

RELAP5-3D コードを用いた主蒸気管破断事故解析と評価

Main Steam Line Break Accident Analysis by RELAP5-3D Code and Evaluation

佐々木 泰裕 (Yasuhiro Sasaki)*¹ 前田 俊哉 (Toshiya Maeda)*²
 馬場 巖 (Iwao Bamba)*³ 志水 孝司 (Takashi Shimizu)*³

要約 RELAP5-3D コードを用いて、15 × 15 ロッドバンドル型 3 ループ PWR プラントを対象に、複数の炉心条件と過渡解析条件を組み合わせ、主蒸気管破断事故解析を実施し、炉心条件および解析条件の違いによるプラント挙動への影響について検討した。次に、RELAP5-3D コードによる解析結果から得られた過渡期間中の炉心出入口領域状態量を境界条件として設定し、RELAP5-3D コードと SIMULATE-3K コードを用いて炉心解析モデルによる解析を実施し、その差異について検討した。解析結果から、最確炉心条件では再臨界に至らないことが示された。また、解析条件の点からは原子炉冷却材ポンプ (RCP) の作動状態および主蒸気逆止弁の開閉状態の仮定が解析結果に影響することが示され、安全評価解析条件の保守性が把握できた。さらに、RELAP5-3D コードと SIMULATE-3K コードによる解析結果の比較から、RELAP5-3D コードの炉心熱水力モデルの保守性、ボロン濃度係数の保守性等が示され、RELAP5-3D コードの解析結果には、なお保守性が含まれるものと考えられる。

キーワード 加圧水型軽水炉, RELAP5-3D, SIMULATE-3K, 主蒸気管破断事故, 3次元解析

Abstract The main steam line break (MSLB) accident was analyzed for several combinations of reactor core conditions and the transient analytical conditions by using the RELAP5-3D code for 15 × 15 rod bundle type three loop PWR plant. The influences of the reactor core conditions and the analytical conditions were examined upon the predicted plant behavior. In addition, using the RELAP5-3D code and the SIMULATE-3K code, analyses by the reactor core model were conducted with quantities of state at the core inlet and outlet as boundary conditions, which were obtained from the analytical results by the RELAP5-3D code. The difference in the results between the two codes was discussed. It was shown from these analyses, that the criticality was not reached during the MSLB accident under the most probable reactor core conditions. Moreover, also shown that the assumption for the reactor coolant pump (RCP) trip and the main steam check valve affected the analytical results, and the conservatism of the safety evaluation condition has been confirmed. The conservatism in the core thermal hydraulic model of the RELAP5-3D code and the boron reactivity coefficient etc. was made clear from the comparison between the RELAP5-3D and the SIMULATE-3K codes, showing that the predicted results by the RELAP5-3D code are still conservative.

Keywords pressurized water reactor, RELAP5-3D, SIMULATE-3K, main steam line break accident, three dimensional analysis

1. はじめに

原子力発電所の安全設計の基本方針の妥当性を確認することを目的として、異常な過渡変化および事故の解析 (安全評価) が行われている。その際に参照される安全評価指針⁽¹⁾には「この解析に使用するモデル及びパラメータは、評価の結果が厳しくなるように選定しなければならない。」とされており、安

全評価に用いられる解析コードやプラント条件、解析条件等は、保守的なもの、いわゆる安全評価条件が用いられている。

その結果、解析結果は当然のことながら十分に保守的なものとなっている。例えば主蒸気管破断事故解析では事故時に臨界に達するとして評価されているが、現実的条件では臨界には達しないことが示されている⁽²⁾。しかしながら、保守的に想定している

* 1 (株) 原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 2 (株) シー・エス・エー・ジャパン

* 3 (株) 原子力エンジニアリング

個々の条件がどのように影響して保守的な解析結果となっているかまでは示されていない。

一方、近年のコンピュータの計算性能の著しい進展や解析技術の発達に伴い、3次元解析コードの開発が進められ、さらに従来は別々のコードで扱うことの多かった核計算と3次元熱水力計算を一つの解析コードで扱うことのできる3次元解析コードの開発が国内でも進められている^{(3)~(5)}。

原子力安全システム研究所（INSS）では、米国アイダホ国立研究所を中心に開発が進められている3次元解析コードRELAP5-3D⁽⁶⁾を導入し、ベンチマーク解析⁽⁷⁾⁽⁸⁾により、同コードが国内外で開発されている3次元解析コードと同等の性能を有することを確認した⁽⁹⁾。

また、3ループプラントを対象に原子炉容器3次元モデルを整備し、原子炉容器入口温度に非均一な分布がある場合の解析を行い、原子炉容器下部プレナムでの冷却材温度分布をCFD解析コードSTAR-CDによる解析結果と比較するとともに、定格出力時の出力分布の再現性を評価し、RELAP5-3Dコードを用いて適切に3次元解析ができることを確認した⁽¹⁰⁾。

そこで、15×15ロッドバンドル型3ループPWRプラントを対象に複数の炉心条件と過渡解析条件を組み合わせ、RELAP5-3Dコードを用いた主蒸気管破断事故の解析を行い、炉心条件および解析条件の違いによるプラント挙動解析結果への影響について検討した。

また、RELAP5-3Dコードによる解析結果から得られた炉心入口・出口条件を境界条件として、炉心の過渡状態を詳細に解析することのできるSIMULATE-3Kコードを用いて解析し、その結果をRELAP5-3Dコードによる結果と比較することにより、RELAP5-3Dコードの炉心解析モデルの保守性についても検討した。

2. RELAP5-3Dコードによる解析

2.1 原子炉容器3次元解析モデル

RELAP5-3Dコードで用いる原子炉容器部の3次元熱水力解析モデルは、図1に示すように1つの3次元ボリュームで模擬し、内部を径方向5分割、周方向6分割、軸方向20分割とした。

そのうち、炉心部は径方向3分割、周方向6分割、

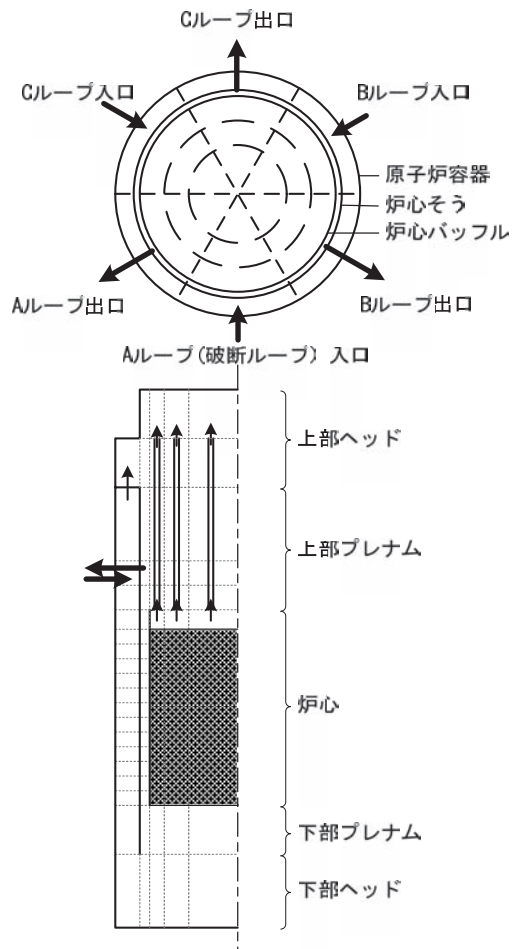


図1 原子炉容器部熱水力モデル

軸方向12分割とした。核計算モデルは径方向には集合体1体を1領域としてモデル化し、最外周に反射体領域を設置した17×17領域、軸方向には燃料有効部を12分割し、上下に反射体を設置した14領域とし、後述する条件で集合体のマクロ定数を設定した。

2.2 解析条件等の設定

安全評価⁽¹¹⁾では、保守的な条件を仮定した安全評価条件⁽¹¹⁾を用いている。ここでは今回の解析で着目した保守性について簡単に述べる。

(1) 炉心条件

炉心条件は減速材密度係数が最大になるサイクル末期（EOC）を対象とし、原子炉の初期状態として高温停止状態を想定している。また、初期未臨界度は制御棒クラスタ1本が全引き抜き位置で固着したときの値として1.77% $\Delta k/k$ としている。この減速

