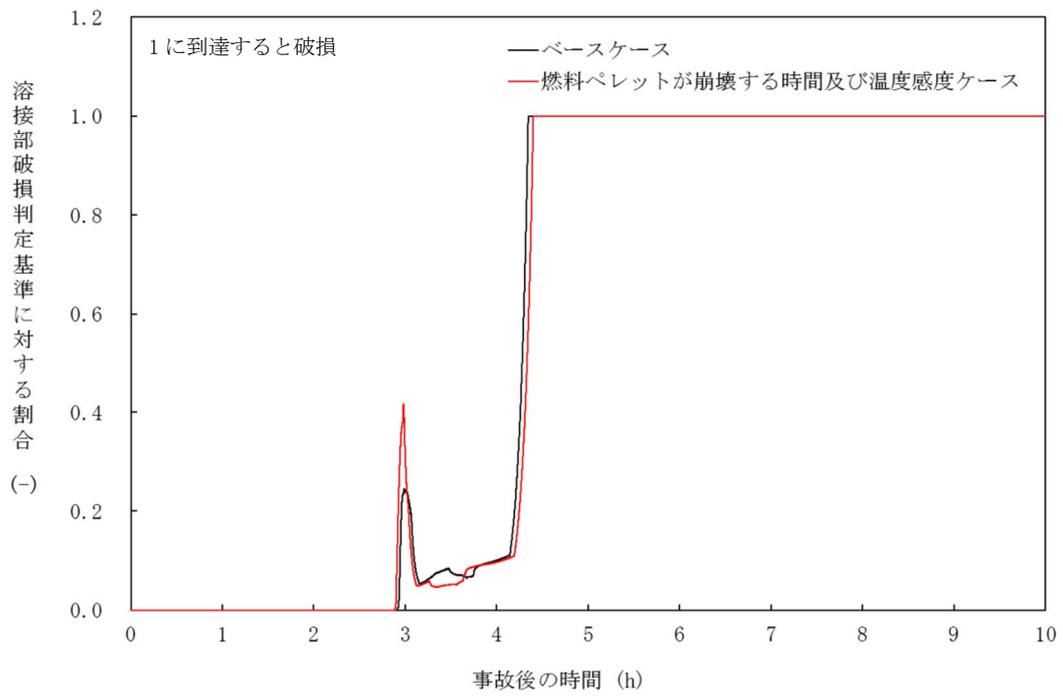


図 4-1-7 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (7)

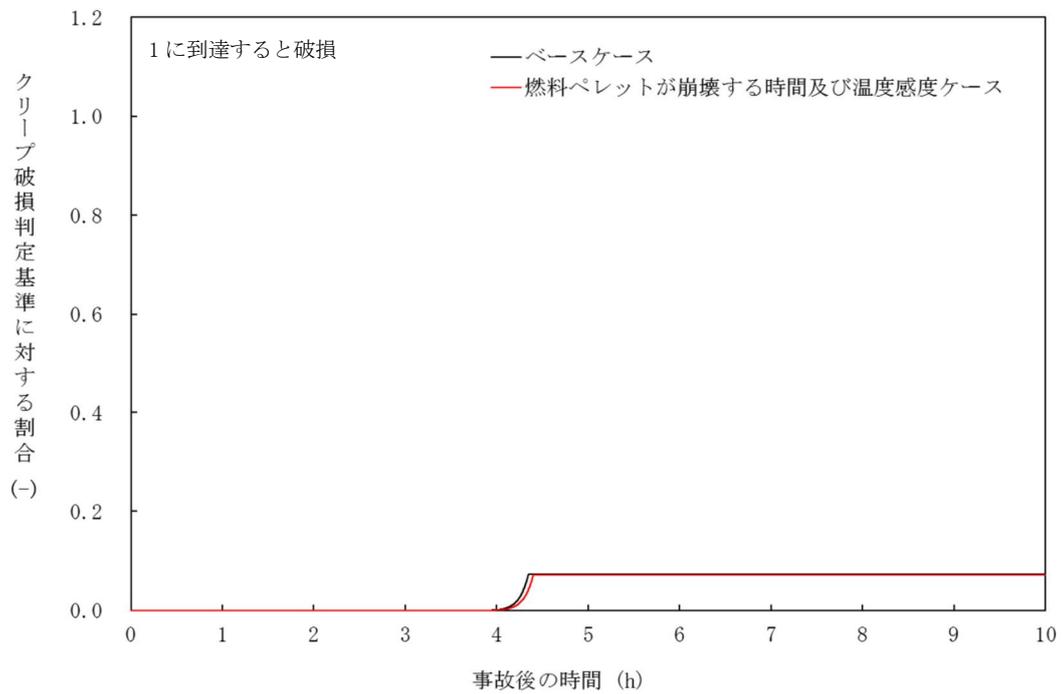


図 4-1-8 燃料ペレットが崩壊する時間及び温度の感度解析 (8)

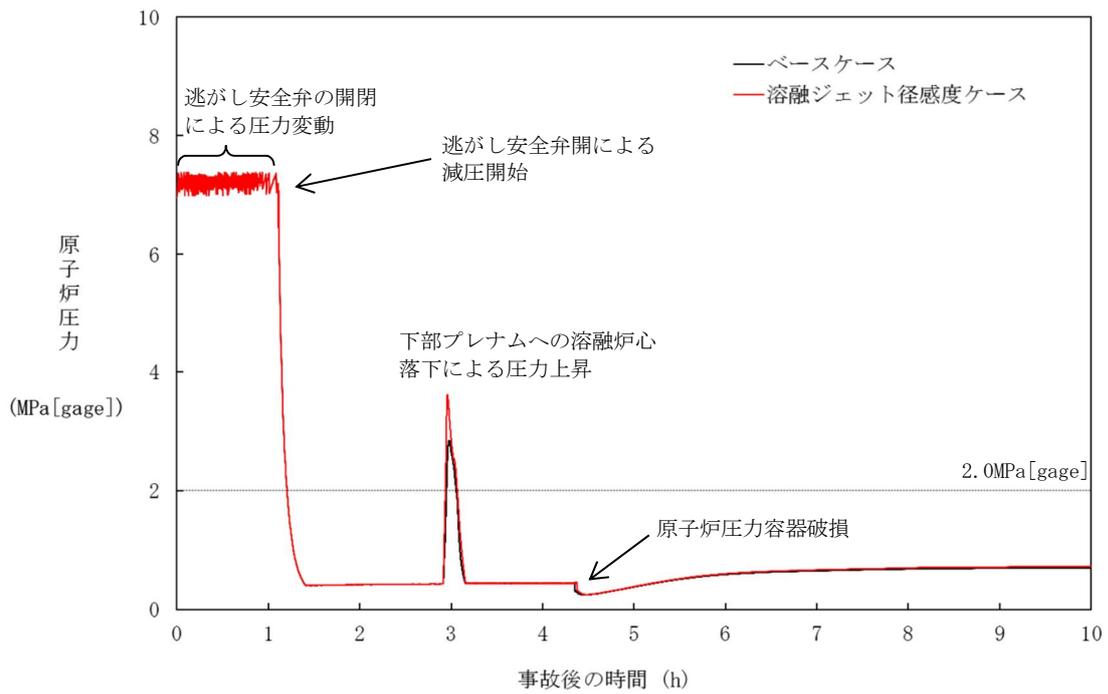


図 4-2-1 熔融ジェット径の感度解析 (1)

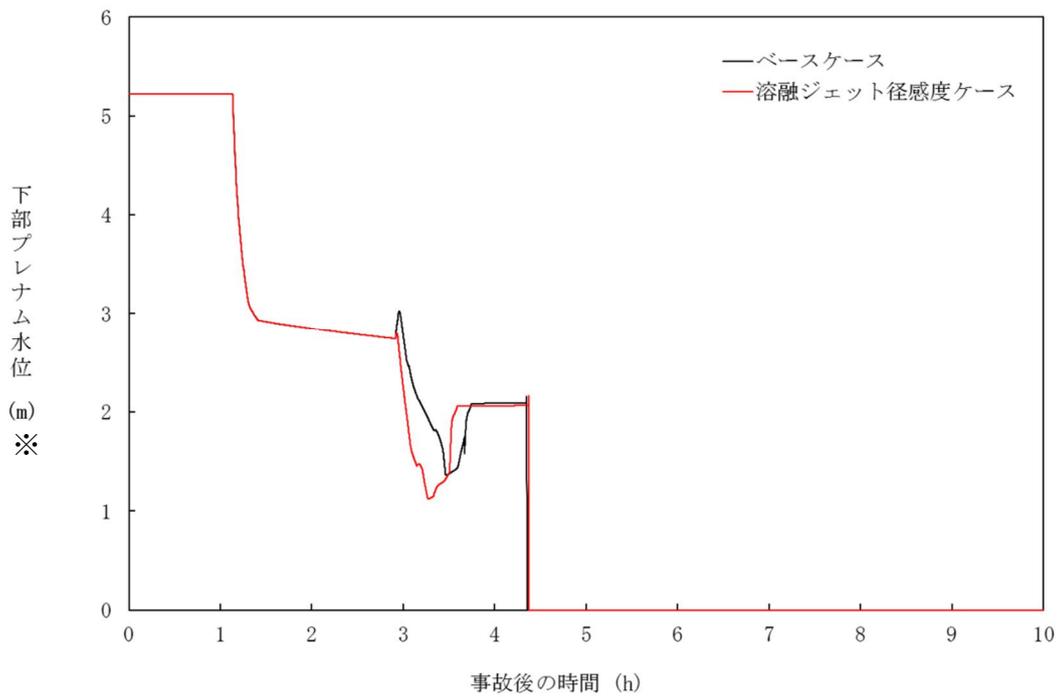


図 4-2-2 熔融ジェット径の感度解析 (2)

※リロケーション後は、下部プレナム水位に熔融デブリ高さを含む。

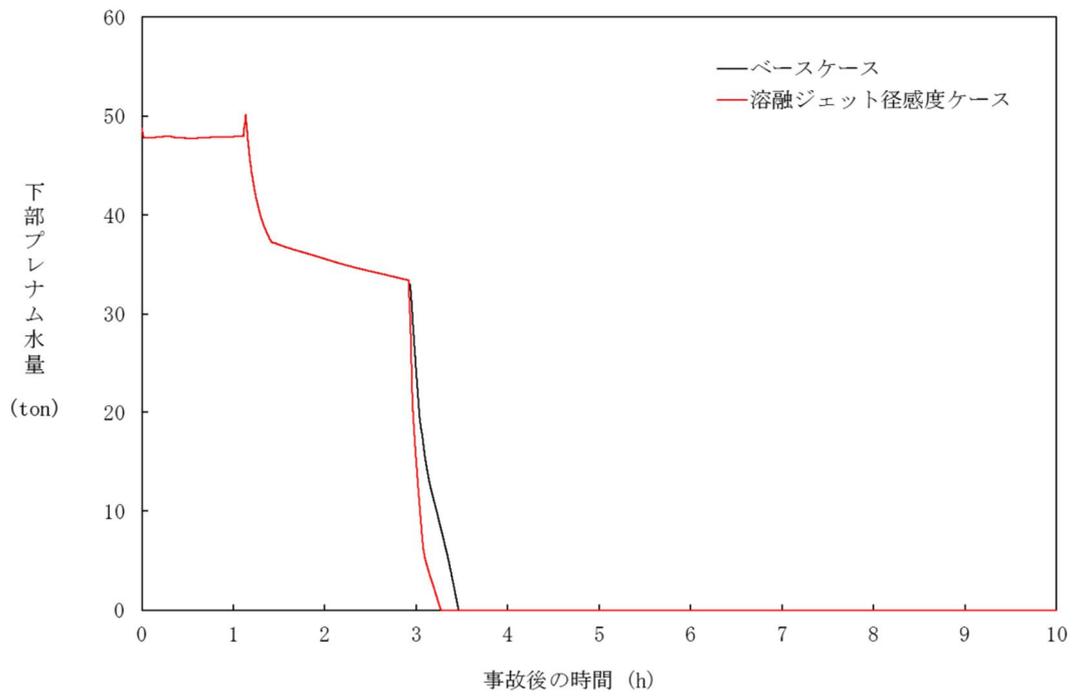


図 4-2-3 溶融ジェット径の感度解析 (3)

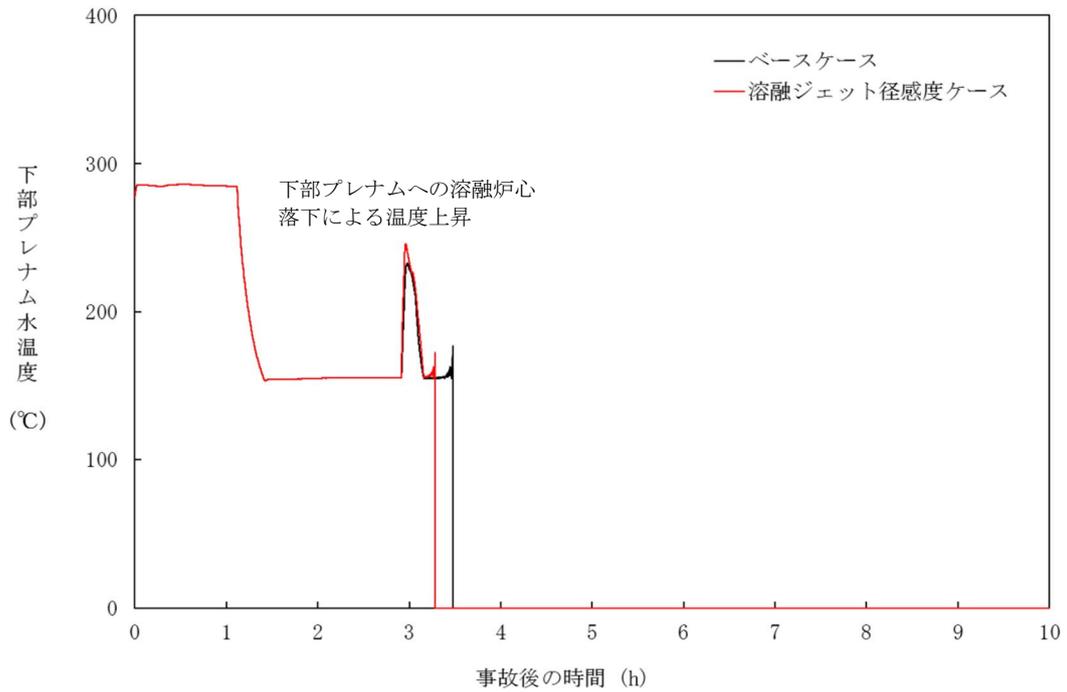


図 4-2-4 溶融ジェット径の感度解析 (4)

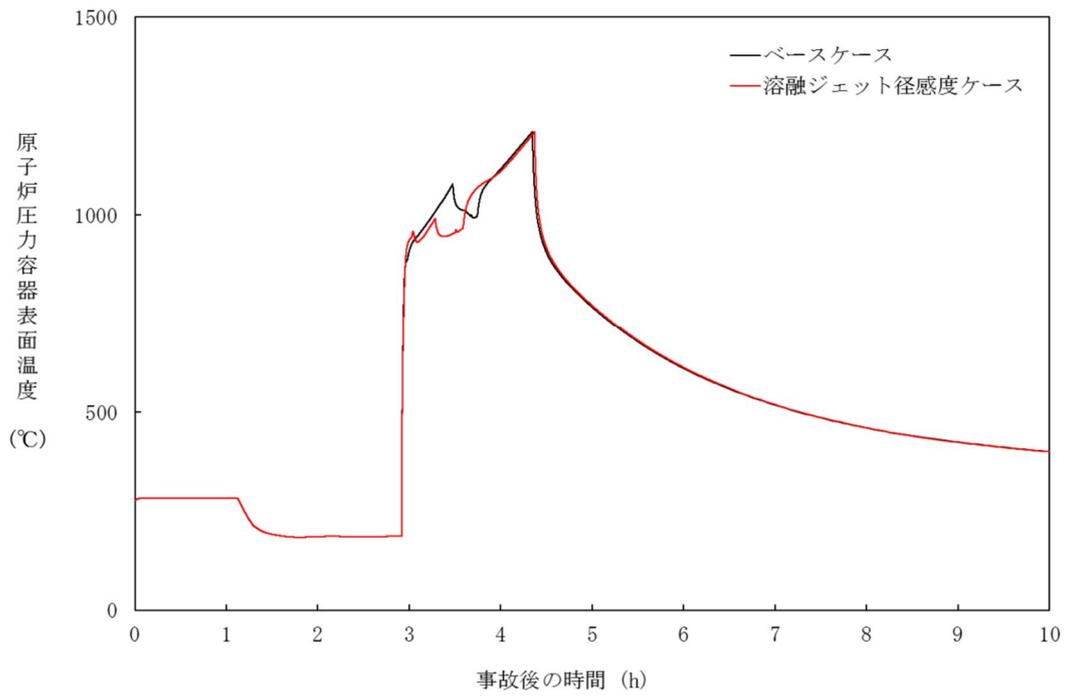


図 4-2-5 溶融ジェット径の感度解析 (5)

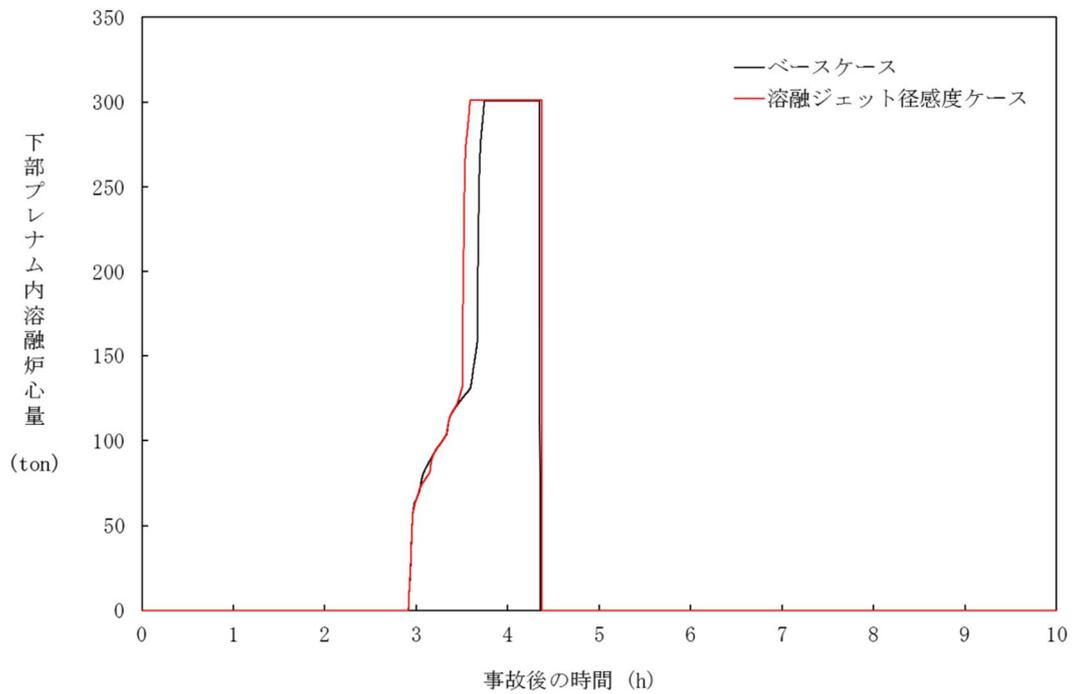


図 4-2-6 溶融ジェット径の感度解析 (6)

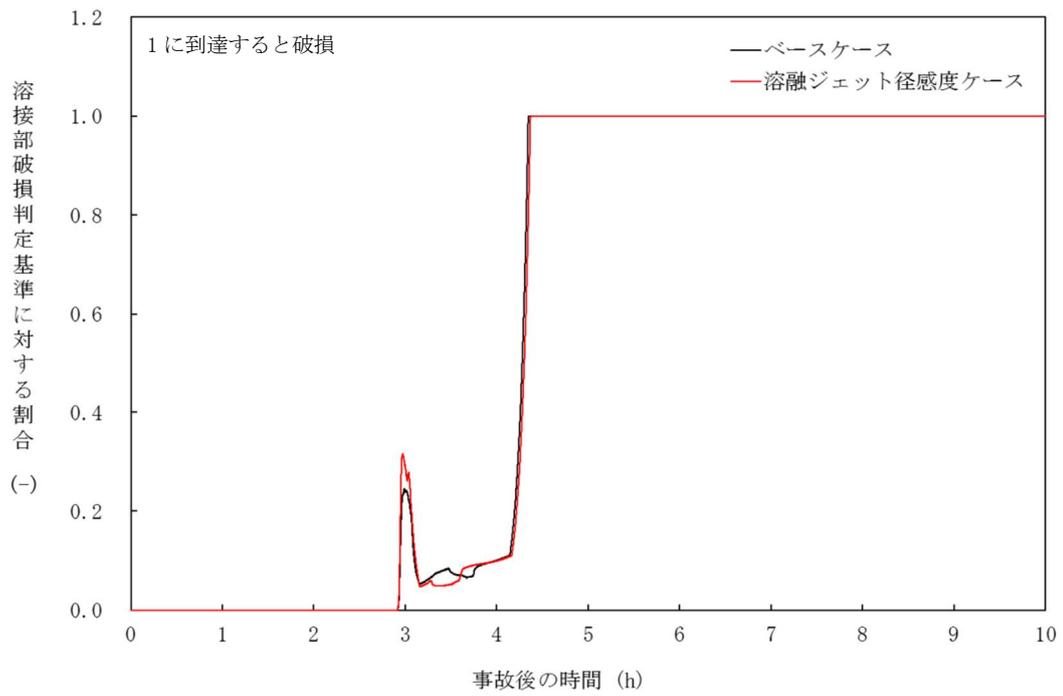


図 4-2-7 溶融ジェット径の感度解析 (7)

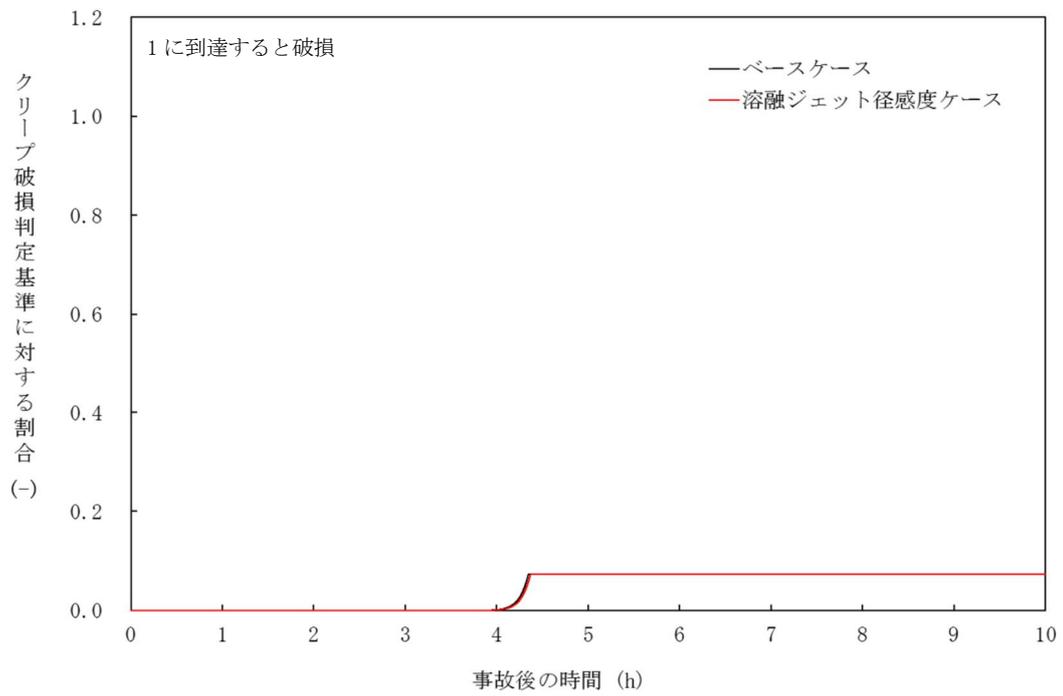


図 4-2-8 溶融ジェット径の感度解析 (8)

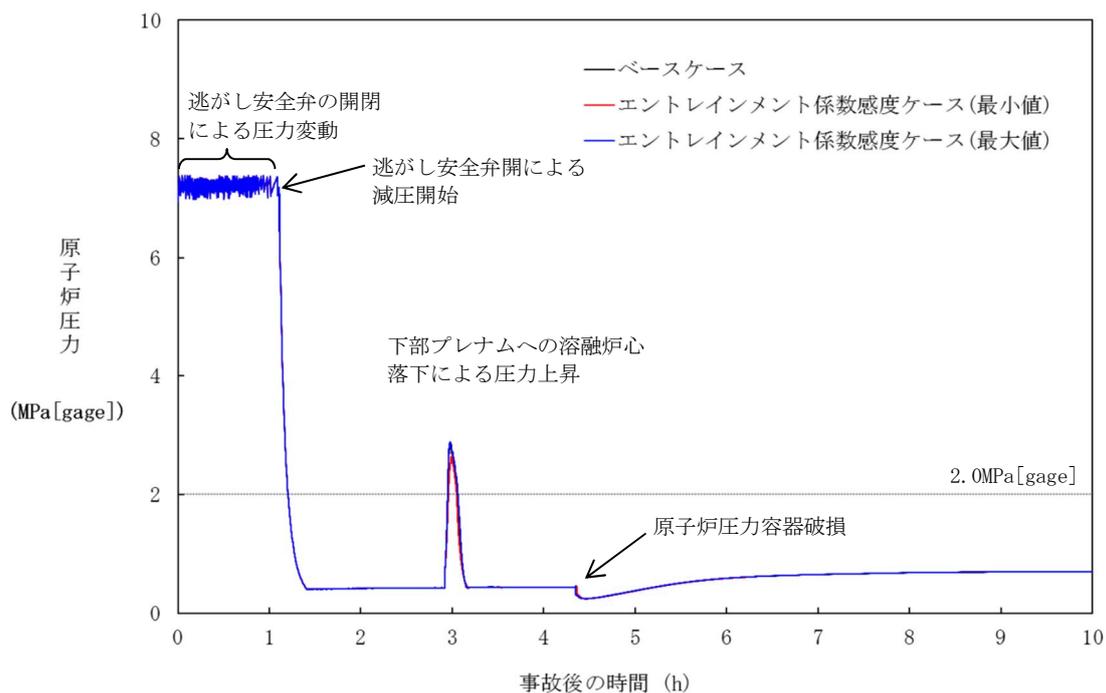


図 4-3-1 エントレインメント係数の感度解析 (1)

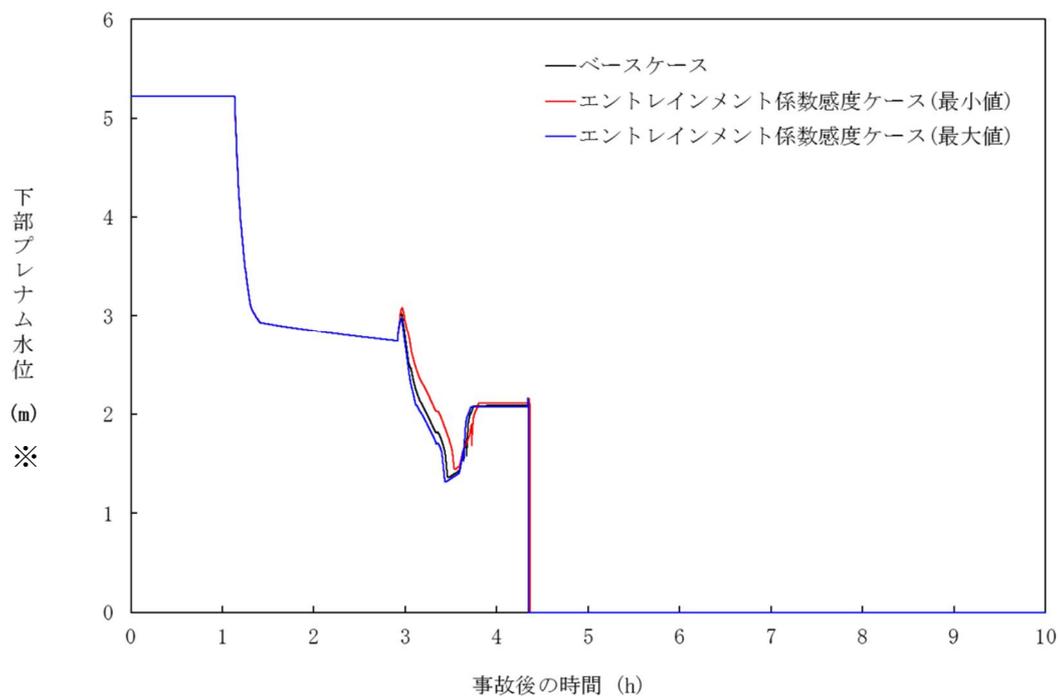


図 4-3-2 エントレインメント係数の感度解析 (2)
 ※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

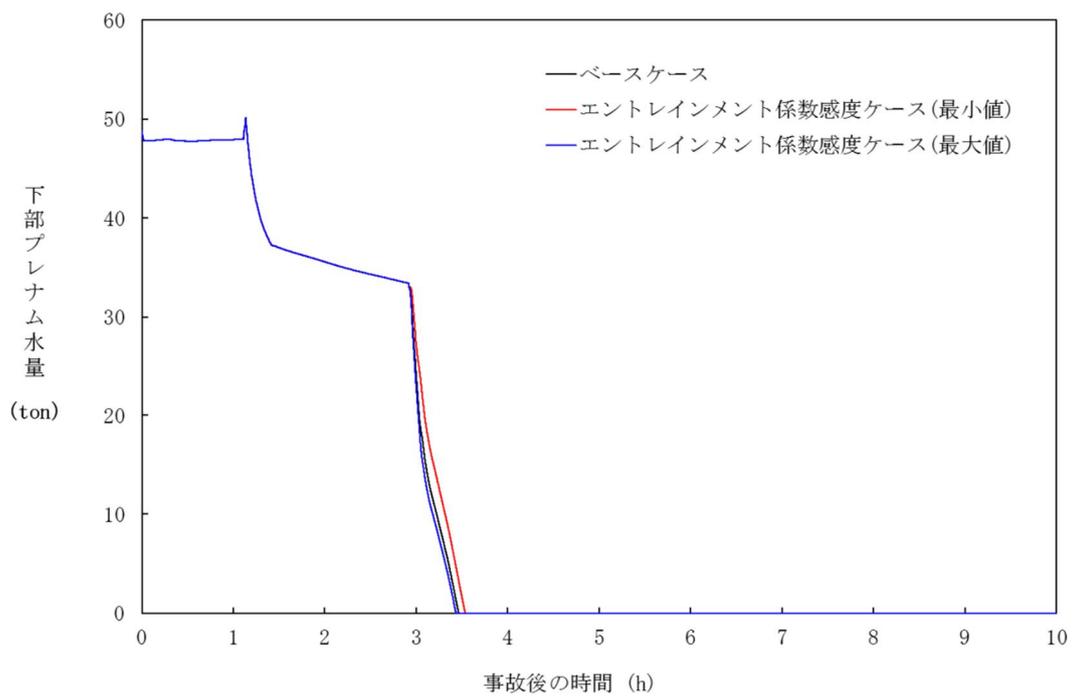


図 4-3-3 エントレインメント係数の感度解析 (3)

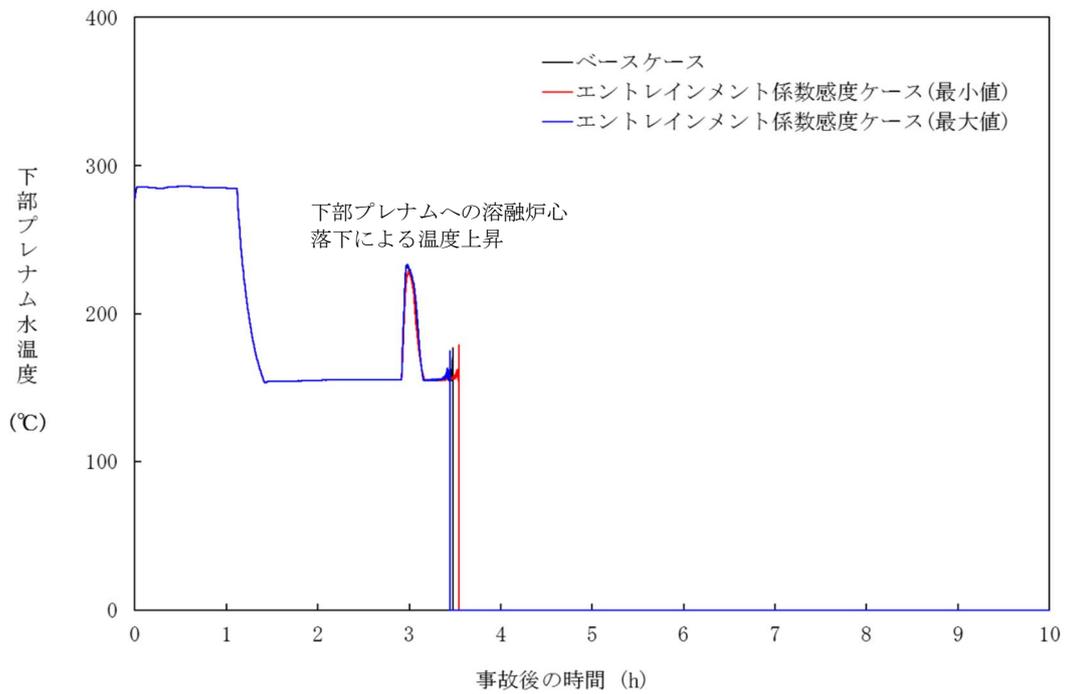


図 4-3-4 エントレインメント係数の感度解析 (4)

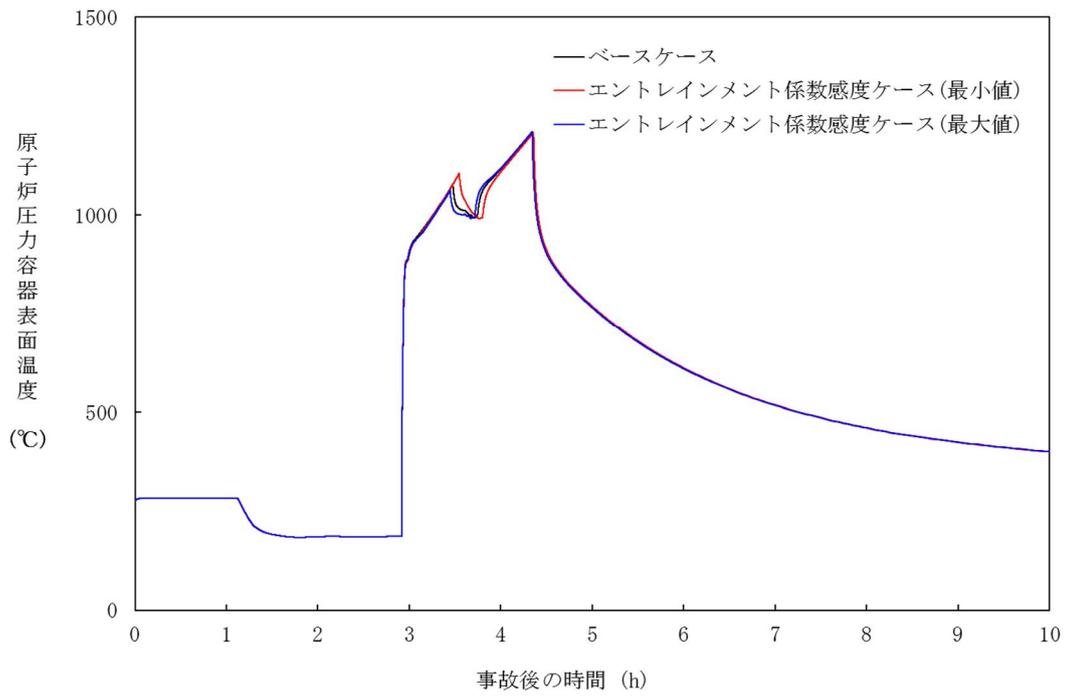


図 4-3-5 エントレインメント係数の感度解析 (5)

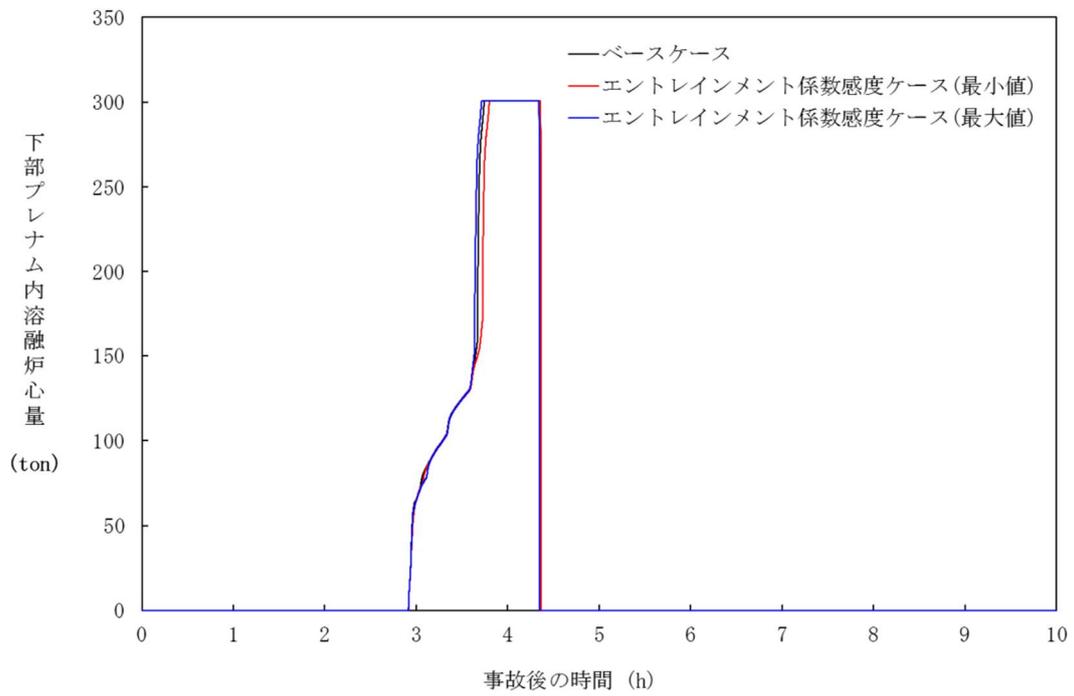


図 4-3-6 エントレインメント係数の感度解析 (6)

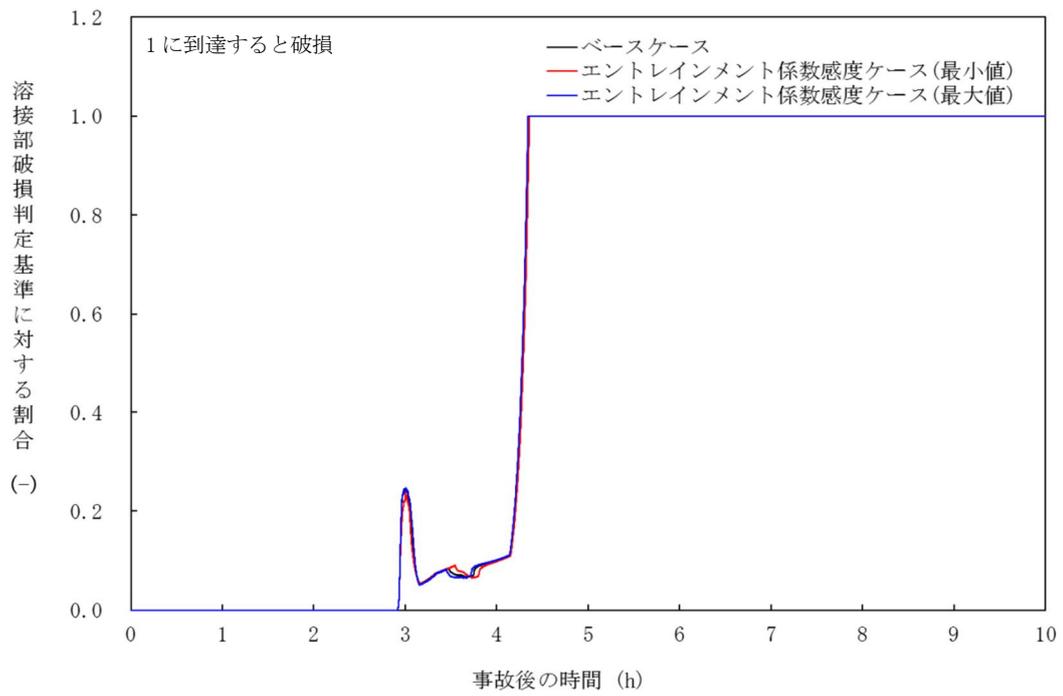


図 4-3-7 エントレインメント係数の感度解析 (7)

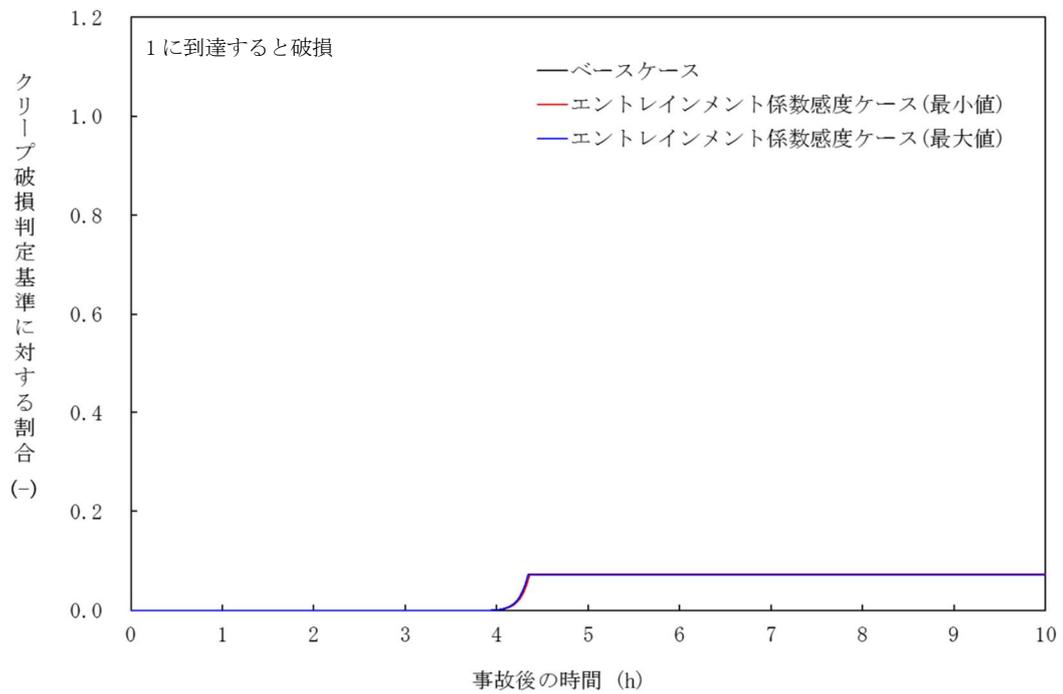


図 4-3-8 エントレインメント係数の感度解析 (8)

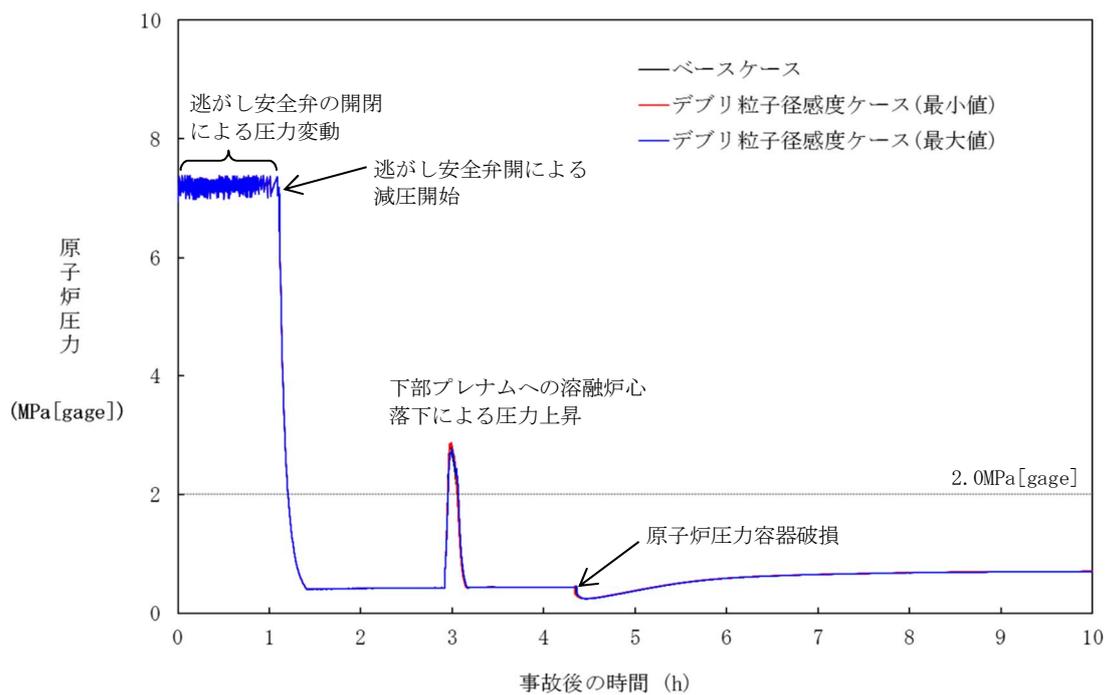


図 4-4-1 デブリ粒子径の感度解析 (1)

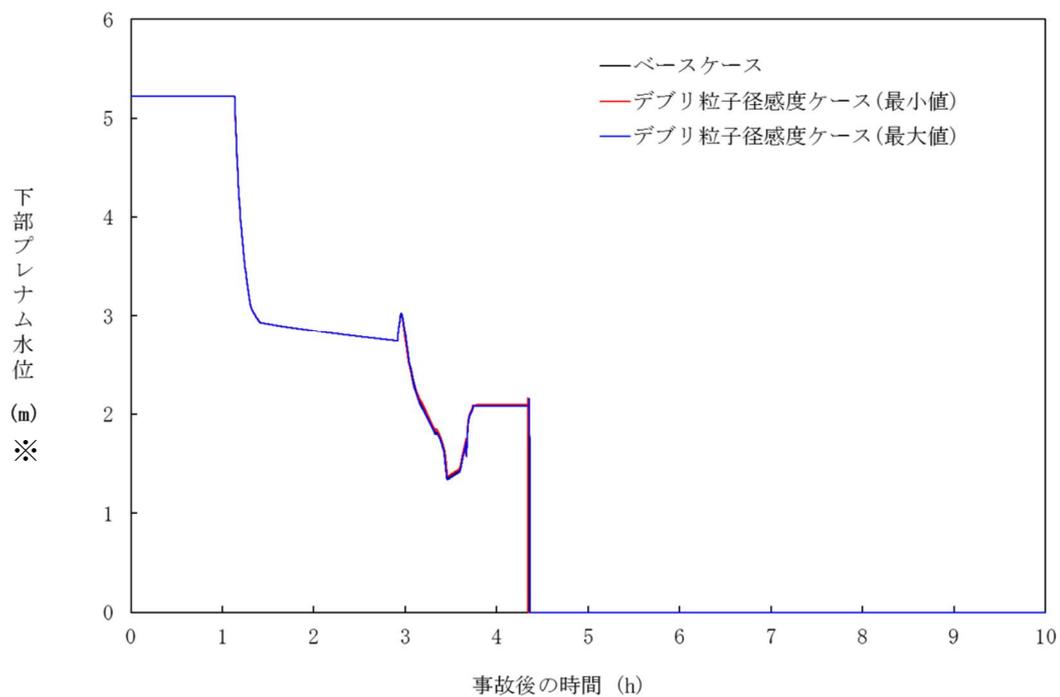


図 4-4-2 デブリ粒子径の感度解析 (2)

※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

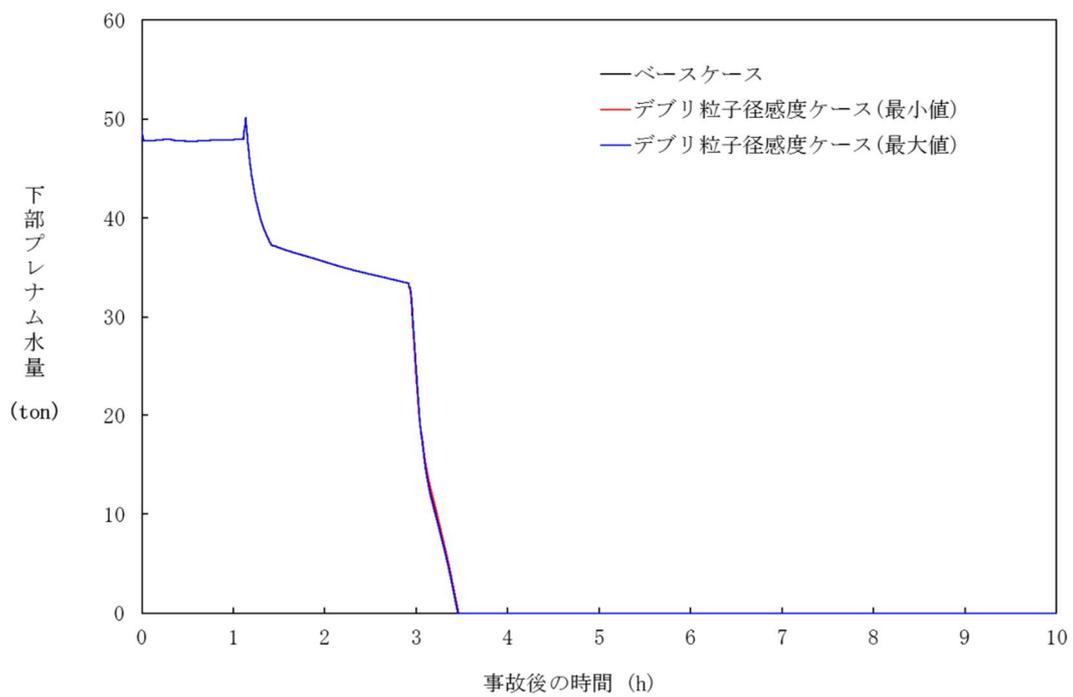


図 4-4-3 デブリ粒子径の感度解析 (3)

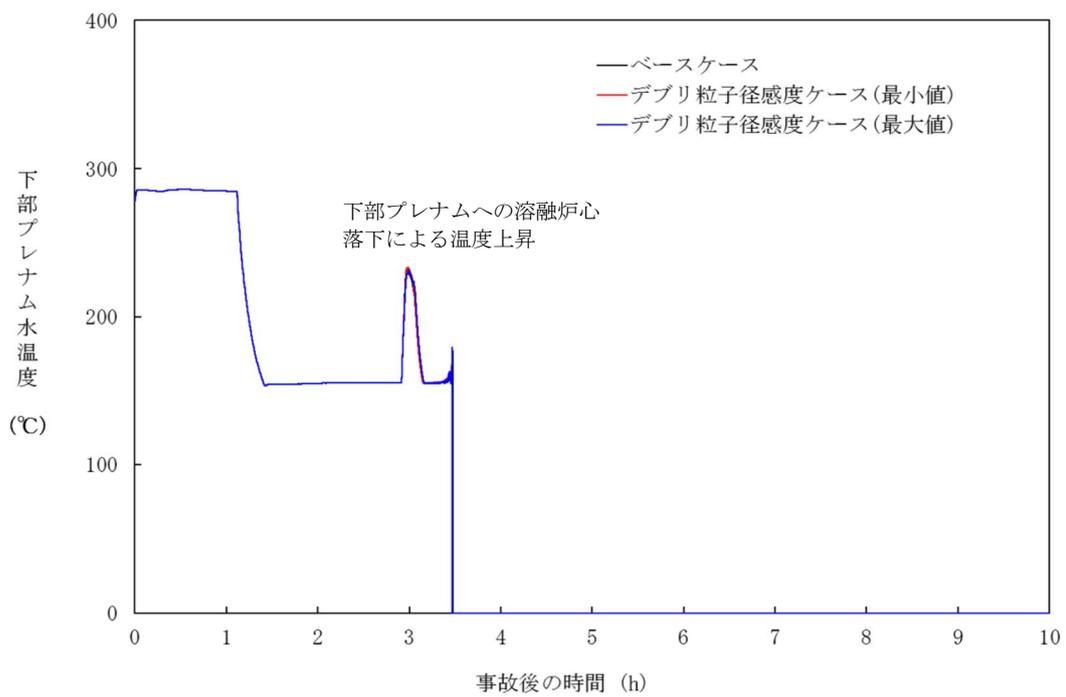


図 4-4-4 デブリ粒子径の感度解析 (4)

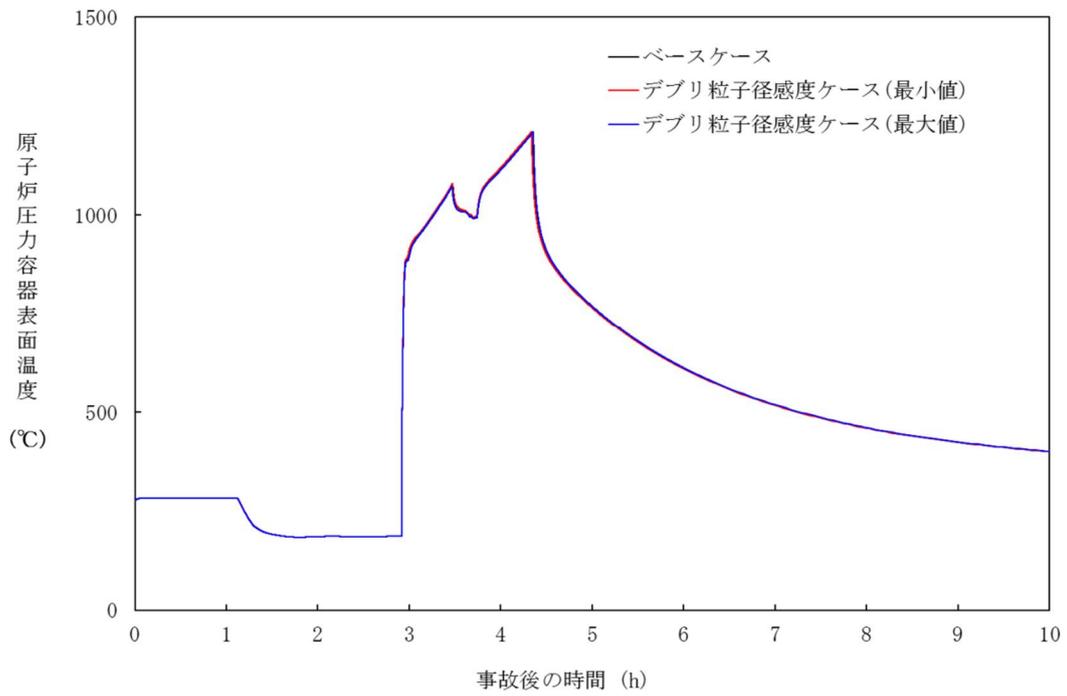


図 4-4-5 デブリ粒子径の感度解析 (5)

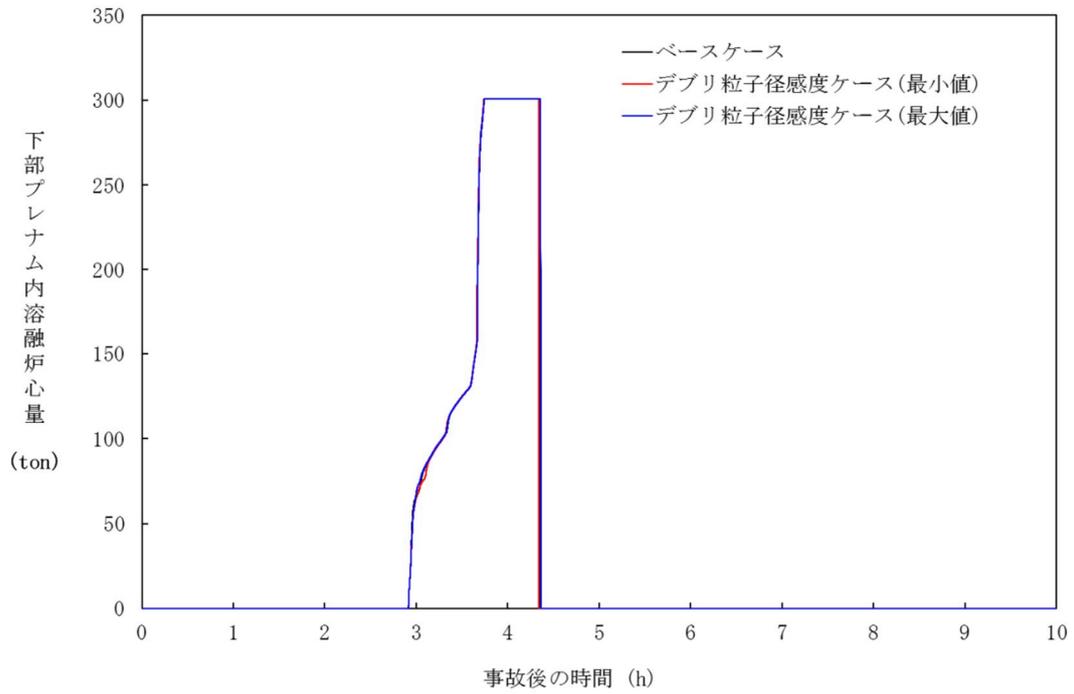


図 4-4-6 デブリ粒子径の感度解析 (6)

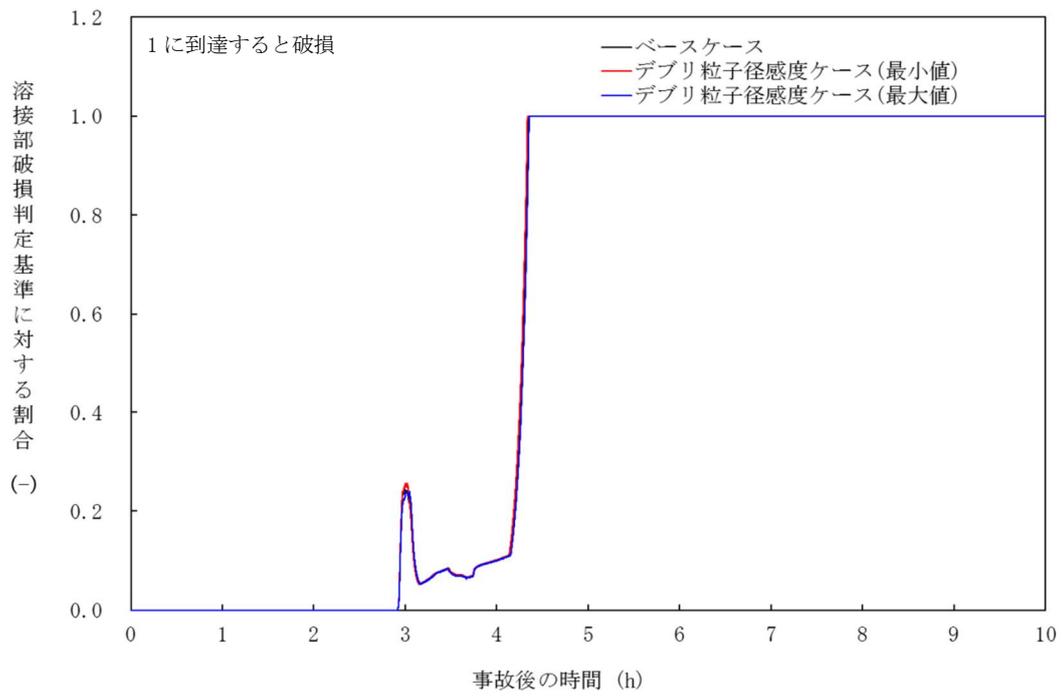


図 4-4-7 デブリ粒子径の感度解析 (7)

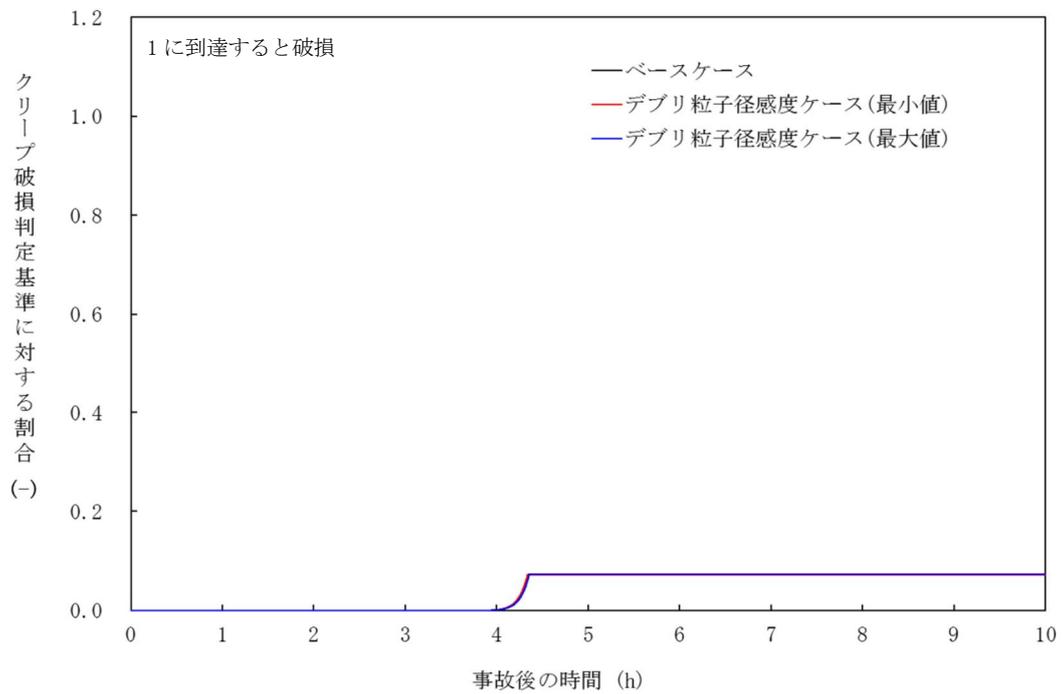


図 4-4-8 デブリ粒子径の感度解析 (8)

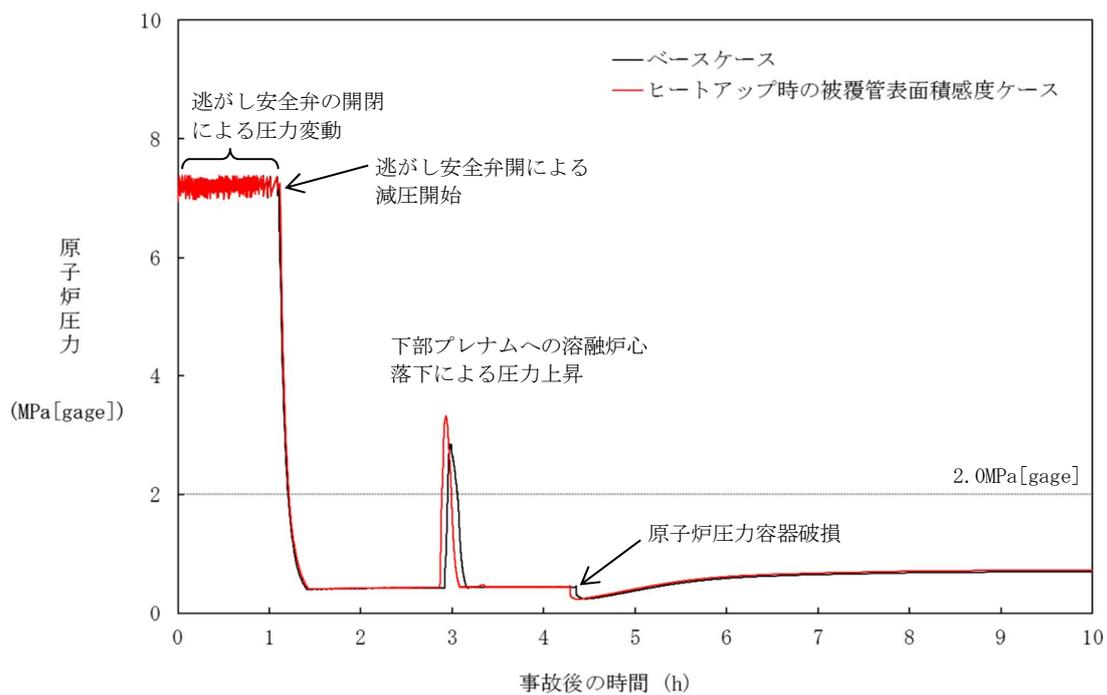


図 4-5-1 ジルコニウム-水反応速度の感度解析 (1)

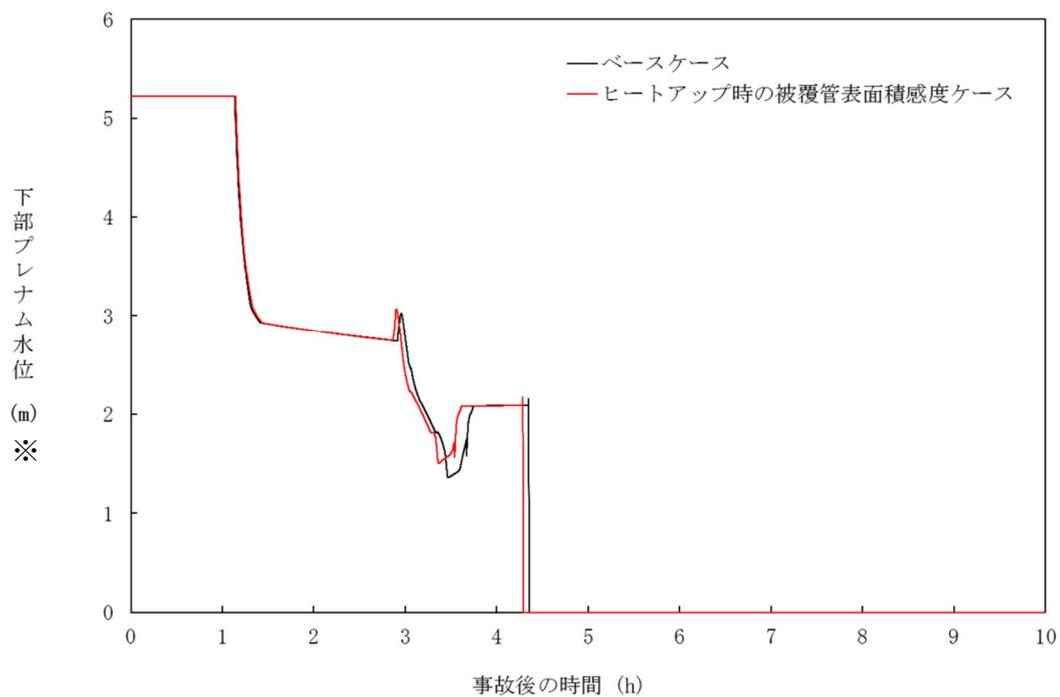


図 4-5-2 ジルコニウム-水反応速度の感度解析 (2)
 ※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

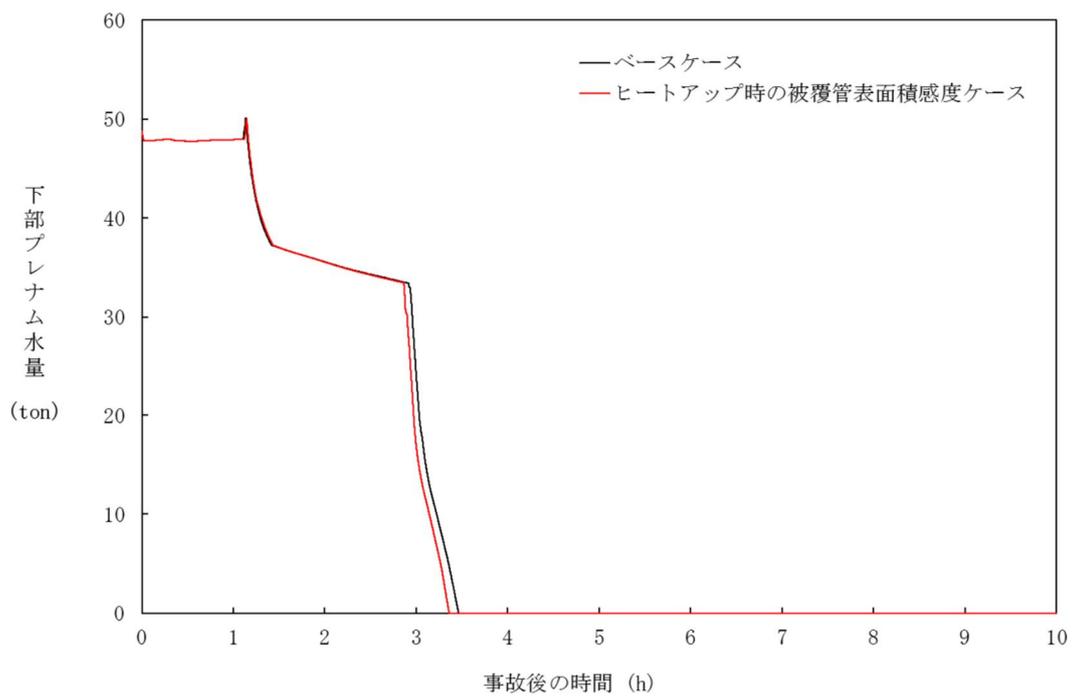


図 4-5-3 ジルコニウム-水反応速度の感度解析 (3)

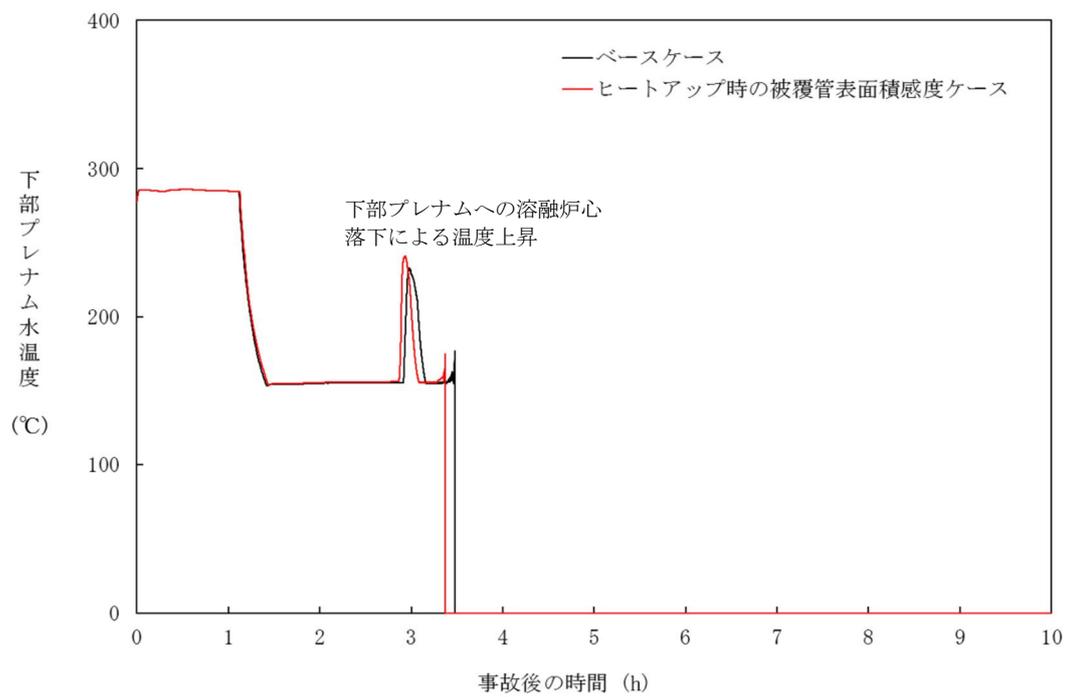


図 4-5-4 ジルコニウム-水反応速度の感度解析 (4)

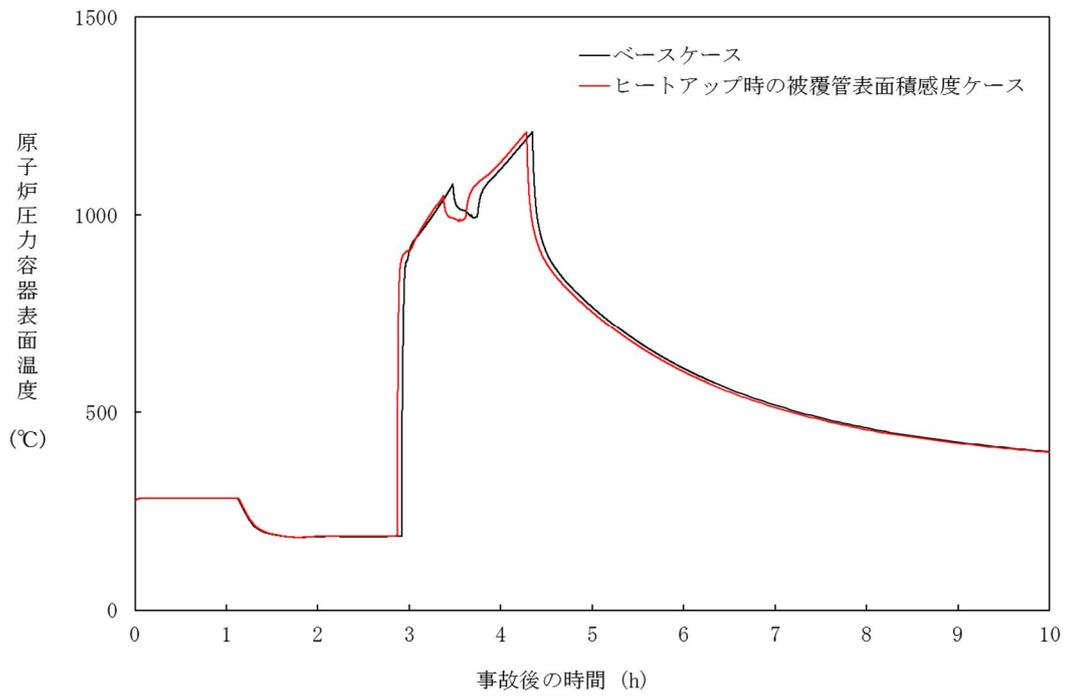


図 4-5-5 ジルコニウム-水反応速度の感度解析 (5)

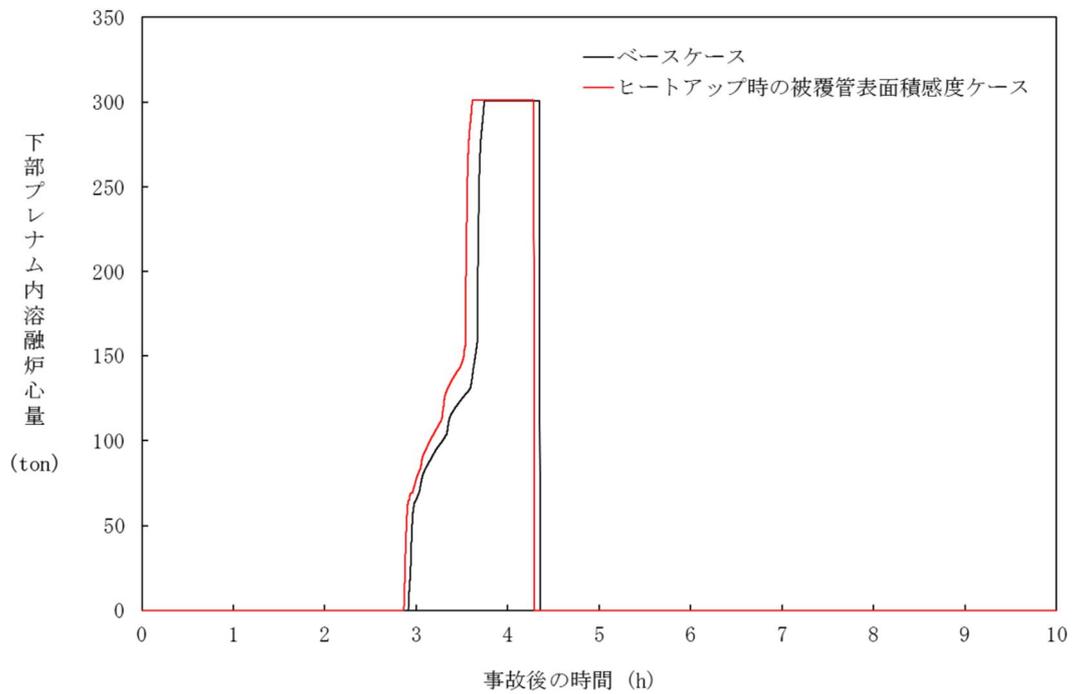


図 4-5-6 ジルコニウム-水反応速度の感度解析 (6)

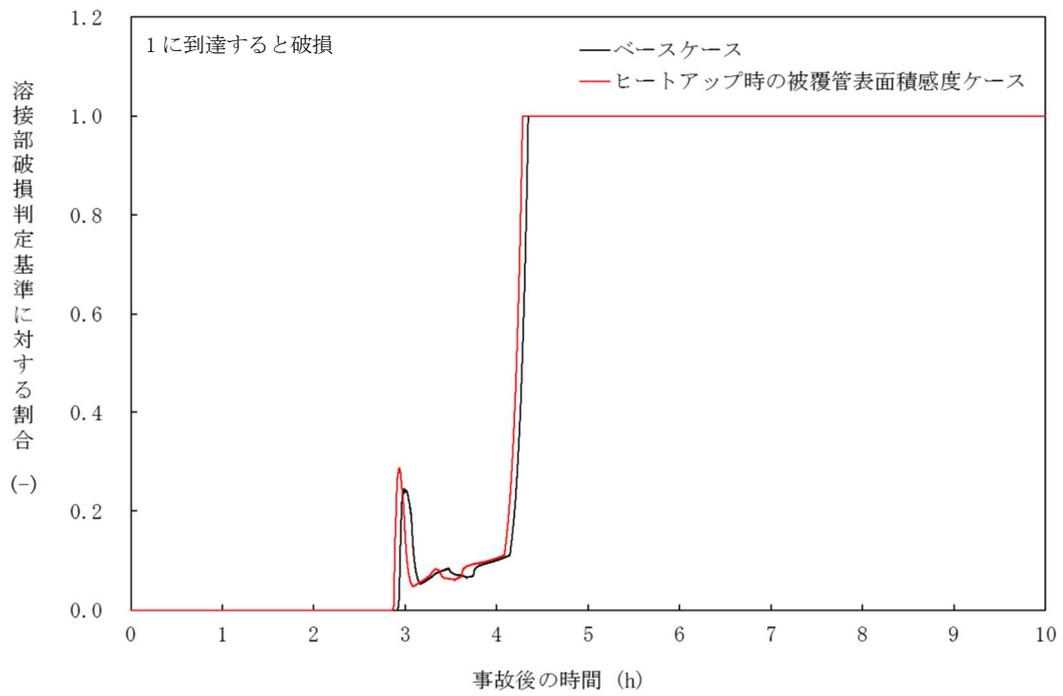


図 4-5-7 ジルコニウム-水反応速度の感度解析 (7)

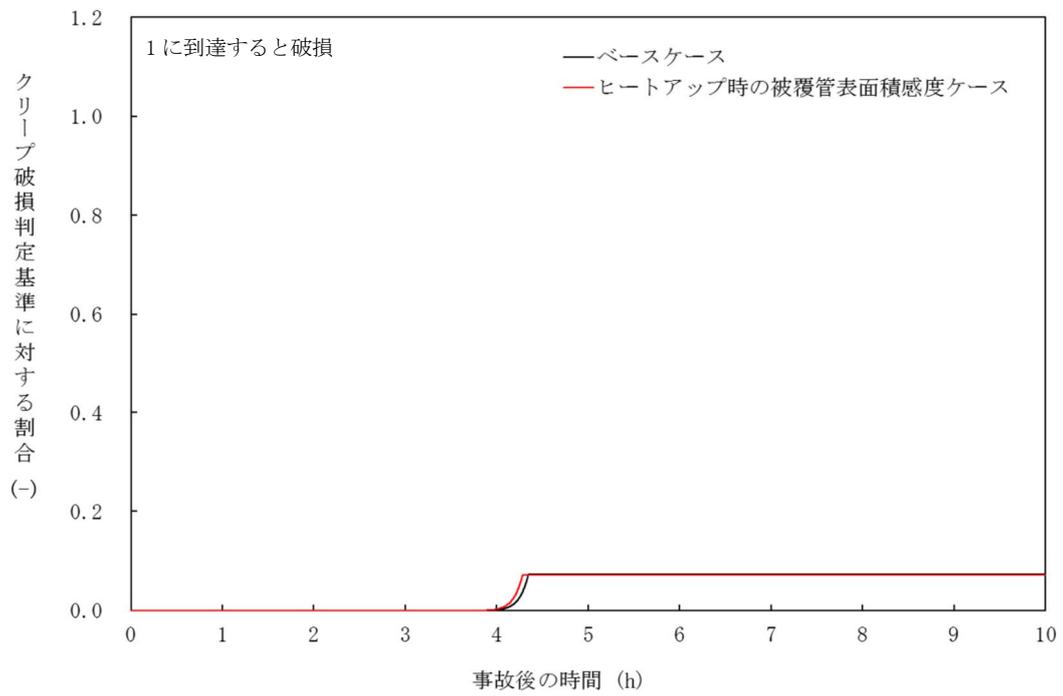


図 4-5-8 ジルコニウム-水反応速度の感度解析 (8)

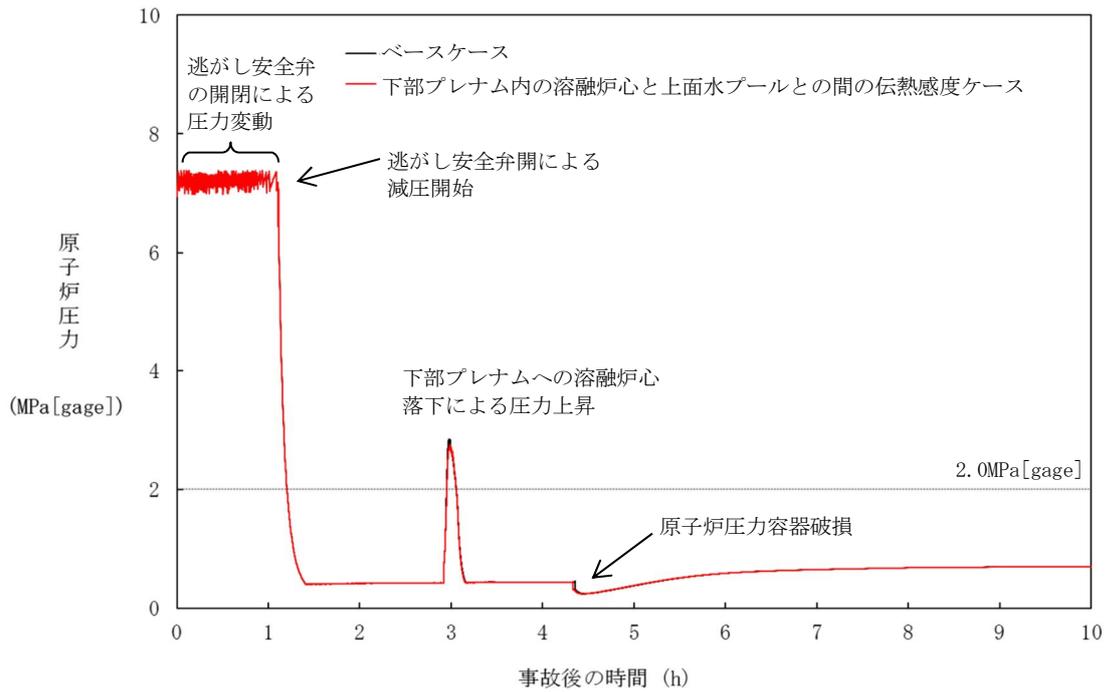


図 4-6-1 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (1)

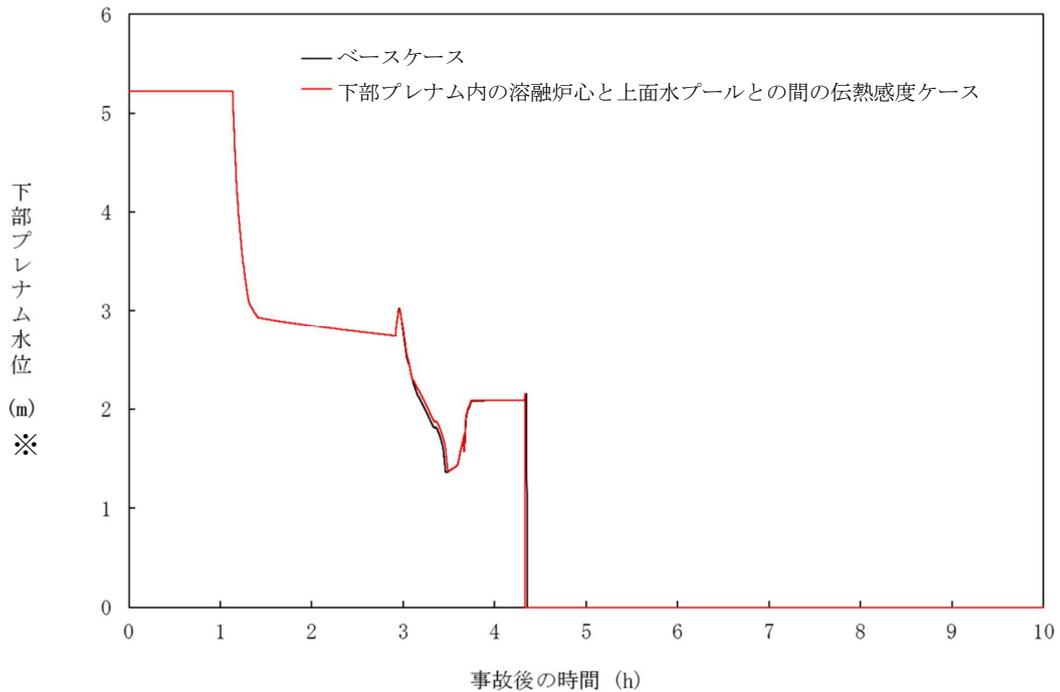


図 4-6-2 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (2)
 ※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

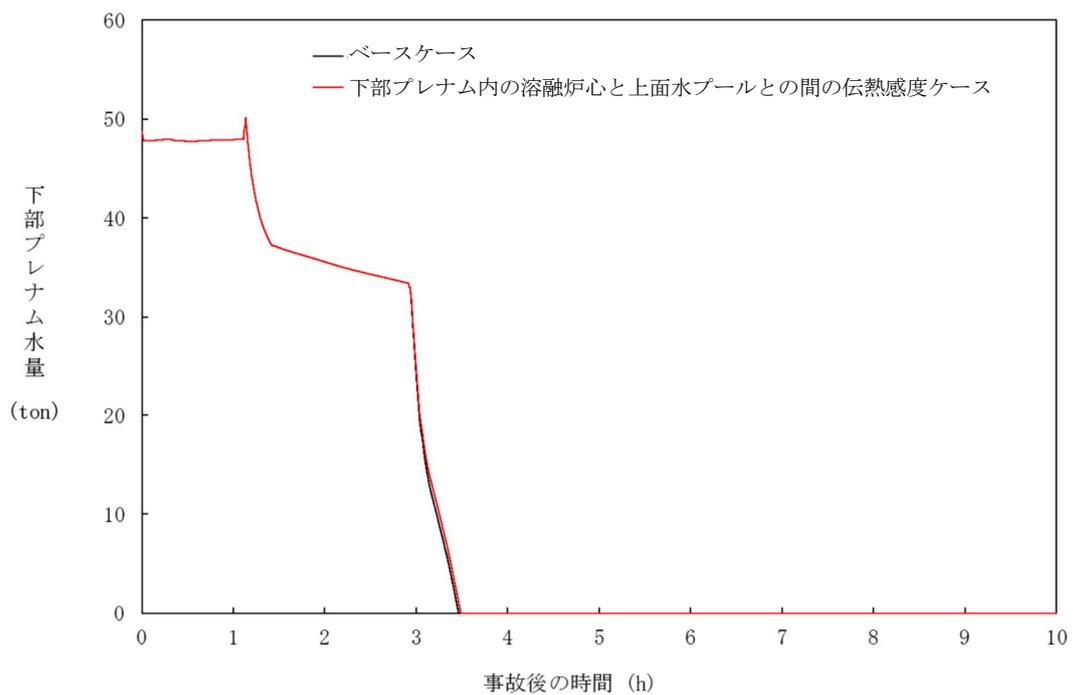


図 4-6-3 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (3)

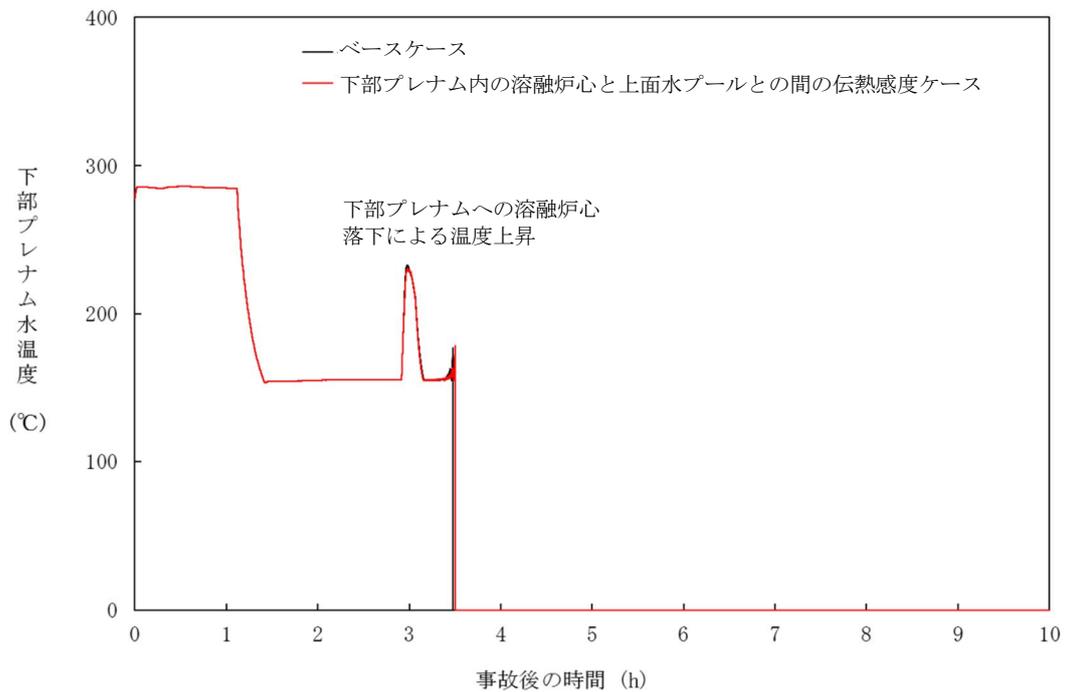


図 4-6-4 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (4)

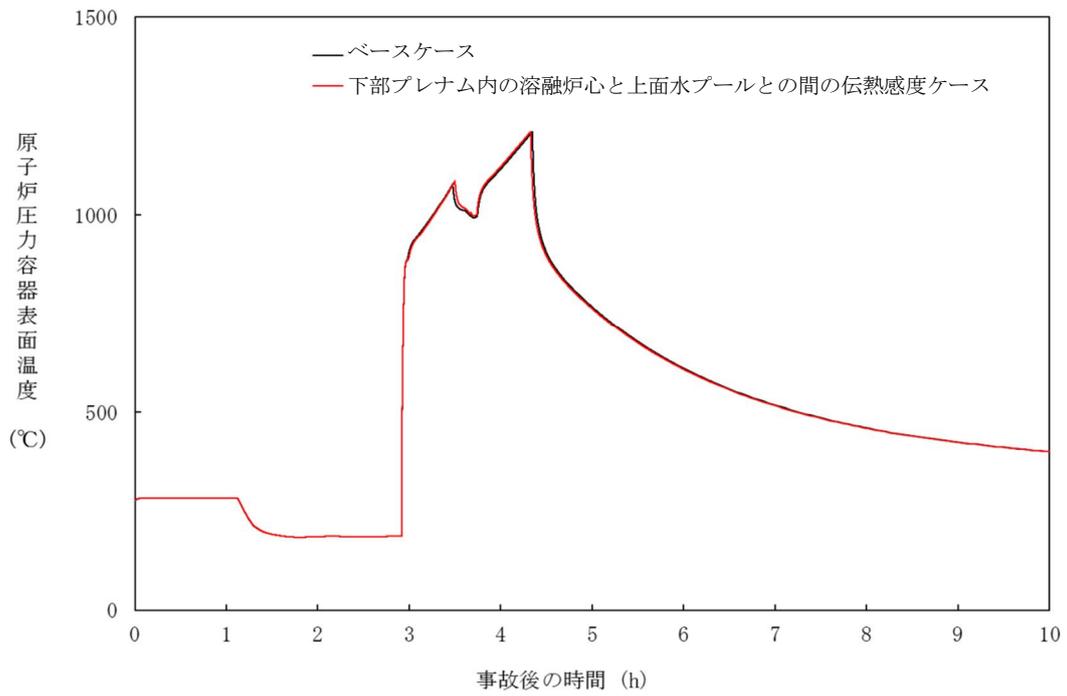


図 4-6-5 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (5)

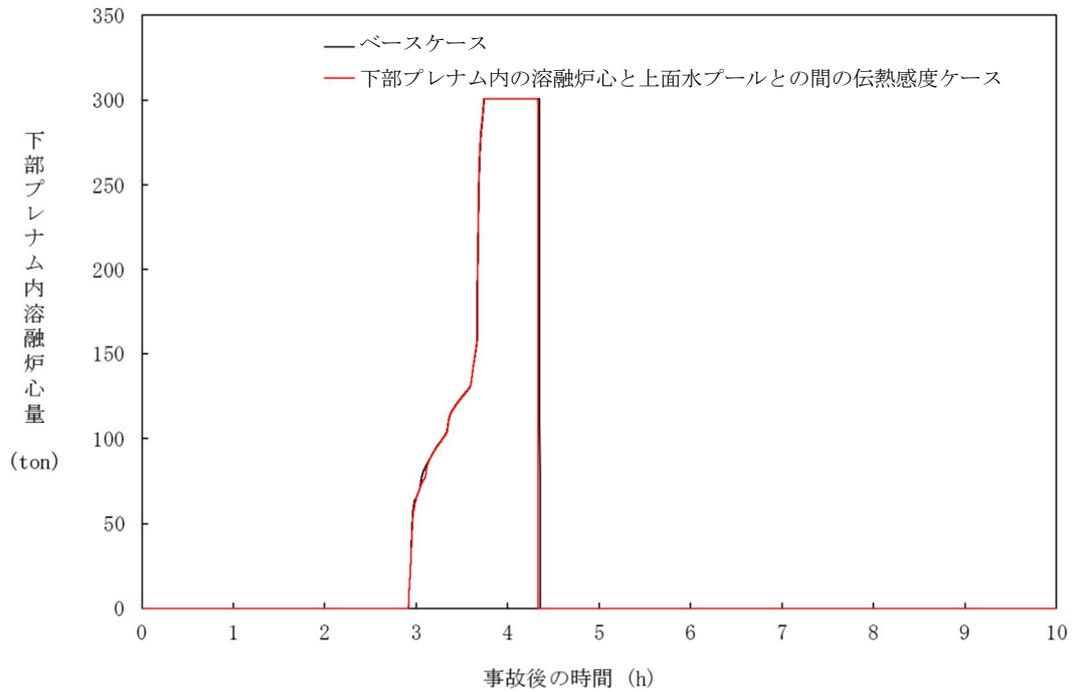


図 4-6-6 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (6)

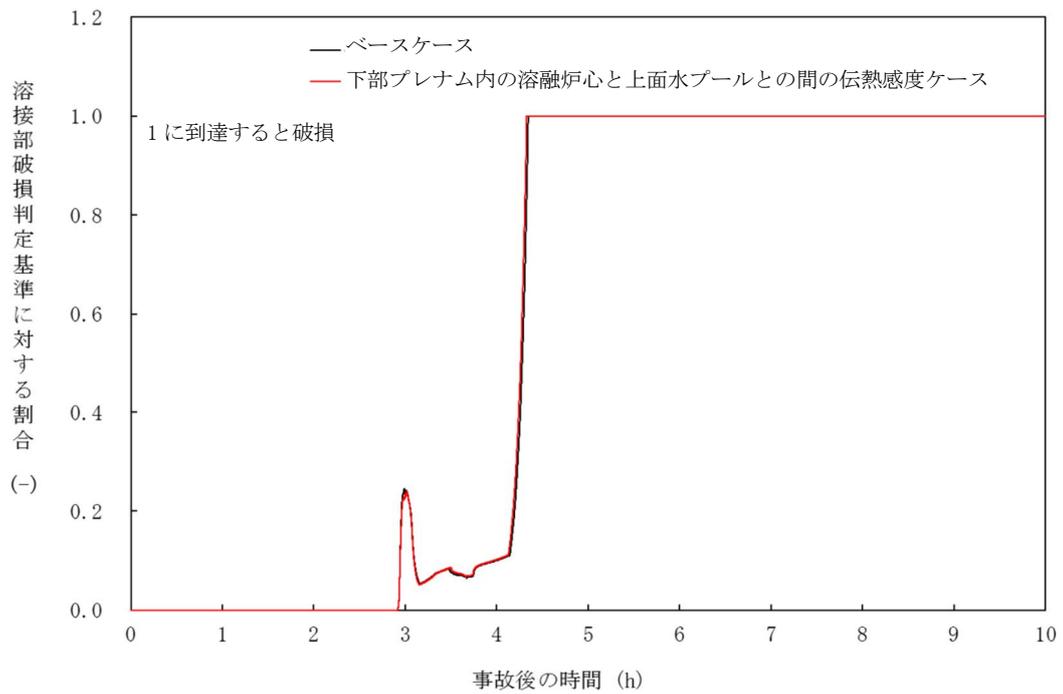


図 4-6-7 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (7)

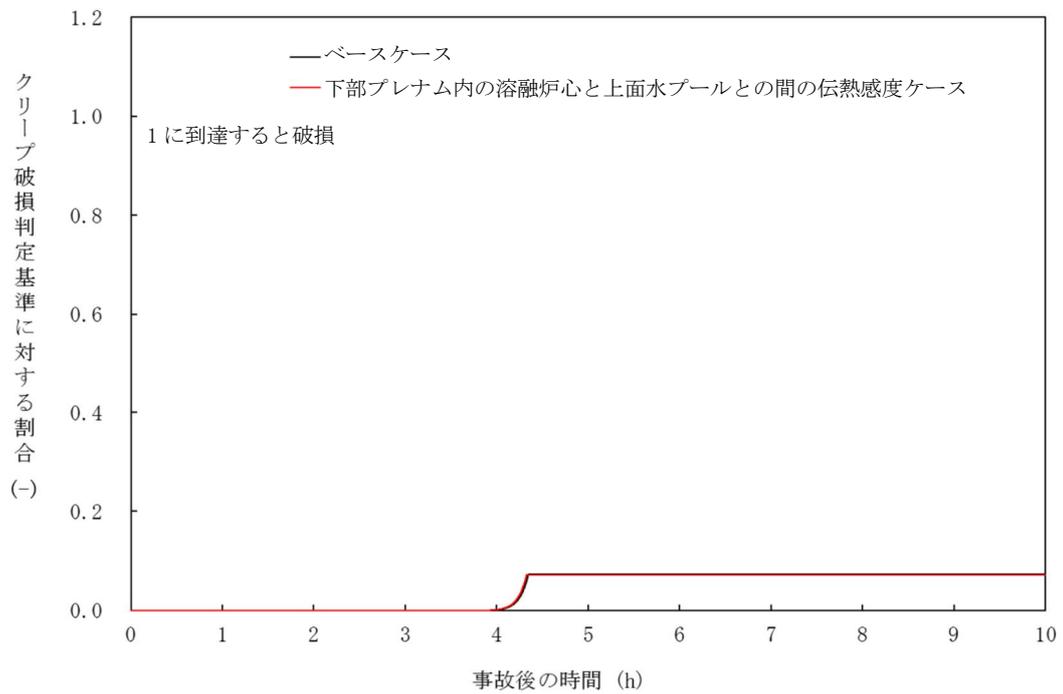


図 4-6-8 下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析 (8)

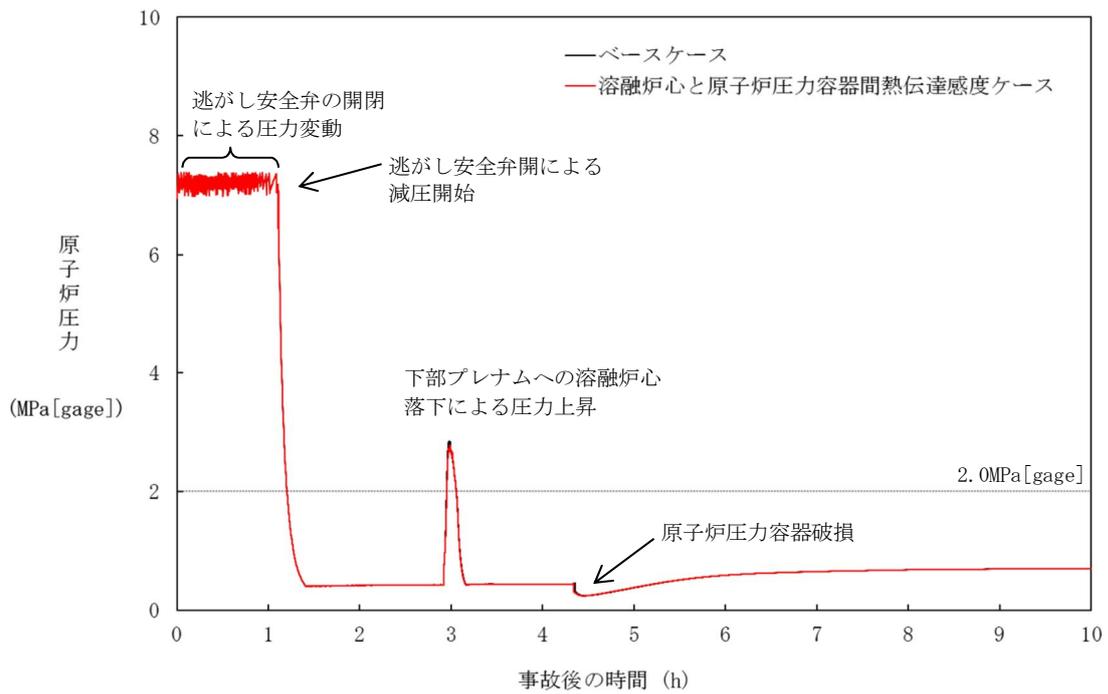


図 4-7-1 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (1)

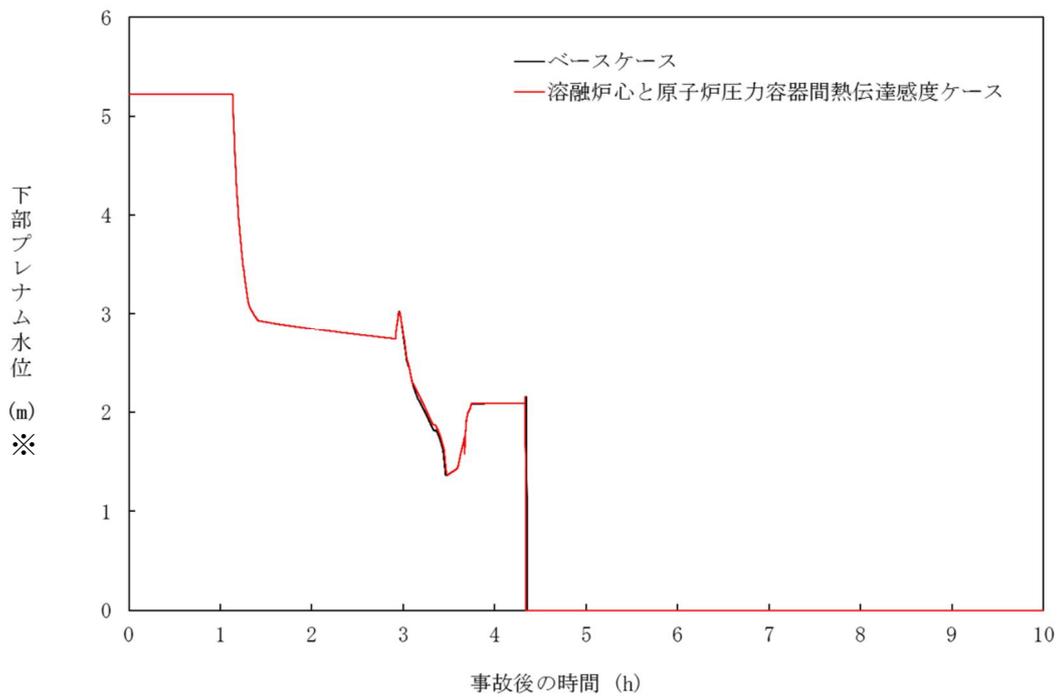


図 4-7-2 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (2)
 ※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

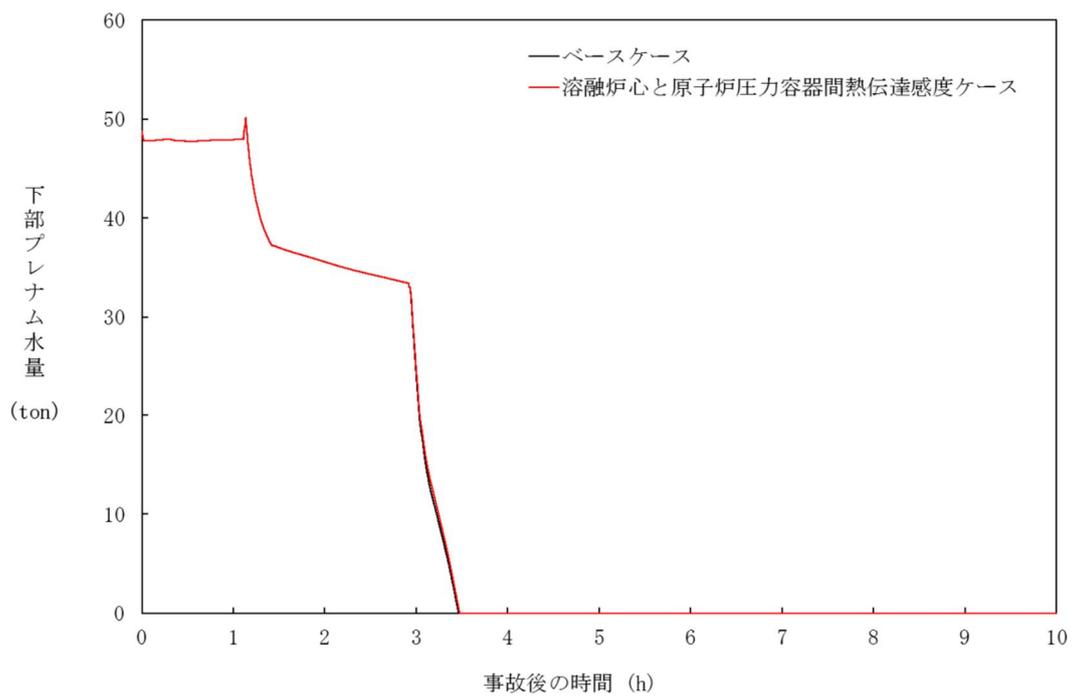


図 4-7-3 溶融炉心と原子炉压力容器間熱伝達の感度解析 (3)

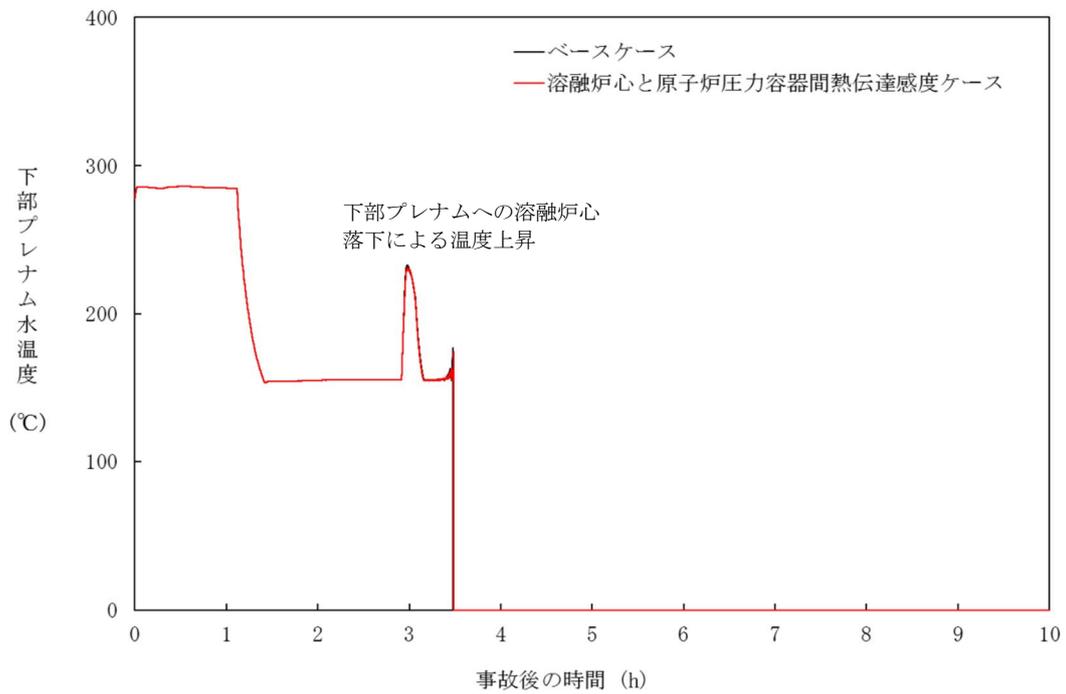


図 4-7-4 溶融炉心と原子炉压力容器間熱伝達の感度解析 (4)

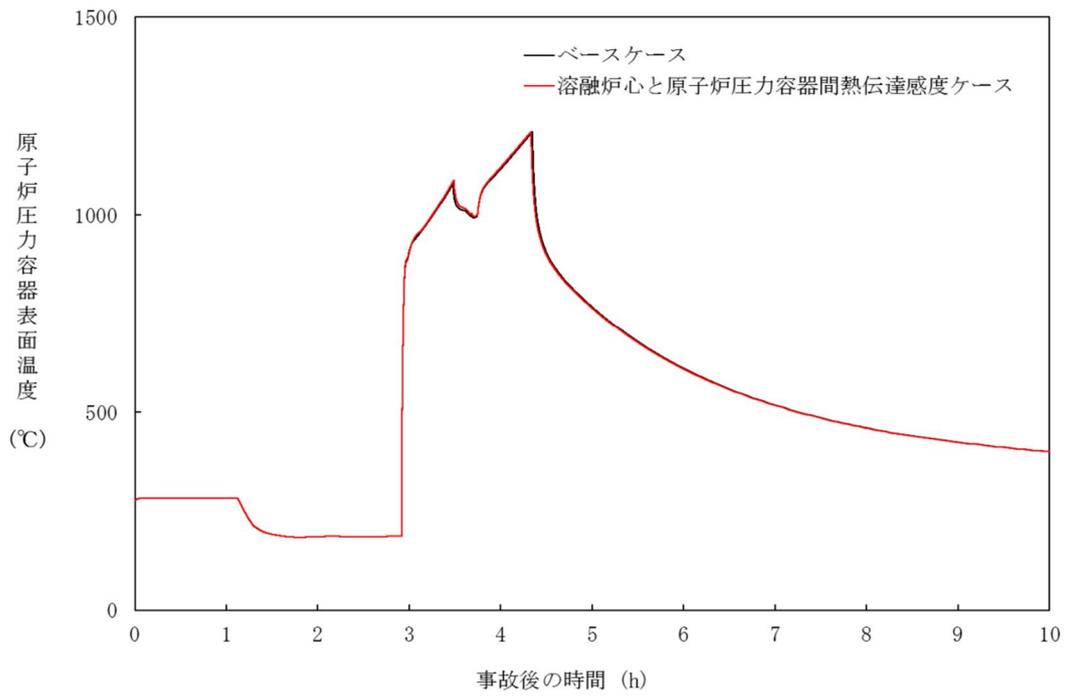


図 4-7-5 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (5)

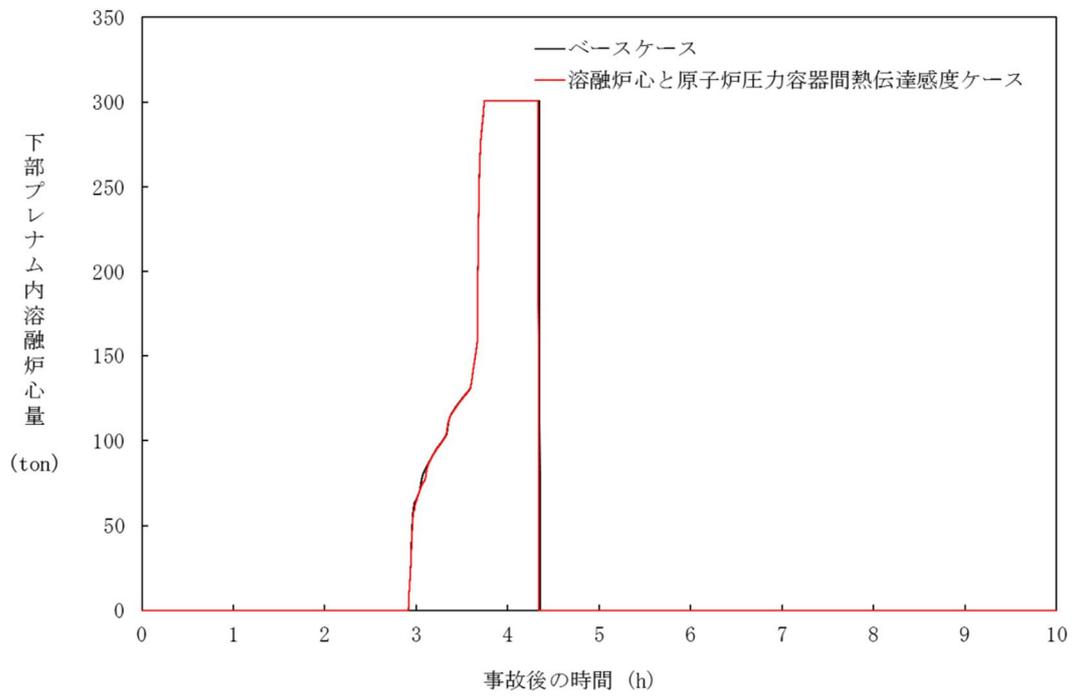


図 4-7-6 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (6)

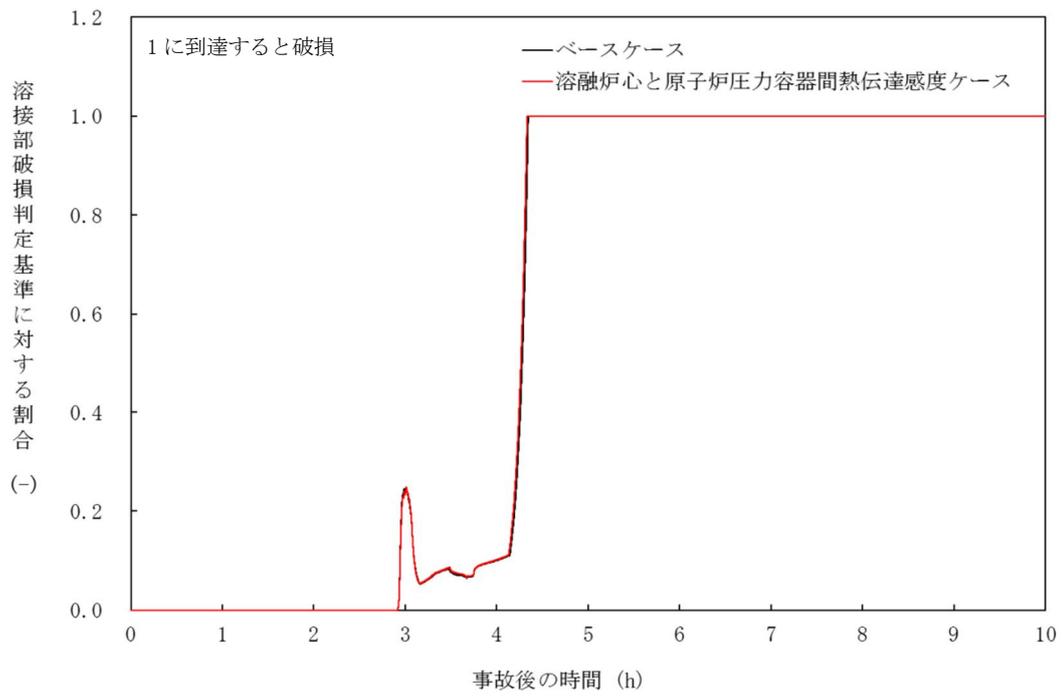


図 4-7-7 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (7)

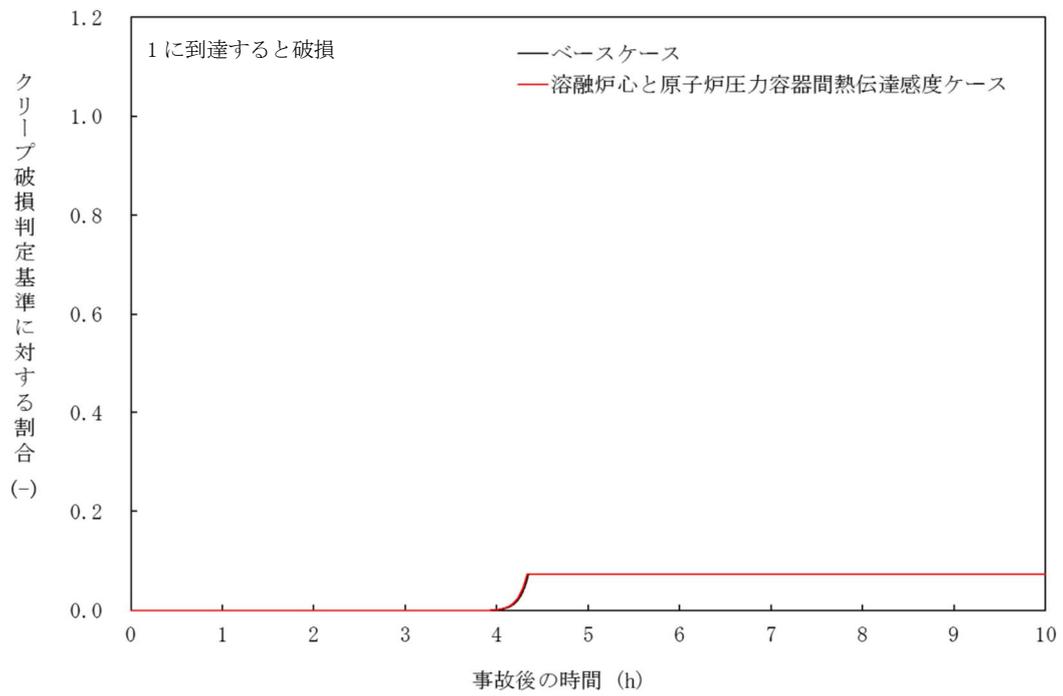


図 4-7-8 溶融炉心と原子炉圧力容器間熱伝達の感度解析 (8)

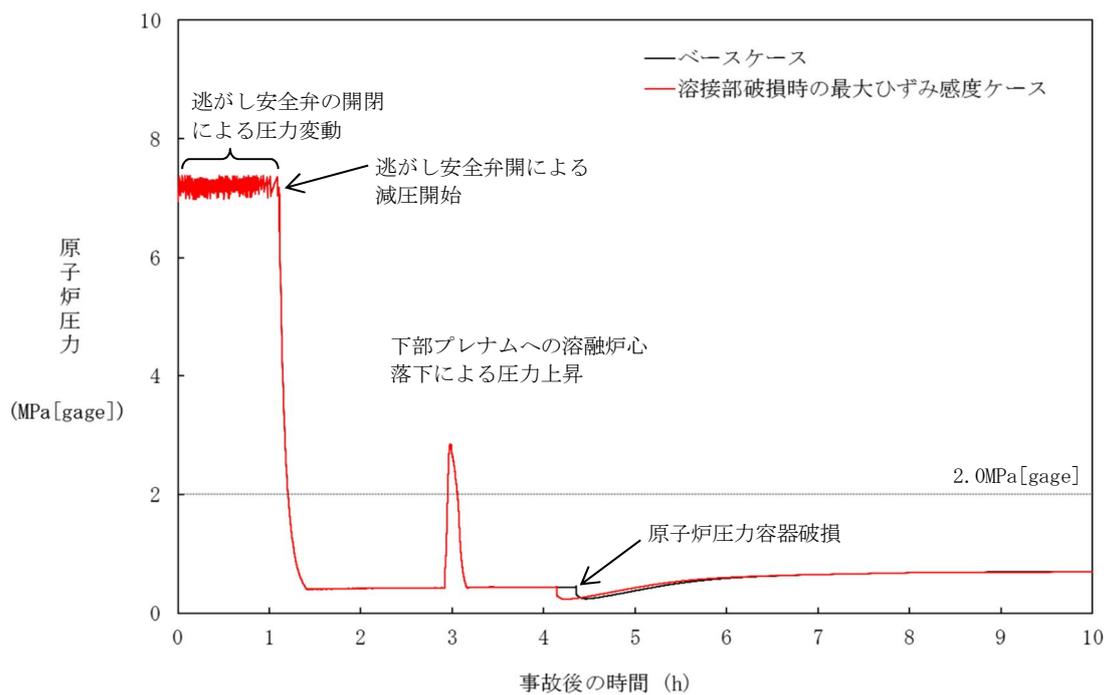


図 4-8-1 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (1)

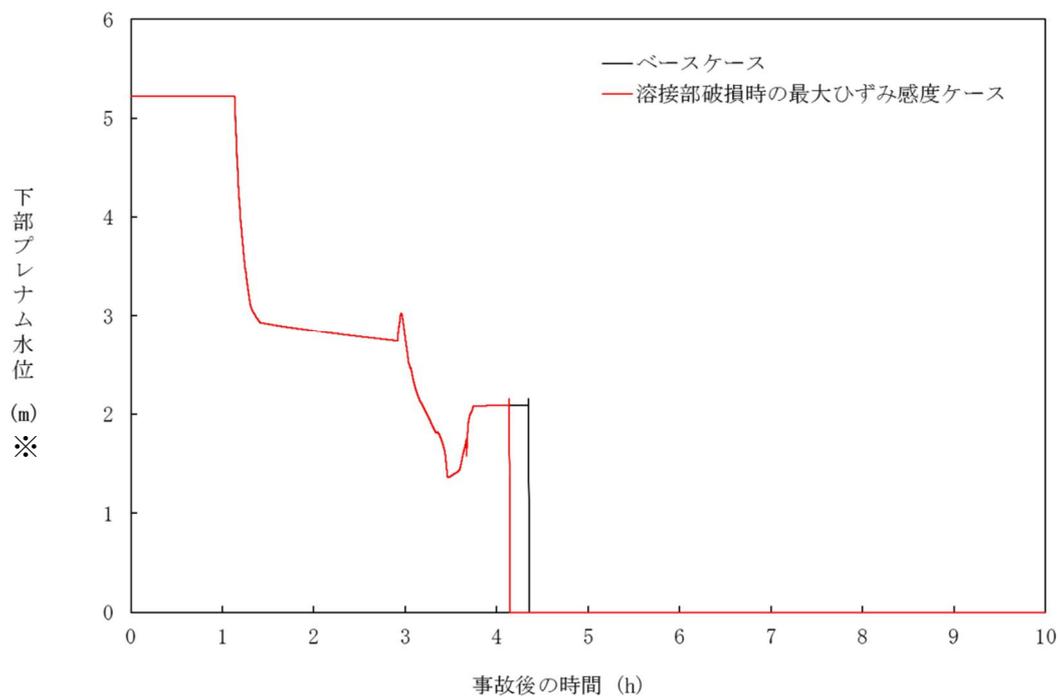


図 4-8-2 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (2)

※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

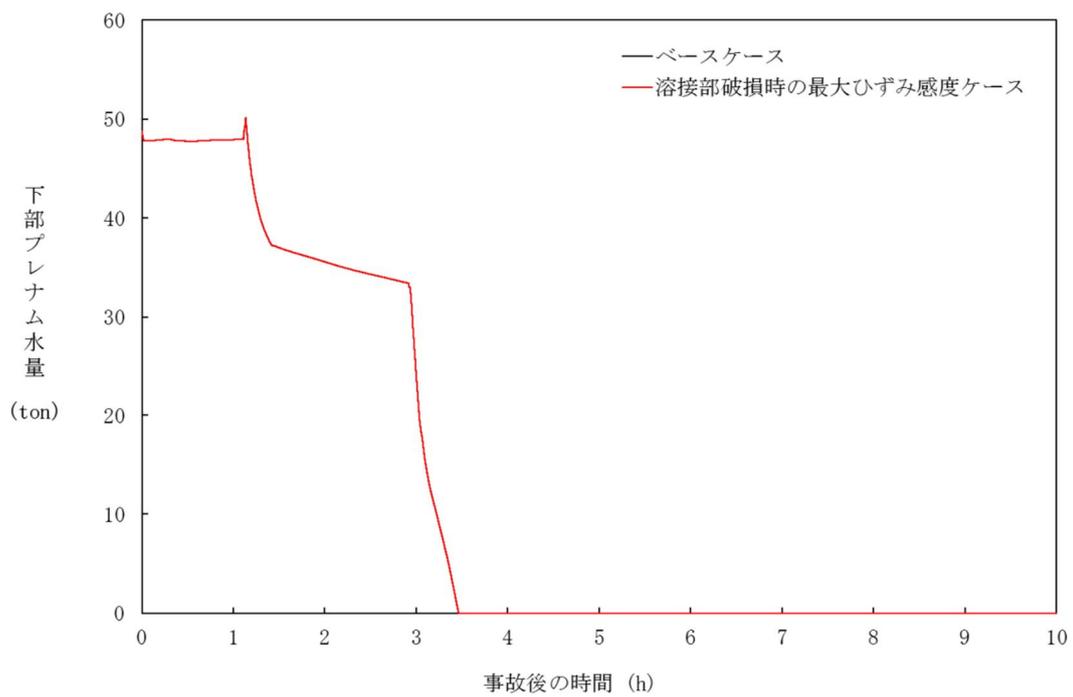


図 4-8-3 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (3)

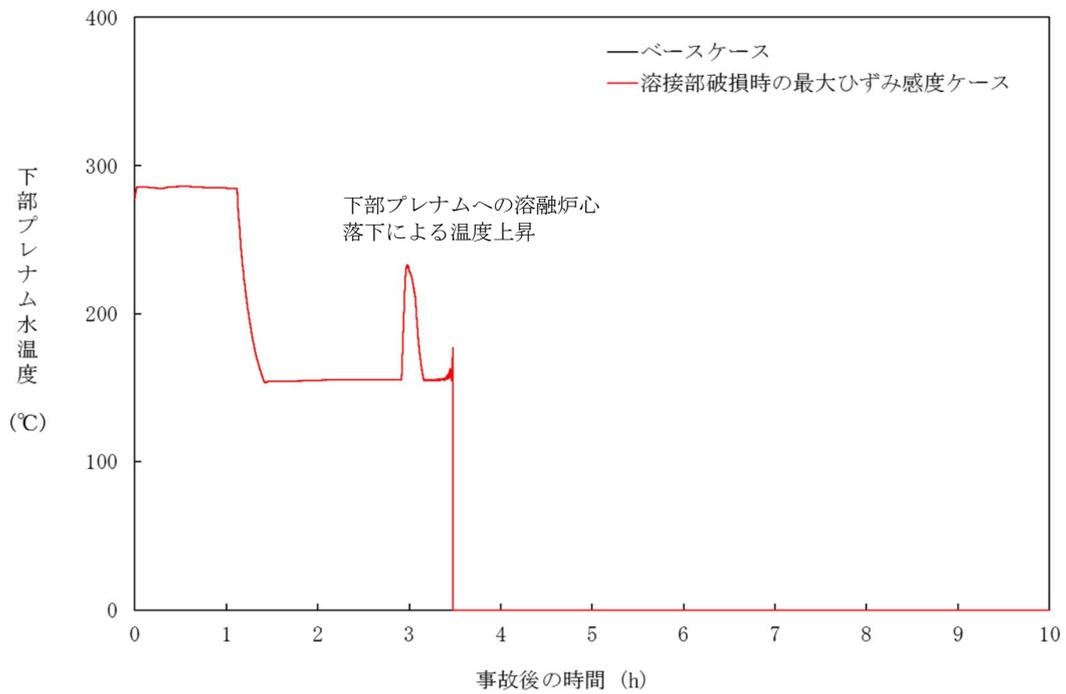


図 4-8-4 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (4)

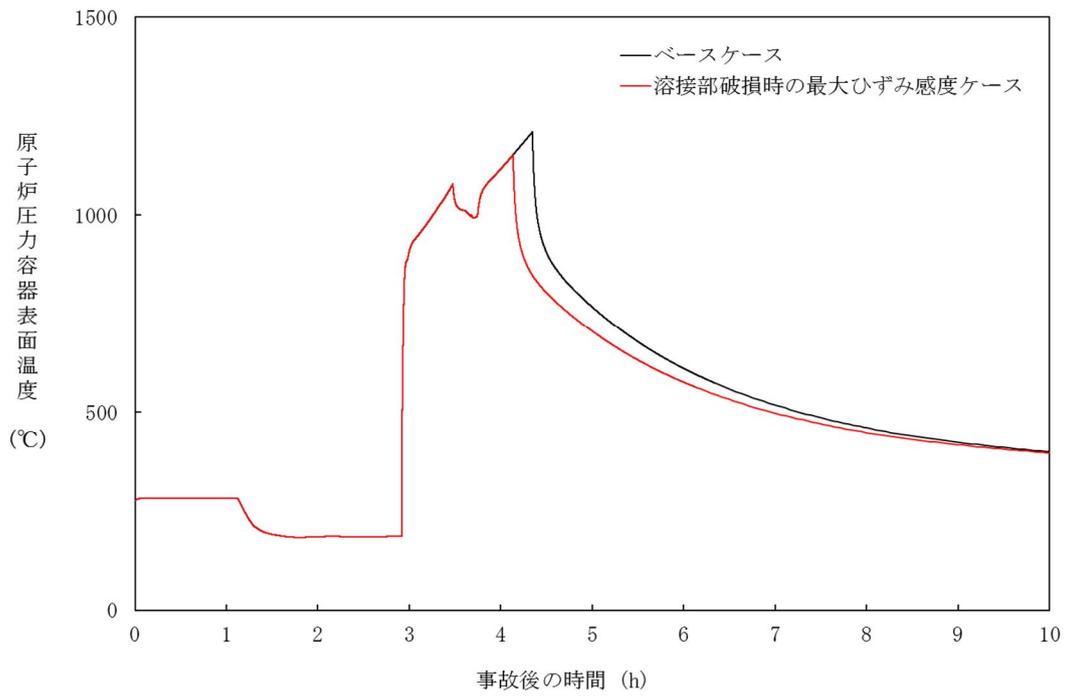


図 4-8-5 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (5)

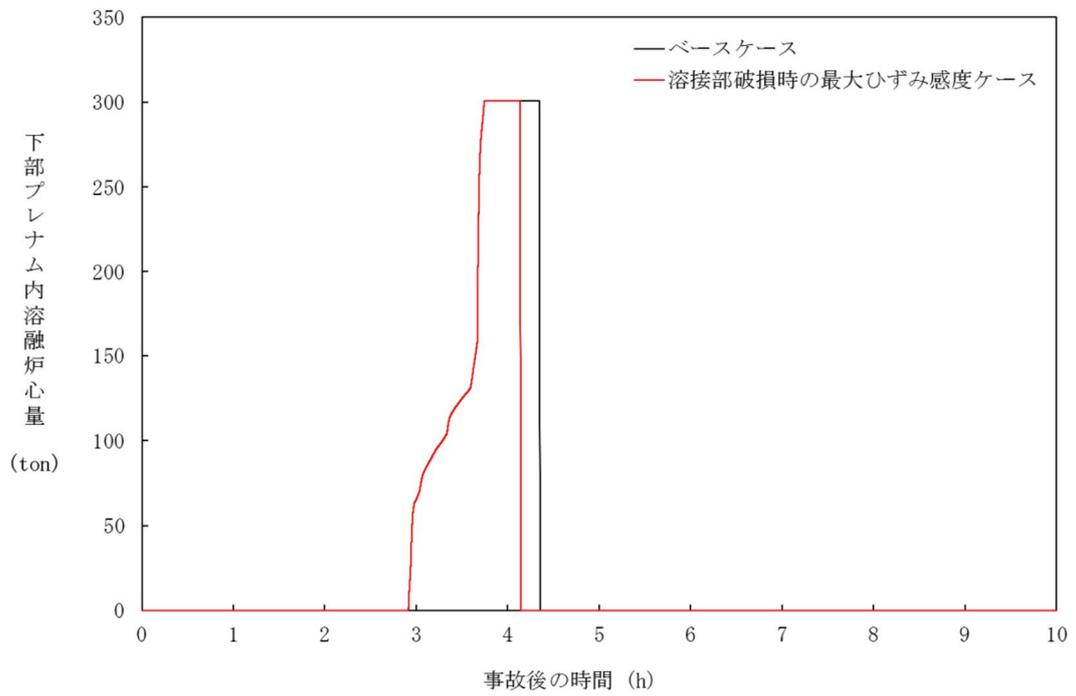


図 4-8-6 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (6)

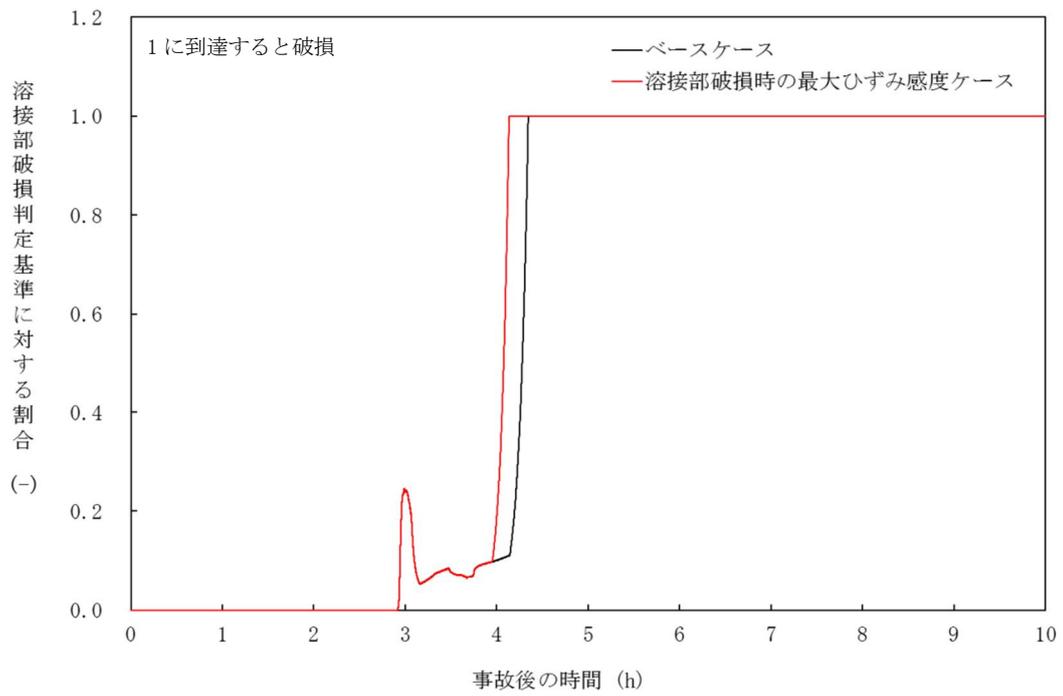


図 4-8-7 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (7)

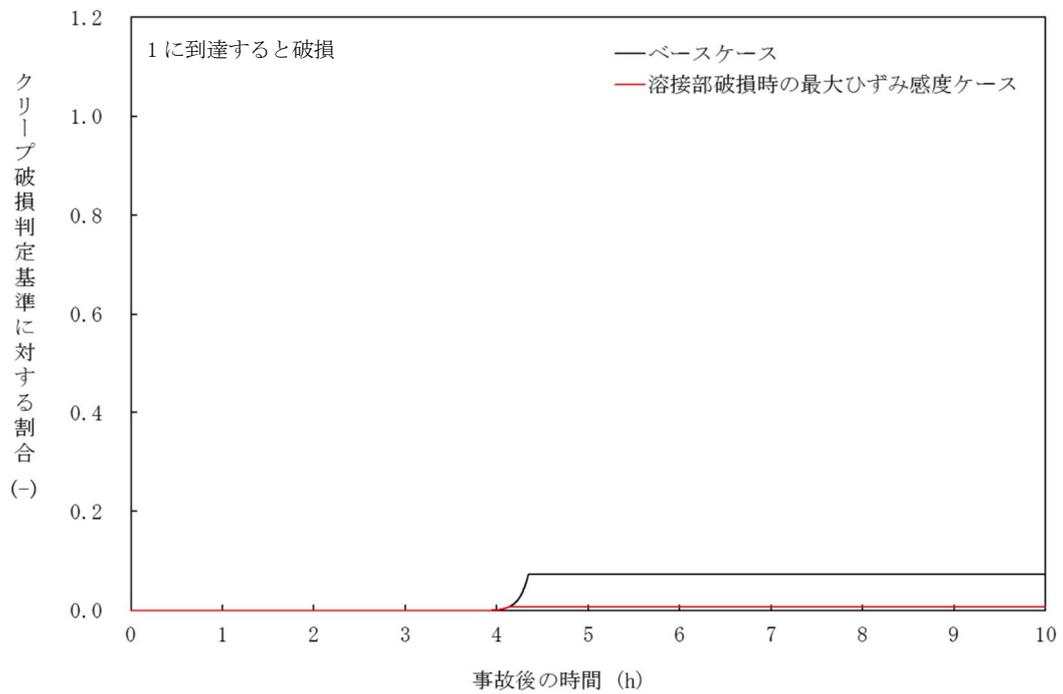


図 4-8-8 溶接部破損時の最大ひずみの感度解析 (8)

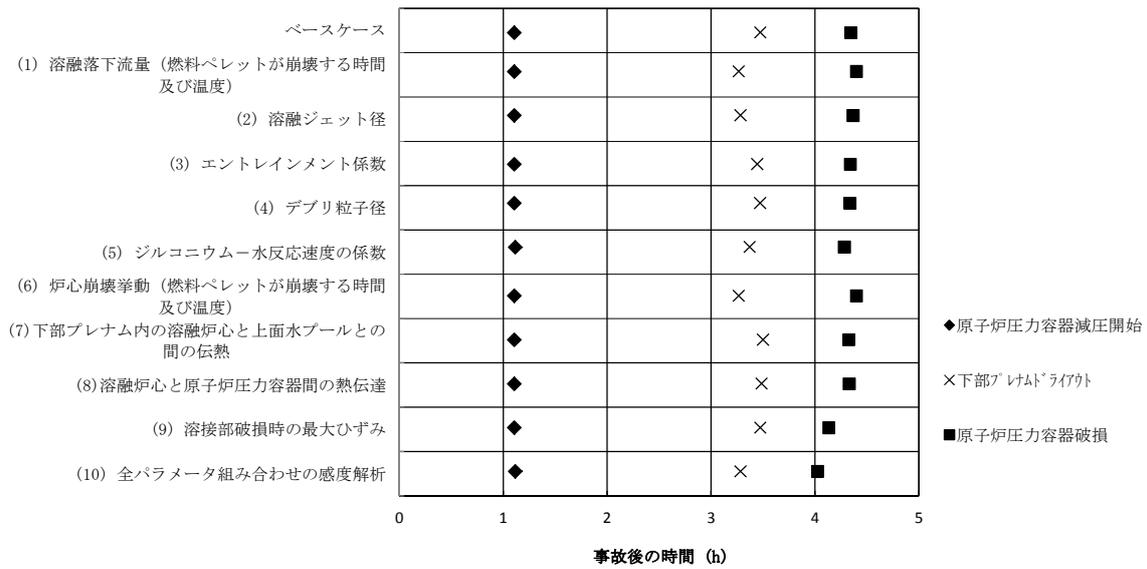


図 4-9-1 感度解析における原子炉圧力容器破損等の整理

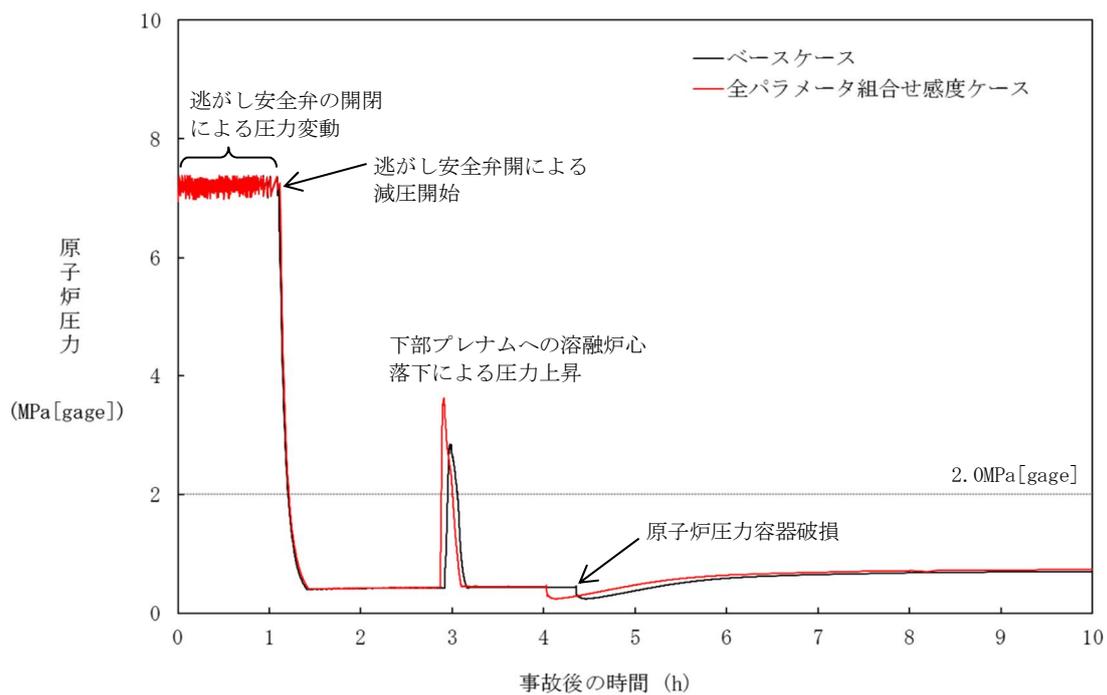


図 4-9-2 全パラメータ組み合わせの感度解析 (1)

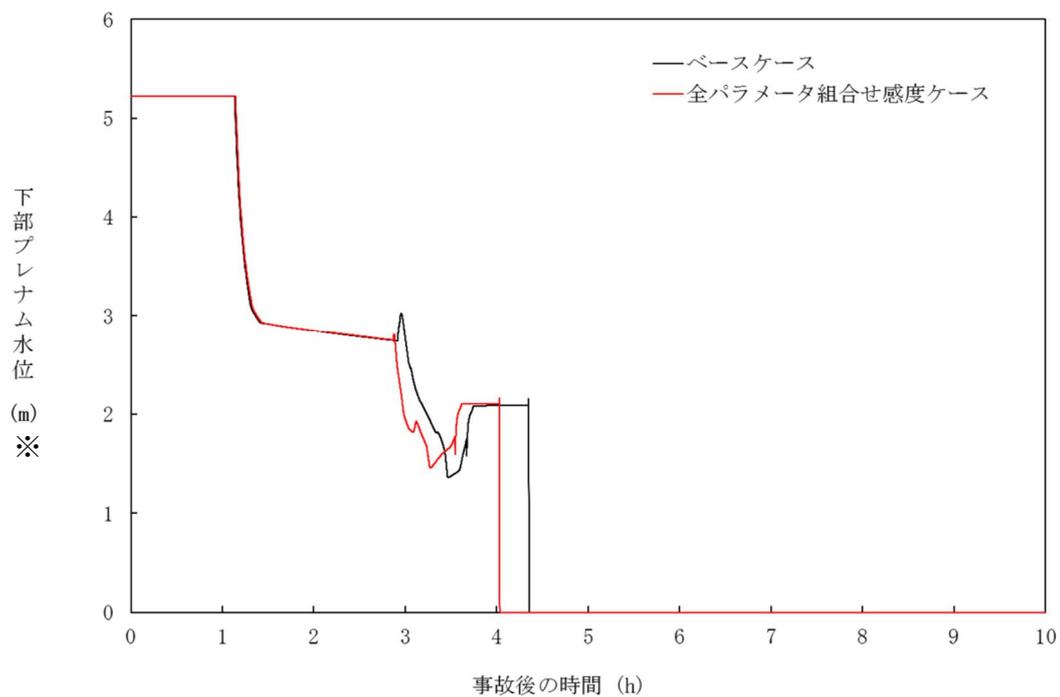


図 4-9-3 全パラメータ組み合わせの感度解析 (2)

※リロケーション後は、下部プレナム水位に溶融デブリ高さを含む。

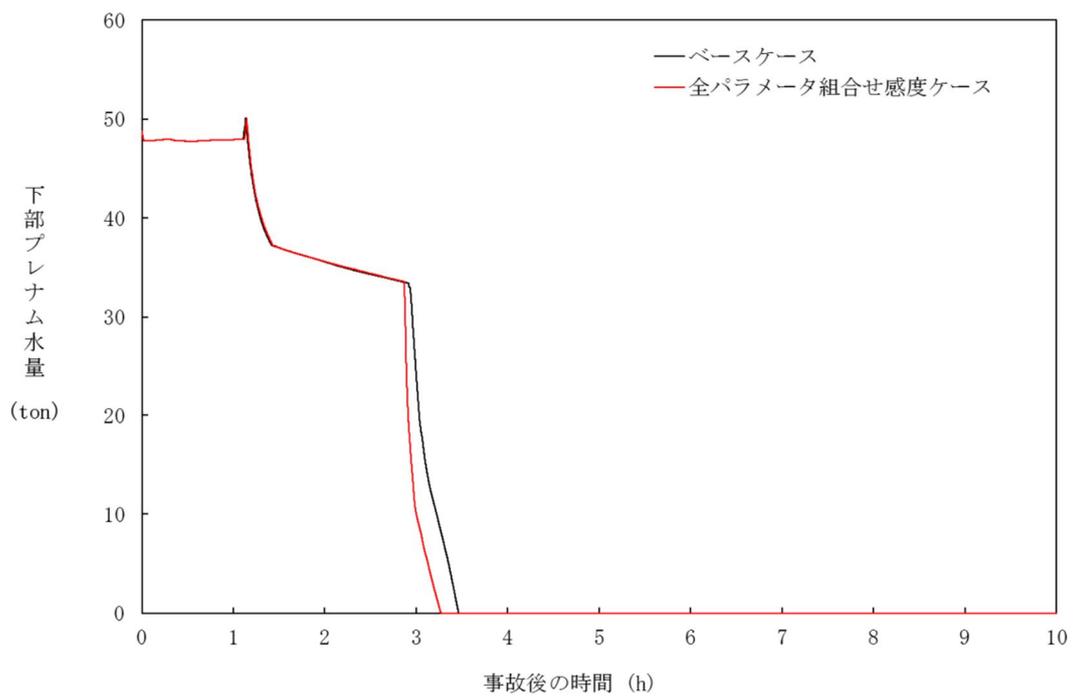


図 4-9-4 全パラメータ組み合わせの感度解析 (3)

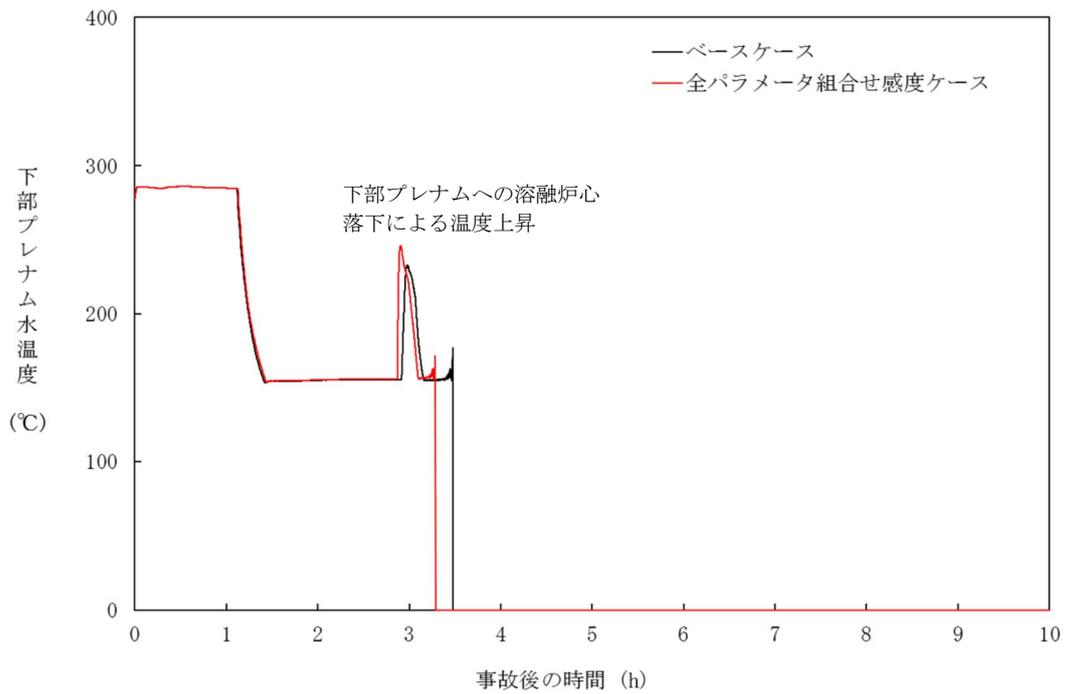


図 4-9-5 全パラメータ組み合わせの感度解析 (4)

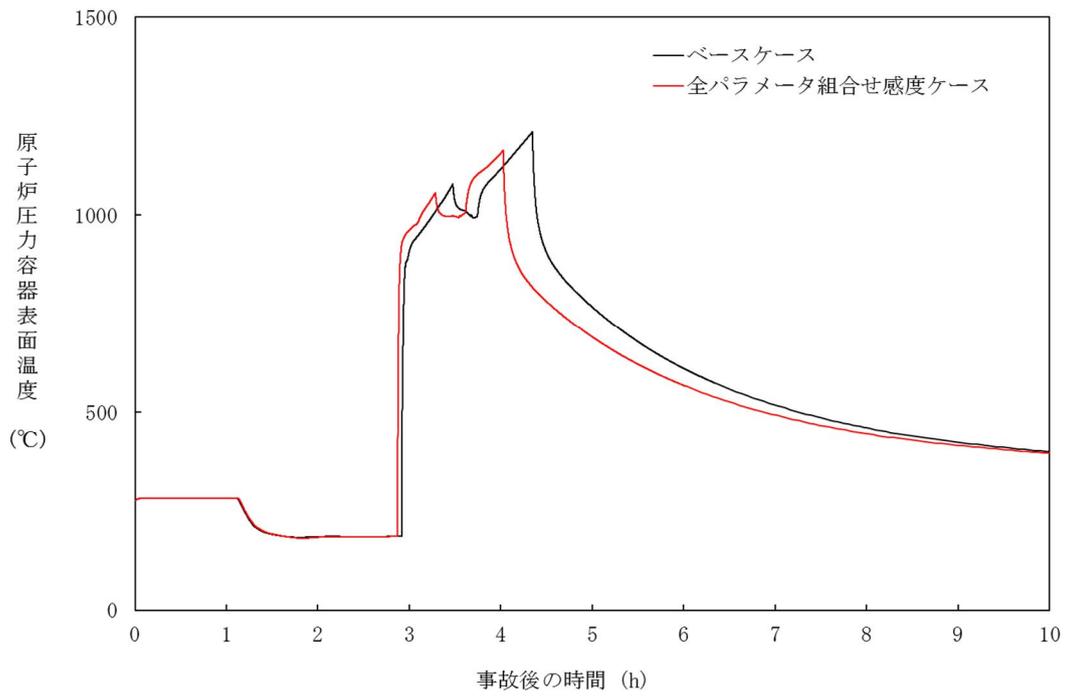


図 4-9-6 全パラメータ組み合わせの感度解析 (5)

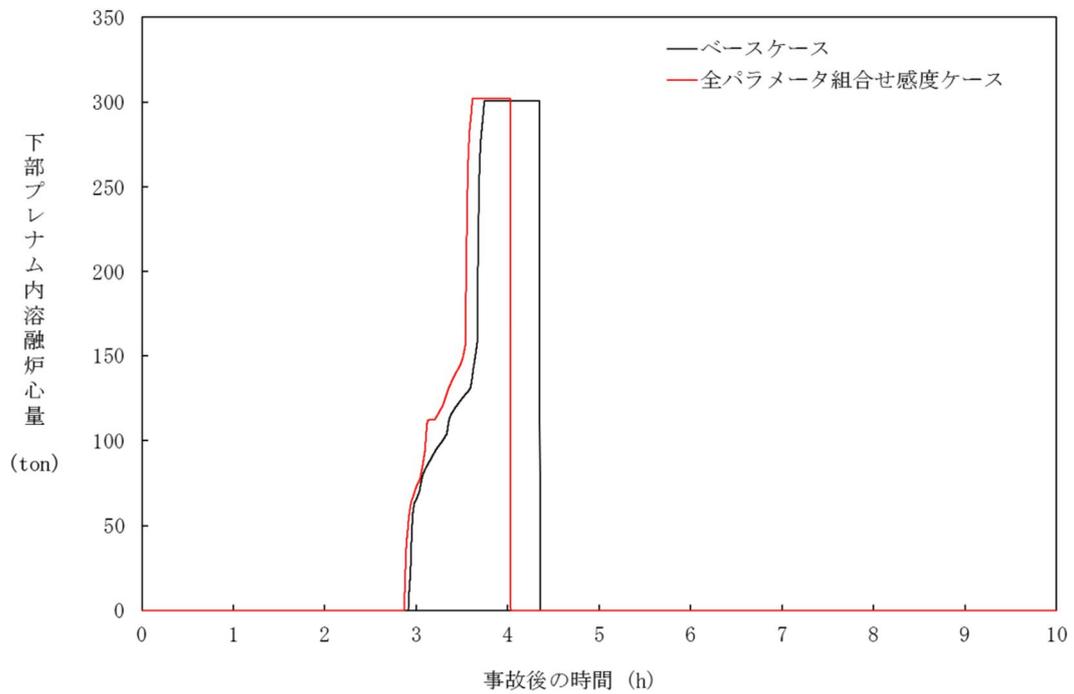


図 4-9-7 全パラメータ組み合わせの感度解析 (6)

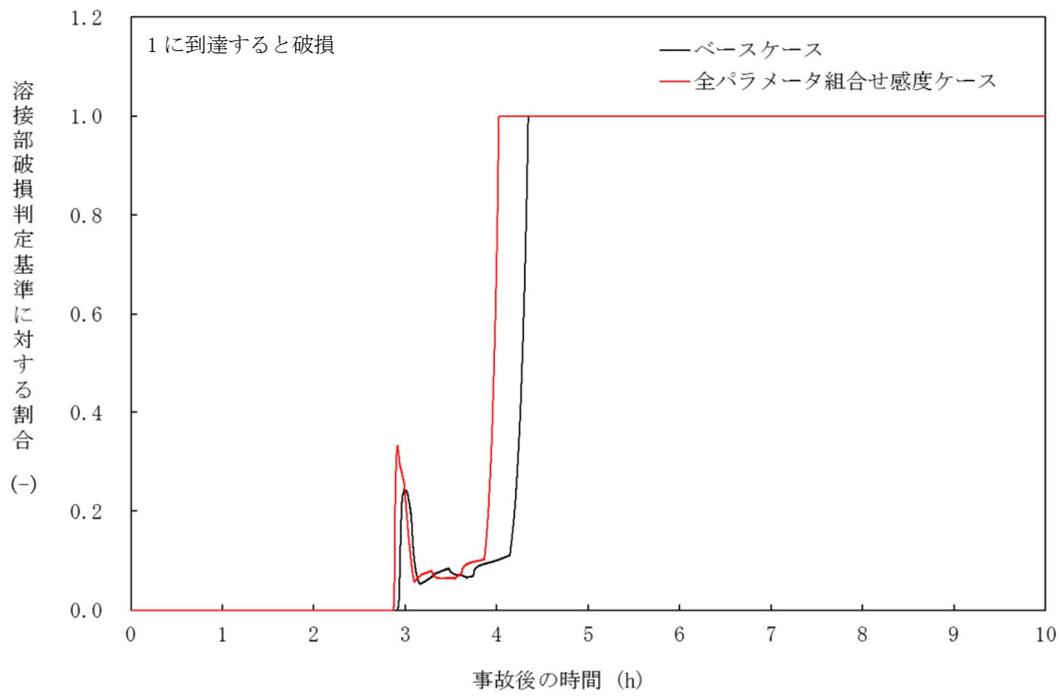


図 4-9-8 全パラメータ組み合わせの感度解析 (7)

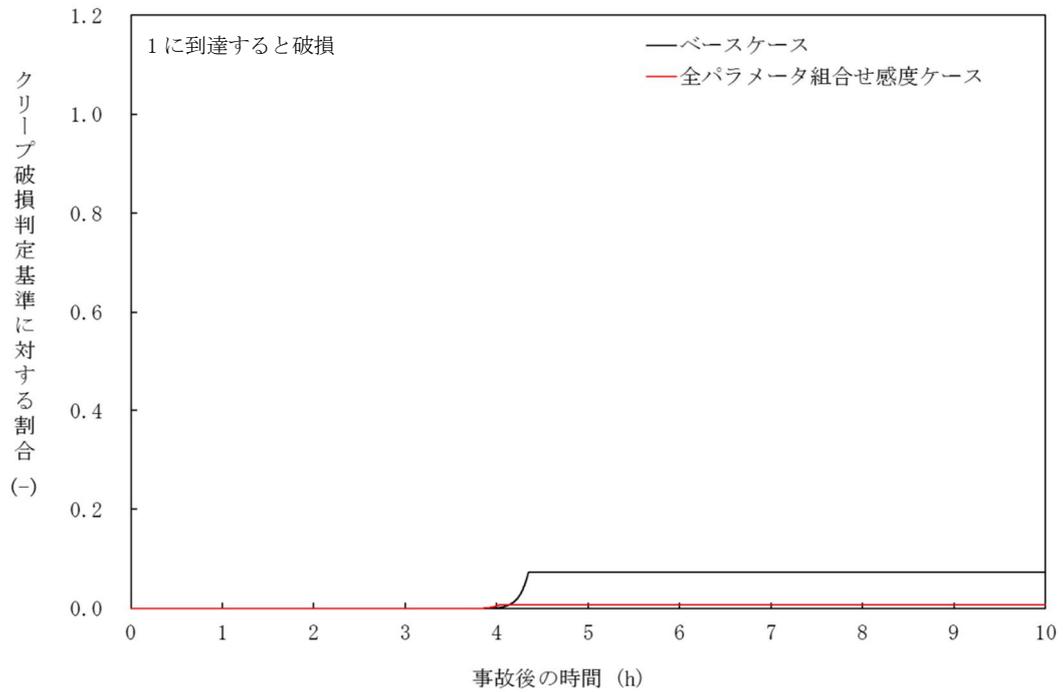


図 4-9-9 全パラメータ組み合わせの感度解析 (8)

5. まとめ

HPME/DCH 防止に関する不確かさの要因として抽出した以下の項目について、感度解析を実施し、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力への感度を確認した。

- ・燃料ペレットが崩壊する時間及び温度
- ・溶融ジェット径
- ・エントレインメント係数
- ・デブリ粒子径
- ・ジルコニウム-水反応速度の係数
- ・下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱
- ・溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達
- ・溶接部破損時の最大ひずみ

その結果、いずれの項目についても、圧カスパイクに対する感度は限定的であり、原子炉圧力容器の破損時期の観点でも、原子炉圧力減圧時からの時間余裕が十分大きい結果となった。これらのパラメータを組み合わせた感度解析ケースにおいても、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力は 2.0MPa[gage]を十分下回っている。

以上のことから、HPME/DCH の防止に関して、MAAP の解析モデルに関する不確かさは小さいと言える。

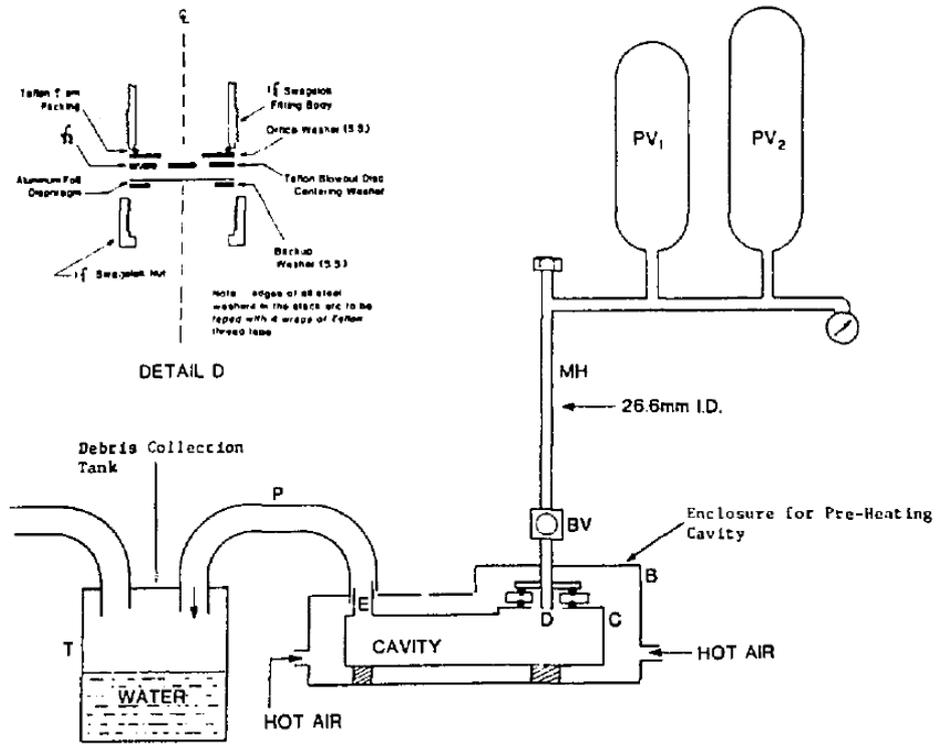
付録1 Surry 型原子炉下部キャビティの 1/42 スケール実験

BNL では、Surry 型原子炉下部キャビティの 1/42 スケールモデルを用いた模擬物質の分散放出実験^[7]を実施し、原子炉下部キャビティ内に残存する物質の測定結果を整理して、実機において分散放出が生じない圧力を評価している。

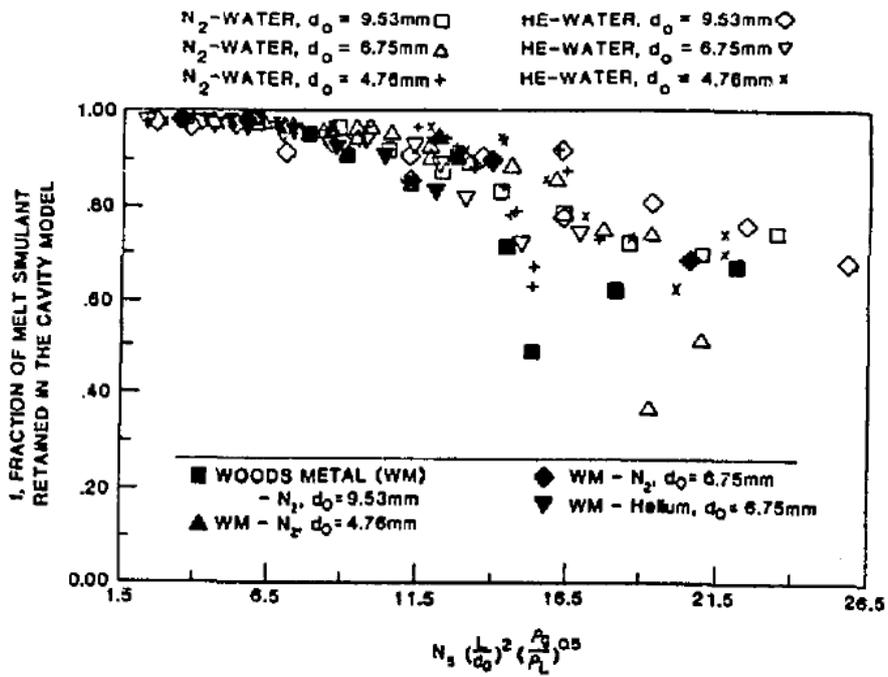
実験装置の概要を付図 1-1 に示す。模擬物質は弁の上のメタルホルダに保持され、弁を開放すると、模擬気体の圧力によって、模擬物質が原子炉下部キャビティに噴出する。その後、模擬気体のブローダウンによって模擬物質の一部が配管やタンクにエントレインされ、原子炉下部キャビティに残った模擬物質を測定する。

模擬物質を用いた分散放出実験では、様々な初期圧力、様々な開口径に対して、原子炉下部キャビティ内に残存する模擬物質の割合を測定している。模擬物質としては水とウッド合金を使用し、模擬気体としては窒素とヘリウムを使用している。付図 1-2 に測定結果を示す。原子炉下部キャビティ内に残存する模擬物質の割合の測定結果 (f) は Kutateladze 数に関する無次元数 (G) の関数として整理されており、 $f \sim 1/(1+0.001G^2)$ でよく近似できる。

この関係式を用いて、分散放出が無視できる 1 次系圧力を評価することができる。具体的には、Kutateladze 数に関する無次元数が 7 以下の場合に熔融炉心の分散放出が無視できるとしている。このとき、原子炉下部キャビティに残存する模擬物質の割合は、すべてのデータについて 0.9 以上、平均値では約 0.95 である。実機条件（水蒸気温度 500K、原子炉圧力容器破損口径 0.4m）に対しては、熔融炉心の分散放出が無視できる 1 次系圧力は 2.38MPa と評価される。



付図 1-1 Surray 型原子炉下部キャビティの 1/42 スケール実験装置



付図 1-2 Kutateladze 数に関する無次元数と原子炉下部キャビティに残存する模擬物質との関係

付録2 溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱の感度解析条件に用いる係数の妥当性

(1) 感度係数の位置づけ

本感度解析に使用した係数は、下部プレナムに落下した溶融デブリ表面の金属層と上面水プールへの限界熱流束の乗数である。

付図 2-1 に、MAAPにおけるデブリベッドへの冷却材浸入による冷却の状態図を示す。MAAPパラメータ内で適用している本係数の下限値「0」は、金属層が水に対して不透過性であり、熱は金属層表面で対流又は熱伝導のみで水に伝わることを意味し、上限値「1」は水が金属層に浸入し、限界熱流束によって制限された速度で冷却され、かつ表面からも対流又は熱伝導で除熱されることを意味する。本係数を調整することにより、金属層への水の浸入に伴う熱伝達の不確かさの影響を確認することができる。

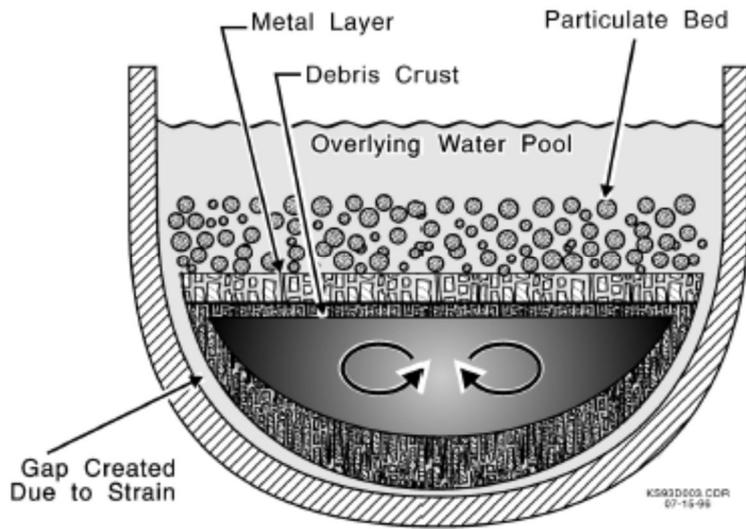
MAAPパラメータでデフォルト値として使用している値は、金属層への水の浸入が少ない場合を想定して、下限としてグリムスヴォトン溶岩での実験^{[4]※1}で得られた除熱量を参考にした設定値(□)，上限としてMAAPの感度解析によりサーベイした、代表的な崩壊熱レベルの溶融デブリが冷却できる最小の除熱量に対応する設定値(□)を考慮し、その中間値(□)をデフォルト値としている。このとおり本係数は、不確かさを有するパラメータであるが、下記の感度解析にて示すとおり、デブリ冷却への影響は限定的であることから、推奨範囲の中間値をベースケース解析に用いることは妥当と考える。

※1：グリムスヴォトン溶岩 (Grimsvotn lava field) での実験

グリムスヴォトン溶岩に広範囲にスプレイ散布することで、熱伝達のための除熱よりも早く溶岩が固化する現象が確認された。この実験ではスプレイ水の溶岩への浸入による除熱量(約40kW/m²)が評価されている。

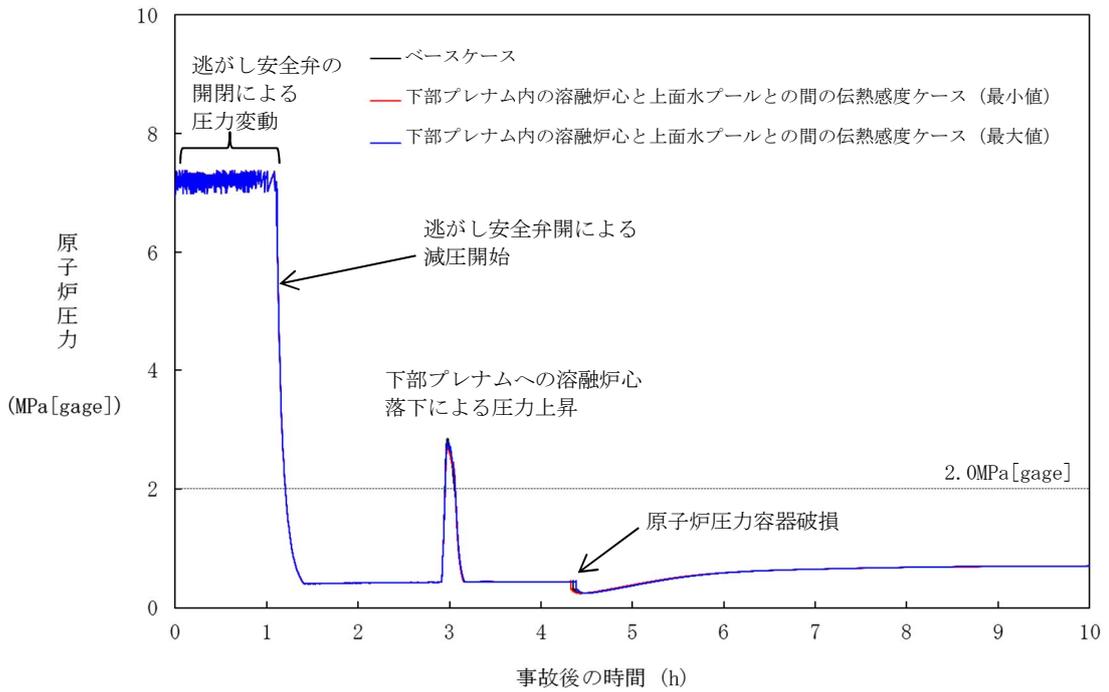
(2) 感度係数の影響

付図 2-2 に、係数を □～□の範囲で変化させた解析結果を示す。溶融炉心と上面水プールとの間の伝熱は、原子炉压力容器の破損時間にほとんど影響を与えない結果となっている。このことから、推奨範囲の中間値(□)をベースケース解析において使用することは妥当と考える。



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

付図 2-1 デブリベッドへの冷却材浸入による冷却



付図 2-2 原子炉圧力の時間変化

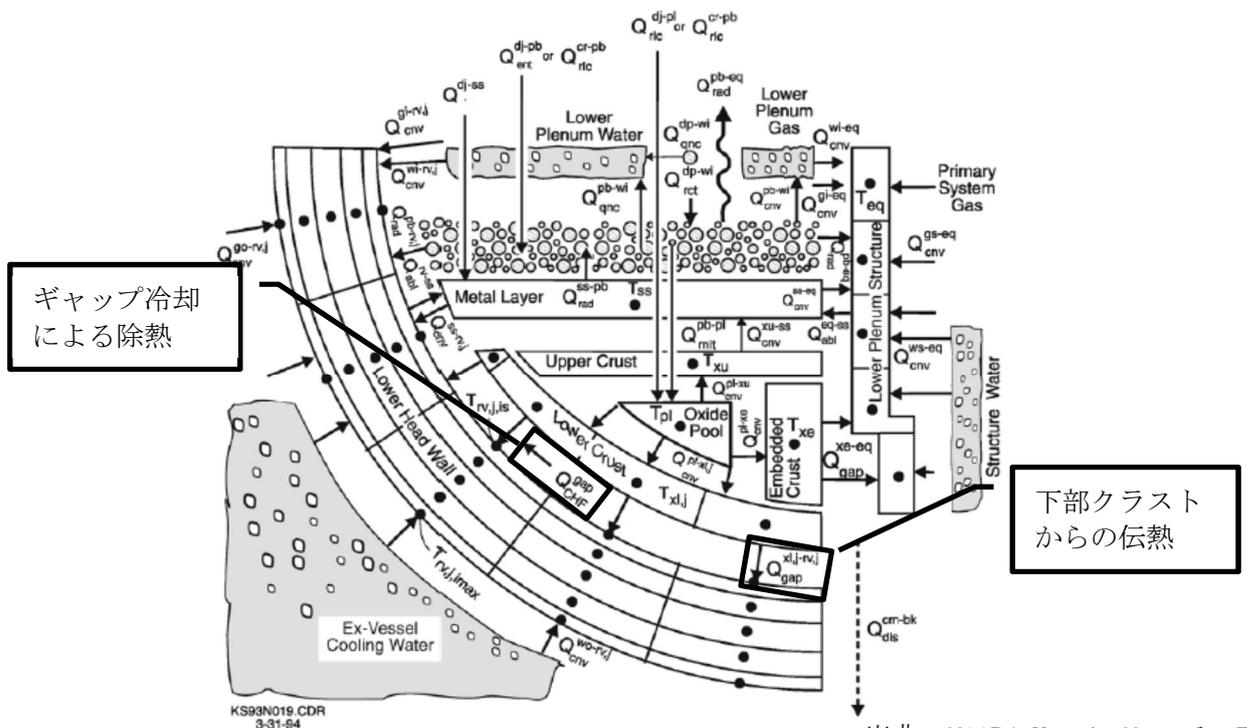
付録3 溶融デブリと原子炉圧力容器間の熱伝達におけるギャップ冷却について

付図3-1に下部プレナムでのエネルギー移行図を示す。

MAAPでは、下部プレナムに落下した溶融デブリは溶融プールの外側にクラストが形成される。この、下部クラストと原子炉圧力容器内面にひずみが生じ、下部クラストと容器内面に生じたギャップに冷却材が流入することでクラスト表面及び原子炉圧力容器内面から除熱される「ギャップ冷却」が生じるというモデルになっている。

付図3-1に示すとおり、MAAPでは、上述のギャップ冷却による除熱量と下部クラストから隣接流体への伝熱量を評価している。下部クラストから移行し、ギャップ冷却で取り除かれない伝熱量は、原子炉圧力容器内面への伝熱量として評価される。ギャップ冷却は、ギャップに浸入した水の沸騰時の限界熱流束により評価される。溶融デブリと原子炉圧力容器間のギャップに存在する水による除熱量と溶融デブリから原子炉圧力容器への伝熱量を比較すると、下部プレナムギャップの除熱量は、溶融デブリから原子炉容器への伝熱量に比べて非常に小さいことから、原子炉圧力容器温度の上昇が発生する。ドライアウト後、ギャップ冷却効果はゼロとなる。

以上のことから、下部プレナムギャップの除熱量が溶融デブリと原子炉圧力容器間の熱伝達に与える感度は小さく、4.1(8)の感度解析にて示すとおり下部プレナムギャップの除熱量に係る係数が原子炉圧力容器表面の温度に与える影響は小さいといえる。



付図3-1 下部プレナムでのエネルギー移行図

参考文献

- [1] R. O. Gauntt and L. L. Humphries, “Final Results of the XR2-1 BWR Metallic Melt Relocation Experiment”, NUREG/CR-6527, Aug. 1997.
- [2] 日本原子力学会 熱流動部会 編, 気液二相流の数値解析, 朝倉書店, 1993 年
- [3] R. E. Henry and H. K. Fauske, “The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices and Short Tubes,” J. Heat Transfer, Trans. ASME, 1971.
- [4] Uncertainty Working Group of the MAAP User’ s Group, “MAAP4 UNCERTAINTY AND SENSITIVITY ANALYSES”
- [5] K. Kang, et, al,. Experimental Investigations on In-Vessel Corium Retention through Inherent Gap Cooling Mechanisms, Journal of Nuclear Science and Technology, 2006.
- [6] JAERI-M 84-055 「炉心損傷事故解析及び研究の現状 -炉心損傷事故調査解析タスクフォース報告書-」1984 年 3 月
- [7] N. K. Tutu, et al., “Low Pressure Cutoff for Melt Dispersal from Reactor Cavities”, Fourth Proceedings of Nuclear Thermal Hydraulics, ANS Meeting, October 30 . November 4, 1988.

