JAEA-Research
2010-042

IRPhEP ハンドブックのデータを用いた MOZART 臨界実験解析

Analysis of MOZART Critical Experiment Using the IRPhEP Handbook Data

千葉 豪

Go CHIBA

FBRプラント工学研究センター

FBR Plant Engineering Center

December 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

IRPhEP ハンドブックのデータを用いた MOZART 臨界実験解析

日本原子力研究開発機構
FBR プラント工学研究センター
千葉　豪

(2010 年 9 月 27 日受理)

IRPhEP ハンドブックに記載されている実験データに基づいて、MOZART 臨界実験解析を、核データとして JENDL-4.0（遅発中性子データを含む）、計算コードとして SLAROM-UF、CBG を用いて行った。それぞれの核特性に対する解析結果を以下に示す。

- 臨界性の C/E 値として、小型炉心の MZA では 0.9981、中型の MZB では 1.0006 を得た。良好な C/E 値は JENDL-4.0 を用いたその他の MOX 燃料高速炉の臨界性解析でも同様に得られていることから、臨界性について MOZART 実験データと他の MOX 燃料高速炉のデータとの整合性が確認されたと言える。
- 炉中心反応率比における計算値と実験値の差は、F25/F49、C28/F49 については 1%以下、F28/F25、F40/F49、F41/F49 については 4%以下であった。
- Na ボイド反応度は、非漏洩項が支配的なデータに対しては計算値は 10%程度の過大評価となった。また、漏洩項の寄与が大きいデータでは、炉心領域のボイド反応度については漏洩項で規格化した絶対差は最大でも 10%弱となった。
- 物質反応度価値は、Pu については計算値が 5%程度の過大評価となった。また、U、SS については、計算値と実験値の差異は 10%以下であった。
- 制御棒反応度価値については、計算値が 2%から 5%程度の過大評価となった。
- 反応率分布は、炉心領域では計算値と実験値はよく一致したが、しきい値反応についてはブランケット領域で系統的な過小評価が観察された。

反応度特性に対しては計算値の系統的な過大評価が見られた。その原因は明らかではないが、実効遅発中性子割合 β_{eff} の過小評価もひとつの可能性として考えられる。

原子力科学研究所（駐在）：〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Analysis of MOZART Critical Experiment Using the IRPhEP Handbook Data

Go CHIBA

FBR Plant Engineering Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 27, 2010)

Using the experimental data described in the IRPhEP handbook, an experimental analysis of the MOZART experiment is carried out with the nuclear data JENDL-4.0, and the reactor physics codes SLAROM-UF and CBG. The following results are obtained:

- The C/E values for criticality are 0.9981 for the small-sized core MZA and 1.0006 for the middle-sized core MZB. Good agreement between calculation and experimental values has been observed similarly in the analyses for criticality of other MOX-fueled fast reactors. Hence, consistency between the present analysis and the others is confirmed.
- In reaction rate ratios at the core center, calculation values agree with experimental values within 1.0% for F25/F49 and C28/F49, and within 4.0% for F28/F25, F40/F49 and F41/F49.
- In sodium void reactivity worths, calculation values are about 10% larger than experimental values for the non-leakage-dominated data. For the data to which the leakage component largely contributes, absolute differences normalized by the leakage component are less than 10%.
- In material worths, calculation values are about 5% larger than experimental values for plutonium. Calculation values agree with experimental values within 10% differences for uranium and SS.
- In control rod worths, calculation values are 2% to 5% larger than experimental values.
- In reaction rate distributions, calculation values agree well with experimental values in core regions. On the other hand, underestimation is observed systematically in calculation values of threshold reactions in blanket regions.

For the reactivity characteristic, overestimation is systematically observed in calculations. While the reason has not yet been investigated, the result suggests underestimation of β_{eff}.

Keywords: Experimental Analysis, MOZART Experiment, Fast Reactor, JENDL-4.0

目 次

1. 序論 1

2. 計算モデルの作成 2
2.1 単位格子モデルの作成 2
2.2 全炉心モデルの作成 4

3. 実験解析結果 8
3.1 実験解析手法 8
3.2 実験解析結果 9
3.2.1 臨界性 9
3.2.2 実効遅発中性子割合 10
3.2.3 炉中心反応率比 11
3.2.4 Na ボイド反応度 15
3.2.5 物質反応度価値 21
3.2.6 制御棒反応度価値 27
3.2.7 反応率分布（箔による測定） 30
3.2.8 反応率分布（核分裂検出器による測定） 40
3.3 反応度特性の C/E 値の整理 69

4. 結論 70

謝辞 70

参考文献 71

付録A 格子情報データベースの作成 72
A.1 概要 72
A.1.1 物質組成データ 72
A.1.2 プレートデータ 73
A.1.3 単位格子データ 74
A.1.4 制御棒データ 76
A.2 物質組成データにおける全数密度のチェック 77

付録B 一次元簡易炉心モデルを用いた反応率分布の計算精度の検討 80
B.1 炉心モデルの構築と参照解の計算 80

B.2 決定論手法による計算 81
B.3 ブランケット領域における F28、F40 過小評価の原因調査 90
B.4 ブランケット領域における Pu-239 核分裂反応率エネルギースペクトルの比較 91

Contents

1. Introduction 1

2. Preparation of calculation model 2
2.1 Preparation of cell model 2
2.2 Preparation of core model 4

3. Results of experimental analysis 8
3.1 Methods 8
3.2 Results 9
3.2.1 Criticality 9
3.2.2 Effective delayed neutron fraction 10
3.2.3 Reaction rate ratio at core center 11
3.2.4 Sodium void reactivity 15
3.2.5 Material worth 21
3.2.6 Control rod worth 27
3.2.7 Reaction rate distribution (foil measurement) 30
3.2.8 Reaction rate distribution (fission chamber measurement) 40
3.3 Obserbation of C/E values for reactivity 69

4. Conclusion 70

Acknowledgment 70

References 71

Appendix A Development of database for lattice information 72
A.1 Brief description 72
A.1.1 Material composition data 72
A.1.2 Plate data 73
A.1.3 Unit cell data 74
A.1.4 Control rod data 76
A.2 Confirmation of total number density 77

Appendix B Study on numerical accuracy of reaction rate distribution calculations with one-dimensional simplified core model 80
B.1 Core speficification and reference solution 80
B.2 Calculations with a deterministic method 81
B.3 Investigation of underestimation of F28 and F40 in blanket regions 90
B.4 Comparison in Pu-239 fission rate energy spectrum in blanket regions 91

List of Tables

Table 3.2.1 Results of criticality 9
Table 3.2.2 Comparison in effective delayed neutron fraction 10
Table 3.2.3 Results of reaction rate ratio at core center 13
Table 3.2.4 Void region and corresponding step index 15
Table 3.2.5 Correction factors for sodium void reactivity worth (JENDL-4.0) 16
Table 3.2.6 Correction factors for sodium void reactivity worth (JENDL-3.3) 17
Table 3.2.7 Results of sodium void reactivity worth 18
Table 3.2.8 Normalized absolute difference of sodium void reactivity worth . 19
Table 3.2.9 Correction factors and corrected calculation values of material worth 22
Table 3.2.10 C/E values of material worth 23
Table 3.2.11 Correction factors and corrected calculation values for control rod worth 28
Table 3.2.12 C/E values of control rod worth 28
Table 3.2.13 Correction factors for reaction rate experimental values measured by a radiation foil 31
Table 3.2.14 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZA in the foil measurement 32
Table 3.2.15 Correction factors for uranium-235 fission rate distribution of MZA in the foil measurement 32
Table 3.2.16 Correction factors for uranium-238 capture rate distribution of MZA in the foil measurement 33
Table 3.2.17 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZB/3 in the foil measurement 34
Table 3.2.18 Correction factors for uranium-235 fission rate distribution of MZB/3 in the foil measurement 35
Table 3.2.19 Correction factors for uranium-238 capture rate distribution of MZB/3 in the foil measurement 36
Table 3.2.20 C/E values for reaction rate distribution of MZA in the foil measurement 37
Table 3.2.21 C/E values for reaction rate distribution of MZB/3 in the foil measurement 38
Table 3.2.22 Summary of C/E values for reaction rate distribution obtained by the foil measurement 39

Table 3.2.23 Correction factors for plutonium-239 fission rate distribution of MZA in the fission chamber measurement 41
Table 3.2.24 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZA in the fission chamber measurement 41
Table 3.2.25 Correction factors for plutonium-240 fission rate distribution of MZA in the fission chamber measurement 42
Table 3.2.26 Correction factors for plutonium-239 fission rate distribution of MZB/1 in the fission chamber measurement 43
Table 3.2.27 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZB/1 in the fission chamber measurement 44
Table 3.2.28 Correction factors for uranium-235 fission rate distribution of MZB/1 in the fission chamber measurement 45
Table 3.2.29 Correction factors for plutonium-239 fission rate distribution of MZB/2 in the fission chamber measurement 46
Table 3.2.30 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZB/2 in the fission chamber measurement 47
Table 3.2.31 Correction factors for uranium-235 fission rate distribution of MZB/2 in the fission chamber measurement 48
Table 3.2.32 Correction factors for plutonium-239 fission rate distribution of MZB/3 in the fission chamber measurement 49
Table 3.2.33 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZB/3 in the fission chamber measurement 50
Table 3.2.34 Correction factors for plutonium-240 fission rate distribution of MZB/3 in the fission chamber measurement 51
Table 3.2.35 C/E values of plutonium-239 fission rate distribution of MZA in the fission chamber measurement 52
Table 3.2.36 C/E values of uranium-238 fission rate distribution of MZA in the fission chamber measurement 53
Table 3.2.37 C/E values of plutonium-240 fission rate distribution of MZA in the fission chamber measurement 53
Table 3.2.38 C/E values of plutonium-239 fission rate distribution of MZB/1 in the fission chamber measurement 54
Table 3.2.39 C/E values of uranium-238 fission rate distribution of MZB/1 in the fission chamber measurement 55
Table 3.2.40 C/E values of uranium-235 fission rate distribution of MZB/1 in the fission chamber measurement 56

Table 3.2.41 C/E values of plutonium-239 fission rate distribution of MZB/2 in the fission chamber measurement 57
Table 3.2.42 C/E values of uranium-238 fission rate distribution of MZB/2 in the fission chamber measurement 58
Table 3.2.43 C/E values of uranium-235 fission rate distribution of MZB/2 in the fission chamber measurement 59
Table 3.2.44 C/E values of plutonium-239 fission rate distribution of MZB/3 in the fission chamber measurement 60
Table 3.2.45 C/E values of uranium-238 fission rate distribution of MZB/3 in the fission chamber measurement 61
Table 3.2.46 C/E values of plutonium-240 fission rate distribution of MZB/3 in the fission chamber measurement 62
Table 3.2.47 Correction factors for plutonium-239 fission rate distribution of MZC in the fission chamber measurement 64
Table 3.2.48 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZC in the fission chamber measurement 65
Table 3.2.49 C/E values for plutonium-239 fission rate distribution of MZC in the fission chamber measurement 66
Table 3.2.50 C/E values for uranium-238 fission rate distribution of MZC in the fission chamber measurement 67
Table 3.2.51 Summary of C/E values for reaction rate distribution obtained by the fission chamber measurement 68
Table 3.3.1 Summary of C/E values for reactivity 69

Table A.1.1 List of nuclide index 73

List of Figures

Fig. 2.1.1 Specification of the ZEBRA critical assembly 3
Fig. 2.2.1 Core specification of MZA 6
Fig. 2.2.2 Core specification of MZB/1 7

Fig. 3.2.1 Specification of reaction rate ratio measurement with a fission chamber 14
Fig. 3.2.2 Core specification of radial void reactivity measurement in MZB/2 20
Fig. 3.2.3 Perturbed cells in the MZA material worth measurement 24
Fig. 3.2.4 Perturbed cells in the MZB material worth measurement 25
Fig. 3.2.5 Macrocell model for SS sample worth analysis 26
Fig. 3.2.6 Core specification of MZC 29

Fig. A.2.1 Description of plate stretch model 79
Fig. A.2.2 Description of control rod cell 79

Fig. B.2.1 Results of Pu-239 fission reaction rate distribution in 1-D MZA model 82
Fig. B.2.2 Results of U-238 fission reaction rate distribution in 1-D MZA model 82
Fig. B.2.3 Results of Pu-240 fission reaction rate distribution in 1-D MZA model 83
Fig. B.2.4 Results of U-238 capture reaction rate distribution in 1-D MZA model 83
Fig. B.2.5 Results of Pu-239 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/1 model 84
Fig. B.2.6 Results of U-238 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/1 model 84
Fig. B.2.7 Results of Pu-240 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/1 model 85
Fig. B.2.8 Results of U-238 capture reaction rate distribution in 1-D MZB/1 model 85
Fig. B.2.9 Results of Pu-239 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/2 model 86
Fig. B.2.10 Results of U-238 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/2 model 86
Fig. B.2.11 Results of Pu-240 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/2 model 87
Fig. B.2.12 Results of U-238 capture reaction rate distribution in 1-D MZB/2 model 87
Fig. B.2.13 Results of Pu-239 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/3 model 88
Fig. B.2.14 Results of U-238 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/3 model 88
Fig. B.2.15 Results of Pu-240 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/3 model 89
Fig. B.2.16 Results of U-238 capture reaction rate distribution in 1-D MZB/3 model 89
Fig. B.3.1 Results of U-238 and Pu-240 fission reaction rate distribution in the different MZA model 90
Fig. B.4.1 Plutonium-239 fission reaction rate energy spectra in the blanket region of MZB/1 91

Fig. B.4.2 Plutonium-239 fission reaction rate energy spectra in the blanket region of the MZB cores 92

This is a blank page.

1. 序論

MOZART 実験は、英国原子力公社の実験装置 ZEBRA を用いて実施された高速増殖原型炉もんじゅのモックアップ臨界実験である。

この実験で取得されたデータは、これまでの「もんじゅ」の許認可申請において核設計手法の精度を担保する目的で利用されるなどしており、有用性が高いものである。この実験の解析に必要な情報は 2003 年に国内にて整理された（以下、ARTECH データと呼称する）[1] が、最近になって経済協力開発機構 · 原子力機関（OECD/NEA）が発行する International handbook of evaluated reactor physics benchmark experiment （通称 IRPhEP ハンドブック）に登録された [2]。IRPhEP ハンドブックに記載されている実験データ（以下、IRPhEP データ）は、MOZART 実験に直接関わった研究者により再評価されたものであることから、ARTECH データと比較して、より高い品質を有すると考えられる。さらに、IRPhEP データは ARTECH データと比べて詳細な情報を有する（例えば ARTECH データにおける格子データは一次元モデルのものであるが、IRPhEP ハンドブックでは三次元モデルのデータが与えられている）という特長もある。従って、今後、MOZART 実験解析を行い、その結果を利用する場合には、IRPhEP データを用いることが望ましい。

本報告書では、IRPhEP データに基づいて行った MOZART 実験解析の結果について述べる。また、この実験解析のため、実験で用いられた各種燃料要素の情報を格納し、かつ三次元の単位格子情報から一次元の格子データを生成する機能等を有するデータベースを作成した。その概要を付録にて述べる。

2. 計算モデルの作成

2.1 単位格子モデルの作成

MOZART 臨界実験が行われた臨界集合体 ZEBRA の炉心は、Element（実機では燃料集合体に該当する）と呼ばれるもので構成される。この Element は、燃料や構造材を模擬するための薄い四角形状の物質プレート（その多くは薄い缶で被覆されている）とそれらを格納する Sheath から成る。Sheath は鉛直方向に炉心に挿入され、物質プレートは Sheath 内に積み上げられる。なお、物質プレートと Sheath の間には間隙が存在する。また、Element は鉛直方向について、燃料格子、ブランケット格子等の単位格子に分けられる。これらを図示したものを **Fig. 2.1.1** に示す。

IRPhEP ハンドブックでは、Element は「C11-1A」「C12-30A」「B11-1」のように記述されている。また、単位格子も同様に「C11-1A」「C12-30A」「B11-3」のように記述されているが、ブランケット Element では Element の名前とそれに含まれる単位格子の名前とで全く対応していないものがあるため、注意が必要である。

Element は 5×5 配列で「Super lattice」を構成し、この Super lattice 内の Element は軸ブランケット領域でグリッドにより固定されている。また、Super lattice 間には 0.2665cm の間隙が存在する。

ベンチマーク問題では、これらの構造を厳密に考慮するモデル（モデル A）に加えて、決定論コードで計算しやすいようにプレートと Sheath の間隙及び Element 間の間隙を Sheath と混合させるモデル（モデル B）、さらに Super lattice 間の間隙を各 Element の Sheath に等しく分散させるモデル（モデル C）が提供されている（ハンドブック 234 頁、以下「HB/234p」のように記述する）。モデル C では Super lattice について解析者が配慮する必要が無い。これらについては Fig. 2.1.1 に概略を示している。

今回の実験解析は、モデル C を出発点として行うこととした。

実験解析に先立って、物質プレートの数密度やサイズ、単位格子内の物質プレートの配列といったデータを格納し、単位格子の均質モデル、一次元プレートストレッチモデル、一次元リングモデル（制御棒とフォロワ用）を生成する機能を有するデータベースを C++により作成した。このデータベースの詳細については付録にて述べる。なお、今回の実験解析では、各単位格子はこのデータベースを用いて一次元プレートストレッチモデルに変換して扱った。

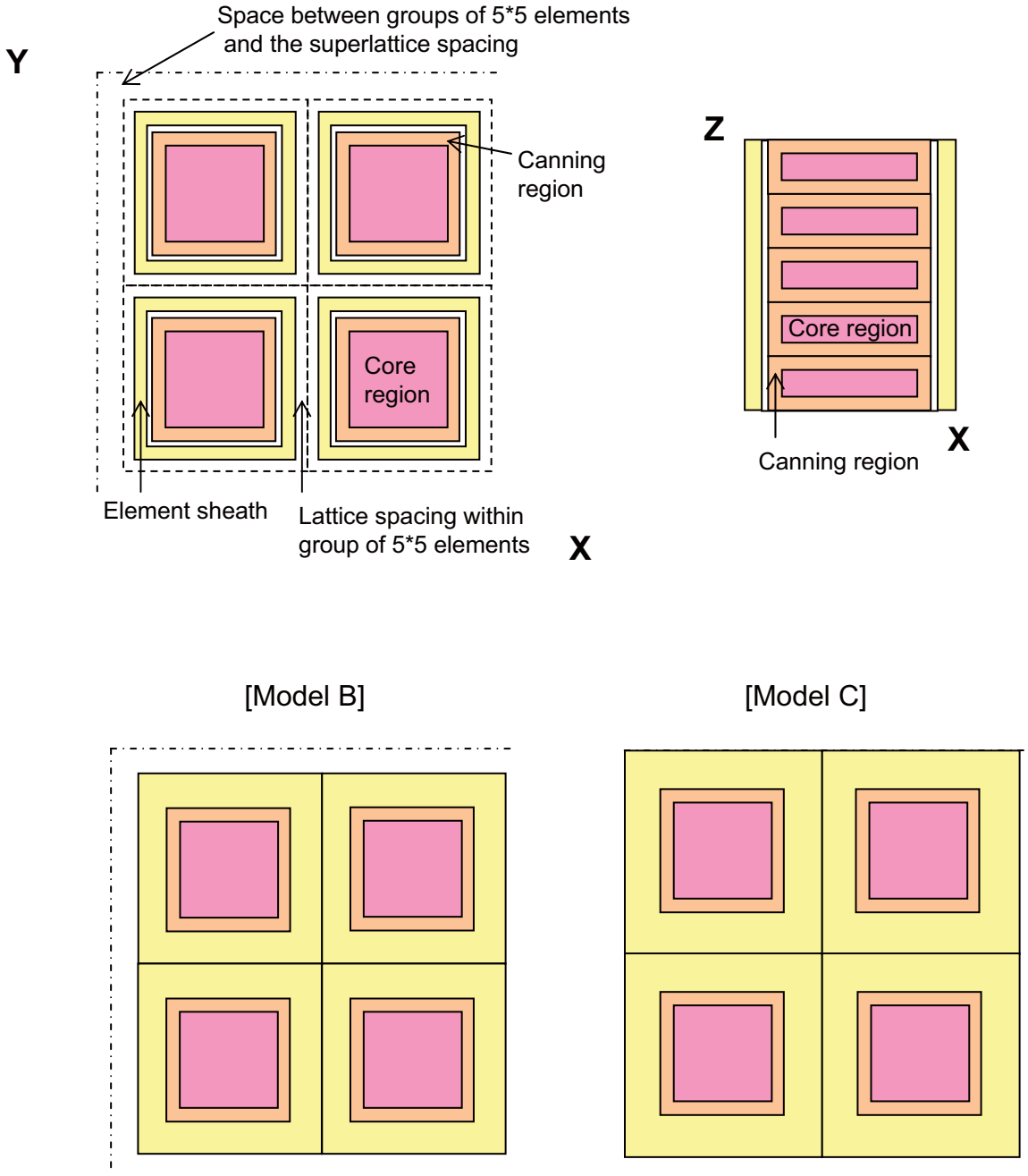


Fig. 2.1.1 Specification of the ZEBRA critical assembly

2.2 全炉心モデルの作成

MOZART 臨界実験では、「もんじゅ」の外側炉心を模擬した一領域小型炉心 MZA、「もんじゅ」の模擬炉心である MZB、制御棒挿入を模擬するための炉心 MZC が構築された。MZB には、径ブランケットのセクター領域の物質構成が異なる三つの炉心（MZB/1：天然ウラン酸化物、MZB/2：劣化ウラン酸化物、MZB/3：天然ウラン金属）があり、測定された核特性が各炉心で異なる。なお、セクター領域以外は天然ウラン金属のブランケットであり、MZB/3 は径ブランケットが均質な組成となる（MZA のブランケットも金属ウランである）。また、MZC は MZB/3 において制御棒領域が部分的に配置された炉心である。**Figure 2.2.1** と **2.2.2** に、MZA、MZB/1 の炉心配置図を示す[1] 。Figure 2.2.2 において、「B12-30」「B12-30A」が天然ウラン酸化物ブランケットを含む Element に対応する（HB/257p）。MZB/2 ではこれらが Element「B12-32」（劣化ウラン酸化物ブランケット、IRPhEP ハンドブックに付属されている MTN レポートの No.31 を参照のこと）に、MZB/3 ではこれらに加えて Element「B11-1C」が Element「B11-1D」に置換される（B11-1C、B11-1D は天然ウラン金属ブランケット）。なお、「B11-1D」は「B11-1」と同一と見做してよいとされている（HB/246p に記載）。

Figure 2.2.2 に示されているように、MZB ではセクター領域において、SS 反射体領域の外側に炭素反射体が設置されている（Element「B12-31」「B12-33」が該当）。反応率の径方向分布は主にセクター領域側で測定されており、その解析ではこの炭素反射体を無視することは出来ないことに注意が必要である。

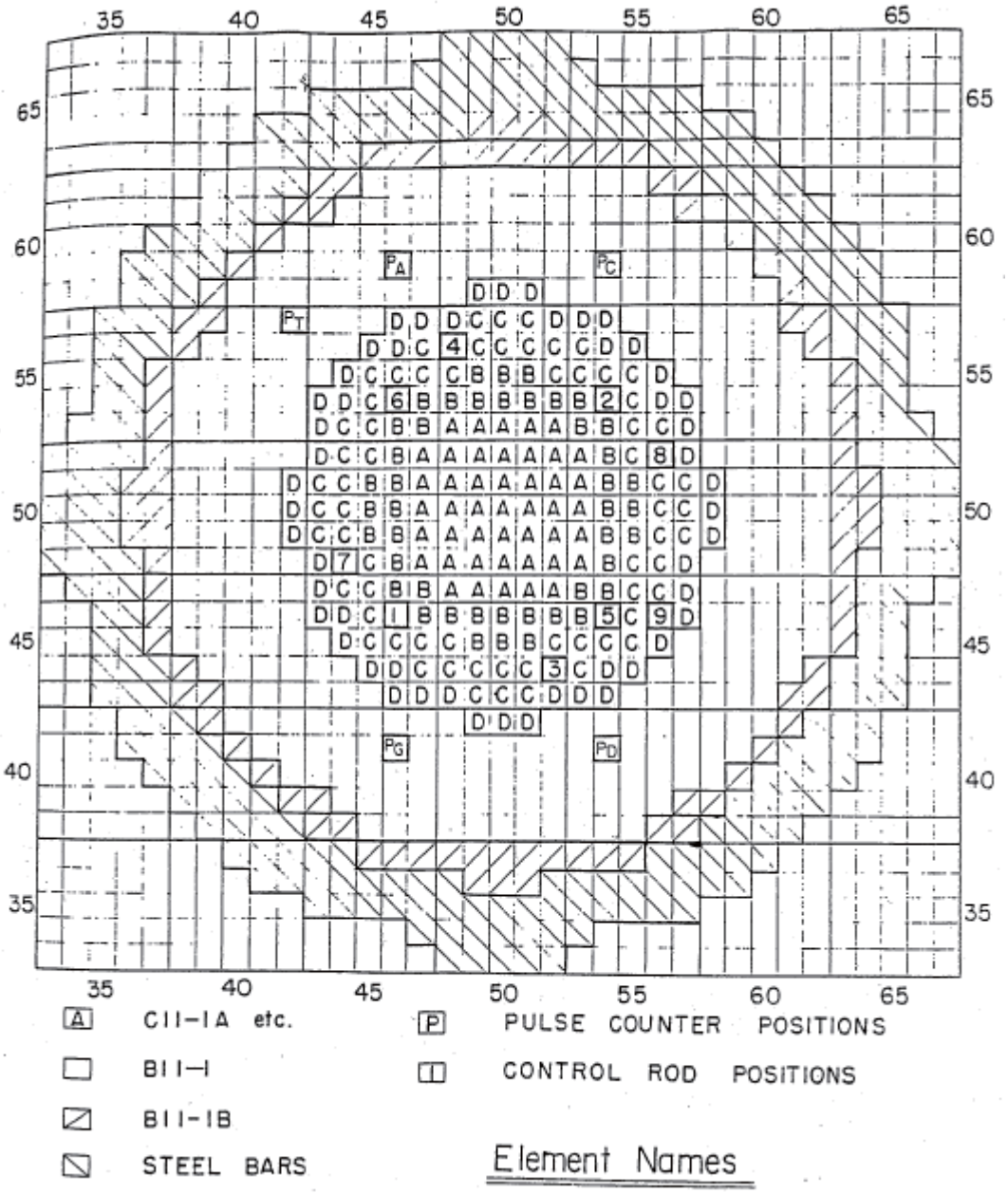
Element における単位格子の構成はハンドブックに記載されている（HB/256,257p）。例えば、Element「C11-1A」は、炉心上部から単位格子「B11-2」が 1、「B11-1」が 4、「C11-1A」が 12、「B11-1」が 4、「B11-2A」が 1 という構成になっている。ここで、単位格子「B11-2」「B11-2A」はプレナムに、「B11-1」は軸ブランケットに、「C11-1A」は燃料に、それぞれ対応している。