材密度係数は、最確炉心条件に比べて保守的な値であるとともに、初期未臨界度も保守的な条件である。

(2) 原子炉冷却材ポンプ (RCP) の扱い

安全評価では、外部電源がある場合とない場合の2つのケースを想定している。このうち外部電源がある場合には原子炉冷却材ポンプ (RCP) の運転継続により冷却が進み、結果がより厳しくなる。一方、実機プラントの設計では安全注入 (SI) 信号発信に伴い原子炉冷却材ポンプ (RCP) は停止するので、これを無視した仮定は保守的な条件である。

(3) 高圧注入 (HPI) ポンプ作動台数等

単一故障として炉心冷却性の点から1台の高圧注入 (HPI) ポンプのみが作動するものとしているが、実機プラントの設計では2台の高圧注入 (HPI) ポンプが作動する。その上、ボロン注入配管内の純水が一掃される時間及び1次冷却材配管内での輸送遅れを考慮しているが、ボロン注入配管内が純水のみで満たされているというのは保守的な条件である。

(4) 主蒸気逆止弁の効果

破断側主蒸気逆止弁の効果を無視して健全側蒸気発生器からの回り込みによる蒸気放出による冷却効果も考慮している。しかし、実機プラントの設計では主蒸気逆止弁が設置されているので健全側蒸気発生器からの回り込みによる蒸気放出はなく、このため安全評価条件は保守的な条件となっている。

(5) 炉心動特性モデル

炉心動特性を1点炉近似でモデル化しているため、炉心の3次元核的挙動を扱うことはできない。これは炉心の空間的挙動を扱うという点で保守的なモデルである。

2.2.1 炉心条件の設定

RELAP5-3D コードでの解析に用いる炉心は、サイクル末期 (EOC)、高温零出力状態でゼノン (Xe) が消滅し、親核種のプロメシウム (Pm) が崩壊してサマリウム (Sm) の量がピークとなった (No-Xe, Peak-Sm) 条件を基準条件とした。この炉心に炉心設計コード SIMULATE-3 で作成した全炉心データから、図2に斜線で示す第4象限の1/8炉心部分のデータを抽出し、これらの値を対称性を用いて全炉心領域に展開してマクロ定数を設定した。軸方向の分布は SIMULATE-3 コードで求めた軸方向分布を用いた。

炉心条件は、最確炉心条件に加え、減速材密度

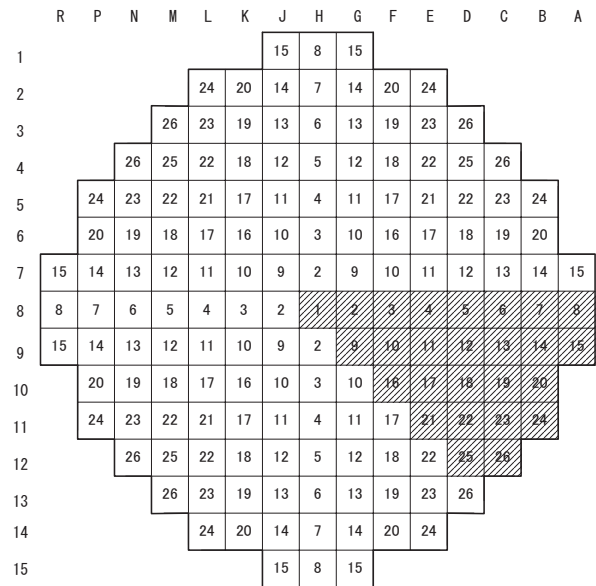


図2 マクロテーブル配置

(温度) 係数が安全評価条件とほぼ等価となるように制御棒係数を調整 (1.7 倍) し、初期未臨界度も安全評価条件と同様に 1.77% $\Delta k/k$ とした保守的炉心条件を設定した。

なお、制御棒位置は最確炉心条件、保守的炉心条件ともに全制御棒挿入 (最大制御棒係数を有する制御棒 (H14 位置) 1 本が固着) 状態を仮定した。

2.2.2 プラント過渡解析条件の設定

高温停止状態における主蒸気管破断事故解析のために必要な解析条件としては、安全評価条件との比較の観点等から安全注入 (SI) 信号発信後の原子炉冷却材ポンプ (RCP) トリップの扱い、高圧注入系配管内におけるボロンの輸送遅れ、主蒸気逆止弁の機能について、表1に示すようにケースを分けて設定した。また、高圧注入 (HPI) ポンプについては最確炉心条件に対しては2台作動するものとし、保守的炉心条件に対しては1台作動の場合と2台作動の場合を考慮した。

蒸気発生器への給水特性、運転員操作時間遅れについては安全評価条件と同様の扱いとした。

表1 解析ケース一覧

炉心条件	ケース名	RCPトリップ ⁽¹⁾	高圧注入配管内ボロン濃度 ⁽²⁾	主蒸気逆止弁機能 ⁽³⁾	高圧注入(HPI)ポンプ作動台数
最確条件 EOC	最確ケース	○	RCS	○	2台
	最確ケース a	×	RCS	○	
	最確ケース b	○	0 ppm	○	
	最確ケース c	○	RCS	×	
	最確ケース abc	×	0 ppm	×	
保守的条件 EOC	保守的ケース	○	RCS	○	2台 または1台
	保守的ケース a	×	RCS	○	
	保守的ケース b	○	0 ppm	○	
	保守的ケース c	○	RCS	×	
	保守的ケース abc	×	0 ppm	×	

- (1) 「○」はSI信号発信に伴うRCPトリップ成功, 「×」はRCPトリップ失敗(運転継続)を表す
- (2) 「RCS」は一次冷却材系(RCS)ボロン濃度と同じであることを表す
- (3) 「○」は機能正常, 「×」は機能喪失を表す

2.3 RELAP5-3D 解析結果の検討

2.3.1 各解析ケースでの比較

各解析ケースについて、炉出力の挙動に着目して考察する。

(1) 最確炉心条件

最確炉心条件では図3に示すように、いずれのケースも臨界には至らず、出力上昇は見られなかった。

(2) 保守的炉心条件 (高圧注入ポンプ2台)

高圧注入(HPI)ポンプ2台作動の場合の保守的炉心条件では、図4に示すように基本ケースである保守的ケースにおいても主蒸気管破断に伴う冷却材温度の低下により反応度が添加され、時刻20秒過ぎに急峻な出力の立ち上がりが見られ、ピーク値で

7%程度まで上昇するが、速やかに炉出力は低下し、時刻28秒頃からのボロン添加によりさらに低下した。

(a) 原子炉冷却材ポンプの扱い

原子炉冷却材ポンプ(RCP)トリップを無視した場合の影響については、保守的ケースと保守的ケースaとの比較、ならびに保守的ケースcと保守的ケースabcとの比較から、原子炉冷却材ポンプ(RCP)トリップなしの場合には冷却効果が大きいため、図4に示すように時刻40秒過ぎの出力上昇が大きくなり、図8に示すように燃料棒表面熱流束も高めに推移することがわかる。なお、保守的ケースc、保守的ケースabcで時刻20秒より前に燃料棒表面熱流束のピークが見られるが、これは冷却材温度低下によるもので燃料棒の発熱によるものではない。

(b) 高圧注入系配管内ボロン濃度

高圧注入系配管内を純水とする仮定は、保守的

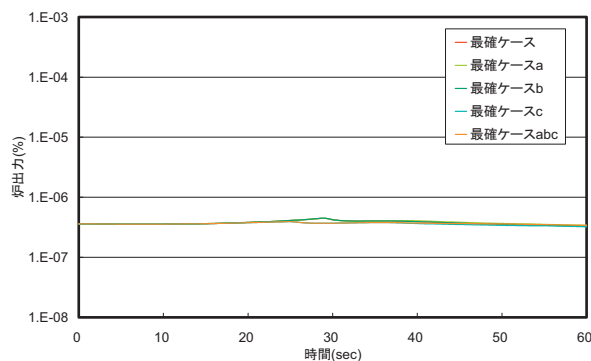


図3 炉出力 (最確 EOC)

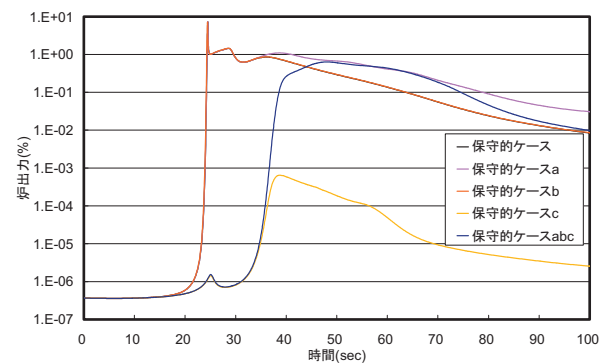


図4 炉出力 (保守的 EOC, HPI ポンプ2台)

