

「常陽」MK-III炉心管理コードシステム
“HESTIA” の開発
(研究報告)

2003 年 1 月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。
〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute,
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2003

2003年1月

「常陽」MK-III炉心管理コードシステム“HESTIA”の開発

大川内靖*、前田茂貴*、関根隆*、長崎英明**

要　旨

「常陽」の高度化計画（MK-III計画）の一環として、MK-III炉心における炉心管理及び照射条件評価を高精度で行うため、MK-III炉心管理コードシステム“HESTIA”を開発した。

HESTIAでは、核計算の精度向上として、計算体系については、MK-II炉心管理コードシステム“MAGI”で使用してきたHex-Z体系からTri-Z体系に変更し、集合体あたりの径方向メッシュ数を1から24へ、燃料領域における軸方向メッシュ幅を5cmから2.5cmへ詳細化した。また、エネルギー群数については、中性子束は7群から18群に、 γ 線は3群から7群に増加した。これにより、“MAGI”では十分に模擬できなかったステンレス鋼製反射体と隣接した炉心燃料集合体内の中性子束の空間分布及びスペクトル変化を詳細に計算でき、反射体に隣接した炉心燃料集合体の出力分布の計算精度を改善できることを確認した。

また、熱流力計算については、上記の核計算で得られた集合体内の詳細な出力分布を考慮でき、集合体内の乱流熱伝達を取り扱え、さらに計算時間が短いポーラスボディモデルを採用することにより、集合体内の冷却材温度の計算精度を向上させた。この結果、サブチャンネルモデルと同等の計算結果が得られることを確認した。

MK-III炉心での実用に先立って、HESTIAを用いてMK-II炉心の記録計算を行い、運用実績のあるMAGIの計算結果と比較することにより、HESTIAの計算値の妥当性を確認した。この結果、両コードシステムによる評価結果は、過剰反応度はエネルギー群縮約効果及びメッシュ効果を考慮すると約 $0.01\Delta k/k'$ 以内で、最大中性子束及び炉心平均燃焼度は約3%以内で、冷却材出入口温度差は約7°C以内で一致し、HESTIAによる計算結果の妥当性が確認された。

今後は、MK-III炉心の炉心・燃料管理にHESTIAを用いるとともに、MK-III性能試験及び核特性測定用集合体を用いた出力・中性子束分布測定試験の解析により、本コードシステムの計算精度を評価する計画である。

*核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター

照射施設運転管理センター 実験炉部技術課

**原子力システム(株)

Development of JOYO MK-III core management code system "HESTIA"

Yasushi OHKAWACHI*, Shigetaka MAEDA*

Takashi SEKINE*, Hideaki NAGASAKI**

ABSTRACT

As part of the JOYO upgrading program (MK-III program), the JOYO MK-III core management code system "HESTIA" was developed in order to improve the calculation accuracy concerning the core and fuel management and irradiation condition evaluation in the MK-III core.

The neutronic calculation of HESTIA was modified to improve the power and neutron flux distribution. The calculation geometry was changed to Tri-Z geometry from Hex-Z geometry which was used in the MK-II core management code system "MAGI". The number of calculation mesh per subassembly was increased to 24 meshes in the radial direction, and the fuel region was divided into 20 meshes in the axial direction. The number of neutron energy group was increased from 7 to 18, and that of gamma energy group was increased from 3 to 7 groups respectively. As a result, HESTIA can accurately calculate the local neutron flux distribution and spectrum change within the fuel subassembly at the boundary between the fuel and reflector regions, which can not be fully simulated by MAGI. It was also confirmed that HESTIA can improve the power distribution in the driver fuel subassembly adjacent to radial reflector.

As to thermo-hydraulic calculation, the porous body model was adopted to improve the calculation accuracy of coolant temperature. This model can take into account the detailed power distribution and the turbulent heat transfer in a fuel subassembly. It was found that the calculated value by HESTIA agreed well with that of the subchannel model.

In order to verify the calculation accuracy of HESTIA, JOYO MK-II core characteristics calculation was conducted using HESTIA, and calculation results were compared with those of MAGI. The MAGI calculation results were already confirmed by the core performance test and post irradiation examination data. The comparison of both calculation code systems showed that the excess reactivity agreed within $0.01\% \Delta k/kk'$, the maximum neutron flux agreed within 3%, the core average burn-up agreed within 3%, the coolant temperature difference between reactor inlet and outlet agreed within 7 °C.

HESTIA will be used for the purpose of the core and fuel management in the MK-III core. The calculation accuracy of HESTIA will be further confirmed by comparing with the MK-III initial core performance test results and the subsequent power and neutron flux distribution measurement by means of multiple foil activation method.

*Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center, O-arai Engineering Center, JNC

**Nuclear Energy System Inc.

目 次

1 はじめに	1
2 炉心管理コードシステムの高度化	2
2.1 計算手法及び計算体系の最適化	2
2.2 エネルギー群縮約効果	3
2.3 集合体内の組成の非均質効果	4
2.4 燃焼計算	4
2.5 動特性パラメータ	5
2.6 热流力計算に用いた物性値	7
2.7 冷却材温度計算	9
2.8 燃料ピン温度計算	10
2.9 集合体出力計算	10
3 “HESTIA” の計算値の妥当性確認	29
3.1 過剰反応度	29
3.2 最大線出力密度	31
3.3 最大集合体出力	31
3.4 径方向ピーピング係数	31
3.5 冷却材流量	32
3.6 冷却材出口温度	32
3.7 被覆管最高温度	32
3.8 燃料最高温度	33
3.9 炉心平均燃焼度	33
3.10 最大中性子束	34
3.11 実効遅発中性子割合	34
3.12 反射体に隣接する炉心燃料の出力分布の改善	34
3.13 ポーラスボディモデルによる集合体内の冷却材温度分布の改善	35
4 おわりに	39
謝辞	40
参考文献	41

表リスト

表 2.1-1	中性子束の計算手法及び計算体系に関するサーバイ計算結果	13
表 2.2-1	実効増倍率に対する中性子束 70 群計算と 18 群計算の比較	13
表 2.2-2	中性子束のエネルギー群構造	14
表 2.2-3	炉心及び反射体領域の集合体位置平均 γ 線束のエネルギー群数依存性 (3 群計算と 20 群計算の比較)	15
表 2.2-4	炉心及び反射体領域の集合体位置平均 γ 線束のエネルギー群数依存性 (7 群計算と 20 群計算の比較)	15
表 2.2-5	γ 線束のエネルギー群構造	16
表 2.5-1	遅発中性子生成割合	17
表 2.5-2	遅発中性子核分裂スペクトル	17
表 2.5-3	遅発中性子先行核の崩壊定数	17
表 2.6-1	A 型特殊燃料集合体の圧力損失係数	18
表 2.6-2	B 型特殊燃料集合体の圧力損失係数	18
表 2.6-3	C 型特殊燃料集合体の圧力損失係数	18
表 2.6-4	計測線付集合体の圧力損失係数	18
表 2.6-5	温度制御型材料照射装置の圧力損失係数	18
表 2.6-6	材料照射用反射体等の圧力損失係数	19

図リスト

図 2-1 “HESTIA” のシステムフロー	20
図 2.4-1 炉心燃料集合体の燃焼計算領域	22
図 2.4-2 照射燃料集合体の燃焼計算領域	23
図 2.4-3 制御棒の燃焼計算領域	24
図 2.4-4 中性子遮へい体の燃焼計算領域	25
図 2.4-5 燃焼チェーン	26
図 2.7-1 ポーラスボディモデルにおける流量場の仮定	27
図 2.8-1 最大発熱ピンの線出力計算メッシュと冷却材温度計算セグメントの対応	28
図 3.12-1 反射体に隣接する炉心燃料集合体内の出力分布	36
図 3.12-2 反射体隣接位置の炉心燃料集合体内の径方向出力分布	37
図 3.12-3 反射体に隣接する集合体内の中性子スペクトルの比較 (MK-II 第 0 サイクル BOC アドレス 5C3)	37
図 3.13-1 集合体内の径方向温度分布の比較（出口付近）	38

1. はじめに

高速実験炉「常陽」は、高速中性子照射場として、FBR の実用化のための高性能燃料・材料の開発や大学、電力等の外部研究機関からの多種多様な照射試験をより効率的に行っていくことが求められる。こうした背景に鑑み、炉心の高中性子束化、運転時間の増大及び照射技術の高度化を柱とする「常陽」高度化改造計画（MK-III計画^{(1),(2),(3)}）を進めている。

この MK-III 計画の一環として、MK-III 炉心における炉心管理及び照射条件評価を高精度で行うため、MK-III 炉心管理コードシステム “HESTIA” を開発した。

“HESTIA” の開発にあたっては、仕様検討を平成 5~6 年度に行い、平成 7 年度から “HESTIA” の各計算モジュールの作成に着手し、平成 12 年度には各計算モジュールをコードシステムとして統合し、平成 13 年度よりテストラン及び MK-II 炉心の記録計算による計算値の妥当性を確認した。

本報告書では、“HESTIA” コードシステムの概要、及び “HESTIA” コードの計算値の妥当性確認について述べる。

2. 炉心管理コードシステムの高度化

「常陽」MK-II炉心（照射用炉心）は小型の高速炉心であるため、炉外への中性子漏えいが大きく、かつ、炉心燃料集合体に比べて核物質量が少ない、あるいは全く含まない照射試験用燃料集合体や材料試験用集合体を炉内に装荷するため、濃縮 U (^{235}U 濃縮度約 18wt%) と Pu (Pu 富化度約 30wt%) の混合酸化物を炉心燃料に用いて運転に必要な過剰反応度を確保している。このため、中性子スペクトルが硬く、燃料領域内では核分裂性物質が燃焼により消費される割合に比べて親物質の転換が少ない（内部転換比が小さい）特徴を有する。

「常陽」MK-II炉心における炉心管理計算では、上記の特徴を踏まえ、中性子束の詳細分布や微細なエネルギースペクトルの計算よりも、むしろ過剰反応度や炉心全体の出力分布及び各集合体の燃焼度といったバルクの炉心特性の把握に重点を置いた計算法を採用した。

「常陽」MK-II炉心管理コードシステム “MAGI”^{(4), (5)}は、上記の「常陽」の炉心特性と開発当時の計算機能力を考慮し、水平方向については 8.15cm ピッチで配列された各集合体を六角格子（集合体あたり 1 メッシュ）、軸方向については燃料領域 (55cm) とその上下のステンレス鋼反射体を含む 140cm の領域を 20 メッシュに分割した Hex-Z 体系でモデル化し、中性子束 7 群、 γ 線 3 群の拡散計算を実施してきた。

これまでの MAGI による解析値と実測値の比較より、臨界性については、現行の手法でもバイアス補正することにより、 $\pm 0.1\% \Delta k / k k'$ の精度で予測できることを確認している。また、照射後試験で実施されている Nd 法に基づく燃料ピンの燃焼率測定との比較により、装荷位置及び燃焼度によらず、燃焼率測定値と MAGI の計算値が 5% 以内で一致することを確認している。

一方、反射体に隣接し、中性子束・スペクトルの局所的な変化が大きい領域については、スペクトルの軟化による出力増加を模擬できないことが燃焼率測定結果との比較により確認している。

MAGI の計算結果は、炉心・燃料管理のための各種炉心特性の計算に用いられるばかりではなく、輸送計算・モンテカルロ計算における組成及び中性子源分布等の入力データとしても使用されており、その計算精度の更なる向上は、照射条件評価精度の向上の観点からも重要である。

このため、「常陽」MK-III計画における照射技術の高度化の一環として、炉心管理コードシステムの高度化を行った。核計算の高度化にあたっては、集合体内の局所的な中性子束及びスペクトルの変化を考慮するため、空間メッシュ及びエネルギー群数を詳細化した。また、熱流力計算については、核計算の結果得られた集合体内の詳細な出力分布、及び集合体内の乱流熱伝達を考慮できるポーラスボディモデルを採用することにより、高精度化を図った。

以下に、高度化のための検討内容と改良点について述べる。また、図 2-1 にコードシステムの概要を示す。

2.1 計算手法及び計算体系の最適化

集合体内の局所的な中性子束及びスペクトルの変化を評価するためには、中性子の計算点

である空間メッシュ及びエネルギー群数を詳細化する必要がある。空間メッシュの詳細化については、径方向のメッシュ数を 24、54 とした拡散及び輸送計算によりサーベイ計算を行って検討した。ここで、検討に用いた炉定数セットは JENDL-2^{(6), (7)} をベースとした JFS-3-J2⁽⁸⁾ である。

計算ケース及び計算結果を表 2. 1-1 に示す。3 次元の輸送計算については、Hex-Z 体系であっても、現在の計算機能力では計算時間が膨大となり実用的ではないことを確認し、3 次元拡散計算を採用することとした。集合体あたりの径方向メッシュ数については、24 メッシュと 54 メッシュの拡散計算結果の比較より、「常陽」の集合体サイズであれば、24 メッシュとすることにより、メッシュ分割の影響を無視できることを確認した。

また、軸方向メッシュ幅については、MAGI では下部軸方向反射体から上部軸方向反射体までの 140cm の領域を 20 メッシュ（燃料領域については 55cm のスタック長を 5cm/メッシュ）に分割していたが、HESTIA では、ガスプレナムを含む軸方向 160cm の領域に計算範囲を拡大するとともに、炉心部及び上部反射体の軸方向メッシュ数を MAGI と比べて 2 倍に増加させた。この結果、軸方向もメッシュ数は 46（燃料領域については 2.5cm/メッシュ）に詳細化した。

2. 2 エネルギー群縮約効果

中性子束及び γ 線束のエネルギー群数を詳細化するための検討を行った。それぞれの検討内容について以下に述べる。

① 中性子束のエネルギー群数

反射体や制御棒に隣接し、集合体内での中性子束及びスペクトル分布の変化が大きな炉心燃料集合体については、集合体平均の核分裂率は精度良く評価できるものの、隣接する反射体方向に装填された燃料ピンについては、中性子スペクトルが軟らかくなる効果を考慮できないため、燃焼率を過小評価する傾向があった。中性子スペクトルの変化を精度良く評価し、詳細な出力分布及び過剰反応度計算の精度を向上するため、中性子束のエネルギー群数を詳細化するための検討を行った。

