

BN 及び BFS 炉心解析システムの整備（Ⅱ）
－3 次元 Hex-Z 体系用輸送核特性解析コードの整備－
技術報告書
(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)



2002 年 3 月

株式会社 三菱総合研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan



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

2002

BN及びBFS炉心解析システムの整備（II） －3次元Hex-Z体系用輸送核特性解析コードの整備－

船曳 淳*
角田 弘和*

要旨

BN 及び BFS 炉心体系を正確にモデル化することができる 3 次元 Hex-Z 体系用解析コードの汎用性を向上させ、高精度な核特性解析を実現するために以下の整備を行った。

NSHEX 用 3 次元 Hex-Z 体系用輸送摂動計算コードのノード内中性子束再構築法を改良した。併せて、ノード内中性子束再構築法を用いて得られる中性子束分布を基に、ピーティング係数、最大線出力等の設計パラメータを計算するための機能を 3 次元 Hex-Z 体系用輸送ノード法計算コード NSHEX-BURN に追加した。

3 次元 Hex-Z 体系用有限差分法輸送計算コード MINIHEX を実用レベルに改良するため、キャッシュチューニング等のプログラム構造の改良、加速法の適用、並列計算版の整備を実施した。プログラム構造の改良及び中性子束外挿法の適用によって約 3.8 倍の速度向上を得た。さらに並列化を実施することにより、共有メモリ型並列計算機 GP7000 上で約 5.3 倍（9 PE 使用）、EWS クラスタ上で 1.5 倍（4 PE 使用）の速度向上が得られた。また、並列計算版を整備したことにより、MINIHEX の大規模問題への適用性が高まった。

3 次元 Hex-Z 体系用反応率計算コード LAGOON-HEXZ の機能を拡張し、MINIHEX とのインターフェイス機能を追加整備した。これにより、MINIHEX で計算した中性子束を用いた反応率計算が可能となった。

NSHEX 用の 3 次元輸送摂動計算コード SNPERT-HEXZ をベースに MINIHEX 用 3 次元摂動計算コードを整備した。これにより、MINIHEX で計算した中性子束及び固有値を用いた摂動計算が可能となった。

本報告書は、（株）三菱総合研究所が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務の成果である。

担当部室：大洗工学センター システム技術開発部 中性子工学グループ

*株式会社 三菱総合研究所

Development of a Code System for the BN and BFS Reactor Analysis (II)

—Development of a Three-dimensional Hex-Z Geometry

Transport Code System for Reactor Core Analysis—

Jun Funabiki*

Hirokazu Tsunoda*

Abstract

The following codes were developed to enhance the applicability of the three-dimensional Hex-Z geometry codes that can model the BN and BFS reactor core accurately.

The neutron flux reconstruction method in the three-dimensional transport-based perturbation code SNPERT-HEXZ was modified to improve the calculation accuracy.

New functions to calculate design parameters, such as peaking coefficients, maximum linear power etc., based on the reconstructed neutron flux were added to the three dimensional Hex-Z geometry transport burn-up code NSHEX-BURN.

The three-dimensional Hex-Z finite difference transport code MINIHEX was modified to improve the computational performance. First, mesh-tuning and a flux extrapolation method were applied to MINIHEX. This modification reduced the computational time by a factor of 3.8 at most. Second, the modified MINIHEX was parallelized with MPI by an angular space decomposition method. A series of performance check calculations was performed on GP7000 and DEC/alpha EWS cluster. Speed-up obtained on GP7000 was at most 5.3 for 9 PE and that on DEC/alpha cluster was at most 1.5 for 4 PE. The parallelization of MINIHEX also enhanced the applicability of the code to larger scale computational problems and more detailed reactor core modeling.

An interface to MINIHEX was added to the three-dimensional Hex-Z geometry reaction rate calculation code LAGOON-HEXZ. The added interface enables the code to calculate reaction rates using neutron flux obtained by MINIHEX.

A three-dimensional transport-based perturbation code for MINIHEX was developed based on the three-dimensional transport-based perturbation code NSHEX-HEXZ. This code makes it possible to evaluate reactivity change from the neutron flux and eigenvalue obtained by MINIHEX.

* Mitsubishi Research Institute, Inc.

BN 及び BFS 炉心解析システムの整備（II）
—3 次元 Hex-Z 体系用輸送核特性解析コードの整備—

報告書 目次

要旨.....	i
Abstract.....	ii
目次.....	iii
表リスト	v
図リスト	vi
1. 序論.....	1-1
1. 1 目的	1-1
1. 2 実施項目	1-1
1. 3 実施概要	1-1
1. 3. 1 3次元 Hex-Z 体系用輸送ノード法計算コード NSHEX-BURN の整備	1-1
1. 3. 2 3次元 Hex-Z 体系用有限差分法輸送計算コードの整備	1-2
2. 3次元 Hex-Z 体系用輸送ノード法計算コード NSHEX-BURN の整備	2-1
2. 1 ノード内中性子束構築法の改良.....	2-1
2. 1. 1 手法1	2-1
2. 1. 2 手法2	2-3
2. 1. 3 手法3	2-5
2. 1. 4 手法4	2-6
2. 1. 5 軸方向再構築.....	2-10
2. 1. 6 3次元再構築.....	2-10
2. 2 中性子束再構築法の確認.....	2-10
2. 2. 1 確認方法	2-10
2. 2. 2 手法間の比較結果.....	2-11
2. 3 摂動計算機能の改良	2-11
2. 3. 1 内積処理の方法	2-11
2. 3. 2 内積処理の確認	2-13
2. 3. 3 機能の確認.....	2-13
2. 4 設計パラメータ計算機能の追加.....	2-13
3. 3次元 Hex-Z 体系用有限差分法輸送計算コードの整備	3-1
3. 1 キャッシュチューニング等の改良	3-1
3. 1. 1 内部反復処理部の分析	3-1
3. 1. 2 プログラムの改良.....	3-2
3. 1. 3 試計算	3-2

3. 2 中性子束及び中性子源外挿法の適用	3-3
3. 2. 1 外挿法の実装	3-3
3. 2. 2 試計算	3-3
3. 3 並列処理の導入	3-4
3. 3. 1 並列化の方針	3-4
3. 3. 2 並列化の実施	3-4
3. 3. 3 試計算及び並列化性能の評価	3-5
3. 4 反応率プログラムへのインターフェイス機能の追加	3-7
3. 4. 1 機能追加	3-7
3. 4. 2 機能確認	3-7
3. 5 摂動計算プログラムへのインターフェイス機能の追加	3-8
3. 5. 1 MINIHEX への機能追加	3-8
3. 5. 2 MINIHEX 用摂動計算コードの整備	3-8
3. 5. 3 機能確認	3-8
4. 結論	4-1
参考文献	参-1
付録 A NSHEX の未収束性に関する検討	A-1
付録 B 集合体出力分布評価コード(ASSYPOW)使用マニュアル	B-1

表リスト

表2. 1	NSHEX のファイル出力内容.....	2-16
表2. 2	分布関数の係数	2-18
表2. 3	3次元摂動計算コードの試計算結果.....	2-18
表3. 1	キャッシュチューニング及びプログラム構造改良によって得た スピードアップ	3-11
表3. 2	中性子束及び中性子束外挿法の適用結果	3-11
表3. 3	並列化した MINIHEX のスピードアップ	3-12
表3. 4	厳密摂動計算結果.....	3-12

図リスト

図 2. 1	径方向中性子束分布の計算方向	2-19
図 2. 2	再構築した中性子束分布の比較 (集合体番号 1、1 群、x 方向)	2-20
図 2. 3	再構築した中性子束分布の比較 (集合体番号 1、1 群、u 方向)	2-20
図 2. 4	再構築した中性子束分布の比較 (集合体番号 1、1 群、v 方向)	2-21
図 2. 5	再構築した中性子束分布の比較 (集合体番号 1、4 群、x 方向)	2-21
図 2. 6	再構築した中性子束分布の比較 (集合体番号 1、4 群、u 方向)	2-22
図 2. 7	再構築した中性子束分布の比較 (集合体番号 1、4 群、v 方向)	2-22
図 2. 8	再構築した中性子束分布の比較 (集合体番号 90、1 群、x 方向)	2-23
図 2. 9	再構築した中性子束分布の比較 (集合体番号 90、1 群、u 方向)	2-23
図 2. 10	構築した中性子束分布の比較 (集合体番号 90、1 群、v 方向)	2-24
図 2. 11	再構築した中性子束分布の比較 (集合体番号 90、4 群、x 方向)	2-24
図 2. 12	再構築した中性子束分布の比較 (集合体番号 90、4 群、u 方向)	2-25
図 2. 13	再構築した中性子束分布の比較 (集合体番号 90、4 群、v 方向)	2-25
図 3. 1	改良前の内部反復スキームの概要	3-13
図 3. 2	改良後の内部反復スキームの概要	3-14
図 3. 3	キャッシュチューニング及びプログラム構造改良によるスピードアップ ..	3-15
図 3. 4	中性子束外挿法を外部反復へ適用した場合の収束挙動 (BFS 炉心モデル、7 群)	3-16
図 3. 5	中性子束外挿法を外部反復へ適用した場合の収束挙動 (BFS 炉心モデル、18 群)	3-16
図 3. 6	中性子源外挿法を外部反復へ適用した場合の収束挙動 (BFS 炉心モデル、7 群)	3-17
図 3. 7	中性子源外挿法を外部反復へ適用した場合の収束挙動 (BFS 炉心モデル、18 群)	3-17
図 3. 8	並列化した MINIHEX のスピードアップ (BFS、7 群)	3-18
図 3. 9	並列化した MINIHEX のスピードアップ (BFS、18 群)	3-18
図 3. 10	並列化した MINIHEX の計算時間 (BFS、7 群)	3-19
図 3. 11	並列化した MINIHEX の計算時間 (BFS、18 群)	3-19
図 3. 12	角度並列版 NSHEX のスピードアップ (高速増殖原型炉 13 層、7 群モデル、DEC クラスタ 100BaseT)	3-20
図 3. 13	MINIHEX、CITATION 向け反応率分布処理のフロー	3-21
図 3. 14	MINIHEX の中性子束出力ファイル (34 番) のレコード構成	3-22
図 3. 15	PREP の中性子束評価位置	3-23
図 3. 16	PREP による処理前後の第 1 群中性子束分布 (中心断面)	3-24
図 3. 17	PREP による処理前後の第 7 群中性子束分布 (中心断面)	3-25
図 3. 18	PREP による処理後の各集合体内 6 点の第 1 群中性子束分布	3-26
図 3. 19	PREP による処理後の各集合体内 6 点の第 7 群中性子束分布	3-27
図 3. 20	LAGOON を用いた Pu239 核分裂反応率の C/E 値	3-28

図3. 2 1 LAGOON を用いた U235 核分裂反応率の C／E 値.....	3-29
図3. 2 2 LAGOON を用いた U238 核分裂反応率の C／E 値.....	3-30
図3. 2 3 MINIHEX の摂動計算コード向けファイル出力(90 番)のレコード構成.....	3-31

1. 序論

1. 1 目的

ロシアでは、核兵器の解体により得られる Pu の処分の一環として、現在稼動中の実機高速炉 BN-600 に解体核を含む MOX 燃料を装荷したハイブリッド体系の稼動を目的として、その設計研究が行われている。一方、ロシア解体核処分支援を目的として、核燃料開発サイクル機構（以下、サイクル機構）とロシアのオブニンスクにある物理エネルギー研究所（IPPE）との共同研究が 1999 年 6 月に開始され、その一環として、サイクル機構において、BN-600 ハイブリッド炉心の解析、及び、その予備実験である高速炉臨界実験装置 BFS-2 を用いて構成された体系 BFS-62 炉心を用いた実験解析が行われている。

上記サイクル機構の具体的義務は、高精度な解析を行うことにより、ロシアで行われている BN-600 設計解析、及び臨界実験解析の品質を調査することにある。BN 及び BFS 体系は Hex-Z 体系であり、XYZ 体系であるこれまでの JUPITER 等の臨界実験解析を目的として整備してきたコードシステム¹⁾では、体系を正確に取り扱うことが出来ず、その使用はモデル化誤差を引き起こす原因となる。

このため、昨年度は 3 次元 Hex-Z 体系用輸送ノード法計算コード NSHEX²⁾の汎用性を向上させるために、燃焼計算機能及び摂動計算機能の付加、ならびに加速法の検討を実施し、NSHEX-BURN コード³⁾として整備した。今年度は、同コードのノード内中性子束分布再構築法に改良を加えて BN-600 のベンチマーク計算で問題となる設計用パラメータを計算する際の精度向上を図る。また、サイクル機構が支給する 3 次元 Hex-Z 体系用有限差分法輸送計算コード（暫定版）を実用レベルに改良するため、加速法の検討、並列計算版の整備、及び、後処理プログラムへのインターフェイス機能の追加を行う。

1. 2 実施項目

以下の項目を実施した。

- (1) 3 次元 Hex-Z 体系用輸送ノード法計算コード NSHEX-BURN の整備
- (2) 3 次元 Hex-Z 体系用有限差分法輸送計算コードの整備

1. 3 実施概要

1. 3. 1 3 次元 Hex-Z 体系用輸送ノード法計算コード NSHEX-BURN の整備

BN-600 ハイブリッド体系の 3 次元解析を目的として、3 次元 Hex-Z 体系用輸送ノード法計算コード NSHEX-BURN の改良、及び、汎用性向上のためのシステム整備を行った。具体的な改良、及び、整備の内容は以下に示す通りである。

(1) ノード内中性子束再構築法の改良

昨年度の作業において、NSHEX コードの計算結果に基づく摂動計算機能の追加を行ったが、昨年度適用したノード内中性子束再構築法では、直接計算結果に対し、最大で約 30% の反応度計算結果の誤差を生み出すことから、ノード内中性子束再構築法の改良を行う必要のあることが明らかとなった。そこで、摂動計算及び（2）で記述する集合体内出力分布等の計算を高精度で行うため、以下の手順でノード内中性子束再構築法を改良した。

- ① ノード内中性子束再構築法に関する調査を行い、その改良について検討を行う。
- ② NSHEX を用いた計算により得られる情報を基にノード内中性子束再構築法により、ノード内の 3 次元角度中性子束分布及び随伴角度中性子束分布を多項式展開の形で求める。
- ③ 多項式展開により表されている角度中性子束、随伴角度中性子束をノード内で内積処理する。
- ④ 一般の有限差分摂動計算コードと同様に、②で得られた内積値を基に全炉心に渡る摂動計算を行う。

(2) 設計パラメータ計算機能の追加

ノード内中性子束再構築法を用いて得られる中性子束分布を基に、ピーピング係数、最大線出力等の設計パラメータを計算するための機能を追加した。追加した設計パラメータは次の通りである。

- ① 最大高速中性子束とその位置
- ② 最大線出力とその位置（ユーザーが指定する領域毎の値も含む）
- ③ ピーピング係数（径方向、軸方向、炉心）
- ④ 増殖比（ユーザーが指定する領域毎の値も含む）
- ⑤ 集合体単位最大燃焼度

燃料ピンは、ユーザーが与えるピン（層）数とピンピッチ条件の下、六角格子状に規則的に配列されているものとし、上記パラメータ計算のためのサーベイを行うものとした。

1. 3. 2 3 次元 Hex-Z 体系用有限差分法輸送計算コードの整備

高速炉の核特性解析では、一般に輸送補正を無視することはできない。また、BFS-2 臨界実験装置の燃料セルは六角格子配置であるから、その解析においては Hex-Z 体系用計算コードを適用した方が形状モデル化誤差を低減できる観点から有利である。一方、BFS-2 はセルピッチが 5.1cm と実機高速炉に比べて小さく、炉心を構成する燃料セルの数が非常に多いことから、NSHEX コードの適用は、ノード法の特性がほとんど生かされない上、計算機容量の観点からも現実的ではない。3 次元 XYZ 体系用有限差分法輸送計算コードとして、TRITAC コードが整備されているが、Hex-Z 格子体系計算への適用時には、1 セルを最低 2 分割する必要があり、計算機記憶容量に関する課題が残されている上に、計算結果には上述の形状モデル化誤差も含まれることになる。

以上のことから、BFS-2 臨界実験解析に対して、形状モデル化誤差がなく、計算機記憶容量の合理化を図ることが可能である、3 次元 Hex-Z 体系用有限差分法輸送計算コードの適用が有望であると考えられ、昨年度、サイクル機構によって簡単なプログラムが作成された。現状では、当プログラムには加速法や並列処理の導入といった計算の効率化が図られておらず、1 回の BFS-2 体系計算に数十時間を要しており、計算時間の短縮が強く望まれている。そこで、本作業では、効率的な輸送計算を行うために、3 次元 Hex-Z 体系用有限差分法輸送計算コードに加速法あるいは並列処理の導入を図ると共に、昨年度整備した反応率計算プログラム及び摂動計算コードへのインターフェイス機能を追加した。

(1) 3次元 Hex-Z 体系用有限差分法輸送計算コードへの加速法及び並列処理の導入
BFS-2 臨界実験解析における輸送補正計算を効率的に行うため、以下の手法の導入について検討を行った。

- ① リバランス法等の加速法
- ② 角度メッシュあるいは空間メッシュによる並列処理

(2) 反応率計算プログラム及び摂動計算コードへのインターフェイス機能の追加
3次元 Hex-Z 体系用有限差分法輸送計算コードにより得られた中性子束及び固有値を用いて、反応率及び摂動計算を行うため、昨年度整備を行った以下の後処理プログラムに対するインターフェイス機能の追加を行った。これに伴い、次の後処理プログラムの改良も併せて実施した。

- ① 3次元 Hex-Z 体系用反応率計算コード LAGOON-HEXZ³⁾
- ② NSHEX 用摂動計算コード SNPERT-HEXZ³⁾

2. 3次元 Hex-Z 体系用輸送ノード法計算コード NSHEX-BURN の整備

BN-600 ハイブリッド体系の 3 次元解析を目的として、3 次元 Hex-Z 体系用輸送ノード法計算コード NSHEX-BURN の改良、及び、汎用性向上のためのシステム整備を行った。

2. 1 ノード内中性子束構築法の改良

昨年度の作業において、NSHEX コードの計算結果に基づく摂動計算機能の整備を行ったが、昨年度適用したノード内中性子束再構築法では、直接計算結果に対し、最大で約 30% の反応度計算結果の誤差を生み出すことが明らかとなった。このため、ノード内中性子束再構築法の再検討を行った。

前年度適用した手法は、径方向の再構築で XY 平面内の分布を 2 次式で表すもので、2 次式の係数はノード平均及びノード境界平均角度束を用いた（手法 1）。ここでは次の手法を検討した。

- ノード平均及びノード境界平均角度束に加えて、ノード中央角度束も考慮して 2 次式で表現（手法 2）
- ノード平均及びノード境界平均角度束に加えて、ノード頂点角度束も考慮して 3 次式で表現（手法 3）
- ノード平均及びノード境界平均角度束に加えて、ノード境界中性子束勾配も考慮して 3 次式で表現（手法 4）

以下に各手法を概観する。ただし、軸方向再構築の方法は前年度と同一であるので、ここでは径方向再構築の手法のみを説明する。

2. 1. 1 手法 1

これは前年度適用した手法である。集合体内の径方向中性子束分布は次の x と y の 2 次多項式で近似できると仮定する。

$$\phi(x, y) = \sum_{ij} \phi_{i,j} x^i y^j \quad (2-1)$$

ただし、

$$-\frac{1}{2} \leq x \leq \frac{1}{2} \quad (2-2)$$

すなわち、ノード内の座標は対面間距離が 1 になるように規格化されている。

(2-1) 式を用いてノード平均角度束とノード境界平均角度束は次式のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \phi_{xp} \\ \phi_{xn} \\ \phi_{up} \\ \phi_{un} \\ \phi_{vp} \\ \phi_{vn} \\ \phi_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{36} & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{36} & 0 \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & \frac{\sqrt{3}}{18} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & \frac{\sqrt{3}}{18} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & -\frac{\sqrt{3}}{18} \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{7}{36} & -\frac{\sqrt{3}}{18} \\ 1 & 0 & \frac{5}{72} & 0 & \frac{5}{72} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{00} \\ \phi_{10} \\ \phi_{20} \\ \phi_{01} \\ \phi_{02} \\ \phi_{11} \end{pmatrix} \quad (2-3)$$

中性子束分布の再構築は、(2-3)式により計算されるパラメータ $\tilde{\phi}_i$ が、炉心計算により得られたパラメータ $\bar{\phi}_i$ と一致または可能な限り近い値となるように多項式の各係数を定めることにより行われる。

ここでは、最小自乗法を用いることにより、多項式の各係数を求めることを考える。なお、(2-3)式中にも示されているようにノード平均中性子束 $\bar{\phi}_\alpha$ は炉心計算において収束判定対象であり、最も信頼できる値であるので固定とし、以下に示す最小自乗法適用の際は、Lagrange の未定定数法を用い、各パラメータの絶対差の和を最小とする方法により取り扱われる。これは、次式で示される値が最小となるように多項式の各係数を求める方法である。

$$S = \sum_i (\tilde{\phi}_i - \bar{\phi}_i)^2 \quad (2-4)$$

Lagrange の未定定数法を用いて多項式の各係数について次の方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial \phi_j} \left\{ S - \lambda \left(\phi_{00} + \frac{5}{72} \phi_{20} + \frac{5}{72} \phi_{02} - \bar{\phi}_\alpha \right) \right\} = 0 \quad (2-5)$$

得られた 6 つの方程式より λ を消去し、5 つの方程式と $\bar{\phi}_\alpha$ に関する方程式をあわせた 6 つの方程式を連立させることにより、多項式の 6 つのパラメータが得られる。結局、多項式の係数は次式のように求められる。

$$\begin{pmatrix} \phi_{00} \\ \phi_{10} \\ \phi_{20} \\ \phi_{01} \\ \phi_{02} \\ \phi_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & 2 \\ \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 \\ \frac{27}{10} & \frac{27}{10} & \frac{9}{20} & \frac{9}{20} & \frac{9}{20} & \frac{9}{20} & -\frac{36}{5} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\frac{3}{10} & -\frac{3}{10} & \frac{39}{20} & \frac{39}{20} & \frac{39}{20} & \frac{39}{20} & -\frac{36}{5} \\ 0 & 0 & \frac{3\sqrt{3}}{2} & \frac{3\sqrt{3}}{2} & -\frac{3\sqrt{3}}{2} & -\frac{3\sqrt{3}}{2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\phi}_{x+} \\ \bar{\phi}_{x-} \\ \bar{\phi}_{u+} \\ \bar{\phi}_{u-} \\ \bar{\phi}_{v+} \\ \bar{\phi}_{v-} \\ \bar{\phi}_\alpha \end{pmatrix} \quad (2-6)$$

2. 1. 2 手法2

これは、中性子束高次モーメントを利用することにより得られる x 、 u 、 v 方向のノード中央中性子束を利用することにより、中性子束を構築する方法であり、ノード中心付近の中性子束の再構築精度向上を図ったものである。炉心計算により得られるノード中央中性子束は、中性子束高次モーメントを用いることにより、例えば x 方向の場合、次式で表される。

$$\bar{\phi}_{x0} = \bar{\phi}_x(0) = \sum_i \phi_{x,i} h_i(0) = \phi_{x,0} - \frac{5}{72} \phi_{x,2} + \frac{631}{142240} \phi_{x,4} + \dots$$

他方、(2-1)式からは、 x 方向のノード中央中性子束は次式の横方向積分により得られる。

$$\tilde{\phi}_{x0} = \tilde{\phi}_x(0) = \frac{\int_{-1/\sqrt{3}}^{1/\sqrt{3}} dy \cdot \phi(0, y)}{\int_{-1/\sqrt{3}}^{1/\sqrt{3}} dy} \quad (2-7)$$

u 方向及び v 方向についても同様に横方向積分する必要がある。ここでは、 u 方向及び v 方向の座標をそれぞれ変数 (u_x, u_y) 、 (v_x, v_y) で表し、変数 u_y 、 v_y を用いて横方向積分を行い、元の (x, y) 座標に戻す方法を採用する。前記の座標変数間には、回転の写像行列を用いることによりそれぞれ次の関係式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 60^\circ & \sin 60^\circ \\ -\sin 60^\circ & \cos 60^\circ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2-8-1)$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 120^\circ & \sin 120^\circ \\ -\sin 120^\circ & \cos 120^\circ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2-8-1)$$

この関係式を用いて(2-1)式をそれぞれの方向の変数で表し、横方向積分を行い、再度、(2-8)式を用いて元の x 、 y で表せばよい。たとえば、 u 方向の横方向積分は次式により行われる。

$$\tilde{\phi}_{u0} = \tilde{\phi}_u(0) = \frac{\int_{-1/\sqrt{3}}^{1/\sqrt{3}} du_y \cdot \phi(u_x=0, u_y)}{\int_{-1/\sqrt{3}}^{1/\sqrt{3}} du_y} \quad (2-9)$$

結局、平均中性子束、ノード境界中性子束、ノード中央中性子束は次式のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \tilde{\phi}_{x+} \\ \tilde{\phi}_{x-} \\ \tilde{\phi}_{u+} \\ \tilde{\phi}_{u-} \\ \tilde{\phi}_{v+} \\ \tilde{\phi}_{v-} \\ \tilde{\phi}_{x0} \\ \tilde{\phi}_{u0} \\ \tilde{\phi}_{v0} \\ \tilde{\phi}_\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{36} & \frac{1}{72} & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & -\frac{1}{8} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{36} & -\frac{1}{72} & 0 \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{1}{32} & \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{\sqrt{3}}{18} & \frac{5\sqrt{3}}{288} & \frac{7}{36} & \frac{11}{288} & \frac{5\sqrt{3}}{96} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{1}{32} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{\sqrt{3}}{18} & -\frac{5\sqrt{3}}{288} & \frac{7}{36} & -\frac{11}{288} & -\frac{5\sqrt{3}}{96} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{1}{32} & \frac{\sqrt{3}}{4} & -\frac{\sqrt{3}}{18} & \frac{5\sqrt{3}}{288} & \frac{7}{36} & -\frac{11}{288} & \frac{5\sqrt{3}}{96} \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{1}{32} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & -\frac{\sqrt{3}}{18} & -\frac{5\sqrt{3}}{288} & \frac{7}{36} & \frac{11}{288} & -\frac{5\sqrt{3}}{96} \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{1}{32} & -\frac{1}{4} & \frac{18}{288} & \frac{36}{288} & \frac{36}{288} & \frac{36}{288} & \frac{96}{288} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{9} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \frac{1}{12} & 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{36} & 0 & \frac{1}{36} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \frac{1}{12} & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{36} & 0 & \frac{1}{36} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \frac{5}{72} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{5}{72} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{00} \\ \phi_{10} \\ \phi_{20} \\ \phi_{30} \\ \phi_{01} \\ \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{02} \\ \phi_{12} \\ \phi_{03} \end{pmatrix} \quad (2-10)$$

右辺の行列は 10 行 10 列の正方行列ではあるが、行列式が 0 となるため逆行列を求めることは不可能であり、換言すれば、上記のパラメータは x と y の 3 次式による表現では完全に独立ではないと言うことができる。

そこで、3 次式による記述は断念し、2 次式による定式化を行うこととする。2 次式による表現では、各パラメータは次のように表される。

$$\begin{pmatrix} \tilde{\phi}_{x+} \\ \tilde{\phi}_{x-} \\ \tilde{\phi}_{u+} \\ \tilde{\phi}_{u-} \\ \tilde{\phi}_{v+} \\ \tilde{\phi}_{v-} \\ \tilde{\phi}_{x0} \\ \tilde{\phi}_{u0} \\ \tilde{\phi}_{v0} \\ \tilde{\phi}_\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 & 0 & \frac{1}{36} \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 & 0 & \frac{1}{36} \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{\sqrt{3}}{18} & \frac{7}{36} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{\sqrt{3}}{18} & \frac{7}{36} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{\sqrt{3}}{4} & -\frac{\sqrt{3}}{18} & \frac{7}{36} \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & -\frac{\sqrt{3}}{18} & \frac{7}{36} \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{1}{4} & \frac{18}{36} & \frac{36}{36} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{9} \\ 1 & 0 & \frac{1}{12} & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{36} & \frac{1}{36} \\ 1 & 0 & \frac{1}{12} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{36} & \frac{1}{36} \\ 1 & 0 & \frac{5}{72} & 0 & 0 & \frac{5}{72} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{00} \\ \phi_{10} \\ \phi_{20} \\ \phi_{01} \\ \phi_{11} \\ \phi_{02} \\ \phi_{12} \end{pmatrix} \quad (2-10')$$

手法 1 と同様に Lagrange の未定定数法を用いて多項式の各係数について次の方程式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \phi_{00} \\ \phi_{10} \\ \phi_{20} \\ \phi_{01} \\ \phi_{11} \\ \phi_{02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{25}{153} & -\frac{25}{153} & -\frac{25}{153} & -\frac{25}{153} & -\frac{25}{153} & -\frac{25}{153} & \frac{5}{153} & \frac{5}{153} & \frac{5}{153} & \frac{32}{17} \\ \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{128}{51} & \frac{128}{51} & \frac{26}{51} & \frac{26}{51} & \frac{26}{51} & \frac{26}{51} & -\frac{46}{51} & \frac{5}{51} & \frac{5}{51} & -\frac{324}{51} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4}{\sqrt{3}} & \frac{4}{\sqrt{3}} & -\frac{4}{\sqrt{3}} & -\frac{4}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{2}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\frac{8}{51} & -\frac{8}{51} & \frac{94}{51} & \frac{94}{51} & \frac{94}{51} & \frac{94}{51} & \frac{22}{51} & -\frac{29}{51} & -\frac{29}{51} & -\frac{324}{51} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\phi}_{x+} \\ \bar{\phi}_{x-} \\ \bar{\phi}_{u+} \\ \bar{\phi}_{u-} \\ \bar{\phi}_{v+} \\ \bar{\phi}_{v-} \\ \bar{\phi}_{x0} \\ \bar{\phi}_{u0} \\ \bar{\phi}_{v0} \\ \bar{\phi}_a \end{pmatrix} \quad (2-11)$$

2. 1. 3 手法3

ノード頂点中性子束を用いた場合、ノード平均1個+ノード境界6個+ノード頂点6個の計13個のパラメータが利用可能であり、10個の係数を求める必要のある3次式による構築法の適用には十分である。各パラメータは次式により表される。

$$\begin{pmatrix} \tilde{\phi}_{x+} \\ \tilde{\phi}_{x-} \\ \tilde{\phi}_{u+} \\ \tilde{\phi}_{u-} \\ \tilde{\phi}_{v+} \\ \tilde{\phi}_{v-} \\ \tilde{\phi}_{uu+} \\ \tilde{\phi}_{uu-} \\ \tilde{\phi}_{uv+} \\ \tilde{\phi}_{uv-} \\ \tilde{\phi}_{vx+} \\ \tilde{\phi}_{vx-} \\ \tilde{\phi}_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{36} & \frac{1}{72} & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & -\frac{1}{8} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{36} & -\frac{1}{72} & 0 \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{1}{32} & \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{\sqrt{3}}{18} & \frac{5\sqrt{3}}{288} & \frac{7}{36} & \frac{11}{288} & \frac{5\sqrt{3}}{96} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{1}{32} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{\sqrt{3}}{18} & -\frac{5\sqrt{3}}{288} & \frac{7}{36} & -\frac{11}{288} & -\frac{5\sqrt{3}}{96} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{1}{32} & \frac{4}{\sqrt{3}} & \frac{18}{288} & \frac{36}{288} & -\frac{36}{288} & -\frac{36}{288} & \frac{96}{288} \\ 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & \frac{1}{2\sqrt{3}} & \frac{4\sqrt{3}}{8\sqrt{3}} & \frac{1}{12} & \frac{1}{24} & \frac{1}{24\sqrt{3}} & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & -\frac{1}{8} & -\frac{1}{2\sqrt{3}} & \frac{4\sqrt{3}}{-8\sqrt{3}} & \frac{1}{12} & -\frac{1}{24} & -\frac{1}{24\sqrt{3}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3\sqrt{3}} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & -\frac{1}{3\sqrt{3}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & -\frac{1}{8} & \frac{1}{2\sqrt{3}} & -\frac{4\sqrt{3}}{8\sqrt{3}} & \frac{1}{12} & -\frac{1}{24} & \frac{1}{24\sqrt{3}} & 0 \\ 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & -\frac{1}{2\sqrt{3}} & -\frac{4\sqrt{3}}{-8\sqrt{3}} & \frac{1}{12} & \frac{1}{24} & -\frac{1}{24\sqrt{3}} & 0 \\ 1 & 0 & \frac{5}{72} & 0 & 0 & 0 & \frac{5}{72} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{00} \\ \phi_{10} \\ \phi_{20} \\ \phi_{30} \\ \phi_{01} \\ \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{02} \\ \phi_{12} \\ \phi_{03} \end{pmatrix} \quad (2-12)$$

