



JAEA-Data/Code

2019-011

DOI:10.11484/jaea-data-code-2019-011

## 3次元六角体系用中性子輸送計算コードの整備 (2)

－ MINISTRI コードの改良及び機能拡張－

Development of Neutron Transport Calculation Codes for 3-D Hexagonal Geometry (2)

-Improvement and Enhancement of the MINISTRI Code-

杉野 和輝 滝野 一夫

Kazuteru SUGINO and Kazuo TAKINO

原子力科学研究部門

原子力科学研究所

原子力基礎工学研究センター

核工学・炉工学ディビジョン

Nuclear Data and Reactor Engineering Division

Nuclear Science and Engineering Center

Nuclear Science Research Institute

Sector of Nuclear Science Research

January 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

## 3次元六角体系用中性子輸送計算コードの整備(2)

### —MINISTRI コードの改良及び機能拡張—

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所  
原子力基礎工学研究センター 核工学・炉工学ディビジョン

杉野 和輝、滝野 一夫<sup>+1</sup>

(2019年9月26日 受理)

実機高速炉炉心やロシアの BFS 臨界実験体系の中性子輸送計算を高精度で行うことが可能な決定論的手法に基づく3次元六角体系用三角メッシュ有限差分離散座標法(S<sub>N</sub>法)輸送計算コード MINISTRI コード (Ver. 7.0) を整備した。

具体的には、これまで整備した MINISTRI コード (Ver. 1.1) の非収束性の問題を詳細に分析し、適切な改良を行うことにより、大型炉心体系への適用における収束性を飛躍的に向上させることができた。改良後の MINISTRI を種々の高速炉炉心を対象にして検証を行った結果、同じ断面積を用いた多群モンテカルロ法計算結果に対して、実効増倍率で0.1%以内、出力分布で0.7%以内の一致が見られ、十分な精度を有することを確認した。

また、計算時間に関しては、初期拡散計算機能の導入と並列処理化により、従来と比較して約10分の1への計算時間の短縮を図ることができた。

更に、セル非等方ストリーミング効果取り扱い機能の導入、摂動計算ツールの整備、六角格子内三角メッシュ毎断面積指定機能の追加、六角メッシュ計算コード MINIHEX 統合を行い、汎用性を高めた。

**Development of Neutron Transport Calculation Codes for 3-D Hexagonal Geometry (2)  
- Improvement and Enhancement of the MINISTRI Code -**

Kazuteru SUGINO and Kazuo TAKINO<sup>+1</sup>

Nuclear Data and Reactor Engineering Division, Nuclear Science and Engineering Center,  
Nuclear Science Research Institute, Sector of Nuclear Science Research,  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 26, 2019)

A deterministic discrete ordinates method ( $S_N$  method) transport calculation code for three-dimensional hexagonal geometry has been developed as the MINISTRI code (Ver. 7.0). MINISTRI is based on the triangle-mesh finite difference method, which can perform neutron transport calculations with high accuracy for cores of fast power reactors and assemblies of the Russian BFS critical facility.

The present study has derived a proper scheme for remarkably improving the convergence of MINISTRI by investigating the issue of previous MINISTRI (Ver. 1.1), which sometimes plays a poor convergence performance in calculations for large-scale power reactor cores. The verification test of improved MINISTRI has been carried out for various cores by setting the reference result as the multi-group Monte-Carlo calculation with the same cross-sections as used in MINISTRI. As a result, it is found that the agreements are within 0.1% for eigenvalues and within 0.7% for power distributions. Thus, the satisfying accuracy of MINISTRI has been confirmed.

In order to reduce the calculation time, the initial diffusion calculation scheme and the parallel processing have been implemented. As a result, the calculation time is reduced to the approximately one tenth compared with previous MINISTRI.

Furthermore, adoption of the treatment of the anisotropic cell streaming effect, preparation of the perturbation calculation tool, implementation of the function for specification of the triangle-mesh-wise material and merging of the hexagonal-mesh calculation code MINIHEX have been carried out. Thus, the versatility of MINISTRI has been enhanced.

Keywords: MINISTRI, Transport Calculation, Hexagonal Geometry, Finite Difference, Discrete Ordinates,  $S_N$ , Anisotropic Cell Streaming Effect, Perturbation Calculation

---

<sup>+1</sup> Fast Reactor Life-Cycle Safety and Integrity Evaluation Technology Development Department, Fast Reactor Cycle System Research and Development Center

目 次

1. 緒言 .....	1
2. <b>MINISTRI</b> の改良 .....	3
2.1 収束性の改善 .....	3
2.2 初期拡散計算機能の導入 .....	5
2.3 検証 .....	6
3. <b>MINISTRI</b> の機能拡張 .....	39
3.1 <b>MINISTRI</b> への非等方ストリーミング効果取り扱い手法の導入 .....	39
3.1.1 六角体系用の基本式の導出 .....	39
3.1.2 取り扱い手法の検証 .....	42
3.2 摂動計算コードの整備 .....	44
3.2.1 摂動計算コードの作成 .....	44
3.2.2 検証計算 .....	44
3.3 <b>MINISTRI</b> の並列処理化 .....	45
3.3.1 並列処理化対象サブルーチンの選定 .....	45
3.3.2 並列処理化方法 .....	46
3.3.3 並列処理化による計算速度への効果の検討 .....	47
3.4 <b>MINISTRI</b> への諸機能の追加 .....	49
4. 結言 .....	67
謝辞 .....	68
参考文献 .....	69
付録 A <b>MINISTRI</b> の実行方法及び入力マニュアル .....	71
付録 B 摂動計算コード <b>MINISTRI-PERT</b> の実行方法 .....	85
付録 C 並列処理化版 <b>MINISTRI</b> の実行方法 .....	90
付録 D <b>MINISTRI</b> の基礎式の導出 .....	93
付録 E 輸送厳密摂動計算式の導出 .....	97
付録 F 拡散計算コードと摂動計算コードの整備 .....	106

Contents

1. Introduction .....	1
2. Improvement of MINISTRI .....	3
2.1 Improvement in the convergence performance .....	3
2.2 Implementation of the initial diffusion calculation scheme .....	5
2.3 Verification .....	6
3. Enhancement of MINISTRI .....	39
3.1 Implementation of the treatment on the cell anisotropic streaming effect .....	39
3.1.1 Derivation of the basic formula for the hexagonal geometry .....	39
3.1.2 Verification of the treatment .....	42
3.2 Compilation of the perturbation calculation code .....	44
3.2.1 Preparation of the perturbation calculation code .....	44
3.2.2 Verification calculation .....	44
3.3 Parallelization of MINISTRI .....	45
3.3.1 Selection of the target subroutines for the parallelization .....	45
3.3.2 Parallelization method .....	46
3.3.3 Investigation on the speed-up effect due to the parallelization .....	47
3.4 Implementation of the various functions to MINISTRI .....	49
4. Conclusion .....	67
Acknowledgement .....	68
References .....	69
Appendix A Execution scheme and input manual of MINISTRI .....	71
Appendix B Execution scheme of the perturbation calculation code MINISTRI-PERT .....	85
Appendix C Execution scheme of the parallelization version of MINISTRI .....	90
Appendix D Derivation of the basic formula of MINISTRI .....	93
Appendix E Derivation of the exact perturbation calculation formula based on the transport theory .....	97
Appendix F Preparation of the diffusion calculation code and the related perturbation calculation code .....	106

表リスト

Table 2.1-1	Convergence performance and fraction of negative outgoing angular fluxes for the Monju core before the improvement .....	24
Table 2.1-2	Convergence performance and fraction of negative outgoing angular fluxes for the Monju core after the improvement .....	25
Table 2.3-1	Angular discretization effects in eigenvalue for the KNK-II core .....	26
Table 2.3-2	Angular discretization effects in eigenvalue for the Monju core .....	26
Table 2.3-3	Angular discretization effects in eigenvalue for the Super-Phenix core .....	26
Table 2.3-4	Angular discretization effects in region- and group-wise flux for the KNK-II core .....	27
Table 2.3-5	Angular discretization effects in subassembly-wise power distribution for the Monju core .....	27
Table 2.3-6	Angular discretization effects in subassembly-wise power distribution for the Super-Phenix core .....	27
Table 2.3-7	Calculation criteria and conditions for verification tests .....	28
Table 2.3-8	Difference in eigenvalue relative to the reference for the KNK-II core .....	29
Table 2.3-9	Maximum difference in region- and group-wise flux relative to the reference for the KNK-II core .....	30
Table 2.3-10	Calculation time for the KNK-II core .....	31
Table 2.3-11	Difference in eigenvalue relative to the reference for the Monju core .....	32
Table 2.3-12	Maximum difference in subassembly-wise power distribution relative to the reference for the Monju core .....	33
Table 2.3-13	Calculation time for the Monju core .....	33
Table 2.3-14	Difference in eigenvalue relative to the reference for the Super-Phenix core .....	34
Table 2.3-15	Maximum difference in subassembly-wise power distribution relative to the reference for the Super-Phenix core .....	35
Table 2.3-16	Calculation time for the Super-Phenix core .....	36
Table 2.3-17	Difference in eigenvalue relative to the reference for the Super-Phenix core with stricter convergence criteriae .....	37
Table 2.3-18	Maximum relative difference to the reference in subassembly-wise power distribution for the Super-Phenix core with stricter convergence criteria .....	38
Table 2.3-19	Calculation time for the Super-Phenix core with stricter convergence criteria .....	38
Table 3.1-1	Results of eigenvalue by diffusion and transport calculations without and with anisotropic streaming treatment for the next generation fast reactor core with Na plenum .....	58
Table 3.1-2	Comparison in calculation time of transport calculations between the conventional isotropic streaming treatment and the anisotropic streaming treatment for the next generation fast reactor core with Na plenum .....	58
Table 3.1-3	Results of eigenvalue by diffusion and transport calculations without and with anisotropic streaming treatment for the BFS-73-1 core .....	59
Table 3.1-4	Comparison in calculation time of transport calculations between the conventional isotropic streaming treatment and the anisotropic streaming treatment for the BFS-73-1 core .....	60

Table 3.2-1 Absolute difference of the perturbation calculations to the direct calculations for the next generation fast reactor core with Na plenum ----- 60

Table 3.2-2 Comparison in non-leakage term of the perturbation calculations between diffusion and transport calculations for the next generation fast reactor core with Na plenum ----- 61

Table 3.2-3 Comparison in leakage term of the perturbation calculations between diffusion and transport calculations for the next generation fast reactor core with Na plenum ----- 61

Table 3.2-4 Comparison in total reactivity of the perturbation calculations between diffusion and transport calculations for the next generation fast reactor core with Na plenum ----- 61

Table 3.2-5 Absolute difference of the perturbation calculations to the direct calculations for the BFS-73-1 core ----- 62

Table 3.2-6 Comparison in non-leakage term of the perturbation calculations between diffusion and transport calculations for the BFS-73-1 core ----- 63

Table 3.2-7 Comparison in leakage term of the perturbation calculations between diffusion and transport calculations for the BFS-73-1 core ----- 64

Table 3.2-8 Comparison in total reactivity of the perturbation calculations between diffusion and transport calculations for the BFS-73-1 core ----- 65

Table 3.3-1 Calculation conditions of the investigation on the parallelization for the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core ----- 66



図リスト

Fig. 2-1 Layout of the KNK-II core ..... 11

Fig. 2-2 Layout of the Monju core ..... 12

Fig. 2-3 Layout of the Super-Phenix core ..... 13

Fig. 2.1-1 Typical axial angular flux profiles of 24-radial-triangle-mesh within the hexagonal lattice in the corner of blanket region for the Monju core before the improvement ..... 14

Fig. 2.1-2 Parameters used in the basic formula of MINISTR1 ..... 15

Fig. 2.1-3 Mesh vertex flux averaging within a hexagonal lattice ..... 16

Fig. 2.1-4 Typical axial angular flux profiles of 24-radial-triangle-mesh within the hexagonal lattice in the corner of blanket region for the Monju core after the improvement ..... 17

Fig. 2.2-1 Comparison in calculation time under several convergence criteria of initial diffusion calculation (IDC) for the KNK-II core ..... 18

Fig. 2.2-2 Comparison in calculation time under several convergence criteria of initial diffusion calculation (IDC) for the SPX core ..... 18

Fig. 2.3-1 Difference in region- and group-wise flux relative to the reference for the KNK-II core ..... 19

Fig. 2.3-2 Difference in subassembly-wise power distribution relative to the reference for the Monju core ..... 20

Fig. 2.3-3 Difference in subassembly-wise power distribution relative to the reference for the Super-Phenix core with stricter convergence criteria ..... 22

Fig. 3.1-1 Core layout of the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core with axial blanket or Na plenum ..... 52

Fig. 3.3-1 Subroutine structure diagram of MINISTR1 and share of the computation time on the preliminary survey for the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core ..... 53

Fig. 3.3-2 Image of the parallelization on the preparation of threads in the outer-most do loop ..... 54

Fig. 3.3-3 Example of color ordering for the case of six divided hexagonal lattice (Two-color ordering)..... 55

Fig. 3.3-4 Example of color ordering for the case of no divided hexagonal lattice (Three-color ordering)---- ..... 55

Fig. 3.3-5 Speedup factors for the hexagonal mesh and isotropic streaming case for calculations of the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core ..... 56

Fig. 3.3-6 Speedup factors for the hexagonal mesh and anisotropic streaming case for calculations of the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core ..... 56

Fig. 3.3-7 Speedup factors for the 6 triangular mesh and isotropic streaming case for calculations of the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core ..... 57

Fig. 3.3-8 Speedup factors for the 6 triangular mesh and anisotropic streaming case for calculations of the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core ..... 57

This is a blank page.

## 1. 緒言

高速炉炉心の詳細な核特性解析では、中性子輸送理論に基づく計算コードの適用が不可欠である。高速炉の中で、実機プラントや一部の臨界実験装置の炉心は、六角格子配列の燃料集合体や燃料要素で構成されている。一方、それら六角格子配列を直接取り扱うことのできる 3 次元六角体系用の決定論的手法に基づく輸送計算コードについては、公開されているものに限定すると、同じ 3 次元の直交座標体系用の輸送計算コードのように十分に整備が行き届いていると言った状況ではない。他方、同じく輸送理論に基づいているモンテカルロ法は原理的に任意の体系への適用が可能であり、3 次元六角体系への適用も例外ではないが、最大線出力等の局所的な出力分布や、微小な反応度変化等の解析では、統計精度の観点から課題が残されている。従って、決定論的手法に基づく 3 次元六角体系用の輸送計算コードの整備は、特にそれらの核特性解析を行う観点から重要である。

そのような背景の下、3 次元六角体系用輸送計算コード NSHEX、MINIHEX、MINISTR の整備を継続して行ってきた<sup>1)</sup>。

NSHEX は、大型実機高速炉解析への適用を目的として、開発されてきたコードである。空間的な計算要素（空間メッシュあるいは空間ノード）内の中性子束等の分布を最大 6 次までの多項式展開により取り扱うので、1 次式による取り扱いを仮定している有限差分法と比較して、計算精度を損なうことなく空間的な計算要素を大きめに取ることが可能であり、計算機容量と計算速度の観点からは優れている。しかしながら、多項式展開における高次モードの収束性の問題のために計算精度が十分でないこと、六角格子内を非均質に取り扱うことが困難であること、六角体系の多項式展開に対応した摂動計算手法の開発が見通せないことなどの課題が挙げられる。従って、NSHEX コードの開発は当面凍結することとする。

MINIHEX は、六角格子配列ピッチが約 5cm と高速炉の平均自由行程に相当するロシアの臨界実験装置 BFS-1 及び BFS-2 を用いた実験<sup>2,3)</sup>の解析を主目的に開発を行ってきたコードである。後述の MINISTR との共通部分が多く、利用者と開発者の双方の便宜から、MINISTR への統合を図ることとする。

MINISTR は、前述の NSHEX と同様に、大型実機高速炉解析への適用を目的として開発が行われてきたコードであるが、オーソドックスな三角メッシュ有限差分法に基づいており、原理的には、計算機容量と計算速度の観点から NSHEX よりも劣勢である。MINISTR の開発開始前には、三角メッシュ有限差分法に基づく公開コードの開発成功例が見られなかったことから、そのポテンシャルの見極めを兼ねて MINIHEX コードをベースに開発を開始した。前報<sup>1)</sup>では、開発段階の MINISTR の検証について示したが、実機高速炉炉心の固有値及び集合体毎出力分布に関して、目標精度を満足すると推定される角度分点及び空間メッシュ条件では計算が収束しない場合が多く見られることが分かった。

また、MINIHEX 及び MINISTR に対応する摂動計算コードの整備も課題として位置付

けていた<sup>1)</sup>。

そこで、本報告では、MINISTRI の収束性の問題を原因究明すると共に、その解決策に関する検討結果を示すこととする。

また、実用性の向上のために種々の機能追加についても述べる。具体的には、初期中性子束分布推定用の拡散計算機能の導入、セル非均質性に起因する非等方セルストリーミング効果<sup>4)</sup>を取り扱うための機能の導入や摂動計算機能の追加、並列処理化の検討などである。

その他、整備の合理化のための MINIHEx ソルバーの MINISTRI への組み込み、三角メッシュ毎領域指定機能の追加と黒体吸収体 (Black absorber) 取り扱い機能の追加と倍精度・単精度切り替え効率化と負の自群散乱断面積に対する処理を実施する。

本報告書の構成は次の通りである。第 2 章では、MINISTRI の基本部分の改良、収束性の改善と初期中性子束推定について述べ、改良後の MINISTRI の検証結果を示す。第 3 章では、MINISTRI への機能追加、すなわち、セル非均質性に起因する非等方ストリーミング効果を取り扱うための機能の導入や摂動計算機能の追加、並列処理化について示すと共に諸機能の導入について概説する。第 4 章では以上をまとめる。

なお、全ての解析は LINUX マシン Dell Precision Tower 7910 (CPU: Intel Xeon、クロック周波数: 3.2GHz、8 core×2) を用いて行っている。

## 2. MINISTRI の改良

MINISTRI の改良では、あらゆるサイズ・構造の炉心に対しても十分な計算精度と合理的な計算時間で計算可能となることを目標とする。具体的には、Fig. 2-1 に示す小型炉心でありかつ中性子減速材を含むドライバ燃料及び反射体が装荷されたことにより高い非均質性を有する KNK-II 国際ベンチマーク問題（以下、KNK-II 炉心、KNK-II core）<sup>5)</sup>、Fig. 2-2 に示す中型均質炉心である原型炉「もんじゅ」の炉心モデル（以下、「もんじゅ」炉心、Monju core）<sup>6, 7)</sup>、Fig. 2-3 に示す大型均質炉心であるフランスの実証炉「スーパーフェニックス」の炉心モデル（以下、「スーパーフェニックス」炉心、Super-Phenix core）<sup>8, 9)</sup>を対象とする。

制御棒挿入状態としては、通常の出力行状態を想定して、燃焼末期を模擬した制御棒全引抜（All rods out）と燃焼初期を模擬した制御棒半挿入（Rods half-in、CCR half-in または MCR half-in、CCR は Coarse Control Rod（「もんじゅ」炉心における粗調整棒）、MCR は Main Control rod（「もんじゅ」炉心における粗調整棒と微調整棒を合わせた主調整棒、あるいは「スーパーフェニックス」炉心における主調整棒の略）、及び、炉心の停止状態である制御棒全挿入（Rods in または MCR in あるいは BCR in、「もんじゅ」炉心及び「スーパーフェニックス」炉心における BCR は Backup Control rod（後備炉停止棒の略））である。制御棒の<sup>10</sup>B濃縮度は、KNK-II 炉心は明記されていないが、「もんじゅ」炉心は MCR が約 40%で BCR が約 90%、「スーパーフェニックス」炉心は MCR と BCR の双方とも約 90%であり、解析上も模擬している。

なお、解析で用いた断面積としては、KNK-II 国際ベンチマーク問題における 4 群計算では指定された 4 群のものを、「もんじゅ」及び「スーパーフェニックス」炉心における 18 群計算では、JENDL-4.0 に基づく SLAROM-UF 用の 70 群炉定数 UFLIB.J40<sup>10)</sup>を基に SLAROM-UF コード<sup>11, 12)</sup>を用いて、一旦、70 群断面積を求め、同断面積を用いた炉心体系計算により得られた中性子スペクトルを用いて縮約された 18 群断面積を、それぞれ用いた。

### 2.1 収束性の改善

#### (1) 収束性の問題の検討

従来の MINISTRI を、KNK-II 炉心、「もんじゅ」炉心、「スーパーフェニックス」炉心に適用したが、S<sub>4</sub> 計算ではほぼ十分な収束性を確認していた<sup>1)</sup>。しかしながら、S<sub>8</sub> 計算において空間メッシュを細分化した場合には、特に、「もんじゅ」炉心と「スーパーフェニックス」炉心の計算の収束性に問題が見られていた。すなわち、計算が大規模化すると収束が得られないとの課題があった<sup>1)</sup>。

そこで、Fig. 2-2 に示す「もんじゅ」体系を対象に、効率化のために中性子エネルギー 1 群の取り扱いで種々の計算条件下で収束性について検討を行った。

その結果、Table 2.1-1 に示すように、計算が大規模になるに従い収束性が損なわれるが、そのような場合には負の流出角度中性子束の発生割合が高くなり、具体的には 0.5%程度を超える場合に収束性の悪化が見られ、収束が得られないことが分かった。すなわち、負の流出角度中性子束に対して、"Set flux to zero and correct (Flux fix-up)"の処理が多発することにより、Fig. 2.1-1 に示すようにメッシュ平均角度中性子束のプロファイルに多数の凹凸が見られるように異常となり、計算の不安定化を引き起こしていることが判明した。なお、"Flux fix-up"を適用しない場合には、計算自体が異常となり、更に不安定性が増すので"Flux fix-up"は必須である。

また、Table 2.1-1 から分かるように、S<sub>2</sub>条件を除いて、メッシュがより細かい場合の方が、負の流出角度中性子束の発生割合がより高く見られ、直交座標用のものに代表される通常の S<sub>N</sub> 輸送計算とは逆の傾向であることから異常と考えられる。

## (2) 平均化処理の適用

以上の検討結果より、流出角度中性子束の算出においてメッシュ頂点中性子束を利用する点が通常の S<sub>N</sub> 輸送計算と異なること（詳細は付録 D を参照のこと）から、その頂点中性子束の算出方法が適切でないことが推定される。具体的には、Fig. 2.1-2（添え字の u, U と v, V は付録 D 中の Fig.D-2 に示す通り方向を表す。）に示すように、六角格子当たり 6 メッシュの場合について、メッシュ  $\alpha$  及びメッシュ  $\beta$  の下側とメッシュ  $\gamma$  及びメッシュ  $\delta$  の上側の頂点は共通であるが、従来の方法では、次の(2-1)式で表されるような方式に従いそれぞれ異なる値が与えられていた。

すなわち、

$$\begin{cases} \psi_{\beta,U}^m = 3\bar{\psi}_{\alpha}^m - 2\bar{\psi}_{\alpha,v+}^m \\ \psi_{\delta,V}^m = 3\bar{\psi}_{\gamma}^m - 2\bar{\psi}_{\gamma,u-}^m \end{cases} \quad (2.1-1)$$

ここで、(2.1-1)式の導出は付録 D に示されており、(D-8)式に相当する。

このような取り扱い、収束性の問題のない本来の頂点中性子束からのずれを引き起こし、空間スイープを通じてずれが増幅され、計算規模の大型化に伴い、収束性の問題が顕在化したものと推測される。

そこで、共通である頂点の角度中性子束に関して、本来は同一とすべきとの考えから次式の通り平均化処理を施すこととした<sup>13)</sup>。

$$\bar{\psi}_{\beta\delta,UV}^m = \frac{\psi_{\beta,U}^m + \psi_{\delta,V}^m}{2} \quad (2.1-2)$$

ここで、

$\bar{\psi}_{\beta\delta,UV}^m$ ：平均化処理後のメッシュ  $\beta$  頂点  $U$  及びメッシュ  $\delta$  頂点  $V$  の頂点角度中性子束

模式的には六角格子当たり 24 メッシュの場合も含めて Fig. 2.1-3 に示す通りである。六

角格子境界については、空間スウィープの順序の都合から、平均化処理を施さないこととした。

また、メッシュ $\alpha$ とメッシュ $\gamma$ 以外に、Fig. 2.1-2にあるメッシュ $\zeta$ の頂点を加えた3つの頂点中性子束の平均を取るような手法も挙げられるので比較検討を行うこととした。

改良後の収束性に関する結果をTable 2.1-2に示す。平均化処理により、収束性は飛躍的に改善し、負の流出角度中性子の発生割合はほぼゼロとなった。また、メッシュがより細かい場合の方が、負の流出角度中性子束の発生割合がより低く見られており、通常の $S_N$ 輸送計算と同様の傾向を示すようになっている。更に、Fig. 2.1-4に示すように角度中性子束のプロファイルに凹凸が見られなくなり、正常となった。

なお、メッシュ $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\zeta$ の3つの頂点中性子束の平均を取る手法については、検討の結果、2つの平均を取る手法と計算結果に差はほとんど見られないものの、計算時間を数%程度余分に要することから採用しないこととした。

## 2.2 初期拡散計算機能の導入

### (1) 検討条件

初期拡散計算における加速法の導入効果の確認や最適な収束判定条件の導出のためのサーベイを行った。サーベイではKNK-II炉心、「もんじゅ」炉心、「スーパーフェニックス」炉心の各全制御棒全引き抜きを対象とし、基本的には六角格子当たり径方向6メッシュ、軸方向5cmメッシュ、角度分点 $S_4$ を計算条件として選定した。KNK-II炉心におけるサーベイでは、制御棒全引き抜き体系(All rods out)以外に、制御棒半挿入体系(Rods half-in)と制御棒全挿入体系(Rods in)を対象として制御棒挿入による影響や、六角格子当たり径方向メッシュを24に、あるいは、角度分点を $S_8$ にすることにより、メッシュ条件の違いによる影響を観察することとした。また、初期拡散計算時の収束判定条件の違いによる計算時間の比較を以下の条件下で行った。

#### ○輸送計算

- ・中性子束(内側反復及び外側反復) :  $1 \times 10^{-4}$
- ・固有値 :  $1 \times 10^{-5}$

#### ○初期拡散計算

- ・中性子束(外側反復) :  $1 \sim 1 \times 10^{-4}$  (サーベイ)
- ・中性子束(内側反復) :  $1 \times 10^{-4}$  (輸送計算と同じ) \*1
- ・固有値 : 中性子束(外側反復)の条件の10分の1\*1

\*1: 予備検討により好条件であることを見出していたため

### (2) 検討結果

初期拡散計算と輸送計算の種々の加速法を組み合わせた場合の、初期拡散計算時の収束判定条件の違いによる初期拡散計算導入効果をKNK-II炉心のAll rods outを例として、

Fig. 2.2-1 に示す。初期拡散計算の計算時間は収束判定条件が厳しくなるに従い、増加が見られる。輸送計算の時間は  $3 \times 10^{-2}$  までは減少するものの、それより厳しい条件では頭打ちとなっている。従って、合計時間では  $3 \times 10^{-2}$  の条件において最も短くなっている。

このように、収束判定条件の最適化は、初期拡散計算と輸送計算の合計時間を指標に行うことが理想である。この場合、輸送計算の角度分点が詳細になるに従いその計算時間が増加し、初期拡散計算の時間の割合が減少することから、最適化条件には角度分点依存性が伴うこととなる。ただし、MINISTR1 に導入されている現状の拡散計算ソルバーには改良の余地があり、改良が図られれば、収束判定条件による初期拡散計算の時間の違いは、輸送計算の時間と比較して十分に小さくなるものと期待できる。そこで、初期拡散計算の時間は考慮しないこととして、輸送計算の時間が収束することを以て最適条件とすることとする。また、初期拡散計算を伴わない場合の計算時間に対する初期拡散計算導入後の計算時間の比、すなわち、スピードアップとしても、輸送計算に限定して評価することとする。

KNK-II 炉心の All rods out では、前述の通り  $3 \times 10^{-2}$  となるが、他の炉心体系についてサーベイを行ったところ、例えば、「スーパーフェニックス」炉心に関しては、Fig. 2.2-2 に示すように  $1 \times 10^{-3}$  の条件でようやく収束するような場合が見られた。従って、今回のサーベイからは、なるべく多くの場合を包絡する観点から  $1 \times 10^{-3}$  を与えることが推奨されることとなる。

次にスピードアップについて、KNK-II 炉心ではいずれの制御棒挿入状態あるいは空間メッシュ・角度分点の条件でも概ね 2 倍であった。それに対し、「もんじゅ」炉心では約 3.5 倍、「スーパーフェニックス」炉心では約 4 倍が得られた。スピードアップの違いの主要因として、初期拡散計算の輸送・メッシュ効果の大きさが考えられる。すなわち、KNK-II 炉心では  $1 \sim 2\% \Delta k/k$  と大きく見られたのに対し、「もんじゅ」炉心では  $0.6\% \Delta k/k$ 、「スーパーフェニックス」炉心では  $0.2\% \Delta k/k$  と小さく、「もんじゅ」炉心と「スーパーフェニックス」炉心では輸送計算に対しての初期推定がより適切に与えられたためと考えられる。

なお、収束判定条件の違いによる輸送計算の固有値の差異はほとんど見られず、初期拡散計算を導入することによる問題は特になかった。

## 2.3 検証

### (1) 検証条件

MINISTR1 の検証は、角度分点セット及び空間メッシュをそれぞれ合理的に最大限に詳細にした条件で行う。検証における参照解は、同じ断面積を用いた多群モンテカルロ法計算コード GMVP<sup>14)</sup>による計算結果とする。

評価対象の核特性としては、3 つ全ての炉心の固有値（実効増倍率）と KNK-II 炉心の領域平均中性子束、「もんじゅ」及び「スーパーフェニックス」の炉心領域における集合体毎出力分布とする。固有値及び集合体毎出力分布の目標精度は、文献 15) の表 5.2-13~16 に示されている 750MWe 炉心の臨界性と F49 反応率分布の各設計手法の精度評価結果にお



ける C/E 値の分布から得られる誤差あるいは断面積起因誤差の中の最小値を参考に設定することとした。すなわち、C/E 値の分布から得られる誤差あるいは断面積起因誤差は、解析手法に係る誤差とはそれぞれ、ほぼ独立あるいは完全に独立な関係にあり、設計では不確かさとして両者を統計的に積み上げるため、それらの誤差よりも遥かに小さい精度の要求は合理的ではないと考えたことによる。具体的には、固有値は 0.1%に、領域平均中性子束と集合体毎出力分布は 0.7%にそれぞれ設定することとした。

負の中性子束発生時の処理は負となった中性子束をゼロにセットし、その条件でメッシュ平均中性子束を再計算する方法（中性子束 Fix-up または Set to zero and correct）とした。また、拡散計算による初期中性子束推定を行うこととし、加速法として内側反復と外側反復の双方に粗メッシュリバランス法を適用した。

角度分点セットの設定に関しては、各炉心体系を対象にしたサーベイにより決定することとする。角度分点セット依存性サーベイでは、径方向六角格子内を 6 メッシュ分割した条件とし、MINISTRI で取り扱いが可能な最も詳細な条件である S<sub>16</sub> 計算結果を基準とした場合の差異が目標精度を下回る条件を見出す。

まず、固有値に関するサーベイ結果を KNK-II 炉心、「もんじゅ」炉心、「スーパーフェニックス」炉心それぞれについて、Table 2.3-1～3 に示す。S<sub>4</sub> 計算では KNK-II 炉心の制御棒全挿入条件において最大で 0.15%と目標精度を超える差異が見られており、不十分であることが分かる。S<sub>8</sub> 計算では同じ KNK-II 炉心の制御棒全挿入条件において最大で 0.03%の差異にまで低下しており、S<sub>8</sub> 条件とすれば目標精度 0.1%の条件下での検証は十分であることが分かる。

次に、KNK-II 炉心の領域平均中性子束と「もんじゅ」炉心と「スーパーフェニックス」炉心の集合体毎出力分布に関するサーベイ結果を Table 2.3-4～6 に示す。KNK-II 炉心の領域平均中性子束では、S<sub>4</sub> 条件では目標精度の 2%前後の最大差異が見られることから不十分であるが、S<sub>8</sub> 条件とした場合には最大で 0.3%となり、目標精度を満足することが分かる。

「もんじゅ」炉心と「スーパーフェニックス」炉心の集合体毎出力分布については、S<sub>8</sub> 条件において、それぞれ最大で 0.04%であり、目標精度を十分に満足している。

以上から、検証計算における角度分点の条件は S<sub>8</sub> と設定する。角度分点セット以外も含めた検証条件を Table 2.3-7 に示す。

## (2) 検証結果

### 1) KNK-II 炉心における検証結果

固有値についての検証結果を Table 2.3-8 に示す。表中に太字で示しているが、六角格子当たり径方向 54 メッシュと 96 メッシュとし、軸方向のメッシュ幅を 2.5cm にした条件では、一部を除いて改良前では収束は得られなかったが、本報で示す改良により収束が得られている。また、六角格子当たり径方向に 54 メッシュ以上に分割することにより目標精度を満足することが分かる。更に、計算条件を詳細にするに従い、参照解に対する相対差の減少

が見られる。

次に、領域平均中性子束についての検証結果を Table 2.3-9 に示す。六角格子当たり径方向に 96 メッシュとし、軸方向のメッシュ幅を 2.5cm にした条件において唯一、3 種類の制御棒挿入状態の体系全てにおいて目標精度を満足することが分かる。

目標精度を満足する六角格子当たり径方向 96 メッシュ分割、軸方向のメッシュ幅を 2.5cm にした条件下での領域平均中性子束の参照解に対する差異を Fig. 2.3-1 に示す。何れの制御棒挿入条件でも参照解に対する差異は 0.4%以下であり、目標精度を十分に満足している。

