



JAEA-Data/Code

2008-015

高温ガス炉の炉心動特性解析コードの改良

Development of Reactor Kinetics Analysis Code

高松 邦吉 中川 繁明 武田 哲明*

Kuniyoshi TAKAMATSU, Shigeaki NAKAGAWA and Tetsuaki TAKEDA*

原子力基礎工学研究部門
高温ガス炉特性・安全性試験グループ

HTGR Performance and Safety Demonstration Group
Nuclear Science and Engineering Directorate

October 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-
Data/
Code

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

高温ガス炉の炉心動特性解析コードの改良

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門

核熱応用工学ユニット

高松 邦吉、中川 繁明、武田 哲明*

(2008年6月2日 受理)

高温ガス炉の炉心動特性解析コードである TAC/BLOOST コードについて、炉心部温度係数として多領域炉心モデルを導入し、高温工学試験研究炉（HTTR）で取得した実測値を活用して解析モデルの改良を行い、動特性解析の検討を行った。その結果、燃焼による燃料および構造物に対する物性値の変化、ブロック間のギャップの変化、中性子照射による燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップの変化、冷却材流路断面積の変化に対する改良点が明らかになり、循環機停止試験の再現解析では、実測値を 3%以内の精度で予測できるようになった。

大洗研究開発センター（駐在）：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

*山梨大学

Development of Reactor Kinetics Analysis Code

Kuniyoshi TAKAMATSU, Shigeaki NAKAGAWA and Tetsuaki TAKEDA*

Nuclear Applied Heat Technology Division
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received June 2, 2008)

A reactor kinetics analysis code called the TAC/BLOOST code was developed for High Temperature Gas-Cooled Reactors (HTGRs). The TAC/BLOOST code can use a divided core model with region temperature coefficients. In this study, a validation of the TAC/BLOOST code was conducted with the experimental data of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR). As a result, some improved points of the property changes of the fuels and the structures according to the burnup effect, the gap changes among the blocks, the gap changes between the fuel compact and the graphite sleeve, and the cross section changes of the coolant were clarified. Moreover, prediction analyses of the gas circulator tripping tests can be showed within 3% accuracy.

Keywords: HTTR, HTGR, TAC/BLOOST, Safety Demonstration Test, Reactor Kinetics, Region Temperature Coefficients, Feedback Effect

*University of Yamanashi

目 次

1. 序論	1
2. 定常解析	2
2.1 原子炉出力 18MW の解析条件	2
2.2 解析結果	4
2.3 課題	7
2.4 原子炉出力 30MW の解析条件	8
2.5 解析結果	8
2.6 課題	8
2.7 原子炉出力 9MW から 30MW までの解析条件	9
2.8 解析結果	9
2.9 RPV 鏡部温度に関する解析条件	10
2.10 解析結果	10
3. 過渡解析	52
4. 結論	93
謝辞	93
参考文献	94

Contents

1. Introduction	1
2. Analysis of Steady State	2
2.1 Analysis Condition at the Reactor Power of 18MW	2
2.2 Analysis Result	4
2.3 Remaining Issues	7
2.4 Analysis Condition at the Reactor Power of 30MW	8
2.5 Analysis Result	8
2.6 Remaining Issues	8
2.7 Analysis Condition at the Reactor Power from 9MW to 30MW	9
2.8 Analysis Result	9
2.9 Analysis Condition for RPV Temperature	10
2.10 Analysis Result	10
3. Transient Analysis	52
4. Concluding Remarks	93
Acknowledgements	93
References	94

表リスト

表 2-1 炉心部の等価半径の算出	12
表 2-2 輻射率の見直し	12
表 2-3 炉心中心部及び炉心周辺部の等価熱伝導率（燃焼 0 日）(kcal/mh°C)	13
表 2-4 炉心中心部及び炉心周辺部の等価熱伝導率（燃焼 660 日）(kcal/mh°C)	13
表 2-5 PGX 黒鉛、ASR-0RB 黒鉛の熱伝導率 (kcal/mh°C)	13
表 2-6 原子炉出力 18MW の BLOOST 用出力分布の入力データ	14
表 2-7 原子炉出力 18MW の TAC-NC 用出力分布の入力データ	14
表 2-8 原子炉出力 18MW のノミナルケースの解析条件	15
表 2-9 原子炉出力 18MW のノミナルケースの解析結果	16
表 2-10 原子炉出力 18MW の VCS パネル入口温度に対する感度解析結果	17
表 2-11 原子炉出力 18MW の炉心部熱伝導率の感度解析結果：温度 (°C)	18
表 2-12 原子炉出力 18MW の炉心部熱伝導率の感度解析結果：温度差 (°C)	18
表 2-13 原子炉出力 18MW のブロック間ギャップの感度解析結果：温度 (°C)	19
表 2-14 原子炉出力 18MW のブロック間ギャップの感度解析結果：温度差 (°C)	19
表 2-15 原子炉出力 18MW の炉心冷却材流量の感度解析結果：温度 (°C)	20
表 2-16 原子炉出力 18MW の炉心冷却材流量の感度解析結果：温度差 (°C)	20
表 2-17 原子炉出力 18MW の最適条件の解析結果	21
表 2-18 原子炉出力 18MW の炉心出口冷却材温度の比較	21
表 2-19 原子炉出力 30MW の定常解析条件	22
表 2-20 原子炉出力 30MW の BLOOST 用出力分布の入力データ	23
表 2-21 原子炉出力 30MW の TAC-NC 用出力分布の入力データ	23
表 2-22 原子炉出力 30MW の定常解析結果	24
表 2-23 原子炉出力 30MW の定常解析結果（実測値－解析値）	24
表 2-24 最適条件における 9MW～30MWまでの解析条件	25
表 2-25 最適条件における 9MW～30MWまでの BLOOST 用出力分布の入力データ	26
表 2-26 最適条件における 9MW～30MWまでの TAC-NC 用出力分布の入力データ	27
表 2-27 最適条件における 9MW～30MWまでの解析結果	28
表 2-28 最適条件における 9MW～30MWまでの実測値との温度差	28
表 2-29 RPV 鏡部温度等に関する解析モデルの改良における解析条件	29
表 2-30 RPV 鏡部温度等に関する解析モデルの改良後の解析結果	30
表 2-31 定格連続試験運転の解析結果	31
表 3-1 (1/3) 循環機停止試験の再現解析に関する検討内容および結果	54
表 3-1 (2/3) 循環機停止試験の再現解析に関する検討内容および結果	55
表 3-1 (3/3) 循環機停止試験の再現解析に関する検討内容および結果	56
表 3-2 燃料コンパクト、黒鉛スリーブ、黒鉛ブロックの製造実績	57
表 3-3 下部可動反射体ブロック、高温プレナムブロックの入力データ	57

図リスト

図 2-1 HTTR 炉心断面図	32
図 2-2 TAC-NC モデルの改良	33
図 2-3 炉心中心部及び炉心周辺部の等価熱伝導率（燃焼 0 日）	34
図 2-4 炉心中心部及び炉心周辺部の等価熱伝導率（燃焼 660 日）	34
図 2-5 PGX 黒鉛、ASR-0RB 黒鉛の熱伝導率	35
図 2-6 TAC-NC の解析モデル	36
図 2-7 ノミナルケース（18m000）の半径方向温度分布	37
図 2-8 ノミナルケース（18m000）の軸方向温度分布	37
図 2-9 輻射率と RPV 側部放熱量の関係（原子炉出力 18MW）	38
図 2-10 ブロック間ギャップ幅の効果（径方向分布）：軸方向メッシュ 24	39
図 2-11 半径方向出力分布の比較（原子炉出力 18MW）	39
図 2-12 炉心出口冷却材温度の比較	40
図 2-13 原子炉出力 30MW 時の径方向出力分布	41
図 2-14 原子炉出力 30MW 時の軸方向出力分布	41
図 2-15 最適条件ケース（30m019b）の半径方向温度分布	42
図 2-16 最適条件ケース（30m019b）の軸方向温度分布	42
図 2-17 原子炉出力 30MW の半径方向温度分布：燃料 1 段目	43
図 2-18 原子炉出力 30MW の半径方向温度分布：燃料 5 段目	43
図 2-19 原子炉出力 30MW の軸方向温度分布：F1 カラム	44
図 2-20 原子炉出力 30MW の軸方向温度分布：側部可動反射体	44
図 2-21 原子炉出力 30MW 時の高温プレナム部冷却材温度の比較	45
図 2-22 半径方向温度分布：燃料 1 段目	46
図 2-23 半径方向温度分布：燃料 5 段目	46
図 2-24 軸方向温度分布：燃料 1 段目	47
図 2-25 軸方向温度分布：側部可動反射体	47
図 2-26 炉心出口冷却材温度の比較	48
図 2-27 TAC-NC の解析モデル	49
図 2-28 輻射率と RPV 放熱量の関係	50
図 2-29 热伝達補正係数と RPV 上鏡温度の関係	50
図 2-30 热伝達補正係数と RPV 下鏡温度の関係	51
図 2-31 TAC/BLOOST の定常解析結果（炉心出口温度）	51
図 3-1 BLOOST モデルでの外側黒鉛の厚みによる影響	59
図 3-2 BLOOST モデルでの冷却材流路の内外径（冷却材流路断面積）による影響	59
図 3-3 BLOOST モデルでの黒鉛スリーブ／燃料コンパクトの厚みによる影響	61
図 3-4 BLOOST モデルでの燃料コンパクトの内径による影響	61
図 3-5 BLOOST モデルでのコンパクト外側ギャップ幅の影響	63

図 3-6 BLOOST モデルのコンパクト内の黒鉛体積割合による影響	63
図 3-7 BLOOST モデルの下部可動反射体、高温プレナムブロックのモデル化による影響	65
図 3-8 冷却材流量（炉心有効流量の考慮）による効果	65
図 3-9 冷却材流量（循環機停止後の冷却材流量変更）の効果	67
図 3-10 循環機停止後の冷却材圧力変化の効果	67
図 3-11 循環機停止後の炉心入口温度の効果	69
図 3-12 燃料温度係数、減速材温度係数の効果	69
図 3-13 遅発中性子先行核の崩壊定数の効果	71
図 3-14 即発中性子寿命の効果	71
図 3-15 BLOOST モデルでの燃料コンパクトの密度の効果	73
図 3-16 BLOOST モデルでの燃料コンパクトの比熱の効果	73
図 3-17 BLOOST モデルでの燃料コンパクトの熱伝導率の効果	75
図 3-18 BLOOST モデルでの黒鉛の密度の効果	75
図 3-19 BLOOST モデルでの黒鉛の比熱の効果	77
図 3-20 BLOOST モデルでの黒鉛の熱伝導率の効果	77
図 3-21 BLOOST モデルでの冷却材熱伝達率の効果	79
図 3-22 TAC-NC モデルでの循環機停止後の崩壊熱の効果	79
図 3-23 TAC-NC モデルでの冷却材熱伝達率の効果	81
図 3-24 TAC-NC モデルでの燃料部等価熱伝導率の効果	81
図 3-25 BLOOST の解析モデル	83
図 3-26 中性子照射量とコンパクト／スリープ間ギャップの関係	83
図 3-27(1) 最適化ケースの解析結果（9MW からの循環機 1 台停止試験）	85
図 3-27(2) 最適化ケースの解析結果（9MW からの循環機 2 台停止試験）	85
図 3-27(3) 最適化ケースの解析結果（18MW からの循環機 1 台停止試験）	87
図 3-27(4) 最適化ケースの解析結果（18MW からの循環機 2 台停止試験）	87
図 3-27(5) 最適化ケースの解析結果（9MW からの制御棒引抜試験：低速 20mm）	89
図 3-27(6) 最適化ケースの解析結果（9MW からの制御棒引抜試験：高速 40mm）	89
図 3-27(7) 最適化ケースの解析結果（18MW からの制御棒引抜試験：低速 20mm）	91
図 3-27(8) 最適化ケースの解析結果（18MW からの制御棒引抜試験：高速 40mm）	91

This is a blank page.

1. 序論

TAC/BLOOST コード¹⁾は、HTTR の安全解析に使用した 2 次元非定常伝熱解析コード TAC-NC コード²⁾と炉心動特性解析コード BLOOST-J2 コード³⁾を組み合わせたものとして開発され、高温ガス炉の反応度添加や流量低下時の炉心動特性とともに、原子炉圧力容器を含む炉内構造物等、原子炉全体の温度挙動解析が可能である。

従来の 1 点炉近似モデルを用いた BLOOST-J2 コードは、HTTR 施設本体の安全解析⁴⁾に使用されており、その安全審査において検証された。また、HTTR における安全性実証試験の反応度添加試験（制御棒引抜き試験）および流量部分喪失試験（循環機停止試験）の実測値と比較することで、安全審査時に設定した安全裕度を定量的に確認することができた。

しかしながら、実測値と解析値の間には誤差が生じていたため、炉心動特性解析ルーチンとして BLOOST-J2 コードを含んだ高温ガス炉用プラント動特性解析コード ACCORD コード⁵⁾を開発し、領域別温度係数を用いた多領域反応度フィードバック効果を考慮できるよう改良を行った。その結果、制御棒引抜き試験では実測値を精度良く再現できるようになった⁶⁾が、循環機停止試験は実測値を精度良く再現することができなかった。

一方、TAC-NC コードは、HTTR の減圧事故、1 次冷却設備二重管内管破損事故の温度解析に用いられており、減圧事故時の炉内への空気侵入挙動を研究するための実験装置を用いた配管破断模擬試験の解析⁷⁾、HTTR の定常運転及び安全性実証試験の解析⁸⁾により検証されている。

よって、燃料チャンネルモデルの BLOOST-J2 コードの径方向境界に 2 次元炉心温度分布を解析できる TAC-NC コードを結合し、炉心全体の熱移動が考慮できる TAC/BLOOST コードを開発した。HTTR の各原子炉出力(9MW～30MW)における定常状態の実測値を用いて TAC/BLOOST コードの最適化を行った後、過渡解析である循環機停止試験の解析を行った結果、実測値を 3% 以内の精度で再現できるようになった。以上より、原子炉の実測値に基づき検証した TAC/BLOOST コードは、将来の高温ガス炉(GTHTR300C)及び第 4 世代原子炉の候補の一つである VHTR の設計及び研究開発に活用できるものと思われる。

2. 定常解析

原子炉出力 9MW、15MW、18MW、24MW、30MW について定常解析を行う。まず、代表的なケースとして、18MW、30MW について 2.1 節と 2.2 節で取り上げ、他のケースは 2.3 節で検討する。

2.1. 原子炉出力 18MW の解析条件

TAC/BLOOST コードを用いて、原子炉出力 18MW における定常状態の再現解析を実施した。再現解析で用いた手順を以下に示す。

① 解析モデル

HTTR の動特性解析を行う場合、図 2-1 に示すように炉心を半径方向 4 分割 (F1～F4)、軸方向 5 分割に分割し、領域別温度係数に対応したそれぞれの温度を TAC から BLOOST へ受け渡さなければならない。このため、現状の TAC-NC モデルの径方向メッシュ分割を以下のとおり修正した。

リング 1 制御棒 (CR1) の 6 カラム分は発熱がないので、図 2-2 に示すように従来の F2 領域を発熱ありの領域 (F2) と発熱なしの領域 (CR1) とに分ける。但し、熱伝導率は従来通り区別せず、平均的な値を用いる。

F3 カラムと F4 カラムの燃料温度を別々に BLOOST 側へ提供するため、半径方向グリッドラインを 100.53cm から 105.82cm へ変更する。表 2-1 は六角ブロックの面間距離を 36.2cm (ブロック同士のギャップを 2mm と想定) とした場合の各領域の等価半径を求めたものである。F3 カラム外側の等価半径以外も若干現状モデルの値と異なるので、合わせて見直す。

② 物性値

TAC-NC の HTTR 炉心モデルは、元々が安全評価を目的として作成されているため、燃料温度と原子炉圧力容器(RPV) 温度をそれぞれ高めに評価する 2 種類の物性値が用意されている。今回は再現解析を目的としているので、現実的な値を使用しなければならない。以下にそれぞれの物性値の変更内容を示す。なお、黒鉛のアニーリング効果による熱伝導率の影響は考慮しない。

輻射率については、JAERI-M91-163 Table4.13 に示されている燃料温度評価用の輻射率と RPV 温度評価用の輻射率の平均値を再現解析で使用する。プログラムではサブルーチン TMADAT を修正する。各物質の輻射率の変更内容を表 2-2 に示す。

SUS304 ボロン入黒鉛の熱伝導率 (物質番号 3、11) については、JAERI-M91-163 Table4.13 に示されている以下の熱伝導率の評価式において、係数 K を RPV 温度評価用と燃料温度評価用の値の平均値 $(25.2+7.2)\div 2=16.2$ とする。

$$\lambda = (0.0125 \times t + 11.5) \times 0.8598 \times 0.667 + K \times 0.333$$

λ : 热伝導率 (kcal/mh°C)

t : 温度 (°C)

K : RPV 温度評価用 25.2、燃料温度評価用 7.2、再現解析時 16.2

燃料体、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロックの熱伝導率（物質番号 4、5、6）については、JAERI-M91-163 Table43 に示されているように、安全評価を目的とした解析では表 2-3 及び表 2-4 に示す安全評価用の熱伝導率が使用されている。安全評価では、RPV 温度を評価する場合には燃焼 0 日の値を、燃料温度を評価する場合には燃焼 660 日の値を使用している。これらの値には、物性値のばらつきとして±20%が見込まれていることから、このばらつき分を元に戻した値を再現解析用として設定した。

従来の値では温度 400°C 未満の熱伝導率が与えられておらず、400°C 未満の場合には 400°C における値を適用するプログラムとなっていたが、今回の再現解析で原子炉出力 9MW～24MW のケースを実施する場合により実態に即した値を適用させるため、400°C～1400°Cまでのデータをもとに多項式近似を行い、100°C～300°C の値を設定した。熱伝導率を表 2-3 及び表 2-4、また図 2-3 及び図 2-4 に示す。

後に実施する安全性実証試験の再現解析（過渡解析）では、燃焼 150 日程度の熱伝導率を用いることが望ましいが、燃焼 0 日と 660 日のデータから 150 日の値を単純に予測することはできないので、燃焼 0 日の値を使用することとした。

PGX 黒鉛、ASR-ORB 黒鉛の熱伝導率（物質番号 7、8、9）については、安全評価で使用している熱伝導率は、ノミナル値に±9kcal/mh°C を考慮することで最大・最小の熱伝導率を求め、RPV 温度評価用と燃料温度評価用とに使い分けていた。今回の評価ではこれらの値の平均値を使用する。熱伝導率の値を表 2-5 及び図 2-5 に示す。

③ VCS 冷却水温度

TAC-NC の解析モデルを図 2-6 に示す。解析モデルは 1 次側部遮へい体コンクリートを含んでいる。境界条件は、中心側（左側）は断熱、上下面是 VCS 冷却材と同じ温度の冷却水を大量に流し、温度を固定している。コンクリート外面は 40°C 固定としているが、その内側（半径方向メッシュ番号 27）で VCS 冷却水温度を指定する。また、半径方向メッシュ 16 番と 19 番では炉側部を上昇する冷却材を模擬するが、入口温度には実測データを使用する。同様に、炉心を上から下へ流れる冷却材の入口温度も実測値を使用する。

④ 出力分布

2003 年 2 月 13 日～3 月 14 日に実施された第 2 サイクル運転（定格・単独運転モード）の各出力保持状態を再現するため、以下の条件を入力する。

HTTR の運転履歴を追った燃焼計算・出力分布計算結果から、出力上昇試験 4（定格・単独運転モード）の運転状態を想定した出力分布計算結果（燃焼 84 日）を使用する。BLOOST 用の出力分布を表 2-6 に、TAC-NC 用の出力分布を表 2-7 にそれぞれ示す。これらは、多次元拡散燃焼計算コード CITATION コード⁹⁾の解析結果を燃料体当たりの体積平均として整理したものである。TAC-NC 用の出力分布は、合計値が 1.0 になるように規格化したもので、さらに F3 カラムは他のカラムの 2 倍のカラム数（12 カラム）存在するため、出力分担が他のカラムの約 2 倍になっている。

⑤ 冷却材流量

原子炉入口での冷却材流量の実測値（PPWC 冷却材流量—IHX バイパス流量）を用いる。側部遮へい体内外面の上昇流は 50%ずつ等分に流量を配分する。また、炉心燃料部の下方向流れは、各領域の燃料チャンネル数に応じて配分する。炉心有効流量割合については、2.1.7 項の感度解析で影響を確認する。

⑥ 冷却材入口温度

側部遮へい体内外面上昇流の入口温度は、炉心側部ガス側部遮へい体内面温度と外面温度の最下部の実測値を用いる。炉心入口温度は、制御棒案内管表面温度の実測値を使用する。炉心入口温度には半径方向に温度分布が付いているので、F1～F4 にそれぞれの位置に対応した実測データを適用する。

⑦ 冷却材圧力

冷却材の圧力は 1 次 PWC 出口圧力の実測値を使用する。

⑧ RPV 放熱量

本解析モデルでは、上下面からの放熱が小さすぎるため、側部パネルからの放熱量を再現させ、RPV を含む側面の温度を実測値と合わせる。実測データから、全 VCS 除熱量のうち側部パネルからの除熱量は約 75% となっている。

以上の再現解析に用いた条件を表 2-8 にまとめて示す。

2.2 解析結果

ノミナルケースとして実施した原子炉出力 18MW の定常計算結果から、半径方向温度分布を図 2-7 に、軸方向温度分布を図 2-8 に示す。また、表 2-9 に実測値と解析値の比較を示す。

① RPV 放熱量

RPV 放熱量は、側部パネルの実測値（VCS 全体除熱量の 75% として 0.32MW）に対して約 0.21MW となった。輻射率を補正することによって除熱量を調整する必要がある。

② RPV 温度、炉心支持格子温度

RPV 側面では解析値の方が最大で 15°C 低くなっているが、上鏡・下鏡・炉心支持格子では解析値の方が極端に低くなっている。実機ではこれらの構造物は原子炉入口の冷却材に接しているが、解析モデルではそのような構造になっていないことが原因と思われる。解析モデルの上下面の境界温度を VCS 冷却水温度（30°C）と同じにしていることに問題がある。

③ 固定反射体内外面温度

最上段では実測値を良く再現しているが、上から 3 段目、8 段目では内面の温度が低めの結果となった。

④ 炉心下部・炉床部構造材温度

実際には高温プレナムブロック（シール用ブロックとキー結合用ブロックから構成）温度は固定反射体に隣接しているが、解析モデルではこの部分が側部可動反射体ブロックになっていることから、側部可動反射体ブロックの最外部のメッシュ温度と比較した結果、実測値を良く再現している。しかし、高温プレナムブロックよりも下側の構造物については、解析値の方がかなり低い温度になっている。これは、RPV下鏡部の温度と同様に原子炉入口ヘリウムを炉床部に流していない解析モデル上の問題と思われる。

⑤ 冷却材温度

炉側部の冷却材温度は実測値を再現している。高温プレナムブロック部の冷却材温度は中心領域が実測値よりも低めの結果となった。原因としては、出力分布や冷却材流量配分が考えられる。現在、冷却材の流量配分は全冷却チャンネルで均等になるよう割り当てている。過去に実施した FLOWNET¹⁰⁾の結果からは、F1 カラムが他のカラムよりも 0.5%程度多く流れているケースも見られるが、炉心出口冷却材温度に及ぼす影響は小さい。出力分布の影響については、燃焼による出力分布の変化を考慮した解析を原子炉出力 30MW の定常解析で実施する。

⑥ RPV 放熱量

RPV 放熱量に影響を与える境界条件である。VCS 冷却水温度、RPV 輻射率について感度解析を行う。

ノミナルケースでは VCS 冷却水温度は 30°C としているが、HTTR の運転データから、炉容器冷却水熱交換器の伝熱性能が低下した場合には VCS パネル入口温度が 40°C に達することもある。VCS パネル入口温度を 30°C から 40°C へ変えた場合の VCS 放熱量と RPV 表面温度を表 2-10 に示す。RPV 側面の温度は僅かに実測値に近づくが、放熱量は少なくなり、実測値を再現しなくなった。

ノミナルケースでは、RPV を含む物質番号①（図 2-6 参照）の輻射率を 0.8 としていた。この輻射率（径方向のみ）を仮想的に 1.0, 1.2, ··· と大きくした場合の輻射率と RPV 放熱量の変化は図 2-9 となった。なお、この計算を実施するため入力ファイルの定数データ A8 で物質番号①の径方向輻射率を指定できるようプログラムを修正した。輻射率は仮想的に 3.0 とすることにより、炉側部からの放熱量を再現できることが分かった。しかしながら現実的な値ではないため、輻射率は 2.4 項で再度考慮する。

⑦ 黒鉛の熱伝導率

炉心部黒鉛の熱伝導率に JAERI-M91-163 に示されている最大値（安全評価で RPV 温度を評価する際に使用していた値）と最小値（同様に燃料温度評価用）を選択した場合の感度を確認した。各部の温度を表 2-11 に、実測値と解析値および熱伝導率最大ケースと最小ケースの解析結果の差を示したものを表 2-12 に示す。表 2-12 より、固定反射体温度について、比較的感度が大きいこと、熱伝導率最大（燃焼 0 日に 20% の誤差を考慮）のケースが一番実測値に近いことが分かる。

⑧ ブロック間ギャップ幅

燃料カラム同士の隙間、燃料カラムと側部可動反射体の隙間、側部可動反射体と固定反射体の隙間を、ノミナルケースの 1/2、1/10 と変化させた場合の感度を確認した。ノミナルケースのブロック間ギャップは次のとおり設定している。

- ・燃料カラム同士のギャップ : 2mm
- ・燃料カラムと側部可動反射体のギャップ : 2mm
- ・側部可動反射体と固定反射体のギャップ : 1mm

各部の温度を表 2-13 に、実測値と解析値の差を示したものを表 2-14 に示す。表 2-14 より、ギャップ幅をノミナルの 1/10 としたケースが他のケースと比べて、やや実測値に近い温度を示している。また、燃料領域最下部（軸方向メッシュ 24）の径方向温度分布の比較を図 2-10 に示す。ギャップ幅を変えた効果は側部可動反射体と固定反射体の温度に変化を与えるが、その他の部分についてはほとんど影響していない。

⑨ 炉心冷却材流量

図 2-6 に示した冷却材流路のうち、炉心部を上から流れる冷却材の流量を実測値の 95%、90%、85% と変化させた。各部の温度を表 2-15 に、実測値と解析値の差を示したものを表 2-16 に示す。冷却材流量を変化させると、炉心出口部の冷却材温度やブロック温度に対して影響が大きい。RPV 上鏡と下鏡、高温プレナムブロックより下側にある構造物の温度を除くと、冷却材流量 95% のケースが最も実測値を再現する。

解析結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ・RPV 放熱量の観点から VCS 冷却水温度は 30°C が良い。
- ・輻射率を仮想的に 3.0 とすることにより、RPV 放熱量を再現することができる。
- ・炉心の熱伝導率は、最大値を使用した方が実測値を再現する。
- ・ブロック間ギャップ幅はノミナルの 1/10 とした方が実測値を再現する。
- ・炉心冷却材流量は、ノミナルの 95% としたケースが実測値を再現する。

これらの条件を組み合わせて最適な条件として実施した結果を表 2-17 に示す。表 2-17 より、最適条件を採用することにより若干悪くなる測定点もあるが、モデルの上下面を除く測定点全体でみると、ノミナルケースよりも実測値をより再現できており、RPV 側部からの放熱量も再現できている。

⑩ 燃焼日数

燃焼日数の異なる出力分布の影響を確認するため、最適条件を用いて出力分布だけを燃焼 128 日から 229 日へ変更させた解析を実施した。半径方向出力分布の比較を図 2-11 に示す。燃焼が進むにつれて炉心中心側の出力密度が高く、外側の出力密度は逆に下がる傾向がある。炉心出口部の冷却材温度を比較した結果を表 2-18、図 2-12 に示す。炉心出口冷却材温度は、F1 カラムを流れる冷却材が中心領域へ、F2～F4 カラムを流れる冷却材が周辺領域へ至るとし、各カラムの冷却材流量と出口温度を用いて求めた混合平均温度である。実測値では中心領域の

方が高温になっているが、出力分布を燃焼 128 日とした解析では全て逆の傾向を示している。但し、熱伝導率に最大値を選択し、炉心冷却材流量を減らしたこと、さらにブロック間ギャップを 1/10 としたことが、それぞれ改善の方向に作用している。出力分布を 229 日へ変更したケースでは、中心領域の温度が高くなり冷却材温度の大小関係が実測値と同じ傾向となった。ちなみに、実測データは燃焼 200 日頃のデータである。

以上のことから、感度解析結果を定常解析条件として反映させるとともに、出力分布は可能な限り実際の燃焼日数に近いものを採用する。

2.3 課題

① 現状の TAC-NC コードの炉心モデルでは、炉心側面だけに原子炉入口温度に等しい低温の冷却材を流しているため、その冷却材が接触する部分（RPV 上下鏡、炉床部構造物）では、実測値を再現することができない。炉心動特性を行う場合、炉心部の温度は問題ないが、原子炉全体の温度を再現する場合、更なる解析コードの改良を必要とする。

② 燃焼が進むことによって出力分布が変化し、これに伴って炉心出口冷却材温度も変化するので、炉心燃料部の半径方向温度分布が重要となる場合には、実際に再現しようとしている時点の出力分布を用いる必要がある。

2.4 原子炉出力 30MW の解析条件

原子炉出力 18MW の基準ケース及び最適条件ケースと同条件で 30MW の定常解析を実施した。また、最適条件ケースについては、燃焼による出力分布の違いを反映させたケースを実施した。

- ・ 30m000 : 基準ケース (全てノミナル条件)
- ・ 30m019 : 最適条件ケース (RPV 放熱量、各部温度ができるだけ実測値を再現する条件)
- ・ 30m019a : 最適条件ケースで、出力分布を燃焼 128 日から 173 日に変更
- ・ 30m019b : 最適条件ケースで、出力分布を燃焼 128 日から 227 日に変更

2.5 解析結果

解析条件を表 2-19 に示す。また、各ケースで使用した出力分布を表 2-20 及び表 2-21、また図 2-13 及び図 2-14 に示す。図 2-14において、燃焼が 128 日 \Rightarrow 173 日 \Rightarrow 227 日と進むにつれて 1 段目の発熱密度が小さくなっているのは、実測データを元に出力分布の算出条件として設定した制御棒位置が 2812mm \Rightarrow 2762mm \Rightarrow 2712mm と挿入方向に変化していることと、濃縮度の高い炉心上部が、燃焼が早く進むためと考えられる。

2.6 課題

出力分布が燃焼 227 日の最適条件ケースの解析結果から、半径方向温度分布を図 2-15、軸方向温度分布を図 2-16 に示す。また、全ケースについて主要な実測値と比較した結果を表 2-22、実測値と解析値の差をまとめたものを表 2-23 に示す。RPV 鏡部や炉床部の計測点を除くと、18MW の定常解析と同様に固定反射体 8 段目の内面温度が実測値との差が大きく、また、最適条件ケースでは RPV 放熱量を実測値に近づけることを優先しているため、圧力容器温度に関しては基準ケースよりも悪い結果となっている。

出力分布の異なる解析ケースについて、燃料 1 段目と 5 段目の半径方向温度分布を図 2-17 及び図 2-18、F1 カラムと側部可動反射体での軸方向温度分布を図 2-19 及び図 2-20 に示す。出力分布による炉心温度への影響は、最大で 20°C 程度であった。

今回実施した全てのケースについて、高温プレナム部の冷却材温度を比較した結果を図 2-21 に示す。燃焼が進むにつれて半径方向の出力分布が変化することにより、炉心中心領域の発熱量が相対的に大きくなることから、冷却材の温度も中心領域が高くなる。なお、比較している実測データは燃焼日数 200 日付近のものである。

以上の結果から、3 章の過渡解析の初期条件として最適解析ケースの燃焼 227 日の結果 (30m019b) を使用する。

2.7 原子炉出力 9MW から 30MWまでの解析条件

原子炉出力 18MW および 30MW で実施した感度解析により明らかとなつた最適条件を用いて原子炉出力 9MW から 30MW までの定常解析を実施した。

解析条件を表 2-24 に示す。出力分布は出来るだけ試験実施時点に近い燃焼 200 日前後の値を用いることとした。解析に用いた出力分布を表 2-25 及び表 2-26 に示す。

2.8 解析結果

主要部分の温度および炉側部放熱量について実測値と比較した結果を表 2-27、実測値との温度差（放熱量差）を表 2-28 に示す。また、燃料 1 段目と 5 段目の半径方向温度分布を図 2-22 及び図 2-23、F1 カラムと側部可動反射体カラムの軸方向温度分布を図 2-24 及び図 2-25 にそれぞれ示す。これらの結果から、RPV 上下鏡部と炉床部構造物を除いた測定点では、概ね実測値を再現しているが、RPV 胴部温度や固定反射体ブロック 8 段目の内側では解析値が高めの温度を示している。RPV 上下鏡部温度を再現させるため、解析モデルの改良に関わる検討を 2.4 節で行う。

炉心出口冷却材温度を実測値と比較した結果を図 2-26 に示す。中心領域は実測値と解析値の差はみられず、周辺領域では解析値の方がやや高めとなっている。

2.9 RPV 鏡部温度に関する解析条件

前節までに行なった定常解析では、解析モデルの特徴から低温の冷却材が直接触れる構造物（RPV 上下鏡、炉心支持格子など）の温度が実測値を再現できない状態であった。このため、解析モデルの改良と熱伝達率補正係数の調整を行う。

① 前節までに示した結果から、以下の条件を適用することで炉内温度の実測値を再現する。

- ・黒鉛構造物の熱伝導率は最大値（安全評価における RPV 評価用）を用いる。
- ・ブロック間ギャップはノミナル条件の 1/10 とする。

燃料カラム同士のギャップ : 0.2mm

燃料カラムと側部可動反射体のギャップ : 0.2mm

側部可動反射体と固定反射体のギャップ : 0.1mm

- ・炉心燃料部の冷却材流量は原子炉入口流量の 95% とする。

- ・出力分布は可能な限り実測データの取得時期に合わせた燃焼状態のものを使用する。

② VCS 冷却水温度と側部コンクリート外面温度が異なる場合、熱移動が発生し、RPV から VCS への放熱量が分からなくなるので、これらの温度は 40°C で統一する。

③ RPV 上鏡と下鏡の温度を実測値に近づけるため、図 2-27 に示すように冷却材の上昇流路は入口側と出口側をそれぞれ RPV の下鏡と上鏡に接触させるように変更する。同様に下降流路については、入口側のみ RPV 上鏡に接触させるように変更する。なお、熱遮へい体については表 2-2 に示す。

④ RPV 上鏡と下鏡側の境界条件は、従来通り VCS 冷却水温度と同じ温度の水を流し、「放熱あり」の状態とする。ただし、RPV 上下面それぞれについて、温度や放熱量が出来るだけ実測値を再現するように熱伝達率補正係数を調整する。

⑤ 炉心側部については、RPV 上下面を調整した後、RPV 側部からの放熱量を調整する。

2.10 解析結果

原子炉出力 30MW を代表ケースとして、感度解析を実施した。

- ・RPV 除熱量 : 0.80MW (内訳は上部パネル 15%、側部パネル 75%、下部パネル 10%)
- ・RPV 上鏡温度 (外表面) : 314°C
- ・RPV 下鏡温度 (外表面) : 366°C

