

公開資料

PNC TJ9605 97-001

## 高速炉核特性の数値解析手法の改良（Ⅱ）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書）

1997年3月

大阪大学工学部

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。

〒311-13 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

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, System Engineering Division, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

PNC TJ9605 97-001  
1997年3月

## 高速炉核特性の数値解析手法の改良(Ⅱ)

竹田 敏一\*  
北田 孝典\*  
木本 達也\*  
片木 洋介\*

### 要旨

本報告書は次の2部と付録から構成されている。

- 第1部 摂動モンテカルロ法による反応度評価手法の改良
- 第2部 3次元六角体系用輸送ノード法の改良
- 付録 高速炉におけるドップラー反応度解析のためのU238サンプルの実効断面積

## 第1部 摂動モンテカルロ法による反応度評価手法の改良

摂動モンテカルロ法の理論式の検討を行い、その後摂動モンテカルロ法の計算コードへの導入を行った。同じヒストリー数の計算を行ったところ、摂動モンテカルロ計算コードでの計算時間は、通常のモンテカルロ計算の1～2割程度の増加であった。作成した摂動モンテカルロ計算コードを用いて行った試計算結果は概ね妥当であり、また偏差も十分に小さいことから、摂動モンテカルロ法の有効性が示された。

しかしながら、得られた摂動前後の固有値の差が評価方法により、正や負になる場合があること、また、摂動による中性子源分布の変化を考慮しない従来手法と、摂動による中性子源分布の変化を考慮する新手法の間で、計算結果に有為な差が見られないことから、さらに摂動モンテカルロ計算コードに対して検討を加える必要がある。

## 第2部 3次元六角体系用輸送ノード法の改良

ノード法を用いた六角-Z体系用輸送計算コード「N S H E X」は、高速炉の炉心計算において非常に精度のよい評価を得ることがこれまでの研究で確かめられてきた。しかし非均質性の高い炉心においてややその精度が劣ることがわかっている。その原因として、ノード内空間分布を求める際に用いる横方向もれの評価法が挙げられる。径方向スイープ時における、集合体からの径方向もれ分布を得るために各ノード頂点中性子束評価を評価する必要がある。従来法では、その頂点の周囲のノード境界平均中性子束を用いている。新手法においては、その頂点近傍の中性子束分布を、いくつかの寄与が大きいと考えられるノード、およびノード境界の中性子束をパラメータとしてx,yの2次式で評価し、その分布式より頂点中性子束を算出している。

以上の手法を用い、NEACRP 3D NEUTRON TRANSPORT BENCHMARKS の小型高速炉モデル、および実機「もんじゅ」体系を用いて検証計算を行った。その結果実効増倍率においては、多群モンテカルロ法によるGMVPに対して、どの手法もほぼ0.1%以内に一致する。各領域の中性子束も、数%以内に一致したもの、制御棒の挿入された体系ではやや差が大きく、従来法に対し新手法はそれほど大きな効果をみ

せず、ほぼ等しい評価が得られた。

---

本報告書は、大阪大学が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究成果である。

\* : 大阪大学工学部原子力工学科

PNC TJ9605 97-001

March 1997

## Improvement of Numerical Analysis Method for FBR Core Characteristics (II)

Toshikazu Takeda\*

Takanori Kitada\*

Tatsuya Kimoto\*

Yousuke Katagi\*

### Abstract

This report is composed of the following two parts and appendix.

(I) Improvement of the Method for Evaluating Reactivity Based on Monte Carlo Perturbation Theory

(II) Improvement of Nodal Transport Method for 3-D Hexagonal Geometry

(Appendix) Effective Cross Section of  $^{238}\text{U}$  Samples for Analyzing Doppler Reactivity in Fast Reactors

Part I Improvement of the Method for Evaluating Reactivity Based on Monte Carlo Perturbation Theory

Theoretical formulation in Monte Carlo perturbation method had been checked, and then

introduced into a calculation code. The increase of cpu time is about 10 to 20 % compared to that if normal Monte Carlo code, in the cases of same number of history. This Monte Carlo perturbation method found to be effective, because results are almost reasonable and deviations of the results are especially small, by using the Monte Carlo perturbation code.

However, there are some cases that the results of the change of eigenvalues becomes positive or negative by changing the estimator, and there is no reasonable difference in the results between the conventional method, which does not consider the change of neutron source distribution caused by a perturbation, and the new method, which consider that change. Thus it is still necessary to check the Monte Carlo perturbation code.

## Part II Improvement of Nodal Transport Method for 3-D Hexagonal Geometry

It is certain that we can accurately evaluate hexagonal geometry FBR core by nodal transport calculation code for hexagonal-Z geometry named 'NSHEX'. However it is also found that in very heterogeneous core the results is not good enough. Because the treatment of the transverse leakage to the radial direction, which is use for evaluating intra-nodal flux distribution, is not so accurate. For the treatment of the leakage distribution, it is necessary to estimate the nodal vertex flux. In conventional method, the vertex flux estimated by the surrounding node surface flux around that vertex. On the contrary, in new methods, the vertex flux is estimated by a second order polynomial series using average angular fluxes at the relevant node boundary, near by node boundaries and nodes averaged flux.

By using that method, the validational calculation was performed for small FBR model of NEACRP 3D NEUTRON TRANSPORT BENCHMARKS, and for "MONJU" power reactor model. As the result, effective multiplication factors are in good agreement within 0.1% between GMVP and the other methods. The difference of the region averaged flux is about a few percent, however, the difference becomes larger for a control rod inserted core. In this

core, new method is doesn't show the effectiveness compared to conventional method, thus the results of both new and conventional methods becomes almost same.

---

This work performed by Department of Nuclear Engineering, Osake University under construct with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

\* : Faculty of Engineering, Department of Nuclear Engineering, Osaka University.

# 第1部

摂動モンテカルロ法による  
反応度評価手法の改良

## 目次

### 第1章 序論

### 第2章 モンテカルロ法の摂動理論の検討

#### 第1節 摂動モンテカルロ法の理論

#### 第2節 摂動モンテカルロ法の計算コードへの導入

##### 2.1 MVPにおける計算フローチャートの概略

##### 2.2 Correlated Sampling MethodのMVPへの導入について

###### 2.2.1 飛行カーネルの摂動前後での比の計算

###### 2.2.2 衝突カーネルの摂動前後での比の計算

###### 2.2.3 物理量のサンプリング

### 第3章 摂動モンテカルロ法による試計算

#### 3.1 計算条件

##### 3.1.1 計算体系

##### 3.1.2 摂動条件

##### 3.1.3 中性子ヒストリー数

##### 3.1.4 新手法の摂動モンテカルロ計算に関して

#### 3.2 計算結果

### 第4章 まとめ

### 参考文献

## List of Figures

- 図2-1 MVPでの中性子ヒストリーフローチャート
- 図2-2 KERNEL内の飛行カーネル比の計算フロー
- 図2-3 KERNEL内の衝突カーネル比の計算フロー

- 図3-1 軽水炉格子体系
- 図3-2 軽水炉格子体系（その2）
- 図3-3 3x3軽水炉格子体系
- 図3-4 3x3高速炉燃料集合体体系
- 図3-5 もんじゅ体系
- 図3-6 高速炉燃料集合体無限均質体系
- 図3-7 摂動前後での中性子源分布（図3-1の場合）
- 図3-8 摂動前後での中性子源分布（図3-2の場合）
- 図3-9(a) 摂動前後での中性子源分布（図3-3の-50%摂動）
- 図3-9(b) 摂動前後での中性子源分布（図3-3の-25%摂動）

- 図3-1 1ピン格子(軽水-10%)でのモンテカルロ法による各バッチでの $k^{*inf}$  (production)
- 図3-2 1ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による各バッチでの $k^{*inf}$  (production)
- 図3-3 1ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による各バッチでの $k^{*inf}$  (production)
- 図3-4 1ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による各バッチでの $\Delta k^{inf}$  (production)
- 図3-5 1ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による各バッチでの $\Delta k^{inf}$  (production)
- 図3-6(a) 1ピン格子(軽水-10%)でのモンテカルロ法による $k^{*inf}$ の収束状況（その1）
- 図3-6(b) 1ピン格子(軽水-10%)でのモンテカルロ法による $k^{*inf}$ の収束状況（その2）
- 図3-7(a) 1ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $k^{*inf}$ の収束状況（その1）
- 図3-7(b) 1ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $k^{*inf}$ の収束状況（その2）
- 図3-8(a) 1ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $k^{*inf}$ の収束状況（その1）
- 図3-8(b) 1ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $k^{*inf}$ の収束状況（その2）
- 図3-9(a) 1ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $\Delta k^{inf}$ の収束状況（その1）
- 図3-9(b) 1ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $\Delta k^{inf}$ の収束状況（その2）
- 図3-10(a) 1ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $\Delta k^{inf}$ の収束状況（その1）
- 図3-10(b) 1ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $\Delta k^{inf}$ の収束状況（その2）
- 図3-11(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)でのモンテカルロ法による各バッチでの $k^{*inf}$  (production)

- 図3-11(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)でのモンテカルロ法  
による各バッチでの $k^{*inf}$  (balance)
- 図3-12(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）  
による各バッチでの $k^{*inf}$  (production)
- 図3-12(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）  
による各バッチでの $k^{*inf}$  (balance)
- 図3-13(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（新手法）  
による各バッチでの $k^{*inf}$  (production)
- 図3-13(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（新手法）  
による各バッチでの $k^{*inf}$  (balance)
- 図3-14(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）  
による各バッチでの $\Delta kinf$  (production)
- 図3-14(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）  
による各バッチでの $\Delta kinf$  (balance)
- 図3-15(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（新手法）  
による各バッチでの $\Delta kinf$  (production)
- 図3-15(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（新手法）  
による各バッチでの $\Delta kinf$  (balance)
- 図3-16(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)でのモンテカルロ法による  
 $k^{*inf}$ の収束状況（その1）
- 図3-16(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)でのモンテカルロ法による  
 $k^{*inf}$ の収束状況（その2）
- 図3-17(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）  
による $k^{*inf}$ の収束状況（その1）
- 図3-17(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）  
による $k^{*inf}$ の収束状況（その2）
- 図3-18(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（新手法）  
による $k^{*inf}$ の収束状況（その1）
- 図3-18(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（新手法）  
による $k^{*inf}$ の収束状況（その2）
- 図3-19(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）  
による $\Delta kinf$ の収束状況（その1）
- 図3-19(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）  
による $\Delta kinf$ の収束状況（その2）
- 図3-20(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（新手法）  
による $\Delta kinf$ の収束状況（その1）
- 図3-20(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法（新手法）  
による $\Delta kinf$ の収束状況（その2）
- 図3-21(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)でのモンテカルロ法  
による各バッチでの $k^{*inf}$  (production)
- 図3-21(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)でのモンテカルロ法  
による各バッチでの $k^{*inf}$  (balance)
- 図3-22(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）  
による各バッチでの $k^{*inf}$  (production)
- 図3-22(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）  
による各バッチでの $k^{*inf}$  (balance)
- 図3-23(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）  
による各バッチでの $k^{*inf}$  (production)

- 図3-23(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による各バッチでの $k^{\text{inf}}$  (balance)
- 図3-24(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による各バッチでの $\Delta k^{\text{inf}}$  (production)
- 図3-24(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による各バッチでの $\Delta k^{\text{inf}}$  (balance)
- 図3-25(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による各バッチでの $\Delta k^{\text{inf}}$  (production)
- 図3-25(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による各バッチでの $\Delta k^{\text{inf}}$  (balance)
- 図3-26(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)でのモンテカルロ法による $k^{\text{inf}}$ の収束状況（その1）
- 図3-26(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)でのモンテカルロ法による $k^{\text{inf}}$ の収束状況（その2）
- 図3-27(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $k^{\text{inf}}$ の収束状況（その1）
- 図3-27(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $k^{\text{inf}}$ の収束状況（その2）
- 図3-28(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $k^{\text{inf}}$ の収束状況（その1）
- 図3-28(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $k^{\text{inf}}$ の収束状況（その2）
- 図3-29(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $\Delta k^{\text{inf}}$ の収束状況（その1）
- 図3-29(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $\Delta k^{\text{inf}}$ の収束状況（その2）
- 図3-30(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $\Delta k^{\text{inf}}$ の収束状況（その1）
- 図3-30(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $\Delta k^{\text{inf}}$ の収束状況（その2）
- 図3-31(a) もんじゅ体系でのモンテカルロ法による各バッチでの $k^{\text{eff}}$  (production)
- 図3-31(b) もんじゅ体系でのモンテカルロ法による各バッチでの $k^{\text{eff}}$  (balance)
- 図3-32(a) もんじゅ体系での摂動モンテカルロ法（従来手法）による各バッチでの $k^{\text{eff}}$  (production)
- 図3-32(b) もんじゅ体系での摂動モンテカルロ法（従来手法）による各バッチでの $k^{\text{eff}}$  (balance)
- 図3-33(a) もんじゅ体系での摂動モンテカルロ法（従来手法）による各バッチでの $\Delta k^{\text{eff}}$  (production)
- 図3-33(b) もんじゅ体系での摂動モンテカルロ法（従来手法）による各バッチでの $\Delta k^{\text{eff}}$  (balance)
- 図3-34(a) もんじゅ体系でのモンテカルロ法による $k^{\text{eff}}$ の収束状況（その1）
- 図3-34(b) もんじゅ体系でのモンテカルロ法による $k^{\text{eff}}$ の収束状況（その2）
- 図3-35(a) もんじゅ体系での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $k^{\text{eff}}$ の収束状況（その1）
- 図3-35(b) もんじゅ体系での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $k^{\text{eff}}$ の収束状況（その2）

図3-36(a)

もんじゅ体系での摂動モンテカルロ法（従来手法）  
による $\Delta k_{eff}$ の収束状況（その1）

図3-36(b)

もんじゅ体系での摂動モンテカルロ法（従来手法）  
による $\Delta k_{eff}$ の収束状況（その2）

## List of Tables

- 表3-1 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-1の体系）
- 表3-2 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-2の体系）
- 表3-3(a) 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-3の体系、-50%）
- 表3-3(b) 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-3の体系、-25%）
- 表3-4(a) 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-4の体系、-50%）
- 表3-4(b) 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-4の体系、-25%）
- 表3-5 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-5の体系）
- 表3-6 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-6の体系）
- 表3-7 計算時間の比較

## 第1章 序論

原子炉内で何らかの摂動が生じた場合に炉心に添加される反応度の解析には、摂動理論が用いられている。また、その摂動理論での解析にはエネルギーを多群とした拡散や輸送理論が用いられている。しかしながら、このような決定論的手法では、エネルギーを多群化した誤差、および幾何形状の近似に伴う誤差を、完全に取り除くことは難しいという弱点が存在する。

一方、近年の計算機技術の発展にともない、これまで計算機資源・時間等の点からルーチンワークに向かないとされてきたモンテカルロ法が、原子炉の臨界性だけでなく種々の物理量を評価する計算手法として注目されてきている。モンテカルロ法では、幾何形状の近似に伴う誤差を取り除くことができ、さらに連続エネルギーモンテカルロ法を用いることによりエネルギーを多群化した誤差をも解消することが可能である。しかしながら、モンテカルロ法は統計的手法であるため、計算結果には偏差がともなう。そのためモンテカルロ法をもちいて反応度の解析を行う場合、計算で得られる反応度よりも十分に小さい偏差となることが求められるため、通常のモンテカルロ計算を摂動前と摂動後に相当する独立な2回の計算結果の差から反応度を計算することは、小さな反応度の場合には非常に多大な計算時間を必要とすることになる。

以上の背景をもとに、昨年度では一度のモンテカルロ計算で反応度を計算することができる摂動モンテカルロ法と呼ばれる手法について、その概念・理論式等について検討したが、本年度では摂動モンテカルロ法を導入した計算コードを作成し、試計算を行うこととした。

## 第2章 モンテカルロ法の摂動理論の検討

第2章は、次のような構成となっている。

第1節では、理論式を詳細に述べる。前年度の報告書にも示したものであるが、今年度では特に計算コード化を念頭に置き、理論式を述べている。第2節では、まず計算コード化に際して必要となったモンテカルロ計算コード内の計算アルゴリズムについて述べ、その後、摂動モンテカルロ法による計算が可能となるように変更を加えた点について、フローチャートを用いて述べる。

### 第1節 摂動モンテカルロ法の理論

現在、本研究で用いている摂動モンテカルロ計算法は、摂動前後での中性子の軌跡を同じとする事により、摂動前後の間に強い相関を与え、さらに摂動前後を同時に計算する Correlated Sampling Method<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>と呼ばれる手法である。

モンテカルロ計算コードでは、粒子に与える重みで粒子の数を表現しているが、Correlated Sampling Methodでは摂動後の粒子の重みを、摂動前の粒子の重みに対する比で表す。そしてこの比は、粒子の飛行、衝突等の各プロセスで、それらの事象が起こる確率の、摂動前後での比を累積して掛けることにより表現される。つまりCorrelated Sampling Methodでは1つの粒子に対して、摂動前と摂動後を表現する2つの重みを与える、粒子の軌跡を追跡する事になる。

ここで、固有値の摂動前後での変化量( $\Delta k_{\text{eff}}$ )についての式を考える。

まず、摂動前の固有値( $k_{\text{eff}}$ )は次の式(2-1)で表される。

$$k_{\text{eff}} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \int dU_{n+1} \dots \int dU_0 P_f(U_{n+1}) \prod_{j=2}^n [T_j C_j] T_1 S(U_0)}{\int dU_0 S(U_0)}, \quad (2-1)$$

ここで、

$$C_j = C(E_{j-1} \rightarrow E_j | r_j),$$

$$T_j = T(E_{j-1} | r_{j-1} \rightarrow r_j),$$

$$P_f(U_{n+1}) = \frac{v \Sigma_f(U_{n+1})}{\Sigma_i(U_{n+1})},$$

$C_j$ ：中性子が空間  $r_j$  で衝突し、エネルギーが  $E_{j-1}$  から  $E_j$  に変化する事を示す衝突カーネル。 $T_j$ ：エネルギー  $E_{j-1}$  の中性子が空間を  $r_{j-1}$  から  $r_j$  まで飛行する ( $r_j$  で衝突する) 事を示す飛行カーネル。 $P_f$  は位相空間座標  $U_{n+1}$  で衝突した場合に核分裂で発生する中性

子数を示す核分裂確率。

同じ表記を用いて、摂動後の固有値( $k_{\text{eff}}^*$ )を表すと次の式(2-2)の様になる。

$$k_{\text{eff}}^* = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \int dU_{n+1} \dots \int dU_0 P_f^*(U_{n+1}) \prod_{j=2}^n [T_j^* C_j^*] T_1^* S^*(U_0)}{\int dU_0 S^*(U_0)}, \quad (2-2)$$

ここで、\*は摂動後の状態を示している。

前述したように、Correlated Sampling Methodでは、中性子の軌跡が摂動前後で同じとするため、理論式上も摂動前後で中性子の軌跡が同じとなるように式が変形される。その結果、 $\Delta k_{\text{eff}}$ は式(2-1), (2-2)から次の式(2-3)の様に表される。

$$\begin{aligned} \Delta k_{\text{eff}} &= k_{\text{eff}}^* - k_{\text{eff}} \\ &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \int dU_{n+1} \dots \int dU_0 [ \frac{P_f^*(U_{n+1})}{P_f(U_{n+1})} \prod_{j=2}^n (\frac{T_j^* C_j^*}{T_j C_j}) \frac{T_1^*}{T_1} \frac{S^*(U_0)}{S(U_0)} \frac{\int S(U_0) dU_0}{\int S^*(U_0) dU_0} - 1 ]}{\int S(U_0) dU_0}, \\ &\quad \times P_f(U_{n+1}) \prod_{j=2}^n (T_j C_j) T_1 S(U_0) \end{aligned} \quad (2-3)$$

ここで、[ ]の中の第1項は、核分裂確率( $P_f$ )、飛行カーネル( $T_j$ )、衝突カーネル( $C_j$ )、中性子源分布( $S$ )の摂動前後の比を乗じたものであり、これを中性子の軌跡を追跡する過程で計算し、ここから第2項目である1を減じたものを、サンプリングすることにより、 $\Delta k_{\text{eff}}$ が求められる事になる。

以上の式群中に表れる、飛行カーネルと衝突カーネルの具体的な形式については、後の節で詳細に示す。

## 第2節 摂動モンテカルロ法の計算コードへの導入

まず、摂動モンテカルロ法を導入する基となる、連続エネルギーモンテカルロコードとして、日本原子力研究所で開発されてきているMVP<sup>(5)</sup>を用いることとした。そこで、まずMVPの計算フローチャートの概略を示し、次にCorrelated Sampling Methodでの計算が出来るように変更した部分の詳細について述べる。

### 2.1 MVPにおける計算フローチャートの概略

MVPでは大きくわけると以下のプロセス（イベント）を通して、計算を進めていくようになっている。

- (1) 中性子飛行過程・・・中性子の存在している位置を移動させる過程。
- (2) 中性子衝突過程・・・散乱、(n2n)、核分裂、吸収等の過程。
- (3) Next Zone Search・・・中性子が次に入射する領域を探す過程。

MVPコードではベクトル処理を行うに適したアルゴリズムを採用しているため、MCNPコードやVIMコードで使用されているヒストリーベースのアルゴリズムではなく、イベントベースのアルゴリズムとなっている。そのため、各プロセス（イベント）内に、同時に多数の粒子が存在しており、次に処理するイベントは、そのイベント内に存在している粒子数の多いものからとなる。しかしながら、MVPコードをベクトル計算機で使用する、しないに関わらず、ある1つの粒子に着目してみると、ヒストリーベースのアルゴリズムとイベントベースのアルゴリズムの間に違いはなく、粒子の発生、飛行、衝突等の過程を経て、体系外に漏れるかアナログ吸収されるかで粒子のヒストリーが終了するように計算が進められていく。

これを、ある1つの粒子の軌跡に着目してMVPコード内のフローチャートに示すと図2-1の様になる。

### 2.2 Correlated Sampling Method のMVPコードへの導入について

Correlated Sampling MethodをMVPコード内に導入するに際しては、Correlated Sampling Methodで新たに計算が必要となる部分をまかなうサブルーチン(ルーチン名KERNEL)を作成し、その他の付加的な処理、例えば計算結果の分散評価等は、オリジナルのMVPと同じ手法を用いることとし、特に大きな変更は加えないようにしている。

ここで、Correlated Sampling Methodの導入に際して新たに計算が必要となるものは

- (1) 飛行カーネル( $T_J$ )の摂動前後での比
- (2) 衝突カーネル( $C_J$ )の摂動前後での比
- (3) 核分裂、吸収反応確率の摂動前後での比

である。飛行カーネルや衝突カーネルの摂動前後の比については、以下で詳しく述べるが、それらは、摂動前を基準としたときに摂動後の場合、どれほどの確率の比で同じ事象が起こるか、ということに相当する。例えば、ある領域内の密度が減少するような摂動の場合には、摂動後は摂動前に比べて、その摂動領域内で衝突する確率が減少し、逆にその

摂動領域を通過する確率が増加する事になる。また、ある核種だけの密度が減少する様な摂動の場合には、摂動後は摂動前に比べて、摂動している核種に衝突する確率が減少し、逆にその他の核種に衝突する確率が増加する。このような確率の摂動前後での比を求めるサブルーチンがKERNELという名称でMVPに追加した。

### 2.2.1 飛行カーネルの摂動前後での比の計算

飛行カーネルは次式で表される。

$$T_J = T(E_{J-1} | r_{J-1} \rightarrow r_J) = \sum_t (E_{J-1} | r_J) \exp \left\{ - \int_{x=0}^{x=x_0} \Sigma_t (E_{J-1} | r_{J-1} + x \vec{\Lambda}) dx \right\}, \quad (2-4)$$

ここで、 $x_0$ は $r_{J-1}$ から $r_J$ までの距離で $\vec{\Lambda}$ は中性子の飛行する単位方向ベクトルとしている。

従って、摂動前後での飛行カーネルの比は次式のように表される。

$$\left( \frac{T_J^*}{T_J} \right) = \frac{\sum_t^* (E_{J-1} | r_J)}{\sum_t (E_{J-1} | r_J)} \times \exp \left\{ - \int_{x=0}^{x=x_0} \left( \frac{\Sigma_t^*}{\Sigma_t} - 1 \right) \Sigma_t (E_{J-1} | r_{J-1} + x \vec{\Lambda}) dx \right\}. \quad (2-5)$$

また、 $r_J$ と $r_{J-1}$ が同じ領域内（境界を挟んでいない）であれば、次式の様に整理できる。

$$\left( \frac{T_J^*}{T_J} \right) = \frac{\sum_t^* (E_{J-1} | r_J)}{\sum_t (E_{J-1} | r_J)} \times \exp \left\{ - \left( \frac{\Sigma_t^*}{\Sigma_t} - 1 \right) \Sigma_t (E_{J-1} | r_J) x_0 \right\}, \quad (2-6)$$

中性子の飛行距離を示す $x_0$ が、 $r_{J-1}$ から領域境界までの距離 $x'$ をこえる場合は、その領域内では衝突しないので、領域境界まで飛行する確率の比について考え、その比を摂動前後での飛行カーネルの比とする事になる。この場合には、飛行カーネルの比は次の式(2-7)の様になる。

$$\left( \frac{T_J^*}{T_J} \right) = \exp \left\{ - \left( \frac{\Sigma_t^*}{\Sigma_t} - 1 \right) \Sigma_t (E_{J-1} | r_J) x'_0 \right\}, \quad (2-7)$$

この時は、サブルーチンKERNEL内で、後に述べる衝突カーネルの比は計算されず1.0としている。そして、さらに次に入射した領域で、飛行カーネルの比が計算され、それを式(2-7)の比に乗じたものが、衝突から次の衝突までの間での飛行カーネルの比として計算されている。

また、飛行カーネルの比の計算には摂動後の全断面積( $\Sigma_t^*$ )が必要となるが、これについては、以下のように計算している。

現在の所、摂動としては密度の増加あるいは減少だけが扱えるようになっているが、この場合、摂動領域内の数密度摂動を起こす核種総数をMとし、その中で核種kのミクロ断面積が $\sigma_{t,k}(E_J | r_J)$ 、摂動前後での数密度をそれぞれ $\rho_k$ 、 $\rho_k^*$ と表記すると、摂動後の全断面積( $\Sigma_t^*$ )は次のように計算できる。

$$\Sigma_t^*(E_J | r_J) = \Sigma_t(E_J | r_J) + \sum_{k=1}^M (\rho_k^* - \rho_k) \sigma_{t,k}(E_J | r_J), \quad (2-8)$$

つまり、サブルーチンKERNEL内では、まず式(2-8)に従って $\Sigma_t^*$ を計算し、それを式(2-6)或いは式(2-7)に代入して飛行カーネルの摂動前後での比を計算する。飛行距離を示す $x_0$ については、KERNELが中性子飛行過程を処理する上位ルーチン(FLIONEまたはFLIGHT)から呼び出されるため、上位ルーチンで得られている $x_0$ をKERNELに受け渡して使用している。同様に、その領域内で衝突したか、領域内で衝突せずに通過したか、についても、上位ルーチンからその情報をKERNELに受け渡して使用している。

そして、得られた飛行カーネルの比は、KERNEL内で中性子重みの比に乘じ、中性子重みの比を更新している。

## 2.2.2 衝突カーネルの摂動前後での比の計算

摂動前後での衝突カーネルの比の計算では、あるエネルギー $E_{J-1}$ で衝突し、エネルギー $E_J$ で、ある方向にはじかれる確率の比が計算されることになる。ここで、散乱後のエネルギーと角度の間には質量数等に依存した関係があるので、核種が異なれば、散乱後のエネルギーと角度が同じとなる確率はほとんどゼロであるとして以下の式を考えている。散乱反応の各種類についてみると、弾性散乱の場合には、質量数が変わると散乱後のエネルギーまたは角度のどちらかは変わることになるので問題がないと考えている。しかしながら非弾性散乱や(n2n)反応の場合には核種が異なっていても散乱後のエネルギーと角度が一致する場合があると考えられるが、現在のところそのような場合については考慮せずにサブルーチン(KERNEL)を作成している。

衝突カーネルの期待値は次式で表される。

$$C_J = C(E_{J-1} \rightarrow E_J | r_J) \\ = \frac{\sum_{\gamma=1}^R \sum_{k=1}^M [\sigma_{\gamma,k}(E_{J-1} | r_J) v_{\gamma,k}(E_J) \rho_k]}{\sum_{k=1}^M [\sigma_{t,k}(E_{J-1} | r_J) \rho_k]}, \quad (2-9)$$

ここで、 $\sigma_{t,k}$  は核種 $k$ のトータルミクロ断面積、 $\rho_k$  は核種 $k$ の数密度、 $M$  は領域内の核種数、 $\sigma_{\gamma,k}$  は反応 $\gamma$  のミクロ断面積、 $v_{\gamma,k}$  は核種 $k$  の反応 $\gamma$  によりエネルギー $E_J$  で発生する中性子数、 $R$  は反応の種類を表している。

ここで、式(2-9)をもとにして、核種 $\alpha$  の反応 $\beta$  が起こる場合の衝突カーネル $C_J(\alpha, \beta)$ を考えると、次式のように表すことが出来る。

$$C_j(\alpha, \beta) = \frac{\sum_{k=1}^M [\sigma_{t,k}(E_{j-1}|r_j) \rho_k]}{\sum_{k=1}^M [\sigma_{t,k}(E_{j-1}|r_j) \rho_k^*]} , \quad (2-10)$$

従って、核種  $\alpha$  の反応  $\beta$  が起こる場合の、摂動前後での衝突カーネルの比（確率の比）は

$$\begin{aligned} \frac{C_j^*(\alpha, \beta)}{C_j(\alpha, \beta)} &= \frac{\sum_{k=1}^M [\sigma_{t,k}(E_{j-1}|r_j) \rho_k^*]}{\sum_{k=1}^M [\sigma_{t,k}(E_{j-1}|r_j) \rho_k^*]} \times \frac{\sum_{k=1}^M [\sigma_{t,k}(E_{j-1}|r_j) \rho_k]}{\sum_{k=1}^M [\sigma_{t,k}(E_{j-1}|r_j) \rho_k]} \\ &= \frac{\Sigma_t(E_{j-1}|r_j) \rho_\alpha^*}{\Sigma_t^*(E_{j-1}|r_j) \rho_\alpha} , \end{aligned} \quad (2-11)$$

と表される。つまり、摂動前後での衝突カーネルの比は、ある核種に衝突する確率 ( $\rho_\alpha / \Sigma_t$ ) の、摂動前後での比として求められる。

このことから、摂動前の状態で存在しない核種、或いは摂動後の状態で100%存在しなくなる核種が含まれている場合には、式(2-11)による計算結果は発散、あるいはゼロとなるため、現在の所そのような摂動は扱わないようしている。摂動前後での衝突カーネルの比が発散する場合は計算を続行すること自体が無理であるが、摂動前後での衝突カーネルの比がゼロとなつても、計算上は答えを得ることは出来る。しかしながら、その比がゼロとなつた場合は摂動後の粒子の重みがゼロとなつていてことになる。これは Correlated Sampling Method ということからもわかるように、摂動前後を同じ軌跡とする事で、相関を強めようとしているにもかかわらず、摂動後の粒子の重みがゼロとなつた場合は摂動前後の相関もゼロとなり、Correlated Samplingを行っているとはいえないなると考えられる。このことが、そのような摂動を扱わないようしている理由である。

衝突カーネルの摂動前後の比も、飛行カーネルと同じくサブルーチンKERNELで計算されている。式(2-11)にあらわれている全断面積については、先の飛行カーネルの計算過程で得られており、それをそのまま用いている。また、衝突核種の摂動前後での数密度の比( $\rho_\alpha^*/\rho_\alpha$ )は、摂動モンテカルロ計算を行う時の入力データとして与えられているものを使用する。そして、計算された衝突カーネルの比は配列に保存し、対応する中性子が衝突した場合に中性子重みの比に乘じ、中性子重みの比を更新していく。中性子が衝突した場合の処理はサブルーチンNEUTRで行われており、そのため、衝突カーネルの比も NEUTRルーチンの中で中性子重みの比に乘じられることになる。

図2-2と図2-3に、新たに作成したサブルーチンKERNEL内の計算フローを示しておこう。

### 2.2.3 物理量のサンプリング

2.2.1と2.2.2で飛行カーネルと衝突カーネルの摂動前後での比の計算について述べたが、ここではそれらを用いて計算される各物理量のサンプリングについて述べる。

現在の所、サンプリングしている物理量としては、摂動前と摂動後それぞれの固有値、核分裂率、吸収率、漏れ、及びそれらの変化量である。

各中性子ヒストリーの軌跡の中で、各領域での飛行距離を用いてTrack Length Estimatorでのサンプリングがおこなわれ、各衝突点からはCollisionとAnalog Estimatorによるサンプリングがおこなわれている。

例えば、摂動前後での生成中性子の変化量をサンプリングしている場合は、以下のような式で表されるものをサンプリングしている。

(1) Track Length Estimator

$$\Delta(v\Sigma_f\phi) = \left( \frac{v\Sigma_f^*}{v\Sigma_f} \frac{w^*}{w} - 1 \right) \times (w \times v\Sigma_f)$$

ここで、 $w$ は中性子の重み、 $x$ は中性子の飛行距離を示している。

(2) Collision Estimator

$$\Delta(v\Sigma_f\phi) = \left( \frac{P_f^*}{P_f} \frac{w^*}{w} - 1 \right) \times (w P_f)$$

(3) Analog Estimator

$$\Delta(v\Sigma_f\phi) = \left( \frac{w^*}{w} - 1 \right) \times (w \frac{v\sigma_{f,\alpha}}{\sigma_{t,\alpha}})$$

Collision EstimatorとAnalog Estimatorの違いは、Analog Estimatorでは衝突した核種 $\alpha$ だけについてサンプリングをおこなうのに対して、Collision Estimatorでは、衝突した核種 $\alpha$ だけでなく、その領域内に存在する他の核種についてもサンプリングをおこなうことである。つまり、計算体系内に1核種しか存在しない場合には、Collision EstimatorとAnalog Estimatorの評価値は一致することになる。

吸収率についても生成率の場合と同様に求める事が出来る。

また、上記の様にして得られる生成中性子の摂動前後での変化量を用いると、固有値の摂動前後での変化量( $\Delta k_{eff}$ )は以下のように計算する事が出来る。

(1) Track Length Estimator

$$\Delta(k_{eff}) = \sum_{total-history} \left( \frac{v\Sigma_f^*}{v\Sigma_f} \frac{w^*}{w} - 1 \right) \times (w \times v\Sigma_f) / (\text{発生中性子数})$$

(2) Collision Estimator

$$\Delta(k_{eff}) = \sum_{total-history} \left( \frac{P_f^*}{P_f} \frac{w^*}{w} - 1 \right) \times (w P_f) / (\text{発生中性子数})$$

### (3) Analog Estimator

$$\Delta(k_{\text{eff}}) = \sum_{\text{total-history}} \left( \frac{w^*}{w} - 1 \right) \times \left( w \frac{v\sigma_{f,k}}{\sigma_{t,k}} \right) / (\text{発生中性子数})$$

これらの式は、いずれもProduction Estimator である。Balance Estimator による  $\Delta k_{\text{eff}}$  については、Track Length、Collision、Analogの各Estimatorで得られる、摂動前後の固有値の差を各バッチで計算している。式で表すと以下のようになる。

$$\begin{aligned}\Delta k_{\text{eff}} &= \sum_n (k_{\text{eff},n}^* - k_{\text{eff},n}) / N \\ &= \sum_n \left( \frac{F_n^*}{A_n^* + L_n^*} - \frac{F_n}{A_n + L_n} \right) / N\end{aligned}$$

ここで、nは各バッチでの値であることを示し、Nは計算全体でのバッチ数を示している。さらに、Fは中性子生成量、Aは中性子吸収量、Lは中性子漏洩量を表している。

ただし、Balance Estimator による  $\Delta k_{\text{eff}}$  については、上の式を用いた計算では Correlated Sampling Methodでの計算結果とはいえないのではないか、という懸念も抱いており、現在、摂動前後の反応率の差を基に計算する様な式についても検討している所である。

