

# RELAPの開発状況

## The development status of RELAP

楠木 貴世志 (Takayoshi Kusunoki)\*<sup>1</sup> 高木 俊弥 (Toshiya Takaki)\*<sup>2</sup>

柳 千裕 (Chihiro Yanagi)\*<sup>1</sup> 藪下 幸久 (Yukihisa Yabushita)\*<sup>3</sup> 安藤 伸裕 (Nobuhiro Ando)\*<sup>3</sup>

**要約** 許認可解析にも用いられている事故解析コード RELAP5-3D のバージョンアップ内容が解析に与える影響を把握することを目的とし、本研究は開始された。本研究では、RELAP5-3D のバージョンアップに伴う改良点の内容の精査検討を行い、主蒸気管破断 (MSLB) 事象やスクラム失敗事象 (ATWS) 事象といった過去の解析経験を活用しながら、解析結果への影響を把握するとともに、当社の RELAP5-3D 解析基盤を整備した。本稿は、これまで実施してきた研究成果についてまとめたものである。

**キーワード** RELAP, 3D, バージョンアップ

**Abstract** This research was started with the aim of understanding the effects of the version upgrade of the accident analysis code RELAP5-3D on the analysis results obtained. In this report, we summarize our investigation of the contents of the version upgrade and our understanding of the effects on the analysis results while utilizing past analysis experiences of the main steam line break (MSLB) event and the anticipated transient without scram (ATWS) event. Using this information, we prepare the analysis platform of RELAP5-3D.

**Keywords** RELAP, 3D, version upgrade

## 1. はじめに

RELAP (The Reactor Excursion and Leak Analysis Program) バージョン 5 (RELAP5) コードは、規制や許認可、運転方法の評価解析に使用する目的で、また、原子力プラント解析の基盤として、米国原子力規制委員会 (NRC) により開発された、加圧水型原子炉/沸騰水型原子炉 (PWR/BWR) の冷却材喪失事故 (LOCA) 事象、過渡事象の解析を行うコードである。RELAP5 は汎用性の高いコードであり、原子炉冷却システムの過渡変動の計算に加えて、水、蒸気、非凝縮性ガス、または溶質を含む混相流を対象とした広範囲の熱流動解析に適用できる。米国エネルギー省 (DOE) の支援により、機能が拡張され、アイダホ国立研究所 (INL) によって RELAP5-3D が開発された。RELAP5-3D は RELAP5 の MOD3 バージョンの後継コードであり、RELAP5/MOD3 をベースに伝熱流動、核動特性に関する 2 次元、3 次元解析が可能のように機能が拡張されている。発電炉はもとより、多種多様なタイプの原子炉

の解析に国際的に広く利用され、実績も豊富である<sup>(1)</sup>。

RELAP5 の基礎方程式は、1 次元管路網モデルをベースとし、多次元流動領域に対しては 1 次元管路の組み合わせでモデル化しており、運動量の 3 次元ベクトルの取扱いはしない。但し、RELAP5-3D では、3 次元領域も使用でき、3 次元ベクトルの取扱いが可能である。気液熱非平衡 2 流体モデルについては、気相、液相に対して、それぞれ 3 つの保存則 (エネルギー保存、質量保存、運動量保存) を適用している。気液相間の相互作用は、流動様式マップに基づくそれぞれの構成式が適用される。炉心核動特性モデルは 1 点炉近似核動特性モデルを採用している。一方、RELAP5-3D では、3 次元炉心核動特性モデルも利用可能である。

これまで、当研究所では RELAP5 コードによる解析結果の妥当性確認を実施してきた。経済協力開発機構 (OECD) で実施された主蒸気管破断ベンチマーク解析を実施し、他の参加機関との比較を行い、他の参加機関の結果と同様な解析結果を得ることができた<sup>(2)</sup>。また、許認可

\*1 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現 関西電力(株)

\*2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

\*3 (株)シー・エス・エー・ジャパン

解析にて使用されている解析手法と同等の精度を達成し、COBRA-EN コードと米国電力研究所 (EPRI) の限界熱流束相関式との組合せによる炉心健全性評価への適用性を確認した<sup>9)</sup>。その他に、炉心出力分布について実プラントの炉心設計で用いられている SIMULATE-3(K)コードとの比較検証を解析の都度実施したこと、実プラントの実測値 (INOCRE 測定値) との比較検証を炉心モデル作成時に実施したこと、及び、定常設定を解析の都度実施することにより、プラントデータに異常がないことを確認してきた。

これまで使用してきた事故解析コードである RELAP5-3D のバージョンアップに伴う改良点の内容の精査検討を行い、これまで実施してきた許認可解析経験を活用しながら、解析結果への影響を把握するとともに、解析基盤を整備してきた。

