

「もんじゅ」炉心におけるセル非均質効果に関する検討
—連続エネルギーモンテカルロコードMVPによる解析評価—
(研究報告)

2002年3月

核燃料サイクル開発機構

敦賀本部国際技術センター

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ください。

〒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

Inquiries 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 319-1184,
japan

©核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

「もんじゅ」炉心におけるセル非均質効果に関する検討 —連続エネルギーモンテカルロコード MVP による解析評価—

諸橋 裕子*、石橋 淳一*、西 裕士*

要 旨

従来「もんじゅ」初臨界炉心の臨界解析は、JUPITER 実験解析で確立された標準的手法を基本として実施してきた。基本とする核データライブラリとしては JENDL-3.2 を使用し、これを処理して 70 群の炉定数セットとした JFS-3-J3.2 をベースに、70 群炉定数を作成している。次に、この 70 群炉定数を用いて 3 次元 Hex-Z 拡散計算により体系計算が実施され、これを基準計算としている。

この場合、エネルギーについては、本来連続量であるものを 70 群に離散化近似して扱うことになる。また、空間座標も本来連続量であるが、集合体当たり 1 メッシュに離散化近似している。更に、本来解くべき輸送方程式も、拡散近似により解いている。燃料集合体内の燃料ピン、ラッパ管等の微細構造も均質化近似している。そのため、これらの近似に伴う厳密解からのズレを別途補正することで、本来の厳密解相当の実効増倍率を求めている。その内の補正量の一つであるセル非均質効果については、燃料集合体内の微細構造を考慮した非均質セルモデルにより炉定数を作成し、これを均質セル計算による 70 群拡散計算結果と比較することで $0.3\sim0.4\% \Delta k$ と評価されている。この補正方法では、これら近似効果は相互に独立で、重ねあわせが可能であることを前提としている。ただし、従来手法の 70 群エネルギー離散化効果や各種近似効果の相互独立性は、实用上の困難さから、必ずしも確認されている訳ではない。

本検討では連続エネルギーモンテカルロコードを用い、全炉心体系を忠実に模擬することによる、「もんじゅ」炉心のセル非均質効果を中心に、エネルギーの離散化近似効果も含めて、従来手法の妥当性を検討した。

解析結果は、セル非均質効果が従来の評価値よりも大きくなり、「もんじゅ」初臨界炉心で $0.54\% \Delta k/kk'$ 、初装荷初期炉心で $0.50\% \Delta k/kk'$ となった。また、セル非均質効果にはプルトニウム富化度依存性があること、体系温度、中性子エネルギーの離散化近似も非均質効果へ影響することがわかり、セル非均質効果は炉心状態の違いに依存する可能性があることが判明した。

これらの結果は今後、炉心解析手法の更なる高精度化、高信頼化へ反映していきたい。

* 敷賀本部 国際技術センター 炉心技術開発グループ

March, 2002

A Study on Cell Heterogeneity Effects in the MONJU Core —Evaluation using the Continuous Energy Monte Carlo Code MVP—

MOROHASHI Yuko*、ISHIBASHI Junichi*、NISHI Hiroshi*

Abstract

The criticality analysis of the MONJU initial critical core was conducted based on conventional methods developed by the JUPITER program. Effective cross sections were created, considering self-shielding effects, from the JAERI Fast Set (JFS-3-J3.2); group constants in 70 energy groups, which were processed from the Japanese Evaluated Nuclear Data Library (JENDL-3.2). These were used in the standard calculation method: a 3-Dimensional Hexagonal-Z whole core calculation by diffusion theory.

This standard calculation, however, involves several approximations. The continuous neutron energy spectrum is divided into 70 discrete energy groups and continuous spatial coordinates are represented by assembly-wise spatial meshes. Original transport equations are solved by diffusion theory (isotropic scattering) approximation and fine structures in fuel assemblies, such as fuel pins or wrapper tubes, are processed into cell-wise homogeneous mixture.

To improve the accuracy of the results, these approximations are compensated for by applying corresponding correction factors. Cell heterogeneity effects, among them, were evaluated to be 0.3-0.4% $\Delta k/kk'$ by diffusion calculations based on the group constants, obtained by heterogeneous cell model calculations. This method, however, has the drawback that it assumes that there is no interdependency of the related approximations; energy grouping, diffusion approximation, etc.

A study on cell heterogeneity effects has been conducted using the continuous energy Monte Carlo method to validate the adequacy of this non-interdependency assumption.

As a result, cell heterogeneity effects slightly larger than those from conventional methods have been obtained: 0.54% $\Delta k/kk'$ for the initial critical core, and 0.50% $\Delta k/kk'$ for the initial full power core. Dependency on plutonium enrichment and fuel temperature has also been identified, which implies the dependency of the cell heterogeneity effects on the specific core conditions. Grouping approximation of neutron energy has been found to be a non-negligible factor.

These results are to be utilized for the development of the future advanced core analysis methods with increased accuracy and reliability.

* Core Development Group, International Cooperation and Technology Development Center,
Tsuruga Head Office, JNC

目次

| | |
|-----------------------|-----|
| 要旨 | i |
| Abstract | ii |
| 目次 | iii |
| 表リスト | iv |
| 図リスト | v |
| | |
| 1. はじめに | 1 |
| | |
| 2. 検討方針と解析手法 | |
| 2.1 検討方針 | 3 |
| 2.2 解析対象とセルモデル | 4 |
| 2.3 解析手法および解析体系 | 5 |
| | |
| 3. 解析結果と検討 | 7 |
| | |
| 4. まとめ | 11 |
| | |
| 謝辞 | 13 |
| 参考文献 | 14 |

表リスト

- 表 1 - 1～1 - 3 燃料集合体および制御棒集合体設計仕様
表 1 - 4 解析対象炉心構成要素 密度データ
表 1 - 5 " 温度データ
表 1 - 6 解析対象炉心 炉心支持板膨張率
表 2 - 1 計算結果 初臨界炉心における非均質効果 全炉心体系
表 2 - 2 " 内側炉心無限配列体系
表 2 - 3 " 外側炉心無限配列体系
表 2 - 4 " 全炉心体系(燃料温度実機温度)
表 3 - 1 計算結果 初装荷初期炉心における非均質効果 全炉心体系
表 3 - 2 " 内側炉心無限配列体系
表 3 - 3 " 外側炉心無限配列体系

図リスト

- 図 1 - 1 非均質モデル
- 図 1 - 1 均質モデル
- 図 1 - 1 ラッパ管内均質モデル
- 図 2 - 1 全炉心体系
- 図 2-2 燃料集合体無限配列体系

1. はじめに

従来「もんじゅ」初臨界炉心の臨界解析は、JUPITER 実験解析で確立された標準的手法を基本として実施されてきた。基本とする核データライブラリとしては JENDL-3.2 を使用しているが、これを処理して 70 群の炉定数セットとした JFS-3-J3.2 をベースに、まず衝突確率法によるセル計算で自己遮蔽因子を考慮した 70 群炉定数を作成している。次に、この 70 群炉定数を用いて 3 次元 Hex-Z 拡散計算により体系計算が実施され、これを基準計算としている。¹⁾

この場合、エネルギーについては、本来連続量であるものを 70 群に離散化近似して扱うことになる。また、空間座標も本来連続量であるが、集合体当たり 1 メッシュに離散化近似している。更に、本来解くべき輸送方程式も、拡散近似により解いている。そのため、これらの近似に伴う厳密解からのズレを別途補正することで、本来の厳密解相当の実効増倍率を求めている。¹⁾