高速炉用炉定数セット (JAERI Fast Set) は 70 群構造であり、高速炉解析では 18 群に縮約して使用することが多い。そこで、70 群と 18 群の計算結果を比較し、エネルギー群数を決定した。表 2. 2-1 に 70 群と 18 群の実効倍率計算結果を示す。18 群と 70 群の計算結果の差は 0.07%Δk/kk' と小さい。また、反射体と隣接した炉心燃料集合体の燃焼率の評価精度については、メッシュの詳細化の効果と併せて、MAGI に比べて最大約 10% 改善されることを PIE 解析により確認した。

以上の結果から、HESTIA で使用する中性子エネルギー群数は 18 群とすることとした。18 群のエネルギー群構造を表 2. 2-2 に示す。

② γ 線束のエネルギー群数

MAGI では、 γ 線のエネルギー群数を 3 群で評価してきた。しかし、MK-III 炉心では、 γ 線

による発熱が主となる領域、特に材料照射用反射体等が装荷される炉心周辺等の評価精度の向上が重要である。このため、 γ 線の計算におけるエネルギー群数の増加に伴う計算精度向上について検討を行った。 γ 線のエネルギー群数は、3群、7群、20群の3ケースで、3次元Tri-Z（集合体あたり6メッシュ）拡散計算により γ 線束を求め比較した。なお、中性子束は7群とし、均質組成モデルを適用した。

γ 線束を評価した位置は、炉心燃料領域（炉心第1列）、炉心燃料領域（制御棒隣接位置）、内側反射体領域及び外側反射体領域である。比較結果を表2.2-3及び表2.2-4に示す。表2.2-3より、これまでの3群による計算は、20群の結果と比較して炉心部の全 γ 線束を9～14%過小評価する。また、炉心から離れた反射体領域では、14～18%過小評価となっており、炉心から離れるにつれ計算精度が低下する。特に、3群とした場合では、3.0MeV～400keVの過小評価傾向が顕著である。一方、7群の場合は、全 γ 線束の結果は、炉心からの位置関係に依存せず、全ての領域において20群による結果と良く一致する。

以上の結果から、HESTIAで使用する γ 線のエネルギー群数は7群を採用した。7群のエネルギー群構造を表2.2-5に示す。

2.3 集合体内の組成の取扱いについて

炉心燃料集合体内の径方向24メッシュについて、ラッパ管に隣接した周囲の18メッシュと集合体中心部の6メッシュとに分割し、組成の非均質性を考慮した場合と、24メッシュの組成を均質として取り扱った場合を比較し、影響を評価した。その結果、炉心燃料集合体を非均質として取り扱う効果は、過剰反応度の計算結果で0.03% $\Delta k/kk'$ 程度の差であり、24メッシュの組成を均質として取り扱っても十分な精度が得られることが確認された。

照射燃料集合体については、集合体内の非均質効果が大きいことから、それぞれの構造を模擬した非均質組成とした。モデル化の詳細については2.4章で述べる。

以上、HESTIAでは、炉心燃料集合体の組成については24メッシュ均質組成とし、照射燃料集合体については、非均質組成で取り扱うこととした。

2.4 燃焼計算

燃焼計算については、基本的にMAGIと同じく行列指数法を用いる。燃焼の対象となる集合体は、炉心燃料集合体、照射燃料集合体、制御棒、中性子遮へい体である。また、中性子源については、MAGIと同様にアンチモンの中性子捕獲反応を考慮した。燃焼計算は、各集合体の軸方向ノード毎に行う。各集合体について燃焼計算を実施する領域を図2.4-1～2.4-4に示す。ここで、計算に使用する中性子束は、集合体毎の各計算領域で平均化した中性子スペクトルを用いた。

① 炉心燃料集合体

集合体内は径方向1領域とし、軸方向ノード幅5cm(12領域)である。なお、照射後試験で測定する炉心燃料集合体内の詳細な燃焼率分布との比較を行うため、炉心燃料集合体内の

メッシュ毎(5cm/メッシュ)に組成を設定し、燃焼計算を行う計算オプションも設けている。

② A型照射燃料集合体

集合体内は、径方向を試験用燃料ピン装填部と、外側の炉心燃料ピン装填部の2領域、軸方向については、炉心燃料集合体と同じ軸方向ノード幅5cm(12領域)に分割し、領域毎に燃焼計算を行う。

③ B型照射燃料集合体

各コンパートメントの組成を反映するため、径方向の外周部のメッシュのうちコンパートメント装填位置に相当する6つの領域と、コンパートメント以外の軸心管及び冷却材の組成を反映したその他のメッシュ、軸方向についてはノード幅5cm(12領域)に分割し、各コンパートメント位置について燃焼計算を行う。

④ C型照射燃料集合体

C型照射燃料集合体は、A型、B型に比べて非均質性が小さいため、炉心燃料集合体と同様に径方向を1領域とし、軸方向ノード幅5cm(12領域)とした。

⑤ 制御棒

集合体内は径方向1領域であり、軸方向ノード幅は5cm(13領域)である。

⑥ 中性子遮へい体

集合体内は径方向1領域であり、軸方向ノード幅は5cm(20領域)である。

燃焼チェーンを図2.4-5に示す。HESTIAでの改良点は、($n, 2n$)反応を取り扱えるようにしたこと、MAGIではランプ化FPとして ^{235}U -FP、 ^{239}Pu -FPの2つを考慮していたのに対して、HESTIAでは ^{235}U -FP、 ^{238}U -FP、 ^{239}Pu -FP、 ^{241}Pu -FPの4つとしたことである。核分裂によるFPの取り扱いは以下のとおりである。なお、 ^{10}B は中性子吸収による減少のみ考慮することとした。

HESTIAで考慮したランプ化FP

^{235}U -FP : ^{235}U

^{238}U -FP : ^{238}U

^{239}Pu -FP : ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{239}Np , ^{241}Am , ^{242m}Am , ^{243}Am , ^{242}Cm , ^{243}Cm , ^{244}Cm

^{241}Pu -FP : ^{241}Pu

2.5 動特性パラメータ

動特性パラメータの計算に使用している核種は、 ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu の6核種である。核データの出典は次のとおりである。遅発中性子収率については、MAGIでは

Tomlinson の評価値を採用していたが、HESTIA では JUPITER 実験解析など最近よく用いられている Tuttle⁽⁹⁾の評価値に変更した。遅発中性子割合（相対比率）と遅発中性子先行核の崩壊定数は Keepin⁽¹⁰⁾、遅発中性子核分裂スペクトルは Saphier⁽¹¹⁾の評価値である。計算に用いている遅発中性子生成割合を表 2.5-1 に示す。また、遅発中性子核分裂スペクトルを表 2.5-2 に、先行核の崩壊定数を表 2.5-3 に示す。

動特性パラメータの計算式を以下に示す。

①実効遅発中性子割合 : β_{eff}

$$\beta_{\text{eff}}(i) = \sum_k \frac{\int_{\text{全炉心}} dr \sum_{g'} \chi_d(i, k, g') \cdot \phi^*(g') \sum_g v \sigma_f(g, k) \cdot N(k) \cdot \phi(g) \cdot \beta(i, k)}{\int_{\text{全炉心}} dr \sum_{g'} \chi_p(g') \cdot \phi^*(g') \sum_g v \sigma_f(g, k) \cdot N(k) \cdot \phi(g)}$$

$\beta(i, k)$: 遅発中性子生成割合

$\chi_d(i, k, g')$: 遅発中性子の核分裂スペクトル

$\chi_p(g')$: 即発中性子の核分裂スペクトル

v : 1 核分裂当たりの中性子発生個数(n)

$\sigma_f(g, k)$: ミクロ核分裂断面積(cm²)

$N(k)$: 原子数密度(atoms/cm³)

$\phi(g)$: 中性子束(n/cm²·s)

$\phi^*(g')$: 随伴中性子束

i : 遅発中性子先行核群 (6 群)

k : 核種 (6 核種)

g, g' : 中性子エネルギー一群 (18 群)

②先行核崩壊定数 : λ_{eff} (1/s)

$$\lambda_{\text{eff}}(i) = \frac{\int_{\text{全炉心}} dr \sum_k \beta(i, k) \cdot \lambda(i) \sum_g v \sigma_f(g, k) \cdot N(k) \cdot \phi(g)}{\int_{\text{全炉心}} dr \sum_k \beta(i, k) \sum_g v \sigma_f(g, k) \cdot N(k) \cdot \phi(g)}$$

$\beta(i, k)$: 遅発中性子生成割合

$\lambda(i)$: 行先核の崩壊定数(1/s)

v : 1 核分裂当たりの中性子発生個数(n)

$\sigma_f(g, k)$: ミクロ核分裂断面積(cm²)

$N(k)$: 原子数密度(atoms/cm³)

$\phi(g)$: 中性子束(n/cm²·s)

i : 遅発中性子先行核群 (6 群)

k : 核種 (6 核種)

g : 中性子エネルギー群 (18 群)

③即発中性子寿命 : l_p (s)

$$l_p = \frac{\int_{\text{全炉心}} dr \sum_g \phi^*(g) \cdot \frac{1}{v(g)} \cdot \phi(g)}{\int_{\text{全炉心}} dr \sum_{g'} \chi_p(g') \cdot \phi^*(g') \sum_g v \sigma_f(g, k) \cdot N(k) \cdot \phi(g)}$$

$\chi_p(g')$: 即発中性子の核分裂スペクトル

v : 1 核分裂当たりの中性子発生個数(n)

$\sigma_f(g, k)$: ミクロ核分裂断面積(cm²)

$N(k)$: 原子数密度(atoms/cm³)

$\phi(g)$: 中性子束(n/cm²·s)

$\phi^*(g')$: 随伴中性子束

$v(g)$: 中性子平均速度(cm/s)

k : 核種 (17 核種)

g : 中性子エネルギー群 (18 群)

2. 6 热流力計算に用いた物性値

热流力計算では、各集合体の圧力損失係数と 1 次冷却材流量とから、炉心全体の流量配分計算を行い、各集合体の冷却材流量を求め、これと各集合体の出力を用いて冷却材温度を計算する。

第 3 章で述べる MK-II 記録計算による検証で使用した “HESTIA” の熱流力計算で用いている物性値を以下に示す。

① 圧力損失係数

MK-II 記録計算による検証で使用した炉心燃料集合体の圧力損失係数を以下に示す。

これらの値は、MK-II 性能試験の炉内流量分布測定試験において測定された値である。

$$\Delta P = a \times w^b$$

ΔP : 圧力損失 [g/cm²] , w : 流量 [g/s]

		a	b
炉心燃料 (要素内)	0, 1列	1. 838E-04	1. 828
	2列	1. 710E-04	1. 847
	3列	1. 719E-04	1. 868
	4列	1. 622E-04	1. 895
	5列	2. 296E-04	1. 894
反射体 (要素内)	内側	1. 955E-02	1. 990
	外側 A	2. 169E-02	1. 967
	外側 B	1. 493E-01	1. 642
制御棒 (要素内)		1. 148E-04	1. 890
中性子源 (要素内)		7. 177E-04	2. 000

同様に MK-II 記録計算による検証で使用したA型特殊燃料集合体、B型特殊燃料集合体、C型特殊燃料集合体、計測線付燃料集合体、温度制御型材料照射装置、材料照射用反射体の圧力損失係数はそれぞれ表 2. 6-1～2. 6-6 に示す a 及び b の値を用いる。

② ペレット熱伝導度⁽¹²⁾

$$K = 0.01169 + \frac{1}{\left[0.06717 + \frac{0.02226 \times (1 - \rho)}{O/M - 1.90} \right] T} + 0.7214 \times 10^{-12} T^3$$

K : ペレット熱伝導度 [W/cm·°C]

T : 燃料ペレット温度 [°C]

ρ : 燃料ペレット理論密度比

O/M : 化学量論比 (酸素対金属比) O/M=1.97

③ 冷却材熱伝導度⁽¹³⁾

$$K = 1. 731 \times 10^{-2} \times (54. 31 - 1. 878 \times 10^{-2} T_F + 2. 091 \times 10^{-6} T_F^2)$$

K : 冷却材熱伝導度 [W/cm·°C]

$T_F = 1. 8T + 32$ T: 冷却材温度 [°C]

④ 被覆管熱伝導度⁽¹⁴⁾

$$K = 0. 1323 + 1. 311 \times 10^{-4} \times T$$

K : 被覆管熱伝導度 [W/cm·°C]

T :被覆管温度 [°C]

⑤ ギャップ熱伝達率⁽¹³⁾

$$hg = 0.5678 \text{ [W/cm}^{\cdot}\text{°C]}$$

⑥ 冷却材比熱⁽¹³⁾

$$C_p = 4.187 \times (0.3433 - 1.387 \times 10^{-4}T + 1.105 \times 10^{-7}T^2)$$

C_p :冷却材比熱 [J/g·°C]

T :冷却材温度 [°C]

⑦ 冷却材密度⁽¹³⁾

$$\gamma = 0.949 - 2.23 \times 10^{-4}T - 1.75 \times 10^{-8}T^2$$

γ :冷却材密度 [g/cm³]

T :冷却材温度 [°C]

⑧ 冷却材粘性係数⁽¹³⁾

$$\nu = \frac{10^{(220.7 / (T + 273.15) - 1.489)}}{(T + 273.15)^{0.4925} \gamma}$$

ν :粘性係数 [g/cm·s]

T :冷却材温度 [°C]

γ :比重 [g/cm³]

2.7 冷却材温度計算

MAGI では、計算メッシュ毎（径方向：集合体あたり 1 メッシュ、軸方向：5cm 幅）に求めた出力と冷却材流量からメッシュ毎の平均冷却材温度を算出し、集合体内の径方向出力ピーピング係数と冷却材流量及び冷却材混合率の関数からなる補正係数を求め、メッシュ毎の平均冷却材温度に乘することにより冷却材温度を計算する方法を採用していた。この方法は、計算速度が速いという長所があるものの、補正係数をあらかじめ求めておく必要があり、その近似範囲もおのずと限定される短所があった。MAGI では、集合体内の径方向出力分布は直線的に変化すると仮定してきたが、照射燃料集合体の装荷位置によっては、燃料集合体の径方向出力分布が直線的ではない場合も生じる。