Element の（軸方向）長さは物質プレートの厚さから決まるが、実際に炉心に配置された場合にはプレートの重さによりプレート厚さが微妙に変化し、Element の長さが変わる。炉心における Element の長さはハンドブックに記載されている（HB/256,257p）が、Element 毎（例えば燃料要素とブランケット要素）で長さが微妙に異なっている。これを決定論計算において厳密に考慮することは計算負荷の観点から得策ではないため、今回の解析では、全ての単位要素の長さが一定（HB/256p の Table 3.9 の記載値）となるように長さを調整した（燃料要素に対しては燃料格子部分、径ブランケット要素に対しては径ブランケット格子部分の長さを調整した）。また、軸ブランケット部分の長さが上部と下部で僅かに異なるため、この平均値をそれぞれに設定することにした。これにより、Z=0 平面について対称性を仮定することが出来、計算負荷を低減することが出来る。なお、上部と下部のプレナムの単位格子には物質の配列に差異があるが、これらの格子均質数密度は同一であり、かつ解析では均質モデルで扱うので、対称と見做すことが出来る。

[1] MZB の径ブランケット領域のより見やすい図は、MZB/1 に対しては HB/24p に、MZB/3 に対しては HB/246p に記載されている。また、Fig. 2.2.2 中で番号が付いている領域は運転用制御棒に対応する。臨界時には炉心部と軸ブランケット部の組成がドライバ燃料と同じになるようにしてあるが、上部の軸ブランケット領域にボロン吸収体が設置してある（HB/295p、296p）。解析モデルではこれを無視する。

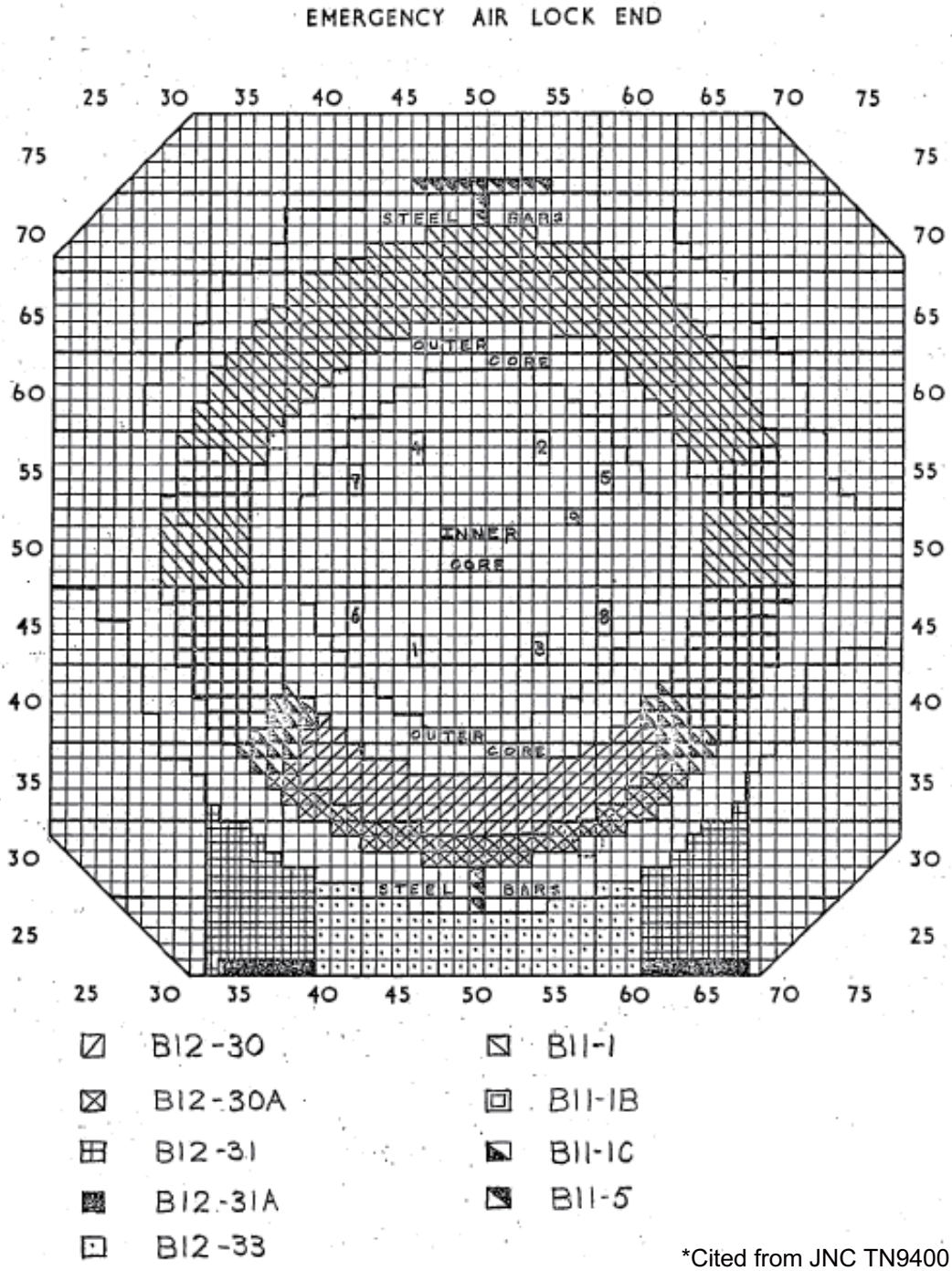
径方向については、MZA 炉心では HB/242p に示されているように、X 軸、Y 軸について対称である。一方、MZB 炉心では HB/244p から 246p に示されているように、径方向（X 軸）については非対称となる。

以上より、今回の解析では MZA は 1/8 炉心モデル、MZB は 1/2 炉心モデルで扱うこととした。ただし、炉中心の物質反応度価値の測定等、Z=0 平面について対称ではない体系は全炉心モデルで扱った。



*Cited from JNC TN9400 2003-009

Fig. 2.2.1 Core specification of MZA



*Cited from JNC TN9400 2003-009

** In MZB/2, elements “B12-30” and “B12-30A” are replaced by the element “B12-32”.
In MZB/3, elements “B12-30”, “B12-30A” and “B11-C” are replaced by the element “B11-1D” which can be regarded as “B11-1”.

Fig. 2.2.2 Core specification of MZB/1

3. 実験解析結果

3.1 実験解析手法

実験解析は、決定論的手法に基づく SLAROM-UF コード [3] と中性子輸送計算コードシステム CBG[4] を用いて行った。

実効断面積は、評価済み核データファイル JENDL-4.0[5] に基づく 70 群の UFLIB.J40 と SLAROM-UF により計算した（格子の非均質性は東捨の方法により評価）。また計算値に対して、（共鳴エネルギー領域に対する）超微細群補正及び（50keV 以上に対する）詳細群補正を行うため、超微細群定数および 175 群の基本定数を用いた計算も別途行った。

炉心計算は格子計算で得られた 70 群実効断面積を用いて行った。基準計算は拡散計算とし、Benoist の非等方拡散係数 [7] を方向で平均化したものを用いた。また、基準計算値に対する補正として、輸送効果（基準計算値と P0S4（輸送近似）輸送計算値との比）、非等方ストリーミング効果（基準計算値と非等方拡散係数を用いた拡散計算値との比）、超微細群効果（基準計算値と超微細群計算により得た実効断面積を用いた計算値との比）、詳細群効果（70 群+超微細群計算値と 175 群+超微細群計算値[1] との比）を考慮した。拡散計算、輸送計算ともに、径方向に関するメッシュ分割は 1 Element（長さ 5.4254cm）あたり 1 メッシュ、Z 軸に関するメッシュ分割は 1 メッシュの最大長が 5cm となるように設定した。輸送計算におけるメッシュの詳細化の効果は考慮していない[2] 。

なお、比較のため JENDL-3.3[6] を用いた同様の計算も行った（補正値も JENDL-3.3 ベースで計算）。

実験値は全て IRPhEP ハンドブックに記載されており、いくつかの核特性については実験値に対する補正値も与えられている。この補正値の導出の詳細は MTN レポートに記載されている。

IRPhEP ハンドブックでは、反応度に対する実験値は全て dk/k 単位で与えられている。これは、較正用制御棒の挿入長さあたりの反応度が dk/k 単位で与えられていることに由来する（HB/139p の Table 1.49 に数値データが記載）。この較正用制御棒の反応度の計算では、FGL5 断面積データと Smith-Tomlinson の遅発中性子データが使用された。ハンドブックでは、異なる断面積データ、遅発中性子データを用いた解析、比較が行えるように、MZA、MZB 炉心での FGL5 と Smith-Tomlinson の遅発中性子データを用いて得た実効遅発中性子割合の値が記載されている（HB/140p）。今回の解析では、dk/k 単位で与えられている反応度実験値は全てドル単位に変換した。また、dk/k 単位で得られた反応度計算値のドル単位への変換は、JENDL に内蔵されているデータを用いて再計算した β_{eff} により行った。

[1] この場合、炉心計算も 175 群で実施。

[2] 一般に、離散座標法に基づく輸送計算は有限差分法に基づく拡散計算と比較して空間変数に関する離散化誤差が小さい。また、離散座標法に基づく輸送計算では、5cm メッシュ·S4 計算が、無限メッシュ·S∞ 計算相当となることが経験的に知られている。従って、輸送効果には空間メッシュ詳細化の効果も陰に含まれる。

3.2 実験解析結果

実験解析の対象とした核特性は、臨界性、炉中心反応率比、Na ボイド反応度、物質反応度価値、制御棒反応度価値、反応率分布である。なお、反応率分布には箔で測定されたデータと核分裂検出器で測定されたデータとがあるため、それらに対する実験解析結果は異なる節にて記述することとした。

なお、JENDL-3.3 による解析結果は反応率分布を除いた特性についてのみ示す。

3.2.1 臨界性

臨界性の実験値は HB/236p に記載されている。MZB シリーズについては、同一の径ブランケットで構成される MZB/3 炉心を対象とした。

臨界性の解析結果を **Table 3.2.1** に示す。なお、JENDL-3.3 の計算値に施した各種補正は JENDL-3.3 を用いて別途評価したものである（他の核特性についても同様）。

Table 3.2.1 Results of criticality

	MZA	MZB/3
Base Cal.	1.00089	0.99933
Streaming effect	-0.00038	+0.00046
Transport&mesh effect	+0.00592	+0.00306
Ultra-fine group effect	+0.00076	+0.00115
175 group effect	+0.00064	+0.00101
Corrected Cal.	1.00783	1.00501
Exp.	1.0100 (0.0017*)	1.0045 (0.0011)
C/E	0.9978	1.0005
C/E (JENDL-3.3)	0.9944	0.9971

* Experimental uncertainty

計算値は $0.25\%\Delta k/kk'$ 以内で実験値と一致しており、これは JENDL-4.0 を用いた MOX 燃料高速炉の臨界性解析で同様に観察されているものである [8)]。従って、IRPhEP ハンドブックに基づく MOZART 実験データと他の MOX 燃料高速炉のデータとの整合性が確認されたと言える。

ARTECH データに基づいて実験解析を行った場合、C/E 値として MZA で 0.9965、MZB で 0.9974 が得られた（JENDL-3.3 ベース）。IRPhEP データに基づいた今回の結果と比較すると、MZB ではよく一致しているが、MZA では 0.002 弱の差異が見られる。この理由として、モデルの簡略化に対する補正の差が挙げられる。今回の解析では単位格子モデルとして IRPhEP ハンドブック記載のモデル C を用いているが、このモデルでは実験値に対して MZA で+0.0011、MZB で+0.0007 の補正が行われる（HB/235p）。この補正は、モンテカルロコード MONK（+JEF-2.2）でのモデル A とモデル C との計算値の差異から評価されたものである。一方、ARTECH データ

に基づく解析では「Super lattice 効果」、つまりモデル C からモデル A にモデルを変える効果として、MZA 炉心の計算値に対して+0.0005 の補正（すなわち、実験値に対しては-0.0005 の補正）が行われている。これは、IRPhEP データにおけるモデル A から C への実験値への変換とは整合がとれていない。なお、IRPhEP ハンドブックによると、MTN レポートでも同様に Super lattice 効果として正の値が得られていたとのことである。

Super lattice の影響については、MZA、MZB に対する C/E 値のばらつきを小さくするという観点からは、ARTECH データ、もしくは MTN レポートで採用された補正値を採用したほうが望ましいが、今回の解析は IRPhEP ハンドブックの記述に従うこととする。この不確かさを排除するのであれば、モデル A に対する実験解析が推奨される。

3.2.2 実効遅発中性子割合

実効遅発中性子割合 β_{eff} の計算では、遅発中性子データとして評価済み核データファイルに格納されているものを用いた。遅発核分裂収率 ν_d は入射エネルギー依存で、また核分裂スペクトル χ_d は遅発中性子の家系毎に、それぞれ定義される。

P0S4 輸送計算結果と拡散計算結果（等方拡散係数を使用）を、IRPhEP ハンドブックにおける評価値とともに **Table 3.2.2** に示す。

Table 3.2.2 Comparison in effective delayed neutron fraction

Core	Nuclide	IRPhEP handbook	Present (P0S4)	Present (Diff.)
MZA	U-235	0.000174	0.000166	0.000168
	U-238	0.001553	0.001447	0.001458
	Pu-239	0.001443	0.001427	0.001431
	Pu-240	0.000125	0.000130	0.000130
	Pu-241	0.000186	0.000186	0.000187
	Pu-242	0.000005	0.000004	0.000004
	Total	**0.003486**	**0.003360** (0.964*)	**0.003377** (0.969)
	(JENDL-3.3)		0.003385	0.003402
MZB	U-235	0.000223	0.000214	0.000216
	U-238	0.001724	0.001612	0.001619
	Pu-239	0.001410	0.001393	0.001395
	Pu-240	0.000095	0.000098	0.000098
	Pu-241	0.000167	0.000162	0.000162
	Pu-242	0.000003	0.000003	0.000003
	Total	**0.003622**	**0.003483** (0.962)	**0.003493** (0.964)
	(JENDL-3.3)		0.003509	0.003519

* Ratio to the IRPhEP handbook value

今回の計算値は、ハンドブックの評価値と比較して 3%から 4%程度小さく、その差異は主に U-238 の β_{eff} に起因することが分かった。なお、U-238 の遅発中性子の家系毎で比較したところ、全ての家系で同程度の相対差が見られた。また、JENDL-4.0 の計算値は JENDL-3.3 と比較して 1%弱程度小さな値となった。これも、主に U-238 の β_{eff} の差異に起因するものであったが、U-238 の遅発中性子データは JENDL-4.0 と-3.3 とでは同一なので、炉心内の中性子束場の差異によるものと考えられる。

IRPhEP ハンドブックの評価値は、ν_d としては Tomlinson の評価値[9] を改訂したもの（MTN/104 の Table 3 参照）を、χ_d としては Keepin のテキスト[10]（p.176、Table 6-3）に記載されているものを、それぞれ用いて計算された。なお、χ_d は全ての核種に対して同一である。一方、JENDL-4.0 の ν_d は、U-238 に対しては Krick、Evans の実験データに基づいて最小二乗法でフィッテングしたものが、Pu-239 に対しては Tuttle の評価値がそれぞれ格納されている。また、χ_d としては Brady と England の評価値が U-238、Pu-239 ともに格納されている。

収率 ν_d [3] について、Tomlinson の改訂評価値と JENDL-4.0 の値を比較すると、U-238 では 0.0458 と 0.0454、Pu-239 では 0.00633 と 0.00625 となっており、U-238 では 1%弱、Pu-239 では 1%強、JENDL-4.0 の値が小さい。従って、ν_d の差異という観点からは、JENDL-4.0 に基づく β_{eff} の計算値は IRPhEP ハンドブック評価値と比較して 1%程度小さいと考えられる。なお、遅発中性子の家系毎の割合は、U-238 では同一であったが、Pu-239 では 20%以下の差異が見られた。収率 ν_d とその家系毎割合における差異の影響を定量的に把握するため、これらを IRPhEP ハンドブック評価値の計算条件相当にして、β_{eff} を MZA について計算した（JENDL-3.3 を用いた拡散計算）。その結果、0.003428 が得られ、JENDL-3.3 評価値と比較して 0.8%程度の値の増加が見られた。

収率 ν_d とその家系毎割合を同一条件とした場合でも残る差異は、χ_d の差異および計算手法によるものと考えられる。この前者について明らかにすべく、β_{eff} において最も差が大きい U-238 の χ_d を Pu-239 のものに置換して計算したところ、計算値の変動は無視できる程度であった。これより、IRPhEP ハンドブック評価値と今回の計算値の差異の原因としては、計算手法の差異が最も可能性が高いと結論づけられる。

また、P0S4 輸送計算結果は拡散計算結果と比較して僅かであるが小さいことが分かった。今回の検討では、β_{eff} として P0S4 輸送計算による値を用いることとした。

3.2.3 炉中心反応率比

炉中心反応率比については、ARTECH データでは箔による測定値のみが整備されていたが、IRPhEP ハンドブックには核分裂計数管による測定値も記載されている。核分裂計数管を用いた測定では、Pu-240、-241 の Pu-239 に対する核分裂反応率比のデータが取得されていることから、今回の解析では核分裂計数管による測定値も対象とした。

炉中心反応率比の実験値は HB/226p に記載されている。

[3]高速炉の核分裂反応率スペクトルで一群にした値。

箔による測定値はセル平均値として与えられているが、核分裂計数管による測定値はそのように与えられてはいない。核分裂計数管を用いた測定では、**Fig. 3.2.1** に示すように、炉中心位置に挿入されている Element の上半分を取り除き、そこに、計数管を先端に取り付けた測定器具を挿入している。従って、計数管は燃料セルに隣接して設置される。この計数管に隣接する物質プレートは、MZA、MZB いずれの場合でもナトリウムプレートであり、そこからの寄与が支配的となることから、計数管位置での反応率比とセル平均の値とは異なる可能性がある。

そこで本解析では、計数管位置での反応率比をそれに接する燃料格子のナトリウムプレート位置でのものと見做し、セル平均の計算値をナトリウムプレート位置でのものに変換するための補正値を以下のようにして得た。

炉中心に配置される単位燃料セル（MZA では C11-1A、MZB では C12-30A）について、最外側（片側）のナトリウムプレートに Pu-239、-240、-241 を極微小量混入し、セル計算を行った。それにより、ナトリウムプレート位置での Pu-240、-241 の Pu-239 に対する核分裂反応率比を得た。次に、均質化したセルに対して中性子束のエネルギースペクトルを計算し、均質実効微視的断面積を用いて、同様に核分裂反応率比を計算した。そして、これらの計算値の比から上記補正値を求めた。この補正値には、中性子束エネルギースペクトル、および検出器断面積となる重核種の核分裂実効断面積の、セル平均値と検出器位置での値との差異の影響が含まれる。この補正値は Pu-240 と Pu-239 の核分裂反応率比に対して顕著に現れたが、これは主に実効核分裂断面積の差異に起因することを数値的に確認した[4] 。

炉中心反応率比の解析結果を、セル平均値を核分裂計数管での値に変換するための補正値と併せて **Table 3.2.3** に示す。なお、ここでは補正済みの計算値を示した（各種補正量は 1%以内）。

F25/F49、C28/F49 については 1%以内で、F28/F25、F40/F49、F41/F49 については 4%以内で、計算値と実験値は一致した。

[4]Pu-239 の核分裂断面積は、セル平均とナトリウムプレート位置とでは、共鳴自己遮蔽効果の違いから値が異なる（セル平均値のほうが小さい）。一方、Pu-240 の核分裂断面積は閾値反応であることから、セル平均値とナトリウムプレート位置とで値に差異はない。従って、F40/F49 はセル平均値よりもナトリウムプレート位置での値のほうが小さくなる（補正値が 1.0 より小さくなる）と言える。

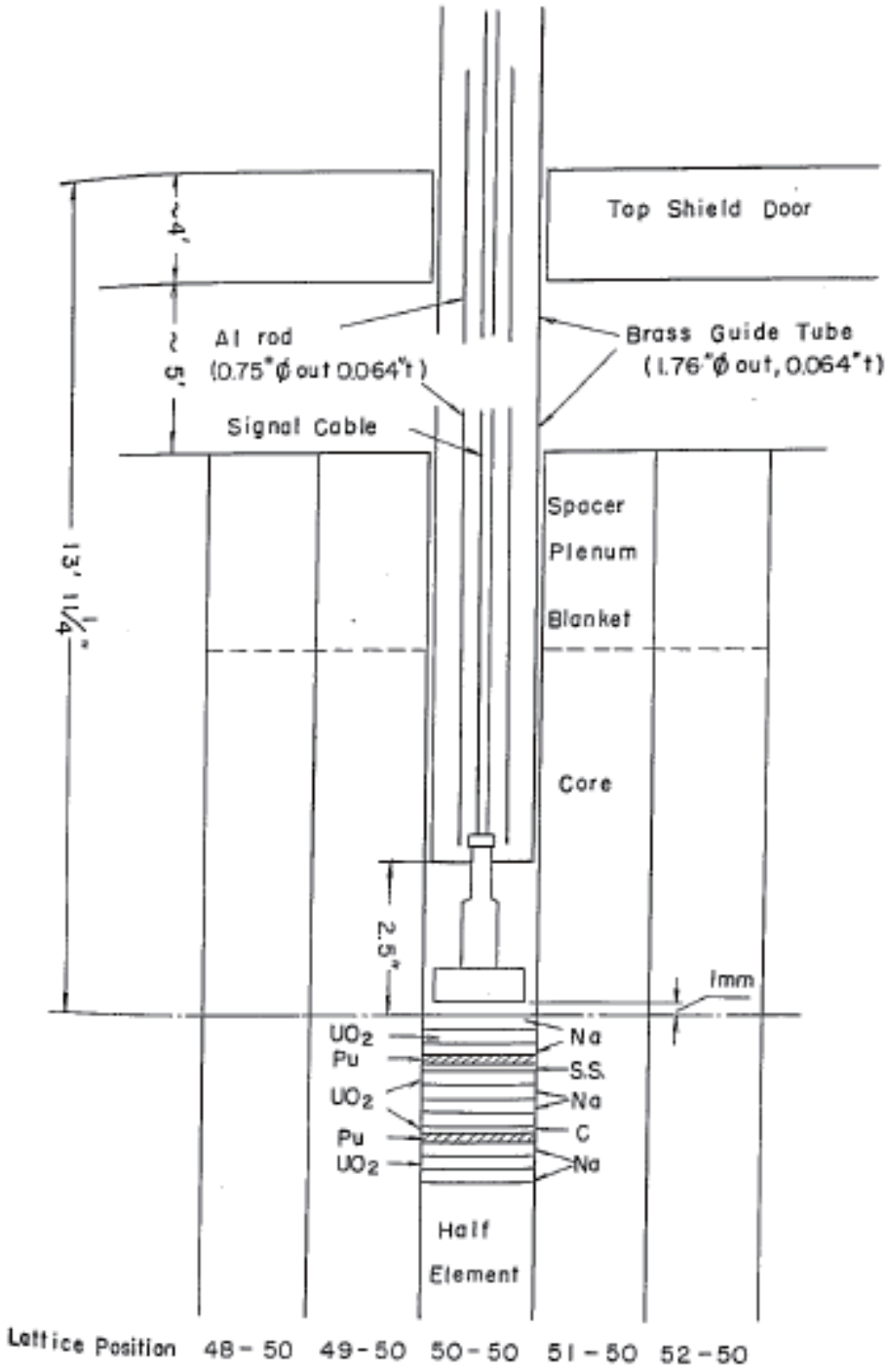
Table 3.2.3 Results of reaction rate ratio at core center

Core	RRR	Cal.	Exp.	C/E	C/E (J33)
MZA	F28/F25 (foil)	0.03268	0.03356 (0.014*)	0.974	0.983
	F25/F49 (foil)	0.97957	0.978 (0.019)	1.002	1.017
	C28/F49 (foil)	0.12794	0.1291 (0.014)	0.991	0.999
	F40/F49 (F.C.**)	0.24746 (0.898***)	0.2565 (0.047)	0.965	0.986
	F41/F49 (F.C.)	1.31806 (1.010)	1.279 (0.033)	1.031	1.053
MZB	F28/F25 (foil)	0.02210	0.02283 (0.012)	0.968	0.977
	F25/F49 (foil)	1.06243	1.066 (0.013)	0.997	1.010
	C28/F49 (foil)	0.14332	0.1428 (0.013)	1.004	1.011
	F40/F49 (F.C.)	0.19470 (0.865)	0.2023 (0.047)	0.962	0.983
	F41/F49 (F.C.)	1.39730 (1.003)	1.356 (0.033)	1.030	1.053

* Relative experimental uncertainty

** Measured by a fission chamber

*** Correction factor for position dependence in fission chamber measurement



*Cited from PNC TJ9678 97-004

Fig. 3.2.1 Specification of reaction rate ratio measurement with a fission chamber

3.2.4 Na ボイド反応度

Na ボイド反応度は、径方向について、MZA では炉中心位置で、MZB/2 では炉中心位置と中心から外れた位置で、それぞれ測定が行われている。いずれも、9 つの燃料 Element をボイド燃料を模擬した Element に置換した際の反応度を測定している。炉中心位置での測定では、軸方向についてボイドパターンを 5 通り変えて反応度が測定されている。一方、炉中心から外れた位置での測定では、径ブランケット領域で 2 つ、外側炉心領域で 2 つ、内側炉心領域で 1 つのデータが取得されている。炉中心から外れた位置での測定について **Fig. 3.2.2** に概要を示す。

ボイドパターンとそれに対応する記号を **Table 3.2.4** に示す（HB/141-143p の記述に対応）。

Table 3.2.4 Void region and corresponding step index

Core	Step index	Void region
MZA	A	Core region 1 (0 to 15 cm)
	B	Core region 2 (15 to 30 cm)
	C	Core region 3 (30 to 45 cm)
	D	Axial blanket (45 to 80 cm)
	E	Elements (0 to 80 cm)
MZB	A	Center 3 core cells (0 to 12.2cm)
(center)	B	Upper 4 and lower 4 core cells (12.2 to 44.6 cm)
	C	All 11 core cells (0 to 44.6 cm)
	D	Axial blankets (44.6 to 79.5 cm)
	E	Core plus axial blanket (0 to 79.5 cm)
MZB	1	Inner metal radial blanket
(radial)	2	Full core height (outer core)
	4	Full core height (inner core)
	5	Full core height (outer core, sector region)
	6	Oxide radial blanket (sector region)

MZB の Na ボイド反応度は MZB/2 炉心で測定されたものであるが、IRPhEP ハンドブックには「臨界性計算のためのどの体系モデルで計算してもよい」という記述があった（HB/290p）。しかし、中心から外れた位置の測定データでは、金属ウランからなるブランケット領域と、酸化劣化ウランからなるセクター側のブランケット領域の二通りのデータが取得されていることから、セクター領域の組成の違いを考慮する必要があると考えられる。そこで、Na ボイド反応度については、MZB/2 炉心のモデルで計算を行った[5] 。

得られた補正値と dk/k 単位の補正後計算値を **Table 3.2.5** と **3.2.6** に、C/E 値を **Table 3.2.7** にそれぞれ示す。なお、実験値は HB/141-143p に記載されている。

[5]炉心におけるセクター領域は HB/144p に、セクター領域に配置される劣化ウランの Element 情報は HB/257p に（B12-32）、劣化ウランの単位格子の情報は HB/255p に、それぞれ示されている。

Table 3.2.5 Correction factors for sodium void reactivity worth (JENDL-4.0)