ここで、ノード中央中性子束は使用されていないが、その理由は、前項で示したように3次式による記述では、完全に独立ではないからである。

前項と同様に、ノード平均中性子束を固定し、Lagrange の未定定数法を用いることにより各係数を求める。結局、各係数は次式により表される。

$$\begin{pmatrix}
 \phi_{00} \\
 \phi_{10} \\
 \phi_{20} \\
 \phi_{30} \\
 \phi_{01} \\
 \phi_{11} \\
 \phi_{21} \\
 \phi_{02} \\
 \phi_{12} \\
 \phi_{03}
 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix}
 -\frac{25}{444} & -\frac{25}{444} & -\frac{25}{444} & -\frac{25}{444} & -\frac{25}{444} & -\frac{35}{444} & -\frac{35}{444} & -\frac{35}{444} & -\frac{35}{444} & -\frac{35}{444} & -\frac{35}{444} & \frac{67}{37} \\
 4 & -4 & 2 & -2 & -2 & 2 & -5 & 5 & 0 & 0 & 5 & 5 & 0 \\
 \frac{417}{481} & \frac{417}{481} & \frac{84}{481} & \frac{84}{481} & \frac{84}{481} & \frac{84}{481} & \frac{879}{962} & \frac{879}{962} & \frac{60}{481} & \frac{60}{481} & \frac{879}{962} & \frac{879}{962} & -\frac{216}{37} \\
 \frac{481}{481} & \frac{481}{481} & \frac{481}{481} & \frac{481}{481} & \frac{481}{481} & \frac{481}{481} & \frac{962}{962} & \frac{962}{962} & \frac{481}{481} & \frac{481}{481} & \frac{962}{962} & \frac{962}{962} & 0 \\
 -10 & 10 & -8 & 8 & 8 & -8 & 9 & -9 & 0 & 0 & -9 & 9 & 0 \\
 0 & 0 & 2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} & 2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} & -\frac{5}{2\sqrt{3}} & \frac{5}{2\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} & -\frac{2\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} & \frac{2\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} & 0 \\
 0 & 0 & \frac{6\sqrt{3}}{13} & \frac{6\sqrt{3}}{13} & -\frac{6\sqrt{3}}{13} & -\frac{6\sqrt{3}}{13} & \frac{9\sqrt{3}}{9\sqrt{3}} & \frac{9\sqrt{3}}{9\sqrt{3}} & 0 & 0 & -\frac{9\sqrt{3}}{9\sqrt{3}} & -\frac{9\sqrt{3}}{9\sqrt{3}} & 0 \\
 0 & 0 & -6\sqrt{3} & 6\sqrt{3} & -6\sqrt{3} & 6\sqrt{3} & \frac{9\sqrt{3}}{2} & \frac{9\sqrt{3}}{2} & \frac{9\sqrt{3}}{2} & \frac{9\sqrt{3}}{2} & \frac{9\sqrt{3}}{2} & \frac{9\sqrt{3}}{2} & 0 \\
 -\frac{27}{481} & -\frac{27}{481} & \frac{306}{481} & \frac{306}{481} & \frac{306}{481} & \frac{306}{481} & \frac{213}{962} & \frac{213}{962} & \frac{606}{481} & \frac{606}{481} & \frac{213}{962} & \frac{213}{962} & -\frac{216}{37} \\
 -\frac{481}{18} & \frac{481}{18} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{9}{9} & -\frac{9}{9} & 0 & 0 & -\frac{9}{9} & \frac{9}{9} & 0 \\
 0 & 0 & -6\sqrt{3} & 6\sqrt{3} & -6\sqrt{3} & 6\sqrt{3} & \frac{5\sqrt{3}}{2} & \frac{5\sqrt{3}}{2} & \frac{13\sqrt{3}}{2} & \frac{13\sqrt{3}}{2} & \frac{5\sqrt{3}}{2} & \frac{5\sqrt{3}}{2} & 0
 \end{pmatrix} \begin{pmatrix}
 \bar{\phi}_{x+} \\
 \bar{\phi}_{x-} \\
 \bar{\phi}_{u+} \\
 \bar{\phi}_{u-} \\
 \bar{\phi}_{v+} \\
 \bar{\phi}_{v-} \\
 \bar{\phi}_{uu+} \\
 \bar{\phi}_{uu-} \\
 \bar{\phi}_{uv+} \\
 \bar{\phi}_{uv-} \\
 \bar{\phi}_{vx+} \\
 \bar{\phi}_{vx-} \\
 \bar{\phi}_{\alpha}
 \end{pmatrix}$$

(2-13)

2. 1. 4 手法4

ノード境界中性子束勾配を用いる方法を考える。これは、中性子束高次モーメントを利用することにより得られる x、u、v 方向のノード境界中性子束勾配を利用することにより、ノード法により得られるパラメータから 3 次式で中性子束を構築する方法である。炉心計算により得られる中性子束勾配は、中性子束高次モーメントを用いることにより、例えば x 方向の場合、次式で表される。

$$\bar{\phi}'_x(x) = \frac{d}{dx} \bar{\phi}_x(x) = \sum_i \phi_{x,i} h'_i(x) = \phi_{x,1} + 2x \cdot \phi_{x,2} + \left(3x^2 - \frac{7}{50}\right) \phi_{x,3} + \left(4x^3 - \frac{725}{3556} \cdot 2x\right) \phi_{x,4} + \dots \quad (2-14)$$

(2-14)式にノード境界の座標を代入することにより、x 方向のノード境界中性子束勾配は次式により表される。

$$\bar{\phi}'_{x+} = \bar{\phi}'_x\left(\frac{1}{2}\right) = \phi_{x,1} + \phi_{x,2} + \frac{61}{100} \phi_{x,3} + \frac{1053}{3556} \phi_{x,4} + \dots \quad (2-15-1)$$

$$\bar{\phi}'_{x-} = \bar{\phi}'_x\left(-\frac{1}{2}\right) = \phi_{x,1} - \phi_{x,2} + \frac{61}{100} \phi_{x,3} - \frac{1053}{3556} \phi_{x,4} + \dots \quad (2-15-2)$$

他方、(2-1)式からは、x 方向の中性子束勾配は次式により得られる。

$$\tilde{\phi}'_x(x) = \frac{d}{dx} \frac{\int_{y_s(x)}^{y_t(x)} dy \cdot \phi(x, y)}{\int_{y_s(x)}^{y_t(x)} dy} \quad (2-16)$$

ここで、

$$y_s(x) = \frac{1 - |x|}{\sqrt{3}} \quad (2-17)$$

(2-16)式にノード境界の座標を代入すれば、ノード境界中性子束勾配が得られる。

u 方向及び v 方向についても同様の処理を行う必要がある。ここでは、u 方向及び v 方向

の座標をそれぞれ変数(u_x, u_y)、(v_x, v_y)で表し、変数 u_y, v_y を用いて横方向積分を行い、元の(x, y)座標に戻す方法を採用する。前記の座標変数間には、回転の写像行列を用いることによりそれぞれ次の関係式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 60^\circ & \sin 60^\circ \\ -\sin 60^\circ & \cos 60^\circ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2-18-1)$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 120^\circ & \sin 120^\circ \\ -\sin 120^\circ & \cos 120^\circ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2-18-2)$$

この関係式を用いて(2-1)式をそれぞれの方向の変数で表し、 x 方向と同様の操作を行う。たとえば、 u 方向の場合は次式の通りである。

$$\tilde{\phi}'_u(u_x) = \frac{d}{du_x} \frac{\int_{y_s(u_x)}^{v_s(u_x)} du_y \cdot \phi(u_x, u_y)}{\int_{y_s(u_x)}^{v_s(u_x)} du_y} \quad (2-19)$$

結局、平均中性子束、ノード境界中性子束、ノード境界中性子束勾配は次式のように表すことができる。

$$\left(\begin{array}{c} \tilde{\phi}_{x+} \\ \tilde{\phi}_{x-} \\ \tilde{\phi}_{u+} \\ \tilde{\phi}_{u-} \\ \tilde{\phi}_{v+} \\ \tilde{\phi}_{v-} \\ \tilde{\phi}_{x+}' \\ \tilde{\phi}_{x-}' \\ \tilde{\phi}_{u+}' \\ \tilde{\phi}_{u-}' \\ \tilde{\phi}_{v+}' \\ \tilde{\phi}_{v-}' \\ \bar{\phi}_a \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cccccccccc} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{36} & \frac{1}{72} & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & -\frac{1}{8} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{36} & -\frac{1}{72} & 0 \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{1}{32} & \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{1}{6\sqrt{3}} & \frac{5}{96\sqrt{3}} & \frac{7}{36} & \frac{11}{288} & \frac{5}{32\sqrt{3}} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{1}{32} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{1}{6\sqrt{3}} & -\frac{5}{96\sqrt{3}} & \frac{7}{36} & -\frac{11}{288} & -\frac{5}{32\sqrt{3}} \\ 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{1}{32} & \frac{\sqrt{3}}{4} & -\frac{1}{6\sqrt{3}} & \frac{5}{96\sqrt{3}} & \frac{7}{36} & -\frac{11}{288} & \frac{5}{32\sqrt{3}} \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{1}{32} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & -\frac{1}{6\sqrt{3}} & -\frac{5}{96\sqrt{3}} & \frac{7}{36} & \frac{11}{288} & -\frac{5}{32\sqrt{3}} \\ 0 & 1 & 1 & \frac{3}{4} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{9} & -\frac{1}{36} & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \frac{3}{4} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{9} & -\frac{1}{36} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \frac{1}{16} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{5}{6\sqrt{3}} & \frac{13}{48\sqrt{3}} & \frac{13}{18} & \frac{43}{144} & \frac{13}{16\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{6} & \frac{1}{16} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{5}{6\sqrt{3}} & \frac{13}{48\sqrt{3}} & -\frac{13}{18} & \frac{43}{144} & \frac{13}{16\sqrt{3}} \\ 0 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{6} & -\frac{1}{16} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{5}{6\sqrt{3}} & \frac{13}{48\sqrt{3}} & \frac{13}{18} & -\frac{43}{144} & \frac{13}{16\sqrt{3}} \\ 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{16} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{5}{6\sqrt{3}} & \frac{13}{48\sqrt{3}} & -\frac{13}{18} & -\frac{43}{144} & \frac{13}{16\sqrt{3}} \\ 1 & 0 & \frac{5}{72} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{5}{72} & 0 & 0 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \phi_{00} \\ \phi_{10} \\ \phi_{20} \\ \phi_{30} \\ \phi_{01} \\ \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{02} \\ \phi_{12} \\ \phi_{03} \end{array} \right) \quad (2-20)$$

ここで、 ϕ_{21} と ϕ_{03} の係数（それぞれ、(2-20)式右辺行列の 7 列目と 10 列目）を比較すると、0 以外のところでは、全て 1:3 となっており、それぞれの係数を個々に求めることは不可能であり、 $\phi_{21}+3\phi_{03}$ に対してしか値が与えられないことが分かる。従って、どちらかの係数を 0 とするか、両係数の関係を与える必要がある。前者の方法では u 及び v 方向の変数で中性子束を記述した場合、 x 方向との整合がとれない、すなわち、分布が再現できないことになる。そこで、 x 、 u 、 v 方向で ϕ_{21} と ϕ_{03} との間に共通した条件（関係式）を与え、いずれの方向の変数を用いて中性子束を記述した場合でも分布を再現できる、すなわち、いずれの式も恒等式となるように工夫することにする。

今、両係数が次の関係にあると仮定する。

$$\phi_{21} = \alpha \cdot \phi_{03} \quad (2-21)$$

すると、各方向の 3 次の項は次のように表される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i+j=3} \phi_{x,ij} \cdot x^i y^j = \phi_{x,30} \cdot x^3 + \phi_{x,21} (x^2 y + \alpha \cdot y^3) + \phi_{x,12} \cdot x y^2 \\ \sum_{i+j=3} \phi_{u,ij} \cdot u_x^i u_y^j = \phi_{u,30} \cdot u_x^3 + \phi_{u,21} (u_x^2 u_y + \alpha \cdot u_y^3) + \phi_{u,12} \cdot u_x u_y^2 \\ \sum_{i+j=3} \phi_{v,ij} \cdot v_x^i v_y^j = \phi_{v,30} \cdot v_x^3 + \phi_{v,21} (v_x^2 v_y + \alpha \cdot v_y^3) + \phi_{v,12} \cdot v_x v_y^2 \end{array} \right. \quad (2-22)$$

この 3 つの式が恒等式となるような α が見つかれば、それを適用することとする。

具体的方法としては、(2-22)式に対し、 u 及び v 方向についても(2-18)式を用いて x と y で表し、各項の係数を等しくすることが可能な α を見つける。

x 方向と u 方向が恒等式となるような α は次のように求められる。

$$\alpha = 1, \frac{-\sqrt{3}\phi_{u,12} - 3\phi_{u,21} - 3\sqrt{3}\phi_{u,30}}{9\phi_{u,21}} \quad (2-23)$$

同様にして、 x 方向と v 方向が恒等式となるような α は次の通りである。

$$\alpha = 1, \frac{\sqrt{3}\phi_{v,12} - 3\phi_{v,21} + 3\sqrt{3}\phi_{v,30}}{9\phi_{v,21}} \quad (2-24)$$

(2-23)、(2-24)式から明らかに α を 1 とすれば、3 方向の中性子束を表す式は恒等式となる。よって α を 1 とし、 $\phi_{21}=\phi_{03}$ と定義することにする。また(2-20)式は次の通り書き換えられる。

$$\begin{pmatrix}
 \tilde{\phi}_{x+} \\
 \tilde{\phi}_{x-} \\
 \tilde{\phi}_{u+} \\
 \tilde{\phi}_{u-} \\
 \tilde{\phi}_{v+} \\
 \tilde{\phi}_{v-} \\
 \tilde{\phi}'_{x+} \\
 \tilde{\phi}'_{x-} \\
 \tilde{\phi}'_{u+} \\
 \tilde{\phi}'_{u-} \\
 \tilde{\phi}'_{v+} \\
 \tilde{\phi}'_{v-} \\
 \bar{\phi}_\alpha
 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix}
 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{36} & \frac{1}{72} \\
 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & -\frac{1}{8} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{36} & -\frac{1}{72} \\
 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{1}{32} & \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{1}{6\sqrt{3}} & \frac{5}{24\sqrt{3}} & \frac{7}{36} & \frac{11}{288} \\
 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{1}{32} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{1}{6\sqrt{3}} & -\frac{5}{24\sqrt{3}} & \frac{7}{36} & -\frac{11}{288} \\
 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{1}{32} & \frac{\sqrt{3}}{4} & -\frac{1}{6\sqrt{3}} & \frac{5}{24\sqrt{3}} & \frac{7}{36} & -\frac{11}{288} \\
 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{1}{32} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & -\frac{1}{6\sqrt{3}} & -\frac{5}{24\sqrt{3}} & \frac{7}{36} & \frac{11}{288} \\
 0 & 1 & 1 & \frac{3}{4} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{9} & -\frac{1}{36} \\
 0 & 1 & -1 & \frac{3}{4} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{9} & -\frac{1}{36} \\
 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \frac{1}{16} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{5}{6\sqrt{3}} & \frac{13}{12\sqrt{3}} & \frac{13}{18} & \frac{43}{144} \\
 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{6} & \frac{1}{16} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{5}{6\sqrt{3}} & \frac{13}{12\sqrt{3}} & -\frac{13}{18} & \frac{43}{144} \\
 0 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{6} & -\frac{1}{16} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{5}{6\sqrt{3}} & \frac{13}{12\sqrt{3}} & \frac{13}{18} & -\frac{43}{144} \\
 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{16} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{5}{6\sqrt{3}} & \frac{13}{12\sqrt{3}} & -\frac{13}{18} & -\frac{43}{144} \\
 1 & 0 & \frac{5}{72} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{5}{72} & 0
 \end{pmatrix} \begin{pmatrix}
 \phi_{00} \\
 \phi_{10} \\
 \phi_{20} \\
 \phi_{30} \\
 \phi_{01} \\
 \phi_{11} \\
 \phi_{21} \\
 \phi_{02} \\
 \phi_{12} \\
 \phi_{03}
 \end{pmatrix} \quad (2-25)$$

前項と同様に、ノード平均中性子束を固定し、Lagrange の未定定数法を用いることにより各係数を求める。結局、各係数は次式により表される。なお、既に $\phi_{21} = \phi_{03}$ の関係式は反映されている。

$$\begin{pmatrix}
 \bar{\phi}_{x+} \\
 \bar{\phi}_{x-} \\
 \bar{\phi}_{u+} \\
 \bar{\phi}_{u-} \\
 \bar{\phi}_{v+} \\
 \bar{\phi}_{v-} \\
 \bar{\phi}'_{x+} \\
 \bar{\phi}'_{x-} \\
 \bar{\phi}'_{u+} \\
 \bar{\phi}'_{u-} \\
 \bar{\phi}'_{v+} \\
 \bar{\phi}'_{v-} \\
 \bar{\phi}_\alpha
 \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix}
 \phi_{00} \\
 \phi_{10} \\
 \phi_{20} \\
 \phi_{30} \\
 \phi_{01} \\
 \phi_{11} \\
 \phi_{21} \\
 \phi_{02} \\
 \phi_{12} \\
 \phi_{03}
 \end{pmatrix} \quad (2-26)$$

ただし、行列 A は次のように表される。

-	25	-	25	-	25	-	25	-	25	-	80	-	80	-	80	-	80	-	80	-	1074
	6294		6294		6294		6294		6294		3147		3147		3147		3147		3147		1049
	13		13		13		13		13		5		5		5		5		5		0
	12		12		24		24		24		24		48		48		48		48		0
	4707		4707		27		27		27		25719		25719		4233		4233		4233		180
54548	54548		109096		109096		109096		109096		54548		54548		109096		109096		109096		1049
299	299		311		311		311		311		383		383		143		143		143		0
202	202		404		404		404		404		404		808		808		808		808		0
0	0		13		13		13		13		0		0		16√3		16√3		16√3		0
			8√3		8√3		8√3		8√3						16√3		16√3		16√3		0
0	0		3√3		3√3		3√3		3√3		0		0		15√3		15√3		15√3		0
			52		52		52		52						52		52		52		0
0	0		3√3		3√3		3√3		3√3		0		0		3√3		3√3		3√3		0
			4		4		4		4						8		8		8		0
1587	1587		6267		6267		6267		6267		5751		5751		35703		35703		35703		180
54548	54548		109096		109096		109096		109096		54548		54548		109096		109096		109096		1049
315	315		279		279		279		279		63		63		783		783		783		0
202	202		404		404		404		404		404		808		808		808		808		0
0	0		3√3		3√3		3√3		3√3		0		0		3√3		3√3		3√3		0
			4		4		4		4						8		8		8		0

2. 1. 5 軸方向再構築

軸方向については、炉心計算より得られる高次モーメントがそのまま用いることが可能であり、次式のように表される。

$$\phi(z) = \phi_0 + \phi_1 \cdot z + \phi_2 \cdot \left(z^2 - \frac{1}{12} \right) + \phi_3 \cdot \left(z^3 - \frac{3}{20}z \right) + \phi_4 \cdot \left(z^4 - \frac{3}{14}z^2 + \frac{3}{560} \right) \quad (2-27)$$

ただし、座標はノード高さが 1 になるように規格化されており、z の定義域は次の通り。

$$-\frac{1}{2} \leq z \leq \frac{1}{2} \quad (2-28)$$

なお、次数は炉心計算の条件により決められる。

2. 1. 6 3 次元再構築

径方向、軸方向双方の再構築結果を組み合わせることにより、次式の通りノード内の 3 次元中性子束分布を得ることができる。

$$\phi(x, y, z) = \phi(x, y) \cdot \frac{\phi(z)}{\phi} \quad (2-29)$$

2. 2 中性子束再構築法の確認

2. 2. 1 確認方法

前年度の再構築検討の補足を含めて、ノード内の再構築した中性子束分布を示し、各手法間の違いを検討する。

本来ならば、径方向の角度束を 2 次または 3 次の多項式で表現した関数面の比較が必要であるが、定量的な検討に適さないので図 2.1 に示すように、x、u、v の各軸に沿った中性子束分布（角度束から生成したスカラー束）を算出し、これを各手法間で比較する。

比較のための中性子束は次式で計算した（径方向再構築に限定）。

$$\tilde{\phi}(x, y) = \sum_m w_m \phi_m(x, y) / \bar{\phi} \quad (2-30)$$

ここで、

$\tilde{\phi}(x, y)$: 比較のために規格化したスカラー束

$\bar{\phi}$: ノード平均スカラー束

$\phi_m(x, y)$: 再構築した角度束

w_m : 角度重み

これにより、ノード内径方向の再構築法によりノード内中性子束分布の手法依存性が明らかになる。

2. 2. 2 手法間の比較結果

NSHEX 計算は 4 群で行った。計算体系は集合体 8 層で構成される KNK-II ベンチマーク体系⁴⁾である。比較に際しては、体系内の中性子束分布を考慮し、径方向中心集合体番号 1 (第 1 層位置) 及び集合体番号 90 (第 4 層位置) の 2 種類で比較する。軸方向は炉心中心面にある。再構築方法として採り上げた手法は次の 5 種類である。

- ① 方法 1 : 2. 1. 1 項で述べた手法 1
- ② 方法 2 : 前年度の 2 番目の手法で、各パラメータの相対値を最小にする方法
- ③ 方法 3 : 2. 1. 2 項で述べた手法 2
- ④ 方法 4 : 2. 1. 3 項で述べた手法 3
- ⑤ 方法 5 : 2. 1. 4 項で述べた手法 4

ここで、方法 2 は前年度の報告でも述べたように、現時点では採用するにふさわしくないものであるが、これを裏付ける結果を示すものとして比較に載せた。

図 2.2～図 2.7 に集合体番号 1 の第 1 群及び第 4 群の比較結果を示す。明らかに方法 2 については、分布平均が 1 から大きくずれており、定式化及びプログラミング上の問題が存在することを示唆している。方法 2 以外の 4 種類では分布計上は異なるものの、概ね似たような分布を示している。ただし、第 4 群の中性子束分布を見ると、方法 4 の分布が他に比べて大きく異なる。

同様な傾向は、図 2.8～図 2.13 に示す集合体番号 90 の第 1 群及び第 4 群の比較結果からも分かる。特に集合体番号 90 の場合は炉心中心からやや離れた位置にあることから、中性子束径方向勾配も相対的に大きく、方法 4 の分布の違いが大きい。

このように、再構築した中性子束分布は方法 1、方法 3、方法 5 などが適切なもの候補に考えられる。ただし、以上見てきた結果からは、真値に近い手法はどれかという決め手が見えていない。定量的には摂動計算の結果等により判断することが必要である。

2. 3 摂動計算機能の改良

2. 3. 1 内積処理の方法

前年度に 3 次元輸送ノード法計算コード NSHEX の計算結果に基づく摂動計算コードの作成を行った。NSHEX の計算結果を用いる摂動コードのポイントは角度束の内積処理にあ

る。すなわち、

①NSHEX コードを用いた計算により得られる情報を基にノード内中性子束再構築法により、ノード内の 3 次元角度中性子束分布および随伴角度中性子束分布を多項式展開の形で求める。

②多項式展開により表されている角度中性子束、随伴角度中性子束をノード内で内積処理する。

ここで、①は前節で述べたような再構築法を適用する。②の角度束内積は次式の通り計算する。

$$\begin{aligned} <\psi, \phi^* >_{Node} &= \int_{Node} dV \psi(x, y, z) \cdot \phi^*(x, y, z) / \int_{Node} dV \\ &= \int dx dy \psi(x, y) \cdot \phi^*(x, y) \times \frac{1}{\bar{\psi} \cdot \bar{\phi}^*} \int dz \psi(z) \cdot \phi^*(z) \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2-31)$$

有限差分法に基づく計算と異なり、再構築された中性子束を用いた摂動計算では、高次の項の寄与を考慮する必要がある。

さて、径方向積分においては、(2-32)から(2-42)までの以下の一連の積分結果を用いる。

$$\int dx dy = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2-32)$$

$$\int x^2 dx dy = \frac{5}{144} \sqrt{3} \quad (2-33)$$

$$\int x^4 dx dy = \frac{7}{1440} \sqrt{3} \quad (2-34)$$

$$\int x^6 dx dy = \frac{3}{3584} \sqrt{3} \quad (2-35)$$

$$\int y^2 dx dy = \frac{5}{144} \sqrt{3} \quad (2-36)$$

$$\int y^4 dx dy = \frac{7}{1440} \sqrt{3} \quad (2-37)$$

$$\int y^6 dx dy = \frac{85}{96768} \sqrt{3} \quad (2-38)$$

$$\int x^2 y^2 dx dy = \frac{7}{4320} \sqrt{3} \quad (2-39)$$

$$\int x^2 y^4 dx dy = \frac{73}{483840} \sqrt{3} \quad (2-40)$$

$$\int x^4 y^2 dx dy = \frac{31}{161280} \sqrt{3} \quad (2-41)$$

$$\int x^i y^j dx dy = 0 \quad (i \text{ または } j \text{ が奇数}) \quad (2-42)$$

これらを(2-30)式の軸方向を除く積分に適用すると、多項式展開係数の各成分に乗せられる係数は表 2.2 で表される。

また、軸方向の内積は次式で与えられる。

$$\int dz \psi(z) \cdot \phi^*(z) = \psi_0 \cdot \phi_0^* + \frac{1}{12} \psi_1 \cdot \phi_1^* + \frac{1}{180} \psi_2 \cdot \phi_2^* + \frac{1}{2800} \psi_3 \cdot \phi_3^* + \frac{1}{44100} \psi_4 \cdot \phi_4^*$$
(2-43)

以上の通りの関係式を考慮して(2-31)式を内積計算部に組み込んだ。

2. 3. 2 内積処理の確認

NSHEX コードの計算結果を格納するダンプファイルから角度束を読み込み、確認計算を行った。

2. 3. 3 機能の確認

(1) 試計算の問題

集合体 8 層で構成される KNK-II ベンチマーク体系⁴⁾の 1 ケース、11 層で構成される SNR ベンチマーク体系の 2 ケース、計 3 ケースの試計算問題を設定した。どのケースも制御棒引き抜き状態から挿入状態に変化する場合の厳密摂動計算を行い、直接計算による反応度変化と比較した。なお、計算はマクロ断面積ベースで行った。

(2) 試計算結果

表 2.3 に結果を示す。方法 3 及び方法 4 の結果は前年度の結果とほぼ等しく、前年度と同じく直接計算による反応度を過大評価している。また、方法 5 の結果は更に悪化し、直接計算から離れる結果となった。

摂動計算においては、再構築した角度束分布が反応度変化に直接的な効果を及ぼすことが明らかになったが、方法 4 (及び方法 2) を除くと分布を見た範囲 (図 2.2~2.13) では方法 1 と方法 3 とでは分布形状が近いことから同じような反応度となることが想定できるが、表 2.3 はまさしく予想される反応度計算結果の比になっている。方法 4 は他の方法に比べて中性子束分布が明らかに異なることから、反応度変化についても他と比べて大きな差が見られている。方法 5 は分布形状も他と大きく異なっており、SNR 計算体系では他の方法に比べて基準値 (直接計算) に近い値になっているものの、KNK 体系では大きく過小評価している。したがって、以上の結果を見る限り、方法 1 ~ 方法 5 でこれといって決め手になる手法は見出せていないと判断される。

2. 4 設計パラメータ計算機能の追加

ノード内中性子束再構築法を用いて得られる中性子束分布を基に、ピーピング係数、最大線出力等の設計パラメータを計算するための機能を NSHEXBURN コードシステムに追加した。計算対象とした設計パラメータは次の通りである。

- ①. 最大高速中性子束とその位置
- ②. 最大線出力とその位置 (ユーザーが指定する領域毎の値も含む)
- ③. ピーピング係数 (径方向、軸方向、炉心)
- ④. 増殖比 (ユーザーが指定する領域毎の値も含む)
- ⑤. 集合体単位最大燃焼度

これらの計算機能は、NSHEXBURN コード内に組み込むのではなく、MOSES コードと

同じく NSHEXBURN から出力される中性子束ファイルに基づき、中性子束再構築法を適用した ASSYPOW コードで計算することとした。

集合体出力分布評価コード (ASSYPOW) は、MOSES コードが計算した集合体内径方向 6 点中性子束並びに発熱断面積データを用いて集合体内ピン位置の出力を算定する機能を備えている。ASSYPOW コードの中核部である燃料ピン位置における中性子束は TriZ メッシュ計算の中性子束の分布に基づき最小二乗フィッティングでピン出力を計算する。そこで、最小二乗フィッティングに代えて前節までに示した角度束再構築法を適用した。

整備したコードは、中性子束再構築法に基づく関数面を設定し、燃料ピン位置の中性子束を定め、これを基にピン発熱量を計算する。主な計算項目は、最大線出力並びに集合体内径方向、軸方向出力分布である。あわせて炉心高さ積分出力、軸方向ピーキングファクタ (F_z) 、径方向ピーキングファクタ (F_{xy})、高速中性子束も計算する。以下に各項目の計算式を示す。

①線出力密度と最高線出力密度

各集合体、各軸方向メッシュ毎の線出力密度 (q^k) は次式のように表される。

$$q^k = \frac{S \times P^k}{N_{pin}} \cdot F_{xy} \quad (2.44)$$

ここで、

P^k : 各集合体、各軸方向メッシュ毎の出力密度 (W/cc)

S : 各集合体の水平方向断面積(cm²)

N_{pin} : 1集合体当たりのピン本数

F_{xy} : 集合体内における径方向ピーキング係数

である。

各集合体毎の最高線出力密度 (q_{max}) は(1)を用いて次式で計算する。

$$q_{max} = \text{Max}\{q^k\} \quad (2.45)$$

②集合体炉心高さ出力 (P_{core})

NSHEXBURN により得られた各集合体毎の出力密度分布に対して軸方向炉心高さの積分をとり、集合体の水平断面積 (S) を掛けて集合体炉心高さ出力 (P_{core}) を計算する。

$$P_{core} = S \int_{\text{炉心高さ}} P(z) dz \quad (2.46)$$

ここで、

$P(z)$: 高さ z における集合体出力密度(W/cc)

である。

③集合体内径方向ピーキング係数 (F_{xy})

集合体平均軸方向最大出力密度の位置において、次式で計算する。

$$F_{xy} = \frac{\max(P^i)}{\text{average}(P^i)} \quad (2.47)$$

ここで、

P^i : 各燃料ピンの出力密度

である。

④集合体内軸方向ピーキング係数（ F_z ）

軸方向炉心高さの範囲において、次式で計算する。

$$F_z = \frac{\max(P(z))}{\text{average}(P(z))} \quad (2.48)$$

ここで、

$P(z)$: 高さ z における集合体出力密度(W/cc)

