



## 3次元六角体系用中性子輸送計算コードの整備

—NSHEX、MINIHEX、MINISTRI コードの整備—

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

- Development of NSHEX, MINIHEX and MINISTRI Codes -

杉野 和輝

Kazuteru SUGINO

原子力基礎工学研究部門  
核工学・炉工学ユニット

Division of Nuclear Data and Reactor Engineering  
Nuclear Science and Engineering Directorate

JAEA-  
Data/  
Code

本レポートは独立行政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 (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:[ird-support@jaea.go.jp](mailto: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  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, 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](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

**3 次元六角体系用中性子輸送計算コードの整備  
—NSHEX、MINIHEX、MINISTRI コードの整備—**

日本原子力研究開発機構  
原子力基礎工学研究部門 核工学・炉工学ユニット  
杉野 和輝

(2011 年 10 月 28 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 次元六角体系用離散座標法 ( $S_N$  法) 輸送計算コード、すなわち、ノード法に基づく NSHEX コード (3 分の 1 炉心版: Ver. 10A.1、全炉心版: Ver. 10B.1)、六角メッシュ有限差分法に基づく MINIHEX コード (Ver. 2.1)、三角メッシュ有限差分法に基づく MINISTRI コード (Ver. 1.1) をそれぞれ整備した。NSHEX については、精度向上のためのノード内多項式展開次数の拡張と収束性改善のための初期有限差分計算の導入を行った。MINIHEX については、負の中性子束発生時の処理の見直しを行った。また、MINIHEX の基本アルゴリズムを変更することにより MINISTRI を新たに作成した。整備後の NSHEX、MINIHEX、MINISTRI の各計算コードを種々の高速炉炉心体系に適用した。その結果、計算精度の観点からは十分な性能を有することを確認した。しかしながら、各計算コードに共通した問題点として、適切な加速法の導入等により、計算時間の短縮や収束性の改善が必要であることが分かった。更に、摂動計算等の後処理を行うための機能の整備が望まれる。そこで、計算コードを改善する上での今後の主要課題を整理した。

**Development of Neutron Transport Calculation Codes for 3-D Hexagonal Geometry**  
**- Development of NSHEX, MINIHEX and MINISTRI Codes -**

Kazuteru SUGINO

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

(Received October 28, 2011)

Deterministic discrete ordinates method ( $S_N$  method) transport calculation codes for three-dimensional hexagonal geometry have been developed: nodal calculation code NSHEX (Ver. 10A.1 for one third core and Ver. 10B.1 for whole core), hexagonal-mesh finite difference calculation code MINIHEX (Ver. 2.1), and triangle-mesh finite difference calculation code MINISTRI (Ver. 1.1), which can perform neutron transport calculations with high accuracy for cores of fast power reactors and assemblies of the Russian BFS critical facility. NSHEX is improved by extending the polynomial expansion order of intranode fluxes for better accuracy and adopting the initial finite difference calculation for better convergence performance. MINIHEX is modified in the process of negative flux fix-up. In addition, MINISTRI is newly produced by changing the basic algorithm of the MINIHEX code. NSHEX, MINIHEX, and MINISTRI currently developed are applied to various fast reactor cores. It is found that these codes show satisfactory performance in terms of calculation accuracy. However, reduction of calculation time and improvement of convergence performance are required for all the codes by such measure as introduction of suitable acceleration technique. Further, development of post process functions is desired, which is represented by perturbation calculation scheme. Therefore major issues are summarized for future code development.

Keywords: NSHEX, MINIHEX, MINISTRI, Transport, Hexagonal Geometry, Nodal, Finite Difference, Discrete Ordinates,  $S_N$

## 目 次

1. 序論 -----	1
1.1 NSHEX の整備 -----	1
1.2 MINIHEX の整備 -----	2
1.3 MINISTRI の整備 -----	2
1.4 報告書の構成 -----	2
2. 3次元六角体系用輸送計算コードの概要 -----	3
2.1 NSHEX -----	3
2.2 MINIHEX -----	4
2.3 MINISTRI -----	5
3. 3次元六角体系用輸送ノード法計算コード NSHEX の整備 -----	9
3.1 ノード内多項式展開次数の拡張 -----	9
3.2 初期有限差分計算の導入 -----	11
4. 3次元六角体系用輸送六角メッシュ有限差分法計算コード MINIHEX の整備 -----	20
4.1 基礎式の導出 -----	20
4.2 負の中性子束発生時の処理に関する改良 -----	22
5. 3次元六角体系用輸送三角メッシュ有限差分法計算コード MINISTRI の整備 -----	27
5.1 基礎式の導出 -----	27
5.2 コードの整備 -----	32
6. 3次元六角体系用輸送計算コードの検証 -----	36
6.1 検証条件 -----	36
6.2 検証結果 -----	37
6.2.1 KNK-II 炉心における検証結果 -----	37
6.2.2 「もんじゅ」炉心における検証結果 -----	38
6.2.3 SPX 炉心における検証結果 -----	38
6.3 まとめ -----	39
7. 3次元六角体系用輸送計算コードの適用性評価 -----	53
7.1 角度分点セットの条件設定 -----	53
7.2 検討条件 -----	53
7.3 検討結果 -----	54
7.3.1 KNK-II 炉心における検討結果 -----	54
7.3.2 「もんじゅ」炉心における検討結果 -----	55
7.3.3 SPX 炉心における検討結果 -----	56
7.3.4 「常陽」MK-I 炉心における検討結果 -----	57
7.3.5 BFS-62-3A 炉心における検討結果 -----	57
7.4 まとめ -----	58
8. 今後の課題 -----	86

9. 結論 -----	87
参考文献 -----	88
付録 1 NSHEX の実行方法及び入力マニュアル（日本語版）-----	90
付録 2 NSHEX の実行方法及び入力マニュアル（英語版）-----	97
付録 3 MINIHEX の実行方法及び入力マニュアル -----	104
付録 4 MINISTRI の実行方法及び入力マニュアル -----	109
付録 5 NSHEX における径方向もれ取り扱い手法の選定 -----	114
付録 6 角度分点セットの整理 -----	123

## Contents

1.	Introduction	1
1.1	Development of NSHEX	1
1.2	Development of MINIHEX	2
1.3	Development of MINISTRI	2
1.4	Components of the Report	2
2.	Brief description of the Transport Calculation Codes for 3-dimensional Hexagonal Geometry	3
2.1	NSHEX	3
2.2	MINIHEX	4
2.3	MINISTRI	5
3.	Development of the Nodal Transport Calculation Code for 3-dimensional Hexagonal Geometry NSHEX	9
3.1	Extension of the Intranode Polynomial Expansion Order	9
3.2	Adoption of the Initial Finite Difference Calculation	11
4.	Development of the Hexagonal-mesh Finite Difference Transport Calculation Code for 3-dimensional Hexagonal Geometry MINIHEX	20
4.1	Derivation of the Basic Formula	20
4.2	Improvement of the Measures for Negative Flux Generation	22
5.	Development of the Triangle-mesh Finite Difference Transport Calculation Code for 3-dimensional Hexagonal Geometry MINISTRI	27
5.1	Derivation of the Basic Formula	27
5.2	Preparation of the Code	32
6.	Verification of the Transport Calculation Codes for 3-dimensional Hexagonal Geometry	36
6.1	Conditions for the Verification	36
6.2	Results of the Verification	37
6.2.1	Verification Results for the KNK-II Core	37
6.2.2	Verification Results for the Monju Core	38
6.2.3	Verification Results for the SPX Core	38
6.3	Summary	39
7.	Evaluation of Applicability of the Transport Calculation Codes for 3-dimensional Hexagonal Geometry	53
7.1	Fixation of Condition of the Angular Quadrature Set	53
7.2	Condition for the Evaluation	53
7.3	Results of the Evaluation	54
7.3.1	Evaluation Results for the KNK-II Core	54

7.3.2	Evaluation Results for the Monju Core -----	55
7.3.3	Evaluation Results for the SPX Core -----	56
7.3.4	Evaluation Results for the Joyo MK-I Core -----	57
7.3.5	Evaluation Results for the BFS-62-3A Core -----	57
7.4	Summary -----	58
8.	Future Issues -----	86
9.	Concluding Remarks -----	87
	References -----	88
Appendix 1	Execution Guide and Input Manual of NSHEX (Japanese Version) -----	90
Appendix 2	Execution Guide and Input Manual of NSHEX (English Version) -----	97
Appendix 3	Execution Guide and Input Manual of MINIHEX -----	104
Appendix 4	Execution Guide and Input Manual of MINISTRI -----	109
Appendix 5	Fixation of the Treatment of the Radial Leakage in NSHEX -----	114
Appendix 6	Arrangement of the Angular Quadrature Sets -----	123

## 表リスト

Table 3.2-1 Comparison in calculation time among IFDC criterion for the KNK-II core -----	14
Table 3.2-2 Comparison in outer iteration counts of IFDC and nodal calculation among IFDC criterion for the KNK-II core -----	14
Table 3.2-3 Comparison in calculation time among IFDC criterion for the Monju core --	15
Table 3.2-4 Comparison in outer iteration counts of IFDC and nodal calculation among IFDC criterion for the Monju core -----	15
Table 3.2-5 Comparison in calculation time among IFDC criterion for the SPX core ----	16
Table 3.2-6 Comparison in outer iteration counts of IFDC and nodal calculation among IFDC criterion for the SPX core -----	16
Table 4.2-1 Comparison in eigenvalue and calculation time among negative flux measures in MINIHEX for the BFS-62-3A core -----	26
Table 5.1-1 Comparison in eigenvalue and calculation time among negative flux measures in MINISTRI for the KNK-II core -----	33
Table 6.1-1 Angular discretization effects in eigenvalue by NSHEX for the KNK-II core -----	40
Table 6.1-2 Angular discretization effects in eigenvalue by NSHEX for the Monju core -	40
Table 6.1-3 Angular discretization effects in eigenvalue by NSHEX for the SPX core ---	40
Table 6.1-4 Angular discretization effects in power distribution by NSHEX for the Monju core -----	41
Table 6.1-5 Angular discretization effects in power distribution by NSHEX for the SPX core -----	41
Table 6.1-6 Angular discretization effects in absorption reaction rate in the control rod region by NSHEX for the KNK-II core -----	41
Table 6.1-7 Calculation criteria and conditions for verification tests -----	42
Table 6.2-1 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX for the KNK-II core -----	46
Table 6.2-2 Relative difference in eigenvalue and calculation time by MINISTRI for the KNK-II core -----	46
Table 6.2-3 Relative difference in absorption reaction rate in the control rod region by NSHEX for the KNK-II core -----	47
Table 6.2-4 Relative difference in absorption reaction rate in the control rod region by MINISTRI for the KNK-II core -----	47
Table 6.2-5 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX for the Monju core -----	48

Table 6.2-6 Relative difference in eigenvalue and calculation time by MINISTRI for the Monju core -----	48
Table 6.2-7 Relative difference in power distribution by NSHEX for the Monju core -----	49
Table 6.2-8 Relative difference in power distribution by MINISTRI for the Monju core -----	49
Table 6.2-9 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX for the SPX core -----	50
Table 6.2-10 Relative difference in eigenvalue and calculation time by MINISTRI for the SPX core -----	50
Table 6.2-11 Relative difference in power distribution by NSHEX for the SPX core -----	51
Table 6.2-12 Relative difference in power distribution by MINISTRI for the SPX core --	51
Table 7.1-1 Relative difference of the flux and absorption reaction rate in the control rod region due to the change of the angular quadrature set and maximum polynomial order in NSHEX for "Rods half-in" case of the KNK-II core -----	59
Table 7.1-2 Relative difference of the flux and absorption reaction rate in the control rod region due to the change of the angular quadrature set and radial mesh width in MINISTRI for "Rods half-in" case of the KNK-II core -----	59
Table 7.2-1 Calculation criteria and conditions for the reference scheme -----	62
Table 7.2-2 Comparison in effective radial mesh sizes among various cores -----	63
Table 7.3-1 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the KNK-II core -----	66
Table 7.3-2 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the Monju core -----	67
Table 7.3-3 Relative difference in power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the Monju core -----	67
Table 7.3-4 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the SPX core -----	68
Table 7.3-5 Relative difference in power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the SPX core -----	68
Table 7.3-6 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the Joyo MK-I core -----	69
Table 7.3-7 Relative difference in power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the Joyo MK-I core -----	69
Table 7.3-8 Relative difference in eigenvalue and calculation time by MINIHEX with the standard calculation condition for the BFS-62-3A core -----	70

## 図リスト

Fig. 2.1-1	Conceptual view of the nodal method for the 3-D hexagonal-Z geometry	6
Fig. 2.1-2	Conceptual view of the transverse leakage in the 3-D hexagonal-Z geometry	7
Fig. 2.3-1	Triangle mesh division for the 3-D hexagonal-Z geometry	8
Fig. 3.1-1	Definition of basic node parameters	17
Fig. 3.2-1	Comparison in convergence performance of fission source between with and without IFDC for "Rods half-in" case of the KNK-II core	18
Fig. 3.2-2	Comparison in convergence performance of fission source between with and without IFDC for "MCR half-in" case of the Monju core	18
Fig. 3.2-3	Comparison in convergence performance of fission source between with and without IFDC for " MCR half-in " case of the SPX core	19
Fig. 4.1-1	Parameters used in the basic formula of MINIHEX	25
Fig. 5.1-1	Parameters used in the basic formula of MINISTRI	34
Fig. 5.2-1	Mesh numbering within a subassembly in MINISTRI	35
Fig. 6.1-1	Layout of the KNK-II core	43
Fig. 6.1-2	Layout of the Monju core	44
Fig. 6.1-3	Layout of the Super Phenix (SPX) core	45
Fig. 6.2-1	Comparison of the 4th group neutron flux distribution calculated by NSHEX around the control rod region for the KNK-II core	52
Fig. 7.1-1	Dependence of eigenvalue on three angular quadrature sets in NSHEX for "Rods half-in" case of the KNK-II core (2nd order polynomial expansion)	60
Fig. 7.1-2	Dependence of eigenvalue on the maximum polynomial order in NSHEX for "Rods half-in" case of the KNK-II core (Angular quadrature set of $S_4$ )	60
Fig. 7.1-3	Dependence of eigenvalue on three angular quadrature sets in MINISTRI for "Rods half-in" case of the KNK-II core (Radially 24meshes/SA)	61
Fig. 7.1-4	Dependence of eigenvalue on the radial mesh division in MINISTRI for "Rods half-in" case of the KNK-II core (Angular quadrature set of $S_4$ )	61
Fig. 7.2-1	Layout of the Joyo MK-I core	64
Fig. 7.2-2	Layout of the BFS-62-3A core	65
Fig. 7.3-1	Effects of polynomial expansion and angular discretization by NSHEX for the KNK-II core	71
Fig. 7.3-2	Effects of spatial mesh and angular discretization by MINISTRI for the KNK-II core	72
Fig. 7.3-3	Effects of polynomial expansion and angular discretization by NSHEX for the Monju core	73
Fig. 7.3-4	Effects of spatial mesh and angular discretization by MINISTRI for the Monju core	74

Fig. 7.3-5 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "All rods out" case of the Monju core -----	75
Fig. 7.3-6 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "MCR half-in" case of the Monju core -----	75
Fig. 7.3-7 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "MCR in" case of the Monju core -----	76
Fig. 7.3-8 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "BCR in" case of the Monju core -----	76
Fig. 7.3-9 Effects of polynomial expansion and angular discretization by NSHEX for the SPX core -----	77
Fig. 7.3-10 Effects of spatial mesh and angular discretization by MINISTRI for the SPX core -----	78
Fig. 7.3-11 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "All rods out" case of the SPX core -----	79
Fig. 7.3-12 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "MCR half-in" case of the SPX core -----	79
Fig. 7.3-13 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "MCR in" case of the SPX core -----	80
Fig. 7.3-14 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "BCR in" case of the SPX core -----	80
Fig. 7.3-15 Effects of spatial mesh and angular discretization by MINISTRI for the Joyo MK-I core -----	81
Fig. 7.3-16 Percentage relative difference in radial power distribution by MINISTRI with the standard calculation condition for "All rods out" case of the Joyo MK-I core -----	82
Fig. 7.3-17 Percentage relative difference in radial power distribution by MINISTRI with the standard calculation condition for "MCR half-in" case of the Joyo MK-I core -----	82
Fig. 7.3-18 Percentage relative difference in radial power distribution by MINISTRI with the standard calculation condition for "MCR in" case of the Joyo MK-I core -----	83
Fig. 7.3-19 Percentage relative difference in radial power distribution by MINISTRI with the standard calculation condition for "BCR in" case of the Joyo MK-I core -----	83

Fig. 7.3-20 Effects of spatial mesh and angular discretization by MINIHEX and MINISTRI for the BFS-62-3A core -----	84
Fig. 7.4-1 Dependence of relative difference of eigenvalue to the reference on the angular quadrature set of S <sub>4</sub> for the KNK-II core -----	85

This is a blank page.

## 1. 序論

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、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種類の3次元六角体系用輸送計算コード NSHEX、MINIHEX、MINISTRI の整備を行うこととしている。

### 1.1 NSHEX の整備

動力炉・核燃料開発事業団（現、日本原子力研究開発機構）と大阪大学との共同研究により、実機高速炉用として3次元六角体系用輸送ノード法計算コード NSHEX の開発を行ってきた<sup>1, 2)</sup>。NSHEX は空間的な計算要素（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2次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となる。例えば、実機高速炉の多くは燃料集合体サイズ（集合体配列ピッチ）が 10cm 以上あるので、有限差分法の場合は径方向に通常 6 個以上の三角メッシュ分割が必要となるが、NSHEX では集合体内のノード分割は不要である。

さて、大型高速炉の解析で想定されるようにサイズの大きい燃料集合体を取り扱う場合、計算精度を維持するには、有限差分法では燃料集合体サイズに応じてメッシュ分割数を上げる必要があるので、計算負荷は相応に増加する。それに対し、NSHEX では多項式展開次数の拡張により計算負荷をほとんど増加させることなしにより精度を高めた解析が可能であると考えられる。そこで、新たに多項式展開の最大次数を 6 次にまで拡張することにより、計算精度向上について検討を行うこととする。

また、NSHEX はノード法コードであることに起因して、有限差分法計算コードよりも収束性が悪いために、収束判定条件を通常（中性子束または核分裂中性子源:  $1 \times 10^{-4}$ 、固有値:  $1 \times 10^{-5}$ ）の 5 倍程度としており、計算精度の悪化を招いていた。ノード法計算における収束性悪化の原因の 1 つとして、初期推定値の設定に検討の余地があると考えた。そこで、中性子束の初期推定のために計算初期に有限差分法計算を導入することにより収束性の改善について検討を行うこととする。

## 1.2 MINIHEX の整備

ロシア解体核処分支援を目的として、ロシア物理化学エネルギー研究所（IPPE）にある臨界実験装置 BFS-2 を用いた炉物理実験の解析を行う必要性が生じた<sup>3)</sup>。BFS-2 で構築される炉心体系は配列ピッチ 5.1cm を有する六角格子により構成される。ここで、5.1cm の配列ピッチに対してノード法は過度に詳細であることに加えて、約 4,000 個の六角格子から構成される体系を取り扱った場合には計算機容量が膨大になることから、NSHEX の適用は現実的ではなかった。そこで、中型高速炉の解析に S<sub>N</sub> 法有限差分法輸送計算コードを適用する場合には、角度分点を S<sub>4</sub> とし、空間メッシュ幅を 5cm 程度とすれば、角度分点と空間メッシュの詳細化に伴う効果が打消合うことにより、無限角度分点及び無限小空間メッシュ計算相当の結果が得られるとの知見<sup>4)</sup>に基づいて、新たに 3 次元六角体系用六角メッシュ有限差分法計算コード MINIHEX コード<sup>5)</sup>が作成された。核燃料サイクル開発機構（現、日本原子力研究開発機構）は、この MINIHEX を BFS-2 臨界実験解析に適用することより、ロシア解体核処分支援活動に大いに貢献した<sup>6)</sup>。

MINIHEX に関しては、既存のものから特に改良は行っていないが、後述の MINISTRI の整備に合わせて、負の中性子束発生時の処理を見直すこととする。

## 1.3 MINISTRI の整備

NSHEX は貴重な 3 次元六角体系用輸送計算コードであることから、その実機プラント計算での利用や応用が大いに望まれており、摂動計算へ接続することは必須である。輸送ノード法に基づく摂動計算を行うには、有限差分法と異なりノード平均中性子束だけでなくノード内の中性子束分布及び随伴中性子束分布を精度良く再構築する必要がある。そのため、摂動計算用にノード内の中性子束分布及び随伴中性子束分布の再構築が試みられたが、参照解となる直接計算による結果を再現できる再構築法を見出すことはできなかった<sup>7)</sup>。

また、BFS-2 に対する MINIHEX の適用性に関して、角度分点と空間メッシュの詳細化に伴う効果の打消し合いの知見には基づいていたものの、それらの具体的な検討は行っておらず、知見成立の確認のための定量的な評価が必要である。

そこで、NSHEX 及び MINIHEX の補完的な用途への適用を想定して、3 次元六角体系用三角メッシュ有限差分法計算コード MINISTRI を新たに作成し、上記課題について検討する。

## 1.4 報告書の構成

報告書の構成としては、第 2 章において各計算コードの概要を述べ、第 3 章、第 4 章、第 5 章ではそれぞれ NSHEX、MINIHEX、MINISTRI の整備について記述し、第 6 章では NSHEX と MINISTRI の検証結果を、第 7 章では NSHEX と MINISTRI に加えて MINIHEX も加えた適用性評価を、第 8 章では 3 つのコードに関する課題をまとめ、第 9 章で結論を述べる。

なお、本報の付録に、NSHEX、MINIHEX、MINISTRI の実行方法と入力マニュアルを示し、3 つのコードの利用性向上に資する。

## 2. 3次元六角体系用輸送計算コードの概要

### 2.1 NSHEX

NSHEX (Nodal  $S_N$  transport calculation code for HEXagonal-Z geometry) は 3 次元六角体系用輸送ノード法計算コードである。基礎方程式は、輸送方程式に対して横方向（例えば、X 軸方向に着目する場合には Y 軸方向と Z 軸方向）に積分を行うことにより、中性子ソース項に横方向もれ項が加えられた 1 次元輸送方程式を求め、その方程式を解析的に解くことにより得られる。NSHEX は、基礎方程式の解法や横方向もれの取り扱いなどにおいて、以下の特徴を有している。

#### ① $S_N$ 法による中性子束の角度依存性の取り扱い

中性子束の角度依存性の取り扱い手法として、国内の高速炉解析において使用実績の豊富な離散座標法 ( $S_N$  法) を採用している<sup>1)</sup>。なお、非等方散乱を考慮するための高次  $P_N$  定数の取り扱いには対応していない。

#### ② 多項式展開によるノード内中性子束およびソース分布の取り扱い

Fig. 2.1-1 に示すようにノード内の中性子束およびソース分布は多項式展開により取り扱われる<sup>1)</sup>。多項式展開は最大 2 次まで可能であったが、適合性の向上を図るために本整備により最大 6 次まで拡張する。

#### ③ ノード間パラメータ接続における $S_N$ 法の適用

NSHEX の開発前は、ノード間のパラメータの接続として、拡散ノード法を発展させて、スカラー中性子束と部分中性子流を用いた方法が報告されていた<sup>8)</sup>。NSHEX では計算精度向上を目的として、より忠実である角度中性子束を用いた接続、すなわち、ノード境界中性子束および横方向もれの角度依存性の取り扱いに対しても  $S_N$  法を適用している<sup>1)</sup>。

#### ④ 六角格子体系用の独自の横方向もれの取り扱い手法

六角格子に対してノード法を適用する場合、Fig. 2.1-2 に示すように、径方向（例えば X 軸方向）への適用と軸方向（Z 軸方向）への適用とで、横方向もれの形態が異なっているために、取り扱い方法も異なる。軸方向にノード法を適用する場合には、横方向もれは径方向（X 軸、U 軸、V 軸方向）のみなので、定式化は直交座標体系用のノード法と同じであり、直交座標体系用ノード法で一般に採用されている 2 次多項式近似を採用している<sup>1)</sup>。それに対し、径方向（例えば X 軸方向）にノード法を適用する場合には、横方向もれは軸方向（Z 軸方向）と径方向（U 軸、V 軸方向）にそれぞれ存在する。

軸方向もれについては、ノード平均中性子束の軸方向内挿を利用した方法を採用している<sup>2)</sup>。

径方向もれに対しては、幾何学的形状から他のもれのように関数をフィッティングするような簡単な方法で取り扱うことは不可能である。従って、NSHEX ではノードの頂点（コーナー）の中性子束をその周囲のパラメータからの近似により求め、得られたノード頂点中性子束を利

用してもれの算出を行っている<sup>9)</sup>。なお、文献9)では2次多項式展開による取り扱いを示しているが、本報の付録5に示すように、径方向もれの取り扱いに関するサーベイを行い、1次多項式展開が最適と判断した。

##### ⑤収束性向上のための初期有限差分法計算

本報の第3章で示すように、ノード法計算の収束性を改善するために初期中性子束の推定として初期有限差分法計算を導入する。すなわち、ノード法計算に先立ち、1ノードを1メッシュとする有限差分法計算により、初期核分裂中性子源分布を与え、収束性の改善を図る。なお、ユーザーの利便を考え、当計算処理の導入に際しては、わずかな入力の変更のみで済むようとする。

加速法としては、内側反復計算においてノード単位のリバランス法の適用が可能である。

NSHEX に関しては、これまで、減速材付小型高速炉炉心 KNK-II、中型高速炉炉心「もんじゅ」、大型高速炉炉心「スーパーフェニックス」を対象に検証が行われている<sup>1, 2, 10)</sup>。本報ではそれらに関連する NSHEX の整備による効果の詳細を示すと共に、実用性を重視した適用性評価にも言及する。

## 2.2 MINIHEX

MINIHEX (Transport calculation code for reactor cores with MINI-HEXagonal-Z geometry) は3次元六角体系用輸送六角メッシュ有限差分法計算コードである<sup>5)</sup>。六角格子で形成される径方向に関しては、1格子が1メッシュに相当し、それ以上のメッシュの細分化には対応していない。軸方向には任意にメッシュの分割が可能である。中性子束の角度依存性の取り扱いには NSHEX と同様に  $S_N$  法を用いている。同じく、非等方散乱を考慮するための高次  $P_N$  定数の取り扱いには対応していない。加速法としては、外側反復計算において、中性子源外挿法の適用が可能である。

MINIHEX は六角格子の配列ピッチが 5.1cm であるロシアの物理科学エネルギー研究所 (IPPE) にある臨界実験装置 BFS-2 を用いて行われた臨界実験の解析<sup>6)</sup>を想定して作成されたコードである。中型高速炉の解析に  $S_N$  法有限差分法輸送計算コードを適用する場合には、角度分点を  $S_4$  とし、空間メッシュ幅を 5cm 程度とすれば、角度分点と空間メッシュの詳細化に効果が打消合うことにより（詳細は第6章参照）、無限角度分点及び無限小空間メッシュ計算相当の結果が得られるとの知見に基づいて<sup>4)</sup>、MINIHEX が作成された。

しかしながら、当時のこの知見は、2次元 RZ 体系計算において見出されたものであり、3次元六角体系に対しての妥当性の確認が望ましい状況である。そこで、本報では、MINIHEX の適用性に加えて、次に紹介する MINISTRI による解析と組合せることにより、3次元六角体系である BFS-2 に対するその知見の妥当性評価についても触れる。

## 2.3 MINISTRI

MINISTRI (Transport calculation code for reactor cores with hexagonal-Z geometry by treating MINced InSide TRIangle-Z meshes) は 3 次元六角体系用輸送三角メッシュ有限差分法計算コードである。六角格子で形成される径方向に関しては、1 格子を 6、24、54、96 個の三角メッシュに分割して計算を行うことができる（物質（断面積）の指定は六角格子単位であり、三角メッシュ単位での指定は不可能）。具体例として、Fig. 2.3-1 には 1 つの六角格子（燃料集合体）を 6 個及び 24 個の三角メッシュに分割した様子を示している。軸方向には任意にメッシュの分割が可能である。中性子束の角度依存性の取り扱いには NSHEX や MINIHEX と同様に  $S_N$  法を用いている。同じく、非等方散乱を考慮するための高次  $P_N$  定数の取り扱いには対応していない。加速法としては、内側及び外側反復計算のそれぞれにおいて、中性子源外挿法及び粗メッシュリバランス法の双方の適用が可能である。

3 次元  $S_N$  法輸送三角メッシュ計算コードとしては、ENSEMBLE-TRIZ が既に存在するが<sup>11-13)</sup>、公開や一般共用はされていない。従って、ENSEMBLE-TRIZ と同様の機能を有し、NSHEX の補完的な位置づけとして、MINISTRI を新たに作成した。本報では、MINISTRI の整備、NSHEX との比較を含めた検証や適用性評価について記述する。また、先に述べた MINIHEX コードの適用性評価に資するために径方向メッシュ分割効果の評価結果についても示す。

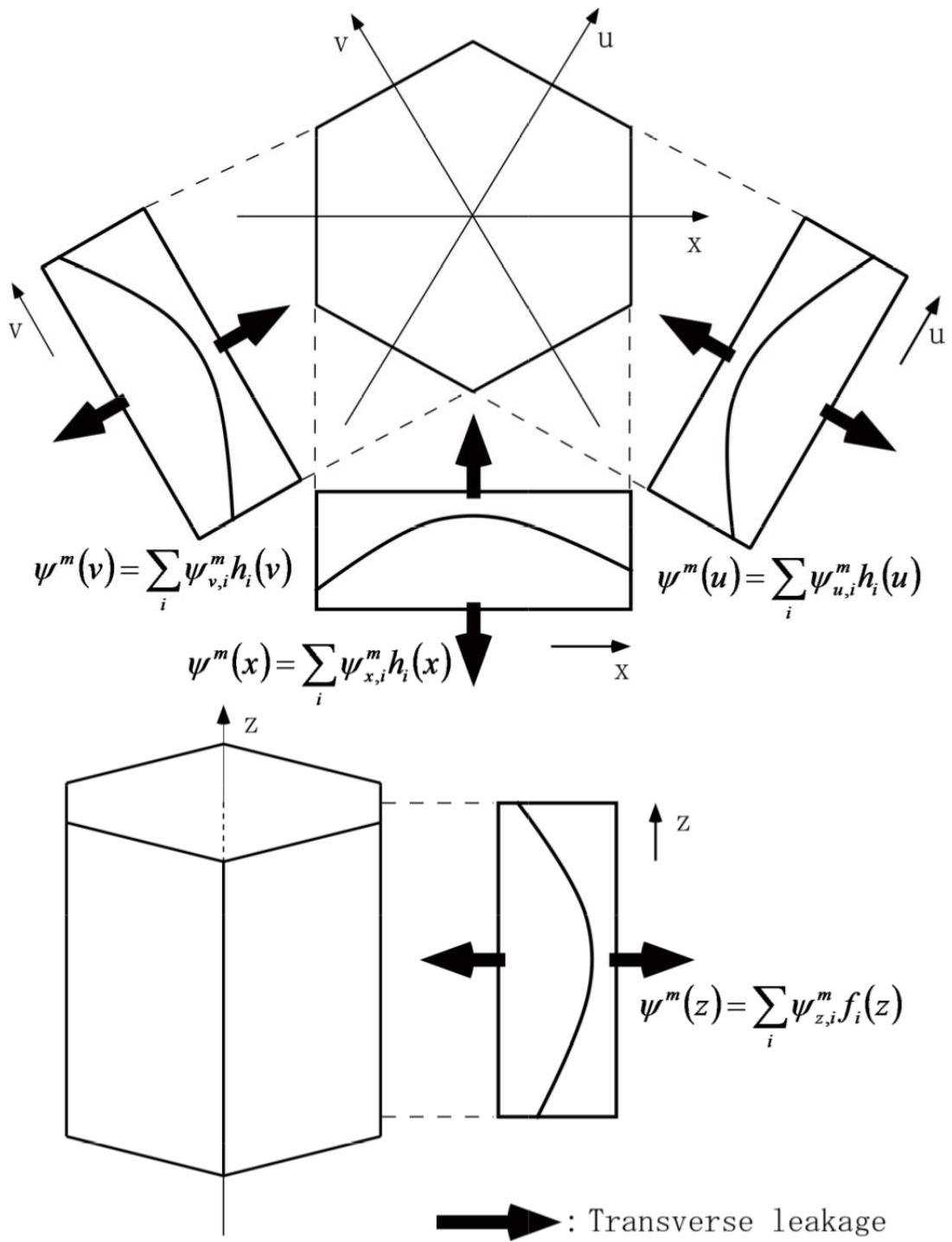
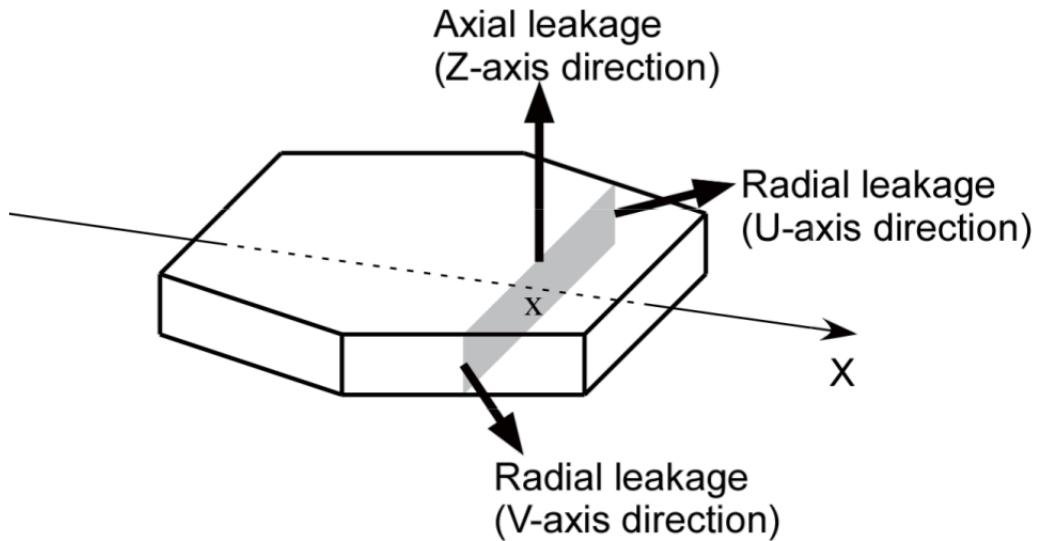
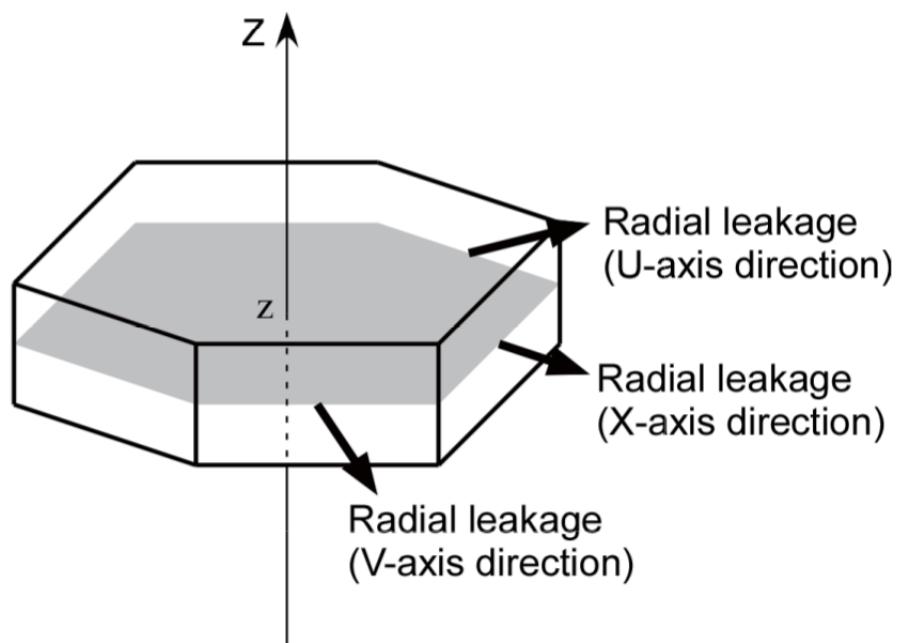


Fig. 2.1-1 Conceptual view of the nodal method for the 3-D hexagonal-Z geometry

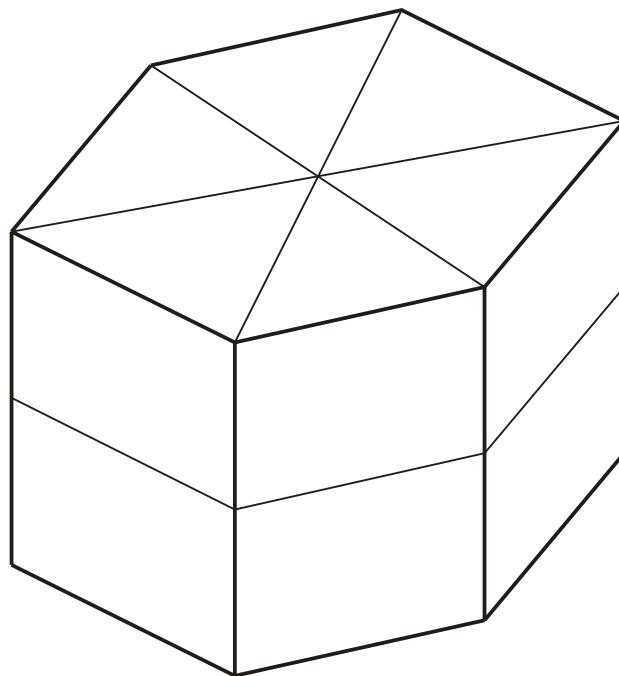


(Nodal method for the radial direction)

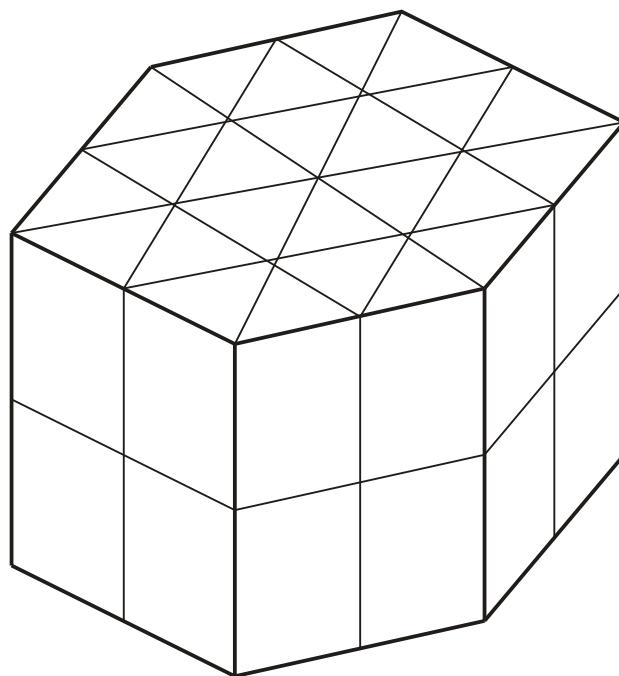


(Nodal method for the axial direction)

Fig. 2.1-2 Conceptual view of the transverse leakage in the 3-D hexagonal-Z geometry



(6 meshes per subassembly in the radial direction)



(24 meshes per subassembly in the radial direction)

Fig. 2.3-1 Triangle mesh division for the 3-D hexagonal-Z geometry

### 3. 3次元六角体系用輸送ノード法計算コード NSHEX の整備

本章では、NSHEX（3分の1炉心版: Ver. 10A.1、全炉心版: Ver. 10B.1）の整備として、ノード内多項式展開次数の拡張と初期有限差分計算の導入について述べる。

#### 3.1 ノード内多項式展開次数の拡張

NSHEX では、ノード内の中性子束分布を多項式展開により取り扱うが、従来の NSHEX では最大 2 次までの取り扱いであった。NSHEX の適用性向上を考えた場合、特に大型炉心のような大型燃料集合体を有する炉心の解析では、2 次の多項式展開ではノード内の中性子束を適切に表現できず、計算精度が不十分であることが懸念される。そこで、そのような大型燃料集合体を有する炉心の解析においても、十分な精度を確保するために、ノード内の中性子束を最大で 6 次の多項式展開により取り扱い可能となるように機能拡張を行う。

今、次の離散座標法（S<sub>N</sub>法）に基づく3次元中性子輸送方程式を扱う。

$$\vec{\Omega}^m \cdot \nabla \psi^m(x, y, z) + \Sigma_t \psi^m(x, y, z) = Q(x, y, z). \quad (3.1-1)$$

