

実機高速炉核特性解析手法の高度化

— 二重非均質性取扱い手法及び
制御棒均質化断面積計算法の検討 —

1998年7月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-chō, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-1393, Japan

©動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

実機高速炉核特性解析手法の高度化 —二重非均質性取扱い手法及び制御棒均質化断面積計算法の検討—

杉野 和輝¹⁾、岩井 武彦²⁾

要 旨

高速炉の核設計精度を向上させるために、核設計基本データベースの整備を継続して行っている。そして、その整備の一環として、実機核特性解析精度の向上を目的とした、実機燃料集合体固有の二重非均質性の取扱い手法の高度化、及び、制御棒均質化断面積計算手法の高度化に関する検討を行った。

二重非均質性取扱い手法の高度化として、連続エネルギーモンテカルロ法による計算結果を基準解として、従来手法の検証、新しい手法としての直接法の導出、及び、直接法と従来手法との比較を行った。また、制御棒均質化断面積計算手法の高度化として、反応率割合保存法の適用性検討を行った。そして、本高度化に関する検討において、以下の結果が得られた。

- ①二重非均質性取扱い手法の高度化：従来手法は臨界性において基準解と統計誤差範囲内で良い一致を示した。また、直接法は従来手法と整合のとれた結果を示した。更に、他の核特性に対する二重非均質性による影響を評価した結果、Naボイド反応度（冷却材反応度）への影響が大きいことが分かった。
- ②制御棒均質化断面積計算手法の高度化：制御棒価値において、反応率割合保存法に基づく計算結果は、制御棒領域を非均質としたままの体系計算結果と良い一致を示した。また、もんじゅ制御棒価値解析において、当手法は従来用いられてきた手法より1～2%大きな評価であったが、この差は当手法のより忠実な計算過程に基づくものであり、当手法は従来手法に対しより高い信頼性を有するものと考えられる。

今回の検討において適用されたこれら2つの手法は、臨界性、あるいは制御棒価値以外の核特性に対しても直接応用することが可能である。そして、これらの手法は実機高速炉核特性解析における精度向上に大いに貢献するものと考えられる。

1) 大洗工学センター 基盤技術開発部 炉心技術開発室

2) 原子力システム株式会社

Advances in Methods of Commercial FBR Core Characteristics Analyses —Investigations of a Treatment of the Double-heterogeneity and a Method to Calculate Homogenized Control Rod Cross Sections—

Kazuteru Sugino¹⁾, Takehiko Iwai²⁾

Abstract

A standard data base for FBR core nuclear design is under development in order to improve the accuracy of FBR design calculation. As a part of the development, we investigated an improved treatment of double-heterogeneity and a method to calculate homogenized control rod cross sections in a commercial reactor geometry, for the betterment of the analytical accuracy of commercial FBR core characteristics.

As an improvement in the treatment of double-heterogeneity, we derived a new method (the direct method) and compared both this and existing methods with continuous energy Monte-Carlo calculations. In addition, we investigated the applicability of the reaction rate ratio preservation method as a advanced method to calculate homogenized control rod cross sections. The present studies gave the following information:

- ① An improved treatment of double-heterogeneity: for criticality the existing method showed good agreement with Monte-Carlo result within one standard deviation; the direct method was consistent with existing one. Preliminary evaluation of effects in core characteristics other than criticality showed that the effect of sodium void reactivity (coolant reactivity) due to the double-heterogeneity was large.
- ② An advanced method to calculate homogenized control rod cross sections: for control rod worths the reaction rate ratio preservation method agreed with those produced by the calculations with the control rod heterogeneity included in the core geometry; in Monju control rod worth analysis, the presented method overestimated control rod worths by 1 to 2% compared with the standard method, but these differences were caused by more accurate model in the presented method and it is considered that this method is more reliable than the standard one.

These two methods investigated in this study can be directly applied to core characteristics other than criticality or control rod worth. Thus it is concluded that these methods will contribute to the improvement of calculational accuracy of commercial FBR core characteristics.

1) Reactor Physics Research Section, Advanced Technology Division, OEC, PNC

2) Nuclear Energy System Incorporation

目 次

要旨	i
Abstract	ii
目次	iii
表リスト	iv
図リスト	v
第1章 緒言	1
第2章 二重非均質性取扱い手法の高度化	3
2.1 従来の二重非均質性取扱い手法	3
2.2 新しい二重非均質性取扱い手法の検討 ー直接法ー	3
2.3 検討方法	4
2.3.1 解析方法	4
2.3.2 検証体系	5
2.3.3 評価の指標	5
2.4 検討結果	5
2.4.1 固有値の比較	5
2.4.2 実効定数の比較	6
2.5 直接法の機構について	6
2.6 もんじゅへの適用	7
2.7 臨界性以外の核特性に対する影響の予備評価	7
2.8 まとめ	8
第3章 制御棒均質化断面積計算法の高度化	29
3.1 従来の制御棒均質化断面積計算法	29
3.1.1 中性子束荷重法	29
3.1.2 Bilinear荷重法	29
3.1.3 反応度保存法	29
3.1.4 反応率割合保存法	30
3.2 反応率割合保存法の検討	31
3.2.1 検証計算	32
3.2.2 検証結果	32
3.2.3 従来のもんじゅ制御棒価値解析結果との比較	33
3.3 まとめ	33
第4章 結言	41
謝辞	43
参考文献	45
付録A 中性子束荷重法に対する反応率割合保存法による断面積の相対差	A-1

表リスト

表2-1(1)	固有値及び非均質効果計算結果	—もんじゅ内側炉心燃料5層体系—	…	9
表2-1(2)	固有値及び非均質効果計算結果	—もんじゅ外側炉心燃料5層体系—	…	9
表2-1(3)	固有値及び非均質効果計算結果	—小型化もんじゅ体系—	……………	9
表2-2(1)	二重非均質性取扱い手法とモンテカルロ法との固有値計算結果の比較	—もんじゅ内側炉心燃料5層体系—	……………	10
表2-2(2)	二重非均質性取扱い手法とモンテカルロ法との固有値計算結果の比較	—もんじゅ外側炉心燃料5層体系—	……………	10
表2-2(3)	二重非均質性取扱い手法とモンテカルロ法との固有値計算結果の比較	—小型化もんじゅ体系—	……………	10
表2-3	二重非均質性取扱いにおける従来法と直接法の固有値計算結果の比較	—もんじゅ体系—	……………	11
表2-4	直接法の採用により予想される主要核特性の二重非均質効果		……………	12
表3-1	制御棒領域スーパーセル計算における制御棒領域均質化前後の固有値の比較		……………	34
表3-2(1)	制御棒価値に関する中性子束荷重法と反応率割合保存法との比較	—もんじゅ炉中心BCR挿入—	……………	35
表3-2(2)	制御棒価値に関する中性子束荷重法と反応率割合保存法との比較	—もんじゅ炉中心CCR挿入—	……………	35
表3-3(1)	反応率割合保存法と中性子束荷重法による均質化断面積の比較	—BCR—	……………	36
表3-3(2)	反応率割合保存法と中性子束荷重法による均質化断面積の比較	—CCR—	……………	37
表3-4	従来法と反応率割合保存法による制御棒価値非均質効果の比較		……………	38

図リスト

図2-1(1)	非均質効果の計算法	—従来手法—	13
図2-1(2)	非均質効果の計算法	—今回の手法—	14
図2-2	直接法におけるもんじゅ燃料集合体のモデル化		15
図2-3	検証計算で用いた小型化もんじゅ体系		16
図2-4(1)	実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する 相対差	—内側炉心燃料吸収断面積(1)—	17
図2-4(2)	実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する 相対差	—内側炉心燃料吸収断面積(2)—	17
図2-5(1)	実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する 相対差	—内側炉心燃料生成断面積(1)—	18
図2-5(2)	実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する 相対差	—内側炉心燃料生成断面積(2)—	18
図2-6(1)	実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する 相対差	—外側炉心燃料吸収断面積(1)—	19
図2-6(2)	実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する 相対差	—外側炉心燃料吸収断面積(2)—	19
図2-7(1)	実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する 相対差	—外側炉心燃料生成断面積(1)—	20
図2-7(2)	実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する 相対差	—外側炉心燃料生成断面積(2)—	20
図2-8(1)	拡散係数における各手法の非均質効果の比較	—内側炉心燃料—	21
図2-8(2)	拡散係数における各手法の非均質効果の比較	—外側炉心燃料—	22
図2-9	拡散係数における非均質効果	—内側炉心燃料ピン周り拡散係数—	23
図2-10(1)	実効定数における各直接法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する 相対差	—4層ピン内側炉心燃料吸収断面積(1)—	24
図2-10(2)	実効定数における各直接法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する 相対差	—4層ピン内側炉心燃料吸収断面積(2)—	24
図2-11(1)	実効定数における各直接法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する 相対差	—4層ピン内側炉心燃料生成断面積(1)—	25
図2-11(2)	実効定数における各直接法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する 相対差	—4層ピン内側炉心燃料生成断面積(2)—	25
図2-12	直接法により得られた主要重核種自己遮蔽因子の空間依存性 —内側炉心燃料ペレット領域 50keV—		26
図2-13(1)	非均質性取扱いに起因するミクロ断面積差による核特性への影響 —もんじゅ炉中心制御棒価値—		27
図2-13(2)	非均質性取扱いに起因するミクロ断面積差による核特性への影響 —もんじゅ初期炉心臨界性—		27

図2-13(3)	非均質性取扱いに起因するマイクロ断面積差による核特性への影響 -F49反応率分布-	27
図2-13(4)	非均質性取扱いに起因するマイクロ断面積差による核特性への影響 -Naボイド反応度-	27
図2-13(5)	非均質性取扱いに起因するマイクロ断面積差による核特性への影響 -ドップラー反応度-	27
図2-14	均質計算に対する直接法による実効マイクロ断面積の相対差 -内側炉心燃料-	27
図3-1	制御棒均質化のための計算モデル	39
図3-2	制御棒断面積均質化法の違いによる断面積相対差と制御棒価値への寄与の 比較	40

第 1 章 緒言

第1章 緒言

大洗工学センター炉心技術開発室では高速炉の核特性評価精度を向上させるために、核設計基本データベースの整備を継続して行っている。核設計データベースは、JUPITER、FCAといった臨界実験体系、常陽、もんじゅといった実機に関する体系情報、実験あるいは性能試験情報とそれらの誤差により構成されており、更に、実験あるいは性能試験を解析するための解析コード群、解析入力データ、解析スキームといった解析手法と有機的に結合されている。

これまで、臨界実験解析についてはJUPITERを中心にデータベースの構築が進められており、一部を除いて実験データ、解析データの整備が終了していると共に、解析手法についてもJUPITER標準解析手法としてほぼ確立されたといえる。

他方、実機においては、臨界実験と異なる格子配列、制御棒構造といった様々な体系条件が存在し、その条件に起因する非均質効果を精度良く評価するための解析モデル及び解析手法の確立が不可欠である。しかしながら、実機核特性解析においては、特に格子計算において、臨界実験解析ほどの詳細な解析手法・解析モデルが確立されておらず、従来の実機核特性解析における非均質効果の取り扱いは、基準計算に対する非均質補正係数を別途計算し、それを加えたり乗じたりすることにより行われていたが、この処理はそれぞれの補正係数計算の独立性の仮定の下行われており、その仮定採用による誤差の発生、及び、核特性毎の補正係数算出の必要性と補正係数算出のための計算の必要性に起因する計算作業量の増加につながり、計算精度向上と計算作業合理化の余地が多分にあると考えられる。

そこで、本報告書では、実機核特性解析における上記計算精度向上と計算作業合理化を目的として、従来の補正係数の使用による非均質効果の取扱いに代わり、格子計算の段階で実効定数として非均質効果を考慮できる手法について検討を行った。実効定数として非均質性を考慮することは、炉心計算と整合のとれた核特性評価につながり、更に、補正係数計算数の低減も図れる。具体的な検討として、実機燃料集合体固有の二重非均質の取扱い手法の高度化、及び、制御棒均質化断面積計算法の高度化を取り上げる。更に、高度化による核特性評価への影響についても言及する。

本報告書においては、第2章で二重非均質取扱い手法の高度化について、第3章では制御棒均質化断面積計算法の高度化について記述し、第4章ではそれらを総括する。

第2章 二重非均質性取扱い手法の高度化

第2章 二重非均質性取扱い手法の高度化

常陽、もんじゅ等高速炉実機の燃料集合体は燃料ピン、冷却材、及び、ラッパー管により構成されるが、そういった集合体を有する炉心体系の核特性を精度良く評価するには、いわゆる二重非均質性を正確に取り扱う必要のあることが知られている¹⁾。他方、従来のもんじゅの炉心核特性解析²⁾では、二重非均質効果は均質計算結果に対する補正係数により考慮されているが、このことは、補正計算モデルの使用によるモデル化誤差を生み、更に、効果毎、核特性毎の補正係数算出の必要性からくる計算作業量の増加を示唆している。そこで、本検討では、連続エネルギーモンテカルロ法により得られた結果を参照解として、従来手法の妥当性を検証すると共に、新しい二重非均質性取扱い手法の提案を行うこととする。

2.1 従来の二重非均質性取扱い手法

二重非均質性とは、燃料ペレット周りの非均質性、すなわち、ペレット-被覆管-冷却材と、ラッパー管周りの非均質性、すなわち、燃料-ラッパー管-ラッパー管ギャップ-冷却材の2つからなる。亀井らはそれら2つの非均質性を2ステップの格子計算により取り扱う手法を考案し、臨界性、Naボイド反応度、ドップラー反応度の二重非均質効果を評価している¹⁾。すなわち、図2-1(1)中の左の計算スキームを用いて説明すると、格子計算第1ステップでは、燃料ペレット+被覆管+冷却材で構成されるピン体系を取扱い、格子計算第2ステップでは、第1ステップで得られた燃料部の実効定数+ラッパー管+ラッパー管内外の冷却材で構成される集合体を取り扱うことにより、集合体実効定数の計算が行われていた。また、中川らはToneの理論を利用して、Dancoff係数法に対するラッパー管の存在によるバックグラウンド断面積の補正方法を導出し、その適用により、それ以前に示されていた2ステップモデルと同様の結果を得ている³⁾。更に、竹田らは、図2-1(1)中の中央と右の計算スキームに示すように、非均質領域をペレット周辺部のみ、あるいは、ラッパー管周辺部のみとし、それ以外の領域は均質としたモデルを設定し、それぞれのモデルを用いた計算よりペレット周辺、及びラッパー管周辺の非均質性によるストリーミング効果を評価している⁴⁾。従来のもんじゅ解析では、亀井らの2ステップモデルと竹田らのストリーミング効果計算モデルを組み合わせ、二重非均質効果を算出している。更に、二重非均質効果をモンテカルロ法による結果と比較することにより、取扱い手法の検証を行っている²⁾。

2.2 新しい二重非均質性取扱い手法の検討 ー直接法ー

従来は2ステップモデルによる評価が主流であったが、今回は格子計算において二重非均質性を直接取り扱うために、図2-2に示すように、燃料集合体内の構造を全てリング化することによりモデル化する。また、各々の燃料ペレット領域の重核のバックグラ

ンド断面積はToneの方法により評価することとする。このような直接的なモデルにより、中性子ストリーミングをより忠実に取り扱え、かつ、ラッパー管の存在により燃料配列が周期的でないような体系の非均質性を精度良く評価できるToneの方法を用いることにより、ラッパー管が集合体内の各々の燃料ペレット領域に及ぼす遮蔽効果をより正確に評価することができると期待できる。更に、図2-1(1)に示すように、従来のもんじゅ解析で採用されていた均質計算に対する3つの補正を施す手法は、二重非均質性を取り扱うだけで1核特性毎に1ケースあたり6回の炉心計算が必要なのに対し、新手法では1回の炉心計算で済ませることができ、非常に効率的である。

2.3 検討方法

2.3.1 解析方法

炉定数としては最新の評価済断面積ライブラリJENDL-3.25)を基本とする高速炉用炉定数セットJFS3-J3.2を用いた。格子計算において複数の燃料領域各々のバックグランド断面積計算にToneの手法を使うことが可能であるCASUP6)コードを用いることとした。炉心計算は拡散理論を用いて、Benoistの異方性拡散係数の平均化操作による近似が不要である3次元Tri-Z体系70群で行った。収束条件は固有値が 1.0×10^{-5} 、中性子束が 1.0×10^{-4} である。

上記決定論計算に対する参照解として連続エネルギーモンテカルロコードMVP7)による単一集合体計算により得られた実効定数、及び炉心計算により得られた固有値を用いた。ここで、連続エネルギーモンテカルロ法を参照解とする場合、70群基本炉定数使用による計算結果との間に群数効果が含まれることになるが、今回の計算条件における評価対象に関しては自己遮蔽因子法は十分な精度を有し、群数効果は無視できると考えられる。ヒストリー数は、単一集合体計算では、実効定数を十分な精度で計算するために150万ヒストリー内10万ヒストリー切り捨て、炉心計算では固有値を計算するために110万ヒストリー内10万ヒストリー切り捨てとした。集合体実効定数作成のための均質化はタリー領域を単一集合体1つに設定することにより可能である。MVPのライブラリとして、もんじゅの解析温度条件である473Kに近いものは、現状では300Kのものしか整備されていないので、格子計算では全て温度条件を300Kとした。更に、整備されていたCASUP用JFSライブラリにはPu-238が含まれておらず、その存在による影響も小さいと考え、Pu-238も全ての計算で考慮しないこととした。なお、決定論炉心計算により得られた固有値については、モンテカルロ計算結果との比較を行うために、均質の実効定数を用いた多群モンテカルロ法コードGMVP7)による結果を用いて輸送・メッシュ補正を施した。

新手法の比較対象として、格子計算の第1ステップにおいてラッパー管領域とラッパー管内外の冷却材を含めないモデル (Model1) を使用する2ステップの手法 (従来手法1)

と、従来のもんじゅ解析で採用されている手法（従来手法2）、すなわち、格子計算の第1ステップにおいてラッパー管領域とラッパー管内外の冷却材を含めるモデル（Model2）を使用する2ステップの手法とした。

2.3.2 検証体系

計算ケースとして以下の体系を設定した。

- ①もんじゅ内側燃料炉心5層（高さ93cm）のみからなる体系
- ②もんじゅ外側燃料炉心5層（高さ93cm）のみからなる体系
- ③小型化もんじゅ体系

③の体系を図2-3に示す。なお、炉心燃料とブランケット燃料が二重非均質性の取扱い対象で、それ以外である遮蔽体領域は全て均質とした。

2.3.3 評価の指標

本検討では、非均質性に関する最善評価では均質計算に対する非均質補正により得られると考え、従来のストリーミング効果を直接補正として用いるのではなく、以下に定義を示す非均質効果により補正を行うものとする。

$$\text{非均質効果} = \text{非均質計算結果} - \text{均質計算結果}$$

計算結果として具体的には、固有値、実効定数、拡散係数が対象となる。また、固有値の非均質性に関する最善評価の計算スキームは図2-1(2)に示す通りとなる。

2.4 検討結果

2.4.1 固有値の比較

まず、非均質効果算出のための各炉心計算により得られた固有値と非均質効果を表2-1(1)～(3)にまとめる。この表に示した各固有値を基に非均質効果とモンテカルロ法との結果と比較するための輸送・メッシュ補正が計算される。

次に、非均質性取扱い手法と連続エネルギーモンテカルロ法による固有値の計算結果の比較を表2-2(1)～(3)にまとめる。また、表2-2中、自己遮蔽・中性子束分布の非均質効果は表2-1のものと同一であり、ストリーミングによる効果は従来手法1、2がピン周りとラッパー管周りの効果を足し合わせたもの、直接法は表2-1と同一のものである。自己遮蔽・中性子束分布による効果について、直接法による結果は従来手法1と2の中間の

値となっているが、それぞれと大差はない。また、ストリーミングによる効果については、ほぼ、従来手法によるものと良い一致を示している。更に、いずれの手法とも固有値の比較ではモンテカルロ法との良い一致が見られる。