① RPV 放熱量

冷却材の流路範囲を変更することによって RPV からの放熱条件が変化することから、RPV 側部方向の輻射率を再度調整した。輻射率と RPV 放熱量の関係を図 2-28 に示す。実測データでは、RPV 側部パネルの除熱量は約 0.6MW (全放熱量の約 75%) であるので、輻射率は 0.8 を採用することとした。なお、この場合の RPV 胴部温度の実測値との差は約 10°C であった。

② RPV 上鏡温度

解析モデル上面の熱伝達率補正係数と RPV 上鏡温度の関係を調査した結果を図 2-29 に示す。RPV 上鏡温度の実測値（314°C）をほぼ再現する条件として、熱伝達率補正係数を 4.0 と設定する。なお、このときの RPV 上鏡部からの放熱量は、実測値 0.12MW（全放熱量の約 15%）に対して、解析値は 0.14MW となった。

③ RPV 下鏡温度

解析モデル下面の熱伝達率補正係数と RPV 下鏡温度の関係を調査した結果を図 2-30 に示す。RPV 下鏡温度の実測値（366°C）をほぼ再現する条件として、熱伝達率補正係数を 0.01 と設定する。なお、このときの RPV 下鏡部からの放熱量は、実測値 0.08MW（全放熱量の約 10%）に対して、解析値は 0.00MW となった。

④ 原子炉出力 9～30MW の定常解析

2.4.3 項で決定した条件を用いて、原子炉出力 9～30MW の定常解析を実施した。解析条件を表 2-29 に、解析結果を表 2-30 に示す。プレナム下部ブロック温度が実測値を再現できていない。これは、炉心を出た冷却材が実際には高温プレナムにおいてプレナム下部ブロックに接触しているが、解析モデルでは高温プレナムの上面で冷却材の流れを終了させていることに原因があると思われる。なお、炉心を出た冷却材の流れをプレナム下部ブロックの上面まで延長した場合、今度はプレナム下部ブロックの温度が極端に高すぎる結果となったことから、現状モデルのままとした。その他の温度測定点では、実測値をほぼ再現している。また、炉心出口冷却材温度も図 2-31 に示すように実測値を再現しており、影響はないことがわかる。

⑤ 連続試験運転との比較

原子炉出力 30MW で平成 19 年 3 月 27 日から 4 月 26 日まで維持した定格連続試験運転との比較を実施した。表 2-31 に示すように解析値は実測値をほぼ再現している。今後、HTTR の燃料、構造材の燃焼依存性に関する実測値を取得することで、実測値と解析値の差を縮めることができるとと思われる。

表 2-1 炉心部の等価半径の算出

	カラム数	領域面積(cm ²)	改良後の等価半径(cm)	従来の等価半径(cm)
C	1	1134.87	19.01	19.10
F1	7	7944.12	50.29	50.28
F2	13	14753.37	68.53	68.47
F2+CR1	19	21562.61	82.85	82.76
F3	31	35181.10	105.82	100.53
F4	37	41990.35	115.61	115.60
SR+CR2+CR3	61	69227.33	148.44	148.50

表 2-2 輻射率の見直し

物質番号	材質 使用部位	輻射率 ε	
		安全評価用 tmadat8.f	再現解析用 tmadat9.f
1	クロムモリブデン鋼、原子炉圧力容器 炉心支持板、VCS 熱反射板	0.6 (入力で次のように補正して使用) 燃料温度評価時 $0.6 \times 0.55 = 0.33$ RPV 温度評価時 $0.6 \times 0.17 = 0.102$	0.8
2	SUS304、熱遮へい体	燃料温度評価時 0.36 RPV 温度評価時 1.0	0.68
3	SUS304 ボロン入黒鉛、上部遮へい体	燃料温度評価時 0.36 RPV 温度評価時 1.0	0.68
4	IG-110 黒鉛、上部／下部可動反射体	燃料温度評価時 0.8 RPV 温度評価時 1.0	0.9
5	燃料体、制御棒案内ブロック	燃料温度評価時 0.8 RPV 温度評価時 1.0	0.9
6	IG-110 黒鉛、側部可動反射体	燃料温度評価時 0.8 RPV 温度評価時 1.0	0.9
7	PGX 黒鉛、高温プレナムブロック	燃料温度評価時 0.8 RPV 温度評価時 1.0	0.9
8	PGX 黒鉛、プレナム下部ブロック 下端ブロック	燃料温度評価時 0.8 RPV 温度評価時 1.0	0.9
9	ASR-0RB 炭素ブロック、炉床部断熱層	燃料温度評価時 0.8 RPV 温度評価時 1.0	0.9
10	ダミー物質、炉側部の冷却材	燃料温度評価時 0.36 RPV 温度評価時 1.0	0.68
11	SUS304 ボロン入黒鉛、側部遮へい体	燃料温度評価時 0.36 RPV 温度評価時 1.0	0.68
12	コンクリート、1 次側部遮へい体	0.9	0.9
13	クロムモリブデン鋼、炉心支持格子	燃料温度評価時 0.6 RPV 温度評価時 1.0	0.8
14	ダミー物質、RPV 外部雰囲気	燃料温度評価時 0.6 RPV 温度評価時 0.6	0.6
15	ダミー物質、RPV 内部雰囲気	燃料温度評価時 0.6 RPV 温度評価時 0.6	0.6

表2-3 炉心中心部及び炉心周辺部の等価熱伝導率（燃焼0日）(kcal/mh°C)

温度 (°C)	安全評価用				再現解析用			
	炉心中心部		炉心周辺部		炉心中心部		炉心周辺部	
	径方向	軸方向	径方向	軸方向	径方向	軸方向	径方向	軸方向
100	86.4	93.7	113.4	113.4	71.9	78.1	94.4	94.4
200	77.5	83.9	101.5	101.5	64.3	70.0	84.3	84.3
300	70.0	75.2	91.1	91.1	57.6	63.0	75.4	75.4
400	63.2	68.0	81.8	81.8	52.7	56.7	68.2	68.2
500	58.2	62.1	74.6	74.6	48.5	51.8	62.2	62.2
600	53.3	56.2	67.3	67.3	44.4	46.8	56.1	56.1
700	50.3	52.1	62.3	62.3	41.9	43.4	51.9	51.9
800	47.3	48.0	57.3	57.3	39.4	40.0	47.8	47.8
900	45.4	45.3	54.0	54.0	37.8	37.8	45.0	45.0
1000	43.5	42.6	50.6	50.6	36.3	35.5	42.2	42.2
1100	42.6	40.7	48.3	48.3	35.5	33.9	40.3	40.3
1200	41.9	38.8	46.0	46.0	34.9	32.3	38.3	38.3
1300	41.3	37.6	44.5	44.5	34.4	31.3	37.1	37.1
1400	40.6	36.3	42.9	42.9	33.8	30.3	35.8	35.8
サブルーチン名	RRFC0P	RAFC0P	RMIG0P	AMIG0P	RRFC0N	RAFC0N	RMIG0N	AMIG0N
該当する物質No.	(4)(5)(RPV温度評価)	(6)(RPV温度評価)			(4)(5)		(6)	

表 2-4 炉心中心部及び炉心周辺部の等価熱伝導率（燃焼 660 日）(kcal/mh°C)

温度 (°C)	安全評価用				再現解析用			
	炉心中心部		炉心周辺部		炉心中心部		炉心周辺部	
	径方向	軸方向	径方向	軸方向	径方向	軸方向	径方向	軸方向
100	9.4	17.8	16.3	18.0	11.8	23.0	20.3	22.4
200	8.9	16.9	15.6	17.2	11.1	21.9	19.5	21.5
300	8.5	16.2	15.0	16.5	10.6	20.9	18.7	20.7
400	8.1	16.1	14.4	15.9	10.1	20.1	18.0	19.9
500	8.0	15.6	13.9	15.4	10.0	19.5	17.4	19.3
600	7.8	15.0	13.4	14.8	9.8	18.8	16.8	18.5
700	7.7	14.6	13.0	14.4	9.6	18.3	16.3	18.0
800	7.6	14.2	12.6	13.9	9.5	17.8	15.8	17.4
900	7.7	14.0	12.3	13.7	9.6	17.5	15.4	17.1
1000	7.6	13.7	12.0	13.3	9.5	17.1	15.0	16.6
1100	7.8	13.4	11.8	13.0	9.8	16.8	14.8	16.3
1200	7.9	13.2	11.5	12.8	9.9	16.5	14.4	16.0
1300	7.9	13.1	11.5	12.7	9.9	16.4	14.4	15.9
1400	7.9	12.9	11.3	12.5	9.9	16.1	14.1	15.6
サブルーチン名	RRFC6F	RAFC6F	RMIG6F	AMIG6F	RRFC6N	RAFC6N	RMIG6N	AMIG6N
該当する物質No.	(4)(5)(燃料温度評価)	(6)(燃料温度評価)			(4)(5)		(6)	

表 2-5 PGX 黒鉛、ASR-ORB 黒鉛の熱伝導率 (kcal/mh°C)

温度 (°C)	PGX黒鉛						ASR-ORB黒鉛		
	径方向			軸方向			(径方向、軸方向共通)		
	燃料用	RPV用	再現用	燃料用	RPV用	再現用	燃料用	RPV用	再現用
100	91.74	109.74	100.74	65.52	83.52	74.52	6.552	8.352	7.452
200	83.28	101.28	92.28	58.54	76.54	67.54	6.984	8.784	7.884
300	75.62	93.62	84.62	52.34	70.34	61.34	7.344	9.144	8.244
400	68.71	86.71	77.71	46.87	64.87	55.87	7.632	9.432	8.532
500	62.54	80.54	71.54	42.05	60.05	51.05	7.920	9.720	8.820
600	57.01	75.01	66.01	37.87	55.87	46.87	8.136	9.936	9.036
700	52.18	70.18	61.18	34.31	52.31	43.31	8.316	10.12	9.218
800	47.89	65.89	56.89	31.25	49.25	40.25	8.460	10.26	9.360
900	44.22	62.22	53.22	28.66	46.66	37.66	8.568	10.37	9.469
1000	41.06	59.06	50.06	26.50	44.50	35.50	8.640	10.44	9.540
1100	38.39	56.39	47.39	24.73	42.73	33.73	8.712	10.51	9.611
1200	36.14	54.14	45.14	23.33	41.33	32.33			
1300	34.37	52.37	43.37	22.18	40.18	31.18			
1400	32.95	50.95	41.95	21.28	39.28	30.28			
1500	31.82	49.82	40.82	20.59	38.59	29.59			
1600	31.04	49.04	40.04	20.02	38.02	29.02			
サブルーチン名	RRPXF	RRXPXP	RRPXN	RAPXF	RAPXP	RAPXN	RASRF	RASRP	RASRN
該当する物質No.	(7)(8)	(7)(8)		(7)(8)			(9)		

表 2-6 原子炉出力 18MW の BLOOST 用出力分布の入力データ

単位 : W/cc

		F1	F2	F3	F4
18MW 84day 2512mm	1 段目	1.361	1.424	1.381	1.537
	2 段目	2.434	2.598	2.444	2.497
	3 段目	2.374	2.542	2.391	2.339
	4 段目	1.628	1.711	1.587	1.625
	5 段目	1.187	1.249	1.152	1.175

day : 燃焼日数、 mm : 制御棒位置

表 2-7 原子炉出力 18MW の TAC-NC 用出力分布の入力データ

相対値、合計値 1.0

		F1	F2	F3	F4
18MW 84day 2512mm	1 段目	0.0299	0.0312	0.0606	0.0337
	2 段目	0.0534	0.0570	0.1072	0.0548
	3 段目	0.0521	0.0557	0.1049	0.0513
	4 段目	0.0357	0.0375	0.0696	0.0356
	5 段目	0.0260	0.0274	0.0505	0.0258

day : 燃焼日数、 mm : 制御棒位置

表 2-8 原子炉出力 18MW のノミナルケースの解析条件

原子炉出力	MW	18.0
冷却材流量 (合計)	t/h	44.51
	kg/s	12.36
炉側部流量 (内)	kg/h	22255.20
炉側部流量 (外)	kg/h	22255.20
F1-1 流量	kg/h	4619.0
F1-2 流量	kg/h	4619.0
F2 流量	kg/h	9238.0
F3 流量	kg/h	17356.3
F4 流量	kg/h	8678.1
冷却材圧力	MPa(g)	3.32
	kgf/cm ²	34.9
原子炉入口冷却材温度	°C	272.1
炉側部入口 (内側) 冷却材温度	°C	274.9
炉側部入口 (外側) 冷却材温度	°C	274.1
炉心入口 (F1) 冷却材温度	°C	272.6
炉心入口 (F2) 冷却材温度	°C	274.4
炉心入口 (F3,F4) 冷却材温度	°C	275.5

表 2-9 原子炉出力 18MW のノミナルケースの解析結果

評価点		実測値	解析値
RPV 上鏡	13A000	226	87
RPV 脊部	13A007	257	245
	13A008	255	250
	24A354	264	249
	13A011	249	237
	13A014	258	106
炉心支持板	24A424	281	268
炉心支持格子	24A430	273	186
固定反射体 1 段目(外側)	24A396	287	284
固定反射体 1 段目(内側)	24A405	285	283
固定反射体 3 段目(外側)	24A399	311	304
固定反射体 3 段目(内側)	24A408	339	317
固定反射体 8 段目(外側)	24A402	297	294
固定反射体 8 段目(内側)	24A411	330	307
高温プレナムブロック	24A434	449	451
プレナム下部ブロック	24A414	439	359
下端ブロック	24A417	305	278
側部遮へい体 1 段目(外側)	24A366	272	272
側部遮へい体 1 段目(内側)	24A375	290	287
側部遮へい体 3 段目(外側)	24A369	272	273
側部遮へい体 3 段目(内側)	24A378	291	287
炉心出口(中心)	24A220	564	539
炉心出口(周辺)	24A226	553	547
RPV 放熱量(MW)		0.32	0.21

表 2-10 原子炉出力 18MW の VCS パネル入口温度に対する感度解析結果

	実測値	VCS 冷却水 温度 30°C	VCS 冷却水 温度 40°C
ケース名	—	18m000	18m001
RPV 側部からの放熱量(MW)	0.32	0.20	0.19
RPV 上鏡温度(13A000)(°C)	226	87	93
RPV 側部温度 (13A007) (°C)	257	245	246
RPV 側部温度 (13A008) (°C)	255	250	251
RPV 側部温度 (24A354) (°C)	264	249	250
RPV 側部温度 (13A011) (°C)	249	237	238
RPV 下鏡温度(13A014) (°C)	258	106	111

表2-11 原子炉出力18MWの炉心部熱伝導率の感度解析結果：温度（℃）

評価点		実測値	熱伝導率最大 (18m012)	熱伝導率パナル (18m000)	熱伝導率最小 (18m013)
RPV上鏡	13A000	226	88	87	86
	13A007	257	245	245	243
	13A008	255	250	250	248
	24A354	264	250	249	248
	13A011	249	237	237	237
RPV下鏡	13A014	258	107	106	106
炉心支持板	24A424	281	268	268	267
炉心支持格子	24A430	273	187	186	184
固定反射体1(外)	24A396	287	285	284	279
固定反射体1(内)	24A405	285	284	283	277
固定反射体3(外)	24A399	311	306	304	291
固定反射体3(内)	24A408	339	318	317	298
固定反射体8(外)	24A402	297	296	294	292
固定反射体8(内)	24A411	330	308	307	306
高温プレナムブロック	24A434	449	454	451	449
プレナム下部ブロック	24A414	439	359	359	360
下端ブロック	24A417	305	281	278	275
側部遮へい体1(外)	24A366	272	272	272	272
側部遮へい体1(内)	24A375	290	288	287	282
側部遮へい体3(外)	24A369	272	273	273	273
側部遮へい体3(内)	24A378	291	288	287	283
炉心出口(中心)	24A220	564	539	539	538
炉心出口(周辺)	24A226	553	546	547	551
RPV放熱量(MW)		0.32	0.21	0.21	0.21

表2-12 原子炉出力18MWの炉心部熱伝導率の感度解析結果：温度差（℃）

評価点		実測値との差(実-解) (℃)			(熱伝導率最大) — (熱伝導率最小)
		熱伝導率最大	熱伝導率パナル	熱伝導率最小	
RPV上鏡	13A000	138	138	140	1.4
	13A007	11	12	14	2.2
	13A008	5	5	8	2.6
	24A354	15	15	16	1.6
	13A011	12	12	12	0.3
RPV下鏡	13A014	151	151	152	1.2
炉心支持板	24A424	13	14	14	0.9
炉心支持格子	24A430	86	87	89	3.5
固定反射体1(外)	24A396	2	3	8	6.2
固定反射体1(内)	24A405	1	2	7	6.7
固定反射体3(外)	24A399	6	8	20	14.5
固定反射体3(内)	24A408	21	22	41	19.4
固定反射体8(外)	24A402	1	3	5	3.2
固定反射体8(内)	24A411	22	23	24	2.1
高温プレナムブロック	24A434	-4	-1	0	4.5
プレナム下部ブロック	24A414	80	80	79	-1.2
下端ブロック	24A417	24	27	30	5.9
側部遮へい体1(外)	24A366	-1	0	0	0.4
側部遮へい体1(内)	24A375	2	3	8	5.6
側部遮へい体3(外)	24A369	0	0	0	0.2
側部遮へい体3(内)	24A378	4	5	9	5.2
炉心出口(中心)	24A220	25	25	26	1.4
炉心出口(周辺)	24A226	7	6	3	-4.1
RPV放熱量(MW)		0	0	0	0.0

表 2-13 原子炉出力 18MW のブロック間ギャップの感度解析結果：温度 (°C)

評価点	実測値	ノミナル	ギャップ幅 1/2	ギャップ幅 1/10
RPV上鏡	13A000	226	87	88
	13A007	257	245	246
	13A008	255	250	251
	24A354	264	249	250
	13A011	249	237	237
RPV下鏡	13A014	258	106	106
炉心支持板	24A424	281	268	268
炉心支持格子	24A430	273	186	186
固定反射体1(外)	24A396	287	284	286
固定反射体1(内)	24A405	285	283	284
固定反射体3(外)	24A399	311	304	316
固定反射体3(内)	24A408	339	317	336
固定反射体8(外)	24A402	297	294	294
固定反射体8(内)	24A411	330	307	308
高温プレナムブロック	24A434	449	451	451
プレナム下部ブロック	24A414	439	359	359
下端ブロック	24A417	305	278	278
側部遮へい体1(外)	24A366	272	272	273
側部遮へい体1(内)	24A375	290	287	290
側部遮へい体3(外)	24A369	272	273	273
側部遮へい体3(内)	24A378	291	287	291
炉心出口(中心)	24A220	564	539	542
炉心出口(周辺)	24A226	553	547	546
RPV放熱量(MW)	0.32	0.21	0.21	0.22

表 2-14 原子炉出力 18MW のブロック間ギャップの感度解析結果：温度差 (°C)

評価点		実測値との差(実-解) (°C)			(ノミナル) — (ギャップ幅1/10)
		ノミナル	ギャップ幅 1/2	ギャップ幅 1/10	
RPV上鏡	13A000	138	138	138	-0.4
	13A007	12	11	10	-1.4
	13A008	5	5	3	-2.0
	24A354	15	15	14	-1.0
	13A011	12	12	12	0.0
RPV下鏡	13A014	151	151	151	0.0
炉心支持板	24A424	14	14	14	0.0
炉心支持格子	24A430	87	87	87	-0.1
固定反射体1(外)	24A396	3	2	1	-2.4
固定反射体1(内)	24A405	2	1	1	-1.2
固定反射体3(外)	24A399	8	3	-5	-12.2
固定反射体3(内)	24A408	22	15	3	-19.1
固定反射体8(外)	24A402	3	3	3	-0.2
固定反射体8(内)	24A411	23	23	23	-0.3
高温プレナムブロック	24A434	-1	-2	-2	-0.4
プレナム下部ブロック	24A414	80	79	80	0.0
下端ブロック	24A417	27	27	27	-0.1
側部遮へい体1(外)	24A366	0	-1	-1	-0.3
側部遮へい体1(内)	24A375	3	2	0	-3.8
側部遮へい体3(外)	24A369	0	0	-1	-0.1
側部遮へい体3(内)	24A378	5	3	1	-3.8
炉心出口(中心)	24A220	25	24	22	-2.8
炉心出口(周辺)	24A226	6	6	8	1.5
RPV放熱量(MW)	0	0	0	0	0.0

表 2-15 原子炉出力 18MW の炉心冷却材流量の感度解析結果：温度 (°C)

評価点		実測値	ノミナル	炉心流量 95%	炉心流量 90%	炉心流量 85%
RPV上鏡	13A000	226	87	87	88	88
	13A007	257	245	245	246	246
	13A008	255	250	250	251	251
	24A354	264	249	249	250	250
	13A011	249	237	237	237	238
RPV下鏡	13A014	258	106	107	107	107
炉心支持板	24A424	281	268	268	268	268
炉心支持格子	24A430	273	186	187	188	189
固定反射体1(外)	24A396	287	284	284	285	286
固定反射体1(内)	24A405	285	283	284	284	285
固定反射体3(外)	24A399	311	304	305	307	309
固定反射体3(内)	24A408	339	317	319	321	324
固定反射体8(外)	24A402	297	294	295	297	298
固定反射体8(内)	24A411	330	307	309	312	314
高温プレナムブロック	24A434	449	451	459	468	478
プレナム下部ブロック	24A414	439	359	365	371	379
下端ブロック	24A417	305	278	280	282	284
側部遮へい体1(外)	24A366	272	272	272	272	272
側部遮へい体1(内)	24A375	290	287	287	288	289
側部遮へい体3(外)	24A369	272	273	273	273	273
側部遮へい体3(内)	24A378	291	287	288	288	289
炉心出口(中心)	24A220	564	539	553	569	586
炉心出口(周辺)	24A226	553	547	561	576	593
RPV放熱量(MW)		0.32	0.21	0.21	0.21	0.22

表 2-16 原子炉出力 18MW の炉心冷却材流量の感度解析結果：温度差 (°C)

評価点		実測値との差(実-解) (°C)			(ノミナル) -(炉心流量85%)
		ノミナル	炉心流量 95%	炉心流量 90%	
RPV上鏡	13A000	138	138	138	-0.4
RPV胴部	13A007	12	12	11	-1.0
	13A008	5	5	5	-1.1
	24A354	15	15	14	-0.9
	13A011	12	12	12	-0.2
	13A014	151	151	150	-1.0
RPV下鏡	24A424	14	14	13	-0.5
炉心支持板	24A430	87	86	85	-3.5
固定反射体1(外)	24A396	3	3	2	-2.4
固定反射体1(内)	24A405	2	1	0	-2.3
固定反射体3(外)	24A399	8	6	4	-5.3
固定反射体3(内)	24A408	22	20	18	-7.5
固定反射体8(外)	24A402	3	2	0	-4.1
固定反射体8(内)	24A411	23	21	19	-7.0
高温プレナムブロック	24A434	-1	-9	-18	-26.6
プレナム下部ブロック	24A414	80	74	67	-19.5
下端ブロック	24A417	27	26	24	-5.8
側部遮へい体1(外)	24A366	0	-1	-1	-0.2
側部遮へい体1(内)	24A375	3	3	2	-2.4
側部遮へい体3(外)	24A369	0	0	-1	-0.1
側部遮へい体3(内)	24A378	5	4	3	-2.4
炉心出口(中心)	24A220	25	11	-5	-47.3
炉心出口(周辺)	24A226	6	-8	-23	-46.0
RPV放熱量(MW)		0.11	0.11	0.11	0.0

表 2-17 原子炉出力 18MW の最適条件の解析結果

評価点	実測値	ノミナル	最適解析	実測値との差 実-解	
				ノミナル	最適解析
RPV上鏡	13A000	226	87	75	138
RPV胴部	13A007	257	245	241	12
	13A008	255	250	247	5
	24A354	264	249	244	15
	13A011	249	237	232	12
RPV下鏡	13A014	258	106	94	151
炉心支持板	24A424	281	268	264	14
炉心支持格子	24A430	273	186	179	87
固定反射体1(外)	24A396	287	284	286	3
固定反射体1(内)	24A405	285	283	284	2
固定反射体3(外)	24A399	311	304	320	8
固定反射体3(内)	24A408	339	317	341	22
固定反射体8(外)	24A402	297	294	296	3
固定反射体8(内)	24A411	330	307	310	23
高温プレナムブロック	24A434	449	451	461	1
プレナム下部ブロック	24A414	439	359	363	80
下端ブロック	24A417	305	278	280	27
側部遮へい体1(外)	24A366	272	272	272	0
側部遮へい体1(内)	24A375	290	287	291	3
側部遮へい体3(外)	24A369	272	273	272	0
側部遮へい体3(内)	24A378	291	287	291	5
炉心出口(中心)	24A220	564	539	556	25
炉心出口(周辺)	24A226	553	547	558	6
RPV放熱量(MW)		0.32	0.21	0.33	0.1
全測定点の温度差の合計				645	648
モデル上下部を除いた点の温度差の合計				147	121

表 2-18 原子炉出力 18MW の炉心出口冷却材温度の比較

ケース	炉心出口冷却材温度(°C)		
	中心	周辺	中心-周辺
実測値	564	553	11
ノミナル	539	547	-8
熱伝導率最大	539	546	-7
熱伝導率最小	538	551	-13
冷却材流量95%	553	561	-8
冷却材流量90%	569	576	-7
冷却材流量85%	586	593	-7
ブロック間ギャップ1/2	540	547	-6
ブロック間ギャップ1/10	542	546	-4
最適条件	556	558	-2
最適条件128⇒229日	562	557	6

表 2-19 原子炉出力 30MW の定常解析条件

ケースNo.	単位	30m000	30m019	30m019a	30m019b
原子炉出力	MW	29.83	←	←	←
冷却材流量(合計)	t/h	44.54	←	←	←
	kg/s	12.37	←	←	←
炉側部流量(内)	kg/h	22268.60	←	←	←
炉側部流量(外)	kg/h	22268.60	←	←	←
F1-1流量	kg/h	4621.8	4390.7	4390.7	4390.7
F1-2流量	kg/h	4621.8	4390.7	4390.7	4390.7
F2流量	kg/h	9243.6	8781.4	8781.4	8781.4
F3流量	kg/h	17366.7	16498.4	16498.4	16498.4
F4流量	kg/h	8683.4	8249.2	8249.2	8249.2
冷却材圧力	MPa(g)	4.00	←	←	←
	kgf/cm ²	41.8	←	←	←
原子炉入口冷却材温度	°C	392.0	←	←	←
炉側部入口(内側)冷却材温度	°C	394.9	←	←	←
炉側部入口(外側)冷却材温度	°C	393.1	←	←	←
炉心入口(F1)冷却材温度	°C	389.9	←	←	←
炉心入口(F2)冷却材温度	°C	393.7	←	←	←
炉心入口(F3F4)冷却材温度	°C	395.1	←	←	←
VCS冷却水温度(A16)	°C	30	30	30	30
RPV輻射率	—	0.8	3	3	3
RPV上鏡部熱伝達補正(A7)	—	1.0	1.0	1.0	1.0
RPV下鏡部熱伝達補正(A9)	—	1.0	1.0	1.0	1.0
上下可動反射体④熱伝導率	—	ノミナル	最大	最大	最大
燃料体⑤熱伝導率	—	ノミナル	最大	最大	最大
側部可動反射体⑥熱伝導率	—	ノミナル	最大	最大	最大
高温プレナムブロック⑦熱伝導率	—	ノミナル	最大	最大	最大
固反体&プレナム下部⑧熱伝導率	—	ノミナル	最大	最大	最大
炭素ブロック⑨熱伝導率	—	ノミナル	最大	最大	最大
出力分布		128日	128日	173日	227日
Makefile		Makefile21	Makefile22	Makefile22	Makefile22
ロードモジュール		bloosttac21	bloosttac22	bloosttac22	bloosttac22
コメント		30MWの基 準ケース	ブロック間 ギャップ幅を 1/10	ブロック間 ギャップ幅を 1/10	ブロック間 ギャップ幅を 1/10

表 2-20 原子炉出力 30MW の BLOOST 用出力分布の入力データ

単位 : W/cc

		F1	F2	F3	F4
30MW 128day 2812mm	1 段目	3.621	3.797	3.589	3.645
	2 段目	4.305	4.567	4.251	4.305
	3 段目	3.524	3.749	3.494	3.408
	4 段目	2.209	2.308	2.114	2.157
	5 段目	1.517	1.590	1.454	1.482
30MW 173day 2762mm	1 段目	3.379	3.531	3.329	3.412
	2 段目	4.285	4.519	4.177	4.226
	3 段目	3.644	3.849	3.553	3.458
	4 段目	2.367	2.453	2.223	2.257
	5 段目	1.647	1.715	1.552	1.576
30MW 227day 2712mm	1 段目	3.132	3.263	3.071	3.182
	2 段目	4.249	4.460	4.098	4.144
	3 段目	3.759	3.944	3.611	3.507
	4 段目	2.529	2.603	2.334	2.361
	5 段目	1.787	1.848	1.657	1.677

表 2-21 原子炉出力 30MW の TAC-NC 用出力分布の入力データ

相対値、合計値 1

		F1	F2	F3	F4
30MW 128day 2812mm	1 段目	0.0476	0.0500	0.0945	0.0480
	2 段目	0.0567	0.0601	0.1119	0.0567
	3 段目	0.0464	0.0493	0.0920	0.0449
	4 段目	0.0291	0.0304	0.0557	0.0284
	5 段目	0.0200	0.0209	0.0383	0.0195
30MW 173day 2762mm	1 段目	0.0445	0.0465	0.0876	0.0449
	2 段目	0.0564	0.0595	0.1099	0.0556
	3 段目	0.0480	0.0506	0.0935	0.0455
	4 段目	0.0312	0.0323	0.0585	0.0297
	5 段目	0.0217	0.0226	0.0409	0.0207
30MW 227day 2712mm	1 段目	0.0412	0.0429	0.0808	0.0419
	2 段目	0.0559	0.0587	0.1079	0.0545
	3 段目	0.0495	0.0519	0.0950	0.0462
	4 段目	0.0333	0.0343	0.0614	0.0311
	5 段目	0.0235	0.0243	0.0436	0.0221

表 2-22 原子炉出力 30MW の定常解析結果

		実測値	30m000	30m019	30m019a	30m019b
RPV上鏡	13A000	314	123	106	106	105
	13A007	362	349	340	339	339
	13A008	361	357	350	350	350
	24A354	377	355	347	347	347
	13A011	350	337	328	328	328
RPV下鏡	13A014	362	141	126	126	126
炉心支持板	24A424	404	381	373	373	373
炉心支持格子	24A430	392	271	264	264	264
固定反射体1(外)	24A396	415	407	409	408	408
固定反射体1(内)	24A405	410	405	406	406	405
固定反射体3(外)	24A399	455	444	464	462	460
固定反射体3(内)	24A408	511	474	507	503	500
固定反射体8(外)	24A402	430	426	430	430	430
固定反射体8(内)	24A411	497	456	460	460	460
高温フレナムブロック	24A434	678	662	679	678	677
フレナム下部ブロック	24A414	671	572	583	583	583
下端ブロック	24A417	455	410	415	415	415
側部遮へい体1(外)	24A366	389	390	389	389	389
側部遮へい体1(内)	24A375	420	414	417	417	417
側部遮へい体3(外)	24A369	390	391	390	390	390
側部遮へい体3(内)	24A378	422	414	419	419	418
炉心出口(中心)	24A220	866	837	865	869	872
炉心出口(周辺)	24A226	845	843	862	861	861
RPV放熱量(MW)		0.60	0.42	0.65	0.65	0.65
解析条件		基準ケース	最適条件ケース			
			燃焼128日	燃焼173日	燃焼227日	

表 2-23 原子炉出力 30MW の定常解析結果 (実測値 - 解析値)

		実測値	30m000	30m019	30m019a	30m019b
RPV上鏡	13A000	—	191	209	209	209
	13A007	—	13	22	22	23
	13A008	—	4	11	11	11
	24A354	—	22	30	30	30
	13A011	—	12	22	22	22
RPV下鏡	13A014	—	221	237	237	237
炉心支持板	24A424	—	24	31	31	31
炉心支持格子	24A430	—	120	127	127	127
固定反射体1(外)	24A396	—	8	6	7	7
固定反射体1(内)	24A405	—	5	4	5	5
固定反射体3(外)	24A399	—	11	9	7	5
固定反射体3(内)	24A408	—	37	4	8	11
固定反射体8(外)	24A402	—	4	0	0	0
固定反射体8(内)	24A411	—	41	36	37	37
高温フレナムブロック	24A434	—	15	1	0	0
フレナム下部ブロック	24A414	—	99	87	88	88
下端ブロック	24A417	—	45	40	40	40
側部遮へい体1(外)	24A366	—	1	0	0	0
側部遮へい体1(内)	24A375	—	6	2	3	3
側部遮へい体3(外)	24A369	—	1	0	0	0
側部遮へい体3(内)	24A378	—	8	3	3	3
炉心出口(中心)	24A220	—	29	1	3	7
炉心出口(周辺)	24A226	—	2	17	17	16
RPV放熱量(MW)	—	0.18	0.05	0.05	0.05	0.05
解析条件		基準ケース	最適条件ケース			
			燃焼128日	燃焼173日	燃焼227日	
実測値との差の合計(全温度計測点)		919	901	906	913	
実測値との差の合計(モデル上下部を除く)		218	170	175	181	

表 2-24 最適条件における 9MW～30MW までの解析条件

ケースNo.	単位	09m020	15m020	18m020	24m020	30m020	設定方針
原子炉出力(実測値)	MW	9.0	14.9	18.0	24.0	29.8	解析では切りのいい値にまとめて使用する
原子炉出力(解析用)		9.0	15.0	18.0	24.0	30.0	
冷却材流量(合計)	t/h	44.50	44.50	44.50	44.50	44.50	各出力の実測値の平均値で統一させた
	kg/s	12.36	12.36	12.36	12.36	12.36	
炉側部流量(内)	kg/h	22250.0	22250.0	22250.0	22250.0	22250.0	全流量の50%
炉側部流量(外)	kg/h	22250.0	22250.0	22250.0	22250.0	22250.0	全流量の50%
F1-1流量	kg/h	4387.0	4387.0	4387.0	4387.0	4387.0	燃料チャンネル数による配分 × 0.95
F1-2流量	kg/h	4387.0	4387.0	4387.0	4387.0	4387.0	
F2流量	kg/h	8774.1	8774.1	8774.1	8774.1	8774.1	
F3流量	kg/h	16484.6	16484.6	16484.6	16484.6	16484.6	
F4流量	kg/h	8242.3	8242.3	8242.3	8242.3	8242.3	
冷却材圧力	MPa(g)	2.81	3.16	3.32	3.61	4.00	各ケースの実測値
	kgf/cm ²	29.7	33.2	34.9	37.8	41.8	
原子炉入口冷却材温度	°C	180.0	241.4	272.1	333.4	392.0	
炉側部入口(内側)冷却材温度	°C	182.3	243.7	274.9	337.3	394.9	
炉側部入口(外側)冷却材温度	°C	182.3	243.3	274.1	336.2	393.1	
炉心入口(F1)冷却材温度	°C	180.4	241.4	272.6	334.2	389.9	
炉心入口(F2)冷却材温度	°C	181.5	243.1	274.4	337.0	393.7	
炉心入口(F3F4)冷却材温度	°C	181.9	244.0	275.5	338.3	395.1	
VCS冷却水温度(A16)	°C	30	30	30	30	30	
RPV輻射率	—	3	3	3	3	3	放熱量を再現させる条件
上下可動反射体④熱伝導率	—	最大	最大	最大	最大	最大	構造物温度や冷却材温度を再現させる条件
燃料体⑤熱伝導率	—	最大	最大	最大	最大	最大	
側部可動反射体⑥熱伝導率	—	最大	最大	最大	最大	最大	
高温プレナムブロック⑦熱伝導率	—	最大	最大	最大	最大	最大	
固反体 & プレナム下部⑧熱伝導率	—	最大	最大	最大	最大	最大	
炭素ブロック⑨熱伝導率	—	最大	最大	最大	最大	最大	
ブロック間ギャップ		1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	
出力分布		205日	205日	229日	274日	227日	出来るだけ試験時期を再現
Makefile		Makefile22	Makefile22	Makefile22	Makefile22	Makefile22	
ロードモジュール		bloosttac22	bloosttac22	bloosttac22	bloosttac22	bloosttac22	