出力分布を求める核計算も、集合体内 1 メッシュから 24 メッシュに拡張され、計算精度が向上した。また、計算機の計算速度も MAGI 開発当時の 20 年前より格段に高速化している

ため、HESTIA では燃料集合体内の径方向温度分布を数値計算により直接求めることにした。数値計算モデルとしては、全燃料集合体を計算対象とすることから、計算時間のかかるサブチャンネルモデルではなく、比較的計算速度が速いポーラスボディモデル⁽¹⁵⁾を採用した。

ポーラスボディモデルの基本的考え方は、三角配列の燃料ピンバンドル形状からなる集合体内の冷却材温度分布を、燃料ピンバンドルの形状を考慮して熱流動的に等価な物性値を持つ連続体からなると近似して、熱伝導方程式を解いて求める。ポーラスボディモデルの概念図を図 2.7-1 に示す。ポーラスボディモデルでは炉心燃料集合体内を、スパイラルワイヤによる冷却材の旋回流が生じるラッパ管と隣接する領域と、旋回流が打ち消しあう集合体の中央部の領域に分け、それぞれの領域で熱伝導方程式を解いて冷却材温度を評価する。このポーラスボディモデルを導入することにより、MAGI では補正係数として扱っていた集合体の径方向の出力分布及び冷却材の混合効果を計算により考慮することができ、冷却材温度計算精度が向上する。

なお、HESTIA では冷却材温度分布を計算するメッシュを、集合体中央部の旋回流が打ち消しあう領域については 24 メッシュ、旋回流が生じるラッパ管と隣接する領域については 12 メッシュに分割する。各領域の発熱量は核計算で評価した 24 メッシュ/集合体の発熱量から内挿により求め、これと冷却材流量より集合体の冷却材温度分布を求める。

2.8 燃料ピン温度計算

燃料ピン温度計算は、炉心燃料集合体のみを対象として単ピンモデルで熱伝導方程式を解いて求める。炉心燃料集合体の温度計算の対象は、最大発熱ピンと集合体平均とした。最大発熱ピンについては、発熱分布は核特性計算における集合体内最大発熱部のメッシュの値を使用し、冷却材温度分布はそのメッシュが含まれるセグメント（温度計算における計算点）のうち、最大発熱部のセグメントの値を使用することとした。例を図 2.8-1 に示す。核特性計算による最大発熱のメッシュを⑯とするとき、そのメッシュが含まれる冷却材温度計算のセグメントは、11, 21, 22, 33, 34 となる。このうち、最大発熱のセグメントの冷却材温度を使用し、被覆管温度と燃料温度を計算する。ただし、図の右上の例のように、核特性計算による最大発熱のメッシュが⑧だった場合、そのメッシュが含まれる冷却材温度計算のセグメントは 14, 26 となり、14 セグメントの冷却材温度を使用することより、燃料ピンの温度を過小評価する可能性がある。これを回避するために、オプションとしてセグメント 14, 26 にセグメント 7 も加えることにした。

集合体平均については、冷却材温度分布、発熱分布とともに平均値を使用することとした。ホットスポット温度については、炉心燃料集合体毎のペレット中心温度、被覆管内面温度及び冷却材温度のそれぞれの最大値に対して、ホットスポットの処理を行うものとした。

2.9 集合体出力計算

中性子束及び γ 線束に基づいて各計算メッシュの発熱量を求め、これらの総和をとることにより、各集合体の発熱量を求める。次に、第 10 列までの全集合体出力の合計値を 140MWt

で規格化して集合体出力を評価する。この規格化した出力を用いて中性子束分布を規格化する。なお、炉内燃料貯蔵ラックに装荷した集合体の発熱については、寄与が小さいため考慮しない。

① γ 線源分布計算

中性子拡散計算により求めた三次元の中性子束分布を基に、三次元体系の γ 線源分布の計算を行う。 γ 線源分布の計算式は以下のとおりである。

$$S_{\gamma}(i, l) = \sum_n \sum_m \gamma_p(i, n, l, m) \cdot N(i, m) \cdot \phi(i, n)$$

$S_{\gamma}(i, l)$: γ 線源分布 ($n/cm^3 \cdot s$)

i : 三次元の空間メッシュ点

l : γ 線のエネルギー群

$\gamma_p(i, n, l, m)$: γ 線発生断面積 (cm^2)

n : 中性子のエネルギー群

m : 核種

$N(i, m)$: 原子数密度 ($atoms/cm^3$)

$\phi(i, n)$: 中性子束 ($n/cm^2 \cdot s$)

② 出力分布計算

中性子拡散計算により求めた三次元の中性子束分布と上述の γ 線源分布を基に、中性子と γ 線による総発熱分布計算を以下の式より算出する。

$$H_n(i) = C \cdot \sum_n \sum_m N(i, m) \cdot \sigma_h(i, n, m) \cdot \phi(i, n)$$

$H_n(i)$: 中性子発熱分布 (W/cm^3)

i : 三次元の空間メッシュ

$N(i, m)$: 原子数密度 ($atoms/cm^3$)

m : 核種

$\sigma_h(i, n, m)$: 中性子発熱断面積 ($MeV \cdot cm^2$)

n : 中性子のエネルギー群

$\phi(i, n)$: 中性子束 ($n/cm^2 \cdot s$)

C : MeV/sec から Wへの換算係数 ($= 1.6021 \times 10^{-13}$)

$$H_\gamma(i) = C \cdot \sum_l S_\gamma(i, l) \cdot E_\gamma(l)$$

$H_\gamma(i)$: γ 発熱分布 (W/cm^3)

i : 三次元の空間メッシュ

$S_\gamma(i, l)$: γ 線源分布 ($\text{n/cm}^3 \cdot \text{s}$)

l : γ 線のエネルギー群

$E_\gamma(l)$: γ 線の群平均エネルギー (MeV)

$$H_t(i) = H_n(i) + H_\gamma(i)$$

$H_t(i)$: 総発熱分布 (W/cm^3)

i : 三次元の空間メッシュ

③集合体出力計算

出力分布計算で求めた総発熱分布を基に、集合体出力の計算を行う。本計算では、炉出力を規格化するとともに、中性子束分布、随伴中性子束分布及び γ 線源分布の規格化も行う。出力の規格化は、第0列～第10列の集合体出力の合計を炉出力に規格化する。また、中性子束分布及び γ 線源分布の絶対値は、炉出力で規格化し、随伴中性子束の規格化は以下の式で行う。

$$\frac{1}{k_{\text{eff}}} \int [\langle v \Sigma_f(i, n) \cdot \phi(i, n) \rangle_n \cdot \langle \chi(n) \cdot \phi^*(i, n) \rangle_n] dV = 1.0$$

k_{eff} : 実効増倍率

v : 1回の核分裂で放出される中性子数 (n)

$\Sigma_f(i, n)$: マクロ核分裂断面積 (cm^{-1})

$\phi(i, n)$: 中性子束 ($\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$)

$\chi(n)$: 核分裂スペクトル

$\phi^*(i, n)$: 隨伴中性子束

表2.1-1 中性子束の計算手法及び計算体系に関するサーベイ計算結果

計算方法	計算体系	径方向メッシュ	軸方向メッシュ	k_{eff}	$\Delta k/kk'$
拡散	3D Hex-Z	1	5.0cm	1.044754	4.28%
拡散	3D Tri-Z	6	5.0cm	1.039320	3.78%
拡散	3D Tri-Z	24	5.0cm	1.037631	3.63%
拡散	3D Tri-Z	54	5.0cm	1.037268	3.59%
拡散	3D Hex-Z	1	2.5cm	1.043344	4.15%
輸送	3D Hex-Z	1	5.0cm	1.052852	5.02%

制御棒6本 各15cm挿入 1/6対称炉心 特燃なし体系

表2.2-1 実効増倍率に対する中性子束70群計算と18群計算の比較

	BOC	EOC
70群	1.12	0.19
18群	1.05	0.12

単位 : % $\Delta k/kk'$

BOC : 運転サイクル初期

EOC : 運転サイクル末期

表2.2-2 中性子束のエネルギー群構造

エネルギー群		エネルギーの範囲	
7群構造	18群構造		
1	1	10MeV	～ 6.0653MeV
	2	6.0653MeV	～ 3.6788MeV
	3	3.6788MeV	～ 2.2313MeV
	4	2.2313MeV	～ 1.3534MeV
2	5	1.3534MeV	～ 0.82085MeV
	6	0.82085MeV	～ 0.38774MeV
3	7	0.38774MeV	～ 0.18316MeV
	8	0.18316MeV	～ 86.517keV
4	9	86.517keV	～ 40.868keV
	10	40.868keV	～ 19.305keV
	11	19.305keV	～ 9.1188keV
5	12	9.1188keV	～ 4.3074keV
	13	4.3074keV	～ 2.0347keV
	14	2.0347keV	～ 961.12eV
6	15	961.12eV	～ 454eV
	16	454eV	～ 214.45eV
	17	214.45eV	～ 101.3eV
7	18	101.3eV	～ 10^{-5} eV

表2.2-3 炉心及び反射体領域の集合体位置平均 γ 線束のエネルギー一群数依存性
(3群計算と20群計算の比較)

(単位: $\gamma/\text{cm}^2\cdot\text{s}$)

γ 線群数		集合体位置			
		炉心中央部	炉心周辺部	内側反射体領域	外側反射体領域
		(2,2)	(5,1)	(7,1)	(9,1)
1	3群計算	7.79E+13	3.59E+13	1.86E+13	8.37E+12
	20群計算*	7.80E+13	3.86E+13	1.86E+13	8.38E+12
	3群/20群	0.999	0.930	1.000	0.999
2	3群計算	6.18E+14	2.70E+14	4.89E+13	1.19E+13
	20群計算*	6.96E+14	3.22E+14	7.22E+13	1.66E+13
	3群/20群	0.888	0.839	0.677	0.717
3	3群計算	9.34E+13	4.68E+13	4.34E+13	1.08E+13
	20群計算*	8.99E+13	4.59E+13	4.51E+13	1.08E+13
	3群/20群	1.039	1.020	0.961	1.000
Total	3群計算	7.89E+14	3.53E+14	1.11E+14	3.11E+13
	20群計算*	8.64E+14	4.07E+14	1.36E+14	3.58E+13
	3群/20群	0.913	0.867	0.816	0.869

*20群の計算結果を3群構造に編集

表2.2-4 炉心及び反射体領域の集合体位置平均 γ 線束のエネルギー一群数依存性
(7群計算と20群計算の比較)

(単位: $\gamma/\text{cm}^2\cdot\text{s}$)

γ 線群数		集合体位置			
		炉心中央部	炉心周辺部	内側反射体領域	外側反射体領域
		(2,2)	(5,1)	(7,1)	(9,1)
1	7群計算	1.65E+10	5.15E+09	8.78E+08	1.02E+08
	20群計算*	1.65E+10	5.15E+09	8.77E+08	1.02E+08
	7群/20群	1.000	1.000	1.001	1.000
2	7群計算	7.78E+13	3.87E+13	1.86E+13	8.37E+12
	20群計算*	7.80E+13	3.86E+13	1.86E+13	8.37E+12
	7群/20群	0.997	1.003	1.000	1.000
3	7群計算	1.35E+14	5.98E+13	1.52E+13	8.37E+12
	20群計算*	1.35E+14	5.99E+13	1.53E+13	8.37E+12
	7群/20群	1.000	0.998	0.993	1.000
4	7群計算	2.44E+14	1.08E+14	1.83E+13	3.83E+12
	20群計算*	2.47E+14	1.09E+14	1.87E+13	3.95E+12
	7群/20群	0.988	0.991	0.979	0.970
5	7群計算	3.00E+14	1.48E+14	3.30E+13	8.03E+12
	20群計算*	3.14E+14	1.54E+14	3.82E+13	9.19E+12
	7群/20群	0.955	0.961	0.864	0.874
6	7群計算	9.29E+13	4.80E+13	4.65E+13	1.13E+13
	20群計算*	8.72E+13	4.43E+13	4.39E+13	1.05E+13
	7群/20群	1.065	1.084	1.059	1.076
7	7群計算	2.71E+12	1.59E+12	1.22E+12	2.99E+11
	20群計算*	2.70E+12	1.65E+12	1.26E+12	3.03E+11
	7群/20群	1.004	0.964	0.968	0.987
Total	7群計算	8.52E+14	4.04E+14	1.33E+14	3.53E+13
	20群計算*	8.64E+14	4.07E+14	1.36E+14	3.58E+13
	7群/20群	0.986	0.993	0.985	0.989

*20群の計算結果を7群構造に編集

表2.2-5 γ 線束のエネルギー群構造

エネルギー群		エネルギーの範囲
3群構造	7群構造	
1	1	14MeV ~ 8MeV
	2	8MeV ~ 5MeV
	3	5MeV ~ 3MeV
2	4	3MeV ~ 2MeV
	5	2MeV ~ 1MeV
	6	1MeV ~ 400keV
3	7	400keV ~ 20keV

表2.5-1 遅発中性子生成割合

遅発中性子 先行核のグループ	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
1	2.56E-04	2.08E-04	8.03E-05	8.81E-05	5.07E-05	7.25E-05
2	1.44E-03	2.20E-03	5.92E-04	8.59E-04	1.16E-03	1.66E-03
3	1.27E-03	2.60E-03	4.57E-04	6.04E-04	8.77E-04	1.25E-03
4	2.75E-03	6.22E-03	6.93E-04	1.10E-03	1.98E-03	2.83E-03
5	8.63E-04	3.60E-03	2.18E-04	4.03E-04	9.22E-04	1.32E-03
6	1.75E-04	1.20E-03	7.40E-05	9.12E-05	8.11E-05	1.16E-04
合計	6.75E-03	1.60E-02	2.11E-03	3.15E-03	5.07E-03	7.25E-03