2.4.2 実効定数の比較

今回の計算結果についてより詳しく検討するために、実効定数、及び、拡散係数の比較を示すことにする。まず、各二重非均質性取扱い手法とモンテカルロ法により得られた実効定数の比較を図2-4～7に示す。なお、MVPでは、吸収断面積の計算を直接行うことは不可能であるので、核分裂と捕獲断面積の和とし、統計誤差についても両者間の系統誤差を無視して単純に二乗平均により算出した。従来手法については、約1MeV以上のエネルギー領域では従来手法2の方が一致が良く、それ以下のエネルギーでは従来手法1の方がより良い一致を示している。これは、ピン格子計算において、高エネルギー領域では、中性子の自由行程が大きいためラッパー管を考慮する必要があり、エネルギーが低くなるについて、ラッパー管から遠い燃料ピンにおいては、ラッパー管の存在による遮蔽効果はほとんどなくなり、そのような燃料ピンがより多く存在することになるので無視した方がいいことを示唆していると考えられる。また、この傾向は、内側燃料、外側燃料の双方に共通に現れており、統計的手法であるモンテカルロ法により偶然現れたものではないと考えられ、今回の実効定数に関する比較結果は信頼できると考えられる。他方、直接法による結果は、従来手法双方の長所を兼ね備えたような結果となっており、固有値について両従来手法の中間的な値となっているということと整合がとれている。次に、各二重非均質性取扱い手法間の平均されたBenoistの拡散係数の非均質効果の比較を内側炉心燃料、外側炉心燃料それぞれについて図2-8(1),(2)に示す。直接法による非均質効果は、ピン周りとラッパー管周りの非均質効果の和とほぼ同様の値となっており、固有値に関する非均質効果と整合のとれた結果となっている。なお、拡散係数の比較として、平均値を引き合いに出したが、平行、垂直、平均それぞれの拡散係数の非均質効果は図2-9に示すとおり系統的に正である。すなわち、非均質体系で計算された拡散係数は、均質体系のものよりも、より中性子ストリーミングを大きく評価することになる。また、平均の拡散係数と異方性拡散係数を用いた場合の固有値については示していないが、ほとんど差が見られなかった。

2.5 直接法の機構について

今回の実効定数作成においては、JUPITER実験解析等で実績のあるCASUPコードを用い、Toneの方法により非均質性を取り扱ったが、より広く普及しているSLAROM^{8),9)}コードでは、バックグラウンド断面積の算出はDancoff係数法により取り扱われており、重核種の含まれる領域は、例えば、そこが重核種の含まれていない領域であっても中心領域に1領域化されて取り扱われることが知られている。従って、直接法における燃料領域が複数存在する体系モデルの非均質性を正確に取り扱うことは出来ないと考えられるが、自

己遮蔽効果取扱いの重要性を評価する観点から、SLAROMコードで採用されている近似に関する直接法への適用性の検証を行った。まず、SLAROMは20領域までしか取り扱うことが出来ないため、集合体内の燃料ピンが4層である燃料集合体モデルを用いて、Tone法、及び、モンテカルロ法との比較を行った。実効定数の比較を図2-10、11に示す。100keV以下ではTone法の方がモンテカルロ法とより良い一致が見られる。また、2MeV以上でもTone法とDancoff係数法間に差が見られるが、これは、低エネルギー部の非均質性の差に起因して、核分裂ソース分布に差が生じ、その結果、核分裂によって発生するエネルギーの中性子束分布に影響を与えたためと考えられる。そして、それ以外のエネルギー領域ではDancoff係数法、Toneの方法とも大差は見られない。また、集合体5層93cm高さ体系の炉心計算により固有値を比較した結果、両者間で約0.2% Δk と有意な差が見られ、Dancoff係数法では直接法におけるモデル下の二重非均質性の取扱いにおいて、大きな誤差要因となることが予想される。

最後に、Tone法を用いた直接法により得られた50keVの捕獲及び核分裂反応断面積の自己遮蔽因子の均質計算結果との比の空間分布を図2-12に示す。特に、U-238の捕獲は約7%と大きな空間依存性を示しており、燃料集合体内でTone法によるペレット領域毎の非均質性の取扱いの必要性を示唆している。

2.6 もんじゅへの適用

実機解析への適用として、もんじゅ炉心体系に対し、直接法と従来二重非均質性取扱い手法の比較を行った。評価は2次元RZ体系拡散計算により行った。計算結果を表2-3に示す。直接法による固有値は従来手法1と従来手法2による補正後の固有値の間の値を示しており、小型化もんじゅ体系への適用の場合と同様の結果が得られており、もんじゅ炉心に対して適用を行っても妥当な結果が得られるものと考えられる。

2.7 臨界性以外の核特性に対する影響の予備評価

今回は臨界性に対する二重非均質性の検討のみであったが、亀井、中川らに指摘されているように、臨界性以外の核特性に関しても、二重非均質効果が大きいことが予想される。そこで、感度解析を用いて各核特性の二重非均質性の取扱いによる影響を簡易評価した。感度解析は、一般化拡散摂動論に基づいて計算された感度係数に、均質計算と直接法により得られたそれぞれの実効マイクロ断面積の相対差を乗じることにより行った。

感度解析による評価結果を表2-4に示す。ここでは、燃料主要組成であるU-238、Pu-239、Pu-240の捕獲、及び、核分裂マイクロ断面積に評価をしばっている。また、臨界性、制御棒価値についてはもんじゅ炉心体系計算により得られたものを、反応率分布、Naボイド反応度、ドップラー反応度（但し、f-tableの温度依存性は非考慮）については、燃料組成や炉心体積が異なるが、暫定的にZPPR-9炉心体系計算により得られたものをそ

れぞれ用いた。臨界性については+0.57%と、本検討により得られた非均質効果と同様の傾向を示している。他の核特性についてはNaボイド反応度を除いて、U-238の捕獲とPu-239の核分裂による寄与が互いにキャンセルし合い、1%以内の影響となっている。Naボイド反応度（冷却材反応度）については、U-238の捕獲とPu-239の核分裂による寄与のキャンセレーションが見られ、測定誤差が大きいとはいえ、特にU-238の捕獲において6.7%の効果が見られ、二重非均質性の影響が大きい核特性であると言える。図2-13に主要なミクロ断面積差に起因する核特性への影響のエネルギー毎の寄与を示すが、ミクロ断面積の差が図2-14に示すように、10keV以下で大きいことに対応して、核特性への影響もそのエネルギー領域で主要であることが分かる。

2.8 まとめ

従来の補正係数の使用による二重非均質性の取扱いに対し、新たに補正計算なしに直接二重非均質性を取り扱える手法を考案した。検証の結果、新手法は、ラッパー管の影響を過小に評価している従来手法1と逆に過大に評価している従来手法2による結果の間の結果を示しており、整合性が見られることが分かった。更に、新手法はモンテカルロ法による結果との一致も良く、実機の二重非均質性取扱い手法として非常に有効なものであると考えられる。今後、今回導出した直接法を実際の実機解析に適用し、臨界性以外の核特性、特に、冷却材反応度の評価を行うことにより、更なる検討を行う必要があると考える。

表2-1(1) 固有値及び非均質効果計算結果 —もんじゅ内側炉心燃料5層体系—

計算条件		固有値	効果	効果名
実効定数	拡散係数			
均質	均質	0.70213	—	(基準)
従来手法1	均質	0.70674	+0.00461	自己遮蔽及び中性子束分布非均質
従来手法2	均質	0.70607	+0.00394	自己遮蔽及び中性子束分布非均質
均質	ピン周り	0.70069	-0.00145	ピン周りストリーミング非均質
均質	ラッパー管周り	0.70085	-0.00128	ラッパー管周りストリーミング非均質
直接法	均質	0.70637	+0.00424	自己遮蔽及び中性子束分布非均質
均質	直接法	0.69964	-0.00250	ストリーミング非均質
直接法	直接法	0.70386	+0.00173	全非均質
均質 (輸送計算)	—	0.71111 ±0.00033	+0.00898	輸送・メッシュ

表2-1(2) 固有値及び非均質効果計算結果 —もんじゅ外側炉心燃料5層体系—

計算条件		固有値	効果	効果名
実効定数	拡散係数			
均質	均質	0.85953	—	(基準)
従来手法1	均質	0.86411	+0.00458	自己遮蔽及び中性子束分布非均質
従来手法2	均質	0.86381	+0.00428	自己遮蔽及び中性子束分布非均質
均質	ピン周り	0.85787	-0.00166	ピン周りストリーミング非均質
均質	ラッパー管周り	0.85812	-0.00141	ラッパー管周りストリーミング非均質
直接法	均質	0.86409	+0.00456	自己遮蔽及び中性子束分布非均質
均質	直接法	0.85672	-0.00281	ストリーミング非均質
直接法	直接法	0.86126	+0.00173	全非均質
均質 (輸送計算)	—	0.87026 ±0.00037	+0.01073	輸送・メッシュ

表2-1(3) 固有値及び非均質効果計算結果 —小型化もんじゅ体系—

計算条件		固有値	効果	効果名
実効定数	拡散係数			
均質	均質	0.94516	—	(基準)
従来手法1	均質	0.95204	+0.00689	自己遮蔽及び中性子束分布非均質
従来手法2	均質	0.95027	+0.00512	自己遮蔽及び中性子束分布非均質
均質	ピン周り	0.94379	-0.00137	ピン周りストリーミング非均質
均質	ラッパー管周り	0.94408	-0.00108	ラッパー管周りストリーミング非均質
直接法	均質	0.95084	+0.00569	自己遮蔽及び中性子束分布非均質
均質	直接法	0.94291	-0.00225	ストリーミング非均質
直接法	直接法	0.94858	+0.00343	全非均質
均質 (輸送計算)	—	0.95084 ±0.00036	+0.00569	輸送・メッシュ

表2-2(1) 二重非均質性取扱い手法とモンテカルロ法との固有値計算結果の比較 — もんじゅ内側炉心燃料5層体系 —

	補正前		非均質効果			輸送・メッシュ補正	補正後 固有値	絶対差 [%Δk]
	固有値		自己遮蔽・中性子束分布	ストリーミング	合計			
従来手法1	0.70213		+0.00461	-0.00272	+0.00188		0.71299	+0.10
従来手法2	0.70213		+0.00394	-0.00272	+0.00121	+0.00898	0.71232	+0.04
直接法	0.70386		(+0.00424)*1	(-0.00250)*1	(+0.00175)*1		0.71284	+0.09
モンテカルロ法 (MVP)	-		-	-	-	-	0.71195 ±0.00046	(Ref.)

*1: 参考値

表2-2(2) 二重非均質性取扱い手法とモンテカルロ法との固有値計算結果の比較 — もんじゅ外側炉心燃料5層体系 —

	補正前		非均質効果			輸送・メッシュ補正	補正後 固有値	絶対差 [%Δk]
	固有値		自己遮蔽・中性子束分布	ストリーミング	合計			
従来手法1	0.85953		+0.00458	-0.00307	+0.00151		0.87176	+0.18
従来手法2	0.85953		+0.00428	-0.00307	+0.00120	+0.01073	0.87146	+0.15
直接法	0.86126		(+0.00456)*1	(-0.00281)*1	(+0.00175)*1		0.87199	+0.20
モンテカルロ法 (MVP)	-		-	-	-	-	0.86994 ±0.00056	(Ref.)

*1: 参考値

表2-2(3) 二重非均質性取扱い手法とモンテカルロ法との固有値計算結果の比較 — 小型化もんじゅ体系 —

	補正前		非均質効果			輸送・メッシュ補正	補正後 固有値	絶対差 [%Δk]
	固有値		自己遮蔽・中性子束分布	ストリーミング	合計			
従来手法1	0.94516		+0.00689	-0.00245	+0.00444		0.95528	-0.03
従来手法2	0.94516		+0.00512	-0.00245	+0.00267	+0.00569	0.95351	-0.20
直接法	0.94858		(+0.00569)*1	(-0.00225)*1	(+0.00344)*1		0.95427	-0.13
モンテカルロ法 (MVP)	-		-	-	-	-	0.95555 ±0.00056	(Ref.)

*1: 参考値

表2-3 二重非均質性取扱いにおける従来法と直接法の固有値計算結果の比較 ーもんじゅ体系ー

	補正前 固有値	非均質効果			補正後 固有値
		自己遮蔽・中性子束分布	ストリーミング	合計	
従来手法1	1.02184	+0.00730	-0.00188	+0.00542	1.02726
従来手法2	1.02184	+0.00510	-0.00188	+0.00322	1.02506
直接法	1.02592	(+0.00572)*1	(-0.00185)*1	(+0.00387)*1	(1.02592)*2

*1: 参考値

*2: 補正計算が不要なので補正前と同じ値を示した。

表2-4 直接法の採用により予想される主要核特性の二重非均質効果

	制御棒価値	臨界性	反応率分布	Naボイド反応度	ドップラー反応度
U-238 Capture	+0.79	+0.43	-1.05	-6.65	+0.52
U-238 Fission	-0.27	+0.11	-0.06	+0.37	-0.37
Pu-239 Capture	+0.21	+0.08	-0.11	-1.60	+1.20
Pu-239 Fission	-0.62	-0.11	+0.58	+4.25	-1.63
Pu-240 Capture	+0.08	+0.03	-0.02	-0.22	+0.15
Pu-240 Fission	-0.09	+0.03	+0.01	+0.03	-0.05
合計	+0.10	+0.57	-0.64	-3.82	-0.17