Core	Term	Step	Streaming	Transport	UF	175g	Corrected Cal.(dk/kk')
MZA	Non-L	A	1.000	1.052	0.993	0.968	4.328e-4
		B	0.998	1.053	0.991	0.971	3.250e-4
		C	0.995	1.035	0.988	0.988	1.890e-4
		D	0.992	0.939	0.970	0.990	1.276e-4
		E	0.997	1.035	0.990	0.977	1.090e-3
	L	A	0.963	0.831	0.998	1.055	-7.359e-5
		B	0.893	0.912	0.997	1.008	-2.501e-4
		C	0.882	0.930	0.997	1.002	-5.113e-4
		D	0.874	0.866	1.000	1.003	-4.368e-4
		E	0.879	0.878	0.998	1.010	-1.333e-3
MZB (center)	Non-L	A	1.002	1.004	0.972	0.975	1.912e-4
		B	0.999	1.003	0.972	0.982	3.230e-4
		C	1.000	1.003	0.972	0.980	5.180e-4
		D	0.992	0.961	0.969	0.991	7.274e-5
		E	0.999	0.998	0.972	0.982	5.918e-4
	L	A	0.928	0.789	1.007	1.076	-8.745e-6
		B	0.897	0.914	0.997	1.005	-2.739e-4
		C	0.898	0.908	0.997	1.010	-2.871e-4
		D	0.866	0.894	1.001	0.996	-1.638e-4
		E	0.882	0.889	0.999	1.006	-4.619e-4
MZB (radial)	Non-L	1	1.002	0.965	0.945	0.962	3.210e-5
		2	1.000	1.049	0.987	0.993	1.403e-4
		4	1.000	1.002	0.973	0.979	2.978e-4
		5	1.001	1.048	0.988	0.985	1.395e-4
		6	1.005	0.966	0.969	0.971	4.296e-5
	L	1	1.074	0.940	1.001	1.001	-1.832e-4
		2	1.012	0.935	0.999	1.006	-3.463e-4
		4	0.945	0.918	0.998	1.007	-2.568e-4
		5	1.014	0.936	0.998	1.005	-3.393e-4
		6	1.071	0.937	0.998	0.993	-1.668e-4

Table 3.2.6 Correction factors for sodium void reactivity worth (JENDL-3.3)

Core	Term	Step	Streaming	Transport	UF	175g	Corrected Cal.(dk/kk')
MZA	Non-L	A	1.000	1.056	0.968	0.993	4.129e-4
		B	0.998	1.056	0.967	0.995	3.106e-4
		C	0.995	1.037	0.968	1.005	1.817e-4
		D	0.992	0.938	0.978	0.978	1.253e-4
		E	0.997	1.037	0.970	0.995	1.045e-3
	L	A	0.957	0.831	1.002	1.046	-7.351e-5
		B	0.877	0.912	0.998	1.005	-2.481e-4
		C	0.865	0.930	0.997	0.999	-5.055e-4
		D	0.862	0.867	1.001	0.991	-4.251e-4
		E	0.864	0.878	0.999	1.003	-1.311e-3
MZB (center)	Non-L	A	1.002	1.005	0.952	0.988	1.834e-4
		B	0.999	1.004	0.954	0.993	3.106e-4
		C	1.000	1.004	0.954	0.992	4.976e-4
		D	0.991	0.961	0.979	0.978	7.105e-5
		E	0.999	0.999	0.957	0.990	5.696e-4
	L	A	0.916	0.787	1.007	1.063	-8.657e-6
		B	0.879	0.913	0.998	1.001	-2.713e-4
		C	0.880	0.907	0.998	1.005	-2.843e-4
		D	0.861	0.895	1.004	0.991	-1.607e-4
		E	0.869	0.889	1.000	1.001	-4.556e-4
MZB (radial)	Non-L	1	1.001	0.963	0.944	0.962	3.146e-5
		2	1.000	1.052	0.966	1.006	1.351e-4
		4	1.001	1.003	0.954	0.992	2.872e-4
		5	1.001	1.051	0.969	0.997	1.348e-4
		6	1.005	0.964	0.969	0.968	4.241e-5
	L	1	1.076	0.941	1.001	0.997	-1.823e-4
		2	1.013	0.934	1.000	1.002	-3.512e-4
		4	0.935	0.917	0.999	1.002	-2.575e-4
		5	1.015	0.935	0.998	1.001	-3.452e-4
		6	1.076	0.938	0.999	0.987	-1.672e-4

Table 3.2.7 Results of sodium void reactivity worth

Core	Step	Cal.($)	Exp.($)	C/E	C/E (J33)
MZA	A	1.069e-1	9.61e-2 (0.066*)	1.112	1.043
	B	2.229e-2	1.55e-2 (0.370)	1.439	1.193
	C	-9.589e-2	-8.58e-2 (0.057)	1.118	1.115
	D	-9.200e-2	-9.07e-2 (0.051)	1.015	0.977
	E	-7.234e-2	-4.99e-2 (0.247)	1.449	1.576
MZB	A	5.237e-2	4.80e-2 (0.011)	1.090	1.037
(center)	B	1.409e-2	1.52e-2 (0.072)	0.928	0.734
	C	6.630e-2	6.32e-2 (0.022)	1.049	0.962
	D	-2.615e-2	-2.10e-2 (0.039)	1.246	1.218
	E	3.729e-2	4.09e-2 (0.041)	0.913	0.796
MZB	1	-4.338e-2	-3.53e-2 (0.016)	1.228	1.216
(radial)	2	-5.915e-2	-5.49e-2 (0.025)	1.077	1.121
	4	1.176e-2	1.35e-2 (0.102)	0.869	0.625
	5	-5.735e-2	-5.41e-2 (0.026)	1.060	1.108
	6	-3.555e-2	-2.71e-2 (0.020)	1.314	1.315

* Relative experimental uncertainty

(The ±5% systematic uncertainty in the reactivity scale is not included.)

Na ボイド反応度は符号が異なる漏洩項、非漏洩項の相殺によって決まるが、その相殺度合いが大きい場合には、計算値と実験値との比（C/E 値）に着目すると見通しが悪い。一方、計算値と実験値の絶対差を、漏洩項もしくは非漏洩項の計算値で規格化した数値（規格化絶対差）[11] は、各項の計算精度を議論するうえで有益である。例えば、非漏洩項で規格化した絶対差は、漏洩項計算値に誤差が無いと仮定した場合の非漏洩項における計算値と実験値の相対差を示すものとなる。Na ボイド反応度に対する解析結果を規格化絶対差で整理したものを **Table 3.2.8** に示す。表中の括弧内の数値は実験誤差（の絶対値）を各項計算値で規格化したものを示しており、規格化絶対差における実験誤差の寄与の大きさを示す。また、太字で示した値は正味の反応度に対して支配的な項で規格化したものであることを示す。

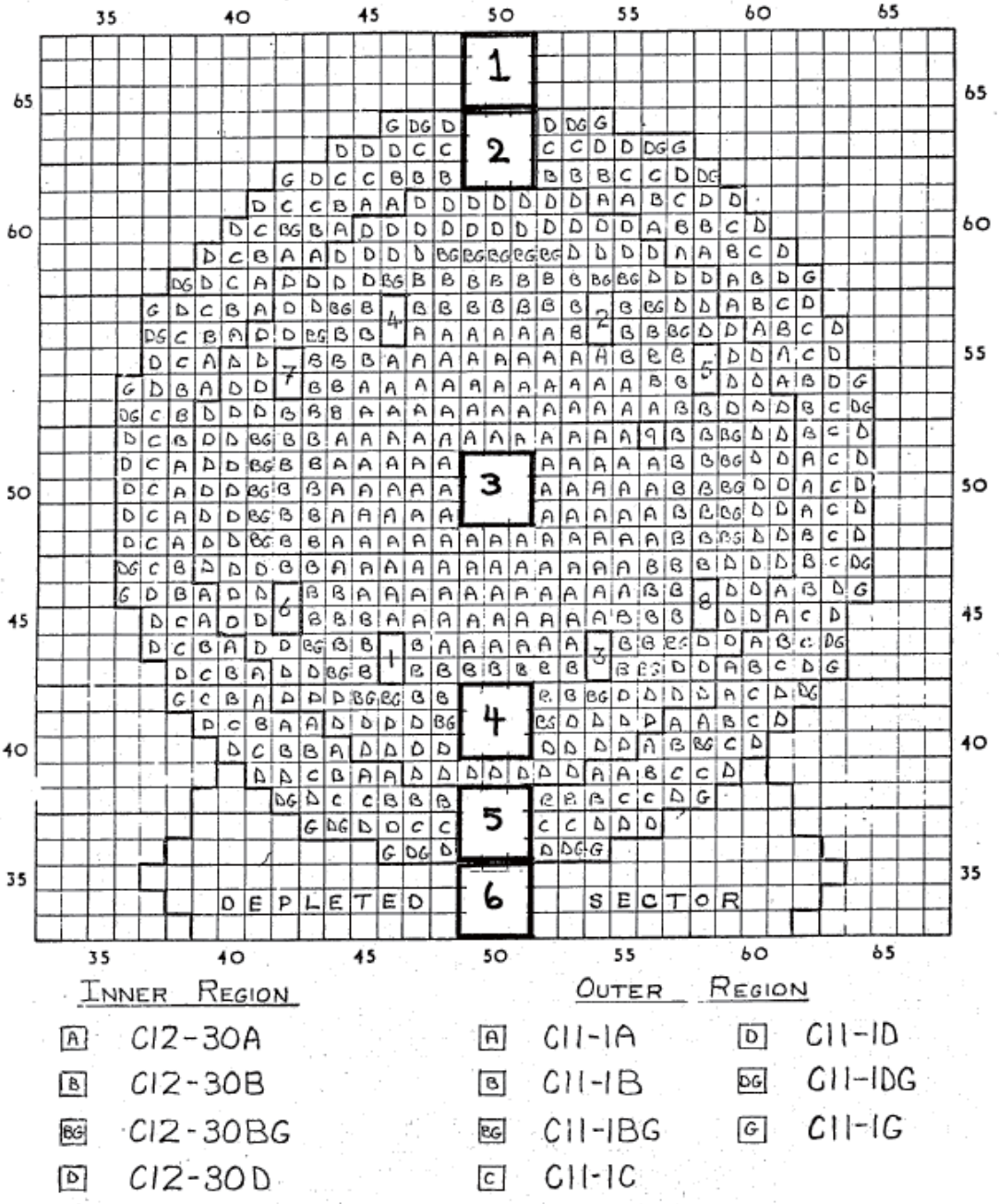
これより、漏洩項の寄与が小さいボイドステップ（MZA、MZB のステップ A）では、非漏洩項で規格化した絶対差は 0.08 程度となっており、非漏洩項を 8%程度過大評価していることが示唆された。一方、漏洩項の寄与が大きいボイドステップでは、漏洩項で規格化した絶対差は系統的に正の値を示しており、漏洩項を過大評価していることが示唆された。この傾向は特に MZB の径ブランケット位置での反応度で大きい。

炉心燃料領域における Na ボイド反応度では、非漏洩項、漏洩項に対する規格化絶対差の最大値（絶対値）はそれぞれ 0.08、0.07 となった。すなわち、炉心領域でのボイド反応度については、それぞれの項に対して 8%程度の予測精度を有することが示唆された。

Table 3.2.8 Normalized absolute difference of sodium void reactivity worth

Core	Step	(C-E)/C_{NL}	(C-E)/C_L	$\|C_L/C_{NL}\|$
MZA	**A***	**0.08** (0.05**)	-0.49 (0.30***)	0.17
	B	**0.07** (0.06)	-0.09 (0.08)	0.71
	C	-0.18 (0.09)	**0.07** (0.03)	2.71
	D	-0.04 (0.13)	**0.01** (0.04)	3.42
	E	-0.07 (0.04)	**0.06** (0.03)	1.22
MZB	**A**	**0.08** (0.01)	-1.73 (0.23)	0.05
(center)	**B**	**-0.01** (0.01)	0.01 (0.01)	0.85
	C	**0.02** (0.01)	-0.04 (0.02)	0.55
	D	-0.25 (0.04)	**0.11** (0.02)	2.25
	E	**-0.02** (0.01)	0.03 (0.01)	0.78
MZB	1	-0.87 (0.06)	**0.15** (0.01)	5.71
(radial)	**2**	-0.10 (0.04)	**0.04** (0.01)	2.47
	4	**-0.02** (0.02)	0.02 (0.02)	0.86
	5	-0.08 (0.04)	**0.03** (0.01)	2.43
	6	-0.69 (0.05)	**0.18** (0.01)	3.88

* Bold character denotes that the void region is a fuel region
** Experimental uncertainty normalized by calculated non-leakage component
*** Experimental uncertainty normalized by calculated leakage component



*Cited from JNC TN9400 2003-009

Fig. 3.2.2 Core specification of radial void reactivity measurement in MZB/2

3.2.5 物質反応度価値

MOZART 実験では、いくつかの重核種、構造材核種、吸収材核種の反応度価値が、炉中心と中心から外れた炉心位置、ブランケット位置において測定された。今回の解析では、炉中心で測定された物質反応度価値のうち、Pu、天然 UO_2、Na、SS を対象とした（Pu については、組成が異なるいくつかのサンプルに対するデータを対象とした）。実験データは、MZA については HB/147p に、MZB については HB/149p に、それぞれまとめられている。これらは、SS の場合を除いて、炉心燃料格子（MZA では C11-1A、MZB では C12-30A）に含まれる着目物質領域を缶に置換することにより測定された。SS の場合は、単位燃料格子中の複数のナトリウムプレートを SS プレートに置換した状態を摂動前とし、SS プレートを缶に置換して反応度が測定された。

Figure 3.2.3、**3.2.4** に、測定において摂動が加えられた単位格子内のプレート位置を示す。MZA では単位格子の境界が軸中心面に一致する一方、MZB では単位格子の中心が軸中心面に一致する。これらの図で示されているように、Pu の場合を除いて、摂動領域が軸方向について炉心中心位置となるように摂動領域が設定されている。従って、Pu の場合以外は炉心は軸方向について対称であり、解析では軸方向について反射境界条件を用いることが出来る。

なお、MZB では MZB/1 炉心で測定が行われたが、径ブランケットのセクター領域の組成の違いの影響は小さいと考えられることから、MZB/3 炉心モデルで解析を行った。

摂動が与えられる燃料格子の均質実効断面積は単位格子モデル（周期境界条件）で計算した。なお、SS の物質反応度価値の場合、SS に含まれる Fe が高速エネルギー領域で共鳴構造を持つことから、摂動前の格子について共鳴自己遮蔽効果の評価が重要となると考えられる。前述したように、SS の物質反応度価値の測定では、摂動が与えられる格子ではナトリウムプレートが SS に置換されているため、摂動格子が周囲の通常の燃料格子と異なり、無限配列を仮定した単位格子モデルの使用は不適切と考えられる[6] 。また、MZA では Fig. 3.2.3 で示されているように、周期境界条件で単位格子を模擬すること自体が適切ではない。そこで、SS を計算対象とする場合のみ、反応度測定対象の格子については、その両端に通常燃料の片側半分の格子を配置したマクロセルモデル（周期境界条件）にて実効断面積を作成した。マクロセルモデルの概要について **Fig. 3.2.5** に示す。この図から分かるように、このマクロセルモデルにより、軸方向に隣接する異なる格子の影響を考慮することができる（径方向についても異なる格子が隣接するが、その影響は考慮していない）。なお、このマクロセルモデルの使用による計算値の変動は補正値として考慮したため、基準計算では SS の場合であっても、測定対象燃料格子は周期境界条件の単位格子モデルで格子計算を行った。

得られた補正値と dk/k 単位の補正後計算値を **Table 3.2.9** に、C/E 値を **Table 3.2.10** に、それぞれ示す。なお、「Pu V8」「Pu IX8」「Pu II8」「Pu III8」は Pu-240 の含有割合が異なる Pu であり、Pu-240 の含有割合は「V8」「IX8」は 18%程度、「II8」は 10%程度、「III8」は 5%程度である。

[6]摂動後（着目物質が缶に置換された場合）の格子についても同じことが言えるが、この場合、摂動が与えられた位置はボイド缶であり、ボイド缶に対して共鳴自己遮蔽効果を考慮する必要はない。ボイド缶以外の領域の共鳴自己遮蔽効果も変わることが考えられるが、その影響は二次的であるので、ここでは考えないこととする。

Pu の反応度価値はいずれの炉心においても 5%程度の系統的な過大評価となった。また、同位体組成の違いによる C/E 値の差は、MZA では有意に見られなかったが、MZB では Pu-240 の組成割合が大きい Pu IX8 の C/E 値が他と比較して 0.01 程度小さくなった。

天然 UO_2 の反応度価値はいずれの炉心でも 10%程度の過大評価となった。なお、U-238 の核分裂断面積は閾値反応であり、UO_2 の反応度価値は核分裂生成による正の反応度効果と吸収による負の反応度効果の相殺の度合いが大きいことから、Pu の反応度価値と比較すると予測が難しいということが定性的に言える。

MZA における Na の反応度価値は 10%程度の過大評価となった。この反応度価値は炉中心で測定されたため非漏洩項の寄与が支配的であるが、この結果は Na ボイド反応度の解析結果と整合がとれるものである。なお、MZB では C/E 値が 0.982 となっており MZA のデータと整合がとれないが、この原因として、測定反応度が小さく測定誤差が大きいこと、測定の方法が MZA と若干異なる（Na の反応度価値が直接測定されたのではなく、SS の物質反応度価値実験データから評価されたもの（MTN/64、6,7p）である）ことが挙げられる。

SS の反応度価値は、マクロセル補正により計算値と実験値の一致が改善し、計算値と実験値は 6%以内で一致した。今回用いた一次元のマクロセルモデルではプレートと平行方向は無限と扱われるため、三次元のモデルで評価する[7] ことにより、さらに計算値の不確かさを低減することが可能となる。

Table 3.2.9　Correction factors and corrected calculation values of material worth

Core	Material	Streaming	Transport	UF	175g	Macrocell	Corrected Cal. (dk/k)
MZA	Pu V8	1.001	1.006	0.995	0.997		2.959e-4
	Pu II8	1.001	1.006	0.996	0.997		3.119e-4
	Pu III8	1.001	1.006	0.996	0.997		2.976e-4
	Nat. UO_2	1.000	1.038	0.999	0.983		-9.390e-5
	Na	1.003	1.084	0.987	0.954		-2.290e-5
	SS	1.001	1.044	0.990	1.005	1.055	-5.060e-5
MZB	Pu IX8	1.002	0.983	0.993	0.997		-2.332e-4
	Pu II8	1.002	0.984	0.994	0.997		-2.463e-4
	Pu III8	1.002	0.983	0.994	0.997		-2.346e-4
	Nat. UO_2	1.003	1.002	0.996	0.991		-9.690e-5
	Na	1.003	1.006	0.968	0.968		-7.400e-6
	SS	1.003	1.003	0.982	0.988	1.699	-2.080e-5

[7]具体的には、三次元離散座標法とサブグループ法を組み合わせた方法で評価が可能と考えられる。

Table 3.2.10 C/E values of material worth

Core	Material	Cal.($)	Exp.($)	C/E	C/E (J33)
MZA	Pu V8	8.939e-2	8.488e-2 (0.003*)	1.053	1.039
	Pu II8	9.409e-2	8.947e-2 (0.003)	1.052	1.036
	Pu III8	8.985e-2	8.537e-2 (0.003)	1.052	1.037
	Nat. UO_2	-2.950e-2	-2.694e-2 (0.017)	1.095	1.086
	Na	-7.068e-3	-6.569e-3 (0.048)	1.076	1.021
	SS	-1.361e-2	-1.452e-2 (0.014)	0.938	0.927
MZB	Pu IX8	6.691e-2	6.438e-2 (0.002)	1.039	1.024
	Pu II8	7.131e-2	6.800e-2 (0.002)	1.049	1.031
	Pu III8	6.783e-2	6.477e-2 (0.002)	1.047	1.030
	Nat. UO_2	-2.959e-2	-2.675e-2 (0.006)	1.106	1.096
	Na	-2.006e-3	-2.043e-3 (0.068)	0.982	0.938
	SS	-5.488e-3	-5.743e-3 (0.024)	0.956	0.946

* Relative experimental uncertainty

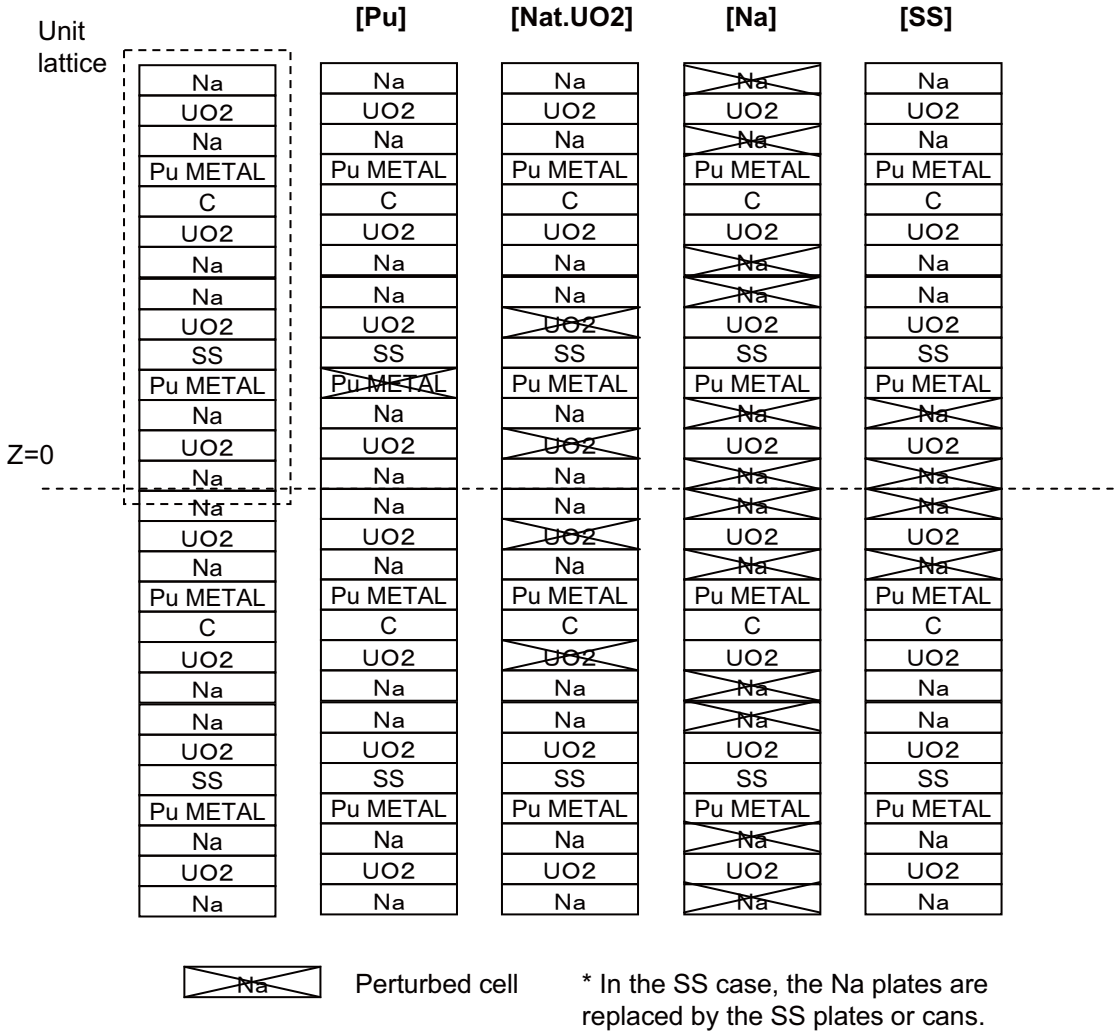


Fig. 3.2.3 Perturbed cells in the MZA material worth measurement

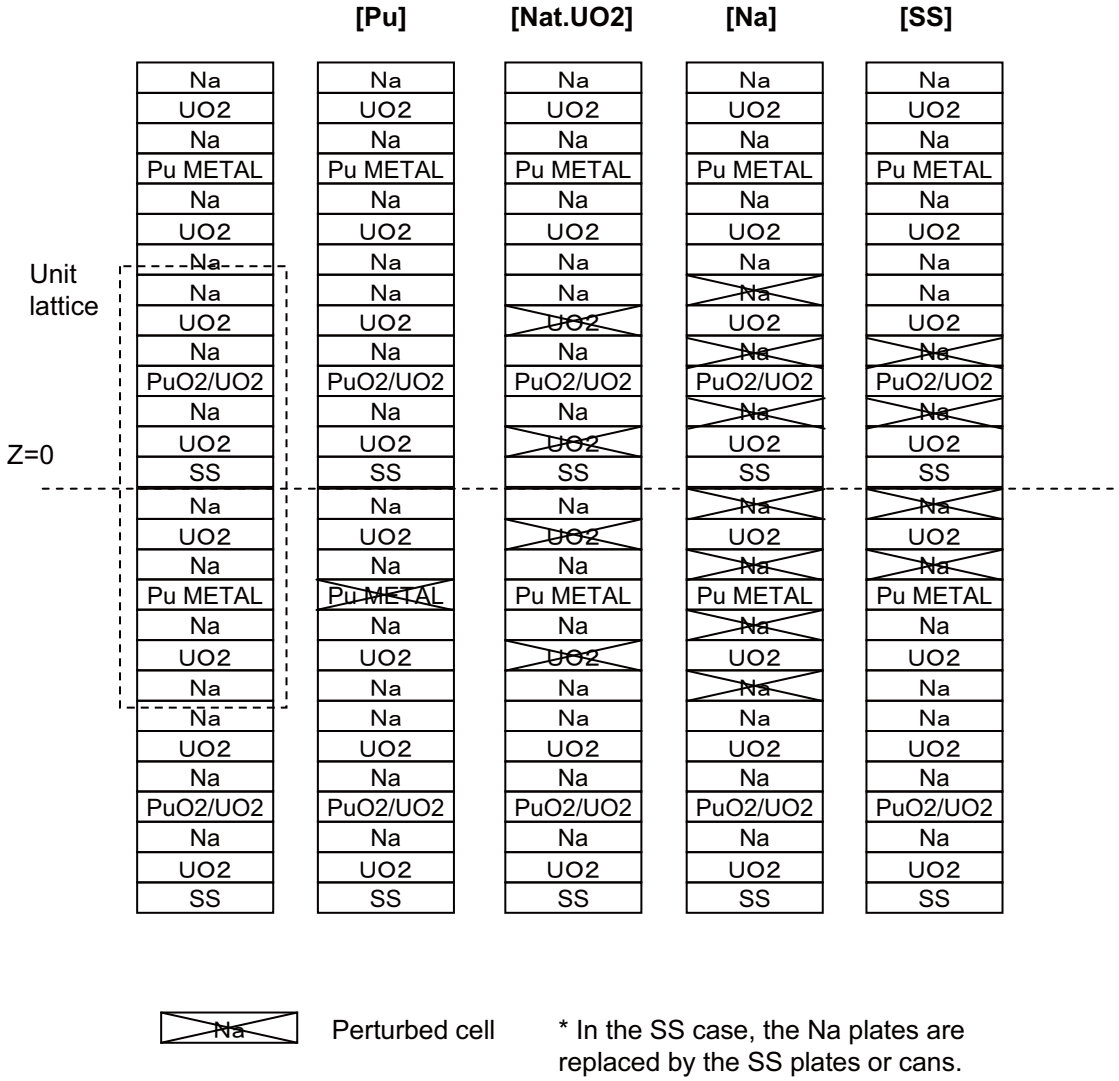
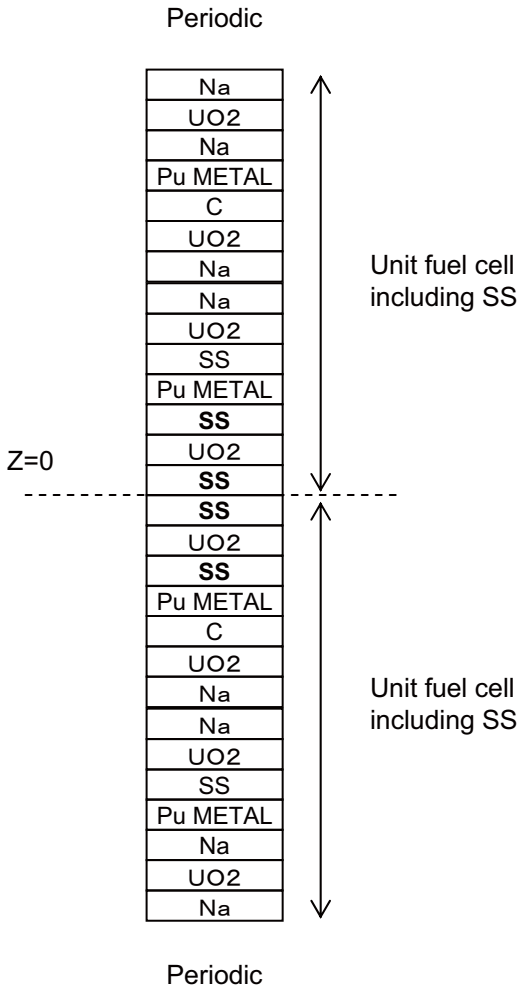


Fig. 3.2.4 Perturbed cells in the MZB material worth measurement



* Due to the limitation of the lattice code in the number of regions, only two fuel lattices are considered with the periodic boundary conditions.