更に、各条件下での計算時間の比較を Table 2.3-10 に示す。ここで、規格化相対計算時間 (Normalized time) とは、各条件下での計算時間を空間メッシュ数で除した規格化計算時間を、最も粗い計算条件 (径方向六角格子当たり 6 メッシュ、軸方向 5cm サイズ) における規格化計算時間を基準にした場合の相対値である。従って、規格化相対計算時間は計算条件の詳細化すなわち空間メッシュ数の増加に伴う収束性の悪化の指標となり得る。KNK-II 炉心の計算においては、いずれの計算条件でも規格化相対計算時間はほぼ 1 と一定であり、計算条件の詳細化に伴う収束性の悪化は見られないことが分かる。また、3 種類の制御棒条件の違いによる計算時間の相違は特に見られない。

## 2) 「もんじゅ」炉心における検証結果

固有値についての検証結果を Table 2.3-11 に示す。六角格子当たり径方向 6 メッシュで軸方向メッシュを 2.5cm 間隔にした場合と、六角格子当たり径方向 24 メッシュ以上とした場合には、改良前では核分裂中性子源の収束が得られなかったが、改良後では収束が得られている。また、六角格子当たり径方向 6 メッシュの場合には、軸方向メッシュを 5.0cm 間隔と 2.5cm 間隔のいずれも MCR in 及び BCR in のケースで目標精度を満足していない。しかしながら、六角格子当たり径方向 24 メッシュ以上とした場合には、いずれの条件でも目標精度を満足している。更に、計算条件を詳細にするに従い、参照解に対する相対差の減少が見られる。

次に、集合体毎出力分布についての検証結果を Table 2.3-12 に示す。いずれの条件でも目標精度を満足している。また、一部わずかながらの例外は見られるものの、計算条件を詳細にするに従い、およそ参照解に対する相対差の減少が見られる。六角格子当たり 6 メッシュ及び 24 メッシュ、軸方向メッシュを 5.0cm 間隔とした場合の集合体毎の相対差を Fig. 2.3-2 に示す。いずれの制御棒条件でかつメッシュ条件においても、中心部で過小評価が、周辺部で過大評価の傾向が、それぞれ系統的に見られるものの、目標精度を十分に下回っている。

更に、各条件下での計算時間の比較を Table 2.3-13 に示す。「もんじゅ」炉心の計算では、計算条件の詳細化に伴い最大で 50%の計算時間の増加が見られ、収束性が悪化していることが分かる。特に、"All rods out"と"CCR half-in"のケースで計算時間の増加が見られる。

しかしながら、最終的には収束が得られ、計算精度自体は向上していることから特に問題ではない。

### 3) 「スーパーフェニックス」炉心における検証結果

本炉心体系における六角格子当たり 96 メッシュの計算は、計算機の容量の関係で不可能であったことを断っておく。

固有値についての検証結果を Table 2.3-14 に示す。改良前ではほとんどの条件において収束が得られなかったが、改良によりいずれの条件でも収束が得られた。また、六角格子当たり径方向 6 メッシュの場合には、軸方向メッシュを 5.0cm 間隔と 2.5cm 間隔のいずれも MCR in のケースで目標精度を満足していない。しかしながら、六角格子当たり径方向 24 メッシュ以上とした場合には、いずれの条件でも目標精度を満足している。更に、計算条件を詳細にするに従い、参照解に対する相対差の減少が見られる。

次に、集合体毎出力分布についての検証結果を Table 2.3-15 に示す。いずれの条件でも MCR in のケースにおいて目標精度を満足していない。また、六角格子当たり 6 メッシュの結果を除けば、計算条件を詳細にするに従い、参照解に対する相対差の増加が見られる。

更に、各条件下での計算時間の比較を Table 2.3-16 に示す。「スーパーフェニックス」炉心の計算においては、いずれの計算条件でも規格化相対計算時間はほぼ 1 と一定であり、計算条件の詳細化に伴う収束性の悪化は見られない。また、3 種類の制御棒条件の違いによる計算時間の相違も特に見られない。

ここで、Table 2.3-15 に示したように計算条件を詳細にした場合でも集合体毎出力分布において目標精度を満足できなかった点を探り上げる。これは、第 4 章で説明する通り、大型体系である「スーパーフェニックス」炉心では、収束判定条件が不十分なためである。そこで、固有値と核分裂中性子源の収束判定条件を 1 桁厳しくした場合の固有値と集合体毎出力分布の検証結果をそれぞれ Table 2.3-17 及び Table 2.3-18 に示す。固有値については、収束判定条件の違いによる影響はあまり見られないが、集合体毎出力分布については、計算条件を詳細にするに従い、特に挿入される制御棒本数の多い MCR half-in と MCR in のケースにおいて参照解に対する相対差の減少が見られることが分かる。固有値と核分裂中性子源の収束判定条件を 1 桁厳しくした条件下での、六角格子当たり 6 メッシュ及び 24 メッシュ、軸方向メッシュを 5.0cm 間隔とした場合の集合体毎の相対差を Fig. 2.3-3 に示す。

「もんじゅ」炉心と異なり、制御棒条件とメッシュ条件に応じて差異の傾向は様々であることが、大型炉心であることが原因であると推察される。

固有値と核分裂中性子源の収束判定条件を 1 桁厳しくした場合に要した計算時間を Table 2.3-19 に示す。Table 2.3-16 に示した固有値と核分裂中性子源の収束判定条件を標準的にした場合の計算時間に対して、ほぼ約 2 倍を要していることが分かるが、目標精度を満足させる観点からは止むを得ない。

### (3) まとめ

MINISTRI を対象とし、中性子の角度と空間分布に関する取り扱いを十分に詳細にした条件で検証を行った。小型炉心 KNK-II、中型炉心「もんじゅ」、大型炉心「スーパーフェニックス」を対象に検証を行った結果、改良前には収束が得られなかったケースも含めて、全てのケースで収束が得られ、いずれの炉心体系の固有値についても目標精度を満足することが分かった。集合体毎出力分布に関しては、KNK-II 炉心と「もんじゅ」炉心に対しては通常の収束判定条件でも目標精度を満足したが、「スーパーフェニックス」炉心に関しては、目標精度を満足させるには収束判定条件をより厳しくする必要のあることが分かった。なお、計算条件の詳細化により参照解に対する一致度合いが向上したことから、MINISTRI の改良が適切であると共に正しくコーディングされていると言える。

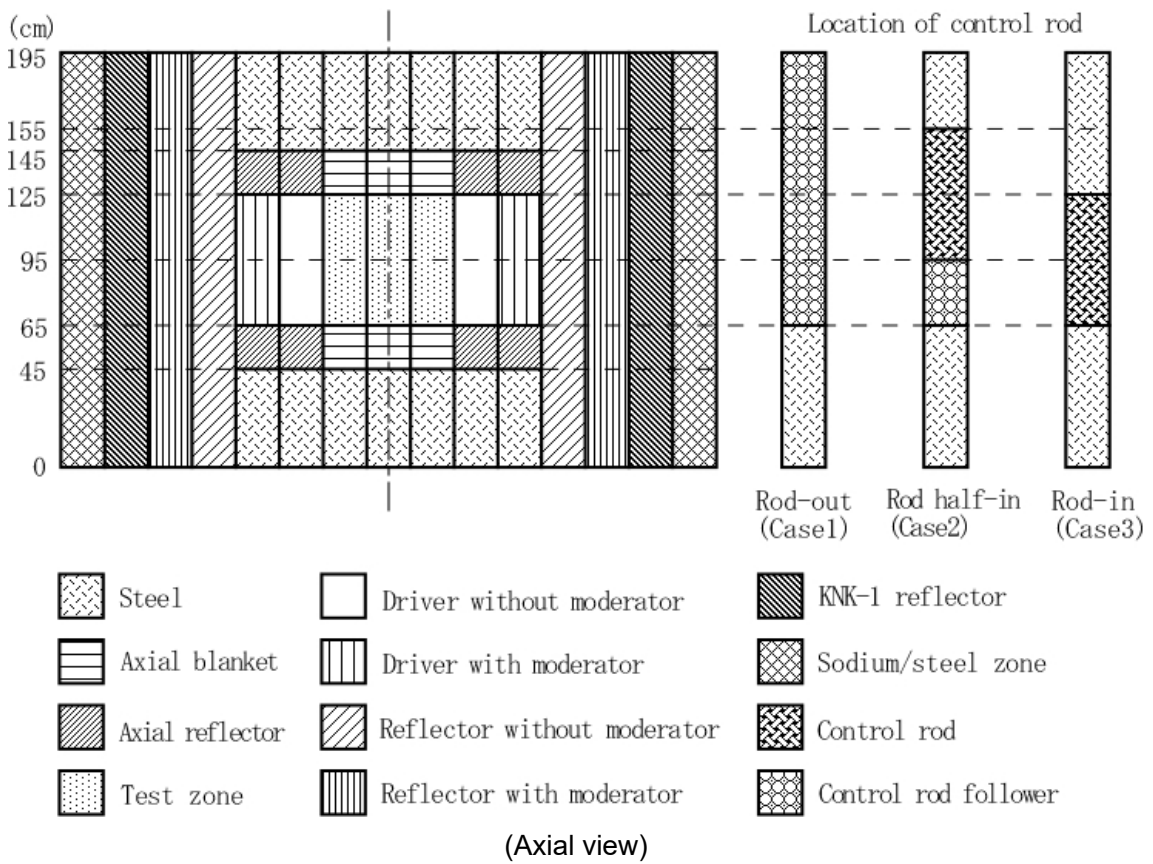
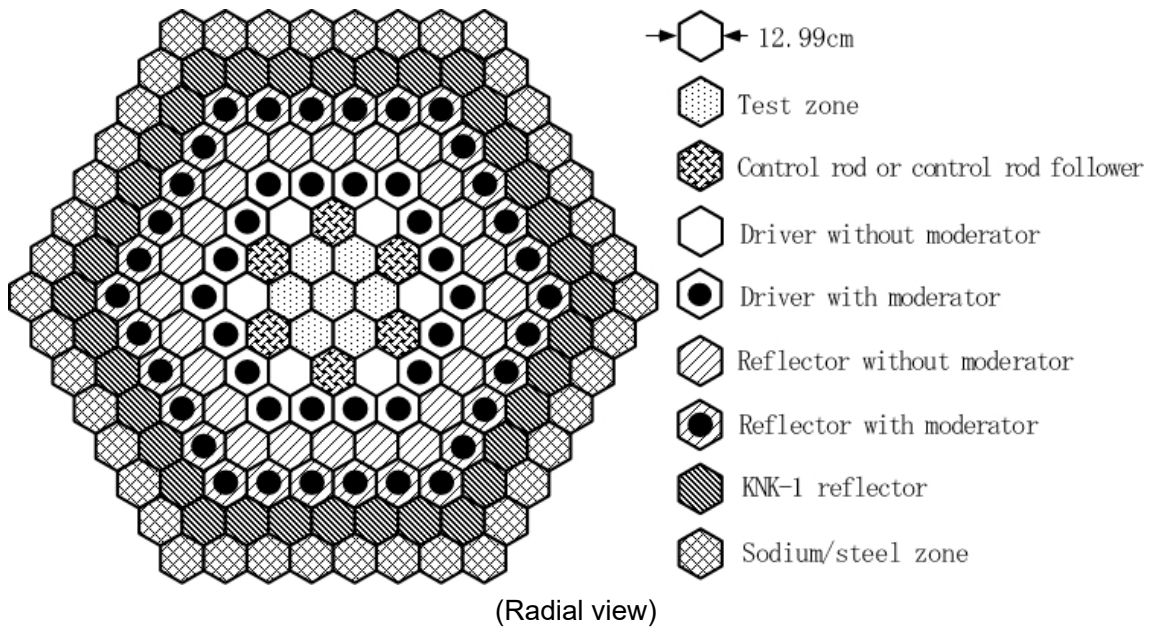


Fig. 2-1 Layout of the KNK-II core

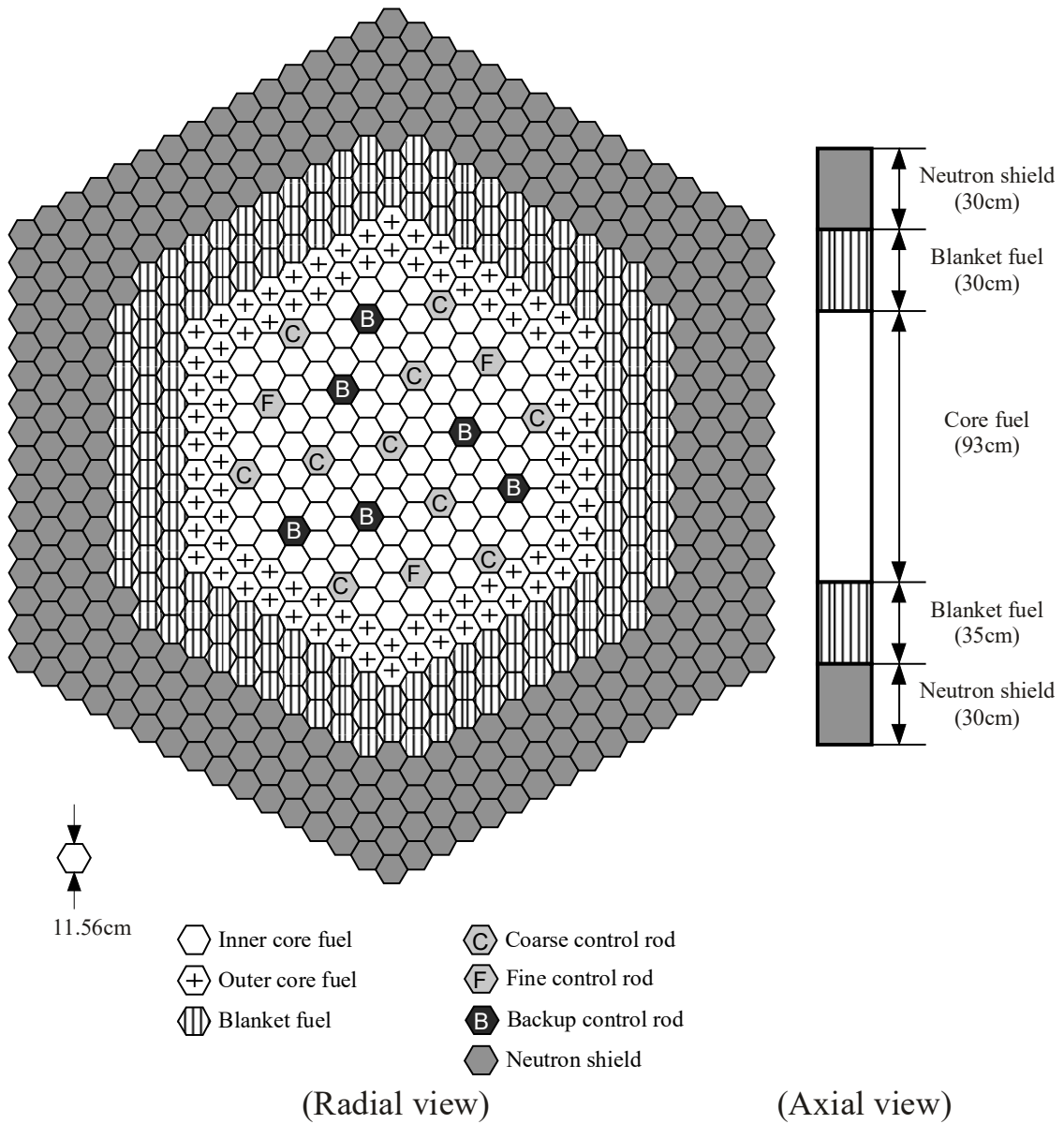


Fig. 2-2 Layout of the Monju core

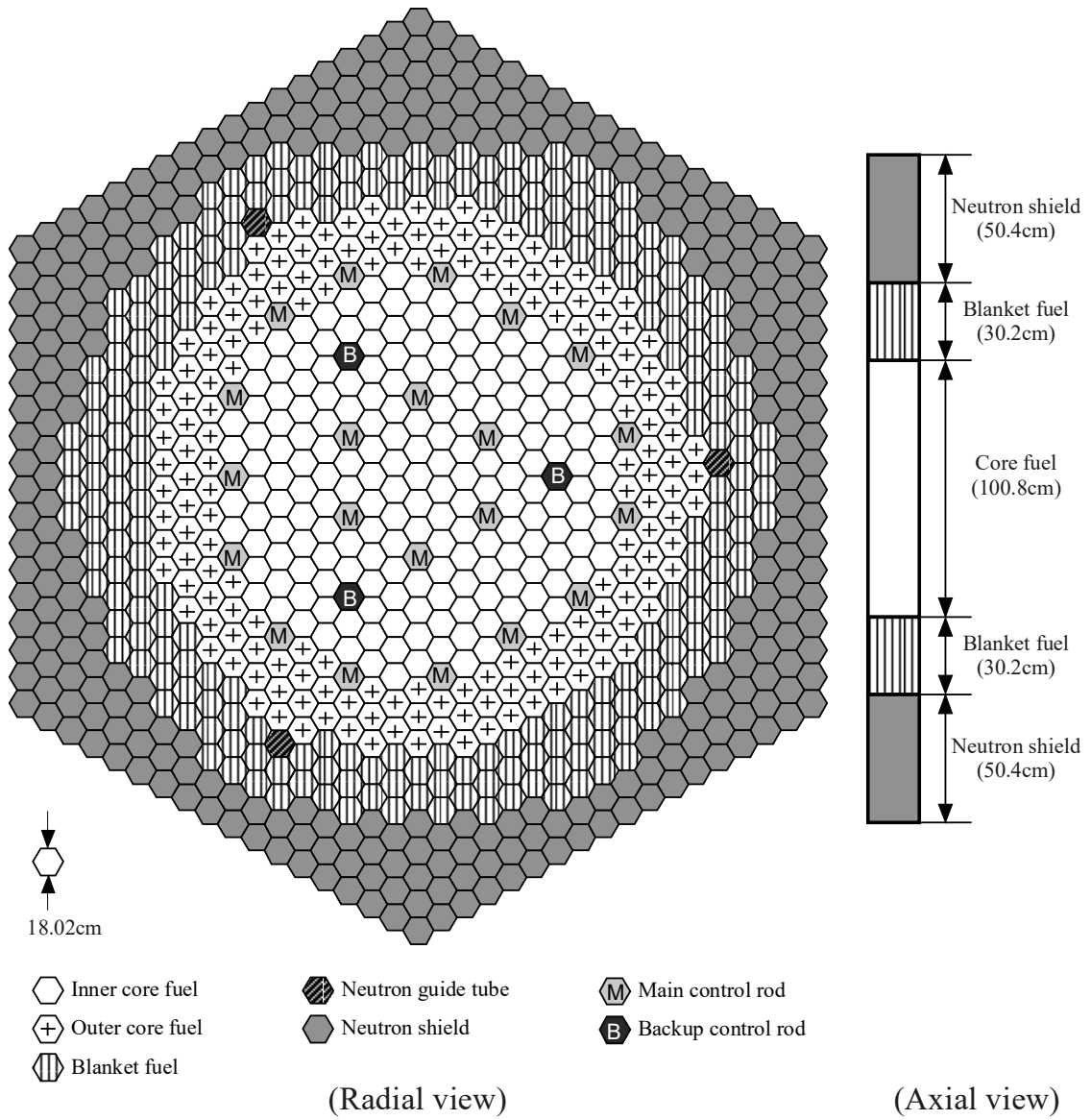


Fig. 2-3 Layout of the Super-Phenix core

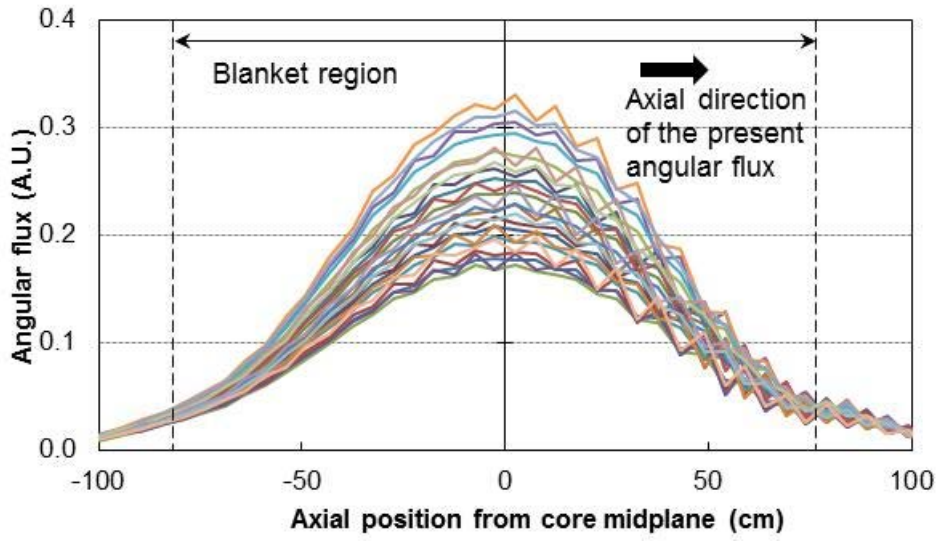


Fig. 2.1-1 Typical axial angular flux profiles of 24-radial-triangle-mesh within the hexagonal lattice in the corner of blanket region for the Monju core before the improvement



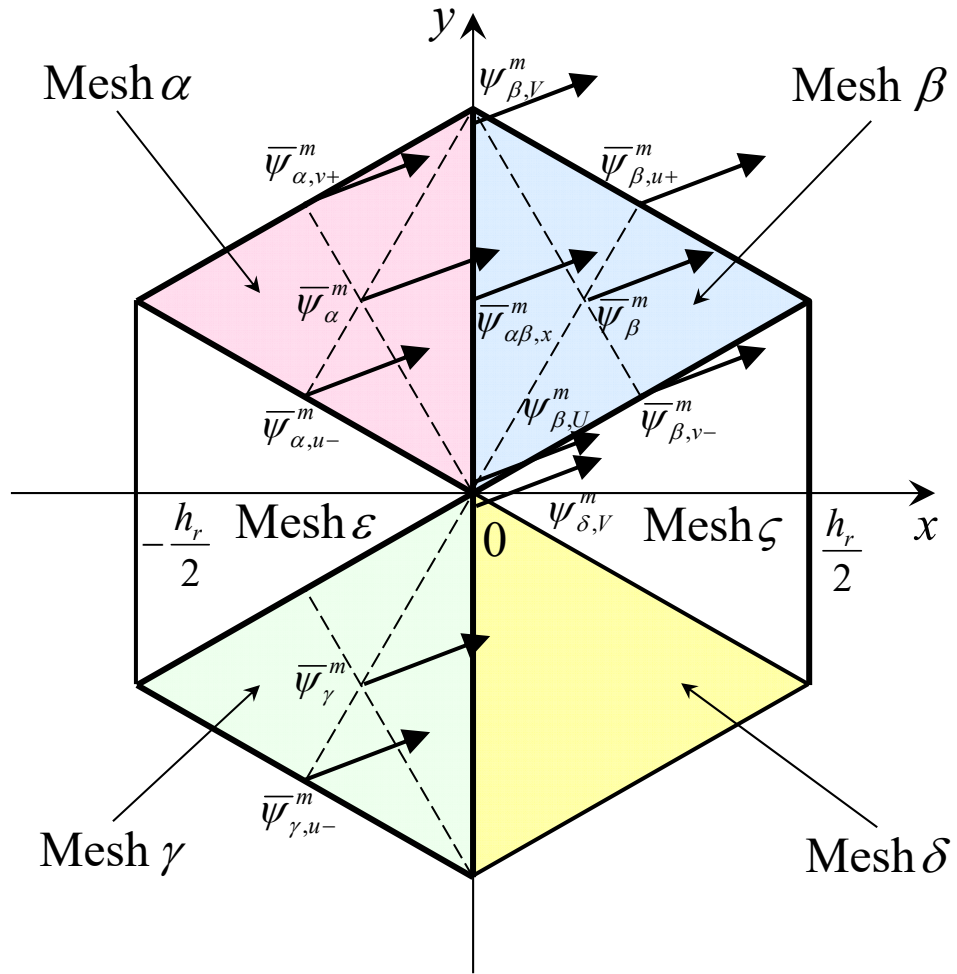
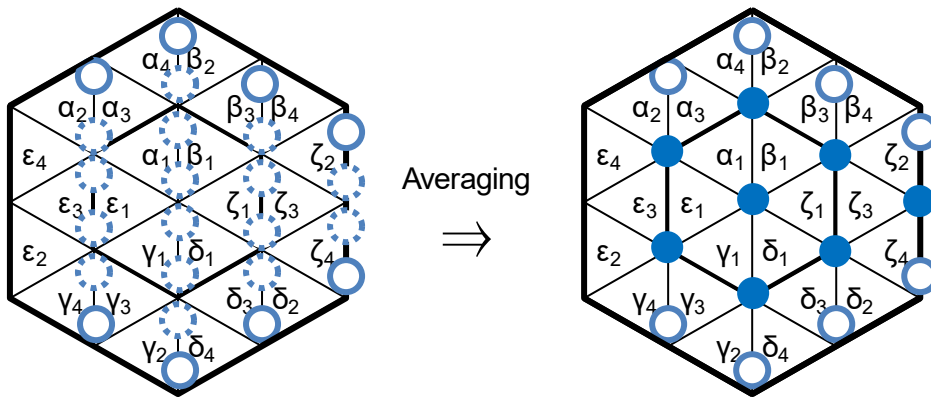


Fig. 2.1-2 Parameters used in the basic formula of MINISTR1



- 6 radial meshes per hexagonal lattice -



- 24 radial meshes per hexagonal lattice -

(For the case when angular flux travels to the right direction)




-  Before averaging (2 different fluxes for each mesh-vertex)
-  After averaging (Identical flux for each mesh-vertex)
-  Not averaged

Fig. 2.1-3 Mesh vertex flux averaging within a hexagonal lattice

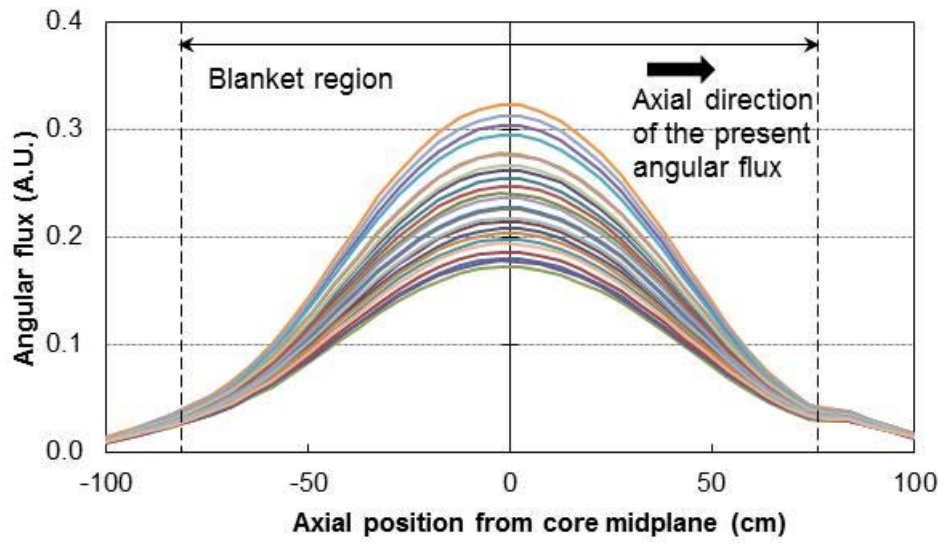


Fig. 2.1-4 Typical axial angular flux profiles of 24-radial-triangle-mesh within the hexagonal lattice in the corner of blanket region for the Monju core after the improvement

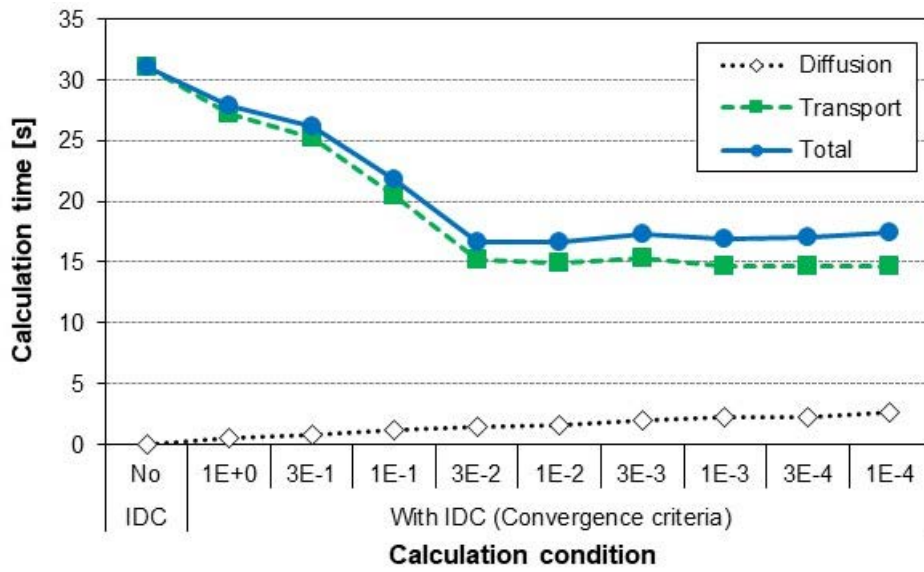


Fig. 2.2-1 Comparison in calculation time under several convergence criteria of initial diffusion calculation (IDC) for the KNK-II core

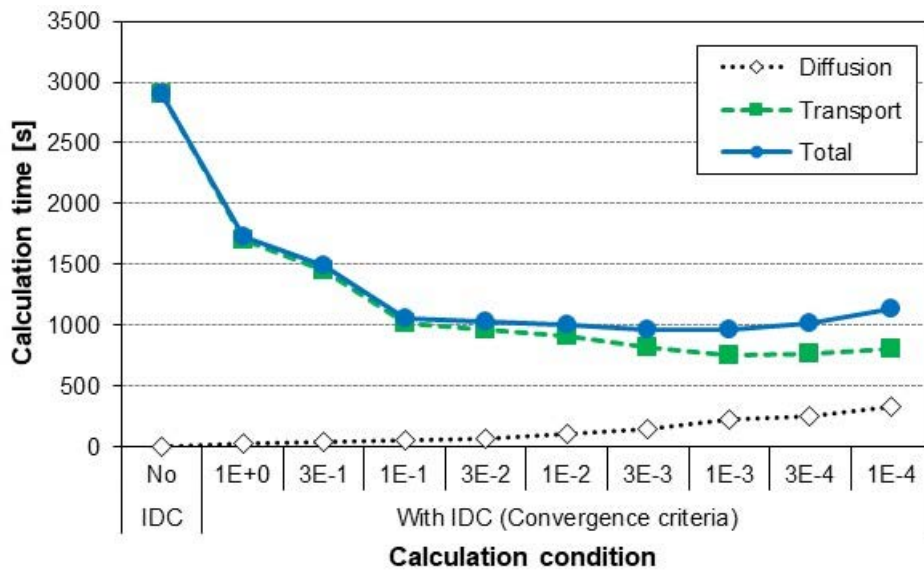
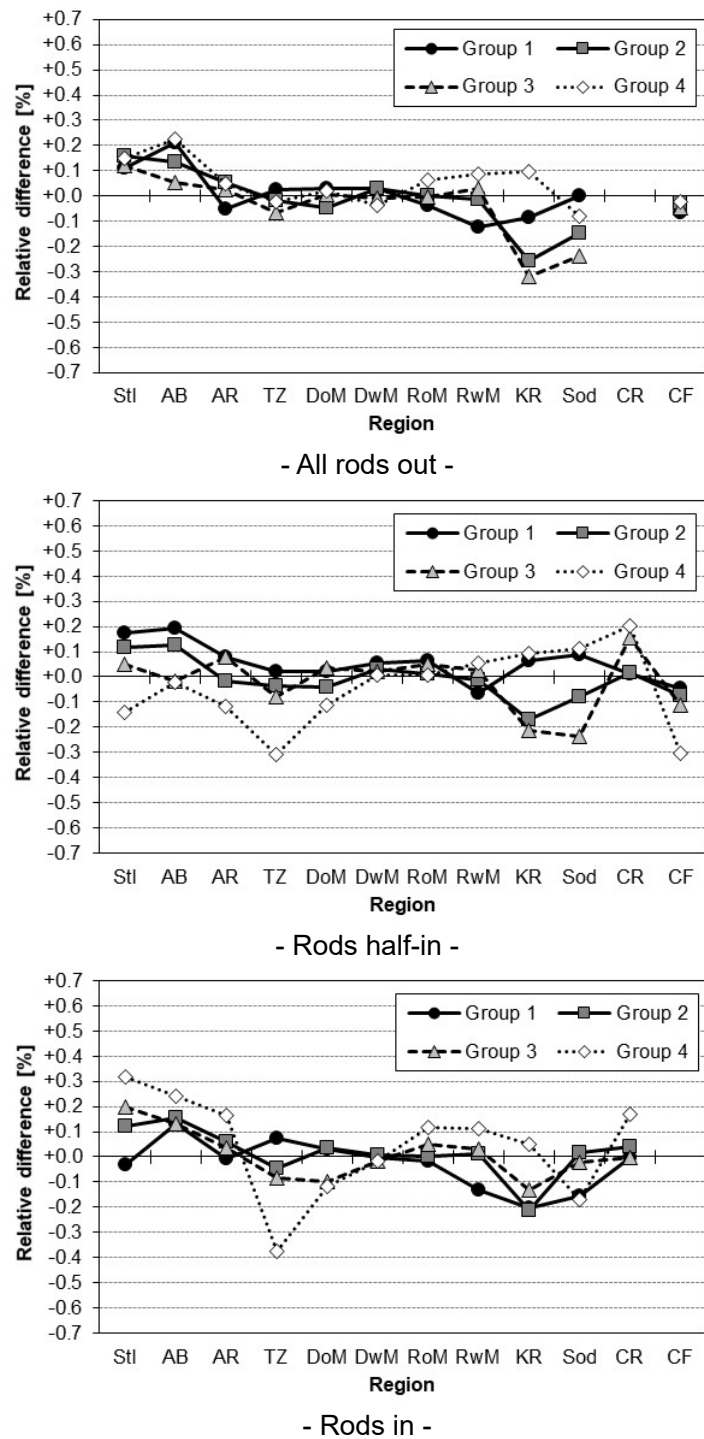
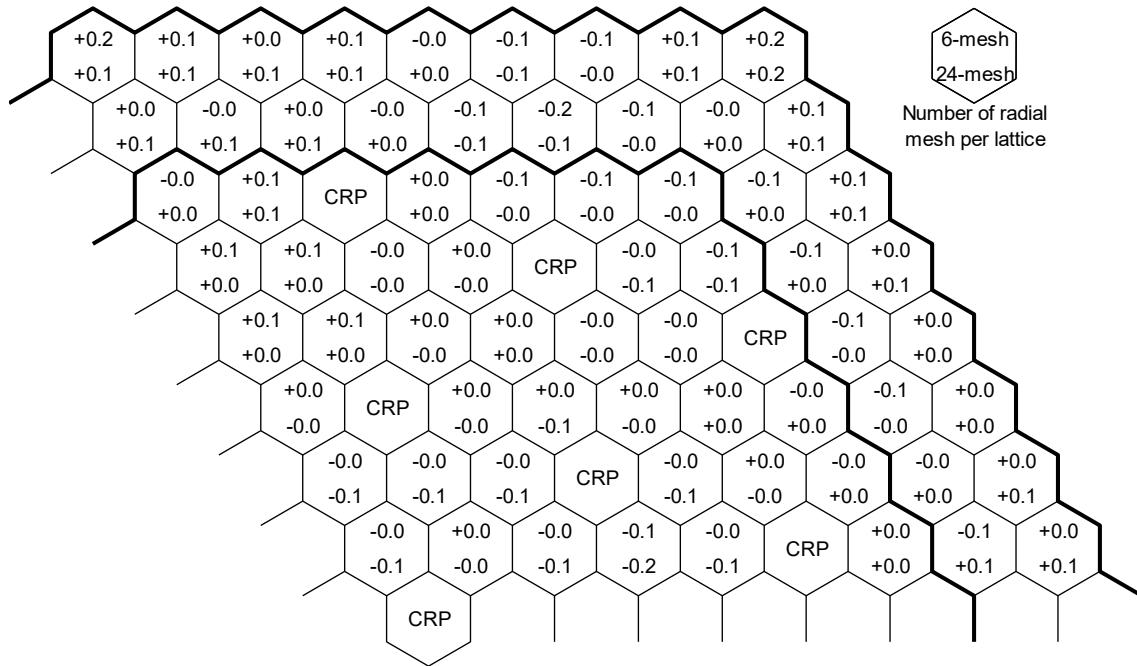