である。

なお、以上の NSHEXBURN 用 ASSYPOW コードの使用法は付録 B にまとめた。

表2.1 NSHEXのファイル出力内容(1/2)

```

#1 整数、実数パラメータ
    write(nf20)
    & iop5,nchk,kcm,kmx,ndir,ndir2,nodr,noct,mm,ngmx,mapmx,nlay
    & ,nsn,eigen,hp
#2 角度重み、核分裂中性子スペクトル
    write(nf20)
    & (wgt(m),m=1,mm),(chi(ig),ig=1,ngmx)
#3 軸方向粗めッシュ情報
    write(nf20)
    & (delz(kc),kc=1,kcm),(ihk(kc),kc=1,kcm)
#4 物質マップ
    write(nf20)
    & ((map(n,k),n=1,nchk),k=1,kcm)
c
c      forward cal.
c
c      if( iop5.eq.0 ) then
#5 ノード平均スカラー束
    do 1000 ng=1,ngmx
        write(nf20)
        & ((sclf1(n,k,ng),n=1,nchk),k=1,kmx)
1000  continue

#6 角度束
    do 1100 ng=1,ngmx
        write(nf20)
        & (((((agflx(isx(is),m,1,ir,n,k,ng),
        & m=1,mm),is=1,noct),ir=1,2),n=1,nchk),k=1,kmx)
        & ,((((agflx(isu(is),m,2,ir,n,k,ng),
        & m=1,mm),is=1,noct),ir=1,2),n=1,nchk),k=1,kmx)
        & ,((((agflx(isv(is),m,3,ir,n,k,ng),
        & m=1,mm),is=1,noct),ir=1,2),n=1,nchk),k=1,kmx)
        write(nf20)
        & (((((caf1x(is,m,ir,n,k,ng),
        & m=1,mm),is=1,noct),ir=1,ndir),n=1,nchk),k=1,kmx)
        write(nf20)
        & (((((zflxm(is,m,io,n,k,ng),
        & m=1,mm),is=1,noct),io=1,nodr),n=1,nchk),k=1,kmx)
1100  continue

```

表2.1 NSHEXのファイル出力内容(2/2)

```

c      adjoint cal.
c
#5  スカラー束
      do 2000 ng=ngmx,1,-1
         write(nf20)
         &      ((sclf1(n,k,ng),n=1,nchk),k=1,kmx)
2000  continue

#6  角度束
      do 2100 ng=ngmx,1,-1
         write(nf20)
         &      (((((agflx(isx(is),m,1,ir,n,k,ng),
         &           m=1,mm),is=1,noct),ir=1,2),n=1,nchk),k=1,kmx)
         &      ,((((agflx(isu(is),m,2,ir,n,k,ng),
         &           m=1,mm),is=1,noct),ir=1,2),n=1,nchk),k=1,kmx)
         &      ,((((agflx(isv(is),m,3,ir,n,k,ng),
         &           m=1,mm),is=1,noct),ir=1,2),n=1,nchk),k=1,kmx)
         write(nf20)
         &      (((((caflx(is,m,ir,n,k,ng),
         &           m=1,mm),is=1,noct),ir=1,ndir),n=1,nchk),k=1,kmx)
         write(nf20)
         &      (((((zflxm(is,m,io,n,k,ng),
         &           m=1,mm),is=1,noct),io=1,nodr),n=1,nchk),k=1,kmx)
2100  continue

```

表 2.2 分布関数の係数

		Adjoint分布関数の係数									
		00	10	20	30	01	11	21	02	12	03
Forward分布関数の係数	00	1	0	5/72	0	0	0	0	5/72	0	0
	10	0	5/72	0	7/720	0	0	0	0	7/2160	0
	20	5/72	0	7/720	0	0	0	0	7/2160	0	0
	30	0	7/720	0	3/1792	0	0	0	0	31/80640	0
	01	0	0	0	0	5/72	0	7/2160	0	0	7/720
	11	0	0	0	0	0	7/2160	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	7/2160	0	31/80640	0	0	73/241920
	02	5/72	0	7/2160	0	0	0	0	7/720	0	0
	12	0	7/2160	0	31/80640	0	0	0	0	73/241920	0
	03	0	0	0	0	7/720	0	73/241920	0	0	85/48384

表 2.3 3次元摂動計算コードの試計算結果

	KNK		SNR-iin		SNR-oin	
	$\epsilon_\phi = 1e-4, \epsilon_k = 1e-5$		$\epsilon_\phi = 1e-4, \epsilon_k = 1e-5$		$\epsilon_\phi = 1e-4, \epsilon_k = 1e-5$	
	反応度変化 $\Delta k/kk'$	相対値	反応度変化 $\Delta k/kk'$	相対値	反応度変化 $\Delta k/kk'$	相対値
直接計算(基準)	-3.279E-02	-	-3.136E-02	-	-3.421E-02	-
前年度の内積計算(方法1)	-3.984E-02	1.22	-3.842E-02	1.23	-4.402E-02	1.29
ノード中央中性子束を用いる内積計算(方法3)	-4.053E-02	1.24	-3.845E-02	1.23	-4.392E-02	1.28
ノード頂点中性子束を用いる内積計算(方法4)	-4.335E-2	1.32	-3.895E-02	1.24	-4.962E-02	1.45
ノード境界中性子束勾配を用いる内積計算(方法5)	-2.322E-2	0.708	-3.618E-2	1.15	-4.147E-2	1.21

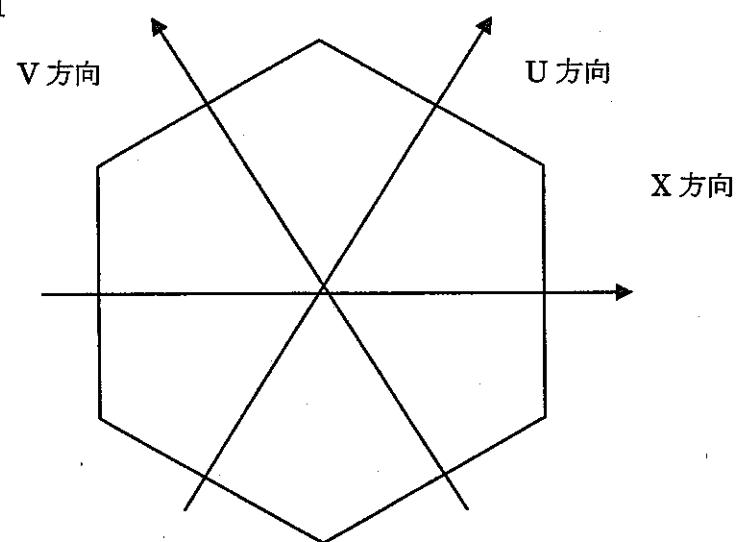


図 2.1 径方向中性子束分布の計算方向

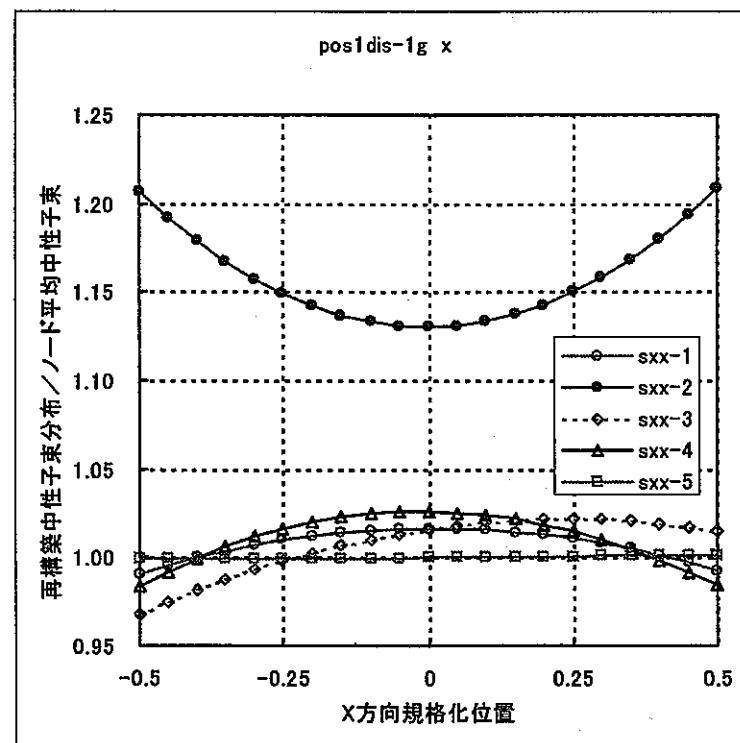


図 2.2 再構築した中性子束分布の比較（集合体番号 1、1 群、x 方向）

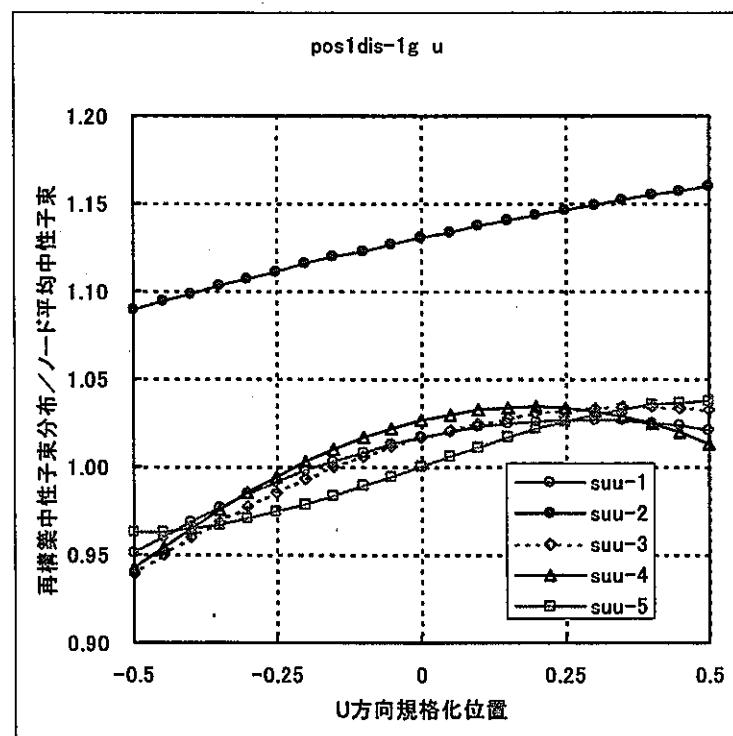


図 2.3 再構築した中性子束分布の比較（集合体番号 1、1 群、u 方向）

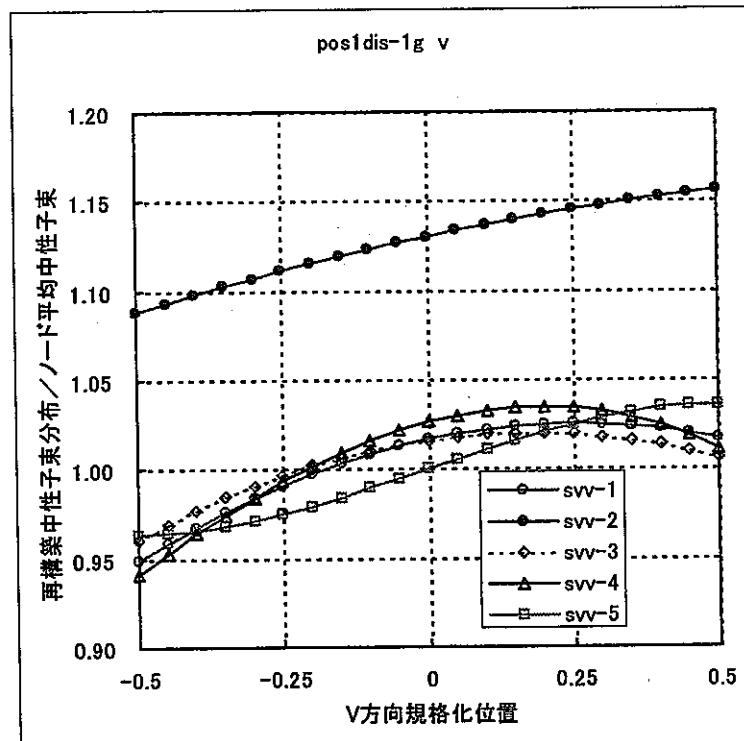


図 2.4 再構築した中性子束分布の比較（集合体番号 1、1 群、v 方向）

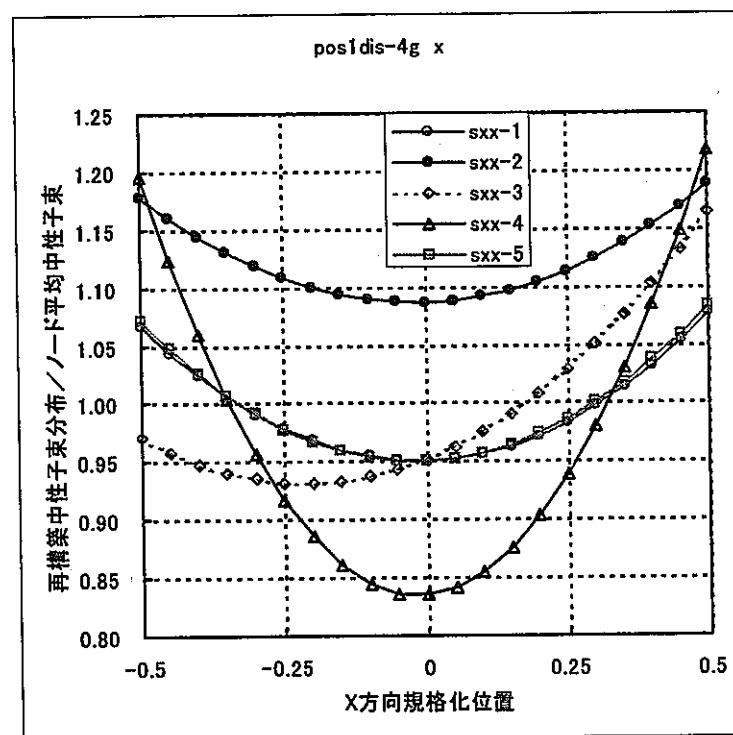


図 2.5 再構築した中性子束分布の比較（集合体番号 1、4 群、x 方向）

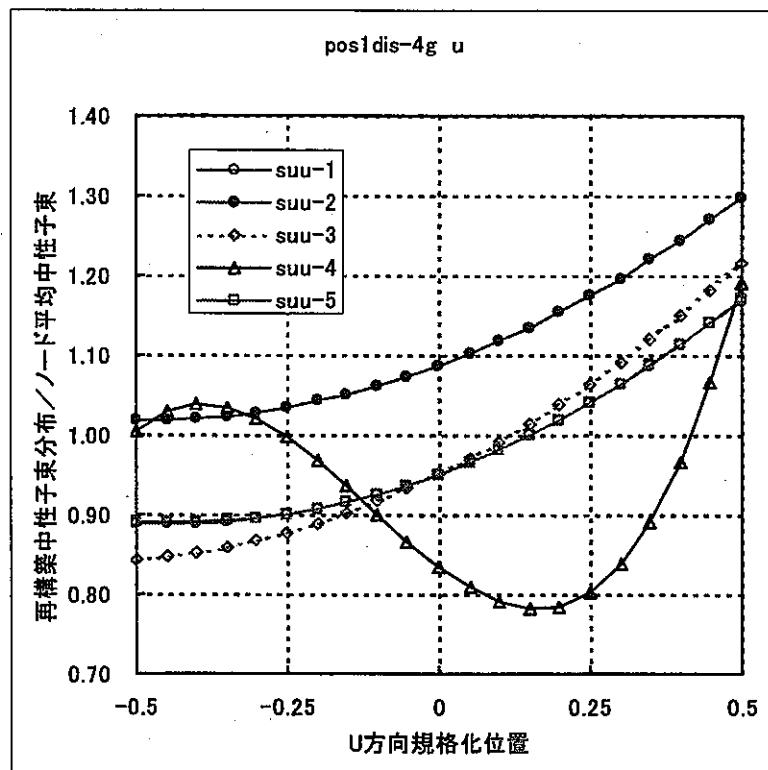


図 2.6 再構築した中性子束分布の比較（集合体番号 1、4 群、u 方向）

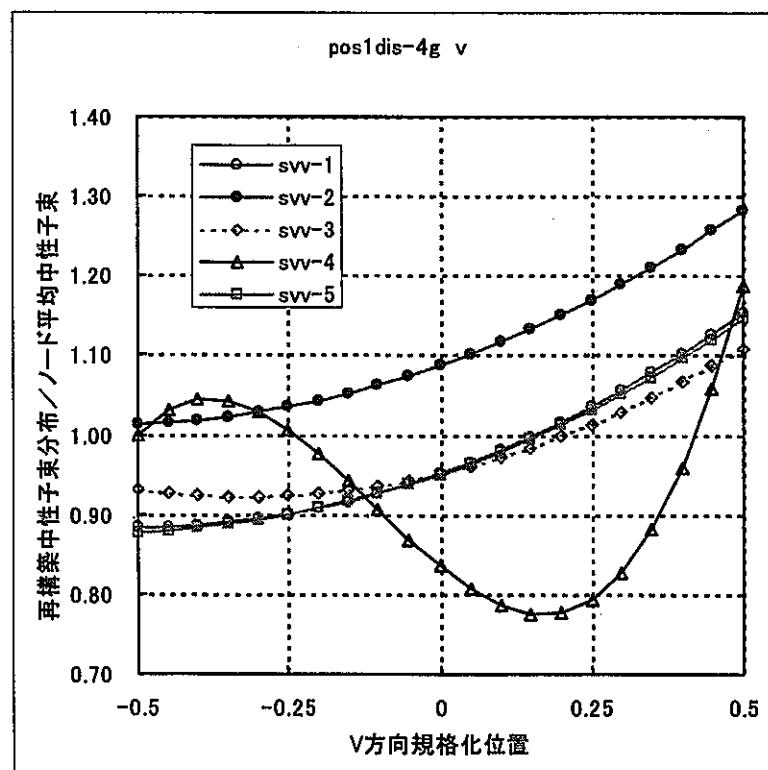


図 2.7 再構築した中性子束分布の比較（集合体番号 1、4 群、v 方向）

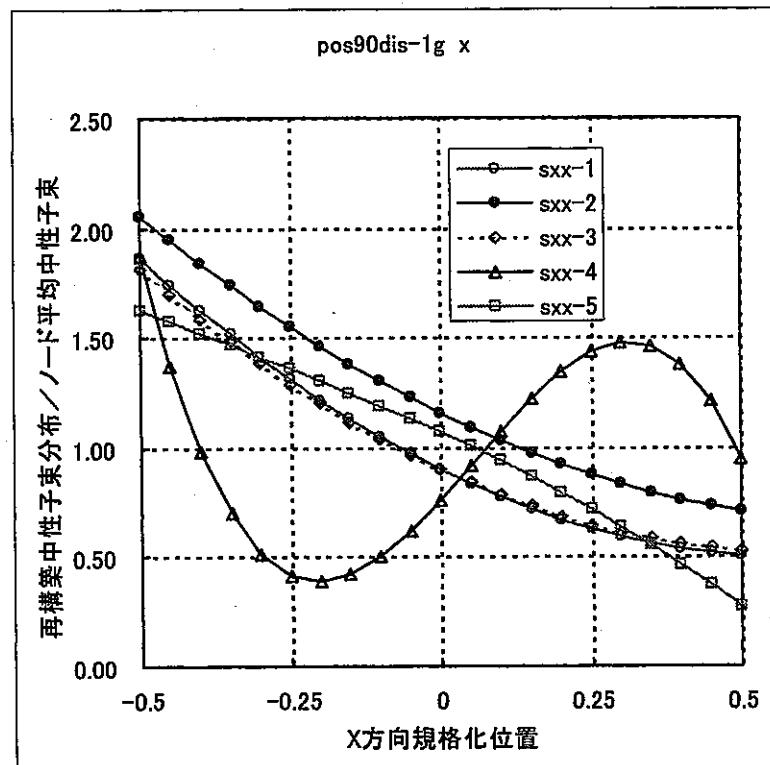


図 2.8 再構築した中性子束分布の比較（集合体番号 90、1 群、x 方向）

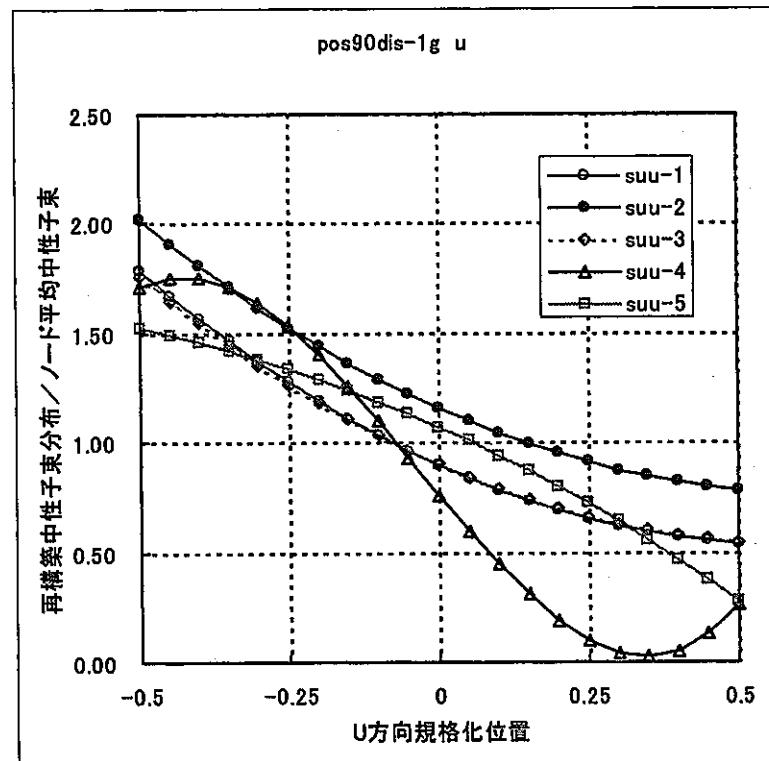


図 2.9 再構築した中性子束分布の比較（集合体番号 90、1 群、u 方向）

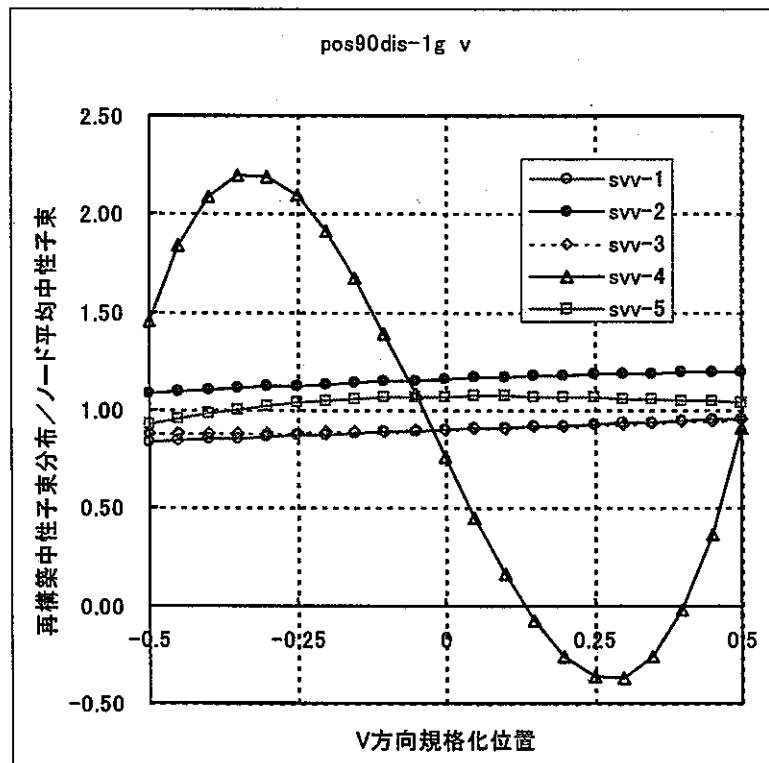


図 2.10 再構築した中性子束分布の比較（集合体番号 90、1 群、v 方向）

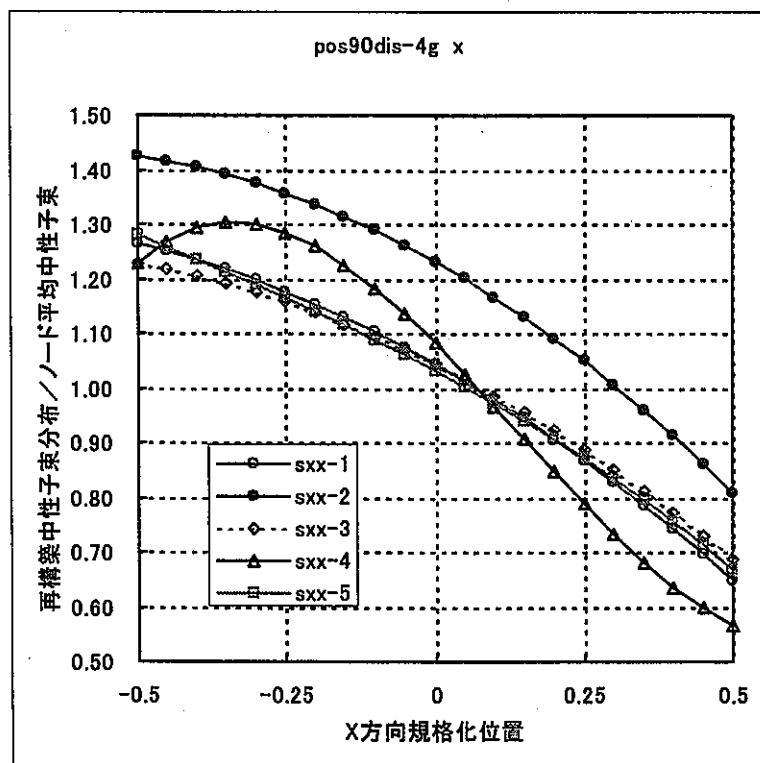


図 2.11 再構築した中性子束分布の比較（集合体番号 90、4 群、x 方向）

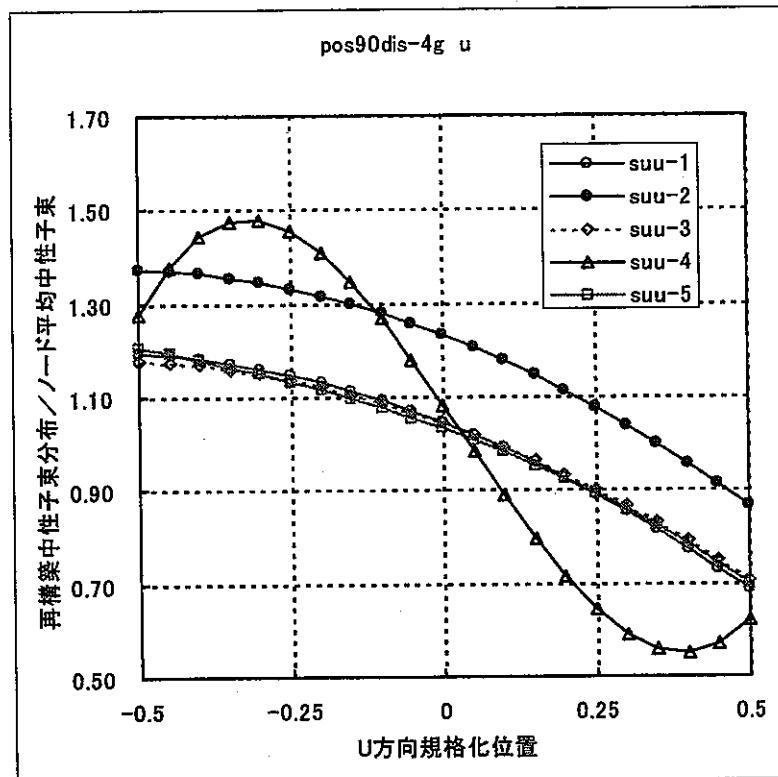


図 2.12 再構築した中性子束分布の比較（集合体番号 90、4 群、u 方向）

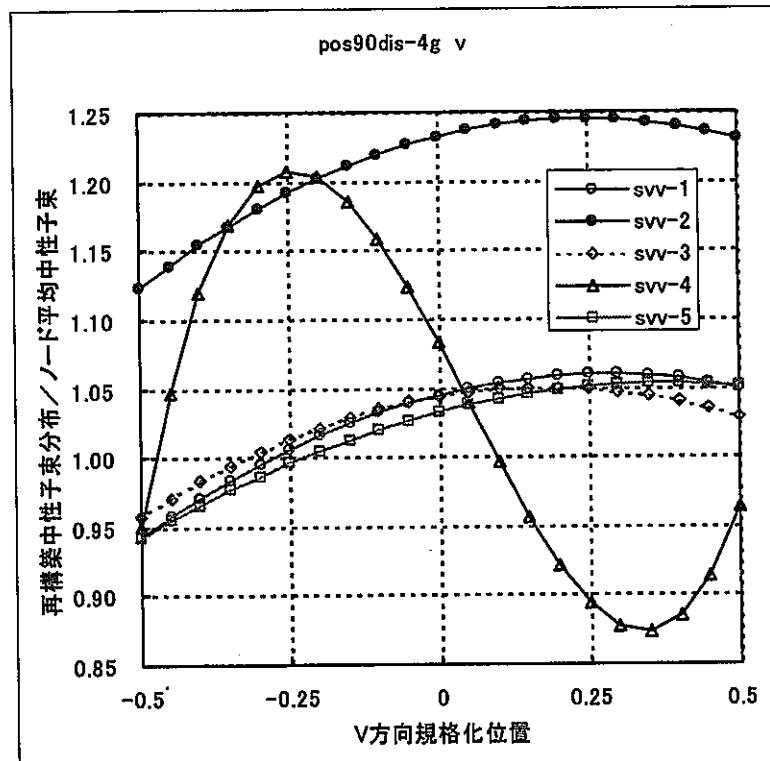


図 2.13 再構築した中性子束分布の比較（集合体番号 90、4 群、v 方向）

3.3 次元 Hex-Z 体系用有限差分法輸送計算コードの整備

BFS-2 臨界実験解析を主目的として作成された 3 次元 Hex-Z 体系用有限差分法輸送計算コード（以下、MINIHEX）は、1 回の BFS-2 体系計算に数十時間をしており、計算時間の短縮が強く望まれている。そのため、計算速度向上の観点からプログラム構造を改良し、更に、NSHEX で有効性が確認されている加速法の適用、及び並列処理の導入を実施し、その効果を検討した。併せて、MINIHEX により得られた中性子束及び固有値から反応率及び摂動計算を行うため、昨年度整備を行った 3 次元 Hex-Z 体系用反応率計算コード LAGOON-HEXZ 及び摂動計算コードへのインターフェイス機能の追加を実施した。

3.1 キャッシュチューニング等の改良

加速法導入に先立ち、MINIHEX のプログラム構造を分析した上でキャッシュチューニング等の改良を施し、スピードアップを図った。これらの改良は、本コードのホットスポットとなっている内部反復ルーチン以下のスキームに対して実施した。

3.1.1 内部反復処理部の分析

(1) ループ構造の分析

内部反復ルーチン INNER では、前回の外部反復で得た各群の外部中性子源を固定し、自群散乱項を更新しながら、空間スウェーブを所定回数繰り返し、角度中性子束（配列 amnt）及びメッシュ境界中性子束（配列 aflux）を計算する。この反復過程において、空間スウェーブが終わるたびに角度中性子束を縮約してスカラー中性子束（配列 flux）を計算し、収束判定を行う。

図 3.1 に内部反復スキームの概要を擬似プログラムによって示す。角度中性子束 amnt は空間及び角度方向の関数であるため、配列 amnt は、オクタント番号 is、オクタント内角度分点 m、軸方向メッシュ番号 k 及び集合体番号 ij ごとの値として 4 次元配列として取り扱われている。空間スウェーブでは、角度メッシュ(is,m)を固定した上で空間メッシュ(ij,k)をスウェーブする。また、各軸方向メッシュ k ごとに IJSWEP ルーチンによって ij 方向（径方向）へスウェーブを行うため、スウェーブ計算部のループ構造は全体として、外側から is,m,k についてのループ、最内側に ij のループが置かれた構造となっている。この 4 重ループ内の主な処理は、ループ最内側において NEFDCL ルーチンをコールし、与えられた (is,m,k,ij) について NEFD アルゴリズムを適用して角度中性子束 amnt 及びメッシュ境界中性子束 aflux を計算することにある。