Fig. 3.2.5 Macrocell model for SS sample worth analysis

3.2.6 制御棒反応度価値

制御棒反応度価値は MZC 炉心で測定された。

制御棒としては、天然組成のボロン（B-10 同位体比 20%）を用いたもの、濃縮したボロン（B-10 濃縮度として 30、80、90%のものがある）を用いたものがあり、単独および複数の制御棒を挿入した場合の反応度価値が測定されている。**Figure 3.2.6** に制御棒挿入位置を示す。

本解析では内側炉心領域における単独制御棒の反応度価値のみを対象とした。

MZC では制御棒の挿入位置に応じて炉心構成が若干異なる。今回の解析に用いた炉心モデルは、MZB/3 炉心の径ブランケット 8 要素を燃料要素に置換したものとした（燃料要素 (C11-1G) に置換した位置は MZC のデータを記述したハンドブック ZEBRA-LMFR-EXP-003（以後 HB2 と記載）の 16p に記載されている）。

制御棒 Element では、外径 1.55cm の吸収ピンが、中心と第一層（1 本）、第二層（12 本）に配置されている。解析では、ナトリウムフォロワと制御棒は一次元円筒にモデル化し、均質断面積は反応率比保存法により作成した。

得られた補正値と dk/k 単位の補正後計算値を **Table 3.2.11** に、C/E 値を **Table 3.2.12** に、それぞれ示す（実験値は HB2/38p に記載）。計算値は 2%から 5%の系統的な過大評価となっており、また、C/E 値に僅かな位置依存性（炉中心に近いほど C/E が大きい）が見られる。

なお、ARTECH データを用いた解析 [1] では 5%程度の過大評価が観察されていたが、ARTECH データを見直したところ、制御棒の上部及び下部のナトリウムフォロワ領域（それぞれ 35.6cm）が制御棒領域として扱われており、反応度価値が大きく評価されていることが分かった。

今回の解析では制御棒を一次元リングにモデル化しているが、IRPhEP ハンドブックには円筒モデルは 1.3%から 3%の差異をもたらす (HB2/106p) とある。二次元格子モデル効果を別途評価しておくことが望ましいであろう。

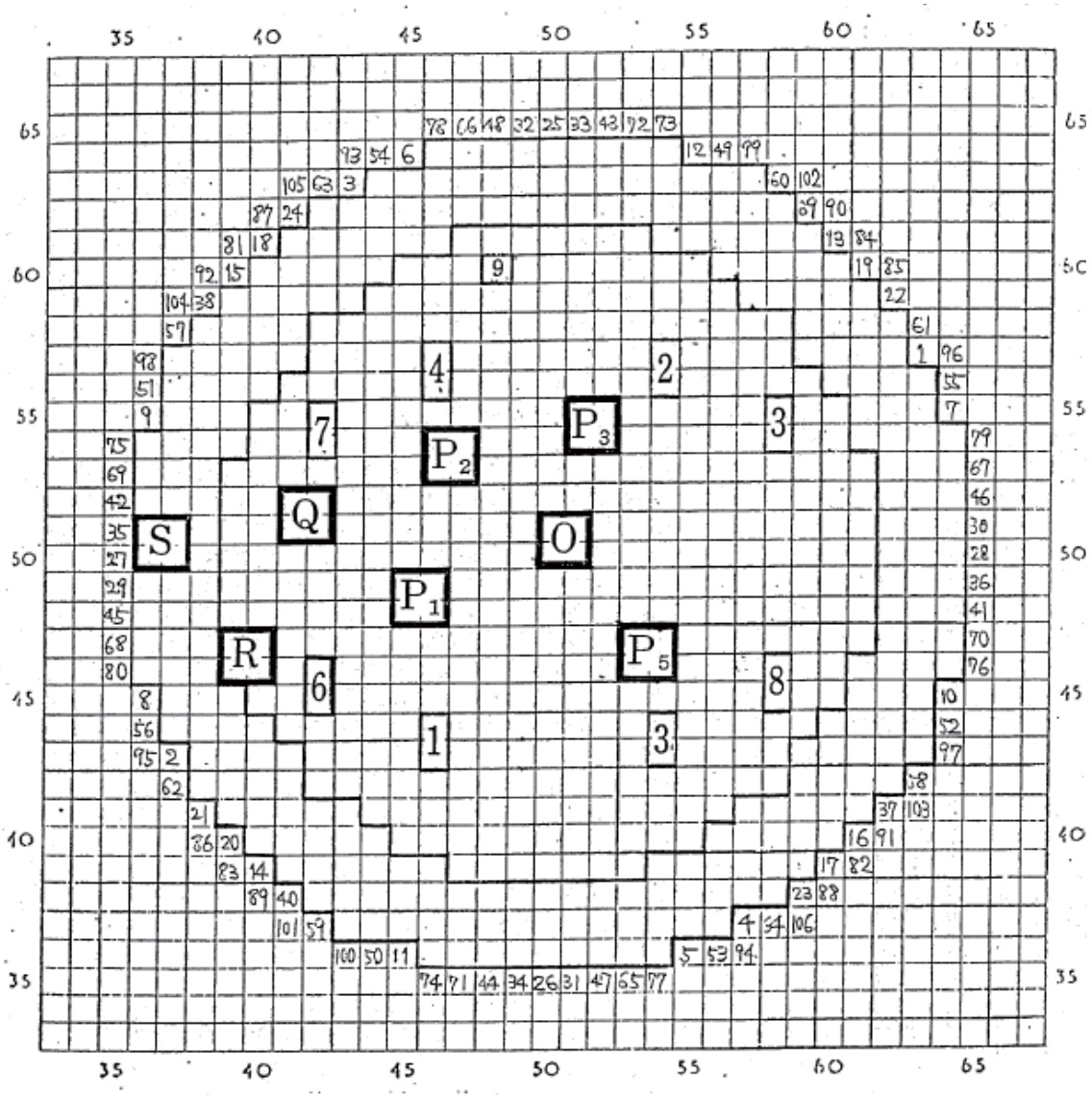
Table 3.2.11 Correction factors and corrected calculation values for control rod worth

CR	Position	Streaming	Transport	UF	175g	Corrected Cal. (dk/k)
Nat.	O	1.003	1.012	1.004	1.003	8.084e-3
	P1	1.003	1.015	1.004	1.003	6.862e-3
	P2	1.003	1.016	1.005	1.003	6.768e-3
	Q	1.003	1.022	1.005	1.002	4.600e-3
	R	1.002	1.029	1.007	1.003	3.052e-3
30%	O	1.004	1.016	1.004	1.001	9.929e-3
	P1	1.004	1.019	1.004	1.002	8.399e-3
	Q	1.004	1.025	1.005	1.001	5.622e-3
80%	O	1.006	1.019	1.003	0.999	1.524e-2
	P1	1.006	1.021	1.004	0.999	1.275e-2
	P2	1.006	1.021	1.004	0.999	1.256e-2
	Q	1.005	1.026	1.004	0.998	8.460e-3
90%	O	1.006	1.019	1.003	0.999	1.615e-2
	P2	1.006	1.021	1.004	0.999	1.348e-2
	Q	1.006	1.025	1.004	0.999	8.931e-3

Table 3.2.12 C/E values of control rod worth

CR	Position	Cal. ($)	Exp. ($)	C/E	C/E (J33)
Nat.	O	2.321	2.225 (0.013*)	1.043	1.037
	P1	1.970	1.891 (0.013)	1.042	1.036
	P2	1.943	1.858 (0.013)	1.046	1.039
	Q	1.321	1.284 (0.014)	1.029	1.026
	R	0.876	0.861 (0.014)	1.017	1.014
30%	O	2.851	2.739 (0.014)	1.041	1.034
	P1	2.412	2.319 (0.015)	1.040	1.033
	Q	1.614	1.576 (0.013)	1.024	1.020
80%	O	4.377	4.230 (0.018)	1.035	1.027
	P1	3.661	3.534 (0.016)	1.036	1.029
	P2	3.607	3.495 (0.016)	1.032	1.025
	Q	2.429	2.347 (0.013)	1.035	1.031
90%	O	4.637	4.522 (0.019)	1.025	1.018
	P2	3.814	3.724 (0.016)	1.024	1.017
	Q	2.564	2.499 (0.014)	1.026	1.022

* Relative experimental uncertainty



*Cited from JNC TN9400 2003-009

Fig. 3.2.6 Core specification of MZC

3.2.7 反応率分布（箔による測定）

反応率分布は、例えばPu-239の核分裂反応についてはF49というように記述することとする（一文字目は反応の種類を示しており、核分裂反応はF、捕獲反応はCが対応する。二文字目は核種を示しており、ウランが2、プルトニウムが4となる。三文字目は同位体を示しており、質量数の一桁目に対応する）。

放射箔により測定された反応率分布については、炉心の径方向に対して測定されたものを解析対象とした。軸方向に対する測定データも存在するが、IRPhEPハンドブックには「軸方向の分布を計算する場合には炉心内の（運転用）制御棒を考慮しなければならない」という記述があった（HB/295p）ため、対象から除外した（実験解析では運転用制御棒を燃料と置換して扱っている）[8]。なお、MZBについては径ブランケット領域が同一組成であるMZB/3の測定データを対象とした。

実験値は、MZAについてはHB/169pに、MZB/3についてはHB/214pに記載されている。なお、IRPhEPハンドブックにはMZAのY=760.0mmにおけるC28に対する実験値が1.1037、MZBのY=434mmにおけるC28実験値が0.8814と記載されているが、これらは対称位置の実験値と大きく異なっている。そこで、これらについては記載ミスと判断し、実験値をそれぞれ0.1037、0.8014と修正した（他のデータの類推から小数点第二位までを対称位置のデータに合わせた）。

IRPhEPハンドブックに記載されている反応率実験値は箔位置相当のものであるが、計算では単位燃料格子を均質として扱うため反応率は格子平均値として得られる。従って、実験値と計算値の比較を行う場合には、実験値を格子平均値相当に焼き直す必要がある。そのための（実験値に対する）補正値がMOZART実験当時に実験と計算の両面から求められており、IRPhEPハンドブックに記載されている[9]。

はじめにMZAでの測定データに対する補正値を整理する。F25に対しては、その補正量は小さく、炉心領域の外側位置とブランケット領域において、実験誤差として0.5%程度を計上すれば良いとの記載がある（HB/168p）。C28に対しては、径ブランケット領域で+7.0%、炉心領域の径ブランケットに近い位置で-2.1%という補正値が与えられている（HB/167p）。ただし、この炉心領域の径ブランケットに近い位置に対する補正値については、MTN/24に記載されている実験データを詳細に観察したところ、単位格子内の異なる位置での反応率測定値に大きなばらつきは見られていない（MTN/24、Table 9）ことから、今回の実験解析では考慮しないこととした。F28に対しては、補正値を実験、計算の両面から評価したもののばらつきが大きいことから、補正はせずに炉心領域の外側位置とブランケット領域において実験誤差を3%程度増加させることが推奨されている（HB/168p）。この3%という誤差であるが、例えば径ブランケットの外側に位置するセルで補正値として1.19が実験から得られていることを踏まえると、かなり小さいものと考えら

[8]以前のARTECHデータに基づく解析[1)]では軸方向の分布も対象としていたが、運転用制御棒を解析で模擬していない（上部軸ブランケット部に設置されているボロン吸収体を無視している）ため、軸上部で反応率を過大評価し、軸下部では逆に過小評価する傾向が見られていた。

[9]実験においては、放射箔を単位燃料格子内の複数の位置に設置して格子平均の反応率を求め、格子内測定位置における反応率の格子平均値に対する比を得ている。

れる。

MZB/3 については、HB/211p の Table 1.102 に補正値が整理されている。ブランケット領域については、組成依存、位置依存で与えられているが、今回の解析では天然ウラン組成に対するものを、ブランケット領域一律に用いた。

Table 3.2.13 に、今回の解析における箔を用いた反応率分布の実験値に対する補正値をまとめる。

Table 3.2.13 Correction factors for reaction rate experimental values measured by a radiation foil

Core	Region	Correction factors		
		F25	F28	C28
MZA	Core	1.00	1.00	1.00
	Blanket	1.00 (0.005*)	1.00 (0.030)	1.07 (0.015)
MZB/3	Inner core	1.00	1.00	1.00
	Outer core	1.00 (0.005)	0.96 (0.006)	1.00 (0.005)
	Blanket	1.00 (0.005)	0.96 (0.016)	1.02 (0.009)

* Additional uncertainties due to the corrections

はじめに、反応率分布に対するストリーミング補正、輸送補正、超微細群補正、詳細群補正を評価した。MZA に対する結果を **Table 3.2.14** から **3.2.16** に、MZB/3 に対する結果を **Table 3.2.17** から **3.2.19** に、それぞれ示す。

Table 3.2.14 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZA in the foil measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.425	1.000	0.994	1.000	1.000
	10.851	1.000	0.995	1.000	1.000
	16.276	1.000	0.994	1.000	1.000
Core	21.702	1.000	0.996	1.000	1.000
	27.127	1.000	0.999	1.001	1.001
	32.552	1.000	0.998	1.001	1.001
	37.978	1.001	1.017	1.002	1.002
	43.403	1.001	1.018	1.002	1.002
	48.829	1.002	1.035	1.004	1.001
	54.254	1.005	0.834	1.005	1.000
Blanket	59.679	1.007	0.903	1.007	1.000
	65.105	1.009	0.933	1.011	1.002
	70.530	1.012	0.930	1.015	1.004
	75.956	1.015	1.069	1.019	1.007

Table 3.2.15 Correction factors for uranium-235 fission rate distribution of MZA in the foil measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.425	1.000	0.996	1.000	1.000
	10.851	1.000	0.996	1.000	1.000
	16.276	1.000	0.995	1.000	1.000
Core	21.702	1.000	0.995	1.000	1.001
	27.127	1.001	0.995	1.001	1.001
	32.552	1.001	0.995	1.002	1.002
	37.978	1.002	0.992	1.003	1.003
	43.403	1.002	0.997	1.007	1.006
	48.829	1.002	0.961	1.015	1.011
	54.254	1.004	0.974	1.022	1.014
Blanket	59.679	1.006	0.981	1.028	1.018
	65.105	1.009	0.988	1.034	1.022
	70.530	1.012	0.989	1.039	1.025
	75.956	1.016	1.001	1.043	1.029

Table 3.2.16 Correction factors for uranium-238 capture rate distribution of MZA in the foil measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.425	1.000	0.996	1.000	1.000
	10.851	1.000	0.996	1.000	1.000
	16.276	1.000	0.995	1.000	1.000
Core	21.702	1.000	0.995	1.000	1.001
	27.127	1.001	0.995	1.000	1.001
	32.552	1.001	0.995	1.000	1.002
	37.978	1.002	0.991	1.001	1.004
	43.403	1.002	0.995	1.000	1.006
	48.829	1.002	0.968	1.002	1.010
	54.254	1.004	0.980	1.002	1.012
Blanket	59.679	1.006	0.982	1.002	1.015
	65.105	1.009	0.986	1.003	1.019
	70.530	1.013	0.986	1.004	1.022
	75.956	1.017	0.999	1.001	1.024

Table 3.2.17 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZB/3 in the foil measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
	-108.510	1.012	1.074	1.019	1.007
	-103.080	1.009	1.051	1.014	1.004
Blanket	-97.657	1.007	0.922	1.010	1.003
	-92.232	1.005	0.896	1.007	1.002
	-86.806	1.003	0.906	1.004	1.002
	-81.381	1.000	1.036	1.003	1.003
	-75.956	0.999	1.006	1.002	1.003
Outer core	-70.530	0.999	1.045	1.002	1.003
	-65.105	0.999	1.017	1.001	1.002
	-59.679	0.999	1.012	1.001	1.001
	-54.254	0.999	0.998	1.001	1.000
	-48.829	1.000	1.002	1.000	1.000
	-43.403	1.000	1.001	1.000	1.000
	-32.552	1.000	1.002	1.000	1.000
	-21.702	1.000	1.003	1.000	1.000
	-10.851	1.000	1.002	1.000	1.000
Inner core	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	10.851	1.000	1.002	1.000	1.000
	21.702	1.000	1.003	1.000	1.000
	32.552	1.000	1.002	1.000	1.000
	43.403	1.000	1.001	1.000	1.000
	48.829	0.999	1.002	1.000	1.000
	54.254	0.999	0.998	1.001	1.000
	59.679	0.999	1.012	1.001	1.001
	65.105	0.999	1.017	1.001	1.002
Outer core	70.530	0.999	1.045	1.002	1.003
	75.956	0.999	1.006	1.002	1.003
	81.381	1.000	1.036	1.003	1.003
	86.806	1.003	0.906	1.004	1.002
Blanket	92.232	1.005	0.896	1.007	1.002
	103.080	1.009	1.051	1.014	1.004
	108.510	1.012	1.074	1.019	1.007

Table 3.2.18 Correction factors for uranium-235 fission rate distribution of MZB/3 in the foil measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
	-108.510	1.012	1.026	1.041	1.025
	-103.080	1.009	1.009	1.037	1.021
Blanket	-97.657	1.006	1.003	1.031	1.018
	-92.232	1.003	0.996	1.026	1.015
	-86.806	1.001	0.991	1.020	1.012
	-81.381	1.000	0.981	1.013	1.008
	-75.956	1.000	1.022	1.005	1.004
Outer core	-70.530	1.000	1.011	1.002	1.002
	-65.105	0.999	1.010	1.001	1.001
	-59.679	0.999	1.004	1.001	1.000
	-54.254	0.999	1.004	1.000	1.000
	-48.829	0.999	1.003	1.000	1.000
	-43.403	1.000	1.002	1.000	1.000
	-32.552	1.000	1.001	1.000	1.000
	-21.702	1.000	1.001	1.000	1.000
	-10.851	1.000	1.000	1.000	1.000
Inner core	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	10.851	1.000	1.000	1.000	1.000
	21.702	1.000	1.001	1.000	1.000
	32.552	1.000	1.001	1.000	1.000
	43.403	1.000	1.002	1.000	1.000
	48.829	0.999	1.003	1.000	1.000
	54.254	0.999	1.004	1.000	1.000
	59.679	0.999	1.004	1.001	1.000
	65.105	0.999	1.010	1.001	1.001
Outer core	70.530	1.000	1.011	1.002	1.002
	75.956	1.000	1.022	1.005	1.004
	81.381	1.000	0.981	1.013	1.009
	86.806	1.001	0.991	1.020	1.012
Blanket	92.232	1.003	0.996	1.026	1.015
	97.657	1.006	1.003	1.032	1.018
	103.080	1.009	1.010	1.037	1.021
	108.510	1.012	1.026	1.042	1.024

Table 3.2.19 Correction factors for uranium-238 capture rate distribution of MZB/3 in the foil measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
	-108.510	1.013	1.023	1.003	1.021
	-103.080	1.009	1.005	1.004	1.018
Blanket	-97.657	1.006	1.004	1.003	1.014
	-92.232	1.003	1.000	1.003	1.011
	-86.806	1.001	0.997	1.002	1.009
	-81.381	1.000	0.988	1.002	1.007
	-75.956	1.000	1.020	1.001	1.003
Outer core	-70.530	1.000	1.009	1.001	1.002
	-65.105	0.999	1.009	1.001	1.001
	-59.679	0.999	1.004	1.001	1.000
	-54.254	0.999	1.004	1.001	1.000
	-48.829	0.999	1.003	1.000	1.000
	-43.403	1.000	1.002	1.000	1.000
	-32.552	1.000	1.001	1.000	1.000
	-10.851	1.000	1.000	1.000	1.000
Inner core	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	10.851	1.000	1.000	1.000	1.000
	21.702	1.000	1.001	1.000	1.000
	32.552	1.000	1.001	1.000	1.000
	43.403	0.999	1.003	1.000	1.000
	48.829	0.999	1.003	1.000	1.000
	54.254	0.999	1.004	1.001	1.000
	59.679	0.999	1.004	1.001	1.000
	65.105	0.999	1.009	1.001	1.001
Outer core	70.530	1.000	1.009	1.001	1.002
	75.956	1.000	1.020	1.001	1.003
	81.381	1.000	0.988	1.002	1.007
	86.806	1.001	0.997	1.002	1.009
Blanket	92.232	1.003	1.000	1.003	1.011
	97.657	1.006	1.003	1.003	1.014
	103.080	1.009	1.005	1.004	1.017
	108.510	1.013	1.023	1.003	1.020

次に、補正後計算値から C/E 値を得た。C/E 値を、MZA について **Table 3.2.20** に、MZB/3 について **Table 3.2.21** に示す。なお、本報告における反応率分布の解析では炉心中心位置で C/E 値が 1.0 となるように反応率の規格化を行っている。

Table 3.2.20　C/E values for reaction rate distribution of MZA in the foil measurement

Region	Y [cm]	F28	F25	C28
	-75.956	1.054 (0.056*)	1.038 (0.033)	1.002 (0.018)
	-70.530	0.924 (0.052)	1.029 (0.033)	0.975 (0.017)
Blanket	-65.105	1.011 (0.050)	1.038 (0.033)	0.991 (0.017)
	-59.679	1.037 (0.045)	1.027 (0.033)	0.997 (0.017)
	-54.254	1.007 (0.040)	1.017 (0.009)	0.973 (0.017)
	-48.829	1.228 (0.036)	0.996 (0.009)	0.968 (0.017)
	-43.403	0.986 (0.014)	1.004 (0.005)	1.021 (0.006)
	-37.978	0.999 (0.012)	0.992 (0.005)	0.992 (0.004)
	-32.552	0.986 (0.010)	0.997 (0.005)	0.997 (0.004)
	-27.127	0.994 (0.008)	0.993 (0.004)	1.013 (0.004)
	-21.702	0.997 (0.008)	0.997 (0.004)	1.000 (0.004)
	-16.276	0.988 (0.008)	1.002 (0.004)	0.992 (0.004)
	-10.851	0.998 (0.012)	0.998 (0.003)	1.000 (0.004)
	-5.425	0.997 (0.011)	0.995 (0.003)	1.011 (0.004)
Core	0.000	1.000 (0.011)	1.000 (0.003)	1.000 (0.004)
	5.425	0.982 (0.011)	0.995 (0.003)	0.987 (0.004)
	10.851	0.996 (0.009)	0.995 (0.003)	0.993 (0.004)
	16.276	0.986 (0.008)	0.995 (0.003)	1.007 (0.004)
	21.702	0.983 (0.008)	0.991 (0.003)	0.993 (0.004)
	27.127	0.992 (0.008)	0.994 (0.004)	0.981 (0.004)
	32.552	0.979 (0.008)	0.992 (0.004)	0.988 (0.004)
	37.978	0.995 (0.011)	0.987 (0.005)	1.004 (0.004)
	43.403	0.982 (0.013)	0.997 (0.005)	1.005 (0.006)
	48.829	1.219 (0.036)	0.994 (0.009)	0.942 (0.017)
	54.254	0.984 (0.040)	1.015 (0.009)	0.964 (0.017)
Blanket	59.679	1.035 (0.045)	1.019 (0.033)	0.967 (0.017)
	65.105	0.977 (0.050)	1.041 (0.033)	0.962 (0.017)
	70.530	0.929 (0.052)	1.012 (0.033)	0.966 (0.017)
	75.956	1.014 (0.056)	1.009 (0.033)	0.966 (0.018)

* Relative experimental error

Table 3.2.21 C/E values for reaction rate distribution of MZB/3 in the foil measurement

Region	Y [cm]	F28	F25	C28
	-108.510	0.953 (0.038*)	0.986 (0.033)	1.002 (0.011)
	-103.080	1.008 (0.037)	0.995 (0.032)	1.004 (0.011)
Blanket	-97.657	0.955 (0.037)	1.006 (0.032)	1.006 (0.011)
	-92.232	1.002 (0.037)	1.006 (0.031)	1.001 (0.010)
	-86.806	1.045 (0.026)	0.996 (0.010)	0.990 (0.010)
	-81.381	1.186 (0.027)	0.983 (0.009)	0.963 (0.010)
	-75.956	0.940 (0.014)	0.986 (0.008)	0.985 (0.007)
Outer core	-70.530	0.983 (0.011)	0.971 (0.009)	0.976 (0.006)
	-65.105	0.959 (0.011)	0.979 (0.008)	0.975 (0.006)
	-59.679	0.994 (0.004)	0.986 (0.004)	0.980 (0.004)
	-54.254	0.988 (0.004)	0.991 (0.004)	0.988 (0.004)
	-48.829	0.993 (0.004)	0.994 (0.004)	0.991 (0.004)
	-43.403	0.995 (0.004)	0.999 (0.003)	1.011 (0.004)
	-32.552	0.998 (0.004)	1.005 (0.003)	1.000 (0.004)
	-21.702	0.998 (0.004)	1.003 (0.003)	-
	-10.851	1.001 (0.005)	1.004 (0.003)	1.004 (0.003)
Inner core	0.000	1.000 (0.004)	1.000 (0.003)	1.000 (0.003)
	10.851	0.997 (0.004)	1.003 (0.003)	1.001 (0.003)
	21.702	1.007 (0.005)	1.001 (0.003)	1.003 (0.003)
	32.552	1.003 (0.004)	1.003 (0.003)	1.001 (0.004)
	43.403	1.003 (0.004)	1.005 (0.003)	1.001 (0.004)
	48.829	0.999 (0.005)	0.998 (0.004)	0.999 (0.004)
	54.254	0.996 (0.004)	0.999 (0.004)	0.992 (0.004)
	59.679	1.005 (0.004)	0.996 (0.004)	0.987 (0.004)
	65.105	0.971 (0.011)	0.986 (0.008)	0.981 (0.006)
Outer core	70.530	0.995 (0.011)	0.983 (0.009)	0.985 (0.006)
	75.956	0.957 (0.014)	0.990 (0.008)	0.995 (0.007)
	81.381	1.190 (0.028)	0.984 (0.009)	0.973 (0.010)
	86.806	1.042 (0.027)	0.998 (0.010)	0.996 (0.010)
Blanket	92.232	0.973 (0.037)	0.987 (0.031)	0.994 (0.010)
	97.657	-	0.976 (0.032)	0.988 (0.011)
	103.080	0.973 (0.038)	0.942 (0.032)	0.962 (0.011)
	108.510	0.916 (0.039)	0.903 (0.033)	0.932 (0.011)