ここで、

$\vec{\Omega}^m$ : 中性子方向余弦ベクトル ( $= (\mu^m, \eta^m, \xi^m)$ )

$m$ : 角度分点変数

$\psi^m$ : 角度分点  $m$  の角度中性子束

$\Sigma_t$ : 全断面積

$Q$ : 中性子源（等方）

これから対象とするのは、径方向（X軸方向）の対面間距離  $d_r$ 、軸方向（Z軸方向）の幅  $d_z$  を有する六角柱状のノードである。Fig. 3.1-1に示すようにX、Y、Z軸の各方向の座標は対面間距離  $d_r$  と軸方向ノード幅  $d_z$  によってそれぞれ規格化されている。(3.1-1)式をX軸方向に対する横方向（垂直方向）、すなわち、Y軸方向とZ軸方向にそれぞれ、 $-y_s(x) < y < y_s(x)$ 、及び、 $-1/2 < z < 1/2$  の区間にわたって積分することにより、次のX軸方向の1次元の輸送方程式を得る。

$$\frac{\mu^m}{d_r} \frac{d}{dx} \{y_s(x) \psi^m(x)\} + \Sigma_t y_s(x) \psi^m(x) = y_s(x) \{Q(x) - L_z^m(x)\} - L_r^m(x). \quad (3.1-2)$$

ここで、 $\psi^m(x)$  は次式で定義されるX軸方向の1次元の角度中性子束である。

$$\psi^m(x) = \frac{\int_{-1/2}^{1/2} dz \int_{-y_s(x)}^{y_s(x)} dy \psi^m(x, y, z)}{\int_{-1/2}^{1/2} dz \int_{-y_s(x)}^{y_s(x)} dy}. \quad (3.1-3)$$

そして、 $y_s(x)$  は次式で定義される関数である。

$$y_s(x) = \frac{1 - |x|}{\sqrt{3}}. \quad (3.1-4)$$

同様にして、Z軸方向の1次元輸送方程式は、(3.1-1)式をZ軸方向に対する横方向、すなわち、Y軸方向とX軸方向にそれぞれ、 $-y_s(x) < y < y_s(x)$  と  $-1/2 < x < 1/2$  の区間にわたって積分することにより、次の通り得られる。

$$\frac{\xi^m}{d_z} \frac{d}{dz} \psi^m(z) + \Sigma_t \psi^m(z) = Q(z) - L_r^m(z). \quad (3.1-5)$$

ここで、 $\psi^m(z)$  は次式で与えられるZ軸方向の1次元の角度中性子束である。

$$\psi^m(z) = \frac{\int_{-1/2}^{1/2} dx \int_{-y_s(x)}^{y_s(x)} dy \psi^m(x, y, z)}{\int_{-1/2}^{1/2} dx \int_{-y_s(x)}^{y_s(x)} dy}. \quad (3.1-6)$$

(3.1-2)式と(3.1-5)式にある  $L_z^m(x)$ 、 $L_r^m(x)$ 、 $L_r^m(z)$  は横方向もれであり、詳細は文献1)を参照されたい。(3.1-2)式と(3.1-5)式を解くことにより、ノード内中性子束  $\psi^m(x)$  及び  $\psi^m(z)$  が得られるが、詳細は同じく文献1)を参照されたい。

NSHEXではX軸方向のノード内角度中性子束は次の多項式展開により扱われる。

$$\psi^m(x) = \sum_{i=0}^N \psi_{x,i}^m h_i(x). \quad (3.1-7)$$

ここで、 $N$  は多項式展開次数である。また、 $h_i(x)$  は六角座標における直交関数系であり、次式を満たす。

$$\int_{-1/2}^{1/2} dx h_i(x) h_j(x) y_s(x) \propto \delta_{ij}. \quad (3.1-8)$$

同様にして、Z軸方向のノード内角度中性子束は次式の通り扱われる。

$$\psi^m(z) = \sum_{i=0}^N \psi_{z,i}^m f_i(z), \quad (3.1-9)$$

ここで、 $f_i(z)$  はXYZ座標（直行座標）における直交関数系であり、次式を満たす。

$$\int_{-1/2}^{1/2} dz f_i(z) f_j(z) \propto \delta_{ij}. \quad (3.1-10)$$

これまでのNSHEXでは最大2次の多項式展開による扱いであったが、ここでは計算精度向上のために最大6次まで拡張する。

径方向（X軸方向）の直交関数系  $h_i(x)$  は次の通り定義される。

$$\begin{cases} h_0(x) = 1 \\ h_1(x) = x \\ h_2(x) = x^2 - \frac{5}{72} \\ h_3(x) = x^3 - \frac{7}{50}x \\ h_4(x) = x^4 - \frac{725}{3556}x^2 + \frac{631}{142240} \\ h_5(x) = x^5 - \frac{1015}{3786}x^3 + \frac{5693}{424032}x \\ h_6(x) = x^6 - \frac{2517805}{7607512}x^4 + \frac{13769}{524656}x^2 - \frac{1425815}{5112248064} \end{cases}. \quad (3.1-11)$$

また、軸方向（Z軸方向）の直交関数系  $f_i(z)$  は次式の通り定義される。

$$\begin{cases} f_0(z) = 1 \\ f_1(z) = z \\ f_2(z) = z^2 - \frac{1}{12} \\ f_3(z) = z^3 - \frac{3}{20}z \\ f_4(z) = z^4 - \frac{3}{14}z^2 + \frac{3}{560} \\ f_5(z) = z^5 - \frac{5}{18}z^3 + \frac{5}{336}z \\ f_6(z) = z^6 - \frac{15}{44}z^4 + \frac{5}{176}z^2 - \frac{5}{14784} \end{cases}. \quad (3.1-12)$$

(3.1-11)式及び(3.1-12)式の3次から6次までが拡張部分である。

ノード内多項式展開次数を2次から6次に拡張したことによる効果については、第4章及び第5章で言及する。

### 3.2 初期有限差分計算の導入

これまでの経験から、初期核分裂中性子源の与え方によって、計算の収束性が異なることが分かっていたが、その要因の1つとして、輸送ノード法では計算パラメータが有限差分法等の一般の計算法と比較して比較的多いことが挙げられる。すなわち、不適切な初期中性子源の下

では不適切な高次モーメントが誘起され、収束性が損なわれるものと考えられる。そこで、ノード法計算前に初期有限差分計算（IFDC: Initial Finite Difference Calculation）を導入することにより、ノード法計算のためのより適切な初期核分裂中性子源の推定を試みた。

IFDC は、適切な初期核分裂中性子源を得る観点からはある適度の反復計算が必要であるが、ノード法計算も合わせた全計算時間短縮の観点からは少ないに越したことはない。従って、ノード法計算の収束性向上と計算時間の短縮から最適な反復計算条件や回数が存在するものと考えられる。そこで、IFDC における核分裂中性子源の収束判定条件をパラメータにして、反復計算条件に関するサーベイを行うこととした。計算対象体系としては、第 4 章で紹介する KNK-II 炉心、「もんじゅ」炉心、スーパーフェニックス（SPX）炉心の各制御棒挿入状態とした。また、ノード法計算における収束判定条件は、第 4 章及び第 5 章で述べる計算条件と同様に核分裂中性子源については  $1 \times 10^{-4}$  と、固有値については  $1 \times 10^{-5}$  とした。また、計算には Linux ワークステーション Precision 690 (CPU: Core2 Duo、クロック周波数 3.0GHz) を使用した。

### (1) KNK-II 炉心

IFDC における核分裂中性子源の収束判定条件をパラメータにした場合の、計算時間 (IFDC とノード法計算の合計) の比較を Table 3.2-1 に、IFDC とノード法計算各々の外側反復回数の比較を Table 3.2-2 にそれぞれ示す。

KNK-II 炉心に関しては、"All rods out" (全制御棒引抜、Rod は制御棒の意) のケースでは IFDC の適用なしでも収束が得られている。それに対し、"Rods half-in" (制御棒半挿入) と "Rods in" (制御棒全挿入) のケースについては、IFDC の適用なしでは収束が得られず、IFDC の適用が不可欠であることが分かる。"Rods half-in" のケースにおけるノード法計算の核分裂中性子源の収束状況の比較を Fig.3.2-1 に示す。図から、IFDC を適用しない場合には、核分裂中性子源は一旦  $1 \times 10^{-3}$  程度までは収束するが、判定条件である  $1 \times 10^{-4}$  までには反復誤差は減少せずに逆に増加に転じていることが分かる。

次に、IFDC を適用した場合の計算時間の比較について、IFDC の収束判定条件を 0.1 から 0.05、0.04 と厳しくするに従い、わずかながら計算時間の増加が見られることが分かる。これは、IFDC の収束判定条件を厳しくした場合、ほぼ単純に IFDC の反復回数 (計算時間) が増加するだけで、ノード法の反復回数 (計算時間) がほとんど短縮されないためである。このように、KNK-II 炉心に対しては、IFDC は非常に有効であり、IFDC の収束判定条件は IFDC の外側反復計算 2~4 回に相当する 0.1 程度で十分であることが分かった。

### (2) 「もんじゅ」炉心

計算時間の比較を Table 3.2-3 に、IFDC とノード法計算各々の外側反復回数の比較を Table 3.2-4 にそれぞれ示す。

「もんじゅ」炉心については、"All rods out"、"MCR half-in" (MCR は主調整棒の意)、"MCR in"、"BCR in" (BCR は後備炉停止棒の意) の全てのケースに対して IFDC なしでは収束が得られていない。"MCR half-in" のケースにおけるノード法計算の核分裂中性子源の収束状況の

比較を Fig.3.2-2 に示す。図から、IFDC を適用しない場合には、核分裂中性子源は一旦  $5 \times 10^{-4}$  程度までは収束するが、判定条件である  $1 \times 10^{-4}$  までには反復誤差は減少せずに逆に増加に転じていることが分かる。

IFDC を適用した場合には、全ての場合について計算の収束が得られている。計算時間に関しては、IFDC の収束判定条件を 0.02 程度とした場合に最も短縮されることが分かる。これは、IFDC の収束判定条件を厳しくすると、IFDC の反復回数の増加は見られるものの、収束判定条件を 0.02 程度と厳しくするまではノード法計算の反復回数が大幅に減少しているためである。

### (3) スーパーフェニックス (SPX) 炉心

計算時間の比較を Table 3.2-5 に、IFDC とノード法計算各々の外側反復回数の比較を Table 3.2-6 にそれぞれ示す。

SPX 炉心についても「もんじゅ」炉心と同様に"All rods out"、"MCR half-in"、"MCR in"、"BCR in" の全てのケースに対して IFDC なしでは収束が得られなかった。"MCR half-in" のケースにおけるノード法計算の核分裂中性子源の収束状況の比較を Fig. 3.2-3 に示す。図から、IFDC を適用しない場合には、ほとんど収束が得られずにすぐに発散している様子が分かる。

IFDC を適用した場合には、IFDC の収束判定条件を 0.05 よりも厳しくすることにより一部を除いて計算の収束が得られた。計算時間に関しては、IFDC の収束判定条件を 0.01 付近とした場合に最も短縮されることが分かるが、"All rods out" のケースでは発散が見られており、0.02 とした場合は収束が得られているものの計算時間が大幅に増加している。

### (4) まとめ

IFDC に関する検討から、初期核分裂中性子源分布にはノード法計算における収束の許容範囲があり、適切な IFDC の適用により初期核分裂中性子源分布を収束の許容範囲外から許容範囲内へと推移させることが可能であることが分かった。反面、IFDC の適用により計算が発散する場合も見られることが分かった。この場合は、現状では IFDC の収束判定条件を変更した再計算しか対応策は見出せていない。

以上のように、確実にノード法計算を収束させる IFDC の条件は見出せなかつたが、今回の検討結果からは収束判定条件として 0.02~0.03 が推奨される。その条件で計算が発散した場合には、0.05 に緩める、あるいは、0.005 に厳しくすることが推奨される。

Table 3.2-1 Comparison in calculation time among IFDC criterion for the KNK-II core

Convergence criterion	All rods out	Rods half-in	Rods in
(No IFDC)	89 <sup>*1</sup>	NC <sup>*2</sup>	NC <sup>*2</sup>
0.100	89	159 <sup>*1</sup>	103 <sup>*1</sup>
0.050	88	161	102
0.040	88	157	101
0.030	90	161	107
0.020	90	160	103
0.010	91	163	104
0.005	94	164	108

\*1: Calculation time [s]

\*2: Not converged

Table 3.2-2 Comparison in outer iteration counts of IFDC and nodal calculation among IFDC criterion for the KNK-II core

Convergence criterion	All rods out		Rods half-in		Rods in	
	IFDC	Nodal	IFDC	Nodal	IFDC	Nodal
(No IFDC)	0	39	0	NC <sup>*1</sup>	0	NC <sup>*1</sup>
0.100	3	31	4	43	2	37
0.050	4	30	4	43	4	35
0.040	4	30	6	38	4	35
0.030	6	30	7	42	5	35
0.020	7	30	8	41	6	35
0.010	8	29	11	41	7	34
0.005	11	29	14	40	11	34

\*1: Not converged

Table 3.2-3 Comparison in calculation time among IFDC criterion for the Monju core

Convergence criterion	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
(No IFDC)	NC <sup>*2</sup>	NC <sup>*2</sup>	NC <sup>*2</sup>	NC <sup>*2</sup>
0.100	120 <sup>*1</sup>	118 <sup>*1</sup>	110 <sup>*1</sup>	113 <sup>*1</sup>
0.050	110	105	84	111
0.040	109	115	84	110
0.030	98	85	84	88
0.020	76	87	79	84
0.010	78	86	81	90
0.005	79	88	82	87

\*1: Calculation time [min]

\*2: Not converged

Table 3.2-4 Comparison in outer iteration counts of IFDC and nodal calculation among IFDC criterion for the Monju core

Convergence criterion	All rods out		MCR half-in		MCR in		BCR in	
	IFDC	Nodal	IFDC	Nodal	IFDC	Nodal	IFDC	Nodal
(No IFDC)	0	NC <sup>*1</sup>	0	NC <sup>*1</sup>	0	NC <sup>*1</sup>	0	NC <sup>*1</sup>
0.100	4	108	6	105	5	106	6	106
0.050	10	104	10	103	10	102	11	103
0.040	11	104	12	102	11	101	12	102
0.030	32	93	30	88	12	100	13	101
0.020	39	73	36	85	37	88	39	89
0.010	48	73	45	83	46	84	48	87
0.005	56	71	54	80	54	86	56	87

\*1: Not converged

Table 3.2-5 Comparison in calculation time among IFDC criterion for the SPX core

Convergence criterion	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
(No IFDC)	NC <sup>*2</sup>	DIV <sup>*3</sup>	NC <sup>*2</sup>	NC <sup>*2</sup>
0.100	DIV <sup>*3</sup>	NC <sup>*2</sup>	280 <sup>*1</sup>	261 <sup>*1</sup>
0.050	158 <sup>*1</sup>	NC	201	200
0.040	153	217 <sup>*1</sup>	174	198
0.030	157	237	174	195
0.020	248	204	215	175
0.010	DIV	195	209	172
0.005	148	206	243	174

<sup>\*1</sup>: Calculation time [min]<sup>\*2</sup>: Not converged<sup>\*3</sup>: Diverged

Table 3.2-6 Comparison in outer iteration counts of IFDC and nodal calculation among IFDC criterion for the SPX core

Convergence criterion	All rods out		MCR half-in		MCR in		BCR in	
	IFDC	Nodal	IFDC	Nodal	IFDC	Nodal	IFDC	Nodal
(No IFDC)	0	NC <sup>*1</sup>	0	DIV <sup>*2</sup>	0	NC <sup>*1</sup>	0	NC <sup>*1</sup>
0.100	15	DIV <sup>*2</sup>	6	NC <sup>*1</sup>	6	150	4	153
0.050	40	96	36	NC	33	94	39	120
0.040	43	87	39	109	36	95	42	116
0.030	46	87	42	115	40	92	45	119
0.020	50	141	48	110	44	102	48	99
0.010	55	DIV	58	102	52	110	54	100
0.005	62	80	65	108	71	129	62	97

<sup>\*1</sup>: Not converged<sup>\*2</sup>: Diverged

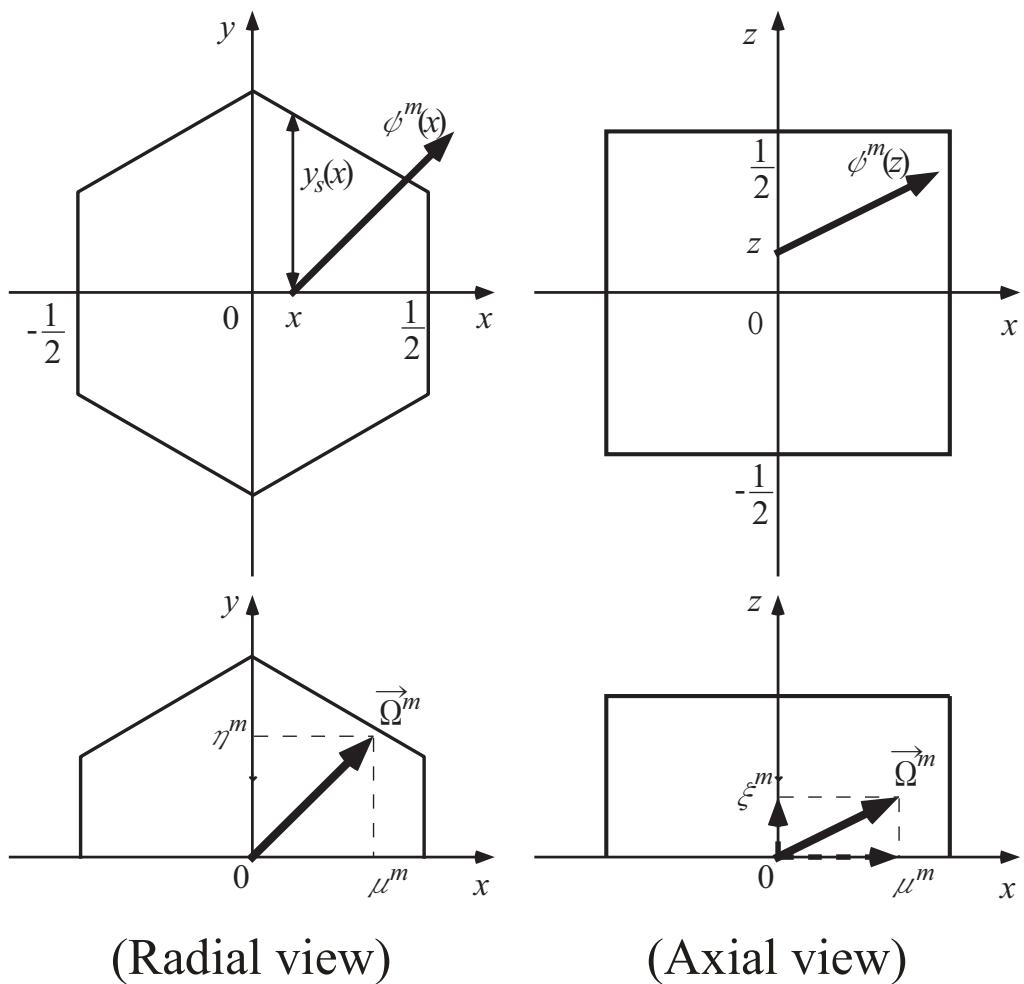


Fig. 3.1-1 Definition of basic node parameters

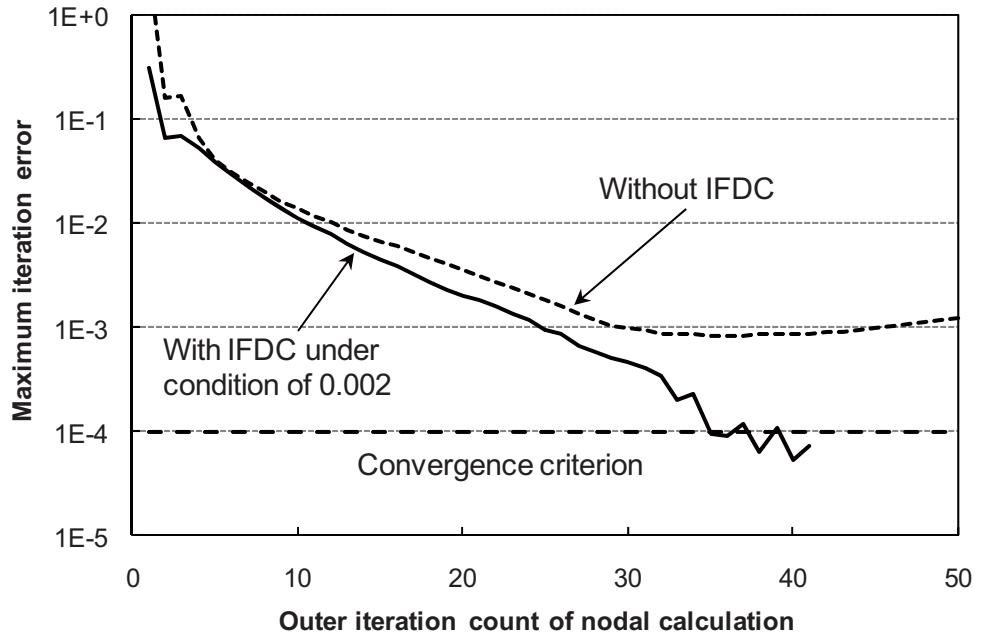


Fig. 3.2-1 Comparison in convergence performance of fission source between with and without IFDC for "Rods half-in" case of the KNK-II core

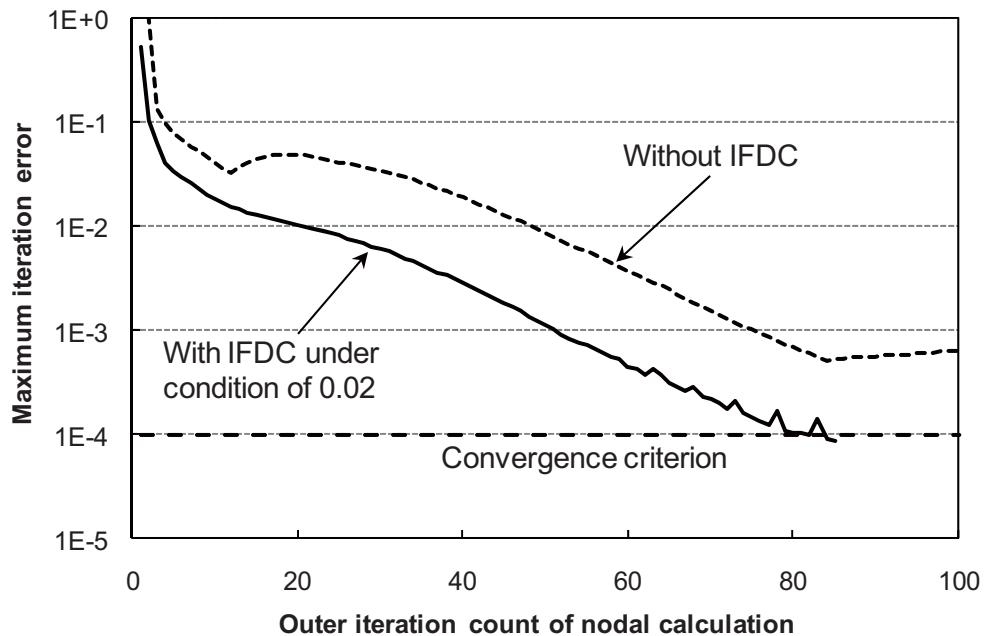


Fig. 3.2-2 Comparison in convergence performance of fission source between with and without IFDC for "MCR half-in" case of the Monju core

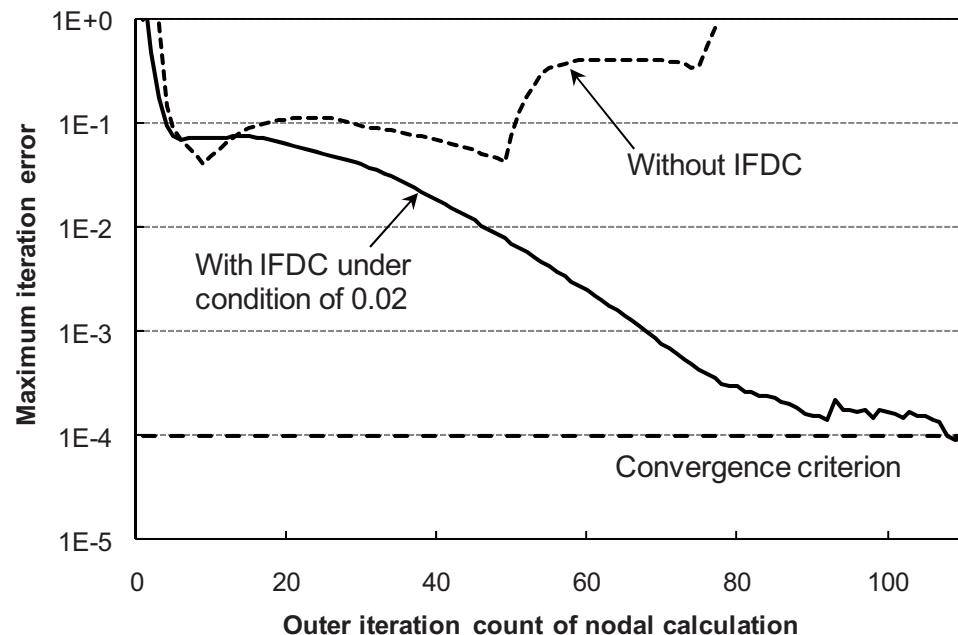


Fig. 3.2-3 Comparison in convergence performance of fission source between with and without IFDC for "MCR half-in" case of the SPX core

#### 4. 3次元六角体系用輸送六角メッシュ有限差分法計算コード MINIHEX の整備

本章では、MINIHEX (Ver. 2.1) の整備として、基礎式の導出（参考用）と負の中性子束発生時の処理に関する改良について述べる。

##### 4.1 基礎式の導出

ここでは、単位燃料集合体を想定した正六角形体系（対辺間距離  $h_r$ ）を取り扱う。また、簡単のために中性子束の軸方向（Z 軸方向）のストリーミングの取り扱いについては省略する。

さて、まずは次の S<sub>N</sub> 法に基づく 2 次元輸送方程式（X-Y 軸方向）を基本にする。

$$\frac{\mu^m}{h_r} \frac{\partial \psi^m(x, y)}{\partial x} + \frac{\eta^m}{h_r} \frac{\partial \psi^m(x, y)}{\partial y} + \Sigma_t \psi^m(x, y) = Q(x, y). \quad (4.1-1)$$

ここで、

$\mu^m$ : 中性子方向余弦（角度分点  $m$ ）の X 軸方向成分

$\eta^m$ : 中性子方向余弦（角度分点  $m$ ）の Y 軸方向成分

$m$ : 角度分点変数

$\psi^m$ : 角度分点  $m$  の角度中性子束

$\Sigma_t$ : 全断面積

$Q$ : 中性子源（等方）

今、Fig. 4.1-1 に示す六角メッシュを対象とする。Fig. 4.1-1 中にある関数  $y_s(x)$  は次の通り定義される。

$$y_s(x) = \frac{1 - |x|}{\sqrt{3}}. \quad (4.1-2)$$

まず、単位正六角形メッシュの積分によりバランス式を得る。

(4.1-1)式の左辺第 1 項について、

$$\begin{aligned}
& \frac{\mu^m}{h_r} \int_{-1/2}^{1/2} dx \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \frac{\partial \psi^m(x, y)}{\partial x} \\
&= \frac{\mu^m}{h_r} \int_{-1/2}^{1/2} dx \left\{ \frac{d}{dx} \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \psi^m(x, y) - \frac{\partial}{\partial y} \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \psi^m(x, y) \frac{dy}{dx} \right\} \\
&= \frac{\mu^m}{h_r} \int_{-1/2}^{1/2} dx \frac{d}{dx} \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \psi^m(x, y) \\
&- \frac{\mu^m}{h_r} \int_{-1/2}^{1/2} dx \left\{ \psi^m(x, y_s(x)) \frac{dy_s(x)}{dx} - \psi^m(x, -y_s(x)) \frac{d(-y_s(x))}{dx} \right\} \\
&= \frac{\mu^m}{h_r} \left[ \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \psi^m(x, y) \right]_{-1/2}^{1/2} + \frac{\mu^m}{\sqrt{3}h_r} \int_{-1/2}^{1/2} dx \cdot \text{sign}(x) \{ \psi^m(x, y_s(x)) + \psi^m(x, -y_s(x)) \} \\
&= \frac{\mu^m}{\sqrt{3}h_r} (\bar{\psi}_{x+}^m - \bar{\psi}_{x-}^m) + \frac{\mu^m}{2\sqrt{3}h_r} (\bar{\psi}_{u+}^m + \bar{\psi}_{v-}^m - \bar{\psi}_{v+}^m - \bar{\psi}_{u-}^m)
\end{aligned} \tag{4.1-3}$$

(4.1-1)式の左辺第2項について、

$$\begin{aligned}
& \frac{\eta^m}{h_r} \int_{-1/2}^{1/2} dx \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \frac{\partial \psi^m(x, y)}{\partial y} = \frac{\eta^m}{h_r} \int_{-1/2}^{1/2} dx \{ \psi^m(x, y_s(x)) - \psi^m(x, -y_s(x)) \} \\
&= \frac{\eta^m}{2h_r} (\bar{\psi}_{u+}^m - \bar{\psi}_{v-}^m + \bar{\psi}_{v+}^m - \bar{\psi}_{u-}^m)
\end{aligned} \tag{4.1-4}$$

(4.1-1)式の左辺第1項と第2項については、以下の通り変形される。

$$\begin{aligned}
& \frac{\mu^m}{h_r} \int_{-1/2}^{1/2} dx \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \frac{\partial \psi^m(x, y)}{\partial x} + \frac{\eta^m}{h_r} \int_{-1/2}^{1/2} dx \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \frac{\partial \psi^m(x, y)}{\partial y} \\
&= \frac{\mu^m}{\sqrt{3}h_r} (\bar{\psi}_{x+}^m - \bar{\psi}_{x-}^m) + \frac{\mu^m}{2\sqrt{3}h_r} (\bar{\psi}_{u+}^m + \bar{\psi}_{v-}^m - \bar{\psi}_{v+}^m - \bar{\psi}_{u-}^m) + \frac{\eta^m}{2h_r} (\bar{\psi}_{u+}^m - \bar{\psi}_{v-}^m + \bar{\psi}_{v+}^m - \bar{\psi}_{u-}^m) \\
&= \frac{\mu^m}{\sqrt{3}h_r} (\bar{\psi}_{x+}^m - \bar{\psi}_{x-}^m) \\
&+ \frac{1}{\sqrt{3}h_r} \left( \frac{1}{2}\mu^m + \frac{\sqrt{3}}{2}\eta^m \right) (\bar{\psi}_{u+}^m - \bar{\psi}_{u-}^m) + \frac{1}{\sqrt{3}h_r} \left( -\frac{1}{2}\mu^m + \frac{\sqrt{3}}{2}\eta^m \right) (\bar{\psi}_{v+}^m - \bar{\psi}_{v-}^m)
\end{aligned} \tag{4.1-5}$$

ここで、次式で表される六角体系用の方向余弦を定義する。

$$\begin{cases} \mu_x^m = \mu^m \\ \mu_u^m = \frac{1}{2}\mu^m + \frac{\sqrt{3}}{2}\eta^m \\ \mu_v^m = \frac{1}{2}\mu^m - \frac{\sqrt{3}}{2}\eta^m \end{cases} \tag{4.1-6}$$

すると、(4.1-5)式は以下のように変形される。

$$\begin{aligned} & \frac{\mu^m}{h_r} \int_{-1/2}^{1/2} dx \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \frac{\partial \psi^m}{\partial x} + \frac{\eta^m}{h_r} \int_{-1/2}^{1/2} dx \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \frac{\partial \psi^m}{\partial y} \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}h_r} \left\{ \mu_x^m (\bar{\psi}_{x+}^m - \bar{\psi}_{x-}^m) + \mu_u^m (\bar{\psi}_{u+}^m - \bar{\psi}_{u-}^m) + \mu_v^m (\bar{\psi}_{v+}^m - \bar{\psi}_{v-}^m) \right\}. \end{aligned} \quad (4.1-7)$$

(4.1-1)式の左辺第3項と右辺については平均処理により、基本的に正三角形の面積の係数  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  を乗じた標記となり、結局、メッシュバランス式は以下の通りとなる。

$$\frac{1}{\sqrt{3}h_r} \left\{ \mu_x^m (\bar{\psi}_{x+}^m - \bar{\psi}_{x-}^m) + \mu_u^m (\bar{\psi}_{u+}^m - \bar{\psi}_{u-}^m) + \mu_v^m (\bar{\psi}_{v+}^m - \bar{\psi}_{v-}^m) \right\} + \frac{\sqrt{3}}{2} \sum_t \bar{\psi}^m = \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{Q}. \quad (4.1-8)$$

すなわち

$$\frac{2}{3h_r} \left\{ \mu_x^m (\bar{\psi}_{x+}^m - \bar{\psi}_{x-}^m) + \mu_u^m (\bar{\psi}_{u+}^m - \bar{\psi}_{u-}^m) + \mu_v^m (\bar{\psi}_{v+}^m - \bar{\psi}_{v-}^m) \right\} + \sum_t \bar{\psi}^m = \bar{Q}. \quad (4.1-9)$$

次に、メッシュ内では中性子束が線形に変化すると仮定し、次の線形差分式を取り入れる。

$$\bar{\psi}^m = \frac{1}{2} (\bar{\psi}_{x+}^m + \bar{\psi}_{x-}^m) = \frac{1}{2} (\bar{\psi}_{u+}^m + \bar{\psi}_{u-}^m) = \frac{1}{2} (\bar{\psi}_{v+}^m + \bar{\psi}_{v-}^m). \quad (4.1-10)$$

(4.1-10)式を用いることにより、メッシュ流出中性子束  $\bar{\psi}_{x+}^m$ 、 $\bar{\psi}_{u+}^m$ 、 $\bar{\psi}_{v+}^m$  をそれぞれ以下の通り表すことができる。

$$\begin{cases} \bar{\psi}_{x+}^m = 2\bar{\psi}^m - \bar{\psi}_{x-}^m \\ \bar{\psi}_{u+}^m = 2\bar{\psi}^m - \bar{\psi}_{u-}^m \\ \bar{\psi}_{v+}^m = 2\bar{\psi}^m - \bar{\psi}_{v-}^m \end{cases} \quad (4.1-11)$$

(4.1-11)式を(4.1-9)式に代入することにより、メッシュ平均中性子束  $\bar{\psi}^m$  は既知のメッシュ入射中性子束  $\bar{\psi}_{x-}^m$ 、 $\bar{\psi}_{u-}^m$ 、 $\bar{\psi}_{v-}^m$  と中性子源  $\bar{Q}$  から次のように得ることができる。

$$\bar{\psi}^m = \frac{\frac{4(\mu_x^m \bar{\psi}_{x-}^m + \mu_u^m \bar{\psi}_{u-}^m + \mu_v^m \bar{\psi}_{v-}^m)}{3h_r} + \bar{Q}}{\frac{4(\mu_x^m + \mu_u^m + \mu_v^m)}{3h_r} + \sum_t}. \quad (4.1-12)$$

## 4.2 負の中性子束発生時の処理に関する改良

従来の MINIHEX では負の流出中性子束が生じた場合には、単に当該の流出中性子束をゼロにセットするだけであった。通常の核特性解析用の輸送計算コードでは"Set flux to zero and

correct (Flux fix-up)"と呼ばれる処理が行われており、MINIHEX に対しても当処理を行うことが最も適切であると考えられる。しかしながら、MINIHEX に関しては、今後使用経験の蓄積により収束性を損なわずにかつ計算精度を悪化させない方法を見出すことを想定して、以下の 5 種類の方法を選択できるようにした。

1 つ目は、負の流出中性子束をゼロにセットしない方法である ("No operation")。

2 つ目は、負の流出中性子束を単にゼロにセットする方法である ("Set to zero")。

3 つ目は、負の流出中性子束をゼロにセットし、メッシュ平均中性子束を再計算する方法である ("Set to zero and correct average")。すなわち、流出中性子束をゼロにセットし、(4.1-9)

式に従って、メッシュ平均中性子束を再計算する。例えば、メッシュ流出中性子束  $\bar{\psi}_{x+}^m$  が負になっただ場合、メッシュ平均中性子束は次のように与えられる。

$$\bar{\psi}^m = \frac{\frac{4(1/2 \cdot \mu_x^m \bar{\psi}_{x-}^m + \mu_u^m \bar{\psi}_{u-}^m + \mu_v^m \bar{\psi}_{v-}^m)}{3h_r} + \bar{Q}}{\frac{4(\mu_u^m + \mu_v^m)}{3h_r} + \Sigma_t}. \quad (4.1-13)$$

また、全ての（径方向）メッシュ流出中性子束が負となった場合、メッシュ平均中性子束は次式で表される。

$$\bar{\psi}^m = \frac{\frac{2(\mu_x^m \bar{\psi}_{x-}^m + \mu_u^m \bar{\psi}_{u-}^m + \mu_v^m \bar{\psi}_{v-}^m)}{3h_r} + \bar{Q}}{\Sigma_t}. \quad (4.1-14)$$

4 つ目は、負の流出中性子束をゼロにセットし、メッシュ平均中性子束を再計算し、負でなかった流出中性子束を(4.1-11)式を用いて再計算を行う方法である ("Set to zero and correct average and outgoing")。この方法が "Set flux to zero and correct (Flux fix-up)" と呼ばれる処理法であり、最も適切であると考えられる。

最後の 5 つ目は、負の流出中性子束をメッシュ平均中性子束にセットする方法である ("Set to average")。この方法は "Step" 近似と呼ばれる。

以上挙げた 5 種類の処理法について、第 7 章で詳細を示す BFS-62-3A 炉心を対象に固有値と計算時間の比較を行った。比較結果を Table 4.2-1 に示すが、"No operation" と "Set to average" を適用した場合には、中性子束の収束が得られなかった。まず、固有値については、最も適切な処理法であると考えられる "Set to zero and correct average and outgoing" に対して、"Set to zero" 及び "Set to zero and correct average" は制御棒全挿入体系においても 0.02% の差異に留まっており、特に問題は見られないことが分かる。次に、計算時間の比較については、"Set to zero and correct average and outgoing" を適用した場合を基準にすると、"Set to zero and correct average" を適用した場合には約 20% 減に留まっているのに対し、"Set to zero" を用いた場合には 3 分の 1 程度にまで短縮されている。このように、BFS-62-3A 炉心に対する比較結果からは、負の中性子束発生時の処理法として、計算精度面に加えて特に計算時間の短縮の観点から "Set to zero" が推奨され、次いで "Set to zero and correct average" が挙げられる。

参考までに、"No operation"と"Set to average"に関して、第6章で詳細を示すKNK-II炉心の計算においても両者の適用を試みたが、BFS-62-3Aへの適用の場合と同様に中性子束の収束が得られなかつたことから、MINIHEXを用いた計算では両者の適用は推奨できないと考えられる。