(2) 配列構造の分析

キャッシュミス（演算に必要なデータがキャッシュに入り切らない場合、メモリからキャッシュにデータを転送せざるを得なくなること）の発生を抑え、高速な演算を行うためには、配列要素へ可能な限り連続的にアクセスするループ構造にする必要がある。Fortran では多次元配列の各要素は、左側のインデックスによって指定される要素から順番にメモリ上に並ぶ。そのため、左側のインデックスについてのループを最内側に置き、右側のインデックスについては最も外側に置くことが望ましい。このような観点から空間スウェーブの 4 重ル

ループ及び配列構造を見ると、ループは外側から is, m, k, ij の順になっているため、主要なアクセス対象である角度束の配列構造は $amnt(ij, k, m, is)$ であるのが望ましいが、実際の構造は $amnt(is, m, ij, k)$ となっており、非効率性が見られる。

(3) サブルーチンコールによるオーバーヘッドの分析

サブルーチンコールは、コールの度にローカル変数のメモリ領域を確保するため、それに伴うオーバーヘッドは Fortran の処理の中でもコストとして大きい。処理をサブルーチン化することによってプログラムの可読性や再利用性が向上するメリットがあるが、計算速度向上の観点からは、サブルーチンコールの回数が膨大にならないよう注意する必要がある。

内部反復処理部 INNER の空間スウェーブ処理では、変数 (is, m, k) の 3 重ループの中でサブルーチン IJSWEP がコールされている。さらに、IJSWEP の中では、変数 ij についてのループ内でサブルーチン NEFDCL がコールされている。すなわち、NEFDCL は、 (is, m, ij, k) の 4 重ループの最内側でコールされている。今回取り扱っている BFS 炉心のモデルにおける (is, m, ij, k) の最大値は $(12, 3, 3781, 58)$ であり、1 回のスウェーブ計算において $12 \times 3 \times 4000 \times 58 = 8 \times 10^6$ 回程度も NEFDCL ルーチンがコールされることになる。このような膨大な数のサブルーチンコールが無視できないオーバーヘッドを伴っている可能性がある。

3. 1. 2 プログラムの改良

上述の分析結果に基づき、次の手順で内部反復処理部を改良した。

- ① 配列 $amnt$ をループ構造に適した構造に変更した。
- ② ①に加え、配列 $aflux$ をループ構造に適した構造に変更した。
- ③ ②に加え、NEFDCL ルーチンを IJSWEP ルーチン内に展開した。
- ④ ③に加え、ループ内の不必要的重複処理を、ループ計算前に一括して行うよう改良するとともに、従来の IJSWEP 及び NEFDCL の処理を統合した NEFDSWEP ルーチンを作成し、INNER からコールするよう整備した。

NEFDSWEP では、 (n, k, m, is) についての 4 重ループ処理をサブルーチンコールなしで一括して行う。これによって、1 回のスウェーブ計算についてサブルーチンコールを 1 回で済ませることができる。最終的に整備した内部反復処理部の擬似プログラムを図 3.2 に示す。改良前の IJSWEP と NEFDCL のプログラム行数はいずれも 70 行程度である。新規作成した NEFDSWEP の行数は 150 行程度であり、可読性に配慮して記述したため、処理統合によるデメリットは特にないと思われる。

3. 1. 3 試計算

前節で述べた①～④の各改良の効果を見るため、BFS 炉心を 7 群で取り扱ったモデルを対象に、参照計算（改良前の計算）に対する相対 CPU 時間を測定した結果を図 3.3 に示す。ここで、CPU 時間は外部反復 2 回目に要した時間を指標として算出した。図 3.3 より、①～④の改良それぞれがスピードアップに対して一定の効果を持っていることがわかる。また、最終的な改良④によって相対 CPU 時間を 0.55 に低減できた。

これらの予備計算結果からキャッシュチューニング及びプログラム構造の改良によって

スピードアップを得られる見通しを得た。そこで、BFS 炉心を 7 群及び 18 群で取り扱ったモデルを対象に収束までの計算を実施した結果を表 3.1 に示す。改良版によって得た実効増倍率、また収束に要した外部反復回数が参照計算と一致したことを以て、改良が正常に行われたことを確認した。また、改良によって、7 群計算では 1.87 倍、18 群計算では 1.74 倍のスピードアップを得た。

なお、MINIHEX は 3 次元輸送ノード法計算コード NSHEX をベースに作成されている。そのため、NSHEX の外部反復以下のプログラム及び配列は MINIHEX と類似な構造となっている。従って、NSHEX に対しても同様なチューニングを施すことにより、同程度のスピードアップが得られる可能性がある。

3. 2 中性子束及び中性子源外挿法の適用

前節で整備したチューニング版 MINIHEX に対する中性子束及び中性子源外挿法の適用性を検討した。

3. 2. 1 外挿法の実装

外挿法としてチェビシェフ加速法を外部反復に適用した。実装においては、3 次元輸送ノード法計算コード NSHEX に対する中性子束及び中性子源外挿法の適用性検討³⁾において NSHEX に組み込まれたチェビシェフ加速ルーチン CHEBY と同一のサブルーチンを実装した。

3. 2. 2 試計算

中性子束及び中性子源外挿法の適用性を、BFS 炉心モデルを対象とした 7 群及び 18 群計算について検討した。外挿を開始する外側反復回数 N^* を 3~7 の範囲で変えて計算した結果を参照計算及びチューニング版で得た結果と併せて表 3.2 に示す。

(1) 中性子束外挿法の適用性検討

チューニング版に対する最大スピードアップとして、7 群の場合 2.03 ($N^*=3$)、18 群の場合 1.88 ($N^*=7$) を得た（参照計算に対するスピードアップとしては、それぞれ 3.79、3.27 である）。これらのスピードアップは常陽 MK-I 炉心モデルを対象として NSHEX に中性子束外挿法を適用した場合に得たスピードアップ³⁾と同程度である。収束に要した外部反復回数について見ると、7 群の場合は 140 回から最小 64 回に、18 群の場合は 118 回から最小 64 回に低減された。7 群の場合は N^* が大きい程、収束に要する外部反復回数が減少する傾向が見られるが、CPU 時間は逆に増大している。18 群の場合は、 N^* と外側反復回数及び CPU 時間の間に明確な関係は見られない。収束挙動例を図 3.4 (7 群、 $N^*=3$)、図 3.5 (18 群、 $N^*=7$) に示す。外挿開始直後に中性子束誤差が急増しているが、参照計算に比べてその後の誤差低減率が大きい。

(2) 中性子源外挿法の適用性検討

チューニング版に対する最大スピードアップとして、7 群の場合 1.16 ($N^*=7$)、18 群の場合 1.18 ($N^*=7$) を得た（参照計算に対するスピードアップとしては、それぞれ 2.16、2.05

である）。収束に要した外側反復回数については、7群の場合 140 回から最小 116 回に、18群の場合は 118 回から最小 95 回に低減された。収束挙動例を図 3.6 (7 群、 $N^*=7$) 、図 3.7 (18 群、 $N^*=7$) に示す。常陽 MK-I 炉心モデルを対象として NSHEX に中性子源外挿法を適用した場合にはほとんど効果が見られなかった³⁾ことと比較すると、MINEHX に対しては一定の効果があった。しかし、中性子束外挿法と比較するとスピードアップ効果は小さい。

3. 3 並列処理の導入

キャッシュチューニング及び中性子束外挿法を適用した MINIHEX コードの並列化を実施し、性能を評価した。

3. 3. 1 並列化の方針

並列化の実施に先立ち、次の方針を定めた。

- ①MINIHEX では内部反復計算部ルーチン INNER 以下の処理が CPU 時間のほとんどを占めるため、INNER ルーチン内を並列化する。
- ②並列化の手法として、角度中性子束の角度メッシュ並列化を採用する。他の手法として空間メッシュ並列化が考えられるが、NSHEX コードの並列化の経験⁵⁾から、角度メッシュ並列化の方が容易かつ高い効率を期待できること、また、シリアル版との計算結果の差が小さいと予測されるため、同手法を採用する。
- ③並列化によって柔軟な領域分割を可能とするため、角度中性子束（配列 amnt）のオクタント番号及びオクタント内角度メッシュ 2 次元分を 1 次元化して並列化する。
- ④MPI-1 を利用して並列化する。実装としては mpich 1.2.1 を利用する。

3. 3. 2 並列化の実施

(1) 動的メモリ割り当て

メインルーチンにて variable dimension で定義されていたすべての配列を Fortran90 の allocatable 属性指定し、allocate 文で宣言するよう変更した。これにより、問題のサイズに応じて再コンパイルすることなく動的に必要な分だけのメモリを確保することができる。また、メインルーチンで宣言されたこれらの配列をメイン下にある MAESTRO 及び RONDO ルーチンに引き渡すよう変更した。

(2) 2 重ループの 1 重化

MINIHEX の角度空間は、オクタント番号 is ($1 \leq is \leq NOCT$) 及びオクタント内角度メッシュ番号 m ($1 \leq m \leq MM$) の組 (is, m) で表される。内部反復におけるほとんどの演算は各 (is, m) に関して独立に行うができるため、この 2 次元空間を並列化することができる。 is, m それぞれを並列化することも可能であるが、自由度の高い分割パターンを可能とするためには (is, m) の 2 次元を 1 次元インデックスとして取り扱う方が好ましい。そこで、(is, m) の組に対応する変数 moct を導入し、NEFDSSWEP ルーチン内の is, m に関する 2 重ループを moct に関する 1 重ループに変更した。

(3) 並列化

次の手順で並列化を実施した。

① 角度束配列の縮小

角度束（配列 amnt）の引数(is,m)の2次元部分を1次元に縮小し、メインルーチンで次のように allocate する。

```
ALLOCATE ( AGMNT(NCHK,KMX,MYMOCT) )
```

ここで、MYMOCT は次のように定義する。

$$\text{MYMOCT} = \text{MEND} - \text{MSTA} + 1$$

MSTA : moct 担当範囲の下限

MEND : moct 担当範囲の上限

MSTA 及び MEND は、自動設定または入力データによる手動設定が可能であり、PE ごとに値を持つ。自動設定では、与えられた PE 数に応じて各 PE の負荷がなるべく均等になるように設定されるようにした。例えば、S4 (MM=3) の解析を 3PE 自動設定で行う場合、各 PE の担当範囲は次のように設定される。

$$\text{PE1 : (MSTA,MEND)=(1,12)}$$

$$\text{PE2 : (MSTA,MEND)=(13,24)}$$

$$\text{PE3 : (MSTA,MEND)=(25,36)}$$

この場合、MYMOCT はすべての PE で 12 となり、1PE 計算の場合に比べて agmnt の要素数が 3 分の 1 に縮減される。

② NEFDSEWP ルーチンの並列化

内部反復処理部のコア部分である NEFDSEWP ルーチン内の moct に関するループを並列化した。

③ FMNT ルーチンの改良及び通信機能追加

FMNT ルーチンでは、空間スウェーブによって更新された角度束を空間メッシュ毎に縮約してスカラー束を計算する。角度束は並列化によって各 PE で分担して計算されているため、縮約する際に PE 間の通信が必要となる。そこで、MPI_ALLREDUCE を利用して縮約計算を行う機能を追加した。なお、通信が発生する個所は初期化及び計算終了処理を除いてこの部分のみである。

3. 3. 3 試計算及び並列化性能の評価

(1) 試計算及びスピードアップ

核燃料サイクル開発機構 F セルボの DEC/Alpha クラスタ及び情報センターの GP7000 上に並列化した MINIHEX を実装し、試計算を実施した。サンプル問題として、BFS 炉心を Sn 次数 4 (角度分点総数 36)、エネルギー群数 7 及び 18 で取り扱ったモデルを扱った。試計算において使用することができた最大 PE 数は DEC/Alpha クラスタの場合 6 台、GP7000 の場合は運用上の問題から 9 台であった。各 PE の負荷を均等にするため、角度分点総数 36 の約数である 2、3、4、6、9 をスピードアップ評価用 PE 数として選定した。

まず、並列版 MINIHEX の試計算で得られた実効増倍率は、7 群計算、18 群計算共にシリアル版で得られた値と一致した。これをもって並列処理の導入が正常になされたと判断した。

表 3.3に試計算で得たスピードアップをまとめた。また、7群、18群それぞれの場合について得たスピードアップを図 3.8及び図 3.9に示す。表 3.3より、エネルギー群数によらず、DEC クラスタ上で最大 1.7 倍 (4PE 使用の場合)、GP7000 上で最大 5.3 倍 (9PE 使用の場合)のスピードアップを得た。計算時間と通信量はいずれも群数にほぼ比例するため、スピードアップが群数に依存しないと考えられる。図 3.8及び図 3.9からわかる通り、DEC クラスタの場合は 3 台以上を使用してもそれ以上スピードアップせず、6 台使用した場合には 4 台使用した場合より逆に若干スピードダウンしている。一方、GP7000 の場合は、鈍化はあるものの 9 台まで比較的良好な台数効果が得られた。

以上の通り、DEC クラスタよりも GP7000 の方が大きな台数効果を得られる。しかし、単体の CPU 性能では DEC クラスタが大きく勝るため、実用面からは両環境で実際に要する経過時間が問題となる。図 3.10及び図 3.11に使用 PE 数に対する計算時間を示す。1PE を使用した計算では DEC クラスタの方が約 4 倍速い。台数を増やした場合には GP7000 の台数効果が効き、両者の差は縮減するが、6 台程度までは DEC クラスタが実用的である。更に、DEC クラスタの場合は 2~6PE で計算時間はほとんど変わらない。従って、実運用では、DEC クラスタ上で 4PE 程度を使用することにより最も効率的な解析が可能である。

(2) 通信遅延の検討

図 3.12に高速増殖原型炉 13 層 7 群モデルを対象として DEC クラスタ上で評価した角度並列版 NSHEX の並列化性能を示す。図 3.8と図 3.12の比較により、DEC クラスタ上での MINIHEX コードの並列化性能は、同コードのベースとなっている NSHEX の性能と比べて大きく劣る。DEC クラスタ上におけるこの性能差は、NSHEX に比べて MINIHEX の通信遅延が顕著であることに起因すると考えられる。一方、共有メモリ型計算機である GP7000 上では通信遅延がさほど顕在化しないため、高い台数効果が得られたと判断される。この推測を検証するため、MINIHEX と NSHEX の通信量について比較検討する。

両コードの通信時間を支配しているのはいずれもサブルーチン FMNT 内でのスカラー中性子束の通信であり、通信時間はスカラー束のデータサイズにほぼ比例する。集合体総数を nchk、軸方向メッシュ数 (NSHEX の場合はノード数) を kmx、使用 PE 数を npe とすると、倍精度計算の場合には、FMNT がコールされる度に大方次の通信データ量が発生する。

$$\text{通信データ量} = \text{nchk} \times \text{kmx} \times \text{npe} \times 8 \text{ byte}$$

前述の高速増殖原型炉モデルを対象とした NSHEX の解析では ($nchk, kmx$) = (469, 14) である。一方、BSF 炉心モデルを対象とした MINIHEX の場合は (3781, 58) である。4PE を使用した場合、上述の通信データ量は次の通りとなる。

NSHEX	: 0.2 MB
MINIHEX	: 7.2 MB

100 BaseT の性能を $100\text{Mbit/sec} = 12.5\text{MB/sec}$ と仮定すると、上記のデータ通信に要する時間の概算は次の通りである。

NSHEX	: 0.02 秒
MINIHEX	: 0.6 秒

内側反復回数を 10 回として 7 群の計算を実施する場合、外側反復一回につき 70 回程度 FMNT がコールされる。上記の通信時間概算値に基づくと、外側反復一回に要する通信時

間の概算は次の通りとなる。

NSHEX	: 1.4 秒
MINIHEX	: 42 秒

両コードが外側反復一回に要する計算時間は数分のオーダーであることを考えると、
MINIHEX では通信時間が並列性能に大きく効くことが理解できる。

3. 4 反応率プログラムへのインターフェイス機能の追加

MINIHEX により得られた中性子束を用いて反応率計算を行うため、昨年度整備した 3 次元 Hex-Z 体系用反応率計算コード LAGOON-HEXZ へのインターフェイス機能を追加した。

3. 4. 1 機能追加

LAGOON-HEXZ には、メンテナンス上の負荷低減等の観点から、CITATION の中性子束ファイルを予め処理して LAGOON-HEXZ へ引き渡す前処理プログラム PREP が用意されている。同様に、MINIHEX の中性子束を LAGOON-HEXZ へ引き渡す際にも PREP を介するものとした。そのため、以下の機能追加を行い、図 3.13 に反応率分布の処理フローで反応率解析を行うものとした。なお、LAGOON-HEXZ 本体は手を加えていない。

① MINIHEX への機能追加

中性子束及びメッシュ関連データ等を 34 番ファイルに出力するサブルーチン dump_lag を追加した。データのレコード構成を図 3.14 に示す。

② PREP への機能追加

CITATION 用に機能が限定されていた PREP に機能追加し、入力オプションによって CITATION または MINIHEX を選択可能とした。併せて、MINIHEX から引き渡された 34 番ファイルを編集処理するサブルーチン hexz_nshexfd を前処理プログラム PREP に追加した。

図 3.13 に反応率分布の処理フローを示す。PREP から編集出力される MINIHEX の中性子束データは、従来通り図 3.15 に示す集合体内 6 点の中性子束とし、形式も従来と同一とした。そのため、MINIHEX への対応機能追加に伴う LAGOON の変更はない。

PREP にて集合体内 6 点の中性子束を算出する際、CITATION の HexZ 体系の場合は、隣接集合体との境界中性子束を拡散係数の重み付けで算出して集合体内 6 点の中性子束を評価するが、輸送計算コードである MINIHEX の場合には着目集合体と隣接集合体の中性子束を線形内挿することにより評価するものとした。

3. 4. 2 機能確認

(1) 前処理部の確認

MINIHEX 及び PREP への機能追加の妥当性を確認するため、BFS 炉心を 7 群で取り扱ったモデルを対象にした輸送計算を実施して中性子束データファイルを作成し、この中性子束データを PREP により処理した。図 3.16、図 3.17 に PREP による処理前後の中性子束分布を比較する。図示した処理後の中性子束は、着目集合体内 6 点の中性子束を平均したものであるが、第 1 群、第 7 群共に処理前後で分布がよく一致している。また、図 3.18、

図 3.19にPREPによる処理後の各集合体内6点の中性子束を第1群、第7群について示す。各群共に集合体内6点の中性子束が規則的に並んでいる。これらの確認によりMINIHEX及びPREPへの機能追加が妥当に行われたと判断した。

(2) 反応率計算

(1)で実施したMINIHEXによる輸送計算と併せて、CITAION-FBRによる7群の拡散計算を実施した。これらの結果からPREP及びLAGOON-HEZを用いてBFS体系の反応率処理計算を行った。

図3.20にPu239核分裂反応率の径方向及び軸方向C/E値分布を示す。Pu239核分裂反応率へ寄与する中性子束に与える輸送効果は小さいため、拡散計算と輸送計算の結果はほぼ一致している。図3.21にU235核分裂反応率の径方向及び軸方向C/E値分布を示す。図3.20のPu239核分裂反応率の結果と同様な傾向である。図3.22にU238核分裂反応率の径方向及び軸方向C/E値分布を示す。径方向、軸方向とも炉心周辺では拡散計算と輸送計算の結果はよく一致している。一方、ブランケット部では輸送計算の結果が拡散計算よりも大きくなっている。これは輸送効果による差異であると考えられる。

以上より、拡散計算に基づく核分裂反応率計算結果と輸送計算に基づく反応率計算結果が、定性的に同じ振る舞いをしており、かつU238核分裂反応率の差異が輸送効果によるものと解釈されることをもって、機能追加が正常に行われたと判断した。

3. 5 摂動計算プログラムへのインターフェイス機能の追加

MINIHEXにより得られた随伴角度束、角度束等を用いて摂動計算を行うための機能追加を実施した。併せて、昨年度整備したNSHEX用摂動計算コードNSHEXPERTをベースにMINIHEX用摂動計算コードを整備した。

3. 5. 1 MINIHEXへの機能追加

輸送摂動計算では、メッシュ毎に随伴角度束と角度束の内積を計算する必要がある。そのため、MINIHEXの90番ファイルにこれらのデータを出力する機能を追加した。図3.23にレコード構成を示す。

なお、BFS炉心モデルをS4、18群で取り扱う場合、全群の角度束データは単精度で500MB程度となり、計算機によってはインコアで保持することが困難なデータ量となる。外側反復毎に各群の角度束をファイル出力することはパフォーマンス上非効率的である。そのため、初めて収束と判定された後（収束条件を初めて2回続けて満たした後）、引き続き角度束を出力しながら外側反復を行い、収束と判定されたら計算を終了するものとした。

3. 5. 2 MINIHEX用摂動計算コードの整備

NSHEX用摂動計算コードNSHEXPERTをベースにMINIHEX用摂動計算コードを作成した。角度束及び随伴角度束データの形式は図3.23に示す通りNSHEXからMINIHEX対応に変更したが、入力データ項目、マクロ・ミクロ断面積データの形式等はNSHEXPERTの形式を踏襲した。利用法は、NSHEXPERTと同様である。

3. 5. 3 機能確認

摂動コードがインターフェイスを含めて正しくプログラミングされていることを厳密摂動計算で確認することとした。

試計算の体系は BFS 炉心を 7 群で扱ったものである。これを基準体系とし、領域ごとの物質を仮想的に変えた 4 ケースの摂動体系を設定した。

表 3.4 に直接計算結果を基準とした摂動計算結果を示す。厳密摂動計算結果は基準に比べて -5.8% ~ +3.7% のズレを生じている。これは、従来の輸送摂動計算では見られない大きな誤差である。

摂動計算に用いた MINIHEX の計算では、固有値が 10^{-5} 、中性子束が 10^{-4} の収束条件を設定している。収束時の固有値の収束誤差は 10^{-8} のオーダーにあることから、摂動分母の計算に使用する実効増倍率が原因となることは考えにくい。中性子束の収束誤差は 10^{-4} 以下程度であるが、たとえ扱うメッシュ数が大きな数であっても、これが % オーダの誤差を生むことも考えにくい。何らかのプログラム上の問題があると考えられ、検討した。

まず摂動コードと MINIHEX 出力リストでの比較では次の通りであった。

- ・ 摂動コードでは角度束、随伴角度束の読み込んでスカラー束を計算する。これを領域平均スカラー中性子束、随伴束として出力した結果は、MINIHEX 出力のスペクトル及び領域ごとの相対値で一致している（4 衍目まで）。
- ・ 断面積データは MINIHEX の印刷値と比較して一致している。
- ・ 摂動領域の指定データは MINIHEX の出力値を使用している。
- ・ メッシュ幅、メッシュ体積の計算も適切である。
- ・ 摂動計算式、摂動分母計算式については、SNPERT の式と同一である。

摂動コードは計算を単精度で行っていることを考慮しても、以上の範囲では特に問題を生じていることは考えにくい。すると、角度束のファイル出力時の扱い及び内積計算の部分に適切でない取扱いがなされている可能性がある。角度束のファイル出力形式は図 3.23 のとおりである。これを、摂動コードでは、

`Forward : (((rflx(m,n,k),n=1,nchk),k=1,kmx),m=1,mm4)`

`Adjoint : (((aflx(m,n,k),n=1,nchk),k=1,kmx),m=1,mm4)`

として読み込む。ここで、`mm4=mm*noct` である。内積計算における Forward と Adjoint 角度束の角度方向の扱いについては、次の通りにしている。

内積 = Sum for m (rflx(m,n,k) * aflx(mx,n,k)) * w(m)

ここで、mx は Forward 角度束に対応する Adjoint 角度束であり、S4 計算を例にとると次の通りセットしている。

m	mx
1,2,3	10,11,12
4,5,6	7,8,9
7,8,9	4,5,6
10,11,12	1,2,3
13,14,15	22,23,24
16,17,18	19,20,21

この角度束の方向設定の取扱いが誤っているために%オーダの誤差を生じる可能性が残っている。再度、角度束の出力部（MINIHEX）及び内積計算部（振動コード）の確認が必要である。

表 3.1 キャッシュチューニング及びプログラム構造改良によって得たスピードアップ

	k	外側反復	CPU時間 h m	speed-up
参照計算(7群)	0.9966106	140	16 49	-
改良版(7群)	0.9966106	140	9 1	1.86
参照計算(18群)	0.9949171	118	33 18	-
改良版(18群)	0.9949171	118	19 8	1.74

表 3.2 中性子束及び中性子束外挿法の適用結果

7群	N*	k	Δk	外側反復	CPU時間 h m	対チューニング版 スピードアップ	対参照計算 スピードアップ
参照計算	-	0.9966106	-	140	16 49	-	-
チューニング	-	0.9966106	0.0E+00	140	9 1	-	1.87
中性子束外挿	3	0.9966324	2.2E-05	75	4 26	2.03	3.79
	4	0.9966231	1.2E-05	71	4 29	2.01	3.75
	5	0.9966159	5.3E-06	68	4 44	1.90	3.55
	7	0.9966110	4.0E-07	64	4 37	1.95	3.64
中性子源外挿	3	0.9966056	-5.0E-06	125	8 13	1.10	2.05
	4	0.9966072	-3.4E-06	122	8 6	1.11	2.08
	5	0.9966088	-1.8E-06	119	7 54	1.14	2.13
	7	0.9966109	3.0E-07	116	7 47	1.16	2.16

収束条件 : $\epsilon_k = 1.0E-05$ 、 $\epsilon_\phi = 1.0E-04$

18群	N*	k	Δk	外側反復	CPU時間 h m	対チューニング版 スピードアップ	対参照計算 スピードアップ
参照計算	-	0.9949171	-	118	33 17	-	-
チューニング	-	0.9949171	0.0E+00	118	19 7	-	1.74
中性子束外挿	3	0.9949237	6.6E-06	65	10 46	1.78	3.09
	4	0.9949243	7.2E-06	68	12 19	1.55	2.70
	5	0.9949258	8.7E-06	68	10 47	1.77	3.09
	7	0.9949288	1.2E-05	64	10 10	1.88	3.27
中性子源外挿	3	0.9949105	-6.6E-06	101	16 50	1.14	1.98
	4	0.9949131	-4.0E-06	98	16 14	1.18	2.05
	5	0.9949143	-2.8E-06	96	16 17	1.17	2.04
	7	0.9949163	-8.0E-07	95	16 13	1.18	2.05

収束条件 : $\epsilon_k = 1.0E-05$ 、 $\epsilon_\phi = 1.0E-04$

表 3.3 並列化したMINIHEXのスピードアップ

7群

PE数	DECクラスタ		GP7000	
	計算時間	スピードアップ	計算時間	スピードアップ
1	1h 24m	—	5h 42m	—
2	57m	1.47	2h 59m	1.91
3	56m	1.50	2h 7m	2.69
4	50m	1.68	1h 40m	3.42
6	56m	1.50	1h 16m	4.50
9	—	—	1h 4m	5.34

18群

PE数	DECクラスタ		GP7000	
	計算時間	スピードアップ	計算時間	スピードアップ
1	3h 6m	—	13h 32m	—
2	2h 4m	1.50	7h 8m	1.90
3	2h 4m	1.50	5h 7m	2.64
4	1h 50m	1.69	4h 2m	3.36
6	2h 4m	1.50	3h 5m	4.39
9	—	—	2h 33m	5.31

表 3.4 厳密摂動計算結果

ケース	摂動内容	直接計算 $\Delta \rho$	厳密摂動計算 $\Delta \rho$	厳密摂動計算／直接計算	相対誤差
abs1	18番の断面積を17番に置換	4.85E-04	4.57E-04	0.9415	-5.8%
abs2	20番の断面積を19番に置換	7.86E-04	7.95E-04	1.0106	1.1%
abs3	abs1とabs2の同時変更	1.22E-03	1.27E-03	1.0368	3.7%
lez1	2番の断面積を1番に変更	3.66E-03	3.54E-03	0.9693	-3.1%

```

Subroutine INNER(amnt,aflux,flux)
C
Dimension amnt (NOCT,MM,NCHK,KMX)      ! 角度中性子束
Dimension aflux(4,NCHK)                 ! メッシュ境界中性子束
Dimension flux(NCHK,KMX)               ! スカラー中性子束
C
NOCT       : オクタント総数
MM         : オクタント内角度分点総数
NCHK       : 集合体総数
KMX        : 軸方向メッシュ総数
C
C
100 Continue
C
自群散乱項更新
C
Do is = 7, 12
  Do m = 1, MM
    aflux(4,*) = 0                      ! 軸方向メッシュ境界中性子束の初期化
    Do k = KMX, 1, -1                   ! Down-Sweep
      Call IJSWEP(aflux,amnt(1,1,1,k),is,m) ! Radial-Sweep
    Enddo
  Enddo
Enddo

C
Do is = 1, 6
  Do m = 1, MM
    aflux(4,*) = 0                      ! 軸方向メッシュ境界中性子束の初期化
    Do k = 1, KMX                       ! Up-Sweep
      Call IJSWEP(aflux,amnt(1,1,1,k),is,m) ! Radial-Sweep
    Enddo
  Enddo
Enddo

C
Call FMNT(flux,amnt)                  ! スカラー束の更新
C
収束判定
Goto 100
C
Return
End

Subroutine IJSWEP(aflux,amnt,is,m)
C
Dimension amnt (NOCT,MM,NCHK)          ! 角度束
Dimension aflux(NDIR,NCHK)             ! 軸方向境界中性子束
C
aflux(1~3,*) = 0                      ! 径方向境界中性子束の初期化
Do ij = 1, NCHK (or Do ij = NCHK, 1, -1)
  ij = modr(ij,is)                    ! 径方向スウェープ (ij:通し番号)
                                      ! オクタント番号に応じて径方向
                                      ! スウェープの順序変更 (ijt:実際の集合体番号)
  Call NEFDICAL(aflux,amnt(1,1,ijt),is,m)
                                      ! NEFD アルゴリズムによる aflux 及び amnt の計算
Enddo

C
Return
End

```

図 3.1 改良前の内部反復スキームの概要

```

C Subroutine INNER(amnt,aflux,flux)
C
C Dimension amnt (NCHK, KMX, MM, NOCT)           ! ループ構造に適した配列構造に変更
C Dimension aflux (NCHK, 4)                      ! ループ構造に適した配列構造に変更
C Dimension flux (NCHK, KMX)
C
C 100 Continue
C
C   自群散乱項更新
C
C   Call NEFDSWEP(amnt,aflux)
C
C   Call FMNT(flux,amnt)
C
C   収束判定
C   Goto 100
C
C   Return
C End

Subroutine NEFDSWEP(amnt,aflux)
C
C Dimension amnt (NCHK, KMX, MM, NOCT)
C Dimension aflux (NCHK, 4)
C
C Do is = 1, NOCT
C   Do m = 1, MM
C     aflux(*,4) = 0                                ! 軸方向メッシュ境界中性子束の初期化
C     Do k = 1, KMX (or Do k=KMX,1,-1)            ! Up/Down-Sweep
C       Do ij = 1, NCHK (or Do ij=NCHK,1,-1)        ! Radial-Sweep
C         ijt = modr(ij,is)
C         aflux(*,1~3) = 0
C         NEFDアルゴリズムの適用
C         amnt(ij,k,m,is) = 更新した角度束
C         aflux(ijt,1~4) = 更新した境界中性子束
C       Enddo
C     Enddo
C   Enddo
C Enddo
C
C Return
C End

Subroutine FMNT(amnt,flux)
C
C Dimension amnt (NCHK, KMX, MM, NOCT)
C Dimension flux (NCHK, KMX)
C
C flux(*,*) = 0
C Do is = 1, NOCT
C   Do m = 1, MM
C     Do k = 1, KMX
C       Do ij = 1, NCHK
C         ijt = modr(ij,is)
C         flux(ijt,k,m,is) = flux(ijt,k,m,is) + amnt(ij,k,m,is)*wgt(m)
C       Enddo
C     Enddo
C   Enddo
C
C Return
C End