例えば、メッシュ効果補正については、3 次元 6 群の 6 角メッシュ体系計算（集合体当たり 1 メッシュ）と 3 角メッシュ体系計算（集合体当たり 6 メッシュ）の比較により外挿評価している。また、輸送効果補正については、3 次元 6 群 XYZ 体系での輸送計算（中性子束角度分点 S4、非等方散乱近似 P0）と拡散計算の比較に基づいて評価されている。¹⁾

更に、集合体内の燃料ピン、ラッパ管などの微細構造を均質化近似することによるセル非均質効果については、これらを考慮した非均質セルモデルにより炉定数を作成し、これを均質セル計算による結果と比較することで評価されている。^{2) 3) 4)}

すなわち、従来から二重非均質効果として知られているピン非均質セルモデルとラッパ管非均質セルモデルにより炉定数を作成し、それを用いた拡散近似体系計算により、それぞれ燃料ピン非均質効果、集合体内中性子束分布効果、ラッパ管周辺ストリーミング効果、ピン周辺ストリーミング効果を評価している。

なお、エネルギー群縮約効果補正是基準計算を 70 群で行っているため無視し得るものとされている。¹⁾

ただし、これらの補正方法では、エネルギーの離散化効果と空間座標の離散化効果は相互に独立で、重ねあわせが可能であることを前提としている。また、輸送効果についても、拡散近似の影響はエネルギー離散化近似や空間座標の離散化とは独立と想定している。セル非均質効果についても同様である。更に、エネルギーの離散化については、70 群分割近似の影響は無視できることを前提としている。

これらは、以上の補正方法が成立するための前提条件ではあるが、従来、その妥当性を確認することは、実用上困難であった。しかし、近年、計算機の処理能力の向上

は目覚しく、最新のパソコンを利用すれば、「もんじゅ」全炉心を忠実に模擬した体系でも、数千万ヒストリーの連続エネルギーモンテカルロ輸送計算が、数日以内の実用的範囲で実施できるようになってきた。これは、従来モンテカルロ法の課題であった統計誤差について、少なくとも実効増倍率のような炉心全体が寄与する物理量については、相当の統計精度が期待できることを意味する。連続エネルギーモンテカルロ輸送計算は、基本的にはエネルギーや空間座標に離散化近似を持ち込みず、本来の輸送方程式を解く手法であり、統計誤差の問題を除けば、現状では最も厳密な計算方法と考えられている。

そこで、本検討では、これら補正のうちでも、特に連続エネルギーモンテカルロ輸送計算による確認が期待できるセル非均質効果を中心に、エネルギーの離散化近似効果も含めて、従来手法の妥当性を確認することとした。

2. 検討方針と解析手法

2.1 検討方針

セル非均質効果とは、核計算において燃料集合体の構造（及びその周辺の集合体間ナトリウム）を、厳密な非均質モデルとして取り扱う代わりに、燃料集合体を均質と見なした均質モデルで取扱うことにより生ずる核計算上の誤差を指す。これは一種の近似誤差であり、通常は計算結果（均質モデル計算）に対する補正項として扱われる。

従来「もんじゅ」炉心におけるセル非均質効果は、集合体内の燃料ピン、ラッパ管などの微細構造を考慮した非均質セルモデルにより炉定数を作成し、これを均質セル計算による結果と比較することで $0.3\sim0.4\% \Delta k$ と評価されている。²⁾

すなわち、従来から二重非均質効果として知られているピン非均質セルモデルとラッパ管非均質セルモデルにより炉定数を作成し、それを用いた拡散近似体系計算により、それぞれ燃料ピン非均質効果、集合体内中性子束分布効果、ラッパ管周辺ストリーミング効果、ピン周辺ストリーミング効果を評価している。^{2) 3) 4)}

ただし、既述のように、この補正方法では、エネルギーの離散化近似効果や空間座標の離散化近似効果、あるいは拡散近似効果（輸送効果）等は、セル非均質効果とは相互に独立で、重ねあわせが可能であることを前提としている。しかし、実用上の困難さから、従来その妥当性は必ずしも確認されている訳ではない。本検討では、これらの近似を持ち込まない連続エネルギーモンテカルロ輸送計算により、セル非均質効果を中心に、エネルギーの離散化近似効果も含めて、従来手法の妥当性を検証する。

なお、ここでは、セル非均質効果が以下の2つの成分から構成されるものと想定して、その分離を試みることとする。

(1) 核燃料物質集中効果

セル内の平均的な原子数密度を模擬した均質モデルに比べると、非均質モデルでは燃料ピン（核燃料物質）が燃料集合体の中央部に集中して配置される。更に、燃料ピン中の燃料ペレットもピン中央部に集中配置される。その結果核分裂反応がより起こりやすくなり、正の反応度効果をもたらすと考えることができる。

なお、燃料ピンを厳密に扱うことにより燃料ピン間のナトリウム、被覆管一ペレット間のギャップが忠実にモデル化され、ストリーミングパスができるので、負の反応度効果をもたらすことも考えられる。すなわち、上記はこの効果との相殺を考えても、なお残る正味の反応度効果となっている。

ここではこの効果を「核燃料物質集中効果」と呼ぶことにする。

(2) ラッパ管間ギャップストリーミング効果

非均質モデルでは「燃料集合体間のラッパ管間隙を中性子がストリーミングして漏洩する現象が忠実に模擬される」ために、燃料集合体外周部からの中性子漏洩がより起こりやすくなり、負の反応度効果をもたらすことが考えられる。この場合、全炉心を忠実に模擬することによる炉心最外周部からの中性子漏洩の効果も、負の反応度効果として含まれる。ここではこれらの効果を「ラッパ管間ギャップストリーミング効果」と呼ぶことにする。

すなわち、これらの効果が相互に影響して、結果的に全炉心体系でのセル非均質効果になると見える。本検討では全体的なセル非均質効果に加え、これら個々の効果についても検討を進め、非均質効果に関する分析を進めることとする。

2.2 解析対象とセルモデル

本検討での解析対象は、以下の 2 体系とした。

- ・もんじゅ初臨界炉心
- ・もんじゅ初装荷初期炉心

これら両体系の炉心配置を図 2-1 に、また燃料集合体及び制御棒集合体の主要な設計仕様を表 1-1~1-4 に示す。^{5) 6) 7) 8)}

なお、スペーサワイヤについては体積を保存するように、被覆管肉厚を厚くして計算を行っている。制御棒挿入深度については初臨界、初装荷初期状態の深度をモデル化した。

集合体（セル）の非均質性を表現するモデルについては、以下の 3 つを考える。

(1) 非均質モデル

燃料集合体をそれぞれ燃料ペレット、被覆管、冷却材、ラッパ管等に分離して、実際の燃料集合体内部構造を忠実に模擬した体系として扱うモデルである。モデル図を図 1-1 に示す。

(2) 均質モデル

非均質モデルに対し、集合体（セル）内を一括して均質化し、インベントリを保存した平均の原子数密度のみ模擬した体系として扱うモデルである。モデル図を図 1-2 に示す。

(3) ラッパ管内均質モデル

セル非均質効果を 2 つの成分に分けるために考案したモデルである。ラッパ管の外

側のナトリウムとその他を均質化した領域の2領域モデルとし、均質モデルとの比較からラッパ管間ギャップストリーミング効果が、また非均質モデルとの比較から核燃料物質集中効果が得られると考えた。モデル図を図1-3に示す。