ケースと保守的ケース b との比較ならびに保守的ケース c と保守的ケース abc との比較で、図 5 に示すように炉心入口ボロン濃度の上昇時期に差がなく、炉出力低下も同様であることから影響はほとんどないといえる。

(c) 主蒸気逆止弁の効果

主蒸気逆止弁の効果を無視した、保守的ケース c、保守的ケース abc では図 4 に示すように時刻 20 秒過ぎの急峻な出力上昇は見られず、冷却材温度低下に伴う時刻 40 秒過ぎの出力ピークも保守的ケース

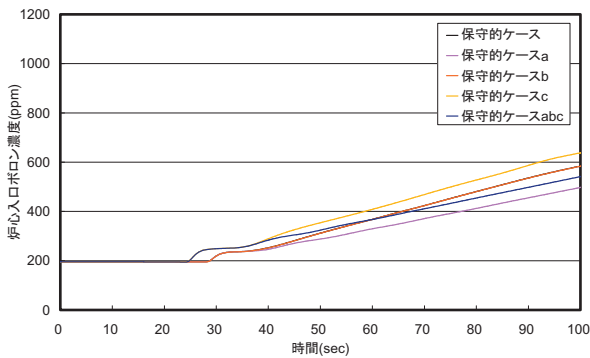


図 5 炉心入口ボロン濃度 (保守的 EOC, HPI ポンプ 2 台)

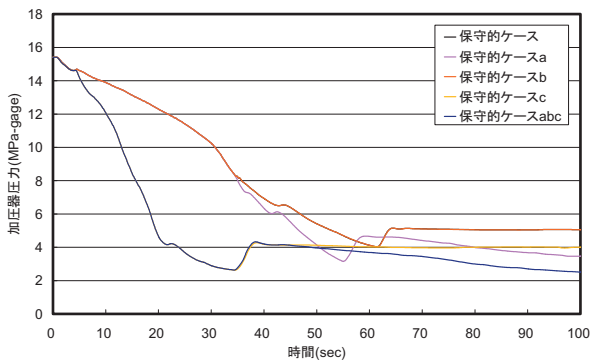


図 6 加圧器圧力 (保守的 EOC, HPI ポンプ 2 台)

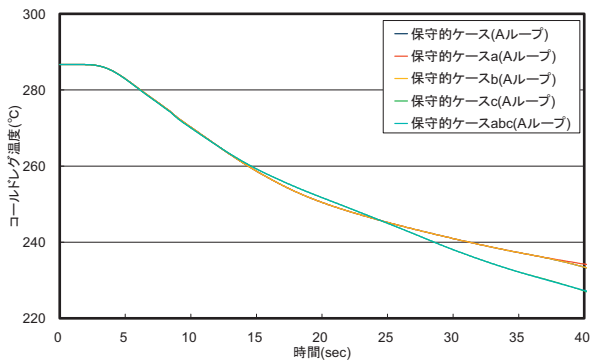


図 7 コールドレグ温度 (保守的 EOC, HPI ポンプ 2 台)

abc で 0.6% 程度にとどまった。これについては、保守的ケースと保守的ケース c、保守的ケース abc との比較から、主蒸気逆止弁の効果を無視したことにより、図 6 に示すように 1 次系圧力低下が早く、高圧注入 (HPI) ポンプからの注入量が増加して図 5 に示すように炉心入口ボロン濃度が早く上昇し、出力上昇途中の段階で負の反応度効果が上回るためとわかった。

また、保守的ケースに比べて保守的ケース c、保守的ケース abc の方が出力上昇の立ち上がる時期が若干遅い。これは主蒸気逆止弁の効果を無視したことにより図 7 に示すように保守的ケース c、保守的ケース abc での破断ループ (A ループ) の温度低下が保守的ケースに比べて若干少なく、反応度添加がやや遅れるためと考えられ、このことが高圧注入 (HPI) ポンプによる出力急昇抑制にも影響していると考えられる。

(3) 保守的炉心条件 (高圧注入ポンプ 1 台)

高圧注入 (HPI) ポンプ 1 台作動の場合の保守的炉心条件では、図 9 に示すように主蒸気逆止弁の効果を無視した保守的ケース c、保守的ケース abc でも時刻 20 秒過ぎの急峻な出力上昇が見られ、ピーク

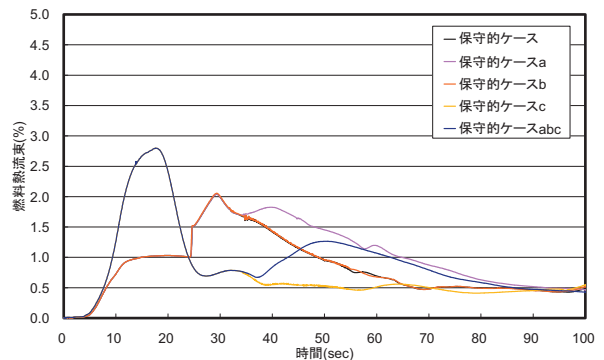


図 8 燃料棒表面熱流束 (保守的 EOC, HPI ポンプ 2 台)

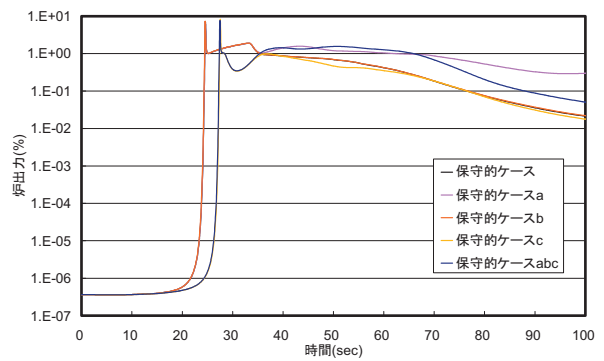


図 9 炉出力 (保守的 EOC, HPI ポンプ 1 台)

出力は約 8%に達した。

これは高圧注入（HPI）ポンプが1台となったことにより図 10 に示すように炉心入口ボロン濃度の上昇幅が小さく、出力上昇を抑えられなかったためと考えられる。また、炉心入口ボロン濃度の上昇速度も高圧注入（HPI）ポンプ 2 台作動の場合に比べて低くなるため、時刻 40 秒過ぎの炉出力も高くなり、図 11 に示すように燃料棒表面熱流束も高くなっている。

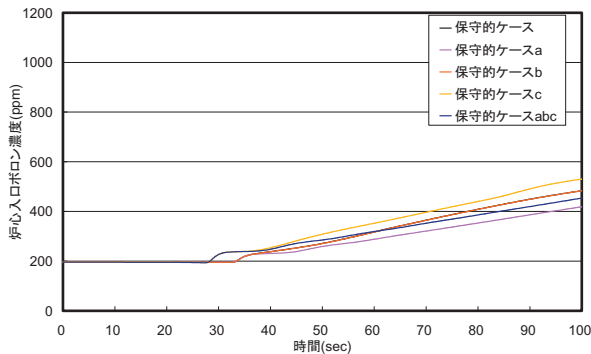


図 10 炉心入口ボロン濃度（保守的 EOC, HPI ポンプ 1 台）

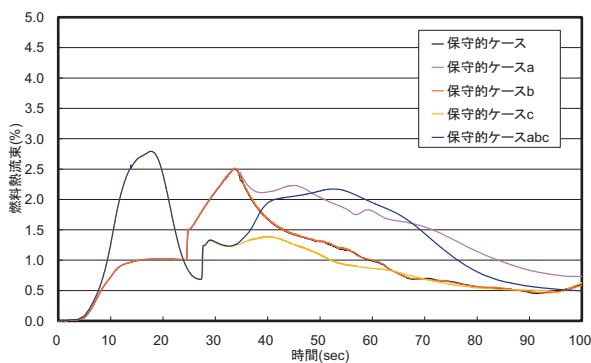


図 11 燃料棒表面熱流束（保守的 EOC, HPI ポンプ 1 台）

2.3.2 原子炉容器内挙動

原子炉容器内の挙動を高圧注入（HPI）ポンプ 1 台作動の保守的ケース abc を例に図 12 に示す。図では時刻 0 秒から 20 秒毎とボロン到達直前およびボロン到達後のピーク時の挙動も併せて示している。