Fig. 2.2-2 Comparison in calculation time under several convergence criteria of initial diffusion calculation (IDC) for the SPX core

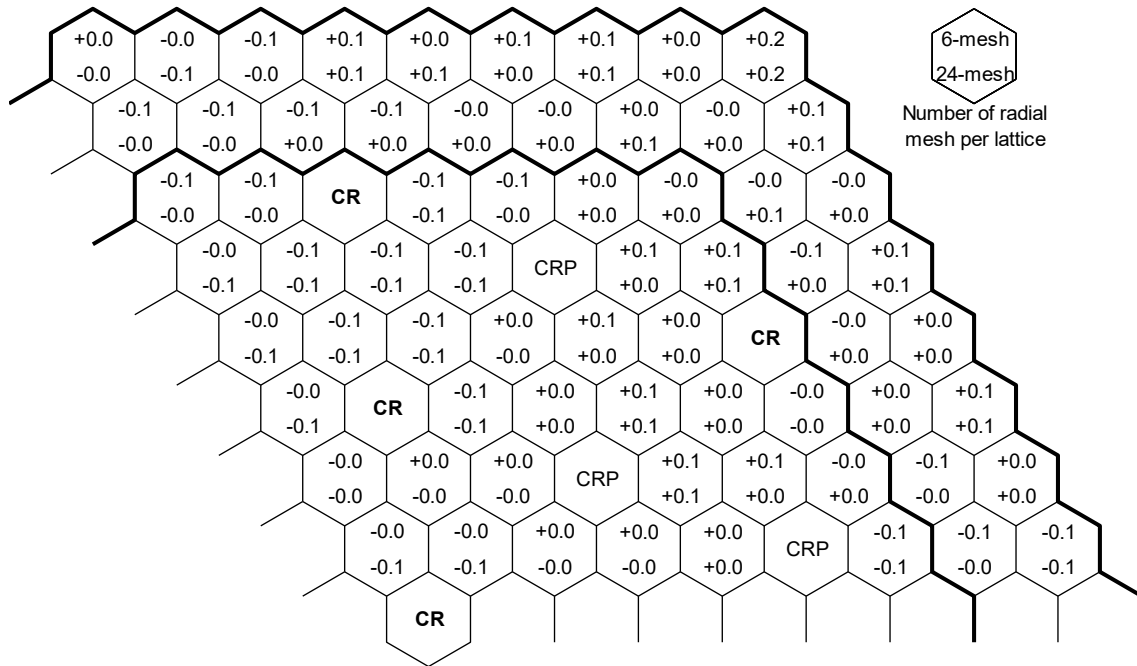


Stl: Steel	AB: Axial blanket	AR: Axial reflector
TZ: Test zone	DoM: Driver without moderator	DwM: Driver with moderator
RoM: Reflector without moderator	RwM: Reflector with moderator	KR: KNK-1 reflector
Sod: Sodium/steel zone	CR: Control rod	CF: Control rod follower

Fig. 2.3-1 Difference in region- and group-wise flux relative to the reference for the KNK-II core

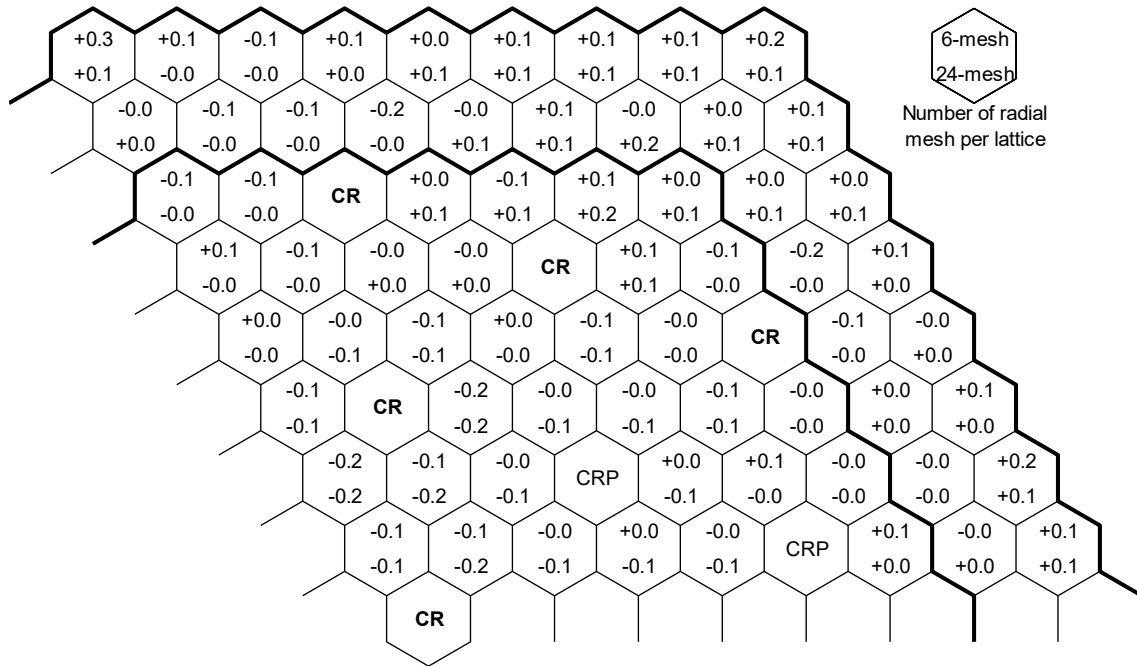


- All rods out -

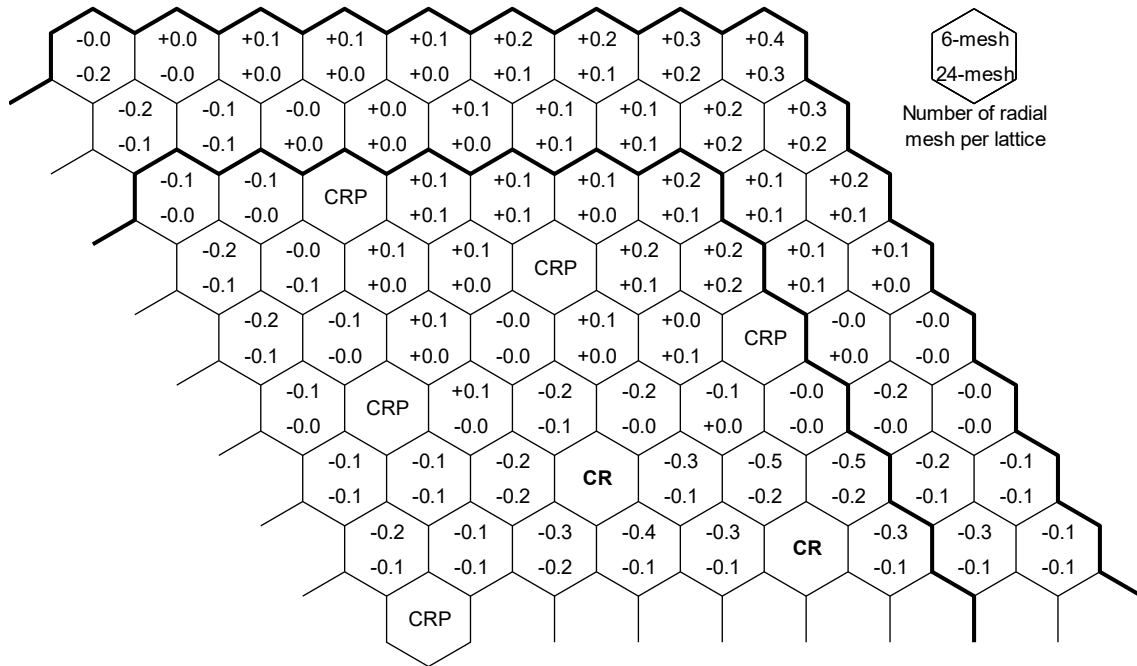


- CCR half-in -

Fig. 2.3-2 Difference in subassembly-wise power distribution relative to the reference for the Monju core (1/2)

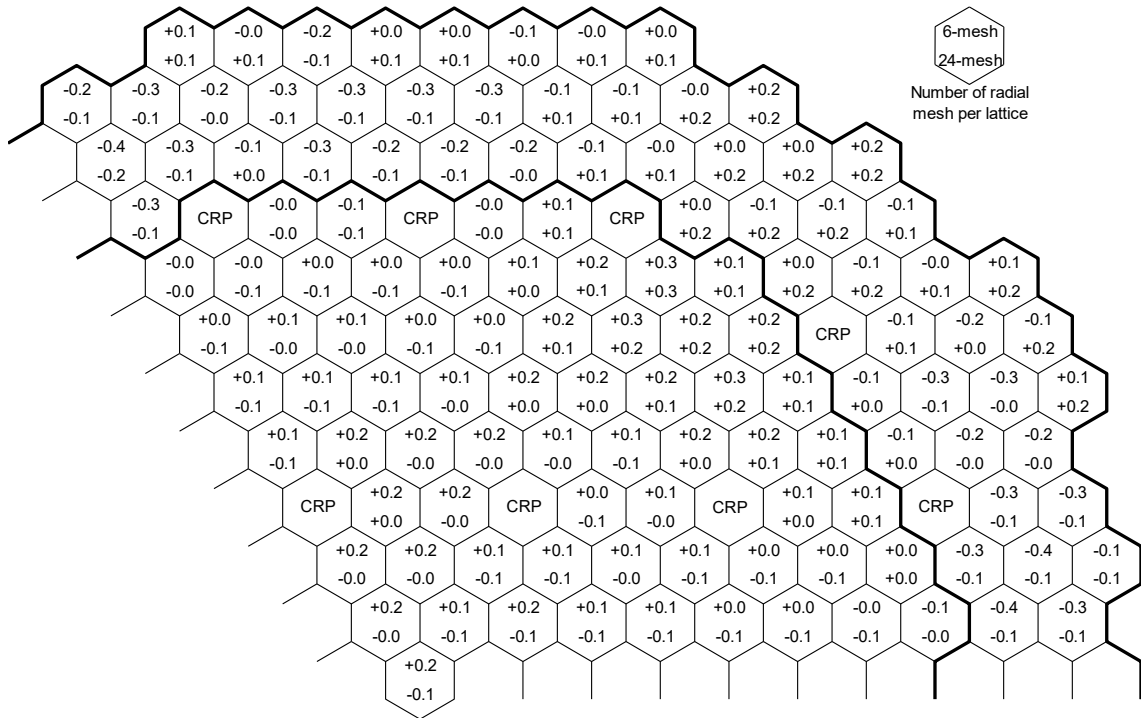


- MCR in -

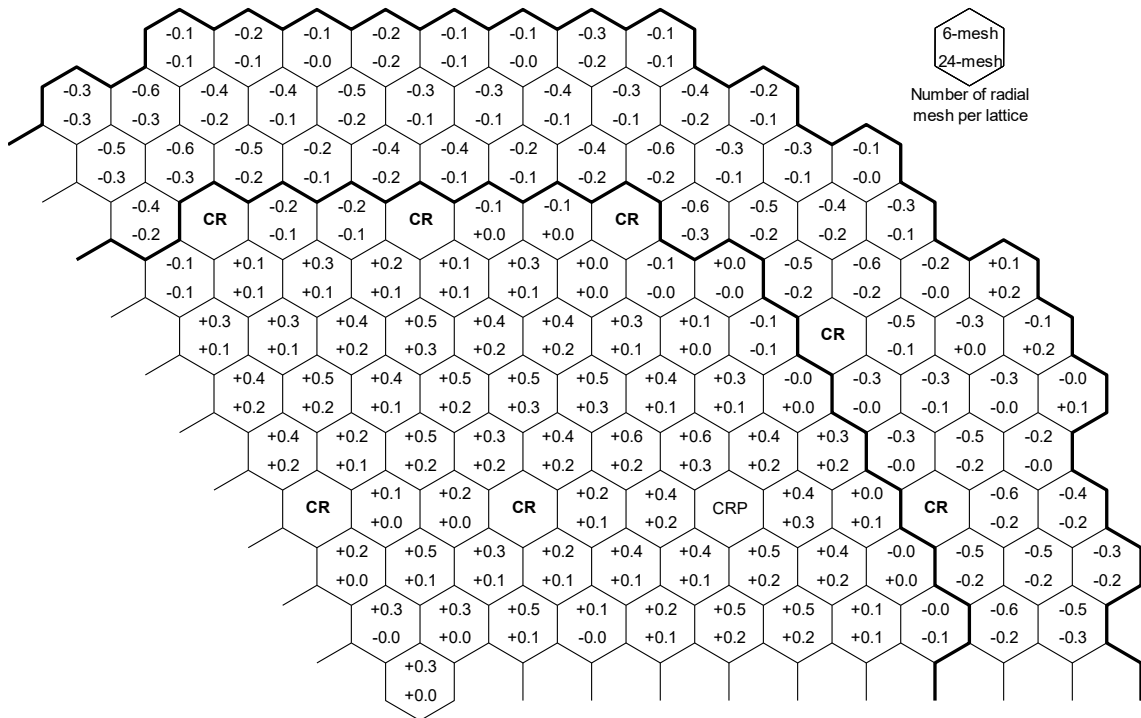


- BCR in -

Fig. 2.3-2 Difference in subassembly-wise power distribution relative to the reference for the Monju core (2/2)



- All rods out -



- MCR half-in -

Fig. 2.3-3 Difference in subassembly-wise power distribution relative to the reference for the Super-Phenix core with stricter convergence criteria (1/2)



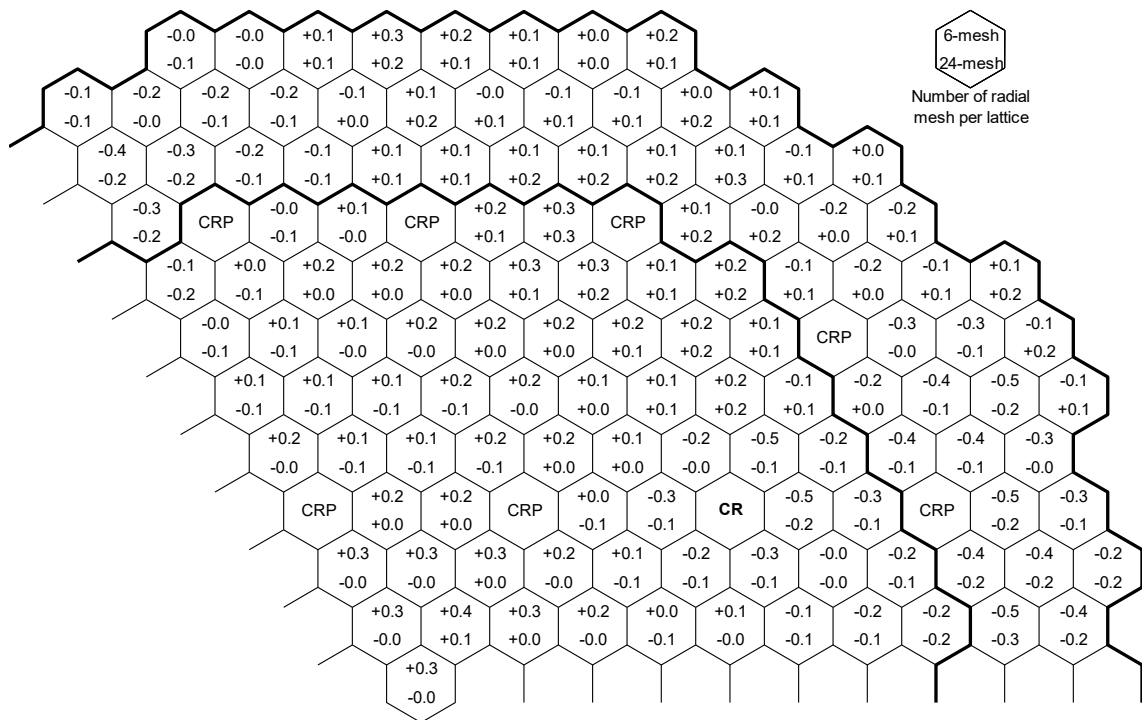
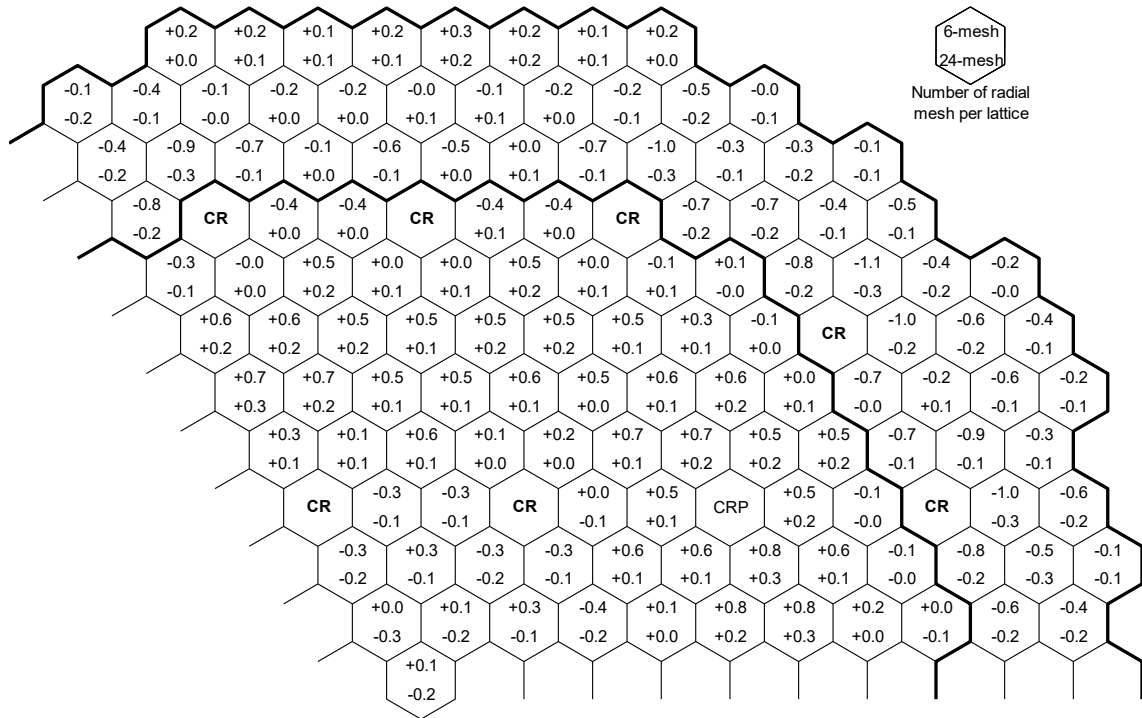


Fig. 2.3-3 Difference in subassembly-wise power distribution relative to the reference for the Super-Phenix core with stricter convergence criteria (2/2)

Table 2.1-1 Convergence performance and fraction of negative outgoing angular fluxes for the Monju core before the improvement

Calculation condition			Convergence and Fraction (%)			
R-mesh*1	A-mesh*2	S <sub>N</sub> order	All rods out		PCR in	
6	5.0 cm	2	Good	3E-3	Good	5E-3
	5.0 cm	4	Good	0.03	Good	0.04
	2.5 cm	4	Good	0.10	Good	0.10
	5.0 cm	8	Good	0.04	Good	0.06
24	5.0 cm	2	Good	0	Good	0
	5.0 cm	4	Bad	0.5	Bad	0.4
	2.5 cm	4	No	1.5	No	1.5
	5.0 cm	8	No	0.8	Bad	0.8
54	5.0 cm	2	Good	9E-5	Good	3E-5
	5.0 cm	4	Good	0.3	Good	0.2
	2.5 cm	4	No	2.3	No	2.2
	5.0 cm	8	Bad	1.4	Bad	1.4
96	5.0 cm	2	Good	0	Good	0
	5.0 cm	4	Good	0.06	Good	0.08
	2.5 cm	4	No	2.9	No	2.9
	5.0 cm	8	No	1.6	No	1.6

\*1 Number of radial meshes per hexagonal lattice

\*2 Axial mesh width

Table 2.1-2 Convergence performance and fraction of negative outgoing angular fluxes for the Monju core after the improvement

Calculation condition			Convergence and Fraction (%)			
R-mesh*1	A-mesh*2	S <sub>N</sub> order	All rods out		PCR in	
6	5.0 cm	2	Good	1E-3	Good	2E-3
	5.0 cm	4	Good	2E-3	Good	3E-3
	2.5 cm	4	Good	3E-3	Good	3E-3
	5.0 cm	8	Good	4E-3	Good	5E-3
24	5.0 cm	2	Good	0	Good	0
	5.0 cm	4	Good	1E-4	Good	6E-5
	2.5 cm	4	Good	0	Good	2E-6
	5.0 cm	8	Good	2E-4	Good	2E-4
54	5.0 cm	2	Good	4E-5	Good	0
	5.0 cm	4	Good	3E-3	Good	3E-3
	2.5 cm	4	Good	3E-3	Good	3E-3
	5.0 cm	8	Good	3E-3	Good	3E-3
96	5.0 cm	2	Good	0	Good	0
	5.0 cm	4	Good	8E-5	Good	0
	2.5 cm	4	Good	0	Good	0
	5.0 cm	8	Good	3E-4	Good	5E-5

\*1 Number of radial meshes per hexagonal lattice

\*2 Axial mesh width

Table 2.3-1 Angular discretization effects in eigenvalue for the KNK-II core

Angular quadrature set	All rods out	Rods half-in	Rods in
S <sub>4</sub>	-0.020* <sup>1</sup>	+0.057* <sup>1</sup>	<u>+0.148*<sup>1</sup></u>
S <sub>8</sub>	+0.002	+0.018	+0.033
S <sub>12</sub>	+0.000	+0.006	+0.009
S <sub>16</sub>	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)

\*1: Relative difference to the reference [% Δ k/k]

Underlined means exceeding of the target accuracy of 0.1 % Δ k/k

Table 2.3-2 Angular discretization effects in eigenvalue for the Monju core

Angular quadrature set	All rods out	CCR half-in	MCR in	BCR in
S <sub>4</sub>	+0.022* <sup>1</sup>	+0.037* <sup>1</sup>	+0.064* <sup>1</sup>	+0.063* <sup>1</sup>
S <sub>8</sub>	+0.002	+0.006	+0.010	+0.009
S <sub>12</sub>	-0.000	+0.002	+0.003	+0.003
S <sub>16</sub>	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)

\*1: Relative difference to the reference [% Δ k/k]

Table 2.3-3 Angular discretization effects in eigenvalue for the Super-Phenix core

Angular quadrature set	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
S <sub>4</sub>	+0.026* <sup>1</sup>	+0.045* <sup>1</sup>	+0.061* <sup>1</sup>	+0.028* <sup>1</sup>
S <sub>8</sub>	+0.004	+0.007	+0.009	+0.004
S <sub>12</sub>	+0.001	+0.002	+0.002	+0.001
S <sub>16</sub>	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)

\*1: Relative difference to the reference [% Δ k/k]

Table 2.3-4 Angular discretization effects in region- and group-wise flux for the KNK-II core

Angular quadrature set	All rods out	Rods half-in	Rods in
S <sub>4</sub>	<u>2.45</u> <sup>*1</sup>	<u>1.96</u> <sup>*1</sup>	<u>1.54</u> <sup>*1</sup>
S <sub>8</sub>	0.30	0.21	0.16
S <sub>12</sub>	0.06	0.04	0.05
S <sub>16</sub>	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)

\*1: Maximum relative difference to the reference [%]

Underlined means exceeding of the target accuracy of 0.7 %

Table 2.3-5 Angular discretization effects in subassembly-wise power distribution for the Monju core

Angular quadrature set	All rods out	CCR half-in	PCR in	BCR in
S <sub>4</sub>	0.12 <sup>*1</sup>	0.11 <sup>*1</sup>	0.18 <sup>*1</sup>	0.26 <sup>*1</sup>
S <sub>8</sub>	0.03	0.02	0.03	0.04
S <sub>12</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01
S <sub>16</sub>	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)

\*1: Maximum relative difference to the reference [%]

Table 2.3-6 Angular discretization effects in subassembly-wise power distribution for the Super-Phenix core

Angular quadrature set	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
S <sub>4</sub>	0.13 <sup>*1</sup>	0.16 <sup>*1</sup>	0.21 <sup>*1</sup>	0.22 <sup>*1</sup>
S <sub>8</sub>	0.02	0.02	0.04	0.04
S <sub>12</sub>	0.00	0.01	0.01	0.01
S <sub>16</sub>	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)

\*1: Maximum relative difference to the reference [%]

Table 2.3-7 Calculation criteria and conditions for verification tests

Item	Criteria and conditions	
	KNK-II	Monju, Super-Phenix
Angular quadrature set	S <sub>8</sub>	←
Spatial treatment in the radial direction	Triangle mesh division within lattice (6-, 24-, 54-, 96-mesh)	←
Spatial treatment in the axial direction (Mesh width)	Around 5.0 cm or 2.5 cm	←
Distribution convergence criteria	1.0×10 <sup>-4</sup> (Fission source for each mesh)	←
Eigenvalue convergence criteria	1.0×10 <sup>-5</sup>	←
Neutron energy groups	4	18
Acceleration method	Initial diffusion calculation and coarse mesh rebalance method for inner and outer iterations	←

Table 2.3-8 Difference in eigenvalue relative to the reference for the KNK-II core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	Rods half-in	Rods in
6	5.0 cm	<u>-0.201</u> <sup>*3</sup>	<u>-0.373</u> <sup>*3</sup>	<u>-0.685</u> <sup>*3</sup>
6	2.5 cm	<u>-0.168</u>	<u>-0.319</u>	<u>-0.657</u>
24	5.0 cm	-0.076	<u>-0.139</u>	<u>-0.205</u>
24	2.5 cm	-0.045	-0.086	<u>-0.177</u>
54	5.0 cm	-0.058	-0.087	-0.086
54	2.5 cm	<b>-0.024</b>	<b>-0.034</b>	-0.058
96	5.0 cm	-0.042	-0.061	-0.044
96	2.5 cm	<b>-0.010</b>	<b>-0.011</b>	<b>-0.013</b>
GMVP (Ref.)		1.09521 ±0.007 <sup>*4</sup>	0.98352 ±0.008 <sup>*4</sup>	0.87989 ±0.008 <sup>*4</sup>

\*1: Number of radial meshes per lattice

\*2: Axial mesh width

\*3: Relative difference to the reference [% Δ k/k]

\*4: Eigenvalue and its standard deviation (1 σ) [% Δ k]

**Boldface means achievement of convergence after the improvement**

Underlined means exceeding of the target accuracy of 0.1% Δ k/k

Table 2.3-9 Maximum difference in region- and group-wise flux relative to the reference for the KNK-II core

Radial mesh*1	Axial mesh*2	All rods out	Rods half-in	Rods in
6	5.0 cm	<u>5.13</u> <sup>*3</sup>	<u>4.76</u> <sup>*3</sup>	<u>5.92</u> <sup>*3</sup>
6	2.5 cm	<u>5.22</u>	<u>4.85</u>	<u>5.78</u>
24	5.0 cm	<u>1.14</u>	<u>1.70</u>	<u>1.86</u>
24	2.5 cm	<u>1.24</u>	<u>1.24</u>	<u>1.72</u>
54	5.0 cm	<u>0.80</u>	<u>0.92</u>	<u>0.79</u>
54	2.5 cm	<b>0.52</b>	<b>0.44</b>	<u>0.81</u>
96	5.0 cm	<u>0.81</u>	<u>0.82</u>	<u>0.93</u>
96	2.5 cm	<b>0.32</b>	<b>0.31</b>	<b>0.37</b>
GMVP		0.02	0.02	0.02
		~0.11 <sup>*4</sup>	~0.12 <sup>*4</sup>	~0.12 <sup>*4</sup>

\*1: Number of radial meshes per lattice

\*2: Axial mesh width

\*3: Maximum relative difference to the reference [%]

\*4: Standard deviation range of the reference ( $1\sigma$ ) [%]

**Boldface means achievement of convergence after the improvement**

Underlined means exceeding of the target accuracy of 0.7 %



Table 2.3-10 Calculation time for the KNK-II core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	Rods half-in	Rods in	Normalized time <sup>*3</sup>
6	5.0 cm	1.0	1.6	1.1	(Ref.)
6	2.5 cm	2.1	3.5	2.3	1.1
24	5.0 cm	4.1	5.0	4.1	0.9
24	2.5 cm	8.5	12	8.3	1.0
54	5.0 cm	10	12	10	1.0
54	2.5 cm	<b>22</b>	<b>31</b>	<b>21</b>	1.1
96	5.0 cm	26	20	21	1.2
96	2.5 cm	<b>50</b>	<b>43</b>	<b>47</b>	1.2

Unit: m

\*1: Number of radial meshes per lattice

\*2: Axial mesh width

\*3: Relative average time normalized by number of meshes

**Boldface means achievement of convergence after the improvement**

Table 2.3-11 Difference in eigenvalue relative to the reference for the Monju core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	CCR half-in	MCR in	BCR in
6	5.0 cm	-0.054 <sup>*3</sup>	-0.081 <sup>*3</sup>	<u>-0.132</u> <sup>*3</sup>	<u>-0.135</u> <sup>*3</sup>
6	2.5 cm	-0.034	-0.061	<u>-0.114</u>	<b><u>-0.117</u></b>
24	5.0 cm	<b>-0.029</b>	<b>-0.034</b>	<b>-0.039</b>	<b>-0.040</b>
24	2.5 cm	<b>-0.007</b>	<b>-0.013</b>	<b>-0.021</b>	<b>-0.021</b>
54	5.0 cm	<b>-0.025</b>	<b>-0.026</b>	<b>-0.020</b>	<b>-0.020</b>
96	5.0 cm	<b>-0.014</b>	<b>-0.016</b>	<b>-0.009</b>	<b>-0.008</b>
GMVP (Ref.)		1.03586 ±0.004 <sup>*4</sup>	0.99581 ±0.004 <sup>*4</sup>	0.93841 ±0.004 <sup>*4</sup>	0.95629 ±0.004 <sup>*4</sup>

\*1: Number of radial meshes per lattice

\*2: Axial mesh width

\*3: Relative difference to the reference [% Δ k/k]

\*4: Eigenvalue and its standard deviation (1 σ) [% Δ k]

**Boldface means achievement of convergence after the improvement**

Underlined means exceeding of the target accuracy of 0.1% Δ k/k

Table 2.3-12 Maximum difference in subassembly-wise power distribution relative to the reference for the Monju core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	CCR half-in	PCR in	BCR in
6	5.0 cm	0.22 <sup>*3</sup>	0.24 <sup>*3</sup>	0.27 <sup>*3</sup>	0.47 <sup>*3</sup>
6	2.5 cm	0.23	0.24	0.27	<b>0.46</b>
24	5.0 cm	<b>0.18</b>	<b>0.15</b>	<b>0.18</b>	<b>0.26</b>
24	2.5 cm	<b>0.17</b>	<b>0.15</b>	<b>0.19</b>	<b>0.25</b>
54	5.0 cm	<b>0.18</b>	<b>0.14</b>	<b>0.21</b>	<b>0.20</b>
96	5.0 cm	<b>0.15</b>	<b>0.12</b>	<b>0.22</b>	<b>0.19</b>
GMVP		0.08 ~0.13 <sup>*4</sup>	0.09 ~0.13 <sup>*4</sup>	0.09 ~0.13 <sup>*4</sup>	0.09 ~0.13 <sup>*4</sup>

\*1: Number of radial meshes per lattice

\*2: Axial mesh width

\*3: Maximum relative difference to the reference [%]

\*4: Standard deviation range of the reference ( $1\sigma$ ) [%]