単位：%

感度係数：

制御棒価値；もんじゅ初期炉心炉中心主調整棒挿入

臨界性；もんじゅ初期炉心

反応率分布；ZPPR-9 Pu-239核分裂反応率分布（外側炉心中央／炉中心）

Naボイド反応度；ZPPR-9 97ドロワ、±20インチ

ドップラー反応度；ZPPR-9 300→1100K

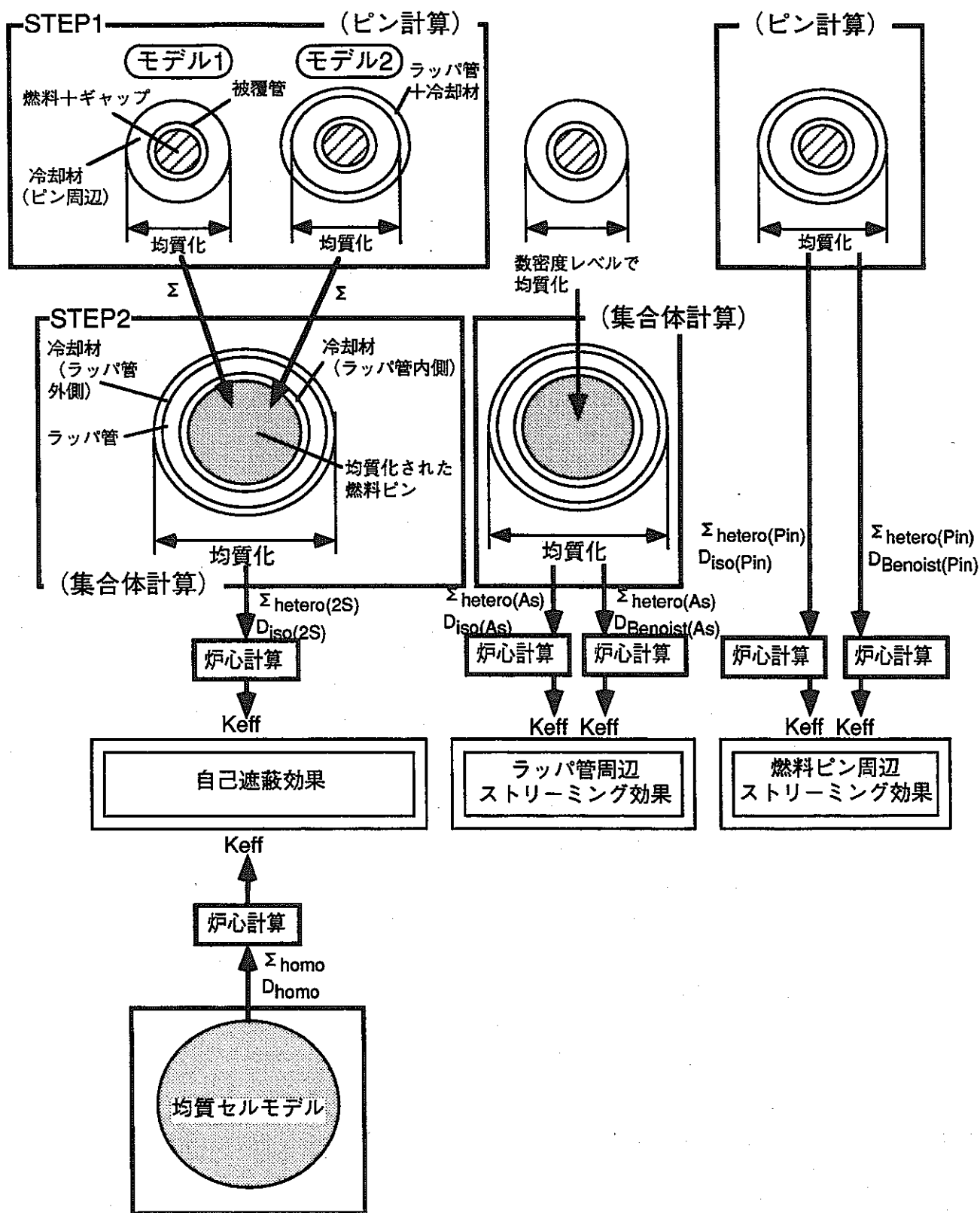


図2-1(1) 非均質効果の計算法 ー従来手法ー

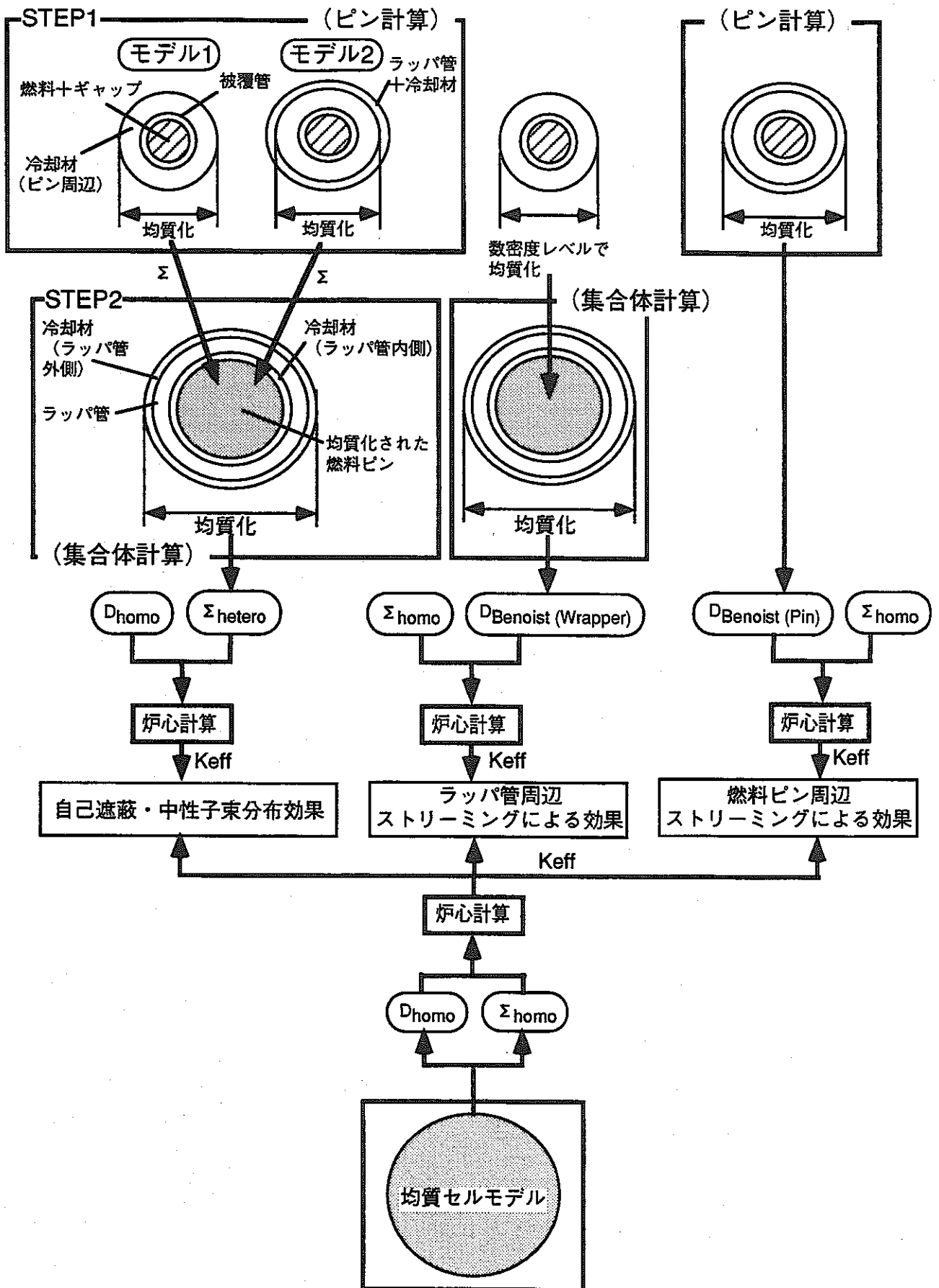


図2-1(2) 非均質効果の計算法 —今回の手法—

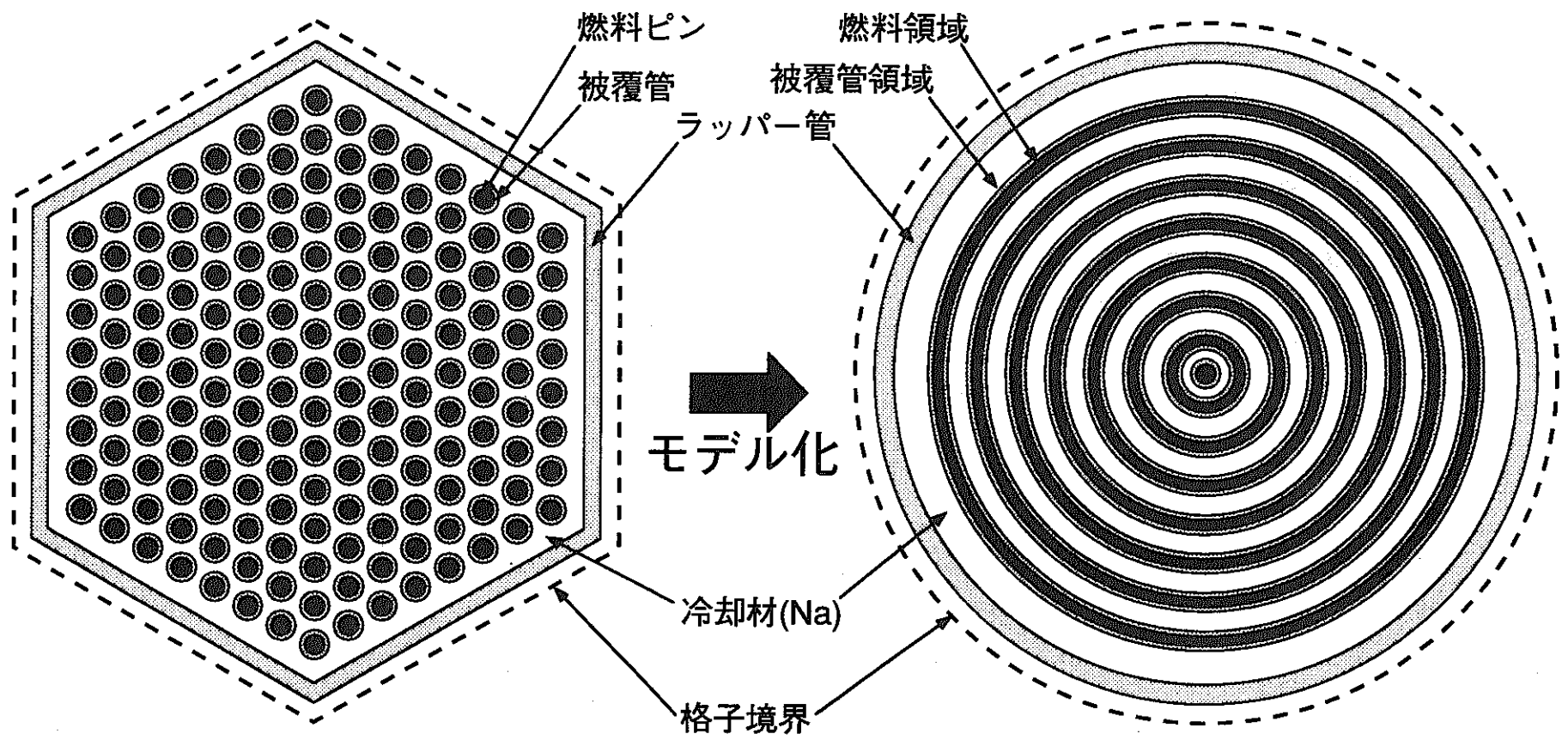
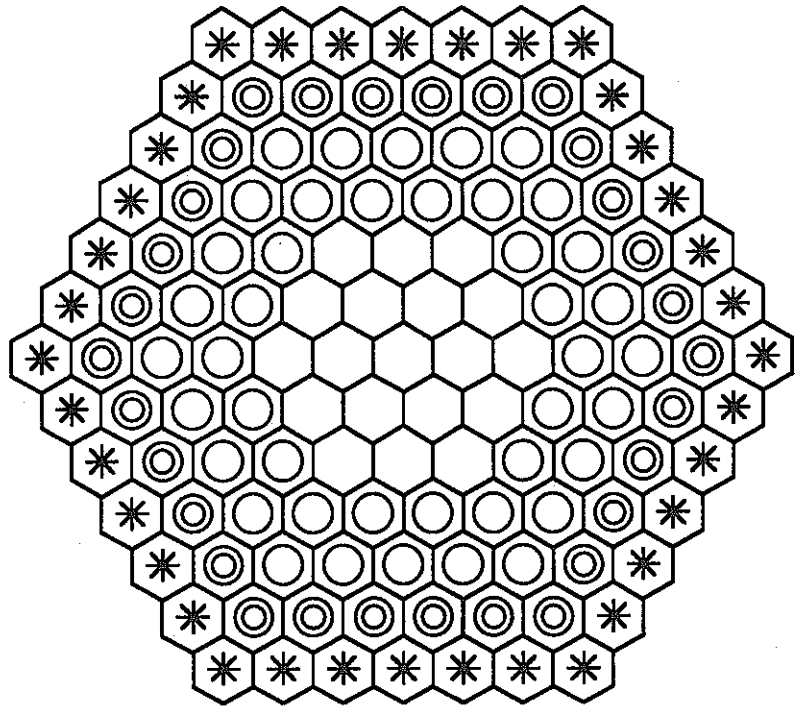


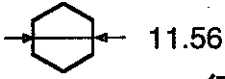


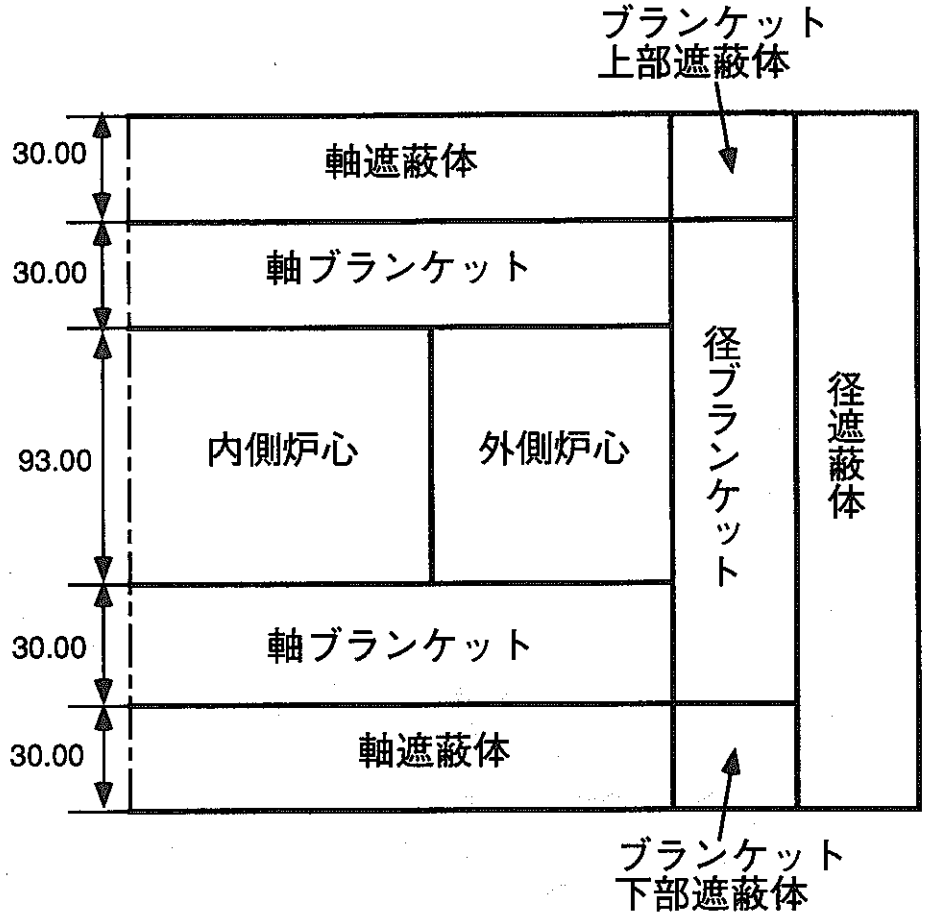
図2-2 直接法におけるもんじゅ燃料集合体のモデル化



-  内側炉心
-  外側炉心
-  径遮蔽体
-  径ブランケット



—径方向炉心中央断面—



—軸方向RZ断面—

単位: cm

図2-3 検証計算で用いた小型化もんじゅ体系

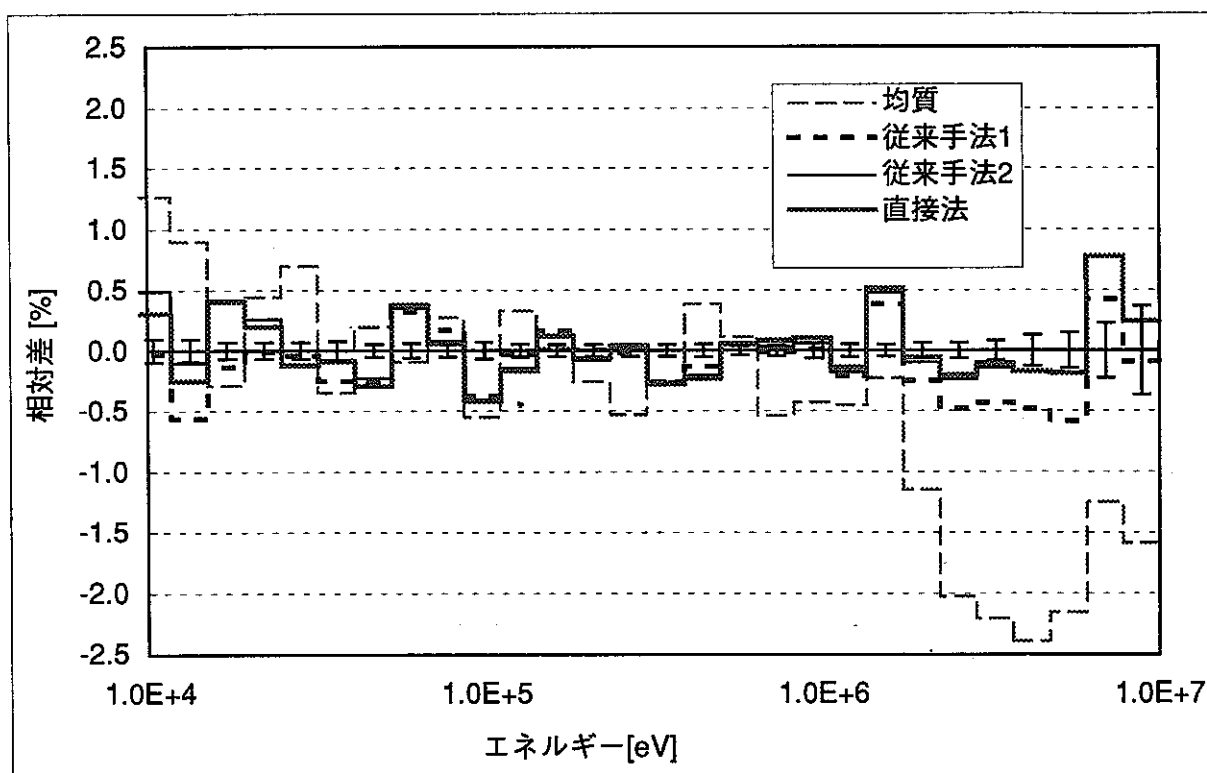


図2-4(1) 実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する相対差
—内側炉心燃料吸収断面積 (1)—

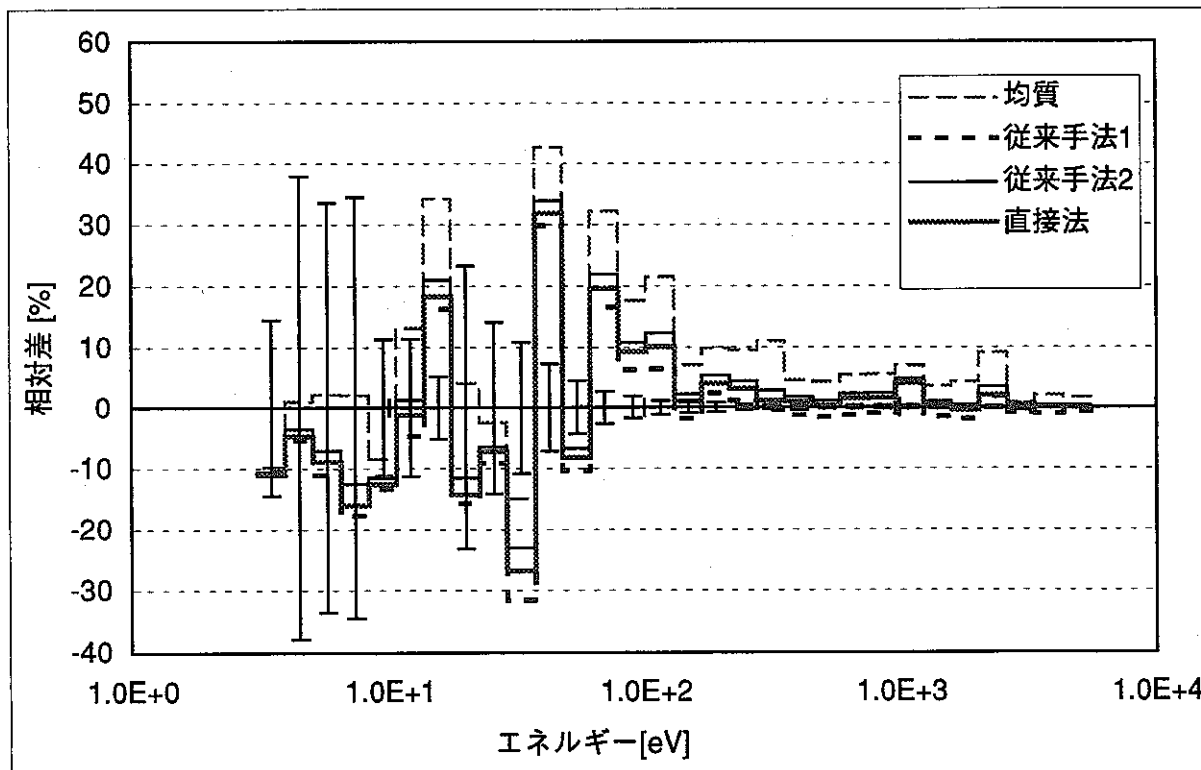


図2-4(2) 実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する相対差
—内側炉心燃料吸収断面積 (2)—

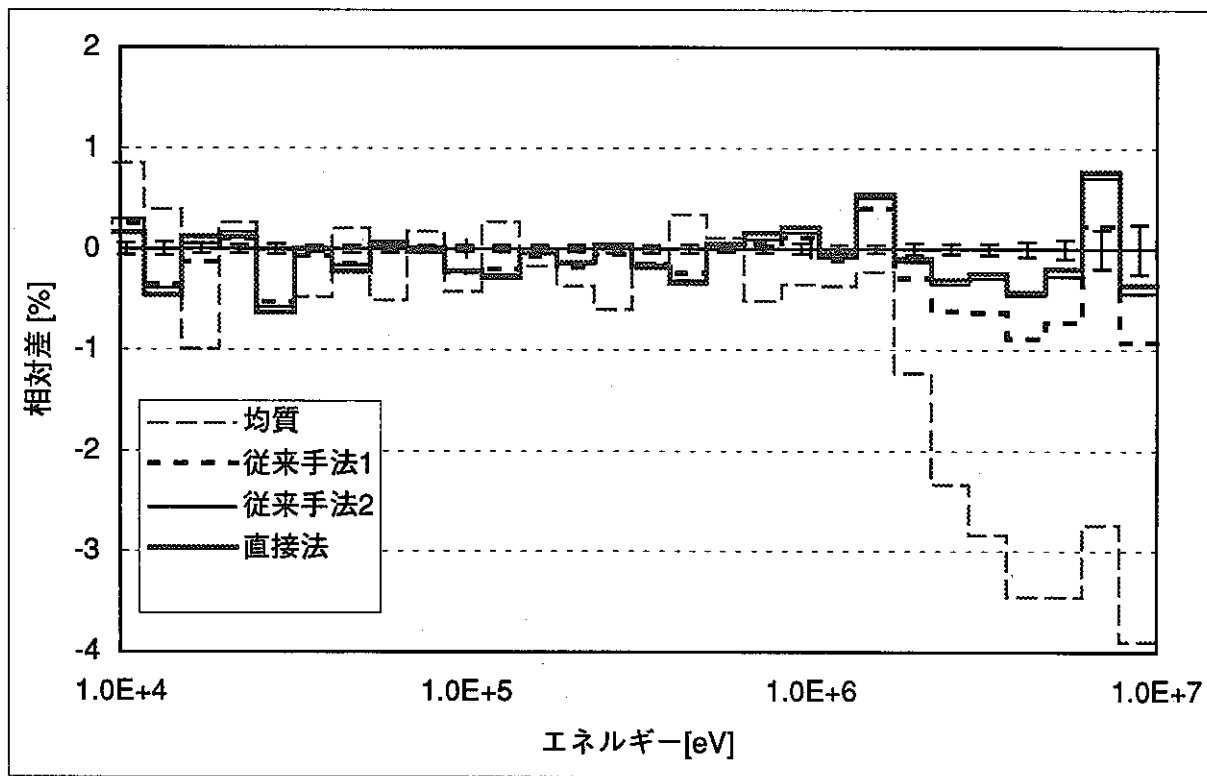


図2-5(1) 実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する相対差
—内側炉心燃料生成断面積 (1)—

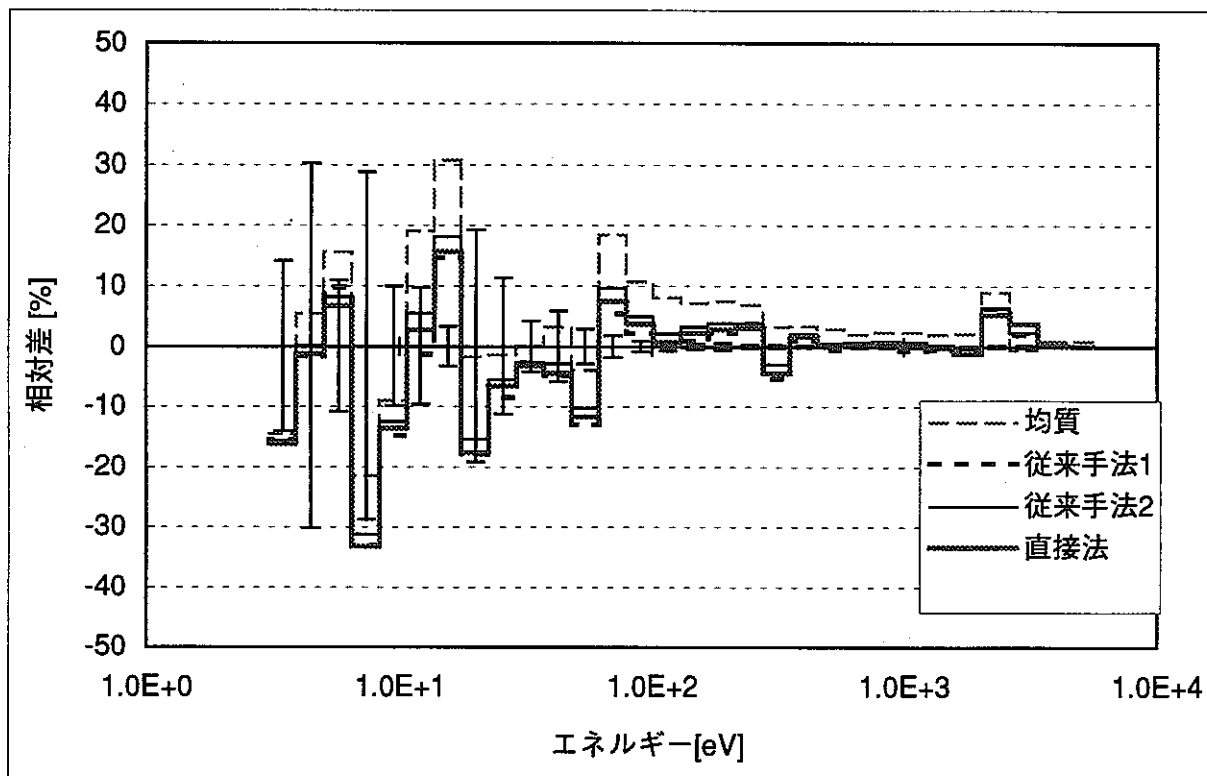


図2-5(2) 実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する相対差
—内側炉心燃料生成断面積 (2)—