## 2. RELAPにおいて抽出した改良点

RELAP5-3D は 1995 年以降、バージョンアップを繰り返し、現在の最新版はバージョン 4.4.2 である。

表 1 バージョンアップに伴う改良点

バージョン	改良点
2.3.6から2.4.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 臨界流モデル</li> <li>・ 熱構造材物性値</li> </ul>
2.4.2から4.0.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 崩壊熱モデル</li> <li>・ 音速計算</li> <li>・ 粘性効果</li> <li>・ 温度一定での外挿の採用</li> <li>・ 質量エラーの詳細出力</li> <li>・ Groeneveld CHF テーブル</li> <li>・ 2次元熱伝導モデル</li> <li>・ 低速流れモデル</li> <li>・ 熱流束境界条件</li> <li>・ ボロン追跡モデル</li> <li>・ 二相下降流モデル</li> <li>・ エントレインメントモデル</li> <li>・ 臨界流モデル</li> <li>・ 熱伝達係数に対する乗数</li> </ul>
4.0.3から4.1.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 被覆管変形モデルにおけるクロスフロー接続</li> <li>・ 2005 Groeneveld CHF 相関式</li> <li>・ 丸め誤差低減オプション</li> <li>・ ストリップ機能</li> <li>・ ストリップファイル</li> <li>・ 制御変数</li> </ul>
4.1.3から4.2.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 体系移動問題</li> </ul>

これまで当研究所では RELAP5-3D のバージョンアップに伴う改良点の内容の精査検討を行い、解析結果への影響を及ぼす可能性のある改良点を抽出してきた (表 1)。各改良点の検討結果の詳細については次章で説明を行う。

## 3. 検討結果

### 3.1 バージョン 2.3.6から2.4.2

#### 3.1.1 臨界流モデル

バージョン 2.4.2 において、Henry-Fauske 臨界流モデルが時間刻み幅 (タイムステップサイズ) に依存しないように改良された (修正 Henry-Fauske モデル)。加えて、ジャンクション制御フラグ c が新設され、ジャンクション毎に臨界流モデルとして、Ransom Trapp モデル<sup>(4)(5)</sup>、または修正 Henry-Fauske モデルのいずれかを選択できるように改良された。

本研究において新バージョン (バージョン 2.4.2) で解析を実施し、ジャンクション制御フラグ c により、臨界流を Ransom Trapp モデル、または修正 Henry-Fauske モデルで解析できることを破断流量により確認した (図 1)。

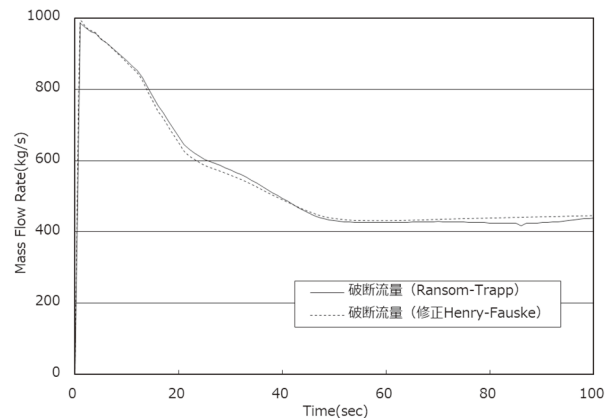


図 1 破断流量

#### 3.1.2 熱構造材物性値

バージョン 2.4.2 において、RELAP5-3D コードに組み込まれている熱構造材の物性値が軽水炉燃料の代表的なデータベースである MATPRO と一致するよう修正された。

本研究において、新バージョン (バージョン 2.4.2) の RELAP5-3D コードに組み込まれる熱構造材の物性値が MATPRO と一致していることを確認するとともに、解析を実施できることを燃料被覆管温度により確認した (図

2).

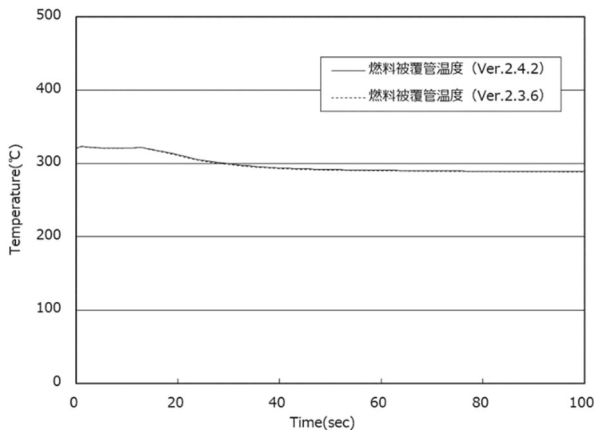


図2 燃料被覆管温度

### 3.2 バージョン 2.4.2から4.0.3

#### 3.2.1 崩壊熱モデル

米国規格協会／米国原子力学会（ANSI/ANS）の崩壊熱に関する標準が 2005 年に改訂された。この崩壊熱に関する標準の情報を RELAP5-3D に搭載するため、バージョン 4.0.3 でカード 30000002（核分裂生成物崩壊熱情報）が変更された。

本研究において、新バージョン（バージョン 4.0.3）に追加された 2005 年の ANSI/ANS 崩壊熱モデル、又は 1979 年の ANS 崩壊熱モデルが選択可能であることを確認するとともに、それらのモデルが正常に機能することを崩壊熱により確認した（図3）。