**Boldface means achievement of convergence after the improvement**

Table 2.3-13 Calculation time for the Monju core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	CCR half-in	MCR in	BCR in	Normalized time <sup>*3</sup>
6	5.0 cm	0.4	0.5	0.4	0.4	(Ref.)
6	2.5 cm	1.0	1.1	0.9	<b>1.0</b>	1.1
24	5.0 cm	<b>2.0</b>	<b>2.3</b>	<b>1.9</b>	<b>1.9</b>	1.1
24	2.5 cm	<b>4.7</b>	<b>5.4</b>	<b>4.4</b>	<b>4.7</b>	1.3
54	5.0 cm	<b>5.3</b>	<b>6.1</b>	<b>4.6</b>	<b>4.7</b>	1.3
96	5.0 cm	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>9.3</b>	<b>10</b>	1.5

Unit: h

\*1: Number of radial meshes per lattice

\*2: Axial mesh width

\*3: Relative average time normalized by number of meshes

**Boldface means achievement of convergence after the improvement**

Table 2.3-14 Difference in eigenvalue relative to the reference for the Super-Phenix core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
6	5.0 cm	<b>-0.030</b> <sup>*3</sup>	<u>-0.103</u> <sup>*3</sup>	<u>-0.210</u> <sup>*3</sup>	<b>-0.039</b> <sup>*3</sup>
6	2.5 cm	<b>-0.014</b>	<b>-0.085</b>	<b><u>-0.198</u></b>	<b>-0.023</b>
24	5.0 cm	<b>-0.008</b>	<b>-0.030</b>	<b>-0.041</b>	<b>-0.007</b>
24	2.5 cm	<b>+0.008</b>	<b>-0.013</b>	<b>-0.029</b>	<b>+0.009</b>
54	5.0 cm	<b>-0.004</b>	<b>-0.015</b>	<b>-0.008</b>	<b>-0.002</b>
96	5.0 cm	N/A <sup>*5</sup>	N/A <sup>*5</sup>	N/A <sup>*5</sup>	N/A <sup>*5</sup>
GMVP (Ref.)		1.02767 ±0.002 <sup>*4</sup>	0.97937 ±0.002 <sup>*4</sup>	0.93408 ±0.003 <sup>*4</sup>	1.01774 ±0.002 <sup>*4</sup>

\*1: Number of radial meshes per lattice

\*2: Axial mesh width

\*3: Relative difference to the reference [% Δ k/k]

\*4: Eigenvalue and its standard deviation (1 σ) [% Δ k]

\*5: Not Available due to lack of computation memory

**Boldface means achievement of convergence after the improvement**

Underlined means exceeding of the target accuracy of 0.1% Δ k/k

Table 2.3-15 Maximum difference in subassembly-wise power distribution relative to the reference for the Super-Phenix core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
6	5.0 cm	<b>0.36</b> <sup>*3</sup>	0.58 <sup>*3</sup>	<u>1.06</u> <sup>*3</sup>	<b>0.46</b> <sup>*3</sup>
6	2.5 cm	<b>0.36</b>	<b>0.57</b>	<u>0.93</u>	<b>0.45</b>
24	5.0 cm	<b>0.52</b>	<b>0.44</b>	<u>0.74</u>	<b>0.59</b>
24	2.5 cm	<b>0.57</b>	<b>0.42</b>	<u>0.76</u>	<b>0.58</b>
54	5.0 cm	<b>0.58</b>	<b>0.48</b>	<u>0.78</u>	<b>0.63</b>
96	5.0 cm	N/A <sup>*5</sup>	N/A <sup>*5</sup>	N/A <sup>*5</sup>	N/A <sup>*5</sup>
GMVP		0.09 ~0.16 <sup>*4</sup>	0.09 ~0.17 <sup>*4</sup>	0.09 ~0.18 <sup>*4</sup>	0.09 ~0.17 <sup>*4</sup>

\*1: Number of radial meshes per lattice

\*2: Axial mesh width

\*3: Maximum relative difference to the reference [%]

\*4: Standard deviation range of the reference ( $1\sigma$ ) [%]

\*5: Not Available due to lack of computation memory

**Boldface means achievement of convergence after the improvement**

Underlined means exceeding of the target accuracy of 0.7 %

Table 2.3-16 Calculation time for the Super-Phenix core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in	Normalized time <sup>*3</sup>
6	5.0 cm	<b>0.8</b>	1.2	0.8	<b>0.8</b>	(Ref.)
6	2.5 cm	<b>1.8</b>	<b>2.7</b>	<b>1.6</b>	<b>1.8</b>	1.1
24	5.0 cm	<b>3.7</b>	<b>3.6</b>	<b>3.5</b>	<b>3.7</b>	1.0
24	2.5 cm	<b>7.3</b>	<b>7.5</b>	<b>6.9</b>	<b>7.4</b>	1.0
54	5.0 cm	<b>8.7</b>	<b>8.7</b>	<b>8.6</b>	<b>9.2</b>	1.1
96	5.0 cm	N/A <sup>*4</sup>	N/A <sup>*4</sup>	N/A <sup>*4</sup>	N/A <sup>*4</sup>	—

Unit: h

\*1: Number of radial meshes per lattice

\*2: Axial mesh width

\*3: Relative average time normalized by number of meshes

\*4: Not Available due to lack of computation memory

**Boldface means achievement of convergence after the improvement**

Table 2.3-17 Difference in eigenvalue relative to the reference for the Super-Phenix core with stricter convergence criteria

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
6	5.0 cm	-0.023 <sup>*3</sup>	-0.099 <sup>*3</sup>	<u>-0.208</u> <sup>*3</sup>	-0.033 <sup>*3</sup>
6	2.5 cm	-0.007	-0.081	<u>-0.195</u>	-0.018
24	5.0 cm	-0.002	-0.027	-0.040	-0.002
24	2.5 cm	+0.014	-0.009	-0.027	+0.013
54	5.0 cm	-0.001	-0.013	-0.008	+0.002
96	5.0 cm	N/A <sup>*5</sup>	N/A <sup>*5</sup>	N/A <sup>*5</sup>	N/A <sup>*5</sup>
GMVP (Ref.)		1.02767 ±0.002 <sup>*4</sup>	0.97937 ±0.002 <sup>*4</sup>	0.93408 ±0.003 <sup>*4</sup>	1.01774 ±0.002 <sup>*4</sup>

\*1: Number of radial meshes per lattice

\*2: Axial mesh width

\*3: Relative difference to the reference [% Δ k/k]

\*4: Eigenvalue and its standard deviation (1 σ) [% Δ k]

\*5: Not Available due to lack of computation memory

Underlined means exceeding of the target accuracy of 0.1% Δ k/k

Table 2.3-18 Maximum relative difference to the reference in subassembly-wise power distribution for the Super-Phenix core with stricter convergence criteria

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
6	5.0 cm	0.39 <sup>*3</sup>	0.63 <sup>*3</sup>	<u>1.11</u> <sup>*3</sup>	0.54 <sup>*3</sup>
6	2.5 cm	0.39	0.63	<u>1.10</u>	0.54
24	5.0 cm	0.26	0.32	0.34	0.29
24	2.5 cm	0.27	0.33	0.34	0.29
54	5.0 cm	0.27	0.30	0.31	0.31
96	5.0 cm	N/A <sup>*5</sup>	N/A <sup>*5</sup>	N/A <sup>*5</sup>	N/A <sup>*5</sup>
GMVP		0.09 ~0.16 <sup>*4</sup>	0.09 ~0.17 <sup>*4</sup>	0.09 ~0.18 <sup>*4</sup>	0.09 ~0.17 <sup>*4</sup>

\*1: Number of radial meshes per lattice

\*2: Axial mesh width

\*3: Maximum relative difference to the reference [%]

\*4: Standard deviation range of the reference ( $1\sigma$ ) [%]

\*5: Not Available due to lack of computation memory

Underlined means exceeding of the target accuracy of 0.7 %

Table 2.3-19 Calculation time for the Super-Phenix core with stricter convergence criteria

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in	Normalized time <sup>*3</sup>
6	5.0 cm	1.8	2.3	1.6	1.8	(Ref.)
6	2.5 cm	3.9	4.9	3.4	3.8	1.1
24	5.0 cm	7.5	7.7	7.4	7.5	1.0
24	2.5 cm	15	17	16	15	1.1
54	5.0 cm	16	17	16	15	1.0
96	5.0 cm	N/A <sup>*4</sup>	N/A <sup>*4</sup>	N/A <sup>*4</sup>	N/A <sup>*4</sup>	—

Unit: h

\*1: Number of radial meshes per lattice

\*2: Axial mesh width

\*3: Relative average time normalized by number of meshes

\*4: Not Available due to lack of computation memory



### 3. MINISTRI の機能拡張

以前の JAEA 報告書<sup>1)</sup>発行時からの主要な機能拡張内容を記述する。具体的には、非等方ストリーミング効果取り扱い手法の導入、摂動計算ツールの整備、並列処理化を行った。

その他、MINIHEX ソルバー（六角格子当たり径方向 1 メッシュ）の組み込み、三角メッシュ毎領域指定機能の追加、黒体吸収体（Black absorber）取り扱い機能の追加、倍精度・単精度切り替え効率化、負の自群散乱断面積に対する処理である。

なお、解析で用いた断面積としては、JENDL-4.0 に基づく SLAROM-UF 用の 70 群炉定数 UFLIB.J40<sup>10)</sup>を基に SLAROM-UF コード<sup>11, 12)</sup>を用いた非均質モデル格子計算により得られた 70 群のものを用いた。

#### 3.1 MINISTRI への非等方ストリーミング効果取り扱い手法の導入

$S_N$  法輸送理論において、セル非均質性に由来する非等方ストリーミング効果を取り扱う手法が考案された<sup>4)</sup>。具体的には、Benoist の非等方拡散係数を利用して、 $P_1$  成分により取り扱うものである。

文献 4) では、XYZ 体系において非等方ストリーミング効果を評価し、拡散計算により得られた結果と同等の効果が得られた旨が報告されている。そこで、Tri-Z 体系用  $S_N$  法輸送計算コード MINISTRI に対しても当該手法の導入を行った。

##### 3.1.1 六角体系用の基本式の導出

非等方性を考慮しない通常の  $S_N$  法輸送方程式は次式で表される。

$$\bar{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_g^m + \frac{1}{3D_{iso,g}} \psi_g^m = Q_g \quad (3.1-1)$$

ここで、

$m$ : 角度中性子束の方向の識別

$g$ : 中性子エネルギー群

$\bar{\Omega}^m$ : 角度中性子束の単位方向ベクトル

$\psi_g^m$ : 角度中性子束

$D_{iso,g}$ : 等方（平均）拡散係数

また、等方中性子源  $Q_g$  は次式で与えられる。

$$Q_g = \sum_{g'} \left( \frac{\chi_g}{k_{eff}} \nu \Sigma_{f,g'} + \Sigma_{s,g' \rightarrow g} \right) \phi_{g'}^0 \quad (3.1-2)$$

ここで、

$\chi_g$ : 核分裂スペクトル

$k_{eff}$ : 実効増倍率 (固有値)

$\nu\Sigma_{f,g}$ : 中性子生成断面積

$\Sigma_{s,g'\rightarrow g}$ : 散乱断面積

また、スカラー中性子束  $\phi_g^0$  は角度中性子束  $\psi_g^m$  とその重み  $w^m$  から次式で与えられる。

$$\phi_g^0 = \sum_m \psi_g^m w^m . \quad (3.1-3)$$

それに対し、中性子束の P<sub>1</sub> 成分により非等方ストリーミング成分を考慮した S<sub>N</sub> 法輸送方程式は 3 次元 XYZ 体系に対しては次式で表される。

$$\bar{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_g^m + \frac{1}{3D_{iso,g}} \psi_g^m = Q_g + 3 \sum_{k=-1}^1 \left( \frac{1}{3D_{iso,g}} - \frac{1}{3D_{k,g}} \right) \phi_g^{1k} R_{1k}^m . \quad (3.1-4)$$

ここで、

$R_{1k}^m$ : 球面調和関数の 1 次の項 (後述)

通常散乱の非等方性を考慮するための P<sub>N</sub> 法では、 $k$  は中性子の進行方向を基準に取るのに対し、非等方ストリーミング成分を取り入れる場合は、各座標 (X, Y, Z) を基準に  $k$  を取っているところが特徴的である。

また、非等方拡散係数  $D_{k,g}$  は次式で与えられる。

$$\begin{cases} D_{-1} = D_y \\ D_0 = D_x \\ D_1 = D_z \end{cases} . \quad (3.1-5)$$

更に、中性子束の P<sub>1</sub> 成分  $\phi_g^{1k}$  は次式で与えられる。

$$\phi_g^{1k} = 3 \sum_m R_{1k}^m \psi_g^m w^m . \quad (3.1-6)$$

さて、1 次の球面調和関数は次式で与えられる。

$$R_{1k}^m = \alpha \mu_k^m. \quad (3.1-7)$$

ここで、方向余弦について、 $\mu^m$ 、 $\eta^m$ 、 $\xi^m$ をそれぞれ x 軸、y 軸、z 軸に対する方向余弦とすると、

$$\begin{cases} \mu_{-1}^m = \eta^m \\ \mu_0^m = \mu^m \\ \mu_1^m = \xi^m \end{cases}. \quad (3.1-8)$$

球面調和関数の係数は次式を満たすように設定する。すなわち、

$$\int_{4\pi} d\bar{\Omega} (3R_{1k}^m)^2 = \int_{-1}^1 d\mu_k^m \int_0^{2\pi} d\varphi (3\alpha\mu_k^m)^2 = \int_{-1}^1 d\mu_k^m \int_0^{2\pi} d\varphi$$

から、次のように係数を求めた。

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

さて、非等方ストリーミング効果を考慮した六角体系用  $S_N$  法輸送方程式も、基本的には (3.1-4) 式で表されるが、便宜的に径方向 X, Y を X, U, V 方向に分解して次式で表す。

$$\bar{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_g^m + \frac{1}{3D_{iso,g}} \psi_g^m = Q_g + 3 \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{3D_{iso,g}} - \frac{1}{3D_{k,g}} \right) \phi_g^{1k} R_{1k}^m. \quad (3.1-9)$$

非等方拡散係数は次式で与えられる。

$$\begin{cases} D_1 = D_x \\ D_2 = D_u \\ D_3 = D_v \\ D_4 = D_z \end{cases}. \quad (3.1-10)$$

また、方向余弦は次式で与えられる。

$$\begin{cases} \mu_1^m = \mu_x^m \\ \mu_2^m = \mu_u^m \\ \mu_3^m = \mu_v^m \\ \mu_4^m = \xi^m \end{cases}. \quad (3.1-11)$$

なお、六角-Z 体系における方向余弦は XYZ 体系における方向余弦を用いて次式で表される。

$$\begin{cases} \mu_x^m = \mu^m \\ \mu_u^m = \frac{1}{2}\mu^m + \frac{\sqrt{3}}{2}\eta^m \\ \mu_v^m = \frac{1}{2}\mu^m - \frac{\sqrt{3}}{2}\eta^m \end{cases} \quad (3.1-12)$$

ここで、3次元XYZ体系の単位オクタント（単位球面あるいは全立体角を極角方向に2等分して方位角方向に4等分した計8等分した内の1つ）に対して、3次元六角-Z体系の単位ドデカント（単位球面あるいは全立体角を極角方向に2等分して方位角方向に6等分した計12等分した内の1つ）では面積が3分の2になるので、1径方向当たりのP<sub>1</sub>成分を3分の2倍する必要がある。結局、球面調和関数は次式で与えることとなる。

$$R_{lk}^m = \begin{cases} \alpha \sqrt{\frac{2}{3}} \mu_k^m = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{2}{3}} \mu_k^m = \frac{\sqrt{2}}{3} \mu_k^m (k=1\sim 3) \\ \alpha \mu_k^m = \frac{1}{\sqrt{3}} \xi^m (k=4) \end{cases} \quad (3.1-13)$$

### 3.1.2 取り扱い手法の検証

#### (1) 検証条件

機能拡張に関しては、これまでの開発の継続性よりも、今後の設計研究への適用に重点を置き、Fig. 3.1-1に示す750MWe次世代高速炉炉心<sup>16,17)</sup>の炉心上部の軸ブランケットをNaプレナムに置換した炉心<sup>18)</sup>を対象とした。格子計算では、燃料領域及びNaプレナム部領域では非均質モデルを、それ以外の領域では均質モデルを用いた。制御棒吸収体は全てNaフォロワで置換している。中性子エネルギー群はSLAROM-UFの炉定数であるUFLIBの70群構造とした。角度分点はS<sub>4</sub>で、空間メッシュ幅は約5cm（径方向に関しては、六角格子当たり24メッシュ）とした。

炉心状態としては、基準状態、炉心部Naボイド化、Naプレナム部Naボイド化、それらの両者のボイド化とし、固有値を対象とした。

なお、取り扱った体系は通常二重非均質構造の燃料領域及びラップ管と冷却材から構成されるNaプレナム部であるため、非等方拡散係数は次式の通りに設定した。

$$\begin{cases} D_1 = D_x = D_{perp} \\ D_2 = D_u = D_{perp} \\ D_3 = D_v = D_{perp} \\ D_4 = D_z = D_{para} \end{cases} \quad (3.1-14)$$

ここで、 $D_{perp}$ と $D_{para}$ はそれぞれ垂直方向と平行方向の拡散係数を表す。

以上は三角メッシュ計算の場合であるが、六角メッシュ用の摂動計算ツールの検証では BFS-73-1 臨界実験装置のサンプル反応度  $\rho$  を対象とした。エネルギーは 70 群、角度次数は  $S_4$  とした。格子計算では、文献 2) のサンプル問題に従い、炉心燃料に関しては 1 次元プレート非均質モデルを用い、それ以外に関しては均質モデルとした。また、燃料プレートは軸方向に積み上げられているため、非等方拡散係数は次式の通りに設定した。

$$\begin{cases} D_1 = D_x = D_{para} \\ D_2 = D_u = D_{para} \\ D_3 = D_v = D_{para} \\ D_4 = D_z = D_{perp} \end{cases} \quad (3.1-15)$$

参照解としては、CITATION-FBR コード<sup>19, 20)</sup>を用いた拡散計算による結果とし、評価対象は主に非等方ストリーミング効果とした。

なお、計算使用容量 (Word 数) に関して、非等方ストリーミング効果を取り扱わない場合と比較して、非等方ストリーミング効果を取り扱った場合は、約 2.2 倍へと増加したため、中性子束の  $P_1$  成分を外部記憶装置にストアする機能を追加した。

## (2) 検証結果

750MWe 次世代高速炉炉心のそれぞれの炉心状態における検証結果を Table 3.1-1 に示す。いずれの炉心状態においても、拡散計算と同等の非等方ストリーミング効果が再現できていることが分かる。実効増倍率自体の拡散計算との差異はこれまでの中型炉心に対する豊富な解析経験で得られた輸送・メッシュ補正相当<sup>15)</sup>となっている。

また、計算時間の比較を Table 3.1-2 に示すが、非等方ストリーミング成分の取り扱いにより 10~20%の増加が見られるが、大きなインパクトはない。

BFS-73-1 炉心の基準状態及び種々のサンプル装荷状態における検証結果を Table 3.1-3 に示す。いずれの炉心状態においても、拡散計算では非等方ストリーミング効果はほとんど見られないが、輸送計算では 750MWe 次世代高速炉炉心の場合と同等に見られている。これは、BFS-73-1 炉心体系が小型であり、炉心からの軸方向と径方向の双方のもれのバランスにより、非等方ストリーミング効果が決まるからであり、軸方向の漏れが主要である 750MWe 次世代高速炉炉心とは異なる。すなわち、拡散計算では両方向の効果が相殺して見かけ上は表れていないと考えられる。試行的に炉心高さを半分にすることにより、軸方向の効果を増加させてみた結果、拡散計算でも輸送計算と同等のレベルにまで非等方ストリーミング効果の増加が見られたことから裏付けられる。実効増倍率自体の拡散計算との差異は中型炉心と比べてやや大きめであるが妥当な結果であると考えられる。

また、計算時間の比較を Table 3.1-4 に示すが、非等方ストリーミング成分の取り扱いにより約 10%の増加が見られるものの、大きなインパクトはない。

### 3.2 摂動計算コードの整備

3次元 Tri-Z メッシュ体系 SN 輸送計算コード **MINISTR1** の開発課題の 1 つとして、**MINISTR1** に対応する摂動計算コードの整備が挙げられる。そこで、厳密摂動計算及び一次摂動計算が可能な摂動計算コード **MINISTR1-PERT** を作成した。

#### 3.2.1 摂動計算コードの作成

**SNPERT**<sup>21)</sup>等の既存のコードを基礎とすることはなく、新たに摂動計算コード **MINISTR1-PERT** を作成した。**MINISTR1-PERT** コードの作成では、**SNPERT** のマニュアルを参考に、大竹及び竹田両氏の摂動理論式<sup>21)</sup>に従い、ツールを作成した。なお、摂動理論式の詳細は付録 E に示す。

付録 E の、(E.1-12)～(E.1-16)式及び(E.1-18)と(E.1-19)式から明らかなように、摂動分子の漏洩項とストリーミング項を除けば、摂動前後のスカラ中性子束のみを与えれば摂動計算が可能であり、角度中性子束は不要である。また、摂動分子の漏洩項については、次式で定義される  $L_{g,i}$  :

$$L_{g,i} = -\sum_m \psi_{g,i}^{\tilde{m},+} (\psi_{g,i}^{m,*} - \phi_{g,i}^*) w^m. \quad (3.2-1)$$

を計算しておけば、摂動分子の漏洩項は次式:

$$[Leakage]_{g,i} = -\delta \Sigma_{tr,g,i} L_{g,i}. \quad (3.2-2)$$

で与えられ、角度中性子束をストックしておく必要はない。このようなことに注意を払うことにより、計算機容量の合理化を図っている。

#### 3.2.2 検証計算

##### (1) 検証条件

三角メッシュ用の摂動計算ツールの検証では **750MWe** 次世代高速炉炉心体系における炉心部 Na ボイド反応度を対象に行った。直接計算との比較に加えて、同じ体系及び断面積を用いた **CITATION-FBR** コード及び **PERKY** コード<sup>22)</sup>を用いた拡散計算ベースの厳密摂動計算による結果との内訳の比較も行う。エネルギーは 70 群、角度次数は  $S_4$ 、六角格子内の三角メッシュ数は 24 とした。

六角メッシュ用の摂動計算ツールの検証では **BFS-73-1** 臨界実験装置のサンプル反応度を対象とした。エネルギーは 70 群、角度次数は  $S_4$  とした。こちらの体系における検証でも、**CITATION-FBR** コード及び **PERKY** コードを用いた拡散計算ベースの厳密摂動計算による結果との内訳の比較も行う。

## (2) 検証結果

750MWe 次世代高速炉炉心体系を用いた検証結果を直接計算による結果との比較として Table 3.2-1 に示す。いずれについても、摂動計算は直接計算と良い一致を示していることが確認できた。また、成分毎（非漏洩成分、漏洩成分、合計）の比較を Table 3.2-2～4 に示す。非漏洩成分と各成分の"Anisotropy"として示す非等方ストリーミング効果は拡散計算の結果と同等である。漏洩成分は、拡散計算よりも絶対値が小さくなっており、プレート燃料を採用している臨界実験解析で得られた輸送・メッシュ補正<sup>15)</sup>ほどは大きくないものの、差異の方向は同様である。

次に、BFS-73-1 炉心体系を用いた検証結果を直接計算による結果との比較として Table 3.2-5 に示す。Table 3.2-8 に示す反応度の大きさを考えれば、十分な一致である。また、成分毎（非漏洩成分、漏洩成分、合計）の比較を Table 3.2-6～8 に示す。漏洩成分は、輸送計算ではほとんど見られないのに対し、拡散計算では有意に見られるが、これは、サンプルとトラバースさせた空間が希薄なため、拡散近似誤差が生じた結果と考えられる。それを除けば、良い一致である。

なお、原因は不明であるが、MINISTR I による随伴中性子束計算では、内側反復と外側反復の双方に粗メッシュリバランス法を適用した場合には収束が得られず、内側反復のみに適用した場合には得られたことを備忘事項として記述しておく。

### 3.3 MINISTR I の並列処理化

計算速度の向上のため、MINISTR I の並列処理化を実施した。並列処理化ツールとしては、メモリ使用量が小さく、ソースコードが複雑になりにくい OpenMP を用いた。

#### 3.3.1 並列処理化対象サブルーチンの選定

始めに、並列処理化する対象のサブルーチンを選定する。選定では、全計算時間における各サブルーチンの処理時間が占める割合（計算時間分担）を調査して、その割合が高いサブルーチン内を並列処理化することにした。各サブルーチンの計算時間分担は、サブルーチンコールの直前及び直後にシステム時間を取得する組み込みサブルーチンを記述することで計測した。

解析対象としては、燃焼計算が伴う設計作業への実用性に鑑みて、750MWe 次世代高速炉炉心（燃焼ゾーン毎平衡サイクル初期燃料組成使用、制御棒全引抜体系）を選定し、固有値計算を実施した。ここで、燃焼計算が伴う場合には出力分布の評価精度が重要となるが、大型炉心の出力分布の解析精度を十分に向上させるためには、2.3 節で述べたように核分裂中性子源の収束判定条件を通常より 1 桁厳しく設定する必要がある。そこで、解析条件を Table 3.3-1（Preliminary survey）に示す通りとした。

Fig. 3.3-1 に MINISTR I のサブルーチンツリー構造と、並列処理化の観点から有意な計算時間分担を有するサブルーチンの計算時間分担の計測結果を示す。各領域中性子スペク

トル計算ルーチン SPECT、初期拡散計算空間スウィープルーチン FDDIFSWEP、輸送計算空間スウィープルーチン FDSWEP、スカラー中性子束計算ルーチン FMNT の計算時間分担が大きいことが分かる。SPECT の計算時間分担が大きくなった原因は、燃料組成をゾーン毎に分けた結果、マテリアル数が非常に多く（1 万以上）なったためである。

上記は、径方向を三角メッシュとした場合であるが、六角メッシュとする場合は、FDDIFSWEP の代わりに FDHEXDIFSWEP が、FDSWEP の代わりに FDHEXSWEP がコールされることとなる。また、後述のように、サブルーチン FDHEXSWEP では 3 色スウィープ法を適用するために、その前処理をサブルーチン MAESTORO で行う必要がある。

結局、MINISTR1 コード全体では、SPECT、FDDIFSWEP、FDSWEP、FMNT、FDHEXDIFSWEP、FDHEXSWEP を並列処理化対象のサブルーチンに選定し、これらのサブルーチンに加え、並列処理化は行わないものの後述する空間スウィープのメッシュの色分けのために前処理を行う MAESTORO のソースを変更することにした。

### 3.3.2 並列処理化方法

並列処理化に当たり、OpenMP の特徴を踏まえて、以下に示すコードの書き方の工夫を取り入れることで、可能な限りの計算速度の向上を図ることとした。

#### 並列処理化にあたってのコードの書き方の工夫

- ①スレッド毎に用意する変数（PRIVATE 変数）を削減  
変数の同期待ち時間の減少を図ることが可能
- ②一つの DO ループでなるべく多くの反復数を稼ぐように DO ループを少数化  
各スレッドへの計算負荷の均等化が可能
- ③最も外側の DO ループで並列処理に用いるスレッドを用意（Fig. 3.3-2 参照）  
並列展開のための時間の短縮が可能

以上の工夫から、具体的には以下の並列処理化を図った。

①に基づき、並列処理化対象の全サブルーチンで、一つの式の記述は長くなるものの、変数の数を可能な限り減らした。

②に基づき、SPECT はマテリアル数とエネルギー群数の積に関して、FDDIFSWEP 及び FDHEXDIFSWEP は軸方向メッシュ数と集合体数の積に関して、FDSWEP 及び FDHEXSWEP、FMNT は角度分点数とドデカント数の積に関して並列処理化した。

③に基づき、最外 DO ループであるエネルギー群の DO ループが記述されているサブルーチン INNER から並列展開を行うようにすることが可能であるが、コードの大幅な変更（サブルーチン FDSWEP、FDDIFSWEP、FDHEXSWEP、FDHEXDIFSWEP、FMNT のコールを止めて、代わりにサブルーチン INNER 内に直接プログラムを挿入することを含む）が伴うことになり、並列処理化前のオリジナルのコードの改良が生じた場合のメンテ



ナンスが困難となる。そこで、一時的なコードの大幅変更による参考評価に留め、コードの改良自体には反映しないこととする。

また、初期拡散計算用サブルーチン（FDDIFSWEP 及び FDHEXDIFSWEP）の並列処理化に際して、オリジナルのコードの計算順序を基にして並列処理化すると、並列スレッド計算における初期拡散計算の結果が計算機の使用状況によって変わってしまい、収束しない場合や全計算時間が並列処理化前より長くなることがあった。そこで、径方向メッシュ分割を三角メッシュとする場合は 2 色スイープ法を、六角メッシュとする場合は 3 色スイープ法を、それぞれ取り入れて並列処理化することとした。2 色スイープ法及び 3 色スイープ法におけるメッシュの色分け例を Fig. 3.3-3 及び Fig. 3.3-4 に示す。

2 色スイープ法のための三角メッシュの色分けは、径方向及び軸方向のメッシュ番号からの偶奇判断により容易にできるために特に処理は不要であり、サブルーチン FDDIFSWEP 内でメッシュ番号から逐次色分けの判断を行うこととした。しかしながら、3 色スイープ法のための六角メッシュの色分けについては、径方向の六角メッシュ番号が炉中心からスパイラル状に昇順に並べられているために、メッシュ番号を 3 で割った際の余りを使うような単純な対応では不可能であり、空間スイープに先立って予め色分けの設定しておくことが適切である。そこで、サブルーチン MAESTORO 内で色分けのための前処理を行い、COMMON 文にてサブルーチン FDHEXDIFSWEP へ直接引き渡すこととした。そのため、六角メッシュの色分けのための配列変数は可変の扱いとしておらず、インクルードファイル multicolor.inc を設け、パラメータ文で宣言することとした。

これらの手法の導入により、並列スレッド計算で、どのような計算機の使用状況であっても、安定して収束し、かつ同じ計算結果を得られるようにした。

### 3.3.3 並列処理化による計算速度への効果の検討

#### (1) 検討条件

並列処理化した MINISTRI コードの計算時間向上について、3.2.2 項に示した検討と同様に、750MWe 次世代高速炉炉心を対象にして検討した。

検討では、計算速度の向上度合い（スピードアップ）を確認するための指標として、3 種類のスピードアップ係数を用いた。一つ目は、ソースコードを部分的に並列処理化した場合における理想的なスピードアップ係数  $S_{IDEAL}$  で、 $S_{IDEAL}$  はアムダールの法則<sup>23)</sup>によって予想できる。アムダールの法則を定式化すると、次式の通りとなる。

$$S_{IDEAL} = \frac{1}{(1-P) + \frac{P}{N}} \quad (3.3-1)$$

ここで、

$P$  : 1 スレッド使用時の並列処理化部の計算時間分担  
(並列処理化部が要する計算時間 / 全計算時間)

$N$  : 並列スレッド数

二つ目に、オリジナルコードからのスピードアップ係数  $S$  を次式のように定義した。

$$S = \frac{T_{ORIGINAL}}{T_{PARALLEL}} \quad (3.3-2)$$

ここで、

$T_{ORIGINAL}$  : オリジナルコードの計算時間

$T_{PARALLEL}$  : 並列処理化後のコードの計算時間

$S$  は実質的なスピードアップを表している。ただし、純粋な並列化効率を把握するための指標としては、並列処理化のためにオリジナルコードから書き変えた効果を含んでいるために、適切ではない。したがって、三つ目に、次式で定義するスピードアップ係数  $S'$  を定義し、これを  $S_{IDEAL}$  と比較することで並列処理化による計算速度への純粋な効果を把握する。

$$S' = \frac{T_{PARALLEL,1}}{T_{PARALLEL}} \quad (3.3-3)$$

ここで、

$T_{PARALLEL,1}$  : 並列処理化のために書き変えたコードを用いた 1 スレッド使用時の計算時間

$S'$  が  $S_{IDEAL}$  に近いほど効率良く計算速度が向上していることになる。

3.3.2 項で述べたように、径方向メッシュ分割が六角メッシュの場合と三角メッシュの場合では、初期拡散計算の計算方法が異なる。また、非等方ストリーミングの取り扱いの有無も考慮し、Table 3.3-1 (Main evaluation) に示す解析条件 (計 4 ケース) で検討することにした。ここでは、より精緻な解析を想定して、エネルギー群数を 70 群としている。

## (2) 検討結果

まず、固有値の計算結果については、並列処理化前後でほぼ同じ結果が得られており、並列処理化コードがオリジナルのコードと同等の計算が実施できていることを確認した。固有値の計算結果が並列処理化前後で完全に一致しなかった理由として次のことが挙げられる。すなわち、輸送計算の並列処理化では、反復計算の順序は変わらないので、基本的に計算結果に差は生じない。しかしながら、初期拡散計算では、空間メッシュの並列処理化に伴い反復計算の順序が変わるので、計算結果に若干の差が生じ、それが輸送計算の結果に伝搬したことが主要因であると考えられる。それ以外に、演算の順序が変わることにより生じる情報落ち (絶対値が大きく異なる数を足したり引いたりすることで、小さい方の情報が無視されてしまう現象) によるわずかな差が生じる可能性も考えられる。

次に、各ケースのスピードアップについて Fig. 3.3-5~8 に示す。各ケースに共通して、10 及び 11 スレッドでのスピードアップ係数が、9 スレッドの場合から増えていないことが分かる。同様の傾向は、5、7、8、13~16 スレッドでも見られる。

この原因については、以下のように考えられる。Fig. 3.3-1 に示されているように、最も

計算時間分担の大きいサブルーチンは、輸送計算における空間スweepを行う **FDSWEP** あるいは **FDHEXSWEP** である。したがって、これらのサブルーチンにおける並列処理化効率が、計算速度に大きく影響する。これらのサブルーチンでは、角度分点に関して並列処理化を行うため、総角度分点数 (= ドデカント数 × 角度分点数) の約数でない並列スレッド数では各スレッドへ均等にジョブが割り当てられず、並列処理化効率が向上しない。**S<sub>4</sub>** の場合、総角度分点数が 36 であるため、36 の約数でない 5、7、8、10、11、13~16 スレッドでは、4、6、9、12 スレッドの場合に対してスピードアップ係数が増えない結果となった。