破断ループは左手前に接続され、近傍に固着制御棒が位置している。破断ループ近傍の冷却材温度低下とともに出力が上昇するが、出力の上昇は制御棒固着位置の上部に限定されていることがわかる。

2.3.3 長時間解析結果

保守的炉心条件について、時刻 1800 秒までの長時間解析を実施した。炉出力の解析結果を図 13 および図 14 に示す。高圧注入（HPI）ポンプの作動により一旦低下した炉出力は約 300 秒～約 500 秒頃に再び上昇する結果となった。

特に、原子炉冷却材ポンプ（RCP）が停止しない保守的ケース a, 保守的ケース abc で他のケースと比較しても高くなっている。これは原子炉冷却材ポンプ（RCP）が運転継続することで冷却が進み、ボロン注入による負の反応度効果よりも冷却による正の反応度効果が上回るためと考えられる。また、保守的ケース abc では逆止弁の効果を無視しているため 2 次ピークの現れる時期が早くなっており、図 6 に示すような初期の圧力挙動の違いが 2 次ピークの現れ方にも影響していると考えられる。

また、高圧注入（HPI）ポンプ 2 台作動の場合と 1 台作動の場合を比較すると、1 台作動の方が 2 次ピーク値も高く、臨界継続時間も長くなっている。これはボロン注入量の違いによると考えられる。

2.3.4 RELAP5-3D 解析結果のまとめ

以上のことをまとめると次のようになる。

- ① 最確炉心条件では臨界には至らず、出力上昇は見られない。初期未臨界度を小さく設定した保守的炉心条件では臨界に至る。したがって初期未臨界度の保守的設定は臨界到達の大きな要因と考えられる。（図 3）
- 以降は保守的炉心条件の解析結果について述べる。
- ② 臨界到達後、高圧注入（HPI）ポンプ作動によるボロン濃度増加により速やかに炉出力は低下する。（図 4, 図 5）
- ③ 原子炉冷却材ポンプ（RCP）運転継続により冷却材の混合が進むことにより、炉出力、燃料棒表面熱流束は若干高めに推移するが、ボロン濃度の上昇により低下する。（図 4, 図 5, 図 8）
- ④ 高圧注入系配管内を純水と仮定することによるプラント挙動の違いはほとんどない。（図 4）
- ⑤ 主蒸気逆止弁の効果を無視することによって、1 次系の圧力低下が早く、高圧注入（HPI）ポンプ作動が早くなり、ボロン注入量も増加する。また、破断ループの温度低下が若干緩やか

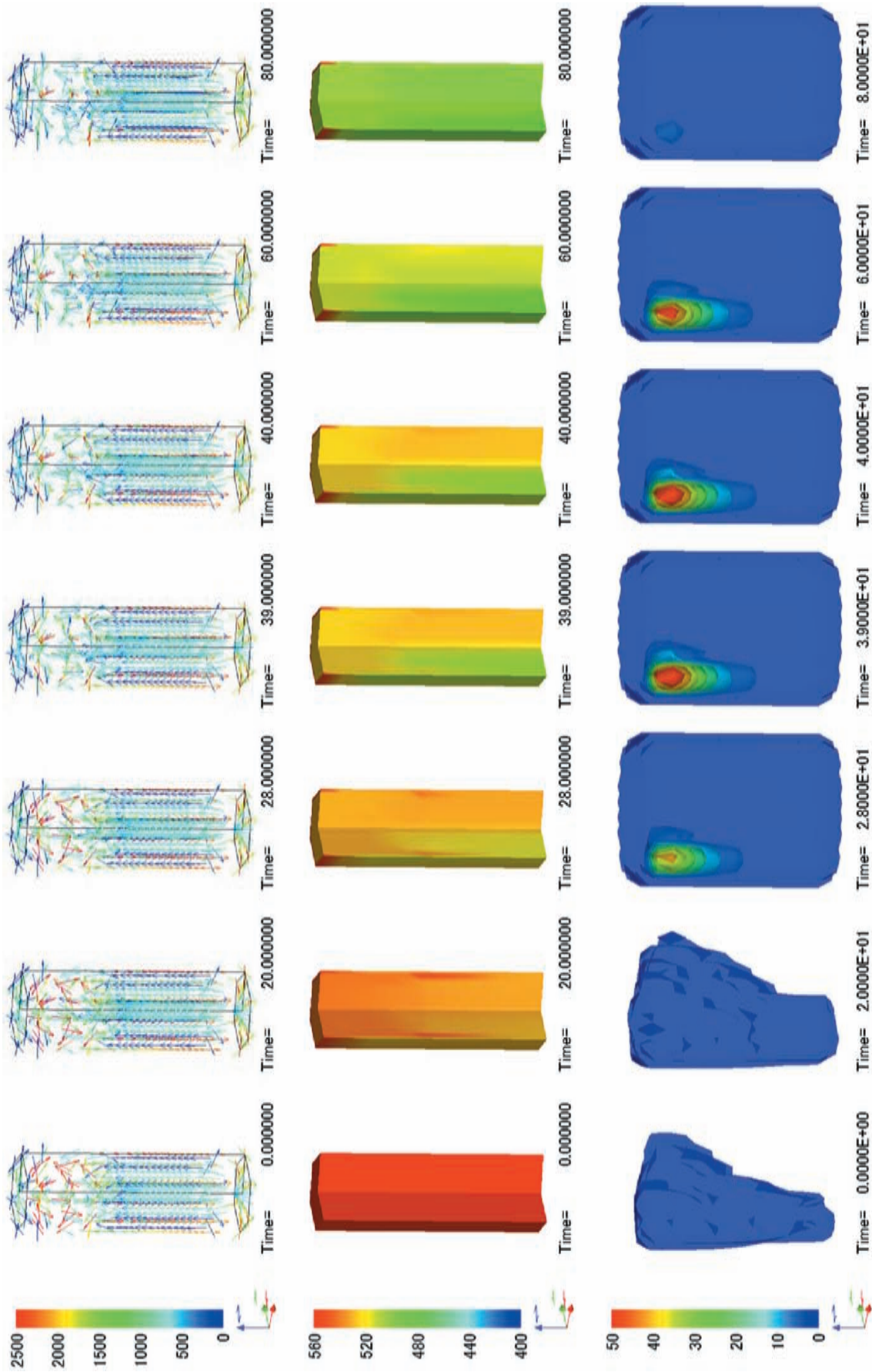


図 12 原子炉容器内挙動 (保守的ケース abc, HPI ポンプ 1 台)
 (上段：質量流量 (kg/sec), 中段：冷却材温度 (K), 下段：出力密度 (MeV/cm³/sec))

になり出力上昇がやや遅くなる。(図4, 図5, 図7)

- ⑥ 1次系の圧力低下が早い場合, 高圧注入(HPI)ポンプが2台作動すれば急峻な出力上昇は見られず, ピーク出力も低いが, 1台作動では急峻な出力上昇が見られ, ピーク出力も他のケースと同程度まで上昇する。(図4, 図9)
- ⑦ 炉出力の上昇は局所の核分裂反応の増加によるもので, 炉心全体での出力上昇は見られない。(図12)
- ⑧ 長時間解析結果では再臨界に達して出力の上昇が見られ, 高圧注入(HPI)ポンプ1台作動の場合の方が臨界継続時間も長くなる。(図13, 図14)

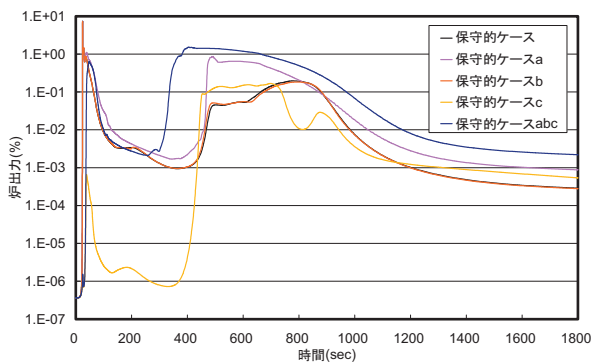


図13 炉出力 (保守的 EOC, HPI ポンプ 2台)