添付 2

溶融炉心と冷却材の相互作用について

目次

1. まえがき	添付 5-2-3
2. 現象の概要	添付 5-2-3
3. これまでの知見の整理	添付 5-2-4
4. 不確かさに関する整理	添付 5-2-27
5. 感度解析と評価	添付 5-2-34
6. まとめ	添付 5-2-39
付録1 FARO 実験によるMAAPの圧カスパイクモデル妥当性確認.....	添付 5-2-40
参考文献	添付 5-2-49

1. まえがき

熔融炉心と冷却材の相互作用（F C I : Fuel-Coolant Interaction, 以下「F C I」という。）に関しては、国内外において現象の解明や評価に関する多くの活動が行われてきている。しかしながら、現在においてもその現象の解明は研究段階にあり、現象全体の十分な理解には至っていない。また、多くのF C I 実験が行われているものの、実機規模での現象については、有効なデータが十分には得られていないといえる。このようなことから、国内外で実施された実験結果の知見から解析モデルに関する不確かさを検討し、これを基にした感度解析により有効性評価への影響を確認する。

2. 現象の概要

熔融炉心と冷却材が接触して一時的な圧力の急上昇が生じる可能性がある。このときに発生するエネルギーが大きいと構造物が破壊され原子炉格納容器が破損する場合がある。熔融炉心と冷却材との接触及びそれに伴って引き起こされる現象のことを” 熔融炉心と冷却材の相互作用（F C I）” と呼ぶ。また、F C I のうち衝撃波を伴うものを” 水蒸気爆発” と呼び、冷却材への伝熱による水蒸気発生に伴う圧力変化を” 圧カスパイク” と呼ぶ。さらに、原子炉圧力容器の下部プレナムで発生するF C I を原子炉圧力容器内F C I と呼び、格納容器下部で発生するF C I を原子炉圧力容器外F C I と呼ぶ。

これまでの研究では、水蒸気爆発現象を以下のような段階的な過程によって説明するモデルが提唱されている。

- ① 炉心あるいは原子炉圧力容器から落下する熔融炉心（デブリジェット）が冷却材中に落下する。水と接触した熔融炉心は、その界面の不安定性により細粒化して水中に分散する（エントレイン）。細粒化した熔融炉心（以下「デブリ粒子」という。）は、蒸気膜に覆われた状態で膜沸騰を伴う水との混合状態となる（粗混合）。
- ② さらに、自発的若しくは外部からの圧力パルス等の外乱により、膜沸騰が不安定化し（トリガリング）、デブリ粒子と冷却材が直接接触する。
- ③ デブリ粒子と冷却材の直接接触により、急速な熱の移動が発生し、急速な蒸気発生・熔融炉心の微細化により、さらにデブリ粒子と冷却材の接触を促進し（伝播）、蒸気発生を促進する。この蒸気発生により圧力波が発生する。
- ④ 発生した圧力波が通過した後の高温高圧領域（元々は粗混合領域）の膨張により運動エネルギーが発生し、構造物を破壊する要因となる。

水蒸気爆発が発生するためには、トリガリングが働く必要があり、さらにデブリ粒子と冷却材の接触が瞬時に粗混合領域全体に伝播する必要がある。水蒸気爆発に至らない場合でも、急速な蒸気発生による圧力上昇（圧カスパイク）が発生する。

3. これまでの知見の整理

原子炉压力容器内水蒸気爆発による格納容器破損は α モード破損と呼ばれ、WASH-1400^[1]でそのリスクが提起されたことを機に多くの調査、研究が続けられてきた。この現象は、溶融炉心が原子炉压力容器下部の水中に落下して水蒸気爆発が発生し、それによる水塊がミサイルとなって原子炉内構造物を破壊し、原子炉压力容器上蓋に衝突することで上蓋がミサイルとなって原子炉格納容器に衝突し破損に至るものである。水蒸気爆発については、国際的な専門家会議による結論がまとめられており、特にBWRの原子炉压力容器内水蒸気爆発による α モード破損については、格納容器破損の脅威とはならないとされている。表 3-1 にBWRの原子炉压力容器内水蒸気爆発に関する専門家会議の見解をまとめる。また、原子炉压力容器内FCIの圧力スパイクについても、原子炉压力容器内での圧力上昇のため、格納容器破損の直接的な脅威とはならない。

一方、原子炉压力容器外FCIについては、緩和策による注水によって形成された格納容器下部の水中に溶融炉心が落下するため、原子炉压力容器内の下部プレナム水に比較して、サブクール度が大きくなり、水蒸気爆発が発生し易い可能性がある。また、原子炉压力容器外FCIの圧力スパイクは、原子炉格納容器内の圧力を直接上昇させるため、格納容器破損の評価対象となる。

以上より、原子炉压力容器内FCIは格納容器破損の脅威とは考えられないため、原子炉压力容器外FCIの観点から、国内外で実施されたFCI実験の知見を以下にまとめる。

3.1 FCI実験の概要

過去に実施された代表的なFCIの実験研究として、(旧)日本原子力研究所で実施されたALPHA実験、JRC イスプラ研究所で実施されたKROTOS実験、FARO実験、(旧)原子力発電技術機構で実施されたCOTELS実験、韓国原子力研究所(KAERI)で実施されたTROI実験及びSERENA実験がある。これらの実験では模擬溶融物として UO_2 混合物を用いた実験とアルミナ等を用いた実験がある。以下では、各実験の概要とそこで得られた知見について整理する。

(1) ALPHA実験

ALPHA実験^[2]では、テルミット反応による酸化アルミニウムと鉄からなる模擬溶融物を用いた実験が実施されている。ALPHA実験装置を図3-1に示す。実験容器は、内径3.9m、高さ5.7m、容積50 m^3 である。模擬格納容器に設置した冷却水プールに高温溶融物を落下させ、水蒸気爆発に関する特性データを計測する実験装置である。表3-2にALPHA実験の実験結果のまとめを示す。高雰囲気圧力(STX008, STX012, STX015)、サブクール度が小さい場合(STX014)は、水蒸気爆発の発生が抑制される実験結果が知見として得られている。溶融物を半減させた3ケース(STX001, STX010, STX013)のうち、2ケース(STX001, STX013)では、水蒸気爆発が発生していない。また、水蒸気爆発のエネルギー変換効率は1~6%程度となっている。ALPHA実験の代表的実験(STX016)の圧力変化の例を図3-2に示す。

(2) KROTOS 実験

KROTOS 実験^{[3][4][5]}では、FARO 実験が大型実験装置であるのに対して小型の実験装置であるが、低圧・サブクール水を主として実験を実施している (図 3-3)。KROTOS 実験の代表的実験 (K37, K42) の圧力変化の例を図 3-4 に示す。KROTOS 実験では模擬コリウムとして UO_2 混合物を用いた実験とアルミナを用いた実験を実施している。表 3-3 に KROTOS 実験の実験結果のまとめを示す。アルミナ実験では、サブクール度が大きい実験ケース (K38, K40, K42, K43, K49) では、外部トリガーなしで水蒸気爆発が発生しているが、サブクール度が小さい実験ケース (K41, K44, K50, K51) では、外部トリガーなしでは水蒸気爆発は発生していない。一方、 UO_2 混合物実験では、外部トリガーなしでは水蒸気爆発は発生していない。また、 UO_2 混合物実験でも外部トリガーありでは水蒸気爆発が発生している (K52, K53, K46) が、これらのケースはサブクール度が大きい実験ケースである。また、 UO_2 混合物実験の水蒸気爆発のエネルギー変換効率は、アルミナ実験の水蒸気爆発に比較して低い結果となっている。アルミナ実験と UO_2 混合物の相違については以下のように考察されている。

- ・ アルミナはプール水面近傍でブレイクアップし、粗混合時に粒子が半径方向に広がり、水蒸気爆発の伝播がし易くなった可能性がある。
- ・ UO_2 混合物実験では、外部トリガーなしでは水蒸気爆発は発生していない。 UO_2 混合物の方が一般的に過熱度は小さく、 UO_2 混合物粒子表面が水と接触した直後に表面が固化し易く、これが水蒸気爆発の発生を抑制した可能性がある。 UO_2 混合物実験では水素ガスが発生し、これにより蒸気膜の崩壊による水蒸気爆発の発生を抑制した可能性がある。

(3) FARO 実験

FARO 実験^{[4][6]}では、酸化物コリウム及び金属 Zr を含むコリウムが用いられ、多くの実験は高圧・飽和水条件で実施されているが、低圧・サブクール水条件の実験も実施されている。FARO 実験装置の概要を図 3-5 に示す。表 3-4 に FARO 実験の実験結果のまとめを示す。また、圧力変化の例として L-14 と L-19 圧力挙動を図 3-6 に示す。FARO 実験のいずれの実験ケースでも水蒸気爆発は発生していない。FARO 実験で得られた主な知見は以下である。

- ・ 高圧・飽和水実験、低圧・サブクール実験のいずれにおいても水蒸気爆発は発生していない。
- ・ 高圧・飽和水の酸化物コリウム実験の場合は一部が粒子化し、一部はパンケーキ状でプール底部に堆積した。高圧・飽和水のコリウムに金属 Zr 成分を含んだ実験及び低圧・サブクール実験では全てのコリウムは粒子化した。
- ・ 粒子の質量中央径は比較的大きかったが、実験条件 (初期圧力、水深、コリウム落下速度、サブクール度) に依存していない。
- ・ Zr 金属を含めた実験ケース (L-11) では、Zr 金属の酸化により、Zr 金属を含めない実験ケース (L-14) よりも圧力上昇が大きくなる。

(4) COTELS 実験

COTELS 実験^[7]では、模擬溶融物として UO_2 -Zr-ZrO₂-SS 混合物を用いており、コリウムに金属成分が含まれている。COTELS 実験装置の概要を図 3-7 に示す。表 3-5 に COTELS 実験の実験結果のまとめを示す。COTELS 実験の代表的な実験ケース (A1) の圧力挙動を図 3-8、各実験ケースの圧力変化を図 3-9 に示す。溶融混合物がプール水に接触した直後 (Region 1) は急激な圧力上昇となる。その後、サブクール水では蒸気凝縮が発生し、一時的に圧力が減少する (Region 2) が、溶融混合物からの熱伝達による蒸気発生により、準定常的な状態まで徐々に圧力が上昇する (Region 3)。COTELS 実験で得られた主な知見は以下である。

- ・ サブクール度が大きいケースも含め、全ての実験で水蒸気爆発は発生していない。
- ・ プールに落下した溶融コリウムは、ほとんどがプール水中で粒子化した。
- ・ 粒子径は、コリウム落下速度の大きいケースを除いて、質量中央径で 6 mm 程度である。コリウム落下速度の大きいケースの粒子径は小さくなっている。
- ・ コリウム落下速度の大きいケースで、粒子径が小さく初期圧力上昇幅も大きくなる傾向がある。また、準定常的な状態での圧力は、溶融物量が多く、サブクール度が小さく、プール水量が少ない程高くなる傾向である。

(5) TROI 実験

TROI 実験^[8]は、韓国原子力研究所 (KAERI) で実施されている実験であり、2007 年から 2012 年までは、KROTOS 実験とともに OECD/NEA の SERENA プロジェクトとして実施された実験である。実験装置の概要図を図 3-10 に示す。また、実験条件及び実験結果を表 3-6 に示す。

ZrO₂ を用いた実験では外部トリガリングを与えていないが、圧力スパイクや水蒸気爆発が発生した実験がある。一方、 UO_2 /ZrO₂ の混合物を用いた実験では、異なった条件による内部トリガリングを発生させるため又は外部トリガリングによる水蒸気爆発時の発生エネルギーを変えるため、混合物の割合、水深、混合物量等の様々な条件により実験を実施し、数ケースでは水蒸気爆発が発生している。TROI 実験で得られた主な知見は以下のとおりである。

- ・ 自発的な水蒸気爆発が生じた実験は、融点を大きく上回る過熱度を溶融物に対して与えるなどの実機と異なる条件であり、その他の実験では自発的な水蒸気爆発は生じていない。
- ・ 水深が深い場合 (130cm) には、内部トリガリングによる水蒸気爆発は発生していない。水深が深いことにより、溶融物粒子が底部に到達するまでの沈降時間が長くなり、溶融物粒子が固化しやすい状況となる。このため、溶融物粒子が底部に接触することで発生するトリガリングの可能性は低減する可能性がある^[9]。

(6) SERENA 実験

SERENA 実験は、OECD/NEA 主導のもと実施されている実験であり、2001 年から 2006 年にかけて実施されたフェーズ 1 と、2007 年から 2012 年にかけて実施されたフェーズ 2 に分かれている。フェーズ 1 では既存の実験に対する再現解析が行われた。また、フェーズ 2 では KROTOS 及び TROI 装置を使用した実験と、その再現解析が行われた。さらに、両フェーズにおいて実機原子炉を想定した解析が行われた。フェーズ 2 で行われた実験の実験条件及び実験結果を表 3-7 に示す。

フェーズ 1、フェーズ 2 においてそれぞれ得られた知見は以下のとおりである。

フェーズ 1

- ・ (解析) 解析コードはアルミナを用いた実験によって調整されており、 $UO_2 \cdot ZrO_2$ コリウムの爆発による機械的エネルギー変換効率を過大評価する傾向にある。
- ・ (解析) 予測される炉内水蒸気爆発の最大荷重は原子炉圧力容器の破損強度と比べて十分小さい。
- ・ (解析) 予測される炉外水蒸気爆発の最大荷重は原子炉格納容器に影響を与える可能性があるが、解析コードの不確かさとばらつきが大きく、その程度を推定することは難しい。

フェーズ 2

- ・ (実験) $80\%UO_2 \cdot 20\%ZrO_2$ コリウムは、 $70\%UO_2 \cdot 30\%ZrO_2$ コリウムに比べて、やや爆発のエネルギーが大きい。これはフェーズ 1 の結果と逆の傾向であり、さらに考察が必要。
- ・ (実験) $UO_2 \cdot ZrO_2$ のみで構成されるコリウムは、アルミナと比べて爆発のエネルギーは小さい。
- ・ (実験) コリウムの組成に酸化物以外 (金属の単体など) が含まれる場合について、酸化と水素ガス生成による影響は定量化できなかった。
- ・ (実験) 全ての観測された爆発の機械的エネルギー変換率は、従来観測されていたエネルギー変換率と同様に、比較的小さい。これは、 UO_2 の密度が高いために熔融コリウムの粒子径が小さくなり、固化が促進されて水蒸気爆発への寄与が小さくなったことと、粗混合段階のボイド率が上昇して爆発のエネルギーを低減したことによると推測されている。

3.2 F C I 実験の知見の整理

前項で示した F C I 実験の知見を整理し、原子炉圧力容器外水蒸気爆発の可能性及び原子炉圧力容器外 F C I の圧力スパイクの影響因子について考察する。

(1) 原子炉圧力容器外 F C I の水蒸気爆発の可能性

酸化アルミニウムと鉄からなる模擬熔融物を用いた ALPHA 実験及びアルミナを用いた

KROTOS 実験では、外部トリガーなしで水蒸気爆発が発生しているが、 UO_2 を用いた KROTOS, FARO, COTELS 実験では外部トリガーなしでは水蒸気爆発は発生していない。 UO_2 混合物では一般的に過熱度が小さいため、粗混合粒子表面が早期に固化し、蒸気膜が崩壊しても溶融物の微細化が起きにくく、水蒸気爆発の発生が抑制されるためと考えられる。

TROI 実験では UO_2 混合物を用いた場合でもトリガーなしで水蒸気爆発が発生している例 (TROI-10, 12, 13, 14) が報告されている。TROI-10, 12 は、溶融物温度が 3800K 程度の高い温度での実験条件である。また、TROI-13, 14 の溶融物温度は、それぞれ 2600K, 3000K であるが、TROI-13 では、温度計測に問題があり実際には 3500K 以上と推測されている。また、TROI-14 では、二つの温度計が異なる最高温度 (4000K, 3200K) を示しており、温度計測の不確かさが大きいとされている。以上を踏まえると、TROI 実験の溶融物温度はかなり高い実験条件と考えられ、他の実験で想定しているような実機条件に近い溶融物温度では水蒸気爆発の発生可能性は十分小さいと考えられる。

TROI 実験と実機条件の比較を検討するために、模擬溶融物にコリウム (UO_2/ZrO_2) を用いた TROI-10, 12, 23, 25 と実機条件の比較を表 3-8 に示す。この表では、図 3-11 に示す Ricou-Spalding 式による粒子化割合^[10]の概算値を示している。溶融物温度が高く過熱度が大きい TROI-10, 12 では、自発的水蒸気爆発が観測されている。これに対して、溶融物温度が高く過熱度が大きい水深が 1.3m と深い TROI-23 では、水蒸気爆発は発生していない。これは、水深が深いことにより、溶融物粒子が底部に到達するまでの沈降時間が長くなり、溶融物粒子が固化しやすいため、溶融物粒子が底部に接触することで発生するトリガリングを抑制したと考えられる^[9]。

水蒸気爆発が発生した TROI-10, 12 の粒子化割合は約 60%であるが、水深がより深い TROI-23 では、粒子化割合が約 80%と比較的大きい値となっており、底部に到達する前に固化する溶融物粒子が比較的多いと考えられる。一方、水深及び粒子化割合は TROI-10, 12 と同程度であるが、溶融物温度がやや低い TROI-25 では、蒸気発生による圧力上昇 (Steam Spike) は生じているが、水蒸気爆発は発生していない。溶融物温度が低い場合、過熱度が小さく粒子が固化しやすいため、水蒸気爆発が抑制されたものと考えられる。

実機条件では、溶融ジェットの初期直径は計装配管口径 (5 cm) ~ 制御棒駆動機構ハウジングの直径 (15cm) 程度と想定されるが、ペDESTAL 注水対策により水深は 2.0m 以上となる。これより、粒子化割合は約 60%~100%となるが、溶融物温度が 2600K 以下と水蒸気爆発が発生した TROI 実験よりも十分低いと考えられ、大規模な水蒸気爆発の発生の可能性は十分小さいと考えられる。

また、いくつかの TROI 実験では水蒸気爆発が発生したときの機械的エネルギー変換効率が報告されている (表 3-6)。これらの中で自発的に水蒸気爆発が発生したとされる TROI-13 の機械的エネルギー変換効率は 0.4%である。これは、ALPHA 実験 (表 3-2) や KROTOS 実験 (表 3-3) で観測されているように、アルミナによる金属模擬溶融物実験の値に対して比較的小さい値となっている。

また、KROTOS 実験 (K52, K53, K46) では、 UO_2 混合物を用いた実験でも外部トリガーを与

えた場合は水蒸気爆発が観測されているが、これらの実験ケースはサブクール度が大きい実験ケースである (K52 のサブクール度：102K, K53 のサブクール度：122K, K46 のサブクール度：83K)。したがって、サブクール度が大きい場合には、 UO_2 混合物を用いた場合でも、水蒸気爆発の可能性が高くなることが考えられる。これは、サブクール度が大きい場合には、粗混合粒子の蒸気膜の安定度が低下し、蒸気膜の崩壊が発生しやすいことが要因と考えられる。

しかし、KROTOS 実験の K52, K53 と同程度の高サブクール度の条件である FARO 実験の L-31 (サブクール度：104K), L-33 (サブクール度：124K) では、水蒸気爆発が発生していない。これらの実験の UO_2 混合物量は、KROTOS 実験が数 kg であるのに対して 100kg 程度であり、より実機条件に近い。

また、COTELS 実験の高サブクール実験 (A11) でも水蒸気爆発は発生していない。COTELS 実験は、BWR の原子炉圧力容器外 F C I を模擬した実験であり、熔融物に原子炉圧力容器内の構造物を想定したステンレススチールを含んでいる。また、熔融物量も 50kg 程度であり、KROTOS 実験よりも実機条件に近い。

以上より、 UO_2 混合物の熔融物量が少ない KROTOS 実験では、水蒸気爆発が発生しているが、熔融物量が多くより実機体系に近い大規模実験である FARO 実験、COTELS 実験では、水蒸気爆発は発生していない。

F C I 実験では、水蒸気爆発のトリガーを発生させるために、高圧ガスを封入した装置 (KROTOS 実験では最大 20MPa のガスを封入可能な装置) を用いている。水蒸気爆発のトリガーは粗混合粒子の周囲に形成される蒸気膜の崩壊に起因すると考えられており、トリガー装置により圧力パルスを発生させ蒸気膜を不安定化させる効果があると考えられる。実機条件では、このようなトリガー装置で発生させているような圧力外乱となる要因は考えられない。また、熔融物がプール底部に接触することでトリガー要因となることが考えられるが、BWR の原子炉圧力容器外 F C I を模擬した COTELS 実験の実験装置では、BWR のペDESTAL 底部と同様に平板コンクリートを模擬した実験装置としており、実機条件と同様であるが水蒸気爆発は観測されていない。

また、実機条件では、水深が実験条件よりも深くなる可能性があるが、水深が深いことにより、熔融物粒子が底部に到達するまでの沈降時間が長くなり、熔融物粒子が固化しやすい状況となる。このため、熔融物粒子が底部に接触することで発生するトリガリングのリスクは低減する可能性がある。

以上より、BWR の実機条件において水蒸気爆発のトリガーとなる特段の要因は考えられないため、実機条件でも水蒸気爆発の発生リスクは十分小さいと考えられる。

上記の実験条件と実機条件の検討より、実機においては、原子炉格納容器の損傷に至る大規模な原子炉圧力容器外水蒸気爆発の可能性は十分に小さいと考えられる。このため、原子炉圧力容器外 F C I の有効性評価では、蒸気発生による圧力上昇 (圧力スパイク) を評価する。なお、参考として、水蒸気爆発の発生を仮定した場合の影響についても、水蒸

気爆発解析コード（JASMIN^[11]）及び構造応答解析コード（AUTODYN^[12]）若しくはLS-DYNA^[13]）を用いて、水蒸気爆発のトリガーを解析的条件として与えることで水蒸気爆発の発生を模擬した解析を行うことにより、水蒸気爆発による格納容器ペDESTAL構造部への影響を評価し、原子炉格納容器の健全性に影響を及ぼさないことを確認している。

（2） 原子炉圧力容器外FCIの圧カスパイクの影響因子

水蒸気爆発が発生しない場合でも、溶融炉心の冷却材への伝熱による水蒸気発生により圧カスパイクが生じる。ここでは、原子炉圧力容器外FCIの圧カスパイク影響因子について、BWRの原子炉圧力容器外FCIを模擬したCOTELS実験の実験結果を中心に検討する。各ケースの圧力変化を図3-9に示す。COTELS実験では、基本実験ケース（A1）に比較してコリウム量が少ない実験ケース（A4）では、デブリ保有熱量が少なく圧力上昇も低くなる傾向がある。また、COTELS実験では、サブクール度が大きいケース（A5, A6）、プール水深が大きいケース（A9）では、蒸気凝縮により圧力上昇が低くなる傾向がある。

粒子化割合については、COTELS実験では水深は0.4mであるが、ほとんどがプール水中で粒子化した。また、FARO実験では、水深が1～2mであるが、高圧・飽和水の酸化コリウム実験では一部が粒子化し、高圧・飽和水のコリウムに金属成分を含んだ実験では全てコリウムが粒子化している。粒子化割合が大きいほうがプール水への伝熱量が多くなるため、圧力上昇は高くなると考えられる。

粒子径については、COTELS実験結果ではコリウム落下速度の大きいケース（A8, A10）では、基本実験ケース（A1）に比較して、粒子径が小さく初期圧力上昇幅も大きくなる傾向がある。一方、FARO実験では、粒子の質量中央径は比較的大きかったが、実験条件（初期圧力、水深、コリウム落下速度、サブクール度）に対する依存性は低いと報告されている。各UO₂混合物実験の平均的な粒子径は、溶融物量の多いFARO実験では2.6～4.8mm^[4]、COTELS実験では6mm程度^[7]である。

以上の影響因子をBWRプラント体系で考えた場合、以下に分類できる。

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

（3） FCIとMCCIを考慮した格納容器下部水張りの考え方

炉心溶融が進展し炉外に溶融炉心が流出する場合、FCIとMCCIの影響緩和において、格納容器下部への初期水張りが重要なマネジメントとなる。以下では格納容器下部への注水による初期水張りの考え方について示す。

FCIの観点では、これまでのFCI実験結果の知見から、BWRの実機条件では水蒸

気爆発の発生リスクは十分小さいと考えられる。しかし、万が一水蒸気爆発が発生したと想定すると、水深が深いと粗混合が促進され、水蒸気爆発の規模が大きくなる可能性がある。

MCCIの観点では、種々の実験結果から、デブリ上面から除熱を向上させるため、格納容器下部への水張り水深を深くすることにより、熔融炉心が落下時に粒子化され、粒子状ベッドとして堆積することにより、デブリ冷却性を向上させることが影響緩和のために重要である。

以上より、水深が深い場合は、万が一水蒸気爆発が発生した場合の影響が大きくなる可能性があるが、MCCIの影響を緩和する観点からは有利である。したがって、水蒸気爆発の評価により原子炉格納容器の健全性に影響を与えないことを十分確認できる範囲で初期水張りの水深を深くし、熔融炉心の粒子化を促進し、MCCIを緩和する運用とすることが得策と考えられる。

表 3-1 BWR体系における原子炉压力容器内水蒸気爆発の発生確率に関する見解

原子炉压力容器内水蒸気爆発に関する国際会議，文献	BWRの原子炉压力容器内水蒸気爆発に関する議論
OECD/CSNI F C I 専門家会議 (1993) ^[14]	BWRの压力容器下部プレナムは，制御棒案内管で密に占められている。そして，炉心の広範囲でのコヒーレントなリロケーションは，炉心支持板の存在により起こりにくいと考えられる。このような特徴によって，燃料-冷却材の粗混合のポテンシャルが制限され，水蒸気爆発に起因する水-熔融物スラグの運動エネルギーを消失させる可能性がある。したがって，スラグにより破壊された压力容器ヘッドのミサイルに伴う格納容器破損は，PWRよりもBWRの方が起こりにくいと評価される。(T. Okkonen 等)
NUREG/CR-5960 (1994) ^[15]	BWRの下部プレナムには，密に詰められた制御棒案内管があるため，原子炉内水蒸気爆発問題の対象とならない。(T.G. Theofanous 等)
SERG-2 ワークショップ (1996) ^[16]	物理的なジオメトリは爆発的事象の発生に寄与しないため，BWRの α モード格納容器破損確率は，おそらくPWRより小さい。(M. Corradini)
OECD/CSNI F C I 専門家会議 (1997) ^[17]	下部プレナム構造物の存在により，水蒸気爆発の影響を緩和する。現在の知見は，一般にBWRでは原子炉内水蒸気爆発は原子炉格納容器への脅威とならない。(O. Zuchuat 等)

表 3-2 ALPHA 実験の主要な実験条件及び実験結果^[2]

実験名	実験ケース	溶融物組成	溶融物質量 (kg)	圧力(MPa)	水温度(K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー変換効率(%)
ALPHA	STX002	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	289	1.0	No	Yes	-
	STX003	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	292	1.0	No	Yes	-
	STX005	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	300	1.0	No	Yes	-
	STX009	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	289	1.0	No	Yes	-
	STX016	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	295	0.9	No	Yes	0.86
	STX017	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	286	0.9	No	Yes	0.66
	STX018	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	283	0.9	No	Yes	3.33
	STX001	Fe-Al ₂ O ₃	10	0.10	293	1.0	No	No	-
	STX010	Fe-Al ₂ O ₃	10	0.10	297	1.0	No	Yes	-
	STX013	Fe-Al ₂ O ₃	10	0.10	284	1.0	No	No	-
	STX014	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	372	1.0	No	No	-
	STX008	Fe-Al ₂ O ₃	20	1.60	288	1.0	No	No	-
	STX012	Fe-Al ₂ O ₃	20	1.60	290	1.0	No	No	-
	STX015	Fe-Al ₂ O ₃	20	1.00	282	1.0	No	No	-
	STX006	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	298	1.0	No	No	-
	STX011	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	290	1.0	No	Yes	-
	STX019	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	281	0.9	No	Yes	5.67
STX020	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	281	1.0	No	No	-	
STX021	Fe-Al ₂ O ₃	20	0.10	281	0.9	No	Yes	4.05	

表 3-3 KROTOS 実験の主要な実験条件及び実験結果^{[3][4][5]}

実験名	実験ケース	溶融物組成	溶融物質量 (kg)	溶融物温度 (K)	圧力 (MPa)	サブクール度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー変換効率(%)
KROTOS	K38	Alumina	1.5	2665	0.1	79	1.11	No	Yes	1.45
	K40	Alumina	1.5	3073	0.1	83	1.11	No	Yes	0.9
	K41	Alumina	1.4	3073	0.1	5	1.11	No	No	-
	K42	Alumina	1.5	2465	0.1	80	1.11	No	Yes	1.9
	K43	Alumina	1.5	2625	0.21	100	1.11	No	Yes	1.3
	K44	Alumina	1.5	2673	0.1	10	1.11	Yes	Yes	2.6
	K49	Alumina	1.5	2688	0.37	120	1.11	No	Yes	2.2
	K50	Alumina	1.7	2473	0.1	13	1.11	No	No	-
	K51	Alumina	1.7	2748	0.1	5	1.11	No	No	-
	K32	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	3.0	3063	0.1	22	1.08	No	No	-
	K33	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	3.2	3063	0.1	75	1.08	No	No	-
	K35	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	3.1	3023	0.1	10	1.08	Yes	No	-
	K36	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	3.0	3025	0.1	79	1.08	Yes	No	-
	K37	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	3.2	3018	0.1	77	1.11	Yes	No	-
	K45	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	3.1	3106	0.1	4	1.14	Yes	No	-
	K46	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	5.4	3086	0.1	83	1.11	Yes	Yes	-
	K47	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	5.4	3023	0.1	82	1.11	Yes	No	-
	K52	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	2.6	3133	0.2	102	1.11	Yes	Yes	0.02
K53	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	3.6	3129	0.36	122	1.11	Yes	Yes	0.05	

表 3-4 FARO 実験の主要な実験条件及び実験結果^[4]

実験名	実験ケース	溶融物組成	溶融物質量 (kg)	溶融物温度 (K)	圧力 (MPa)	サブクール度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー変換効率 (%)
FARO	L-06	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	18	2923	5	0	0.87	No	No	-
	L-08	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	44	3023	5.8	12	1.00	No	No	-
	L-11	77wt.%UO ₂ -19wt.% ZrO ₂ -4wt.%Zr	151	2823	5	2	2.00	No	No	-
	L-14	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	125	3123	5	0	2.05	No	No	-
	L-19	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	157	3073	5	1	1.10	No	No	-
	L-20	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	96	3173	2	0	1.97	No	No	-
	L-24	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	177	3023	0.5	0	2.02	No	No	-
	L-27	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	117	3023	0.5	1	1.47	No	No	-
	L-28	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	175	3052	0.5	1	1.44	No	No	-
	L-29	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	39	3070	0.2	97	1.48	No	No	-
L-31	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	92	2990	0.2	104	1.45	No	No	-	
L-33	80wt.%UO ₂ -20wt.%ZrO ₂	100	3070	0.4	124	1.60	Yes	No	-	

表 3-5 COTELS 実験の主要な実験条件及び実験結果^[7]

実験名	実験ケース	溶融物組成	溶融物質量 (kg)	圧力 (MPa)	サブクール度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー変換効率 (%)
COTELS	A1	55wt.%UO ₂ -25wt.%Zr-5wt.%ZrO ₂ -15wt.%SS	56.3	0.20	0	0.4	No	No	-
	A4	55wt.%UO ₂ -25wt.%Zr-5wt.%ZrO ₂ -15wt.%SS	27.0	0.30	8	0.4	No	No	-
	A5	55wt.%UO ₂ -25wt.%Zr-5wt.%ZrO ₂ -15wt.%SS	55.4	0.25	12	0.4	No	No	-
	A6	55wt.%UO ₂ -25wt.%Zr-5wt.%ZrO ₂ -15wt.%SS	53.1	0.21	21	0.4	No	No	-
	A8	55wt.%UO ₂ -25wt.%Zr-5wt.%ZrO ₂ -15wt.%SS	47.7	0.45	24	0.4	No	No	-
	A9	55wt.%UO ₂ -25wt.%Zr-5wt.%ZrO ₂ -15wt.%SS	57.1	0.21	0	0.9	No	No	-
	A10	55wt.%UO ₂ -25wt.%Zr-5wt.%ZrO ₂ -15wt.%SS	55.0	0.47	21	0.4	No	No	-
	A11	55wt.%UO ₂ -25wt.%Zr-5wt.%ZrO ₂ -15wt.%SS	53.0	0.27	86	0.8	No	No	-

(注) 溶融物温度は 3000~3100K と見積もられている^{[10][18]}

表 3-6 TROI 実験の主要な実験条件及び実験結果(1/2)^{[8][9][19][20]}

実験名	実験ケース	溶融物組成 (%)	溶融物質量 (kg)	溶融物温度 (K)	圧力 (MPa)	水温度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー変換効率(%)
TROI	1	ZrO ₂ /Zr (99/1)	5	>3373	0.1	365	0.67	-	Steam Spike	-
	2	ZrO ₂ /Zr (99/1)	5.5	>3373	0.1	365	0.67	-	No	-
	3	ZrO ₂ /Zr (99/1)	4.88	>3373	0.1	323	0.67	-	No	-
	4	ZrO ₂ /Zr (99/1)	4.2	>3373	0.1	292	0.67	-	Yes	-
	5	ZrO ₂ /Zr (98.5/1.5)	2.9	3373	0.1	337	0.67	-	Yes	-
	9	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	4.3	3200	0.1	296	0.90	-	No	-
	10	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	8.7	3800	0.117	298	0.67	-	Yes	-
	11	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	9.2	>3800	0.111	296	0.67	-	No	-
	12	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	8.4	3800	0.11	293	0.67	-	Yes	-
	13	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	7.7	2600 ^(注1)	0.108	292	0.67	-	Yes	0.40%
	14	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	6.5	3000 ^(注2)	0.105	285	0.67	-	Yes	-
	17	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)						-	No	-
	18	UO ₂ /ZrO ₂ (78/22)	9.1					-	-	-
	21	UO ₂ /ZrO ₂ (80/20)	17.0	3000	0.110	298	1.30	No	No	-
	22	UO ₂ /ZrO ₂ (80/20)	17.0	2900	0.110	297	1.30	No	No	-
	23	UO ₂ /ZrO ₂ (80/20)	17.0	3600	0.110	293	1.30	No	No	-
24	ZrO ₂	9.5	3600	0.110	288	0.67	No	Yes	-	
25	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	15.0	3500	0.110	287	0.67	No	Steam Spike	-	
26	UO ₂ /ZrO ₂ (80/20)	17.0	3300	0.106	283	0.67	No	Steam Spike	-	

(注 1) 参考文献[19]によれば温度計測に問題があり、実際には 3500K 程度以上と推測されている。

(注 2) 参考文献[19]によれば二つの温度計が異なる最高温度(4000K, 3200K)を示しており、計測の不確かさが大きいとされている。

表 3-6 TROI 実験の主要な実験条件及び実験結果 (2/2) [8] [9] [19] [20]

実験名	実験ケース	溶融物組成 (%)	溶融物質量 (kg)	溶融物温度 (K)	圧力 (MPa)	水温度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー変換効率 (%)
TROI	29	UO ₂ /ZrO ₂ (50/50)	11.5					-	No	-
	32	UO ₂ /ZrO ₂ (87/13)						-	No	-
	34	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	10.5	~3000		341	0.67	Yes	Yes	0.63
	35	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	8	~3000	0.110	334	1.30	Yes	Yes	0.21
	36	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	5.3	~3000		305	0.95	Yes	Yes	0.50
	37	UO ₂ /ZrO ₂ (78/22)	8.1	~3000	0.104	313	0.95	Yes	Yes	0.01
	38	UO ₂ /ZrO ₂ (78/22)	5.3	~3000	0.105	288	1.30	-	No	-
	39	UO ₂ /ZrO ₂ (78/22)	3.4	~3000	0.106	285	1.30	-	No	-
	40	UO ₂ /ZrO ₂ (70/30)	11.1	~3000	0.312	287	1.30	-	No	-
	49	UO ₂ /ZrO ₂ /Zr/Fe (62.3/15/11.7/11)	15.96	2730(3360)				-	-	-
	50	UO ₂ /ZrO ₂ /Zr/Fe (59.5/18/11.9/10.6)	14.46					-	-	-
	51	UO ₂ /ZrO ₂ /Zr/Fe (60.5/16.7/12.1/10.7)	6.3 (14.2 load)	2695(3420)	0.115	294	1.30	Yes	Yes	-
	52	UO ₂ /ZrO ₂ /Zr/Fe (61/16/12/11)	8.6 (14.1 load)	2650	0.116	285	1.30	Yes	Steam Spike	-

(注 1) 参考文献[19]によれば温度計測に問題があり、実際には 3500K 程度以上と推測されている。

(注 2) 参考文献[19]によれば二つの温度計が異なる最高温度 (4000K, 3200K) を示しており、計測の不確かさが大きいとされている。

表 3-7 SERENA 実験（フェーズ2）の主要な実験条件及び実験結果^[22]

実験名	実験ケース	溶融物組成 (wt%)	溶融物質 (kg)	溶融物温度 (K)	圧力 (MPa)	水温度 (K)	水深 (m)	外部トリガー	水蒸気爆発発生	機械的エネルギー 変換効率(%)
SERENA (TROI/ KROTOS)	TS-1	UO ₂ /ZrO ₂ (73.4/26.6)	15.4	~3000	0.4	301	1.0	Yes	Yes	0.12
	TS-2	UO ₂ /ZrO ₂ (68.0/32.0)	12.5	3063	0.2	334	1.0	Yes	Yes	0.28
	TS-3	UO ₂ /ZrO ₂ (71.0/29.0)	15.9	3107	0.2	331	1.0	Yes	Yes	0.22
	TS-4	UO ₂ /ZrO ₂ (81.0/19.0)	14.3	3011	0.2	333	1.0	Yes	Yes	0.35
	TS-5	UO ₂ /ZrO ₂ /Zr/U (76.0/18.3/5.0/0.7)	17.9	2940	0.2	337	1.0	Yes	Steam Spike	0.06
	TS-6	UO ₂ /ZrO ₂ /Fe ₂ O ₃ /FP (73.3/18.5/4.9/3.3)	9.3	2910	0.2	338	1.0	Yes	Yes	0.66
	KS-1	UO ₂ /ZrO ₂ (70.0/30.0)	2.4	2969	0.4	302	1.1	Yes	Yes	0.10
	KS-2	UO ₂ /ZrO ₂ (70.0/30.0)	3.9	3049	0.2	333	1.1	Yes	Yes	0.08
	KS-3	UO ₂ /ZrO ₂ (70.0/30.0)	0.8	2850	-	332	1.1	Yes	_(注1)	_(注1)
	KS-4	UO ₂ /ZrO ₂ (80.0/20.0)	2.3	2958	0.2	332	1.1	Yes	Yes	0.18
	KS-5	UO ₂ /ZrO ₂ /Zr (80.1/11.4/8.5)	1.7	2864	0.2	327	1.1	Yes	Energetic event ^(注2)	_(注2)
	KS-6	UO ₂ /ZrO ₂ /Fe ₂ O ₃ /FP (73.0/20.4/4.1/2.5)	1.7	2853	0.2	340	1.1	Yes	Yes	~0

(注 1) 実験失敗

(注 2) 計測失敗

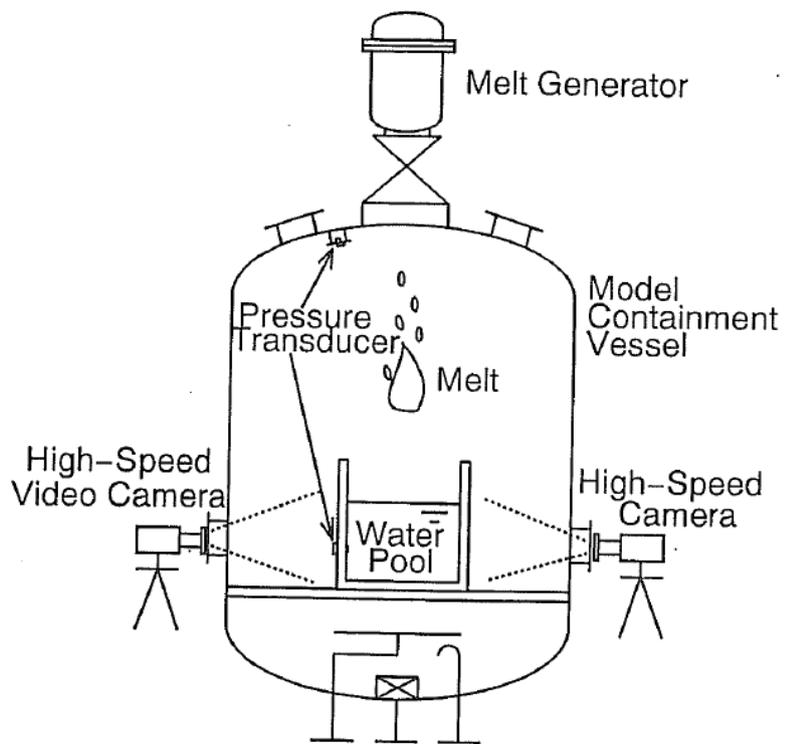
表 3-8 TROI 実験と実機条件の比較

実験ケース	溶融物温度 (過熱度) ^(注1)	溶融 ジェット径	水深	粒子化割合 ^(注2)	水蒸気爆発
TROI-10	3800K (900K)	6.5cm	0.67m	約 60%	Yes
TROI-12	3800K (900K)	6.5cm	0.67m	約 60%	Yes
TROI-23	3600K (700K)	7.4cm	1.30m	約 80%	No
TROI-25	3500K (600K)	8.0cm	0.67m	約 50%	Steam Spike
実機条件	~2600K (~300K)	5~15cm	2.0m~	約 60~100%	-

(注1) 実験条件の過熱度は UO_2/ZrO_2 の相図^[21]より固相線温度を約 2900K とした場合の概算値

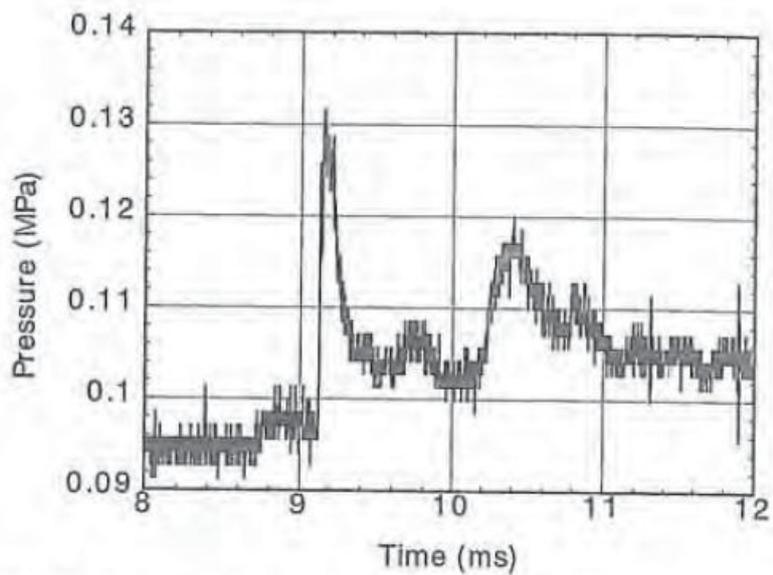
実機条件の過熱度は事故解析結果による下部プレナム部の溶融物（酸化物層）の過熱度の概算値

(注2) Ricou-Spalding 相関式（図 3-11）による概算評価値



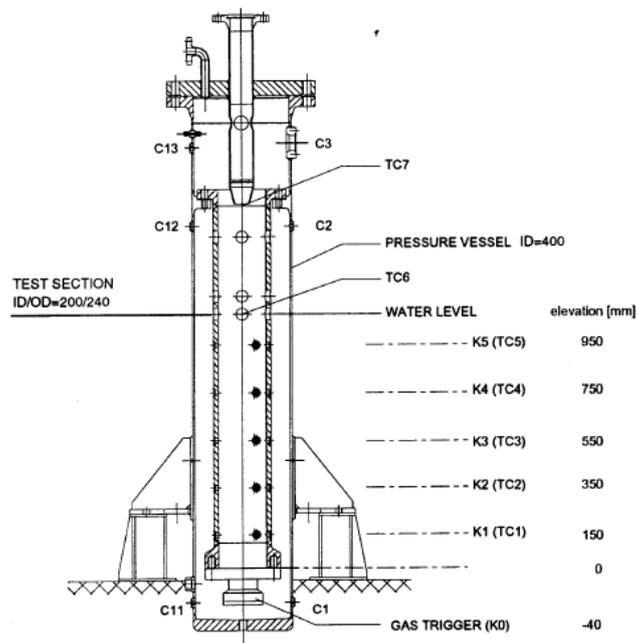
出典：参考文献^[2] p. 371 Fig. 1

図 3-1 ALPHA 実験装置の概要



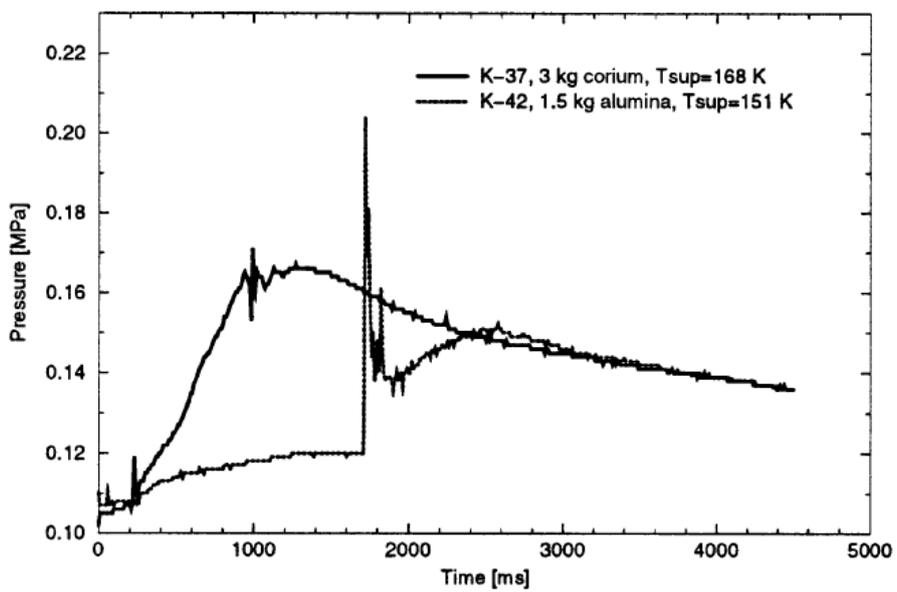
出典：参考文献^[2] p. 380 Fig. 8

図 3-2 ALPHA 実験の圧力評価の例 (STX016)



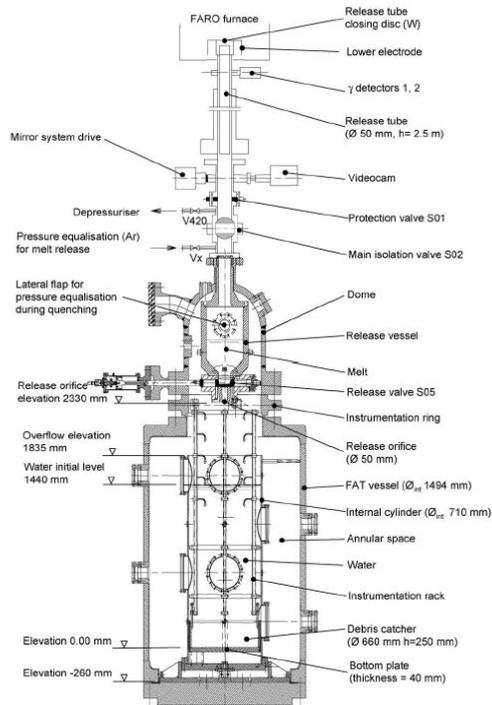
出典：参考文献^[3] p. 380 Fig. 1

図 3-3 KROTOS 実験装置の概要



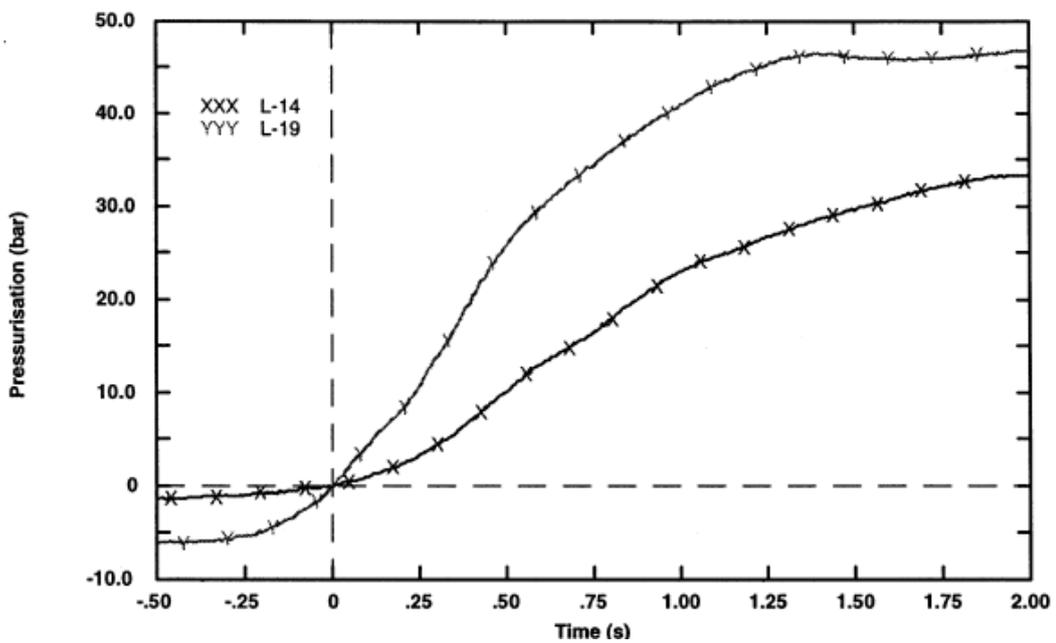
出典：参考文献^[3] p. 385 Fig. 3

図 3-4 KROTOS 実験の代表的圧力変化の例 (K-37, K-42)



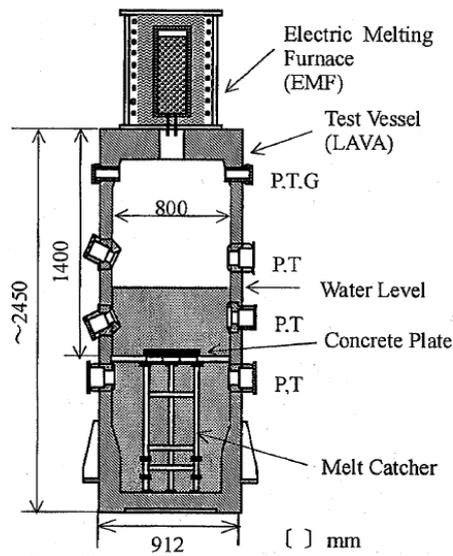
出典：参考文献^[4] p. 1999 Fig. 1

図 3-5 FARO 実験装置の概要



出典：参考文献^[6] p. 229 Fig. 6

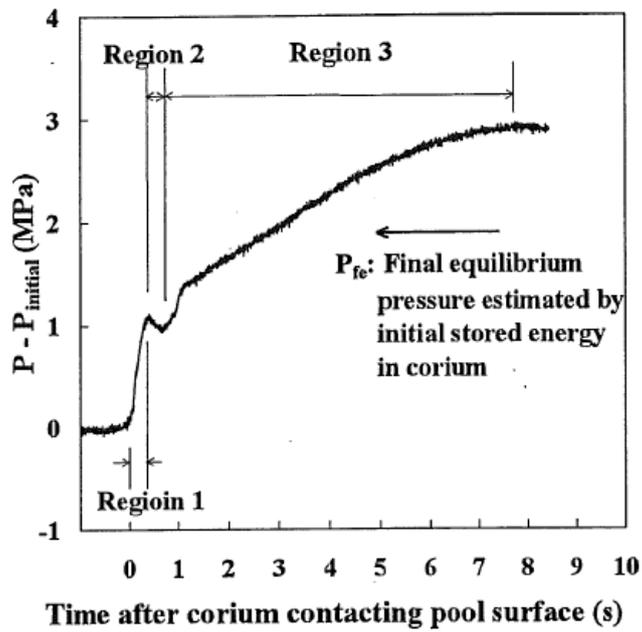
図 3-6 FARO 実験の圧力変化の例 (L-14, L-19)



P: Pressure, T: Temperature,
G: Gas sampling line

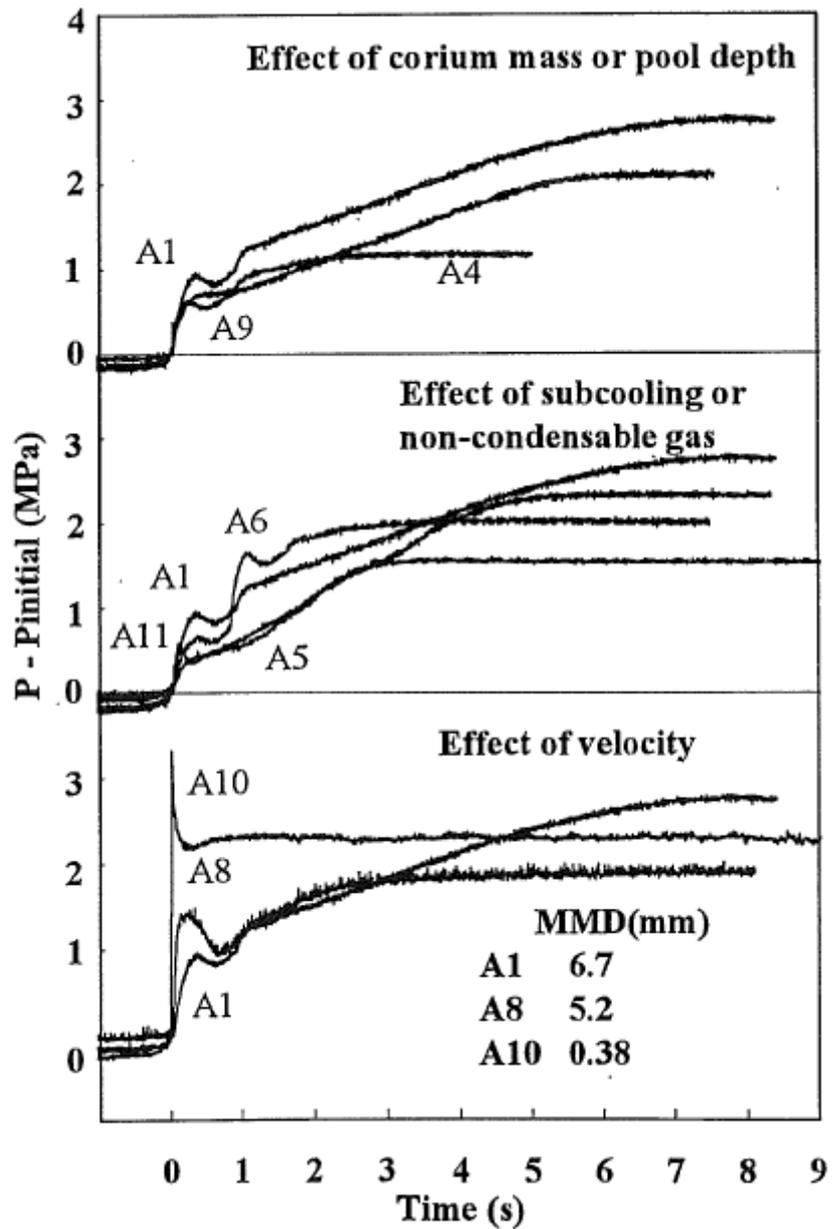
出典：参考文献^[7] p. 37 Fig. 1

図 3-7 COTELS 実験装置の概要



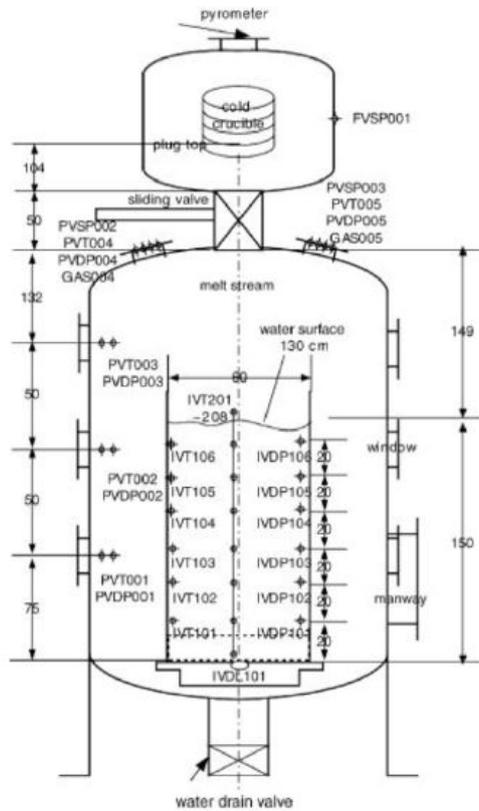
出典：参考文献^[7] p. 38 Fig. 2

図 3-8 COTELS 実験の圧力変化の例 (A1)



出典：参考文献^[7] p. 38 Fig. 3

図 3-9 COTELS 実験の各実験ケースの圧力変化



Expl.:
 IVDP - water dynamic pressure
 PVT - pressure vessel temperature
 PVDP - pressure vessel dyn. pressure
 PVSP - pressure vessel static press.
 IVDL - bottom dynamic load
 IVT - water temperature

2. set up
 (surely from TROI-50
 experiment)

出典：参考文献^[8] Appendix B. p.202

図 3-10 TROI 実験装置の概要

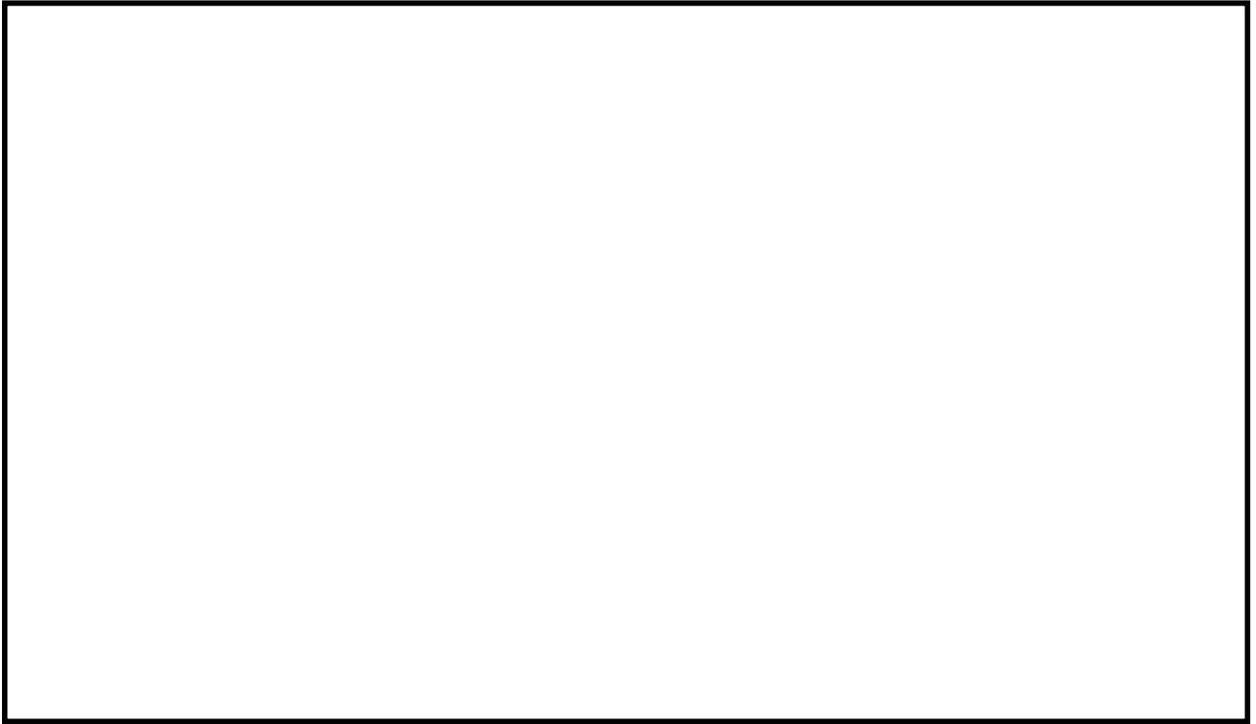


図 3-11 Ricou-Spalding 相関式による粒子化割合のマップ

4. 不確かさに関する整理

ここでは原子炉圧力容器外 F C I について、有効性評価の不確かさ評価を行う。なお、前項で述べたように、原子炉圧力容器外 F C I における水蒸気爆発の発生可能性は低いことから、ここでは圧カスパイクの評価について検討する。

前項で示した既存 F C I 実験の知見の整理より、原子炉圧力容器外 F C I の圧カスパイクに影響する因子の分類として以下が考えられる。

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

また、実機体系では原子炉圧力容器下部領域の圧力変化が原子炉格納容器のドライウェル空間に伝播される現象を伴うことから、影響因子として以下を追加する。

- ・ 原子炉格納容器内での水蒸気の流動

上記の影響因子の不確かさに対する感度解析を行うために、各影響因子の不確かさを解析モデルで考慮する方法について以下に示す。

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

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

ペDESTAL領域の水位に対しては、水深が深いほうが溶融炉心の細粒化量が大きくなる傾向がある。この場合、細粒化した粒子から水への伝熱量が多くなるので、圧カスパイクは厳しくなる方向である。本影響因子は解析モデルパラメータではないため、不確かさ評価は行わない。

(2) 溶融炉心の落下量及び粒子化（破損口径，粒子化割合，落下速度）

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

の径方向侵食による破損口拡大も考慮されている。

細粒化量に関して、MAAPではRicou-Spalding式で評価される。Ricou-Spalding式では、エントレインメント量（細粒化量）を流入流体の速度（ジェット速度）と両流体の密度比に関連させたモデルであり、液-液混合問題において広く利用されている相関式である。落下する炉心溶融物は円柱ジェットで冷却材中に突入することを想定し、円柱ジェット外周部の侵食として粒子化割合を評価している。円柱ジェットのエントレインメント速度（m/s）は、次式で与えている。

$$m_{\text{ent}} = E_o \left(\frac{\rho_w}{\rho_{\text{dj}}} \right)^{1/2} u_{\text{dj}} \quad (1)$$

ここで、 E_o : エントレインメント係数

u_{dj} : ジェット速度 [m/s]

ρ_{dj} : ジェット密度 [kg/m³]

ρ_w : 水密度 [kg/m³]

水中でのジェット速度を一定と仮定し、水面から垂直方向に積分すると、プール底部（水深； ΔH_{pool} ）におけるジェット直径が(2)式のように得られる。

$$d_{\text{dj}} = d_{\text{dj},o} - 2E_o \left(\frac{\rho_w}{\rho_{\text{dj}}} \right)^{1/2} \Delta H_{\text{pool}} \quad (2)$$

(2)式を用いて、溶融ジェット断面の減少分が粒子化割合であるため、粒子化割合 Φ_{ent} は次式のように計算される。

$$\Phi_{\text{ent}} = \frac{d_{\text{dj},o}^2 - d_{\text{dj}}^2}{d_{\text{dj},o}^2} \quad (3)$$

以上の評価式において、デブリ粒子化割合に影響するパラメータは、エントレインメント係数、初期デブリ直径、圧力（僅かではあるが水の密度に影響）及びプール水深である。このうち溶融物ジェット径は保守的に設定しており、また、プール水深は解析モデルパラメータではない。

エントレインメント係数については、MAAPでは代表的なFCIの大規模実験であるFARO実験に対するベンチマーク解析によって範囲を設定しており、推奨範囲は□□～□□となっているため、粒子化量の不確かさとしてエントレインメント係数の感度を確認する。FARO実験条件は、水プールの水深は0.87～2.05m、水プールのサブクール度は飽和～124K、雰囲気圧力条件は2～5.8MPa（高圧条件）、0.2～0.5MPa（低圧条件）の範囲で行われており、一方、実機条件では、格納容器下部の水位は2～4m程度、格納容器下部内の冷却材の

サブクール度は、飽和～90K程度、雰囲気圧力は0.2MPa[abs]程度であることを考慮すると、実験条件は有効性評価解析の特徴的な条件をおおむね包絡しており、ベンチマーク解析で検討されたエントレインメント係数の範囲で感度を確認すれば十分といえる。

溶融炉心の落下速度は、原子炉圧力容器内外の圧力差、溶融炉心の高さ（水頭）及び溶融炉心の落下距離に依存する。原子炉減圧により原子炉圧力容器内外の圧力差が十分小さくなることから、圧力差の不確かさの影響は小さい。また、有効性評価では原子炉圧力容器の下部プレナム部に全量に近い溶融炉心が堆積しており、原子炉圧力容器の破損位置も原子炉圧力容器底部中心となっているため、溶融炉心の水頭が高い状態となっている。この場合、溶融炉心の流出速度が大きく落下量も多くなるため、圧力スパイクの評価も厳しくなる。したがって、溶融炉心の水頭の不確かさ評価は必要ない。一方、落下距離については、プール水位に不確かさがある。BWR 5, Mark-I 改良型格納容器プラントの例では、落下距離の不確かさをプール水位の最大変動幅（3.4m）と仮定すると、ペダスタル底部から原子炉圧力容器底部までの距離（約 9.5m）の4割程度である。溶融炉心の落下速度が、落下距離の平方根に比例すると考えると、落下速度の不確かさは2割程度である。式(1)より溶融炉心の落下速度（ジェット速度）の不確かさはエントレインメント係数の不確かさとして評価できる。また、落下速度の不確かさはエントレインメント係数の不確かさ幅に包絡されている。したがって、溶融炉心の落下速度の不確かさの影響は、エントレインメント係数の不確かさ評価で確認できるため、落下速度の不確かさ評価は行わない。

(3) プール水とデブリ粒子との伝熱（デブリ粒子径）

水中でエントレインされた高温のデブリ粒子は、その周囲を蒸気膜が覆う状態となり、デブリ粒子の熱伝達は膜沸騰熱伝達と輻射熱伝達に支配される。MAAPではエントレインメントしたデブリ粒子の温度を、これらの熱伝達を考慮した機構論的モデルにより計算する。また、デブリ粒子から水への伝熱は、デブリ粒子の径に直接依存する。MAAPでは、デブリ粒子径はジェットの表面張力に依存するモデルにより計算される。デブリ粒子径の導出式には、粒子径ファクタ（モデルパラメータ）が乗じられている。

デブリの粒子径ファクタについては、MAAPでは代表的なFCIの大規模実験に対するベンチマーク解析によって範囲を設定しており、原子炉圧力容器下部プレナム部に対して推奨範囲は ～となっているため、デブリ粒子の伝熱の不確かさは粒子径の不確かさとして考慮する。FARO 実験条件は、水プールの水深は 0.87～2.05m、水プールのサブクール度は飽和～124K、雰囲気圧力条件は 2～5.8MPa（高圧条件）、0.2～0.5MPa（低圧条件）の範囲で行われており、一方、実機条件では、格納容器下部の水位は 2～4m程度、格納容器下部内の冷却材のサブクール度は、飽和～90K程度、雰囲気圧力は 0.2MPa[abs]程度であることを考慮すると、実験条件は有効性評価解析の特徴的な条件をおおむね包絡しており、ベンチマーク解析で検討された範囲で感度を確認すれば十分といえる。

(4) 原子炉格納容器内での水蒸気の流動

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

以上のFCIの不確かさに関する整理結果を表 4-1 に示す。また、FCIにおける不確かさに関するフローを図 4-1 に示す。

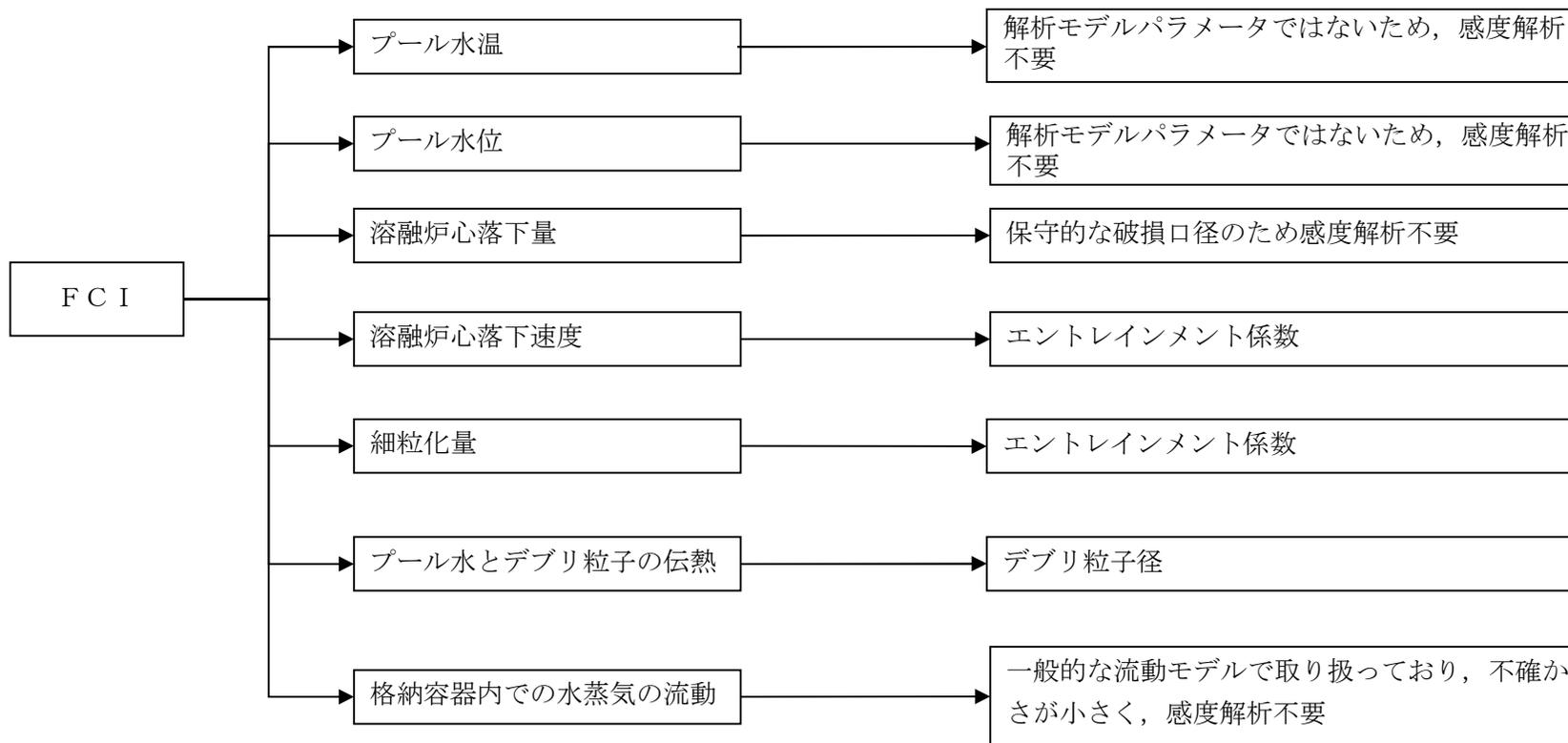


図 4-1 FCI における不確かさに関する流れ図

表 4-1 F C I の不確かさに関する整理結果(1/2)

影響因子	実機での実現象	解析上の取り扱い	感度解析条件
プール水温	ペDESTAL注水の水温によりペDESTAL領域のプール水温が決まる。	ペDESTAL注水の水温は、水源温度の実績値に対して高めの温度を設定している。	解析モデルパラメータではないため、感度解析は行わない。
プール水位	ペDESTAL部の注水により水位が上昇するが、水位がペDESTAL部からドライウェル部への開口部に到達すると、プール水はドライウェル側に流出するため水位はこれ以上上昇しない。	有効性評価では、保守的に高めの水位としてペDESTAL部の開口部下端まで水位があるとしている（BWR 5 Mark-I 改良型格納容器プラントの例）。	解析モデルパラメータではないため、感度解析は行わない。
熔融炉心落下量	破損口径と同じ径の大きさで炉心デブリが流出し、破損口も侵食すると想定される。	破損口径と同じ径で炉心デブリが流出する。破損口の侵食も考慮される。	原子炉圧力容器底部の口径が大きい貫通部として制御棒ハウジングを想定しているため感度解析は不要。
熔融炉心落下速度	原子炉圧力容器内外圧力差、熔融炉心の水頭、落下距離によって落下速度が決まる。	原子炉圧力容器内外圧力差、熔融炉心の水頭、落下距離によって落下速度が決まる。	エントレインメント係数

表 4-1 F C I の不確かさに関する整理結果(2/2)

影響因子	実機での実現象	解析上の取り扱い	感度解析条件
細粒化量	デブリジェット径が大きいため、水中に落下する炉心デブリのうち、エントレインメントされる部分はジェットの表面近傍に限られると想定される。	デブリジェットに対して、Ricou-Spalding 式によって評価される。	エントレインメント係数
プール水とデブリ粒子の伝熱	デブリ粒子から水へ膜沸騰伝熱及び輻射熱伝達から伝熱量が決まる。	デブリ粒子から膜沸騰伝熱及び輻射熱伝達を考慮したモデルによって評価される。	デブリ粒子径
格納容器内での水蒸気の流動	ペDESTAL領域で発生した水蒸気が圧力差と流動抵抗によりドライウェル領域へ移行すると想定される。	ノード・ジャンクションモデルに従い、原子炉格納容器内を流れる水蒸気量が評価される。	一般的な流動モデルで取り扱っており、不確かさが小さく、感度解析不要。

5. 感度解析と評価

4章において抽出したパラメータに関し、感度解析を実施し、有効性評価に対する影響度合いを確認する。

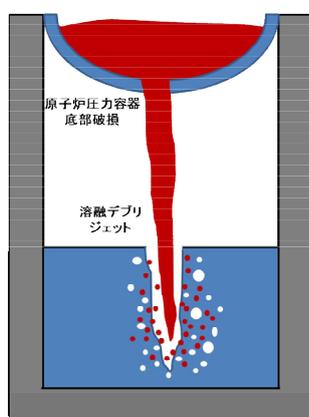
感度解析のベースケースは、BWR 5 Mark-I 改良型格納容器プラントにおける「高圧・低圧注水機能喪失（原子炉圧力容器破損）」である。

(1) Ricou-Spalding のエントレインメント係数

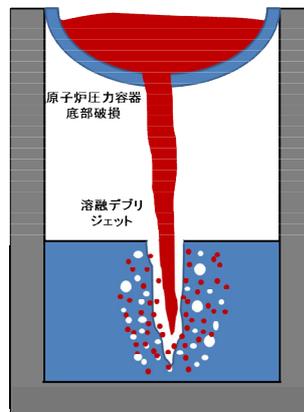
a. 解析条件

Ricou-Spalding のエントレインメント係数は、ベースケースではMAAP推奨範囲（～）のうちおよそ中間となる を設定しているが、感度解析ケースでは、MAAPの当該変数の推奨範囲のうち最大値と最小値 , を設定する。

項目	エントレインメント係数	設定根拠
ベースケース	<input type="text"/>	MAAP推奨範囲のノミナル値
感度解析ケース	<input type="text"/>	MAAP推奨範囲の最小値
	<input type="text"/>	MAAP推奨範囲の最大値



ベースケース



感度解析ケース

エントレインメント係数を大きく（小さく）して細粒化割合が大きく（小さく）なるように設定

b. 解析結果

図 5-1-1 及び図 5-1-2 にエントレインメント係数の感度解析結果を示す。

ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は原子炉圧力容器破損以降に現れる。約 4.3 時間の時点で原子炉圧力容器の破損が発生しており、その時の格納容器圧力の上昇は、感度解析ケース（最大値）の方が僅かに大きい結果となっている。また、格納容器下部水温については、原子炉圧力容器の破損に伴う熔融炉心の落下時点での温度上昇は感度解析ケース（最大値）の方が僅かに高い結果となっている。これは、エントレインメント係数を大きくすることで細粒化が進み、水との接触面積が大きくなり、水蒸気を短期間に発生させる効果があるためである。

c. 評価

エントレインメント係数の圧力スパイクに対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さい。

(2) デブリ粒子径

a. 解析条件

デブリ粒子径には不確かさがあり、粒子径が小さい場合に圧力スパイクが大きくなると考えられる。原子炉圧力容器下部プレナム部の粒子径ファクタは、ベースケースではMAAP推奨範囲（～）のうちおよそ中間となる を設定しているが、感度解析ケースでは、MAAPの当該変数の推奨範囲のうち最小値と最大値 , を設定する。なお、格納容器下部の粒子径ファクタは、固定値 を設定している。

項目	粒子径ファクタ	設定根拠
ベースケース	<input type="text"/>	MAAP推奨範囲のノミナル値
感度解析ケース	<input type="text"/>	MAAP推奨範囲の最小値
	<input type="text"/>	MAAP推奨範囲の最大値

b. 解析結果

図 5-2-1 及び図 5-2-2 に、デブリ粒子径の感度解析結果を示す。

粒子径ファクタは、原子炉压力容器下部プレナム部の細粒化に適用されていることから、本解析には、原子炉压力容器下部プレナム部の細粒化効果が含まれる。原子炉压力容器下部プレナム部に関する考察は添付 1 にて行っており、原子炉圧力への影響は僅かであることが確認されている。原子炉压力容器の破損時刻は、感度解析ケース（最小値）の方が僅かに早い結果となっている。これは、デブリ粒子の径が小さくなることで下部プレナムに残留している冷却材の蒸発が早くなり、結果として原子炉压力容器の破損が早まっている。約 4.3 時間で原子炉压力容器の破損に至り、熔融炉心が格納容器下部に落下し、水蒸気発生に伴う圧力上昇となり、感度解析ケース（最小値）の方が早く上昇する結果となっている。これは、前述のとおり、感度解析ケース（最小値）の方が原子炉压力容器の破損が早くなるためであり、この時の圧力上昇幅を比較すると、ベースケースと感度解析ケースとで大きな差はない。また、格納容器下部水温についても、原子炉压力容器の破損後の温度上昇幅はベースケースと感度解析ケースとで大きな差はない。

c. 評価

デブリ粒子径の圧力スパイクに対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さい。

(3) 感度解析パラメータの組み合わせ

(2) で示したようにデブリ粒子径の圧力スパイクへの感度はほとんどない。このため、エントレインメント係数とデブリ粒子径の感度解析パラメータを組み合わせた解析は、エントレインメント係数の保守側のパラメータの感度解析とほぼ同じとなる。

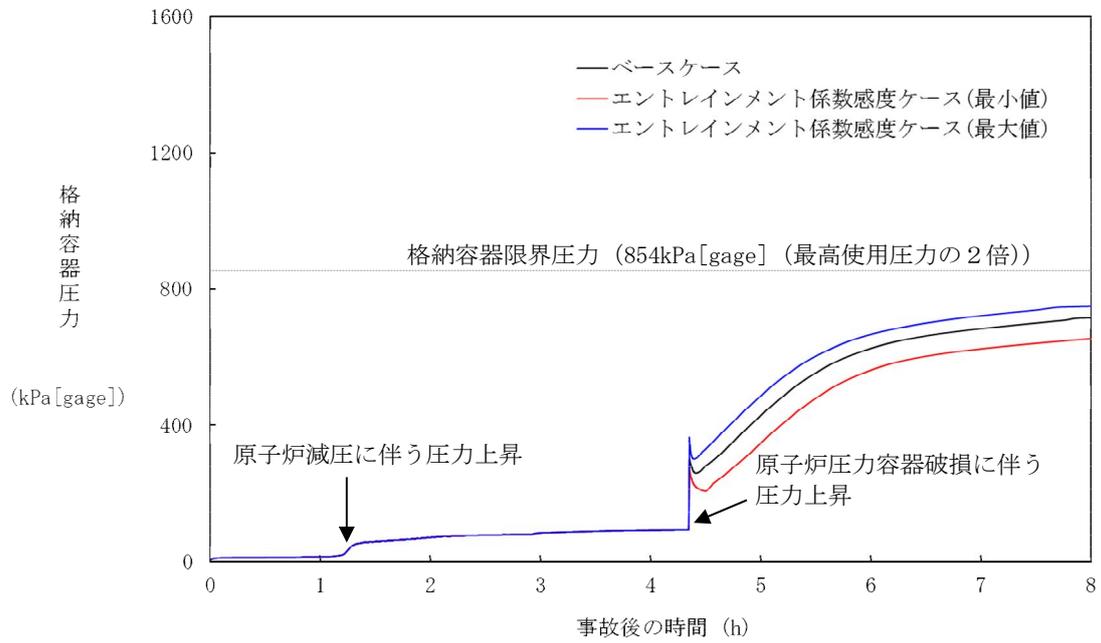


図 5-1-1 エントレインメント係数の感度解析 (ドライウェル圧力)

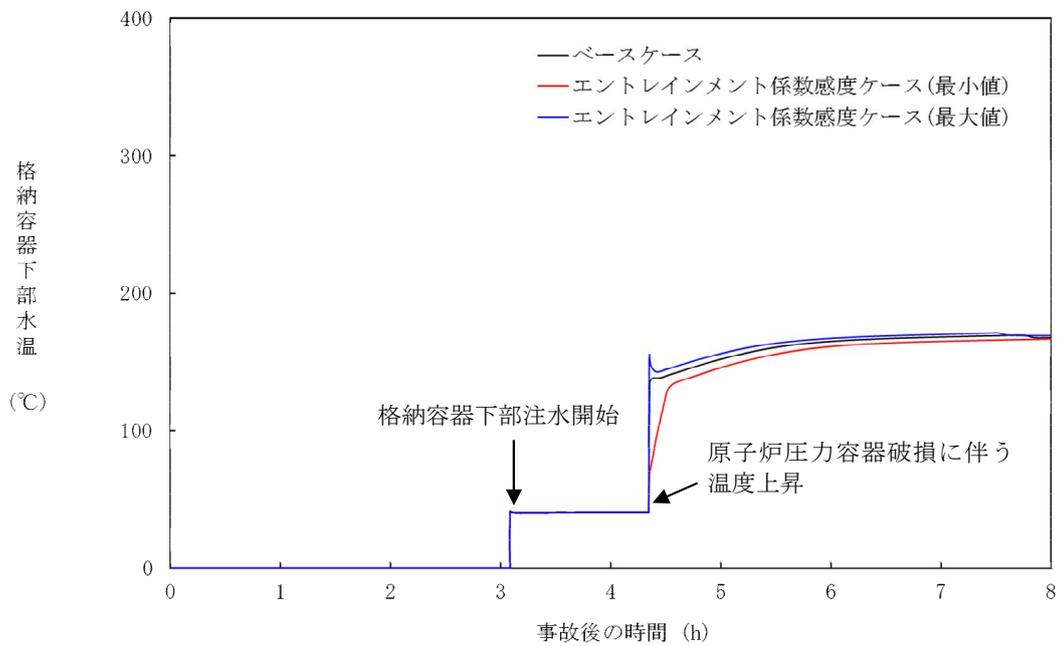


図 5-1-2 エントレインメント係数の感度解析 (格納容器下部水温)

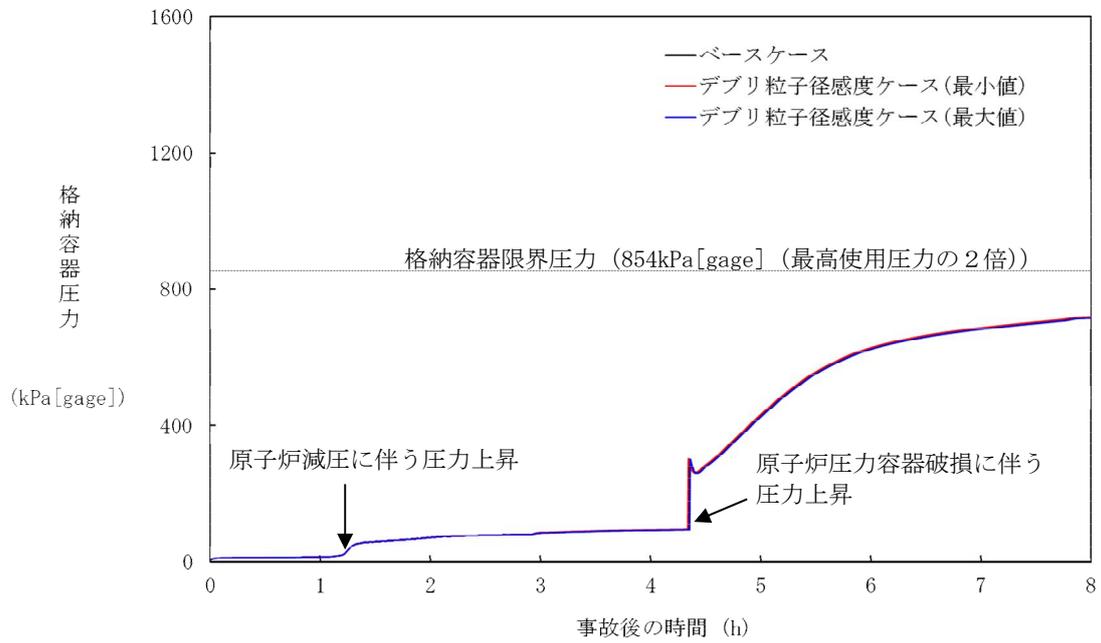


図 5-2-1 デブリ粒子径の感度解析 (ドライウェル圧力)

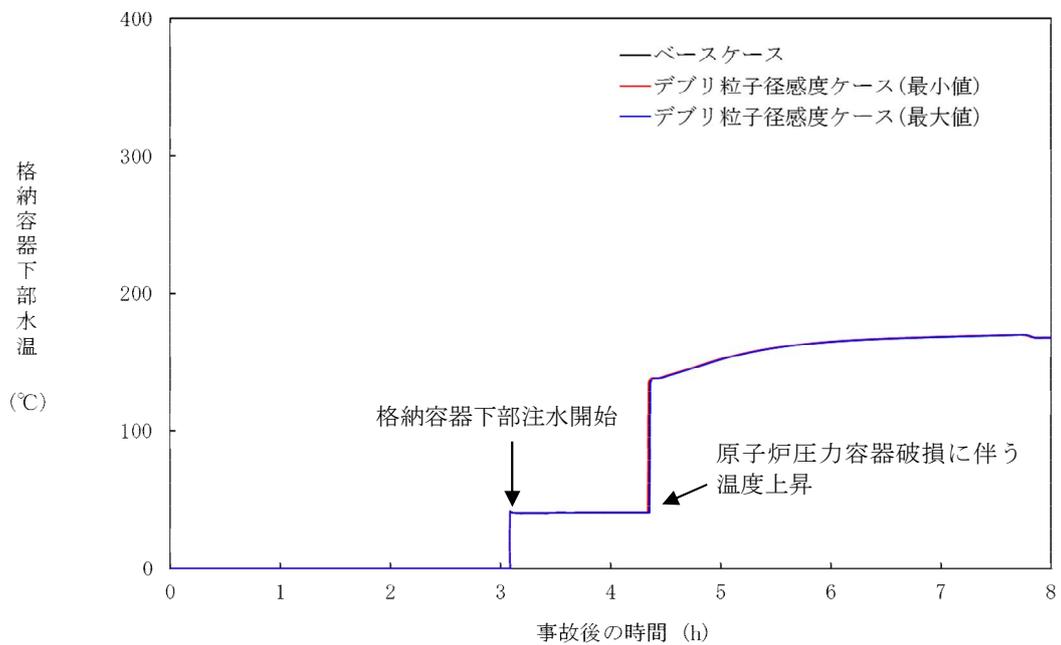


図 5-2-2 デブリ粒子径の感度解析 (格納容器下部水温)

6. まとめ

原子炉圧力容器外におけるFCIについては、これまでに実ウランを用いて種々の実験が行われているが、外部からの強制的なトリガーを与えない場合には水蒸気爆発は発生しないという結果が得られている。外部トリガーを与えた場合でも水蒸気爆発に至らなかったケースが複数確認されており、また、水蒸気爆発が発生した場合においても機械的エネルギーへの変換効率は小さく、大規模な水蒸気爆発には至っていない。したがって、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて小さいと考えられる。

原子炉圧力容器外FCIのうち、圧力スパイクへの影響因子について、実現象と解析モデルにおける取り扱いに着目し、以下に挙げるものを抽出した。

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

これらの項目について、不確かさの幅を考慮した感度解析を実施し、圧力スパイクに対する影響を評価した結果、いずれの項目においても圧力スパイクに対する感度は小さく、重大事故等対策の有効性評価に影響を与えないことを確認した。

付録1 FARO 実験によるMAAPの圧力スパイクモデル妥当性確認

1. FARO 実験の概要

F C I の代表的実験である FARO 実験は、 $UO_2/ZrO_2/Zr$ 熔融混合物を噴出させ、装置下部の冷却材との相互作用を検証する実験である。実験装置、実験条件及び実験結果の概要は 3.1 章 (3) FARO 実験に記載している。

2. MAAP コードによる FARO 実験の検証解析

MAAP コードでは、熔融炉心と冷却材の相互作用を計算し、圧力スパイクを取り扱うモデルに関するパラメータのうち、三つのモデルパラメータが FARO 実験のベンチマーク解析によって妥当性を評価されている。熔融炉心のエントレインメント係数、
及び粒子径ファクタである。

エントレインメント係数は、ジェット速度と密度比から熔融炉心のエントレインメント量を計算する際の係数であり、細粒化モデル (Ricou-Spalding モデル) に使用される。エントレインメント量はプール水への伝熱量に寄与する。また、エントレインメント速度 (m/s) を求める下式からは、プール底部におけるジェット直径、ジェットの粒子化割合が求められる。

$$m_{ent} = E_o \left(\frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} u_{dj}$$

E_o : エントレインメント係数

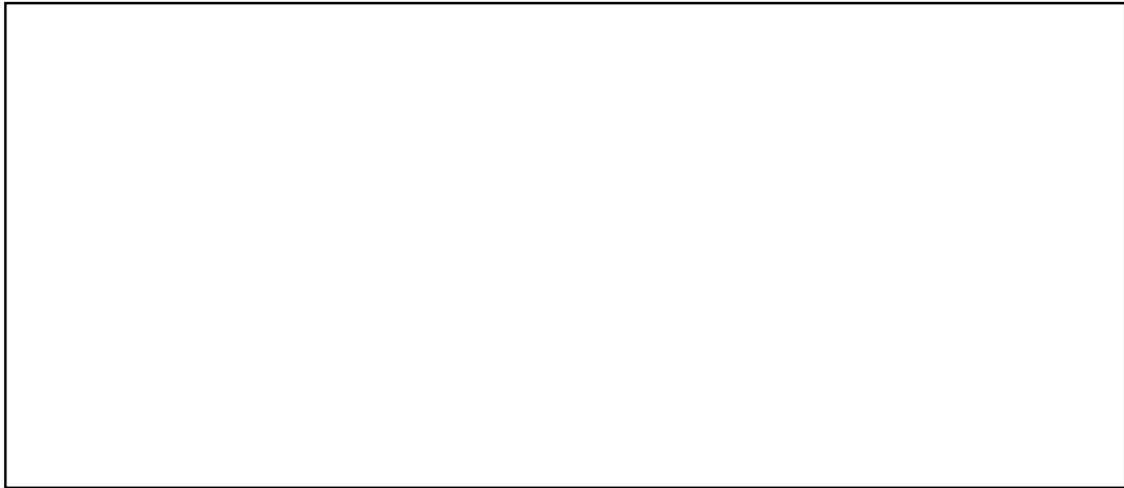
u_{dj} : ジェット速度 [m/s]

ρ_{dj} : ジェット密度 [kg/m³]

ρ_w : 水密度 [kg/m³]

粒子径ファクタは、ジェット表面からエントレインメントを受けた粒子の直径を計算する際の係数である。計算された粒子径は、粒子の沈降速度やデブリ温度の計算に用いられる。

圧力スパイクモデルのベンチマーク解析における仮定を以下に示す。



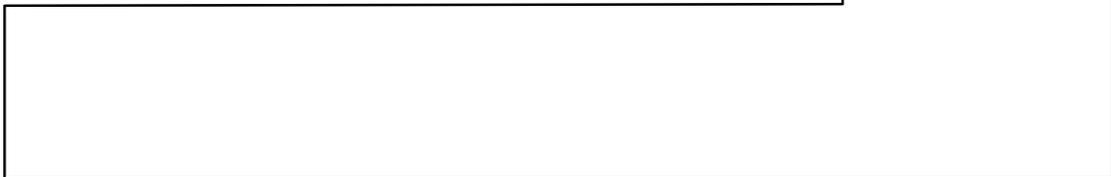
上記の仮定によって、解析結果と実験結果の比較には制限があるが、ピーク圧力の上昇（すなわち、圧カスパイク挙動）と圧力の上昇速度については、比較が可能である。

付図 1, 付図 2, 付図 3, 付図 4, 付図 5, 付図 6, 付図 7, 付図 8, 付図 9, 付図 10, 付図 11 及び付図 12 に L-06, L-08, L-14, L-11 実験の圧力及びデブリ粒子径及び堆積デブリ質量の実験結果と, MAA P 解析結果の比較図を示す。MAA P 解析結果は, 三つのパラメータに対して, 最適値, 最大値, 最小値の組み合わせを用いて評価されている。また, 付表 1 に L-06, L-08, L-14, L-11 実験の過熱度を示す。

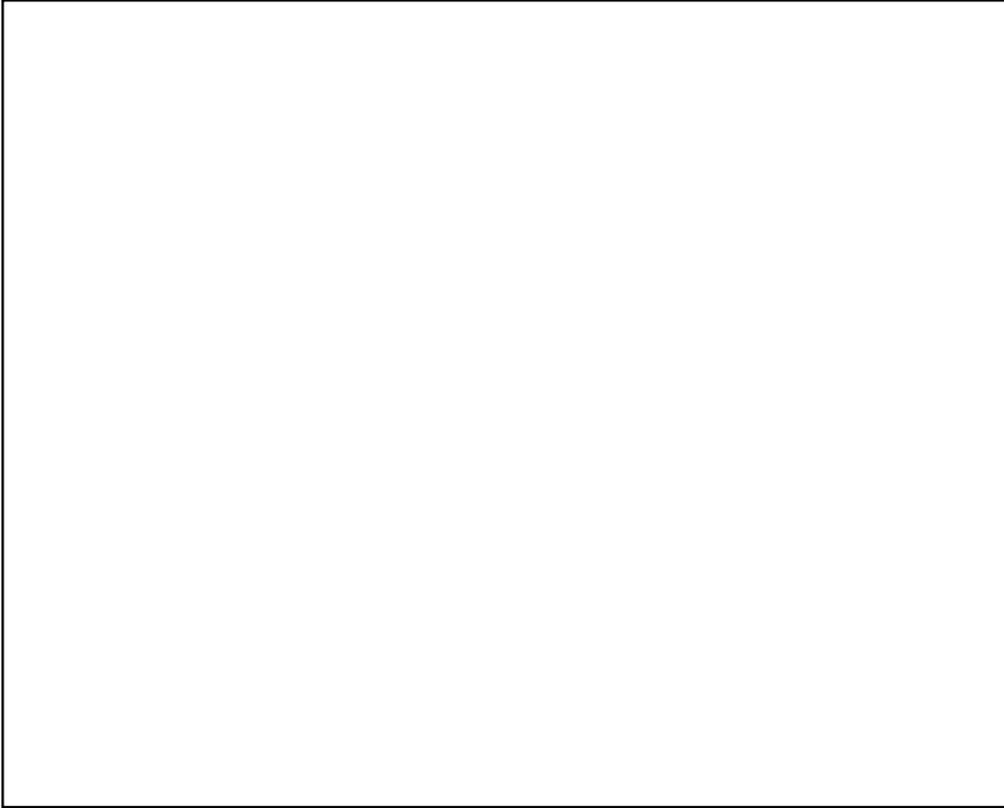
付表 1 FARO 実験における過熱度^[24]

実験ケース	L-06	L-08	L-14	L-11
過熱度[K]	63	163	263	100

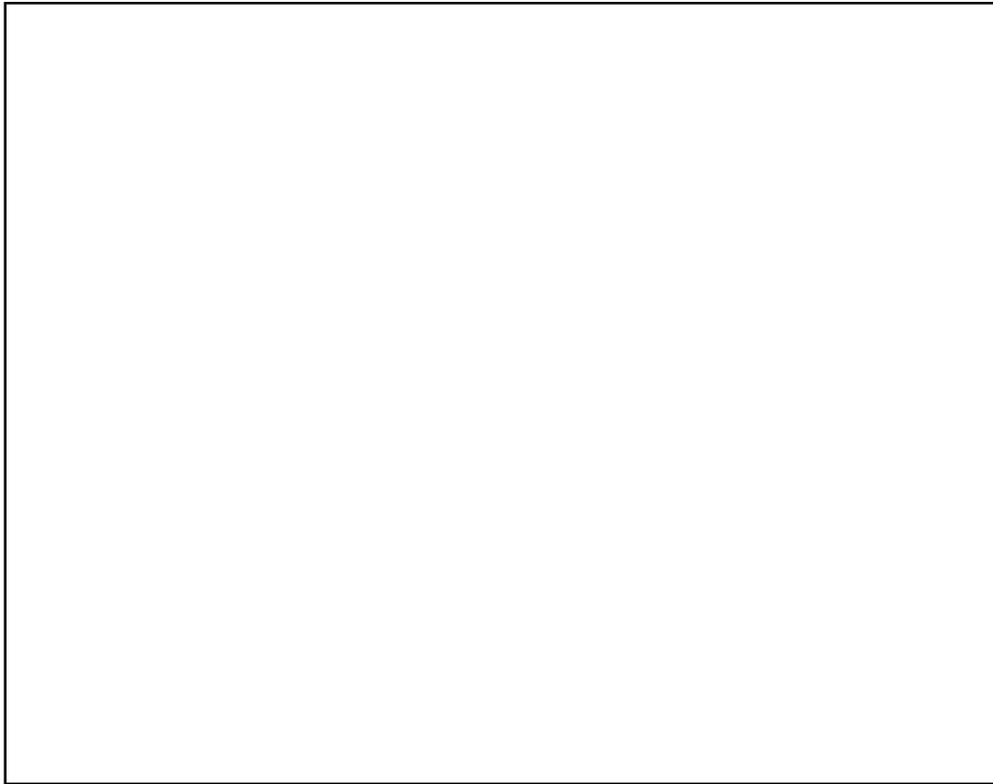
いずれの実験の圧力挙動も, MAA P 解析結果では再現をみた。



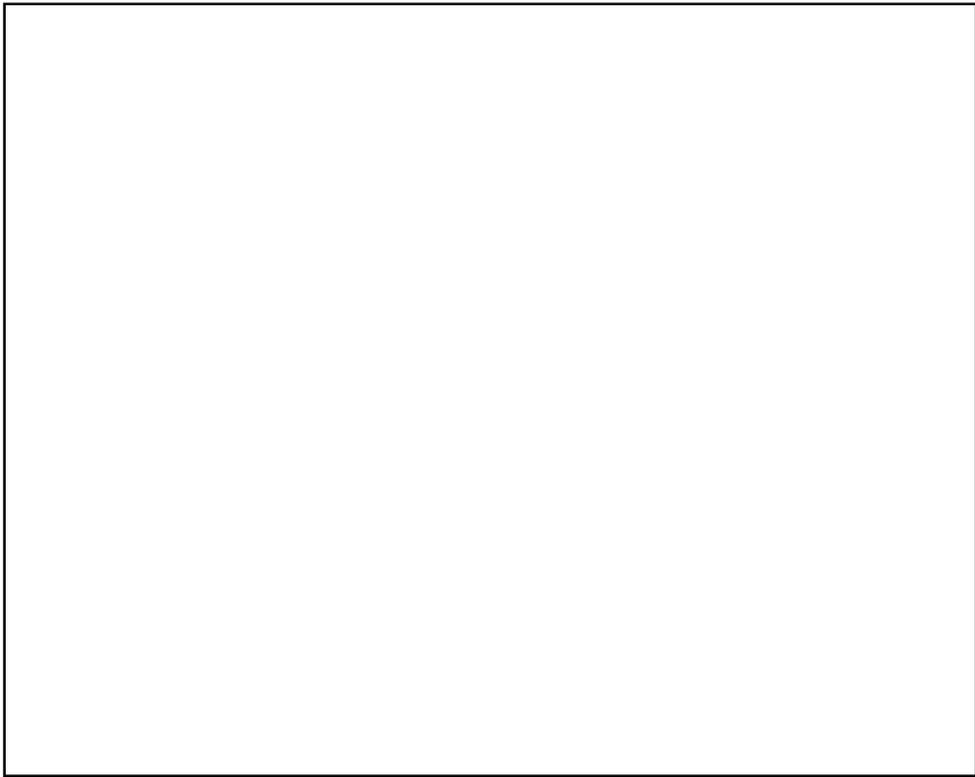
また, デブリ粒子径及び堆積デブリ質量についても, 実験結果のデータは, エントレインメント係数及び粒子径ファクタを変化させた場合の MAA P 解析結果の範囲内によく再現されている。



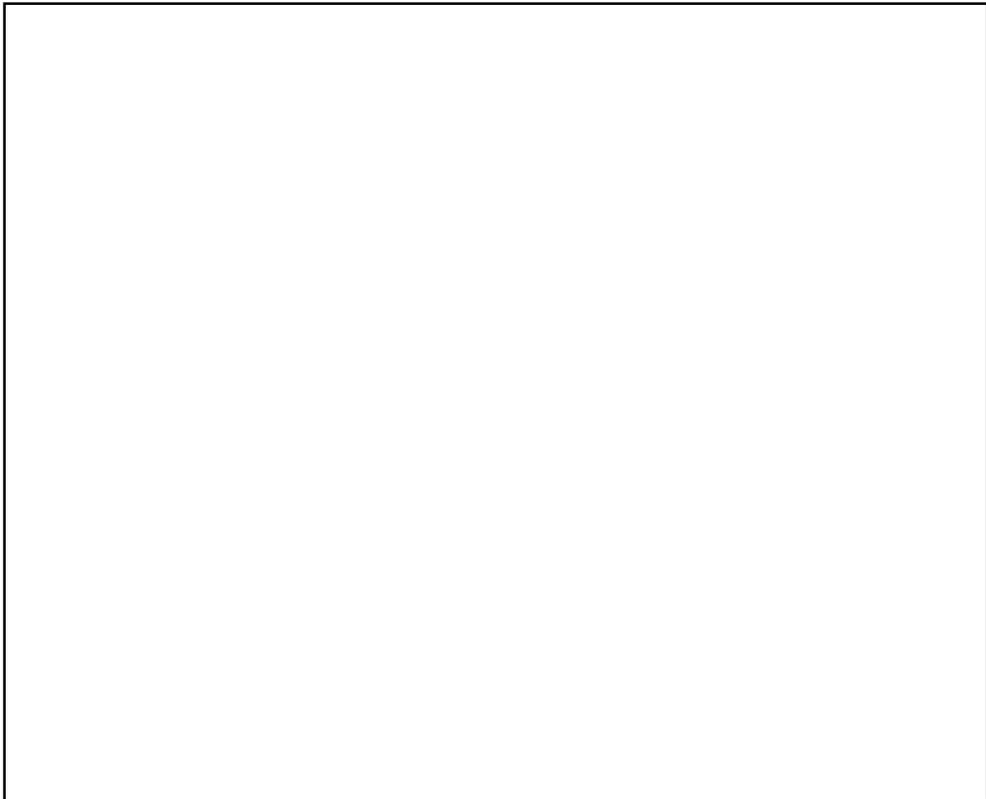
付図1 L-06 実験結果/解析結果比較（圧カスパイク）^[23]



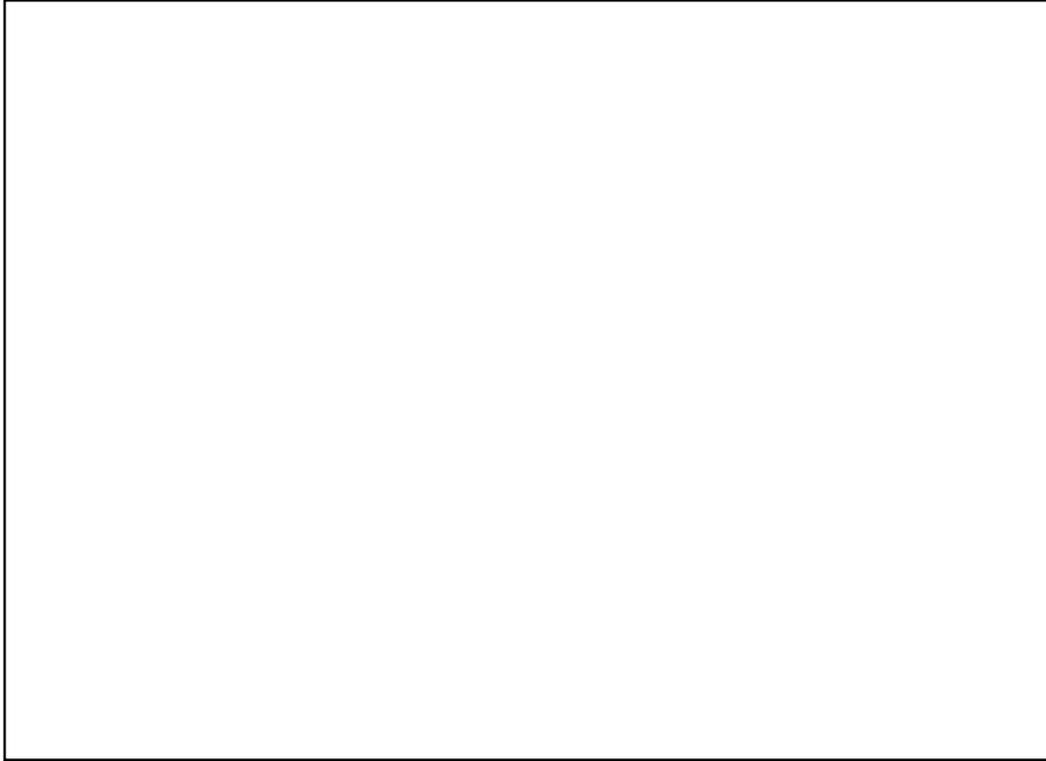
付図2 L-08 実験結果/解析結果比較（圧カスパイク）^[23]



付図3 L-14 実験結果/解析結果比較 (圧カスパイク) [23]



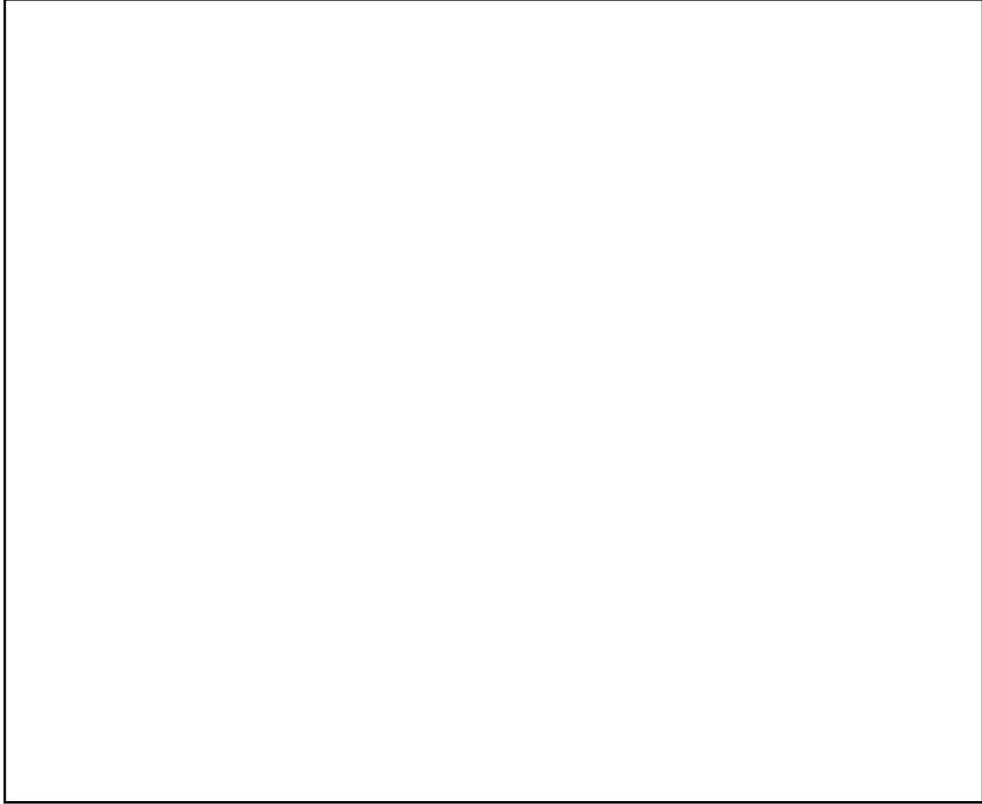
付図4 L-11 実験結果/解析結果比較 (圧カスパイク) [23]



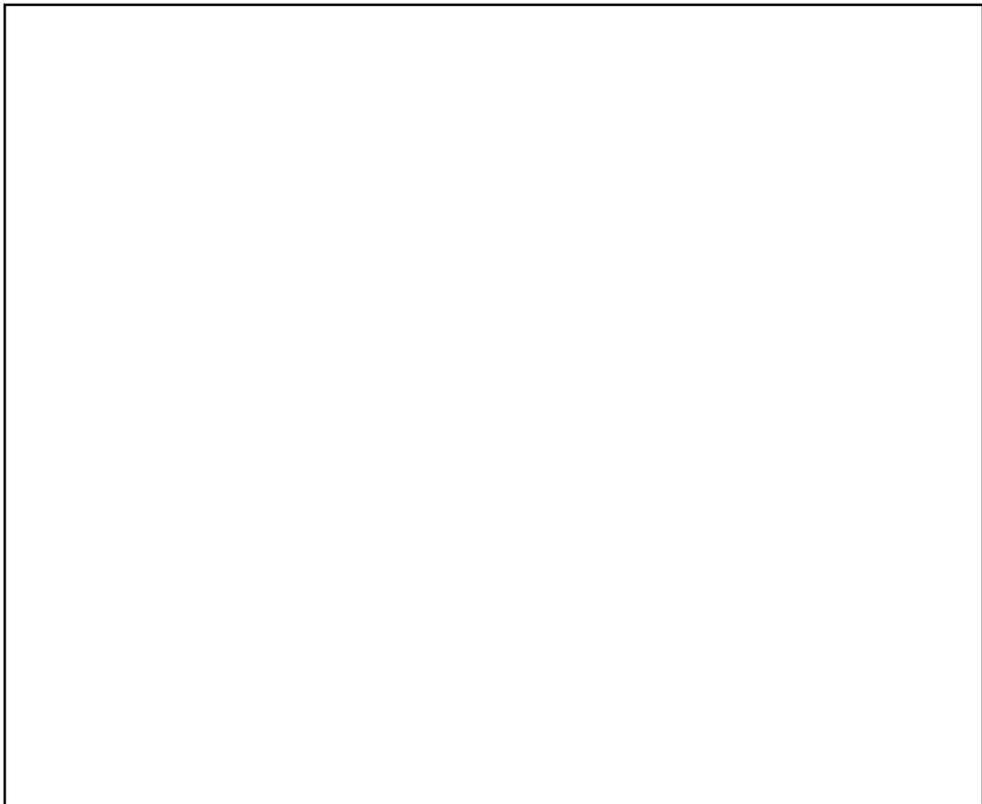
付図 5 L-06 実験結果/解析結果比較 (デブリ粒子径) ^[23]



付図 6 L-08 実験結果/解析結果比較 (デブリ粒子径) ^[23]



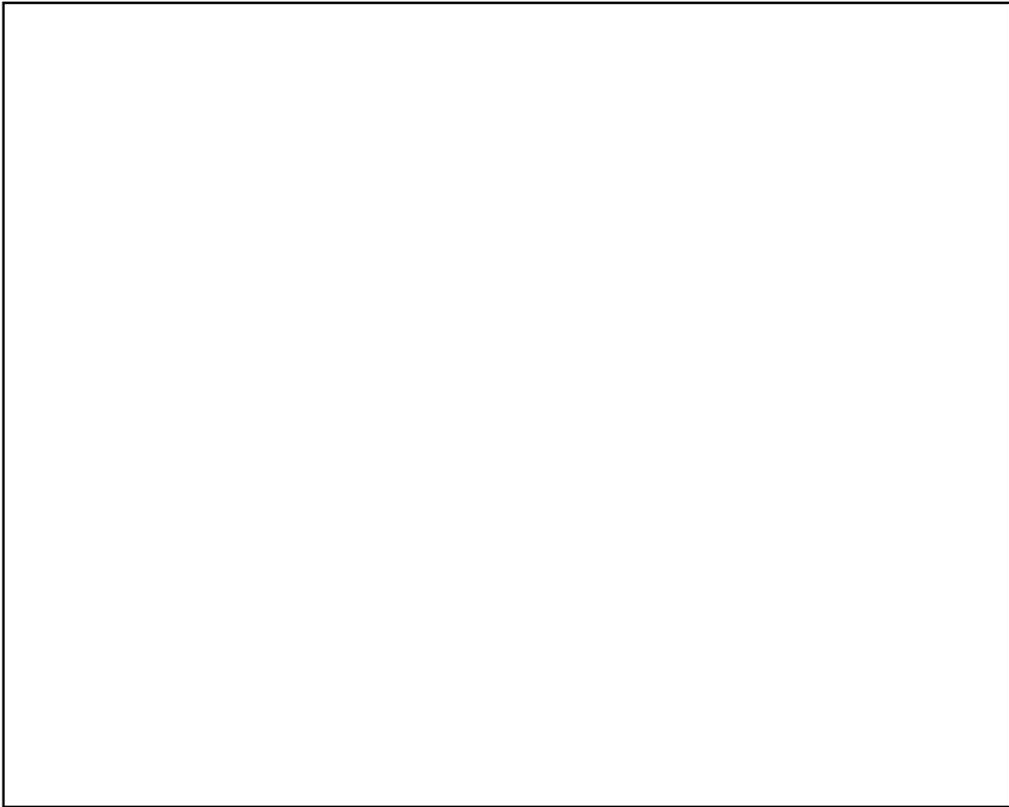
付図 7 L-14 実験結果/解析結果比較 (デブリ粒子径) ^[23]



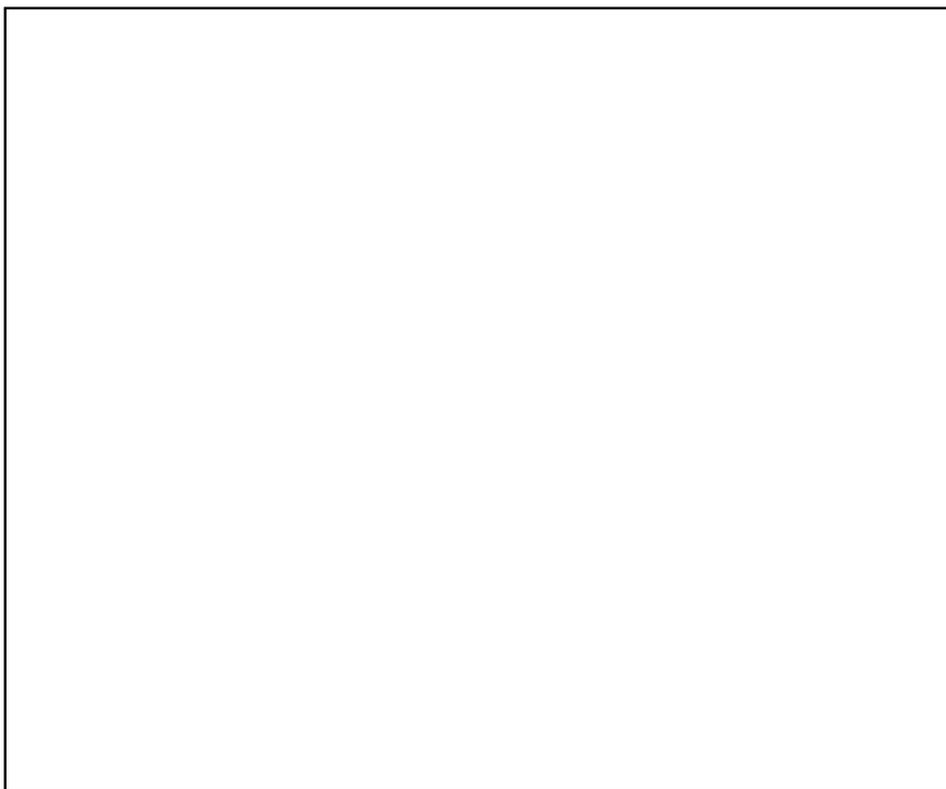
付図 8 L-11 実験結果/解析結果比較 (デブリ粒子径) ^[23]



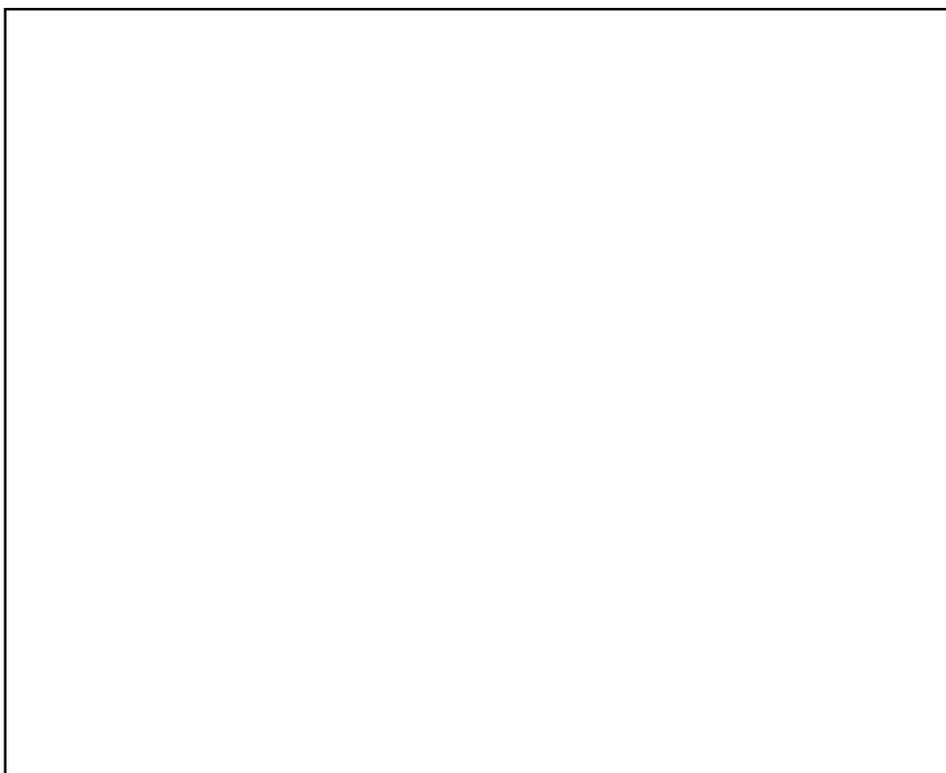
付図 9 L-06 実験結果/解析結果比較 (堆積デブリ質量) ^[23]



付図 10 L-08 実験結果/解析結果比較 (堆積デブリ質量) ^[23]



付図 11 L-14 実験結果/解析結果比較 (堆積デブリ質量) ^[23]



付図 12 L-11 実験結果/解析結果比較 (堆積デブリ質量) ^[23]

3. 結論

MAAPコードでは、FCIに関わる圧力スパイク挙動はデブリジェットモデルで制御されており、その妥当性確認はFARO実験結果とのベンチマーク解析によって行われている。FARO実験結果の示す圧力スパイク挙動のピーク圧力、圧力上昇及びデブリ粒子径について、MAAPコードはよく再現されており、その妥当性が確認されている。

参考文献

- [1] U. S. NRC, Reactor Safety Study, An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400, NUREG-75/014, Oct. 1975.
- [2] N. Yamano, Y. Maruyama, T. Kudo, A. Hidaka, J. Sugimoto, Phenomenological studies on melt-coolant interactions in the ALPHA program, Nucl. Eng. Des. 155 369-389, 1995.
- [3] I. Huhtiniemi, D. Magallon, H. Hohmann, Results of recent KROTOS FCI tests: alumina versus corium melts, Nucl. Eng. Des. 189 379-389, 1999.
- [4] D. Magallon, Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments, Nucl. Eng. Des. 236 1998-2009, 2006.
- [5] H. S. Park, R. Chapman, M. L. Corradini, Vapor Explosions in a One-Dimensional Large-Scale Geometry With Simulant Melts, NUREG/CR-6623, 1999.
- [6] D. Magallon, et al, Lessons learnt from FARO/TERMOS corium melt quenching experiments, Nucl. Eng. Des. 189 223-238, 1999.
- [7] M. Kato, H. Nagasaka, COTELS Fuel Coolant Interaction Tests under Ex-Vessel Conditions, JAERI-Conf 2000-015, 2000.
- [8] V. Tyrpekl, Material effect in the fuel - coolant interaction : structural characterization and solidification mechanism, 2012.
- [9] J.H.Kim, et al, The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments, Proceedings of ICAPP' 04.
- [1 0] (財) 原子力安全研究協会, 「シビアアクシデント対策評価のための格納容器イベントツリーに関する検討」, 平成 13 年 7 月
- [1 1] K.Moriyama, et al, Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA-Data/Code 2008-014, 2008.
- [1 2] 片山, 高速衝突と爆発問題を中心とした諸分野における衝撃解析, 「第 7 回衝撃工学フォーラム (中級者のための衝撃工学入門)」, 日本材料学会, 平成 20 年 11 月
- [1 3] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA KEYWORD USER' S MANUAL VOLUME I, 2007.
- [1 4] T. Okkonen, et al, Safety Issues Related to Fuel-Coolant Interactions in BWR' S, NUREG/CP-0127, 1994.
- [1 5] T. G. Theofanous, et al, Steam Explosions: Fundamentals and Energetic Behavior, NUREG/CR-5960, 1994.
- [1 6] S. Basu, T. Ginsberg, A Reassessment of the Potential for an Alpha-Mode Containment Failure and a Review of the Current understanding of Broader Fuel-Coolant Interaction (FCI) issues, Report of the Second Steam Explosion Review Group Workshop (SERG-2), NUREG-1524, 1996.

-
- [1 7] O. Zuchuat, et al, Steam Explosions-Induced Containment Failure Studies for Swiss Nuclear Power Plants, JAERI-Conf 97-011, 1998.
- [1 8] M. Kato, et al, Fuel Coolant Interaction Tests using UO₂ Corium under Ex-vessel Conditions, JAERI-Conf 99-005, 1999.
- [1 9] J.H. Song, Fuel Coolant Interaction Experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture, Nucl. Eng. Des., 222, 1-15, 2003.
- [2 0] J.H. Kim, Results of the Triggered Steam Explosions from the TROI Experiment, Nucl. Tech., Vol.158 378-395, 2007.
- [2 1] NUCLEA Nuclear Thermodynamic Database, Version 2005-01.
- [2 2] NEA/CSNI/R, OECD/SERENA Project Report Summary and Conclusions, 2015.
- [2 3] Electric Power Research Institute (EPRI), MAAP4, Modular Accident Analysis Program User' s Manual, EPRI Report prepared by Fauske & Associates, Inc.
- [2 4] D. Magallon, Experimental investigation of 150-kg-scale corium melt jet quenching in water, Nucl. Eng. Des. 177 321-337, 1997.

添付 3

溶融炉心とコンクリートの相互作用について

目次

1. まえがき	添付 5-3-3
2. 現象の概要	添付 5-3-4
3. これまでの知見の整理	添付 5-3-5
4. 評価モデルと不確かさに関する整理	添付 5-3-8
5. 感度解析と評価	添付 5-3-32
6. まとめ	添付 5-3-44
付録	添付 5-3-45
付録1 ドライ条件でのMCCI実験	添付 5-3-45
付録2 注水を伴ったMCCI実験	添付 5-3-52
付録3 溶融物の水中落下時の粒子化実験と解析モデル	添付 5-3-77
付録4 溶融物の拡がり実験	添付 5-3-94
付録5 粒子状ベッドの冷却性実験と解析モデル	添付 5-3-109
参考文献	添付 5-3-111

1. まえがき

溶融炉心-コンクリート相互作用 (MCCI) は、炉心溶融が進展し、溶融炉心が原子炉圧力容器底部を溶融貫通し、格納容器下部のペDESTAL床に落下した場合に発生する現象である。MCCI が継続すると、格納容器構造の侵食や非凝縮性ガス (水素ガス等) 発生による格納容器過圧により格納容器破損に至る可能性があり、重要な格納容器破損モードと考えられてきており、これまで種々の実験や解析モデルの開発が行われてきている。これまでは、注水がないドライ条件でのMCCI 挙動や溶融炉心上に注水した場合 (Top Flooding) のMCCI 抑制効果を調べる研究が主に行われてきた。

MCCI の緩和対策として、溶融炉心落下後に注水する以外に、溶融炉心落下前にペDESTALに事前水張りするマネジメントが効果的とされており^[1]、本有効性評価ではこの対策を前提としている。事前水張りにより、溶融炉心が落下時に水中で粒子化され、溶融炉心が粒子状ベツドとして堆積し、デブリ冷却性の向上が期待されるためである (図 1-1 参照)。

本資料では、国内外で実施された実験等による知見を整理するとともに、解析モデルに関する不確かさの整理を行い、感度解析により有効性評価への影響を確認した。

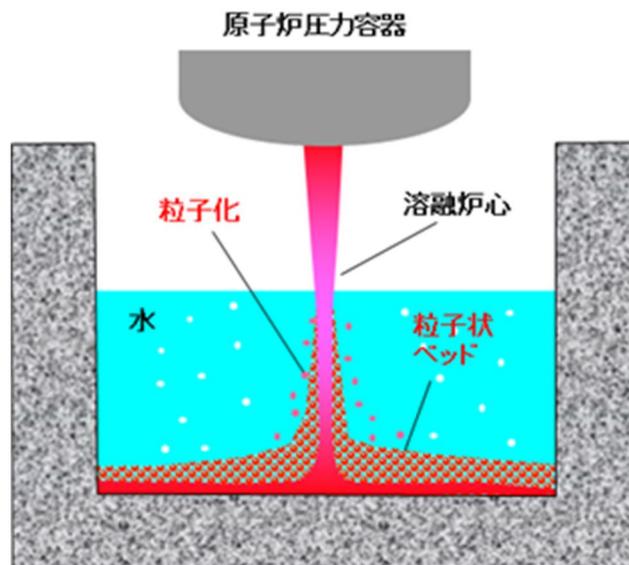


図1-1 ペDESTAL事前水張りによるデブリ粒子化の概念

2. 現象の概要

MCCIは、溶融炉心が原子炉压力容器下部を溶融貫通して格納容器床面に落下し、床面のコンクリートと接触した場合に発生し、高温の溶融炉心によりコンクリートが加熱され熱分解し溶融侵食される現象である。侵食が継続した場合、原子炉格納容器バウンダリの破損や格納容器内支持構造の強度低下に至る可能性がある。また、コンクリートの熱分解により発生する水蒸気及び二酸化炭素が溶融炉心内を通過する間に未酸化金属成分と反応して水素、一酸化炭素等の非凝縮性の可燃性ガスが発生し、原子炉格納容器内の過圧や燃焼に至る可能性がある。このような要因により格納容器破損に至る可能性があり、MCCIは重要な格納容器破損モードと考えられている。MCCIを停止するためには、落下した溶融物（コリウム）を冷却することにより、侵食限界に至る前にコリウムと接しているコンクリート温度を溶融温度(約 1500K)以下にすることが必要となる。

国内BWRでは、原子炉压力容器破損前にペDESTALへ水張りをを行い、下部ヘッドが破損し溶融炉心が落下した際の溶融炉心の冷却を促進することにより、MCCIを緩和する対策を採っている。ペDESTALに落下した溶融炉心は、水プール中を落下する際に、一部は粒子化して水中にエントレインされ、残りは床面に落下して堆積し溶融プールを形成する。エントレインされたデブリ粒子は、水中を浮遊しながら水へ膜沸騰による熱伝達が行われて冷却され、クエンチし、溶融プール上に堆積し、粒子状ベッドを形成する。

ペDESTAL床に堆積した溶融炉心は、崩壊熱や化学反応熱により発熱しているが、水やコンクリートへの伝熱により徐々に冷却され、溶融炉心温度が固化温度を下回ると固化する。溶融炉心の冷却の過程では、中心に溶融プール(液相)、外周部にクラスト(固相)が形成される。溶融炉心上のプール水との伝熱は粒子状ベッドを介して行われるため、冷却効果は、粒子状ベッドの冷却性に依存する。

ペDESTALの溶融炉心と接触しているコンクリートは、溶融炉心からの熱伝達により加熱され、その温度が融点を上回ると溶融し侵食される。この際にガス(水蒸気及び二酸化炭素)及びコンクリートスラグが発生し、溶融炉心に混入されて化学反応(未酸化Zrによる還元反応)により、反応熱とともに水素ガスや一酸化炭素が発生する。

MCCIによるコンクリート侵食量は、溶融炉心から上部水プール、壁方向及び床方向のコンクリートへの熱分配に支配される。国内BWRのMCCI対策としている事前水張りをしている場合には、溶融炉心上面からの除熱が支配的となるため、相対的にコンクリートへの熱移行は抑えられ、コンクリート侵食量は抑えられる。この場合には、上面熱流束が重要となる。また、万一事前水張りできず、溶融炉心上面からの除熱が十分でない場合は、コンクリートへの熱移行量が増え、コンクリート侵食量は大きくなる。この場合には、コンクリートへの熱伝達が重要となる。

3. これまでの知見の整理

本章では、MCC Iに関する実験の概要及びそこで得られた知見に関して整理を行う。

MCC Iに関する実験としては、水による冷却を伴わない実験として米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) で実施された ACE 実験^{[2][3]}, 米国サンディア国立研究所 (SNL) で実施された SURC 実験^[4] (国際標準問題 ISP-24^[5]) 及び独カールスルーエ研究所 (KfK) で実施された BETA 実験^[6]がある (付録 1 参照)。水による冷却を伴う実験 (熔融物上に冷却水を注水した実験) としては, SNL で実施された SWISS 実験^[7]及び WETCOR 実験^[8], 米国電力研究所 (EPRI) の主催で実施された MACE 実験^{[3][9][10]}, 我が国の原子力発電技術機構 (NUPEC) により実施された COTELS 実験^{[1][11]}, OECD プロジェクトとして ANL にて行われた MCC I 実験^{[10][12][13][41]}がある (付録 2 参照)。

また, 水中に熔融デブリを落下させ熔融物の粒子化を調べた実験としては, JRC-ISPRA にて実施した KROTOS 実験^[14]や FARO 実験^[14], NUPEC にて実施した COTELS-FCI 実験^{[1][15]}, スウェーデン王立工科大学 (KTH) で実施された DEFOR 実験^[16]がある (付録 3 参照)。

ペDESTALでの熔融物の拡がり実験としては, 水による冷却を伴わないドライ条件での実験として, 国内BWRを対象にBWR産業界が実施した SPREAD 実験^{[19][20]}や, EPR を対象とした実験が複数実施されており, ウェット条件での実験については実施例が少ないが, 前述の SPREAD 実験や KTH の PULiMS 実験^[21], ANL にて不均質に堆積させたデブリベッドの拡がりを確認したセルフレベリング実験^[22]が行われている。

各実験の詳細は付録資料にて示す。以下に, 実機評価に関連する知見の概要をまとめる。

・ドライ条件でのコンクリート侵食 (付録 1 参照)

熔融炉心に注水が行われない場合の侵食速度は, ACE 実験, SURC 実験及び BETA 実験で確認されている。また, MAA Pコードによる実験解析が行われており, 解析で得られた侵食速度は実験結果と良く一致している (1時間あたり 20cm 程度)^{[23][34]}。

・ウェット条件 (Top Flooding) でのコンクリート侵食 (付録 2 参照)

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

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

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

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

- ・水張りによる溶融物の粒子化（付録3参照）

溶融物ジェットが水中へ落下する場合の粒子化挙動については、FCI 実験等により確認されている。粒子化割合は、主に水深やジェット径に依存し、粒径（質量中央径）は、比較的大きく、実験条件（初期圧力、水深、コリウム落下速度、サブクール度）に対する依存性は低いと報告されている。各UO₂混合物実験の平均的な粒子径は、溶融物量の多いFARO 実験では2.6~4.8mm^[14]、COTELS 実験では6mm程度^[15]である。また、粒子化割合を評価する解析モデルが提案されている（Ricou-Spalding 相関式^[25]やSaitoの相関式^[26]等）。

- ・溶融物の拡がり（付録4参照）

Mark-I 型格納容器のシェルアタックに関する研究^{[17][18][19][20]}により、事前水張りが、溶融物の拡がりを抑制し、シェルアタック防止に有効であることが確認されるとともに、溶融物の拡がりを評価する解析コードが作成されている。溶融物の拡がりには、デブリ落下流量、デブリ成分、デブリ過熱度が主に影響することが示されている。KTHでは、水中での溶融物の拡がり挙動と固化性状を調べるPULiMS 実験^[21]が実施され、溶融物の拡がる過程は、流体力学と固化の二つの競合プロセスに支配されるとして、流体力学には重力、慣性力、粘性力及び表面張力が影響し、固化には溶融物から周囲への熱伝達、崩壊熱発生及び溶融物の相変化が影響するとして、実験と実機条件とを関連づけるスケーリング則の提案^{[20][27][28]}が行われている。また、独カールスルーエ研究センター（FZK）においてKATS 実験^{[23][29][30]}が実施され、溶融物の放出速度が比較的高い場合は、冷却材の有無によらず同様な拡がり挙動になることが示されている。溶融物の拡がり挙動の解析のために、種々の解析コードが提案されており、実験データを元に検証が行われている。三次元の拡がり評価も行われており、比較的広いペDESTALをもつABWR（ペDESTAL半径約5.3m）の溶融物拡がり評価が実施され、床上に水がある場合でも、床全面に溶融物が拡がること示されている^[40]。

また、ANLでのセルフレベルリング実験^[22]により、水プール中に不均質に堆積させた粒

子状ベッドにおいて、内部沸騰によって短時間でベッドの厚さが均一化されることが示されている。

- 粒子状ベッドの冷却性 (付録5 参照)

粒子状ベッドの冷却性については、ドライアウト熱流束が種々の実験で確認されており、主に粒子径に依存するとの結果が得られている。また、ドライアウト熱流束を評価する解析モデルがいくつか提案されているが、Lipinski0-Dモデル^{[24][31][32][33]}が広く使われている。

4. 評価モデルと不確かさに関する整理

本章では、MCCI評価に使用している解析モデルと想定される不確かさについて整理する。

4.1 MCCI評価モデル

MCCI評価には、MCCI現象を扱え、溶融炉心落下や注水によるデブリ冷却効果を評価できるMAAPコード^[34]を使用している。以下に、MCCI伝熱モデルの概要を示す(図4-1参照)。

コリウムの構成

- ・ 均質に溶融したプールを形成すると仮定。
- ・ 上部、下部及び側面にクラスト層を仮定。

クラストの生成

- ・ クラストのエネルギーバランス(溶融プールからの伝熱、水プール・コンクリートへの伝熱)によりクラスト厚さの変化率を計算。

コンクリートの侵食

- ・ コンクリート表面から侵食深さ方向に一次元熱伝導を解き温度分布を計算。
- ・ コンクリート溶融温度(入力値:1500K)以上で侵食開始。
- ・ 溶融炉心からの伝熱量と分解/溶融潜熱により侵食量を評価。
- ・ コンクリート分解による自由水・結合水・CO₂の発生を考慮し、溶融コリウム中での化学熱力学平衡計算により金属との反応、H₂及びCO発生を評価。反応熱は、溶融炉心の崩壊熱に加算される。

伝熱モデル

- ・ 溶融炉心-コンクリート間の熱伝達: 溶融プールからクラスト層への対流熱伝達量とクラスト内崩壊熱の和で熱流束が与えられる。溶融プールからクラスト層への対流熱伝達は、粘性に影響されるため、固化割合に応じて補正されている。溶融炉心から床方向及び側面方向のコンクリートへの熱流束を以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{床方向の熱流束} \quad q_d &= h_d (T_f - T_{F,m}) + q_v \cdot X_{cd} \\ h_d &= h_{d0} (1 - f_s)^n \\ \text{壁方向の熱流束} \quad q_s &= h_s (T_f - T_{F,m}) + q_v \cdot X_{cs} \\ h_s &= h_{s0} (1 - f_s)^n \end{aligned}$$

ここで、

q_d, q_s : 床方向及び側面方向の熱流束 [W/m²]

h_d, h_s : 溶融プールからクラスト層への対流熱伝達係数 [W/m²-K]

h_{d0}, h_{s0} : 溶融プールが完全な液相の場合の対流熱伝達係数 [W/m²-K]

f_s : 固化割合 [-]

- n : 固化効果項の指数 [-]
- T_f : 熔融プールの温度 [K]
- $T_{F,m}$: デブリ融点 [K]
- q_v : 体積発熱率 [W/m³]
- X_{cd}, X_{cs} : 床面及び壁面のクラスト厚さ [m]

対流熱伝達係数 h_{d0} 及び h_{s0} は、BETA実験（二次元侵食実験）のベンチマーク解析^{[23][34]}を元に、それぞれ \square と \square が、固化効果項の指数 n は、 \square が推奨されている。

- ・ クラストの伝熱と厚さ： クラストのエネルギーバランス（熔融プールからの伝熱，水プール・コンクリートへの伝熱）によりクラスト厚さの変化率が計算されている。側面方向及び床方向の熔融プールからの対流熱伝達係数が異なるため，下部クラストと側面クラストの厚さも異なる。内部発熱を考慮し，下部クラスト，側面クラスト，上部クラストは放物線状の温度分布が仮定されている。クラスト成長の結果，熔融プールからの熱とクラスト内発生熱をコンクリートへ伝達できなくなると，クラスト内側で熔融が生じ，クラストは薄くなる。逆に，クラストが十分に薄く，熔融プールからの熱とクラスト内発生熱以上を伝達できれば，凝固が生じ，クラストは厚くなる。
- ・ 上部クラストー水プール間の熱伝達： デブリが冠水されて表面温度が十分低下すると，上部クラストはクエンチ層として扱われ，以下のKutateladze型の水平平板限界熱流束相関式が適用される。このクエンチ熱流束は，デブリ平均温度が水の飽和温度以上である場合に適用される。

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

ここで，

- q_{chf} : 熱流束 [W/m²]
- F_{chf} : 係数 [-] (ユーザー入力)
- h_{fg} : 蒸発潜熱 [J/kg]
- ρ_g : 蒸気の密度 [kg/m³]
- ρ_l : 水の密度 [kg/m³]
- σ : 表面張力 [N/m]
- g : 重力加速度 [m/s²]

係数 F_{chf} として，SNLで実施されたSWISS実験において報告されている熔融物から水プールへの熱流束800kW/m²に相当する値である0.1がデフォルトとして設定されており，係数 F_{chf} を変更することにより粒子状ベッドから水プールへの熱流束を想定した解析が実施できる。係数 F_{chf} と熱流束 q_{chf} の関係を図4-2に示す。係数 F_{chf} の

デフォルトは0.1が用いられており、この場合熱流束 q_{chf} は大気圧状態で 800kW/m^2 程度となる。

デブリ平均温度が水の飽和温度と等しくなると(デブリクエンチ)、水プールへの熱流束は、デブリの崩壊熱が全て水プールへ伝達されるとして計算され、上記限界熱流束相関式は適用されない。デブリクエンチ後は、デブリからコンクリートへの熱伝達は発生しなくなるため、デブリと接しているコンクリート温度が侵食温度以下となり、コンクリートの侵食は停止する。

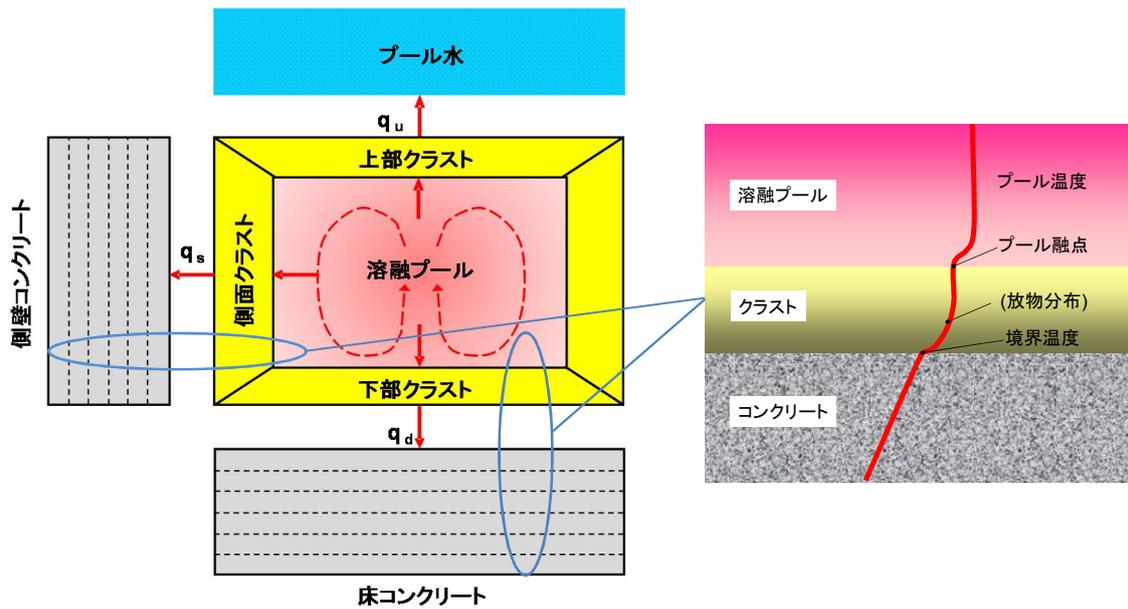


図 4-1 MAAP コードのMCC I 伝熱モデル概要

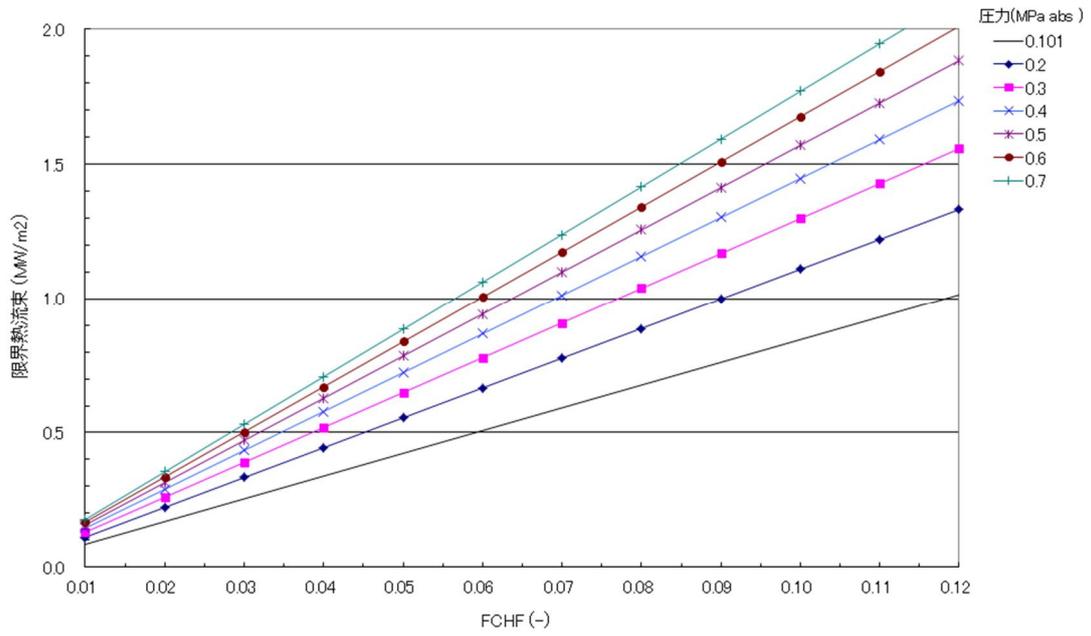


図 4-2 MAA P コードのデブリ上面の熱流束を与える F_{CHF} 入力と限界熱流束の関係

4.2 MCC I 評価における不確かさの整理

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

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

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

(1) 原子炉圧力容器下部ヘッド破損過程

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

下部ヘッド破損面積

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

評価条件： MAA P 解析結果から、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損による制御棒駆動機構ハウジングの逸出が最も早く発生する。これにより約 15cm 径の破断口が下部ヘッドに開き、下部プレナム内の溶融炉心がペDESTAL に落下することになる。他の下部ヘッド貫通部が破損してもこれ以上の破損サイズにはならないことから、制御棒駆動機構ハウジングの逸出が最も厳しい条件となっている。なお、制御棒駆動機構ハウジング溶接部が破損しても外部サポートが設置されている場合には、制御棒駆動機構ハウジングの逸出は起きにくいと考えられるため、この扱いは保守的である。

溶融炉心の落下量

評価モデル： 溶融炉心流出流量は駆動差圧として原子炉圧力容器内とペDESTAL との圧力差に水及び溶融炉心の水頭圧を考慮して計算されている。

評価条件： MAA P 解析結果から、下部ヘッド破損前には全炉心相当の溶融炉心が下部プレナム内に堆積した状態になっている。この状態に至る前には、以下の過程が起こる。即ち、溶融炉心が下部プレナムへ落下を開始すると、下部プレナム水により溶融炉心が冷却される。また、制御棒案内管内にも水が溜まっており、溶融炉心の冷却のヒートシンクになる(図 4-3 参照)。下部プレナムや制御棒案内管内の水が蒸発して喪失すると、制御棒案内管の温度が上昇し溶融に至る。制御棒案内管は炉心重量を支持しているために、制御棒案内管の溶融が起こると、炉心の支持機能が喪失し、全炉心が下部プレナムへ落下する。その後、

制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損が起こり、熔融炉心の放出が開始する。以上のような過程の結果、下部ヘッド破損時に、下部プレナム内に堆積している全炉心相当の熔融炉心が流出することになり、熔融炉心の落下流量としては、最も厳しい条件となっている。

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

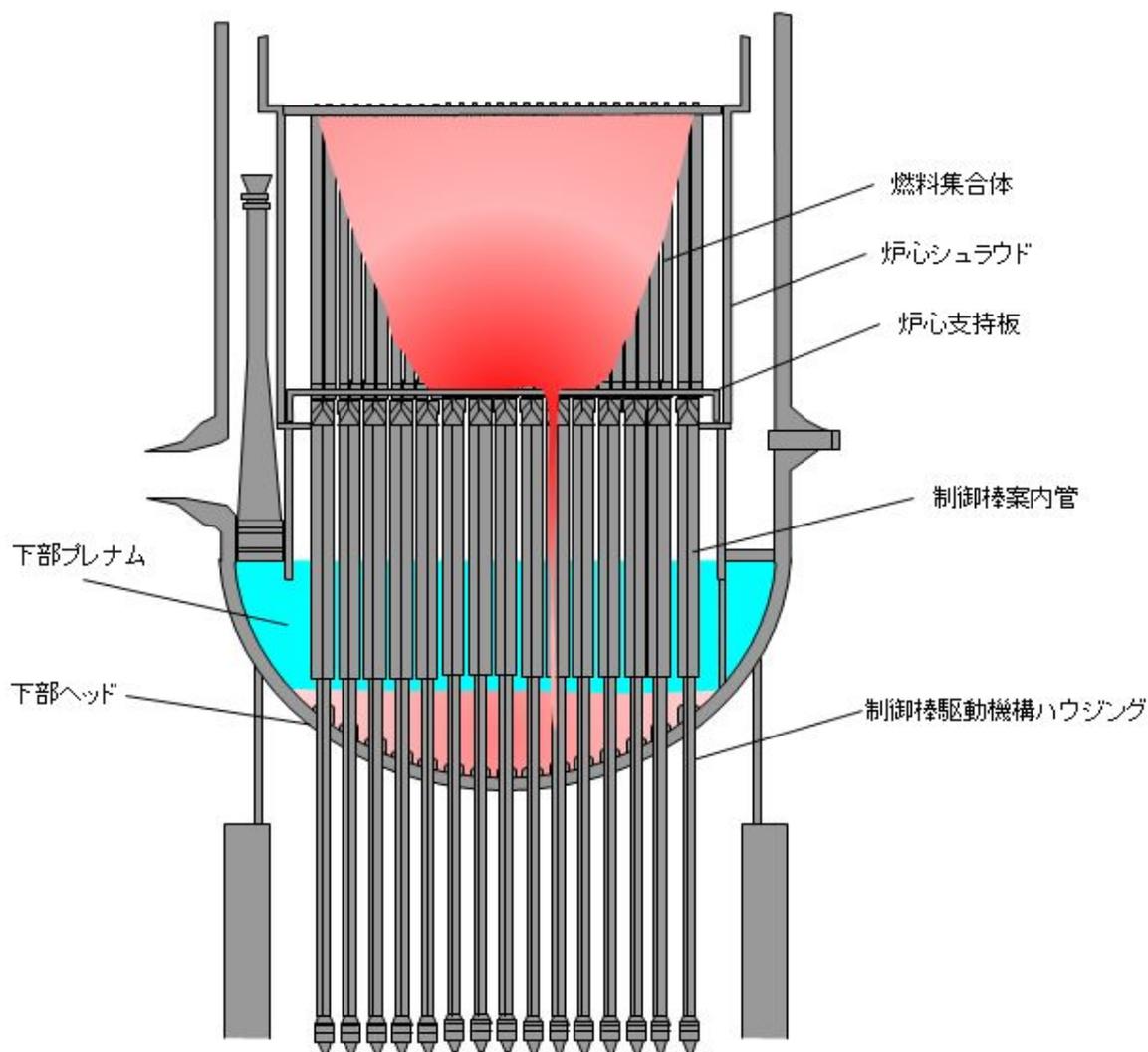


図 4-3 炉心部から下部プレナム内への熔融炉心の移行状態を示す模式図

(2) 溶融物の落下・堆積過程

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

溶融炉心の粒子化

評価モデル： MAA Pコードでは、粒子化割合は、Ricou-Spalding モデル^[25]で計算される。Ricou-Spalding モデルは、エントレインメント量（粒子化量）を流入流体の速度（ジェット速度）と両流体の密度比に関連させたモデルであり、液液混合問題において広く利用されている相関式である。落下する溶融炉心は円柱ジェットで冷却水中に突入することを想定し、円柱ジェット外周部の侵食として粒子化割合を評価している。

円柱ジェットのエントレインメント速度 m_{ent} (m/s) は、次式で与えている。

$$m_{ent} = E_o \left(\frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} u_{dj} \quad (1)$$

ここで、 E_o : エントレインメント係数

u_{dj} : ジェット速度 [m/s]

ρ_{dj} : ジェット密度 [kg/m³]

ρ_w : 水密度 [kg/m³]

水中でのジェット速度を一定と仮定し、水面から垂直方向に積分すると、プール底部（水深： ΔH_{pool} ）におけるジェット直径が(2)式のように得られる。

$$d_{dj} = d_{dj,o} - 2E_o \left(\frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} \Delta H_{pool} \quad (2)$$

(2)式を用いて、溶融ジェット断面の減少分が粒子化割合であるため、次式のように計算される。

$$\Phi_{ent} = \frac{d_{dj,o}^2 - d_{dj}^2}{d_{dj,o}^2} \quad (3)$$

ここで、 d_{dj} : プール底部におけるジェット径 [m]

$d_{dj,0}$: プール水面におけるジェット径 [m]

Φ_{ent} : 水中における粒子化割合 [-]

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

エントレインメント係数については、MAA Pでは代表的なFCIの大規模実験であるFARO 実験に対するベンチマーク解析^[34]によって範囲を設定しており、不確かさ範囲は、～となっている。FARO 実験条件^[14]は、水プールの水深は 0.87～2.05m、水プー

ルのサブクール度は0（飽和）～124K，雰囲気圧力条件は2～5.8MPa（高压条件），0.2～0.5MPa（低压条件）の範囲で行われており，一方，実機条件では，水深は2～4m程度，水プールサブクール度は飽和～90K程度，雰囲気圧力は0.2MPa[abs]程度であることを考慮すると，実験条件は有効性評価の特徴的な条件を包絡しており，ベンチマーク解析で検討されたエントレインメント係数の範囲内で感度を確認すれば十分といえる。

評価条件： MAA P解析ではエントレインメント係数のデフォルト値として が使用されており，これは実験解析により確認された不確かさ範囲の代表値となっている。

溶融物ジェット径は，下部ヘッド破損口径により決まることから，前述のように大きい値としている。これは，粒子化割合を小さめにする扱いをしていることになる。

因みに，Ricou-Spalding 相関式を使用して，実機で想定される水張り水深2m，溶融物ジェット径0.15mの条件の場合で63%程度が粒子化される（図4-4参照）。^[33]

以上のことから，エントレインメント係数については，不確かさ範囲が設定されており，溶融炉心が水中に落下した際の粒子化割合とその過程での蒸気発生やデブリ粒子の酸化による水素ガス発生に影響することから，不確かさ範囲内で感度解析を実施する。

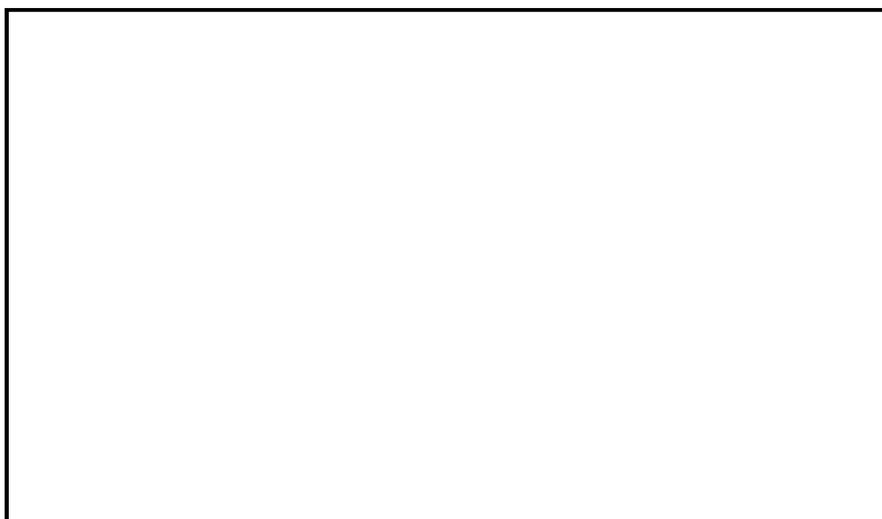


図4-4 Ricou-Spalding 相関式による粒子化割合のマップ^[33]

(3) MCC I 進行と注水によるデブリ冷却過程

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

熔融炉心の拡がり

評価モデル： MAA Pコードでは、落下した熔融炉心はペDESTAL床上に均一に拡がると仮定している。

評価条件： 事前水張りされたペDESTALのプール水中に落下する熔融炉心は、前節の熔融物の落下・堆積過程で示したように、一部が粒子化した後に固化し、残りが熔融状態のまま床面に到達して床面上を拡がり、固化したデブリ粒子が床上の連続層の上に堆積して粒子状ベッドを形成するものと想定される（図 1-1 参照）。このような熔融炉心の拡がりにおいて、熔融物の拡がり距離と粒子状ベッドの堆積形状に不確かさが想定される。

まず、熔融物の拡がり距離の不確かさについて考察する。Mark-I 型格納容器のシェルアタックに関する研究^{[17][18][19][20]}によれば、水張りがないと熔融炉心は格納容器シェル壁（拡がり距離 7m 程度）まで到達するが、水張りがあれば熔融炉心の拡がりは抑えられ、拡がり距離は落下量等にも依存するが 5m 程度となる結果が得られている。有効性評価で想定している制御棒駆動機構ハウジングの逸出を想定すると、ABWR（ペDESTAL半径約 5.3m）で床上に水がある場合でも、落下位置に依らず床全面に熔融物が拡がること、三次元熔融物拡がり解析により示されている^[40]（付録 4 (5) a 参照）。また、PULiMS 実験では、水中での熔融物の拡がり挙動が観察され、高温の熔融物は、水張りがあったとしても落下直後は膜沸騰が維持された状態で拡がり、その後拡がりが停止することが確認されている。また、実験結果を元に、水中での熔融物の拡がり距離を求めるスケーリング則が提案されている。このスケーリング則に、BWRの熔融炉心落下条件を適用して、水中での熔融物の拡がり距離を評価すると、約 18m となる（付録 4 (5) b 参照）。ペDESTAL半径が、ABWRが約 5.3m、Mark-I 改良型格納容器が約 3.2m であることを考慮すると、水張りをしている場合でも熔融炉心は、落下位置に依らず床全面に拡がる可能性が高いと考えられる。これは、熔融物の拡がりに影響する因子のうち、主に熔融炉心落下流量が大きい（全炉心相当の熔融炉心が 1 分程度で落下することを想定）ことによるものと考えられる。熔融物の拡がり距離については、不確かさを考慮しても床全面に拡がるものと想定される。

次に、粒子状ベッドの堆積形状の不確かさについて考察する。落下直後の初期段階では、DEFOR 実験^[16]で確認されたように不均一に堆積することが想定されるが、崩壊熱を発生するデブリ粒子では、粒子状ベッド内の継続的沸騰による粒子の攪拌によるセルフレベルング効果により、時間とともに堆積厚さが均一化することが想定される（付録 4 (4) 参照）。ただし、熔融炉心がペDESTALの中心からずれた位置に落下する場合を想定すると、セルフレベルング効果により均一化に向かっていくが、偏った堆積形状でMCC I が進行する可能性も考えられる。堆積形状の相違により、熔融炉心から水やコンクリートへの伝熱面積が異

なってくる。これにより、熔融炉心から水及びコンクリートへの熱配分が異なってくる。MAAPコードでは、均一堆積形状（円柱）として扱うため、不均一な堆積形状は、正確には模擬できない。図4-1に示す熔融炉心からの伝熱のうち、熔融炉心から水への伝熱が、熔融炉心の冷却に支配的であり、MCCIの結果に大きく影響することを考慮して、均一堆積形状（円柱）と種々の不均一な堆積形状について、水への伝熱面積を比較した。1100MWe BWR 5 Mark-I 改相当の比較結果を図4-5に示すが、MAAPコードで想定している均一堆積形状（円柱）が、最も水への伝熱面積が小さくなる。偏った堆積形状を代表する斜切円柱の場合でも、均一堆積形状（円柱）より水への伝熱面積は大きくなっている。円柱状の部分拡がりの場合でも、上面の伝熱面積は減少するが、側面の伝熱面積が加わることにより、均一堆積形状（円柱）より水への伝熱面積は大きくなっている。以上から、堆積形状の不確かさについては、均一堆積形状（円柱）の扱いが、熔融炉心から水への伝熱を小さくし、結果的にコンクリートへの伝熱を大きくしているため、MCCI評価の観点から保守的な扱いとなっていると考えられる。

以上の考察より、熔融炉心の拡がりについて、粒子状ベッドの堆積形状の不確かさが想定され、熔融炉心から水への伝熱に影響する可能性も考えられることから、拡がりを抑制した場合の感度解析の実施が必要と考えられる。ただし、熔融炉心の拡がりについては、ペDESTALの形状や事前水張りの深さによるところが大きいため、個別プラントにおけるこれらの状況を踏まえて感度解析等の取り扱いを行うことが適切と考えられる。

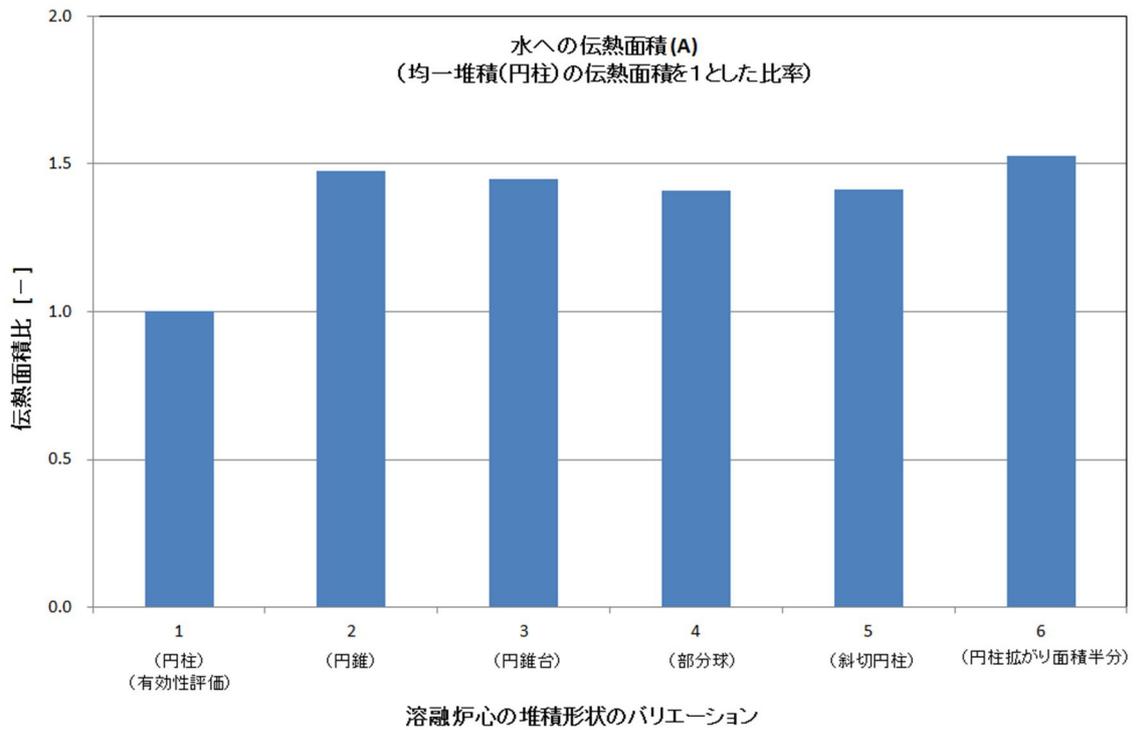
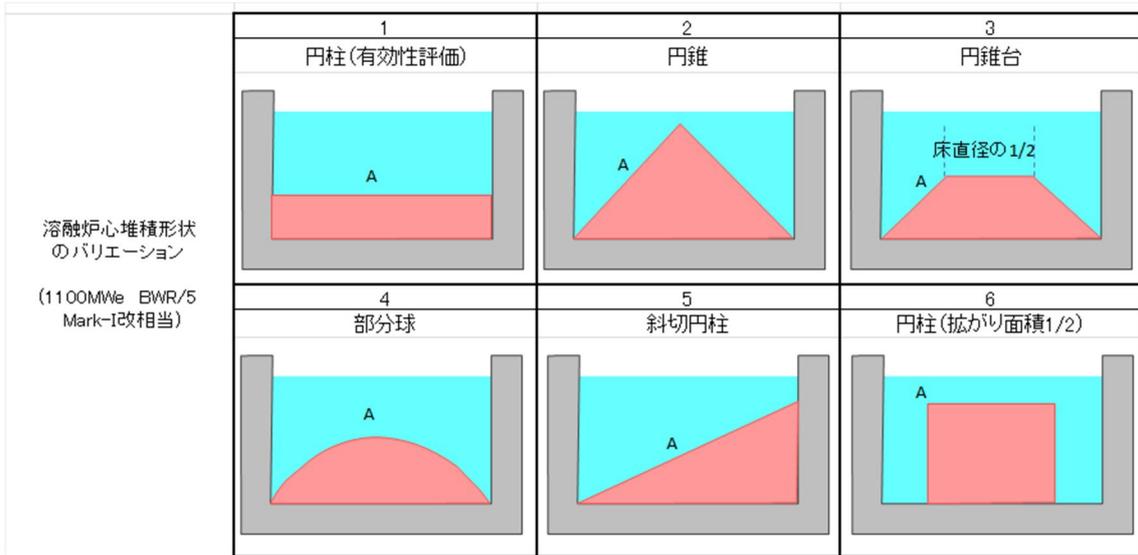


図 4-5 溶融炉心の堆積形状のバリエーションと水への伝熱面積の比較

デブリから水への熱伝達

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

評価モデル： 溶融炉心上面から水への熱流束は、上部クラスト-水プール間の熱伝達モデルであるKutateladze型の水平平板限界熱流束相関式（Kutateladze式）で与えられるが、係数 F_{CHF} を調整することにより、溶融炉心上面の性状に応じた熱流束を設定することが可能である。これは、上面の性状に応じて水への熱流束が内部で計算されるモデルではなく、Kutateladze式による限界熱流束で与えるモデルとなっているためである。

評価条件： 事前水張り対策により溶融炉心の一部は粒子化して、デブリ上部に粒子状ベッドを形成し、下部には粒子化しなかった溶融炉心が溶融プールを形成すると想定される。これは、水中に溶融炉心を落下させた実験的知見^{[14][15][16]}（付録3参照）から、安定クラストは形成されず、粒子状ベッドが形成されていることから妥当と考えられる。なお、SSWICS 実験では、コンクリートがデブリに含有されると上面熱流束が低下する結果が得られているが、これは火山型クラストが形成された場合の知見であり、粒子状ベッドに対する知見ではないと判断される。

デブリ上面に粒子状ベッドが形成されることを想定し、粒子状ベッドから水への熱流束の不確かさを評価する。ここでは、Lipinski 0-Dモデル^[24]を使用し、主なパラメータである粒子径、ポロシティ、堆積高さ、圧力を変えた場合の粒子状ベッドのドライアウト熱流束の不確かさを評価した。以下のように各パラメータを想定した。

- ・ 粒子径は、これまでの実験等の知見により3～7mmと報告されているため^[33]、この範囲を不確かさの範囲と想定する。
- ・ ポロシティは、おおむね0.3以上が報告されているが^[33]、粒子の充填状態の幅を考慮して、0.26（面心立方格子、最稠密）、0.32（体心立方格子）、0.4（MAAP標準値）、0.48（単純立方格子）の範囲を想定する（図4-6参照）。
- ・ 粒子状ベッドの堆積高さは、全炉心相当が落下した場合の堆積高さは1m以上となるが、破損口径の拡大を考慮しても33%以上の粒子化が想定されるため、0.3m以上とする。
- ・ 圧力は、MCCIが発生する時間では格納容器圧力は0.4MPa[abs]以上となっているため（図4-7a及び図4-7b参照）、0.4MPa[abs]以上とする。

Lipinski 0-Dモデルによる評価結果を以下に示す。

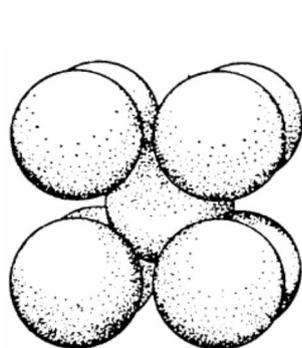
- ・ 図4-8aにドライアウト熱流束の圧力依存性を示す。上記のパラメータの範囲から、粒子径3mm、ポロシティ0.32の熱流束特性が、現実的な範囲内で保守側の特性と想定され、そのときの熱流束は、大気圧状態で800kW/m²程度となる。また、圧力が0.4MPa[abs]以上での下限値としては、ポロシティの最も小さい0.26のケースで800kW/m²程度のドライアウト熱流束となっている。
- ・ 図4-8bにドライアウト熱流束の粒子径依存性を示す。粒子径が3mm以上での下限

値としては、ポロシティの最も小さい 0.26 のケースで 800kW/m^2 程度のドライアウト熱流束となっている。

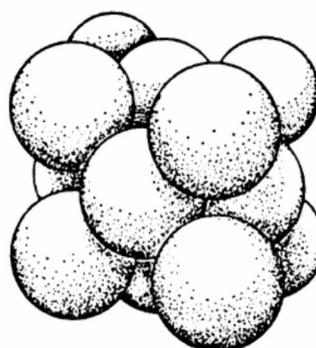
- ・ 図 4-8c にドライアウト熱流束の粒子ベッド高さ依存性を示す。粒子ベッド高さが、0.3m 以上ではドライアウト熱流束はほとんど変化がなく、下限値としては、ポロシティの最も小さい 0.26 のケースで 800kW/m^2 程度のドライアウト熱流束となっている。

以上の粒子状ベッドから水への熱流束の不確かさ評価結果より、有効性評価条件として、大気圧状態で 800kW/m^2 で圧力依存性を考慮した上面熱流束を使用することは、妥当と判断される。これは、MAAPコードのKutateladze式の係数 F_{CHF} をデフォルトの0.1に設定することに相当する。また、デブリ上面熱流束の不確かさの下限値は、 800kW/m^2 程度と考えられるため、粒子径、ポロシティ等の不確かさによる上面熱流束の不確かさの影響を確認するため、 800kW/m^2 一定を仮定した感度解析を実施する。

なお、MAAPコードの F_{CHF} のデフォルト値0.1は、安定クラストが形成されたSWISS実験の知見を元に設定されたものであるが、SSWICS実験の知見より実機では熔融物上面に安定なハードクラストは形成されず、クラストに生じる亀裂から冷却水が内部に浸入することで、デブリの冷却は促進されるものと考えられる。



体心立方格子
(ポロシティ 0.32)



面心立方格子 (最稠密)
(ポロシティ 0.26)

図 4-6 粒子の格子配列とポロシティ

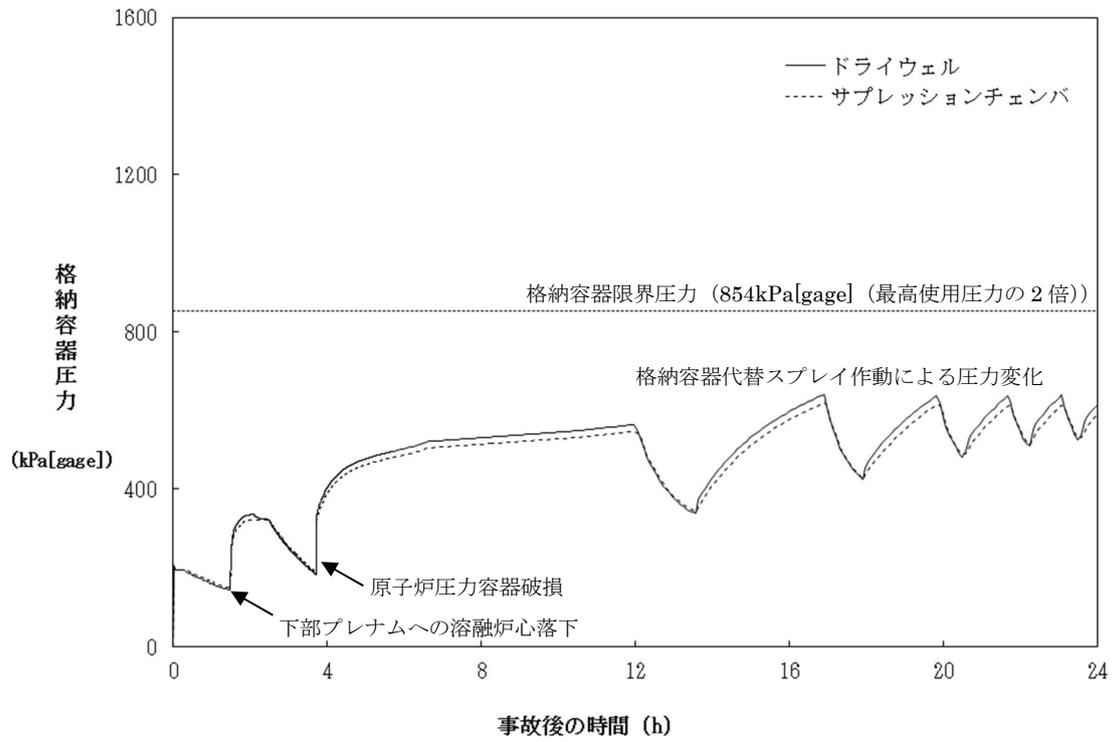


図 4-7a M C C I 評価時の格納容器圧力

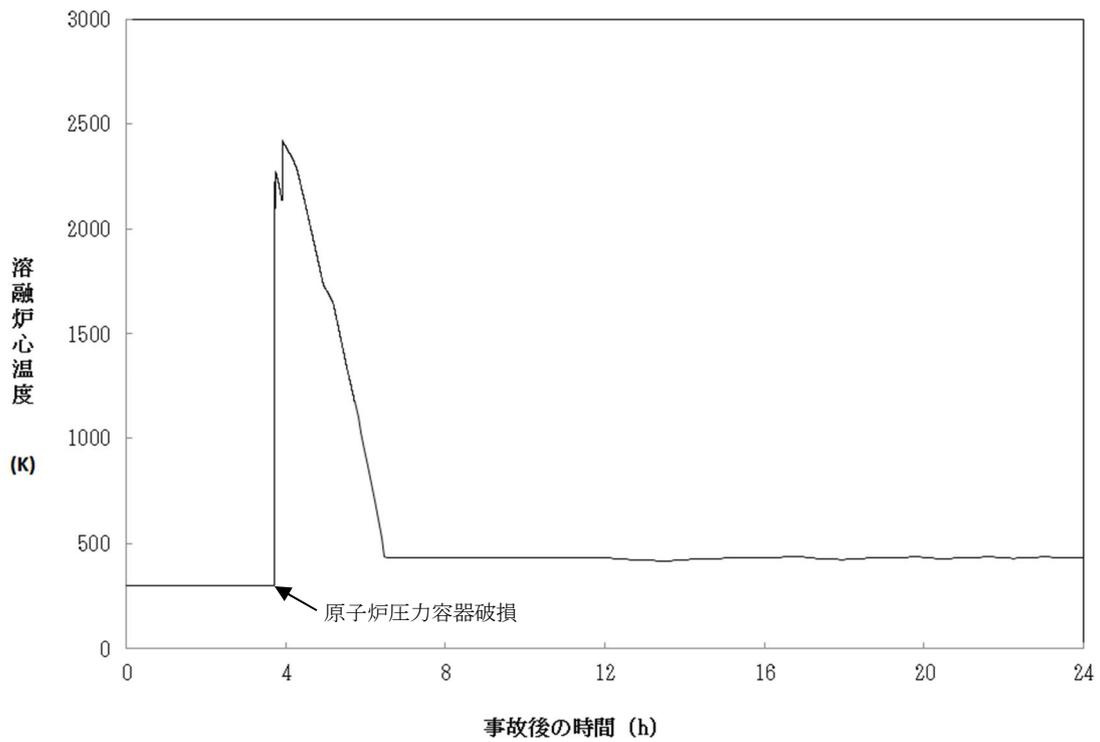


図 4-7b M C C I 評価時の溶融炉心温度

Lipinski 0-D モデル, 粒子径: 3mm、粒子状ベッド高さ: 0.5m

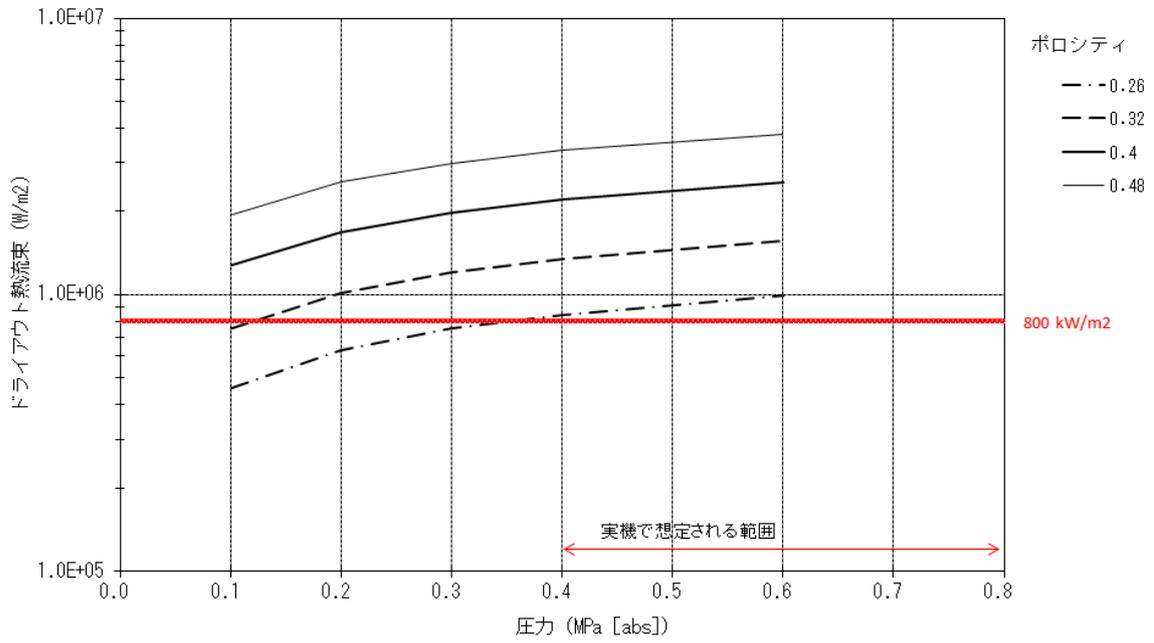


図 4-8a 圧力とドライアウト熱流束の関係
(Lipinski 0-D モデル)

Lipinski 0-D モデル, 圧力: 0.4 MPa(abs)、粒子状ベッド高さ: 0.5m

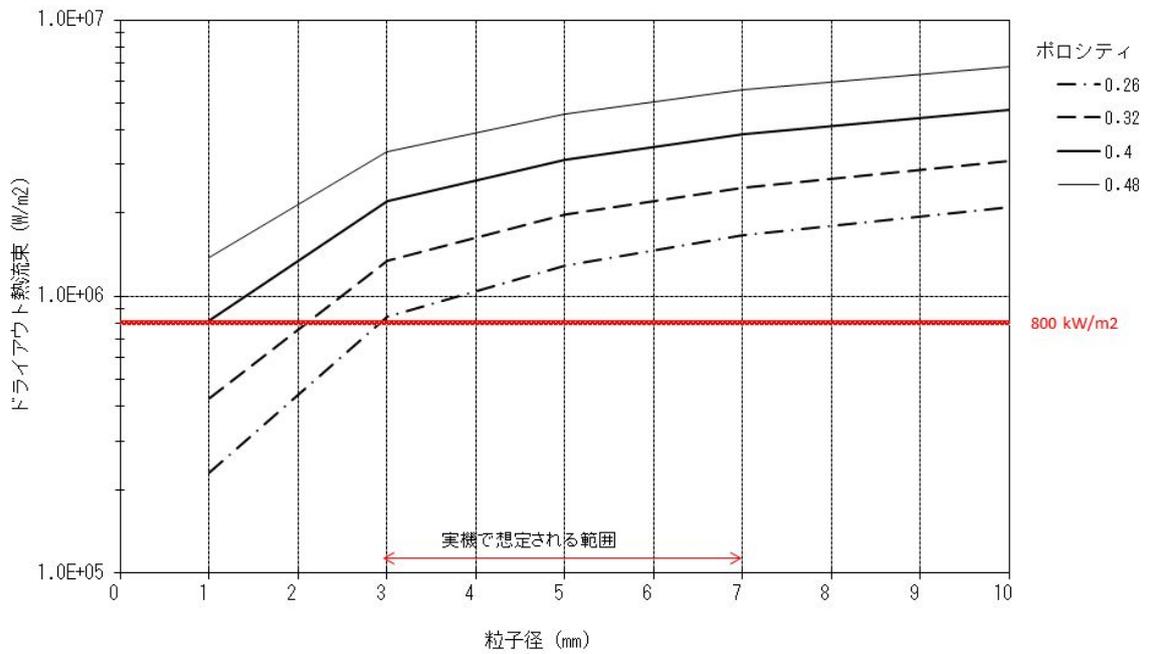


図 4-8b 粒子径とドライアウト熱流束の関係
(Lipinski 0-D モデル)

Lipinski 0-D モデル, 圧力: 0.4 MPa(abs)、粒子径: 3 mm

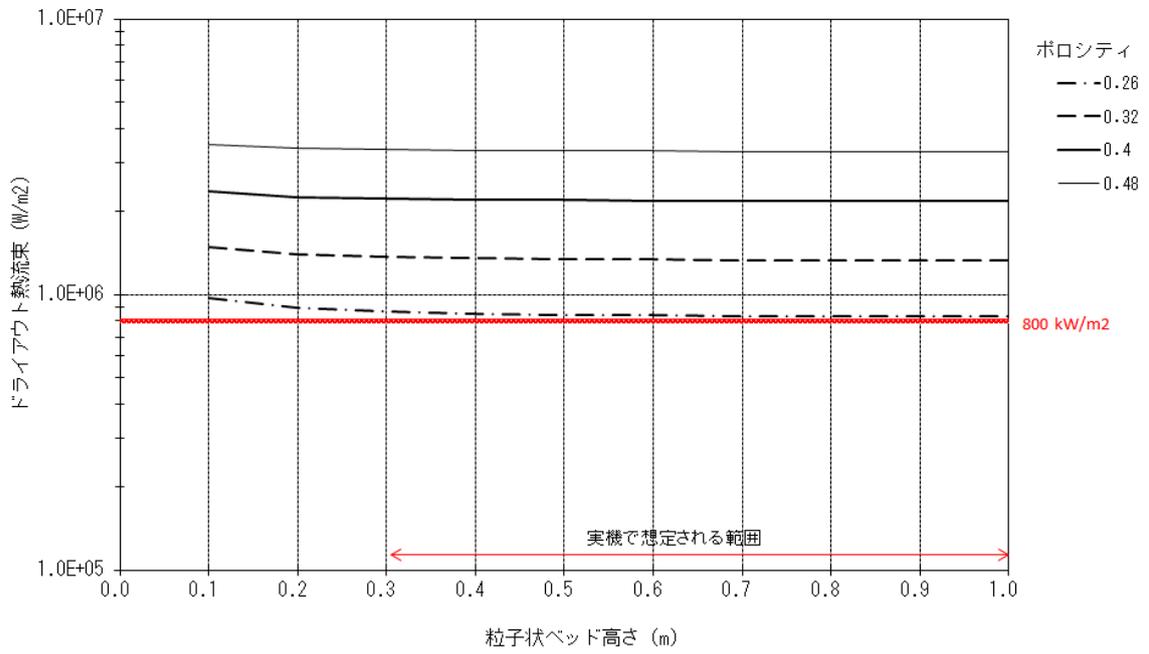


図 4-8c 粒子状ベッド高さ とドライアウト熱流束の関係
(Lipinski 0-D モデル)

コンクリート侵食

コンクリートの種類（玄武岩系や石灰岩系）により、侵食挙動やガス発生挙動が異なる。また、玄武岩系コンクリートに関しては、壁方向と床方向の侵食量に相違が見られる知見が出ている。床方向に大きく侵食する結果（付録1(3)BETA 実験参照）と壁方向に大きく侵食する結果（付録2(5)OECD/MCCI 実験のCCI-1/3 実験参照）があり、この侵食の異方性は、いまだ十分な理解が得られておらず、現状モデルでも扱われていない。また、実験ではドライ条件において侵食の異方性が確認されており（CCI-1/3 実験では、最初ドライ条件で侵食させている）、実機のウェット条件でもこの侵食の異方性が発生するかは不明であるが、念のためモデルパラメータの感度解析により、この侵食異方性の影響を検討する。

評価モデル：

- ・ コンクリート表面から深さ方向に一次元熱伝導を解き温度分布を計算している。
- ・ クラストーコンクリート界面の温度がコンクリート融点以上である場合にコンクリート侵食が計算される。
- ・ コリウムからの伝熱量と分解／溶融潜熱により侵食量を評価する。
- ・ コンクリート分解による自由水・結合水・CO₂の発生を考慮し、溶融コリウム中での化学熱力学平衡計算による未酸化金属との反応によりH₂及びCO発生が計算される。反応熱は、溶融炉心の崩壊熱に加算される。

評価条件： コンクリートの種類には、玄武岩系や石灰岩系があり、プラントに使用されているコンクリートの種類により組成や物性値を使い分けている。表 4-1 にコンクリートの物性値、表 4-2 にコンクリートの組成例を示しており、これらをMAAPの入力としている。融点は石灰岩系コンクリートの方が高いが、比熱は石灰岩系コンクリートの方が小さい。コンクリート成分は骨材(aggregate)の種類に影響され、玄武岩系コンクリート(Basaltic)の成分はSiO₂が主体であるが、石灰岩系コンクリート(Limestone)では、CaCO₃が主体である。

コンクリートの侵食モデルは、主に SURC 実験や ACE/MCCI 実験の一次元侵食の実験や、BETA 実験の二次元侵食のドライ実験に対して検証されている（付録1 参照）。なお、コンクリート侵食モデルは、コンクリート表面から侵食深さ方向に一様に侵食する扱いをしているのに対し、実験で得られた侵食深さは、一般的に侵食面で一様ではない。このため、コンクリート侵食モデルの検証では、実験の平均的な侵食深さと比較して侵食速度が良く一致していることが確認されている。

侵食面での侵食の不均一性とMAAPコードの一様侵食との関係を見るため、SURC-4 実験（一次元侵食）に対するMAAPコードのベンチマーク解析で得られた侵食深さに対して、実験で得られた侵食深さがどの程度の幅にあるかを確認した結果を図 4-9 に示すが、実験で得られた侵食深さは、MAAPコードによる予測侵食量に対しておおむね±20%程度の範囲にある。同様にBETA-V5.1 実験（二次元侵食）に対して確認した結果を同図に示すが、この場合もおおむね±20%程度の範囲にある。従って、実験における侵食面での侵食深さは、

MAAPコードによる予測侵食量のおおむね±20%程度の範囲にあると考えられる。

また、壁方向と床方向の二次元侵食を調べる OECD/MCCI プロジェクトのCCI実験では、石灰岩系コンクリート（CCI-2 実験）と玄武岩系コンクリート（CCI-1 実験、CCI-3 実験）の侵食挙動が調べられている。

石灰岩系コンクリート（CCI-2 実験）では、壁方向と床方向に等方的に侵食している。一方、玄武岩系コンクリート（CCI-3 実験）では、壁方向と床方向の侵食の異方性が確認されており（付録2参照）、玄武岩系コンクリートの壁方向と床方向の侵食速度の相違から、壁方向の熱流束が、床方向の熱流束の約4倍程度大きいと推定されている。なお、同様に玄武岩系コンクリートが使われたCCI-1 実験では、加熱条件が他の実験と異なり高く設定されていたため、代表性があるとは見なされず、侵食挙動の分析やベンチマーク解析には、CCI-3 実験の結果の方が使われている。玄武岩系コンクリートの壁方向と床方向の侵食の異方性のメカニズムに関しては、明確な理解は得られていないが、CCI-3 実験に対するMAAPコードのベンチマーク解析^[35]において、壁方向への熱流束が床方向の4倍程度大きくなるように溶融プールからの対流熱伝達係数を設定することにより、実験の侵食挙動と良く一致する解析結果が得られている。この場合も、実験の侵食深さは、MAAPコードの予測侵食量に対して、上記のSURC-4 実験及びBETA-V5.1 実験のベンチマーク解析で設定した20%以内の侵食深さに収まっている（図4-10参照）。

以上のMAAPコードのベンチマーク解析の分析から、コンクリート侵食の不確かさについて、以下のことが言える。

- ・ 侵食面における侵食深さのばらつきの範囲は、MAAPコードの予測侵食量の20%以内に入っている。
- ・ 玄武岩系コンクリートの壁方向と床方向の侵食の異方性は、MAAPコードにおいて溶融プールからの対流熱伝達係数を変更することにより予測可能である。その場合も侵食のばらつきの範囲は、MAAPコードの予測侵食量の20%以内に入っている。

以上のことから、コンクリート侵食の不確かさに関して、侵食面における侵食深さの不均一性については、おおむねMAAPコードによる予測侵食量の20%の範囲内であることがわかった。一方、玄武岩系コンクリートの壁方向と床方向の侵食の異方性については、実機における影響の確認のため感度解析が必要と考えられ、CCI-3 実験のベンチマーク解析を参考にして、溶融プールから壁方向と床方向の対流熱伝達係数を調整して感度解析を実施する。壁方向の熱配分の最大ケースとして、床方向の4倍として感度解析を行い、コンクリート侵食の壁方向と床方向の異方性の影響を確認する。

以上の各過程での、MCCI現象の影響因子と感度解析パラメータの関係を図4-11に示し、不確かさ要因、有効性評価の扱い及び感度解析の要否を表4-3に整理する。

また、溶融炉心とコンクリートの相互作用における実機で想定される現象と解析上の取り扱いの比較を図4-12に示す。

表 4-1 コンクリートの物性比較 (MAAP入力)

項目	玄武岩系コンクリート	石灰岩系コンクリート
コンクリート組成	SiO ₂ が主体	CaCO ₃ が主体
液相線温度 (K)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
固相線温度 (K)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
比熱 (J/kg-K)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
熔融潜熱 (J/kg)	<input type="text"/>	<input type="text"/>

表 4-2 代表的なコンクリートの組成例 (重量%) [37]

成分	玄武岩系コンクリート	石灰岩系コンクリート
SiO ₂	54.84	3.60
TiO ₂ , MnO, MgO	7.21	5.80
CaO	8.82	45.40
Na ₂ O	1.80	0.0078
K ₂ O	5.39	0.68
Fe ₂ O ₃	6.26	1.20
Al ₂ O ₃	8.32	1.60
Cr ₂ O ₃	0.00	0.004
CO ₂	1.50	35.698
H ₂ O (自由水, 結合水)	5.86	5.94

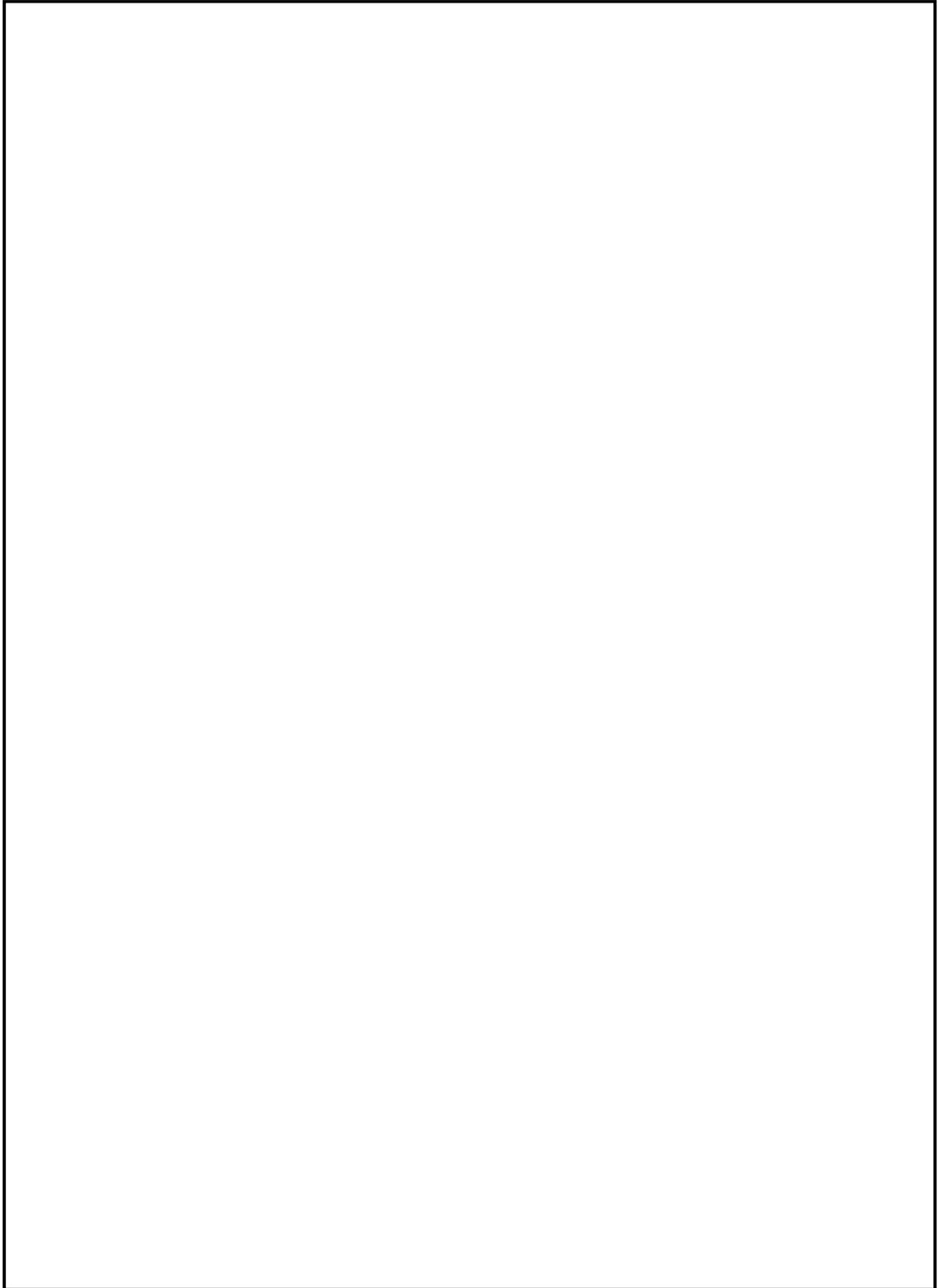


図 4-9 SURC-4 と BETA-V5.1 実験と MAAP4 コード予測の侵食量の比較^[23]

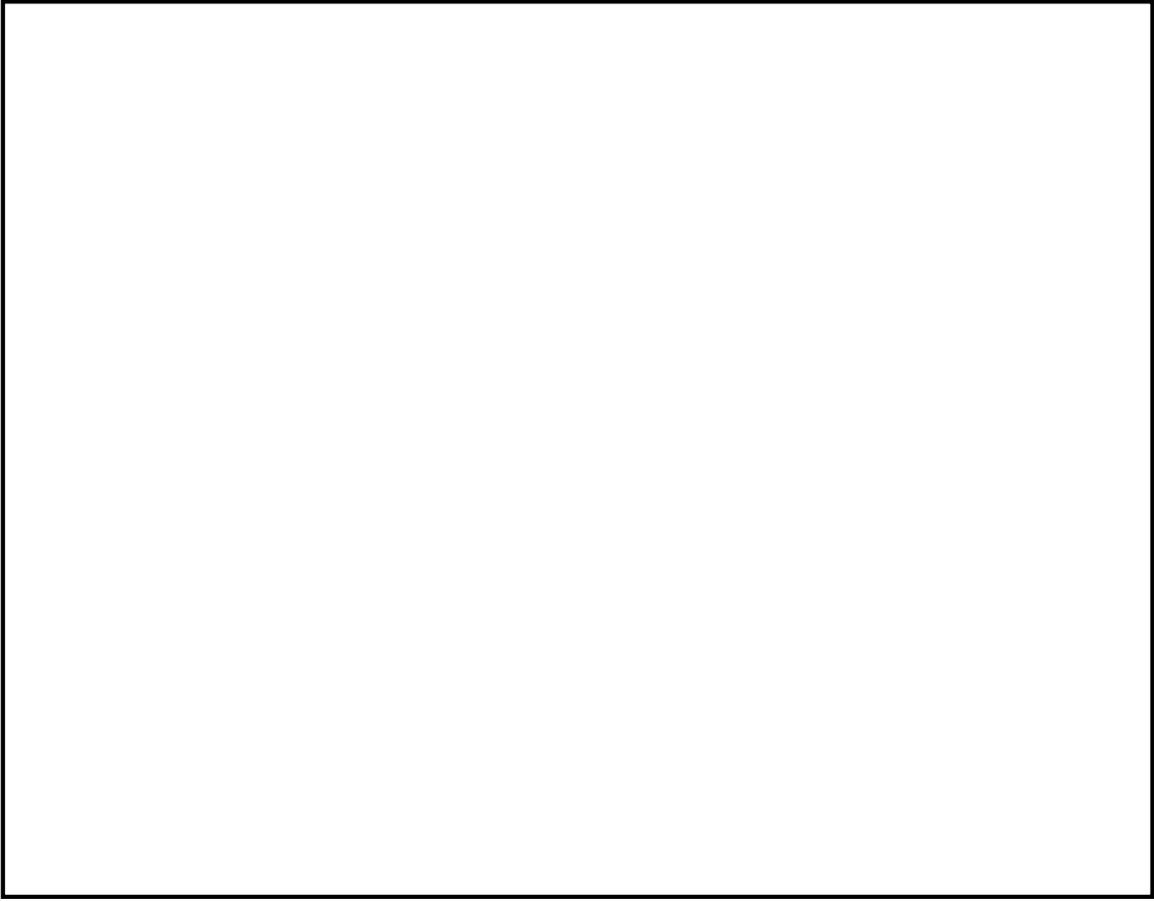


図 4-10 CCI-3 実験（玄武岩系コンクリート）の侵食深さ^[12]

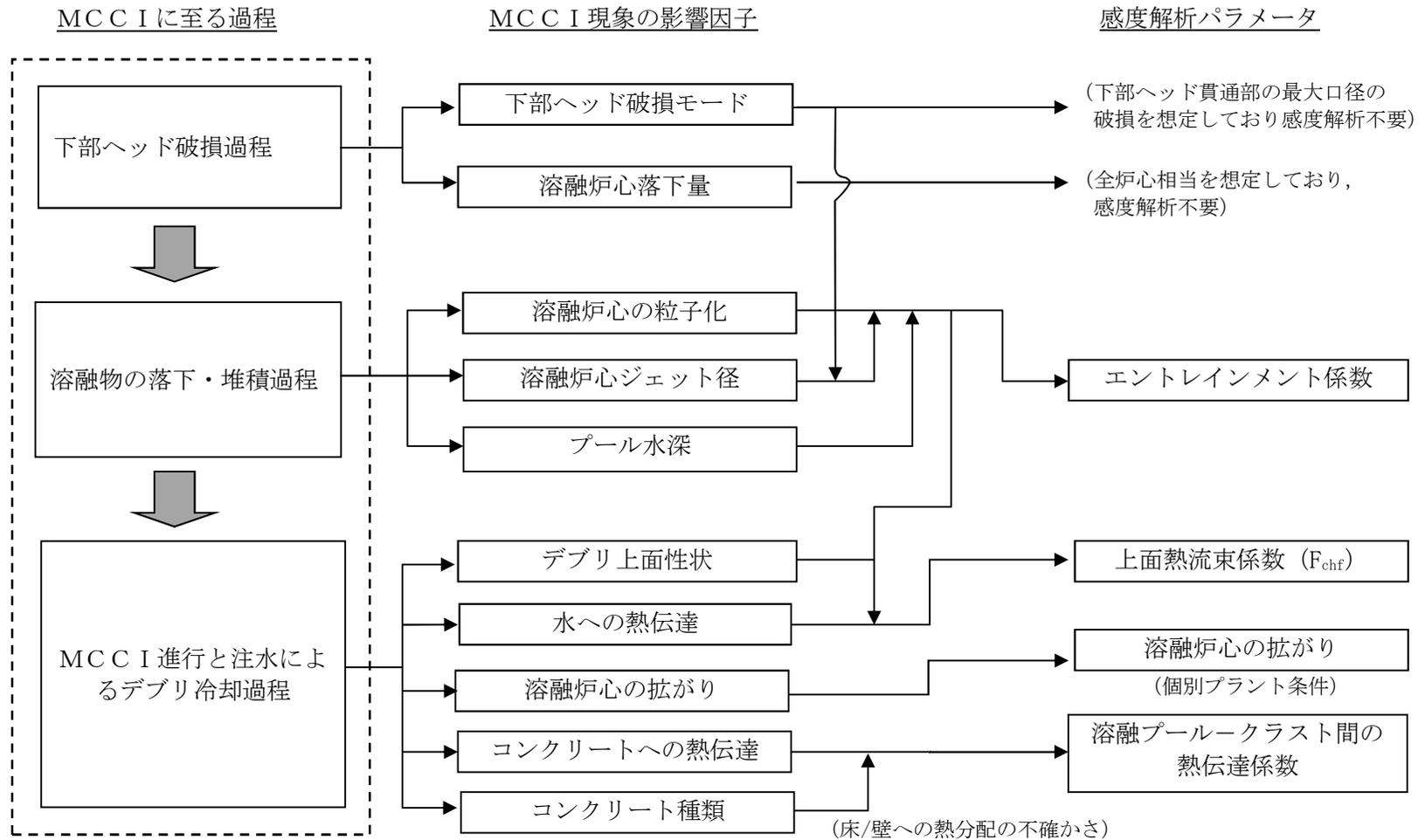


図 4-11 MCC I における不確かさに関する流れ図

実機で想定される現象

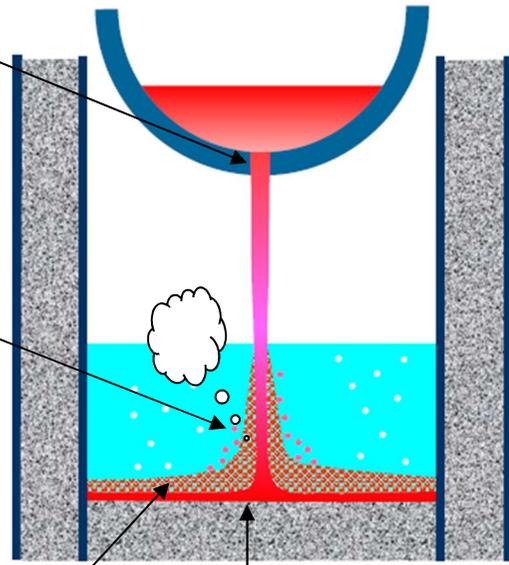
解析上の取り扱い

下部ヘッド破損口を熔融炉心が通過する際に破損口側面が溶かされ、破損口が拡大する。

熔融物が水中を落下する過程で粒子化する。この際デブリ粒子のクエンチにより水蒸気が発生し、デブリ粒子の酸化により水素が発生する。

水深が浅い場合は、熔融物は完全には粒子化せず、床上に熔融炉心が拡がり、その上に粒子状ベッドが堆積する。水により拡がりや抑制され、不均一に堆積する。上面の性状により水への熱伝達が大きく影響される。

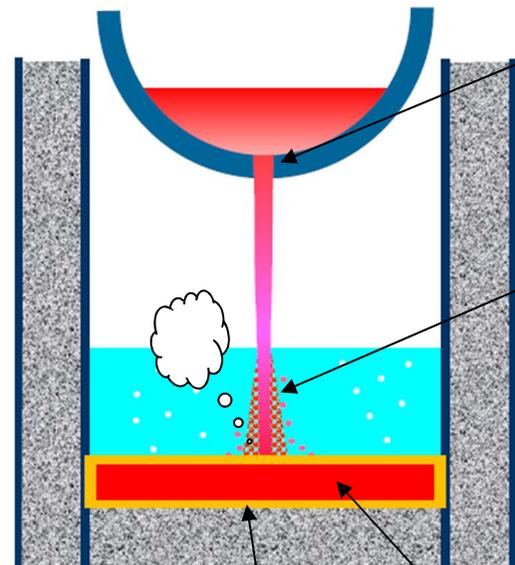
コンクリートの種類により、侵食挙動やガスの発生挙動が異なる。



下部ヘッド破損口を熔融炉心が通過する際の破損口側面の溶融による破損口拡大を模擬。

熔融物が水中を落下する過程での粒子化を模擬。粒子化割合は Ricou-Spalding モデルにより評価。この際デブリ粒子のクエンチによる水蒸気発生と、デブリ粒子の酸化による水素発生を模擬。

コンクリート種類に応じて玄武岩系や石灰岩系を模擬可能。熔融プールからクラストへの対流熱伝達係数を変更することにより熱移行の異方性を評価可能。



熔融炉心は、床上で均一に堆積し、均一に混合して外周部のクラスト層と中心部の熔融プールから構成される平板の発熱体として模擬。上面熱流束は Kutateladze の水平平板限界熱流束相関式で与えており、係数変更により粒子状ベッドから水への熱流束の模擬が可能。

図 4-12 熔融炉心とコンクリートの相互作用における実機で想定される現象と解析上の取り扱いの比較

表 4-3 MCCI 評価の不確かさに関する整理結果

MCCI 現象への影響因子	不確かさ要因	有効性評価の扱い	感度解析の要否
下部ヘッド破損モード	破損部位 破損口侵食拡大	下部ヘッド貫通部の中で最も大口径の制御棒駆動機構ハウジングの瞬時破損を想定し、破損口径の拡大を考慮	下部ヘッド貫通部の中で最も大口径の貫通部の破損を想定し、破損口径の拡大も考慮しているため、感度解析不要。
溶融炉心落下量	原子炉圧力容器内溶融進展	全炉心相当を想定	全炉心相当の最も厳しい落下量を想定しているため、感度解析不要。
溶融炉心の粒子化	プール水深	ペDESTALの注水開始条件及び注水流量について、手順書規定に準じた操作を想定	解析モデルパラメータではないため、感度解析不要。
	エントレインメント係数	実験解析を元に、粒子化割合を少ない側に評価する値を使用	エントレインメント係数に不確かさがあるため、MAAPコードの不確かさ範囲内 (FARO 実験解析に基づく) で感度解析を実施。
	溶融炉心ジェット径	破損口径に対応した径を考慮	最も大きい径を想定して、粒子化割合を小さくし、水に落下した際のデブリクエンチ量を小さくして厳しい側の扱いをしているため、感度解析不要。
溶融炉心の拡がり	水による拡がり抑制	拡がりの知見から、全面に拡がることを想定し、均一堆積モデルを使用	溶融炉心の拡がりを抑制した場合を想定し、水張り深さ等の個別プラントの状況を踏まえた感度解析等の取り扱いを行うことが必要。
デブリから水への熱伝達	デブリ上面の性状	粒子状ベッドの熱流束として、現実的な範囲内で保守側の想定をして、大気圧状態で 800kW/m^2 として圧力依存性を考慮	粒径やポロシティの不確かさを考慮して、下限の熱流束に対して感度解析を実施。
コンクリート種類 (玄武岩系コンクリートの侵食の異方性)	壁方向と床方向の熱分配	溶融プールが完全な液相の場合の対流熱伝達係数として、床方向クラストへは <input type="text"/> 、壁方向クラストへは <input type="text"/> を使用	床方向と壁方向の侵食の異方性の影響を見るため、CCI-3 実験で確認された熱分配比率を想定した感度解析を実施。

5. 感度解析と評価

ペDESTAL床上の溶融炉心の堆積高さが高い方が、溶融炉心の冷却性が悪くなり、MCCIの影響が厳しくなる。国内BWRでは、全炉心が落下した場合には、溶融炉心の堆積高さはMark-I改やMark-IIで約1m程度であり、ABWRでは約0.5m程度である。このため、ここでは、溶融炉心の堆積高さの高いBWR5 Mark-I改プラントを対象に感度解析を行う。前節の検討を踏まえ、BWR5 Mark-I改プラントの大LOCAシーケンスを対象に抽出されたパラメータの感度解析を実施した。

また、ガスの発生の影響を見るために参考解析として石灰岩系コンクリートを想定した解析も実施した。

(1) エントレインメント係数の感度解析

エントレインメント係数は、ベースケースでは□を設定しているが、感度解析ケースでは、MAAPコードのFARO実験解析を元に設定されている当該変数の不確かさ範囲のうち、最小値である□と最大値である□の感度解析を実施する。感度解析ケースを表5-1に示す。解析結果を図5-1-1a、図5-1-1b、図5-1-2a、図5-1-2b及び表5-5に示す。

エントレインメント係数が小さいと粒子化割合が減り、落下時のクエンチによる除熱量が減るため、床に堆積する溶融炉心の温度はベースケースより高めに推移し、コンクリートへの伝熱量も増加するため、侵食量は若干増えている。エントレインメント係数が大きいと粒子化割合が増えて逆のことが起こり、侵食量は若干減少している。

エントレインメント係数の不確かさ幅の範囲では、コンクリート侵食量への影響は小さい。

表 5-1 エントレインメント係数のベースケースと感度解析ケース

パラメータ	ベースケース (有効性評価)	感度解析ケース	根拠
① エントレインメント係数	□	(1) □ (小) (2) □ (大)	(1) MAAP 不確かさ範囲*の最小値 (2) MAAP 不確かさ範囲*の最大値 *FARO 実験解析を元に設定

(2) 上面熱流束の感度解析

感度解析ケースを表 5-2 に示す。上面熱流束の不確かさを考慮した下限値として、Lipinski 0-D モデルにより評価される粒子状ベッドのドライアウト熱流束において、想定される範囲でドライアウト熱流束を小さくする条件の値を選定することとし、圧力 0.4MPa[abs]、粒子径 3mm、及びポロシティ 0.26 を条件とした場合の熱流束である 800kW/m²（一定）を選定した。解析結果を図 5-2a、図 5-2b 及び表 5-5 に示す。

上面熱流束が小さいと水への熱伝達量が減少するため、溶融炉心の温度はベースケースより高めに推移し、コンクリートへの伝熱量も増加するため、侵食量は増えている。

上面熱流束の不確かさ幅の範囲では、コンクリート侵食量への影響は大きい。

表 5-2 上面熱流束係数のベースケースと感度解析ケース

パラメータ	ベースケース (有効性評価)	感度解析ケース	根拠
② 上面熱流束係数 (F _{CHF})	F _{CHF} =0.1 (default) 圧力依存性あり (大気圧状態で約 800kW/m ²)	800kW/m ² 一定	Lipinski 0-D モデルによる評価において、圧力 0.4MPa[abs]、粒子径 3mm、ポロシティ 0.26 のドライアウト熱流束

(3) 溶融プールークラスト間の熱伝達係数の感度解析

感度解析ケースを表 5-3 に示す。熱伝達係数の不確かさ幅の中で、床方向への熱伝達を大きくしたケースと壁方向への熱伝達を大きくしたケースの解析結果を図 5-3-1a, 図 5-3-1b, 図 5-3-2a, 図 5-3-2b 及び表 5-5 に示す。

床方向への熱伝達を大きくすると、床方向へ侵食量は増えており、壁方向の侵食は若干減少している。壁方向への熱伝達を大きくすると、壁方向へ侵食量は増えており、床方向の侵食はあまり変わらない。

溶融プールの熱伝達係数の不確かさ幅の範囲では、コンクリート侵食量への影響は小さい。

表 5-3 溶融プールークラスト間の熱伝達係数のベースケースと感度解析ケース

パラメータ	ベースケース (有効性評価)	感度解析ケース	根拠
③ 溶融プールークラスト間の熱伝達係数	溶融プールが完全な液相の場合の対流熱伝達係数として 床方向: <input type="text"/> 壁方向: <input type="text"/>	(1) 床: <input type="text"/> 壁: <input type="text"/> (2) 床: <input type="text"/> 壁: <input type="text"/>	(1) 床: 壁の 1/4 (CCI-3 実験反映) 壁: 推奨入力値 (2) 床: 推奨入力値 壁: 床の 1/4 ((1) の逆とした。)

(4) 石灰岩系コンクリートを想定した参考解析

解析条件を表 5-4 に示す。コンクリートの組成や物性は、表 4-1 及び表 4-2 に示す値を使用している。石灰岩系コンクリートを想定した場合の解析結果を図 5-4a, 図 5-4b, 図 5-4c, 図 5-4d 及び表 5-5 に示す。石灰岩系コンクリートの場合、床方向及び壁方向の侵食量は若干増加しているが、感度は小さい。また、原子炉格納容器内のガスモル分率もベースケースと同様な結果となる。このケースのようにコンクリート侵食量が小さい場合は、石灰岩系コンクリートの影響は小さい。

表 5-4 コンクリート種類を変えた参考解析条件

パラメータ	ベースケース (有効性評価)	参考解析ケース	根拠
コンクリート種類	玄武岩系	石灰岩系	ガス発生の影響を確認する。

表 5-5 MCC I 感度解析結果の一覧

ケース	パラメータ設定	コンクリート侵食量
有効性評価 (ベースケース)	<ul style="list-style-type: none"> ・エントレインメント係数: <input type="text"/> ・上面熱流束: 約 800kW/m² @ 1ata (F_{chf}=0.1 デフォルト) 圧力依存性考慮 ・溶融プールからクラストへの熱伝達係数 床: <input type="text"/> 壁: <input type="text"/> ・コンクリート組成及び物性値: 玄武岩系 	床面: 2.4cm 壁面: 2.3cm
①-1 エントレインメント係数 小	エントレインメント係数: <input type="text"/>	床面: 3.6cm 壁面: 3.5cm
①-2 エントレインメント係数 大	エントレインメント係数: <input type="text"/>	床面: 1.7cm 壁面: 1.7cm
② 上面熱流束 下限	800kW/m ² 一定	床面: 22.5cm 壁面: 21.6cm
③-1 溶融プール熱伝達床方向大	溶融プール熱伝達係数 床: <input type="text"/> 壁: <input type="text"/>	床面: 2.4cm 壁面: 2.2cm
③-2 溶融プール熱伝達壁方向大	溶融プール熱伝達係数 床: <input type="text"/> 壁: <input type="text"/>	床面: 2.1cm 壁面: 2.4cm
(参考解析) 石灰岩系コンクリート	コンクリート組成及び物性値: 石灰岩系	床面: 2.8cm 壁面: 2.8cm

「本製品（又はサービス）には、米国電力研究所（The Electric Power Research Institute）の出資により電力産業用に開発された技術が取り入れられています。」

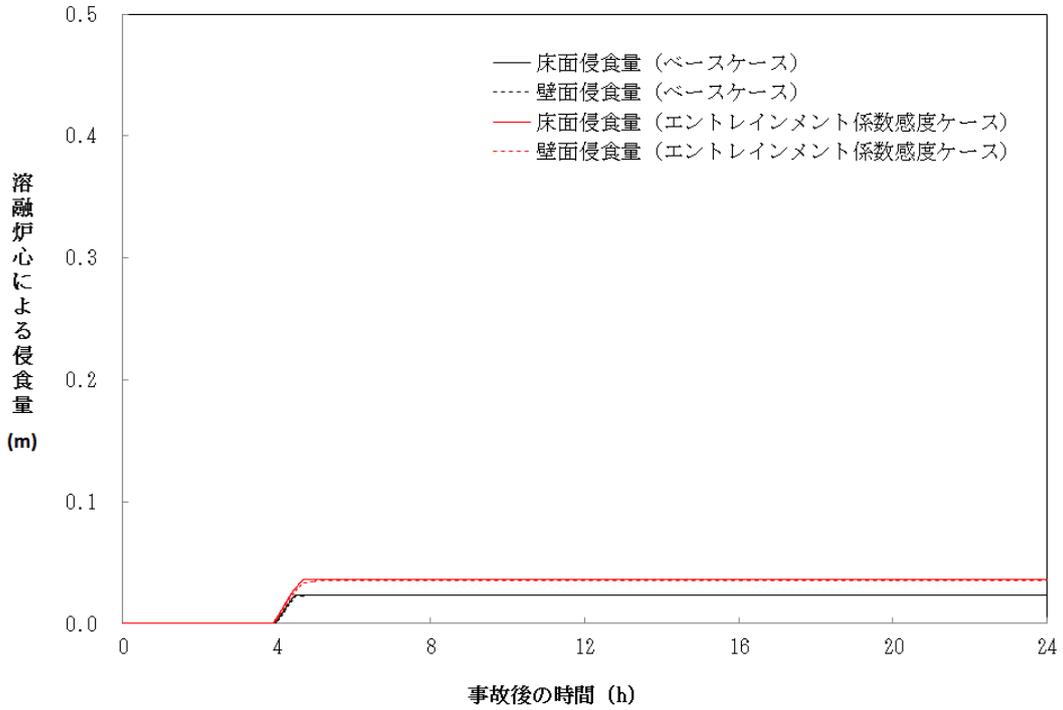


図 5-1-1a コンクリート侵食量の比較（エントレインメント係数 ）

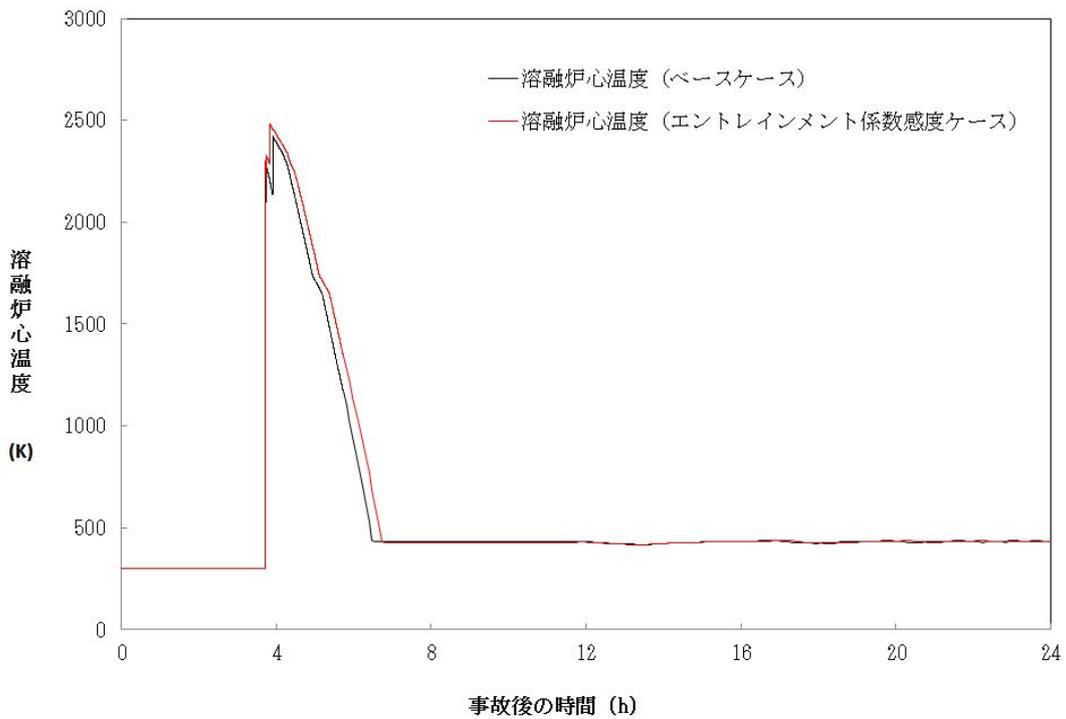


図 5-1-1b 溶融炉心温度の比較（エントレインメント係数 ）

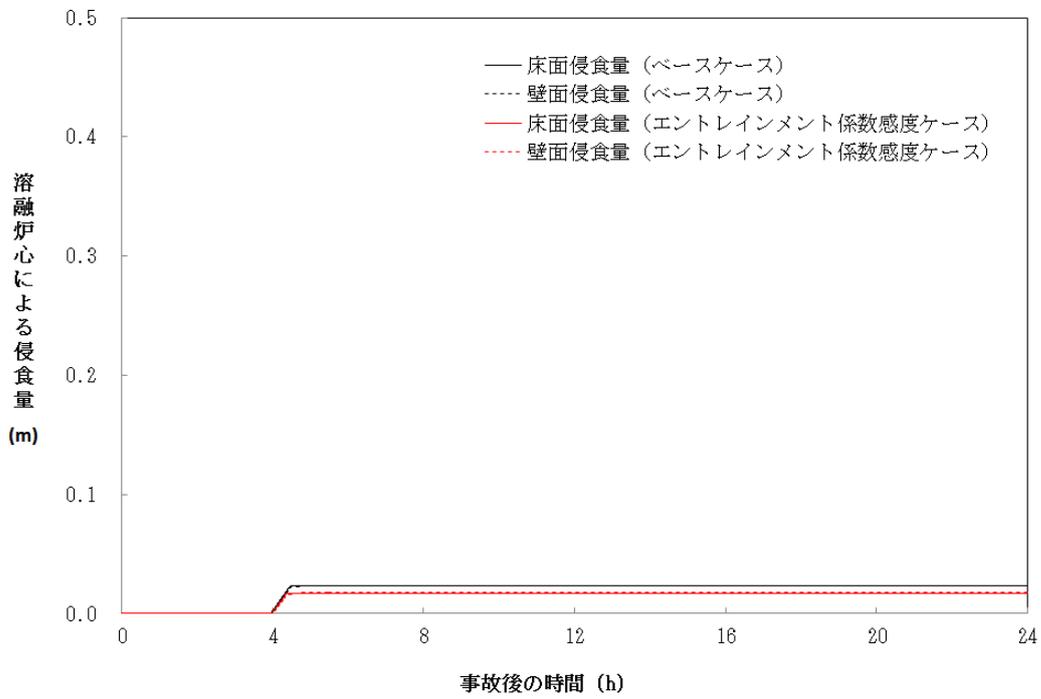


図 5-1-2a コンクリート侵食量の比較 (エントレインメント係数)

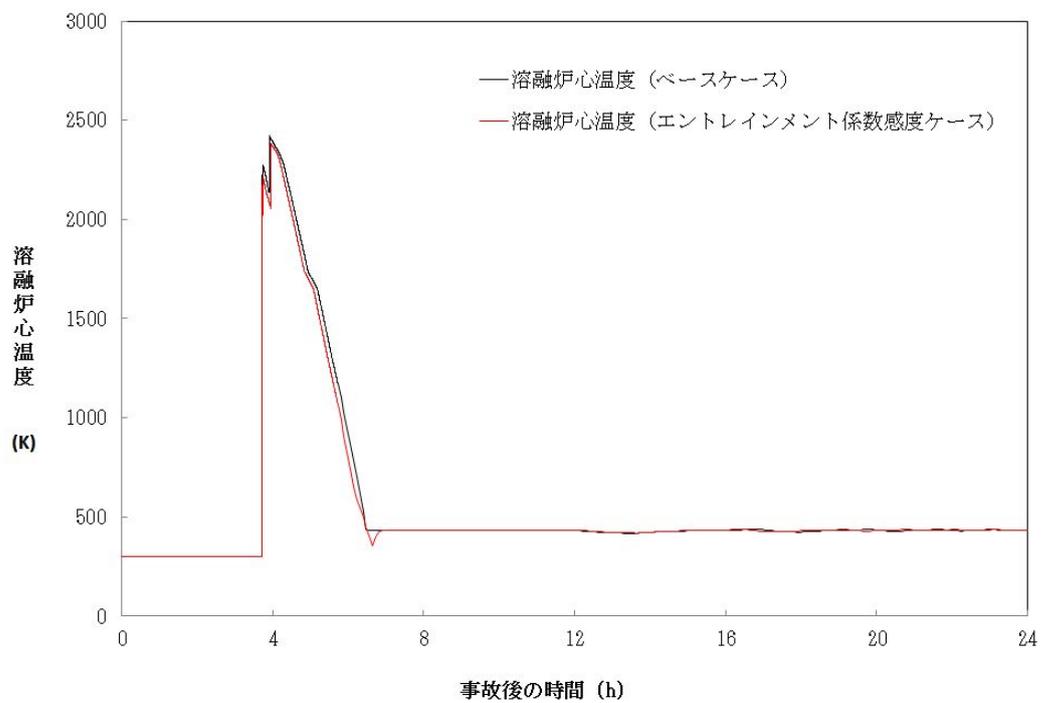


図 5-1-2b 溶融炉心温度の比較 (エントレインメント係数)

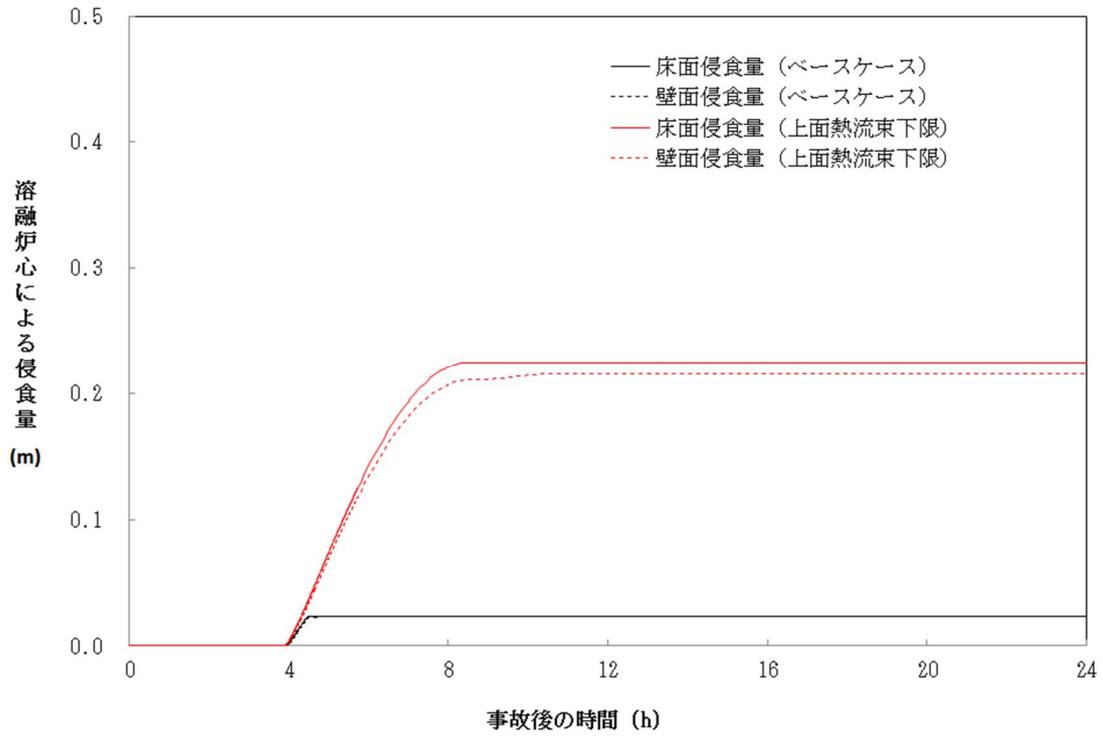


図 5-2a コンクリート侵食量の比較 (上面熱流束 800kW/m^2 一定)

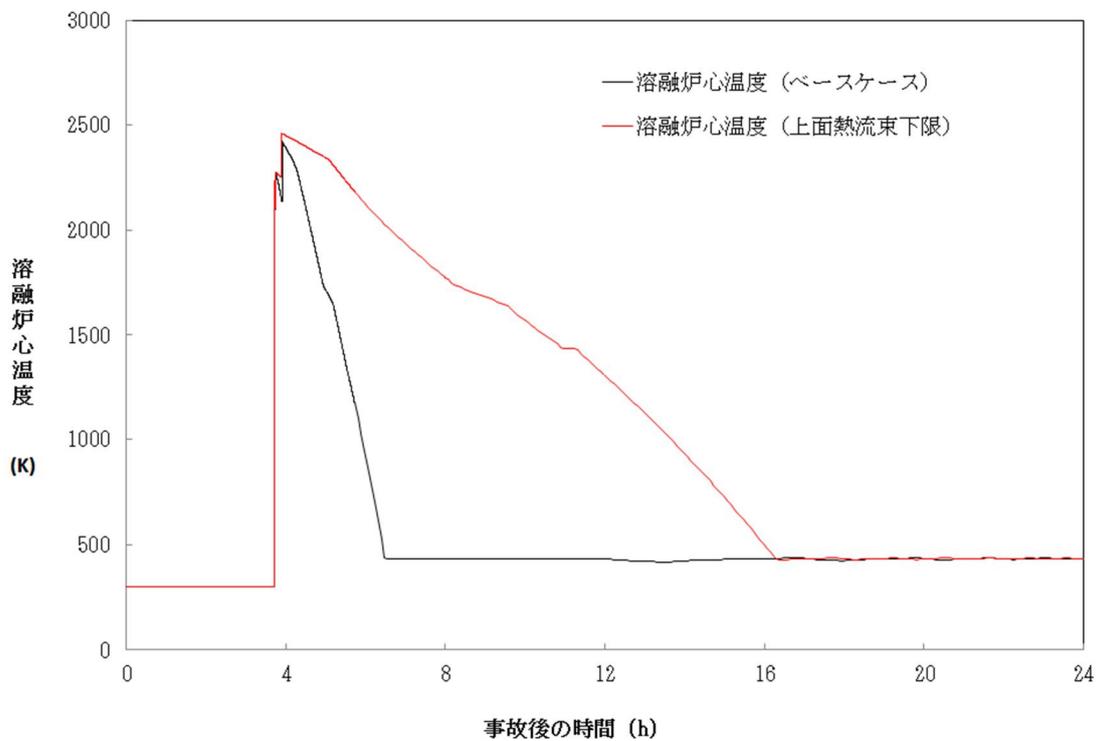


図 5-2b 熔融炉心温度の比較 (上面熱流束 800kW/m^2 一定)

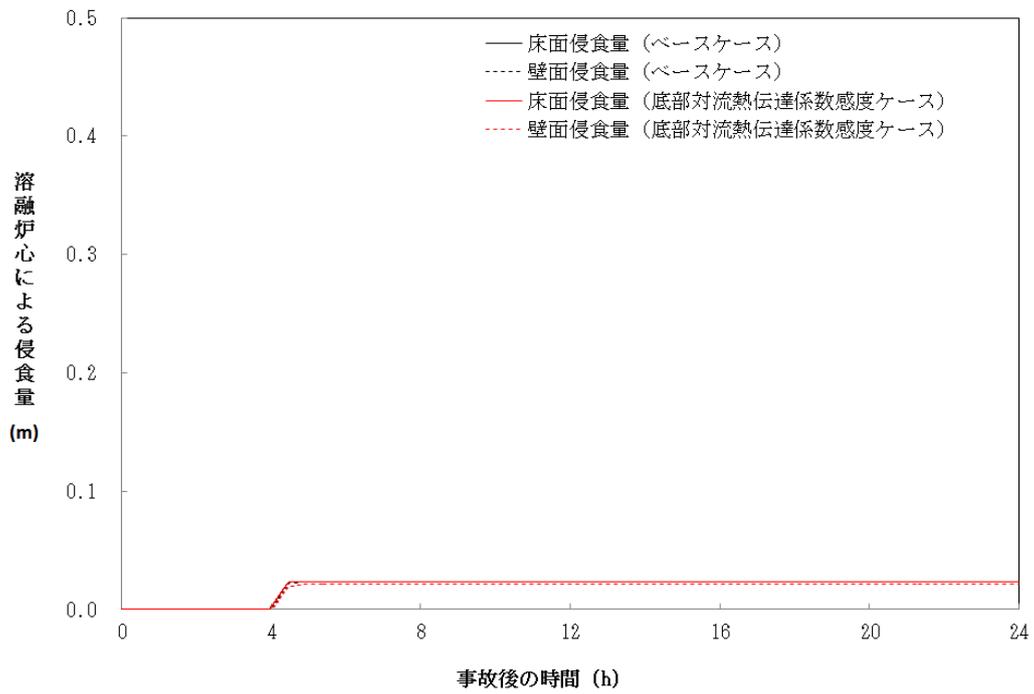


図 5-3-1a コンクリート侵食量の比較 (床方向対流熱伝達係数大)

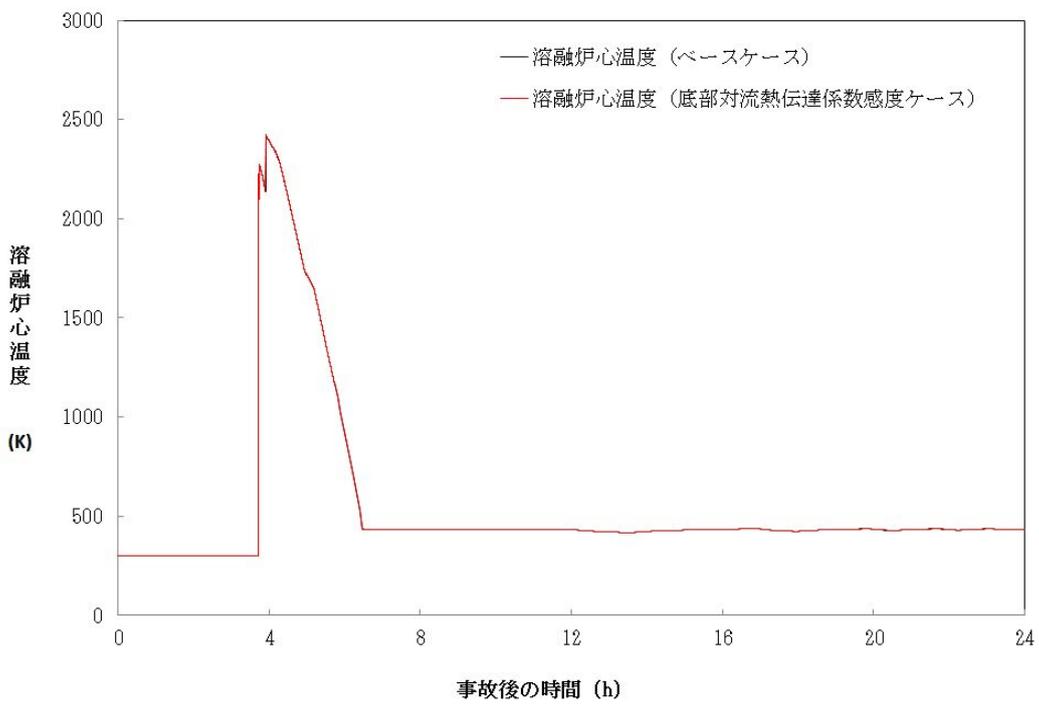


図 5-3-1b 溶融炉心温度の比較 (床方向対流熱伝達係数大)

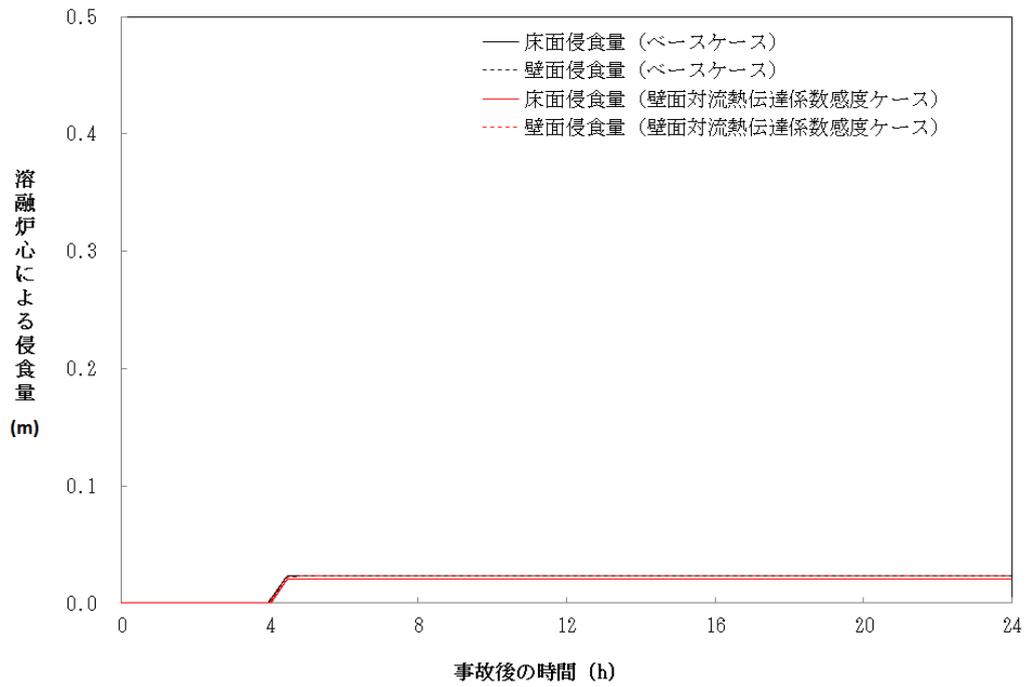


図 5-3-2a コンクリート侵食量の比較 (壁方向対流熱伝達係数大)

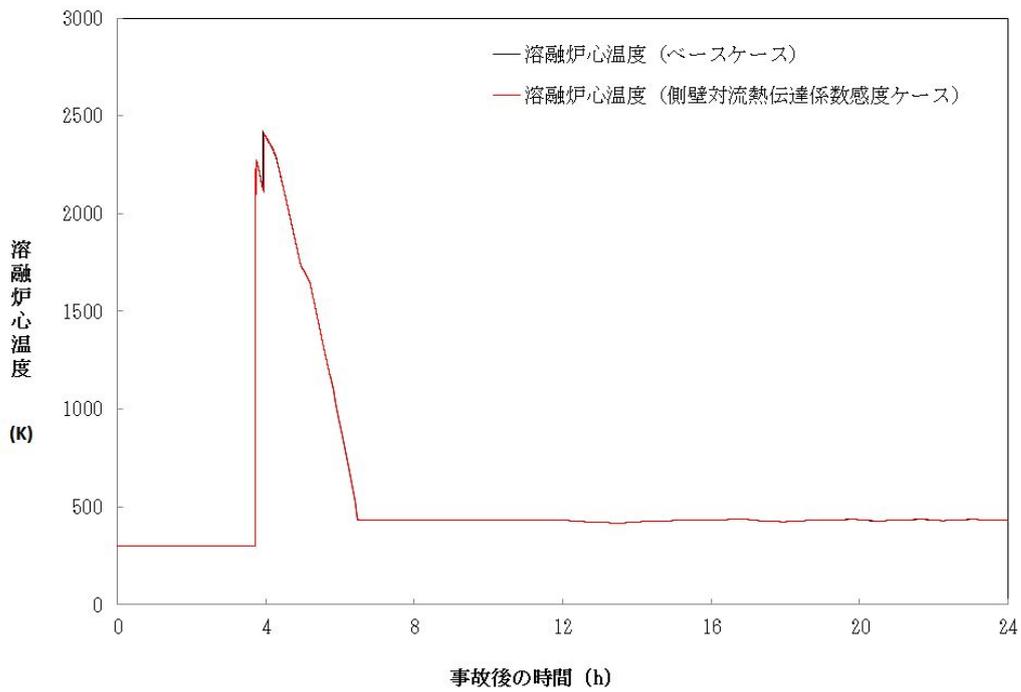


図 5-3-2b 溶融炉心温度の比較 (壁方向対流熱伝達係数大)

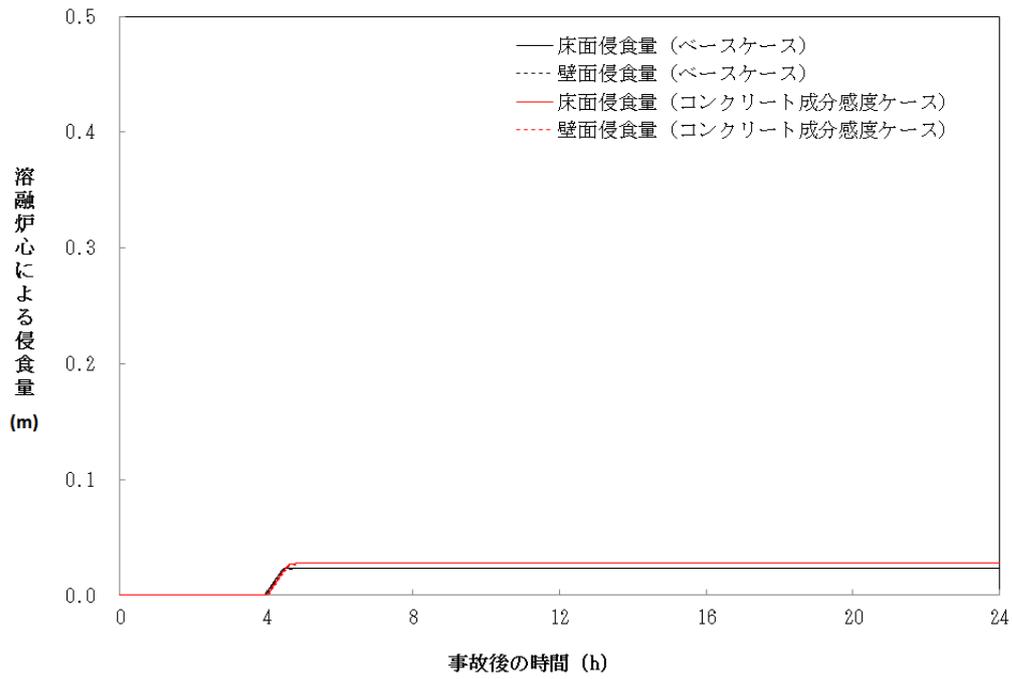


図 5-4a コンクリート侵食量の比較 (石灰岩系コンクリート)

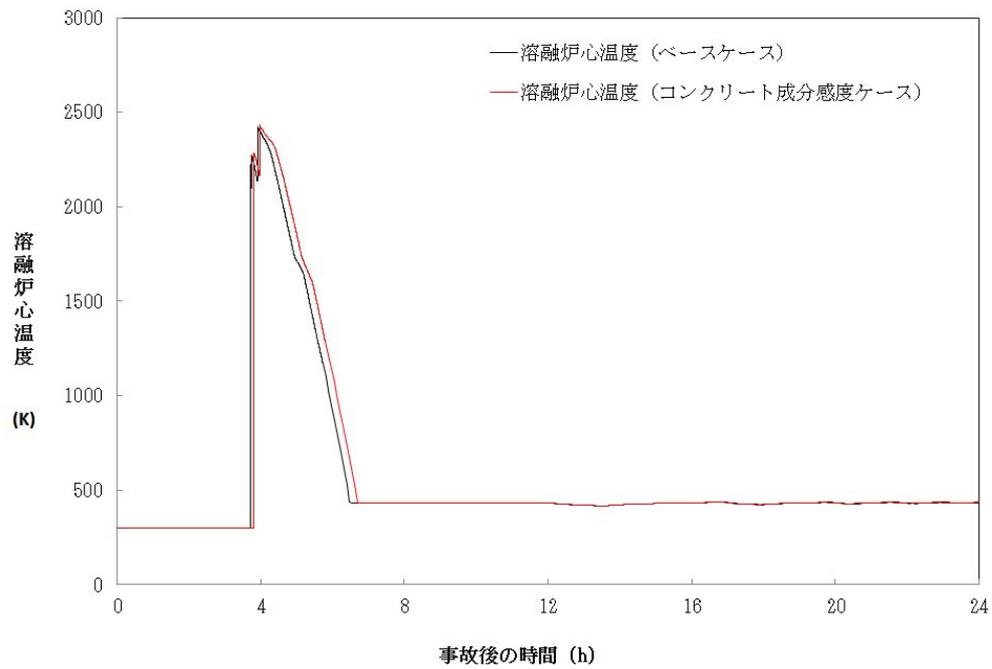


図 5-4b 融融炉心温度の比較 (石灰岩系コンクリート)

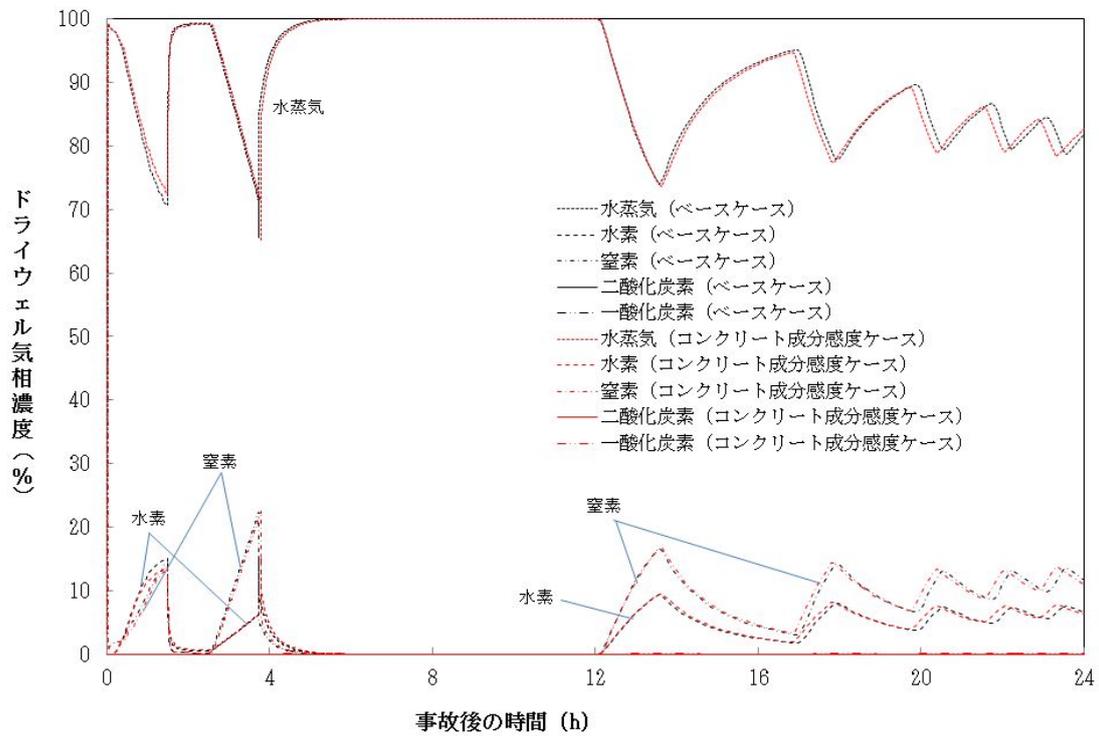


図 5-4c ドライウェルガスモル分率 (石灰岩系コンクリート)

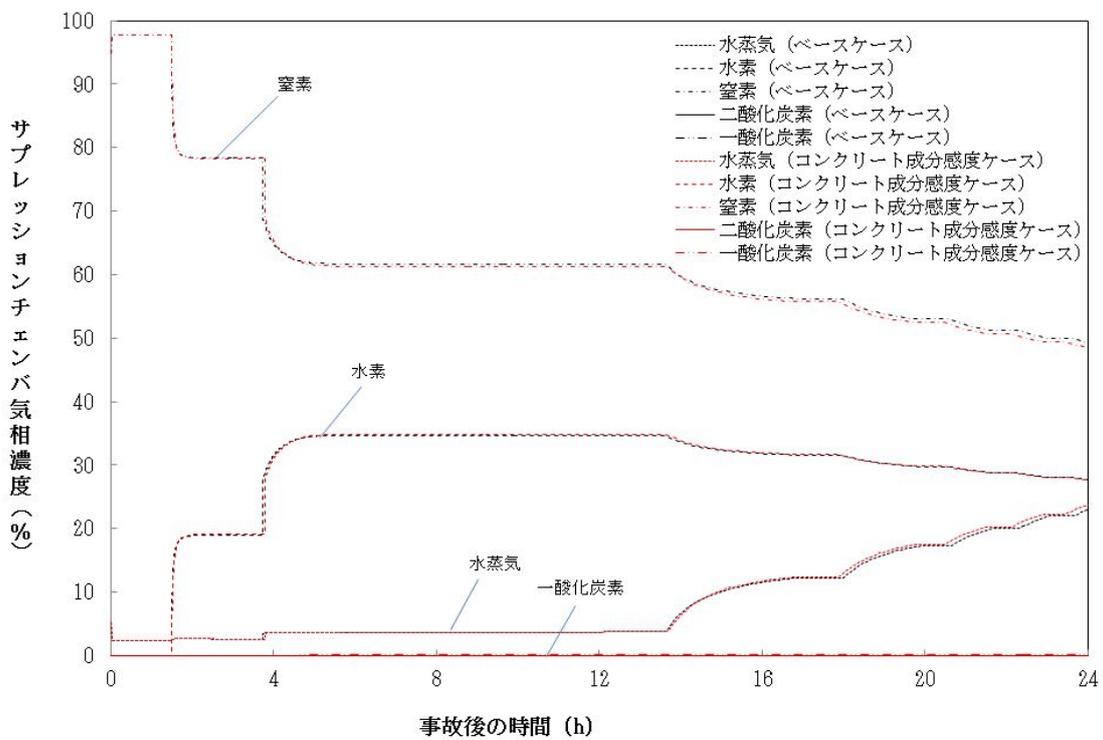


図 5-4d サプレッションチェンバガスモル分率 (石灰岩系コンクリート)

6. まとめ

MCC Iに関する種々の実験から得られた知見等に基づきMCC Iの各過程における不確かさの分析を行い、不確かさがあり、評価結果に影響するモデルパラメータとして、エントレインメント係数、上面熱流束を抽出した。また、二次元侵食実験結果で確認されている侵食の異方性については、いまだ十分な解明が行われておらず、実機のウェット条件でも起こるのかは不明であるが、念のために異方性の影響をみるために、溶融プールから床方向と壁方向への熱伝達係数の感度解析を行った。これらのパラメータの感度解析以外に、コンクリート種類を玄武岩系コンクリートから石灰岩系コンクリートに変更した場合の解析も参考に実施し、コンクリート侵食量への影響を確認した。

BWR 5, Mark-I 改プラントの有効性評価に使用しているノミナル条件を設定したベースケースでは、コンクリート侵食量は2.4cmであった。

エントレインメント係数の感度解析結果より、水中での粒子化によるクエンチ効果に差が出て、床上に堆積した溶融炉心温度に影響し、コンクリート侵食量に影響するが、その影響は小さかった。

上面熱流束の感度解析結果より、上面熱流束は、床上に堆積した溶融炉心温度に大きく影響し、コンクリート侵食量に大きく影響する結果となった。

玄武岩系コンクリートに見られる床方向と壁方向のコンクリート侵食の異方性の影響を確認するため、溶融プールから床方向と壁方向への熱分配の異方性として扱い、溶融プールのクラスト間の熱伝達係数を変えて、床方向への熱伝達が大きい場合と壁方向への熱伝達が大きい場合の感度を調べた。その結果、熱伝達の大きい方向の侵食量が大きくなり、侵食の異方性が確認された。ただし、ノミナル条件の場合のように侵食量が小さい場合は、侵食量に大きな感度がないことがわかった。

感度解析の結果、コンクリート侵食量に対して上面熱流束の感度が支配的であることが確認された。上面熱流束を想定される下限値とした場合でも、コンクリート侵食量は、22.5cm程度に収まることが確認された。

また、実験で確認されている侵食面における侵食の不均一性については、MAAPモデルのベンチマーク解析結果から、実験の侵食面における侵食のばらつきが、MAAPコードによる予測侵食量の20%の範囲内に収まっていることが確認され、上面熱流束の感度に比べて影響が小さいことが確認された。

また参考として、他の条件を同一として玄武岩系コンクリートから石灰岩系コンクリートに変更した解析も実施したところ、侵食量に大きな感度はなかった。また、ガス発生の影響も顕著には見られなかった。

最後に、MCC Iに関係する現象は、複雑な多成分・多相熱伝達現象であり、現状でも知見が十分であるとは言えない。また事前水張り時の落下デブリの冷却性を直接調べた実験例が殆どないことから、今後も継続して検討を進め、新たな知見が出た場合には適宜評価に反映するように努めることが重要であると考えられる。

付録

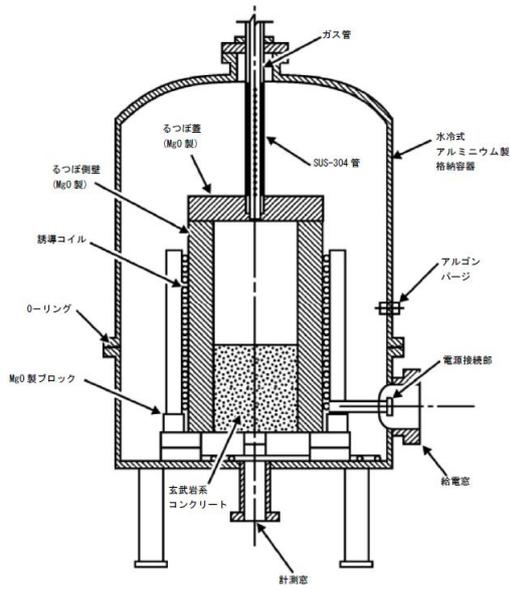
付録1 ドライ条件でのMCC I 実験

デブリとしてUO₂ コリウムを用い、崩壊熱を模擬し、注水を行っていないドライ条件の実験として、米国サンディア国立研究所 (SNL) の SURC 実験、米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) の ACE 実験及び独カールスルーエ研究所 (KfK) で実施された BETA 実験がある。以下にそれぞれの実験について説明する。これらの実験は、実機におけるMCC I 継続の影響の検討に参考となる。

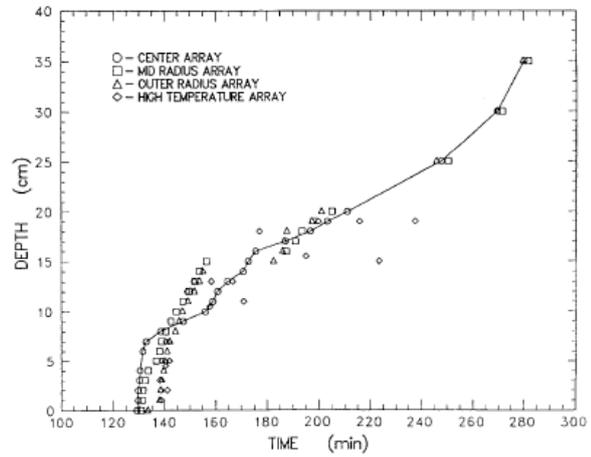
(1) SURC 実験 (米国 SNL) ^{[4][23][34]}

MCC I 時の伝熱、化学反応、ガス及びエアロゾルの放出等を調べ、CORCON 等の解析コードを検証・改良することを目的に SNL にて4回実験が実施された。そのうち実機と同様の組成のUO₂デブリを使用した実験は2回実施された (SURC-1, 2。他の2回の実験は模擬デブリとして SUS304 が使用された)。実験装置の概要を付図 1-1 に示すが、直径 40cm のコンクリート試験体 (SURC-1 実験では石灰岩系 (米国で使用されている)、SURC-2 実験では玄武岩系のコンクリートを使用) を入れた MgO 製の円筒容器に約 250kg の模擬デブリ (組成: UO₂ 69%, ZrO₂ 22%, Zr 9%) を誘導加熱して熔融させてコンクリートとの反応を継続させた。SURC-2 のコンクリートの侵食深さの変化を付図 1-2 に示すが、侵食速度は1時間に 20cm 程度となっている。

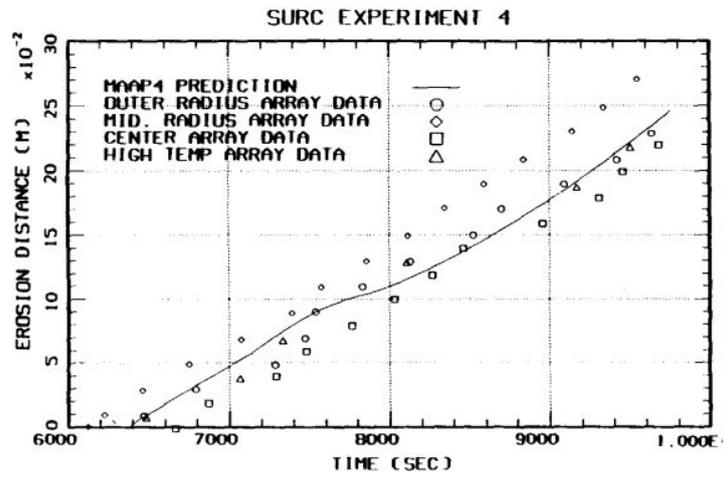
また、SURC-4 は、コード比較のための国際標準問題 (ISP-24) ^[5] に選定され、実験データと種々の解析の比較が行われている。200kg のステンレス鋼と模擬 FP (Te: 0.5kg, La₂O₃: 1.17kg, CeO₂: 1.23kg, BaO: 1.1kg) が、コンクリート侵食が開始するまで加熱され、侵食開始後 14 分経ってから約 0.5 秒間に追加的に 20kg のジルコニウムが熔融物に添加されている。SURC-4 のコンクリートの侵食深さの変化を付図 1-3 に示すが、侵食速度は約 55 分の時点で 24.5~27.5cm で、MAAP 解析結果とよい一致を示している。なお、SURC-4 実験では外周部のコンクリート侵食深さが大きくなっており、MAAP 解析結果と若干相違が見られるが、これは実験では外周部から誘導加熱して熔融物を加熱しているため、外周部の熔融物への入熱量が大きくなることが原因と考えられる。したがって、MAAP との相違は、実験固有の原因と考えられるため、ベンチマーク解析の観点からは問題とはならないと考えられる。



付図 1-1 SURC 実験装置^[23]



付図 1-2 SURC-2 実験の侵食深さ^[23]



付図 1-3 SURC-4 実験の侵食深さとMAAP解析との比較^[23]

(2) ACE 実験 (米国 ANL) [3][23][34]

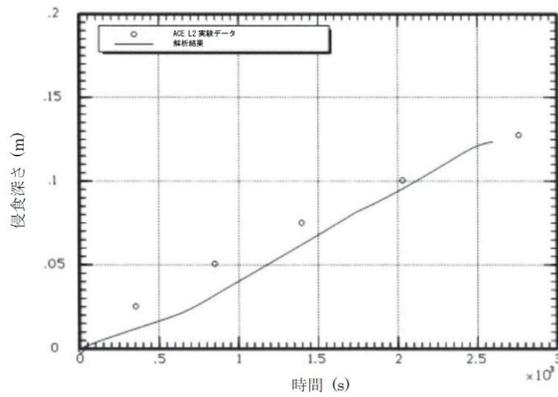
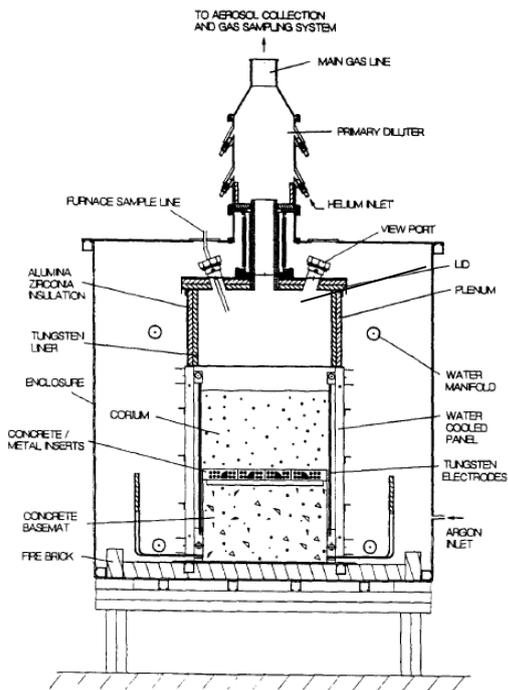
MCC Iにおける熱水力学的及び化学的プロセスを検証し関連コードのデータベースを拡充することを目的に、国際プログラムとしてACE (Advanced Containment Experiments) 計画の一部として実施された。Phase-CでMCC I時のFPエアロゾル放出の定量化の目的で実験が実施された。実験装置の概要を付図 1-4 に示す。実炉組成の約 300kg の模擬デブリを使用し、タングステン電極により直接通電により加熱し溶融させている。コンクリート侵食はベースマット中にある熱電対によりモニターされている。実験マトリックスを付表 1-1 に示すが、実験はコンクリートの種類やデブリの組成を替えて実施された。

L2 実験のコンクリートの侵食深さのMAAP解析との比較を付図 1-5 に示すが、MAAP解析結果とよい一致を示している。

付表 1-1 ACE/MCCI 実験マトリックス^[23]

Test	Concrete Type ^a	Decay Heat Generation W/kg of UO ₂	Corium Mixture	Initial Zr Oxidation %	Absorber Material
L5	L/S	325	PWR	100	none
L2	S	450	PWR	70	none
L1	L/S	350	PWR	70	none
L6	S	350	PWR	30	Ag, In
L4	Serp/S ^b	250	BWR	50	B ₄ C
L7	L/S	250	BWR	70	B ₄ C
L8	L/L	350/150 ^c	PWR	70	Ag, In

a. Concrete type: L/S: limestone/common sand
 S: siliceous
 L/L: limestone/limestone



出典: MAAP4 User's Manual, EPRI

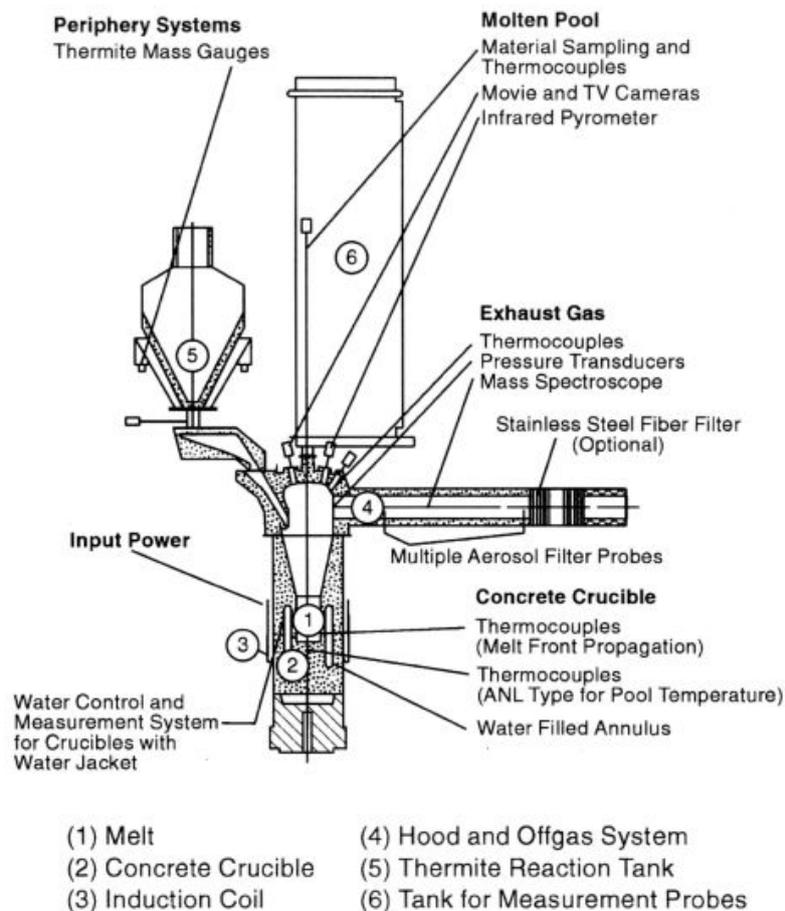
付図 1-4 ACE/MCCI 実験装置^[3]

付図 1-5 ACE-L2 実験と MAAP 解析の侵食深さの比較^[34]

(3) BETA 実験 (独 KfK) [6][34]

MCCI 解析コードの侵食挙動やエアロゾル生成挙動の検証用のデータベースを拡充することを目的として、独 KfK で実施された。実験装置の概要を付図 1-6 に示す。テルミット反応により金属溶融物 (Fe, Cr, Ni, Zr) と酸化物溶融物 (Al_2O_3 , SiO_2 , CaO) を生成させて、玄武岩系コンクリート製のるつぼに落下させて、るつぼ内の溶融物は、誘導加熱により加熱している。ベースマット中にある熱電対により二次元のコンクリート侵食挙動が確認できるようになっている。溶融物として Zr を多く含む溶融物を用いた実験シリーズの実験マトリックス (V5.1~V5.3) を付表 1-2 に示す。

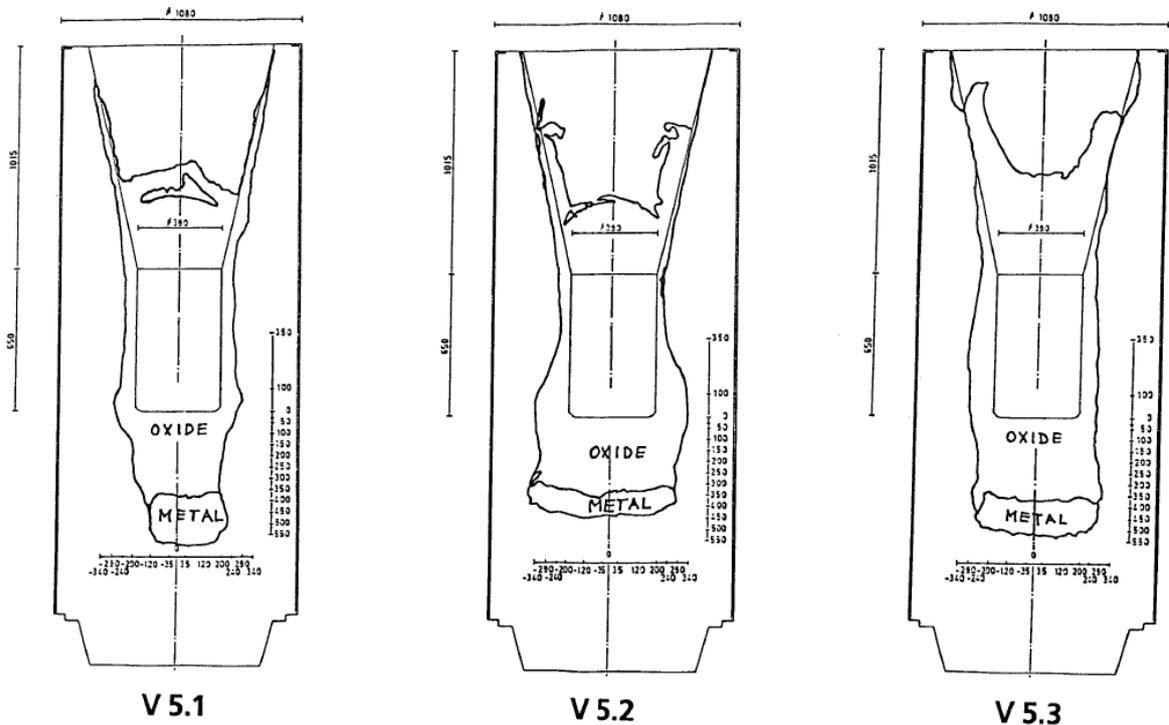
実験後のコンクリート侵食状況を示す模式図を、付図 1-7 に示す。壁方向よりは、床方向の侵食量が大きくなっている。溶融物に含まれる Zr によりコンクリート成分の SiO_2 が還元され、Si や SiO の生成が確認されている。V5.1 実験と V5.2 実験のコンクリートの侵食深さのMAAP解析との比較^[34]を付図 1-8 及び付図 1-9 に示すが、MAAP解析結果とよい一致を示している。このMAAPのベンチマーク解析により、二次元侵食に関わるパラメータ設定の妥当性が判断されている。



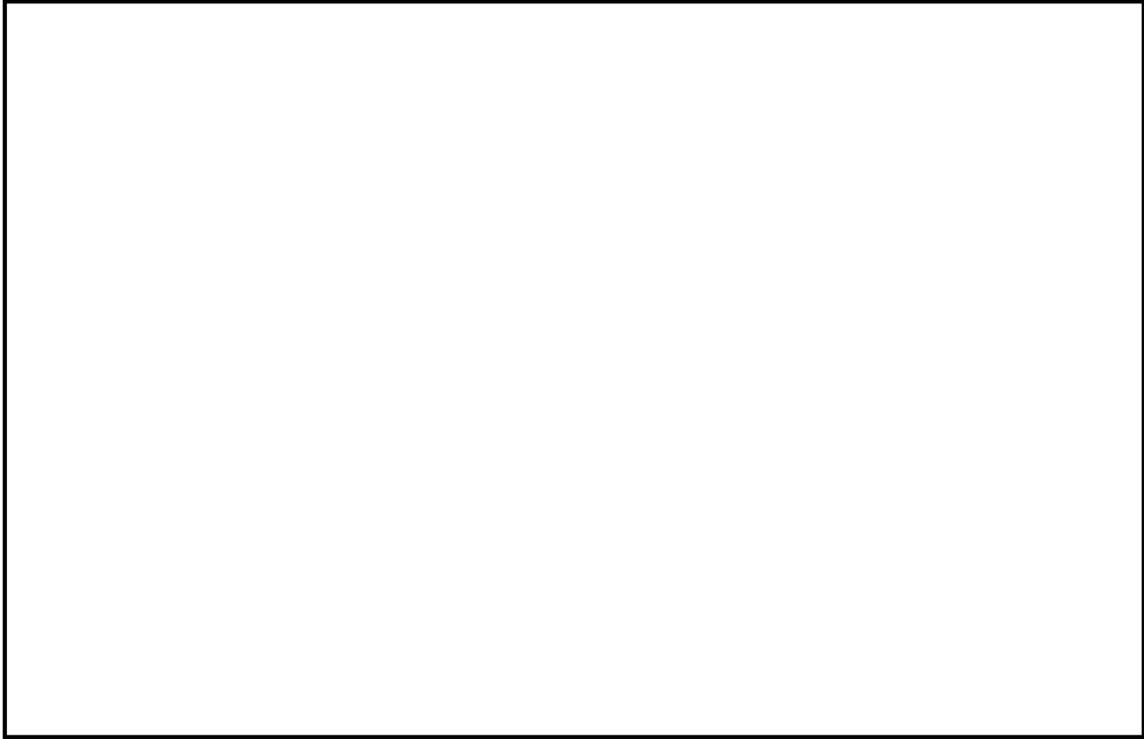
付図 1-6 BETA 実験装置 [34]

付表 1-2 BETA 実験マトリックス^[6]

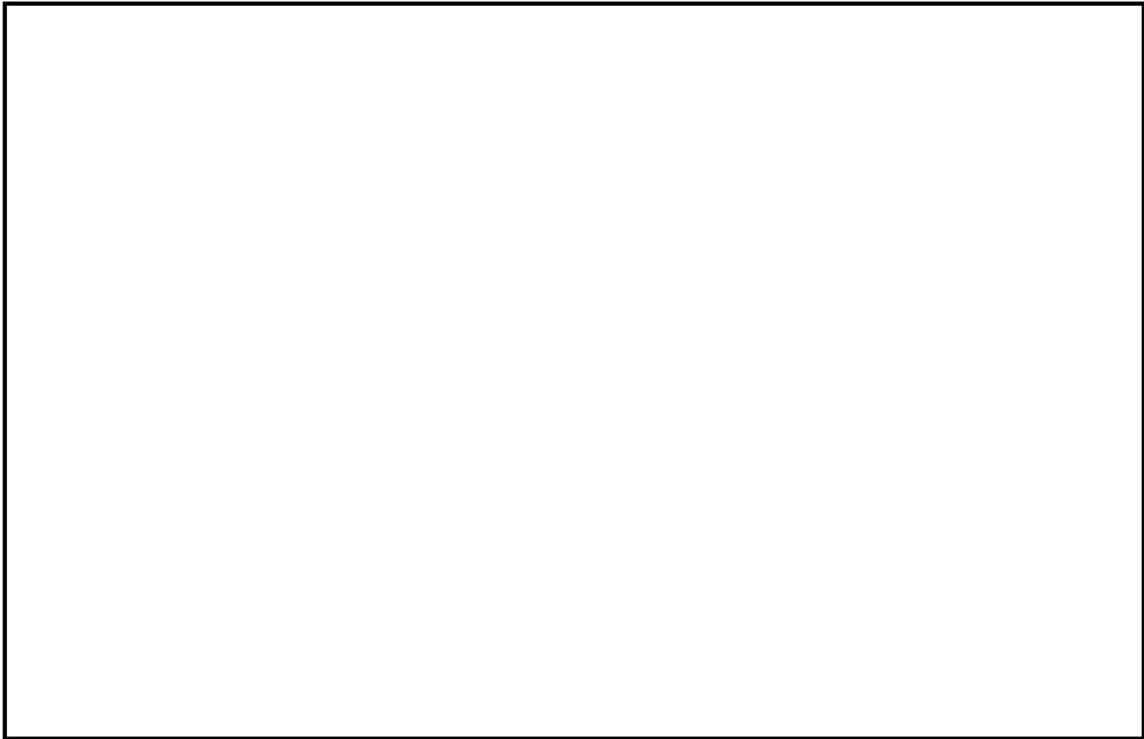
BETA Test	Initial Melt, ~ 2200 K	Fission Product Mock-ups and Additives	Planned Heating Power	Main Objectives
V 5.1	300 kg Fe+Cr+Ni 80 kg Zry-4 50 kg Al ₂ O ₃ +SiO ₂ +CaO	none	400 kW	PWR: Zr chemistry, consequences on erosion and aerosol release
V 5.2	as V 5.1	1 kg Mo, 0.5 kg ZrTe ₂ , 1.5 kg CeO ₂ , 1 kg BaO, 0.5 kg La ₂ O ₃ , 0.5 kg SrO, 6 kg B ₄ C in steel containers	200 kW	BWR with B ₄ C absorber, low power: Zr chemistry and related processes
V 5.3	as V 5.1	1 kg Mo, 1 kg CeO ₂ , 1 kg BaO, 0.5 kg La ₂ O ₃ , 0.5 kg SrO, 6 kg B ₄ C in steel containers	800 kW	BWR with B ₄ C absorber, high power: Zr chemistry and related processes



付図 1-7 BETA 実験後のコンクリート侵食状況を示す模式図^[6]



付図 1-8 BETA-V5.1 実験とM A A P解析の侵食深さの比較 ^[34]



付図 1-9 BETA-V5.2 実験とM A A P解析の侵食深さの比較 ^[34]

付録2 注水を伴ったMCCI実験

注水を伴う実験（溶融物上に冷却水を注水した実験）としては、SNLで実施されたSWISS実験及びWETCOR実験、ANL（EPRI）の主催で実施されたMACE実験及びOECD/MCCI実験、原子力発電技術機構（NUPEC）により実施されたCOTELS実験がある。

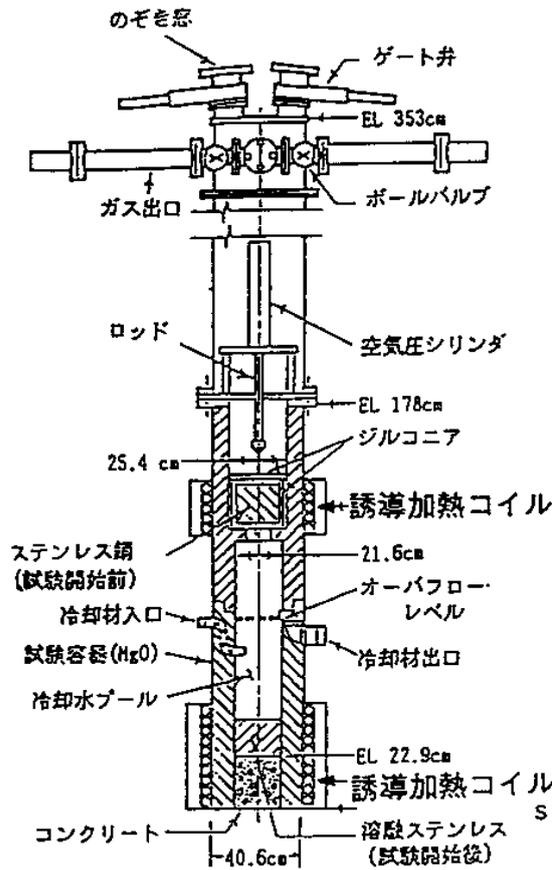
以下の実験の知見を示す。

- (1) SWISS実験（米国サンディア研究所(SNL)）
- (2) WETCOR実験（米国サンディア研究所(SNL)）
- (3) MACE実験（米国アルゴンヌ研究所(ANL)）
- (4) COTELS実験（日本 原子力発電技術機構（NUPEC））
- (5) OECD/MCCI実験（米国アルゴンヌ研究所(ANL)）

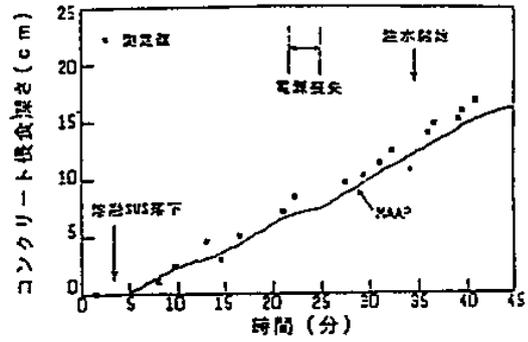
(1) SWISS実験（米国SNL）^[7]

高周波加熱によりステンレスを溶融させ、溶融したステンレスとコンクリートとの反応中に注水し、溶融物の冷却性を調べる実験が2回行われた。実験結果2回とも同様の結果となっており、メルト上面に安定なクラストが形成されてメルト内部に冷却水が浸入しにくくなり、メルトによりコンクリートの侵食が継続した（付図2-1参照）。ただし、本実験はメルトの発熱が実機で想定される値より1桁程度大きいことや100%ステンレスであるため模擬崩壊熱に加え、水-金属反応の発熱が加わったことも一因と分析されている。またコリウムより上方水プールへの熱流束は約800kW/m²程度であった（付図2-2参照）。

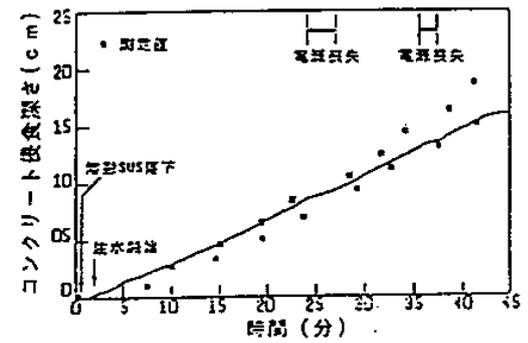
実験条件：45kgのSUSを内径21.6cmのコンクリート上に溶融させた状態で落下して注水を実施。比出力1.6kW/kg SUS



実験装置の概要 (SWISS実験)



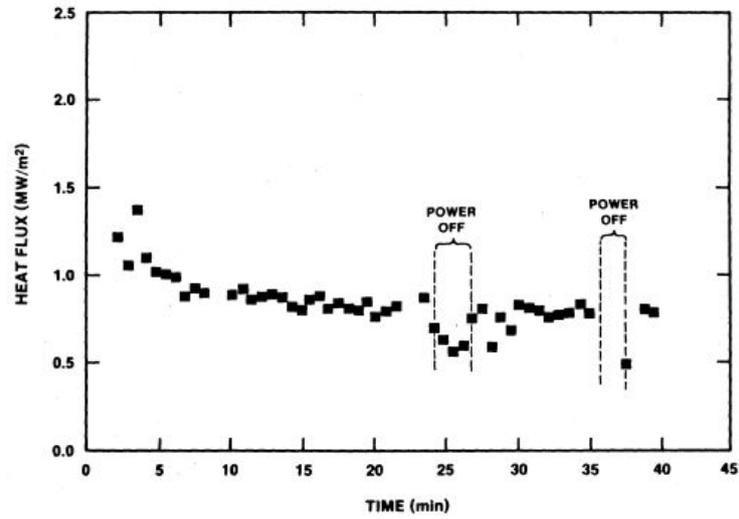
SWISS-1実験におけるコンクリート侵食深さの比較



SWISS-2実験におけるコンクリート侵食深さの比較

実験結果および解析結果の比較 (SWISS実験)

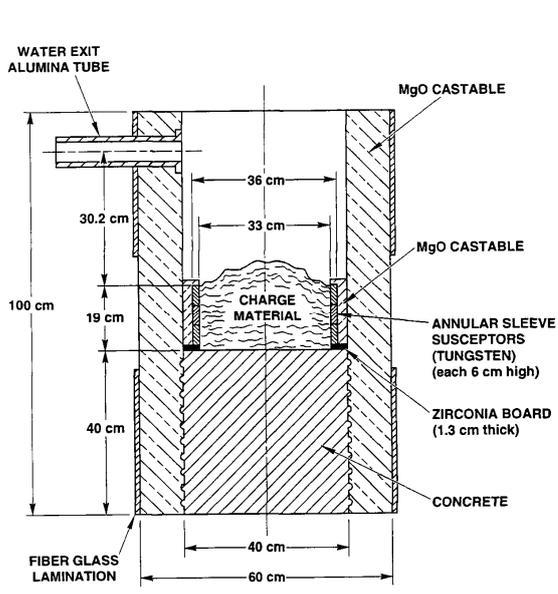
付図 2-1 SWISS 実験の実験装置とコンクリート侵食深さの実験と解析 (MAAP) の比較^[7]



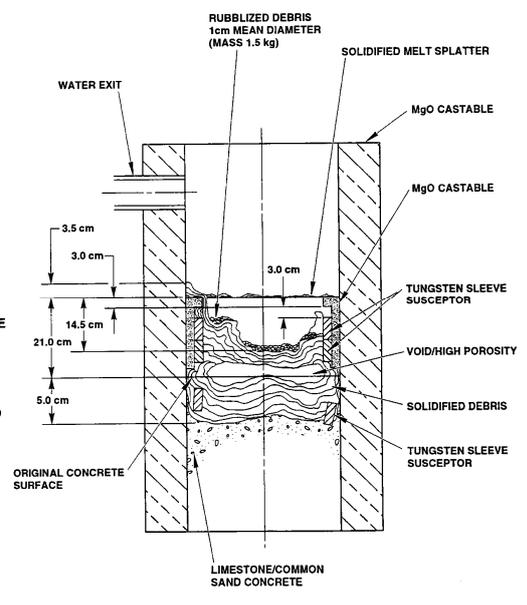
付図 2-2 SWISS-2 実験の水プールへの熱流束^[7]

(2) WETCOR 実験 (米国 SNL) ^[8]

Al₂O₃ と CaO の酸化物混合溶融物 34kg を用いてコンクリートとの反応中に注水し溶融物の冷却性を調べる実験が行われた (付図 2-3 参照)。SWISS 実験と同様の理由によりコンクリートの侵食が継続した。コンクリート侵食速度は SWISS 実験と比べて約 1/3 に低下している。水プールへの熱流束は溶融時に 520kW/m² 程度、凝固時に 200kW/m² 程度であった。



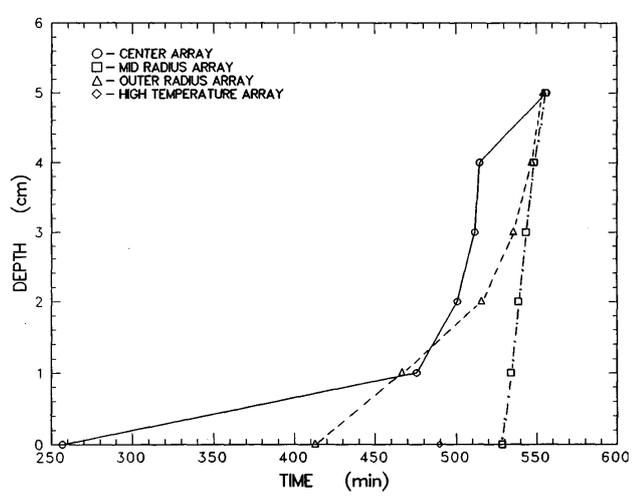
(実験装置の概要)



(実験後の状態の模式図)



(上部クラストの様子)



(コンクリート侵食の時間変化)

付図 2-3 WETCOR 実験結果^[8]

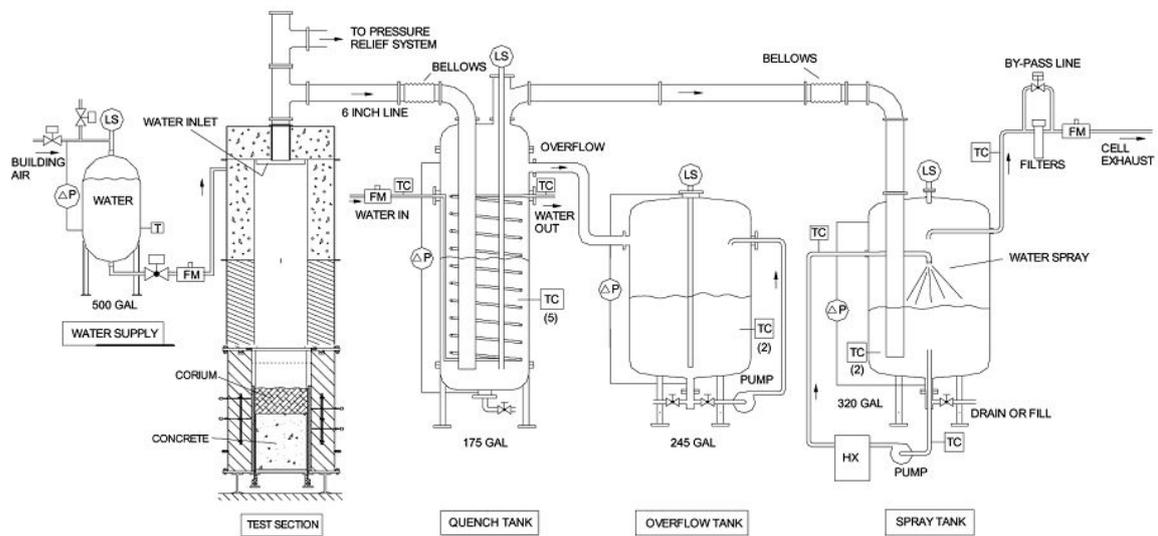
(3) MACE 実験 (米国 ANL) ^{[3][9][10][20]}

MACE 実験 (Melt Attack and Coolability Experiment) は、米国電力研究所 (EPRI) が主催する原子炉格納容器内溶融炉心冷却性に関する国際協力計画である。この実験では、溶融炉心がコンクリート床に落下した後に、溶融炉心の上に注水する状況を模擬しており、大規模実験が含まれていることと、実機相当の UO_2 及び ZrO_2 を主成分とする溶融炉心模擬物を用いて、さらに、直接通電加熱により崩壊熱の発生を模擬していることが特徴である。実験装置の概要を付図 2-4 に示す。MACE 実験では規模の異なる M0, M1b, M3b, M4 の 4 回の実験が実施されており、その主要条件を付表 2-1 に示す。M0 実験のみコンクリートの側壁で、その他は MgO が用いられている。

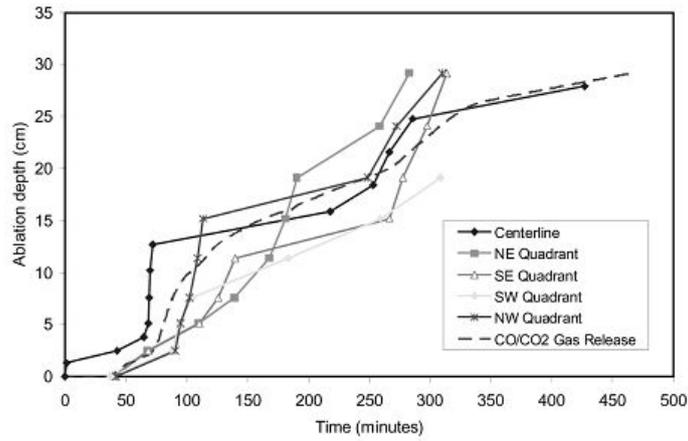
M3b と M4 の実験結果を付図 2-5 及び付図 2-6 に示す。いずれのケースもコンクリート侵食が継続する結果となっている。実験後の溶融炉心模擬物の固化状況を見ると、メルト上部に安定クラストが形成され側壁に固定化されており、クラスト下部に空洞が見られ、クラストと溶融物とが分離した状態になっている。メルトから冷却水への熱流束を見ると、注水直後の短期間は、大きい熱流束となっているが、安定クラストが形成されクラストと溶融物が分離したと想定される状況では、熱流束は低下している。安定クラストの形成とメルトとの分離によりクラストの下にあるデブリの冷却が阻害される結果となったと分析されている。しかしながら、デブリの長期的な冷却に関与し得るメカニズムとして、クラストに生じる亀裂等への浸水及びコンクリート分解ガスによるクラスト開口部からのデブリの噴出が確認されている。

付表 2-1 MACE 実験の主要条件^[20]

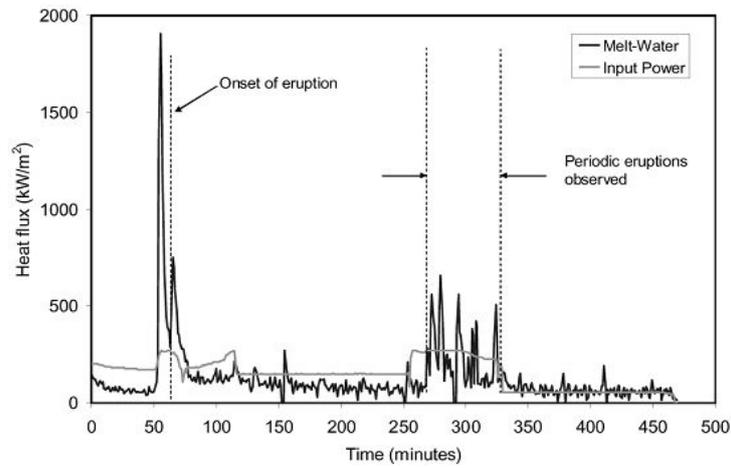
	M0	M1b	M3	M4
熔融炉心模擬物重量 (kg)	130	480	1800	480
コンクリート床 浸食開始時熔融炉心 模擬物組成(%)	UO ₂	56	65	57
	ZrO ₂	11	13	29
	Zr	4	3	-
	その他 (コンクリート 成分等)	29	19	14
熔融炉心模擬物深さ (m)	0.15	0.25	0.2	0.3
熔融炉心模擬物初期温度 (K)	2000	2350	2250	2280
熔融炉心模擬物初期発熱量 (kW)	100	130	300	130
コンクリートの種類	石灰岩系	石灰岩系	石灰岩系	ケイ酸系
コンクリート床面積 (m ²)	0.3×0.3	0.5×0.5	1.2×1.2	0.5×0.5
コンクリート床の深さ (m)	0.35	0.55	0.55	0.55
水位 (m)	0.5	0.5	0.5	0.5



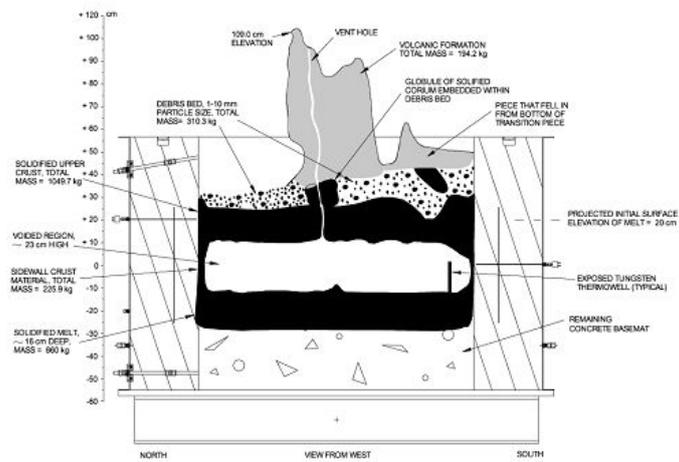
付図 2-4 MACE 及び OECD/MCCI 実験装置^[9]



(軸方向侵食データ)

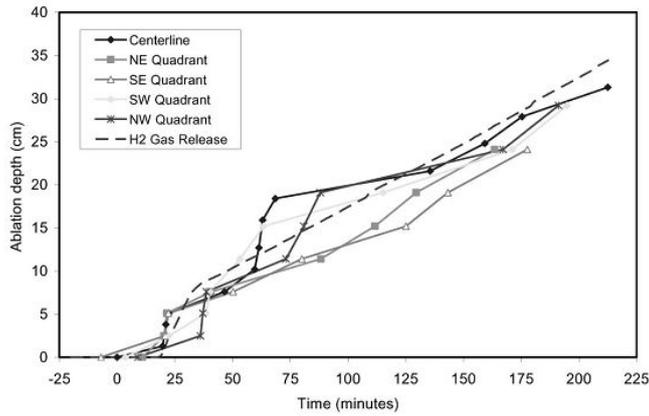


(メルトから水への熱流束)

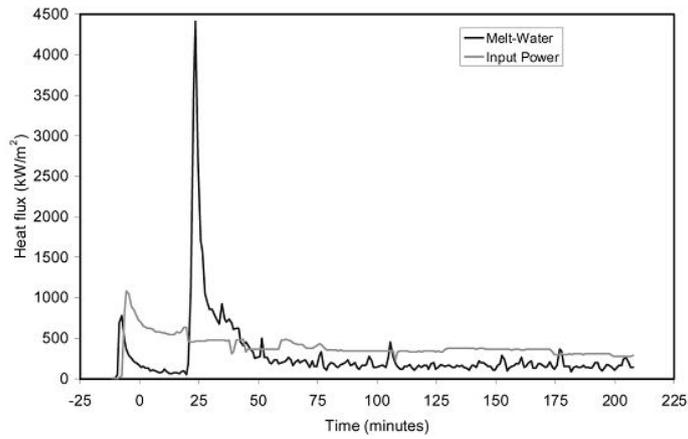


(実験後状態の模式)

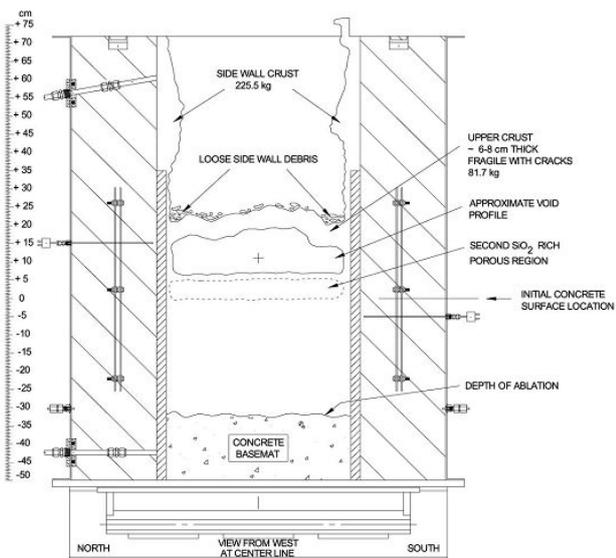
付図 2-5 MACE-M3b 実験結果^[10]



(軸方向侵食データ)



(メルトから水への熱流束)



(実験後状態の模式)

付図 2-6 MACE-M4 実験結果^[10]

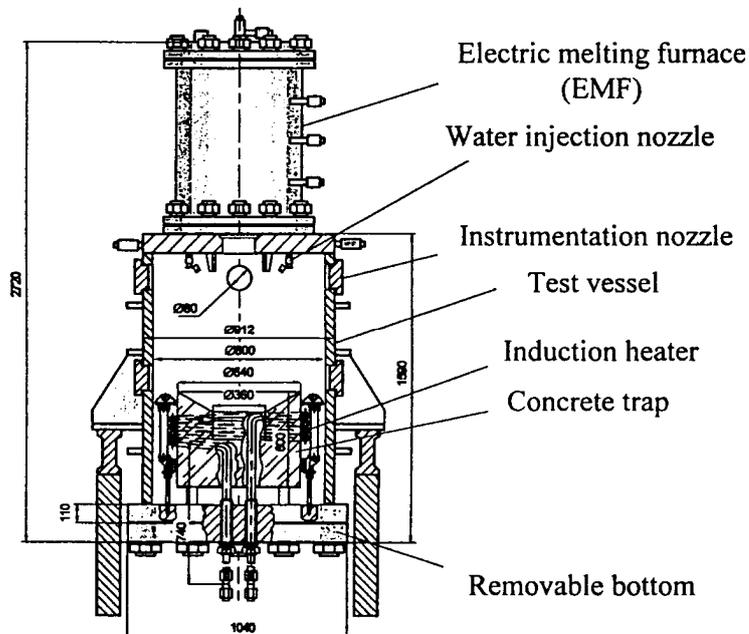
(4) COTELS 実験 (日本 NUPEC) [1][11]

プール水中に実機組成の UO_2 コリウムを落下させる実験 (FCI) とコンクリート上に落下した UO_2 コリウムに注水する実験 (MCCI) を実施している。付図 2-7 にコンクリート上の UO_2 コリウムに注水する実験の実験装置を示す。約 60kg の実機組成の UO_2 コリウムを電気炉で加熱溶解させ、玄武岩系のコンクリート床上に落下させ、その後高周波誘導加熱によりコンクリート上のコリウムを加熱して崩壊熱を模擬している。側壁と床面の両方の侵食を考慮しており、コリウムの高さや直径の比を実験パラメータとしている。注水後にコンクリート温度は低下している。また、侵食深さは 2 cm 程度であった。また、付図 2-8 に実験後に固化したコリウムの断面を観察した結果を示すが、上部は粒子状になっており、下部はインゴット状になっているのが観察されている。また、インゴット状の部分にはひび割れや流路が見られる。

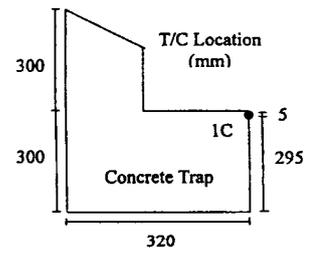
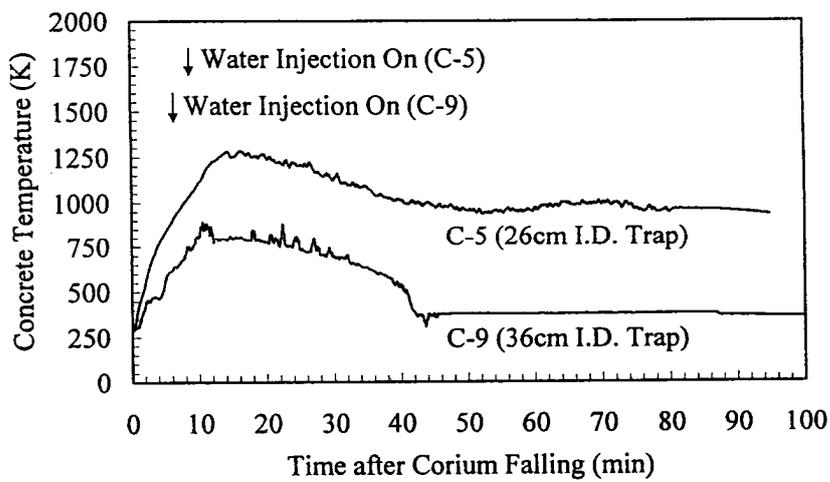
COTELS 実験では、いずれもデブリによるコンクリート侵食が生じているが、先行の SWISS, WETCOR, MACE とは異なり、コンクリート侵食は停止している。これは、以下の理由と分析されている。

- ・デブリの粒子化と塊状デブリ上への粒子化デブリの堆積
- ・デブリとコンクリートとの境界における粗骨材を主体とする多孔質層の形成
- ・粗骨材層及び塊状デブリに形成された流路への浸水

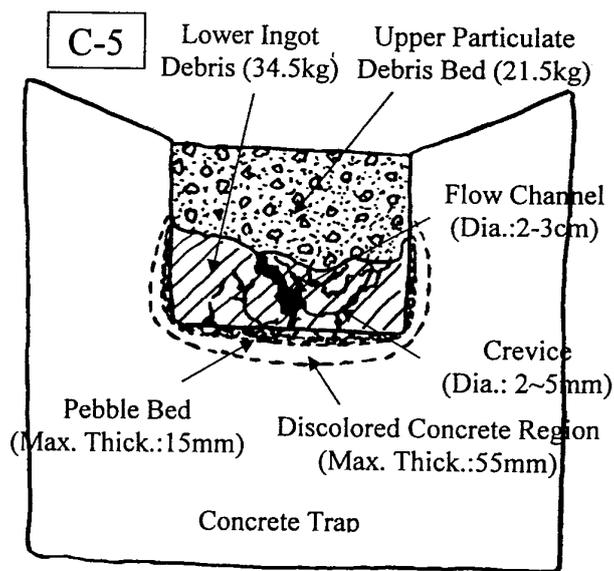
溶融物から水プールへの熱流束は $100\sim 650\text{kW/m}^2$ 程度であったが、これらの熱流束は限界熱流束よりも低く、水が更に高い除熱能力を有する可能性があることが示唆されている。



付図 2-7 COTELS 実験装置 (コンクリート上の UO_2 コリウムに注水する実験) [11]



(コンクリート床温度変化)



(実験後のコリウム断面の模式図)

付図 2-8 COTELS C-5 実験の結果^[11]

(5) OECD/MCCI 実験 (米国 ANL)^{[10][12][13][35][38][41]}

OECD/MCCI 実験は、MACE 実験や COTELS 実験の注水を伴う MCCI 実験で同定された個々のデブリ冷却メカニズムや火山型クラストの冷却性 (付図 2-9 及び付図 2-10 参照) を定量的に解明することを目的として、以下の実験が実施された。

① クラスト浸水・強度実験 (SSWICS 実験)

SSWICS 実験は、クラスト内への浸水メカニズムと浸水による除熱量、さらにクラスト強度を調べるために実施された。実験装置の構造を付図 2-11 に示し、実験条件一覧を付表 2-2 に示す。テスト部内の非侵食性の床面上で、テルミット反応により UO_2 、 ZrO_2 及びコンクリート成分を主成分とするデブリ模擬溶融物を生成しその上に注水する。崩壊熱とコンクリート分解気体の発生は模擬しない過渡クエンチ実験である。最大除熱量はクラスト上面におけるドライアウト熱流束により評価される。実験結果より、安定なクラストは形成されず、クラスト内に冷却材が浸入することにより、熱伝導律速以上の熱流束を期待することができるとしている。さらに、SSWICS 実験で得られたドライアウト熱流束を実機の事故シーケンス解析において直接的に適用できるよう、Lister/Epstein のドライアウト熱流束モデルへの適応が行われた。実験結果とこれに基づいた Lister/Epstein モデルによる予測の比較を付図 2-12 に示す。この実験結果及びこれらに基づいた予測値によれば、コンクリートを全く含有しないデブリに対する上面水プールへのドライアウト熱流束は、約 400kW/m^2 であり、コンクリート含有とともに熱流束は低下し、含有率 15% 程度以上では約 100kW/m^2 となっている。

② 溶融物噴出実験 (MET 実験)

コンクリート分解気体がクラストの開口部を通過する際に、気体に随伴されてクラスト上に噴出するデブリ量の定量化を目的としている。クラスト浸水実験と同様に、テスト部内の非侵食性の床面上で、テルミット反応により UO_2 、 ZrO_2 及びコンクリート成分を主成分とするデブリ模擬溶融物を生成しその上に注水する。クラスト浸水実験との違いは、本実験においては直接通電加熱により崩壊熱を模擬すること及び非侵食性床面に設けた多数の細孔からコンクリート分解気体を模擬する非凝縮性気体を供給している。テスト部で発生する水蒸気量の変化と実験後分析から得られるデブリ噴出量に基づいて、供給気体流量と噴出量の関係性を評価している。

③ 長期二次元コンクリート侵食実験 (CCI 実験)

デブリによる長期的な床部及び側壁の侵食挙動を明らかにすることを目的に実施された。実験装置のテスト部の構造を付図 2-13 に示し、実験条件一覧を付表 2-3 に示す。テルミット反応により生成した UO_2 、 ZrO_2 及びコンクリート成分を主成分とするデブリ模擬溶融物を直接通電により加熱している。電極がある 2 面は非侵食性の側壁を採用し、残りの 2 面をコンクリートにより製作している。使用するコンクリートは実験により種類が変えられている。注水なしの条件で、側壁のコンクリートの最大侵食深さが 30cm に達するまで侵食を継続した後注水を行い、注水後、最大侵食深さが 35cm

に到達した時点で実験を終了している。実験装置に荷重負荷装置を設置し、注水後に形成されるクラストに荷重を与えて、クラストの機械的強度に関するデータを得ている（付図 2-14 参照）。コンクリート種類を変えて3回実験が行われている。CCI実験のコンクリート組成を付表 2-4 に示す。CCI実験のデブリ-水間の熱流束を付図 2-15 に示し、溶融物の平均温度を付図 2-16 に示す。また、実験後の侵食状態の模式図を付図 2-17 に示す。石灰岩系コンクリートの場合、床方向と側壁方向の侵食は同程度となっているのに対し、玄武岩系コンクリートの場合、側壁方向の侵食が床方向より大きくなっており、侵食に異方性があることが示されている。付表 2-5 に示すように、侵食率から側壁方向と床方向の熱流束が推定されている。CCI-2 実験（石灰岩系コンクリート）の場合、側壁方向と床方向は同程度と推定されているのに対し、CCI-3 実験（玄武岩系コンクリート）の場合、側壁方向の熱流束は、床方向より4倍程度大きいと推定されている。

④ クラスト破損実験

本実験は上記①③の実験に付随して実施されており、①のSSWICS実験で形成されたクラストの冷却後破損強度を調べる実験と、③の二次元侵食実験の間に高温状態で破損させる実験の2種の実験が行われている。

前者の実験では、クラスト浸水実験で形成された直径約30cmのクラストに荷重を加えて、クラストの強度を測定している。低温クラスト破損実験装置の概要を付図 2-18 に示す。クラスト上面の中央部に集中荷重を与え、クラスト破損時の荷重からクラストの機械的強度（破損時にクラストに発生する最大の応力）を評価している。クラスト上に堆積する冷却水層及び噴出デブリの荷重に起因してクラスト内に発生する応力と、本実験から得られるクラストの機械的強度を比較することにより、実機規模においては、クラストは破損し下部の溶融物と接触する可能性が高いことが示されている。

後者の二次元侵食実験では、注水前の高温状態で突き棒（lance）によりクラストが破損する荷重を測定し、注水後にも再度突き棒によりクラストが破損する荷重を測定している。これにより、現実に近い状態でのクエンチ前後のクラスト強度が確認され、クエンチ後は、クラスト強度が大きく低下することが確認された。

OECD/MCCI 実験結果から以下の知見が得られている。

- ・ガス噴出は、安定なクラストの形成を阻害し、熱伝達を促進する。
- ・クラストが冷却されると、亀裂が生じクラスト強度は大幅に低下する。
- ・クラストの亀裂により冷却水が内部に浸入し、デブリの冷却が促進される。
- ・溶融物の噴出により、多孔質の粒子状ベッドが形成される。
- ・コンクリートタイプにより侵食異方性がみられる。

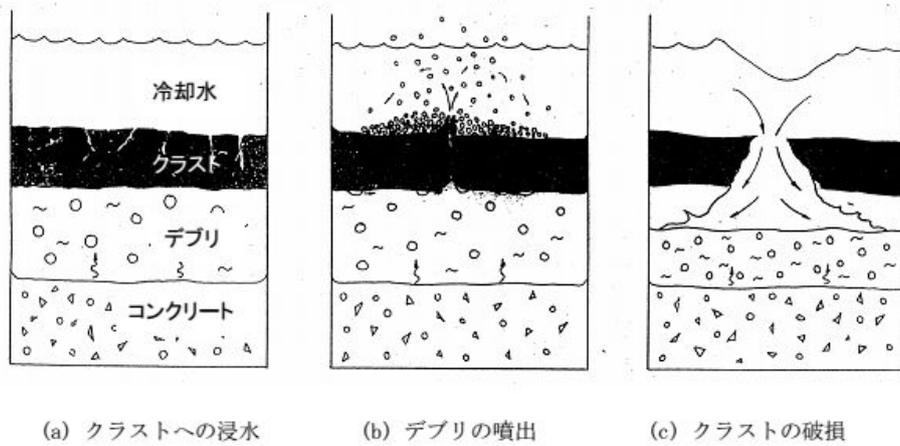
これらの知見は、CORQUENCH コード等に反映される予定である。

また、CCI実験について、MAAPコードによりベンチマーク解析が行われている^[35]。

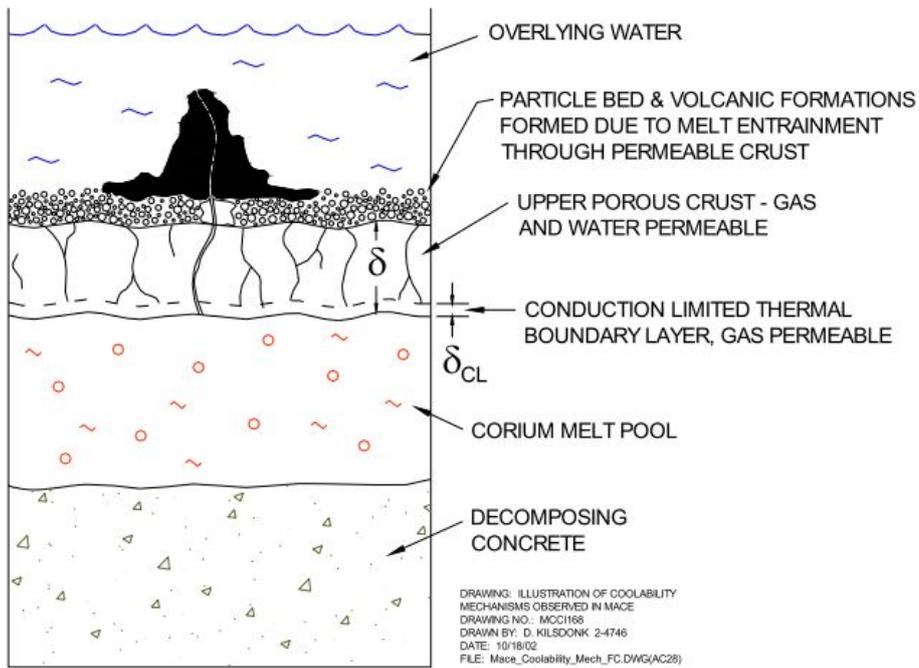
CCI-2 実験（石灰岩系コンクリート）のベンチマーク解析では、固化効果項の影響を除いて対流熱伝達係数のサーベイが可能のように、対流熱伝達係数として床方向と側壁方向ともに $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ 、固化効果項の指数 n に 0 が設定されている。ここで $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ は、実際の M C C I 時の対流熱伝達係数は、固化割合を考慮すると、完全液相状態の値よりも 1 桁程度小さい値（付図 2-19 において固化割合が 60% 程度の値）になることを考慮して設定されている。また、CCI-2 実験では、床方向と側壁方向の熱流束が同程度と推定されていることから、対流熱伝達係数も同じ値が設定されている。この設定を用いた解析により、コリウム温度の変化（付図 2-20 参照）は、実験データと良く合っている。また、床方向の侵食量は（付図 2-21 参照）、実験では注水前には 25cm 程度侵食されているのに対し、M A A P 解析では 33cm 程度の侵食量となっている。側壁方向の侵食量は（付図 2-22 参照）、実験では注水前には 29cm 程度侵食されているのに対し、M A A P 解析では 33cm 程度の侵食量となっている。

CCI-3 実験（玄武岩系コンクリート）のベンチマーク解析では、対流熱伝達係数として床方向に $80\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ 、側壁方向に $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ 、 n に 0 が設定されている。ここで、 $80\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ は、CCI-3 実験では、床方向の熱流束が側壁方向の 1/4 程度と推定されていることから、床方向の対流熱伝達係数を側壁方向の 1/4 程度として設定されている。この設定により、コリウム温度の変化（付図 2-23 参照）は、より実験データに近くなっている。また、床方向の侵食量は（付図 2-24 参照）、実験では注水前には 5 cm 程度侵食されているのに対し、M A A P 解析では 5.7cm 程度の侵食量となっている。側壁方向の侵食量は（付図 2-25 参照）、実験では注水前には 29cm 程度侵食されているのに対し、M A A P 解析では 27cm 程度の侵食量となっている。

C C I 実験を対象にした M A A P ベンチマーク解析により、対流熱伝達係数を適切に設定することにより侵食量がおおむね合うことが確認されている。また、侵食の異方性を扱うためには、床方向と側壁方向の対流熱伝達係数の比率の設定が重要であることが示されている。



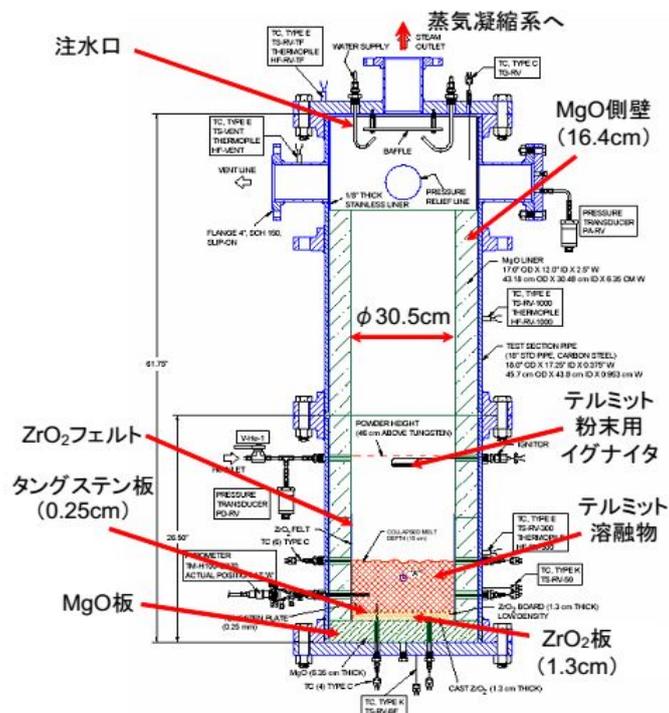
付図 2-9 想定されているデブリ冷却メカニズム^[38]



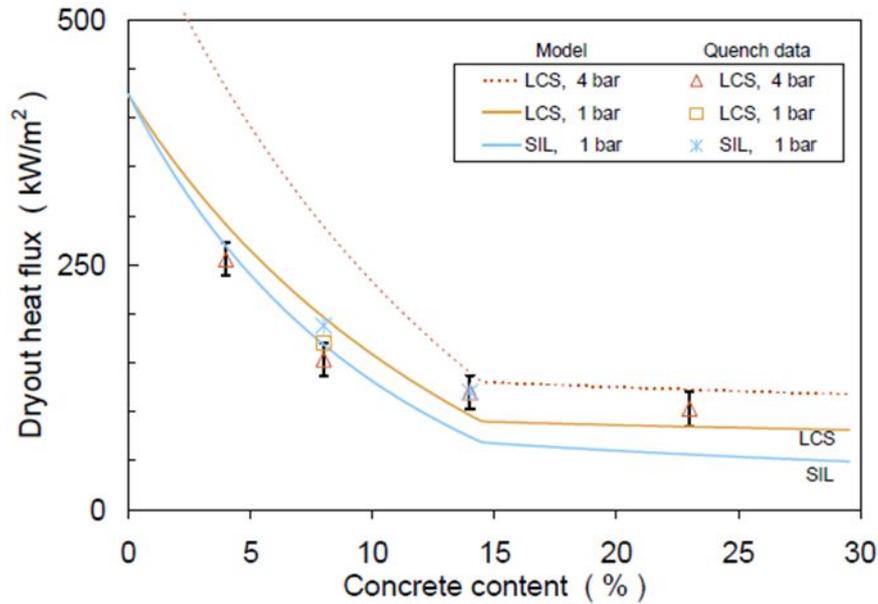
付図 2-10 想定されている火山型クラストの模式図^[12]

付表 2-2 SSWICS 実験 (デブリ冷却実験) 条件一覧^[12]

Parameter	Test Number						
	1	2	3	4	5	6	7
Melt composition (wt % UO ₂ /ZrO ₂ /Cr/concrete)	61/25/6/8	61/25/6/8	61/25/6/8	48/20/9/23	56/23/7/14	56/23/6/14	64/26/6/4
Concrete type	LCS	SIL	LCS	LCS	LCS	SIL	LCS
Melt mass (kg)	75	75	75	60	68	68	80
Melt diameter / depth (cm)	30 / 15	30 / 15	30 / 15	30 / 15	30 / 15	30 / 15	30 / 15
Basemat type	Inert	Inert	Inert	Inert	Inert	Inert	Inert
Initial melt temperature (°C)	~2300	~2100	~2100	~2100	~2100	~1950	~2100
Initial vessel and coolant temperature (°C)	20	20	100	100	100	100	100
System pressure (bar)	1	1	4	4	4	1	4
Water injection period (sec)	665	760	183	195	622	215	194
Water injection flowrate (lpm)	4	4	12	13	6	14	13
Water injected (liters)	33	39	34	40	61	47	40
Condensate collected over course of test (kg)	24.7	16.1	28.9	21.9	22.7	27.6	31.4
Test duration (hours)	2.2	1.2	1.8	2.4	2.6	3.9	1.4



付図 2-11 小規模浸水・クラスト強度実験 (SSWICS) 装置^[12]



付図 2-12 SSWICS 実験データと Lister/Epstein モデルのドライアウト熱流束の比較^[12]

付表 2-3 CCI 実験（二次元コンクリート侵食実験）条件一覧^[12]

Parameter	Specification for Test:		
	CCI-1	CCI-2	CCI-3
Corium	PWR + 8 wt% SIL	PWR + 8 wt% LCS	PWR + 15 wt% SIL
Concrete type ^a	SIL (US-type)	LCS	SIL (EU-type)
Basemat cross-section	50 cm x 50 cm	50 cm x 50 cm	50 cm x 50 cm
Initial melt mass (depth)	400 kg (25 cm)	400 kg (25 cm)	375 kg (25 cm)
Test section sidewall construction	Nonelectrode walls: concrete Electrode walls: Inert	Nonelectrode walls: concrete Electrode walls: Inert	Nonelectrode walls: concrete Electrode walls: Inert
Lateral/Axial ablation limit	35/35 cm	35/35 cm	35/35 cm
System pressure	Atmospheric	Atmospheric	Atmospheric
Melt formation tech.	Chemical reaction (~30 s)	Chemical reaction (~30 s)	Chemical reaction (~30 s)
Initial melt temperature	1950 °C	1880 °C	1950 °C
Melt heating technique	DEH	DEH	DEH
Power supply operation prior to water addition	Constant @ 150 kW	Constant @ 120 kW	Constant @ 120 kW
Criteria for water addition	1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm	1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm	1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm
Inlet water flowrate/temp.	2 lps/20 °C	2 lps/20 °C	2 lps/20 °C
Water depth over melt	50 ± 5 cm	50 ± 5 cm	50 ± 5 cm
Power supply operation after water addition	Constant voltage	Constant voltage	Constant voltage
Test termination criteria	1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached.	1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached.	1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached.
Operational Summary	Successful: non-symmetrical ablation behavior	Successful: symmetrical ablation behavior	Successful: symmetrical ablation behavior

^aSIL denotes siliceous concrete, LCS denotes Limestone/Common Sand concrete.