また、いずれの解析ケースでも、36 の約数である並列スレッド数にのみ着目すると、**S'** は **S<sub>IDEAL</sub>** の 80% 以上となった。したがって、今回の並列処理化により、十分な計算速度の向上を図ることができていることが分かる。更に、今回の並列処理化により、オリジナルコードに対して、12 並列スレッドにより最大 5 倍程度の速度で計算することが可能になった。

なお、3.3.2 項で示した③の工夫を行った場合には、更に、15% 程度のスピードアップが可能となることが分かったが、前述の通りコードのメンテナンス性確保の観点から、参考評価の位置づけである。

### 3.4 MINISTRI への諸機能の追加

**MINISTRI** の汎用性を高めるために、以下に示す機能の追加を行った。具体的な適用方法や詳細は付録 A の入力マニュアルを参照されたい。

#### (1) MINIHEX ソルバーの組込み

六角格子当たり径方向 1 メッシュ計算機能を追加した。なお、**MINIHEX** コードとしての整備は今後、行わないこととする。

#### (2) 三角メッシュ毎領域指定機能の追加

六角格子毎であったが、六角格子毎のマップに負の領域を指定し、対応する格子内マップ (**Intra-lattice map**) に三角メッシュ毎に領域指定を行う機能を追加した。付録 A に示す入力マニュアルの **Card 13** における変数 **MAP** に対して負の領域指定を行った場合に、**Card 13-1** を追加する。

#### (3) 黒体吸収体取り扱い機能の追加

**Black absorber** 取り扱い機能を追加した。付録 A に示す入力マニュアルの **Card 2** における変数 **MAPMX** よりも大きな値を同入力力の **Card 13** における変数 **MAP** に対して与えればよい。

#### (4) 倍精度・単精度切り替え効率化

インクルードファイル **precision.inc** に精度指定の **implicit double precision** 文があるが、

コメントアウトの有無により切り替えを可能とした。メインルーチンの倍精度の配列 LIMIT も修正する必要がある。

(5) 負の自群散乱断面積に関する補正

付録 A の入力マニュアルに示すように MINISTRI では、バランスを取るために自群散乱断面積を次式に従って修正する。

$$\Sigma_{s,g \rightarrow g} = \Sigma_{t,g} - \Sigma_{a,g} - \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g \rightarrow g'} . \quad (3.4-1)$$

ただし、輸送計算ではしばしばいわゆる多群輸送近似（全断面積の代わりに輸送断面積を用い、散乱を等方として取り扱うことにより散乱の 1 次の非等方性を考慮する方法）が用いられるため、実質的に(3.4-1)式は次式となる。

$$\Sigma_{s,g \rightarrow g} = \Sigma_{tr,g} - \Sigma_{a,g} - \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g \rightarrow g'} . \quad (3.4-2)$$

当然ながら、全断面積よりも輸送断面積の方が小さいため、(3.4-2)式から求められる自群散乱断面積の方が、(3.4-1)式から求められるものよりも小さくなる。そして、エネルギー群を多くとると、自群散乱断面積が非常に小さくなるために、(3.4-2)式の補正を行うと、負の自群散乱断面積が発生しやすくなる。例えば、SLAROM-UF コードの断面積ライブラリである UFLIB の 70 群構造を使用した場合はほとんど発生しないが、UFLIB の 175 群構造や 900 群構造を用いると、負の自群散乱断面積がしばしば発生する。

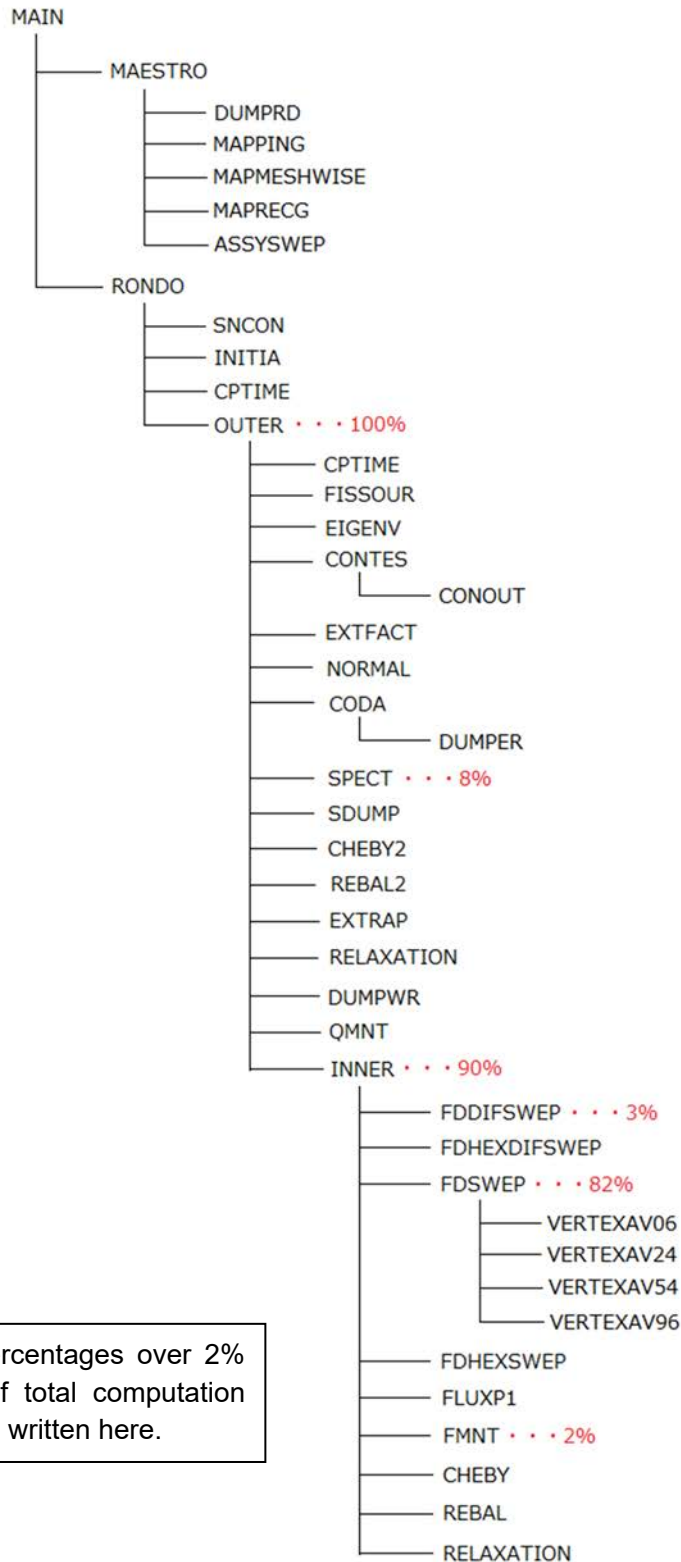
負の自群散乱断面積が存在すると、負の中性子束の発生につながり、収束性が悪化し、計算が収束しない場合が見られる。そこで、計算結果の信頼性は若干低下することになるが、負の自群散乱断面積をゼロにセットすると共に負の差分を当該エネルギー群から 1 個上のエネルギー群への散乱断面積に対して代わりに適用する手法を採用することとした。なお、負の差分の適用後にその散乱断面積が負となった場合には、当該の散乱断面積をゼロにセットして、更に、1 個上のエネルギー群への散乱断面積に対して負の差分を適用し、負の散乱断面積が発生しなくなるまで繰り返し負の差分を適用することとした。

この手法は、付録 A に示す入力の Card 6 内において新たに IOP7 を設けて、IOP7 をゼロ以外とした場合に行うこととした。この手法を適用した場合にはその旨を出力に表示するが、IOP7 をゼロに設定して当該手法を適用しないようにした場合でも、負の自群散乱断面積が検出された旨を出力に表示することとした。

報告者が適用した範囲では、175 群構造での計算の場合は特に問題は見られず、当手法を推奨できる。ただし、900 群構造での計算の場合には、異常な計算結果が現れることがあったので、当手法を推奨できない。900 群構造での計算が必要な場合には、自群散乱断面積を用いる必要のない拡散計算により、70 群や 175 群などのより少ない群数での計算に対する補正の形で評価することが適切であると考え。ここで、拡散計算コード CITATION と摂動計算コード PERKY では固定配列宣言が使用されているので、これらの計算コードを 900

群計算へ対応させることは容易ではない。そこで、MINISTRI の初期拡散計算機能を活用することにより、拡散計算コード D-MINISTRI を整備した。D-MINISTRI を用いれば、時間は非常に要するものの、900 群拡散計算が実行可能である。併せて、拡散摂動計算コード D-MINISTRI-PERT も整備した。詳細は付録 F に示されている。





Only percentages over 2% share of total computation time are written here.

Fig. 3.3-1 Subroutine structure diagram of MINISTR1 and share of the computation time on the preliminary survey for the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core

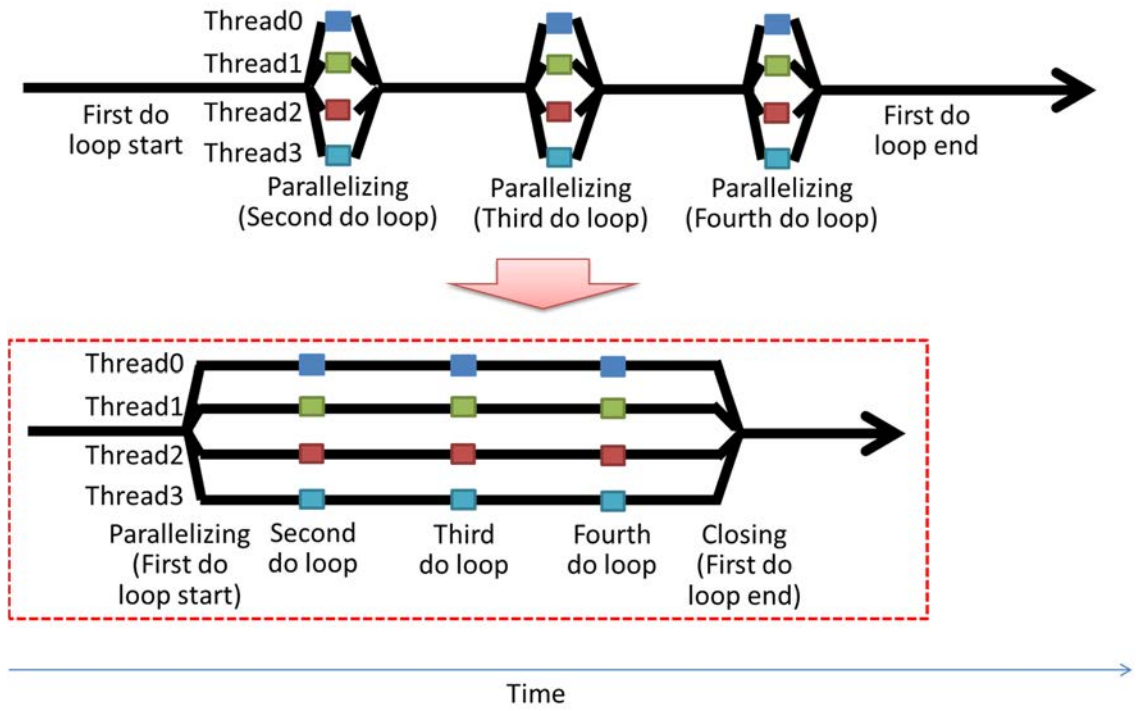


Fig. 3.3-2 Image of the parallelization on the preparation of threads in the outer-most do loop



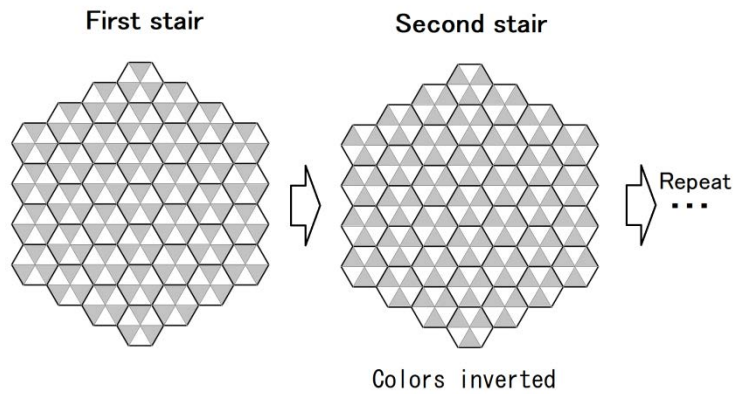


Fig. 3.3-3 Example of color ordering for the case of six divided hexagonal lattice (Two-color ordering)

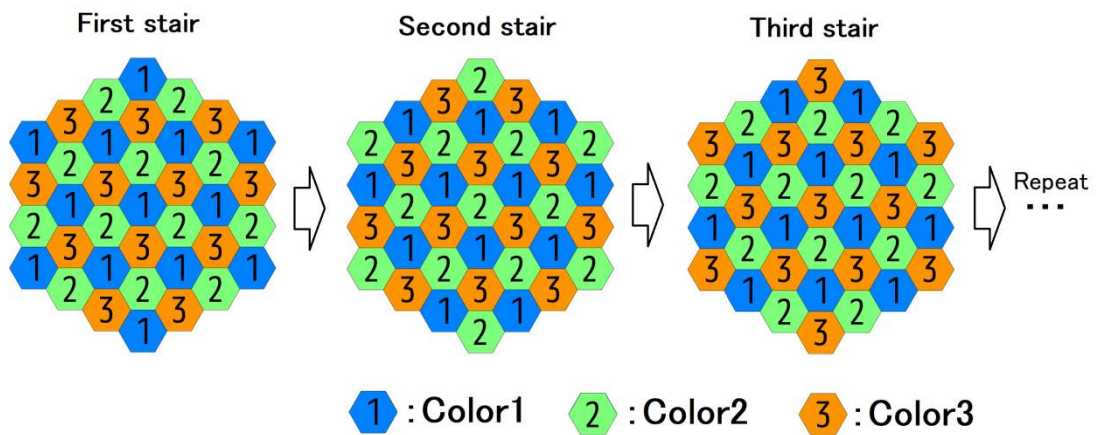


Fig. 3.3-4 Example of color ordering for the case of no divided hexagonal lattice (Three-color ordering)

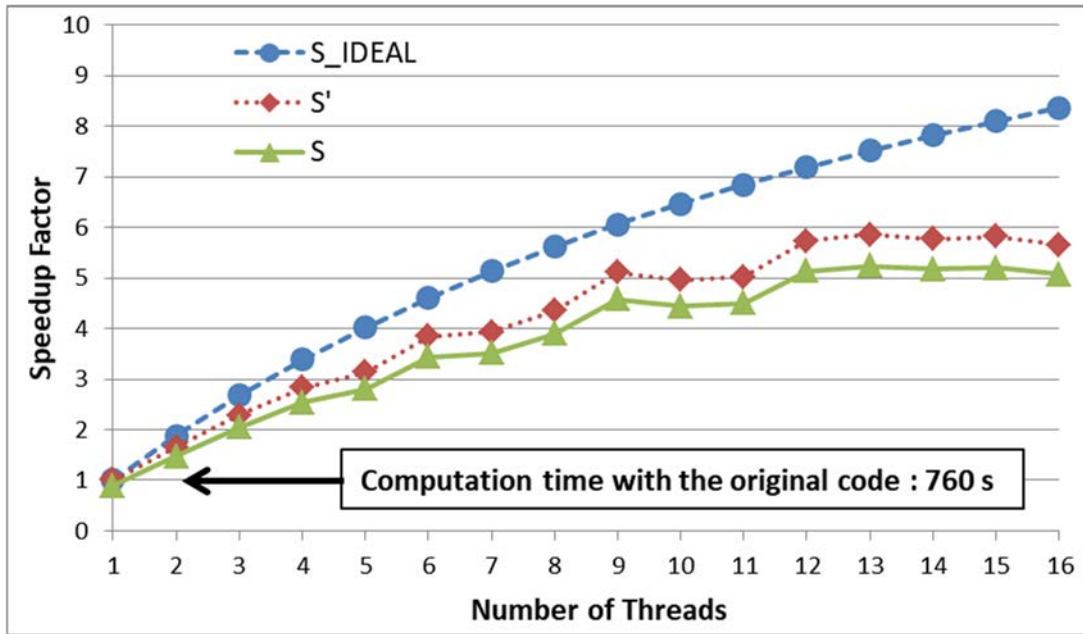


Fig. 3.3-5 Speedup factors for the hexagonal mesh and isotropic streaming case for calculations of the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core

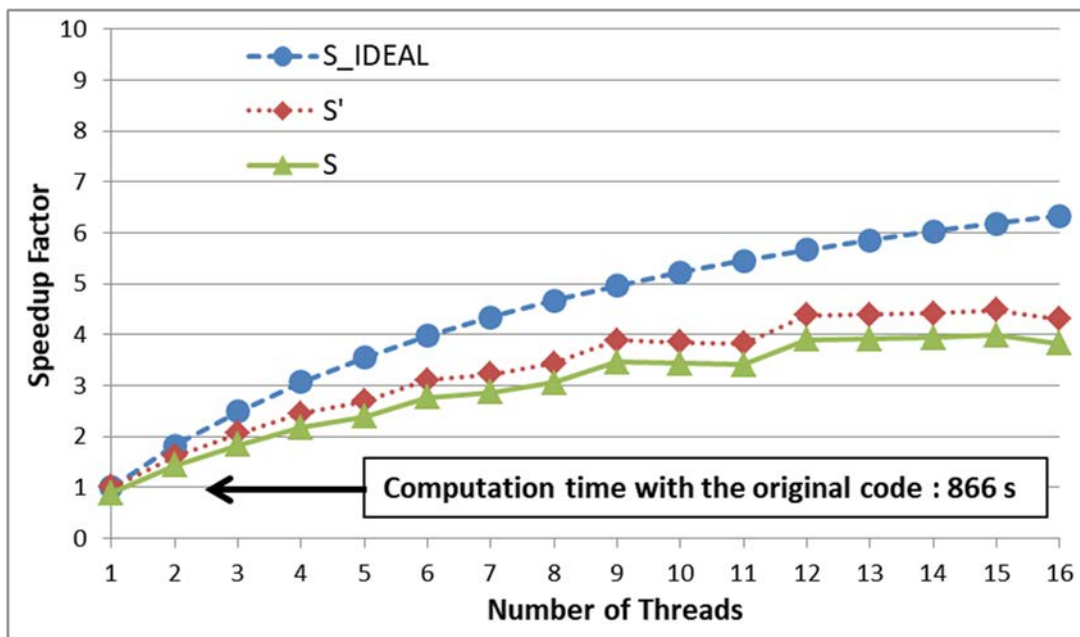


Fig. 3.3-6 Speedup factors for the hexagonal mesh and anisotropic streaming case for calculations of the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core

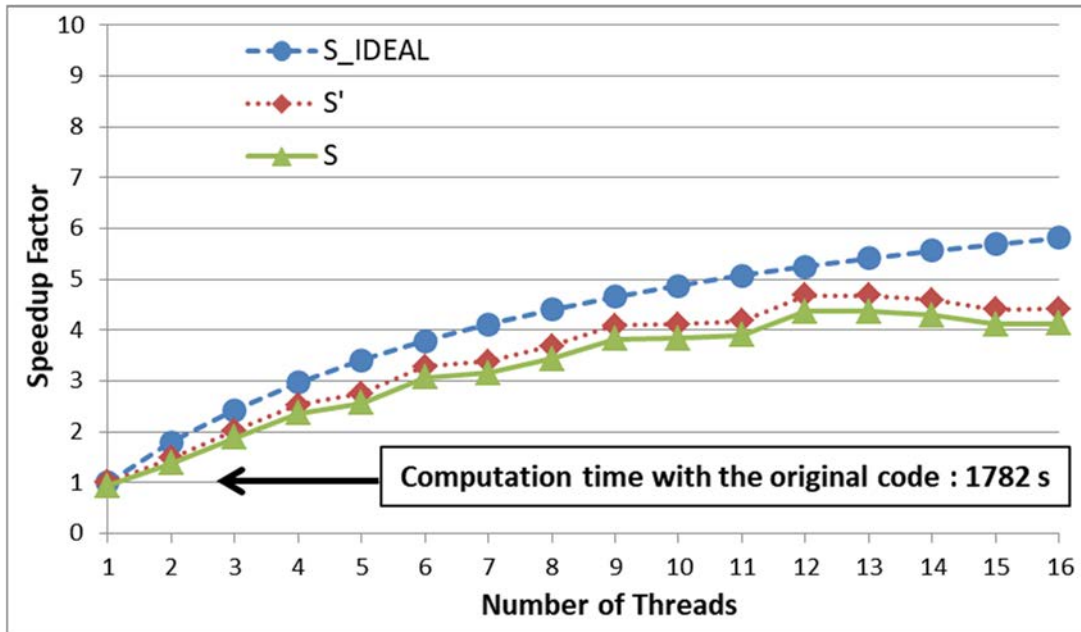


Fig. 3.3-7 Speedup factors for the 6 triangular mesh and isotropic streaming case for calculations of the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core

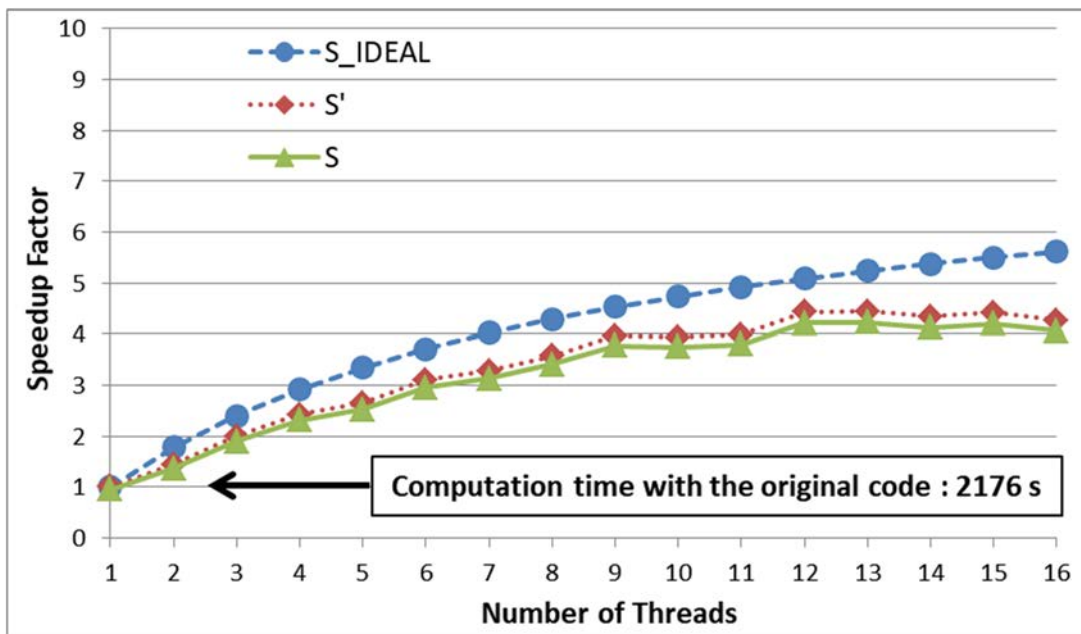


Fig. 3.3-8 Speedup factors for the 6 triangular mesh and anisotropic streaming case for calculations of the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core

Table 3.1-1 Results of eigenvalue by diffusion and transport calculations without and with anisotropic streaming treatment for the next generation fast reactor core with Na plenum

State	Diffusion (CITATION-FBR)			Transport (MINISTR)		
	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy
Reference	1.03721	1.03692	-0.00028	1.04060	1.04031	-0.00029
Core void	1.05692	1.05647	-0.00045	1.06070	1.06026	-0.00045
Plenum void	1.01792	1.01707	-0.00085	1.02356	1.02273	-0.00083
Both void	1.03403	1.03279	-0.00125	1.04055	1.03935	-0.00119

Table 3.1-2 Comparison in calculation time of transport calculations between the conventional isotropic streaming treatment and the anisotropic streaming treatment for the next generation fast reactor core with Na plenum

State	Iso-tropic	Aniso-tropic	Factor
Reference	1.59E+04	1.79E+04	1.12
Core void	1.67E+04	1.83E+04	1.10
Plenum void	1.83E+04	2.02E+04	1.10
Both void	1.81E+04	2.19E+04	1.21
Reference (Adjoint)	2.20E+04	2.67E+04	1.21

Unit: s

Table 3.1-3 Results of eigenvalue by diffusion and transport calculations without and with anisotropic streaming treatment for the BFS-73-1 core

State	Diffusion (CITATION-FBR)			Transport (MINISTR)		
	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy
Reference	0.98669	0.98672	+0.00003	0.99187	0.99207	+0.00020
U-235	0.98671	0.98675	+0.00003	0.99189	0.99209	+0.00020
U-natural	0.98669	0.98672	+0.00003	0.99186	0.99206	+0.00020
Enriched-B (1)	0.98668	0.98671	+0.00003	0.99186	0.99206	+0.00020
Enriched-B (2)	0.98663	0.98666	+0.00003	0.99180	0.99201	+0.00020
Carbon	0.98670	0.98673	+0.00003	0.99187	0.99207	+0.00020
Sodium	0.98669	0.98672	+0.00003	0.99187	0.99207	+0.00020
Pu-239	0.98676	0.98679	+0.00003	0.99193	0.99214	+0.00021
Pu-240 (1)	0.98670	0.98673	+0.00003	0.99187	0.99208	+0.00020
Pu-240 (2)	0.98672	0.98675	+0.00003	0.99190	0.99210	+0.00020
Pu-241	0.98671	0.98674	+0.00003	0.99188	0.99209	+0.00020
Np-237	0.98669	0.98672	+0.00003	0.99186	0.99207	+0.00020
Am-241	0.98669	0.98672	+0.00003	0.99186	0.99207	+0.00020
Polyethylene (1)	0.98672	0.98675	+0.00003	0.99190	0.99210	+0.00020
Polyethylene (2)	0.98675	0.98678	+0.00003	0.99192	0.99212	+0.00020
Polyethylene (3)	0.98677	0.98680	+0.00003	0.99194	0.99215	+0.00020

Table 3.1-4 Comparison in calculation time of transport calculations between the conventional isotropic streaming treatment and the anisotropic streaming treatment for the BFS-73-1 core

State	Iso-tropic	Aniso-tropic	Factor
Reference	4.16E+02	4.49E+02	1.08
U-235	4.14E+02	4.50E+02	1.09
U-natural	4.14E+02	4.51E+02	1.09
Enriched-B (1)	4.13E+02	4.47E+02	1.08
Enriched-B (2)	4.23E+02	4.48E+02	1.06
Carbon	4.02E+02	4.46E+02	1.11
Sodium	3.87E+02	4.48E+02	1.16
Pu-239	4.15E+02	4.48E+02	1.08
Pu-240 (1)	4.15E+02	4.49E+02	1.08
Pu-240 (2)	4.16E+02	4.48E+02	1.08
Pu-241	4.14E+02	4.48E+02	1.08
Np-237	4.13E+02	4.49E+02	1.09
Am-241	4.17E+02	4.42E+02	1.06
Polyethylene (1)	4.16E+02	4.55E+02	1.09
Polyethylene (2)	4.25E+02	4.48E+02	1.05
Polyethylene (3)	4.19E+02	4.53E+02	1.08
Reference (Adjoint)	4.40E+02	4.76E+02	1.08

Unit: s

Table 3.2-1 Absolute difference of the perturbation calculations to the direct calculations for the next generation fast reactor core with Na plenum

Void pattern	Diffusion		Transport	
	Iso-tropic	Aniso-tropic	Iso-tropic	Aniso-tropic
Core	+0.00	+0.00	+0.00	+0.00
Plenum	+0.00	-0.00	-0.01	-0.01
Both	+0.00	+0.00	-0.00	-0.01

Unit: % $\Delta k/k'$

Table 3.2-2 Comparison in non-leakage term of the perturbation calculations between diffusion and transport calculations for the next generation fast reactor core with Na plenum

Void pattern	Diffusion (CITATION-FBR)			Transport (MINISTR)		
	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy
Core	2.48	2.48	-0.00	2.49	2.49	-0.00
Plenum	0.21	0.21	-0.00	0.20	0.20	-0.00
Both	2.74	2.73	-0.00	2.74	2.74	-0.00

Unit: % $\Delta k/kk'$

Table 3.2-3 Comparison in leakage term of the perturbation calculations between diffusion and transport calculations for the next generation fast reactor core with Na plenum

Void pattern	Diffusion (CITATION-FBR)			Transport (MINISTR)		
	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy
Core	-0.68	-0.69	-0.01	-0.66	-0.68	-0.02
Plenum	-2.04	-2.09	-0.05	-1.81	-1.86	-0.05
Both	-3.03	-3.12	-0.09	-2.75	-2.83	-0.08

Unit: % $\Delta k/kk'$

Table 3.2-4 Comparison in total reactivity of the perturbation calculations between diffusion and transport calculations for the next generation fast reactor core with Na plenum

Void pattern	Diffusion (CITATION-FBR)			Transport (MINISTR)		
	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy
Core	1.80	1.78	-0.01	1.82	1.81	-0.02
Plenum	-1.83	-1.88	-0.06	-1.60	-1.65	-0.05
Both	-0.30	-0.39	-0.09	0.00	-0.09	-0.09

Unit: % $\Delta k/kk'$

Table 3.2-5 Absolute difference of the perturbation calculations to the direct calculations for the BFS-73-1 core

Sample	Diffusion		Transport	
	Iso-tropic	Aniso-tropic	Iso-tropic	Aniso-tropic
U-235	+0.03	-0.00	-0.02	-0.01
U-natural	+0.00	+0.00	-0.00	+0.04
Enriched-B (1)	-0.00	-0.00	-0.00	+0.01
Enriched-B (2)	-0.01	-0.01	-0.03	+0.02
Carbon	+0.00	+0.01	+0.05	+0.04
Sodium	+0.00	+0.01	+0.02	+0.05
Pu-239	-0.00	-0.00	+0.60	+0.22
Pu-240 (1)	-0.00	-0.00	-0.00	+0.01
Pu-240 (2)	+0.00	+0.01	+0.01	+0.01
Pu-241	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02
Np-237	-0.01	-0.01	+0.01	+0.02
Am-241	-0.01	-0.01	-0.00	+0.01
Polyethylene (1)	+0.01	+0.02	-0.00	+0.03
Polyethylene (2)	+0.01	+0.00	+0.03	+0.00
Polyethylene (3)	+0.01	+0.01	+0.06	+0.01

Unit: pcm



Table 3.2-6 Comparison in non-leakage term of the perturbation calculations between diffusion and transport calculations for the BFS-73-1 core

Sample	Diffusion (CITATION-FBR)			Transport (MINISTRI)		
	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy
U-235	2.24	2.24	-0.00	2.28	2.28	+0.00
U-natural	-0.71	-0.71	+0.00	-0.73	-0.74	-0.00
Enriched-B (1)	-1.10	-1.10	+0.00	-1.13	-1.13	-0.00
Enriched-B (2)	-6.44	-6.44	+0.00	-6.63	-6.64	-0.01
Carbon	0.37	0.37	+0.00	0.34	0.34	+0.00
Sodium	0.00	0.00	+0.00	-0.01	-0.01	+0.00
Pu-239	6.80	6.80	-0.00	6.93	6.93	+0.01
Pu-240 (1)	0.78	0.78	-0.00	0.79	0.79	+0.00
Pu-240 (2)	3.13	3.13	-0.00	3.15	3.16	+0.00
Pu-241	1.53	1.53	-0.00	1.55	1.55	+0.00
Np-237	-0.15	-0.15	-0.00	-0.18	-0.19	-0.00
Am-241	-0.18	-0.18	-0.00	-0.20	-0.21	-0.00
Polyethylene (1)	3.06	3.06	+0.00	3.00	3.00	-0.00
Polyethylene (2)	5.47	5.47	-0.00	5.35	5.35	-0.00
Polyethylene (3)	8.23	8.23	-0.00	8.03	8.03	-0.00

Unit: pcm ( $10^{-5}\Delta k/k'$ )

Table 3.2-7 Comparison in leakage term of the perturbation calculations between diffusion and transport calculations for the BFS-73-1 core

Sample	Diffusion (CITATION-FBR)			Transport (MINISTRI)		
	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy
U-235	0.02	0.02	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
U-natural	0.11	0.12	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
Enriched-B (1)	0.01	0.01	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
Enriched-B (2)	0.04	0.04	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
Carbon	0.21	0.22	+0.01	-0.00	-0.00	+0.00
Sodium	0.15	0.16	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
Pu-239	0.04	0.04	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
Pu-240 (1)	0.02	0.02	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
Pu-240 (2)	0.06	0.06	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
Pu-241	0.01	0.01	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
Np-237	0.03	0.03	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
Am-241	0.01	0.01	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
Polyethylene (1)	0.07	0.07	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
Polyethylene (2)	0.11	0.11	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00
Polyethylene (3)	0.14	0.14	+0.00	-0.00	-0.00	+0.00

Unit: pcm ( $10^{-5}\Delta k/k'$ )

Table 3.2-8 Comparison in total reactivity of the perturbation calculations between diffusion and transport calculations for the BFS-73-1 core

Sample	Diffusion (CITATION-FBR)			Transport (MINISTRI)		
	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy	Iso-tropic	Aniso-tropic	Aniso-tropy
U-235	2.27	2.27	+0.00	2.28	2.28	+0.00
U-natural	-0.59	-0.59	+0.00	-0.73	-0.74	-0.00
Enriched-B (1)	-1.09	-1.09	+0.00	-1.13	-1.13	-0.00
Enriched-B (2)	-6.40	-6.39	+0.00	-6.63	-6.64	-0.01
Carbon	0.59	0.59	+0.01	0.33	0.33	+0.00
Sodium	0.15	0.15	+0.00	-0.01	-0.01	+0.00
Pu-239	6.84	6.84	+0.00	6.93	6.93	+0.01
Pu-240 (1)	0.80	0.80	+0.00	0.79	0.79	+0.00
Pu-240 (2)	3.19	3.19	+0.00	3.15	3.16	+0.00
Pu-241	1.54	1.54	+0.00	1.55	1.55	+0.00
Np-237	-0.12	-0.12	+0.00	-0.18	-0.19	-0.00
Am-241	-0.17	-0.17	+0.00	-0.20	-0.21	-0.00
Polyethylene (1)	3.13	3.13	+0.00	3.00	2.99	-0.00
Polyethylene (2)	5.58	5.58	+0.00	5.35	5.35	-0.00
Polyethylene (3)	8.37	8.37	+0.00	8.03	8.03	-0.00