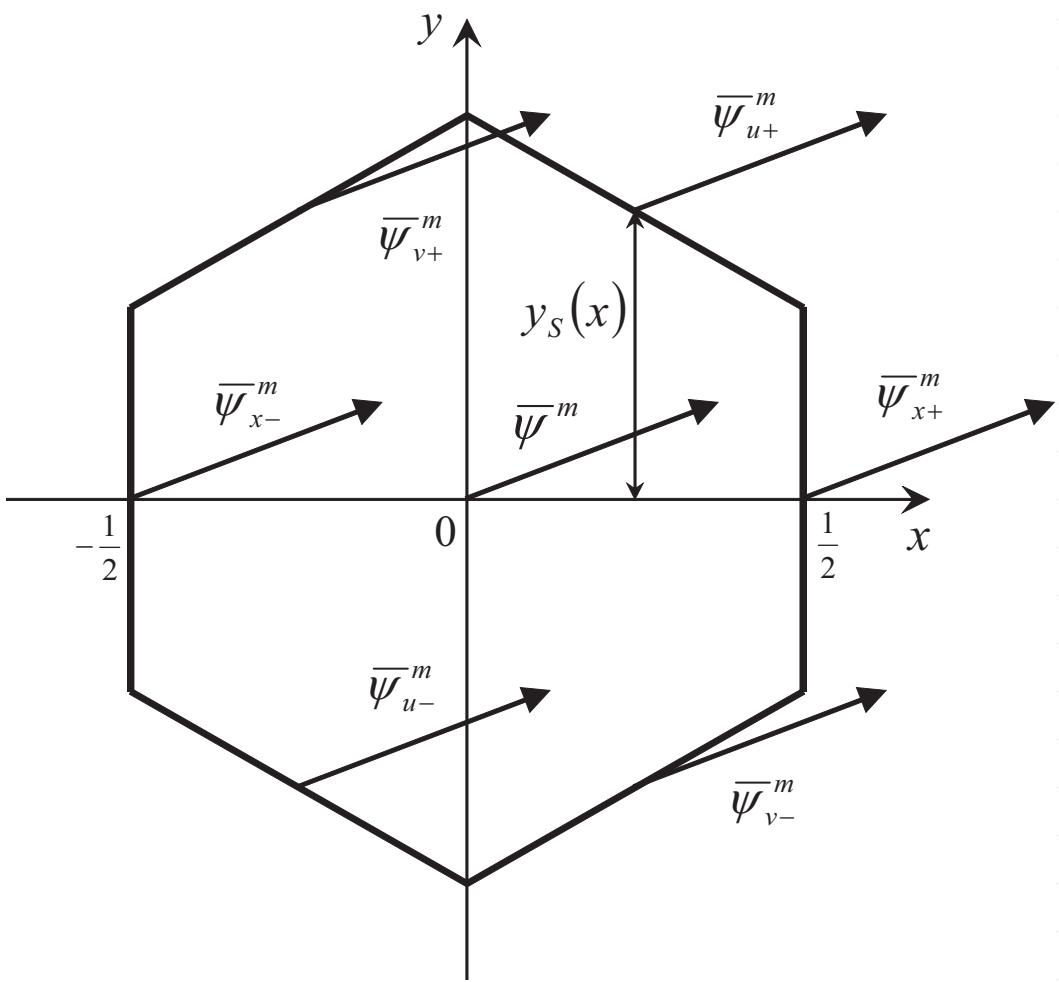


Fig. 4.1-1 Parameters used in the basic formula of MINIHEX

Table 4.2-1 Comparison in eigenvalue and calculation time among negative flux measures in MINIHEX for the BFS-62-3A core

Measure	All rods out	Central MCR in	Off-center MCR in	1 BCR in	Average time [min]
No operation	NC <sup>*2</sup>	NC <sup>*2</sup>	NC <sup>*2</sup>	NC <sup>*2</sup>	-
Set to zero	+0.022 <sup>*1</sup>	+0.022 <sup>*1</sup>	+0.023 <sup>*1</sup>	+0.023 <sup>*1</sup>	228
Set to zero and correct average	+0.022	+0.024	+0.023	+0.023	486
Set to average	NC <sup>*2</sup>	NC <sup>*2</sup>	NC <sup>*2</sup>	NC <sup>*2</sup>	-
Set to zero and correct average and outgoing (Ref.)	0.99060	0.98665	0.98771	0.98496	605

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

\*2: Not converged

## 5. 3次元六角体系用輸送三角メッシュ有限差分法計算コード MINISTRI の整備

本章では、MINISTRI (Ver. 1.1) の整備として、基礎式の導出とコードの整備について述べる。

### 5.1 基礎式の導出

ここでは、単位燃料集合体を想定した正六角形体系（対辺間距離  $h_r$ ）を径方向に 6 分割することにより生じる正三角形メッシュについて取り扱う。それ以上の細分化を行った場合の定式化は、変数  $h_r$  を調整することで容易に対応可能である。また、簡単のために中性子束の軸方向 (Z 軸方向) のストリーミングの取り扱いについては省略する。

さて、まずは次の  $S_N$  法に基づく 2 次元輸送方程式 (X-Y 軸方向) を基本にする。

$$\frac{\mu^m}{h_r} \frac{\partial \psi^m(x, y)}{\partial x} + \frac{\eta^m}{h_r} \frac{\partial \psi^m(x, y)}{\partial y} + \Sigma_t \psi^m(x, y) = Q(x, y). \quad (5.1-1)$$

ここで、

$\mu^m$ : 中性子方向余弦 (角度分点  $m$ ) の X 軸方向成分

$\eta^m$ : 中性子方向余弦 (角度分点  $m$ ) の Y 軸方向成分

$m$ : 角度分点変数

$\psi^m$ : 角度分点  $m$  の角度中性子束

$\Sigma_t$ : 全断面積

$Q$ : 中性子源 (等方)

今、Fig. 5.1-1 に示す 2 つの三角メッシュ  $\alpha$  及び  $\beta$  を対象とする。三角メッシュ体系におけるある角度分点の角度中性子束の空間スウェープを考えた場合、入射中性子束数 2 (既知) で流出中性子束数 1 (未知) となるメッシュ (メッシュ  $\alpha$ ) と、逆に入射中性子束数 1 (既知) で流出中性子束数 2 (未知) となるメッシュ (メッシュ  $\beta$ ) が存在することになる。そこで、以降は 2 種類の三角メッシュ  $\alpha$  と  $\beta$  それぞれについて、定式化を行うこととする。

また、Fig. 5.1-1 中にある関数  $y_s(x)$  は次の通り定義される。

$$y_s(x) = \frac{|x|}{\sqrt{3}}. \quad (5.1-2)$$

まず、メッシュ  $\alpha$  ( $x \geq 0$ ) について、単位正三角形メッシュの積分によりバランス式を得る。

(5.1-1) 式の左辺第 1 項について、

$$\begin{aligned}
& \frac{\mu^m}{h_r} \int_0^{1/2} dx \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \frac{\partial \psi^m(x, y)}{\partial x} \\
&= \frac{\mu^m}{h_r} \int_0^{1/2} dx \left\{ \frac{d}{dx} \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \psi^m(x, y) - \frac{\partial}{\partial y} \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \psi^m(x, y) \frac{dy_s(x)}{dx} \right\} \\
&= \frac{\mu^m}{h_r} \left[ \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \psi^m(x, y) \right]_0^{1/2} - \frac{\mu^m}{h_r} \int_0^{1/2} dx \left\{ \psi^m(x, y_s(x)) \frac{dy_s(x)}{dx} - \psi^m(-y_s(x)) \frac{d(-y_s(x))}{dx} \right\} \\
&= \frac{\mu^m}{\sqrt{3}h_r} \bar{\psi}_{x+}^m - \frac{\mu^m}{2\sqrt{3}h_r} (\bar{\psi}_{v+}^m + \bar{\psi}_{u-}^m)
\end{aligned} \tag{5.1-3}$$

(5.1-1)式の左辺第2項について、

$$\begin{aligned}
& \frac{\eta^m}{h_r} \int_0^{1/2} dx \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \frac{\partial \psi^m(x, y)}{\partial y} = \frac{\eta^m}{h_r} \int_0^{1/2} dx \left\{ \psi^m(y_s(x)) - \psi^m(-y_s(x)) \right\} \\
&= \frac{\eta^m}{2h_r} (\bar{\psi}_{v+}^m - \bar{\psi}_{u-}^m)
\end{aligned} \tag{5.1-4}$$

(5.1-1)式の左辺第1項と第2項については、以下の通り変形される。

$$\begin{aligned}
& \frac{\mu^m}{h_r} \int_0^{1/2} dx \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \frac{\partial \psi^m(x, y)}{\partial x} + \frac{\eta^m}{h_r} \int_0^{1/2} dx \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \frac{\partial \psi^m(x, y)}{\partial y} \\
&= \frac{\mu^m}{\sqrt{3}h_r} \bar{\psi}_{x+}^m - \frac{\mu^m}{2\sqrt{3}h_r} (\bar{\psi}_{v+}^m + \bar{\psi}_{u-}^m) + \frac{\eta^m}{2h_r} (\bar{\psi}_{v+}^m - \bar{\psi}_{u-}^m) \\
&= \frac{\mu^m}{\sqrt{3}h_r} \bar{\psi}_{x+}^m - \frac{1}{\sqrt{3}h_r} \left( \frac{\mu^m}{2} + \frac{\sqrt{3}\eta^m}{2} \right) \bar{\psi}_{u-}^m - \frac{1}{\sqrt{3}h_r} \left( -\frac{\mu^m}{2} + \frac{\sqrt{3}\eta^m}{2} \right) \bar{\psi}_{v+}^m
\end{aligned} \tag{5.1-5}$$

ここで、次式で表される六角体系用の方向余弦を定義する。

$$\begin{cases} \mu_x^m = \mu^m \\ \mu_u^m = \frac{1}{2} \mu^m + \frac{\sqrt{3}}{2} \eta^m \\ \mu_v^m = \frac{1}{2} \mu^m - \frac{\sqrt{3}}{2} \eta^m \end{cases} \tag{5.1-6}$$

すると、(5.1-5)式は以下のように変形される。

$$\frac{\mu^m}{h_r} \int_0^{1/2} dx \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \frac{\partial \psi^m}{\partial x} + \frac{\eta^m}{h_r} \int_0^{1/2} dx \int_{y_s(x)}^{y_s(x)} dy \frac{\partial \psi^m}{\partial y} = \frac{1}{\sqrt{3}h_r} (\mu_x^m \bar{\psi}_{x+}^m - \mu_u^m \bar{\psi}_{u+}^m - \mu_v^m \bar{\psi}_{v-}^m). \tag{5.1-7}$$

(5.1-1)式の左辺第3項と右辺については平均処理により、基本的に正三角形の面積の係数

$\frac{1}{4\sqrt{3}}$  を乗じた標記となり、結局、メッシュバランス式は以下の通りとなる。

$$\frac{1}{\sqrt{3}h_r} \left( \mu_x^m \bar{\psi}_{x+} - \mu_u^m \bar{\psi}_{u-} - \mu_v^m \bar{\psi}_{v+} \right) + \frac{1}{4\sqrt{3}} \Sigma_t \bar{\psi}_\alpha^m = \frac{1}{4\sqrt{3}} \bar{Q}_\alpha. \quad (5.1-8)$$

すなわち、メッシュ  $\alpha$  のバランス式は次の通り表記される。

$$\frac{4}{h_r} \left( \mu_x^m \bar{\psi}_{x+} - \mu_u^m \bar{\psi}_{u-} - \mu_v^m \bar{\psi}_{v+} \right) + \Sigma_t \bar{\psi}_\alpha^m = \bar{Q}_\alpha. \quad (5.1-9)$$

同様に式の変形を行うことにより、メッシュ  $\beta$  ( $x \leq 0$ ) についても、以下の通り表記できる。

$$\frac{4}{h_r} \left( -\mu_x^m \bar{\psi}_{x-}^m + \mu_u^m \bar{\psi}_{u+}^m + \mu_v^m \bar{\psi}_{v-}^m \right) + \Sigma_t \bar{\psi}_\beta^m = \bar{Q}_\beta. \quad (5.1-10)$$

次に、メッシュ内では中性子束が線形に変化すると仮定し、各々のメッシュ内の差分式を取り入れる。メッシュ  $\alpha$  については、メッシュ平均中性子束  $\bar{\psi}_\alpha^m$  とメッシュ入射中性子束  $\bar{\psi}_{u-}^m$  及び  $\bar{\psi}_{v+}^m$  とメッシュ頂点中性子束  $\psi_{\alpha,U}^m$  及び  $\psi_{\alpha,V}^m$  に関して、次の線形差分式を取り入れる。

$$\bar{\psi}_\alpha^m = \frac{1}{3} \left( 2\bar{\psi}_{u-}^m + \psi_{\alpha,U}^m \right) = \frac{1}{3} \left( 2\bar{\psi}_{v+}^m + \psi_{\alpha,V}^m \right). \quad (5.1-11)$$

また、メッシュ流出中性子束  $\bar{\psi}_{x+}^m$  とメッシュ頂点中性子束  $\psi_{\alpha,U}^m$  及び  $\psi_{\alpha,V}^m$  に関して、次の線形差分式を取り入れる。

$$\bar{\psi}_{x+}^m = \frac{1}{2} \left( \psi_{\alpha,U}^m + \psi_{\alpha,V}^m \right). \quad (5.1-12)$$

(5.1-11)式及び(5.1-12)式を用いることにより、メッシュ流出中性子束  $\bar{\psi}_{x+}^m$  を以下の通り表すことができる。

$$\bar{\psi}_{x+}^m = 3\bar{\psi}_\alpha^m - \bar{\psi}_{u-}^m - \bar{\psi}_{v+}^m. \quad (5.1-13)$$

(5.1-13)式を(5.1-9)式に代入することにより、メッシュ  $\alpha$  の中性子束は既知のメッシュ入射中性子束  $\bar{\psi}_{u-}^m$  及び  $\bar{\psi}_{v+}^m$  と中性子源  $\bar{Q}_\alpha$  から次のように得ることができる。

$$\bar{\psi}_\alpha^m = \frac{\frac{4(\mu_x^m + \mu_u^m)\bar{\psi}_{u-}^m + 4(\mu_x^m + \mu_v^m)\bar{\psi}_{v+}^m}{h_r} + \bar{Q}_\alpha}{\frac{12\mu_x^m}{h_r} + \Sigma_t}. \quad (5.1-14)$$

他方、メッシュ  $\beta$  については、与えられた条件式の数がメッシュ  $\alpha$  と同じでも未知数が 1 つ多いために、同様の方法ではメッシュ平均中性子束を得ることはできない。そこで、隣接するメッシュ  $\gamma$  の情報（既知）を利用することする。まず、メッシュ  $\gamma$  内のメッシュ平均中性子

束  $\bar{\psi}_\gamma^m$  と メッシュ入射中性子束  $\bar{\psi}_{\gamma,v+}^m$  及び  $\bar{\psi}_{\gamma,u-}^m$  と メッシュ頂点中性子束  $\psi_{\beta,U}^m$  及び  $\psi_{\beta,V}^m$  に関する次の線形差分式を取り入れる。

$$\bar{\psi}_\gamma^m = \frac{1}{3} (2\bar{\psi}_{\gamma,v+}^m + \psi_{\beta,U}^m) = \frac{1}{3} (2\bar{\psi}_{\gamma,u-}^m + \psi_{\beta,V}^m). \quad (5.1-15)$$

(5.1-15)式からメッシュ頂点中性子束  $\psi_{\beta,U}^m$  及び  $\psi_{\beta,V}^m$  は次のように与えられる。

$$\begin{cases} \psi_{\beta,U}^m = 3\bar{\psi}_\gamma^m - 2\bar{\psi}_{\gamma,v+}^m \\ \psi_{\beta,V}^m = 3\bar{\psi}_\gamma^m - 2\bar{\psi}_{\gamma,u-}^m \end{cases} \quad (5.1-16)$$

更に、メッシュ  $\beta$  内のメッシュ平均中性子束  $\bar{\psi}_\beta^m$  と メッシュ流出中性子束  $\bar{\psi}_{u+}^m$  及び  $\bar{\psi}_{v-}^m$  と メッシュ頂点中性子束  $\psi_{\beta,U}^m$  及び  $\psi_{\beta,V}^m$  に関する次の線形差分式を取り入れる。

$$\bar{\psi}_\beta^m = \frac{1}{3} (2\bar{\psi}_{u+}^m + \psi_{\beta,U}^m) = \frac{1}{3} (2\bar{\psi}_{v-}^m + \psi_{\beta,V}^m). \quad (5.1-17)$$

(5.1-17)式より、メッシュ  $\beta$  からの流出中性子束  $\bar{\psi}_{u+}^m$  及び  $\bar{\psi}_{v-}^m$  は次のように与えられる。

$$\begin{cases} \bar{\psi}_{u+}^m = \frac{1}{2} (3\bar{\psi}_\beta^m - \psi_{\beta,U}^m) \\ \bar{\psi}_{v-}^m = \frac{1}{2} (3\bar{\psi}_\beta^m - \psi_{\beta,V}^m) \end{cases} \quad (5.1-18)$$

(5.1-18)式を(5.1-10)式に代入することにより、メッシュ  $\beta$  の平均中性子束  $\bar{\psi}_\beta^m$  は既知のメッシュ入射中性子束  $\bar{\psi}_{x-}^m$  と メッシュ頂点中性子束  $\psi_{\beta,U}^m$  及び  $\psi_{\beta,V}^m$  と 中性子源  $\bar{Q}_\beta$  から次の通り表記できる。

$$\bar{\psi}_\beta^m = \frac{\frac{4\mu_x^m \bar{\psi}_{x-}^m + 2\mu_u^m \psi_{\beta,U}^m + 2\mu_v^m \psi_{\beta,V}^m}{h_r} + \bar{Q}_\beta}{\frac{6(\mu_u^m + \mu_v^m)}{h_r} + \Sigma_t}. \quad (5.1-19)$$

負の流出中性子束が生じた場合の処理は、MINIHEX と同様に MINISTRI では以下の 5 種類の方法を選択できるようにしている。

1 つ目は、負の流出中性子束をゼロにセットしない方法である ("No operation")。

2 つ目は、負の流出中性子束を単にゼロにセットする方法である ("Set to zero")。

3 つ目は、負の流出中性子束をゼロにセットし、メッシュ平均中性子束を再計算する方法である ("Set to zero and correct average")。すなわち、流出中性子束をゼロにセットし、(5.1-9)

式及び(5.1-10)式に従って、メッシュ平均中性子束を再計算する。本報告ではこの方法を採用している。具体的に数式を用いて示すこととする。

まず、メッシュ  $\alpha$  について次通りとなる。

$$\bar{\psi}_{\alpha}^m = \frac{\frac{4\mu_u^m \bar{\psi}_{u-}^m + 4\mu_v^m \bar{\psi}_{v+}^m}{h_r} + \bar{Q}_{\alpha}}{\Sigma_t}. \quad (5.1-20)$$

また、メッシュ  $\beta$  について、一方の流出中性子束のみ（例えば、 $\bar{\psi}_{u+}^m$ ）が負となった場合、メッシュ平均中性子束は次式で表される。

$$\bar{\psi}_{\beta}^m = \frac{\frac{4\mu_x^m \bar{\psi}_{x-}^m + 2\mu_v^m \psi_{\beta,V}^m}{h_r} + \bar{Q}_{\beta}}{\frac{6\mu_v^m}{h_r} + \Sigma_t}. \quad (5.1-21)$$

更に、メッシュ  $\beta$  について、双方の流出中性子束が負となった場合は次の通りとなる。

$$\bar{\psi}_{\beta}^m = \frac{\frac{4\mu_x^m \bar{\psi}_{x-}^m}{h_r} + \bar{Q}_{\beta}}{\Sigma_t}. \quad (5.1-22)$$

4つ目は、メッシュ  $\beta$  について、一方の流出中性子束のみが負となった場合に限られるが、負の流出中性子束をゼロにセットし、メッシュ平均中性子束を再計算し、負でなかった流出中性子束を(5.1-18)式を用いて再計算を行う方法である ("Set to zero and correct average and outgoing")。この方法が "Set flux to zero and correct (Flux fix-up)" と呼ばれる処理法であり、最も適切であると考えられる。

最後の5つ目は、負の流出中性子束をメッシュ平均中性子束にセットする方法である ("Set to average")。この方法は "Step" 近似と呼ばれる。

なお、メッシュ頂点中性子束が負になった場合の処理として、ゼロにはセットするが、メッシュ平均中性子束の再計算は行わず、メッシュ境界中性子束の再計算結果に合わせて、負にならなかつた側のメッシュ頂点中性子束を(5.1-12)式により再計算する。

以上挙げた5種類の処理法について、第6章で詳細を示す KNK-II 炉心を対象に固有値と計算時間の比較を行った。比較結果を Table 5.1-1 に示す。固有値については、最も適切な処理法であると考えられる "Set to zero and correct average and outgoing" に対して、"No operation" と "Set to average" を採用した場合には、制御棒全挿入体系においてそれぞれ 0.06%、0.10% と比較的大きな差異が見られ、核特性計算の実用上は問題となる可能性のあることが分かる。それに対し、"Set to zero" 及び "Set to zero and correct average" は制御棒全挿入体系においてもそれぞれ 0.03%、0.02% の差異に留まっており、特に問題は見られないことが分かる。なお、計算時間の比較については5種類の処理法間で特に差は見られない。このように、KNK-II 炉心に対する比較結果からは、負の中性子束発生時の処理として、"Set to zero and correct average and outgoing" が最適であるが、"Set to zero and correct average" や "Set to zero" を適

用しても特に問題はないと言える。

## 5.2 コードの整備

基本的には MINIHEX コードをベースに有限差分法計算部分を、元々の六角-Z 体系用の処理から三角-Z 体系用に変更改良することにより MINISTRI の作成を行った。集合体内の三角メッシュによる径方向分割数は 6、24、54、96 に対応させた。集合体内のメッシュ番号は Fig. 5.2-1 に示す通り集合体中心から螺旋状につけ、径方向の空間スウェーブやメッシュ間のデータの受け渡しは、6、24、24、96 メッシュ分割時のぞれぞれのメッシュ番号表により管理することとした。

Table 5.1-1 Comparison in eigenvalue and calculation time among negative flux measures in MINISTRI for the KNK-II core

Measure	All rods out	Rods half-in	Rods in	Average time [min]
No operation	+0.000 <sup>*1</sup>	+0.044 <sup>*1</sup>	+0.103 <sup>*1</sup>	10
Set to zero	+0.000	+0.018	+0.026	11
Set to zero and correct average	+0.000	+0.014	+0.021	11
Set to average	-0.000	+0.029	+0.055	10
Set to zero and correct average and outgoing (Ref.)	1.09451	0.98283	0.87960	11

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

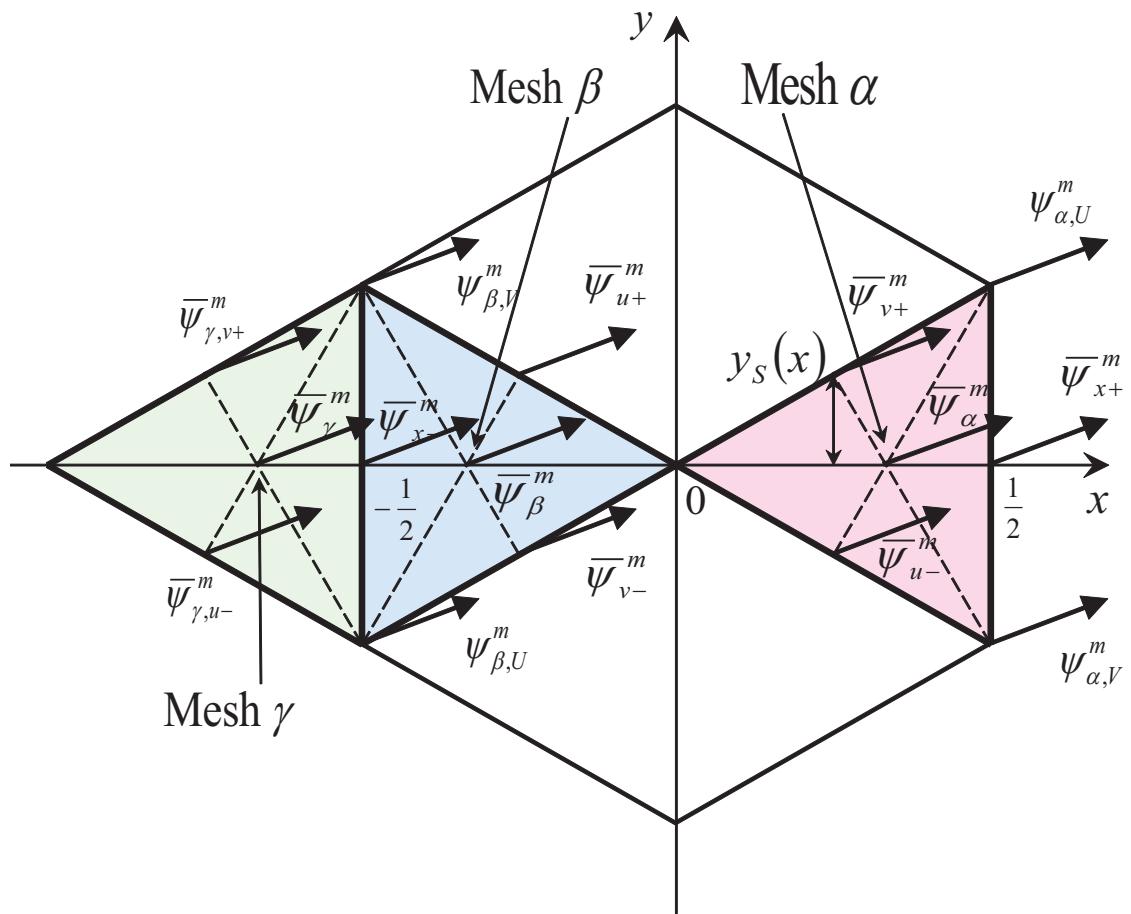


Fig. 5.1-1 Parameters used in the basic formula of MINISTRI

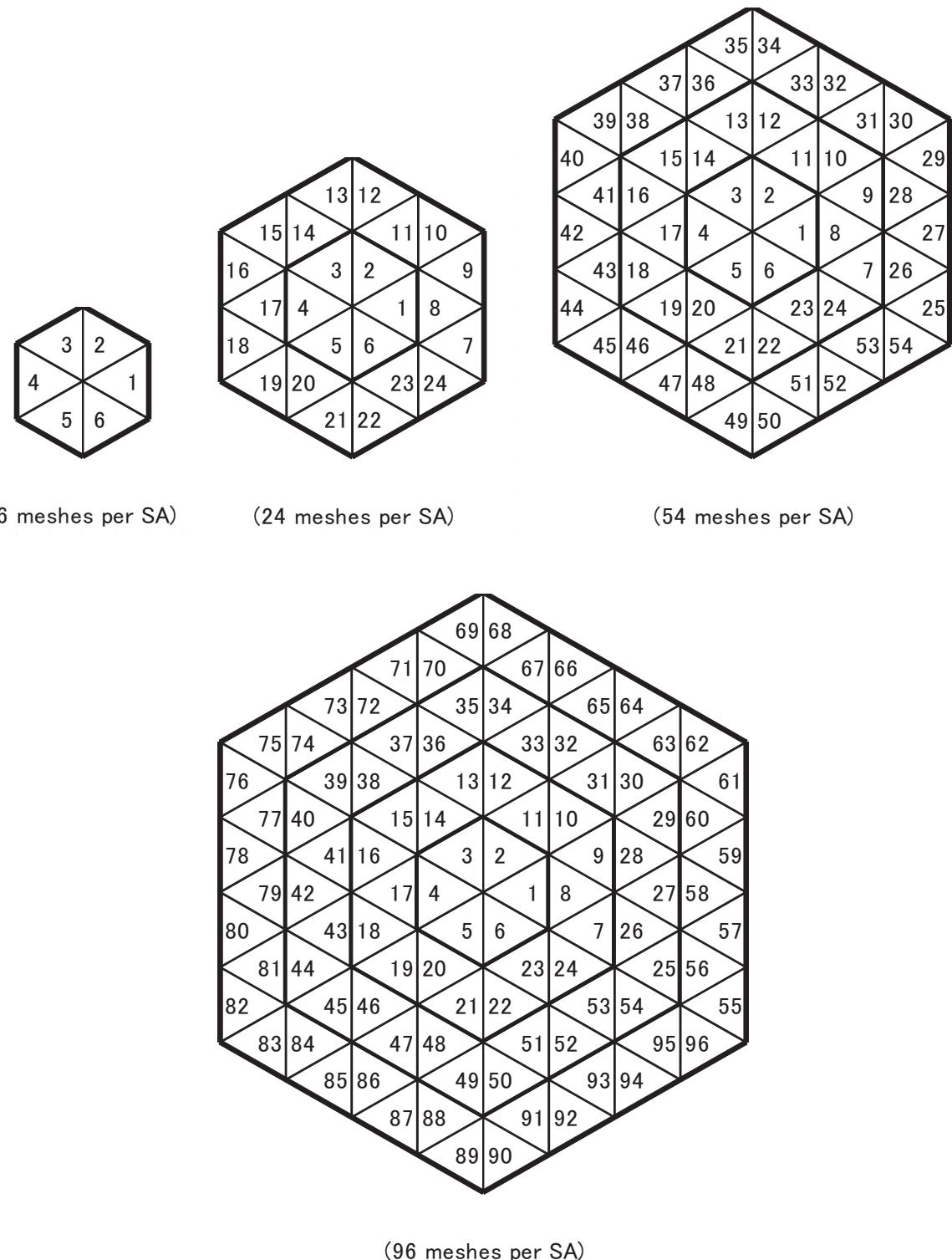


Fig. 5.2-1 Mesh numbering within a subassembly in MINISTRI

## 6. 3次元六角体系用輸送計算コードの検証

### 6.1 検証条件

検証は、角度分点セット及び空間メッシュ（多項式展開）をそれぞれ最大限に詳細にした場合相当となるように十分に詳細な条件で行う。従って、軸方向に加えて径方向に対しても中性子束の空間分布を詳細に取り扱うことが可能な NSHEX 及び MINISTRI の検証を行うこととする。MINIHEX は径方向メッシュの細分化が不可能であるため、次章で示す適用性評価のみの対象とする。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>22)</sup>による計算結果とする。

#### (1) 計算体系

計算体系としては、Fig. 6.1-1 に示す小型炉心 KNK-II<sup>14)</sup>、Fig. 6.1-2 に示す中型炉心「もんじゅ」(Monju)<sup>15, 16)</sup>、Fig. 6.1-3 に示す大型炉心「スーパーフェニックス」(SPX)<sup>17, 18)</sup>を対象とする。制御棒挿入状態としては、通常の出力運転状態を想定して、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"または"MCR half-in"、"MCR"は>Main Control rod" (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"、"BCR"は"Backup Control rod" (後備炉停止棒の略)) である。制御棒の  $^{10}\text{B}$  濃縮度は、KNK-II は 40%、「もんじゅ」は MCR が 40% で BCR が 90%、SPX は MCR と BCR の双方とも 90% であり、解析上も模擬している。

#### (2) 計算対象核特性

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「もんじゅ」及び SPX 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、米国における検討結果<sup>19)</sup>、FBR サイクル実用化戦略調査研究における検討結果<sup>20)</sup>を基に、断面積起因誤差の評価結果<sup>21)</sup>を差し引くことにより解析手法に係る精度として設定する。検討結果を参照した結果、固有値は 0.1% に、集合体毎出力分布は 2% にそれぞれ設定することとした。なお、集合体毎出力分布の目標精度は、通常の出力運転状態、すなわち、制御棒全引抜または制御棒半挿入状態のみに対して適用することとし、出力がほぼゼロである制御棒全挿入状態に対しては、参考扱いとする。加えて、計算条件の違いによる固有値の変化の原因を分析するために、KNK-II 炉心を対象に制御棒挿入状態における制御棒領域の中性子束を観察することとする。

#### (3) 計算条件

MINISTRI における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とした。また、基本的に加速法を適用しなかったが、MINISTRI による SPX 炉心の解析についてのみは、収束性が良くなかったので、外側反復においてチェビシェフ加速法を適用することとした。

まずは、各炉心体系を対象にして、角度分点セットの設定に関するサーベイを実施した。計

算結果の角度分点セット依存性サーベイではノード内を2次多項式展開とした NSHEX を主に用いたが MINISTRI による計算との比較も行う。結果は全て S<sub>12</sub> 計算結果を基準とした差異としてまとめる。

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、SPX 炉心それぞれについて、Table 6.1-1～6.1-3 に示す。S<sub>4</sub> 計算では最大で 0.14% 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> 計算では最大で 0.02% の差異にまで低下しており、S<sub>12</sub> 計算はサーベイ用基準計算条件として十分詳細であることと、S<sub>8</sub> 条件とすれば目標精度 0.1% では検証は十分であることが分かる。なお、具体的には示していないが、径方向集合体内を 6 メッシュ分割した条件での MINISTRI による計算結果もほぼ同様の傾向を示していた。

次に、「もんじゅ」炉心と SPX 炉心の集合体毎出力分布に関するサーベイ結果を Table 6.1-4、6.1-5 に示す。「もんじゅ」炉心の集合体毎出力分布については S<sub>4</sub> 計算と S<sub>8</sub> 計算の双方とも差異は 0.2% 以下とほとんど見られない。SPX 炉心の集合体毎出力分布では、"All rods out" ケースのように S<sub>8</sub> 計算では差異がほとんど見られないが S<sub>4</sub> 計算では最大差異が 0.8% に及んだり、"MCR in" ケースのように S<sub>4</sub> 計算と S<sub>8</sub> 計算の双方とも最大差異が 0.6% 前後見られたりする場合があり、S<sub>12</sub> 計算に対する差異が「もんじゅ」炉心と比べて大きく見られることが分かる。しかしながら、S<sub>8</sub> 計算による差異は両炉心体系を対象としても最大で 0.6% であり、目標精度の半分以下である。

更に、KNK-II 炉心の制御棒領域の中性子束に関するサーベイ結果を Table 6.1-6 に示す。S<sub>4</sub> 計算では最大で第 1 群において 0.6% の過小評価が見られたが、S<sub>8</sub> 計算では約 0.1% 程度の過小評価にまで低減しており、S<sub>8</sub> 計算の精度の良さが確認できた。

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 6.1-7 に示す。なお、NSHEX による SPX 炉心の "MCR in" ケースの解析では、収束性が良くなかったので、外側反復毎の高次モーメントの更新を止める条件を通常の  $2.0 \times 10^{-4}$  から  $4.0 \times 10^{-4}$  に緩めた。

## 6.2 検証結果

### 6.2.1 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 NSHEX と MINISTRI それぞれについて、Table 6.2-1 及び 6.2-2 に示す。NSHEX については、4 次展開以上とすることによりいずれのケースについても目標精度を満足することが分かる。MINISTRI による固有値はメッシュ分割依存性が非常に大きく、集合体当たり径方向に 24 メッシュ以上に分割しないと目標精度を満足しない。軸方向についても、詳細に分割することによる効果が大きいことが分かる。なお、はっきりとした原因は不明であるが、メッシュをある程度細かく分割すると、収束しなかったり、集合体当たり径方向 54 メッシュで軸方向 2.5cm とした場合のように異常な計算結果を示したりした場合があった。推測ではあるが、負の中性子束の発生頻度が増加したために、反復計算毎の対応処理の有無による振動が生じたものと考えられる。計算時間に関しては、NSHEX では展開次数依存性はあまり見られず、いずれの場合も GMVP よりも短時間で計算が終了していることが分かる。MINISTRI に関しても GMVP よりは短時間で計算が終了しているが、目標精度を満足

するもの同士（NSHEX：4 次、MINISTRI：径方向 24 分割・軸方向 2.5cm メッシュ）で比較すると、1 オーダー NSHEX の方が優れている。

次に、制御棒領域の中性子束についての検証結果を NSHEX と MINISTRI それぞれについて、Table 6.2-3 及び 6.2-4 に示す。NSHEX では 2 次展開を用いた場合には GMVP に対して過大評価が見られ、これが "Rods in" ケースにおける固有値の過小評価の原因になっていると考えられる。4 次展開以上とした場合には、2 次展開の場合に見られたような過大評価は見られず、固有値の計算結果とも整合が見られることが分かる。制御棒領域付近の第 4 群中性子束分布の比較を Fig. 6.2-1 に示すが、6 次展開ではノード境界においてほぼ中性子束が連続になっている。それに対し、2 次展開では中性子束分布が十分に取り扱われておらず、ノード境界でも不連続となっており、制御棒領域において中性子束をやや過大評価している様子が分かる。MINISTRI に関しては、集合体当たり径方向 6 メッシュの場合のようにメッシュ分割が粗い場合には、大きな過大評価が見られることが分かり、固有値の過小評価の原因となっていることが分かる。また、メッシュ分割を細かくすることにより、過大評価が解消される傾向にあることが分かる。

### 6.2.2 「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 NSHEX と MINISTRI それぞれについて、Table 6.2-5 及び 6.2-6 に示す。NSHEX に関しては、展開次数依存性があまり見られず、いずれのケースも目標精度を満足している。MINISTRI に関しては、集合体当たり径方向 6 メッシュで軸方向 5cm メッシュとした場合には、"MCR in" 及び "BCR in" のケースでわずかに目標精度を満足していない。同じ径方向メッシュで軸方向メッシュを 2.5cm 間隔にすると、目標精度を満足するが "BCR in" ケースにおいて核分裂中性子源の収束が得られなかった。なお、集合体当たり径方向 24 メッシュとした計算は異常な結果となっており、「もんじゅ」炉心においてもメッシュを細かく取った場合の収束性の問題が観測された。計算時間は NSHEX に関しては GMVP と同等であるが、MINISTRI については NSHEX の 2 倍で GMVP の 3 倍程度を要している。

次に、集合体毎出力分布についての検証結果を NSHEX と MINISTRI それぞれについて、Table 6.2-7 及び 6.2-8 に示す。"All rods out" 及び "MCR half-in" のケースに関して、NSHEX では 0.4% 以内で、MINISTRI では 0.5% 以内で一致が見られており、目標精度を満足している。なお、参考扱いである "MCR in" 及び "BCR in" のケースについても、NSHEX と MINISTRI の双方の結果共に目標精度を満足している。

### 6.2.3 SPX 炉心における検証結果

固有値についての検証結果を NSHEX と MINISTRI それぞれについて、Table 6.2-9 及び 6.2-10 に示す。NSHEX に関して、2 次多項式展開では "MCR in" のケースで目標精度を満足しないことが分かるが、4 次以上の多項式展開とすることにより、いずれのケースも満足する。計算時間に関しては、GMVP の数倍を要しており、加速法の導入等の課題が残されていることが分かる。MINISTRI に関しては、収束性が悪く、固有値と核分裂中性子源の双方共に収束が得られたのは集合体当たり径方向 6 メッシュの軸方向 5cm メッシュ条件とした場合の、"MCR

"half-in"と"MCR in"のケースのみである。収束が得られても"MCR in"のケースで目標精度を満足していない。今後、収束性を改善する必要がある。

次に、集合体毎出力分布についての検証結果を NSHEX と MINISTRI それぞれについて、Table 6.2-11 及び 6.2-12 に示す。NSHEX では展開次数依存性がほとんど見られず、"All rods out"及び"MCR half-in"のケースでは、1.9%以内で GMVP を一致しており、目標精度を満足している。MINISTRI に関しては、収束したケースについては目標精度を満足していることが分かる。

### 6.3 まとめ

NSHEX と 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、NSHEX 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を満足することが分かった。それに対し、MINISTRI に関しては、KNK-II では目標精度を満足したが、「もんじゅ」炉心と「スーパーフェニックス」炉心に対しては、目標精度を満足すると推定される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。

Table 6.1-1 Angular discretization effects in eigenvalue by NSHEX for the KNK-II core

Angular quadrature set	All rods out	Rods half-in	Rods in
S <sub>4</sub>	+0.012 <sup>*1</sup>	+0.075 <sup>*1</sup>	+0.140 <sup>*1</sup>
S <sub>8</sub>	+0.004	+0.012	+0.018
S <sub>12</sub>	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)

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

Table 6.1-2 Angular discretization effects in eigenvalue by NSHEX for the Monju core

Angular quadrature set	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
S <sub>4</sub>	+0.023 <sup>*1</sup>	+0.043 <sup>*1</sup>	+0.061 <sup>*1</sup>	+0.059 <sup>*1</sup>
S <sub>8</sub>	+0.003	+0.005	+0.007	+0.007
S <sub>12</sub>	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)

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

Table 6.1-3 Angular discretization effects in eigenvalue by NSHEX for the SPX core

Angular quadrature set	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
S <sub>4</sub>	+0.037 <sup>*1</sup>	+0.046 <sup>*1</sup>	+0.074 <sup>*1</sup>	+0.029 <sup>*1</sup>
S <sub>8</sub>	+0.003	+0.005	+0.020	+0.004
S <sub>12</sub>	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)

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

Table 6.1-4 Angular discretization effects in power distribution by NSHEX for the Monju core

Angular quadrature set	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
S <sub>4</sub>	0.10 <sup>*1</sup>	0.12 <sup>*1</sup>	0.15 <sup>*1</sup>	0.18 <sup>*1</sup>
S <sub>8</sub>	0.01	0.02	0.02	0.02
S <sub>12</sub>	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)

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

Table 6.1-5 Angular discretization effects in power distribution by NSHEX for the SPX core

Angular quadrature set	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
S <sub>4</sub>	0.84 <sup>*1</sup>	0.20 <sup>*1</sup>	0.66 <sup>*1</sup>	0.22 <sup>*1</sup>
S <sub>8</sub>	0.01	0.04	0.55	0.09
S <sub>12</sub>	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)	(Ref.)

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

Table 6.1-6 Angular discretization effects in absorption reaction rate in the control rod region by NSHEX for the KNK-II core

Angular quadrature set	All rods out	Rods half-in	Rods in
S <sub>4</sub>	-	-0.38 <sup>*1</sup>	-0.47 <sup>*1</sup>
S <sub>8</sub>	-	-0.08	-0.06
S <sub>12</sub>	-	(Ref.)	(Ref.)