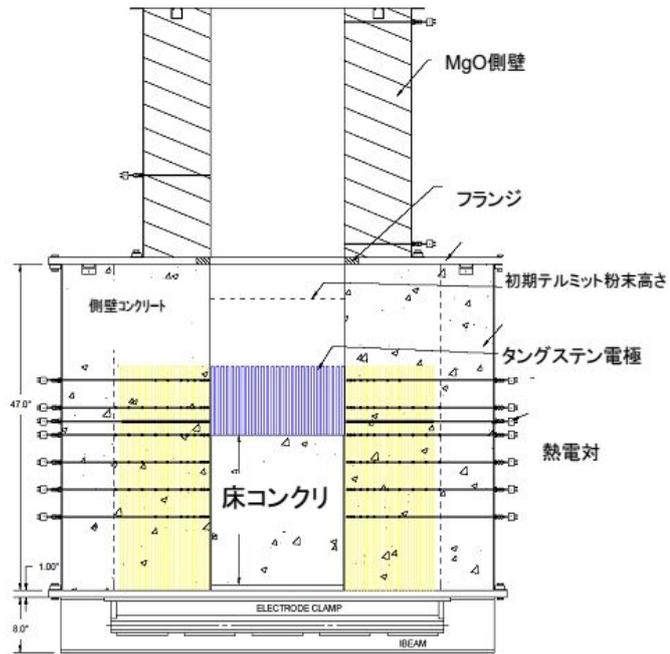
付表 2-4 CCI 実験に使用されたコンクリートの組成 [12]

Oxide	CCI-1 Wt%	CCI-2 Wt%	CCI-3 Wt%
Al ₂ O ₃	0.77	2.49	3.53
CaO	8.54	25.88	16.79
Fe ₂ O ₃	0.79	1.39	1.49
MgO	0.60	11.47	0.85
MnO	0.00	0.03	0.04
K ₂ O	0.12	0.55	0.81
SiO ₂	82.48	21.61	59.91
Na ₂ O	0.00	0.31	0.66
SrO	0.00	0.00	0.04
TiO ₂	0.051	0.135	0.155
SO ₃	0.514	0.505	0.434
CO ₂	0.901	29.71	9.80
H ₂ O, Free	1.808	3.255	2.293
H ₂ O, Bound	1.92	1.11	1.40
Total	98.48	98.47	98.19

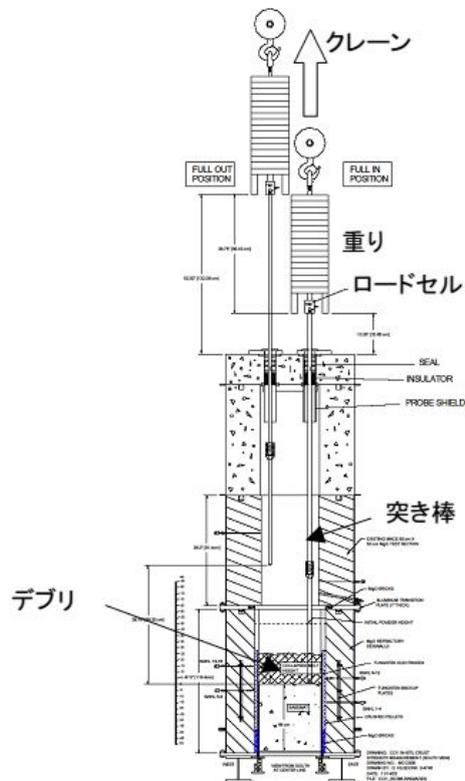
付表 2-5 C C I 実験の側壁方向/床方向の侵食率と熱流束の推定値 [12]

Test	Concr. Type	Lateral Ablation		Axial Ablation		Lateral -Axial Heat Flux Ratio	Data Points Utilized for Ablation Rate Estimates
		Ablation Rate (cm/hr)	Heat Flux (kW/m ²)	Ablation Rate (cm/hr)	Heat Flux (kW/m ²)		
CCI-1	SIL (US)	N: 39.1	395	26.1	265	- ^a	N Lateral: (19.1 cm, 51 min) (29.2 cm, 66 min) S Lateral: (7.6 cm, 54 min) (5.1 cm, 35 min) Axial: (7.6 cm, 53 min) (1.3 cm, 39 min)
		S: 8.4	86				
CCI-2	LCS	4.0	58	4.0	59	1.0	Lateral: (19.1 cm, 148 min) (29.2 cm, 302 min) Axial: (15.2 cm, 107 min) (24.1 cm, 240 min)
CCI-3	SIL (EU)	10.0	97	2.5	25	4.0	Lateral: (19.1 cm, 47 min) (29.2 cm, 107 min) Axial: (2.5 cm, 117 min) (5.1 cm, 178 min)

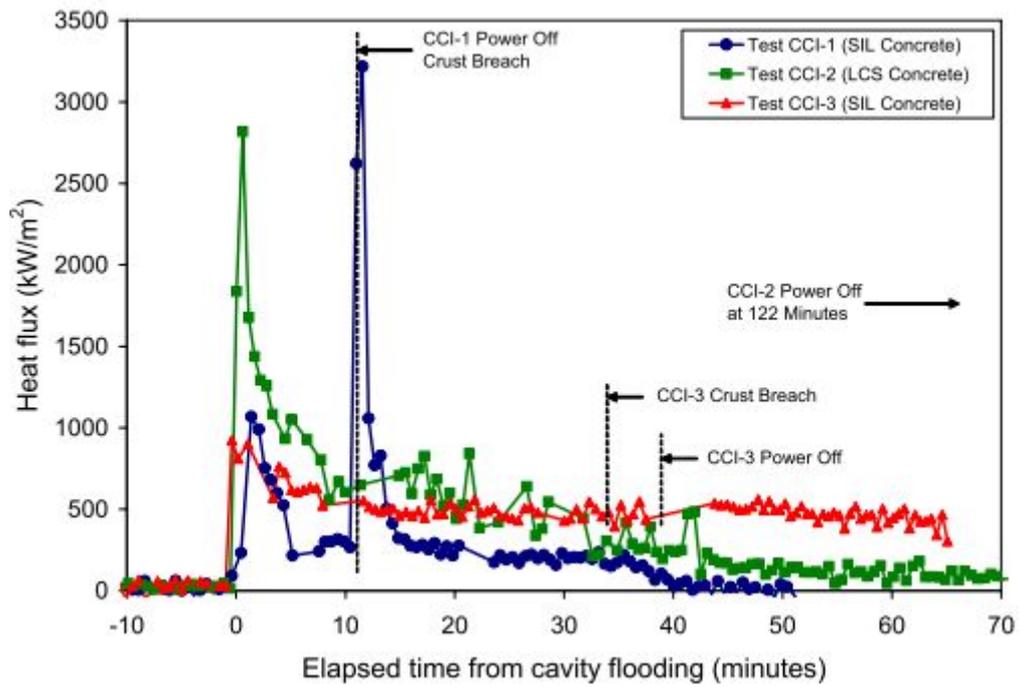
^aHeat flux ratio not evaluated for this test due to large asymmetry in lateral cavity erosion.



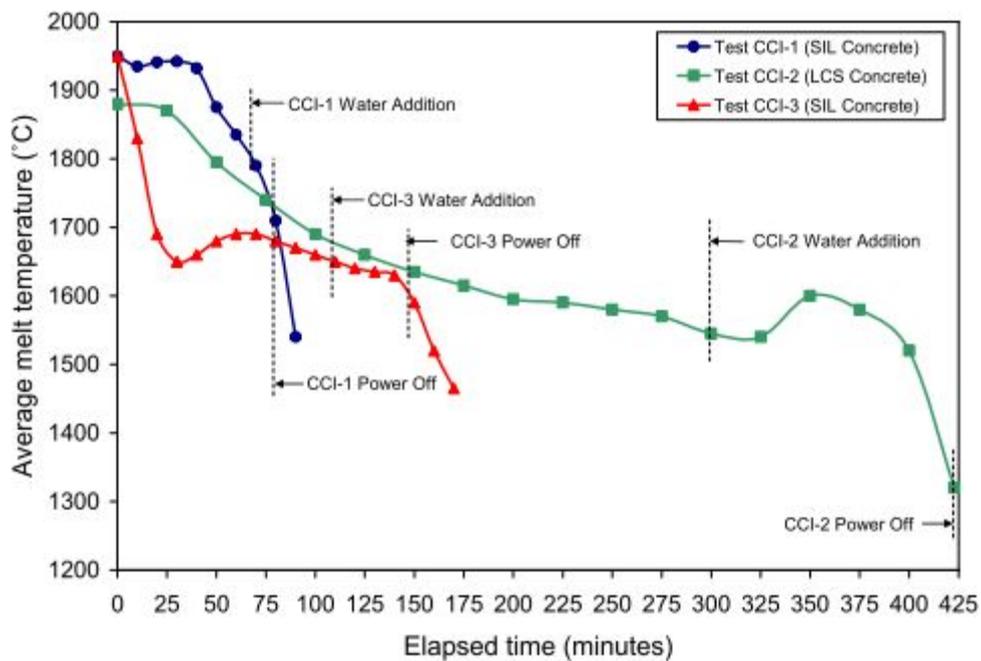
付図 2-13 C C I 実験のテスト部^[12]



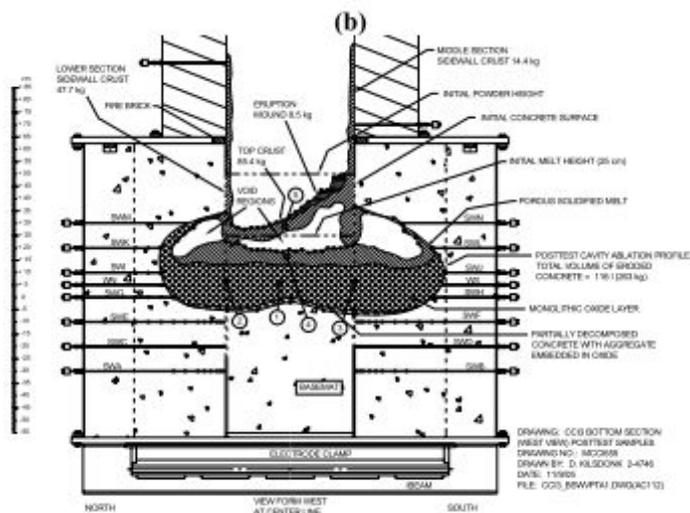
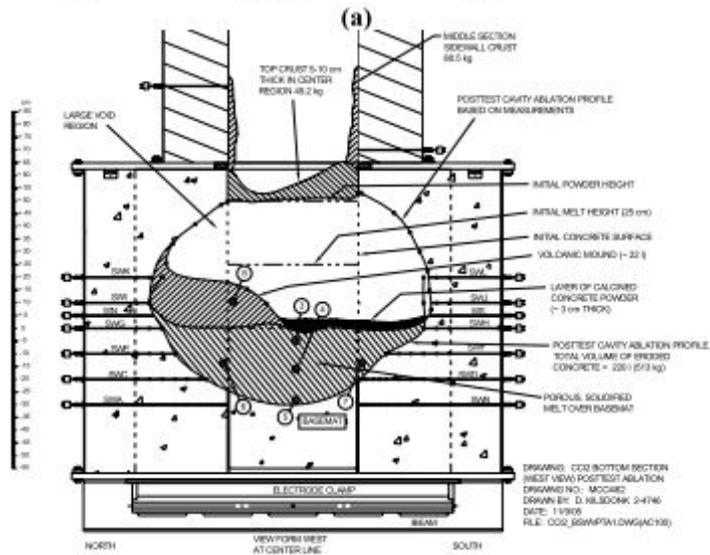
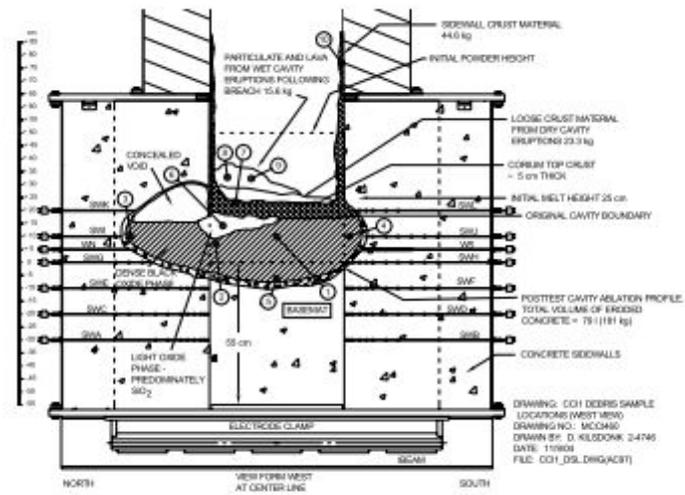
付図 2-14 長期二次元侵食実験におけるクラスト破壊／強度測定装置^[41]



付図 2-15 C C I 実験におけるデブリー水間の熱流束 [12]



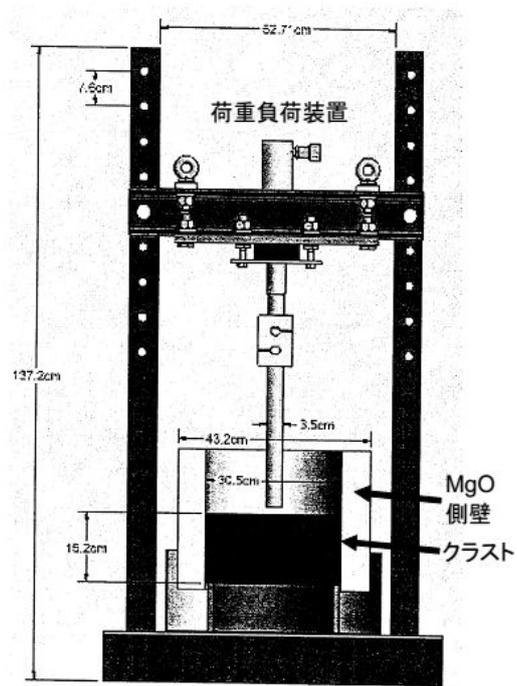
付図 2-16 C C I 実験における溶融物平均温度 [12]



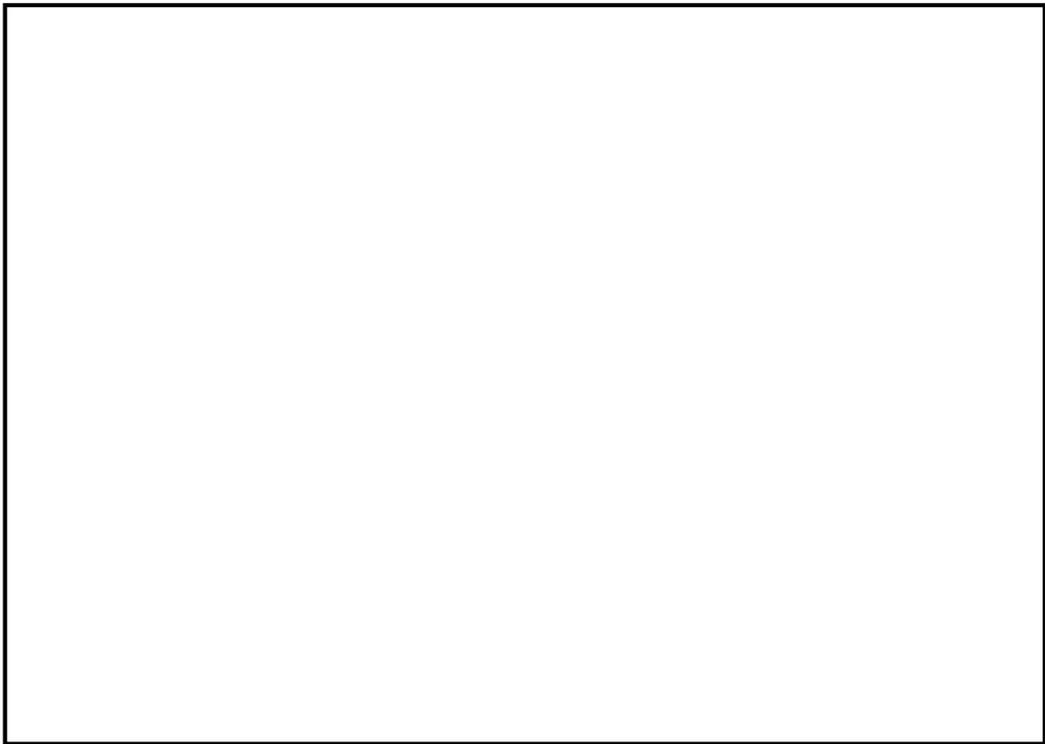
(c)

付図 2-17 CCI 実験における侵食状態の模式図 [12]

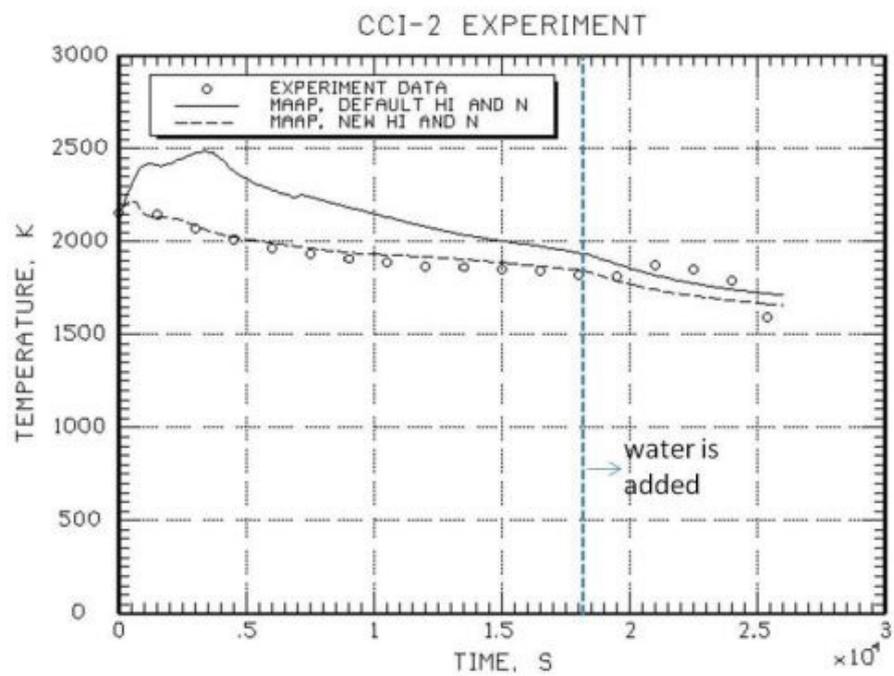
(a) CCI-1, (b) CCI-2, (c) CCI-3



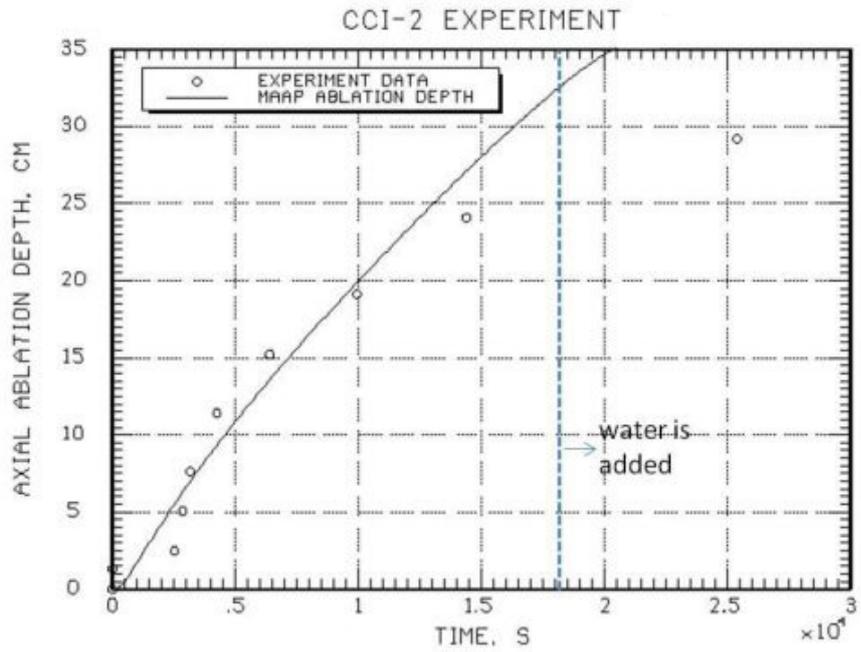
付図 2-18 クラスト浸水実験の実験後の低温クラスト強度測定装置^[38]



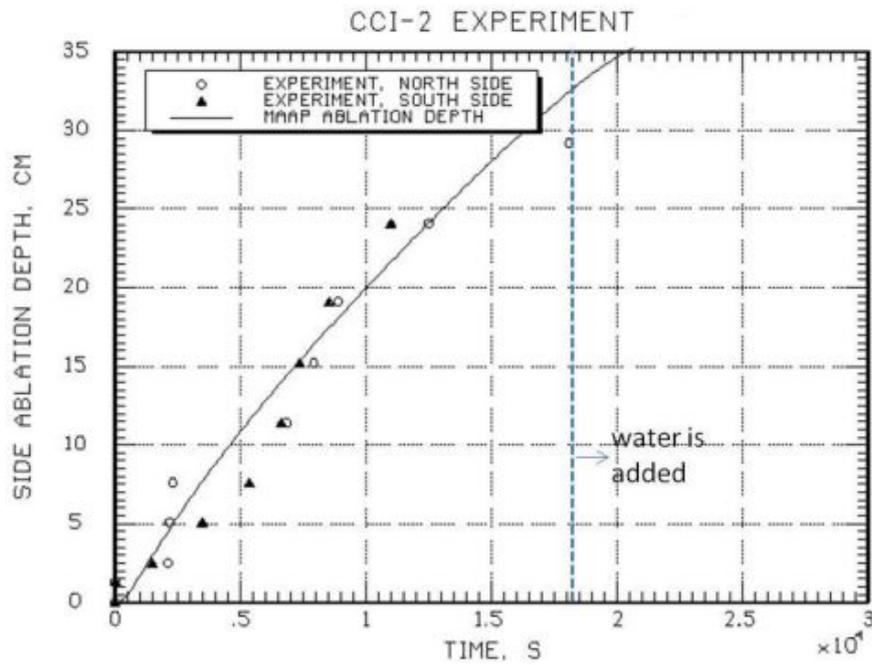
付図 2-19 溶融プールからクラストへの対流熱伝達係数



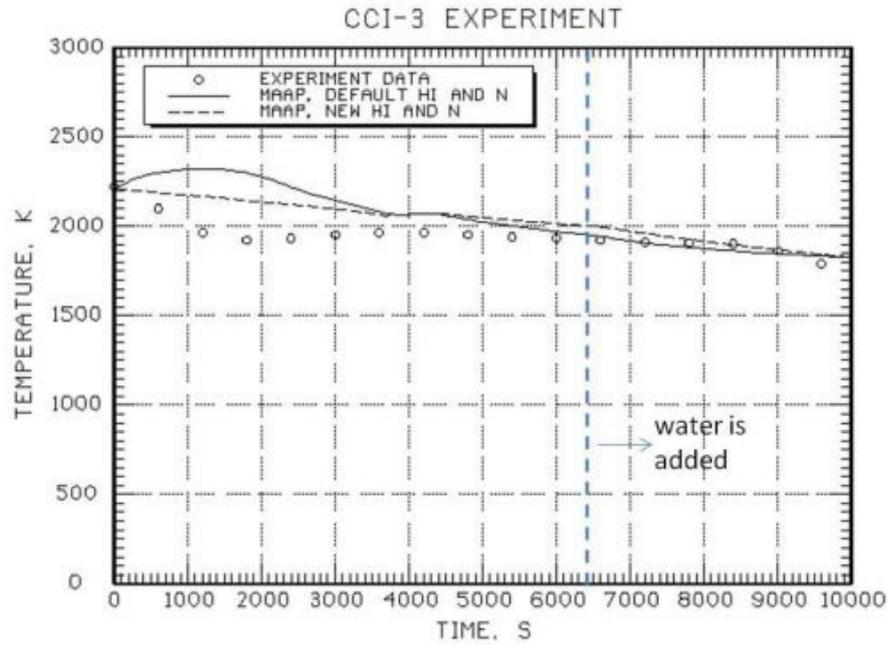
付図 2-20 CCI-2 実験のコリウム温度の実験データと MAAP 解析結果の比較^[35]
 (MAAP New 熱伝達係数 (破線) : 床方向 $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$, 側壁方向 $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$, $n=0$)



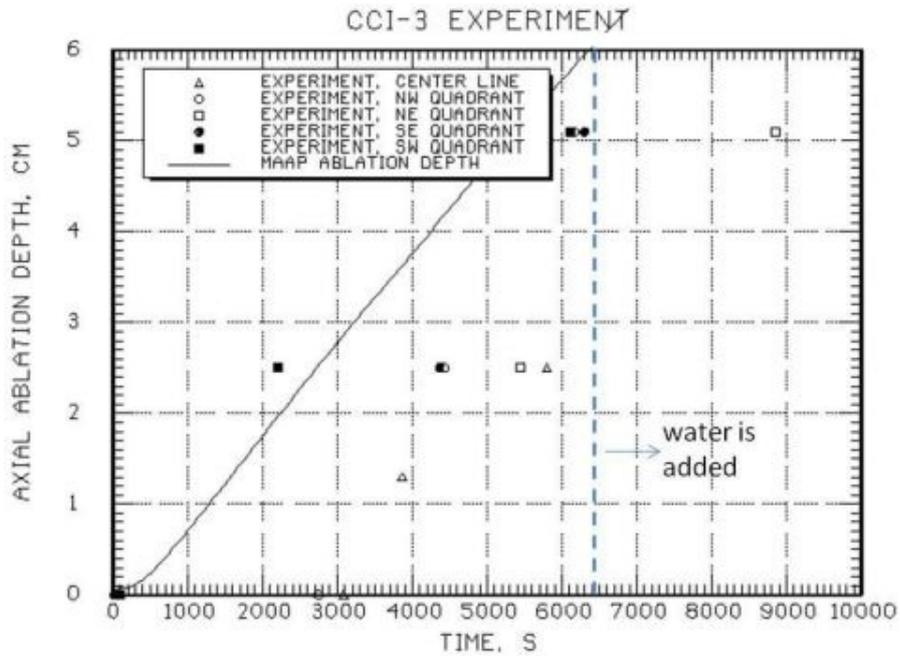
付図 2-21 CCI-2 実験の床方向侵食の実験データとMAAP解析結果の比較^[35]



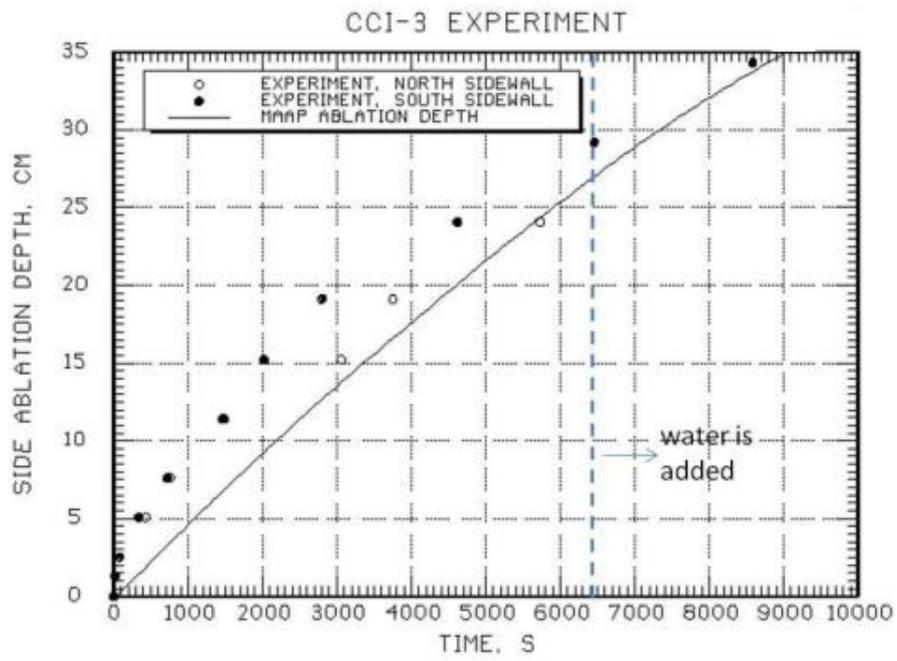
付図 2-22 CCI-2 実験の側壁方向侵食の実験データとMAAP解析結果の比較^[35]



付図 2-23 CCI-3 実験のコリウム温度の実験データとMAAP解析結果の比較^[35]
 (MAAP New 熱伝達係数 (破線) : 床方向 $80\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$, 側壁方向 $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$, $n=0$)



付図 2-24 CCI-3 実験の床方向侵食の実験データとMAAP解析結果の比較^[35]



付図 2-25 CCI-3 実験の側壁向侵食の実験データとMAA P解析結果の比較^[35]

付録3 溶融物の水中落下時の粒子化実験と解析モデル

溶融物が水中に落下した場合の粒子化現象については、主に溶融炉心と冷却材の相互作用 (FCI) を調べるために行われてきた。ここでは、以下の実験についての知見を述べる。

- (1) FARO 実験 (イタリア JRC-ISPRA)
- (2) COTELS-FCI 実験 (日本 NUPEC)
- (3) DEFOR 実験 (スウェーデン KTH)

また、MAAPコードでは、溶融炉心が原子炉压力容器下部プレナム水等に落下する場合の粒子化割合を評価しており、Ricou-Spalding 相関式又は Saito の相関式が用いられている。ここではこれらの相関式の元になった実験についても説明する。

(1) FARO 実験 (イタリア JRC-ISPRA) [1][14]

主に原子炉压力容器内で溶融物が炉心から下部プレナムの水プールに落下した場合の水蒸気爆発発生の可能性を調べることを目的とした実験で、当初は高圧での実験を対象としてきたが、後に低圧での実験が3ケース実施された。高圧実験装置の構成は、FARO りつぼと実験容器 TERMOS (内径: 710mm, 体積: 1.5m³) である (付図 3-1 参照)。低圧実験装置では FAT と呼ばれる実験容器の中に TERMOS と同一内径の円筒容器が置かれ、観測窓が設置された。実験手順は原則的に高圧実験も低圧実験も同様で、FARO りつぼで生成された溶融コリウムは一度リリースベッセルに保持し、その底部にあるフラップ又は弁を開放して溶融物を水プールに落下させる。高圧実験ではリリースベッセルは溶融物落下速度を調整するために加圧可能である。ほとんどの実験は酸化コリウム (80wt%U₂O₃+20wt%ZrO₂) で実施され、テスト L11 のみが金属 Zr を含むコリウム (77wt%U₂O₃+19wt%ZrO₂+4wt%Zr) が用いられた。また、多くの実験は高圧・飽和水条件で実施されたが、近年は低圧・サブクール水条件でも3ケース実施されてきている。主な実験パラメータは、初期圧力 (0.2~6 MPa)、コリウム質量 (18~177kg)、水深 (87cm~2.05m)、サブクール度 (飽和~124K)、コリウム組成 (1ケースのみ金属 Zr を 4.1wt%追加) である (付表 3-1 参照)。

実験からの主な知見は以下のとおりである。

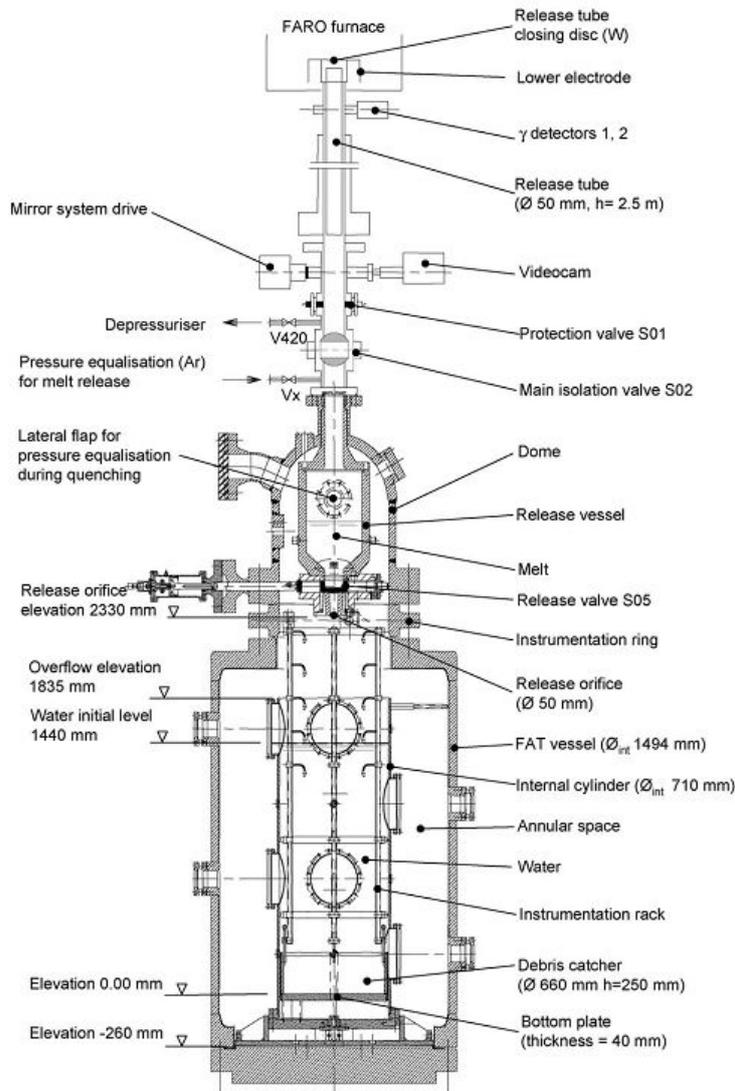
- ・ 高圧・飽和水実験、低圧・サブクール実験の何れにおいても水蒸気爆発は発生していなかった。
- ・ いずれの実験においても、コリウムの一部が粒子化し、一部はパンケーキ状としてプール底部に堆積した。プール水中に設置した熱電対の測定結果より、一部のコリウムはジェット状でプール底面に衝突したと推定されている (付図 3-2 参照)。
- ・ 粒子化割合は、ほとんどの実験でプール水深に依存し、高圧飽和水実験の水深 1 m 程度で落下コリウムの約 50%が粒子化したが、コリウムに少量の金属 Zr (4.1wt%) を添加した場合と低圧のサブクール水の実験では 100%近くが粒子化した (付図 3-3 参照)。
- ・ 粒子の質量中央径は比較的大きく、3.2~4.8mm の範囲であり、実験パラメータ (初期圧力、水深、コリウム落下速度、サブクール度) に依存していない。

付表 3-1 FARO 実験マトリックス^[14]

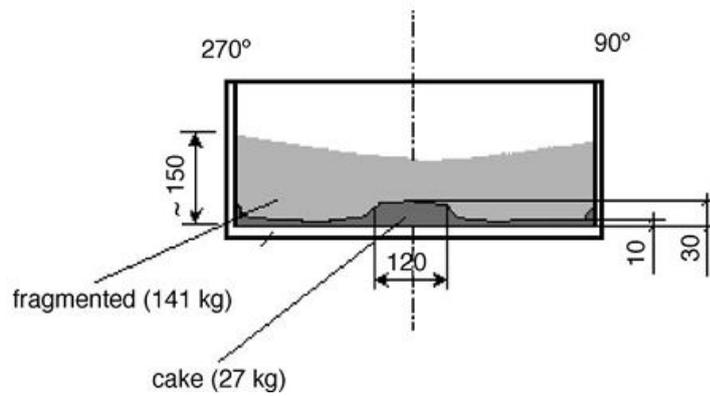
FARO LWR test series—main experimental conditions and debris data

Test	L-06	L-08	L-11	L-14	L-19	L-20	L-24	L-27	L-28	L-29	L-31	L-33
Experimental conditions												
Corium composition ^a	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Melt mass ^b (kg)	18	44	151	125	157	96	177	117	175	39	92	100 ^c
Melt temperature (K)	2923	3023	2823	3123	3073	3173	3023	3023	3052	3070	2990	3070
Melt release diameter ^d (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50
Melt fall height in gas (m)	1.83	1.53	1.09	1.04	1.99	1.12	1.07	0.73	0.89	0.74	0.77	0.77
System pressure (MPa)	5	5.8	5	5	5	2	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.4
Gas phase	Steam/Ar	Steam/Ar	Steam/Ar	Steam/Ar	Steam ^e	Argon	Argon	Argon				
Water depth (m)	0.87	1.00	2.00	2.05	1.10	1.97	2.02	1.47	1.44	1.48	1.45	1.60
Water temperature (K)	539	536	535	537	536	486	425	424	424	297	291	293
Water subcooling (K)	0	12	2	0	1	0	0	1	1	97	104	124
Water Mass (kg)	120	255	608	623	330	660	719	536	517	492	481	625
Debris bed data ^f												
Hard debris, cake (kg, %)	6, 33	14, 32	0, 0	20, 16	77, 49	21, 22	27, 16	26, 23	77, 48	39, 100	0, 0	8, 8
Loose debris (kg, %)	12, 67	30, 68	146, 100	105, 84	80, 51	73, 78	141, 84	70, 77	84, 52	0, 0	83, 100	89, 92
Mean loose debris size (mm)	4.5	3.8	3.5	4.8	3.7	4.4	2.6	Na ^g	3.0	-	3.4	2.6 ^h

^a A: 80 wt.% UO₂-20 wt.% ZrO₂; B: 77 wt.% UO₂-19 wt.% ZrO₂-4 wt.% Zr.



付図 3-1 FARO 実験装置 (L-27 実験) ^[14]



付図 3-2 FARO L-24 実験後のデブリの堆積状態 (数値単位 mm) ^[14]



(a) View of the debris as found



(b) View of the cake after partial removal of loose debris



(c) View of blocks after breaking the cake

付図 3-3 FARO/L-33 実験後のデブリ取り出し段階ごとのデブリ状態 ^[14]
(低圧, サブクール水)

(2) COTELS-FCI 実験 (日本 NUPEC) ^{[1][15]}

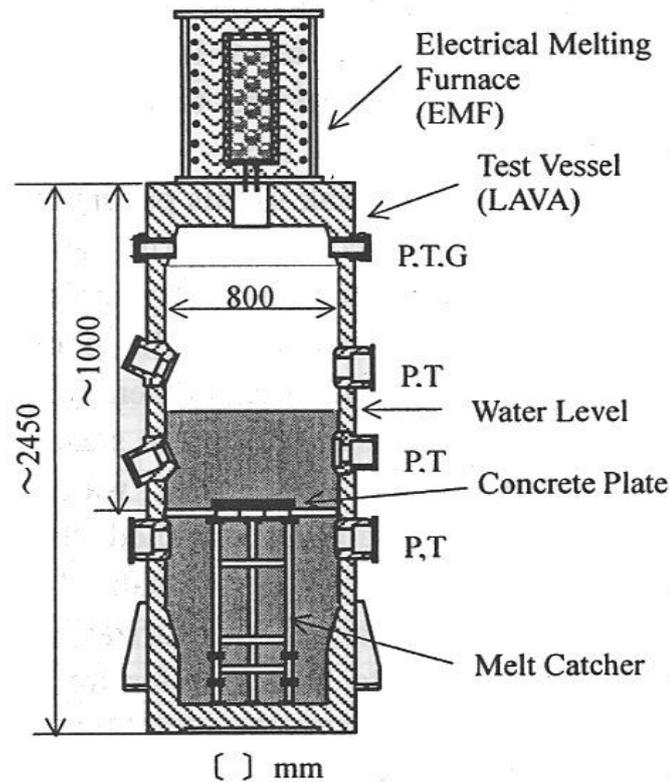
本実験は、原子炉圧力容器外での F C I 挙動を調べるために実施された。UO₂ 混合物を溶融物として用い、その成分は原子炉内構造物のみならず、原子炉圧力容器下部ヘッド内の下部構造物も考慮して設定されている。付図 3-4 に COTELS-FCI 実験装置の概要を示す。実験装置は、UO₂ 混合物を溶融させる電気炉とその下に溶融物と水との相互作用を調べるメルトレシーバより構成されている。電気炉は、グラファイト製のつぼと高周波誘導加熱コイルにより構成されている。グラファイト製のつぼは最高温度 3200K で、60kg の UO₂ 混合物を加熱溶融可能である。つぼ下部には、溶融物を落下させるための穴を設けるプラグ破壊装置が設置され、UO₂ 混合物が溶融後、瞬時に直径 5 cm の穴が作ることが可能である。メルトレシーバは、高さ約 2.5m、外径約 90cm で円筒状をしており、メルトレシーバの中には、高さが可変のメルトキャッチャーが設置されており、メルトキャッチャーの高さを変化させることによりプール水深を変化させる実験を実施しており、雰囲気気体積は変化させないように考慮されている。メルトキャッチャーの中心部は、実炉の格納容器床面を模擬するために厚さ 3 cm のコンクリートが設置され、溶融コリウム/水/コンクリート間の相互作用を調べることが可能となっている。なお、コンクリートの成分は日本と同じ玄武岩系である。実験マトリックスと主な結果を付表 3-2 に示す。

付表 3-2 COTELS-FCI 実験マトリックス^[1]

Run No.	A1	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11
コリウム組成(*1)	B	B	B	B	B	B	B	B	B
落下コリウム量, kg	56.3	27.0	55.4	53.1	24.9	47.7	57.1	55.0	53
プール水深, m	0.4	0.4	0.4	0.4	1.0	0.4	0.9	0.4	0.8
水サブクール度, K	0	8	12	21	0	21	0	21	86
初気圧, MPa	0.20	0.30	0.25	0.21	0.18	0.45	0.21	0.47	0.27
雰囲気ガス組成	Steam	Steam	Steam N ₂ 20%	Steam	Steam	Steam	Steam	Steam	Ar
差圧, MPa (*2)	0.03	0.03	0.01	~0	~0	0.67(*3)	0.02	0.14	0.13
ピーク圧力, MPa	1.34	1.04	0.62	0.88	(*4)	1.83	0.92	3.85	1.08
インゴットコリウム, kg	5	2.5	4.2	6.5	0	0	3.8	0	4
質量中央径, mm	6.7	6.2	7.5	7.2	8.2	5.2	7.0	0.38	4.8

*1)コリウム組成

B; UO₂:55wt%+Zr:25%+ZrO₂:5%+SS:15%



P: Pressure, T: Temperature,
G: Gas sampling line

付図 3-4 COTELS-FCI 実験装置^[15]

(3) DEFOR 実験 (スウェーデン KTH) ^[16]

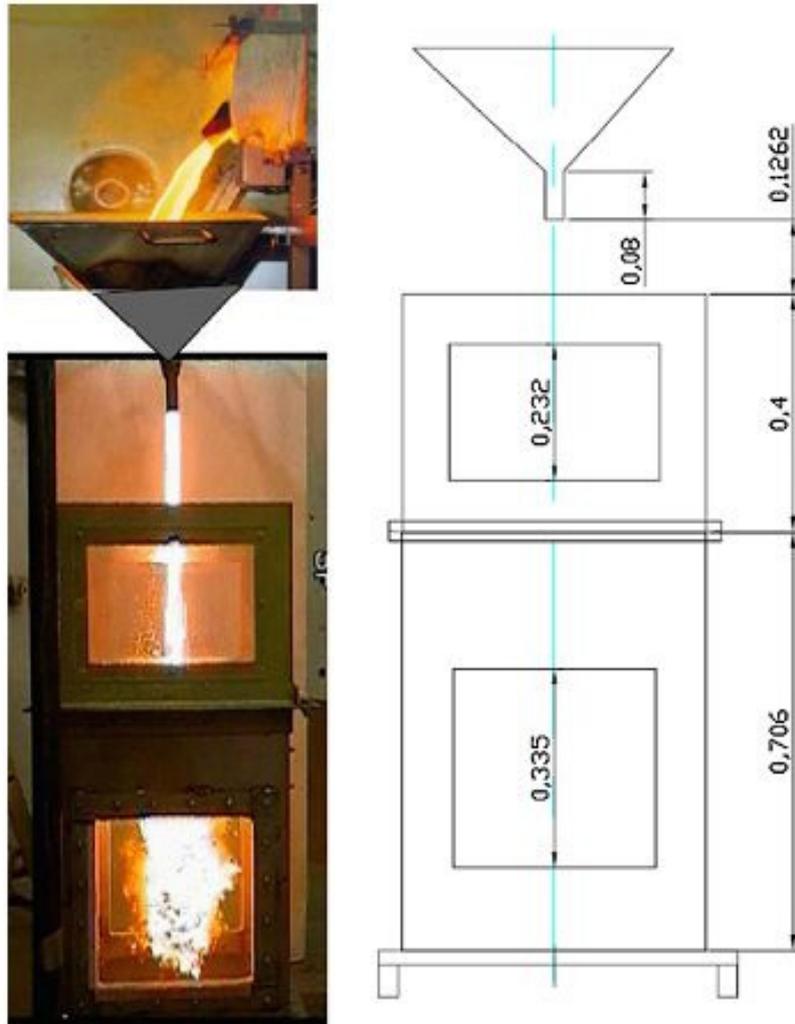
水張り時のデブリ冷却性を調べる目的で実施されている。熔融物の粒子化について、水サブクール、水深、メルト成分、過熱度等の影響を調べるために、熔融物の落下実験が実施されている。実験装置を付図 3-5 に示すが、上から、誘導加熱炉、メルト容器、冷却タンクより成り、冷却タンクはガラス張りで粒子化の観察が可能となっている。熔融物はメルト容器下部のノズルから重力落下により水中に落下する。DEFOR-E 実験の実験マトリックスを付表 3-3 に示すが、6 ケースの熔融物は $\text{CaO-B}_2\text{O}_3$ (密度 2500kg/m^3) の酸化物が使用されており、1 ケースはより重量の大きい $\text{W}_3\text{-CaO}$ (密度 $5000\sim 8000\text{kg/m}^3$) が使用されている。

実験結果より、粒子化挙動は、水サブクールと水深の影響が大きいとしている。実験後のデブリ状態例を付図 3-6 に示すが、平均ポロシティは $0.55\sim 0.7$ 程度と大きい値が得られている。主な結果を付表 3-3 に併せて示す。

付表 3-3 DEFOR-E 実験マトリックス^[16]

Experimental conditions and the measured porosity in the DEFOR-E tests.

Parameter/property	No.						
	1	2	3	4	5	6	7
Melt volume, l	3.5	7.0	3.5	3.5	3.5	3.5	2.5
Melt initial temp., °C	1200	1300	1350	1350	1200	1250	1280
Coolant volume, l	163	163	163	100	100	163	163
Coolant initial temp., °C	13	11	85	15	83	88	7
Water pool depth, cm	65	65	65	40	40	65	65
Measured porosity, %	60	77	74	56	50	68	65



付図 3-5 DEFOR-E 実験装置^[16]



DEFOR- E1



DEFOR- E4



DEFOR- E7

付図 3-6 DEFOR-E 実験後のデブリ状態^[16]

(4) 溶融物落下時の水中での粒子化割合の解析モデル

水中落下時の溶融物の粒子化現象について、これまで種々の実験的研究が行われており、また粒子化割合については相関式も提案されている。ここでは、粒子化現象に関する相関式を用いて、溶融炉心ジェットのパデスタル水プールの条件に対する粒子化割合を評価した。相関式として、MAAPコードで使用されている以下の二つの式を用いて計算を行った。

- ・ Ricou-Spalding の相関式
- ・ Saito の相関式

a) Ricou-Spalding の粒子化相関式^{[25][34]}

Ricou-Spalding の相関式は、空気中へガスジェットを噴出させたエントレインメント実験から得られたもので（実験装置は付図 3-7 参照）、周囲の流体（空気）がガスジェットによってエントレインされ（巻き込まれ）、ジェット質量流量が距離とともに増加することを相関づけた整理式である。式の検証例を付図 3-8 に示す。

これをメルトジェットのブレイクアップに適用するため、周囲の流体（水）がメルトジェットにエントレインされると考え、そのエントレインされた分だけメルトジェットが侵食され粒子化するとして、円柱ジェットのエントレインメント速度 (m/s) を、次式で与えている（付図 3-9 参照）。

$$m_{ent} = E_o \left(\frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} u_{dj}$$

ここで、 E_o : エントレインメント係数

u_{dj} : ジェット速度 [m/s]

ρ_{dj} : ジェット密度 [kg/m³]

ρ_w : 水密度 [kg/m³]

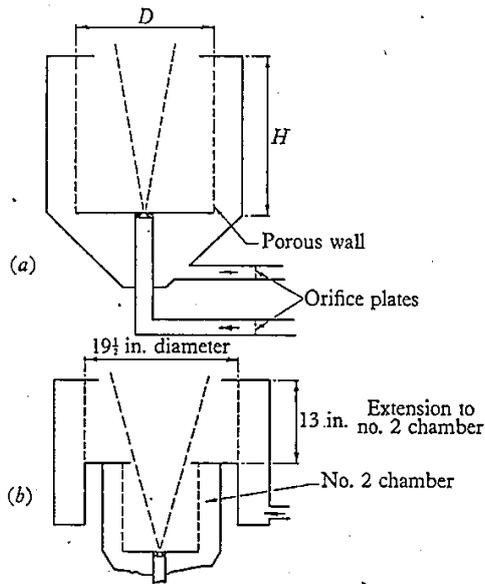


FIGURE 1. (a) Leading dimensions of three chambers.
(b) Dimensions of extension to no. 2 chamber.

No.	Entrainment chamber		
	1	2	3
H in.	8.7	13	3
D in.	5.8	8.9	8.9

付図 3-7 Ricou-Spalding のエントレイメント実験装置^[25]

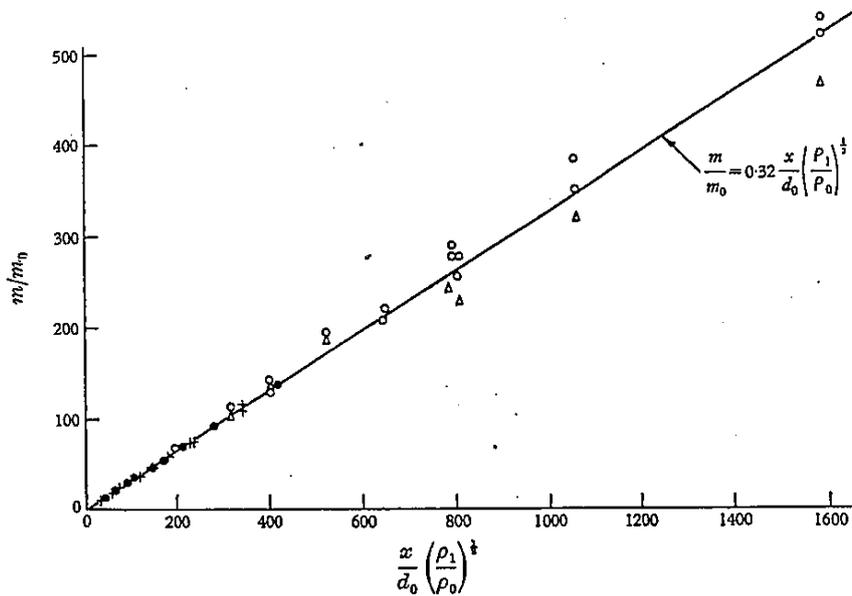


FIGURE 5. Entrainment rate for isothermal jets. Experimental results: (a) ●, air into air; (b) +, propane and carbon dioxide into air; (c), ○, hydrogen into air; (Δ, entrainment chamber inverted).

付図 3-8 Ricou-Spalding の相関式の検証例^[25]

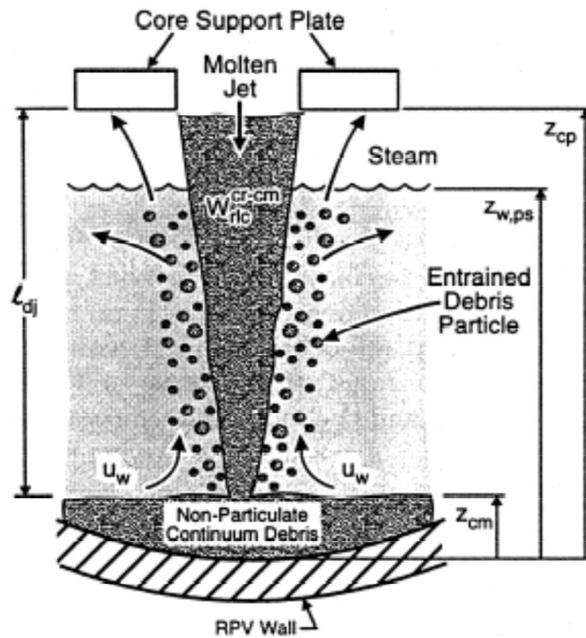


Fig. 3. Molten debris jet breakup and quenching.

付図 3-9 溶融デブリのジェットブレイクアップとクエンチの概念^[34]

b) Saito の相関式^[26]

フレオン 11 あるいは液体窒素の中に高温水ジェットを吹き込む実験により、ジェットのブレイクアップ長さに関する相関式を導出している。実験装置を付図 3-10 に示す。実験条件は、ノズル直径 5~40mm, ジェット速度 2.5~15m/s である。実験結果は、付図 3-11 にまとめられ、それに基づき下記相関式が導かれた。

$$\frac{L}{D_j} = 2.1 \times \left(\frac{\rho_j}{\rho_c}\right)^{0.5} \times F_r^{0.5}$$

ここで, F_r : フルード数 = $\frac{V_j^2}{(g \times D_j)}$

L : ジェットのブレイクアップ長さ [m]

D_j : ジェット直径 [m]

ρ_j : ジェット密度 [kg/m³]

ρ_c : 冷却材密度 [kg/m³]

V_j : ジェット速度 [m/s]

g : 重力加速度 [m/s²]

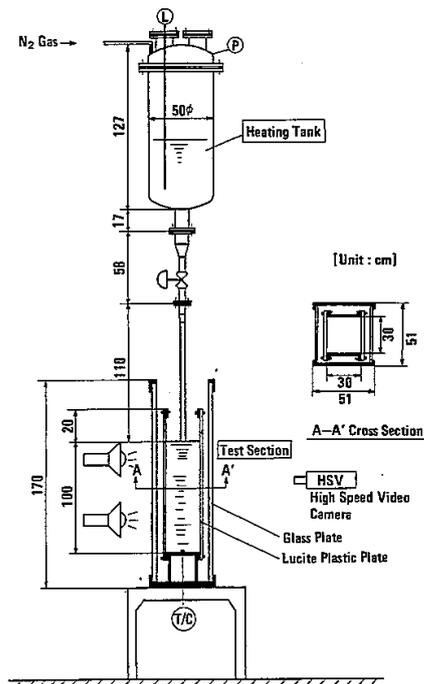


Fig. 1 JET-I experimental facility

付図 3-10 Saito らの実験装置^[33]

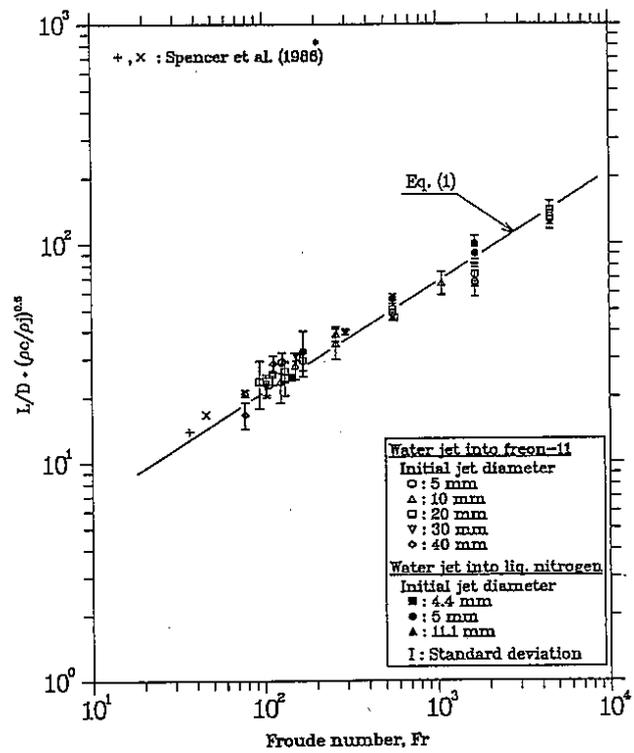


Fig. 8 Experimental correlation for jet mean penetration length

付図 3-11 Saito らの実験結果^[33]

c) 相関式の適用性に関する検討^[33]

Ricou-Spalding の相関式は、ガスジェットの空気中でのガス巻き込み現象に基づき作成された相関式であるため、熔融炉心物質ジェットの水中の粒子化現象への適用性の確認のため、ALPHA-MJB 実験、FARO-TERMOS 実験を対象に比較計算された結果を示す。

あわせて Saito の相関式との比較も示す。Saito の相関式ではジェットのブレイクアップ長さが与えられるので、ジェットの突入から消滅までジェット径が直線的に減少すると仮定して粒子化割合が求められている。

(a) ALPHA-MJB 実験

水中に鉛-ビスマスの熔融物を落下させた実験であり、密度や速度といった計算条件は付表 3-4 の値が用いられている。実験結果と計算結果の比較を付図 3-12 及び付図 3-13 に示す。実験結果は、ジェットブレイクアップ長さとして記載されている水深を、粒子化割合 100%として記す。

Ricou-Spalding 相関式における係数 E_0 の値は、MAAP 推奨値 **0.045** を使用することで、実験結果及び Saito の相関式とよく一致する結果が得られている。

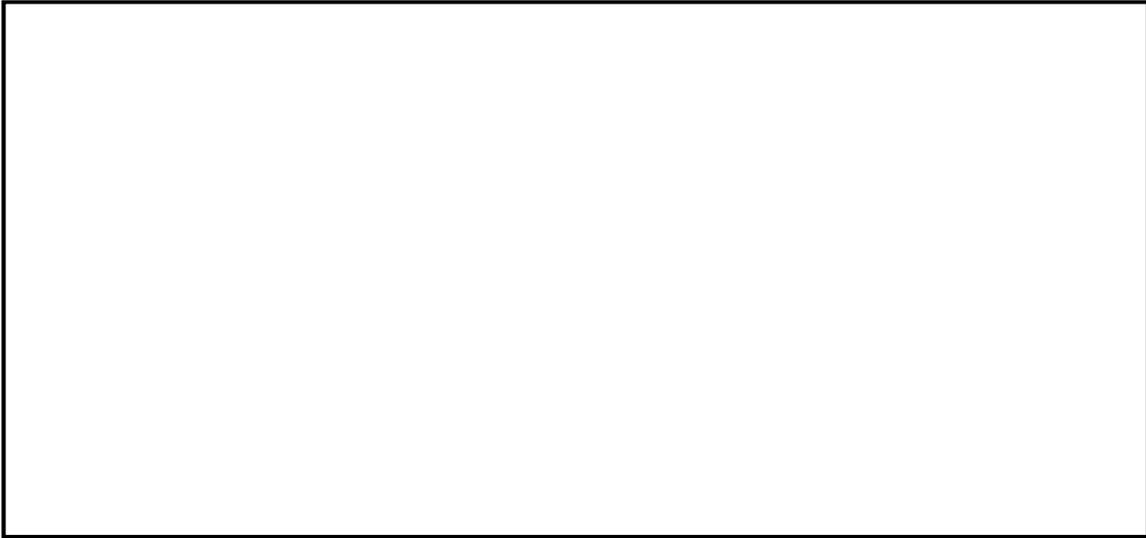
付表 3-4 ALPHA-MJB 実験の検証解析条件^[33]

ケース	熔融物密度 (kg/m ³)	水密度 (kg/m ³)	ジェット径 (m)	ジェット速度 (m/s)
MJB01	10453	958	0.03	3.05
MJB02	↑	↑	0.021	2.86

(補足) 熔融物密度は鉛-ビスマス 500K での値を使用



付図 3-12 ALPHA-MJB01 実験結果との比較^[33]

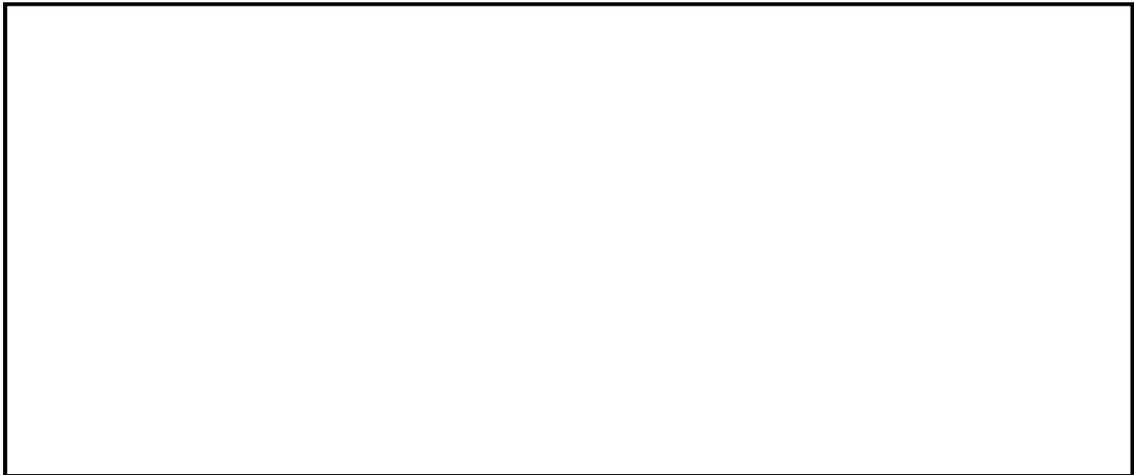


付図 3-13 ALPHA-MJB02 実験結果との比較^[33]

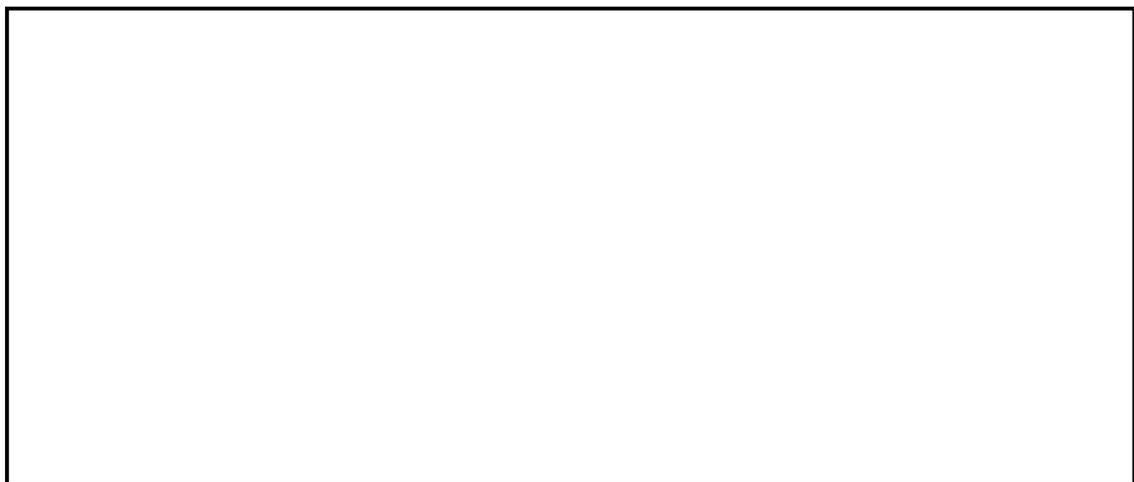
(b) FARO-TERMOS 実験

水中に実機燃料組成を模擬した熔融物を落下させた実験であり、密度、速度等の条件は付表 3-5 の値が用いられている。実験結果と計算結果の比較を付図 3-14、付図 3-15、付図 3-16、付図 3-17、付図 3-18 及び付図 3-19 に示す。実験結果は水プール水深に対する粒子化割合として示されている。計算結果は、実験結果とよく合っているか粒子化割合を小さく評価している。なお、Ricou-Spalding 相関式における係数 E_0 の値は が使用されている。

付表 3-5 FARO-TERMOS 実験の検証解析条件^[33]



付図 3-14 FARO-L06 実験結果との比較^[33]



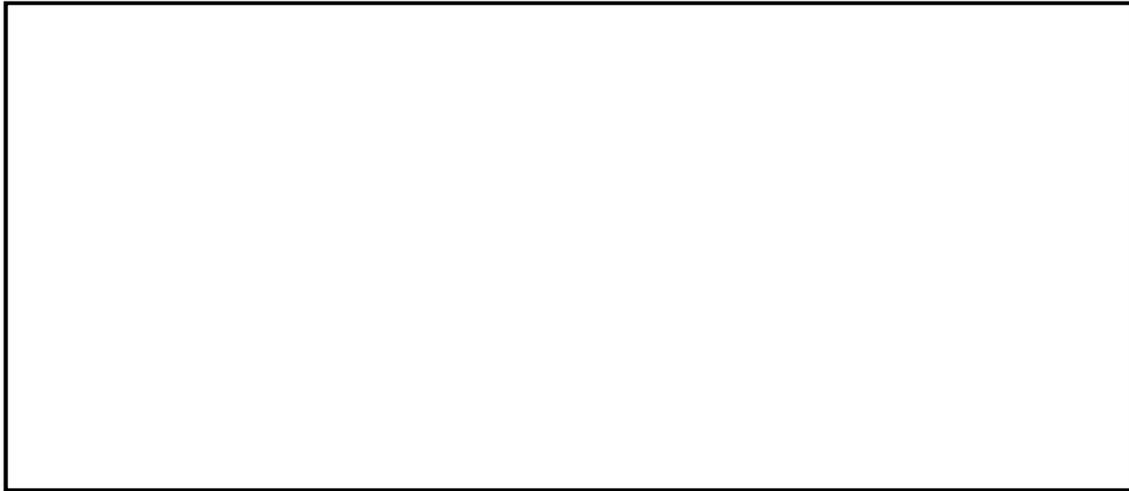
付図 3-15 FARO-L08 実験結果との比較^[33]



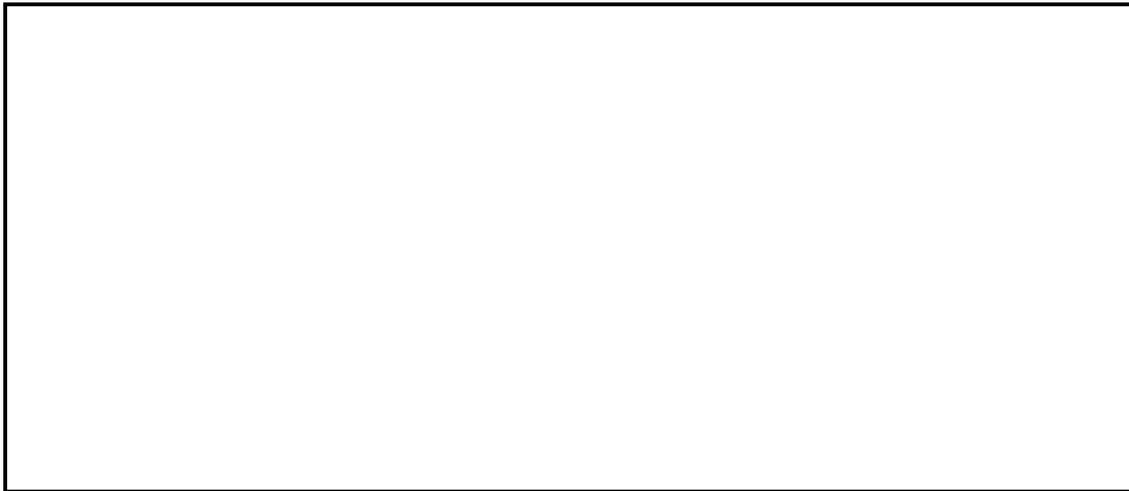
付図 3-16 FARO-L11 実験結果との比較^[33]



付図 3-17 FARO-L14 実験結果との比較^[33]



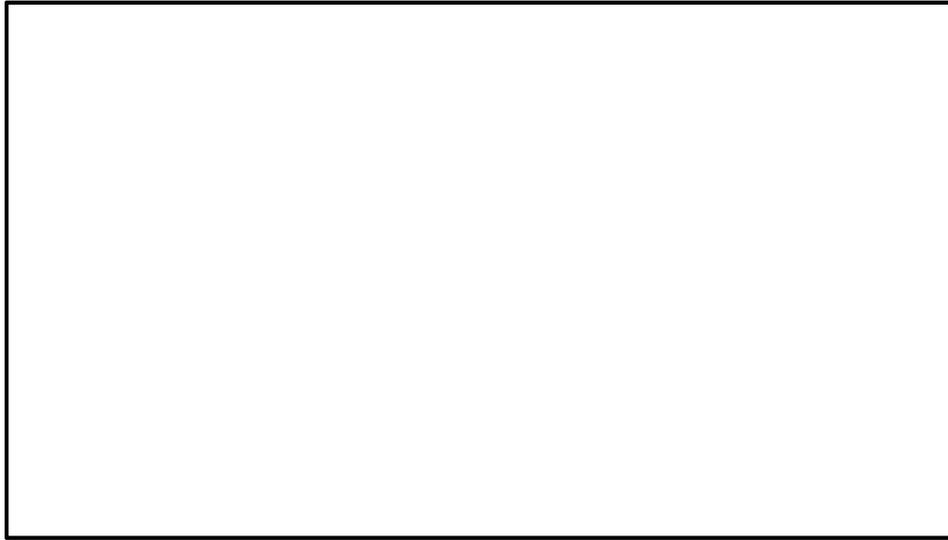
付図 3-18 FARO-L19 実験結果との比較^[33]



付図 3-19 FARO-L20 実験結果との比較^[33]

d) 格納容器ペDESTAL水張り水深に対する粒子化割合の評価^[33]

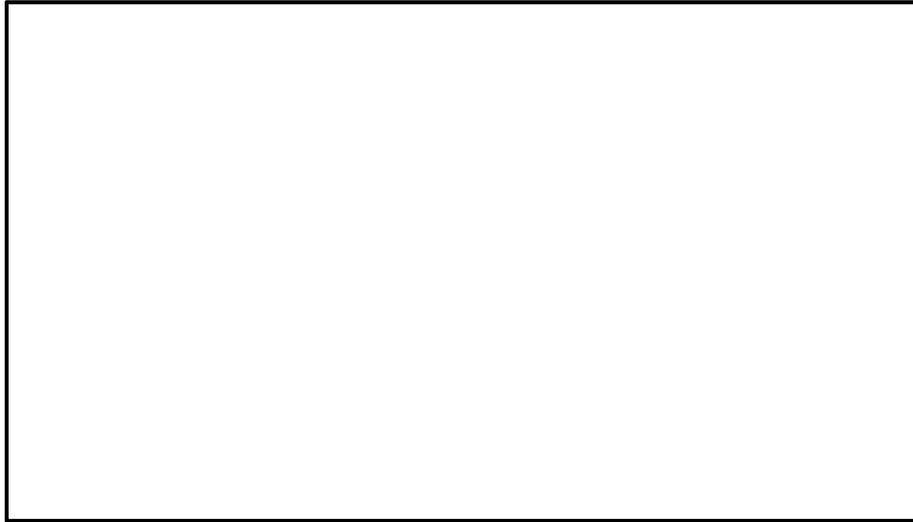
Ricou-Spalding の相関式及び Saito の相関式に基づき、大気圧飽和状態の水プールを想定し、水深とジェット直径及びジェット速度をパラメータとして粒子化割合を整理されたものを付図 3-20、付図 3-21 及び付図 3-22 に示す。



付図 3-20 Ricou-Spalding 相関式による粒子化割合のマップ^[33]



付図 3-21 Saito の相関式による粒子化割合のマップ ($V_j=5.0\text{m/s}$)^[33]



付図 3-22 Saito の相関式による粒子化割合のマップ ($V_j=10.0\text{m/s}$) [33]

付録4 溶融物の拡がり実験

溶融物の拡がり挙動に関して、付表 4-1 に示す実験的研究が実施されている。この中で水が存在する場合の溶融物の拡がりに関する主要な知見について以下に整理する。

付表 4-1 溶融物拡がりに関する主な実験^[27]

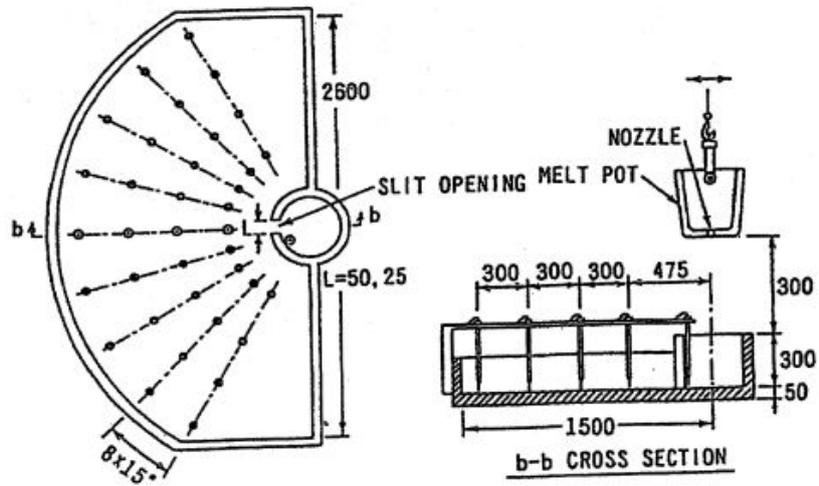
実験名	実施国	拡がり形状	溶融物	その他
BNL ^[18]	米国	2D	Pb	ドライ, ウエット
SPREAD ^[19]	日本	1D, 2D	ステンレススチール	ドライ, ウエット
CORINE ^[36]	フランス	2D	グリセロール他	ドライ, ウエット
VULCANO	フランス	2D	コリウム	ドライ
KATS ^[23]	ドイツ	1D, 2D	テルミット	ドライ, ウエット
COMAS	ドイツ	1D, 2D	コリウム	ドライ
ISPRA	EU JRAC	2D	コリウム	ドライ
S3E ^[27]	スウェーデン	1D, 2D	模擬物 (ウッズメタル等)	ドライ, ウエット
PULiMS ^[21]		2D	模擬物 (B ₂ O ₃ -WO ₃ 等)	ウエット

(1) Mark-I 型格納容器のシェルアタックに関する研究^{[17][18][19][20]}

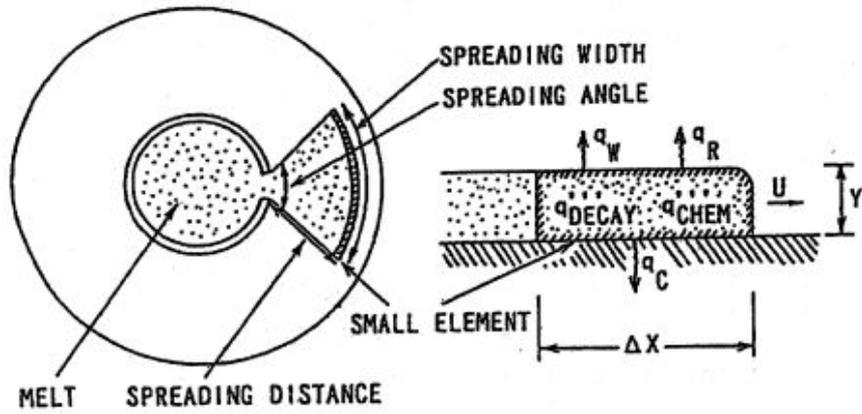
Mark-I 型格納容器のシェルアタックに関して ROAAM 手法による確率論的評価^[17]が行われており、その中で水張り時のデブリの拡がりの評価が行われている。溶融物拡がり挙動解析には、MELTS SPREAD コードが使用されている。溶融物の拡がり挙動には、溶融物落下流量、溶融物成分、溶融物過熱度が主に影響するとされている。

米国 BNL では、溶融物として鉛を使用した小規模な拡がり実験を、ドライ条件とウエット条件で行っている^[18]。溶融物の過熱度と水深が、デブリ拡がり挙動において重要であること、溶融物の拡がりは、水への熱伝達による溶融物の温度挙動と、溶融物の流体力学的挙動により制限されることが示されている。

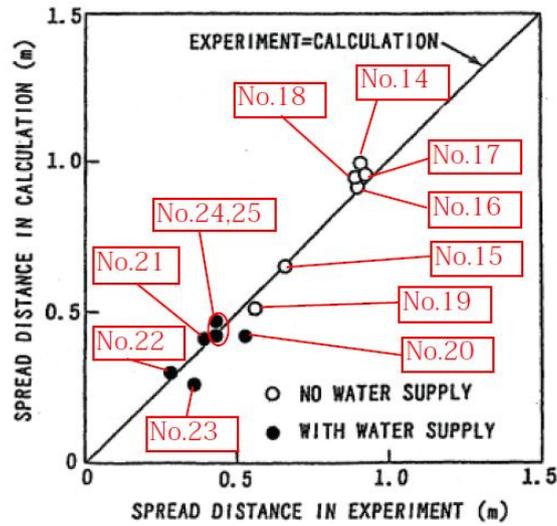
国内 BWR 産業界では、SPREAD 実験^{[19][20]}が実施されている。溶融物として約 2000K に加熱したステンレススチールを用い、溶融物落下流量、水深、溶融物過熱度等を変化させて、格納容器模擬試験体（一次元形状と二次元形状の 2 種類、二次元形状は付図 4-1 を参照）に放出し、溶融物の拡がり挙動に関する基礎的なデータを収集した。実験条件を付表 4-2 に示す。また、溶融物の拡がりを解析する SPREAD コードが開発されている。溶融物が重力で拡がると仮定し、熱源として崩壊熱及び化学反応を考慮し、床コンクリートや上面の水プールへの伝熱を考慮し、質量、運動量及びエネルギーのバランスを解くことにより、溶融物の移動速度と溶融物厚さを求めている。(付図 4-2 参照) このモデルでは、流動限界固相率を超えた時点で流動が停止すると仮定されており、実験データを再現する流動限界固相率として 55%が使用されている。二次元体系に対する実験結果と解析結果の比較を付図 4-3 に示すが、よい一致が示されている。



付図 4-1 溶融物拡がり実験の試験体（二次元形状）^[20]



付図 4-2 SPREAD コードの概念図^[20]



付図 4-3 溶融物拡がり距離の実験値と解析値の比較 [20]

付表 4-2 SPREAD 実験条件 [19]

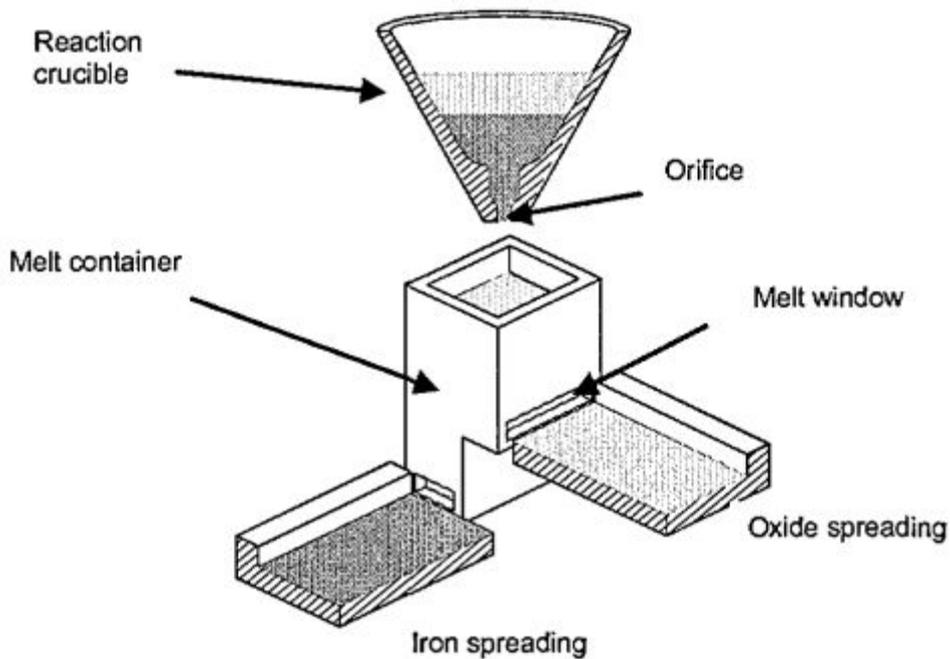
Test No.	Melt Mass (kg)	Super Heat (K)	Slit Width (m)	Floor Material	Nozzle Diam. (mm)	Water Depth (mm)	Water Added Position *
1	95.0	133	0.15	Concrete	70	0	-
2	7.5	77	↑	↑	↑	0	-
3	24.0	149	↑	↑	30	0	-
4	43.0	115	0.05	↑	↑	0	-
5	19.0	110	↑	↑	↑	0	-
6	66.0	107	↑	↑	↑	40	O/C
7	115.0	135	↑	↑	↑	0	-
8	66.0	112	↑	↑	↑	0	-
9	94.2	110	0.025	↑	↑	0	-
10	60.2	86	0.05	MgO	↑	0	-
11	93.4	122	↑	Concrete	↑	40	O/C
12	67.0	115	↑	↑	↑	40	O/C
13	93.1	116	0.025	↑	↑	40	O/C
14	68.1	130	0.05	↑	70	0	-
15	63.6	133	↑	↑	30	0	-
16	116.0	131	↑	↑	↑	0	-
17	106.2	171	↑	↑	↑	0	-
18	108.8	158	↑	↑	↑	0	-
19	61.9	108	0.025	↑	↑	0	-
20	64.0	91	0.05	↑	↑	10	O/C
21	69.1	107	↑	↑	↑	40	O/C
22	65.0	90	↑	↑	↑	70	O/C
23	60.0	94	0.025	↑	↑	40	O/C
24	65.0	125	0.05	↑	↑	40	O/C, I/C
25	63.8	94	↑	↑	↑	Spray	O/C

* O/C: Outside of Cylindrical Region I/C: Inside of Cylindrical Region

(2) EPR コアキャッチャの溶融物拡がりに関わる実験^{[23][29][30][36]}

CEA/DRN/DTP で行われた CORINE 実験^[36]では、低融点物質（グリセロール他）を模擬物質として使用して、水中での拡がり挙動を調べる実験が実施され、拡がり先端の移動速度や底部に形成されるクラストの影響が調べられた。

独カールスルーエ研究センター（FZK）で実施された KATS 実験^{[23][29][30]}では、溶融物としてテルミット（ Al_2O_3 約 150kg, Fe 約 150kg）が使用され、溶融物の放出速度や温度、拡がり形状（1D, 2D）、床の材質（コンクリート、セラミック、コーティング）、水の有無をパラメータに溶融物の拡がり実験が行われている。実験装置を付図 4-4 及び付図 4-5 に示す。 Al_2O_3 と Fe では密度が異なり成層化するため、溶融物の出口を 2 箇所設け、最初に Al_2O_3 が放出し、最後に Fe を放出することにより酸化物溶融物の拡がり と金属溶融物の拡がりを分けて実験が可能となっている。実験条件を付表 4-3 に示す。KATS-10 と KATS-11 の実験条件はほぼ同様であるが、KATS-10 の方は 1 mm の水張りをし、KATS-11 の方はドライ条件となっている。両者の拡がり結果を付図 4-6 に示すが、両ケースのように溶融物の放出速度が比較的高い場合は、冷却材の有無によらず同様な拡がり挙動になる結果となっている。



付図 4-4 KATS 実験装置の概要図 ^[29]



(1D)

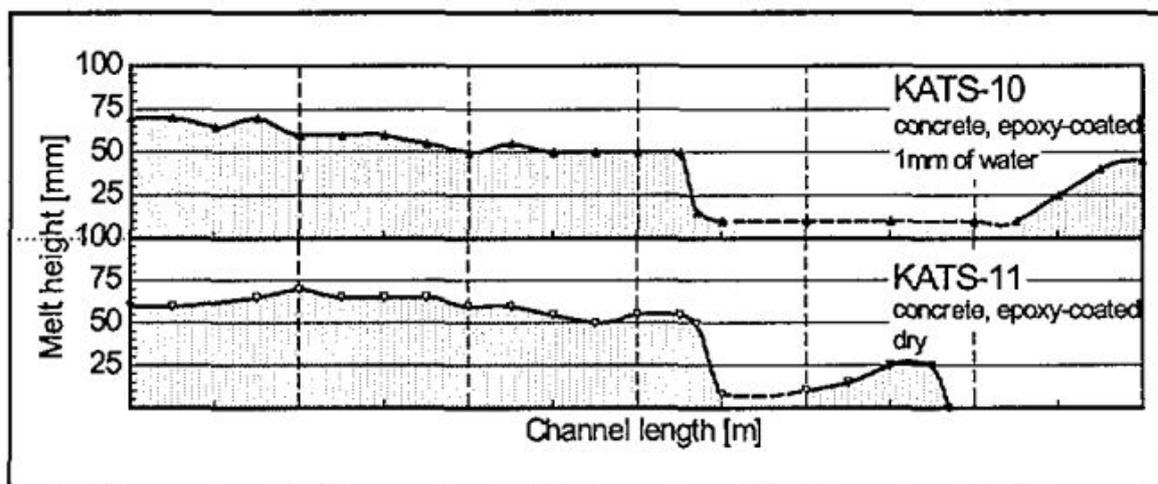


(2D)

付図 4-5 KATS 実験の 1D と 2D の拡がり形状の写真^[30]付表 4-3 KATS 実験条件と拡がり距離（酸化物溶融物，1D 拡がり）^[29]

Test #	Substratum	Mass in channel (kg)	Temperature Melt (°C)	Pouring rate (l/s) / Length in Time(s)	Spreading length (m)
KATS-12	Ceramics*)	186	2027	12.7 → 0 l/s in 10 s	11.7
KATS-14	Ceramics*)	176	1967	2 → 1.2 l/s in 37 s	7.2
KATS-10	Concrete 1mm Water (Epoxy)	179	2037	12.4 → 0 l/s in 10s	>12 first front 6.5 m main front
KATS-11	Concrete Dry (Epoxy)	183	2062	12.7 → 0 l/s in 10s	9.5 m first Front 6.8 m main front
KATS-13	Concrete Dry	185	2052	12.7 → 0 l/s in 10s	7.5

*) Cordierite (Al₂O₃ 37 wt%, SiO₂ 52 wt%, MgO 6,5 wt%)

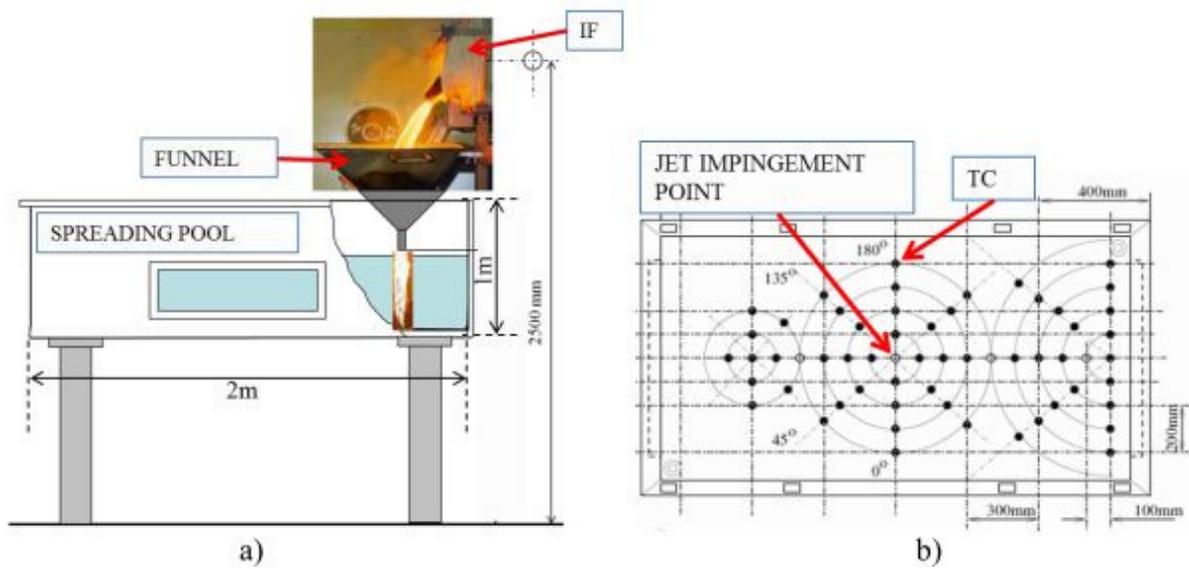


付図 4-6 KATS 実験の水の有無の影響（酸化物溶融物，1D 拡がり）^[29]

(3) KTH の溶融物拡がり研究^{[21][27]}

スウェーデン KTH では、溶融物拡がりの小規模実験として、S3E 実験^[27]が行われている。種々の溶融物と冷却材の組合せ（例 ウッズメタル-水、塩（ $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ ）-パラフィン）で溶融物温度、溶融物流量等をパラメータに、溶融物の拡がり挙動に関するデータが取られている。溶融物が冷却される過程において、低密度の多孔質の層が形成される結果が得られており、溶融物の流れにより、この多孔質層が持ち上げられ、流量（慣性力）によって決定される距離まで拡がる挙動を示した。

また、水中での溶融物拡がり挙動を調べる PULiMS 実験^[21]が実施されている。この実験では、浅い水プール（水深 20cm）へ溶融した $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-W}_2\text{O}_6$ 合金を流入させ、その拡がり挙動が観察された。実験装置を付図 4-7 に示し、実験条件を付表 4-4 に示す。水中へ流入した溶融物の拡がりの様子を付図 4-8 に示す。また、固化したデブリ層の性状を付図 4-9 に示す。固化したデブリ層は 3 層を形成し、デブリ層下面とコンクリートは密着せずギャップが存在しており、水又は蒸気が存在していた可能性がある。3 層の最下層は薄い 1.5-2 mm のケーキ（クラスト）層で空隙はなく、中間層は割れ目や細長い孔が含まれている。最上部は不規則な構造で高多孔性である。



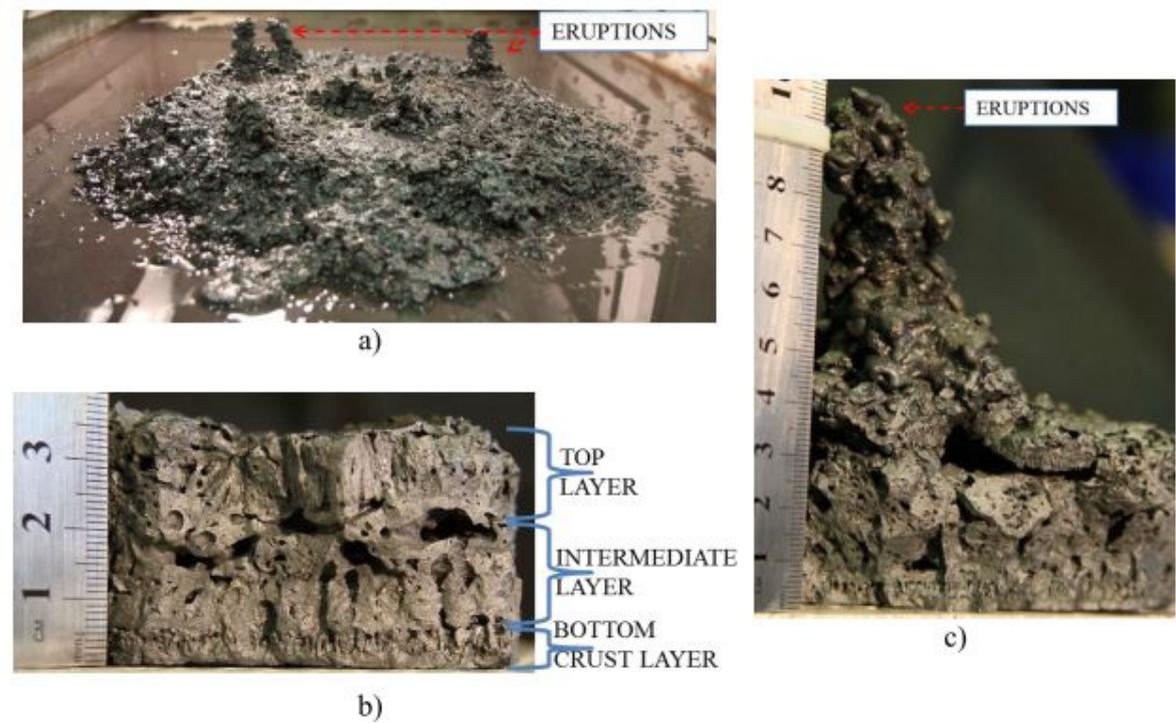
付図 4-7 PULiMS 実験装置の概要図^[21]

付表 4-4 PULiMS 実験条件^[21]

Parameter	PULiMS tests				
	E1	E2	E3	E4	E5
Melt material	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	B ₂ O ₃ -CaO	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	ZrO ₂ -WO ₃
Melt mass composition, %	42.64-57.36 eutectic	30-70 non-eutectic	42.64-57.36 eutectic	42.64-57.36 eutectic	15.74-84.26 eutectic
Melt jet diameter, mm	20	20	20	20	20
Jet free fall height, mm	400	400	400	400	400
Initial melt volume, L	3	3	10	6	6
Initial melt mass, kg	23.4	7.5	78.1	46.9	41.2
T _{sol} , °C	870	1027	870	870	1231
T _{liq} , °C	870	1027	870	870	1231
Melt temperature in the funnel upon pouring, °C	1006	1350	1076	940	1531
Water pool depth, mm	200	200	200	200	200
Water temperature, °C	79	78	75	77	72



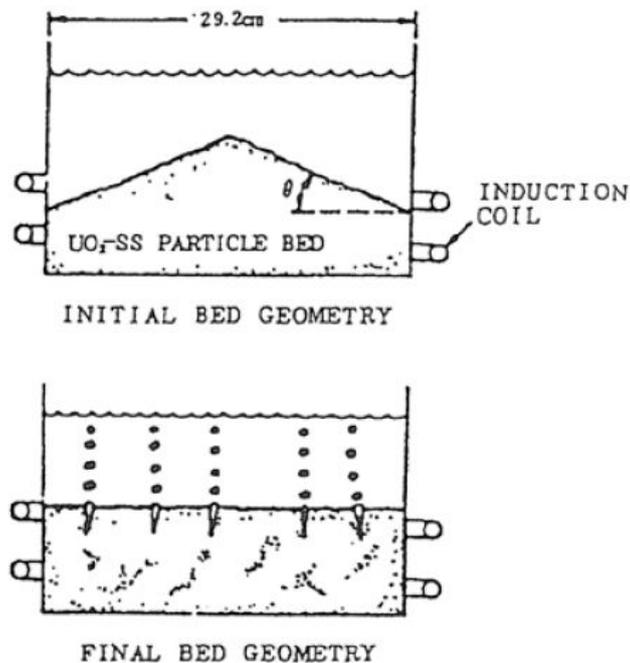
付図 4-8 PULiMS 実験 E4 ケースの溶融物拡がり挙動のスナップ写真 [21]



付図 4-9 PULiMS-E4 実験の固化デブリの性状写真 [21]

(4) 粒子状ベッドの拡がり^[22]

ANL では、水プール中に不均質に堆積させたデブリベッドが、内部の沸騰により均一化する様子を確認するため、水プール中に UO_2 、SUS、Cu の 0.2～1 mm 程度の粒子ベッドを非均一の厚さに堆積させ、誘導加熱により崩壊熱発生を模擬させた実験^[22]を行っている。付図 4-10 に粒子ベッド厚さの均一化の概念図を示す。非均一の厚さに堆積した粒子ベッドは、誘導加熱により粒子ベッド内に沸騰が生じ、粒子が吹き上げられて再堆積する過程で厚さが均一化し、均一化に要した時間は 2～3 分程度であると報告されている。



付図 4-10 セルフレベリング実験におけるデブリベッドの均一化の概念図^[22]

(5) 溶融物の拡がり解析^{[20][27][28][39][40]}

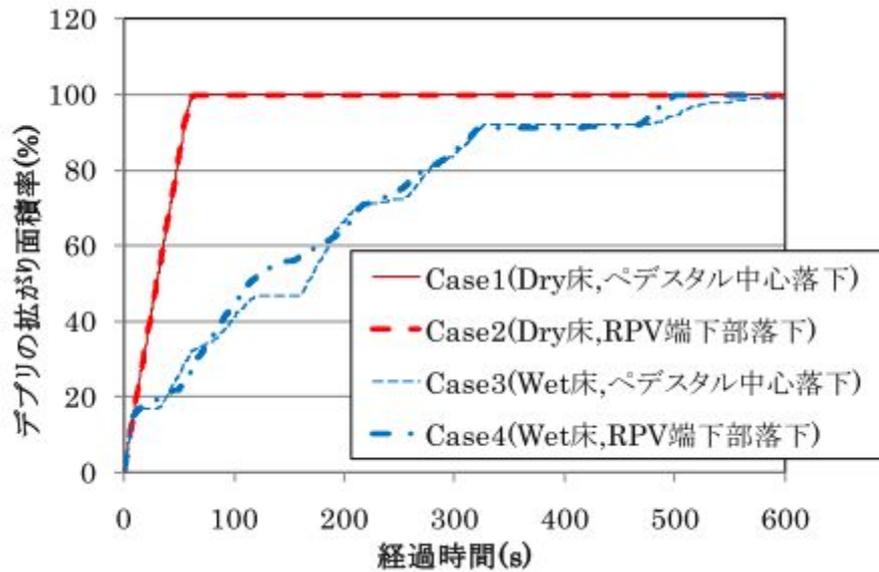
溶融物の拡がり挙動の解析のために、種々の解析コードが提案されている。主要なものを付表 4-5 に示す。これらの解析コードは、実験データを元に検証が行われている。また、実験と実機条件とを関連づけるスケーリング則の提案も行われている。^{[20][27][28]}

付表 4-5 溶融物拡がり挙動の主な解析コード^[27]

Code	Country	Model characteristics
CORFLOW *	Germany	2D - mechanistic
CROCO	France	Simplified (ISPN)
LAVA *	Japan	2D - Bingham fluid
MELTSREAD *	USA	1D - complex physics and chemistry
MECO	Germany	Mechanistic (Ruhr Univ.)
RASPLAV / SPREAD	Russia	2D - hydrodynamic
SPREAD	Japan	simplified
THEMA *	France	phenomenological (CEA/DRN)
Footnote	* Code receiving International recognition	

a) 三次元溶融物拡がり解析例

溶融物の拡がり挙動を三次元で評価した例もある。付図 4-11 に示すとおり過酷事故解析コード SAMPSON のデブリ拡がりモジュール (DSA)^[39] を使用して、ABWR の格納容器ペDESTAL 上におけるデブリ拡がり評価を実施している^[40]。床面に 200mm の水位がある条件 (Wet 床条件) で、制御棒駆動機構ハウジング 1 本の破損を想定して、全炉心相当の溶融炉心がペDESTAL (半径約 5.3m) へ落下する場合の溶融炉心の床上の拡がり面積を評価している。床面に水が存在する場合でも、溶融炉心は落下位置に依らずペDESTAL のほぼ全面に拡がり、最終的な堆積高さは 400~500mm 程度となる結果を得ている。



付図 4-11 ABWRを対象にした三次元溶融炉心拡がり評価結果例 (SAMPSONコード) [40]

b) スケーリング則を用いた溶融物拡がり相関式

(3)に示した PULiMS 実験の結果を元に、水中での溶融物の拡がり距離を求めるスケーリング則が提案されている [28]。これは、障害物のない水平な床面に落下した溶融物の拡がり停止後の平均厚さや拡がり距離を求める相関式である。一般的に、溶融物の拡がり挙動は、溶融物の堆積高さに対応した重力による拡がり、と、溶融物冷却に伴う粘性増加による流動性低下の競合する二つのプロセスにより支配される。(付図 4-12 参照)

スケーリング則では、競合する二つのプロセスの時間スケールとして、流体力学的拡がり時間 τ_{conv} を、拡がり停止後の平均厚さ δ_v に達するまでの時間と定義し、固化時間 τ_{solid} を、溶融物が冷却され固化するまでの時間と定義し、これらの時間の比を、拡がりの無次元時間スケール $T (= \tau_{conv}/\tau_{solid})$ と定義している。また、拡がり停止後の平均厚さ δ_v と表面張力とのバランスで決まる厚さ δ_{cap} の比を、無次元長さスケール $L (= \delta_v/\delta_{cap})$ と定義している。

障害物のない水平な床を想定し、落下した溶融物が軸対称に拡がると仮定すると、無次元長さスケール L は、無次元時間スケール T を用いて(1)式で表されるとしている。添え字の i は 慣性力支配流れの値を示し、 v は粘性力支配流れの値を示している。

$$L_v = C_v \cdot T^{1/2} \cdot N^{1/2} \quad (1)$$

また、拡がり距離 $r(t)$ と拡がり時間 t の関係は、以下のように表されるとしている。

$$\text{慣性力支配流れの場合} \quad r_i(t) = \beta_i \cdot t^{3/4} \quad (2)$$

$$\text{粘性力支配流れの場合} \quad r_v(t) = \beta_v \cdot t^{1/2} \quad (3)$$

ここで,

δ_{cap} : 表面張力とバランスする厚さ ($= 2\sqrt{\sigma/\rho_m g'}$)

C_v : 比例定数。PULiMS 実験より, $C_v=1.30$ が得られている。

N : 粘性因子 ($= \frac{\tau_{conv,v} \cdot \delta_v}{\tau_{conv,i} \cdot \delta_{cap}}$)

β : 拡がり係数 $\beta_i = 0.84(g' G)^{1/4}$, $\beta_v = 0.67\left(\frac{g' G^3}{v}\right)^{1/8}$

τ_{solid} : デブリ固化特性時間(s) ($= \delta_{cap} \cdot \rho_m \cdot \frac{C_{p,m} \cdot \Delta T_{sup} + \eta \cdot H_f}{q''_{up} + q''_{dn} - q_v \cdot \delta_{cap}}$)

ΔT_{sup} : デブリ過熱度(K) , $C_{p,m}$: デブリ比熱(J/kg/K)

q''_{up} : デブリ上面の熱流束(放射及び対流熱伝達) (W/m²)

q''_{dn} : デブリ下面の熱流束(対流熱伝達) (W/m²)

q_v : 単位体積当たりの崩壊熱(W/m³)

H_f : デブリの溶融潜熱(J/kg) , η : 流動停止までの有効潜熱割合(-)

σ : デブリ表面張力(N/m) , ρ_m : デブリ密度(kg/m³) , ρ_w : 水の密度(kg/m³)

g : 重力加速度(m/s²) , v : デブリの動粘性係数(m²/s)

g' : 水中における重力加速度の補正 ($= g(\rho_m - \rho_w)/\rho_m$) (m/s²)

V_{tot} : デブリ体積(m³) ($= \frac{m(1-f_m)}{\rho_m}$) , m : デブリ質量(kg)

G : エントレインされなかった連続体デブリの体積流量(m³/s) ($= \frac{V_{tot}}{t_{rel}}$)

t_{rel} : 原子炉圧力容器からの溶融炉心放出時間(s)

f_m : デブリ落下時のエントレイン割合(-)

ρ'_m : 有効デブリ密度(kg/m³) ($= \rho_m(1 - \varepsilon_m)$) , ε_m : デブリボイド分率(-)

(1)式は、拡がり停止時のデブリ平均厚さが、無次元時間スケール(=溶融物の拡がり時間/固化時間)の平方根に比例することを意味しており、溶融物の拡がりが遅いほど、固化するまでの時間が短いほど、無次元時間は大きくなり、結果として、拡がり停止時の平均厚さが大きく、拡がり面積は小さくなる傾向を示している。逆に、溶融物の拡がり早いほど、固化までの時間が長いほど、無次元時間は小さくなり、平均厚さが薄くなり、拡がり距離は大きくなる。このスケーリング則について、PULiMS 実験との比較が行われており、付図 4-13 に、実験結果とスケーリング則による評価との比較を示すが、概ね一致している結果が得られている。

上記のスケーリング則の式より、 $\tau_{conv,v}$ 及び N は次式のように得られる。

$$\tau_{conv,v} = \left(\frac{V_{tot} \cdot \tau_{solid}^{1/2}}{\pi \cdot \beta_v^2 \cdot \delta_{cap} \cdot C_v \cdot N^{1/2}} \right)^{2/3} \quad (4)$$

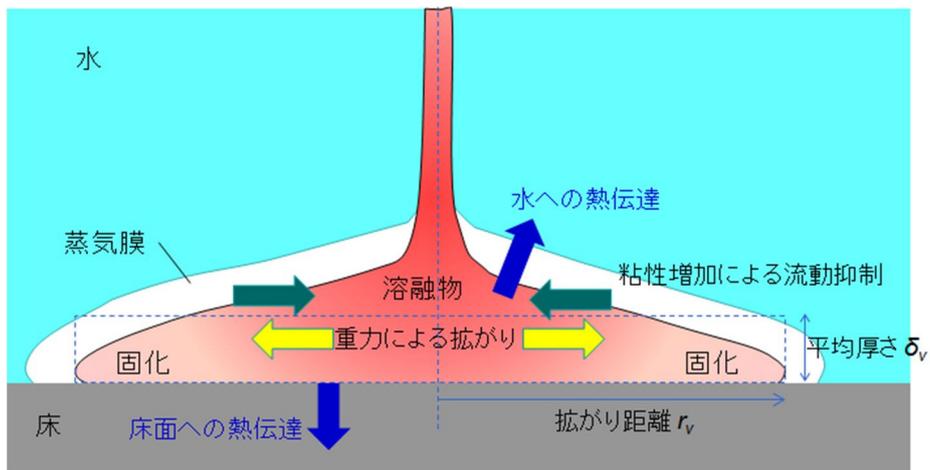
$$N = \left(\frac{v_{tot}}{\pi \delta_{cap}} \right)^{1/3} \frac{\beta_i^{4/3}}{\beta_v^2} \quad (5)$$

(4)式及び(5)式により $\tau_{conv,v}$ が求まり、次式で拡がり距離が得られる。

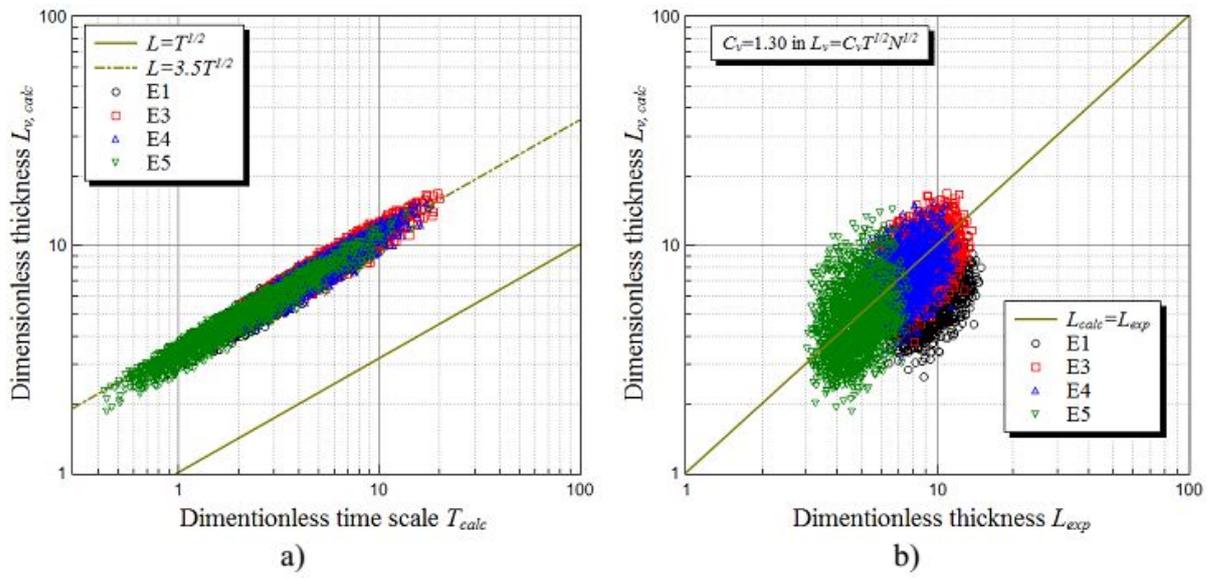
$$r_v(\tau_{conv,v}) = \beta_v \cdot \tau_{conv,v}^{1/2} \quad (6)$$

BWRの溶融物条件（付表 4-6 参照）を用いて、上記のPULiMS スケーリング則を適用し、(6)式により溶融物の拡がり半径を評価した。付図 4-14 に評価結果を示す。制御棒駆動機構ハウジング破損時の溶融物落下質量速度である約 8500kg/s の場合、約 18m の拡がり半径を得る。溶融物質量を減らして落下質量速度を減らすと、拡がり距離は減少するが、BWR条件の落下質量速度の1/10にしても、まだ、ペDESTAL半径（Mark-I 改の場合約 3.2m）を超えた拡がり半径を得る。

したがって、PULiMS スケーリング則を適用しても、BWRの溶融物条件では、溶融物はペDESTAL床全面に拡がる結果となる。

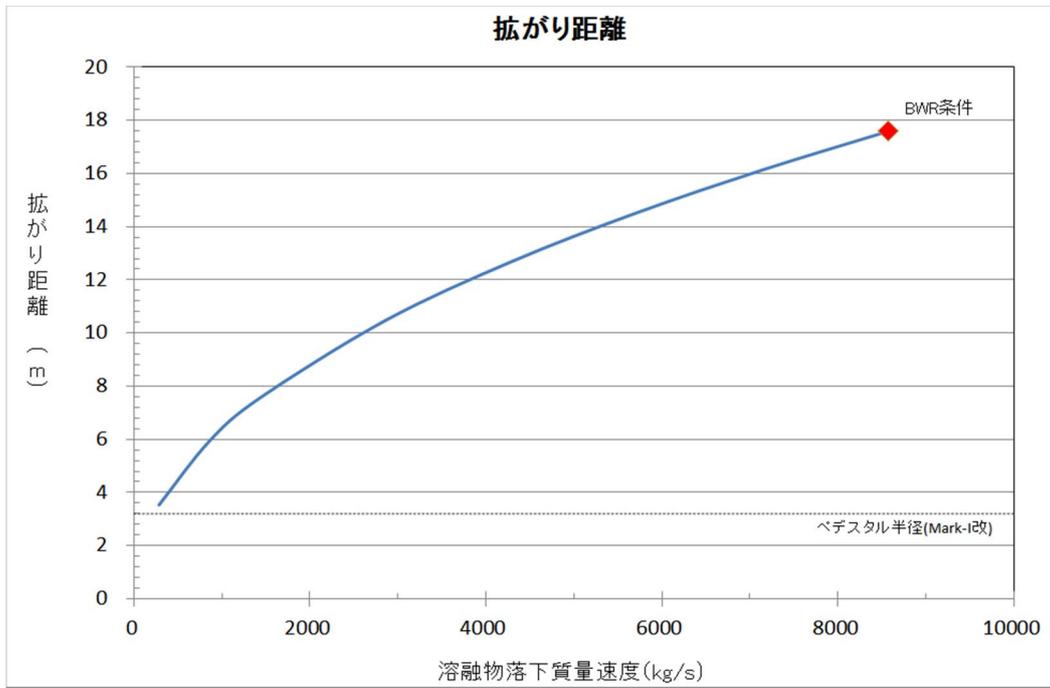
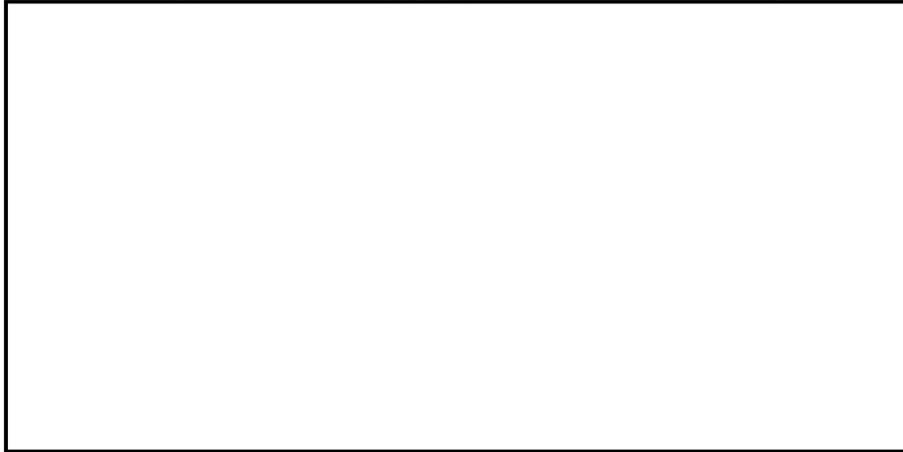


付図 4-12 溶融炉心の拡がりに関わる熱伝達及び流体力学的な力を示す模式図



付図 4-13 PULiMS 実験を対象にしたスケーリング則による評価と実験結果の比較^[28]

付表 4-6 BWR 溶融物条件 (BWR 5 Mark-I 改)

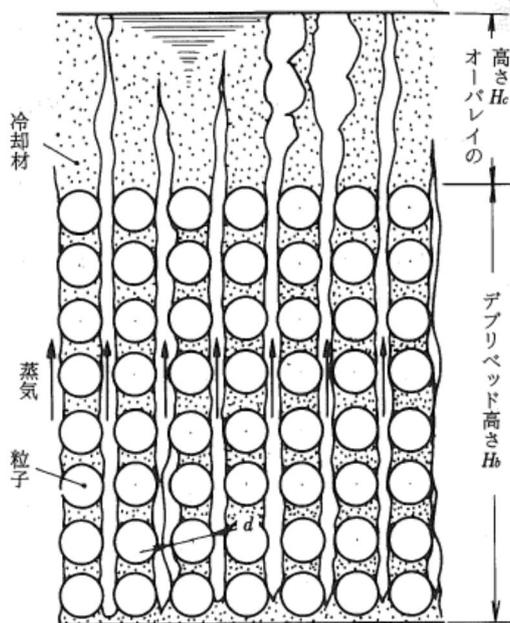


付図 4-14 溶融物落下質量速度と拡がり距離の関係 (PULiMS スケーリング則適用)

付録5 粒子状ベッドの冷却性実験と解析モデル

粒子状ベッドの冷却性については、高速増殖炉の炉心損傷事故の評価において重要な評価となることから、従来から多くの実験的及び解析的研究が行われてきている^[32]。また、TMI-2事故以降は、軽水炉を対象とした研究も進められている。

デブリベッド冷却に関する研究の主要な焦点の一つは、デブリベッドの冷却限界が、崩壊熱を上回るかどうかであり、判断基準のパラメータはデブリベッドのドライアウト熱流束と考えられている。発熱する粒子状ベッドの内を流下する冷却水と上昇する蒸気の対向二相流がデブリベッド内で形成される。粒子状デブリベッドの流動状態の模式図を付図5-1に示す。崩壊熱が高いと、局所的にデブリベッド内でドライアウトが生じ、デブリベッドの温度が急激に高くなる。この時の熱流束がドライアウト熱流束となる。粒子状デブリベッドのドライアウト熱流束は、種々の実験が行われ、種々の相関式が提案されている。その中でもLipinski 0-Dモデル^[24]（次頁参照）は、小さい粒径から大きい粒径まで適用可能とされており、広く使われている。MAAPコード内でも压力容器下部プレナムの粒子状ベッドの冷却の評価に使用されている。Lipinski 0-Dモデルでは、ドライアウト熱流束は、主に粒子径、ポロシティ、堆積高さ、圧力に依存する。



付図 5-1 粒子状デブリベッドの流動状態の模式図^[32]

c. Lipinskiの0-Dモデル⁽¹¹⁾

Lipinskiは多孔質の対向二相流の気液各相で、層流及び乱流に適用できる運動量の式を、連続の式、エネルギーの式と共に連立して解いた。

連続の式

$$\rho_v U_v = \rho_l U_l \quad \dots(8.14)$$

運動量の式 (気相)

$$\rho_v U_v^2 / \eta \eta_v + \mu_v U_v / \kappa \kappa_v + \rho_v g = \Delta P_v / H_b \quad \dots(8.15)$$

運動量の式 (液相)

$$-\rho_l U_l^2 / \eta \eta_l - \mu_l U_l / \kappa \kappa_l + \rho_l g = \Delta P_l / H_b \quad \dots(8.16)$$

エネルギー式

$$\rho_v U_v \Delta h_v = \dot{Q} H_b \quad \dots(8.17)$$

圧力の釣合⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾

$$\Delta P_v - \Delta P_l = \sigma (\epsilon / 5 \kappa)^{1/2} \quad \dots(8.18)$$

ここで、

U : 見掛け流速

κ : 層流での浸透率

η : 乱流での浸透率

$\kappa_v, \kappa_l, \eta_v, \eta_l$: 各々層流及び乱流での気液の比浸透率 (無次元)

でデブリベッド内の平均液体存在割合 s の関数で、以下のように表わしている⁽¹⁵⁾。

$$\kappa = (d^2 / 180) \epsilon^3 / (1 - \epsilon)^2$$

$$\eta = (d / 1.75) \epsilon^3 / (1 - \epsilon)$$

$$\kappa_v = 1 - 1.11s, \quad \kappa_l = s^3$$

$$\eta_v = (1 - s)^3, \quad \eta_l = s^3$$

上述の関係を用いると、式(8.14)~式(8.18)からデブリベッド上面での熱流束 q ($=\dot{Q}H_b$) は下式で与えられる。

$$q = \rho_v \Delta h_v u_1 \{ \{ 1 + (u_2 / u_1)^2 \}^{1/2} - 1 \} \quad \dots(8.19)$$

$$u_1 = \frac{90(1-\epsilon)}{1.75d} \left\{ \frac{\mu_v}{\rho_v(1-1.11s)} + \frac{\mu_l}{\rho_l s^3} \right\} /$$

$$\left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\}$$

$$u_2 = \left[\frac{d\epsilon^3(\rho_l - \rho_g)g}{1.75(1-\epsilon)} \left\{ 1 + \frac{6\sigma(1-\epsilon)}{\epsilon d(\rho_l - \rho_g)gH_b} \right\} / \right.$$

$$\left. \left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\} \right]^{1/2}$$

ドライアウト熱流束は、式(8.19)が s ($0 \leq s \leq 1$) に関して極大値をとる条件として求まる。

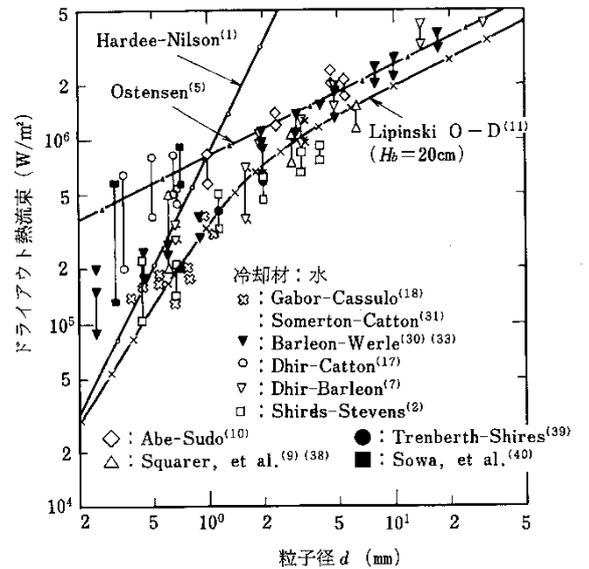


図8.6 冷却材が水の場合の理論式・半実験式と実験結果との比較

参考文献:

- [1] (財)原子力発電技術機構 (NUPEC), 「重要構造物安全評価 (原子炉格納容器信頼性実証事業) に関する 総括報告書」 (2003)
- [2] EPRI, Technical Foundation of Reactor Safety, Revision 1, Knowledge Base for Resolving Severe Accident Issues, 1022186 (2010).
- [3] B. R. Sehgal, et al., “ACE Project Phases C & D : ACE/MCCI and MACE Tests,” Proceedings of the U.S. Nuclear Regulatory Commission, 19th Water Reactor Safety Information Meeting, NUREG/CP-0119, Vol.2 (1991).
- [4] E. R. Copus, et al., “Sustained Uranium-Concrete Interactions (SURC)”, Reactor Safety Research Semiannual Report, NUREG/CR-4805 (1986).
- [5] G. A. Greene, R. A. Bari, ” ISP-24 International Standard Problem No 24, SURC-4 Experiment On Core-Concrete Interactions, Final Workshop Summary Report,” CSNI Report No 155, Volume 2 (1989).
- [6] H. Alsmeyer, et al., ” BETA experiments on Zirconium Oxidation and Aerosol Release during Melt-Concrete interaction,” Proceedings of the Second OECD(NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions, NEA/CSNI/R(92)10, Karlsruhe, Germany (1992).
- [7] R. E. Blose, et al., “SWISS: Sustained Heated Metallic Melt/Concrete Interactions With Overlying Water Pools,” NUREG/CR-4727 (1987).
- [8] R. E. Blose, et al., “Core-Concrete Interactions with Overlying Water Pools - The WETCOR-1 Test,” NUREG/CR-5907 (1993).
- [9] M. T. Farmer, et al., ”Status of Large Scale MACE Core Coolability Experiments,” OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany (1999).
- [10] M. T. Farmer, et al., ” Corium Coolability under Ex-Vessel Accident Conditions for LWRs,” Nuc. Eng. and Technol., 41, 5 (2009).
- [11] H. Nagasaka, et al., “COTELS Project (3): Ex-vessel Debris Cooling Tests,” OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany (1999).
- [12] M. T. Farmer, et al., “OECD MCCI Project Final Report,” OECD/MCCI-2005-TR06 (2006).
- [13] M. T. Farmer, et al., “OECD MCCI-2 Project Final Report,” OECD/MCCI-2010-TR07 (2010).
- [14] D. Magallon, ” Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments,” Nucl. Eng. Design, 236 1998-2009 (2006).
- [15] M. Kato, H. Nagasaka, et al., “COTELS Fuel Coolant Interaction Tests under Ex-Vessel Conditions,” JAERI-Conf 2000-015 (2000).

- [16] A. Karbojian, et al., "A scoping study of debris bed formation in the DEFOR test facility," Nucl. Eng. Design 239 1653-1659, (2009).
- [17] T.G.Theofanous, et al., "The Probability of Liner Failure in a Mark-I Containment," NUREG/CR-5423, (1991).
- [18] G.A.Greene, et al., "Experimental Studies on Melt Spreading, Bubbling Heat Transfer and Coolant Layer Boiling," Proceedings of 16th Water Reactor Safety Information Meeting, NUREG/CP-0096, pp.341-358 (1988).
- [19] H.Suzuki, et al., "Fundamental Experiment and Analysis for Melt Spreading on Concrete Floor," Proceedings of 2nd ASME/JSME Nuclear Engineering Conference, Vol. 1, pp. 403-407 (1993).
- [20] (社) 日本原子力学会, シビアアクシデント熱流動現象評価 (2001)
- [21] A.Konovalenko, et al., "Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-Coolant Interaction," Proceedings of NUTHOS-9, N9P0303, Taiwan (2012).
- [22] J. D. Gabor, L. Baker, Jr., and J. C. Cassulo, (ANL), "Studies on Heat Removal and Bed Leveling of Induction-heated Materials Simulating Fuel Debris," SAND76-9008 (1976).
- [23] Proceedings of the Second OECD(NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions, NEA/CSNI/R(92)10, Karlsruhe, Germany (1992).
- [24] R.J.Lipinski, "A Model for Boiling and Dryout in Particle Beds," " NUREG/CR-2646, SAND82-0765 (1982).
- [25] F.P.Ricou, D.B.Spalding, "Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets," Journal of Fluid Mechanics, Vol.11, pp.21-32 (1961).
- [26] M.Saito, K.Sato, S.Imahori, "Experimental Study on Penetration Behaviors of Water Jet into Freon-11 and Liquid Nitrogen," ANS Proc. of National Heat Transfer Conference, Houston, Texas, USA, (1988).
- [27] T.N.Dinh, et al., "Core Melt Spreading on a Reactor Containment Floor," Progress in Nuclear Energy, Vol. 36, No. 4, pp.405-468 (2000).
- [28] A.Konovalenko, P.Kudinov, "Development of Scaling Approach for Prediction of Terminal Spread Thickness of Melt Poured into a Pool of Water," Proceedings of NUTHOS-9, N9P0302, Taiwan (2012).
- [29] B.Eppinger, et al., "KATS Experiments to Simulate Corium Spreading in the EPR Core Catcher Concept," FzK, Karlsruhe, Germany.
- [30] B.Eppinger, et al., "Simulationsexperimente zum Ausbreitungsverhalten von Kernschmelzen: KATS-8 bis KATS-17," FZKA 6589 (2001).
- [31] I.Lindholm, "A Review of Dryout Heat Fluxes and Coolability of Particle Beds," SKI Report 02:17 (2002).

- [32] 日本機械学会編,「沸騰熱伝達と冷却: 第8章 デブリベッドの冷却」, 日本工業出版, 平成元年
- [33] (財)原子力安全研究協会,「シビアアクシデント対策評価のための格納容器イベントツリーに関する検討」, 平成13年7月
付録7-4 熔融炉心の粒子化割合, 付録7-5 粒子状物質ベッドの冷却性
付録7-6 粒子状物質の粒子径
- [34] EPRI/FAI, MAAP4 Computer Code Manual (2007).
- [35] Q.Zhou, et al.,” Benchmark of MCCI Model in MAAP5.02 against OECD CCI Experiment Series,” Proceedings of ICAPP 2014, ICAPP-14352, Charlotte, USA, (2014).
- [36] J.M.Veteau and R.Wittmaack., ”CORINE Experiments and Theoretical Modeling,” Proceedings of FISA-95, Luxemburg EUR 16896 EN, pp.271-285 (1996).
- [37] R.K.Cole, et al.,” CORCON-Mod2: A Computer Program for Analysis of Molten Core-Concrete Interactions,” NUREG/CR-3920, SAND84-1246, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (1984).
- [38] 独立行政法人原子力安全基盤機構,「平成17年度 原子炉施設のアクシデントマネージメントに係る知識ベースの整備に関する報告書 =環境への影響緩和(デブリ冷却) =」, 06 基シ報-0003, 平成18年7月
- [39] M.Hidaka, et al.,” Verification for Flow Analysis Capability in the Model of Three-Dimensional Natural Convection with Simultaneous Spreading, Melting and Solidification for the Debris Coolability Analysis Module in the Severe Accident Analysis Code ‘SAMPSON’ , (II),” Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 39, No. 5, p. 520-530 (2002).
- [40] 中島 他, SAMPSON コードによる ABWR 格納容器ペDESTAL上の炉心デブリの3次元拡がり評価, 日本原子力学会「2013年秋の大会」, H12, 2013年9月
- [41] M.T.Farmer, et al., “OECD MCCI Project 2-D Core Concrete Interaction (CCI) Tests: Final Report,” OECD/MCCI-2005-TR05 (2006).