Unit: pcm ( $10^{-5}\Delta k/k'$ )

Table 3.3-1 Calculation conditions of the investigation on the parallelization for the 750MWe sodium-cooled next generation fast reactor core

Item		Preliminary survey	Main evaluation (hexagonal mesh)	Main evaluation (triangular mesh)
Neutron energy groups		7	70	70
Angular quadrature set		S <sub>4</sub> (total: 36 directions)	←	←
Neutron streaming		Isotropic	Isotropic / Anisotropic	Isotropic / Anisotropic
Radial meshes per subassembly		6 triangular meshes	1 hexagonal mesh	6 triangular meshes
Accele- ration (Inner)	Diffusion calculation	SOR	Chebyshev	SOR
	Transport calculation	Coarse mesh rebalance	Chebyshev	Coarse mesh rebalance
Accele- ration (Outer)	Diffusion calculation	SOR and Flux extrapolation	Chebyshev	SOR and Flux extrapolation
	Transport calculation	Coarse mesh rebalance	Chebyshev	Coarse mesh rebalance
Convergence diagnostic		Fission source	←	←
Convergence criteria (Inner / Outer / Eigenvalue)		1.0×10 <sup>-5</sup> / 1.0×10 <sup>-5</sup> / 1.0×10 <sup>-6</sup>	←	←

#### 4. 結言

実機高速炉炉心の中性子輸送計算を高精度で行うことが可能な決定論的手法に基づく 3 次元六角体系用三角メッシュ有限差分法輸送計算コード **MINISTR**I コードを改良した。

収束性の改善策として、メッシュ頂点中性子束の平均化処理を行うことにより、負の中性子束の発生が抑制され、これまでの非収束性の問題はほぼ完全に解決された。

また、輸送計算に先立って拡散計算を実行し、得られた中性子束分布を輸送計算の初期推定として与えることにより、計算時間を半分以下に低減できることが分かった。

改良後の **MINISTR**I を対象に、決定論的手法計算と同じ断面積を用いたモンテカルロ法による計算結果を参照解として、改良後の **MINISTR**I の検証及び実用性評価を行った。検証では、中性子束の角度と空間分布に関する取り扱いを十分に詳細にした条件で、両コードを実機高速炉炉心に適用することにより行った。その結果、**MINISTR**I による結果は、いずれの炉心体系の固有値及び集合体毎出力分布についても目標精度として設定した固有値（実効増倍率）の 0.1%と集合体毎出力分布の 0.7%をそれぞれ満足することが分かった。

**MINISTR**I の機能拡張として、セル非均質性に起因する非等方ストリーミング効果を取り扱うための機能の導入や摂動計算ツールの整備を行った。

更に、並列処理化により、12 並列計算で約 5 倍にまで計算速度の向上を図ることができた。

また、六角格子内の三角メッシュ毎に断面積を与える機能と計算時間合理化のための黒体（完全吸収体）取り扱い機能を与え、汎用性と利便性の向上を図った。

当初の **MINISTR**I に対し、収束性の飛躍的向上が図られ、計算時間に関しては、初期拡散計算機能の適用と並列処理を合わせると、約 10 分の 1 への計算時間の短縮が図られたことになる。また、通常は拡散計算で取り扱うセル非等方ストリーミング効果の取り扱いが可能となり、摂動計算も可能となった。ロシアの **BFS** 臨界実験解析用に開発した **MINIHEX** コードの機能も統合し、コードメンテナンスの効率化を図った。

今後の、実機高速炉と **BFS** 体系の解析への適用に期待したい。

謝辞

高速炉・新型炉研究開発部門・大洗研究所・高速炉サイクル研究開発センター・高速炉解析評価技術開発部の丸山修平氏には、非等方中性子ストリーミング効果を取り入れた離散化輸送理論に基づく手法の **MINISTRI** への組み込みにおきまして、種々の助言を頂きました。また、株式会社 **NESI** の沼田一幸氏には、**MINISTRI** コードの並列処理化に関して多大な助言を頂きました。株式会社 **NESI** の菰田宏氏には、**MINISTRI** コードを実行させるための計算機環境の整備に大変尽力いただきました。更に、原子力科学研究部門・原子力科学研究所・原子力基礎工学研究センター・核工学・炉工学ディビジョンの秋江拓志氏には、草稿を閲覧して頂いた上で多数のコメントを賜りまして、報告書が大変分かりやすく仕上げることができました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 杉野 和輝, 3次元六角体系用中性子輸送計算コードの整備 –NSHEX、MINIHEX、MINISTR I コードの整備–, JAEA-Data/Code 2011-018, 2012, 125p.
- 2) Manturov, G., Kochethov, A., et al., BFS-73-1 Assembly: Experimental Model of Sodium-cooled Fast Reactor with Core of Metal Uranium Fuel of 18.5% Enrichment and Depleted Uranium Dioxide Blanket, BFS1-LMFR-EXP-001, CRIT-SPEC-COEF-KIN-RRATE, NEA/NSC/DOE (2006)1.
- 3) Manturov, G., Kochethov, A., et al., BFS-62-3A Experiment: Fast Reactor Core with U and U-Pu Fuel of 17% Enrichment and Partial Stainless Steel Reflector, BFS2-LMFR-EXP-001, CRIT-SPEC-REAC-RRATE, NEA/NSC/DOE (2006)1.
- 4) 丸山 修平, 大木 繁夫, 非等方中性子ストリーミング効果を取り入れた離散化輸送理論の開発, 日本原子力学会 2018 年春の年会予稿集, 1F11.
- 5) Takeda, T. and Ikeda, H., 3-D Neutron Transport Benchmarks, NEACRP-L-330, 1991.
- 6) Nakashima, F., Kaise, Y., et al., Core Performance and Characteristics of the Prototype Fast Breeder Reactor MONJU, Proc. Inter. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles (FR'91), Kyoto, Japan, 1991, Vol.1, pp.8.2-1 - 9.
- 7) 高下 浩文, 樋口 真史, 他, 核設計手法報告書, JNC TN8410 2000-011, 2000, 185p.
- 8) Gourdon, J. and Mesnage B., An Overview of Superphenix Commissioning Tests, Nucl. Sci. Eng., 106, 1990, pp.1-10.
- 9) Hunter, S. N., Super-Phenix Benchmark Used for Comparison of PNC and CEA Calculation Methods, and of JENDL-3.2 and CARNAVAL IV Nuclear Data, PNC TN9410 98-015, 1998, 81p.
- 10) 杉野 和輝, 神 智之, 他, JENDL-4.0 に基づく高速炉用炉定数 UFLIB.J40 及び JFS-3-J4.0 の作成, JAEA-Data/Code 2011-017, 2012, 44p.
- 11) Hazama, T., Chiba, G., et al., Development of a Fine and Ultra-Fine Group Cell Calculation Code SLAROM-UF for Fast Reactor Analyses, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 43, No. 8, 2006, pp.908-918.
- 12) 羽様 平, 千葉 豪, 他, SLAROM-UF: 高速炉用超微細群格子計算コード (マニュアル), JNC TN9520 2004-001, 2004, 97p.
- 13) 杉野 和輝, 大木 繁夫, 次世代高速炉の核設計における解析手法の詳細化の検討(2) – 3次元六角-Z体系用輸送計算コードの適用性評価–, 日本原子力学会 2015 年春の年会予稿集, J32.
- 14) Nagaya, Y., Okumura, K., et al., MVP/GMVP II: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods, JAERI 1348, 2005, 388p.

- 15) 杉野 和輝, 石川 眞, 他, 核設計基本データベースの整備(XIV) –JENDL-4.0 に基づく高速炉核特性解析の総合評価–, JAEA-Research 2012-013, 2012, 411p.
- 16) 大久保 努, 大木 繁夫, 他, 高速増殖実証炉に向けた炉心概念検討 (1) 全体概要, 日本原子力学会 2010 年秋の大会予稿集, P30.
- 17) 小倉 理志, 森脇 裕之, 他, 高速増殖実証炉に向けた炉心概念検討 (2) 炉心設計, 日本原子力学会 2010 年秋の大会予稿集, P31.
- 18) 杉野 和輝, 大木 繁夫, Na プレナム付高速炉炉心の Na ボイド反応度解析手法の検討, 日本原子力学会 2017 年秋の大会予稿集, 2M22.
- 19) Fowler, T. B., Vondy, D. R., et al., Nuclear Reactor Core Analysis code: CITATION, ORNL-TM-2496, Rev. 2, 1971.
- 20) 石川 眞, 斎藤 正幸, 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, 314p.
- 21) 佐々木 誠, 市川 真一, 「常陽」輸送コードシステムの作成 Sn 輸送コード・使用マニュアル, PNC TN952 81-08, 1981, 109p.
- 22) 飯島 進, 吉田 弘幸, 他, 高速炉設計用計算プログラム・2 (2次元・3次元拡散摂動理論計算コード: PERKY) , JAERI-M 6993, 1977, 51p.
- 23) 片桐孝洋, 「並列プログラミング入門」第 2 講並列処理と MPI の基礎, 2015, <https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/events/lectures/X01/shiryoku-2.pdf> (参照: 2019 年 9 月 19 日) .



## 付録 A MINISTRI の実行方法及び入力マニュアル

## (1) 概要

MINISTRI は、一般の実機高速炉解析を想定して作成された Tri-Z 体系または Hex-Z 体系用有限差分  $S_N$  輸送計算コードである。

取り扱い可能な境界条件を角度中性子束の計算機容量を合理化するために真空条件のみとしているために、全炉心体系のみ計算可能である。

また、入力に関しては、輸送ノード法計算コード NSHEX のものを基本としており、ある程度の互換性も確保するために境界条件に関する入力はダミーで残している。それ以外に従来の版から第 2、3 章で示した改良に関わる入力を追加している。

## (2) 実行方法

基本的にサンプルのシェルスクリプトと `readme.txt` を参照のこと。以下、補足情報を示す。

## a) MINISTRI コードの入出力ファイル番号

# 1 : リスタートファイル	(READ)
# 2 : リスタートファイル	(WRITE)
# 6 : 計算の経過表示	(WRITE)
# 7 : 領域平均中性子束	(WRITE)
# 8 : インプット	(READ)
# 9 : アウトプット	(WRITE)
#12 : 規格化後の中性子束等の出力	(WRITE)
#14 : 規格化前の角度中性子束等の出力	(WRITE)
#31 : 収束状況 (中性子束、固有値) の出力	(WRITE)

ポスト処理関連としては、#12 は出力分布評価や燃焼計算等に関連する情報を、#14 は摂動計算に関連する情報を出力するものである。

## b) Variable Dimension の取り扱い

MINISTRI では、計算機容量節約の観点から全配列データは Variable Dimension(以下、VD)により取り扱われており、VD の大きさはメインルーチンのパラメータ文で次のように指定されている。

```
PARAMETER (LIMIT=#####, LIMIT2=#####)
```

LIMITが全実数配列の大きさを、LIMIT2が全整数配列の大きさをそれぞれ示している。そして、コードを実行するとタイトルの直後に必要なVDの大きさが表示されるが、それらの大きさがLIMITまたはLIMIT2を上回ると実行が中断される。その際、ソース中の上記のパラメータ文を直接編集して設定し直す必要がある。ただし、あまり大きな数字を与えると、計算機の許容最大容量を越えるおそれがあるので、注意が必要である。

c) 単精度と倍精度計算の切り替え

インクルードファイルprecision.incのIMPLICIT文をコメントアウトした場合は単精度計算、コメントアウトしない場合は倍精度計算となる。それぞれの計算に応じて、b)で示した変数LIMITを調整する。

d) 非等方拡散係数を出力させるためのJOINTの改良部分

従来の非等方性を取り扱わない場合の計算に影響を与えないように、核分裂スペクトルの次に非等方拡散係数を出力させるように、JOINTの3つのサブルーチンNSHEX、NSHEXX、NSHMACを修正する。

なお、非等方拡散係数を追加で出力するように改良を行った際、散乱マトリックスの処理の不具合が見つかり、非等方拡散係数の配列の破壊につながったため、サブルーチンNSHEX中で定義されている変数L37を増加させた。なお、この不具合は核分裂スペクトルの処理には影響がないので、従来の計算では問題は見られなかった。

修正内容をFig. A-1～3に示す。

(3) 入力マニュアル

MINISTRIの入力マニュアルを付録Aの巻末に示す。

```

(Omitting halfway)
57      L31 = LAST1
58      L32 = L31+NG*NR
59      L33 = L32+NG*NR
60      L34 = L33+NG*NR
61      L35 = L34+NG*NR
62      L36 = L35+NG*NR
63 C Mod by SUGINO 2018/04/18 Start
64      L37 = L36+NG*NG*(NR+1)
65      L38 = L37+NG*NR
66      L39 = L38+NG*NR
67      LAST2 = L39+NG
68 C Mod by SUGINO 2018/04/18 End
69      IF (LAST2-1.GT.LIMIT) GO TO 7300
(Omitting halfway)
77      CALL NSHEXX (A(L1), A(L2), A(L3), A(L4), A(L5), A(L6),
78 C          XABS XNUFIS DAV DPARA DPERP XTR
79 C
80      1          A(L7), A(L8), A(L9), A(L10), A(L11), A(L12),
81 C          XTOT XFIS XSCT XIN XN2N XSCTGJ
82 C
83      2          A(L13), A(L28), A(L29),
84 C          XGPLGJ BSQ WORK
85 C
86      3          A(L31), A(L32), A(L33), A(L34), A(L35), A(L36),
87 C          TOTAL ABSOP SIGNUF TRANS TN2N SCATKJ
88 C
89 C Mod by SUGINO 2018/04/18 Start
90      4          A(L37), A(L38), A(L39), IRETC)
91 C          XPARA XPERP XKAI
92 C Mod by SUGINO 2018/04/18 End
(Omitting below)

```

Fig. A-1 Modification of the subroutine NSHEX in the JOINT code

Remark: Underlined means additional parts

```

1      SUBROUTINE NSHEXX (XABS, XNUFIS, DAV, DPARA, DPERP, XTR, XTOT, XFIS, XSCT,
2      1      XIN, XN2N, XSCTGJ, XCPLGJ, BSQ, WORK,
3 C Mod by SUGINO 2018/04/18 Start
4      2      TOTAL, ABSOP, SNUFIS, TRANS, FIS, SCATKJ,
5      3      XPARA, XPERP, XKAI, IRETC)
6 C Mod by SUGINO 2018/04/18 End
7 C
(Omitting halfway)
60     DIMENSION TOTAL (NG, NR) , ABSOP (NG, NR) , SNUFIS (NG, NR) , TRANS (NG, NR)
61 C Mod by SUGINO 2018/04/18 Start
62     DIMENSION FIS (NG, NR) , SCATKJ (NG, NG, NR) ,
63     1      XPARA (NG, NR) , XPERP (NG, NR) , XKAI (NG)
64 C Mod by SUGINO 2018/04/18 End
65 C
(Omitting halfway)
78     CALL NSHMAC (XABS, XNUFIS, DAV, DPARA, DPERP, XTR, XTOT, XFIS, XSCT, XIN,
79     1      XN2N, XSCTGJ, XCPLGJ, BSQ, WORK,
80     2      TOTAL (1, NMAT) , ABSOP (1, NMAT) , SNUFIS (1, NMAT) ,
81     3      TRANS (1, NMAT) , FIS (1, NMAT) ,
82 C Mod by SUGINO 2018/04/18 Start
83     4      SCATKJ (1, 1, NMAT) , XPARA (1, NMAT) , XPERP (1, NMAT) , IRETC)
84 C Mod by SUGINO 2018/04/18 End
85 C
(Omitting halfway)
103 1300 CONTINUE
104 C Mod by SUGINO 2018/04/18 Start
105     CALL MATRIX (XPARA, NG, NR, NG, NR, ' XPARA ', NDBG)
106     CALL MATRIX (XPERP, NG, NR, NG, NR, ' XPARA ', NDBG)
107 C Mod by SUGINO 2018/04/18 End
108 C
(Omitting halfway)
138 C Mod by SUGINO 2018/04/18 start
139 C WRITE PARARELL DIFFUSION COEFFICIENT
140 C
141     DO M=1, NR
142     WRITE (NF8, 4100) (XPARA (N, M) , XPERP (N, M) , N=1, NG)
143     ENDDO
144 C Mod by SUGINO 2018/04/18 End
145     GO TO 9999
(Omitting below)

```

Fig. A-2 Modification of the subroutine NSHEXS in the JOINT code

Remark: Underlined means additional parts

```

1      SUBROUTINE NSHMAC (XABS, XNUFIS, DAV, DPARA, DPERP, XTR, XTOT, XFIS, XSCT,
2      1          XIN, XN2N, SCATGJ, SCPLGJ, BSQ, WORK, TOTAL, ABSOP, SIGNUF,
3 C Mod by SUGINO 2018/04/18 Start
4      2          TRANS, FIS, SCATKJ, XPARA, XPERP, IRETC)
5 C Mod by SUGINO 2018/04/18 End
(Omitting halfway)
59     DIMENSION SCATKJ(NG, NG)
60 C Mod by SUGINO 2018/04/18 Start
61     DIMENSION XPARA(NG), XPERP(NG)
62 C Mod by SUGINO 2018/04/18 End
63 C --- 87/01/08 --- ADDED BY. T. MITSUNARI
(Omitting halfway)
195 cend -----
196 C Mod by SUGINO 2018/04/18 Start
197     XPARA(I) = DPARA(I)
198     XPERP(I) = DPERP(I)
199 C Mod by SUGINO 2018/04/18 End
200 1080 CONTINUE
(Omitting below)

```

Fig. A-3 Modification of the subroutine NSHMAC in the JOINT code

Remark: Underlined means additional parts

MINISTRI 入力マニュアル

(Ver.7.0)

<JOINT を用いる場合のみ Card 0 は必要>

Card 0-1: NSHEX (A5)

NSHEX: 制御文字 (そのまま"NSHEX"と入力)

Card 0-2: INCORE,SLAROM (A6, 4X, A6)

INCORE: 代表的な断面積 PDS ファイルメンバー名を指定  
(PDS ファイルの FORMAT 指定)

SLAROM: 断面積作成コード名 (そのまま"SLAROM"と入力)

Card 0-3: ITOT (I5)

ITOT:  $\Sigma_t$  のオプション

1, 2 . . .  $\Sigma_t = \Sigma_{transport}$

0 . . . .  $\Sigma_t = \Sigma_{total}$

-1 . . . .  $\Sigma_t = 1/3 Dav$

-2 . . . .  $\Sigma_t = 1/3 D_{\perp}$

-3 . . . .  $\Sigma_t = 1/3 D_{//}$

-4 . . . .  $\Sigma_t = 2/3 (D_{//} + D_{\perp})$

-5 . . . .  $\Sigma_t = 1/(2D_{//} + D_{\perp})$

-6 . . . .  $\Sigma_t = 1/(D_{//} + 2D_{\perp})$

※JOINT 関係の入力は NSHEX と共通なので、コード名は NSHEX で良い。

※自群散乱断面積はコード上で次式により再定義される。

$$\Sigma_{s,g \rightarrow g} = \Sigma_{t,g} - \Sigma_{a,g} - \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g \rightarrow g'}$$

Card 1: ISTART (I12)

ISTART: 計算オプション

0 . . . . リスタート (ファイル#1 が必要)

1 . . . . 新規計算

Card 2: NLAY, NGMX, MAPMX, NSN (4I12)

NLAY: 径方向メッシュ数 (炉心層数)

NGMX: エネルギー群数

MAPMX: 領域 (マテリアル) 数

NSN:  $S_n$  次数 (2~16 の偶数)

Card 3: IDUMP, IBR, NTMX, IVERTX (4I12)

IDUMP: 中性子束と角度中性子束をダンプする。

(#12 と #14 の書式は Fig. A-4 を参照のこと。)

0 . . . . YES (規格化後の中性子束のみ #12 へ出力)

1 . . . . NO

2 . . . . YES

(規格化後の中性子束を #12 へ、規格化前の角度中性子束を #14 へ、それぞれ出力)

IBR: ダミー

NTMX: 六角格子当たり径方向メッシュ数 (1, 6, 24, 54, 96 のいずれか)

IVERTX: メッシュ頂点中性子束の平均処理 (通常 0)

0 . . . . . あり

0 以外 . . . . . なし

Card 4: KMX, KCM, IBT, IBB (4I12)

KMX: 軸方向全メッシュ数  
 KCM: 軸方向領域 (粗メッシュ) 数  
 IBT/IBB: ダミー/ダミー

Card 5: IOP1, IOP2, IANISOD, IRFLXP1 (4I12)

IOP1: 流出中性子束あるいは頂点中性子束が負となった場合の処理 (通常 2)  
 <0 . . . . . 処理を行わない。  
 0 . . . . . ゼロセットのみ  
 (負となった流出中性子束あるいは頂点中性子束をゼロにセットする。)  
 1 . . . . . ゼロセットと平均中性子束再計算  
 (負となった流出中性子束あるいは頂点中性子束をゼロにセットして平均中性子束を再計算する。)  
 2 . . . . . ゼロセットと平均中性子束及び非負中性子束再計算  
 (負となった流出中性子束あるいは頂点中性子束をゼロにセットして平均中性子束を再計算し、更に、負となっていなかった流出中性子束と負となった中性子流出面反対側の頂点中性子束を再計算する。)  
 5 . . . . . Step 近似を適用  
 (メッシュ平均中性子束をセットする。)  
 IOP2: 内側反復における加速法の適用の有無 (通常 2)  
 0 . . . . . なし  
 (初期中性子束推定用拡散計算は逐次緩和法 (SOR 法))  
 1 . . . . . あり (チェビシェフ加速法)  
 (初期中性子束推定用拡散計算も同様)  
 2 . . . . . あり (粗メッシュリバランス法)  
 (初期中性子束推定用拡散計算は SOR 法)  
 上記以外 . . . . . なし  
 (初期中性子束推定用拡散計算の加速法もなし)  
 IANISOD: 非等方ストリーミング効果取り扱いの考慮  
 0 . . . . . なし  
 1 . . . . . あり (径方向: 垂直方向拡散係数、軸方向: 平行方向拡散係数)  
 2 . . . . . あり (径方向: 平行方向拡散係数、軸方向: 垂直方向拡散係数)  
 上記以外 . . . . . 無効 (計算が中断)  
 IRFLXP1: 非等方ストリーミング効果取扱い時の P1 中性子束の外部記憶装置への保存オプション  
 0 . . . . . 不使用  
 1 . . . . . 使用 (エネルギー群毎に 1 記憶装置割当)  
 2 . . . . . 使用 (外側反復隔回毎に 1 記憶装置割当)

Card 6: IOP3, IOP4, IOP5, IOP6, Integer\*6 (下記参照), IOP7 (4I12, 6I3, I6)

IOP3: 外側反復における加速法の適用の有無 (通常 2)  
 0 . . . . . なし  
 (初期中性子束推定用拡散計算は SOR 法と中性子束外挿法の組合せ)  
 1 . . . . . あり (チェビシェフ加速法) ※IOP2 を 2 以外に設定  
 (初期中性子束推定用拡散計算も同様)  
 2 . . . . . あり (粗メッシュリバランス法) ※IOP2 を 1 以外に設定  
 (初期中性子束推定用拡散計算は SOR 法と中性子束外挿法の組合せ)  
 上記以外 . . . . . なし  
 (初期中性子束推定用拡散計算の加速法もなし)  
 ※70 群計算等のエネルギー群数が多い場合の随伴中性子束計算において、IOP2 に 2 を指定した場合、IOP3 に 2 を指定すると、計算が収束しない場合が多く見られる。従って、IOP2 に 2 を指定した場合は IOP3 に 0 を指定することが推奨される。

IOP4: 外側反復の収束判定に用いる物理量の指定

- 1 . . . . . 集合体平均核分裂中性子源
- 0 . . . . . 中性子束
- 1 . . . . . 核分裂中性子源
- 2 . . . . . 指定領域中性子束 (Card 12 で領域を指定)

IOP5: 計算モードの指定

- 0 . . . . . 中性子束計算
- 1 . . . . . 随伴中性子束計算
- 2 . . . . . 随伴中性子束計算 (固有値固定)

IOP6: ダミー

(1001 あるいは 1002 を与えた場合には、試行的に Card 13-1 における順番指定の変更を可能としている。Fig. A-5 を参照のこと。)

NSTA\_OUTACC: 外挿を開始する外側反復回数

MXODR\_OUTACC: 外挿対象モーメント次数

INOFF\_OUTACC: 高次モーメントへの外挿適用の停止オプション

(各群の前の内側反復回数が INOFF\_OUTACC 以下の場合、その群への外挿適用を停止する。)

IOP\_RECAL\_FISSEIGEN: 外挿後の中性子源及び固有値再計算オプション

- 0 . . . . . なし
- 1 . . . . . あり

IOP\_CHEB1: . . . . . 1 に設定

IOP\_CHEB2: . . . . . 1 に設定

IOP7: 負の自群散乱断面積の処理オプション

- 0 . . . . . なし
- 0 以外 . . . . . あり

(自群散乱断面積をゼロにセットし、自群散乱断面積の負の分を、負の断面積が生じないようにエネルギー群差の小さい下方散乱断面積から順次減じていく。詳細は 3.4(5)を参照のこと。)

Card 7: CONCR, CONCR2, CONCRI, CONCRE, FACT (4E12.5, F12.5)

CONCR: 外側反復中性子束収束条件 (通常 1.0E-4)

CONCR2: ダミー

CONCRI: 内側反復中性子束収束条件 (通常 CONCR と同じ)

CONCRE: 固有値 (実効増倍率) 収束条件 (通常 1.0E-5)

FACT: 規格化定数

- >0 . . . . .  $\nu \Sigma f \phi$  の空間・エネルギー合計値により規格化
- <0 . . . . .  $\Sigma f \phi$  の空間・エネルギー合計値により規格化

Card 8: ITINMX, ITOUTMX, TIMOUT, EIGEN, ACUT, CONDIF (2I12, 3F12.5, E12.5)

ITINMX: 最大内側反復回数

ITOUTMX: 最大外側反復回数

TIMOUT: 計算制限時間 [分]

EIGEN: 固有値 (実効増倍率) 初期値 (通常 1.0)

ACUT: ダミー

CONDIF: 初期拡散計算の中性子束収束条件

(初期中性子束分布推定用拡散計算の外側反復における中性子束収束条件であり、通常 1.0E-3 を適用。0.0 以下の場合には初期拡散計算なし。)

Card 9: (IHK(KC), KC=1, KCM) (24I3)

IHK(KC): 軸方向領域 KC の軸方向メッシュ数 (下部から上部への順)

Card 10: (ZC(KC), KC=1, KCM+1) (6E12.5)

ZC(KC): 軸方向領域境界の座標 [cm] (下部から上部への順)

(軸方向領域 KC は  $ZC(KC) \leq Z \leq ZC(KC+1)$  に存在することになる。)



Card 11: HP (E12.5)

HP: 径方向メッシュ間隔 (集合体配列ピッチ) [cm]

Card 12 (IMJ(MP), MP=1, MAPMX) (24I3) (IOP4=2 の場合のみ入力)

IMJ(MP): 領域 MP の収束判定フラグ

0 . . . . 判定対象

1 . . . . 判定非対象

Card 13: MAP(N, KC) (Free Format)

MAP(N, KC): 領域 (マテリアル、マップ) 番号

(軸方向領域 (PLANE) 毎に下部から上部への順に与え、それを KCM 回繰り返す。Fig. A-6, A-7 を参照のこと。)

1~MAPMX: 通常のマップ番号

0 または (MAPMX+1) 以上: 黒色吸収体

(0 あるいは MAPMX よりも大きい値を与えた場合には、その領域は黒色吸収体 (Black absorber) と認識される。)

<0: 符号反転後の格子内マップ番号

(負の値を与えることにより、格子内マップの入力である Card 13-1 を用いて当該格子を構成する各三角メッシュの領域番号を指定することが可能となる。負の値を与えた場合のその絶対値が六角格子単位の格子内マップの順番に相当する。)

※JOINT を用いる場合は 80 列以内で入力する必要がある。

Card 13-1: (MAPT(NT), NT=1, NTMX) (Free Format)

MAPT(NT): 格子内マップにおける領域番号

(六角格子単位で与える。Card 13 の MAP(N, KC)において、いずれか 1 つでも負の領域番号が与えられた場合に、それらの絶対値の最大値の回数だけ繰り返す。

Fig. A-8 に示すメッシュ番号順 (中心から反時計回りスパイラル状) に領域番号を指定する。Fig. A-5 も参照のこと。)

<JOINT を用いない場合>

Card 14: XABS(NG, NR), XFIS(NG, NR), XSGF(NG, NR), XTRA(NG, NR),

(XSCT(NG, NN, NR), NN=1, NGMX) (6E12.5)

XABS(NG, NR): 領域 NR、エネルギー群 NG の吸収断面積  $\Sigma_a$

XFIS(NG, NR): 領域 NR、エネルギー群 NG の生成断面積  $\nu \Sigma_f$

XSGF(NG, NR): 領域 NR、エネルギー群 NG の核分裂断面積  $\Sigma_f$

XTRA(NG, NR): 領域 NR、エネルギー群 NG の全断面積  $\Sigma_t$

XSCT(NG, NN, NR): 領域 NR、エネルギー群 NG → NN の散乱断面積  $\Sigma_s(\text{ng} \rightarrow \text{nn})$

(これを NGMX 回繰り返し、更に MAPMX 回繰り返す。)

※自群散乱断面積はコード内で次式により再定義される。

$$\Sigma_{s,g \rightarrow g} = \Sigma_{t,g} - \Sigma_{a,g} - \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g \rightarrow g'}$$

Card 15: (CHI(NG), NG=1, NGMX) (6E12.5)

CHI(NG): 核分裂スペクトル

(エネルギー群 NG への核分裂による中性子放出割合。コード内で合計が 1.0 になるように規格化される。)

・ IANISOD が 1 または 2 の場合のみ

Card 16: (ADCON(1,NG,NR), ADCON(2,NG,NR), NG=1, NGMX) (6E12.5)

ADCON(1,NG,NR): 垂直方向の拡散係数

ADCON(2,NG,NR): 平行方向の拡散係数

(これを MAPMX 回繰り返す。)

<JOINT を用いる場合>

*Card 14-1: XS@ (A4)*

*XS@: 制御文字 (そのまま"XS@"と入力)*

*Card 14-2: MEMBER1, SLAROM (A6, 4X, A6)*

*MEMBER1: 断面積 PDS ファイルのメンバー名*

*SLAROM: 断面積作成コード名 (そのまま"SLAROM"と入力)*

(*Card14-2* を MAPMX 回繰り返す。)

*Card 15: MEMBER2, SLAROM (A6, 4X, A6)*

*MEMBER2: 計算に用いる核分裂スペクトルを含む断面積 PDS ファイルのメンバー名 (核分裂スペクトルは 1 種類のみ指定可能)*

*SLAROM: 断面積作成コード名 (そのまま"SLAROM"と入力)*

・ IANISOD が 1 または 2 の場合のみ

<MINISTRI 用の非等方拡散係数読み込みに対応した JOINT を適用>

*Card 16: (入力不要)*

```

WRITE(I01) IDUMP, NLAY, NCHK, NTMX, KMX, NGMX, MAPMX, KCM, KCBM, IOP5
WRITE(I01) EIGEN, HP
WRITE(I01) (DELZ(KC), KC=1, KCM)
WRITE(I01) (IDK(K), K=1, KMX)
WRITE(I01) (IHK(KC), KC=1, KCM)
WRITE(I01) (ZC(KCB), KCB=1, KCBM)
DO 100 KC=1, KCM
WRITE(I01) ((MAPXS(NT, N, KC), NT=1, NTMX), N=1, NCHK)
100 CONTINUE
DO 110 NG=1, NGMX
DO 110 K=1, KMX
WRITE(I01) ((SCLFL(NT, N, K, NG), NT=1, NTMX), N=1, NCHK)
110 CONTINUE

```

Fluxes and materials (#12)

```

DO NG=1, NGMX (随伴中性子束計算の場合は"DO NG=NGMX, 1, -1")
WRITE(I03) (((((AGMNT(NT, N, K, M, IS), NT=1, NTMX), N=1, NCHK), K=1, KMX),
&           M=1, MM), IS=1, NDOD)
ENDDO
WRITE(I03) EIGEN, (XMU(M), M=1, MM), (UMU(M), M=1, MM),
&           (VMU(M), M=1, MM), (XCI(M), M=1, MM), (WGT(M), M=1, MM)
DO KC=1, KCM
WRITE(I03) ((MAPXS(NT, N, KC), NT=1, NTMX), N=1, NCHK)
ENDDO

```

Angular fluxes and materials (#14)

Fig. A-4 Output formatting of the flules (#12) and angular fluxes (#14)

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

When IOP6 set to other than 1001 and 1002

```

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

When IOP6 set to 1001

```

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

When IOP6 set to 1002

Fig. A-5 Ordering of the materials in intra-lattice map (Example when NTMX=24)

Remark: Numbers in these figure correspond to the mesh numbers in Fig. A-8 (24 meshes per HL)