(4) その他（熱膨張効果の取り扱いについて）

以上に示した寸法は設計データに基づく室温状態でのものであり、本来ならば、解析体系に応じた状態の炉心温度における径方向・軸方向の熱膨張効果（炉心支持板、ラッパ管、被覆管、ペレット等の寸法・密度変化）を考慮するべきである。ただし、今回は計算の便宜上、中でも反応度効果の約7割以上を占める炉心支持板の熱膨張のみを考慮した。これは炉心支持板の熱膨張による集合体配列ピッチの変化を模擬するものである（ドップラー効果については、別途厳密に考慮。解析上の温度条件を表1-5に示す）。各解析対象炉心での炉心支持板の膨張率を表1-6に示す。

本検討では実効増倍率そのものではなく、モデル化の違い（均質／非均質）による反応度効果（＝非均質効果）を評価対象としているため、以上の差異は両体系で相殺されるものと考えた。

2.3 解析手法及び解析体系

(1) 使用コード

以上のセルモデルに基づく実効増倍率の計算には、モンテカルロ中性粒子輸送計算コード MVP Version2.0⁹⁾を使用する。

粒子輸送モンテカルロ法は中性子や γ 線などの放射線の挙動を厳密に計算するための計算手法であり、同様の計算を行うほかの手法（拡散近似、決定論的手法による輸送計算など）に比べて、統計誤差は残るもの、近似を持ち込まない精確な計算が行える点に特長がある。

MVPコードは中性子及び光子の輸送計算問題をモンテカルロ法によって計算するプログラムであり、原子炉炉心解析、臨界安全性解析、遮蔽計算、放射線計測機器の設計計算等、多くの用途に利用できるという汎用性を持っている。

MVPコードは全炉心を燃料ピンレベルまで、忠実にモデル化し輸送計算を実行できるうえに、一般的な拡散計算コード等で用いられるような均質モデルでも計算を行うことができる。

このような特長を利用して連続エネルギーモンテカルロ法輸送計算による、より厳密なセル非均質効果の評価、検討を行うものとする。

(2) 核データライブラリ

核データライブラリとしては、JENDL-3.2をベースとしたMVP用任意温度対応ライブラリを用いる⁹⁾。

(3) 解析体系

解析対象とした初臨界炉心、初装荷初期炉心に対し、それぞれ以下の体系について実効増倍率を計算する。

- ・全炉心体系（非均質モデル、均質モデル、ラッパ管内均質モデル）
- ・内側炉心燃料無限配列体系（非均質モデル、均質モデル）
- ・外側炉心燃料無限配列体系（非均質モデル、均質モデル）

全炉心体系は、内側炉心燃料から中性子遮蔽体まで、炉心構成要素 715 体をすべて忠実にモデル化した体系である。

無限配列体系は燃料集合体 1 体の側面を完全反射境界で囲うことで無限配列炉心を模擬した仮想的体系である。これは、無限配列体系による結果の比較から、非均質効果の Pu 富化度依存性や径方向ストリーミング効果等を分離して確認するために考案した体系である。

なお、無限配列体系における初臨界炉心と初装荷初期炉心の違いは、集合体間のギャップと燃料の富化度及び組成（実組成と設計組成）である。

図 2-1、2-2 に体系概念図を示す。

3. 解析結果と考察

本検討では連続エネルギーモンテカルロコードを用い、全炉心体系を忠実に模擬することによる、「もんじゅ」炉心のセル非均質効果の評価を行った。

初臨界炉心におけるセル非均質効果を表 2-1~2-4、初装荷初期炉心における同効果を表 3-1~3-3 に示す。

従来は衝突確率法に基づくセル計算コード SLAROM を用い、ピン非均質セルモデル、ラッパ管非均質セルモデルを組合わせて作成した実効断面積を用いた体系計算と、均質モデルによる実効断面積を用いた体系計算同士の比較から、非均質効果を評価している。更に各々のセルでのストリーミング効果を別途考慮する、という方法をとっている²⁾。この方法では、モデル化による近似や拡散近似、断面積を 70 群に離散化近似することによる影響が、セル非均質効果として含まれてしまう。

これに対し、本検討によるセル非均質効果は、従来の評価値 ($0.3\sim0.4\% \Delta k^2$) よりも大きくなり、初臨界炉心で $0.54\% \Delta k/kk'$ 、初装荷初期炉心で $0.50\% \Delta k/kk'$ となつた。また、セル非均質効果にはプルトニウム富化度依存性があること、体系温度、核反応断面積の離散化近似も非均質効果へ影響することがわかった。

今回の解析によって得られた結果の詳細を以下にまとめ、それについての考察を述べる。

(1) プルトニウム富化度依存性

今回の解析結果によれば、初臨界炉心内側炉心無限配列体系のセル非均質効果は $0.47\% \Delta k/kk'$ 、同外側炉心無限配列体系のセル非均質効果は $0.25\% \Delta k/kk'$ となつた。また、初装荷初期炉心内側炉心無限配列体系のセル非均質効果は $0.37\% \Delta k/kk'$ 、同外側炉心無限配列体系のセル非均質効果は $0.23\% \Delta k/kk'$ となつた。

のことから、セル非均質効果にはプルトニウム富化度依存性のあることがわかる。今回の解析ではプルトニウム富化度 $10\sim20\%$ 前後でサーベイ計算を実施したが、この範囲のプルトニウム富化度に限っては、プルトニウム富化度が高くなるほど、非均質効果が小さくなるとの結果が得られた。

なお、ここでは非均質効果を反応度差 ($\Delta \rho = \Delta k/kk'$) によって評価しているが、無限配列体系のように実効増倍率が 1.0 を大きく上回るような体系を評価する場合には、適当ではない可能性がある。上記の結果を増倍率の絶対変化 (Δk) でみると、初臨界炉心で内側 $0.61\% \Delta k$ 、外側 $0.47\% \Delta k$ 、初期炉心では内側 $0.49\% \Delta k$ 、外側 $0.43\% \Delta k$ となり、Pu 富化度依存性は確かに存在するものの、反応度差ほどの影響はないとも考えられる。

そのうえでなお、Pu 富化度依存性が表れる要因としては、燃料核種の自己遮蔽効果が考えられる。燃料部分を非均質モデル化した場合、前述したように「核燃料物質

「集中効果」による正の反応度効果が生じると考えられるが、このときに自己遮蔽効果の観点からPu富化度の違いが以下のように働く可能性が考えられる。

- ・核燃料物質が集中するとU-238の自己遮蔽効果により、U-238自身の吸収反応が低下し、相対的に正の反応度効果をもたらす。Pu富化度が高く、U-238の存在比率が小さければこの効果も小さくなり、負の反応度効果となって表れる。そのため「核燃料物質集中効果」による正の反応度効果を結果的に小さくする。
- ・核燃料物質が集中すると、核分裂性Puの自己遮蔽効果により、核分裂性Pu自身の核分裂反応が低下する。Pu富化度が高い場合、この効果が大きくなり、負の反応度効果となって表れる。そのため「核燃料物質集中効果」による正の反応度効果を小さくする。

これにより、外側炉心燃料では非均質化による増倍率の変化が小さく、非均質効果が小さく表れると解釈することができる。

(2) 核燃料物質集中効果とラッパ管間ギャップストリーミング効果

当初、全炉心体系のセル非均質効果は、内側炉心無限配列体系と外側炉心無限配列体系それぞれのセル非均質効果が平均化されて、無限配列体系の両セル非均質効果の中間的な値になるものと考えた。また、無限配列体系に対し、有限である全炉心体系では中性子漏洩量（ストリーミング効果）が多くなり、セル非均質効果は小さくなる方向と考えて、全炉心体系でのセル非均質効果を2つの成分に分けることを試みた。その結果は、全炉心体系におけるセル非均質効果が無限配列体系よりも大きくなるという結果になった。