* Relative experimental error

炉心領域およびブランケット領域それぞれについて、各反応率分布のC/E値を整理したものを**Table 3.2.22**に示す。なお、異なる領域に隣接する格子位置では、格子平均値を得るための補正に起因する実験値の不確かさが大きいと考えられるため、そのような位置のC/E値を除外して整理し直したものを括弧内に示す。

MZAの炉心領域、MZB/3の内側炉心領域については、F28、F25は2%の幅で、C28は4%の幅でC/E値が分布している。また、MZB/3の外側炉心領域については、全ての反応について、内側炉心と比較して僅かな過小評価が観察される。

Table 3.2.22　Summary of C/E values for reaction rate distribution obtained by the foil measurement

Core	Region	F28	F25	C28
MZA	Core	0.979-1.000	0.987-1.004	0.981-1.021
		(0.979-1.000)	(0.987-1.002)	(0.981-1.013)
	Blanket	0.924-1.228	0.994-1.041	0.942-1.002
		(0.924-1.037)	(1.012-1.041)	(0.962-0.997)
MZB/3	Inner core	0.988-1.007	0.986-1.005	0.980-1.011
		(0.988-1.007)	(0.991-1.005)	(0.988-1.011)
	Outer core	0.940-0.995	0.971-0.990	0.975-0.995
		(0.983-0.995)	(0.971-0.983)	(0.976-0.985)
	Blanket	0.916-1.190	0.903-1.006	0.932-1.006
		(0.955-1.045)	(0.942-1.006)	(0.962-1.006)

3.2.8 反応率分布（核分裂検出器による測定）

核分裂検出器により測定された反応率分布については、MZA、MZB、MZC で測定されている。はじめに制御棒が挿入されていない体系である MZA、MZB の結果を示す。

MZB については、MZB/1、/2、/3 の各炉心について反応率分布が測定されている。本解析ではその全てについて、「Shield Room Axis」と呼ばれる Y 軸方向の分布を対象とした（ただし、セクター側のみ）[10] 。MZA での実験値は HB/177,181,184p に、MZB/3 での実験値は HB/192p から 197p に記載されている。今回は、F49、F28 については全ての炉心で、F40 については MZA と MZB/3 のみで、F25 については MZB/1 と MZB/2 で、それぞれ解析を行った。

MZA での F28 を除いて、MZA、MZB の全ての反応率分布に対する実験値は、Element の中心位置と関係なく、かつ Element の幅よりも細かい区間で与えられている。そこで、Element 平均値として与えられる計算値との比較を容易にするため、各 Element の中心位置での反応率実験値を三次のスプライン関数で内挿して求めた。なお、MZA 炉心は X 軸について対称と見做せるため、Y の絶対値が同一となる Y>0 及び Y<0 における二点の平均値を実験値とした。

測定では、核分裂検出器は隣接する単位燃料格子の境界にあって互いに隣接しあう二枚のナトリウムプレートの位置に挿入されている。従って、核分裂検出器に含まれる重核種の共鳴自己遮蔽効果に対する燃料格子に含まれる重核種からの寄与は小さいと考えられる。また、核分裂検出器に使用されている重核種はごく微量である。以上のことを踏まえ、実験解析では検出器断面積として無限希釈断面積を用いることとした。

はじめに、反応率分布に対するストリーミング補正、輸送補正、超微細群補正、詳細群補正を評価した。補正値を、MZA について **Table 3.2.23** から **3.2.25** に、MZB/1 について **Table 3.2.26** から **3.2.28** に、MZB/2 について **Table 3.2.29** から **3.2.31** に、MZB/3 について **Table 3.2.32** から **3.2.34** に、それぞれ示す。

[10] なお、MZA では Shield Room Axis のみが測定された。

Table 3.2.23 Correction factors for plutonium-239 fission rate distribution of MZA in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
	1.356	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.425	1.000	0.996	1.000	1.000
	10.851	1.000	0.996	1.000	1.000
	16.276	1.000	0.995	1.000	1.000
Core	21.702	1.000	0.996	1.001	1.000
	27.127	1.001	0.996	1.001	1.001
	32.552	1.001	0.996	1.002	1.001
	37.978	1.002	0.994	1.004	1.002
	43.403	1.002	0.998	1.009	1.004
	48.829	1.002	0.960	1.021	1.012
	54.254	1.004	0.969	1.031	1.018
Blanket	59.679	1.006	0.977	1.040	1.025
	65.105	1.009	0.986	1.048	1.034
	70.530	1.012	0.987	1.054	1.044
	75.956	1.016	1.000	1.056	1.048

Table 3.2.24 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZA in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
	1.356	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.425	1.000	0.994	1.000	1.000
	10.851	1.000	0.995	1.000	1.000
	16.276	1.000	0.994	1.000	1.000
Core	21.702	1.000	0.996	1.000	1.000
	27.127	1.000	0.999	1.001	1.001
	32.552	1.000	0.998	1.001	1.001
	37.978	1.001	1.017	1.002	1.002
	43.403	1.001	1.018	1.002	1.002
	48.829	1.002	1.035	1.003	1.000
	54.254	1.005	0.836	1.004	0.999
Blanket	59.679	1.007	0.903	1.007	0.999
	65.105	1.009	0.934	1.011	1.000
	70.530	1.012	0.929	1.015	1.003
	75.956	1.015	1.067	1.019	1.005

Table 3.2.25 Correction factors for plutonium-240 fission rate distribution of MZA in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
	1.356	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.425	1.000	0.995	1.000	1.000
	10.851	1.000	0.995	1.000	1.000
	16.276	1.000	0.995	1.000	1.000
Core	21.702	1.000	0.996	1.000	1.000
	27.127	1.000	0.998	1.001	1.001
	32.552	1.001	0.998	1.001	1.001
	37.978	1.001	1.007	1.002	1.001
	43.403	1.001	1.006	1.002	1.001
	48.829	1.002	1.009	1.003	1.000
	54.254	1.004	0.924	1.004	0.999
Blanket	59.679	1.006	0.943	1.006	1.000
	65.105	1.009	0.958	1.009	1.002
	70.530	1.011	0.956	1.012	1.007
	75.956	1.015	0.997	1.016	1.013

Table 3.2.26 Correction factors for plutonium-239 fission rate distribution of MZB/1 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
Inner core	0.00	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.43	1.000	1.000	1.000	1.000
	10.85	1.000	1.000	1.000	1.000
	16.28	1.000	1.000	1.000	1.000
	21.70	1.000	1.000	1.000	1.000
	27.13	1.000	1.001	1.000	1.000
	32.55	1.000	1.001	1.000	1.000
	37.98	1.000	1.001	1.000	1.000
	43.40	1.000	1.001	1.000	0.999
	48.83	1.000	1.002	1.000	0.999
	54.25	1.000	1.003	1.000	0.999
	59.68	1.000	1.004	1.000	0.999
Outer core	65.10	1.001	1.009	1.000	1.000
	70.53	1.001	1.012	1.000	1.000
	75.96	1.002	1.012	1.001	1.001
Blanket	81.38	1.002	0.992	1.005	1.004
	86.81	1.003	0.990	1.008	1.007
	92.23	1.004	0.991	1.012	1.011
	97.66	1.005	0.991	1.015	1.017
	103.08	1.007	0.995	1.018	1.024
	108.51	1.008	1.010	1.021	1.021

Table 3.2.27 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZB/1 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
Inner core	0.00	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.43	1.000	1.002	1.000	1.000
	10.85	1.000	1.002	1.000	1.000
	16.28	1.000	1.001	1.000	1.000
	21.70	1.000	1.002	1.000	1.000
	27.13	1.000	1.002	1.000	1.000
	32.55	1.000	1.002	1.000	1.000
	37.98	1.000	1.001	1.000	1.000
	43.40	1.000	1.001	1.000	1.000
	48.83	1.000	1.002	1.000	1.000
	54.25	1.000	0.997	1.000	1.000
	59.68	1.000	1.011	1.000	1.000
Outer core	65.10	1.000	1.015	1.000	1.002
	70.53	1.001	1.042	1.000	1.002
	75.96	1.001	1.004	1.000	1.002
Blanket	81.38	1.002	1.030	1.000	0.998
	86.81	1.003	0.905	1.001	0.995
	92.23	1.004	0.892	1.002	0.993
	97.66	1.004	0.914	1.003	0.992
	103.08	1.005	1.038	1.005	0.992
	108.51	1.006	1.065	1.007	0.993

Table 3.2.28 Correction factors for uranium-235 fission rate distribution of MZB/1 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
Inner core	0.00	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.43	1.000	1.000	1.000	1.000
	10.85	1.000	1.000	1.000	1.000
	16.28	1.000	1.000	1.000	1.000
	21.70	1.000	1.000	1.000	1.000
	27.13	1.000	1.001	1.000	1.000
	32.55	1.000	1.001	1.000	1.000
	37.98	1.000	1.001	1.000	0.999
	43.40	1.000	1.002	1.000	0.999
	48.83	1.000	1.002	1.000	0.999
	54.25	1.000	1.003	1.000	0.999
	59.68	1.000	1.003	1.000	0.999
Outer core	65.10	1.001	1.009	1.000	1.000
	70.53	1.001	1.010	1.000	1.001
	75.96	1.002	1.013	1.001	1.002
Blanket	81.38	1.002	0.990	1.004	1.004
	86.81	1.003	0.993	1.006	1.007
	92.23	1.004	0.994	1.009	1.009
	97.66	1.005	0.996	1.012	1.011
	103.08	1.007	1.000	1.015	1.010
	108.51	1.008	1.014	1.019	1.006

Table 3.2.29 Correction factors for plutonium-239 fission rate distribution of MZB/2 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
Inner core	0.00	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.43	1.000	1.000	1.000	1.000
	10.85	1.000	1.000	1.000	1.000
	16.28	1.000	1.000	1.000	1.000
	21.70	1.000	1.001	1.000	1.000
	27.13	1.000	1.001	1.000	1.000
	32.55	1.000	1.001	1.000	1.000
	37.98	1.000	1.002	1.000	1.000
	43.40	1.000	1.002	1.000	0.999
	48.83	1.000	1.003	1.000	0.999
	54.25	1.000	1.003	1.000	0.999
	59.68	1.000	1.005	1.000	0.999
Outer core	65.10	1.000	1.010	0.999	1.000
	70.53	1.001	1.013	1.000	1.000
	75.96	1.001	1.014	1.001	1.001
Blanket	81.38	1.001	0.992	1.005	1.006
	86.81	1.003	0.989	1.009	1.011
	92.23	1.004	0.988	1.014	1.018
	97.66	1.006	0.990	1.018	1.028
	103.08	1.008	0.991	1.022	1.036
	108.51	1.009	1.001	1.023	1.032

Table 3.2.30 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZB/2 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
Inner core	0.00	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.43	1.000	1.002	1.000	1.000
	10.85	1.000	1.002	1.000	1.000
	16.28	1.000	1.001	1.000	1.000
	21.70	1.000	1.002	1.000	1.000
	27.13	1.000	1.002	1.000	1.000
	32.55	1.000	1.002	1.000	1.000
	37.98	1.000	1.002	1.000	1.000
	43.40	1.000	1.001	1.000	1.000
	48.83	1.000	1.002	1.000	1.000
	54.25	1.000	0.998	1.000	1.000
	59.68	1.000	1.012	1.000	1.000
Outer core	65.10	1.000	1.017	1.000	1.001
	70.53	1.000	1.045	1.000	1.002
	75.96	1.000	1.008	1.000	1.002
Blanket	81.38	1.001	1.026	1.000	0.998
	86.81	1.002	0.898	1.000	0.995
	92.23	1.004	0.870	1.001	0.992
	97.66	1.005	0.886	1.001	0.989
	103.08	1.006	1.030	1.002	0.988
	108.51	1.007	1.086	1.003	0.987

Table 3.2.31 Correction factors for uranium-235 fission rate distribution of MZB/2 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
Inner core	0.00	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.43	1.000	1.000	1.000	1.000
	10.85	1.000	1.000	1.000	1.000
	16.28	1.000	1.000	1.000	1.000
	21.70	1.000	1.001	1.000	1.000
	27.13	1.000	1.001	1.000	1.000
	32.55	1.000	1.001	1.000	1.000
	37.98	1.000	1.002	1.000	0.999
	43.40	1.000	1.002	1.000	0.999
	48.83	1.000	1.003	1.000	0.999
	54.25	1.000	1.003	1.000	0.999
	59.68	1.000	1.004	1.000	0.999
Outer core	65.10	1.000	1.010	1.000	1.000
	70.53	1.001	1.010	1.000	1.000
	75.96	1.001	1.014	1.001	1.002
Blanket	81.38	1.002	0.991	1.004	1.005
	86.81	1.003	0.992	1.007	1.007
	92.23	1.004	0.992	1.010	1.009
	97.66	1.006	0.995	1.014	1.010
	103.08	1.008	0.997	1.018	1.009
	108.51	1.010	1.009	1.022	1.005

Table 3.2.32 Correction factors for plutonium-239 fission rate distribution of MZB/3 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
Inner core	0.00	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.43	1.000	1.000	1.000	1.000
	10.85	1.000	1.000	1.000	1.000
	16.28	1.000	1.000	1.000	1.000
	21.70	1.000	1.001	1.000	1.000
	27.13	1.000	1.001	1.000	1.000
	32.55	1.000	1.001	1.000	1.000
	37.98	1.000	1.002	1.000	1.000
	43.40	1.000	1.002	1.000	1.000
	48.83	0.999	1.003	1.000	1.000
	54.25	0.999	1.003	1.000	1.000
	59.68	0.999	1.005	1.001	1.000
Outer core	65.10	0.999	1.010	1.001	1.001
	70.53	1.000	1.012	1.002	1.001
	75.96	1.000	1.020	1.006	1.003
Blanket	81.38	1.000	0.980	1.018	1.010
	86.81	1.001	0.985	1.028	1.015
	92.23	1.004	0.990	1.037	1.022
	97.66	1.007	0.996	1.045	1.031
	103.08	1.010	1.000	1.051	1.039
	108.51	1.012	1.013	1.050	1.036

Table 3.2.33 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZB/3 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
Inner core	0.00	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.43	1.000	1.002	1.000	1.000
	10.85	1.000	1.002	1.000	1.000
	16.28	1.000	1.001	1.000	1.000
	21.70	1.000	1.003	1.000	1.000
	27.13	1.000	1.002	1.000	1.000
	32.55	1.000	1.002	1.000	1.000
	37.98	1.000	1.002	1.000	1.000
	43.40	1.000	1.001	1.000	1.000
	48.83	1.000	1.002	1.000	1.000
	54.25	0.999	0.998	1.001	1.000
	59.68	0.999	1.012	1.001	1.001
Outer core	65.10	0.999	1.016	1.001	1.002
	70.53	0.999	1.045	1.002	1.003
	75.96	0.999	1.006	1.002	1.003
Blanket	81.38	1.000	1.035	1.003	1.002
	86.81	1.003	0.907	1.004	1.000
	92.23	1.005	0.896	1.006	1.000
	97.66	1.007	0.923	1.010	1.000
	103.08	1.009	1.047	1.015	1.001
	108.51	1.012	1.065	1.019	1.001

Table 3.2.34 Correction factors for plutonium-240 fission rate distribution of MZB/3 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
Inner core	0.00	1.000	1.000	1.000	1.000
	5.43	1.000	1.001	1.000	1.000
	10.85	1.000	1.001	1.000	1.000
	16.28	1.000	1.000	1.000	1.000
	21.70	1.000	1.001	1.000	1.000
	27.13	1.000	1.001	1.000	1.000
	32.55	1.000	1.001	1.000	1.000
	37.98	1.000	1.001	1.000	1.000
	43.40	1.000	1.001	1.000	1.000
	48.83	1.000	1.002	1.000	1.000
	54.25	0.999	1.001	1.001	1.001
	59.68	0.999	1.010	1.001	1.001
Outer core	65.10	0.999	1.013	1.001	1.002
	70.53	0.999	1.029	1.002	1.003
	75.96	0.999	1.008	1.002	1.003
Blanket	81.38	1.000	1.020	1.003	1.002
	86.81	1.002	0.966	1.004	1.001
	92.23	1.004	0.959	1.006	1.001
	97.66	1.007	0.968	1.008	1.002
	103.08	1.009	1.002	1.011	1.004
	108.51	1.012	1.010	1.015	1.007

次に、実験値と補正後計算値および C/E 値を、MZA について **Table 3.2.35** から **3.2.37** に、MZB/1 について **Table 3.2.38** から **3.2.40** に、MZB/2 について **Table 3.2.41** から **3.2.43** に、MZB/3 について **Table 3.2.44** から **3.2.46** に、それぞれ示す。

Table 3.2.35　C/E values of plutonium-239 fission rate distribution of MZA in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Exp.	Cal.	C/E
Core	1.356	1.0021	1.0021	1.000
	5.425	0.9885	0.9899	1.001
	10.851	0.9612	0.9581	0.997
	16.276	0.9059	0.9066	1.001
	21.702	0.8420	0.8383	0.996
	27.127	0.7585	0.7558	0.996
	32.552	0.6693	0.6649	0.993
	37.978	0.5762	0.5719	0.993
	43.403	0.5019	0.4962	0.989
Blanket	48.829	0.4676	0.4453	0.952
	54.254	0.4084	0.3871	0.948
	59.679	0.3420	0.3215	0.940
	65.105	0.2782	0.2596	0.933
	70.530	0.2291	0.2074	0.905
	75.956	0.1938	0.1732	0.894

Table 3.2.36 C/E values of uranium-238 fission rate distribution of MZA in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Exp.	Cal.	C/E
	1.356	1.0000	1.0000	1.000
	5.425	0.9917	0.9861	0.994
	10.851	0.9592	0.9540	0.995
	16.276	0.8994	0.8995	1.000
Core	21.702	0.8282	0.8285	1.000
	27.127	0.7402	0.7391	0.999
	32.552	0.6301	0.6299	1.000
	37.978	0.5056	0.5135	1.016
	43.403	0.3627	0.3673	1.013
	48.829	0.1868	0.1911	1.023
	54.254	0.0931	0.0793	0.852
Blanket	59.679	0.0502	0.0459	0.914
	65.105	0.0295	0.0265	0.898
	70.530	0.0174	0.0152	0.875
	75.956	0.0102	0.0100	0.977

Table 3.2.37 C/E values of plutonium-240 fission rate distribution of MZA in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Exp.	Cal.	C/E
	1.356	1.0013	1.0013	1.000
	5.425	0.9864	0.9881	1.002
	10.851	0.9565	0.9557	0.999
	16.276	0.9037	0.9016	0.998
Core	21.702	0.8322	0.8298	0.997
	27.127	0.7449	0.7403	0.994
	32.552	0.6366	0.6335	0.995
	37.978	0.5164	0.5182	1.003
	43.403	0.3925	0.3851	0.981
	48.829	0.2440	0.2386	0.978
	54.254	0.1476	0.1350	0.915
Blanket	59.679	0.0918	0.0865	0.942
	65.105	0.0593	0.0556	0.937
	70.530	0.0386	0.0352	0.911
	75.956	0.0252	0.0230	0.914

Table 3.2.38 C/E values of plutonium-239 fission rate distribution of MZB/1 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Exp.	Cal.	C/E
Inner core	0.00	1.0000	1.0000	1.000
	5.43	0.9986	0.9978	0.999
	10.85	0.9918	0.9896	0.998
	16.28	0.9785	0.9754	0.997
	21.70	0.9582	0.9558	0.997
	27.13	0.9320	0.9304	0.998
	32.55	0.9014	0.8994	0.998
	37.98	0.8674	0.8628	0.995
	43.40	0.8280	0.8209	0.991
	48.83	0.7778	0.7738	0.995
	54.25	0.7191	0.7211	1.003
	59.68	0.6722	0.6634	0.987
Outer core	65.10	0.6079	0.6008	0.988
	70.53	0.5417	0.5308	0.980
	75.96	0.4700	0.4591	0.977
Blanket	81.38	0.3983	0.3886	0.976
	86.81	0.3247	0.3180	0.979
	92.23	0.2630	0.2538	0.965
	97.66	0.2110	0.2004	0.950
	103.08	0.1699	0.1618	0.952
	108.51	0.1578	0.1485	0.941

Table 3.2.39 C/E values of uranium-238 fission rate distribution of MZB/1 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Exp.	Cal.	C/E
Inner core	0.00	1.0000	1.0000	1.000
	5.43	0.9976	0.9997	1.002
	10.85	0.9909	0.9917	1.001
	16.28	0.9794	0.9763	0.997
	21.70	0.9627	0.9585	0.996
	27.13	0.9404	0.9332	0.992
	32.55	0.9117	0.9039	0.991
	37.98	0.8767	0.8696	0.992
	43.40	0.8370	0.8320	0.994
	48.83	0.7952	0.7937	0.998
	54.25	0.7568	0.7522	0.994
	59.68	0.7346	0.7309	0.995
Outer core	65.10	0.7316	0.7179	0.981
	70.53	0.6519	0.6496	0.997
	75.96	0.5063	0.4840	0.956
Blanket	81.38	0.2749	0.2696	0.981
	86.81	0.1439	0.1270	0.883
	92.23	0.0783	0.0688	0.878
	97.66	0.0472	0.0398	0.842
	103.08	0.0281	0.0263	0.937
	108.51	0.0175	0.0158	0.905

Table 3.2.40 C/E values of uranium-235 fission rate distribution of MZB/1 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Exp.	Cal.	C/E
Inner core	0.00	1.0000	1.0000	1.000
	5.43	0.9980	0.9977	1.000
	10.85	0.9904	0.9894	0.999
	16.28	0.9771	0.9752	0.998
	21.70	0.9578	0.9553	0.997
	27.13	0.9324	0.9295	0.997
	32.55	0.9008	0.8979	0.997
	37.98	0.8632	0.8607	0.997
	43.40	0.8218	0.8178	0.995
	48.83	0.7790	0.7692	0.987
	54.25	0.7317	0.7146	0.977
	59.68	0.6677	0.6536	0.979
Outer core	65.10	0.5961	0.5877	0.986
	70.53	0.5320	0.5199	0.977
	75.96	0.4685	0.4587	0.979
Blanket	81.38	0.4131	0.4020	0.973
	86.81	0.3462	0.3392	0.980
	92.23	0.2781	0.2745	0.987
	97.66	0.2224	0.2165	0.974
	103.08	0.1772	0.1709	0.965
	108.51	0.1526	0.1479	0.969

Table 3.2.41 C/E values of plutonium-239 fission rate distribution of MZB/2 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Exp.	Cal.	C/E
Inner core	0.00	1.0000	1.0000	1.000
	5.43	0.9942	0.9967	1.002
	10.85	0.9817	0.9871	1.005
	16.28	0.9641	0.9716	1.008
	21.70	0.9428	0.9505	1.008
	27.13	0.9178	0.9235	1.006
	32.55	0.8887	0.8908	1.002
	37.98	0.8548	0.8526	0.997
	43.40	0.8141	0.8091	0.994
	48.83	0.7644	0.7603	0.995
	54.25	0.7068	0.7060	0.999
	59.68	0.6522	0.6468	0.992
Outer core	65.10	0.5863	0.5830	0.994
	70.53	0.5210	0.5121	0.983
	75.96	0.4494	0.4403	0.980
Blanket	81.38	0.3850	0.3747	0.973
	86.81	0.3208	0.3126	0.974
	92.23	0.2635	0.2577	0.978
	97.66	0.2216	0.2138	0.965
	103.08	0.1874	0.1835	0.979
	108.51	0.1724	0.1732	1.005

Table 3.2.42 C/E values of uranium-238 fission rate distribution of MZB/2 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Exp.	Cal.	C/E
Inner core	0.00	1.0000	1.0000	1.000
	5.43	0.9961	0.9985	1.002
	10.85	0.9864	0.9892	1.003
	16.28	0.9718	0.9725	1.001
	21.70	0.9528	0.9531	1.000
	27.13	0.9290	0.9262	0.997
	32.55	0.8993	0.8953	0.996
	37.98	0.8635	0.8592	0.995
	43.40	0.8237	0.8198	0.995
	48.83	0.7827	0.7797	0.996
	54.25	0.7437	0.7361	0.990
	59.68	0.7170	0.7122	0.993
Outer core	65.10	0.7075	0.6962	0.984
	70.53	0.6297	0.6261	0.994
	75.96	0.4830	0.4615	0.955
Blanket	81.38	0.2532	0.2561	1.011
	86.81	0.1322	0.1215	0.919
	92.23	0.0726	0.0641	0.882
	97.66	0.0412	0.0359	0.871
	103.08	0.0238	0.0232	0.975
	108.51	0.0135	0.0137	1.017

Table 3.2.43 C/E values of uranium-235 fission rate distribution of MZB/2 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Exp.	Cal.	C/E
Inner core	0.00	1.0000	1.0000	1.000
	5.43	0.9985	0.9965	0.998
	10.85	0.9917	0.9869	0.995
	16.28	0.9774	0.9713	0.994
	21.70	0.9543	0.9499	0.995
	27.13	0.9244	0.9226	0.998
	32.55	0.8899	0.8894	0.999
	37.98	0.8526	0.8505	0.998
	43.40	0.8106	0.8060	0.994
	48.83	0.7613	0.7559	0.993
	54.25	0.7045	0.6998	0.993
	59.68	0.6437	0.6374	0.990
Outer core	65.10	0.5807	0.5704	0.982
	70.53	0.5183	0.5017	0.968
	75.96	0.4549	0.4401	0.967
Blanket	81.38	0.3995	0.3867	0.968
	86.81	0.3430	0.3310	0.965
	92.23	0.2804	0.2748	0.980
	97.66	0.2315	0.2254	0.974
	103.08	0.1895	0.1870	0.987
	108.51	0.1666	0.1671	1.003