表 2-25 最適条件における 9MW～30MW までの BLOOST 用出力分布の入力データ

単位 : W/cc

		F1	F2	F3	F4
9MW 205day 2282mm	1 段目	0.397	0.411	0.405	0.502
	2 段目	1.054	1.111	1.036	1.077
	3 段目	1.297	1.368	1.266	1.237
	4 段目	1.031	1.067	0.969	0.985
	5 段目	0.803	0.833	0.754	0.764
15MW 205day 2462mm	1 段目	0.989	1.026	0.988	1.123
	2 段目	1.962	2.066	1.922	1.964
	3 段目	2.050	2.161	1.996	1.947
	4 段目	1.517	1.570	1.423	1.446
	5 段目	1.133	1.177	1.064	1.079
18MW 229day 2512mm	1 段目	1.304	1.355	1.301	1.444
	2 段目	2.391	2.519	2.331	2.375
	3 段目	2.438	2.564	2.359	2.299
	4 段目	1.772	1.827	1.651	1.674
	5 段目	1.310	1.355	1.223	1.239
24MW 274day 2612mm	1 段目	2.094	2.171	2.046	2.182
	2 段目	3.303	3.454	3.159	3.199
	3 段目	3.159	3.299	3.000	2.911
	4 段目	2.255	2.309	2.056	2.075
	5 段目	1.639	1.688	1.504	1.519
30MW 227day 2712mm	1 段目	3.132	3.263	3.071	3.182
	2 段目	4.249	4.460	4.098	4.144
	3 段目	3.759	3.944	3.611	3.507
	4 段目	2.529	2.603	2.334	2.361
	5 段目	1.787	1.848	1.657	1.677

表 2-26 最適条件における 9MW～30MW までの TAC-NC 用出力分布の入力データ

相対値、合計値 1

		F1	F2	F3	F4
9MW 205day 2282mm	1 段目	0.0174	0.0180	0.0355	0.0220
	2 段目	0.0462	0.0487	0.0909	0.0473
	3 段目	0.0569	0.0600	0.1111	0.0543
	4 段目	0.0452	0.0468	0.0850	0.0432
	5 段目	0.0352	0.0365	0.0661	0.0335
15MW 205day 2462mm	1 段目	0.0260	0.0270	0.0520	0.0296
	2 段目	0.0516	0.0544	0.1011	0.0517
	3 段目	0.0540	0.0569	0.1051	0.0512
	4 段目	0.0399	0.0413	0.0749	0.0381
	5 段目	0.0298	0.0310	0.0560	0.0284
18MW 229day 2512mm	1 段目	0.0286	0.0297	0.0571	0.0317
	2 段目	0.0524	0.0552	0.1022	0.0521
	3 段目	0.0535	0.0562	0.1035	0.0504
	4 段目	0.0389	0.0401	0.0724	0.0367
	5 段目	0.0287	0.0297	0.0536	0.0272
24MW 274day 2612mm	1 段目	0.0344	0.0357	0.0673	0.0359
	2 段目	0.0543	0.0568	0.1039	0.0526
	3 段目	0.0520	0.0543	0.0987	0.0479
	4 段目	0.0371	0.0380	0.0676	0.0341
	5 段目	0.0270	0.0278	0.0495	0.0250
30MW 227day 2712mm	1 段目	0.0412	0.0429	0.0808	0.0419
	2 段目	0.0559	0.0587	0.1079	0.0545
	3 段目	0.0495	0.0519	0.0950	0.0462
	4 段目	0.0333	0.0343	0.0614	0.0311
	5 段目	0.0235	0.0243	0.0436	0.0221

表 2-27 最適条件における 9MW～30MWまでの解析結果

		9MW		15MW		18MW		24MW		30MW	
		実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値
RPV上鏡	13A000	152	54	201	67	226	75	273	90	314	106
RPV胴部	13A007	173	161	229	214	257	240	312	293	362	339
	13A008	172	164	227	219	255	246	311	301	361	350
	24A354	177	163	235	217	264	244	323	298	377	347
	13A011	169	156	222	206	249	232	302	282	350	328
	RPV下鏡	13A014	174	69	230	86	258	94	313	111	362
炉心支持板	24A424	186	177	249	235	281	264	345	321	404	373
炉心支持格子	24A430	182	117	242	158	273	179	335	223	392	265
固定反射体1(外)	24A396	188	188	253	253	287	286	354	350	415	408
固定反射体1(内)	24A405	187	187	252	252	285	284	351	347	410	405
固定反射体3(外)	24A399	199	204	273	281	311	319	387	392	455	461
固定反射体3(内)	24A408	208	212	294	296	339	338	429	421	511	500
固定反射体8(外)	24A402	193	192	262	261	297	296	366	366	430	430
固定反射体8(内)	24A411	207	197	288	271	330	309	416	387	497	461
高温プレナムブロック	24A434	270	281	390	401	449	459	568	572	678	679
プレナム下部ブロック	24A414	264	212	379	310	439	363	559	475	671	585
下端ブロック	24A417	193	179	267	245	305	280	383	350	455	415
側部遮へい体1(外)	24A366	181	181	241	241	272	272	333	333	389	389
側部遮へい体1(内)	24A375	189	190	256	257	290	290	358	356	420	417
側部遮へい体3(外)	24A369	181	181	242	242	272	272	334	334	390	390
側部遮へい体3(内)	24A378	190	191	257	258	291	291	360	357	422	419
炉心出口(中心)	24A220	324	325	483	482	564	562	722	725	866	876
炉心出口(周辺)	24A226	320	323	475	479	553	557	705	712	845	864
RPV放熱量(MW)		0.17	0.16	0.27	0.26	0.32	0.32	0.44	0.48	0.60	0.65

表 2-28 最適条件における 9MW～30MWまでの実測値との温度差

		9MW	15MW	18MW	24MW	30MW
RPV上鏡	13A000	98	134	151	182	209
RPV胴部	13A007	12	15	16	20	22
	13A008	8	8	9	11	11
	24A354	14	18	20	25	30
	13A011	13	16	18	20	22
	RPV下鏡	13A014	104	144	164	202
炉心支持板	24A424	9	15	18	24	31
炉心支持格子	24A430	64	85	94	112	127
固定反射体1(外)	24A396	0	0	1	4	7
固定反射体1(内)	24A405	0	0	1	3	5
固定反射体3(外)	24A399	6	7	7	5	6
固定反射体3(内)	24A408	4	2	1	8	11
固定反射体8(外)	24A402	1	1	1	1	0
固定反射体8(内)	24A411	10	17	21	29	36
高温プレナムブロック	24A434	10	11	10	5	1
プレナム下部ブロック	24A414	51	70	76	84	86
下端ブロック	24A417	14	22	25	34	39
側部遮へい体1(外)	24A366	0	0	0	0	0
側部遮へい体1(内)	24A375	1	1	0	1	3
側部遮へい体3(外)	24A369	0	0	0	0	0
側部遮へい体3(内)	24A378	1	0	0	2	3
炉心出口(中心)	24A220	1	1	2	3	10
炉心出口(周辺)	24A226	3	3	4	7	19
RPV放熱量(MW)		0.01	0.01	0.00	0.04	0.05
実測値との差の合計(全)		425	569	639	783	915
実測値との差の合計(上下部以外)		84	101	112	144	186

表 2-29 RPV 鏡部温度等に関する解析モデルの改良における解析条件

ケースNo.	単位	09m039	15m039	18m039	24m039	30m039	設定方針
原子炉出力(実測値)	MW	9.0	14.9	18.0	24.0	29.8	解析では切りのいい値にまるめて使用する
原子炉出力(解析用)		9.0	15.0	18.0	24.0	30.0	
冷却材流量(合計)	t/h	44.50	44.50	44.50	44.50	44.50	各出力の実測値の平均値で統一させた
	kg/s	12.36	12.36	12.36	12.36	12.36	
炉側部流量(内)	kg/h	22250.0	22250.0	22250.0	22250.0	22250.0	全流量の50%
炉側部流量(外)	kg/h	22250.0	22250.0	22250.0	22250.0	22250.0	全流量の50%
F1-1流量	kg/h	4387.0	4387.0	4387.0	4387.0	4387.0	燃料チャンネル数による配分 ×0.95
F1-2流量	kg/h	4387.0	4387.0	4387.0	4387.0	4387.0	
F2流量	kg/h	8774.1	8774.1	8774.1	8774.1	8774.1	
F3流量	kg/h	16484.6	16484.6	16484.6	16484.6	16484.6	
F4流量	kg/h	8242.3	8242.3	8242.3	8242.3	8242.3	
冷却材圧力	MPa(g)	2.81	3.16	3.32	3.61	4.00	各ケースの実測値
	kgf/cm ²	29.7	33.2	34.9	37.8	41.8	
原子炉入口冷却材温度	°C	180.0	241.4	272.1	333.4	392.0	
炉側部入口(内側)冷却材温度	°C	182.3	243.7	274.9	337.3	394.9	
炉側部入口(外側)冷却材温度	°C	182.3	243.3	274.1	336.2	393.1	
炉心入口(F1)冷却材温度	°C	180.4	241.4	272.6	334.2	389.9	
炉心入口(F2)冷却材温度	°C	181.5	243.1	274.4	337.0	393.7	
炉心入口(F3F4)冷却材温度	°C	181.9	244.0	275.5	338.3	395.1	
VCS冷却水温度(A16)	°C	40	40	40	40	40	
RPV輻射率	—	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	
上面熱伝達補正		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	上鏡温度を再現させる条件
下面熱伝達補正		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	下鏡温度を再現させる条件
上下可動反射体④熱伝導率	—	最大	最大	最大	最大	最大	構造物温度や冷却材温度を再現させる条件
燃料体⑤熱伝導率	—	最大	最大	最大	最大	最大	
側部可動反射体⑥熱伝導率	—	最大	最大	最大	最大	最大	
高温プレナムブロック⑦熱伝導率	—	最大	最大	最大	最大	最大	
固反体 & プレナム下部⑧熱伝導率	—	最大	最大	最大	最大	最大	
炭素ブロック⑨熱伝導率	—	最大	最大	最大	最大	最大	
ブロック間ギャップ		1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	
出力分布		205日	205日	229日	274日	227日	炉心出口温度を再現させる条件
モデル上下部境界条件		放熱あり	放熱あり	放熱あり	放熱あり	放熱あり	
炉内冷却材流路範囲(軸方向メッシュ)		4⇒41	4⇒41	4⇒41	4⇒41	4⇒41	上下鏡温度を再現させる条件

表 2-30 RPV 鏡部温度等に関する解析モデルの改良後の解析結果

	PID	9MW			15MW			18MW			24MW			30MW		
		実測値	解析値	実-解												
RPV	13A000(上鏡外面)	152	158	-6	201	207	-6	226	231	-5	273	278	-5	314	318	-4
	13A007(胴部外面)	173	168	5	229	222	7	257	249	8	312	303	10	362	351	11
	胴部内外平均	175	169	6	232	225	8	261	253	8	319	309	9	371	361	10
	24A354(胴部内面)	177	177	0	235	236	-1	264	266	-2	323	326	-3	377	381	-4
	13A011(胴部外面)	169	165	3	222	218	5	249	244	6	302	296	6	350	343	7
	13A013(下鏡外面)	175	173	2	232	228	3	260	256	4	316	312	5	366	362	4
	24A424	186	182	4	249	243	6	281	274	8	345	335	11	404	390	14
炉心支持格子	24A430	182	185	-3	242	247	-5	273	279	-6	335	343	-8	392	403	-12
	24A396(1段目外面)	188	190	-3	253	257	-4	287	291	-4	354	357	-3	415	418	-3
	24A405(1段目内面)	187	188	-2	252	254	-3	285	287	-3	351	353	-2	410	413	-3
	24A399(3段目外面)	199	201	-2	273	274	-1	311	310	2	387	380	7	455	444	12
	24A408(3段目内面)	208	216	-8	294	305	-10	339	348	-9	429	436	-7	511	522	-11
	24A402(8段目外面)	193	191	3	262	257	5	297	290	6	366	356	10	430	416	14
	24A411(8段目内面)	207	204	3	288	285	2	330	328	2	416	414	2	497	496	1
炉床部黒鉛	24A434(高温ブレナム [®] 印力)	270	281	-10	390	401	-11	449	459	-10	568	572	-5	678	679	-2
	24A414(フレーム下部 [®] 印力)	264	217	46	379	318	62	439	373	66	559	490	69	671	606	65
	24A417(恒床部断熱層)	193	194	0	267	265	2	305	302	3	383	377	7	455	447	8
	24A366(1段目外面)	181	181	0	241	241	0	272	271	0	333	332	1	389	388	1
	24A375(1段目内面)	189	190	-1	256	256	0	290	290	0	358	355	2	420	416	4
	24A369(3段目外面)	181	181	0	242	242	0	272	272	0	334	334	0	390	390	0
	24A378(3段目内面)	190	191	-1	257	258	-1	291	292	0	360	358	1	422	420	2
炉心出口冷却材	炉心出口中心	324	325	-1	483	482	1	563	562	1	721	725	-3	866	875	-9
	炉心出口周辺	317	323	-5	471	478	-7	548	556	-8	701	712	-11	845	863	-18
	RPV放熱量(MW)	0.22	0.20	0.02	0.36	0.32	0.03	0.42	0.40	0.02	0.59	0.57	0.02	0.80	0.76	0.04

表 2-31 定格連続試験運転の解析結果

	PID	定格連続試験運転		
		実測値	解析値	実-解
RPV	13A000(上鏡外面)	305	318	-13
	13A007(胴部外面)	354	351	3
	13A008(胴部内面)	354	350	4
	24A354(胴部内面)	369	381	-12
	13A011(胴部外面)	342	343	-1
	13A013(下鏡外面)	356	362	-6
炉心支持格子	24A424	396	390	6
	24A430	383	403	-20
固定反射体	24A396(1段目外面)	406	418	-12
	24A405(1段目内面)	401	413	-12
	24A399(3段目外面)	443	444	-1
	24A408(3段目内面)	494	522	-28
	24A402(8段目外面)	419	416	3
	24A411(8段目内面)	481	496	-15
炉床部黒鉛	24A434(高温プレナムブロック)	656	679	-23
	24A414(プレナム下部ブロック)	645	606	39
	24A417(炉床部断熱層)	440	447	-7
炉側部冷却材	24A366(1断面外面)	381	388	-7
	24A375(1段目内面)	411	416	-5
	24A369(3段目外面)	382	390	-8
	24A378(3段目内面)	412	420	-8
炉心出口冷却材	24A220(炉心出口中心)	856	875	-19
	24A226(炉心出口周辺)	827	863	-36

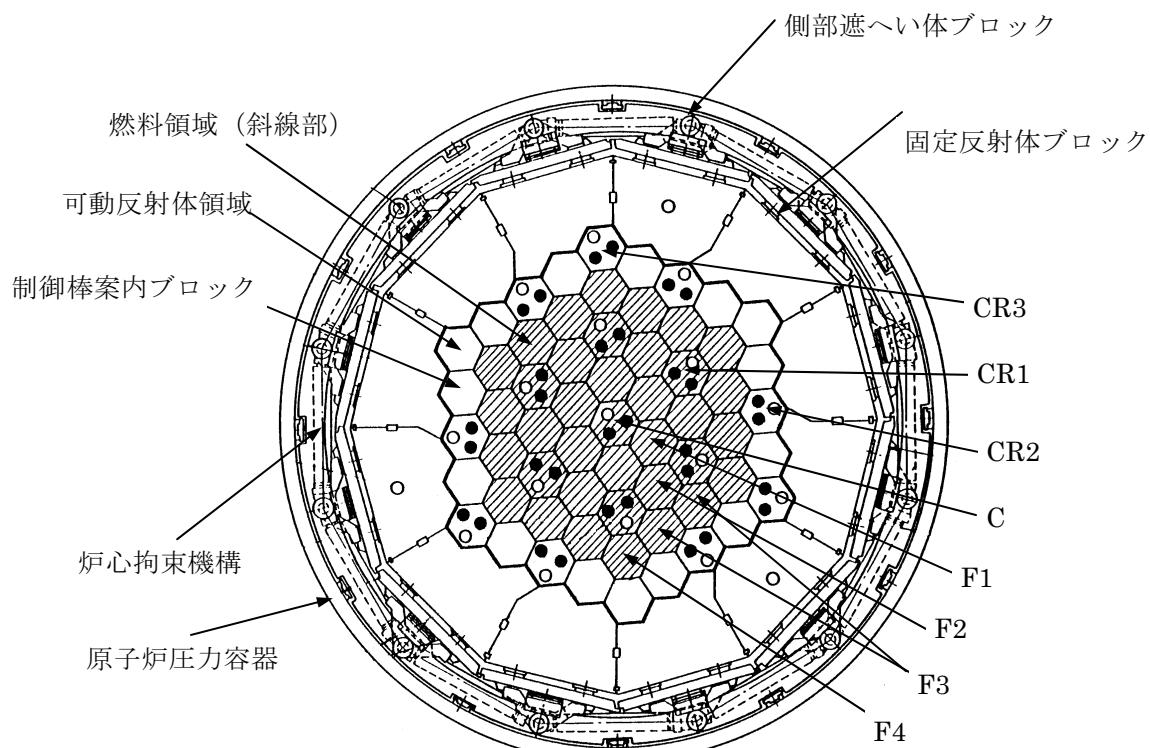


図 2-1 HTTR 炉心断面図

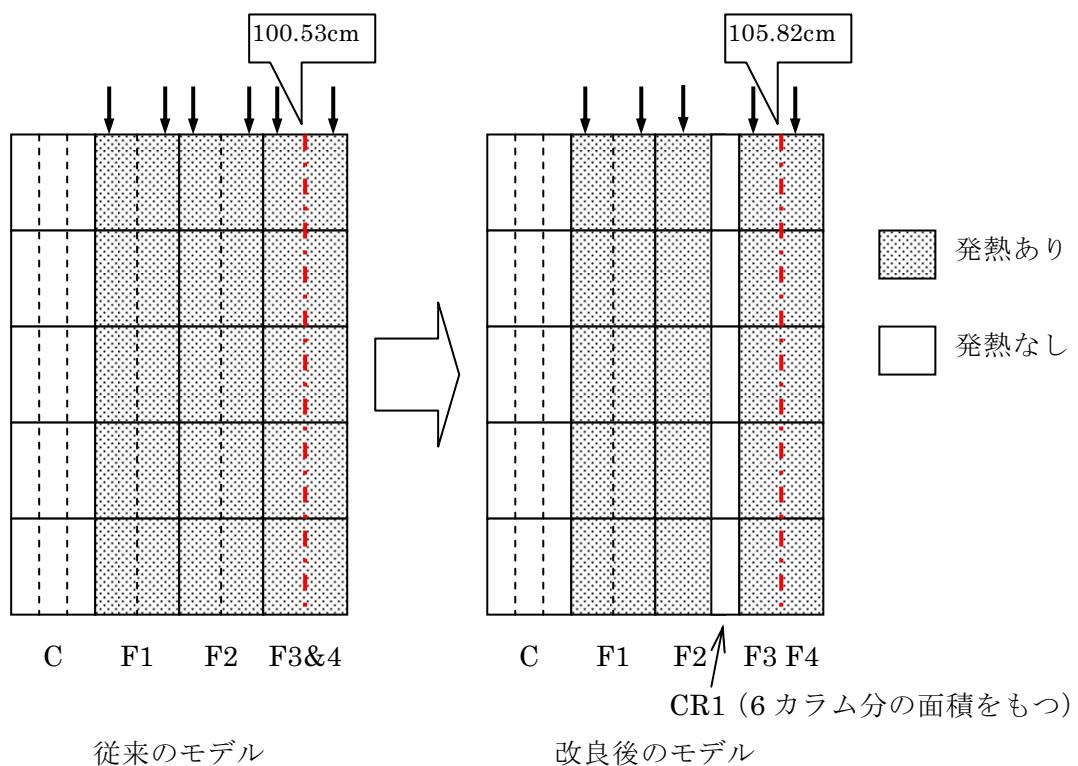


図 2-2 TAC-NC モデルの改良

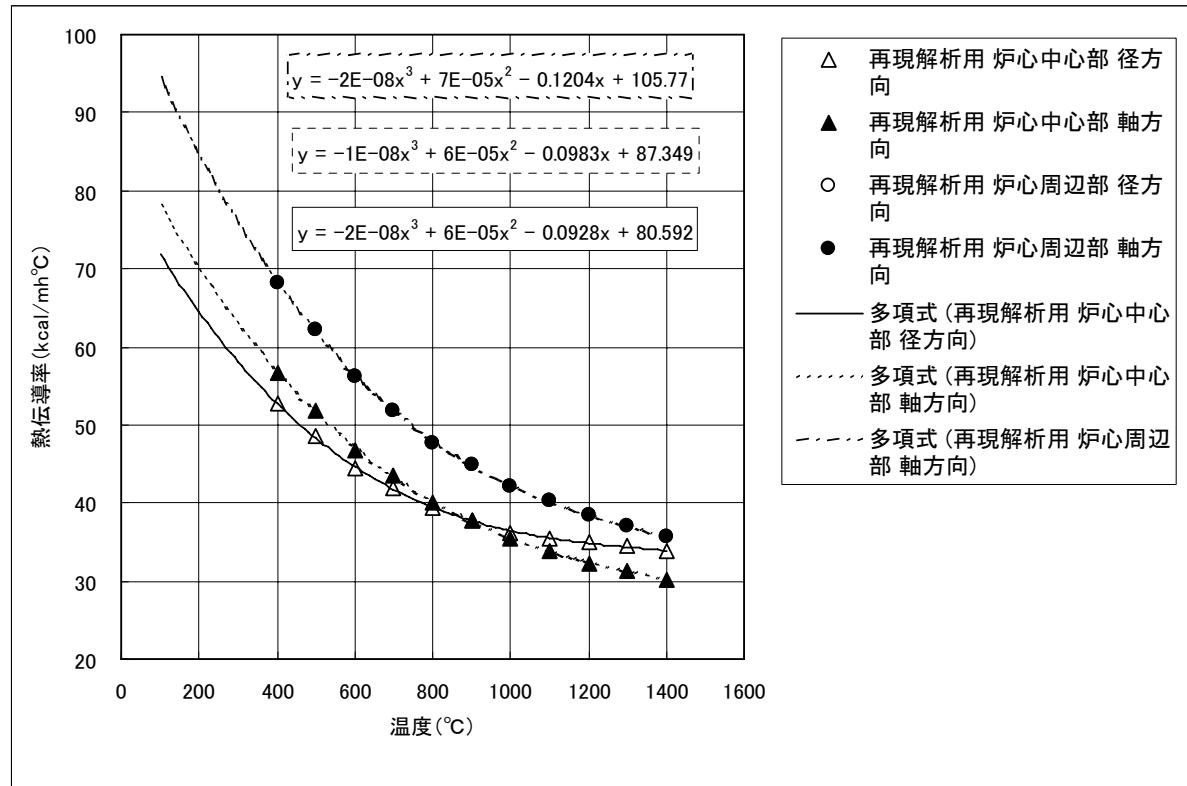


図 2-3 炉心中心部及び炉心周辺部の等価熱伝導率（燃焼 0 日）

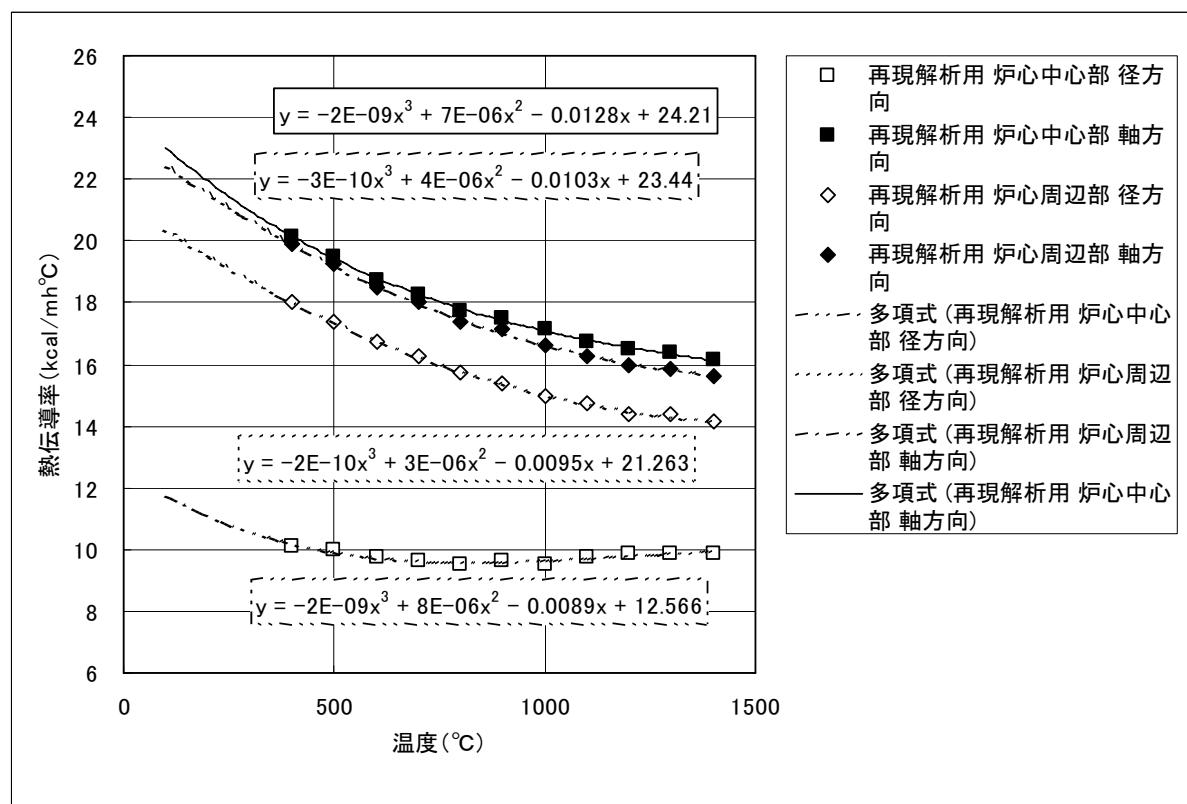


図 2-4 炉心中心部及び炉心周辺部の等価熱伝導率（燃焼 660 日）

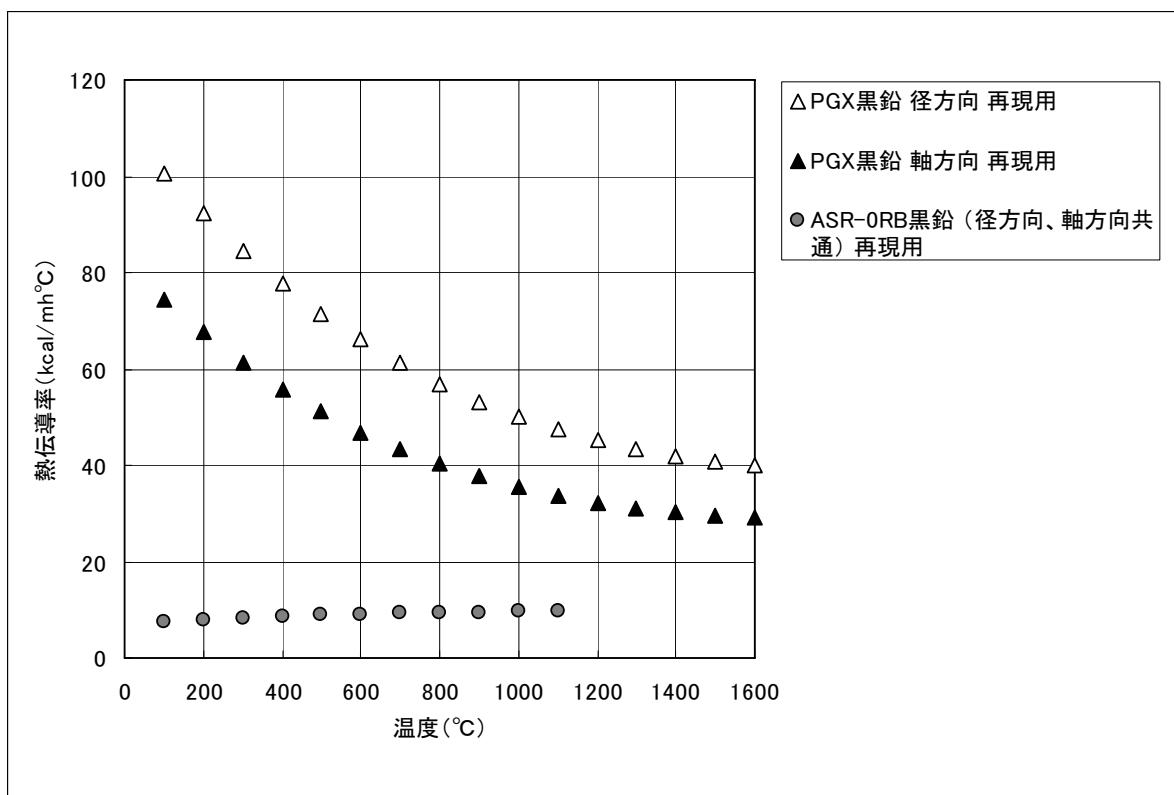
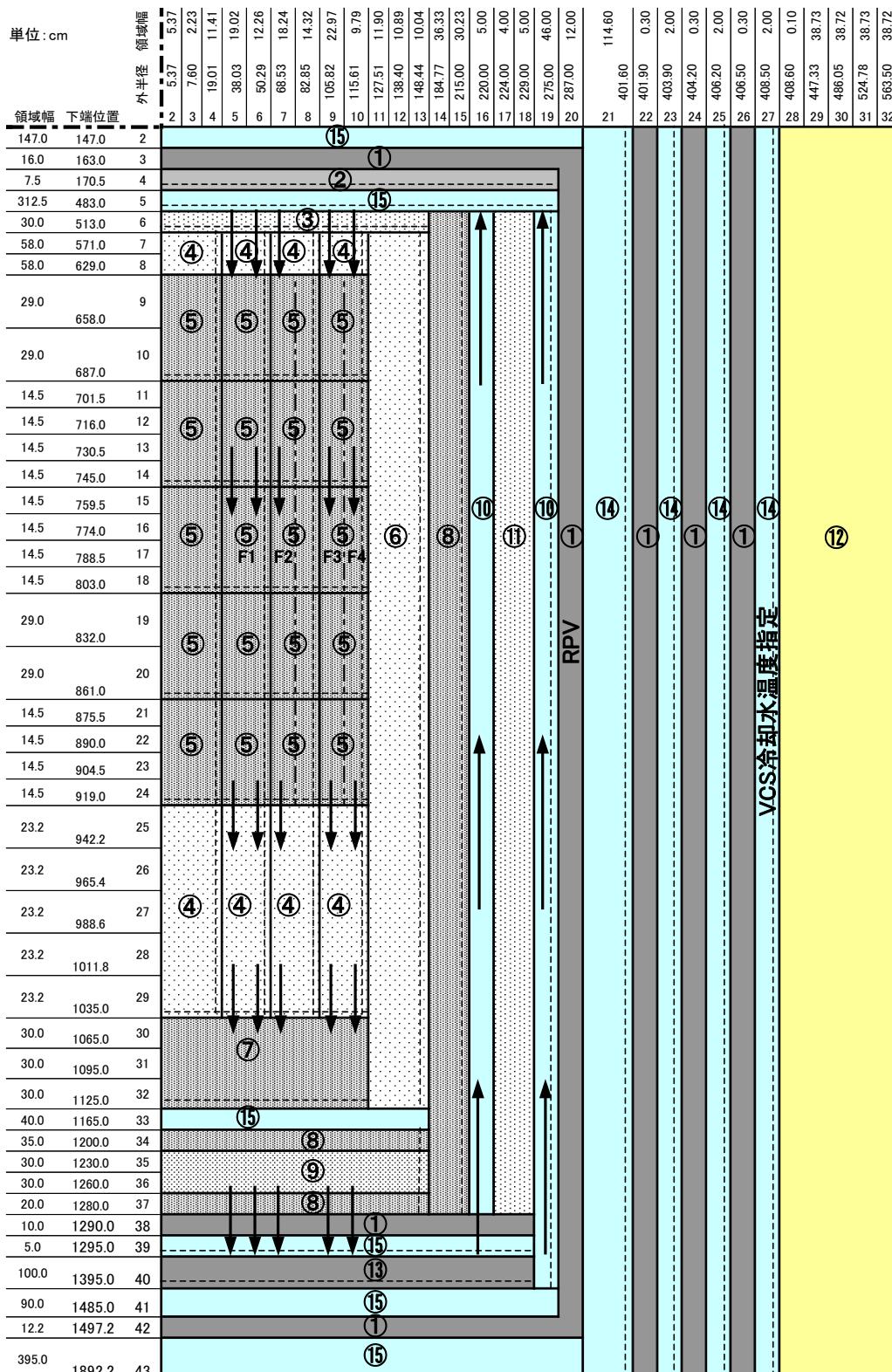


図 2-5 PGX 黒鉛、ASR-0RB 黒鉛の熱伝導率



- ① クロモリ鋼(RPV他)
- ② SUS304(熱遮へい体)
- ③ SUS304、ボロン入黒鉛(上部遮へい体)
- ④ IG-110黒鉛(上部・下部可動反射体)
- ⑤ 燃料、燃料ブロック、制御棒案内ブロック
- ⑥ IG-110黒鉛(側部可動反射体)
- ⑦ PGX黒鉛(高温ブレナムブロック)
- ⑧ PGX黒鉛(ブレナム下部ブロック、下端ブロック)
- ⑨ ASR-0RB(炭素ブロック)
- ⑩ ダミー物質(ヘリウム)
- ⑪ SUS304ボロン入黒鉛(側部遮へい体)
- ⑫ コンクリート(1次側部遮へい体)
- ⑬ クロモリ鋼(炉心支持格子)
- ⑭ ダミー物質(空気)
- ⑮ ダミー物質(ヘリウム)