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

Table 6.1-7 Calculation criteria and conditions for verification tests

Item	Criteria and conditions	
	NSHEX	MINISTRI
Angular quadrature set	$S_8$	←
Spatial treatment in the radial direction	Polynomial expansion with up to sixth order	Triangle mesh division (6, 24, 54, 96 meshes) within Subassembly
Spatial treatment in the axial direction	Polynomial expansion with up to sixth order	Finer mesh division
Node or mesh width in the axial direction	Around 20cm	Around 5.0 cm or 2.5cm
Fission source convergence criteria for each node	Less than $1.0 \times 10^{-4}$	←
Eigenvalue convergence criteria	Less than $1.0 \times 10^{-5}$	←
High order moments calculation condition	Greater than $2.0 \times 10^{-4}$ *1	Nothing
Neutron energy group	4 (KNK-II), 18 (Monju and SPX)	←

\*1: Set  $4.0 \times 10^{-4}$  for "MCR in" case of the SPX core

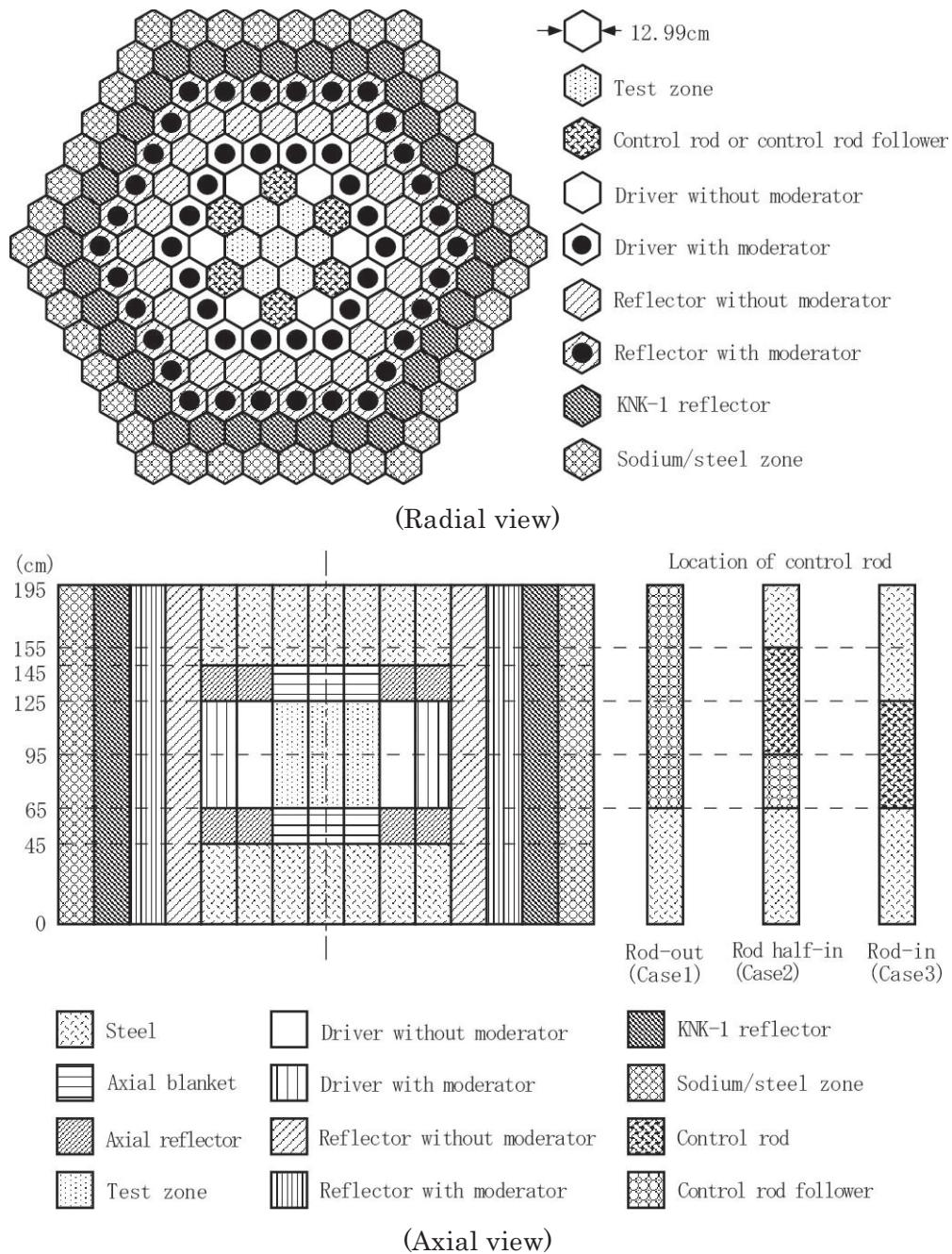


Fig. 6.1-1 Layout of the KNK-II core

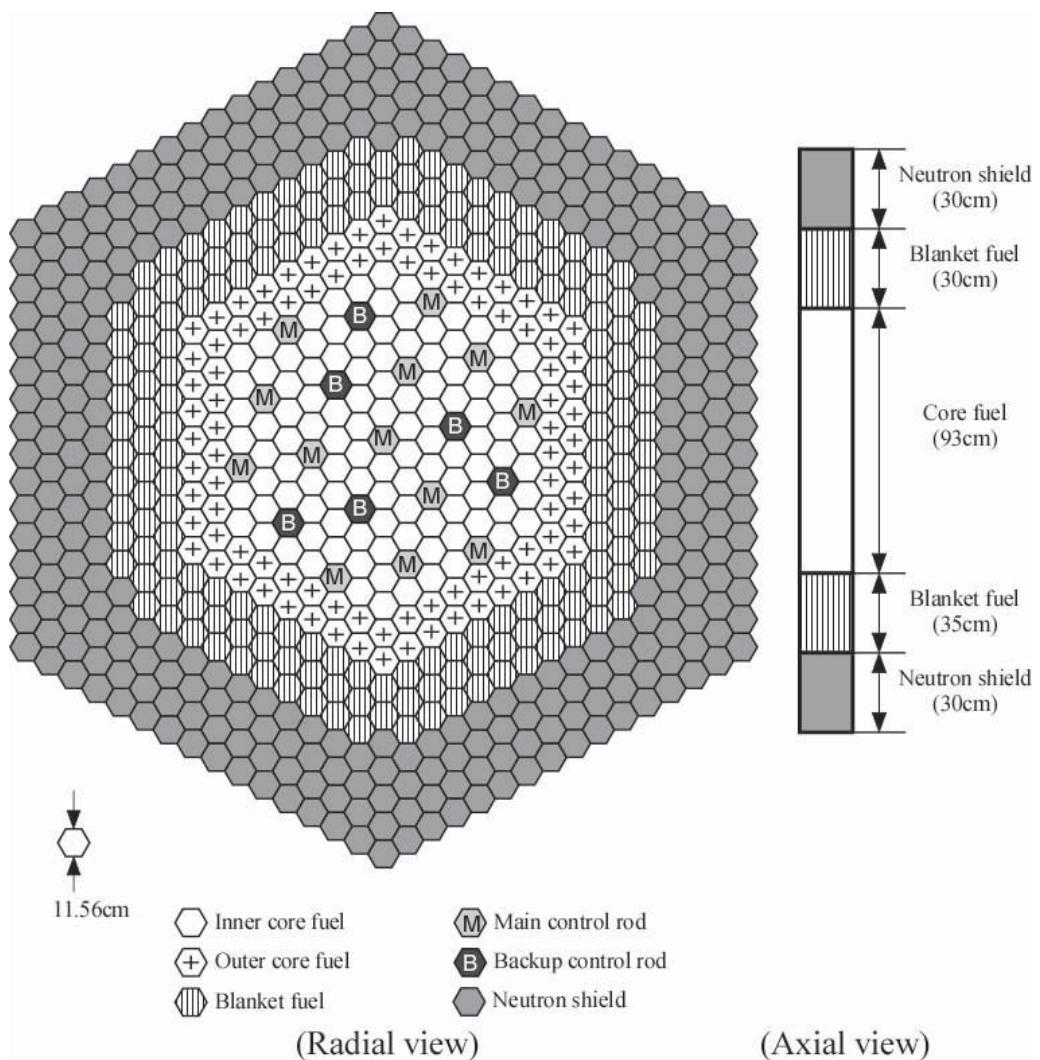


Fig. 6.1-2 Layout of the Monju core

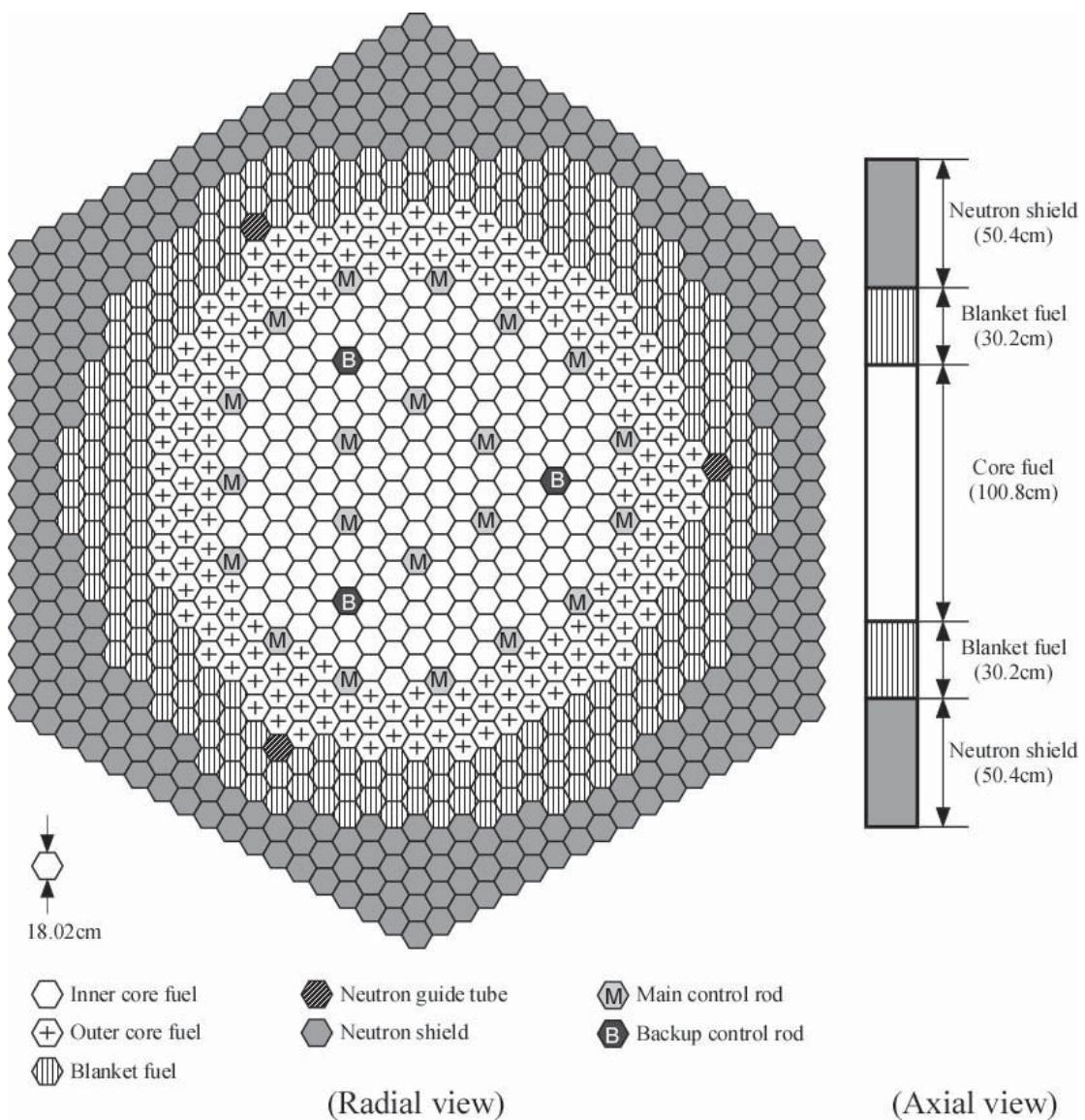


Fig. 6.1-3 Layout of the Super Phenix (SPX) core

Table 6.2-1 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX for the KNK-II core

Maximum polynomial order	All rods out	Rods half-in	Rods in	Average time [min]
2nd	+0.070 <sup>*1</sup>	-0.017 <sup>*1</sup>	<u>-0.123</u> <sup>*1</sup>	7
4th	+0.047	+0.037	+0.022	8
6th	+0.048	+0.038	+0.022	9
GMVP (Ref.)	1.09527 ±0.024 <sup>*2</sup>	0.98349 ±0.026 <sup>*2</sup>	0.87966 ±0.026 <sup>*2</sup>	287

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

Underlined means exceeding of the target accuracy

Table 6.2-2 Relative difference in eigenvalue and calculation time by MINISTRl for the KNK-II core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	Rods half-in	Rods in	Average time [min]
6	5.0cm	<u>-0.190</u> <sup>*3</sup>	<u>-0.310</u> <sup>*3</sup>	<u>-0.483</u> <sup>*3</sup>	9
6	2.5cm	<u>-0.158</u>	<u>-0.258</u>	<u>-0.455</u>	20
24	5.0cm	-0.072	<u>-0.123</u>	<u>-0.123</u>	36
24	2.5cm	+0.042	-0.012	-0.042	71
54	5.0cm	-0.042	-0.071	-0.020	77
54	2.5cm	<u>+1.196</u>	NC <sup>*5</sup>	NC <sup>*5</sup>	211
96	5.0cm	-0.008	-0.041	+0.027	140
96	2.5cm	NC <sup>*5</sup>	NC	NC	-
GMVP (Ref.)		1.09527 ±0.024 <sup>*4</sup>	0.98349 ±0.026 <sup>*4</sup>	0.87966 ±0.026 <sup>*4</sup>	287

\*1: Number of radial meshes per subassembly

\*2: Axial mesh size

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

\*4: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*5: Not converged

Underlined means exceeding of the target accuracy

Table 6.2-3 Relative difference in absorption reaction rate in the control rod region by NSHEX for the KNK-II core

Maximum polynomial order	All rods out	Rods half-in	Rods in
2nd	-	+0.34 <sup>*1</sup>	+0.86 <sup>*1</sup>
4th	-	+0.01	+0.23
6th	-	+0.00	+0.22
Uncertainty of GMVP	-	0.14 <sup>*2</sup>	0.10 <sup>*2</sup>

\*1: Relative difference to the reference (GMVP) [%]

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

Table 6.2-4 Relative difference in absorption reaction rate in the control rod region by MINISTRI for the KNK-II core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	Rods half-in	Rods in
6	5.0cm	-	+1.34 <sup>*3</sup>	+1.65 <sup>*3</sup>
6	2.5cm	-	+1.35	+1.88
24	5.0cm	-	+0.72	+0.47
24	2.5cm	-	+0.59	+0.47
54	5.0cm	-	+0.61	+0.15
54	2.5cm	-	NC <sup>*5</sup>	NC <sup>*5</sup>
96	5.0cm	-	+0.82	+0.08
96	2.5cm	-	NC	NC
Uncertainty of GMVP	-	0.14 <sup>*4</sup>	0.10 <sup>*4</sup>	

\*1: Number of radial meshes per subassembly

\*2: Axial mesh size

\*3: Relative difference to the reference (GMVP) [%]

\*4: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*5: Not converged

Table 6.2-5 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX for the Monju core

Maximum polynomial order	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in	Average time [min]
2nd	+0.019 <sup>*1</sup>	-0.013 <sup>*1</sup>	+0.013 <sup>*1</sup>	+0.009 <sup>*1</sup>	329
4th	+0.016	-0.004	+0.031	+0.028	389
6th	+0.015	-0.004	+0.031	+0.028	422
GMVP (Ref.)	1.03861 ±0.010 <sup>*2</sup>	0.98551 ±0.010 <sup>*2</sup>	0.93493 ±0.010 <sup>*2</sup>	0.95665 ±0.010 <sup>*2</sup>	306

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

Table 6.2-6 Relative difference in eigenvalue and calculation time by MINISTRI for the Monju core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in	Average time [min]
6	5.0cm	-0.039 <sup>*3</sup>	-0.093 <sup>*3</sup>	<u>-0.105<sup>*3</sup></u>	<u>-0.107<sup>*3</sup></u>	384
6	2.5cm	+0.001	-0.057	-0.070	-0.076 <sup>*5</sup>	858
24	5.0cm	<u>+0.157<sup>*5</sup></u>	+0.073 <sup>*5</sup>	<u>+0.124<sup>*5</sup></u>	<u>+0.130<sup>*5</sup></u>	-
GMVP (Ref.)		1.03861 ±0.010 <sup>*4</sup>	0.98551 ±0.010 <sup>*4</sup>	0.93493 ±0.010 <sup>*4</sup>	0.95665 ±0.010 <sup>*4</sup>	306

\*1: Number of radial meshes per subassembly

\*2: Axial mesh size

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

\*4: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*5: Converged in eigenvalue only

Underlined means exceeding of the target accuracy

Table 6.2-7 Relative difference in power distribution by NSHEX for the Monju core

Maximum polynomial order	All rods out	MCR half-in	MCR in <sup>*3</sup>	BCR in <sup>*3</sup>
2nd	0.35 <sup>*1</sup>	0.42 <sup>*1</sup>	0.59 <sup>*1</sup>	0.55 <sup>*1</sup>
4th	0.37	0.42	0.61	0.45
6th	0.37	0.42	0.61	0.45
Uncertainty of GMVP	0.21 <sup>*2</sup>	0.22 <sup>*2</sup>	0.23 <sup>*2</sup>	0.23 <sup>*2</sup>

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*3: Out of parameters for verification

Table 6.2-8 Relative difference in power distribution by MINISTRI for the Monju core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	MCR half-in	MCR in <sup>*6</sup>	BCR in <sup>*6</sup>
6	5.0cm	0.34 <sup>*3</sup>	0.53 <sup>*3</sup>	0.63 <sup>*3</sup>	0.65 <sup>*3</sup>
6	2.5cm	0.31	0.51	0.79	NC <sup>*5</sup>
24	5.0cm	NC <sup>*5</sup>	NC <sup>*5</sup>	NC <sup>*5</sup>	NC <sup>*5</sup>
Uncertainty of GMVP		0.21 <sup>*4</sup>	0.22 <sup>*4</sup>	0.23 <sup>*4</sup>	0.23 <sup>*4</sup>

\*1: Number of radial meshes per subassembly

\*2: Axial mesh size

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

\*4: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*5: Not converged

\*6: Out of parameters for verification

Table 6.2-9 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX for the SPX core

Maximum polynomial order	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in	Average time [min]
2nd	-0.005 <sup>*1</sup>	-0.018 <sup>*1</sup>	<u>-0.113<sup>*1</sup></u>	-0.005 <sup>*1</sup>	748
4th	-0.005	+0.011	-0.050	-0.001	820
6th	-0.005	+0.010	-0.050	-0.001	927
GMVP (Ref.)	1.02256 ±0.005 <sup>*2</sup>	0.97474 ±0.006 <sup>*2</sup>	0.93021 ±0.006 <sup>*2</sup>	1.01278 ±0.005 <sup>*2</sup>	269

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

Underlined means exceeding of the target accuracy

Table 6.2-10 Relative difference in eigenvalue and calculation time by MINISTRI for the SPX core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in	Average time [min]
6	5.0cm	-0.072 <sup>*3,*5</sup>	-0.071 <sup>*3</sup>	<u>-0.156<sup>*3</sup></u>	-0.084 <sup>*3,*5</sup>	1488
6	2.5cm	-0.057 <sup>*5</sup>	-0.083 <sup>*5</sup>	<u>-0.178<sup>*5</sup></u>	-0.067 <sup>*5</sup>	-
24	5.0cm	NC <sup>*6</sup>	NC <sup>*6</sup>	NC <sup>*6</sup>	NC <sup>*6</sup>	-
GMVP (Ref.)		1.02256 ±0.005 <sup>*4</sup>	0.97474 ±0.006 <sup>*4</sup>	0.93021 ±0.006 <sup>*4</sup>	1.01278 ±0.005 <sup>*4</sup>	269

\*1: Number of radial meshes per subassembly

\*2: Axial mesh size

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

\*4: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*5: Converged in eigenvalue only

\*6: Not converged

Underlined means exceeding of the target accuracy

Table 6.2-11 Relative difference in power distribution by NSHEX for the SPX core

Maximum polynomial order	All rods out	MCR half-in	MCR in <sup>*3</sup>	BCR in <sup>*3</sup>
2nd	1.49 <sup>*1</sup>	1.84 <sup>*1</sup>	4.18 <sup>*1</sup>	2.81 <sup>*1</sup>
4th	1.44	1.78	4.09	2.92
6th	1.45	1.78	4.39	2.92
Uncertainty of GMVP	0.22 <sup>*2</sup>	0.22 <sup>*2</sup>	0.22 <sup>*2</sup>	0.21 <sup>*2</sup>

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*3: Out of parameters for verification

Table 6.2-12 Relative difference in power distribution by MINISTRI for the SPX core

Radial mesh <sup>*1</sup>	Axial mesh <sup>*2</sup>	All rods out	MCR half-in	MCR in <sup>*6</sup>	BCR in <sup>*6</sup>
6	5.0cm	NC <sup>*5</sup>	0.98 <sup>*3</sup>	1.55 <sup>*3</sup>	NC <sup>*5</sup>
6	2.5cm	NC	NC <sup>*5</sup>	NC <sup>*5</sup>	NC
24	5.0cm	NC	NC	NC	NC
Uncertainty of GMVP		0.22 <sup>*4</sup>	0.22 <sup>*4</sup>	0.22 <sup>*4</sup>	0.21 <sup>*4</sup>

\*1: Number of radial meshes per subassembly

\*2: Axial mesh size

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

\*4: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*5: Not converged

\*6: Out of parameters for verification

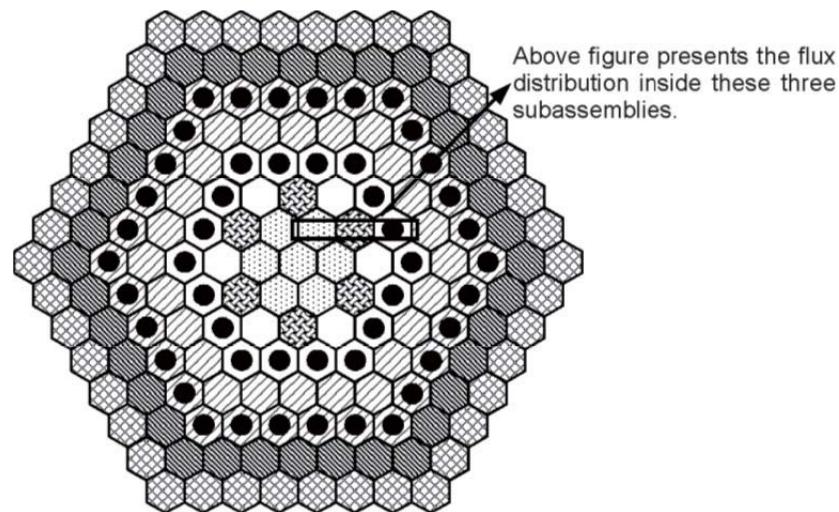
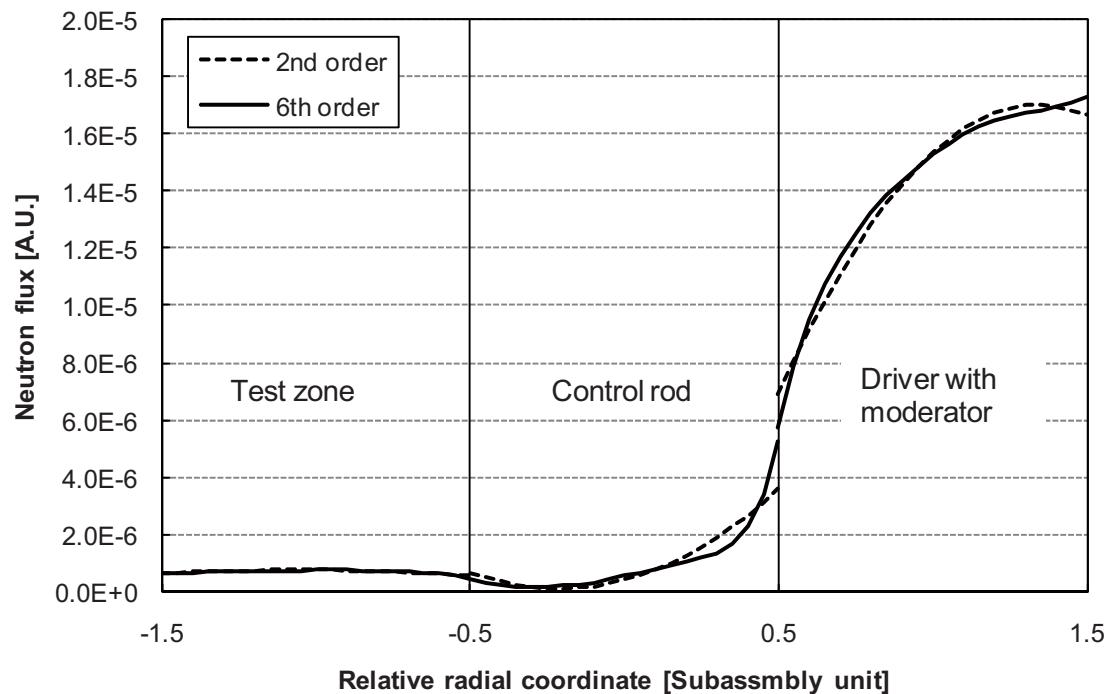


Fig. 6.2-1 Comparison of the 4th group neutron flux distribution calculated by NSHEX around the control rod region for the KNK-II core

## 7. 3次元六角体系用輸送計算コードの適用性評価

### 7.1 角度分点セットの条件設定

実際の実機解析への適用においては、第6章の検討で示したような角度分点と多項式展開次数あるいは空間メッシュを十分詳細に取った解析を必ずしも行う必要はないと考えられる。Fig. 7.1-1 及び Fig. 7.1-2 はそれぞれ NSHEX において角度分点及び多項式展開次数の取り方の違いによる固有値の計算結果の変化を示したもので、右へ行くに従い計算条件を粗くすることとなる。Fig. 7.1-3 及び Fig. 7.1-4 は MINISTRI において同様に角度分点及び空間メッシュの取り方の違いによる固有値の計算結果の変化を示したものである。角度分点に関しては、完全対称条件 ("Completely symmetric") で作成されたものとして、偶数モーメントを保存させる条件で設定された分点セット（以下、"Even condition"）<sup>23)</sup>を用いた場合はその限りではないが、TWOTRAN コード<sup>24)</sup>のデフォルトで与えられている分点セット（以下、"Reference"）やレベル毎モーメント保存条件により得られるもの（以下、"Level condition"）<sup>23)</sup>を用いた場合には、角度分点を粗くするに従い、S<sub>4</sub>条件までは固有値の増加が見られる（角度分点セットの詳細は付録6を参照）。他方、多項式展開次数あるいは空間メッシュに関しては、粗くすることにより逆に固有値の減少が見られる。このようなメカニズムは Table 7.1-1 (NSHEX) 及び Table 7.1-2 (MINISTRI) に示すようにほぼ制御棒領域の中性子束や吸収反応率の相対関係で説明できる。すなわち、制御棒領域の中性子束や吸収反応率は、"Reference"の角度分点セットを用いた場合に角度分点を粗くすることにより減少するが、多項式展開次数あるいは空間メッシュ分割を粗くした場合には逆に増加している。このように、固有値や中性子束において、角度分点と空間メッシュをより粗く取ることによる効果は互いに打消し合うことが分かる。

この知見から、"Reference"の角度分点セットを用いて角度分点条件を S<sub>4</sub>とし、最適な多項式展開次数あるいは空間メッシュ分割を取ることにより、最も詳細な角度分点及び空間分布取り扱い条件下での結果を再現することが予想できる。そこで、角度分点条件を S<sub>4</sub>とし、多項式展開次数あるいは空間メッシュ分割に関するサーベイにより最適な空間分布取り扱い条件を見つけ、本報告書で対象とする輸送計算コードの適用性評価を行うこととする。

### 7.2 検討条件

NSHEX、MINISTRI、MINIHEX の適用性評価を行う。評価は、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>22)</sup>による計算結果との比較により行う。

#### (1) 計算体系

計算体系として、第6章で対象とした、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」(SPX) の他に、Fig. 7.2-1 に示す小型炉心「常陽」MK-I (Joyo MK-I)<sup>25)</sup>と Fig. 7.2-2 に示す中型炉心 BFS-62-3A<sup>26)</sup>も対象とする。「常陽」MK-I 炉心の制御棒挿入状態としては、「もんじゅ」炉心や SPX 炉心と同様に実際の制御棒の運用を想定して、"All rods out"、"MCR half-in"、"MCR in"、"BCR in" の 4 ケースとする。「常陽」MK-I 炉心の "MCR" と "BCR" は同じ仕様であり、B-10 濃縮度は 90% である。BFS-62-3A 炉心については、"All rods

"out"の他に、制御棒価値測定実験の1部を模擬した、"Central MCR in"、"Off center MCR in"、"1 BCR in"を加えた4ケースを対象とする。BFS-62-3A炉心の"MCR"と"BCR"では、双方共に天然ホウ素（B）が採用されているが、ホウ素の含有率は異なっており、"BCR"は"MCR"の約2.5倍となっている。

## (2) 計算対象核特性

評価対象の核特性としては、5つ全ての炉心の固有値と「もんじゅ」、SPX、「常陽」MK-Iの炉心領域における集合体毎出力分布とする。目標精度については、第6章で示した通り固有値については0.1%とし、集合体毎出力分布については2%とする。なお、集合体毎出力分布の目標精度は、通常の出力運転状態、すなわち、制御棒全引抜または制御棒半挿入状態のみに対して適用することとし、出力がほぼゼロである制御棒全挿入状態に関しては参考扱いとする。

## (3) 計算条件

それぞれのコードの解析条件をTable 7.2-1に示す。また、本検討で対象とした5炉心について、MINISTRIとMINIHEXを適用した場合について、集合体（セル）内径方向メッシュ分割と実効メッシュ幅（メッシュ面積の平方根）の対応をTable 7.2-2に示す。

角度分点条件及び空間分布取り扱い条件に関する固有値のサーベイ計算ではまず、それぞれ複数の条件下の結果から、無限角度分点あるいは空間分布連続取り扱い条件（無限多项式展開次数条件または無限小空間角度メッシュ条件）の固有値を外挿により求める。引き続き、空間分布取り扱い条件を一定として、ある角度分点条件( $S_N$ )の結果と無限角度分点条件の結果との差（以下、 $S_N$ 角度分点効果）を求める。同様にして、角度分点条件を一定として、ある空間分布取り扱い条件の結果と空間分布連続取り扱い条件の結果との差（以下、空間分布取り扱い効果）を求める。

そして、上記により得られた計算結果から、空間分布効果が $S_4$ 角度分点効果を打ち消し、残りの効果の絶対値が0.1% $\Delta k$ 以下となるような多项式展開次数あるいはメッシュ分割を適用性評価用の条件として選定する。なお、多项式展開次数あるいはメッシュ分割は計算時間や計算機使用容量の合理的のためにできるだけ粗く取ることとする。

## 7.3 検討結果

各炉心に関して、角度分点と空間分布取り扱いに関する固有値のサーベイ結果、基準条件の選定、基準条件での固有値と集合体毎出力分布（KNK-IIとBFS-62-3Aを除く）の解析結果を示すこととする。なお、MINISTRIとMINIHEXを用いた場合には、軸方向のメッシュ分割による効果も存在するが、径方向の効果に比べて十分に小さかったことと軸方向のメッシュ分割は通常径方向と同程度にすることからサーベイ結果の記載を割愛した。

### 7.3.1 KNK-II炉心における検討結果

固有値に関する角度分点及び空間分布取り扱い条件の依存性について、NSHEXを用いた場合の結果をFig. 7.3-1に、MINISTRIを用いた場合（MINIHEXは適用範囲外）の結果をFig.

7.3-2 にそれぞれ示す。角度分点と空間分布取り扱いに関するサーベイでは、 $S_4$  角度分点効果を打消すような空間分布取り扱い条件を選定することとなるので、多項式展開次数またはメッシュ分割の依存性を示す図には、 $S_4$  角度分点効果を符号反転の上「-」印で相応の位置に表示させ、角度分点効果と空間分布取り扱い効果の打消し合いの結果残る効果を矢印の向きと長さで示している。具体的には、NSHEX を用いた場合には、横軸上の 2 次多項式展開とした条件の位置に表示されることにより、2 次多項式展開の適用性の目安としている。また、MINISTRI と MINIHEX を用いた場合には、横軸上で  $S_4$  角度分点効果を打消す径方向メッシュ条件位置付近に表示されることにより、適切なメッシュ分割条件選定の目安としている。

NSHEX を用いた場合については、2 次多項式展開とすることにより、適度に  $S_4$  角度分点効果を打消す様子が分かり、2 次多項式展開が基準条件として選定できる。

MINISTRI については、全てのケースについて 2.5cm メッシュ（メッシュ面積 6.1cm<sup>2</sup>）とすると空間分布取り扱い効果が  $S_4$  角度分点効果をやや上回るものとの適度に打消し合い、残りの効果は目標精度を満足できる見込みが読み取れるので、径方向と軸方向共に 2.5cm メッシュ分割を基準条件に選定する。

基準条件での、固有値の計算結果及び計算時間を Table 7.3-1 に示す。

固有値については、NSHEX と MINISTRI の双方とも基準条件において目標精度を満足している。計算時間については、MINISTRI は NSHEX の約 10 倍を要しているが、双方とも GMVP ほどは要していないことが分かる。

### 7.3.2 「もんじゅ」炉心における検討結果

固有値に関する角度分点及び空間分布取り扱い条件の依存性について、NSHEX を用いた場合の結果を Fig. 7.3-3 に、MINISTRI を用いた場合（MINIHEX は適用範囲外）の結果を Fig. 7.3-4 にそれぞれ示す。

NSHEX を用いた場合については、2 次多項式展開とした場合の空間分布取り扱い効果が小さく  $S_4$  角度分点効果の打消し度合いが小さいものの、残りの効果は目標精度を満足できることが読み取れるので、2 次多項式展開が基準条件として選定できる。

MINISTRI については、2.2cm メッシュ（メッシュ面積 4.8cm<sup>2</sup>）とすると空間分布取り扱い効果と  $S_4$  角度分点効果がほぼ打ち消し合うが、全てのケースについて 4.4cm メッシュ（メッシュ面積 19cm<sup>2</sup>）としても空間分布取り扱い効果が  $S_4$  角度分点効果を上回るもの、残りの効果は目標精度を満足できる見込みが読み取れるので、径方向 4.4cm メッシュ分割（軸方向 5.0cm メッシュ分割）を基準条件に選定する。

基準条件での、固有値の計算結果及び計算時間を Table 7.3-2 に、集合体毎出力分布の計算結果を Fig. 7.3-5～8 及び Table 7.3-3（最大誤差のみ）に、それぞれ示す。

固有値については、基準条件において、NSHEX については最大 0.07% の過大評価が、MINISTRI では最大 0.06% の過小評価がそれぞれ見られるが、NSHEX と MINISTRI の双方とも目標精度を満足している。計算時間については、NSHEX、MINISTRI、GMVP について同等である。

集合体毎出力分布については、"All rods out" と "MCR half-in" のケースについて、GMVP の

統計誤差を上回っているものの、NSHEX と MINISTRI の双方とも GMVP と 0.5%以内で一致が見られ、目標精度を十分に満足している。参考までに、制御棒全挿入状態 ("MCR in" 及び "BCR in") については、0.7%以内で一致が見られ、制御棒全挿入による GMVP との一致度合いの悪化は特に見られない。

### 7.3.3 SPX 炉心における検討結果

固有値に関する角度分点と空間分布取り扱い条件の依存性について、NSHEX を用いた場合の結果を Fig. 7.3-9 に、MINISTRI を用いた場合 (MINIHEX は適用範囲外) の結果を Fig. 7.3-10 にそれぞれ示す。

NSHEX を用いた場合については、2 次多項式展開とした場合の空間分布取り扱い効果は  $S_4$  角度分点効果よりもやや小さいが、残りの効果は目標精度を満足できることが読み取れるので、2 次多項式展開が基準条件として選定できる。

MINISTRI については、"All rods out"、"MCR half-in"、"BCR in" の 3 ケースについては 6.8cm メッシュ (メッシュ面積 47cm<sup>2</sup>) としても、空間分布取り扱い効果は  $S_4$  角度分点効果を大きく上回ることはなく、残りの効果は目標精度を満足できる見通しである。一方、"MCR in" のケースでは 6.8cm メッシュ (メッシュ面積 47cm<sup>2</sup>) とした場合には、空間分布取り扱い効果が非常に大きく、 $S_4$  角度分点効果と打消し合った残りの効果は目標精度とほぼ同等である。他方、"MCR in" のケースで 3.4cm メッシュ (メッシュ面積 12cm<sup>2</sup>) 条件とすると、 $S_4$  角度分点効果と空間分布取り扱い効果がほぼ打ち消し合うことから、"MCR in" のケースでは 3.4cm メッシュ条件が適切であることが分かる。全てのケースについて目標精度を満足できるのは 3.4cm メッシュ (メッシュ面積 12cm<sup>2</sup>) 条件だが、"MCR in" のケース以外は 6.8cm メッシュ条件でも目標精度を満足する見通しなので、径方向は 3.4cm と 6.8cm メッシュ分割の双方 (軸方向は 5.0cm メッシュ分割) を基準条件に選定する。

基準条件での、固有値の計算結果及び計算時間を Table 7.3-4 に、集合体毎出力分布の計算結果を Fig. 7.3-11～14 (MINISTRI に関しては 3.4cm メッシュの結果を掲載) 及び Table 7.3-5 (最大誤差のみ) に、それぞれ示す。

固有値については、NSHEX では最大 0.06% の過小評価が見られるが、目標精度を満足している。MINISTRI では 6.8cm メッシュとした場合には "MCR in" ケースについてはわずかに目標精度を満足しないが、それ以外のケースでは十分に満足している。更に、MINISTRIにおいて 3.4cm とした場合には、全てのケースについて目標精度を十分に満足しているが、"MCR half-in" のケースでは核分裂中性子源の非収束と言う問題が生じた。計算時間については、NSHEX と MINISTRI の 6.8cm メッシュの場合は GMVP と同等であるが、MINISTRI で 3.4cm メッシュとすると、メッシュ数は 4 倍となるので相応に計算時間を要している。

集合体毎出力分布については、NSHEX では目標精度は満足しているものの、"All rods out" のケースでは 0.7% 以内の一一致であるのに対して、"MCR half-in" のケースでは 1.8% 以内の一一致であり、制御棒の挿入による一致度合いの悪化が見られている。また、参考扱いであるが、"MCR in" と "BCR in" のケースでは、GMVP に対してそれぞれ 4.2% 及び 3.1% に及ぶ差異が見られている。MINISTRI に関しては、3.4cm メッシュとした場合 ("MCR half-in" のケースは非収束)

に加えて、6.8cm メッシュとした場合でも GMVP と 1.4%以内の一致が見られ、目標精度を満足している。また、制御棒全挿入状態 ("MCR in" と "BCR in" のケース) でも GMVP と 2%以内の一致が見られている。

ここで、"MCR in" のケースにおける NSHEX の結果の差異に関する検討について示す。このケースの計算では、外側反復毎に高次モーメントの更新を止める条件を通常の  $2.0 \times 10^{-4}$  から  $4.0 \times 10^{-4}$  に緩めたために、GMVP との差異が拡大すると共に MINISTRI とは差異の現れ方の傾向が異なったものと考えられる。そこで、NSHEX の収束性と計算アルゴリズムの改良について検討を行った。その結果、内側反復計算にリバランス法を適用し、中性子束の高次モーメントを計算の最後まで外側反復毎に更新するように変更したところ、計算時間は元の約 2 倍を要したが、GMVP との差異は最大で 2.4% にまで改善が見られた。すなわち、4.3% に及ぶ GMVP との差異は、NSHEX の基礎理論の不備によるものではないことを確認した。

#### 7.3.4 「常陽」 MK-I 炉心における検討結果

まず、NSHEX を用いた場合には、全てのケースにおいて計算の収束が得られなかった。なお、計算が収束しなかった原因としては、追加検討から集合体ピッチが 8.2cm とやや小さいことと、制御棒全挿入状態において軸方向に 5cm と小さいサイズのノードを取ったことがあることが分かった。

