

拡散計算コードによるHTTRの
炉心温度係数算出手法の改良
－SRACを用いた温度係数の算出－

Improvement of Calculation Method for Temperature Coefficient of HTTR
by Neutronics Calculation Code Based on Diffusion Theory
- Analysis for Temperature Coefficient by SRAC Code System -

後藤 実 高松 邦吉

Minoru GOTO and Kuniyoshi TAKAMATSU

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 & Safety Demonstration Group
Nuclear Science and Engineering Directorate

March 2007

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

拡散計算コードによる HTTR の炉心温度係数算出手法の改良
－SRAC を用いた温度係数の算出－

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
後藤 実、高松 邦吉

(2007 年 3 月 27 日受理)

HTTR の動特性計算に必要な炉心の温度係数は、拡散計算コードによる炉心計算を行い、その結果から算出した温度係数を、モンテカルロ計算コード MVP による炉心計算結果で補正する手法が用いられてきた。この温度係数の算出手法には改善の余地があると考え、モンテカルロ計算コードの補正を必要としない、拡散計算コードのみによる温度係数の算出手法について検討した。具体的には、格子計算で得られる中性子スペクトルに着目し、温度係数の算出にこれまで用いられてきた格子モデルを改良した。

改良した格子モデルを用いた格子計算を行い群定数を作成し、それを用いた拡散計算コードによる HTTR の炉心計算を行った。これらの格子計算および炉心計算は、SRAC コードシステムを用いて行った。炉心計算の結果を用いて炉心の温度係数を算出し、それを HTTR の動特性計算に適用した。その結果、動特性計算の結果は、実験結果に対して良い一致を得ており、拡散計算コードにより妥当な炉心の温度係数を、モンテカルロ計算コードによる補正を行うことなく算出することができた。

Improvement of Calculation Method for Temperature Coefficient of HTTR by Neutronics
Calculation Code Based on Diffusion Theory
- Analysis for Temperature Coefficient by SRAC Code System -

Minoru GOTO and Kuniyoshi TAKAMATSU

Nuclear Applied Heat Technology Division
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 27, 2007)

The HTTR temperature coefficients required for the core dynamics calculations had been calculated from the HTTR core calculation results by the diffusion code with which the corrections had been performed using the core calculation results by the Monte-Carlo code MVP. This calculation method for the temperature coefficients was considered to have some issues to be improved. Then, the calculation method was improved to obtain the temperature coefficients in which the corrections by the Monte-Carlo code were not required. Specifically, from the point of view of neutron spectrum calculated by lattice calculations, the lattice model was revised which had been used for the calculations of the temperature coefficients

The HTTR core calculations were performed by the diffusion code with the group constants which were generated by the lattice calculations with the improved lattice model. The core calculations and the lattice calculations were performed by the SRAC code system. The HTTR core dynamics calculation was performed with the temperature coefficient obtained from the core calculation results. In consequence, the core dynamics calculation result showed good agreement with the experimental data and the valid temperature coefficient could be calculated only by the diffusion code without the corrections by Monte-Carlo code.

Keywords : HTTR, Temperature Coefficient, Neutron Spectrum, Lattice, SRAC, MVP, Diffusion, Monte-Carlo

目 次

1. はじめに	1
2. HTTR の概要	3
2. 1 HTTR の主要諸元	3
2. 2 炉心構造	3
2. 3 燃料	3
2. 4 反応度調整材	4
2. 5 制御棒	4
3. 温度係数算出手法の改良	12
3. 1 温度係数の算出手法	12
3. 1. 1 従来の手法	12
3. 1. 2 改良した手法	12
3. 2 改良した手法の妥当性の検証	12
3. 2. 1 検証方法	12
3. 2. 2 計算条件	13
3. 2. 3 結果	14
4. 温度係数の算出と動特性計算	20
4. 1 温度係数の算出	20
4. 1. 1 格子計算	20
4. 1. 2 炉心計算	21
4. 2 動特性計算	21
5. まとめ	27
謝辞	27
参考文献	28

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of HTTR	3
2.1 Main characteristics	3
2.2 Core structure	3
2.3 Fuel	3
2.4 Burnable poison	4
2.5 Control rod	4
3. Improvement of calculation method for temperature coefficient.....	12
3.1 Calculation method for temperature coefficient	12
3.1.1 Conventional method	12
3.1.2 Improved method	12
3.2 Evaluation for validity of improved method	12
3.2.1 Evaluation method	12
3.2.2 Calculation method	13
3.2.3 Results	14
4. Calculation of temperature coefficient and core dynamics	20
4.1 Calculation of temperature coefficient	20
4.1.1 Lattice calculation	20
4.1.2 Core calculation	21
4.2 Core dynamics calculation	21
5. Conclusions	27
Acknowledgement	27
References	28

1. はじめに

日本原子力研究開発機構では、高い固有の安全性と経済性を有する実用高温ガス炉の開発を目指して、超高温ガス炉（VHTR）システムを対象とした設計・評価解析手法の開発と検証に関する研究を、高温工学試験研究炉（High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR）⁽¹⁾を用いて行っている。その中で、反応度投入等の異常・事故発生時における、VHTR 炉心の過渡出力を解析するために必要な、原子炉動特性の評価解析手法の高度化および検証が、HTTR で実施されている安全性実証試験⁽²⁾の結果を用い行われている。原子炉動特性の評価解析手法の高度化、すなわち動特性計算の高度化により、異常・事故発生時における VHTR 炉心の過渡出力計算の精度向上が達成され、VHTR システムの設計を行う上で適切な安全裕度を考慮した、経済的にも優れた VHTR システムの設計が可能となる。動特性計算を行うには、炉心の温度係数が入力データとして必要であり、その温度係数は核計算コードによる炉心計算の結果から算出される。したがって、動特性計算の高度化のためには、炉心の温度係数を核計算コードにより精度良く算出することが重要である。

高温ガス炉の固有の安全性を定量的に実証するための安全性実証試験が HTTR を用いて行われている⁽²⁾。具体的には、反応度投入や炉心除熱量の減少等の異常・事故に分類される事象を、実機の高温ガス炉である HTTR において試験として模擬し、高温ガス炉の固有の安全性を実証する試験が行われている。その中で、反応度投入事象を模擬した制御棒引抜き試験が行われ、原子炉の過渡出力について、試験結果と、HTTR の設計に用いられた計算手法による動特性計算結果の比較が行われた。この動特性計算では、炉心全体で 1 つの温度係数を用いる手法が採られた。試験結果と計算結果の間に大きな矛盾はないものの、計算結果は試験結果を大きめに評価し、HTTR の設計に用いた動特性計算手法に改善の余地があることが明らかとなった。両者の差異の原因として、炉心全体で 1 つの温度係数を用いる手法では、HTTR 炉心の温度差が大きいことによる（30MW 運転時は、原子炉入口冷却材温度：約 400°C、原子炉出口冷却材温度：約 950°C）炉心の温度係数の空間依存性を、モデル化できていないことが挙げられ、この問題を解決するために、動特性計算に、炉心を多領域に分けた温度係数を用いる手法（領域別温度係数）が提案された⁽³⁾。この手法を採用した HTTR の動特性計算が、HTTR 炉心を径方向に 4 分割、軸方向に 5 分割の計 20 の領域別温度係数を用いて行われた^(4,5)。この動特性計算で用いられた炉心の温度係数には、拡散計算コードによる HTTR の炉心計算結果から算出した炉心の温度係数を、モンテカルロ計算コードによる HTTR の炉心計算結果で補正した値が用いられた。拡散計算コードによる炉心計算に必要な群定数の作成には、燃料棒格子モデル（1本の燃料棒とそれを囲む減速材を格子単位とし、燃料ブロックにおいて隣接する燃料棒間隔を格子間隔とするモデル）が用いられた。その結果、動特性計算の結果は試験結果に対して良い一致を得た。

上記の温度係数の計算手法は、モンテカルロ計算コードを用いた補正を必要とすることから、計算手法に改善の余地があると考えられた。そこで、拡散計算コードによる HTTR の炉心計算のみで温度係数を算出し、モンテカルロ計算コードを用いた補正を不要とする計算手法について検

討した。炉心の温度係数の計算手法を検討する中で、燃料棒格子モデルを用いた格子計算で得られる中性子スペクトルが、HTTR 炉心の中性子スペクトルの参照解とした MVP による炉心計算結果と大きく異なることに着目した。本来、群定数の作成には、炉心の中性子スペクトルが反映されるべきであり、格子計算で得られる中性子スペクトルと炉心の中性子スペクトルは、大きく異なるべきではない。また、これまでに、群定数の作成に燃料棒格子モデルを用いた拡散計算コードによる HTTR の過剰反応度に関する検討が行われ、その検討の中で、中性子スペクトルの観点から、燃料棒格子モデルには改良の余地があることが指摘されている⁽⁶⁾。そこで、格子計算で得られる中性子スペクトルと炉心の中性子スペクトルの違いが、拡散計算コードを用いて算出される炉心の温度係数の精度に影響を及ぼす可能性があると考え、格子モデルの違いに起因する中性子スペクトルの違いを調べ、計算手法の検討を進めた。

本報では、格子計算で得られる中性子スペクトルに着目し、拡散計算コードによる HTTR の炉心計算結果から、従来必要とされたモンテカルロ計算コードを用いた補正を行うことなく HTTR の動特性計算に用いる炉心の温度係数を算出する手法の検討結果について報告する。

2. HTTR の概要

2. 1 HTTR の主要諸元

高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR) の主要諸元を表 2-1 に示す。HTTR は、高温ガス炉の技術基盤の確立を目的として、日本原子力研究開発機構に設置された、原子炉熱出力 30MW、ヘリウムガス冷却-黒鉛減速型の我が国初の高温ガス炉である⁽¹⁾。原子炉から取り出して利用できるヘリウムガス温度、即ち原子炉出口冷却材温度は、世界で最も高い 950°C に達する。