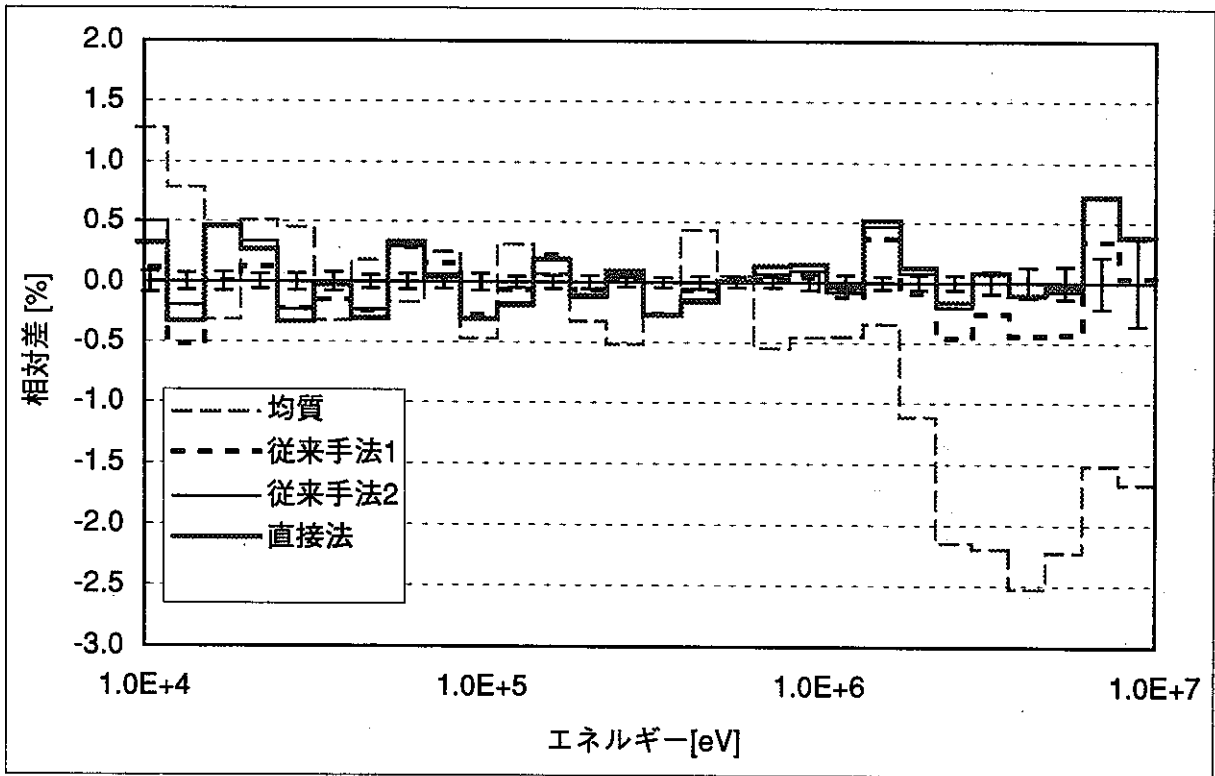


図2-6(1) 実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する相対差
—外側炉心燃料吸収断面積 (1)—

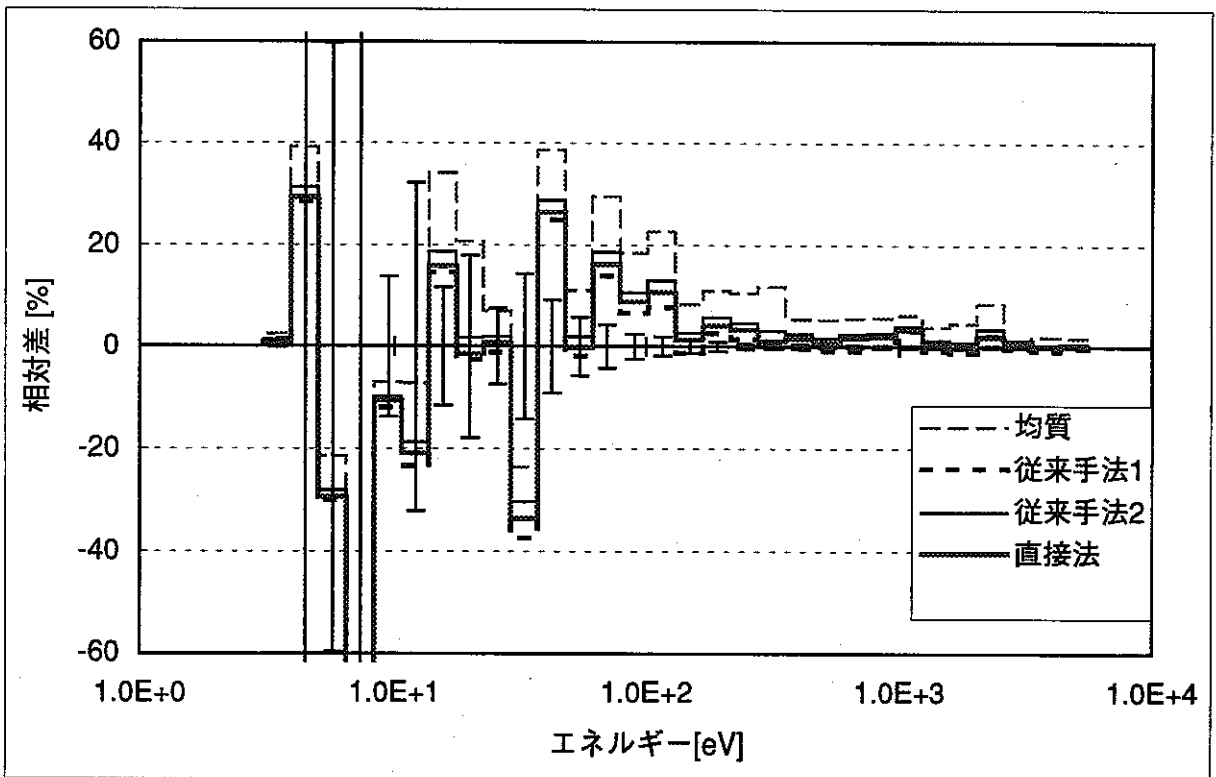


図2-6(2) 実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する相対差
—外側炉心燃料吸収断面積 (2)—

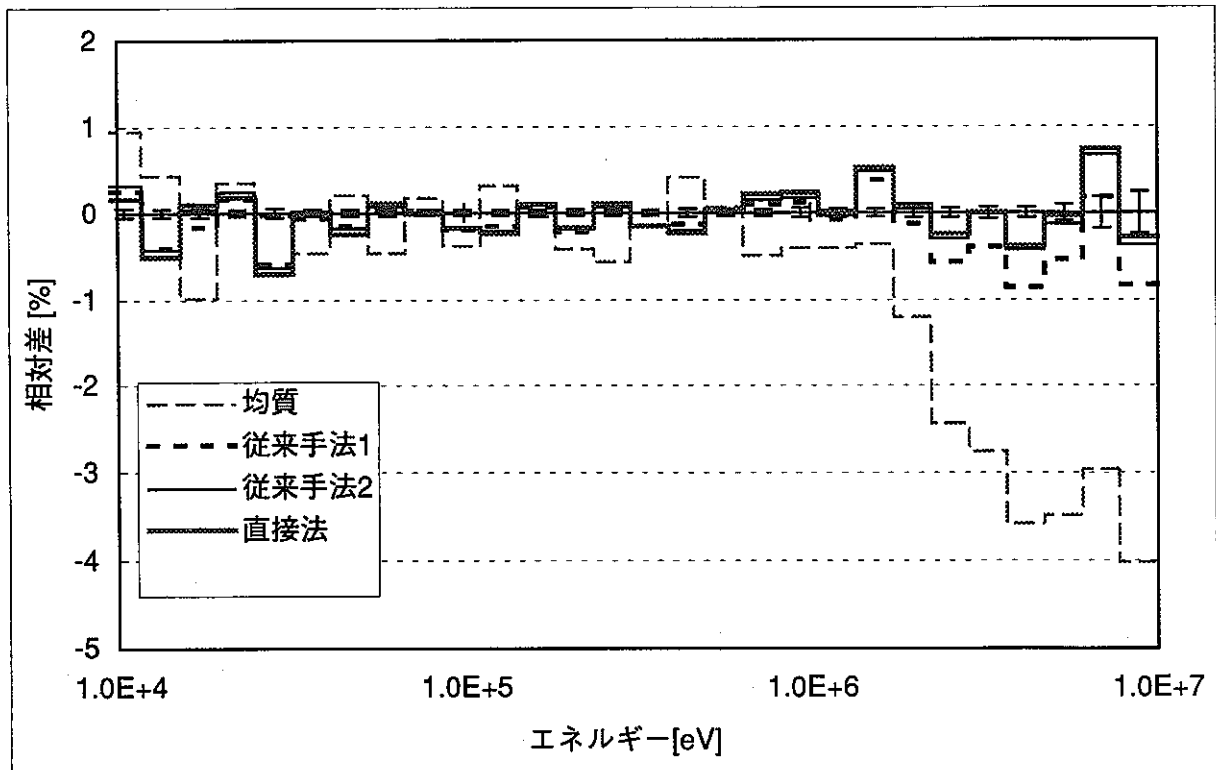


図2-7(1) 実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する相対差
—外側炉心燃料生成断面積 (1)—

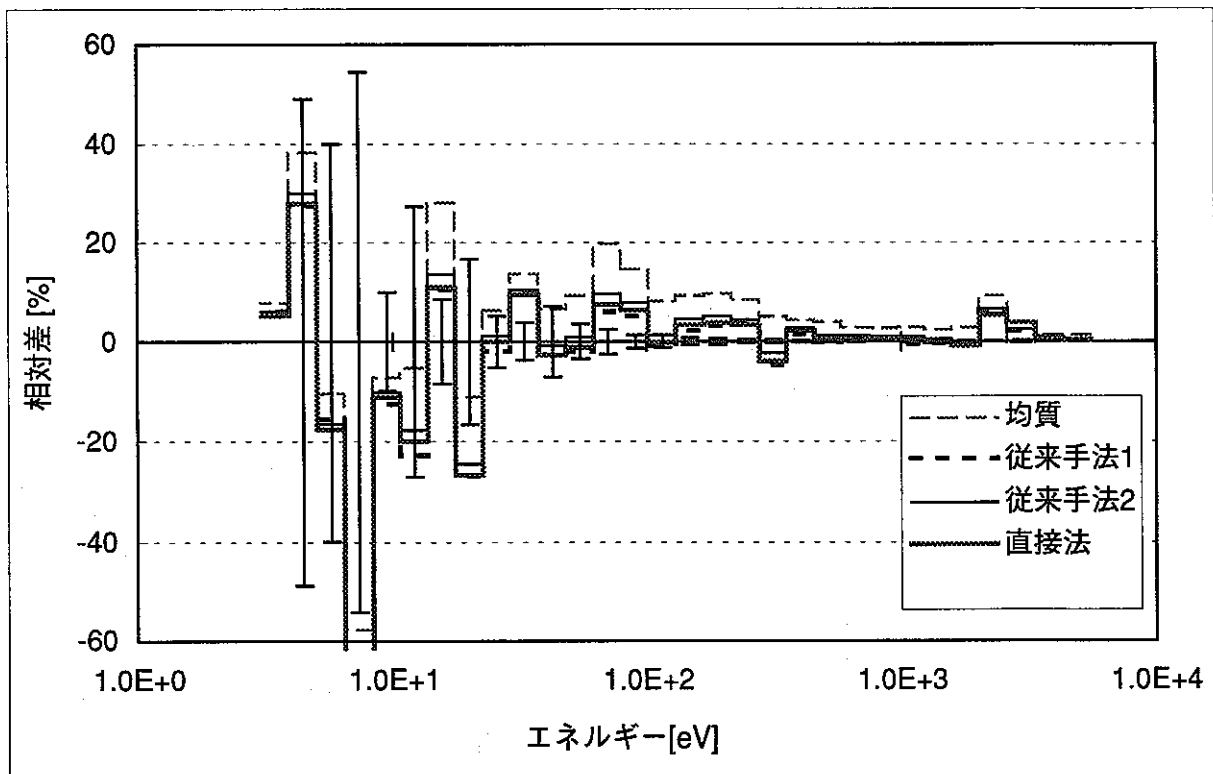


図2-7(2) 実効定数における各手法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する相対差
—外側炉心燃料生成断面積 (2)—