表2.5-2 遅発中性子核分裂スペクトル

群 (18群構造)	エネルギー範囲(MeV)	核分裂スペクトル		
		^{235}U	^{238}U	Pu^*
4	2.2313 ~ 1.3534	0.0201	0.0205	0.0184
5	1.3534 ~ 0.82085	0.1033	0.0952	0.1021
6	0.82085 ~ 0.38774	0.3571	0.3506	0.3570
7	0.38774 ~ 0.18316	0.3273	0.3275	0.3342
8	0.18316 ~ 0.086517	0.1763	0.1900	0.1692
9	0.086517 ~ 0.040868	0.0159	0.0162	0.0191

* $^{239}\text{Pu}, ^{240}\text{Pu}, ^{241}\text{Pu}, ^{242}\text{Pu}$ に共通に使用している

表2.5-3 遅発中性子先行核の崩壊定数

(単位:1/s)

遅発中性子 先行核のグループ	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
1	0.0127	0.0132	0.0129	0.0129	0.0128	0.0129
2	0.0317	0.0321	0.0311	0.0313	0.0299	0.0295
3	0.1150	0.1390	0.1340	0.1350	0.1240	0.1310
4	0.3110	0.3580	0.3310	0.3330	0.3520	0.3380
5	1.4000	1.4100	1.2600	1.3600	1.6100	1.3900
6	3.8700	4.0200	3.2100	4.0400	3.4700	3.6500

表2.6-1 A型特殊燃料集合体の圧力損失係数

	集合体名	照射履歴	圧損係数	
			a	b
1	PFA010	5-7,8[2E2]	1.494E-04	1.85969
2	PFA020	14-19[2B2]	1.107E-04	1.887

表2.6-2 B型特殊燃料集合体の圧力損失係数

	集合体名	照射履歴	圧損係数	
			a	b
1	PFB000	0[1A1]	1.853E-04	1.988
2	PFB010	0[1E1] 1-2[2B1]	2.647E-04 2.704E-04	1.95495 1.95495
3	PFB020	3-7,8-10[3C2]	2.400E-04	1.97374
4	PFB030	15-16[3F2]	7.180E-04	1.875
5	PFB011	7D1[1D1]	2.704E-04	1.95495
6	PFB031	12D1[1A1]	2.853E-04	1.986
7	PFB060	17-20[3F2]	9.975E-04	1.931
8	PFB070	21-23[3F2]	6.212E-04	1.971
9	PFB051	23D1[000]	6.516E-04	1.855
10	PFB052	24D1[000]	8.522E-04	1.78114
11	PFB080	25,26-27[3F2]	1.202E-03	1.857
12	PFB001	25D1[000]	1.165E-03	1.776
13	PFB090	29,30-33[3B2]	4.269E-03	1.6697

表2.6-3 C型特殊燃料集合体の圧力損失係数

	集合体名	照射履歴	圧損係数	
			a	b
1	PFC010	1[2E2] 2-4[2E2]	3.101E-04 3.101E-04	1.877715 1.87715
2	PFC020	3-7,8-11[3A2]	3.504E-04	1.94643
3	PFC030	9-12,12D2-20D1[3E1] 21-23,23D2-23D3[2D2]	3.504E-04 3.370E-04	1.94643 1.94542
4	PFC011	15D1[000] 15D2[4A4] 15D3[4D4]	2.558E-04 2.528E-04 2.528E-04	1.8902 1.9099 1.9099
5	PFC040	16-23D1,24-27,30-35[3C2]	3.396E-04	1.9460
6	PFC050	17-22[2E2]	2.968E-04	1.8560
7	PFC060	23-23D3[3E1] 24,25-28[3E3] 30-35[3D2]	5.393E-04 5.393E-04 5.393E-04	1.9460 1.9460 1.9460

表2.6-4 計測線付集合体の圧力損失係数

	集合体名	照射履歴	圧損係数	
			a	b
1	PFI010	8-12D3[5F2]	1.319E-04	1.9920
2	PFI020	23D3[5F2]	2.522E-03	1.9460
3	PFI011	13-23D1[5F2]	1.306E-04	1.9920

表2.6-5 温度制御型材料照射装置の圧力損失係数

	集合体名	照射履歴	圧損係数	
			a	b
1	PRM010	29-32[3E3]	9.384E-04	1.98167

照射履歴は集合体が装荷されていたサイクルを示している。なお、カッコ内は装荷位置（アドレス）である。

$$\Delta P = a \times w^b$$

ΔP : 圧力損失 [g/cm²]

w : 流量 [g/s]

表2.6-6 材料照射用反射体等の圧力損失係数

	集合体名	照射履歴	圧損係数	
			a	b
1	PRA010	3-7D2[6C6]	3.433E-03	1.9575
2	PRA020	3-15[6F6]	3.433E-03	1.9575
3	PRA031	13-18[6D6]	3.433E-03	1.9575
4	PRA032	13-21[6C6]	3.433E-03	1.9575
5	PRA041	8-12D3[6C6]	3.433E-03	1.9575
6	PRA050	20-24[6D2]	3.433E-03	1.9575
7	PRA060	23-34[6C6]	3.433E-03	1.9575
8	PRA070	26-31[6D2]	3.433E-03	1.9575
9	PRA080	31-32[6D6]	3.433E-03	1.9575
10	PRC000	0[1C1]	5.136E-04	1.9460
11	PRC010	14-15,16[1A1]	5.300E-03	1.9940
12	PRC020	17-20D1[1A1]	5.300E-03	1.9940
13	PRC030	21-23[1A1]	5.300E-03	1.9940
14	PRC040	24,25,26-27[1A1]	5.300E-03	1.9940
15	PRC050	29[3D2],31[3A2],33[3A1],34[3E3]	5.300E-03	1.9940
16	PRC051	32[3A1],33[3E3],35[3A1]	5.232E-03	1.9922
17	PRH010	17-20D1[5B5]	2.575E-03	1.9575
18	PRH020	19-20[7E5]	7.248E-03	1.8531
19		21-27[7E5]	4.5218E-03	1.94615
20	PRM010	29-32 [3E3]	9.384E-04	1.98167
21	PRS010	1-2[5D3]	3.433E-03	1.9575
22	PRS019	21-23D3[6F4]	3.433E-03	1.9575
23	PRS020	3[5D3]	3.433E-03	1.9575
24	PRS021	21[5B5]	3.433E-03	1.9575
25	PRS030	1-6[7F7]	3.433E-03	1.9575
26	PRS040	1[7B7]	3.433E-03	1.9575
27	PRS050	8[5C4]	3.433E-03	1.9575
28	PRS060	7[7F7]	3.433E-03	1.9575
29	PRS070	7D1-12D3[7F7]	3.433E-03	1.9575
30	PRS080	8-12D3[7B7]	3.433E-03	1.9575
31	PRS090	13-17[5B2]	7.206E-04	1.9350
32	PRS100	15-29D1[5D5]	3.433E-03	1.9575
33	PRS110	18-24D1[5B2]	3.433E-03	1.9575
34	PRS120	17-19[6A4]	3.433E-03	1.9575
35	PRS130	17-19[6D4]	3.433E-03	1.9575
36	PRS140	18-23D3[5C4]	3.433E-03	1.9575
37	PRS150	18-27[5C5]	3.433E-03	1.9575
38	PRS160	19[5F5]	3.433E-03	1.9575
39	PRS170	19-31 [6B3]	3.433E-03	1.9575
40	PRS180	20-31 [6E3]	3.433E-03	1.9575
41	PRS200	26-30[5C4],31-33[5A2]	3.433E-03	1.9575
42	PRS220	26-35[5E2]	3.433E-03	1.9575
43	PRS230	24-25D1[5E5]	3.433E-03	1.9575
44	PRS240	26-33[5E5]	3.433E-03	1.9575
45	PRS250	25[5A2]	1.920E-03	1.8520
46	PRS260	30-33[5B5]	3.433E-03	1.9575
47	PSV010	34-35[000]	5.232E-03	1.9922
48	PSV020	34-35[9B1]	1.801E-02	1.9977
49	PSV030 *	34-35[R-10]	-	-

* PSV030は炉内燃料貯蔵ラックでの照射のため、圧損係数はない。

照射履歴は集合体が装荷されていたサイクルを

示している。なお、カッコ内は装荷位置（アドレス）である。

$$\Delta P = a \times w^b$$

ΔP : 圧力損失 [g/cm^2]

w : 流量 [g/s]

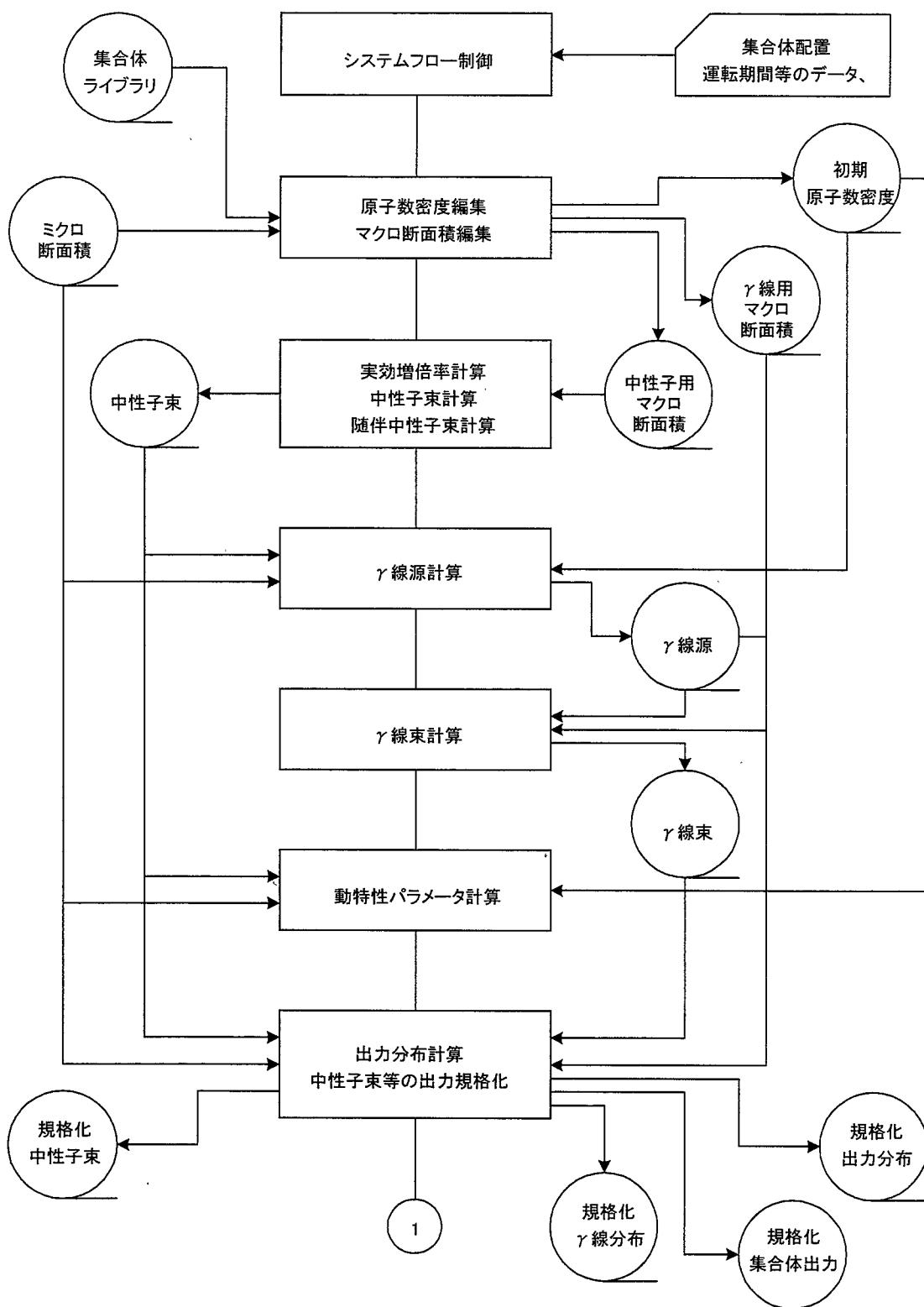


図 2-1 “HESTIA” のシステムフロー (1/2)

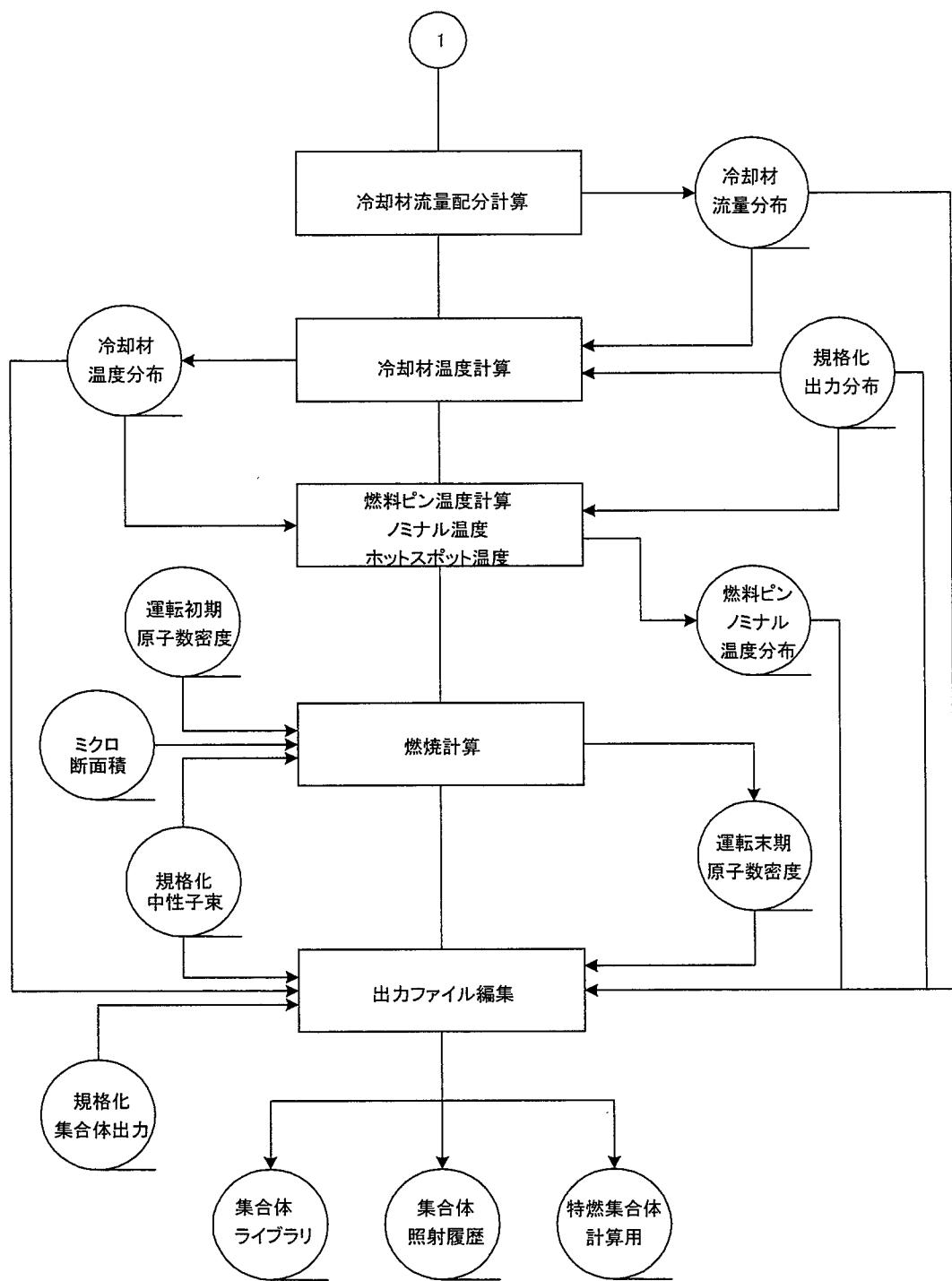


図 2-1 “HESTIA” のシステムフロー (2/2)