図 2-6 TAC-NC の解析モデル

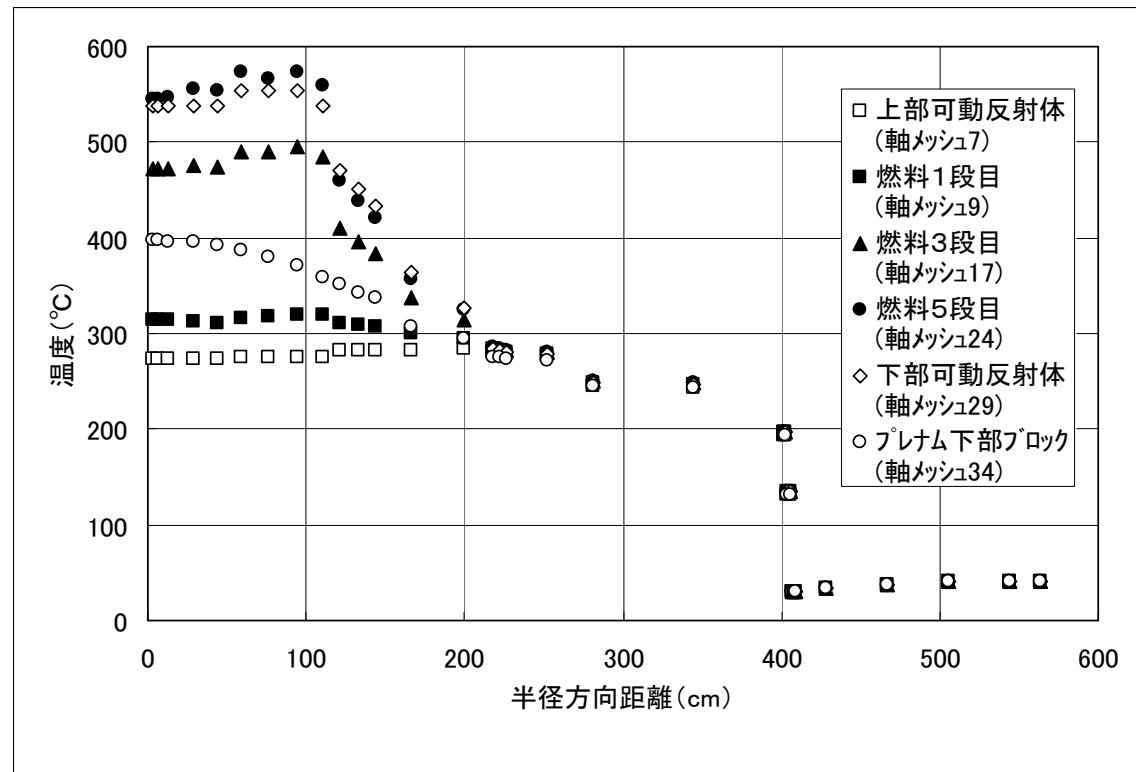


図 2-7 ノミナルケース (18m000) の半径方向温度分布

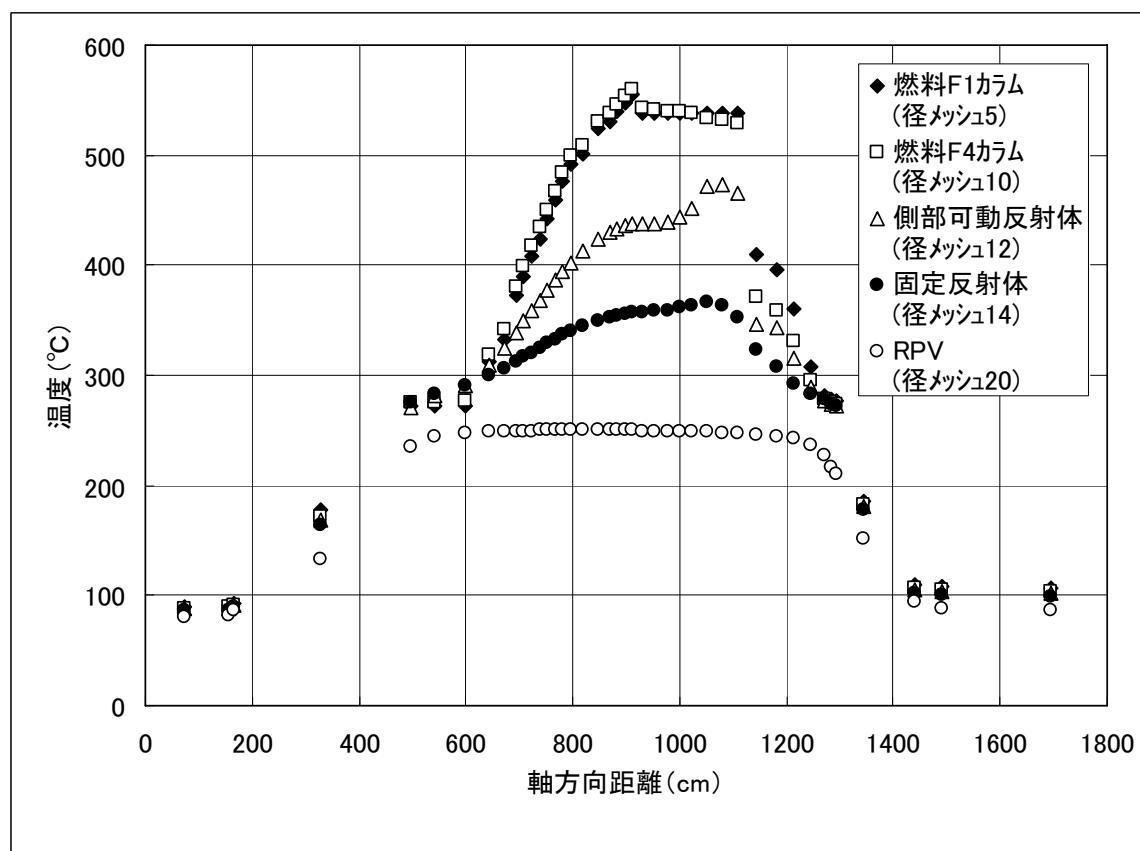


図 2-8 ノミナルケース (18m000) の軸方向温度分布

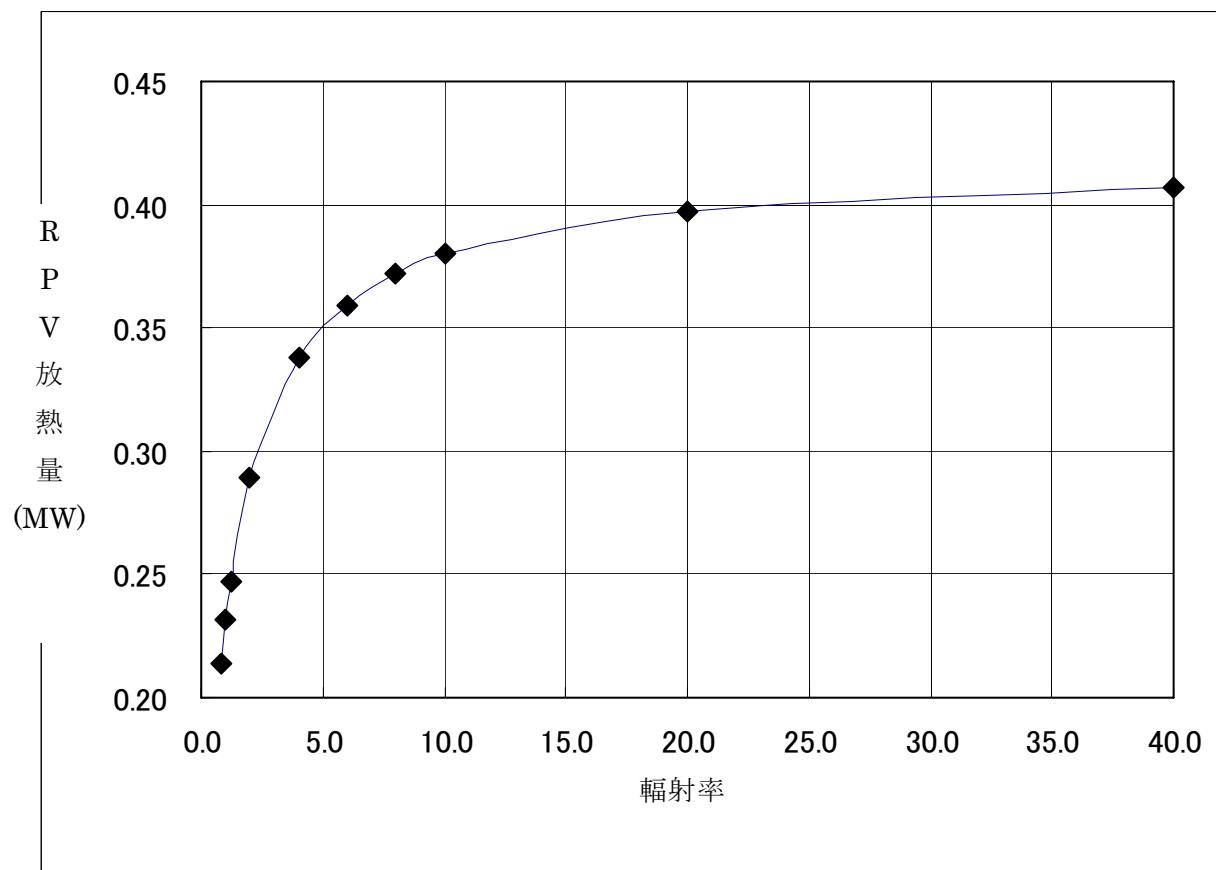


図 2-9 輻射率と RPV 側部放熱量の関係（原子炉出力 18MW）

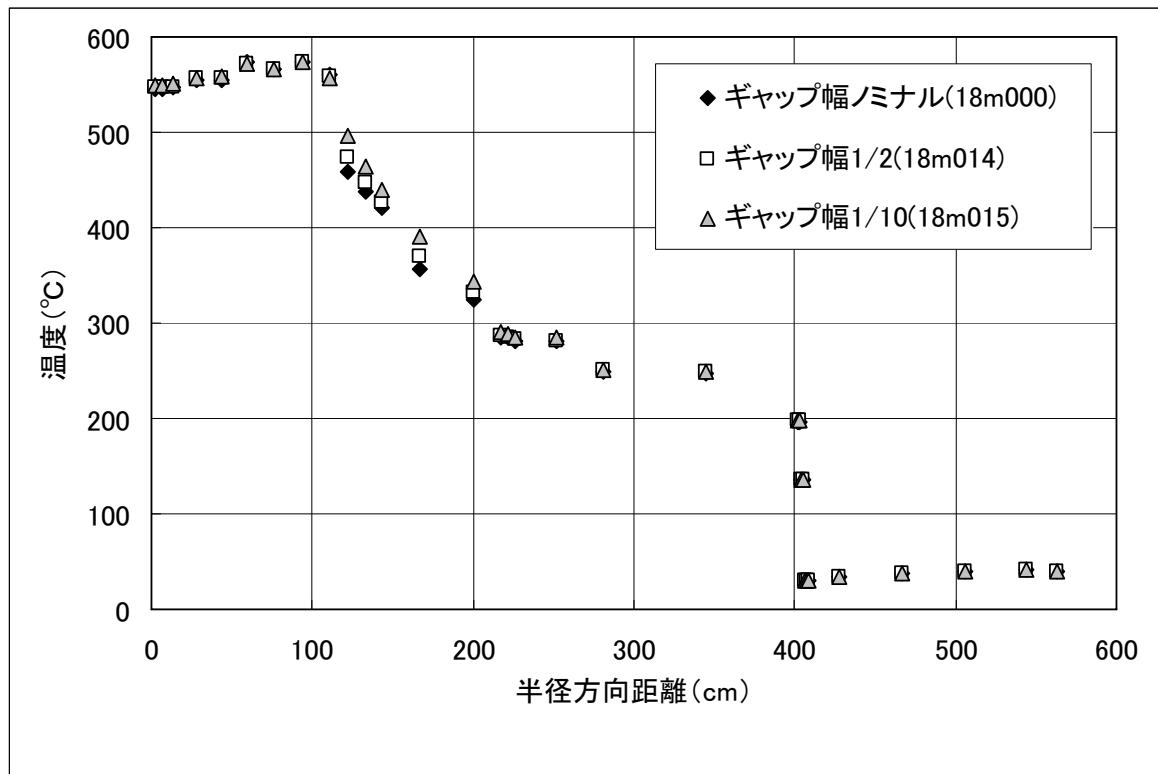


図 2-10 ブロック間ギャップ幅の効果（径方向分布）：軸方向メッシュ 24

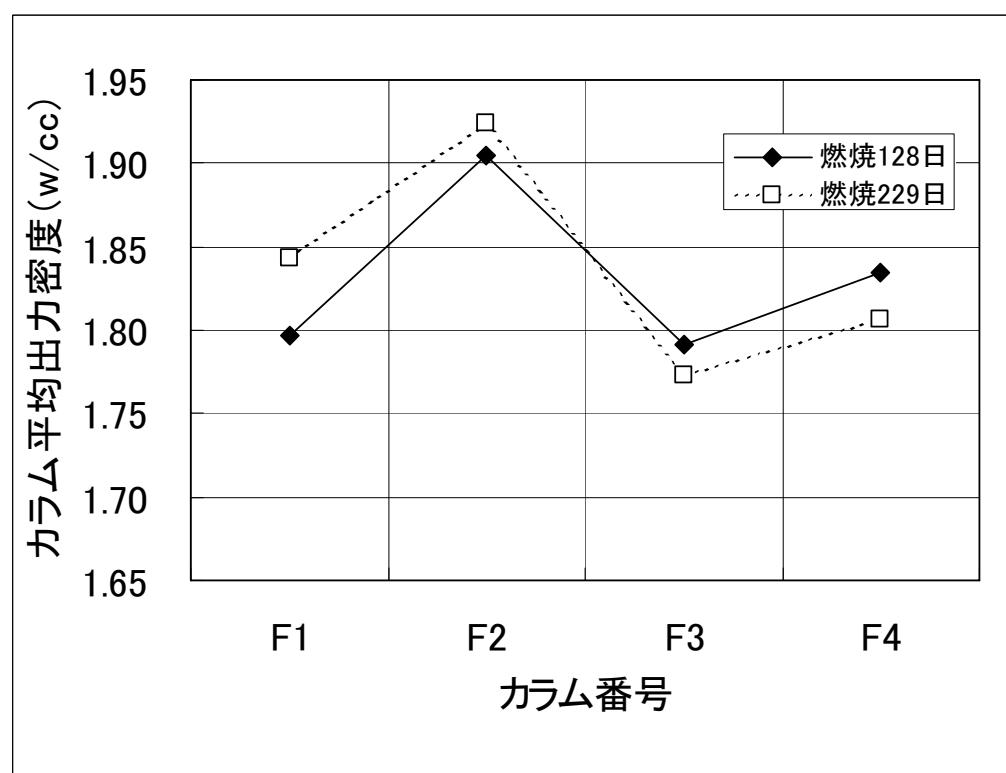


図 2-11 半径方向出力分布の比較（原子炉出力 18MW）

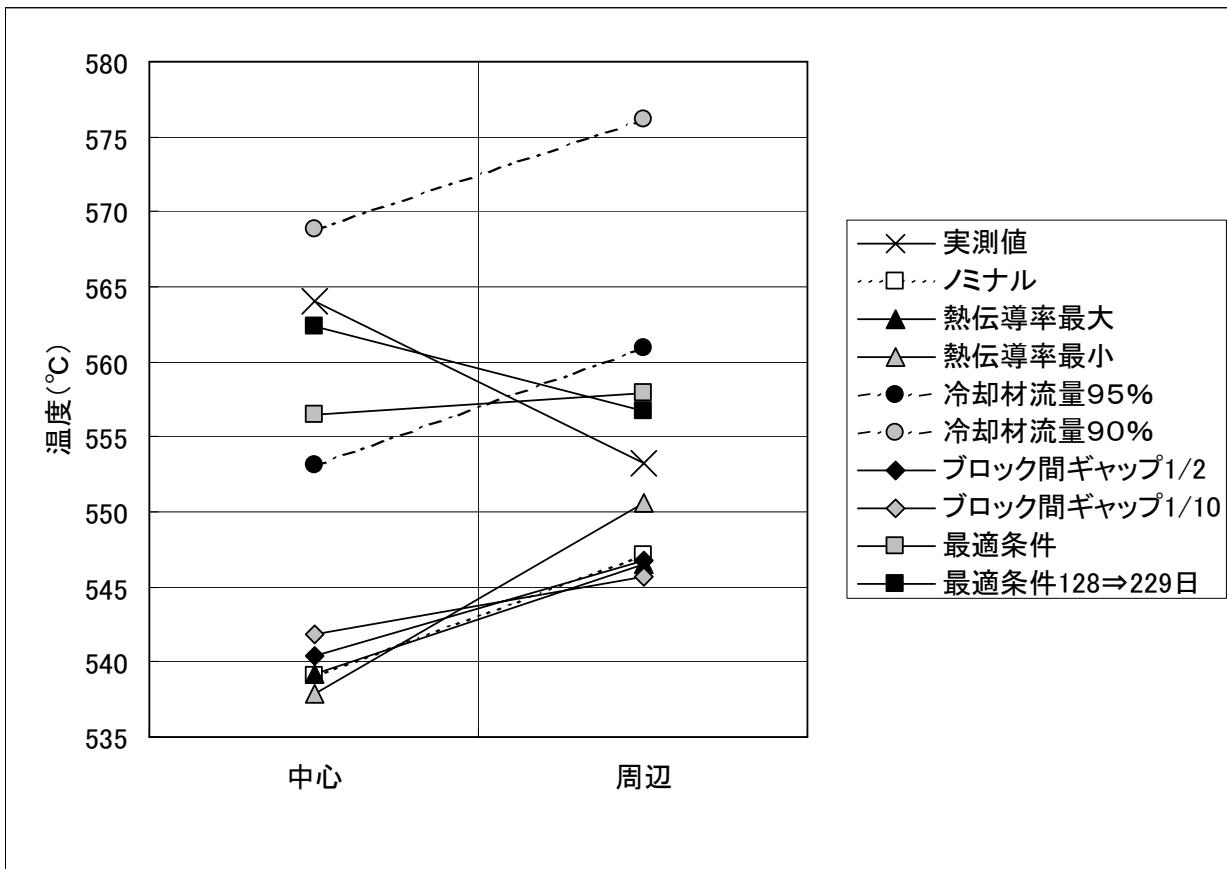


図 2-12 炉心出口冷却材温度の比較

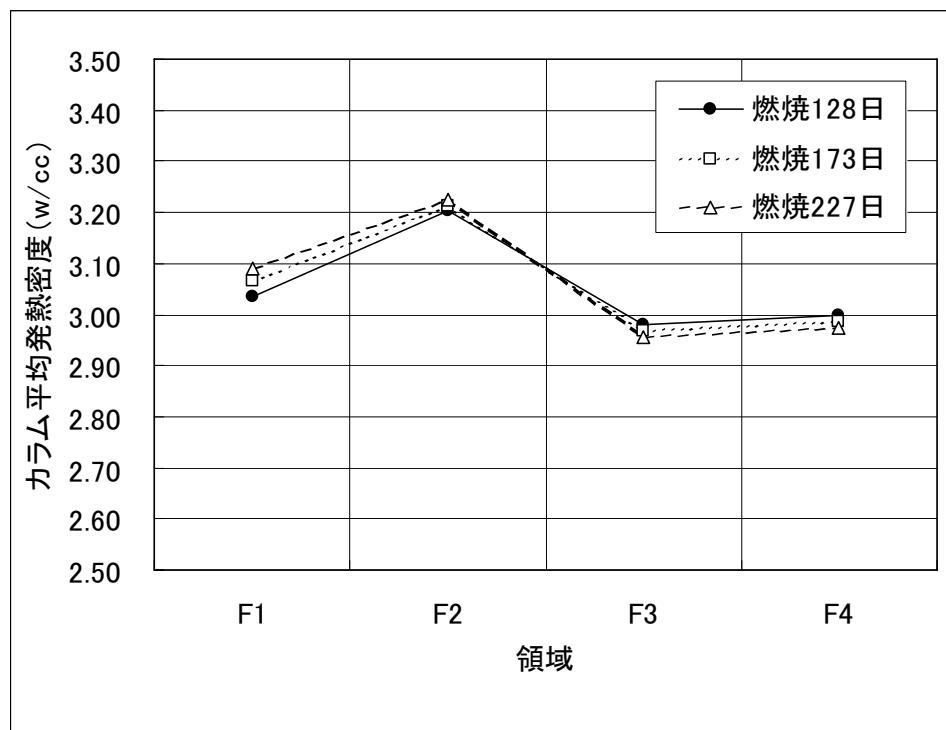


図 2-13 原子炉出力 30MW 時の径方向出力分布

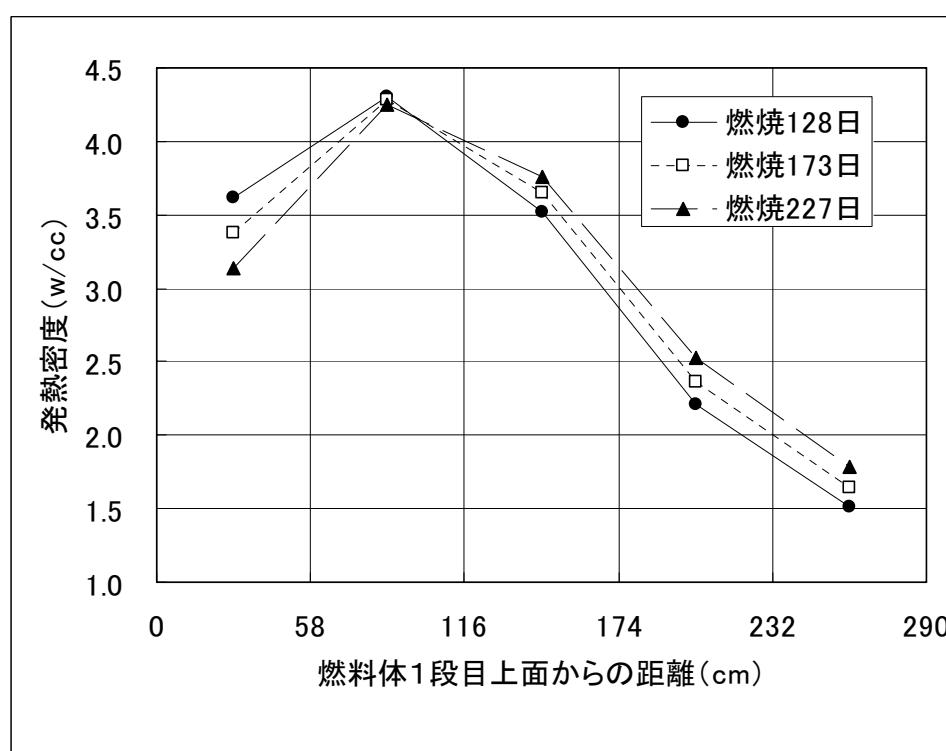


図 2-14 原子炉出力 30MW 時の軸方向出力分布

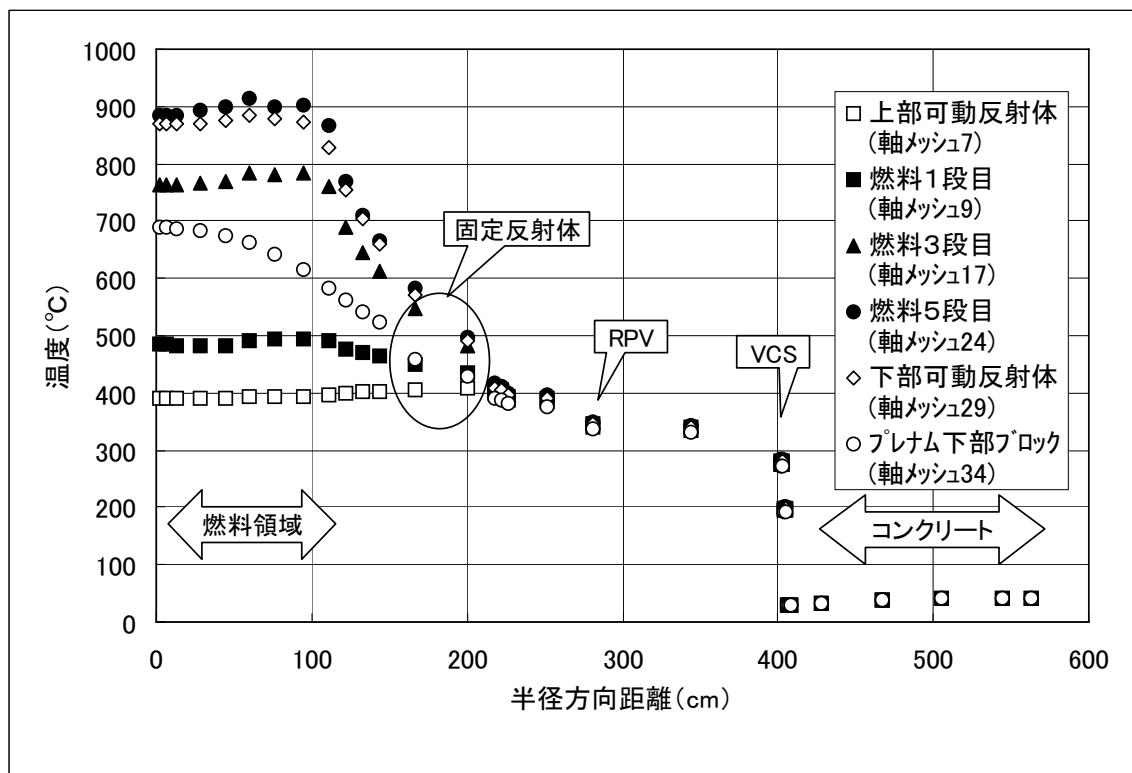


図 2-15 最適条件ケース (30m019b) の半径方向温度分布

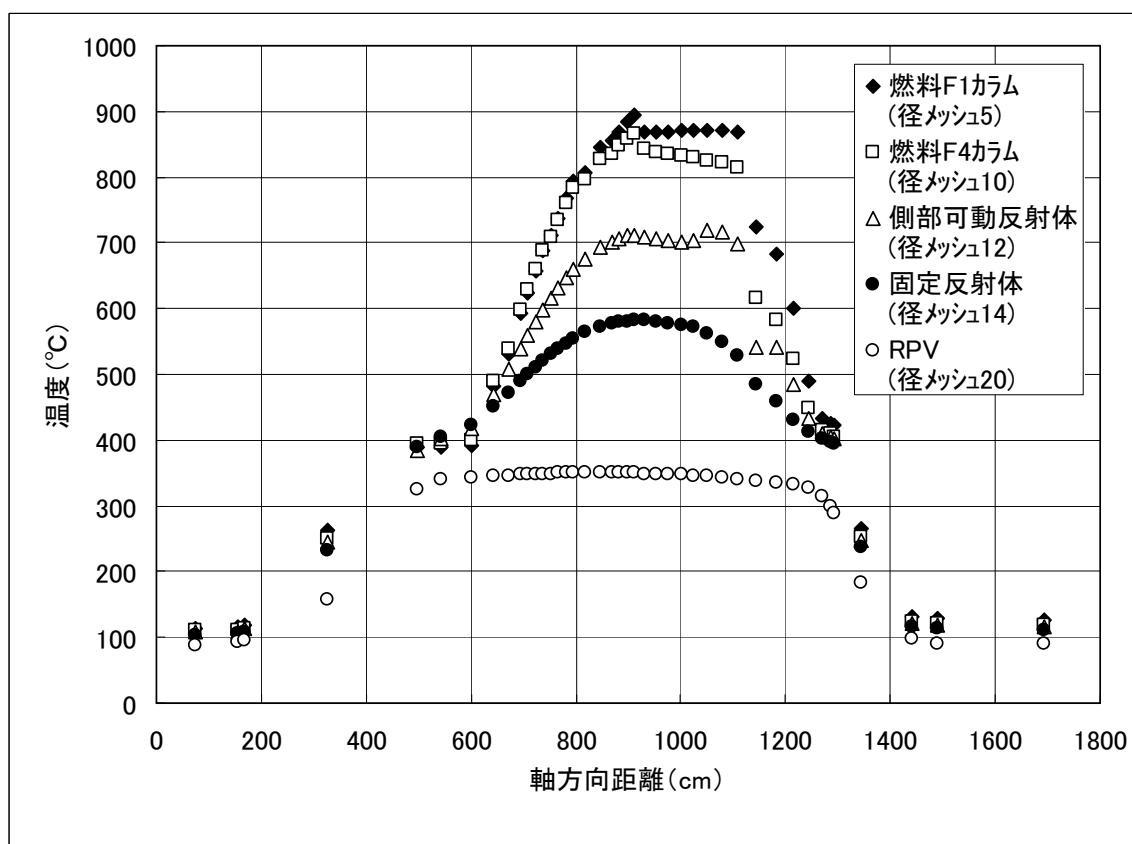


図 2-16 最適条件ケース (30m019b) の軸方向温度分布

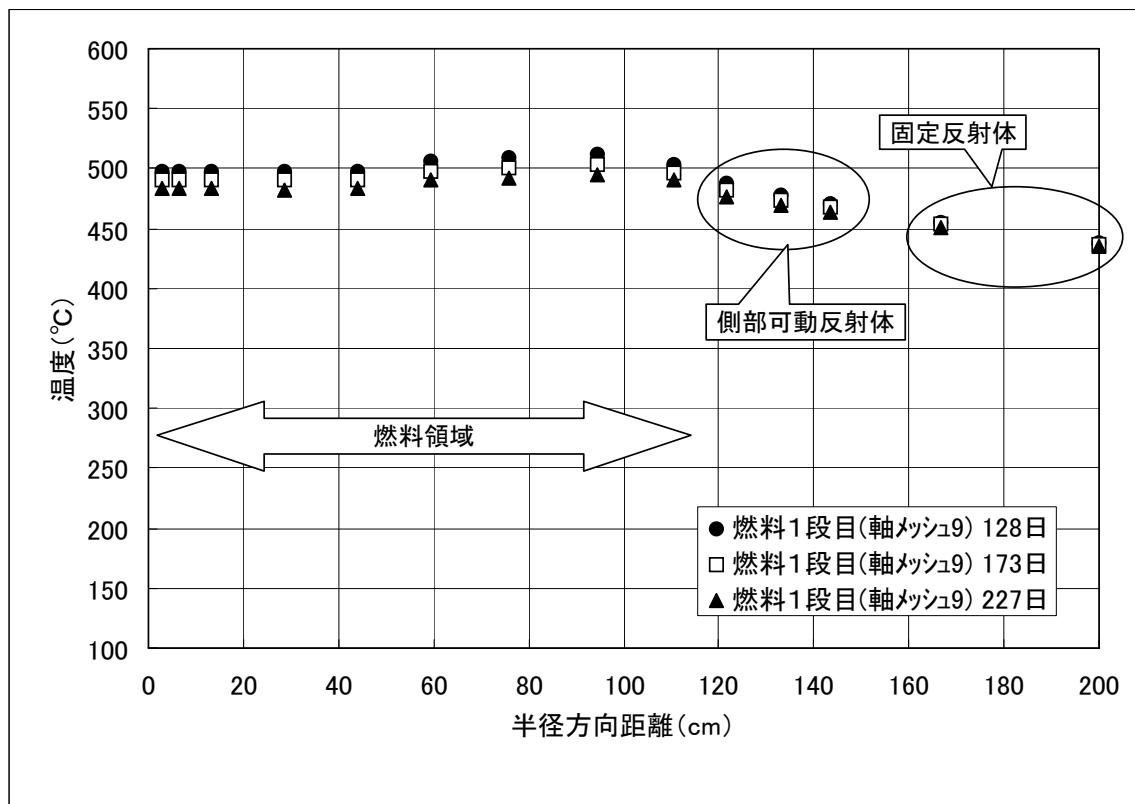


図 2-17 原子炉出力 30MW の半径方向温度分布：燃料 1 段目

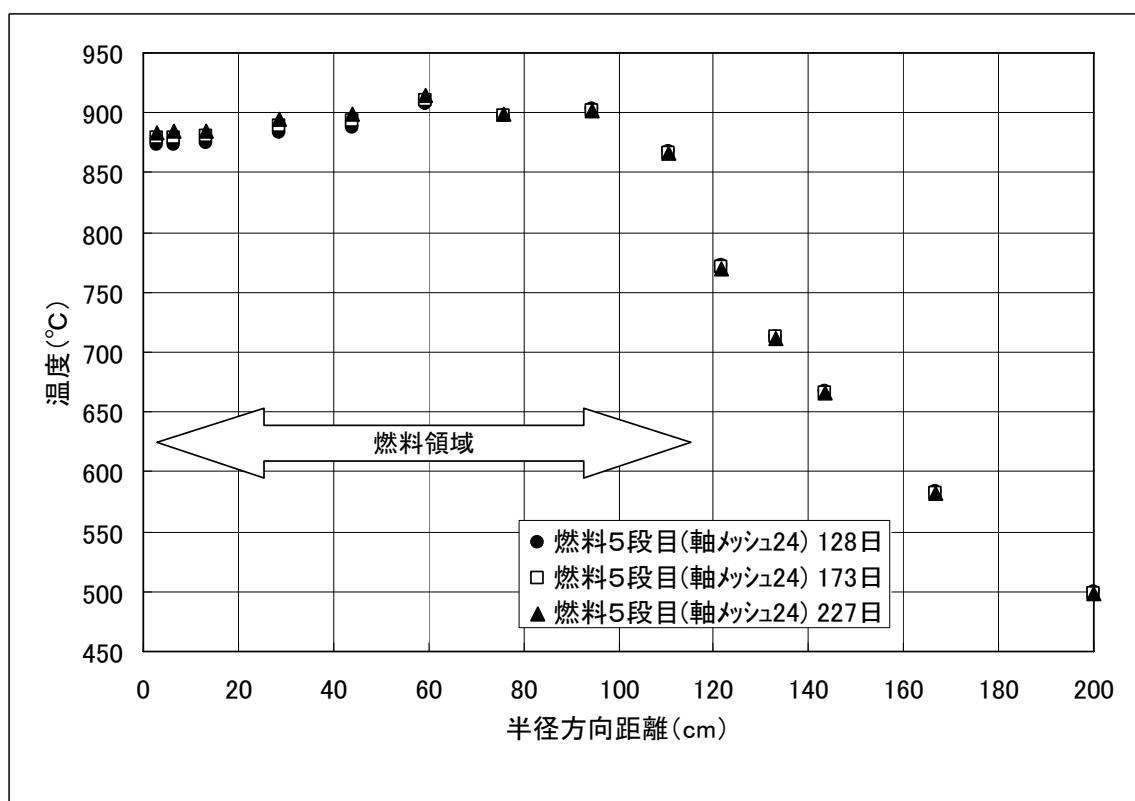


図 2-18 原子炉出力 30MW の半径方向温度分布：燃料 5 段目

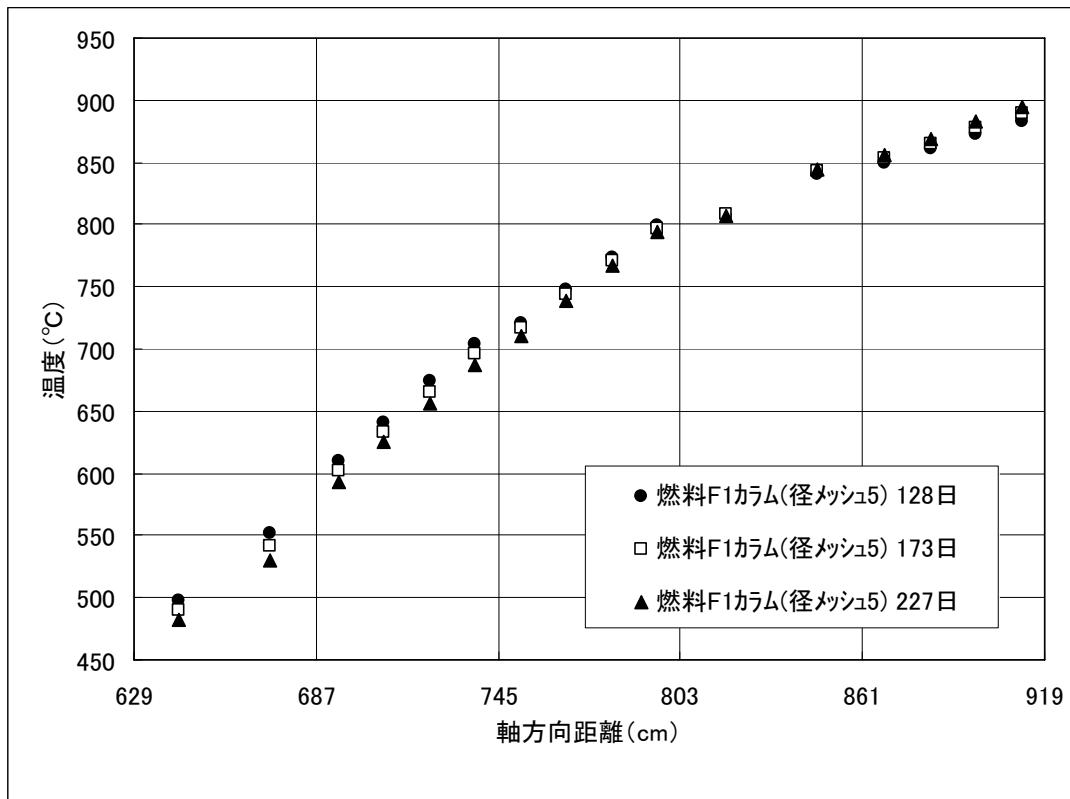


図 2-19 原子炉出力 30MW の軸方向温度分布 : F1 カラム

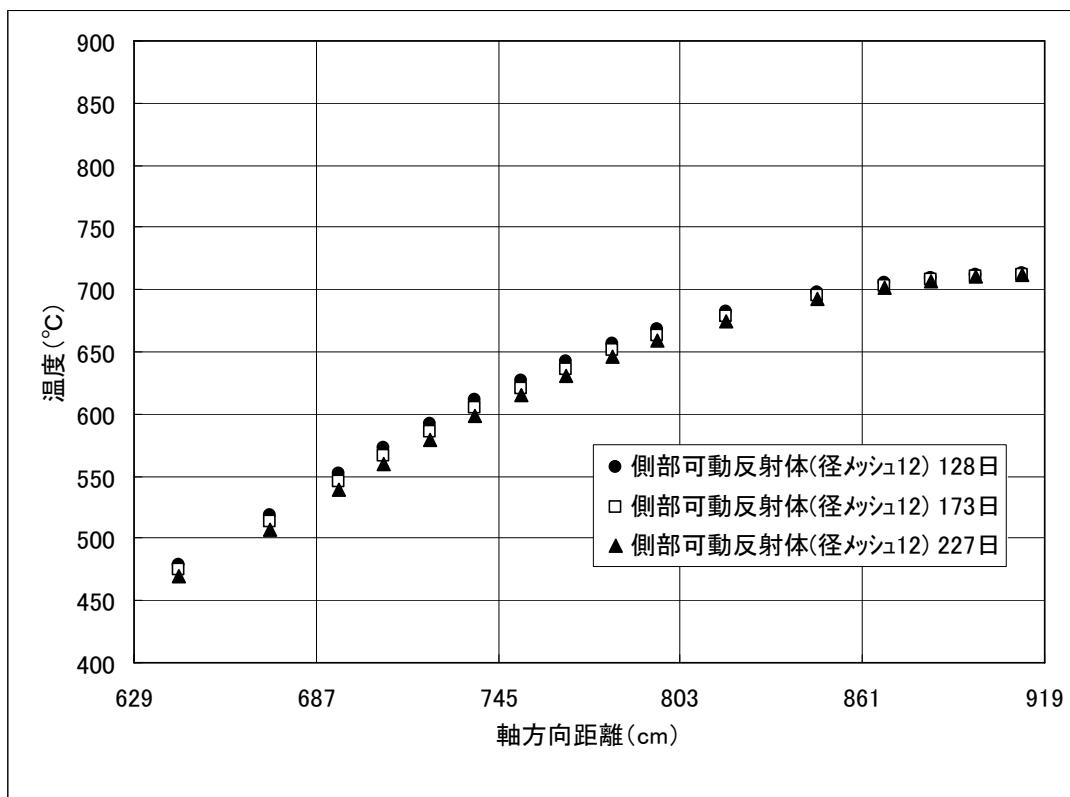


図 2-20 原子炉出力 30MW の軸方向温度分布 : 側部可動反射体

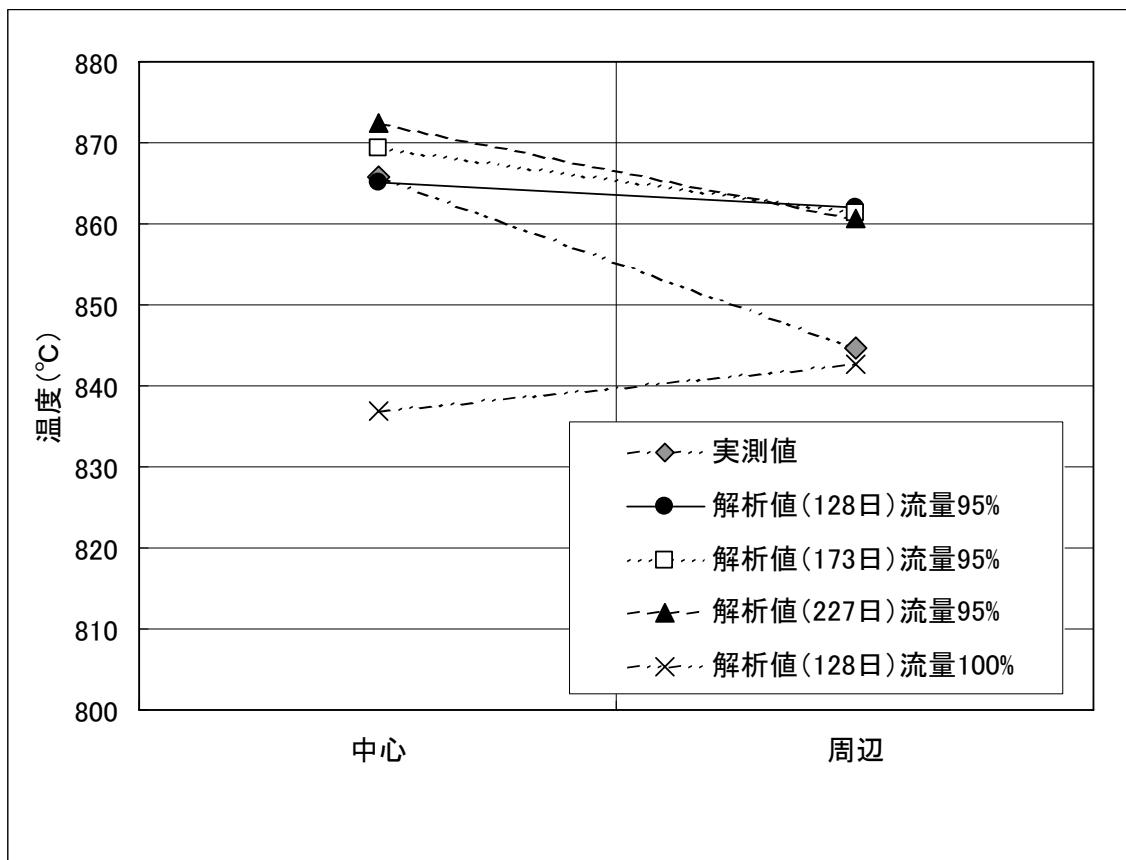


図 2-21 原子炉出力 30MW 時の高温プレナム部冷却材温度の比較

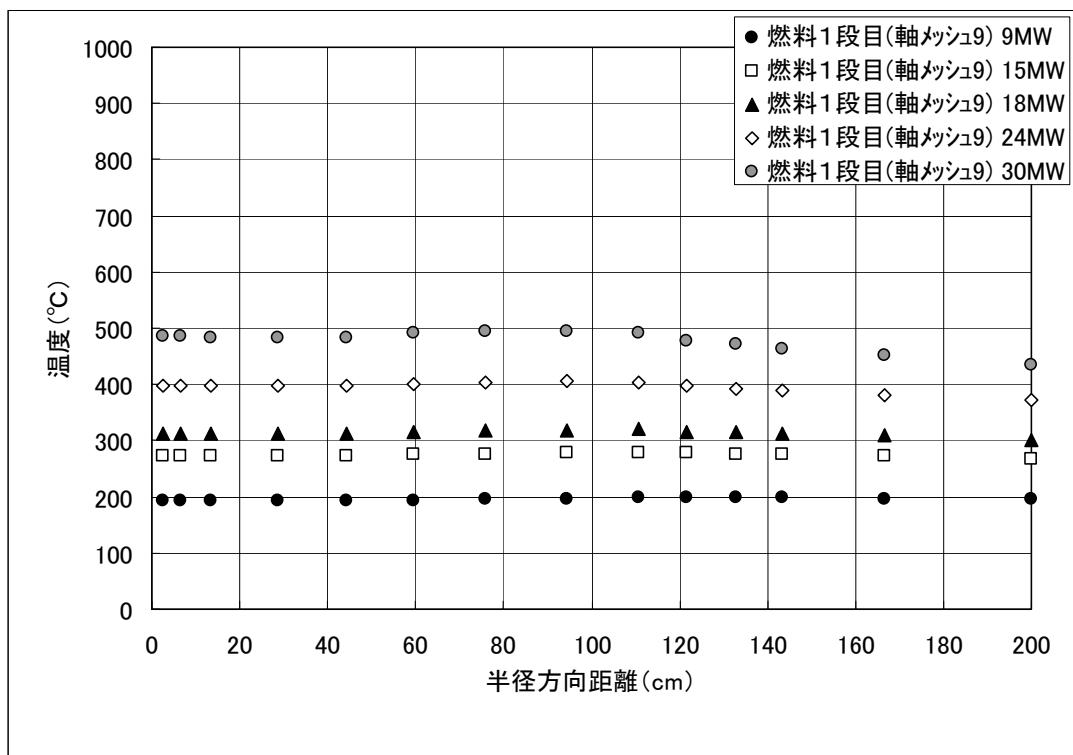


図 2-22 半径方向温度分布：燃料 1 段目