```

図 3.2 改良後の内部反復スキームの概要

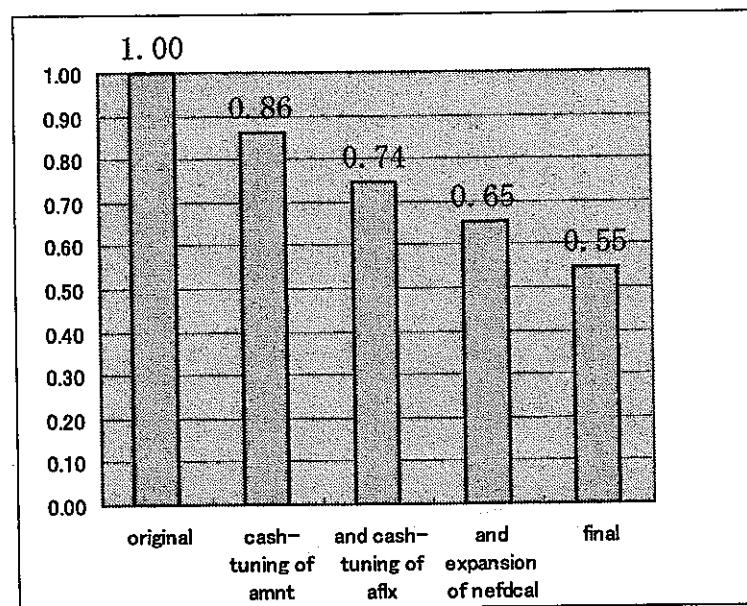


図 3.3 キャッシュチューニング及びプログラム構造改良によるスピードアップ

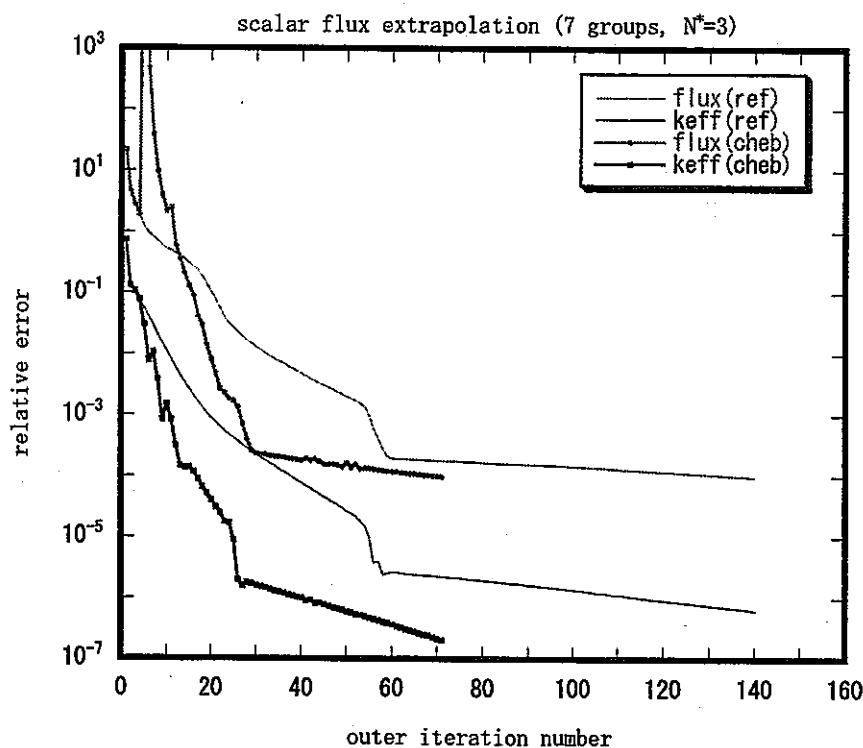


図 3.4 中性子束外挿法を外部反復へ適用した場合の収束挙動 (BFS 炉心モデル、7 群)

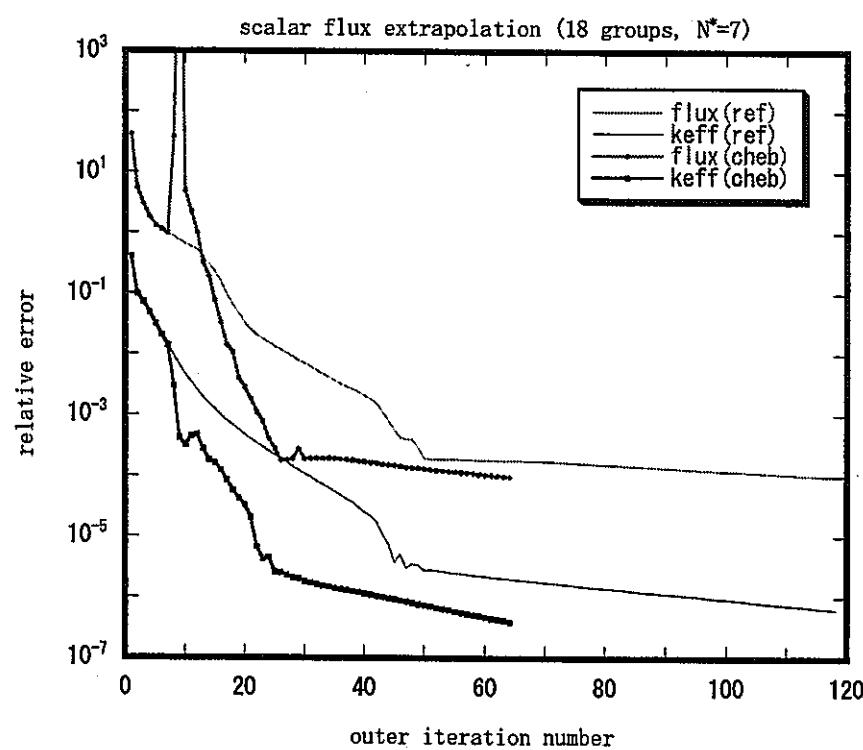


図 3.5 中性子束外挿法を外部反復へ適用した場合の収束挙動 (BFS 炉心モデル、18 群)

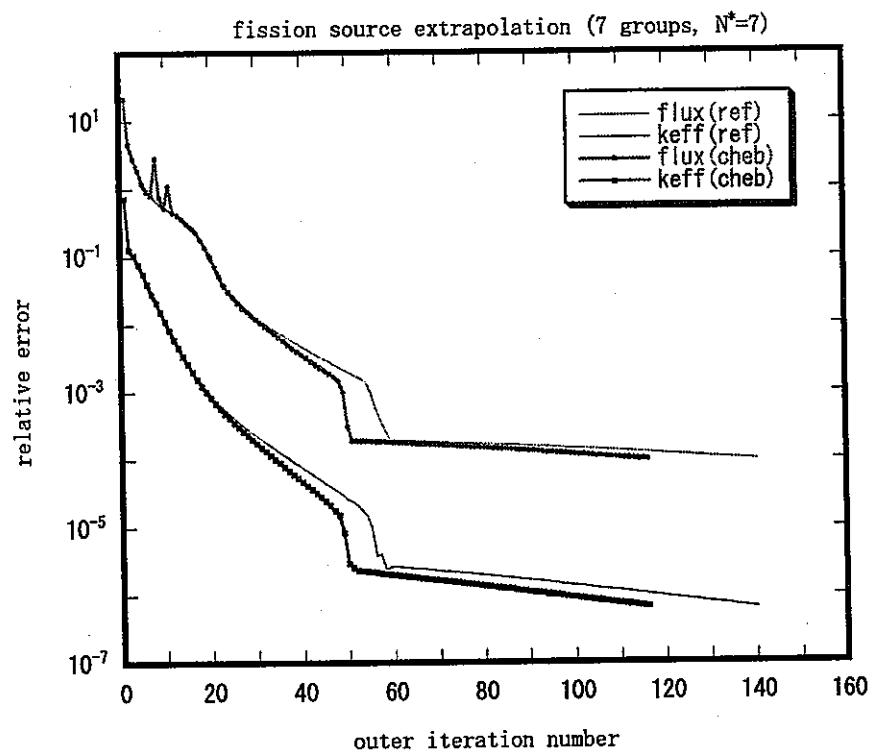


図 3.6 中性子源外挿法を外部反復へ適用した場合の収束挙動 (BFS 炉心モデル、7 群)

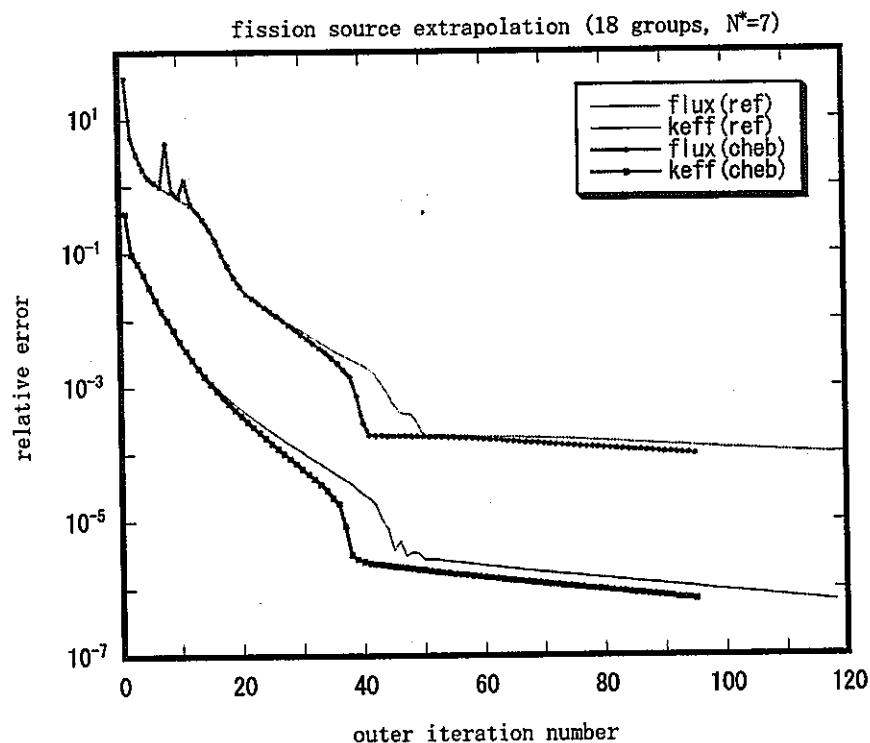


図 3.7 中性子源外挿法を外部反復へ適用した場合の収束挙動 (BFS 炉心モデル、18 群)

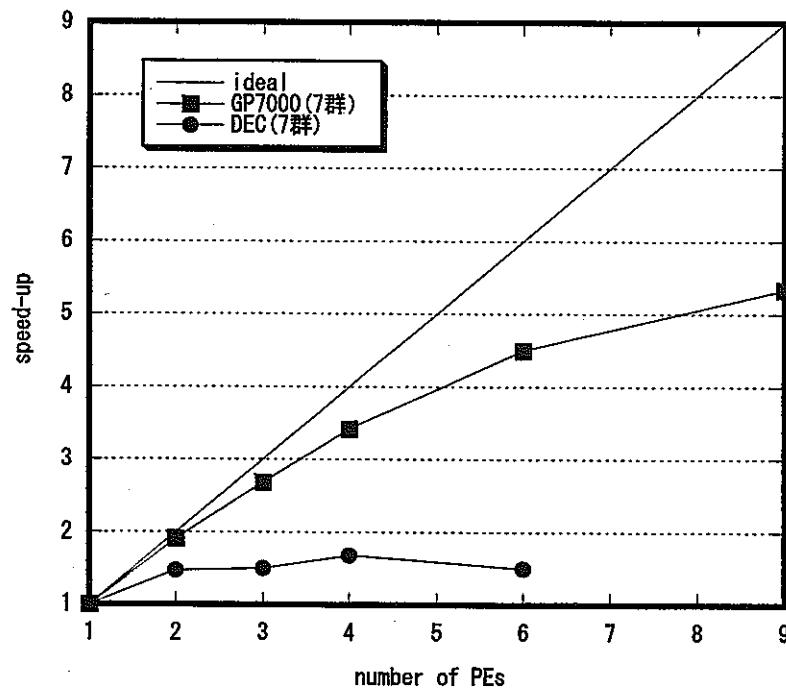


図 3.8 並列化した MINIHEX のスピードアップ (BFS、7 群)

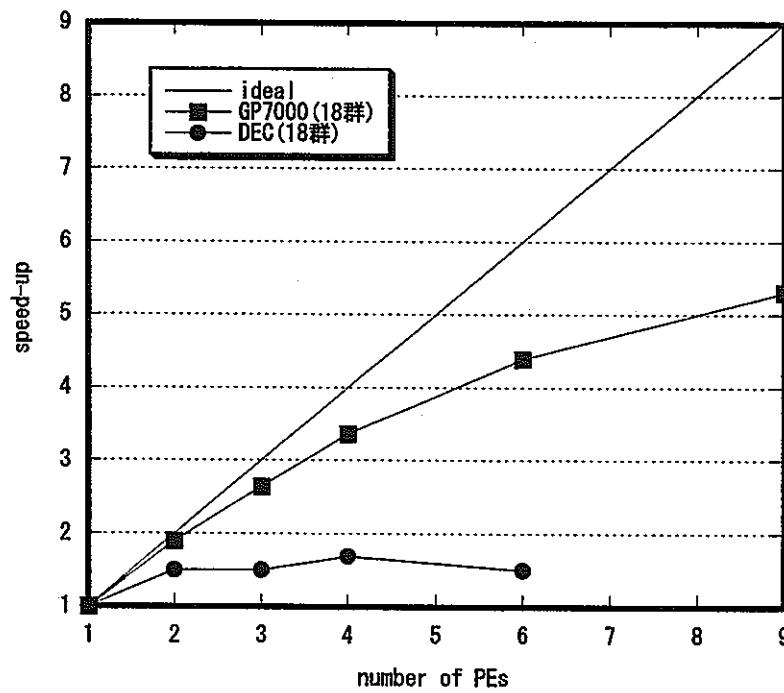


図 3.9 並列化した MINIHEX のスピードアップ (BFS、18 群)

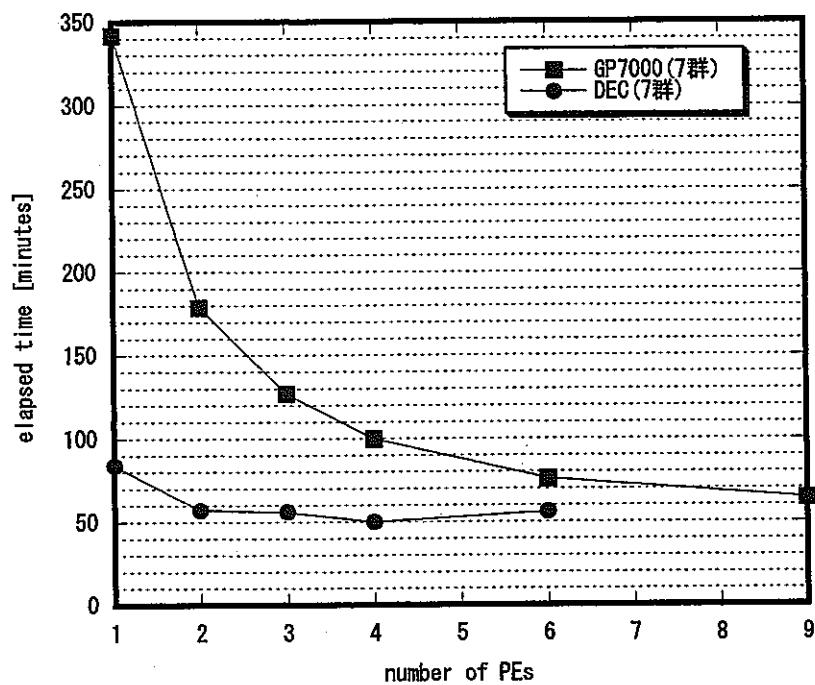


図 3.10 並列化した MINIHEX の計算時間 (BFS、7 群)

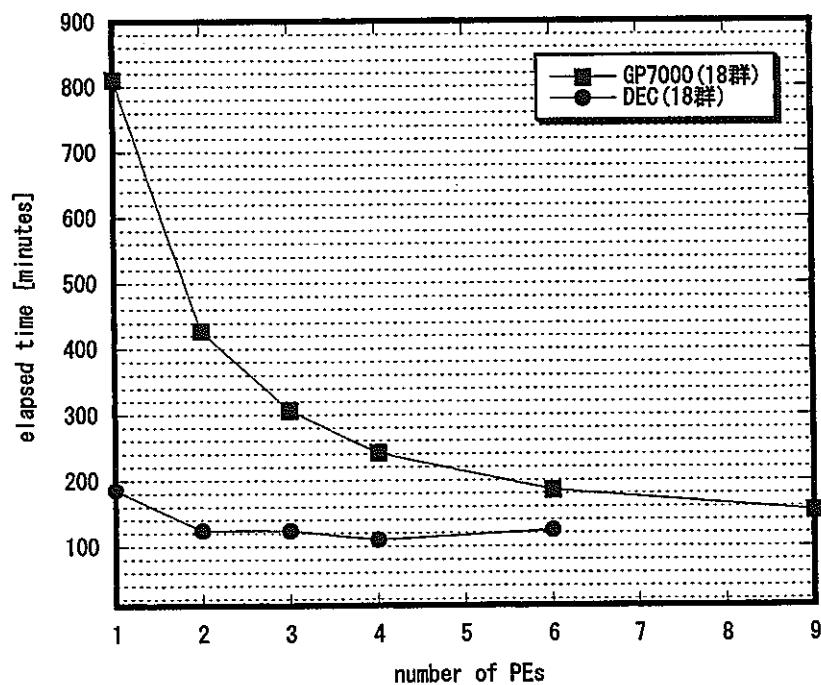


図 3.11 並列化した MINIHEX の計算時間 (BFS、18 群)

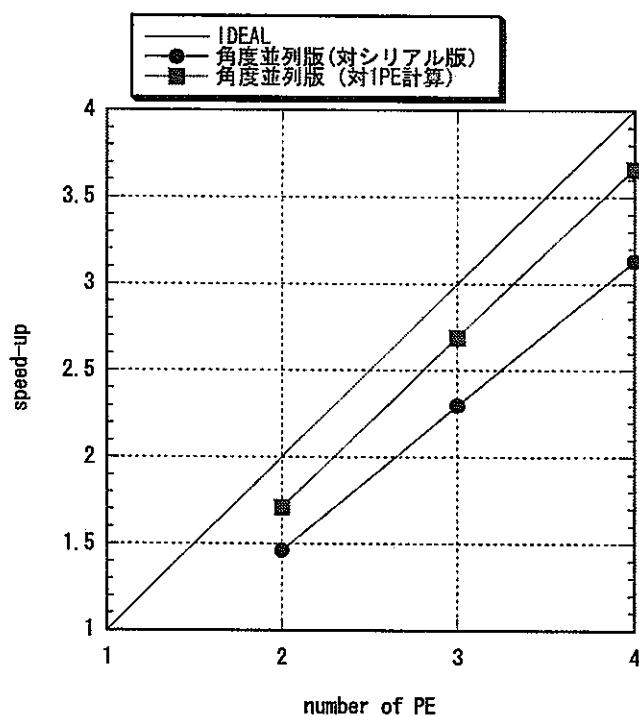


図 3.12 角度並列版 NSHEX のスピードアップ
(高速増殖原型炉 13 層、7 群モデル、DEC クラスタ 100BaseT)

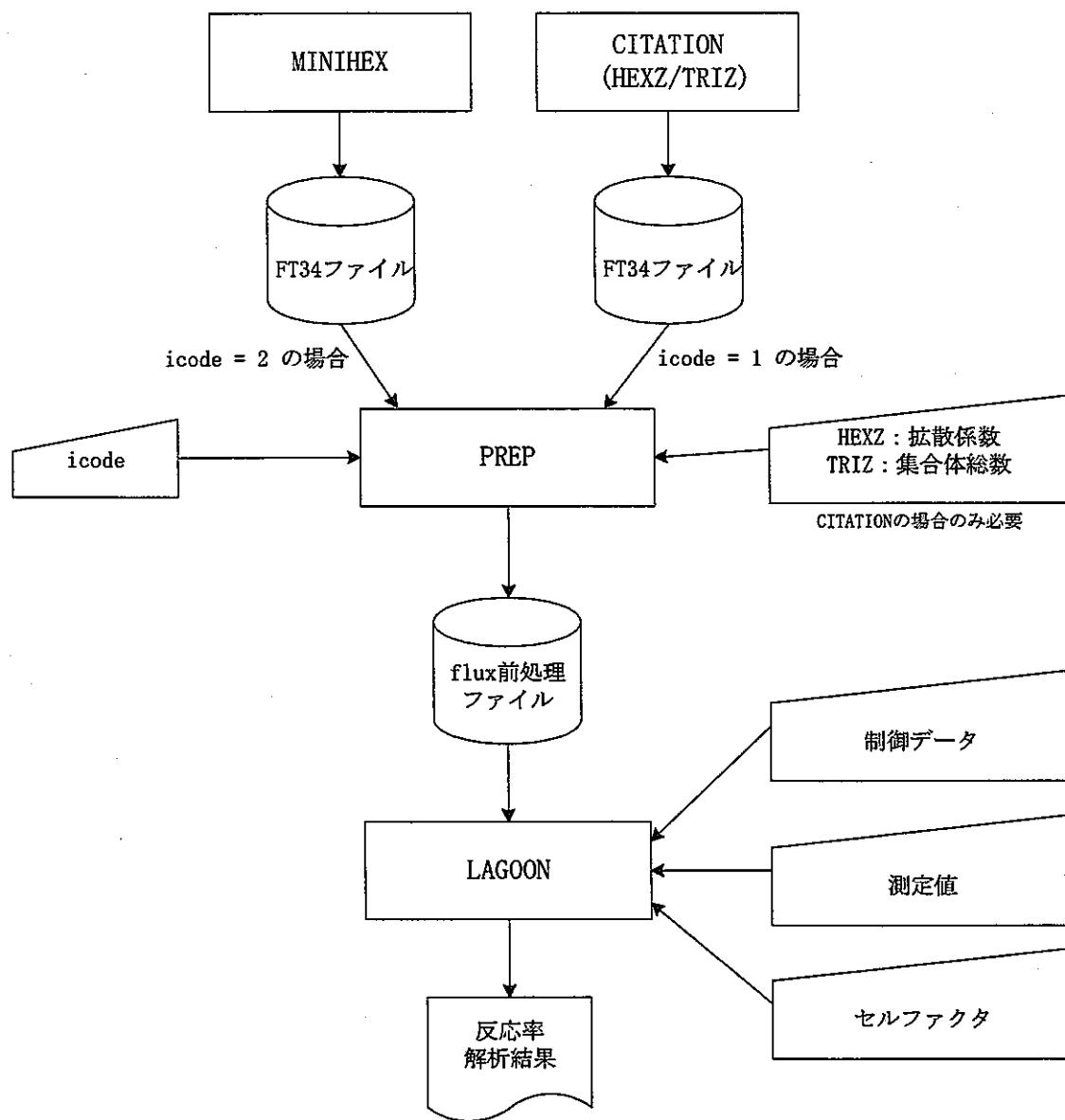


図 3.13 MINIHEX、CITATION 向け反応率分布処理のフロー

● レコード構成

```
#1      nlay,nchk,kmx,ngmx,kcm,kcbm,mapmx
#2      do k=1,kcm
        (map(n,k),n=1,nchk)
        enddo
#3      (idk(k),k=1,kmx)
#4      (ihk(k),k=1,kcm)
#5      real(hp)
#6      (real(zc(k)),k=1,kcbm)
#7      do ig=1,ngmx
        do k=1,kmx
          (real(sclf(n,k,ig)),n=1,nchk)
        enddo
      enddo
```

図 3.14 MINIHEX の中性子束出力ファイル（34番）のレコード構成

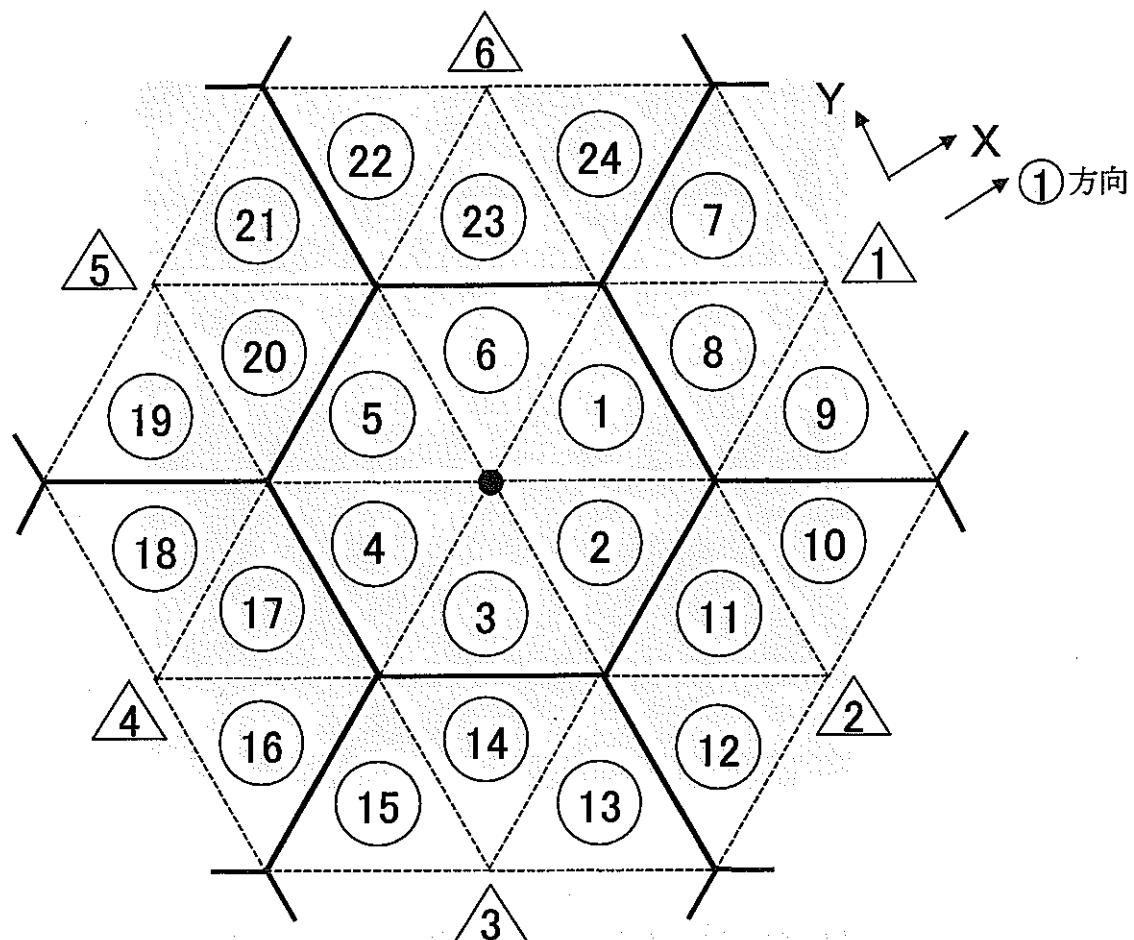
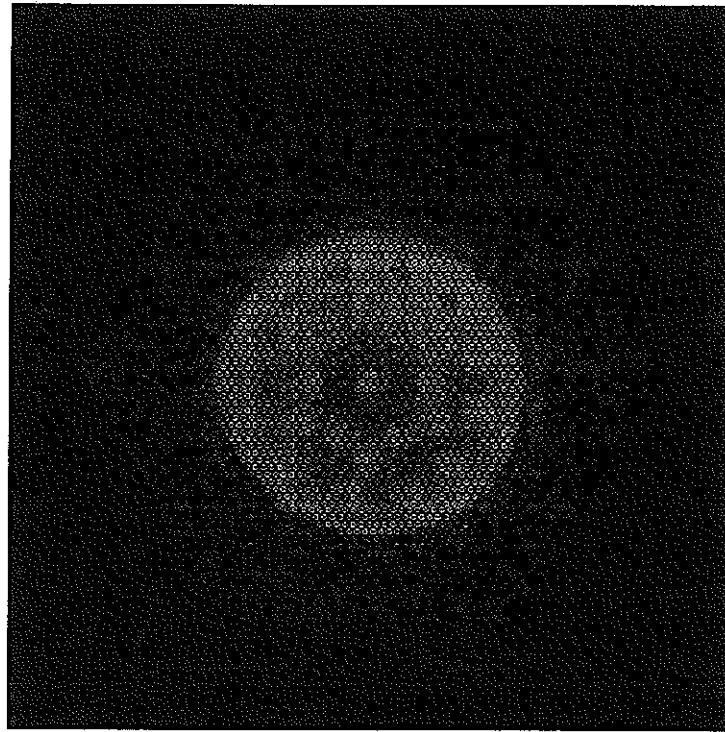


図 3.15 PREP の中性子束評価位置

PREP 处理前



PREP 处理後 (集合体内 6 点平均中性子束)

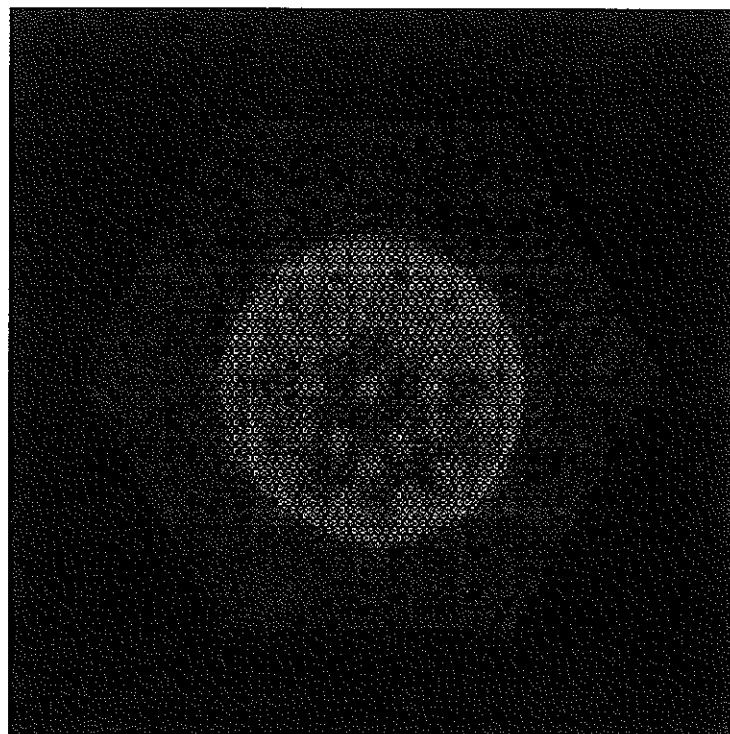
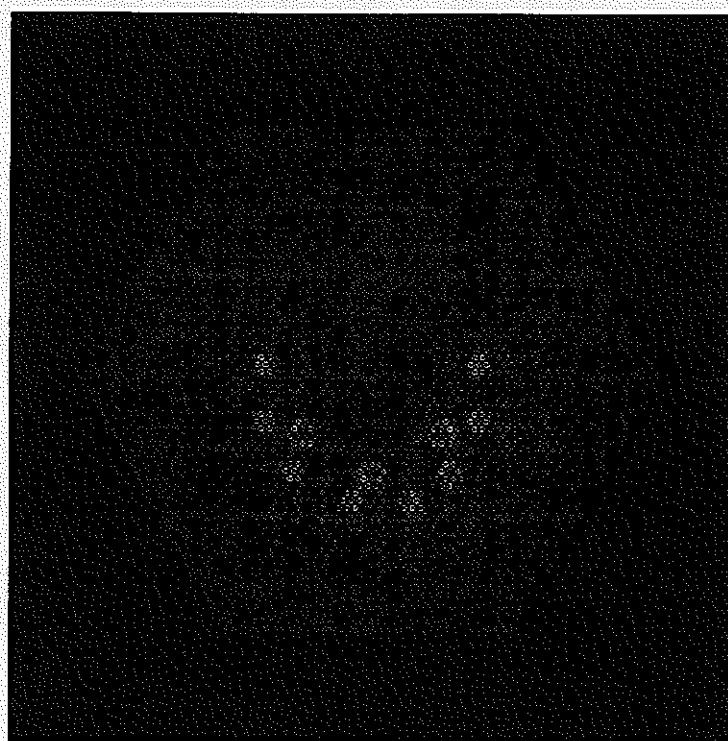