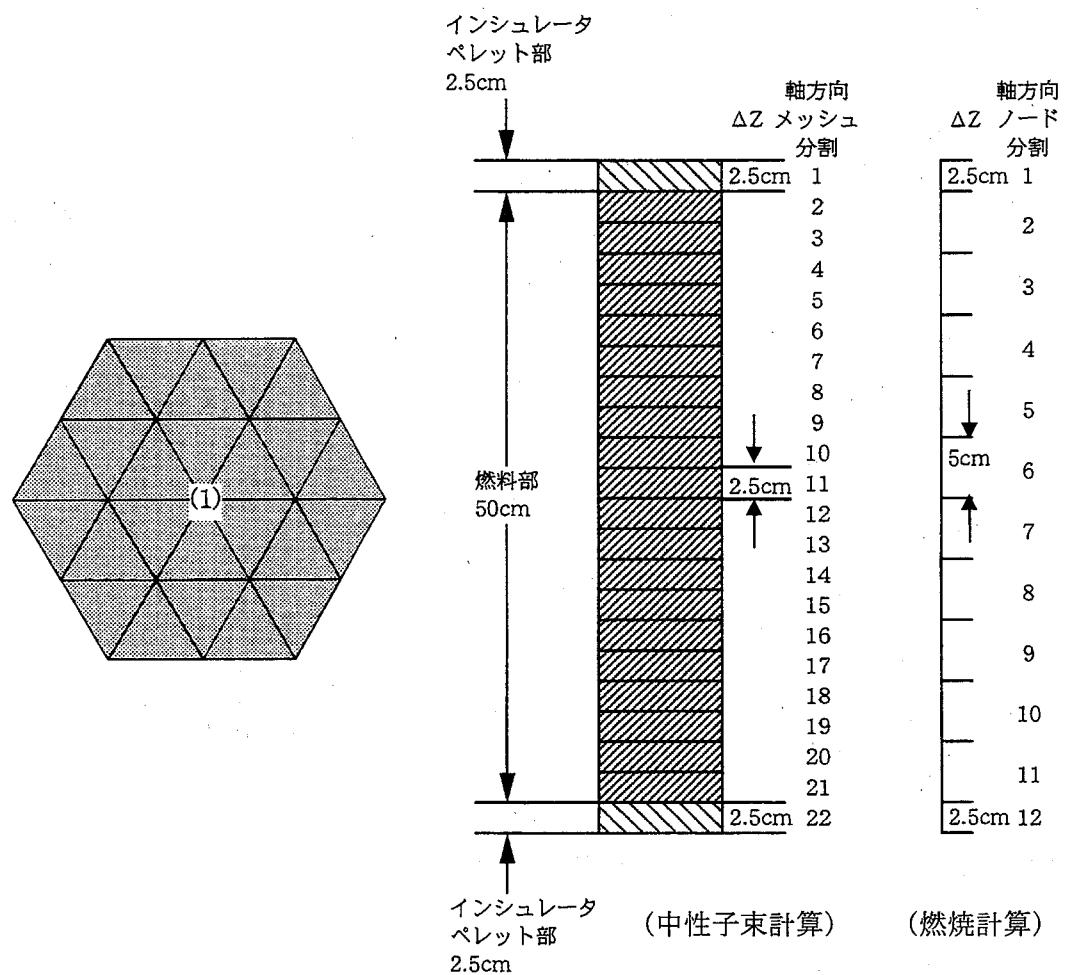


図 2.4-1 炉心燃料集合体の燃焼計算領域

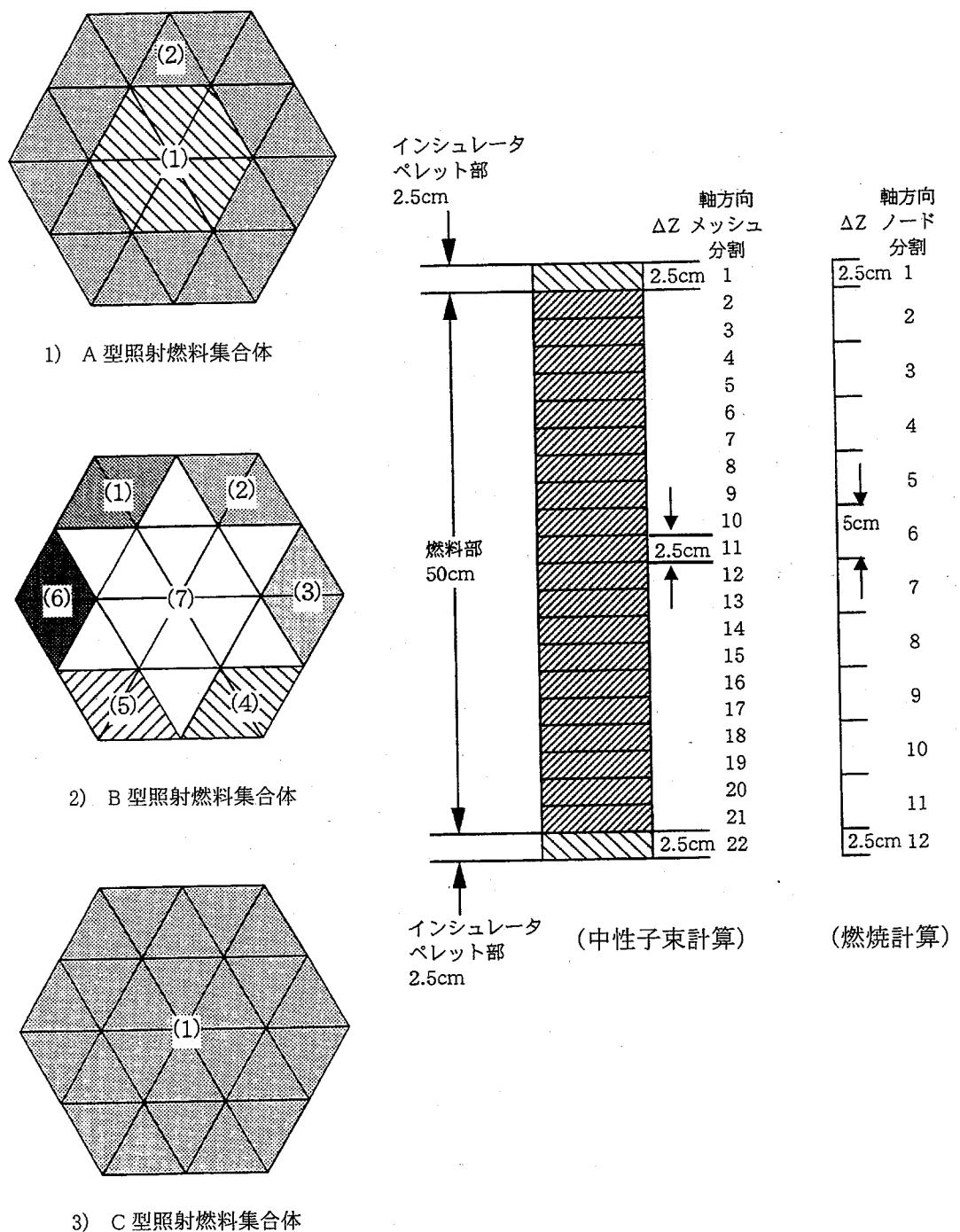


図 2.4-2 照射燃料集合体の燃焼計算領域

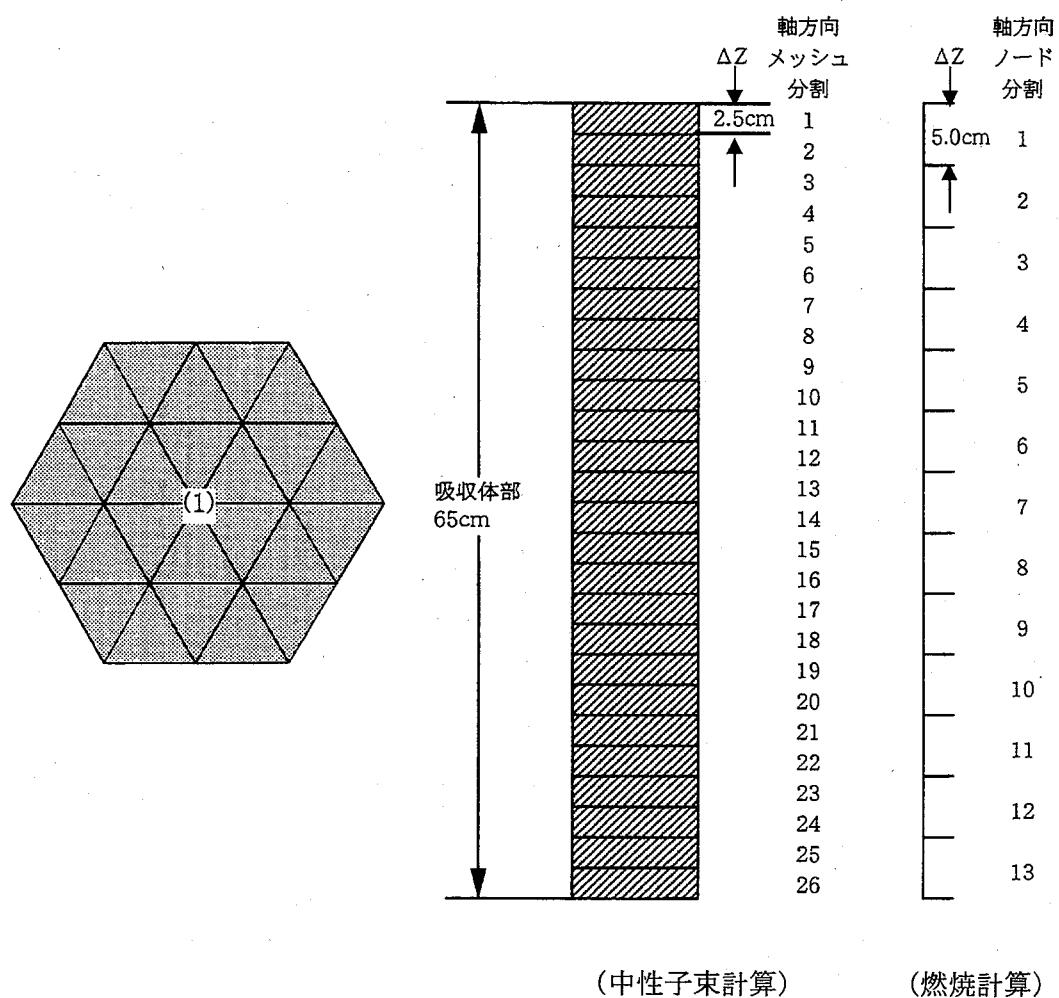


図 2.4-3 制御棒の燃焼計算領域

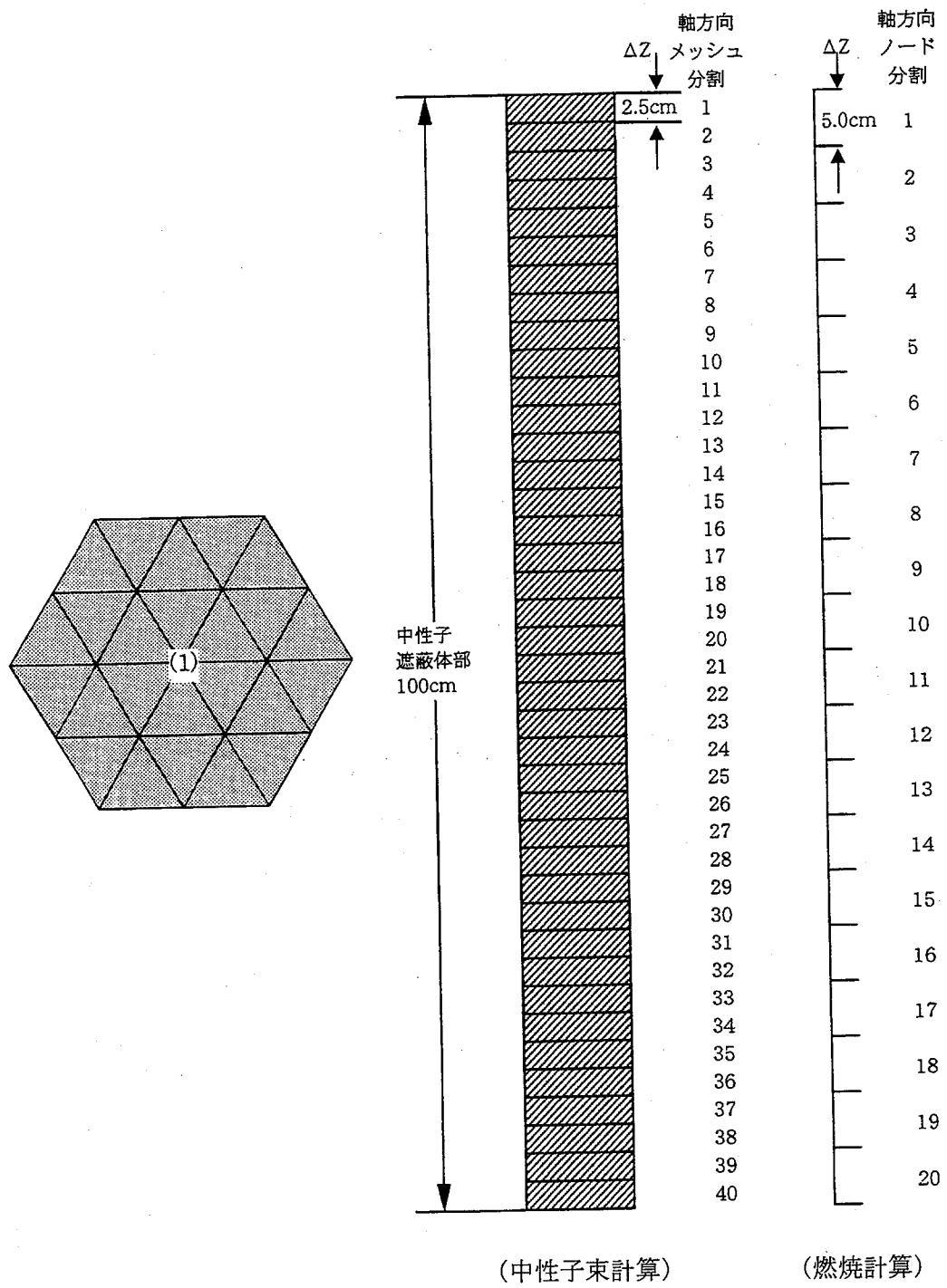
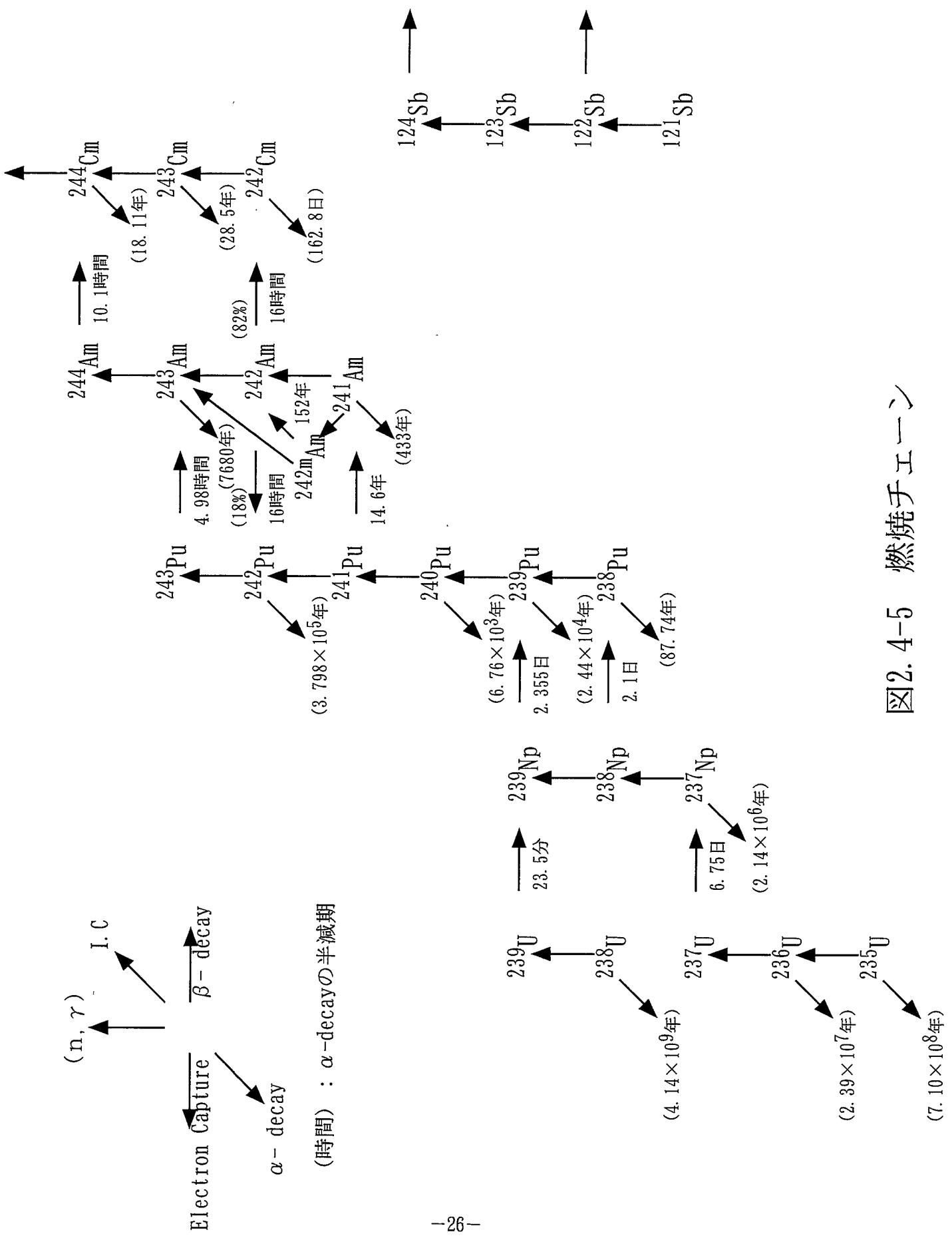


図 2.4-4 中性子遮へい体の燃焼計算領域



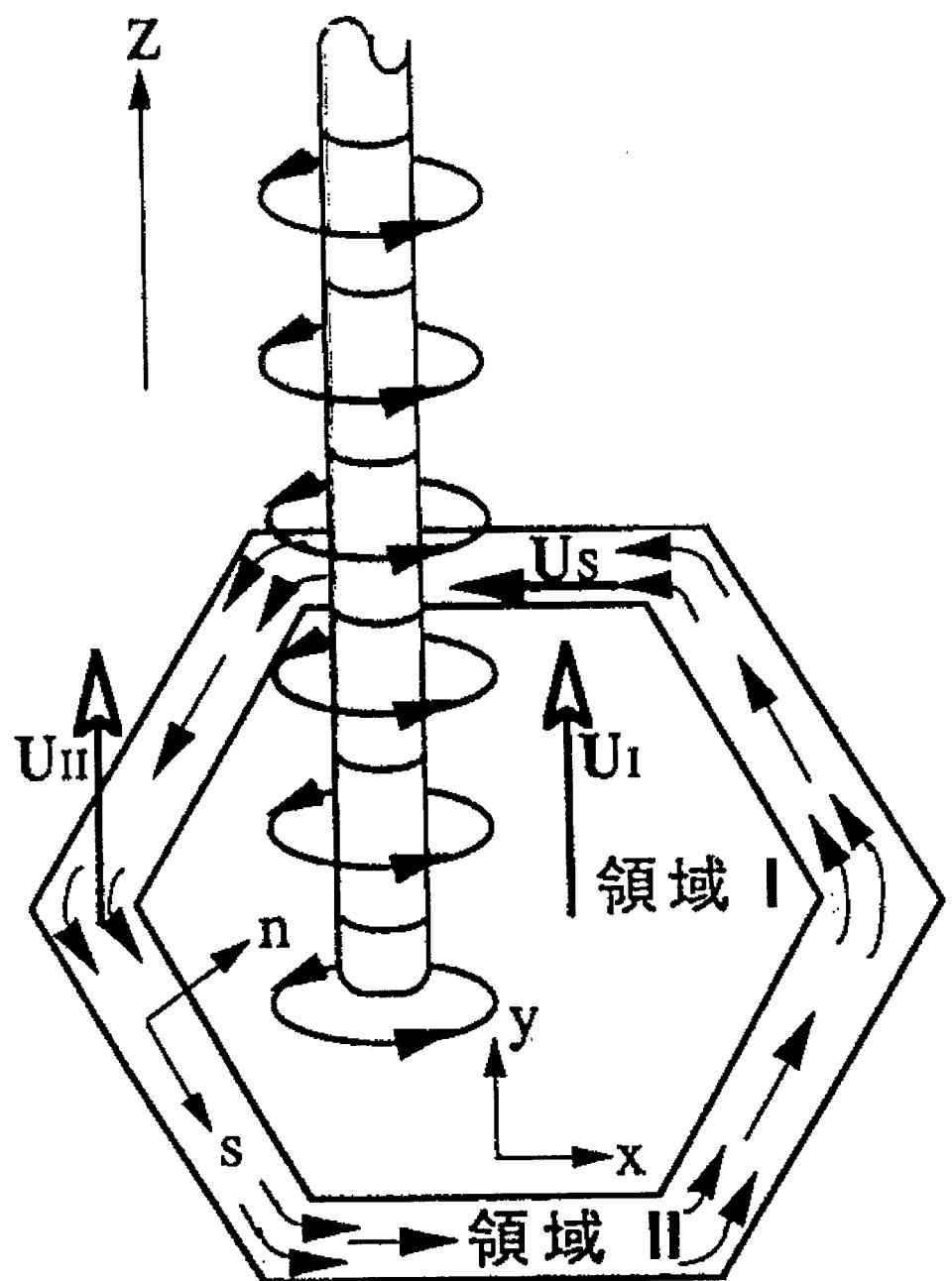
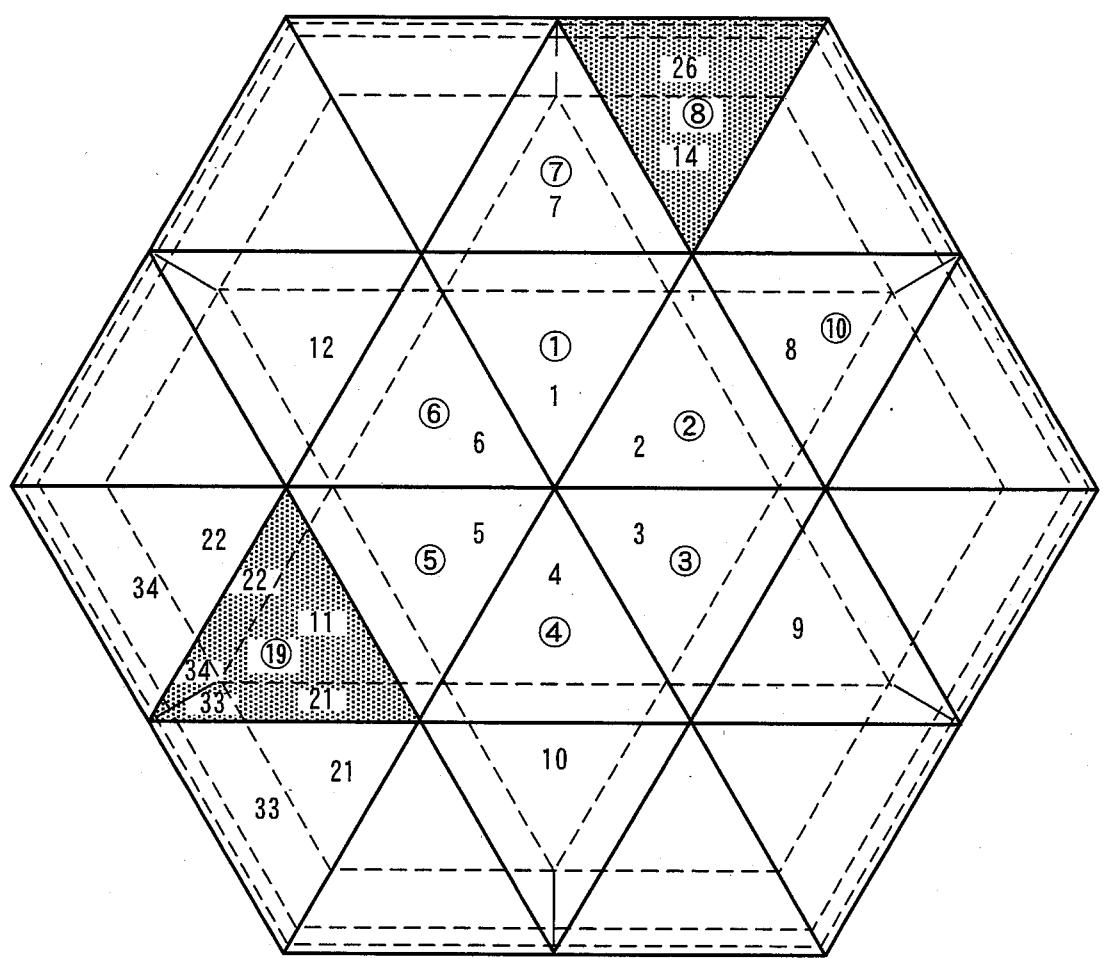