Table 3.2.44 C/E values of plutonium-239 fission rate distribution of MZB/3 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Exp.	Cal.	C/E
Inner core	0.00	1.0000	1.0000	1.000
	5.43	0.9970	0.9974	1.000
	10.85	0.9880	0.9886	1.001
	16.28	0.9747	0.9740	0.999
	21.70	0.9554	0.9538	0.998
	27.13	0.9284	0.9277	0.999
	32.55	0.8961	0.8960	1.000
	37.98	0.8609	0.8587	0.997
	43.40	0.8210	0.8161	0.994
	48.83	0.7743	0.7682	0.992
	54.25	0.7231	0.7148	0.989
	59.68	0.6597	0.6567	0.996
Outer core	65.10	0.5998	0.5951	0.992
	70.53	0.5414	0.5286	0.976
	75.96	0.4838	0.4728	0.977
Blanket	81.38	0.4615	0.4371	0.947
	86.81	0.4136	0.3938	0.952
	92.23	0.3644	0.3405	0.934
	97.66	0.3077	0.2894	0.941
	103.08	0.2694	0.2484	0.922
	108.51	0.2469	0.2283	0.925

Table 3.2.45 C/E values of uranium-238 fission rate distribution of MZB/3 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Exp.	Cal.	C/E
Inner core	0.00	1.0000	1.0000	1.000
	5.43	0.9938	0.9993	1.006
	10.85	0.9841	0.9908	1.007
	16.28	0.9684	0.9749	1.007
	21.70	0.9483	0.9565	1.009
	27.13	0.9252	0.9305	1.006
	32.55	0.8965	0.9006	1.005
	37.98	0.8605	0.8656	1.006
	43.40	0.8222	0.8273	1.006
	48.83	0.7863	0.7885	1.003
	54.25	0.7457	0.7465	1.001
	59.68	0.7217	0.7249	1.004
Outer core	65.10	0.7136	0.7121	0.998
	70.53	0.6442	0.6456	1.002
	75.96	0.4996	0.4820	0.965
Blanket	81.38	0.2704	0.2686	0.993
	86.81	0.1369	0.1264	0.923
	92.23	0.0765	0.0692	0.905
	97.66	0.0459	0.0411	0.895
	103.08	0.0288	0.0279	0.967
	108.51	0.0173	0.0170	0.981

Table 3.2.46 C/E values of plutonium-240 fission rate distribution of MZB/3 in the fission chamber measurement

Region	Y [cm]	Exp.	Cal.	C/E
Inner core	0.00	1.0000	1.0000	1.000
	5.43	0.9949	0.9981	1.003
	10.85	0.9873	0.9896	1.002
	16.28	0.9747	0.9746	1.000
	21.70	0.9553	0.9554	1.000
	27.13	0.9282	0.9299	1.002
	32.55	0.8971	0.8998	1.003
	37.98	0.8648	0.8648	1.000
	43.40	0.8284	0.8259	0.997
	48.83	0.7857	0.7846	0.999
	54.25	0.7422	0.7399	0.997
	59.68	0.7025	0.7029	1.001
Outer core	65.10	0.6659	0.6652	0.999
	70.53	0.5933	0.5921	0.998
	75.96	0.4729	0.4619	0.977
Blanket	81.38	0.3045	0.3032	0.996
	86.81	0.1916	0.1844	0.963
	92.23	0.1241	0.1189	0.958
	97.66	0.0843	0.0789	0.935
	103.08	0.0556	0.0542	0.975
	108.51	0.0379	0.0366	0.965

次に、MZC において、いくつかの制御棒が挿入された体系での核分裂反応率の解析結果について述べる。

ここでは、対称関係にある P1、P3、P5 位置（Fig. 3.2.6 参照）に天然ボロンの制御棒を挿入した体系での F49、F28 を解析対象とした。実験値は HB2/88p に、体系図は HB2/73p に与えられている。なお、制御棒挿入に伴う反応度の低下を補うために外側炉心に接する一部のブランケット領域が燃料 Element に置換される（体系図参照）が、その燃料 Element は燃料格子として「C11-1G」が含まれるものとして扱った（HB2 では「C11-ED」なる燃料格子が含まれるとの記載があるが、C11-ED についての情報がハンドブックでは不足している）。

なお、MZC では Element 毎に測定値が与えられているが、その Element 内での位置が Element 中心位置と大きくずれる場合があるため、中心位置での測定値を三次のスプライン関数により内挿して求めた。また、MZC での測定は「flight tube direction」で行われたので、X 軸方向の分布となる。

補正値を **Table 3.2.47** と **3.2.48** に、C/E 値を **Table 3.2.49** と **3.2.50** に、それぞれ示す。

Table 3.2.47 Correction factors for plutonium-239 fission rate distribution of MZC in the fission chamber measurement

Region	X [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
Blanket	103.11	1.006	1.019	1.047	1.034
	96.73	0.999	0.991	1.018	1.011
Outer core	70.61	0.998	1.022	1.001	1.000
	54.24	0.998	1.009	1.000	0.999
	46.87	0.999	1.007	1.000	0.999
	43.49	0.999	1.005	1.000	0.999
	37.86	0.999	1.001	1.000	1.000
	32.49	1.000	0.993	1.000	1.000
	27.11	1.000	0.993	1.000	1.000
	21.74	1.000	0.993	1.000	1.000
	16.37	1.000	0.990	1.000	1.000
	10.73	1.000	0.997	1.000	1.000
	5.36	1.000	0.999	1.000	1.000
Inner core	-0.01	1.000	1.000	1.000	1.000
	-5.38	1.000	1.001	1.000	1.000
	-10.75	1.000	1.002	1.000	1.000
	-16.39	1.000	1.003	1.000	1.000
	-21.76	1.000	1.003	1.000	1.000
	-27.13	1.000	1.002	1.000	1.000
	-32.51	0.999	1.003	1.000	1.000
	-37.87	0.999	1.004	1.000	0.999
	-43.51	0.999	1.005	1.000	0.999
	-48.89	0.999	1.006	1.000	0.999
	-54.26	0.998	1.008	1.000	0.999
Outer core	-70.64	0.998	1.021	1.001	1.000
Blanket	-86.75	0.999	0.991	1.018	1.011
	-103.11	1.006	1.018	1.047	1.033

Table 3.2.48 Correction factors for uranium-238 fission rate distribution of MZC in the fission chamber measurement

Region	X [cm]	Streaming	Transport	UF	175g
Blanket	103.11	1.006	0.989	1.010	1.000
	96.73	0.999	1.043	1.003	1.002
Outer core	70.61	0.998	1.040	1.001	1.002
	54.24	0.999	1.001	1.000	1.000
	46.87	0.999	1.001	1.000	1.000
	43.49	0.999	1.002	1.000	1.000
	37.86	0.999	0.997	1.000	1.000
	32.49	1.000	0.978	1.000	0.999
	27.11	1.000	0.982	1.000	0.999
	21.74	1.000	0.982	1.000	0.999
	16.37	1.000	0.978	1.000	1.000
	10.73	1.000	0.996	1.000	1.000
	5.36	1.000	1.000	1.000	1.000
Inner core	-0.01	1.000	1.000	1.000	1.000
	-5.38	1.000	1.005	1.000	1.000
	-10.75	1.000	1.006	1.000	1.000
	-16.39	1.000	1.005	1.000	1.000
	-21.76	1.000	1.006	1.000	1.000
	-27.13	1.000	1.004	1.000	1.000
	-32.51	0.999	1.004	1.000	1.000
	-37.87	0.999	1.006	1.000	1.000
	-43.51	0.999	1.002	1.000	1.000
	-48.89	0.999	0.999	1.000	1.000
	-54.26	0.999	0.997	1.000	1.000
Outer core	-70.64	0.998	1.039	1.001	1.002
Blanket	-86.75	0.999	1.042	1.003	1.002
	-103.13	1.006	0.988	1.010	1.000

Table 3.2.49 C/E values for plutonium-239 fission rate distribution of MZC in the fission chamber measurement

Region	X [cm]	Exp.	Cal.	C/E
Blanket	103.11	0.4055	0.3662	0.903
	96.73	0.6009	0.5424	0.903
Outer core	70.61	0.7629	0.7342	0.962
	54.24	0.9201	0.8965	0.974
	46.87	0.9369	0.9261	0.988
	43.49	0.9504	0.9433	0.993
	37.86	0.9520	0.9451	0.993
	32.49	0.9442	0.9295	0.984
	27.11	0.9251	0.9140	0.988
	21.74	0.9258	0.9210	0.995
	16.37	0.9574	0.9509	0.993
	10.73	0.9827	0.9815	0.999
	5.36	1.0027	0.9965	0.994
Inner core	-0.01	1.0019	1.0000	0.998
	-5.38	0.9952	0.9974	1.002
	-10.75	0.9904	0.9914	1.001
	-16.39	0.9942	0.9859	0.992
	-21.76	0.9887	0.9833	0.995
	-27.13	0.9960	0.9825	0.986
	-32.51	0.9958	0.9805	0.985
	-37.87	0.9839	0.9736	0.990
	-43.51	0.9763	0.9582	0.981
	-48.89	0.9539	0.9336	0.979
	-54.26	0.9174	0.8996	0.981
Outer core	-70.64	0.7621	0.7329	0.962
Blanket	-86.75	0.5967	0.5412	0.907
	-103.11	0.4052	0.3684	0.909

Table 3.2.50 C/E values for uranium-238 fission rate distribution of MZC in the fission chamber measurement

Result	X [cm]	Exp.	Cal.	C/E
Blanket	103.11	0.0597	0.0544	0.911
	96.73	0.3422	0.3439	1.005
Outer core	70.61	0.9710	0.9567	0.985
	54.24	0.9621	0.9543	0.992
	46.87	0.9692	0.9593	0.990
	43.49	0.9705	0.9616	0.991
	37.86	0.9579	0.9467	0.988
	32.49	0.9187	0.9039	0.984
	27.11	0.8875	0.8718	0.982
	21.74	0.8904	0.8779	0.986
	16.37	0.9493	0.9209	0.970
	10.73	0.9881	0.9734	0.985
	5.36	0.9996	0.9956	0.996
Inner core	-0.01	1.0063	1.0000	0.994
	-5.38	0.9939	1.0006	1.007
	-10.75	0.9904	0.9929	1.003
	-16.39	0.9920	0.9850	0.993
	-21.76	0.9880	0.9849	0.997
	-27.13	1.0063	0.9876	0.981
	-32.51	1.0033	0.9922	0.989
	-37.87	1.0059	0.9932	0.987
	-43.51	0.9963	0.9832	0.987
	-48.89	0.9932	0.9691	0.976
	-54.26	0.9833	0.9569	0.973
Outer core	-70.64	0.9793	0.9547	0.975
Blanket	-86.75	0.3499	0.3428	0.980
	-103.13	0.0616	0.0542	0.880

最後に、核分裂検出器により測定された核分裂反応率について、各領域における C/E 値の分布範囲を整理したものを **Table 3.2.51** に示す。

ブランケット領域における反応率分布であるが、閾値反応である F28、F40 については全ての炉心について 10%を越える過小評価が観察されている。一方 F49、F25 については、金属ウランが用いられている MZA、MZB/3 については最大で 8%程度の過小評価が見られている一方、酸化ウランが用いられている MZB/1、MZB/2 については過小評価の程度が小さい。これは、ブランケット領域に金属ウランを用いた場合には相当量の炭素が用いられており（単位格子に炭素プレートが配置されている)、酸化ウランを用いた場合と比較して中性子エネルギースペクトルが軟化することによるものと考えられる。

Table 3.2.51　Summary of C/E values for reaction rate distribution obtained by the fission chamber measurement

Core	Region	F49	F28	F40	F25
MZA	Core	0.989-1.001	0.994-1.016	0.981-1.003	
	Blanket	0.894-0.952	0.852-1.023	0.942-0.978	
MZB/1	Inner core	0.987-1.003	0.991-1.002		0.977-1.000
	Outer core	0.977-0.988	0.956-0.997		0.977-0.986
	Blanket	0.941-0.979	0.842-0.981		0.965-0.987
MZB/2	Inner core	0.992-1.008	0.990-1.003		0.990-1.000
	Outer core	0.980-0.994	0.955-0.994		0.967-0.982
	Blanket	0.965-1.005	0.871-1.017		0.965-1.003
MZB/3	Inner core	0.989-1.001	1.000-1.009	0.977-1.003	
	Outer core	0.976-0.992	0.965-1.002	0.977-0.999	
	Blanket	0.922-0.952	0.895-0.993	0.930-0.996	
MZC	Inner core	0.974-1.002	0.970-1.007		
	Outer core	0.962	0.975-0.985		

3.3 反応度特性の C/E 値の整理

反応度特性に対する計算では、dk/k 単位で得られた反応度を実効遅発中性子割合 β_{eff} を用いてドル単位に変換するため、β_{eff} の誤差が系統的に影響する。**Table 3.3.1** には、今回の実験解析で対象とした反応度特性である、Na ボイド反応度、物質反応度価値、制御棒価値の C/E 値について整理したものを示す。なお、Na ボイド反応度については非漏洩項が支配的となる MZA、MZB のボイドステップ A のみの結果を、制御棒価値については結果の一部を、それぞれ示す。

Table 3.3.1 Summary of C/E values for reactivity

Reactivity	Core	Step or material or case	C/E
Sodium void	MZA	A	1.112
	MZB	A	1.090
Material worth	MZA	Pu V8	1.053
		Pu II8	1.052
		Pu III8	1.052
		Nat. UO_2	1.095
		Na	1.076
		SS	0.938
	MZB	Pu IX8	1.039
		Pu II8	1.049
		Pu III8	1.047
		Nat. UO_2	1.106
		Na	0.982
		SS	0.956
Control rod	MZC	Nat.CR, O	1.043
		Nat.CR, P1	1.042
		Nat.CR, R	1.017
		30% B-10 CR, O	1.041
		90% B-10 CR, Q	1.026

この結果より、SS、Na の物質反応度価値（Na については MZB のみ）を除いて系統的な過大評価が観察される。その原因としてはいくつか考えられるが、β_{eff} の過大評価もひとつの可能性として挙げられるであろう。なお、SS の物質反応度価値については傾向がその他と異なるが、この解析では SS プレートに対する共鳴自己遮蔽効果の取り扱いに不十分な点があり、計算値に比較的大きい不確かさが含まれる。

4. 結論

IRPhEP ハンドブックに記載されている実験データに基づいて、MOZART 臨界実験解析を、核データとして JENDL-4.0（遅発中性子データを含む）、計算コードとして SLAROM-UF、CBG を用いて行った。それぞれの核特性に対する解析結果を以下に示す。

- 臨界性の C/E 値として、小型炉心の MZA では 0.9981、中型の MZB では 1.0006 を得た。良好な C/E 値は JENDL-4.0 を用いた MOX 燃料高速炉の臨界性解析でも同様に得られていることから、臨界性について MOZART 実験データと他の MOX 燃料高速炉のデータとの整合性が確認されたと言える。
- 炉中心反応率比における計算値と実験値の差は、F25/F49、C28/F49 については 1%以下、F28/F25、F40/F49、F41/F49 については 4%以下であった。
- Na ボイド反応度は、非漏洩項が支配的なデータに対しては計算値は 10%程度の過大評価となった。また、漏洩項の寄与が大きいデータでは、炉心領域のボイド反応度については漏洩項で規格化した絶対差は最大でも 10%弱となった。
- 物質反応度価値は、Pu については計算値が 5%程度の過大評価となった。また、U、SS については、計算値と実験値の差異は 10%以下であった。
- 制御棒反応度価値については、計算値が 2%から 5%程度の過大評価となった。
- 反応率分布は、炉心領域では計算値と実験値はよく一致したが、閾値反応についてはブランケット領域で系統的な過小評価が観察された。

反応度特性に対しては、計算値の系統的な過大評価が見られた。その原因は明らかではないが、実効遅発中性子割合 β_{eff} の過小評価が可能性のひとつとして挙げられる。

謝辞

原子力基礎工学研究部門の石川眞氏には、本報告書の全般について、数多くの有益なコメントをいただきました。また、FBR プラント工学センター、炉心・燃料特性評価グループの鈴木隆之氏、羽様平氏には、本報告書に対し数多くの有益なコメントをいただきました。ここに深い謝意を表します。

参考文献

1) 貝瀬、長田、「MOZART 実験データの整理と JFS-3-J3.2R による解析」、JNC TJ9400 2003-009, (2003).

2) J. B. Briggs (Ed.), *International handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments,* NEA/NSC/DOC (2006)1, March 2009 Edition, Nuclear Energy Agency, Paris (2009).

3) T. Hazama, *et al.*, 'SLAROM-UF: Ultra Fine Group Cell Calculation Code for Fast Reactor - Version 20090113 -,' JAEA-Review 2009-003 (2009).

4) G.Chiba, Y.Shimazu, 'Sodium void reactivity calculations for fast critical assemblies without whole-lattice homogenization,' *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**[12], p.1526 (2008).

5) K.Shibata, *et al.*, 'JENDL-4.0: a new library for nuclear science and engineering,' *J. Nucl. Sci. Technol.*, (being submitted).

6) K.Shibata, *et al.*, 'Japanese evaluated nuclear data library version 3 revision 3: JENDL-3.3,' *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, p.1125 (2002).

7) P.Benoist, 'Streaming effects and collision probabilities in lattices,' *Nucl. Sci. Eng.*, **34**, p.285 (1968).

8) G.Chiba, *et al.*, 'JENDL-4.0 benchmarking for fission reactor applications,' *J. Nucl. Sci. Technol.*, (being submitted).

9) L.Tomlinson, 'Delayed neutron from fission,' AERE-R 6993 (1972).

10) G.R.Keepin, 'Physics of nuclear kinetics,' Addison-Wesley publishing company, INC. (1965).

11) G.Chiba, Y.Shimazu, 'Sodium void reactivity calculations for fast critical assemblies without whole-lattice homogenization,' *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**[12], p.1526 (2008).

付録A　格子情報データベースの作成

決定論手法に基づく実験解析では単位格子を適切にモデル化する必要がある。このモデル化には任意性があるため、異なる核データファイル、異なる計算コードでの実験解析結果の比較を行う場合には、統一された格子モデルを用いる必要がある。

そこで、IRPhE ハンドブックに記載されている MOZART 実験のプレートデータ（サイズ、物質組成）及び種々のプレートから成る単位格子のデータを格納し、決定論手法による実験解析のための一次元格子モデルを生成するデータベースを作成した。本付録では、作成したデータベースの概要と、その使用法について述べる。

A.1　概要

データベースはオブジェクト指向言語 C++により作成した。本データベースは物質組成、プレート、単位格子、制御棒等を定義する「クラス」で構成される。クラスはそれに属する情報を保有するとともに、それらに関連した種々の処理（「メソッド」）を実行することが出来る。クラスは「型」であり、その実体は「インスタンス」と呼ばれる。例えば、「プレート」はクラスである一方、「Pu プレート」や「GI8 プレート」といった実体があるものはインスタンスに該当する。

A.1.1　物質組成データ

プレートやそれを被覆する缶、種々のプレートを格納する sheath 等に含まれる核種とその数密度は、「CompositionData」クラスで管理する。データベースにおいては、CompositionData クラスのインスタンスが保有する実際の情報はテキストファイルから読み込む方式とした。以下に、「PU_V8」プレートの物質組成を定義するテキストファイルを例として示す。

```
 19
 125
 1.7475e-4
 625
 2.5027e-4
 725
 1.3413e-5
 825
 5.0640e-5
1325
 2.1760e-5
1400
 2.3831e-5
2400
 5.1941e-6
2525
 1.0687e-6
2600
 1.6610e-5
2800
 1.1804e-5
```

```
3100
 2.2424e-3
4200
 1.9583e-6
9237
 1.3318e-6
9434
 2.9103e-5
9437
 2.9328e-2
9440
 6.7928e-3
9443
 1.0119e-3
9446
 1.6639e-4
9543
 9.4236e-5
```

一行目で含まれる核種数を指定し、二行目以降では含まれる核種の ENDF フォーマットにおける ID と数密度のセットを核種数だけ指定する。**Table A.1.1** に、核種とそれに対応する ENDF フォーマットの ID、JAERI Fase set-3(JFS) の ID を示す。

Table A.1.1　List of nuclide index

Nuclide	ENDF ID	JFS ID	Nuclide	ENDF ID	JFS ID
H	125	1	Mn-55	2525	25
Li-7	328	307	Fe	2600	26
B-10	525	105	Ni	2800	28
B-11	528	115	Cu	2900	92
C	625	6	Ga	3100	31
N-14	725	147	Nb	4100	41
O	825	8	Mo	4200	42
Na	1125	11	Ag	4700	47
Al	1325	13	U-235	9228	925
Si	1400	14	U-238	9237	928
P-31	1525	15	Pu-238	9434	948
S	1600	16	Pu-239	9437	949
K	1900	19	Pu-240	9440	940
Ca	2000	20	Pu-241	9443	941
Ti	2200	22	Pu-242	9446	942
V	2300	23	Am-241	9543	951
Cr	2400	24			

A.1.2　プレートデータ

プレートの情報は「Plate」クラスで管理する。

プレートは缶で被覆されているものといないものとに分類される。はじめに、缶で被覆されているプレートのインスタンスの生成について述べる。以下に、「PU_V8」プレートを定義するソースプログラムを示す。

```
string mdir("./CompData/");
CompositionData pu_v8_core(mdir,"pu_v8_core");
CompositionData pu_v8_can(mdir,"pu_v8_can");

Plate pu_v8;
pu_v8.PutCompositionData(&pu_v8_core,&pu_v8_can);
pu_v8.PutPlateThickness(0.3265);
pu_v8.PutCoreThickness(0.23506);
pu_v8.PutCoreWidth(4.671);
```

はじめにプレートと缶の物質組成を定義するCompositionDataクラスのインスタンスを生成する（引数で指定されたファイル名のテキストデータから情報を得ている）。その後、プレートクラスのインスタンス「pu_v8」を生成し、プレートと缶の物質組成データとしてCompositionDataクラスのインスタンスを与える。その後、缶を含むプレート全体の厚さ、（缶を含まない）プレート部分の厚さと幅を指定する。なお、缶を含むプレート全体の幅はデフォルトで5.067cmと指定されている。

次に、缶で被覆されていないプレートのインスタンスの生成の例として、「GI8」プレートを定義するソースプログラムを示す。

```
string mdir("./CompData/");
CompositionData gi8_c(mdir,"gi8");
Plate gi8(&gi8_c, 0.3180);
```

この場合には、プレートの物質組成データとプレートの厚さのみを引数として与える。このようなデータの与え方をすることにより、このインスタンスが缶で被覆されていないプレートであることをデータベースが認識する。

A.1.3 単位格子データ

種々のプレートから構成される格子データは、「Lattice」クラスで管理する。

以下に単位格子「C11-1A」を定義するソースプログラムを示す。

```
string mdir("./CompData/");
CompositionData sheath_c(mdir,"sheath");

// (omitted)

Plate pu_v8;
pu_v8.PutCompositionData(&pu_v8_core,&pu_v8_can);
pu_v8.PutPlateThickness(0.3265);
pu_v8.PutCoreThickness(0.23506);
pu_v8.PutCoreWidth(4.671);

// (omitted)

Lattice c11_1a(&sheath_c);
c11_1a.PutPlate(nastbr4);
c11_1a.PutPlate(uo24r4);
c11_1a.PutPlate(nastbr4);
c11_1a.PutPlate(pu_v8);
```

```
c11_1a.PutPlate(gi8);
c11_1a.PutPlate(uo24r4);
c11_1a.PutPlate(nastbr4);
c11_1a.PutPlate(nastbr4);
c11_1a.PutPlate(uo24r4);
c11_1a.PutPlate(ststbr8);
c11_1a.PutPlate(pu_v8);
c11_1a.PutPlate(nastbr4);
c11_1a.PutPlate(uo24r4);
c11_1a.PutPlate(nastbr4);
```

Lattice クラスのインスタンスを生成する際に、引数として格子の外枠部である「シース」の物質組成データを指定する（この例では CompositionData クラスの「sheath_c」）。その後、プレートの配列に従って、プレートクラスのインスタンスを指定する。

Lattice クラスは、一次元プレートストレッチ格子モデルを生成する機能を有する。プレートストレッチモデルの概要については **Fig. A.2.1** に示す。プレートストレッチモデルの生成は Lattice クラスの「ConstructPlateStretchModel」メソッドで行う。その使用例を以下に示す。

```
string wdir("/home/chiba/CBGCAL/mzb.irphe/XS/CellData/");
c11_1a.ConstructPlateStretchModel(wdir,"C11-1A");
```

このメソッドの引数は、生成したモデルのデータの出力先を示す。出力されるデータは、報告者が別途作成した格子計算コード SLAROM-UF 用入力生成ツールのためのフォーマットに基づいている。

出力されるテキストデータの例を以下に示す。

```
26      / total number of materials
MAT0
 15
  1 1.99941e-05    6 2.30572e-04    13 1.85922e-05    14 5.78423e-04
  22 1.57165e-05    23 4.92382e-06    24 1.39472e-02    25 1.00647e-03
  26 5.01862e-02    28 6.80688e-03    29 3.94713e-06    42 7.84329e-06
  15 2.44045e-05    16 2.35707e-05    41 2.64430e-04
MAT1
 21
  1 4.60839e-06    6 4.94367e-05    13 1.85922e-05    14 7.49079e-05
  22 1.57165e-05    23 4.92382e-06    24 1.39506e-03    25 1.02213e-04
  26 4.95178e-03    28 7.39862e-04    29 3.94713e-06    42 7.84329e-06
  15 9.91523e-07    16 9.57644e-07    41 1.07434e-05    307 3.20463e-07
  115 1.23446e-07    8 1.66834e-06    11 1.93461e-02    19 3.86856e-07
  20 1.44299e-06
MAT2
 15
  1 3.52203e-05    6 5.62558e-04    13 1.58486e-04    14 1.32238e-03

  // (omitted)

  26 5.30301e-06    924 9.49044e-07    925 1.31608e-04    928 7.25722e-02
MAT24
 15
  1 1.99941e-05    6 2.30572e-04    13 1.85922e-05    14 5.78423e-04
  22 1.57165e-05    23 4.92382e-06    24 1.39472e-02    25 1.00647e-03
  26 5.01862e-02    28 6.80688e-03    29 3.94713e-06    42 7.84329e-06
  15 2.44045e-05    16 2.35707e-05    41 2.64430e-04
MAT25
 21
  1 4.60839e-06    6 4.94367e-05    13 1.85922e-05    14 7.49079e-05
  22 1.57165e-05    23 4.92382e-06    24 1.39506e-03    25 1.02213e-04
  26 4.95178e-03    28 7.39862e-04    29 3.94713e-06    42 7.84329e-06
  15 9.91523e-07    16 9.57644e-07    41 1.07434e-05    307 3.20463e-07
```

```
  115 1.23446e-07    8 1.66834e-06    11 1.93461e-02    19 3.86856e-07
  20 1.44299e-06

38   / total number of regions
MAT0
MAT1
MAT0
MAT2
MAT3
MAT2

// (omitted)

MAT23
MAT22
MAT24
MAT25
MAT24

slab
 3.68300e-02
 5.42340e-01
 3.68300e-02
 3.68300e-02

 // (omitted)

 3.68300e-02
 5.54240e-01
 3.68300e-02
 3.68300e-02
 5.42340e-01
 3.68300e-02

 300.0 / temperature
```

このフォーマットでは、核種のインデックスはENDFフォーマットではなく、JFSのものを使用していることに注意が必要である。

なお、均質モデルを生成することも可能であり、その場合には「Homogenize」メソッドを用いる（引数はConstructPlateStretchModelと同様）。