第6部 A P E X

目次

－ A P E X －

1. はじめに	6-4
2. 重要現象の特定	6-5
2.1 事故シーケンスと評価指標	6-5
2.2 ランクの定義	6-6
2.3 物理現象に対するランク付け	6-7
3. 解析モデルについて	6-16
3.1 コード概要	6-16
3.2 重要現象に対する解析モデル	6-18
3.3 解析モデル	6-19
3.4 入出力	6-45
4. 妥当性確認	6-49
4.1 重要現象に対する妥当性確認方法.....	6-49
4.2 SPERT-III E 炉心実験との比較	6-54
4.3 実効共鳴積分測定に関わる Hellstrand の実験式との比較...	6-59
4.4 MISTRAL 臨界試験との比較	6-63
4.5 BWR 実機での制御棒価値測定試験との比較	6-68
4.6 実機解析への適用性	6-72

5. 有効性評価への適用性	6-73
5.1 不確かさの取り扱いについて（評価指標の視点）	6-73
5.2 不確かさの取り扱いについて（運転操作の観点）	6-83
6. 参考文献	6-86
添付1 入力項目リスト	6-87
添付2 二次元（RZ）モデルの適用性	6-88
添付3 検出器モデル	6-91
添付4 二次元（RZ）体系への縮約に伴う不確かさの影響評価	6-103

1. はじめに

本資料は、運転停止中原子炉における燃料損傷防止対策に関する有効性評価（以下「有効性評価」という。）に適用するコードのうち、APEXコードについて、以下に関してまとめたものである。なお、ここでいうAPEXコードは、炉心動特性解析を行うAPEX Ver.1（以下「APEX」という。）と、単チャンネル熱水力解析を行うSCAT（RIA用）Ver.2（以下「SCAT」という。）からなる。以下ではAPEX及びSCATについて示す。

- ・有効性評価において重要となる現象の特定
- ・APEX－SCAT*コードの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

*APEX及びSCATの両コードをまとめて、APEX－SCATと本説明資料内では記載している。

2. 重要現象の特定

2.1 事故シーケンスと評価指標

APEX-SCATコードが適用される、運転停止中原子炉における「反応度の誤投入」事象に対する燃料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。

(1) 反応度の誤投入

本シナリオは、原子炉が運転停止中に、制御棒1本が全引抜されている状態から、他の1本の制御棒が操作量の上限を超える誤った操作によって引き抜かれ、臨界超過に至る事象を想定する。事象発生後、制御棒引き抜きに伴い出力が上昇するが、起動領域モニタあるいは中間領域モニタによる状態監視を行うことで、出力の過度な上昇を防止する。また、更に中性子束が上昇しスクラム設定点に至った場合には原子炉がスクラムすることにより炉心は未臨界となる。

本事象では反応度投入事象に伴う急激な出力上昇の可能性があるため、燃料エンタルピが評価指標になる。なお、有効性評価解析においては、燃料破損の判定を、燃料エンタルピの最大値が「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針」（以下「反応度投入事象評価指針」という。）に示された燃料の許容設計限界を超えているか否か、及び、「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象における燃焼の進んだ燃料の取扱いについて」に示されたペレット-被覆管機械的相互作用によるピーク出力部燃料エンタルピの増分における破損しきい値を超えているか否かをもって確認する。

なお、ABWRでは起動領域モニタによるペリオドトリップ機能

と、改良型制御棒駆動機構（FMC RD）の遅い制御棒引き抜き速度により引抜制御棒投入反応度が従来型BWRより小さいことから、燃料エンタルピの評価は実施せず、投入反応度が1ドルに至らないことをもって、燃料健全性に影響がないことを確認する。

本事象は、局所的な出力上昇事象であり、原子炉の水位に有意な変動は生じないことから、燃料エンタルピが破損しきい値を超えていないことを確認することをもって、以下の有効性評価項目を満足することを確認する。

- a. 燃料有効長頂部が冠水していること。
- b. 放射線の遮蔽が維持される水位を確保すること。
- c. 未臨界を確保すること（ただし、通常の運転操作における臨界、又は燃料の健全性に影響を与えない一時的かつ僅かな出力上昇を伴う臨界は除く）。

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APEX-SCAT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 2.2-1 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 2.2-1 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

燃料エンタルピを評価指標とした物理現象とランクの関係を表 2.3-1 に示し、以下に説明する。表 2.2-1 の定義に従い、物理現象に対してランク付けを行い、「H」及び「M」に分類された物理現象を重要現象として抽出した。

ランク付けに当たっては、燃料エンタルピは核分裂出力、反応度フィードバック効果、制御棒反応度効果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。

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)]

制御棒引き抜きに伴い炉心に正の反応度が印加されることにより、核分裂出力が増加する。燃料エンタルピは発生熱量の蓄積量として定義されるため、核分裂出力は重要な物理現象であり、重要度は高いと考えられる。

(2) 出力分布変化[炉心(核)]

炉心の出力分布変化は、制御棒引き抜きに伴う中性子束分布変化により支配され、燃料エンタルピの分布に影響を与える。また、出力分布変化は動特性方程式で重要なフィードバック因子となるドップラ反応度にも影響を与え、中性子束レベルにも影響を与える。したがって、出力分布変化は、直接的・間接的に、燃料エンタルピの最大値に影響を与える。このため、出力分布変化の重要度は、高いと考えられる。

また、本事象では炉心外周部の制御棒が一本引き抜かれることで局所的に出力が上昇することから、三次元的な出力分布変化の影響が生じる。

(3) 反応度フィードバック効果[炉心(核)]

炉心の動特性解析においては、反応度フィードバック効果が事象の進展に大きな影響を与えることから、反応度フィードバック効果は重要な現象である。反応度フィードバック効果は、原子炉出力変化後、燃料領域の温度変化による反応度フィードバック効果（ドッ

プラ反応度) と、減速材領域の温度・ボイド率変化による反応度フィードバック効果(減速材温度反応度, 減速材ボイド反応度)に分類される。

本事故シーケンスでは原子炉スクラムによる負の反応度印加により原子炉出力が低下する効果が支配的であり, ドップラ反応度フィードバック効果・減速材温度反応度フィードバック効果・減速材ボイド反応度フィードバック効果の重要度は中程度と考えられる。

また, 反応度フィードバックは動的反応度の大小が重要であるため, 遅発中性子割合も影響する。

(4) 制御棒反応度効果[炉心(核)]

本事故シーケンスでは, 制御棒誤引き抜きによる正の反応度印加が主要な外乱であり, 引抜制御棒反応度は燃料エンタルピに大きな影響を与える。また, スクラムによる負の反応度印加により原子炉は未臨界となることから, スクラム反応度は燃料エンタルピに影響する。このため, 制御棒反応度効果の重要度は高いと考えられる。また, 本事象では引き抜かれる制御棒の位置は炉心中央とは限らないことから, 制御棒反応度は一般に三次元的な位置に依存する影響を受ける。

また, 制御棒反応度効果は動的反応度の大小が重要であるため, 遅発中性子割合も影響する。

(5) 崩壊熱[炉心(核)]

崩壊熱は, 出力運転中における核分裂生成物, アクチニドの蓄積に伴う物理現象であり, 本事故シーケンスのように停止時からの制

御棒引き抜きに伴う短時間の出力上昇において、燃料エンタルピに与える影響はないと考えられる。

(6) 三次元効果[炉心(核)]

本事象は、局所的かつ一時的な出力上昇事象であるため、炉心の核熱不安定事象は生じないと考えられる。

(7) 燃料棒内温度変化[炉心(燃料)]

燃料棒内温度変化は、燃料ペレット及び被覆管の熱伝導とギャップ部及び燃料棒表面の熱伝達を通して表面熱流束の変化に伴う燃料棒の除熱に影響する。また、燃料温度の上昇を通じて、ドップラ反応度フィードバック効果に影響を与える。

本事故シーケンスのように燃料温度の上昇量が小さい事象においては、除熱及びドップラ反応度フィードバック効果への影響の観点から燃料棒内温度変化の重要度は中程度であると考えられる。

(8) 燃料棒表面熱伝達[炉心(燃料)]

燃料棒表面熱伝達（単相壁面熱伝達，二相壁面熱伝達）は，表面熱流束の変化に伴う燃料棒の除熱に影響することから，燃料エンタルピに影響を与える。

本事故シーケンスのように表面熱流束の上昇量が小さい事象においては，除熱の観点から燃料棒表面熱伝達の重要度は中程度であると考えられる。

(9) 沸騰遷移[炉心(燃料)]

表面熱流束が限界熱流束に達すると、沸騰遷移状態を経て膜沸騰状態となるため、熱伝達は悪化し、燃料エンタルピに影響を与える。

本事故シーケンスにおいては表面熱流束の上昇量が小さく、沸騰遷移には至らないが、仮に沸騰遷移が発生した場合、熱伝達の悪化により、燃料エンタルピは上昇する。本事故シーケンスでは、燃料エンタルピがピークに至るまでの除熱量は数～十数 kJ/kg 程度であり、沸騰遷移発生時に熱伝達が悪化することによる燃料エンタルピの上昇量も、数～十数 kJ/kg の範囲内に留まると推測されることから、沸騰遷移の重要度は中程度と考えられる。

(10) 燃料被覆管酸化[炉心(燃料)]

出力が上昇し燃料被覆管温度が著しく上昇した場合には、ジルコニウム-水反応が促進され、燃料被覆管の酸化反応による被覆管表面温度の上昇に伴う表面熱伝達の悪化を介して、燃料エンタルピに影響を与える。

本事故シーケンスでは、事象を通じての燃料被覆管温度の上昇量が小さく、燃料被覆管温度がジルコニウム-水反応が発生する程度(約 900℃)までは至らないことから、燃料被覆管酸化の重要度は低いと考えられる。

(11) 燃料被覆管変形[炉心(燃料)]

燃料被覆管温度が急激に上昇した場合には、燃料被覆管の変形が生じる可能性があり、ギャップ熱伝達の変化や流路閉塞による冷却

挙動の変化を介して燃料エンタルピに影響を与える。

本事故シーケンスでは、事象を通じての燃料被覆管温度の上昇量が小さく、燃料被覆管変形には至らないと考えられることから、燃料被覆管変形による燃料エンタルピへの影響は考慮しない。

(12) 三次元効果[炉心(燃料)]

本事故シーケンスは、炉心の局所的かつ一時的な出力上昇現象であり、炉心露出は生じないことから、炉心露出に伴う燃料棒間及びチャンネルボックスとの輻射熱伝達による燃料エンタルピへの影響は考慮しない。

(13) 沸騰・ボイド率変化[炉心(熱流動)]

出力上昇に伴い炉心において沸騰・ボイド率変化が生じる場合には、沸騰状態での被覆管からの表面熱伝達、圧力損失、反応度フィードバック等の変化を介して燃料エンタルピに影響を与える。

本事故シーケンスにおいては表面熱流束の上昇量が小さく、沸騰に伴うボイド発生割合は小さいことから、沸騰・ボイド率変化の重要度は低いと考えられる。

(14) 気液分離(水位変化)・対向流[炉心(熱流動)]

本事故シーケンスは、炉心の局所的かつ一時的な出力上昇現象であり、炉心露出は生じないことから、気液分離(水位変化)・対向流は生じないと考えられる。

(15) 気液熱非平衡[炉心(熱流動)]

本事故シーケンスは、表面熱流束の上昇量が小さく、沸騰に伴うボイド発生割合は小さいことから、蒸気の過熱による気液熱非平衡の効果は生じないと考えられる。

(16) 三次元効果[炉心(熱流動)]

炉心の出力が局所的に上昇する場合、ボイドも局所的に発生するため、ボイド発生による流量配分の三次元効果が生じ、沸騰状態での被覆管からの表面熱伝達、圧力損失、反応度フィードバック等の変化を介して燃料エンタルピに影響を与える。

本事故シーケンスにおいては、表面熱流束の上昇量が小さく、沸騰に伴うボイド発生割合は小さいことから、燃料集合体間の流量配分等による炉心(熱流動)の三次元効果の重要度は低いと考えられる。

(17) 圧力損失[炉心(熱流動)]

炉心又はチャンネルの圧力損失は、原子炉再循環流量、並びにチャンネル流量及びその配分に影響する。チャンネル内流量は、燃料の除熱を通じて燃料エンタルピに影響を与えるが、本事故シーケンスにおいては表面熱流束の上昇量が小さく、沸騰に伴うボイド発生割合は小さいことから、ボイド発生による流量配分に与える影響は無視でき、圧力損失の影響はないと考えられる。

(18) 原子炉圧力容器に係る物理現象

本事故シーケンスは、運転停止中原子炉における「反応度の誤投

入」による炉心内の局所的かつ一時的な出力上昇事象であり，原子炉压力容器に係る物理現象による燃料エンタルピへの影響はないと考えられる。

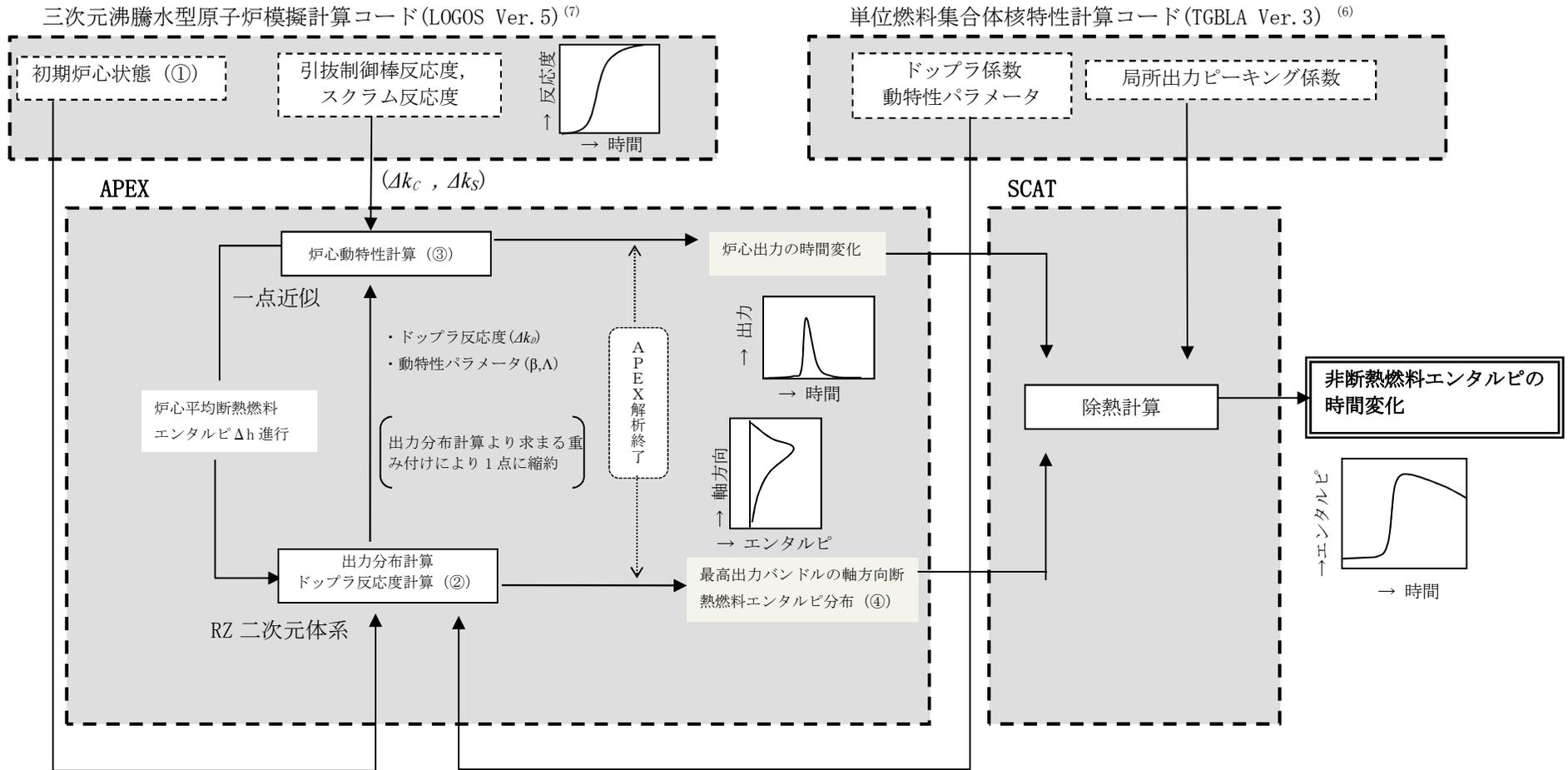
表 2.3-1 有効性評価の物理現象のランク

分類	評価事象		反応度の誤投入
	物理現象	評価指標	燃料エンタルピ°
炉心 (核)	(1)	核分裂出力	<u>H</u>
	(2)	出力分布変化	<u>H</u>
	(3)	反応度フィードバック効果	<u>M</u>
	(4)	制御棒反応度効果	<u>H</u>
	(5)	崩壊熱	I
	(6)	三次元効果	I
炉心 (燃料)	(7)	燃料棒内温度変化	<u>M</u>
	(8)	燃料棒表面熱伝達	<u>M</u>
	(9)	沸騰遷移	<u>M</u>
	(10)	燃料被覆管酸化	L
	(11)	燃料被覆管変形	I
	(12)	三次元効果	I
炉心 (熱流動)	(13)	沸騰・ボイド率変化	L
	(14)	気液分離(水位変化)・対向流	I
	(15)	気液熱非平衡	I
	(16)	三次元効果	L
	(17)	圧力損失	I
原子炉圧力容器 (逃し安全弁含む)	(18)	冷却材流量変化	I
		冷却材放出(臨界流・差圧流)	I
		沸騰・凝縮・ボイド率変化	I
		気液分離(水位変化)・対向流	I
		気液熱非平衡	I
		圧力損失	I
		構造材との熱伝達	I
		E C C S注水(給水系・代替注水設備含む)	I
		ほう酸水の拡散	I
		三次元効果	I

3. 解析モデルについて

3.1 コード概要

APEX-SCATコードは、反応度投入時の炉心の出力変化等を解析する炉心動特性解析と、その解析結果を入力として燃料集合体内における冷却材による除熱計算を行い、燃料エンタルピを評価する燃料挙動解析に分けられる。炉心動特性解析には反応度投入事象解析コードAPEXを、燃料挙動解析には単チャンネル熱水力解析コードSCATを用いて解析を行っている。この解析の流れを、図3.1-1に示す。



※：図中の丸数字は、3.3.1 炉心動特性解析 (APEX コード) [解析の流れ]に対応している。

図 3.1-1 APEX-SCATの結合計算の流れ

3.2 重要現象に対する解析モデル

2.3 節において重要現象に分類された物理現象(表 2.3-1 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 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 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	動特性モデル	一点近似動特性モデル
	出力分布変化	炉心出力分布モデル	二次元 (RZ) 拡散モデル
	制御棒反応度効果	動特性モデル	一点近似動特性モデル
	反応度フィードバック効果	動特性モデル	一点近似動特性モデル 二次元 (RZ) 拡散モデル
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 燃料棒表面熱伝達モデル
	燃料棒表面熱伝達	チャンネル内熱流動モデル	燃料棒表面熱伝達モデル
	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

3.3 解析モデル

APEX-SCATコードを構成するAPEXコード，SCATコードの解析モデルを表3.3-1に示す。また計算の内容を以下に示す。

表 3.3-1 APEX-SCATコードの解析モデル⁽¹⁾⁽²⁾

分類	重要現象	計算モデル
炉心 (核)	核分裂出力	一点近似動特性方程式，二次元 (RZ) 拡散方程式を適用。 また，反応度フィードバックとしては，断熱モデルに基づくドップラ反応度フィードバックモデルを採用し，減速材温度フィードバック及び減速材ポイドフィードバックは考慮しない。
	出力分布変化	
	制御棒反応度効果	
	反応度フィードバック効果	
炉心 (燃料)	燃料棒内温度変化	ギャップ熱伝達：Ross & Stoute の式を用いて非定常熱伝導方程式を適用。 燃料棒表面熱伝達：(燃料棒表面熱伝達モデルに記載)
	燃料棒表面熱伝達	以下の伝熱モードを考慮 ・ 単相強制対流：Dittus-Boelter の式 ・ 核沸騰状態：Jens-Lottes の式 ・ 膜沸騰状態(低温時)：NSRRの実測データに基づいて導出された熱伝達相関式
	沸騰遷移	低温時：Rohsenow-Griffith の式及び Kutateladze の式を適用して判定

3.3.1 炉心動特性解析(APEXコード) ⁽¹⁾⁽²⁾

APEXコードは、熱的現象を断熱としており、炉心平均出力の過渡変化を炉心一点近似による中性子動特性方程式で表し、出力の炉心空間分布を二次元(RZ)拡散方程式で表す。炉心各部分のエンタルピの上昇は、出力分布に比例するものとし、炉心平均断熱燃料エンタルピがある程度上昇する間(以下「エンタルピステップ」という。)は、出力分布は一定としている。また、投入反応度としては、引抜制御棒反応度、スクラム反応度及びドップラ反応度を考慮するが、このドップラ反応度は、二次元(RZ)拡散計算による出力分布変化を考慮して求められる。

解析に当たっては、次のような前提を設けている。

- (1) 炉心平均出力の過渡変化は、炉心一点近似による動特性方程式により表される。
- (2) 熱的現象は断熱とする。
- (3) 出力分布は、中性子エネルギー三群・二次元(RZ)拡散方程式によって表される。
- (4) 炉心各部分のエンタルピの上昇は出力分布に比例するものとする。
- (5) エンタルピステップでは、出力分布は一定と仮定する。

[解析の流れ]

① 初期炉心状態の作成

- a. 対象となる炉心を三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードにより求める。当該炉心について、後述する③a.の炉心動特性計算で用いる引抜制御棒反応度、スクラム反応度を求める。ここでは、各領域の組成(燃料タイプ、ガドリニア分布等)及び

燃焼度分布の空間的効果は全て計算に含まれている。

- b. a. で求めた炉心を RZ 二次元体系に変換するため、炉心径方向の集合体核定数が同心円状となるよう、領域ごとに核定数を均質化するとともに、誤引抜制御棒周りの核定数を炉心中心へ移動する。通常、領域分けは、図 3.3.1-1 に示すように径方向を 9 領域とし、それぞれを軸方向に 24 領域分割(三次元体系と同じ)し、更に反射体領域として 1 領域を加え、図 3.3.1-2 に示すように 217 領域とする。APEX コードでは引抜制御棒は体系の中心に位置するものとしており、炉心計算結果で設定した引抜制御棒が APEX コードにおける体系の中心に位置するように、以下に示すような手法を行っている。
- i). 炉心の全燃料集合体を対象に、初期制御棒パターン状態の炉心計算結果の核定数を同心円状の燃料集合体領域ごとに均質化した後、RZ 体系に縮約する。
 - ii). 制御棒が引き抜かれた領域で出力ピーキングが大きくなることを考慮し、引抜制御棒周囲の燃料集合体核定数を 3 領域の同心円状に均質化した後、制御棒の引き抜き状態を考慮して RZ 体系に縮約する。
 - iii). ii). で作成した核定数が、i). で作成した炉心の中心になるように上書きする。上書きにおいては、出力スパイク発生時のドップラ反応度フィードバック量を適切に評価するよう、制御棒引き抜きによる投入反応度が、実効遅発中性子割合と等しくなった即発臨界状態となる位置まで制御棒が引き抜かれた状態

を模擬するようにする。

i). ~iii). に示した核定数を RZ 体系に縮約する流れを、図 3.3.1-3 に示す。また、炉心最外周の制御棒が引き抜かれる場合の ii). における核定数の縮約方法について、図 3.3.1-4 に示す。燃料集合体が存在しない領域は縮約対象に含めず、燃料集合体が存在する領域のみの核定数を縮約することで、炉心最外周の制御棒が引き抜かれた状態を模擬するようにしている。

本手法による RZ 体系への縮約に伴う不確かさが解析結果に及ぼす影響を、縮約を介さずに炉心三次元体系で動特性解析を行うことができる三次元動特性解析コード TRACG Ver.5 (以下「TRACG」という。) を用いて評価した結果を添付 4 に示す。

- c. b. で作成した領域ごとの核定数を RZ 二次元体系に振り分け、次式の中性子エネルギー三群拡散計算により二次元 (RZ) の相対出力分布を計算する。

なお、拡散計算は、二次元領域を更に細分化して行い、出力分布及び断熱燃料エンタルピ分布は、細分化された各ノード (以下「メッシュ」という。) について計算する。

$$\begin{aligned} -D_1 \nabla^2 \phi_1 + (\Sigma_R \phi)_1 &= \frac{1}{\lambda} \{ (v\Sigma_f \phi)_1 + (v\Sigma_f \phi)_2 + (v\Sigma_f \phi)_3 \} \\ -D_2 \nabla^2 \phi_2 + (\Sigma_R \phi)_2 &= (\Sigma_{sl} \phi)_1 \\ -D_3 \nabla^2 \phi_3 + (\Sigma_R \phi)_3 &= (\Sigma_{sl} \phi)_2 \end{aligned}$$

記号は以下のとおりである。

ϕ	:	中性子束
D	:	拡散定数
λ	:	固有値
ν	:	単位核分裂あたりに放出される中性子数
Σ_R	:	除去断面積(= $\Sigma_a + \Sigma_{sl}$)
Σ_f	:	核分裂断面積
Σ_a	:	吸収断面積
Σ_{sl}	:	減速断面積
添字 1 ~ 3	:	中性子エネルギー群

② エンタルピステップの進行に伴う相対出力分布及びドップラ反応度の計算

- a. 炉心平均断熱燃料エンタルピを，僅かに増加させる。増加した後の各メッシュにおける断熱燃料エンタルピは，以下の式により計算される。

$$h_m^{n+1} = h_m^n + P_m^{n+1} \cdot \overline{\Delta h^n}$$

記号は以下のとおりである。

h_m	:	メッシュ m の断熱燃料エンタルピ
P_m	:	エンタルピステップ進行時のメッシュ m の相対出力 予測値
$\overline{\Delta h}$:	炉心平均断熱燃料エンタルピの上昇幅(エンタルピス

テップ)

n : エンタルピステップの番号

また、各メッシュの断熱燃料エンタルピの計算結果をもとに、各メッシュの温度を計算する。なお、エンタルピステップ Δh^n は、制御棒が引き抜かれ炉心出力が上昇する時間領域で細かく設定する。

- b. a. で計算された各メッシュの温度をもとに、各メッシュのドップラ反応度を計算する。その後、各メッシュのドップラ反応度の計算結果をもとに、各メッシュの第2群(共鳴領域)の中性子吸収断面積の増加量($\Delta\Sigma_a$)を計算する。

$$\Delta\Sigma_a(T) = \Sigma_{R_2}(T) - \Sigma_{R_2}(T_0)$$

$$= \frac{-\Sigma_{R_2}(T_0) \frac{\Delta k_\infty(T)}{k_\infty}}{1 + \frac{\Delta k_\infty(T)}{k_\infty} - \frac{\nu\Sigma_{f1}}{\Sigma_{R1}} \frac{\Delta k_\infty(T)}{k_\infty}}$$

$$\frac{\Delta k_\infty(T)}{k_\infty} = C_{dop} \times (\sqrt{T} - \sqrt{T_0})$$

記号は以下のとおりである。

$\frac{\Delta k_\infty(T)}{k_\infty}$: ドップラ反応度

$\Sigma_{R_2}(T)$: 第2群除去断面積

C_{dop} : ドップラ反応度係数

- c. $\Delta\Sigma_a$ の変化を反映し、二次元（RZ）の相対出力分布を再計算する。拡散方程式は、①c.に基づく。

c. で計算された各メッシュの相対出力を、a. の各メッシュの相対出力予測値 (P_m) に適用し、収束するまで繰り返し計算を行う。最終的な c. の計算結果をもとに、炉心平均断熱燃料エンタルピを僅かに増加させた際の、各メッシュの相対出力分布 (P_m^{n+1}) を計算する。

③ 炉心動特性計算

- a. 炉心平均断熱燃料エンタルピが $\Delta\bar{h}^n$ 進む間の炉心出力の時間変化を一点近似動特性方程式により計算する。

$$\frac{dN}{dt}(t) = \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{k-1}{k} - \beta \right) N(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t)$$

$$\frac{dC_i}{dt}(t) = \frac{1}{\Lambda} \beta_i N(t) - \lambda_i C_i(t)$$

また、中性子密度と炉心平均出力は、換算係数 A により、

$$P(t) = A \times N(t)$$

と示され、炉心出力変化に伴う炉心平均エンタルピの変化は以下により求まる。

$$\frac{d\bar{h}}{dt}(t) = B(P(t) - P(0))$$

記号は以下のとおりである。

$N(t)$: 中性子密度

$P(t)$: 炉心平均出力

A : 中性子密度と炉心平均出力の換算係数

$k(t)$: 実効増倍率

$C_i(t)$: 遅発中性子グループ i の先行核密度

$\bar{h}(t)$: 炉心平均エンタルピ

Λ : 即発中性子寿命

β_i : 遅発中性子グループ i の割合

β : 全遅発中性子の割合 $\left(= \sum_{i=1}^6 \beta_i \right)$

λ_i : 遅発中性子グループ i の先行核崩壊定数

B : 平均出力を平均エンタルピに換算する係数

i : 遅発中性子グループ ($i = 1 \sim 6$)

一点近似動特性計算に用いる実効増倍率 k は次式により，前記①a. で求めた引抜制御棒反応度及びスクラム反応度を外部入力として与え，ドップラ反応度は前記②c. の拡散計算における固有値の差を炉心平均断熱燃料エンタルピ \bar{h}^n と $\bar{h}^n + \Delta h^n$ 間で直線内挿して与える。ここで $\Delta k_c, \Delta k_s$ は外部入力のため，解析中は制御棒は固定とし，ドップラフィードバックによる影響を考慮して中性子束分布を評価する。

$$k(t) = k(0) + \Delta k_c(t) + \Delta k_s(t - t_s) + \Delta k_D(t)$$

記号は以下のとおりである。(各反応度は、 Δk 単位)

- $k(t)$: 実効増倍率 ($k(0) = 1.0$)
 $\Delta k_c(t)$: 引抜制御棒反応度
 $\Delta k_s(t - t_s)$: スクラム反応度 (t_s はスクラム開始時間)
 $\Delta k_D(t)$: ドップラ反応度

ここで、ドップラ反応度 $\Delta k_D(t)$ は、前記②c. の二次元拡散計算結果から得られた固有値 λ と、前記③a. の炉心動特性計算から得られた炉心平均燃料エンタルピ $\bar{h}(t)$ から、以下の式で計算される。

$$\Delta k_D(t) = \frac{\left\{ \lambda^n + \frac{(\lambda^{n+1} - \lambda^n)(\bar{h}(t) - \bar{h}^n)}{\Delta \bar{h}^n} \right\}}{\lambda^0} - 1.0$$

記号は以下のとおりである。

- λ^0 : ①c. の二次元拡散計算における初期固有値
 λ^n : ②c. の二次元拡散計算における固有値

④ 次のエンタルピステップの計算

前記②及び③の計算を、断熱燃料エンタルピ変化が安定するまで繰り返し、最終エンタルピ分布を求める。

$$h_m^f = h_m^n + \left\{ P_m^n + \frac{(P_m^{n+1} - P_m^n)\Delta \bar{h}^f}{\Delta \bar{h}^n} \right\} \Delta \bar{h}^f$$

記号は以下のとおりである。

f : 最終値を示す指標

n : 計算ステップ番号

$\overline{\Delta h}^f$: 最終エンタルピまでのエンタルピ幅 ($=\overline{h}^f - \overline{h}^n$)

m : メッシュ番号

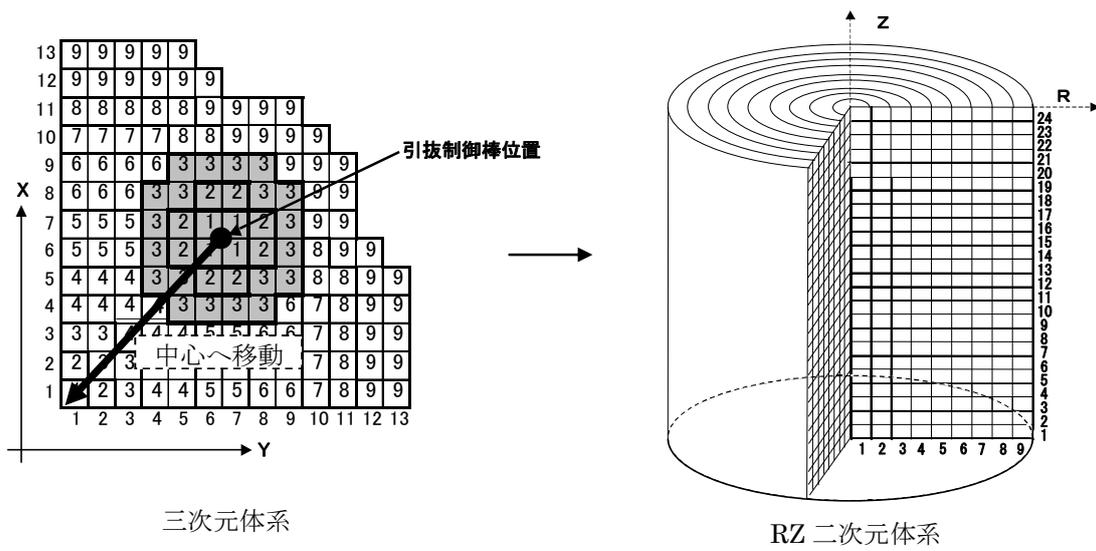


図 3.3.1-1 A P E Xコードで用いる核定数作成の模式図

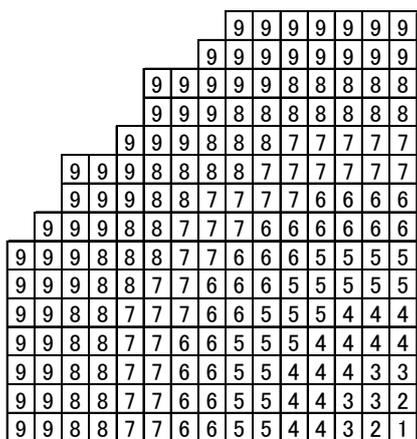
枠内の番号は物質番号

反射体		反射体								
Z	24	24	48	72	96	120	144	168	192	216
方	23	23	47	71	95	119	143	167	191	215
向	22	22	46	70	94	118	142	166	190	214
領	21	21	45	69	93	117	141	165	189	213
域	20	20	44	68	92	116	140	164	188	212
番	19	19	43	67	91	115	139	163	187	211
号	18	18	42	66	90	114	138	162	186	210
	17	17	41	65	89	113	137	161	185	209
	16	16	40	64	88	112	136	160	184	208
	15	15	39	63	87	111	135	159	183	207
	14	14	38	62	86	110	134	158	182	206
	13	13	37	61	85	109	133	157	181	205
	12	12	36	60	84	108	132	156	180	204
	11	11	35	59	83	107	131	155	179	203
	10	10	34	58	82	106	130	154	178	202
	9	9	33	57	81	105	129	153	177	201
	8	8	32	56	80	104	128	152	176	200
	7	7	31	55	79	103	127	151	175	199
	6	6	30	54	78	102	126	150	174	198
	5	5	29	53	77	101	125	149	173	197
	4	4	28	52	76	100	124	148	172	196
	3	3	27	51	75	99	123	147	171	195
	2	2	26	50	74	98	122	146	170	194
	1	1	25	49	73	97	121	145	169	193
反射体		反射体								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		R方向領域番号								

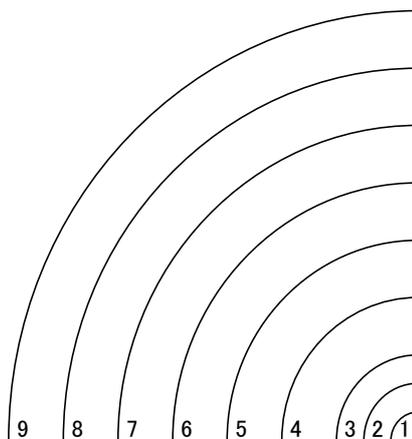
注: 反射体は厚さ30cmの水

図 3.3.1-2 A P E Xコードで用いる炉心のノード分割

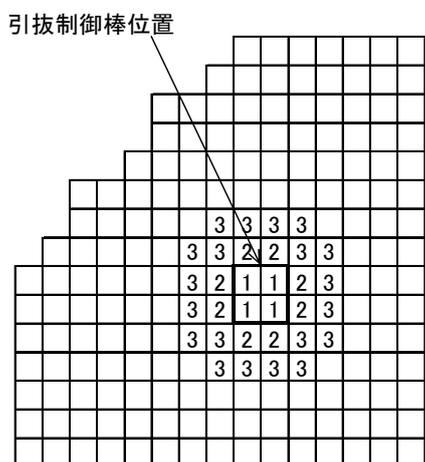
炉心計算結果
X-Y-Z体系



APEX入力
R-Z体系



炉心計算結果
X-Y-Z体系



APEX入力
R-Z体系

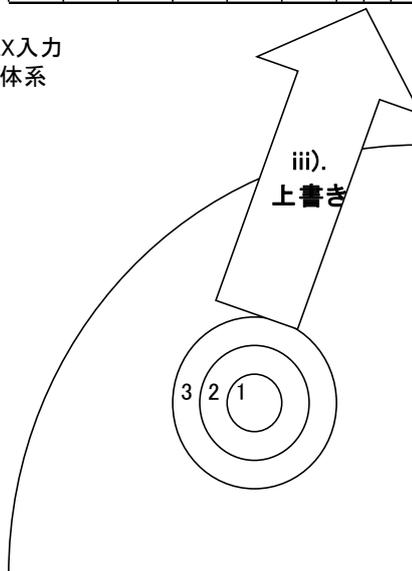
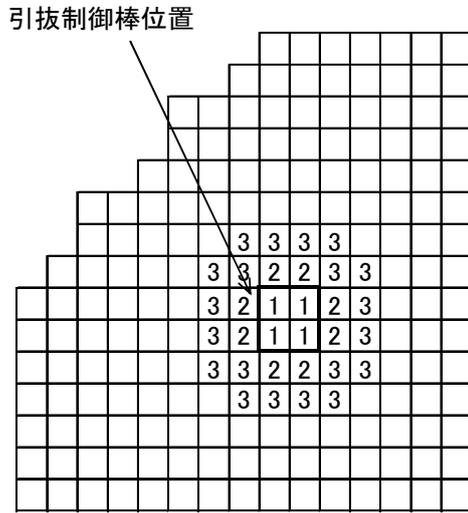
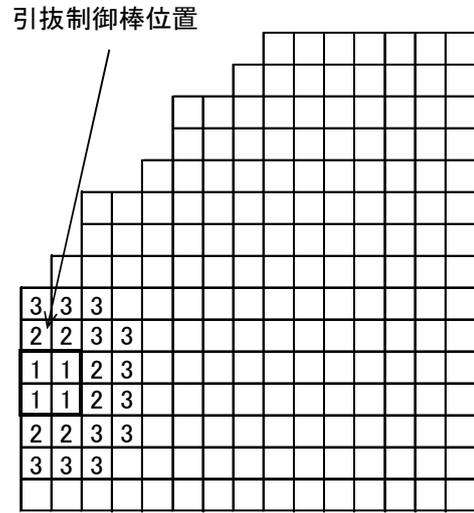


図 3.3.1-3 APEXコードによる核定数縮約の模式図

炉心計算結果
X-Y-Z体系



炉心中央部の制御棒を引き抜く場合



炉心最外周の制御棒を引き抜く場合

図 3.3.1-4 炉心最外周の制御棒を引き抜く場合の核定数縮約の模式図

3.3.2 燃料挙動解析(SCATコード) ⁽¹⁾⁽²⁾

3.3.1 で述べた炉心動特性解析で求めた最高出力燃料集合体の出力の時間変化を入力として、SCATコードを用いた最高出力燃料集合体の最高出力燃料棒の除熱計算を行い、燃料エンタルピの時間的变化を求める。

SCATコードでは、燃料棒軸方向のノード分割数をAPEXコードと同等とする。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、ノードごとに径方向の熱伝達を計算する。

燃料ペレット及び被覆管には、径方向一次元の非定常熱伝導方程式を適用して燃料棒内の温度分布を計算し、チャンネル内冷却材には、質量、運動量及びエネルギー保存則を適用して冷却材の熱水力学的挙動を計算する。冷却材の沸騰状態に応じた熱伝達率相関式を用いることにより、燃料棒の除熱量を求める。

以下に解析モデルを説明する。なお、ここで用いるSCAT (SCAT (RIA 用) Ver.2) は、プラント動特性解析用のSCATコードにおいて、ギャップ部熱伝達係数としてRoss & Stouteの式を基本に用い、低温時の膜沸騰熱伝達係数及び限界熱流束条件を追加している。また、被覆材の高温化に伴うジルコニウム-水反応による発熱の効果を考慮している。

3.3.2.1 チャンネル内熱流動モデル

以下に、単一チャンネル熱水力解析モデルを示す。

(1) 保存則

冷却材の温度，冷却材エンタルピ，圧力損失等の熱水力パラメータは，均質流モデルに基づく二相流の連続の式，エネルギー保存式，運動量保存式から求められる。

本事故シーケンスでは，事象を通じての燃料エンタルピ上昇が小さく，燃料エンタルピは判断基準に対して十分な余裕があることから，冷却材の流動を均質流で扱うことによる不確かさは，判断基準に対する余裕に包含されると考えられる。

以下に基礎式を示す⁽¹⁾⁽²⁾。

(a) 連続の式

$$\frac{\partial G}{\partial z} + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} = 0$$

(b) 流体のエネルギー保存式

$$\rho'' \frac{\partial H}{\partial t} + G \frac{\partial H}{\partial z} = Q(z, t)$$

さらに，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。

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (G^2 v') + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{(f/\rho_l)G^2}{2D_H} + \bar{\rho}g = 0$$

ここで，気液の平均密度 $\bar{\rho}$ 及び ρ'' と平均比容積 v' は以下で表される。

$$\bar{\rho} = \rho_f(1 - R) + \rho_g \cdot R$$

$$\rho'' = [\rho_f x + \rho_g(1 - x)] \frac{dR}{dx}$$

$$v' = v_f \frac{(1-x)^2}{1-R} + v_g \frac{x^2}{R}$$

記号は以下のとおりである。

- G : チャンネル質量流束
- ρ : 密度
- H : 冷却材エンタルピ
- $Q(z, t)$: 熱伝達量
- P : 炉心圧力
- g : 重力加速度
- v : 比容積
- f : 摩擦圧損係数
- D_H : チャンネルの水力等価直径
- R : ボイド体積率
- x : 蒸気重量率

(添字)

- l : 液相
- f : 飽和水
- g : 飽和蒸気

(2) 構成式

i. 燃料棒表面熱伝達モデル

冷却材の沸騰状態(液単相, 核沸騰, 膜沸騰)に基づいた熱伝達の
 相関式を適用する。SCATでは, サブクール沸騰を考慮せずに,

飽和沸騰が生じるまで、液単相流の熱伝達係数を用いることにより、液単相領域における燃料棒の除熱量を保守的条件にて計算している。

冷却材の沸騰状態の選択ロジック（低温時）を図 3.3.2-1 に示す。低温時における核沸騰から膜沸騰への移行については、Rohsenow-Griffith の式及び Kutateladze の式を用いて判定する。限界熱流束の判定については「ii. 沸騰遷移評価モデル」に示す。

各沸騰状態に対して設定される熱伝達モデルは、サブクール領域の単相流には Dittus-Boelter の式を、核沸騰領域には Jens-Lottes の式を、膜沸騰領域には低温時は NSRR の実測データに基づいて導出された熱伝達相関式を用いる⁽¹⁾⁽²⁾。

(a) 液単相

$$T_c = T_w + \frac{q}{h_w}$$

ここで h_w は Dittus-Boelter の式を用いる。

$$h_w = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{k_l}{D_H}$$

(b) 核沸騰状態 (Jens-Lottes の式)

$$T_c = T_{sat} + 0.79 e^{-\frac{P}{6.2 \times 10^6}} (q)^{1/4}$$

(c) 膜沸騰状態

$$T_c = T_w + \frac{q}{h_w}$$

ここで h_w は、NSRR の実測データに基づいて導出された以下の熱伝達相関式で与えられる。

$$h_w = h_{con}(1 + 0.025\Delta T_{sub}) + f\sigma(T_c + T_{sat})(T_c^2 + T_{sat}^2)$$

$$h_{con} = 0.943 \left[\frac{k_v^3 \cdot \rho_v \cdot (\rho_f - \rho_v) \cdot h_{fv} \cdot g}{L \cdot \mu_v \cdot (T_c - T_{sat})} \right]^{0.25}$$

ここで

$$h_{fv} = h_{fg} + 0.34C_{pv}(T_c - T_{sat})$$

記号は以下のとおりである。

- T_c : 被覆管表面温度
- T_w : 冷却材温度
- T_{sat} : 飽和温度
- ΔT_{sub} : サブクール度 ($=T_{sat} - T_l$)
- h_w : 被覆管-冷却材間の熱伝達係数
- h_{con} : 層流膜沸騰の平均熱伝達係数
- D_H : 水力等価直径
- P : 冷却材圧力
- k : 冷却材の熱伝導率
- ρ : 冷却材の密度
- μ_v : 冷却材の粘性係数
- C_{pv} : 定圧比熱
- g : 重力加速度
- q : 被覆管表面熱流束
- h_{fg} : 飽和圧力で定義した蒸発潜熱
- h_{fv} : 過熱を考慮した蒸発潜熱
- f : 放射率
- σ : ステファン・ボルツマン定数
- L : NSRR試験体系の代表長さ

Re : レイノルズ数

Pr : プラントル数

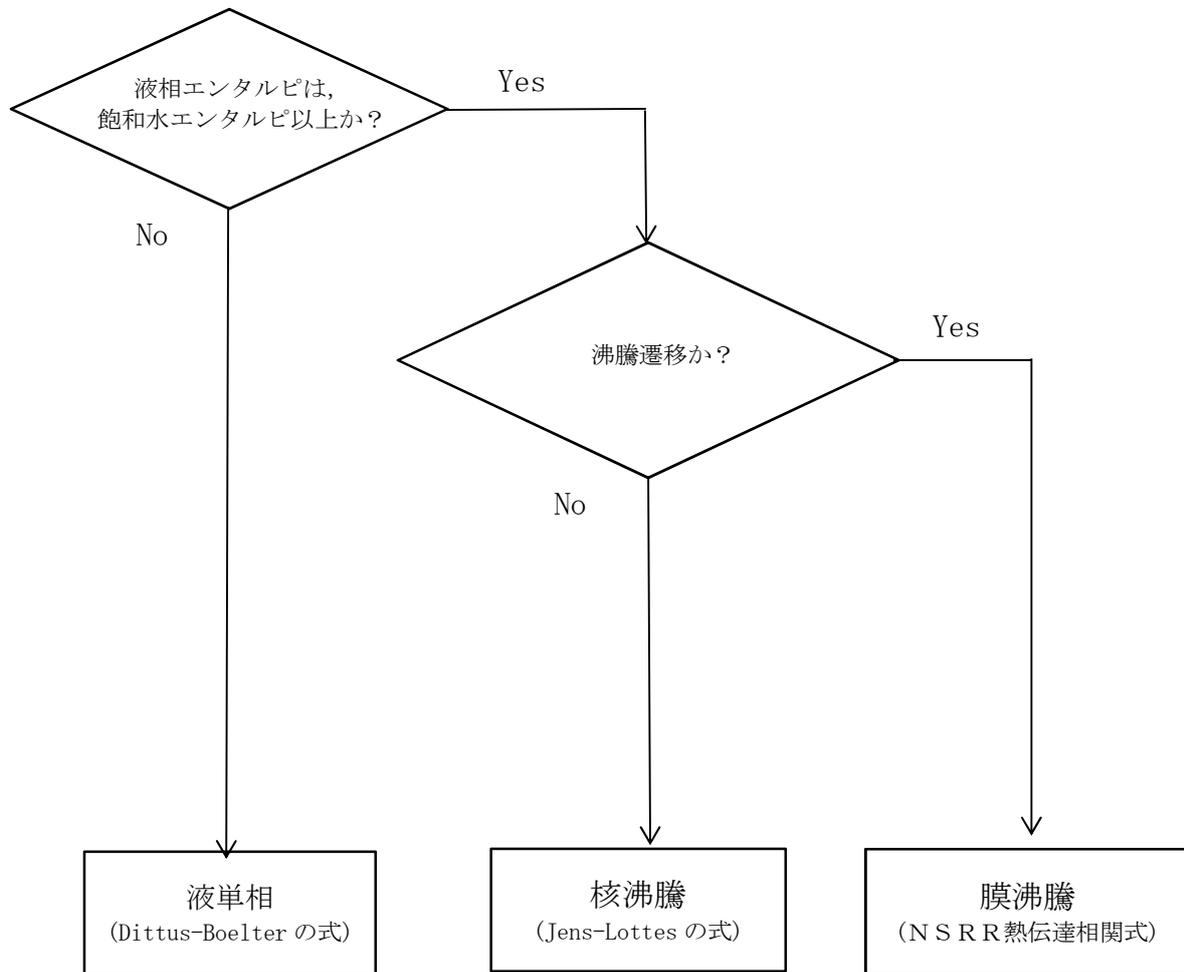
(添字)

l : 液相

v : 蒸気

f : 飽和水

g : 飽和蒸気



沸騰遷移判定

低温時： Rohsenow-Griffith の式及び Kutateladze の式

(膜沸騰移行後は膜沸騰状態を維持)

図 3.3.2-1 沸騰状態の選択ロジック (低温時)

ii. 沸騰遷移評価モデル

(a) 低温時 (Rohsenow-Griffith の式及び Kutateladze の式)

低温時における限界熱流束条件の判定は以下の式を用いて行われる⁽¹⁾⁽²⁾。

$$q_{BO} = q_{BOO} \cdot \left[1 + 0.065 \times (\rho_l / \rho_g)^{0.8} \cdot C_{pl} \cdot \Delta T_{sub} / h_{fg} \right]$$

ここで

$$q_{BOO} = 0.012 \cdot \rho_g \cdot h_{fg} \cdot [(\rho_l - \rho_g) / \rho_g]^{0.6}$$

記号は以下のとおりである。

q_{BO} : サブクールプール沸騰における限界熱流束

q_{BOO} : 飽和プール沸騰における限界熱流束

ρ_l : 水密度

ρ_g : 蒸気密度

C_{pl} : 水の定圧比熱

ΔT_{sub} : サブクール度

h_{fg} : 蒸発潜熱

3.3.2.2 燃料モデル

S C A Tコードの燃料モデルでは、次のような前提を設けている。

- 1) 軸方向相対出力分布は過渡中一定である。
- 2) 燃料棒半径方向発熱分布は過渡中一定である。
- 3) 燃料・被覆材中の熱の流れは半径方向で起こる。
- 4) 燃料・被覆材の比熱・熱伝導率等の物性値は温度の関数として計算する。

(1) 出力分布モデル

燃料の軸方向出力分布は、初期状態一定値として入力している。

(2) 熱伝導モデル

燃料棒を軸方向にノード分割し、ノードごとに径方向一次元の定常及び非定常の熱伝導方程式を解き、温度分布、熱流束分布等を求める。燃料棒は、燃料ペレット、ペレットと被覆管の空隙部であるギャップ部、被覆管で構成され、表 3.3.2-1 及び図 3.3.2-2 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ついて径方向に熱伝導方程式を適用して、燃料棒内の熱伝導を計算する。

以下に基礎式を示す⁽¹⁾⁽²⁾。

(a) 燃料ペレット内の熱伝導

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r K_F(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \rho_F C_F(T) \frac{\partial T}{\partial t} - Q_F(t)$$

(b) 燃料ペレット-被覆管ギャップの熱伝達

$$\left[K_F \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{\text{燃料表面}} = h_g \cdot \Delta T_{gap}$$

ギャップ熱伝達モデルは(3)にて詳述する。

(c) 燃料被覆管の熱伝導

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r K_c(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \rho_c \cdot C_c(T) \frac{\partial T}{\partial t}$$

記号は以下のとおりである。

- $K_F(T)$: 温度 T での燃料熱伝導率
- $K_c(T)$: 温度 T での被覆管熱伝導率
- ρ_F : 温度 T での燃料密度
- ρ_c : 温度 T での被覆管密度
- $C_F(T)$: 温度 T での燃料比熱
- $C_c(T)$: 温度 T での被覆管比熱
- $Q_F(t)$: 単位体積当たりの燃料の発熱量
- h_g : 燃料-被覆管ギャップの熱伝達係数
- ΔT_{gap} : 燃料表面と被覆管内面の温度差

(3) ギャップ熱伝達モデル

ギャップ熱伝達係数 h_g は、Ross & Stoute の式を基本に用いて、以下に示す 3 項の和で表される ⁽¹⁾⁽²⁾。

$$h_g = h_s + h_f + h_r$$

h_s : 固体接触部熱伝達係数

h_f : ガス境界層熱伝達係数

h_r : 輻射熱伝達係数

h_s, h_f, h_r は各々次式で表される。

$$h_s = \frac{K_m P_c}{A \cdot H \cdot R^{\frac{1}{2}}}$$

$$h_f = \frac{K_f}{C(R_1 + R_2) + (g_1 + g_2) + D}$$

$$h_r = \frac{\sigma_B(T_s^4 - T_c^4)}{G_{fact}(T_s - T_c)}$$

ここで

$$K_m = 2 \cdot K_{UO_2} \cdot K_{Zr} / (K_{UO_2} + K_{Zr})$$

$$R = [(R_1^2 + R_2^2) / 2]^{1/2}$$

記号は以下のとおりである。

K_m : 被覆管・ペレット平均熱伝導度

K_{UO_2} : ペレット熱伝導度

K_{Zr} : 被覆管熱伝導度

K_f : ガス熱伝導率

P_c : 被覆管・ペレット接触圧力

R_1, R_2 : 燃料被覆管内表面粗さ及びペレット外表面粗さ

R : 表面粗さ

H : 被覆管硬さ

A : 定数

C : 定数(ただし, 接触圧力 P_c に依存)

$g_1 + g_2$: ペレット表面・被覆管内面での温度ジャンプ距離

D : ギャップ幅

σ_B : ステファン・ボルツマン定数

G_{fact} : 修正形態係数

T_s, T_c : 燃料ペレット表面温度及び燃料被覆管内面温度

表 3.3.2-1 SCATコードのノーディングの考え方

領域	考え方
燃料棒グループ	最高出力燃料集合体の最高出力燃料棒の除熱計算を行う。
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、核計算にあわせて燃料部を 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)	ペレット内温度計算メッシュ点数は 20 点とし、ペレット径を内側から 5 : 3 : 2 に 3 分割し、内側領域に 4 点、中間領域に 5 点、外側領域に 11 点を取り、外側領域を細かくメッシュを切って解析する。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。

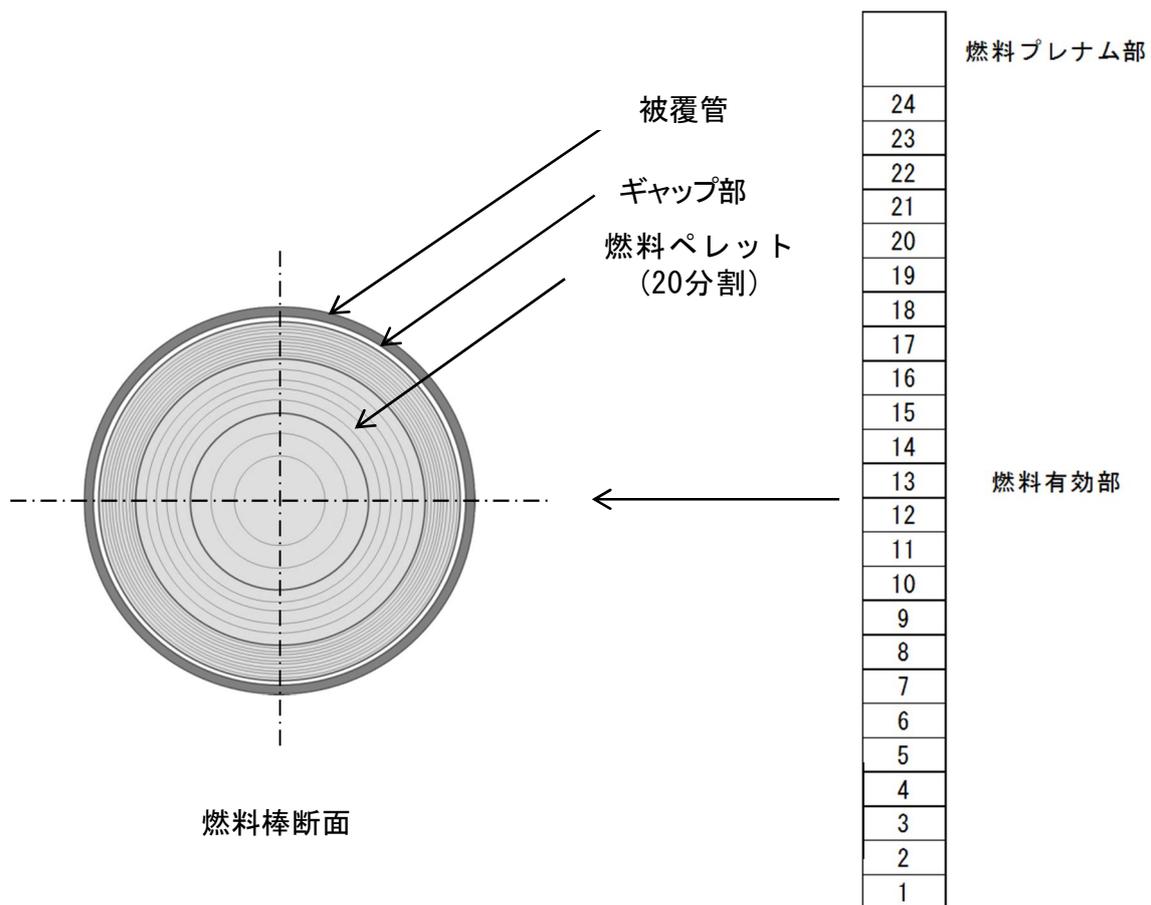


図 3.3.2-2 SCATコードによる燃料棒のノード分割 (例)

3.4 入出力

APEX-SCATコードの入出力を図3.4-1に示す。APEX-SCATコードのインプットデータは、以下に示す各要素コードのインプットデータで構成される。

また、図3.4-2に、前処理コードによるAPEX入力作成の流れを示し、前処理コードの不確かさについては5.1章にて説明する。

APEXコード

初期条件(燃料温度, 原子炉出力等)

炉心データ(引抜制御棒反応度, スクラム反応度等)

燃料データ(動特性パラメータ, 核定数等)

SCATコード

初期条件(圧力, 流量等)

炉心データ(炉心平均出力変化, 炉心出力分布)

燃料データ(幾何形状, 熱水力データ, 物性データ等)

上記をインプットデータとして、解析を実施し、以下のアウトプットデータを得る。

APEXコード

炉心反応度の時間変化

炉心平均出力の時間変化

断熱燃料エンタルピ分布の時間変化

炉心内燃料出力分布の時間変化等

SCATコード

非断熱燃料エンタルピーの時間変化等

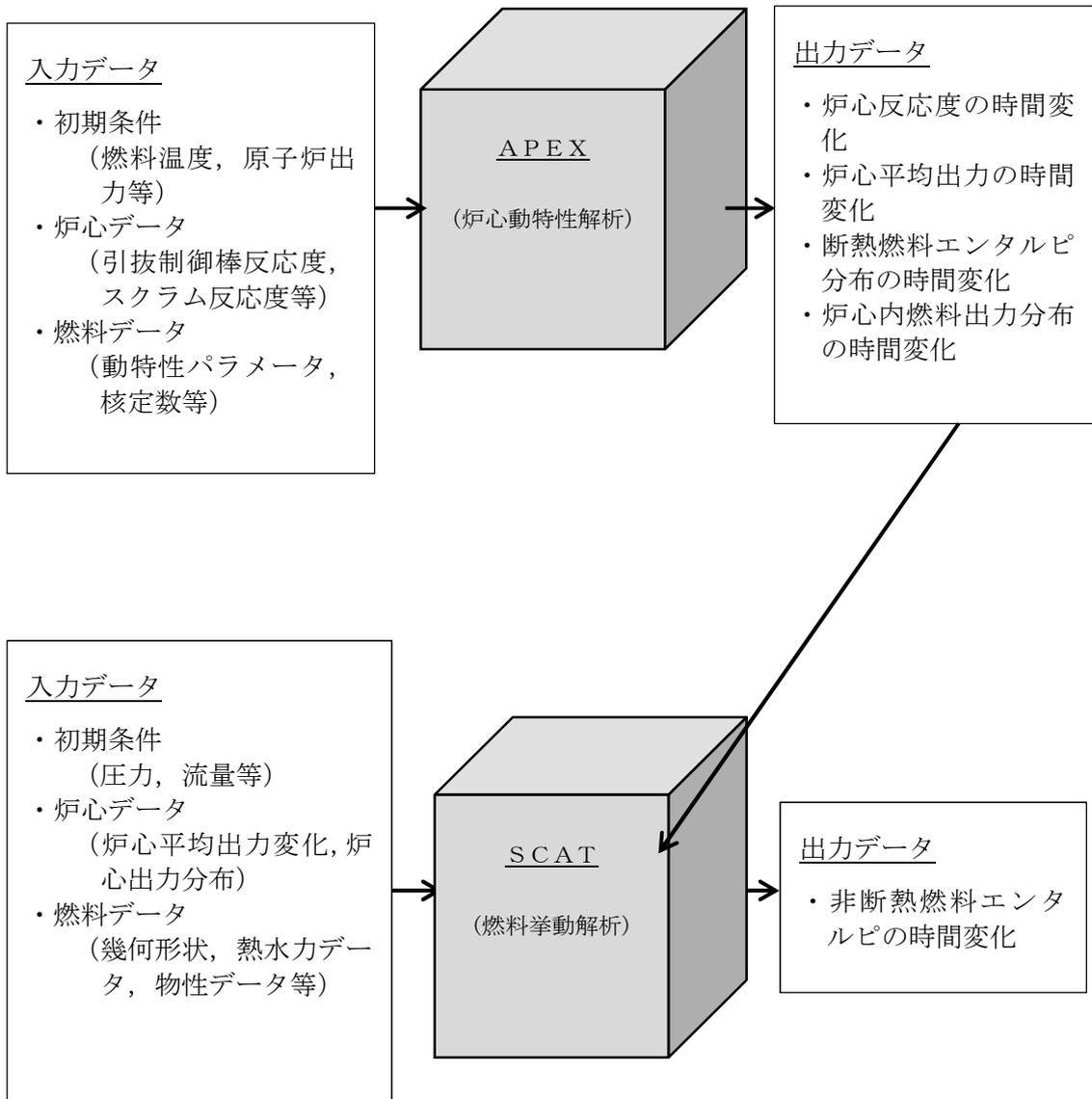


図 3.4-1 APEX-SCATコードの入出力

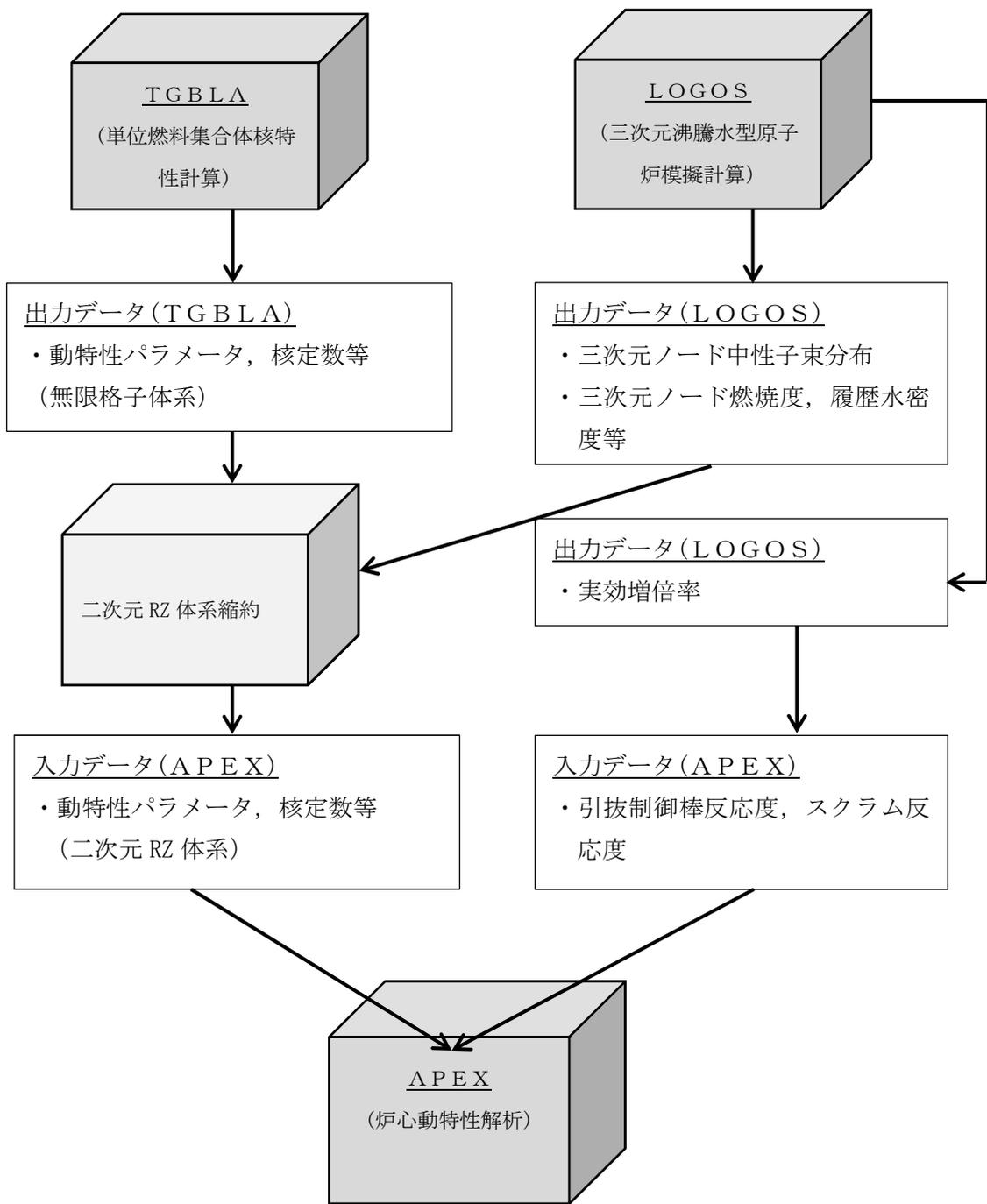


図 3.4-2 前処理コードによる A P E X 入力作成の流れ

4. 妥当性確認

4.1 重要現象に対する妥当性確認方法

運転停止中原子炉における「反応度の誤投入」事象で使用している解析コードは、「運転時の異常な過渡変化」解析及び「設計基準事故」解析で使用されているものと同一である。「反応度の誤投入」事象が、「原子炉起動時の制御棒の異常な引き抜き」と基本的に同一の物理現象を扱うことから、本コードは「反応度の誤投入」事象に対して適用性がある。2.3 節において重要現象に分類された物理現象の妥当性確認方法を表 4.1-1 に示す。

4.1.1 炉心(核)における重要現象の確認方法

炉心(核)に対する重要現象は、核分裂出力（炉心出力の中性子動特性）、反応度フィードバック効果（ドップラ反応度効果、ボイド反応度効果）、制御棒反応度効果、及び出力分布変化であり、APEXコードでは、中性子拡散計算と一点近似動特性計算とを出力分布に依存する反応度のフィードバックを通じて結び付けた計算体系で評価している。具体的な解析モデルとしては、

- ・ 炉心出力は一点近似動特性モデル
- ・ 出力分布は二次元（RZ）拡散モデル
- ・ 出力分布計算用の核定数は、三次元体系の炉心から空間効果を考慮し二次元（RZ）体系に縮約
- ・ ドップラ反応度フィードバックは出力分布依存で考慮
- ・ 熱的現象は断熱とし、ボイドフィードバック効果は考慮しない
- ・ 制御棒反応度は、三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードにより算出し、一点近似動特性解析ではこれを外部入力として扱う

を採用している。

一点近似動特性モデルは動特性解析において従来から広く一般的に用いられているものであり、「反応度の誤投入」事象の解析に使用することは妥当であると考えられる。

また、出力分布モデルは二次元（RZ）拡散モデルとし、出力分布計算用の核定数を、三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードによる三次元出力分布を再現するように、三次元体系の炉心から空間効果を考慮し二次元（RZ）体系に縮約していることから、「反応度の誤投入」事象の解析に使用することは妥当であると考えられる。なお、参考として、添付2に、二次元（RZ）体系の適用性について記載している。

ドップラ反応度フィードバックモデルは、核定数と一点近似動特性モデルの両者が適切であることが確認できれば、その結果として得られるドップラ反応度フィードバック効果の妥当性が確認できる。

制御棒反応度は三次元中性子拡散モデルに基づく三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードによる実効増倍率計算により求められるため、制御棒引き抜き前後の状態の実効増倍率計算（実効増倍率の差分）が適切であることを確認できれば、制御棒反応度効果の妥当性が確認できる。

この考え方にに基づき、炉心(核)における重要現象に対して、以下のプロセスにより妥当性を確認している。

(1) ドップラ反応度フィードバックモデル

ドップラ反応度フィードバックモデルは、核定数としてのドップラ係数及び実効遅発中性子割合の試験結果との比較と、反応度投入事象

を模擬した試験結果との比較から、総合的に妥当性を確認している。

核定数としての確認は、ドップラ係数は実効共鳴積分とその温度依存係数の積として表すことができることから、Hellstrand らの温度依存性を考慮した実効共鳴積分の実験式⁽⁴⁾と比較することにより実施している。

また、動的反応度に影響する実効遅発中性子割合は、MISTRAL 臨界試験⁽⁵⁾にて測定されており、その試験結果と比較する。

反応度投入事象を模擬した試験結果との比較としては、米国の SPERT-III 炉心実験⁽³⁾と比較する。

(2) 制御棒反応度効果評価モデル

制御棒反応度効果については、実機炉心において、制御棒価値測定試験が実施されており、その試験結果と比較することにより妥当性確認を実施している。

4.1.2 炉心(燃料)における重要現象の確認方法

炉心(燃料)における重要現象である燃料棒内温度分布、燃料棒表面熱伝達及び沸騰遷移は、燃料エンタルピを求める際に必要となる。

S C A Tにおける燃料挙動解析モデルは、熱伝導モデル、熱水力学的モデル、圧力損失モデルからなっている。熱伝導モデルは、軸方向を一次元に分割しノードごとに径方向一次元の基本的な定常及び非定常の熱伝導方程式に基づいている。熱水力学的モデルは、冷却材の扱いに関し基本的な軸方向の連続の式、エネルギー保存式、運動量保存式に基づいている。これらの方程式は従来から広く一般に使用されているものであり、「反応度の誤投入」解析に使用することは妥当である。

る。

一方、S C A Tにおける燃料の表面熱伝達のモデルは、単相強制対流、核沸騰、膜沸騰状態に対し、核沸騰から膜沸騰への判定条件も含めて「反応度投入事象評価指針」で使用することが妥当とされている相関式を用いている。

また、ペレットと被覆管ギャップ熱伝達係数は、Ross & Stoute の関係式を使用している。本関係式については、従来から、原子炉設置許可申請において、「原子炉起動時の制御棒の異常な引き抜き」や「制御棒落下事故」解析に用いられ、また、燃料棒の熱機械特性コードP R I M EやF E M A X Iでも広く使用されているものであり、豊富な使用実績がある。また、比熱等の物性値も「反応度投入事象評価指針」で使用することが妥当とされている MATPRO-VERSION 11 (REVISION 2)に基づいている。

以上から、炉心(燃料)における重要現象である燃料棒内温度分布及び沸騰状態変化の評価方法は妥当であり、よって、それに基づく燃料エンタルピーの評価方法は適切であるといえることから、個々のモデルを対象とした妥当性確認は行わないこととする。

表 4.1-1 重要現象に対する妥当性確認

分類	重要現象	解析モデル	S P E R T I I I E 炉心実験	実効共鳴積分測定に関わる H e l i u m の 実 験 式	M I S T R A L 臨界試験	実機での制御棒価値 測定試験
炉心 (核)	核分裂出力*	<ul style="list-style-type: none"> 一点近似動特性モデル(炉出力) 出力分布は二次元拡散モデル 核定数は三次元体系の炉心から空間効果を考慮し二次元体系に縮約 	-	-	-	-
	出力分布変化*	<ul style="list-style-type: none"> 二次元 (RZ) 拡散モデル エンタルピステップの進行に伴う相対出力分布変化を考慮 	-	-	-	-
	反応度フィードバック効果	<ul style="list-style-type: none"> ドップラ反応度フィードバックは出力分布依存で考慮 熱的現象は断熱, ボイド反応度フィードバック効果は考慮しない 	図 4.2-2	図 4.3-2	図 4.4-2	-
	制御棒反応度効果	<ul style="list-style-type: none"> 三次元拡散モデル 動特性計算では外部入力 	-	-	-	表 4.5-1 表 4.5-2
炉心 (燃料)	燃料棒内温度変化*	<ul style="list-style-type: none"> 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*	<ul style="list-style-type: none"> 単相強制対流: Dittus-Boelter の式 核沸騰状態: Jens-Lottes の式 膜沸騰状態(低温時): NSRR の実測データに基づいて導出された熱伝達相関式 	-	-	-	-
	沸騰遷移*	低温時: Rohsenow-Griffith の式及び Kutateladze の式	-	-	-	-

* : 4.1 節に記載の理由により, 妥当性確認を行わない重要現象

4.2 SPERT-III E 炉心実験との比較⁽³⁾

ここでは、APEXコードのドップラ反応度フィードバックモデルの妥当性確認として、SPERT-III E 炉心の実験解析を実施した。SPERT-III E 炉心実験は 1950 年代に実施された反応度投入実験であり、動特性計算コードの中性子動特性、ドップラ反応度フィードバック効果を中心として総合的な妥当性確認の目的で使用されている。今回、APEXコードのドップラ反応度フィードバックモデルの妥当性を確認するため、ピーク時の出力の試験結果と解析結果を比較した。

(1) SPERT-III E 炉心実験概要

SPERT-III E 炉心は小型の軽水炉を模擬した炉心であり、燃料は焼結 UO_2 、濃縮度 4.8wt% のウラン燃料集合体が装荷され、炉心中央部には反応度投入用の十字型制御棒（トランジェントロッド）が配置されている。燃料集合体は 5×5 と 4×4 に燃料棒が格子配列されている。SPERT-III では、低温零出力から高温出力状態までの様々な初期状態から制御棒の引き抜きにより反応度を添加することにより、反応度投入実験を行っている。SPERT-III E 炉心の燃料集合体及び制御棒配置図を図 4.2-1 に示す。また、SPERT-III E 炉心の設計仕様を表 4.2-1 に示す。

これから、BWR での低温状態からの反応度投入事象評価の妥当性確認として、SPERT-III E 炉心実験の低温零出力状態からの実験の解析を APEX コードで実施することにより行っている。

低温零出力状態からの試験条件を下記に示す。ここでは、ドップラ反応度フィードバックモデルの妥当性を確認するため、投入反応度が 1.21 ドルと最も大きい TEST43 を試験解析の対象とした。

- ・初期炉心状態 : 低温時
- ・初期出力 : 5×10^{-5} MW
- ・原子炉圧力 : 大気圧
- ・炉心流量 : 0 %
- ・冷却材温度 : 25°C以下
- ・投入反応度 : 1.21 ドル

(2) SPERT-III E 炉心解析条件

解析では、図 4.2-1 に示す炉心を五つのリング領域に分割した。最外周は減速材反射体、第4周は25ロッド集合体領域、内部の3周は25ロッド集合体、シムコントロールバンドル、16ロッド集合体、トランジェントロッドの混合領域である。二次元 (RZ) 体系は 20 領域からなり、燃料は 13 領域、反射体は 7 領域である。

(3) SPERT-III E 炉心試験解析結果

APEXコードによる出力の時間変化と試験結果の比較を図 4.2-2 に示す。ピーク時の出力は、試験結果が 280 ± 42 MW に対し計算結果は 292 MW と測定誤差以内で一致しているとともに、全体の時間変化もおおむね一致している。これから、APEXコードのドップラ反応度フィードバックモデルの妥当性を、反応度投入事象を模擬した試験との比較の観点から確認した。

表 4.2-1 SPERT-III E 炉心の設計仕様

コンポーネント	仕様
圧力容器及び一次系	
圧力容器タイプ	全溶接多層圧力容器
圧力容器材質	304Lステンレス鋼
圧力容器サイズ	内径1.3m, 高さ7.24m
設計圧力	16.8MPa
設計温度	955K
流量特性	1260kg/sで炉心内を上昇
熱除去性能	1/2時間で最大60MW
炉心	
形状	ほぼ円筒状, 直径0.66m
燃料集合体の数及びタイプ	25ロッド集合体48体及び16ロッド集合体12体
減速材 - 反射材	軽水
減速材に対する非減速材の比	1.03
燃料	
タイプ	UO ₂ ペレット
燃料棒長さ	1.04m
有効長	973mm
ピッチ	正方格子, 14.9mm
燃料棒外径	11.8mm
被覆管肉厚	0.5mm
濃縮度	4.8%
UO ₂ 密度	10.5g/cm ³
各燃料棒のUO ₂ 質量	913.5g
各燃料棒の ²³⁸ U質量	766.4g
各燃料棒の ²³⁵ U質量	38.5g
被覆管	348ステンレス鋼
シムコントロールバンドル	
数	計8本, 各象限で2本
構成	燃料フォロワー及び1.35wt%のB-10を含む18-8ステンレス鋼
ポイズン部の寸法	1辺63.4mmの正方形, 高さ1.17m
燃料フォロワーの寸法	1辺63.4mmの正方形, 高さ1.16m
トランジェントロッド	
タイプ	十字型
構成	上部: 18-8ステンレス鋼, ポイズン部: 1.35wt% B-10ステンレス鋼
長さ	ポイズン部: 970mm

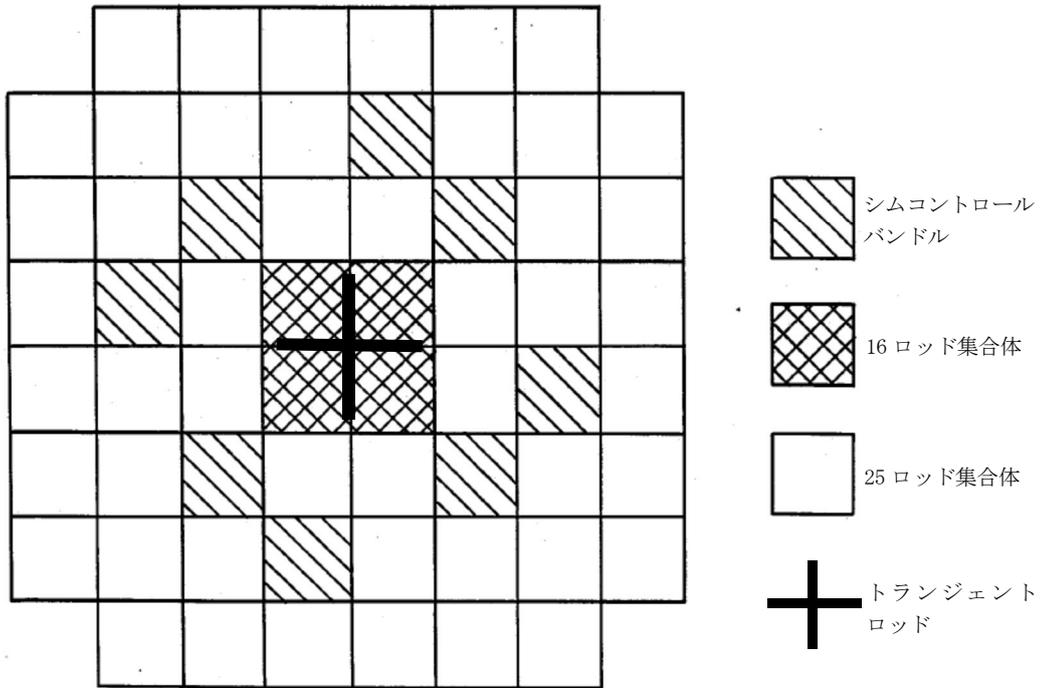


図 4.2-1 SPERT-III 炉心 燃料集合体及び制御棒配置図⁽³⁾

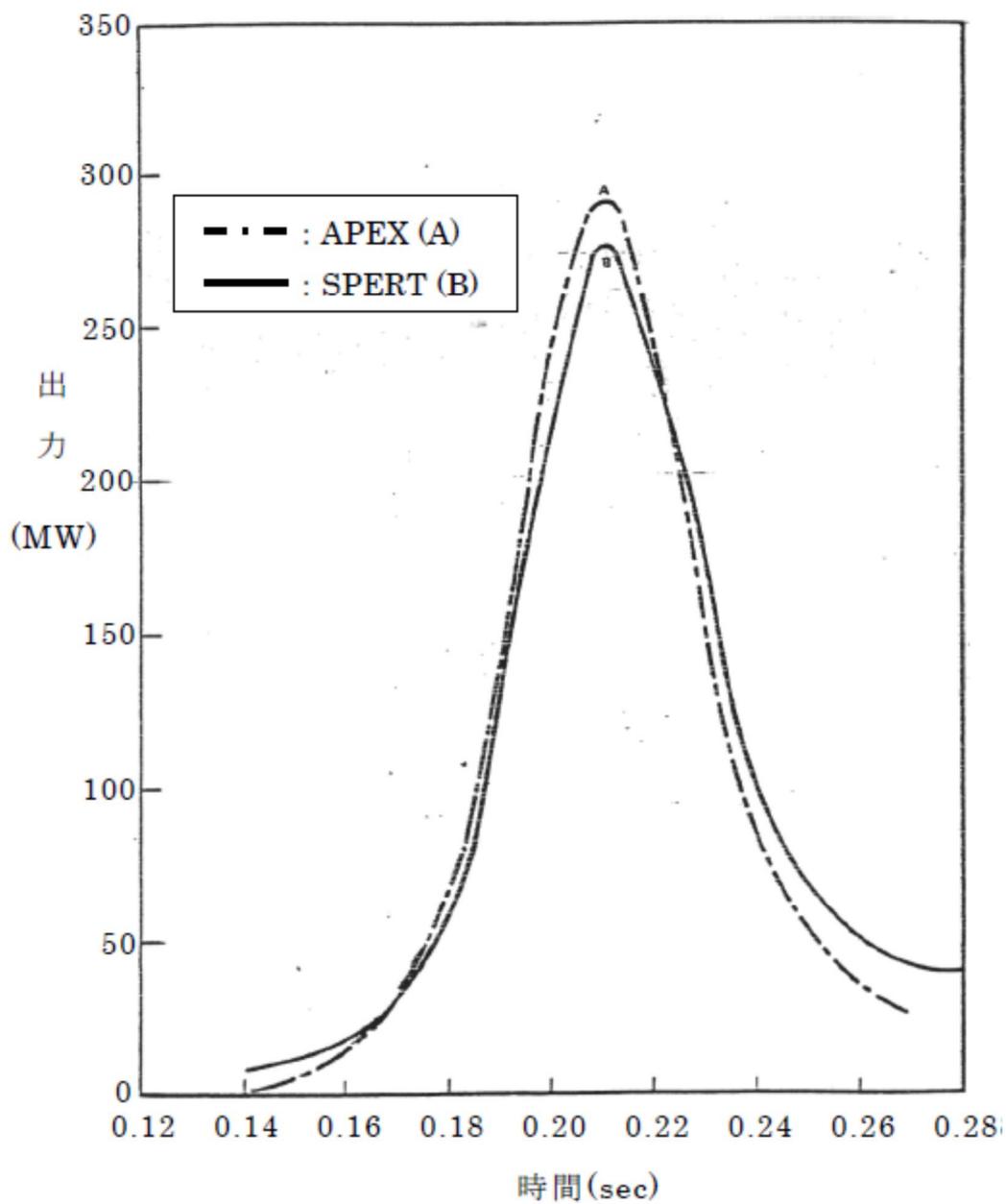


図 4.2-2 SPERT-III E 炉心実験 (低温零出力) と A P E X コードによる出力の時間変化の比⁽³⁾

4.3 実効共鳴積分測定に関わる Hellstrand の実験式との比較⁽⁶⁾

ドップラ反応度効果の妥当性確認として、4.2 節で示した SPERT-III E 炉心実験との比較に加えて、ドップラ反応度効果を計算する際に使用される核定数としてのドップラ反応度係数について、実効共鳴積分測定に関わる Hellstrand の実験式との比較を行い、妥当性を確認した。

ドップラ反応度効果は、主に ^{238}U による中性子の共鳴吸収によって起こる現象であり、ウラン燃料を装荷した炉心でも MOX 燃料を装荷した炉心でも核種全体の約 8 割を占めている。ドップラ反応度を評価する際に使用されるドップラ反応度係数は、 ^{238}U 実効共鳴積分 (I^{238}) の温度依存性によるものである。 ^{238}U に対して、実効共鳴積分及びその温度依存係数 (β) について Hellstrand らによってウラン酸化物棒での実験が行われており、実効共鳴積分の温度依存性を考慮した実効共鳴積分の実験式がまとめられている⁽⁴⁾。この実験は、図 4.3-1 に示すように、寸法を変えた照射サンプル (^{238}U) を加熱容器に入れた上で重水炉にて照射した後、その放射化量を測定することによって行われている。

$$I^{238}(T) = (I^{238}(T_0) - \delta) \{1 + \beta(\sqrt{T} - \sqrt{T_0})\} + \delta$$

$$I^{238}(T_0) = \left(4.15 + 26.6 \sqrt{\frac{S_F}{M_F}} \right) + \delta$$

$$\beta = 10^{-2} \left(0.58 + 0.5 \cdot \frac{S_F}{M_F} \right)$$

記号は以下のとおりである。

$I^{238}(T)$: ^{238}U の実効共鳴積分 (barn)

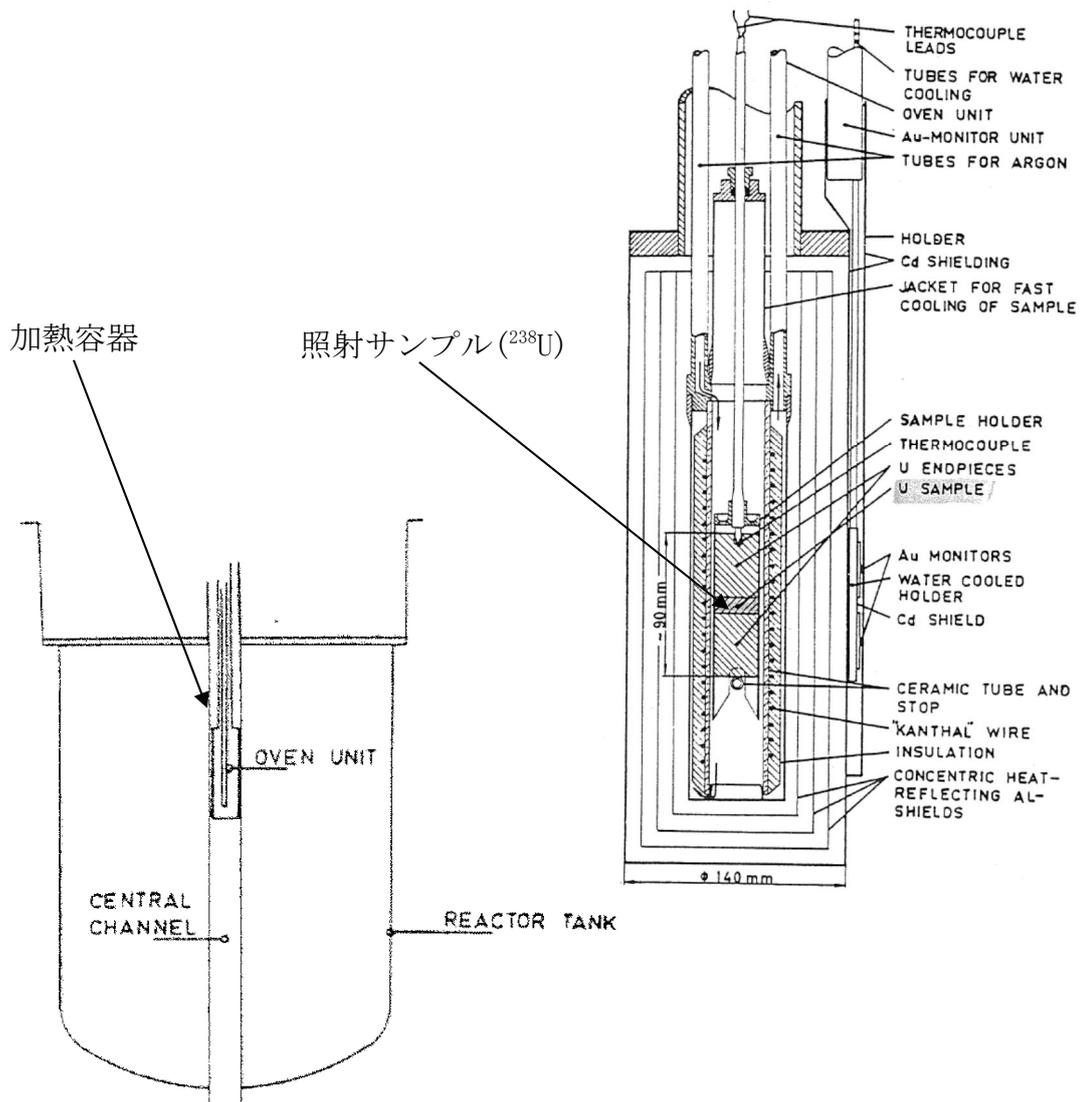
T : 燃料温度 (K)

T_0	:	基準燃料温度(K), ここでは $T_0 = 293(K)$
δ	:	共鳴積分の内の $1/v$ 吸収の寄与(1.2(barn))
S_F	:	格子効果を考慮した燃料表面積(cm^2)
M_F	:	燃料質量(g)
β	:	温度依存係数

この Hellstrand の実験式とドップラ反応度係数を算出する単位燃料集合体核計算コードの計算値と比較することにより、核定数としてのドップラ反応度係数の妥当性が確認できる。図 4.3-2 に Hellstrand の式の実効共鳴積分の温度依存性と単位燃料集合体核計算コードによる実効共鳴積分の温度依存性の比較を示す。ドップラ反応度係数は、 ^{238}U 実効共鳴積分 $I^{238}(T)$ の燃料温度に対する微分係数に比例する。前記の式から、この微分係数は、基準温度の実効共鳴積分 $I^{238}(T_0)$ ($1/v$ 吸収の寄与を除く) と、温度依存係数 β により $I^{238}(T_0) \times \beta / (2\sqrt{T})$ として表すことができる。

双方の $I^{238}(T_0) \times \beta / (2\sqrt{T})$ は Hellstrand の実験式の誤差 (7~9%) の範囲内で一致している⁽⁶⁾。このことから、ドップラ反応度フィードバック効果の不確かさは7~9%程度であると推定できる。

これから、APEXコードのドップラ反応度フィードバックモデルの妥当性を、核定数としてのドップラ係数の観点から確認した。



照射用原子炉 (重水炉)

加熟容器詳細図

図 4.3-1 Hellstrand の実験体系⁽⁴⁾



図 4.3-2 ^{238}U の実効共鳴積分の実験式と核計算コードの比較⁽⁶⁾

4.4 MISTRAL 臨界試験との比較⁽⁵⁾

MISTRAL 臨界試験は、フランス原子力庁カダラッシュ研究所の臨界試験装置 EOLE 炉で行われた MOX 燃料及びウラン燃料装荷炉心に関する炉物理試験である。

MISTRAL 臨界試験における、ウラン燃料体系及び MOX 燃料体系の試験解析ケースを表 4.4-1 に、炉心構成を図 4.4-1 に示す。ウラン燃料棒の ^{235}U 濃縮度は約 3.7wt%，MOX 燃料棒の Pu 含有率は約 7.0wt%（一部約 8.7wt%），母材は劣化ウランである。MISTRAL 臨界試験では、図に示すとおり、各燃料棒を均一に配列した体系で試験が行われている。

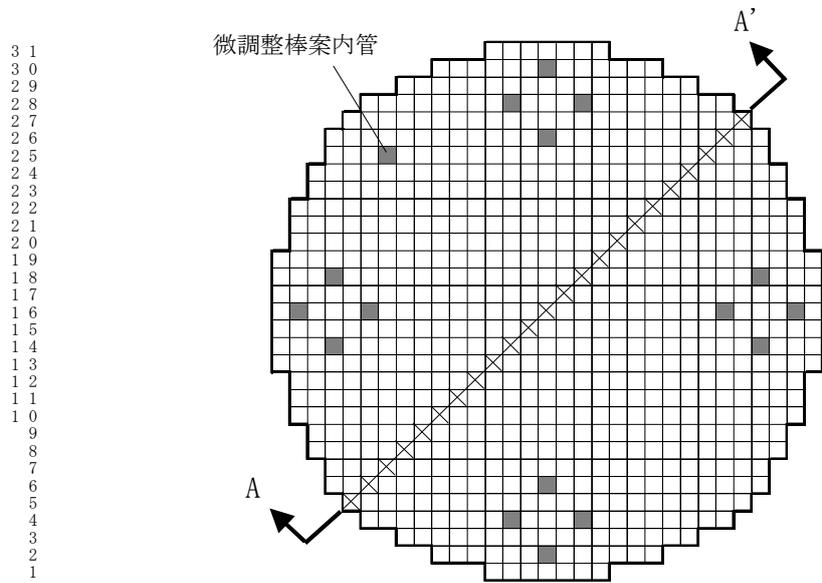
ウラン燃料体系（炉心 1）及び MOX 燃料体系（炉心 2）における実効遅発中性子割合の測定値と単位燃料集合体核計算コードによる解析値の比較を図 4.4-2 に示す。ウラン燃料体系、MOX 燃料体系ともに解析値の測定値に対する誤差は約 4%程度⁽⁶⁾である。

これから、APEXコードのドップラ反応度フィードバックモデルの妥当性を、核定数としての実効遅発中性子割合の観点から確認した。

表 4. 4-1 MISTRAL 臨界試験解析ケース一覧⁽⁵⁾

体系	基準炉心試験						
	燃料種類	²³⁵ U 濃縮度 (wt%)	Pu 含有率 (wt%)	H/HM*	格子ピッチ (cm)	燃料棒配列	減速材温度 (°C)
ウラン 燃料体系 (炉心 1)	ウラン	約 3.7	—	5.1	1.32	図 4.4-1(1)	常温
MOX 燃料体系 (炉心 2)	MOX	劣化ウラン (約 0.2)	約 7.0 (一部約 8.7)	5.2	1.32	図 4.4-1(2)	常温

* : 水素対重金属原子数比

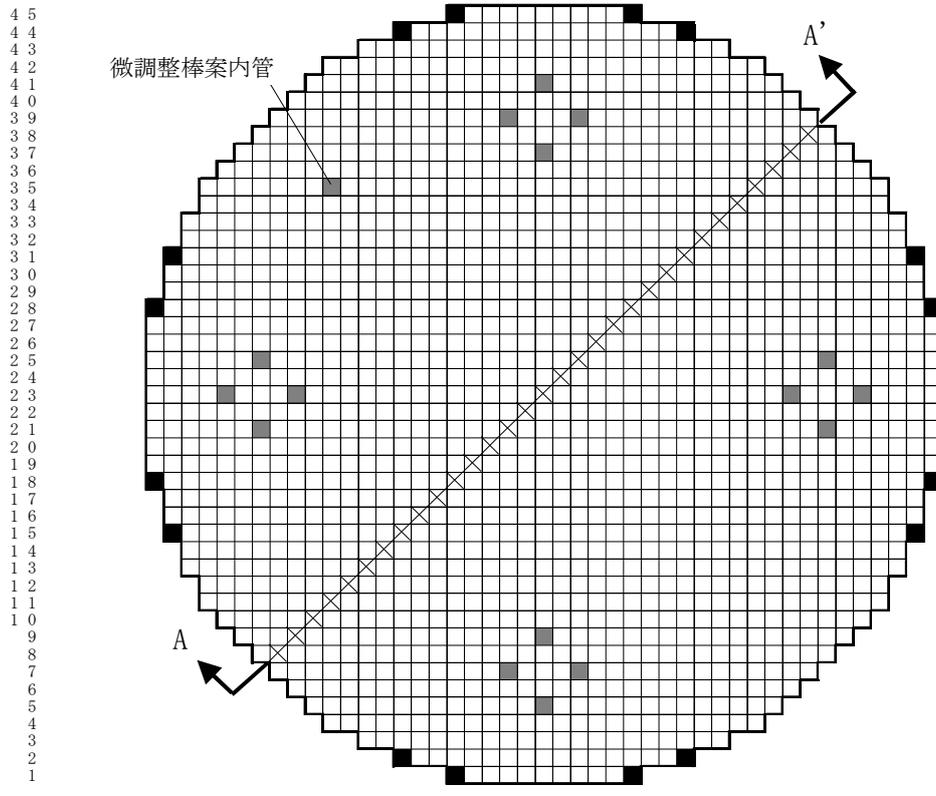


3 1
3 0
2 9
2 8
2 7
2 6
2 5
2 4
2 3
2 2
2 1
2 0
1 9
1 8
1 7
1 6
1 5
1 4
1 3
1 2
1 1
1 0
9
8
7
6
5
4
3
2
1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 3 3
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1

- 燃料棒 □ UO_2 3.7wt%
- 安全棒案内管 : 16
- 微調整棒案内管 : 1
- :安全棒案内管及び微調整棒案内管
- × :出力分布測定位置

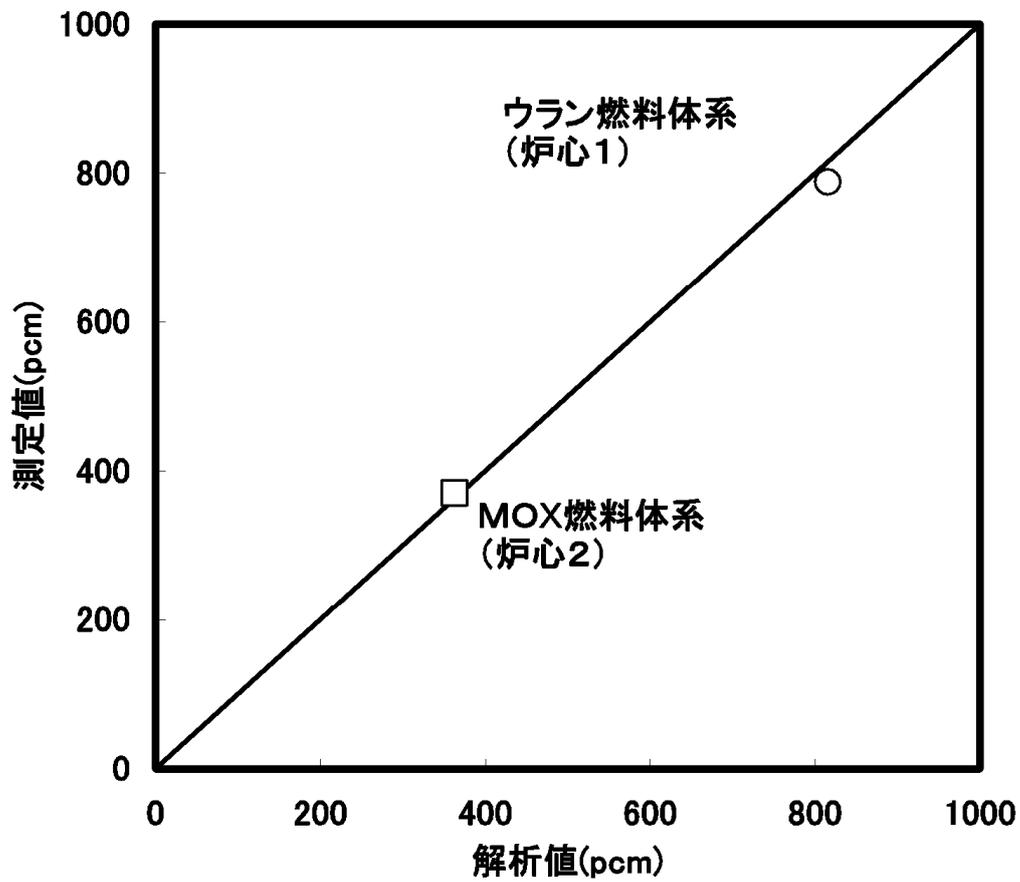
図 4. 4-1(1) MISTRAL 臨界試験におけるウラン燃料体系(炉心 1)の炉心構成⁽⁵⁾



1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5

- 燃料棒 □ MOX7.0wt%
- MOX8.7wt%
- 安全棒案内管 : 16
- 微調整棒案内管 : 1
- :安全棒案内管及び微調整棒案内管
- × :出力分布測定位置

図 4. 4-1(2) MISTRAL 臨界試験における MOX 燃料体系(炉心 2)の炉心構成⁽⁵⁾



注： pcm：反応度(1pcm = $10^{-5}\Delta k/k$)

図 4.4-2 MISTRAL 臨界試験における実効遅発中性子割合の比較⁽⁶⁾

4.5 BWR実機での制御棒価値測定試験との比較⁽⁷⁾

動特性解析においては、制御棒引き抜きによる反応度及びスクラムによる反応度はあらかじめ三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードにより求められた反応度特性を外部入力としている。よって、制御棒反応度効果の妥当性確認は、三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードの制御棒引き抜き前後の炉心状態の実効増倍率計算(実効増倍率の差分)が適切であることを確認することにより可能である。

BWRでは、実機の起動試験や炉物理試験において、制御棒反応度価値測定試験を実施している。ここでは、TGBLA Ver. 3-LOGOS Ver. 5コードについて、制御棒価値の測定結果と解析結果の比較を行うことで、制御棒反応度効果の妥当性確認を行った結果を示す。

表 4.5-1 に代表的な 110 万 kWe 級 BWR 5 での制御棒価値の測定結果と解析結果の比較を示し、図 4.5-1 に試験時の制御棒パターンを示す。これらのデータは、「原子炉安全基準専門部会高燃焼度燃料反応度投入事象検討小委員会(平成9年3月)」で報告されたもので、制御棒パターンは起動途中のパターンで、試験開始時は 40 本程度の制御棒が炉心全体に平均的に引き抜かれている。

また、表 4.5-2 に、代表的な 80 万 kWe 級 BWR 4 での炉物理試験における制御棒価値の測定結果と解析結果の比較を示し、図 4.5-2 に試験時の制御棒パターンを示す。ここでは、本事故シーケンスの制御棒パターンにより近い、炉心の一部領域で制御棒が局所的に引き抜かれている 4 ケースを妥当性確認対象として選定した。なお、ケース 3 とケース 4 は炉心に MOX 燃料が装荷されている場合で、ケース 3 は測定対象制御棒周囲に 1 体の MOX 燃料が装荷されている。

起動試験では、新燃料のみが炉心に装荷され、多数の制御棒が引き

抜かれているのに対して、炉物理試験では、新燃料及び燃焼後燃料が装荷され、また、制御棒の引き抜きパターンが局所的な領域に偏っており、外周制御棒の制御棒価値が測定できている。

表 4.5-1 及び表 4.5-2 から、制御棒価値計算の偏差は最大でも絶対値で $0.04\% \Delta k$ 、相対値では約 9 % 程度となっている。

表 4.5-1 110 万 kWe 級 BWR 5 での制御棒価値の測定結果と解析結果の比較⁽⁷⁾

(単位 : % Δk)

	解析値	実測値	偏差 (解析－実測)	相対偏差(%) (偏差／実測値)
ケース 1	0.24	0.25	-0.01	-4.0
ケース 2	0.19	0.18	0.01	5.6
ケース 3	0.49	0.45	0.04	8.9

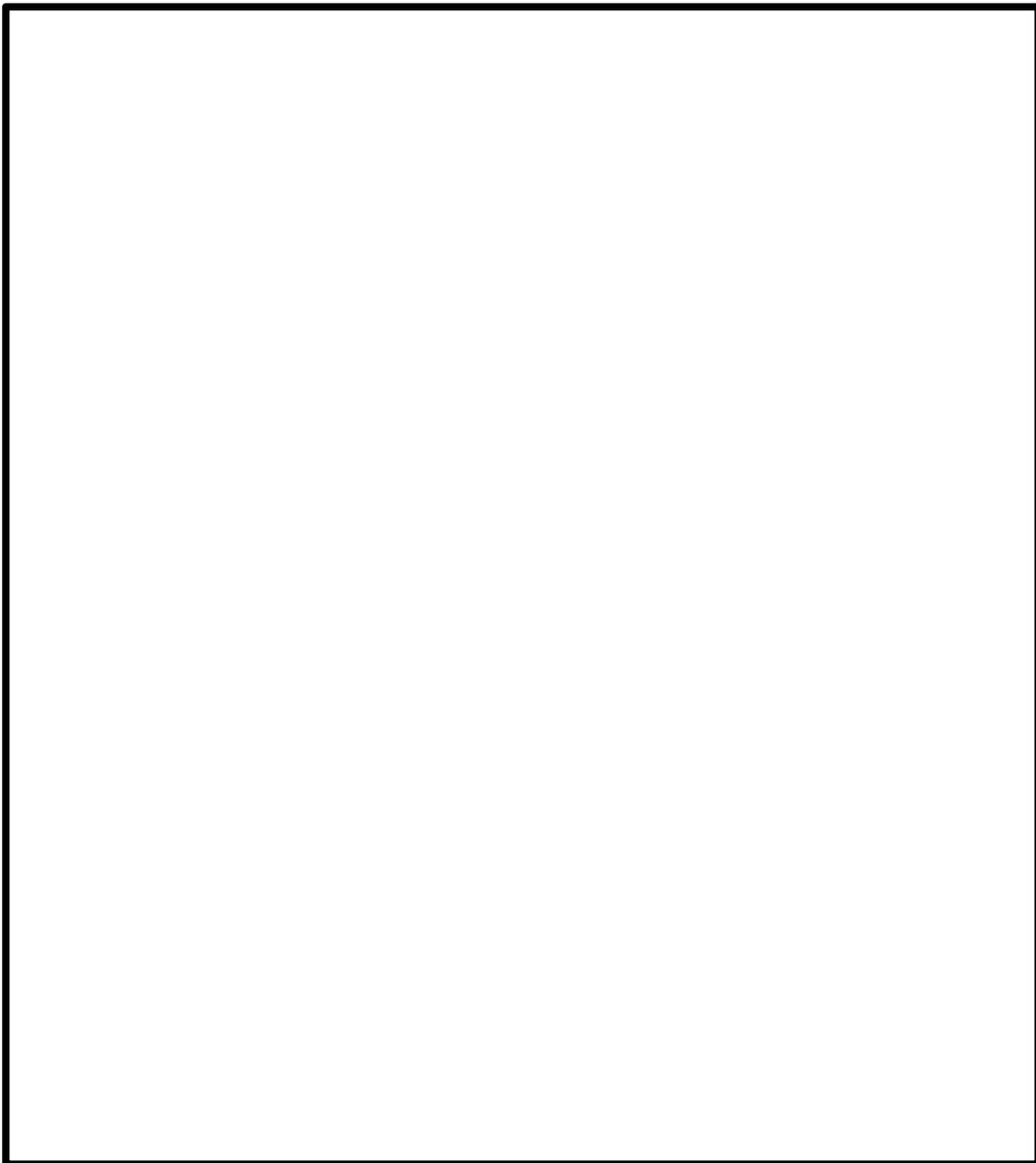


図 4.5-1 起動試験時の制御棒パターン

表 4.5-2 80 万 kWe 級 BWR 4 での制御棒価値の測定結果と解析結果の比較
 (単位: % $\Delta k/kk'$)

	解析値	実測値	偏差 (解析－実測)	相対偏差(%) (偏差／実測値)
ケース 1				
ケース 2				
ケース 3 (MOX 有)				
ケース 4 (MOX 無)				

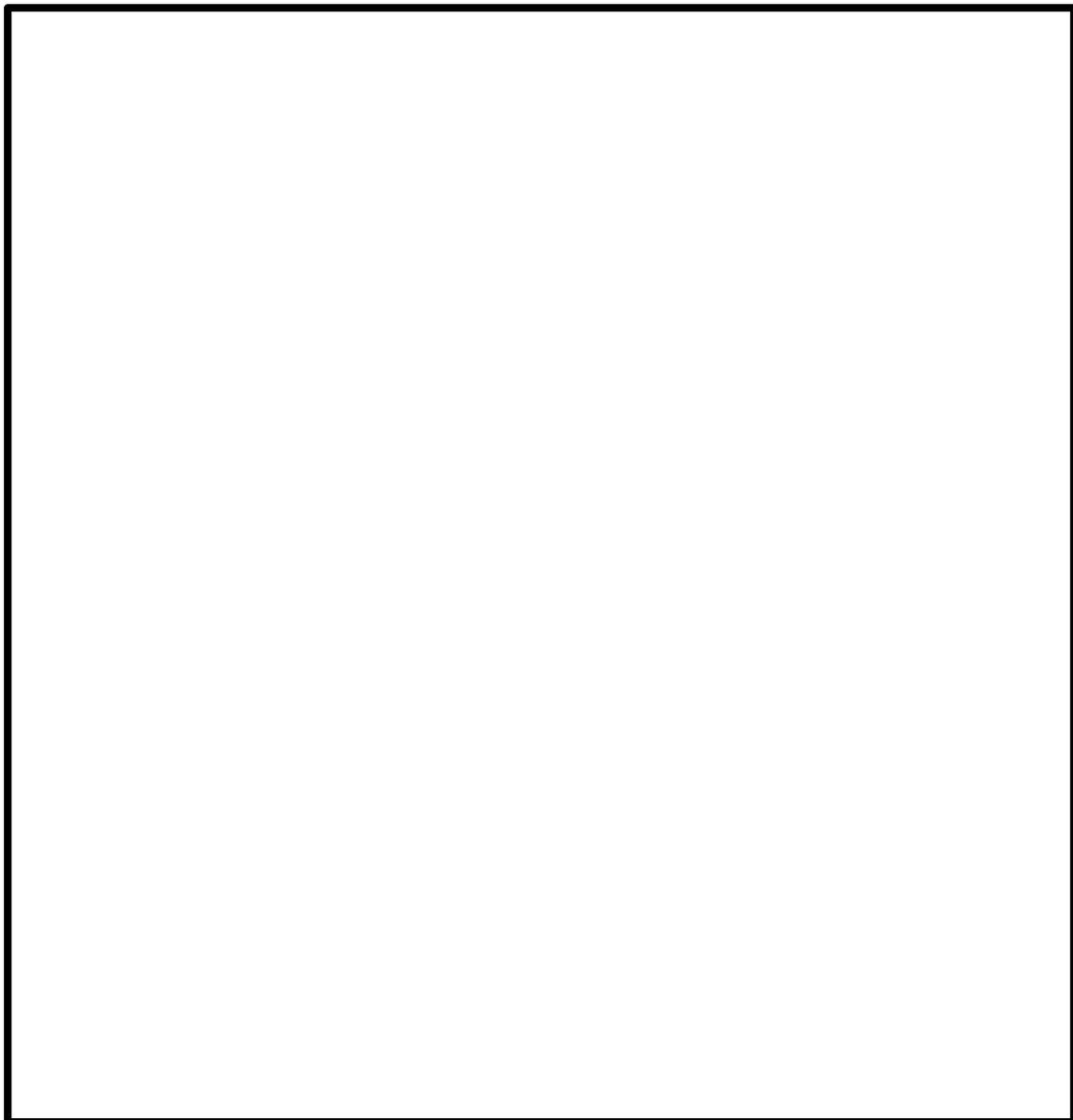


図 4.5-2 炉物理試験時の制御棒パターン

4.6 実機解析への適用性

運転停止中原子炉における「反応度の誤投入」の重要現象に対して実施したAPEX-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述べる。

制御棒の反応度効果については、実機炉心での測定試験との比較により確認されていることから実機への適用において問題はない。

ドップラ反応度フィードバック効果については、軽水炉を模擬したSPERT-III炉心での試験により確認している。加えて、ドップラ反応度係数を算出する際に使用されるドップラ係数についても Hellstrand によって実施されたBWR燃料と同じウラン酸化物棒での試験による結果と比較していることから、実機の適用において問題はない。

以上から、本章に記載している妥当性確認結果は、BWRプラントへの適用性を有するとともに、実機BWRの「反応度の誤投入」に関する有効性評価解析への適用性を有することを確認した。

5. 有効性評価への適用性

5.1 不確かさの取り扱いについて（評価指標の視点）

4章の妥当性確認において得られた重要現象に対する不確かさと、その不確かさが運転停止中原子炉における「反応度の誤投入」事象の燃料エンタルピー最大値へ与える影響を表 5.1-1 に示す。

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

(1) 核分裂出力

核分裂出力は、空間領域は誤引抜制御棒を炉心中心とした二次元 (RZ) 解析、時間領域は一点近似の中性子動特性方程式を解くことにより求めている。三次元から二次元 (RZ) への縮約に当たっては三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードによる炉心内中性子束分布を重み付けとして用い、二次元領域内の三群核定数、動特性パラメータを求めている。ドップラ反応度については時間依存の出力分布変化を取り込んだ上で炉心一点に縮約し、一点近似中性子動特性方程式に使用している。なお、制御棒引き抜きによる投入反応度は、三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードにより算出し、上記の一点近似動特性解析へ入力する。

核分裂出力の不確かさは、事象過程での核分裂出力変化の支配要因である動特性パラメータを含む核定数と同核定数に基づく反応度フィードバック効果（ボイド、ドップラ）、及び制御棒反応度効果の不確かさに含まれることから、ここでは考慮しない。反応度フィードバック効果のうち、ボイド反応度は、保守側に考慮しないこととしているため、影響があるのはドップラ反応度である。これらを含めたドップラ反応度の不確かさについては、SPERT-III 炉心実験との比較におい

て、APEXは試験値と測定誤差範囲内で同程度となっている。

(2) 出力分布変化

APEXコードでは、制御棒引き抜きに伴う径方向及び軸方向の出力分布の変化を、二次元（RZ）計算により評価している。二次元（RZ）各領域の核定数は、三次元の中性子束分布を重みとした領域平均の縮約値を用いている。

この縮約過程において、径方向出力分布及び軸方向出力分布に基づく不確かさが生じるものの、解析では引抜制御棒価値を厳しく設定し、さらに局所ピーキング係数は炉心に装荷されている燃料の燃焼寿命を通じた最大値（燃焼度0GWd/tでの値）を用いており、このような保守的な解析条件によって、最高出力燃料集合体の最高出力燃料棒の燃料エンタルピを評価することから、出力分布変化の不確かさは考慮しない。なお、二次元（RZ）体系の本事故シーケンスへの適用性については、添付2で説明する。

(3) 制御棒反応度効果

引抜制御棒反応度及びスクラム反応度による制御棒反応度効果は、図 3.4-2 に示すように、三次元核熱水力拡散計算コードによる実効増倍率計算により求めているため、三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードの不確かさに依存する。

制御棒反応度の不確かさについては、起動試験時及び炉物理試験時に行われた制御棒価値の測定結果と解析結果の比較例から、TGBLA Ver.3-LOGOS Ver.5の制御棒価値の不確かさが約9%以下であることが示されている。これを踏まえて、解析を行う必要がある。

また、実効遅発中性子割合の不確かさは、単位燃料集合体核特性計算コードの不確かさに依存する。TGBLA Ver.3 では、実効遅発中性子割合の不確かさは MISTRAL 臨界試験の比較から、約4%と評価されている。これを踏まえて、解析を行う必要がある。

(4) 反応度フィードバック

反応度フィードバックのうち、ドップラ係数の不確かさは、単位燃料集合体核特性計算コードの不確かさに依存する。TGBLA Ver.3 では、ドップラ係数の不確かさは Hellstrand の試験等との比較から、約7～9%と評価されている。これを踏まえて、解析を行う必要がある。

また、実効遅発中性子割合の不確かさは(3)にて述べたとおり、約4%と評価されている。これを踏まえて、解析を行う必要がある。

なお、ボイド反応度フィードバック効果については、「3.3 解析モデル」にて説明したとおり、APEXコードでは考慮しないモデルとしている。

(5) 燃料棒内温度変化

「反応度投入事象評価指針」において、燃料棒内メッシュの「制御棒落下」解析結果への影響は0%と報告されており、「制御棒落下」より事象が緩やかな本事故シーケンスについても、影響はほとんど生じないと考えられることから、コードの不確かさ要因としては考慮しないこととする。

(6) 燃料棒表面熱伝達

燃料棒表面熱伝達の不確かさは、除熱量の評価に影響を与えるが、「反応度の誤投入」事象は挙動が緩やかであるために出力上昇も小さく、膜沸騰に至ることなく事象は収束する。また、サブクール沸騰に伴う熱伝達係数の向上は考慮せずに、液相エンタルピが飽和状態に達するまでは单相液相状態であるという保守的条件にて熱伝達を計算している。このため、燃料棒表面熱伝達は、コードの不確かさ要因としては考慮しないこととする。

(7) 沸騰遷移

本事故シーケンスにおける事象を通じての表面熱流束は、限界熱流束に対して十分小さくなっていることから、沸騰遷移の判定式の不確かさが燃料エンタルピ解析結果に影響することはないため、コードの不確かさ要因としては考慮しないこととする。

表 5.1-1(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	<ul style="list-style-type: none"> 一点近似動特性モデル(炉出力) 出力分布は二次元拡散モデル 核定数は三次元体系の炉心を空間効果を考慮し二次元体系に縮約 	考慮しない	ドップラ反応度フィードバック及び制御棒反応度効果の不確かさに含まれる。
	出力分布変化	<ul style="list-style-type: none"> 二次元 (RZ) 拡散モデル エンタルピステップの進行に伴う相対出力分布変化を考慮 	考慮しない	解析では制御棒引き抜きに伴う反応度印加曲線を厳しく設定し、さらに局所出力ピーキング係数は対象領域にある燃料の燃焼寿命を考慮した最大値(燃焼度 0 GWd/t での値)を用いるといった保守的なモデルを適用していることから、出力分布変化の不確かさは考慮しない。
	反応度フィードバック効果	<ul style="list-style-type: none"> ドップラ反応度フィードバック効果は出力分布依存で考慮 熱的現象は断熱、ボイド反応度フィードバック効果は考慮しない 	<ul style="list-style-type: none"> ドップラ反応度フィードバック効果：7～9% 実効遅発中性子割合：4% 	実験によるとドップラ反応度フィードバックの不確かさは7～9%と評価されていることから、これを踏まえて解析を行う必要がある。また、臨界試験との比較により、実効遅発中性子割合の不確かさは約4%と評価されていることから、これを踏まえて解析を行う必要がある。
	制御棒反応度効果	<ul style="list-style-type: none"> 三次元拡散モデル 動特性計算では外部入力 	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒反応度：9% 実効遅発中性子割合：4% 	制御棒反応度の不確かさは約9%程度あることから、これを踏まえて解析を行う必要がある。また、臨界試験との比較により、実効遅発中性子割合の不確かさは約4%と評価されていることから、これを踏まえて解析を行う必要がある。

表 5.1-1(2) 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)	燃料棒内温度 変化	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	考慮しない	「反応度投入事象評価指針」において燃料棒内メッシュの「制御棒落下」解析結果への影響は0%と報告されており、類似の事象である本事故シーケンスについても、影響はほとんど生じない。
	燃料棒表面熱 伝達	<ul style="list-style-type: none"> ・単相強制対流：Dittus-Boelter の式 ・核沸騰状態：Jens-Lottes の式 ・膜沸騰状態(低温時)：NSRR の実測データに基づいて導出された熱伝達相関式 	考慮しない	「反応度の誤投入」事象は挙動が緩やかであるために出力上昇も小さく、事象発生後はスクラム反応度印加により速やかに収束するため、除熱量に不確かさがあるとしても、燃料エンタルピの最大値に対する影響はほとんどない。
	沸騰遷移	低温時：Rohsenow-Griffith の式及び Kutateladze の式	考慮しない	事象を通じての表面熱流束は限界熱流束に対して十分小さくなっていることから、沸騰遷移の判定式の不確かさが燃料エンタルピの最大値に与える影響はほとんどない。

5.1.2 重要現象の不確かさに対する感度解析

5.1.1 節で示した重要現象の不確かさのうち、ドップラフィードバック効果、制御棒反応度効果については、不確かさにより評価指標である燃料エンタルピの最大値が大きくなる可能性があることから、不確かさが印加反応度時の燃料エンタルピ最大値に与える影響の程度を確認するため、135万kWe級ABWRと110万kWe級BWR5の代表2プラントについて、運転停止中原子炉における「反応度の誤投入」事象の感度解析を実施した。

感度解析におけるふり幅は以下とする。

- ・ ドップラ反応度 ($\pm 10\%$)
- ・ 引抜制御棒反応度曲線 (1.1倍, 0.9倍)
- ・ スクラム反応度曲線 (1.1倍, 0.9倍)
- ・ β (実効遅発中性子割合) (1.1倍, 0.9倍)

表 5.1.2-1, 表 5.1.2-2 に、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た、感度解析結果を示す。

(1) ABWR

ABWRにおける投入反応度の感度解析の結果を示す。まとめは表 5.1.2-1 に示した。

- ・ ベースケース

投入反応度は0.55ドルである。

- ・ ドップラ効果, スクラム反応度値の感度 (ケース1, 3)

投入反応度は0.55ドルでベースケースからの感度はほとんどなかった。

- ・引抜制御棒反応度値の感度（ケース 2）

投入反応度は下記となった。

反応度値+10%で 0.56 ドル

反応度値-10%で 0.53 ドル

- ・ β （実効遅発中性子割合）の感度（ケース 4）

投入反応度は下記となった。

実効遅発中性子割合+10%で 0.53 ドル

実効遅発中性子割合-10%で 0.56 ドル

以上から、ABWRでは、ドップラ反応度、スクラム反応度の不確かさの影響はほとんどなく、また、引抜制御棒反応度値、 β （実効遅発中性子割合）の不確かさの影響はわずかである。

上記にて、重要物理現象の不確かさが投入反応度を与える影響を確認した。

(2) BWR 5

BWR 5における燃料エンタルピー最大値の感度解析の結果を示す。まとめは表 5.1.2-2 に示した。

- ・ベースケース

燃料エンタルピー最大値は 35kJ/kgUO₂（増分：27kJ/kgUO₂）である。

- ・ドップラ効果の感度（ケース 1）

燃料エンタルピー最大値は以下となった。

ドップラ効果+10%で 34kJ/kgUO₂ (増分：26kJ/kgUO₂)

ドップラ効果-10%で 36kJ/kgUO₂ (増分：28kJ/kgUO₂)

- ・引抜制御棒反応度値の感度 (ケース 2)

燃料エンタルピ最大値は以下となった。

反応度値+10%で 48kJ/kgUO₂ (増分：40kJ/kgUO₂)

反応度値-10%で 25kJ/kgUO₂ (増分：17kJ/kgUO₂)

- ・スクラム反応度値の感度 (ケース 3)

燃料エンタルピ最大値は以下となった。

反応度値+10%で 33kJ/kgUO₂ (増分：25kJ/kgUO₂)

反応度値-10%で 37kJ/kgUO₂ (増分：29kJ/kgUO₂)

- ・ β (実効遅発中性子割合)の感度 (ケース 4)

燃料エンタルピ最大値は以下となった。

実効遅発中性子割合+10%で 31kJ/kgUO₂ (増分：23kJ/kgUO₂)

実効遅発中性子割合-10%で 40kJ/kgUO₂ (増分：32kJ/kgUO₂)

以上から、BWR 5では、ドップラ反応度、スクラム反応度の不確かさの影響はほとんどなく、また、引抜制御棒反応度値及び β (実効遅発中性子割合)の不確かさの影響はわずかである。

上記にて、重要物理現象の不確かさが燃料エンタルピに与える影響を確認した。

なお、解析条件の不確かさではあるが、事象開始からスクラムまでの制御棒引き抜き量は、事象発生時の初期出力に依存することから、

初期出力をベースケース（定格の 10^{-8} ）の10倍、1/10倍とした感度解析を行った。初期出力のふり幅は、「反応度投入事象評価指針」の「Ⅲ. BWRに関する感度解析」にて評価された条件と同一とした。また、初期燃料温度の不確かさは燃料エンタルピ初期値に影響を与えることから、初期燃料温度（ベースケース：20℃）を制御棒引き抜き操作時に取り得る減速材温度を考慮して60℃とした感度解析を行った。

その結果、ABWRにおける初期出力による投入反応度の感度解析結果では、初期出力10倍で0.55ドル、初期出力1/10倍で0.54ドル、初期燃料温度60℃で0.57ドルとなった。また、BWR5における初期出力による燃料エンタルピ最大値の解析結果では、初期出力10倍で14kJ/kgUO₂（増分：6kJ/kgUO₂）、初期出力1/10倍で74kJ/kgUO₂（増分：66kJ/kgUO₂）、初期燃料温度60℃で46kJ/kgUO₂（増分：31kJ/kgUO₂）となった。

これから、初期出力、初期燃料温度の初期解析条件の不確かさにより、投入反応度、燃料エンタルピへの影響が生じるが、「反応度投入事象評価指針」に示された燃料の許容設計限界値等を超えることはなく、燃料の健全性は維持されることを確認した。

5.2 不確かさの取り扱いについて（運転操作の観点）

停止時の制御棒の誤引抜は，起動領域モニタの原子炉周期短信号あるいは中間領域モニタの中性子束高信号の発生により，自動的にスクラムされ，事象は未臨界となり収束することから，運転員の操作を介しない。

したがって，APEX-SCATコードの不確かさは，運転操作に影響を与えない。

表 5.1.2-1 ABWR代表プラントの停止時の制御棒の誤引き抜き事象の感度解析

ケース	ドップラ効果	引抜制御棒 反応度価値	スクラム 反応度価値	β (実効遅発中性 子割合)	投入反応度[ドル]
ベース	最確値	最確値	最確値	最確値	0.55
1-1	絶対値+10%	最確値	最確値	最確値	0.55
1-2	絶対値-10%	最確値	最確値	最確値	0.55
2-1	最確値	1.1 倍	最確値	最確値	0.56
2-2	最確値	0.9 倍	最確値	最確値	0.53
3-1	最確値	最確値	1.1 倍	最確値	0.55
3-2	最確値	最確値	0.9 倍	最確値	0.55
4-1	最確値	最確値	最確値	1.1 倍	0.53
4-2	最確値	最確値	最確値	0.9 倍	0.56

表 5.1.2-2 BWR 5 代表プラントの停止時の制御棒の誤引き抜き事象の感度解析

ケース	ドップラ効果	引抜制御棒反応度 値	スクラム 反応度値	β (実効 遅発中性 子割合)	燃料エンタルピー最大値		燃料エンタルピー増分の最大値	
					解析値 [kJ/kgUO ₂]	判断基準 [kJ/kgUO ₂]	解析値 [kJ/kgUO ₂]	判断基準 [kJ/kgUO ₂]
ベース	最確値	最確値	最確値	最確値	35	272	27	167
1-1	絶対値+10%	最確値	最確値	最確値	34		26	
1-2	絶対値-10%	最確値	最確値	最確値	36		28	
2-1	最確値	1.1 倍	最確値	最確値	48		40	
2-2	最確値	0.9 倍	最確値	最確値	25		17	
3-1	最確値	最確値	1.1 倍	最確値	33		25	
3-2	最確値	最確値	0.9 倍	最確値	37		29	
4-1	最確値	最確値	最確値	1.1 倍	31		23	
4-2	最確値	最確値	最確値	0.9 倍	40		32	

6. 参考文献

- (1) 「沸騰水型原子力発電所 反応度投入事象解析手法について」(株式会社東芝, TLR-017 改訂3 平成11年2月)
- (2) 「沸騰水型原子力発電所 反応度投入事象解析手法について」(株式会社日立製作所, HLR-012 訂3 平成11年2月)
- (3) "SPERT Reactivity Tests", NEDO-20315, February 1974.
- (4) "The Temperature Coefficient of the Resonance Integral for Uranium Metal and Oxide", Nucl. Sci. Eng., 8, 497(1960),
E. Hellstrand, et. al.
- (5) MOX 燃料炉物理試験 MISTRAL の解析, 日本原子力学会和文論文誌,
Vol. 2, No. 1 (2003) 380., 石井(他)
- (6) 「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)
- (7) 「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, TLR-007 改訂1 平成20年9月)

添付1 入力項目リスト

入力項目リスト

解析コード	分類	入 力 項 目	
A P E X	初期条件	初期炉心条件(燃料温度, 原子炉出力等)	
	炉心データ	炉心幾何形状	
		制御棒価値	
		スクラム反応度	
	燃料データ	ドップラ反応度係数	
		動特性パラメータ	
		拡散計算用核定数	
		燃料物性データ	
	S C A T	初期条件	初期条件(圧力, 流量等)
		炉心データ	APEX の出力(炉心平均出力変化, 炉心出力分布)
燃料データ		燃料集合体幾何形状	
		燃料集合体熱水力データ	
		燃料物性データ	
		ギャップ熱伝達係数	
		ペレット径方向出力分布	
		局所出力ピーキング係数	

添付2 二次元 (RZ) モデルの適用性

1. はじめに

3.3.1 節で示したように、「反応度の誤投入」事象の解析に適用するコードのうち、炉心動特性挙動を解析するAPEXコードでは、二次元 (RZ) モデルを適用しており、4章に示したように、APEXコードの妥当性確認を行っている。本添付においては、二次元 (RZ) モデルの適用性について補足的説明を行う。

2. 二次元 (RZ) モデルの適用の考え方

APEXコードでは、制御棒引き抜き時の炉心動特性挙動について炉心平均出力の過渡変化を一点近似動特性モデルで、また出力の炉心空間分布を二次元 (RZ) モデルにて扱っている。この際の各物理的項目のモデリングに基づいて、以下にその適用性を示す。

- ① 一点近似動特性モデルにおける反応度のうち、制御棒引き抜きに伴う反応度印加、スクラム制御棒挿入に伴う反応度印加については、三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードによって評価した結果を適用している。
- ② 解析対象となる炉心を三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードにて評価した結果得られるノードごとの核定数(組成及び燃焼度の三次元的空間分布)を、同評価結果により得られる三次元中性子束分布にて加重平均して二次元 (RZ) 領域へ配分する。また、誤引抜制御棒廻りの挙動が正確に評価できるように、別途、同制御棒周りの領域を選択の上で縮約する。

- ③ ②の縮約過程では引抜制御棒位置及びその周辺領域を複数に分けて縮約すること、また、三次元計算の反応率を保存して複数の領域の核定数を作成することで、領域平均の出力分布を評価している。
- ④ ②にて設定された二次元（RZ）体系において、エネルギー三群拡散方程式を適用して、中性子空間分布を求める。この中性子空間分布に基づいてノードごとのドップラ反応度を算出し、中性子空間分布とドップラ反応度分布双方の収束計算を実施する。
- ⑤ ①にて求められた反応度変化を外部入力として、一点近似動特性モデルを適用して炉心平均出力の過渡変化を求める。この際に用いている反応度変化のうち、今回の事象で支配的な引抜制御棒反応度、スクラム反応度については、引き抜かれる制御棒の三次元的な位置に依存する影響を考慮している。
- ⑥ 燃料エンタルピーの最大値は、最高出力燃料集合体の最高出力燃料棒の出力変化を評価することから、局所ピーキング係数も重要となるが、APEXコードでは解析結果における保守性を担保するために、炉心に装荷されている燃料の燃焼寿命を通じた最大値（燃焼度 0GWd/t での値）を固定入力として設定している。
- ⑦ ②及び③の縮約過程では、径方向出力分布及び軸方向出力分布に不確かさが生じるものの、解析では引抜制御棒値を解析結果が厳しくなる側に設定し、さらに⑥により局所ピーキング係数を炉心に

装荷されている燃料の燃焼寿命を通じた最大値を用いていることから、本事故シーケンスでの燃料エンタルピー評価において二次元 (RZ) モデルは適用性を有している。

添付3 検出器モデル

1. はじめに

本事故シーケンスでは、制御棒引き抜きに伴い出力が上昇した後、中間領域計装（以下「IRM」という。）の中性子束高信号、又は起動領域計装（以下「SRNM」という。）の原子炉周期短信号が発生して原子炉スクラムし、事象が収束する。

ここでは、IRM及びSRNMによるスクラム信号発生をAPEXコードで模擬するモデルについて説明する。

2. IRMモデル

IRMプラントにおいては、制御棒引き抜きに伴い出力が上昇した後、IRMのレンジ1の中性子束高スクラム設定点（フルスケールの120/125）でスクラム信号が発生するとしている。また、IRM応答はA系とB系の2系統に配分され、A系とB系のそれぞれでスクラム信号が発生すると原子炉はスクラムする。

今回の有効性評価では、IRMのレンジ1下限（フルスケールの5/125）に対応する熱中性子束は、と設定した。定格出力時の炉心平均熱中性子束は約 $3.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}(\text{nv})$ （9×9燃料（A型）の代表的な値）であることから、IRMのレンジ1下限（フルスケールの5/125）に対応する出力は以下と設定した。

- ① IRMのレンジ1下限（フルスケールの5/125）に対応する熱中性子束設定値：
- ② 定格出力時の炉心平均熱中性子束（9×9燃料（A型）の代表的な値）：
 $3.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}(\text{nv})$

- ③ I R Mのレンジ1 下限(フルスケールの 5/125)に対応する出力(ピーキング 1.0 の場合) :

(定格に対する比)

I R Mは原子炉内に局所的に配置されており、本事故シーケンスでは炉心外周部の制御棒が引き抜かれることで局所的に出力が上昇することから、I R Mの応答も局所的な影響を受ける。一方、A P E Xコードは一点近似動特性モデルを用いており、I R M応答の局所性を直接には考慮することができないため、炉心平均出力が、I R M応答の局所性を考慮して設定した値に達した時点でスクラム信号が発生するとしている。

添付図 3.2-1 に、80 万 kWe 級BWR 5 を対象とした反応度誤投入発生時を想定し、炉心が即発臨界に達するまで制御棒が引き抜かれた状態における、I R M検出器軸方向位置の炉心径方向出力分布を三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードで解析した結果を示す。

A系及びB系ともに、誤引抜制御棒に最も近い検出器が1 個バイパスされた条件における、I R M検出器周囲の出力ピーキング係数(炉心平均値 : 1.0)は、A系で約 0.10、B系で約 0.16 となる。今回の有効性評価では、出力ピーキング係数を 0.01 と設定した。

また、I R M検出器が配置されている燃料集合体間のギャップ位置は燃料集合体部に比べて熱中性子束が大きく、添付図 3.2-2 に示すとおり、低温時制御棒挿入状態における格子平均中性子束に対するI R M検出器位置の熱中性子束比は約 3 である。

以上の検討から、反応度誤投入有効性評価におけるI R Mプラントのスクラム設定点に対応する炉心平均出力を下記のとおり設定した。

① I R Mのレンジ1 下限(フルスケールの 5 /125)に対応する出力(ピーキング 1.0 の場合) : (定格に対する比)

② I R M検出器周囲の出力ピーキング係数 : 0.01

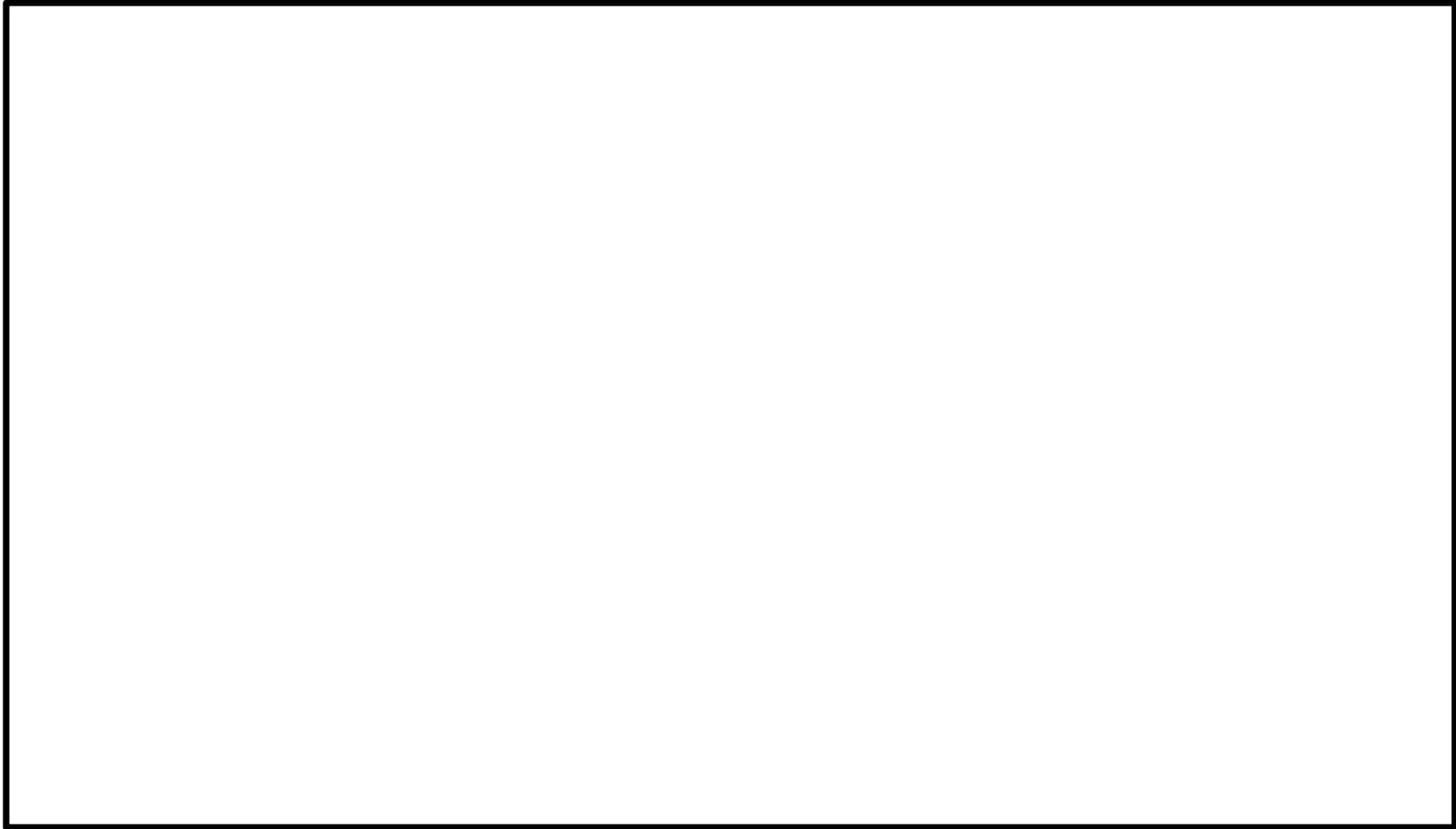
③ ギャップ位置の熱中性子束ピーキング係数 : 3

④ I R Mのレンジ1 下限に対応する炉心平均出力(ピーキング考慮) :

(定格に対する比)

⑤ I R Mのレンジ1 中性子束高スクラム設定点に対応する炉心平均出力(ピーキング考慮) :

④ $\times \frac{120/125}{5/125} =$ (定格に対する比)



添付図 3.2-2 格子平均中性子束に対する IRM 位置の熱中性子束比
(9 × 9 燃料(A型), 低温時, 制御棒挿入状態)

3. SRNMモデル

SRNMプラントにおいては、制御棒引き抜きに伴い出力が上昇した後、SRNMの原子炉周期短(中間領域においてペリオド 10 秒)でスクラム信号が発生するとしている。また、BWR 5ではSRNM応答はA系とB系の2系統に区分され、A系とB系のそれぞれでスクラム信号が発生すると原子炉はスクラムする。ABWRではSRNM応答は区分Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳの4系統に区分され、4系統のうち2系統でスクラム信号が発生すると原子炉はスクラムする。

反応度誤投入有効性評価においては、BWR 5ではA系とB系それぞれで誤引抜制御棒に最も近い検出器が1個バイパスされた条件を仮定している。また、ABWRでは以下の添付表 3.3-1 に示すSRNM区分、及び、添付表 3.3-2 に示すバイパスグループ区分に従い、各バイパスグループで誤引抜制御棒に最も近い検出器が1個バイパスされた条件を仮定している。

添付表 3.3-1 ABWRのSRNM区分

区分	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
SRNMチャンネル	A, E, J	B, F	C, G, L	D, H

添付表 3.3-2 ABWRのSRNMバイパスグループ区分

バイパスグループ	A	B	C
SRNMチャンネル	A, B, F, G	C, E, H	D, J, L

中間領域下限に対応する熱中性子束は，IRM検出器の動作領域下限と同等の と設定し，2.と同様に，中間領域下限に対応する出力(ピーキング1.0の場合)は (定格に対する比)と設定した。

また，IRMと同様に，SRNMも原子炉内に局所的に配置されており，本事故シーケンスでは炉心外周部の制御棒が引き抜かれることで局所的に出力が上昇することから，SRNMの応答も局所的な影響を受ける。一方，APEXコードは一点近似動特性モデルを用いており，SRNM応答の局所性を直接には考慮することができないため，炉心平均出力が，SRNM応答の局所性を考慮して設定した値に達した時点で中間領域に到達するとしている。

添付図 3.3-1 及び添付図 3.3-2 に，110 万 kWe 級 BWR 5 及び ABWR を対象とした反応度誤投入発生時を想定し，炉心が即発臨界に達するまで制御棒が引き抜かれた状態における，SRNM検出器軸方向位置の炉心径方向出力分布を三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードで解析した結果を示す。

110 万 kWe 級 BWR 5 において，A系及びB系ともに，誤引抜制御棒に最も近い検出器が1個バイパスされた条件における，SRNM検出器周囲の出力ピーキング係数(炉心平均値：1.0)は，A系で約 0.01，B系で約 0.07 となる。

また，ABWRにおいて，各バイパスグループともに，誤引抜制御棒に最も近い検出器が1個バイパスされた条件における，SRNM検出器周囲の出力ピーキング係数は，4区分のうち先に中間領域に到達する区分Ⅲで約 0.04，区分Ⅳで約 0.01 となる。

以上から、SRNMプラントを対象とした反応度誤投入有効性評価では出力ピーキング係数を0.01と設定した。

また、IRM検出器と同様、SRNM検出器が配置されている燃料集合体間のギャップ位置は燃料集合体部に比べて熱中性子束が大きく、添付図3.2-2に示したとおり、低温時制御棒挿入状態における格子平均中性子束に対するSRNM検出器位置の熱中性子束比は約3である。

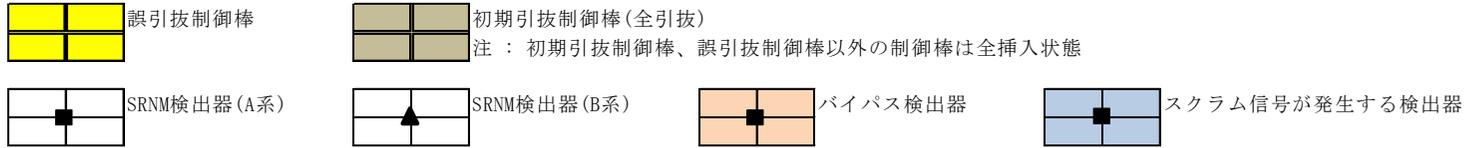
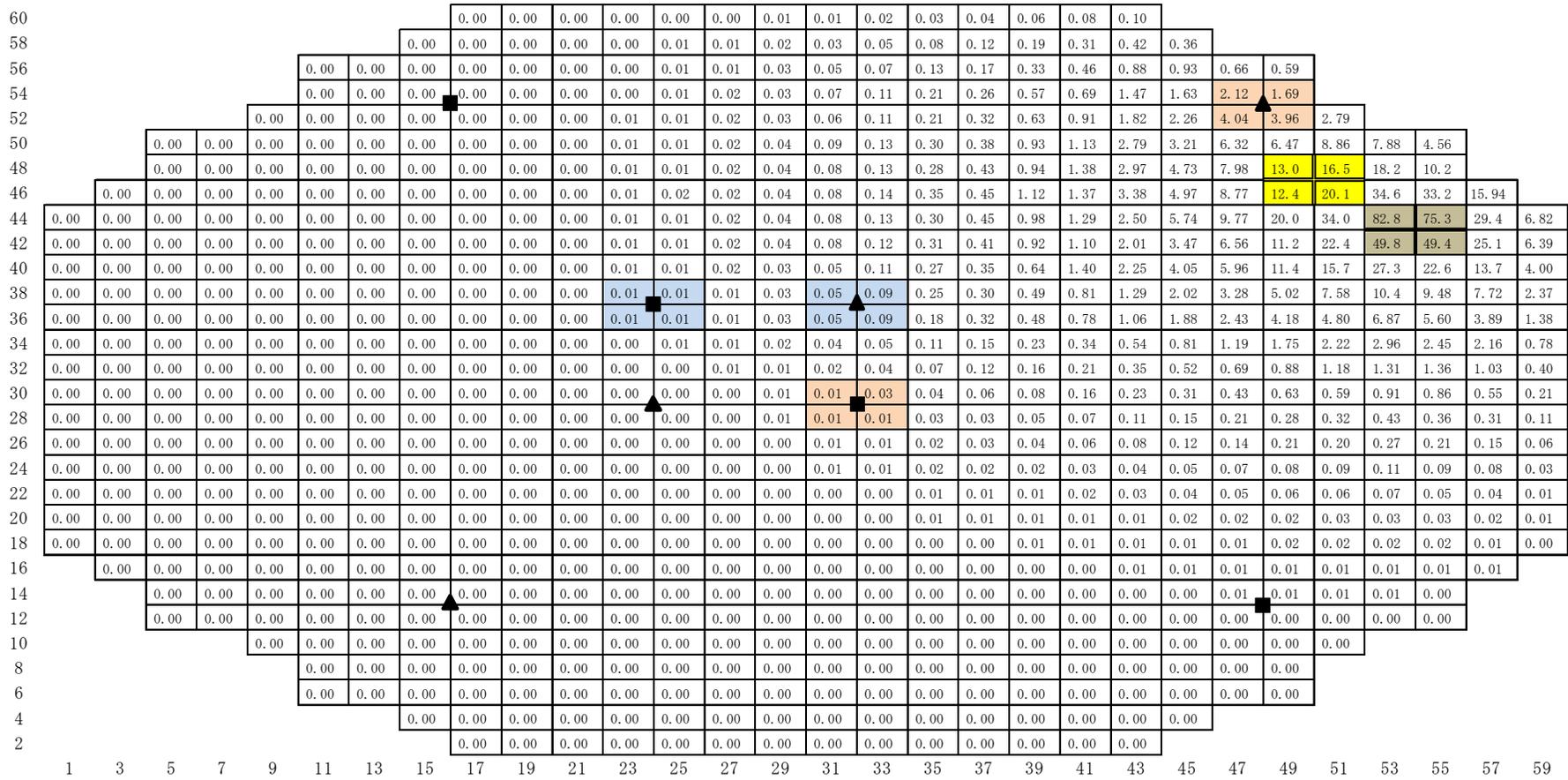
以上の検討から、反応度誤投入有効性評価におけるSRNMプラントの中間領域下限に対応する炉心平均出力を下記のとおり設定した。

- ① 中間領域に対応する出力(ピーキング1.0の場合)： (定格に対する比)
- ② SRNM検出器周囲の出力ピーキング係数：0.01
- ③ ギャップ位置の熱中性子束ピーキング係数：3
- ④ 中間領域に対応する炉心平均出力(ピーキング考慮)：
 (定格に対する比)

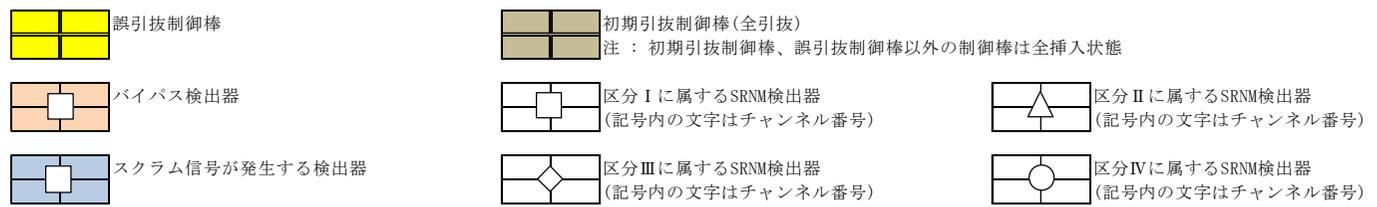
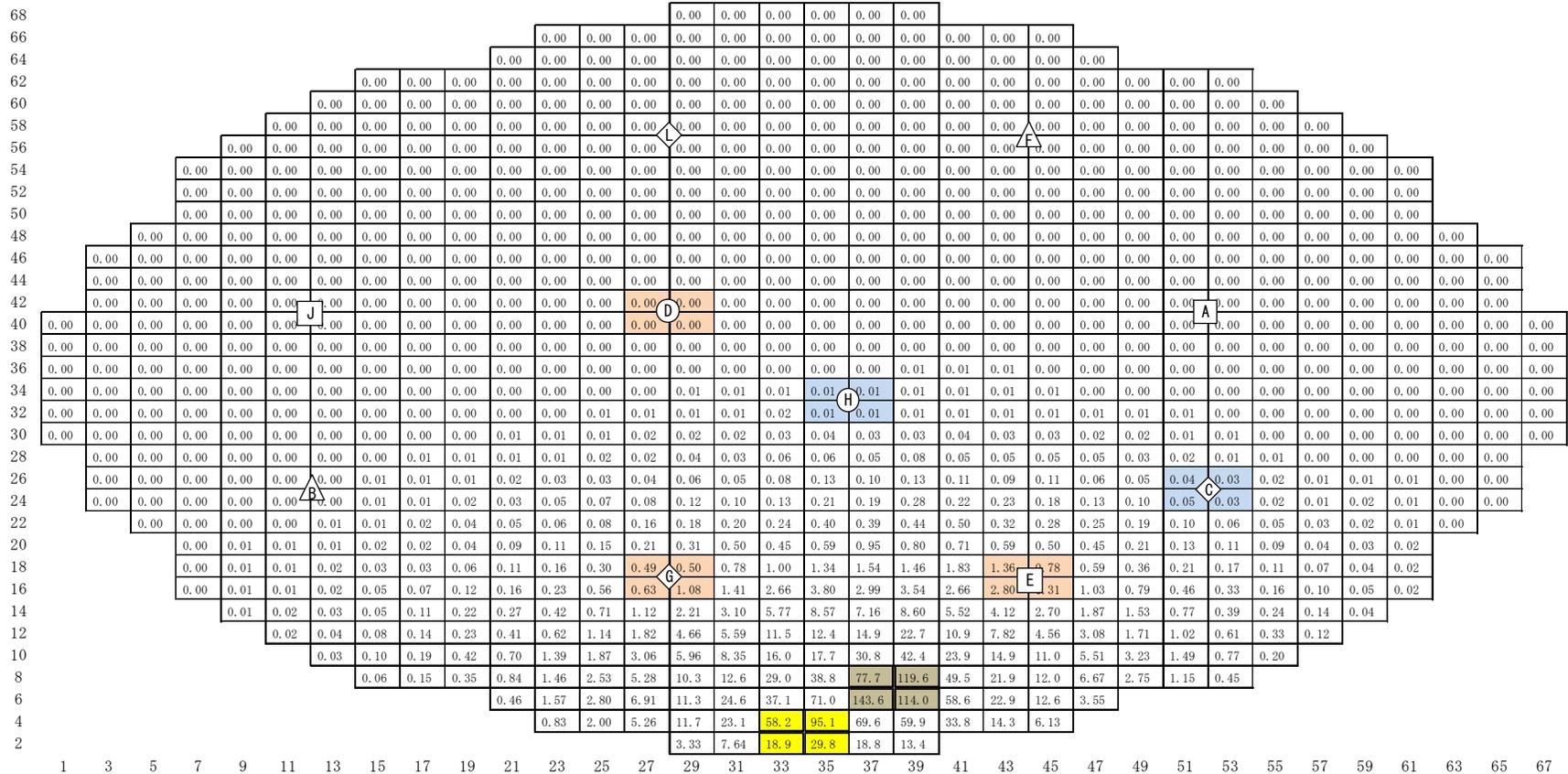
SRNMプラントでは炉心平均出力が中間領域下限(定格の)より大きく、かつ、原子炉周期短(ペリオド10秒)となる時点でスクラムするとしている。APEXコードでは、SRNM検出器配置の局所性を考慮し、炉心平均出力の増加率にを掛けることで、誤引抜制御棒とSRNMが離れている場合の空間的效果を考慮している。

添付図3.3-3に、ABWRプラントを対象に、反応度誤投入発生時のSRNM検出器応答の増加率を三次元動特性解析コードTRACGで

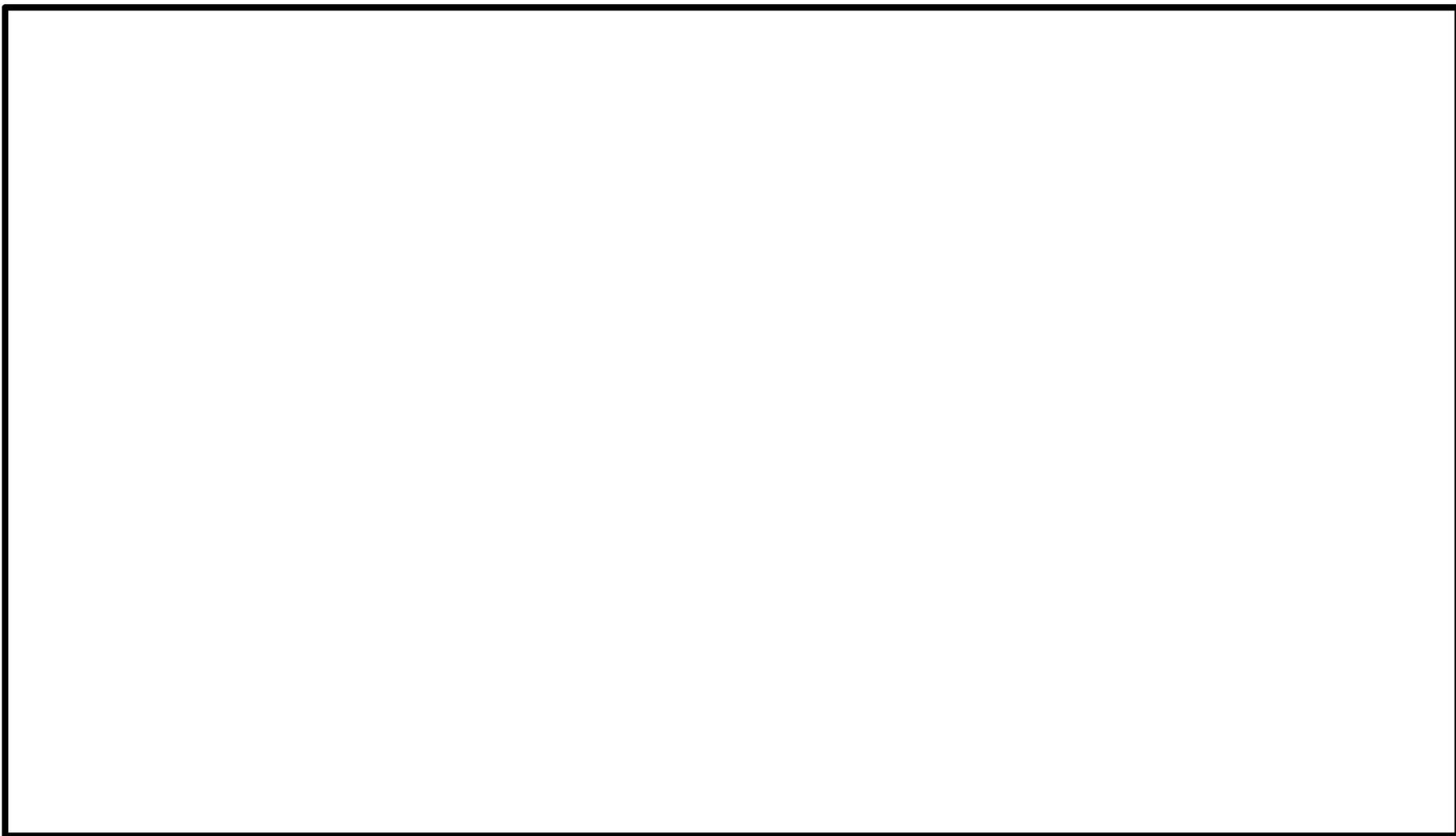
評価した結果を示す。過渡事象を通じた炉心平均出力の増加率に□を掛けた値は、各SRNM検出器位置の中性子束増加率より小さくなっており、炉心平均出力の増加率に□を掛けるAPEXコードの解析方法はスクラム時刻を保守側に評価している。



添付図 3. 3-1 反応度誤投入発生時に炉心が即発臨界に達するまで制御棒が引き抜かれた状態における S R N M検出器軸方向位置の炉心径方向出力分布(110 万 kWe 級 B W R 5)



添付図 3.3-2 反応度誤投入発生時に炉心が即発臨界に達するまで制御棒が引き抜かれた状態における S R N M 検出器軸方向位置の炉心径方向出力分布 (A B W R)



添付図 3.3-3 反応度誤投入発生時のSRNM応答(ABWR)

添付4 二次元 (RZ) 体系への縮約に伴う不確かさの影響評価

1. はじめに

3.3.1 節にて説明した、APEXコードによる炉心動特性解析において、三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードで求めた炉心を二次元 (RZ) 体系に縮約する操作に伴う不確かさが解析結果に及ぼす影響を、縮約を介さずに炉心三次元体系で動特性解析を行うことができる三次元動特性解析コードTRACGを用いて影響評価を実施した。

2. 評価条件

80 万 kWe 級BWR 5を対象に、TRACGコードを用いて以下の3炉心における反応度誤投入解析を実施し、燃料エンタルピへの影響を評価した。その他の主要な解析条件は、申請解析と同等とした。

ベース : 反応度誤投入有効性評価の申請解析相当の炉心

感度解析 1 : ベース炉心を基に、誤引抜制御棒周囲の燃料集合体を炉心中心部に移動させることで、APEXコードの引抜制御棒周囲の核定数を炉心中心に移動させる操作を模擬した炉心

感度解析 2 : 感度解析 1 を基に、APEXコードの二次元 (RZ) 体系への縮約操作を模擬した炉心

添付図 4.2-1 及び添付図 4.2-2 に、ベース炉心及び感度解析用炉心の燃料集合体燃焼度分布を示す。感度解析 1 用炉心は、ベース炉心から、誤引抜制御棒周囲の燃料集合体を炉心中心部に移動させることで、APEXコードの引抜制御棒周囲の核定数を炉心中心に移動させ

る操作を模擬している。また，感度解析 2 用炉心は，感度解析 1 用炉心を基に，添付図 4. 2-3 に示す炉心領域分けに従って，インポートランスを考慮する上で三次元出力分布重みとして，ノード単位で領域ごとの燃焼度及び履歴水密度を平均化することで，APEXコードの二次元（RZ）体系への断面積縮約操作を模擬している。

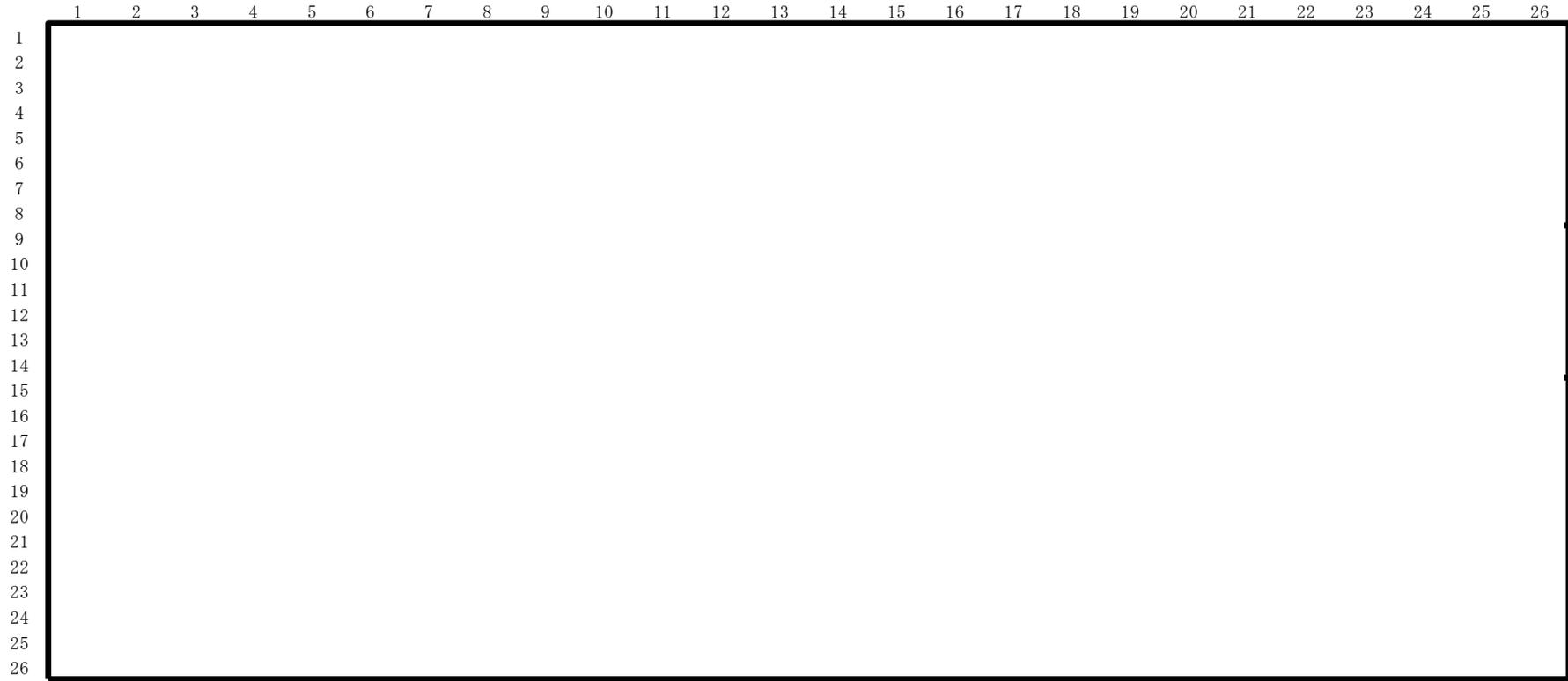
3. 評価結果

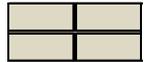
添付表 4.3-1 及び添付図 4.3-1 に、反応度誤投入の解析結果を示す。申請解析相当のベース炉心と、APEXコードの二次元（RZ）体系への縮約操作を模擬した感度解析用炉心で、反応度誤投入の過渡変化挙動はほぼ同等であり、燃料エンタルピへの影響も約 1.0kJ/kgUO₂程度に留まることから、APEXコードの二次元（RZ）体系への縮約操作に伴う不確かさが、判断指標に対する結論に影響を与えるものでないことを確認した。

添付表 4.3-1 解析結果のまとめ

ケース	全反応度の最大値 [%Δk]	全反応度の最大値 [ドル]	実効遅発中性子割合	炉心平均中性子束の最大値 [%定格]	ピーク出力部燃料エンタルピ増分 [kJ/kgUO ₂]	燃料エンタルピの最大値 [kJ/kgUO ₂]
申請解析*1	0.69	1.13	0.0061	約 12	約 35	約 49
TRACG (ベース)	0.64	1.10	0.0058	約 8	約 33	約 44
TRACG (感度解析 1)	0.63	1.12	0.0057	約 8	約 33	約 44
TRACG (感度解析 2)	0.63	1.12	0.0056	約 12	約 32	約 45

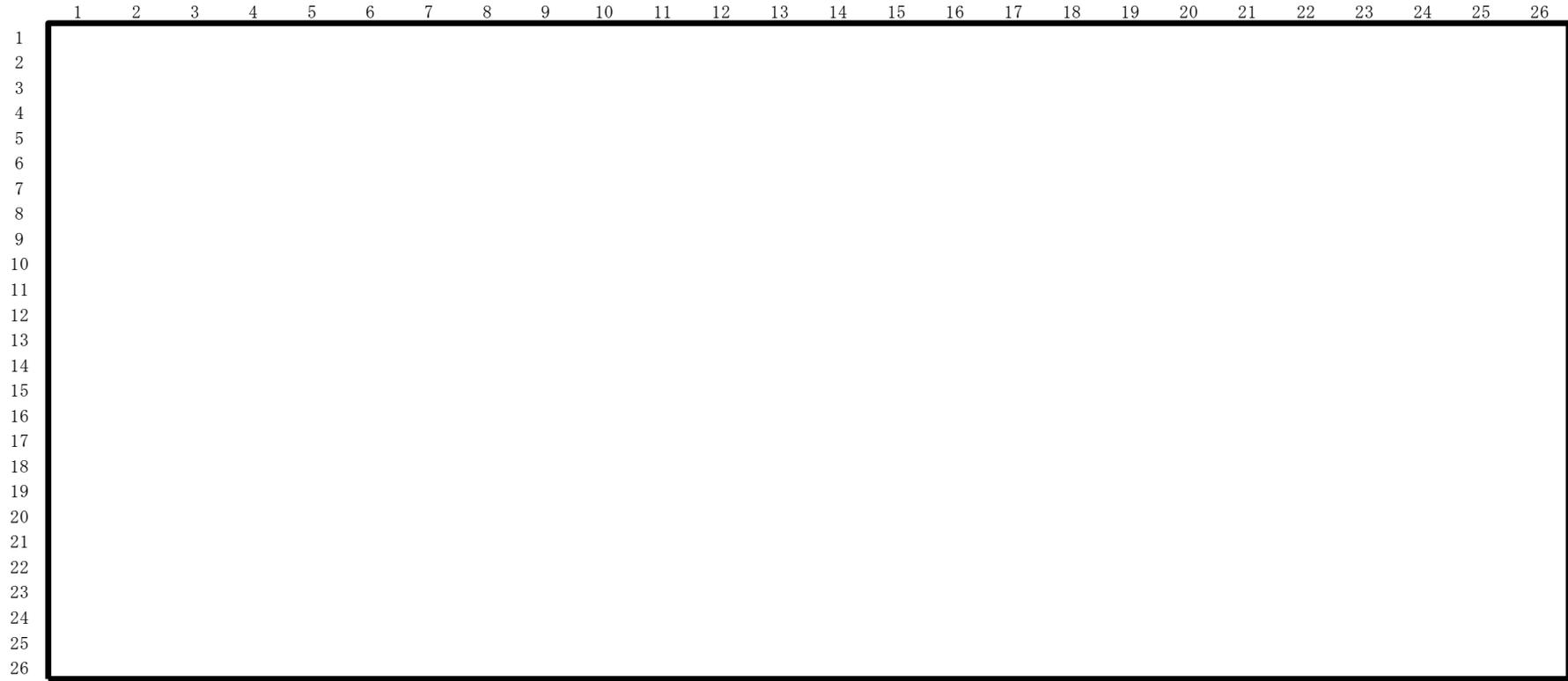
*1：APEX コードによる当該炉心の申請解析結果に相当する。

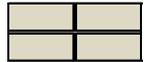


 誤引抜制御棒位置

 移動対象とした燃料集合体 (APEXコードの引抜制御棒周囲の縮約対象燃料集合体に相当)

添付図 4.2-1 ベース炉心(反応度誤投入有効性評価の申請解析相当の炉心)の燃焼度分布
(単位 : GWd/t)



 誤引抜制御棒位置

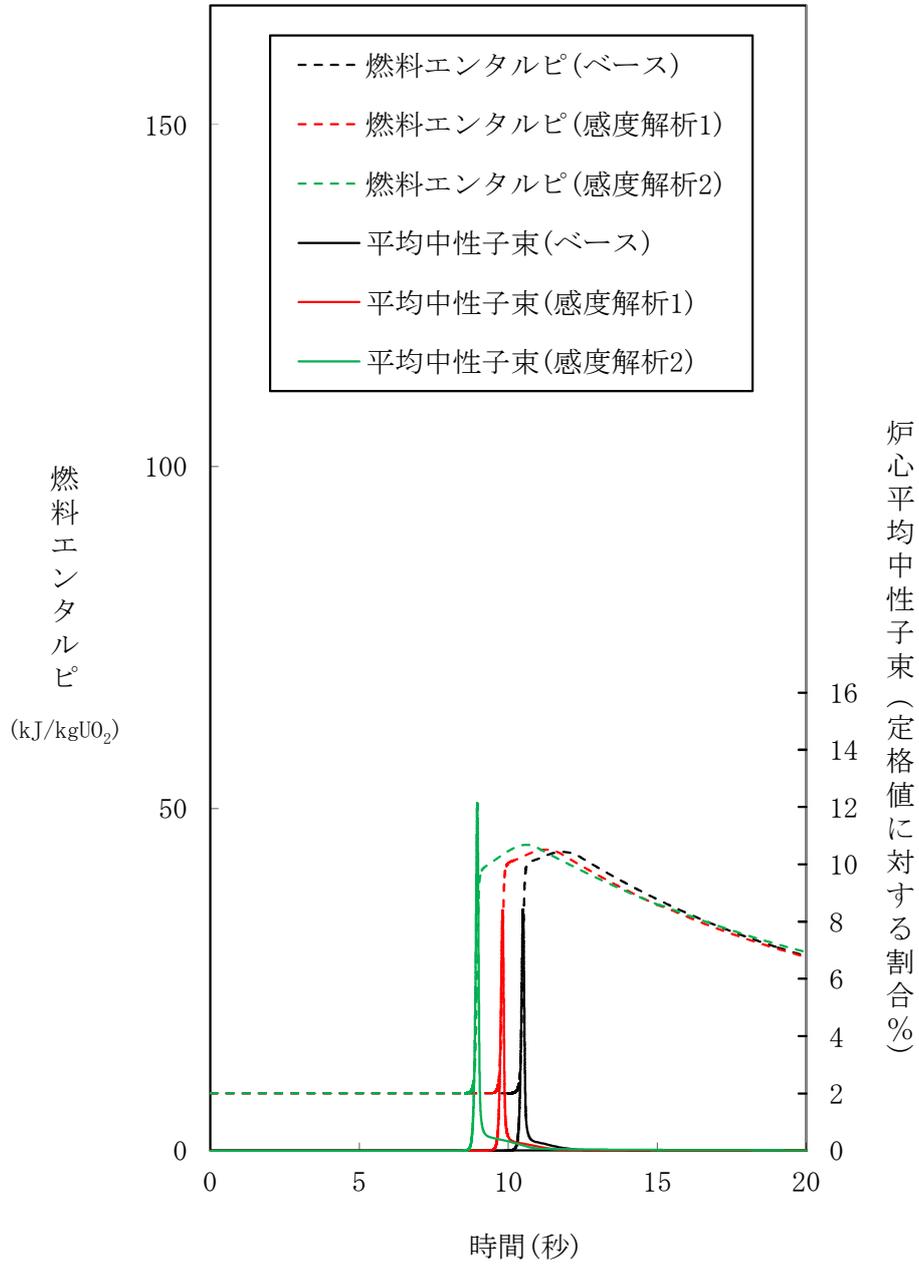
 移動対象とした燃料集合体 (APEXコードの引抜制御棒周囲の縮約対象燃料集合体に相当)

添付図 4.2-2 感度解析 1 用炉心 (ベース炉心を基に、誤引抜制御棒周囲の燃料集合体を炉心中心部に移動させた炉心) の燃焼度分布 (単位 : GWd/t)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1									9	9	9	9	9	9	9	9	9	9									
2								9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9								
3				9	9	9	9	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9					
4			9	9	9	9	9	8	8	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	9	9	9	9				
5		9	9	9	8	8	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	8	8	9	9	9			
6		9	9	8	8	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	8	8	9	9			
7		9	9	8	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	7	8	9	9				
8	9	9	8	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	7	8	9	9			
9	9	9	8	8	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6	7	8	8	9	9	
10	9	9	8	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6	7	8	9	9	
11	9	9	8	7	6	6	5	5	4	4	4	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	6	6	7	8	9	9
12	9	9	8	7	6	6	5	5	4	4	3	3	2	2	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7	8	9	9
13	9	9	8	7	6	6	5	5	4	4	3	2	1	1	2	3	4	4	5	5	6	6	7	8	9	9	
14	9	9	8	7	6	6	5	5	4	4	3	2	1	1	2	3	4	4	5	5	6	6	7	8	9	9	
15	9	9	8	7	6	6	5	5	4	4	3	3	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	8	9	9	
16	9	9	8	7	6	6	5	5	4	4	4	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7	8	9	9	
17	9	9	8	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6	7	8	9	9	
18	9	9	8	8	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6	7	8	8	9	9	
19		9	9	8	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	7	8	9	9		
20		9	9	8	7	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	7	8	9	9			
21		9	9	8	8	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	8	8	9	9			
22		9	9	9	8	8	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	8	8	9	9	9				
23			9	9	9	9	8	8	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	9	9	9	9					
24				9	9	9	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9						
25					9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9									
26						9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9										



添付図 4.2-3 感度解析 2 用炉心の作成において設定した炉心領域分け



添付図 4. 3-1 反応度誤投入における過渡変化

参考資料 1

TRACG

目次

1	はじめに	参考 1-4
2	使用実績及び解析モデルについて	参考 1-5
2.1	使用実績	参考 1-6
2.2	解析モデル	参考 1-14
3	解析結果の例示	参考 1-23
3.1	PEACH BOTTOM タービントリップ試験	参考 1-24
3.2	LASALLE 不安定事象	参考 1-32
3.3	福島第二原子力発電所 2 号炉起動試験	参考 1-44
3.4	柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉起動試験	参考 1-51
3.5	S L C 試験	参考 1-58
4	A T W S 解析への適用例	参考 1-63
4.1	A B W R 平衡炉心の M S I V 誤閉止	参考 1-63
添付 1	T R A C G コードによる中性子束振動に係る解析結果を参考として用いる理由について	参考 1-84

1 はじめに

現行の過渡解析（主蒸気隔離弁の誤閉止等）では、事象発生後短時間で原子炉スクラムするため中性子束振動現象は生じることがないが、今回の重大事故等対策の有効性評価のうち原子炉停止機能喪失では、原子炉がスクラムせず、高出力・低流量の状態に至るために中性子束振動が生じる可能性がある。この中性子束振動現象については、REDYコード及びSCATコードでは取り扱うことができないことから、この取り扱いが可能な解析コードとして米国の設計認証申請においても適用例を有するTRACGコードによる解析を参照する（添付1）。

以上を踏まえ、本資料では、炉心損傷防止に関する重大事故等対策の有効性評価（以下「有効性評価」という。）に適用するREDYコード（REDY Ver. 1（ATWS用）、REDY Ver. 2）及びSCATコード（SCAT Ver. 3）に対する参考として使用するTRACGコード（TRACG Ver. 5）について

- ・使用実績及び解析モデル
- ・解析結果の例示
- ・ATWS解析への適用例

に関してまとめる。

2 使用実績及び解析モデルについて

TRACGは、オリジナルの原子炉過渡解析コード（以下「TRAC」という。）⁽¹⁾のGE Hitachi Nuclear Energy社（以下「GEH」という。）が所有権をもつバージョンである。この解析コードは、単純な運転時の異常な過渡変化（以下「AOO」という。）及び設計基準事故である冷却材喪失事故（以下「LOCA」という。）から過渡時のスクラム失敗事象（以下「ATWS」という。）に至るまでの沸騰水型原子炉（以下「BWR」という。）の過渡変化を解析するための最適評価コードである。この章では、TRACGコードの使用実績及び解析モデルについて記述する。

なお、以降でのTRACGに関する記述は、米国での適用実績については旧バージョンに関するものであるが、それ以外の記述については最新バージョンであるTRACG Ver.5に関するものである。

最新バージョンであるTRACG Ver.5と前バージョンのTRACG Ver.4との相違点は、核動特性モデルがエネルギー修正1群からエネルギー3群解析的多項式ノード法モデルに改良された点であり、熱水力モデルは同じである。

2.1 使用実績

この節ではTRACGコードの開発の経緯、全体のスコープ及び評価性能、米国での適用例について説明する。

2.1.1 背景

TRACは、元々加圧水型原子炉（以下「PWR」という。）の解析のため、ロスアラモス国立研究所(LANL)で開発されたものである。TRACの最初のPWRバージョンは、TRAC-P1A⁽²⁾と呼ばれた。TRACのBWRバージョンの開発は、GEHとアイダホ国立工学研究所(INEL)の協調的取組みとして1979年に開始された。この取組みの目的は、BWRのLOCAを模擬できるTRACのバージョンを開発することにあった。主な作業として、BWRへの適用のため、TRACの基本モデルの改良及びBWR固有のコンポーネントのためのモデル開発がなされた。GEHでのこの作業には、GEH、原子力規制委員会(以下「NRC」という。)及び電力中央研究所(以下「EPRI」という。)が、リフィル/再冠水及びFISTプログラムの下で共同出資した。作業は、1980年代半ばに頂点に達し、INEL⁽³⁾でのTRAC-BD1/MOD1の開発、及びGEH^{(4)~(10)}でのTRACB04の開発に結実した。これらはBWRのLOCA解析能力を有するTRACの最初の主要バージョンであった。共同開発したことから、二つのBWR用TRACバージョンの基本構造及びコンポーネントモデルは、実質的に同一であった。この開発期間中、TRACGは、BWRのLOCA及び過渡を模擬した個別効果試験データ、機器性能評価データ及び総合効果試験に対し、広範に妥当性が確認された。妥当性確認の詳細文書は、参考文献(4)、(5)、(10)に含まれる。

1985年に始まったTRACのBWRバージョンの開発に関する次の段階では、過渡及びATWSへの適用を含むようにコードの解析能力を向上させる目的に注力した。この期間中の主な成果は、三次元核動特性モデルの実装、熱水力モデルのための陰解法を用いた数値積分法の開発及びBWR燃料模擬法の改良であった。1990年代を通して進展した開発活動の結果、コードバージョンをTRACGと改名した。この期間中、試験装置及びBWRプラント⁽¹¹⁾のみならず、制御棒落下試験も含めた過渡及び安定性データに対し、TRACGの妥当性が広範に確認された。参考文献(12)に、これらの妥当性確認を包括的に記述した。TRACGは、ESBWR^{(13),(14)}の開発を支援するため実施した広範囲のシステム効果、機器性能評価及び総合効果試験に対し、さらなる妥当性が確認されている。