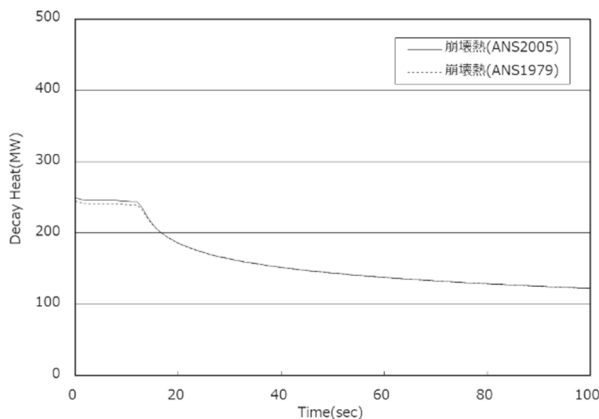


図3 崩壊熱

#### 3.2.2 音速計算

バージョン 4.0.3 において、非凝縮性ガスが存在する時のジャンクション点での音速計算がボリュームでの音速計算手法と整合する計算方法に修正された。ちなみに、旧計算手法はカード 1 のオプション 3 で利用できる。

本研究において新バージョン（バージョン 4.0.3）で解析を実施し、旧バージョン（バージョン 2.4.2）の非凝縮性ガスが存在する時のジャンクション音速が改良されていることを破断流音速により確認した（図4）。

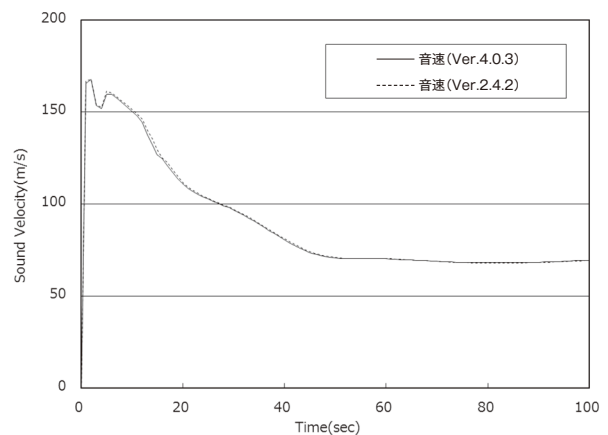


図4 破断流音速

(非凝縮性ガス存在時の音速モデル)

#### 3.2.3 粘性効果

バージョン 4.0.3 において、3 次元コンポーネント（MULTID コンポーネント）を使用することにより、いくつかの乱流効果についてモデル化が可能となった。これはカード 1 のオプション 31 により制御される。

本研究において、RELAP5-3D コードの新バージョン（バージョン 4.0.3）の当該モデルの評価プログラム flux3d.f を調査し、コンポーネント内に蒸気が発生する場合には粘性項が計算されることを確認した。また、実機のスクラム失敗事象（ATWS）解析において、オプション 31 を指定した場合（粘性モデルを使用）としない場合（粘性モデルを不使用）を比較した結果、原子炉圧力容器内の圧力分布に差異が見られることを炉心部圧力により確認した（表2）。

表 2 炉心部圧力 (時刻 500 秒) (一部抜粋)

r	$\theta$	z	粘性モデル使用	粘性モデル不使用	偏差 (MPa)
			(MPa)	(MPa)	
1	1	12	15.4248	15.4295	-0.0047
1	2	12	15.4247	15.4294	-0.0047
1	3	12	15.4248	15.4294	-0.0046
1	4	12	15.4249	15.4295	-0.0046
1	5	12	15.4249	15.4295	-0.0046
1	6	12	15.4248	15.4294	-0.0046
1	7	12	15.4248	15.4294	-0.0046
1	8	12	15.4248	15.4295	-0.0047
2	1	12	15.4260	15.4306	-0.0046
2	2	12	15.4257	15.4304	-0.0047
2	3	12	15.4258	15.4304	-0.0046
2	4	12	15.4260	15.4306	-0.0046
2	5	12	15.4261	15.4307	-0.0046
2	6	12	15.4258	15.4305	-0.0047
2	7	12	15.4258	15.4305	-0.0047
2	8	12	15.4260	15.4306	-0.0046
3	1	12	15.4264	15.4310	-0.0046
3	2	12	15.4260	15.4307	-0.0047
3	3	12	15.4261	15.4307	-0.0046
3	4	12	15.4264	15.4310	-0.0046
3	5	12	15.4266	15.4312	-0.0046
3	6	12	15.4262	15.4308	-0.0046
3	7	12	15.4262	15.4308	-0.0046
3	8	12	15.4264	15.4310	-0.0046

3.2.4 温度一定での外挿の採用

圧力一定として不適切な液相密度の外挿をすることで質量エラーが発生する。そのため、バージョン 4.0.3 から温度一定で液相密度を外挿する方法が追加された。この方法はカード 1 のオプション 71 で利用できる。

本研究において、圧力一定として液相密度の外挿計算を行っていた旧バージョン (バージョン 2.4.2) と比較して、新バージョン (バージョン 4.0.3) では温度一定で液相密度を外挿することによって、計算精度が向上していることを質量エラーにより確認した (図 5)。

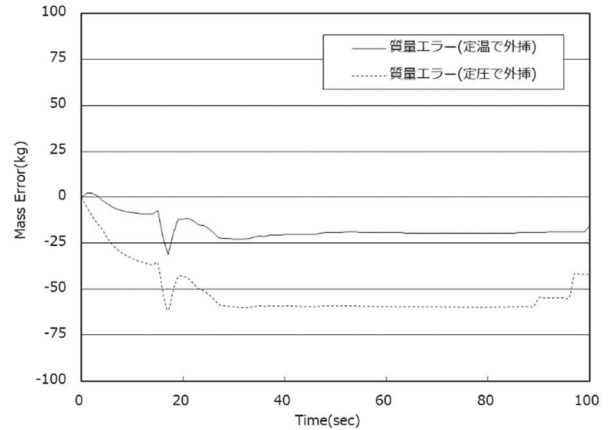


図 5 系全体の積算質量エラー (液相密度評価モデル)

3.2.5 質量エラーの詳細出力

バージョン 4.0.3 で各種質量エラーの出力指定 (Minor Edits) に以下が追加された。

- ・ 総量 (液相+気相)
- ・ 液相
- ・ 気相 (非凝縮含む)
- ・ 非凝縮性ガス
- ・ ホウ素

本研究において新バージョン (バージョン 4.0.3) で解析を実施し、各種質量エラーのマイナエディットが正常に機能することを破断ボリュームの質量エラーにより確認した (図 6)。なお、図 6 では気相、ホウ素及び非凝縮性ガスの質量エラーが一致しており (質量エラーは 0)、質量エラー総量が液相の質量エラーと一致している。

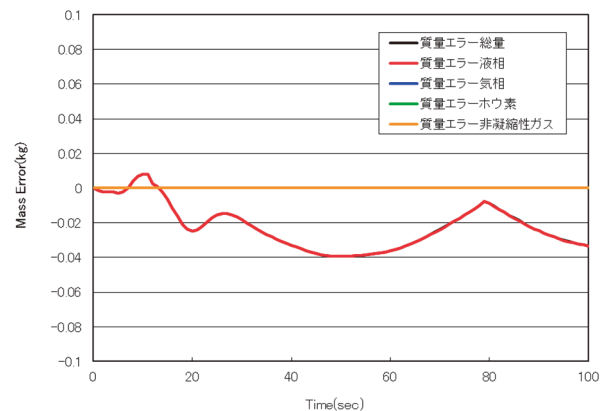


図 6 破断ボリュームの質量エラー (エディット表示)

### 3.2.6 Groeneveld CHFテーブル

RELAP5-3D の Groeneveld CHF 表に誤記があることが判明したため、バージョン 4.0.3 でこれらの誤記が修正された。

本研究において旧バージョン (バージョン 2.3.6) と新バージョン (バージョン 4.0.3) それぞれで解析を行い、旧バージョン (バージョン 2.3.6) の限界熱流束 (CHF) が新バージョン (バージョン 4.0.3) で再現されていることを確認した (図 7)。なお、図 7 では両者に有意な差異は見られない。

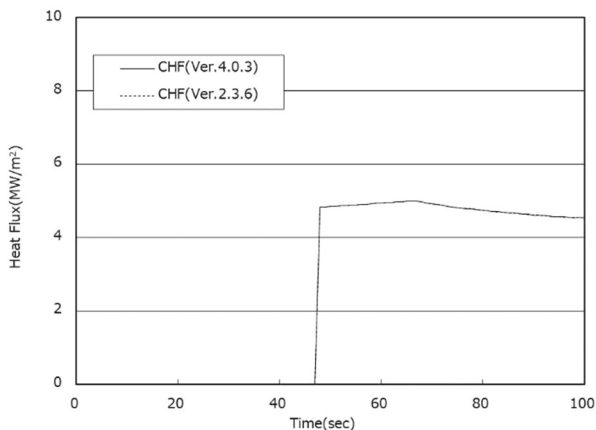


図 7 限界熱流束 (限界熱流束モデル)

### 3.2.7 2次元熱伝導モデル

これまで 1 次元熱伝導モデルのみであったが、バージョン 4.0.3 から 2 次元熱伝導モデルが追加された。2 次元熱伝導モデルは再冠水モデルの一部であり、差分法には ADI 法を使用している。ADI 法とは「交互方向陰解法」のことであり、一次元熱伝導に対しては、一般的にクランク・ニコルソン法が適用されるが、それを時刻の進展時に x、y の各方向について交互に差分法を求める方法である。2 次元熱伝導モデルでは、カード ICCCC000 の W6 を 3 にセットする。

本研究において新バージョン (バージョン 4.0.3) で解析を実施し、2 次元熱伝導モデルを適応した場合としない場合において、燃料被覆管温度に差異が見られ、特に 2 次元熱伝導モデルを適応した場合には、早期のクエンチングが見られることを炉心温度により確認した (図 8)。