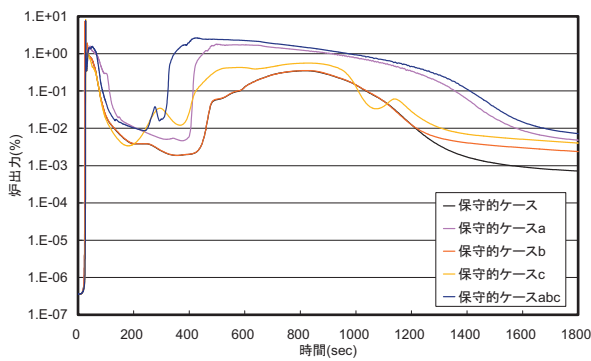


図14 炉出力 (保守的 EOC, HPI ポンプ 1台)

3. SIMULATE-3K コードとの比較

3.1 境界条件の設定

SIMULATE-3K コードによる解析体系を図15に示す。このモデルに, RELAP5-3D コードによる解析結果から得られた過渡期間中の炉心出入口領域の

状態量を境界条件として設定した。

具体的には, 図16に示す18分割領域での炉心入口プレナムの圧力, 冷却材流量, 冷却材温度およびボロン濃度と炉心出口プレナム圧力の時間依存データを設定した。なお, 核計算に用いるマクロ定数はRELAP5-3D コード用に作成した炉心データの元になるSIMULATE-3 コードの炉心データをそのまま用いた。

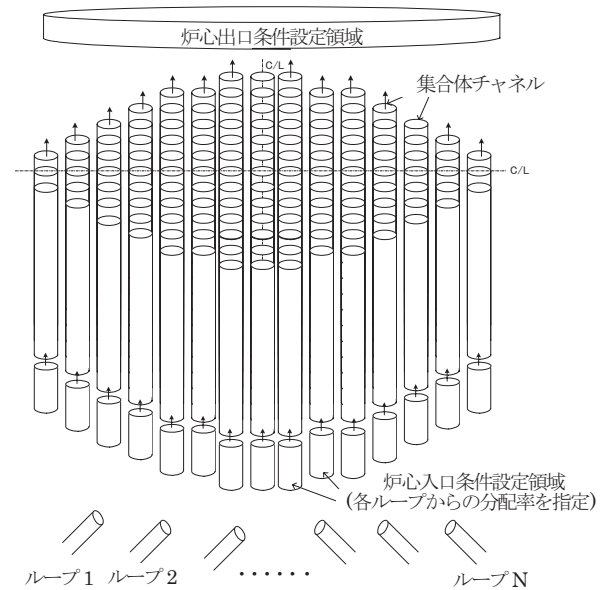


図15 IMULATE-3K 熱水力モデル

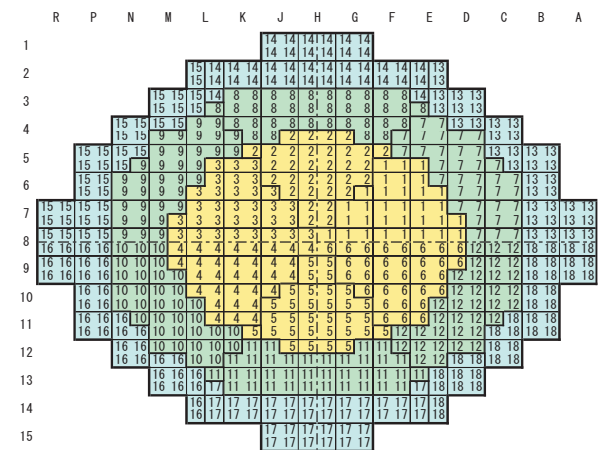


図16 境界条件マップ (数値は熱水力領域の番号を示す)

3.2 両コードによる評価解析

SIMULATE-3K コードによる解析をマクロ定数と初期未臨界度に最確炉心条件を使用した場合と保守的炉心条件を適用した場合について実施し、解析結果を RELAP5-3D コードの炉心モデルに同じ境界条件を与えて得られた解析結果と比較した。

なお、RELAP5-3D コードでは過渡時の反応度変化が出力されないため、図 17～図 22 に示す反応度変化は SIMULATE-3K コードによる解析結果である。

RELAP5-3D コードでは解析初期状態の炉心固有値（実効増倍率に相当）に応じて中性子発生項に対する臨界補正が施されるため、初期状態の臨界からのずれが大きいと補正による過渡時の出力応答への影響が生じる。したがって、定常状態での固有値が 1.0 となるよう設定し、過渡解析初期に所要の未臨界状態となるような境界条件設定が必要となる。また、SIMULATE-3K コードでは定常状態で自動サーチした臨界ボロン濃度条件を引き継いで過渡解析が実行されるため、同様に過渡解析初期に未臨界状態の設定が必要となる。したがって、解析開始時点（時刻 0 秒）では炉心を臨界状態に設定し、次のタイムステップで所要の初期未臨界度となるようにボロン濃度を変化させている。

3.2.1 最確炉心条件

最確ケースと最確ケース abc の合計 2 ケースについて解析を実施した。解析条件と結果の一覧を表 2 に示す。

最確炉心条件を用いた場合には、図 17～図 18 に示すようにいずれのケースにおいても主蒸気管破断にともなう炉心への冷水導入があっても炉心が臨界となることはなく、炉出力の増加はみられなかった。いずれのケースにおいても RELAP5-3D コードと SIMULATE-3K コードの解析結果はよく一致している。

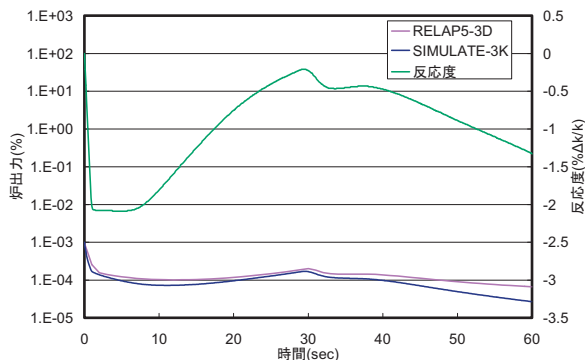


図 17 炉出力と反応度変化（最確ケース）

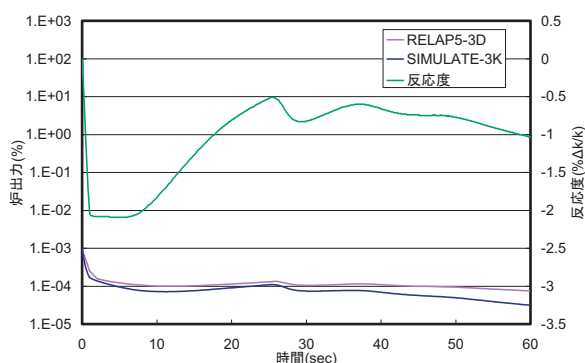


図 18 炉出力と反応度変化（最確ケース abc）

3.2.2 保守的炉心条件

マクロ定数と初期未臨界度として保守的条件 EOC を使用し、境界条件として高压注入（HPI）ポンプ 2 台作動の保守的ケースと保守的ケース abc の場合、及び高压注入（HPI）ポンプ 1 台作動とした同じく 2 ケースの合計 4 ケースについて解析を実施した。解析条件と結果の一覧を表 3 に示す。