図 3.16 PREP による処理前後の第 1 群中性子束分布 (中心断面)

PREP 处理前



PREP 处理後 (集合体内 6 点平均中性子束)

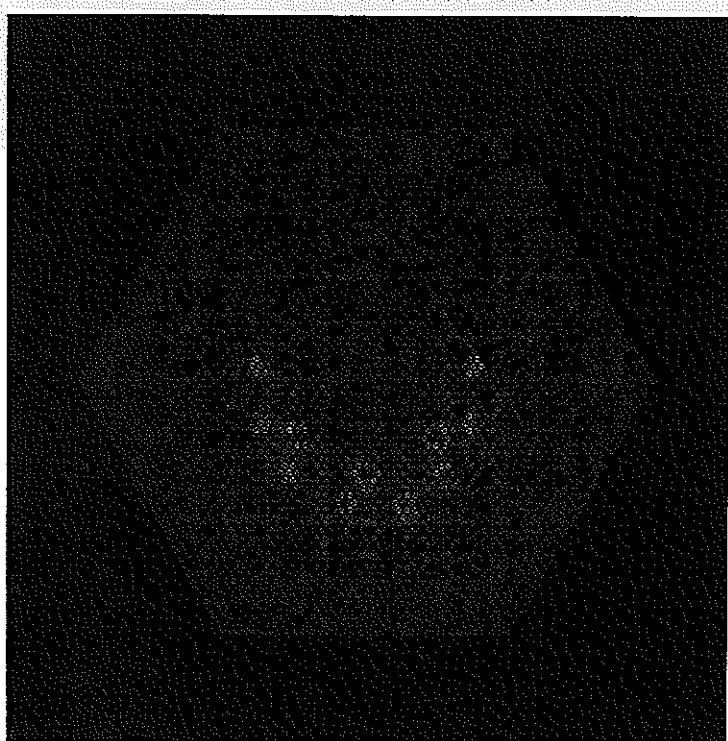


図 3.17 PREP による処理前後の第 7 群中性子束分布 (中心断面)

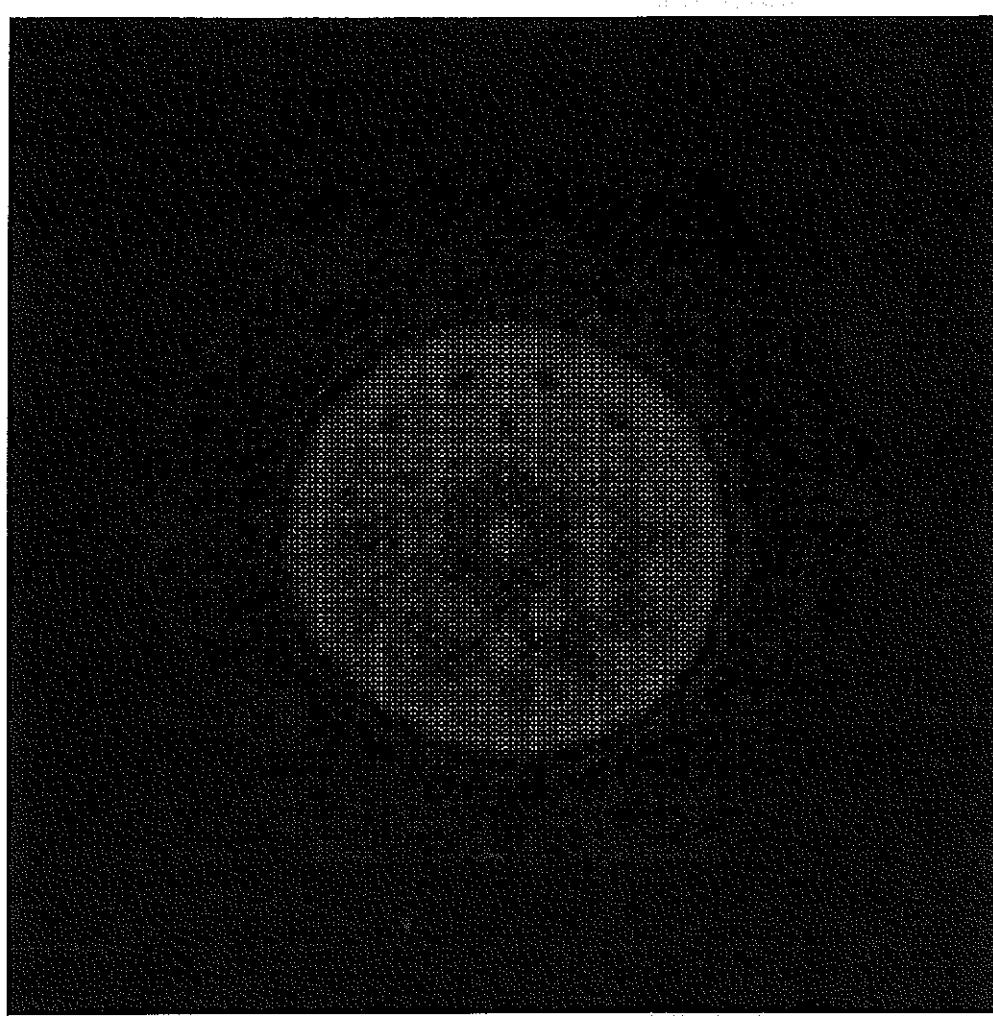


図 3.18 PREP による処理後の各集合体内 6 点の第 1 群中性子束分布

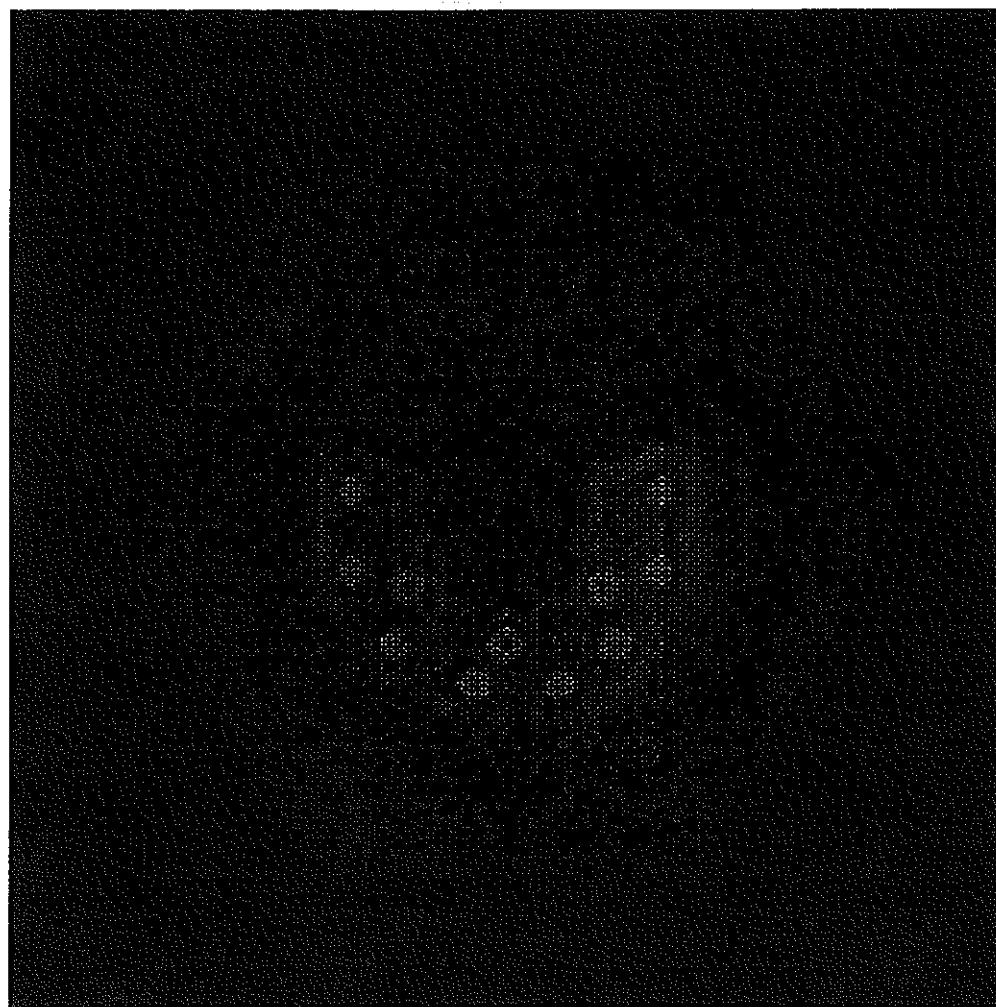


図 3.19 PREP による処理後の各集合体内 6 点の第 7 群中性子束分布

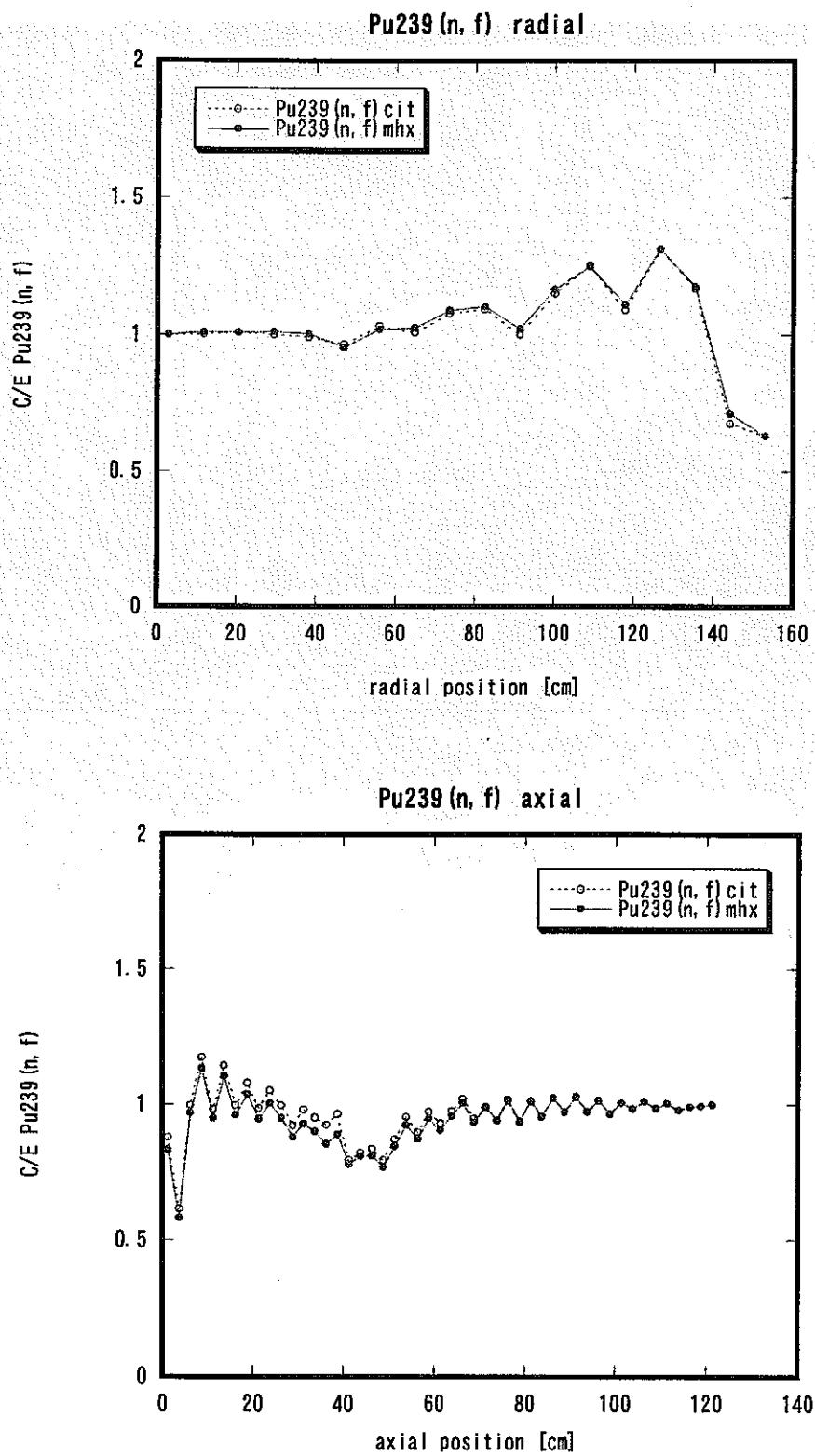


図 3.20 LAGOON を用いた Pu239 核分裂反応率の C/E 値
(cit は CITATION による拡散計算、mhx は MINIHEX による輸送計算を意味する)

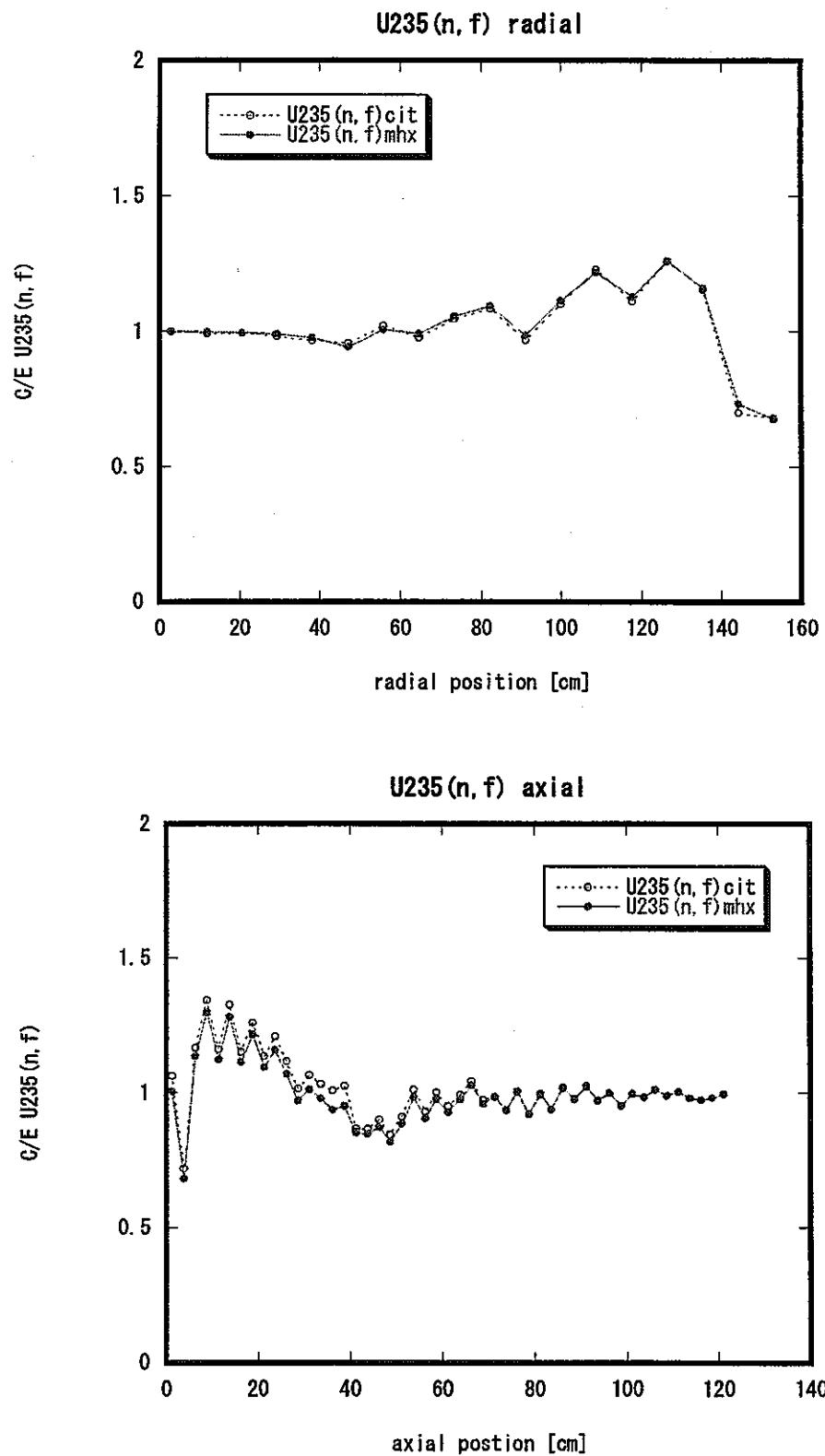


図 3.21 LAGOON を用いた U235 核分裂反応率の C/E 値
(cit は CITATION による拡散計算、mhx は MINIHEX による輸送計算を意味する)

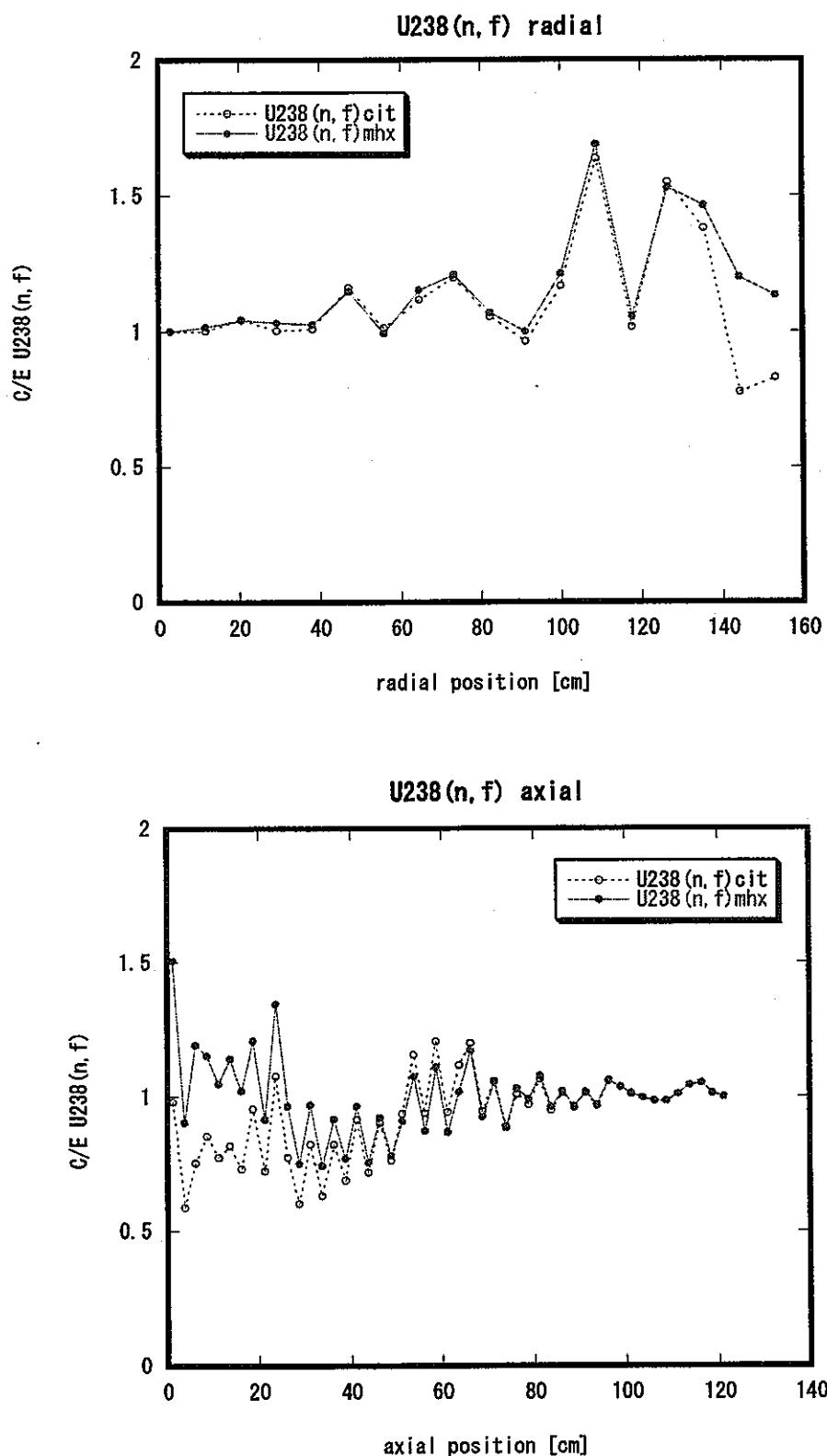


図 3.22 LAGOON を用いた U238 核分裂反応率の C/E 値
(cit は CITATION による拡散計算、mhx は MINIHEX による輸送計算を意味する)

● レコード構成

#1 整数、実数パラメータ

iop5,nchk,kcm,kmx,noct,mm,ngmx,mapmx,nlay,nsn,eigen,hp

#2 角度重み、核分裂中性子スペクトル

(wgt(m),m=1,mm),(chi(ig),ig=1,ngmx)

#3 軸方向疎メッシュ情報

(delz(kc),kc=1,kcm),(ihk(k),k=1,kcm)

#4 物質マップ

((map(n,k),n=1,nchk),k=1,kcm)

forward 計算の場合

#5 角度束

```
do ng=1,ngmx
  (((((agmnt(n,k,m,is),n=1,nchk),k=1,kmx),m=1,mm),is=1,noct)
enddo
```

adjoint 計算の場合

#5 角度束

```
do ng= ngmx,1,-1
  (((((agmnt(n,k,m,is),n=1,nchk),k=1,kmx),m=1,mm),is=1,noct)
```

図 3.23 MINIHEX の摂動計算コード向けファイル出力(90 番)のレコード構成

4. 結論

- (1) NSHEX コードの計算結果に基づく摂動計算精度の向上を目的として、NSHEX-BURN コードのノード内中性子束分布再構築法の改良を実施した。併せて、NSHEX-BURN に機能追加を実施し、ノード内中性子束再構築法を用いて得られる中性子束分布を基に、ピーピング係数、最大線出力等の設計パラメータを計算することを可能にした。
- (2) MINIHEX の計算速度を向上させるため、キャッシュチューニング等のプログラム改修 及び加速法適用を実施し、BFS 炉心モデルを解析対象としてその効果を検討した。キャッシュチューニング等の改修により最大 1.9 倍のスピードアップを得た。このチューニング版 MINIHEX に中性子束外挿法を適用することにより、最大 2.0 倍のスピードアップを得た。その結果、キャッシュチューニングと中性子束外挿法の適用により、最大 3.8 倍の速度向上を実現した。
- (3) キャッシュチューニング及び中性子束外挿法を適用した MINIHEX の並列化を実施した。並列化は角度空間メッシュ分割により行い、通信インターフェイスとして MPI を用いた。BFS 炉心モデルを解析対象として並列化性能を評価した結果、共有メモリ型並列計算機 GP7000 上で 9 台のプロセッサを利用することにより最大 5.3 倍のスピードアップを得た。分散メモリ型の DEC/alpha クラスタ上では通信遅延効果が大きく、4 台を使用したスピードアップは 1.5 倍に留まった。一方、並列化によって必要なメモリを複数のプロセッサに分散させることができたため、MINIHEX の大規模問題への適用性が向上した。
- (4) 3 次元 Hex-Z 体系用反応率計算コード LAGOON-HEXZ の前処理機能を拡張し、 MINIHEX とのインターフェイス機能を追加整備した。これにより、MINIHEX による 3 次元 Hex-Z 体系の輸送計算によって得た中性子束を用いた反応率計算が可能となった。
- (5) NSHEX 用の 3 次元輸送摂動計算コード NSHEXPERT をベースに MINIHEX 用 3 次元摂動計算コードを整備した。これにより、MINIHEX で計算した中性子束及び固有値を用いた摂動計算が可能となった。ただし、直接計算による反応度変化を基準とすると厳密摂動計算結果は誤差が生じている。角度束の内積等の扱いに再検討が必要である。

参考文献

- 1) 石川眞, 斎藤正幸, 佐藤若英他、「核設計基本データベースの整備(IV) -核特性解析コードシステムの整備-」, PNC TN9440 94-004 (1994年3月)
- 2) 杉野和輝、「3次元 HexZ 体系用ノード法輸送計算コード NSHEX の実用性向上のための改良」, PNC TN9410 98-064 (1998年7月)
- 3) 船曳淳, 角田弘和, 「BN 及び BFS 炉心解析システムの整備」, JNC TJ9400 2001-008(2001)
- 4) T. Takeda and H. Ikeda,"3-D Neutron Transport Benchmarks," NEACRP-L-330 (Mar.1991).

付録 A NSHEX の未収束性に関する検討

NSHEXで計算すると発散する基準体系(19層、7群)の全炉心計算を対象として、NSHEXの未収束性を検討した。

1. 支給された入出力データ

計算が収束しないケースの検討用として、以下のデータを利用した。

ファイル名	内容	事前情報
hexz07gref1.ft08	体系1=ガスフォロワ配置基準体系入力（全炉心、7群）	外側反復20回弱で発散が開始
hexz07gref2.ft08	体系2=ガスフォロワを燃料で置換した体系入力（全炉心、7群）	収束
hexz07gref2-1by3.ft09	体系2出力（3分の1炉心、7群）	$k = 1.1416788$

2. 確認計算

- 体系1は事前情報通り外側反復20回程度から発散が開始した。
- 体系2は収束し、 $k = 1.1652476$ を得た。3分の1炉心の結果と比較して妥当な値と判断される。

3. 未収束性の検討

3. 1 ノード平均スカラー束の挙動

発散する体系1について再計算し、各外部反復ごと、群ごとにノード平均スカラー束を出力してその振る舞いを検討した。

(1) 径方向分布

図1に下線で示した径方向領域のK=3 (Kは軸方向細メッシュ番号)におけるノード平均スカラー束分布の発散の様子を図2に示す。図中、上から第1群、第4群、第7群の順である。横軸のradial position (以下、RP)は図1の下線で示した集合体の左から数えた集合体番号を示す。第1群の発散が顕著であり、かつ早期に開始している。また、いずれもRP=11のガスフォロワ(物質番号7)付近をピークとして発散している。

(2) 軸方向分布

RP=11におけるノード平均スカラー束軸方向分布の発散の様子を図3に示す。図中、上から第1群、第4群、第7群の順である。横軸のaxial positionは軸方向細メッシュ番号kを示す。第1群の発散が顕著であり、かつ早期に開始している。また、k=1付近(炉心下部)から先に発散している。

3. 2 発散原因の推測

図2と図3の第1群の振る舞いを考え併せると、発散の種はガスフォロワであるRP=11付近のk=1の位置にあるよう見える。この発散の開始が径方向スウェーブに起因するものか、軸方向スウェーブに起因するものかは定かでないが、次のような発散シナリオが推

測される。

- ① 物理量分布は 2 次モーメントまでで表現している。
- ② 径方向分布が比較的平坦となるガスフォロワ領域では、元々精度のよくない 2 次モーメントの誤差が特に大きくなる。
- ③ 径方向分布の平坦さは炉心中心に比べ炉心下端 ($k=1$) の方が顕著である。
- ④ そのため、ガスフォロワ領域の $k=1$ 付近から発散が開始した。
なお、これまでの NSHEx の使用経験では、軸方向細メッシュ幅を小さく設定しすぎると発散するケースがあった。上記と同様に、この原因として 2 次モーメントが悪さをしている可能性があると考えている。

4. 解決策の検討

上述の発散シナリオが正しければ、局所的に径方向展開次数を低次に落とした計算を行うことにより収束性が向上する可能性がある。現行 NSHEx では、グローバルかつ径方向と軸方向一律に展開次数を設定する仕様となっている。これを局所的かつ径方向と軸方向の展開次数を独立に設定できるようにしてパラメトリックな計算を実施すれば、未収束性原因究明の一助となる可能性がある。(なお、体系 1 を対象として展開次数を 1 次までとして計算したところ、やはり発散した。)

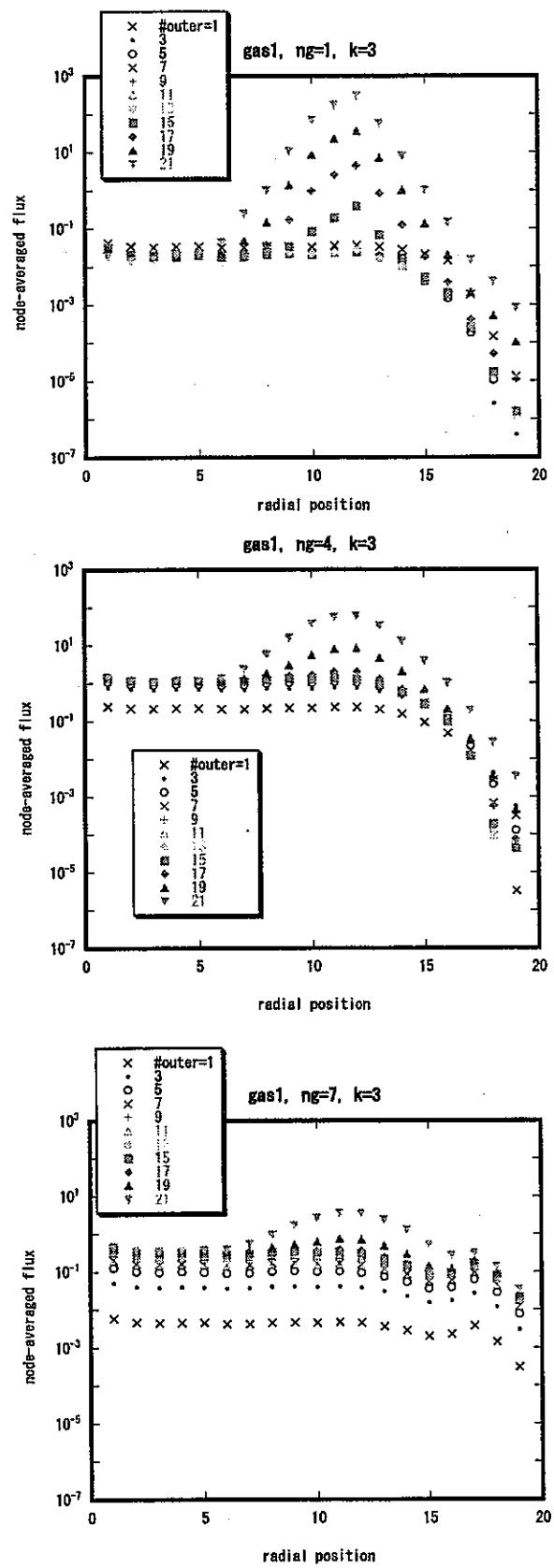


図 2 体系 1 (ガス炉) のノード平均スカラー束の発散の様子 (径方向分布)