2. 2 炉心構造

HTTR の原子炉圧力容器縦断面図を図 2-1 に示す。HTTR の炉心は、鋼製の圧力容器の中に収められている。冷却材は、炉心下部に設けられている二重配管の環状の外側流路から圧力容器内に入る。圧力容器に流入した冷却材は、まず炉心下部の鋼構造物を冷却する。その後、炉心側部に流れ、さらに固定反射体と圧力容器の間の流路を上方へ流れて上部プレナムに至り、上部プレナムで反転し、炉心に流入する。炉心で加熱された冷却材は、高温プレナムで一つにまとめられ、二重配管の内管を通して圧力容器外部へ流れる。

HTTR の炉心の水平方向断面図および縦断面図を、図 2-2 および図 2-3 にそれぞれ示す。HTTR の炉心は、4 種類の黒鉛製ブロック (燃料ブロック (燃料体)、制御棒案内ブロック、照射ブロックおよび反射体ブロック) を柱状に積み上げて構成され (カラムと呼ぶ)、その周囲は黒鉛製の固定反射体で囲まれている。各ブロックの外寸法は共通で、面間距離 360mm、高さ 580mm の六角柱状の形状である。

2. 3 燃料

HTTR の燃料ブロックの構造を図 2-4 に示す。HTTR の炉心には、150 体の燃料ブロック (30 体の燃料カラム) が装荷されている。燃料ブロックは、31 または 33 箇所に施された冷却材流路孔に燃料棒を挿入した構造である。燃料棒は黒鉛スリーブに 14 個の燃料コンパクトを充填した構造で、燃料コンパクトには約 13000 個の被覆燃料粒子 (直径約 0.92mm) が充填されている (図 2-4 参照)。被覆燃料粒子は、直径約 0.60mm の燃料核を、低密度熱分解炭素、高密度熱分解炭素、および炭化ケイ素の薄い層で 4 層に被覆した構造であり、これにより燃料粒子自体が、核分裂生成物の放出を防ぐ機能を有している。冷却材であるヘリウムガスは、燃料棒と黒鉛ブロックの間のギャップを下向きに流れて燃料の冷却を行う。

一般的な発電用原子炉では、原子炉入口冷却材温度と原子炉出口冷却材温度の差は数十°C であるのに対して、HTTR の場合は約 550°C にも達する (原子炉入口: 約 400°C、原子炉出口: 約 950°C)。また、事故時の被覆燃料粒子の破損による核分裂生成物の放出を防ぐ観点から、通常運転時の燃料最高温度は 1495°C 以下に制限されている。このような条件下で、熱出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 950°C を達成するために、HTTR では、炉心の相対的な出力密度分布を冷却材入口側 (炉心上部) で高く、出口側 (炉心下部) で低く保つようになっている。この出力分布密度の調整は、

図2-5に示すように、燃料ブロック単位で濃縮度を変える(12種類:3.4-9.9wt%、平均濃縮度:5.9wt%) ことを行っている。

2. 4 反応度調整材

制御棒の炉心への挿入量が燃焼により変化すると、出力分布の形が変化し、燃料温度が制限値を超える可能性がある。そのため、燃焼期間を通じて制御棒の炉心への挿入量をほぼ一定に維持し、ほぼ同じ出力分布を維持することが必要である。これを実現するために、HTTRでは、炭化ホウ素を中性子吸収材とする反応度調整材(Burnable Poison:BP)を用い、燃焼に伴う燃料の反応度変化の補償を行っている。BPは燃料ブロックのダウエルピンの下に設けられた装荷孔に挿入されており(図2-4参照)、1燃料体に2本のBP棒が挿入されている。HTTRではBP濃度2.0%と2.5%の2種類のBPを用いている。

2. 5 制御棒

HTTRの制御棒の概略図を図2-6に示す。HTTRの原子炉反応度制御系は、図2-2に示す燃料領域および可動反射体領域に挿入される計16対の制御棒(炭化ホウ素を中性子吸収材とする32本の制御棒)で構成される。7対の制御棒が燃料領域に挿入され、9対の制御棒が可動反射体領域に挿入される。通常運転期間中は、炉心の水平方向の出力分布を乱さないために、最外周の3対の制御棒を除く全ての制御棒は同じ高さに揃えられている。

表 2-1 HTTR の主要諸元

項目	諸元
熱出力	30MW
冷却材	He ガス
原子炉出口冷却材温度	850°C (定格運転時) 950°C (高温試験運転時)
原子炉入口冷却材温度	395°C
一次冷却材圧力	4MPa
炉心構造材	黒鉛
出力密度	2.5MW/m ³
燃料	低濃縮二酸化ウラン (3.4-9.9wt%)
燃料体形式	ブロック型
原子炉圧力容器	鋼製 (2 ¹ / ₄ Cr-Mo 鋼)