これも、全炉心体系（増倍率が1に近い）と無限配列体系（増倍率が1を上回る）を同じ反応度差($\Delta\rho$)によって整理・評価した結果であり、もともとの実効増倍率が大きく異なる体系計算であるため、検討の余地がある。また、全炉心体系での計算では、内側・外側炉心の非均質効果のほかに、プランケット燃料集合体の非均質効果も含まれていると考えられる。

いずれにしてもこれらの結果には、統計誤差の処理やMVPコード固有の体系モデル取り扱い上の特徴など、まだ検討の余地もあるかと思われ、引き続き検討を実施していきたい。

なお、以上の点に更なる検討の余地はあるものの、核燃料物質集中効果とラッパ管間ギャップストリーミング効果の2つに成分分けした結果は、核燃料物質集中効果が $0.60\%\Delta k/kk'$ 、ストリーミング効果が $-0.10\%\Delta k/kk'$ となり、着目範囲に多少違いはあるが、従来手法で考えられている「ラッパ管周辺ストリーミング効果」の値に近いものとなった。

(3) 燃料温度依存性

これ以外に、初臨界炉心と初装荷初期炉心でのセル非均質効果の差異要因を探る試みとして、初臨界炉心の燃料を初装荷初期炉心で使用した実機温度と想定して計算を行った。炉心支持板膨張率は初臨界炉心のままとし、断面積の温度依存にのみに着目した。同様に初装荷炉心の燃料温度を初臨界炉心と同様の 200°C、炉心支持板膨張率は初装荷炉心のままと想定して計算を行なった。

実効増倍率は、温度を高くすると非均質モデル、均質モデルとも小さくなつておらず、温度を低くすると非均質モデル、均質モデルとも大きくなっている。これはドップラー効果によるものと解釈される。また、セル非均質効果は初臨界炉心燃料温度を実機温度にした場合 $0.45\% \Delta k/kk$ 、初装荷炉心燃料温度を 200°C にした場合、 $0.60\% \Delta k/kk$ となり、燃料温度を上げると若干非均質効果が小さくなり、燃料温度を下げると非均質効果が大きくなることを確認した。これは、均質体系と非均質体系でドップラー効果の利きが違うということを示している。このことは、同一の炉心であつても、体系温度によって非均質効果に違いが出る可能性を示している。

(4) 粒子エネルギーの離散化近似による影響

ここまで解析結果から、MVP コードによる非均質効果解析の結果が従来の手法による非均質効果と比較して大きい値を示す傾向にあることが判つた。そこで、その要因の一つと思われる核反応断面積の粒子エネルギー離散化近似の取り扱い方に着目した確認計算を行つた。¹⁰⁾

MVP の連続エネルギー断面積に対し、従来手法では 70 群の離散化工エネルギー断面積データを基本としている。そこで多群エネルギーのモンテカルロ法輸送計算コード “GMVP” を用いた計算を実施し、粒子エネルギーの離散化近似による非均質効果への影響について検討を行つた。

GMVP コードは MVP と同様のモンテカルロ法輸送計算コードであり、断面積データとして従来の解析手法で用いられているものと同様の多群離散化工エネルギー断面積データを使用するように改修された計算コードである。

計算を行う炉心体系は「もんじゅ」初臨界炉心の全炉心体系とした。炉心各領域の断面積データとしては、均質及び非均質モデルの実効巨視断面積データを、従来の解析手法で用いられている SLAROM により計算した。SLAROM コードには、解析対象領域内の核種の原子数密度と核種それぞれの無限希釈断面積データから、自己遮蔽効果や領域温度を考慮した実効巨視断面積及び微視断面積を計算する機能がある。今回はこのうち実効巨視断面積データを取り出して GMVP コード用巨視断面積データを編集した。更に非均質モデルの巨視断面積データは、前章で参照した従来の解析手法である二重非均質法、すなわち燃料集合体中の燃料ピン非均質とラッパ管非均質という異なる非均質性をそれぞれ考慮した実効巨視断面積作成法を用いて作成している。

以上の条件による GMVP コードの計算結果を、MVP による「もんじゅ」初臨界炉心非均質効果の結果と比較することで、粒子エネルギーの離散化近似による非均質効果解析への影響を評価した。

その結果、GMVP コードによる 70 群離散化工エネルギー断面積を用いた「もんじゅ」初臨界炉心の非均質効果は、以下のとおりとなった。

$$70 \text{ 群離散化断面積による非均質効果} = 0.51 \% \Delta k/kk$$

なお、この計算では GMVP 用 70 群断面積データ作成の都合から、通常よく行なわれるよう被覆管内側の燃料ペレットとギャップを一括してスミヤ処理した。そのため、これまで MVP で使用してきたペレット - 被覆管ギャップを分離した形で表現した非均質モデルとは異なるモデルとなってしまった。そこで MVP コードでも改めて GMVP と同一の非均質モデルでの計算を実行した。その結果、非均質効果は以下のようになった。

$$\text{連続エネルギー断面積による非均質効果} = 0.63 \% \Delta k/kk \quad (\text{新モデルによる})$$

以上の結果から、連続エネルギー断面積を用いた場合、70 群離散化工エネルギー断面積を用いるよりも、約 $0.1 \% \Delta k/kk$ 程度非均質効果が大きく評価されるものと理解された。

原因としては、非均質効果のように実効増倍率の微小な変化を対象とする場合、共鳴領域の断面積の（離散化近似のための）近似処理の影響が、有意な差異となって現れることが考えられる。

このことが MVP コードを使った手法による非均質効果が、従来手法による非均質効果より大きな値を示す一つの要因と解釈することができる。²⁾

なお、以上に示したように、MVP コードによる計算では、本来同一の体系でも、モデル化次第で結果に影響する場合があり、更に継続して検討が必要と考える。

4. まとめ

従来のセル非均質効果の評価は、衝突確率法に基づくセル計算コード SLAROM を用い、ピン非均質セルモデル、ラッパ管非均質セルモデルを組合合わせて作成した実効断面積を用いた体系計算と、均質モデルによる実効断面積を用いた場合の比較から非均質効果を評価している。更に各々のセルでのストリーミング効果を別途考慮する、という方法をとっている^{2) 3) 4)}。この方法では、モデル化による近似や拡散近似、断面積を 70 群に離散化近似することによる影響が、セル非均質効果として含まれてしまう。今回行った解析では、全炉心を忠実に模擬し、連続エネルギーモンテカルロ計算コードを用いることによる厳密なセル非均質効果を求めるこことを目指した。

その結果、今回 MVP コードを用いて求めたセル非均質効果としては、以下の値が得られた。

- ・初臨界炉心 0.54% $\Delta k/kk$
- ・初装荷初期炉心 0.50% $\Delta k/kk$

更にセル非均質効果には、次のような依存性があるとの結果が得られた。

- ・プルトニウム富化度依存性があり、プルトニウム富化度が高くなるほど、非均質効果が小さく表れる傾向にある。
- ・燃料温度依存性があり、体系温度が高くなると、非均質効果は小さくなる傾向にある。
- ・中性子エネルギー離散化近似への依存性があり、連続エネルギーでは非均質効果は大きく評価される傾向にある。