MINISTRI を用いた場合 (MINIHEX は適用範囲外) の固有値に関する角度分点と空間分布取り扱い条件の依存性を Fig. 7.3-15 に示す。1.6cm メッシュ (メッシュ面積  $2.4\text{cm}^2$ ) とすると空間分布取り扱い効果と  $S_4$  角度分点効果がほぼ打ち消し合うが、空間メッシュ効果がやや大きい 3.1cm メッシュ (メッシュ面積  $9.7\text{cm}^2$ ) としても、残りの効果は目標精度を満足できる見込みがあるので、径方向 3.1cm メッシュ分割 (軸方向 2.5cm メッシュ分割) を基準条件に選定する。

基準条件での、固有値の計算結果及び計算時間を Table 7.3-6 に、集合体毎出力分布の計算結果を Fig. 7.3-16~19 及び Table 7.3-7 (最大誤差のみ) に、それぞれ示す。

固有値については、基準条件において、MINISTRI では 0.06~0.07% の過小評価がそれぞれ見られるが、目標精度を満足している。計算時間については、MINISTRI と GMVP で同等である。

集合体毎出力分布については、GMVP の統計誤差を一部上回っているものの、MINISTRI は GMVP と 0.6% 以内で一致が見られ、目標精度を十分に満足している。

#### 7.3.5 BFS-62-3A 炉心における検討結果

第 1 章 1.2 で述べたように NSHEX の適用は現実的ではないので行わない。

MINIHEX 及び MINISTRI を用いた場合の固有値に関する角度分点と空間分布取り扱い条件の依存性を Fig. 7.3-20 に示す。全てのケースに関して 4.7cm メッシュ (メッシュ面積  $23\text{cm}^2$ ) が最適であることが明らかであり、MINISTRI による径方向 4.7cm メッシュ (軸方向 5.0cm メッシュ分割) を基準条件に選定する。

基準条件での、固有値の計算結果及び計算時間を Table 7.3-8 に示す。GMVP の統計精度は

若干上回るもの、MINIHEX は GMVP と 0.01%以内の一致が見られ、目標精度を十分に満足している。計算時間については、MINIHEX と GMVP で同等である。

#### 7.4 まとめ

TWOTRAN コードのデフォルトで与えられている"Reference"角度分点セットを用いた場合には、角度分点と空間メッシュや多項式展開を詳細にする効果は互いに打消し合うとの特性を生かして、角度分点を第 6 章で示した検証計算の S<sub>8</sub>から S<sub>4</sub>に緩めた条件で適用性評価を行った。この角度分点条件の緩和により、ほぼ全ての計算について収束した結果が得られるようになった。

適用性評価の結果、NSHEX については 2 次多項式展開が、MINIHEX と MINISTRI については、小型炉心では 2.5cm メッシュが、中型及び大型炉心では 5.0cm メッシュとした条件が目標精度の満足と計算時間短縮の観点から最適であることが分かった。MINISTRI と MINIHEX を用いた有限差分法計算に関する検討結果は、次のように整理できる。

表 S<sub>4</sub>角度分点条件における炉心サイズと最適径方向メッシュサイズとの関係

炉心サイズ	炉心	径方向メッシュサ イズ [cm]	集合体配列ピッ チ [cm]	集合体内径方向 メッシュ分割数
小型	KNK-II	2.5	13.0	24
	Joyo MK-I	3.1	8.2	6
中型	Monju	4.4	11.6	6
	BFS-62-3A	4.7	5.1	1
大型	SPX	6.8	18.0	6
		3.4		24

また、KNK-II 炉心、「もんじゅ」炉心、「スーパーフェニックス」炉心への適用における計算時間の比較では、NSHEX の方が優れていることが分かった。

なお、今回の検討では、"Reference"角度分点セットに限定した上で、空間メッシュや多項式展開次数に関するサーベイを実施したが、逆に、空間メッシュや多項式展開次数を粗めに設定し固定した上で、最適な S<sub>4</sub>角度分点セットのサーベイを行う方策も考えられる。例えば、小型炉心 KNK-II に対して、2.5cm ではなく 5.0cm 空間メッシュ分割とした条件で MINISTRI の適用を考える。Fig. 7.4-1 は、S<sub>4</sub>角度分点セットの最小方向余弦をパラメータとして、KNK-II 炉心における固有値の参照解に対する相対差を図示したものである。固有値の相対差は制御棒挿入状態によって異なるが、最小方向余弦を 0.235 に設定した場合に、いずれの制御棒挿入状態に対しても目標精度をほぼ満足できることを示している。参考までに、"Reference"角度分点セットでは最小方向余弦は約 0.3 であり、それを適用した場合には 0.2~0.4% の過小評価となり目標精度から逸脱することが分かる。

Table 7.1-1 Relative difference of the flux and absorption reaction rate in the control rod region due to the change of the angular quadrature set and maximum polynomial order in NSHEx for "Rods half-in" case of the KNK-II core

Condition change	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Absorption reaction rate
Angular quadrature set (Even condition: $S_{16} \rightarrow S_4$ )	+0.4 <sup>*1</sup>	+0.2 <sup>*1</sup>	+0.2 <sup>*1</sup>	+0.4 <sup>*1</sup>	+0.2 <sup>*1</sup>
Angular quadrature set (Reference: $S_{16} \rightarrow S_4$ )	-0.6	-0.4	-0.3	-0.1	-0.4
Maximum polynomial order (6th $\rightarrow$ 2nd)	+0.0	+0.1	+0.6	+2.0	+0.4

\*1: Relative difference (%)

Table 7.1-2 Relative difference of the flux and absorption reaction rate in the control rod region due to the change of the angular quadrature set and radial mesh width in MINISTRI for "Rods half-in" case of the KNK-II core

Condition change	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Absorption reaction rate
Angular quadrature set (Even condition: $S_{16} \rightarrow S_4$ )	+0.5 <sup>*1</sup>	+0.2 <sup>*1</sup>	+0.2 <sup>*1</sup>	+0.8 <sup>*1</sup>	+0.3 <sup>*1</sup>
Angular quadrature set (Reference: $S_{16} \rightarrow S_4$ )	-0.6	-0.4	-0.4	-0.1	-0.4
Radial mesh width (1.2 $\rightarrow$ 2.5cm)	+0.3	+0.2	+0.1	+0.5	+0.2

\*1: Relative difference (%)

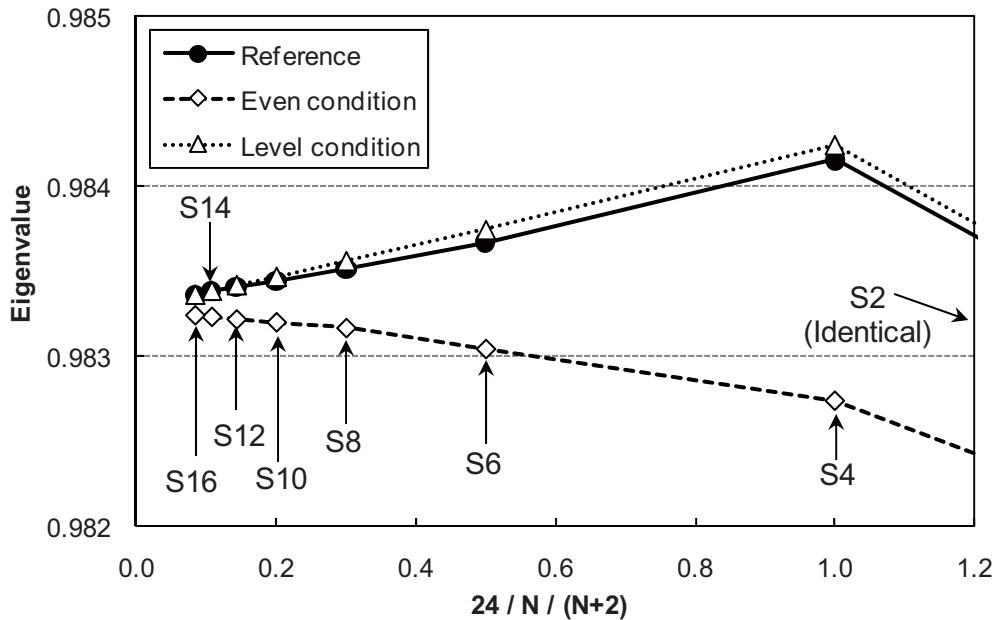


Fig. 7.1-1 Dependence of eigenvalue on three angular quadrature sets in NSHEX for "Rods half-in" case of the KNK-II core (2nd order polynomial expansion)

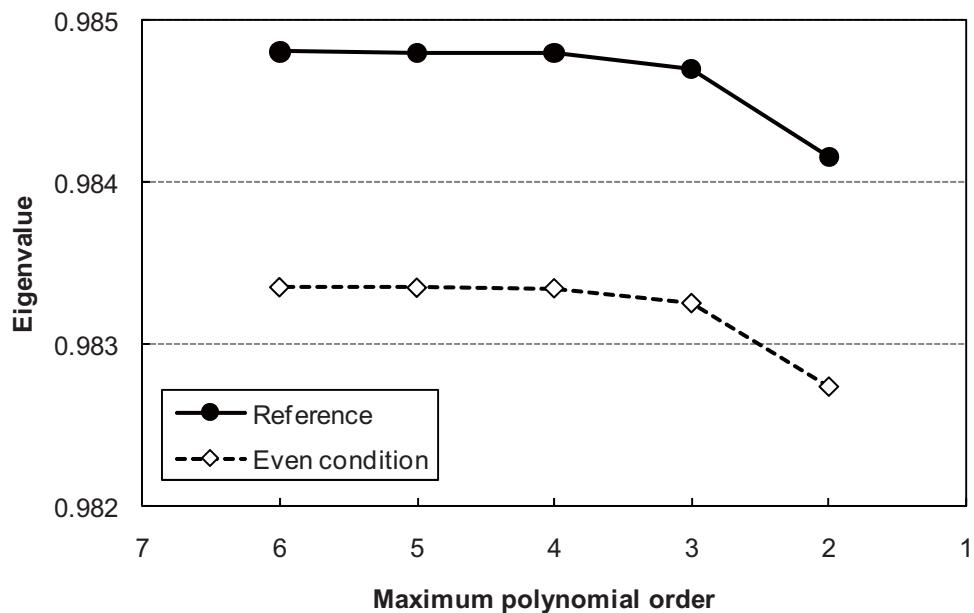


Fig. 7.1-2 Dependence of eigenvalue on the maximum polynomial order in NSHEX for "Rods half-in" case of the KNK-II core (Angular quadrature set of S<sub>4</sub>)

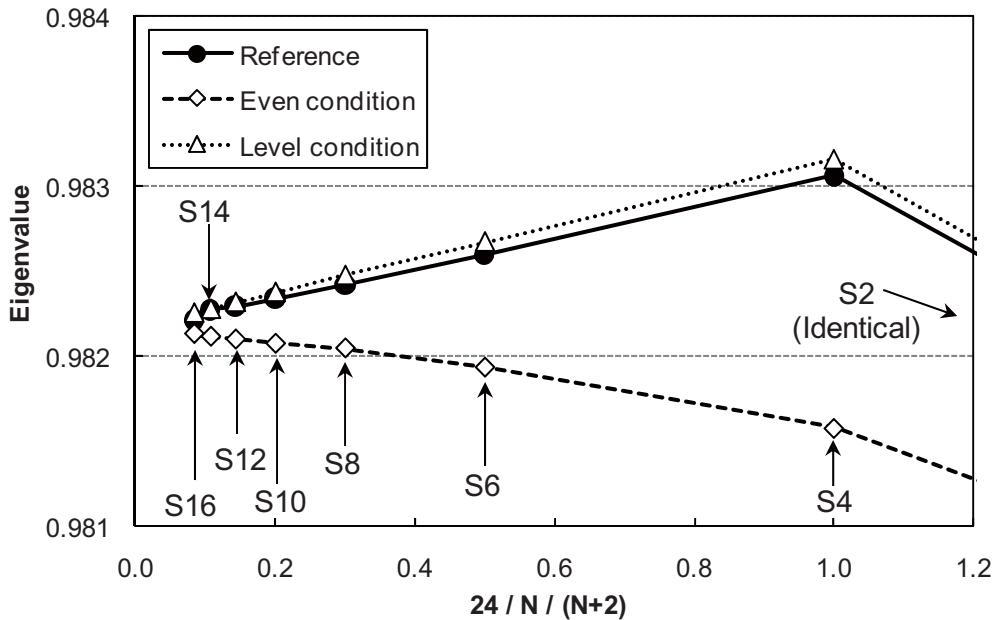


Fig. 7.1-3 Dependence of eigenvalue on three angular quadrature sets in MINISTRI for "Rods half-in" case of the KNK-II core (Radially 24meshes/SA)

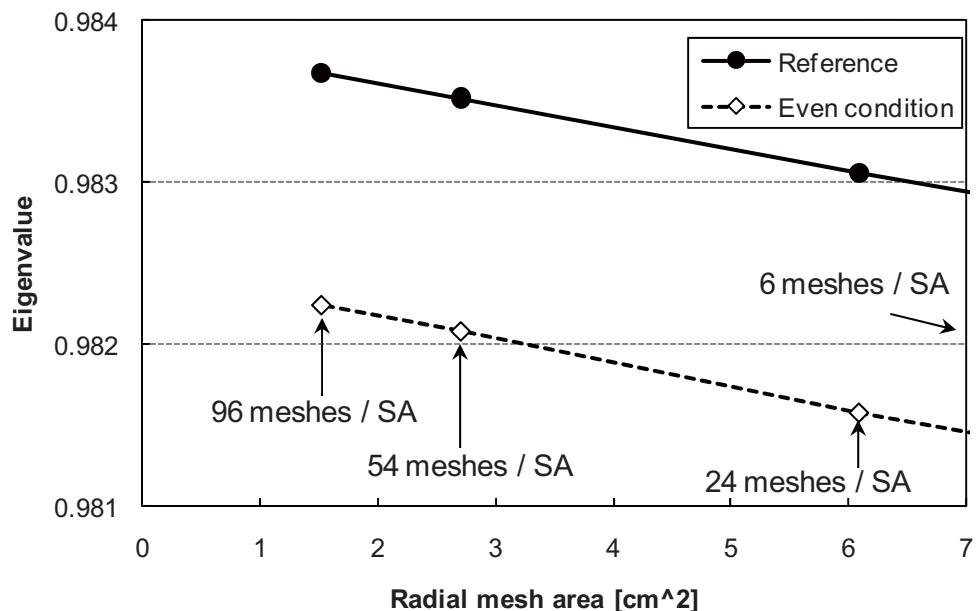


Fig. 7.1-4 Dependence of eigenvalue on the radial mesh division in MINISTRI for "Rods half-in" case of the KNK-II core (Angular quadrature set of S<sub>4</sub>)

Table 7.2-1 Calculation criteria and conditions for the reference scheme

Item	Criteria and conditions	
	NSHEX	MINIHEX or MINISTRI
Angular quadrature set	$S_4$	←
Spatial treatment in the radial direction	Polynomial expansion with up to sixth order	No division or triangle mesh division (6, 24, 54, 96 meshes) within SA
Spatial treatment in the axial direction	Polynomial expansion with the second order	Finer mesh division
Node or mesh width in the axial direction	Around 20cm	Around 5.0 cm or 2.5cm
Fission source convergence criteria for each node	Less than $1.0 \times 10^{-4}$	←
Eigenvalue convergence criteria	Less than $1.0 \times 10^{-5}$	←
High order moments calculation condition	Greater than $2.0 \times 10^{-4}$ *1	Nothing
Neutron energy group	4 (KNK-II), 18 (Monju, SPX, Joyo MK-I, and BFS-62-3A)	←

\*1: Set  $4.0 \times 10^{-4}$  for "MCR in" case of the SPX core

Table 7.2-2 Comparison in effective radial mesh sizes among various cores

Core	Core size	SA across flat length [cm]	Number of radial meshes per SA	Effective radial mesh size [cm]
KNK-II	Small	12.9900	6	4.9
			24	2.5
			54	1.6
			96	1.2
Monju	Intermediate	11.5600	6	4.4
			24	2.2
			54	1.5
SPX	Large	18.0190	6	6.8
			24	3.4
Joyo	Small	8.1817	1	7.6
			6	3.1
			24	1.6
BFS	Intermediate (BFS-62-3A)	5.1000	1	4.7
			6	1.9

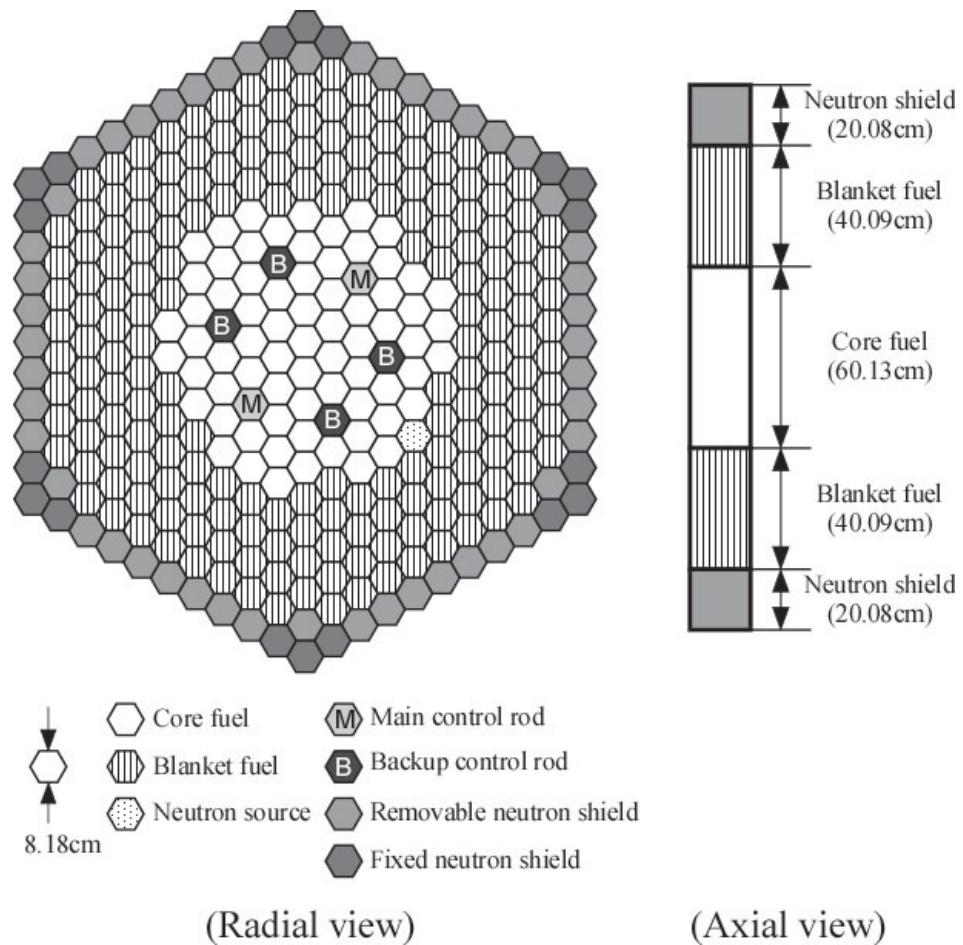


Fig. 7.2-1 Layout of the Joyo MK-I core

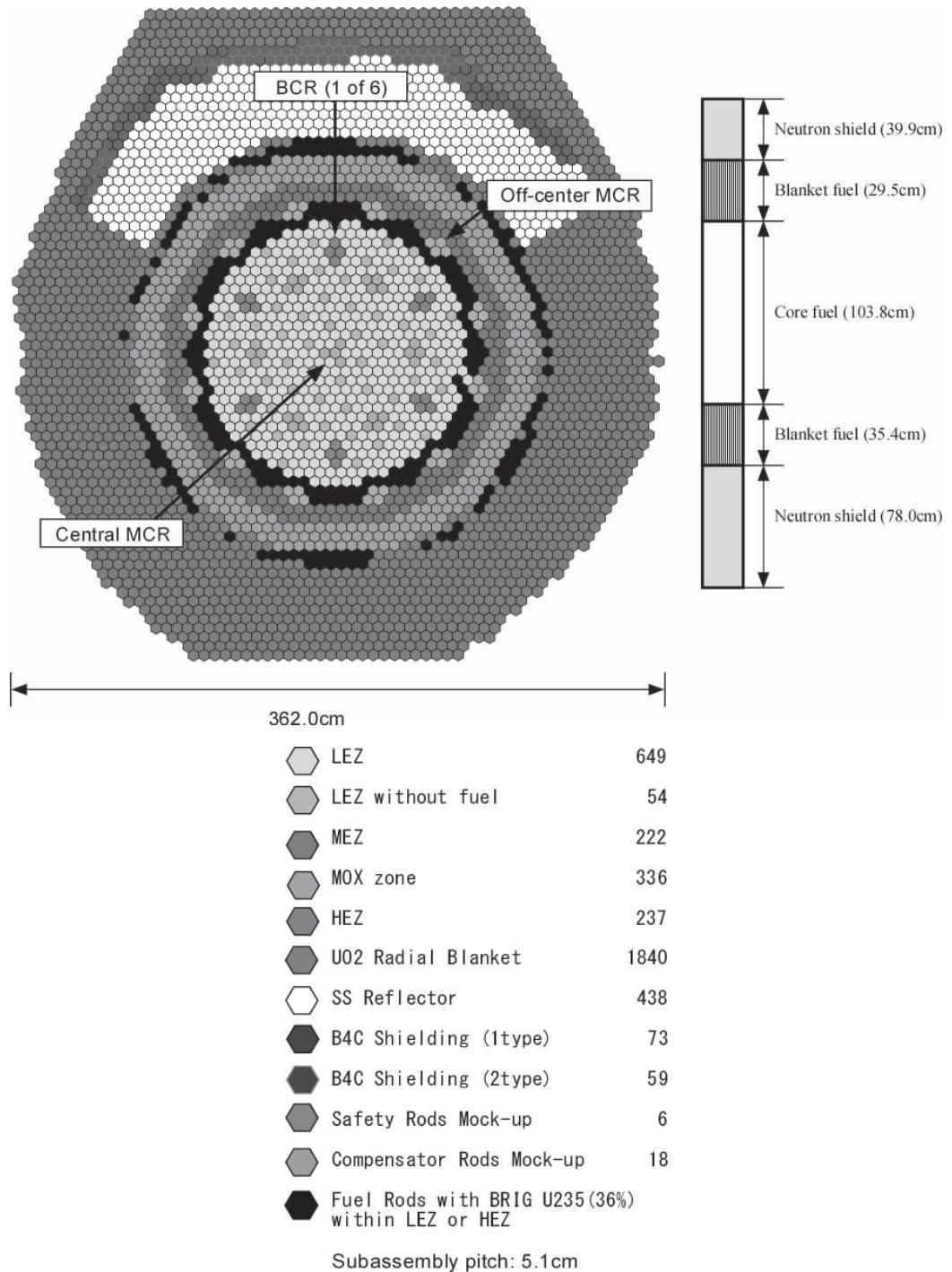


Fig. 7.2-2 Layout of the BFS-62-3A core

Table 7.3-1 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the KNK-II core

Code	All rods out	Rods half-in	Rods in	Average time [min]
NSHEX	+0.079 <sup>*1</sup>	+0.046 <sup>*1</sup>	-0.001 <sup>*1</sup>	2
MINISTRI (2.5) <sup>*3</sup>	-0.015	+0.023	+0.049	24
GMVP (Ref.)	1.09527 ±0.024 <sup>*2</sup>	0.98349 ±0.026 <sup>*2</sup>	0.87966 ±0.026 <sup>*2</sup>	287

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*3: Radial and axial mesh sizes [cm]

Table 7.3-2 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the Monju core

Code	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in	Average time [min]
NSHEX	+0.039 <sup>*1</sup>	+0.024 <sup>*1</sup>	+0.067 <sup>*1</sup>	+0.062 <sup>*1</sup>	93
MINISTRI (4.4) <sup>*3</sup>	-0.021	-0.059	-0.053	-0.056	117
GMVP (Ref.)	1.03861 ±0.010 <sup>*2</sup>	0.98551 ±0.010 <sup>*2</sup>	0.93493 ±0.010 <sup>*2</sup>	0.95665 ±0.010 <sup>*2</sup>	306

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*3: Mesh size in the radial direction [cm] (5.0cm in the axial direction)

Table 7.3-3 Relative difference in power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the Monju core

Code	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
NSHEX	0.33 <sup>*1</sup>	0.40 <sup>*1</sup>	0.64 <sup>*1</sup>	0.53 <sup>*1</sup>
MINISTRI (4.4) <sup>*3</sup>	0.24	0.52	0.67	0.54
Uncertainty of GMVP	0.21 <sup>*2</sup>	0.22 <sup>*2</sup>	0.23 <sup>*2</sup>	0.23 <sup>*2</sup>

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*3: Mesh size in the radial direction [cm] (5.0cm in the axial direction)

Table 7.3-4 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the SPX core

Code	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in	Average time [min]
NSHEX	+0.029 <sup>*1</sup>	+0.022 <sup>*1</sup>	-0.059 <sup>*1</sup>	+0.021 <sup>*1</sup>	232
MINISTRI (6.8) <sup>*3</sup>	-0.018	-0.036	<u>-0.107</u>	-0.025	411
MINISTRI (3.4) <sup>*3</sup>	+0.018	-0.010 <sup>*4</sup>	+0.018	+0.018	1426
GMVP (Ref.)	1.02256 ±0.005 <sup>*2</sup>	0.97474 ±0.006 <sup>*2</sup>	0.93021 ±0.006 <sup>*2</sup>	1.01278 ±0.005 <sup>*2</sup>	269

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*3: Mesh size in the radial direction [cm] (5.0cm in the axial direction)

\*4: Converged in eigenvalue only

Underlined means exceeding of the target accuracy

Table 7.3-5 Relative difference in power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the SPX core

Code	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
NSHEX	0.72 <sup>*1</sup>	1.82 <sup>*1</sup>	4.23 <sup>*1</sup>	3.11 <sup>*1</sup>
MINISTRI (6.8) <sup>*3</sup>	0.73	1.42	1.46	1.76
MINISTRI (3.4) <sup>*3</sup>	0.58	NC <sup>*4</sup>	1.02	1.29
Uncertainty of GMVP	0.22 <sup>*2</sup>	0.22 <sup>*2</sup>	0.22 <sup>*2</sup>	0.21 <sup>*2</sup>

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*3: Mesh size in the radial direction [cm] (5.0cm in the axial direction)

\*4: Converged in eigenvalue only

Table 7.3-6 Relative difference in eigenvalue and calculation time by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the Joyo MK-I core

Code	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in	Average time [min]
NSHEX	NC <sup>*4</sup>	NC <sup>*4</sup>	NC <sup>*4</sup>	NC <sup>*4</sup>	-
MINISTRI (3.1) <sup>*3</sup>	-0.062 <sup>*1</sup>	-0.065 <sup>*1</sup>	-0.063 <sup>*1</sup>	-0.067 <sup>*1</sup>	53
GMVP (Ref.)	1.00958 ±0.011 <sup>*2</sup>	0.98635 ±0.010 <sup>*2</sup>	0.96253 ±0.011 <sup>*2</sup>	0.91733 ±0.011 <sup>*2</sup>	118

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*3: Mesh size in the radial direction [cm] (2.5cm in the axial direction)

\*4: Not converged

Table 7.3-7 Relative difference in power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for the Joyo MK-I core

Code	All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in
NSHEX	NC <sup>*4</sup>	NC <sup>*4</sup>	NC <sup>*4</sup>	NC <sup>*4</sup>
MINISTRI (3.1) <sup>*3</sup>	0.35 <sup>*1</sup>	0.60 <sup>*1</sup>	0.54 <sup>*1</sup>	0.54 <sup>*1</sup>
Uncertainty of GMVP	0.18 <sup>*2</sup>	0.19 <sup>*2</sup>	0.19 <sup>*2</sup>	0.19 <sup>*2</sup>

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*3: Mesh size in the radial direction [cm] (2.5cm in the axial direction)

\*4: Not converged

Table 7.3-8 Relative difference in eigenvalue and calculation time by MINIHEX with the standard calculation condition for the BFS-62-3A core

Code	All rods out	Central MCR in	Off-center MCR in	1 BCR in	Average time [min]
MINIHEX (4.7) <sup>*3</sup>	+0.001 <sup>*1</sup>	+0.007 <sup>*1</sup>	+0.006 <sup>*1</sup>	-0.004 <sup>*1</sup>	486
GMVP (Ref.)	0.99081 ±0.003 <sup>*2</sup>	0.98682 ±0.003 <sup>*2</sup>	0.98788 ±0.003 <sup>*2</sup>	0.98523 ±0.003 <sup>*2</sup>	1546

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

\*2: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

\*3: Mesh size in the radial direction [cm] (5.0cm in the axial direction)

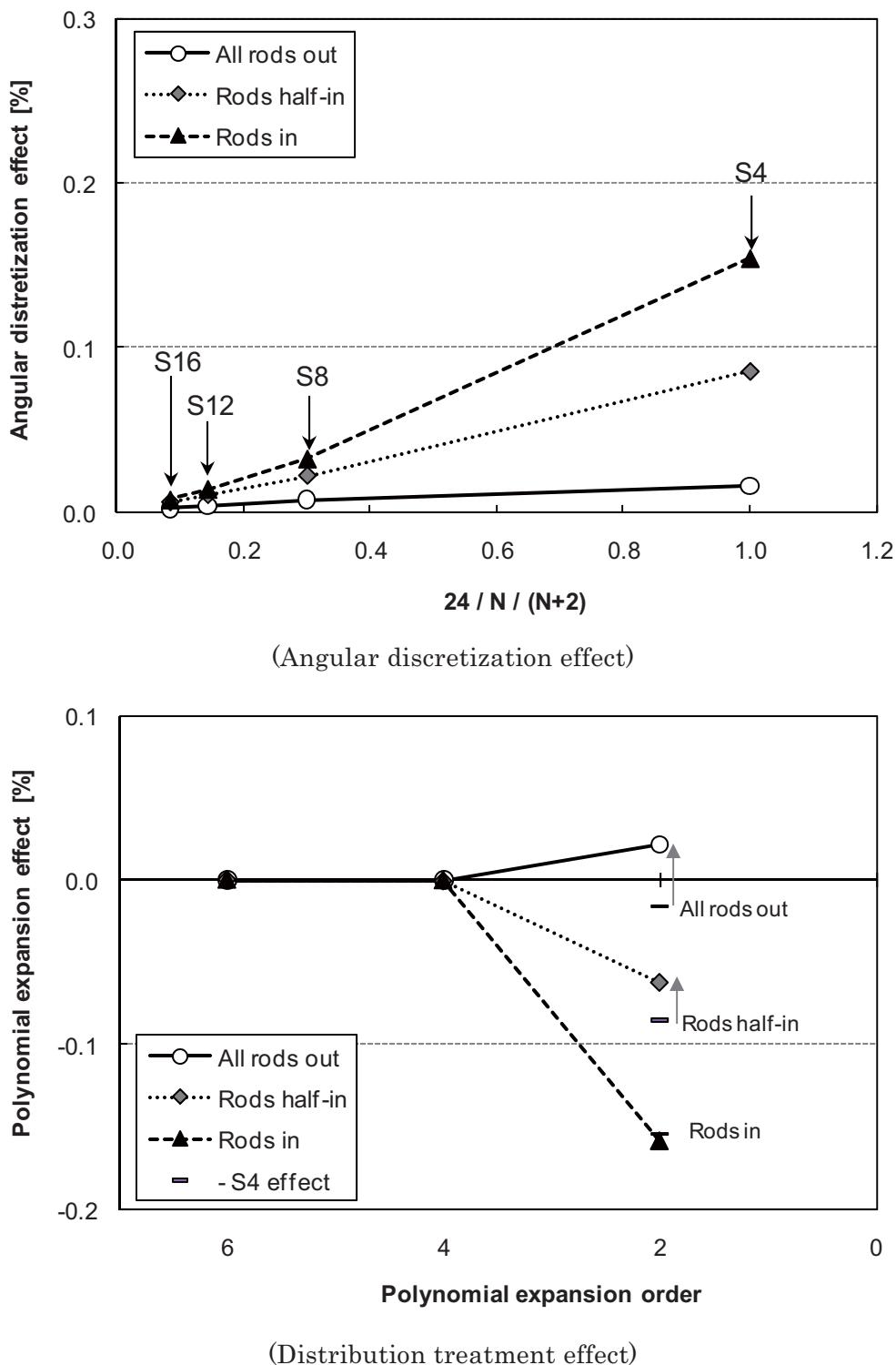


Fig. 7.3-1 Effects of polynomial expansion and angular discretization by NSHEX for the KNK-II core

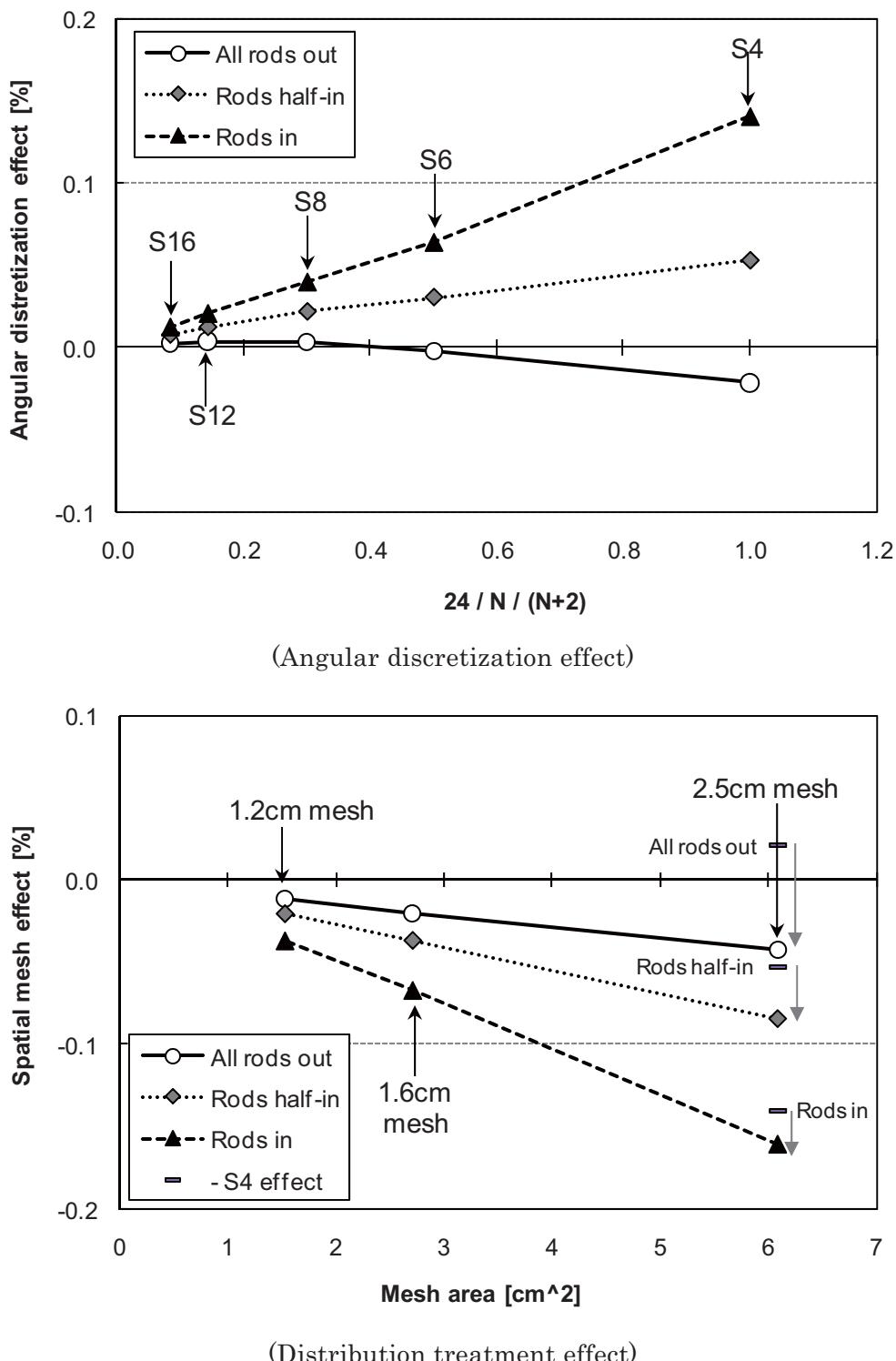


Fig. 7.3-2 Effects of spatial mesh and angular discretization by MINISTRI for the KNK-II core

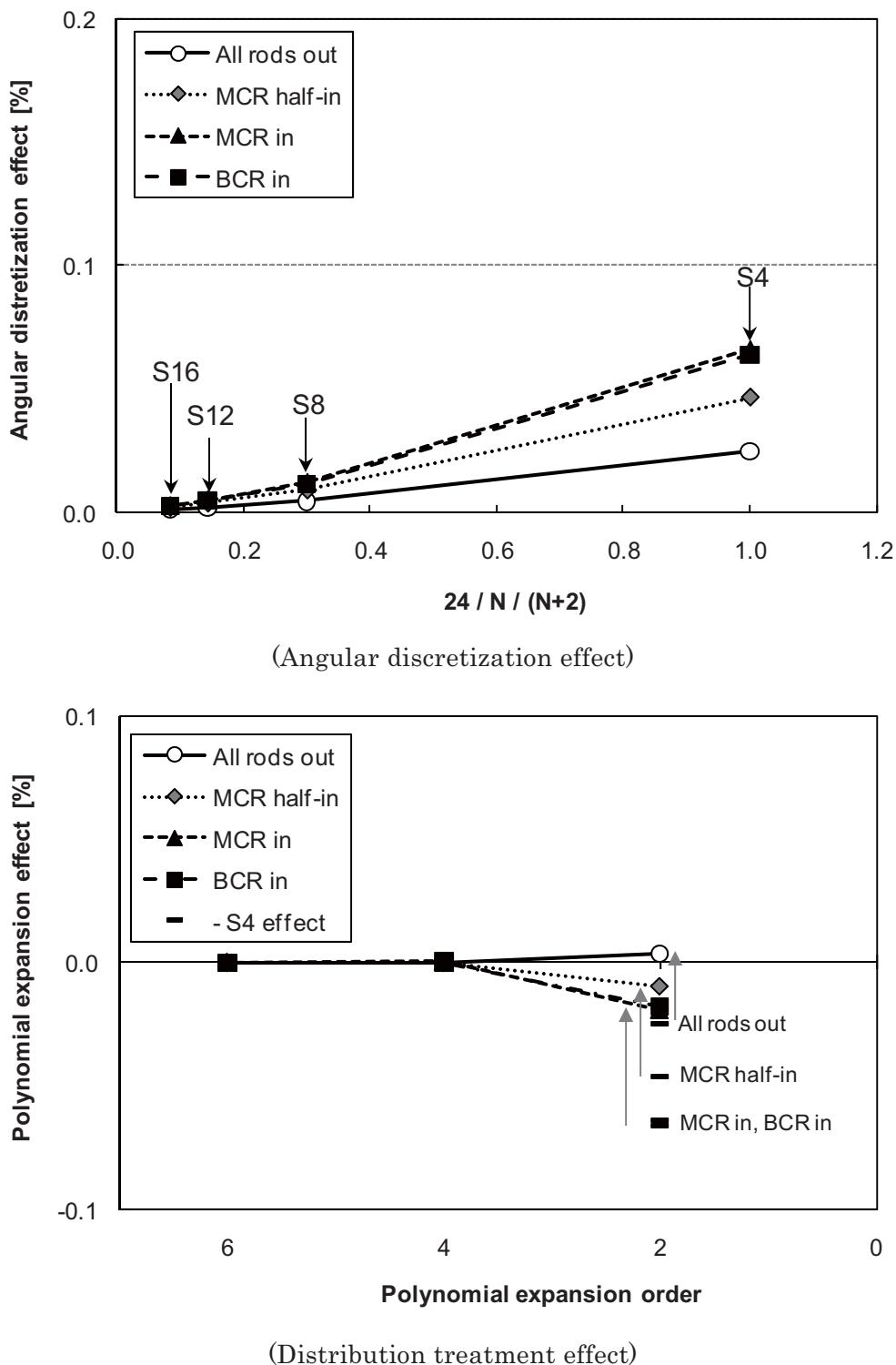


Fig. 7.3-3 Effects of polynomial expansion and angular discretization by NSHEX for the Monju core