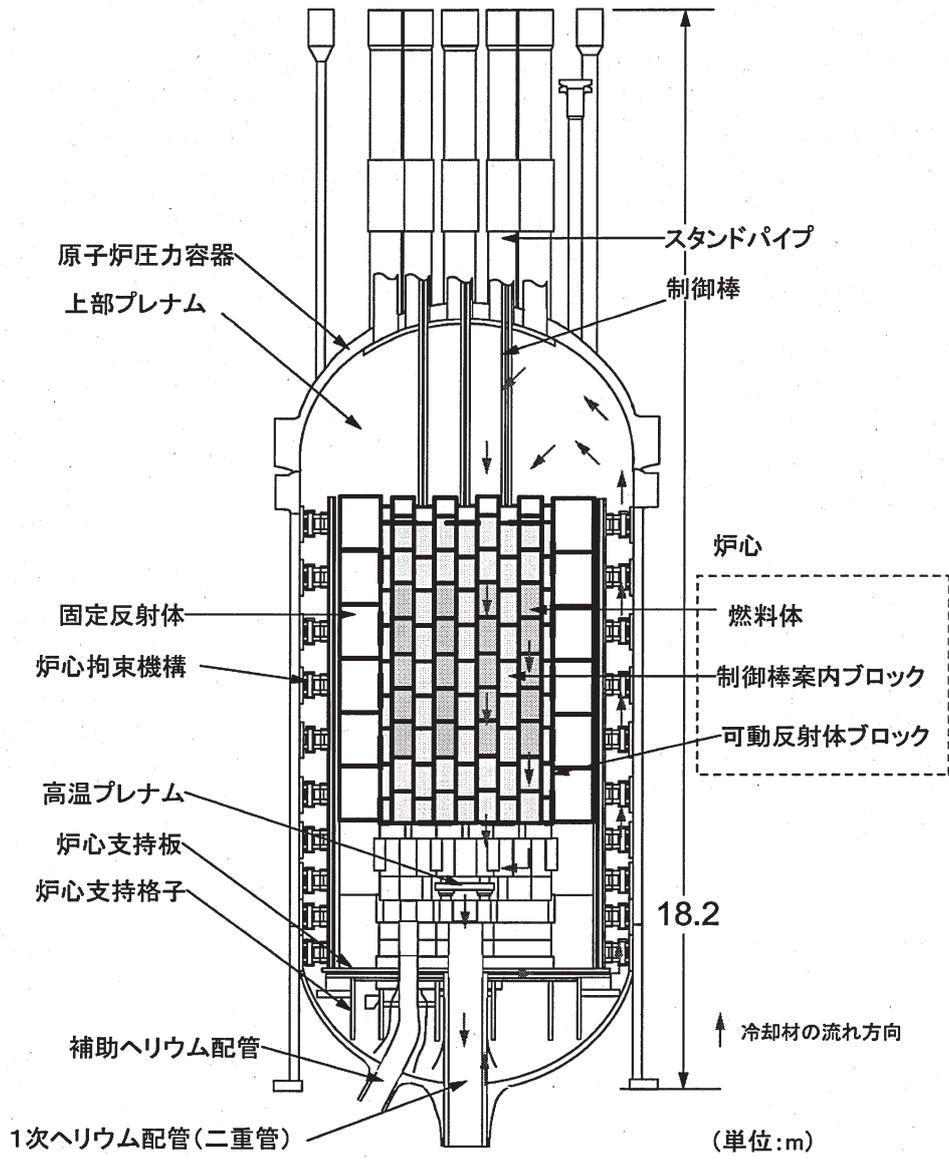


図2-1 HTTRの原子炉圧力容器縦断面図

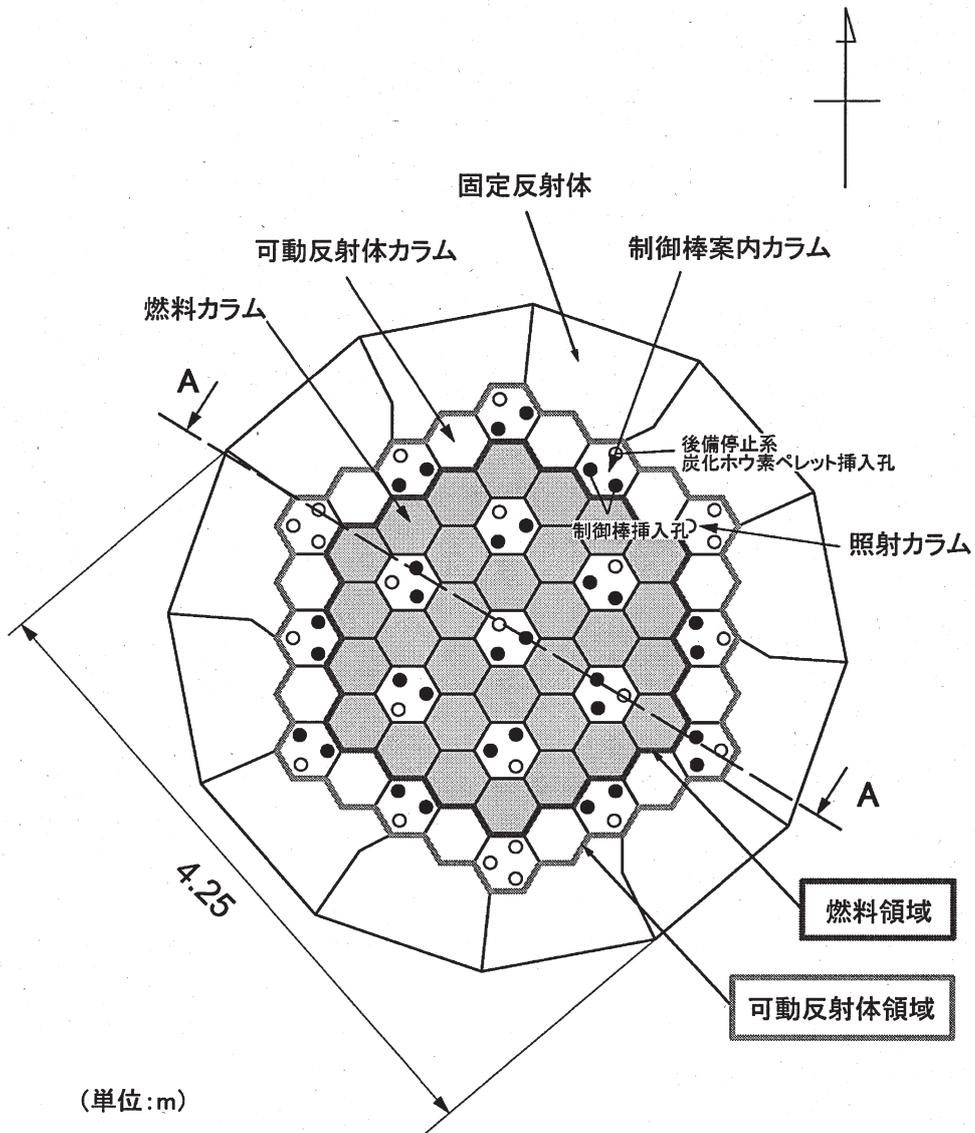


図2-2 HTTR 炉心の水平方向断面図

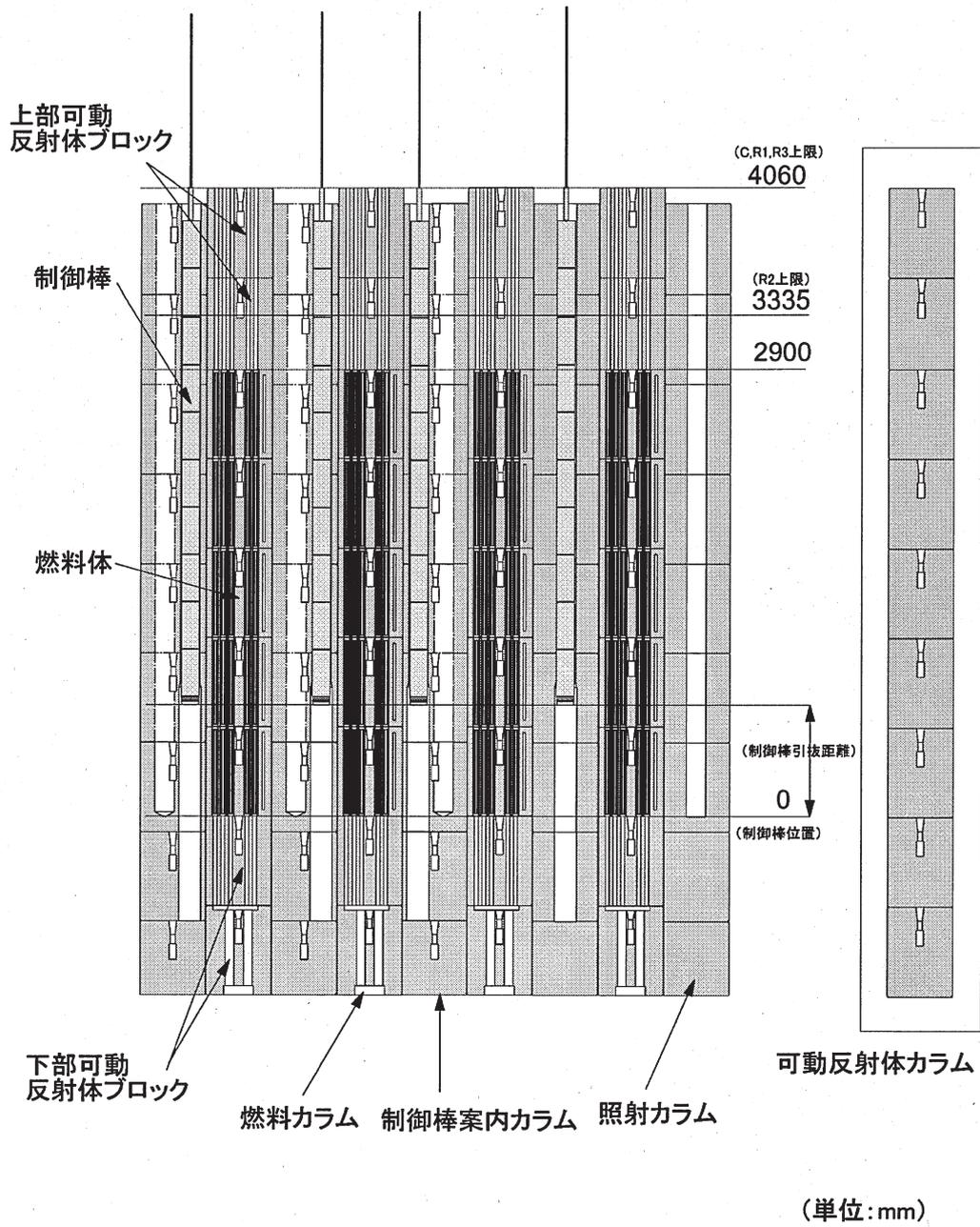


図2-3 HTTR 炉心の縦断面図 (図2-2のA-A断面図)

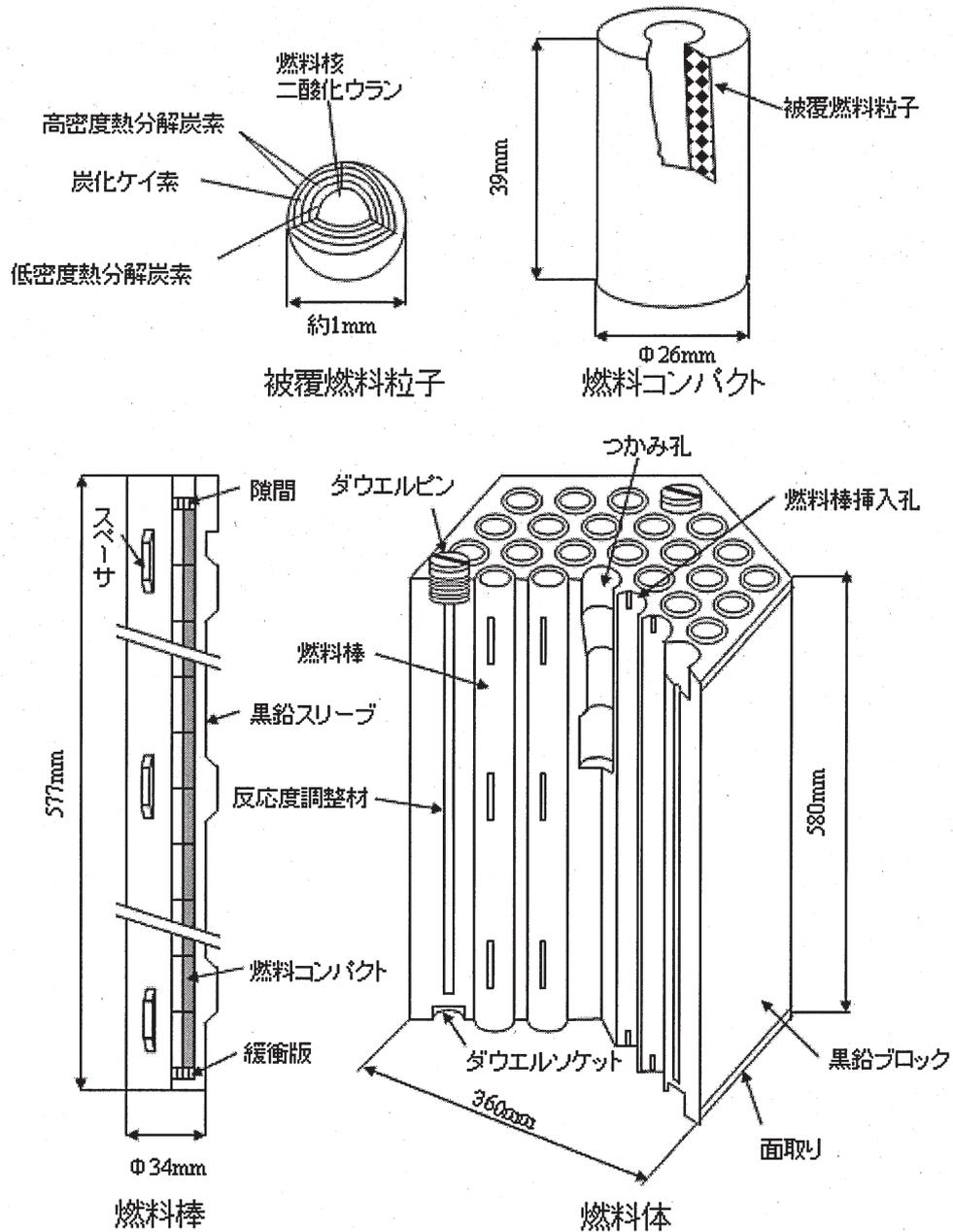
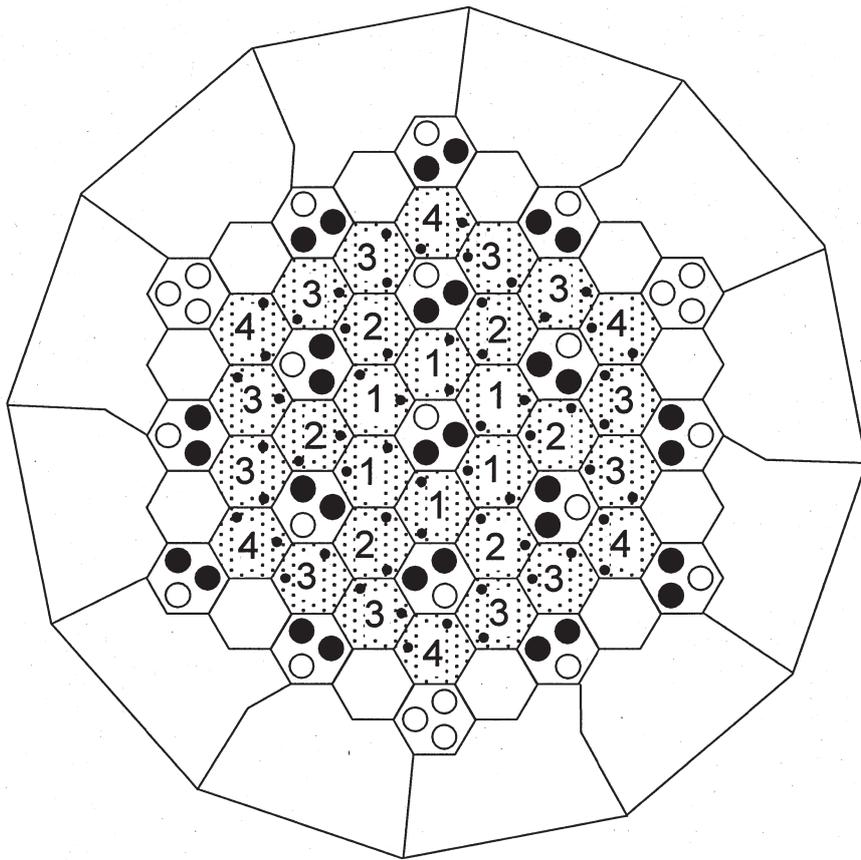