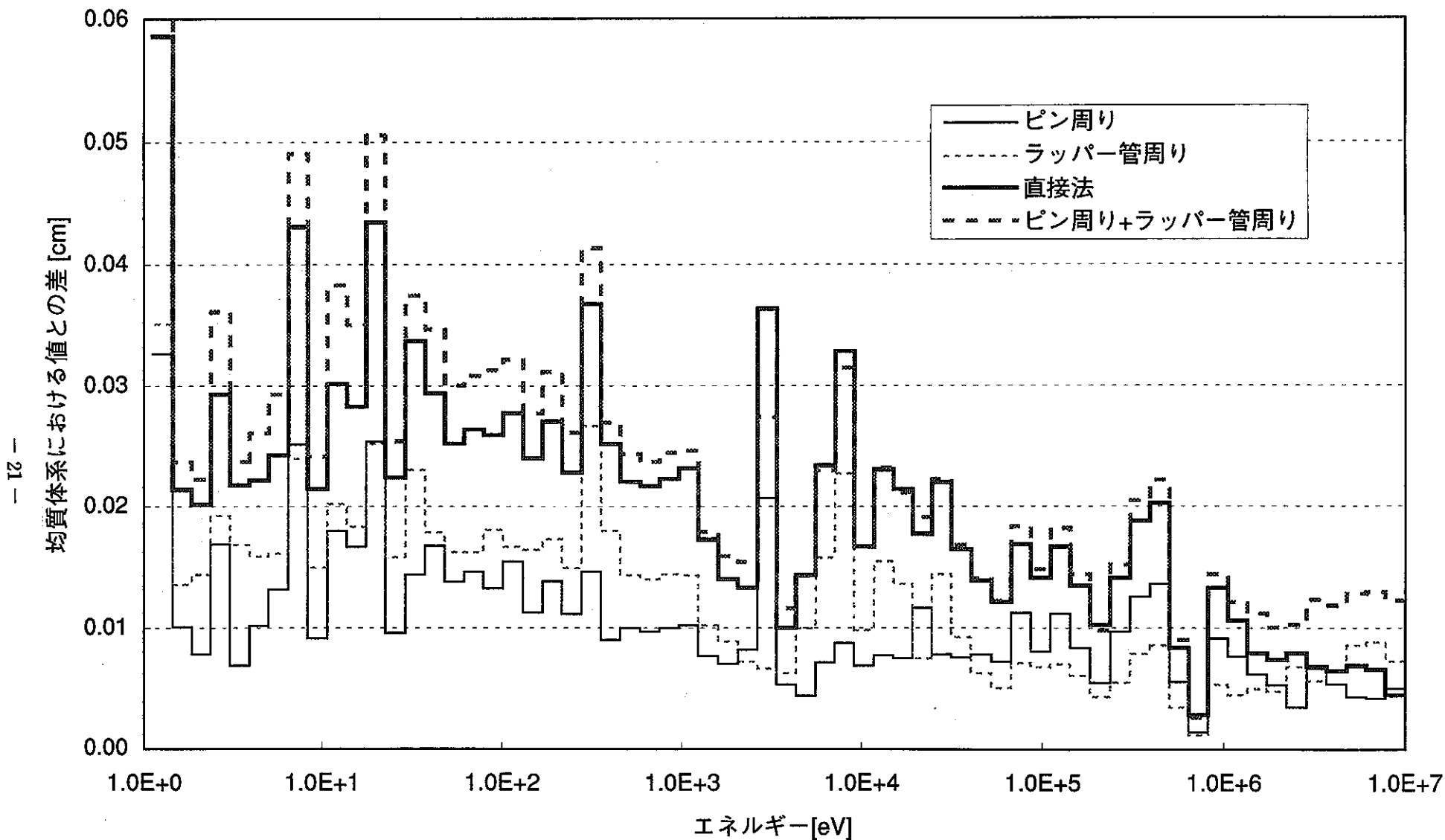


図2-8(1) 拡散係数における各手法の非均質効果の比較
 —内側炉心燃料—

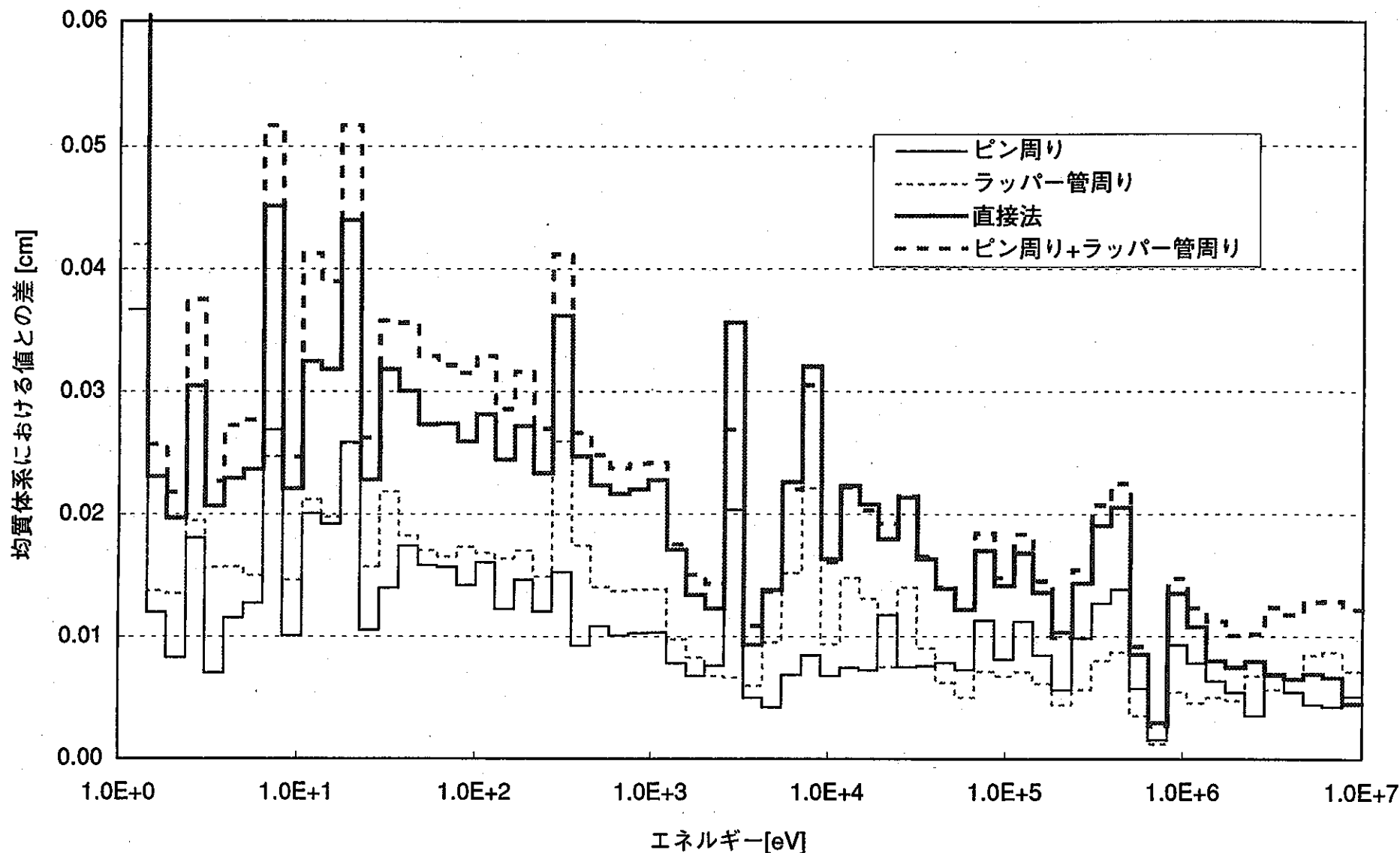


図2-8(2) 拡散係数における各手法の非均質効果の比較
—外側炉心燃料—

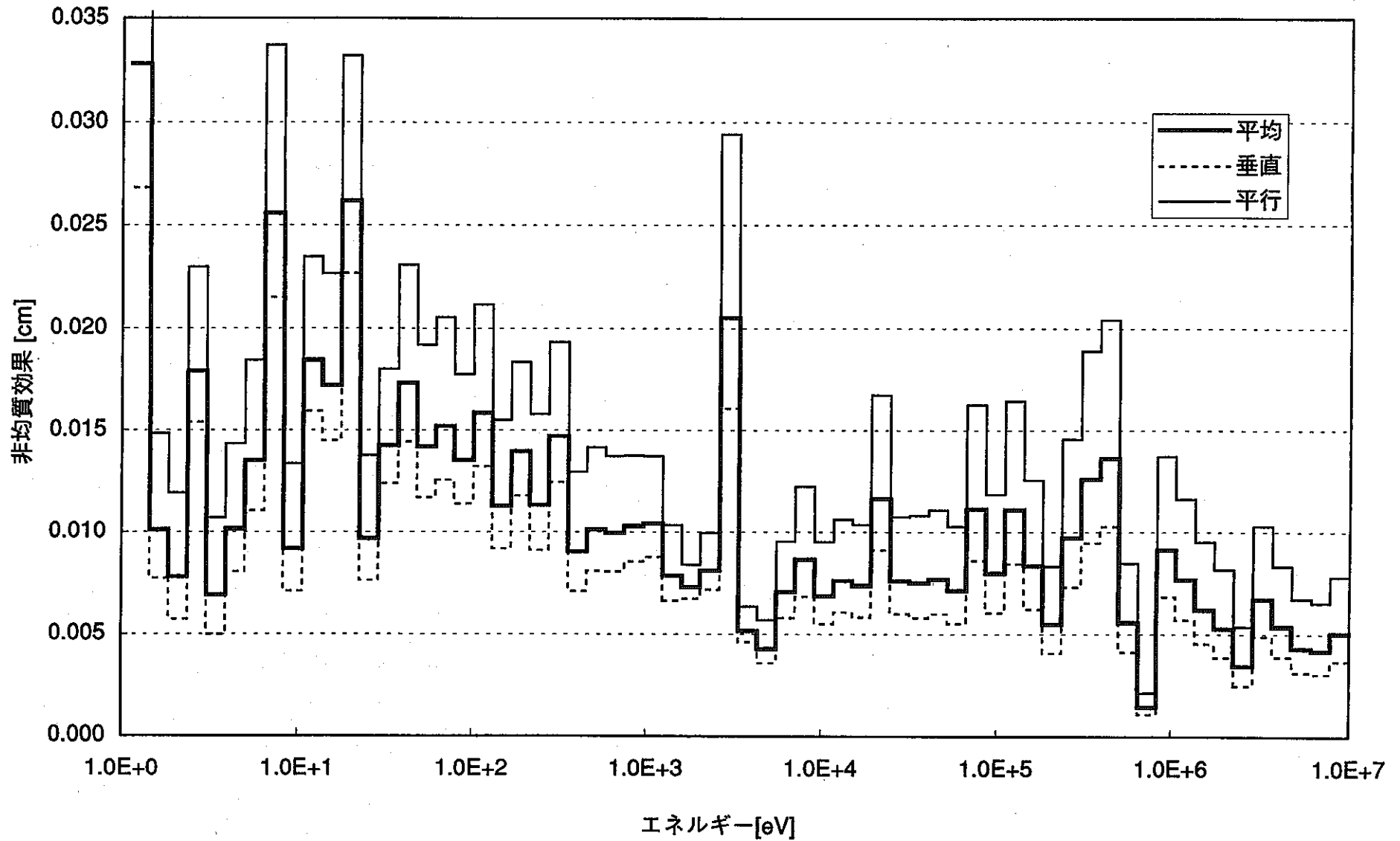


図2-9 拡散係数における非均質効果
—内側炉心燃料ピン周り拡散係数—

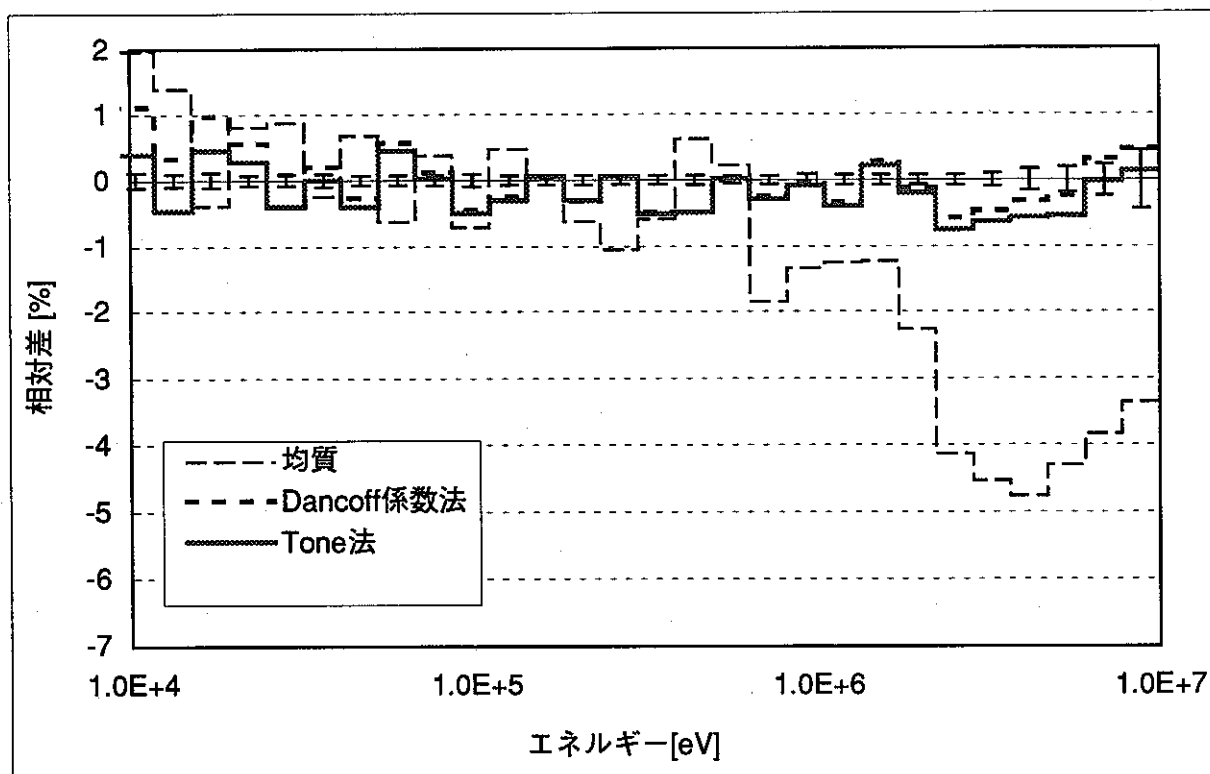


図2-10(1) 実効定数における各直接法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する相対差
 -4層ピン内側炉心燃料吸収断面積 (1)-

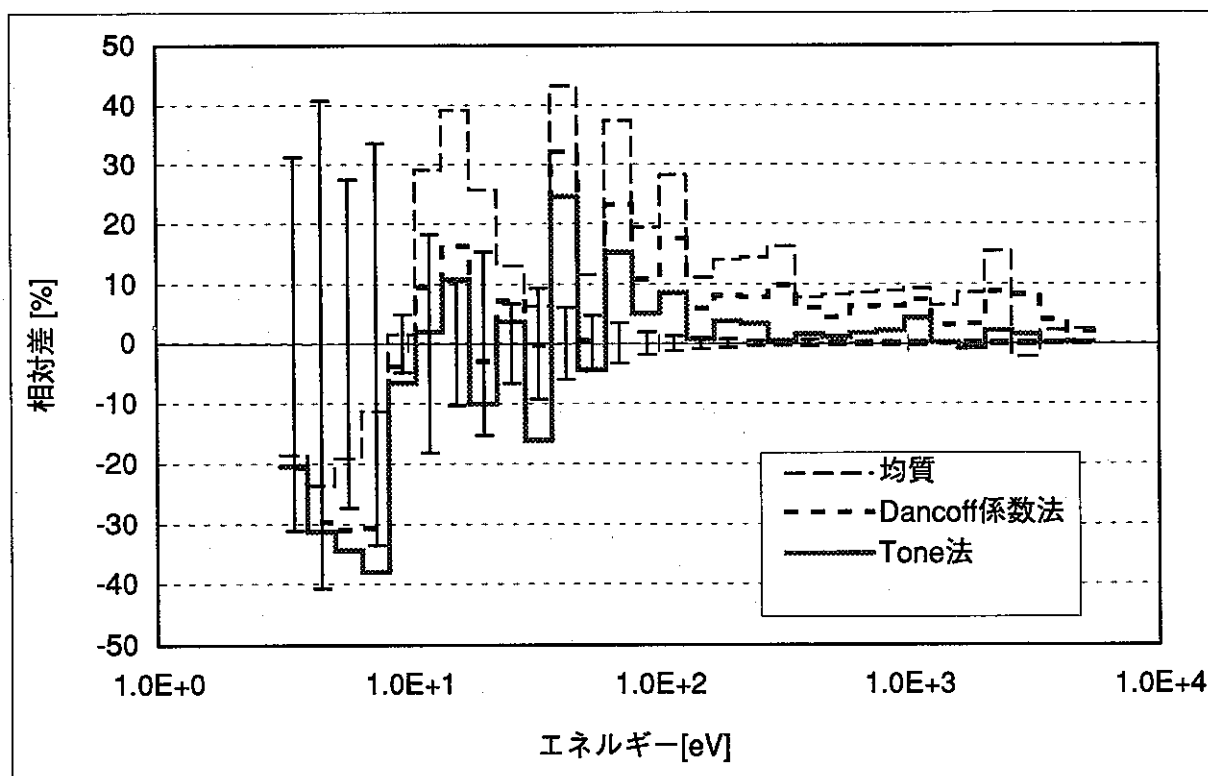


図2-10(2) 実効定数における各直接法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する相対差
 -4層ピン内側炉心燃料吸収断面積 (2)-

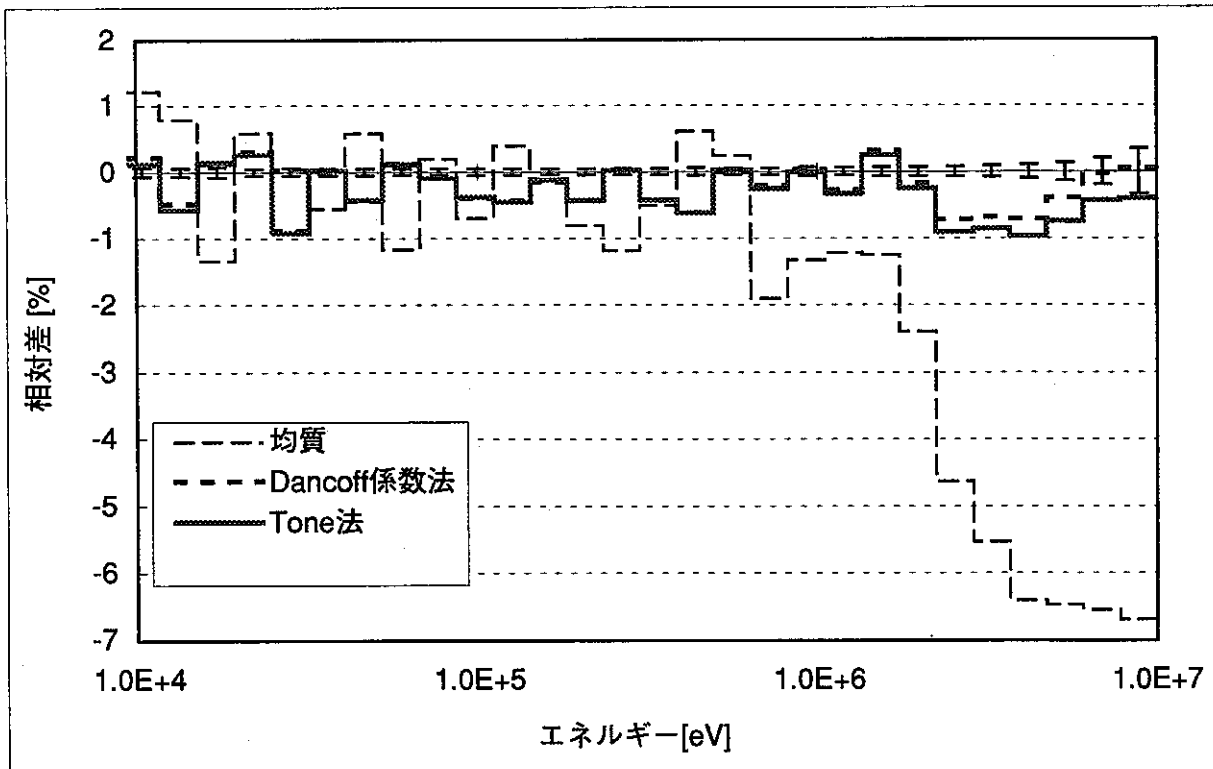


図2-11(1) 実効定数における各直接法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する相対差
—4層ピン内側炉心燃料生成断面積 (1)—