A.1.4 制御棒データ

制御棒とフォロワのデータは、「ControlRod」クラスで管理する。制御棒とフォロワは**Fig. A.2.2**に示すように、外側に正方形領域、その内側に円筒領域があり、制御棒の場合には円筒領域の内部に被覆された吸収ピンが複数存在する。それ以外は冷却材（ナトリウム）で充填されている（正方形領域外側はボイド）。

また、ControlRodクラスは、一次元円筒格子モデルを生成する機能を有する。

はじめに、制御棒フォロワのインスタンスの定義と、円筒格子モデルの生成の例を以下に示す。

```
string mdir("./CompDataMZC/");

CompositionData outer_fol(mdir,"outer_fol");
CompositionData cyl_fol(mdir,"cyl_fol");
CompositionData sodium(mdir,"sodium");
CompositionData fuel_hom(mdir,"c12_30a_hom");

double width_lat=5.4254*2.;
```

```
  double width_sqr=10.7442;
  double inwidth_sqr=9.86;
  double vol_org=width_sqr*width_sqr-inwidth_sqr*inwidth_sqr;
  double vol_new=width_lat*width_lat-inwidth_sqr*inwidth_sqr;
  outer_abs.FactorizeDensity(vol_org/vol_new);

  ControlRod follower;
  follower.PutCompositionSquareRegion(&outer_fol);
  follower.PutCompositionInnerCylinder(&cyl_fol);
  follower.PutCompositionSodium(&sodium);
  follower.PutCompositionFuel(&fuel_hom);
  follower.WriteCBGInputAsFollower(wdir,"FOLLOWER");
```

正方形領域の物質組成を示す CompositionData クラスのインスタンス「outer_fol」に対して「FactorizeDensity」メソッド（数密度を一律に定数倍するメソッド）が行われているが、これは一次元円筒モデル化の過程で、外側正方形領域とその外側のボイド領域を混合して取り扱うためである。また、一次元円筒モデルの生成はフォロワに対しては「WriteCBGInputAsFollower」メソッドにより行う。引数は円筒モデルデータの出力先を示す。

次に、以下に制御棒のインスタンスの定義と、円筒格子モデルの生成の例を示す。

```
  string mdir("./CompDataMZC/");
  CompositionData outer_abs(mdir,"outer_abs");
  CompositionData outer_fol(mdir,"outer_fol");
  CompositionData cyl_abs(mdir,"cyl_abs");
  CompositionData bn38_tubecan(mdir,"bn38_tubecan");
  CompositionData abs_bn(mdir,"abs_bn");
  CompositionData sodium(mdir,"sodium");
  CompositionData fuel_hom(mdir,"c12_30a_hom");

  ControlRod bnat;
  bnat.PutCompositionSquareRegion(&outer_abs);
  bnat.PutCompositionInnerCylinder(&cyl_abs);
  bnat.PutCompositionSodium(&sodium);
  bnat.PutCompositionAbsorber(&abs_bn);
  bnat.PutCompositionTubecan(&bn38_tubecan);
  bnat.PutCompositionFuel(&fuel_hom);
  bnat.WriteCBGInputAsControlRod(wdir,"BNAT");
```

一次元円筒モデルの生成は制御棒に対しては「WriteCBGInputAsControlRod」メソッドにより行う。

A.2　物質組成データにおける全数密度のチェック

IRPhEP ハンドブックには、各物質組成データに対して、含まれる核種の数密度の総和が与えられている。そこで、今回作成した物質組成データに誤りが無いかを確認するため、各物質組成データを読み込み数密度の和を計算して、ハンドブック記載値と比較するプログラムを作成した。そのプログラムを以下に示す。

```
#include <cmath>
#include "CompositionData.h"
#include "Plate.h"
#include "Lattice.h"

  int main()
{
  // To check total number density for composition data
```

```
  int compnum=55;
  double eps=1e-4;

  string mdir("./CompData/");
  string naminp[]={
    "pu_iv4_core","pu_iv4_can","pu_v8_core","pu_vi8_core","pu_vii8_core",
    "pu_viii8_core","pu_ix8_core","pu_x8_core","pu_xi8_core","pu_xii8_core",
    "pu_v8_can","pu_vi8_can","pu_vii8_can","pu_viii8_can","pu_ix8_can",
    "pu_x8_can","pu_xi8_can","pu_xii8_can","uo22r4_core","uo23r4_core",
    "uo24r4_core","uo22r4_can","uo23r4_can","uo24r4_can","uo2dp4",
    "u8","u2","nastdl4_core","nastdm4_core","nastbr4_core",
    "naji4_core","najii4_core","nastdl4_can","nastdm4_can","nastbr4_can",
    "naji4_can","najii4_can","ststbr8","ststdl8","ststf8_can",
    "mst1","mst2","mst3","mst8","mst9f10",
    "gi8","gii8","giii8","alg8","alsc3",
    "al2o34","sheath","mshth","pu_ii8","pu_iii8"
  };
  double totden[]={
    6.4446e-2, 7.3500e-2, 4.0237e-2, 4.0490e-2, 3.9915e-2,
    4.0151e-2, 4.0082e-2, 4.0180e-2, 4.0160e-2, 4.0247e-2,
    6.6033e-2, 6.7463e-2, 6.7217e-2, 6.7140e-2, 6.7015e-2,
    6.7073e-2, 6.6140e-2, 6.5554e-2, 6.8419e-2, 6.9515e-2,
    6.8668e-2, 6.7716e-2, 7.0670e-2, 6.5639e-2, 6.7105e-2,
    4.7208e-2, 4.7925e-2, 2.3191e-2, 2.3191e-2, 2.3126e-2,
    2.3458e-2, 2.3458e-2, 7.8723e-2, 7.8781e-2, 7.8585e-2,
    8.1505e-2, 8.1446e-2, 8.6072e-2, 8.5517e-2, 8.3029e-2,
    8.5086e-2, 8.4617e-2, 8.4980e-2, 8.3902e-2, 7.3006e-2,
    8.1484e-2, 8.5125e-2, 8.3529e-2, 2.6752e-2, 4.7627e-2,
    1.1070e-1, 3.5960e-2, 3.3129e-2, 3.7530e-2, 3.7258e-2
  }; // Total number density described in the IRPhE handbook

  cout<<"+++ Check total number density +++\n";
  cout<<"   criteria (relative difference) "<<eps<<"\n\n";
  for(int i=0;i<compnum;i++){
    CompositionData comp(mdir,naminp[i]);
    double tden=comp.GetTotalDen();
    double diff=fabs(tden-totden[i])/totden[i];
    if(diff>eps){
      cout<<"     "<<naminp[i]<<" : "<<diff<<"\n";
    };
  };

  return 0;
}
```

IRPhEP ハンドブック記載の参照値はプログラム内部で定義している。このプログラムを動作させると、相対差が「eps」以上となる物質組成クラスのインスタンスを表示する。

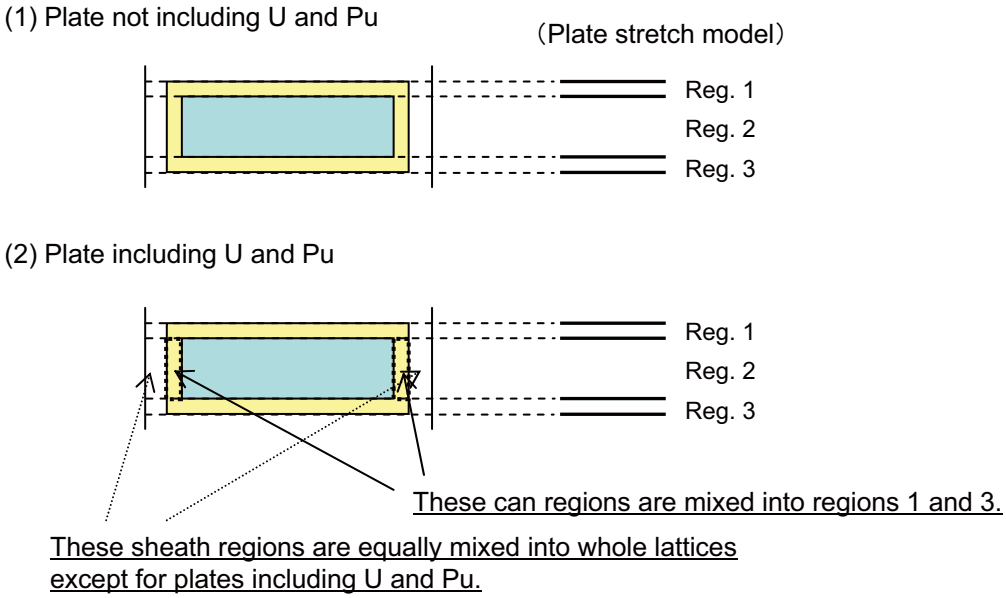


Fig. A.2.1 Description of plate stretch model

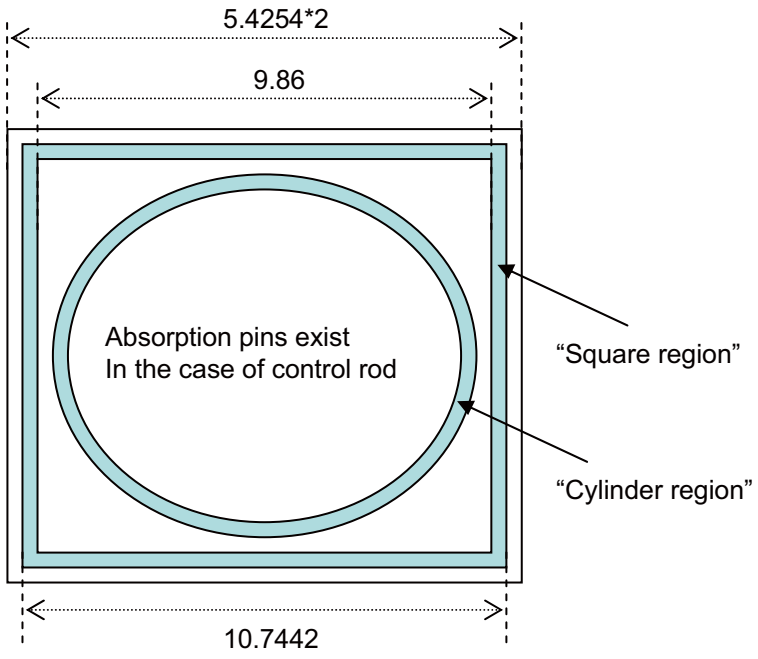


Fig. A.2.2 Description of control rod cell

付録B　一次元簡易炉心モデルを用いた反応率分布の計算精度の検討

本章では、決定論的手法による反応率空間分布の計算精度を定量的に評価するため、簡易炉心モデルを構築し、連続エネルギーモンテカルロコード MVP-II による計算値との比較を行う。

B.1　炉心モデルの構築と参照解の計算

MZA、MZB/1、MZB/2、MZB/3 を模擬した四種の球形簡易炉心モデルを構築した。MZB については反応率分布が主に測定されたセクター領域を模擬し、径反射体の外側には炭素反射体を設置した。

MZA のモデルは、燃料領域が「C11-1A」(厚さ 52cm)、径ブランケット領域が「B11-3」(同 32cm)、遮蔽体領域が「MST9F10」(同 16cm) の三領域からなるものとした。一方、MZB のモデルは、内側炉心領域が「C12-30A」(厚さ 62cm)、外側炉心領域が「C11-1A」(同 18cm)、径ブランケット領域が MZB/1 の場合は「B12-31 (NUO_2)」、MZB/2 の場合は「B12-36 (DUO_2)」、MZB/3 の場合は「B11-3 (NU)」(同 30cm)、遮蔽体領域が「MST9F10」(同 16cm)、炭素遮蔽体領域が「G13」(同 20cm) の五領域からなるものとした。なお、全ての領域は均質組成とした。

反応率分布は F49、F28、F40、C28 を対象とし、MVP-II では炉中心から 2cm 幅で分割されたメッシュについて反応率を計算した。MVP-II の計算におけるヒストリー数は 1,000 万とし、核データとして JENDL-3.3 を用いた。なお、この計算では、炭素に対して黒鉛の熱中性子散乱則データを適用した。ただし、炭素を自由気体とした場合とで有意な差異は観察されなかった。

B.2　決定論手法による計算

決定論手法による計算は、今回の実験解析で採用した最も詳細な手法で行った。各領域の実効断面積は 175 群の UFLIB.J33 と超微細群ライブラリを用いて計算し、炉心計算は離散座標法に基づくコード CBG/SNR で行った。炉心計算での空間メッシュ分割は、1 メッシュあたり 2cm とし、角度求積セットとして DP_{11} セット（角度分点数 24）を用いた。散乱の非等方性は P0 輸送近似で扱ったが、別途整合 P 近似に基づく P3 計算も行った。

中性子束は MVP-II、CBG/SNR ともに総核分裂源数が 1.0 となるように規格化したため、反応率分布の比較は絶対値で行った。

各反応率について参照解に対する比を、MZA について **Fig. B.2.1** から **Fig. B.2.4** に、MZB/1 について **Fig. B.2.5** から **Fig. B.2.8** に、MZB/2 について **Fig. B.2.9** から **Fig. B.2.12** に、MZB/3 について **Fig. B.2.13** から **Fig. B.2.16** に、それぞれ示す。なお、図中では、炉心領域とブランケット領域の境界を（MZB の場合は内側炉心と外側炉心の境界も）実線で示した。また、誤差棒は MVP-II 計算値に与えられている統計誤差（1σ）を示す。

F49 については、MZB/3 を除いてブランケット領域に僅かな過小評価が観察されるものの、1.5%以内で参照解を再現した。また、P3 計算値と P0 計算値の差は無視できる程度であった。

F28 については、P0 計算値にはブランケット領域に系統的な過小評価が観察されたが、ブランケット最深部でも最大で 4%程度であった。一方、P3 計算値においてはブランケット領域の過小評価はブランケット最深部で僅かに観察される程度である。

F40 については、F28 と同様にブランケット領域に系統的な過小評価が観察されており、P3 計算では僅かに改善することが分かる。

最後に C28 については、ブランケット領域と炉心領域とで僅かな差異が観察されるものの、1.5%以内で参照解を再現した。ただし、反射体に接するメッシュでは大幅な過小評価が見られた。

以上より、格子を均質と仮定した場合の炉心では、閾値反応である F28、F40 にブランケット領域の過小評価が観察された。F28 については、散乱の非等方性を三次まで考慮することにより、過小評価はほぼ解消することを確認した。

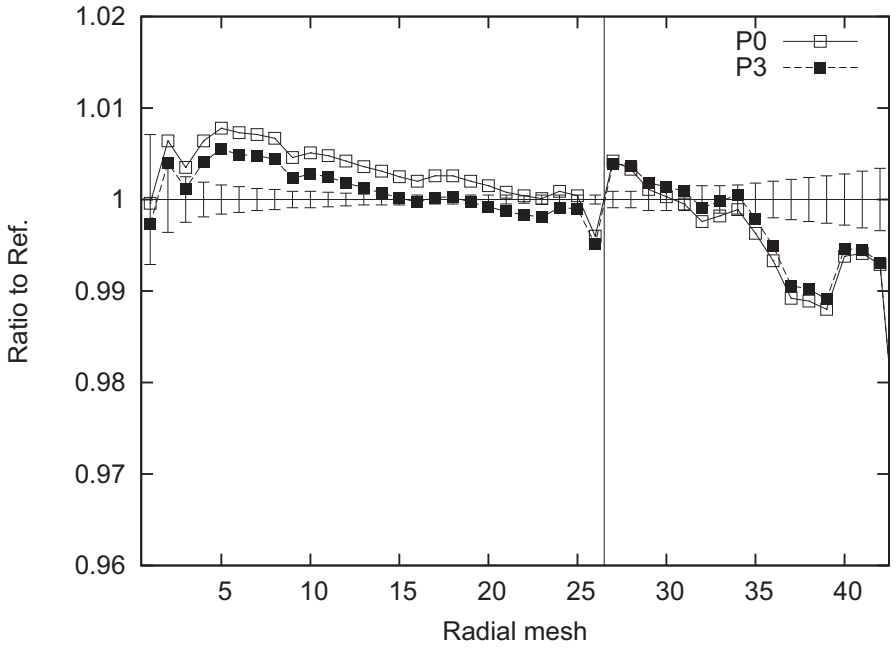


Fig. B.2.1 Results of Pu-239 fission reaction rate distribution in 1-D MZA model

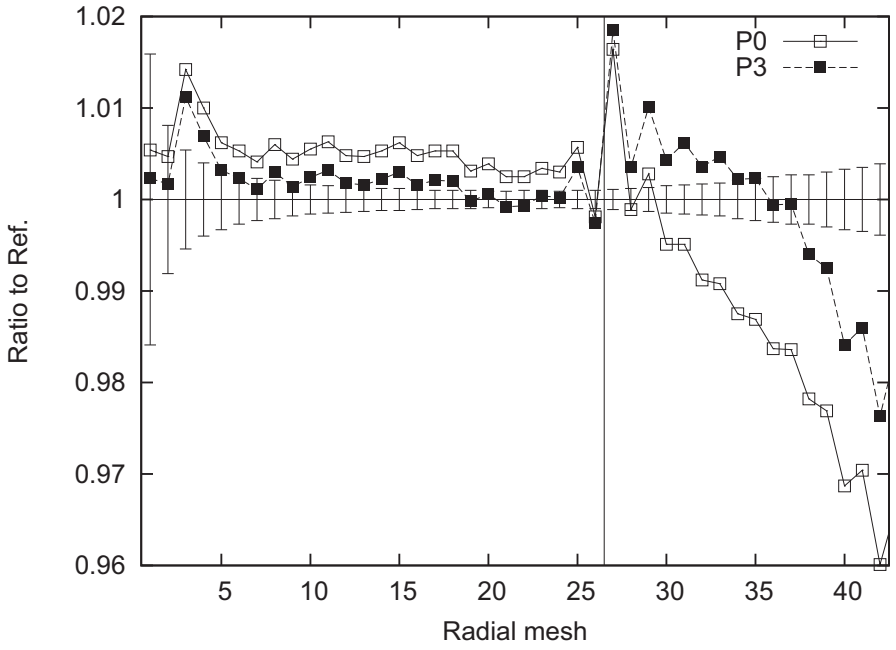


Fig. B.2.2 Results of U-238 fission reaction rate distribution in 1-D MZA model

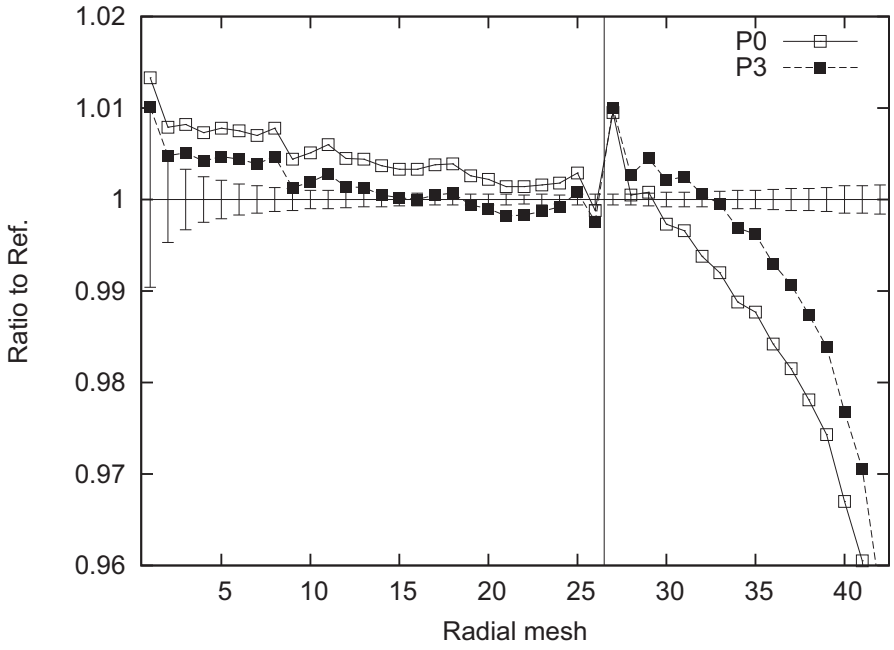


Fig. B.2.3 Results of Pu-240 fission reaction rate distribution in 1-D MZA model

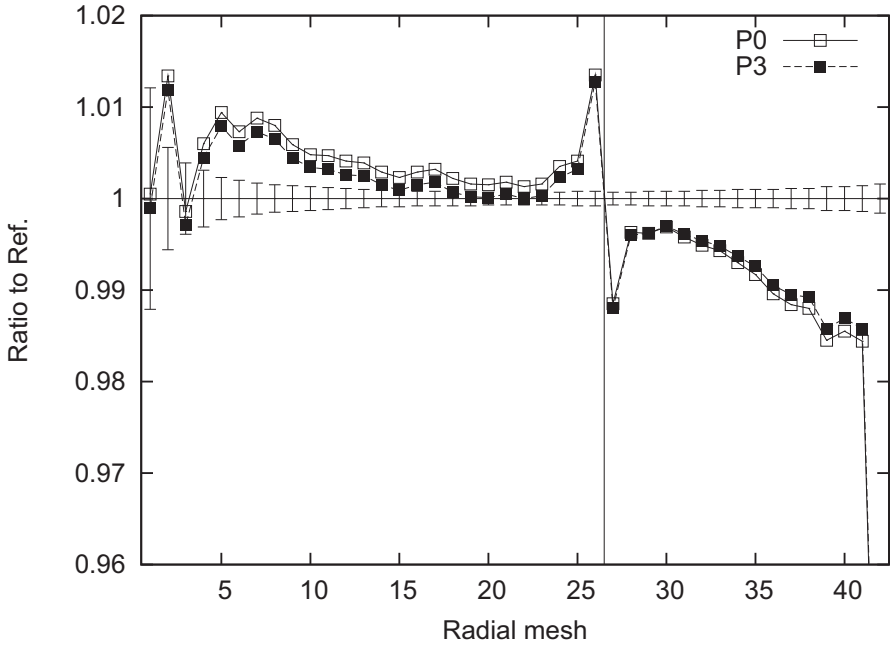


Fig. B.2.4 Results of U-238 capture reaction rate distribution in 1-D MZA model

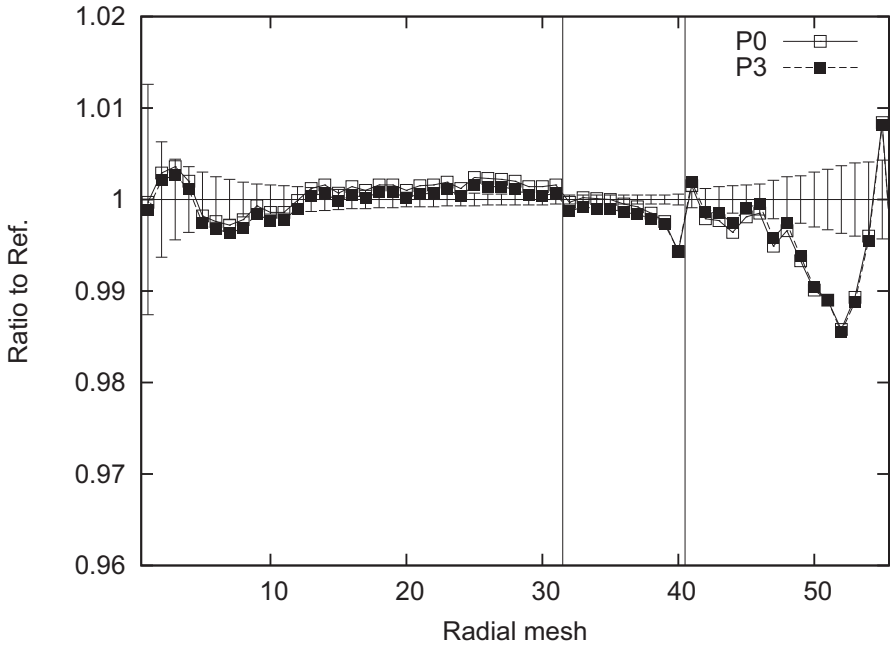


Fig. B.2.5 Results of Pu-239 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/1 model

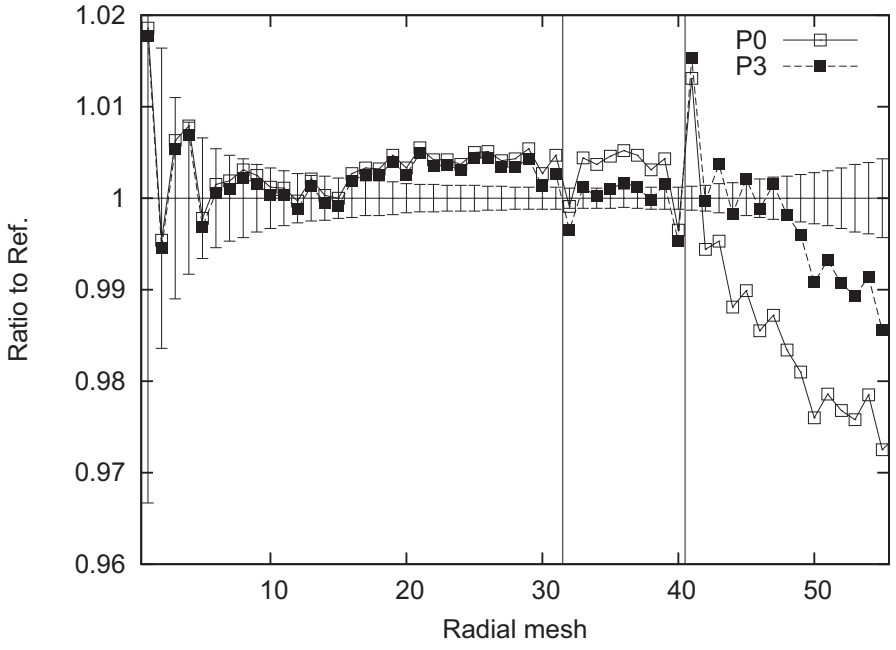


Fig. B.2.6 Results of U-238 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/1 model

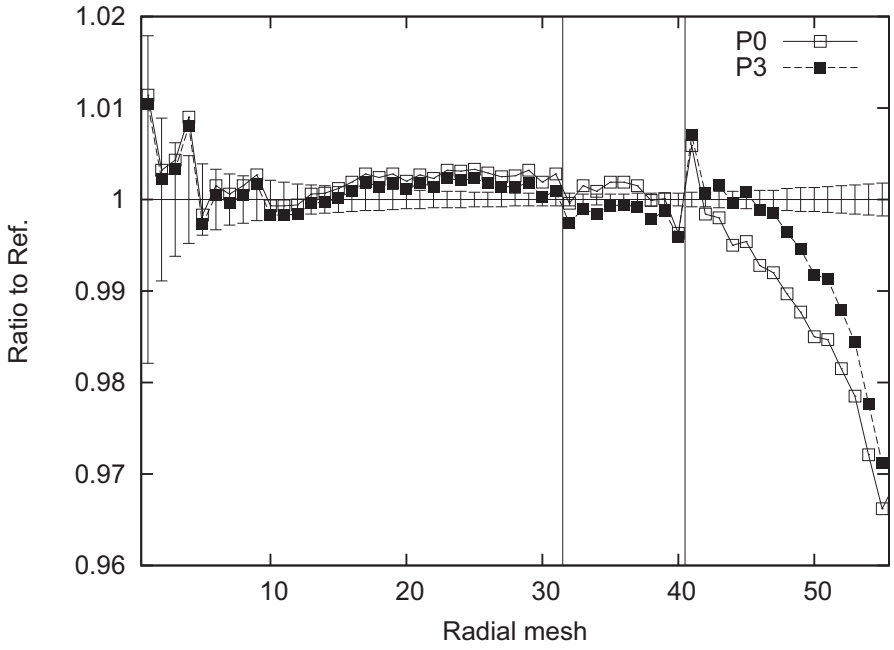


Fig. B.2.7 Results of Pu-240 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/1 model