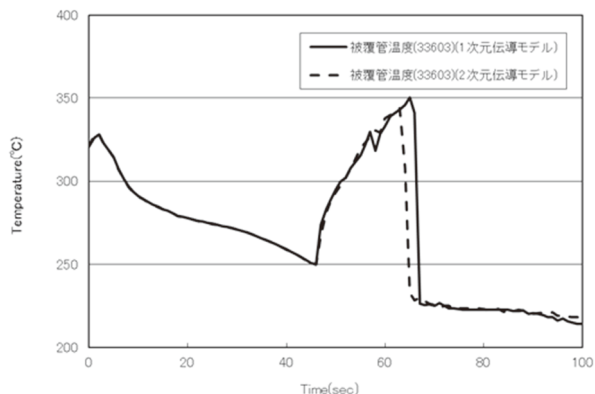


図 8 炉心温度

### 3.2.8 低速流れモデル

運動方程式に対する現行の解法は低流速時には精度が良くない。特に現状のコードでは壁面摩擦力とユーザー入力の形状損失係数の計算において、Re 数が最小値 50 に制限されているため、この入力する損失係数によって求まる圧力損失はジャンクション流速が 0.01 m/sec に近づくに伴い精度が悪くなる。また、コードは水平管における低流速の場合に精度が悪くなるというスピニアップ問題を回避するために、総圧力損失の絶対値を 0.00004 Pa に制限して、ユーザーが低流量の運動方程式のより精度が良い結果が得られるように改良された。今回の Re 数の最小値を 0.01 に設定する改良によって、形状損失圧損の計算で使用される最小流速は  $1.0 \times 10^{-8}$  m/sec となり、特に圧力損失の絶対値に対しては最小値を設定しない。このモデルはカード 1 のオプション 29 で利用できる。

表 3 水平管内の圧力損失 (流入速度 0.0006m/s)

時刻	低速モデル 使用時	低速モデル 不使用時	偏差
(s)	(Pa)	(Pa)	(Pa)
0.0	0.0000000	0.0000000	0.0000000
0.5	0.0164054	0.0158290	0.0005764
1.0	0.0164052	0.0158288	0.0005764
1.5	0.0164052	0.0158288	0.0005764
2.0	0.0164052	0.0158288	0.0005764
2.5	0.0164052	0.0158288	0.0005764
3.0	0.0164052	0.0158288	0.0005764
3.5	0.0164052	0.0158288	0.0005764
4.0	0.0164052	0.0158288	0.0005764
4.5	0.0164052	0.0158288	0.0005764
5.0	0.0164052	0.0158288	0.0005764

本研究において新バージョン（バージョン 4.0.3）で解析を実施し、カード 1 のオプション 29 を適用した場合と適用しない場合において、低速流れにおける壁面摩擦係数、圧力損失に差異が見られることを水平管内の圧力損失により確認した（表 3）。

### 3.2.9 熱流束境界条件

バージョン 4.0.3 で制御系変数を熱流束境界条件とするモデル化が可能のように改良された。カード 1CCCCG501～1CCCCG599、1CCCCG601～1CCCCG699 の W3（入力データの 3 番目の変数）を 2xxxx とする。xxxx の値は、熱流束境界条件をモデル化する制御系変数に対応する 1～9999 の値である。

本研究において新バージョン（バージョン 4.0.3）で解析を実施し、蒸気発生器伝熱管の熱流束を一定と仮定した場合、過渡時の蒸気発生器伝熱管熱流束の挙動に変化が見られず、一定値のままであることを燃料棒の熱流束により確認した（図 9）。

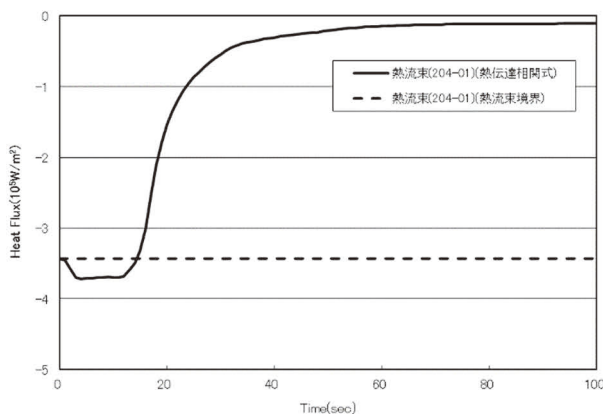


図 9 燃料棒の熱流束

### 3.2.10 ボロン追跡モデル

Godunov のボロン追跡モデル（カード 1 のオプション 23）の間違いが見つかったため、バージョン 4.0.3 で修正された。

本研究において解析を実施し、旧バージョン（バージョン 2.4.2）では、1 次冷却材のボロン濃度に数値拡散が見られていたが、新バージョン（バージョン 4.0.3）で改良されていることをボロン密度により確認した（図 10）。

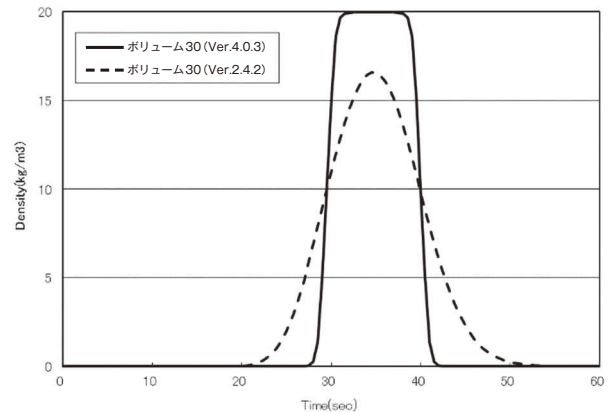


図 10 ボロン密度

### 3.2.11 二相下降流モデル

RELAP5-3D に内蔵されている EPRI のドリフトフラックス相関式は、小径、中間径の管とロッドバンドルでの高質量束下降流（下降流の流量が高い流れ）ではスリップ比（気液二相流における流路断面平均の気相速度と液相速度の比）を高めて予測する。この問題を解決するため、バージョン 4.0.3 から小径、中間径の管とロッドバンドルでの下降流の質量流束が 1,500 kg/(s・m<sup>2</sup>) を超える場合、EPRI 相関式は Zuber-Findlay(6) と Kataoka-Ishii(7) の相関式に置き換わるよう修正された。Zuber-Findlay と Kataoka-Ishii の相関式は既に大径管の高質量束下降流に適用されている。