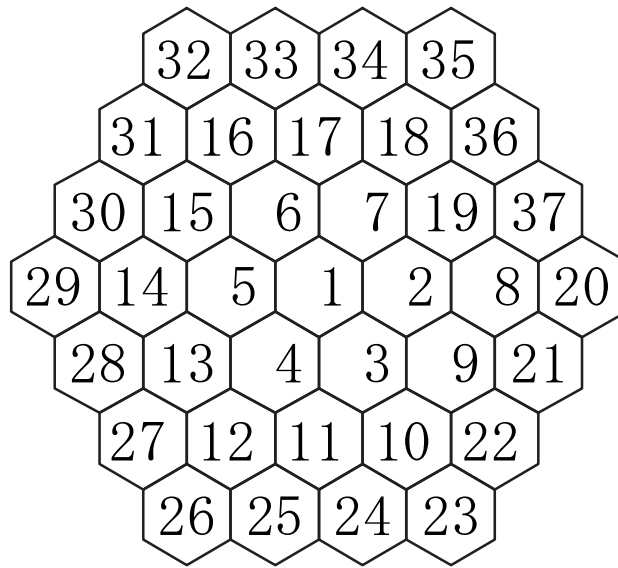


Fig. A-6 Hexagonal lattice addressing of MINISTRI

0	0	0	32	33	34	35
0	0	31	16	17	18	36
0	30	15	6	7	19	37
29	14	5	1	2	8	20
28	13	4	3	9	21	0
27	12	11	10	22	0	0
26	25	24	23	0	0	0

Fig. A-7 Relationship between the mesh addressing and the map input format of MINISTRI

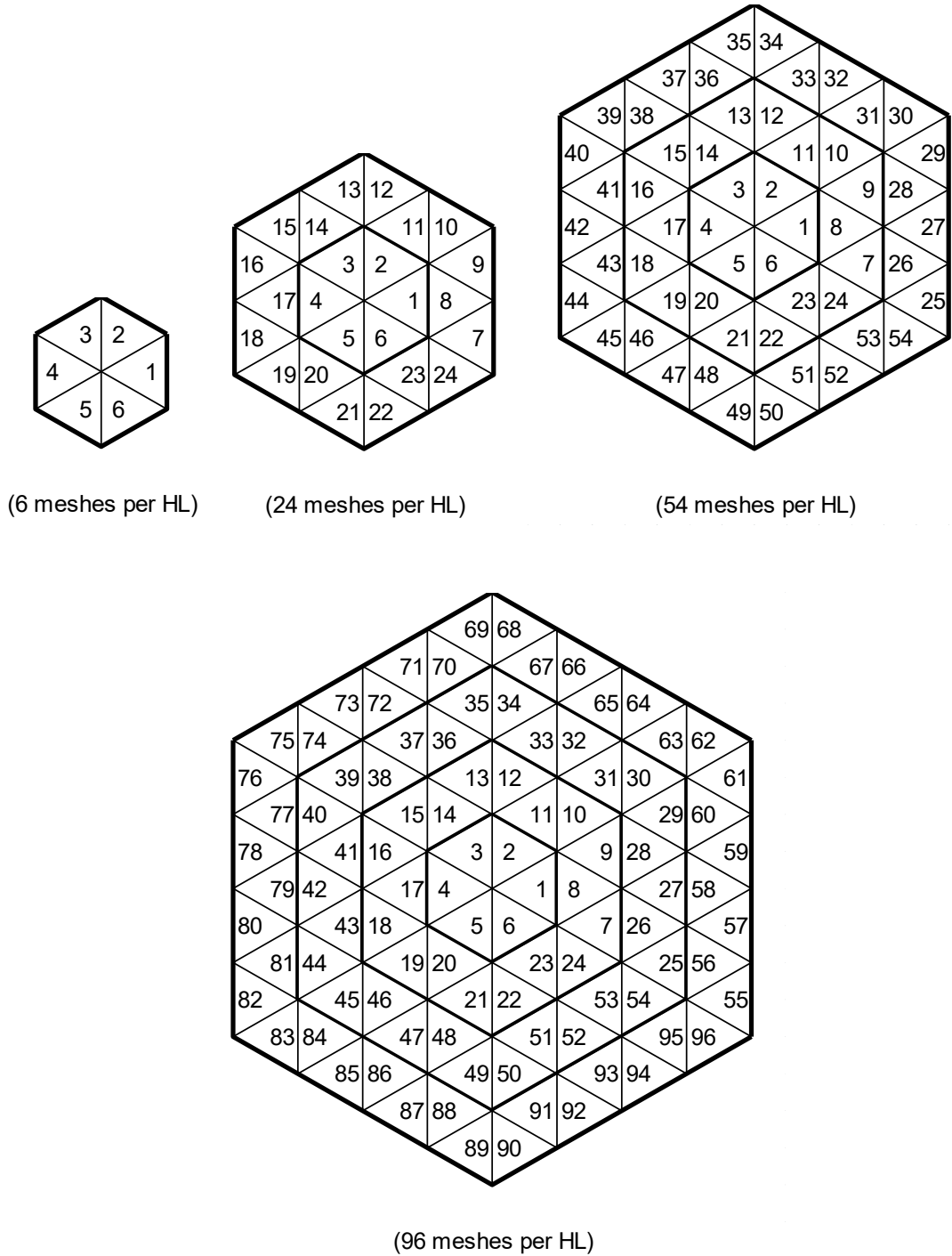


Fig. A-8 Mesh numberings of MINISTRI within a hexagonal lattice

※HL: Hexagonal Lattice

## 付録 B 摂動計算コード MINISTRI-PERT の実行方法

SNPERT 等のような摂動計算コード専用の入力は不要とし、摂動前後のいずれか（摂動前後で参照する全ての断面積の指定があれば良い）の MINISTRI の入力、及び、摂動前後のメッシュ毎のマップ情報と角度中性子束を与えれば、摂動計算を実行可能とする。そこで、摂動分子は摂動前後でマップ番号が異なる場合のみ計算することとし、合計以外にマップ番号の変化パターンに応じて摂動計算結果の詳細（項・エネルギー群別）を出力することとする。

### B.1 記憶装置番号の割り当て

摂動計算に先立ち、MINISTRI の実行の際、変数 IDUMP を 2 に設定することにより、記憶装置番号 14 に角度中性子束と固有値と角度中性子束の重みとメッシュマップをダンプさせる。

MINISTRI-PERT では以下の記憶装置の割り当てとする。

#1 : MINISTRI の入力

#6 : 標準出力

#11 : MINISTRI の随伴角度中性子束とメッシュマップ等の出力（摂動前）

#12 : MINISTRI の正規角度中性子束とメッシュマップ等の出力（摂動後）

ここで、#1 に関して、六角格子内マップ入力の読み込みには対応させていないので、MINISTRI-PERT を実行するには六角格子内マップを消去する必要がある。当然ながら、六角格子内マップ指定機能自体には、#11 と #12 での読み込みにより対応している。

また、#1 としては最終的には MINISTRI の入力を与えることになるが、JOINT を介して与えることも可能である。

### B.2 MINISTRI の改良

MINISTRI を MINISTRI-PERT に接続させるに伴い、MINISTRI のサブルーチン OUTER におけるスカラー中性子束や角度中性子束等の出力部の改良を行った。

具体的には、MINISTRI の #13 のスカラー中性子束の出力は必須ではないことから、簡素化のためにその出力を省くこととした。

また、#14 には IDUMP として 2 を指定した場合には、角度中性子束と固有値と方向余弦と角度中性子束の重みが出力されていたが、更に、メッシュマップを出力させることとした。

加えて、#2 として、リスタートファイルも出力させることとした。これにより、膨大な容量となる角度中性子束を保存しなくとも、リスタートファイルを保存しておけば、リスタート計算により直ぐに角度中性子束が得られるようにした。

### B.3 MINISTRI-PERT 実行上の注意点

前述したように、MINISTRI-PERT では、マップ番号の変化により摂動の有無を判定している。従って、マップ番号の指定と対応する断面積の指定は、PERKY や SNPRT で可能であった方法が不可能となる場合があることに注意が必要である。

全炉心 Na ボイド反応度の計算を例に MINISTRI-PERT での指定方法を示す。

Table B.3-1 及び Table B.3-2 は厳密摂動用のマップ番号指定とそれに対応する断面積の種類の見本である。内側炉心領域と外側炉心領域では、摂動前において MAP 番号が 1 及び 2 から、摂動後ではそれぞれ 13 及び 14 に変化しており、摂動領域と認識される。そして、MAP 番号の 1 及び 2 が基準状態で、13 及び 14 が Na ボイド化状態であるため、中性子束及び断面積共に適切に与えられることとなる。

Table B.3-3 及び Table B.3-4 は PERKY や SNPRT でしばしば用いられる指定方法であるが、MINISTRI-PERT では、摂動前後で MAP 番号の変化がないので、摂動なしと認識され、摂動計算は行われず（結果としてゼロを出力）。

また、Table B.3-5 及び Table B.3-6 は一次摂動用のマップ番号指定とそれに対応する断面積の種類の見本である。この場合、#1 入力としては、摂動後のものは不適切で、摂動前のものに限定される。

更に、MINISTRI の計算に合わせて、MINISTRI-PERT でも単精度と倍精度計算の切り替えを行う必要がある。ただし、MINISTRI の場合と若干異なっており、インクルードファイル precision.inc の 1 行目の IMPLICIT 文の方をコメントアウトした場合は単精度計算、2 行目の IMPLICIT 文の方をコメントアウトした場合は倍精度計算となる。なお、2 行目の IMPLICIT 文は単精度計算時の反応度合計値の情報落ちを防止するための処置である。そして、MINISTRI の場合と同様にそれぞれの計算に応じて、メインルーチンの PARAMETER 文で宣言されている変数 MAXR を調整する。



Table B.3-1 Example of the region number specification for exact perturbation calculation of whole core sodium void reactivity - Good example -

Region name	Map number	
	Reference	Perturbed
Inner core	1	<b>13</b>
Outer core	2	<b>14</b>
Na plenum	3	3
Lower axial blanket	4	4
Radial blanket	5	5
Upper reflector	6	6
Lower reflector	7	7
Radial reflector	8	8
Na follower	9	9
Coarse control rod	10	10
Fine control rod	11	11
Back-up control rod	12	12

Table B.3-2 Example of the region specification for exact perturbation calculation of whole core sodium void reactivity - Good example -

Map number	Region name (State)
1	Inner core (Reference)
2	Outer core (Reference)
3	Na plenum
4	Lower axial blanket
5	Radial blanket
6	Upper reflector
7	Lower reflector
8	Radial reflector
9	Na follower
10	Coarse control rod
11	Fine control rod
12	Back-up control rod
13	Inner core (Na voided)
14	Outer core (Na voided)

Table B.3-3 Example of the region number specification for exact perturbation calculation of whole core sodium void reactivity - Bad example -

Region name	Map number
Inner core	1
Outer core	2
Na plenum	3
Lower axial blanket	4
Radial blanket	5
Upper reflector	6
Lower reflector	7
Radial reflector	8
Na follower	9
Coarse control rod	10
Fine control rod	11
Back-up control rod	12

Table B.3-4 Example of the region specification for exact perturbation calculation of whole core sodium void reactivity - Bad example -

Map number	Region name (State)	
	Reference	Perturbed
1	Inner core (Reference)	Inner core (Na voided)
2	Outer core (Reference)	Outer core (Na voided)
3	Na plenum	Na plenum
4	Lower axial blanket	Lower axial blanket
5	Radial blanket	Radial blanket
6	Upper reflector	Upper reflector
7	Lower reflector	Lower reflector
8	Radial reflector	Radial reflector
9	Na follower	Na follower
10	Coarse control rod	Coarse control rod
11	Fine control rod	Fine control rod
12	Back-up control rod	Back-up control rod

Table B.3-5 Example of the region number specification for first order perturbation calculation of whole core sodium void reactivity - Good example -

Region name	Map number	
	Reference	Perturbed
Inner core	1	<b>13</b>
Outer core	2	<b>14</b>
Na plenum	3	3
Lower axial blanket	4	4
Radial blanket	5	5
Upper reflector	6	6
Lower reflector	7	7
Radial reflector	8	8
Na follower	9	9
Coarse control rod	10	10
Fine control rod	11	11
Back-up control rod	12	12

Table B.3-6 Example of the region specification for first order perturbation calculation of whole core sodium void reactivity - Good example -

Map number	Region name (State)	
	Reference	Perturbed
1	Inner core (Reference)	(Dummy)
2	Outer core (Reference)	(Dummy)
3	Na plenum	Na plenum
4	Lower axial blanket	Lower axial blanket
5	Radial blanket	Radial blanket
6	Upper reflector	Upper reflector
7	Lower reflector	Lower reflector
8	Radial reflector	Radial reflector
9	Na follower	Na follower
10	Coarse control rod	Coarse control rod
11	Fine control rod	Fine control rod
12	Back-up control rod	Back-up control rod
13	Inner core (Na voided)	Inner core (Reference)
14	Outer core (Na voided)	Outer core (Reference)

## 付録 C 並列処理化版 MINISTR1 の実行方法

## C.1 実行方法

## (1) コンパイル

src ディレクトリの中にある Makefile ファイルを編集して、使用するコンパイラを指定し、コンパイルを実施する。

なお、本整備では、Intel Fortran コンパイラあるいは GNU Fortran コンパイラを用いてコンパイルを行った。

## ※Intel Fortran コンパイラの自動並列処理化機能について

Intel Fortran コンパイラは、コンパイル中に並列処理化しても問題の無い DO ループを自動で解析して見つけ出し、並列処理化する機能を有している。この機能を使用する場合は、parallel オプションを有効にする。openmp オプションと共に有効とすると、本文中で述べたスピードアップから、更に、30～40%の計算速度の向上が見られた。

## (2) 並列スレッド数の設定

使用したい並列スレッド数を設定するための環境変数を設定する。この環境変数を設定せずに並列処理化版 MINISTR1 を実行すると、ワークステーション上で使用していないスレッド全てを使って計算が実行されるため、注意が必要である。

なお、本文で示したように、スレッド当たりの並列処理化効率を高める観点からは、並列スレッド数を総角度分点数 (= ドデカント数 × 角度分点数) の約数に設定することが望ましい。

## (B シェル環境の場合)

```
export OMP_NUM_THREADS=####
```

入力値は、例えば並列数 6 とする場合では上記の"####"の部分で"6"とする。

## (C シェル環境の場合)

```
setenv OMP_NUM_THREADS ####
```

入力方法は B シェルの場合と同様である。

## (3) ロードモジュールの実行

ロードモジュールの実行方法は、オリジナルコードと同じである。

## C.2 注意事項

## (1) スタックサイズに関する注意事項

使用するスタックサイズ (各スレッドで用いられるメモリ容量) が十分でない場合には、**Segmentation Fault** を起こし、計算が途中で停止する。その場合には、スタックサイズ (デフォルトは大抵の場合、32bit CPU で 2MByte、64bit CPU で 4Mbyte)<sup>1</sup> を引き上げる必要がある。ただし、スタックサイズには上限値が設けられているので、必要な場合には上限値を引き上げてから、スタックサイズを引き上げることになる。

以下、スタックサイズの変更方法を示す。

#### ①スタックサイズ上限値の確認

スタックサイズは KByte 単位で表示される。

(B シェル環境の場合)

```
ulimit -s
```

(C シェル環境の場合)

```
limit
```

#### ②スタックサイズ上限値の設定

例えば、スタックサイズ上限値を無制限に設定する場合には、以下の設定を行う。

(B シェル環境の場合)

```
ulimit -s unlimited
```

(C シェル環境の場合)

```
limit stacksize unlimited
```

B シェルの場合、"unlimited"としても無制限として取り扱われないことがあるので注意が必要である。

また、スタックサイズ上限値を具体的に設定する場合には、"unlimited"の代わりに、KByte 単位で設定する。例えば 16MByte の場合では  $16 \times 1024 = "16384"$  とする。

#### ③スタックサイズの設定

---

<sup>1</sup> 例えば、インテルコンパイラの場合は次の URL を参照

[https://www.xlsoft.com/jp/products/intel/compilers/ccl/12/ug/index.htm#optaps/common/optaps\\_par\\_var.htm](https://www.xlsoft.com/jp/products/intel/compilers/ccl/12/ug/index.htm#optaps/common/optaps_par_var.htm) (参照：2019年9月20日)

(B シェル環境の場合)

```
export OMP_STACKSIZE=####
```

入力値は、例えば 16MByte の場合では"16M"とする。

(C シェル環境の場合)

```
setenv OMP_STACKSIZE ####
```

入力方法は B シェルの場合と同様である。

(2) 六角メッシュ体系における初期拡散計算で取り扱う上限集合体数の設定

六角メッシュ体系における初期拡散計算では、3色スweep法を採用しているが、六角メッシュの色分けのための配列変数は可変の扱いとしていないために、取り扱う上限集合体数をインクルードファイル `multicolor.inc` 内のパラメータ文で、以下のように宣言することとしている。

```
PARAMETER (LIM_NCLM=####)
```

デフォルト値は 10000 であり、六角メッシュ体系計算において集合体数がこの値を超える場合は、値を引き上げる必要がある。

付録 D MINISTRI の基礎式の導出

バランス式の導出の詳細は文献 1)に示されているので、本論文では主要部分のみを示す。  
軸方向については直交座標用のバランス式と同様であるため省略し、簡略化のために径  
方向の 2 次元の式で記述する。

今、Fig. D-1 に示す六角格子と各三角メッシュを取り上げる。また、六角格子用の方向余  
弦の模式を Fig. D-2 に示す。

ここで、

$m$ : 角度中性子束の方向の識別

$\vec{\Omega}^m$ : 角度中性子束の単位方向ベクトル

$\mu^m, \eta^m$ :  $\vec{\Omega}^m$  の方向余弦 (それぞれ  $x, y$  方向成分)

$\mu_x^m, \mu_u^m, \mu_v^m$ : 次式で定義される  $\vec{\Omega}^m$  の方向余弦 (それぞれ  $x, u, v$  方向成分)

$$\begin{cases} \mu_x^m = \mu^m \\ \mu_u^m = \frac{1}{2}\mu^m + \frac{\sqrt{3}}{2}\eta^m \\ \mu_v^m = -\frac{1}{2}\mu^m + \frac{\sqrt{3}}{2}\eta^m \end{cases} \quad (\text{D-1})$$

$\bar{\psi}_\alpha^m, \bar{\psi}_\beta^m, \bar{\psi}_\gamma^m$ : 各メッシュ  $\alpha, \beta, \gamma$  の平均角度中性子束

$\bar{\psi}_{\alpha,u-}^m, \bar{\psi}_{\alpha,v+}^m$ : メッシュ  $\alpha$  への平均入射角度中性子束 (それぞれ  $u, v$  面)

$\bar{\psi}_{\alpha\beta,x}^m$ : メッシュ  $\alpha$  からの平均流出角度中性子束 ( $x$  面)、または、メッシュ  $\beta$  への平均入  
射角度中性子束 ( $x$  面)

$\bar{\psi}_{\beta,u+}^m, \bar{\psi}_{\beta,v-}^m$ : メッシュ  $\beta$  からの平均流出角度中性子束 (それぞれ  $u, v$  面)

$\bar{\psi}_{\gamma,u-}^m$ : メッシュ  $\gamma$  への平均入射角度中性子束 ( $u$  面)

$\psi_{\beta,U}^m, \psi_{\beta,V}^m$ : メッシュ  $\beta$  の頂点角度中性子束 (それぞれ頂点  $U, V$ )

$\psi_{\delta,V}^m$ : メッシュ  $\delta$  の頂点角度中性子束 (頂点  $V$ )

ある三角メッシュに 2 つの角度中性子束が入射し、1 つの角度中性子束が流出する場合

(Fig. D-1 中のメッシュ  $\alpha$ ) のバランス式は、離散化座標法で表されたボルツマン方程式をメッシュ  $\alpha$  内で積分することにより次の通り導き出される。

$$\frac{4}{h_r} \left( \mu_x^m \bar{\psi}_{\alpha\beta,x}^m - \mu_u^m \bar{\psi}_{\alpha,u-}^m - \mu_v^m \bar{\psi}_{\alpha,v+}^m \right) + \Sigma_{t,\alpha} \bar{\psi}_\alpha^m = \bar{Q}_\alpha. \quad (\text{D-2})$$

ここで、

$\bar{Q}_\alpha$  : メッシュ  $\alpha$  の平均中性子源

$\Sigma_{t,\alpha}$  : メッシュ  $\alpha$  の巨視的全断面積

$h_r$  : 三角メッシュの垂線の長さの 2 倍

また、単一メッシュ内での中性子束分布は線形すなわち 1 次式で表せると仮定すると、いわゆる次のダイヤモンド差分式が成立する。

$$\bar{\psi}_\alpha^m = \frac{\bar{\psi}_{\alpha\beta,x}^m + \bar{\psi}_{\alpha,u-}^m + \bar{\psi}_{\alpha,v+}^m}{3}. \quad (\text{D-3})$$

既知数である 2 つの入射角度中性子束から、(D-2)と(D-3)の 2 つの式を用いて、未知数である平均角度中性子束と 1 つの流出角度中性子束を求める。

このような場合には、直交座標用のものに代表される通常のメッシュ中心  $S_N$  輸送計算との基本的なアルゴリズムの違いはない。

具体的な解法としては、まず、(D-3)式を変形して流出中性子束に関する外挿式を得る。

$$\bar{\psi}_{\alpha\beta,x}^m = 3\bar{\psi}_\alpha^m - \bar{\psi}_{\alpha,u-}^m - \bar{\psi}_{\alpha,v+}^m. \quad (\text{D-3}')$$

そして、(D-3')式を(D-2)に代入することにより、未知数の 1 つである平均中性子束が得られる。

$$\bar{\psi}_\alpha^m = \frac{4(\mu_x^m + \mu_u^m)\bar{\psi}_{\alpha,u-}^m + 4(\mu_x^m + \mu_v^m)\bar{\psi}_{\alpha,v+}^m + \bar{Q}_\alpha}{\frac{12\mu_x^m}{h_r} + \Sigma_{t,\alpha}}. \quad (\text{D-4})$$

平均中性子束が得られれば、(D-3')式よりも一つの未知数である流出中性子束が容易に得られる。

さて、ある三角メッシュに 1 つの角度中性子束が入射し、2 つの角度中性子束が流出する場合 (Fig. D-1 中のメッシュ  $\beta$ ) のバランス式は、離散化座標法で表されたボルツマン方程式をメッシュ  $\beta$  内で積分することにより次の通り導き出される。

$$\frac{4}{h_r} \left( -\mu_x^m \bar{\psi}_{\alpha\beta,x}^m + \mu_u^m \bar{\psi}_{\beta,u+}^m + \mu_v^m \bar{\psi}_{\beta,v-}^m \right) + \Sigma_{t,\beta} \bar{\psi}_\beta^m = \bar{Q}_\beta. \quad (\text{D-5})$$

ここで、



$\bar{Q}_\beta$ : メッシュ  $\beta$  の平均中性子源

$\Sigma_{t,\beta}$ : メッシュ  $\beta$  の巨視的全断面積

また、メッシュ  $\beta$  に関するダイヤモンド差分式は次の通りとなる。

$$\bar{\psi}_\beta^m = \frac{\bar{\psi}_{\alpha\beta,x}^m + \bar{\psi}_{\beta,u+}^m + \bar{\psi}_{\beta,v-}^m}{3}. \quad (\text{D-6})$$

既知数である 1 つの入射角度中性子束と、(D-5)と(D-6)の 2 つの式を用いて、未知数である平均角度中性子束と 2 つの流出角度中性子束を求めることは不可能である。すなわち、このような場合には、通常の直交座標用に代表されるメッシュ中心  $S_N$  輸送計算とは異なる。

そこで、MINISTR1 ではメッシュ頂点の中性子束を利用することとしている。メッシュ内の中性子束分布が一次式で標記可能と仮定すると、次のメッシュ頂点中性子束に関するダイヤモンド差分式が成立する。

$$\bar{\psi}_\beta^m = \frac{2\bar{\psi}_{\beta,u+}^m + \psi_{\beta,U}^m}{3} = \frac{2\bar{\psi}_{\beta,v-}^m + \psi_{\beta,V}^m}{3}. \quad (\text{D-7})$$

(D-7)式より次の流出中性子束に対する外挿式が得られる。

$$\begin{cases} \bar{\psi}_{\beta,u+}^m = \frac{1}{2}(3\bar{\psi}_\beta^m - \psi_{\beta,U}^m) \\ \bar{\psi}_{\beta,v-}^m = \frac{1}{2}(3\bar{\psi}_\beta^m - \psi_{\beta,V}^m) \end{cases}. \quad (\text{D-7}')$$

頂点中性子束は、メッシュ  $\alpha$  について予め次の外挿式により求めておく。

$$\begin{cases} \psi_{\beta,U}^m = 3\bar{\psi}_\alpha^m - 2\bar{\psi}_{\alpha,v+}^m \\ \psi_{\beta,V}^m = 3\bar{\psi}_\alpha^m - 2\bar{\psi}_{\alpha,u-}^m \end{cases}. \quad (\text{D-8})$$

(D-7)式を(D-5)式に代入して整理することにより、メッシュ平均中性子束が次式で与えられる。

$$\bar{\psi}_\beta^m = \frac{\frac{4\mu_x^m \bar{\psi}_{\alpha\beta,x}^m + 2\mu_u^m \psi_{\beta,U}^m + 2\mu_v^m \psi_{\beta,V}^m}{h_r} + \bar{Q}_\beta}{\frac{6(\mu_u^m + \mu_v^m)}{h_r} + \Sigma_{t,\beta}}. \quad (\text{D-9})$$

メッシュ平均中性子束が求めれば、容易に残りの 2 つの未知数であるメッシュ流出中性子束が(D-7)式により得られる。

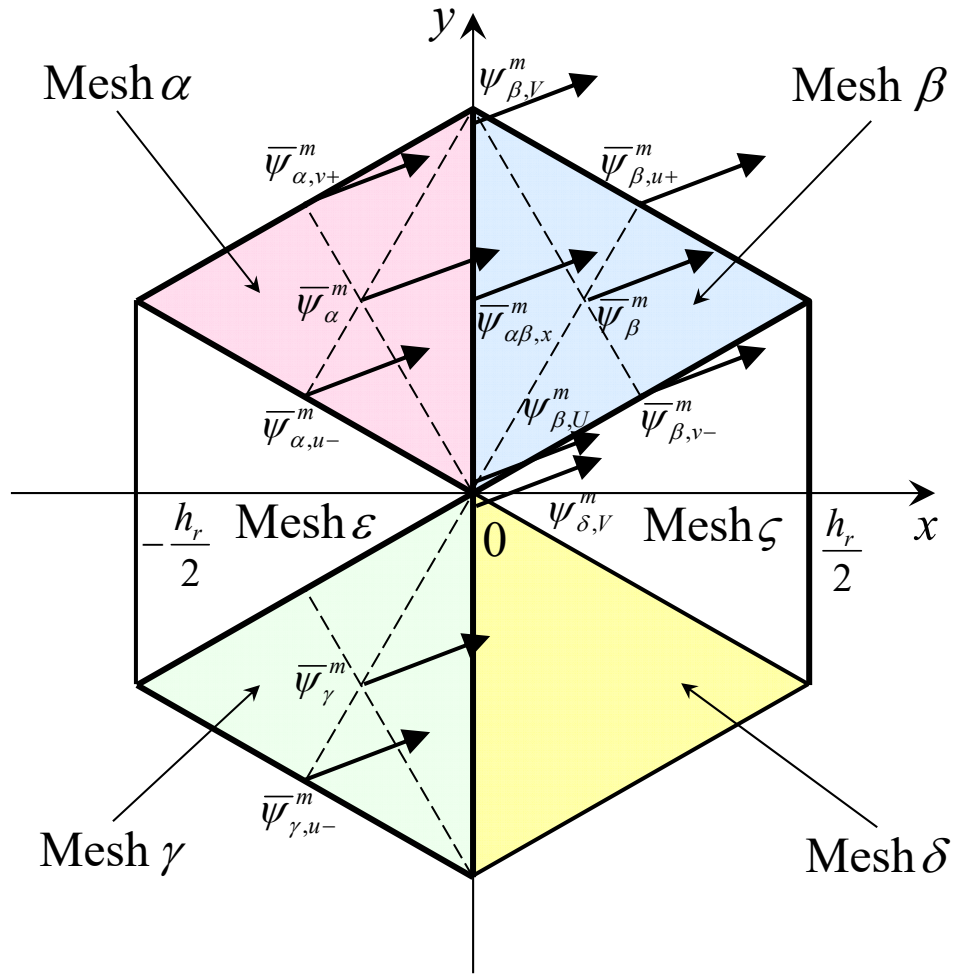


Fig. D-1 Parameters used in the basic formula of MINISTR1

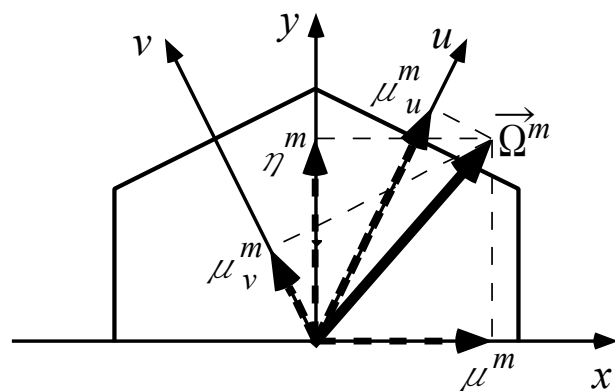


Fig. D-2 Definition of directional cosines for hexagonal lattice

付録 E 輸送厳密摂動計算式の導出

E.1 輸送厳密摂動計算式の導出

輸送厳密摂動の計算式の導出過程と導出結果に関しては、ストリーミング項（仮称）を除いて、文献 21) に示されているが、本報告ではストリーミング項も含めて改めて示すこととする。なお、漏洩項について拡散厳密摂動との対応を図るため、竹田と大竹による計算式 21) を採用することとする。

さて、摂動後の正規中性子束の空間及び角度に関する離散化した輸送方程式は次式で表される。

$$\bar{\Omega}^m \bullet \nabla \psi_{g,i}^{m,*} + \Sigma_{tr,g,i}^* \psi_{g,i}^{m,*} = \frac{1}{k^*} \chi_g \sum_{g'} \nu \Sigma_{f,g',i}^* \phi_{g',i}^* + \sum_{g'} \Sigma_{s,g' \rightarrow g,i}^* \phi_{g',i}^* \quad (\text{E.1-1})$$

同様に、摂動前の随伴中性子束の空間及び角度に関する離散化した輸送方程式は次式で表される。

$$-\bar{\Omega}^m \bullet \nabla \psi_{g,i}^{m,+} + \Sigma_{tr,g,i} \psi_{g,i}^{m,+} = \frac{1}{k} \nu \Sigma_{f,g,i} \sum_{g'} \chi_{g'} \phi_{g',i}^+ + \sum_{g'} \Sigma_{s,g \rightarrow g',i} \phi_{g',i}^+ \quad (\text{E.1-2})$$

ここで、

$\bar{\Omega}^m$  : 方向余弦

$\bullet$  : ベクトルの内積

$\nabla$  : スカラー量の勾配 (Gradient)

$\psi_{g,i}^{m,+}$  : 摂動前の随伴角度中性子束

$\psi_{g,i}^{m,*}$  : 摂動後の正規角度中性子束

$i$  : 空間メッシュの識別

$m$  : 角度中性子束の角度分点の識別

$g, g'$  : エネルギー群の識別

$\Sigma_{tr,g,i}, \Sigma_{tr,g,i}^*$  : 摂動前後の輸送断面積

$k, k^*$  : 摂動前後の固有値

$\chi_g$  : 核分裂スペクトル (摂動による変化は無視し、空間依存性は未考慮)

$\nu \Sigma_{f,g,i}, \nu \Sigma_{f,g,i}^*$  : 摂動前後の中性子生成断面積

$\phi_{g,i}^+$  : 摂動前の随伴スカラー中性子束、次式で定義 :

$$\phi_{g,i}^+ = \sum_m \psi_{g,i}^{m,+} w^m$$

$w^m$  : 次式を満足する角度分点の重み

$$\sum_m w^m = 1$$

$\phi_{g,i}^*$  : 摂動後の正規スカラー中性子束、定義は摂動前の随伴スカラー中性子束と同様

$\Sigma_{s,g' \rightarrow g,i}$ ,  $\Sigma_{s,g \rightarrow g',i}^*$  : 摂動前後の散乱断面積

輸送厳密摂動計算式の導出の便宜上、(E.1-1)及び(E.1-2)の両式を次のように変形する。

$$-\frac{1}{k^*} \chi_g \sum_{g'} v \Sigma_{f,g',i}^* \phi_{g',i}^* = -\bar{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,*} - \Sigma_{tr,g,i}^* \psi_{g,i}^{m,*} + \sum_{g'} \Sigma_{s,g' \rightarrow g,i}^* \phi_{g',i}^* \quad (\text{E.1-1})$$

$$-\frac{1}{k} v \Sigma_{f,g,i} \sum_{g'} \chi_{g'} \phi_{g',i}^+ = \bar{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,+} - \Sigma_{tr,g,i} \psi_{g,i}^{m,+} + \sum_{g'} \Sigma_{s,g \rightarrow g',i} \phi_{g',i}^+ \quad (\text{E.1-2})$$

(E.1-1)式に $\psi_{g,i}^{m,+}$ を乗じた式から、(E.1-2)式に $\psi_{g,i}^{m,*}$ を乗じた式を辺々に差し引き、空間メ

ッシュとエネルギー群と角度分点に関して和を取ると、以下の式が得られる。

・ 左辺

$$\begin{aligned} & \sum_i V_i \sum_g \sum_m \left( -\frac{\chi_g}{k^*} \psi_{g,i}^{m,+} \sum_{g'} v \Sigma_{f,g',i}^* \phi_{g',i}^* + \frac{v \Sigma_{f,g,i}}{k} \psi_{g,i}^{m,*} \sum_{g'} \chi_{g'} \phi_{g',i}^+ \right) w^m \\ &= \sum_i V_i \sum_g \left( -\frac{\chi_g}{k^*} \phi_{g,i}^+ \sum_{g'} v \Sigma_{f,g',i}^* \phi_{g',i}^* + \frac{v \Sigma_{f,g,i}}{k} \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \chi_{g'} \phi_{g',i}^+ \right) \\ &= -\frac{1}{k^*} \sum_i V_i \sum_g (v \Sigma_{f,g,i}^* - v \Sigma_{f,g,i}) \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \chi_{g'} \phi_{g',i}^+ \\ &+ \left( \frac{1}{k} - \frac{1}{k^*} \right) \sum_i V_i \sum_g v \Sigma_{f,g,i} \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \chi_{g'} \phi_{g',i}^+ \\ &= -\frac{1}{k^*} \sum_i V_i \sum_g \delta v \Sigma_{f,g,i} \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \chi_{g'} \phi_{g',i}^+ + \rho \sum_i V_i \sum_g v \Sigma_{f,g,i} \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \chi_{g'} \phi_{g',i}^+ \\ &= -[\text{Production}] + \rho [\text{Denom}] \end{aligned} \quad (\text{E.1-3})$$