以上のことから、セル非均質効果は炉心状態の違いに依存する可能性のあることが判明した。したがって、本検討での結果は、あくまで一例と理解すべきであろう。燃料組成の異なる炉心、体系の異なる炉心、燃料温度の異なる炉心等を検討する際は、要求精度にもよるが、厳密にはその都度セル非均質効果を評価・確認することが望ましい。

また、中性子エネルギー離散化近似にも依存性があるので、70 群分割を基本とする従来手法を基準とする場合、この点にも配慮が必要である。なお、従来手法による解析が 70 群断面積データを基本としていることから、今回は 70 群による中性子エネルギー離散化近似による影響を評価した。これについては、さらに 6 群や 25 群等の少数群で同様の評価を行い、その影響を検討していきたい。

MVP コードを用いた非均質効果解析については、今後とも解析方法に検討を要すると思われるが、今回の全体的な結果から、本手法による評価では、セル非均質効果は従来言われている値よりも大き目に評価され、「もんじゅ」初臨界炉心の実効増倍率

の解析計算結果と実測データとのズレ（C/E 値）は、従来に比べ縮小する方向となつた。

ただし、いかに厳密な計算手法を採用したとしても、元々の核データライブラリ自体に不確かさがあることも事実であり、解析計算結果と実測データにズレが生じることは避けられない面もある。この点について、どのように対処するかについては、大別すると次のふたつの方法が考えられる。

ひとつは、いわゆるバイアスファクター法と呼ばれている方法で、要は得られた計算結果にバイアスファクターを掛けることで、実測データからのズレを補正する方法である（E/C 補正法）。しかし、この方法には、元々のバイアスファクターを求めた体系と、評価対象とした体系に何らかの違いがある場合（例えば、燃料の同位体組成比や体系の温度が異なる場合など）、同一のバイアスファクターを適用することによる外挿精度はどの程度か、等の検討課題が残る。特に、元々の体系との違いが大きい場合には（例えば、ペレット密度や燃料ピン径の変更など）、その外挿性につき十分な検討が必要である。

もうひとつは、炉定数調整法¹¹⁾を利用することである。この場合、解析計算結果と実測データとのズレは、最終的には核データライブラリのズレにより生じているものとされる。これより、計算値、実測値の精度に応じて、重みつき最小自乗法により炉定数が調整される。したがって、解析計算手法が、各種近似を持ち込まない厳密な手法であれば（または、各種補正によりそれ相当の厳密解が得られていれば）、残された誤差要因は核データライブラリしかないこととなり、元々の体系との違いが大きい場合でも、理論上は適用性が確保されるものと考えられている。すなわち、現行炉心の運用はもちろん、将来の「もんじゅ」炉心の高度化計画等まで含めて考えるなら、こちらの炉定数調整法のほうが、より汎用性の高い方法であり、更に将来の実用化時代の高速炉開発にも寄与し得るものと期待される。

その意味で、今回の検討で得られた結果が、厳密解相当とされていた従来の結果と若干のズレを生じたことは、今後の検討のための基礎データとして重要なものと認識される。今後は、この結果を、炉定数調整法を通じて将来の「もんじゅ」炉心解析に有效地に活用すべく、検討を継続していきたい。

特に、炉定数調整法は、実効増倍率以外に制御棒反応度価値や反応率比、出力係数や燃焼係数、更には使用済み燃料の PIE（照射後試験）による組成変化データなど、炉物理試験や運転経験で得られる各種炉物理特性データを逐次反映できることから、これらを含めた総合的な検討を実施していきたいと考えている。それにより、実効増倍率を始め制御棒反応度価値や増殖比など、各種の核特性値について、より一層整合性・汎用性のある総合的評価が可能になり、高速炉炉心核特性評価手法の信頼性向上に資することができるものと考える。

謝辞

本報告書作成にあたり、大洗工学センターシステム技術開発部中性子工学グループ
杉野和輝氏、原子力システム(株)沼田一幸氏にはご多忙の中、モンテカルロコードの整備、
使用方法等について、多大なご指導、アドバイスをいただきました。

ここに謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 板垣善彦, 他：“JENDL-3.2によるもんじゅ臨界性解析”, 日本原子力学会 1996 年秋の大会 A53, (1996).
- 2) 鈴木隆之, 佐々木研治：“高速原型炉における燃料非均質効果の解析検討”, 日本原子力学会 1997 年春の年会 E39, (1997).
- 3) T.Yamamoto, H.Unesaki : Evaluation of Neutron Streaming in Fast Breeder Reactor Fuel Subassembly by Double Heterogeneous Modeling, Nucl.Sci.Eng., vol.101,pp.179-184, (1989).
- 4) T.Kamei, T.Yoshida : Fuel Pin and Subassembly Heterogeneity Effect on Neutronics Properties of Fast Power Reactor, J.Nucl.Sci.Technol., vol.18,No.1,pp.74-76, (1981).
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団：高速増殖炉もんじゅ発電所 原子炉設置許可申請書, 添付資料八, 8.3 節, (1980 年発行、1990 年変更版).
- 6) 動力炉・核燃料開発事業団：高速増殖炉もんじゅ発電所 設計及び工事の方法の認可申請書,
(第 4 回申請) 原子炉本体 (その 5), 計測制御系統施設 (その 4), (1986).
(第 5 回申請) 原子炉本体 (その 6), (その 7), (1987).
- 7) 堀雅夫：基礎高速炉工学, 日本工業新聞社, (1993).
- 8) 長谷川正義, 三島良績：原子炉材料ハンドブック, 日本工業新聞社, (1977).
- 9) 日本原子力研究所: モンテカルロ中性粒子輸送計算コード MVP/GMVP Version2.0, (本資料は「日本原子力研究所原子炉工学部炉特性研究室ホームページ」に掲載されているものを基としている) (1998).
[<http://gaia.tokai.jaeri.go.jp/activity/mvp/mvp/mvpman/mvpman98/index.html>]
- 10) M.Nakagawa, T.Mori : Whole Core Calculations of Power Reactors by Use of Monte Carlo Method, J.Nucl.Sci.Technol., vol.30,No.7,pp.692-701, (1993)
- 11) 石川眞, 他：高速炉用統合炉定数 ADJ2000 の作成, JNC TN9400 2001-071, (2001).

表1-1 燃料集合体および制御棒集合体設計仕様

| 項目 | 仕様 |
|---|--------------------------|
| 1. 炉心燃料集合体 | |
| 1) 燃料要素 | |
| a) 炉心燃料ペレット | |
| ①材料 | プルトニウム・ウラン混合酸化物および二酸化ウラン |
| ②プルトニウム同位元素比 Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242 | (wt%) 0/58/24/14/4 |
| ③Pu-fiss. 富化度 内側／外側 | (%) 14.4/19.9 |
| ④ウラン同位元素比 U235/U238 | (wt%) 0.2/99.8 |
| ⑤燃料スタック長 | (mm) 930 |
| ⑥外径 | (mm) 5.40 |
| ⑦理論密度比 | (%) 85 |
| ⑧O/M比 | 1.97 |
| b) 軸プランケット燃料ペレット | 二酸化ウラン |
| ①材料 | 0.2/99.8 |
| ②ウラン同位元素比 U235/U238 | (wt%) |
| ③燃料スタック長 上部プランケット | (mm) 300 |
| 下部プランケット | (mm) 350 |
| ④外径 | (mm) 5.40 |
| ⑤理論密度比 | (%) 93 |
| ⑥O/M比 | 2.00 |
| c) 被覆管 | SUS316相当ステンレス鋼 |
| ①材質 | |
| ②外径 | (mm) 6.50 |
| ③内径 | (mm) 5.56 |
| ④肉厚 | (mm) 0.47 |
| d) スペーサワイヤ (計算では被覆管肉厚を増加させることで体積を保存) | |
| ①材質 | SUS316相当ステンレス鋼 |
| ②外径 | (mm) 1.32 |
| ③ワイヤ巻付けピッチ | (mm) 307 |
| 2) 燃料集合体 | |
| a) 燃料集合体 | 正三角形配列 |
| ①要素配列 | |
| ②要素配列ピッチ | (mm) 7.87 |
| ③要素数 | (本/集合体) 169 |
| ④集合体配列ピッチ | (mm) 115.6 |
| b) ラッパ管 | SUS316相当ステンレス鋼 |
| ①材質 | |
| ②外対面寸法 | (mm) 110.6 |
| ③内対面寸法 | (mm) 104.6 |
| ④肉厚 | (mm) 3.0 |