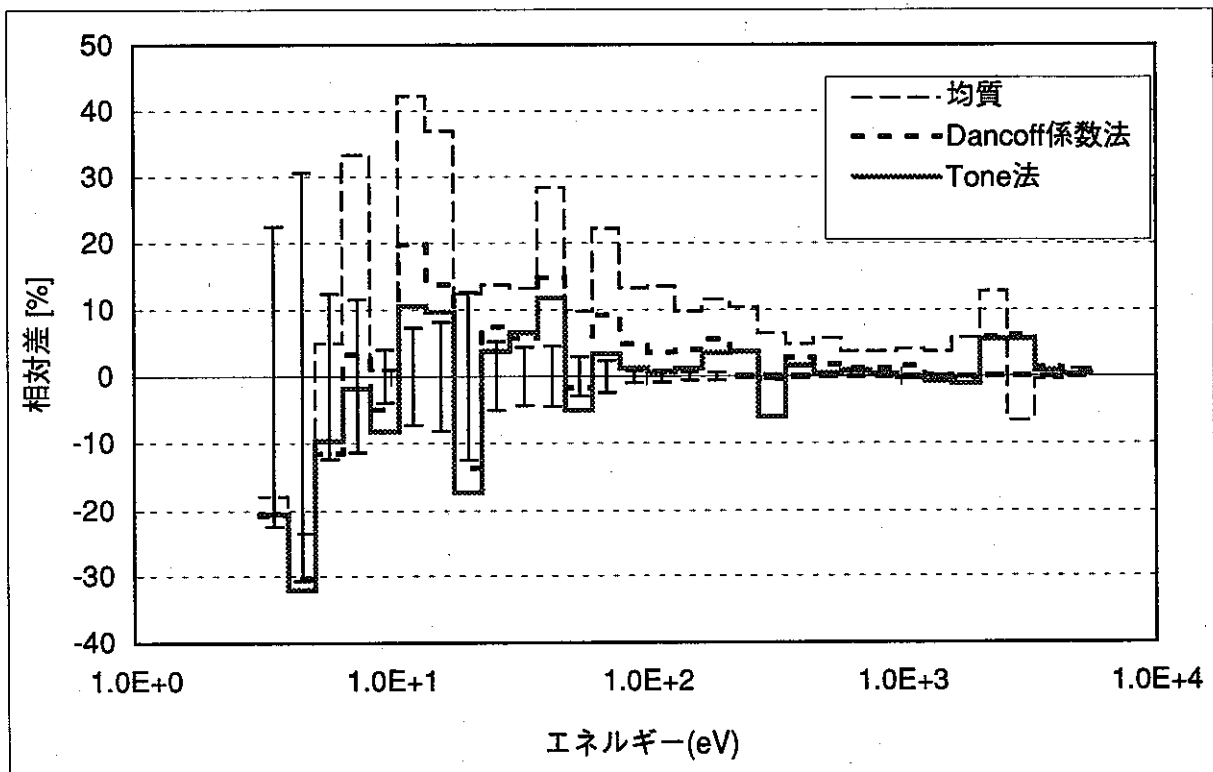


図2-11(2) 実効定数における各直接法の連続エネルギーモンテカルロ法に対する相対差
—4層ピン内側炉心燃料生成断面積 (1)—

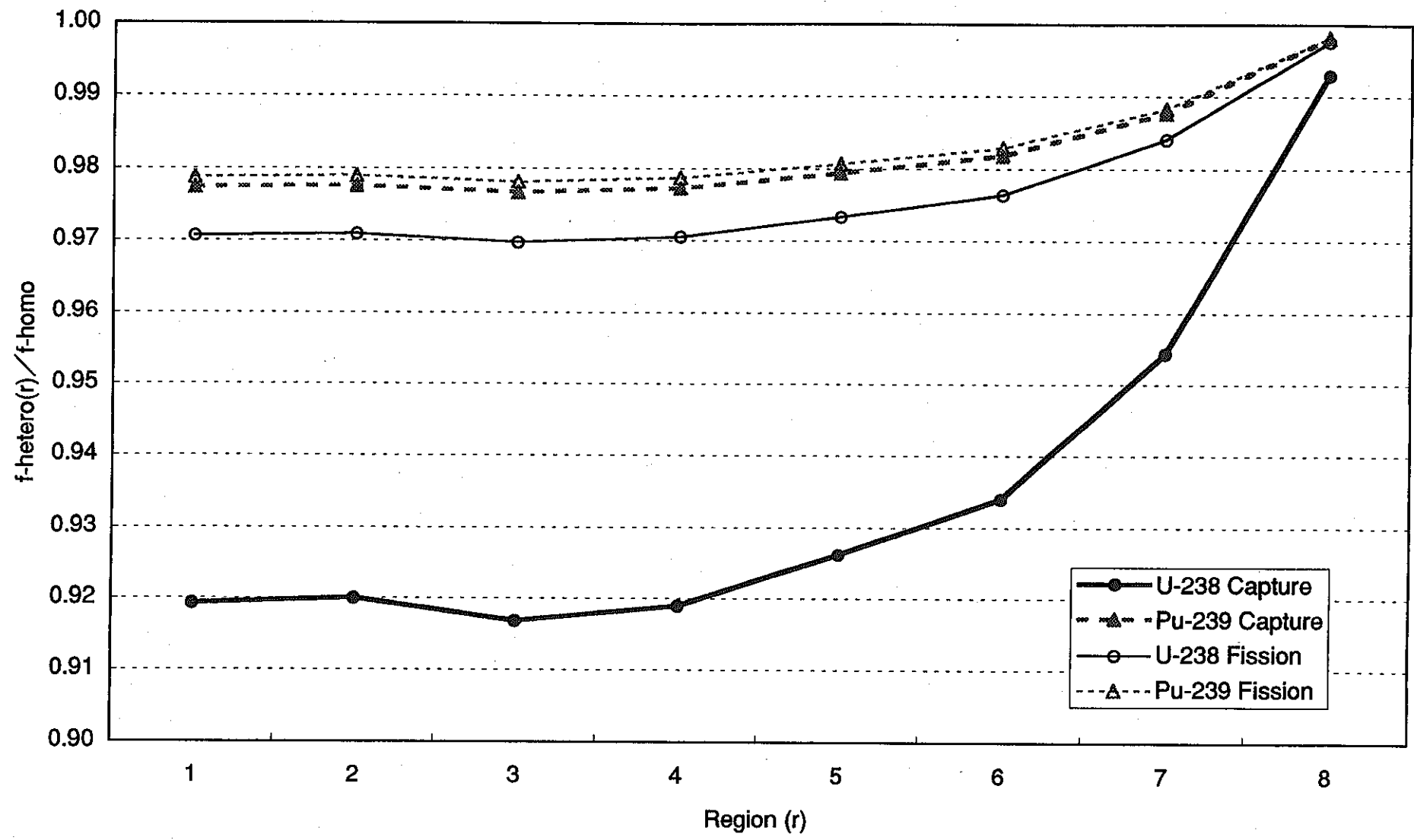


図2-12 直接法により得られた主要重核種自己遮蔽因子の空間依存性
—内側炉心燃料ペレット領域 50keV—

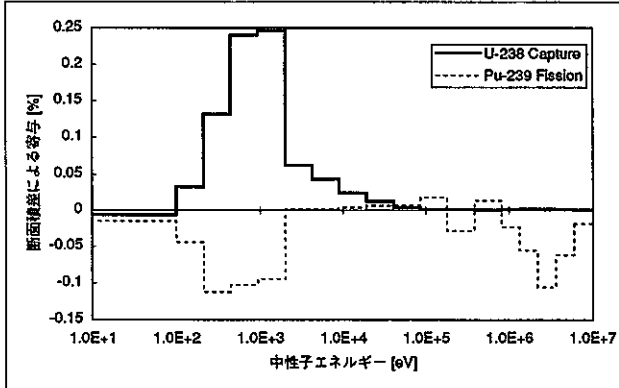


図2-13(1) 非均質性取扱いに起因するミクロ断面積差による核特性への影響 —もんじゅ炉中心制御棒価値—

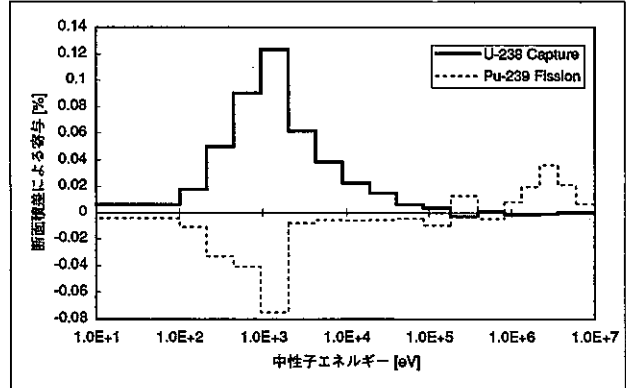


図2-13(2) 非均質性取扱いに起因するミクロ断面積差による核特性への影響 —もんじゅ初期炉心臨界性—

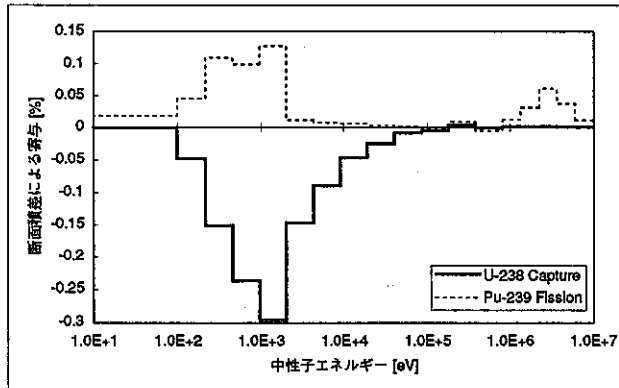


図2-13(3) 非均質性取扱いに起因するミクロ断面積差による核特性への影響 —F49反応率分布—

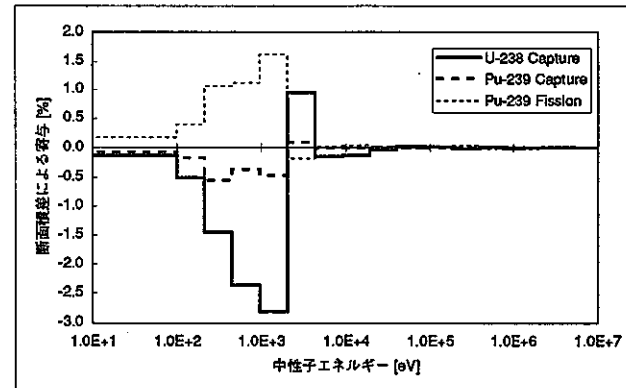


図2-13(4) 非均質性取扱いに起因するミクロ断面積差による核特性への影響 —Naボイド反応度—

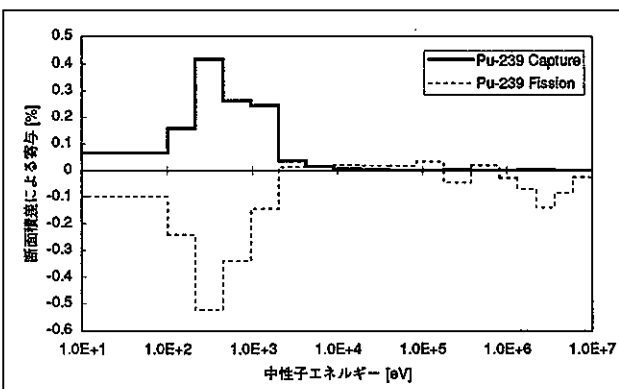


図2-13(5) 非均質性取扱いに起因するミクロ断面積差による核特性への影響 —ドブラー反応度—

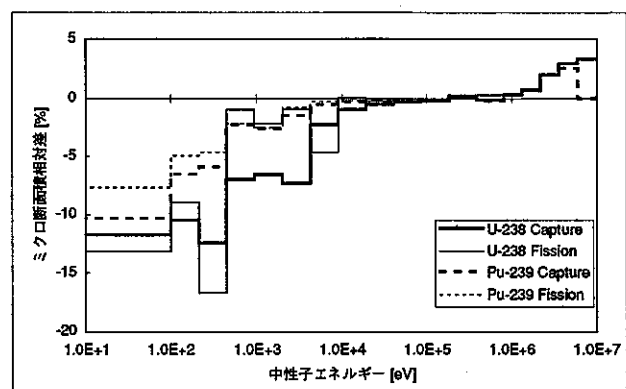


図2-14 均質計算に対する直接法による実効ミクロ断面積の相対差 —内側炉心燃料—

第3章 制御棒均質化断面積計算法 の高度化

第3章 制御棒均質化断面積計算法の高度化

制御棒領域では、自明のように非常に中性子吸収が大きいので、中性子勾配がより急になり、炉心計算で用いるための均質化実効定数作成においては、他の領域と比較して、空間自己遮蔽効果をより詳細に取り扱う必要がある。一方、従来の中性子束荷重による均質化法では、制御棒領域の中性子束の評価が不十分であり、制御棒価値を過大評価することが知られている。従来のもんじゅ制御棒価値解析では別途求められる補正係数によりその効果が考慮されているが、制御棒価値以外の核特性に対しては、制御棒領域の中性子束評価の不十分さに対する補正が不可能である。全核特性に対する制御棒領域中性子束評価の改善策として、反応度保存法10)、あるいは反応率割合保存法11)が挙げられる。本資料では、既存格子計算コードの比較的簡単な改良で実行可能な反応率割合保存法を用い、もんじゅ制御棒価値解析に対する適用性について検討することにする。

3.1 従来の制御棒均質化断面積計算法

3.1.1 中性子束荷重法

この方法は最も一般に行われている方法であり、反応率保存の考え方に基づいている。ただし、均質化後の断面積を用いた体系計算において、反応率が保存されているという保障はなく、制御棒価値においては一般に過大評価となることが知られている。

3.1.2 Bilinear荷重法

中性子束荷重法が反応率保存に基づいているのに対し、この方法は反応度保存の考え方に基づいている。すなわち、重み関数について、中性子荷重法が中性子束であったのに対し、当手法では中性子束と随伴中性子束の積が用いられる。なお、当手法の適用には格子計算コードの大幅な改良が必要なため、今後の検討対象とする。

3.1.3 反応度保存法

この手法は、均質化前後で反応度を保存する、すなわち、非均質体系からの均質化による反応度が0になるように、均質化実効定数を調整するという手法である。まず、制御棒領域と周囲の燃料領域からなるスーパーセルモデルを考える。計算法は次の通りである。

- ①制御棒領域を非均質とした体系において、中性子束分布 $\phi_{net}^g(\vec{r})$ を計算する。また、それを基に中性子束荷重により、初期均質化断面積を算出する。
- ②制御棒領域を均質とした体系において、随伴中性子束分布 $\phi_{hom}^{*g}(\vec{r})$ の計算を行う。

③①と②の計算結果より、摂動論を用いて次式により均質化反応度 $\Delta\rho_{hom}$ を計算する。

$$\Delta\rho_{hom} = \frac{1}{\int_{Cell} dr \sum_g v \Sigma_f^g(\vec{r}) \cdot \phi_{hom}^{*g}(\vec{r}) \sum_{g'} \chi^{g'} \cdot \phi_{het}^{g'}(\vec{r})} \times \left[-\int_{CR} dr \sum_g \left\{ \Sigma_{a,hel}^g(\vec{r}) - \tilde{\Sigma}_{a,hom}^g \right\} \cdot \phi_{hom}^{*g}(\vec{r}) \cdot \phi_{het}^g(\vec{r}) + \int_{CR} dr \sum_g \phi_{hom}^{*g}(\vec{r}) \sum_{g'} \left\{ \Sigma_{s,hel}^{g \rightarrow g'}(\vec{r}) - \tilde{\Sigma}_{s,hom}^{g \rightarrow g'} \right\} \left\{ \phi_{het}^{g'}(\vec{r}) - \phi_{het}^g(\vec{r}) \right\} \right] \quad (3-1)$$

④均質化反応度 $\Delta\rho_{hom}$ が0近傍となれば計算を終了し、0近傍でなければ均質化断面積を調整し（実際には、均質化因子を調整し、乗じる）、②に戻る。

すなわち、反復計算により均質化実効定数の作成が行われる。なお、④において、均質化因子の算出方法、エネルギー群毎に評価されているか等について、文献10)を調査したところ、均質化断面積計算として次式が示されていた。

$$\tilde{\Sigma}_{x,CR}^g = \frac{\int_{Abs} dr \Sigma_x^g(\vec{r}) \cdot \phi_{hom}^{*g}(\vec{r}) \cdot \phi_{het}^g(\vec{r}) + \int_{Cool} dr \Sigma_x^g(\vec{r}) \cdot \phi_{hom}^{*g}(\vec{r}) \cdot \phi_{het}^g(\vec{r})}{\int_{CR} dr \phi_{hom}^{*g}(\vec{r}) \cdot \phi_{het}^g(\vec{r})} \quad (3-2)$$

ただし、制御棒領域（CR）は吸収材（Abs）とそれ以外の構造材と冷却材からなる領域領域（Cool）から構成されており、左辺の均質化断面積を用いた均質体系計算を反復し、そこから得られる随伴中性子束 ϕ^* が収束すれば、計算が終了となる。なお、本手法の適用も、格子計算コードの大幅な改良を要するため、今回は検討対象から外す。

3.1.4 反応率割合保存法

反応率割合保存法は、均質化の際、周辺の燃料領域に対する制御棒領域の反応率割合を保存するように、制御棒領域の実効定数を調整するという手法である。ここでも、反応度保存法の場合と同様に、制御棒領域と周囲の燃料領域からなるスーパーセルモデルを考える。まず、反応率割合保存法の基本式を次に示す。

$$\frac{\int_{CR} dr \Sigma_x^g(\vec{r}) \cdot \phi^g(\vec{r})}{\int_{Fuel} dr \Sigma_x^g(\vec{r}) \cdot \phi^g(\vec{r})} = \frac{\tilde{\Sigma}_{x,CR}^g \cdot \tilde{\phi}_{CR}^g \cdot V_{CR}}{\tilde{\Sigma}_{x,Fuel}^g \cdot \tilde{\phi}_{Fuel}^g \cdot V_{Fuel}} \quad (3-3)$$

ここで、xは反応の種類を表す。

左辺は非均質体系計算による反応率割合を、右辺は均質体系計算によって得られる反応率割合をそれぞれ表し、右辺の \sim （チルダ）は、それが付けられている変数が、以下で示す均質体系計算により算出されるものであることを、そして、 $-$ （バー）は非均質計算により得られた中性子束の重みにより得られる変数であることを表す。

次に、(3-3)式を基本とした具体的な計算法を示す。

- ①制御棒領域を非均質とした体系において中性子束分布を計算し、それを基に燃料領域に対する制御棒領域平均の反応率割合 α_x^g を算出する。すなわち、

$$\alpha_x^g = \frac{\int_{CR} dr \Sigma_x^g(\vec{r}) \phi^g(\vec{r})}{\int_{Fuel} dr \Sigma_x^g(\vec{r}) \phi^g(\vec{r})} \quad (3-4)$$

また、得られた中性子束分布を重みとして、燃料領域の均質化断面積、及び、制御棒領域の初期均質化断面積を算出する。

- ②燃料及び制御棒領域を均質とした体系において中性子束分布を計算する。

- ③②で得られた中性子束分布を基に、(3-3)、(3-4)式より導出される次式により、反応率割合保存法に基づく均質化断面積を計算する。

$$\bar{\Sigma}_{x,CR}^{g,(n+1)} = \alpha_x^g \cdot \bar{\Sigma}_{x,Fuel}^g \cdot \frac{\bar{\phi}_{Fuel}^{g,(n)}}{\bar{\phi}_{CR}^{g,(n)}} \cdot \frac{V_{Fuel}}{V_{CR}} \quad (3-5)$$

この手法も、反応度保存法と同様に反復計算により、均質化実効定数の作成を行うものである。なお、括弧内のnは反復計算の回数を表す。

- ④均質化断面積の収束判定を行う。収束すれば計算終了とし、収束していなければ②に戻る。

なお、(3-5)式では制御棒断面積均質化による調整はマクロ断面積が対象であるが、制御棒の燃焼をこの手法に基づいて取り扱う場合には、例えば、B-10（核種番号105）の実効ミクロ断面積のみを調整するという方法もある。すなわち、制御棒均質化断面積をB-10の均質化実効ミクロ断面積を用いて次式により表す。

$$\bar{\Sigma}_{x,CR}^g = \sum_{i \neq 105} \bar{N}_i \bar{\sigma}_{x,i}^g + \bar{N}_{105} \bar{\sigma}_{x,105}^g \quad (3-6)$$

— (バー) のついている数密度、及び、ミクロ断面積は、均質体系におけるものである。そして、(3-6)式より容易にB-10の均質化実効ミクロ断面積を求めることが出来る。

3.2 反応率割合保存法の検討

具体的に反応率割合保存法適用の対象とした反応の種類は、輸送、吸収、中性子生成、核分裂、散乱マトリックス、N2Nである。制御棒の均質化においては、中性子生成、及び核分裂断面積を対象とする必要はないが、当手法適用の一般性を持たせるために、それらも含めることとした。

1回の反復計算において、全種類の断面積に対して適用した後、断面積バランスを取る必要がある、一般に行われている次式に示す自群散乱の調整を行うこととした。

$$\Sigma_s^{g \rightarrow g} = \Sigma_{tr}^g - \Sigma_a^g - \sum_{g' \neq g} \Sigma_s^{g \rightarrow g'} \quad (3-7)$$

なお、バックリングの存在による疑似吸収項算出のための拡散係数は、反復計算により更新される輸送断面積の3倍の逆数ではなく、非均質計算により既に得られるものとした。

3.2.1 検証計算

反応率割合保存法の妥当性を検証するため、格子計算だけでなく、炉心計算レベルでも、非均質計算と当手法により求められた断面積使用による制御棒価値計算結果の比較を行うこととした。炉定数としてJFS3-J3.2を用いた。制御棒断面積の均質化のための格子計算では、図3-1に示すように、まず、実際の制御棒吸収体ピンを円環状にモデル化し、制御棒領域とそれを取り巻く6体の内側炉心燃料集合体を円筒状のスーパーセルモデルを取扱う。非燃料領域のバックグラウンド断面積は通常均質体系下で求められるので、特に格子計算コードの選択の余地はないが、著者のプログラミングの観点からCASUPコードに反応率割合保存法計算ルーチンを組み込み、中性子束荷重法及び反応率割合保存法に基づく実効定数作成を行った。他方、炉心計算は、2次元RZ70群輸送計算により行った。基準となる制御棒部非均質炉心計算では、制御棒吸収体、及び、構造材+冷却材領域それぞれについて均質格子計算により実効定数を用いた。なお、炉心計算において制御棒領域を非均質のまま取り扱えるのは炉中心挿入の場合のみであるので、検証計算もそれを対象としている。それに対し、制御棒部均質炉心計算では、非均質計算と同じ空間メッシュ分割の下、中性子束荷重、及び、反応率割合保存法による制御棒均質化断面積が用いられている。検証はもんじゅの後備炉停止棒（B10濃縮度約90%、以下BCR）、及び、主調整棒（B10濃縮度約39%、以下CCR）を計算対象として行った。

3.2.2 検証結果

まず、スーパーセル計算の結果を表3-1に示す。中性子束荷重法では、均質化により反応度が保存されていないのに対し、反応率割合保存法では反応度までも保存されることが分かる。

次に、炉心計算による制御棒価値計算結果を表3-2(1)（BCR）、及び表3-2(2)（CCR）に示す。中性子束荷重法ではBCR、CCRでそれぞれ4.0、3.3%の過大評価が見られ、B-10濃縮度の高いBCRの方が度合いが大きい。他方、反応率割合保存法では良い一致が見られる。また、従来法ではこの結果より、反応率割合保存法は制御棒均質化断面積の作成に有効であると判断できる。

最後に、断面積に関する従来法との比較を表3-3(1)（BCR）、及び表3-3(2)（CCR）に示す。中性子束荷重法に対して、反応率割合保存法は実効断面積をより小さく評価しており、中性子束荷重法により得られた制御棒実効定数使用による制御棒価値の過大評価を解消する方向であることが分かる。また、B-10濃縮度の大きさにより吸収断面積がよ

り大きいBCRで、手法間の相対差がより大きい。更に、反応毎の相対差に差が見られな
いが、この証明は付録Aに示す通りである。ここで、中性子束荷重法-反応率割合保存法
間の均質化断面積の相対差と制御棒価値の相対差との関係について考察する。制御棒価
値の相対差は表3-2から計算すると、BCR、CCRそれぞれ4.4、3.4%であるが、断面積の
相対差はエネルギー領域によっては約40%に達する。そこで、厳密拡散摂動計算により
算出した、両手法間の断面積差が及ぼす制御棒価値への寄与のエネルギー分布を図3-2
に示す。BCR、CCRとも寄与は1keV以上であり、寄与の大半は断面積差が数~10%のエ
ネルギー領域であることが分かる。従って、制御棒領域の相対差が4.4、3.4%程度であ
る要因は、制御棒領域の断面積による制御棒価値の感度が、断面積相対差が数~10%程
度のエネルギー領域で大きいことにあることが分かる。

3.2.3 従来のもんじゅ制御棒価値解析結果との比較

ここでは、従来のもんじゅ制御棒価値解析法と今回の方法による結果との比較を行う。
従来の制御棒価値解析では、制御棒領域の格子計算における非均質と均質体系計算によ
る反応度の比を均質化断面積補正と定義している。そして、中性子束荷重法により得ら
れた制御棒実効定数を用いて制御棒価値を計算し、均質化断面積補正を乗じることによ
り非均質計算による制御棒価値相当の結果を算出している。そこで、比較のために表
3-2に示した結果より得られる今回の手法による非均質効果と従来解析で用いられてい
る非均質補正係数を比較することにより、制御棒価値への影響を評価する。従来法と反
応率割合保存法により得られた結果との比較を表3-4に示す。今回の手法の採用により
BCRでは2%、CCRでは1%の制御棒価値の上昇が見込まれ、従来のJENDL-3.2による
BCR及びCCR制御棒価値のC/E値は0.97~0.98であることから改善の方向ではある。この
差は従来の解析法ではスーパーセル計算のみから算出される補正值であるのに対し、今
回の方法では、スーパーセル計算において実効定数を算出後、炉心計算において非均質
効果を評価しており、炉心計算が反映されている観点から、今回の手法の方がより正確
であると考えられる。

3.3 まとめ

今回の方法は制御棒価値だけでなく、全ての核特性に対し反映させることができると
いう長所がある。そこで、制御棒領域の均質化断面積を適切に算出し、制御棒価値や制
御棒挿入体系におけるその他の核特性を精度良く評価できる標準解析手法として、反応
率割合保存法を確立していきたいと考える。また、今回の検討で得られた制御棒価値の
相対差（BCR: 約4%、CCR: 約3%）は、断面積の相対差（0~45%）と比較して非常に小
さいものなのあったが、この要因は断面積の相対差が数~10%のエネルギー領域で制御
棒領域の断面積による制御棒価値の感度が大きいことにあることが分かった。