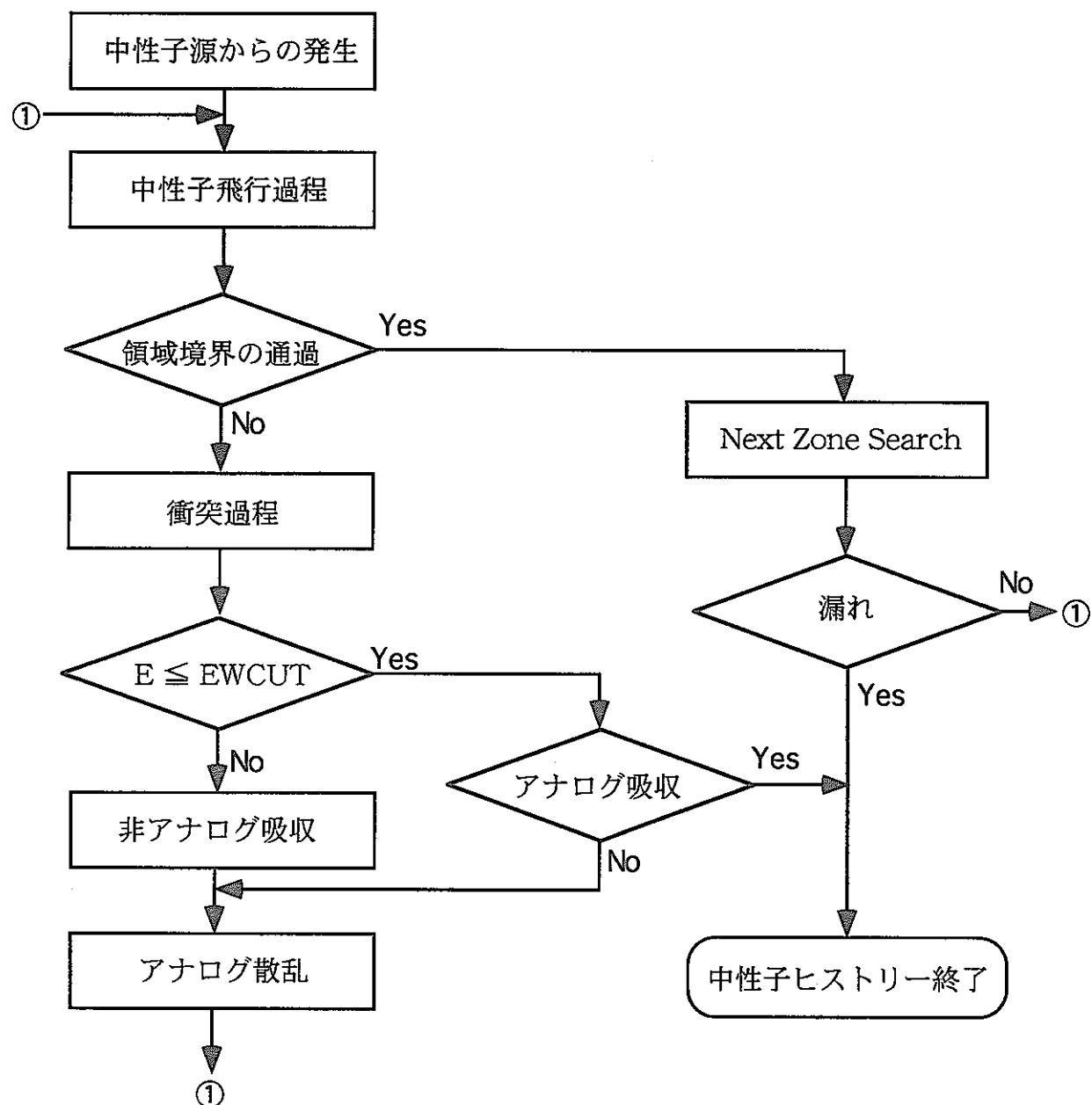


図2-1 MVPでの中性子ヒストリーフローチャート

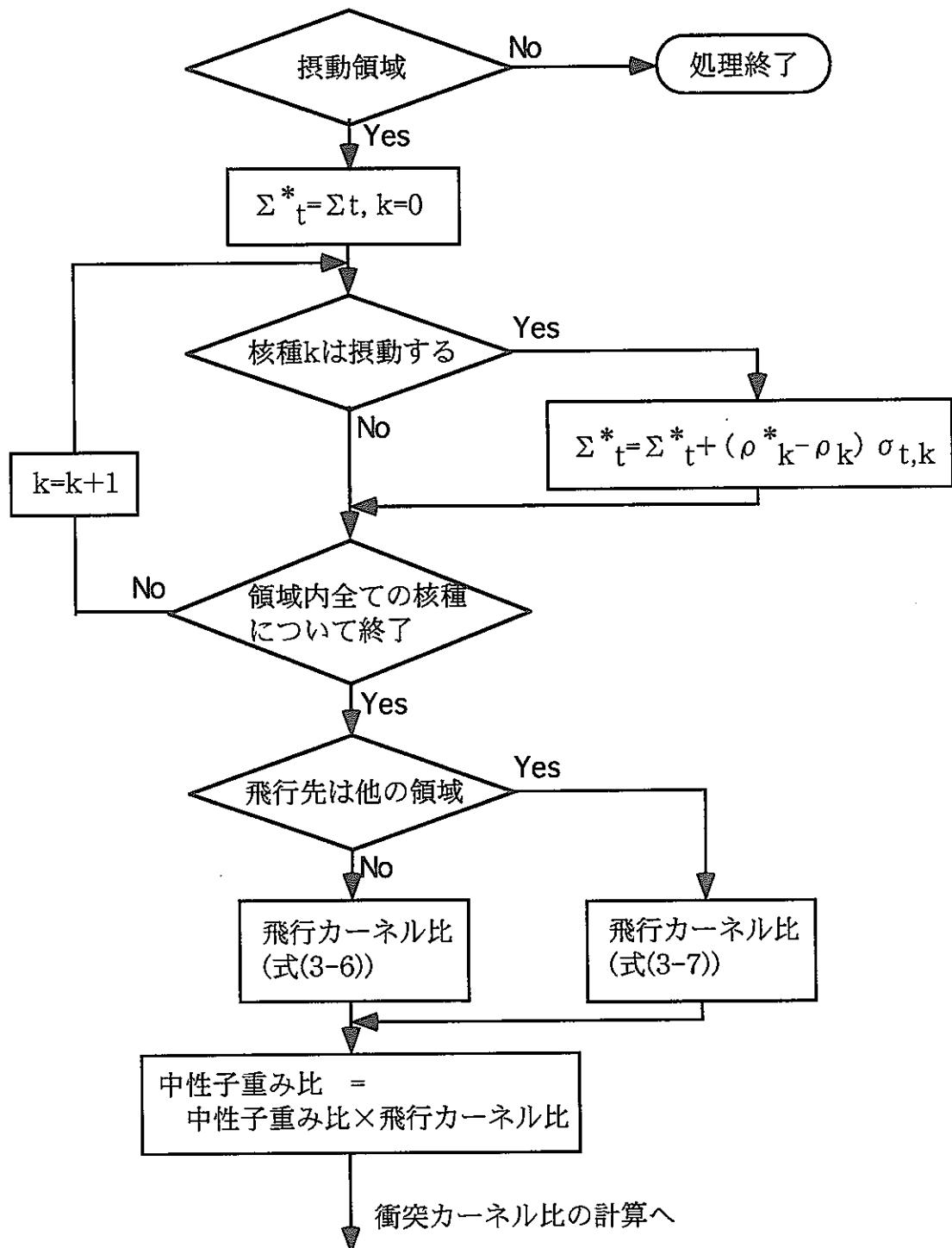


図2-2 KERNEL内の飛行カーネル比の計算フロー

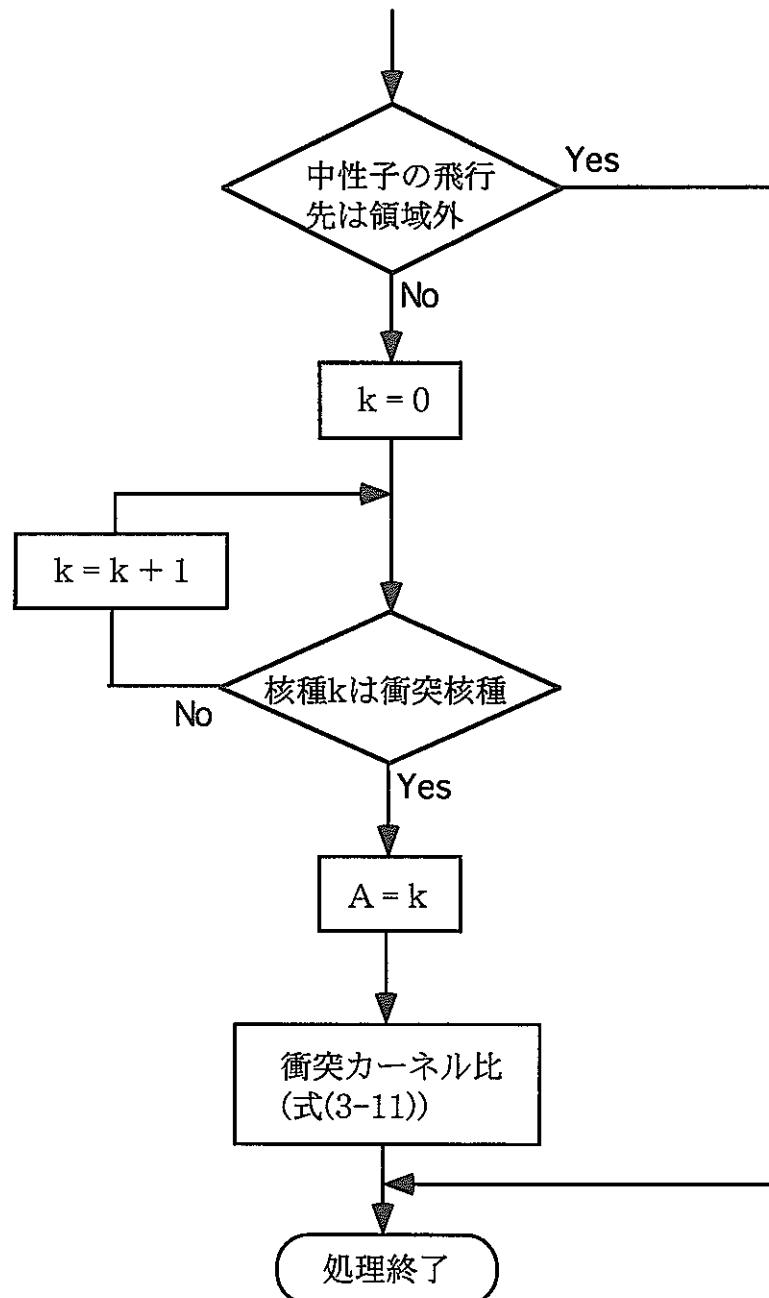


図2-3 KERNEL内の衝突カーネル比の計算フロー

## 第3章 摂動モンテカルロ法による試計算

ここでは、第2章までで述べた摂動モンテカルロ法を導入した計算コードを用いておこなった、試計算結果について述べる。

### 3.1 計算条件

現在の所、作成した摂動モンテカルロ計算コードでは密度摂動しか扱えないため、試計算をするにあたり対象とした摂動は、密度の増減で表される摂動のみを計算対象とした。

密度摂動のみが計算できるわけであるが、ナトリウムボイド反応度では、ナトリウムの密度が増減する摂動であり、また、制御棒反応度価値であっても、集合体をスミアした体系で考えるならば、制御棒の挿入や引き抜きはスミア領域の吸収材等の密度が増減する摂動として扱うことが可能であると考えられる為、現在の計算コードで計算可能である。しかしながら、第2章でも述べたように、摂動前に存在している核種が、摂動後では存在しなくなるような摂動は、摂動後の中性子重みをゼロとする事になるため、摂動前と摂動後を同時に追跡するCorrelated Sampling Methodとはいえないのではないか、という懸念があり、計算対象からは除外している。

以下に今回行った摂動の計算条件について詳しく述べる。

#### 3.1.1 計算体系

試計算に用いた計算体系を図3-1～図3-6に示す。図に示したように計算体系については、単純な格子体系からもんじゅ体系までを対象とした。図3-1はUO<sub>2</sub>燃料ピンを中心配した軽水炉格子体系、図3-2はUO<sub>2</sub>燃料格子を2つ並べた体系、図3-3、3-4は3x3格子、集合体体系で図3-3ではUO<sub>2</sub>燃料格子、図3-4では高速炉燃料集合体をスミアしたもの、図3-5は制御棒全引き抜き状態のもんじゅ体系、そして、図3-6は高速炉燃料集合体をスミアした無限均質体系である。

#### 3.1.2 摂動条件

摂動条件については、各計算体系において、各々次のような摂動を加え、その時の固有値の変化を摂動モンテカルロ法で計算した。摂動モンテカルロ計算においては、従来手法である「摂動前後での中性子源分布の変化を考慮しない」場合と新手法である「摂動前後での中性子源分布の変化を考慮する」場合の2種類の計算をおこなった。また、独立な2回のモンテカルロ計算（摂動前と摂動後の状態での2回のモンテカルロ計算）をおこない、それらの計算結果の差から参照解を得た。摂動条件としては3.1.1で示した各々の体系で、以下のような摂動を加え、その時の固有値の変化を計算した。

図3-1の体系では、軽水密度を-10%とする摂動

図3-2の体系では、一方の格子内の燃料密度を-50%とする摂動

図3-3の体系では、中心に位置する格子内の燃料密度を-50%または-25%とする2種類の摂動

図3-4の体系では、中心に位置する格子に存在する燃料要素の密度を-50%または-25%とする2種類の摂動

図3-5の体系では、体系内の全てのナトリウム密度を-50%とする摂動

図3-6の体系では、体系内のナトリウム密度を-50%とする摂動

### 3.1.3 中性子ヒストリー数

モンテカルロ計算での中性子ヒストリー数については、50万～100万ヒストリーであり一部参照解を正確に得るために250万ヒストリーの計算も行った。

図3-1では、独立なモンテカルロ計算、摂動モンテカルロ計算とも $10000 \times 50$ (+捨てバッチ5)。図3-2では、独立なモンテカルロ計算、摂動モンテカルロ計算とも $20000 \times 50$ (+捨てバッチ5)。図3-3の-50%摂動および-25%摂動での独立なモンテカルロ計算で $20000 \times 125$ (+捨てバッチ3)、摂動モンテカルロ計算では $20000 \times 25$ (+捨てバッチ3)。図3-4の-50%摂動および-25%摂動、図3-5、図3-6での計算は、独立なモンテカルロ計算、摂動モンテカルロ計算とも $20000 \times 25$ (+捨てバッチ3)、とした。

### 3.1.4 新手法の摂動モンテカルロ計算について

摂動モンテカルロ計算では、従来手法と新手法の2種類の計算をおこなったが、新手法の計算においては、摂動後の中性子源分布を表現する際に、中性子源分布が物理的に等しくなると考えられる領域で、発生中性子の重みを同じとなるように処理している。

そこで、計算体系内で中性子の発生する領域については適当な領域に分割し、分割した各領域で、発生中性子に与える重みを、前のバッチで計算された中性子の重みの比の平均値で与えるようにしている。この処理は、計算結果を歪めないと見い切れないが、各バッチで平均化をおこなわずに、計算を進めていった場合は、次のような問題が生じるため、やむを得ずおこなっている。

固有値計算をおこなうモンテカルロ計算では、追跡する全体の中性子数をバッチという単位で分割し、各バッチでは先のバッチで計算された中性子源分布を用いて計算が進められている。このため、モンテカルロ計算においては、はじめの幾つかのバッチは中性子源分布を安定させるための「捨てバッチ」として扱い、最終の計算結果には使用しない様になっている。摂動モンテカルロ計算でも、通常のモンテカルロ計算と同様に、追跡する全体の中性子数をバッチに分割し計算を進めていくが、ここで、特に摂動後の中性子源分布の表現に問題が生じる。摂動後の中性子源分布は、摂動前を基準とした、発生中性子に与える重みの比で表している。これにより、各発生点での発生中性子数が摂動前後で異なる事を表現しているが、当然ながら、重みの比は1ではない。そのため、バッチを重ねて計算を進めていくと、重みの比が幾度となく乗じられ、重みの比が $1/1000$ や $1000$ といった極端に1から離れた値となることがあり、計算結果が大きく振れてしまう事になる。先に述べた平均化はこの問題をさけるために導入したものである。

そこで、新手法による摂動モンテカルロ計算では、以下のように中性子発生領域を分割し、各領域内で中性子の重みの平均を求め、使用している。

図3-1と図3-2の体系では、燃料ピン内を等体積で10分割

図3-3と図3-4の体系では、摂動領域内は1領域のまま  
そして、図3-5では、新手法による計算を行っておらず、さらに図3-6では、領域分割する必要がなく、新手法による計算を行っていない。

### 3.2 計算結果

表3-1～表3-6に、各計算ケースで得られた実効増倍率と実効増倍率の差をまとめて示す。

計算結果を全体的に見ると、一部参照解の偏差( $1\sigma$ )からはずれた計算結果が見られるが、摂動モンテカルロ計算結果は、概ね参照解の偏差内に収まった値となっている。そして、摂動モンテカルロ法においては、従来法と新手法の2種類の計算をおこなったが、両者の計算結果の間には、有為な違いがほとんど見られない。また、図3-7～図3-9には、中性子源分布の摂動前後での変化を示したが、図3-8や図3-9に示したような摂動前後で中性子源分布が大きく変化している様な場合にも、有為な違いがほとんど見られないため、特に新手法に関しては、摂動モンテカルロコード内のバグも含めて、さらに検討が必要であると考えている。

また、表3-5に示した、もんじゅ体系で体系全体のナトリウム密度を-50%とする摂動の場合に得られた計算結果を見る。参照解で得られている固有値の差の絶対値はそれほど小さくなく、他のケースでは摂動モンテカルロ法での計算結果は、ほぼ妥当な値となっているが、もんじゅ体系ではEstimatorによって正負が逆転しており、摂動モンテカルロ法での計算結果は妥当なものであるとは言いがたい。これについては、未だにその原因を正確には把握できていない。

表3-7には、計算時間を比較した。ケースに依っては計算機が異なるために、表中には、計算時間の比較が可能なもののみが示されている。計算時間は、摂動モンテカルロ計算を行うことにより増加しているが、その割合は1～2割程度に収まっている。この程度の計算時間の増加のみで、摂動に伴う固有値の変化を求めることから、摂動モンテカルロ法による計算の有効性が示されていると考えている。

図3-1～図3-10には、1ピン格子で軽水密度を-10%とする摂動での、通常のモンテカルロ計算、摂動モンテカルロ法計算で得られた、固有値、および固有値の差の、各バッチでの値、および収束状況を示した。

図3-11～図3-20には、3x3軽水炉格子体系で中央の燃料密度を-50%とする摂動での、通常のモンテカルロ計算、摂動モンテカルロ法計算で得られた、固有値、および固有値の差の、各バッチでの値、および収束状況を示した。

図3-21～図3-30には、3x3軽水炉格子体系で中央の燃料密度を-25%とする摂動での、通常のモンテカルロ計算、摂動モンテカルロ法計算で得られた、固有値、および固有値の差の、各バッチでの値、および収束状況を示した。

図3-31～図3-36には、もんじゅ体系で体系内全領域のナトリウム密度を-50%とする摂動での、通常のモンテカルロ計算、摂動モンテカルロ法計算で得られた、固有値、および固有値の差の、各バッチでの値、および収束状況を示した。

まず、1ピン格子体系の場合であるが、各バッチでの固有値の値は、通常のモンテカルロ計算でも大きく変動しているが、固有値の収束は、まま良いことがわかる。摂動モンテカルロ法を用いた場合でも、各バッチでの固有値の値は、大きく変動しており、またさらに、固有値の差も各バッチで大きく変動しているが、固有値、固有値の差とも概ね良く収束していく様子が見られている。

3x3軽水炉格子体系の場合にも、通常のモンテカルロ計算、摂動モンテカルロ計算とも、各バッチでの固有値や固有値の差が大きく変動していることがわかるが、先の1ピン格子体系の場合には見られなかったEstimatorの違いによる、計算結果の違いが顕著に見受けられる。固有値であれば図3-12(a)や図3-13(a)の様にCollision Estimatorが他のEstimatorとは大きく異なっている。また、固有値の差の収束状況を図3-19(b)や図3-20(b)で見ると、Productionによる結果が大きく波打っており、収束する傾向が見られないことがわかる。この傾向は-50%の摂動の場合(図3-11～図3-20)だけでなく-25%の摂動の場合(図3-21～図3-30)にも同様に見られる。

さらに、もんじゅ体系での計算結果を見ると、各バッチでの固有値の差(図3-33)は、正になったり負になったりと変動している。このことからもわかるように、固有値の差の収束状況(図3-36は)は、理解しがたい傾向を示している。

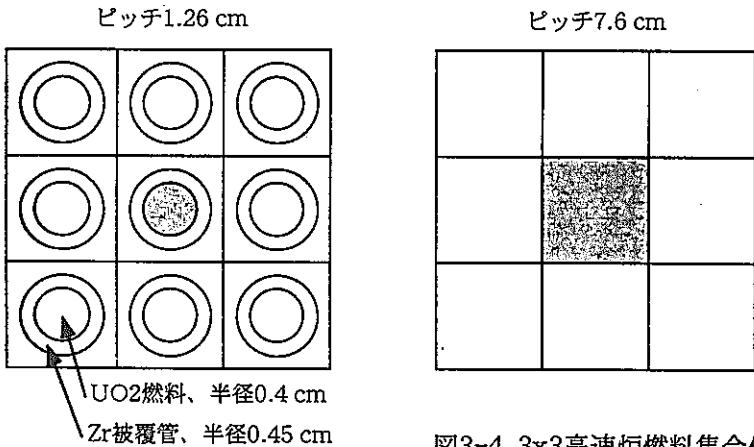
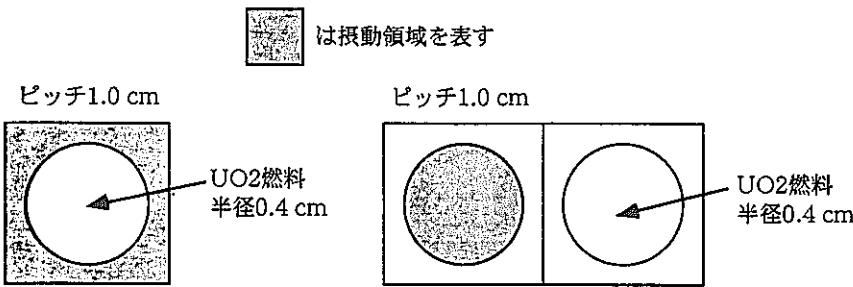
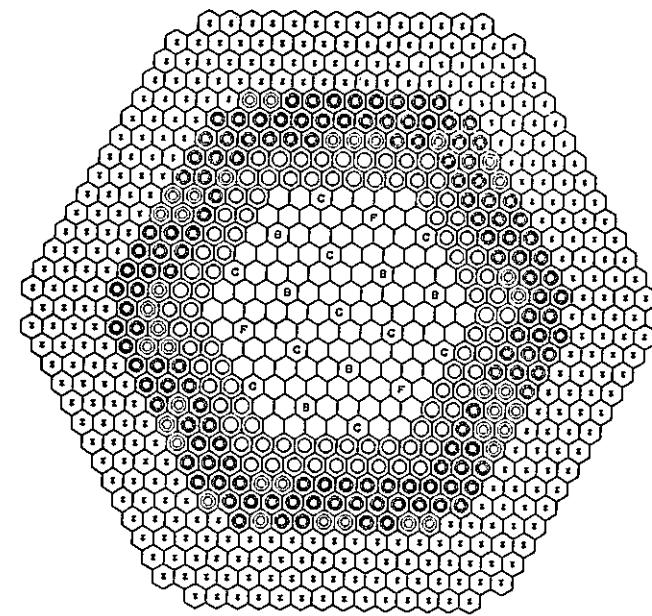


図3-6 高速炉燃料集合体無限均質体系



- |             |                   |
|-------------|-------------------|
| ○ 内側炉心 108体 | □ 後備炉停止棒 6体       |
| ◎ 外側炉心 90体  | ◎ 半径方向ブランケット 172体 |
| △ 微調整棒 3体   | ◆ 半径方向遮蔽体 324体    |
| ◎ 粗調整棒 10体  |                   |

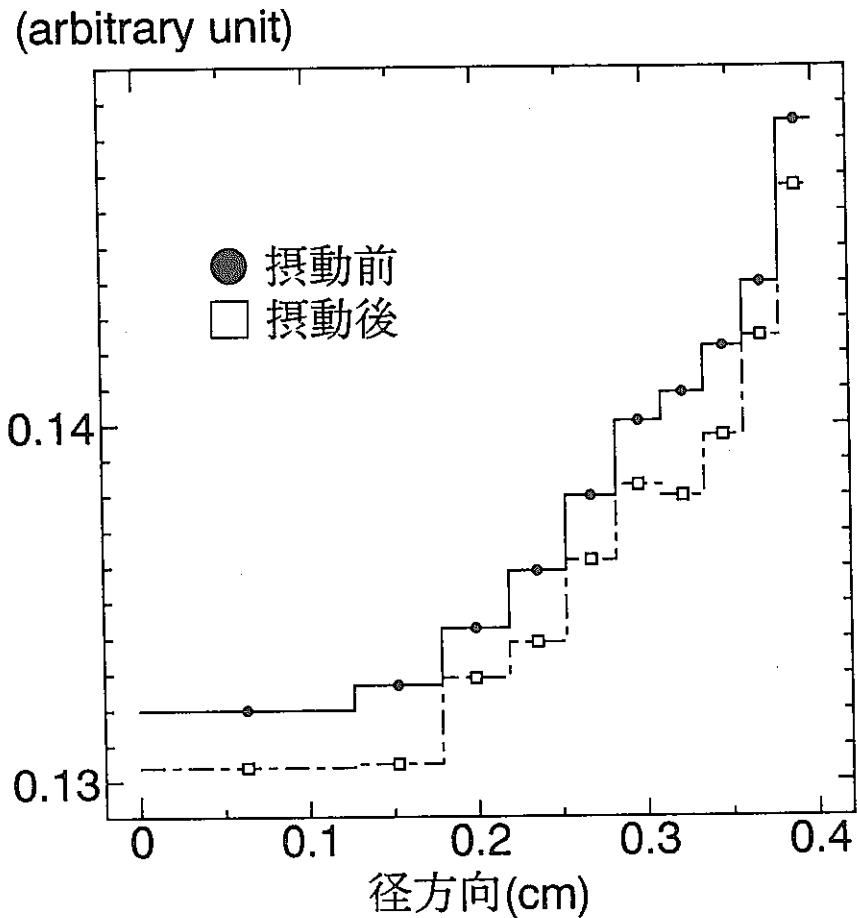


図3-7 摂動前後での中性子源分布(図3-1の場合)

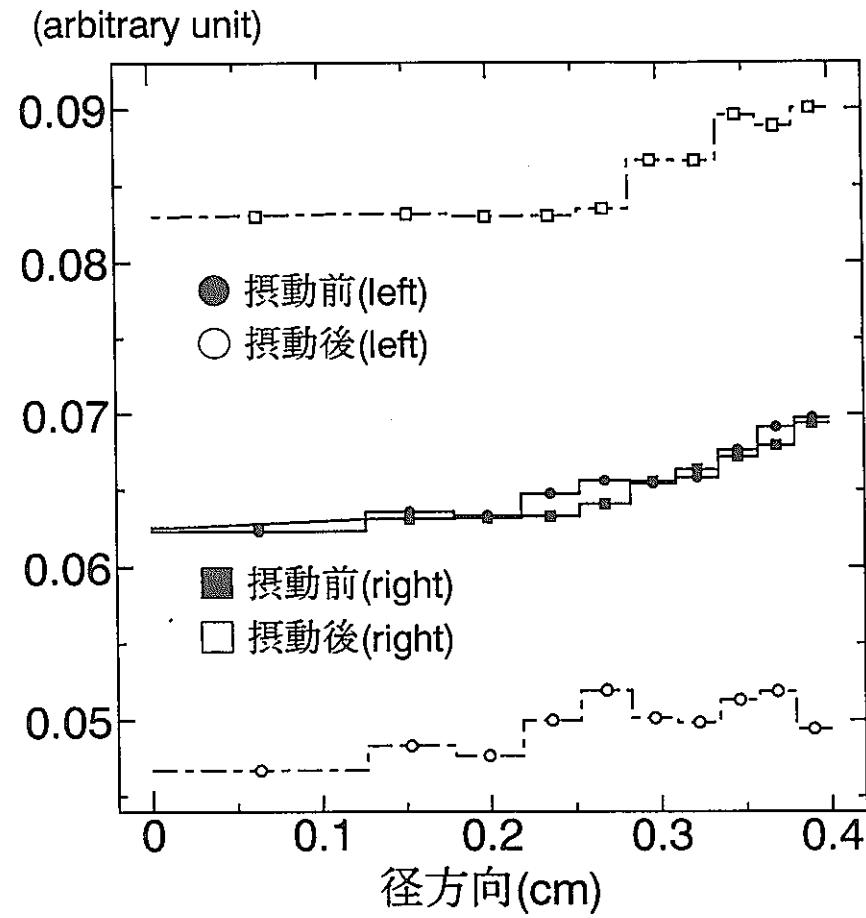


図3-8 摂動前後での中性子源分布(図3-2の場合)

1.543 (2.3%)	1.532 (2.5%)	1.543 (3.1%)	撮動前 ( $1\sigma$ ) 撮動後 ( $1\sigma$ )
1.621 (3.2%)	1.615 (3.9%)	1.609 (3.5%)	
1.543 (2.8%)	1.537 (3.8%) 0.922 (4.9%)	1.534 (3.1%)	
1.630 (3.6%)		1.622 (3.3%)	
1.550 (3.2%)	1.542 (2.2%)	1.537 (2.2%)	
1.621 (3.6%)	1.634 (3.7%)	1.610 (3.7%)	

図3-9(a) 摂動前後での中性子源分布 (図3-3の-50%摂動)

1.543 (2.3%)	1.532 (2.5%)	1.543 (3.1%)	撮動前は、 上と同じ
1.578 (3.4%)	1.570 (3.0%)	1.574 (3.3%)	
1.543 (2.8%)	1.537 (3.8%) 1.255 (4.4%)	1.534 (3.1%)	
1.583 (2.9%)		1.574 (2.9%)	
1.550 (3.2%)	1.542 (2.2%)	1.537 (2.2%)	
1.583 (3.2%)	1.584 (3.6%)	1.571 (3.4%)	

図3-9(b) 摂動前後での中性子源分布 (図3-3の-25%摂動)

表3-1 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-1の体系）

独立計算での摂動前の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.39009 (0.0600%)
Collision Estimator	1.39031 (0.0531%)
Analog Estimator	1.38967 (0.0679%)
Production	1.39046 (0.0874%)
Balance	1.39022 (0.0523%)
All	1.39030 (0.0488%)

独立計算での摂動後の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.37019 (0.0721%)
Collision Estimator	1.37124 (0.0520%)
Analog Estimator	1.37111 (0.0581%)
Production	1.37107 (0.0866%)
Balance	1.37109 (0.0521%)
All	1.37161 (0.0482%)

表3-1 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-1の体系）（続き）

独立計算結果からの、摂動前後での実効増倍率の差（参照解）

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	-1.990e-2 (6.50%)
Collision Estimator	-1.907e-2 (5.38%)
Analog Estimator	-1.856e-2 (6.65%)
Production	-1.939e-2 (8.76%)
Balance	-1.913e-2 (5.33%)
All	-1.869e-2 (5.07%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差  
(摂動前後での中性子源分布の変動を無視した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	-1.849e-2 (2.29%)
Collision Estimator	-1.877e-2 (2.16%)
Analog Estimator	-1.885e-2 (2.50%)
Production	-1.855e-2 (5.40%)
Balance	-1.868e-2 (2.10%)
All	-1.878e-2 (1.79%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差  
(摂動前後での中性子源分布の変動を考慮した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	-1.849e-2 (2.30%)
Collision Estimator	-1.878e-2 (2.17%)
Analog Estimator	-1.887e-2 (2.51%)
Production	-1.855e-2 (5.32%)
Balance	-1.868e-2 (2.11%)
All	-1.879e-2 (1.78%)

表3-2 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-2の体系）

独立計算での摂動前の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.31047 (0.0477%)
Collision Estimator	1.31062 (0.0450%)
Analog Estimator	1.31076 (0.0575%)
Production	1.31075 (0.0704%)
Balance	1.31064 (0.0449%)
All	1.31041 (0.0432%)

独立計算での摂動後の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.35862 (0.0413%)
Collision Estimator	1.35800 (0.0454%)
Analog Estimator	1.35752 (0.0522%)
Production	1.35809 (0.0690%)
Balance	1.35839 (0.0407%)
All	1.35833 (0.0370%)

表3-2 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-2の体系）（続き）

独立計算結果からの、摂動前後での実効増倍率の差（参照解）

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	4.815e-2 (1.74%)
Collision Estimator	4.738e-2 (1.80%)
Analog Estimator	4.676e-2 (2.21%)
Production	4.734e-2 (2.78%)
Balance	4.775e-2 (1.69%)
All	4.792e-2 (1.58%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差  
(摂動前後での中性子源分布の変動を無視した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	4.509e-2 (4.62%)
Collision Estimator	4.576e-2 (2.73%)
Analog Estimator	4.558e-2 (3.63%)
Production	4.254e-2 (9.71%)
Balance	4.561e-2 (2.65%)
All	4.575e-2 (2.58%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差  
(摂動前後での中性子源分布の変動を考慮した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	4.539e-2 (4.51%)
Collision Estimator	4.543e-2 (2.82%)
Analog Estimator	4.489e-2 (3.56%)
Production	4.129e-2 (8.95%)
Balance	4.504e-2 (2.55%)
All	4.513e-2 (2.53%)

表3-3(a) 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-3の体系、-50%摂動）

独立計算での摂動前の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.38754 (0.0242%)
Collision Estimator	1.38753 (0.0234%)
Analog Estimator	1.38757 (0.0316%)
Production	1.38762 (0.0293%)
Balance	1.38759 (0.0226%)
All	1.38747 (0.0217%)

独立計算での摂動後の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.39043 (0.0258%)
Collision Estimator	1.38980 (0.0217%)
Analog Estimator	1.38994 (0.0310%)
Production	1.39001 (0.0286%)
Balance	1.39007 (0.0224%)
All	1.38990 (0.0206%)

表3-3(a) 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-3の体系、-50%摂動）（続き）

独立計算結果からの、摂動前後での実効増倍率の差（参照解）

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	2.89e-3 (17.0%)
Collision Estimator	2.27e-3 (13.5%)
Analog Estimator	2.37e-3 (14.7%)
Production	1.38e-3 (28.2%)
Balance	2.48e-3 (12.2%)
All	2.43e-3 (17.1%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差  
(摂動前後での中性子源分布の変動を無視した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	3.005e-3 (13.5%)
Collision Estimator	2.508e-3 (13.8%)
Analog Estimator	2.608e-3 (13.8%)
Production	3.132e-3 (31.4%)
Balance	2.655e-3 (12.2%)
All	2.554e-3 (11.6%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差  
(摂動前後での中性子源分布の変動を考慮した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	3.045e-3 (14.3%)
Collision Estimator	2.607e-3 (13.5%)
Analog Estimator	2.597e-3 (14.7%)
Production	3.467e-3 (28.2%)
Balance	2.686e-3 (12.2%)
All	2.696e-3 (10.3%)

表3-3(b) 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-3の体系、-25%摂動）

独立計算での摂動前の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.38754 (0.0242%)
Collision Estimator	1.38753 (0.0234%)
Analog Estimator	1.38757 (0.0316%)
Production	1.38762 (0.0293%)
Balance	1.38759 (0.0226%)
All	1.38747 (0.0217%)

独立計算での摂動後の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.38868 (0.0232%)
Collision Estimator	1.38856 (0.0218%)
Analog Estimator	1.38882 (0.0277%)
Production	1.38846 (0.0260%)
Balance	1.38852 (0.0212%)
All	1.38870 (0.0203%)

表3-3(b) 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-3の体系、-25%摂動）（続き）

独立計算結果からの、摂動前後での実効増倍率の差（参照解）

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.14e-3 (40.8%)
Collision Estimator	1.03e-3 (43.1%)
Analog Estimator	1.25e-3 (46.7%)
Production	8.40e-4 (64.7%)
Balance	9.30e-4 (46.2%)
All	1.23e-3 (33.5%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差  
(摂動前後での中性子源分布の変動を無視した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.420e-3 (12.5%)
Collision Estimator	1.319e-3 (12.3%)
Analog Estimator	1.406e-3 (12.6%)
Production	1.705e-3 (23.2%)
Balance	1.376e-3 (11.3%)
All	1.469e-3 (9.04%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差  
(摂動前後での中性子源分布の変動を考慮した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.445e-3 (13.4%)
Collision Estimator	1.373e-3 (12.1%)
Analog Estimator	1.411e-3 (13.1%)
Production	1.770e-3 (21.9%)
Balance	1.397e-3 (11.3%)
All	1.533e-3 (8.44%)

表3-4(a) 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-4の体系、-50%摂動）

独立計算での摂動前の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.85624 (0.0199%)
Collision Estimator	1.85611 (0.0153%)
Analog Estimator	1.85579 (0.0227%)
Production	1.85609 (0.0159%)
Balance	1.85597 (0.0154%)
All	1.85628 (0.0129%)

独立計算での摂動後の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.84596 (0.0184%)
Collision Estimator	1.84587 (0.0170%)
Analog Estimator	1.84556 (0.0255%)
Production	1.84607 (0.0183%)
Balance	1.84588 (0.0168%)
All	1.84596 (0.0164%)