注) PuおよびUの同位元素比は設計で使用された値である。

初臨界炉心については実機製造データを使用した。

※高速増殖炉もんじゅ発電所設計及び工事の方法の認可申請書（第5回申請）（1987年）
原子炉本体（その6）（その7）参照

表1-2 燃料集合体および制御棒集合体設計仕様

| 項目 | 仕様 |
|--------------------------------------|----------------|
| 2. ブランケット燃料集合体 | |
| 1) 燃料要素 | |
| a) 炉心燃料ペレット | |
| ①材質 | 二酸化ウラン |
| ②ウラン同位元素比 U235/U238 | 0.2/99.8 |
| ③燃料スタック長 | (mm) |
| ④外径 | (mm) |
| ⑤理論密度比 | (%) |
| ⑥O/M比 | |
| b) 被覆管 | |
| ①材質 | SUS316相当ステンレス鋼 |
| ②外径 | (mm) |
| ③内径 | (mm) |
| ④肉厚 | (mm) |
| c) スペーサワイヤ (計算では被覆管肉厚を増加させることで体積を保存) | |
| ①材質 | SUS316相当ステンレス鋼 |
| ②外径 | (mm) |
| ③ワイヤ巻付けピッチ | (mm) |
| 2) 燃料集合体 | (最外周燃料要素のみ0.9) |
| a) 燃料集合体 | 251.0 |
| ①要素配列 | |
| ②要素配列ピッチ | 正三角形配列 |
| ③要素数 | 13.15 |
| ④集合体配列ピッチ | 61 |
| b) ラッパ管 | 115.6 |
| ①材質 | SUS316相当ステンレス鋼 |
| ②外対面寸法 | (mm) |
| ③内対面寸法 | (mm) |
| ④肉厚 | (mm) |

注) Uの同位元素比は設計で使用された値である。

初臨界炉心については実機製造データを使用した。

※高速増殖炉もんじゅ発電所設計及び工事の方法の認可申請書（第5回申請）（1987年）
原子炉本体（その6）（その7）参照

表1-3 燃料集合体および制御棒集合体設計仕様

| 項目 | 仕様 |
|----------------------------------|-------------------------|
| 3. 制御棒 | |
| 1) 微調整棒 | |
| a) 中性子吸収材 | B ₄ C |
| b) ¹⁰ B濃縮度 | (wt%) 39 |
| c) B ₄ Cペレット理論密度比 | (%) 95 ^{注1)} |
| d) B ₄ Cペレット外径 | (mm) 12.2 |
| e) 被覆管 外径／内径 | (mm) 16.9/12.9 |
| f) 吸収体要素数 | (本/集合体) 19 |
| g) 吸収体スタック長 | (mm) 800 |
| h) 被覆管材質 | SUS316相当ステンレス鋼 |
| 2) 粗調整棒 | |
| a) 中性子吸収材 | B ₄ C |
| b) ¹⁰ B濃縮度 | (wt%) 39 |
| c) B ₄ Cペレット理論密度比 | (%) 95 ^{注1)} |
| d) B ₄ Cペレット外径 | (mm) 12.2 |
| e) 被覆管 外径／内径 | (mm) 16.9/12.9 |
| f) 吸収体要素数 | (本/集合体) 19 |
| g) 吸収体スタック長 | (mm) 800 |
| h) 被覆管材質 | SUS316相当ステンレス鋼 |
| 3) 後備炉停止調整棒 | |
| a) 中性子吸収材 | B ₄ C |
| b) ¹⁰ B濃縮度 | (wt%) 90 |
| c) B ₄ Cペレット理論密度比 | (%) 95 ^{注1)} |
| d) B ₄ Cペレット外径 | (mm) 14.2 |
| e) 被覆管 外径／内径 | (mm) 16.9/14.9 |
| f) 吸収体要素数 | (本/集合体) 19 |
| g) 吸収体スタック長 | (mm) 930 |
| h) 被覆管材質 | SUS316相当ステンレス鋼 |
| *挿入深度については初臨界、初装荷初期状態の深度をモデル化した。 | |
| 4. 中性子遮蔽体 | |
| ①数量 | (本) 316 |
| ②全長 | (mm) 2580 |
| ③中性子遮蔽体 (ラッパ管内円筒ブロック) 外径 | (mm) 100 ^{注1)} |
| ④ラッパ管内対面管距離 | (mm) 104.6 |
| ⑤ラッパ管内対面管距離 | (mm) 110.6 |
| ⑥ラッパ管／遮蔽体材質 | SUS316相当ステンレス鋼 |

注1) 設定値

※高速増殖炉もんじゅ発電所設計及び工事の方法の認可申請書（第4回申請）（1986年）
計測制御系統施設（その4）及び原子炉本体（その5）参照

表1-4 解析対象炉心構成要素 密度データ

| 炉心構成要素 | | 密度 (g/cm ³) * | 参考資料 |
|--------|------------------|--|-------------|
| 燃料 | MOX | 11.08 (Pu富化度20wt%相当) | 文献7) p. 294 |
| | UO ₂ | 10.96 | 文献7) p. 294 |
| 構造材 | SUS316 | 7.97 | 文献7) p. 296 |
| | SUS304 | 7.90 | 文献7) p. 296 |
| 冷却材 | Na | $\rho = 0.9500 - 2.298 \times 10^{-4}T - 1.461 \times 10^{-8}T^2 + 5.638 \times 10^{-12}T^3$ | 文献5) 8-3-58 |
| | | ρ : 冷却材密度 (g/cm ³) T : 冷却材温度 (°C) | |
| 制御棒吸収体 | B ₄ C | 2.49 | 文献8) p. 408 |

※各密度はNaを除き室温 (20°C) 状態での値

表1-5 解析対象炉心構成要素 温度データ

| 解析対象炉心 | 領域 | 温度 (K) * |
|---------|------------|----------|
| 初臨界炉心 | 全領域共通 | 473 |
| 初装荷初期炉心 | 内側炉心部 | 1431 |
| | 外側炉心部 | 1331 |
| | 軸方向ブランケット部 | 760 |
| | 径方向ブランケット部 | 729 |
| | その他 | 673 |

※設定値

表1-6 解析対象炉心 炉心支持板膨張率

| 解析対象炉心 | 支持板構造材膨張率 | 設定条件 |
|---------|-----------|---|
| 初臨界炉心 | 0.295 | 支持板構造材の室温 (20°C) から炉心零出力状態の冷却材温度 (200°C) までの熱膨張を考慮 |
| 初装荷初期炉心 | 0.662 | 支持板構造材の室温 (20°C) から定格出力状態の冷却材入口温度 (397°C) までの熱膨張を考慮 |