ここで、

$$V_i : \text{空間メッシュの体積} \left( V_i = \frac{\sqrt{3}}{2} h_r^2 h_{z,i} \right)$$

$h_r$  : 六角格子配列ピッチ

$h_{z,i}$  : 軸方向高さ

$\delta v \Sigma_{f,g,i}$  : 摂動前後の中性子生成断面積の差 ( $= v \Sigma_{f,g,i}^* - v \Sigma_{f,g,i}$ )

[*Production*] : 摂動分子の核分裂生成項

[*Denom*] : 摂動分母

また、 $\rho$  は次式で定義される反応度を表す。

$$\rho = \left( \frac{1}{k} - \frac{1}{k^*} \right) = \left( 1 - \frac{1}{k^*} \right) - \left( 1 - \frac{1}{k} \right). \quad (\text{E.1-4})$$

(E.1-3)式の第1項の核分裂項は最終的には右辺へ移項することになるので、(E.1-3)式中では核分裂項に対して負の符号を与えている。

・ 右辺第1項

有限差分法の場合、 $\vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,*}$  及び  $-\vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,+}$  は定数となるので、次式のように記述できる。

$$\begin{aligned} & \sum_i V_i \sum_g \sum_m \left( -\psi_{g,i}^{m,+} \cdot \vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,*} - \psi_{g,i}^{m,*} \cdot \vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,+} \right) w^m \\ &= -\sum_i V_i \sum_g \sum_m \left( \psi_{g,i}^{m,+} \cdot \vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,*} + \psi_{g,i}^{m,*} \cdot \vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,+} \right) w^m. \quad (\text{E.1-5}) \\ &= [\textit{Streaming}] \end{aligned}$$

ここで、

[*Streaming*] : 摂動分子のストリーミング項

この項は輸送方程式のストリーミング項に由来するので、ストリーミング項と暫定的に命名した。

・ 右辺第2項

$$\sum_i V_i \sum_g \sum_m \left( -\Sigma_{tr,g,i}^* + \Sigma_{tr,g,i} \right) \psi_{g,i}^{m,+} \psi_{g,i}^{m,*} w^m = -\sum_i V_i \sum_g \sum_m \delta \Sigma_{tr,g,i} \psi_{g,i}^{m,+} \psi_{g,i}^{m,*} w^m. \quad (\text{E.1-6})$$

ここで、

$\delta \Sigma_{tr,g,i}$  : 摂動前後の輸送断面積の差 ( $= \Sigma_{tr,g,i}^* - \Sigma_{tr,g,i}$ )

さて、輸送摂動ではある空間メッシュからの中性子の漏洩は中性子束の非等方性に由来するので、次式のようにスカラー中性子束と角度中性子束の差分を取ることで、漏洩項を分離することとする。

$$\begin{aligned}
 & - \sum_i V_i \sum_g \sum_m \delta \Sigma_{tr,g,i} \psi_{g,i}^{m,+} \psi_{g,i}^{m,*} w^m \\
 = & - \sum_i V_i \sum_g \sum_m \delta \Sigma_{tr,g,i} \psi_{g,i}^{m,+} (\psi_{g,i}^{m,*} - \phi_{g,i}^*) w^m - \sum_i V_i \sum_g \sum_m \delta \Sigma_{tr,g,i} \psi_{g,i}^{m,+} \phi_{g,i}^* w^m \\
 = & - \sum_i V_i \sum_g \sum_m \delta \Sigma_{tr,g,i} \psi_{g,i}^{m,+} (\psi_{g,i}^{m,*} - \phi_{g,i}^*) w^m - \sum_i V_i \sum_g \delta \Sigma_{tr,g,i} \phi_{g,i}^+ \phi_{g,i}^* \\
 = & [Leakage] + [Others]
 \end{aligned} \tag{E.1-7}$$

ここで、

[Leakage] : 摂動分子の漏洩項

更に輸送断面積の差は次のように表される。

$$\delta \Sigma_{tr,g,i} = \delta \Sigma_{a,g,i} + \sum_{g'} \delta \Sigma_{s,g \rightarrow g',i} \tag{E.1-8}$$

ここで、

$\delta \Sigma_{a,g,i}$  : 摂動前後の吸収断面積の差 ( $= \Sigma_{a,g,i}^* - \Sigma_{a,g,i}$ )

$\delta \Sigma_{s,g \rightarrow g',i}$  : 摂動前後の散乱断面積の差 ( $= \Sigma_{s,g \rightarrow g',i}^* - \Sigma_{s,g \rightarrow g',i}$ )

従って、

$$\begin{aligned}
 & [Leakage] + [Others] \\
 = & [Leakage] - \sum_i V_i \sum_g \delta \Sigma_{tr,g,i} \phi_{g,i}^+ \phi_{g,i}^* \\
 = & [Leakage] - \sum_i V_i \sum_g \delta \Sigma_{a,g,i} \phi_{g,i}^+ \phi_{g,i}^* - \sum_i V_i \sum_g \phi_{g,i}^+ \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \delta \Sigma_{s,g \rightarrow g',i} \\
 = & [Leakage] + [Absorption] + [Scattering1]
 \end{aligned} \tag{E.1-9}$$

ここで、

[Absorption] : 摂動分子の吸収項

[Scattering1] : 摂動分子の散乱項の一部

・ 右辺第 3 項

$$\begin{aligned}
 & \sum_i V_i \sum_g \sum_m \left( \psi_{g,i}^{m,+} \sum_{g'} \Sigma_{s,g' \rightarrow g,i}^* \phi_{g',i}^* - \psi_{g,i}^{m,*} \sum_{g'} \Sigma_{s,g \rightarrow g',i} \phi_{g',i}^+ \right) w^m \\
 &= \sum_i V_i \sum_g \left( \phi_{g,i}^+ \sum_{g'} \Sigma_{s,g' \rightarrow g,i}^* \phi_{g',i}^* - \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \Sigma_{s,g \rightarrow g',i} \phi_{g',i}^+ \right) \\
 &= \sum_i V_i \sum_g \left( \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \Sigma_{s,g \rightarrow g',i} \phi_{g',i}^+ - \phi_{g,i}^+ \sum_{g'} \Sigma_{s,g' \rightarrow g,i}^* \phi_{g',i}^* \right) \quad \cdot \quad (E.1-10) \\
 &= \sum_i V_i \sum_g \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \delta \Sigma_{s,g \rightarrow g',i} \phi_{g',i}^+ \\
 &= [\textit{Scattering}2]
 \end{aligned}$$

ここで、

$[\textit{Scattering}2]$  : 摂動分子の散乱項の一部

結局、(E.1-9)式と(E.1-10)式の各々の散乱項の一部と併せて、

$$\begin{aligned}
 [\textit{Scattering}] &= [\textit{Scattering}1] + [\textit{Scattering}2] \\
 &= -\sum_i V_i \sum_g \phi_{g,i}^+ \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \delta \Sigma_{s,g \rightarrow g',i} + \sum_i V_i \sum_g \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \delta \Sigma_{s,g \rightarrow g',i} \phi_{g',i}^+ \quad \cdot \quad (E.1-11) \\
 &= \sum_i V_i \sum_g \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \delta \Sigma_{s,g' \rightarrow g,i} (\phi_{g',i}^+ - \phi_{g,i}^+)
 \end{aligned}$$

ここで、

$[\textit{Scattering}]$  : 摂動分子の散乱項

以上をまとめると、

- 反応度

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{1}{[\textit{Denom}]} \sum_i V_i \sum_g \left( [\textit{Production}]_{g,i} + [\textit{Absorption}]_{g,i} + [\textit{Scattering}]_{g,i} \right. \\
 &\quad \left. + [\textit{Leakage}]_{g,i} + [\textit{Streaming}]_{g,i} \right) \quad \cdot \quad (E.1-12)
 \end{aligned}$$

- 摂動分子の核分裂生成項 (エネルギー群及び空間メッシュ当たり)

$$[\textit{Production}]_{g,i} = \frac{1}{k^*} \delta v \Sigma_{f,g,i} \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \chi_{g'} \phi_{g',i}^+ \quad \cdot \quad (E.1-13)$$

- 摂動分子の吸収項 (エネルギー群及び空間メッシュ当たり)

$$[\textit{Absorption}]_{g,i} = -\delta \Sigma_{a,g,i} \phi_{g,i}^+ \phi_{g,i}^* \quad \cdot \quad (E.1-14)$$

- 摂動分子の散乱項 (エネルギー群及び空間メッシュ当たり)

$$[Scattering]_{g,i} = \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \delta\Sigma_{s,g' \rightarrow g,i} (\phi_{g',i}^+ - \phi_{g,i}^+). \quad (E.1-15)$$

・ 摂動分子の漏洩項 (エネルギー群及び空間メッシュ当たり)

$$[Leakage]_{g,i} = -\sum_m \delta\Sigma_{tr,g,i} \psi_{g,i}^{m,+} (\psi_{g,i}^{m,*} - \phi_{g,i}^*) w^m \quad (E.1-16)$$

・ 摂動分子のストリーミング項 (エネルギー群及び空間メッシュ当たり)

$$[Streaming]_{g,i} = -\sum_m (\psi_{g,i}^{m,+} \cdot \vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,*} + \psi_{g,i}^{m,*} \cdot \vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,+}) w^m. \quad (E.1-17)$$

・ 摂動分母

$$[Denom] = \sum_i V_i \sum_g \nu \Sigma_{f,g,i} \phi_{g,i}^* \sum_{g'} \chi_{g'} \phi_{g',i}^+. \quad (E.1-18)$$

なお、(E.1-14)式に示した吸収項は、吸収断面積が捕獲断面積と核分裂断面積の和であることから、捕獲吸収項と核分裂吸収項に細分可能である。そこで、MINISTRI-PERT では、核分裂吸収項を別途出力させることとした。核分裂吸収項は次式で与えられる。

$$[Fission]_{g,i} = -\delta\Sigma_{f,g,i} \phi_{g,i}^+ \phi_{g,i}^*. \quad (E.1-19)$$

ここで、

$\delta\Sigma_{f,g,i}$  : 摂動前後の核分裂断面積の差

捕獲吸収項は吸収項から核分裂吸収項を差し引けば得られる。

## E.2 ストリーミング項について

ストリーミング項の空間による和は(E.1-17)式から次式で与えられる。

$$[Streaming]_g = -\sum_m \sum_i (\psi_{g,i}^{m,*} \cdot \vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,+} + \psi_{g,i}^{m,+} \cdot \vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,*}) w^m V_i. \quad (E.2-1)$$

MINISTRI は有限差分法を採用しているので、中性子束及び随伴中性子束の勾配と方向余弦ベクトルの積  $\vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,*}$  及び  $-\vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^{m,+}$  は差分で表すこととなる。よって、ストリーミング項は次式で与えられる。



$$\begin{aligned}
 [\text{Streaming}]_g = & -\sum_m \sum_i \left[ \psi_{g,i}^{m,*} \left\{ \sum_{s \in X,U,V} \frac{2\mu_s^m}{3h_r} (\psi_{g,i,s+}^{m,+} - \psi_{g,i,s-}^{m,+}) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\xi^m}{h_{z,i}} (\psi_{g,i,z+}^{m,+} - \psi_{g,i,z-}^{m,+}) \right\} \right. \\
 & \left. + \psi_{g,i}^{m,+} \left\{ \sum_{s \in X,U,V} \frac{2\mu_s^m}{3h_r} (\psi_{g,i,s+}^{m,*} - \psi_{g,i,s-}^{m,*}) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\xi^m}{h_{z,i}} (\psi_{g,i,z+}^{m,*} - \psi_{g,i,z-}^{m,*}) \right\} \right] w^m V_i
 \end{aligned} \tag{E.2-2}$$

ここで、負の角度中性子束発生時の処理が伴わない場合は、メッシュ平均の中性子束及び随伴中性子束はダイヤモンド差分式に従って境界部の中性子束及び随伴中性子束の平均で表すことが可能である。すなわち、

$$\begin{aligned}
 [\text{Streaming}]_g = & -\sum_m \sum_i \left\{ \sum_{s \in X,U,V} \frac{\psi_{g,i,s+}^{m,*} + \psi_{g,i,s-}^{m,*}}{2} \frac{2\mu_s^m}{3h_r} (\psi_{g,i,s+}^{m,+} - \psi_{g,i,s-}^{m,+}) \right. \\
 & \left. + \frac{\psi_{g,i,z+}^{m,*} + \psi_{g,i,z-}^{m,*}}{2} \frac{\xi^m}{h_{z,i}} (\psi_{g,i,z+}^{m,+} - \psi_{g,i,z-}^{m,+}) \right. \\
 & \left. + \sum_{s \in X,U,V} \frac{\psi_{g,i,s+}^{m,+} + \psi_{g,i,s-}^{m,+}}{2} \frac{2\mu_s^m}{3h_r} (\psi_{g,i,s+}^{m,*} - \psi_{g,i,s-}^{m,*}) \right. \\
 & \left. + \frac{\psi_{g,i,z+}^{m,+} + \psi_{g,i,z-}^{m,+}}{2} \frac{\xi^m}{h_{z,i}} (\psi_{g,i,z+}^{m,*} - \psi_{g,i,z-}^{m,*}) \right\} w^m V_i \\
 = & -\sum_m \sum_i \left\{ \sum_{s \in X,U,V} \frac{2\mu_s^m}{3h_r} (\psi_{g,i,s+}^{m,*} \psi_{g,i,s+}^{m,+} - \psi_{g,i,s-}^{m,*} \psi_{g,i,s-}^{m,+}) \right. \\
 & \left. + \frac{\xi^m}{h_{z,i}} (\psi_{g,i,z+}^{m,*} \psi_{g,i,z+}^{m,+} - \psi_{g,i,z-}^{m,*} \psi_{g,i,z-}^{m,+}) \right\} w^m V_i
 \end{aligned} \tag{E.2-3}$$

$V_i = \frac{\sqrt{3}}{2} h_r^2 h_{z,i}$  であるから、更に、

$$\begin{aligned}
 [\text{Streaming}]_g = & -\sum_m \sum_i \left\{ \sum_{s \in X,U,V} \frac{1}{\sqrt{3}} h_r h_{z,i} \mu_s^m (\psi_{g,i,s+}^{m,*} \psi_{g,i,s+}^{m,+} - \psi_{g,i,s-}^{m,*} \psi_{g,i,s-}^{m,+}) \right. \\
 & \left. + \frac{\sqrt{3}}{2} h_r^2 \xi^m (\psi_{g,i,z+}^{m,*} \psi_{g,i,z+}^{m,+} - \psi_{g,i,z-}^{m,*} \psi_{g,i,z-}^{m,+}) \right\} w^m
 \end{aligned} \tag{E.2-4}$$

各メッシュ境界で中性子束と随伴中性子束の積は連続であるから、(E.2-4)式を全空間にわたって捉えると、次式のように変形できる。

$$\begin{aligned}
 [\text{Streaming}]_g = & -\sum_m \sum_{i \in \text{boundary}} \left\{ \sum_{s \in x,u,v} \frac{1}{\sqrt{3}} h_r h_{z,i} \mu_s^m \psi_{g,i,s\pm}^{m,*} \psi_{g,i,s\pm}^{m,+} \right. \\
 & \left. + \frac{\sqrt{3}}{2} h_r^2 \xi^m \psi_{g,i,z\pm}^{m,*} \psi_{g,i,z\pm}^{m,+} \right\} w^m . \tag{E.2-5} \\
 = & 0
 \end{aligned}$$

すなわち、(E.2-5)式に示されるように、外部（真空）境界面の中性子束と随伴中性子束の積の項のみが残る。そして、中性子束と随伴中性子束は向きが逆であり、境界面において常に流入と流出の関係となるので、それらの積は常にゼロとなる。

ここで、負の中性子束の発生に伴う処理が伴う場合は、(E.2-3)式が成立しないので、ストリーミング項がゼロになるとは限らない。ただし、通常は負の中性子束の発生による影響が有意にならないように十分にメッシュを細かく取る。従って、摂動計算においてストリーミング項を考慮する必要はない。

### E.3 摂動分子の非等方漏洩成分の計算式の導出

中性子束の P<sub>1</sub> 成分により非等方ストリーミング効果を考慮した S<sub>N</sub> 法輸送方程式は次式で表される。

$$\bar{\Omega}^m \cdot \nabla \psi_{g,i}^m + \frac{1}{3D_{iso,g,i}} \psi_{g,i}^m = 3 \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{3D_{iso,g,i}} - \frac{1}{3D_{k,g,i}} \right) \phi_{g,i}^{1k} R_{1k}^m + Q_{g,i} . \tag{E.3-1}$$

(E.3-1)式より、摂動後の正規中性子束に関する非等方ストリーミング項は次式により表される。

$$3 \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{3D_{iso,g,i}^*} - \frac{1}{3D_{k,g,i}^*} \right) \phi_{g,i}^{1k,*} R_{1k}^m . \tag{E.3-2}$$

同様に、摂動前の随伴中性子束に関する非等方ストリーミング項は次式により表される。

$$3 \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{3D_{iso,g,i}} - \frac{1}{3D_{k,g,i}} \right) \phi_{g,i}^{1k,+} R_{1k}^m . \tag{E.3-3}$$

ここで、正規と随伴の中性子束に共通して、中性子束の P<sub>1</sub> 成分と球面調和関数は次式で与えられる。

$$\phi_{g,i}^{1k} = 3 \sum_m R_{1k}^m \psi_{g,i}^m w^m . \tag{E.3-4}$$

$$R_{1k}^m = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{3} \mu_k^m (k=1 \sim 3) \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \xi^m (k=4) \end{cases} . \quad (\text{E.3-5})$$

(E.3-2)式に摂動前の随伴角度中性子束と角度メッシュの重みを乗じて角度メッシュにより積分を取ると、次のように変形できる。

$$3 \sum_m \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{3D_{iso,g,i}^*} - \frac{1}{3D_{k,g,i}^*} \right) \psi_{g,i}^{m,+} \phi_{g,i}^{1k,*} R_{1k}^m \omega^m = \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{3D_{iso,g,i}^*} - \frac{1}{3D_{k,g,i}^*} \right) \phi_{g,i}^{1k,+} \phi_{g,i}^{1k,*} . \quad (\text{E.3-6})$$

同様に、(E.3-3)式に摂動後の随伴角度中性子束と角度メッシュの重みを乗じて角度メッシュで積分を取ると、次のように変形できる。

$$3 \sum_m \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{3D_{iso,g,i}^*} - \frac{1}{3D_{k,g,i}^*} \right) \psi_{g,i}^{m,*} \phi_{g,i}^{1k,+} R_{1k}^m \omega^m = \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{3D_{iso,g,i}^*} - \frac{1}{3D_{k,g,i}^*} \right) \phi_{g,i}^{1k,*} \phi_{g,i}^{1k,+} . \quad (\text{E.3-7})$$

(E.3-6)式の右辺から(E.3-7)式の右辺を差し引くと、次のように変形される。

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{3D_{iso,g,i}^*} - \frac{1}{3D_{k,g,i}^*} \right) \phi_{g,i}^{1k,*} \phi_{g,i}^{1k,+} - \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{3D_{iso,g,i}^*} - \frac{1}{3D_{k,g,i}^*} \right) \phi_{g,i}^{1k,+} \phi_{g,i}^{1k,*} \\ &= \sum_{k=1}^4 \left( \Sigma_{tr,g,i}^* - \Sigma_{tr,g,i} - \Sigma_{tr,k,g,i}^* + \Sigma_{tr,k,g,i} \right) \phi_{g,i}^{1k,*} \phi_{g,i}^{1k,+} . \\ &= \sum_{k=1}^4 \left( \delta \Sigma_{tr,g,i} - \delta \Sigma_{tr,k,g,i} \right) \phi_{g,i}^{1k,*} \phi_{g,i}^{1k,+} \end{aligned} \quad (\text{E.3-8})$$

ここで、方向依存の輸送断面積は **Benoist** の非等方拡散係数から次式により定義されることとした。

$$\Sigma_{tr,k,g,i} = \frac{1}{3D_{k,g,i}} . \quad (\text{E.3-9})$$

結局、摂動分子の非等方ストリーミング成分、換言すると、非等方漏洩成分は次式で与えられることとなる。

$$[Aniso - Leakage]_{g,i} = \sum_{k=1}^4 \left( \delta \Sigma_{tr,g,i} - \delta \Sigma_{tr,k,g,i} \right) \phi_{g,i}^{1k,*} \phi_{g,i}^{1k,+} \quad (\text{E.3-10})$$

第 3 章の非等方ストリーミングを考慮した摂動計算結果における漏洩成分は(E.1-16)式で表される通常の漏洩成分と(E.3-10)式で表される非等方漏洩成分の和である。

## 付録 F 拡散計算コードと摂動計算コードの整備

MINISTR1 の初期拡散計算部分を活用させて単一コードとして独立させることにより、六角体系用 3 次元拡散計算コード D-MINISTR1 を整備した。MINISTR1 で可能であった非等方セルストリーミング効果の取り扱い機能は、通常の拡散計算と同様に非等方拡散係数の形で直接取り扱うこととしている。なお、D-MINISTR1 では MINISTR1 と異なり、計算機使用容量の増加につながらないために、径方向及び軸方向に関して反射境界条件の取り扱いを可能としている。これらの反射条件を適切に設定することにより、1 次元無限平板体系や 2 次元 Tri メッシュまたは Hex メッシュの拡散計算が可能となる。

CITATION と異なり、MINISTR1 と同様に可変配列としているので、例えば、UFLIB の 900 群構造のような大規模な群数の炉心計算も容易に実行可能である。

実行方法は MINISTR1 と同様であるので、付録 A を参照すれば良いが、入力マニュアルに関しては、次ページ以降のものを参照されたい。MINISTR1 と異なる部分に関しては、下線を施すことにより特筆している。

なお、計算結果に関しては、CITATION コードとの比較により検証済みではあるが、計算時間に関しては、70 群や 175 群などの CITATION で計算可能な条件では 10~30 倍を要するので、900 群構造での計算のように CITATION では困難な条件での計算の適用に限定することが望ましい。

併せて、輸送摂動計算コード MINISTR1-PERT を元に、拡散摂動計算コード D-MINISTR1-PERT を整備した。可変配列となっているので、900 群構造等の群数の拡張への対応は容易である。

実行方法は MINISTR1-PERT と同じであるので、付録 B を参照のこと。なお、摂動計算に先立ち、D-MINISTR1 の実行の際、変数 IDUMP を 0 または 2 に設定することにより、記憶装置番号 12 に中性子束と固有値とメッシュマップをダンプさせる必要がある。

D-MINISTRI 入力マニュアル

(Ver.4.0)

<JOINT を用いる場合のみ Card 0 は必要>

Card 0-1: NSHEX (A5)

NSHEX: 制御文字 (そのまま"NSHEX"と入力)

Card 0-2: INCORE,SLAROM (A6, 4X, A6)

INCORE: 代表的な断面積 PDS ファイルメンバー名を指定  
(PDS ファイルの FORMAT 指定)

SLAROM: 断面積作成コード名 (そのまま"SLAROM"と入力)

Card 0-3: ITOT (I5)

ITOT:  $\Sigma_t$  のオプション

1, 2 . . .  $\Sigma_t = \Sigma_{transport}$

0 . . . .  $\Sigma_t = \Sigma_{total}$

-1 . . . .  $\Sigma_t = 1/3 Dav$

-2 . . . .  $\Sigma_t = 1/3 D_{\perp}$

-3 . . . .  $\Sigma_t = 1/3 D_{//}$

-4 . . . .  $\Sigma_t = 2/3 (D_{//} + D_{\perp})$

-5 . . . .  $\Sigma_t = 1/(2D_{//} + D_{\perp})$

-6 . . . .  $\Sigma_t = 1/(D_{//} + 2D_{\perp})$

※JOINT 関係の入力は NSHEX と共通なので、コード名は NSHEX で良い。

※自群散乱断面積はコード上で次式により再定義される。

$$\Sigma_{s,g \rightarrow g} = \Sigma_{t,g} - \Sigma_{a,g} - \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g \rightarrow g'}$$

Card 1: ISTART (I12)

ISTART: 計算オプション

0 . . . . リスタート (ファイル#1 が必要)

1 . . . . 新規計算

Card 2: NLAY, NGMX, MAPMX, NSN (4I12)

NLAY: 径方向メッシュ数 (炉心層数)

NGMX: エネルギー群数

MAPMX: 領域 (マテリアル) 数

NSN: ダミー

Card 3: IDUMP, IBR, NTMX, IVERTX (4I12)

IDUMP: 中性子束と角度中性子束をダンプする。

0, 2 . . . YES (規格化後の中性子束のみ#12 へ出力)

1 . . . . NO

IBR: 径方向境界条件

1 . . . . 反射条件 (MINISTRI では非対応)

1 以外 . . . 真空条件

NTMX: 六角格子当たり径方向メッシュ数 (1、6、24、54、96 のいずれか)

IVERTX: ダミー

Card 4: KMX, KCM, IBT, IBB (4I12)

KMX: 軸方向全メッシュ数

KCM: 軸方向領域 (粗メッシュ) 数

IBT/IBB: 軸方向上部/下部境界条件

0 . . . . 真空条件  
1 . . . . 反射条件 (MINISTR1 では非対応)

Card 5: IOP1, IOP2, IANISOD, IRFLXP1 (4I12)

IOP1: 中性子束が負となった場合の処理 (通常 2)  
 <0 . . . . 処理を行わない。  
 0, >0 . . . . ゼロにセットする。  
 IOP2: 内側反復における加速法の適用の有無 (通常 2)  
0 . . . . あり (逐次緩和法 (SOR 法))  
1 . . . . あり (チェビシェフ加速法)  
2 . . . . あり (SOR 法)  
 上記以外 . . . . なし  
 IANISOD: 非等方拡散係数の適用  
0 . . . . なし (輸送断面積から等方の拡散係数を計算)  
 1 . . . . あり (径方向: 垂直方向、軸方向: 平行方向)  
 2 . . . . あり (径方向: 平行方向、軸方向: 垂直方向)  
 上記以外 . . . . 無効 (計算が中断)  
IRFLXP1: ダミー

Card 6: IOP3, IOP4, IOP5, IOP6, Integer\*6, IOP7 (4I12, 6I3, I6)

IOP3: 外側反復における加速法の適用の有無 (通常 2)  
0 . . . . あり (SOR 法と中性子束外挿法の組合せ)  
1 . . . . あり (チェビシェフ加速法)  
2 . . . . あり (SOR 法と中性子束外挿法の組合せ)  
 IOP4: 外側反復の収束判定に用いる物理量の指定  
 -1 . . . . 集合体平均核分裂中性子源  
 0 . . . . 中性子束  
 1 . . . . 核分裂中性子源  
 2 . . . . 指定領域中性子束 (Card 12 で領域を指定)  
 IOP5: 計算モードの指定  
 0 . . . . 中性子束計算  
 1 . . . . 随伴中性子束計算  
 2 . . . . 随伴中性子束計算 (固有値固定)  
 IOP6: ダミー  
 (1001 あるいは 1002 を与えた場合には、試行的に Card 13-1 における順番指定  
 の変更を可能としている。Fig. A-5 を参照のこと。)  
 NSTA\_OUTACC: 外挿を開始する外側反復回数  
 MXODR\_OUTACC: 外挿対象モーメント次数  
 INOFF\_OUTACC: 高次モーメントへの外挿適用の停止オプション  
 (各群の前の内側反復回数が INOFF\_OUTACC 以下の場合、その群への外挿適  
 用を停止する。)  
 IOP\_RECAL\_FISSEIGEN: 外挿後の中性子源及び固有値再計算オプション  
 0 . . . . なし  
 1 . . . . あり  
 IOP\_CHEB1: . . . . 1 に設定  
 IOP\_CHEB2: . . . . 1 に設定  
IOP7: ダミー

Card 7: CONCR, CONCR2, CONCRI, CONCRE, FACT (4E12.5, F12.5)

CONCR: 外側反復中性子束収束条件 (通常 1.0E-4)  
 CONCR2: ダミー  
 CONCRI: 内側反復中性子束収束条件 (通常 CONCR と同じ)  
 CONCRE: 固有値 (実効増倍率) 収束条件 (通常 1.0E-5)  
 FACT: 規格化定数

>0 . . .  $v\Sigma_{fp}$  の空間・エネルギー合計値により規格化  
 <0 . . .  $\Sigma_{fp}$  の空間・エネルギー合計値により規格化

Card 8: ITINMX, ITOUTMX, TIMOUT, EIGEN, ACUT, CONDIF (2I12, 3F12.5, E12.5)

ITINMX: 最大内側反復回数  
 ITOUTMX: 最大外側反復回数  
 TIMOUT: 計算制限時間 [分]  
 EIGEN: 固有値 (実効増倍率) 初期値 (通常 1.0)  
 ACUT: ダミー  
 CONDIF: ダミー

Card 9: (IHK(KC), KC=1, KCM) (24I3)

IHK(KC): 軸方向領域 KC の軸方向メッシュ数 (下部から上部への順)

Card 10: (ZC(KC), KC=1, KCM+1) (6E12.5)

ZC(KC): 軸方向領域境界の座標 [cm] (下部から上部への順)  
 (軸方向領域 KC は  $ZC(KC) \leq Z \leq ZC(KC+1)$  に存在することになる。)

Card 11: HP (E12.5)

HP: 径方向メッシュ間隔 (集合体配列ピッチ) [cm]

Card 12 (IMJ(MP), MP=1, MAPMX) (24I3) (IOP4=2 の場合のみ入力)

IMJ(MP): 領域 MP の収束判定フラグ  
 0 . . . . 判定対象  
 1 . . . . 判定非対象

Card 13: MAP(N, KC) (Free Format)

MAP(N, KC): 領域 (マテリアル、マップ) 番号  
 (軸方向領域 (PLANE) 毎に下部から上部への順に与え、それを KCM 回繰り返す。Fig. A-1, A-2 を参照のこと。)  
 1~MAPMX: 通常のマップ番号  
 0 または (MAPMX+1) 以上: 黒色吸収体  
 (0 あるいは MAPMX よりも大きい値を与えた場合には、その領域は黒色吸収体 (Black absorber) と認識される。)  
 <0: 符号反転後の格子内マップ番号  
 (負の値を与えることにより、格子内マップの入力である Card 13-1 を用いて当該格子を構成する各三角メッシュの領域番号を指定することが可能となる。負の値を与えた場合のその絶対値が六角格子単位の格子内マップの順番に相当する。)

※JOINT を用いる場合は 80 列以内で入力する必要がある。

Card 13-1: (MAPT(NT), NT=1, NTMX) (Free Format)

MAPT(NT): 格子内マップにおける領域番号  
 (六角格子単位で与える。Card 13 の MAP(N, KC) において、いずれか 1 つでも負の領域番号が与えられた場合に、それらの絶対値の最大値の回数だけ繰り返す。Fig. A-3 に示すメッシュ番号順 (中心から反時計回りスパイラル状) に領域番号を指定する。Fig. A-5 も参照のこと。)

<JOINT を用いない場合>

Card 14: XABS(NG, NR), XFIS(NG, NR), XSGF(NG, NR), XTRA(NG, NR),  
 (XSCT(NG, NN, NR), NN=1, NGMX) (6E12.5)

XABS(NG, NR): 領域 NR、エネルギー群 NG の吸収断面積  $\Sigma_a$   
 XFIS(NG, NR): 領域 NR、エネルギー群 NG の生成断面積  $v\Sigma_f$   
 XSGF(NG, NR): 領域 NR、エネルギー群 NG の核分裂断面積  $\Sigma_f$

XTRA(NG, NR): 領域 NR、エネルギー群 NG の全断面積  $\Sigma_t$   
 XSCT(NG, NN, NR): 領域 NR、エネルギー群 NG→NN の散乱断面積  $\Sigma_s(\text{ng} \rightarrow \text{nn})$   
 (これを NGMX 回繰り返す、更に MAPMX 回繰り返す。)

※自群散乱断面積はコード内で次式により再定義される。

$$\Sigma_{s,g \rightarrow g} = \Sigma_{t,g} - \Sigma_{a,g} - \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g \rightarrow g'}$$

Card 15: (CHI(NG), NG=1, NGMX) (6E12.5)

CHI(NG): 核分裂スペクトル

(エネルギー群 NG への核分裂による中性子放出割合。コード内で合計が 1.0 になるように規格化される。)

・ IANISOP が 1 または 2 の場合のみ

Card 16: (ADCON(1,NG,NR), ADCON(2,NG,NR), NG=1, NGMX) (6E12.5)

ADCON(1,NG,NR): 垂直方向の拡散係数

ADCON(2,NG,NR): 平行方向の拡散係数

(これを MAPMX 回繰り返す。)

<JOINT を用いる場合>

Card 14-1: XS@ (A4)

XS@: 制御文字 (そのまま"XS@"と入力)

Card 14-2: MEMBER1, SLAROM (A6, 4X, A6)

MEMBER1: 断面積 PDS ファイルのメンバー名

SLAROM: 断面積作成コード名 (そのまま"SLAROM"と入力)

(Card14-2 を MAPMX 回繰り返す。)

Card 15: MEMBER2, SLAROM (A6, 4X, A6)

MEMBER2: 計算に用いる核分裂スペクトルを含む断面積 PDS ファイルのメンバー名  
 (核分裂スペクトルは 1 種類のみ指定可能)

SLAROM: 断面積作成コード名 (そのまま"SLAROM"と入力)

・ IANISOD が 1 または 2 の場合のみ

<MINISTR1 用の非等方拡散係数読み込みに対応した JOINT を適用>

Card 16: (入力不要)



# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射線当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみに使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電荷密度, 電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
モルエネルギー	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
放射線強度	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線輝度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクタ	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フォトル	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