図 2-4 燃料体の構造



N: 燃料体領域番号
 ●: 反応度調整材(BP)

上からの段数	燃料領域番号				BP 濃度
	1	2	3	4	
1	6.7	7.9	9.4	9.9	2.0
2	5.2	6.3	7.2	7.9	2.5
3	4.3	5.2	5.9	6.3	2.5
4	3.4	3.9	4.3	4.8	2.0
5	3.4	3.9	4.3	4.8	2.0

(単位: wt%)

図 2-5 炉心内の燃料濃縮度と BP 濃度の配分

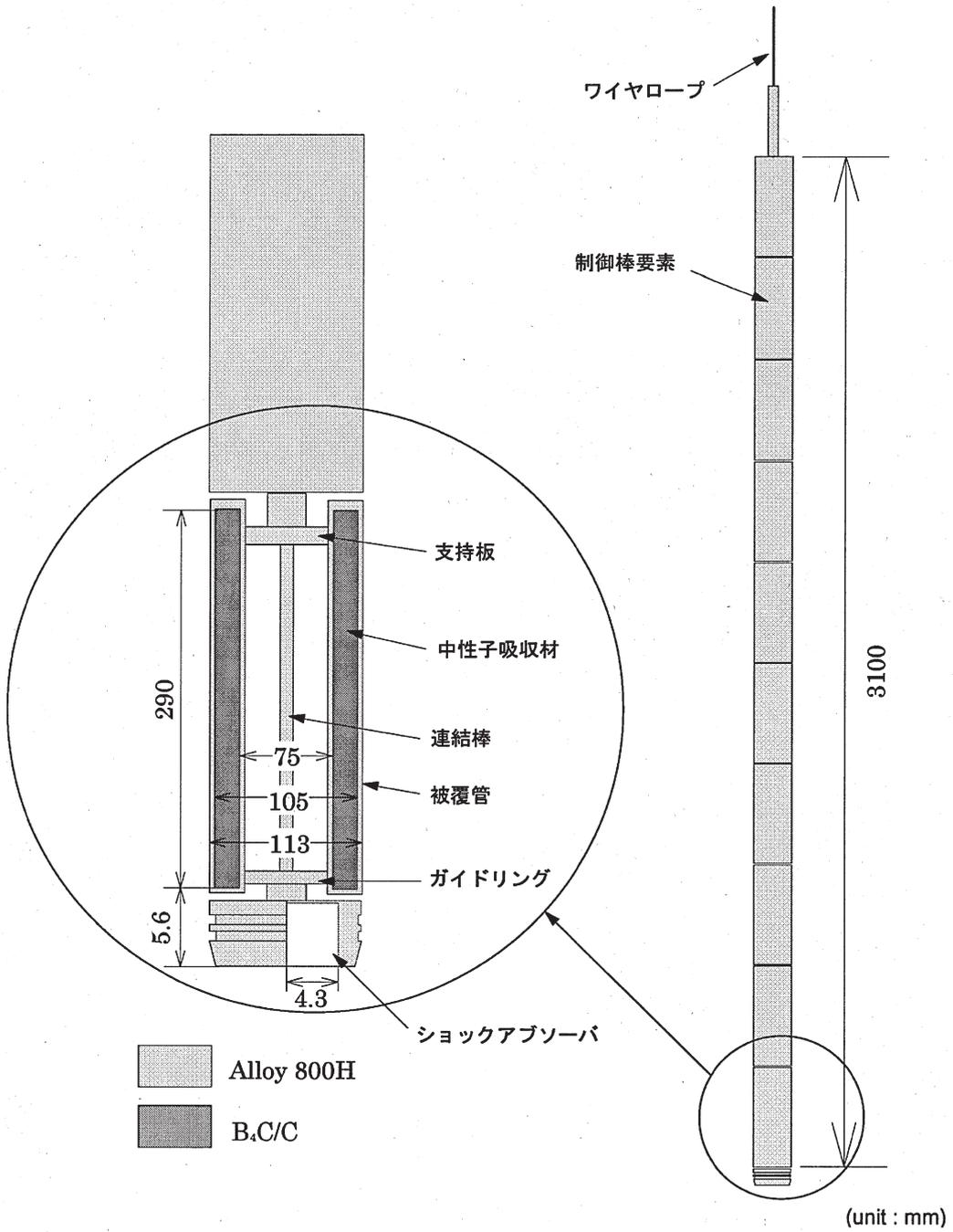


図2-6 制御棒の概略図

3. 温度係数算出手法の改良

3. 1 温度係数の算出手法

3. 1. 1 従来の手法

HTTR の動特性計算に用いる炉心の温度係数の算出には、従来、燃料棒格子モデルを用いた格子計算により作成した群定数が用いられてきた^(4, 5)。具体的には、燃料棒格子モデルを用いた格子計算により燃料ブロックの群定数を作成し、その群定数を用いた拡散計算コードによる HTTR の炉心計算結果から炉心の温度係数を算出していた。HTTR 燃料ブロックの群定数を作成するための格子計算に用いられた、燃料棒格子モデルを図 3-1 に示す。燃料棒格子モデルは、1本の燃料棒（燃料コンパクト、黒鉛スリーブおよびヘリウム）と減速材で構成される体系を格子単位とするモデルであり、その外径は HTTR 燃料ブロックの隣接する燃料棒間隔に基づく。

HTTR の臨界近接試験を対象とした、拡散計算コードを用いた炉心計算において、燃料棒格子モデルが用いられた。その中で、HTTR の燃料ブロックの構造上、実際の燃料ブロックの V_m/V_f （減速材対燃料体積比）は、燃料棒格子モデルの V_m/V_f に比べて大きいため、燃料ブロック外側領域の中性子スペクトルは、燃料棒格子モデルを用いた格子計算で得られる中性子スペクトルに比べて定性的に軟らかいと考えられることから、燃料棒格子モデルには改良の余地があると指摘されていた⁽⁶⁾。

3. 1. 2 改良した手法

HTTR 燃料ブロックの群定数を作成するための、燃料ブロック格子モデルを図 3-2 に示す。燃料ブロック格子モデルは、燃料ブロックを格子単位とするモデルである。燃料ブロック格子モデルは、燃料ブロックの内側と外側での V_m/V_f の違いを含めてモデル化している。したがって、燃料ブロック格子モデルを格子計算に用いることで、従来用いてきた燃料棒格子モデルに比べ、炉心の中性子スペクトルをより正確に群定数の作成に反映することが期待できる。また、その群定数を拡散計算コードによる HTTR の炉心計算に用いることで、精度良く温度係数を計算することが期待できる。そこで、本報では、燃料ブロック格子モデルを用いた格子計算により群定数を作成し、その群定数を用いた拡散計算コードによる炉心計算を行い、得られた炉心計算結果から温度係数を算出することとした。

3. 2 改良した手法の妥当性の検証

3. 2. 1 検証方法

群定数の作成には、炉心の中性子スペクトルが必要であるが、未知であるため、炉心の中性子スペクトルの近似値を用いて群定数を作成する。この中性子スペクトルの近似値は、格子計算により算出される。したがって、格子計算で得られる中性子スペクトルは、炉心の中性子スペクトルを反映する必要がある。前述のように、群定数を作成する格子計算に、従来の燃料棒格子モデルに代わり、燃料ブロック格子モデルを用いることで、格子計算で得られる中性子スペクトルが改善され、拡散計算コードにより精度良く温度係数が算出されることが期待できる。この中性子

スペクトルの改善を確認することで、格子計算に燃料ブロック格子モデルを用いる改良した手法の妥当性を検証することができる。そこで、燃料ブロック格子モデルおよび燃料棒格子モデルを用いた格子計算で得られる中性子スペクトルと、炉心の中性子スペクトルの比較を行った。実際の炉心の中性子スペクトルの測定は困難なので、参照解を用いて比較を行った。この炉心の中性子スペクトルの参照解は、モンテカルロ計算コードによる炉心計算結果を用いた。

HTTR の燃料濃縮度は、燃料ブロック単位で異なるため、 V_m/V_f は燃料ブロック単位で変わり、それに伴い中性子スペクトルも変わる。そこで、中性子スペクトルの参照解と格子計算の比較は、燃料ブロック単位で行った。HTTR の燃料領域には燃料ブロック 150 体が含まれるが、燃料濃縮度、燃料ブロックの炉心内の配置およびその対称性を考慮すると、炉心径方向について 4 領域、軸方向について 5 領域、計 20 領域に分けて、核的な特性を検討することができる。したがって、中性子スペクトルの比較についても、全 150 領域について行う必要はなく、この 20 領域について行えばよい。さらに、中性子スペクトルの参照解と格子計算の差異を定量的に確認するには、この 20 領域の中で、中性子スペクトルの差異が最も小さい領域と、最も大きい領域について比較を行うことで、その他の領域についての比較結果は、十分予測できると考えた。そこで、比較対象とする燃料領域を決めるために、炉心の中性子スペクトルについて、定性的な検討を行った。