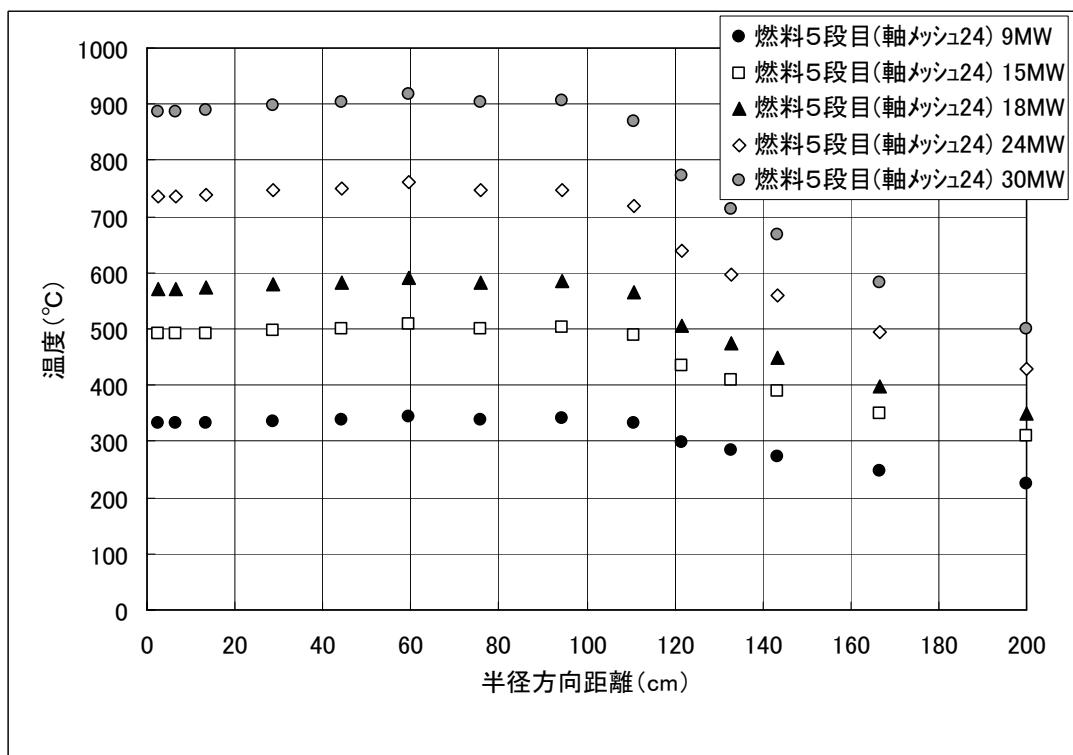


図 2-23 半径方向温度分布：燃料 5 段目

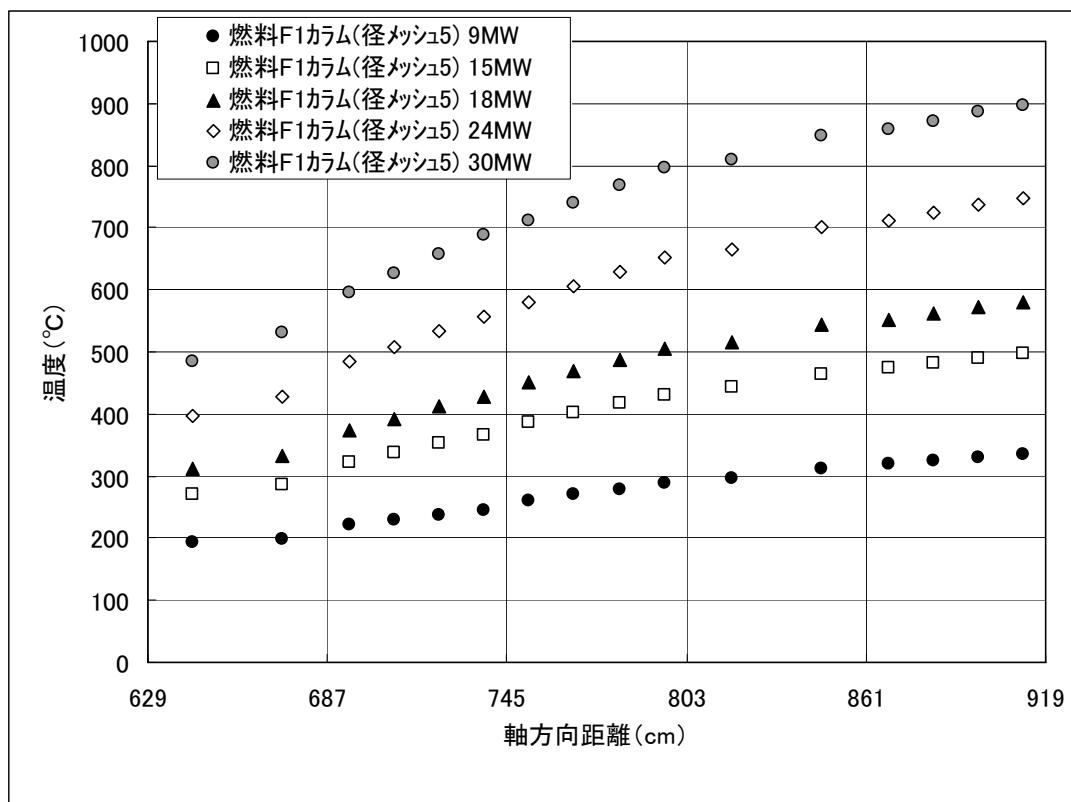


図 2-24 軸方向温度分布：燃料 1 段目

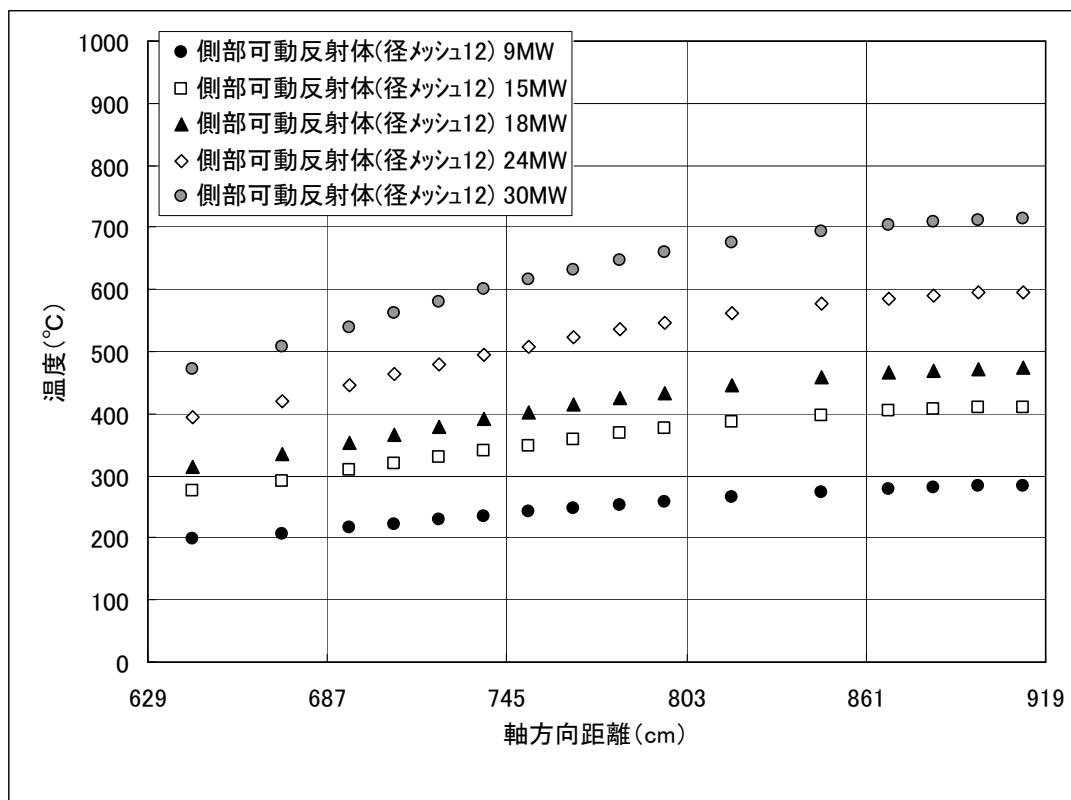


図 2-25 軸方向温度分布：側部可動反射体

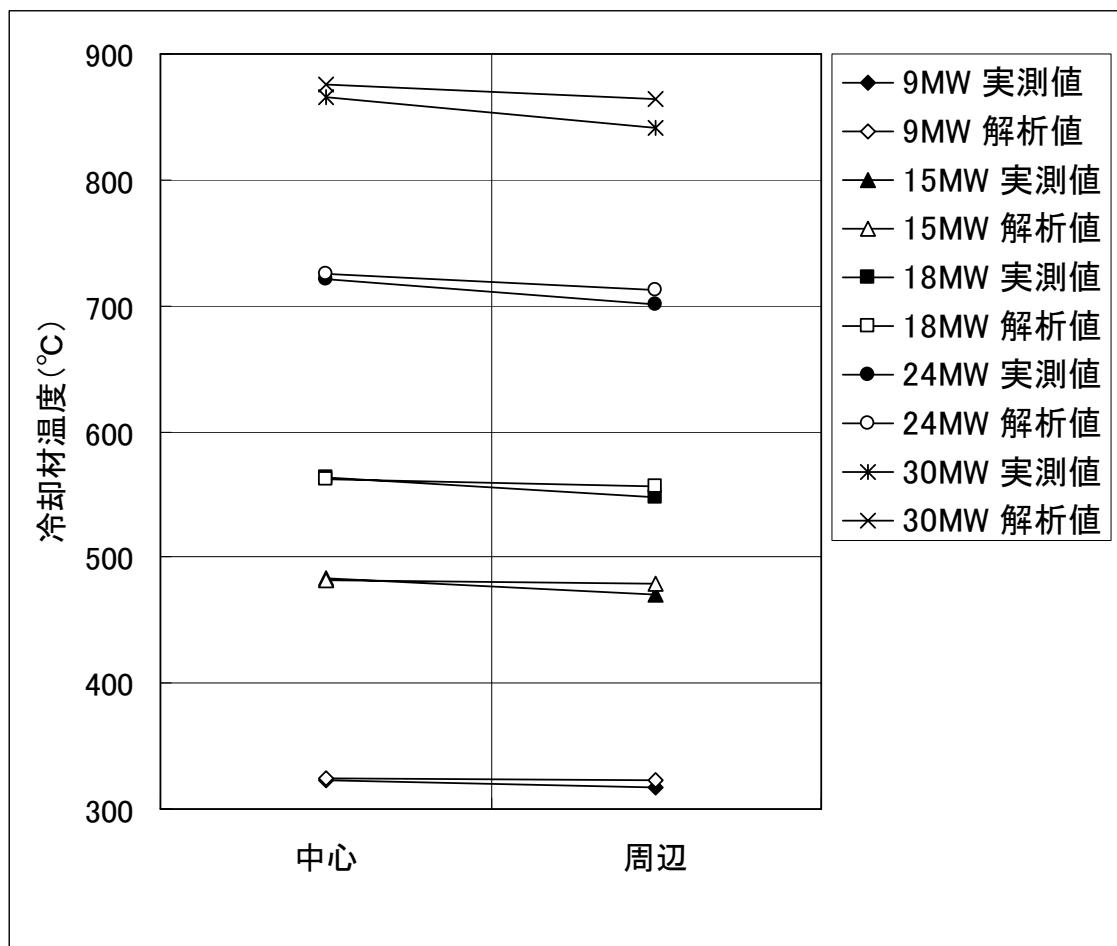
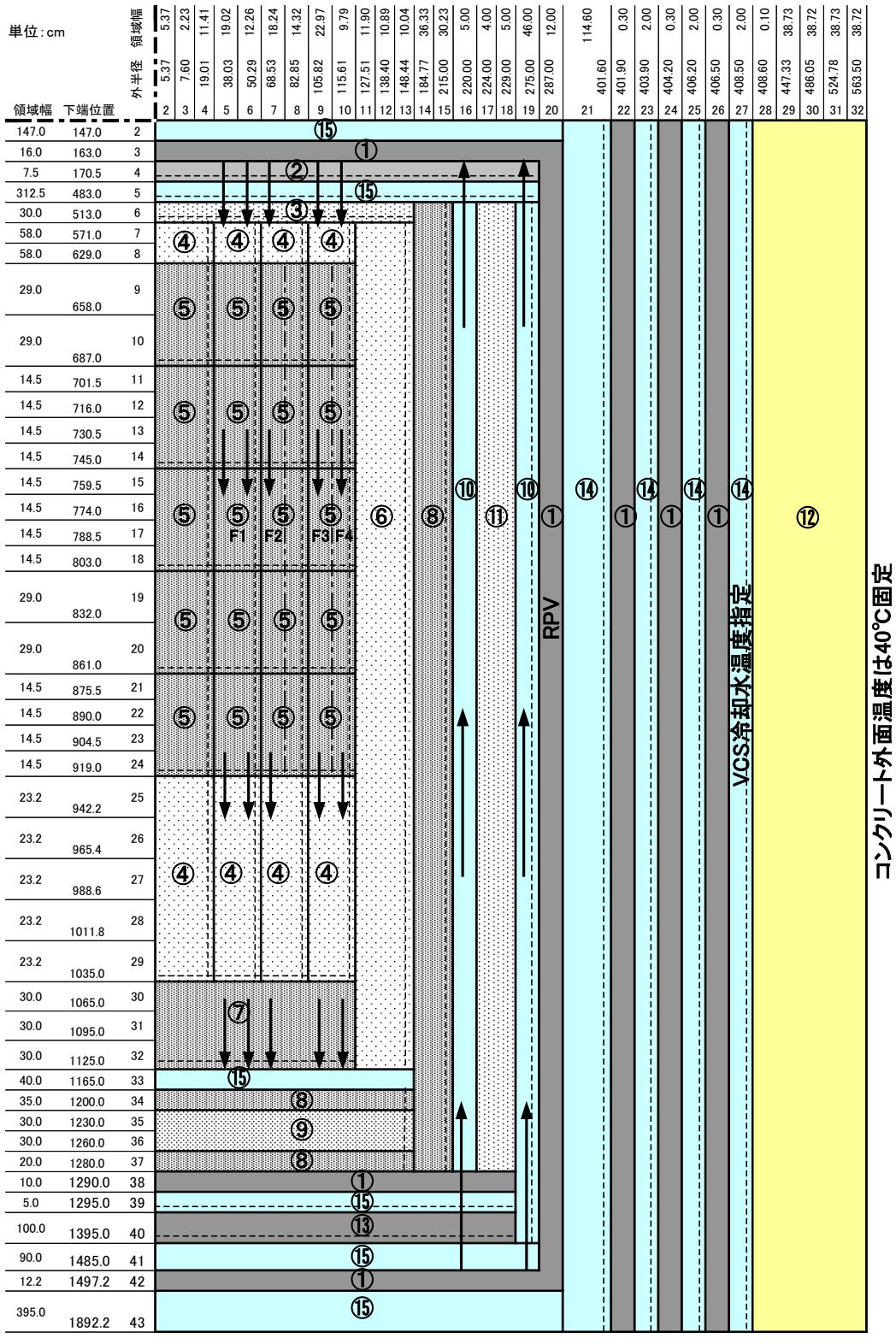


図 2-26 炉心出口冷却材温度の比較



- ① クロモリ鋼(RPV他)
- ② SUS304(熱遮へい体)
- ③ SUS304、ボロン入黒鉛(上部遮へい体)
- ④ IG-110黒鉛(上部・下部可動反射体)
- ⑤ 燃料、燃料ブロック、制御棒案内ブロック
- ⑥ IG-110黒鉛(側部可動反射体)
- ⑦ PGX黒鉛(高温プレナムブロック)
- ⑧ PGX黒鉛(プレナム下部ブロック、下端ブロック)
- ⑨ ASR-ORB(炭素ブロック)
- ⑩ ダミー物質(ヘリウム)
- ⑪ SUS304ボロン入黒鉛(側部遮へい体)
- ⑫ コンクリート(1次側部遮へい体)
- ⑬ クロモリ鋼(炉心支持格子)
- ⑭ ダミー物質(空気)
- ⑮ ダミー物質(ヘリウム)

(炉内冷却材流路は、定常計算時の状態を示している)

図 2-27 TAC-NC の解析モデル

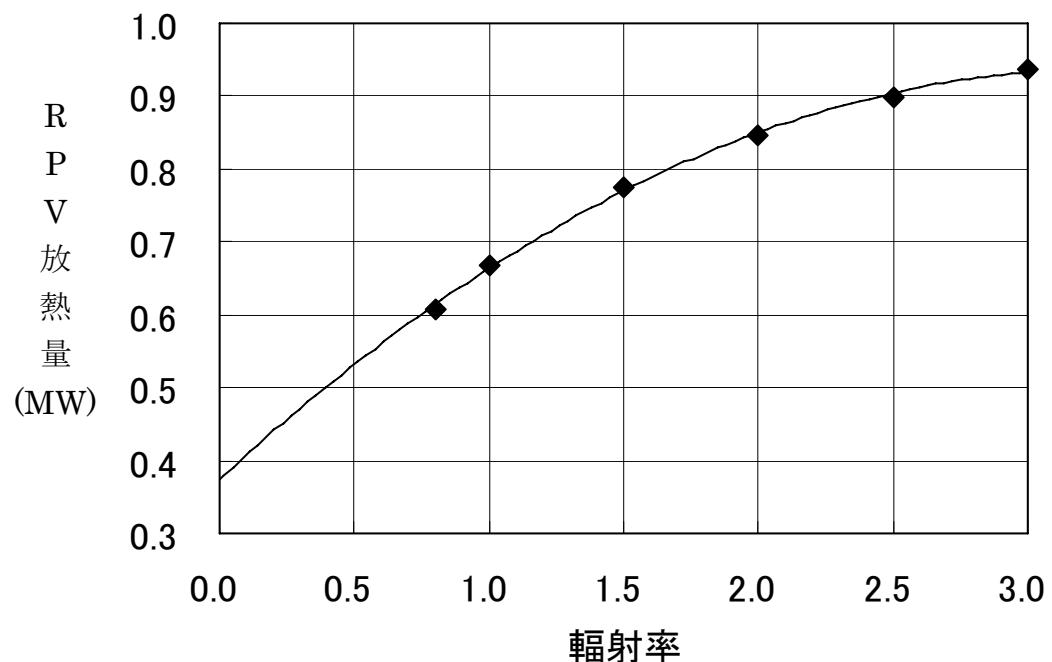


図 2-28 輻射率と RPV 放熱量の関係

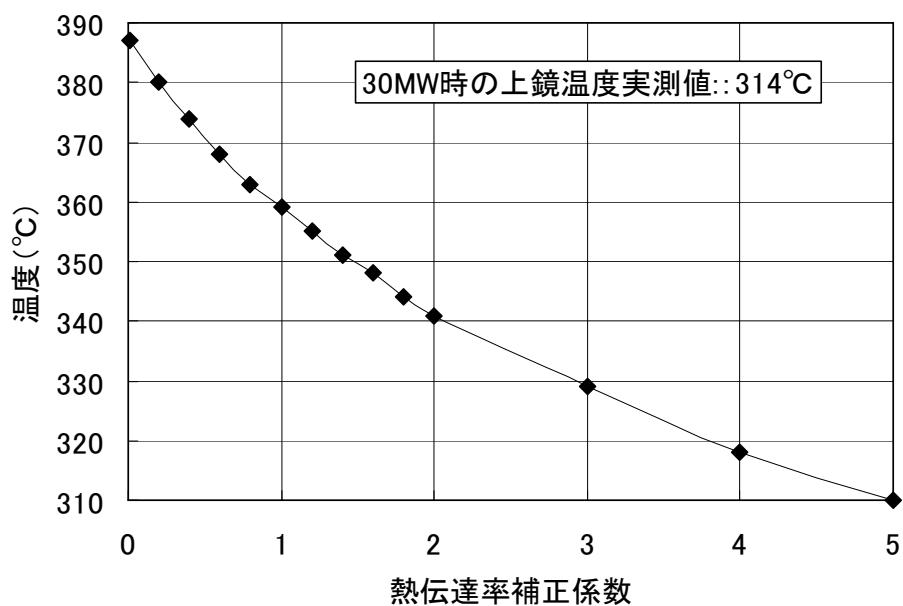


図 2-29 热伝達補正係数と RPV 上鏡温度の関係

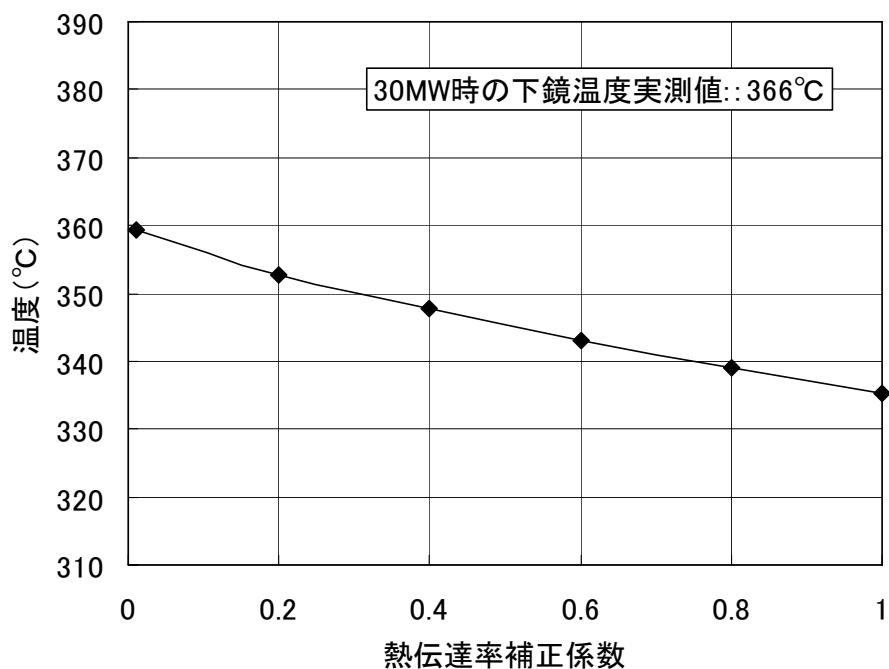


図 2-30 热伝達補正係数と RPV 下鏡温度の関係

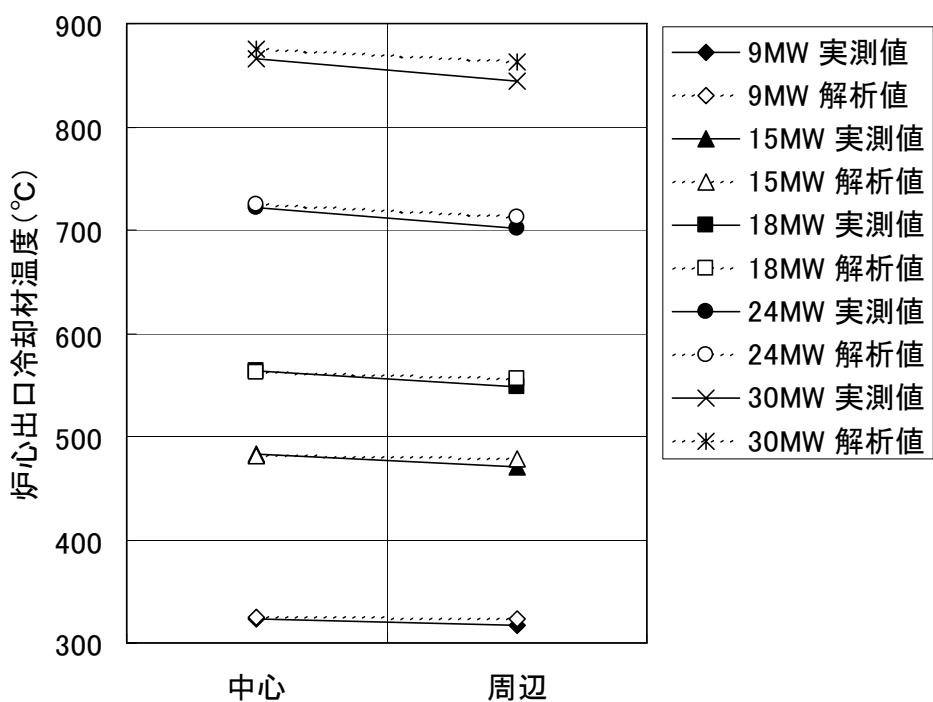


図 2-31 TAC/BLOOST の定常解析結果（炉心出口温度）

3. 過渡解析

2 章で実施した定常解析における最適解析条件を用いて循環機停止試験の再現解析を実施し、過渡解析における最適な解析条件を求める。

2.4 項で実施した定常解析を「基準ケース」と設定し、伝熱計算モデルの形状や物性値、およびその他の解析条件について検討を行なった結果を表 3-1 および図 3-1～図 3-24 に示す。表 3-1 には、解析結果の図番に加え解析条件を変更することによる解析結果への影響の度合いを、過渡時の原子炉出力挙動と整定値とに分けて記号で示した（○：解析結果への影響有り、△：解析結果への影響僅かに有り、×：解析結果への影響無し）。