2.1.2 コード全体のスコープ及び評価性能

TRACGは、原子炉の熱水力挙動を評価する多次元二流体モデル、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に基づいている。

熱水力挙動を取り扱うためにTRACGで用いる二流体モデルは、TRAC-PF1及びTRAC-BF1⁽¹⁾に使用されている二流体モデルと基本的に同じである。この二流体モデルは、気相及び液相に対し、質量、運動量及びエネルギーの保存式を基礎式として解く。TRACGの基

礎式では、二相間の熱的及び力学的な平衡について、いかなる仮定も含めていない。また、気相は蒸気及び非凝縮性ガスの混合気体から構成することが可能であり、液相には水溶性ほう素を含めてもよい。熱水力モデルは、ベッセルコンポーネントを多次元、その他すべてのコンポーネントを一次元で定式化している。

質量、運動量及びエネルギーの保存式は、気液界面及び壁面におけるせん断応力及び熱伝達に対する構成式からなる付加的なモデルを用いることで閉じることができる。構成式は流動様式に依存しており、コード全体で首尾一貫して使用する単一の流動様式マップに基づいて選定する。

基本的な熱水力モデルに加えて、TRACGでは再循環ポンプ、ジェットポンプ、燃料チャンネル、気水分離器及び蒸気乾燥器のようなBWR機器のための一連のコンポーネントモデルも備えている。TRACGでは、更に、圧力、水位及び再循環流量制御系のような主要なBWR制御系を模擬することのできる制御系モデルを備えている。

三次元核動特性モデルは三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードAETNA^{(15), (17)}と同一のモデルであり、エネルギー3群の時間依存拡散方程式、及び6群の遅発中性子先行核濃度の動特性方程式を解く。制御棒位置及び熱水力モデルから求められた減速材密度、燃料温度、ほう素濃度に基づき反応度フィードバックが求められる。

TRACGの構成はモジュール化手法に基づいている。TRACGの熱水力モデルは、パイプ、ポンプ、弁、T字配管、チャンネル、ジェットポンプ、気水分離器、熱交換器及びベッセルコンポーネントのような一連の基本コンポーネントをモジュールとして含んでいる。これらのコンポーネントを構成要素として使用し組み立てることで解析対象を模擬する。解析に際しては、任意の数のコンポーネントを組み合わせることが可能である。コンポーネントの数、それらの相互関係及び各コンポーネントの詳細は、入力データを通して特定される。TRACGは、このようにして、単純な個別効果試験から完全なBWRプラントまでの広い範囲の設備を模擬できる能力を有している^{(18), (41)}。

TRACGでは、個別効果試験、機器性能データ、総合効果試験及び実規模のBWRプラントデータに対し、広範にその妥当性を確認してきている。個別効果試験に対する基本モデルの妥当性確認、総合効果試験に対する妥当性確認及び実プラントデータに対する妥当性確認の中で実施した代表的な結果を本資料で説明する。この妥当性確認の目的は、TRACGの基本モデルの適用性を実証すること及びモデルの不確かさを定量化することにある。

2.1.3 米国での適用実績

TRACGの旧バージョンであるVer. 2及びVer. 4について、米国のNRC (Nuclear Regulatory Commission) に承認されたLTR (Licensing Topical Report) をもとにA O O, ATWS, 安定性, LOCAに関する使用実績を説明する。

表 2.1-1 に米国のNRCに承認されたA O O, ATWS, 安定性, LOCAに関する主なLTRを示す。No. 1 から No. 5 はA O O又はATWSに関するLTRを、No. 6 から No. 9

は安定性に関するLTRを、No. 10はLOCAに関するLTRを示しており、それぞれにNRCのSER (Safety Evaluation Report : 安全評価報告書) が添付されている。No. 11はTRACGで使用されている解析モデルについて記述されており、No. 12は試験データとの比較によるTRACGの妥当性確認結果について記述されている。No. 11及びNo. 12は、各プラントタイプ、各適用事象に対してTRACGの適用性を示したNo. 1からNo. 10のLTRを審査する時に参照され、その妥当性が評価されている。

2.1.3.1 AOOへの適用実績

AOOについては、No. 1, No. 3, No. 4に解析例が提示されている。No. 1では、代表的なBWR4プラントを対象として、圧力増加過渡事象についてはタービントリップ (バイパス弁不作動)、給水制御系の故障、主蒸気隔離弁の誤閉止を、圧力減少過渡事象については圧力制御系の故障を、流量増加/減少過渡事象については再循環ポンプトリップ、再循環流量制御系の故障を、サブクール過渡事象については給水加熱喪失を、水位減少過渡事象については給水流量の全喪失を、TRACG Ver. 2を用いて炉心出力、炉心流量、ドーム圧力、圧力容器入口及び出口の流量、CPR (Critical Power Ratio : 限界出力比) の時間変化等について評価した結果を示している。No. 3では、No. 1とは異なるBWR4プラントを対象として、圧力増加過渡事象についてはタービントリップ (バイパス弁不作動)、給水制御系の故障、主蒸気隔離弁の誤閉止を、流量増加/減少過渡事象については再循環流量制御系の故障を、サブクール過渡事象については給水加熱喪失を選択し、TRACG Ver. 4及びVer. 2の結果を炉心出力、炉心流量、給水流量、入口サブクール度、ドーム圧力変化、 Δ CPR/ICPRの時間変化等について比較して示している。TRACG Ver. 4の結果はVer. 2の結果に対して保守的な結果を生じるとしている。No. 4では、ESBWRを対象として、圧力増加過渡事象については負荷遮断 (バイパス弁不作動)、タービントリップ (バイパス弁不作動)、主蒸気隔離弁の誤閉止を、サブクール過渡事象については給水加熱喪失を、水位減少過渡については給水流量の全喪失を、TRACG Ver. 4を用いて炉心出力、炉心流量、ドーム圧力、圧力容器入口及び出口の流量、CPRの時間変化等について評価した結果を示している。

2.1.3.2 ATWSへの適用実績

ATWSについては、No. 2, No. 3, No. 5に解析例が提示されている。No. 2では、代表的なBWRプラントを対象として、圧力増加過渡事象については主蒸気隔離弁の誤閉止に対するスクラム失敗を、圧力減少過渡事象については圧力制御系の故障に対するスクラム失敗を、TRACG Ver. 2を用いて炉心出力、炉心流量、ドーム圧力、圧力容器入口及び出口の流量の時間変化等について評価した結果を示している。No. 3では、BWR4プラントを対象として圧力増加過渡事象である主蒸気隔離弁の誤閉止に対するスクラム失敗を選択し、TRACG Ver. 4及びVer. 2の結果を炉心出力、炉心流量、給水流量、入口サブクール度、ドーム圧力変化、 Δ CPR/ICPRの時間変化等について比較して示している。TRACG Ver. 4の結果は

Ver. 2 の結果に対して保守的な結果を生じるとしている。No. 5 では、E S B W R を対象として、圧力増加過渡事象については主蒸気隔離弁の誤閉止、復水器真空度の喪失 (L C V : Loss of Condenser Vacuum) に対するスクラム失敗を、サブクール過渡事象については給水加熱喪失に対するスクラム失敗を TRACG Ver. 4 を用いて、中性子束、炉心流量、給水流量、蒸気流量、ドーム圧力、ダウンカマの水位、ボロン濃度の時間変化等について評価した結果を示している。また、No. 5 ではタービントリップ (バイパス弁作動) に対するスクラム失敗において、核及び熱水力の相互作用による不安定性から生じる出力振動の時間変化について評価した結果を示している。

2.1.3.3 安定性への適用実績

安定性については、No. 6 から No. 9 に解析例が示されている。No. 6 では、代表的な B W R プラントを対象として、TRACG Ver. 4 を用いた不安定事象を解析し M C P R (Minimum CPR: 最小限界出力比) の時間変化及び S L M C P R (Safety Limit MCPR) に対する裕度を評価している。No. 7 では、炉心サイズの異なる二つの B W R 4 プラント並びに B W R 5 及び B W R 6 プラントを対象として、高出力/低流量における炉心出力の振動を TRACG Ver. 2 を用いて解析し、D I V O M (Delta CPR over Initial MCPR Versus Oscillation Magnitude) の評価を行った結果が示されている。No. 8 では、代表的な B W R を対象として、TRACG Ver. 4 及び Ver. 2 を用いて不安定事象を解析し、チャンネルの出力、流量、及び M C P R の時間変化、D I V O M について両コードの比較結果が示されている。D I V O M の評価において TRACG Ver. 4 の結果は、Ver. 2 の結果に対して本質的に同等であるか、より保守的な結果となるとしている。No. 9 では、E S B W R を対象として、チャンネル安定性、炉心安定性、領域安定性に関する TRACG Ver. 4 の解析結果が示されている。

2.1.3.4 L O C A への適用実績

L O C A については、No. 10 に解析例が示されている。No. 10 では、E S B W R を対象として、E C C S / L O C A、格納容器 / L O C A 及び主蒸気管破断 L O C A に関する TRACG Ver. 4 の解析結果が示されている。

2.1.3.5 審査で参照・評価された L T R

N R C の審査では、上記で説明した各事象評価への T R A C G の適用を申請した No. 1 から No. 10 の L T R の審査に No. 11 及び No. 12 の L T R が参照されて適用範囲に応じた内容が評価されている。No. 11 は T R A C G のモデル解説書の最新版であり、中性子動特性及び熱水力挙動を解析するために必要な基礎方程式、物理モデル又は構成式、機器・コンポーネントモデル、数値解法について記載されている。No. 12 は T R A C G の妥当性確認結果の最新版であり、試験データとの比較により T R A C G モデルの妥当性を示している。表 2.1-2 及び表 2.1-3 に T R A C G の妥当性確認に関する実績を示す。

TRACGの妥当性確認では、下記の主要な妥当性確認カテゴリで構成される系統的な方法に従い、個別効果試験及び機器性能評価試験にて解析モデルの不確かさを評価し、総合効果試験にて解析コードの適用性及び解析モデルの総合的な妥当性が確認されている。また、BWRプラント試験にて、解析コードのBWR実規模体系への適用性が確認されている^{(12), (16)}。

- 個別効果試験

基本モデル及び現象の妥当性確認を特別に指向した十分に制御された試験である。ここに含まれるのは、(1)界面せん断力及びサブクール沸騰モデルを評価するボイド率データ^{(19)~(23)}、(2)熱伝達データ^{(24), (25)}、(3)対向流制限(CCF L)及び臨界流等の流れ制限データ^{(26)~(28)}、(4)壁面摩擦モデルを評価する圧力損失データ^{(29), (30)}、(5)限界出力データ⁽³¹⁾、(6)核動特性モデル化手法を評価する制御棒落下試験データ⁽³²⁾、(7)密度波伝搬等の現象のモデル化手法を評価する熱水力安定性データである。

- 機器性能評価試験

特定のBWR機器の性能を予測するために、TRACGの能力を評価する根拠を提供する試験である。ここに含まれるのは、(1)順流及び逆流に対するジェットポンプデータ、(2)気液分離及び圧力損失に関する気水分離器データ、(3)BWR上部プレナムの緊急炉心冷却注水及びその分布に関するデータ、(4)炉心スプレイ分布データである。

- 総合効果試験

BWRの縮小模擬結果で構成される試験である。これらの試験の主目的は、システム全体の性能及びシステム中の異なる機器間の相互作用を評価することである。これらの試験には、ジェットポンプ付きBWRに対するTLTA^{(34)~(36)}、FIST、SSTF及びROSA試験装置、ジェットポンプなしの外部ポンププラントに対するFIX試験装置、並びにESBWRに対するGIST試験装置で実施されたLOCA模擬試験を含む。

- BWRプラント試験

このカテゴリには、BWRプラントの過渡試験及び安定性試験が含まれる。

表 2.1-1 TRACGコードの米国における使用実績

No.	NRC から承認された LTR (Licensing Topical Report)	適用範囲	解析コード
1	GE Nuclear Energy, "TRACG Application for Anticipated Operational Occurrences (A00) Transient Analyses," NEDO-32906-A, Revision 3, September 2006.	BWR2~6, A00	TRACG Ver.2
2	GE Nuclear Energy, "TRACG Application for Anticipated Transient Without Scram Overpressure Transient Analyses," NEDO-32906 Supplement 1-A, November 2003.	BWR2~6, ATWS	TRACG Ver.2
3	GE Hitachi Nuclear Energy, "Migration to TRACG04/PANAC11 from TRACG02/PANAC10 for TRACG A00 and ATWS Overpressure Transients," NEDO-32906 Supplement 3-A, Revision 1, April 2010.	BWR2~6 , A00 及び ATWS 圧 力増加過渡	TRACG Ver.4
4	GE Hitachi Nuclear Energy, "TRACG Application for ESBWR Transient Analysis," NEDO-33083 Supplement 3-A, Revision 1, September 2010.	ESBWR , A00	TRACG Ver.4
5	GE Hitachi Nuclear Energy, "TRACG Application for ESBWR Anticipated Transient Without Scram Analyses," NEDO-33083 Supplement 2-A, Revision 2, October 2010.	ESBWR, ATWS	TRACG Ver.4
6	GE Hitachi Nuclear Energy, "DSS-CD TRACG APPLICATION," NEDO-33147-A, Revision 4, August 2013.	BWR3~6, 安定性	TRACG Ver.4
7	GE Nuclear Energy, "Reactor Stability Detect and Suppress Solutions Licensing Basis Methodology for Reload Applications," NEDO-32465-A, August 1996.	安定性解決策オ プション I-D, II, IIIを使用す る BWR, 安定性	TRACG Ver.2
8	GE Hitachi Nuclear Energy, "Migration to TRACG04/PANAC11 from TRACG02/PANAC10 for Reactor Stability Detect and Suppress Solutions Licensing Basis Methodology for Reload Applications," NEDO-32465 Supplement 1-A, Revision 1, October 2014.	安定性解決策オ プション I-D, II, IIIを使用す る BWR, 安定性	TRACG Ver.4
9	GE Hitachi Nuclear Energy, "TRACG Application for ESBWR Stability Analysis," NEDO-33083 Supplement 1-A, Revision 2, September 2010.	ESBWR, 安定性	TRACG Ver.4
10	GE Hitachi Nuclear Energy, "TRACG Application for ESBWR," NEDO-33083-A, Revision 1, September 2010.	ESBWR, LOCA	TRACG Ver.4
	上記 LTR の審査で参照・評価された LTR		
11	GE Hitachi Nuclear Energy, "TRACG MODEL DESCRIPTION," NEDO-32176, Revision 4, January 2008.		TRACG Ver.4
12	GE Nuclear Energy, "TRACG Qualification," NEDO-32177, Revision 3, August 2007.		TRACG Ver.4

表 2.1-2 TRACGコードの妥当性確認実績(個別効果試験, 機器性能評価試験)

試験項目		
個別効果試験	ボイド率	Frigo-64 試験
		Christensen サブクールボイド試験
		Wilson 及び Bartolomei 気泡上昇試験
		EBWR 試験
		PSTF レベルスウェル試験
		東芝低圧ボイド試験
		OntarioHydro ボイド試験
		CISE 水密度試験
	熱伝達	THTF 膜沸騰試験
		炉心スプレイ熱伝達(CSHT)
	対向流制限	CSHT 試験
	臨界流	Marviken 臨界流試験
		PSTF 臨界流試験
Edwards ブローダウン		
圧力降下	ATLAS での圧力降下試験	
限界出力	流動振動試験	
	加圧事象及び ABWR 再循環ポンプ全台トリップ試験	
自然循環及び安定性	FRIGG 試験	
反応度投入	SPERT III 試験	
機器性能評価試験	ジェットポンプ性能	INEL 1/6 スケールのジェットポンプデータ
		BWR4 実規模 1 本ノズルジェットポンプデータ
		BWR5 実規模 5 本ノズルジェットポンプデータ
	気水分離器	実規模 2 段/ 3 段気水分離器データ
上部プレナム効果	SSTF 試験	
炉心スプレイ分布	SSTF 試験	

表 2.1-3 TRACGコードの妥当性確認実績(総合効果試験, BWRプラント試験)

	試 験 項 目
総合効果試験	TLTA 試験
	FIST 試験
	SSTF 試験
	ROSA-III試験
	FIX-II 試験
	GIST 試験
BWRプラント試験	PEACH BOTTOM タービントリップ試験
	HATCH 2台ポンプトリップ試験
	HATCH 主蒸気隔離弁の閉止試験
	LASALLE 不安定事象
	LEIBSTADT 安定性試験
	NINE MILE POINT 不安定事象
	PEACH BOTTOM 安定性試験
	NINE MILE POINT ポンプ流量増加試験
	LEIBSTADT 給水流量喪失試験

2.2 解析モデル

この章では、BWRの原子炉内で生じる過渡変化において、過渡時のスクラム失敗事象（ATWS）を対象とした重要な物理現象の評価に必要な基礎方程式及び解析モデルについて説明する。

2.2.1 モジュール構造

TRACGは物理領域を主な単位としたモジュール構造を有し、モジュールを組み合わせることによる柔軟な形状模擬能力を持っている。このために、TRACGには、モジュール化した基本的な熱水力コンポーネント、例えばベッセル、チャンネル、パイプ、T字管及び弁等がある。また、これらのコンポーネントを活用した気水分離器、ジェットポンプ及びポンプ等の原子炉内機器用のコンポーネントも用意されている。これらのコンポーネントは、システム模擬に当たっての構成要素として使用され、互いを組み合わせて接続する。これにより、BWRプラント又は試験体系のように、物理領域の内部で種々の熱流動現象が生起し、領域間の接続を通してそれらが輸送されるシステムを構成する。また、炉心においては、三次元中性子動特性モデルによる解析機能も有しており、BWRプラントの現実的な解析が可能となっている。

一例を図 2.2-1 に示す。この図では、BWR 5の原子炉圧力容器内及びそれに接続される配管をTRACGのコンポーネントで模擬している。コンポーネント群は流路又は熱伝達経路を通して互いに結合することができる。また、TRACGには、複数の制御ブロックから構成されるモジュール化された制御系システムがある。制御ブロックは、互い同士又は熱水力コンポーネントと結合してBWRの水位制御系のような複雑な制御系を構成できる。

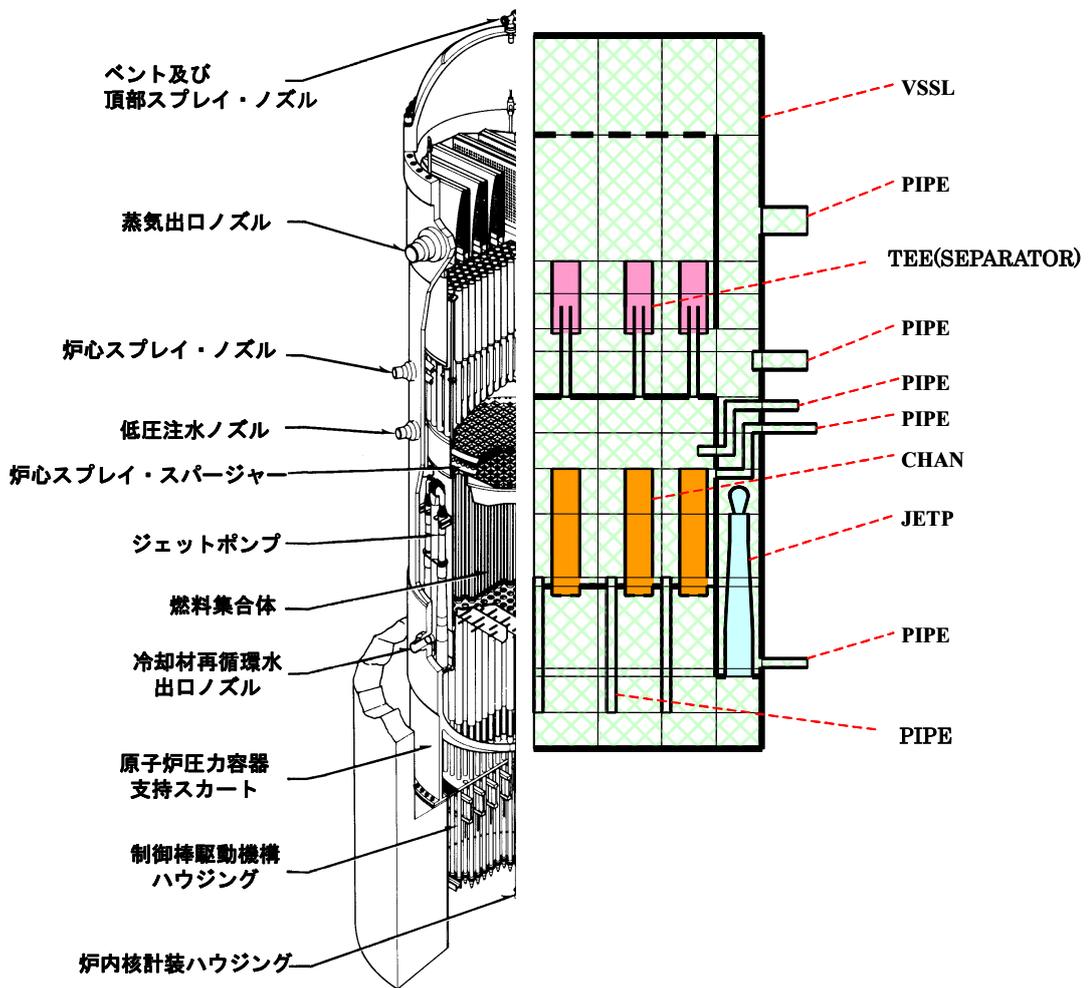


図 2.2-1 TRACGによるBWR 5の模擬

TRACGは次に示すような熱水力コンポーネントを内蔵している。

- PIPE パイプ (PIPE) コンポーネントは、TRACG中で最も簡単なコンポーネントであり、管路中の流れに対する一次元熱水力モデル、及び管路壁における径方向熱伝導モデルを有している。
- PUMP ポンプ (PUMP) コンポーネントは、コンポーネント中のセル境界の一つにポンプモデルが含まれる点を除けば、パイプコンポーネントに類似している。ポンプモデルは、ポンプ速度及び流れに対しポンプが与える揚程を計算する。
- VLVE バルブ (VLVE) コンポーネントは、セル境界の一つの流路面積が弁の開閉を模擬するよう変化できる点を除けば、パイプコンポーネントに類似している。

TEE T字配管 (TEE) コンポーネントは、T字配管又はY字配管を構成するため、互いに連結した二つのパイプコンポーネントからなる。

気水分離器は、T字配管コンポーネントのオプションの一つである。1次分岐部はBWR気水分離器のスタンドパイプ及び胴部を構成する。一方、2次分岐部は液の排水流路を模擬する。気水分離器オプションが選択された場合、当該コンポーネント中の蒸気と液との分離を模擬するための特別なモデルが使用される。

JETP ジェットポンプ (JETP) コンポーネントは、駆動流と吸込み流との相互作用及び混合を模擬するための特別なモデルを含む点を除けば、T字配管コンポーネントに類似している。

CHAN チャンネル (CHAN) コンポーネントは、T字配管コンポーネントに基づき、燃料棒の模擬機能を有する。1次分岐部は加熱チャンネルを模擬し、燃料棒を含む。2次分岐部は、BWR燃料チャンネル下部からの漏えい流路を模擬する。また、オプションの一つとして、内部分岐部で当該チャンネル内のウォータロッドを模擬できる。さらに、燃料棒内径方向熱伝導を解くための一次元モデルを有する。当該チャンネル中の発熱及び熱伝達に関する特別なモデルも有している。

HEAT 熱交換器 (HEAT) は給水加熱器等を対象とする合成コンポーネントであり、その一次系側を構成するT字配管コンポーネントを基本要素とする。2次系側はパイプコンポーネントにより模擬される。熱交換器の1次側と2次側との間の熱伝達を模擬する特別なモデルを有する。熱交換器コンポーネントは、入力データ作成を容易にするために設けたものである。なお、熱交換器は、1次側及び2次側を模擬するよう入力データにより二つのコンポーネントを定義すれば、両者のセル間の熱伝達結合を用いて構成することもできる。

VSSL ベッセル (VSSL) コンポーネントは、TRACGにおける唯一の多次元コンポーネントである。二次元直交座標系、並びに二次元及び三次元の円柱座標系にてノード分割を行うことができる。ベッセルコンポーネント中の多次元流れを取り扱うため、多次元熱水力モデルが使用される。また、構造物を模擬する熱平板をベッセルコンポーネント中の種々の位置に組み込むことができる。例えば、集中定数化熱平板モデルについてはベッセルコンポーネント中のすべてのセル内に、一次元熱平板モデルについては軸方向又は半径方向に隣接するセル間境界面上に設置することができる。

TRACG中のすべてのコンポーネントは、同一の基本モデルを利用する。すなわち、すべての一次元コンポーネントが使用する共通の一次元熱水力モデルがある。多次元熱水力モデルはベッセルコンポーネントのみで使用されるが、このモデルは、一次元に縮約する

と一次元モデルと同一になる。また、すべての一次元コンポーネント中の壁面熱伝達、及びベッセルコンポーネント中の径方向ヒートスラブモデルで、一つの共通な熱伝導モデルを使用する。ベッセルコンポーネント内で軸方向ヒートスラブに対し使用する一次元熱伝導モデルも、離散化方法を除けば同様である。最後になるが、TRACG中には、ただ一組のせん断力及び熱伝達に対する構成式群があり、すべてのコンポーネントでこれを使用している。

2.2.2 基礎方程式とモデルの概要

ここでは、重要現象を評価するために必要となる解析モデルで、特に重要である基礎方程式、物理モデル又は構成式について説明する。

2.2.2.1 流体場の方程式

BWRの原子炉内で生じる過渡変化は、冷却水及び蒸気を流体成分とする二相流の下で生じる現象であるため、気液二相流からなる流体場を解く必要がある。また、AOC及びATWSでは、特に炉心中での重要現象がサブクール状態を含む熱的非平衡及び沸騰系であるため、主に界面せん断力に規定される気液間相対速度が位置によって大きく変化する非均質系を対象とし、さらに過渡変化の時定数に沿って状態が変化して行くため、これに追従できる流体場の方程式が必要とされる。

このような適用対象に対して適合する流体場の方程式には、二流体場に対する保存式が適切であることが知られており、対象とする質量、エネルギー及び運動量に関わる物理量の輸送量を決定するに際し、二相流二流体場の6個の方程式を解くことになる。TRACGは、このような場の保存式に基づいて作成された解析コードである。

TRACGでは、このような定式化により非平衡、非均質な二相流を直接取り扱うことができ、熱的平衡性及び相速度に先験的な仮定を導入しない定式化が可能となる。ただし、BWRの過渡及び事故に適用するに当たって問題とならない範囲で、場の保存式を簡略化する。例えば運動量保存式において、圧力に関し気相及び液相の圧力を等しく置く1圧力モデルを導入し、また、気液間の質量輸送に伴って生じる気液界面力を界面せん断力に対して無視する。さらにエネルギー保存式において、位置エネルギー、及び変動速度の平均化の過程で生じる変動エネルギー項を無視する。

空間次元に関しては、原子炉圧力容器を除くと一次的な取扱いで十分であり、原子炉圧力容器のみ唯一三次元的な取扱いが必要となる。時間解法については完全陰解法の使用を推奨しているが、数値粘性による解析解の忠実度低下を抑制する観点から、オプションとして半陰解法を用いることもできる。

気相質量保存式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_v) = -\nabla \cdot (\alpha\rho_v\vec{v}_v) + \Gamma_g \quad (2.2-1)$$

液相質量保存式：

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\alpha)\rho_l] = -\nabla \cdot [(1-\alpha)\rho_l\vec{v}_l] - \Gamma_g \quad (2.2-2)$$

気相運動量保存式：

$$\alpha\rho_v \frac{\partial \vec{v}_v}{\partial t} + \alpha\rho_v \vec{v}_v \cdot \nabla \vec{v}_v = -\alpha\nabla P - \vec{F}_{wv} + \alpha\rho_v \vec{g} - \vec{f}_{lv} - \vec{f}_{VM} \quad (2.2-3)$$

液相運動量保存式：

$$(1-\alpha)\rho_l \frac{\partial \vec{v}_l}{\partial t} + (1-\alpha)\rho_l \vec{v}_l \cdot \nabla \vec{v}_l = -(1-\alpha)\nabla P - F_{wl} + (1-\alpha)\rho_l \vec{g} + \vec{f}_{lv} + \vec{f}_{VM} \quad (2.2-4)$$

気相エネルギー保存式：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\alpha\rho_v \left(e_v + \frac{v_v^2}{2} \right) \right] + P \frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[\alpha\rho_v \vec{v}_v \left(e_v + \frac{v_v^2}{2} \right) \right] - \nabla \cdot (P\alpha\vec{v}_v) + q_{wv}''' + q_{iv}''' + \Gamma_g h_g \quad (2.2-5)$$

液相エネルギー保存式：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1-\alpha)\rho_l \left(e_l + \frac{v_l^2}{2} \right) \right] - P \frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[(1-\alpha)\rho_l \vec{v}_l \left(e_l + \frac{v_l^2}{2} \right) \right] - \nabla \cdot [P(1-\alpha)\vec{v}_l] + q_{wl}''' + q_{il}''' - \Gamma_g h_f \quad (2.2-6)$$

ここで

- α : ボイド率
- ρ_v, ρ_l : 気相密度, 液相密度
- v_v, v_l : 気相速度, 液相速度
- Γ_g : 界面を通じた質量生成率
- P : 圧力
- F_{wv}, F_{wl} : 気相及び液相へ作用する壁面摩擦力の成分
- g : 重力加速度
- f_{lv} : 界面せん断力
- f_{VM} : 仮想質量
- e_v, e_l : 気相の内部エネルギー, 液相の内部エネルギー
- q_{wv}, q_{wl} : 壁面から気相及び液相への熱流量

q_{iv}, q_{il} : 界面から気相及び液相への熱流量
 h_g, h_f : 飽和蒸気の比エンタルピ, 飽和水の比エンタルピ
 t : 時間

2.2.2.2 構造物についての場の方程式

TRACGでは、体系中の燃料棒及び他の構造物に対する場の方程式として、熱伝導方程式を解く。構造物には、一次元コンポーネントに対するパイプコンポーネント壁、並びにベッセルコンポーネントの外壁及びベッセルコンポーネント中の内部熱平板が含まれる。一次元コンポーネントの壁において、内壁からの熱伝達は当該コンポーネント中の流体に向かう。一方、外壁からの熱輸送は、他の任意コンポーネント中の流体に向かうことができる。ベッセルコンポーネント中の内部熱平板は、ベッセル中の一つのセル内部に完全に含まれるか、軸方向又は径方向に位置する二つのセル間でその境界上に配置される。

TRACGは直交座標系及び円柱座標系の一次元熱伝導モデルを用いており、燃料棒、二つのベッセル内径方向リングに接する二つの境界面をもつ2面ヒートスラブ、一次元コンポーネントの壁には円柱座標系を用いている。

直交座標系：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' \quad (2.2-7)$$

円柱座標系：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q''' \quad (2.2-8)$$

ここで

ρ : 密度
 C_p : 定圧比熱
 T : 温度
 r, z : 径方向位置, 軸方向位置
 k : 熱伝導率
 q''' : 体積熱生成率

2.2.2.3 物理モデル又は構成式

二相流流動様式, サブクール沸騰, 界面せん断力, 界面熱伝達, 界面積濃度, 壁面摩擦, 壁面熱伝達, 臨界流, 局所圧力損失, 限界出力及びリウエットの物理モデル又は構成式については、旧バージョンである TRACG Ver. 4 と同じであるため、ここでの説明は省略する⁽⁴¹⁾。物理モデル又は構成式は、米国において AOO, 安定性, ATWS 等へ適用されており、十分な実績を有している。

2.2.2.4 中性子動特性方程式

TRACGは、中性子エネルギー3群、遅発中性子先行核6群の三次元の時間依存中性子拡散方程式を解く。中性子束及び遅発中性子先行核濃度は、減速材密度、燃料温度、ほう素濃度及び／又は制御棒の変化に応じて、あらゆる (i, j, k) ノードで時間について求められる。ただし、燃焼度及びキセノン濃度分布は、過渡期間中で一定を仮定する。

TRACGで使用する三次元中性子動特性モデルは、三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードAETNA^{(15), (17)}と同一のモデルを組み込んでおり、炉心の過渡解析を目的として時間依存の多群拡散方程式を解く。空間解法には静特性解析と同じ解析的多項式拡散ノード法を用い、時間解法には完全陰解法後退差分スキームを標準解法として周波数変換法とともに用いている。この時間解法は、無条件安定で大きな時間ステップを可能とする。過渡時の拡散方程式を解く際に時間ステップを比較的大きく取れるようにするため、遅発中性子先行核濃度は時間ステップ内で核分裂源が線形的に変化することを仮定して解析的に解かれる。非線形反復におけるノード法結合補正係数の更新ステップを大きくとることで更なる計算時間短縮が実現できる。

三次元時間依存中性子拡散方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_g^i} \frac{\partial}{\partial t} \phi_g^i(x, y, z, t) &= \nabla \cdot D_g^i(x, y, z, t) \nabla \phi_g^i(x, y, z, t) - \Sigma_{rg}^i(x, y, z, t) \phi_g^i(x, y, z, t) \\ &+ \frac{\chi_g^p}{k_{eff}} (1 - \beta^i) \sum_{g'} v \Sigma_{fg'}^i(x, y, z, t) \phi_{g'}^i(x, y, z, t) \\ &+ \sum_{g' < g} \Sigma_{sg' \rightarrow g}^i(x, y, z, t) \phi_{g'}^i(x, y, z, t) \\ &+ \sum_{m=1}^6 \chi_g^m \lambda_m^i C_m^i(x, y, z, t) + \chi_g^{ext} q_{ext}^i(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (2.2-9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} C_m^i(x, y, z, t) = \frac{\beta_m^i}{k_{eff}} \sum_{g'} v \Sigma_{fg'}^i(x, y, z, t) \phi_{g'}^i(x, y, z, t) - \lambda_m^i C_m^i(x, y, z, t) \quad (2.2-10)$$

ここで

- $D_g^i(x, y, z, t)$: 時刻 t におけるノード i の第 g 群拡散係数
- $\Sigma_{rg}^i(x, y, z, t)$: 時刻 t におけるノード i の第 g 群除去断面積
- $\Sigma_{fg}^i(x, y, z, t)$: 時刻 t におけるノード i の第 g 群核分裂断面積
- v : 核分裂当たりの発生中性子数
- $\Sigma_{sg' \rightarrow g}^i(x, y, z, t)$: 時刻 t におけるノード i の第 g' 群から g 群への散乱断面積
- $C_m^i(x, y, z, t)$: 時刻 t におけるノード i の第 m 群遅発中性子先行核濃度
- $\phi_g^i(x, y, z, t)$: 時刻 t におけるノード i の第 g 群中性子束
- $q_{ext}^i(x, y, z, t)$: 時刻 t におけるノード i の第 g 群外部中性子源

- v_g^i : 時刻 t におけるノード i の第 g 群中性子速度
 χ_g^p : 第 g 群即発中性子核分裂スペクトル
 k_{eff} : 初期定常時の実効増倍率
 β_m^i : ノード i の第 m 群遅発中性子生成率 ($\beta^i = \sum_{m=1}^6 \beta_m^i$)
 χ_g^m : 第 m 群遅発中性子核分裂スペクトル
 λ_m^i : ノード i の第 m 群遅発中性子先行核崩壊定数
 χ_g^{ext} : 第 g 群外部中性子源核分裂スペクトル

中性子動特性モデルでは、炉心中の出力分布を直交三次元 (x-y-z) 系で計算するが、その際に燃料温度及び冷却材密度の変化、並びに制御棒移動を考慮する。チャンネル熱水力及び燃料熱伝達に関わるモデルでは、炉心を並行多チャンネルとして模擬し、それぞれのチャンネルが複数の燃料集合体をもつように関係付ける。また、状態量は各チャンネルの各軸方向ノードで解く。チャンネル群の水力的な境界条件は、解析コード中の炉心外モデルにて定める。各コンポーネントは、図 2.2-2 に示したデータを通じて結合される。

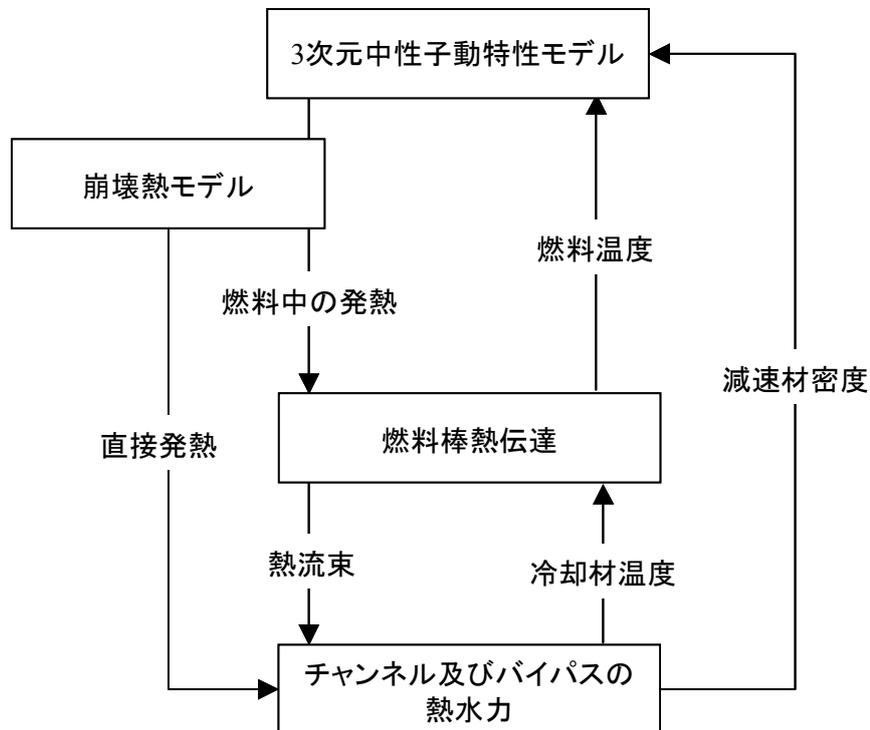


図 2.2-2 TRACG のモデル間でのデータの流れ

中性子動特性モデルにおけるノード分割は、径方向には1燃料集合体当たり1ノード、軸方向には24又は25ノードをとる。しかし、熱水力及び熱伝達に対するチャンネル、つまりTRACG中のチャンネルコンポーネントに対するノード分割は、水平の(x-y)方向で、中性子動特性モデルのそれと比較して粗い。すなわち、熱水力的及び幾何形状的に類似した状態量をグループにまとめ平均化して一つのコンポーネントとしている。このため、チャンネルコンポーネント数は燃料集合体数より少なくなる。中性子動特性モデルからチャンネルモデルへのデータの流れは平均化を通じてなされる。また、熱水力から中性子動特性モデルへのデータの流れは図2.2-2に示したように減速材密度及び燃料温度である。

TRACGの三次元中性子動特性モデルにおける計算では、減速材密度及び燃料温度の変化をチャンネルモデルが与える。バイパス水密度はベッセルコンポーネントから得られるが、チャンネル及びウォータロッドの水密度を体積で重み付けして組み合わせ、ノード平均の相対水密度を与える。

TRACGのほう素モデルでは、ほう素の微視的断面積及び数密度を用いて吸収断面積を補正することによりボロン反応度を考慮し、ほう素の混合については質量保存式を取り扱うことにより、液相の流れ場とともに移動する溶質として考慮している。

TRACGでは、核モデル及び熱水力モデルで原子炉压力容器内を三次元的に取り扱い、熱水力モデルでは二相流二流体場の6個の方程式により、質量、運動量及びエネルギーについて液相及び気相を個別に取り扱うことができるので、核熱結合による密度波振動から生じる中性子束振動を評価することが可能である。

3 解析結果の例示

この章では、ATWSを対象とした評価で重要な物理現象を考慮に入れて、TRACG Ver. 5が前バージョンのTRACG Ver. 4から改良された核動特性モデルの確認、REDY/SCATで取り扱うことができない振動現象の評価、国内のBWR及びABWRの評価、並びにATWSにおいて特徴的な事象であるSLCの評価に関する観点で、参考解析結果を例示する。

3.1 PEACH BOTTOM タービントリップ試験

1977年4月、Peach Bottom 原子力発電所2号機において、特別に計装された3件のタービントリップバイパス弁作動試験が、低出力レベルで実施された⁽³⁷⁾。試験は、過渡解析コードのための妥当性確認データを取得するために設計されており、EPR I が後援する中で、GEH及びフィラデルフィア電力会社により実施された。試験条件は、モデルの妥当性確認用データの量を最大化しつつ、許容可能な設計値の範囲内での燃料の運転を確実にするように選定された。試験の主目的は、急速加圧事象時における主蒸気配管の動力的効果についての高品質の試験データを取得することにあった。試験は、中性子束高でスクラムが開始するよう直接スクラム（タービン止め弁開度スイッチにより開始されることになるスクラム）を無効化して実施された。発電用原子炉の通常運転と異なるこの条件は、モデルと試験データとの間で有意な比較が行えるよう、中性子束を十分に大きく増加させるために必要であった。

3.1.1 試験の説明

表 3.1-1 に、3件のタービントリップ試験の初期条件及びスクラム設定点を示す。試験の初期条件は、定格炉心流量近傍で一連の出力を増加させる形で選定された。2回目の試験に先立ってキセノン過渡現象のため、計画出力レベルの1%以内に出力を保持するのに、炉心流量を減少させることが必要となった。各々のタービントリップ試験はタービン止め弁（以下「TSV」という。）の急閉で開始され、TSV閉によるスクラム信号をバイパスして中性子束スパイクが得られた。再循環ポンプのトリップはTT3を除いて防止された。中性子束が中性子束高スクラムのセットポイントに到達したとき、スクラムが生じ中性子束の減少が起こった。TSV閉後すぐにタービンバイパス弁が開き始め、原子炉圧力容器からの蒸気インベントリの開放により圧力上昇が徐々に軽減された。

表 3.1-1 Peach Bottom タービントリップ試験の条件

条件	炉心出力		炉心流量		中性子束高スクラム設定 (定格出力比%)
	(MWt)	(定格比%)	(kg/s)	(定格比%)	
定格	3,293	100	12,915	100	—
TT1	1,562	47.4	12,764	98.8	85
TT2	2,030	61.6	10,445	80.9	95
TT3	2,275	69.1	12,839	99.4	77

3.1.2 解析モデル

Peach Bottom 2号機のタービントリップ試験のTRACG解析は、標準的なノード分割手法を使用して実施した⁽¹⁶⁾。試験が実施された時点で、炉心には576体の7×7及び188体の8×8燃料集合体が装荷されていた。炉心は上部及び／又は下部プレナムにおける熱水力的特徴の変化を模擬するために径方向に三つのリングに分割した。TRACG計算では、燃料集合体を8個のCHANコンポーネントで模擬した。燃料集合体のグループ分割を表3.1-2に示す。3件の試験の模擬解析で燃料集合体のグループ分割は異なっている。各CHANコンポーネントでは、同じタイプ（すなわち7×7又は8×8）、類似した出力、及び同様な径方向位置（VSSLコンポーネント中の同じリング）の一群の燃料集合体を模擬した。初期の定常状態は、燃料集合体核特性計算コードLANCR^{(33), (38)}及び三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードAETNA^{(15), (17)}によってプラントのトラッキング計算により作成した⁽⁴²⁾。TRACGの中性子束計算モデルはAETNAと同じである。このように、本解析は炉心設計コードを含むコードシステムとして行われており、より高品質な安全評価パラメータの評価を可能としている。

3.1.3 試験データとの比較

コードの妥当性確認の観点からすると、Peach Bottomタービントリップ試験での測定値とTRACG解析結果との比較では、中性子束が最も重要な変数である。中性子束は過渡時の限界出力比及びその予測に必要なパラメータを決定する上で、また、炉心圧力の正確な計算、並びにドブドラ、スクラム及びボイド反応度フィードバック現象を正確に表す上で、第一に重要なパラメータである。

全中性子束について、測定値と計算値を3試験で比較して図3.1-1から図3.1-3に示すとともに、表3.1-3にまとめる。ここで、全中性子束は核分裂断面積を重みとして中性子束をエネルギーについて積分したものを意味しており、核分裂出力と同じである。

表3.1-3は、中性子束ピーク値についてTRACG計算値と試験の測定値とを比較している。中性子束の測定値は、文献(37)の図6-7から図6-9までの“炉心平均LPRM信号”をデジタル化して得た。中性子束ピークの計算値は、試験値に対して約□高いTT2から約□高いTT1までの範囲にある。3試験に対し、TRACGは標準偏差約□で平均約□ピーク中性子束を過大評価する。

中性子束の時間積分値は、過渡時の限界出力比を正確に予測するためのTRACGの能力を測るには、中性子束ピーク値よりもよい指標である。図3.1-4に数値的に積分した中性子束を時間に対しプロットして示す。すべての試験においてMCPRは1秒前後で最小値となることから、計算値と測定値間の1秒前後の積分値に注目すると、TT1では計算値が測定値と大変よく一致している。一方、TT2及びTT3では計算値が過大評価している。すべての試験において流量はほぼ一定に保たれ、着目する時間領域において同等であることから、核分裂出力積分値の評価がMCPRの評価に影響のある唯一の因子である。

Peach Bottom タービントリップ試験に対し、原子炉ドーム圧についての測定値と計算値の比較を図 3.1-5 から図 3.1-7 に示す。3 試験の全てに対し、過渡変化の全域にわたって、TRACG が原子炉ドーム圧を妥当な範囲で予測している。中性子束は炉心圧力上昇に伴うボイドの消滅により増加する。信頼性のある安全評価パラメータの評価のために、事象開始から 1 秒後に MCPR が最小値に達することから、1 秒前までの圧力上昇の再現も重要である。初期の圧力上昇、最初及び引き続く圧力振動の大きさ及びタイミング、並びにドーム圧のピーク値を、いずれも妥当な範囲で予測している。圧力振動を正確に予測することは、蒸気配管内の動的応答の詳細を、TRACG の蒸気配管モデルが正しく模擬することを示している。ドーム圧ピーク値を妥当な範囲で予測することで、バイパス弁特性について、TRACG モデルの妥当性が確認される。

3.1.4 結論

Peach Bottom 2 号機での 3 件のタービントリップ試験において、原子炉の加圧及び中性子束の応答を TRACG の解析結果と比較し、試験結果を十分に再現できることを確認した。また、MCPR の計算にとって重要なパラメータである中性子束の時間積分量が、適切に、又は幾分か保守的に予測されることを確認した。これらの結果より、運転中の BWR の過渡的な挙動を予測するために TRACG を使用することは妥当であることが示された。

表 3.1-2 Peach Bottom タービントリップ試験 TRACG 解析用燃料集合体グループ分割

--

表 3.1-3 Peach Bottom タービントリップ試験における中性子束の比較

--

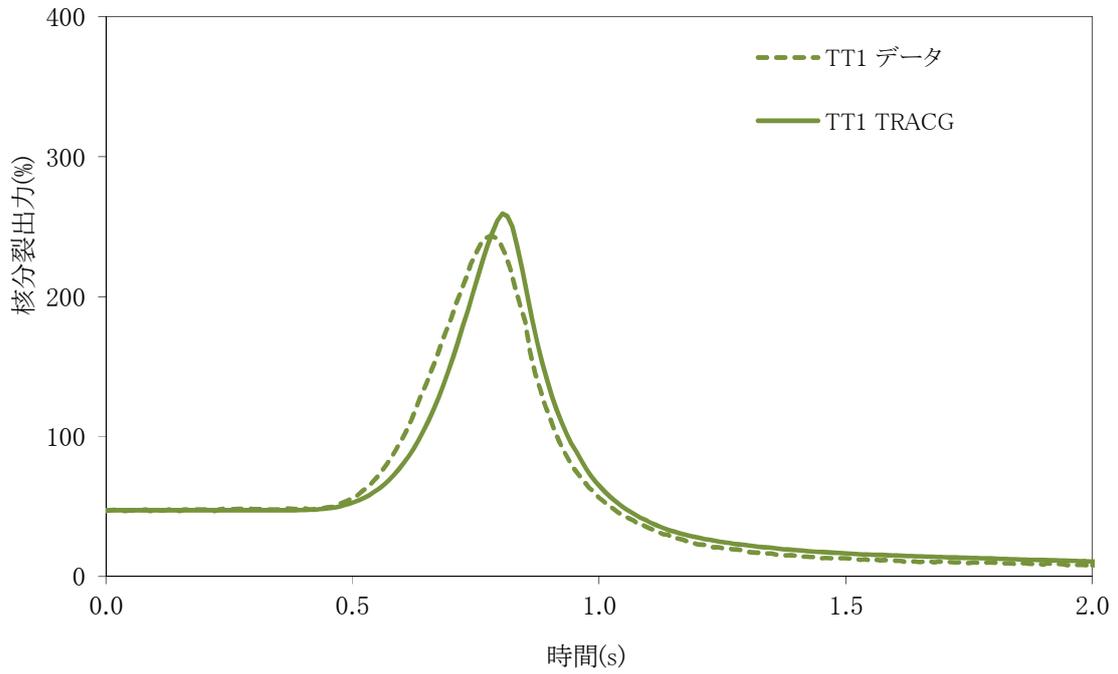


図 3.1-1 Peach Bottom タービントリップ試験 1 に対する核分裂出力応答

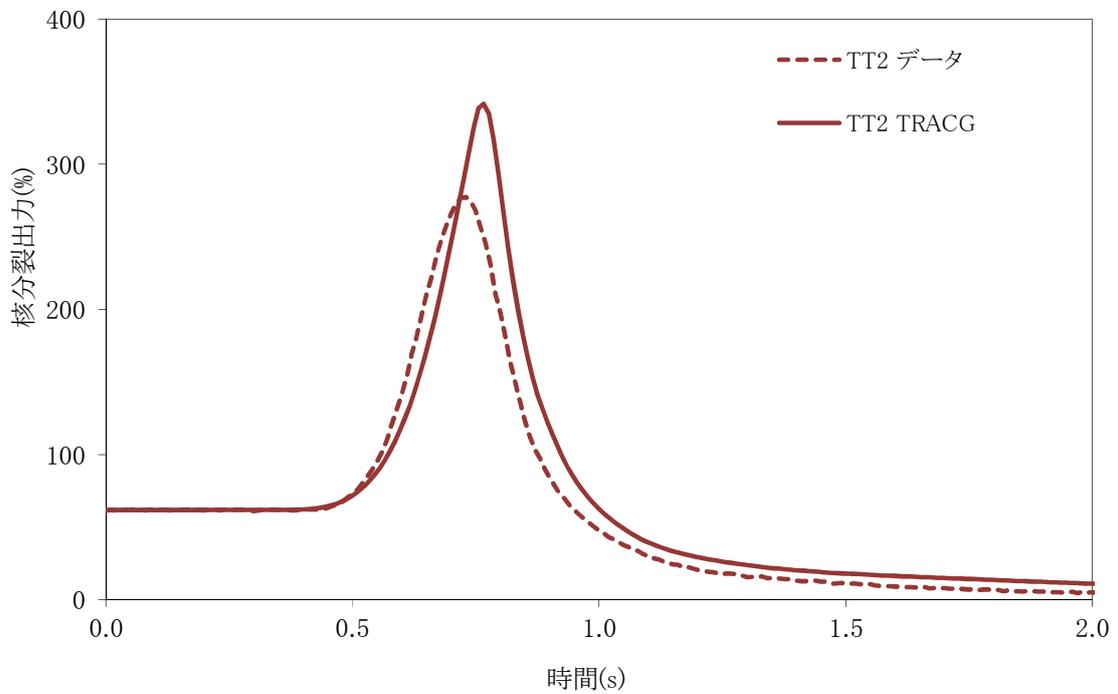


図 3.1-2 Peach Bottom タービントリップ試験 2 に対する核分裂出力応答

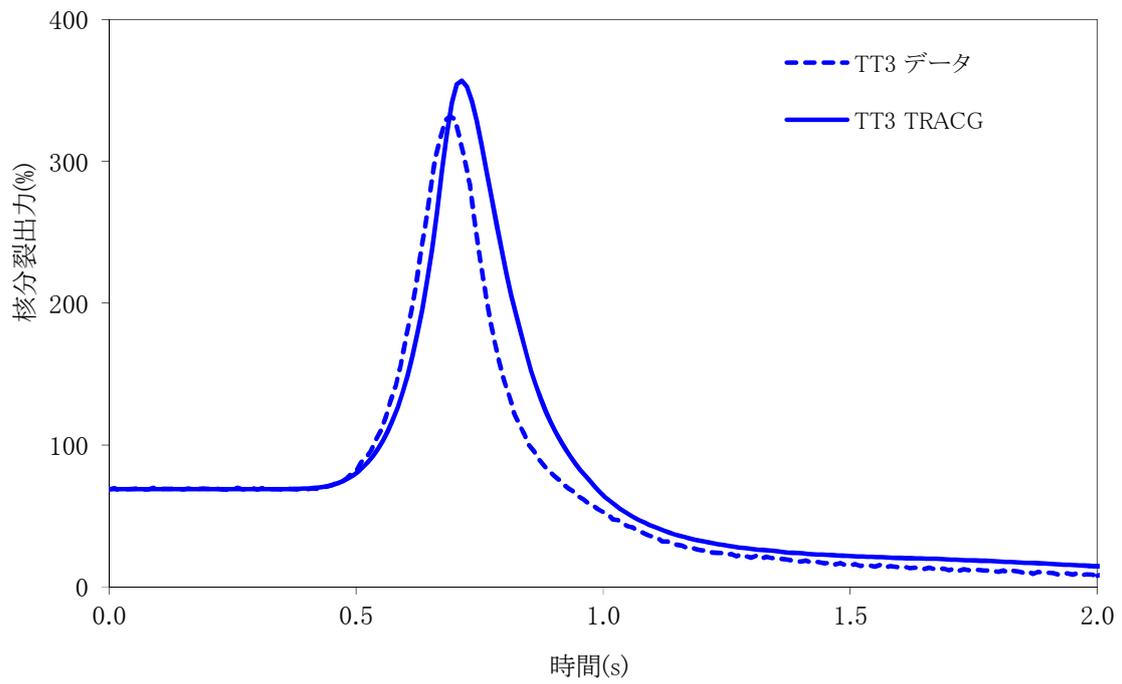


図 3.1-3 Peach Bottom タービントリップ試験 3 に対する核分裂出力応答

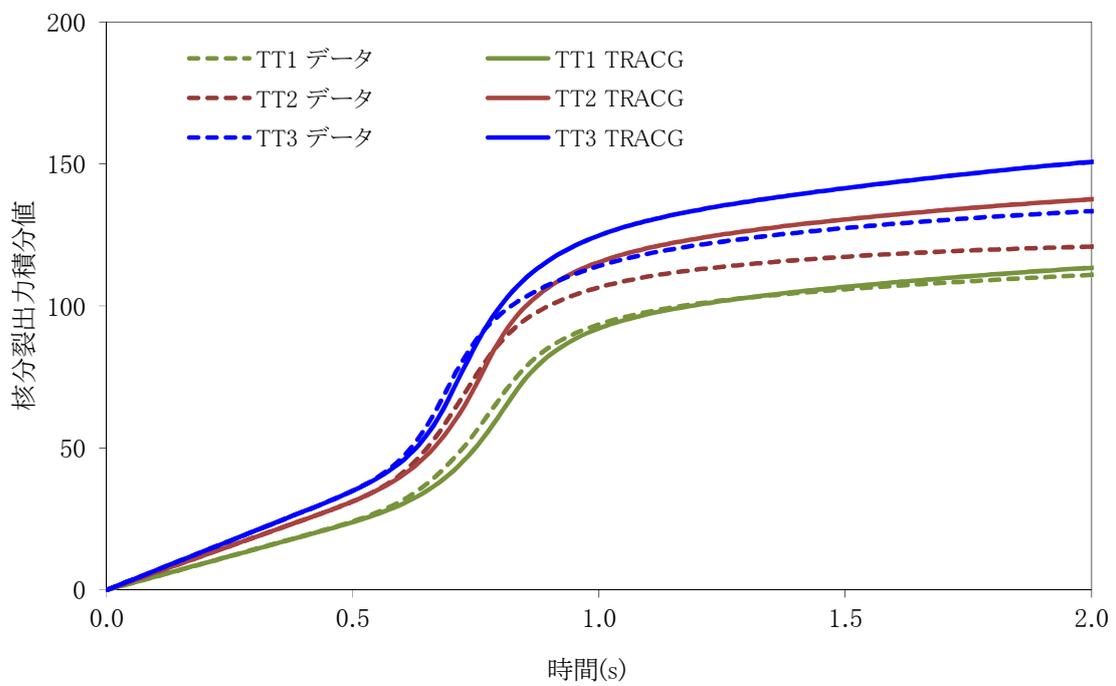


図 3.1-4 Peach Bottom タービントリップ試験 1, 2 及び 3 に対する核分裂出力の積分量の応答

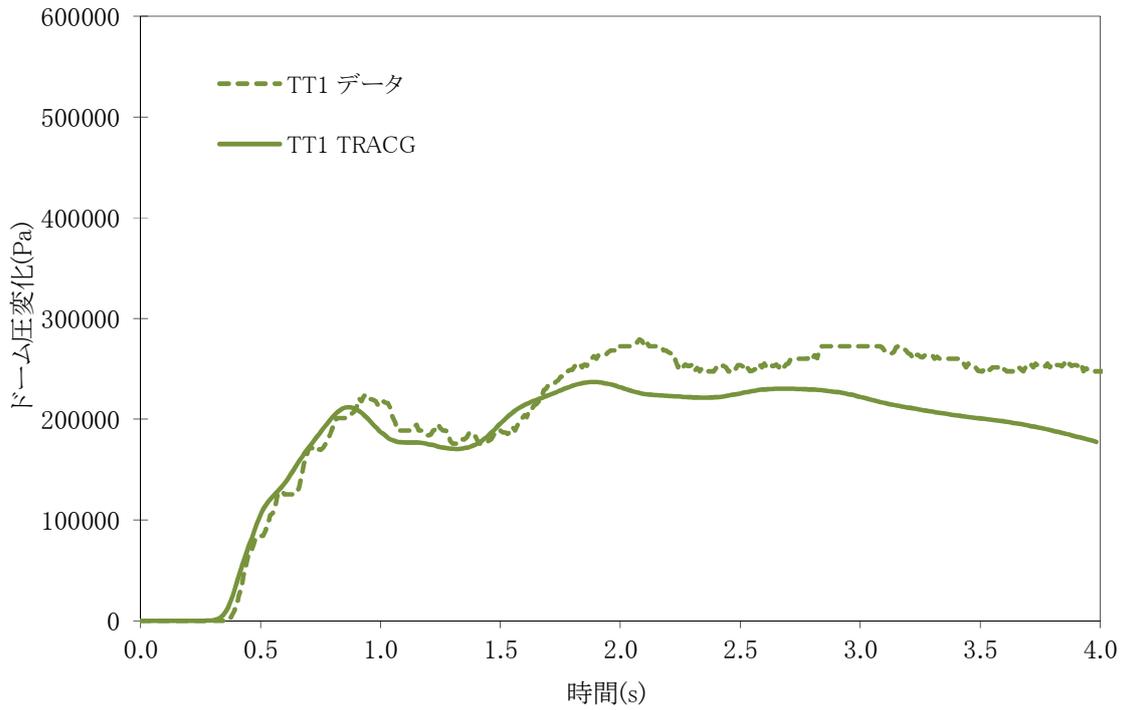


図 3.1-5 Peach Bottom タービントリップ試験 1 に対するドーム圧変化

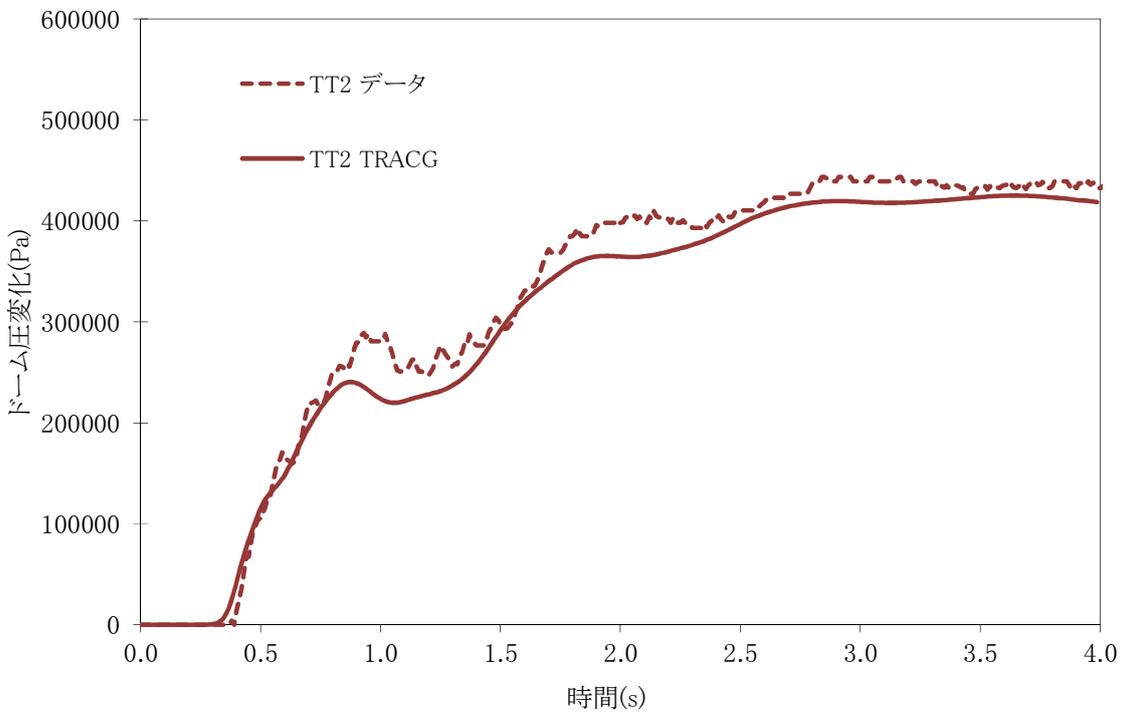


図 3.1-6 Peach Bottom タービントリップ試験 2 に対するドーム圧変化

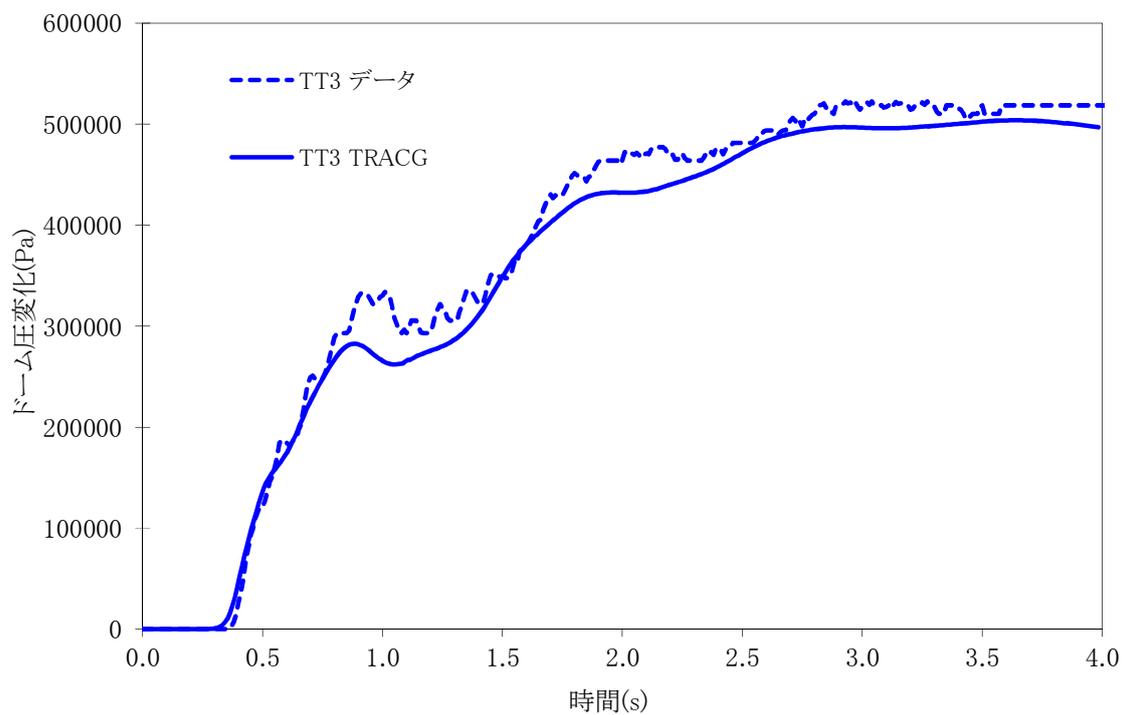


図 3.1-7 Peach Bottom タービントリップ試験 3 に対するドーム圧変化

3.2 LASALLE 不安定事象

1988年3月に米国 LaSalle-2 号機で発生した不安定事象⁽³⁹⁾からは、炉心一体での振動 (corewide oscillation) に関する安定性解析、及び、プラント過渡応答解析の妥当性を確認するために有効なデータが得られている。表 3.2-1 に事象発生時のプラント条件が示されている。原子炉は 84%定格出力/76%定格流量で運転されていた。本事象は、再循環ポンプが両系トリップしたことで流量が減少し、自然循環状態となったときに発生した。流量の減少により炉心平均出力は 40%近くまで減少し、この影響による主蒸気管流量の減少は給水加熱の減少に繋がった。給水加熱の減少により、炉心平均出力は 45%まで上昇すると同時に、炉心下部での出力ピーキングは増大した。炉心全体での振動は、ポンプトリップから約 5 分後に検知され、APRM 高スクラムが約 7 分後 (事象発生から 410 秒) に発生した。

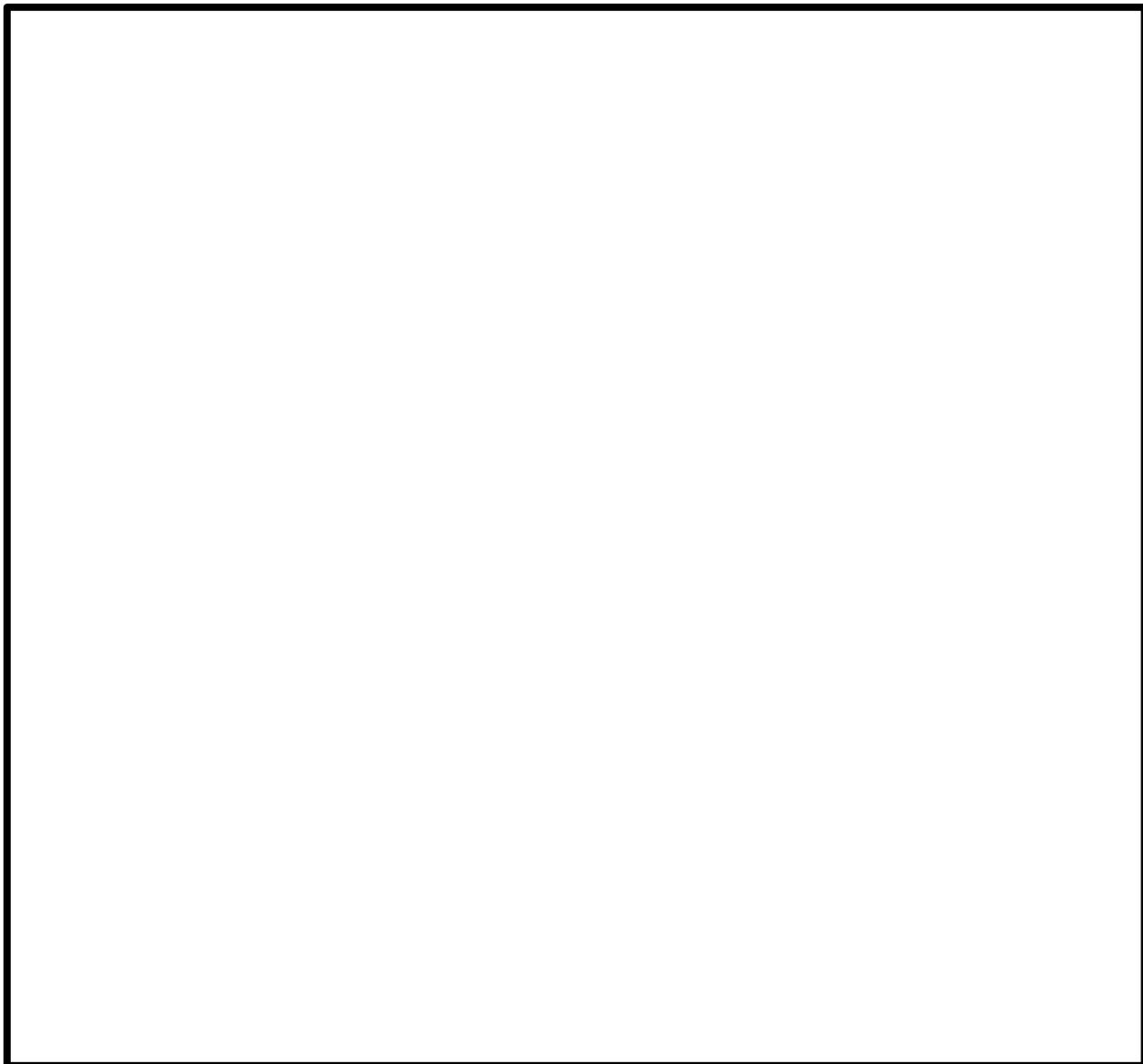
本事象に関する TRACG 模擬性能の評価に利用されたデータは、次の二つに分類される。第 1 の分類は、事象開始後の 6 分間に亘り 1 分ごとに記録された主蒸気管流量、炉心流量、ドーム圧力、原子炉水位、給水流量、給水温度である。第 2 の分類は、スクラム直前の 1 分間、連続的に記録された出力、炉心流量、原子炉水位、給水流量である。給水制御弁 (actuator valve) が故障していたことが事象発生後に確認されている。これは、事象発生中に観測された給水流量の 35 秒間の大きな揺れと整合しているばかりでなく、原子炉スクラム直前の 1 分間に記録された出力、炉心流量、原子炉水位の変動とも対応している。

3.2.1 TRACG 解析モデル

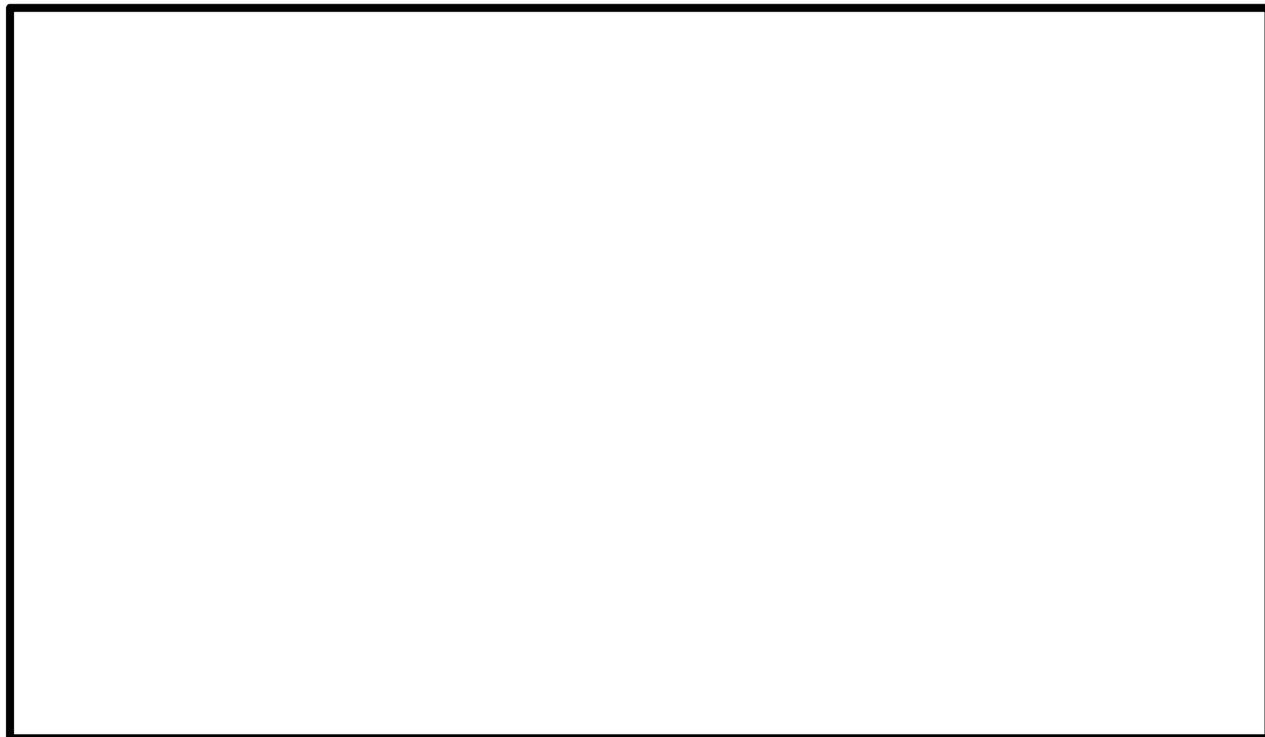
BWR 5 である LaSalle-2 不安定事象についての TRACG 解析は、標準的なノード分割 (燃料有効部を軸方向 25 ノードに均等分割する。) を修正することにより行われた。安定性への適用であることを考慮に入れ、燃料チャンネルのノード分割は、下部加熱 4 ノードをそれぞれ四つのサブノードに分割し、それより下流側 6 ノードをそれぞれ二つのサブノードに分割する (燃料有効部を軸方向 43 ノードに非均等分割する: ノード高さが上流側から下流側にかけて 3 段階で大きくなる) ように修正された。この修正により、沸騰境界における密度波についての解析精度が改善された。図 3.2-1 に本事象の模擬に用いられたチャンネルグルーピングが示されている。炉心内の 764 体の燃料集合体は、それぞれが八つの平均的な水力特性を有するチャンネル (CHAN コンポーネント) に振り分けられた。燃料集合体のグルーピングは、集合体タイプ及び出力ピーキングに基づいて行われた。実炉での三次元出力分布の変化を推定することを目的として、APRM と LPRM の応答模擬が TRACG 制御系モデルを利用することにより行われた。



3.2.2 試験データとの比較



3.2.3 結果の考察



3.2.4 結論

LaSalle 不安定事象についてのTRACG模擬計算により、TRACGはREDY/S
CATで取り扱うことができない炉心一体振動を再現することができた。

表 3.2-1 LaSalle2 不安定事象の初期条件

出力 (MWt)	炉心流量 (kg/s)	ドーム圧力 (MPa)	給水温度 (K)	給水流量 (kg/s)
2,801	10,332	6.878	478	1,460

表 3.2-2 APRMの比較

--

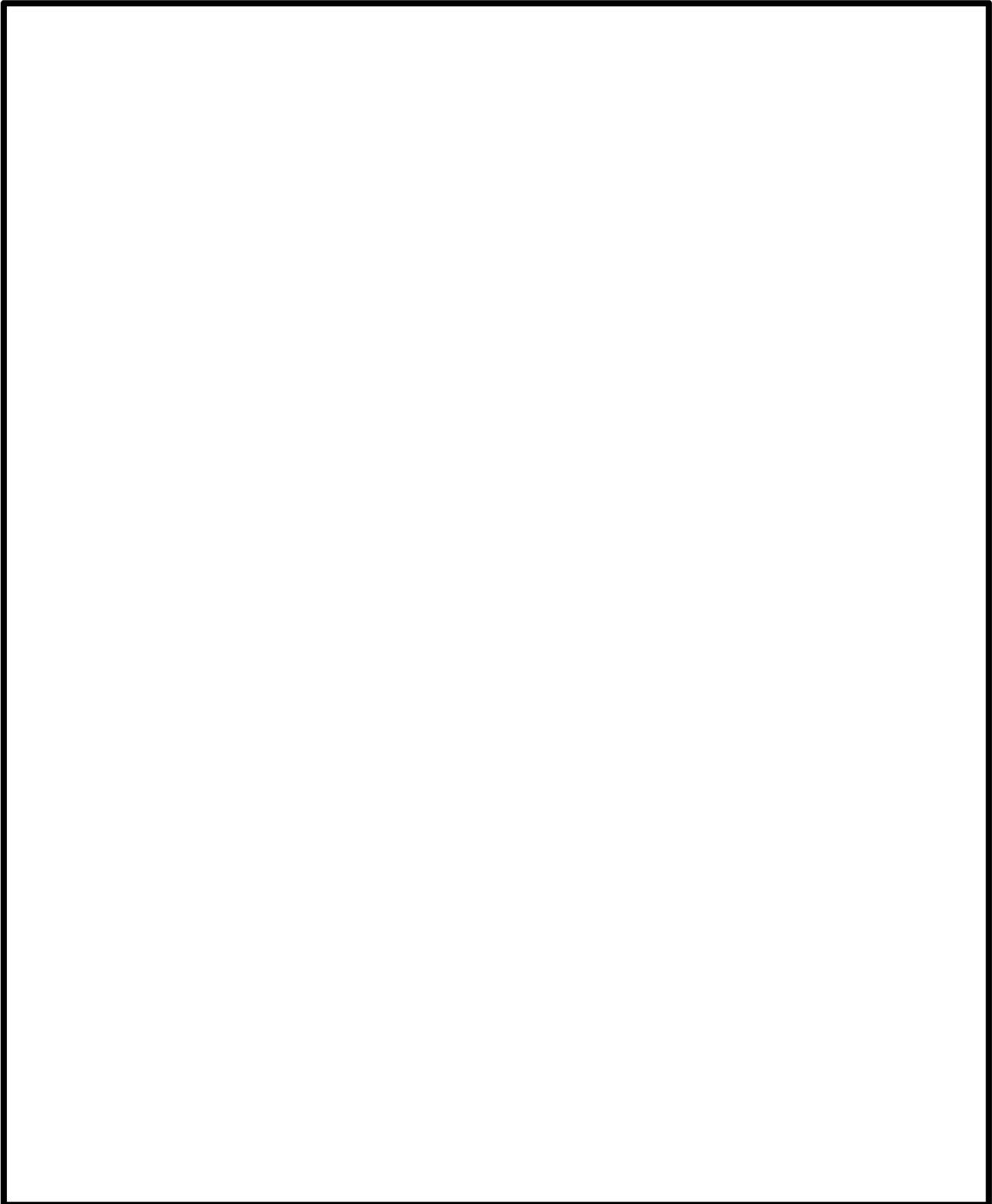


図 3.2-1 LaSalle-2 不安定事象模擬のためのTRACGによるチャンネルグルーピング



図 3.2-2 TRACGによる炉心出力の時間変化

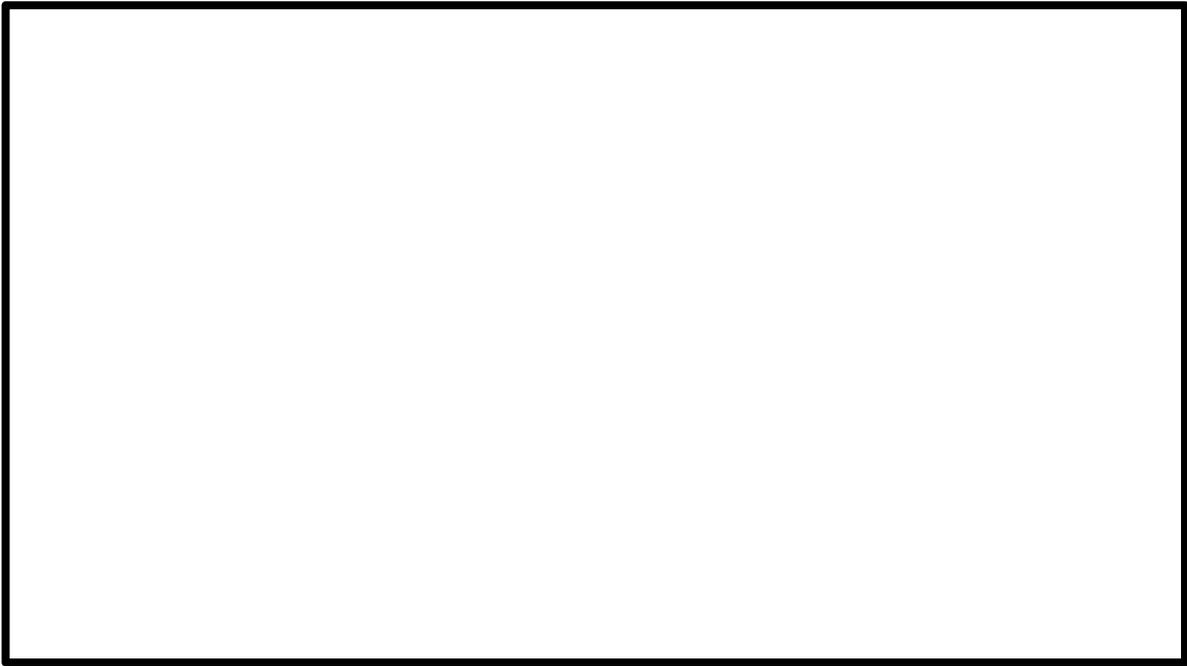


図 3.2-3 TRACGによるAPRMの時間変化



図 3.2-4 TRACGによる炉心流量時間変化とプラントデータとの比較



図 3.2-5 TRACGによるドーム圧力時間変化とプラントデータとの比較

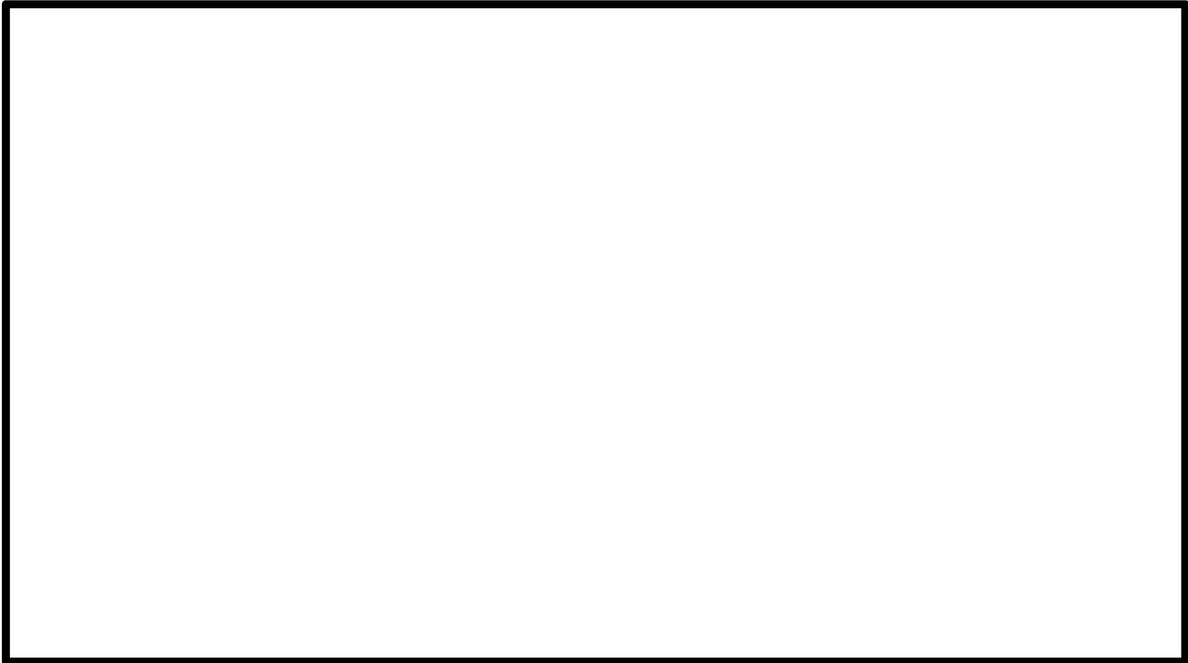


図 3.2-6 TRACGによる給水温度時間変化とプラントデータとの比較

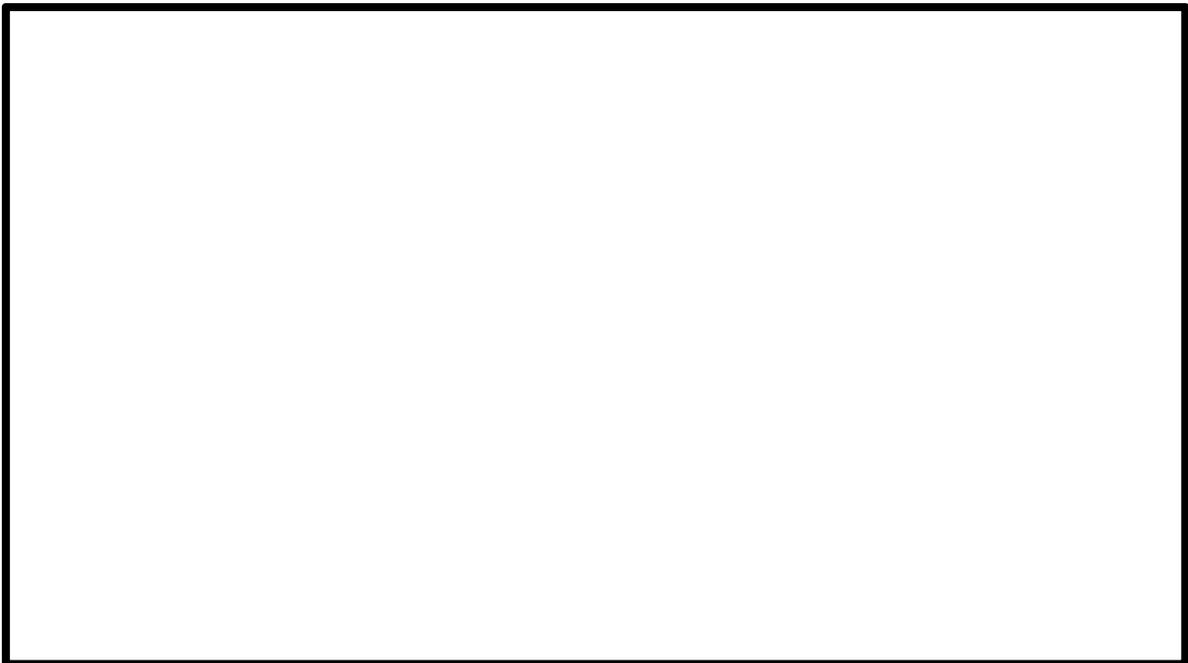


図 3.2-7 TRACGによる給水流量時間変化とプラントデータとの比較



図 3.2-8 TRACGによる主蒸気管流量時間変化とプラントデータとの比較



図 3.2-9 TRACGによる原子炉水位時間変化とプラントデータとの比較



図 3.2-10 TRACGによるAPRMとプラントデータとの詳細比較



図 3.2-11 TRACGによる給水流量とプラントデータとの詳細比較



図 3.2-12 TRACGによる炉心流量とプラントデータとの詳細比較

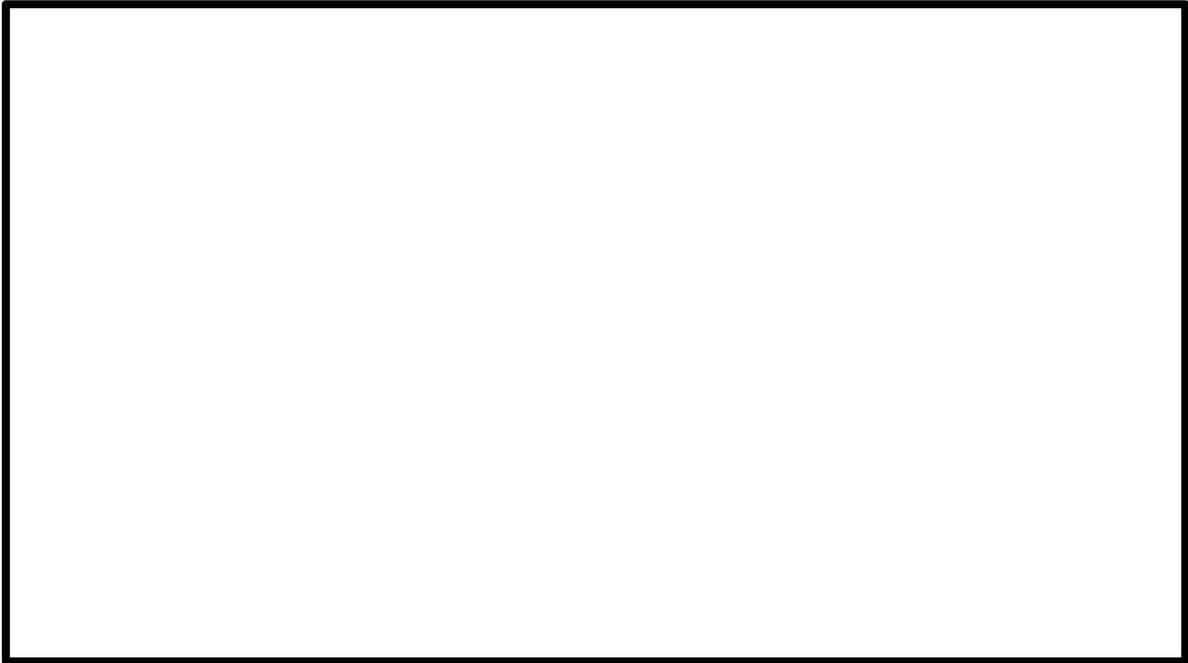


図 3.2-13 TRACGによる原子炉水位とプラントデータとの詳細比較

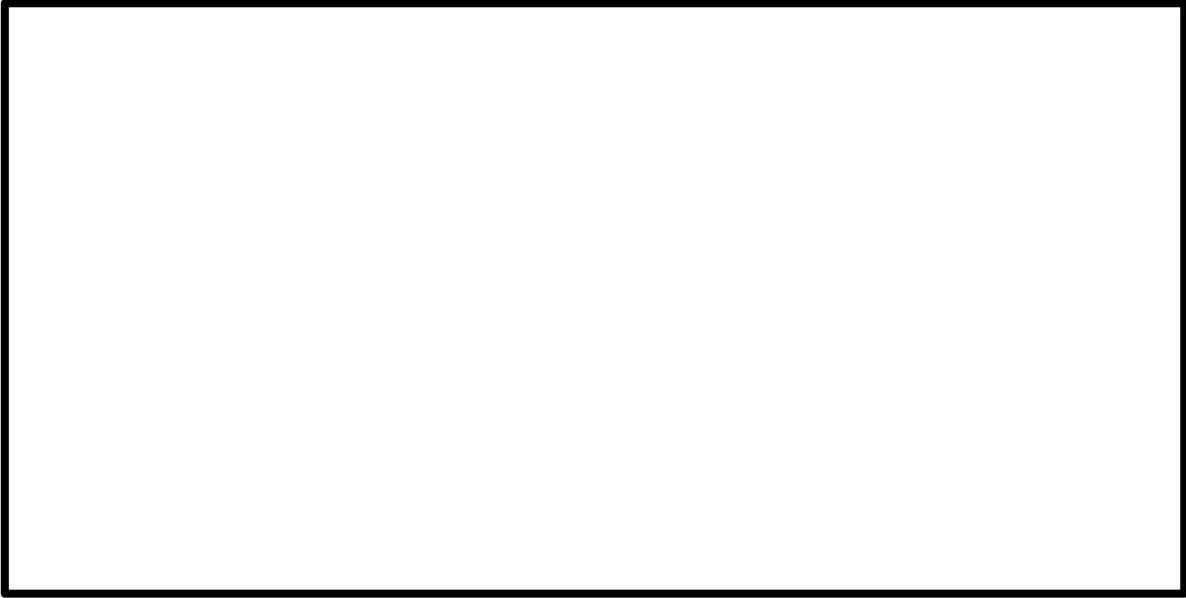


図 3.2-14 TRACGによる炉心入口温度の時間変化

3.3 福島第二原子力発電所2号炉起動試験

日本国内のBWRは従来型BWRとABWRに大別することができる。両者は主に再循環系の構成が異なるため、A O O挙動も異なり個別に検証することが必要である。本節では従来型BWRの代表例として熱出力3,293MWtの福島第二原子力発電所2号炉について取り上げる。同炉の諸元表を表3.3-1に示す。

対象とした試験は、圧力上昇過渡時の発電機負荷遮断試験（以下「LRWB」という。）、流量減少過渡時の再循環ポンプトリップ試験（再循環ポンプ2台中1台トリップ（以下「RPT」という。））の2ケースとした。図3.3-1、図3.3-2に各試験の事象進展図を示す。

3.3.1 TRACG解析モデル

TRACGではVSSLコンポーネントによって原子炉压力容器のモデル化を三次元的に行うことができる。従って本解析における原子炉压力容器のモデル化は軸方向を15領域、径方向を円柱状に4領域に分割した。また、燃料チャンネルについてはCHANコンポーネント、主蒸気管は一次元コンポーネントのTEE, VLVE, FILL, BREK等により行った。従来型BWRの原子炉压力容器のノーディングを図3.3-3に、燃料チャンネルのノーディングを図3.3-4に、主蒸気管のノーディングを図3.3-5に示す。これらのノーディングに従いTRACGの解析を実施した。

TRACGの炉心状態はAETNAにより初期化され、過渡計算ではTRACG自身の三次元核動特性モデルによって計算される。燃料チャンネルについて、核計算は全チャンネルが独立に計算されるが、熱水力計算は燃料チャンネルの出力に応じて幾つかのグループに分け、複数の燃料チャンネルをまとめて計算する。

再循環流量制御、給水流量制御、炉心圧力制御等のコントロールシステム、及び安全保護系等についてはコントロールブロックによってモデル化を行う。

3.3.2 試験データとの比較

発電機負荷遮断試験に関する比較を図3.3-6に、再循環ポンプトリップ試験に関する比較を図3.3-7に示す。

3.3.3 結果の考察

発電機負荷遮断試験については、中性子束、炉心流量、主蒸気流量、給水流量、原子炉圧力、原子炉水位それぞれの時間変化をTRACGの解析結果と比較した。中性子束（APRM応答）について見ると、スクラムにより速やかな低下傾向を示し、の範囲で一致する。また、各パラメータの変化傾向、最大値の発生時間等が同等であり、試験結果を十分に再現できることを確認した。

再循環ポンプトリップ試験についても、中性子束、主蒸気流量、給水流量、原子炉圧力、原子炉水位、再循環ループ流量それぞれの時間変化をTRACGの解析結果と比較した。中

性子束（APRM応答）は、再循環ポンプトリップによる流量低下により速やかな低下傾向を示し、その後整定する。中性子束の変動が大きい事象初期において[]、その後の出力が整定する時間領域では[]の範囲で一致する。また、各パラメータの変化傾向、最大値の発生時間等が同等であり、試験結果を十分に再現できることを確認した。

3.3.4 結論

上記で提示した発電機負荷遮断試験及び再循環ポンプトリップ試験についてTRACGでは十分に試験結果を再現できることを確認した。これらの結果より過渡的な挙動解析にTRACGを使用することは妥当である。

表 3.3-1 福島第二原子力発電所 2 号炉の諸元表

原子炉タイプ	BWR 5
電気出力 (MWe)	1,100
熱出力 (MWt)	3,293
燃料集合体体数	764
炉心流量 (t/h)	48,300
原子炉ドーム圧力 (MPa (gage))	6.93
再循環ポンプ台数	2 (External loop)

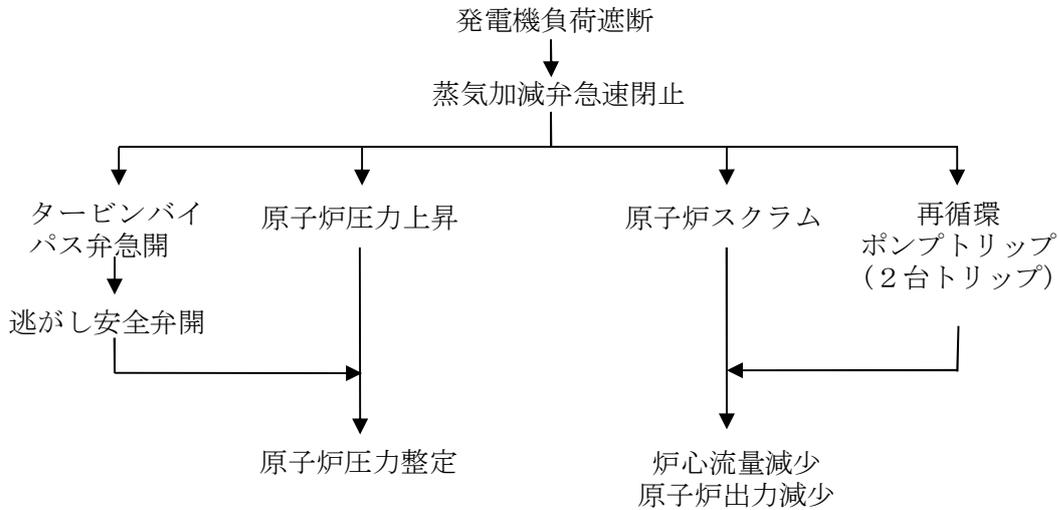


図 3.3-1 福島第二原子力発電所 2 号炉における L R W B 事象進展図

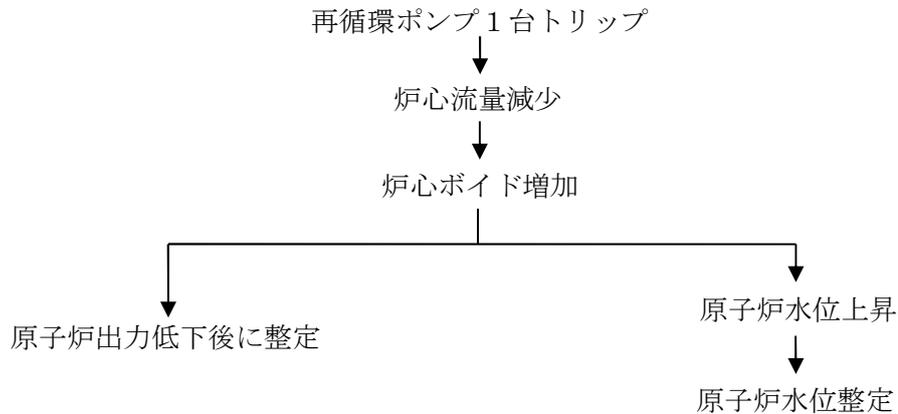


図 3.3-2 福島第二原子力発電所 2 号炉における 1 R P T 事象進展図

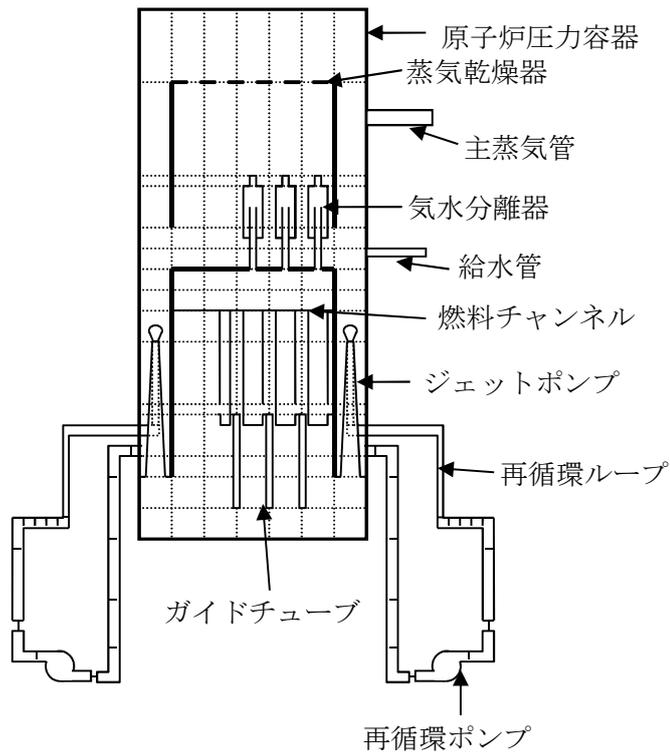


図 3.3-3 福島第二原子力発電所 2号炉の原子炉压力容器ノーディング図

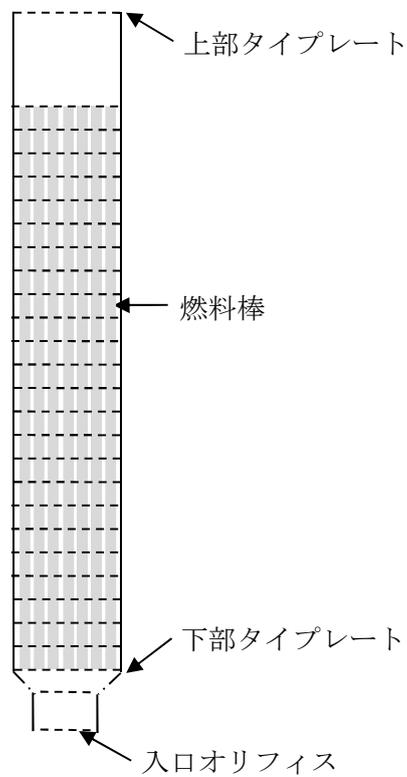


図 3.3-4 福島第二原子力発電所 2号炉の燃料チャンネルノーディング図

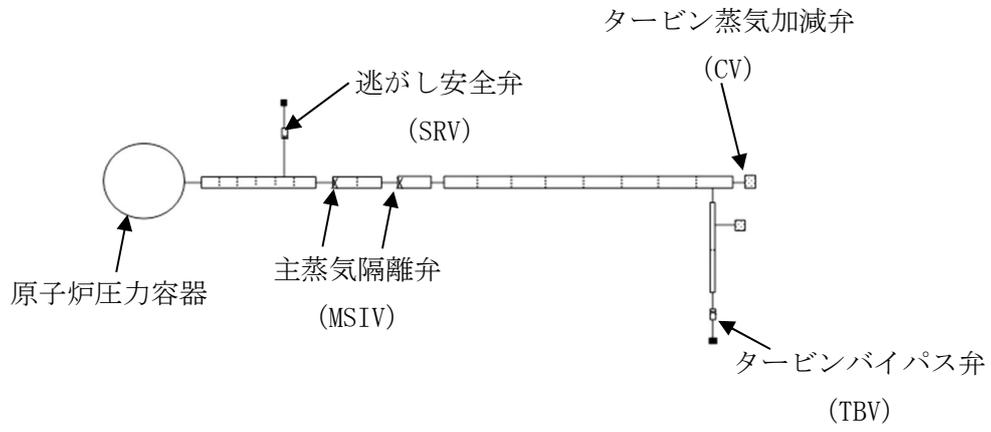


図 3.3-5 福島第二原子力発電所 2 号炉の主蒸気管ノーディング図

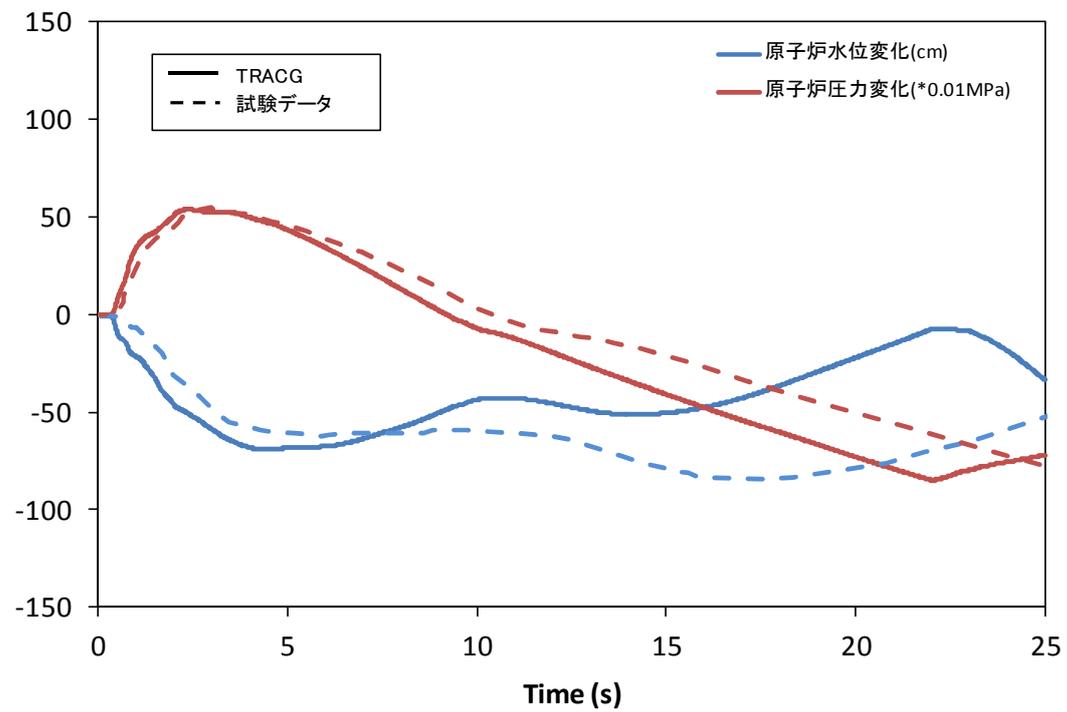
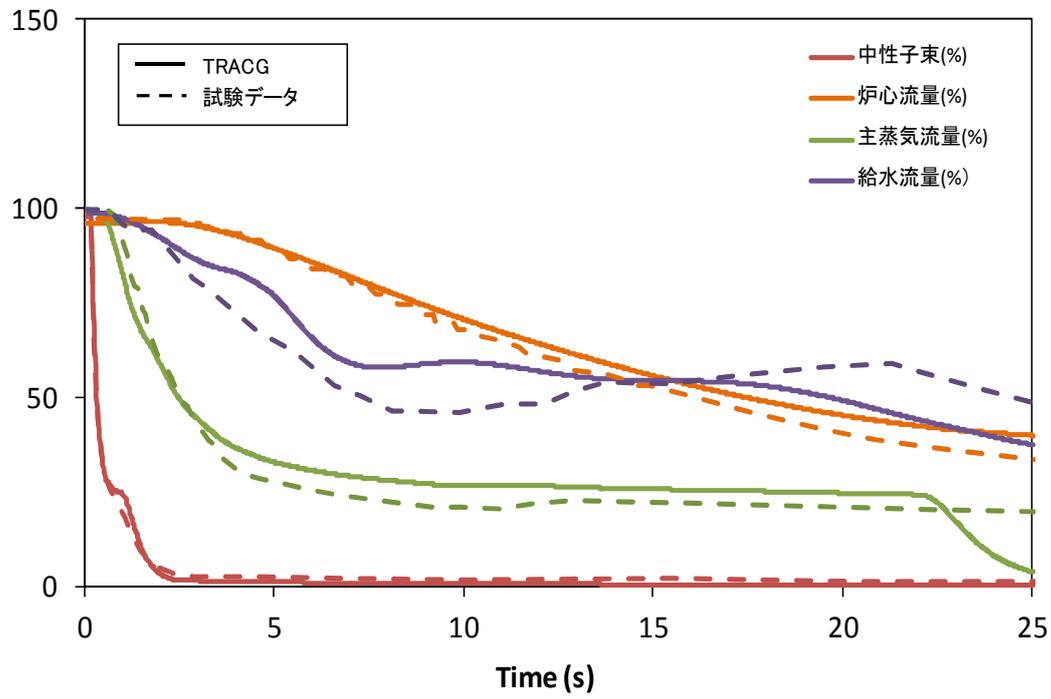


図 3.3-6 福島第二原子力発電所 2 号炉の LRWB と解析結果の比較

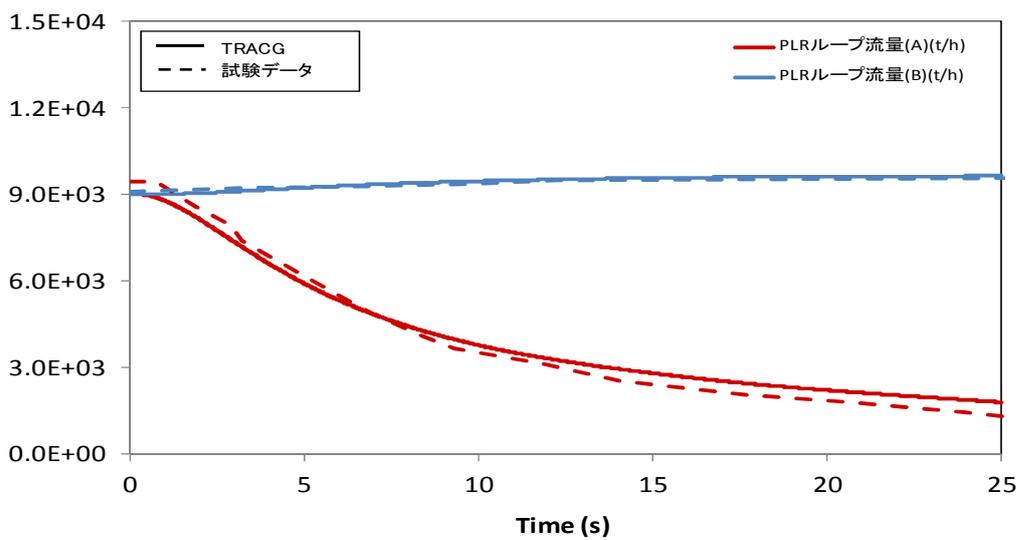
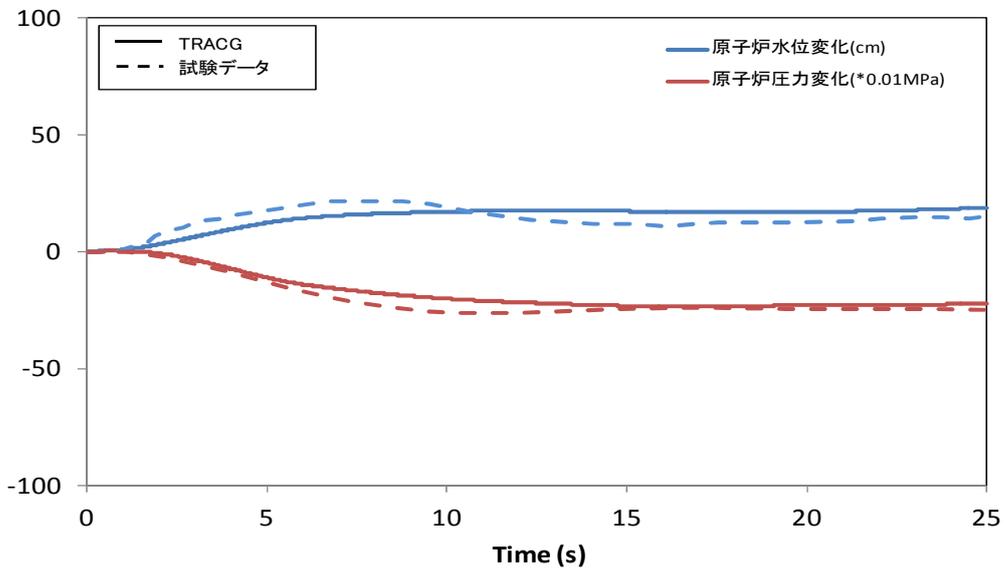
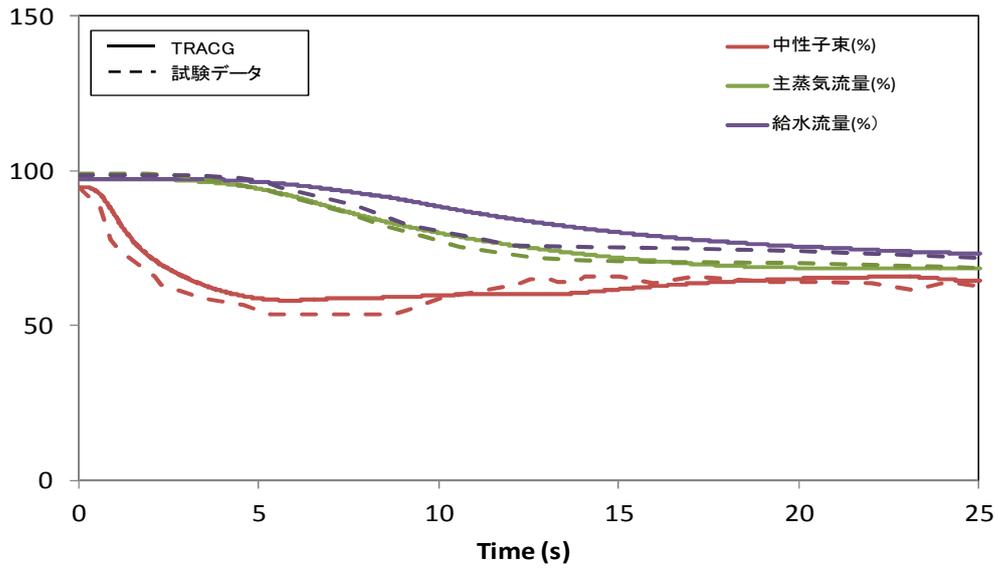


図 3.3-7 福島第二原子力発電所 2号炉の 1 R P T と解析結果の比較

3.4 柏崎刈羽原子力発電所7号炉起動試験

本節ではABWRの代表例として熱出力 3,926MWt の柏崎刈羽原子力発電所7号炉について取り上げる。同炉の諸元表を表 3.4-1 に示す。

対象とした試験は、圧力上昇過渡時の発電機負荷遮断試験(LRWB)、流量減少過渡時のインターナルポンプトリップ試験(インターナルポンプ10台中3台トリップ(以下「3RPT」という。))の2ケースとした。図 3.4-1、図 3.4-2 に各試験の事象進展図を示す。

3.4.1 TRACG解析モデル

原子炉圧力容器、燃料チャンネル、主蒸気管のモデル化は前節 3.3 と同様に行った。ABWRの原子炉圧力容器のノーディングを図 3.4-3 に、燃料チャンネルのノーディングを図 3.4-4 に、主蒸気管のノーディングを図 3.4-5 に示す。これらのノーディングに従いTRACGの解析を実施した。

TRACGの炉心状態はAETNAにより初期化され、過渡計算ではTRACG自身の三次元核動特性モデルによって計算される。燃料チャンネルについて、核計算は全チャンネルが独立に計算されるが、熱水力計算は燃料チャンネルの出力に応じて幾つかのグループに分け、複数の燃料チャンネルをまとめて計算する。

再循環流量制御、給水流量制御、炉心圧力制御等のコントロールシステム、及び安全保護系等についてはコントロールブロックによってモデル化を行う。

3.4.2 試験データとの比較

発電機負荷遮断試験に関する比較を図 3.4-6 に、インターナルポンプトリップ試験に関する比較を図 3.4-7 に示す。

3.4.3 結果の考察

発電機負荷遮断試験については、中性子束、炉心流量、主蒸気流量、給水流量、原子炉圧力、原子炉水位それぞれの時間変化をTRACGの解析結果と比較した。中性子束(APRM応答)について見ると、スクラムにより速やかな低下傾向を示し、の範囲で一致する。また、各パラメータの変化傾向、最大値の発生時間等が同等であり、試験結果を十分に再現できることを確認した。

インターナルポンプトリップ試験についても、中性子束、炉心流量、主蒸気流量、給水流量、原子炉圧力、原子炉水位、インターナルポンプ回転数それぞれの時間変化をTRACGの解析結果と比較した。中性子束(APRM応答)は、インターナルポンプトリップによる流量低下により速やかな低下傾向を示し、その後整定する。中性子束の変動が大きい事象初期において、その後の出力が整定する時間領域ではの範囲で一致する。また、各パラメータの変化傾向、最大値の発生時間等が同等であり、試験結果を十分に再現できることを確認した。

3.4.4 結論

上記で提示した発電機負荷遮断試験及びインターナルポンプトリップ試験についてTRACGでは十分に試験結果を再現できることを確認した。これらの結果より過渡的な挙動解析にTRACGを使用することは妥当である。

表 3.4-1 柏崎刈羽原子力発電所7号炉の諸元表

原子炉タイプ	A B W R
電気出力 (MWe)	1,356
熱出力 (MWt)	3,926
燃料集合体体数	872
炉心流量 (t/h)	52,200
原子炉ドーム圧力 (MPa (gage))	7.07
インターナルポンプ台数	10 (Internal loop)

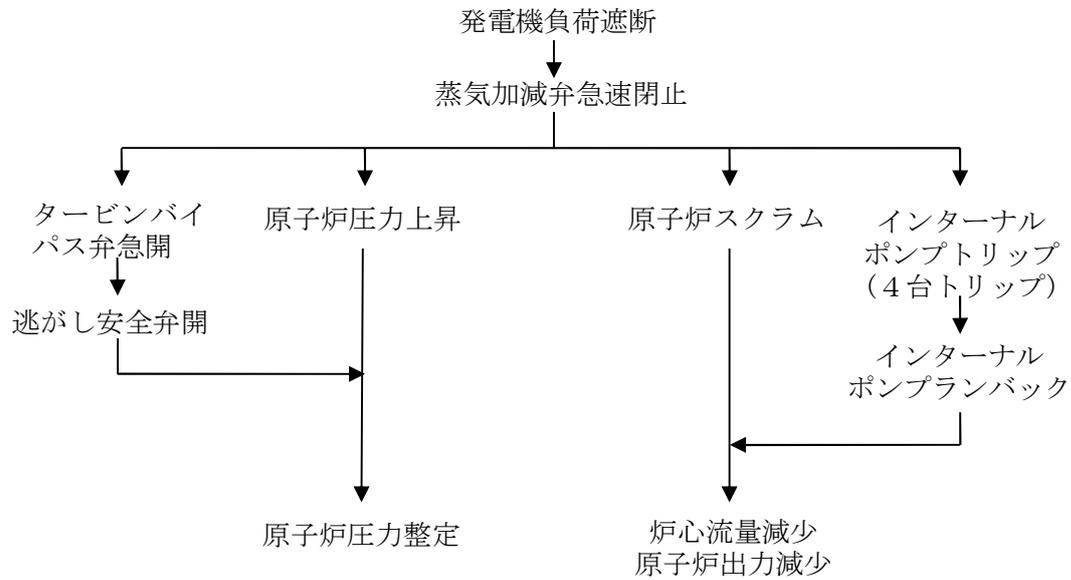


図 3.4-1 柏崎刈羽原子力発電所7号炉におけるLRWB事象進展図

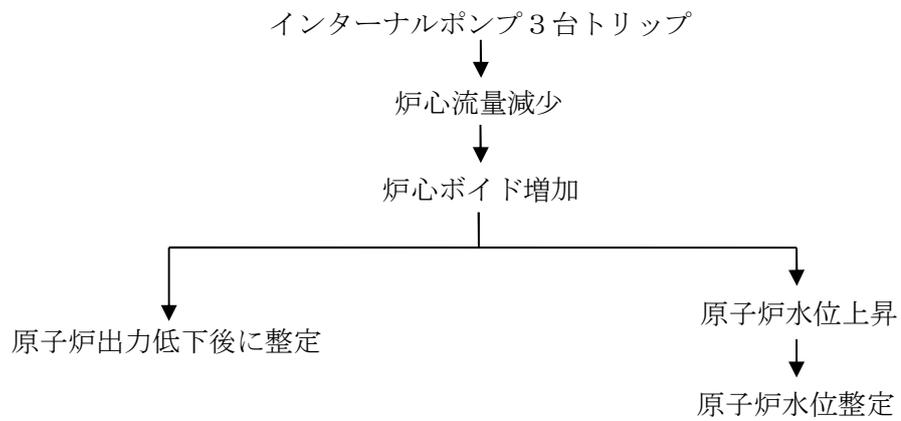


図 3.4-2 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉における 3 R P T 事象進展図

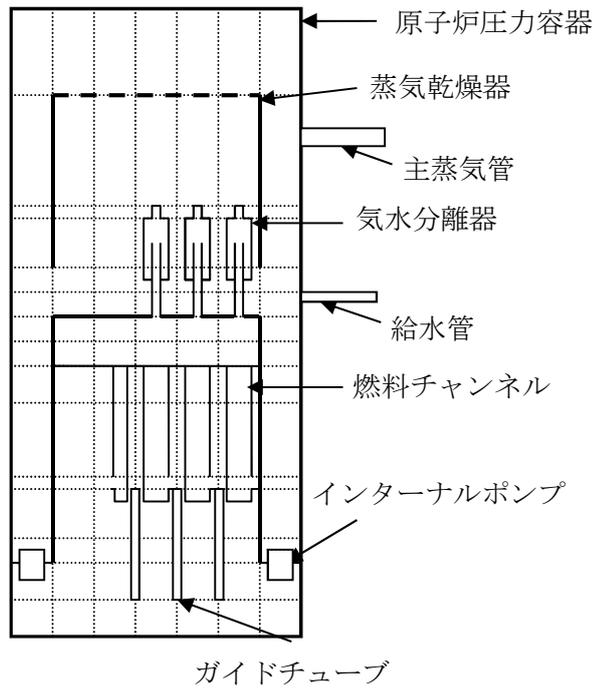


図 3.4-3 柏崎刈羽原子力発電所 7号炉の原子炉圧力容器ノーディング図

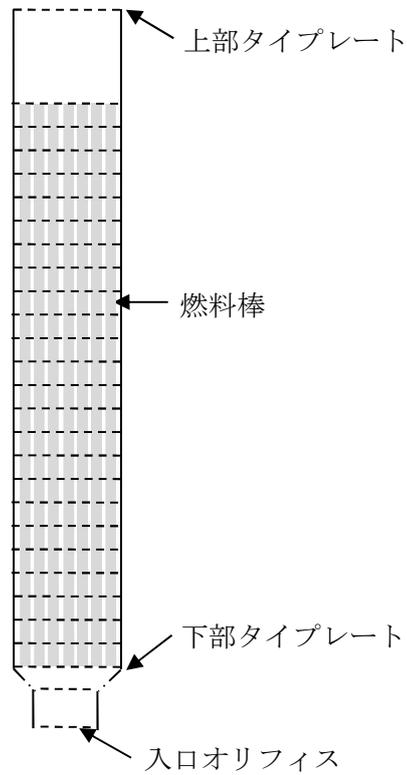


図 3.4-4 柏崎刈羽原子力発電所 7号炉の燃料チャンネルノーディング図

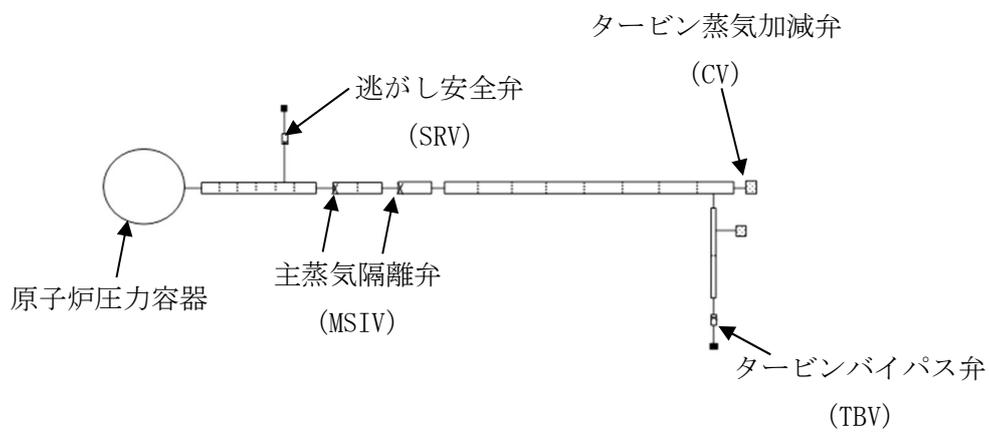


図 3.4-5 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉の主蒸気管ノーディング図

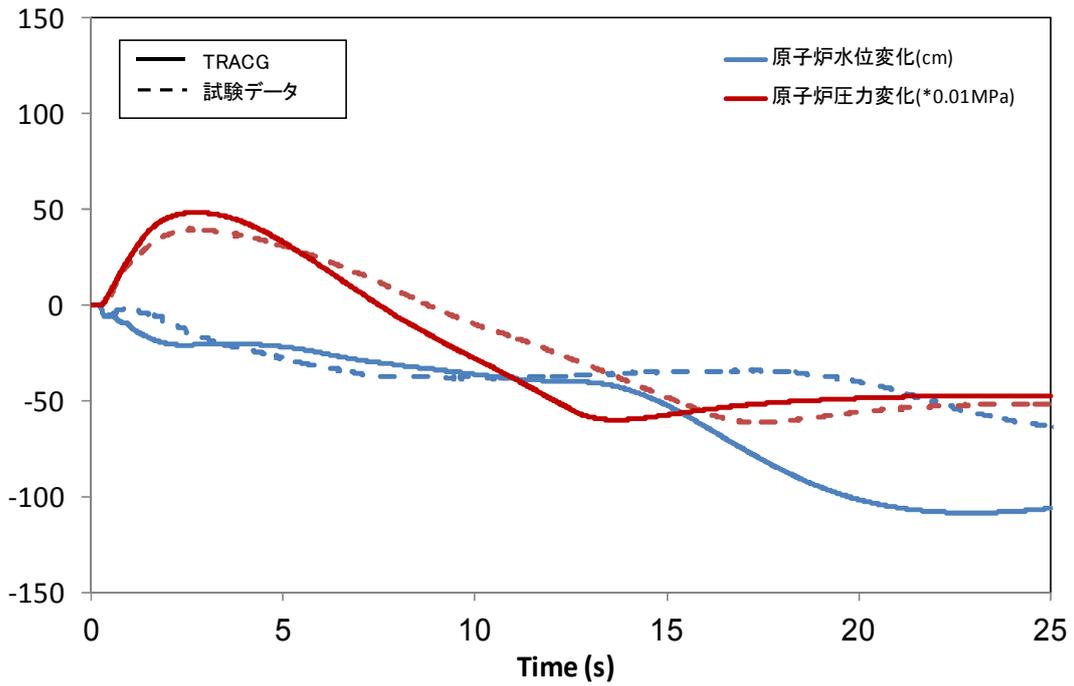
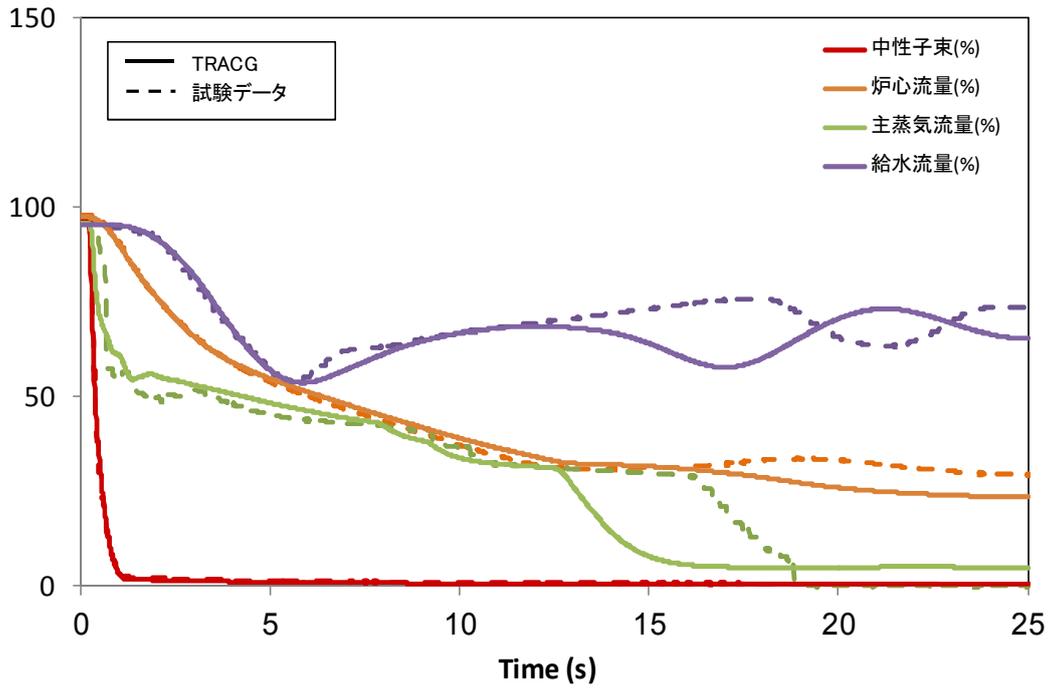


図 3.4-6 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉の LRWB と解析結果の比較

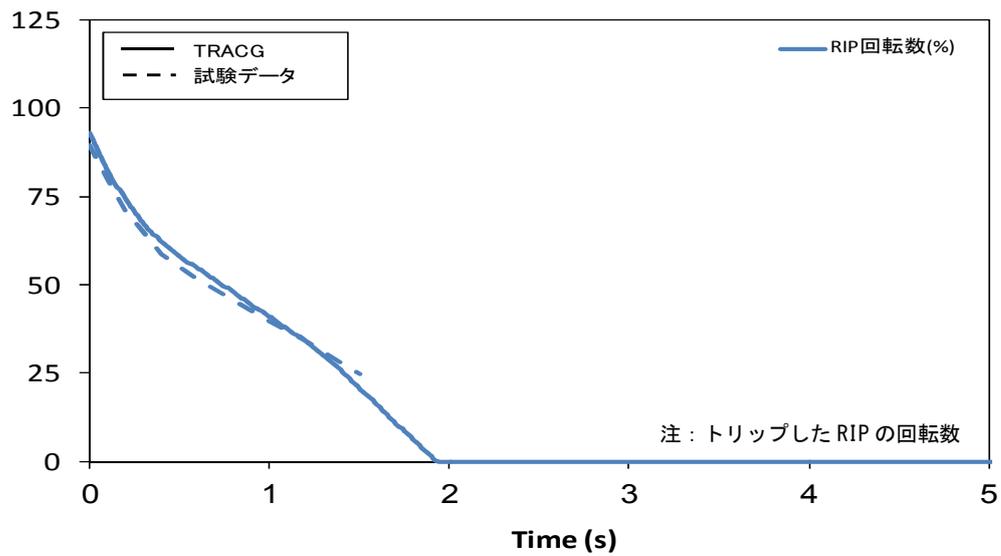
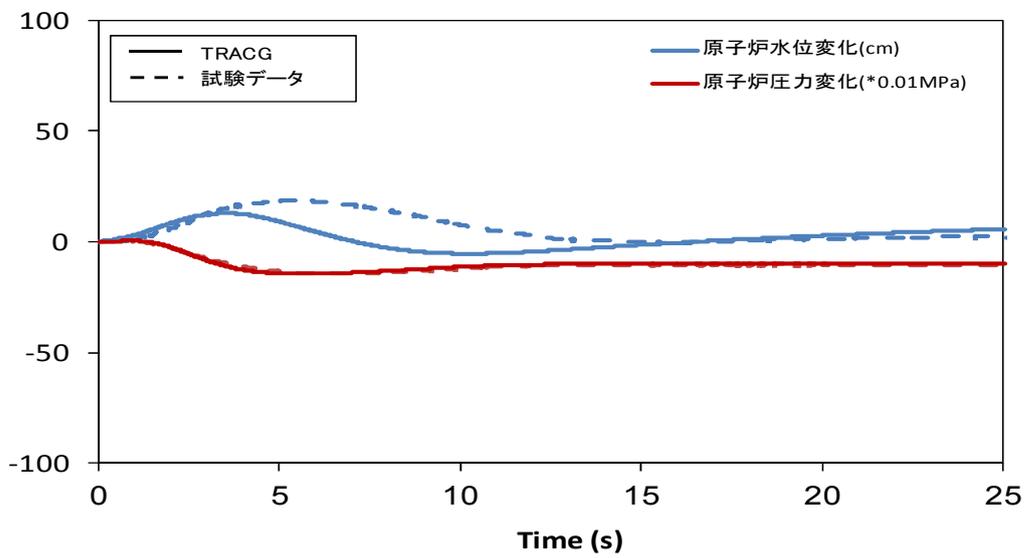
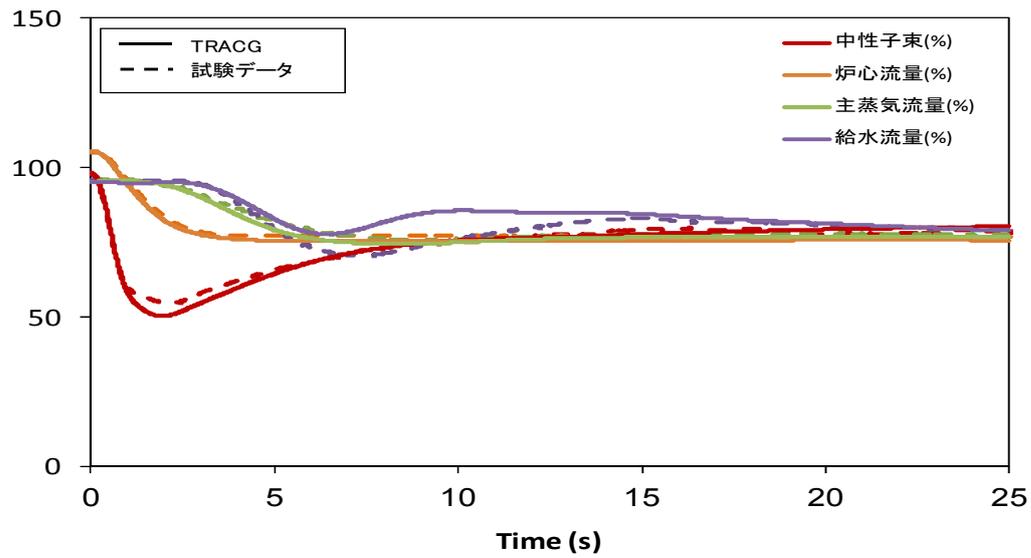


図 3.4-7 柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉の 3 R P T と解析結果の比較

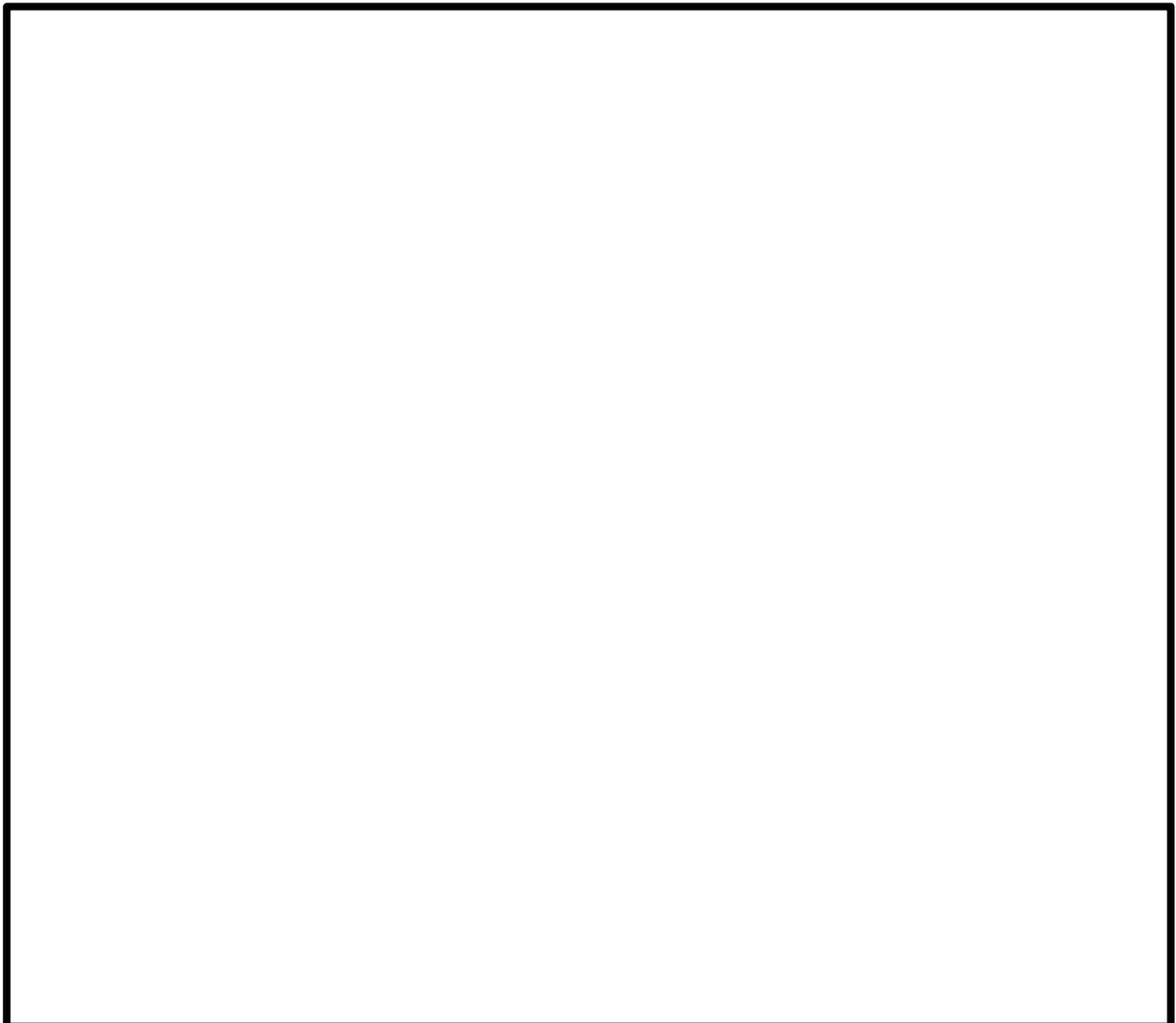
3.5 S L C 試験

GE Hitachi Nuclear Energy (G E H) 社で実施された S L C S (Stand-by Liquid Control System) に関する Vallecitos 試験⁽⁴⁰⁾について説明する。

3.5.1 試験の説明

1980 年頃に、G E H 社は Vallecitos 試験装置を用いて、一連のほう酸溶液混合試験を実施した。Vallecitos 試験装置は、実機 B W R の詳細な 1/6 規模モデルであり、ほう酸溶液の注入位置を変更することが可能であった。Vallecitos 試験は大気圧及び室温の下で実施され、低温時のほう酸溶液の相対密度を模擬した代替溶液が使用された。試験は、原子炉定格炉心流量の 5 %、10%及び 15%等の流量と等価な条件で実施された。試験装置には、制御棒案内管、燃料集合体、ジェットポンプ、気水分離器等の原子炉圧力容器の底部から上部までの B W R のすべての機器、及び二つの外部再循環ループが含まれていた。

3.5.2 試験データとの比較



3.5.3 結論

Vallecitos 試験装置を用いて実施されたほう酸溶液混合試験に関するTRACGの解析結果が妥当な範囲で測定値を再現できることから、TRACGのほう素モデルの妥当性が確認された。

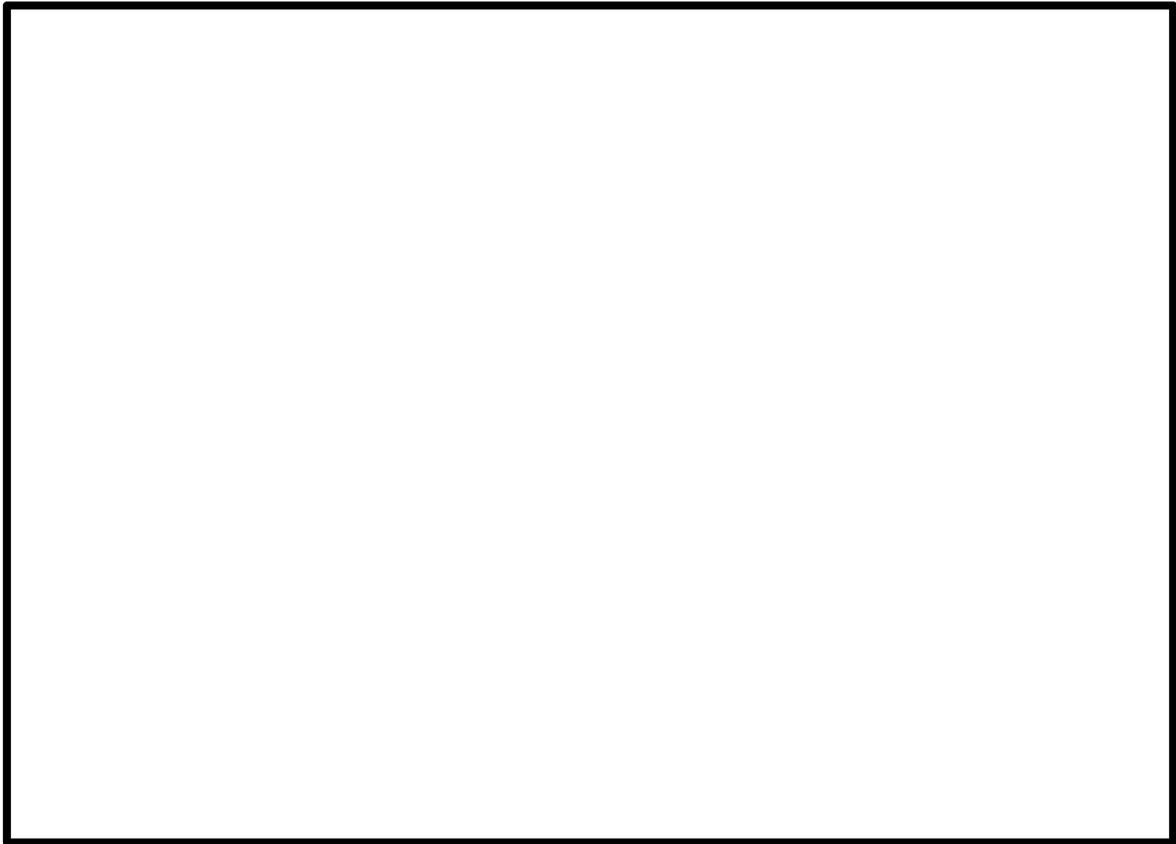


図 3.5-1 Vallecitos 試験 125 における下部プレナムのほう酸混合係数（5%炉心流量）



図 3.5-2 Vallecitos 試験 125 における炉心のほう酸混合係数（5%炉心流量）

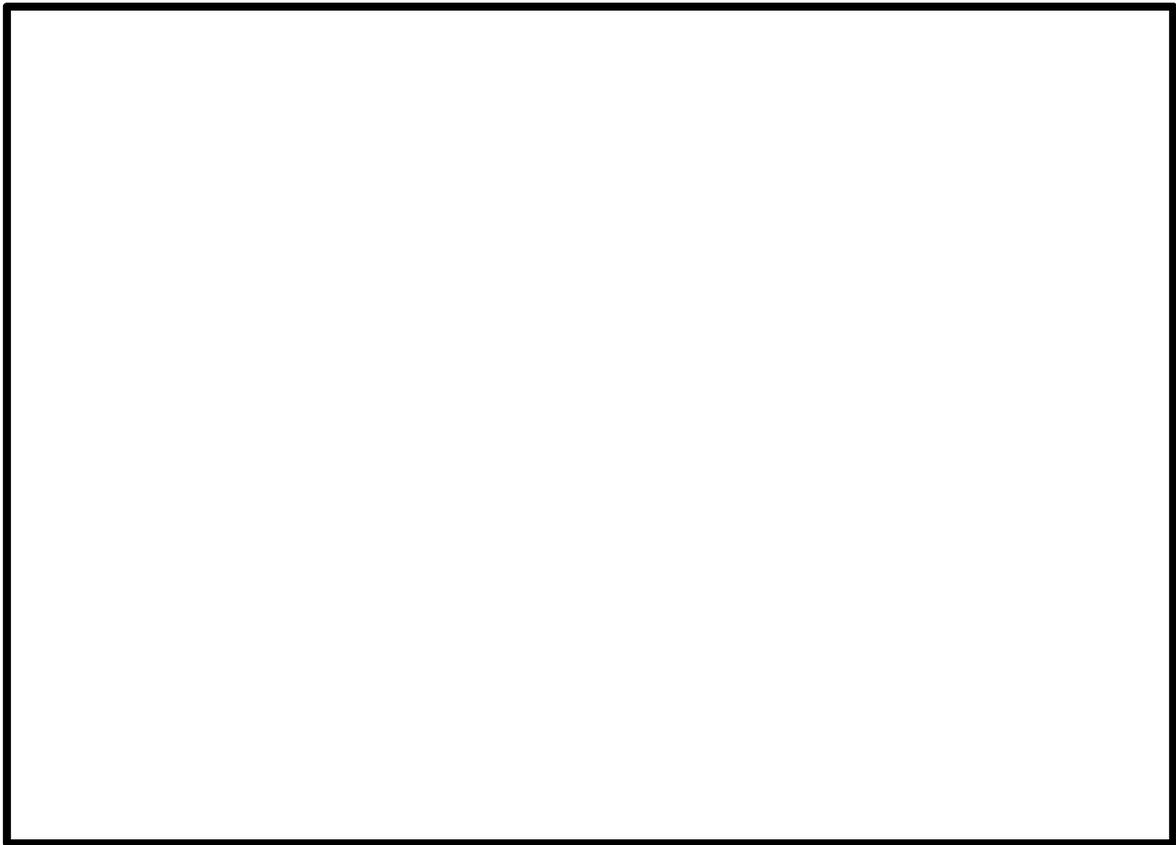


図 3.5-3 Vallecitos 試験 122 における下部プレナムのほう酸混合係数 (10%炉心流量)

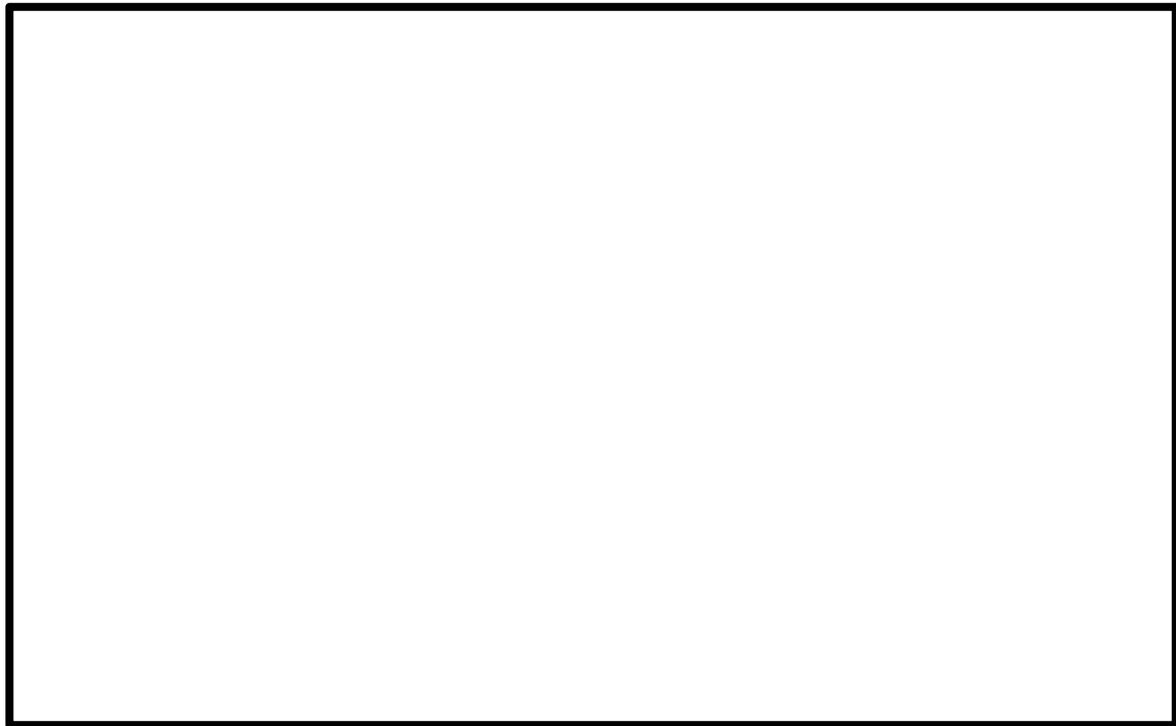


図 3.5-4 Vallecitos 試験 122 における炉心のほう酸混合係数 (10%炉心流量)

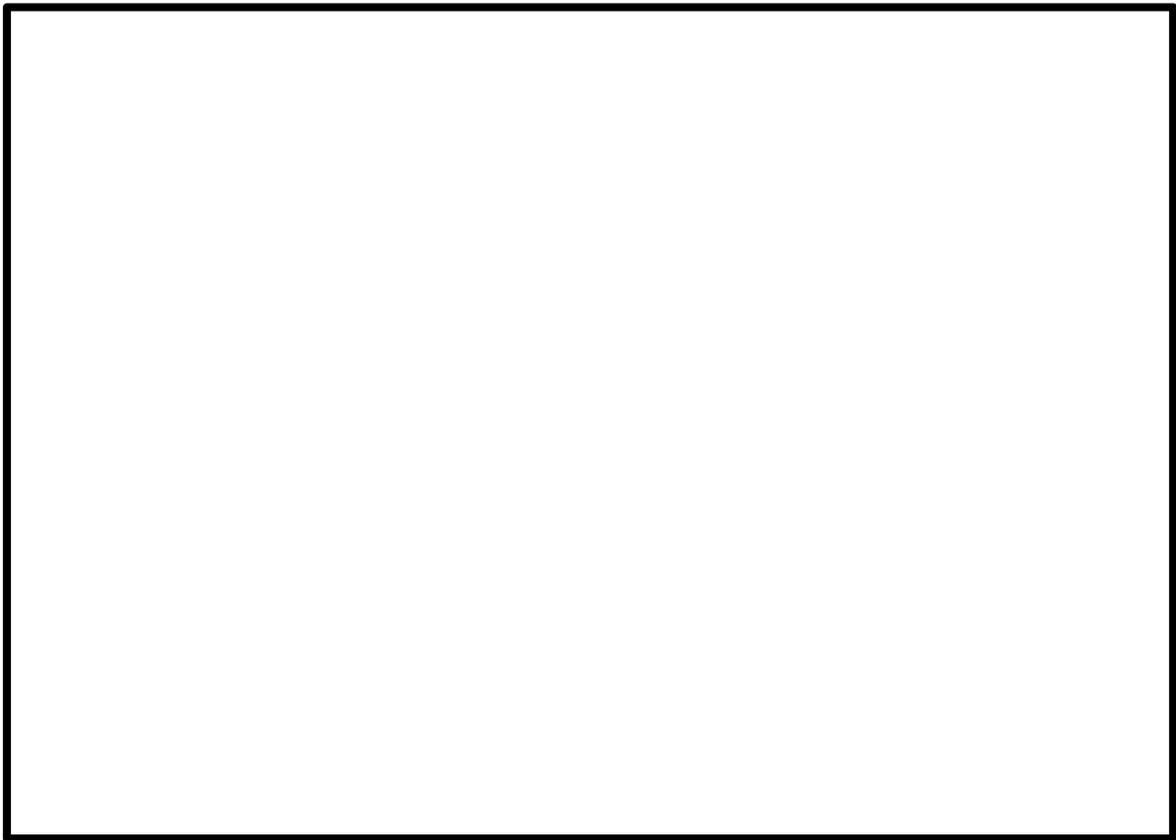


図 3.5-5 Vallecitos 試験 327 における下部プレナムのほう酸混合係数 (10%炉心流量)



図 3.5-6 Vallecitos 試験 327 における炉心のほう酸混合係数 (10%炉心流量)

4 ATWS解析への適用例

REDYコード (REDY Ver. 1 (ATWS用), REDY Ver. 2) 及びSCATコード (SCAT Ver. 3) の有効性評価に対して, 比較用の参考解析としてTRACGコードをATWS解析に適用した結果について例示する。

なお, ATWS解析では, 前章で説明したLASALLE不安定事象で検討した結果を反映して, チャンネルコンポーネントについて同じノード分割を用いた。

4.1 ABWR平衡炉心のMSIV誤閉止

図4.1-1～図4.1-8にABWRの平衡炉心においてMSIVの誤閉止を想定した場合のATWS解析結果を示す。燃料被覆管温度は最高で約550℃であり, 燃料被覆管最高温度は判断基準に対して十分な余裕があることが分かる。

参考に, 軸方向出力分布, 燃焼度点及び初期炉心流量が異なる条件についても確認した。評価した中で厳しい結果を与える下部ピーク炉心, サイクル末期, 初期炉心流量90%の場合であっても, 燃料被覆管温度は最高で約560℃であり, 燃料被覆管最高温度は判断基準に対して十分な余裕があることを確認した。図4.1-9～図4.1-16にATWS解析結果を示す。

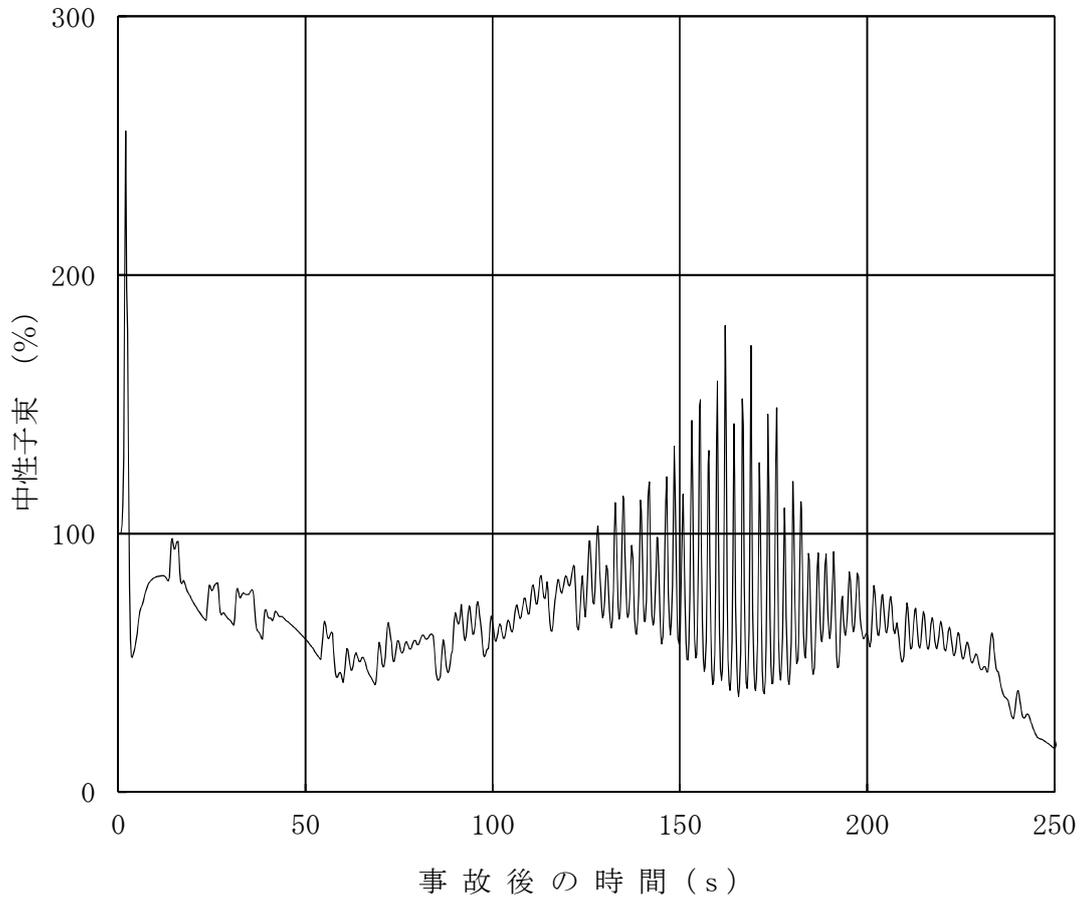


図 4.1-1 ATWS時の中性子束の時間推移
(ABWR, 平衡炉心)

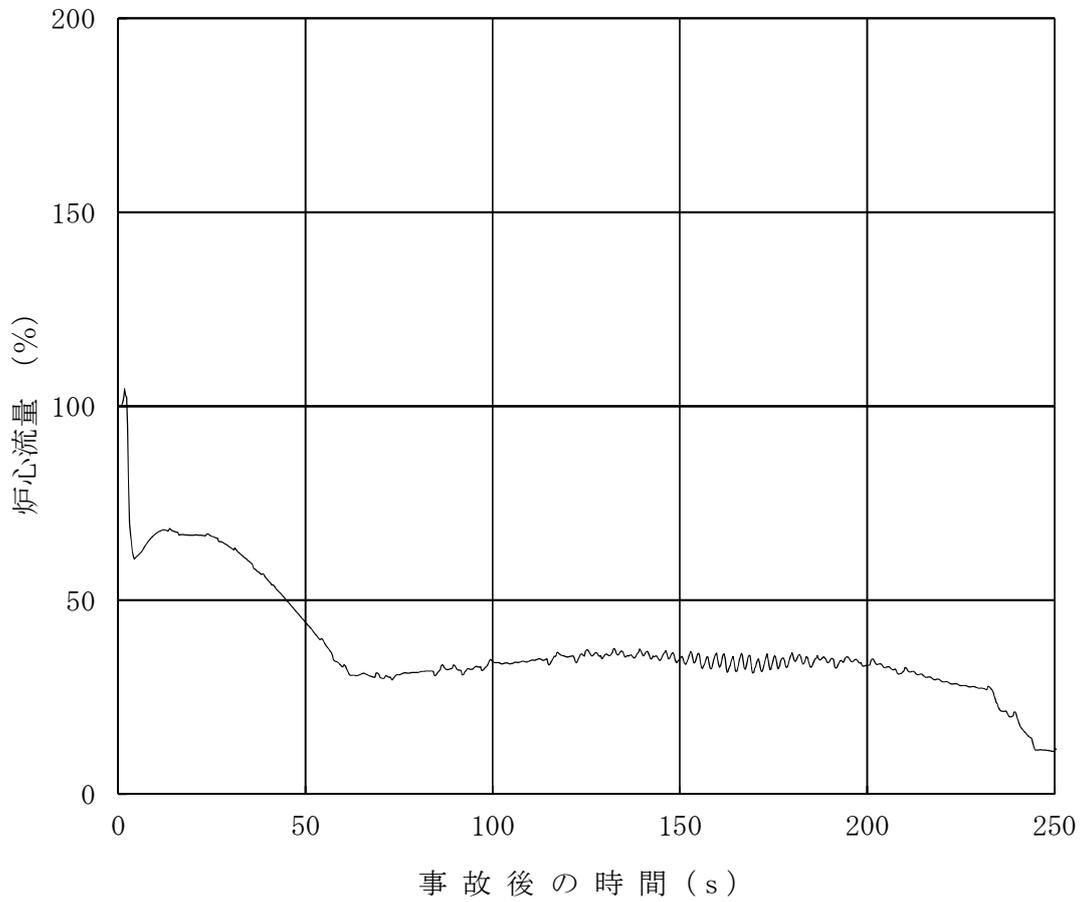


図 4.1-2 ATWS時の炉心流量の時間推移
(ABWR, 平衡炉心)