表3-4(a) 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-4の体系、-50%摂動）（続き）

独立計算結果からの、摂動前後の実効増倍率の差（参照解）

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	-1.028e-2 (4.88%)
Collision Estimator	-1.024e-2 (4.13%)
Analog Estimator	-1.023e-2 (6.17%)
Production	-1.002e-2 (4.47%)
Balance	-1.009e-2 (4.18%)
All	-1.032e-2 (3.74%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差  
(摂動前後での中性子源分布の変動を無視した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	-9.902e-3 (2.08%)
Collision Estimator	-9.964e-3 (1.86%)
Analog Estimator	-9.510e-3 (4.11%)
Production	-1.073e-2 (14.68%)
Balance	-1.002e-2 (5.31%)
All	-1.013e-2 (1.70%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差  
(摂動前後での中性子源分布の変動を考慮した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	-9.526e-3 (2.51%)
Collision Estimator	-9.593e-3 (2.08%)
Analog Estimator	-9.056e-3 (4.44%)
Production	-9.837e-3 (17.06%)
Balance	-9.687e-3 (5.69%)
All	-9.636e-3 (2.04%)

表3-4(b) 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-4の体系、-25%摂動）

独立計算での摂動前の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.85624 (0.0199%)
Collision Estimator	1.85611 (0.0153%)
Analog Estimator	1.85579 (0.0227%)
Production	1.85609 (0.0159%)
Balance	1.85597 (0.0154%)
All	1.85628 (0.0129%)

独立計算での摂動後の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.85121 (0.0137%)
Collision Estimator	1.85105 (0.0129%)
Analog Estimator	1.85111 (0.0207%)
Production	1.85113 (0.0161%)
Balance	1.85109 (0.0128%)
All	1.85101 (0.0125%)

表3-4(b) 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-4の体系、-25%摂動）（続き）

独立計算結果からの、摂動前後の実効増倍率の差（参照解）

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	-5.03e-3 (8.91%)
Collision Estimator	-5.06e-3 (7.33%)
Analog Estimator	-4.68e-3 (12.12%)
Production	-4.96e-3 (8.46%)
Balance	-4.88e-3 (7.61%)
All	-5.27e-3 (6.32%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差  
(摂動前後での中性子源分布の変動を無視した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	-4.934e-3 (1.43%)
Collision Estimator	-4.963e-3 (1.43%)
Analog Estimator	-4.803e-3 (2.78%)
Production	-4.179e-3 (15.87%)
Balance	-5.101e-3 (3.55%)
All	-4.973e-3 (1.33%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差  
(摂動前後での中性子源分布の変動を考慮した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	-4.838e-3 (1.56%)
Collision Estimator	-4.871e-3 (1.40%)
Analog Estimator	-4.672e-3 (2.80%)
Production	-3.994e-3 (16.55%)
Balance	-5.016e-3 (3.80%)
All	-4.892e-3 (1.34%)

表3-5 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-5の体系）

独立計算での撮動前の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.03914 (0.0748%)
Collision Estimator	1.03898 (0.0734%)
Analog Estimator	1.03984 (0.0841%)
Production	1.03923 (0.0730%)
Balance	1.03907 (0.0750%)
All	1.04013 (0.0677%)

独立計算での撮動後の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.03474 (0.0635%)
Collision Estimator	1.03490 (0.0557%)
Analog Estimator	1.03513 (0.0925%)
Production	1.03510 (0.0589%)
Balance	1.03488 (0.0539%)
All	1.03500 (0.0532%)

表3-5 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-5の体系）（続き）

独立計算結果からの、撮動前後での実効増倍率の差（参照解）

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	-4.40e-3 (23.1%)
Collision Estimator	-4.08e-3 (23.4%)
Analog Estimator	-4.71e-3 (27.5%)
Production	-4.13e-3 (23.6%)
Balance	-4.19e-3 (22.9%)
All	-5.13e-3 (17.4%)

撮動モンテカルロ計算での、撮動前後の実効増倍率の差  
(撮動前後での中性子源分布の変動を無視した場合)

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.460e-2 (61.1%)
Collision Estimator	8.121e-3 (86.4%)
Analog Estimator	1.295e-2 (83.6%)
Production	-2.231e-2 (23.7%)
Balance	5.370e-3 (124%)
All	-1.857e-2 (23.7%)

表3-6 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-6の体系）

独立計算での摂動前の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.85617 (0.0155%)
Collision Estimator	1.85614 (0.0156%)
Analog Estimator	1.85590 (0.0199%)
Production	1.85610 (0.0173%)
Balance	1.85604 (0.0161%)
All	1.85631 (0.0104%)

独立計算での摂動後の実効増倍率

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	1.88486 (0.0155%)
Collision Estimator	1.88470 (0.0134%)
Analog Estimator	1.88496 (0.0237%)
Production	1.88468 (0.0146%)
Balance	1.88479 (0.0149%)
All	1.88480 (0.0130%)

33

表3-6 実効増倍率と実効増倍率の差の計算結果（図3-6の体系）（続き）

独立計算結果からの、摂動前後での実効増倍率の差（参照解）

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	2.869e-2 (1.43%)
Collision Estimator	2.856e-2 (1.35%)
Analog Estimator	2.906e-2 (2.00%)
Production	2.858e-2 (1.48%)
Balance	2.875e-2 (1.43%)
All	2.849e-2 (1.10%)

摂動モンテカルロ計算での、摂動前後の実効増倍率の差

評価方法	計算結果（偏差）
Track Length Estimator	2.811e-2 (2.28%)
Collision Estimator	2.826e-2 (1.70%)
Analog Estimator	2.800e-2 (3.74%)
Production	3.178e-2 (10.50%)
Balance	2.728e-2 (4.30%)
All	2.842e-2 (1.29%)

表3-7 計算時間の比較

計算ケース	通常のモンテカルロ計算	摂動モンテカルロ (従来手法)	摂動モンテカルロ (新手法)
1 ピン格子体系 (燃料-50%)	9023/50万	10596/50万	10417/50万
3x3軽水炉燃料格子体系 (中央燃料-25%)	4136/50万	5024/50万	5357/50万
3x3高速炉燃料集合体体系 (中央燃料-25%)	2232/50万	2556/50万	2375/50万

単位：秒

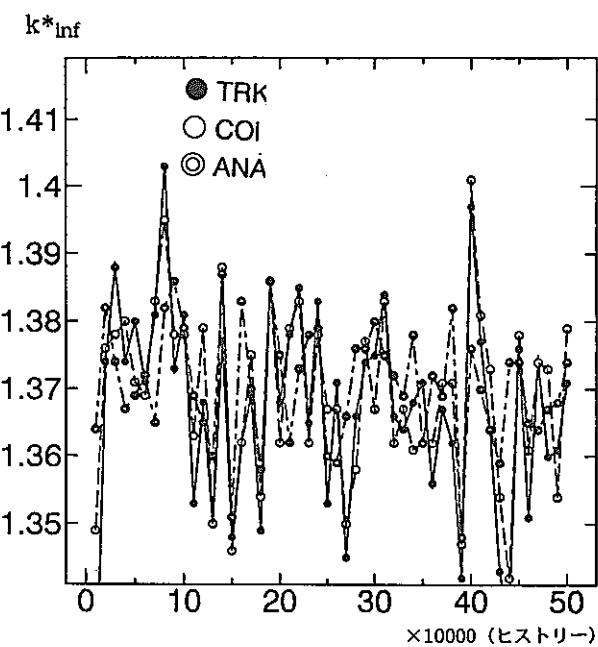


図3-1 1 ピン格子(軽水-10%)でのモンテカルロ法  
による各バッチでの $k^{\ast}_{\text{inf}}$  (production)

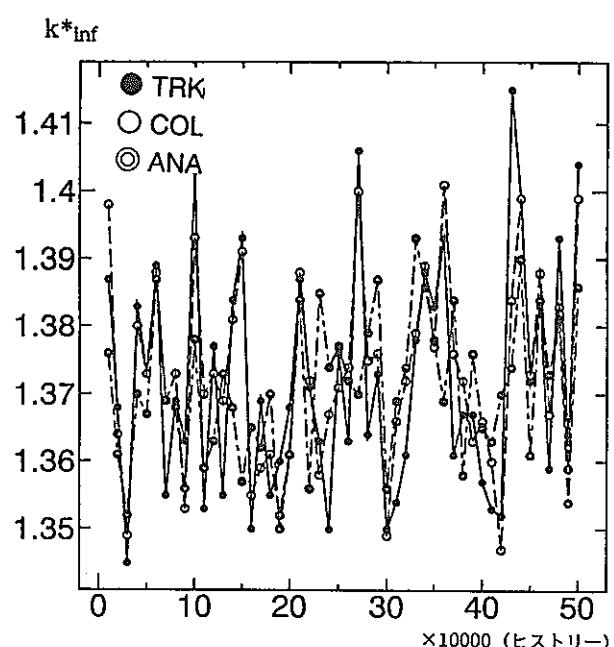


図3-2 1 ピン格子(軽水-10%)での振動モンテカルロ法（従来手法）  
による各バッチでの $k^{\ast}_{\text{inf}}$  (production)

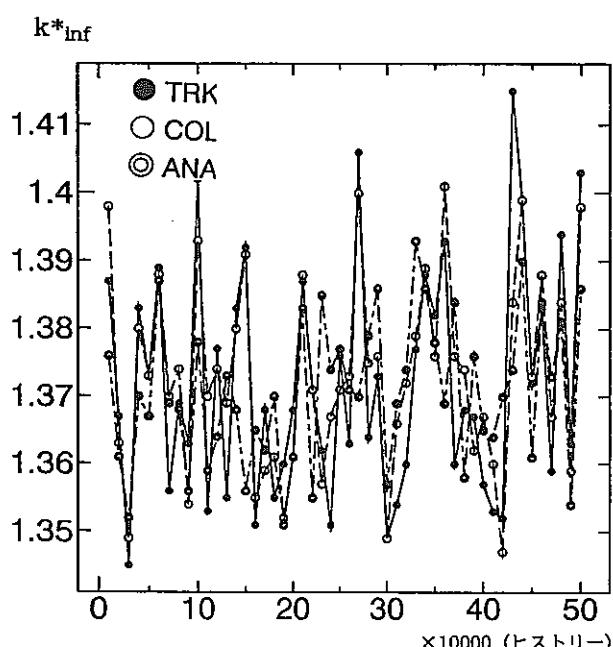


図3-3 1 ピン格子(軽水-10%)での振動モンテカルロ法（新手法）  
による各バッチでの $k^{\ast}_{\text{inf}}$  (production)

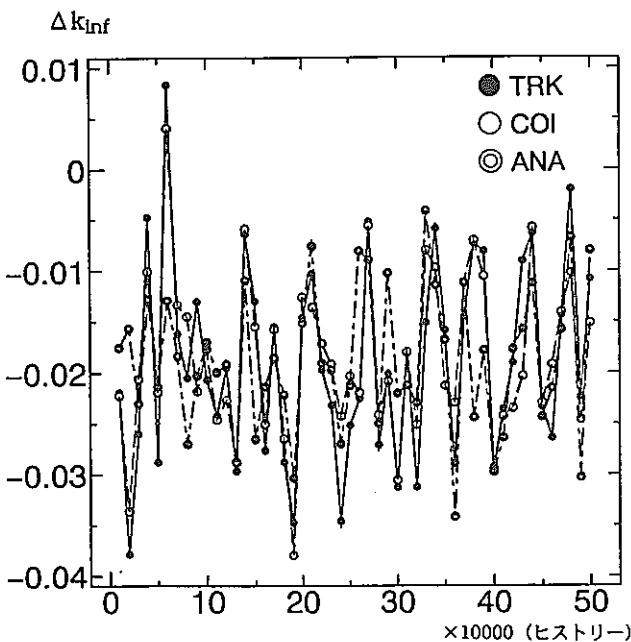


図3-4 1 ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法(従来手法)による各バッチでの $\Delta k_{\text{inf}}$ (production)

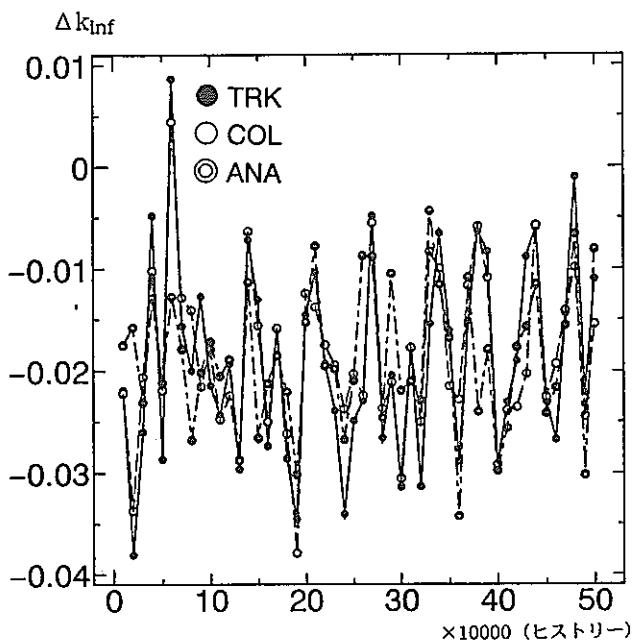


図3-5 1 ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法(新手法)による各バッチでの $\Delta k_{\text{inf}}$ (production)

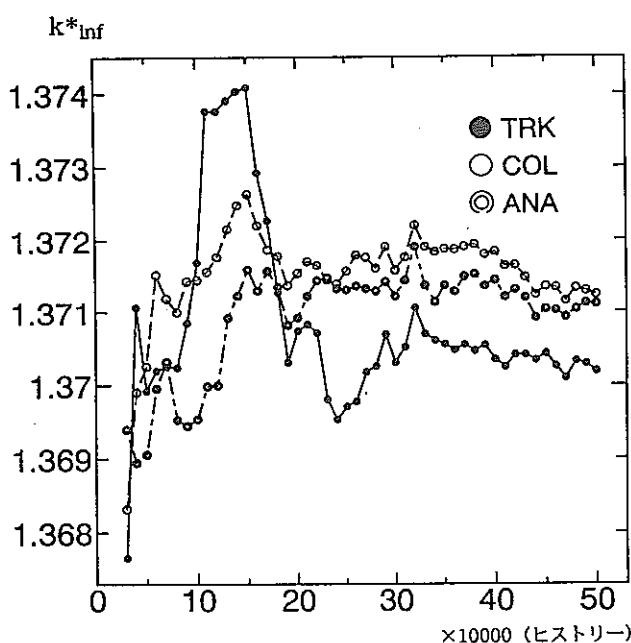


図3-6(a) 1 ピン格子(軽水-10%)でのモンテカルロ法による $k^{\ast}_{\text{inf}}$ の収束状況(その1)

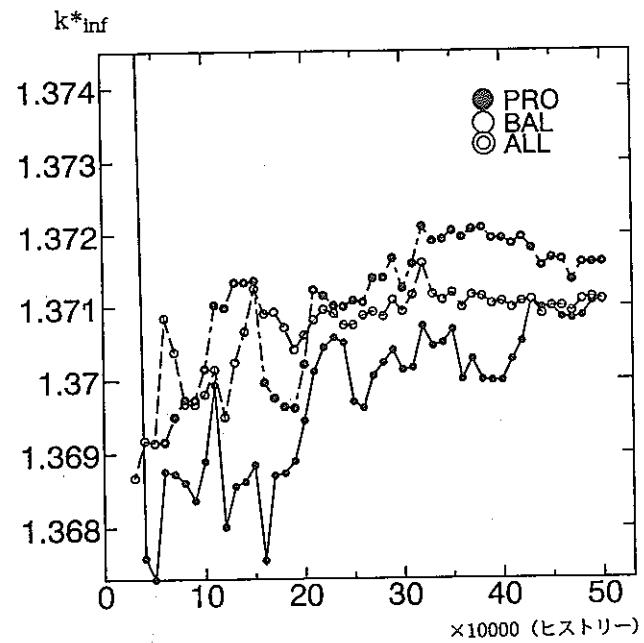


図3-6(b) 1 ピン格子(軽水-10%)でのモンテカルロ法による $k^{\ast}_{\text{inf}}$ の収束状況(その2)

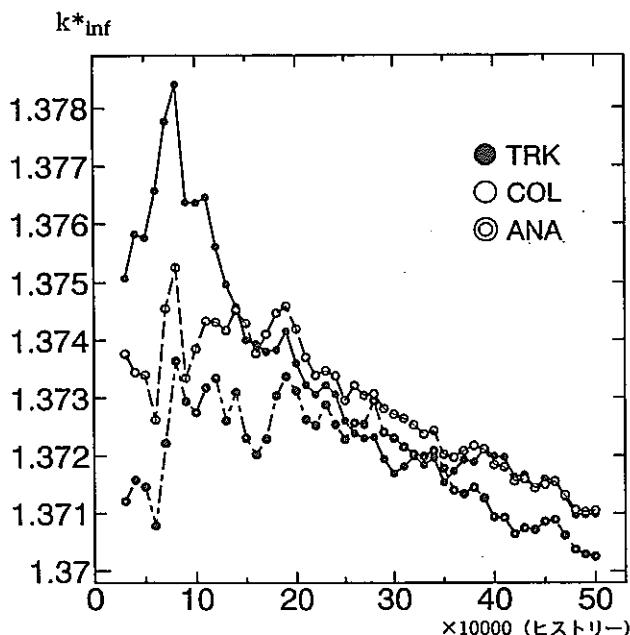


図3-7(a) 1 ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $k^{\ast}_{\text{inf}}$ の収束状況（その1）

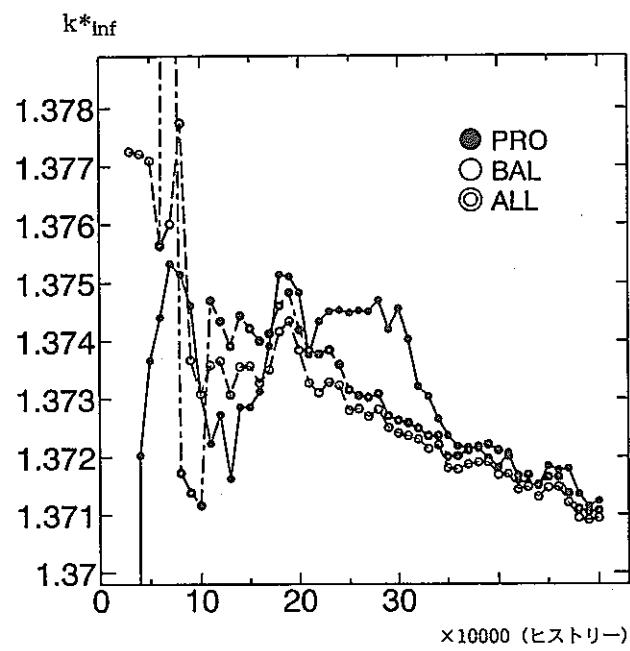


図3-7(b) 1 ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $k^{\ast}_{\text{inf}}$ の収束状況（その2）

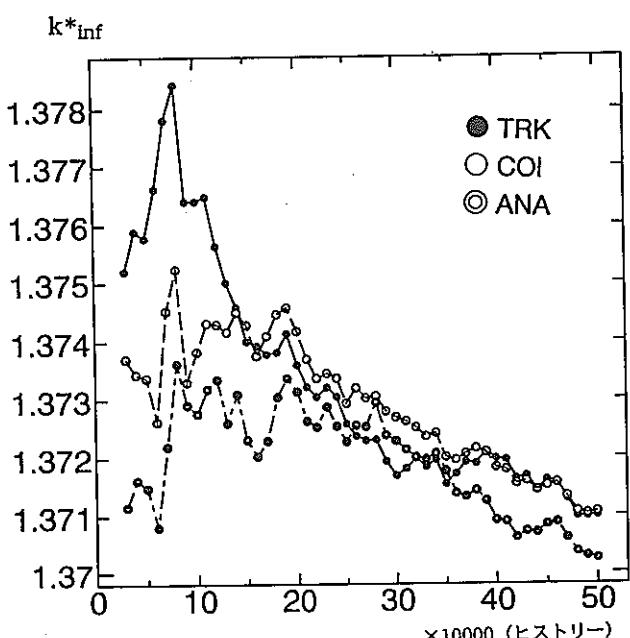


図3-8(a) 1 ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $k^{\ast}_{\text{inf}}$ の収束状況（その1）

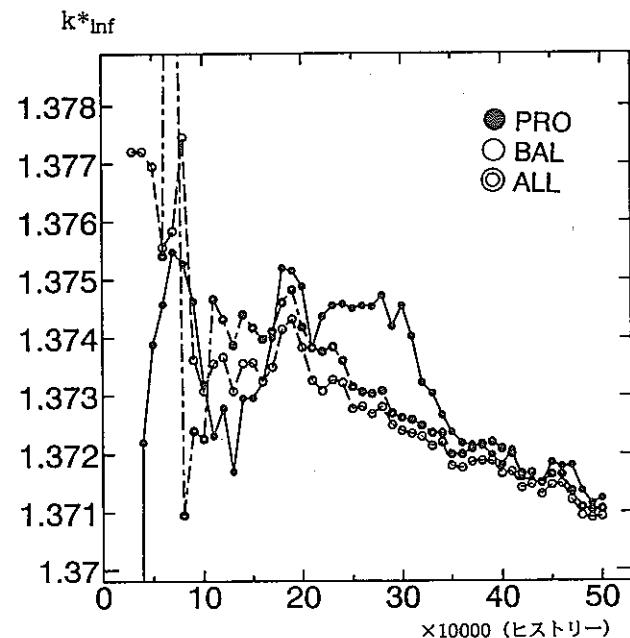


図3-8(b) 1 ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $k^{\ast}_{\text{inf}}$ の収束状況（その2）

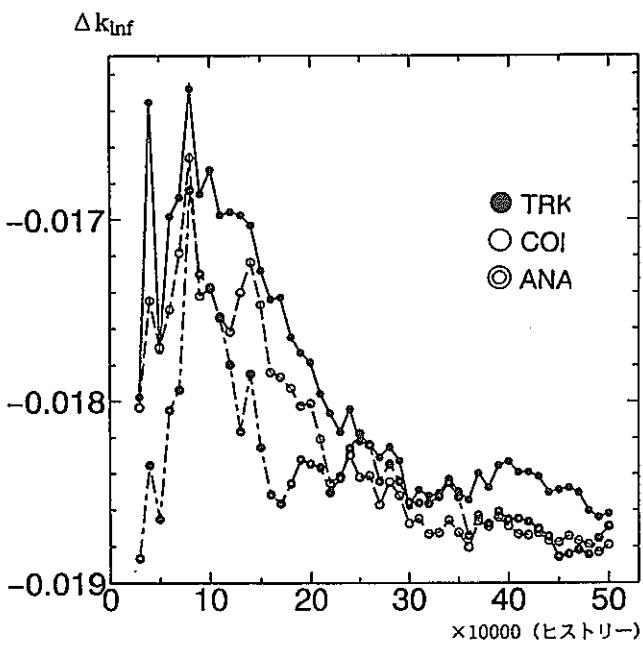


図3-9(a) 1 ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $\Delta k_{\text{inf}}$ の収束状況（その1）

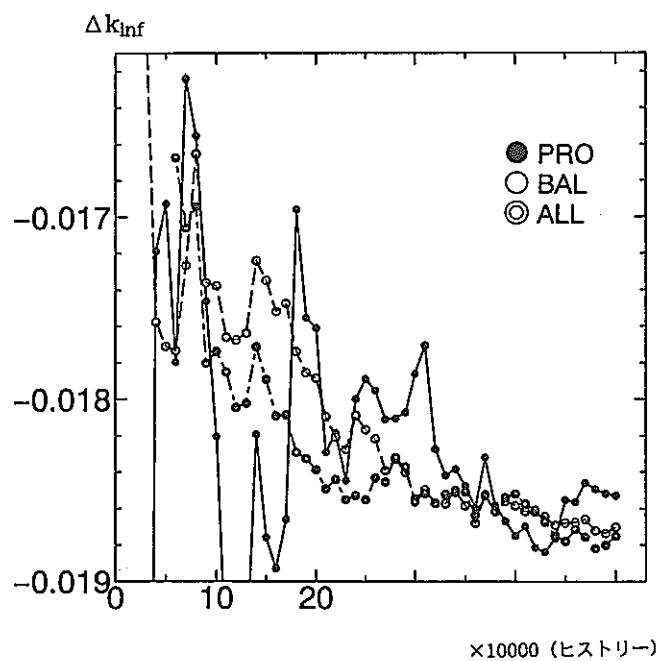


図3-9(b) 1 ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $\Delta k_{\text{inf}}$ の収束状況（その2）

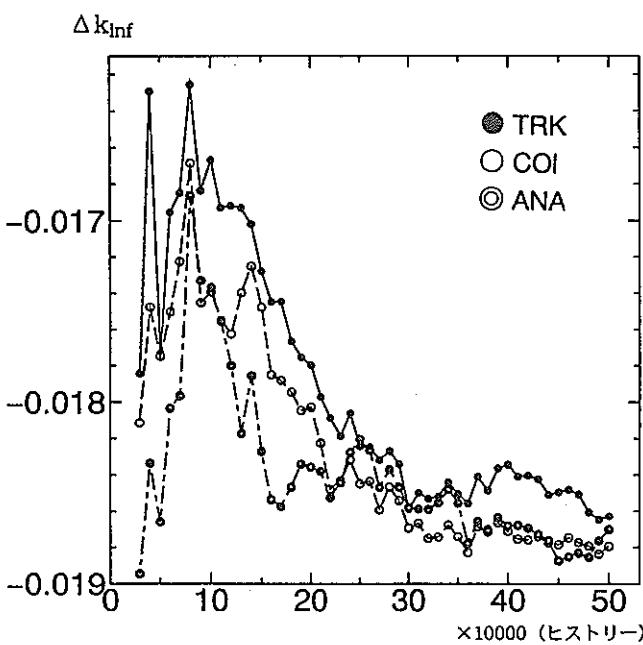


図3-10(a) 1 ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $\Delta k_{\text{inf}}$ の収束状況（その1）

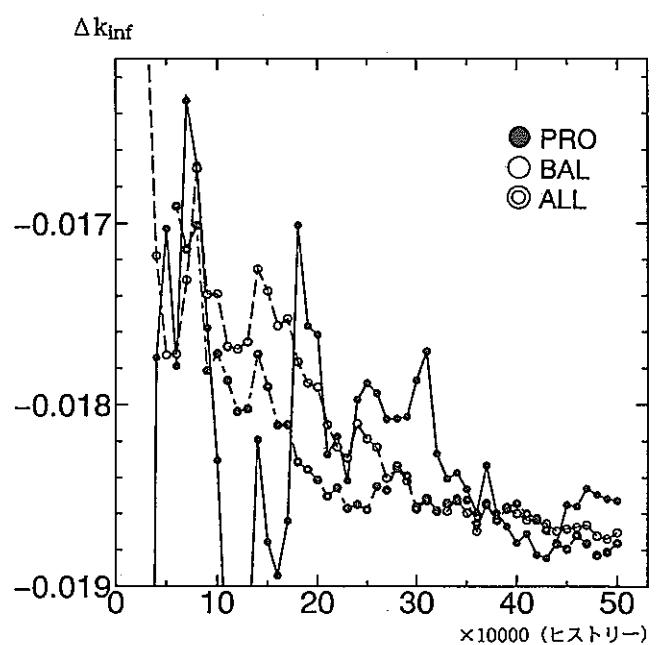


図3-10(b) 1 ピン格子(軽水-10%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $\Delta k_{\text{inf}}$ の収束状況（その2）

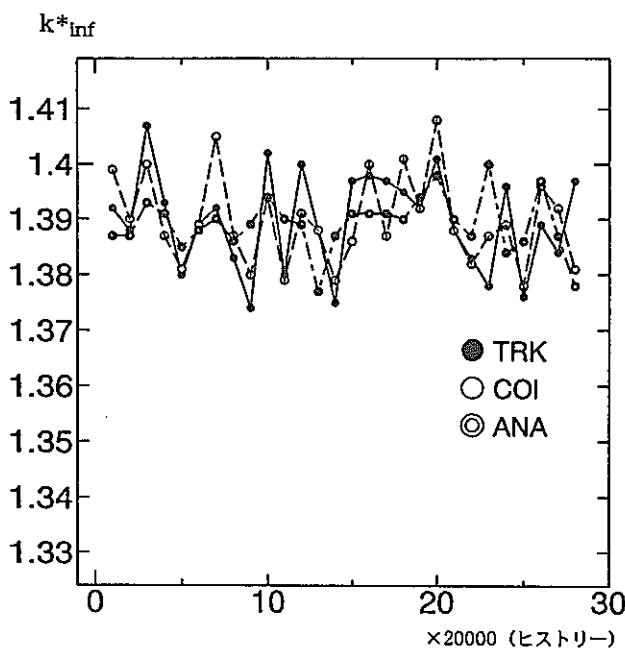


図3-11(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)でのモンテカルロ法による各パッチでの $k^{*}_{\text{inf}}$  (production)

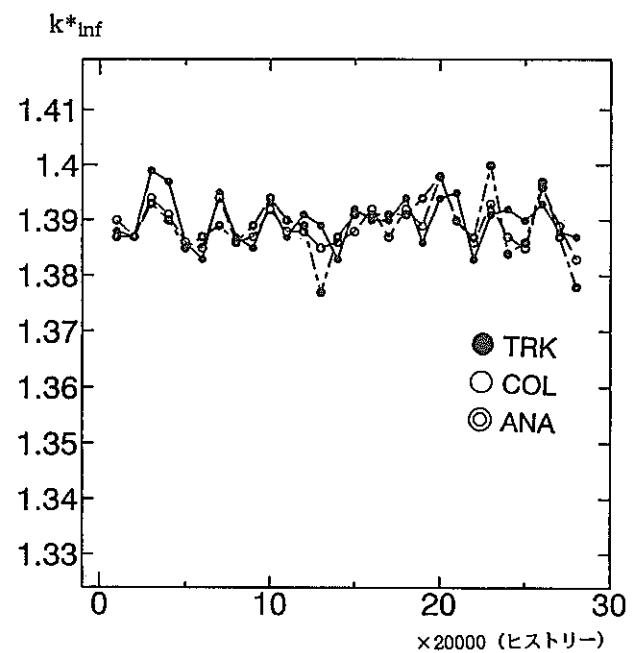


図3-11(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)でのモンテカルロ法による各パッチでの $k^{*}_{\text{inf}}$  (balance)

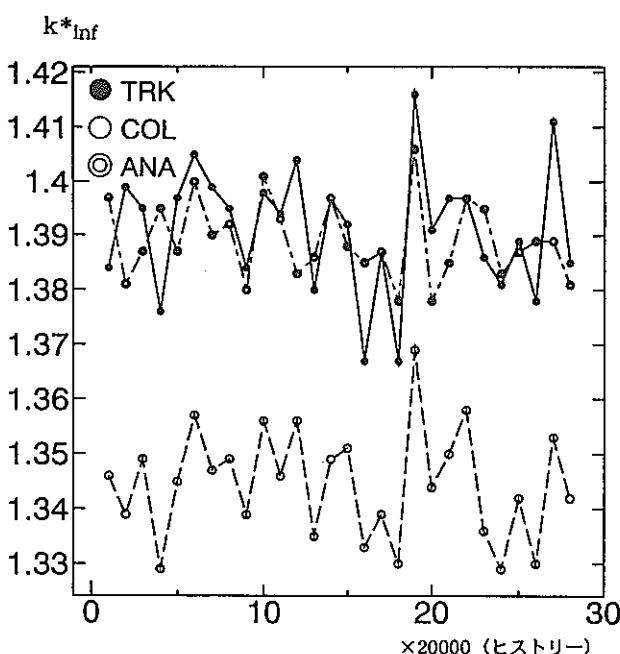


図3-12(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での慣動モンテカルロ法(従来手法)による各パッチでの $k^{*}_{\text{inf}}$  (production)

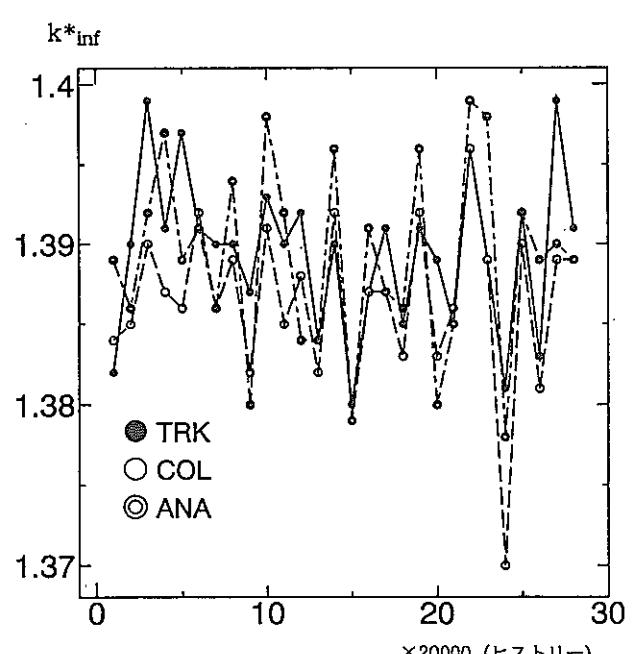


図3-12(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での慣動モンテカルロ法(従来手法)による各パッチでの $k^{*}_{\text{inf}}$  (balance)

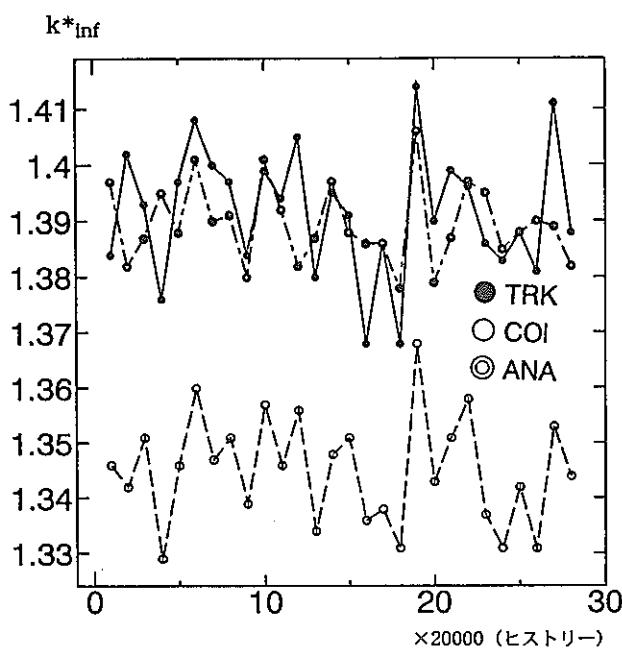


図3-13(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(新手法)による各バッチでの $k^*_{\text{inf}}$ (production)

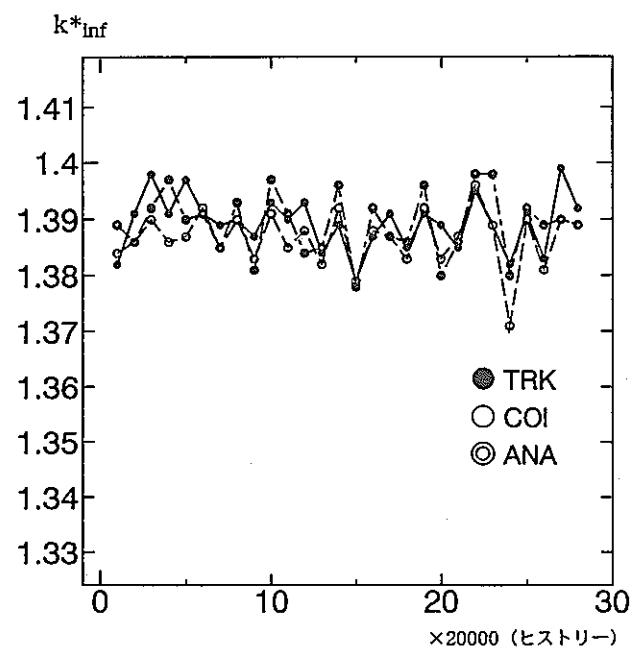


図3-13(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(新手法)による各バッチでの $k^*_{\text{inf}}$ (balance)

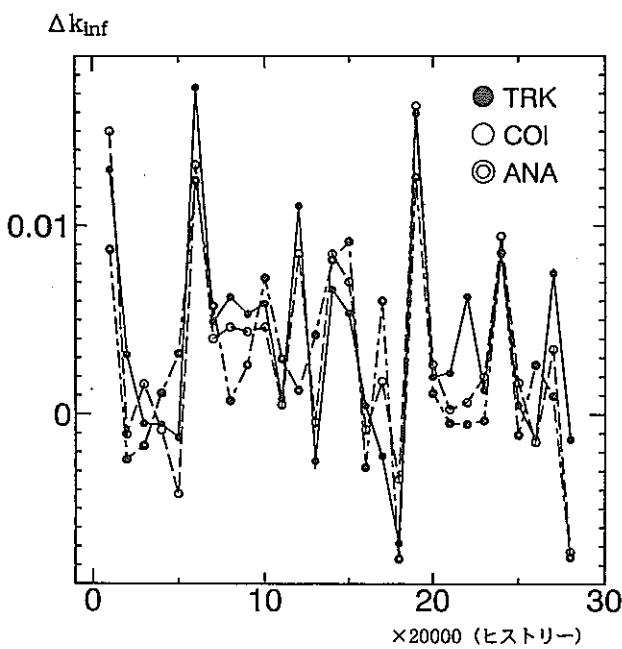


図3-14(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(従来手法)による各バッチでの $\Delta k_{\text{inf}}$ (production)