「基準ケース」で設定した BLOOST 側の伝熱解析モデルは、HTTR の設計値を用いて設定しているので、燃料の製造実績や中性子照射による収縮、及び熱膨張の影響を確認する必要がある。

① BLOOST 伝熱解析モデルの半径方向領域境界

図 3-25 に示す BLOOST の解析モデルの半径方向領域境界の座標と燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間ギャップ幅を変更させ、影響の度合いを確認した。図 3-1～図 3-5 に示すように、冷却材流路断面積が大きくなる場合、燃料コンパクトが小さくなる場合、ギャップ幅が大きくなる場合に循環機停止後の整定値が実測値に近づいた。

燃料コンパクト、黒鉛スリーブ、黒鉛ブロックの製造実績については、HTTR 燃料の製造実績を表 3-2 に示す。解析モデルを変更するほどの設計値からの大きなズレはない。燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップ幅は 0.0125cm から 0.0137cm へと若干増加する。

中性子照射による収縮の影響については、燃焼日数を 170 日と仮定すると、燃料カラムの中性子照射量の炉心平均値は $2 \times 10^{24} \text{n}/\text{m}^2$ 程度である。HTTR の設置変更許可申請書に中性子照射量とギャップ幅の関係が図 3-26 のように示されている。図 3-26 から、燃料コンパクトと黒鉛スリーブのギャップ幅は約 0.02cm に変化すると考えられる。

熱膨張の影響については、燃料コンパクトよりも黒鉛 (IG-110) の方が熱膨張率は大きいので、熱膨張を考慮すると燃料コンパクトと黒鉛スリーブのギャップ幅は大きくなる方向であるが、原子炉停止時と 18MW 運転時では 0.0137cm から 0.0138cm に変化する程度である。

② 下部可動反射体ブロック、高温プレナムブロック

BLOOST の伝熱計算モデルでは、下部可動反射体と高温プレナムブロックの高さが実際の形状に即した値となっておらず、また、設計時の要素試験の結果を用いて熱容量補正係数や冷却材流路断面積が設定されていた。今回は HTTR の実測値との比較を行なうことから、これらの値を実際の形状に合わせて表 3-3 のとおり見直した。高温プレナムブロックの高さをパラメータとして変更した場合の結果を図 3-7 に示す。本結果から、これらのデータを実機形状に戻すことにより、循環機停止試験は整定値を実測値に近づくことが分かった。

解析結果をまとめると以下のとおりとなる。循環機停止試験の再現解析を行なうにあたって見直すべき項目を以下に示す。

- ・冷却材流路の内外径（流路断面積）を変更
- ・燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップを変更（0.0125cm から 0.020cm へ変更）
- ・下部可動反射体と高温プレナムブロックを実機形状に合わせる。
- ・TAC と BLOOST 側で炉心を流れる冷却材流量を実測値の 90%とする。熱流力設計の炉心有効流量割合と一致する。
- ・既に実施した循環機停止試験では、循環機停止後の冷却材圧力変化を入力データに反映させる。
- ・BLOOST の冷却材熱伝達率をノミナル化
- ・TAC の冷却材熱伝達率をノミナル化

③ 高温プレナムブロック

上記の見直しを行い、循環機停止試験の代表ケースについて再現解析を行なった。但し、冷却材の流路本数や形状において、高温プレナムブロック部と燃料部では著しく異なっている。また、燃料領域から離れているために熱容量として見込む必要があるかなどの疑問があるので、高さを変化させて感度を確認することとした。計算ケースは以下の 4 ケース設定した。

t2 : シール用ブロック（23cm）とキー結合用ブロック（67cm）を全て考慮

t3 : 高温プレナムブロックをダミー扱い（全体高さ 1cm）に設定

t4 : シール用ブロック（23cm）分のみ考慮

t5 : 高温プレナムブロックの全体高さ（90cm）を半分の高さ（45cm）に設定

解析結果を図 3-27(1)～図 3-27(8)に示す。これらの結果から、全ての試験項目およびケースで共通して再現性が良い形態は、高温プレナムブロックをダミー扱いとしたケースである。この場合、循環機停止試験に関してはこれまでの解析結果と比べて実測値に近づいたが、高温プレナムブロックをダミー扱いする物理的な意味が不明なため、将来の高温ガス炉への適用は、シール用ブロックとキー結合用ブロックの全てを考慮した t2 を推奨する。

結論として図 3-27(1)～図 3-27(8)に示すように、燃料最高温度に関係する部分として、循環機停止試験の場合は定常値、制御棒引抜き試験の場合は上に凸の原子炉出力ピーク値において、全て 3%以内の精度で予測が可能であることがわかった。

表 3-1 (1/3) 循環機停止試験の再現解析に関する検討内容および結果

(1) BLOOST 伝熱解析 モードル (形状・ 寸法)	①外側黒鉛 の外径寸法 (外側黒鉛 の厚み) ②冷却材流 路の内外径 (流路断面 積)	30 カラムの燃料黒鉛ブロ ックの面積を 954 本のチ ヤンネル数で均等割りし、円 筒モデルに巻きつい る。(厚さ 1.3cm)	最外メッシュの座標を変えることにより、外側黒鉛の厚みを約±25%変更させた。原 子炉出力の変化は基準ケースとの違いは殆ど見られなかつた。 (同時に外側黒鉛や黒鉛スリーブの厚さが変わることになる) その結果、流路孔の内 径を小さく、あるいは外径を大きくして流路断面積を基準値よりも大きくした場合、 原子炉出力の整定値は実測値に近づいた。	△ ○	△ ○	△ ○	△ ○	図 3-1 図 3-2
③黒鉛スリ ーブ／燃料 コンパクト の厚み	黒鉛スリーブ厚さ 0.4cm 燃料コンパクト厚さ 0.8cm	燃料コンパクトと黒鉛スリーブの境界位置を内側／外側に移動させることにより、そ れぞれの厚さを変化させた。その結果、境界位置を内側に変化させた場合(黒鉛スリ ーブが厚く、燃料コンパクトが薄くなる)、原子炉出力の整定値は実測値に近づいた。	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	図 3-3
④燃料コン パクトの内 半径	内半径 0.5cm	中空燃料コンパクトの内半径を 0.5cm から 0.2cm に変更することで燃料コンパクト 厚さを増やす解析を実施した。その結果、ごく僅かに原子炉出力の整定値は実測値に 近づくが、解析条件を極端に変化させた割には結果の影響度は非常に小さい。	△ ○	△ ○	△ ○	△ ○	△ ○	図 3-4
⑤燃料コン パクトの外 側ギャップ 幅	0.0125cm	HTTR 設置変更許可申請書では、中性子照射によってギャップ幅が大きくなるとの 記述がある。照射量とギャップ幅の関係式も記載されており、この式を適用すると循 環機停止試験における出力の整定値は実測値に若干近づく。	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	図 3-5
⑥コンパク ト内の黒鉛 体積割合	0.9168	減速材の平均温度を算出する際に、燃料コンパクト内部の黒鉛も減速材として考慮す るために、本データを必要としている。減速材黒鉛の全體体積と比較してコンパクト部 の黒鉛量は僅かなので、この体積割合を極端に変化させても解析結果にはほとんど影 響しなかつた。	× ×	× ×	× ×	× ×	× ×	図 3-6
⑦下部可動 反射体、高 温プレナム ブロックの モデル修正	ブロック高さ、熱容量補正 など、根拠不明の値になっ ていた。	下部可動反射体 (58cm×2)、高温プレナムブロック (検討用パラメータとして 1~ 90cm) を想定して解析モデルと流路断面積等のデータを変更させた結果、循環機停 止試験は基準ケースと比較して整定値が実測値に近づくが、制御棒引抜試験では整定 値が実測値から離れていった。	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	図 3-7

○：解析結果への影響有り、△：解析結果への影響僅かに有り、×：解析結果への影響無し)

表 3-1 (2/3) 循環機停止試験の再現解析に関する検討内容および結果

項目	基準ケースの条件	検討	過渡変化に対する感度	整定値に対する感度	図番
(II) 解析条件: ①冷却材流量 1	循環機停止試験時の実測 炉心、有効流量割合（約 90%）を考慮することにより、僅かではあるが 実測値に近づく。		△	△	図 3-8
②冷却材流量 2	初期流量は実測値を用いるが、循環機停止後の流量を変化させる解析 を実施した。その結果、9MW からの 2 台停止試験では冷却材流量を +10%、18MW からの 2 台停止試験では+15%とすると、出力整定値 が実測値をほぼ再現した。ただし、循環機停止後だけ冷却材流量を増 加させる根拠はない。	○	○	○	図 3-9
③冷却材圧力	初期冷却材圧力で一定	試験実施済ケースの実測値から循環機停止後に冷却材圧力が低下して いることを確認。この挙動を BLOOST の解析条件に適用すると、僅 かではあるが整定値は実測値に近づく。	○	○	図 3-10
④炉心入口 冷却材温度	初期炉心入口温度で一定	実測値を確認した結果、循環機停止後は原子炉入口冷却材温度が低下 するが、その後炉心側部で暖められるため、炉心入口温度は 10 分程度 の間はほとんど変化しておらず、初期炉心入口温度で一定とするの は妥当である。	○	○	図 3-11
⑤温度係数	最新の領域別温度係数	燃料温度係数と減速材温度係数をそれぞれ±20%変化させたパラメー タ解析を実施した。初期の出力変化には多少変化がみられるが、整定 値には殆ど影響しない。	○	×	図 3-12
⑥遅発中性子先行核の 崩壊定数		遅発中性子先行核の崩壊定数 (λ_i) を一律基準ケースの 1.5 倍の値に 設定した解析を実施した結果、過渡的な挙動に変化はみられたが、整 定値は変化しなかった。	○	×	図 3-13
⑦即発中性子寿命	$7.32 \times 10^{-4} \text{sec}$ (燃焼初期の値)	燃焼 150 日相当の値 ($9.4 \times 10^{-4} \text{sec}$) に見直しを行なった。解析結果に は影響しなかった。	×	×	図 3-14

○：解析結果への影響有り、△：解析結果への影響僅かに有り、×：解析結果への影響無し)

表 3-1 (3/3) 循環機停止試験の再現解析に関する検討内容および結果

項目	基準ケースの条件	検討	過渡変化に対する感度	整定値に対する感度	図番
(III) BLOOST 側物性値 など	①コンパクトの密度 2.39×10 ³ kg/m ³	仮にコンパクトの密度を2倍にした場合の再現解析を行った。出力の変化は基準ケースよりもやっかりとなるが、整定値に変化は生じなかった。	○	×	図 3-15
	②コンパクトの比熱 温度依存の相関式	仮にコンパクトの比熱を2倍にした場合の再現解析を行なったが、整定値に変化は生じなかった。	○	×	図 3-16
	③コンパクトの熱伝導率 温度依存の式（黒鉛と同じ値）	仮に熱伝導率を2倍にした再現解析を行なったが、整定値に変化は生じなかった。	○	×	図 3-17
	④黒鉛の密度 1.70×10 ³ kg/m ³	仮に黒鉛の密度を2倍にした再現解析を行った。出力の変化は基準ケースよりもやっかりとなるが、整定値に変化は生じなかった。	○	×	図 3-18
	⑤黒鉛の比熱 温度依存の相関式	仮に黒鉛リーブの熱容量を1.5倍にした再現解析を実施したが、整定値に変化は生じなかった。	○	×	図 3-19
	⑥黒鉛の熱伝導率 と同一値)	仮に熱伝導率を2倍に設定して再現解析を行なったが、整定値に変化は生じなかった。	○	×	図 3-20
	⑦冷却材熱伝達率 安全評価用としてノミナルよりも10%低い値に設定されていた。	冷却材熱伝達率をノミナル値、ノミナル値×1.8と変化させてみたが、循環機停止後の整定値は殆ど変化しなかった。	○	×	図 3-21
(IV) その他	①TAC 崩壊熱の影響 循環機停止時には、崩壊熱は考慮されない。	原子炉出力が95%まで低下した段階で崩壊熱が出力に加算されるようにして再現解析を行なった。崩壊熱が加算された分、核出力が小さくなり、合計出力は基準ケースと変わらない結果となった。	×	×	図 3-22
	②TAC 热伝達率 HENDEL 実験結果に対する熱伝導率のノミナル値となるようNu数の式の係数を0.020⇒0.023に変更すると、ごく僅かであるが整定値は実測値に近づく結果となつた。	HENDEL 実験結果のノミナル値となるようNu数の式の係数を変更すると、熱伝導式の定数を変更すると、解析結果へへの影響は殆ど変化しなかつた。	×	△	図 3-23
	③TAC 燃料部等熱伝導率 定常解析結果を実測値に合せた結果として、安全評価で使用していた燃焼0日の値（熱伝導率大きめ）を使用。	熱伝導率を燃焼660日の値（熱伝導率小さめ）に変更した解析を実施したが、解析結果は殆ど変化しなかつた。	×	×	図 3-24

○：解析結果への影響有り、△：解析結果への影響僅かに有り、×：解析結果への影響無し)

表 3-2 燃料コンパクト、黒鉛スリーブ、黒鉛ブロックの製造実績

	設計値	製造実績*
燃料コンパクト内径	$10.0 \pm 0.1 \text{mm}$	$9.993 \pm 0.0434 \text{mm}$
燃料コンパクト外径	$26.0 \pm 0.1 \text{mm}$	$25.996 \pm 0.1072 \text{mm}$
黒鉛スリーブ内径	$26.25 \pm 0.1 \text{mm}$	$26.27 \pm 0.072 \text{mm}$
黒鉛スリーブ外径	$34.0 \pm 0.1 \text{mm}$	$33.99 \pm 0.045 \text{mm}$
燃料棒挿入孔内径	$41.0 \pm 0.1 \text{mm}$	$41.0 \pm 0.06 \text{mm}$

* : 誤差は 3σ を示す。

表 3-3 下部可動反射体ブロック、高温プレナムブロックの入力データ

	下部可動反射体	高温プレナムブロック
メッシュ高さ	$116 = 58 + 58 \text{cm}$	$90 = 23 + 67 \text{cm}$
熱容量補正	1.00	1.00
流路断面積	$4.155 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ($\phi 23 \text{mm}$ の孔)	$4.85 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ($\phi 290 \text{mm}$ の孔 7 個分を 954 で割る)
等価直径	0.023 m	0.29 m

This is a blank page.

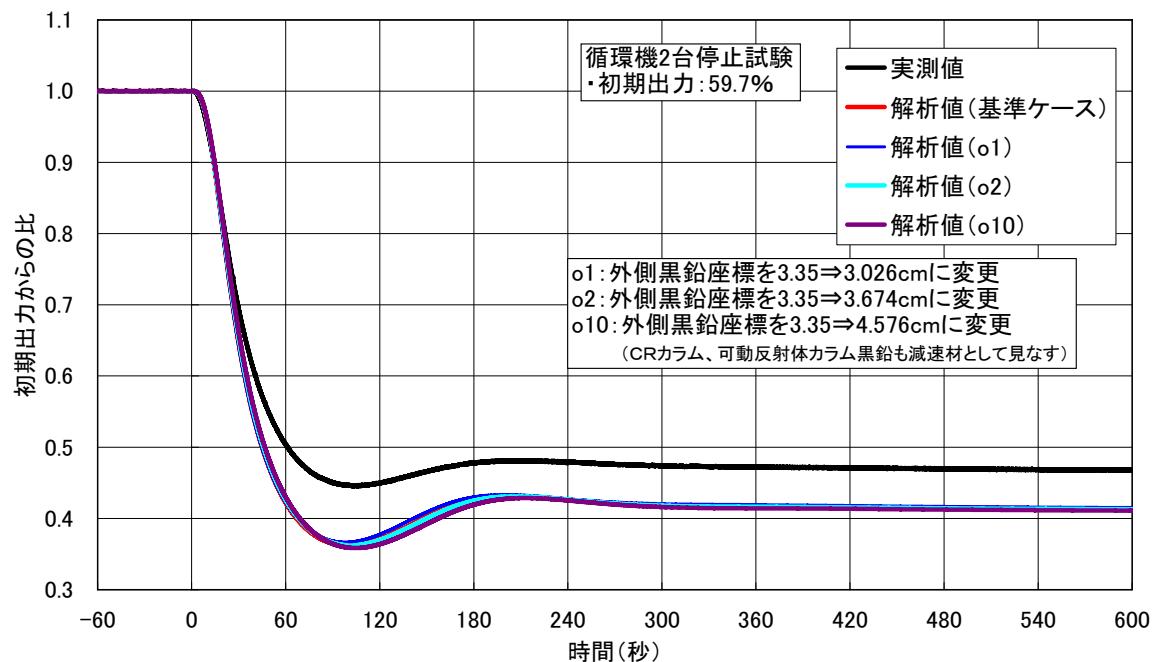


図 3-1 BLOOST モデルでの外側黒鉛の厚みによる影響

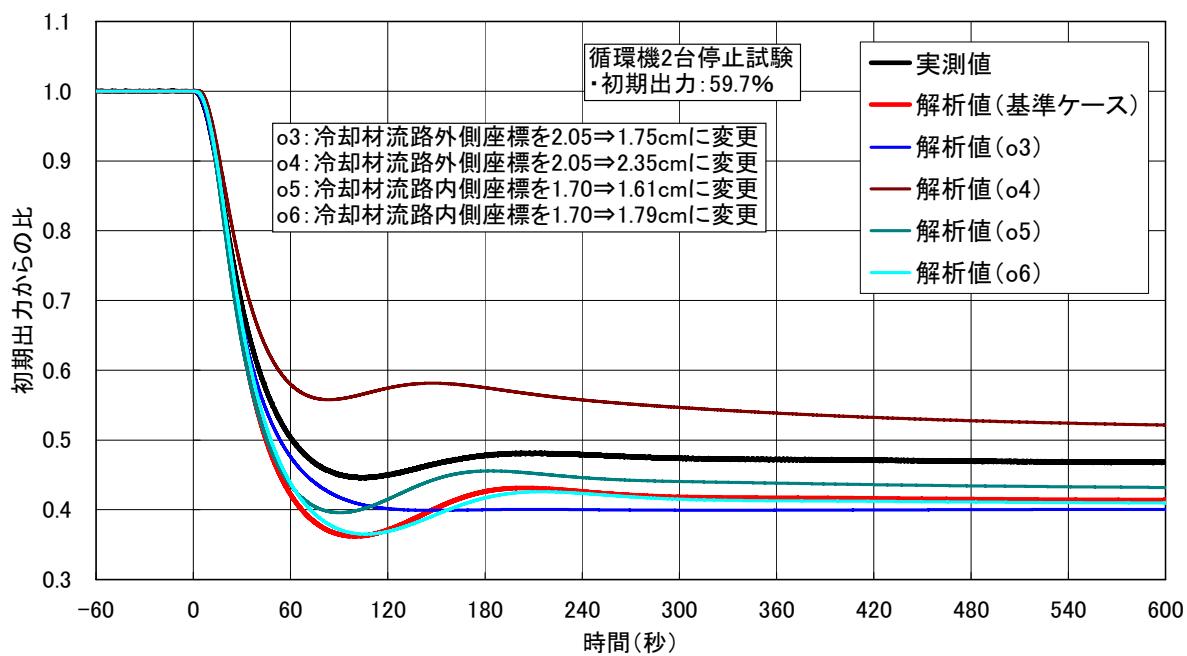


図 3-2 BLOOST モデルでの冷却材流路の内外径 (冷却材流路断面積) による影響

This is a blank page.

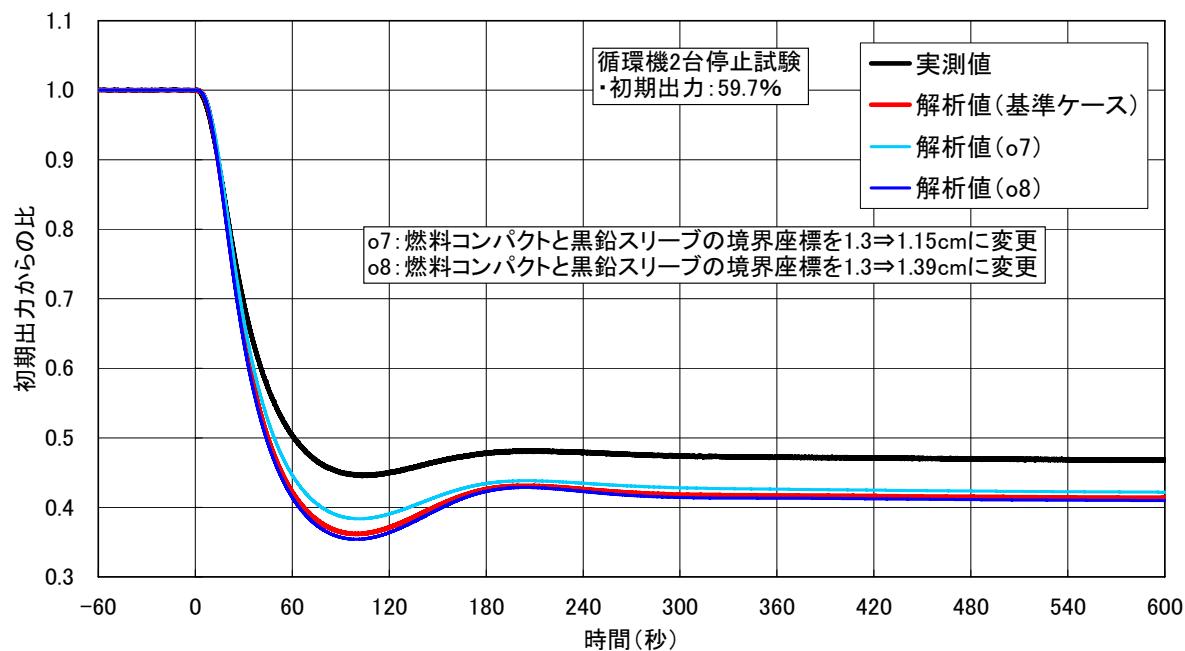


図 3-3 BLOOST モデルでの黒鉛スリーブ／燃料コンパクトの厚みによる影響

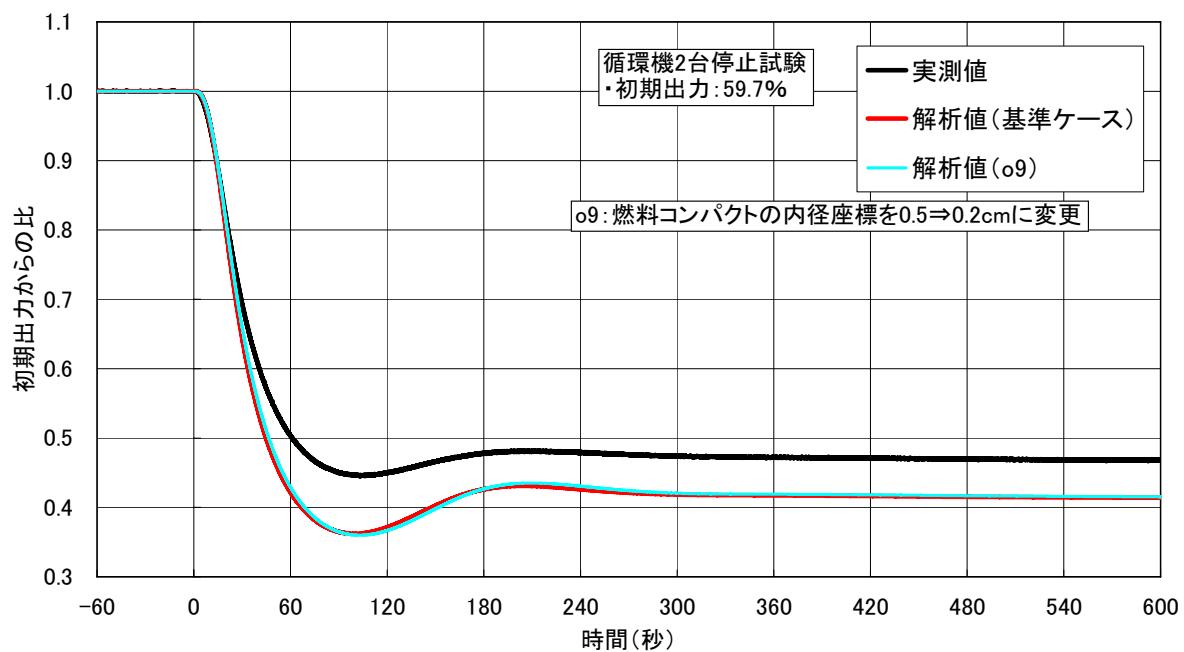


図 3-4 BLOOST モデルでの燃料コンパクトの内径による影響

This is a blank page.

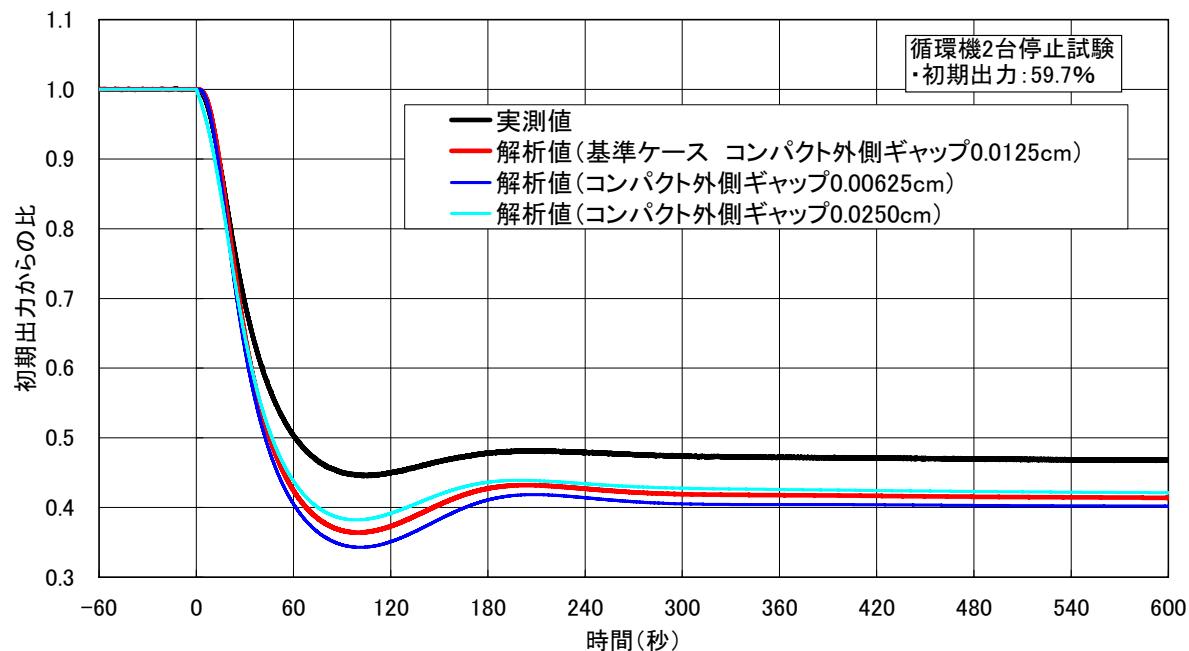


図 3-5 BLOOST モデルでのコンパクト外側ギャップ幅の影響

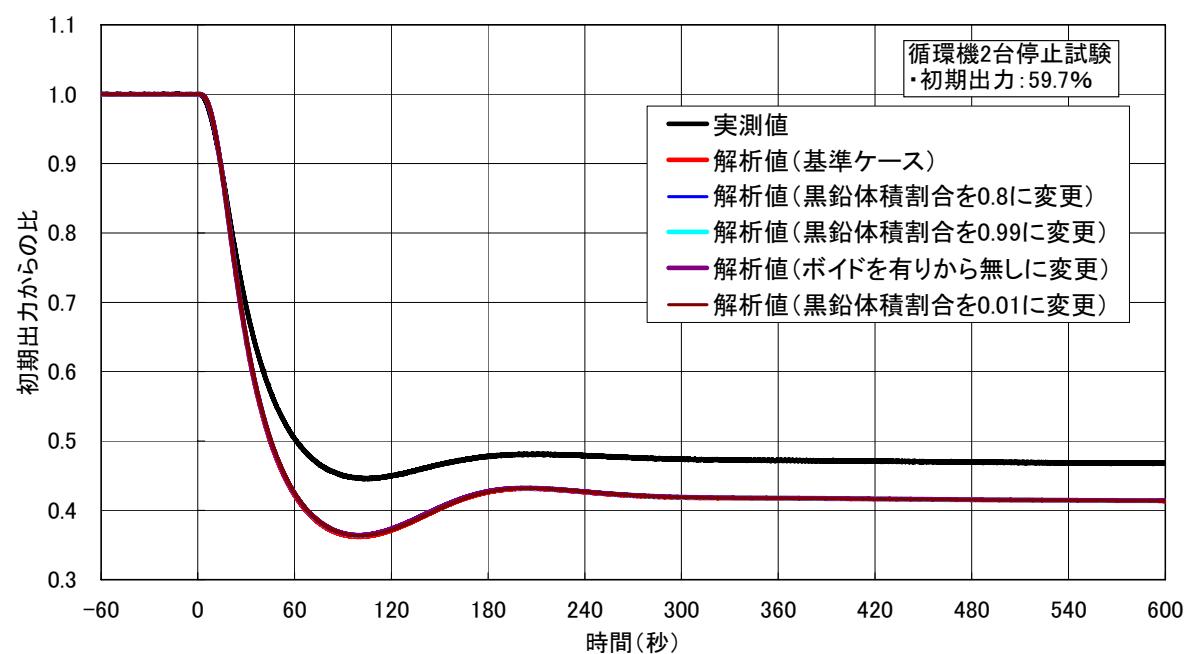


図 3-6 BLOOST モデルのコンパクト内の黒鉛体積割合による影響

This is a blank page.

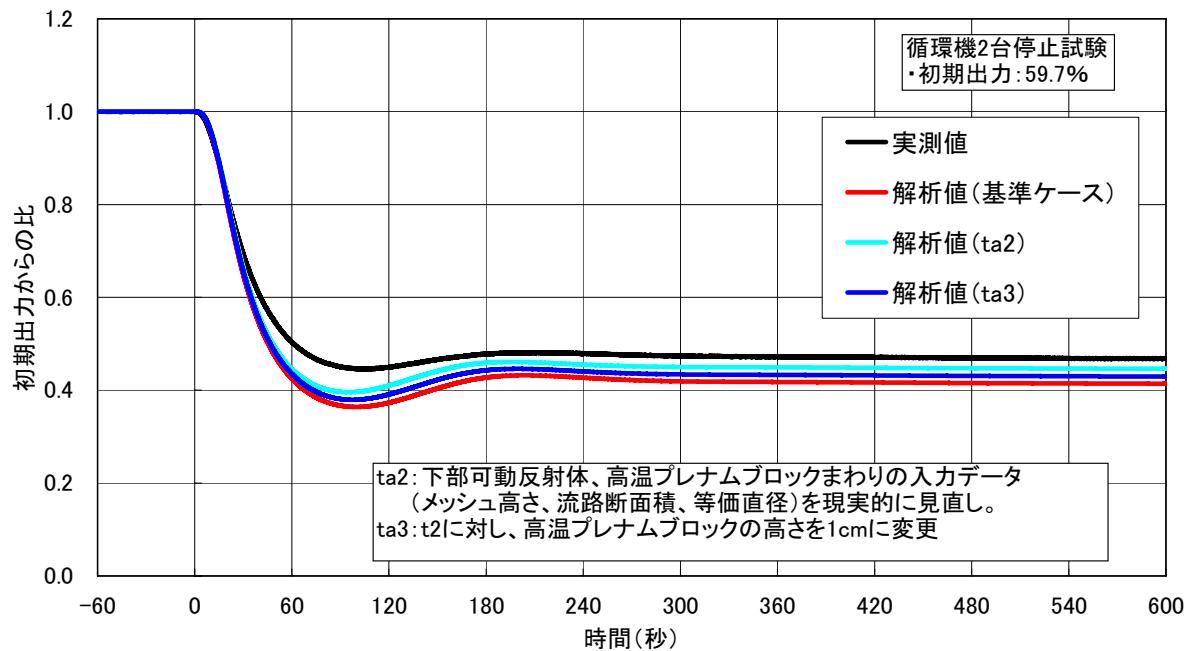


図 3-7 BLOOST モデルの下部可動反射体、高温プレナムブロックのモデル化による影響

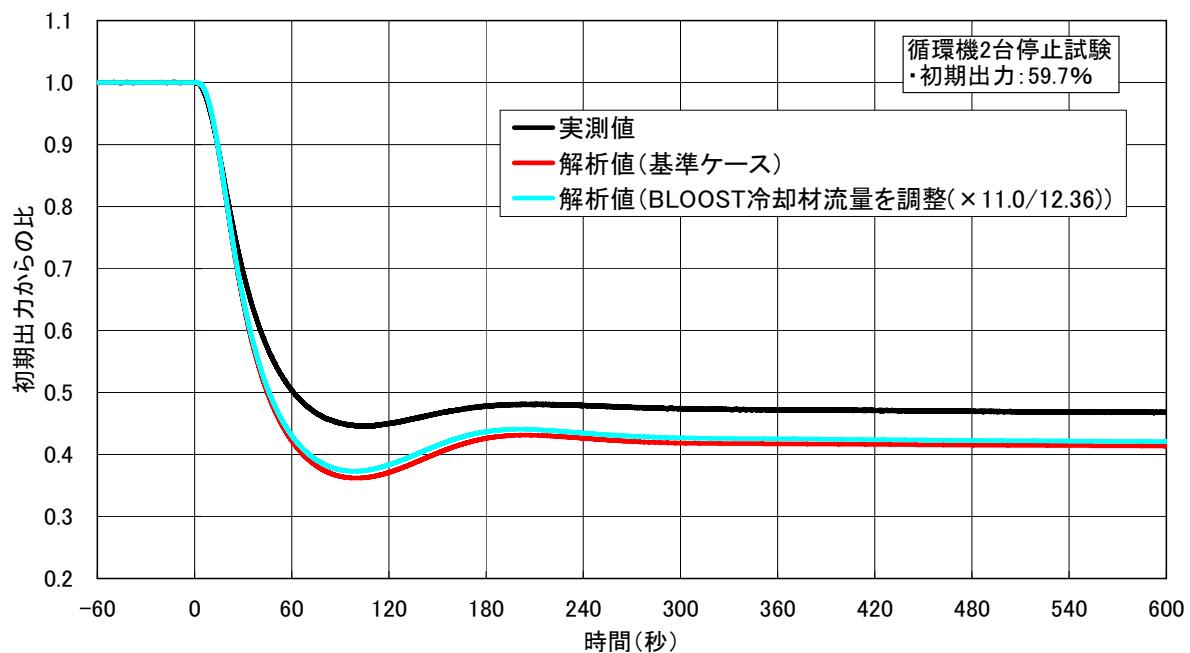


図 3-8 冷却材流量（炉心有効流量の考慮）による効果

This is a blank page.