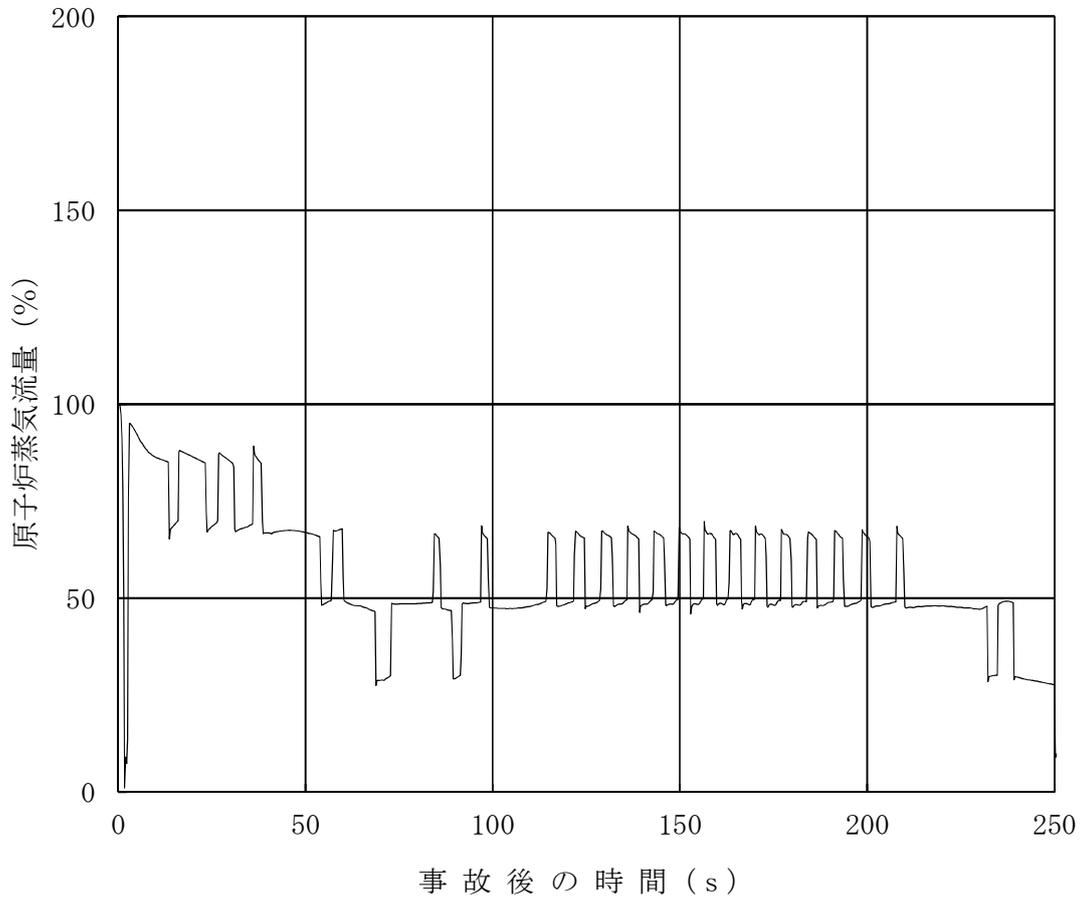


図 4.1-3 ATWS時の原子炉蒸気流量の時間推移
(ABWR, 平衡炉心)

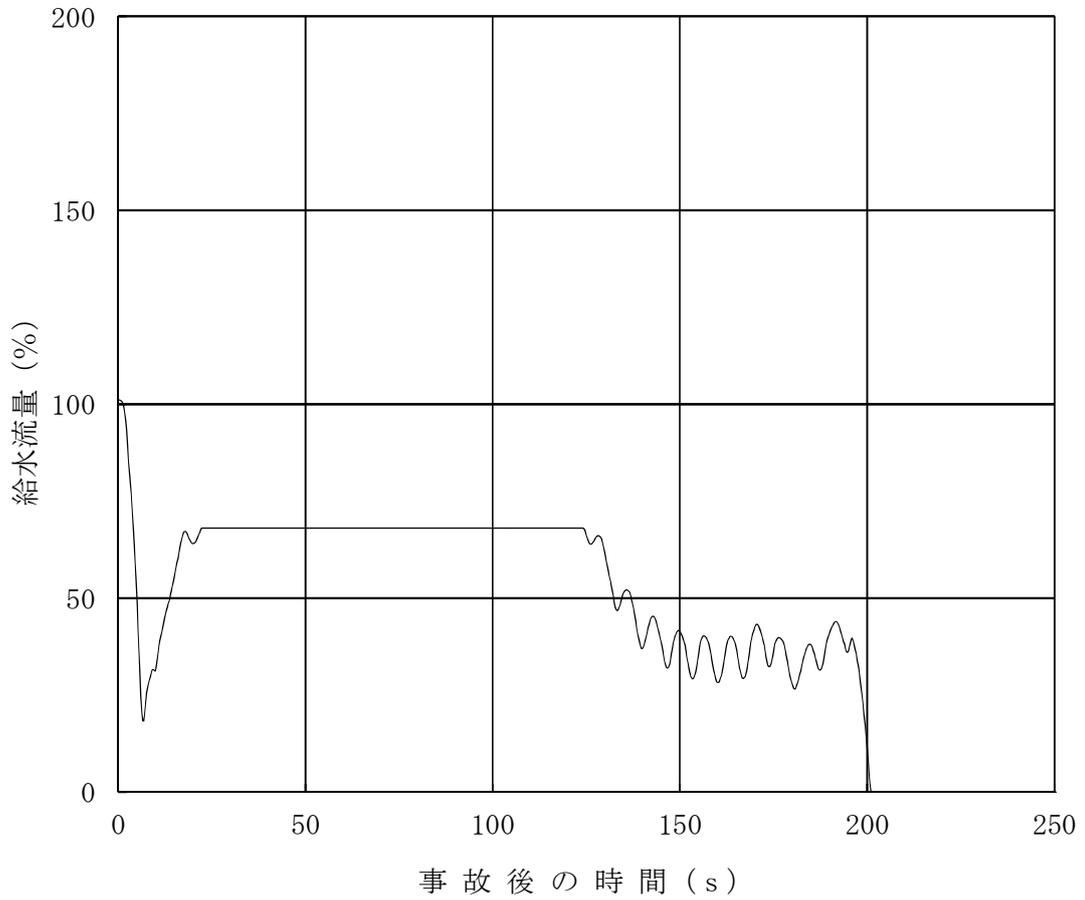


図 4.1-4 ATWS時の給水流速の時間推移
(ABWR, 平衡炉心)

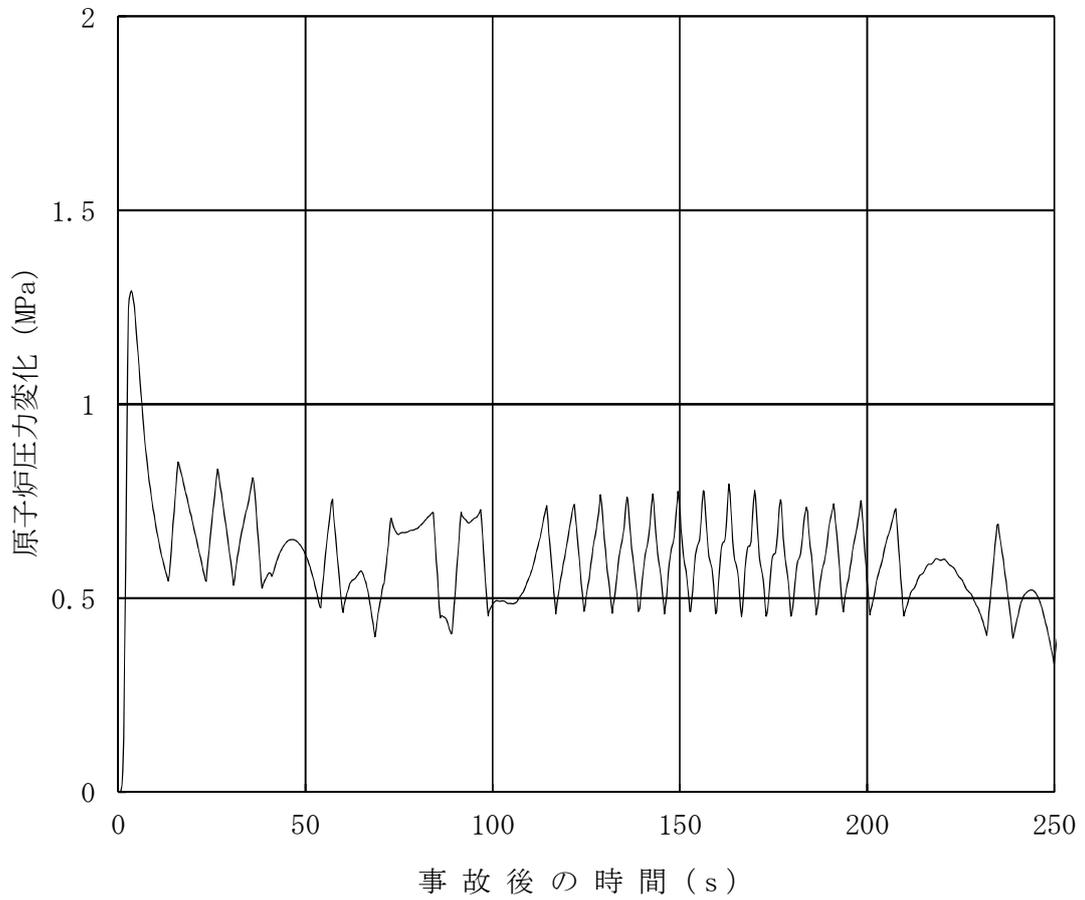


図 4.1-5 ATWS時の原子炉圧力変化の時間推移
(ABWR, 平衡炉心)

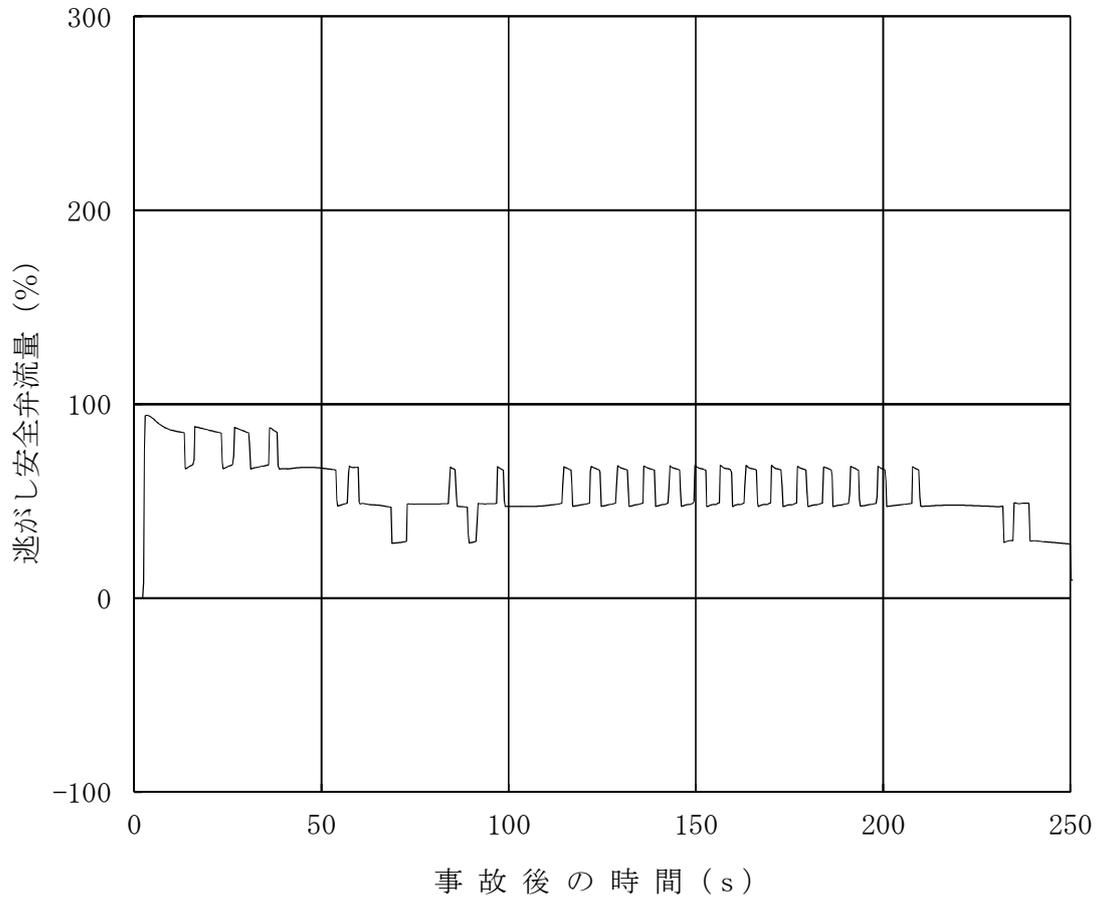


図 4.1-6 ATWS時の逃がし安全弁流量の時間推移
(ABWR, 平衡炉心)

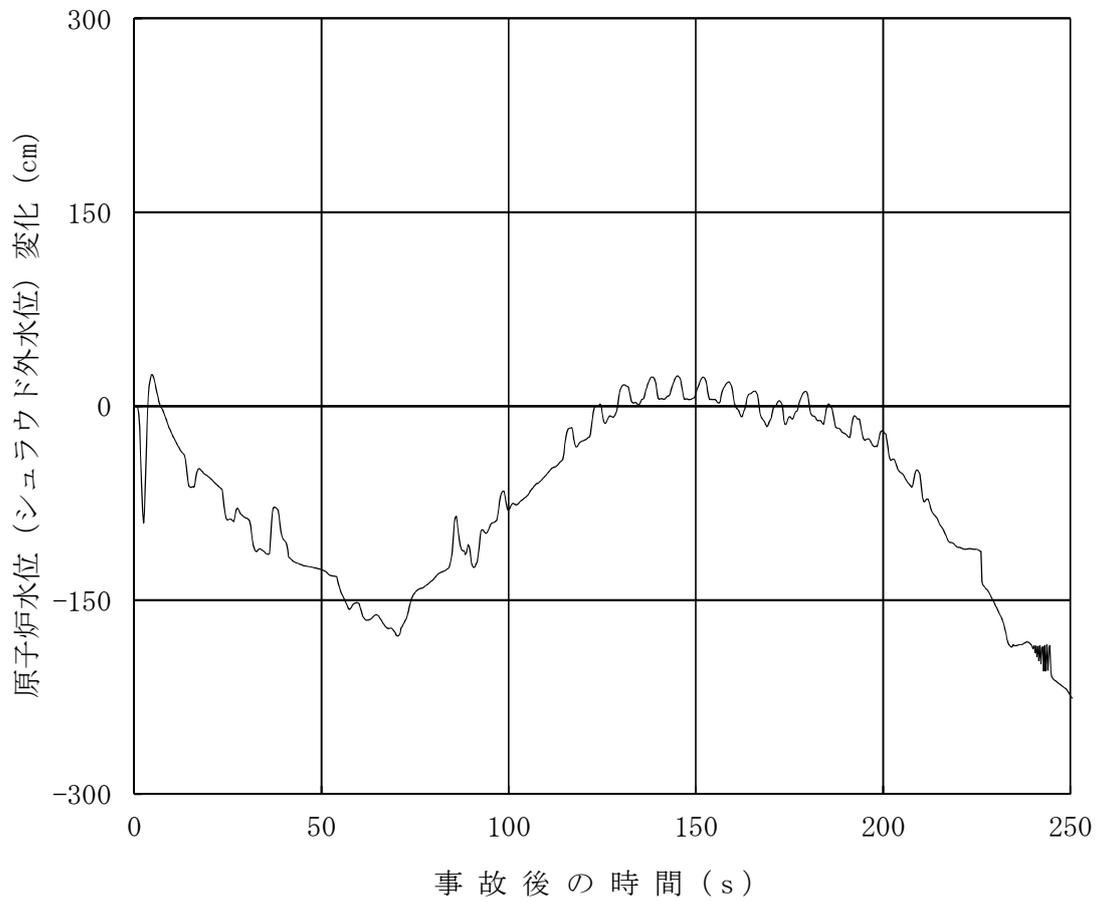


図 4.1-7 ATWS時の原子炉水位変化の時間推移
(ABWR, 平衡炉心)

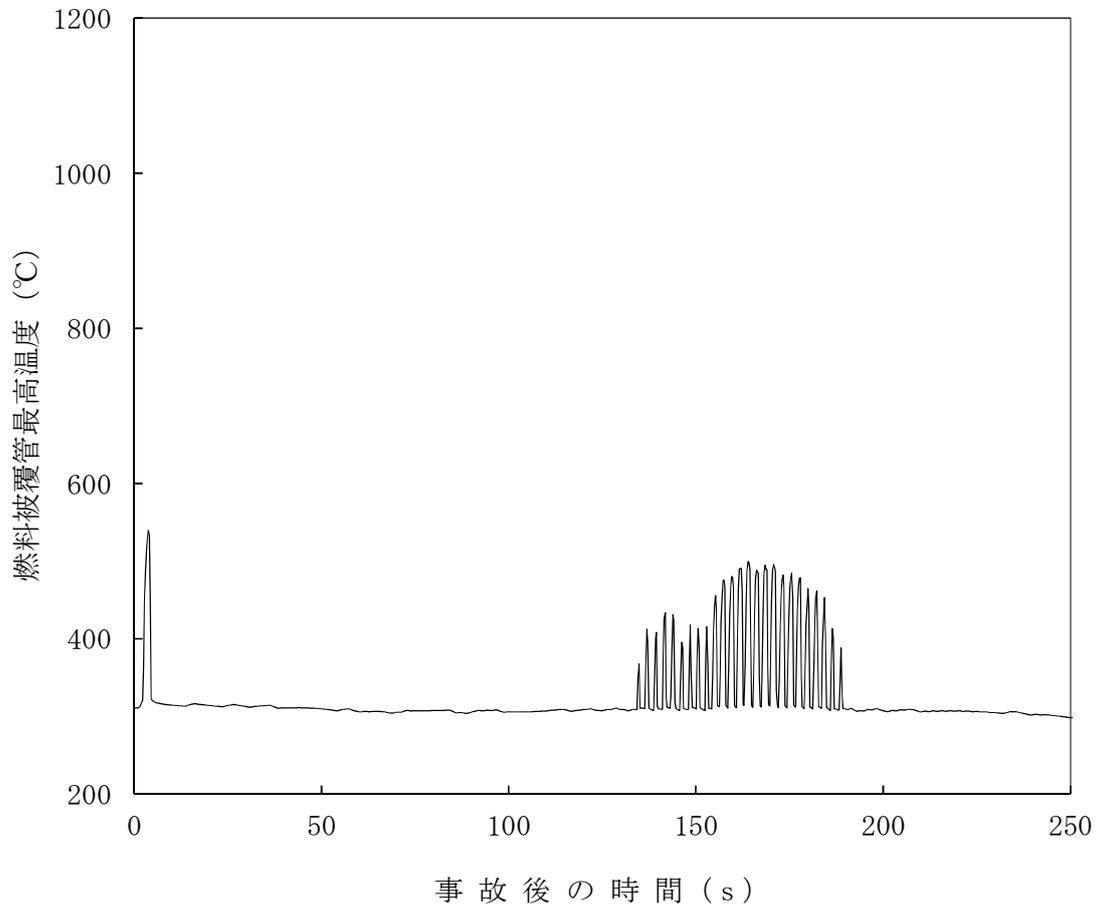


図 4.1-8 ATWS時の燃料被覆管最高温度の時間推移
(ABWR, 平衡炉心)

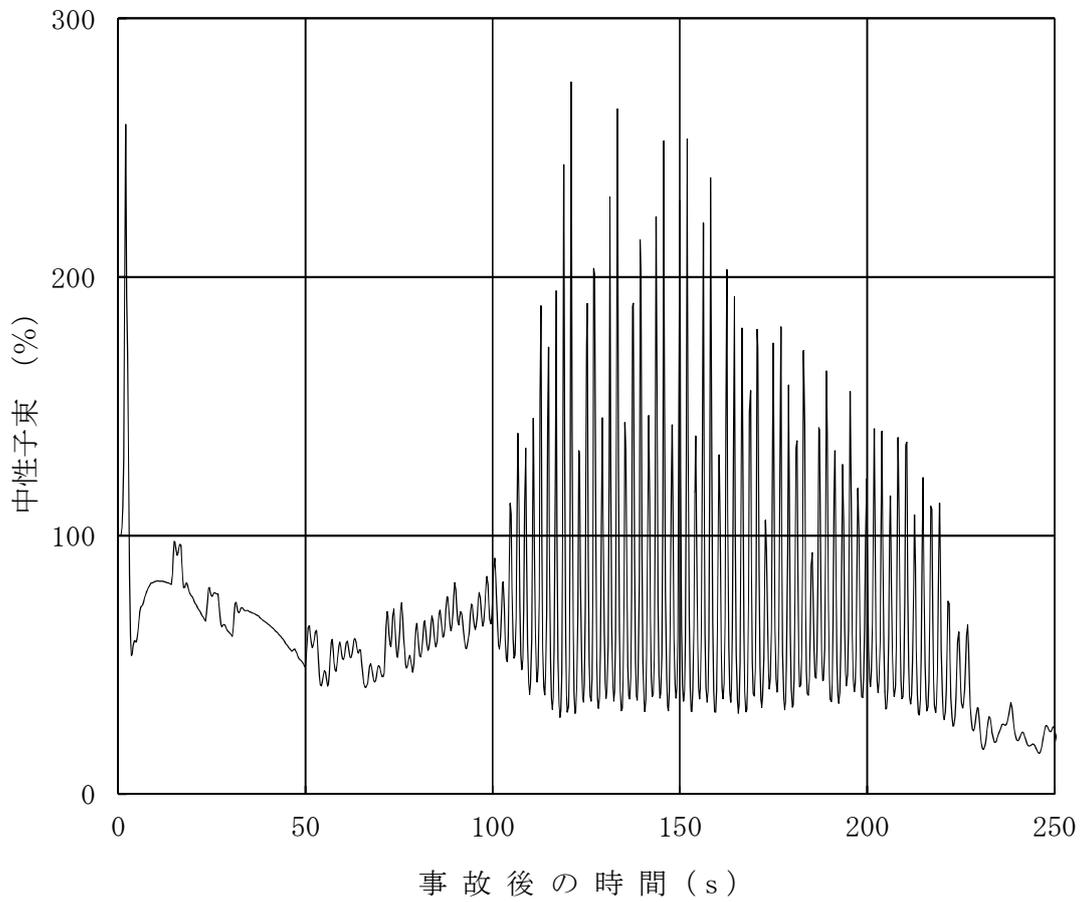


図 4.1-9 ATWS時の中性子束の時間推移
 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)

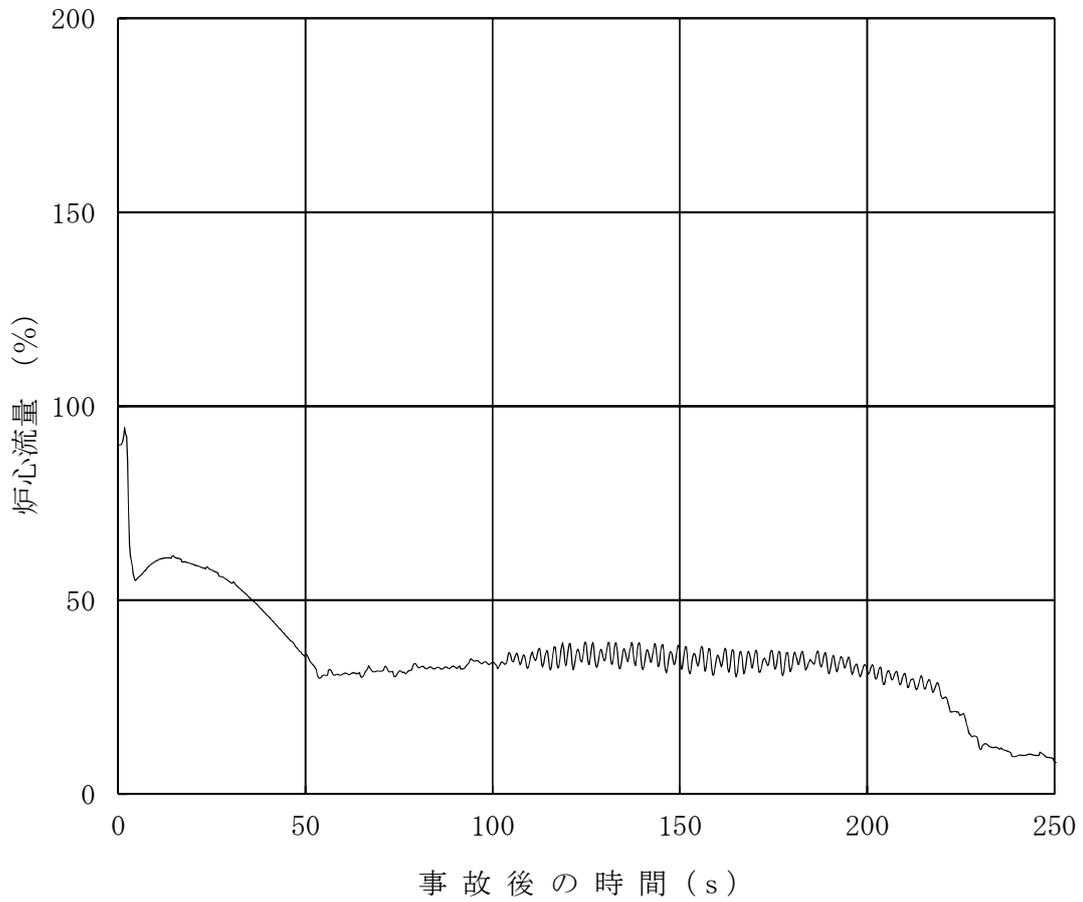


図 4.1-10 ATWS時の炉心流量の時間推移
(ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)

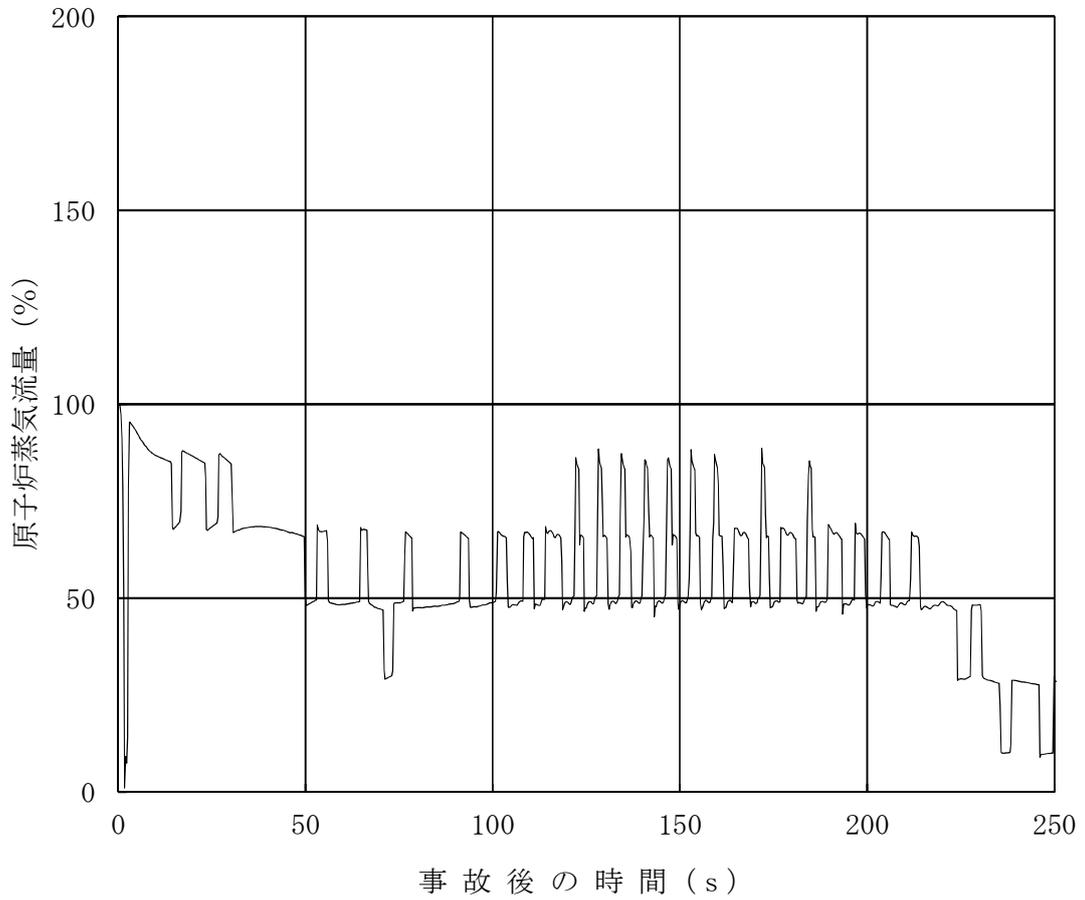


図 4.1-11 ATWS時の原子炉蒸気流量の時間推移
 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)

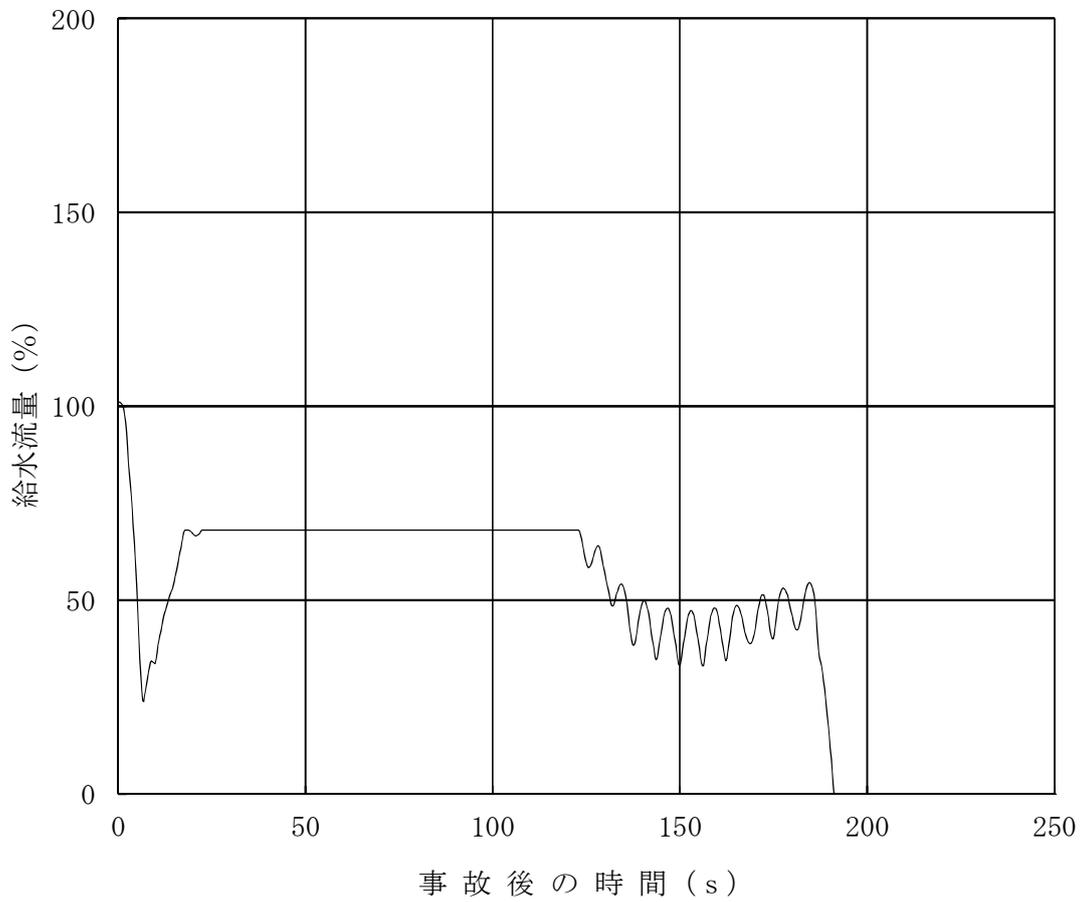


図 4.1-12 ATWS時の給水流量の時間推移
 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)

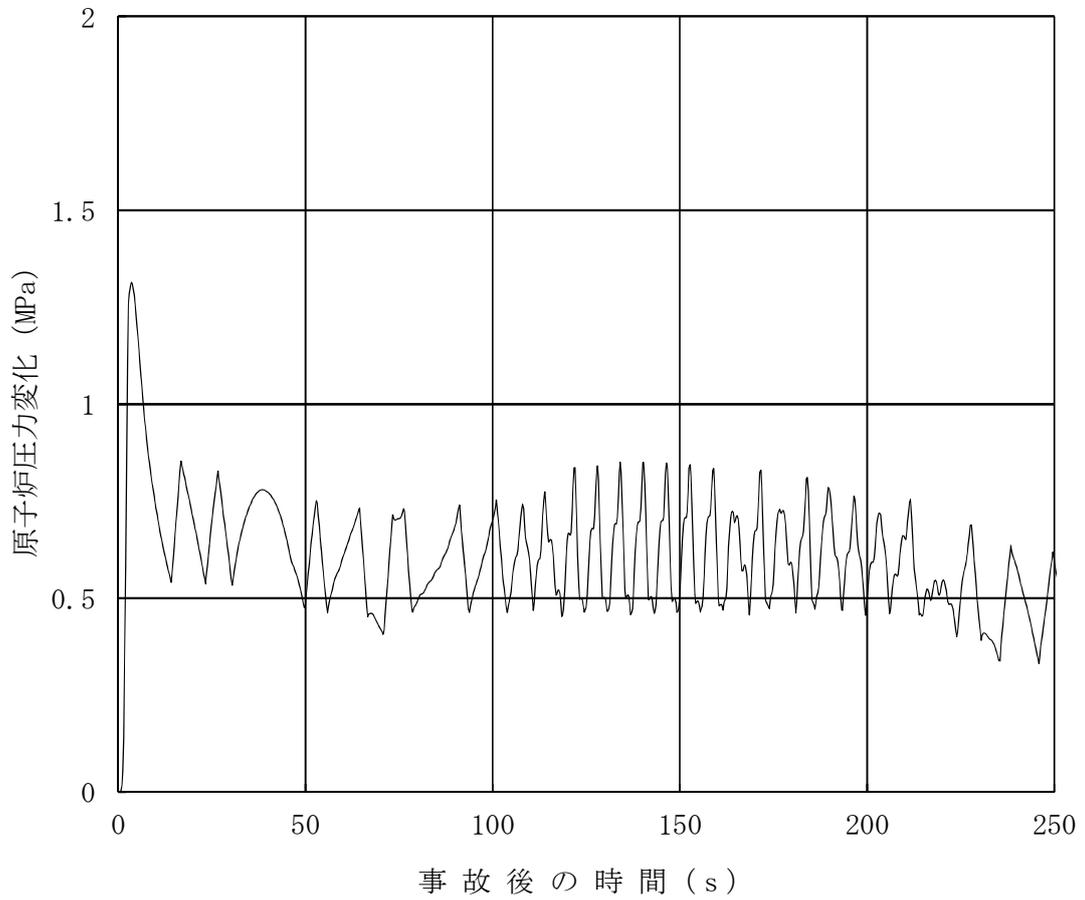


図 4.1-13 ATWS時の原子炉圧力変化の時間推移
(ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)

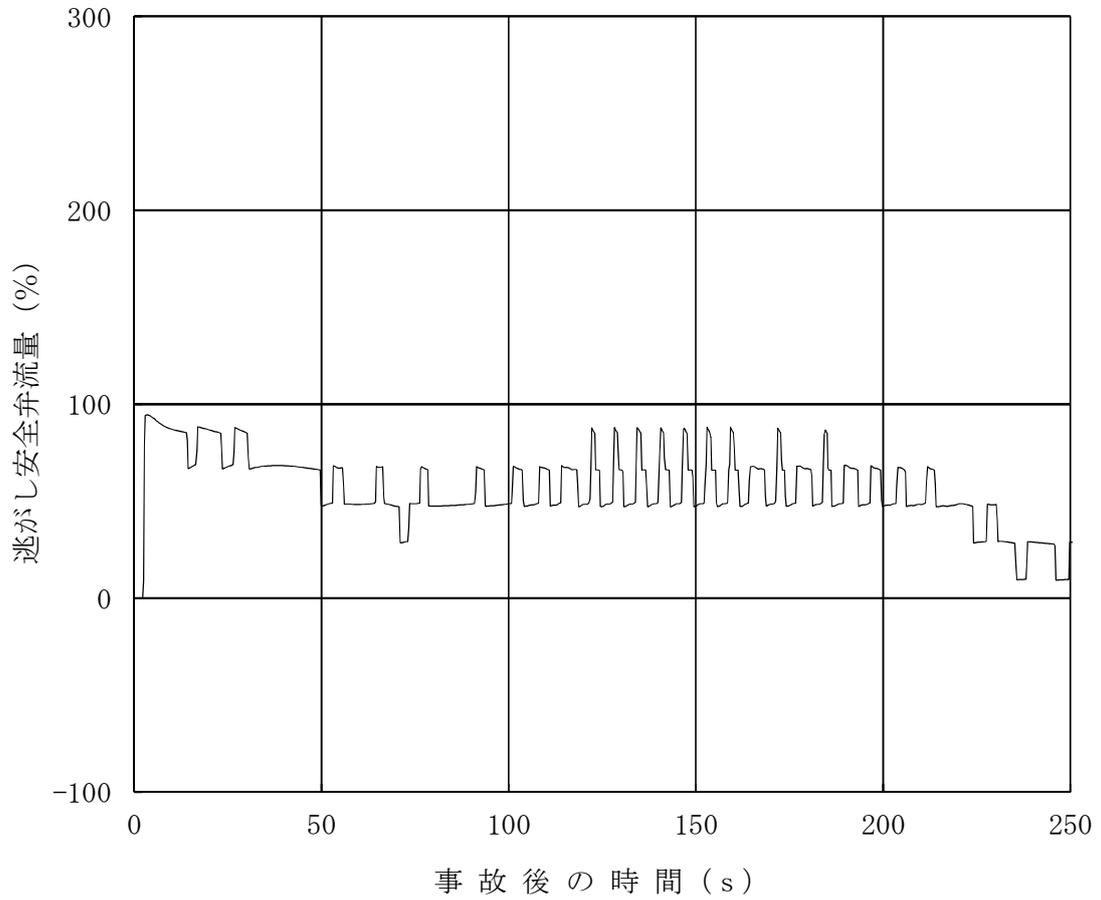


図 4.1-14 ATWS時の逃がし安全弁流量の時間推移
 (ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)

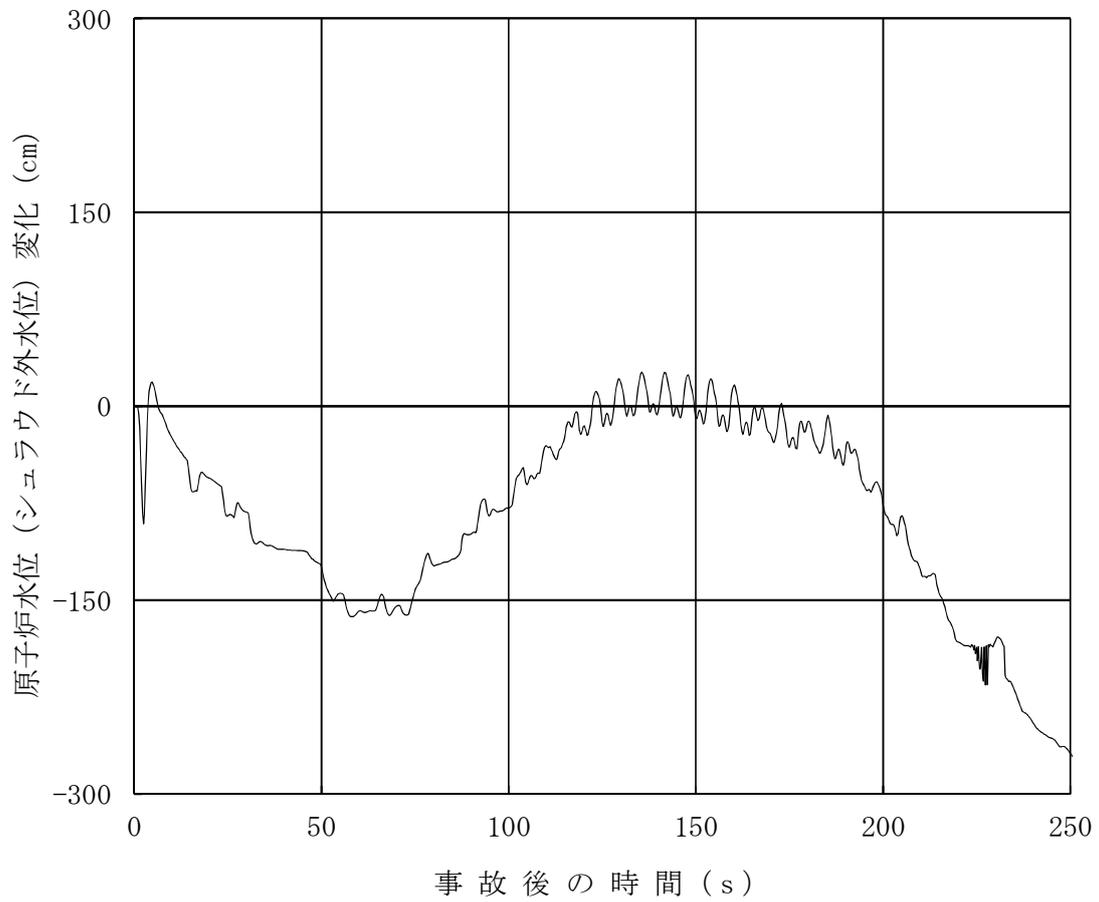


図 4.1-15 ATWS時の原子炉水位変化の時間推移
(ABWR, 平衡炉心, 初期条件変更)

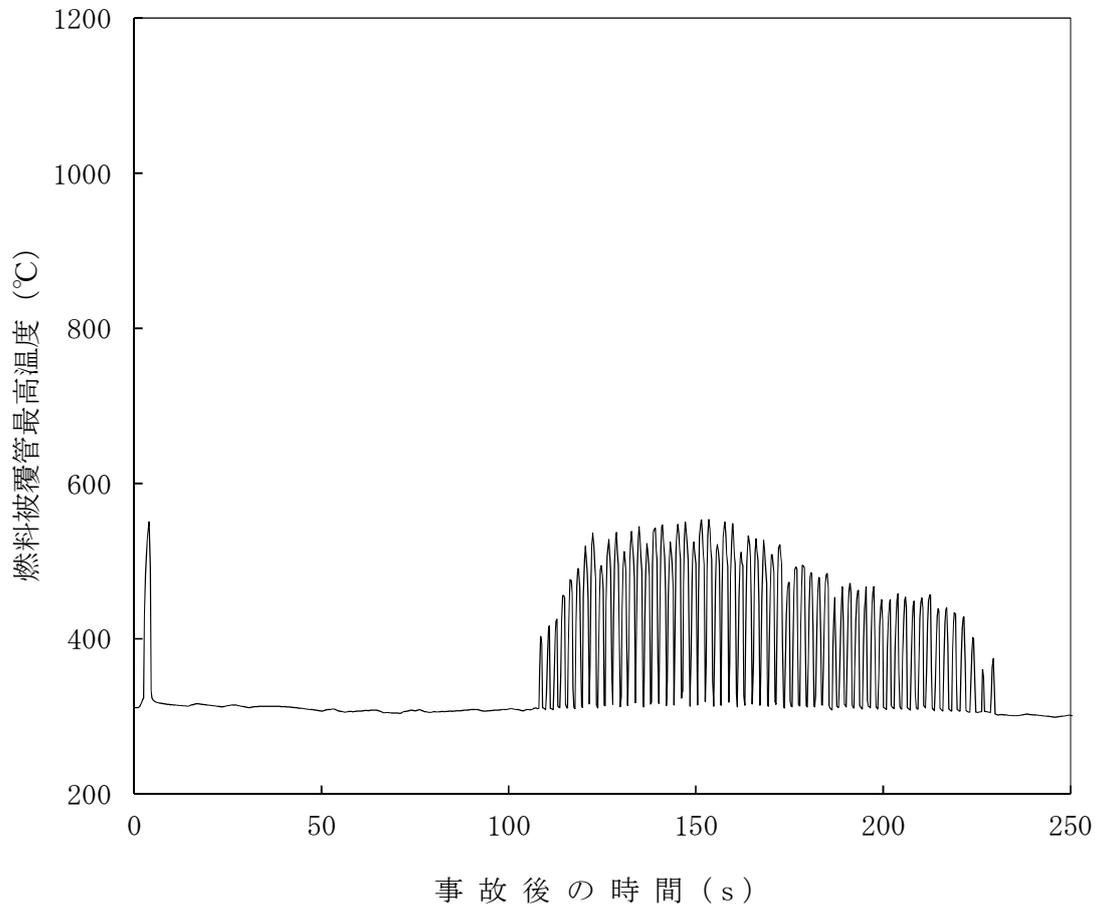


図 4.1-16 A TWS時の燃料被覆管最高温度の時間推移
 (A BWR, 平衡炉心, 初期条件変更)

参考文献

- (1) J. A. Borkowski, et al., *TRAC-BF1/MOD1: An Advanced Best Estimate Computer Program for Boiling Water Reactor Accident Analysis*, NUREG/CR-4356, Idaho National Engineering Laboratory, 1992.
- (2) R. J. Pryor, et al., *TRAC-PIA An Advanced Best-Estimate Computer Program for PWR LOCA Analysis*, Los Alamos Scientific Laboratory, NUREG/CR-0665, May 1979.
- (3) D. D. Taylor, et al., *TRAC-BD1/MOD1: An Advanced Best Estimate Computer Program for Boiling Water Reactor Transient Analysis*, Volumes 1-4, NUREG/CR-3633, Idaho National Engineering Laboratory, April 1984.
- (4) J. G. M. Andersen, K. H. Chu and J. C. Shaug, *BWR REFILL-REFLOOD Program, Task 4.7 - Model Development, Basic Models for the BWR Version of TRAC*, GEAP-22051, NUREG/CR-2573, EPRI NP-2375, April 1983.
- (5) Y. K. Cheung, V. Parameswaran and J. C. Shaug, *BWR REFILL-REFLOOD Program, Task 4.7 - Model Development, TRAC-BWR Component Models*, GEAP-22052, NUREG/CR-2574, EPRI NP-2376, April 1983.
- (6) Md. Alamgir, *BWR REFILL-REFLOOD Program Task 4.8 - TRAC-BWR Model Qualification for BWR Safety Analysis*, Final Report, GEAP-22049, NUREG/CR-2571, EPRI NP-2377, July 1983.
- (7) J. G. M. Andersen and C. L. Heck, *BWR Full Integral Simulation Test (FIST) Program, TRAC-BWR Model Development, Volume 1 - Numerical Methods*, GEAP-30875-1, NUREG/CR-4127-1, EPRI NP-3987-1, April 1985.
- (8) K. H. Chu, J. G. M. Andersen, Y. K. Cheung and J. C. Shaug, *BWR Full Integral Simulation Test (FIST) Program, TRAC-BWR Model Development, Volume 2 - Models*, GEAP-30875-2, NUREG/CR-4127-2, EPRI NP-3987-2, May 1985.
- (9) Y. K. Cheung, J. G. M. Andersen, K. H. Chu and J. C. Shaug, *BWR Full Integral Simulation Test (FIST) Program, TRAC-BWR Model Development, Volume 3 - Developmental Assessment for Plant Application*, GEAP-30875-3, NUREG/CR-4127-3, EPRI NP-3987-3, June 1985.
- (10) W. A. Sutherland, Md. Alamgir, J. A. Findlay and W. S. Hwang, *BWR Full Integral Simulation Test (FIST), Phase II Test Results and TRAC-BWR Model Qualification*, GEAP-30876, NUREG/CR-4128, EPRI NP-3988, June 1985.
- (11) J. G. M. Andersen, J. K. Garrett and J. C. Shaug, *TRACG Analysis of BWR Plant Stability Data*, Proceedings from the International Workshop on Boiling Water Reactor Stability, Brookhaven, New York, October 1990.

- (12) J. G. M. Andersen, et al., *TRACG Qualification*, NEDE-32177P, Rev. 2, January 2000.
- (13) J. R. Fitch, et al., *TRACG Qualification for SBWR*, NEDC-32725P, Rev. 1, August 2002.
- (14) J. R. Fitch, et al., *TRACG Qualification for ESBWR*, NEDC-33080P, Rev. 1, May 2005.
- (15) T. Iwamoto, M. Tamitani and B. R. Moore, *Methods, Benchmarking and Applications of BWR Core Simulator AETNA*, Advances in Nuclear Fuel Management III (ANFM 2003), Hilton Head Island, South Carolina, USA, Oct. 5-8, 2003.
- (16) J. G. M. Andersen, et al., *TRACG Qualification*, NEDE-32177P, Rev. 3, August 2007.
- (17) M. Tamitani, T. Iwamoto and B. R. Moore, *Development of Kinetics Model for BWR Core Simulator AETNA*, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 40, No. 4, p. 201-202, April 2003.
- (18) J. G. M. Andersen et al., *TRACG Model Description*, NEDE-32176P, Rev. 3, April 2006.
- (19) H. Christensen, *Power-to-Void Transfer Functions*, ANL-6385, July 1961.
- (20) J.F. Wilson, R.J. Grenda and J.F. Patterson, *Steam Volume Fraction in a Bubbling Two-Phase Mixture*, Trans. Am. Nucl. Soc. 4(2), P 356-357, 1961.
- (21) S. Morooka, T. Ishizuka, M. Iizuka and K. Yoshimura, *Experimental Study on Void Fraction in a Simulated BWR Fuel Assembly (Evaluation of Cross-Sectional Averaged Void Fraction)*, Nuclear Engineering and Design 114, pp. 91-98 (1989).
- (22) T. Mitsutake, S. Morooka, K. Suzuki, S. Tsunoyama and K. Yoshimura, *Void Fraction Estimation Within Rod Bundles Based on Three-Fluid Model and Comparison with X-ray CT Void Data*, Nuclear Engineering and Design 120, pp. 203-212 (1990).
- (23) G. Agostini, A. Era and A. Premoli, *Density Measurements of Steam-Water Mixtures Flowing in a Tubular Channel Under Adiabatic and Heated Conditions*, CISE-R-291, December 1969.
- (24) D. K. Felde, et al., *Facility Description-THTF MOD 3 ORNL PWR BDHT Separate-Effects Program*, NUREG/CR-2640 (ORNL/TM-7842), September 1982.
- (25) D. G. Morris, et al., *An Analysis of Transient Film Boiling of High-Pressure Water in a Rod Bundle*, NUREG/CR-2469 (ORNL/NUREG-85), March 1982.
- (26) *The Marviken Full-Scale Critical-Flow Tests - Description of the Test Facility*, MXC-101, Marviken, Sweden, May 1982.

- (27) *The Marviken Full-Scale Critical-Flow Tests - Results from Test 15*, MXC-215, Marviken, Sweden, May 1982.
- (28) *The Marviken Full-Scale Critical-Flow Tests - Results from Test 24*, MXC-224, Marviken, Sweden, May 1982.
- (29) B. Matzner and D. A. Wilhelmson, *Critical Power and Pressure Drop Tests - Step II Fuel Design Standardization Program for BWR/2-5 Reload Fuel*, NEDC-31499P, 1987.
- (30) GE Nuclear Energy, *Critical Power and Pressure Drop Tests of Simulated 10X10 Bundle Designs Applicable to GE14*, NEDC-32874P, March 2000.
- (31) GE Nuclear Energy, *TASC-03A - A Computer Program for Transient Analysis of a Single Channel*, NEDC-32084P-A, Rev. 2, July 2002.
- (32) R. K. McCardell, D. I. Herborn and J. E. Houghtailing, *Reactivity Accident Test Results and Analyses for the SPERT III E-Core - A Small, Oxide-Fueled, Pressurized-Water Reactor*, IDO-17281, AEC Research and Development Report, March 1969.
- (33) K. Azekura, et al., *Development of a BWR Lattice Analysis Code LANCER Based on an Improved CCCP Method*, Advances in Nuclear Fuel Management III (ANFM 2003), Hilton Head Island, South Carolina, USA, Oct. 5-8, 2003.
- (34) W. J. Letzring, *Preliminary Facility Description Report for the BD/ECC 1A Test Phase*, GEAP-23592/NRC-2, December 1977.
- (35) D. Seely, and R. Muralidharan, *BWR Low Flow Bundle Uncovery Test and Analysis*, General Electric Company, GEAP-24964, NUREG/CR-2231, EPRI NP-1781, August 1981.
- (36) L. S. Lee, G. L. Sozzi and S. A. Allison, *BWR Large Break Simulation Tests - BWR Blowdown/Emergency Core Cooling Program*, Volumes 1 & 2, General Electric Company, GEAP-24962-1, NUREG/CR-2229, EPRI NP-1783, March 1981.
- (37) *Transient and Stability Tests at Peach Bottom Atomic Power Station Unit 2 at End of Cycle2*, EPRI NP-564, June 1978.
- (38) T. Iwamoto, et al., *Validation of LANCR01/AETNA01 BWR Code Package against FUBILA MOX Experiments and Fukushima Daiichi Nucleare Power Plant Unit 3 MOX Core*, PHYSOR 2014 - The Role of Reactor Physics Toward a Sustainable Future, The Westin Miyako, Kyoto, Japan, September 28 - October 3, 2014.
- (39) USNRC, *AEOD Concerns Regarding The Power Oscillation Event at LaSalle 2(BWR-5)*, AEOD Special Report S803, 1988.
- (40) J. M. Dotson, et al., *Three-dimensional Boron Mixing Model*, NEDE-22267, October 1982.

- (41) GE Hitachi Nuclear Energy, *TRACG Model Description*, NEDE-32176P, Rev. 4, January 2008.
- (42) 株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン「炉心核熱水力特性解析システム システム全般」, GLR-005 システム編 (平成 27 年 4 月)

添付1 TRACGコードによる中性子束振動に係る解析結果を参考として用いる理由について

BWRにおいて高出力・低炉心流量状態となった場合、以下に示すような中性子束振動及び流量振動が発生することがある。

(1) チャンネル安定性

BWRの炉心は上下に共通のプレナム部を有する多数の燃料チャンネルが配置されている。各チャンネル内では、チャンネル入口から流入する冷却材が、非沸騰、サブクール沸騰、飽和沸騰へとチャンネル出口に向かって連続的な変化を示す。何らかの要因により摂動（例えば、冷却材流量の増加）が加えられると、チャンネルの入口と出口の間の差圧が変化するが、上下プレナム間の差圧は一定であるため、摂動は抑制される。この際、摂動の影響が大きいチャンネル下流側（二相流領域）に摂動を受けた流れが到達するのに時間遅れがあるため、流量振動が起きることがある。これをチャンネル安定性という。

(2) 炉心安定性、領域安定性

BWRにおいて例えば出力が上昇した場合、ボイド率が増加して負の反応度が投入され、出力が抑制される。その後、出力低下によりボイド率が減少して正の反応度が投入されるが、ボイド率の変化に時間遅れがあることにより出力振動（中性子束振動）が起きることがある。このようなボイド率変動に伴う反応度フィードバック以外に、燃料棒温度変動に伴う反応度フィードバック、炉心流量変化がチャンネル入口部から原子炉内構造物（上部プレナム、セパレータ、再循環系、下部プレナム）を経て炉心入口部に戻ることに伴う流量フィードバック及び(1)に述べたチャンネル安定性も重畳して、中性子束振動が起きる。

このようなメカニズムにより炉心全体の中性子束振動が発生するものを炉心安定性、空間的に高次モードでの中性子束振動が起きるものを領域安定性という。

上記(1)、(2)に関して、REDYコードでは、核特性は一点近似動特性モデルを用い、ボイド率、圧力損失等の熱水力特性は炉心を一点に近似した集中定数モデルを用いているため、チャンネル安定性、チャンネル安定性を含んでいる炉心安定性、チャンネル安定性に加え炉心内の領域間の振動を取扱う領域安定性のいずれも模擬することは困難である。

一方、TRACGコードでは、核特性モデル及び熱水力モデルで原子炉圧力容器内を三次元的に取り扱い、熱水力モデルでは二相流二流体場の6個の方程式により、質量、運動量及びエネルギーについて液相及び気相を個別に取り扱うことができるので、チャンネル安定性、炉心安定性、領域安定性のいずれの安定性も評価することが可能である。

このため、短時間領域での中性子束振動が局所的な燃料被覆管温度に与える影響を確認するために、参考としてTRACGコードによる評価を行っている。

参考資料 2

J A S M I N E

目 次

1.	はじめに.....	参考 2-3
2.	使用実績及び解析モデルについて.....	参考 2-4
2.1	使用実績.....	参考 2-4
2.2	解析モデル.....	参考 2-6
2.2.1	背景.....	参考 2-6
2.2.2	解析モデルの構成.....	参考 2-6
2.2.3	解析モデルの説明.....	参考 2-9
2.3	入出力.....	参考 2-21
2.3.1	入力例.....	参考 2-22
2.3.2	出力例.....	参考 2-28
3.	解析結果の例示.....	参考 2-29
4.	水蒸気爆発実験への適用例.....	参考 2-31
4.1	粗混合実験解析.....	参考 2-31
4.1.1	解析条件.....	参考 2-31
4.1.2	解析結果.....	参考 2-35
4.2	爆発実験解析.....	参考 2-37
4.2.1	解析条件.....	参考 2-37
4.2.2	解析結果.....	参考 2-42
5.	参考文献.....	参考 2-49
添付 1	水蒸気爆発時のウォーターハンマーについて.....	参考 2-50
添付 2	水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較について.....	参考 2-54

1. はじめに

格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」では，運転時の異常な過渡変化，原子炉冷却材喪失事故又は全交流動力電源喪失が発生するとともに，非常用炉心冷却系等の安全機能の喪失が重畳する。このため，緩和措置がとられない場合には，溶融炉心と原子炉圧力容器外の水が接触し，このときに発生するエネルギーが大きい場合に構造物が破壊され原子炉格納容器破損に至る可能性がある。

この原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用による水蒸気爆発事象発生の可能性は，これまでの知見からも極めて低いと考えられる。しかしながら，水蒸気爆発が発生した場合についても考慮し，ペDESTAL等の原子炉格納容器の構造部材の支持機能に対する影響を確認しておくことは，格納容器下部への水張り等の格納容器破損防止対策の適切性を確認する上でも有益な参考情報になると考える。

本資料では，水蒸気爆発の現象を評価する解析コードである J A S M I N E コードについて，以下の内容をまとめる。

- ・ 使用実績及び解析モデル
- ・ 実験結果とのベンチマーク

2. 使用実績及び解析モデルについて

2.1 使用実績

水蒸気爆発解析コード J A S M I N E (JAEA Simulator for Multiphase I N T e r a c t i o n s and Explosions) ⁽¹⁾は、日本原子力研究開発機構 (以下「J A E A」という。)にて開発された水蒸気爆発の現象を評価する解析コードであり、水蒸気爆発の粗混合過程及び伝播膨張過程 (爆発過程)における伝熱流動現象のシミュレーションを行うことができる。

表 2-1 に J A S M I N E コードの主な適用実績を示す。J A S M I N E コードは、FARO 及び KROTOS における各種実験結果とのベンチマークにより水蒸気爆発時の挙動を適切に模擬できることが確認されている他、SERENA 実験解析への適用⁽²⁾、炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率評価への適用実績⁽³⁾がある。

(1)格納容器破損確率評価への適用

BWR 及び PWR モデルプラントにおける炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率を、水蒸気爆発の解析コードである J A S M I N E コードと確率論的手法を組み合わせ、評価した事例が文献⁽³⁾にて示されている。

BWR モデルプラント (Mark-II 型格納容器) を対象としたペDESTAL 領域水蒸気爆発解析の概要は以下のとおりである。

既存の確率論的安全評価より、ペDESTAL 領域における水蒸気爆発に対する寄与の大きい事故シーケンスとして「中破断 L O C A 時炉心冷却失敗、自動減圧成功」、「中破断 L O C A 時低圧注入作動、崩壊熱除去失敗」の各シーケンスグループが選定され、事故解析コードによる解析等に基づき原子炉圧力容器破損時の原子炉格納容器内熱水力条件及び熔融炉心条件が設定されている。

解析体系は二次元円筒座標系であり、径方向 13×軸方向 33 セルの解析格子でペDESTAL 領域が模擬されている。爆発解析では、体系の中心軸上で底から 2 番目のセルに爆発源を置き、トリガリングを与えている。

J A S M I N E コードは炉外水蒸気爆発による負荷の確率分布を評価するために用いられている。評価の入力条件である水蒸気爆発の初期・境界条件、及び解析モデルに含まれるパラメータは、それぞれの不確かさを表す確率分布関数で与えられ、J A S M I N E 解析により、その不確かさを伝播させ、水蒸気爆発による負荷の確率分布が評価される。負荷を示す指標としては、プール水に与えられる運動エネルギーのピーク値、壁面の力積の飽和値がそれぞれ評価され、水蒸気爆発による負荷の累積確率分布が評価されている。

(2)SERENA 実験解析への適用

国際協力プロジェクトとして実施されている最新の OECD-NEA/SERENA 実験データを用いて、J A S M I N E コードを用い、SERENA 実験 TROI 装置体系を対象にメッシュモデルを作

成し、試験体系内での粗混合過程及び微細化過程における熱流動解析が実施⁽²⁾されている。

SERENA 実験 FARO 装置は炉容器と圧力容器の2つに大別され、試験時には、炉容器内で融解した熔融デブリが開放弁及びノズルを通じて圧力容器内に設置された試験容器に流入する。試験容器は、直径 600mm、高さ 1.5m の円筒容器であり、水面高さが 1 m となるように水が溜められている。解析体系は、圧力容器、圧力容器内の試験容器、メルト流入位置としてノズルが考慮されており、試験容器形状が軸対称形状であることから、二次元軸対称としてモデル化されている。

表 2-1 J A S M I N E コードの主な適用実績

1	研究名称	軽水炉シビアアクシデント時の炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率の評価
	解析実施者	J A E A
	実施時期	2007 年 11 月
	研究概要	BWR 及び PWR モデルプラントにおける炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率を評価した。水蒸気爆発による負荷の確率分布を評価するために、ラテン超方格サンプリング (LHS) による確率論的手法を用い、その中で水蒸気爆発コード J A S M I N E コードを物理モデルとして使用した。評価対象は BWR Mark-II 型のペDESTAL 及び圧力抑制プール、PWR のキャビティにおける水蒸気爆発である。
2	研究名称	改良型軽水炉のシビアアクシデント対策に係る検討
	解析実施者	独立行政法人 原子力安全基盤機構
	実施時期	平成 21 年度
	研究概要	F C I 解析コード J A S M I N E Ver. 3 を用いて、SERENA 実験体系を対象にメッシュモデルを作成し、容器内熱流動解析を実施することによりその適用性について検討を実施。また作成したモデルを適用して感度解析を実施し、模擬熔融デブリ及びプール水の温度、プールの形状、模擬熔融デブリの組成について水蒸気爆発に対する影響を確認した。

2.2 解析モデル

2.2.1 背景

図 2-1 で示すとおり、水蒸気爆発は、熱的デトネーションモデル⁽⁴⁾において、4つの段階があると考えられている。それぞれの過程に關与する現象を以下に示す。

- ・粗混合 低温冷却材内で高温の融体が粗い粒子として分散（細粒化）し、混合しながら蒸気膜によって断熱されている状態。（タイムスケール：0.1秒～数秒）
- ・トリガリング 蒸気膜の不安定化による急速な冷却材の蒸発及び溶融した液滴の微細化の開始
- ・伝播 衝撃波の伝播に伴う溶融液滴の微細化及び急速な熱伝達が生じる状態。（タイムスケール：数ミリ秒単位）
- ・膨張（爆発） 冷却材の蒸発と、周囲に負荷を生じさせる可能性のある混合物の膨張（爆発）

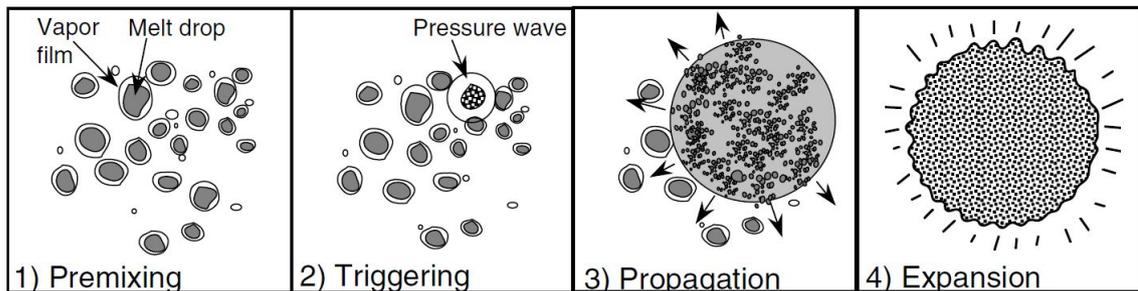


図 2-1 水蒸気爆発の現象論的な4つの段階⁽¹⁾

上で示した現象論的な4つの段階の仮定に基づくと、水蒸気爆発による発生エネルギーの評価は、通常次の2ステップを通して行われる。

- ・冷却材と粗混合状態にあり、続く爆発過程に關与し得る高温液体がもつ内部エネルギーの評価
- ・伝播と膨張（爆発）の過程を介する力学的エネルギーの評価

2.2.2 解析モデルの構成

原子炉压力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用（以下「FCI」という。）で想定される現象と J A S M I N E コードの概念と構成を図 2-2 に示す。J A S M I N E コードは溶融炉心挙動モデルと冷却材の多相流動モデルの2つで構成される。溶融炉心モデルは融体ジェット、融体プール、融体粒子の3つのサブモデルを含む。冷却材の熱水力挙動を扱う

多相流動モデルは、日本原子力研究所（JAERI）で開発されたACE-3Dコード⁽⁶⁾の修正版である。

JASMIN Eコードは、粗混合過程と爆発過程の2段階に分けて水蒸気爆発の全過程を解析する。初めに、流動体系や流入する溶解物に関する初期・境界条件を与えることで粗混合過程が解析され、次に、解析時刻における粗混合計算の出力データに、爆発モデルオプションの指定を与えることで、爆発過程、即ち伝播と膨張過程が解析される。

粗混合過程と爆発過程の物理特性を表2-2にまとめる。

表 2-2 粗混合過程及び爆発過程の物理特性

	粗混合	爆発（伝播，膨張）
物理特性		
支配的な物理過程	重力（浮力）による対流	衝撃波の伝播
時間スケール	0.1-10 s	0.1-10ms
融体サイズスケール	1-10mm	1-100 μm

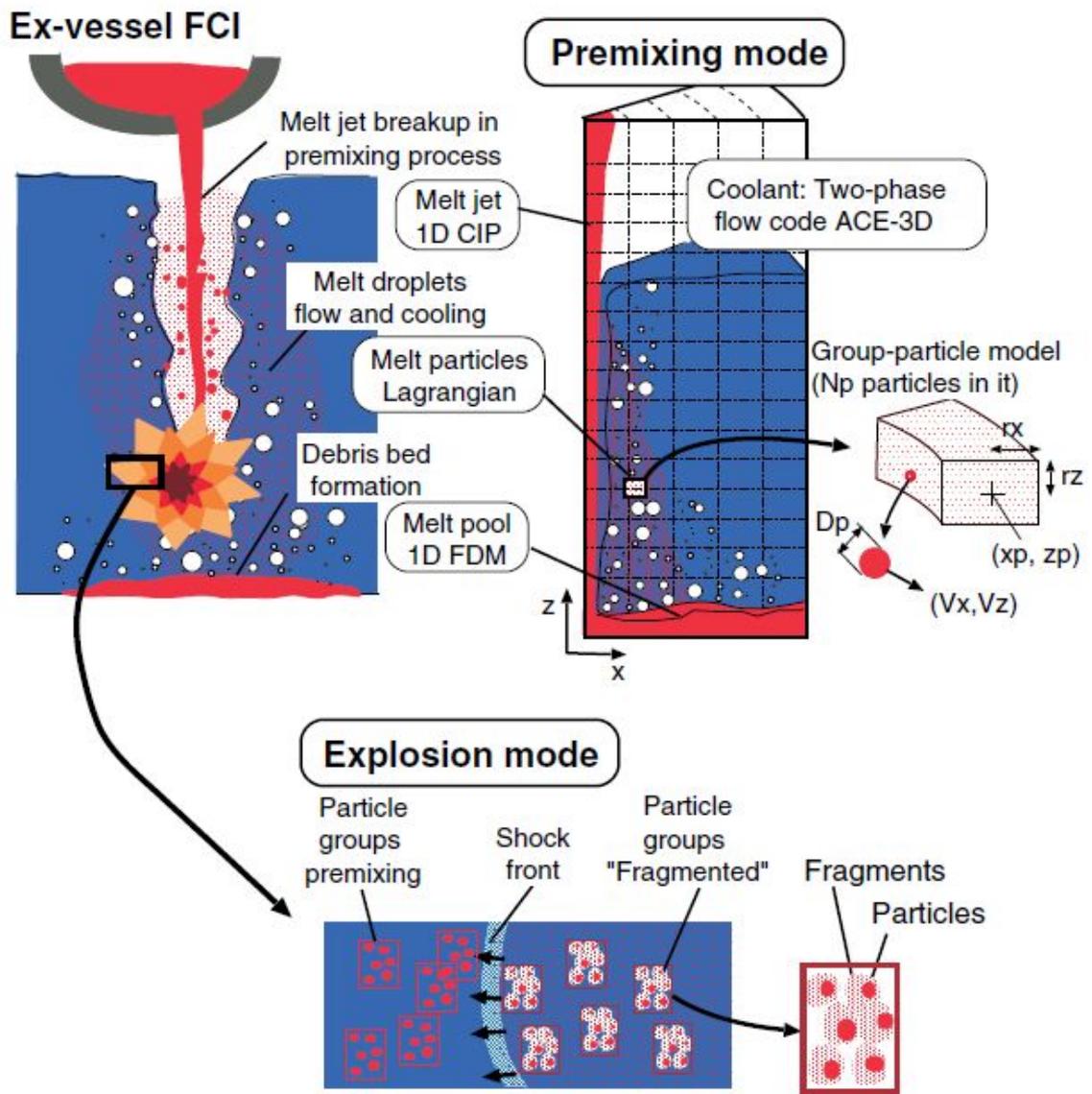


図 2-2 JASMINEコードの概念と構成⁽¹⁾

2.2.3 解析モデルの説明

(1) 融体ジェットモデル

融体ジェットに対しては、Z方向一次元の質量、内部エネルギー及び運動量保存則が解かれる。融体ジェット表面からの液滴の発生（融体ジェットからの質量エントレインメント）は、ジェット分裂長に対する実験相関式と融体ジェットの質量保存則に基づき求められる。図 2-3 は、融体ジェットがプール水で侵食され、下方に進むに従ってジェット直径が減少する様を表している。ジェットが完全に消失する水深をジェット分裂長 L_{brk} と呼ぶ。

ジェット分裂長は、Bond 数 $Bo_J > 50$ の条件では Taylor 型相関式⁽⁶⁾が用いられ、それ以外の場合は Saito らの相関式⁽⁷⁾によって次のとおり算出される。

$$\frac{L_{brk}}{D_{ji}} = \begin{cases} 10 \left(\frac{\rho_J}{\rho_l} \right)^{1/2} & Bo_J = \frac{\rho_J \cdot g \cdot D_{ji}^2}{\sigma_J} \geq 50 \\ 2.1 \left(\frac{\rho_J}{\rho_l} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{V_{ji}^2}{g \cdot D_{ji}} \right)^{1/2} & Bo_J = \frac{\rho_J \cdot g \cdot D_{ji}^2}{\sigma_J} < 50 \end{cases} \quad (2.2-1)$$

ここで、 ρ_J と ρ_l はそれぞれジェットと水の密度、 σ_J はジェットの表面張力、 D_{ji} は水面でのジェットの直径、 V_{ji} は水面でのジェット流速、 g は重力加速度である。

融体液滴発生量、すなわち質量エントレインメントに対応する体積エントレインメント流量 (V_e) は、ジェット直径が水深とともに線形的に減少するという仮定で計算される。

$$V_e = \frac{V_J}{2} \cdot \left(\frac{D_{ji}}{L_{brk}} \right) \cdot \sqrt{\frac{H_{pl}}{\max(L_{brk}, H_{pl})}} \quad (2.2-2)$$

ここで、 H_{pl} はプール深さ、 V_J はジェットの流速である。

質量エントレインメント流量 \dot{m}_e は、次のように求められる。

$$\dot{m}_e = C_{ent} \cdot \rho_J \cdot V_e \quad (2.2-3)$$

ここで、 C_{ent} は定数である。定数 C_{ent} を 1 として設定した場合、ジェットは実験に基づく相関式によって決定されたジェット分裂長で崩壊する。 C_{ent} を大きくするにつれ、ジェット分裂長は短くなる。

本融体ジェットモデルでは、ジェットからの伝熱は、表面積と冷却水内の移動時間のどちらにおいても、融体粒子や融体プールの場合と比較して小さいので、現在のところ考慮されていない。したがって、ジェットから冷却水への熱流束は 0 と設定される。

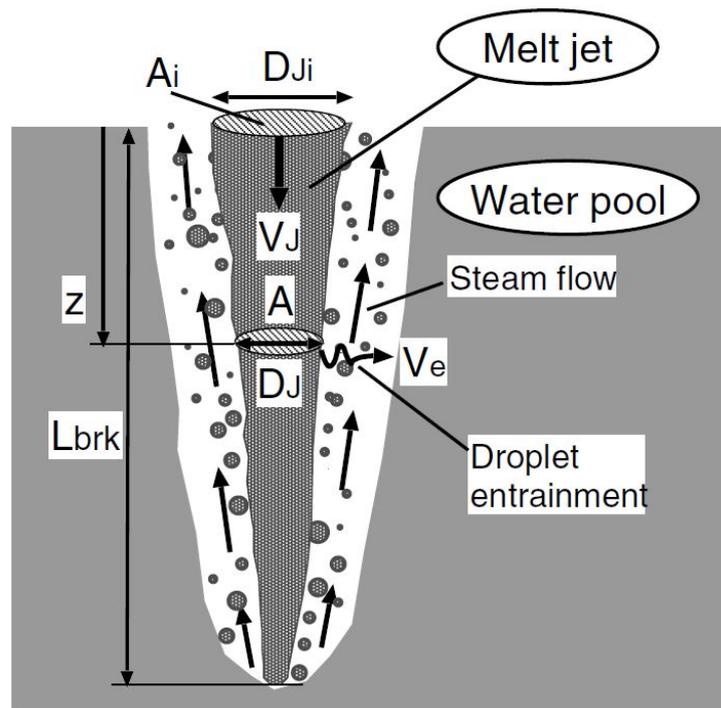


図 2-3 ジェット分裂モデルの概要 ⁽¹⁾

(2) 融体プールモデル

ジェット又は粒子群が底面に到達する際には、連続した融体を形成する可能性がある。図 2-4 に、融体プールモデルの様式図を示す。融体プールモデルの概要を以下に示す。

- X 方向一次元の質量，エネルギー及び運動量保存則を解く。
- ジェットや粒子群から加わった融体質量を考慮する。
- 融体プール表面における二相流及び床との摩擦影響は無視する。
- 融体プール端の凝固を取り扱う。
- 二相流と融体プール間の伝熱を考慮する。（図 2-5）
- 流動様式が気泡流以外，すなわち核沸騰，膜沸騰状態となって気相体積が増加することによる熱流束緩和効果（ボイド効果）は，ベース熱流束にボイド率の関数としての係数を乗じることで考慮する。

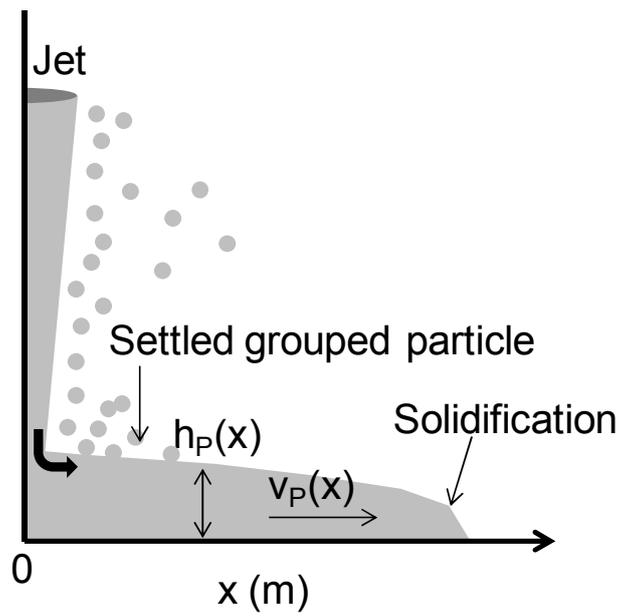


図 2-4 融体プールモデル模式図 (1)

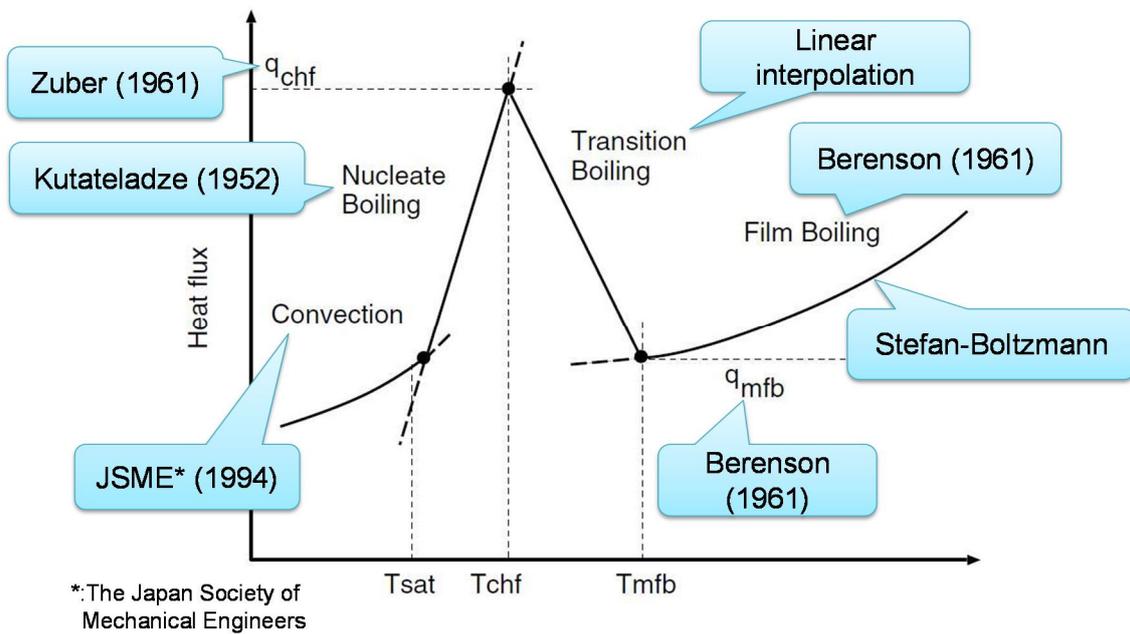


図 2-5 各沸騰状態において用いられる伝熱モデル (融体プール)

(3) 融体粒子モデル

実機体系のような大規模シミュレーションを可能とするために、グループ化された粒子（粒子群）の概念が導入された。図 2-6 に融体粒子モデルの概要図を示す。融体粒子モデルの概要を以下に示す。

- “粒子群”とは、同じ特性を持ち、X-Z 平面上の有限な空間を占める粒子のグループである。
- 粒子群の実際の形状、回転、拡散特性のような属性は無視される。
- それぞれの粒子群の代表粒子の動きやヒートバランスは、ラグランジュ方程式によって計算される。
- ジェット表面から粒子群が離れる前に、一定量以上の粒子を蓄える“前粒子群”概念が導入されている。前粒子群の融体ジェット表面からの放出基準を以下に示す。
 - 粒子群質量 > 0 ，かつ下記に示す少なくとも1つの状況に該当すること。
 - 粒子数が N_{per} の値を超える。
 - 前粒子群の X 方向のサイズが、格子の X 方向サイズの 4 分の 1 より大きい。
 - 前粒子群の X 方向の外側のエッジ位置が最初のセル境界を超える。
 - 存続時間が時間制限値 n_{hist} を超える。

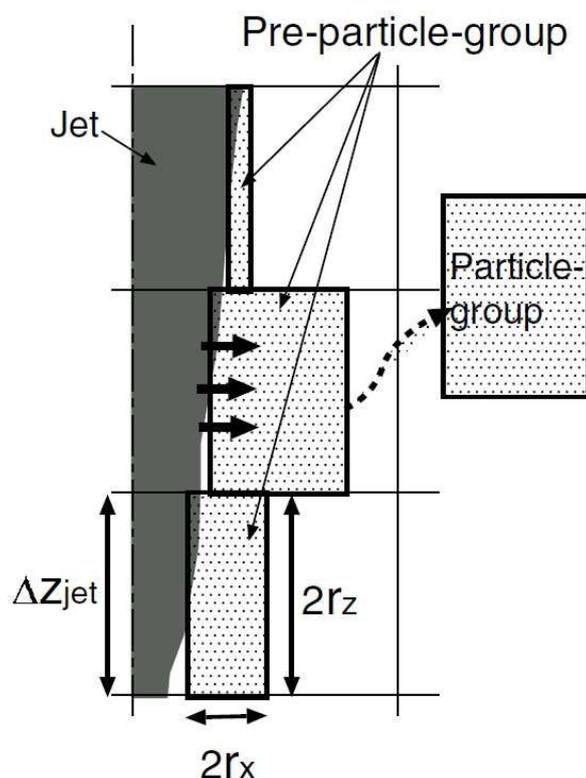


図 2-6 融体粒子モデル概要図 (1)

次に、粒子群の取り扱い手法について説明する。

図 2-7 に、物理的に非現実的な状況の発生を回避するために設けられた粒子群間のインターフェースにおける三つのモデルを示す。これらのモデルの特徴を以下に示す。

1. 接触する二つの粒子群の粒子の体積割合の総和が融合制限 $\alpha_{\text{pack}} (=0.6)$ 以上となる場合は、二つの粒子群は減衰係数 0.5 の条件で反発する。
2. 上記の条件を満たさず、かつ二つの接する粒子群が同じような特性を持つ場合、すなわち温度、粒子径、速度が 20%以内の差で一致する場合は、それらは融合して一つの粒子群となる。
3. 上記二つの条件を満たさない場合、二つの粒子群は干渉を起こさずにすり抜ける。

図 2-8 に、解析体系の境界において粒子群に適用する取扱い条件を示す。

1. 粒子群が中心境界に到達した場合、境界内側へ弾性衝突する。
2. 粒子群が頂部又は側部の境界に達した際は、減衰係数 0.1 の条件で境界内側へと反発する。
3. 粒子群が底へ到達した際、デブリプールと粒子群のどちらかが溶融している場合には粒子群はデブリプールと融合する。そうでない場合には、粒子群は冷え固まったデブリプール上に堆積し、デブリベッドを形成する。

図 2-9 に粒子に対する抗力係数の評価条件を示す。抗力係数は球体に対する一般的な評価式を用いる。

融体粒子に対する伝熱モデルの概要を以下に示す。

- ・ 粒子表面における熱伝達率は、図 2-10 に示す相関式により評価される。粒子が固化するかどうかは、その粒子の表面温度により判断される。
- ・ 粒子群周囲のボイド及び床への粒子群堆積に伴う伝熱効果の劣化の影響が考慮される。

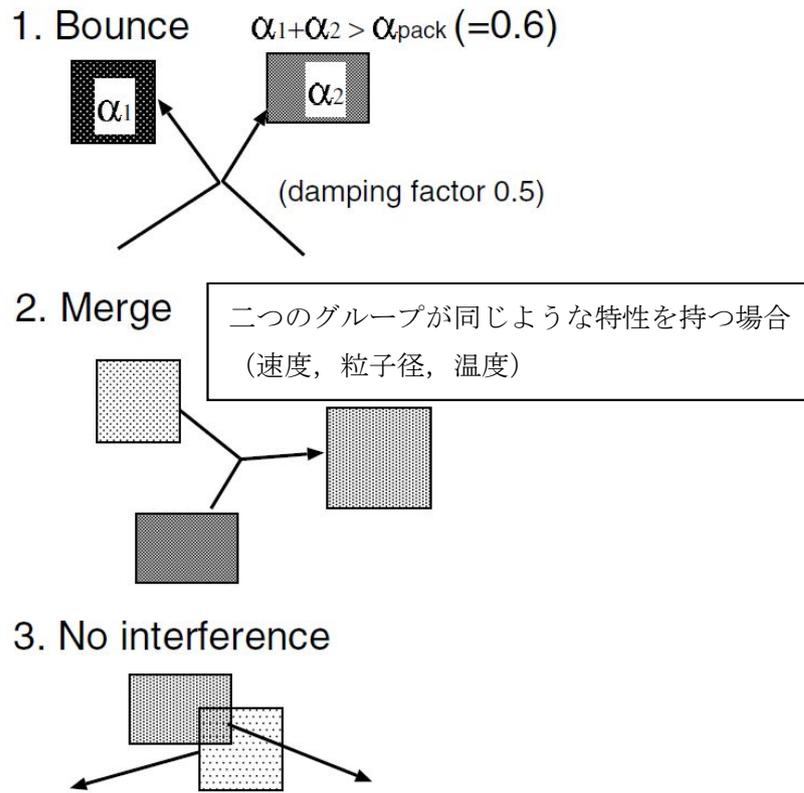


図 2-7 粒子群間のインターフェースモデル ⁽¹⁾

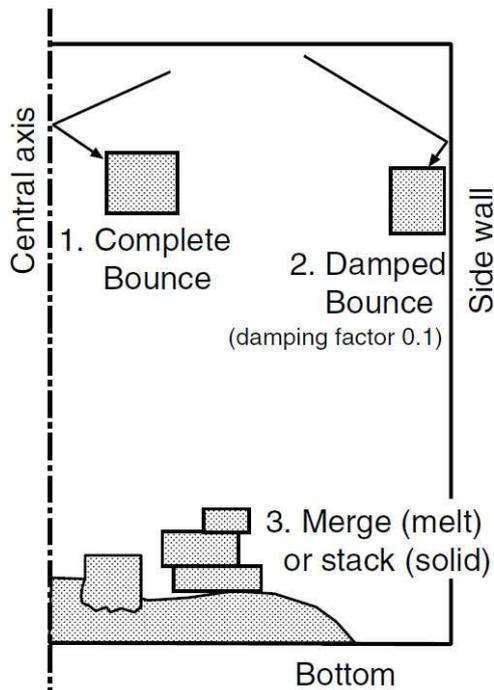


図 2-8 粒子群の境界での取扱い ⁽¹⁾

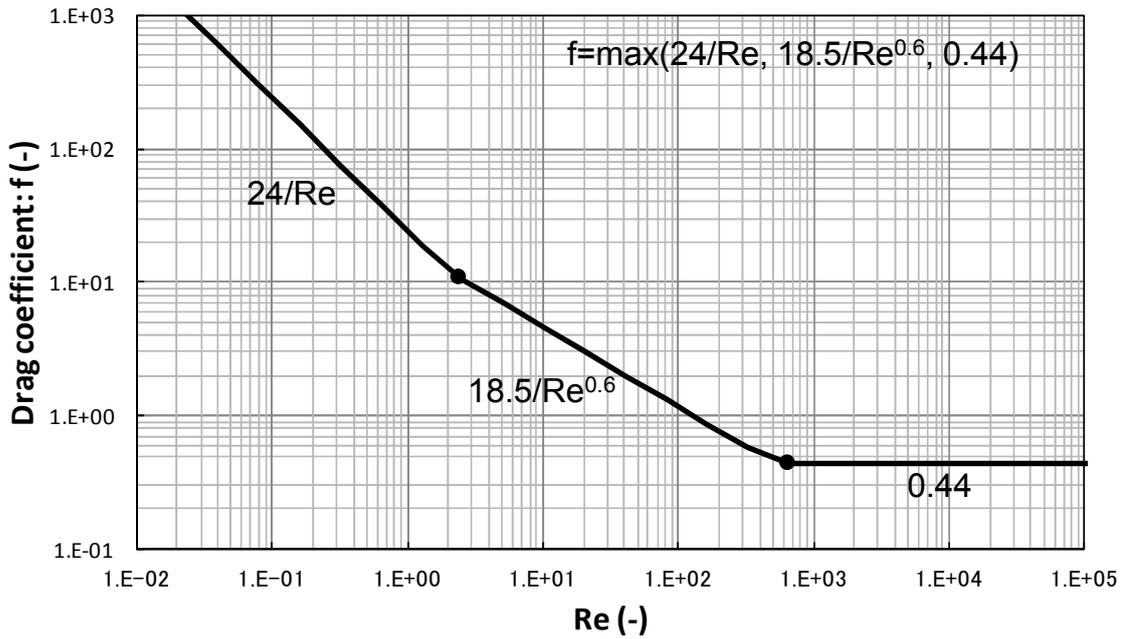


図 2-9 融体粒子の流体抗力係数

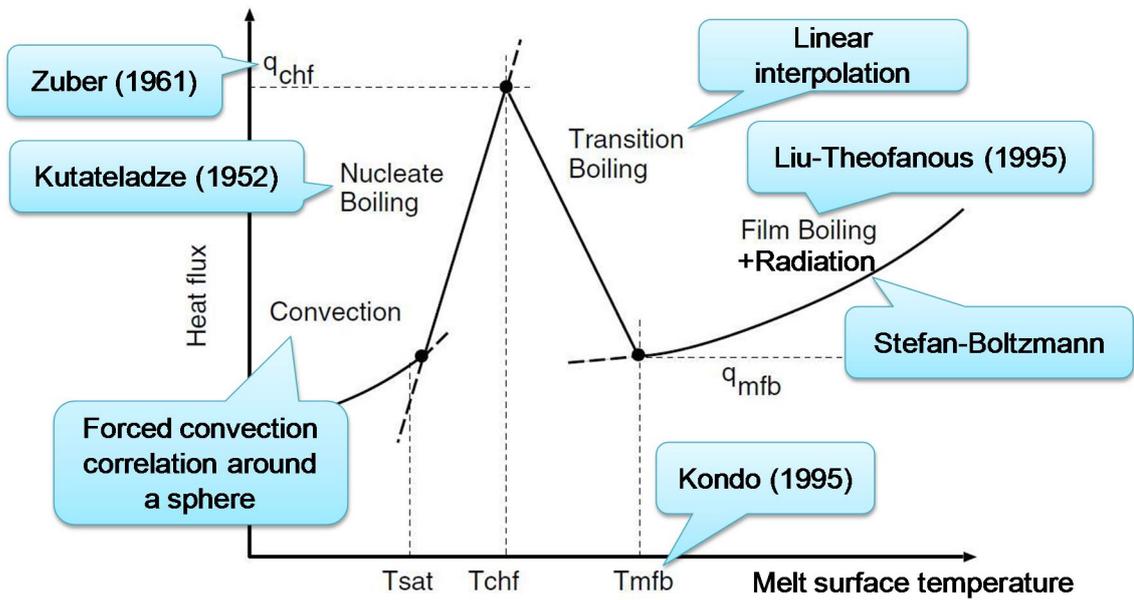


図 2-10 各沸騰状態において用いられる伝熱モデル (粒子群)

(4) トリガリングモデル

JASMINコードを用いた解析では、粗混合計算結果を爆発計算に引き継ぐ際に、トリガリングと呼ばれる爆発のきっかけをユーザーが任意のタイミングで与えることにより、爆発解析を実施する。トリガリングモデルの特徴を以下に示す。

- ・ 局所的な圧力上昇と瞬時のガス膨張によりトリガリングを与える。
- ・ 圧力伝播は微細化を誘発する。

(5) 微細化モデル

爆発過程は以下の概念を基本としてモデル化されている。

- ・ 粗混合で発生した粒子が衝撃波、即ち周囲冷却材の極端に大きな相対速度に晒されると、流体力により粒子表面の融体が微細化する。
- ・ 微細化粒子は μm オーダーで熱放出が非常に早く、瞬時に水を蒸発させることで、衝撃波を増幅させる。熱放出は微細化粒子の発生率に依存する。

上記過程を評価するために、図 2-11 に示す粒子群モデルにおいて、融体モデル構成要素として”微細粒群”が追加された。

微細粒群は粒子群から発生した微細化粒子の集合体である。微細粒群は以下のように扱われる。

- ・ 微細化粒子の発生：

微細化粒子質量は母粒子群から水力的な相互作用により分離される。質量保存則は次のように表せる。

$$\frac{dm_p}{dt} = -\dot{m}_f \quad (2.2-4)$$

$$\frac{dM_f}{dt} = n_p \dot{m}_f \quad (2.2-5)$$

ここで、 m_p は粒子群中の一粒子の質量、 m_f は一粒子から生成する微細粒群の質量、 M_f は粒子群全体から生成する微細粒群の質量、 n_p は粒子群の粒子数である。一粒子からの微細化率 \dot{m}_f は構成式(2.2-7)により与えられる。

- ・ 伝熱とエネルギー保存：

微細化粒子表面の熱伝達率は非常に大きいと考えられることから、微細化粒子内の熱伝導が、この過程における伝熱量の律速となる。微細化粒子の外部の熱伝達率は非常に大きいと考えられ、定常状態でのいかなる伝熱式もこの特異に過度的な状況には適用できない。微細化粒子の単位質量当たりの熱放出量 \dot{q}_f を用いて、微細化粒子のエネルギー保存は以下のように表せる。

$$\frac{de_f}{dt} = e_p \frac{n_p \dot{m}_f}{M_f} - \dot{q}_f \quad (2.2-6)$$

ここで、 e_f と e_p は微細化粒子と粒子群の粒子の比内部エネルギーである。母粒子（粒子群の粒子）の比内部エネルギーは爆発過程では一定であると仮定する。

微細化粒子の主要な作用は急速熱放出で、運動論的な観点は重要ではないことから、微細化粒子に対する運動方程式は解かず、微細化粒子は母粒子群に付随すると仮定する。

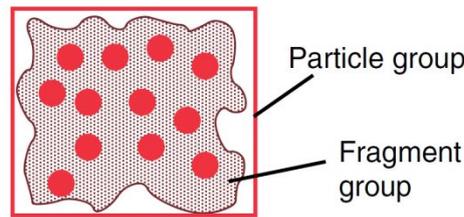


図 2-11 粒子群と微細粒群⁽¹⁾

一融体粒子からの微細化率 \dot{m}_f は以下のように求める。

$$\dot{m}_f = C_{fg} \cdot \frac{1}{t_b^*} \frac{\pi}{6} D_p^2 v_r (\rho_c \rho_p)^{1/2} \quad (2.2-7)$$

$$t_b^* = \begin{cases} 1 & \text{: Carachario set al. model} \\ 13.7/Bo^{1/4} & \text{: Yuen et al. model} \end{cases} \quad (2.2-8)$$

$$Bo = \frac{3}{16} \frac{C_D \rho_c D_p v_r^2}{\sigma_p} \quad (2.2-9)$$

$$t_b = t_b^* \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_c} \frac{D_p}{v_r}} \quad (2.2-10)$$

ここで、 t_b は分裂時間、 t_b^* は分裂の無次元時間、 D_p は粒子径、 v_r は粒子と冷却材間の相対速度、 ρ_c と ρ_p は冷却材と融体粒子の密度、 σ_p は融体粒子の表面張力である。抗力係数 C_D はニュートン域の値0.44を使用する。 C_{fg} は実験定数である。

(6) 二相流モデル

JASMIN Eコードにおける二相流モデルは、二相流コードACE-3D⁽⁵⁾を基に開発された。二相流モデルの特徴を以下に示す。

- ACE-3Dは円筒座標系の三次元保存方程式を解くことができるが、JASMIN Eコードでは二次元座標系での計算機能が適用されている。
- 水、蒸気、非凝縮性ガスの質量及び内部エネルギー方程式が解かれる。対して、運動量方程式においては、蒸気と非凝縮性ガスは平衡状態であると仮定して、水、混合性ガスの質量及び内部エネルギー方程式を解く。
- 融体プールと融体粒子、微細化粒子からの伝熱を扱うことができる。
- 水-ガス間の熱伝達係数（図 2-12 参照）は、TRAC-PF1コードの気泡流と液滴流のモデルを採用。
- 二相間の相対速度が終端速度に等しいと仮定（図 2-13 参照）。
- 水滴/気泡径は臨界 We 数を用いて評価。臨界 We 数は、水滴は 4.0、気泡は 7.5（図 2-13 参照）。
- 抗力係数は融体粒子の場合とほぼ同じ（図 2-14 参照）。
- 融体粒子から二相流への伝熱量分配機構を図 2-15(a)に示す。図 2-15(a)において fhtint, fhikill, fhigkill は粗混合解析にて冷却材の蒸発を制御するパラメータである。fhtint は、融体からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合を示す。fhikill, fhigkill は、それぞれサブクール水と気液界面の熱伝達係数、過熱蒸気と気液界面の熱伝達係数の乗数である。
- 微細化粒子から二相流への伝熱量分配機構を図 2-15(b)に示す。Kev は爆発解析にて微細化粒子からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合を表す。

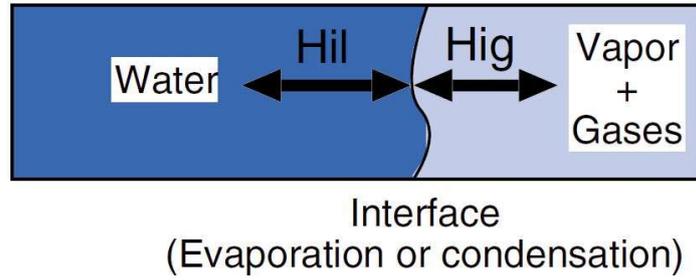
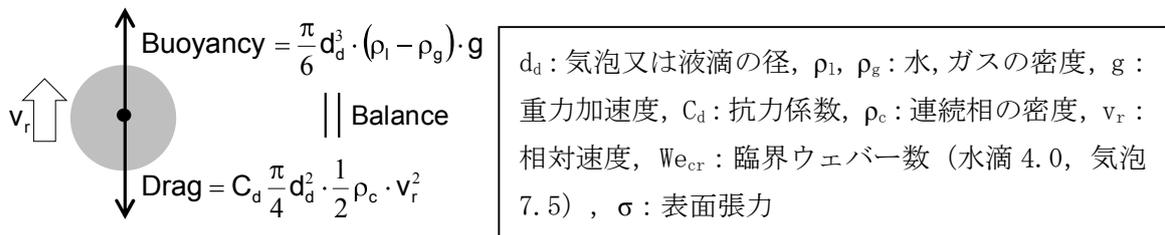


図 2-12 水とガスの界面における熱伝達⁽¹⁾



$$d_d = \frac{We_{cr} \cdot \sigma}{\rho_c \cdot v_r^2}$$

図 2-13 水滴及び気泡における力のつり合い

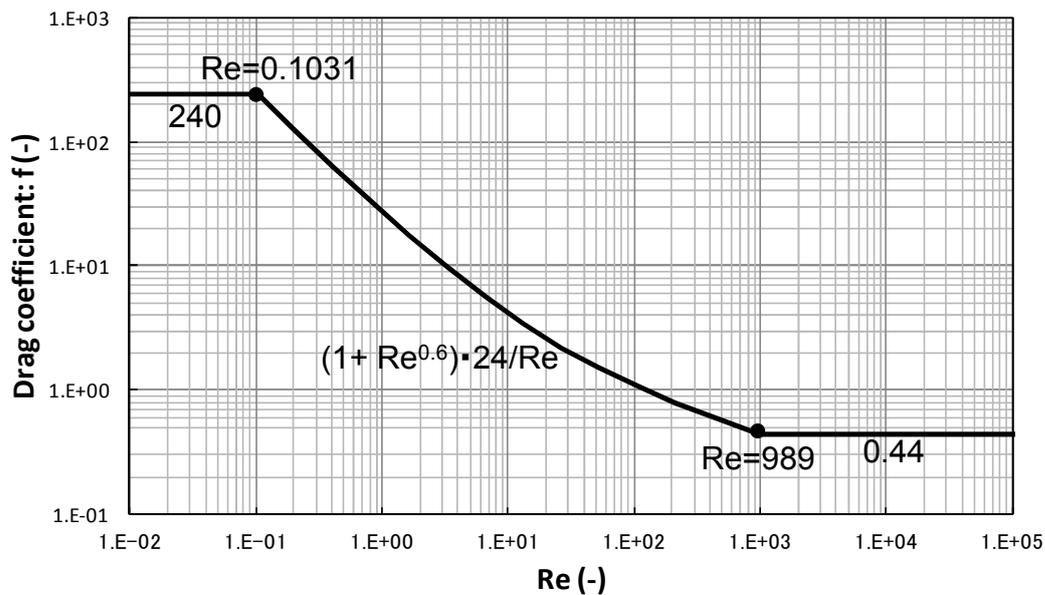
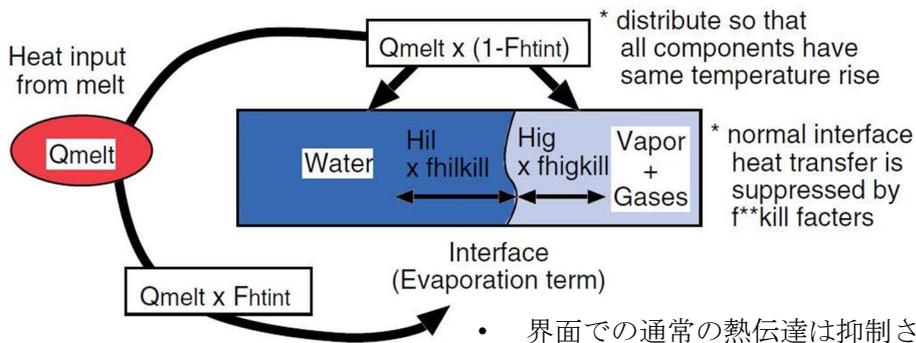
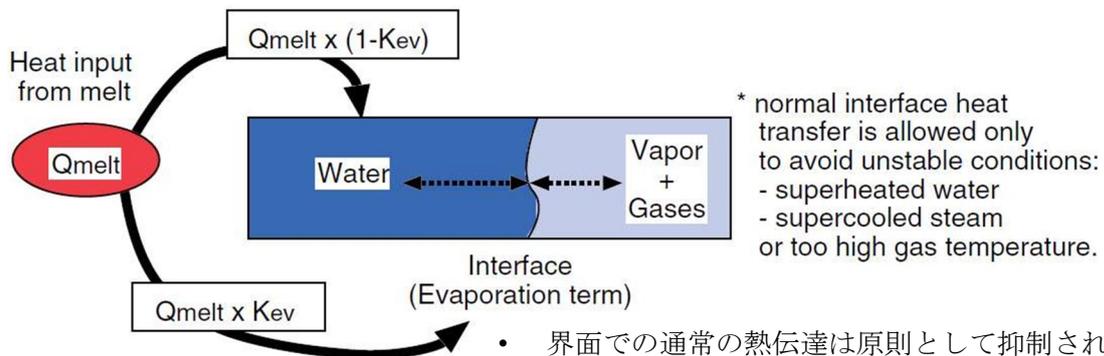


図 2-14 水滴及び気泡の流体抗力係数



- 界面での通常の熱伝達は抑制される。
- f_{htint} , f_{hikill} , $f_{higkill}$ は粗混合解析にて冷却材の蒸発を制御するパラメータ。

(a) 融体粒子から二相流への伝熱量分配機構 ⁽¹⁾



- 界面での通常の熱伝達は原則として抑制される。
- K_{ev} は爆発解析にて、微細化粒子からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合。

(b) 微細化粒子から二相流への伝熱量分配機構

図 2-15 二相流への伝熱量分配機構 ⁽¹⁾

2.3 入出力

本章では、J A S M I N Eコードによる水蒸気爆発解析時の入出力例を示す。

図 2-16 に水蒸気爆発解析のフロー図を示す。幾何形状等のプラント固有条件や事象進展解析 (M A A P) に基づく溶融燃料条件等に基づき J A S M I N Eコードの入力条件の設定を行う。

J A S M I N E解析の評価結果は、水蒸気爆発時の原子炉格納容器の健全性評価を実施するための構造応答評価コードの負荷条件として用いられる。水蒸気爆発負荷として、高圧気泡を膨張させるモデルを用いる場合には、水蒸気爆発時の発生エネルギー条件や爆発時の圧力条件が構造応答評価コードに引き渡される。

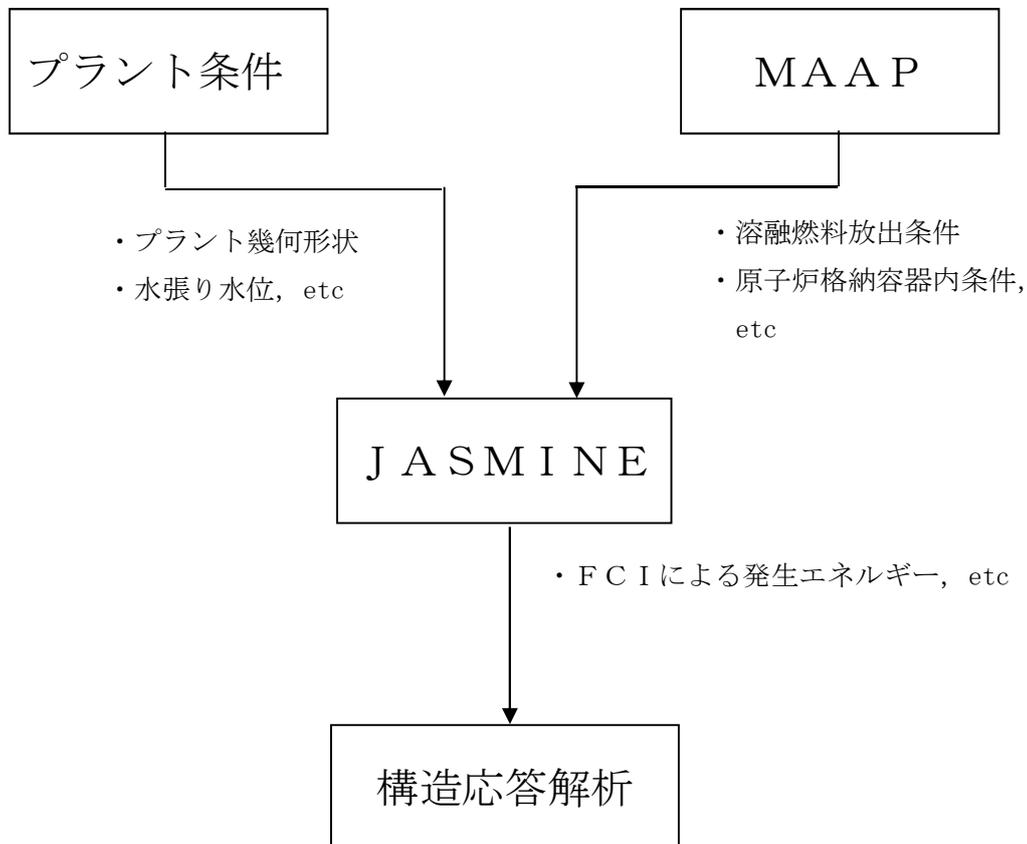


図 2-16 水蒸気爆発解析の流れ

2.3.1 入力例

(1) 計算体系の幾何形状

計算領域は、図 2-17 に示すとおり、円筒座標系における角度 θ のセクターとして定義され、体積は X-Z 平面のグリッドとして離散化される。

原子炉圧力容器破損時におけるペDESTAL領域での水蒸気爆発解析を実施する場合、計算体系を圧力容器、ペDESTAL壁面、床面で形成される原形状の中からモデル化することができる。

X-Z 平面でのメッシュ分割は、J A S M I N E コードの制限値【X方向(=30)、Z方向(=40)】以内で任意に設定することができ、ペDESTAL領域について、ベッセル、ペDESTAL空間（液相、気相）、ペDESTAL壁面等を定義することが可能である。図 2-18 にメッシュ分割の例を示す。

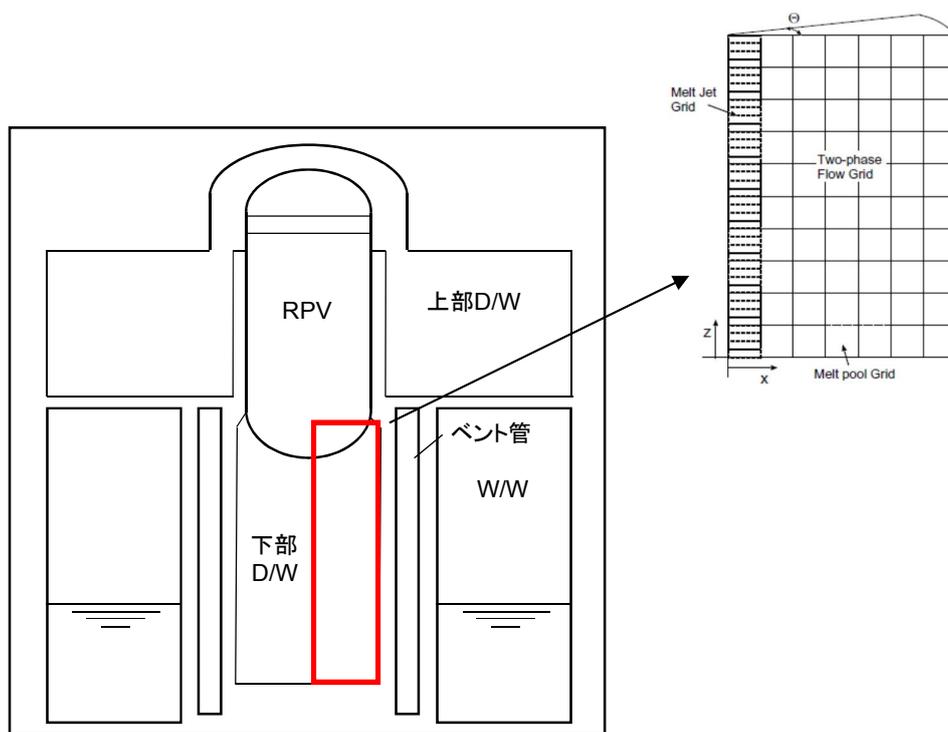


図 2-17 計算体系の幾何形状の例

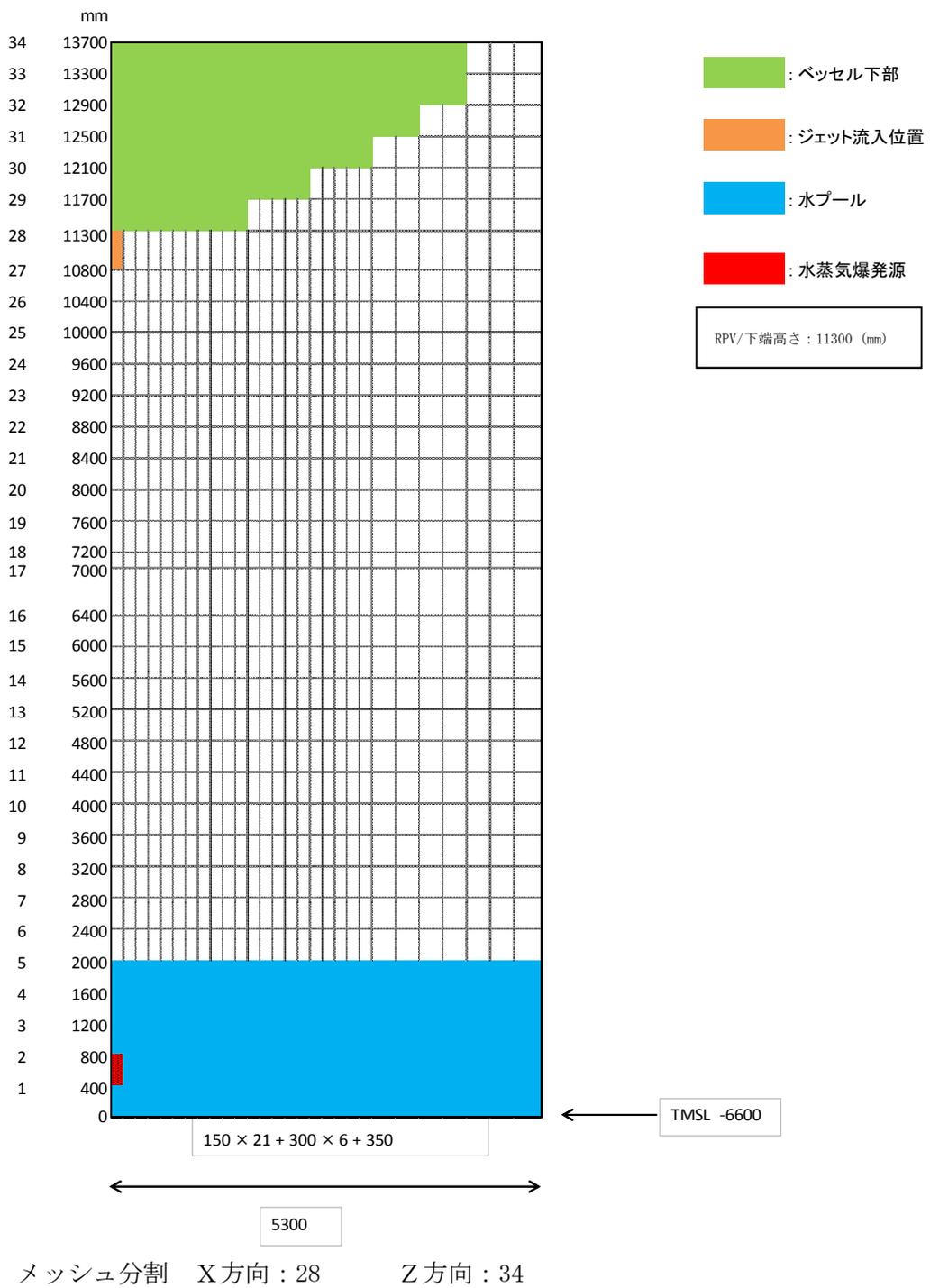


図 2-18 JASMIN 解析のメッシュ分割の例

(2) 溶融炉心物性値

溶融炉心物性値については、溶融コリウムの物性値ライブラリ (jasmine.corium, jasmine.corium2, jasmine.corium3) が、J A S M I N E コードに付属されており、ユーザーは目的に応じてこれらを活用することができる。各物性値ライブラリの主要な特性は以下のとおりである。表 2-3 に jasmine.corium2 の物性値を例示する。

jasmine.corium : FARO/KROTOS 実験条件 (UO₂/ZrO₂=80/20wt%)
jasmine.corium2 : FARO/KROTOS 実験条件 (UO₂/ZrO₂=80/20wt%) , 融点, リキダス,
ソリダスを実機相当条件に設定
jasmine.corium3 : TROI 実験条件 (UO₂/ZrO₂=70/30wt%)

(3) 主要入力値

表 2-4 に (1), (2) 以外の主要な入力例を示す。

(4) 入力条件の設定の考え方

入力条件は、表 2-4 に示された入力条件の例で示すように、代表的な水蒸気爆発実験を最適に再現するために設定した入力値をベースとし、水蒸気爆発事象に伴う不確かさを踏まえて、以下の保守性を考慮して設定している。なお、評価結果に対して各々が相互に影響し得る条件については、総合的に保守性が担保できることを考慮した設定としている。

- ・メルト放出速度：メルト放出速度は、破損口にかかるデブリ堆積圧等の圧力から計算される。メルト放出速度としては、原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）の低圧破損時に最も大きくなる条件である溶融デブリ全量が下部プレナムに堆積した場合を想定した値を設定。
- ・メルト放出口径：粗混合融体質量を保守的に評価するために、RPV 底部の貫通配管で最も大きい口径 0.15m の値を保守的に丸めて として設定。
- ・粗混合時液滴径：既存の F C I 実験 (KROTOS, FARO, TROI, CCM) のザウター平均粒径は 0 ~ 3 mm 程度⁽⁸⁾とされている。一般に粗混合時液滴径が大きい程、粒子から冷却材への伝熱が低下して粒子が固化しにくくなり、冷却材ボイド率も低下することで、粗混合融体質量が大きい傾向があると考えられ、このような傾向は、トリガリング位置を底部、トリガリングタイミングを粗混合融体質量がピークとなる条件において、感度解析により確認されている。上述のトリガ条件を前提として、爆発の強度が大きくなりやすい条件として、上述のザウター平均粒径を包絡する を設定。

- ・トリガリング位置： 爆発に関与し得る融体の質量が最大に近く、爆発の強度が大きくなりやすい条件として、中心軸上の底部から軸方向2セル目を選定。
- ・トリガリング タイミング： 水蒸気爆発により発生する運動エネルギーが最も大きくなると考えられる条件として設定。

表 2-3 J A S M I N E 解析における物性値

No.	項目	物性値		備考
		数値	単位	
1	溶融点		[K]	組み込みライブラリ (jasmine.corium2) に基づく値
2	固相線温度		[K]	
3	液相線温度		[K]	
4	固相密度		[kg/m ³]	
5	液相密度		[kg/m ³]	
6	液相比熱		[J/(kg·K)]	
7	固相比熱		[J/(kg·K)]	
8	溶融潜熱		[J/kg]	
9	熱伝導率		[W/(m·K)]	
10	粘性係数		[Pa·s]	
11	表面張力		[N/m]	
12	輻射率		[—]	

表 2-4 J A S M I N E 解析における主な入力条件の例 (1/2)

No.	入力	値(定義)	単位	備考
1	初期圧力		[Pa]	MAAP解析結果に基づき設定。
2	プール水温		[K]	MAAP解析結果に基づき設定。
3	落下メルト総重量		[kg]	MAAP解析結果に基づき設定。
4	メルトジェット温度		[K]	MAAP解析によると下部プレナム内の溶融デブリの酸化物層の過熱度は約 [] であることから、溶融デブリの融点は jasmine 付属のメルトの物性値パッケージ jasmine.corium2 のリキダス [] に過熱度 [] を考慮した値を設定。
5	メルト放出速度		[m/s]	MAAP解析に基づくRPV破損時のデブリ流入速度の最大値を設定。
6	メルト放出口径		[m]	RPV底部の貫通配管で最も口径の大きいCRDチューブ径 0.15mを保守的に丸めて [] を設定。
7	プール水深	2	[m]	手順上定める値を設定。
8	粗混合時液滴径	[]	[m]	大規模FCI実験結果 (FARO, COTELS 等) の粒径分布から代表粒子径として設定。
9	爆発後粒子径	0.00005	[m]	文献 ⁽¹⁾ 記載のJAEAが実施した検証解析に用いられる条件を採用。
10	ブレイクアップ係数	1.0	[-]	文献 ⁽¹⁾ 記載のJAEAが実施した検証解析に用いられる条件を採用。
11	液滴速度ファクタ	5	[-]	文献 ⁽¹⁾ 記載のJAEAが実施した検証解析に用いられる条件を採用。
12	トリガリング位置	ベDESTAL の中心, 底から 0.6m	[m]	トリガ位置には中心軸上の底部付近として底部から軸方向2セル目を選定。これは爆発に関与し得る融体の質量が最大に近く、爆発の強度が大きくなりやすい条件を選定したものである。
13	トリガリングタイミング	粗混合融体 質量の最初 のピークと なる時刻	[sec]	水蒸気爆発により発生する運動エネルギーが最も大きくなると考えられる条件として設定。
14	トリガ閾値	5×10^5	[Pa]	マニュアルによるトリガ圧力の設定範囲 500kPa-10MPa より、500kPa を設定。

表 2-4 J A S M I N E 解析における主な入力条件の例 (2/2)

No.	入力	値(定義)	単位	備考
15	フラグメンテーションモデル	Caracharios(1983)モデル	[-]	-
16	フラグメンテーション条件	粒子温度の平均温度が融点以上	[-]	-
17	フラグメンテーション係数	0.35	[-]	文献 ⁽¹⁾ 記載の J A E A が実施した検証解析に用いられる条件を採用。
18	フラグメンテーション時間	10^{-3}	[sec]	
19	蒸発に用いられるエネルギー割合	融体の寄与 : 0.02 フラグメント放熱の寄与 : 0.7	[-]	
20	フラグメンテーションにおけるボイド緩和係数	ボイド率 0.3~0.75 でカットオフ	[-]	文献 ⁽¹⁾ 記載の J A E A が実施した検証解析に用いられる条件を採用。
21	トリガ点圧力	1×10^7	[Pa]	ピーク圧力よりも低くかつトリガ閾値圧力 500kPa よりも十分大きい圧力として設定。
22	トリガ点ガス割合	粗混合解析結果の引継ぎ	[-]	トリガ気相割合は、粗混合解析結果に基づきトリガ発生時点でのトリガセルでの気相割合を設定。
23	トリガ点ガス温度	1000	[K]	文献 ⁽¹⁾ 記載の J A E A が実施した検証解析に用いられる条件を採用。

2.3.2 出力例

JASMINNE解析は、「粗混合過程」と「爆発過程」の2段階に分かれている。それぞれの解析における主要な出力を以下に示す。

(1)粗混合過程

- ・放出されたメルト及び粗混合領域におけるメルト粒子の全質量

粗混合解析は、爆発解析の初期条件を評価するために実施する。重要な物理量は、粗混合過程において熔融状態で水中に分散した融体の質量であり、この物理量に基づきトリガリングタイミングを設定する。

JASMINNEコードではこの物理量を定量化する指標として、粗混合融体質量（ボイド率0.75以下の領域に存在し、温度が融点以上の融体質量）の時間変化を出力することができる。爆発の強度が大きくなるように粗混合融体質量が最初にピークとなったタイミングでトリガリングタイミングを設定する。

(2)爆発過程

- ・流体の運動エネルギーの時間変化

流体の運動エネルギーを用いて構造健全性評価を実施する場合には、水蒸気爆発発生時にトリガセルから周囲へ圧力波が伝播し、その発生エネルギーの大部分が流体の運動エネルギーに変換されると想定し、全領域の流体の運動エネルギーの時間変化からその最大値を設定することが考えられる。

3. 解析結果の例示

本項では、ABWR代表プラントにおけるJASMIN解析結果例を示す。
評価条件はそれぞれ以下の通りである。

- ・評価体系 : 図 2-18
- ・主な評価条件 : 表 2-3, 表 2-4

(1) 粗混合過程

放出されたメルト及び粗混合領域におけるメルト粒子の全質量を図 3-1 に示す。図 3-1 により、粗混合融体質量が最初にピークとなる約 0.9 秒後にトリガリングタイミングを設定している。

(2) 爆発過程

流体の運動エネルギーの時間変化を図 3-2 に示す。図 3-2 より、流体の運動エネルギーのピーク値約 7MJ が水蒸気爆発時に発生するエネルギーと設定することができる。

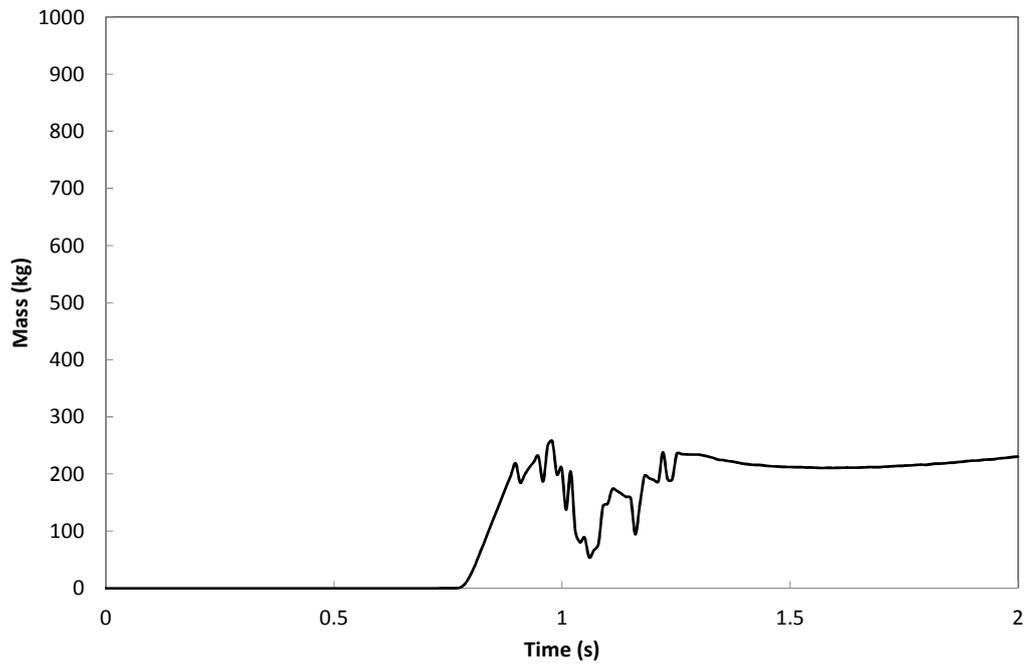


図 3-1 粗混合融体質量（温度が融点以上かつボイド率 0.75 以下の領域に存在する融体質量）の時間的推移

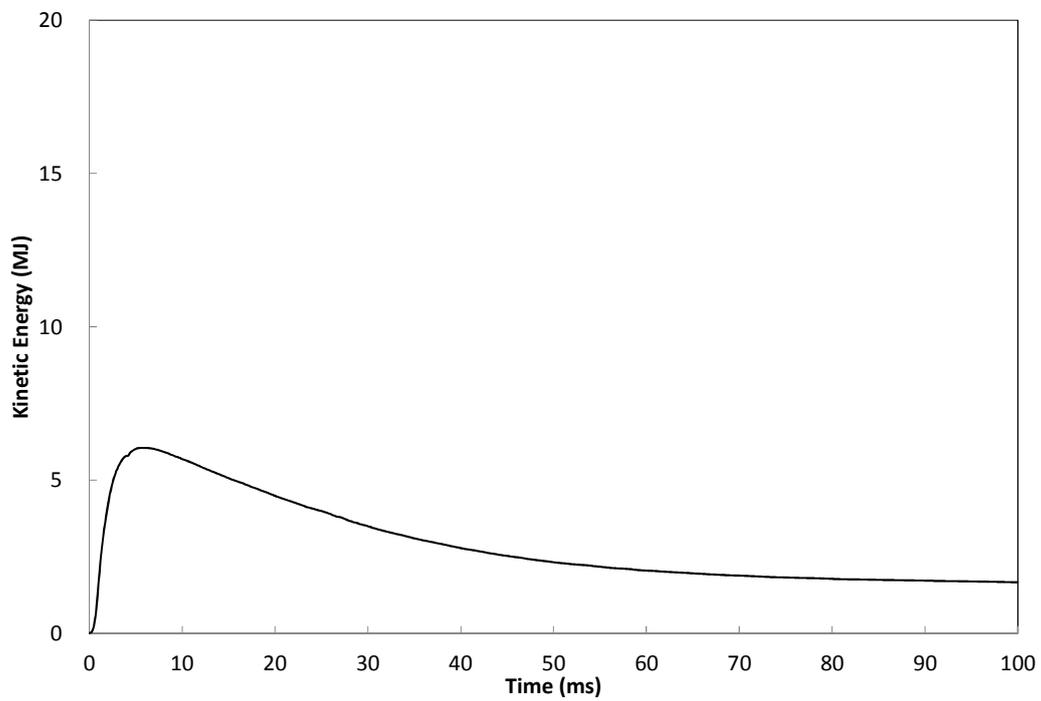


図 3-2 流体運動エネルギーの時間的推移

4. 水蒸気爆発実験への適用例

4.1 粗混合実験解析

粗混合に関するモデルの機能を確認するため、及び実験を最適に再現することを目的としたパラメータ調整のため、JRC-Ispra 研究所で実施された FARO 実験に関するシミュレーションを、JAEA が実施している⁽¹⁾。FARO 実験では、熔融燃料としてコリウム(UO_2 と ZrO_2 の混合物)を使用し、これらを水プールに落下させたときの、融体ジェット分裂やクエンチ時の加圧および水蒸気発生によるプール水位上昇等のデータが得られている。FARO 実験における実験装置の概要を図 4-1 に示す。JASMIN E コードにおけるベンチマークでは、サブクール度、圧力、ジェット径等のパラメータの異なる 3 種類の実験ケースを選択している。これらの実験では水蒸気爆発が発生せず、かつ粗混合状態が確認できたため、粗混合に関するベンチマーク実験として選定された。以下に各ケースの特徴を簡単に述べる。

- L14 ケース : デブリの温度は 3073K、水位は 2.05m、サブクール度は 1 K と小さく、圧力は高圧 (5 MPa) であり、ジェット径は 92mm と大きい。雰囲気ガスは蒸気である。
- L28 ケース : デブリの温度は 3053K、水位は 1.44m、サブクール度は 1 K と小さく、圧力は低圧 (0.51MPa) であり、ジェット径は 44mm と小さい。雰囲気ガスは蒸気である。
- L31 ケース : デブリの温度は 2990K、水位は 1.45m、サブクール度は 104K と大きく、圧力は最も低圧 (0.22MPa) であり、ジェット径は 48mm と小さい。雰囲気ガスはアルゴンである。

4.1.1 解析条件

ベンチマーク対象の実験ケース (L14, L28, L31) の実験条件及びそれぞれのベンチマーク解析条件を表 4-1 に示す。また、実験装置を模擬した解析モデルを図 4-2 に示す。

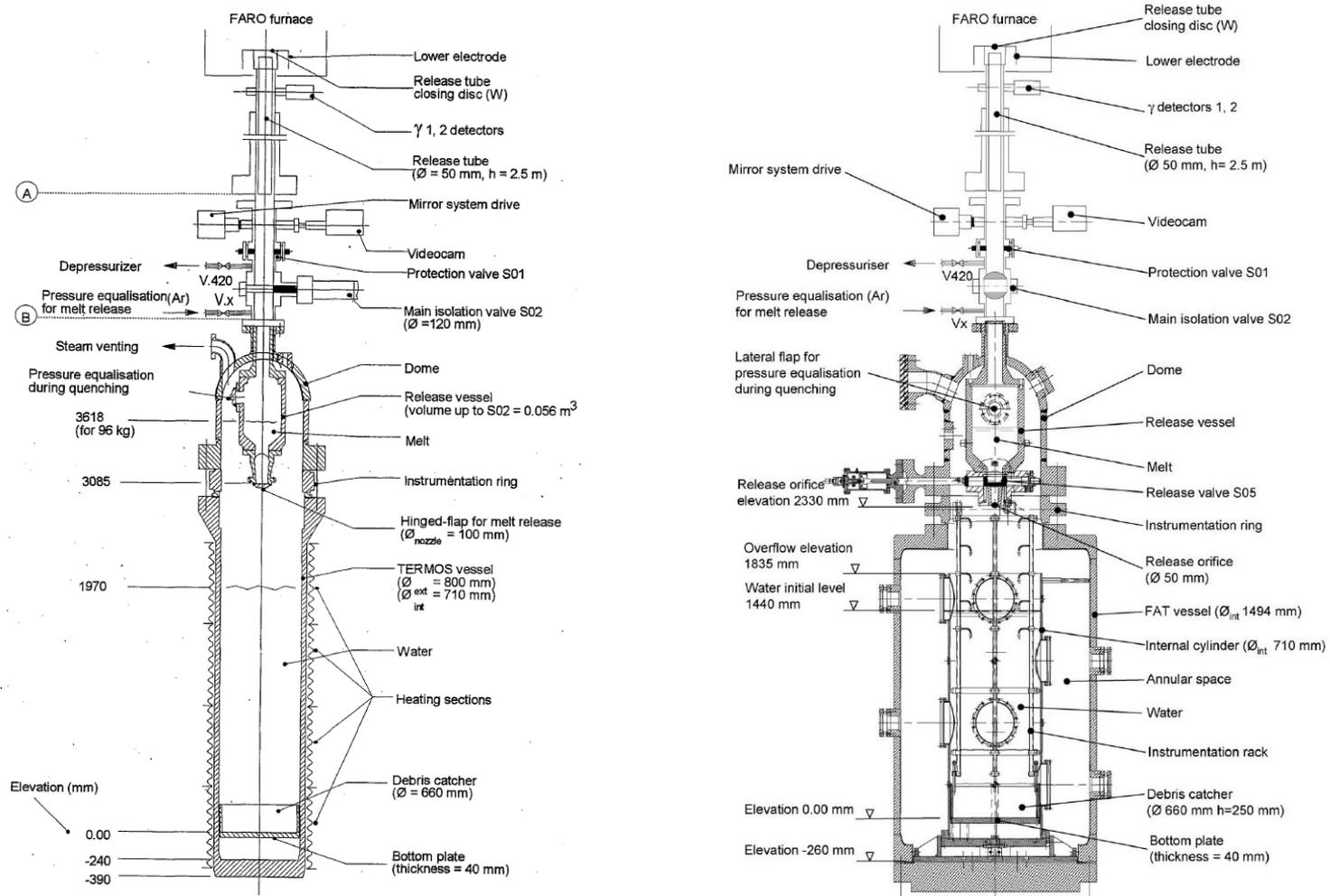


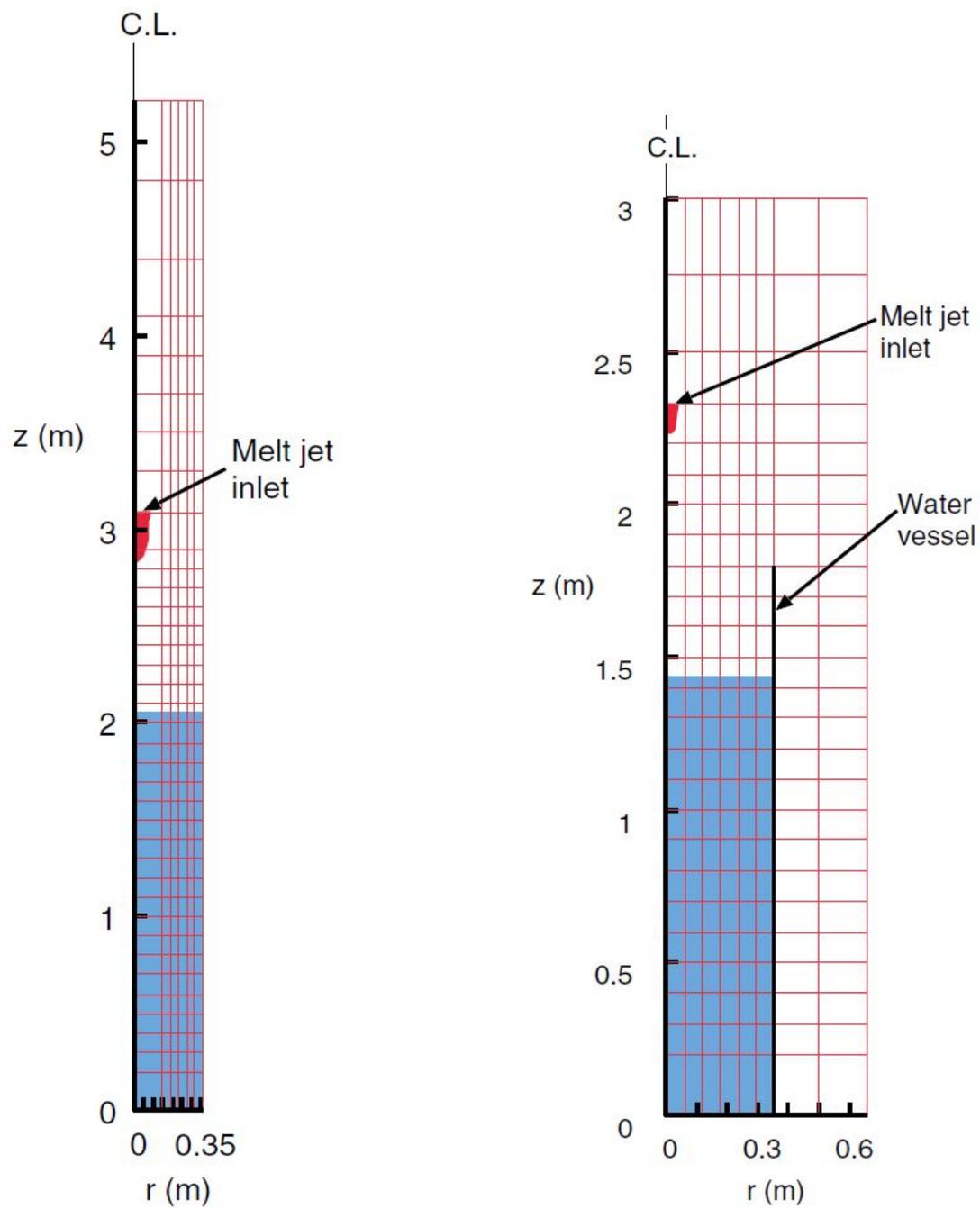
图 4-1 FARO 实验装置 (9), (10)

表 4-1 FARO 実験 (L14, L28 及び L31) の実験条件及び解析条件

	L14	L28	L31
Melt			
Material	Corium ($T_{sol}/T_{liq} = 2830/2850(K)$, 80wt% UO_2 -20wt% ZrO_2)		
Released mass (kg)	125	175	92
Temperature (K)	3073	3053	2990
Jet diameter at inlet (mm)	92	44	48
Water			
Temperature (Subcool) (K)	537 (1)	424 (1)	291 (104)
Pool depth (m)	2.05	1.44	1.45
Water vessel diameter (m)	0.71	0.71	0.71
Cover gas			
Atmosphere	Steam	Steam	Argon
Initial pressure (MPa)	5.0	0.51	0.22
Cover gas volume(m ³)	1.26	3.53	3.49
Results			
Pressure rise at plateau (MPa)	2.5	1.2	0.04
Level swell (m)	~1.4	~0.6	~0.3
Agglomerated mass (kg)	20 (16%)	77 (44%)	0
Debris mean dia. ^{a)} (mm)	5.0	3.0	3.3
Analytical			
Grid (Water pool zone)	6×37(6×20)	8×25(6×14)	
Central column radius (m)	0.15	0.10	0.10
Time step (ms)		~0.5	
Jet initial velocity(m/s)	3.0	~3.0	~2.7
Jet flow-in duration(s)	0.80	5.2	2.5
Melt particle dia.(const.)(mm)	5.0	3.0	3.0
Jet break-up length model ^{b)}	Taylor type, $C_{ent} = 1$		
Surface temperature drop model	Use		
N_{pcr} ^{c)}	1000		
n_{hist} ^{c)}	1000		
F_{htint} ^{d)}	0.02		

a) mass median diameter b) see 2.2.1 c) see 2.2.3 d) see 2.3.2

出典 : Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

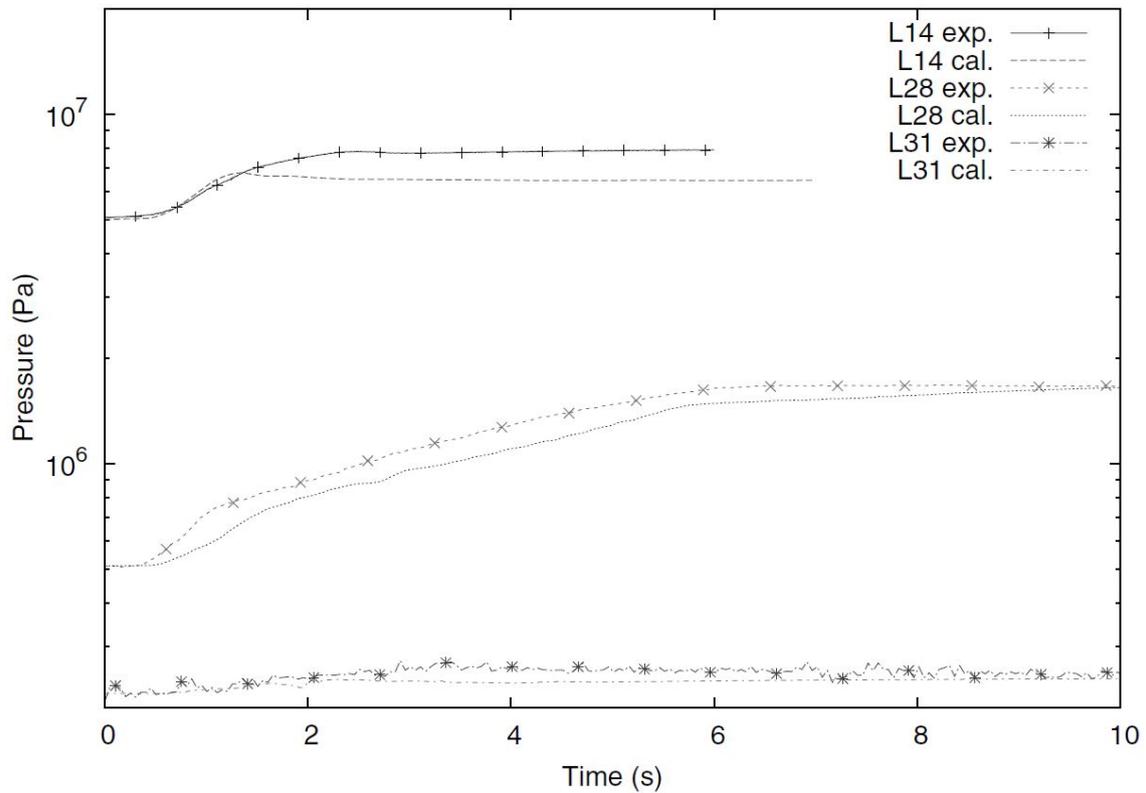


出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

図 4-2 FARO L-14 (左) 及び FARO L28, L31 (右) の解析モデル

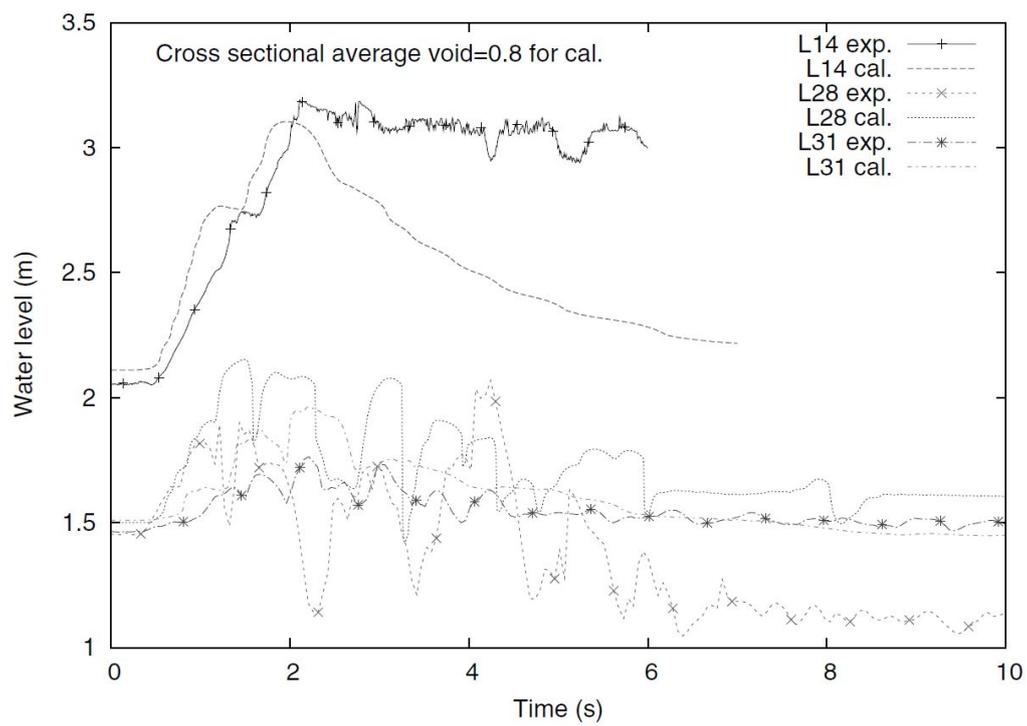
4.1.2 解析結果

圧力履歴の解析結果を図 4-3 に、プール水位挙動の解析結果を図 4-4 に示す。図において、exp. が実験結果で、cal. が解析結果である。全体として実験結果はおおむね良く再現されている。詳細にみると、圧力がやや低めに評価されているのに対し、特に低圧実験 (L28 と L31) において水位は高めに評価されている。



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

図 4-3 圧力履歴比較



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

図 4-4 プール水位挙動比較

4.2 爆発実験解析

爆発に関するモデルの機能を確認するため、及び実験を最適に再現することを目的としたパラメータ調整のため、JRC-Ispra 研究所にて実施された実験のうち、FCIに伴うエネルギーの発生が確認された KROTOS-44, 42 実験及び FARO-L33 実験に加え、エネルギーの発生が確認できなかった KROTOS-37 実験についても解析対象として選定した。これらの検証解析は、JAEAにて実施されている。⁽¹⁾

KROTOS 実験では、1～3 kg 程度の溶融アルミナ又はコリウム (UO_2 と ZrO_2 の混合物) を円柱形状の水槽に落下させ、圧縮アルゴンガスによる圧力パルスによってトリガがかけられている。FARO 実験は、大規模スケールの実験であり、100kg の溶融コリウムを水プールに落下させ、起爆装置からの圧力パルスによってトリガがかけられている。これらの実験結果から、各位置での圧力過渡変化及び微細化粒子の粒子径分布に関するデータに対する検証を実施した。

4.2.1 解析条件

解析条件を表4-2に、KROTOS及びFARO実験の解析メッシュモデル図を、図4-5に示す。水蒸気爆発解析では粗混合過程と爆発過程の2つの過程を解析する。粗混合過程では、計算モデルを調整することで実験結果を適切に模擬することが可能である。具体的には、ジェット分裂長の相関式と調整係数は、同等の状況で水蒸気爆発が発生しない場合のジェット分裂長を再現できるよう選択される。

トリガ時刻における全体のボイド率等の実験パラメータの一致性を確認し、粗混合過程の解析結果が妥当であることを確認した。そして、それらの結果を爆発過程の初期条件に設定した。

爆発解析では融体物質やその他の実験条件に関係なくモデルパラメータの値を一定とする。これらは、解析値がKROTOSのアルミナ実験での圧力パルス、水蒸気爆発により発生した微細化粒子の質量分率と一致するように設定している。爆発過程でのモデルパラメータの調整にアルミナを用いた実験を採用した理由を以下に示す。図4-6に、KROTOS実験のアルミナとコリウムの総質量、融体質量及びボイド率 0.75 以下の融体質量についての比較結果を示す。アルミナでは粗混合過程において常に溶融状態であり、過度に水蒸気が発生することはない。そのため、理想的な粗混合条件（融体物質の大部分が固化せず、水と十分に混合されている）が達成できている。一方、コリウムではトリガ時刻における融体の大部分が固化あるいは高ボイド率領域に含まれているため、水蒸気爆発に寄与する融体量はわずかとなる。この相違は物質の物理的特性や初期温度に関係する。アルミナはコリウムと比較して、融点、初期温度及び密度が低く、潜熱が大きい。そのため、液滴径が大きくなり、融体が冷却されるまでに要する時間が長くなる。また、アルミナの融体温度が低く、体積当たりの表面積が小さいため、水への熱伝達は小さくなる。これらの理由により、コ

リウムではアルミナほど大規模な水蒸気爆発は発生しない。以上より、理想的な粗混合状態が得られるアルミナを用いた実験のほうが、爆発過程の微細化モデルパラメータの調整には適切と考えられる。

外部トリガは、中心底部のセルに与える。外部トリガ条件は、KROTOSでは、実験で使
用したガス室の条件（ 15cm^3 ， 14MPa ， pV =約 220kJ ）から設定する。また、FARO-L33では、起爆
エネルギー 1kJ と等価な体積と圧力（ 28.6cm^3 ， 35MPa ）から設定する。

表 4-2 KROTOS-37, 42, 44 及び FARO-L33 の実験条件及び解析条件

		K44	K42	K37	L33
Melt	Material	Alumina ^{a)}		Corium ^{b)}	
	Released mass (kg)	1.50	1.54	3.22	100
	Temperature(K)	2673	2465	3018	3070
	Jet release dia. (mm)	30			48
	Free fall height(m)	0.44			0.77
Water	Temperature(Subcool) (K)	363(10)	293(80)	296(77)	294(124)
	Depth (m)	1.105			1.62
	Vessel diameter (m)	0.20			0.71
Cover gas	Atmosphere	Steam	Argon		
	Pressure (MPa)	0.10			0.41
	Cover gas volume(m ³)	0.290			3.496
Premixing results	Level swell (cm)	12	3	30	9
	Jet break-up length (m)	~0.3		~0.8	~1.1
Explosion results	Pressure peaks (MPa)	~50	~50	NA ^{c)}	~6
	Half height width (ms)	~1.5	~1	NA ^{c)}	~3
	Debris <0.106mm (%)	47	31	1.4	~8 ^{d)}
Analytical conditions	Time step (μ s)	~2			
	Jet initial velocity(m/s)	3.0			~2.9
	Jet flow-in duration(s)	0.270	0.255	0.191	2.6
	Melt Particle dia.(mm)	10		2	3
	Jet break-up length model ^{e)}	S: $C_{ent} = 2.5$		S: $C_{ent} = 1.7$	T: $C_{ent} = 1$
	Surface temperature drop model	Use			
	N_{pcr} ^{f)}	100			1000
	n_{hist} ^{f)}	500			1000
	External trigger	14.8MPa-15cm ³			35MPa-29cm ³
	Trigger time (s)	0.9		0.5	1.12
	C_{frg} ^{g)}	0.35			
	d_{frg} (μ m) ^{g)}	50			
	$t_{triglifc}$ (ms) ^{g)}	1.0			
	p_{trig} (MPa) ^{g)}	0.2			0.5
	Fragmentation criterion	$T_{av} \geq T_{mp}$			
K_{ev} ^{h)}	0.7				

a) $T_{melt} = 2300(K)$ b) $UO_2(80)-ZrO_2(20)$ (wt%), $T_{sol}/T_{liq} = 2830/2850(K)$

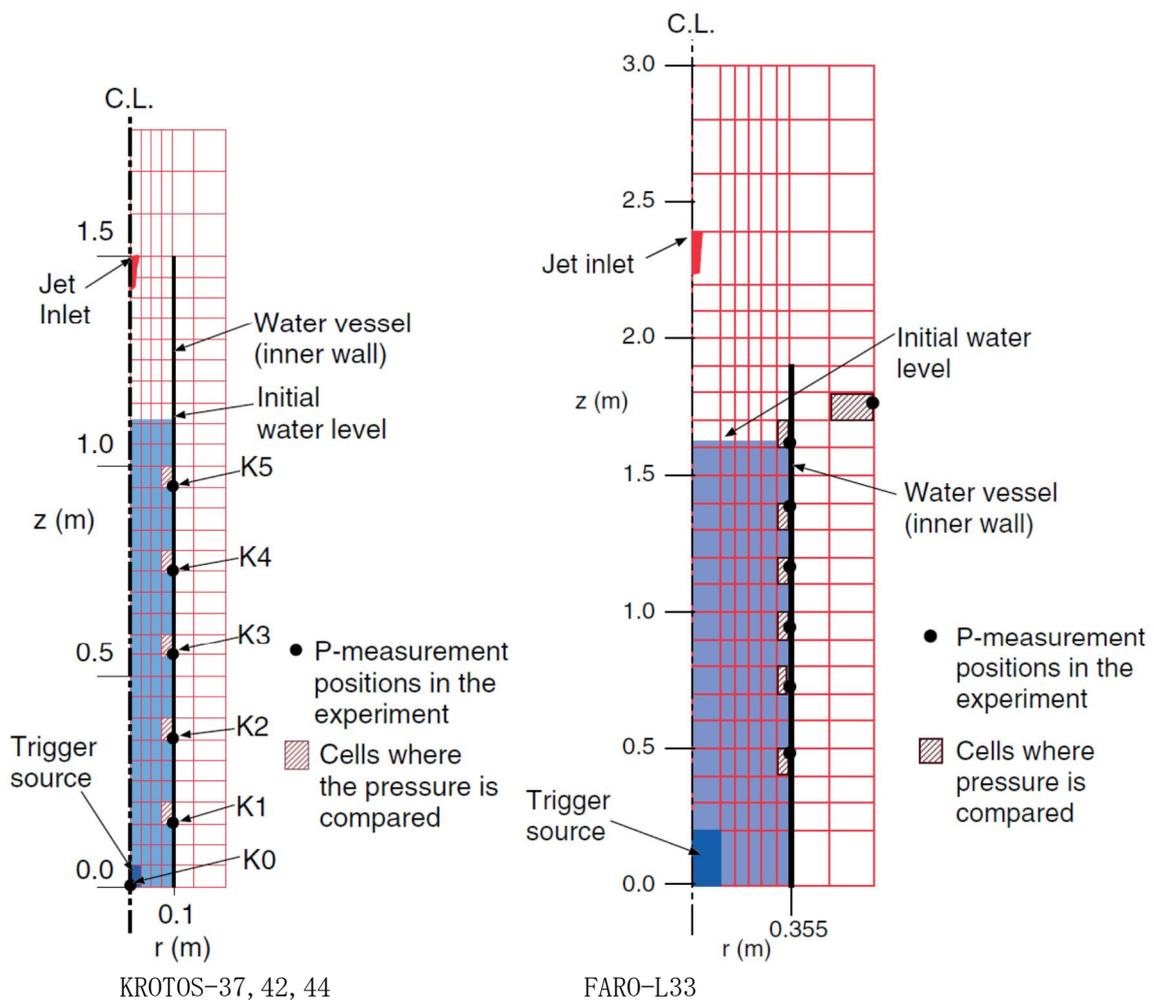
c) Reportedly “no propagating energetic explosions” [37].

d) Extrapolated from the size distribution reported in [41]. The ratio to the melt mass in the system at the triggering time, ~40kg, is ~20%.

e) S: Saito et al. correlation, T: Taylor type correlation (see 2.2.1)

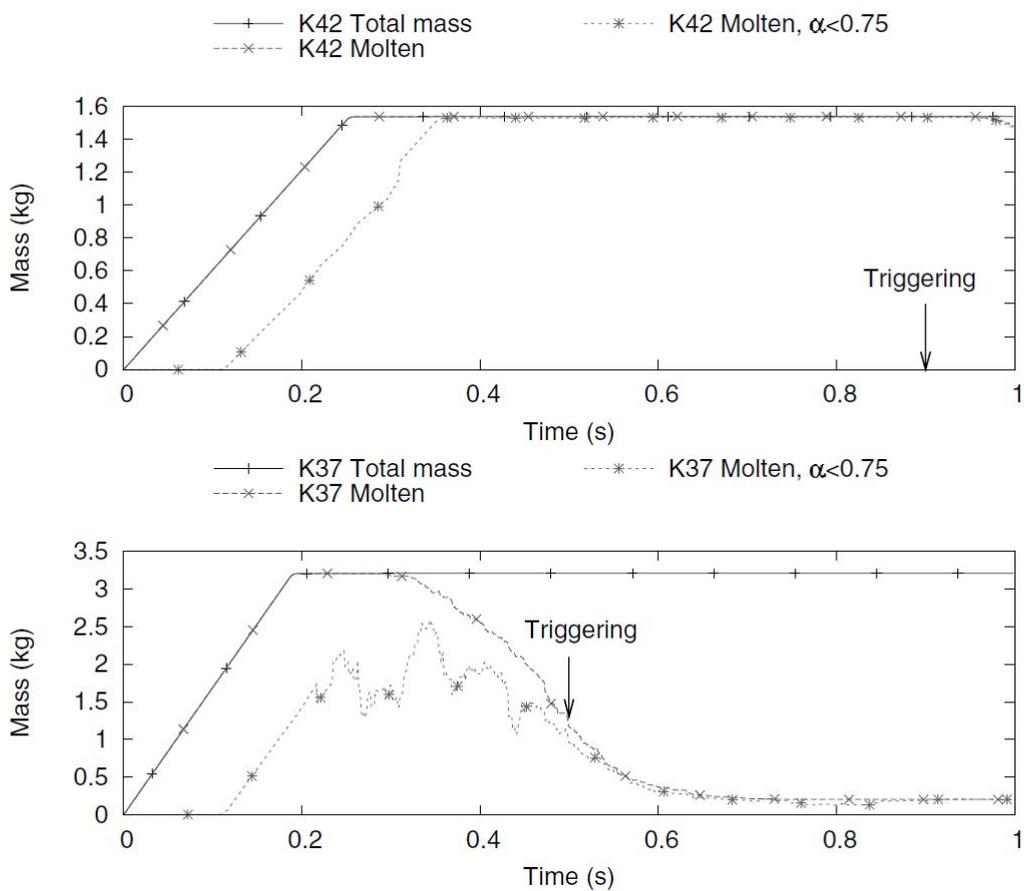
f) see 2.2.3 g) see 2.2.4 h) see 2.3.2

出典 : Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

図 4-5 解析モデル (KROTOS-37, 42, 44 及び FARO-L33)



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

図4-6 粗混合過程での融体質量
(上：アルミナ (K42) ，下：コリウム (K37))

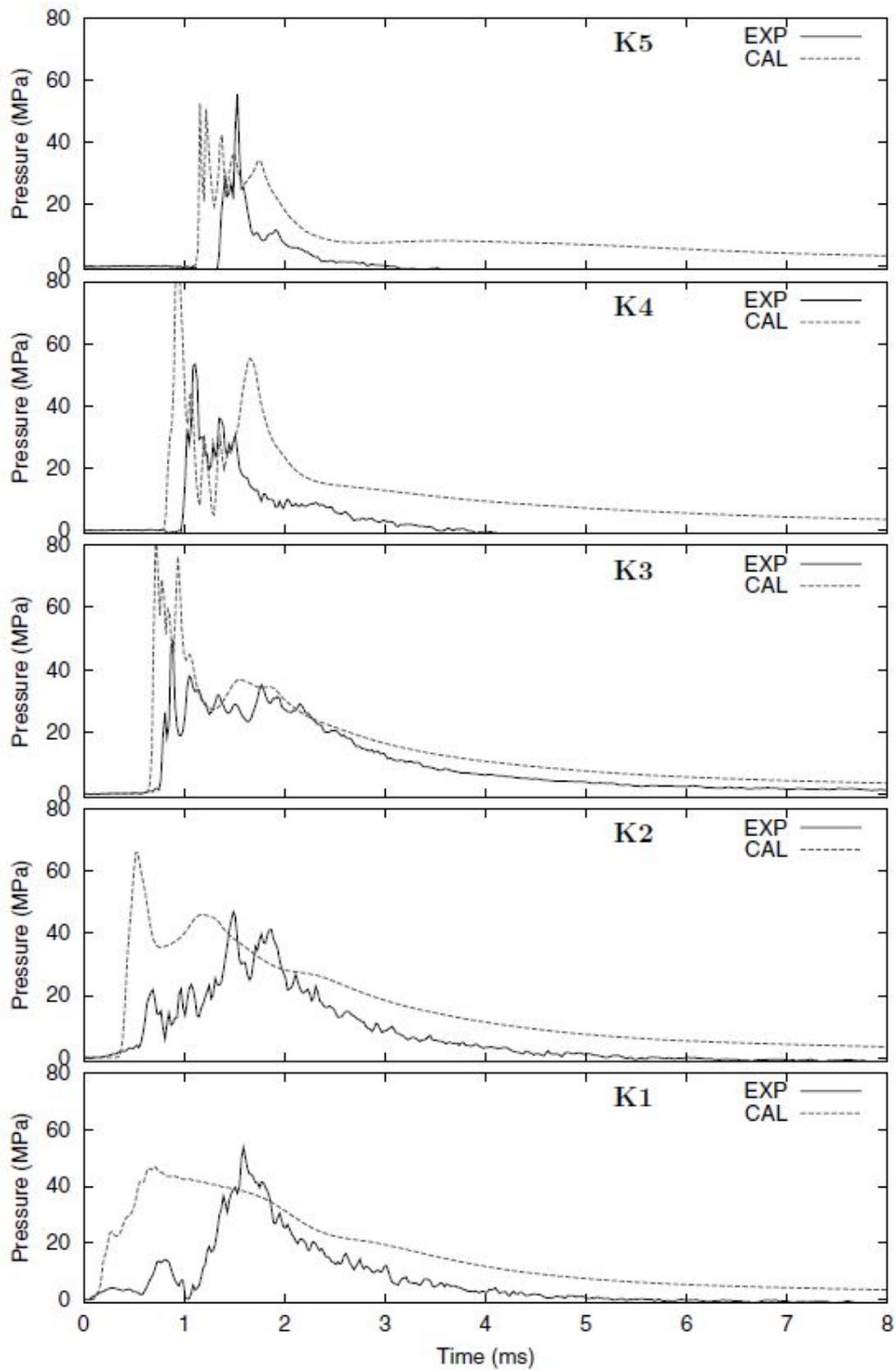
4.2.2 解析結果

図4-7及び図4-8に、KROTOSのアルミナ実験（KROTOS-44, 42）における垂直に位置した各測定点での圧力履歴の実験結果と解析結果の比較を示す。解析結果は実験結果とよく一致していることが確認できる。また、水のサブクール度が相違するKROTOS-44, 42の解析・実験結果の傾向が一致していることより、サブクールの影響は小さいものと考えられる。

図4-9に、KROTOSのコリウム実験（KROTOS-37）の解析結果を示す。この実験では水蒸気爆発が生じていないことが報告されている。解析では、トリガリング圧力パルスは爆発源に近い底部のK1及びK2のみで局所的にピークとなるが、それ以外の測定点ではピーク値はない。また、K1及びK2のピーク値を過ぎるとそれ以降は減衰している。

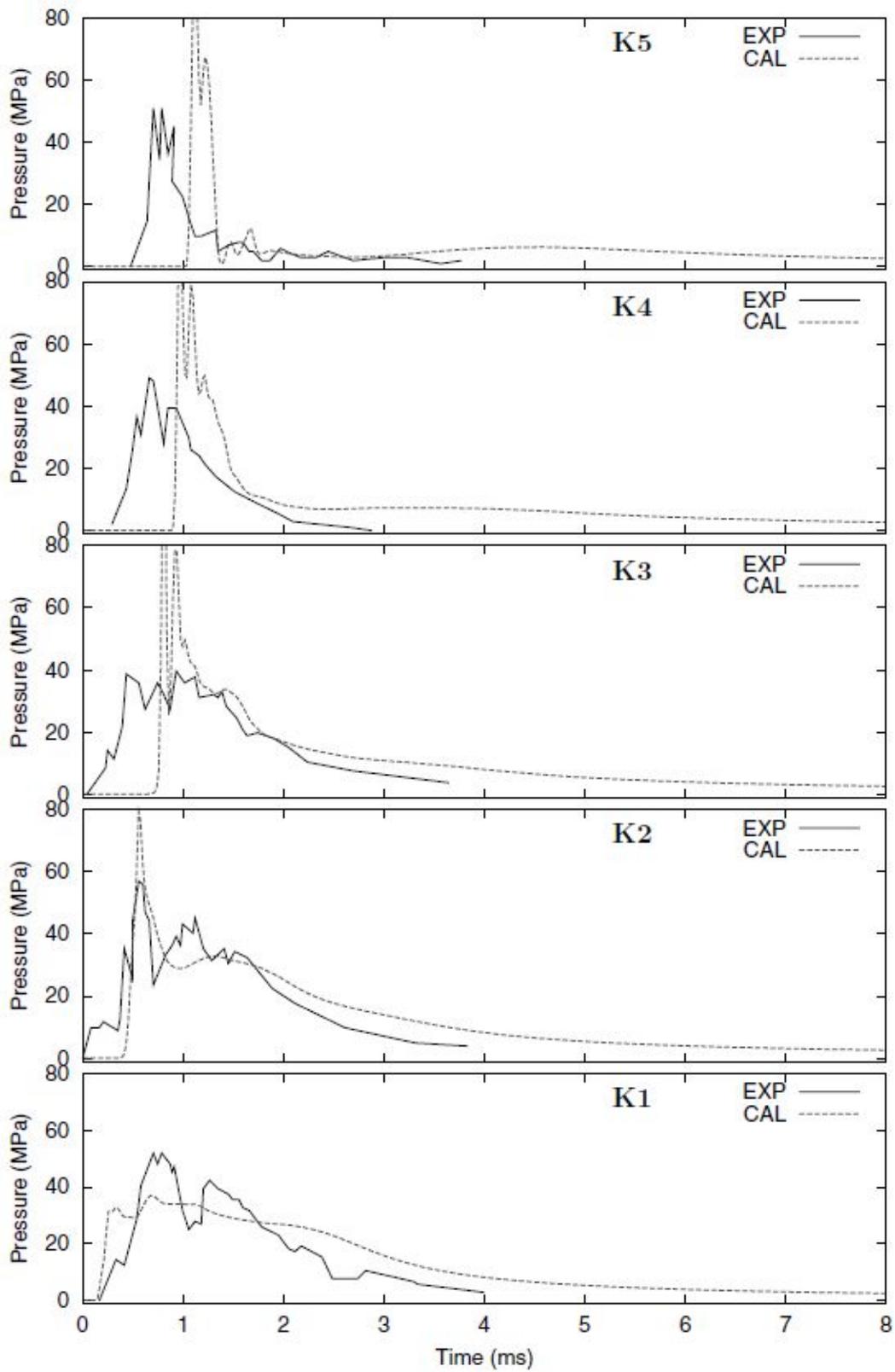
図4-10. に、FARO-L33における垂直に位置した各測定点での圧力履歴の実験結果と解析結果の比較図を示す。図4-10より、圧力パルスの傾向が良く一致していることがわかる。なお、水面近傍である $Z=1615\text{mm}$ での圧力挙動について、実験結果では大きな圧力上昇は確認されておらず、解析結果との差異が生じているが、これは解析による爆発時の水位挙動と実験結果との相違が圧力伝播挙動に影響している可能性が考えられる。図4-11及び図4-12に、KROTOS実験（44, 42, 37）及びFARO実験（L33）の流体運動エネルギーの解析結果と実験結果の比較図を示す。KROTOSのアルミナ実験（44, 42）とFARO-L33において、解析結果と実験結果はよく一致していることがわかる。KROTOS-37では流体運動エネルギーが小さくなっており、これは実験において、水蒸気爆発が生じていない事実と一致している。

一般的に、水蒸気爆発により粒子径 0.1mm より小さい微細化粒子が発生する。解析では、この粒子径を $50\mu\text{m}$ としている図4-13及び図4-14に、KROTOS実験(44, 42)及びFARO実験(L33)の微細化粒子の質量分率の比較結果を示す。実験と解析で粒子径が異なる為、正確な比較はできないが、解析結果の微細化粒子の質量分率は実験結果と同程度となることが確認できる。



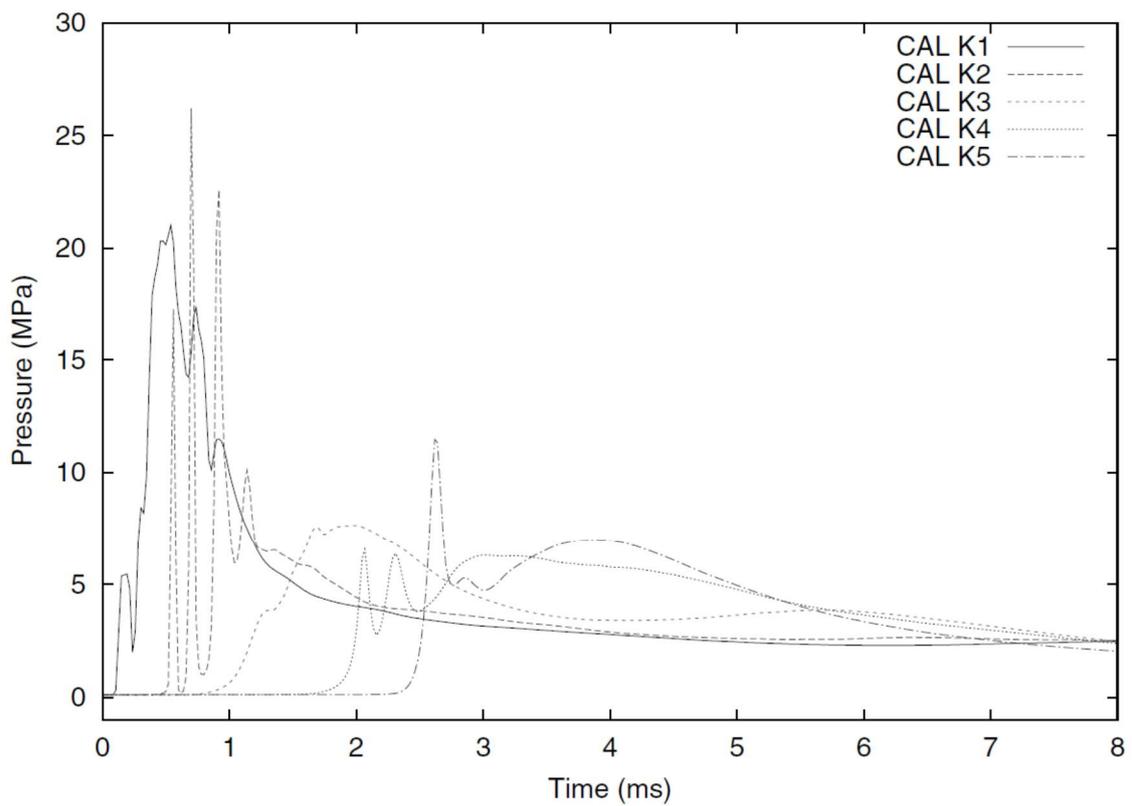
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

図 4-7 压力履歴 (KROTOS-44)



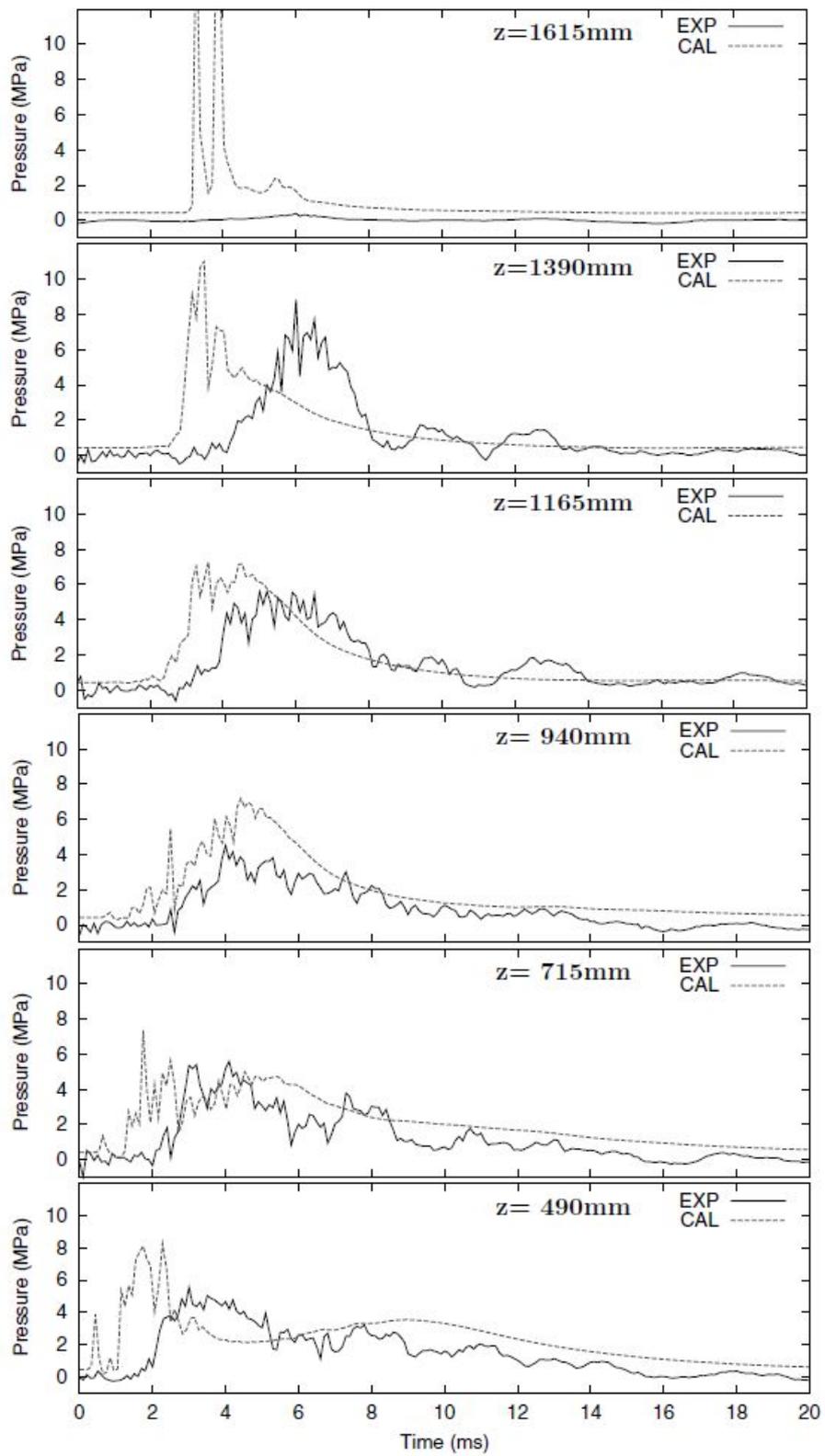
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

图 4-8 压力履歴 (KROTOS-42)



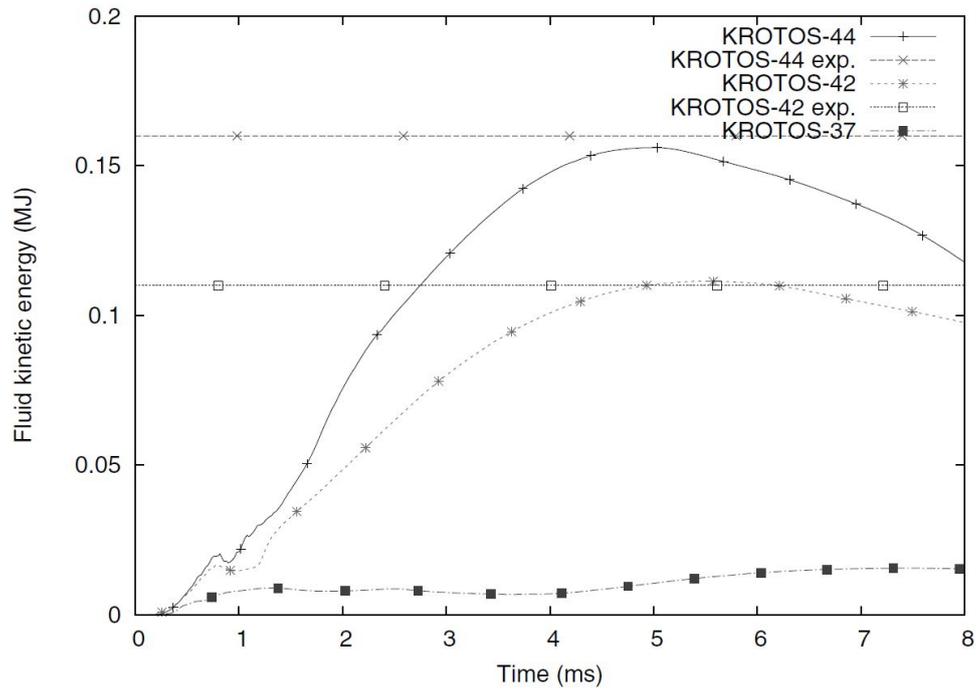
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

図 4-9 压力履歴 (KROTOS-37)



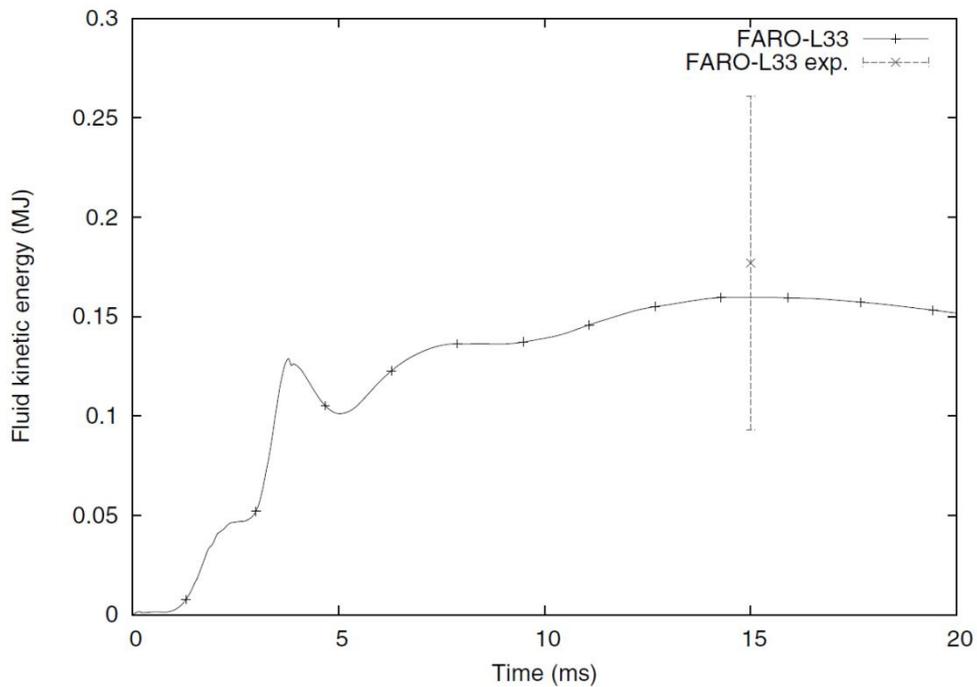
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

图 4-10 压力履歴 (FARO-L33)



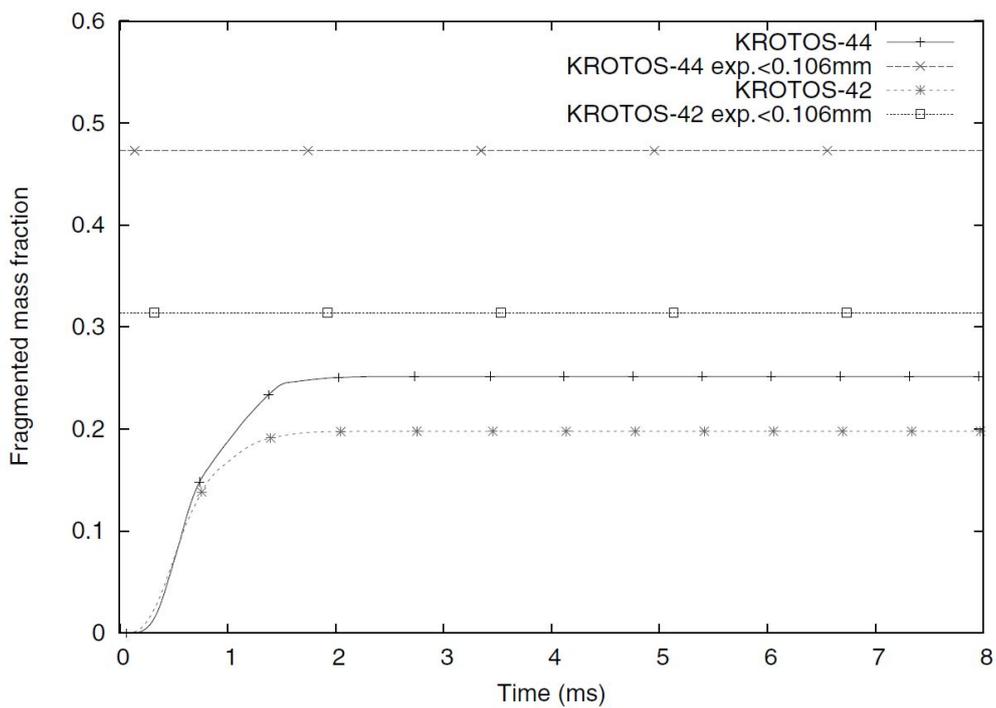
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

図 4-11 流体運動エネルギー (KROTOS)



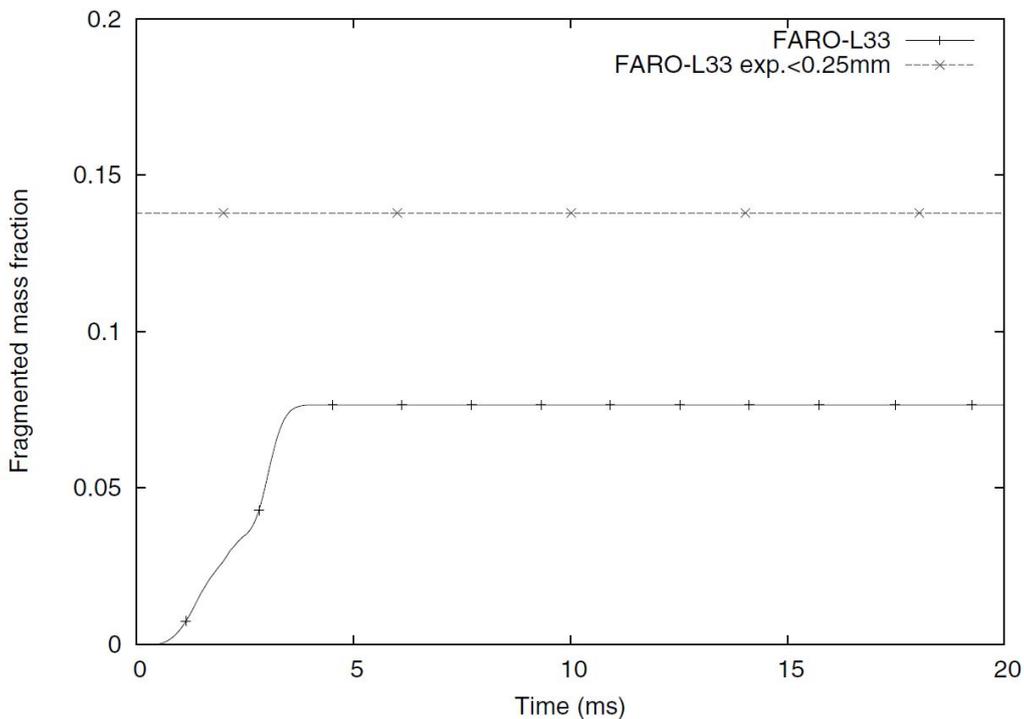
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

図 4-12 流体運動エネルギー (FARO-L33)



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

図 4-13 微細化粒子の質量分布 (KROTOS)



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾

図 4-14 微細化粒子の質量分布 (FARO-L33)

5. 参考文献

- (1) K. Moriyama, et al, Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA-Data/Code 2008-014, July 2008.
- (2) 改良型軽水炉のシビアアクシデント対策に係る検討, 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成 21 年度
- (3) 森山 清史 他, 軽水炉シビアアクシデント時の炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率の評価, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Reserch-2007-072.
- (4) S. J. BOARD, R. W. HALL, R. S. HALL, Detonation of fuel coolant explosions, Nature 254, 319-321, 1975.
- (5) 大貫 晃 他, 多次元二流体モデル構成方程式評価用コード ACE-3D の開発, JAERI-Data/Code 96-033, 1996 年 11 月
- (6) G. I. Taylor. The dispersion of jets of metals of low melting point in water. G. K. Batchelor, editor, The scientific papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor, vol. 3 Aerodynamics and the mechanics of projectiles and explosion, pp.304-305. Cambridge University Press, Cambridge, 1963.
- (7) M. Saito, K. Sato, S. Imahori, Experimental study on penetration behaviors of water jet into freon-11 and liquid nitrogen, ANS Proc. National Heat Transfer Conference, Houston, U.S., vol. 3, pp.173--183, 1988.
- (8) R. Meignen, et al, The challenge of modeling fuel-coolant interaction: Part I - Premixing, Nucl. Eng. Des. 280 511-527, 2014.
- (9) A. Annunziato, et al, FARO TEST L-14 ON FUEL COOLANT INTERACTION AND QUENCHING Comparison Report, Volume I: Analysis of the Results, OECD/CSNI International Standaard Problem 39, 1998.
- (10) D. Magallon, Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments, Nuclear Engineering and Design 236, 1998-2009, 2006.