格子計算に用いる燃料ブロック格子モデルは、燃料ブロックが無限に配列するモデルである。一方、実際の HTTR 炉心の燃料ブロックは反射体ブロック等の燃料を含まない黒鉛ブロックと必ず隣接する。したがって、燃料ブロック格子モデルの V_m/V_f は、実際の HTTR 炉心の V_m/V_f より小さい。これにより、炉心の全ての燃料領域について、格子計算で得られる中性子スペクトルは、参照解の中性子スペクトルより硬いと考えられる。

燃料ブロック格子モデルと実際の炉心の間で V_m/V_f の差異が小さいと両者のスペクトルの差異は小さく、逆に V_m/V_f の差異が大きいと両者のスペクトルの差異は大きい。燃料ブロック格子モデルは無限に燃料ブロックが配列するモデルなので、燃料ブロック格子モデルの V_m/V_f との差異が最も小さいと考えられる実際の炉心の燃料領域は、その周りが最も多くの燃料ブロックで囲まれていると言える。これに相当する燃料領域は、燃料領域 1 の上から 3 段目の燃料ブロック（燃料ブロック F1-3、図 3-3 参照）である。一方、燃料ブロック格子モデルの V_m/V_f との差異が最も大きいと考えられる実際の燃料ブロックは、その周りに最も多くの燃料を含まないブロックに囲まれていると言える。これに相当する燃料ブロックは、燃料領域 4 の上から 1 段目または上から 5 段目（燃料ブロック F4-1 または F4-5、図 3-3 参照）である。

以上より、中性子スペクトルの参照解と格子計算結果の差異が最も小さい燃料領域は燃料ブロック F1-3 で、最も差異が大きいのは燃料ブロック F4-1 あるいは F4-5 であると考えられるので、中性子スペクトルの参照解と格子計算結果の比較は、これらの 3 つの燃料ブロックについて行った。ここで、燃料ブロック F4-1 および F4-5 については、どちらが中性子スペクトルの差異がより大きいのか、定性的な判断が難しいので、両者を比較の対象とした。

3. 2. 2 計算条件

これまでに行われた HTTR の動特性計算に必要な炉心の温度係数の算出は、拡散計算コードによる HTTR の炉心計算結果を用いて行われ、その炉心計算は、高温ガス炉核特性解析コードシス

テム⁷⁾を用いて行われた。高温ガス炉核特性解析コードシステムは、衝突確率法に基づく1次元格子燃焼計算コード DELIGHT、2次元 Sn 輸送計算コード TWOTRAN、および多次元拡散計算コード CITATION で構成される。この計算コードシステムを用いた HTTR の炉心計算では、群定数の作成は DELIGHT による格子計算で行われた。しかし、DELIGHT は、燃料ブロック格子モデルを取り扱うことができない。そこで、燃料ブロック格子モデルを用いる格子計算を行うために、汎用核計算コードシステム SRAC⁸⁾を用いた。SRAC は、衝突確率法に基づく格子燃焼計算コード SRAC/PIJ、2次元 Sn 輸送計算コード TWOTRAN、多次元拡散計算コード CITATION 等より構成される。

中性子スペクトルの参照解と格子計算結果を比較するために、燃料ブロック F1-3、F4-1 および F4-5 を対象とした、燃料ブロック格子モデルおよび燃料棒格子モデルを作成し、SRAC/PIJ で中性子エネルギー107群の格子計算を行い、中性子スペクトルを計算した。格子モデルの作成には、実際の燃料ブロックの形状および組成データを用いた。ただし、BP のモデル化については、本検討が中性子の減速効果についてであること、そして BP の中性子の減速効果への寄与は小さいと考えられることから、その必要はないと判断し、モデル化していない。作成した燃料ブロック格子モデルおよび燃料棒格子モデルを用い SRAC/PIJ による格子計算を行い、中性子スペクトルを計算した。格子計算は、格子体系の温度が 296K で均一として行った。被覆燃料粒子に起因する二重非均質問題の取り扱いは、SRAC の計算オプションを用いて行った。

HTTR 炉心の中性子スペクトルの参照解を得るために、MVP による HTTR の炉心計算を行い、各燃料ブロックの中性子スペクトルを計算した。計算に用いた炉心モデルの幾何形状は、燃料コンパクトまで詳細にモデル化した。炉心の温度は 296K で均一とした。被覆燃料粒子に起因する、炉心の二重非均質問題の扱いは、MVP に内蔵されている確率的形状モデル¹⁰⁾を用いて行った。BP のモデル化については、格子計算の場合と同じ理由により、モデル化していない。

3. 2. 3 結果

燃料ブロック F1-3 についての比較結果を、図 3-4 に示す。燃料ブロック F1-3 は、中性子スペクトルの参照解と格子計算結果の差異が最も小さいと考えられる領域である。HTTR は熱中性子炉なので、熱領域の中性子スペクトルの差異が炉心計算に与える影響が大きいと考えられる。そこで、中性子スペクトルの比較はマックスウェルのピークに着目して行った。燃料ブロック格子モデルを用いた格子計算結果は、参照解のマックスウェルピークを約 8%過小評価している。これは、燃料ブロック格子モデルでは、隣接するブロックの中性子の減速効果に対する寄与を考慮していないため、中性子スペクトルを参照解に比べ硬めに計算することによる。しかしながら、この差異は小さく、燃料ブロック格子モデルを用いた格子計算で得られる中性子スペクトルは、参照解に対して、全中性子エネルギー領域に渡り、概ね一致していると言える。一方、燃料棒格子モデルを用いた格子計算結果は、参照解のマックスウェルピークを約 29%過小評価したおり、両者の間には明らかな差異が認められる。したがって、燃料ブロック格子モデルを格子計算に用いることで、燃料棒格子モデルを用いる場合に比べ、中性子スペクトルが改善されると考えられる。

燃料ブロック F4-1 および F4-5 についての比較結果を図 3-5 および 3-6 にそれぞれ示す。

燃料ブロック F4-1 および F4-5 は、中性子スペクトルの参照解と格子計算の結果の差異が最も大きい領域と考えられる領域である。比較は、前述の F1-3 の場合と同様に、マックスウェルのピークに着目して行った。燃料ブロック F4-1 および F4-5 とともに、燃料ブロック格子モデルを用いる格子計算結果は、参照解のマックスウェルピークを、それぞれ約 30%および約 26%過小評価している。一方、燃料棒格子モデルを用いた格子計算結果は、燃料ブロック F4-1 および F4-5 の参照解のマックスウェルピークを、それぞれ約 54%および約 49%過小評価しており、その差異の大きさは、燃料ブロック格子モデルを用いた場合の約 2 倍程度大きい。したがって、燃料ブロック F4-1 および F4-5 においても、燃料ブロック格子モデルを格子計算に用いることで、燃料棒格子モデルを用いる場合に比べ、中性子スペクトルが改善されると考えられる。

以上より、燃料ブロック F3-1、F4-1 および F4-5 について、燃料ブロック格子モデルを格子計算に用いることで、従来の燃料棒格子モデルを用いる場合に比べ、中性子スペクトルの参照解と格子計算の結果の一致性が改善されることが定量的に確認できた。この結果から、これらの燃料ブロック以外についても、中性子スペクトルの参照解と燃料ブロック格子モデルを用いた格子計算結果の一致性は、燃料棒格子モデルを用いる場合に比べ改善されると考えられる。すなわち、燃料ブロック格子モデルを用いることで、従来の燃料棒格子モデルを用いる場合に比べ、全ての燃料領域において中性子スペクトルが改善され、群定数の作成に炉心の中性子スペクトルをより正確に反映することができると考えられる。これにより、拡散計算コードによる炉心計算結果から算出する温度係数を用いた、HTTR の動特性計算を精度良く計算し、従来必要とされていたモンテカルロ計算による補正を不要とすることが期待できる。