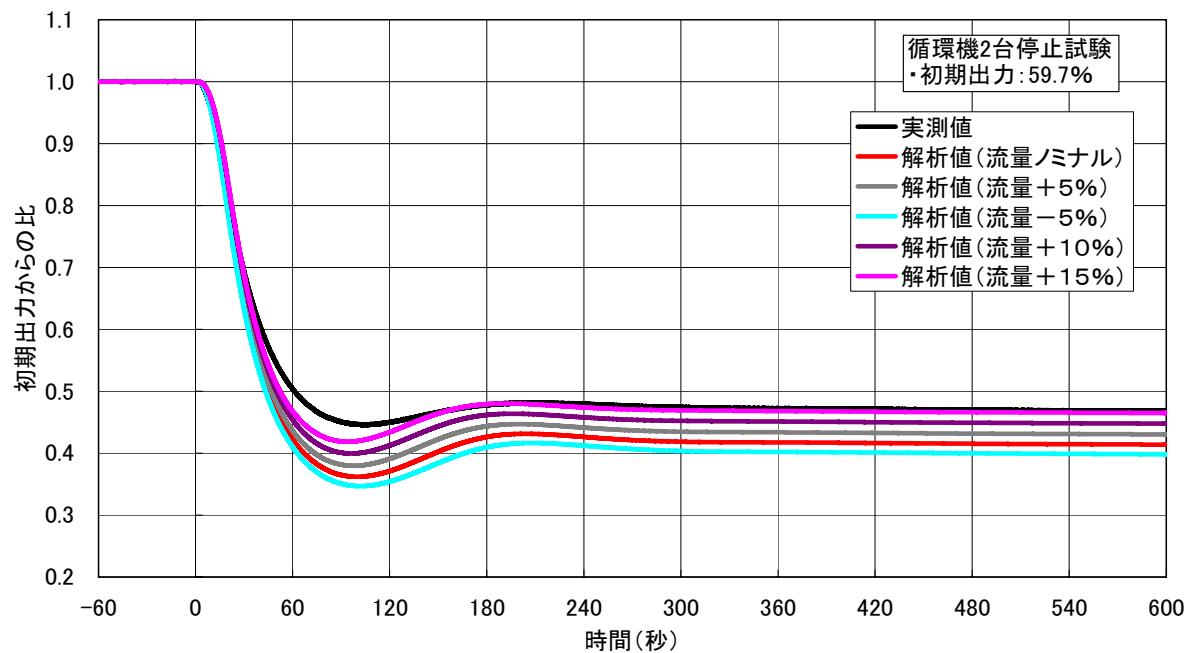


図 3-9　冷却材流量（循環機停止後の冷却材流量変更）の効果

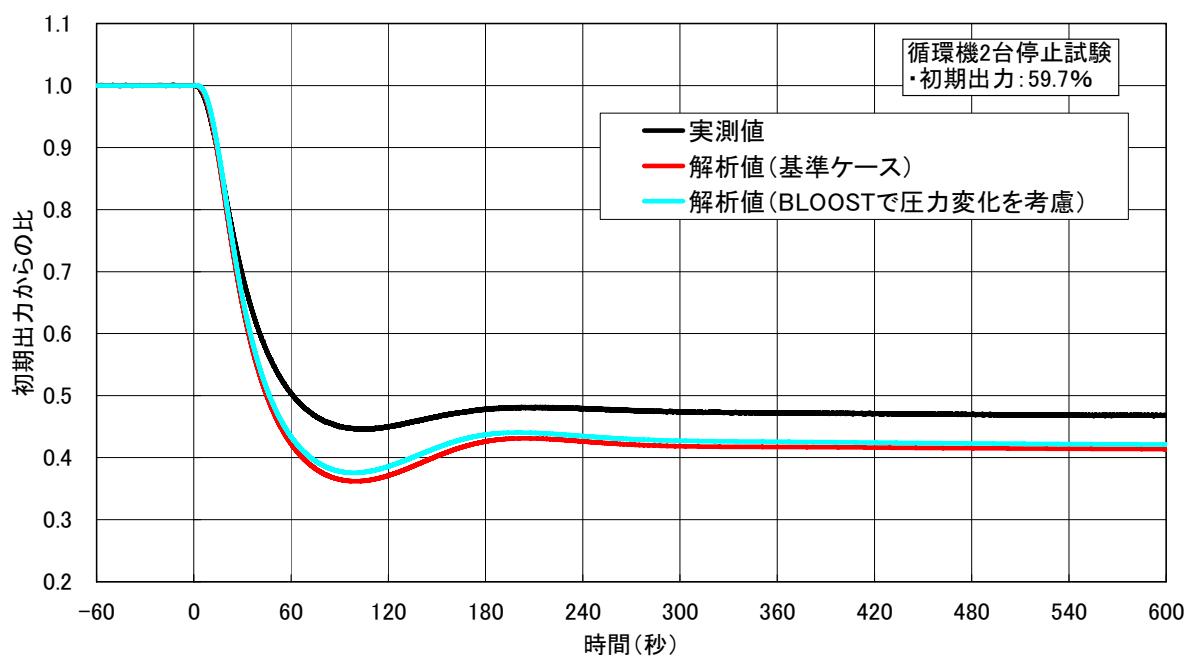


図 3-10　循環機停止後の冷却材圧力変化の効果

This is a blank page.

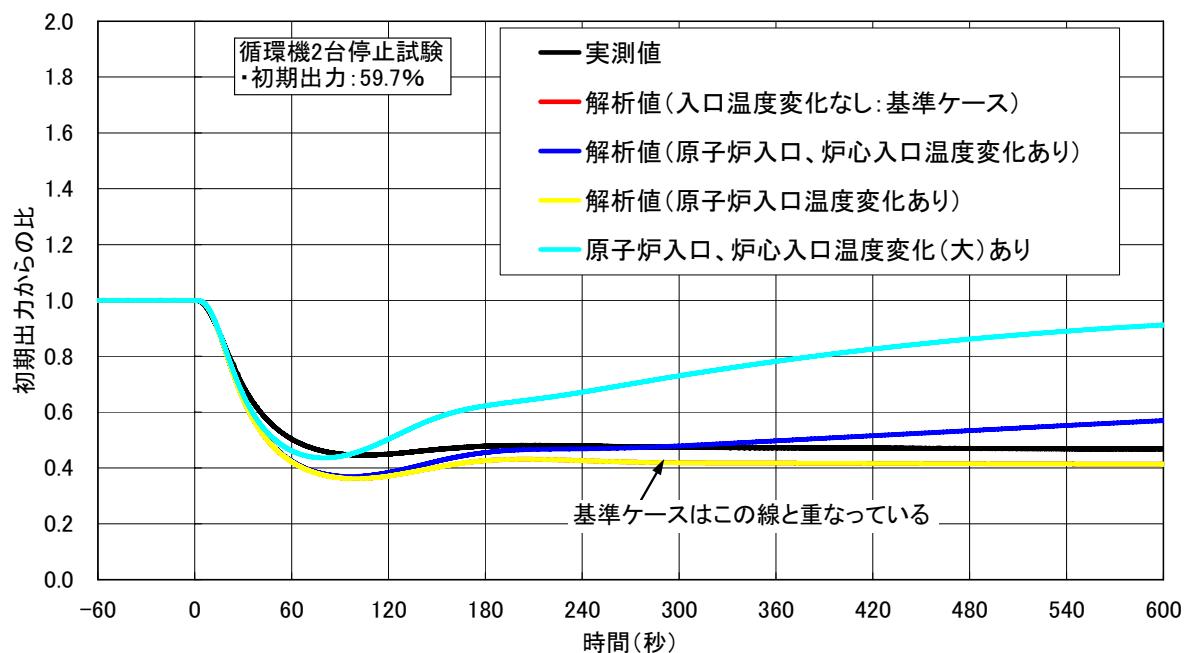


図 3-11 循環機停止後の炉心入口温度の効果

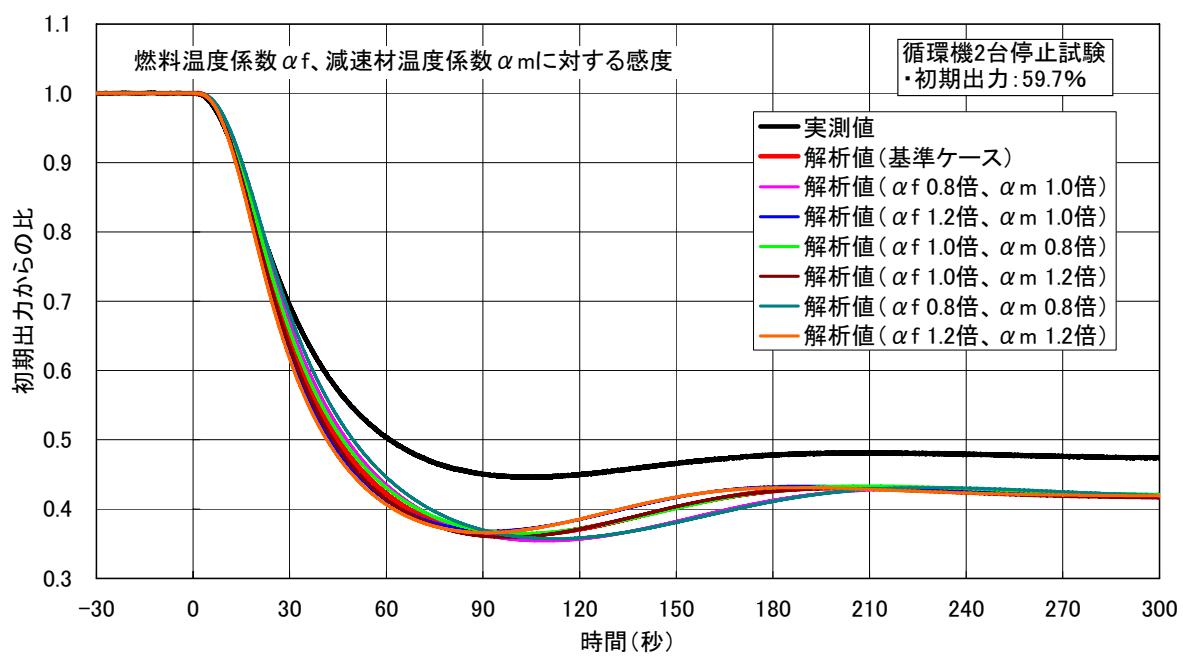


図 3-12 燃料温度係数、減速材温度係数の効果

This is a blank page.

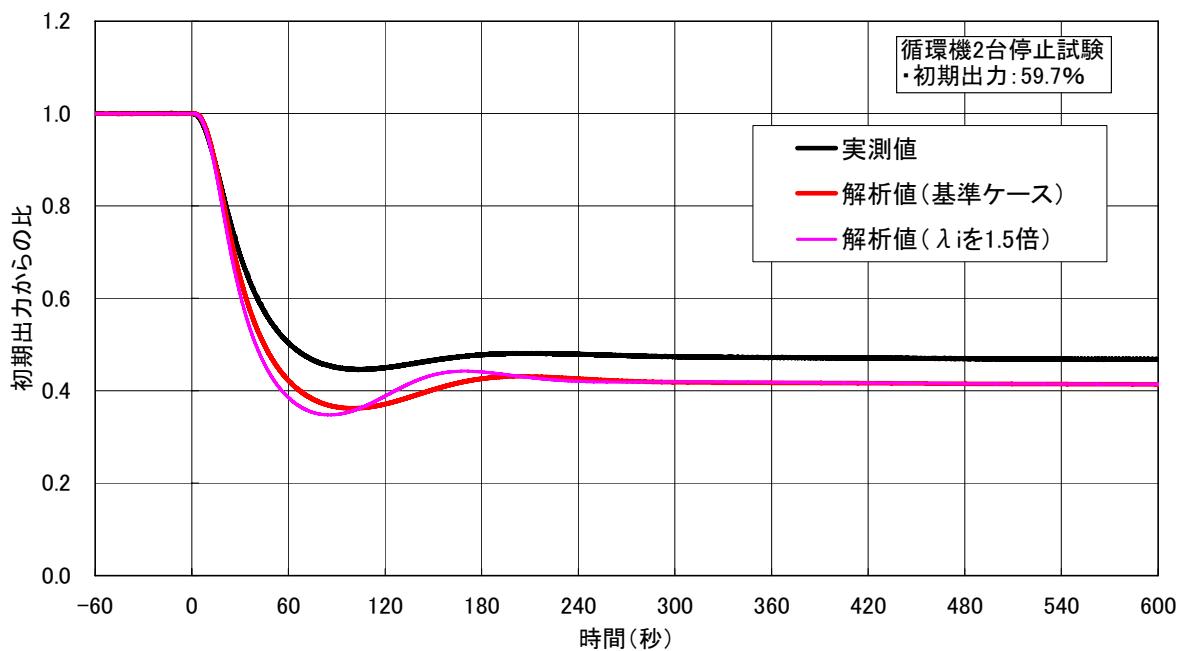


図 3-13 遅発中性子先行核の崩壊定数の効果

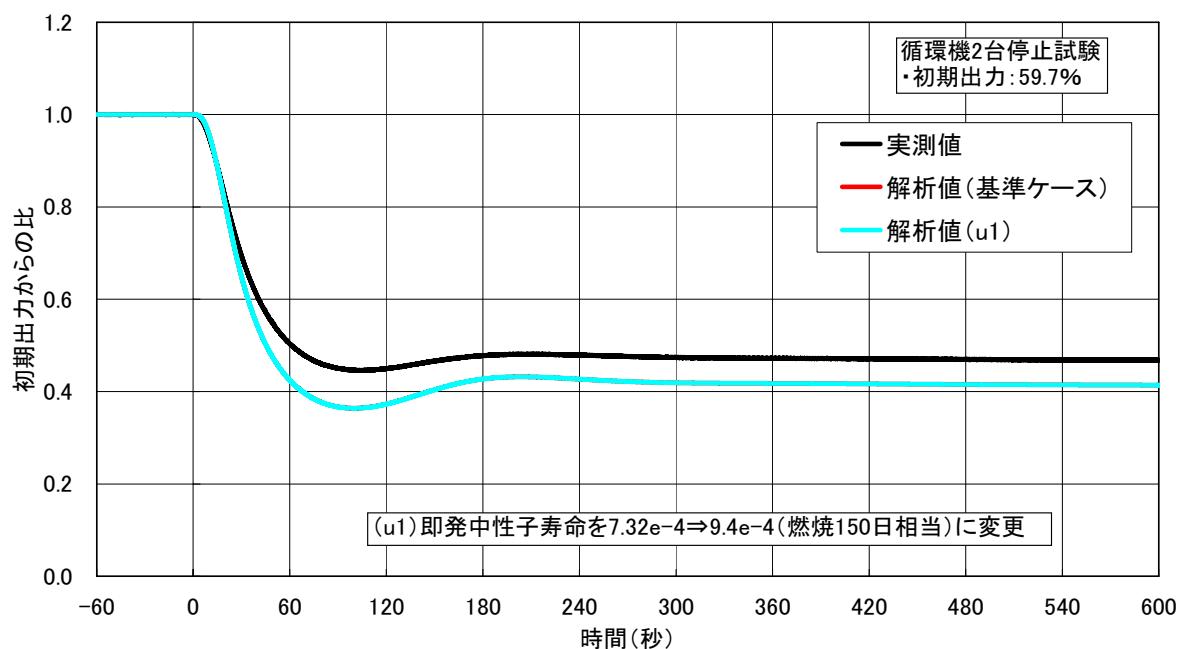


図 3-14 即発中性子寿命の効果

This is a blank page.

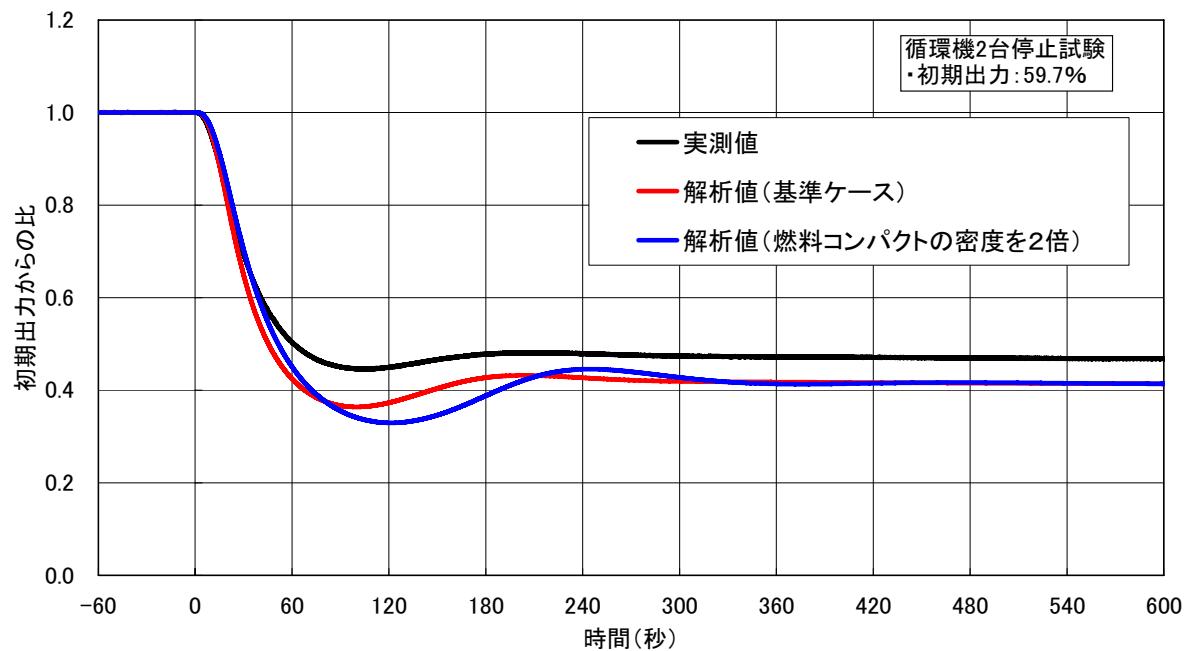


図 3-15 BLOOST モデルでの燃料コンパクトの密度の効果

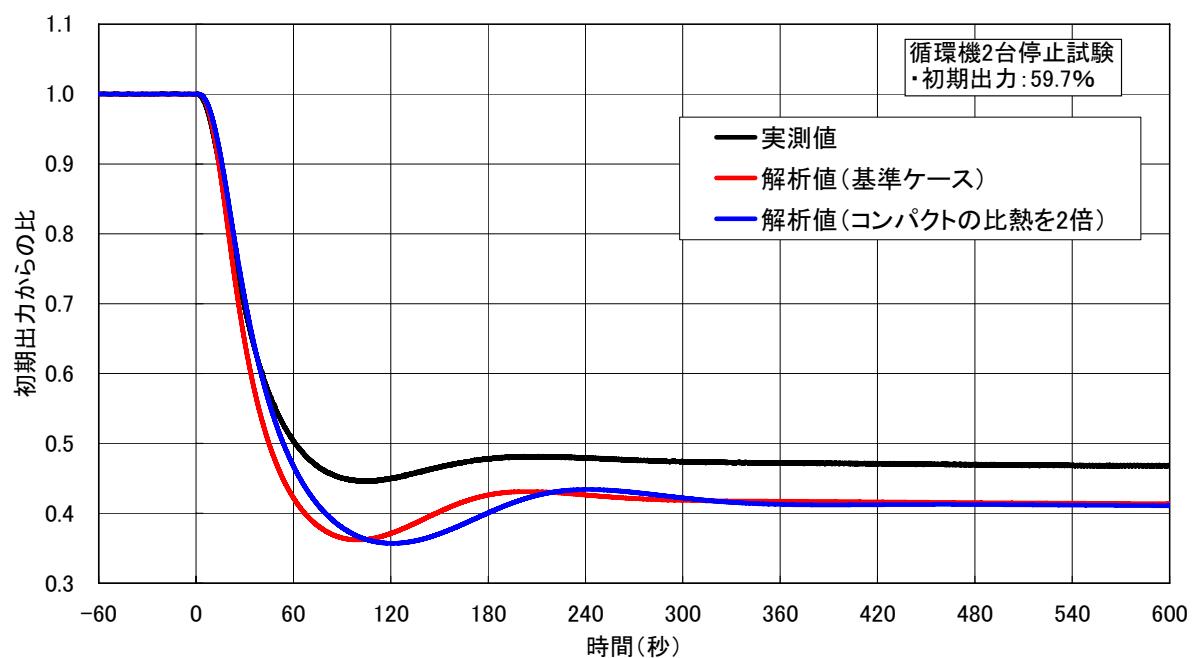


図 3-16 BLOOST モデルでの燃料コンパクトの比熱の効果

This is a blank page.

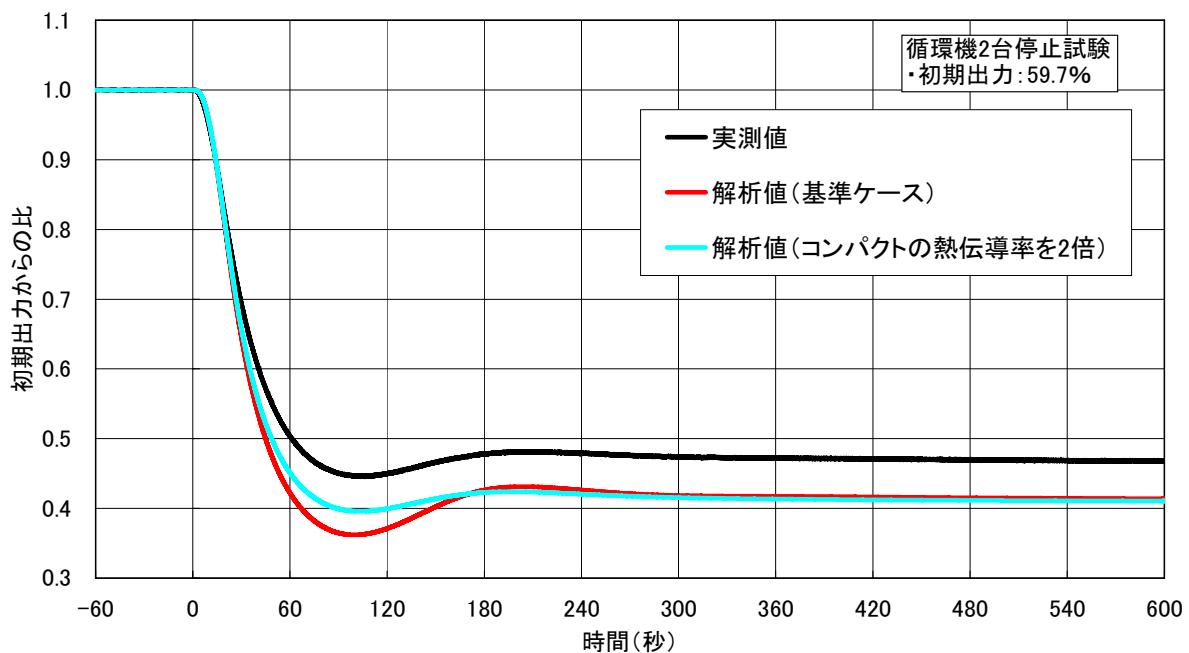


図 3-17 BLOOST モデルでの燃料コンパクトの熱伝導率の効果

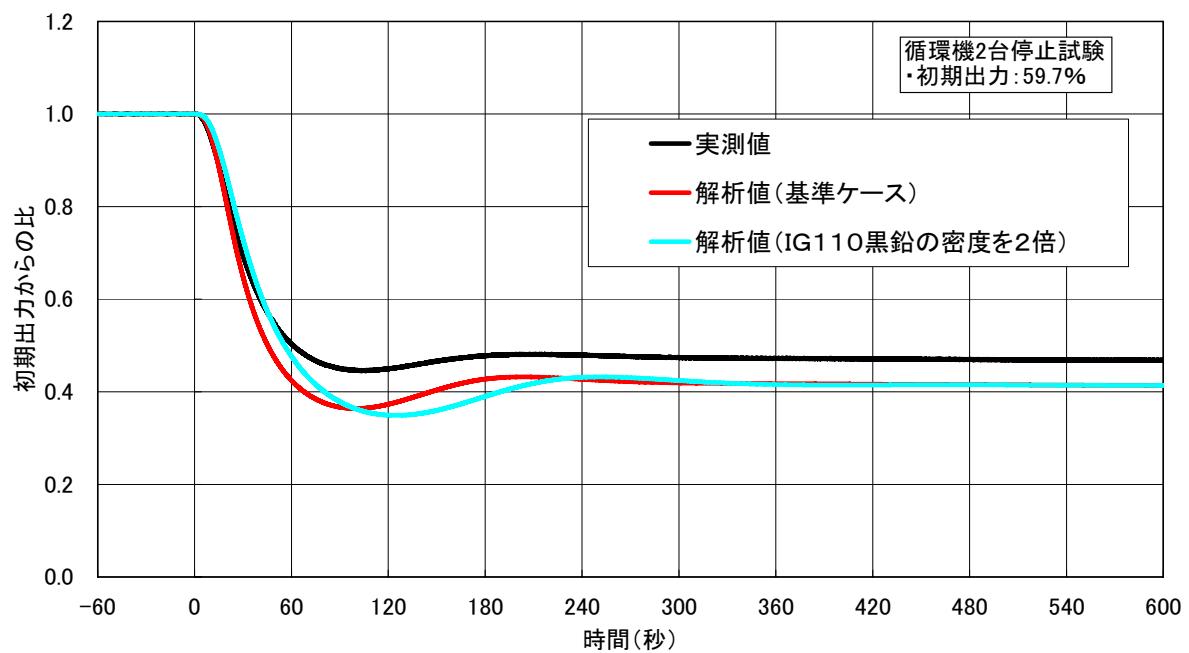


図 3-18 BLOOST モデルでの黒鉛の密度の効果

This is a blank page.

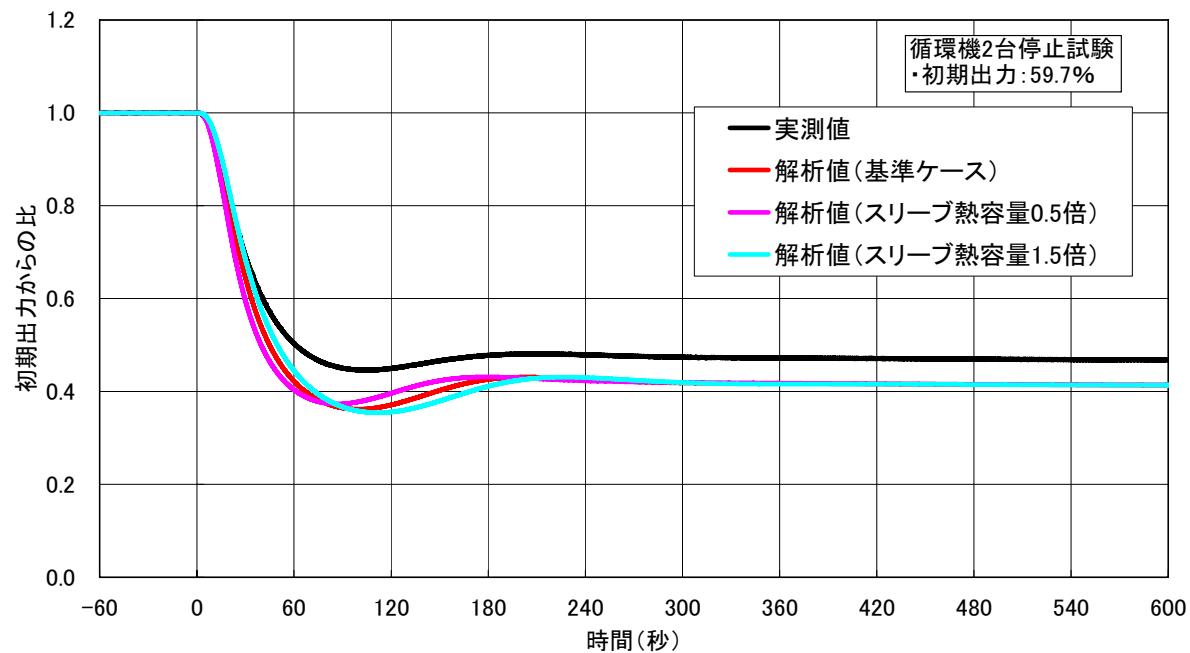


図 3-19 BLOOST モデルでの黒鉛の比熱の効果

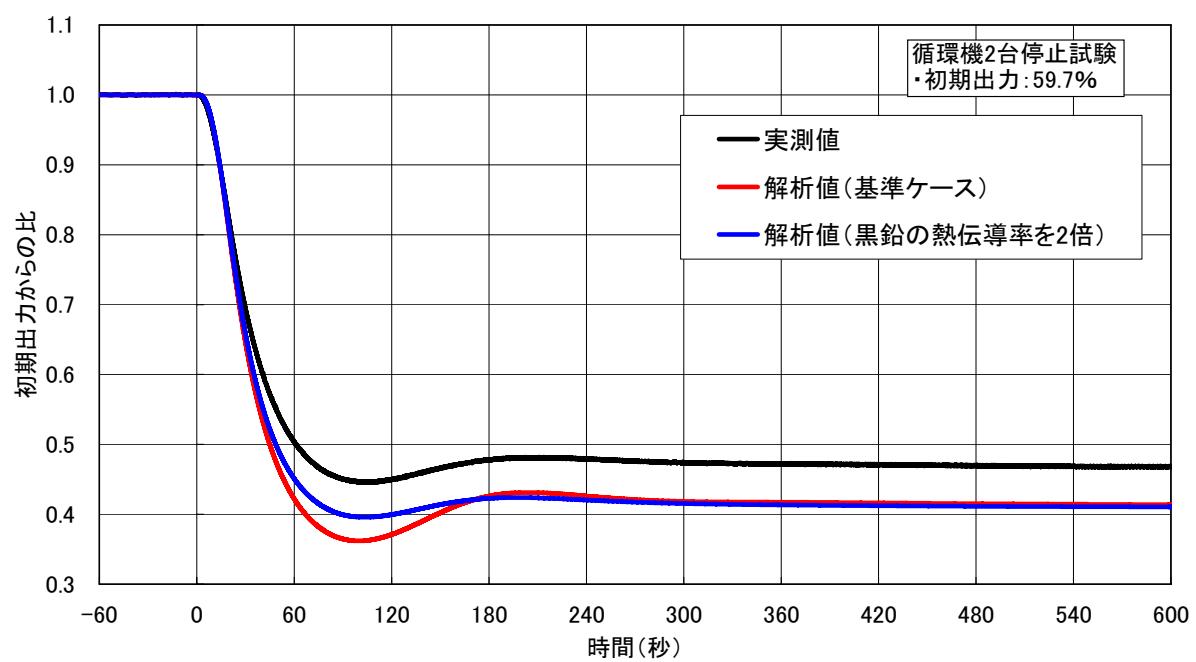


図 3-20 BLOOST モデルでの黒鉛の熱伝導率の効果

This is a blank page.

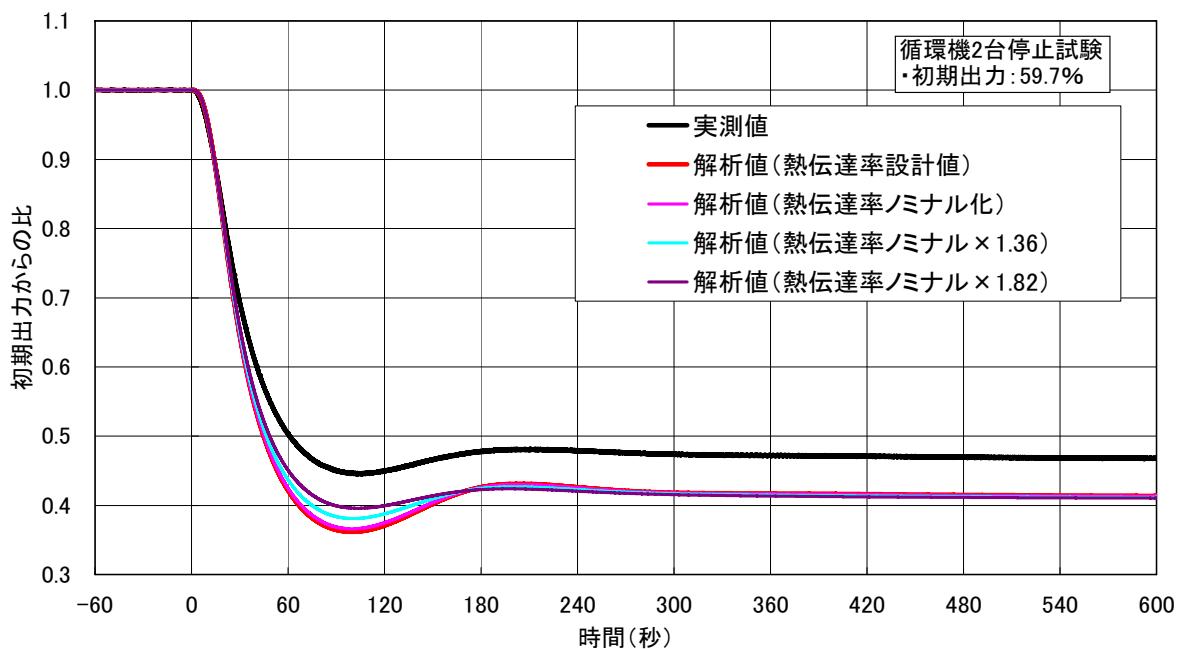


図 3-21 BLOOST モデルでの冷却材熱伝達率の効果

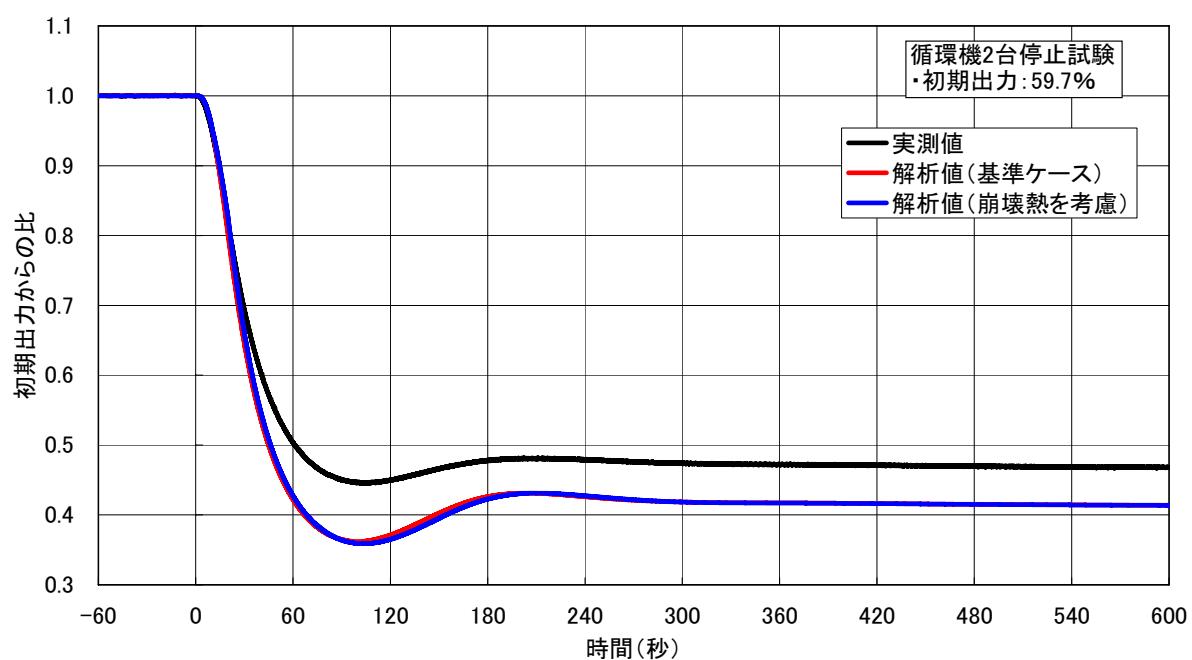


図 3-22 TAC-NC モデルでの循環機停止後の崩壊熱の効果

This is a blank page.