添付1 水蒸気爆発時のウォーターハンマーについて

炉外において水蒸気爆発が発生した場合、発生した気体によって水塊が急加速を受けながらピストン状に押し上げられ、この水塊衝突による衝撃力が構造物の健全性に影響を及ぼす可能性が考えられる。ウォーターハンマーは、この水塊衝撃と圧力波の2つの効果に分けられるが、ペDESTALにおいては水面の上に気相部があり圧力波は問題とならないため、水塊衝突について以下に考察を示す。

この水塊の上昇について、軽水炉のSA時を想定した気泡急成長に伴う水撃力に関する研究（稲坂ら、2004）では容器下部から注入した気泡によって、水位がピストン状に押し上げられ、気泡が水面に達して吹き抜けるまで水塊として上昇する様子が観察されている。水塊による水位上昇は、主に容器の径： D と初期水位： H_0 のアスペクト比（ H_0/D ）によって整理できるとされており、構造物をこの水塊の到達範囲外に配置することにより水撃力の影響を回避できると結論付けている。添付図 1-1 に実験装置、添付図 1-2 に水塊の到達範囲の整理結果、添付図 1-3 に水塊挙動の実験結果を示す。

女川2号炉、浜岡4号炉、島根2号炉及び柏崎刈羽6号及び7号炉では、ペDESTAL径と初期水位のアスペクト比による無次元水位はそれぞれ0.6、0.5、0.65及び0.2程度である。この知見を適用した場合、添付図 1-2 より上記のアスペクト比において水塊群到達範囲が最も大きくなるのは島根2号炉のアスペクト比0.65であり、そのときの水塊の上昇を含む最大水位は約7.5m（ペDESTALの径の1.25倍程度）となる。これより、島根2号炉の場合、水塊はペDESTAL床から約7.5mまで上昇する可能性があるが、これはペDESTAL床面からのRPV底部高さ約9.0mよりも低いことから、RPV支持機能の健全性に与える影響はないといえる。

本実験では、水蒸気爆発時の水塊運動の主要パラメータとして、容器径、初期水位、気泡圧力を変更したケースについて実験を実施している。これらの実験パラメータ範囲の実機条件への適用性は以下のとおりである。

容器径については、大型容器（内径1.0m）と小型容器（内径0.428m）の実験を行い、容器径のスケール効果を考慮している。実験結果より、容器径で規格化した無次元水面上昇距離は、小型容器と大型容器で同一のアスペクト比条件における実験結果の観察結果から、ほぼ一致すると評価されている。添付図 1-2 の水塊到達範囲の実験相関式は、これらの実験装置のデータより整理されたものである。したがって、実機の格納容器下部領域の径は本実験装置の容器径よりも大きくなるが、実験相関式は容器のスケール効果を考慮しており、実機条件にも適用できると考えられる。

また、この実験では、圧縮空気を水張り容器の底部から供給して水蒸気爆発による気泡運動の水位上昇への影響を調査しているが、実機では必ずしも底部から気泡が成長を始め

るわけではない。しかしながら、底部から供給される気泡は一次元軸方向への運動が支配的となる一方で、実機では蒸気泡がより三次元的に運動できるため、軸方向への水位上昇を評価する観点では、この実験方法は実機と比較して保守的であると考えられる。

初期水位は、無次元初期水位を変更したケース（0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4）の実験を行っているが、実験の実水位は最大 1.4m（容器径 1.0mの場合）となる。実機条件では、実験条件の実水位より高くなると想定される。しかし、初期水位と水位上昇の関係は、容器径で規格化された無次元初期水位（容器径と初期水位の比）及び無次元水塊到達範囲（容器径と水位上昇の比）で整理される（添付図 1-2）。この無次元水位でみると実機条件は、実験範囲にあり、実機条件に適用できると考えられる。

気泡の圧力条件は、気泡圧力を変更したケース（0.5MPa, 1.0MPa, 2.0MPa）を行っている。実験結果より、圧力が大きくなると気泡が吹き抜けやすくなり、水塊が押し上げられる範囲は圧力に依存しなくなる傾向がある。このため、高圧条件（10MPa 以上）での水塊到達範囲はほぼ同じになるとされている。これより、実機での水蒸気爆発では、実験条件よりも圧力が高くなることが想定されるが、添付図 1-2 の水塊到達範囲は実機条件にも適用できると考えられる。

なお、この実験の圧力条件は実機における落下熔融炉心の重量を想定して設定されており、2.0MPa の圧力条件は実機炉心相当で約 11 t の落下熔融炉心による蒸気発生量に対応している¹。表 2-4 に示す実機を想定した解析条件では、熔融炉心の R P V 外への放出後、熔融炉心重量は数秒で約 11 t に達するが、水蒸気爆発が 1 秒前後で生じることを考慮すれば、この実験条件の設定は実機で生じる事象と同程度のオーダーであると考えられる。

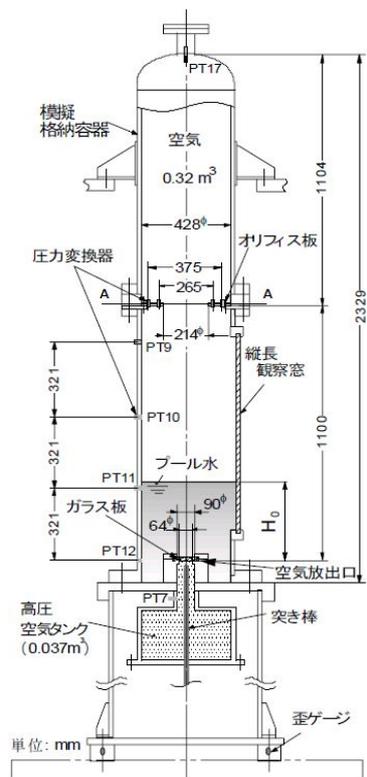
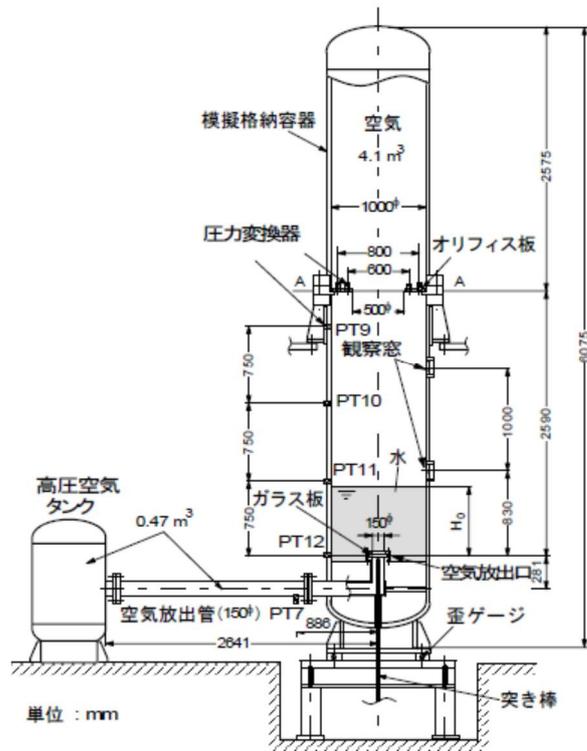
また、この実験研究は空気を対象としたものであるが、水蒸気を対象とした場合には、蒸気泡に対する凝縮効果のため、水塊の上昇と水撃力が抑制されるとする知見がある（稲坂ら, 2007）。

以上より、本実験結果による水塊運動の範囲の結果は、実機条件でも適用できると考えられる。

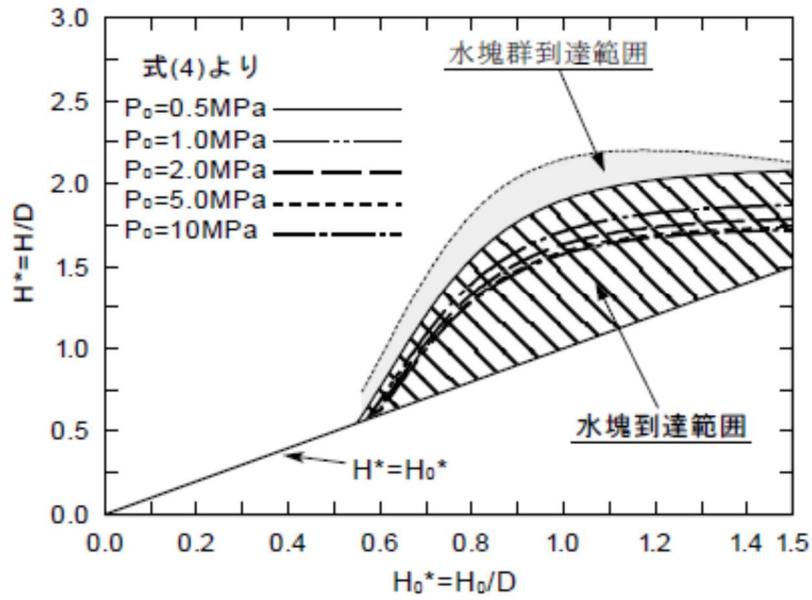
[参考文献]

- (1) 稲坂, 安達, 汐崎, 綾, 成合, 2004. 「軽水炉のシビアアクシデント時における気泡急成長による水撃力の研究」, 海上技術安全研究報告書 第4巻 第3号, p. 323-343.
- (2) 稲坂, 安達, 村田, 綾, 2007. 「軽水炉のシビアアクシデント時における蒸気急発生による水撃力」, 日本原子力学会和文論文誌 6, p. 289-297.

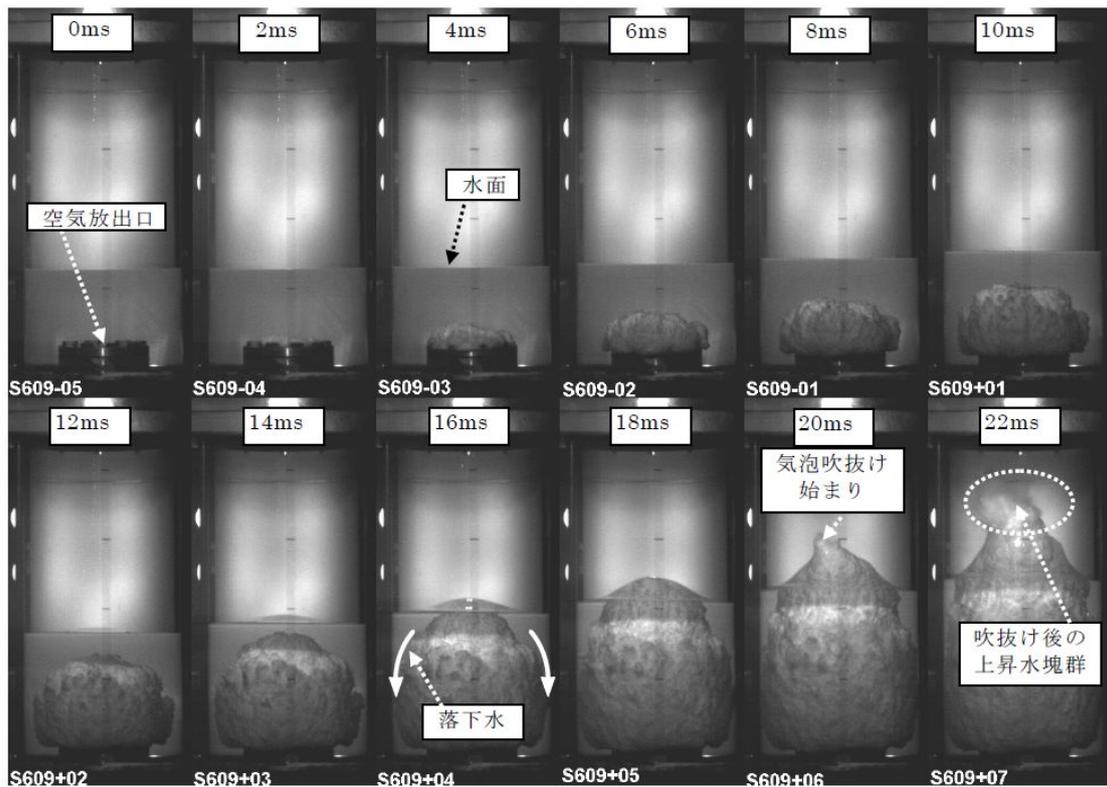
¹ 熔融炉心の潜熱及び比熱をそれぞれ 323kJ/kg, 0.526kJ/(Kg-K)として、実験体系における空気容量と同等の蒸気発生量となる熔融炉心重量を概算し、実験体系と実機の空間スケール(~1/10 スケール)の違いを踏まえて算出（稲坂ら, 2004）



添付図 1-1 水撃実験装置（上：大型容器、下：小型容器）（稲坂ら，2004）



添付図 1-2 水塊がコヒーレント性を保ったまま上昇する範囲 (稲坂ら, 2004)



添付図 1-3 気泡の成長と水塊挙動の実験結果 ($P_0=0.5\text{MPa}$, $H_0^*=0.6$) (稲坂ら, 2004)

添付2 水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較について

1. はじめに

水蒸気爆発時の発生エネルギーを議論するうえで、デブリの持つ熱エネルギーが機械的エネルギーに変換されるエネルギー変換効率は重要なパラメータであり、各研究機関で実施された水蒸気爆発実験においても、実験時に確認されたパラメータに基づきエネルギー変換効率が評価されている。また、水蒸気爆発解析において、粗混合過程、爆発過程の解析モデルの妥当性を確認するためのベンチマークの一つとして、実験時に確認されているエネルギー変換効率との比較が実施されている。

本資料では、水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較結果をまとめる。

2. 水蒸気爆発実験でのエネルギー変換効率

(1) エネルギー変換効率について

一般的には以下の式①によりエネルギー変換効率は評価されている。

$$\textcircled{1} \text{ エネルギー変換効率(\%)} = \text{機械的エネルギー} / \text{デブリの持つ熱エネルギー} \times 100$$

機械的エネルギー：試験容器内の温度、圧力挙動からの評価、構造材への荷重評価等より機械的エネルギーを評価

デブリの持つ熱エネルギー：落下させる全デブリ質量、温度、比熱からデブリの持つ保有エネルギーを評価

上式①に基づくエネルギー変換効率は、粗混合過程と爆発過程の二つのプロセスが影響するパラメータとして扱う必要がある。粗混合過程は、落下デブリ質量に対して、デブリ注入速度、プール水位等といった実験条件が、粗混合融体質量に大きく影響する。一方、爆発過程は、粗混合粒子の微細化から爆発的な伝熱挙動といった物理現象であるため、体系等の実験条件の影響は低いと考えられる。

したがって、以下の式②により定義されたエネルギー変換効率を用いることで、実験条件の影響を小さくできると考える。

$$\textcircled{2} \text{ エネルギー変換効率(\%)} = \text{機械的エネルギー} / \text{粗混合融体の持つ熱エネルギー} \times 100$$

粗混合融体の持つ熱エネルギー：温度がデブリ融点以上かつボイド率0.75%以下の領域に存在する融体質量のエネルギー

(2) TROI 実験におけるエネルギー変換効率

UO₂ デブリを用いた水蒸気爆発実験において、比較的高いエネルギー変換効率が確認

されている TROI 実験を対象に式②でエネルギー変換効率を評価した結果を添付表 2-1 に示す。

添付表 2-1 TROI 実験におけるエネルギー変換効率

	TS1	TS2	TS3	TS4	TS6	備考
式①	0.12%	0.28%	0.22%	0.35%	0.66%	参考文献(1)より
式②	0.36%	0.81%	0.54%	1.25%	2.49%	参考文献(2)より

3. 実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率との比較

実プラントの水蒸気爆発評価結果に基づき式①と式②より算出したエネルギー変換効率を添付表 2-2 にまとめる。

ここで、TROI 実験並びに実プラントの条件におけるジェット分裂長を評価した結果、TROI 実験 (TS1～TS4, TS6) の実験条件におけるジェット分裂長は約 1 m であり、プール水位は 1 m であるため、TS1～TS4, TS6 はプール底部到達までにジェットがほぼ完全に分裂すると推測される。また、ABWR プラント実機体系におけるジェット分裂長は、約 4～5 m であり、7 m 水位ではジェットが完全に分裂すると推測される。

したがって、ジェットがほぼ完全に分裂する条件となっている TS1～TS4, TS6 と ABWR プラント実機体系 7 m 水位条件について、式②によるエネルギー変換効率で比較を行うと、TS1～TS4, TS6 にて確認されたエネルギー変換効率を ABWR プラント実機体系が上回る結果となることが確認できた。

上記より ABWR プラント実機体系における JASMIN E 解析においては、同等の条件の実験と比較するとエネルギー変換率は保守的な結果を与えていることが確認できた。

添付表 2-2 ABWR プラント実機体系におけるエネルギー変換効率

	水位 7m
式①	0.8%
式②	3.0%

4. 参考文献

- (1) NEA/CSNI/R(2014)15, OECD/SERENA Project Report Summary and Conclusions
- (2) 堀田, 森田, 梶本, 丸山, 2017. 「JASMIN E Version 3 による溶融燃料-冷却材相互作用 SERENA2 実験解析」, 日本原子力学会和文論文誌 (2017)

LS-DYNA

目 次

L S - D Y N A

1. はじめに	参考 3-3
2. 適用対象事象及び適用実績	参考 3-4
3. 解析モデルと解析結果の例示	参考 3-6
3.1 計算要素	参考 3-7
3.2 境界条件	参考 3-10
3.3 材料モデル	参考 3-13
3.4 爆発源の設定方法	参考 3-19
3.5 解析フロー	参考 3-22
3.6 入出力	参考 3-23
3.7 解析結果の例示	参考 3-24
4. 解析結果の検証	参考 3-31
5. 参考文献	参考 3-38
添付 1 運動エネルギーから圧力として伝わる時の考え方について	参考 3-39
添付 2 反射波の考慮について	参考 3-42
添付 3 ペDESTAL構造応答評価における判定基準について	参考 3-48

1. はじめに

本資料は、格納容器破損防止に関する重大事故対策の有効性評価（以下、「有効性評価」と称す。）において、格納容器破損モード「原子炉压力容器外の溶融燃料 - 冷却材相互作用」（以下、「FCI」と称す。）に対して参考として示した水蒸気爆発の発生を仮定した場合の格納容器の健全性への影響評価に適用するコードのうち、LS-DYNAコードについて、

- ・適用対象事象及び適用実績
- ・解析モデルと解析結果の例示
- ・解析結果の検証

に関してまとめたものである。

なお、JASMINEコードの計算結果をインプットする必要があるが、このJASMINEコードに対する説明は別資料（解析コード（JASMINE）説明資料（参考資料））にて行う。

2. 適用対象事象及び適用実績

LS-DYNAコードは、原子炉圧力容器外において FCI による水蒸気爆発の発生を想定した場合、圧力容器の支持構造物であるペDESTALへの荷重を評価し、その健全性を確認することを目的として使用する。

(1) 適用対象事象

シビアアクシデント発生時に原子炉圧力容器の破損を想定する場合、溶融炉心・コンクリート相互作用の緩和策として、格納容器下部への水張りが実施される。原子炉圧力容器から溶融炉心が落下した場合において、この格納容器下部の冷却水と溶融炉心の接触による水蒸気爆発事象発生の可能性は、これまでの知見からも極めて低いと考えられる。しかしながら、水蒸気爆発が発生した場合についても考慮し、原子炉格納容器の健全性に対する影響を確認しておくことは、原子炉格納容器下部への水張り等の格納容器破損防止対策の適切性を確認する上でも有益な参考情報になると考える。

この炉外における FCI による水蒸気爆発発生時の評価は、水蒸気爆発解析コード J A S M I N Eにより実施し、水蒸気爆発現象に伴う流体の圧力及び運動エネルギー並びに融体デブリの振る舞いを評価する。

LS-DYNAコードでは、この J A S M I N Eコードによって得られた評価結果に基づき、水蒸気爆発発生時の爆発源の状態を入力条件として与え、流体中を伝播する圧力波がペDESTAL構造材に荷重として作用する構造応答を評価する。

(2) 適用実績

LS-DYNAコードは、ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) で開発された D Y N A 3 Dコードに基づき、リバモアソフトウェアテクノロジー社 (LSTC) が開発した汎用有限要素解析コードである^[1]。

D Y N A 3 Dコードは、重量物の構造材衝撃問題を対象として開発されており、衝撃波による非線形動的応答評価を目的とするため、陽解法による解析を採用している。LS-DYNAコードは、自動車の衝突安全解析への適用を目的として開発されており、D Y N A 3 Dと同様に、衝撃問題に対して陽解法を適用する。

LS-DYNAコードは、自動車製造分野への適用を主目的として開発されているが、時間と共に接触条件や構造物形状が変化するような非線形解析が可能であり、衝撃や爆発的燃焼による圧力伝播、構造物の塑性歪み、健全性の解析に対応している。このため、自動車産業に限らず、航空宇宙、防衛、電気機器、建設・土木分野等にも応用されており、原子炉圧力容器外において水蒸気爆発が発生した際のペDESTAL構造材への荷重応答評価にも適していると言える。

原子力分野における爆発及び爆轟に伴う衝撃荷重の構造材応答評価にLS-DYNAコードを適用した例について概要を以下に示す。

a. BWR配管における混合ガス（水素・酸素）の燃焼による配管健全性評価^[2]

BWR配管の主蒸気の放射線分解により生じる可燃性混合ガス（水素・酸素）の燃焼による配管内での爆轟を模擬した強度試験に対し、LS-DYNAコードにより試験模擬解析を実施している。LS-DYNAコードによる強度解析は、試験体の周方向ひずみを良好に再現することが確認されている。

b. 原子力発電施設等に係る構造物の爆発衝撃挙動解析^[3]

この研究は原子力発電所施設等での爆発衝撃荷重に対する構造物の堅牢性を評価するための解析モデルを構築する目的で実施されており、水中爆轟バブル挙動解析手法の確立と地中に設置された構造物の衝撃荷重に対する挙動評価手法の確立を主課題として検討されている。LS-DYNAコードによるこれらの課題に対する評価の結果、水中爆轟バブル挙動については、必要な時間スケールでの解析が適切に実施できることが確認され、地中構造物に対する堅牢性評価については、試験結果とトレース解析の比較から、爆発衝撃問題に対する解析モデルが構築可能であるとの知見が得られている。

3. 解析モデルと解析結果の例示

LS-DYNAコードは、構造物などの大変形応答を解析するための非線形動的構造解析ソフトウェアであり、静的問題から準静的な塑性加工問題、波動の伝播を考慮するような衝撃問題などの解析が可能である。時刻歴応答解析では、時間積分に中央差分による収束計算が不要な陽解法を用いて解析するため、落下・衝突のような非線形性の強い問題でも解が発散せず、安定して解が得られる。またLS-DYNAコードの使用実績としては、自動車・航空宇宙・造船などの産業で製品の安全性対応や高品質化などに幅広く活用されている。

陽解法の特徴は、着目している要素の隣接する過去の要素情報しか現在の状態に影響を与えないということである。したがって衝撃解析では、波動の伝搬速度である音速 c が重要な意味を持っており、いま着目する要素（要素サイズ Δe ）で、音速 c の影響による現象を陽解法で安定に実行するためには、時間積分の刻み幅（ Δt ）に Courant 条件と言われる制約がある。

$$\Delta t = \frac{\Delta e}{c}$$

ここで連続体が構造体の場合、ヤング率 E 、密度 ρ とすると、構造体内での音速 c は、

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

連続体が流体の場合、体積弾性率 K 、密度 ρ とすると、流体内部での音速 c は、

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

である。FCI 時の構造応答解析で取扱う連続体のおよその音速 c は、鋼材で 5000 m/s、コンクリートで 3400 m/s、水中で 1500m/s、空気中で 330 m/s である。

LS-DYNAコードでは、時間積分の刻み幅 Δt を、すべての要素で決定される時間増分の中で最小のものを自動的に用いている。

3.1 計算要素

一般的に連続体（流体・固体）を記述するための手法的な観点から分類すると、LS-DYNAコードでは以下の3種類がある。このうちALE要素を用いた手法は、流体構造連成解析手法としては、LS-DYNAコードでは最も実績があるものの一つである。各要素の概念を図3-1に示す。

(a) Euler 要素

空間に固定した座標を用い、各瞬間における速度、圧力などの物理量の変化の様子を空間座標と時間の関数として記述する。(メッシュの中を物質が移動) 流体の場合、特定箇所を追跡し、その位置を確認することが難しいことから、Euler要素を用いることが一般的である。

(b) Lagrange 要素

物質の位置、速度、圧力などの物理量の時間変化と共に座標が変形する。境界面が移動または変形しても、メッシュが追従するので主として固体に対して適用性がある。

(c) ALE 要素

Euler要素とLagrange要素の中間的な座標を用いる。物体の変形や流動とは無関係に任意に動かすことのできる参照座標系を用いて連続体の運動を記述する方法。Euler要素では移動境界を表現するには特別な工夫を必要とするが、ALE要素では、移動境界を比較的容易に表せる。

また、幾何形状から分類すると、以下の代表的な2種類がある。

(d) Solid 要素

標準的な三次元体積要素。8節点6面体Solid要素や6節点5面体Solid要素などがある。

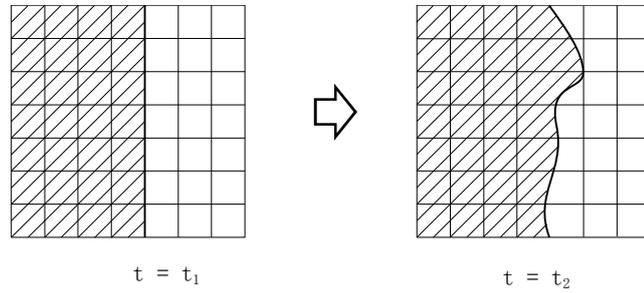
(e) Shell 要素

三次元モデルでは、3節点あるいは4節点の薄板シェル要素として、板厚方向の寸法がそれ以外の寸法よりもきわめて小さい構造物をモデル化するのに使用される。二次元モデルでは、平面ひずみ要素や軸対称要素などに使用される。

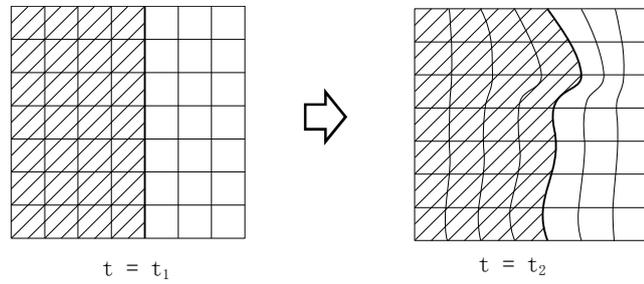
LS-DYNAコードでは、三次元のペDESTALの構造応答の観点から、構造材に力を伝える流体にはALE Solid要素、構造材にはLagrange Solid要素を用いる。構造材の各メッシュ分割は、ペDESTALの壁厚方向、周方向及び高さ方向に十分に解析精度を確保できるサイズとする。流体側のメッシュサイズは、力のやり取りの関係から構造側と同サイズにすることが推奨されていることから、流体と構造の連成境界面では同サイズとなるように設定する。

流体や固体の連続体の挙動を記述する基礎式としては、連続の式（質量保存則）・運動方程式（運動量保存則）・エネルギー保存式の3式が必要となる。この3式と物質の性質を表

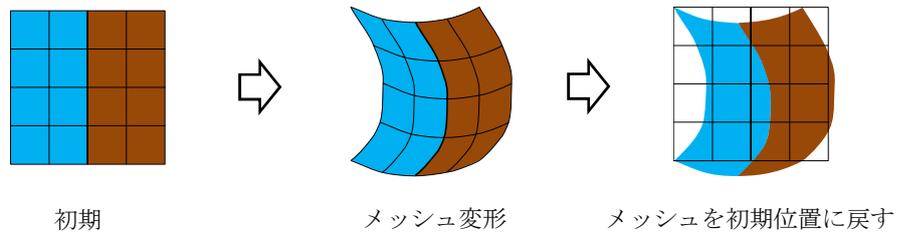
現するための状態方程式や材料構成式とが連立して解かれることにより、連続体の運動、すなわち、流体と固体の移動、変形及び動的な相互作用を求めることができる。数値解法上は、有限要素法による空間の離散化・中心差分に基づく、陽解法と呼ばれる極めて微少な時間幅で数値的に積分する方法が用いられている。



(a) Euler 要素の概念



(b) Lagrange 要素の概念



Lagrangian ステップ
通常構造解析と同様に計算する

Advection(移流) ステップ
時間を進めず、メッシュを初期位置に戻し、物理量をマッピングする

(c) ALE 要素の概念

図 3-1 各要素タイプの内容

3.2 境界条件

原子炉圧力容器を支持するペDESTAL内のリブ配置構造を考慮して、解析モデルは三次元体系とする。図 3-2 に示すようにペDESTAL基部は PCV 底部コンクリート内に埋没されており、構造的には剛体と見なせることから、図 3-3 に示す FCI 解析時の拘束条件として、PCV 底部コンクリート内に埋没しているペDESTAL鋼板は完全拘束とする。

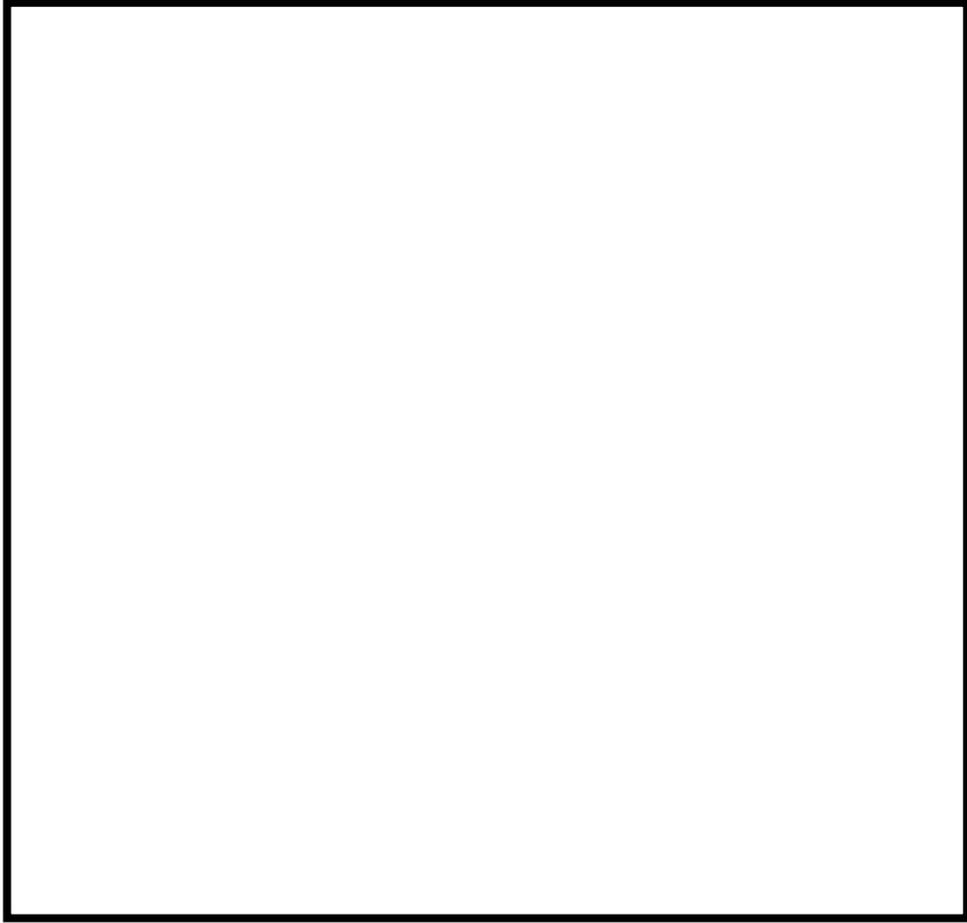


図 3-2 ペDESTALの設置構造

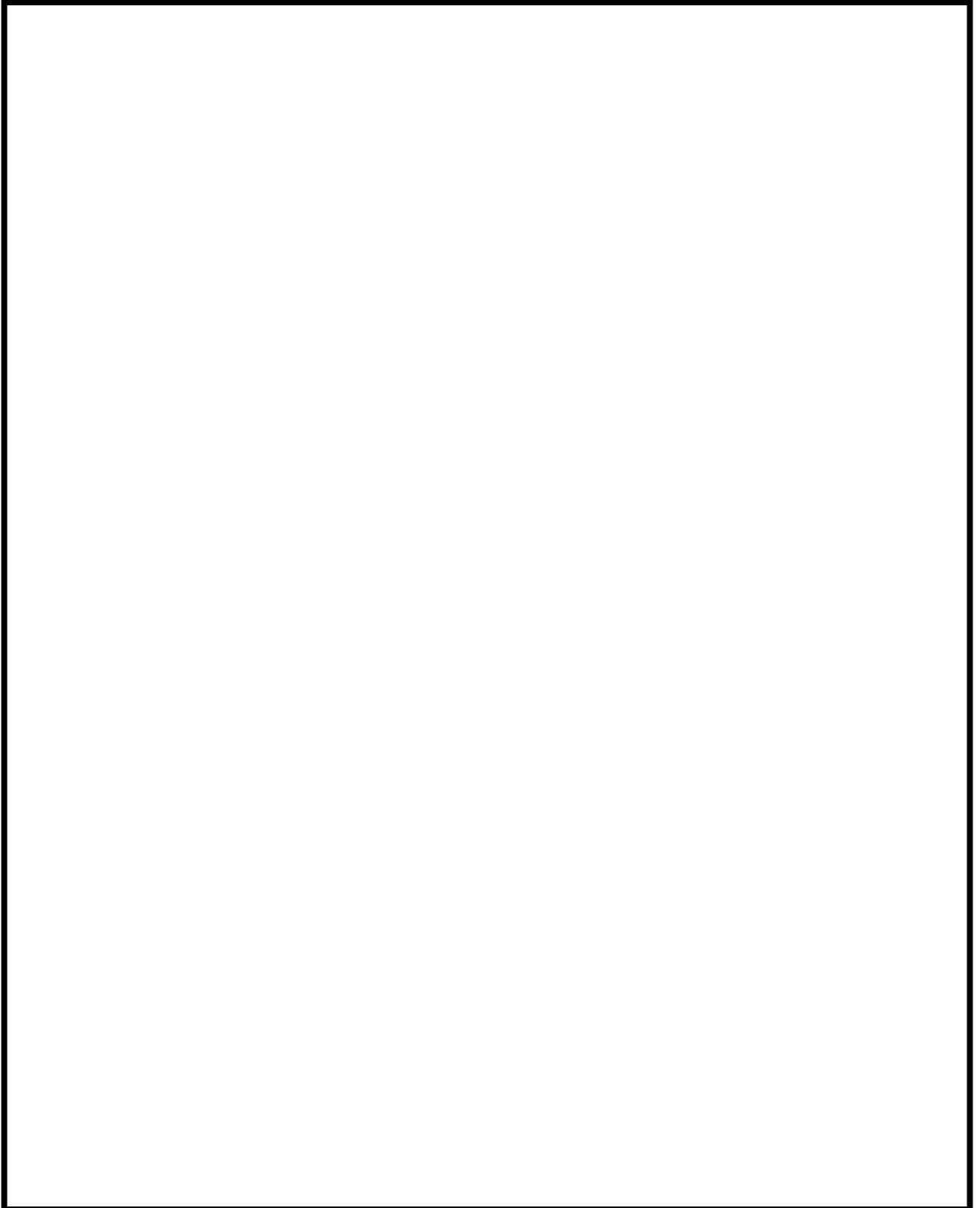


図 3-3 FCI 解析時の拘束条件

3.3 材料モデル

3.3.1 計算体系

今回の評価では三次元モデルを用い、で評価を実施している。本評価では、気相部、液相部、爆発源、鋼板及びコンクリートをモデル化しており、縦リブ鋼板も想定している。また、開口部の影響を考慮するため、CRD 搬入口高さ位置に開口部を設定している。

3.3.2 流体モデル

流体の影響を考慮する際、特定の粒子の運動を知るより、空間に固定されたメッシュ内での流動状態や時間変化を知る方が重要である。また、構造材との連成を考慮した場合、流体は移動境界を比較的容易に表せる ALE 要素を用いるのが適当である。以下に流体要素のプロパティ一覧を示す。なお、想定したセル形状を考慮し、Solid モデルを採用する。

表 3-1 要素プロパティ一覧

部位	要素
爆発源	ALE 要素 (Solid)
液相	ALE 要素 (Solid)
気相	ALE 要素 (Solid)

3.3.3 構造材モデル

構造材の変形を考慮する際、構造材メッシュの変形を考慮する必要がある。メッシュ自体の変形を考慮する場合、粒子の集まりが時間とともに、どのように動いていくか（メッシュ点がどのように動いていくか）に着目する Lagrange 手法を用いるのが適当である。以下に構造材要素のプロパティ一覧を示す。なお、厚さ方向の影響も確認するため、鋼板についても Solid モデルを採用する。

表 3-2 要素プロパティ一覧

部位	要素
コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)
鋼板	Lagrange 要素 (Solid)

3.3.4 材料モデル

表 3-3 と表 3-4 に鋼材とコンクリートの材料特性を示す。表 3-1 及び表 3-2 の設定の基
づき、解析にあたっては個別プラントの密度、ヤング率、降伏応力等を入力する。

流体から構造材に力が掛かることで応力が発生する。この応力により構造材に歪みが発
生する。このときの応力歪み曲線をコンクリート及び鋼板について図 3-4 及び図 3-5 に示
す。なお、コンクリートに関しては、最大の力を受ける圧縮方向の応力歪み曲線で代表す
る。

表 3-3 鋼材の材料特性

項目	設定
構成則	等方硬化則
破壊則	— (入力では考慮せず、解析 結果を見て判断)
密度	SPV490 の値
ヤング率	
降伏応力	
塑性ひずみ特性	

表 3-4 コンクリートの材料特性

項目	設定
構成則	等方硬化則で近似
破壊則	— (強度部材では無く考慮 しない)
密度	個別プラントの設計強度 による値
ヤング率	
降伏応力	
塑性ひずみ特性	



図 3-4 コンクリートの応力歪み曲線（設計強度：30MPa）



図 3-5 鋼板の応力歪み曲線

3.3.5 メッシュ分割

図3-6～図3-10に各部のメッシュ分割について示す。ペDESTALの構造応答の観点から、爆発荷重に対する変形挙動を精度よく模擬できるように、高さ方向及び壁厚方向に十分な分割数が確保できる寸法として要素幅 mm 程度で基本的な要素数を設定する。なお、LS-DYNAコードでは三次元の構造材を模擬するため、構造材の形状に則してより詳細な要素幅も考慮している。また、構造材に力を伝える流体（ALE 要素）のメッシュサイズは、ALE法を用いることを考慮し、境界面における伝達ロスが生じないように構造材（Lagrange要素）のメッシュサイズと同等とする。

以下に各要素のメッシュ分割例を示す。

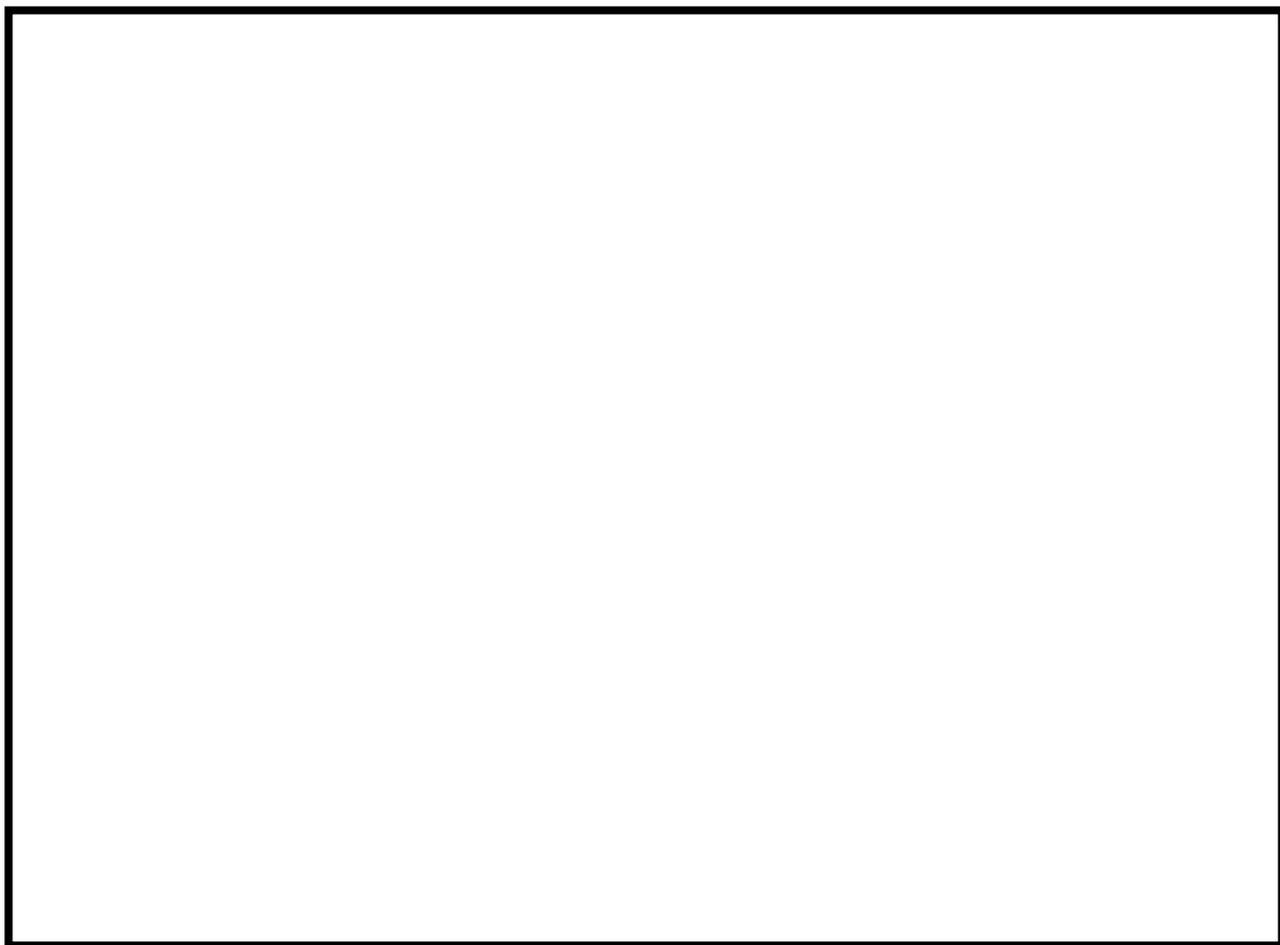


図3-6 コンクリート部のメッシュ例



図 3-7 鋼板部のメッシュ例



図 3-8 爆発源のメッシュ例



図 3-9 水相部のメッシュ例

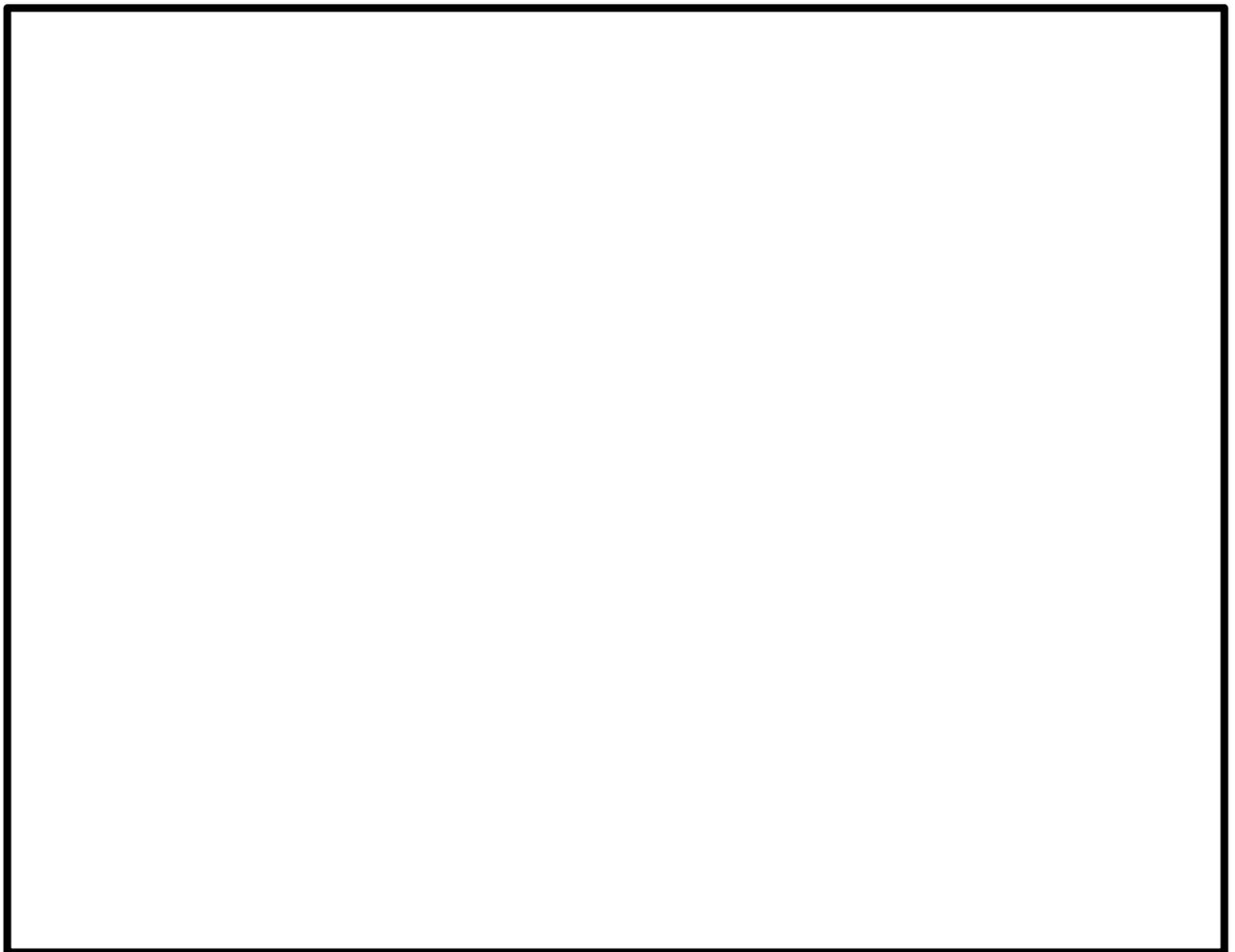


図 3-10 気相部のメッシュ例

3.4 爆発源の設定方法

爆発源の設定方法を以下に示す。

3.4.1 爆発源の形状

仮定する爆発源の形状は、JASMIN Eコードの解析による粗混合領域の分布形状に合わせて円柱状に設定する。下図 3-11 に粗混合領域の分布形状の例を示す。

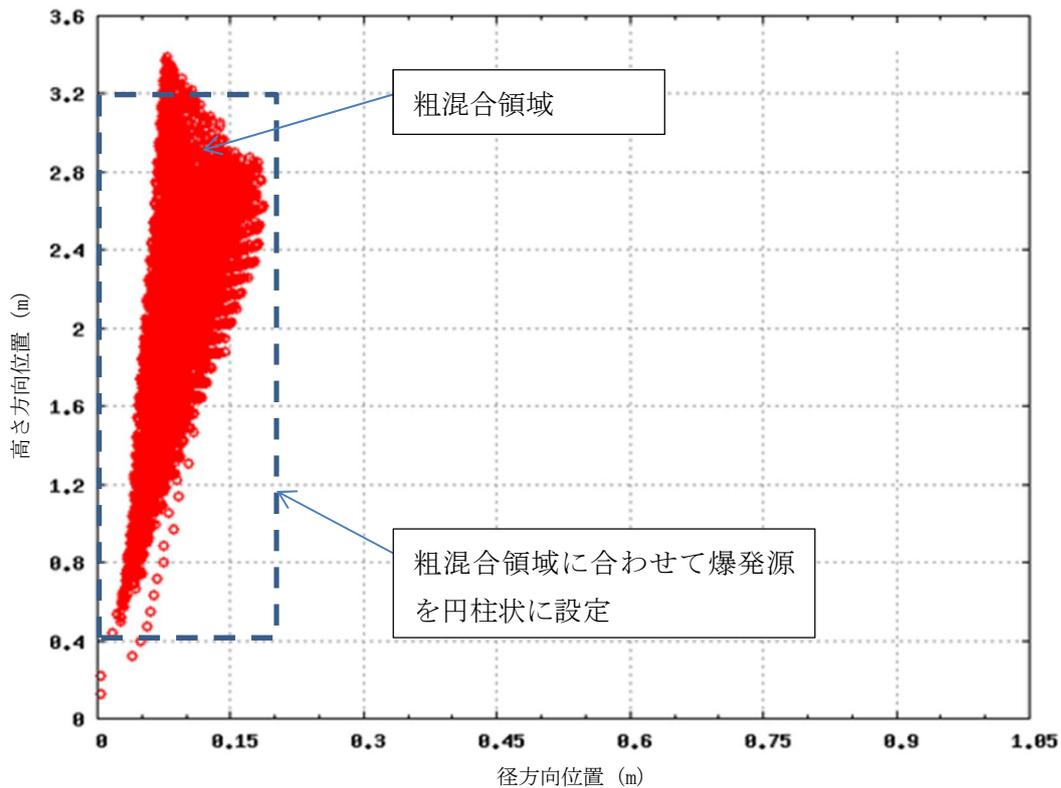


図 3-11 粗混合領域の分布形状の例

なお、粗混合粒子の分布が少ない領域は、爆発に大きく寄与しないため無視する。また、ポイド率が大きく、爆発に寄与しない上部領域も無視して設定している。

3.4.2 爆発源の圧力

実際の爆発は、起爆点より粗混合粒子が連鎖的に爆発していくため、爆発源領域の圧力履歴は、粗混合粒子位置により異なり、それぞれ個別の圧力ピークをとる。LS-DYNAコードにおいて、多数の爆発源が連鎖的に起爆する解析を模擬することは煩雑なため、

全爆発源領域で同時に爆発が発生すると仮定している。今回の評価では、各粗混合粒子位置の圧力履歴のうち、最大となった圧力値を全爆発源領域の初期圧力として設定する。下図 3-12 に粗混合領域の圧力履歴の例を示す。

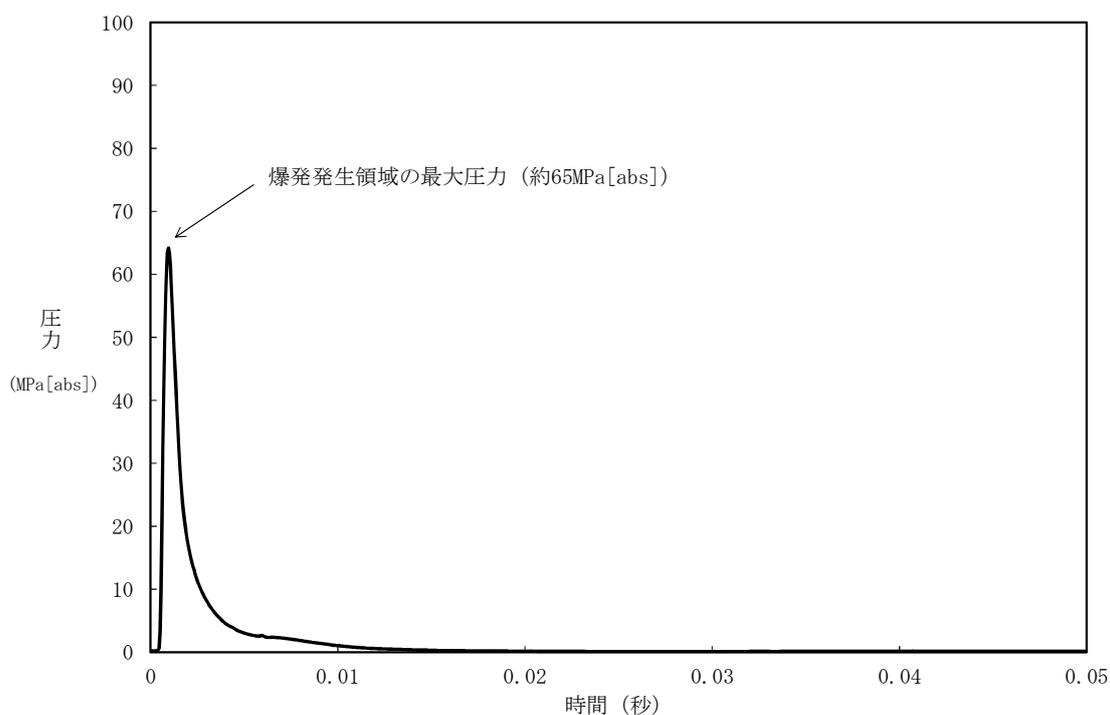


図 3-12 J A S M I N E 解析による粗混合領域の圧力履歴の例

3.4.3 爆発源の開放エネルギー

J A S M I N E コードの解析による流体の運動エネルギーは、L S - D Y N A コードで直接入力することはできない。そのため、今回の評価では、この流体運動エネルギーを再現するため、爆発源の開放エネルギーを適切に設定し、L S - D Y N A コードの解析結果としての流体運動エネルギーの最大値が J A S M I N E コードの解析の最大運動エネルギー相当となるよう調節している。これらの設定方法を図 3-13 に示す。

なお、この流体の最大運動エネルギーを保存する解析手法は、添付 1 に示す通り保守的な評価となる。

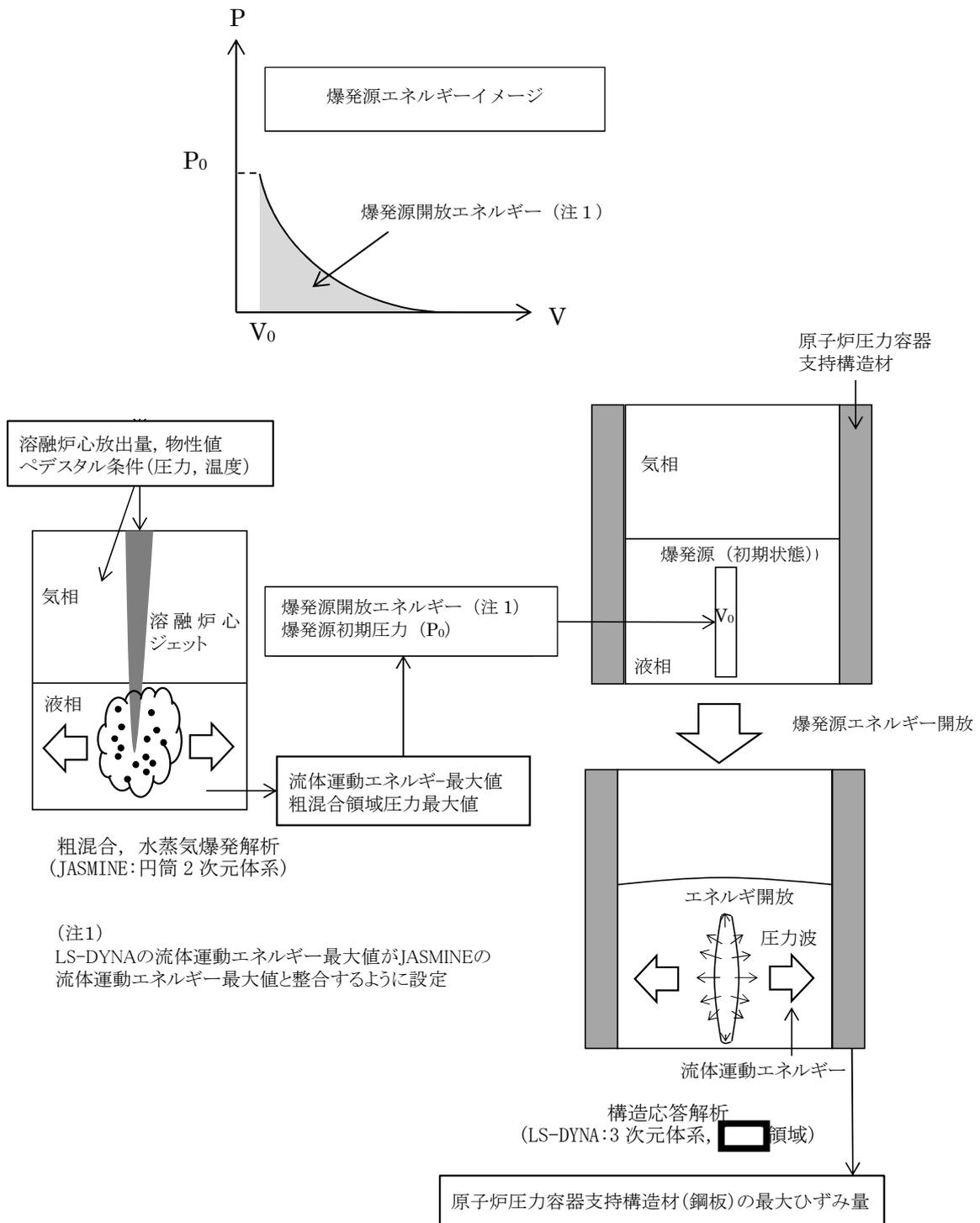


図 3-13 LS-DYNAコードにおける流体運動エネルギー設定方法

3.5 解析フロー

LS-DYNAコードの入力は、JASMIN Eコードの解析結果である粗混合領域の形状、爆発源の最大圧力、流体の運動エネルギーを入力条件として引き継ぎ、解析を実施する。なお、流体の運動エネルギーをLS-DYNAコードに直接入力することはできないため、爆発源の開放エネルギーを調節することで、JASMIN Eコードから出力される流体の運動エネルギーを再現している。

解析フローを図 3-14 に示す。

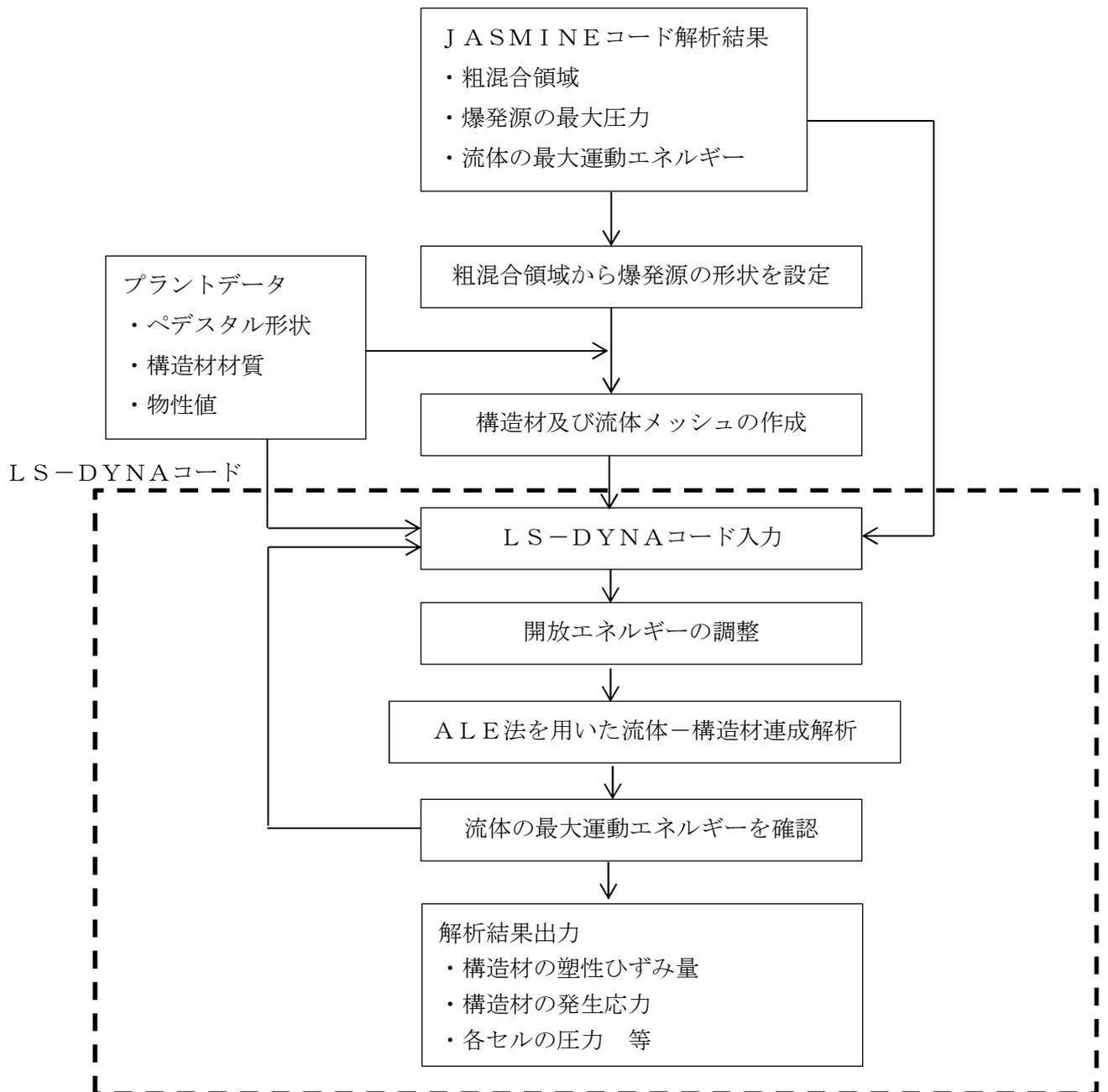


図 3-14 LS-DYNAコード解析フロー図

3.6 入出力

LS-DYNAコードの主要な入出力は図 3-14 に示した解析フロー図にも示されるとおりである。LS-DYNA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 ペDESTAL構造物の幾何形状
- ② 各構造物に対する拘束条件
- ③ 構造物及び流体の物性値
- ④ 流体及び構造材のメッシュデータ
- ⑤ 流体及び構造材の要素タイプ
- ⑥ 爆発源の形状（JASMIN Eコードによる評価結果に基づく）
- ⑦ 爆発源の初期圧力及びエネルギー（JASMIN Eコードによる評価結果に基づく）

上記をインプットデータとして、水蒸気爆発発生時の構造材衝撃荷重応答を評価し、以下の主要なアウトプットデータを得る。

- ① 構造材の塑性ひずみ量
- ② 構造材の発生応力
- ③ 各セルの圧力

3.7 解析結果の例示

代表プラントの解析入力条件と解析結果について例示する。

(1) 解析モデル及び境界条件

LS-DYNAコードによる解析モデルについて図 3-15 に示す。この図に示す通り、気相部、液相部、爆発源、鋼板、コンクリート及び縦リブ鋼板を模擬している。拘束条件については、図 3-15 に示す△で示したコンクリートで埋設されている部分は全方位で拘束されているとし、△で示したペDESTAL頂部、液相底面（ペDESTAL床面）、気相頂部は、Z方向のみ拘束されているとした。

模擬する部位毎の要素タイプと要素数について、表 3-5 に示す。

表 3-5 要素分割の詳細

部位	要素	要素数
爆発源	ALE 要素 (Solid)	
液相	ALE 要素 (Solid)	
気相	ALE 要素 (Solid)	
コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)	
鋼板	Lagrange 要素 (Solid)	

(2) 材料物性

代表プラントのペDESTALの構成材料（充填コンクリート及び鋼板）の密度、ヤング率、ポアソン比を表 3-6 に示す。また、これらの構造材の応力歪み曲線については、図 3-4 及び図 3-5 に示すとおりである。

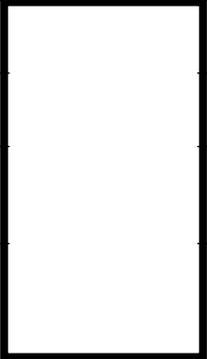
表 3-6 ペDESTALの構成材料の物性値

材料	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (Pa)	ポアソン比
充填コンクリート			
鋼板			

(3) 爆発源の条件

爆発源の仕様を表 3-7 に示す。

表 3-7 爆発源の仕様

項目	値	設定根拠
初期半径		J A S M I N E コード解析結果の粗混合粒子の空間分布に基づいて設定
初期体積		
最大圧力 (初期圧力)		J A S M I N E コード解析結果の爆発源の最大圧力より設定
流体の運動エネルギー*		J A S M I N E コード解析結果の流体の運動エネルギーの最大値を再現する値を設定 J A S M I N E コード解析結果に基づく値

*) L S - D Y N A コードへの入力値ではなく、開放エネルギーの調整の結果として確認される

(4) 解析結果

(1) ~ (3) の入力条件に基づき、解析を実施した結果について、爆発発生から 0.01 秒後の内外鋼板の塑性ひずみの分布及び内外鋼板の発生応力が最大となる位置での応力の時刻歴を図 3-16 及び図 3-17 にそれぞれ示す。また、発生応力が最大となる時間で応力分布を内側鋼板及び外側鋼板について、図 3-18 及び図 3-19 にそれぞれ示す。

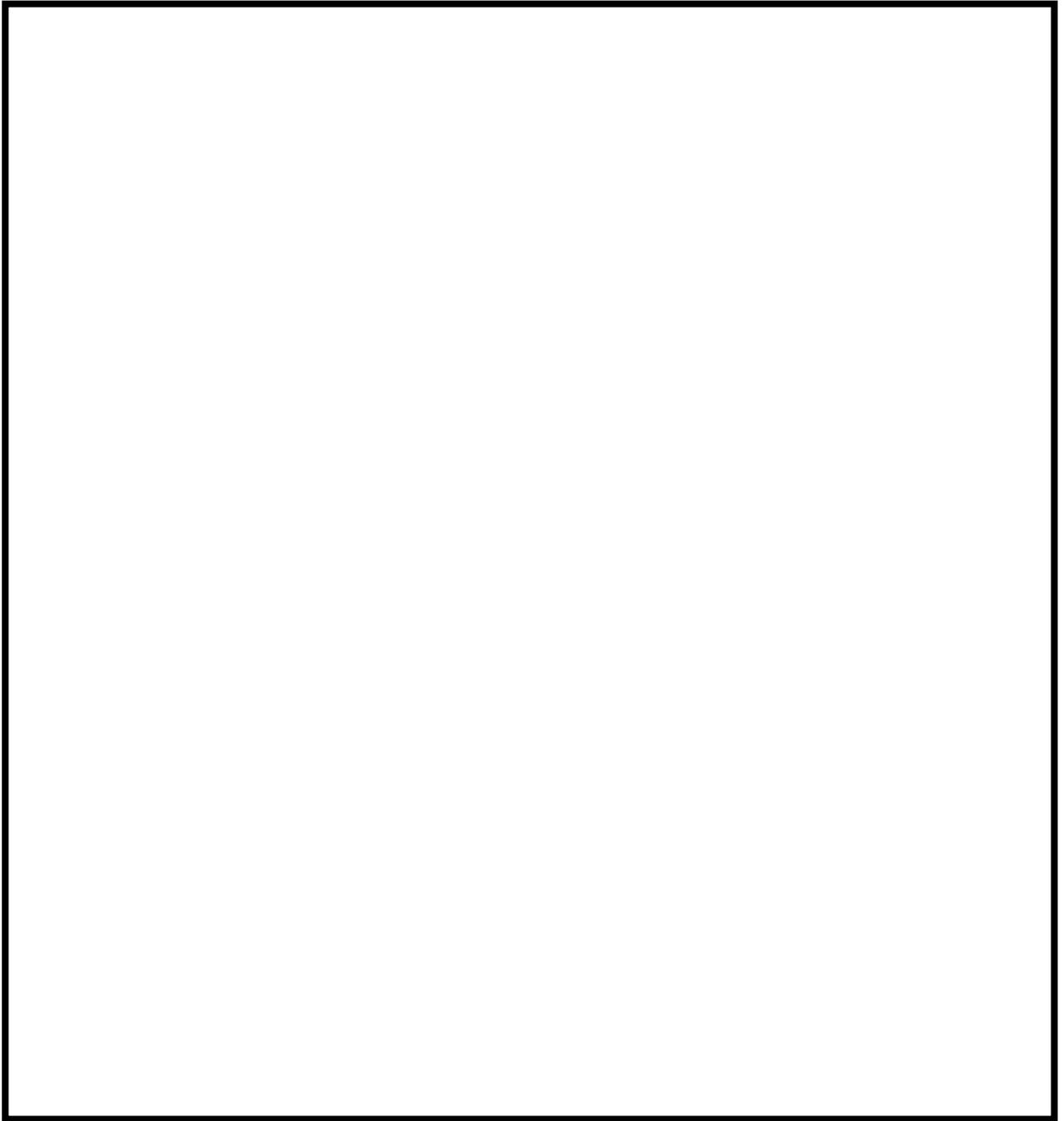


図 3-15 代表プラントのLS-DYNAコードの解析モデル

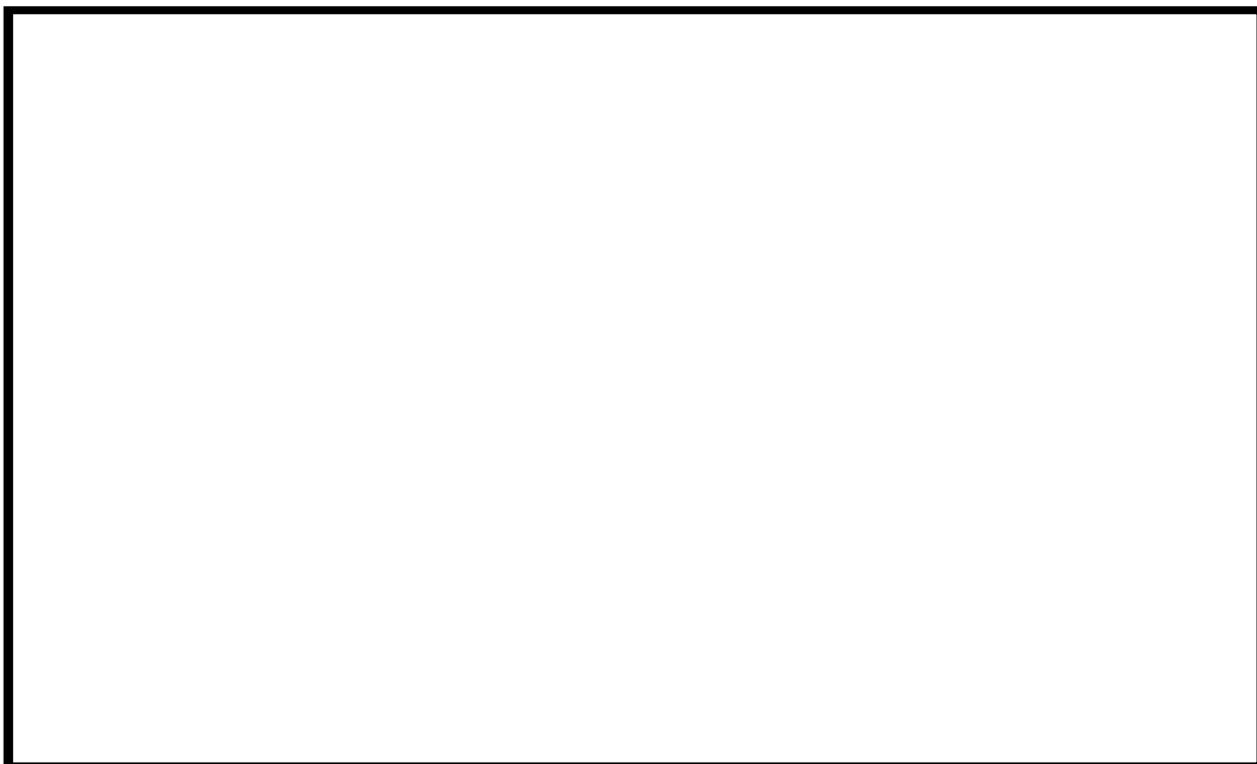


図 3-16 爆発発生から 0.01 秒後の内外鋼板の塑性ひずみの分布
(上：内側鋼板，下：外側鋼板)

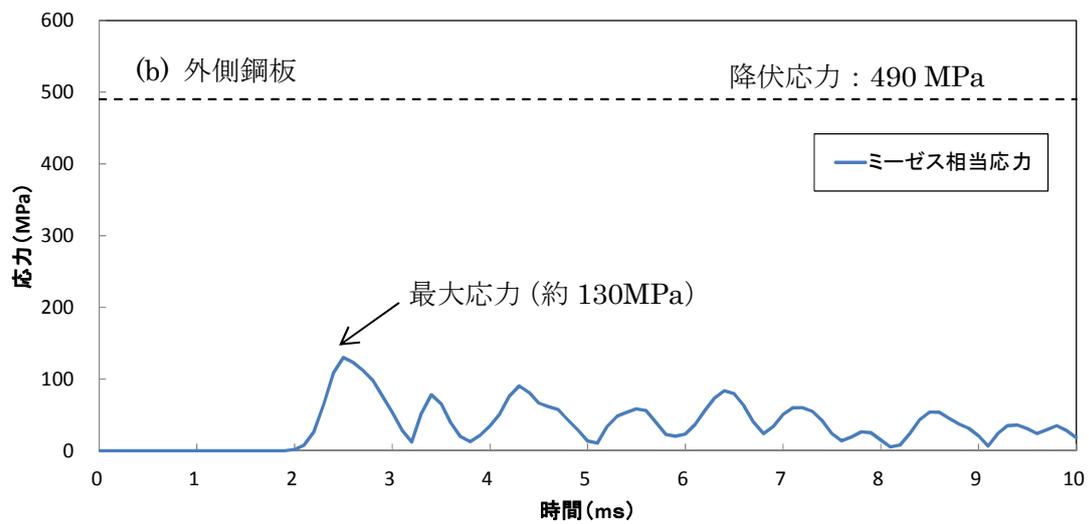
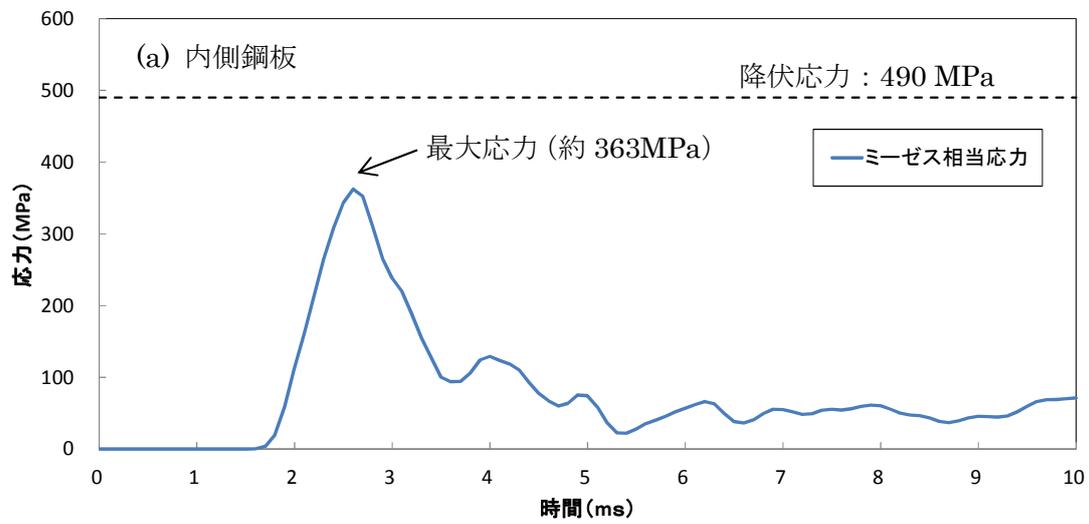


図 3-17 内外鋼板の発生応力が最大となる位置での応力の時刻歴
(上：内側鋼板，下：外側鋼板)

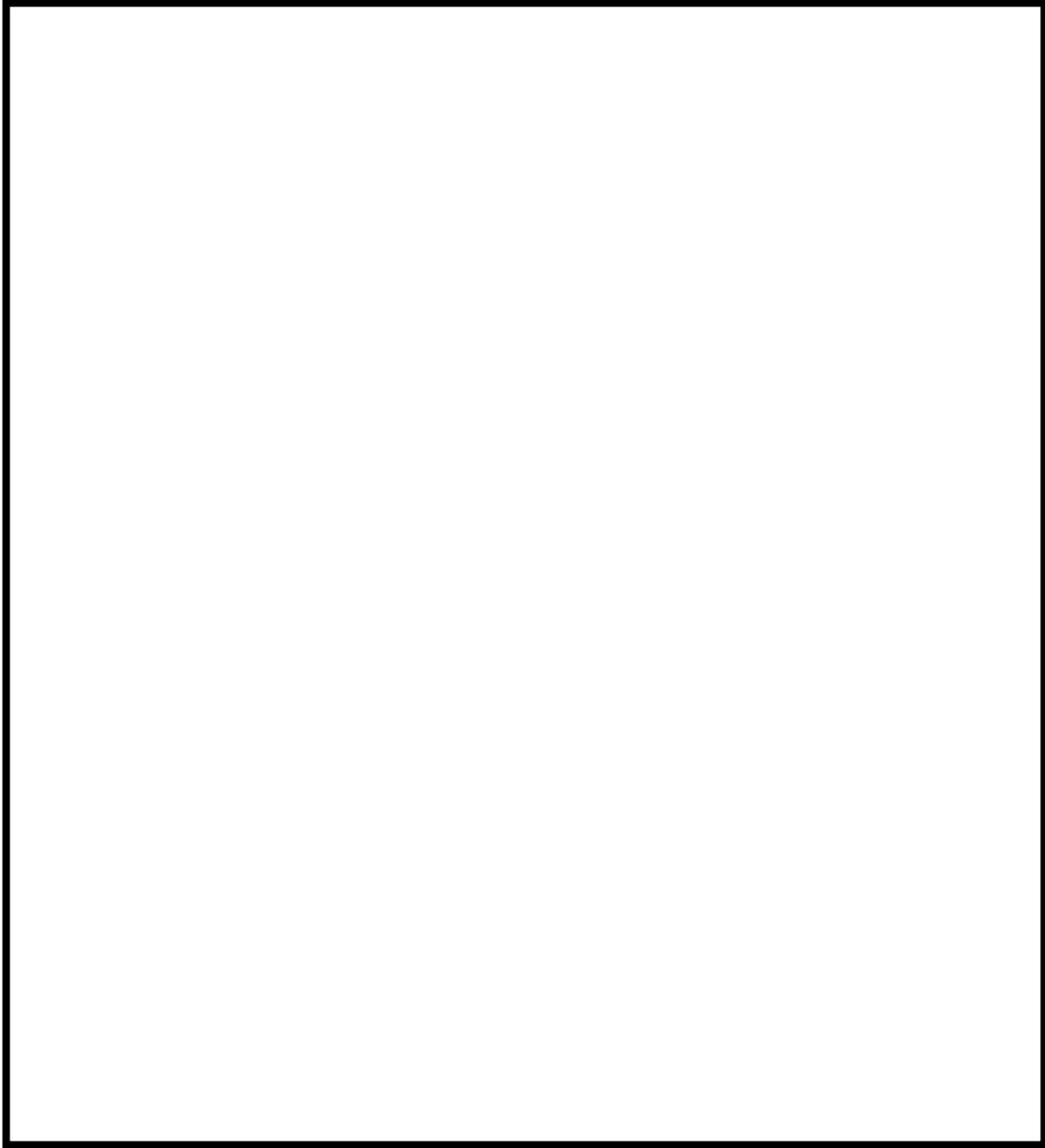


図 3-18 発生応力が最大となる時間での応力分布（内側鋼板）

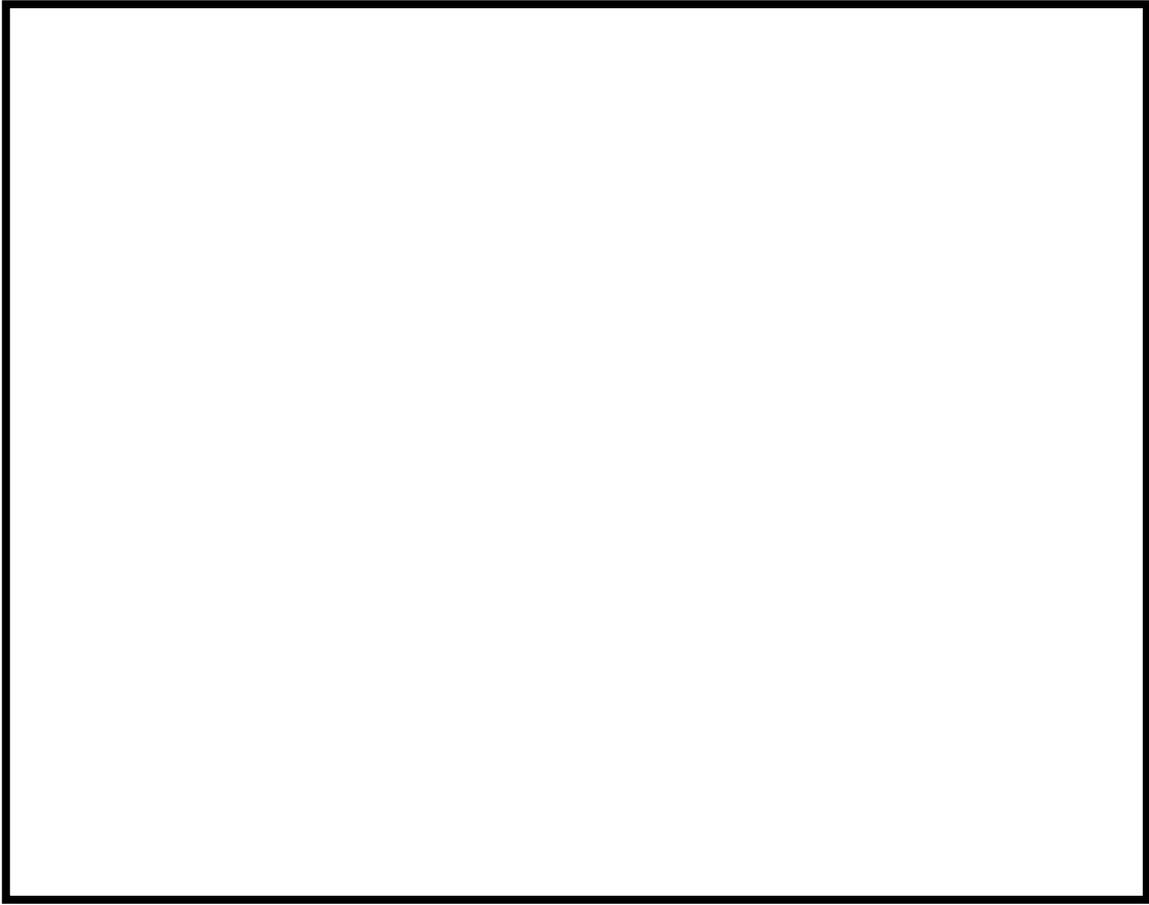


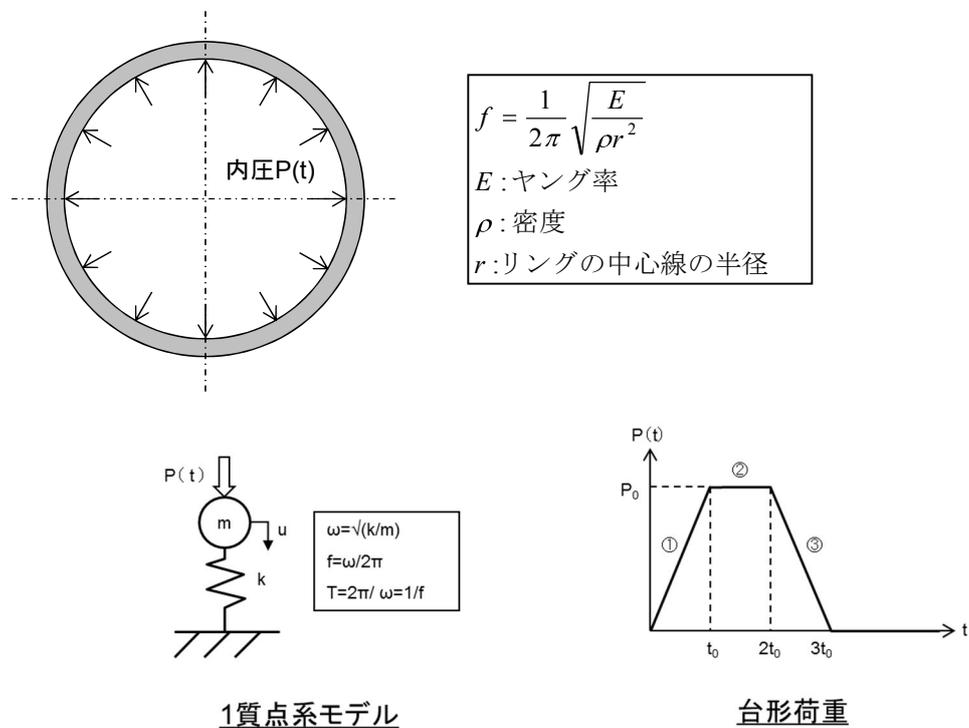
図 3-19 発生応力が最大となる時間での応力分布（外側鋼板）

4. 解析結果の検証

本章では、LS-DYNAコードを用いた解析解と理論解の比較検証結果を示す。LS-DYNAコードを用いたペDESTALの構造応答解析は、鋼板、放射状リブ及びコンクリート部を三次元ソリッド要素でモデル化して実施していることから、検証はペDESTAL構造とはほぼ同形状をモデル化したソリッド要素とする。

(1) 理論解との比較

連続体要素を扱う動的解析の基本的な例題として、リング（円環）の面内振動を取り上げた。衝撃荷重が作用する構造物の応答では、図 4-1 に示すように構造物の固有周波数 f が大きく関係し^[4]、弾性範囲では図 4-1 に示されるような動的倍率（静的変位に対する倍率）の理論解が与えられる^[5]。



時間区分	荷重の式	動的倍率 (=動的変位, u /静的変位, δ_{st})
① $0 \leq t \leq t_0$	$P(t) = \frac{P_0}{t_0} t$	$\frac{u}{\delta_{st}} = \frac{t}{t_0} - \frac{\sin \omega t}{\omega t_0}$
② $t_0 \leq t \leq 2t_0$	$P(t) = P_0$	$\frac{u}{\delta_{st}} = 1 + \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$
③ $2t_0 \leq t \leq 3t_0$	$P(t) = \frac{P_0}{t_0} \cdot (3t_0 - t)$	$\frac{u}{\delta_{st}} = 3 - \frac{t}{t_0} + \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - 2t_0) + \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$
④ $3t_0 \leq t$	$P(t) = 0$	$\frac{u}{\delta_{st}} = \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega (t - 3t_0) + \sin \omega (t - 2t_0) - \sin \omega t \}$

図 4-1 衝撃荷重に対する応答（動的倍率）

図 4-2 に解析モデルを示す。リング形状は内半径 m, 外半径 m で解析モデルは対称性から 1/4 モデルとした。拘束条件としてリング周方向端部は鏡面对称, 径方向には自由で, 高さ方向は片側が固定されている。計算に用いた材料物性, 内圧の最大値は以下の数値を用いた。図 4-2 に示す圧力衝撃荷重履歴は, 最大圧力荷重を 1 としたときの荷重比の履歴として表している。

縦弾性係数 E : (MPa)

質量密度 ρ : (kg/m^3)

ポアソン比 ν : (-)

内圧 P_0 : 1.0 (MPa)

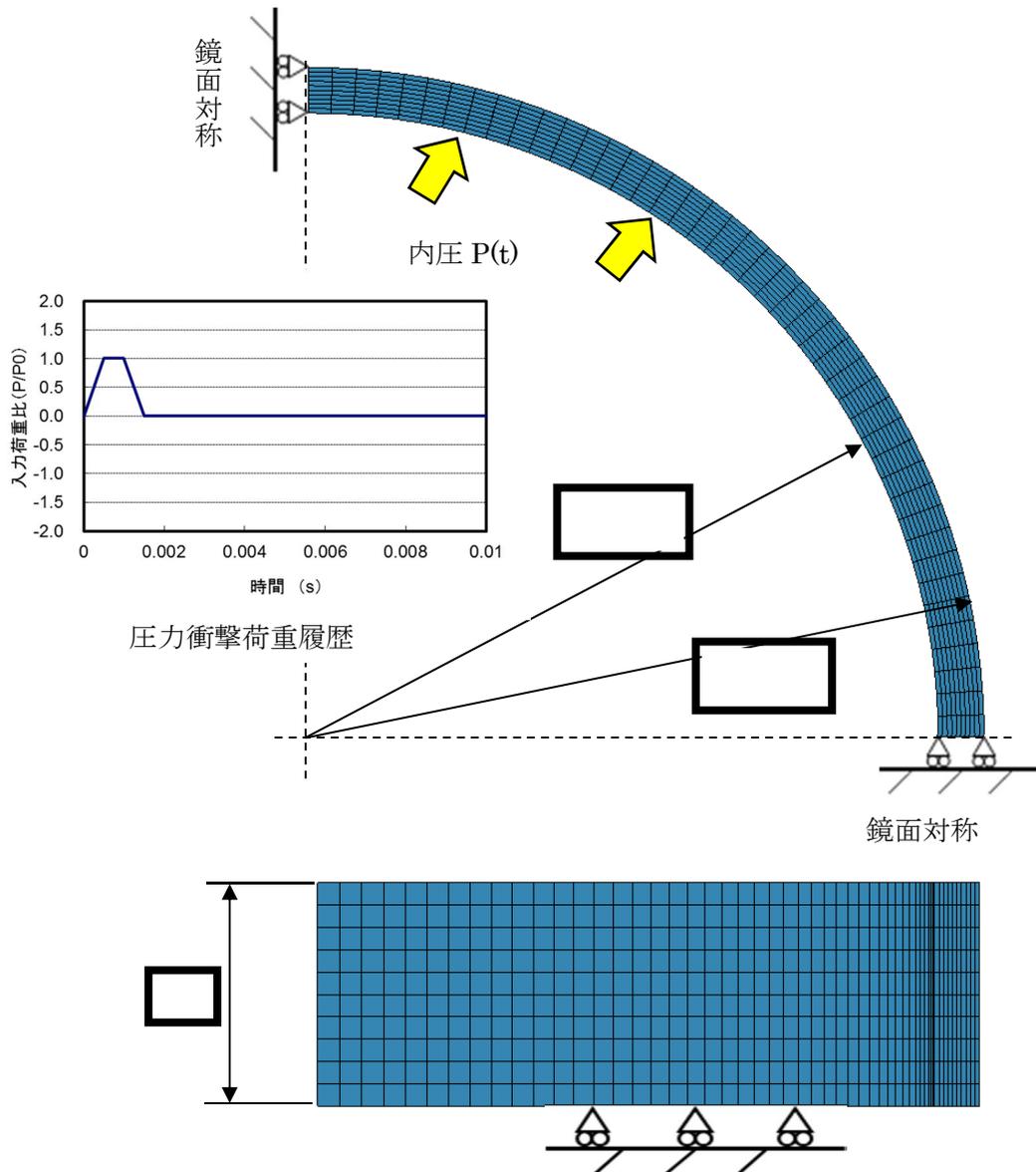


図 4-2 解析対象モデル

(a) 円形リングの面内振動の固有振動数

参考文献[4]より円形リングの固有振動数の理論解は、表 4-1 に示すように 283.80Hz である。

表 4-1 円形リングの固有振動数（理論解）

項目	
縦弾性係数 E (MPa)	
ポアソン比	
密度 (kg/m ³)	
固有周波数 (Hz)	283.80
周期 T (s)	3.52×10^{-3}

LS-DYNAコードの固有値計算値は、図 4-3 に示すように 283.37Hz であり、誤差 -0.15%で理論解と良く一致している。

LS-DYNA eigenvalues at time 1.00000E-0

Time = 283.37

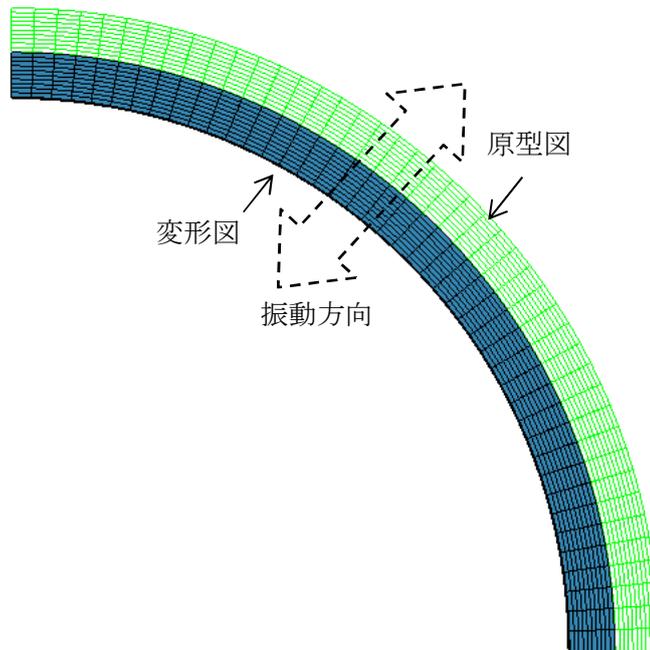


図 4-3 LS-DYNAコードの固有値解析結果
(径方向に振動する固有値モード)

(b) 台形荷重に対する応答

次に参考文献[5]による動的倍率の理論解と解析解を比較する。入力する衝撃荷重の条件を図4-2に示すような台形荷重で時間 t_0 は 0.5ms, 最大荷重 P_0 は 1MPa とした。理論解による最大動的倍率は 1.505 倍である。

LS-DYNAコードによる動的解析結果のリング内面位置での時刻歴変位を理論解とあわせて図4-4に示す。LS-DYNAコードの動的解析結果による最大動的倍率は 1.514 倍で、理論解との誤差 0.6% と良く一致しており、衝撃荷重に対する問題に LS-DYNAコードを用いることは妥当である。

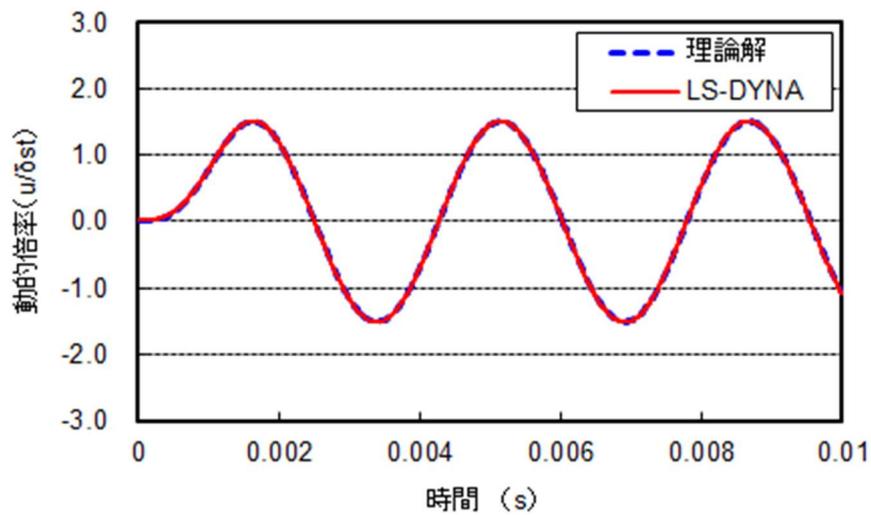


図 4-4 動的倍率の理論解と LS-DYNAコードによる解析結果の比較

(2) メッシュ分割の感度解析

今回の FCI 時の RPV ペデスタルの構造評価では、構造体を模擬する Lagrange Solid 要素（要素幅約 mm），流体を模擬する ALE Solid 要素（要素幅約 mm）を設定している。

ここで、設定したメッシュ分割が適切なのかを確かめるために、ペデスタル壁の一部を模擬した円環モデルにてメッシュ分割数の異なる二つのモデルに対して動的解析を行い、解析結果を比較した。図 4-5 に検討した円環モデルの概要，図 4-6 に解析結果の比較を示す。図 4-6 に示すように、FCI 時の設定した要素サイズ（モデル 1）と各要素辺長さを 1/2 とした詳細モデル（モデル 2）の内外壁面における径方向変位の数値誤差^{*)} は内外面で+4%，周方向応力の解析結果の数値誤差は内面で+3%，外面で+5%であり、解析結果に対して影響を与えるような大きな差は無く、メッシュ分割は妥当である。

*) 数値誤差の定義は、 $(\text{モデル 1} - \text{モデル 2}) / \text{モデル 2}$

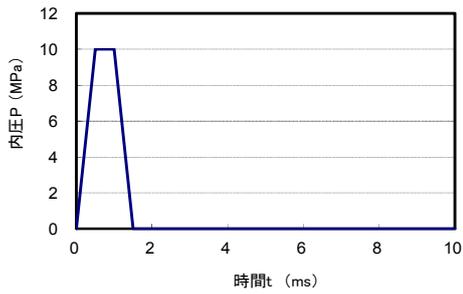
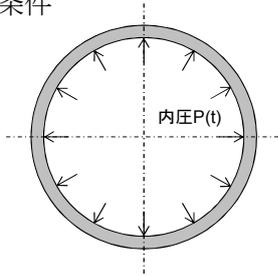
+ (プラス) は、モデル 1 の方が解析結果の数値が大きいことを示す。

検討した円環の概略寸法
 内径： ϕ [] m
 壁厚： t [] m
 高さ： h [] m

検討した円環の物性
 ヤング率： E [] Pa
 密度： ρ [] kg/m³
 ポアソン比： ν []

	モデル 1 (FCI 評価時と同等の 要素サイズ)	モデル 2 (FCI 評価時の約 1/2 の 要素サイズ)
要素分割数	[]	
横断面		
縦断面		

荷重条件



FCI と同程度の荷重作用時間

図 4-5 要素サイズの比較検討に用いた円環モデルの概要

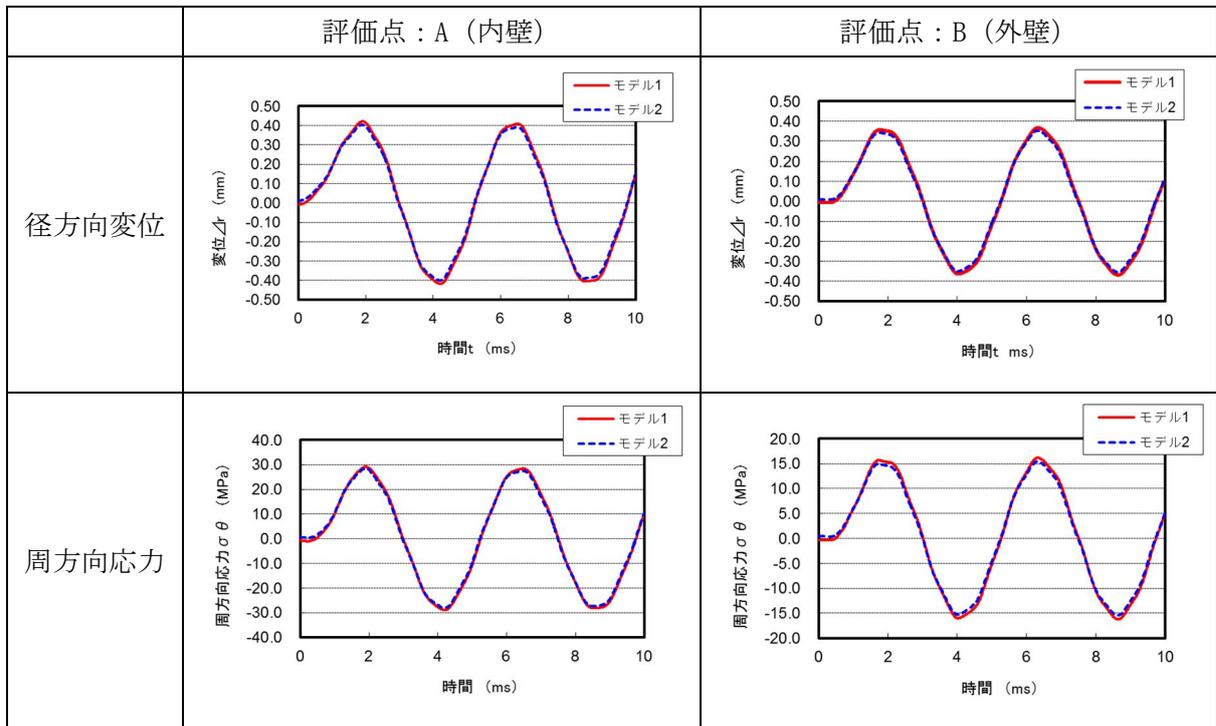
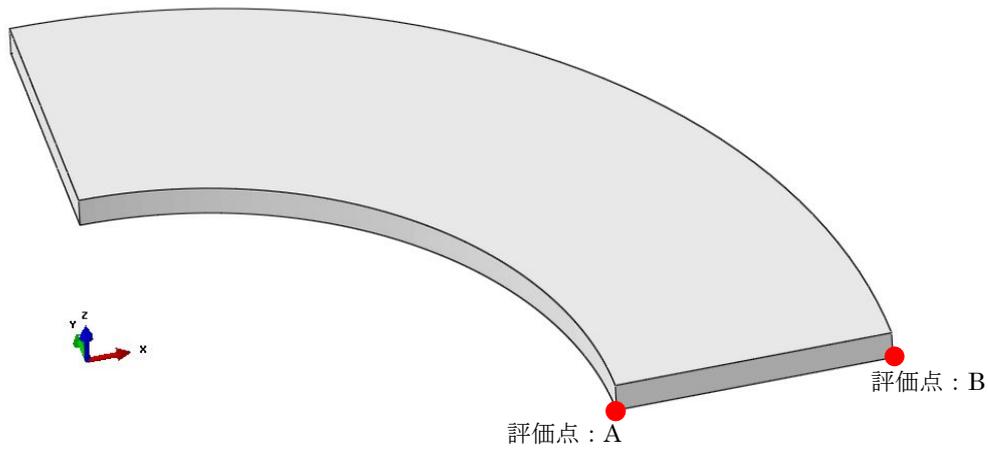


図 4-6 要素サイズの異なるモデルの動的解析結果の比較

5. 参考文献

- [1] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA KEYWORD USER' S MANUAL VOLUME I, 2007
- [2] 「BWR 配管における混合ガス（水素・酸素）の燃焼による配管損傷防止に関するガイドライン（第3版）」, 平成22年3月, 日本原子力技術協会
- [3] 「原子力発電施設等に係る構造物の爆発衝撃荷重挙動解析」, 平成20年11月, 原子力安全基盤機構
- [4] 「新版 工業振動学」, チモシエンコ, pp.428 ~ pp.429, 1977年1月, コロナ社
- [5] 「基礎からの衝撃工学」, 石川, pp.86 ~ pp.87, 2008年3月, 森北出版

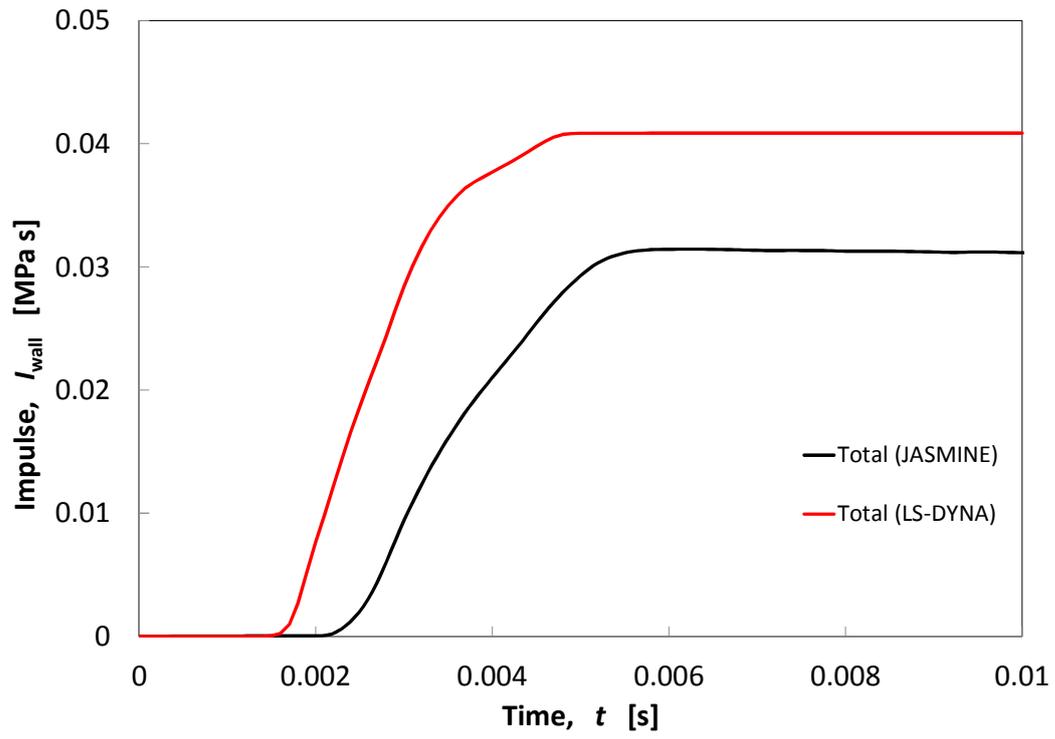
添付1 運動エネルギーから圧力として伝わる時の考え方について

3.4節に示したように、LS-DYNAコードの評価は、JASMINEコードの解析結果に基づき設定した水蒸気爆発時の流体の最大運動エネルギーに基づいて実施している。すなわち、LS-DYNAコードの評価での水蒸気爆発時の流体最大運動エネルギーがJASMINEコードの評価における全領域の流体運動エネルギーの最大値と同等となるように設定している。これは、水蒸気爆発発生時には熔融デブリからの熱エネルギーが、爆発による圧力波を介して流体側に運動エネルギーとして伝わりこれが構造材のペDESTAL壁に作用するためであり、この運動エネルギーの最大値を解析条件としてLS-DYNAコードの評価に引き渡すことにより、ペDESTALの構造健全性を適切に評価できると考えられるためである。

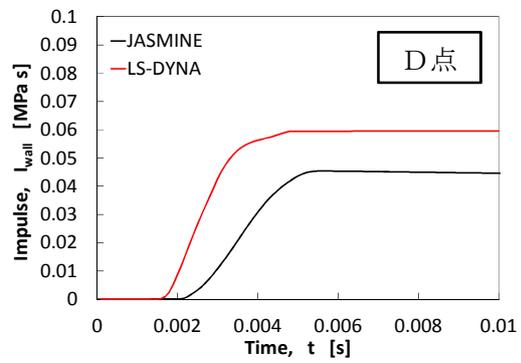
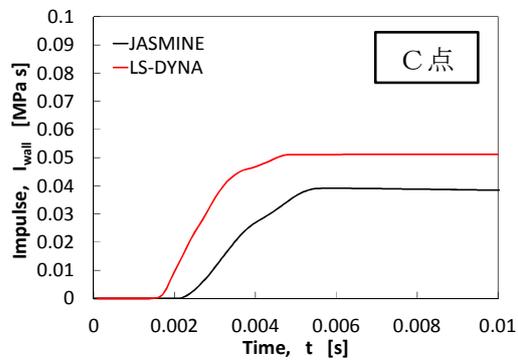
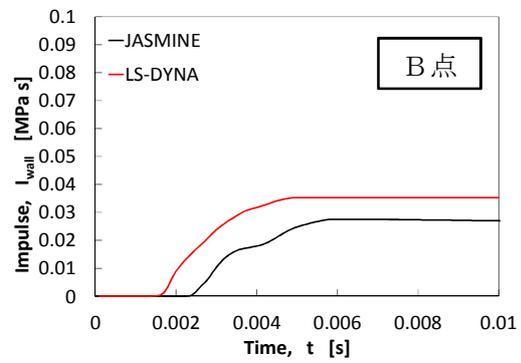
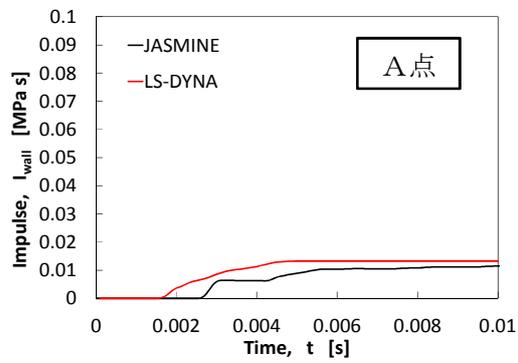
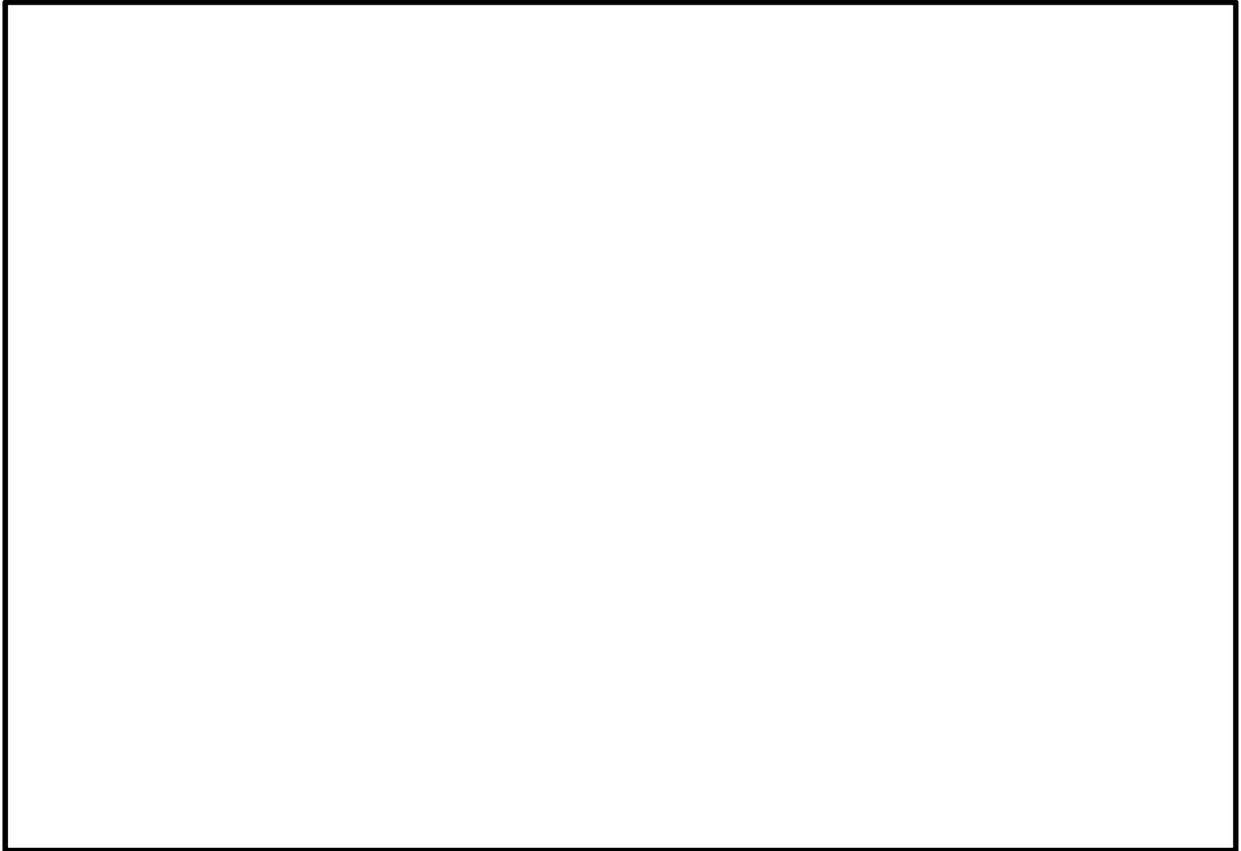
上記の考え方の妥当性を確認するために、JASMINEコードの解析による水蒸気爆発時の壁面力積履歴とLS-DYNAコードの解析における壁面力積履歴を比較した。添付図1-1に示すとおり、LS-DYNAコードの解析における壁面力積履歴はJASMINEコードの解析よりも大きく、解析条件として保守的であることが確認できる。

また、爆発源の形状については、3.4節に示したように、JASMINEコードの解析による粗混合領域の分布形状に合わせて円柱状に設定している。LS-DYNAコードの解析では、円柱状に設定した爆発源の領域の中で、JASMINEコードの解析の結果、最も大きくなる圧力を爆発源全体の初期圧力として設定しており、構造応答評価が保守的となるように配慮している。

一方で、爆発源の位置及び形状に関して、水相部の底部付近の小さな領域を爆発源として設定するよりは、3.4節に示した円柱状の爆発源は、その上部が水面に近い場合、爆発源のエネルギーが水面より上方の気相部に伝搬しやすいと考えられる。添付図1-2には、ペDESTALの側壁に隣接する各軸方向位置における力積履歴について、JASMINEコードの結果とLS-DYNAコードの結果を比較した。この図に示されるように、水面以下の力積について、軸方向高さが高い位置の力積はLS-DYNAコードの方がやや大きいものの、下層部と比較してJASMINEコードとの差異が小さくなっていることが分かる。このように、爆発源の形状を円柱状として設定することにより、爆発源のエネルギーの一部が気相部に伝搬されやすくなり、軸方向高さが高い位置では、LS-DYNAコードの力積が小さくなりやすい可能性があるものの、全体としては、JASMINEコードの力積履歴と比較して保守的であり、爆発源を円柱状とした場合であっても、LS-DYNAコードの解析条件の保守性を確認できる。



添付図 1-1 水蒸気爆発による壁面力積履歴の比較



添付図 1-2 ペデスタル側壁の局所位置における力積のコード間の比較

添付2 反射波の考慮について

LS-DYNAコードは非線形動的構造解析ソフトウェアであり、時刻歴応答計算では陰解法を採用した有限要素法解析ツールとは異なり、収束計算を必要としない陽解法を採用しているため、特に爆発荷重・衝撃荷重のような非線形性の強い問題を扱うことが可能である。

今回のFCI時のRPVペDESTALの構造応答は、構造体を模擬するLagrange要素（要素幅約 mm）と流体を模擬するALE要素（要素幅約 mm）を設定し、両者の相互作用による流体-構造連成解析によって計算している。

Lagrange要素の幅は、ペDESTALの構造応答の観点から、爆発荷重に対する変形挙動を精度よく模擬できるように、壁厚方向に十分な分割数が確保できる寸法として設定したものである。一方、ALE要素は、Lagrange要素との力のやり取りの関係からLagrange要素と同等の設定をすることが推奨されており、要素幅を mmと設定している。

なお、一般的に陽解法では、荷重等の伝播速度と要素サイズから自動的に時間刻みを計算することで、解析の精度を確保している。

したがって、今回の解析体系においても、要素サイズ、時間刻みは適切に設定されており、流体-構造間、及び構造体内部での圧力伝播や反射の影響については適切に模擬できているものと考えている。

ここで、反射波の影響確認を目的として、単純なLagrange要素のモデルにパルス状の荷重を負荷した場合の構造物内部の応力履歴を調査した。解析体系と荷重条件を添付図2-1に示す。

添付図2-1に示す条件で圧力波の伝播挙動を解析した結果として、代表点のLagrange要素の応力時刻歴を抽出した結果を添付図2-2に、時刻毎の応力分布を添付図2-3に示す。

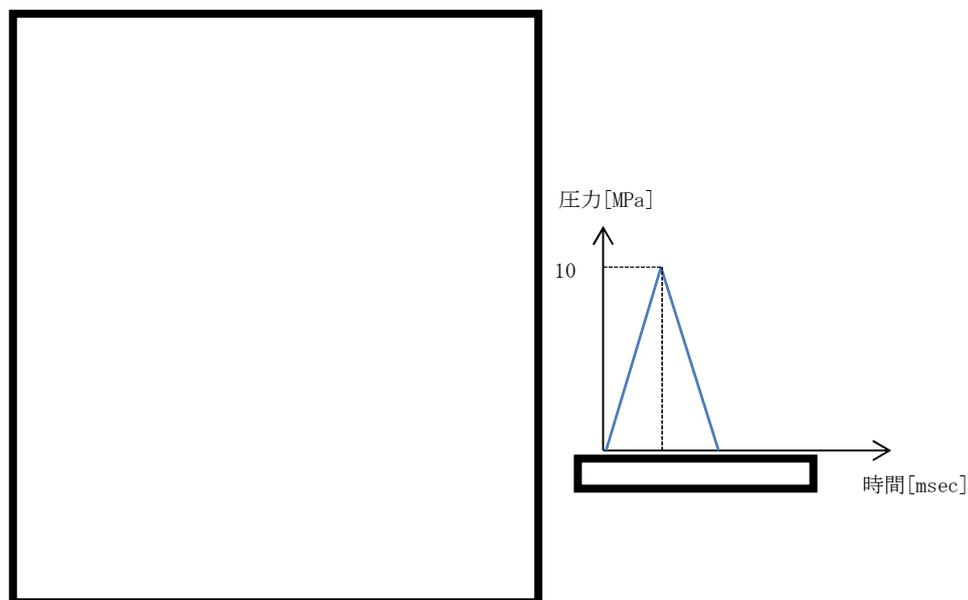
添付図2-2に示す通り、圧力波の進行と反射の影響により、要素が受ける応力の時刻歴は圧縮応力と引張応力が周期的に変動しており、境界面で圧力波の反射が考慮されていることを確認した。

また、同様のモデルを用いて反射波の重畳の効果についても確認した。解析モデルと荷重条件を添付図2-4に示す。添付図2-4に示す条件で圧力伝播挙動を解析した結果として、圧力測定点のLagrange要素の圧力時刻歴を抽出した結果の比較を添付図2-5に示す。

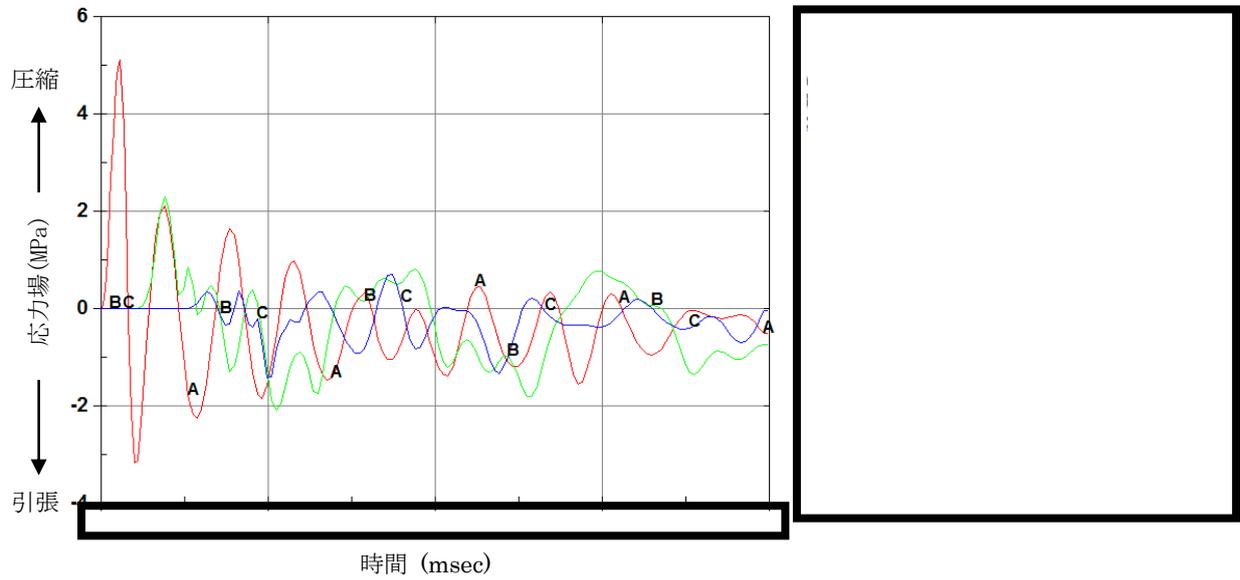
添付図2-5に示す通り、ケース1とケース2の入力を重ね合わせたケース3の解析結果は、ケース1とケース2の解析で得られた個々の圧力波形の重ね合わせとして表現されていることが確認された。これにより、LS-DYNAコードでは圧力伝播と反射、及び反射波の重畳が適切に模擬されていることを確認した。

また、添付図 2-6 に 3 章に示すペDESTAL構造解析において没水部のペDESTAL外側壁面に負荷される圧力荷重の時刻歴を示す。

今回の解析対象である水蒸気爆発は、高い圧力の荷重がごくわずかな時間（ミリ秒単位）で作用する事象であり、爆発エネルギーの開放直後の圧力波による発生応力が支配的になると考えられる。実際の解析評価においても、添付図 2-6 に示したように、水蒸気爆発によって生じる圧力波の第一ピークによる圧力が、以降の反射波による圧力ピークに比べて大きく、爆発初期の圧力波が構造応答評価に対して支配的となることを確認できる。

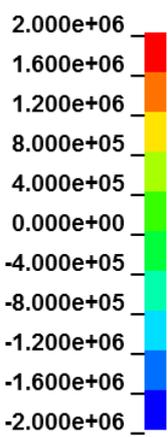


添付図 2-1 解析モデルと荷重条件



添付図 2-2 Lagrange 要素の代表点における応力場の履歴

応力場 (Pa)

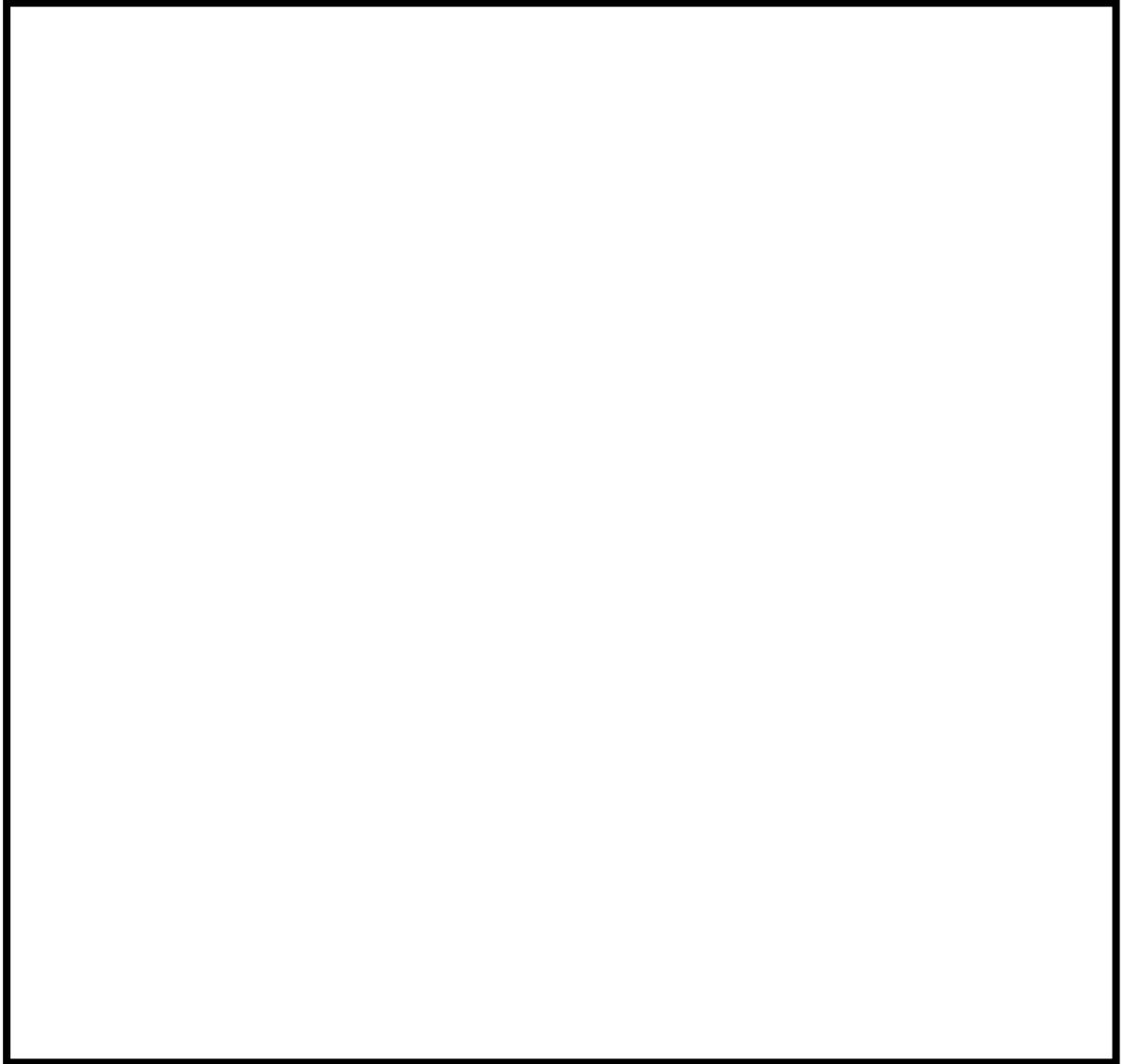


リング内の音速 c は、 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ より、

$c=5082\text{m/s}$ であり、 0.01ms で約 50.8mm 進む。時刻歴の圧力ピークは、概ね音速 c で進行している。

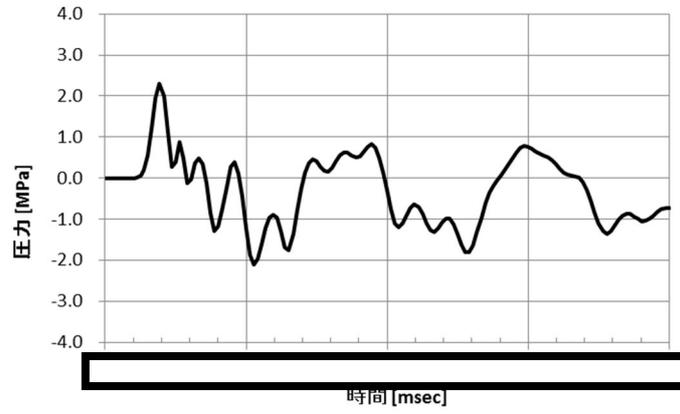


添付図 2-3 応力場分布の推移

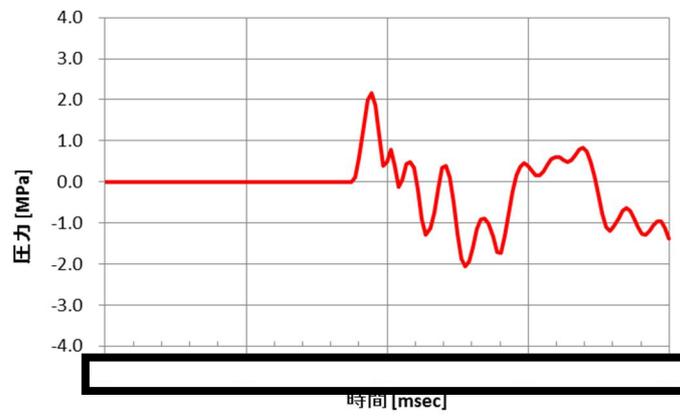


添付図 2-4 解析モデルと荷重条件

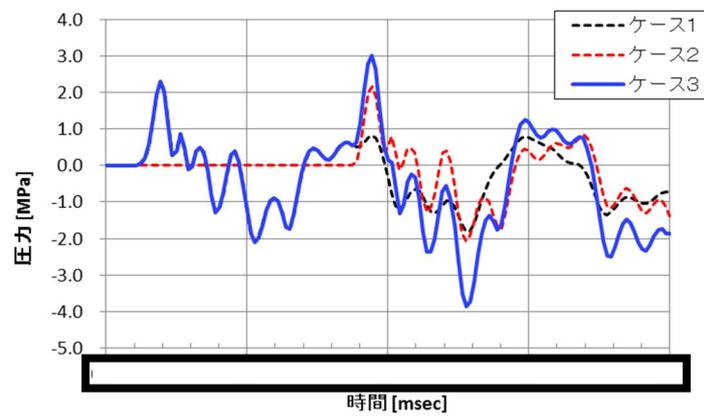
< ケース 1 >



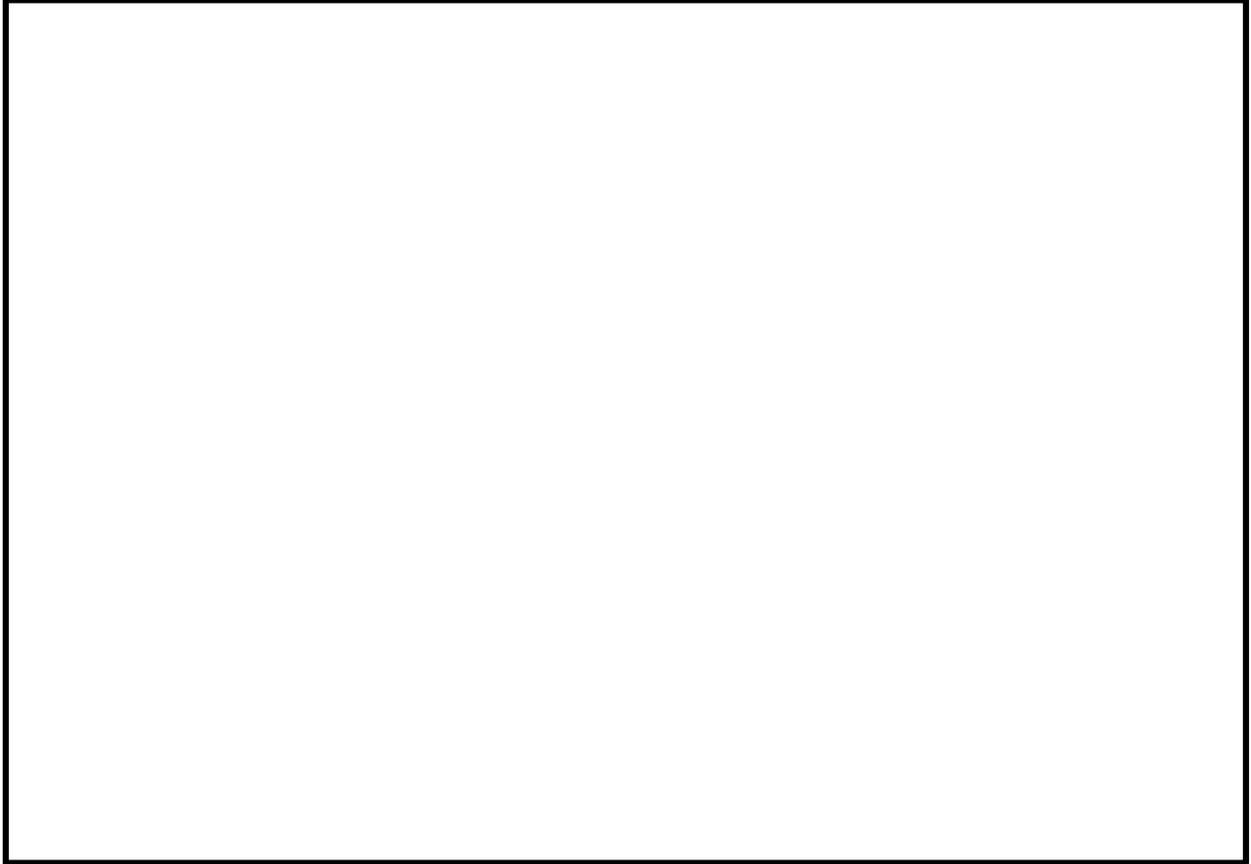
< ケース 2 >



< ケース 3 >



添付図 2-5 各ケースの圧力履歴



添付図 2-6 圧力によってペDESTAL外側壁面に作用する荷重

添付3 ペDESTAL構造応答評価における判定基準について

1. ペDESTALの支持機能について

炉外 FCI の水蒸気爆発評価においては、爆発による衝撃荷重により、ペDESTALが圧力容器等を支持する機能を損なわないことが健全性の判断基準となる。

保守的な想定として、内側鋼板、コンクリート及び縦リブ構造材を無視し、ペDESTALの外側鋼板のみを考慮した場合の降伏強度について以下に評価する。

ペDESTALの外側鋼板の断面積は、

$$A_0 = \pi/4 \times (D_0^2 - D_i^2) = \boxed{} \text{ mm}^2$$

外側鋼板の降伏応力は、

$$S_y = 490 \text{ MPa}$$

よって、外側鋼板の降伏耐力は、

$$P_y = \boxed{} \text{ mm}^2 \times 490 \text{ MPa} = \boxed{} \text{ kN}$$

となる。一方、ペDESTAL評価箇所に加わる主な荷重としては、

- ① 圧力容器からの作用荷重 (約 $\boxed{}$ ton)
- ② 原子炉遮へい壁からの作用荷重 (約 $\boxed{}$ ton)
- ③ ペDESTALの基礎に直接作用する荷重 (約 $\boxed{}$ ton)

があり、鉛直方向の荷重は合計で約 $\boxed{}$ kN ($\boxed{}$ ton) である。したがって、外側鋼板のみでもペDESTALに加わる荷重に対して降伏することはない。

以上に示すように、ペDESTALの支持機能は外側鋼板のみで成立するため、炉外 FCI 時の水蒸気爆発評価においては、衝撃荷重によるペDESTAL外側鋼板の健全性への影響を確認する。

2. 許容ひずみについて

鋼板の健全性は、爆発荷重によって生じるひずみが許容ひずみ範囲内であることをもって確認する。

炉外 FCI 評価に用いるペDESTAL鋼板の許容ひずみは、材料データの既往知見 (NUPEC 試験^[1]) の最大荷重点でのひずみより 10%としている。以下ではその設定の考え方について示

す。

ペDESTAL鋼板の材質はSPV490である。SPV490のJIS規格では破断ひずみを19%以上である。これに対して、既往知見の一つであるNUPEC試験データにSPV490の最大荷重点でのひずみ10%がある。

ペDESTALの機能維持の観点からは、耐力が低下せず、外力の増加に対応できる範囲であれば荷重負担能力が維持できることから、FCI時の荷重に対して発生するひずみが最大荷重時ひずみ未満であることが機能維持の判定基準であると考えられる。このため、SPV490の最大荷重点でのひずみ10%を許容ひずみとして採用する。

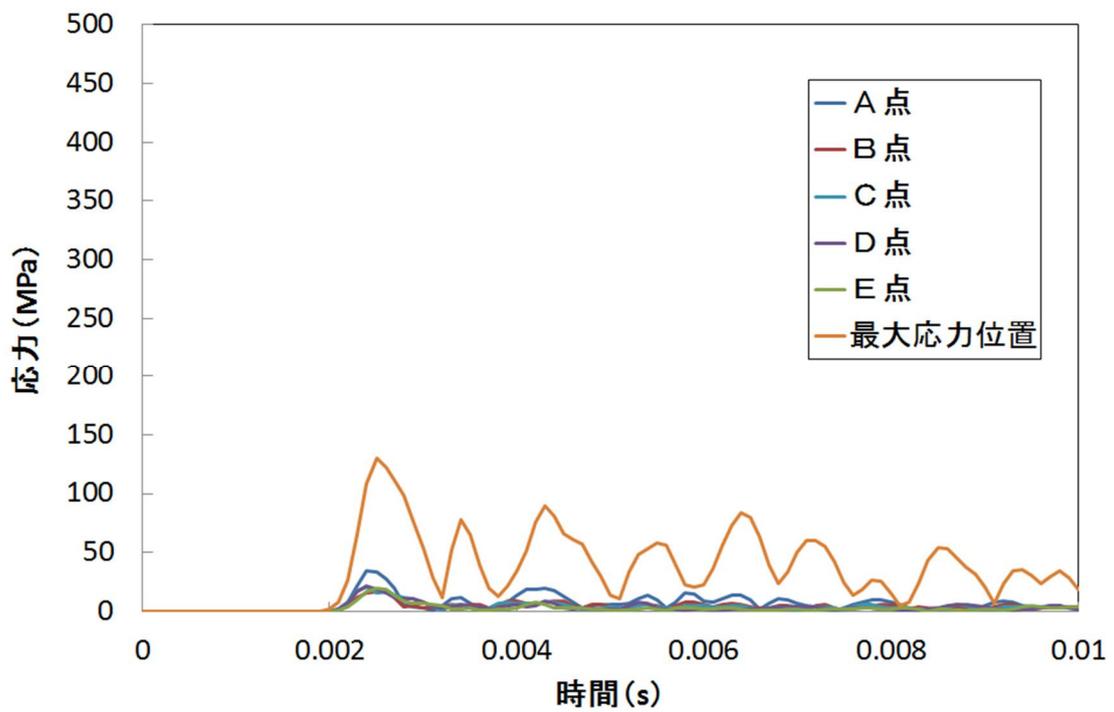
3. 代表的な解析結果と判断基準に対する傾向の確認

今回の評価結果では添付図3-1に示すように、外側鋼板の応力は最も厳しい局所位置においても約130MPaであり、鋼板の大半の領域では応力の最大値は30MPa程度である。また、局所的に降伏応力を上回る応力が発生して塑性ひずみが生じたとしても問題となることはなく、外側鋼板の局所以外の大部分に生じる塑性ひずみ量が判断基準を十分に下回っていれば、ペDESTALの支持機能は維持される。

以上のように、外側鋼板は炉外FCI時の水蒸気爆発荷重に対し、最も厳しい局所位置においても弾性変形の範囲内であり、その他の大部分の領域の発生応力は降伏応力に対しても十分に余裕があることから、ペDESTALの支持機能としての健全性には影響がないと判断できる。

4. 参考文献

- [1] 「平成7年度 溶接部等熱影響部信頼性実証試験（原子炉格納容器）に関する報告書」，原子力安全基盤機構，平成8年3月



添付図 3-1 炉外 FCI 評価における外側鋼板の応力コンター図（最大応力発生時）
及び代表位置における応力履歴