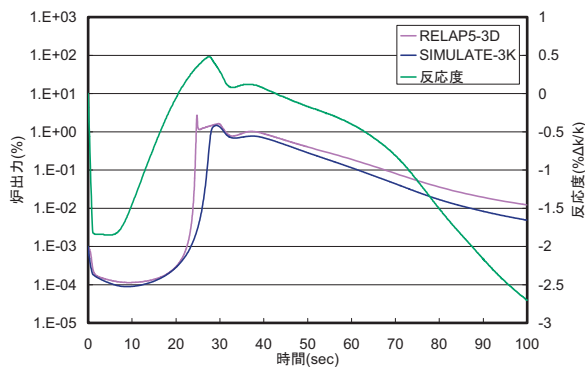
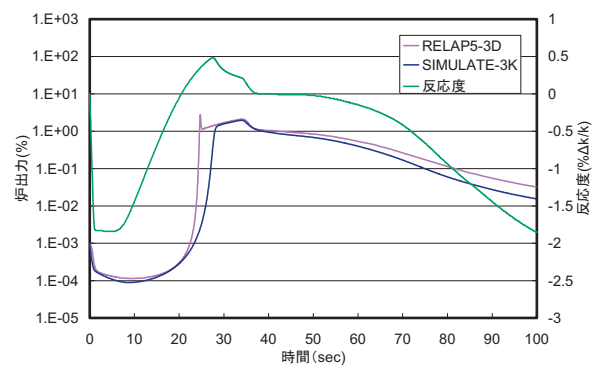
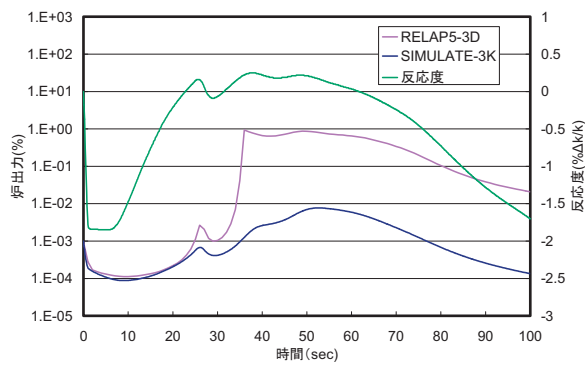
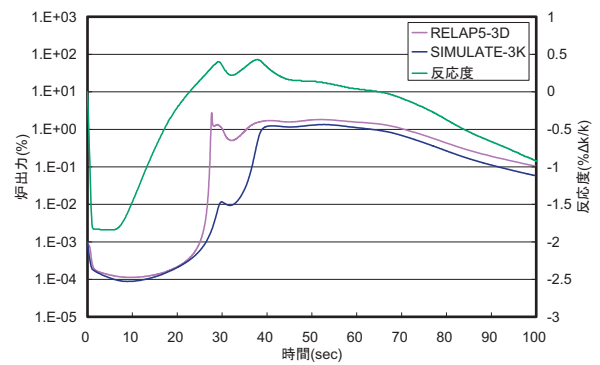
RELAP5-3D コードと SIMULATE-3K コードの炉出力の解析結果の比較を反応度変化と併せて図 19～図 22 にそれぞれ示している。各ケースとも炉心が臨界に達した後の炉出力の立ち上がりは RELAP5-3D コードの結果の方が急激となっている。

表 2 解析条件および結果一覧（最確炉心条件時）

解析ケース	初期未臨界度 (% Δk/k)	制御棒 固着位置	解析結果 (SIMULATE-3K)		解析結果 (RELAP5-3D)
			最大到達反応度 (% Δk/k)	最大炉出力 (%)	最大炉出力 (%)
最確ケース	2.01	H-14	再臨界に到達せず (-0.21)	1.70E-04	2.01E-04
最確ケース abc	2.01	H-14	再臨界に到達せず (-0.51)	1.11E-04	1.35E-04

表3 解析条件および結果一覧 (保守的炉心条件時)

解析ケース	初期未臨界度 (% $\Delta k/k$)	制御棒 固着位置	解析結果 (SIMULATE-3K)		解析結果 (RELAP5-3D)
			最大到達反応度(% $\Delta k/k$)	最大炉出力 (%)	最大炉出力 (%)
保守的ケース (HPI ポンプ 2 台起動)	1.77	H-14	0.48	1.478	1.634
保守的ケース abc (HPI ポンプ 2 台起動)	1.77	H-14	0.25	7.70E-03	0.878
保守的ケース (HPI ポンプ 1 台起動)	1.77	H-14	0.48	1.971	2.105
保守的ケース abc (HPI ポンプ 1 台起動)	1.77	H-14	0.43	1.339	1.828

図19 炉出力と反応度変化
(保守的ケース, HPI ポンプ 2 台)図21 炉出力と反応度変化
(保守的ケース, HPI ポンプ 1 台)図20 炉出力と反応度変化
(保守的ケース abc, HPI ポンプ 2 台)図22 炉出力と反応度変化
(保守的ケース abc, HPI ポンプ 1 台)

RELAP5-3D コードの解析結果にのみ臨界となった後の出力上昇時に瞬間的な出力ピークが見られるケースがあるが、このピークの継続時間は非常に短い (0.1 秒以下) ので燃料棒表面熱流束の増加にはほとんど寄与しない。したがって最大出力の比較は、瞬間的な出力ピークを除いて行う。

いずれのケースにおいても炉心は臨界に到達しているが最大到達反応度は 0.5% $\Delta k/k$ 以下であり、最大炉出力も高圧注入 (HPI) ポンプ 1 台作動条件

の保守的ケースの 1.987% (SIMULATE-3K コード) と 2.105% (RELAP5-3D コード) となっている。いずれのケースにおいても到達する最大炉出力は RELAP5-3D コードによる解析結果の方が若干大きくなっており、複数の燃料集合体を 1 つの熱水力領域とする RELAP5-3D コードのモデル化が保守的条件となっていることを示している。

また、臨界に達して炉出力が増加した後に高圧注入 (HPI) ポンプから注入されるボロン水によって

炉心ボロン濃度が増加すると、炉心は未臨界状態に戻り出力は低下していく。この出力低下割合はSIMULATE-3K コードによる結果の方が大きい。

これらの炉出力の差異の原因として以下のことが考えられる。

- RELAP5-3D コードでは、過渡期間中にボロン濃度が負の値にならないようにするため初期未臨界時のボロン濃度を約 200ppm としているのに対して、負の値が許容される SIMULATE-3K コードでは 0ppm であり、注入されるボロンによる炉心ボロン濃度変化が初期値の大きい RELAP5-3D コードでは少し緩和されることとなり、負の反応度添加が遅れる。

- 炉出力の増加によって減速材密度の変化による反応度のフィードバックが変化するが、SIMULATE-3K コードでは燃料集合体毎にその出力変化に対応したフィードバックが作用するが、複数の燃料集合体を1つの熱水力領域としてモデル化している RELAP5-3D コードでは領域平均の値がフィードバック計算に使用されるため、出力増加による負の反応度フィードバックが SIMULATE-3K コードと比較して小さく評価される。

図 23 には保守的ケースで高圧注入 (HPI) ポンプ 1 台作動のケースにおける、ピーク出力到達時 (30.0 秒) の制御棒固着位置の燃料集合体の軸方向出力分布の、RELAP5-3D コードと SIMULATE-3K コードの比較例を示す。また、図 24 にはピーク出力到達時 (30.0 秒) でのピーク出力発生プレーン (軸方向に 12 分割した領域の下から 11 番目の領域での断面) での燃料集合体出力の比較例を示す。ピーク出力時の燃料集合体出力の比較図には相対出力 0.3 以上の位置で求めた誤差と炉心全体での最小 2 乗誤

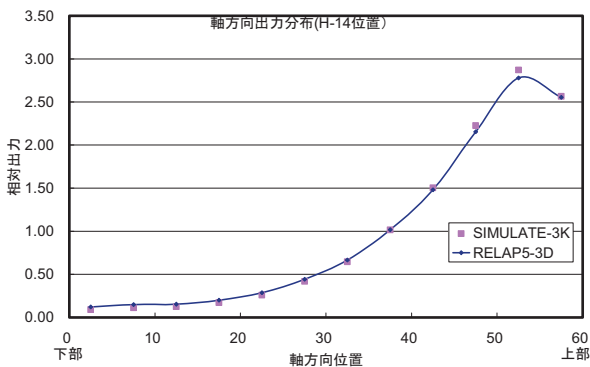


図 23 集合体軸方向出力分布 (30 秒, 保守的ケース, HPI ポンプ 1 台)

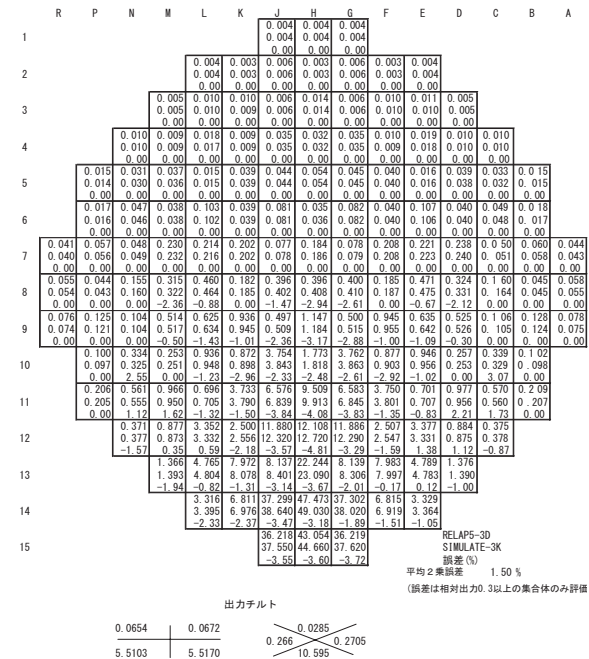


図 24 径方向出力分布 (30 秒, 保守的ケース, HPI ポンプ 1 台, ピーク出力プレーン)