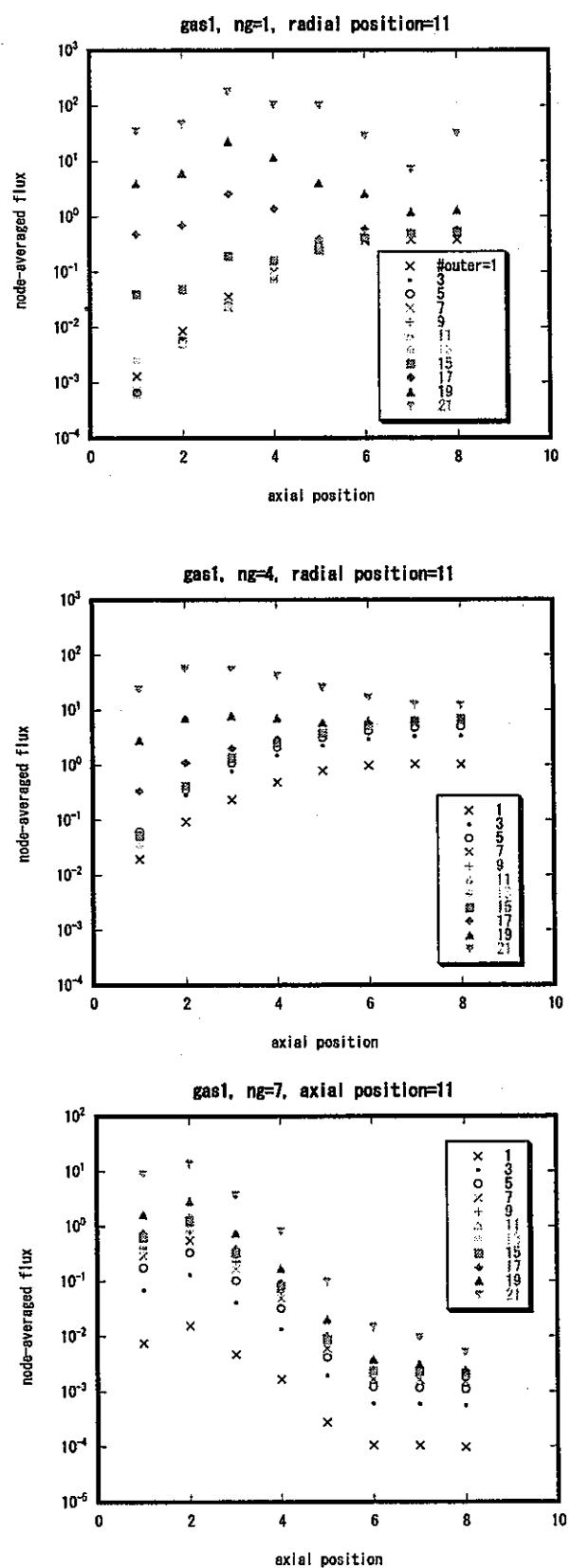


図 3 体系 1 (ガス炉) のノード平均スカラー束の発散の様子 (軸方向分布)

付録 B 集合体出力分布評価コード(ASSYPOW) 使用マニュアル

B. 1 はじめに.....	B-1
B. 2 使用環境.....	B-1
B. 3 セットアップ.....	B-2
B. 3. 1 メモリサイズの変更.....	B-2
B. 3. 2 実行形式プログラムの作成.....	B-3
B. 3. 3 計算の実行.....	B-4
B. 4 入力データの作成.....	B-5
B. 5 サンプル入力データ.....	B-6
B. 6 主な使用ファイル.....	B-7
B. 6. 1 NSHEXBURN からの受け取りデータ	B-7
B. 6. 2 COBRA4-MJ 用出力ファイル	B-9
B. 6. 3 中性子照射量評価用出力ファイル.....	B-10
B. 7 幾何的配置の前提.....	B-12
B. 8 サンプル出力結果.....	B-14

図リスト

図 B. 1 ASSYPOW と関連コード間のデータの流れ.....	B-2
図 B. 2 ファイルのレコード構成	B-9
図 B. 3 ファイルのレコード構成	B-10
図 B. 4 集合体内ピンの番号付け	B-12
図 B. 5 集合体配置における基準方向	B-13

B.1 はじめに

集合体出力分布評価コード(ASSYPOW)^{*}は、三次元拡散燃焼計算コード MOSES が計算する中性子束分布を用いて着目集合体内の出力分布を計算するために開発された。本コードでは、1 軸方向プレーン当たり集合体内 6 点の中性子束を用い、隣接集合体の中性子束を含めて 3 次関数で当てはめ、これを基に集合体内燃料ピン位置における中性子束を決定する。この中性子束を用いてピン毎、軸方向プレーン毎の出力を決定し、最大線出力ならびに集合体内径方向、軸方向出力分布、炉心高さ積分出力、軸方向ピーキングファクタ (F_z)、径方向ピーキングファクタ (F_{xy})、高速中性子束等を計算する。

今回は原版に各種補正係数の考慮、他コードへデータを引き渡すためのインターフェイスを追加したバージョン^{**}を基にして、NSHEXBURN コードの出力中性子束を用いノード内中性子束分布を再構築し、得られた中性子束を基に上記核特性データを算定するようにした。

以下に NSHEXBURN 用 ASSYPOW コードの使用法をまとめた。

B.2 使用環境

UNIX(LINUX) および PC Windows 環境で実行可能である。関連コードとデータの流れを図 B.1 に示す。NSHEXBURN から出力されるファイル（後述）を読み込むと共に、計算処理の対象集合体を指定することにより、集合体内出力分布を計算する。併せて別コード向けのインターフェイスファイルを作成する。このように、本コードは NSHEXBURN コードの後処理機能を果たすものである。

* (株) 三菱総合研究所、「集合体内出力分布計算システムの整備」、PNC PJ8222 97-001、平成 9 年 3 月

** (株) 三菱総合研究所、「MOSES コード摂動計算機能等の整備」、JNC ZJ2410 2001-009、平成 13 年 3 月

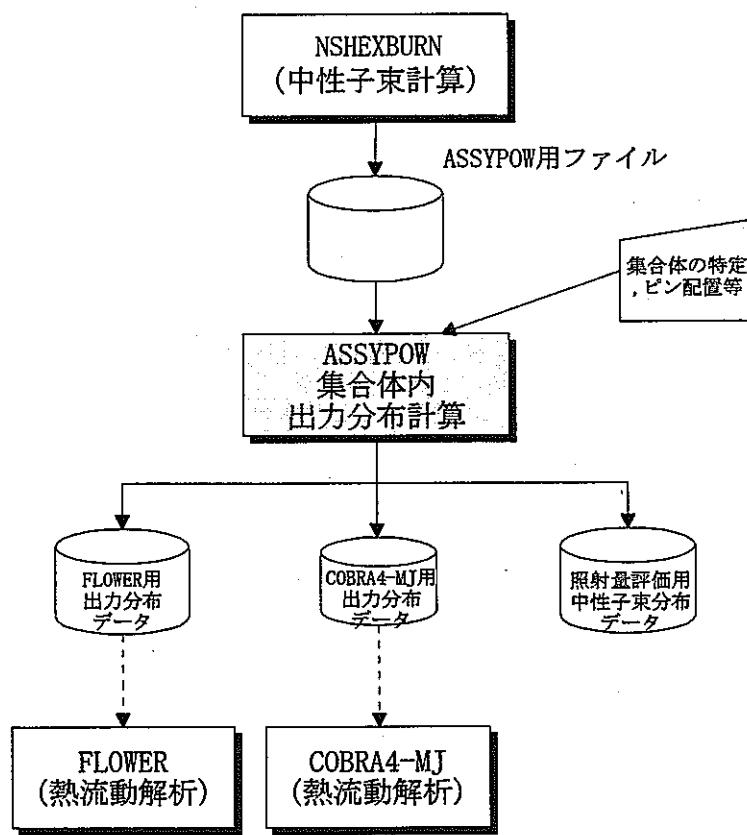


図 B. 1 ASSYPOW と関連コード間のデータの流れ

B. 3 セットアップ

B. 3. 1 メモリサイズの変更

本プログラムは、問題のサイズに応じてパラメータ宣言を変更するようにプログラミング化してある。利用に際しては、下記の `include` ファイルで設定しているパラメータのサイズに注意し、必要ならばこれらを変更してロードモジュールを作り直す必要がある。

```

global. inc
c/global/
    parameter (mlay=16, msym=6, masm=1+3*mlay*(mlay-1)*msym/6)
    parameter (kmm=60, mgm=18, mpin=271, kzmm=25, mgp=mgm+1)

pcalin. inc
c%pcalin
    parameter (maxasm=300, maxstp=100, maxgrp=18, maxcor=3)

```

上記の例では、

- ・集合体層数 =16
- ・軸方向メッシュ数 =60
- ・エネルギー群数 =18
- ・ピン数 =271
- ・ゾーン数 =25
- ・着目集合体数 =300
- ・計算ステップ数 =100
- ・補正係数組み数 =3

を各々の最大値としている。

B. 3. 2 実行形式プログラムの作成

次の makefile で実行形式プログラムを作成する。

```
#####
# Makifile
#
#
#####
#
SRC= asymesh.f control.f cormap.f cormapd.f cormape.f cout.f \
      flxin1.f flxin2.f flxin3.f flxset1.f flxset3.f flxset4.f \
      fout.f fout2.f haddr.f indxh.f input.f input2.f main.f \
      matcoef.f matcoef3.f matcoef4.f matcoef5.f parchk.f pinmesh.f \
      pinpow.f powcal.f powedt.f recon1.f recon2.f recon3.f recon4.f \
      recon5.f reconz.f swgt.f .
FFLAGS= -O -X7 -Q
FFLAGS= -g -X7
EXE=main.exe
$(EXE): $(SRC:.f=.o)
      f90 -o $(EXE) $(FFLAGS) $(SRC:.f=.o)
.o:
      f90 -c $(FFLAGS) $<
clean :
      /bin/rm -f $(SRC:.f=.o) $(EXE)
```

B. 3.3 計算の実行

次の shell で計算を実行する。

```
# !/bin/sh
# goassypow
# script to run assypow
#
ln -s $1.post fort.1          ...NSHEXBURN 出力ファイル
main.exe <$2.inp >$2.out
mv fort.9   $2.dbg           ...デバッグ出力（指定時のみ必要）
mv fort.10  $2.flower        ...他コード接続用
mv fort.11  $2.dump          ...ファイルダンプ
mv fort.20  $2.cobra         ...ファイルダンプ (COBRA 用)
mv fort.21  $2.nvt           ...ファイルダンプ (照射量計算用)
rm fort*
#
exit
```

B.4 入力データの作成

本計算コードの制御用入力データは以下の通りである。入力機番は5で、形式はすべて自由形式(*)である。

#1 計算する集合体数

NCAL 着目集合体数 (=<300:ただし設定値による)
NCORR 補正係数の組数 (=<3:ただし設定値による)
ただし0ならば補正係数の入力はなしとして扱う

#2 集合体番号指定

IASM(NCAL) 出力分布計算用着目集合体番号

#3 集合体タイプ

JASM(NCAL) 出力分布計算用着目集合体種別
(1/2=炉心燃料集合体/径方向ブランケット集合体)

#4 補正係数 (NCORR>0の場合にNCORRセット与える)

HCORR 補正係数のコメント(20文字以下)。
補正係数のデータ列の前に必ず行を変えする。

CORR(NCAL) 補正係数

#5 集合体内ピンと軸方向メッシュ範囲

NPINC 炉心燃料集合体内燃料ピン本数
NPINB 径方向ブランケット集合体内燃料ピン本数
PITCHC 炉心燃料ピンピッチ(cm)
PITCHB ブランケット燃料ピンピッチ(cm)
KCORE(2)* 炉心燃料における燃料領域範囲
(上端および下端軸方向メッシュ番号)
KBLKT(2)* ブランケット燃料における燃料領域範囲(同上)

*これらのメッシュ範囲で軸方向ピーリングファクタが計算される。

NKOUT 計算出力平面指定数(10以下)

#6 出力平面指定

KOUT(NKOUT) 集合体内出力分布プリント出力平面軸方向メッシュ番号

7 オプション

LRECON ノード内中性子束の径方向再構築方法の選択
=1 ノード平均及びノード境界平均角度束を用いて 2 次元で表現した手法
=3 ノード平均、ノード境界平均角度束、及びノード中央角度束を用いて 2 次元で表現した手法
=4 ノード平均、ノード境界平均角度束、及びノード頂点角度束を用いて 3 次元で表現した手法
=5 ノード平均、ノード境界平均角度束、及びノード境界中性子束勾配を用いて 3 次元で表現した手法

LSTEP 計算する燃焼ステップ
(0/n=全燃焼ステップ/# 6 で指定したステップのみ)
ただし、n の最大は 100

LPRI プリント出力レベル (0/1/2=最小／中間／最大)

LDBG デバッグ用フラグ (通常は 0 を指定)

8 PSTEP(LSTEP) 計算する燃焼ステップ (LSTEP>0)

9 RESP(MAXGRP) ピン位置中性子束計算用重畠関数 R

B.5 サンプル入力データ

補正係数を指定しない場合の入力データ例を以下に示す。

```
10 0          /ncal, ncorr
 2 8 9 20 22
 175 176 177 218 219 /iasm
 5*1 5*2 /jasm
 169 61 0.787 1.315 12 37 4 45 1 /npinc....kblk2
 23          /kout
 1 0 1 0 0      /lrecon, lstep, lpri, ldbg
 18*1.0       /resp
```

補正係数を2種類与える場合の入力データ例を以下に示す。

```
10 2          /ncal
 2 8 9 20 22
 175 176 177 218 219 /iasm
5*1 5*2 /jasm
CORRECTION 1
5*0.98 5*0.9
CORRECTION 2
5*1.01 5*0.8
169 61 0.787 1.315 12 37 4 45 1 /npinc....kblk2
23          /kout
1 0 1 0 0      /lrecon, lstep, lpri, ldbg
18*1.0        /resp
```

B. 6 主な使用ファイル

図B.1で示したように、使用するファイルはNSHEXBURNの出力ファイルのみである。

コードが出力するファイルは、FLOWER、COBRA、照射量評価用とがある。

B. 6.1 NSHEXBURN からの受け取りデータ

本コードが必要とする NSHEXBURN コード出力ファイルは以下の通りである。入力機番は1で、形式はすべてバイナリ形式である。これらは、マクロ断面積計算を行うサブルーチン(DMACR)、及び中性子束の規格化を行うサブルーチン(DNNRM)から出力されている。各レコードの内容を以下に示す。

#1 制御パラメータ

nlay	:I*4 :集合体層数
nsym	:I*4 :体系範囲 (1 : 2 : 3 : 6=1/6 : 1/3 : 1/2 : 1/1)
km	:I*4 :軸方向メッシュ数
kzm	:I*4 :軸方向ゾーン数
igm	:I*4 :エネルギー群数
nmes	:I*4 :中性子束解法 (1 : 5 : 6=粗メッシュ : TriZ : TriZ 軸倍メッシュ)
ndir	:I*4 :=4
nodr	:I*4 :散乱次数

mm :I*4 := isn*(isn+2)/8 (isn : Sn 次数)
 mm4 :I*4 := mm*12

#2 幾何データ

hp :R*4 :集合体対面間距離(cm)
 dz(km) :R*4 :軸方向メッシュ幅(cm)
 kpln(km) :I*4 :軸方向メッシュ毎ゾーン番号

#3 幾何データ 2

nzmesh(kzm) :I*4 :軸方向ノード毎のメッシュ数(等間隔)

#4 角度分点重み

wgt(mm) :R*8 :角度分点重み

#5 燃焼ステップヘッダー情報

nbstep :I*4 :燃焼ステップ
 btime :R*4 :燃焼期間(日)
 tpow :R*4 :炉出力(MW)
 title :C*72 :燃焼計算タイトル

#6 燃焼ステップの固有値

eigen :R*8 :固有値

#7 断面積データ

sigh(nasm, kzm, igm) :R*4 :発熱断面積(W·s/cm)

#8 スカラー中性子束

sclf1(nasm, kzm, igm) :R*8 :ノード平均中性子束

#9 出力規格化定数

pnorm :R*4 :出力規格化定数
 (本バージョンでは pnorm=1.0)

#10 滞留時間

stay(nasm) :R*4 :集合体滞留時間(日)

#11～#14まで、エネルギー群毎に繰り返し

#11 径方向角度束

bflux(mm4, 3, 2, nasm, kzm) :R*8 :ノード境界平均角度束

#12 径方向中央角度束

caf1x(mm4, ndir, nasm, kzm) :R*8 :ノード中央角度束

#13 軸方向角度束

zf1xm(mm4, nodr, nasm, kzm) :R*8 :軸方向角度束

#14 中性子束勾配

flxmdev(mm4, 2, nasm, kzm, 3) :R*8 :ノード境界中性子束勾配

なお、#5 から #14 のデータは燃焼ステップ毎に NSHEXBURN からファイルに書き出されている。また、C*72、I*4、R*4、R*8 は各々文字、整数型 72 バイト、実数型 4 バイト、実数型 8 バイトを示す。

B. 6.2 COBRA4-MJ 用出力ファイル

次のレコード構成のバイナリファイルを出力する。

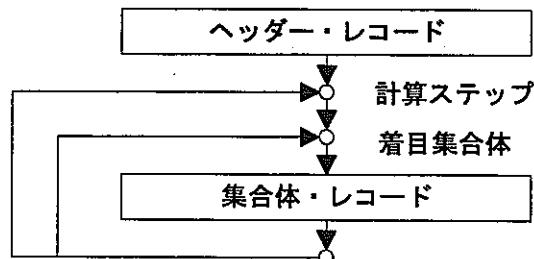


図 B.2 ファイルのレコード構成

ここで、各レコードは次の通りである。

(1) ヘッダー・レコード

NPLN : I*4 : 軸方向メッシュ数

DELZ(NPLN) : R*4 : メッシュ幅[cm] (NSHEXBURN)

上部から下部に向かって与えられる。

(2) 集合体・レコード

IASM : C*5 : 集合体名称 ('03B02' 等の集合体アドレス)

NPIN : I*4 : 燃料ピン数

NBstp : I*4 : 燃焼ステップ番号

APOW : R*4 : 集合体積分出力 [MW]
 KPLN(NPLN) : I*4 : DELZ に対応するメッシュ毎ゾーン番号(NSHEXBURN)
 POW(NPIN, NPLN) : R*4 : ピン毎、軸方向メッシュ毎相対出力
 ((POW((n, k), n=1, NPIN), k=1, NPLN) の順である。

注) C*5、I*4、R*4 は各々文字型 5 バイト、整数型 4 バイト、実数型 4 バイトを示す。

B. 6.3 中性子照射量評価用出力ファイル

次のレコード構成のバイナリファイルを出力する。

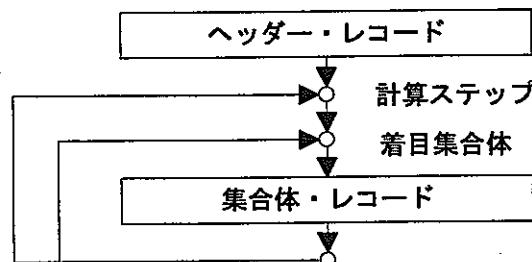


図 B.3 ファイルのレコード構成

ここで、各レコードは次の通りである。

(1) ヘッダー・レコード

NPLN : I*4 : 軸方向メッシュ数
 NGRP : I*4 : エネルギー群数
 DELZ(NPLN) : R*4 : メッシュ幅 [cm] (NSHEXBURN)

上部から下部に向かって与えられる。

(2) 集合体・レコード

IASM : C*5 : 集合体名称 ('03B02' 等の集合体アドレス)
 NPIN : I*4 : 燃料ピン数
 NBSTP : I*4 : 燃焼ステップ番号
 BTIME : R*4 : 炉内滞留時間 [日]
 KPLN(NPLN) : I*4 : メッシュ毎ゾーン番号(NSHEXBURN) 同上。

PHI (NPIN, NPLN, NGRP) : R*4 : ピン毎、軸方向メッシュ毎中性子束 [1/cm²/s]

((PHI((n, k, ig), n=1, NPIN), k=1, NPLN), ig=1, NGRP)

の順である。

RPHI (NPIN, NPLN) : R*4 : ピン毎、軸方向メッシュ毎積分中性子束 [1/cm²/s]

ただし、重畠関数で積分している。

((RPHI((n, k, ig), n=1, NPIN), k=1, NPLN)

の順である。

注) C*5、 I*4、 R*4 は各々文字型 5 バイト、整数型 4 バイト、実数型 4 バイトを示す。

B.7 幾何的配置の前提

本コードは、着目集合体中の燃料ピンの番号付けを図 B.4 のように設定している。

集合体内出力ピーク位置もこのピン番号で識別できるようになっている。ただし、集合体の方向は炉心内位置によって異なる。これを図 B.5 に示す。

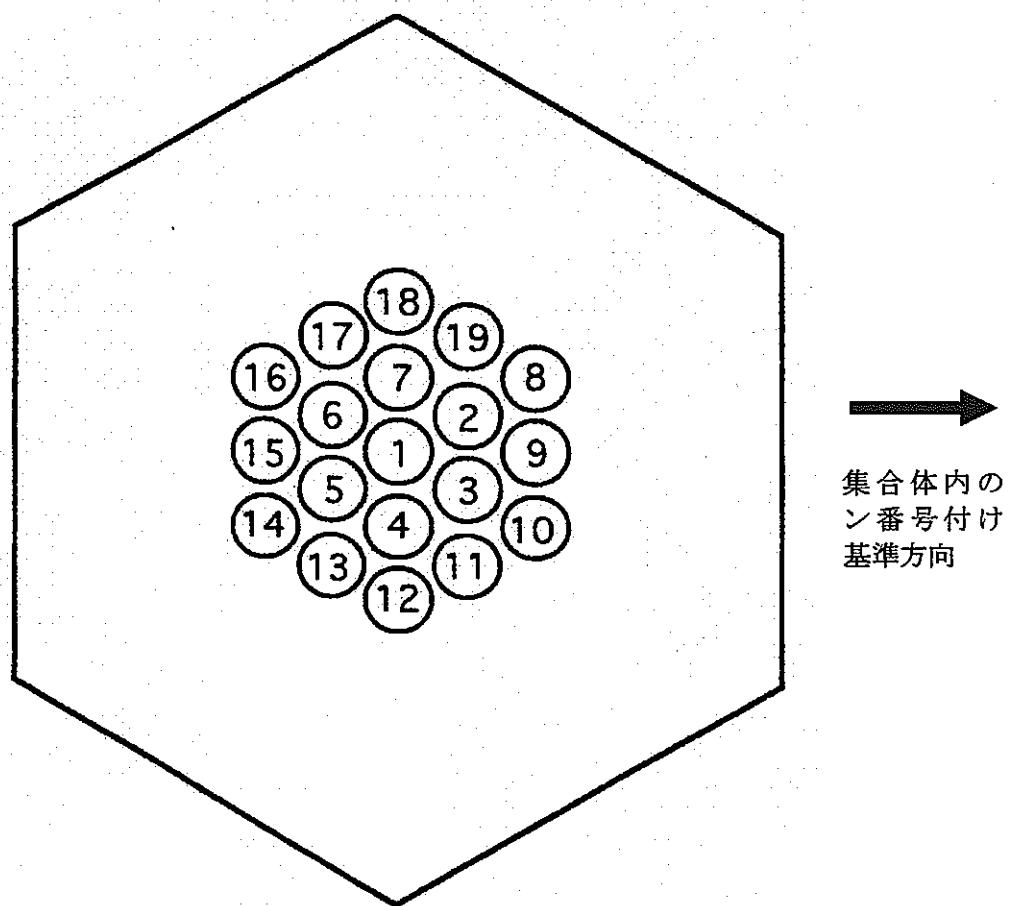
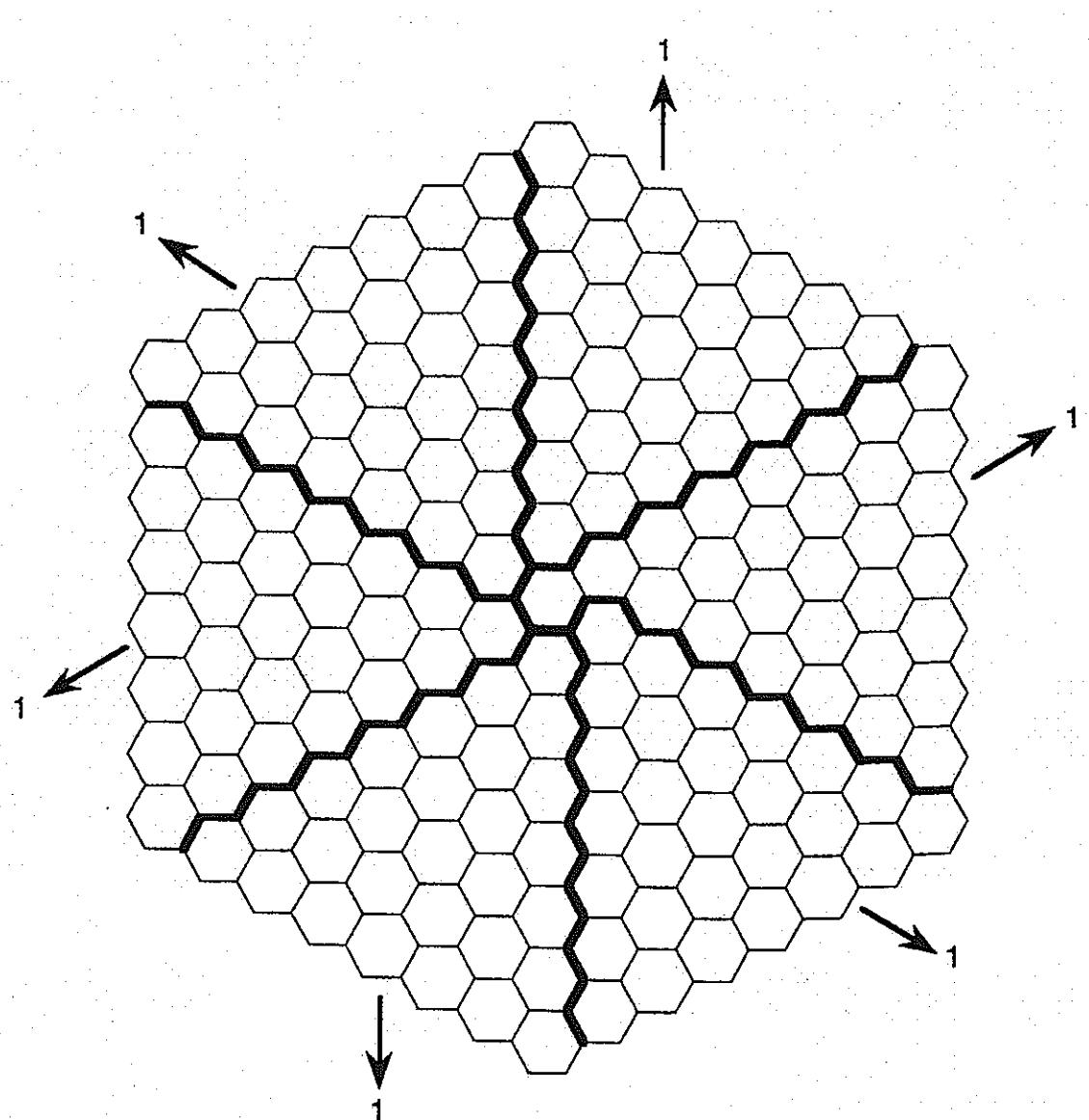


図 B.4 集合体内ピンの番号付け



* 1 は集合体内ピン番号付けの基準方向を表す

図 B.5 集合体配置における基準方向

B.8 サンプル出力結果

サンプル計算の出力結果を以下に記載する。本ケースは、補正係数なし、中性子束再構築を lrecon=1、集合体内のピン数を 7 ピンとした燃焼 2 ステップの計算結果である。

```

1 -----
----- program A S S Y P O W -----
0 control input :
ncal = 3 number of assembly for calculation
ncorr = 0 number of power correction factor set

iasm = target assembly numbers
      2 60 125
jasm = target assembly types (1/2=core/blANKET)
      1 1 2

npins = 7 total number of fuel pins in core assembly
npinb = 7 total number of fuel pins in blkt assembly
pitchc= 3.7333 fuel pin pitch of core assembly (cm)
pitchb= 3.7333 fuel pin pitch of blkt assembly (cm)
kcore1= 1 lower mesh number of core region
kcore2= 36 upper mesh number of core region
kblkt1= 1 lower mesh number of blkt region
kblkt2= 36 upper mesh number of blkt region

nplayc= 2 number of fuel pin layers in core assembly
nplayb= 2 number of fuel pin layers in blkt assembly
nkout = 1 number of axial mesh to edit

kout = axial mesh numbers specified
      18

lrecon= 1 reconstruction method

-----
----- nshexburn parameters -----
0 parameters contained in nshexburn post file :
nlay = 7 number of assembly layers
nsym = 6 symmetry parameter (1:2:3:6=1/6:1/3:1/2:1/1)
nasm = 127 total number of assemblies
km = 36 number of axial mesh
kzm = 8 number of axial zone
igm = 4 number of neutron energy groups
rmos = 1 method (1:2:3:4=HexZ:modHexZ:TriZ:fineTriZ)
ndir = 4
nodr = 3 number of scattering order
mm = 3 = isn*(ism+2)/8 (ism=sn number)
mm4 = 36 = mm*12

resp = response functions for integral flux
      1.0000e+00 1.0000e+00 1.0000e+00 1.0000e+00
0 parameters contained in file :
hp = 11.20030 assembly hexagonal pitch (cm)
shex = 108.64003 assembly cross sectional area (cm2)

      k   delz(cm)   nkpin
      1   5.0000    1
      2   5.0000    1
      3   5.0000    1
      4   5.0000    1
      5   5.0000    2
      6   5.0000    2
      7   5.0000    2
      8   5.0000    2
      9   4.7500    3
     10   4.7500    3
     11   4.7500    3
     12   4.7500    3
     13   4.7500    3
     14   4.7500    4
     15   4.7500    4
     16   4.7500    4
     17   4.7500    4

```

18	4.7500	4
19	4.7500	5
20	4.7500	5
21	4.7500	5
22	4.7500	5
23	4.7500	5
24	4.7500	6
25	4.7500	6
26	4.7500	6
27	4.7500	6
28	4.7500	6
29	5.0000	7
30	5.0000	7
31	5.0000	7
32	5.0000	7
33	5.0000	8
34	5.0000	8
35	5.0000	8
36	5.0000	8

nzmesh :

4 4 5 5 5 5 4 4

wgt :

2.77778e-02 2.77778e-02 2.77778e-02

assembly numbers

122			
121		123	
120		87	124
119	86	88	125
118	85	58	90
117	84	57	91
116	83	56	92
82	55	34	127
115	54	33	126
81	32	18	37
114	53	16	19
80	31	6	20
113	52	15	21
79	30	5	22
112	51	14	23
78	29	13	24
111	50	28	25
77	49	27	43
110	76	48	44
109	75	47	68
108	74	46	99
107	73	71	100
106	72	102	
105	103		
104			

fuel assembly pin numbers

7	
6	2
1	
5	3
4	

blanket assembly pin numbers

7	
6	2
1	
5	3
4	

1 <<(1) nsburn test 7layer problem

>>> step/time(day)/power(MWt)= 1 0.00 50.00

1) * target assembly number = 2 * type=core # of fuel pins = 7

axial plane	dz (cm)	power,dens (w/cc)	avg.pin power(w/cm)	vol. intg power(w)	power peak Fxy pin#	axial qmax(W/cm)	assy.avg. Fz Flux(n/cm ² /s)	flux peak Fxy pin#	assy.peak Flux(n/cm ² /s)
1	5.00	7.8694e-02	1.2213e+00	4.2747e+01	1.0496 2	1.2819e+00	0.0022 4.8021e+13	1.0330 2	4.9607e+13
2	5.00	2.2875e-01	3.5502e+00	1.2426e+02	1.0271 2	3.6463e+00	0.0064 5.5249e+13	1.0347 2	5.7165e+13
3	5.00	3.8286e-01	5.9436e+00	2.0803e+02	1.0222 2	6.0756e+00	0.0106 6.2677e+13	1.0360 2	6.4932e+13