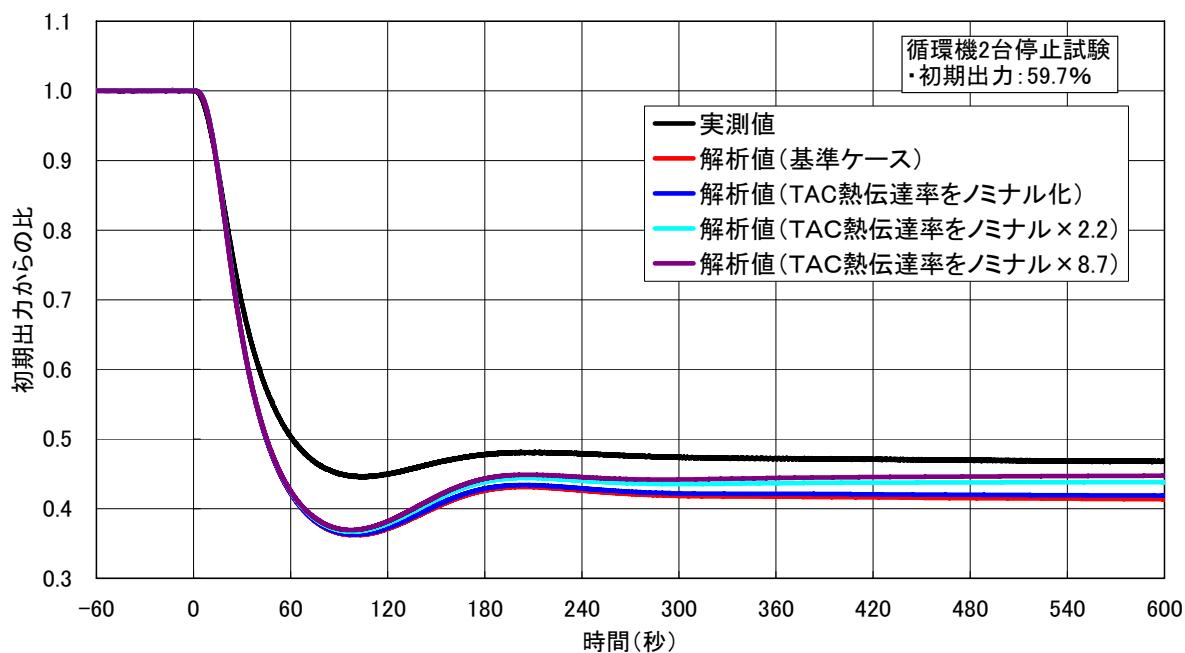


図 3-23 TAC-NC モデルでの冷却材熱伝達率の効果

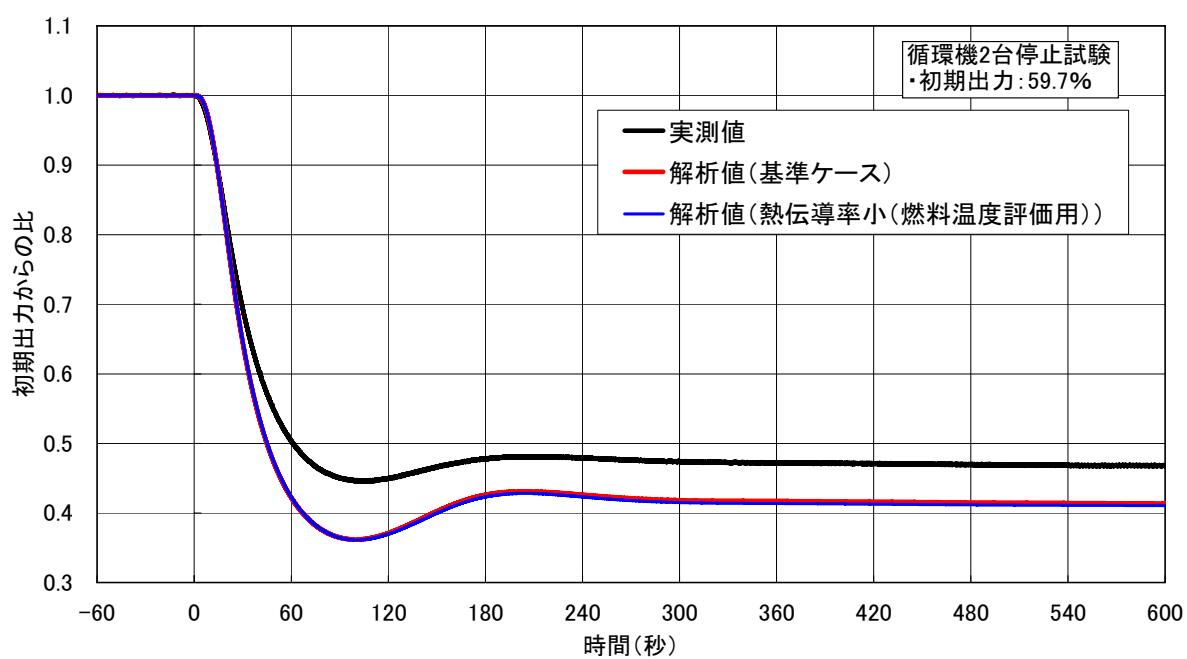


図 3-24 TAC-NC モデルでの燃料部等価熱伝導率の効果

This is a blank page.

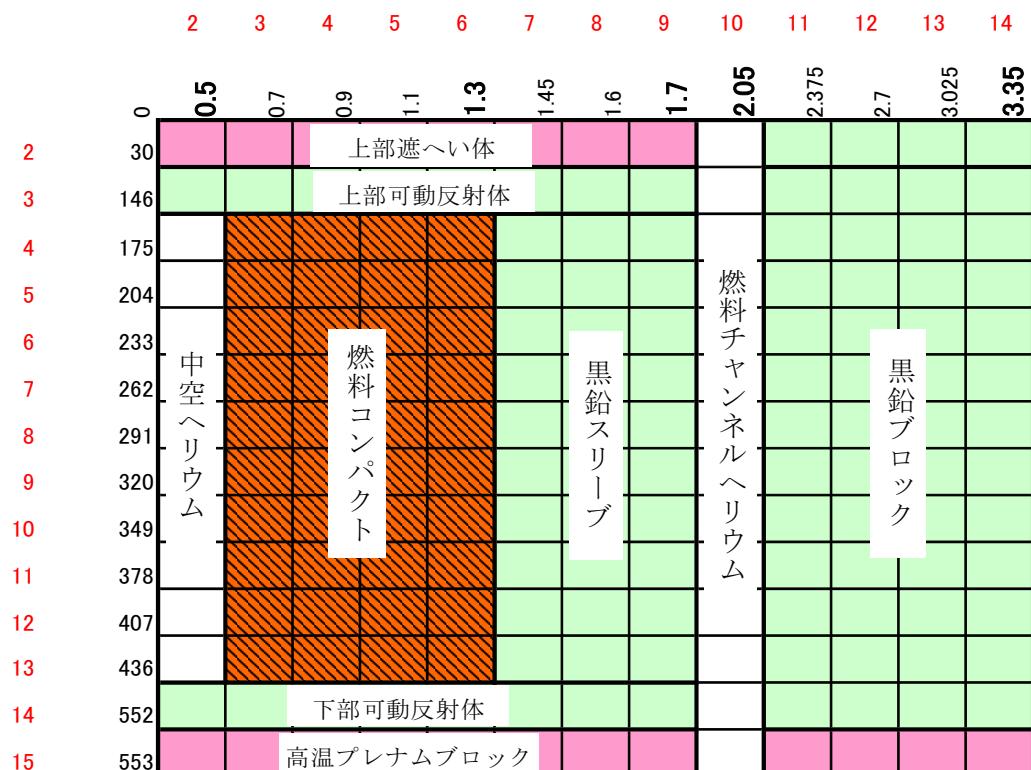
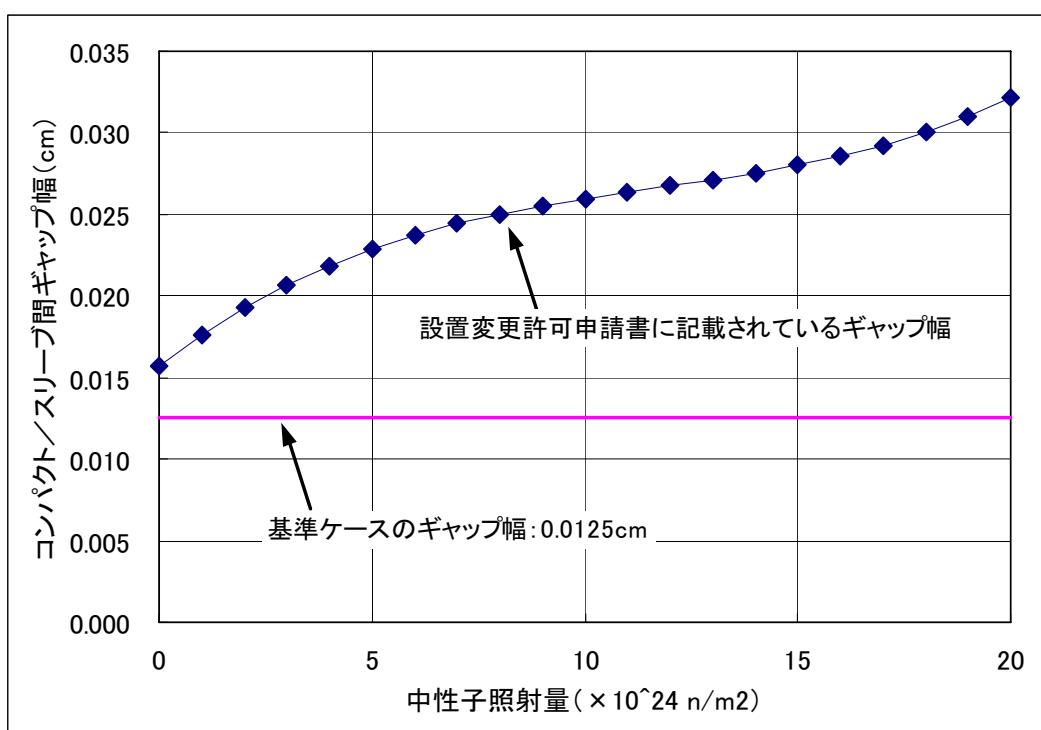


図 3-25 BLOOST の解析モデル

図 3-26 中性子照射量とコンパクト／スリーブ間ギャップの関係
(出展 : HTTR 設置変更許可申請書)

This is a blank page.

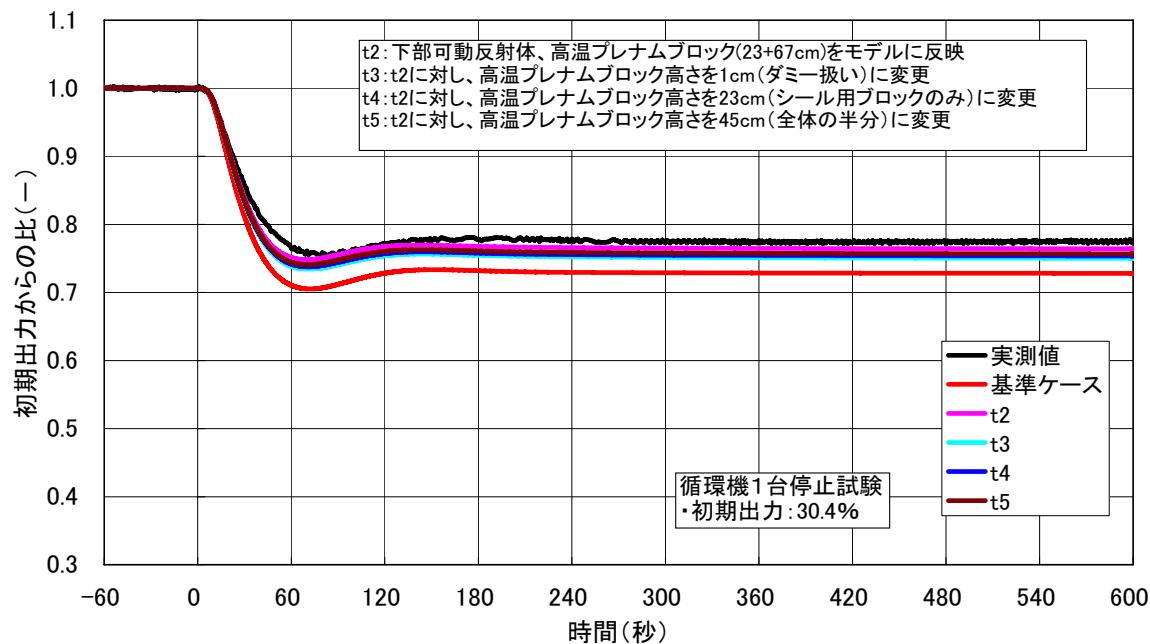


図 3-27(1) 最適化ケースの解析結果 (9MW からの循環機 1 台停止試験)

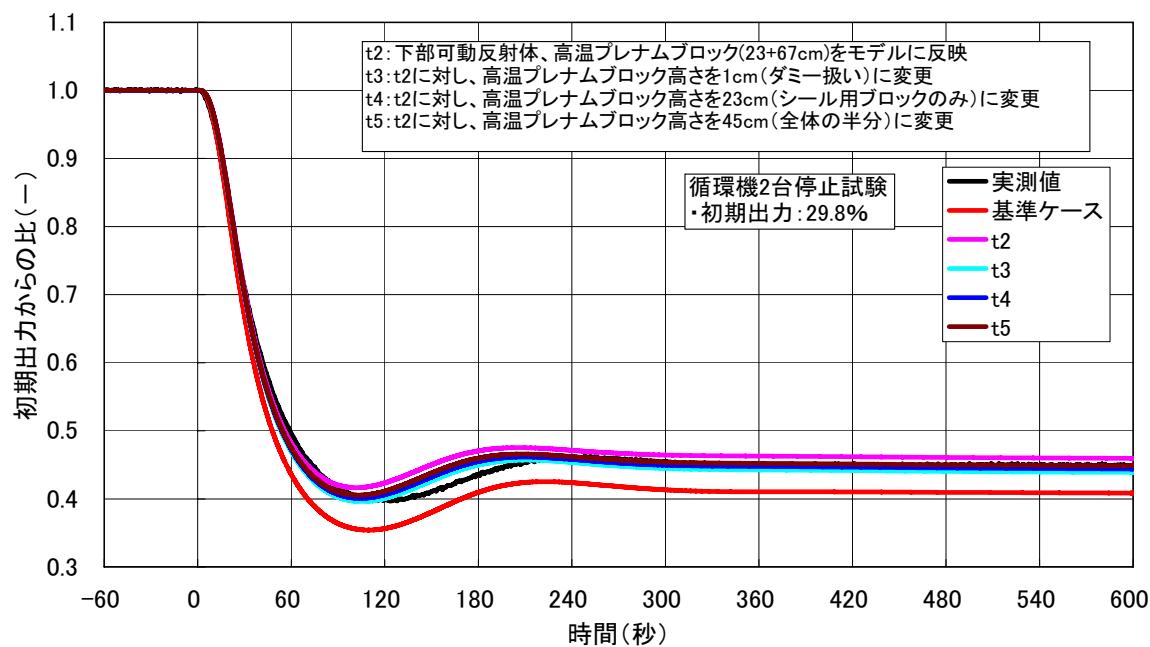


図 3-27(2) 最適化ケースの解析結果 (9MW からの循環機 2 台停止試験)

This is a blank page.

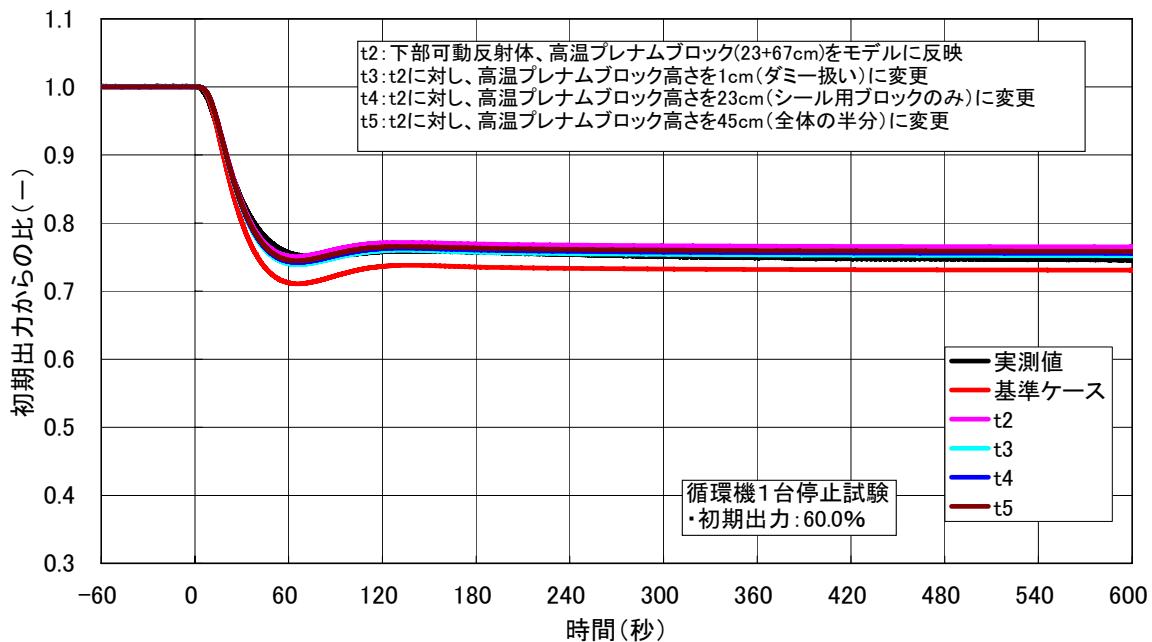


図 3-27(3) 最適化ケースの解析結果 (18MW からの循環機 1 台停止試験)

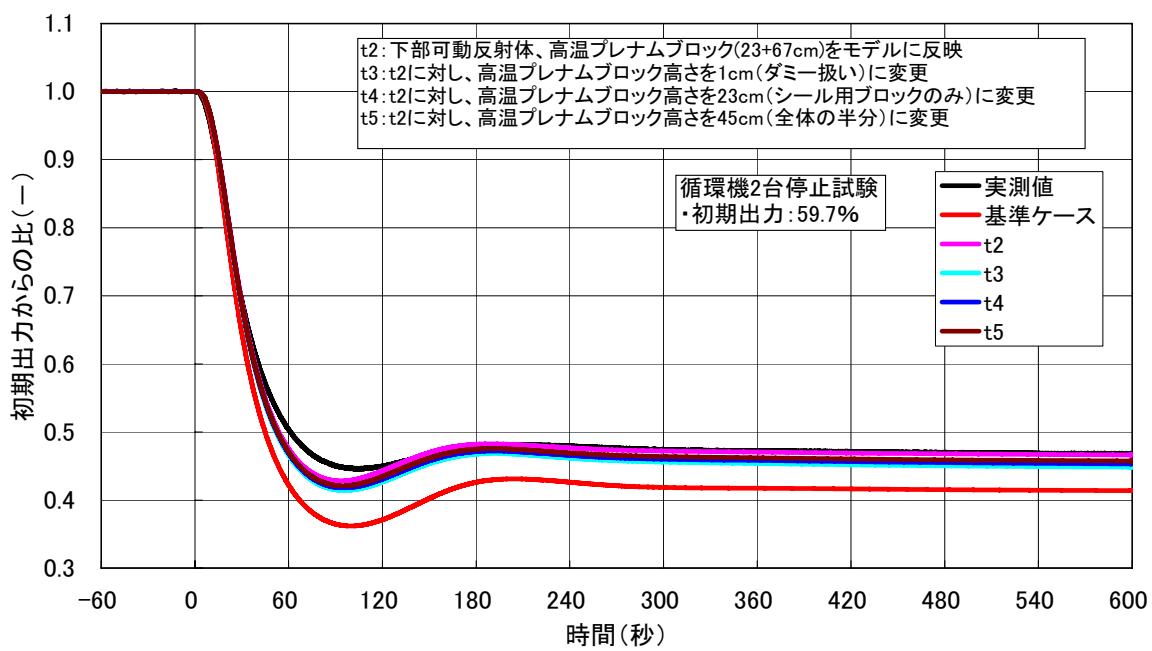
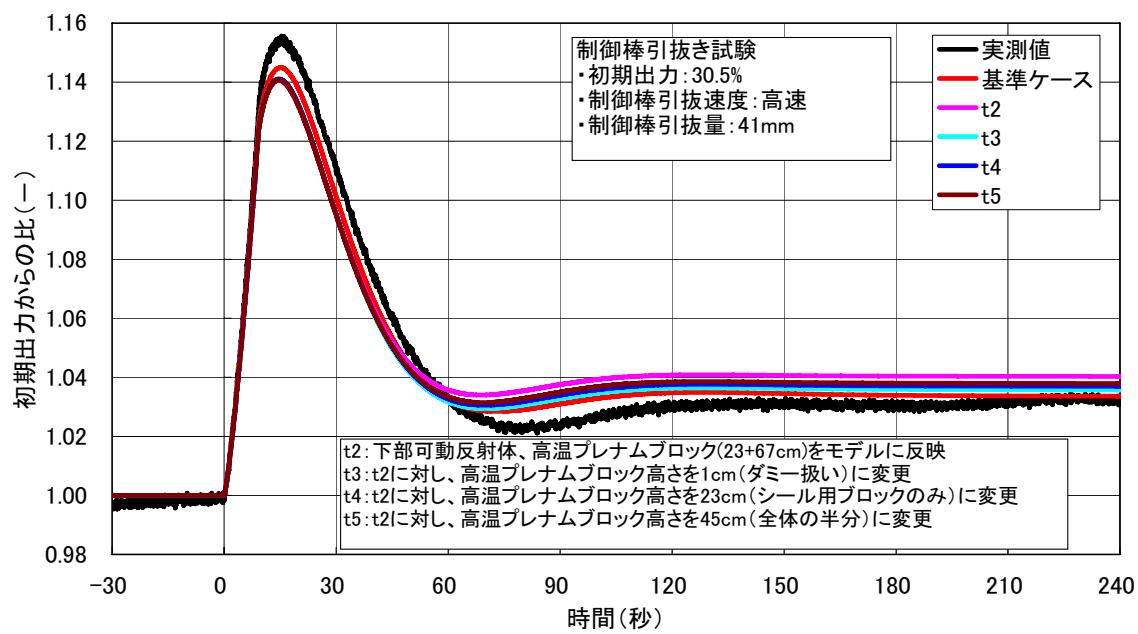
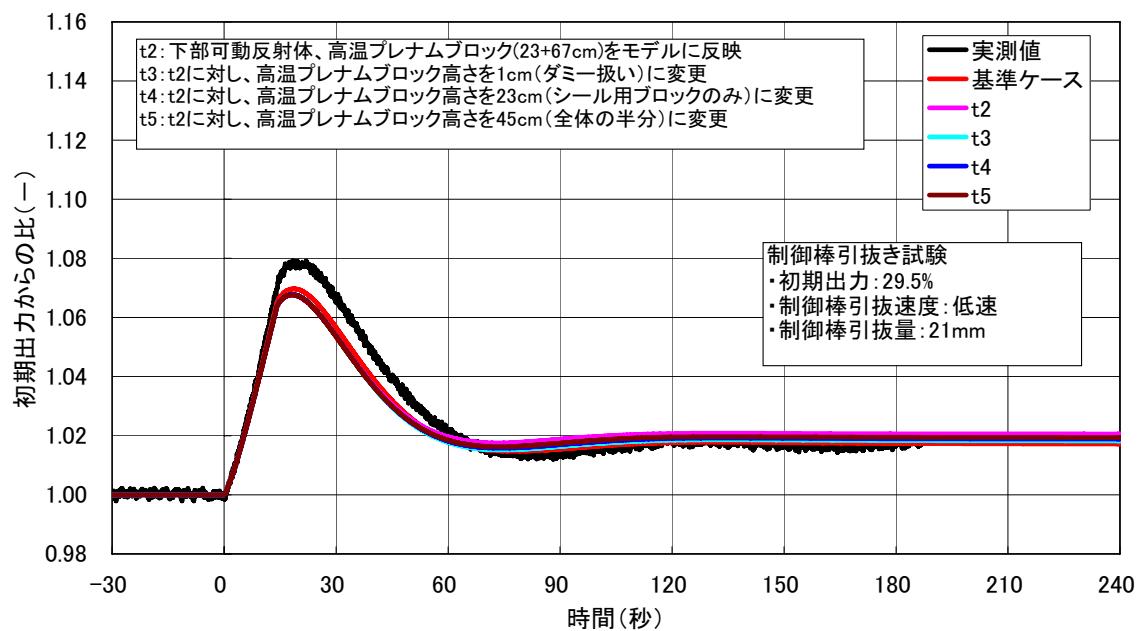
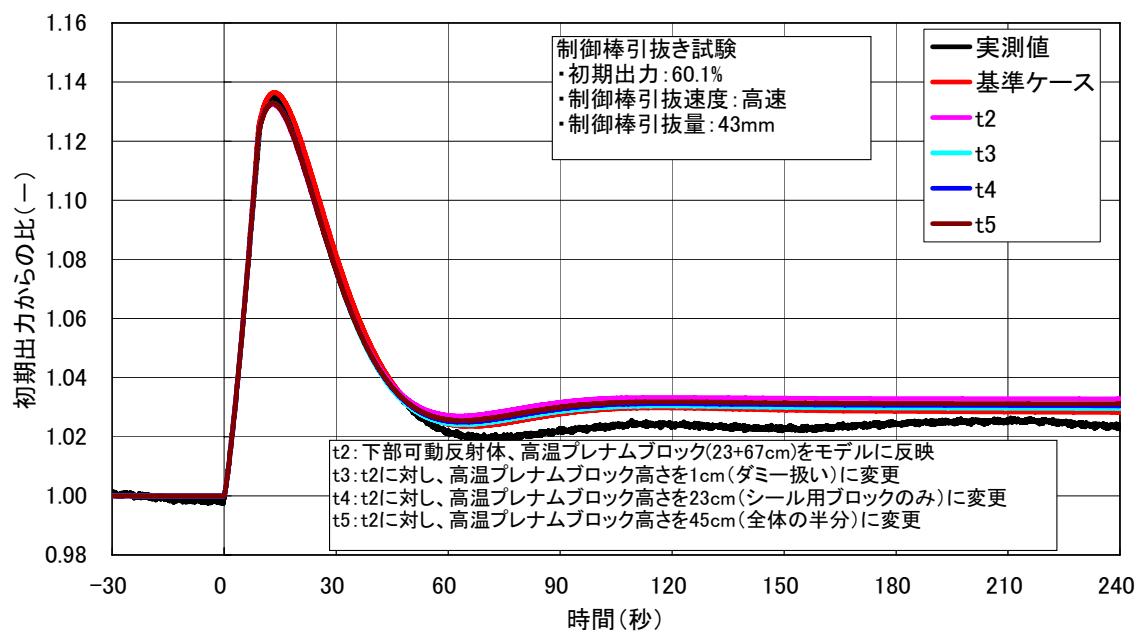
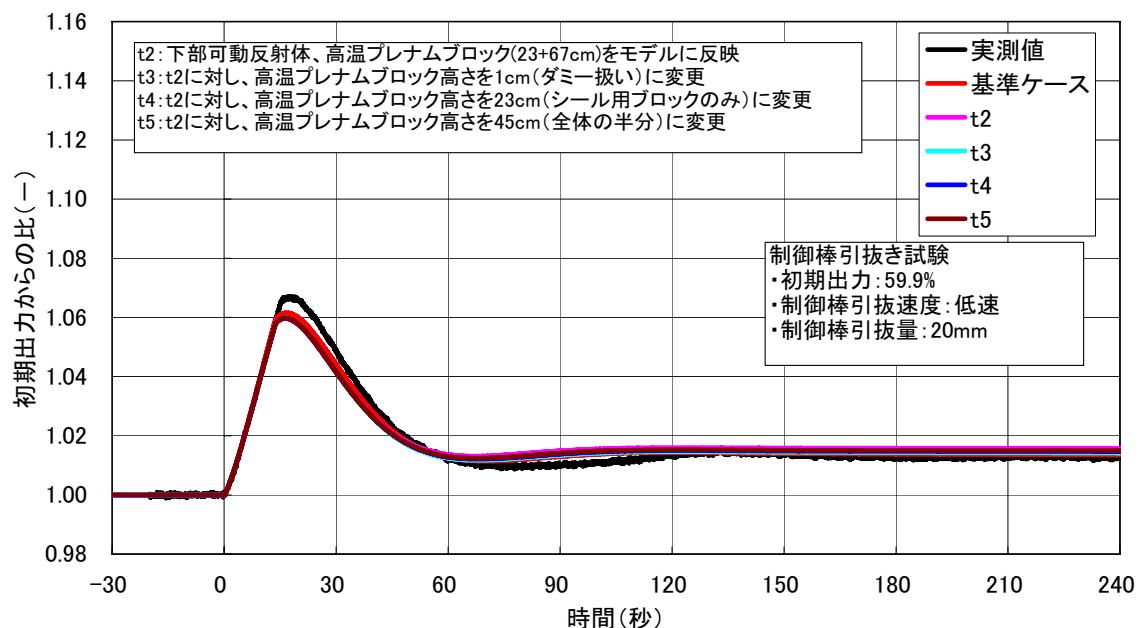


図 3-27(4) 最適化ケースの解析結果 (18MW からの循環機 2 台停止試験)

This is a blank page.



This is a blank page.



This is a blank page.

4. 結論

本研究では、TAC-NC コードと BLOOST-J2 コードを組み合わせた TAC/BLOOST コードについて、HTTR で実施した定常状態の実測値を活用して解析モデルの改良を行い、さらに循環機停止試験の実測値を活用して動特性解析の検討を行った。これら一連の改良を実施することで循環機停止試験の再現解析では、実測値を 3%以内の精度で予測できるようになった。

本研究によって明らかになった解析モデルの改良ポイントおよび課題を以下に示す。

TAC に関して、

- ・ HTTR の燃料日数が少ないため、黒鉛構造物の熱伝導率として燃焼 0 日の値を用いる。
- ・ ブロック間のギャップ幅をノミナル値より小さくする。
- ・ RPV 上鏡および下鏡の温度を再現するため、冷却材を RPV 上鏡と下鏡に接触させるよう解析モデルを作成する。
- ・ RPV 上鏡と下鏡の境界条件は、従来どおり VCS 冷却水温度と同じ温度の水を流し、放熱ありの状態とする。ただし熱伝達率補正係数を調整する必要がある。

BLOOST に関して、

- ・ 冷却材流路の内外径（流路断面積）の変化を設定する。
- ・ 中性子照射量に比例した燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップを設定する。
- ・ 循環機停止試験後の冷却材圧力の変化を設定する。

現時点では以上の改良を行うことで、HTTR の実測値を精度良く表すことができた。しかしながら、以下の値については今後の課題である。

- ・ 燃料および構造物に対する燃焼効果
- ・ ブロック間のギャップ幅に対する燃焼効果
- ・ 冷却材流路断面積に対する燃焼効果
- ・ 燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップ幅に対する燃焼効果

以上より、燃焼初期の状態での TAC/BLOOST コードの検証を終了したが、今後は更に燃焼が進むため、解析モデルの改良を進めていく必要がある。

本研究により、原子炉の実測値に基づき検証した TAC/BLOOST コードは、将来の高温ガス炉(GTHTR300C)及び第 4 世代原子炉の候補の一つである VHTR の設計及び研究開発に活用できるものと思われる。

謝 辞

本報をまとめるにあたり、高温工学試験研究炉開発部 小森芳廣部長、中澤利雄次長及び伊与久達夫次長に深く感謝の意を表します。また、実測値の取得にあたり HTTR 運転管理課各位、HTTR 技術課各位、並びに、富士電機システムズ株式会社の中野正明氏及び高田英治氏からの協力を得たことを記し、ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1)高松邦吉, 他：“TAC/BLOOST コードの検証（受託研究）”, JAERI-Data/Code 2005-003 (2005).
- 2)國富一彦, 他：“高温工学試験研究炉の炉内 2 次元温度分布解析コード; TAC-NC とその検証”, JAERI-M 89-001 (1989).
- 3)中川繁明, 他：“高温ガス炉の炉心動特性解析コード; BLOOST-J2”, JAERI-M 89-013 (1989).
- 4)椎名保顕, 他：“高温工学試験研究炉(HTTR)の安全解析に用いる解析コードとその検証”, JAERI-M 90-034 (1989).
- 5)竹田武司, 他：“高温ガス炉用プラント動特性解析コード'ACCORD'の開発”, JAERI-Data/Code 96-032 (1996).
- 6)高松邦吉, 他：“HTTR における制御棒引抜き試験解析および炉心定数 原子炉出力 30～60%”, 日本原子力学会和文論文誌 Vol.5, No.2, p. 81-95 (2006).
- 7)國富一彦, 他：“高温工学試験研究炉の減圧事故時の温度分布解析”, JAERI-M 91-163 (1991).
- 8)高松邦吉, 他：“HTTR の安全性実証試験結果による TAC-NC コードの検証”, 日本原子力学誌 Vol.3, No.4, p. 369-380 (2004).
- 9)T.B. Fowler, et al. : “Nuclear Reactor Core Analysis Code : CITATION”, ORNL-TM-2496, Rev.2, (1971).
- 10)丸山創, 他：“炉内流動解析コード FLOWNET の検証”, JAERI-M 88-138 (1988).

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル毎秒	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率、電気量	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	C/V
静電容量	フアード	F	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジemens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	K
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	$lm \cdot m^{-2}$
吸収線量、質量エネルギー一分率	グレイ	Gy	lm/m^2
線量当量、周辺線量当量	カーマ		$m^2 \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム		
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每スチラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每スチラジアン	W/(m ² ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	°=(π/180) rad
分	'	'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1 dam^2=10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイニン	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m/s$
ガウス	G	$1 G \triangleq 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe \triangleq (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx \triangleq 10^{-8} Wb$
スチルブ	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	X unit	$1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 γ=1 nT=10^{-9} T$
ジヤンスキ	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
カリヨーン	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロ	μ	$1 μ = 1 μm = 10^{-6} m$