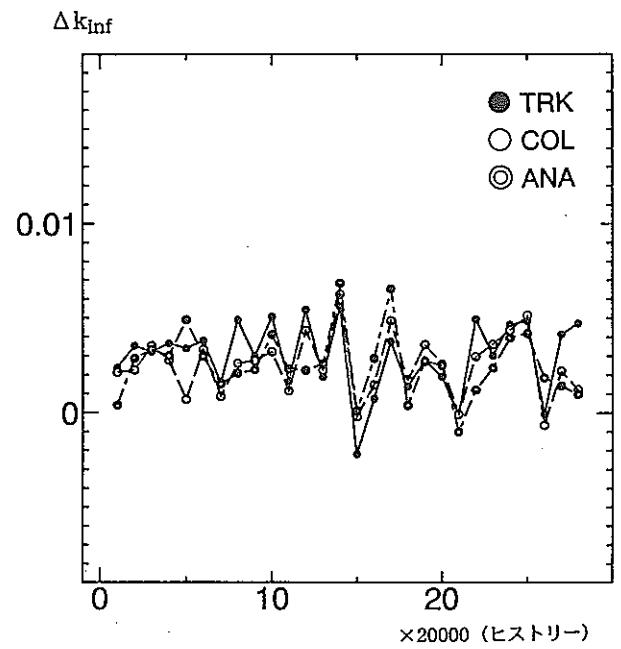


図3-14(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(従来手法)による各バッチでの $\Delta k_{\text{inf}}$ (balance)

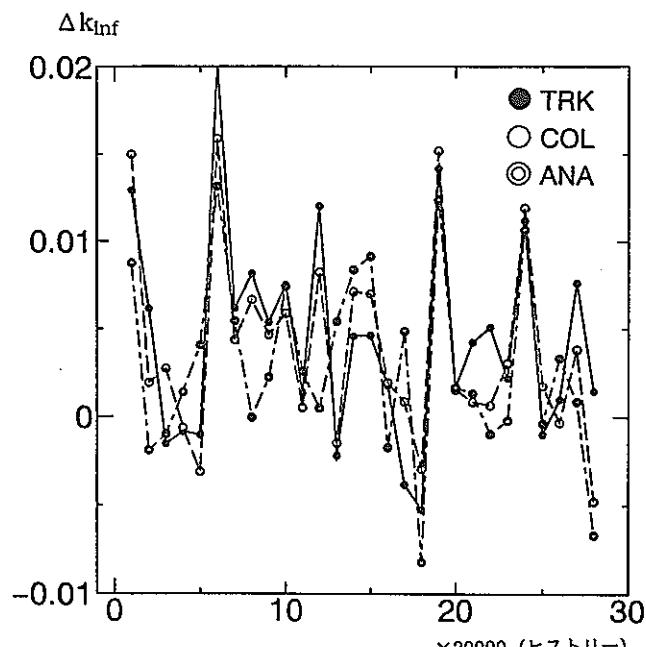


図3-15(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(新手法)による各バッチでの $\Delta k_{\text{inf}}$  (production)

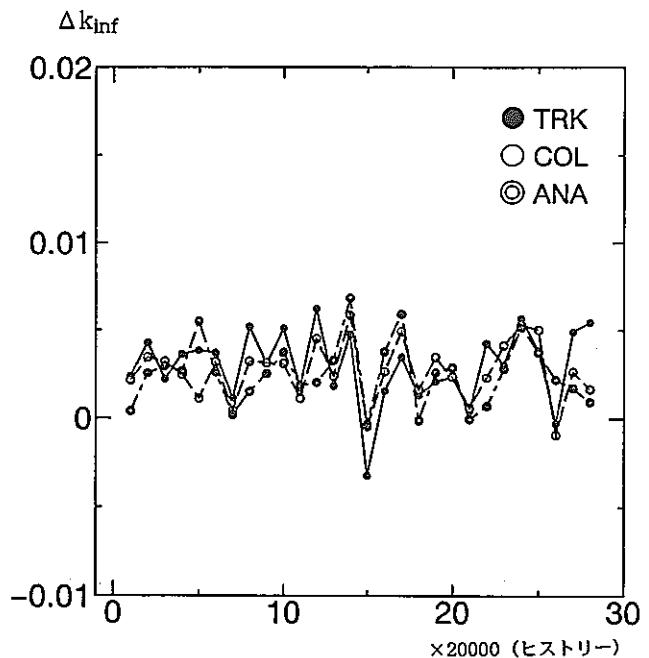


図3-15(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(新手法)による各バッチでの $\Delta k_{\text{inf}}$  (balance)

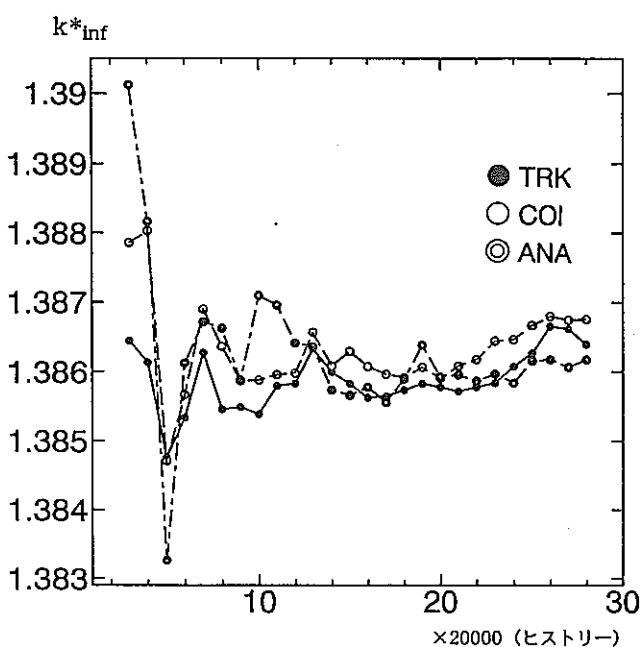


図3-16(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)でのモンテカルロ法による $k^*\text{inf}$ の収束状況(その1)

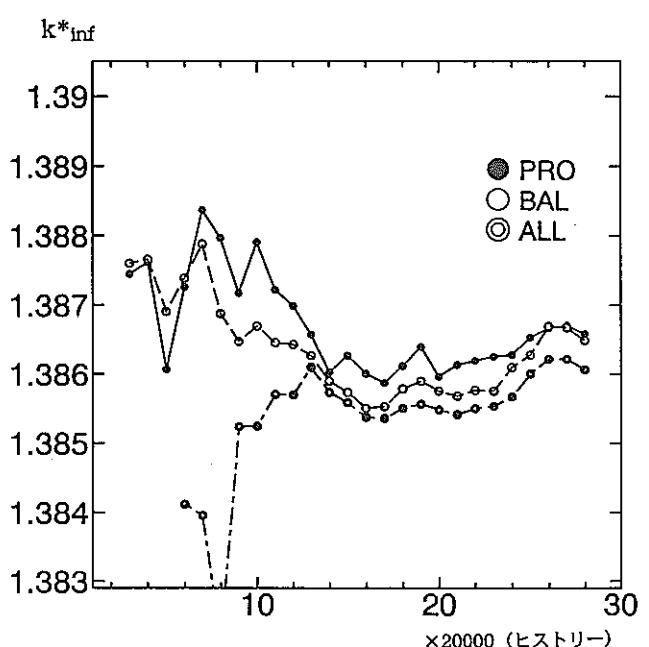


図3-16(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)でのモンテカルロ法による $k^*\text{inf}$ の収束状況(その2)

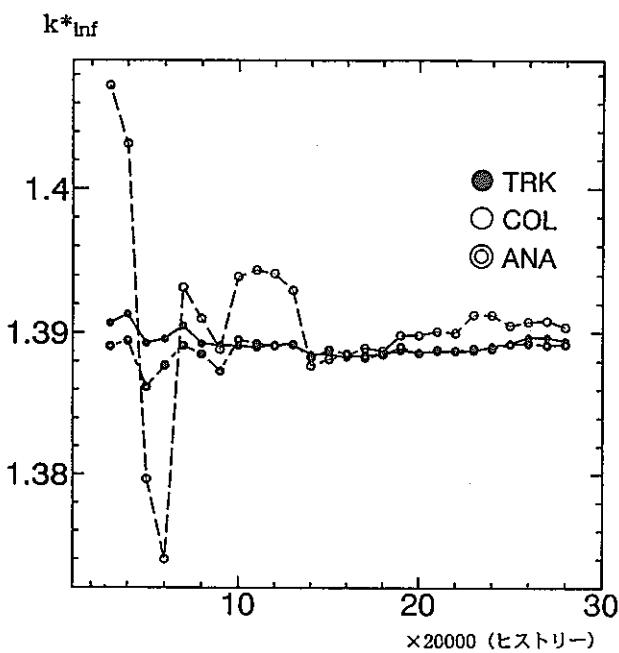


図3-17(a)  $3 \times 3$ 軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(従来手法)による $k^{*}_{\text{inf}}$ の収束状況(その1)

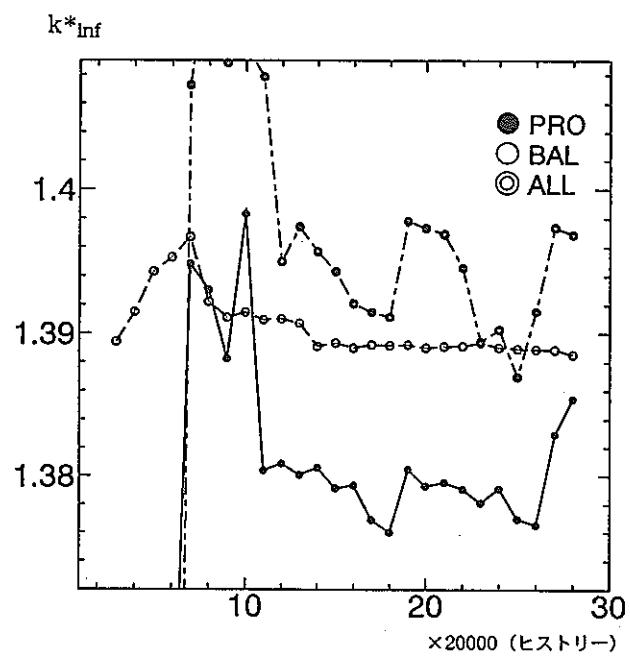


図3-17(b)  $3 \times 3$ 軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(従来手法)による $k^{*}_{\text{inf}}$ の収束状況(その2)

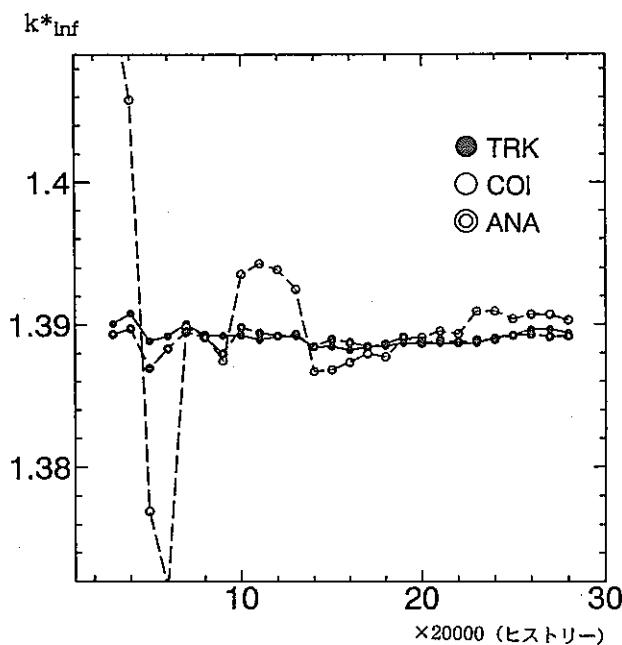


図3-18(a)  $3 \times 3$ 軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(新手法)による $k^{*}_{\text{inf}}$ の収束状況(その1)

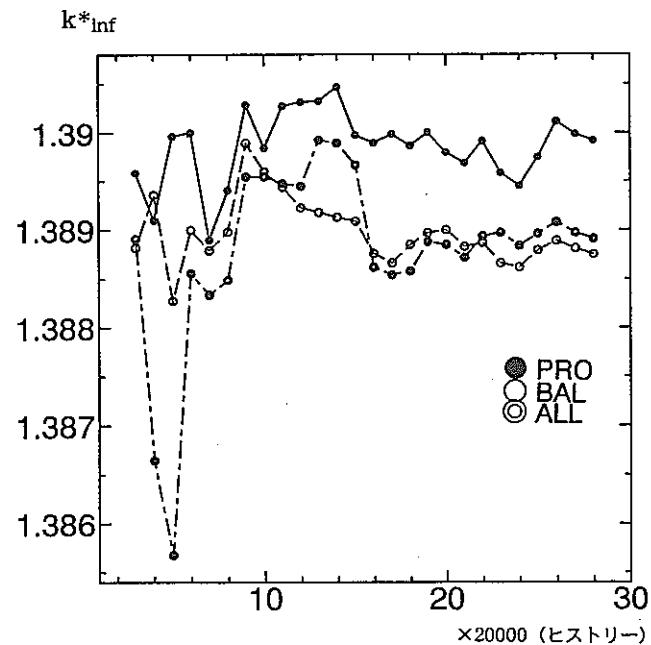


図3-18(b)  $3 \times 3$ 軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(新手法)による $k^{*}_{\text{inf}}$ の収束状況(その2)

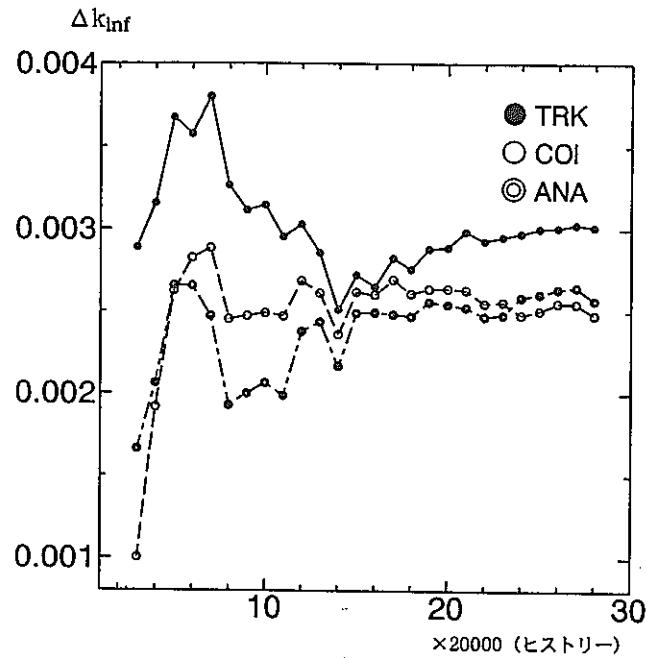


図3-19(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(従来手法)による $\Delta k_{\text{inf}}$ の収束状況(その1)

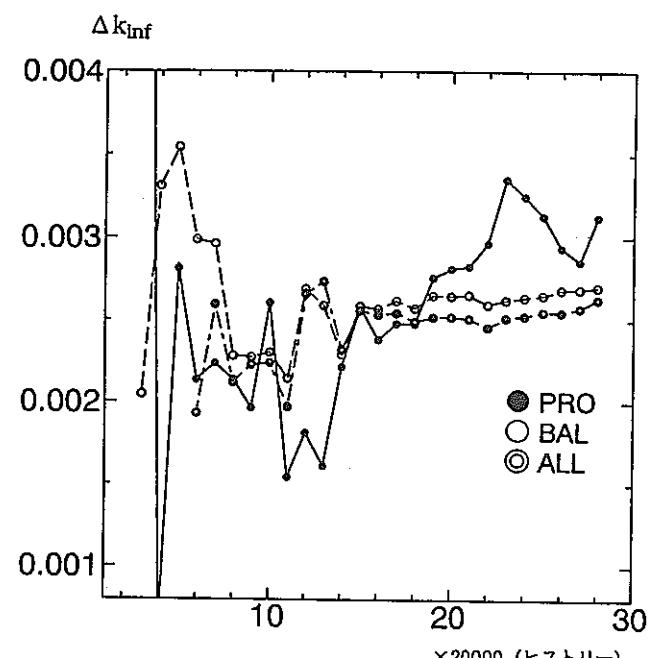


図3-19(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(従来手法)による $\Delta k_{\text{inf}}$ の収束状況(その2)

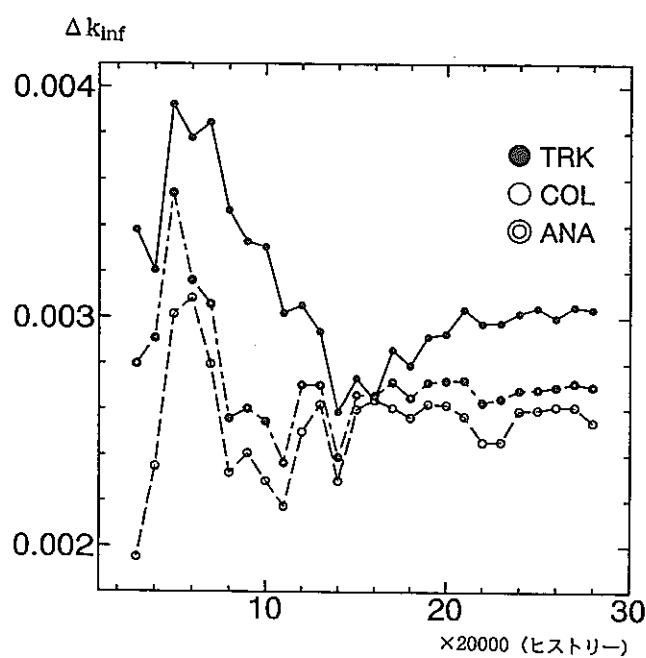


図3-20(a) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(新手法)による $\Delta k_{\text{inf}}$ の収束状況(その1)

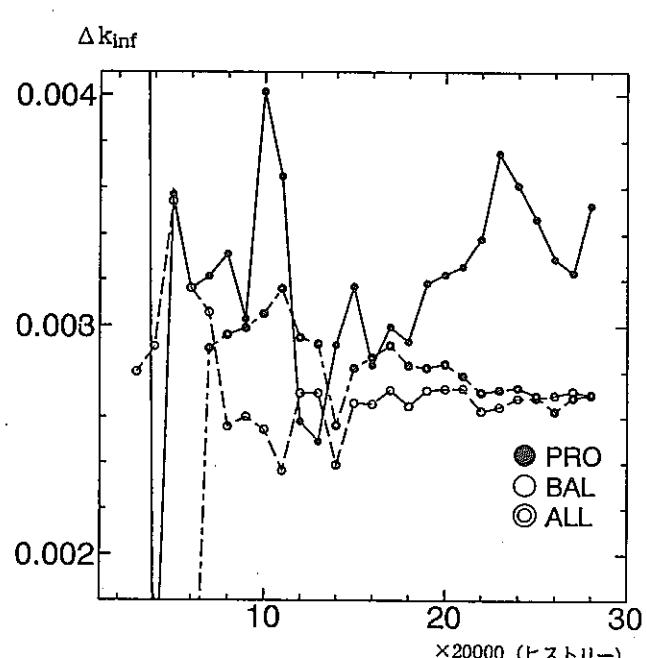


図3-20(b) 3x3軽水炉格子体系(-50%)での摂動モンテカルロ法(新手法)による $\Delta k_{\text{inf}}$ の収束状況(その2)

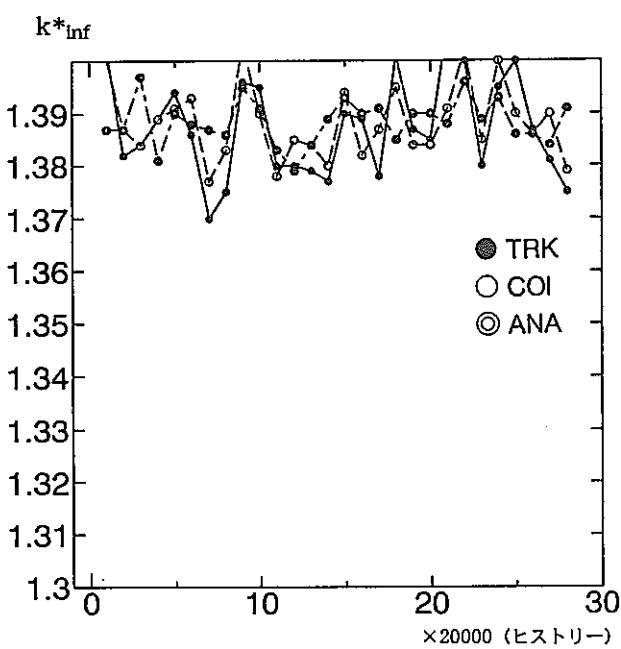


図3-21(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)でのモンテカルロ法による各バッチでの $k^{*}_{\text{inf}}$  (production)

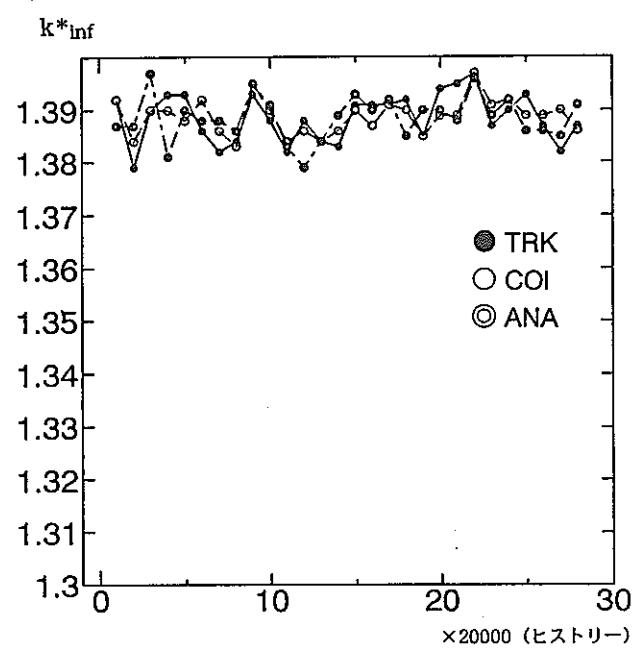


図3-21(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)でのモンテカルロ法による各バッチでの $k^{*}_{\text{inf}}$  (balance)

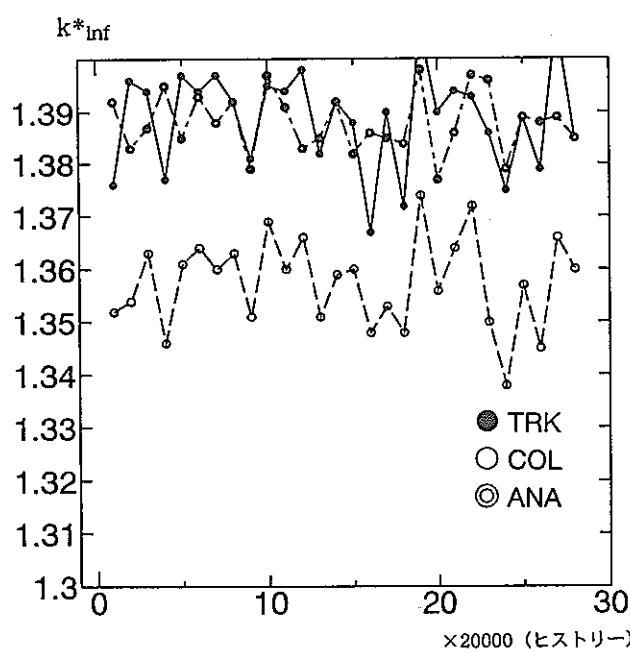


図3-22(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での従来モンテカルロ法(従来手法)による各バッチでの $k^{*}_{\text{inf}}$  (production)

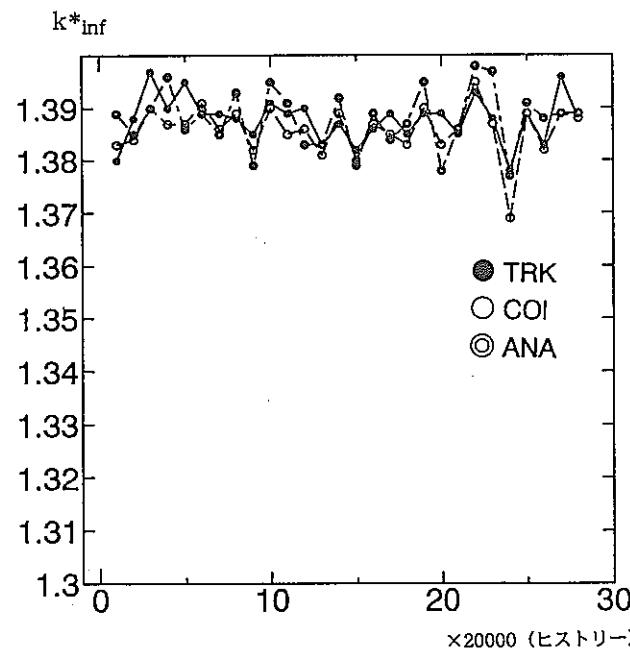


図3-22(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での従来モンテカルロ法(従来手法)による各バッチでの $k^{*}_{\text{inf}}$  (balance)

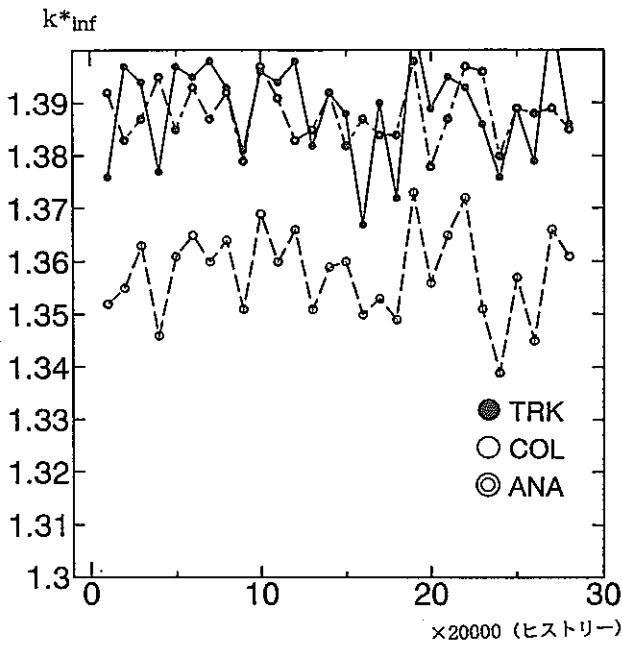


図3-23(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法(新手法)による各バッチでの $k^{\ast}_{\text{inf}}$  (production)

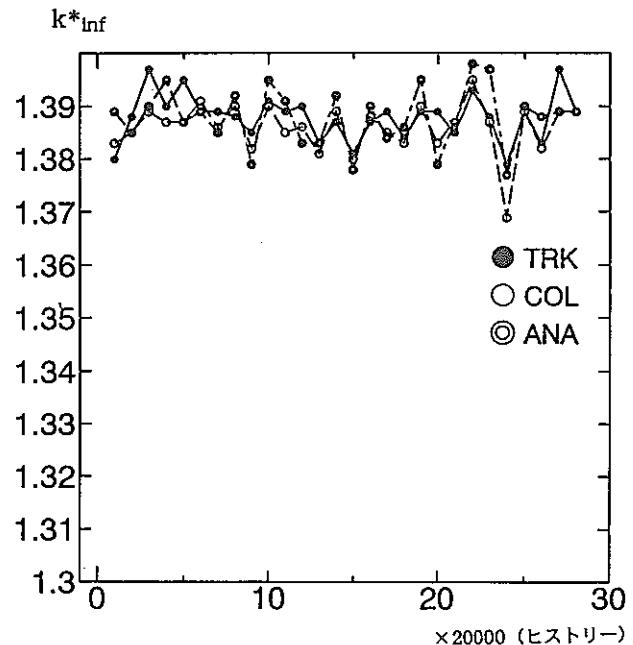


図3-23(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法(新手法)による各バッチでの $k^{\ast}_{\text{inf}}$  (balance)

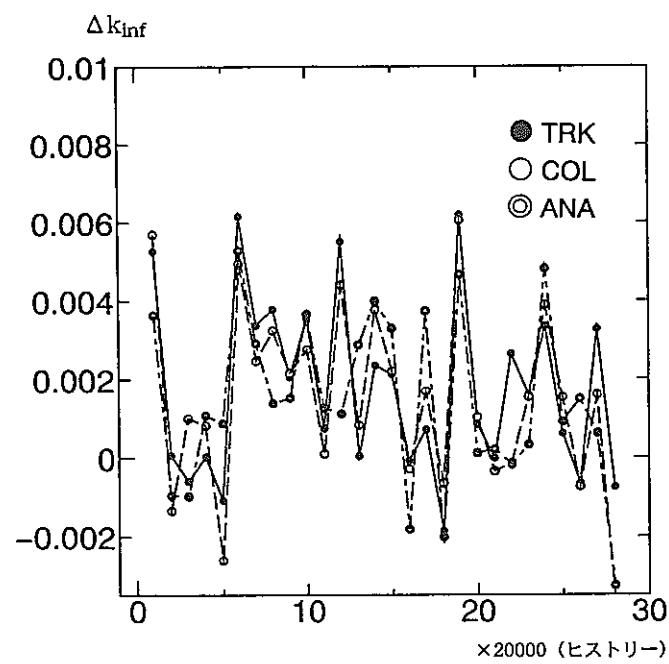


図3-24(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法(従来手法)による各バッチでの $\Delta k_{\text{inf}}$  (production)

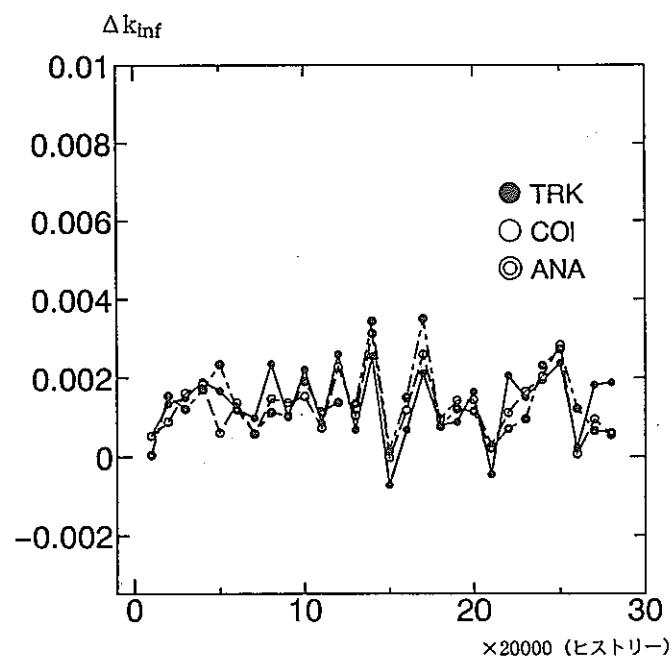


図3-24(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法(従来手法)による各バッチでの $\Delta k_{\text{inf}}$  (balance)

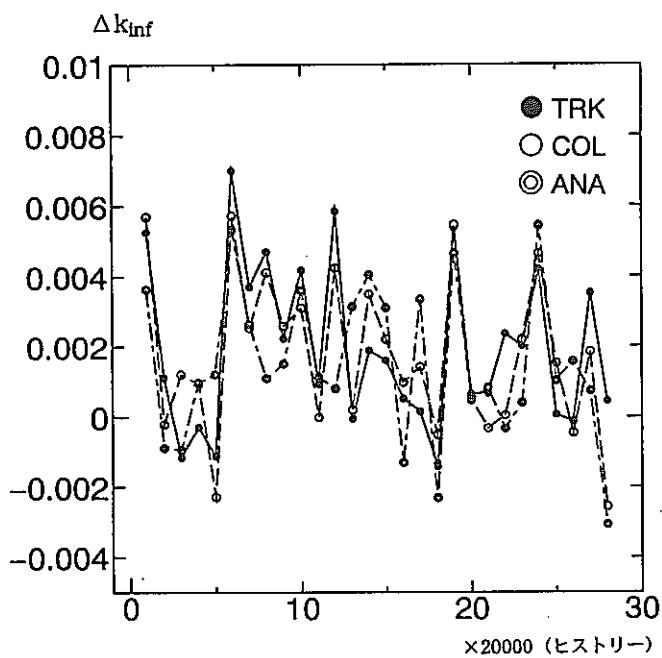


図3-25(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による各パッチでの $\Delta k_{\text{inf}}$  (production)

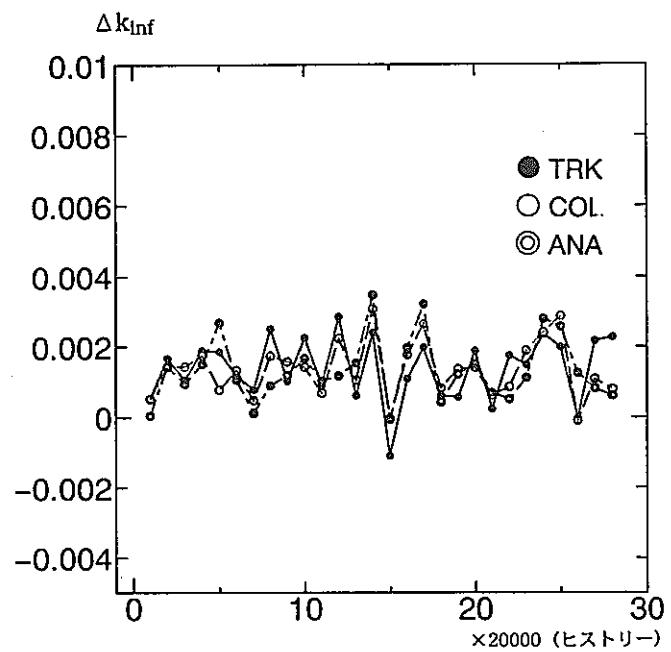


図3-25(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による各パッチでの $\Delta k_{\text{inf}}$  (balance)

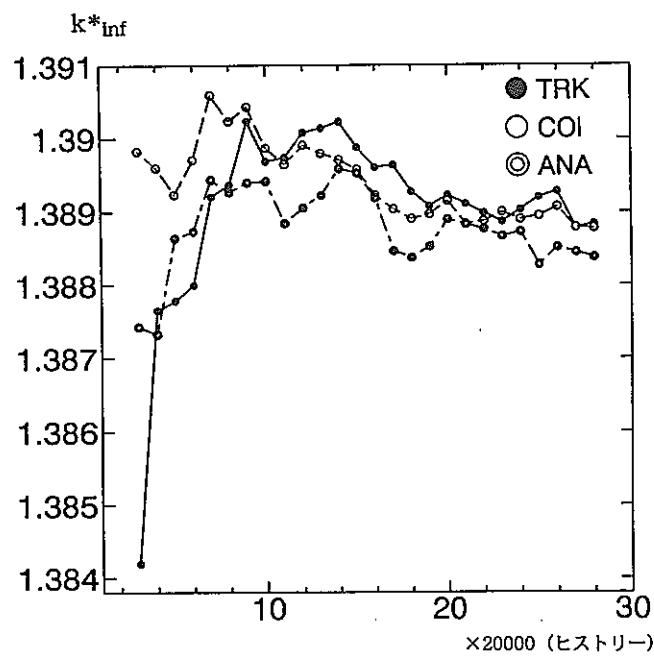


図3-26(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)でのモンテカルロ法による $k^*_{\text{inf}}$ の収束状況（その1）

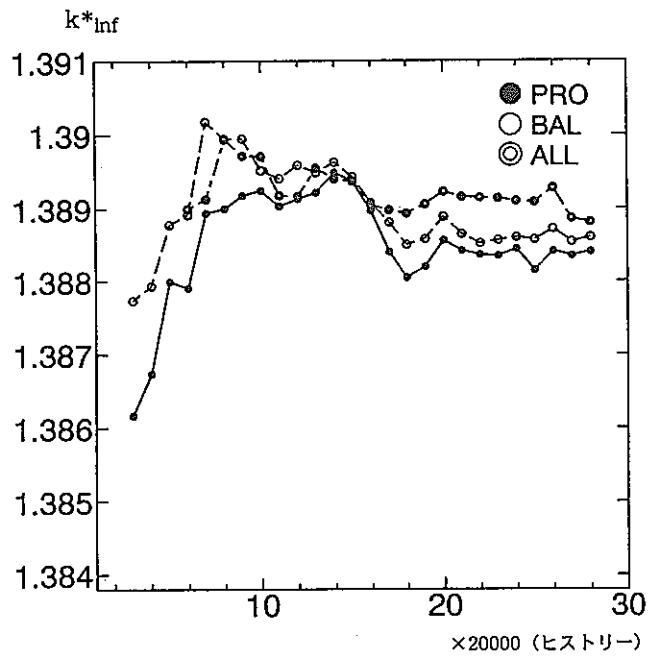


図3-26(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)でのモンテカルロ法による $k^*_{\text{inf}}$ の収束状況（その2）