図 2.7-1 ポーラスボディモデルにおける流量場の仮定



実線と○数字：線出力計算モデルとメッシュ番号
破線と数字：冷却材温度計算モデルとセグメント番号

図 2.8-1 最大発熱ピンの線出力計算メッシュと冷却材温度計算セグメントの対応

3. “HESTIA” の計算値の妥当性確認

MK-III用炉心管理コードシステム“HESTIA”とMK-II用炉心管理コードシステム“MAGI”を用いて、MK-II炉心の記録計算を実施し、計算結果を比較することによりHESTIAの計算値の妥当性を確認した。計算に用いた炉定数セットはJFS-3-J3.2R⁽¹⁶⁾である。評価項目は、過剰反応度、最大線出力密度、最大集合体出力、径方向ピーキング係数、冷却材流量、冷却材出口温度、被覆管最高温度、燃料最高温度、炉心平均燃焼度、最大中性子束、実効遅発中性子割合である。以下に各評価結果を示す。

3.1 過剰反応度

MK-II性能試験炉心、及びMK-II炉心としての最終運転である第35サイクルの運転初期(BOC)、運転末期(EOC)における過剰反応度のMAGI及びHESTIAによる評価結果を以下に示す。なお、計算に用いた炉定数はJFS-3-J3.2Rである。

(単位: % $\Delta k/kk'$)

	MAGI		HESTIA		HESTIA-MAGI	
	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
性能試験炉心	1.88	1.24	0.44	-0.23	-1.44	-1.47
第35サイクル	3.23	2.28	2.03	1.04	-1.20	-1.24

HESTIAによる過剰反応度の評価結果は、MAGIに比べ系統的に過小評価である。これは空間メッシュ数及びエネルギー群数を詳細化したためである。SLAROM⁽¹⁷⁾及びCITATION⁽¹⁸⁾により、これらの詳細化の影響を評価した。その結果を以下に示す。対象としたのは、MK-II性能試験炉心のBOCである。

① 径方向メッシュ詳細化の効果

CITATIONを用いて、中性子エネルギー群数を7群、軸方向メッシュ幅を5cm(24メッシュ)とし、径方向メッシュ数をそれぞれ1、24とした場合の影響評価を行った。計算に用いた炉定数はJFS-3-J3.2Rである。過剰反応度の計算結果を以下に示す。これにより、径方向メッシュ数を1から24へ詳細化することにより、過剰反応度が約0.76% $\Delta k/kk'$ 低下することを確認した。

(単位: % $\Delta k/kk'$)

	径方向メッシュ数		24メッシュ-1メッシュ
	1	24	
過剰反応度	2.15	1.39	-0.76

② 軸方向メッシュ詳細化の効果

CITATION を用いて、中性子エネルギー群数を 7 群、径方向を 1 メッシュとし、軸方向メッシュ数をそれぞれ 24、46 とした場合の影響評価を行った。計算に用いた炉定数は JFS-3-J3. 2R である。計算結果を以下に示す。これにより、軸方向メッシュ数を 24 から 46 へ詳細化することにより、過剰反応度が約 0.23% $\Delta k/kk'$ 低下することを確認した。

(単位 : % $\Delta k/kk'$)

	軸方向メッシュ数		46 メッシュ - 24 メッシュ
	24	46	
過剰反応度	2.15	1.92	-0.23

③ エネルギー群数詳細化の効果

CITATION を用いて、中性子束のエネルギー群数を 7 群から 18 群へ詳細化した際の影響評価を行った。計算に用いた炉定数は JFS-3-J3. 2R、計算体系は RZ 体系ある。結果を以下に示す。これにより、エネルギー群数を 7 群から 18 群へ詳細化することにより、過剰反応度は約 0.45% $\Delta k/kk'$ 低下することを確認した。

(単位 : % $\Delta k/kk'$)

	エネルギー群数		18 群 - 7 群
	7	18	
過剰反応度	2.60	2.15	-0.45

①～③の評価結果をまとめると以下のとおりとなる。

径方向メッシュ詳細化の効果 (1→24 メッシュ)	約-0.76% $\Delta k/kk'$
軸方向メッシュ詳細化の効果 (24→46 メッシュ)	約-0.23% $\Delta k/kk'$
エネルギー群数詳細化の効果 (7→18 群)	約-0.45% $\Delta k/kk'$
合計	約-1.44% $\Delta k/kk'$
HESTIA-MAGI	約-1.44% $\Delta k/kk'$

以上の結果から、空間メッシュ及びエネルギー群数詳細化の効果は、合計で約-1.44% $\Delta k/kk'$ となった。特に径方向メッシュ詳細化の影響が大きいことがわかる。一方、HESTIA と MAGI の過剰反応度の計算値の差は、約-1.44% $\Delta k/kk'$ であり、これらの詳細化の効果と一致する。したがって、HESTIA と MAGI の計算値の差は、空間メッシュ及びエネルギー群数詳細化の影響であり、HESTIA の過剰反応度計算の妥当性が確認された。

3.2 最大線出力密度

MK-II 性能試験炉心及び MK-II 炉心第 35 サイクルの BOC、EOC における最大線出力密度を以下に示す。

(単位 : W/cm)

	MAGI		HESTIA	
	BOC	EOC	BOC	EOC
性能試験炉心	331	329	332	330
第 35 サイクル	313	308	316	310

アドレスはいずれも炉心中心<000>

最大線出力密度の評価結果は、運転サイクルによらず 1%以内で一致しており、これにより HESTIA の最大線出力密度に対する計算の妥当性を確認した。

3.3 最大集合体出力

MK-II 性能試験炉心及び MK-II 炉心第 35 サイクルの BOC、EOC における最大集合体出力を以下に示す。

(単位 : MW)

	MAGI		HESTIA	
	BOC	EOC	BOC	EOC
性能試験炉心	2.01	2.00	2.00	1.99
第 35 サイクル	1.87	1.85	1.89	1.86

アドレスは性能試験炉心 : <000>、第 35 サイクル<1E1>

最大集合体出力の評価結果は、運転サイクルによらず 1%以内で一致しており、これにより HESTIA の最大集合体出力に対する計算の妥当性を確認した。

3.4 径方向ピーピング係数

MK-II 性能試験炉心及び MK-II 炉心第 35 サイクルの、BOC、EOC における径方向ピーピング係数を以下に示す。

	MAGI		HESTIA	
	BOC	EOC	BOC	EOC
性能試験炉心	1.35	1.35	1.34	1.33
第 35 サイクル	1.47	1.45	1.46	1.44

径方向ピーピング係数の評価結果は、運転サイクルによらずよく一致しており、これにより HESTIA の径方向ピーピング係数に対する計算の妥当性を確認した。

3.5 冷却材流量

MK-II 性能試験炉心及び MK-II 炉心第 35 サイクルにおける冷却材流量を以下に示す。

(単位 : kg/s)

	MAGI	HESTIA
性能試験炉心	8.92	8.97
第 35 サイクル	8.00	8.07

アドレスは<000>

HESTIA の冷却材流量計算の結果は、運転サイクルによらず 1%以内で一致しており、これにより HESTIA の最大集合体出力に対する計算の妥当性を確認した。

3.6 冷却材出口温度

MK-II 性能試験炉心及び MK-II 炉心第 35 サイクルの、BOC、EOC における冷却材出口温度の評価結果を以下に示す。

(単位 : °C)

	MAGI		HESTIA	
	BOC	EOC	BOC	EOC
性能試験炉心	546	545	539	538
第 35 サイクル	555	555	549	549

アドレスは性能試験炉心 : <000>、第 35 サイクル<1E1>

冷却材入口温度を 370°C とすると、出入り口温度差 (ΔT) は以下のとおりとなる。

(単位 : °C)

	MAGI		HESTIA	
	BOC	EOC	BOC	EOC
性能試験炉心	176	175	169	168
第 35 サイクル	185	185	179	179

アドレスは性能試験炉心 : <000>、第 35 サイクル<1E1>

MAGI 及び HESTIA による評価結果は約 6~7°C (約 3%) で一致しており、これにより HESTIA の冷却材出口温度計算の妥当性を確認した。

3.7 被覆管最高温度

MK-II 性能試験炉心の BOC における被覆管最高温度の評価結果は、MAGI では 619°C (炉心装荷位置 (以下アドレス) <3E2>) に対して、HESTIA では 619°C (アドレス<000>) となり、アドレスが異なる結果となった。これは、MAGI によるアドレス<000>での被覆管温度は 617°C

であり、<000>と<3E2>の温度差が極めて小さく、出力分布及び冷却材流量の微小な相違により、被覆管温度が最高となる炉心装荷位置が逆転したためと考えられる。

HESTIA による被覆管温度評価結果、及びアドレス間の温度差が極めて小さいことを考慮すると、HESTIA の被覆管最高温度計算は妥当である。

(単位 : °C)

	MAGI				HESTIA	
	温度	アドレス	温度	アドレス	温度	アドレス
性能試験炉心	619	3E2	617	000	619	000

3.8 燃料最高温度

MK-II 性能試験炉心及び MK-II 炉心第 35 サイクルの、BOC、EOC における燃料最高温度の評価結果を以下に示す。

(単位 : °C)

	MAGI		HESTIA	
	BOC	EOC	BOC	EOC
性能試験炉心	2244	2232	2242	2229
第 35 サイクル	2146	2143	2174	2145

アドレスは性能試験炉心 : <000>、第 35 サイクル<1E1>

MAGI 及び HESTIA による評価結果はほぼ一致しており、これにより HESTIA の燃料最高温度計算の妥当性を確認した。

3.9 炉心平均燃焼度

MK-II 性能試験炉心の EOC における炉心平均燃焼度は、MAGI では 3,800MWd/t に対して、HESTIA の計算値は 3,840MWd/t であり、1%以内で一致している。第 35 サイクル BOC の値は、MAGI が 31,300MWd/t であるのに対して、HESTIA は 32,300MWd/t、EOC の値は MAGI が 36,400MWd/t、HESTIA が 37,500MWd/t であり、約 3%以内で一致している。以上より、HESTIA の炉心平均燃焼度計算の妥当性を確認した。

(単位 : MWd/t)

	MAGI		HESTIA	
	BOC	EOC	BOC	EOC
性能試験炉心	-	3,800	-	3,840
第 35 サイクル	31,300	36,400	32,300	37,500

3.10 最大中性子束

MK-II 性能試験炉心及び MK-II 炉心第 35 サイクルの、BOC、EOC における最大中性子束の評価結果を以下に示す。

(単位 : n/cm² · s)

	MAGI		HESTIA	
	BOC	EOC	BOC	EOC
性能試験炉心	4.42×10^{15}	4.45×10^{15}	4.50×10^{15}	4.53×10^{15}
第 35 サイクル	4.02×10^{15}	4.04×10^{15}	4.14×10^{15}	4.15×10^{15}

MAGI 及び HESTIA による評価結果は約 3%以内で一致している。これにより HESTIA の最大中性子束の妥当性を確認した。

3.11 実効遅発中性子割合

MK-II 性能試験炉心及び MK-II 炉心第 35 サイクルの、BOC、EOC における実効遅発中性子割合の評価結果を以下に示す。

	MAGI		HESTIA	
	BOC	EOC	BOC	EOC
性能試験炉心	3.95×10^{-3}	3.95×10^{-3}	3.94×10^{-3}	3.94×10^{-3}
第 35 サイクル	4.26×10^{-3}	4.26×10^{-3}	4.25×10^{-3}	4.26×10^{-3}

MAGI 及び HESTIA による評価結果は良く一致しており、これにより HESTIA の実効遅発中性子割合計算の妥当性を確認した。

3.12 反射体に隣接する炉心燃料の出力分布の改善

MAGI では、制御棒や反射体と隣接するような中性子束・スペクトルの局所的な変化が大きい領域については、炉心燃料集合体内の中性子束及びスペクトル変化を詳細に計算できなかったため、HESTIA ではエネルギー群数及び空間メッシュ数を詳細化することにより、計算精度の向上を図った。図 3.12-1 に、MK-II 性能試験炉心 BOC における反射体隣接位置（アドレス：5C3）の炉心燃料集合体内の出力分布評価結果を示す。また、図 3.12-2 に集合体内の径方向出力分布評価結果を示す。MAGI で求めた中性子束をベースに、一群ポテンシャル理論コード(ESPRIT-J)で炉心燃料集合体内の出力分布を求める直線的に変化するのに対して、HESTIA では反射体隣接側の出力増加を模擬できることを確認した。また、集合体内の中性子スペクトルの比較を図 3.12-3 に示す。これより、炉心中心側に対して反射体側の中性子スペクトルの軟化を評価できることを確認した。

3.13 ポーラスボディモデルによる集合体内の冷却材温度分布の改善

MK-II 性能試験炉心における集合体内の径方向冷却材温度分布の評価結果を図 3.13-1 に示す。ポーラスボディモデルを採用した HESTIA の結果は、サブチャンネルモデルの結果と良く一致しており、これにより HESTIA で用いたポーラスボディモデルによる冷却材温度計算の妥当性を確認した。