計算結果 初臨界炉心における非均質効果

表2-1 全炉心体系 (200°C均一)

| | ヒストリ一数 | 実効増倍率 | 統計誤差 (%) |
|-----------------|------------|----------|----------|
| a. 非均質モデル | 10,000,000 | 0.999297 | 0.0141 |
| b. 均質モデル | 10,000,000 | 0.993912 | 0.0131 |
| 非均質効果 (%Δk/kk') | a - b | 0.54 | |

表2-2 内側炉心無限配列体系

| | ヒストリ一数 | 実効増倍率 | 統計誤差 (%) |
|-----------------|------------|---------|----------|
| c. 非均質モデル | 10,000,000 | 1.15014 | 0.0099 |
| d. 均質モデル | 10,000,000 | 1.14402 | 0.0097 |
| 非均質効果 (%Δk/kk') | c - d | 0.47 | |

表2-3 外側炉心無限配列体系

| | ヒストリ一数 | 実効増倍率 | 統計誤差 (%) |
|-----------------|------------|---------|----------|
| e. 非均質モデル | 10,000,000 | 1.36561 | 0.0093 |
| f. 均質モデル | 10,000,000 | 1.36093 | 0.0094 |
| 非均質効果 (%Δk/kk') | e - f | 0.25 | |

表2-4 燃料温度依存性確認計算

全炉心体系 (初臨界炉心で燃料温度のみ初装荷初期温度に変更)

| | ヒストリ一数 | 実効増倍率 | 統計誤差 (%) |
|-----------------|------------|----------|----------|
| g. 非均質モデル | 10,000,000 | 0.989266 | 0.0152 |
| h. 均質モデル | 10,000,000 | 0.984869 | 0.0138 |
| 非均質効果 (%Δk/kk') | g - h | 0.45 | |

計算結果 初装荷初期炉心における非均質効果

表3-1 全炉心体系

| | ヒストリー数 | 実効増倍率 | 統計誤差 (%) |
|---------------------------|------------|---------|-----------|
| a. 非均質モデル | 10,000,000 | 1.02571 | 0.0132 |
| b. 均質モデル | 10,000,000 | 1.02050 | 0.0143 |
| c. ラッパ管内均質モデル | 10,000,000 | 1.01947 | 0.0137 |
| 非均質効果 (% $\Delta k/kk'$) | a - b | 0.50 | |
| | a - c | 0.60 | 核燃料物質集中効果 |
| | c - b | -0.10 | ストリーミング効果 |

表3-2 内側炉心無限配列体系

| | ヒストリー数 | 実効増倍率 | 統計誤差 (%) |
|---------------------------|------------|---------|----------|
| d. 非均質モデル | 10,000,000 | 1.15094 | 0.0102 |
| e. 均質モデル | 10,000,000 | 1.14601 | 0.0099 |
| 非均質効果 (% $\Delta k/kk'$) | d - e | 0.37 | |

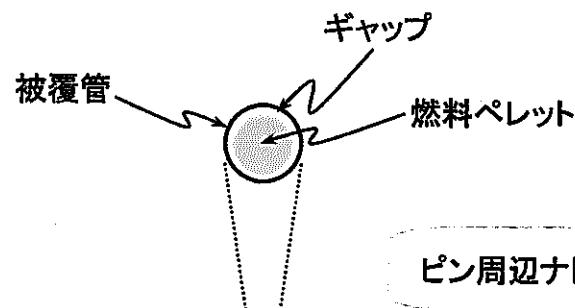
表3-3 外側炉心無限配列体系

| | ヒストリー数 | 実効増倍率 | 統計誤差 (%) |
|---------------------------|------------|---------|----------|
| f. 非均質モデル | 10,000,000 | 1.36752 | 0.0095 |
| g. 均質モデル | 10,000,000 | 1.36322 | 0.0091 |
| 非均質効果 (% $\Delta k/kk'$) | f - g | 0.23 | |

表3-4 燃料温度依存性確認計算

全炉心体系 (初装荷初期炉心で燃料温度のみ初臨界温度200°Cに変更)

| | ヒストリー数 | 実効増倍率 | 統計誤差 (%) |
|---------------------------|------------|---------|----------|
| h. 非均質モデル | 10,000,000 | 1.03558 | 0.0143 |
| i. 均質モデル | 10,000,000 | 1.02920 | 0.0133 |
| 非均質効果 (% $\Delta k/kk'$) | h - i | 0.60 | |

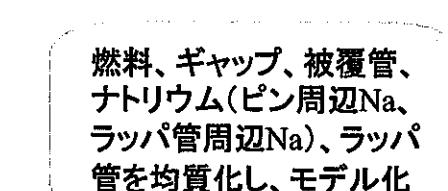


ピン周辺ナトリウム

ラッパ管

ラッパ管周辺ナトリウム

図1-1 非均質モデル



ラッパ管周辺ナトリウム

図1-2 均質モデル

燃料、ギャップ、被覆管、
ナトリウム(ピン周辺Na)、
ラッパ管を均質化し、モデ
ル化

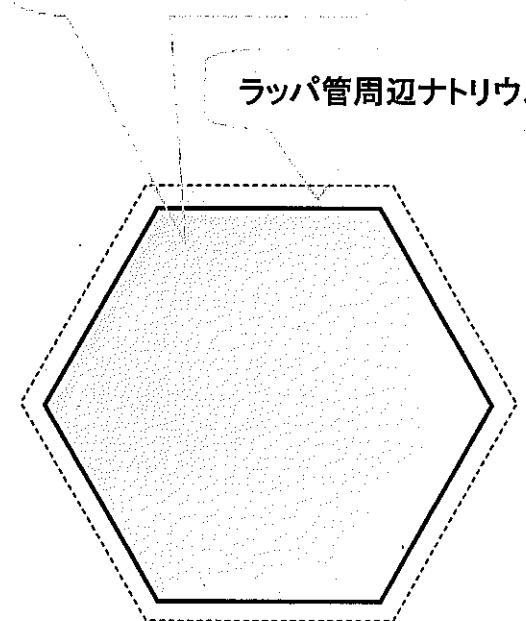
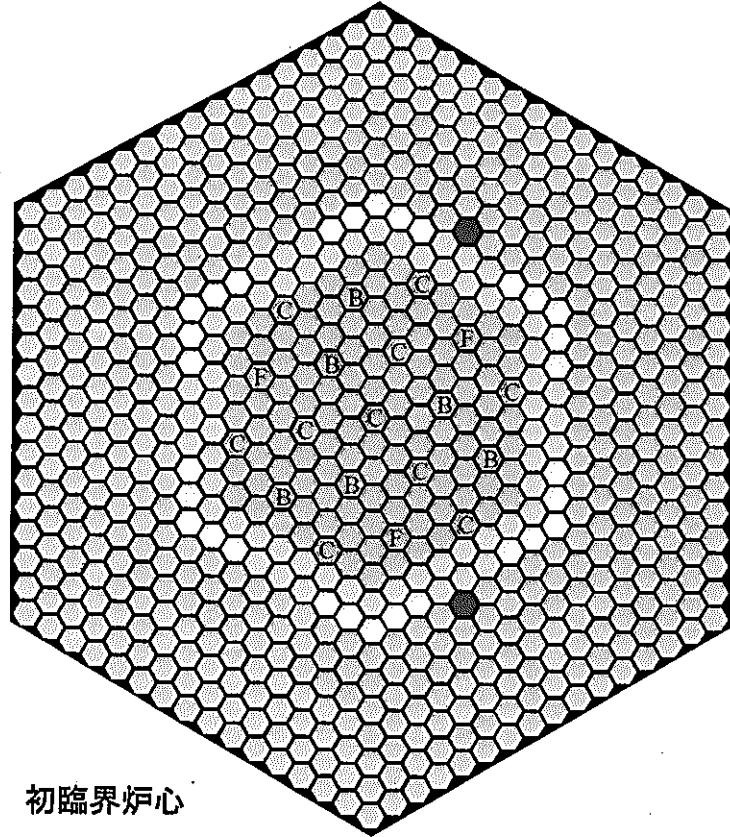
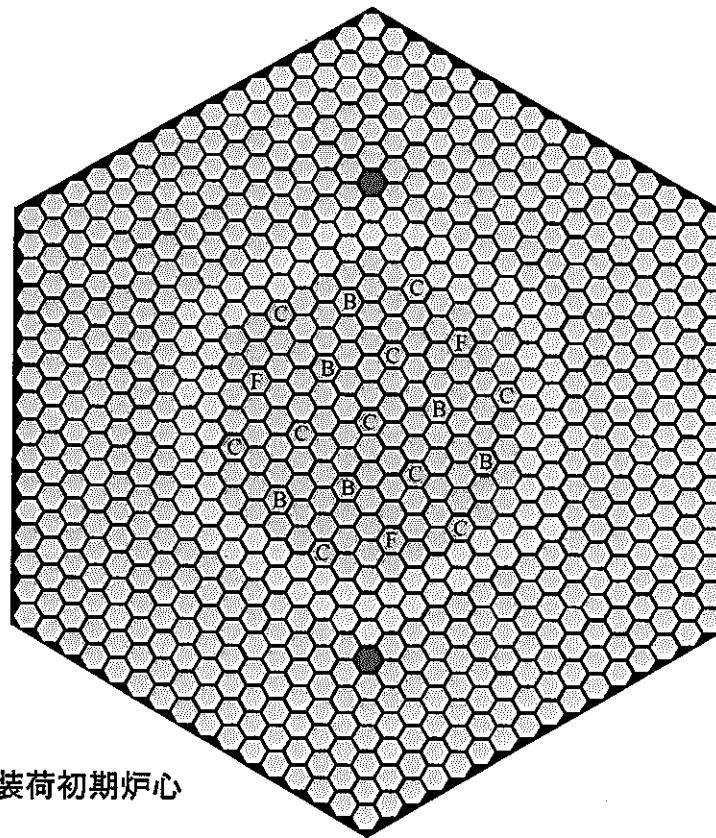