本研究において新バージョン（バージョン 4.0.3）で解析を実施し、蒸気発生器ダウンカム下部の流量流束、及び温度挙動を比較し、スリップ比が改良されていることを破断側ダウンカマの質量流束により確認した（図 11）。

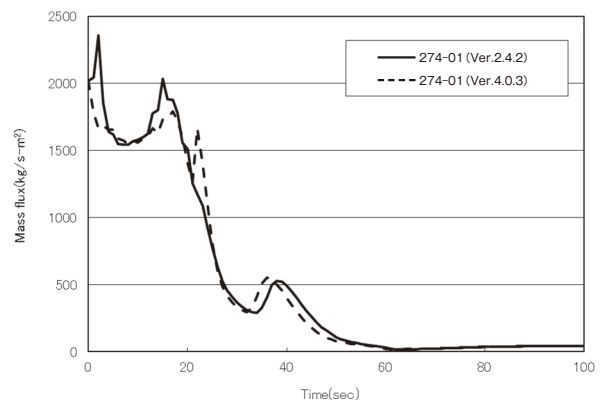


図 11 破断側ダウンカマの質量流束

### 3.2.12 エントレインメントモデル

上流ボリュームの質量流束が  $3,000 \text{ kg/(s} \cdot \text{m}^2)$  未満の場合にエントレインメントモデルが適用される。これまで (バージョン 2.4.2)、このモデルは上流ボリュームと当該ジャンクション両方の質量流束が  $3,000 \text{ kg/(s} \cdot \text{m}^2)$  未満の場合に適用されていたが、ジャンクション質量流束が  $3,000 \text{ kg/(s} \cdot \text{m}^2)$  あたりで激しい振動が観測された。

本研究において解析を実施し、旧バージョン (バージョン 2.4.2) では質量流束、ボイド率に激しい振動がみられる解析ケースにおいて、新バージョン (バージョン 4.0.3) では振動が解消されていることを質量流束により確認した (図 12)。

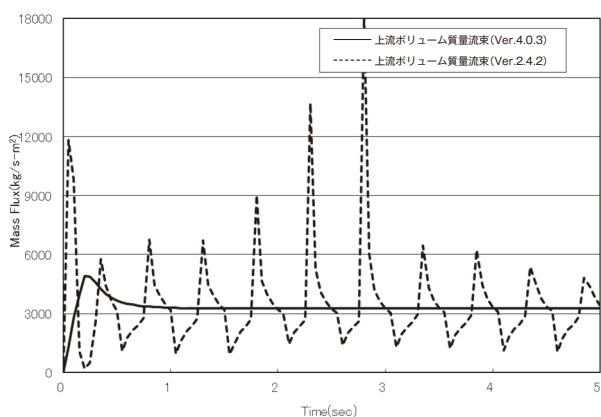


図 12 上流ボリューム質量流束

### 3.2.13 臨界流モデル

バージョン 4.0.3 において Henry-Fauske の臨界流モデルが改良され、破断ジャンクションが入口に接続されているのか、出口に接続されているのかに係らず運動量フラックス (モーメンタムフラックス) 項が正しく計算されるようになった。平衡クオリティ (乾き度) 計算が変更され、クロスフロージャンクションが入口面に接続されているのか、出口面に接続されているのかに計算値は依存しない。そこで、バージョン 4.0.3 から破断ジャンクションが入口側に設置されても、出口側に設置されても、正しく臨界計算が行えるよう修正された。

本研究において新バージョン (バージョン 4.0.3) で解析を実施し、破断ジャンクションが入口側に設置された場合でも、出口側に設置された場合でも、正しく臨界計算が行えるよう修正されていることを破断流の質量流量により確認した (図 13)。

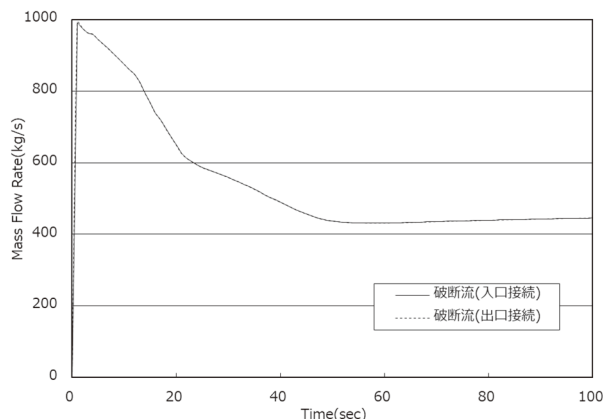


図 13 破断流の質量流量 (臨界流モデル)

### 3.2.14 熱伝達係数に対する乗数

バージョン 4.0.3 から、熱伝達係数に対する乗数が強制対流、層流域、自然対流のいずれの相関式に対してもユーザー入力が可能となった。これらの乗数は混合対流熱伝達のより精緻な表現を可能にする。