表3-1 制御棒領域スーパーセル計算における制御棒領域均質化前後の固有値の比較

	非均質体系	均質体系a	均質体系b
BCR	0.80566	0.78584 (-3.130)*	0.80565 (-0.002)*
CCR	0.95178	0.94037 (-1.275)*	0.95149 (-0.000)*

均質体系a: 中性子束荷重による制御棒均質化断面積使用

均質体系b: 反応率割合保存法による制御棒均質化断面積使用

*: 均質化反応度 [% $\Delta k/k$ ']

表3-2(1) 制御棒価値に関する中性子束荷重法と反応率割合保存法との比較
—もんじゅ炉中心BCR挿入—

		非均質体系	中性子束荷重法	反応率割合保存法
実効増倍率	制御棒非挿入 (Naフォロー)	1.02433		
	制御棒挿入	1.00820	1.00757	1.00825
制御棒価値		1.562* (Ref.)	1.625* (+4.0)**	1.557* (-0.3)**

*: % $\Delta k/k'$

** : Referenceに対する相対差 [%]

表3-2(2) 制御棒価値に関する中性子束荷重法と反応率割合保存法との比較
—もんじゅ炉中心CCR挿入—

		非均質体系	中性子束荷重法	反応率割合保存法
実効増倍率	制御棒非挿入 (Naフォロー)	1.02433		
	制御棒挿入	1.01350	1.01314	1.01350
制御棒価値		1.044* (Ref.)	1.078* (+3.3)**	1.043* (-0.0)**

*: % $\Delta k/k'$

** : Referenceに対する相対差 [%]

表3-3(1) 反応率割合保存法と中性子束荷重法による均質化断面積の比較 —BCR—

エネルギー群	エネルギー上限 [eV]	中性子束荷重法			反応率割合保存法			相対差 [%]		
		Σ_{tr}	Σ_a	$\Sigma_{n,2n}$	Σ_{tr}	Σ_a	$\Sigma_{n,2n}$	Σ_{tr}	Σ_a	$\Sigma_{n,2n}$
1	1.00E+7	7.98E-2	1.10E-2	1.34E-4	7.89E-2	1.08E-2	1.33E-4	-1.11	-1.11	-1.11
2	7.79E+6	8.63E-2	1.02E-2	7.91E-7	8.53E-2	1.01E-2	7.82E-7	-1.10	-1.10	-1.10
3	6.07E+6	8.93E-2	9.98E-3	0.00E+0	8.84E-2	9.87E-3	0.00E+0	-1.07	-1.07	—
4	4.72E+6	1.02E-1	9.44E-3	0.00E+0	1.01E-1	9.34E-3	0.00E+0	-1.10	-1.10	—
5	3.68E+6	1.13E-1	7.44E-3	0.00E+0	1.12E-1	7.32E-3	0.00E+0	-1.61	-1.61	—
6	2.87E+6	1.25E-1	7.75E-3	0.00E+0	1.23E-1	7.59E-3	0.00E+0	-2.03	-2.03	—
7	2.23E+6	1.23E-1	1.29E-2	0.00E+0	1.21E-1	1.26E-2	0.00E+0	-1.82	-1.82	—
8	1.74E+6	1.25E-1	9.52E-3	0.00E+0	1.22E-1	9.30E-3	0.00E+0	-2.28	-2.28	—
9	1.35E+6	1.41E-1	6.38E-3	0.00E+0	1.38E-1	6.23E-3	0.00E+0	-2.37	-2.37	—
10	1.05E+6	1.57E-1	6.85E-3	0.00E+0	1.53E-1	6.69E-3	0.00E+0	-2.42	-2.42	—
11	8.21E+5	1.97E-1	8.82E-3	0.00E+0	1.89E-1	8.43E-3	0.00E+0	-4.40	-4.40	—
12	6.39E+5	1.79E-1	1.35E-2	0.00E+0	1.69E-1	1.28E-2	0.00E+0	-5.61	-5.61	—
13	4.98E+5	2.22E-1	1.95E-2	0.00E+0	2.14E-1	1.88E-2	0.00E+0	-3.73	-3.73	—
14	3.88E+5	2.09E-1	1.96E-2	0.00E+0	1.98E-1	1.85E-2	0.00E+0	-5.37	-5.37	—
15	3.02E+5	2.25E-1	2.42E-2	0.00E+0	2.15E-1	2.32E-2	0.00E+0	-4.24	-4.23	—
16	2.35E+5	2.63E-1	2.88E-2	0.00E+0	2.48E-1	2.71E-2	0.00E+0	-5.79	-5.79	—
17	1.83E+5	2.49E-1	3.29E-2	0.00E+0	2.34E-1	3.09E-2	0.00E+0	-6.11	-6.11	—
18	1.43E+5	2.31E-1	3.55E-2	0.00E+0	2.14E-1	3.29E-2	0.00E+0	-7.34	-7.34	—
19	1.11E+5	2.66E-1	4.16E-2	0.00E+0	2.48E-1	3.89E-2	0.00E+0	-6.68	-6.68	—
20	8.65E+4	2.41E-1	4.44E-2	0.00E+0	2.23E-1	4.09E-2	0.00E+0	-7.72	-7.72	—
21	6.74E+4	2.79E-1	5.03E-2	0.00E+0	2.60E-1	4.69E-2	0.00E+0	-6.76	-6.76	—
22	5.25E+4	2.79E-1	5.08E-2	0.00E+0	2.48E-1	4.52E-2	0.00E+0	-11.12	-11.12	—
23	4.09E+4	3.10E-1	5.76E-2	0.00E+0	2.77E-1	5.13E-2	0.00E+0	-10.78	-10.78	—
24	3.18E+4	3.72E-1	5.93E-2	0.00E+0	3.15E-1	5.01E-2	0.00E+0	-15.46	-15.46	—
25	2.48E+4	2.63E-1	6.63E-2	0.00E+0	2.29E-1	5.78E-2	0.00E+0	-12.80	-12.80	—
26	1.93E+4	3.88E-1	7.73E-2	0.00E+0	3.30E-1	6.58E-2	0.00E+0	-14.88	-14.88	—
27	1.50E+4	4.13E-1	7.35E-2	0.00E+0	3.28E-1	5.83E-2	0.00E+0	-20.67	-20.67	—
28	1.17E+4	3.66E-1	7.80E-2	0.00E+0	2.90E-1	6.18E-2	0.00E+0	-20.82	-20.82	—
29	9.12E+3	5.71E-1	8.74E-2	0.00E+0	4.32E-1	6.61E-2	0.00E+0	-24.38	-24.38	—
30	7.10E+3	5.17E-1	8.50E-2	0.00E+0	3.78E-1	6.21E-2	0.00E+0	-26.94	-26.94	—
31	5.53E+3	5.43E-1	8.93E-2	0.00E+0	3.89E-1	6.39E-2	0.00E+0	-28.41	-28.41	—
32	4.31E+3	7.80E-1	9.56E-2	0.00E+0	5.39E-1	6.61E-2	0.00E+0	-30.86	-30.86	—
33	3.35E+3	2.31E+0	1.35E-1	0.00E+0	1.63E+0	9.54E-2	0.00E+0	-29.19	-29.19	—
34	2.61E+3	9.66E-1	8.45E-2	0.00E+0	6.14E-1	5.37E-2	0.00E+0	-36.46	-36.46	—
35	2.03E+3	4.72E-1	9.24E-2	0.00E+0	3.10E-1	6.07E-2	0.00E+0	-34.27	-34.27	—
36	1.58E+3	3.96E-1	1.02E-1	0.00E+0	2.69E-1	6.91E-2	0.00E+0	-32.11	-32.11	—
37	1.23E+3	4.17E-1	1.15E-1	0.00E+0	2.81E-1	7.77E-2	0.00E+0	-32.57	-32.57	—
38	9.61E+2	3.91E-1	1.12E-1	0.00E+0	2.64E-1	7.55E-2	0.00E+0	-32.48	-32.48	—
39	7.49E+2	3.95E-1	1.14E-1	0.00E+0	2.64E-1	7.60E-2	0.00E+0	-33.13	-33.13	—
40	5.83E+2	4.08E-1	1.16E-1	0.00E+0	2.68E-1	7.65E-2	0.00E+0	-34.24	-34.24	—
41	4.54E+2	4.67E-1	1.19E-1	0.00E+0	3.01E-1	7.66E-2	0.00E+0	-35.53	-35.53	—
42	3.54E+2	6.29E-1	1.14E-1	0.00E+0	3.82E-1	6.90E-2	0.00E+0	-39.32	-39.32	—
43	2.75E+2	4.20E-1	1.16E-1	0.00E+0	2.68E-1	7.39E-2	0.00E+0	-36.32	-36.32	—
44	2.14E+2	4.16E-1	1.18E-1	0.00E+0	2.65E-1	7.54E-2	0.00E+0	-36.29	-36.29	—
45	1.67E+2	4.25E-1	1.21E-1	0.00E+0	2.69E-1	7.69E-2	0.00E+0	-36.68	-36.68	—
46	1.30E+2	4.21E-1	1.20E-1	0.00E+0	2.63E-1	7.49E-2	0.00E+0	-37.52	-37.52	—
47	1.01E+2	4.23E-1	1.20E-1	0.00E+0	2.65E-1	7.53E-2	0.00E+0	-37.44	-37.44	—
48	7.89E+1	4.28E-1	1.23E-1	0.00E+0	2.64E-1	7.62E-2	0.00E+0	-38.21	-38.21	—
49	6.14E+1	4.29E-1	1.23E-1	0.00E+0	2.65E-1	7.57E-2	0.00E+0	-38.32	-38.32	—
50	4.79E+1	4.73E-1	1.48E-1	0.00E+0	2.88E-1	9.02E-2	0.00E+0	-39.13	-39.13	—
51	3.73E+1	4.29E-1	1.22E-1	0.00E+0	2.67E-1	7.59E-2	0.00E+0	-37.82	-37.82	—
52	2.90E+1	4.26E-1	1.18E-1	0.00E+0	2.65E-1	7.36E-2	0.00E+0	-37.78	-37.78	—
53	2.26E+1	4.31E-1	1.22E-1	0.00E+0	2.57E-1	7.29E-2	0.00E+0	-40.46	-40.46	—
54	1.76E+1	4.36E-1	1.26E-1	0.00E+0	2.63E-1	7.63E-2	0.00E+0	-39.67	-39.67	—
55	1.37E+1	4.35E-1	1.25E-1	0.00E+0	2.63E-1	7.58E-2	0.00E+0	-39.48	-39.48	—
56	1.07E+1	4.31E-1	1.22E-1	0.00E+0	2.70E-1	7.62E-2	0.00E+0	-37.40	-37.40	—
57	8.32E+0	4.31E-1	1.21E-1	0.00E+0	2.59E-1	7.28E-2	0.00E+0	-39.97	-39.97	—
58	6.48E+0	4.32E-1	1.22E-1	0.00E+0	2.60E-1	7.33E-2	0.00E+0	-39.83	-39.83	—
59	5.04E+0	4.31E-1	1.21E-1	0.00E+0	2.63E-1	7.41E-2	0.00E+0	-39.00	-39.00	—
60	3.93E+0	4.31E-1	1.21E-1	0.00E+0	2.67E-1	7.52E-2	0.00E+0	-38.00	-38.00	—
61	3.06E+0	4.33E-1	1.23E-1	0.00E+0	2.61E-1	7.39E-2	0.00E+0	-39.76	-39.76	—
62	2.38E+0	4.34E-1	1.23E-1	0.00E+0	2.66E-1	7.57E-2	0.00E+0	-38.68	-38.68	—
63	1.86E+0	4.35E-1	1.24E-1	0.00E+0	2.65E-1	7.60E-2	0.00E+0	-38.97	-38.97	—
64	1.45E+0	4.37E-1	1.27E-1	0.00E+0	2.54E-1	7.37E-2	0.00E+0	-41.81	-41.81	—
65	1.13E+0	4.40E-1	1.30E-1	0.00E+0	2.42E-1	7.15E-2	0.00E+0	-45.05	-45.05	—
66	8.76E-1	4.43E-1	1.32E-1	0.00E+0	2.43E-1	7.26E-2	0.00E+0	-45.18	-45.18	—
67	6.83E-1	4.44E-1	1.34E-1	0.00E+0	2.45E-1	7.37E-2	0.00E+0	-44.94	-44.94	—
68	5.32E-1	4.46E-1	1.36E-1	0.00E+0	2.46E-1	7.48E-2	0.00E+0	-44.79	-44.79	—
69	4.14E-1	4.48E-1	1.38E-1	0.00E+0	2.46E-1	7.55E-2	0.00E+0	-45.22	-45.22	—
70	3.22E-1	4.76E-1	1.85E-1	0.00E+0	2.60E-1	1.01E-1	0.00E+0	-45.36	-45.36	—

*: 相対差 = $\{ \Sigma (\text{反応率割合保存法}) - \Sigma (\text{中性子束荷重法}) \} / \Sigma (\text{中性子束荷重法})$

表3-3(2) 反応率割合保存法と中性子束荷重法による均質化断面積の比較 —CCR—

エネルギー群	エネルギー上限 [eV]	中性子束荷重法			反応率割合保存法			相対差* [%]		
		Σ_{tr}	Σ_a	$\Sigma_{n,2n}$	Σ_{tr}	Σ_a	$\Sigma_{n,2n}$	Σ_{tr}	Σ_a	$\Sigma_{n,2n}$
1	1.00E+7	8.02E-2	7.77E-3	1.32E-4	7.96E-2	7.71E-3	1.31E-4	-0.79	-0.79	-0.79
2	7.79E+6	8.85E-2	5.92E-3	1.00E-6	8.77E-2	5.87E-3	9.96E-7	-0.83	-0.83	-0.83
3	6.07E+6	9.36E-2	4.86E-3	0.00E+0	9.29E-2	4.82E-3	0.00E+0	-0.77	-0.77	—
4	4.72E+6	1.02E-1	4.20E-3	0.00E+0	1.01E-1	4.18E-3	0.00E+0	-0.59	-0.59	—
5	3.68E+6	1.11E-1	3.18E-3	0.00E+0	1.10E-1	3.15E-3	0.00E+0	-0.92	-0.92	—
6	2.87E+6	1.21E-1	3.03E-3	0.00E+0	1.20E-1	2.99E-3	0.00E+0	-1.19	-1.19	—
7	2.23E+6	1.21E-1	4.65E-3	0.00E+0	1.20E-1	4.60E-3	0.00E+0	-1.03	-1.03	—
8	1.74E+6	1.28E-1	3.42E-3	0.00E+0	1.26E-1	3.36E-3	0.00E+0	-1.54	-1.54	—
9	1.35E+6	1.47E-1	2.31E-3	0.00E+0	1.45E-1	2.27E-3	0.00E+0	-1.57	-1.57	—
10	1.05E+6	1.41E-1	2.61E-3	0.00E+0	1.41E-1	2.61E-3	0.00E+0	-0.25	-0.25	—
11	8.21E+5	1.79E-1	3.33E-3	0.00E+0	1.76E-1	3.26E-3	0.00E+0	-2.08	-2.08	—
12	6.39E+5	1.57E-1	5.06E-3	0.00E+0	1.52E-1	4.89E-3	0.00E+0	-3.37	-3.37	—
13	4.98E+5	2.08E-1	7.07E-3	0.00E+0	2.04E-1	6.92E-3	0.00E+0	-2.14	-2.14	—
14	3.88E+5	1.87E-1	7.38E-3	0.00E+0	1.82E-1	7.18E-3	0.00E+0	-2.74	-2.74	—
15	3.02E+5	2.02E-1	9.09E-3	0.00E+0	1.99E-1	8.94E-3	0.00E+0	-1.63	-1.63	—
16	2.35E+5	2.47E-1	1.09E-2	0.00E+0	2.40E-1	1.06E-2	0.00E+0	-2.61	-2.61	—
17	1.83E+5	2.36E-1	1.24E-2	0.00E+0	2.29E-1	1.21E-2	0.00E+0	-2.86	-2.87	—
18	1.43E+5	2.17E-1	1.37E-2	0.00E+0	2.09E-1	1.32E-2	0.00E+0	-3.67	-3.67	—
19	1.11E+5	2.61E-1	1.62E-2	0.00E+0	2.54E-1	1.58E-2	0.00E+0	-2.42	-2.42	—
20	8.65E+4	2.32E-1	1.75E-2	0.00E+0	2.25E-1	1.70E-2	0.00E+0	-3.19	-3.19	—
21	6.74E+4	2.74E-1	2.02E-2	0.00E+0	2.71E-1	2.00E-2	0.00E+0	-1.10	-1.10	—
22	5.25E+4	2.79E-1	2.09E-2	0.00E+0	2.65E-1	1.98E-2	0.00E+0	-4.94	-4.94	—
23	4.09E+4	3.17E-1	2.44E-2	0.00E+0	3.06E-1	2.35E-2	0.00E+0	-3.40	-3.40	—
24	3.18E+4	3.87E-1	2.60E-2	0.00E+0	3.62E-1	2.44E-2	0.00E+0	-6.39	-6.39	—
25	2.48E+4	2.57E-1	2.97E-2	0.00E+0	2.45E-1	2.82E-2	0.00E+0	-4.89	-4.89	—
26	1.93E+4	4.01E-1	3.60E-2	0.00E+0	3.87E-1	3.48E-2	0.00E+0	-3.49	-3.49	—
27	1.50E+4	4.34E-1	3.63E-2	0.00E+0	3.96E-1	3.31E-2	0.00E+0	-8.78	-8.78	—
28	1.17E+4	3.73E-1	3.97E-2	0.00E+0	3.39E-1	3.61E-2	0.00E+0	-9.11	-9.11	—
29	9.12E+3	6.04E-1	4.76E-2	0.00E+0	5.49E-1	4.33E-2	0.00E+0	-9.07	-9.07	—
30	7.10E+3	5.37E-1	4.84E-2	0.00E+0	4.70E-1	4.23E-2	0.00E+0	-12.52	-12.52	—
31	5.53E+3	5.53E-1	5.35E-2	0.00E+0	4.79E-1	4.63E-2	0.00E+0	-13.45	-13.45	—
32	4.31E+3	7.65E-1	6.26E-2	0.00E+0	6.67E-1	5.46E-2	0.00E+0	-12.83	-12.83	—
33	3.35E+3	2.00E+0	9.92E-2	0.00E+0	1.91E+0	9.44E-2	0.00E+0	-4.84	-4.84	—
34	2.61E+3	9.33E-1	5.85E-2	0.00E+0	7.26E-1	4.55E-2	0.00E+0	-22.24	-22.24	—
35	2.03E+3	4.69E-1	6.11E-2	0.00E+0	3.53E-1	4.61E-2	0.00E+0	-24.56	-24.56	—
36	1.58E+3	3.99E-1	6.97E-2	0.00E+0	3.11E-1	5.43E-2	0.00E+0	-22.08	-22.08	—
37	1.23E+3	4.25E-1	8.62E-2	0.00E+0	3.32E-1	6.74E-2	0.00E+0	-21.87	-21.87	—
38	9.61E+2	4.03E-1	8.53E-2	0.00E+0	3.13E-1	6.63E-2	0.00E+0	-22.26	-22.26	—
39	7.49E+2	4.10E-1	9.03E-2	0.00E+0	3.14E-1	6.92E-2	0.00E+0	-23.43	-23.43	—
40	5.83E+2	4.27E-1	9.70E-2	0.00E+0	3.20E-1	7.27E-2	0.00E+0	-25.01	-25.01	—
41	4.54E+2	4.88E-1	1.05E-1	0.00E+0	3.60E-1	7.71E-2	0.00E+0	-26.34	-26.34	—
42	3.54E+2	6.40E-1	1.03E-1	0.00E+0	4.41E-1	7.09E-2	0.00E+0	-31.07	-31.07	—
43	2.75E+2	4.42E-1	1.04E-1	0.00E+0	3.11E-1	7.32E-2	0.00E+0	-29.64	-29.64	—
44	2.14E+2	4.39E-1	1.09E-1	0.00E+0	3.06E-1	7.60E-2	0.00E+0	-30.18	-30.18	—
45	1.67E+2	4.49E-1	1.14E-1	0.00E+0	3.09E-1	7.88E-2	0.00E+0	-31.13	-31.13	—
46	1.30E+2	4.46E-1	1.15E-1	0.00E+0	3.00E-1	7.70E-2	0.00E+0	-32.79	-32.79	—
47	1.01E+2	4.48E-1	1.17E-1	0.00E+0	2.99E-1	7.79E-2	0.00E+0	-33.18	-33.18	—
48	7.89E+1	4.56E-1	1.23E-1	0.00E+0	2.99E-1	8.10E-2	0.00E+0	-34.41	-34.41	—
49	6.14E+1	4.58E-1	1.24E-1	0.00E+0	2.98E-1	8.06E-2	0.00E+0	-34.93	-34.93	—
50	4.79E+1	5.04E-1	1.54E-1	0.00E+0	3.23E-1	9.87E-2	0.00E+0	-35.79	-35.79	—
51	3.73E+1	4.56E-1	1.23E-1	0.00E+0	2.97E-1	7.99E-2	0.00E+0	-34.98	-34.98	—
52	2.90E+1	4.45E-1	1.12E-1	0.00E+0	2.87E-1	7.25E-2	0.00E+0	-35.40	-35.40	—
53	2.26E+1	4.57E-1	1.23E-1	0.00E+0	2.81E-1	7.59E-2	0.00E+0	-38.49	-38.49	—
54	1.76E+1	4.69E-1	1.34E-1	0.00E+0	2.94E-1	8.41E-2	0.00E+0	-37.36	-37.36	—
55	1.37E+1	4.68E-1	1.32E-1	0.00E+0	2.96E-1	8.34E-2	0.00E+0	-36.79	-36.79	—
56	1.07E+1	4.57E-1	1.21E-1	0.00E+0	2.99E-1	7.94E-2	0.00E+0	-34.46	-34.46	—
57	8.32E+0	4.53E-1	1.20E-1	0.00E+0	2.80E-1	7.38E-2	0.00E+0	-38.30	-38.30	—
58	6.48E+0	4.51E-1	1.18E-1	0.00E+0	2.78E-1	7.30E-2	0.00E+0	-38.39	-38.39	—
59	5.04E+0	4.47E-1	1.15E-1	0.00E+0	2.79E-1	7.16E-2	0.00E+0	-37.55	-37.55	—
60	3.93E+0	4.44E-1	1.12E-1	0.00E+0	2.82E-1	7.10E-2	0.00E+0	-36.46	-36.46	—
61	3.06E+0	4.47E-1	1.15E-1	0.00E+0	2.75E-1	7.08E-2	0.00E+0	-38.46	-38.46	—
62	2.38E+0	4.47E-1	1.15E-1	0.00E+0	2.80E-1	7.18E-2	0.00E+0	-37.29	-37.29	—
63	1.86E+0	4.48E-1	1.16E-1	0.00E+0	2.79E-1	7.21E-2	0.00E+0	-37.61	-37.61	—
64	1.45E+0	4.54E-1	1.21E-1	0.00E+0	2.68E-1	7.18E-2	0.00E+0	-40.82	-40.82	—
65	1.13E+0	4.63E-1	1.31E-1	0.00E+0	2.58E-1	7.29E-2	0.00E+0	-44.39	-44.39	—
66	8.76E-1	4.68E-1	1.35E-1	0.00E+0	2.59E-1	7.51E-2	0.00E+0	-44.50	-44.50	—
67	6.83E-1	4.69E-1	1.37E-1	0.00E+0	2.62E-1	7.63E-2	0.00E+0	-44.24	-44.24	—
68	5.32E-1	4.70E-1	1.38E-1	0.00E+0	2.63E-1	7.70E-2	0.00E+0	-44.14	-44.14	—
69	4.14E-1	4.72E-1	1.40E-1	0.00E+0	2.62E-1	7.76E-2	0.00E+0	-44.57	-44.57	—
70	3.22E-1	5.07E-1	1.90E-1	0.00E+0	2.81E-1	1.05E-1	0.00E+0	-44.67	-44.67	—