図1-3 ラッパ管内均質モデル



初臨界炉心



初装荷初期炉心

| 炉心構成要素 | 記号 | 数量 |
|-------------|--------|-----|
| 炉心燃料集合体 | 内側炉心 | 108 |
| | 外側炉心 | 60 |
| 模擬燃料集合体 | | 30 |
| ブランケット燃料集合体 | | 172 |
| 制御棒集合体 | 微調整棒 | 3 |
| | 粗調整棒 | 10 |
| | 後備炉停止棒 | 6 |
| 中性子源集合体 | | 2 |
| 中性子遮蔽体 | | 324 |

| 炉心構成要素 | 記号 | 数量 |
|-------------|--------|-----|
| 炉心燃料集合体 | 内側炉心 | 108 |
| | 外側炉心 | 90 |
| ブランケット燃料集合体 | | 172 |
| 制御棒集合体 | 微調整棒 | 3 |
| | 粗調整棒 | 10 |
| | 後備炉停止棒 | 6 |
| 中性子源集合体 | | 2 |
| 中性子遮蔽体 | | 324 |

図2-1 全炉心体系

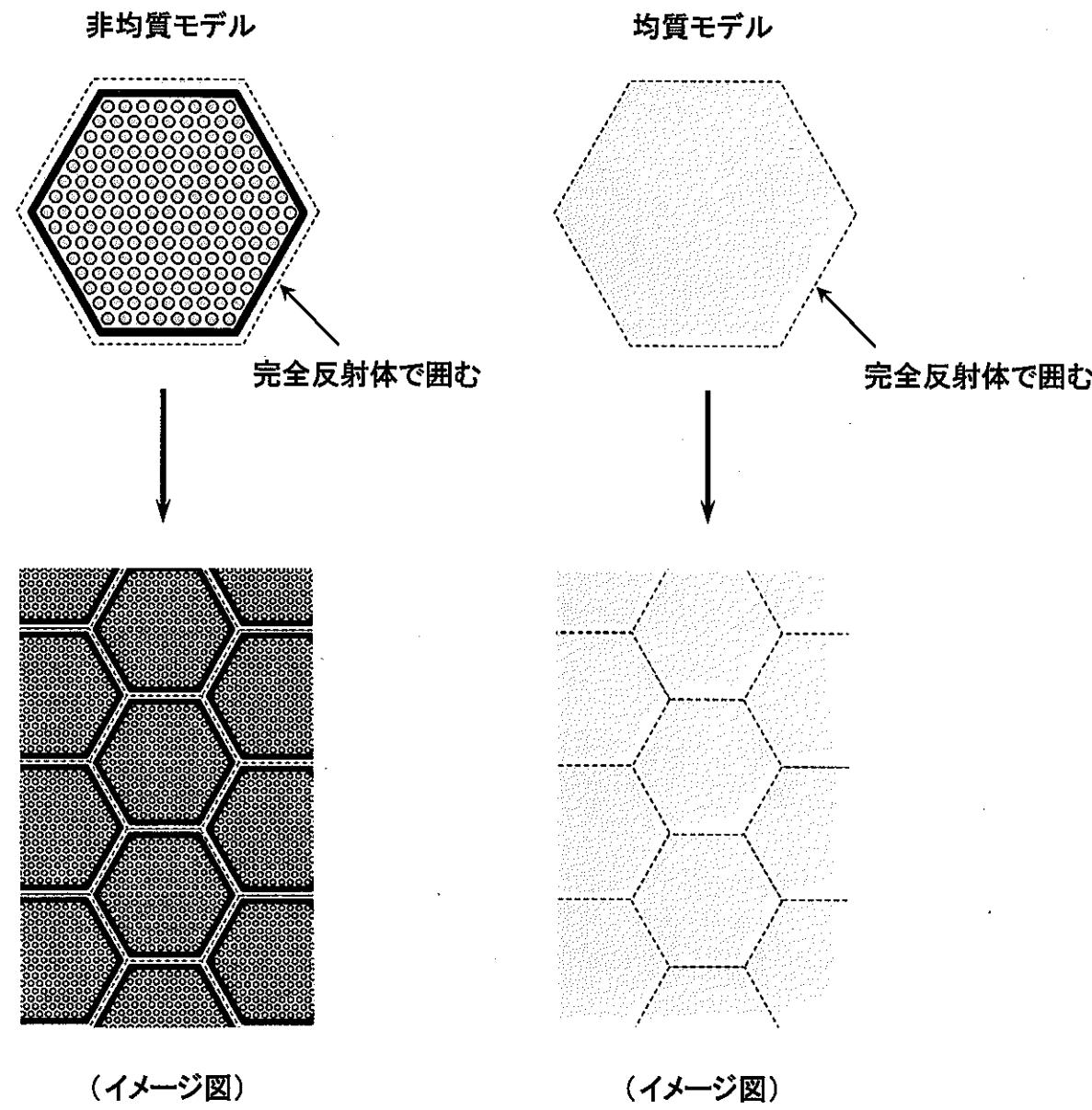


図2-2 燃料集合体無限配列体系