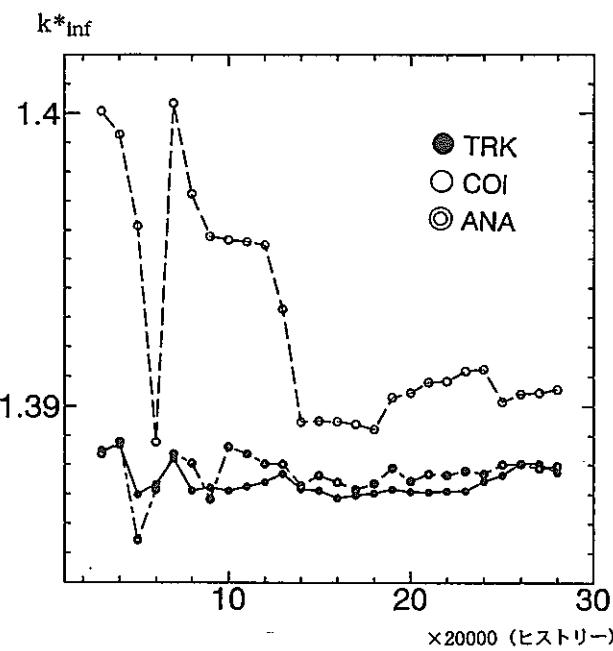


図3-27(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $k^{\ast}_{\text{inf}}$ の収束状況（その1）

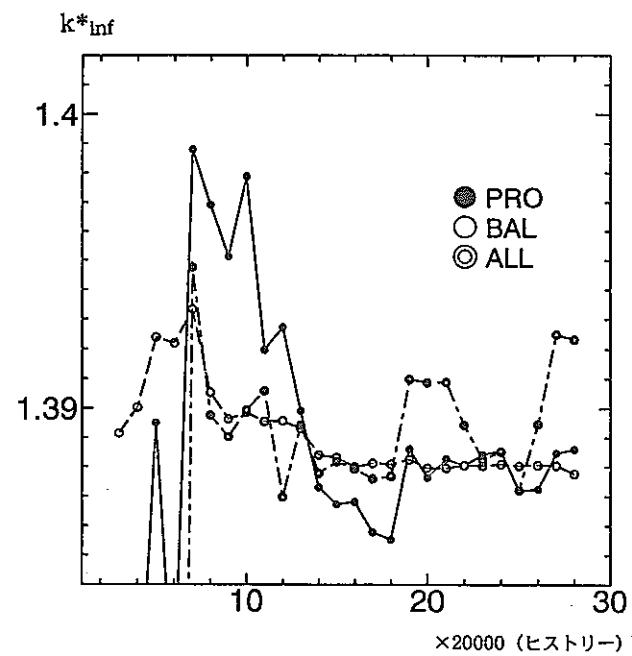


図3-27(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $k^{\ast}_{\text{inf}}$ の収束状況（その2）

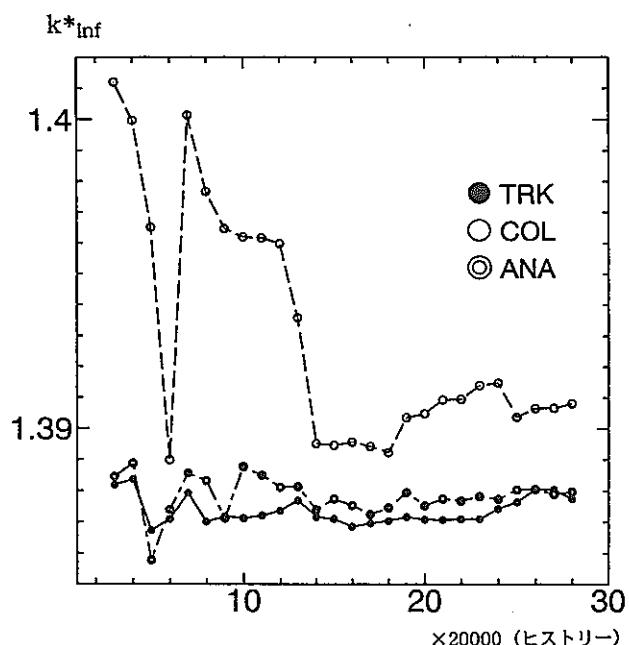


図3-28(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $k^{\ast}_{\text{inf}}$ の収束状況（その1）

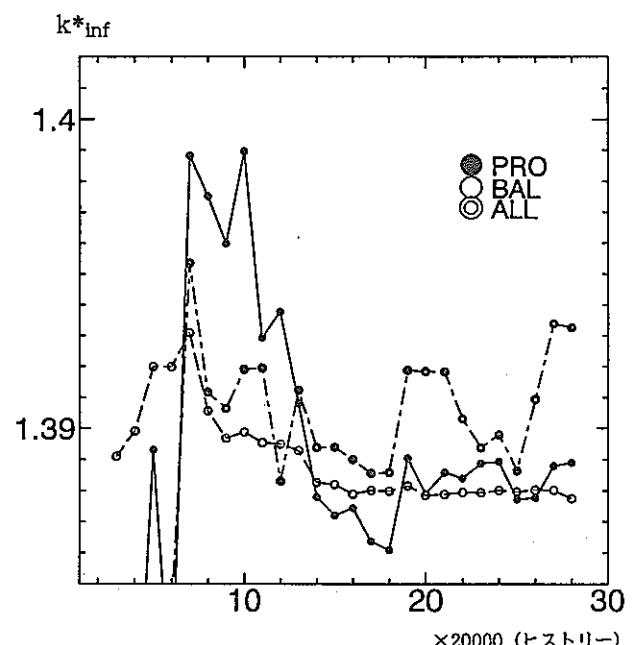


図3-28(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $k^{\ast}_{\text{inf}}$ の収束状況（その2）

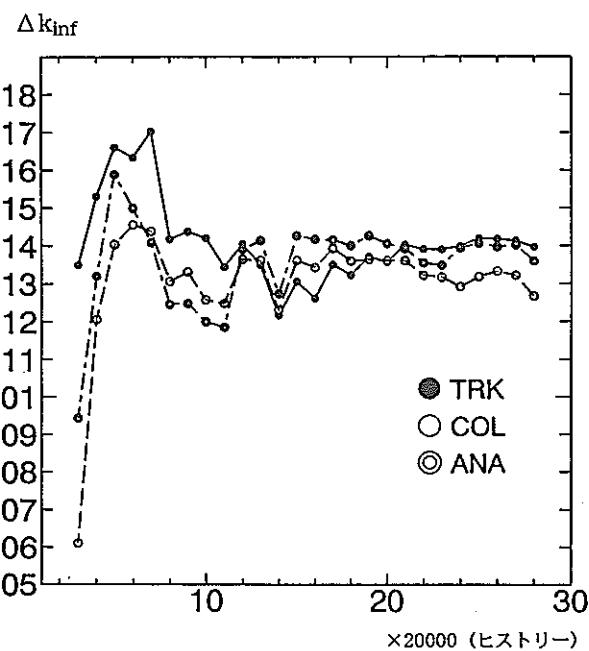


図3-29(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $\Delta k_{\text{inf}}$ の収束状況（その1）

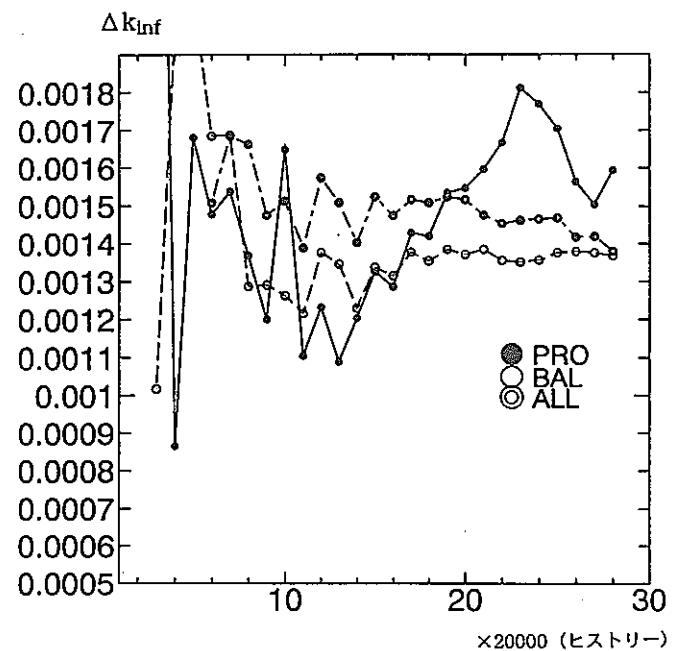


図3-29(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（従来手法）による $\Delta k_{\text{inf}}$ の収束状況（その2）

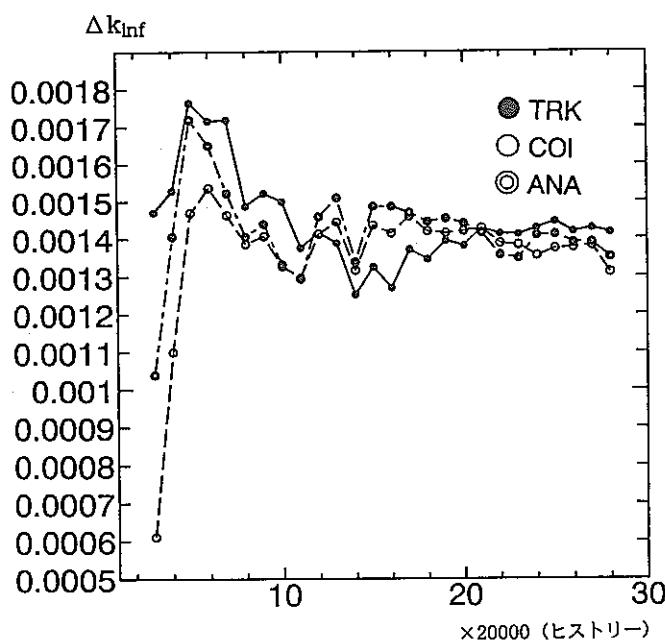


図3-30(a) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $\Delta k_{\text{inf}}$ の収束状況（その1）

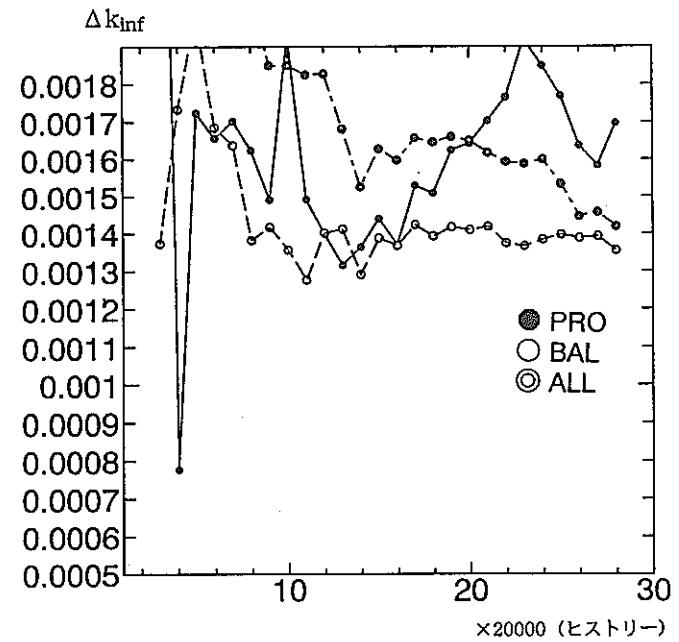


図3-30(b) 3x3軽水炉格子体系(-25%)での摂動モンテカルロ法（新手法）による $\Delta k_{\text{inf}}$ の収束状況（その2）

$k^*_{\text{eff}}$

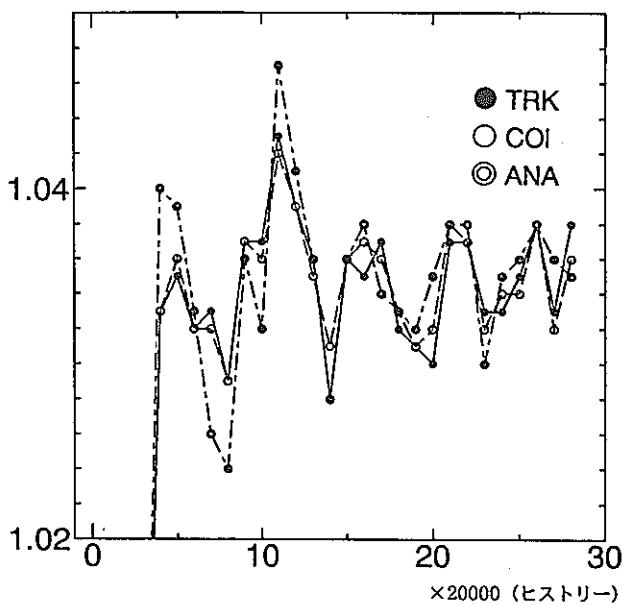


図3-31(a) もんじゅ体系でのモンテカルロ法による各バッチでの $k^*_{\text{eff}}$  (production)

$k^*_{\text{eff}}$

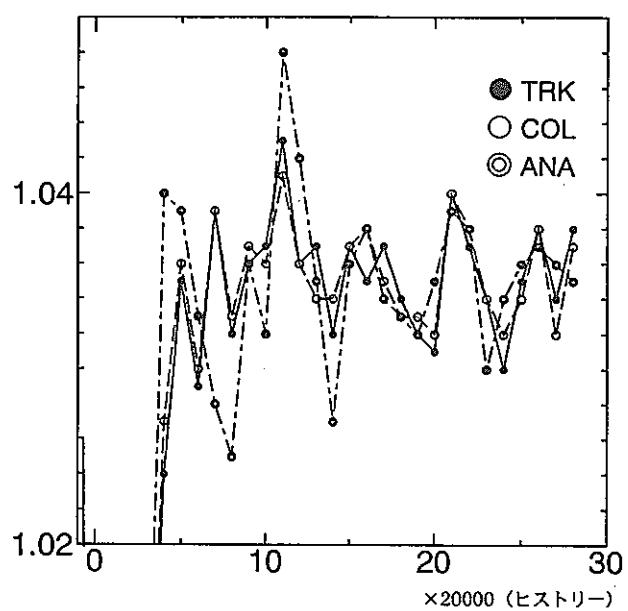


図3-31(b) もんじゅ体系でのモンテカルロ法による各バッチでの $k^*_{\text{eff}}$  (balance)

$k^*_{\text{eff}}$

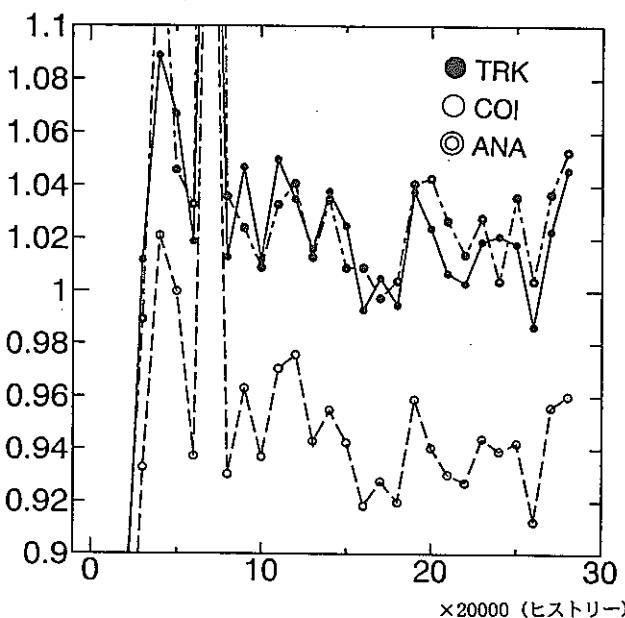


図3-32(a) もんじゅ体系での摂動モンテカルロ法（従来手法）による各バッチでの $k^*_{\text{eff}}$  (production)

$k^*_{\text{eff}}$

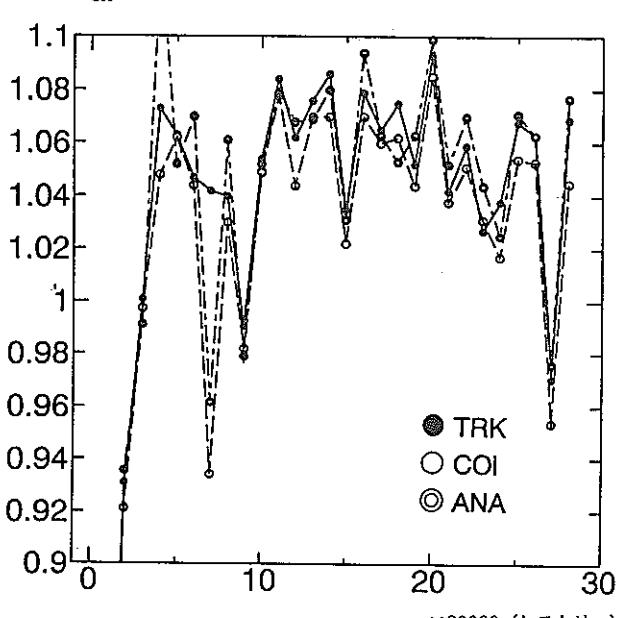


図3-32(b) もんじゅ体系での摂動モンテカルロ法（従来手法）による各バッチでの $k^*_{\text{eff}}$  (balance)

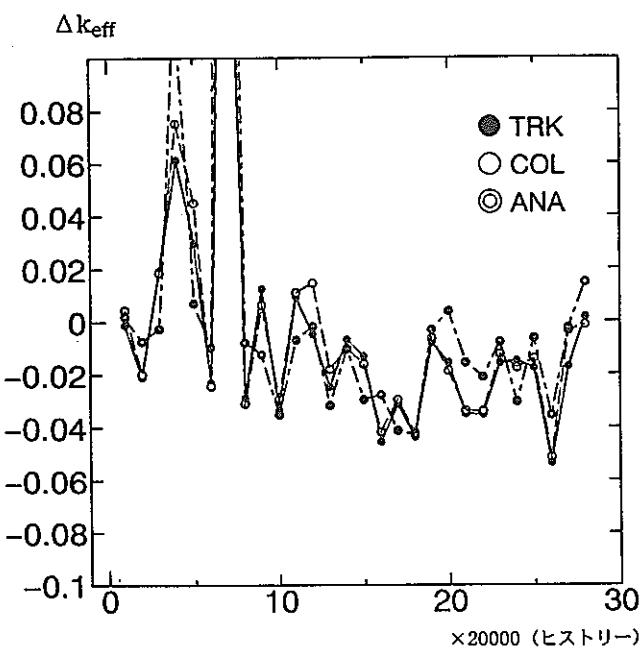


図3-33(a) もんじゅ体系での振動モンテカルロ法（従来手法）による各バッチでの $\Delta k_{\text{eff}}$  (production)

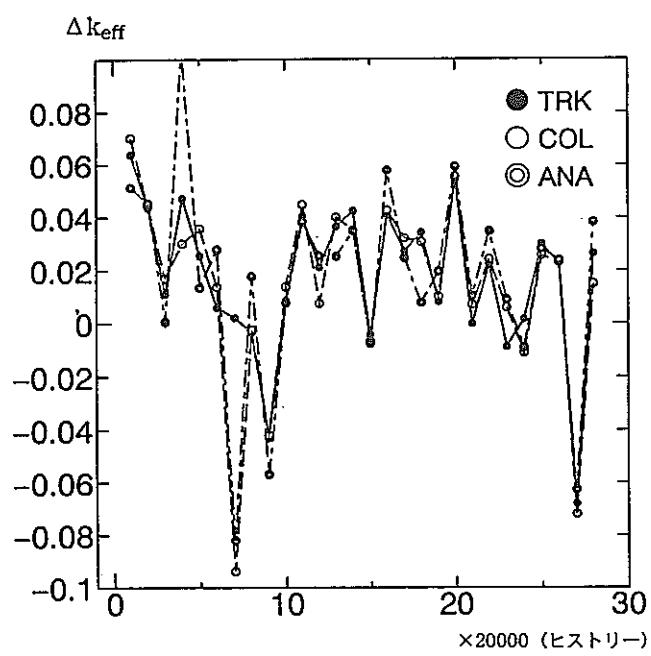


図3-33(b) もんじゅ体系での振動モンテカルロ法（従来手法）による各バッチでの $\Delta k_{\text{eff}}$  (balance)

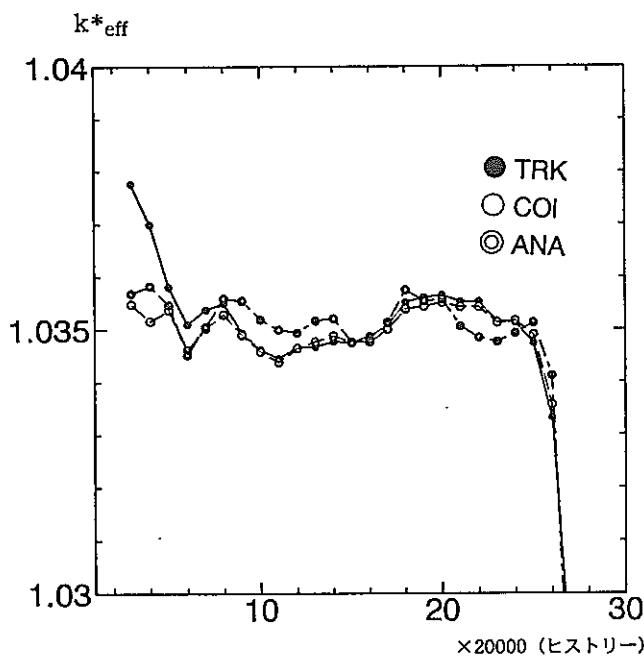


図3-34(a) もんじゅ体系でのモンテカルロ法による $k^*_{\text{eff}}$ の収束状況（その1）

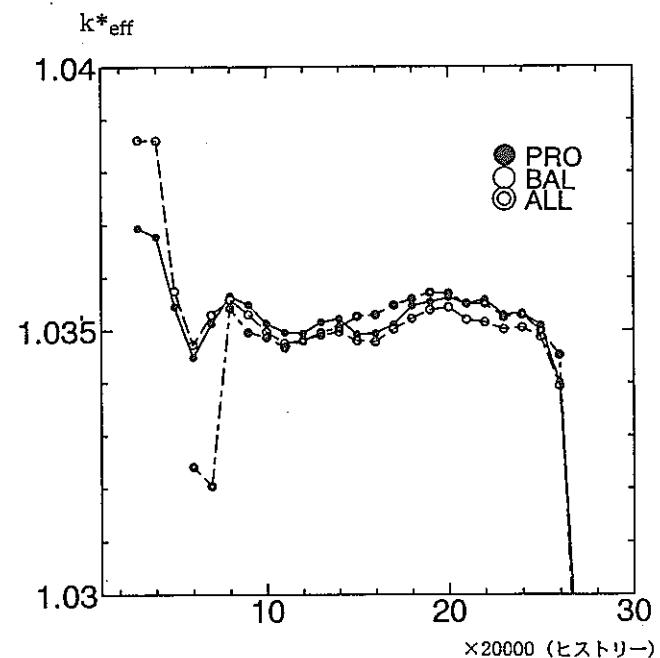


図3-34(b) もんじゅ体系でのモンテカルロ法による $k^*_{\text{eff}}$ の収束状況（その2）

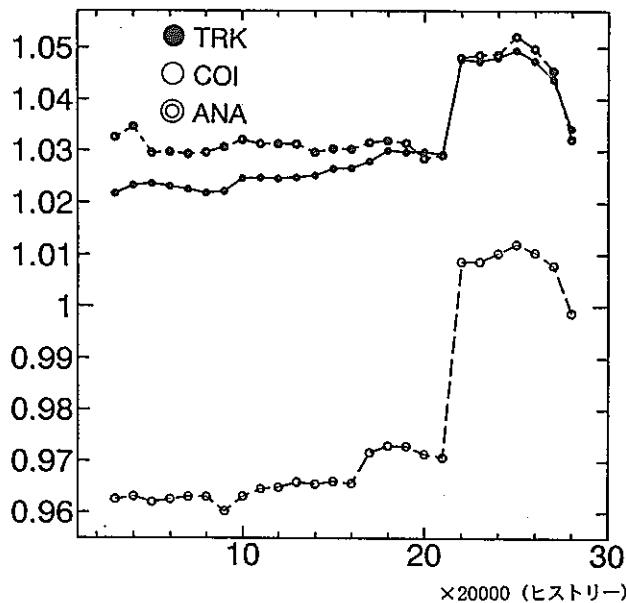
$k^*_{\text{eff}}$ 

図3-35(a) もんじゅ体系での摸動モンテカルロ法（従来手法）による $k^*_{\text{eff}}$ の収束状況（その1）

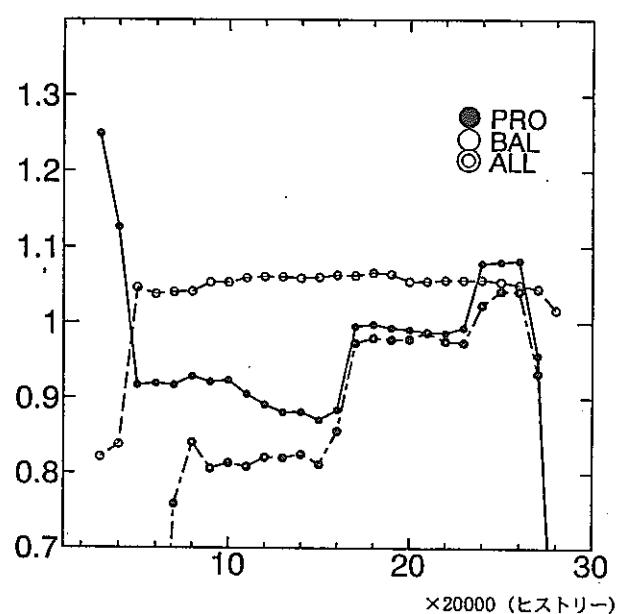
 $k^*_{\text{eff}}$ 

図3-35(b) もんじゅ体系での摸動モンテカルロ法（従来手法）による $k^*_{\text{eff}}$ の収束状況（その2）

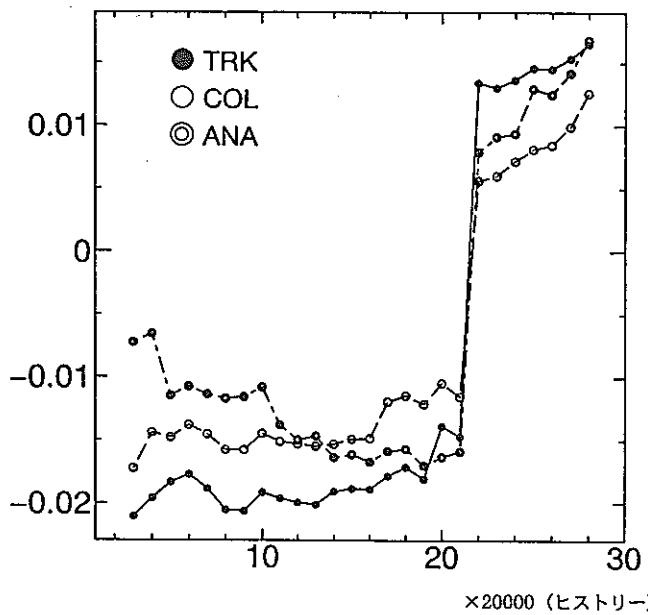
 $\Delta k_{\text{eff}}$ 

図3-36(a) もんじゅ体系での摸動モンテカルロ法（従来手法）による $\Delta k_{\text{eff}}$ の収束状況（その1）

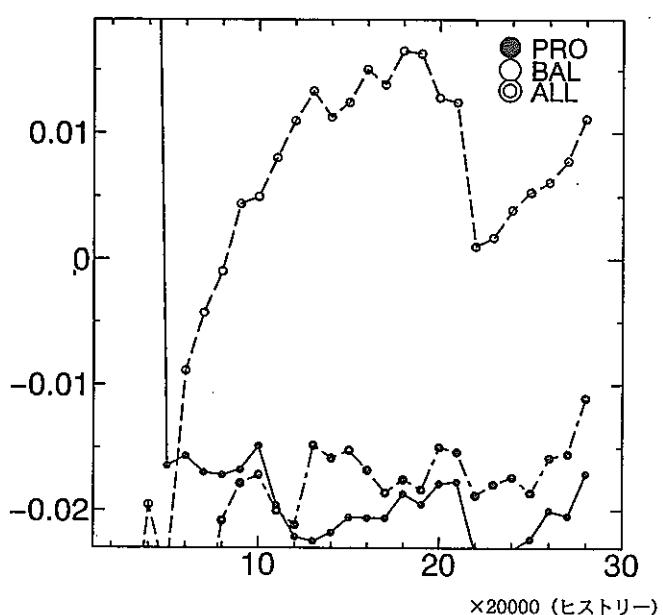
 $\Delta k_{\text{eff}}$ 

図3-36(b) もんじゅ体系での摸動モンテカルロ法（従来手法）による $\Delta k_{\text{eff}}$ の収束状況（その2）

## 第4章 まとめ

今年度では、前年度の報告書で示した摂動モンテカルロ法の理論式の検討と、摂動モンテカルロ法に基づく摂動モンテカルロ計算コードの開発を行った。摂動モンテカルロ法を導入する連続エネルギーモンテカルロコードは、近年非常に使用されることが多くなってきておりMVPコードとした。そこでまずMVPコード内の計算アルゴリズムの確認作業を行い、摂動モンテカルロ法を導入するに際して、変更すべきサブルーチンと追加すべきサブルーチンの検討を計算アルゴリズムの上から検討し、摂動モンテカルロ法に基づく計算アルゴリズムの導入した。現在の所、密度の増減のみを摂動として扱うことが出来る摂動モンテカルロ計算コードとなっている。

次に、摂動モンテカルロ法を導入した計算コードを用いて、種々の体系について試計算を行い、計算コードの有効性について検討を行った。

その結果、計算体系が比較的小さな体系であれば、摂動幅の大小に依らず、概ね妥当な計算結果を得ることが出来ることがわかった。また、計算時間は、摂動モンテカルロ法を用いることにより1～2割程度増加するものの、2回の独立なモンテカルロ計算を行う場合よりはるかに少ない計算時間で、固有値の変化を評価することができる事がわかった。しかしながら、摂動モンテカルロ計算では、依然として収束性の問題が残っている。とりわけ、もんじゅ体系の様な大きな体系では、各バッチで得られる固有値の差が大きく変動し、最終の計算結果もEstimatorによって正負が逆転した値を出力している。さらに、摂動モンテカルロ法としては、昨年の報告書に示した「摂動前後の中性子源分布の変動を考慮しない」従来手法と「摂動前後の中性子源分布の変動を考慮する」新手法の2種類の計算を行ったが、中性子源分布が摂動前後で大きく変化する体系であっても、従来手法と新手法の計算結果の間に有為な違いが見られなかった。

のことから、作成した摂動モンテカルロ計算コード内に、依然としてバグが存在している事も考えられるため、今後さらに、摂動モンテカルロ計算コードだけでなく摂動モンテカルロ法の理論式まで含めて、検討を行っていく予定である。

## 参考文献

- (1) H. Rief, "Generalized Monte Carlo Perturbation Algorithms for Correlated Sampling and A Second-Order Taylor Series Approach", Ann. Nucl. Energy, Vol. 11, No. 9, pp.455–476, 1984.
- (2) H. Rief, E. M. Gelbard, R. W. Schaefer and K. S. Smith, "Review of Monte Carlo Techniques for Analyzing Reactor Perturbations", Nucl. Sci. Eng., 92, pp.289–297, 1986.
- (3) Franz X. Gallmeier, "A New MCNP Option: KCORR – The Use of Correlated Sampling Method to Study Reactivity Effects Due to Changes of a Reactor Arrangement", Nucl. Sci. Eng., 120, pp.102–109, 1995.
- (4) Monte Carlo Particle Transport Methods: Neutron and Photon Calculations, CRC Press.
- (5) 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・光子輸送計算コード", JAERI-Data/Code 94-007.