*: 相対差 = { Σ (反応率割合保存法) - Σ (中性子束荷重法) } / Σ (中性子束荷重法)

表3-4 従来法と反応率割合保存法による制御棒価値非均質効果の比較

	BCR	CCR
従来非均質補正	0.942 (Ref.)	0.960 (Ref.)
反応率割合保存法 による非均質効果	0.959 (+0.017)*	0.967 (+0.007)*

*:従来法に対する反応率割合保存法採用によるC/E値の増減

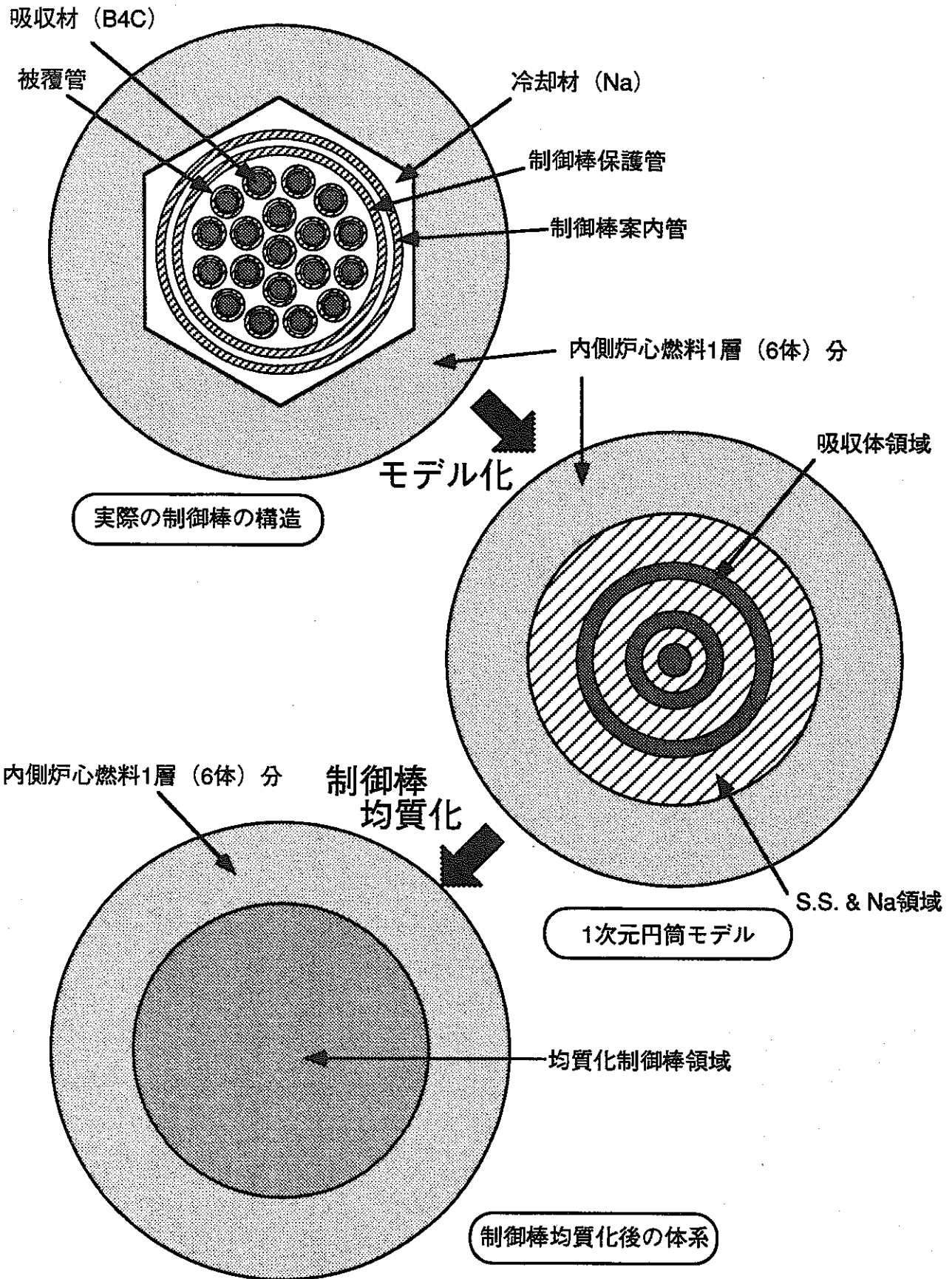


図3-1 制御棒均質化のための計算モデル

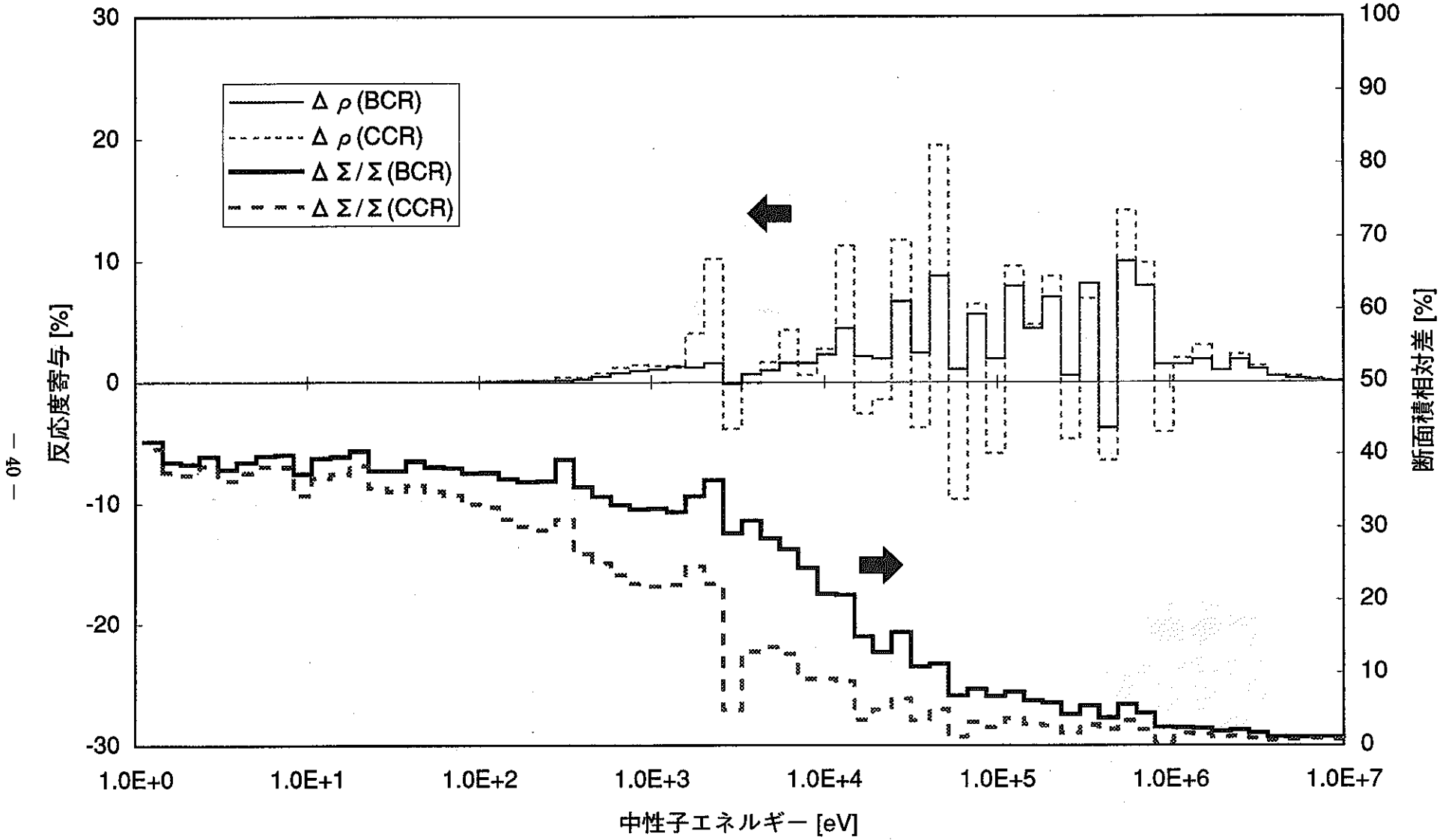


図3-2 制御棒断面積均質化法の違いによる断面積相対差と制御棒価値への寄与の比較

第 4 章 結言

第4章 結言

FBR実機においては、解析手法がほぼ確立された臨界実験と異なる格子配列、制御棒構造といった様々な条件が存在し、その条件に起因する非均質効果を精度良く評価するための解析モデル及び解析手法の確立が不可欠である。しかしながら、実機核特性解析においては、特に格子計算において、臨界実験解析ほどの詳細な解析手法・解析モデルが確立されておらず、従来の実機核特性解析における非均質効果の取り扱いは、基準計算に対する非均質補正係数を別途計算し、それを乗じることにより行われていたが、この処理はそれぞれの補正係数計算の独立性の仮定の下行われており、その仮定採用による誤差の発生、及び、核特性毎の補正係数算出の必要性と補正係数算出のための計算の必要性に起因する計算作業量の増加につながり、計算精度向上と計算作業合理化の余地が多分にあると考えられる。そこで、従来の補正係数の使用による非均質効果の取扱いに代わり、格子計算の段階で実効定数として非均質効果を考慮できる手法について検討を行った。具体的には、実機燃料集合体固有の二重非均質の取扱い手法の高度化として直接法の導出とその適用性、及び、制御棒均質化断面積計算手法の高度化として反応率割合保存法の適用性に関する検討を行った。

①二重非均質性取扱い手法の高度化：モデル化誤差がほぼ存在しないと言われている連続エネルギーモンテカルロ法による計算結果を基準解として、従来手法の検証、新しい手法として直接法の導出、及び、その従来手法と比較検討を行った。従来手法は、ラッパ管のモデル化の異なる2つの手法が存在するが、両者とも基準解と統計誤差範囲内で良い一致を示した。また、新しい手法は2つの従来手法と整合のとれた結果を示すことが明らかとなった。今回の評価は核特性として臨界性に限定したものであったが、簡易的に他の核特性に対する二重非均質性による影響を評価した結果、従来の知見にあるようにNaボイド反応度（冷却材反応度）への影響が大きいことが分かった。

②制御棒均質化断面積計算手法の高度化：従来より用いられている中性子束荷重による方法に代わる制御棒スーパーセル計算における反応率割合保存法の適用性検討を行った。その結果、スーパーセル計算において、反応率割合だけでなく、制御棒領域均質化により、反応度も保存されることが分かった。また、炉心計算において、制御棒領域を非均質とした体系を基準として本手法を検証した結果、制御棒価値について良い一致を示すことが分かった。もんじゅ制御棒解析における従来の補正係数の使用による結果との比較を行った結果、本手法は制御棒価値を1~2%大きく評価するが、これは従来の方法が格子計算のみによる補正計算の算出であったのに対し、本手法では炉心計算まで考慮に入れたより忠実な解析による評価となっており、本手法はより高い信頼性を有するものと考えられる。

両手法は、実効断面積レベルで解析モデルによる効果を取り入れることが可能なもの

であり、今回評価した臨界性、あるいは制御棒価値以外の核特性に対しても直接応用することが可能である。特に制御棒均質化効果は出力分布の評価等において影響の大きいことが予想されるが、制御棒価値以外の補正係数の算出は困難が予想され、本手法の有効性が期待できる。以上のことより、今回検討を行った手法は実機核特性解析における精度向上に大いに貢献するものと考えられる。

謝 辞

本報告書作成に当たりまして、東電ソフトウェア株式会社の小坂進矢氏には、御多忙の中、反応率割合保存法の詳細についてご説明いただきました。また、株式会社CRC総合研究所（現ゼネラル・エレクトリック・インターナショナル・インク）の齊藤正幸氏、原子力システム(株)の板垣善彦氏と高速増殖炉もんじゅ建設所技術課の鈴木隆之副主任研究員には、もんじゅ解析に必要な情報を提供していただきました。更に、炉心技術開発室の石川眞室長代理には、この度の研究に関しまして多大なご指導・アドバイスを頂きました。

ここに謹んで感謝の意を表します。

参考文献

参考文献

- 1) T.Kamei, T.Yoshida: Fuel Pin and Subassembly Heterogeneity Effect on Neutronics Properties of Fast Power Reactor, J. Nucl. Sci. Technol., 18[1], pp.74-76 (Jan. 1981).
- 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春の年会」、E39、1997年3月。
- 3) M.Nakagawa, H.Inoue: Double Heterogeneity Effect of Fuel Pin and Subassembly in a Fast Power Reactor, Nucl. Sci. Eng., 83, pp.214-228 (1983).
- 4) T.Takeda, H.Unesaki, et al.: Evaluation of Streaming Effect in an FBR Fuel Assembly by Double Heterogeneous Modeling, ANS TRANSACTIONS, 55, 620 (1987).
- 5) T.Nakagawa, K.Shibata, et al.: Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2, J. Nucl. Sci. Technol., 32, p.1259 (Dec.1995).
- 6) S.Ono, et al.: Technol. Rep. Osaka Univ., 33, 1708, 207 (1983).
- 7) 森貴正、中川正幸：MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード、JAERI-Data/Code 94-007 (1994年8月)。
- 8) 中川正幸、土橋敬一郎：SLAROM: 高速炉の非均質系炉心解析コード、JAERI-M 5916 (1974年)。
- 9) M.Nakagawa, K.Tsuchihashi: SLAROM: A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor, JAERI 1294 (1984).
- 10) M.Carta, G.Granget et al.: Control Rod Heterogeneity Effects in Liquid-Metal Fast Breeder Reactors: Method Developments and Experimental Validation, Nucl. Sci. Eng., 100, pp. 269-276 (1988).
- 11) T.Kitada, S.Kosaka, and T.Takeda: New Control Rod Homogenization Method for Fast Reactors, J. Nucl. Sci. Technol., 31 [7], pp. 647-653 (July 1994).

付録A 中性子束荷重法に対する 反応率割合保存法による断面積の相対差

付録A 中性子束荷重法に対する反応率割合保存法による断面積の相対差

ここでは、中性子束荷重法に対する反応率割合保存法による断面積の相対差において、反応毎に差が見られないことを証明する。

まず、反応率割合保存則は次式で表される。

$$\frac{\int_{CR} dr \Sigma_x^g(\bar{r}) \cdot \phi^g(\bar{r})}{\int_{Fuel} dr \Sigma_x^g(\bar{r}) \cdot \phi^g(\bar{r})} = \frac{\bar{\Sigma}_{x,CR}^g \cdot \bar{\phi}_{CR}^g \cdot V_{CR}}{\bar{\Sigma}_{x,Fuel}^g \cdot \bar{\phi}_{Fuel}^g \cdot V_{Fuel}} \quad (A-1)$$

ここで、中性子束荷重による燃料領域、及び制御棒領域の均質化断面積は次の通りである。

$$\bar{\Sigma}_{x,Fuel}^g = \frac{\int_{Fuel} dr \Sigma_x^g(\bar{r}) \cdot \phi^g(\bar{r})}{\int_{Fuel} dr \phi^g(\bar{r})} \quad (A-2)$$

$$\bar{\Sigma}_{x,CR}^g = \frac{\int_{CR} dr \Sigma_x^g(\bar{r}) \cdot \phi^g(\bar{r})}{\int_{CR} dr \phi^g(\bar{r})} \quad (A-3)$$

(A-2)、(A-3)式を(A-1)式に代入することにより、次式が得られる。

$$\frac{\bar{\Sigma}_{x,CR}^g \cdot \int_{CR} dr \phi^g(\bar{r})}{\bar{\Sigma}_{x,Fuel}^g \cdot \int_{Fuel} dr \phi^g(\bar{r})} = \frac{\bar{\Sigma}_{x,CR}^g \cdot \bar{\phi}_{CR}^g \cdot V_{CR}}{\bar{\Sigma}_{x,Fuel}^g \cdot \bar{\phi}_{Fuel}^g \cdot V_{Fuel}} \quad (A-4)$$

そして、(A-4)式を整理することにより、中性子束荷重と反応率保存法による均質化断面積の比は次式により表されることになり、結局、反応の種類に依存しないことが分かる。

$$\frac{\bar{\Sigma}_{x,CR}^g}{\bar{\Sigma}_{x,CR}^g} = \frac{\bar{\phi}_{Fuel}^g \cdot V_{Fuel} \cdot \int_{CR} dr \phi^g(\bar{r})}{\bar{\phi}_{CR}^g \cdot V_{CR} \cdot \int_{Fuel} dr \phi^g(\bar{r})} \quad (A-5)$$