差の値を示す。

軸方向出力は過渡期間中の全ての時刻において RELAP5-3D コードと SIMULATE-3K コードの結果はよく一致している。また、燃料集合体出力がピークとなる制御棒固着位置 (H-14) での誤差は過渡期間中の全ての時刻で 3.0% 以下であり、SIMULATE-3K コードの結果とほぼ同等である。

4. RELAP5-3D 解析結果の保守性の評価

今回の RELAP5-3D コードによる解析に関して、解析コードの特性及び条件設定等の観点から、今回の RELAP5-3D コードによる解析の保守性に影響を与えていると考えられるマクロ定数、熱水力チャネル分割、初期ボロン濃度、ボロン濃度係数について検討した。

4.1 マクロ定数

マクロ定数の保守的設定として、減速材密度 (温度) 係数値を安全評価条件と一致するように制御棒値を変更してマクロ定数作成時の基準ボロン濃度の調整を行っている。主蒸気管破断事故解析では初期状態として全制御棒挿入 (最大反応度の制御棒 1 本を固着) 状態を設定するが、制御棒値を最確条

件での値より大きくすることにより制御棒が挿入されない集合体出力が相対的に高くなる。図 25 に制御棒吸収断面積を最確条件と最確条件の 1.7 倍した場合の全制御棒挿入 (ARI) 状態での径方向出力分布の比較を示す。(黄色の網掛け部が制御棒位置)

減速材密度 (温度) 係数を安全評価条件と合わせた最確条件 × 1.7 のケースでは、制御棒の挿入されない領域 (例えば K11~F11, J12~G12, H13) で約 20% 程度の出力増加が見られる。このことから、制御棒値を大きくした条件を用いて作成したマクロ定数を使用することにより、炉心への冷水導入時の正の反応度添加量を保守的に評価できると同時に、固着制御棒位置集合体近傍の出力が相対的に高くなり、さらに保守性を加えた評価となっている。

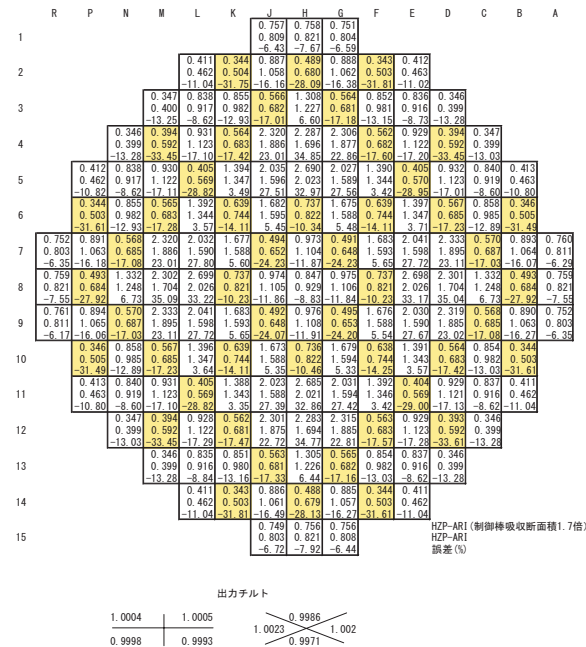


図 25 径方向出力分布 (EOC, ARI, 制御棒値: 最確条件 × 1.7)

4.2 熱水力チャネルの分割

RELAP5-3D コードでは複数の燃料集合体領域を 1 つの熱水力チャネルとしてモデル化しているので、この熱水力チャネルに属する燃料集合体のフィードバック計算には対応するチャネルの平均的な熱水力パラメータ (減速材温度, ボロン濃度等) が使用されることになる。このため出力の高い燃料集合体に対して出力上昇に伴う負の反応度フィードバックが小さめに計算されて、出力増加が大きくなりより保

守的な評価となる。

主蒸気管破断事故解析では固着制御棒近傍の燃料集合体出力の局所的な増加が発生する。標準的な径方向 3 分割 & 周方向 6 分割モデル (R3T6) と、固着制御棒近傍を細かく分割した径方向 3 分割 & 周方向 10 分割モデル (R3T10) での結果を比較した場合、図 26 に示すように最大到達出力は 10% 程度標準分割の方が大きくなっており、径方向出力分布と軸方向出力分布には過渡変化の全期間に亘って大きな差異は見られなかった。

分割による保守性の観点と、接続する冷却材配管位置との整合性の観点から、径方向 3 分割 & 周方向 6 分割の標準分割モデルは主蒸気管破断事故解析に適していると考えられる。

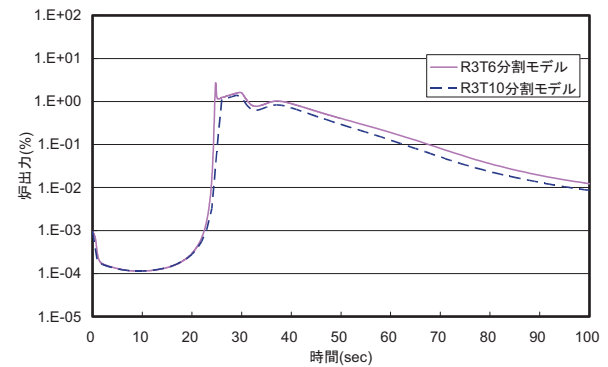


図 26 炉出力 (保守的のケース, HPI ポンプ 2 台)

4.3 初期ボロン濃度

RELAP5-3D コードでは反応度フィードバックとして減速材密度 (温度) フィードバック, ボロン濃度フィードバック, および燃料棒温度フィードバックの 3 つを考慮し、それぞれ独立にフィードバック補正量を計算して足し合わせている。

主蒸気管破断事故解析のように冷水導入による炉心への正の反応度添加を評価する場合、減速材密度 (温度) 係数を保守的に評価する観点からはボロン濃度は低い方がより保守的となる。RELAP5-3D コードによる解析ではマクロ定数とフィードバック補正計算用データは SIMULATE-3 コードで設定した値を使用するので、減速材密度 (温度) フィードバック計算用の係数は低いボロン濃度条件を用いて設定している。一方、ボロン濃度フィードバック補正量はボロン濃度変化に対して線形であるので、過渡解

析初期のボロン濃度は高めに設定した方が、負の反応度添加が抑えられて出力上昇が大きくなり保守的な評価となる。その理由は高圧注入（HPI）ポンプ作動によって炉心にボロン水が注入された時点での炉心ボロン濃度増加が緩和されるためである。

4.4 ボロン濃度係数

図 27 に高圧注入（HPI）ポンプ 1 台作動条件を用いた保守的ケースにおける 1000 秒までの解析結果を後述の影響評価の結果と併せて示す。

長時間解析では、まず事故発生後 30~40 秒で臨界到達後の出力増加が見られたのち、炉心ボロン濃度が増加して炉心は未臨界となって一旦出力は低下している。この後、炉心に導入される冷水による冷却材温度低下にともなう正の反応度添加と炉心ボロン濃度増加による負の反応度添加のバランスによって炉出力が変動している。

RELAP5-3D コードでは過渡期間の後半において炉心は再臨界となり、定格出力の 1~2% 程度まで再び炉出力は増加している。一方、SIMULATE-3K コードでは過渡期間後半での再臨界は見られなかった。

RELAP5-3D コードによる解析で過渡期間後半で炉心が再臨界に達する 300 秒以降では、炉出力の挙動が両コード間で差異が見られる。これは RELAP5-3D コードに設定したボロン濃度フィードバック係数が保守性を有すること、および RELAP5-3D コードのボロン濃度フィードバック係数および減速材密度フィードバック係数が互いの依存性を取り扱っていないことが原因となり、RELAP5-3D の出力が過大評価されたと考えられる。

この点について、核定数作成時の条件等に関してさらに検討した。

4.4.1 冷却材係数作成時の基準温度

主蒸気管破断事故は、過渡時の温度変化範囲が広く、長時間解析時の冷却材温度は、初期温度よりも 100℃ 以上低下する。これに対して、冷却材係数の作成は、基準点としての初期温度と初期温度 ± 50 ℃ の 3 点を用いてフィッティングしているため、主蒸気管破断事故の長時間解析においては、フィッティングに用いた温度よりも低い温度に到達し、外挿誤差を生じる可能性がある。