本研究において新バージョン (バージョン 4.0.3) で解析を実施し、熱伝達係数に対する乗数により伝熱量が適切に評価されていることを、蒸気発生器除熱量により確認した (図 14)。

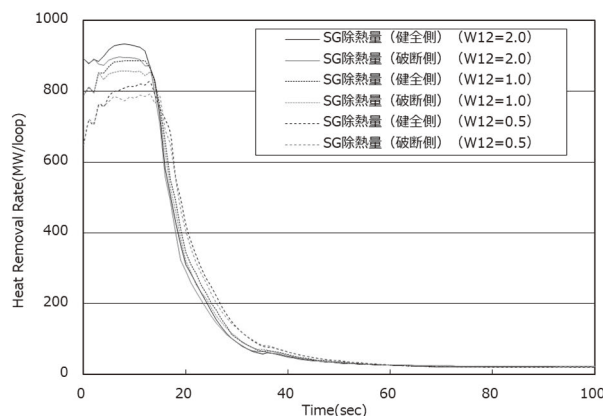


図 14 蒸気発生器除熱量

## 3.3 バージョン 4.0.3から4.1.3

### 3.3.1 被覆管変形モデルにおけるクロスフロー接続

バージョン 4.0.3 以前は被覆管変形モデルにおけるクロスフロー接続を適用した解析において、被覆管変形に伴う幾何形状変化が正しく取り扱われていないことが分かった。そのため、バージョン 4.1.3 で被覆管変形モデルに

よるクロスフロー接続のモデル化機能が追加された。

本研究において、RELAP5-3D コードのソースファイルを調査することによって、新バージョン（バージョン 4.1.3）では被覆管変形に伴う幾何形状変化の効果がそれらのロッド群に囲まれた流路面積の減少に反映されていることが確認された（図 15）。

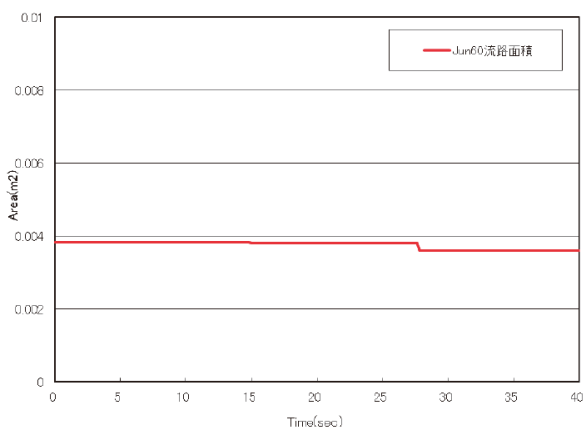


図 15 流路面積

### 3.3.2 2005 Groeneveld CHF 相関式

バージョン 4.1.3 から、2005 Groeneveld CHF 相関式は、カード 1 オプション 53 を用いて有効化することができるよう修正された。

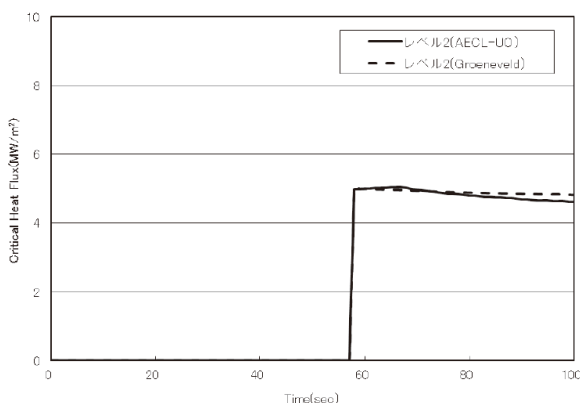


図 16 限界熱流束

本研究において新バージョン（バージョン 4.1.3）で解析を実施し、カード 1 オプション 53 を指定した場合としない場合を比較した結果、燃料棒の冷却状況は同等であるのに対して、限界熱流束（CHF）相関式の相違によるものと考えられる相違が見られることを確認した。これにより、CHF 相関式が変更されていることを限界熱流束の値

を比較することにより確認した（図 16）。

### 3.3.3 丸め誤差低減オプション

バージョン 4.1.3 から、行列方程式を解く BPLU ソルバ等に 4 倍精度浮動小数を追加して、丸め誤差を取り除くオプションが用意された。このオプションを使用すると丸め誤差は減少するが計算時間が大幅に増加する。これは、カード 1 オプション 63 でアクセスできる。

本研究において新バージョン（バージョン 4.1.3）で解析を実施し、カード 1 オプション 63 を指定する場合としない場合について、CPU 時間、主要な炉内パラメータの挙動を比較することによって丸め誤差低減モデルが採用されていることを蒸気発生器圧力により確認した（図 17）。