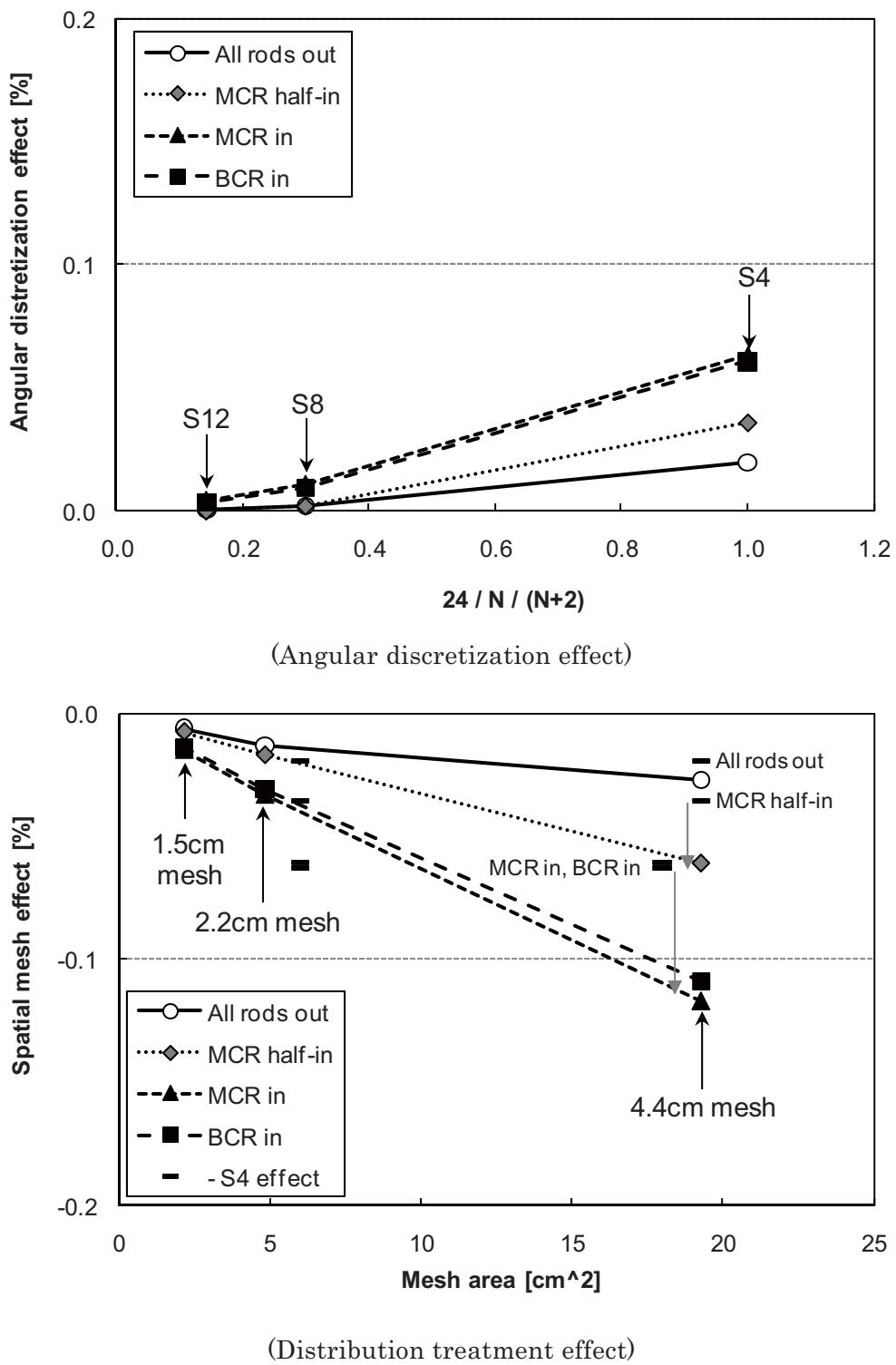


Fig. 7.3-4 Effects of spatial mesh and angular discretization by MINISTRI for the Monju core

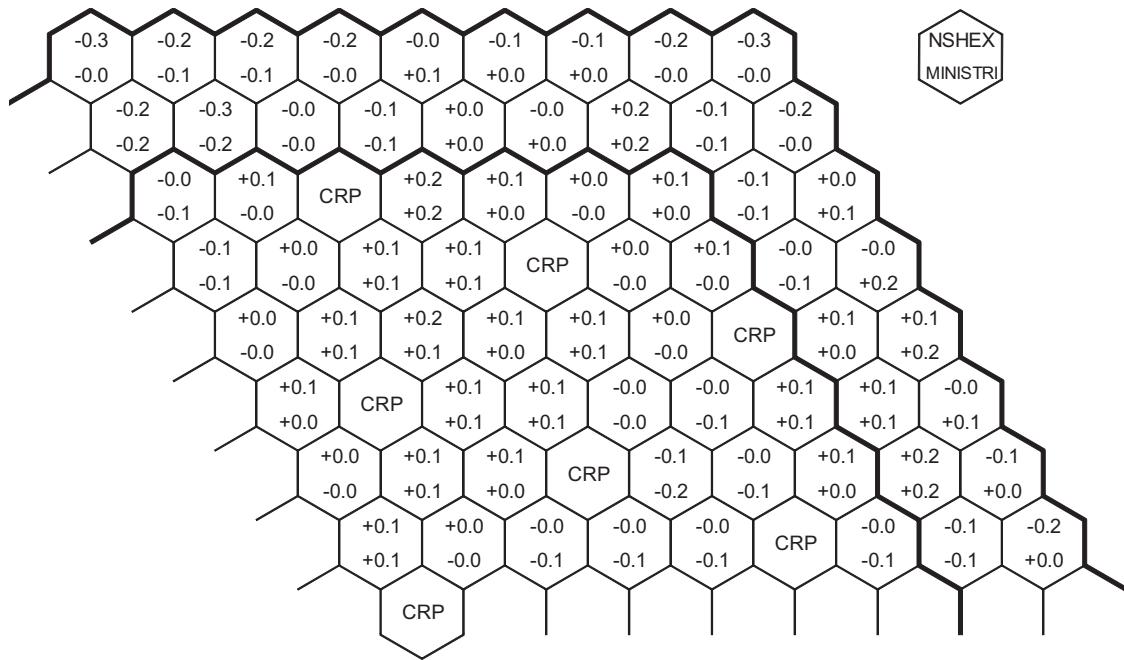


Fig. 7.3-5 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "All rods out" case of the Monju core

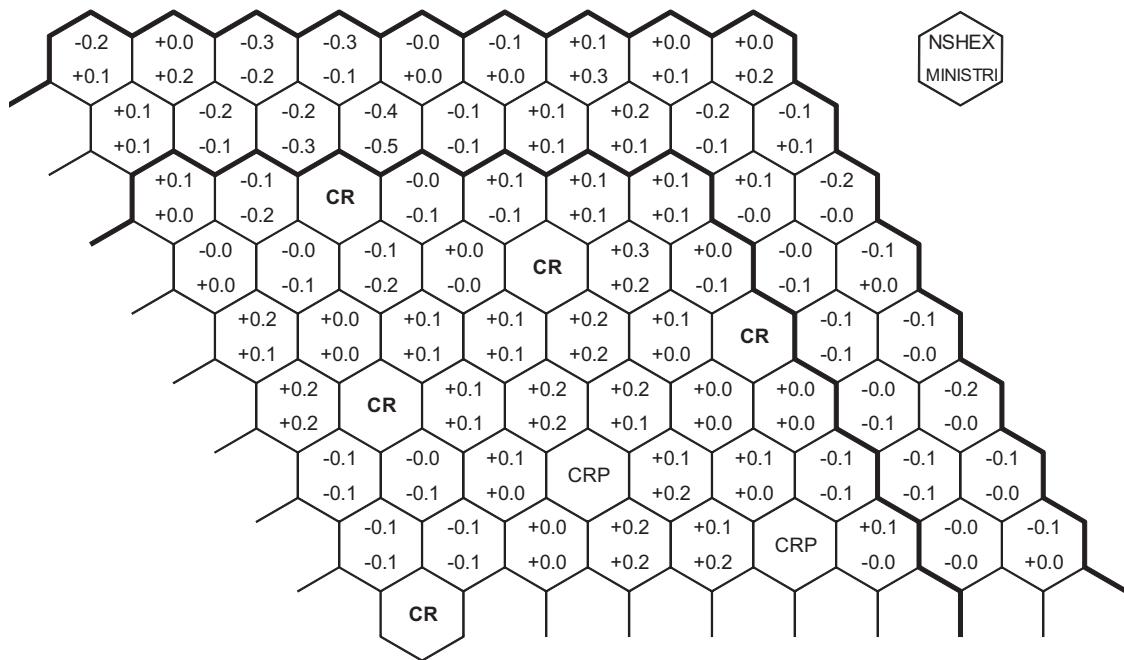


Fig. 7.3-6 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "MCR half-in" case of the Monju core

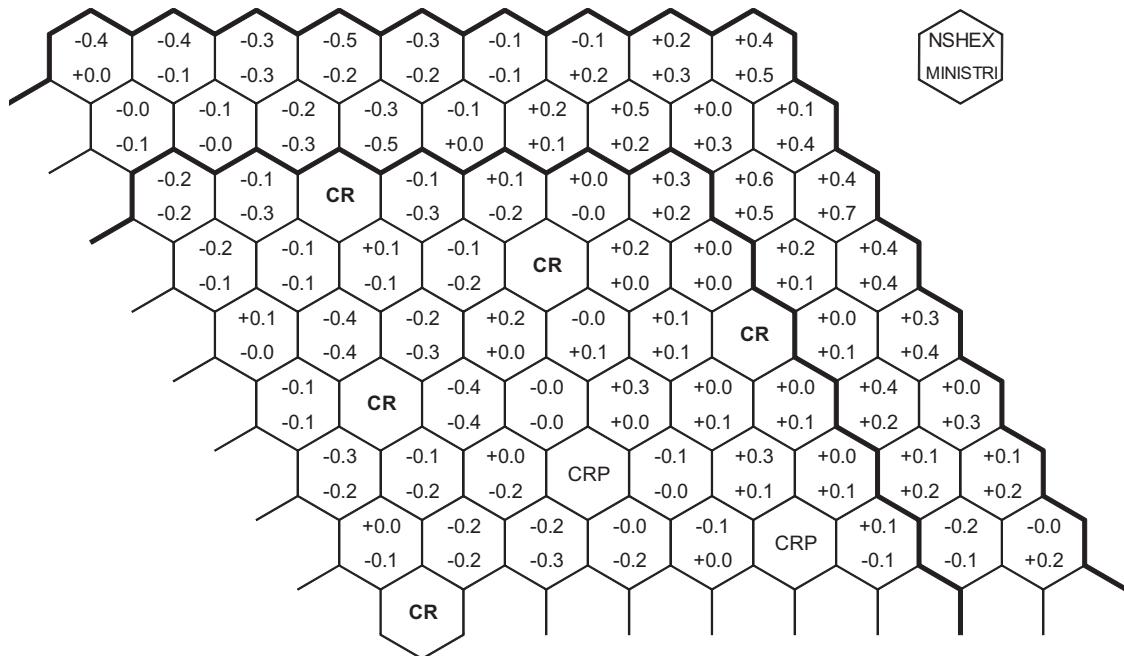


Fig. 7.3-7 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "MCR in" case of the Monju core

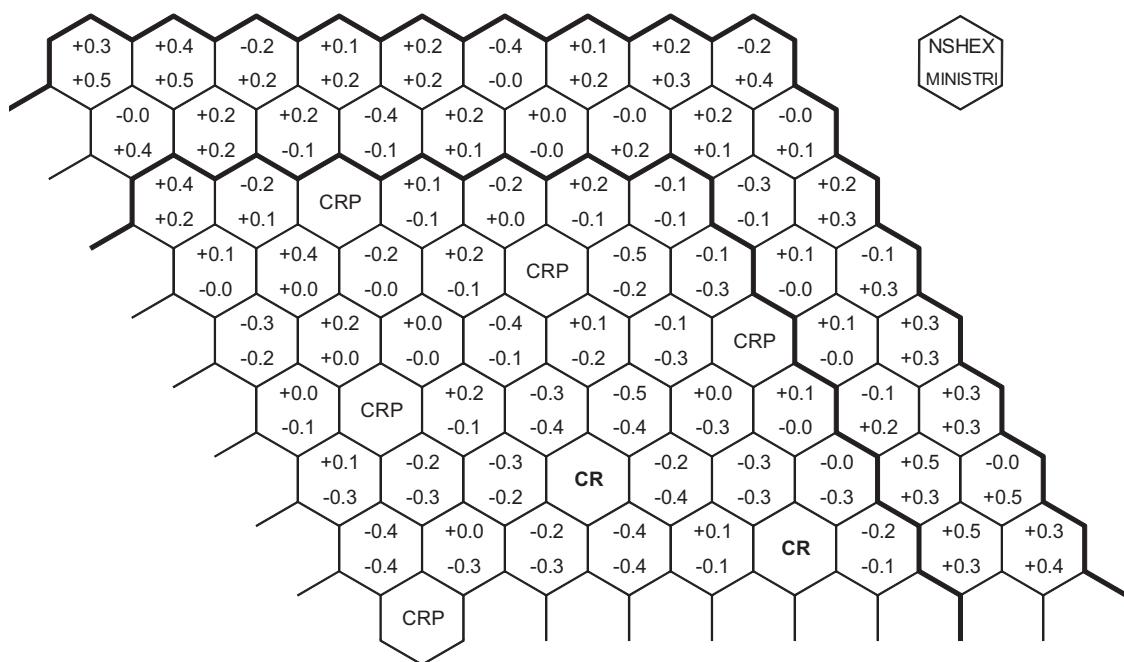


Fig. 7.3-8 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "BCR in" case of the Monju core

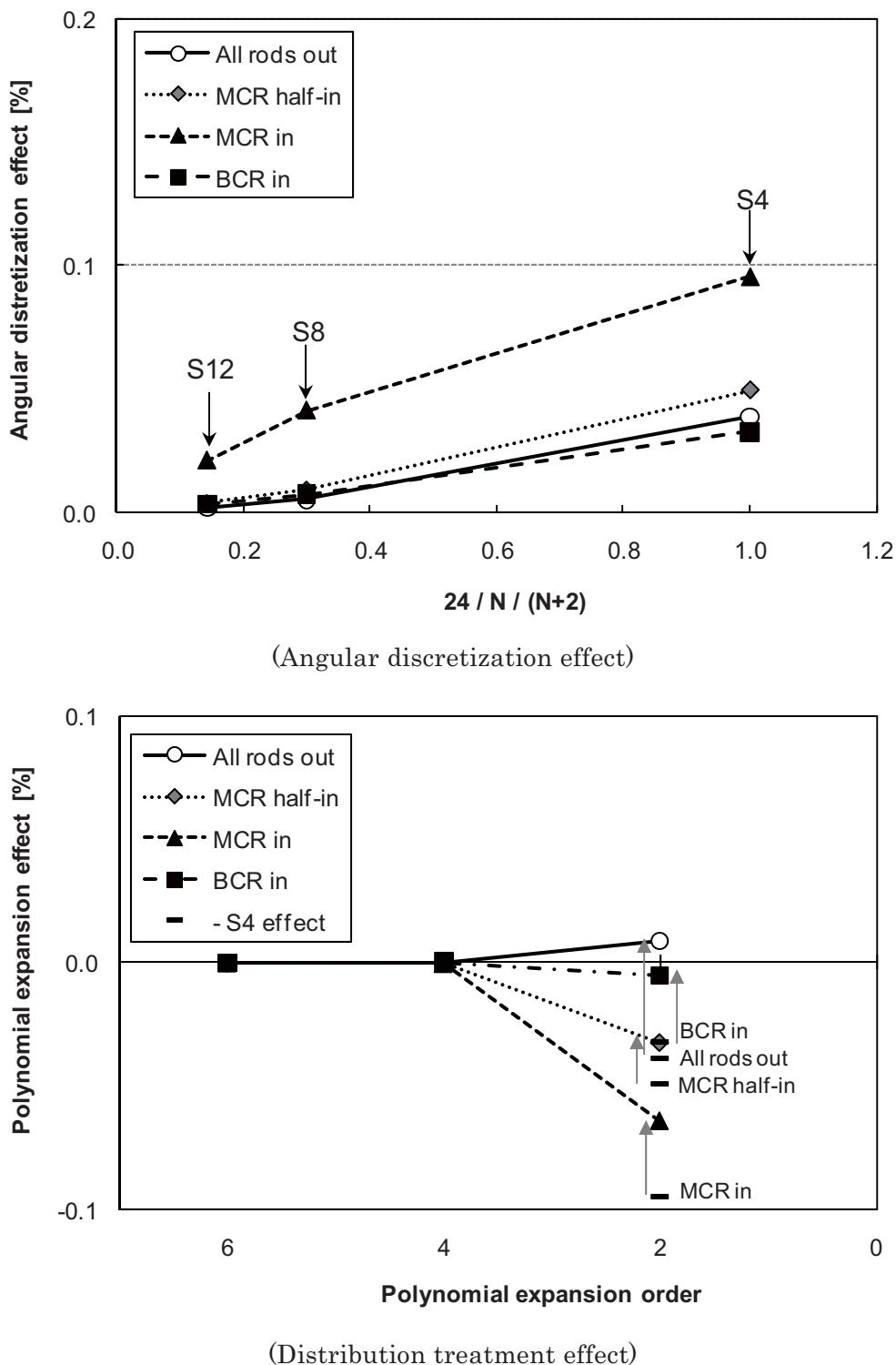


Fig. 7.3-9 Effects of polynomial expansion and angular discretization by NSHEX for the SPX core

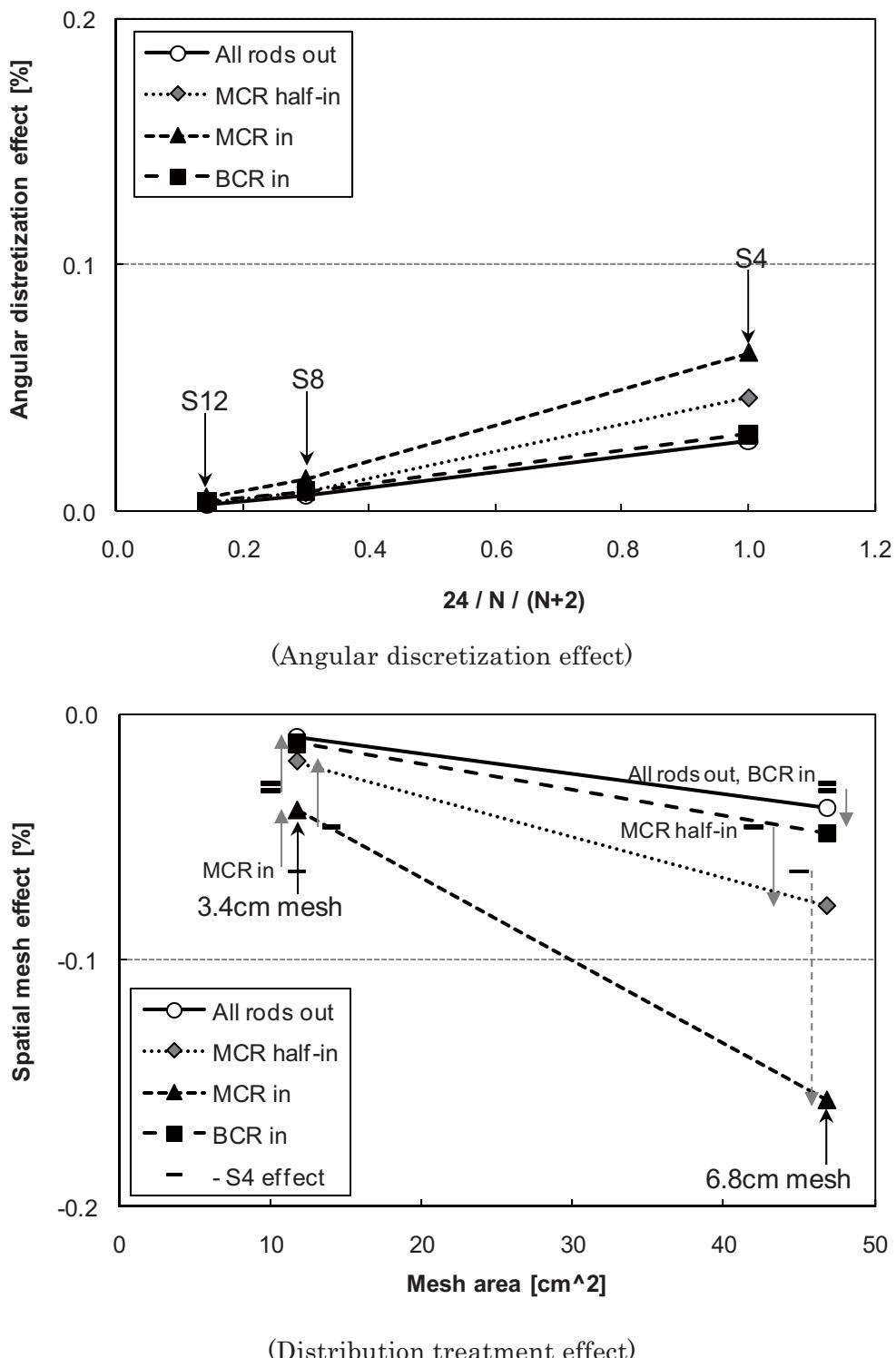


Fig. 7.3-10 Effects of spatial mesh and angular discretization by MINISTRI for the SPX core

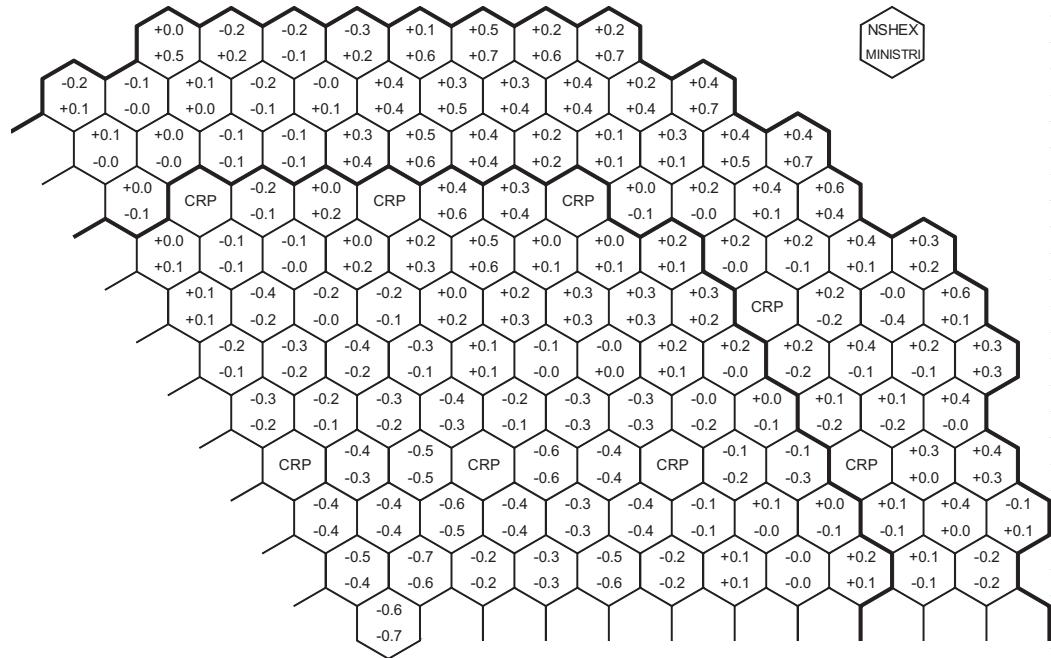


Fig. 7.3-11 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "All rods out" case of the SPX core

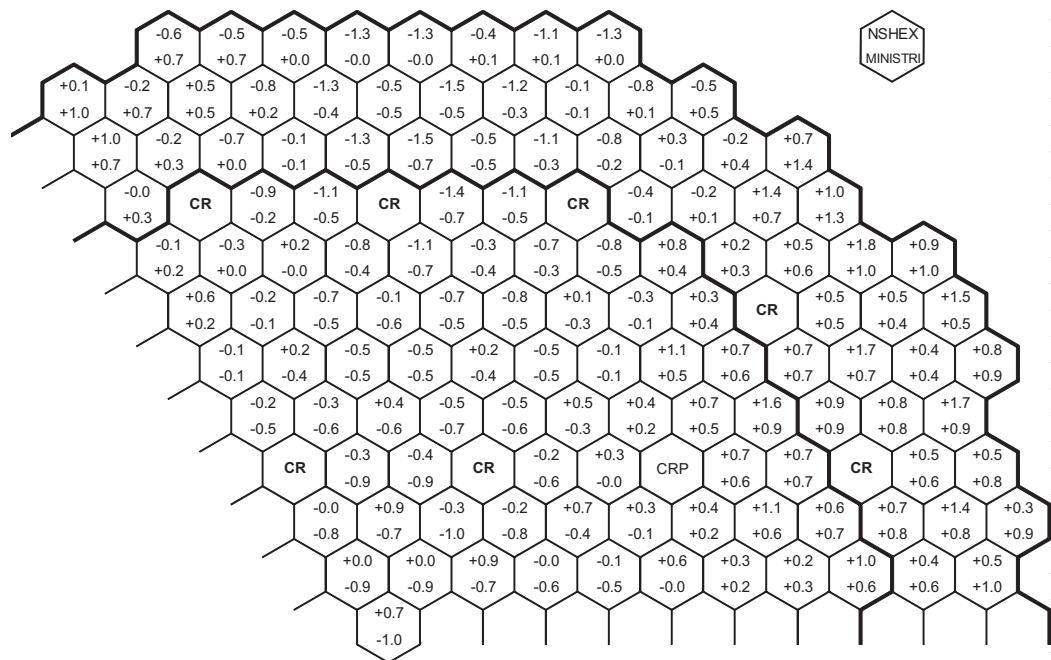


Fig. 7.3-12 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "MCR half-in" case of the SPX core

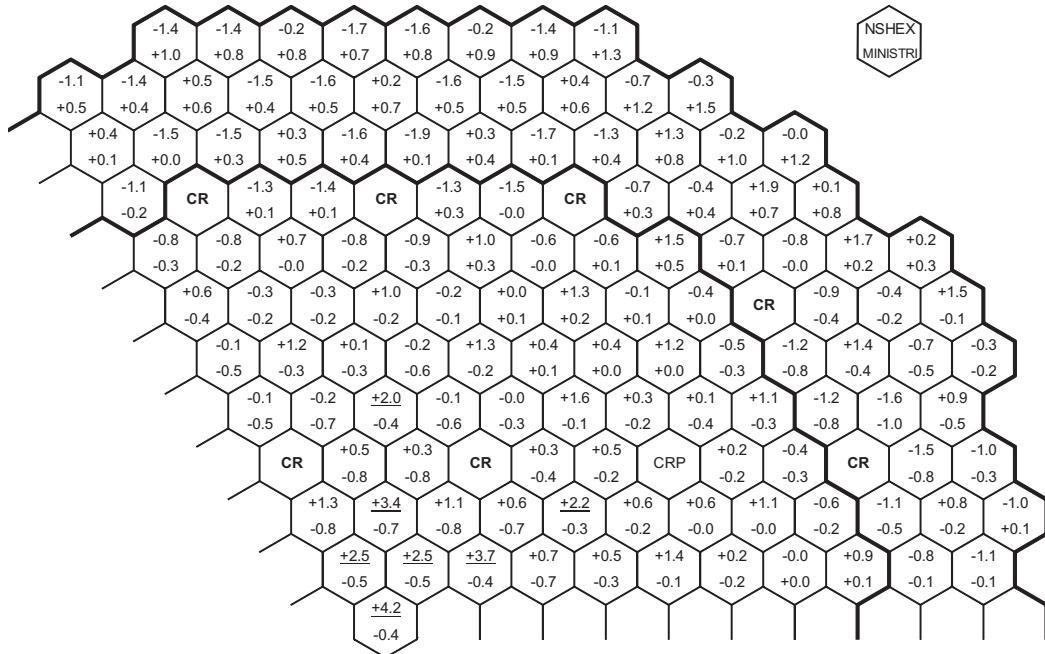


Fig. 7.3-13 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "MCR in" case of the SPX core

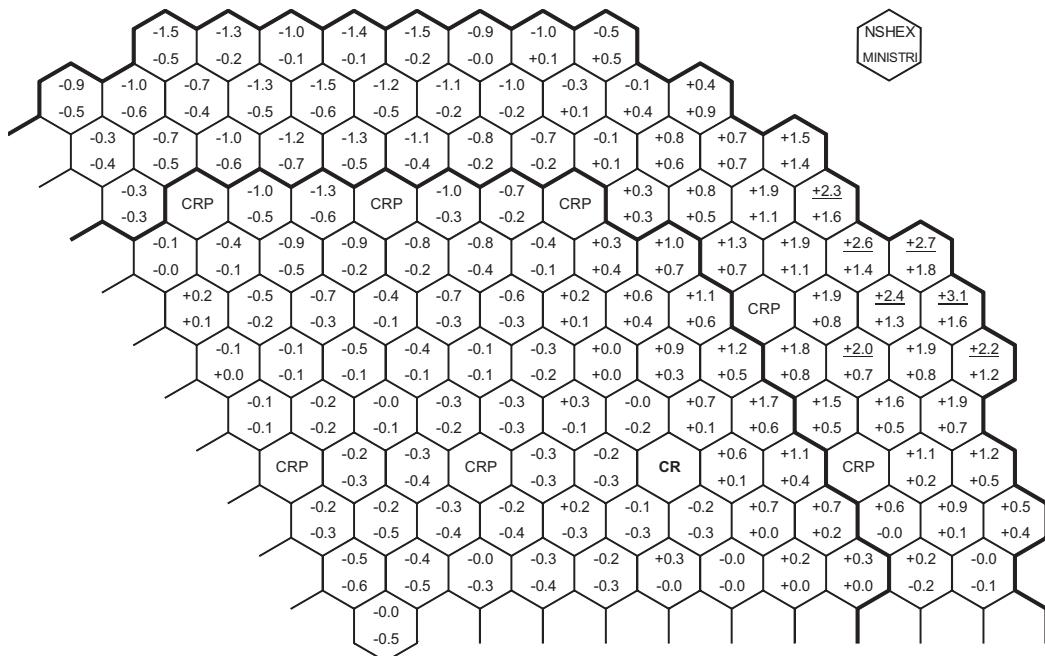


Fig. 7.3-14 Percentage relative difference in radial power distribution by NSHEX and MINISTRI with the standard calculation condition for "BCR in" case of the SPX core

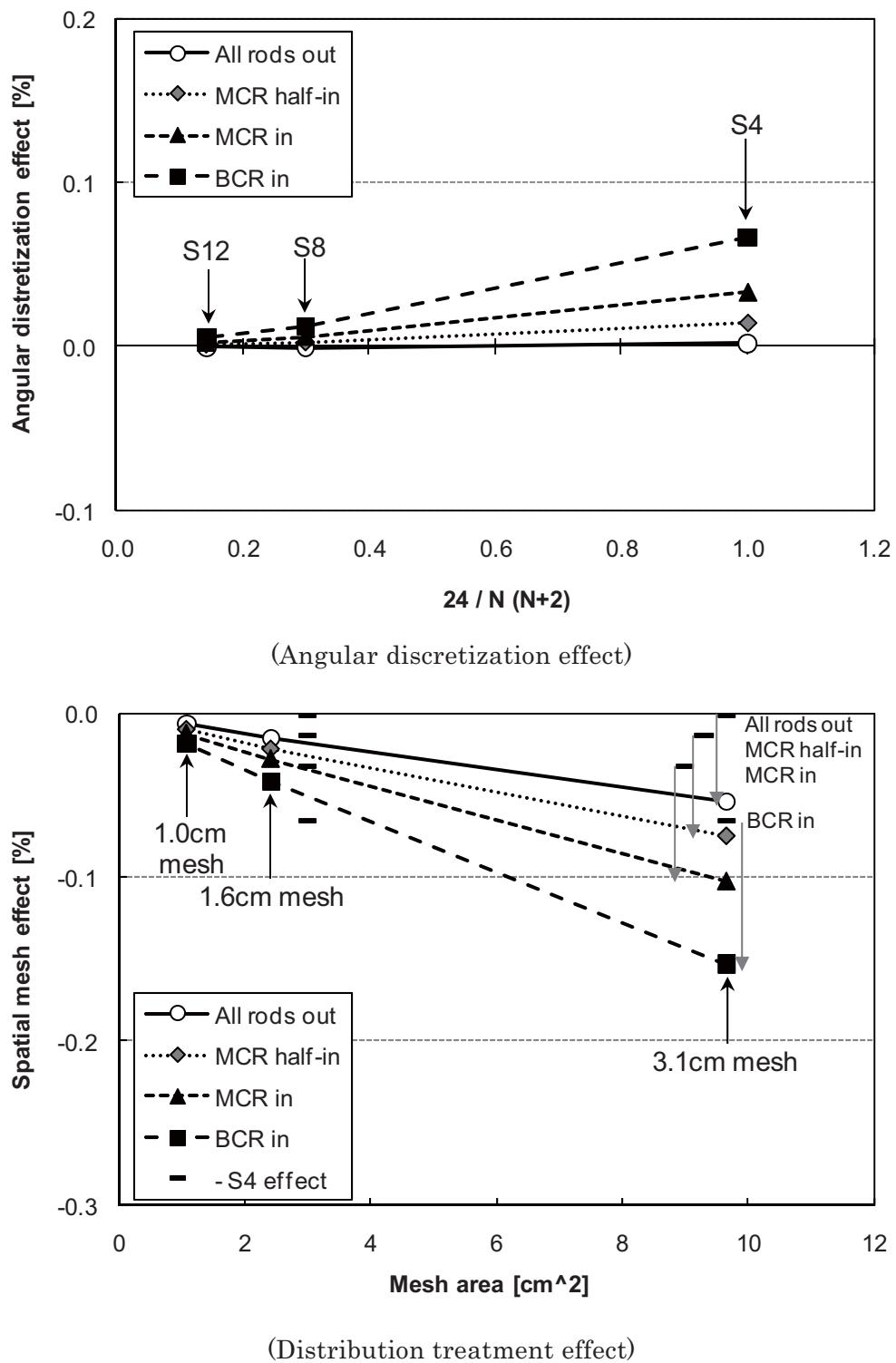


Fig. 7.3-15 Effects of spatial mesh and angular discretization by MINISTRI for the Joyo MK-I core

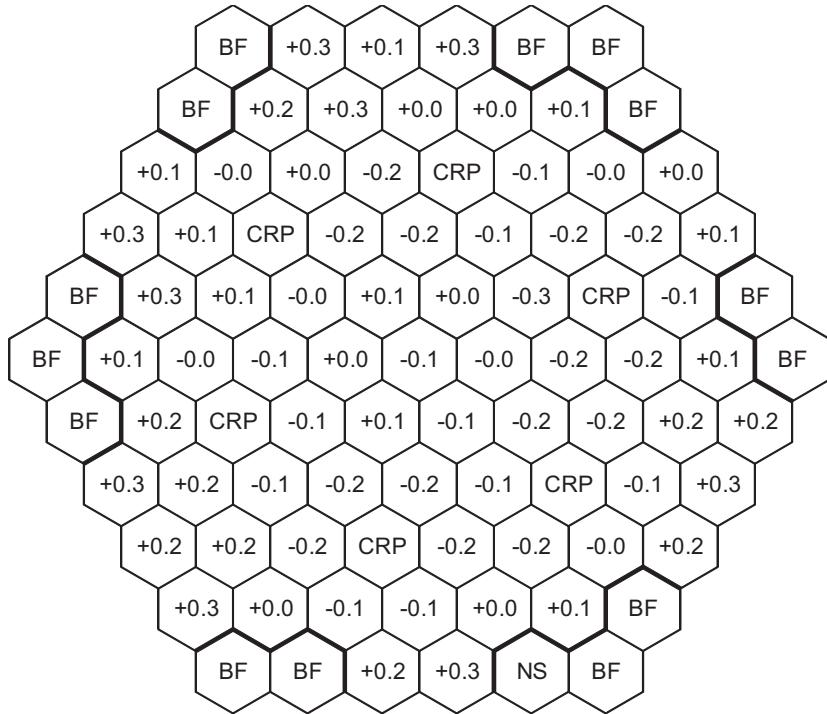


Fig. 7.3-16 Percentage relative difference in radial power distribution by MINISTRI with the standard calculation condition for "All rods out" case of the Joyo MK-I core

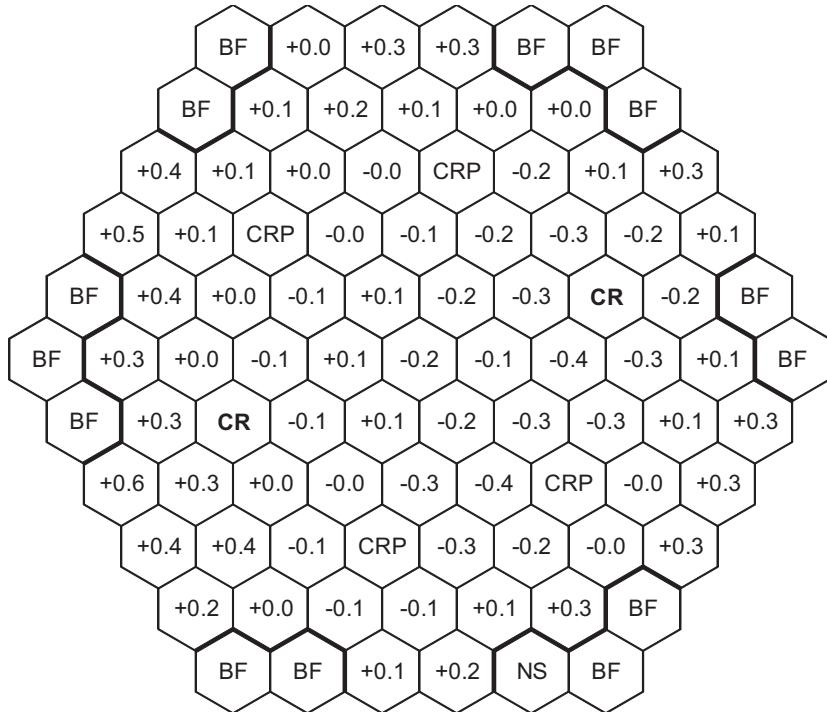


Fig. 7.3-17 Percentage relative difference in radial power distribution by MINISTRI with the standard calculation condition for "MCR half-in" case of the Joyo MK-I core

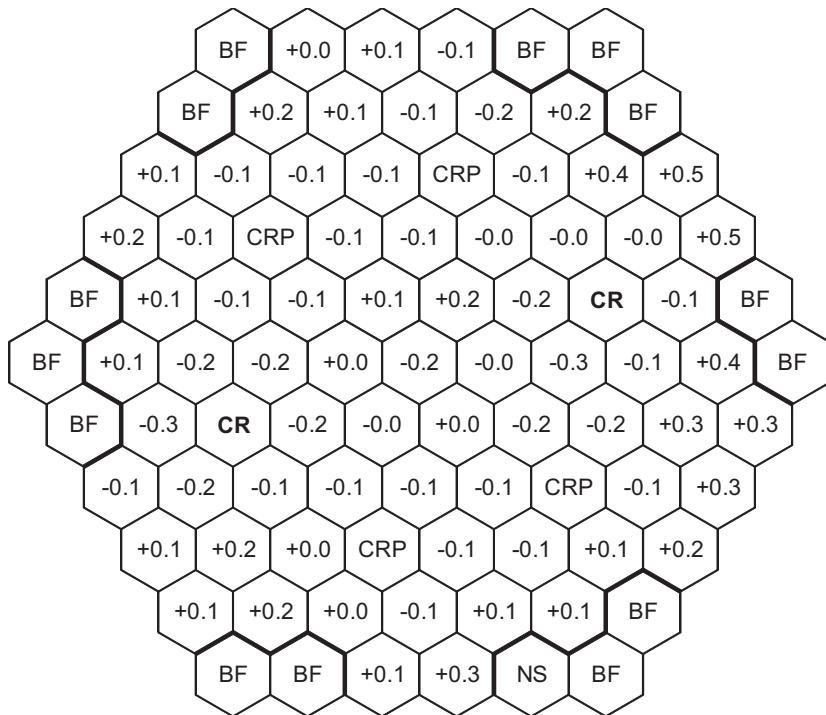


Fig. 7.3-18 Percentage relative difference in radial power distribution by MINISTRI with the standard calculation condition for "MCR in" case of the Joyo MK-I core