4	5.00	5.4133e-01	8.4015e+00	2.9405e+02	1.0201	2	8.5701e+00	0.0150	7.0305e+13	1.0370	2	7.2907e+13	
5	5.00	1.5798e+00	2.4519e+01	8.5817e+02	1.0057	4	2.4659e+01	0.0439	2.3285e+14	1.0176	2	2.3696e+14	
6	5.00	1.7916e+00	2.7805e+01	9.7317e+02	1.0058	4	2.7965e+01	0.0498	2.4305e+14	1.0183	2	2.4749e+14	
7	5.00	1.9387e+00	3.0089e+01	1.0531e+03	1.0060	2	3.0268e+01	0.0539	2.5014e+14	1.0187	2	2.5483e+14	
8	5.00	2.0214e+00	3.1372e+01	1.0980e+03	1.0061	2	3.1565e+01	0.0562	2.5412e+14	1.0190	2	2.5896e+14	
9	4.75	5.1673e+01	8.0196e+02	2.6665e+04	1.0066	5	8.0726e+02	1.4357	6.3615e+14	1.0065	5	6.4031e+14	
10	4.75	5.1884e+01	8.0524e+02	2.6774e+04	1.0067	5	8.1066e+02	1.4415	6.3770e+14	1.0066	5	6.4188e+14	
11	4.75	5.2308e+01	8.1181e+02	2.6993e+04	1.0069	5	8.1745e+02	1.4533	6.4080e+14	1.0066	5	6.4503e+14	
12	4.75	5.2944e+01	8.2169e+02	2.7321e+04	1.0072	5	8.2763e+02	1.4710	6.4546e+14	1.0067	5	6.4976e+14	
13	4.75	5.3792e+01	8.3485e+02	2.7759e+04	1.0076	5	8.4121e+02	1.4945	6.5167e+14	1.0068	5	6.5607e+14	
14	4.75	7.6141e+01	1.8117e+03	3.9292e+04	1.0069	5	1.1898e+03	2.1155	9.3704e+14	1.0062	5	9.4288e+14	
15	4.75	7.6659e+01	1.8977e+03	3.9559e+04	1.0071	5	1.1982e+03	2.1299	9.4083e+14	1.0063	5	9.4675e+14	
16	4.75	7.7058e+01	1.1959e+03	3.9765e+04	1.0073	5	1.2046e+03	2.1410	9.4376e+14	1.0063	5	9.4973e+14	
17	4.75	7.7339e+01	1.2003e+03	3.9910e+04	1.0074	5	1.2092e+03	2.1488	9.4581e+14	1.0064	5	9.5183e+14	
18	4.75	7.7502e+01	1.2028e+03	3.9994e+04	1.0075	5	1.2118e+03	2.1533	9.4701e+14	1.0064	5	9.5305e+14	
*	19	4.75	7.7949e+01	1.2098e+03	4.0225e+04	1.0077	5	1.2191e+03	2.1657	9.5281e+14	1.0067	5	9.5918e+14
20	4.75	7.7821e+01	1.2078e+03	4.0159e+04	1.0077	5	1.2171e+03	2.1622	9.5187e+14	1.0067	5	9.5822e+14	
21	4.75	7.7584e+01	1.2041e+03	4.0037e+04	1.0076	5	1.2132e+03	2.1556	9.5014e+14	1.0066	5	9.5645e+14	
22	4.75	7.7237e+01	1.1987e+03	3.9857e+04	1.0074	5	1.2076e+03	2.1459	9.4760e+14	1.0066	5	9.5386e+14	
23	4.75	7.6780e+01	1.1916e+03	3.9622e+04	1.0072	5	1.2003e+03	2.1332	9.4425e+14	1.0066	5	9.5045e+14	
24	4.75	5.5179e+01	8.5638e+02	8.4755e+04	1.0107	5	8.6556e+02	1.5331	6.6920e+14	1.0088	5	6.7506e+14	
25	4.75	5.4424e+01	8.4465e+02	8.8085e+04	1.0103	5	8.5335e+02	1.5121	6.6367e+14	1.0087	5	6.6941e+14	
26	4.75	5.4050e+01	8.3886e+02	2.7892e+04	1.0101	5	8.4731e+02	1.5017	6.6094e+14	1.0086	5	6.6662e+14	
27	4.75	5.4060e+01	8.3901e+02	2.7897e+04	1.0101	5	8.4745e+02	1.5020	6.6101e+14	1.0086	5	6.6669e+14	
28	4.75	5.4452e+01	8.4510e+02	8.8099e+04	1.0103	5	8.5377e+02	1.5129	6.6388e+14	1.0086	5	6.6961e+14	
29	5.00	2.1321e+00	3.3090e+01	1.1581e+03	1.0240	6	3.3885e+01	0.0592	2.9067e+14	1.0241	6	2.9787e+14	
30	5.00	2.1512e+00	3.3387e+01	1.1685e+03	1.0244	6	3.4203e+01	0.0598	2.9159e+14	1.0242	6	2.9865e+14	
31	5.00	2.0387e+00	3.1641e+01	1.1074e+03	1.0251	6	3.2436e+01	0.0566	2.8617e+14	1.0243	6	2.9312e+14	
32	5.00	1.7946e+00	2.7852e+01	9.7481e+02	1.0263	6	2.8584e+01	0.0499	2.7441e+14	1.0243	6	2.8108e+14	
33	5.00	7.7817e-01	1.2077e+01	4.2270e+02	1.0338	6	1.2486e+01	0.0216	9.8181e+13	1.0375	6	1.0187e+14	
34	5.00	5.2265e-01	8.1115e+00	2.8390e+02	1.0376	6	8.4166e+00	0.0145	8.5873e+13	1.0380	6	8.9133e+13	
35	5.00	2.6269e-01	4.0769e+00	1.4269e+02	1.0489	6	4.2763e+00	0.0073	7.3351e+13	1.0386	6	7.6179e+13	
36	5.00	-1.7166e-03	-2.6642e-02	-9.3248e-01	0.0000	0	0.0000e+00	0.0000	6.0615e+13	1.0394	6	6.3002e+13	

Total 175.00 6.8429e+05
 1 <<(1) nsburn test 7layer problem >> step/time(day)/power (MWt)= 1 0.00 50.00

1) * target assembly number = 2 * type=core # of fuel pins = 7
 peak axial mesh number = 19
 radial peaking factor (Fxy) = 1.0077e+00 pin (5)
 maximum linear heat (W/cm) = 1.2191e+03
 maximum integral flux (n/cm2/s) = 9.5918e+14

normalized pin power distribution at peak axial position
 qmax(W/cm) = 1.2191e+03

0.993	
1.000	0.983
0.995	
1.000	0.983
0.993	

normalized pin flux distribution at peak axial position
 flux(n/cm2/s) = 9.5918e+14

0.996	
1.001	0.996
0.998	
1.001	0.996
0.996	

1) * target assembly number = 2 * type=core # of fuel pins = 7
 specified axial mesh number = 18
 radial peaking factor (Fxy) = 1.0075e+00 pin (5)
 maximum linear heat (W/cm) = 1.2118e+03
 maximum integral flux (n/cm2/s) = 9.5305e+14

normalized pin power distribution at 18 axial mesh
 qmax(W/cm) = 1.2118e+03

0.993	
1.000	0.983
0.996	
1.000	0.983
0.993	

normalized pin flux distribution at 18 axial mesh
 peak flux(n/cm2/s) = 9.5305e+14

normalized pin flux distribution at peak axial position
 flux(n/cm²/s) = 3.4049e+14

0.461
0.821
0.279
0.649
1.004
0.461
0.827

3) * target assembly number = 125 * type=blk1 # of fuel pins = 7
 specified axial mesh number = 18
 radial peaking factor (Fxy) = 1.6974e+00 pin (5)
 maximum linear heat (W/cm) = 9.5690e+01
 maximum integral flux (n/cm²/s) = 3.3863e+14

normalized pin power distribution at 18 axial mesh
 qmax(W/cm) = 9.5690e+01

0.391
0.763
0.248
0.561
1.000
0.391
0.770

normalized pin flux distribution at 18 axial mesh
 peak flux(n/cm²/s) = 3.3863e+14

0.461
0.821
0.279
0.649
1.004
0.461
0.827

1 <<(2) nsburn test 7layer problem >> step/time(day)/power(MWt)= 2 100.00 50.00

1) * target assembly number = 2 * type=core # of fuel pins = 7

axial plane	dz (cm)	power.dens (w/cc)	avg.pin power (w/cm)	vol.intg power (w)	power Fxy peak	axial qmax (W/cm)	asym, avg. Fz	flux Flux (n/cm/s)	peak Fxy pin#	asym.peak Flux (n/cm ² /s)	
1	5.00	7.8838e-02	1.2236e+00	4.2825e+01	1.0498	2	1.2844e+00	0.0022	4.8276e+13	1.0330	
2	5.00	2.2994e-01	3.5686e+00	1.2490e+02	1.0270	2	3.6651e+00	0.0064	5.5555e+13	1.0347	
3	5.00	3.8532e-01	5.9802e+00	2.0931e+02	1.0222	2	6.1129e+00	0.0107	6.3039e+13	1.0360	
4	5.00	5.4500e-01	8.4584e+00	2.9604e+02	1.0200	2	8.6278e+00	0.0151	7.0730e+13	1.0370	
5	5.00	1.5890e+00	2.4651e+01	8.6315e+02	1.0057	4	2.4802e+01	0.0439	2.3419e+14	1.0176	
6	5.00	1.8018e+00	2.7964e+01	9.7874e+02	1.0057	4	2.8124e+01	0.0498	2.4444e+14	1.0183	
7	5.00	1.9498e+00	3.0262e+01	1.0592e+03	1.0059	2	3.0442e+01	0.0539	2.5157e+14	1.0187	
8	5.00	2.0333e+00	3.1556e+01	1.1045e+03	1.0061	2	3.1750e+01	0.0562	2.5559e+14	1.0191	
9	4.75	5.1950e+01	8.0626e+02	2.6980e+04	1.0066	5	8.1159e+02	1.4366	6.3950e+14	1.0065	
10	4.75	5.2160e+01	8.0953e+02	2.6917e+04	1.0067	5	8.1498e+02	1.4424	6.4104e+14	1.0065	
11	4.75	5.2585e+01	8.1611e+02	2.7136e+04	1.0069	5	8.2178e+02	1.4541	6.4414e+14	1.0066	
12	4.75	5.3223e+01	8.2602e+02	2.7465e+04	1.0072	5	8.3199e+02	1.4718	6.4881e+14	1.0067	
13	4.75	5.4074e+01	8.3923e+02	2.7904e+04	1.0076	5	8.4561e+02	1.4953	6.5505e+14	1.0067	
14	4.75	7.6474e+01	1.1869e+03	3.9464e+04	1.0069	5	1.1951e+03	2.1148	9.4109e+14	1.0063	
15	4.75	7.6956e+01	1.1950e+03	3.9733e+04	1.0071	5	1.2035e+03	2.1292	9.4491e+14	1.0063	
16	4.75	7.7396e+01	1.2012e+03	3.9939e+04	1.0073	5	1.2100e+03	2.1403	9.4784e+14	1.0064	
17	4.75	7.7677e+01	1.2055e+03	4.0084e+04	1.0074	5	1.2145e+03	2.1480	9.4990e+14	1.0064	
18	4.75	7.7838e+01	1.2080e+03	4.0167e+04	1.0075	5	1.2171e+03	2.1525	9.5108e+14	1.0064	
*	19	4.75	7.8282e+01	1.2149e+03	4.0397e+04	1.0078	5	1.2244e+03	2.1648	9.5685e+14	1.0067
20	4.75	7.8156e+01	1.2130e+03	4.0332e+04	1.0077	5	1.2223e+03	2.1613	9.5592e+14	1.0067	
21	4.75	7.7919e+01	1.2093e+03	4.0209e+04	1.0076	5	1.2185e+03	2.1547	9.5419e+14	1.0067	
22	4.75	7.7571e+01	1.2039e+03	4.0030e+04	1.0075	5	1.2129e+03	2.1451	9.5164e+14	1.0066	
23	4.75	7.7112e+01	1.1968e+03	3.9793e+04	1.0073	5	1.2055e+03	2.1324	9.4928e+14	1.0066	
24	4.75	5.5460e+01	8.6074e+02	2.8620e+04	1.0107	5	8.6996e+02	1.5337	6.7256e+14	1.0088	
25	4.75	5.4701e+01	8.4896e+02	2.8228e+04	1.0103	5	8.5770e+02	1.5127	6.6700e+14	1.0087	
26	4.75	5.4327e+01	8.4316e+02	2.8035e+04	1.0101	5	8.5165e+02	1.5023	6.6427e+14	1.0086	
27	4.75	5.4338e+01	8.4333e+02	2.8041e+04	1.0101	5	8.5182e+02	1.5026	6.6435e+14	1.0086	
28	4.75	5.4734e+01	8.4948e+02	2.8245e+04	1.0103	5	8.5820e+02	1.5136	6.6725e+14	1.0086	
29	5.00	2.1443e+00	3.3279e+01	1.1648e+03	1.0240	6	3.4079e+01	0.0593	2.9228e+14	1.0241	
30	5.00	2.1632e+00	3.3573e+01	1.1751e+03	1.0244	6	3.4394e+01	0.0598	2.9319e+14	1.0242	
31	5.00	2.0498e+00	3.1813e+01	1.1135e+03	1.0251	6	3.2612e+01	0.0567	2.8773e+14	1.0243	
32	5.00	1.8041e+00	2.7999e+01	9.7996e+02	1.0263	6	2.8735e+01	0.0499	2.7589e+14	1.0243	
33	5.00	7.8258e-01	1.2146e+01	4.2510e+02	1.0339	6	1.2557e+01	0.0216	9.8717e+13	1.0375	
34	5.00	5.2561e-01	8.1575e+00	2.8551e+02	1.0376	6	8.4644e+00	0.0145	8.6339e+13	1.0380	
35	5.00	2.6417e-01	4.1000e+00	1.4350e+02	1.0489	6	4.3005e+00	0.0073	7.3747e+13	1.0386	
36	5.00	-1.7279e-03	-2.6817e-02	-9.3858e-01	0.0000	0	0.0000e+00	0.0000	6.0939e+13	1.0394	

Total 175.00 6.8751e+05 >> step/time(day)/power(MWt)= 2 100.00 50.00
 1 <<(2) nsburn test 7layer problem

1) * target assembly number = 2 * type=core # of fuel pins = 7
 peak axial mesh number = 19

radial peaking factor (Fxy) = 1.0078e+00 pin (5)
 maximum linear heat (W/cm) = 1.2244e+03
 maximum integral flux (n/cm²/s) = 9.6327e+14

normalized pin power distribution at peak axial position
 qmax (W/cm) = 1.2244e+03

0.993	
1.000	0.983
0.995	
1.000	0.982
0.993	

normalized pin flux distribution at peak axial position
 flux (n/cm²/s) = 9.6327e+14

0.996	
1.001	0.986
0.998	
1.001	0.986
0.996	

1) * target assembly number = 2 * type=core # of fuel pins = 7
 specified axial mesh number = 18
 radial peaking factor (Fxy) = 1.0075e+00 pin (5)
 maximum linear heat (W/cm) = 1.2171e+03
 maximum integral flux (n/cm²/s) = 9.5717e+14

normalized pin power distribution at 18 axial mesh
 qmax (W/cm) = 1.2171e+03

0.993	
1.000	0.983
0.996	
1.000	0.983
0.993	

normalized pin flux distribution at 18 axial mesh
 peak flux (n/cm²/s) = 9.5717e+14

0.996	
1.001	0.986
0.998	
1.001	0.986
0.996	

1 <<(2) nsburn test 7layer problem >> step/time(day)/power(MWt)= 2 100.00 50.00

2) * target assembly number = 60 * type=core # of fuel pins = 7

axial plane	dz (cm)	power_dens (w/cc)	avg.pin power (w/cm)	vol.intg power(w)	power peak Fxy	peak pin#	axial qmax (W/cm)	Fz	assy. avg. Flux (n/cm/s)	flux peak Fxy	peak pin#	assy. peak Flux (n/cm ² /s)
1	5.00	3.0425e-02	4.7219e-01	1.6527e+01	1.0914	4	5.1536e-01	0.0008	3.4483e+13	1.0956	5	3.7779e+13
2	5.00	1.6044e-01	2.4901e+00	8.7153e+01	1.0856	5	2.7032e+00	0.0045	4.0747e+13	1.0950	5	4.4620e+13
3	5.00	2.9634e-01	4.5992e+00	1.6097e+02	1.0857	5	4.9933e+00	0.0082	4.7296e+13	1.0946	5	5.1771e+13
4	5.00	4.3812e-01	6.7995e+00	2.3789e+02	1.0857	5	7.3825e+00	0.0122	5.4127e+13	1.0943	5	5.9230e+13
5	5.00	1.3060e+00	2.0268e+01	7.0940e+02	1.0763	5	2.1814e+01	0.0362	1.7436e+14	1.0926	5	1.9050e+14
6	5.00	1.4537e+00	2.2562e+01	7.8968e+02	1.0767	5	2.4293e+01	0.0403	1.8148e+14	1.0926	5	1.9828e+14
7	5.00	1.5165e+00	2.3536e+01	8.2376e+02	1.0768	5	2.5345e+01	0.0421	1.8451e+14	1.0925	5	2.0158e+14
8	5.00	1.4942e+00	2.3190e+01	8.1166e+02	1.0767	5	2.4969e+01	0.0415	1.8344e+14	1.0925	5	2.0041e+14
9	4.75	5.2945e+01	8.2171e+02	2.7322e+04	1.0857	5	8.9213e+02	1.4694	4.7134e+14	1.0861	5	5.1194e+14
10	4.75	5.2550e+01	8.1558e+02	2.7118e+04	1.0855	5	8.8529e+02	1.4585	4.6921e+14	1.0861	5	5.0959e+14
11	4.75	5.2500e+01	8.1480e+02	2.7092e+04	1.0854	5	8.8441e+02	1.4570	4.6894e+14	1.0860	5	5.0929e+14
12	4.75	5.2794e+01	8.1936e+02	2.7244e+04	1.0856	5	8.8950e+02	1.4652	4.7053e+14	1.0861	5	5.1103e+14
13	4.75	5.3431e+01	8.2926e+02	2.7573e+04	1.0860	5	9.0057e+02	1.4829	4.7376e+14	1.0862	5	5.1482e+14
14	4.75	7.6954e+01	1.1943e+03	3.9711e+04	1.0837	5	1.2942e+03	2.1357	6.9116e+14	1.0846	5	7.4965e+14
15	4.75	7.7318e+01	1.2000e+03	3.9899e+04	1.0838	5	1.3006e+03	2.1458	6.9313e+14	1.0847	5	7.5181e+14
16	4.75	7.7609e+01	1.2043e+03	4.0045e+04	1.0840	5	1.3055e+03	2.1537	6.9465e+14	1.0847	5	7.5349e+14
17	4.75	7.7799e+01	1.2074e+03	4.0147e+04	1.0840	5	1.3089e+03	2.1592	6.9573e+14	1.0847	5	7.5468e+14
18	4.75	7.7917e+01	1.2093e+03	4.0208e+04	1.0841	5	1.3110e+03	2.1624	6.9636e+14	1.0847	5	7.5538e+14
* 19	4.75	7.8340e+01	1.2158e+03	4.0427e+04	1.0842	5	1.3182e+03	2.1742	7.0033e+14	1.0848	5	7.5973e+14
20	4.75	7.8244e+01	1.2143e+03	4.0377e+04	1.0841	5	1.3165e+03	2.1715	6.9981e+14	1.0848	5	7.5916e+14
21	4.75	7.8068e+01	1.2116e+03	4.0287e+04	1.0840	5	1.3135e+03	2.1667	6.9886e+14	1.0848	5	7.5812e+14
22	4.75	7.7817e+01	1.2077e+03	4.0157e+04	1.0839	5	1.3091e+03	2.1597	6.9750e+14	1.0848	5	7.5662e+14
23	4.75	7.7488e+01	1.2026e+03	3.9987e+04	1.0838	5	1.3034e+03	2.1505	6.9571e+14	1.0847	5	7.5465e+14
24	4.75	5.4640e+01	8.4801e+02	2.8196e+04	1.0869	5	9.2173e+02	1.5164	4.8491e+14	1.0870	5	5.2710e+14
25	4.75	5.4032e+01	8.3857e+02	2.7882e+04	1.0866	5	9.1116e+02	1.4996	4.8163e+14	1.0869	5	5.2348e+14
26	4.75	5.3829e+01	8.3543e+02	2.7778e+04	1.0864	5	9.0764e+02	1.4939	4.8053e+14	1.0869	5	5.2228e+14
27	4.75	5.4032e+01	8.3858e+02	2.7883e+04	1.0866	5	9.1116e+02	1.4996	4.8163e+14	1.0869	5	5.2349e+14

28	4.75	5.4641e+01	8.4803e+02	2.8197e+04	1.0869	5	9.2174e+02	1.5165	4.8492e+14	1.0870	5	5.2710e+14
29	5.00	1.5467e+00	2.4005e+01	8.4016e+02	1.0800	5	2.5925e+01	0.0429	1.9660e+14	1.0983	5	2.1592e+14
30	5.00	1.5981e+00	2.4802e+01	8.6809e+02	1.0802	5	2.6791e+01	0.0444	1.9908e+14	1.0983	5	2.1865e+14
31	5.00	1.5461e+00	2.3996e+01	8.3984e+02	1.0801	5	2.5917e+01	0.0429	1.9657e+14	1.0983	5	2.1589e+14
32	5.00	1.3907e+00	2.1584e+01	7.5543e+02	1.0795	5	2.3301e+01	0.0386	1.8907e+14	1.0983	5	2.0766e+14
33	5.00	5.0887e-01	7.8977e+00	2.7642e+02	1.0968	5	8.6622e+00	0.0141	6.3347e+13	1.1069	5	7.0120e+13
34	5.00	3.4239e-01	5.3139e+00	1.8599e+02	1.0972	5	5.8302e+00	0.0095	5.5325e+13	1.1071	5	6.1249e+13
35	5.00	1.7607e-01	2.7326e+00	9.5642e+01	1.0982	5	3.0008e+00	0.0049	4.7310e+13	1.1073	5	5.2388e+13
36	5.00	9.9160e-03	1.5390e-01	5.3864e+00	1.1314	5	1.7411e-01	0.0003	3.9304e+13	1.1076	5	4.3535e+13

Total 175.00

6.8503e+05

1 <<(2) nsburn test 7layer problem

>>> step/time(day)/power(MWt)= 2 100.00 50.00

2) * target assembly number = 60 * type=core # of fuel pins = 7
 peak axial mesh number = 19
 radial peaking factor (Fxy) = 1.0841e+00 pin (5)
 maximum linear heat (W/cm) = 1.3182e+03
 maximum integral flux (n/cm²/s) = 7.5973e+14

normalized pin power distribution at peak axial position
 qmax (W/cm) = 1.3182e+03

0.879	
0.959	0.838
0.928	
1.000	0.885
0.967	

normalized pin flux distribution at peak axial position
 flux(n/cm²/s) = 7.5973e+14

0.881	
0.961	0.840
0.930	
1.003	0.887
0.969	

2) * target assembly number = 60 * type=core # of fuel pins = 7
 specified axial mesh number = 18
 radial peaking factor (Fxy) = 1.0841e+00 pin (5)
 maximum linear heat (W/cm) = 1.3110e+03
 maximum integral flux (n/cm²/s) = 7.5538e+14

normalized pin power distribution at 18 axial mesh
 qmax (W/cm) = 1.3110e+03

0.879	
0.959	0.838
0.928	
1.000	0.885
0.967	

normalized pin flux distribution at 18 axial mesh
 peak flux(n/cm²/s) = 7.5538e+14

0.881	
0.961	0.840
0.930	
1.003	0.887
0.970	

1 <<(2) nsburn test 7layer problem

>>> step/time(day)/power(MWt)= 2 100.00 50.00

3) * target assembly number = 125 * type=bikt # of fuel pins = 7

axial plane	dz (cm)	power.dens (w/cc)	avg.pin power(w/cm)	vol.intg power(w)	Fxy	power peak pin#	axial qmax (W/cm)	Fz	assy.avg. Flux(n/cm ² /s)	flux peak Fxy	assy.peak pin#	Flux(n/cm ² /s)
1	5.00	2.4876e-02	3.8608e-01	1.3513e+01	1.3725	5	5.2990e-01	0.0138	1.1078e+13	1.5445	5	1.7111e+13
2	5.00	7.7374e-02	1.2008e+00	4.2029e+01	1.4781	5	1.7750e+00	0.0430	1.2828e+13	1.5466	5	1.9840e+13
3	5.00	1.3325e-01	2.0680e+00	7.2380e+01	1.4990	5	3.1000e+00	0.0741	1.4691e+13	1.5482	5	2.2745e+13
4	5.00	1.9249e-01	2.9875e+00	1.0456e+02	1.5079	5	4.5048e+00	0.1071	1.6666e+13	1.5495	5	2.5824e+13
5	5.00	5.4543e-01	8.4651e+00	2.9628e+02	1.5387	5	1.3025e+01	0.3034	5.4426e+13	1.5463	5	8.4161e+13
6	5.00	6.0272e-01	9.3542e+00	3.2740e+02	1.5441	5	1.4444e+01	0.3353	5.6336e+13	1.5474	5	8.7172e+13
7	5.00	6.4270e-01	9.9746e+00	3.4911e+02	1.5477	5	1.5438e+01	0.3575	5.7669e+13	1.5481	5	8.9279e+13
8	5.00	6.6537e-01	1.0326e+01	3.6143e+02	1.5499	5	1.6005e+01	0.3701	5.8425e+13	1.5487	5	9.0482e+13
9	4.75	2.3231e+00	3.6055e+01	1.1988e+03	1.6926	5	6.1026e+01	1.2922	1.4521e+14	1.5612	5	2.2670e+14
10	4.75	2.3353e+00	3.6244e+01	1.2051e+03	1.6932	5	6.1369e+01	1.2990	1.4562e+14	1.5614	5	2.2736e+14
11	4.75	2.3556e+00	3.6558e+01	1.2156e+03	1.6941	5	6.1933e+01	1.3103	1.4629e+14	1.5615	5	2.2844e+14
12	4.75	2.3839e+00	3.6999e+01	1.2302e+03	1.6951	5	6.2717e+01	1.3260	1.4724e+14	1.5617	5	2.2994e+14

13	4.75	2.4204e+00	3.7565e+01	1.2490e+03	1.6963	5	6.3722e+01	1.3463	1.4846e+14	1.5619	5	2.3187e+14	
14	4.75	3.5565e+00	5.5198e+01	1.8353e+03	1.6953	5	9.3576e+01	1.9783	2.1496e+14	1.5610	5	3.3554e+14	
15	4.75	3.5888e+00	5.5699e+01	1.8520e+03	1.6960	5	9.4465e+01	1.9963	2.1603e+14	1.5611	5	3.3724e+14	
16	4.75	3.6130e+00	5.6074e+01	1.8645e+03	1.6965	5	9.5130e+01	2.0097	2.1684e+14	1.5611	5	3.3852e+14	
17	4.75	3.6291e+00	5.6323e+01	1.8727e+03	1.6968	5	9.5571e+01	2.0186	2.1738e+14	1.5612	5	3.3936e+14	
18	4.75	3.6369e+00	5.6445e+01	1.8768e+03	1.6970	5	9.5789e+01	2.0230	2.1764e+14	1.5612	5	3.3978e+14	
*	19	4.75	3.6550e+00	5.6725e+01	1.8861e+03	1.6970	5	9.6265e+01	2.0330	2.1881e+14	1.5613	5	3.4162e+14
20	4.75	3.6487e+00	5.6627e+01	1.8829e+03	1.6969	5	9.6090e+01	2.0295	2.1860e+14	1.5612	5	3.4129e+14	
21	4.75	3.6341e+00	5.6402e+01	1.8754e+03	1.6966	5	9.5689e+01	2.0214	2.1812e+14	1.5612	5	3.4052e+14	
22	4.75	3.6114e+00	5.6050e+01	1.8636e+03	1.6961	5	9.5064e+01	2.0088	2.1736e+14	1.5611	5	3.3932e+14	
23	4.75	3.5805e+00	5.5570e+01	1.8477e+03	1.6954	5	9.4214e+01	1.9916	2.1633e+14	1.5610	5	3.3769e+14	
24	4.75	2.4613e+00	3.8200e+01	1.2702e+03	1.6968	5	6.4819e+01	1.3691	1.5142e+14	1.5625	5	2.3660e+14	
25	4.75	2.4271e+00	3.7669e+01	1.2525e+03	1.6957	5	6.3875e+01	1.3500	1.5028e+14	1.5623	5	2.3479e+14	
26	4.75	2.4021e+00	3.7281e+01	1.2396e+03	1.6948	5	6.3183e+01	1.3362	1.4945e+14	1.5621	5	2.3346e+14	
27	4.75	2.3864e+00	3.7037e+01	1.2315e+03	1.6941	5	6.2743e+01	1.3274	1.4892e+14	1.5620	5	2.3226e+14	
28	4.75	2.3800e+00	3.6937e+01	1.2282e+03	1.6936	5	6.2556e+01	1.3238	1.4871e+14	1.5618	5	2.3226e+14	
29	5.00	6.8581e-01	1.0644e+01	3.7253e+02	1.6520	5	1.6519e+01	0.3815	6.1289e+13	1.5522	5	9.5134e+13	
30	5.00	6.6724e-01	1.0356e+01	3.6245e+02	1.5501	5	1.6053e+01	0.3711	6.0670e+13	1.5517	5	9.4144e+13	
31	5.00	6.2827e-01	9.7508e+00	3.4128e+02	1.5468	5	1.5083e+01	0.3495	5.9371e+13	1.5510	5	9.2084e+13	
32	5.00	5.6889e-01	8.8292e+00	3.0902e+02	1.5415	5	1.3610e+01	0.3164	5.7391e+13	1.5500	5	8.8955e+13	
33	5.00	2.0986e-01	3.2570e+00	1.1400e+02	1.5133	5	4.9289e+00	0.1167	1.8352e+13	1.5577	5	2.8586e+13	
34	5.00	1.4551e-01	2.2584e+00	7.9042e+01	1.5051	5	3.3991e+00	0.0809	1.6207e+13	1.5564	5	2.5224e+13	
35	5.00	8.2895e-02	1.2865e+00	4.5029e+01	1.4841	5	1.9094e+00	0.0461	1.4119e+13	1.5547	5	2.1951e+13	
36	5.00	2.2006e-02	3.4153e-01	1.1954e+01	1.3467	5	4.5992e-01	0.0122	1.2090e+13	1.5523	5	1.8766e+13	

Total 175.00

3.4180e+04

1 <<(2) naburn test 7layer problem

>>> step/time(day)/power(MWt)= 2 100.00 50.00

3) * target assembly number = 125 * type=blklt # of fuel pins = 7
 peak axial mesh number = 19
 radial peaking factor (Fxy) = 1.6970e+00 pin (5)
 maximum linear heat (W/cm) = 9.6265e+01
 maximum integral flux (n/cm2/s) = 3.4162e+14

normalized pin power distribution at peak axial position
 qmax(W/cm) = 9.6265e+01

0.391	
0.764	0.249
0.561	
1.000	0.391
0.770	

normalized pin flux distribution at peak axial position
 flux(n/cm2/s) = 3.4162e+14

0.461	
0.821	0.279
0.649	
1.004	0.461
0.827	

3) * target assembly number = 125 * type=blklt # of fuel pins = 7
 specified axial mesh number = 18
 radial peaking factor (Fxy) = 1.6970e+00 pin (5)
 maximum linear heat (W/cm) = 9.5789e+01
 maximum integral flux (n/cm2/s) = 3.3978e+14

normalized pin power distribution at 18 axial mesh
 qmax(W/cm) = 9.5789e+01

0.391	
0.763	0.249
0.561	
1.000	0.391
0.770	

normalized pin flux distribution at 18 axial mesh
 peak flux(n/cm2/s) = 3.3978e+14

0.461	
0.821	0.279
0.649	
1.004	0.461
0.827	

@@ end of file was reached ... stop !!!