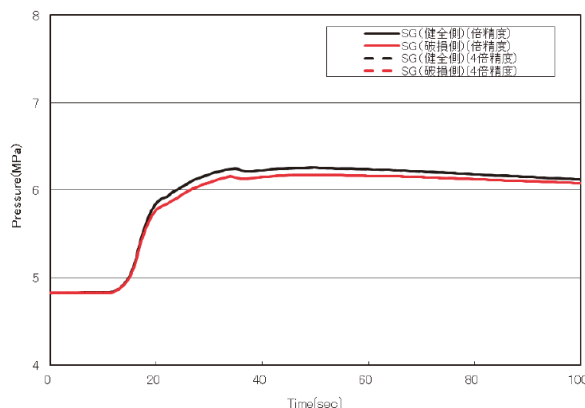


図 17 蒸気発生器圧力（丸め誤差）

### 3.3.4 ストリップ機能

バージョン 4.1.3 でユーザーはストリップ要求データカード 1001 からカード 1999 のワード 2 にキーワード all を使用し、プロットファイル特定の変数をすべて要求できるよう修正された（例えば、1001 mflowj all）。

本研究において新バージョン（バージョン 4.1.3）で解析を実施し、本機能が正しく機能することを、入力データで使用される htnr（熱流束）、cntrlvar（制御系ブロック値）についてそれぞれすべての熱構造体、制御ブロックの値が出力されていることにより確認した（図 18）。





### 3.4 バージョン4.1.3から4.2.1

#### 3.4.1 体系移動問題

バージョン 4.1.3 から、地震時に船舶、飛行機、宇宙船、地上の原子炉などに発生する可能性のある移動問題をシミュレートするための新しい機能が追加された。この新しい機能により、ユーザーは入力を通じ、参照ボリュームの位置と並進変位によって暗示される原点を中心とした回転を含む動きをシミュレートできる。過渡時の回転は、オイラー角と並進変位のテーブルとの組み合わせを使用してシミュレートされる。

本研究において、水平管内の 1 点を中心とした回転について新バージョン (バージョン 4.2.1) で解析を実施し、本機能を回転速度により確認した (図 23)。

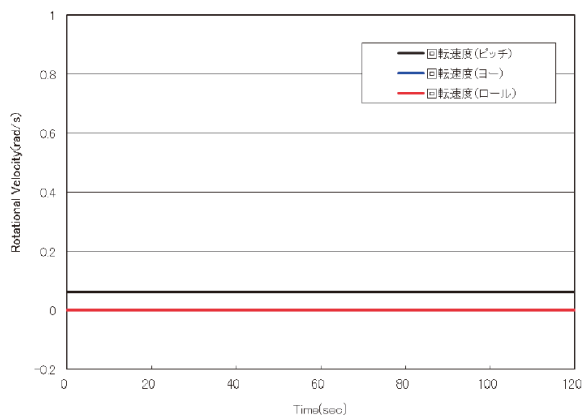


図 23 回転速度

## 4. おわりに

当研究所ではこれまで RELAP5-3D のバージョンアップに伴う改良点の内容の精査検討を行い、解析結果への影響を及ぼす可能性のある以下の改良点を抽出し、検討を行った。その結果、各モデルが正常に機能することを確認できた。

- ・ 臨界流モデルの改良
- ・ 熱構造材物性値
- ・ 崩壊熱モデル
- ・ 音速計算
- ・ 粘性効果
- ・ 温度一定での外挿の採用
- ・ 質量エラーの詳細出力
- ・ Groeneveld CHF テーブル

- ・ 2次元熱伝導モデル
- ・ 低速流れモデル
- ・ 熱流束境界条件
- ・ ボロン追跡モデル
- ・ 二相下降流モデルの改良
- ・ エントレインメント
- ・ 臨界流モデルの改良
- ・ 熱伝達係数に対する乗数
- ・ 被覆管変形モデルにおけるクロスフロー接続
- ・ 2005 Groeneveld CHF 相関式
- ・ 丸め誤差低減オプション
- ・ ストリップ機能
- ・ ストリップファイル
- ・ 制御変数
- ・ 体系移動問題

今後も、RELAP5-3D のバージョンアップに伴う改良点が解析に与える影響を把握するとともに、その改良点の内容の精査検討を行う予定である。

## 引用文献

- (1) Idaho National Laboratory, “RELAP5-3D Code Manual”, INEEL-EXT-98-00834 (2013).
- (2) 佐々木泰裕, 長江尚史, RELAP5-3D コードを用いた主蒸気管ベンチマーク解析と結果の可視化, INSS JOURNAL Vol. 15 (2008).
- (3) 川崎郁夫, 吉田至孝, 佐々木泰裕, COBRA-EN コード/EPRI 相関式の DNBR 計算信頼性評価, INSS JOURNAL Vol. 18 (2011).
- (4) V. H. Ransom and J. A. Trapp, “The RELAP5 Choked Flow Model and Application to a Large Scale Flow Test”, Proceedings of the ANS/ASME/NRC International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Saratoga Springs, New York, October 5-8 (1980), pp. 799-819.
- (5) J. A. Trapp and V. H. Ransom, “A Choked-Flow Calculation Criterion for Nonhomogeneous, Nonequilibrium, Two-Phase Flows”, International Journal of Multiphase Flow, Volume 8, Issue 6 (1982), pp.669-681.
- (6) N. Zuber and J. Findlay, “Average Volumetric Concentrations in Two-Phase Flow Systems”, Journal of Heat Transfer. 87 (1965), pp. 453-568.

- (7) I. Kataoka and M. Ishii, "Drift Flux Model for Large Diameter Pipe and New Correlation for Pool Void Fraction", *International Journal of Heat Mass Transfer*. Volume 30, Issue 9 (1987), pp. 1927-1939.