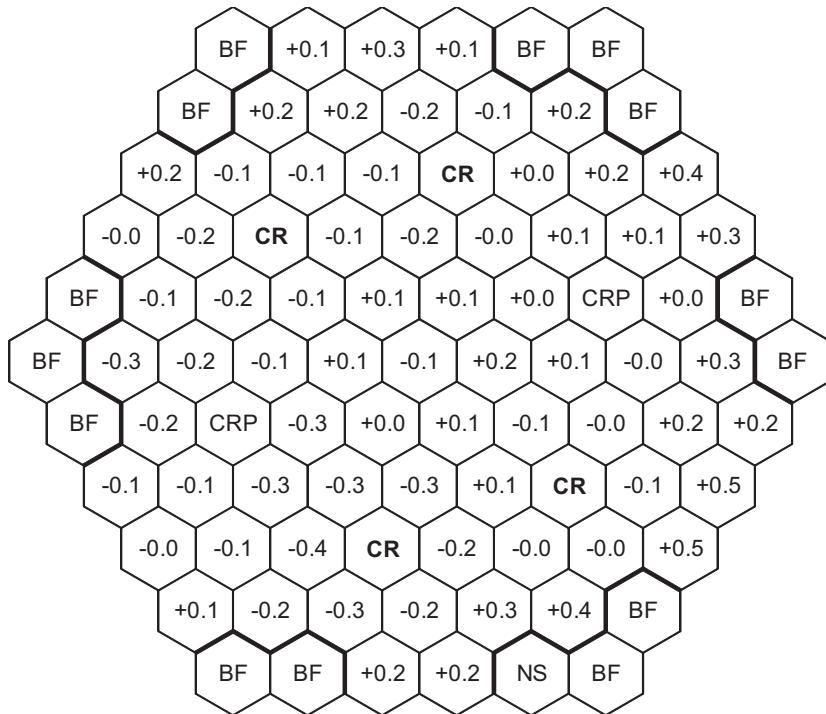


Fig. 7.3-19 Percentage relative difference in radial power distribution by MINISTRI with the standard calculation condition for "BCR in" case of the Joyo MK-I core

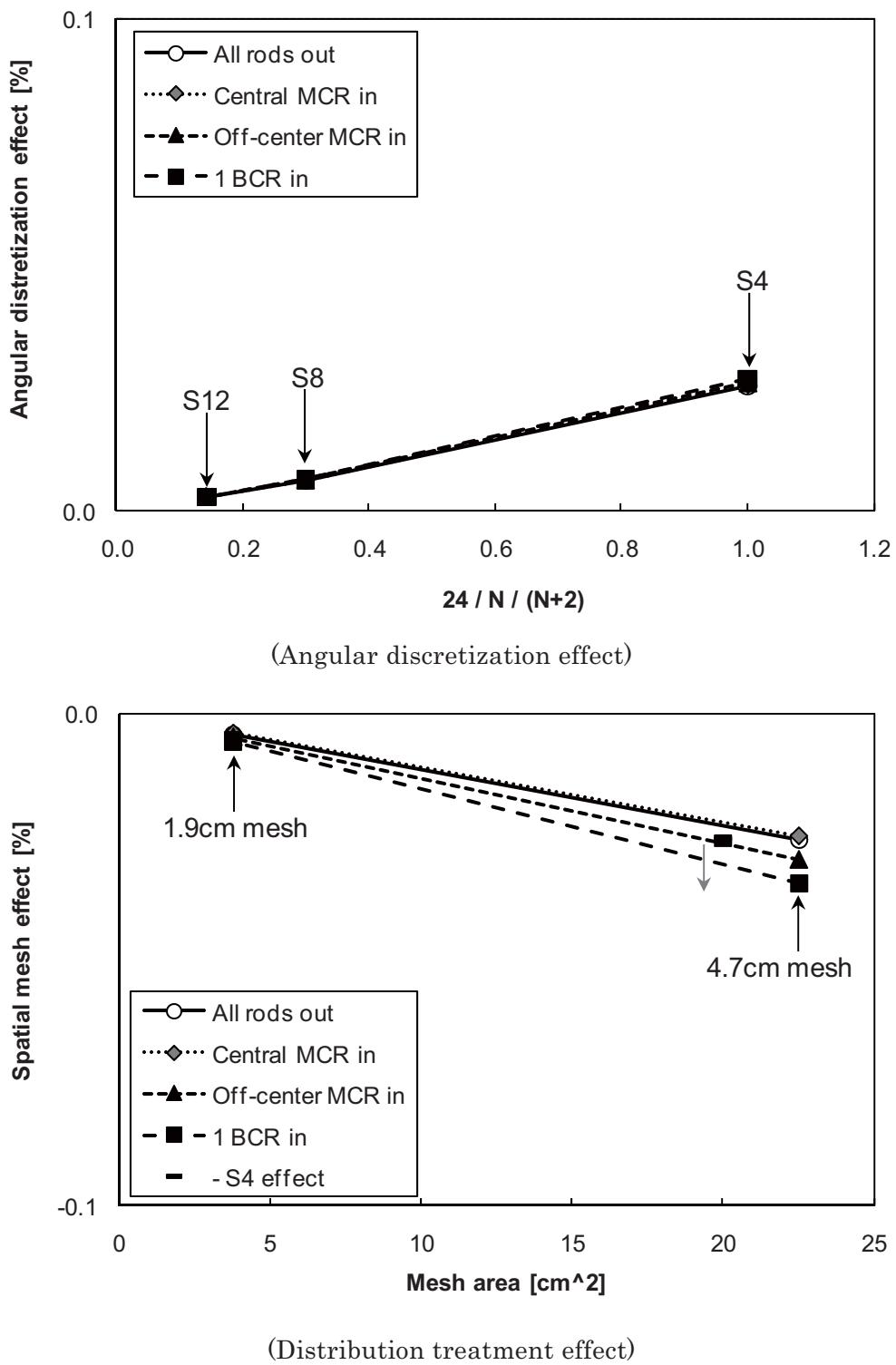


Fig. 7.3-20 Effects of spatial mesh and angular discretization by MINIHEX and MINISTRI for the BFS-62-3A core

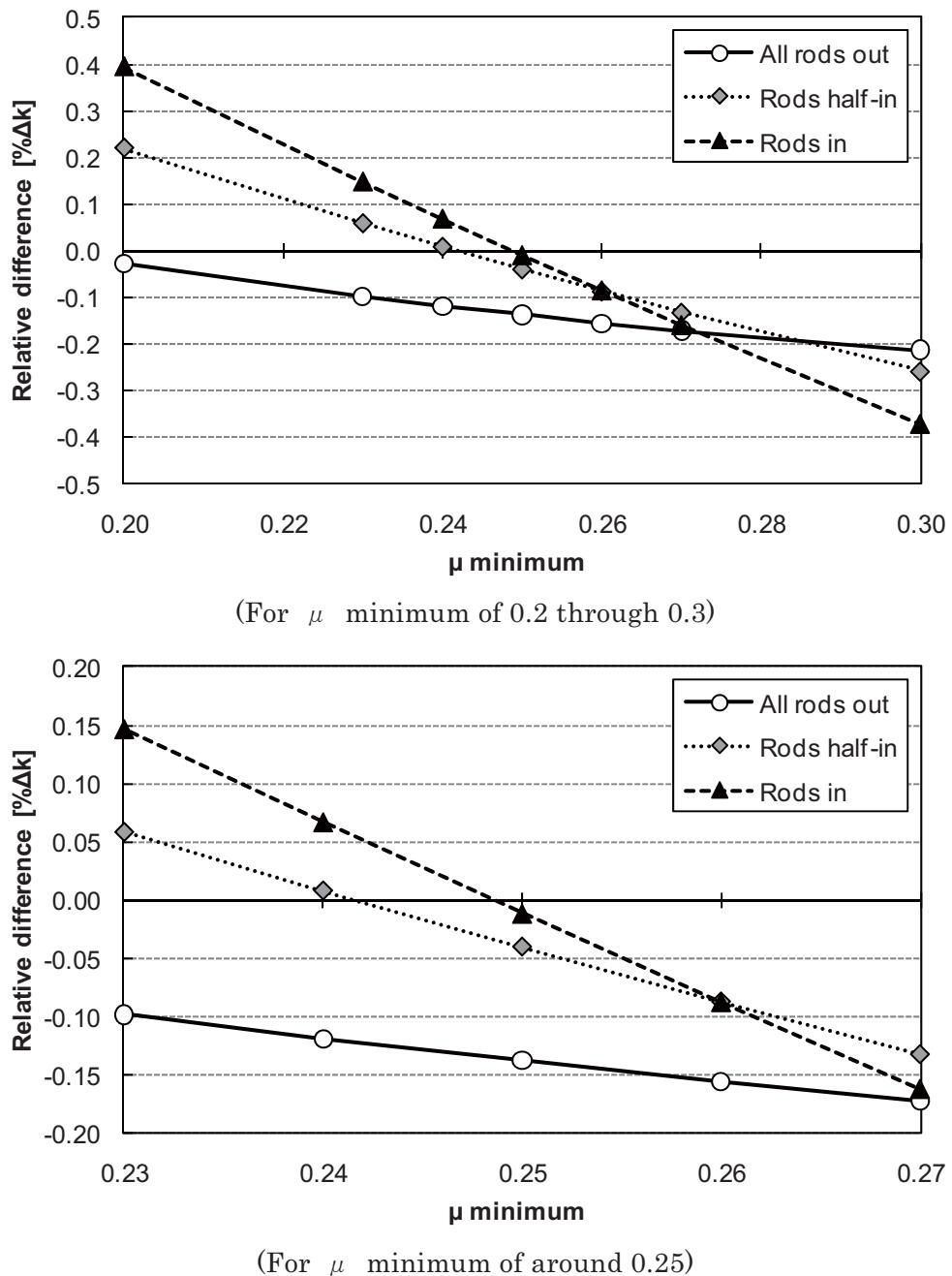


Fig. 7.4-1 Dependence of relative difference of eigenvalue to the reference on the angular quadrature set of  $S_4$  for the KNK-II core

## 8. 今後の課題

NSHEX、MINIHEX、MINISTRI の 3 つの輸送計算コードに共通して、いずれも適切な加速法の導入等による収束性の改善が課題として挙げられる。また、後続の摂動計算との接続も課題として挙げられる。

まず、ノード法に基づく NSHEX について述べる。NSHEX 用の加速法としては、現状では内側反復におけるノード単位リバランス法が取り入れられているが<sup>27)</sup>、収束性の改善は得られるものの計算時間の短縮は必ずしも図られるわけではない。従って、リバランス法の効率化が最優先されると考えられる。一般の有限差分法において非常に効果的な加速性能を有する拡散合成法については、ノード法計算コードに対する効果の有無は不明であるが、検討の価値はあると考えられる。また、摂動計算ではノード内の正規及び随伴の中性子束分布を精度よく再構築する必要があるが、六角体系用の輸送ノード法に対して適切な再構築法は見出せていない。よって、摂動計算との接続結合にしても、適切な手法を見出す必要があり、大きな研究開発課題が残されていると言える。

次に、有限差分法に基づく MINIHEX と MINISTRI に関して示す。現状では、両コードに チェビシェフ 加速法が導入されており、外側反復への適用により、計算時間がほぼ半分に短縮されることが分かっている<sup>5)</sup>。更なる計算時間の短縮のためには、有限差分法コードにおける実績から、拡散合成法が非常に有効であると考えられ、導入の価値は大いにあると考えられる。MINISTRI では、角度メッシュや空間メッシュを詳細に取った場合にしばしば計算が収束しない場合が見られたことからも、効果的な加速法の導入は切望される。また、摂動計算との接続についても、MINIHEX については既に整備済みであり<sup>5)</sup>、MINISTRI に対応させることは比較的容易であると考えられる。

## 9. 結論

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 次元六角体系用輸送計算コード、すなわち、ノード法に基づく NSHEX コード、六角メッシュ有限差分法に基づく MINIHEX コード、三角メッシュ有限差分法に基づく MINISTRI コードをそれぞれ整備した。

NSHEX については、適合性向上のためのノード内多項式展開次数の拡張と収束性改善のための初期有限差分計算の導入を行った。また、MINIHEX については、負の中性子束発生時の処理の見直しを行った。更に、MINIHEX を基本として MINISTRI を新たに作成した。

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、整備後の NSHEX、MINIHEX、MINISTRI の検証及び適用性評価を行った。目標精度として、固有値（実効増倍率）については 0.1%を、集合体毎出力分布については 2%を暫定した。

検証は NSHEX と MINISTRI を対象とし、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、NSHEX 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を満足することが分かった。それに対し、MINISTRI に関しては、目標精度を満足すると推定される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、角度分点と空間メッシュあるいは多項式展開を詳細にする効果は互いに打消し合うとの特性を生かして、NSHEX、MINIHEX、MINISTRI を対象に実機高速炉炉心及び BFS 臨界実験体系に適用することにより適用性評価を行った。その結果、角度分点 S<sub>4</sub> の条件下で、NSHEX については 2 次多項式展開が、MINIHEX と MINISTRI については、小型炉心では 2.5cm メッシュが、中型及び大型炉心では 5.0cm メッシュとした条件が目標精度の満足と計算時間短縮の観点から最適であることが分かった。なお、今回の加速法非適用条件での実機高速炉炉心への適用における計算時間の比較では、NSHEX の方が MINISTRI よりも優れていることが分かった。

今後は、各計算コードに共通して拡散合成法等の加速法の適用により、計算時間の短縮や収束性の改善が必要であることが分かった。また、摂動計算への接続に関して、ノード法コードである NSHEX については大きな研究開発課題が残されているが、有限差分法コードである MINISTRI については、MINIHEX と同様に比較的容易に機能整備が可能であると考えられる。このように、それぞれの計算コードの今後の実用性を高めるための課題を整理した。

## 参考文献

- 1) Ikeda, H. and Takeda, T., A New Nodal  $S_N$  Transport Method for Three-dimensional Hexagonal Geometry, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 31, No. 6, 1994, pp. 497-509.
- 2) Sugino, K. and Takeda, T., An Improvement of the Transverse Leakage Treatment for Nodal  $S_N$  Transport Calculation Method in Hexagonal-Z Geometry, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 33, No. 8, 1996, pp. 620-627.
- 3) Yamato, A. and Aratani, K., The Present Status of International Cooperation Pertaining to Russia Surplus Weapons Plutonium Disposition, 第2回JNC原子力平和利用国際フォーラム資料集, JNC TN1450 2000-001, 2000, pp. 104-107.
- 4) 杉野 和輝, 横山 賢治, 他, 核設計基本データベースの整備(VII) –JUPITER 実験解析の高度化–, PNC TN9410 97-098, 1997.
- 5) 船曳 淳, 角田 弘和, BN 及び BFS 炉心解析システムの整備 (II) –3次元 Hex-Z 体系用輸送核特性解析コードの整備–, JNC TJ9410 2002-001, 2002.
- 6) Hazama, T., Shono, A., et al., Verification of a Nuclear Analysis System for Fast Reactors using BFS-62 Critical Experiment, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 41, No. 12, 2004, pp. 1145-1154.
- 7) 船曳 淳, 角田 弘和, BN 及び BFS 炉心解析システムの整備," JNC TJ9400 2001-008, 2001.
- 8) Wagner, M. R., Three-Dimensional Nodal Diffusion and Transport Theory Methods for Hexagonal-z Geometry, Nucl. Sci. Eng., Vol. 103, 1989, pp. 377-391.
- 9) Sugino, K. and Takeda, T., A New Method of Treating Radial Leakage in Nodal  $S_N$  Transport Calculation for Hexagonal Geometry, Proc. Int. Conf. on the Physics of Reactors PHYSOR 96, Mito, Japan, Sept. 16-20, 1996, A153-A162.
- 10) Sugino, K. and Kugo, T., Effect of Polynomial Expansion Order of Intranode Flux Treatment in Nodal  $S_N$  Transport Calculation Code NSHEX for Large-size Fast Power Reactor Core Analysis, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 48, No. 3, 2011, p. 421-428.
- 11) 池田 一三, 菅 太郎, 他, 3次元三角メッシュ  $S_N$  核計算コードの開発, 日本原子力学会「1994年秋の大会」予稿集, 1994, G57.
- 12) 田淵 士郎, 池田 一三, 他, 3次元三角メッシュ  $S_N$  核計算コードの開発(II), 日本原子力学会「1995年秋の大会」予稿集, 1995, A45.
- 13) 菅 太郎, 池田 一三, 他, 高速炉炉心特性計算の確率論的手法及び決定論的手法との比較, 日本原子力学会「2000年春の年会」予稿集, 2000, O26.
- 14) Takeda, T. and Ikeda, H., Three-dimensional Neutron Transport Benchmarks, NEACRP-L-330, 1991.
- 15) 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), 1991, Vol.1, pp.8.2-1 - 9, Kyoto, Japan.
- 16) 高下 浩文, 樋口 真史, 他, 核設計手法報告書, JNC TN8410 2000-011, 2000.

- 17) Gourdon, J. and Mesnage B., An Overview of Superphenix Commissioning Tests, Nucl. Sci. Eng., 106, 1990, pp.1-10.
- 18) 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.
- 19) Palmiotti, G., Salvatores, M., et al., A Global Approach to the Physics Validation of Simulation Codes for Future Nuclear Systems, Proc. Inter. Conf. on Reactor Physics, Nuclear Power: A Sustainable Resource, Interlaken, Switzerland, Sept. 14-19, 2008.
- 20) 小川 隆, 小林 登, 他, ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討(MOX燃料炉心)－2006年度報告－, JAEA-Research 2007-084, 2007.
- 21) 羽様 平, 千葉 豪, 他, 高速炉用統合炉定数 ADJ2000R の作成, JNC TN9400 2002-064, 2002.
- 22) 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.
- 23) Lathrop, K. D. and Carlson, B. G., Discrete Ordinates Angular Quadrature of the Neutron Transport Equation, Rep. LA-3186, 1065, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, N.M. .
- 24) Lathrop, K. D. and Brinkley, F. W., Theory and Use of the General-Geometry TWOTRAN Program, Rep. LA-4432, 1970, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, N.M. .
- 25) NEA Nuclear Science Committee, Japan's Experimental Fast Reactor Joyo MK-I Core: Sodium-Cooled Uranium-Plutonium Mixed Oxide Fueled Fast Core Surrounded by UO<sub>2</sub> Blanket, International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments NEA/NSC/DOC(2006)01.
- 26) NEA Nuclear Science Committee, BFS-62-3A Experiment: Fast Reactor Core with U and U-Pu Fuel of 17% Enrichment and Partial Stainless Steel Reflector, International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments NEA/NSC/DOC(2006)01.
- 27) 杉野 和輝, 3次元 HexZ 体系用ノード法輸送計算コード NSHEX の実用性向上のための改良, PNC TN9410 98-064, 1998.

## 付録 1 NSHEX の実行方法及び入力マニュアル（日本語版）

NSHEX の実行方法

## 1.NSHEX 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)
# 8 : インプット	(READ)
# 9 : アウトプット	(WRITE)
#12 : ノード内中性子束とノード境界中性子束のダンプ	(WRITE)
#20 : 応答行列の中間ファイル (IOP7=1 の時必要)	(READ & WRITE)
#21～20+NGMX : 角度中性子束の中間ファイル (IOP6=1 の時必要) *	(READ & WRITE)
#21, 22 : 角度中性子束の中間ファイル (IOP6=2 の時必要) *	(READ & WRITE)

\*: IOP6=1 の場合はエネルギー群毎に一つの記憶装置（中間ファイル）が割り当てられ、IOP6=2 の場合は外側反復毎に 21 番と 22 番ファイルの読み込み・書き込みが入れ替わる。IOP6=1 の方が中間ファイル容量は少ないが、より多くの記憶装置を要する。

## 2.Variable Dimension の取り扱い

NSHEX 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いる。VD の大きさはメインルーチン (main000.f) のパラメータ文で、

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

により、指定されている。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、計算機の許容最大メモリーを越えるおそれがあるので、注意が必要。

NSHEX の入力マニュアル

(3 分の 1 炉心版: Ver.10A.1、全炉心版: Ver.10B.1)

3 分の 1 炉心版（回転対称境界条件）と全炉心版が個別に整備されている。入力は境界条件とマップの指定が異なるので注意されたい。

<JOINT を用いる場合のみ Card 0 が必要>

*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 ファイルメンバーネームを指定  
(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 . . .  $\Sigma t = 1/3 D_{av}$   
-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 . . .  $\Sigma t = 1/(D_{//} + 2D_{\perp})$

※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, IRET, CONFCT (2I12, F12.5)*

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

IRET: 収束判定条件を緩和して再計算する最大回数

CONFCT: 収束判定条件緩和係数（1.0 以下を指定した場合には自動的に 2.0 に設定される。）

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

NLAY: 径方向ノード数（炉心層数）

NGMX: エネルギー群数

MAPMX: 領域（マテリアル）数

NSN: SN 次数（2～16 の偶数）

*Card 3: IDUMP, IBR, NODR (3I12)*

IDUMP: ノード内中性子束とノード境界中性子束をダンプする。書式はサブルーチン SDUMP を参照のこと。

0 . . . YES（ノード平均中性子束のみ）

1 . . . NO

2 . . . YES（ノード平均中性子束とノード内中性子束高次モメント）

3 . . . YES（ノード平均中性子束とノード内中性子束高次モメントとノード境界中性子束）

IBR: 径方向境界条件

0 . . . 周期的条件（1/3 炉心版のみ）

1 · · · · 反射条件 (1/3 炉心版のみ)

2 · · · · 真空条件

NODR: ノード内中性子束の展開次数 (最大 6、通常 2)

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

KMX: 軸方向全ノード数

KCM: 軸方向領域数

IBT/IBB: 軸方向上部/下部境界条件

0 · · · · 真空条件

1 · · · · 反射条件

Card 5: IOP1, IOP2, IOP2D (3I12)

IOP1: 中性子束高次モーメント非計算モード移行オプション (通常 3~5)

0 · · · · 0 次モーメント (ノード平均中性子束) の外側反復における反復誤差が CONCR2 以下になったら、高次モーメントの計算を打ち切る。

≥1 · · · · 0 次モーメントの外側反復における反復誤差が CONCR2 以下になったら、外側反復 IOP1 回毎に高次モーメントの計算を行う。

IOP2: 横方向もれ高次モーメントの計算オプション (通常 0)

0 · · · · 全内側反復前に 1 回計算

1 · · · · 全内側反復後に 1 回計算

IOP2D: 径方向スウェープ時軸方向もれ高次モーメント計算方法 (通常 0)

0 · · · · 中性子束内挿法

1 · · · · 2 次横方向もれ近似 (QLA)

Card 6: IOP3, IOP4, IOP5, IOP6, IOP7 (5I12)

IOP3: 加速法の適用 (通常 0)

>0 · · · YES (リバランス加速法を内側反復 IOP3 回毎に適用)

0 · · · · NO

IOP4: 外側反復の収束判定に用いる物理量の指定 (通常 -1)

-1 · · · · ノード平均核分裂中性子源

0 · · · · ノード平均中性子束

1 · · · · ノード平均及びノード境界核分裂中性子源

2 · · · · 指定領域ノード平均中性子束 (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: 角度中性子束の中間ファイル使用の指定

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)

IOP7: 応答行列の中間ファイル使用の指定

0 · · · · 不使用

1 · · · · 使用

※詳細は実行方法の項参照

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

CONCR: 外側反復中性子束または核分裂中性子源収束条件 (通常 5.0E-4)

CONCR2: 中性子束高次モーメント計算条件 (通常 2 × CONCR, IOP1 参照)

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 · · · ·  $\nu \sum f_\phi$  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, CONIFD (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: 径方向スウェーブ時の軸方向もれ計算条件  
(通常 0.0、IOP2D=0 の場合のみ)

CONIFD: 初期有限差分計算収束判定条件 (通常 2.0E-2)

Card 9: (IHK(KC), KC=1, KCM) (25I3)

IHK(KC): 軸方向領域 KC の軸方向ノード数 (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: 径方向ノードピッチ [cm]

Card 12: (IMJ(MP), MP=1, MAPMX) (25I3) (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) 每に下部から上部への順に与え、それを KCM 回繰り返す。Fig. A.1-1~5 参照。JOINT を用いる場合は 80 列以内で入力する必要がある。

<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  $\rightarrow$  NN の散乱断面積  $\Sigma s(ng \rightarrow nn)$

(これを NGMX 回繰り返し、更に 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)

(Card 14-2 を MAPMX 回繰り返す。)

※自群散乱断面積はコード上で次式により再定義される。

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

<JOINT を用いない場合>

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。)

<JOINT を用いる場合>

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  
メンバーネーム (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)

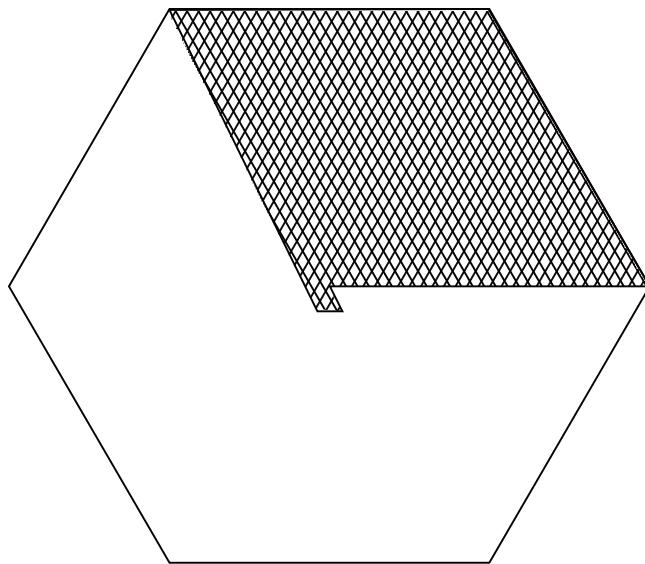


Fig. A.1-1 3 分の 1 炉心版 NSHEX における回転対称炉心領域の取り方

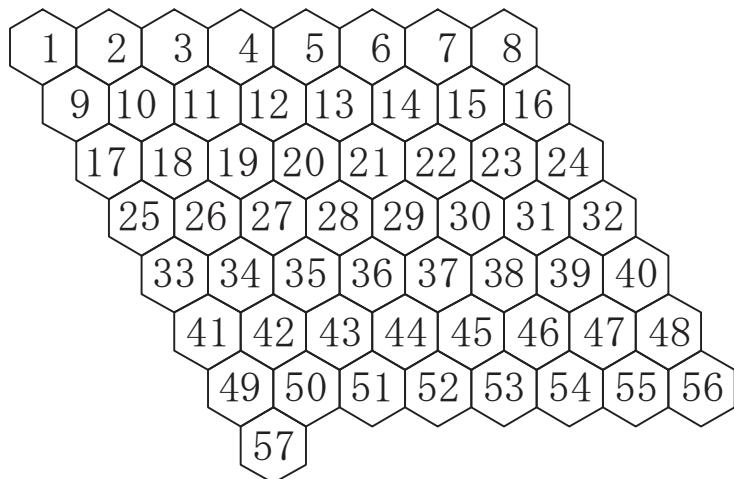


Fig. A.1-2 3 分の 1 炉心版 NSHEX のノード番号

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56
57							

Fig. A.1-3 3 分の 1 炉心版 NSHEX のノード番号とマップ入力との対応

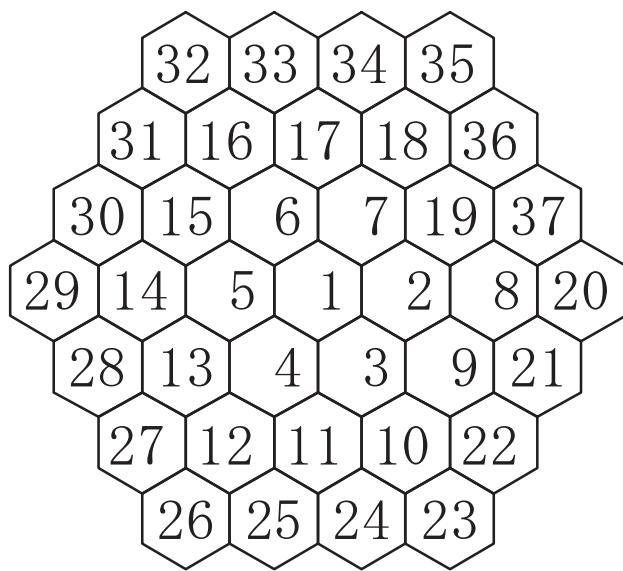


Fig. A.1-4 全炉心版 NSHEX のノード番号

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.1-5 全炉心版 NSHEX のノード番号とマップ入力との対応

## 付録 2 NSHEX の実行方法及び入力マニュアル（英語版）

HOW TO USE NSHEX

## 1. INTERFACE UNIT ID

# 1: Restart file	(READ)
# 2: Restart file	(WRITE)
# 6: Monitor output	(WRITE)
# 8: Input	(READ)
# 9: Standard output	(WRITE)
#12: Dump of intra-node flux and node-boundary flux	(WRITE)
#20: Work file of the response matrices (Required when IOP7=1)	(READ & WRITE)
#21 through 20+NGMX : Work file of the angular flux (Required when IOP6=1)*	(READ & WRITE)
#21 and 22 : Work file of the angular flux (Required when IOP6=2)*	(READ & WRITE)

\*: When IOP6=1, the interface units or work files are occupied every energy group. When IOP6=2, the interface units 21 and 22 are occupied one after the other every outer iteration. In the case when IOP6=1, less file volume but more interface units are required.

## 2. TREATMENT OF THE VARIABLE DIMENSION

For a computation memory economy most of dimensions are allocated by single variable dimension, and the sizes of the variable dimensions are specified by the following statement in the main routine (main000.f):.

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

The value LIMIT specifies the size of the real-type (R) variable dimension and the value LIMIT2 that of the integer-type (I) one. They must be greater than required sizes, otherwise calculation stops. You can check required sizes of the variable dimensions in the monitor output (Unit # 6).

NSHEX INPUT MANUAL

(Ver.10A.1 for one third core and Ver.10B.1 for whole core)

There are 2 subversions of NSHEX, which are 1/3 core and whole code subversions.  
 Inputs for boundary condition and map specification are different.

<Card 0 is necessary only when JOINT is used.>

*Card 0-1: NSHEX (A5)*

*NSHEX: Control character (Just specify "NSHEX")*

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

*INCORE: Representative member name of the PDS file  
 (For the specification of the PDS file format)*

*SLAROM: Code name for the cross sections (Specify "SLAROM")*

*Card 0-3: ITOT (I5)*

*ITOT: Option for the total cross sections*

1, 2	=Transport cross sections
0	=Total cross sections
-1	=1/3Dav (Averaged diffusion coefficients)
-2	=1/3D(Benoist's perpendicular)
-3	=1/3D(Benoist's parallel)
-4	=2/3(D(B's perpendicular)+D(B's parallel))
-5	=1/(D(B's perpendicular)+2D(B's parallel))
-6	=1/(2D(B's perpendicular)+D(B's parallel))

REMARK: Within-group scattering cross sections are redefined by following equation:

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

Card 1: ISTART, IRET, CONFCT (2I12, F12.5)

*ISTART: Calculation option*

0	Restart calculation (File #1 is required.)
1	New calculation

*IRET: Maximum retrial counts*

*CONFCT: Relaxation factor of convergence criterions (Automatically set 2.0 if specified less or equal to 1.0)*

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

*NLAY: Number of the radial nodes (Number of layers)*

*NGMX: Number of energy groups*

*MAPMX: Number of regions (materials)*

*NSN: SN order (2 through 16 and even number)*

Card 3: IDUMP, IBR, NODR (3I12)

*IDUMP: Dump option for the intra-node flux and node-boundary flux to file #12 (Format is referred to the subroutine "SDUMP")*

0	YES (Node-average flux only)
1	NO
2	YES (Node-average flux and intra-node high order flux moment)
3	YES (Node-average flux, intra-node high order flux moment and node-boundary flux)

*IBR: Boundary condition in the radial direction*

0	Periodic (1/3 core version only)
---	----------------------------------

1      Reflective (1/3 core version only)  
 2      Vacuum

NODR: Expansion order of the intra-node flux (Maximum: 6, Normal: 2)

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

KMX: Total number of axial nodes (planes)

KCM: Number of axial regions

IBT/IBB: Boundary condition in the axial direction (Top / Bottom)

0      Vacuum  
 1      Reflective

Card 5: IOP1, IOP2, IOP2D (3I12)

IOP1: Calculation option for the high order flux moments (Normally 3 through 5)

0      Calculation stopped when maximum iteration error of node average (0th order) flux becomes less than CONCR2.  
 >0     Calculation performed every IOP1 times of outer iteration after maximum iteration error of node average (0th order) flux becomes less than CONCR2.

IOP2: Calculation option for the high order transverse leakage moments (Normally 0)

0      Once before all inner iterations  
 1      Once after all inner iterations

IOP2D: Calculation method for the high order axial leakage moments in the radial sweep (Normally 0)

0      Scalar flux interpolation method  
 1      Quadratic leakage approximation (QLA)

Card 6: IOP3, IOP4, IOP5, IOP6, IOP7 (5I12)

IOP3: Application of the acceleration methods (Normally 0)

>0     YES (Rebalance applied in inner iterations every IOP3 times)  
 0      NO

IOP4: Parameters for the convergence judgment in outer iteration (Normally -1)

-1     Fission source (Node average)  
 0      Flux (Node average)  
 1      Fission source (Node average and node boundaries)  
 2      Flux (Node average) in the specified regions by Card 12

IOP5: Calculation mode

0      Real  
 1      Adjoint  
 2      Adjoint with fixed eigenvalue

IOP6: Option for the work files of the angular flux

0      Not used  
 1      Used (1 unit per every energy group)  
 2      Used (1 unit per every other outer iteration)

IOP7: Option for the work file of the response matrices

0      Not used  
 1      Used

See "HOW TO USE NSHEX"

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

CONCR: Convergence criterion on flux in outer iteration (Normally 1.0E-4)

CONCR2: Calculation condition on the high order flux moments

(Normally  $2 \times \text{CONCR}$ , See the description on IOP1)  
**CONCRI:** Convergence criterion on flux in inner iteration  
 (Normally same as CONCR)  
**CONCRE:** Convergence criterion on eigenvalue (Normally 1.0E-5)  
**FACT:** Normalization factor  
 >0 By neutron production  
 <0 . . . By fission source

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

ITINMX: Maximum number of inner iteration  
 ITOUTMX: Maximum number of outer iteration  
 TIMOUT: CPU time limit [minute]  
 EIGEN: Initial Eigenvalue (Normally 1.0)  
 ACUT: Axial leakage calculation condition in radial sweep  
 (Normally 0.0,  
 only if IOP2D=0)  
 CONIFD: Convergence criterion on the initial finite difference calculation  
 (Normally 2.0E-2)

Card 9: (IHK(KC), KC=1, KCM) (25I3)

IHK(KC): Number of axial nodes (planes) in axial region KC  
 (From bottom to top)

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

ZC(KC): Coordinates of the radial region boundaries [cm]  
 (From bottom to top) (Axial region KC exists in the extent of  
 ZC(KC) through ZC(KC+1))

Card 11: HP (E12.5)

HP: Radial node across flat length [cm]

Card 12: (IMJ(MP), MP=1, MAPMX) (25I3) (Required only when IOP4=2)

IMJ(MP): Convergence judgment flag of region MP  
 0 Considered  
 1 Ignored

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

MAP(N, KC): Region (material) numbers (Region map)  
 Specify them for every axial plane and repeat KCM times from  
 bottom to top. See Fig. A.2.1-1 through 5. When JOINT is used,  
 this card should be specified within 80 columns.