なお、事象発生後 100 秒の範囲においては、外挿となることはない。

4.4.2 ボロン濃度係数作成時の冷却材温度

ボロン濃度係数作成時のボロン濃度範囲は、200ppm の幅で 3 種類のボロン濃度状態を設定しフィッティングしているが、このときの基準冷却材温度には初期温度（286.1℃）を用いている。

ここで、ボロン濃度は水に対する重量割合であるので、基準温度が異なると、濃度は同じでも単位体積あたりの ^{10}B の個数密度は異なる。同様に、ボロン濃度を重量割合で一定量変化させた場合、たとえば、290℃ で 100ppm 変化する場合と、240℃ で 100ppm 変化する場合とでは、 ^{10}B 個数密度の変化量は冷却材密度が高い 240℃ 時の方が大きくなる。

すなわち、ボロン濃度係数作成時の基準温度として低い温度を用いた方が、同じ重量% 変化させたときの ^{10}B 個数密度の変化量が大きく、ボロン価値の絶対値は大きくなる。

主蒸気管破断事故の場合、初期温度は過渡変化中最も高い温度なので、これを係数作成の基準温度とした場合、ボロン価値を最も小さく見積もることとなる。これは、安全注入でボロン濃度が上昇した時の RELAP5-3D コードの出力が SIMULATE-3K コードよりも大きい傾向と一致しており、両者の差異の原因の一つと考えられる。

4.4.3 冷却材係数作成時のボロン濃度の影響

ボロン濃度フィードバックが基準温度の影響を受けるのと同様に、減速材密度フィードバックは、係数作成時の基準ボロン濃度の影響を受ける。

一般的に、ボロン濃度が高いほど密度係数は小さく（温度係数が浅く）なるため、今回のように、0ppm 付近で作成した冷却材係数を用いると、減速材温度に対する感度が大きくなる（保守的に大きくした）。

主蒸気管破断事故長時間解析時の事象後半においてはボロン濃度が高くなるため、実際には密度係数は初期よりも小さくなると考えられる。RELAP5-3D コードでは、ボロンとは独立した一定の密度フィードバックが適用されるため、冷却材温度低下による反応度添加を過大評価することとなる。この影響も、両コードの差異の原因の一つと考えら

れる。

4.4.4 SIMULATE-3K コードの核定数

SIMULATE-3K コードのボロン反応度計算は、 ^{10}B 個数密度と ^{10}B ミクロ断面積に基づくミクロ計算であり、適用性が冷却材温度に大きく依存することはない。また、燃料定数に関しても、様々な燃焼度、温度、ボロン濃度等を組み合わせたブランチ計算により、パラメータの組み合わせに依存しない適切な取り扱いとなっている。

4.4.5 係数作成条件の影響度

核定数作成条件による影響を確認するために、以下のケースを比較検討した。解析結果を図 27 に示す。

- ・冷却材係数作成時のフィッティング温度を 50°C 低下 (4.4.1 節に対応)
- ・ボロン濃度係数作成時の基準温度を 50°C 低下 (4.4.2 節に対応)

冷却材係数作成時の基準温度を変更し、冷却材温度に対する係数の外挿をなくしたケースでは、もともと冷却材の非線形性が小さいことから、ほとんど影響は見られなかった。

一方、ボロン濃度係数作成時の基準冷却材温度を変更したケースにおいては、長期解析の事象後半の出力上昇が低下し、出力上昇が緩和された。これは、低い温度（高い水密度）でボロン濃度係数を作成することにより、ボロン価値が元のケースよりも大きくなり、安全注入水による反応度抑制効果が大きくなったためと考えられる。

長時間解析の事象後半においては、ボロン濃度係

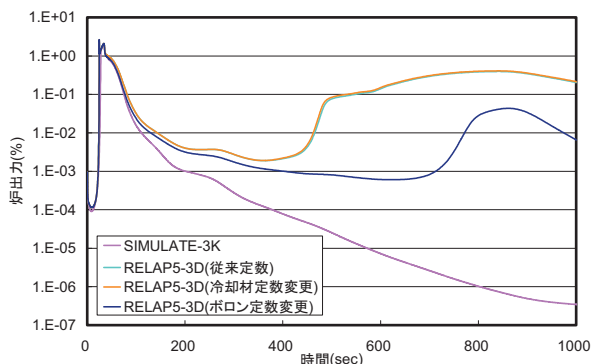


図 27 炉出力応答の比較（保守的ケース）

数を変更しても両コード間の差異が残っているが、これは、4.4.3 節に述べたように、RELAP5-3D コードが一定の減速材密度フィードバックで計算していることが原因の一つと考えられる。（実際にはボロン濃度の上昇により、事象が進むほど密度係数は小さくなる。）

5. まとめ

RELAP5-3D コードを用いて、 15×15 型 3 ループプラントを対象に、EOC の最確炉心条件および保守的炉心条件を用いた主蒸気管破断事故解析を実施し、炉心条件および解析条件の違いによるプラント挙動への影響を明らかにした。

解析結果では、最確炉心条件では臨界に至らなかったが、保守的炉心条件を設定したケースでは臨界になり、炉出力が上昇する結果となった。高圧注入（HPI）ポンプによるボロン注入によって炉出力は低下するが、主蒸気逆止弁の有無と、原子炉冷却材ポンプ（RCP）運転継続の有無が炉出力の挙動に影響を与えることが示された。

RELAP5-3D コードによる解析結果から得られた過渡期間中の炉心出入口領域状態量を境界条件として設定し、RELAP5-3D コードと SIMULATE-3K コードの炉心モデルを用いて主蒸気管破断事故解析を実施した。最確炉心条件と保守的炉心条件のいずれのケースにおいても両コード間の結果はよく一致しており、RELAP5-3D コードによる炉心 3 次元出力解析は SIMULATE-3K コードと同等な評価となることがわかった。

今回の評価に用いた RELAP5-3D コードのモデルについて感度解析を行い、保守性が考慮されており適切であることを確認した。

長時間解析では、過渡期間後半で炉出力の挙動が RELAP5-3D コードと SIMULATE-3K コード間で差異が見られたが、その原因は、RELAP5-3D コードに設定したボロン濃度フィードバック係数が保守性を有すること、および RELAP5-3D コードのボロン濃度フィードバック係数および減速材密度フィードバック係数が互いの依存性を取り扱っていないことが原因となり、RELAP5-3D の出力が過大評価されたと考えられる。

以上のことから、RELAP5-3D コードによる解析結果には、なお保守性が含まれるものと考えられる。

文献

- (1) 原子力安全委員会, 発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針, (2001)
- (2) 石川迪夫, 原子炉の暴走 第2版 一臨界事故で何が起きたか一, 日刊工業新聞社 (2008)
- (3) S.Aoki, T.Suemura, J.Ogawa, T.Takeda, "The Verification of 3 Dimensional Nodal Kinetics Code ANCK Using Transient Benchmark Problems," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.44, No.6, pp.862-868 (2007)
- (4) S.Aoki, T.Suemura, J.Ogawa, T.Takeda, "Analysis of the Main Steam Line Break Benchmark (Phase II) Using ANCK/MIDAC Code," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.45, No.1, pp.36-44 (2008)
- (5) 坂場弘, 研究開発の現状紹介, 熱流動部会 ニュースレター (第60号), 日本原子力学会熱流動部会 (2008)
- (6) The RELAP5-3D © Code Development Team, RELAP5-3D © Code Manual, INEEL-EXT-98-00834 Revision 2.3, (2005).
- (7) K. N. Ivanov, T. M. Beam and A. J. Baratta, Pressurised Water Reactor Main Steam Line Break (MSLB) Benchmark -Volume I: Final Specifications, NEA/NSC/DOC (99) 8, (1999).
- (8) N. Todorova, K. Ivanov and B. Taylor, Pressurised Water Reactor Main Steam Line Break (MSLB) Benchmark -Volume IV: Results of Phase III on Coupled Core-plant Transient Modelling, NEA/NSC/DOC (2003) 21, (2003).
- (9) 佐々木泰裕, 長江尚史, "RELAP5-3D コードを用いた主蒸気管破断ベンチマーク解析と結果の可視化," INSS JOURNAL, Vol.15, p.313 (2008)
- (10) 佐々木泰裕, 前田俊哉, 馬場巖, 志水孝司, "RELAP5-3D コードを用いた3次元解析手法の検討," 日本原子力学会 "2008年秋の大会", I51 (2008)
- (11) 美浜発電所 原子炉設置変更許可申請書 (3号原子炉施設の変更), 関西電力株式会社 (2003)