## 第2部

3次元六角体系用輸送ノード法の改良

## 目次

### 第 1 章 序論

### 第 2 章 理論

2-1 径方向もれの導出

2-2 頂点中性子束の評価手法

### 第 3 章 計算手法、体系

3-1 ベンチマーク体系における計算

3-2 もんじゅ体系における計算

### 第 4 章 計算結果

4-1 ベンチマーク体系における計算結果

4-2 もんじゅ体系における計算結果

4-3 径方向もれの取り扱い手法の差

### 第 5 章 結論

## List of Tables

- 表 1-1 BENCHMARKS 体系での実効増倍率
- 表 1-2-1 BENCHMARKS(case1)体系での各領域の平均中性子束、相対差
- 表 1-2-2 BENCHMARKS(case3)体系での各領域の平均中性子束、相対差
- 表 2-1 「もんじゅ」 体系での実効増倍率
- 表 2-2-1 「もんじゅ」 (制御棒全引き抜き) 体系での各領域の平均中性子束、  
相対差
- 表 2-2-2 「もんじゅ」 (制御棒全挿入) 体系での各領域の平均中性子束、  
相対差
- 表 2-3-1 「もんじゅ」 (制御棒全引き抜き) 体系での各ノード内核分裂反応率  
相対差
- 表 2-3-2 「もんじゅ」 (制御棒全挿入) 体系での各ノード内核分裂反応率  
相対差
- 表 2-4 「もんじゅ」 (制御棒全挿入) 体系での各ノード内吸收反応率  
相対差
- 表 2-5 「もんじゅ」 (制御棒全挿入) 炉心内軸方向無限体系での R13 の  
中性子束 [手法 1] [手法 5]

## List of Figures

- 図 1 六角-Z 体系の座標系
- 図 2 径径もれの取り扱い手法
- 図 3-1 検証体系領域図 (KNK-II、径方向炉心中央)
- 図 3-2 検証体系領域図 (KNK-II、軸方向)
- 図 4 もんじゅ R-Z 体系図 (軸方向、簡略化)
- 図 5-1 もんじゅ径方向断面図
- 図 5-2 もんじゅ軸方向断面図

# 1章 序論

高速炉では炉心内のスペクトルが硬く、集合体間の干渉効果がおおきくなり輸送効果が生じる。また、燃料集合体は六角形であるため六角-Zあるいは三角-Z体系での計算が必要になる。しかし、集合体の対辺距離が、例えば実機のもんじゅ体系で 11.56cm と大きいため、有限差分法では空間メッシュ効果が大きく、正確な精度の計算をするには集合体内をさらに詳細なメッシュに区切る必要がある。しかし計算時間等もそれにしたがって膨大になってしまう。そのような背景から、高速炉用の六角-Z 体系に近代輸送ノード法を適用し、「NSHEX」コードが開発された。NSHEX コードではノード境界面の角度依存性を Sn 法で考慮するなどの改良が加えられた。六角-Z 体系でのノード法では、3 つの横方向もれを取り扱っており、ノード内の中性子束分布を正確に求めるためには、その横方向もれ分布を精度よく評価する必要がある。中性子の径方向分布計算時における軸方向もれは、対象とするノード、及び隣接する 2 つのノードをパラメータとして二次の多項式で近似されている。径方向計算時における軸方向もれは、実機の高速炉炉心体系等のように径方向の非均質性が強いため、隣接ノード間との相関によって二次の多項式で近似するよりも、対象ノードの情報を用いた中性子内挿法をもちいることで横方向もれを評価している。3 つ目の横方向もれとして、中性子径方向分布計算時における径方向もれの取り扱いをする必要がある。この径方向もれは隣接ノードおよびノード中心で不連続性をしめし、他の 2 つの横方向もれのように二次の多項式で表わすことはできない。よってノード境界面の平均中性子束、及びノード内の平均中性子束を用いて、そのノード境界からの横方向もれ分布を評価している。

第 2 章ではこの径方向もれを解析的な導出法及び、その取り扱い手法について述べる。第 3 章では、第 2 章で考案されたいいくつかの取り扱い手法についての検証計算をおこない、参照解として用いた多群エネルギーモンテカルロ法と比較検討を行う。

## 2 章 理論

### 2-1 径方向もれの導出

Sn 法による輸送ノード法では、ノード内中性子束、ノード境界中性子束の角度分布をともに Sn 法を用いて考慮している。3 次元輸送方程式において、注目する方向以外の成分を横方向積分をおこなうことにより 1 次元の輸送方程式を導き、ノード間の結合式を得る。またノード内の中性子束分布、中性子源分布は二次の多項式展開を用いて評価している。

Sn 法を用いた 3 次元輸送方程式より

$$\vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi^{g,m}(x, y, z) + \Sigma_t^g \psi^{g,m}(x, y, z) = \Sigma_s^{g \rightarrow g} \phi^{g,m}(x, y, z) + Q^g(x, y, z)$$
$$Q^g(x, y, z) = \sum_{g'} \left[ \Sigma_s^{g' \rightarrow g} - \delta_{g', g} \Sigma_s^{g' \rightarrow g} + \frac{\chi^{g'}}{k_{eff}} v \Sigma_f^{g'} \right] \phi^{g', m}(x, y, z)$$

ここで

$\Omega^m$  : 角度中性子束の方向ベクトル

$\psi^{g,m}(x, y, z)$  : g 群の角度中性子束

$\Sigma_s^g$  : g 群の全断面積

$\Sigma_s^{g \rightarrow g'}$  :  $g \rightarrow g'$  群への散乱断面積

$\phi^{g,m}(x, y, z)$  : g 群のスカラー中性子束

$Q^g(x, y, z)$  : g 群中性子源

$k_{eff}$  : 実効増倍率

$\chi$  : 核分裂スペクトル

六角-Z の座標系を図 1 に示す。この輸送方程式を横方向積分を行い、x 方向の 1 次元ノード輸送方程式を得る。

$$\frac{\mu}{h_r} \frac{d}{dx} \{ y_s(x) \psi^{g,m}(x) \} + \Sigma_t^g y_s(x) \psi^{g,m}(x) =$$
$$y_s(x) \{ \Sigma_s^g \phi^{g,m}(x, y, z) + Q^g(x, y, z) \} - \{ L_r^{r,g,m}(x) + y_s(x) L_r^{z,g,m}(x) \}$$

ここで

$$\psi^{g,m}(x) = \frac{\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} dz \int_{-y_s(x)}^{y_s(x)} dy \psi^{g,m}(x,y,z)}{\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} dz \int_{-y_s(x)}^{y_s(x)} dy}$$

とする。

この微分方程式を解くことでノード内の1次元中性子束分布を得ることができる。

$\mu_v^m \geq 0$  の時

$$y_s(x) \psi^{g,m}(x) = \frac{hr}{\mu} \int_{-\frac{1}{2}}^x dz \int_{-y_s(x)}^{y_s(x)} dx \exp[-\frac{\Sigma t h r}{\mu} (x-x)] \{ y_s(x) \cdot S(x) - L_r^{g,m}(x) \} \\ + \frac{1}{2\sqrt{3}} \exp[-\frac{\Sigma t h r}{\mu} (\frac{1}{2}-x)] \psi_{x+,in}^{g,m}$$

$$L_r^{g,m}(x) = L_r^{r,g,m}(x) + y_s(x) L_r^{z,g,m}(x)$$

$L_r^{r,g,m}(x)$  は  $x$  方向以外の径方向、すなわち  $u$ 、 $v$  方向の成分に対するノードからの横方向もれである。

$L_r^{z,g,m}(x)$  は、軸方向、すなわち  $z$  方向の成分に対するノードからの横方向もれを示している。

この時径方向もれは次式のように表される。

$$L_r^{r,g,m}(x) = \frac{1}{\sqrt{3} hr} \{ \mu_v^m \psi_{v+}^m(x) - \mu_u^m \psi_{u-}^m(x) \} \quad (-\frac{1}{2} \leq x \leq 0) \\ L_r^{r,g,m}(x) = \frac{1}{\sqrt{3} hr} \{ \mu_u^m \psi_{u+}^m(x) - \mu_v^m \psi_{v-}^m(x) \} \quad (0 \leq x \leq \frac{1}{2})$$

ここで  $\mu_u^m$ 、 $\mu_v^m$  はそれぞれ  $u$ 、 $v$  軸への方向余弦である。

$\psi_s^m(x) \{ s \in \pm u, \pm v \}$  は各ノード境界面での、横方向積分により  $y$ 、 $z$  方向に平均化された1次元 ( $x$  方向) 中性子束分布である。

よってノード境界面  $S$  での中性子束分布をもとめることで、径方向もれを評価することができる。2次の展開関数系を用いて次式のように表す。

$$\psi_s^m(x) = \psi_{s+,0}^m + \psi_{s+,1}^m(x - \frac{1}{4}) + \psi_{s+,2}^m(x^2 - \frac{1}{2}x + \frac{1}{24}) \quad (0 \leq x \leq \frac{1}{2})$$

$$\psi_s^m(x) = \psi_{s+,0}^m + \psi_{s+,1}^m(x + \frac{1}{4}) + \psi_{s+,2}^m(x^2 - \frac{1}{2}x - \frac{1}{24}) \quad (-\frac{1}{2} \leq x \leq 0)$$

この時3つの中性子束モーメントを得るために、ノード境界面Sの平均中性子束、及びSの両端に位置する2つの頂点中性子束の合計3つのパラメータを用いる。ノード境界面の平均中性子束は解析的に算出が可能であるが、頂点中性子束は算出することができず、何らかの近似によって評価する必要がある。

## 2-2 頂点中性子束の評価手法

2-1で述べたように、径方向スイープ時における各径方向のノード境界面からの横方向もれ（以後径径もれ）の分布を得るために、各ノード頂点の中性子束を何らかの手法で近似的に評価する必要がある。以下にその手法を挙げる。

手法1、2は従来法であり、手法3、4、5は今回新しく考案された手法である。

### i) 手法1

図2において点線矢印はノード内平均、またはノード境界平均の角度中性子束を表わし、太矢印はノード頂点の角度中性子束を示している。図より、頂点Aの角度中性子束を求める場合、頂点Aの角度中性子束に対して図のような方向に中性子が飛行しているとすると、x-面の境界中性子束がもっとも寄与が大きいと考えられる。よって次式で近似する。

$$\psi_A^m = \overline{\psi_{u+}^m}, \quad \psi_B^m = \overline{\psi_{x-}^m}$$

### ii) 手法2

同様に図において、頂点Aの角度中性子束に対して周囲の3つのノードが同程度に寄与をもっているとし、3つの平均中性子束の平均が頂点Aの中性子束と等しいとした手法。中性子の飛行方向は考慮せず、どの方向に対しても同様に次式を用いる。

$$\psi_A^m = \frac{\overline{\psi_{x-}^m} + \overline{\psi_{u+}^m} + \overline{\psi_{v+}^m}}{3}, \quad \psi_B^m = \frac{\overline{\psi_{x+}^m} + \overline{\psi_{u+}^m} + \overline{\psi_{v-}^m}}{3}$$

### iii) 手法3

手法1、2では頂点Aの周囲の1つ、または3つのノード境界中性子束を用いて評価した。新手法では、頂点A及びBの近傍の中性子束分布をx, yの二次式で fitting し、頂点中性子束を評価する。図2よりノード $\alpha$ 、 $\beta$ の平均中性子束、及びx-、v+、u+、x+、v-面の境界平均中性子の計7つのパラメータを用いて、次式で表わされる2次式の6つの係数を求める。

$$\psi^m(x, y) = \psi_{00}^m + \psi_{10}^m x + \psi_{20}^m x^2 + \psi_{01}^m y + \psi_{02}^m y^2 + \psi_{11}^m x y$$

7つのパラメータを6つの係数で表わすと

$$\begin{pmatrix} \psi_{u+}^m \\ \psi_{v+}^m \\ \psi_{v+}^m \\ \psi_{x+}^m \\ \psi_{v-}^m \\ \psi_{\alpha}^m \\ \psi_{\beta}^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{3\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & \frac{\sqrt{3}}{18} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{3\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & -\frac{\sqrt{3}}{18} \\ 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{36} & \frac{3\sqrt{3}}{4} \\ 1 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{7}{9} & 0 \\ 1 & \frac{3}{4} & \frac{7}{12} & \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & \frac{7\sqrt{3}}{36} \\ 1 & 0 & \frac{5}{72} & 0 & \frac{5}{72} & 0 \\ 1 & \frac{1}{12} & \frac{23}{72} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{59}{72} & \frac{\sqrt{3}}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{00}^m \\ \psi_{10}^m \\ \psi_{20}^m \\ \psi_{01}^m \\ \psi_{02}^m \\ \psi_{11}^m \end{pmatrix}$$

7つのパラメータより6つの係数を、最小二乗法を用いて評価する。

$$\begin{pmatrix} \psi_00^m \\ \psi_10^m \\ \psi_20^m \\ \psi_{01}^m \\ \psi_{02}^m \\ \psi_{11}^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{65}{129} & \frac{9}{129} & \frac{9}{129} & -\frac{34}{129} & -\frac{34}{129} & \frac{100}{129} & \frac{14}{129} \\ \frac{810}{129} & -\frac{943}{129} & \frac{863}{129} & \frac{433}{129} & -\frac{83}{129} & -\frac{755}{129} & -\frac{325}{129} \\ \frac{645}{900} & \frac{645}{900} & \frac{645}{900} & \frac{645}{900} & \frac{645}{900} & \frac{645}{900} & \frac{645}{900} \\ -\frac{900}{215} & \frac{441}{215} & \frac{54}{215} & \frac{54}{215} & \frac{441}{215} & \frac{45}{215} & \frac{45}{215} \\ \frac{215}{810} & \frac{215}{810} & \frac{215}{810} & \frac{215}{810} & \frac{215}{810} & \frac{215}{810} & \frac{215}{810} \\ \frac{810}{215} & \frac{261}{215} & -\frac{341}{215} & \frac{89}{215} & \frac{261}{215} & -\frac{755}{215} & -\frac{325}{215} \\ \frac{215\sqrt{3}}{660} & \frac{215\sqrt{3}}{660} & \frac{215\sqrt{3}}{660} & \frac{215\sqrt{3}}{660} & \frac{215\sqrt{3}}{660} & \frac{215\sqrt{3}}{660} & \frac{215\sqrt{3}}{660} \\ -\frac{660}{215} & -\frac{141}{215} & \frac{246}{215} & \frac{246}{215} & -\frac{141}{215} & \frac{225}{215} & \frac{225}{215} \\ \frac{240\sqrt{3}}{215} & -\frac{66\sqrt{3}}{215} & -\frac{324\sqrt{3}}{215} & -\frac{324\sqrt{3}}{215} & -\frac{66\sqrt{3}}{215} & \frac{270\sqrt{3}}{215} & \frac{270\sqrt{3}}{215} \\ 215 & 215 & 215 & 215 & 215 & 215 & 215 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{u+}^m \\ \psi_{v+}^m \\ \psi_{x+}^m \\ \psi_{v-}^m \\ \psi_{x-}^m \\ \psi_{\alpha}^m \\ \psi_{\beta}^m \end{pmatrix}$$

上式より 6 つの係数は、7 つのパラメータにより表わされている。これを基の式に代入して、(x,y) に頂点 A( $1/2, 1/2\sqrt{3}$ )、頂点 B( $0, 1/\sqrt{3}$ ) を代入し頂点中性子束を 7 つのパラメータで評価すると次式のようになる。

$$\begin{aligned} \psi_A^m &= \frac{(95\psi_{u+}^m + 33\psi_{x+}^m + 33\psi_{v-}^m - 10\psi_{v+}^m - 10\psi_{x-}^m - 6\psi_{\alpha}^m - 6\psi_{\beta}^m)}{129} \\ \psi_B^m &= \frac{(95\psi_{u+}^m - 10\psi_{x+}^m - 10\psi_{v-}^m + 33\psi_{v+}^m + 33\psi_{x-}^m - 6\psi_{\alpha}^m - 6\psi_{\beta}^m)}{129} \end{aligned}$$

#### iv) 手法 4

手法 3 では 6 つの係数を求めるのに 7 つのパラメータを用い、最小二乗法をにより計算を行った。頂点 A (または B) を算出する際選ぶパラメータは、中性子の飛行方向に関係なく同じであった。手法 4 では中性子の飛行方向を考慮し、6 つのパラメータを選択的に用いる手法である。いま図 2 のような方向に中性子が飛行している時、ノード  $\beta$  はノード  $\alpha$  より頂点 A に対して寄与が大きいと考えらる。よってノード  $\beta$  の平均中性子束、及び x-、v+、u+、x+、v- 面の境界平均中性子の計 6 つのパラメータを用いる。手法 3 と同様に以下の式が成立する。

$$\begin{pmatrix} \psi^m_{u+} \\ \psi^m_m \\ \psi^m_{v+} \\ \psi^m_{v-} \\ \psi^m_{x+} \\ \psi^m_{x-} \\ \psi^m_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{3\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & \frac{\sqrt{3}}{18} \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{3\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & -\frac{\sqrt{3}}{18} \\ 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{36} & \frac{3\sqrt{3}}{4} \\ 1 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{7}{9} & 0 \\ 1 & \frac{3}{4} & \frac{7}{12} & \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & \frac{7\sqrt{3}}{36} \\ 1 & \frac{1}{12} & \frac{23}{72} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{59}{72} & \frac{3\sqrt{3}}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi^m_{00} \\ \psi^m_{10} \\ \psi^m_{20} \\ \psi^m_{01} \\ \psi^m_{02} \\ \psi^m_{11} \end{pmatrix}$$

以上の式より逆行列を計算し、6つの係数を得る。

$$\begin{pmatrix} \psi^m_{00} \\ \psi^m_{10} \\ \psi^m_{20} \\ \psi^m_{01} \\ \psi^m_{02} \\ \psi^m_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{65}{129} & \frac{109}{129} & \frac{109}{129} & -\frac{134}{129} & -\frac{134}{129} & -\frac{38}{43} \\ \frac{54}{54} & -\frac{566}{215} & \frac{36}{215} & \frac{396}{215} & \frac{214}{215} & -\frac{72}{215} \\ \frac{43}{43} & \frac{215}{396} & \frac{215}{9} & \frac{215}{99} & \frac{215}{486} & -\frac{18}{43} \\ -\frac{180}{43} & \frac{396}{215} & \frac{215}{215} & \frac{215}{215} & \frac{215}{215} & -\frac{43}{43} \\ \frac{54\sqrt{3}}{43} & -\frac{494\sqrt{3}}{645} & -\frac{1096\sqrt{3}}{645} & \frac{844\sqrt{3}}{645} & \frac{1016\sqrt{3}}{645} & -\frac{72\sqrt{3}}{43} \\ \frac{43}{43} & \frac{645}{84} & \frac{645}{471} & \frac{645}{21} & \frac{645}{366} & \frac{43}{90} \\ -\frac{132}{43} & \frac{84}{215} & \frac{215}{215} & \frac{215}{215} & \frac{215}{215} & \frac{43}{43} \\ \frac{48\sqrt{3}}{43} & \frac{204\sqrt{3}}{215} & -\frac{54\sqrt{3}}{215} & -\frac{594\sqrt{3}}{215} & -\frac{336\sqrt{3}}{215} & \frac{108\sqrt{3}}{43} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi^m_{u+} \\ \psi^m_m \\ \psi^m_{v+} \\ \psi^m_{v-} \\ \psi^m_{x+} \\ \psi^m_{x-} \\ \psi^m_\beta \end{pmatrix}$$

得られた式に頂点 A( $1/2, 1/2\sqrt{3}$ )、頂点 B ( $0, 1/\sqrt{3}$ ) を代入し頂点中性子束を得る。

$$\begin{aligned} \psi_A^m &= \frac{(95\psi_{u+}^m - 16\psi_{x+}^m - 4\psi_{v-}^m + 27\psi_{v+}^m + 39\psi_{x-}^m - 12\psi_\beta^m)}{129} \\ \psi_B^m &= \frac{(95\psi_{u+}^m + 27\psi_{x+}^m + 39\psi_{v-}^m - 16\psi_{v+}^m - 4\psi_{x-}^m - 12\psi_\beta^m)}{129} \end{aligned}$$

### v) 手法 5

手法3、4はノード頂点中性子束を求めるにあたり、計算しているノード以外のノードの平均中性子束もパラメータの1つとして用いてきた。手法5では、注目しているノードからの横方向もれを評価する際、その周囲のノードをパラメータとして用い、計算しようとするノード内の平均中性子束、及びそのノードの6つの境界面の計7つのパラメータを用い6つの係数を求めようとする

手法である。手法3と同様に最小二乗法をもちいて評価する。

$$\begin{pmatrix} \psi_{x+}^m \\ \psi_{x-}^m \\ \psi_{u+}^m \\ \psi_{u-}^m \\ \psi_{v+}^m \\ \psi_{v-}^m \\ \psi_{\alpha}^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{36} & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{36} & 0 \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & \frac{\sqrt{3}}{18} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & \frac{\sqrt{3}}{18} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & -\frac{\sqrt{3}}{18} \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & -\frac{\sqrt{3}}{18} \\ 1 & 0 & \frac{5}{72} & 0 & \frac{5}{72} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{00}^m \\ \psi_{10}^m \\ \psi_{20}^m \\ \psi_{01}^m \\ \psi_{02}^m \\ \psi_{11}^m \end{pmatrix}$$

同様に最小二乗法を用いて係数を用いる。

$$\begin{pmatrix} \psi_{00}^m \\ \psi_{10}^m \\ \psi_{20}^m \\ \psi_{01}^m \\ \psi_{02}^m \\ \psi_{11}^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{12}{19} & -\frac{1}{19} & -\frac{1}{19} & -\frac{1}{19} & -\frac{1}{19} & -\frac{1}{19} & -\frac{1}{19} \\ 0 & \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{99}{76} & \frac{3357}{1520} & \frac{3357}{1520} & -\frac{63}{1520} & -\frac{63}{1520} & -\frac{63}{1520} & -\frac{63}{1520} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{189}{76} & -\frac{1053}{1520} & -\frac{1053}{1520} & \frac{2367}{1520} & \frac{2367}{1520} & \frac{2367}{1520} & \frac{2367}{1520} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{3\sqrt{3}}{2} & \frac{3\sqrt{3}}{2} & -\frac{3\sqrt{3}}{2} & -\frac{3\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{x+}^m \\ \psi_{u+}^m \\ \psi_{v+}^m \\ \psi_{x-}^m \\ \psi_{u-}^m \\ \psi_{v-}^m \\ \psi_{\alpha}^m \end{pmatrix}$$

同様にして、得られた関数より頂点A、Bの中性子束を求める。

$$\psi_A^m = \frac{(49\psi_{x+}^m + 49\psi_{u+}^m - 16\psi_{v+}^m + 9\psi_{x-}^m + 9\psi_{u-}^m - 16\psi_{v-}^m - 24\psi_{\alpha}^m)}{60}$$

$$\psi_B^m = \frac{(-16\psi_{x+}^m + 49\psi_{u+}^m + 49\psi_{v+}^m - 16\psi_{x-}^m + 9\psi_{u-}^m + 9\psi_{v-}^m - 24\psi_{\alpha}^m)}{60}$$

### 3 章 計算手法、体系

#### 3-1 ベンチマーク体系における計算

各手法の検証計算としてまず図 3 に示す 3D NEUTRON TRANSPORT BENCHMARKS の小型高速炉 KNK-II(case1,3)において行った。径径もれの取り扱い手法として 2-2 で取り上げた 5 つの手法を用いて、それぞれ計算を行った。参照解として多群エネルギーモンテカルロ法による「GMVP」を用いた。エネルギー群は 4 群とし、角度依存性は S4 まで考慮した。この時の実効増倍率の結果を表を 1-1 に、各領域平均の中性子束の結果を表 1-2 に示す。

#### 3-2 「もんじゅ」体系における計算

基本断面積データとして「JENDL-3.2」より作成された高速炉用断面積セット「JFS3J3.2R」の 70 群の無限希釈ミクロ断面積を用いた。この断面積より高速炉用格子計算コード「CASUP」を用いて各領域の 70 群実効断面積を作成した。次に、図 4-1 に示すもんじゅ R-Z 体系において「CITATION」により炉心計算を行い、各領域の 70 群スペクトルを得る。このスペクトルを用いて CASUP から得られた各領域の 70 群実効断面積をスペクトル重みで縮約し、各領域の 6 群の実効断面積を作成した。

図 4-1 に示す「もんじゅ」体系において、六角 - Z 体系用輸送計算コード「NSHEX」コード炉心計算を行った。CASE1 として制御棒全引き抜き体系、CASE2 として全制御棒全挿入体系の 2 つの CASE を考えた。同様に径径もれの 5 つの手法を用いてそれぞれ計算をし比較した。参照解として 2-1 と同様に「GMVP」コードを用いた。角度依存性は S4 まで考慮した。この時の実効増倍率の結果を表を 2-1 に示す。図 4-1 の炉心径方向断面図において示されているノードに注目し、図 4-2 の炉心軸方向領域図に示す炉心下端から 110cm～126.5cm の各領域の平均の中性子束を、同様の領域において GMVP により求められた中性子束と比較し、その相対差[%]の結果を表 2-2 に示す。

また各領域における核分裂反応率を表 2-3 に示す。

## 4 章 計算結果

### 4-1 ベンチマーク体系における計算結果

始めに CASE1（制御棒引き抜き体系）について検討する。表 1-1 より各手法とも実効増倍率は、参照解の GMVP に対して 0.06%以内で一致している。また表 1-2-1 に示す各領域の中性子束評価においても、AXIAL BLANKET の第 3 群や SODIUM STEEL ZONE の第 3 群以外は 1%以内で一致している。SODIUM STEEL ZONE で手法 5 がやや誤差が大きくなっているが、ほかの手法に差はみられなかった。

次に CASE3（制御棒挿入体系）について検討する。表 2-1 より実効増倍率は、参照解の GMVP に対して手法 5 を除いて各手法とも 0.2%程度過小評価であることがわかった。手法 5 では逆に 0.16%過大評価であった。また表 2-2-2 に示す各領域の中性子束評価においては、TEST ZONE で手法 1～4 は 4 群でやや過大評価の傾向であったが、ほかの群では 0.3%以内で一致していた。それにたいして手法 5 は、他の手法に比べ参照解との一致がみられた。DRIVER 領域では、TEST ZONE の結果と同様に、4 群でやや過大評価する傾向があるものの、0.7%以内で GMVP と一致している。手法 1～4 に比べ手法 5 はやや過小評価であった。CONTROL ROD 領域では手法 1～4 が過大評価、手法 5 が過小評価の傾向であった。どの手法も低エネルギー群である第 4 群の誤差が 2～3%程度であった。これは制御棒領域付近で低エネルギー群の方が中性子分布の歪みが大きいため、各ノード頂点の評価が不安定になり、それらのパラメータを使って求めた横方向もれの分布に影響を与えたと考えられる。CONTROL ROD 領域において、手法 1～4 での手法間の差について考える。手法 2 が 0.7%～3.3% の過大評価であったのに対し、その他の手法では 0.17%～2.3% であり、手法 2 で多少誤差が目立った。この原因として、制御棒領域付近では中性子の飛行方向に偏りが生じているのに対し、頂点中性子束を評価する際中性子の飛行方向に重点をおいていない手法では、他の手法に比べ大きめの誤差を生じたものと考えられる。手法 3 も中性子束の飛行方向をに重点をおいていないが、1 つの頂点中性子束を求める際に用いるパラメータの数が多く、手法 2 に比べより詳細な評価を行っていると考えられ、手法 2 よりもやや誤差が小さくなったと思われる。また CONTROL ROD 領域に接している TEST ZONE、DRIVER 領域においても、CASE1 の時と比較して CASE3 の方が低エネルギー群の誤差を過大評価する傾向にあり、CONTROL ROD 領域のノードにおける横方向もれの評価の差が周囲のノードにも影響を与えていると考えられる。その他の領域では、CASE1 と同様の傾向が得られた。

## 4-2 「もんじゅ」体系における計算結果

制御棒全引き抜き体系において検討する。表 2-1 より実効増倍率を比較すると、手法 1~4 では 0.01%以内で GMVP の結果と非常によく一致しており、手法 5 でも 0.04%で一致した。3-2 で述べた領域での中性子束について表 2-2-1 より、内側燃料のエネルギー 1~5 群でどの手法もほぼ 1.0%以内で GMVP と一致した。6 群の誤差はやや大きく R6 では 10%を超えた。これはレファレンスが低エネルギー群で粒子数が少ないため、標準偏差が大きくなってしまうためである。外側燃料領域については、1~5 群で 2%、BLANKET 領域では 4.3%とやや誤差は大きくなつた。手法間では、その誤差の傾向に差はみられず、誤差の大きさもそれほど差は見られなかつた。Na 領域でも 6 群以外では 1.8%以内で一致していた。表 2-3 に示す核分裂反応率では、R11 のブランケット領域で 1~2%ほど過大評価する傾向であったが、他の領域では 1%以内で GMVP の結果と一致していた。

次に制御棒全挿入体系において検討する。表 2-2 より実効増倍率を比較すると手法 1~4 は 0.06%以内で GMVP とよく一致している。また手法 5 は 0.25%過大評価であった。同様に中性子束について表 2-2-2 より、内側燃料ではどの手法もほぼ過小評価する傾向であった。また R-2,3 といった炉中心側より R-6,7 といった炉心外側の方がやや誤差は小さくなる傾向であったが、手法間の差はあまりなかった。外側燃料でも手法間にそれほど差はなく、どの手法も 6 群以外は数%で GMVP と一致していた。ブランケット領域も外側燃料とほぼ同じ傾向であった。

制御棒領域では、1~4 群で 1~3%程どの手法も過小評価していた。5、6 群では過大評価していたが、手法 5 のみが逆に過小評価であった。制御棒領域内の中性子束が過小評価された結果、吸収反応率が過小評価され実効増倍率が過大評価する原因の 1 つとなったと考えられる。表 2-4 に、制御棒全挿入体系におけるノード吸収反応率の GMVP との相対差[%]を示す。表 2-2-2 より手法 5 は、制御棒領域で他の手法よりノード内中性子束をより過小評価する傾向が強く、また 5,6 群で手法 1~4 では過大評価なのに対し手法 5 は過小評価である。よって表 2-4 に示すように、吸収反応率は他の手法が 0.6~1.5%程過小評価しているのに比べ手法 5 は 1.6~2%とより強く過小評価する傾向にあり、このことが原因となり、実効増倍率が他の手法より 0.2%も過大評価したと思われる。

以上の結果から 4-1 のベンチマーク体系(case3)と同様に、制御棒が挿入された体系では、炉心内の中性子束分布が複雑になることが予想されるが、現在の評価方法では特に制御棒領域のノードからの横方向もれを十分の精度で評価するには至っていない。

#### 4-3 径方向もれの取り扱い手法の差

径方向もれの取り扱い手法について、考案された手法間でも評価の差をもたらした。そこで、体系をより簡略化して径方向もれの評価の差を詳細に調べる。

制御棒が挿入された「もんじゅ」体系の、軸方向に対して炉心中央付近の径方向断面を切り取り、軸方向に無限均質の体系を考える。この体系において手法 1,5 を用いてそれぞれ炉心計算を行い、横方向もれの評価を比較する。R13 (制御棒領域) の位置のノードについて、ノード内角度中性子束、及びノード境界面の角度中性子束を表 2-5 に示す。中性子の飛行方向は図 1 の座標系において 1:x+、2:u+、3:v+、4:x-、5:u-、6:v- 方向を示す。なお、Z 軸方向に関しては正負の方向は区別せず、それぞれの和をとった。X+, U- 等は R13 のノード境界面を示す。A,B はそれぞれの手法によって得られた (角度) 頂点中性子束である。ノード内中性子束の欄で太枠で囲まれた数字は、6 つの角度成分の和、すなわちノード内平均のスカラー中性子束である。手法 1 と 5 でくらべると 1 ~ 4 群では等しいが、5, 6 群では手法 5 の方がやや小さめの値をとっている。これは 4-2 で述べたように、もんじゅ体系における制御棒領域 (R-1, 12, 13) での評価と同様の傾向で、手法 5 は手法 1 と比較して 5, 6 群でノード内中性子束が小さくなる。この原因をそれぞれのノード境界中性子束を比較して調べる。各ノード境界面の角度中性子束について、細字は R-13 のノードに入ってくる方向の中性子量を示し、斜字は逆にノードから出て行く方向に飛行する中性子量を示す。太線の下の欄は、そのノード境界面から正味ノード内にはいってくる中性子量、すなわち

「ノード (R13) 内に入ってくる方向に飛行する中性子の量」

- 「ノード (R13) 内から出て行く方向に飛行する中性子の量」  
を示す。

1~4 群ではどちらの手法もノードに入ってくる中性子量の評価に差は見られなかった。5, 6 群では手法 5 はノードに入ってくる中性子の量、出て行く中性子の量共に手法 1 より小さくなる。正味ノードに入ってくる中性子の量がどの面も小さく評価されていることから、ノードに入ってくる中性子の量が小さく評価されることによる影響のほうが大きく効いていると思われる。これは制御棒領域のノード R-13 の 6 つのノード境界面の中性子量は、XU1, UV1 といった周囲のノード境界面より小さく、ノードに入ってくる方向に飛行する頂点中性子束を評価する際、隣接ノードの情報を取り入れずに、対象ノード (R-13) の 6 つのノード境界面で表現しようとすることにより、ノードに入ってくる中性子量を小さく評価してしまうと考えられる。よって吸収体といった非均質性の高い領域では手法 5 はノード内中性子束を過小評価してしまうと考えられる。

## 5 章 結論

本年度の研究では、径方向スワイープ時における径方向もれの取り扱い手法について新たな評価手法を考案し、各手法の妥当性を検討した。制御棒全引き抜き体系において、「NSHEX」コードは「GMVP」と比較して実効増倍率、領域平均の中性子束とともに精度よく一致していることがわかった。制御棒が挿入された体系においても実効増倍率では、レファレンスに対してベンチマーク体系において 0.2%程度で一致し、実機のもんじゅ体系においても 0.06%以下の精度で一致した。中性子束分布においては、実機もんじゅ体系の制御棒全引き抜き体系では、低エネルギー群の 6 群以外は数%の精度で一致することがわかった。制御棒全挿入体系においては、外側燃料、ブランケット領域において同様に低エネルギー群の 6 群以外は数%程度で一致した。また制御棒領域では、数%ほど過小評価していた。特に手法 5 はこの傾向が強かつたが、他の手法間ではそれほど有意な差は見られなかった。また制御棒領域の近傍の内側燃料は、制御棒全引き抜き体系では 1%以下の精度であつていたノードも、数%程度過小評価の傾向であった。

一方核分裂反応率では、制御部全引き抜き体系では各手法とも、燃料領域で 1%以内で一致し、ブランケット領域でも 2%以内で一致した。制御棒全挿入体系では、内側燃料において炉中心付近で 1~2%の GMVP と差を生じた。また外側燃料では 1%以内で一致していたものの、ブランケット領域では 1~3%程度の過大評価していた。手法 5 がやや誤差が小さかったが、手法間でそれほど大きな差は認められなかった。

径方向もれの取り扱い手法のうち、中性子の飛行方向を考慮した手法 1 と手法 2 では GMVP との差が小さかったが、新手法として今回検証した手法 3、4 も、ほぼ手法 1 と同じ程度の精度を得ることがわかった。しかし、従来法に比べ新手法が、制御棒領域でのノード内中性子束の過小評価傾向を軽減するような効果はあまりみられなかった。

表1-1 BENCHMARKS 体系での実効増倍率

CASE1

GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
1.0954	1.0951	1.0953	1.0961	1.0953	1.0960
( $\pm 0.05\%$ )	<b>-0.02%</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.06%</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.06%</b>

CASE3

GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
0.8806	0.8788	0.8777	0.8786	0.8787	0.8820
( $\pm 0.04\%$ )	<b>-0.20%</b>	<b>-0.33%</b>	<b>-0.22%</b>	<b>-0.22%</b>	<b>0.16%</b>

( ):GMVPの標準偏差

太字 : GMVPとの差 [%Δ]

表1-2-1 BENCHMARKS (case1) 体系での各領域の平均中性子束 相対差

STEEL	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	4.89E-06	0.69	0.79	0.94	0.78	1.02
	2	9.69E-06	0.03	0.11	0.38	0.13	0.48
	3	7.23E-06	-0.14	-0.18	0.11	-0.19	0.17
	4	7.85E-06	0.58	0.45	0.54	0.45	0.55
[%]							
AXIAL BLANKET	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	3.52E-05	-0.05	0.08	0.04	0.05	0.08
	2	4.95E-05	0.00	0.12	0.19	0.10	0.17
	3	2.01E-05	1.13	1.20	1.17	1.15	1.06
	4	1.20E-05	0.97	0.94	0.63	0.91	0.52
[%]							
AXIAL REFLECTOR	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	2.18E-05	-1.18	-1.11	-0.94	-1.11	-0.85
	2	2.93E-05	-0.70	-0.63	-0.45	-0.63	-0.36
	3	1.83E-05	-0.38	-0.41	-0.25	-0.42	-0.17
	4	1.42E-05	-0.15	-0.33	-0.37	-0.33	-0.37
[%]							
TEST ZONE	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	1.34E-04	-0.18	-0.10	-0.04	-0.07	0.03
	2	1.08E-04	-0.17	-0.08	0.01	-0.08	-0.02
	3	3.09E-05	0.51	0.60	0.25	0.52	0.09
	4	3.89E-06	-0.65	-0.92	-1.82	-0.80	-2.35
[%]							
DRIVER without MODERATOR	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	9.92E-05	-0.39	-0.47	-0.35	-0.37	-0.24
	2	7.98E-05	-0.04	-0.08	0.10	-0.03	0.17
	3	2.97E-05	0.42	0.72	0.20	0.50	0.22
	4	6.88E-06	0.68	1.42	-0.24	0.91	-0.77
[%]							
DRIVER with MODERATOR	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	6.53E-05	0.11	0.07	0.28	0.12	0.39
	2	5.01E-05	0.07	0.13	0.20	0.10	0.21
	3	2.83E-05	0.14	0.10	0.26	0.11	0.27
	4	1.45E-05	0.01	-0.24	-0.11	-0.19	-0.12
[%]							
REFLECTOR without MODERATOR	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	1.04E-05	-0.42	-0.28	-0.53	-0.41	-0.63
	2	1.24E-05	-0.14	-0.38	0.08	-0.18	0.17
	3	8.74E-06	-0.20	-0.52	-0.15	-0.48	0.14
	4	1.05E-05	0.31	-0.05	-0.45	-0.14	-0.23
[%]							
REFLECTOR with MODERATOR	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	2.68E-06	-0.39	-0.72	-2.03	-0.94	-2.43
	2	2.98E-06	-0.13	-0.12	-0.88	-0.23	-0.87
	3	2.71E-06	-0.51	-0.38	-0.87	-0.43	-0.84
	4	7.82E-06	-0.94	-0.77	-0.83	-0.74	-0.64
[%]							
KNK-1 REFLECTOR	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	9.38E-07	0.87	0.16	-0.53	0.53	-1.09
	2	1.23E-06	2.37	0.50	-0.16	0.95	-0.92
	3	9.71E-07	1.94	0.13	0.26	0.30	-0.85
	4	2.60E-06	-1.73	-0.68	-0.48	-1.07	-0.79
[%]							
SODIUM STEEL ZONE	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	3.16E-07	-0.36	-0.87	-0.37	-0.61	-1.84
	2	5.23E-07	-0.65	-1.47	0.13	-1.18	-1.68
	3	3.93E-07	-1.48	-2.54	-0.15	-2.37	-2.45
	4	5.75E-07	-0.20	1.04	2.80	0.83	0.32
[%]							
CONTROL ROD	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	0.00E+00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.00E+00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.00E+00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.00E+00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
[%]							
CONTROL ROD FOLLOWER	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	5.25E-05	0.17	0.51	0.38	0.32	0.25
	2	5.07E-05	0.32	0.42	0.52	0.43	0.55
	3	2.26E-05	0.64	0.64	0.53	0.70	0.62
	4	1.04E-05	0.02	-0.30	-0.33	0.01	0.06
[%]							