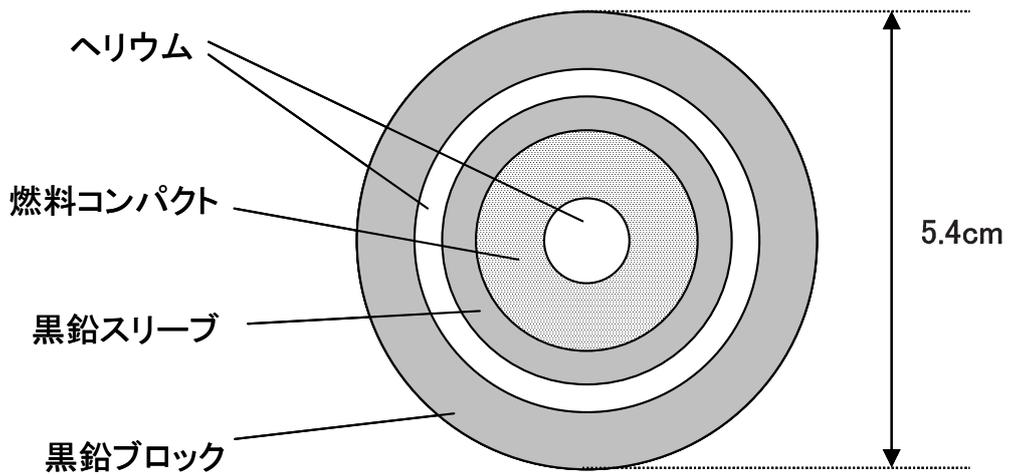


図3-1 燃料棒格子モデル

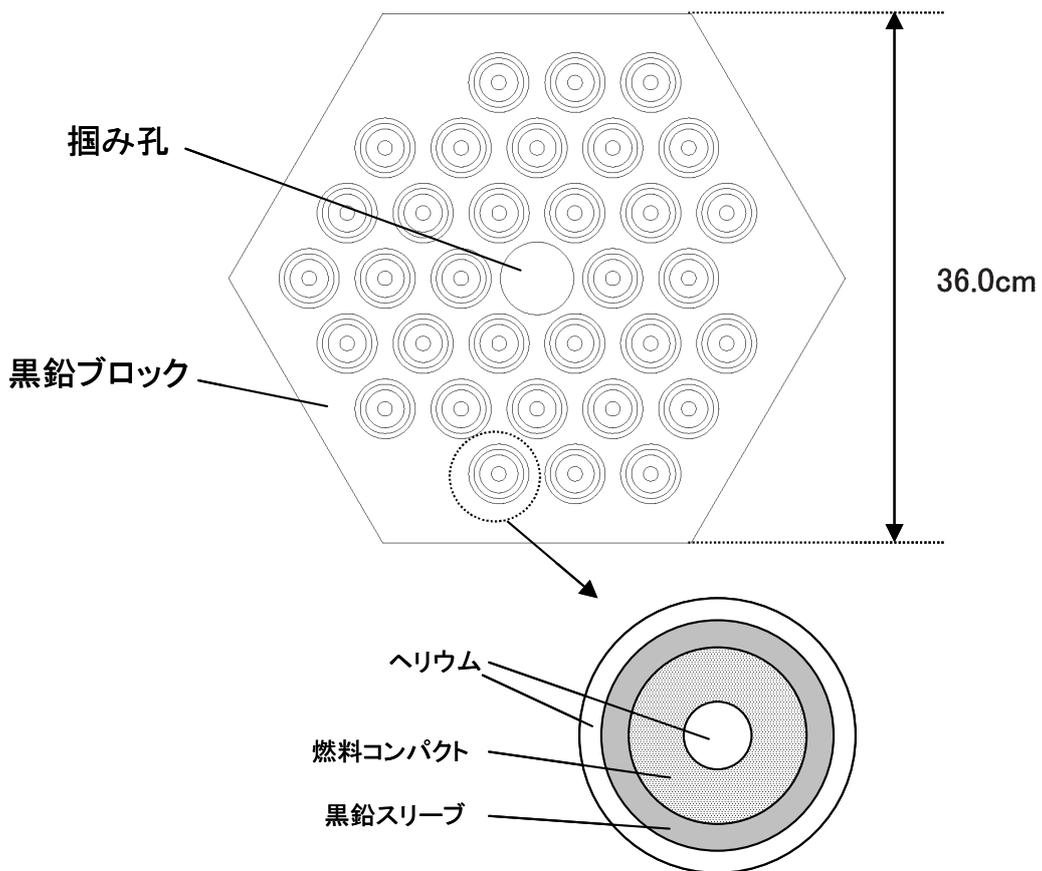


図3-2 燃料ブロック格子モデル (33ピン燃料)

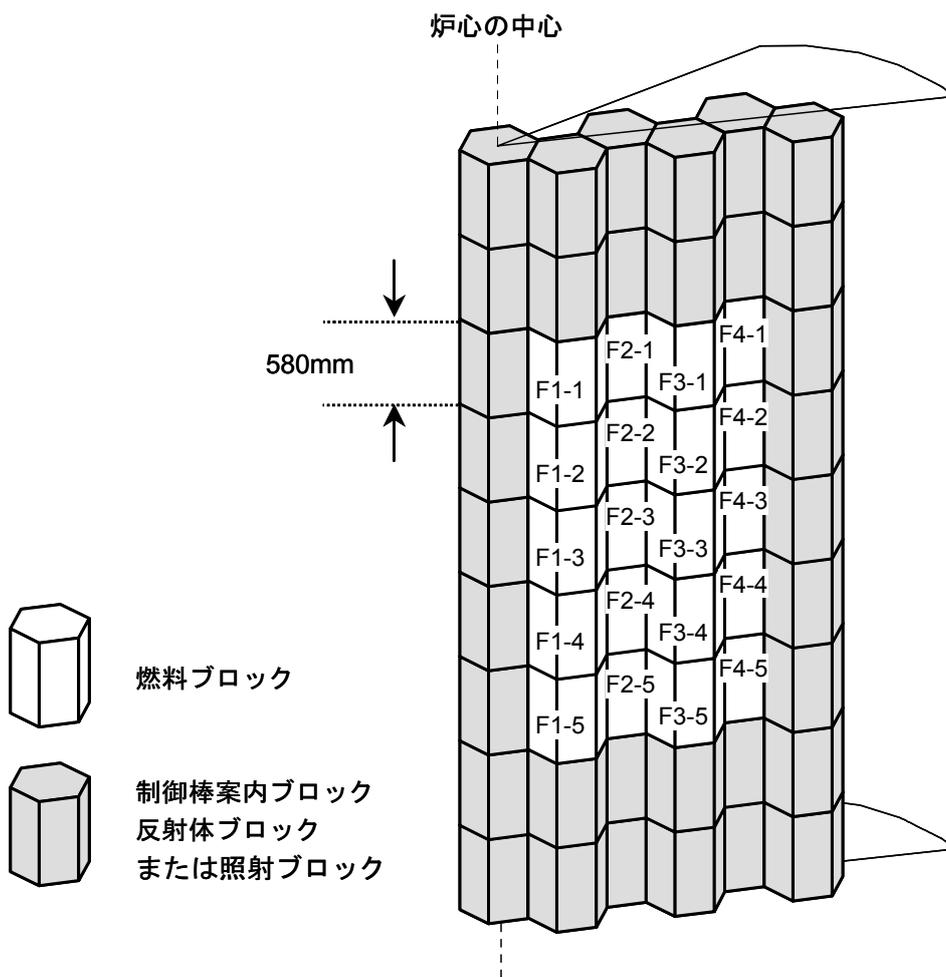


図3-3 燃料ブロックの配置

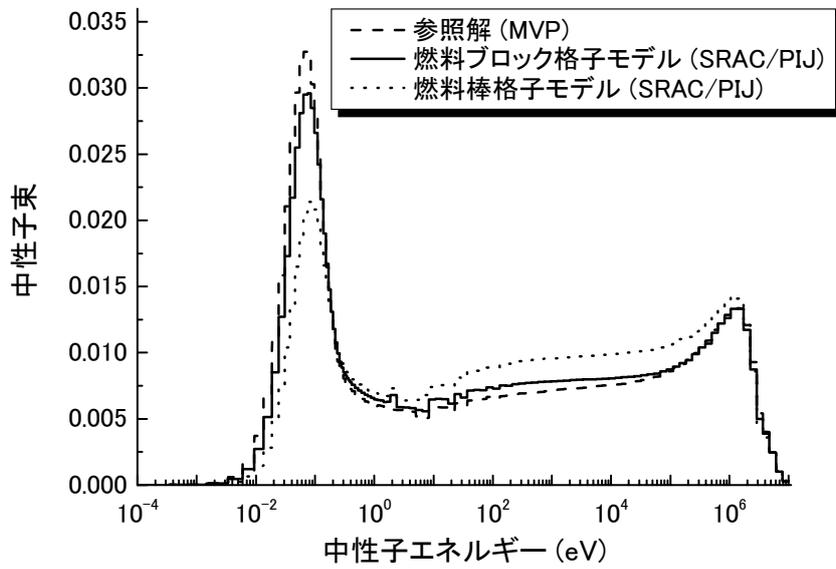


図3-4 燃料領域1、上から3段目 (F1-3) の燃料ブロックの中性子スペクトル

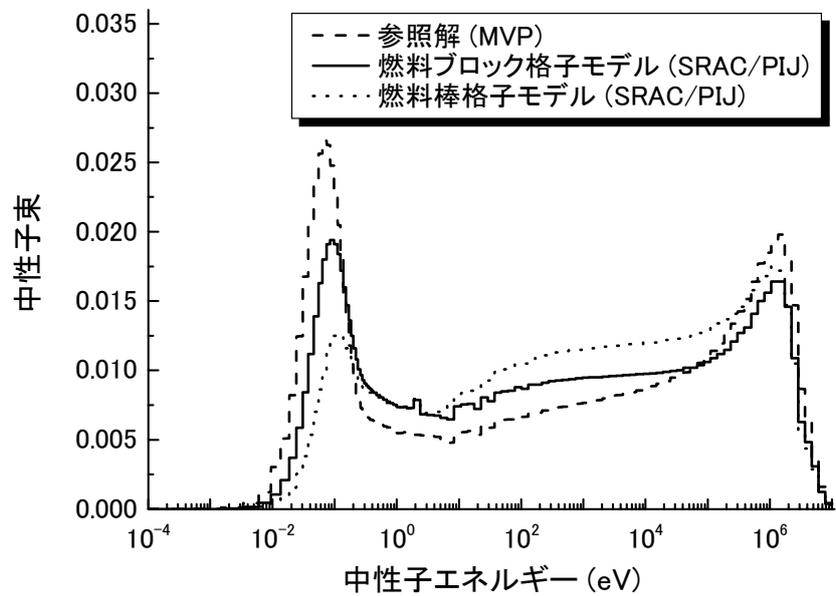


図3-5 燃料領域4、上から1段目 (F4-1) の燃料ブロックの中性子スペクトル

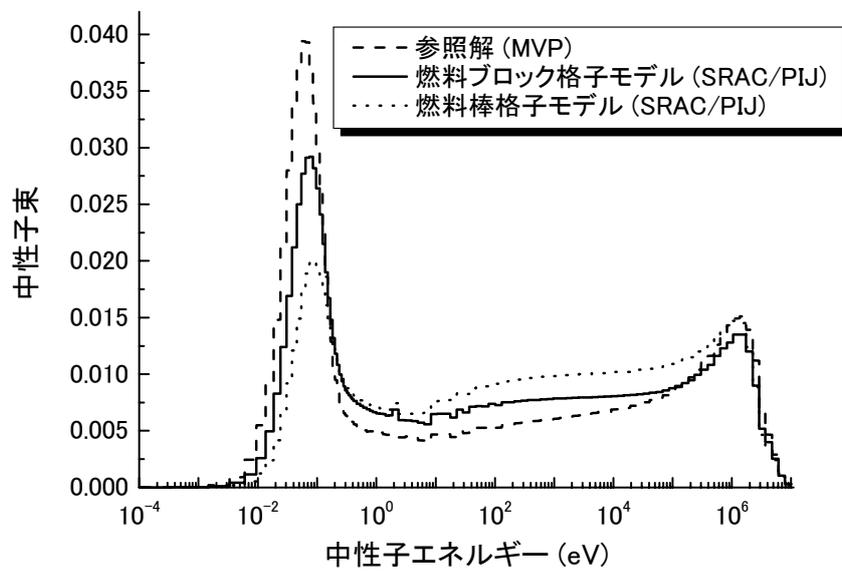


図3-6 燃料領域4、上から5段目 (F4-5) の燃料ブロックの中性子スペクトル

4. 温度係数の算出と動特性計算

第3章で、従来用いていた燃料棒格子モデルに代わり、燃料ブロック格子モデルを格子計算に用いることで、炉心の中性子スペクトルをより正確に群定数の作成に反映できることが明らかになった。これにより、燃料ブロック格子モデルを格子計算に用い群定数を作成することで、拡散計算コードにより算出する温度係数を用いる HTTR の動特性計算が精度良く計算され、従来必要とされていたモンテカルロ計算による補正を不要とすることが期待できる。そこで、燃料ブロック格子モデルを用いて算出した温度係数を HTTR の動特性計算に適用し、動特性計算が精度良く計算されることを確認するために、計算結果と試験結果を比較した。