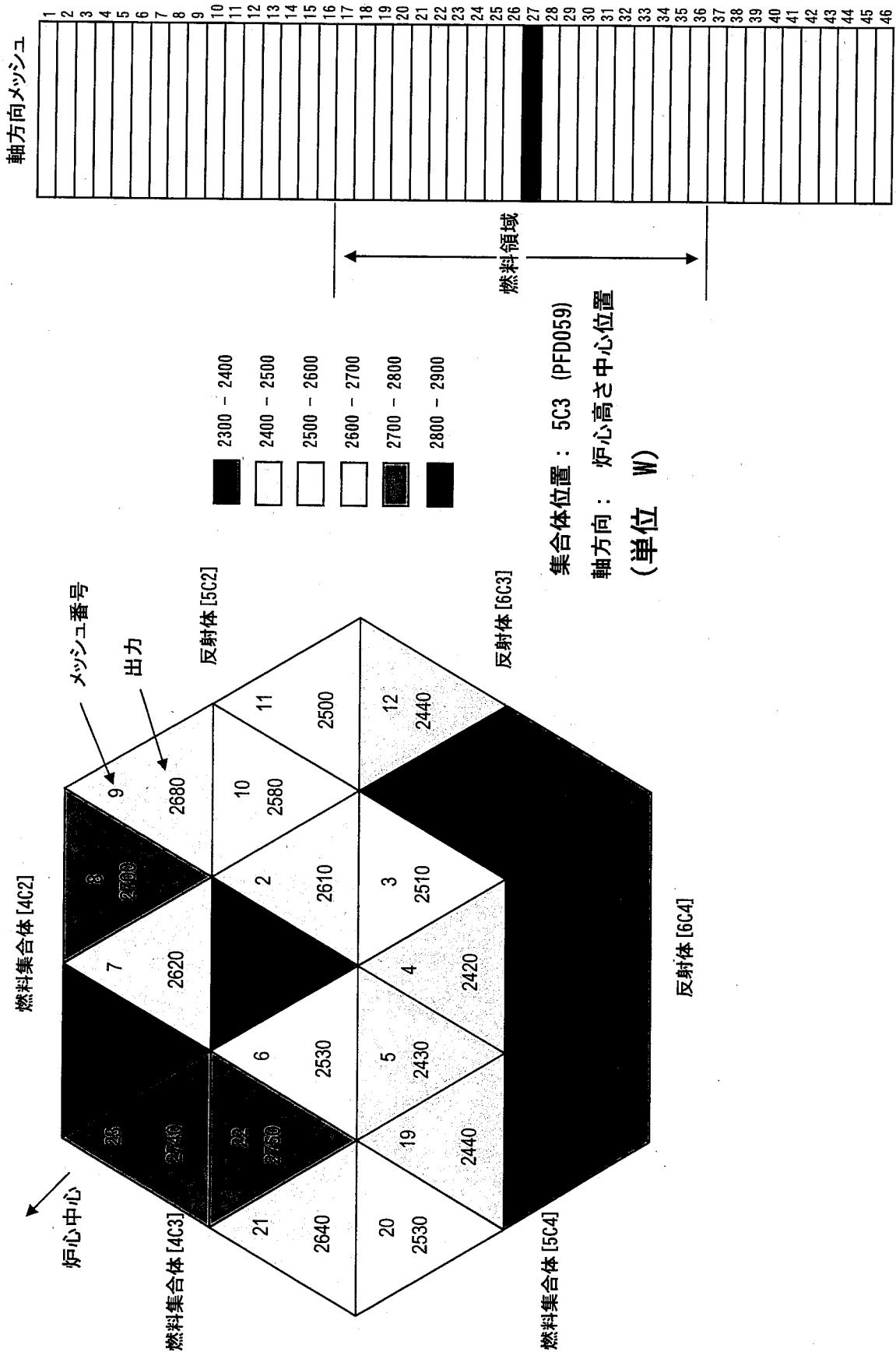


図3.12-1 反射体に隣接する燃料集合体内の出力分布

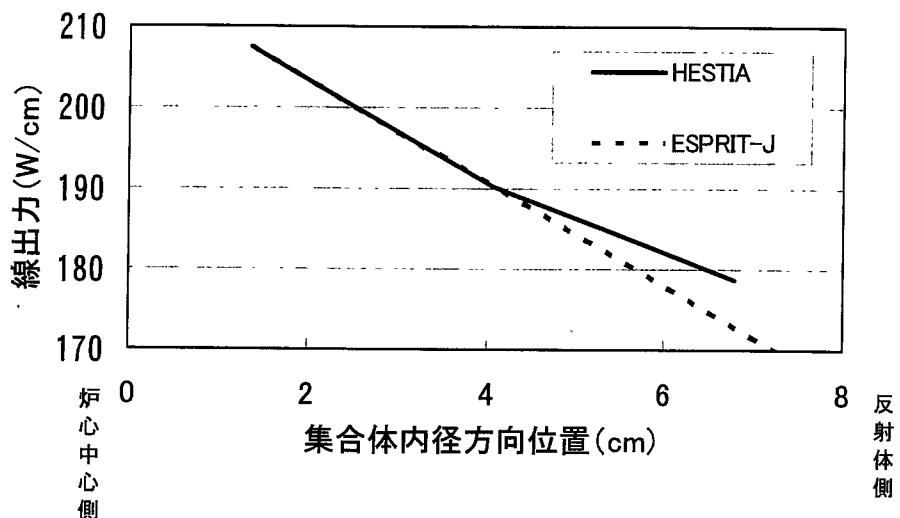


図3.12-2 反射体隣接位置の炉心燃料集合体内の径方向出力分布

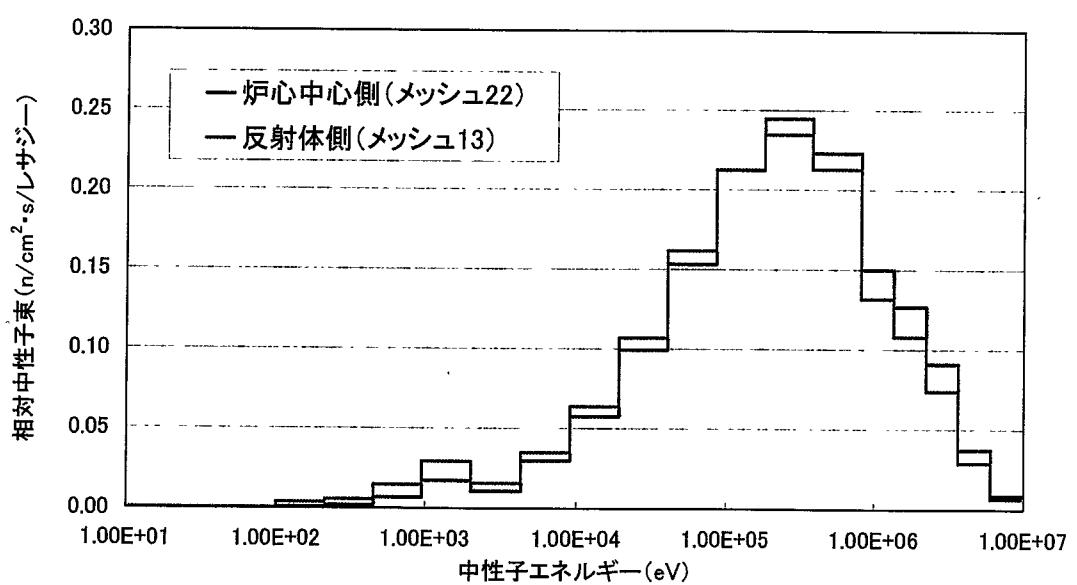


図3.12-3 反射体に隣接する集合体内の中性子スペクトルの比較
(MK-II 第0サイクルBOC アドレス5C3)

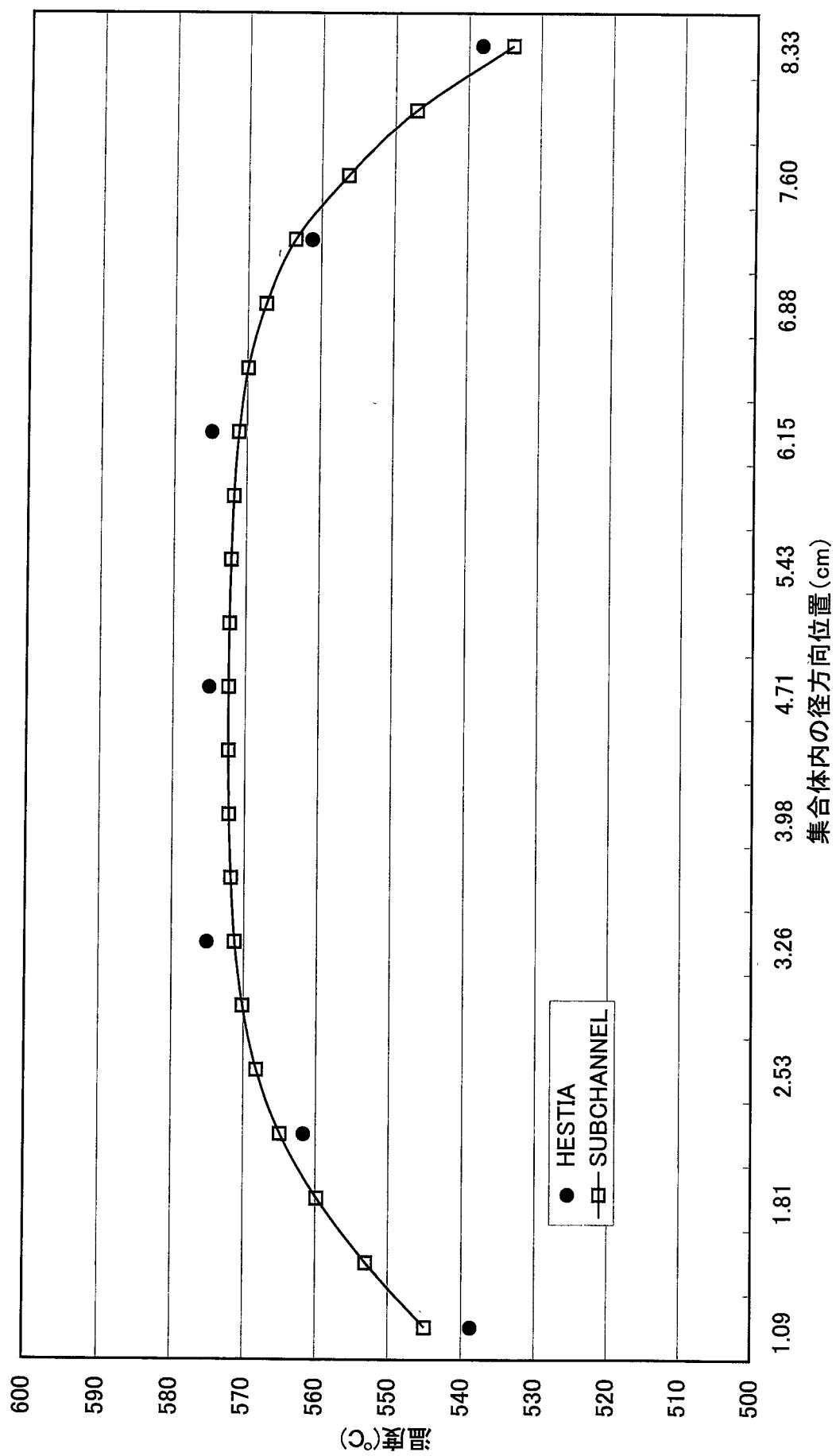


図3.13-1 集合体内の径方向温度分布の比較(出口付近)

4. おわりに

「常陽」は世界的にも貴重な高速炉であり、MK-III計画による照射性能の高度化により、照射試験炉として今まで以上に内外のニーズに応えていくこととなる。よって、一般的な炉心管理のための核特性の把握はもちろんのこと、照射場における照射条件評価の更なる精度向上が重要である。MK-II炉心管理コードシステム“MAGI”で課題となっていた反射体と隣接する位置における出力分布、中性子束分布の計算精度の改善は、MK-III炉心管理コードシステム“HESTIA”により達成されることを確認した。

今後は、MK-III炉心の炉心・燃料管理に HESTIA を用いるとともに、MK-III性能試験及びそれに引き続いて行われる核特性測定用集合体を用いた出力・中性子束分布測定試験の解析により、本コードシステムの計算精度を評価する計画である。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、アイ・ティ・ジェイ株式会社の伊藤智之氏には炉心管理コードシステム “MAGI” 及び “HESTIA” による核計算作業にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) S. Suzuki *et al.*, "Upgrading Program of Experimental Fast Reactor JOYO -The MK-III Program-", *Proc. of 10th Pacific Basin Nuclear Conference*, Kobe, Japan, Vol.1, p.759-768 (1996).
- (2) T. Sekine *et al.*, "Upgrade of irradiation test capability of the experimental fast reactor JOYO," *Proc. of 11th International Symposium on REACTOR DOSIMETRY*, Belgium, Aug. 18-23, 2002, to be published.
- (3) S. Miyakawa *et al.*, "The Fruits and Hope of the Experimental Fast Reactor "JOYO", " *Proc. of 13th Pacific Basin Nuclear Conference*, Shenzhen, China, Oct. 21-25, 2002, p.247 (2002).
- (4) 有井祥夫, 他 : 高速実験炉「常陽」MK-II 炉心の炉心・燃料管理経験, 日本原子力学会誌 Vol.39, No.4, p.315 (1997).
- (5) 大川内靖, 他 : 「常陽」MK-II 炉心特性データベース —JENDL-3.2 への改訂—, JNC TN9410 2001-019 (2001).
- (6) T. Nakagawa, "Summary of JENDL-2 General Purpose File," JAERI-M 84-103 (1984).
- (7) Japanese Nuclear Data Committee: "Graphs of Evaluated Neutron Cross Sections in JENDL-2," JAERI-M 84-052 (1984).
- (8) H. Takano and Y. Ishiguro, "Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2," JAERI-M 82-135(1982).
- (9) R. J. Tuttle, *Proc. of Consultants' Meeting on Delayed Neutron Properties*, IAEA, Vienna (1979).
- (10) G. R. Keepin, "Physics of Nuclear Kinetics" (1965).
- (11) D. Saphier, "Evaluated Delayed Neutron Spectra and Their importance in Reactor Calculations," Nuclear Science and Engineering 62, p.660 (1977).
- (12) R. P. Hibert *et al.*, "Evaluation of Material Property Correlations used in LIFE-II", GEAP-13967 (1973).
- (13) G. H. Golden and J.V.Tokar, "Thermophysical Properties of Sodium", ANL-7323 (1967).
- (14) STAINLESS STEEL CLADDING DEVELOPMENT, Quarterly Progress Report, WARD-4135-5 (1969).
- (15) E. U. Khan *et al.*, "A Porous body model for predicting temperature distribution in wire-wrapped fuel rod assemblies," Nuclear Engineering and Design 35 (1975).
- (16) 千葉豪, 他 : JFS-3-J3.2 の重み関数訂正による核特性への影響評価, JNC TN9400 2001-109 (2001).

- (17) M. Nakagawa and K. Tsuchihashi, "SLAROM : A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor," JAERI-1294 (1984).
- (18) T. B. Flower *et al.*, "Nuclear Reactor Core Analysis Code:CITATION," ORNL/TM-2496 Rev.2 (1971).