表1-2-2 BENCHMARKS (case3) 体系での各領域の平均中性子束 相対差

	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5	
STEEL	1	6.06E-06	1.10	1.35	1.23	1.22	1.12	
	2	1.08E-05	0.48	0.70	0.61	0.61	0.61	
	3	7.42E-06	0.42	0.59	0.48	0.47	0.41	
	4	7.53E-06	-0.42	-0.36	-0.44	-0.48	-0.81	[%]
AXIAL BLANKET	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5	
	1	4.08E-05	1.54	1.77	1.67	1.69	1.48	
	2	5.21E-05	0.64	0.82	0.75	0.75	0.64	
	3	2.37E-05	0.24	0.38	0.30	0.28	0.06	
AXIAL REFLECTOR	1	9.78E-06	1.81	1.87	1.79	1.74	1.09	
	2	2.38E-05	-0.24	-0.09	-0.17	-0.16	-0.17	
	3	2.96E-05	0.05	0.21	0.13	0.13	0.11	
	4	1.70E-05	0.22	0.29	0.22	0.21	0.24	
TEST ZONE	1	1.28E-05	-0.43	-0.48	-0.53	-0.57	-0.86	
	2	1.65E-04	-0.28	-0.07	-0.13	-0.11	-0.25	
	3	1.17E-04	0.08	0.20	0.16	0.16	0.12	
	4	2.18E-05	-0.17	-0.30	-0.18	-0.27	-0.37	
DRIVER without MODERATOR	1	1.18E-06	1.97	0.45	2.09	1.73	-0.06	
	2	1.10E-04	-0.63	-0.73	-0.68	-0.65	-0.66	
	3	7.77E-05	0.14	0.04	0.11	0.12	0.15	
	4	2.12E-05	-0.38	-0.34	-0.31	-0.40	-0.64	
DRIVER with MODERATOR	1	3.94E-06	0.95	1.09	1.05	1.00	-0.28	
	2	7.52E-05	0.25	0.30	0.25	0.26	0.25	
	3	5.20E-05	0.21	0.32	0.23	0.22	0.09	
	4	2.70E-05	0.19	0.15	0.13	0.14	0.35	
REFLECTOR without MODERATOR	1	1.34E-05	0.08	-0.16	-0.11	-0.11	0.27	
	2	1.22E-05	0.14	0.58	0.33	0.28	-0.38	
	3	1.38E-05	0.18	0.17	0.18	0.22	0.27	
	4	9.19E-06	0.15	0.08	-0.04	-0.06	0.33	
REFLECTOR with MODERATOR	1	1.09E-05	0.44	0.28	0.08	0.05	-0.38	
	2	3.14E-06	0.50	0.35	0.10	0.01	-2.02	
	3	3.35E-06	0.21	0.41	0.21	0.18	-0.89	
	4	3.00E-06	-0.14	0.21	0.04	0.04	-0.77	
KNK-1 REFLECTOR	1	8.57E-06	-0.34	0.05	-0.05	-0.04	-0.37	
	2	1.10E-06	1.00	0.47	0.56	0.69	-1.46	
	3	1.41E-06	1.84	0.21	0.46	0.53	-1.67	
	4	1.10E-06	0.91	-0.55	-0.50	-0.53	-1.94	
SODIUM STEEL ZONE	1	2.89E-06	-0.82	0.40	0.03	-0.12	-0.21	
	2	3.70E-07	0.04	-0.30	-0.28	-0.17	-1.93	
	3	6.00E-07	-0.80	-1.41	-1.30	-1.26	-2.10	
	4	4.45E-07	-0.99	-1.78	-1.74	-1.74	-2.12	
CONTROL ROD	1	6.42E-07	0.49	1.82	1.61	1.49	1.23	
	2	9.57E-05	0.17	0.69	0.32	0.26	-0.20	
	3	6.95E-05	0.37	0.74	0.49	0.47	-0.07	
	4	1.35E-05	0.25	0.82	0.33	0.31	-1.71	
CONTROL ROD FOLLOWER	1	9.73E-07	2.08	3.26	2.08	2.32	-2.82	
	2	0.00E+00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	3	0.00E+00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	4	0.00E+00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

表2-1 「もんじゅ」体系での実効増倍率

制御棒全引き抜き体系

GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
1.0321 ( $\pm 0.019\%$ )	1.0320 <b>0.01%</b>	1.0319 <b>0.00%</b>	1.0319 <b>0.00%</b>	1.0319 <b>0.00%</b>	1.0323 <b>0.04%</b>

制御棒全挿入体系

GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
0.8604 ( $\pm 0.027\%$ )	0.8610 <b>0.06%</b>	0.8605 <b>0.00%</b>	0.8609 <b>0.04%</b>	0.8609 <b>0.04%</b>	0.8626 <b>0.25%</b>

( ):GMVPの標準偏差

太字 : GMVPとの差 [%Δ]

表2-2-1 もんじゅ(制御棒全引き抜き)体系での各ノード内平均中性子束 相対差

	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
			1	1.41E-02	0.79	0.95	0.76
1 - NA	2	9.09E-02	-0.39	-0.48	-0.49	-0.50	-0.72
	3	5.75E-02	-1.08	-1.36	-1.21	-1.20	-1.36
	4	1.53E-02	0.04	-0.32	-0.26	-0.23	0.25
	5	3.40E-03	-0.50	-0.99	-0.82	-0.82	0.52
	6	2.70E-05	8.15	6.65	16.50	11.60	59.20
							[%]
2 - IC	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	1.56E-02	-0.45	-0.60	-0.57	-0.56	-0.62
	2	9.02E-02	-0.69	-0.80	-0.79	-0.79	-0.86
	3	5.45E-02	-0.99	-1.22	-1.10	-1.10	-1.26
	4	1.33E-02	-0.42	-0.57	-0.63	-0.64	-0.62
	5	2.52E-03	-0.73	-0.90	-0.97	-0.97	-0.87
	6	1.18E-05	-4.80	-5.08	-5.33	-5.50	-6.14
							[%]
3 - IC	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	1.52E-02	-0.31	-0.45	-0.41	-0.41	-0.48
	2	8.76E-02	-0.39	-0.49	-0.48	-0.47	-0.56
	3	5.25E-02	0.08	-0.12	-0.02	-0.02	-0.18
	4	1.29E-02	-0.67	-0.80	-0.84	-0.85	-0.87
	5	2.44E-03	-0.32	-0.45	-0.51	-0.52	-0.48
	6	1.07E-05	0.17	0.00	-0.10	0.09	-0.66
							[%]
4 - IC	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	1.45E-02	-0.44	-0.53	-0.50	-0.50	-0.58
	2	8.40E-02	-0.35	-0.42	-0.41	-0.41	-0.50
	3	5.04E-02	-0.21	-0.35	-0.27	-0.27	-0.41
	4	1.21E-02	0.36	0.27	0.22	0.22	0.15
	5	2.38E-03	-0.77	-0.91	-0.93	-0.92	-0.82
	6	9.99E-06	7.08	6.82	6.14	5.20	3.76
							[%]
5 - IC	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	1.37E-02	-0.56	-0.62	-0.60	-0.60	-0.68
	2	7.84E-02	0.12	0.09	0.09	0.10	0.02
	3	4.67E-02	0.19	0.12	0.17	0.17	0.06
	4	1.13E-02	0.26	0.23	0.20	0.20	0.15
	5	2.10E-03	-0.60	-0.59	-0.63	-0.64	-0.66
	6	9.17E-06	-3.73	-3.60	-3.65	-3.35	-4.58
							[%]
6 - IC	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	1.26E-02	-0.28	-0.32	-0.30	-0.30	-0.43
	2	7.24E-02	0.23	0.23	0.23	0.24	0.18
	3	4.24E-02	0.21	0.21	0.22	0.22	0.16
	4	1.02E-02	-1.01	-0.99	-1.01	-1.02	-1.07
	5	1.91E-03	-0.78	-0.76	-0.77	-0.78	-0.63
	6	9.47E-06	-12.00	-12.20	-13.20	-14.70	-16.70
							[%]
7 - IC	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	1.19E-02	-0.07	0.12	0.07	0.07	0.10
	2	6.51E-02	0.17	0.25	0.24	0.24	0.29
	3	3.61E-02	0.14	0.20	0.18	0.18	0.18
	4	7.99E-03	0.95	0.98	1.00	0.98	0.90
	5	1.33E-03	-0.55	-0.59	-0.52	-0.53	-0.58
	6	4.28E-06	-1.26	-1.55	0.17	-0.22	4.39
							[%]

表2-2-1 もんじゅ(制御棒全引き抜き) 体系での各ノード内平均中性子束 相対差(続き)

	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
			1	2	3	4	5
8 - OC	1	1.06E-02	-1.12	-1.00	-1.02	-1.01	-0.66
	2	5.29E-02	-0.87	-0.77	-0.78	-0.78	-0.57
	3	2.82E-02	-0.88	-0.75	-0.81	-0.82	-0.80
	4	6.01E-03	1.58	1.67	1.69	1.68	1.48
	5	8.66E-04	-0.53	-0.49	-0.45	-0.45	-1.06
	6	2.32E-06	4.77	3.55	6.57	10.70	13.10
[%]							
9 - OC	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	6.16E-03	0.02	-0.13	-0.04	-0.02	0.52
	2	3.30E-02	-0.59	-0.49	-0.49	-0.49	-0.21
	3	1.99E-02	-0.29	-0.06	-0.16	-0.18	-0.12
	4	4.89E-03	-1.90	-1.69	-1.71	-1.71	-1.95
	5	8.52E-04	-0.29	0.03	-0.06	-0.04	-0.76
[%]							
10 - BLANKET	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	1.48E-03	-1.21	-0.50	-0.64	-0.67	-1.38
	2	1.41E-02	-1.79	-1.52	-1.56	-1.57	-1.69
	3	1.23E-02	-0.80	-0.52	-0.62	-0.61	-0.50
	4	3.81E-03	-0.85	-0.68	-0.65	-0.63	-0.57
	5	1.09E-03	1.20	1.29	1.38	1.40	1.70
[%]							
11 -BLANKET	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	3.25E-04	3.68	2.76	2.74	2.69	1.14
	2	4.97E-03	1.54	1.56	1.52	1.50	1.07
	3	5.89E-03	-0.39	-0.07	-0.19	-0.19	-0.16
	4	2.24E-03	-4.25	-3.97	-3.95	-3.93	-4.01
	5	8.40E-04	-1.90	-1.49	-1.47	-1.44	-1.53
[%]							
12 - NA	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	1.17E-02	-1.44	-1.01	-1.23	-1.26	-1.77
	2	7.02E-02	0.05	0.16	0.13	0.12	0.00
	3	4.22E-02	-1.06	-1.02	-1.01	-1.00	-1.01
	4	1.09E-02	-0.97	-1.04	-0.92	-0.90	-0.48
	5	2.29E-03	-1.50	-1.72	-1.46	-1.47	-0.11
[%]							
13 - NA	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
	1	1.34E-02	-0.17	0.08	-0.12	-0.15	-0.74
	2	8.54E-02	-0.37	-0.38	-0.40	-0.41	-0.61
	3	5.35E-02	-0.45	-0.60	-0.50	-0.49	-0.61
	4	1.41E-02	1.20	0.98	1.06	1.09	1.54
	5	3.22E-03	-1.71	-2.06	-1.88	-1.88	-0.62
[%]							

表2-2-2 もんじゅ(制御棒全挿入)体系での各ノード内平均中性子束 相対差

	ENERGY	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
			-3.70	-3.57	-3.67	-3.74	-4.21
1 - CR	1	7.43E-03	-3.70	-3.57	-3.67	-3.74	-4.21
	2	4.44E-02	-2.11	-2.25	-2.16	-2.18	-2.34
	3	2.18E-02	-1.18	-1.31	-1.20	-1.19	-1.46
	4	2.86E-03	-1.60	-1.51	-1.70	-1.62	-3.06
	5	2.06E-04	2.58	2.96	2.30	2.75	-0.30
	6	2.64E-07	3.27	3.87	-7.54	44.50	26.70
[%]							
2 - IC	ENERGY						
	1	9.74E-03	-2.55	-2.80	-2.55	-2.54	-2.29
	2	5.21E-02	-2.32	-2.55	-2.33	-2.32	-2.07
	3	2.64E-02	-1.43	-1.65	-1.39	-1.38	-0.97
	4	5.12E-03	-0.69	-1.05	-0.61	-0.64	0.45
	5	7.27E-04	-3.33	-3.91	-3.17	-3.35	-1.27
	6	1.89E-06	19.50	18.60	20.70	12.20	16.40
[%]							
3 - IC	ENERGY						
	1	1.00E-02	-2.94	-3.28	-3.03	-3.03	-2.83
	2	5.30E-02	-1.69	-2.00	-1.79	-1.78	-1.57
	3	2.67E-02	-1.18	-1.51	-1.26	-1.26	-0.83
	4	5.23E-03	-2.16	-2.67	-2.23	-2.25	-1.12
	5	6.96E-04	1.40	0.63	1.43	1.23	3.49
	6	2.66E-06	-16.50	-17.20	-15.20	-21.20	-17.10
[%]							
4 - IC	ENERGY						
	1	1.06E-02	-3.47	-3.80	-3.59	-3.58	-3.43
	2	5.52E-02	-0.60	-0.89	-0.71	-0.70	-0.53
	3	2.77E-02	-0.53	-0.86	-0.64	-0.63	-0.21
	4	5.38E-03	-2.37	-2.89	-2.50	-2.53	-1.39
	5	7.71E-04	-3.02	-3.85	-3.07	-3.26	-0.99
	6	2.49E-06	-1.86	-2.88	-1.68	-9.72	-6.24
[%]							
5 - IC	ENERGY						
	1	1.10E-02	-0.89	-1.20	-1.03	-1.02	-0.93
	2	5.81E-02	-1.14	-1.43	-1.28	-1.26	-1.19
	3	2.77E-02	-0.77	-1.17	-0.93	-0.91	-0.54
	4	5.19E-03	-0.66	-1.34	-0.75	-0.79	0.69
	5	7.47E-04	-4.29	-5.14	-4.26	-4.48	-2.23
	6	2.74E-06	-18.90	-19.60	-17.80	-20.00	-23.20
[%]							
6 - IC	ENERGY						
	1	1.24E-02	-0.37	-0.63	-0.54	-0.54	-0.60
	2	6.51E-02	-0.91	-1.11	-1.04	-1.02	-1.03
	3	3.08E-02	-0.78	-1.10	-0.95	-0.93	-0.67
	4	5.68E-03	0.75	0.19	0.64	0.60	1.80
	5	8.31E-04	-0.46	-1.22	-0.48	-0.66	1.41
	6	2.69E-06	-1.76	-2.54	-1.17	-4.43	-8.87
[%]							
7 - IC	ENERGY						
	1	1.55E-02	-0.78	-0.57	-0.67	-0.67	-0.78
	2	7.65E-02	-0.74	-0.67	-0.72	-0.71	-0.71
	3	3.69E-02	-0.06	-0.09	-0.12	-0.12	0.00
	4	7.46E-03	1.12	0.98	0.98	0.94	1.31
	5	1.10E-03	-0.28	-0.51	-0.41	-0.51	0.30
	6	2.78E-06	17.10	16.30	13.40	5.42	7.44
[%]							

表2-2-2 もんじゅ(制御棒全挿入)体系での各ノード内平均中性子束 相対差(続き)

8 - OC	ENERGY	1	1.61E-02	0.08	0.25	0.14	0.15	0.25	[%]
		2	7.29E-02	-0.50	-0.37	-0.46	-0.45	-0.42	
		3	3.55E-02	-1.21	-1.16	-1.25	-1.26	-1.36	
		4	7.24E-03	1.30	1.31	1.24	1.21	0.99	
		5	9.67E-04	2.54	2.47	2.43	2.41	1.80	
		6	2.92E-06	-1.97	-3.41	-0.99	1.89	-1.82	
9 - OC	ENERGY	1	1.03E-02	0.15	0.01	0.00	0.03	0.25	[%]
		2	4.98E-02	-0.53	-0.42	-0.51	-0.50	-0.46	
		3	2.77E-02	-0.12	0.00	-0.13	-0.14	-0.31	
		4	6.57E-03	-0.44	-0.33	-0.47	-0.48	-0.85	
		5	1.17E-03	-1.67	-1.47	-1.69	-1.67	-2.51	
		6	1.61E-05	0.50	1.17	-0.32	0.55	-5.92	
10 - BLANKET	ENERGY	1	2.43E-03	2.28	3.18	2.91	2.89	1.77	[%]
		2	2.13E-02	-0.02	0.35	0.21	0.21	-0.25	
		3	1.80E-02	-0.62	-0.44	-0.55	-0.53	-0.74	
		4	5.43E-03	-0.08	-0.01	-0.11	-0.10	-0.22	
		5	1.58E-03	-0.74	-0.80	-0.85	-0.84	-0.69	
		6	8.56E-05	-6.28	-6.53	-6.31	-6.60	-5.35	
11 - BLANKET	ENERGY	1	5.48E-04	5.47	4.57	4.42	4.38	2.43	[%]
		2	7.96E-03	-1.33	-1.28	-1.41	-1.42	-2.18	
		3	9.06E-03	-3.12	-2.95	-3.06	-3.05	-3.36	
		4	3.14E-03	0.99	1.18	1.06	1.09	0.81	
		5	1.20E-03	-0.09	0.16	0.03	0.07	-0.21	
		6	1.04E-04	-1.49	-0.94	-1.02	-0.91	-1.57	
12 - CR	ENERGY	1	1.06E-02	-0.81	-0.21	-0.55	-0.63	-1.37	[%]
		2	6.03E-02	-1.16	-0.92	-1.05	-1.07	-1.48	
		3	2.87E-02	-1.15	-0.96	-1.09	-1.08	-1.66	
		4	3.62E-03	-0.24	0.19	-0.26	-0.19	-2.05	
		5	2.53E-04	2.30	3.00	2.01	2.47	-1.11	
		6	2.57E-07	16.80	17.30	2.85	66.50	61.00	
13 - CR	ENERGY	1	8.01E-03	-1.14	-0.86	-1.04	-1.12	-1.69	[%]
		2	4.89E-02	-1.84	-1.84	-1.82	-1.85	-2.09	
		3	2.41E-02	-1.25	-1.25	-1.22	-1.21	-1.56	
		4	3.16E-03	-1.74	-1.50	-1.78	-1.70	-3.22	
		5	2.30E-04	1.41	1.93	1.17	1.62	-1.49	
		6	2.21E-07	34.20	35.20	20.20	89.40	65.60	

表2-3-1 もんじゅ(制御棒全引き抜き) 体系での各ノード内核分裂反応率 相対差

	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
1-NA	0	0	0	0	0	0
2-IC	4.22E-04	-0.69	-0.85	-0.82	-0.82	-0.89
3-IC	4.09E-04	-0.29	-0.43	-0.40	-0.40	-0.48
4-IC	3.93E-04	-0.26	-0.36	-0.34	-0.34	-0.43
5-IC	3.64E-04	-0.02	-0.07	-0.06	-0.06	-0.13
6-IC	3.34E-04	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.16
7-IC	2.91E-04	0.16	0.25	0.24	0.23	0.25
8-OC	3.09E-04	-0.66	-0.55	-0.57	-0.57	-0.45
9-OC	2.07E-04	-0.55	-0.43	-0.45	-0.45	-0.31
10-BLANKET	9.43E-06	-1.13	-0.52	-0.63	-0.65	-1.19
11-BLANKET	2.66E-06	1.80	1.34	1.32	1.29	0.28
12-NA	0	0	0	0	0	0
13-NA	0	0	0	0	0	0

[%]

表2-3-2 もんじゅ(制御棒全挿入) 体系での各ノード内核分裂反応率 相対差

	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
1-CCR	0	0	0	0	0	0
2-IC	2.21E-04	-2.05	-2.30	-2.03	-2.03	-1.61
3-IC	2.25E-04	-1.82	-2.18	-1.91	-1.91	-1.51
4-IC	2.35E-04	-1.50	-1.85	-1.62	-1.62	-1.24
5-IC	2.41E-04	-1.06	-1.43	-1.19	-1.19	-0.87
6-IC	2.70E-04	-0.60	-0.88	-0.74	-0.74	-0.54
7-IC	3.27E-04	-0.41	-0.36	-0.41	-0.42	-0.36
8-OC	4.17E-04	-0.27	-0.17	-0.26	-0.25	-0.28
9-OC	3.06E-04	-0.34	-0.27	-0.37	-0.36	-0.45
10-BLANKET	1.51E-05	1.75	2.52	2.28	2.26	1.32
11-BLANKET	4.30E-06	3.14	2.63	2.49	2.47	1.06
12-CCR	0	0	0	0	0	0
13-CCR	0	0	0	0	0	0

[%]

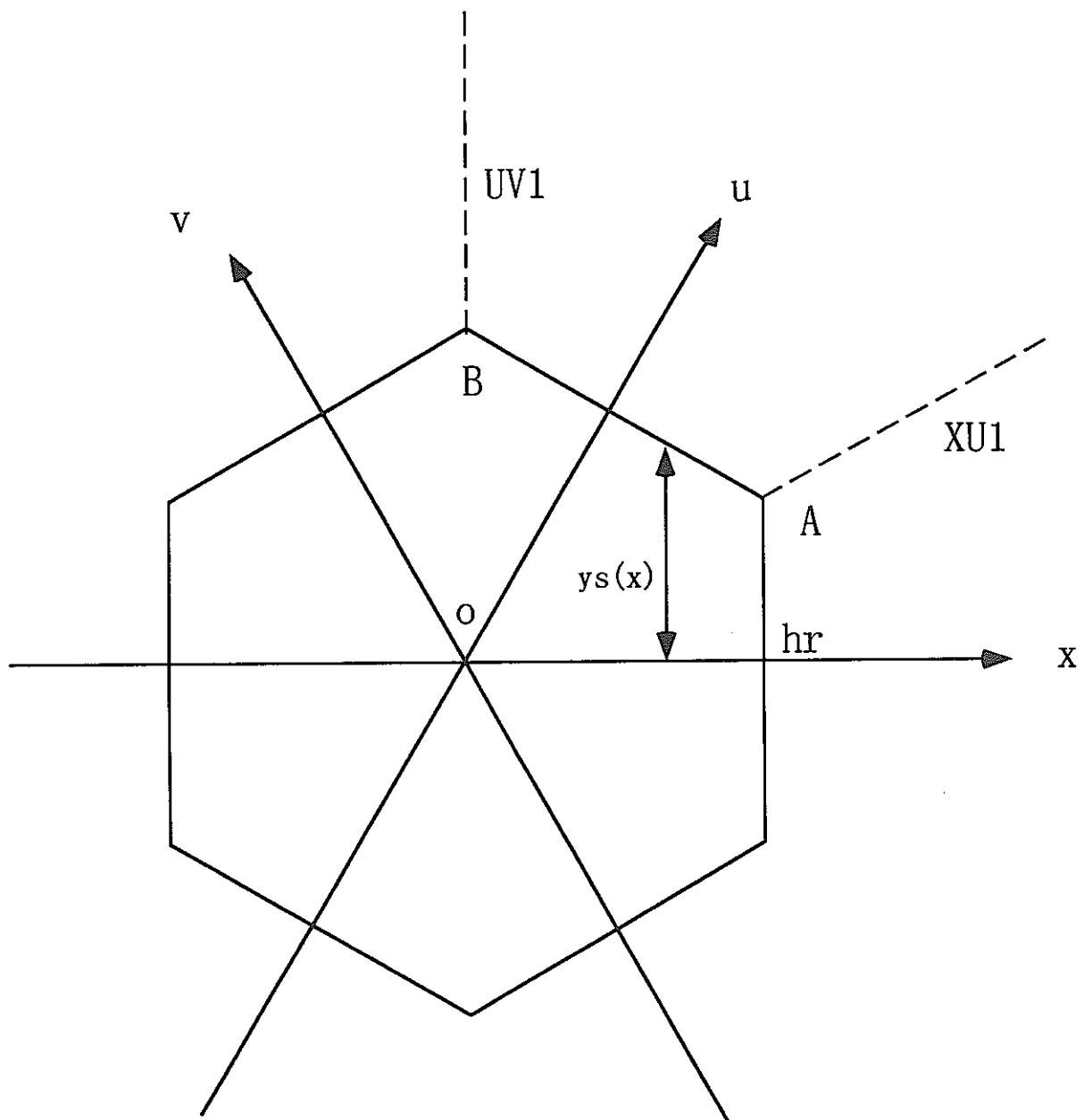
表2-4 もんじゅ(制御棒全挿入) 体系での各ノード内吸収反応率 相対差

	GMVP	手法1	手法2	手法3	手法4	手法5
1-CCR	1.31E-03	-1.49	-1.56	-1.54	-1.51	-2.04
2-IC	4.47E-04	-1.85	-2.11	-1.82	-1.83	-1.30
3-IC	4.54E-04	-1.63	-2.01	-1.72	-1.72	-1.20
4-IC	4.75E-04	-1.37	-1.74	-1.48	-1.49	-0.99
5-IC	4.81E-04	-1.08	-1.49	-1.20	-1.21	-0.73
6-IC	5.36E-04	-0.53	-0.85	-0.66	-0.67	-0.32
7-IC	6.54E-04	-0.21	-0.20	-0.24	-0.25	-0.12
8-OC	7.41E-04	-0.21	-0.12	-0.21	-0.21	-0.28
9-OC	5.70E-04	-0.39	-0.30	-0.41	-0.41	-0.57
10-BLANKET	2.10E-04	-0.27	-0.08	-0.19	-0.18	-0.41
11-BLANKET	1.10E-04	-0.92	-0.76	-0.88	-0.86	-1.26
12-CCR	1.73E-03	-0.89	-0.62	-0.83	-0.81	-1.64
13-CCR	1.45E-03	-1.43	-1.37	-1.43	-1.40	-2.01

[%]



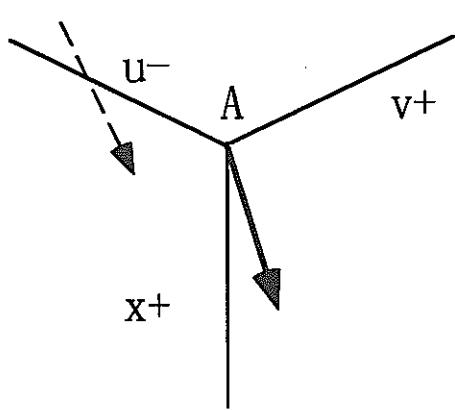




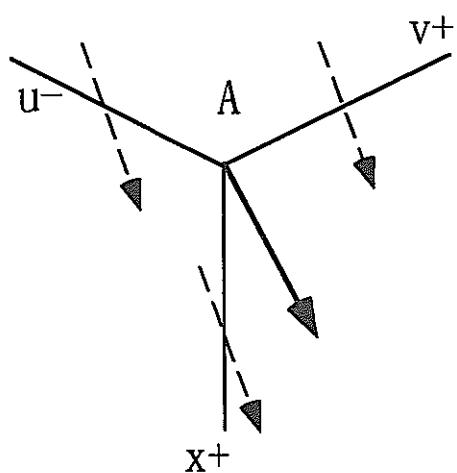
$hr$  : 対辺距離 (11.56cm)

図1 六角-Z 体系の座標系

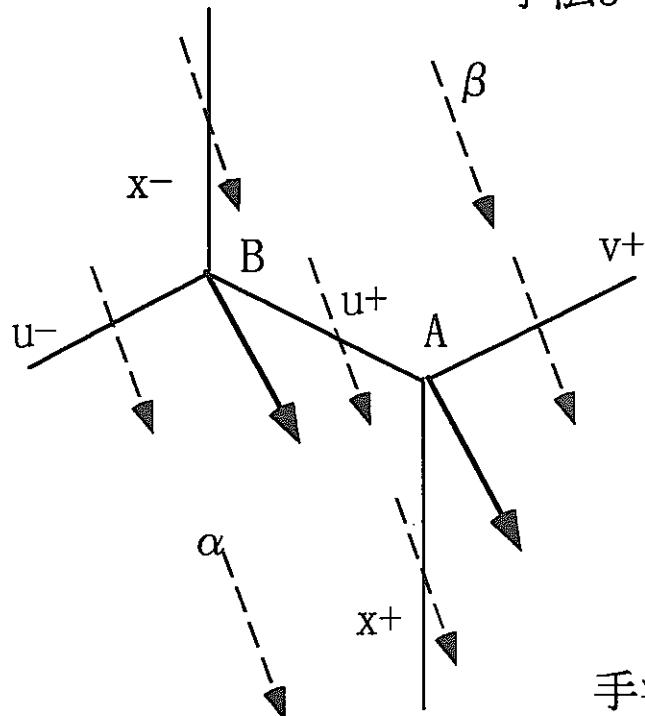
手法 1



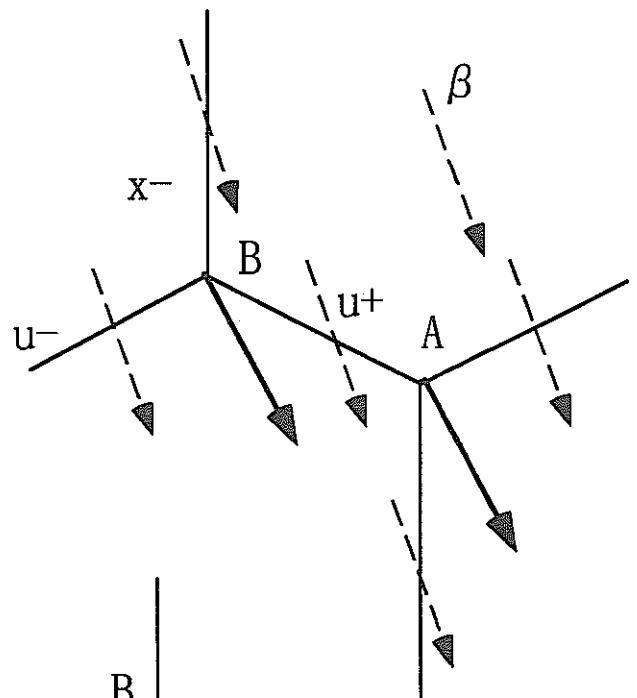
手法 2



手法3



手法4



手法5

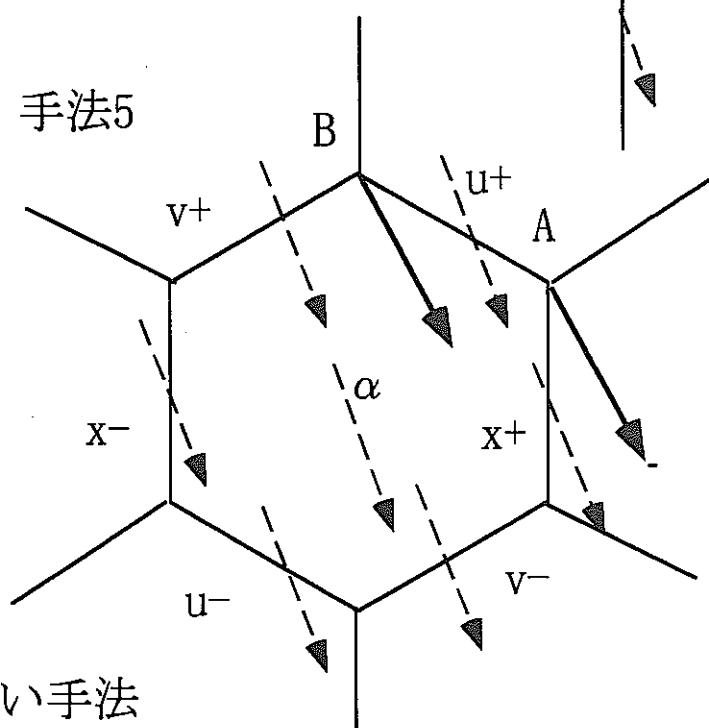
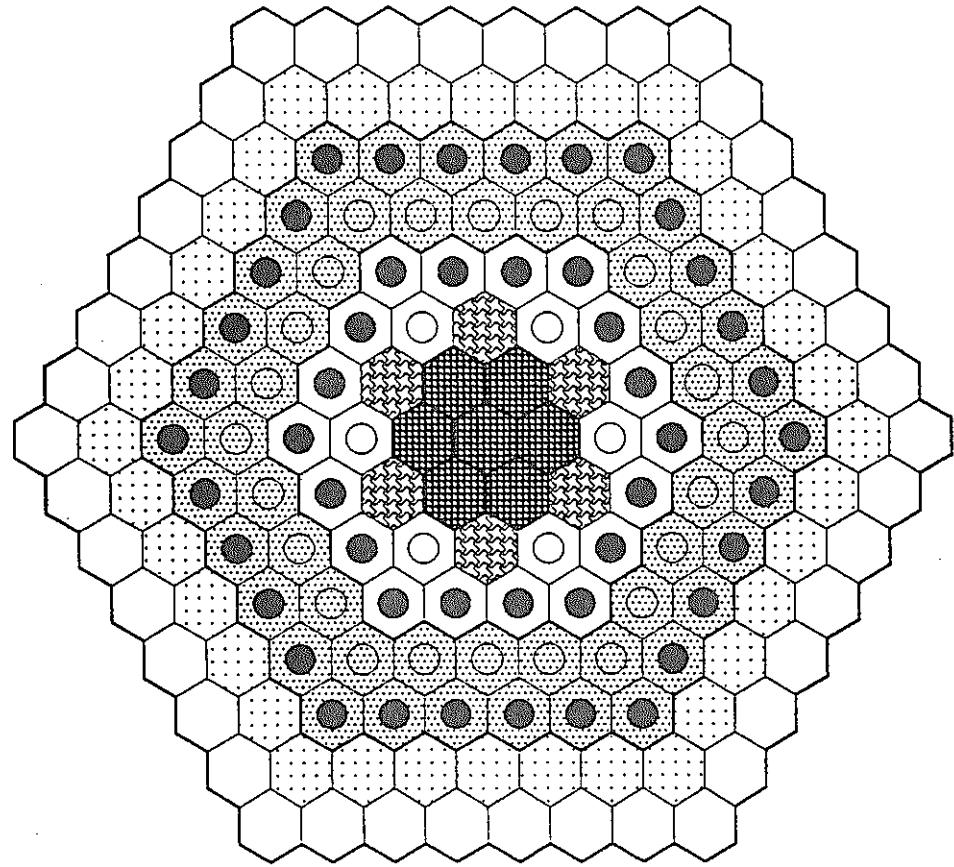


図2 径径もれの取り扱い手法



- 12. 99 cm
- TEST ZONE
- ▨ CONTROL ROD OR CONTROL ROD FOLLOWER
- DRIVER WITHOUT MODERATOR
- DRIVER WITH MODERATOR
- ▨ REFLECTOR WITHOUT MODERATOR
- REFLECTOR WITH MODERATOR
- ▨ KNK-1 REFLECTOR
- SODIUM/STEEL ZONE