4. 1 温度係数の算出

これまでに行われた HTTR の動特性計算では、燃料濃縮度および炉心における燃料ブロックの配置の対称性を考慮し、炉心を径方向に4つの燃料領域、軸方向に5領域、計20領域に分けた領域別温度係数が用いられており^(4,5)、本報でも同様に20領域について領域別温度係数を算出し動特性計算に用いた。動特性計算は、初期原子力出力9MWで実施された制御棒引抜き試験について行うので、原子炉出力9MWの領域別温度係数を作成した。

4. 1. 1 格子計算

燃料ブロック格子モデルを用い、SRAC/PIJにより中性子エネルギー107群の格子計算を行い、中性子エネルギーを12群に縮約した燃料ブロックの群定数を作成した。被覆燃料粒子に起因する二重非均質問題の取り扱い、SRACの計算オプションを用いて行った。また、BPについては、第3章では格子計算モデルの違いが中性子の減速効果に及ぼす影響についての検討であるため、そのモデル化は行わなかったが、温度係数の算出には炉心の実効増倍率の算出が必要であり、実効増倍率に対するBPの効果は無視できないので、ここではBPをモデル化した(図4-1参照)。制御棒案内ブロック、および反射ブロック等、燃料ブロック以外のブロックについても、それぞれ格子モデルを作成し、SRAC/PIJによる格子計算を行い、群定数を作成した。群定数作成は、以下の3つの温度条件について行い、拡散計算コードによる炉心計算に用いた。温度条件(b)および(c)の計算は、燃料温度係数および減速材温度係数を算出するための計算である。計算に用いた原子炉出力9MWの炉心温度条件を表4-1に示す⁽¹⁾。

- (a) 原子炉出力9MWの温度条件(基準温度条件)
- (b) 燃料コンパクト(被覆燃料粒子、および黒鉛マトリックス)の温度を基準温度条件から60°C上昇させた条件
- (c) 燃料ブロックの黒鉛部(黒鉛ブロック、および黒鉛スリーブ)の温度を基準温度条件から60°C上昇させた条件

4. 1. 2 炉心計算

燃料ブロック格子モデルにより作成した群定数を用いて CITATION による炉心計算を行い、HTTR の領域別温度係数を算出した。具体的には、9MW 出力炉心の基準温度条件と、ある 1 つの燃料ブロックについて燃料コンパクト（被覆燃料粒子、および黒鉛マトリックス）の温度を基準温度条件から 60°C 上昇させた温度条件で、それぞれ炉心計算を行い、得られた実効増倍率と式 (1) より燃料温度係数を領域別に算出した。同様に、基準温度条件と、ある 1 つの燃料ブロックについて黒鉛部（黒鉛ブロック、および黒鉛スリーブ）の温度を基準温度条件から 60°C 上昇させた条件で、それぞれ炉心計算を行い、得られた実効増倍率と式 (1) より減速材温度係数を領域別に算出した。

$$\alpha_i = \frac{(k_i - k_0)/k_i k_0}{\Delta T} \quad (1)$$

α_i 炉心領域 i の領域別温度係数

k_0 基準温度条件（表 4-1）を用いた実効増倍率

k_i 基準温度条件から炉心領域 i の温度を ΔT °C 上昇させた場合の実効増倍率

上記で算出した領域別温度係数の全領域の和と、燃料棒格子モデルを用いる従来の手法により算出した領域別温度係数の全領域の和を、燃料温度係数と減速材温度係数に分けて表 4-2 に示す。なお、燃料棒格子モデルを用いた従来の手法による領域別温度係数は、DELIGHT で群定数を作成し、その群定数を用いた CITATION による炉心計算結果から算出した領域別温度係数を、MVP による全炉心計算結果を用いた補正した値である。燃料ブロック格子モデルを用いた手法では、燃料温度係数および減速材温度係数の和は、それぞれ $-5.76 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ および $-7.77 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ である。これに対し、燃料棒格子モデルを用いた手法では、それぞれ、 $-3.46 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ および $-9.70 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ であり、これらの値は、MVP による全炉心計算結果から算出した、炉心を 1 領域とした燃料温度係数 $-5.43 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ 、および減速材温度係数 $-5.70 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ を用いて補正された。この補正は、領域別温度係数の相対値が保たれるように行われた。改良した手法と、従来の手法との間では、減速材温度係数の差異が $2.07 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ であるのに対し、燃料温度係数の差異は $0.33 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ であり比較的小さい。

4. 2 動特性計算

燃料ブロック格子モデルを用いた改良した手法により算出した領域別温度係数を、HTTR で実施された初期出力 9MW からの制御棒引抜き試験⁽³⁾を対象とした動特性計算に適用し、原子炉の過渡出力を計算した。計算結果と試験結果を、燃料棒格子モデルを用いた従来の手法により算出した温度係数を動特性計算に適用した場合の結果と併せて図 4-2 に示す。なお、燃料棒格子モデルを用いた従来の手法による温度係数の算出では、DELIGHT で群定数を作成し、その群定数を用いた CITATION による炉心計算結果から得られた温度係数を、MVP による炉心計算結果を用いて補正している。また、これらの動特性計算は、高温ガス炉プラント動特性解析コード ACCORD⁽³⁾により行われた。時刻 0 の制御棒引抜き開始とともに、正の反応度が炉心に添加され、

原子炉出力は上昇し、時刻 15 秒付近で原子炉出力は最大となる。その後、炉心の温度上昇による負の反応度が炉心に添加され、時間の経過とともに原子炉出力は低下する。HTTR では、FP の放出を防ぐ観点から、燃料最高温度が設定されている。そのため、原子炉運転中の燃料温度を精度良く計算することが、安全性の観点から重要である。燃料温度は、原子炉出力の上昇に伴い上昇するので、動特性計算においては、原子炉の過渡出力ピーク値を精度良く計算することが特に重要である。図 4-2 における時刻 15 秒付近の原子炉出力ピーク値は、改良した手法により算出した領域別温度係数を用いた計算結果が 10.5MW であるのに対し、試験結果は 10.6MW である。計算結果は試験結果に対して 1%以内の差異で一致しており、原子炉出力ピーク値を精度良く計算できていると言える。

燃料ブロック格子モデルを用いた改良した手法と、燃料棒格子モデルを用いた従来の手法との比較では、両者の差異は 1%以内に収まっており、両者の計算結果は試験結果に対して、同じ程度に精度良く計算できていると言える。制御棒引抜き試験を対象とした原子炉過渡出力を求めるの動特性計算結果は燃料温度係数に支配され、減速材温度係数の違いが動特性計算に及ぼす影響は僅かであることが報告されている⁽³⁾。したがって、図 4-2 に示す改良した手法、および従来の手法により算出した温度係数を用いた動特性計算結果の差異が 1%以内で小さい理由は、表 4-2 に示すように、両者間の燃料温度係数の差異が小さいことによると考えられる。

以上より、燃料ブロック格子モデルを用いて温度係数を算出することで、従来必要とされたモンテカルロ計算による温度係数の補正を行うことなく、HTTR 炉心の動特性計算を精度良く行うことができることを確認した。これは、燃料ブロック格子モデルを用いて群定数を作成することにより、その群定数を用いた炉心計算結果から算出する燃料温度係数が、従来の燃料棒格子モデルを用いる場合に比べ、より精度良く算出されることが主な理由と考えられる。

表 4-1 原子炉出力 9MW における HTTR の炉心温度条件 (K)

	燃料カラム(F)	燃料カラム(M)	制御棒案内カラム	可動反射体カラム および照射カラム	固定反射体
上部	460	460	460	460	460
1 段目	490	460	460	460	460
2 段目	580	520	500	480	480
3 段目	630	560	540	480	480
4 段目	650	620	600	480	480
5 段目	650	620	600	480	480
下部	600	600	600	480	480

燃料カラム(F) : 燃料コンパクト

燃料カラム(M) : 黒鉛ブロックおよび黒鉛スリーブ

表 4-2 原子炉出力 9MW における HTTR 炉心の温度係数の比較

計算手法	格子計算 (計算コード)	炉心計算 (計算コード)	MVP による補正	燃料温度係数 ($\Delta k/k^{\circ}C$)	減速材温度係数 ($\Delta k/k^{\circ}C$)
改良した手法	燃料ブロックモデル (SRAC/PIJ)	3次元全炉心モデル (CITATION)	なし	$-5.76 \times 10^{-5} *$	$-7.77 \times 10^{-5} **$
従来手法	燃料棒モデル (DELIGHT)	3次元全炉心モデル (CITATION)	なし あり	$-3.46 \times 10^{-5} *$ -5.43×10^{-5}	$-9.70 \times 10^{-5} **$ -5.70×10^{-5}