<When JOINT is not used>

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): Absorption cross sections of energy group NG in region  
 NR  
 XFIS(NG, NR): Production cross sections of energy group NG in region NR  
 XSGF(NG, NR): Fission cross sections of energy group NG in region NR  
 XTRA(NG, NR): Total cross sections of energy group NG in region NR  
 XSCT(NG, NN, NR): Scattering cross sections from energy group NG to  
 NN in region NR  
 (Repeat NGMX times, and repeat MAPMX times)

<When JOINT is used>

Card 14-1: XS@ (A4)

*XS@: Control character (Just specify "XS@ ")*

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

*MEMBER1: Member name of the PDS file*

*SLAROM: Code name for the cross sections (Specify "SLAROM")  
(Repeat Card14-2 MAPMX times)*

REMARK: Within-group scattering cross sections are redefined by following equation:

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

<When JOINT is not used>

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

*CHI(NG): Fission spectrum (Releasing fraction to energy group NG.  
Normalized so as to set sum of them equal to 1.0.)*

<When JOINT is used>

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

*MEMBER2: Member name of the PDS file including the one  
representative fission spectrum*

*SLAROM: Code name for the cross sections (Specify "SLAROM")*

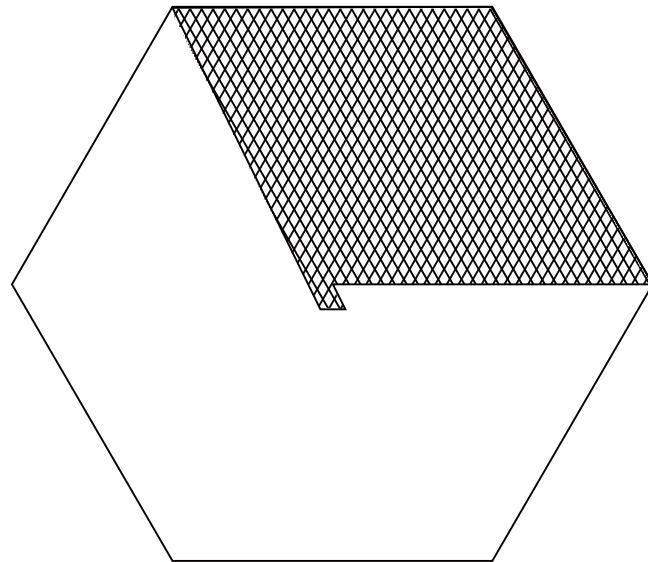


Fig. A.2-1 Configuration of the 1/3 rotational core

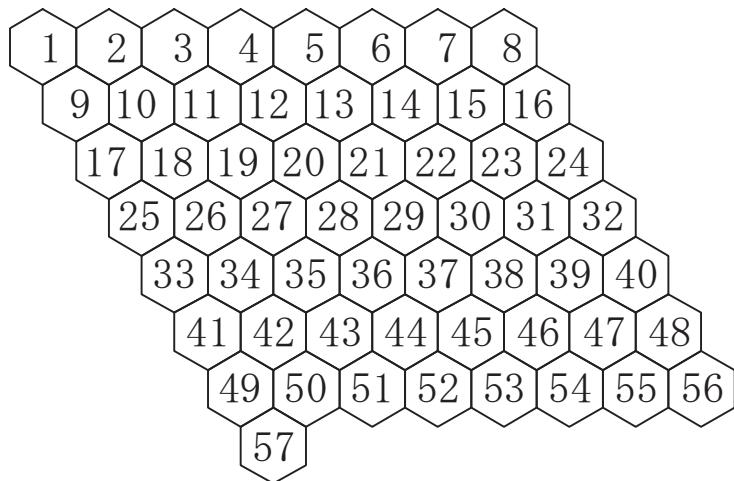


Fig. A.2-2 Node addressing of the NSHEX 1/3 core version (NLAY=8)

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56
57							

Fig. A.2-3 Relationship between the node addressing and the map input format of the NSHEX 1/3 core version (NLAY=8)

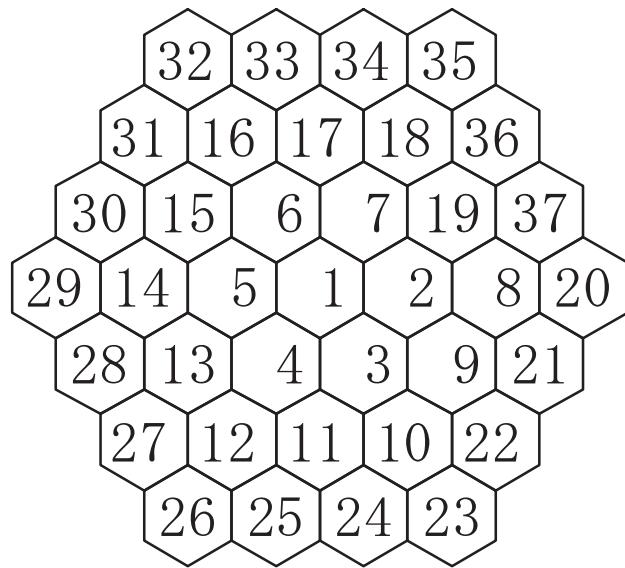


Fig. A.2-4 Node addressing of the NSHEX whole core version (NLAY=4)

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.2-5 Relationship between the node addressing and the map input format of the NSHEX whole core version (NLAY=4)

## 付録 3 MINIHEX の実行方法及び入力マニュアル

MINIHEX の実行方法

## 1. 概要

MINIHEX は、BFS-2 臨界実験装置を用いて行われる臨界実験解析を想定して作成された Hex-Z 体系用有限差分  $S_N$  輸送計算コードである。

BFS-2 臨界実験装置は間隔 5.1cm の正六角格子で構成されており、有限差分輸送理論を適用しても、径方向の空間メッシュ誤差が十分に低減可能であると考えられるため、当コードの作成に至った。

取り扱い可能な体系は、全炉心体系のみであり、境界条件は全て真空条件となる。

## 2. 実行方法

## 2-1. MINIHEX 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)
# 31 : 収束状況（中性子束、固有値）の出力	(WRITE)

## 2-2. Variable Dimension の取り扱い

MINIHEX 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いる。VD の大きさはメインルーチン (main000.f) のパラメータ文で、

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

により、指定されている。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、計算機の許容最大メモリーを越えるおそれがあるので、注意が必要。

MINIHEX 入力マニュアル  
(Ver.2.1)

全炉心版のみが整備されている。

<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 . . .  $\Sigma t = 1/3 D_{av}$
- 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: Sn 次数 (2~16 の偶数)

Card 3: IDUMP, IBR, NODR (3I12)

IDUMP: ダミー

IBR: ダミー

NODR: 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: ダミー/ダミー

Card 5: IOP1, IOP2, NODRL (3I12)

IOP1: 流出中性子束が負となった場合の処理 (通常 1)

<0 . . . 処理を行わない。

=0 . . . 負となった流出中性子束をゼロにセットする。

=1 . . . 負となった流出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。  
 >1 . . . 負となった流出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、負となつていなかつた流出中性子束を再計算する。  
 IOP2: ダミー  
 NODRL: ダミー

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

IOP3: 外側反復における加速法（中性子束外挿法）の適用の有無  
 0 . . . なし  
 1 . . . あり  
 IOP4: 外側反復の収束判定に用いる物理量の指定  
 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  
 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  
 各群の前回の内側反復回数が 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

## 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 . . .  $\nu \sum f_\phi$  の空間・エネルギー合計値により規格化  
 <0 . . .  $\sum f_\phi$  の空間・エネルギー合計値により規格化

## Card 8: ITINMX, ITOUTMX, TIMOUT, EIGEN (2I12, 2F12.5)

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）

## Card 9: (IHK(KC), KC=1, KCM) (25I3)

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 [cm]

Card 12 (IMJ(MP), MP=1, MAPMX) (25I3) (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) 每に下部から上部への順に与え、それを KCM 回繰り返す。Fig. A.3-1, 2 参照。MAPMX よりも大きい値を与えた場合には、その領域は Black absorber と認識される。JOINT を用いる場合は 80 列以内で入力する必要がある。

<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  
 $\Sigma s(ng \rightarrow nn)$

(これを NGMX 回繰り返し、更に 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)

(Card 14-2 を 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。

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

<JOINT を用いない場合>

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。)

<JOINT を用いる場合>

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)

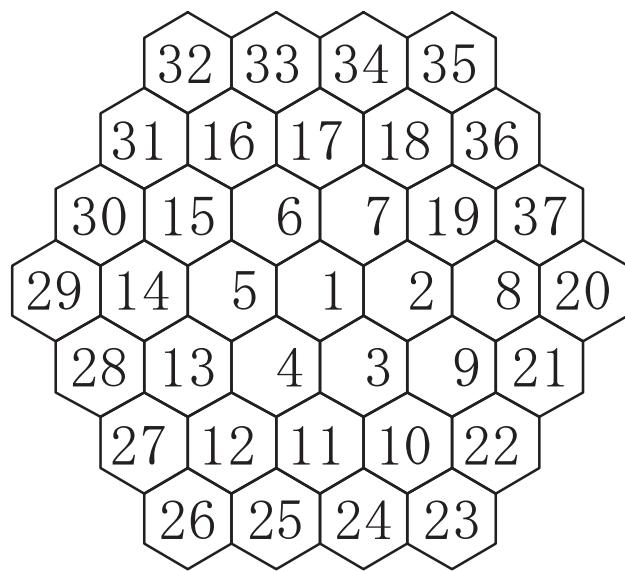


Fig. A.3-1 MINIHEX のメッシュ番号

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.3-2 MINIHEX のメッシュ番号とマップ入力との対応

## 付録 4 MINISTRI の実行方法及び入力マニュアル

MINISTRI の実行方法

## 1. 概要

MINISTRI は、NSHEX コードの補完的役割を目的として、一般の実機高速炉解析を想定して作成された Tri-Z 体系用有限差分  $S_N$  輸送計算コードである。

取り扱い可能な体系は、全炉心体系のみであり、境界条件は全て真空条件となる。

## 2. 実行方法

## 2-1. 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)
# 3 1 : 収束状況（中性子束、固有値）の出力	(WRITE)

## 2-2. 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いる。VD の大きさはメインルーチンのパラメータ文で、

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

により、指定されている。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、計算機の許容最大メモリーを越えるおそれがあるので、注意が必要。

MINISTRI 入力マニュアル  
(Ver.1.1)

全炉心版のみが整備されている。

<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 . . .  $\Sigma t = 1/3 D_{av}$
- 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: Sn 次数 (2~16 の偶数)

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

IDUMP: ダミー

IBR: ダミー

NTMX: 集合体内径方向メッシュ数 (6, 24, 54, 96 のいずれか)

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, NODRL (3I12)

IOP1: 流出中性子束と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 . . . 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 . . . . 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 . . . . 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 近似を適用する（メッシュ平均中性子束をセット）。

IOP2: 内側反復における加速法の適用の有無（通常 0）

0 . . . . なし

1 . . . . あり（中性子束外挿法）

2 . . . . あり（粗メッシュリバランス法）

NODRL: ダミー

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

IOP3: 外側反復における加速法の適用の有無（通常 1）

0 . . . . なし

1 . . . . あり（中性子束外挿法）※IOP2 を 2 以外に設定

2 . . . . あり（粗メッシュリバランス法）※IOP2 を 1 以外に設定

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

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  
 各群の前回の内側反復回数が 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

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 . . . .  $\nu \sum f_\phi$  の空間・エネルギー合計値により規格化

<0 . . . .  $\sum f_\phi$  の空間・エネルギー合計値により規格化

Card 8: ITINMX, ITOUTMX, TIMOUT, EIGEN (2I12, 2F12.5)

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）

Card 9: (IHK(KC), KC=1, KCM) (25I3)

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) (25I3) (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) 每に下部から上部への順に与え、それを KCM 回繰り返す。Fig. A.4-1, 2 参照。MAPMX よりも大きい値を与えた場合には、その領域は Black absorber と認識される。JOINT を用いる場合は 80 列以内で入力する必要がある。

## &lt;JOINT を用いない場合&gt;

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  $\rightarrow$  NN の散乱断面積  
 $\Sigma s(ng \rightarrow nn)$   
 (これを NGMX 回繰り返し、更に MAPMX 回繰り返す。)

## &lt;JOINT を用いる場合&gt;

## 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ネーム

SLAROM: 断面積作成コード名 (そのまま "SLAROM" と入力)  
 (Card 14-2 を 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。

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

## &lt;JOINT を用いない場合&gt;

## 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。)

## &lt;JOINT を用いる場合&gt;

## 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  
 メンバーネーム (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)

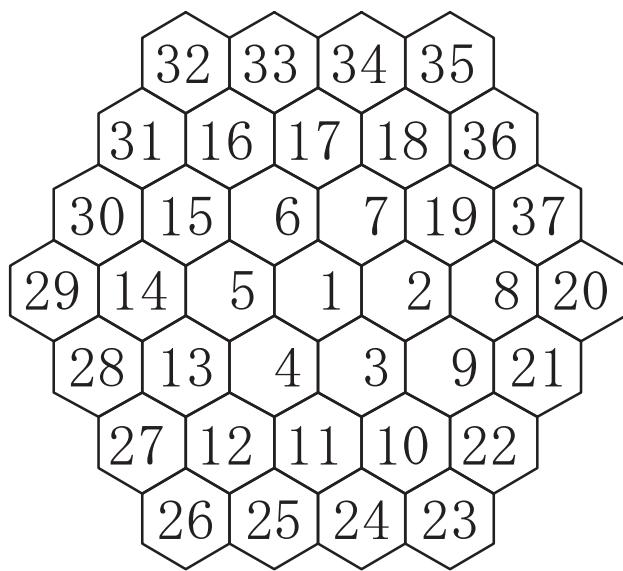


Fig. A.4-1 MINISTRI のメッシュ番号

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.4-2 MINISTRI のメッシュ番号とマップ入力との対応

## 付録 5 NSHEX における径方向もれ取り扱い手法の選定

直交座標系のノード法で一般に採用されている横方向もれ 2 次多項式近似（当該ノードと両隣接の計 3 つの平均横方向もれから当該ノードのもれを 2 次式で表す方法）は、六角座標体系用ノード法では横方向もれがノード境界とノード中心 ( $x=0$ ) で不連続になるために適用不可能である。そのために、NSHEX では横方向もれの定義に立ち戻り、横方向もれの計算に必要なノード境界中性子束の分布をノード頂点の中性子束を用いて表すこととしている。

今、Fig. A.5-1 中のノード境界中性子束  $\psi_{u+}$  の  $x$  方向依存性について考える。 $\psi_{u+}(x')$  を 2 次多項式で展開すると、次式が得られる。

$$\psi_{u+}(x') = \sum_{i=0}^2 \psi_{u+,i} g_i(x') \quad (A.5-1)$$

ここで、ノード境界中性子束モーメント  $\psi_{u+,i}$  は、Fig. A.5-1 に示す当該ノード境界平均中性子束  $\bar{\psi}_{u+}$  と両端のノード頂点中性子束  $\psi_A$  及び  $\psi_B$  を用いて次式で表記できる。

$$\begin{cases} \psi_{u+,0} = \bar{\psi}_{u+} \\ \psi_{u+,1} = 2(\psi_A - \psi_B) \\ \psi_{u+,2} = 12(\psi_A + \psi_B - 2\bar{\psi}_{u+}) \end{cases} \quad (A.5-2)$$

また、展開関数系  $g_i(x)$  は次の通り定義される。

$$\begin{cases} g_0(x) = 1 \\ g_1(x) = x - \frac{1}{4} \\ g_2(x) = x^2 - \frac{1}{2}x + \frac{1}{24} \end{cases} \quad (A.5-3)$$

ノード境界中性子束は通常のノード法バランス式から得られるが、ノード境界中性子束の算出には、何らかの近似が必要である。考えられるのは、ノード頂点周辺のノード境界中性子束やノード平均中性子束から、局所的な関数系を仮定して内挿することである。以下、今回検討対象とした手法と手法間の解析結果の比較を示し、最適な径方向取り扱い手法を導出することとする。

### (1) 手法 A

対象とするノード頂点付近の局所的な中性子束が 2 次元の 1 次式で表すことが可能であると仮定し、ノード頂点の周辺のノード境界平均中性子束から推定する方法である。まず、次の 2

次元 1 次式を考える。

$$\tilde{\psi}(x, y) = \tilde{\psi}_{00} + \tilde{\psi}_{10}x + \tilde{\psi}_{01}y. \quad (\text{A.5-4})$$

ノード頂点中性子束  $\psi_A$  を取り上げると、その周辺のノード境界平均中性子束  $\bar{\psi}_{u+}$ 、 $\bar{\psi}_{x+}$ 、及び  $\bar{\psi}_{v-}$  は式(A.5-4)を用いて次のように表される。

$$\begin{pmatrix} \bar{\psi}_{u+} \\ \bar{\psi}_{x+} \\ \bar{\psi}_{v-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & \sqrt{3}/4 \\ 1 & 1/2 & 0 \\ 1 & 3/4 & \sqrt{3}/4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\psi}_{00} \\ \tilde{\psi}_{10} \\ \tilde{\psi}_{01} \end{pmatrix}. \quad (\text{A.5-5})$$

式(A.6-5)を解き、ノード頂点 A の座標  $(x = 1/2, y = 1/2\sqrt{3})$  を代入すると、ノード頂点中性子束  $\psi_A$  が得られる。ノード頂点中性子束  $\psi_B$  についても同様に、その周辺のノード境界平均中性子束  $\bar{\psi}_{u+}$ 、 $\bar{\psi}_{x-}$ 、及び  $\bar{\psi}_{v+}$  について式(A.6-4)を用いて表記し、得られた表記式を解いてノード頂点 B の座標  $(x = 0, y = 1/\sqrt{3})$  を代入すると、ノード頂点中性子束  $\psi_B$  が得られる。結局、手法 A を用いた場合のノード頂点中性子束は次式で表される。

$$\begin{cases} \psi_A = \frac{\bar{\psi}_{u+} + \bar{\psi}_{x+} + \bar{\psi}_{v-}}{3} \\ \psi_B = \frac{\bar{\psi}_{u+} + \bar{\psi}_{x-} + \bar{\psi}_{v+}}{3} \end{cases} \quad (\text{A.5-6})$$

## (2) 手法 B

対象とするノード境界付近の局所的な中性子束が 2 次元の 2 次式で表すことが可能であると仮定し、ノード境界周辺のノード境界平均中性子束とノード平均中性子束から推定する方法である。まず、次の 2 次元 2 次式を考える。

$$\tilde{\psi}(x, y) = \tilde{\psi}_{00} + \tilde{\psi}_{10}x + \tilde{\psi}_{20}x^2 + \tilde{\psi}_{01}y + \tilde{\psi}_{02}y^2 + \tilde{\psi}_{11}xy. \quad (\text{A.5-7})$$

ノード境界中性子束  $\psi_{u+}(x)$  を対象とした場合、推定に用いるノード境界平均中性子束としては、 $\bar{\psi}_{u+}$ 、 $\bar{\psi}_{x+}$ 、 $\bar{\psi}_{v-}$ 、 $\bar{\psi}_{x-}$ 、及び  $\bar{\psi}_{v+}$  に限定することが適切であると考えられる。しかしながら、式(A.5-7)から明らかなように、未知数は 6 個あるので、推定に用いるパラメータは 6 個以上必要である。すなわち、5 個のノード境界平均中性子束からだけでは推定が不十分であり、ノード平均中性子束も用いる必要がある。ノード平均中性子束の候補としては、対象のノード

境界を挟むノードの平均中性子束  $\bar{\psi}_\alpha$  及び  $\bar{\psi}_\beta$  と対象のノード境界の両端部に位置するノード

の平均中性子束  $\bar{\psi}_\gamma$  及び  $\bar{\psi}_\delta$  が挙げられる。手法 B では、ノード平均中性子束  $\bar{\psi}_\alpha$  と  $\bar{\psi}_\beta$  を用いることとする。

さて、式(A.5-7)を用いると、ノード境界平均中性子束  $\bar{\psi}_{u+}$ 、 $\bar{\psi}_{x+}$ 、 $\bar{\psi}_{v-}$ 、 $\bar{\psi}_{x-}$ 、 $\bar{\psi}_{v+}$ 、及び、ノード平均中性子束  $\bar{\psi}_\alpha$ 、 $\bar{\psi}_\beta$  は以下の通り表記される。

$$\begin{pmatrix} \bar{\psi}_{u+} \\ \bar{\psi}_{v+} \\ \bar{\psi}_{x+} \\ \bar{\psi}_{x-} \\ \bar{\psi}_{v-} \\ \bar{\psi}_\alpha \\ \bar{\psi}_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 1/12 & \sqrt{3}/4 & 7/36 & \sqrt{3}/18 \\ 1 & -1/4 & 1/12 & \sqrt{3}/4 & 7/36 & -\sqrt{3}/18 \\ 1 & 1/2 & 1/4 & 0 & 1/36 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \sqrt{3}/2 & 7/9 & 0 \\ 1 & 3/4 & 7/12 & \sqrt{3}/4 & 7/36 & 7\sqrt{3}/36 \\ 1 & 0 & 5/72 & 0 & 5/72 & 0 \\ 1 & 1/2 & 23/72 & \sqrt{3}/2 & 59/72 & \sqrt{3}/4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\psi}_{00} \\ \tilde{\psi}_{10} \\ \tilde{\psi}_{20} \\ \tilde{\psi}_{01} \\ \tilde{\psi}_{02} \\ \tilde{\psi}_{11} \end{pmatrix}. \quad (\text{A.5-8})$$

(A.5-8)式は未知数 6 個に対して既知数（式の数）は 7 個であるので、最小二乗法を用いて、未知数を求めることとなる。7 個の既知数について同じ重み付けで最小二乗を取った場合と、ノード境界中性子束を固定して残り 6 個のパラメータと同じ重み付けで最小二乗を取った場合を取り扱ったが、両者の結果は同じであった。得られた式に、ノード頂点 A 及び B の座標を代入することにより、結局、手法 B を用いた場合のノード頂点中性子束は次の通り得られる。

$$\begin{cases} \psi_A = \frac{95\bar{\psi}_{u+} + 33(\bar{\psi}_{x+} + \bar{\psi}_{v-}) - 10(\bar{\psi}_{v+} + \bar{\psi}_{x-}) - 6(\bar{\psi}_\alpha + \bar{\psi}_\beta)}{129} \\ \psi_B = \frac{95\bar{\psi}_{u+} + 33(\bar{\psi}_{v+} + \bar{\psi}_{x-}) - 10(\bar{\psi}_{x+} + \bar{\psi}_{v-}) - 6(\bar{\psi}_\alpha + \bar{\psi}_\beta)}{129} \end{cases} \quad (\text{A.5-9})$$

### (3) 手法 C

手法 B と同じく、対象とするノード境界付近の局所的な中性子束が 2 次元の 2 次式で表すことが可能であると仮定し、ノード境界周辺のノード境界平均中性子束とノード平均中性子束から推定する方法である。手法 B との相違は、ノード平均中性子束  $\bar{\psi}_\alpha$  と  $\bar{\psi}_\beta$  の代わりにノード平均中性子束  $\bar{\psi}_\gamma$  と  $\bar{\psi}_\delta$  を用いる点である。

式(A.6-7)を用いると、ノード境界平均中性子束  $\bar{\psi}_{u+}$ 、 $\bar{\psi}_{x+}$ 、 $\bar{\psi}_{v-}$ 、 $\bar{\psi}_{x-}$ 、 $\bar{\psi}_{v+}$ 、及び、ノード平均中性子束  $\bar{\psi}_\gamma$ 、 $\bar{\psi}_\delta$  は以下の通り表記される。

$$\begin{pmatrix} \bar{\psi}_{u+} \\ \bar{\psi}_{v+} \\ \bar{\psi}_{x+} \\ \bar{\psi}_{x-} \\ \bar{\psi}_{v-} \\ \bar{\psi}_\gamma \\ \bar{\psi}_\delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 1/12 & \sqrt{3}/4 & 7/36 & \sqrt{3}/18 \\ 1 & -1/4 & 1/12 & \sqrt{3}/4 & 7/36 & -\sqrt{3}/18 \\ 1 & 1/2 & 1/4 & 0 & 1/36 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \sqrt{3}/2 & 7/9 & 0 \\ 1 & 3/4 & 7/12 & \sqrt{3}/4 & 7/36 & 7\sqrt{3}/36 \\ 1 & 1 & 77/72 & 0 & 5/72 & 0 \\ 1 & -1/2 & 23/72 & \sqrt{3}/2 & 59/72 & -\sqrt{3}/4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\psi}_{00} \\ \tilde{\psi}_{10} \\ \tilde{\psi}_{20} \\ \tilde{\psi}_{01} \\ \tilde{\psi}_{02} \\ \tilde{\psi}_{11} \end{pmatrix}. \quad (\text{A.5-10})$$

手法 B の導出で示した通りの手順により、手法 C を用いた場合のノード頂点中性子束は次の通り得られる。

$$\begin{cases} \psi_A = \frac{417\bar{\psi}_{u+} + 16(\bar{\psi}_{x+} + \bar{\psi}_{v-}) - 31(\bar{\psi}_{v+} + \bar{\psi}_{x-}) + 65\bar{\psi}_\gamma - 29\bar{\psi}_\delta}{423} \\ \psi_B = \frac{417\bar{\psi}_{u+} + 16(\bar{\psi}_{v+} + \bar{\psi}_{x-}) - 31(\bar{\psi}_{x+} + \bar{\psi}_{v-}) + 65\bar{\psi}_\delta - 29\bar{\psi}_\gamma}{423} \end{cases}. \quad (\text{A.5-11})$$

#### (4) 手法 D

手法 B、C と同じく、対象とする局所的なノード境界付近の中性子束が 2 次元の 2 次式で表すことが可能であると仮定し、ノード境界周辺のノード境界平均中性子束とノード平均中性子束から推定する方法である。手法 D では、候補となるノード平均中性子束を全て用いる。

式(A.6-7)を用いると、ノード境界平均中性子束  $\bar{\psi}_{u+}$ 、 $\bar{\psi}_{x+}$ 、 $\bar{\psi}_{v-}$ 、 $\bar{\psi}_{x-}$ 、 $\bar{\psi}_{v+}$ 、及び、ノード平均中性子束  $\bar{\psi}_\alpha$ 、 $\bar{\psi}_\beta$ 、 $\bar{\psi}_\gamma$ 、 $\bar{\psi}_\delta$  は以下の通り表記される。

$$\begin{pmatrix} \bar{\psi}_{u+} \\ \bar{\psi}_{v+} \\ \bar{\psi}_{x+} \\ \bar{\psi}_{x-} \\ \bar{\psi}_{v-} \\ \bar{\psi}_\alpha \\ \bar{\psi}_\beta \\ \bar{\psi}_\gamma \\ \bar{\psi}_\delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 1/12 & \sqrt{3}/4 & 7/36 & \sqrt{3}/18 \\ 1 & -1/4 & 1/12 & \sqrt{3}/4 & 7/36 & -\sqrt{3}/18 \\ 1 & 1/2 & 1/4 & 0 & 1/36 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \sqrt{3}/2 & 7/9 & 0 \\ 1 & 3/4 & 7/12 & \sqrt{3}/4 & 7/36 & 7\sqrt{3}/36 \\ 1 & 0 & 5/72 & 0 & 5/72 & 0 \\ 1 & 1/2 & 23/72 & \sqrt{3}/2 & 59/72 & \sqrt{3}/4 \\ 1 & 1 & 77/72 & 0 & 5/72 & 0 \\ 1 & -1/2 & 23/72 & \sqrt{3}/2 & 59/72 & -\sqrt{3}/4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\psi}_{00} \\ \tilde{\psi}_{10} \\ \tilde{\psi}_{20} \\ \tilde{\psi}_{01} \\ \tilde{\psi}_{02} \\ \tilde{\psi}_{11} \end{pmatrix}. \quad (\text{A.5-12})$$

9 個全ての既知数に対して同じ重み付けで最小二乗を取ることにより、6 つの未知数を得て、ノード頂点 A 及び B の座標を代入することにより、手法 D を用いた場合のノード頂点中性子束は次の通り得られる。

$$\begin{cases} \psi_A = \{115071\bar{\psi}_{u+} + 73184(\bar{\psi}_{x+} + \bar{\psi}_{v-}) + 43615(\bar{\psi}_{v+} + \bar{\psi}_{x-}) \\ \quad + 15763\bar{\psi}_\gamma - 43375\bar{\psi}_\delta - 27468(\bar{\psi}_\alpha + \bar{\psi}_\beta)\}/266121 \\ \psi_B = \{115071\bar{\psi}_{u+} + 73184(\bar{\psi}_{v+} + \bar{\psi}_{x-}) + 43615(\bar{\psi}_{x+} + \bar{\psi}_{v-}) \\ \quad + 15763\bar{\psi}_\delta - 43375\bar{\psi}_\gamma - 27468(\bar{\psi}_\alpha + \bar{\psi}_\beta)\}/266121 \end{cases}. \quad (\text{A.5-13})$$

### (5) 手法の選定

ここでは、計算精度と計算時間の観点から、最適な径方向もれの取り扱い手法を選定する。径方向もれの取り扱い手法としては、参考ケースとしてノードの正の方向と負の方向それぞれで一定とした場合 (Constant)、1次多項式展開とした場合、2次多項式展開とした場合を検討対象とした。1次多項式展開の場合は、局所的な中性子束に関して1次近似を仮定した手法 A を適用した。2次多項式展開の場合は、局所的な中性子束に関して2次近似を仮定した手法 B、C、D の他に1次近似を仮定した手法 A も適用した。検証体系は、KNK-II 炉心、「もんじゅ」炉心、SPX 炉心の各制御棒挿入状態とした。NSHEX の計算条件は Table 5.1-7 に示す通りであるが、ノード内中性子束展開次数は 4 とした。参照解は GMVP により得られた結果とした。

検討結果を Table A.5-1～A.5-3 に示す。

まず、Table A.5-1 に示す KNK-II 炉心の結果について。径方向もれを一定とした場合には、参照解に対し 0.1%以上の過大評価が見られ、制御棒挿入割合の増加と共にその度合いが大きく見られることが分かる。それに対し、径方向もれを1次または2次の多項式展開により取り扱った場合には、大幅な改善の見られることが分かる。その中でも2次多項式展開の手法 A と手法 D では参照解に対して "Rods in" のケースで 0.1%前後の過小評価が見られており、やや劣る結果を示している。計算時間に関しては、計算精度で劣る径方向もれを一定にした場合を除くと、自明なように1次多項式展開が最も短いことが分かる。

次に、Table A.5-2 に示す「もんじゅ」炉心の結果について。径方向もれを一定とした場合は、KNK-II 炉心ほどではないが、"MCR in" または "BCR in" のケースで 0.1%にまで及ぶ過大評価が見られる。径方向もれを多項式展開で取り扱った場合には、一定とした場合に対し改善が見られるが、手法間でほとんど優劣が見られない。なお、計算時間の観点からは1次多項式展開で手法 A を採用した場合が最も優れている。

最後に、Table A.5-3 に示す SPX 炉心の結果について。径方向もれを一定とした場合は、KNK-II 炉心や「もんじゅ」炉心の場合と同様に制御棒が挿入されている "MCR half-in" や "MCR in" のケースで参照解に対して大きな過大評価が見られている。径方向もれを多項式展開で取り扱った場合には、特に "MCR in" のケースにおける過小評価の度合いから、1次多項式展開の手法 A と 2 次多項式展開の手法 C が優れており、計算時間の観点からは 1 次多項式展開の方が有利である。

以上の検討結果より、計算精度の観点からは、1次多項式展開（手法 A）と 2 次多項式展開の手法 C が最も優れているが、計算時間の観点も考慮に入れると、最適な径方向もれの取り扱い手法として 1 次多項式展開が選定される。

1次多項式展開に対して計算精度面で2次多項式展開に利点が見出せなかった理由としては、

2次多項式展開におけるパラメータとして用いたノード平均中性子束は、そのノードが比較的広範囲にわたっているので、ノード境界部の局所的な中性子束分布を推定するための精度向上にはつながらないことが挙げられる。

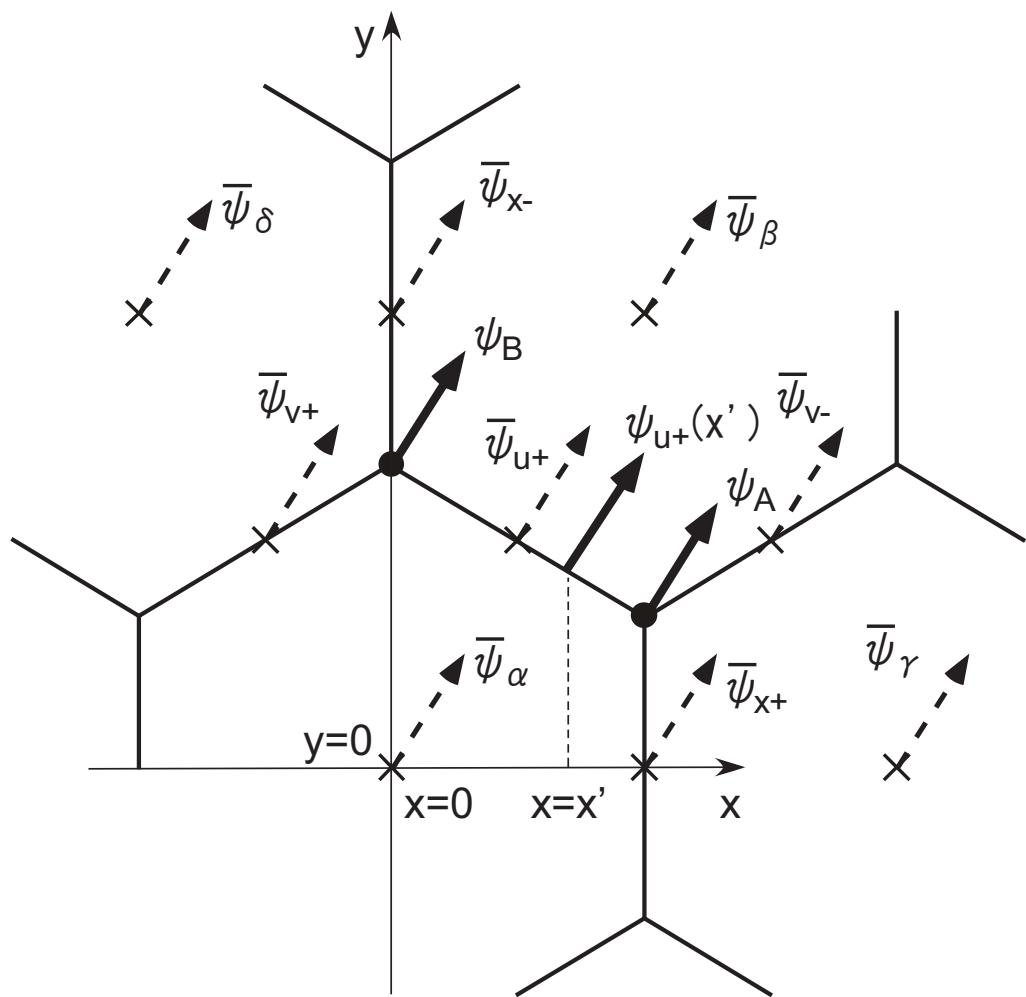


Fig. A.5-1 Node parameters for calculating the node vertex fluxes

Table A.5-1 Comparison in eigenvalue among treatments of the radial leakage for the KNK-II core

Radial leakage treatment [Method]		All rods out	Rods half-in	Rods in	Average time [min]
Constant		+0.123 <sup>*2</sup>	+0.149 <sup>*2</sup>	+0.216 <sup>*2</sup>	7
First <sup>*1</sup>	[A]	+0.047	+0.037	+0.022	8
Second <sup>*1</sup>	[A]	+0.044	-0.016	-0.125	9
	[B]	+0.046	+0.015	-0.038	9
	[C]	+0.050	+0.029	-0.003	9
	[D]	+0.047	-0.006	-0.097	9
GMVP (Ref.)		1.09527 ±0.024 <sup>*3</sup>	0.98349 ±0.026 <sup>*3</sup>	0.87966 ±0.026 <sup>*3</sup>	287

\*1: Polynomial expansion order of the radial leakage

\*2: Relative difference to the reference [%]

\*3: Statistical uncertainty (1σ) [%]

Table A.5-2 Comparison in eigenvalue among treatments of the radial leakage for the Monju core

Radial leakage treatment [Method]		All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in	Average time [min]
Constant		+0.035 <sup>*2</sup>	+0.035 <sup>*2</sup>	+0.099 <sup>*2</sup>	+0.099 <sup>*2</sup>	314
First <sup>*1</sup>	[A]	+0.016	-0.004	+0.031	+0.028	389
Second <sup>*1</sup>	[A]	+0.017	-0.016	+0.004	+0.001	429
	[B]	+0.016	-0.009	+0.020	+0.017	438
	[C]	+0.019	-0.003	+0.032	+0.027	414
	[D]	+0.017	-0.010	+0.016	+0.012	428
GMVP (Ref.)		1.03861 ±0.010 <sup>*3</sup>	0.98551 ±0.010 <sup>*3</sup>	0.93493 ±0.010 <sup>*3</sup>	0.95665 ±0.010 <sup>*3</sup>	307

\*1: Polynomial expansion order of the radial leakage

\*2: Relative difference to the reference [%]

\*3: Statistical uncertainty (1σ) [%]

Table A.5-3 Comparison in eigenvalue among treatments of the radial leakage for the SPX core

Radial leakage treatment [Method]		All rods out	MCR half-in	MCR in	BCR in	Average time [min]
Constant		+0.014 <sup>*2</sup>	+0.076 <sup>*2</sup>	+0.077 <sup>*2</sup>	+0.031 <sup>*2</sup>	676
First <sup>*1</sup>	[A]	-0.005	+0.011	-0.050	-0.001	820
Second <sup>*1</sup>	[A]	-0.007	-0.008	-0.099	-0.006	899
	[B]	-0.006	+0.005	-0.069	-0.003	875
	[C]	-0.004	+0.014	-0.047	+0.001	928
	[D]	-0.005	+0.004	-0.071	-0.002	882
GMVP (Ref.)		1.02256 ±0.005 <sup>*3</sup>	0.97474 ±0.006 <sup>*3</sup>	0.93021 ±0.006 <sup>*3</sup>	1.01278 ±0.005 <sup>*3</sup>	269

\*1: Polynomial expansion order of the radial leakage

\*2: Relative difference to the reference [%]

\*3: Statistical uncertainty ( $1\sigma$ ) [%]

## 付録 6 角度分点セットの整理

完全対称条件での角度分点セットを整理した。整理した角度分点セットを Table A.6-1 に示す。ここで示す角度分点セットは、TWOTRAN コードのデフォルトで与えられているもの ("Reference")<sup>24)</sup>、偶数モーメント保存条件により得られるもの ("Even moment condition" または "Even condition")<sup>23)</sup>、レベル毎モーメント保存条件により得られるもの ("Level moment condition" または "Level condition")<sup>23)</sup>である。表中のインデックス ("Index") の定義は、X 軸方向余弦  $\mu$  と角度分点重み  $w$  とで異なっており、Fig. A.6-1 に示す通りである。表から分かるように、"Reference" の分点セットは "Level moment condition" と非常に類似していることが分かる。

なお、3 次元直交座標体系におけるオクタント数は 8 であるが、3 次元六角体系ではオクタント数は 12 となる。従って、それに応じて角度分点セットを六角体系用に変換する必要があるが、その変換は各コード内で行われる。

$\mu$	$w$	$\mu$	$w$
		6	1
		5	2 2
1	1 ( $S_2$ )	4	3 4 3
		3	3 5 5 3
		2	2 4 5 4 2
2	1	1	1 2 3 3 2 1
1	1 1 ( $S_4$ )		( $S_{12}$ )
		7	1
3	1	6	2 2
2	2 2	5	3 5 3
1	1 2 1 ( $S_6$ )	4	4 6 6 4
		3	3 6 7 6 3
		2	2 5 6 6 5 2
4	1	1	1 2 3 4 3 2 1
3	2 2		( $S_{14}$ )
2	2 3 2		
1	1 2 2 1 ( $S_8$ )	8	1
		7	2 2
		6	3 5 3
5	1	5	4 6 6 4
4	2 2	4	4 7 8 7 4
3	3 4 3	3	3 6 8 8 6 3
2	2 4 4 2	2	2 5 6 7 6 5 2
1	1 2 3 2 1 ( $S_{10}$ )	1	1 2 3 4 4 3 2 1 ( $S_{16}$ )

Fig. A.6-1 Definition of indices for the angular quadrature sets

Table A.6-1 Comparison of angular quadrature sets for the discrete ordinates method

Angular quadrature set	Index	Reference		Even moment condition		Level moment condition	
		$\mu$	w	$\mu$	w	$\mu$	w
$S_2$	1	0.57735027	1.00000000	0.57735027	1.00000000	0.57735027	1.00000000
$S_4$	1	0.30163878	0.33333333	0.35002117	0.33333333	0.29879685	0.33333333
	2	0.90444905	-	0.86889030	-	0.90633376	-
$S_6$	1	0.23009194	0.16944656	0.26663540	0.17612613	0.22702927	0.17005970
	2	0.68813432	0.16388677	0.68150773	0.15720720	0.68864276	0.16327363
	3	0.94557676	-	0.92618094	-	0.94705619	-
$S_8$	1	0.19232747	0.11678847	0.21821789	0.12098765	0.19033876	0.11716461
	2	0.57735027	0.09325523	0.57735027	0.09074074	0.57735027	0.09317489
	3	0.79352178	0.09010320	0.78679579	0.09259259	0.79400115	0.08945683
	4	0.96229948	-	0.95118973	-	0.96308998	-
$S_{10}$	1	0.16962228	0.08984204	0.18932133	0.08930315	0.16712436	0.08941160
	2	0.50714192	0.06728871	0.50888176	0.07252915	0.50693455	0.06731572
	3	0.69686020	0.05578007	0.69431889	0.04504377	0.69716191	0.05575763
	4	0.84500612	0.05313381	0.83975996	0.05392811	0.84562806	0.05353267
	5	0.97080202	-	0.96349098	-	0.97166810	-
$S_{12}$	1	0.15395746	0.07332178	0.16721265	0.07076259	0.15074906	0.07228677
	2	0.45769112	0.05266740	0.45954763	0.05588110	0.45726372	0.05279200
	3	0.62869660	0.04161495	0.62801910	0.03733767	0.62885208	0.04139769
	4	0.76225828	0.03895667	0.76002101	0.05028190	0.76277112	0.03974576
	5	0.87568027	0.03249018	0.87227054	0.02585129	0.87646141	0.03292142
	6	0.97600932	-	0.97163772	-	0.97701046	-
$S_{14}$	1	0.14238965	0.06217163	0.15198586	0.05799704	0.13840299	0.06065293
	2	0.42048076	0.04332570	0.42215698	0.04890080	0.41981467	0.04354652
	3	0.57735027	0.03321761	0.57735027	0.02354750	0.57735027	0.03283231
	4	0.69990185	0.03183706	0.69889209	0.03790526	0.70030158	0.03155849
	5	0.80398498	0.03048632	0.80222626	0.03659115	0.80468086	0.03152217
	6	0.89605866	0.02454512	0.89369110	0.02734734	0.89699512	0.02509682
	7	0.97951538	0.01998445	0.97662715	0.00374577	0.98065755	0.01994529
$S_{16}$	1	0.13344572	0.05415425	0.13895688	0.04898724	0.12866550	0.05222585
	2	0.39119433	0.03679653	0.39228926	0.04132960	0.39027815	0.03713534
	3	0.53689687	0.02777273	0.53709656	0.02123263	0.53673015	0.02721805
	4	0.65075610	0.02580284	0.65042645	0.02562065	0.65103109	0.02544962
	5	0.74746822	0.02494275	0.74675057	0.03604859	0.74806665	0.02613194
	6	0.83302700	0.01962325	0.83199656	0.01445893	0.83388604	0.02023875
	7	0.91058181	0.01879762	0.90928550	0.03449579	0.91166230	0.01950839
	8	0.98203079	0.01544801	0.98050088	0.00851811	0.98330584	0.01538363

This is a blank page.

# 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
物質量	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 基本単位	
	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>
比體積	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	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	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
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup> m/m m <sup>2</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup> Hz
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	N	m kg s <sup>-2</sup>
力	ニュートン	Pa	N/m <sup>2</sup> m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
圧力、応力	パスカル	J	N m m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	W	J/s m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
仕事率、工率、放射束	ワット	C	s A
電荷、電気量	クーロン	V	W/A m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電位差(電圧)、起電力	ボルト	F	C/V m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
静電容量	ファラード	Ω	V/A m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
電気抵抗	オーム	S	A/V m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
コンダクタンス	ジーメンス	Wb	Vs m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	エーベル	T	Wb/m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	テスラ	H	Wb/A m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	度	℃	K
光度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup> lm/m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> cd s <sup>-1</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ルクス	Ix	lm
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq	J/kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	グレイ	Sv	J/kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性	シーベルト <sup>(g)</sup>	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み、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(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じである。したがって、温度差や温度間隔を表す數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
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>1</sup> kg s <sup>-1</sup>
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>2</sup>
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量、エンタルピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比熱容量、比エンタルピー	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>
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
熱伝導率	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>
体積エネルギー	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>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> sA
表面電荷密度	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> sA
電束密度、電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> sA
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg s <sup>-4</sup> A <sup>2</sup>
透過率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>1</sup>
モルエンタルピー、モル熱容量	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>
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> sA
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>-2</sup> s <sup>-3</sup>
放射強度	ワット毎メートル	W/sr	m <sup>1</sup> m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
放射輝度	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>
酵素活性濃度	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	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨ	タ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ
10 <sup>21</sup>	ゼ	タ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ
10 <sup>18</sup>	エ	ク	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ
10 <sup>15</sup>	ペ	タ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ
10 <sup>12</sup>	テ	ラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ
10 <sup>9</sup>	ギ	ガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ
10 <sup>6</sup>	メ	ガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト
10 <sup>3</sup>	キ	ロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト
10 <sup>2</sup>	ヘ	ク	h	10 <sup>-21</sup>	ゼット
10 <sup>1</sup>	デ	カ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト

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=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=1(60)'=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)"=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L	1L=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=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	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=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=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=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
ノット	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネバール	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
デジベル	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
ダイーン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ボアズ	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>
フォート	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> x
ガル	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	Oe	1 Oe△(10 <sup>3</sup> /4n)A m <sup>-1</sup>

(c) 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	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	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (15°Cカロリー), 4.1868J (ITカロリー) 4.184J (熱化学カロリー)
ミクロシン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