図3-1 検証体系領域図（KNK-II、径方向炉心中央）

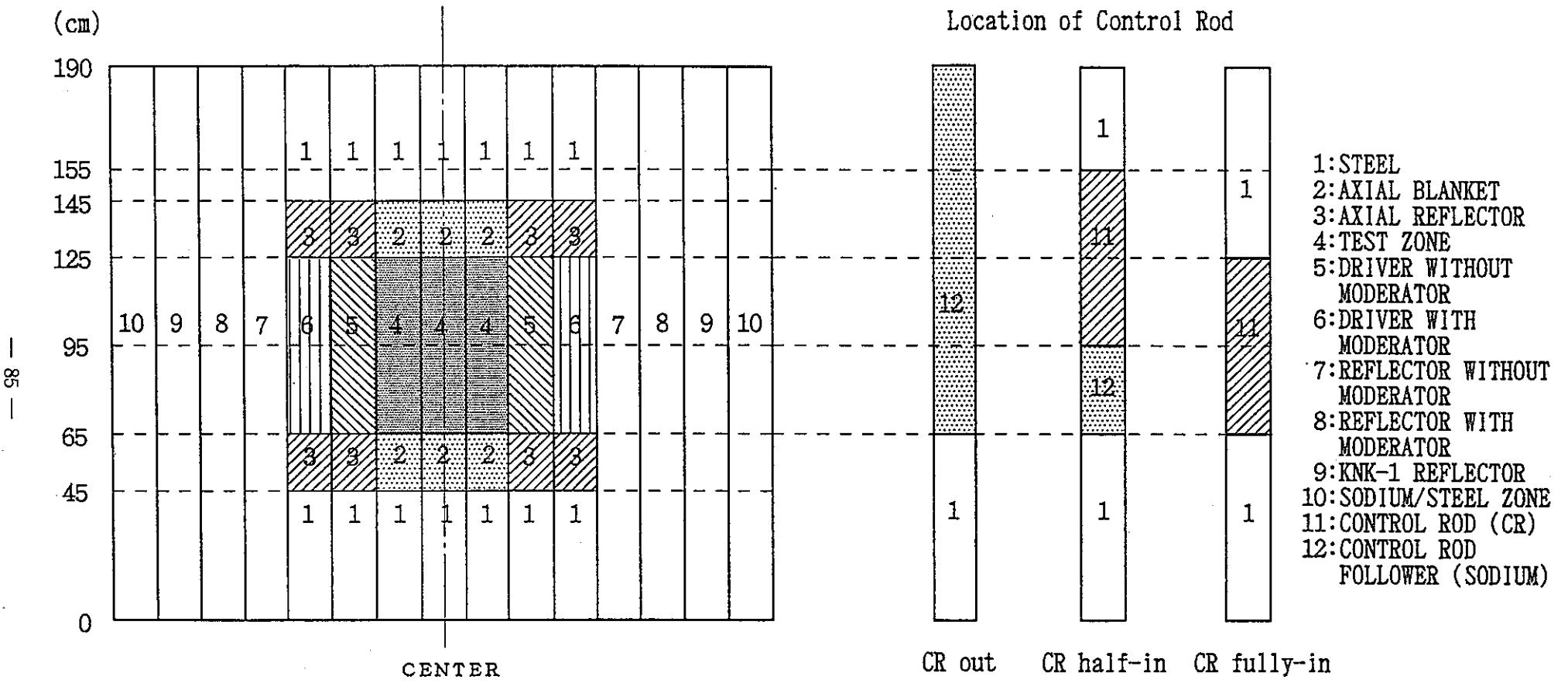


図3-2 検証体系領域図（KNK-II、軸方向）

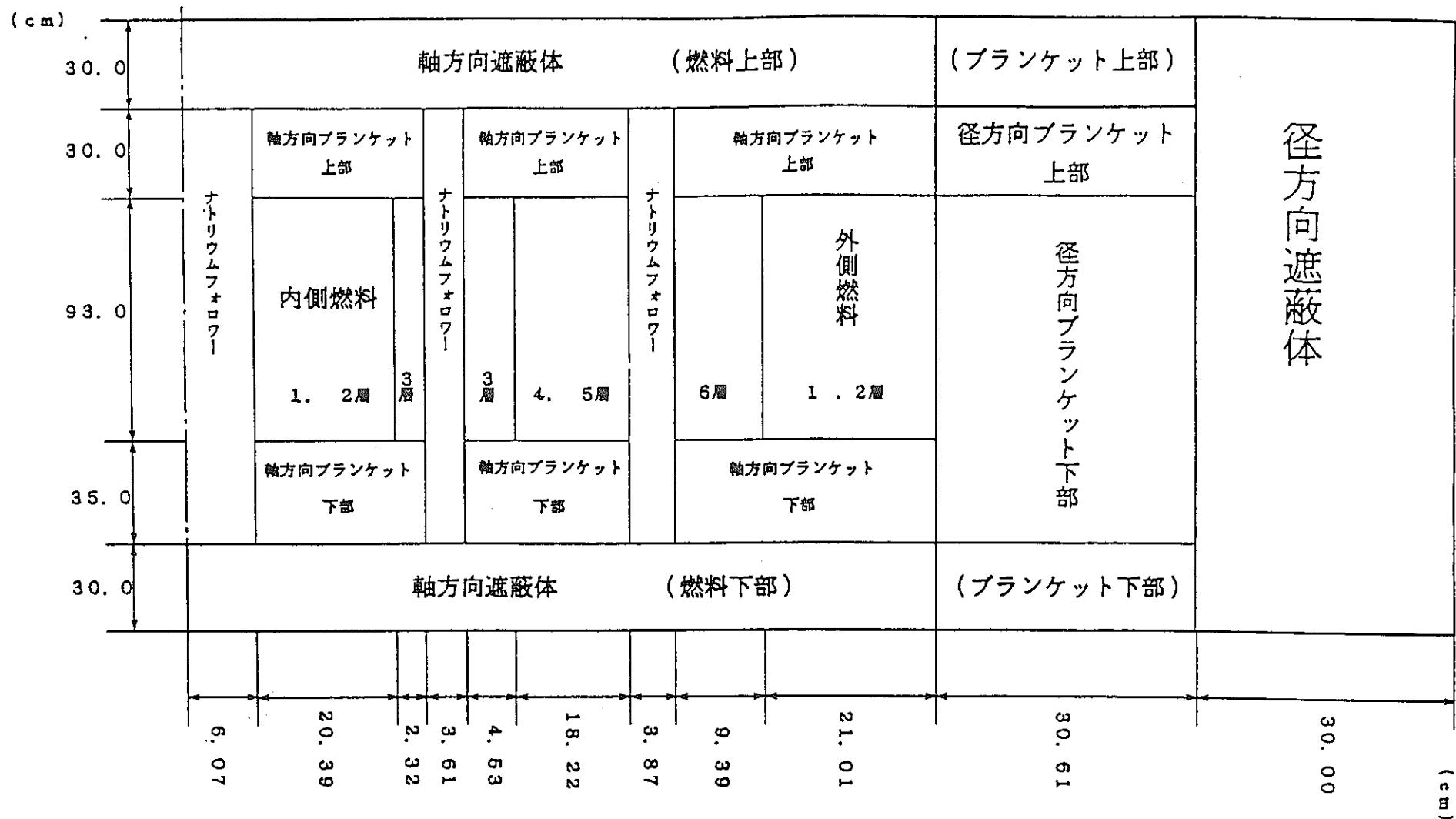
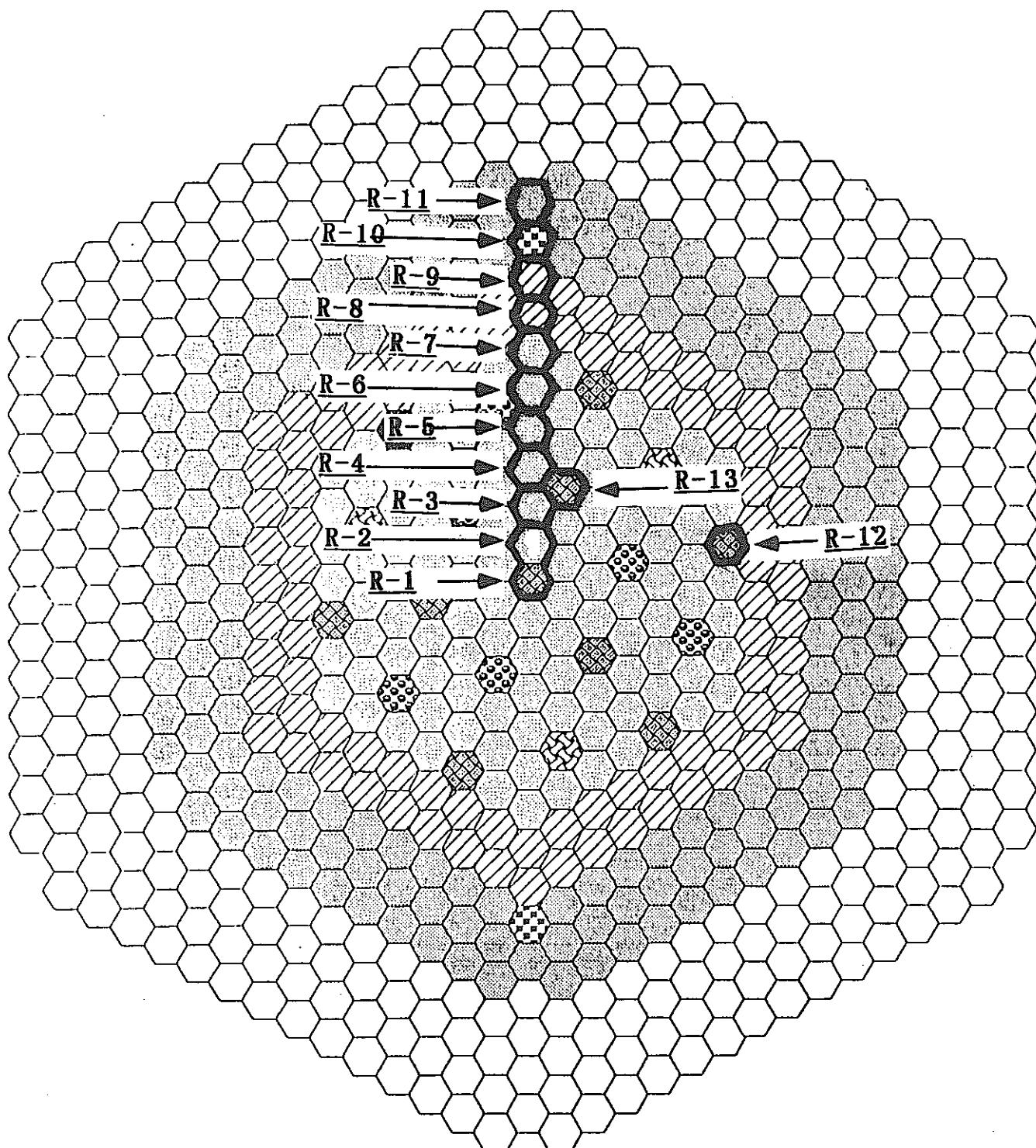


図4 もんじゅR-Z体系図（軸方向、簡略化）



炉心構成要素		記号	本数
炉心燃料集合体	内側炉心	(●)	108
	外側炉心	(▨)	90
プ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

炉心構成要素	記号	本数
中性子源集合体	(●)	2
中性子しゃへい体	(○)	316
サーベイランス集合体	(□)	8

注. 集合体サイズ  
対面寸法11.56cmの正六角形

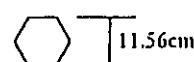


図5-1 もんじゅ径方向断面図

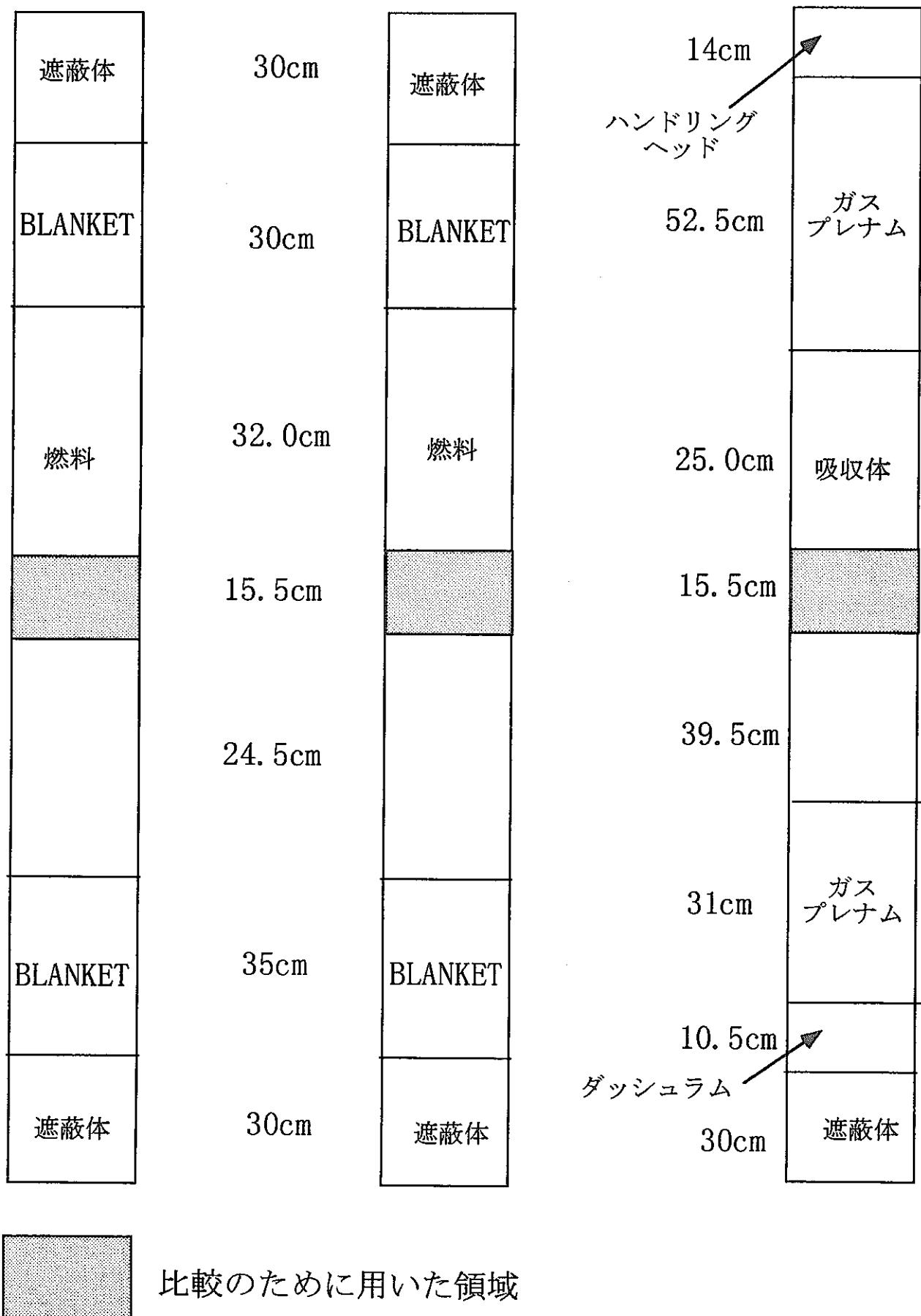


図5-2 もんじゅ軸方向断面図

## 付録

高速炉におけるドップラー反応度解析  
のためのU238サンプルの実効断面積

# Effective Cross Section of $^{238}\text{U}$ Samples for Analyzing Doppler Reactivity in Fast Reactors

## ABSTRACT

An effective cross section of  $^{238}\text{U}$  sample has been derived to accurately calculate the Doppler reactivity worth. The neutron spectrum in the sample is determined by considering the interference effect of neutron spectrum between the sample and the surrounding fuel region, and is used to obtain the effective cross section of the sample. The obtained effective cross section can be calculated using the conventional self-shielding factors. The use of the present cross section has increased the Doppler reactivity worth in ZPPR-9 by about 4% compared to the result by the conventional self-shielding factor method without the spectrum interference effect. This increment coincides with the result of the ultra fine energy cell calculation by PEACO-X<sup>(1)</sup>.

## I. INTRODUCTION

Experiments on Doppler reactivity worths of fast reactors have been conducted using the fast critical assemblies SEFOR<sup>(2)</sup>, FCA<sup>(3)</sup>, ZPPR<sup>(4)</sup> and so on by changing the temperature of small samples or fuel. In the experiment of isothermal temperature variation over the core such as the SEFOR experiment a large proportion of the reactivity worth is due to the core expansion. So it is difficult to isolate the Doppler reactivity worth from the total reactivity.

In the FCA and ZPPR experiments the Doppler samples of  $^{238}\text{U}$ , Fe were contained in capsules with heater. The capsules are adiabatic with neighboring fuel regions. Therefore only the Doppler reactivities of the samples are measured without the effect of the fuel expansion.

The analyses of Doppler samples in the ZPPR assemblies were carried by Okajima<sup>(5)</sup> and Shirakata<sup>(4)</sup>. Okajima utilized a sophisticated method to calculate the effective group cross section of samples : A super-cell model composed of a central sample region, structural region of capsules and a surrounding fuel region was used, and the effective group cross

section of the sample was calculated by using the ultra fine group cell calculation code PEACO-X. He concluded that the resonance interference effect of the sample and the fuel regions was important in calculating the effective group cross section. His conclusion is important for the accurate analysis of Doppler reactivity worth. However there remains a question whether or not the commonly used self-shielding factor method is applicable to such a problem.

In this paper we derive a new formula for the effective group cross section based on the conventional self-shielding factor method. The neutron spectrum interference effect between a sample region and a fuel region is taken into account in terms of collision probability for the super-cell model. Chapter II describes the formulation for the effective group cross section. Chapter III shows numerical results, and conclusions are presented in Chapter IV.

## II. THEORY

Let us first derive an analytic expression for the neutron spectrum in a Doppler sample region. It is assumed that the Doppler sample region denoted by suffix 1 is surrounded by the fuel region denoted by suffix 2 in Fig.1.

The neutron flux  $\phi_1(E)$  in region 1 satisfies

$$\Phi_1(E)\Sigma_1(E)V_1 = P_{11}(E)S_1(E)V_1 + P_{21}(E)S_2(E)V_2 \quad (1)$$

where  $\Sigma_i(E)$  : total cross section of region i

$V_i$  : volume of region i

$P_{ij}(E)$  : collision probability for a neutron born in region i to make its first collision in region j

$S_i(E)$  : neutron source in region i.

The neutron source  $S_i(E)$  is assumed to be proportional to  $1/E$  and spatially constant based on the narrow resonance approximation. The use of the reciprocity relation for the collision probability, and the rational approximation

$$P_{11} = \frac{\Sigma_1(E)}{\Sigma_1(E) + a\Sigma_e} \quad (2)$$

leads to

$$\phi_1(E) = \frac{1}{\Sigma_1(E) + a\Sigma_e} \cdot \frac{\Sigma_2(E) + a\Sigma_e}{\Sigma_2(E)} \cdot \frac{1}{E} \quad (3)$$

where  $a$  is the Bell factor, and  $\Sigma_e = 1/d$  ( $d$  : sample diameter).

When there is no resonant nuclide in region 2,  $\Sigma_2(E)$  is constant. In this case the neutron spectrum in region 1 reduces to the following conventional expression

$$\phi_1(E) \propto \frac{1}{\Sigma_1(E) + a\Sigma_e}. \quad (4)$$

Usually the region 2 contains the isotopes of U and Pu which have resonances. Therefore when the sample contains nuclides whose resonances overlap with those of U and Pu isotopes, it is necessary to take into account of the effect of  $\Sigma_2(E)$  brought to  $\phi_1(E)$  according to Eq.(3). The resonance overlap is of course significant when the sample contains the same nuclide as one of isotopes of U and Pu.

Here we consider the case when the sample contains  $^{238}\text{U}$ . However the formulation can be used for the cases without spoiling generality.

We rewrite Eq.(3) using the microscopic total cross section  $\sigma(E)$  of  $^{238}\text{U}$  as follows

$$\phi_1(E) \propto \frac{1}{\sigma(E) + \sigma_{1b}} \cdot \frac{\sigma(E) + \sigma_{2b}}{\sigma(E) + \sigma_{2b'}} \cdot \frac{1}{E} \quad (5)$$

where

$$\sigma_{1b} = \frac{1}{N_1} \{ \Sigma_{10} + a\Sigma_e \}$$

$$\sigma_{2b} = \frac{1}{N_2} \{ \Sigma_{20} + a\Sigma_e \}$$

$$\sigma_{2b'} = \frac{1}{N_2} \Sigma_{20}$$

$N_i$  : atomic number densities of  $^{238}\text{U}$  in region i

$\Sigma_{ij}$  : macroscopic total cross sections of the nuclides

excluding  $^{238}\text{U}$  of region i.

Here  $\sigma_{1b}$  corresponds to the background cross section of the isolated Doppler sample, and  $\sigma_{2b'}$  corresponds to that of the core region. Therefore the neutron spectrum is expressed by

$$\phi_1(E) = \left\{ \frac{A}{\sigma(E) + \sigma_{1b}} + \frac{B}{\sigma(E) + \sigma_{2b'}} \right\} \cdot \frac{1}{E}$$

where

$$A = \frac{\sigma_{1b} - \sigma_{2b'}}{\sigma_{1b} - \sigma_{2b'}}$$

$$B = \frac{\sigma_{2b} - \sigma_{2b'}}{\sigma_{1b} - \sigma_{2b'}}.$$
(6)

The effective cross section is therefore given by

$$\overline{\sigma_{eff}} = \frac{\int dE \sigma(E) \left\{ \frac{A}{\sigma(E) + \sigma_{1b}} + \frac{B}{\sigma(E) + \sigma_{2b'}} \right\} \cdot \frac{1}{E}}{\int dE \left\{ \frac{A}{\sigma(E) + \sigma_{1b}} + \frac{B}{\sigma(E) + \sigma_{2b'}} \right\} \cdot \frac{1}{E}}.$$
(7)

While the conventional effective cross section  $\overline{\sigma_{1b}}$  with the background cross section  $\sigma_{1b}$  is defined by

$$\overline{\sigma_{1b}} = \frac{\int dE \frac{\sigma(E)}{\sigma(E) + \sigma_{1b}} \cdot \frac{1}{E}}{\int dE \frac{1}{\sigma(E) + \sigma_{1b}} \cdot \frac{1}{E}}.$$
(8)

This conventional effective cross section is calculated for different background cross section and different temperature using the table of self-shielding factor. Transforming Eq.(8) we obtain

$$K_{1b} = \int dE \frac{1}{\sigma(E) + \sigma_{1b}} \cdot \frac{1}{E} = \frac{\tau}{\overline{\sigma_{1b}} + \sigma_{1b}}$$
(9)

where  $\tau$  is the lethargy of the energy group considered. The similar equation is obtained for  $\overline{\sigma_{2b'}}$

$$K_{2b'} = \frac{\tau}{\sigma_{2b'} + \sigma_{2b'}} . \quad (10)$$

Substituting Eqs.(9) and (10) into (7) leads to

$$\overline{\sigma_{eff}} = \frac{AK_{1b}\overline{\sigma_{1b}} + BK_{2b'}\overline{\sigma_{2b'}}}{AK_{1b} + BK_{2b'}} . \quad (11)$$

Thus a new formula of the effective cross section is derived using the conventional cross section  $\overline{\sigma_{1b}}$  and  $\overline{\sigma_{2b'}}$ .

In the following let us investigate Eq.(11). First we consider a case where the sample region is much large compared to the surrounding region. In this case  $\Sigma_e$  is small because  $\Sigma_e = 1/d$  ( $d$  : diameter of region 1), so

$$\sigma_{1b} \ll \sigma_{2b} \approx \sigma_{2b'} . \quad (12)$$

Therefore  $A = 1$  and  $B = 0$ . Thus Eq.(11) reduces to

$$\overline{\sigma_{eff}} = \overline{\sigma_{1b}} . \quad (13)$$

Thus in this case the effective cross section reduces to the conventional formula in which  $\Sigma_2$  is assumed constant in Eq.(3), and there is no resonance interference effect.

On the other hand when the sample is very small,

$$\sigma_{1b} > \sigma_{2b'} \text{ and } K_{2b'} > K_{1b} \quad (14)$$

, so

$$\overline{\sigma_{eff}} = \overline{\sigma_{2b'}} . \quad (15)$$

This corresponds to the effective cross section of the surrounding fuel region.

The effective cross section defined by Eq.(11) corresponds to a linear combination of this two limited cases.

### III. NUMERICAL RESULTS

The formula of the effective group cross section has been applied to the analysis of UO<sub>2</sub> Doppler reactivity worth measured at the core center of the fast critical assembly ZPPR-9.

The Doppler reactivity worths responding to the temperature changes 298.0(K) → 487.5(K), 298.0(K) → 644.4(K), 298.0(K) → 794.0(K), 298.0(K) → 935.4(K), 298.0(K) → 1087.0(K) were analyzed.

Figure 2 shows the effective microscopic capture cross section of <sup>238</sup>U in the sample calculated by the present method. The ratio of the cross section to that calculated by the conventional method with the Dancoff factor, Eq.(13) is also shown. The effective cross section was calculated with the JENDL-3.2. The <sup>238</sup>U capture cross section calculated by the present method is smaller than that by the conventional method. The ratio is about unity above 10keV, but 0.8 in the energy range 100eV~1keV. The smaller effective microscopic capture cross section of <sup>238</sup>U in the sample means increment of the resonance self-shielding effect due to the surrounding fuel. Thus the present method estimates stronger interference than the conventional method. Figure 3 shows the comparison between the <sup>238</sup>U background cross section of the isolated Doppler sample ( $\sigma_{1b}$ ) and that of the core region ( $\sigma_{2b}$ ). The  $\sigma_{2b}$  is smaller than the  $\sigma_{1b}$ . The coefficients AK<sub>1b</sub> and BK<sub>2b</sub> in Eq.(11) are the same order. Therefore the effective <sup>238</sup>U capture cross section in the sample approaches the average of  $\sigma_{1b}$  and  $\sigma_{2b}$  as is expected from Eq.(11). This tendency can be seen from Fig.4 which shows the comparison between the effective <sup>238</sup>U capture cross section by the present method and those by using of the <sup>238</sup>U background cross sections ( $\sigma_{1b}$  and  $\sigma_{2b}$ ).

Figure 5 shows the difference of the <sup>238</sup>U capture cross section for temperatures 298.0(K) and 1087.0(K) for the present method and the conventional method. The ratio for the present method relative to the conventional method is 2.7~1.0 in the energy range 1keV~180keV. In the present calculation using the JFS-3-J3.2R there is no resonance parameters above 180keV. So the contribution above 180keV to the Doppler effect cannot be taken into account in the present calculation. Doppler reactivity worths was calculated by using of a perturbation formulation. This formulation uses the changes of <sup>238</sup>U capture cross section in the sample.

Therefore the Doppler reactivity worths by the present method become larger than those by the conventional method.

The ratio of calculated to experimental Doppler reactivities are listed in Table 1 at each temperature. It can be seen from Table 1 that the Doppler reactivity worth calculated by the present method increases by about 4% compared to the conventional method. By comparing the C/E values between these methods, it is shown that the present method better predicts the measured Doppler reactivity worths.

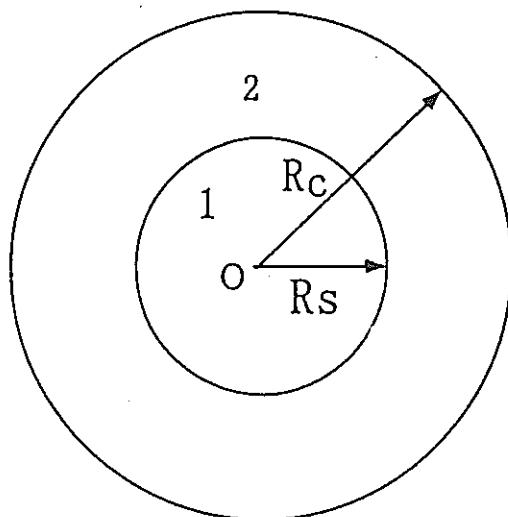
#### IV. CONCLUSIONS

In order to evaluate the resonance interaction effect between the Doppler sample region and core region, a new method was formulated for the effective cross section. When this resonance interaction effect is taken into account, the calculated Doppler reactivity worths become larger than those using the conventional method. From these results we confirmed the effect of the resonance interaction between the Doppler sample region and core region could be estimated by using of the present method.

Table 1 Doppler reactivity worths for each calculation method

Temp (K)	Experiment (¢ /kg)*	Conventional Method		Present Method	
		Calculation(¢ /kg)*	C/E	Calculation(¢ /kg)*	C/E
298.0→					
487.5	-0.0277	-0.0219	0.791	-0.0231	0.834
644.4	-0.0440	-0.0356	0.809	-0.0375	0.852
794.0	-0.0586	-0.0462	0.788	-0.0486	0.829
935.4	-0.0662	-0.0543	0.820	-0.0573	0.867
1087.0	-0.0763	-0.0618	0.810	-0.0658	0.858

\*  $\beta_{\text{eff}} = 3.612 \times 10^{-3}$ , weight of  $^{238}\text{U}$  in sample : 1.08616kg



1:Doppler sample ( $R_s=3.117\text{cm}$ )  
2:Fuel region ( $R_c=30\text{cm}$ )

Fig.1 Two regions model for Doppler sample cross section calculaltion

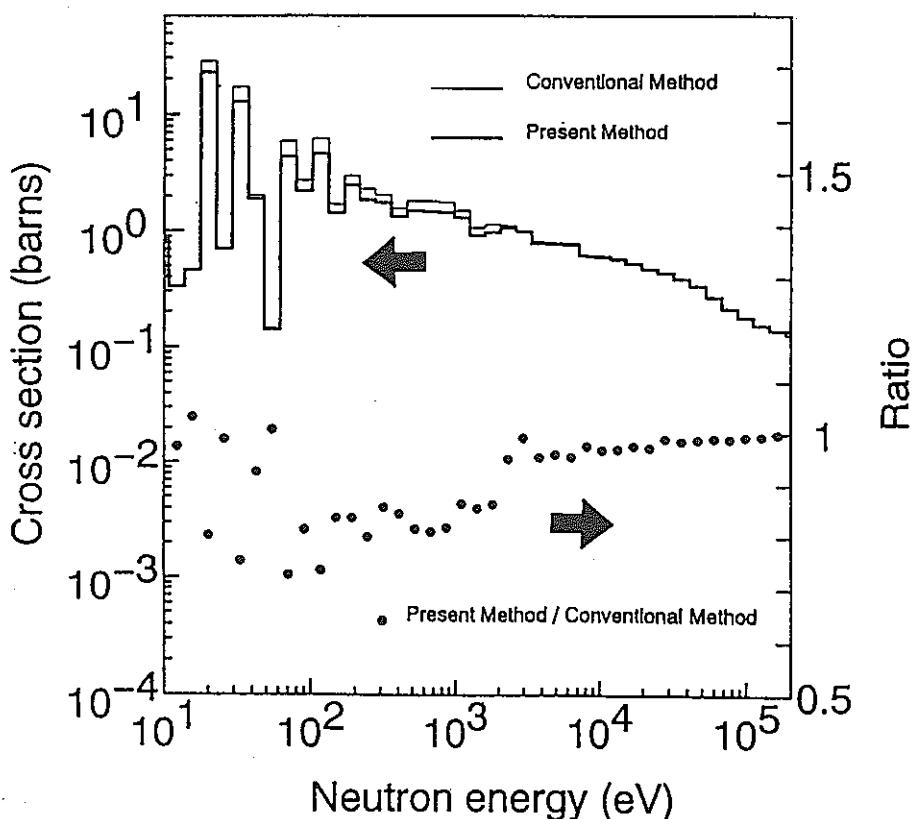


Fig.2 Comparison between  $^{238}\text{U}$  effective microscopic cross sections of Doppler sample calculated by the conventional method and the present method (298K)

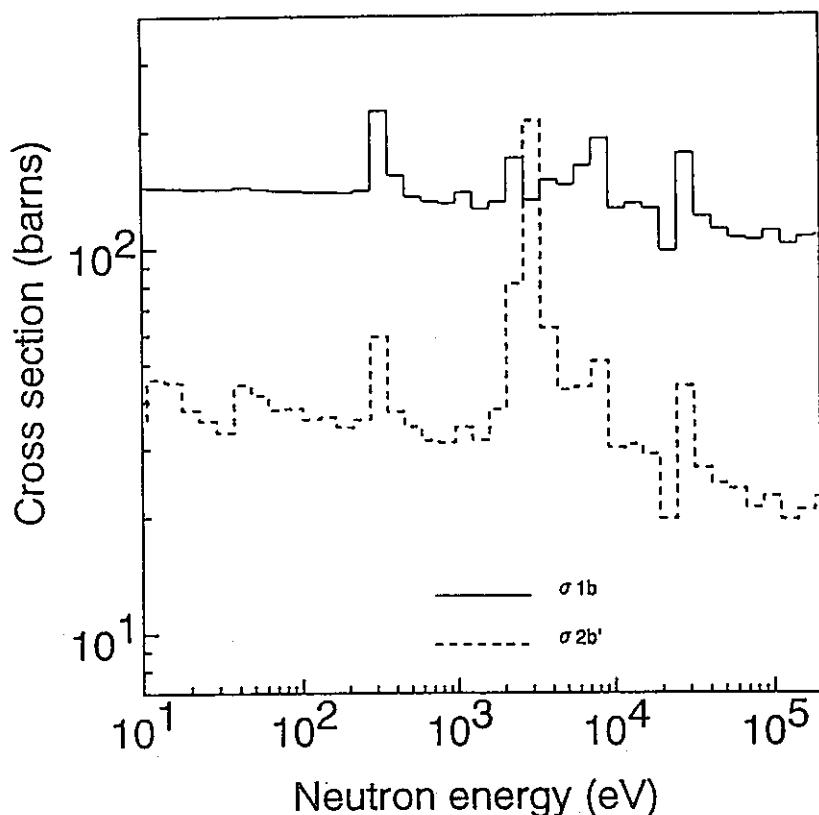


Fig.3 Comparison between  $^{238}\text{U}$  background cross sections of the isolated Doppler sample ( $\sigma_{1b}$ ) and that of the core region ( $\sigma_{2b}$ )

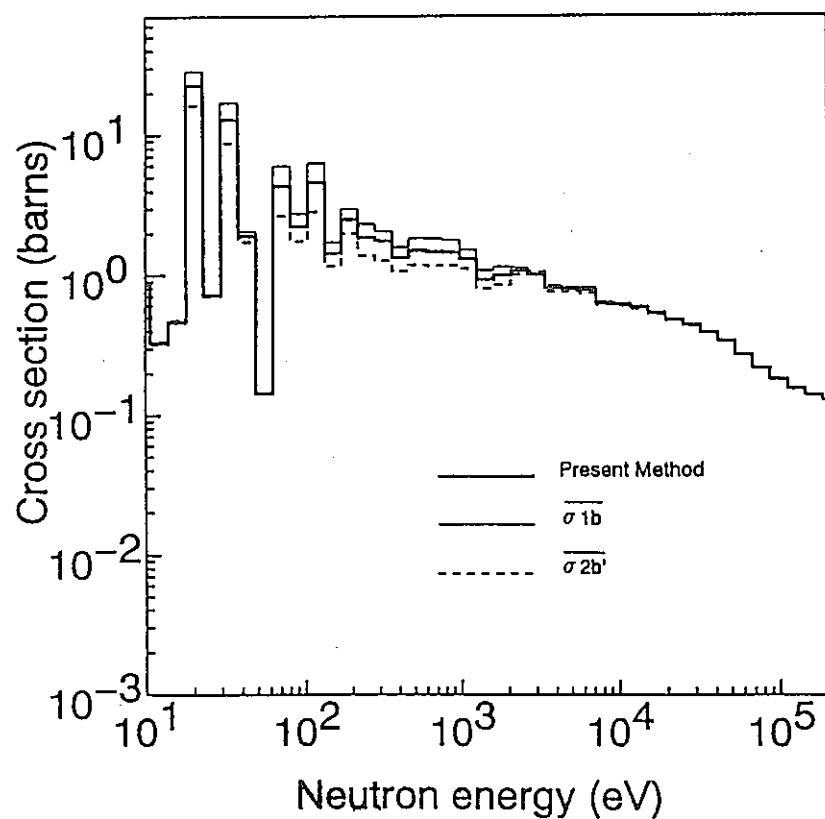


Fig.4 Comparison between  $^{238}\text{U}$  effective microscopic cross section by the present method and those by using of the  $^{238}\text{U}$  background cross sections ( $\sigma_{1b}$  and  $\sigma_{2b}$ )

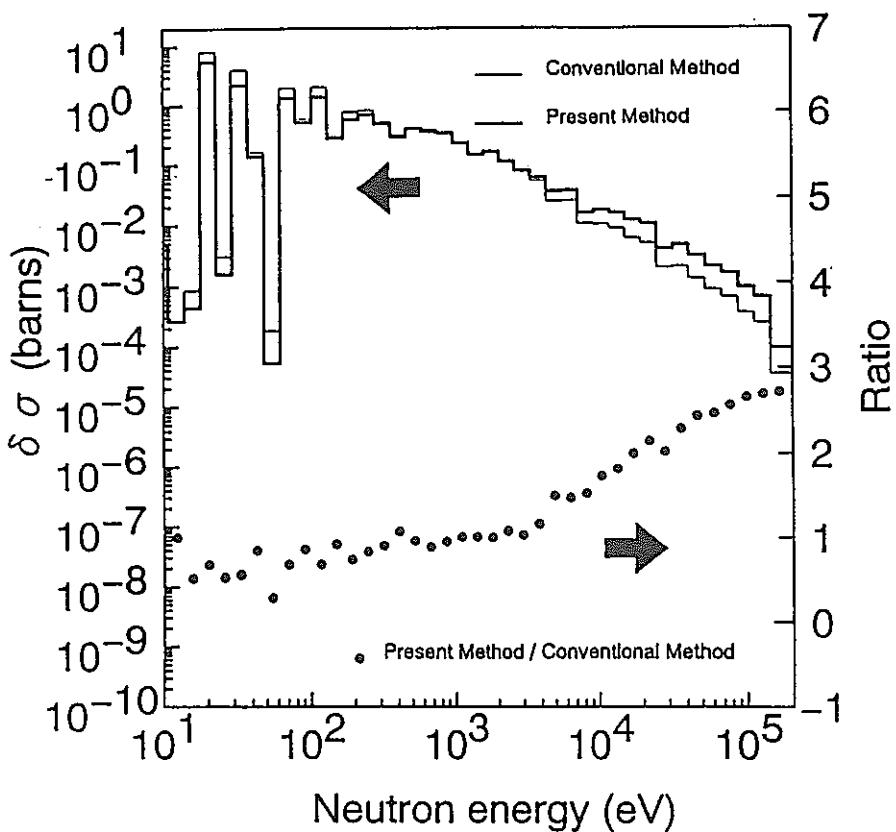


Fig.5 Comparison between the difference of  $^{238}\text{U}$  effective microscopic capture cross sections of Doppler sample calculated by the conventional method and the present method (298K $\rightarrow$ 1087K)

## REFERENCES

- (1) Okajima, S., et al.: Measurement of Doppler Effect up to 2000°C at FCA, JAERI-M 92-125, (1992).
- (2) Freeman, D.D.: "SEFOR Experimental Results and Applications to LMFBR's", General Electric Co., GEAP-13929 (1973).
- (3) Oigawa, H., Okajima, S., Mukaiyama, T., Satoh, K.: Experimental study of  $^{238}\text{U}$  Doppler reactivity worth in FCA XVI-1 and XVI-2 cores, JAERI-M 92-113, (1992), [in Japanese].
- (4) Shirakata, K., et al.: Analysis of JUPITER experiments, Proc. 1981 Semin. on Nuclear Data, JAERI-M 9999, 161 (1982).
- (5) Okajima, S., et al.: Resonance Interaction Effect between Hot Sample and Cold Core in Analysis of Doppler Effect Measurement, J. Nucl. Sci. Technol., 31[10], 1097 (1994).