* 領域別の燃料温度係数の和

** 領域別の減速材温度係数の和

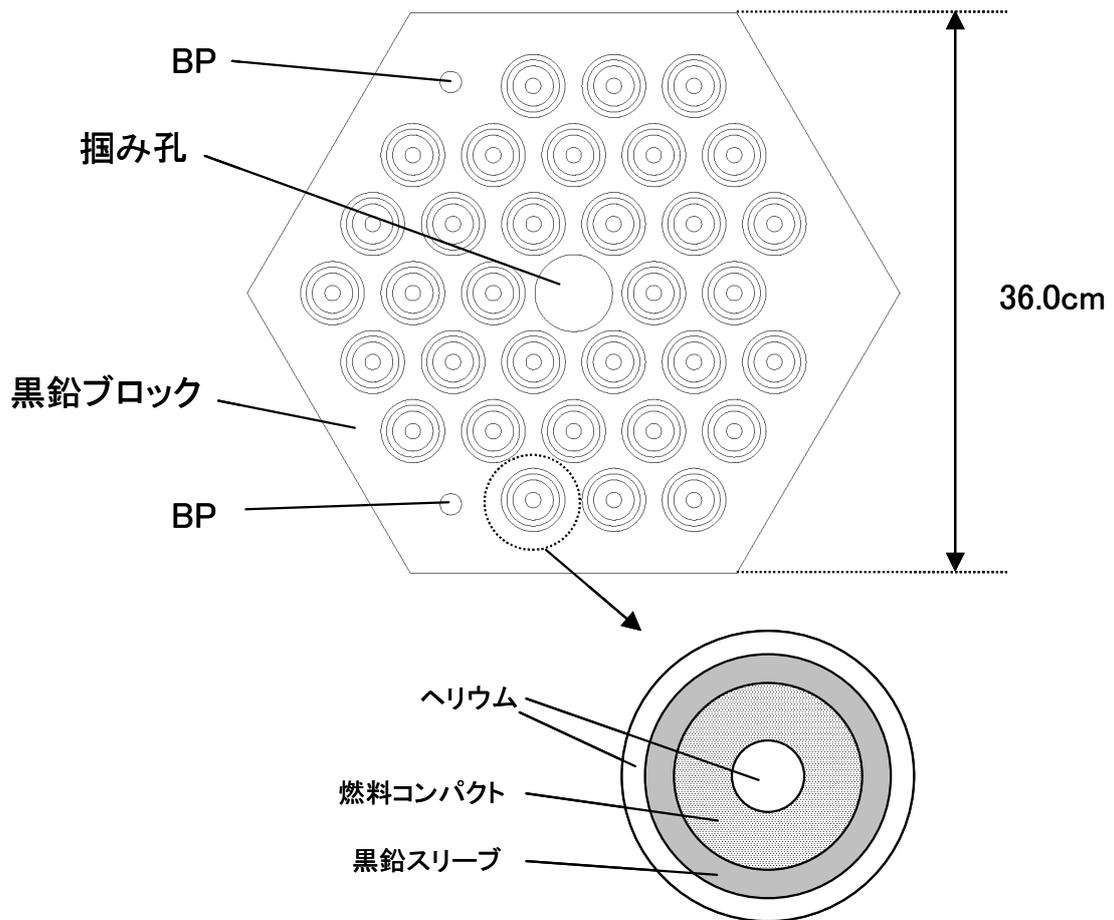


図4-1 燃料ブロック格子モデル (33ピン燃料)

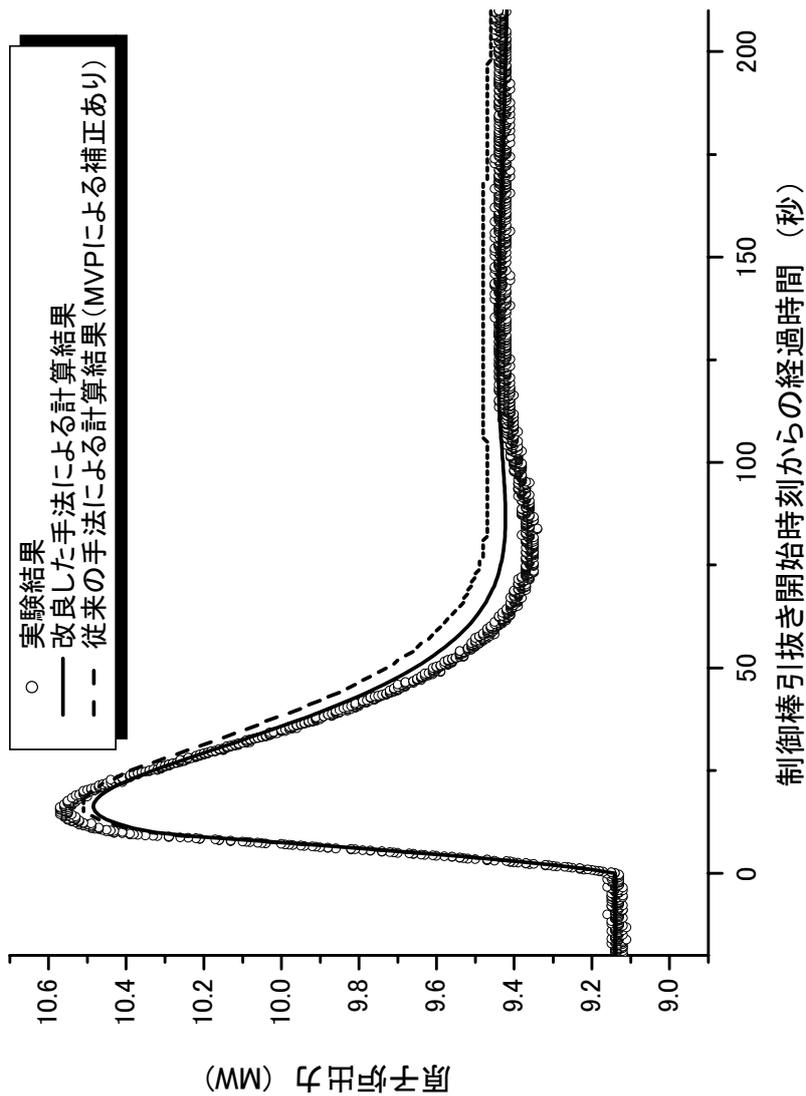


図 4-2 制御棒引抜き試験の動特性計算結果と試験結果の比較

5. まとめ

拡散計算コードによる HTTR の炉心計算で用いる群定数の作成に、従来用いられてきた燃料棒格子モデルに代わり、燃料ブロック格子モデルを用いた。炉心の中性子スペクトルの参照解と格子計算結果の比較から、格子計算に燃料ブロックモデルを用いることで、群定数の作成に、炉心のスペクトルをより正確に反映できると考えられる。

上記の結果をもとに、燃料ブロック格子モデルを用いた格子計算により群定数を作成した。作成した群定数を用い拡散計算コードによる HTTR の炉心計算を行い、その結果から炉心の領域別温度係数を算出した。算出した領域別温度係数を用い、HTTR で行われた制御棒引抜き試験の動特性計算を行った。その結果、炉心の過渡出力の計算結果は試験結果に対して良い一致を得た。特に、炉心の安全性の評価上重要な過渡出力のピーク値は、試験結果に対して 1%以内の差異で、精度良く計算することができた。

中性子スペクトルの参照解と燃料ブロック格子モデルを用いた計算結果の比較より、炉心の一部の領域においては、両者の間に、明らかな差異が認められる。すなわち、群定数の作成に、炉心の中性子スペクトルが十分には反映されていない可能性が残る。しかし、従来の燃料棒格子モデルを用いる場合に比べて、炉心の中性子スペクトルを正確に群定数の作成に反映できると考えられ、また、燃料ブロック格子モデルを用いて算出した領域別温度係数は、それを用いた動特性計算結果と試験結果の間に十分に良い一致を与える。したがって、燃料ブロック格子モデルを用いた HTTR の領域別温度係数の計算手法は、改良の余地は残るものの、HTTR の炉心動特性計算を精度良く行う観点からは、有効な計算手法であり、将来の VHTR の安全性解析を精度良く行う上でも、有効な計算手法と考えられる。

謝辞

本検討を進めるにあたり貴重な助言を頂いた、高温工学試験研究炉部 HTTR 技術課長藤本望氏、同課主査野尻直喜氏、および原子炉基礎工学研究部門コジェネレーション高温ガス炉設計評価グループ研究副主幹島川聡司氏に感謝いたします。

参考文献

- (1) S. Saito, T. Tanaka, Y. Sudo, et al., Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), JAERI 1332, Japan Atomic Energy Institute (JAERI), (1994)
- (2) 橘幸男、中川繁昭、竹田武司、他、“高温工学試験研究炉 (HTTR) の安全性実証試験計画、” JAERI-Tech 2002-059
- (3) 高田英治、中川繁昭、高松邦吉、他、“HTTR 制御棒引抜き試験の動特性解析 (受託調査)、” JAERI-Tech 2004-048、(2004)
- (4) 高松邦吉、中川繁昭、“高温ガス炉における制御棒引抜き試験解析の高度化、” 日本原子力学会和文論文誌、5[1]、45 (2006)
- (5) N. Nojiri, K. Takamatsu, S. Nakagawa, and S. Shimakawa, "Spatial-time-dependence of Thermal Feedback Reactivity during Control-rod Withdrawal Test using the HTTR," Global 2005 Tsukuba, Japan, Oct. (2005).
- (6) 藤本望、山下清信、“高温工学試験研究炉炉心解析モデルの改良—過剰反応度に関する検討—、” JAERI-Research 99-059
- (7) K. Yamashita, et al., "Nuclear Design of the High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)," Nucl. Sci. Eng., 122, 212 (1996).
- (8) 奥村啓介、金子邦男、土橋敬一郎、“SRAC95 ; 汎用核計算コードシステム、” JAERI-Data/Code 95-015、(1996)
- (9) Y. Nagaya, K. Okumura, T. Mori, et al., "MVP/GMVPII: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods," JAERI 1348, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), (2005).
- (10) 村田勲、森貴正、中川正幸、板倉洋文、“確率的形状モデルを用いた連続エネルギーモンテカルロ法による不規則配列球状燃料体系の解析、” JAERI-Research 96-015、(1996)
- (11) 藤本望、野尻直喜、高田英治、他、“HTTR 出力上昇試験での臨界制御棒位置と温度係数—中間報告—、” JAERI-Tech 2000-091、(2001)

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
物質の量	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	毎メートル	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
(物質の) 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	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度 ^(d)	セルシウス度	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻¹ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー当量, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・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った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。組立単位を形作る際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
力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ⁻¹ ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
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 ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・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 ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ² ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³

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	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(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	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×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		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm 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
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ジャンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリー	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