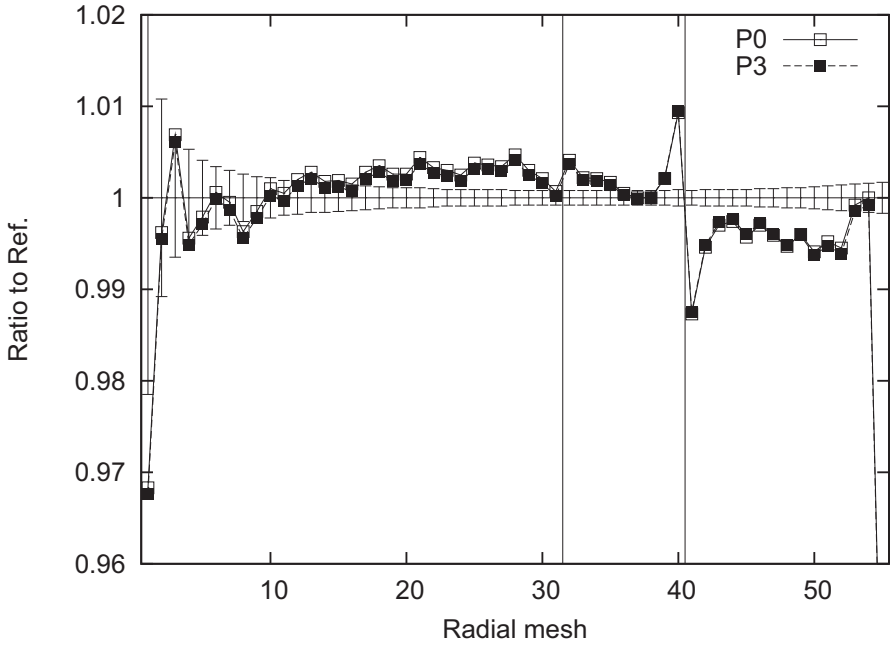


Fig. B.2.8 Results of U-238 capture reaction rate distribution in 1-D MZB/1 model

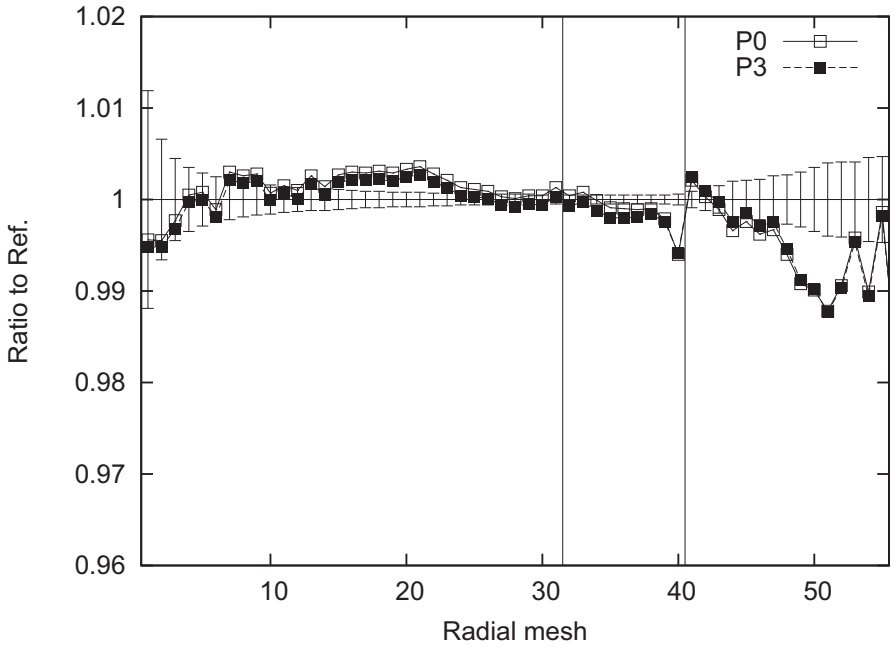


Fig. B.2.9 Results of Pu-239 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/2 model

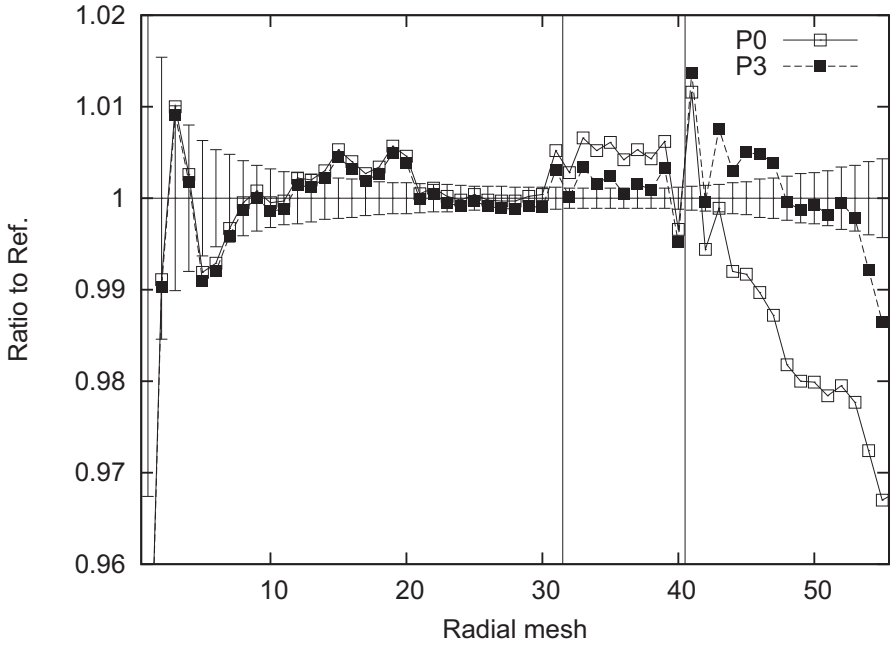


Fig. B.2.10 Results of U-238 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/2 model

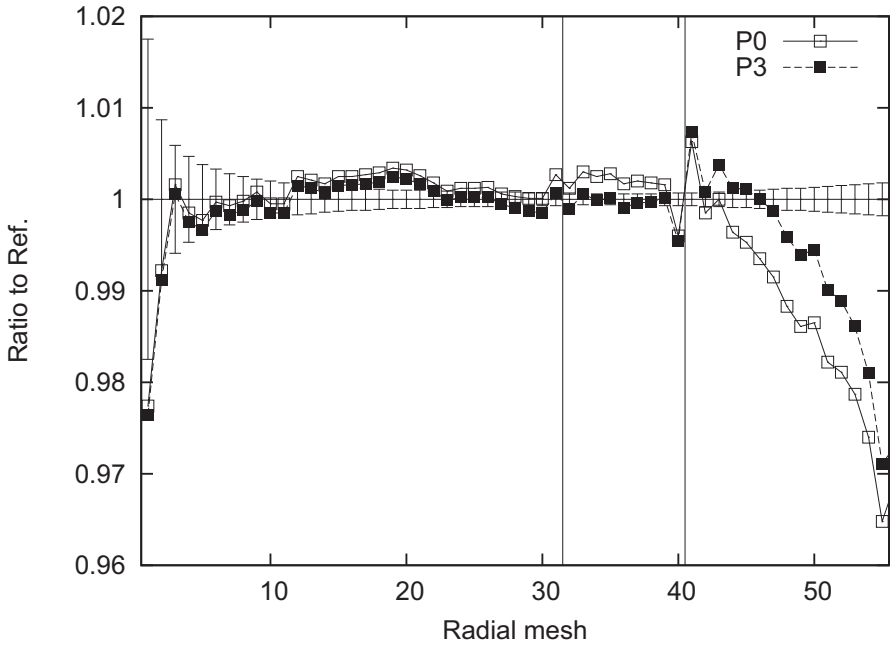


Fig. B.2.11 Results of Pu-240 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/2 model

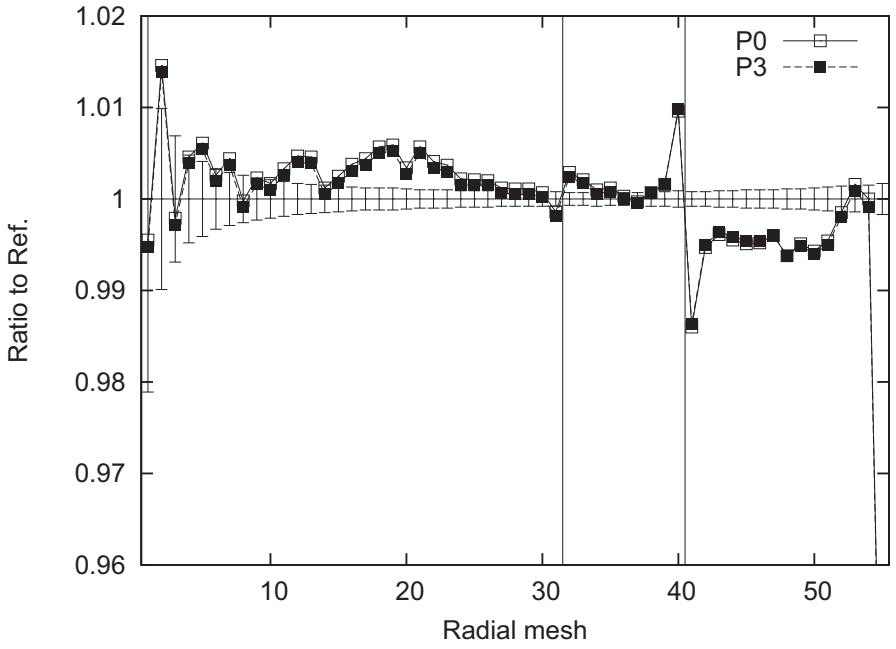


Fig. B.2.12 Results of U-238 capture reaction rate distribution in 1-D MZB/2 model

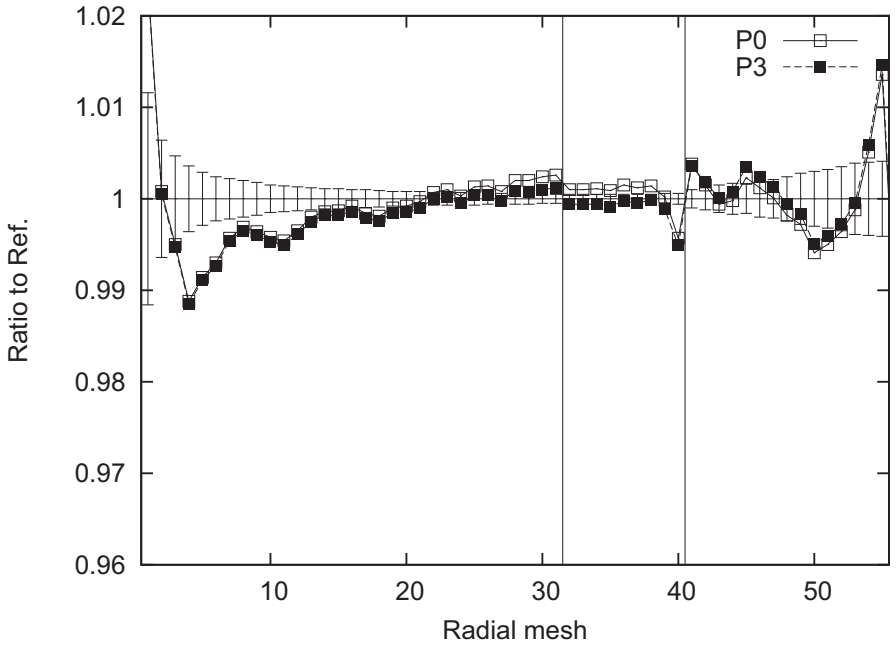


Fig. B.2.13 Results of Pu-239 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/3 model

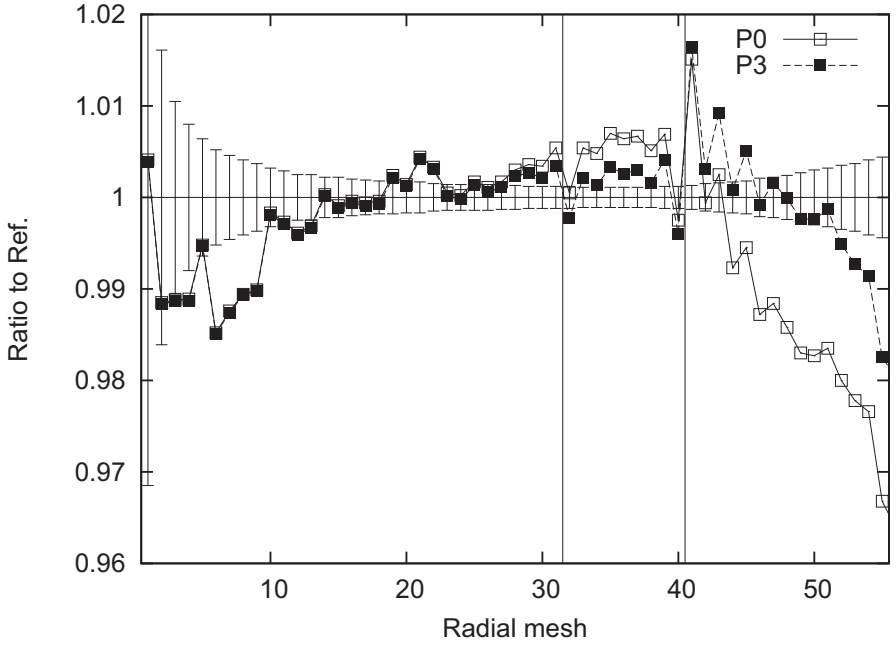


Fig. B.2.14 Results of U-238 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/3 model

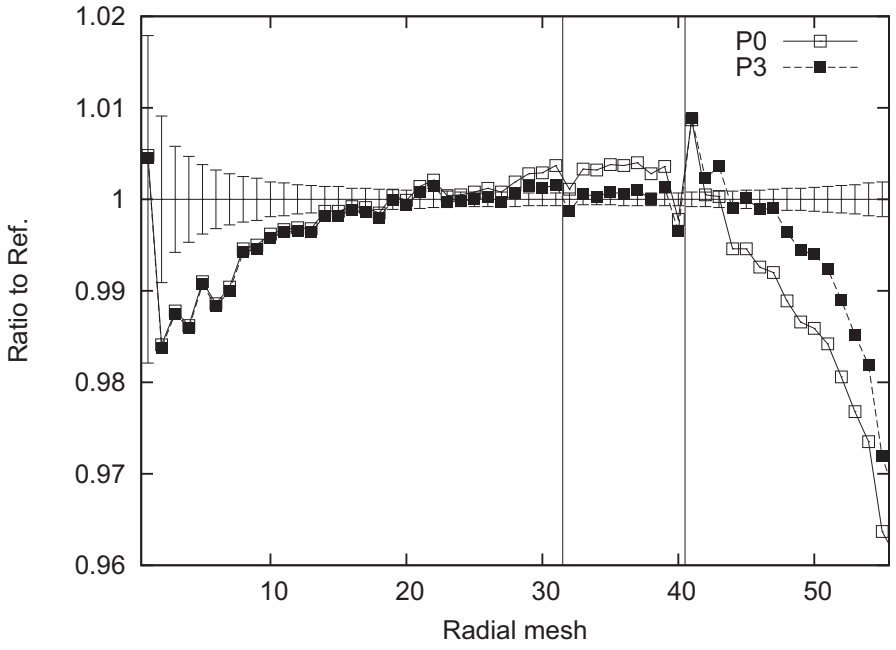


Fig. B.2.15 Results of Pu-240 fission reaction rate distribution in 1-D MZB/3 model

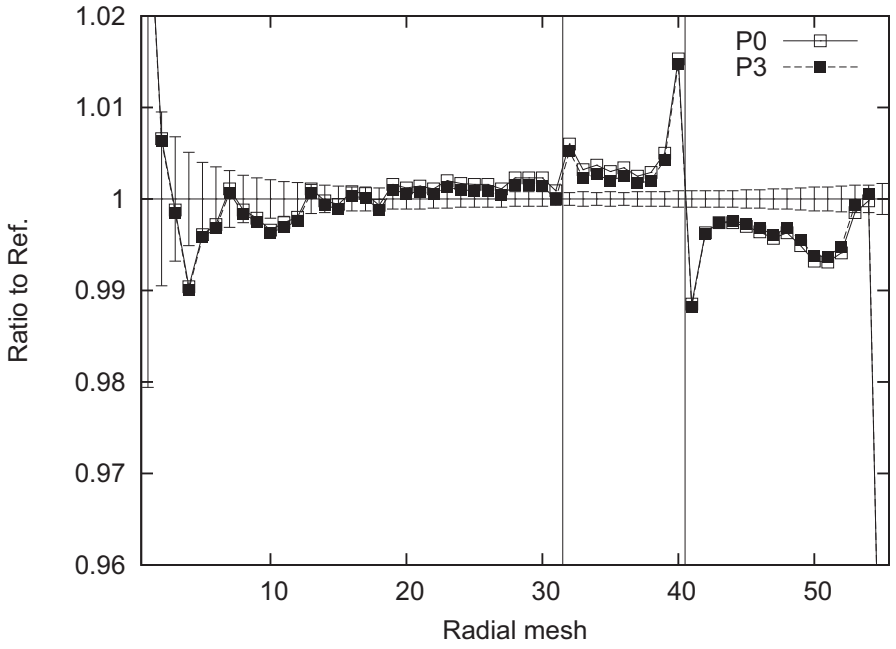


Fig. B.2.16 Results of U-238 capture reaction rate distribution in 1-D MZB/3 model

B.3　ブランケット領域における F28、F40 過小評価の原因調査

MZA モデルにおいて、閾値反応である F28、F40 について、ブランケット領域の過小評価が観察された。その原因としては、燃料領域で発生した高エネルギー領域の中性子の透過の過小評価と、ブランケット領域に含まれる U-235 の核分裂反応の過小評価とが考えられる。閾値反応ではない F49、C28 についてはブランケット領域の過小評価は観察されていないため、後者が原因とは考えづらいが、それを確認する目的で、ブランケット領域から U-235 を取り除いたモデルを考え、同様に計算を行った。

連続エネルギーモンテカルロ計算値に対する決定論計算値の比を、F28、F40 について **Fig. B.3.1** に示す。前節と同様にブランケット領域の過小評価が観察されていることから、閾値反応のブランケット領域における反応率の過小評価は高エネルギー中性子の透過の取り扱いに原因がある可能性が高いことが確認できた。

なお、非等方散乱を P5 まで考慮した計算、角度求積セットとして DP_{19} セットを用いた計算も行ったが、ブランケット領域の過小評価は改善しなかった。また、空間メッシュ数を倍にした計算を行ったところ、F28 の過小評価は僅かに改善したが、F40 への影響は軽微であった。

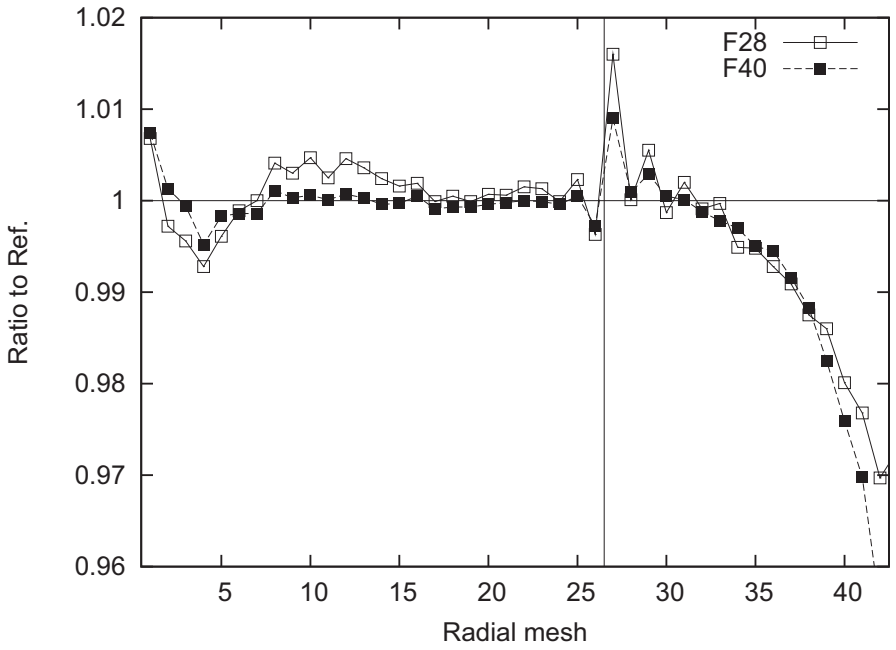


Fig. B.3.1　Results of U-238 and Pu-240 fission reaction rate distribution in the different MZA model

B.4　ブランケット領域における Pu-239 核分裂反応率エネルギースペクトルの比較

MZB では SUS 反射体の外側に炭素反射体が配置されており、ブランケット領域の深部では中性子束のエネルギースペクトルが有意に軟化することが予想される。そこで、MZB の炉心について、ブランケット領域における Pu-239 核分裂反応率のエネルギースペクトルを決定論的手法で計算した。

はじめに、MZB/1 についてブランケット領域における反応率スペクトルの位置依存性を観察した。結果を **Fig. B.4.1** に示す。これより、ブランケット領域の深部に進むに従い、反応率のエネルギースペクトルが低エネルギー側にシフトしていくこと、ブランケット領域の外周部では有意な熱エネルギー領域の寄与が存在することが分かる。

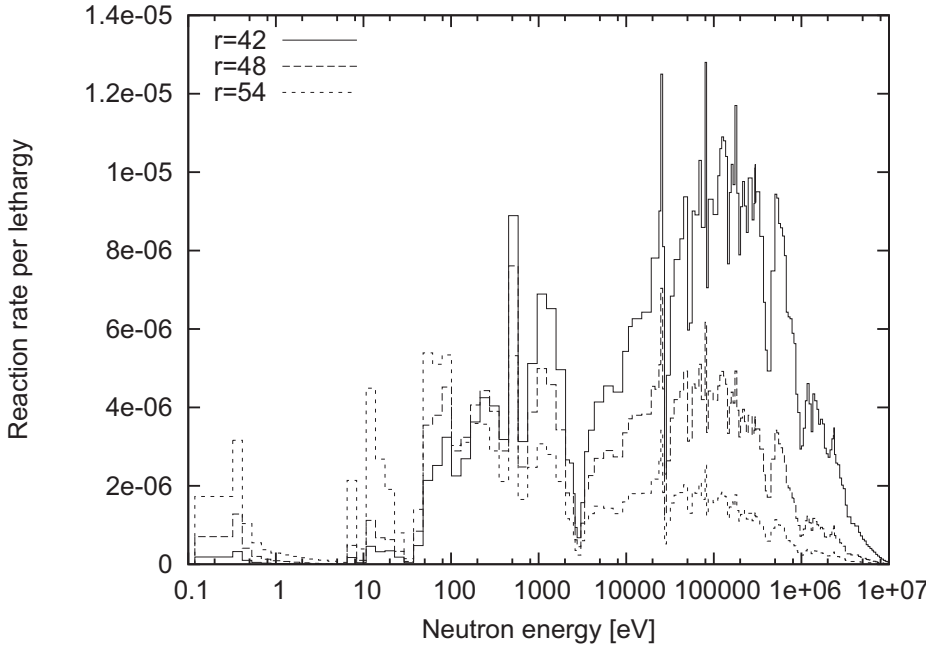


Fig. B.4.1　Plutonium-239 fission reaction rate energy spectra in the blanket region of MZB/1

次に、SUS 反射体に隣接するメッシュのひとつ内側のメッシュ位置における Pu-239 核分裂反応率のエネルギースペクトルを MZB/1、MZB/2、MZB/3 で比較した。結果を **Fig. B.4.2** に示す。いずれの炉心においても、熱エネルギー領域の寄与が観察される。

以上より、MZB の Pu-239 核分裂反応率分布において、ブランケット領域の深部では熱エネルギー領域の寄与が有意に存在することが分かった。

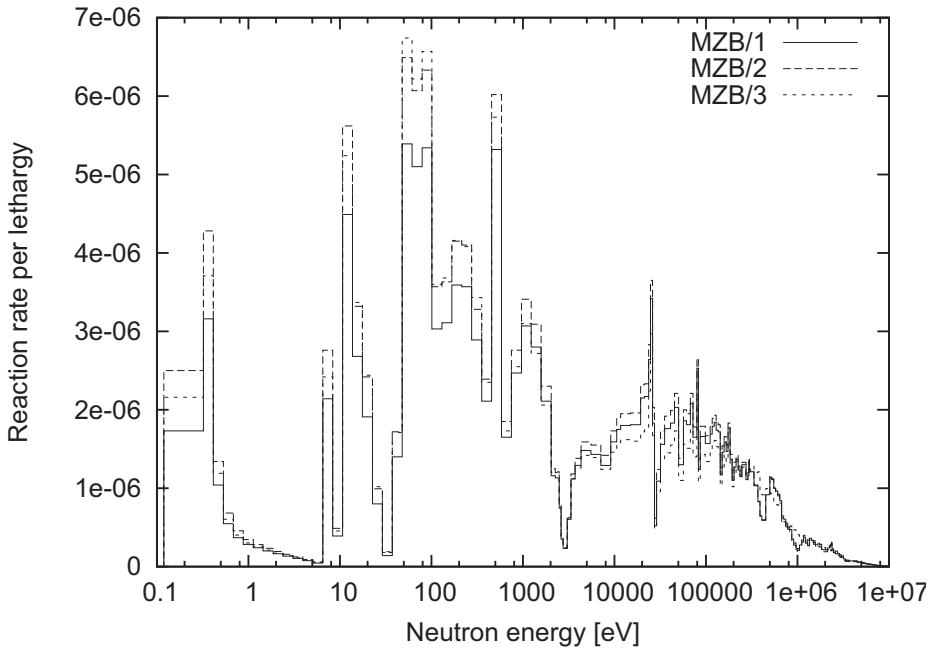


Fig. B.4.2 Plutonium-239 fission reaction rate energy spectra in the blanket region of the MZB cores

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^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度(a)，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(b)	（数字の） 1	1
比透磁率(b)	（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) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン(b)	rad	1 (b)	m/m
立体角	ステラジアン(b)	sr(c)	1 (b)	m^2/m^2
周波数	ヘルツ(d)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度(e)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m^{-2} cd
放射性核種の放射能(f)	ベクレル(d)	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト(g)	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s^{-1} 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およびsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、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一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表５．SI 接頭語

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

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=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	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ 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	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

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=10^5Pa
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^{-10}m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
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	$1\ erg=10^{-7}$ J
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}$N
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G =1Mx\ cm^{-2} =10^{-4}T$
エルステッド(c)	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$A m^{-1}

(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
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	$1\ \gamma=1\ nT=10\text{-}9T$
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu=1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています