

BFS 臨界実験解析

— BFS-62-3A 及び 62-4 炉心の解析 —

(研究報告)



2002年6月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

BFS 臨界実験解析 —BFS-62-3A 及び 62-4 炉心の解析— (研究報告)

羽様 平¹⁾、庄野 彰¹⁾、岩井 武彦²⁾、佐藤 若英²⁾

要旨

ロシア解体核処分支援を目的に、核燃料サイクル開発機構ではロシアの物理エネルギー研究所との共同研究により、高速炉臨界実験装置 BFS-2 を用いて BN-600 を模擬した実験の解析を実施している。

本報告は、BN-600 に部分的に MOX 燃料を装荷し、ブランケットをステンレス鋼に置換した炉心 (BN-600 ハイブリッド炉心) の模擬炉心 (BFS-62-3A 炉心)、及び BFS-62-3A 炉心のステンレス鋼をブランケットに戻した BFS-62-4 炉心の解析に関するものである。

解析は JUPITER 実験解析で培われた標準解析手法に基づいて実施した。その結果、臨界性と反応率比については十分な精度で実験値と一致することを確認した。制御棒価値や反応率分布については、BFS-62-4 炉心では特に問題は見られなかったが、BFS-62-3A についてはステンレス鋼領域での反応率分布を約 20% 過大に、制御棒価値の一部を約 10% 過小に評価することを確認した。

Na ボイド反応度については 20% 以上の過小評価となったが、炉定数の高度化により改善を図った結果、実験値とほぼ一致することを確認した。

また、これまでの BFS-62 シリーズ間の解析精度を比較することにより、MOX 燃料の部分的な装荷は解析精度に有意な影響を与えないことを確認した。

本解析では、精度評価に加えて BFS-62-3A 炉心による BN-600 ハイブリッド炉心の模擬性が重要であり、両炉心の核特性解析値を比較評価した。その結果、中性子スペクトル、核分裂反応率比、核分裂反応率分布及び制御棒価値については模擬性を有しているが、MOX 燃料装荷に伴い重要となる Na ボイド反応度については、非漏洩項に大きな差異があることが分かった。

本報告書の内容は、原子力システム(株)が核燃料サイクル開発機構(機構担当部課室:システム技術開発部、中性子工学グループ)との契約により実施した業務成果に関するものを含み、核燃料サイクル開発機構が取りまとめたものである。

- 1): 大洗工学センター システム技術開発部 中性子工学グループ
2): 原子力システム(株)

ANALYSES ON THE BFS CRITICAL EXPERIMENTS - AN ANALYSIS ON THE BFS-62-3A AND 62-4 CORES -

Taira Hazama¹⁾, Akira Shono¹⁾,
Takehiko Iwai²⁾, and Wakaei Sato²⁾

ABSTRACT

In order to support the Russian excess weapons plutonium disposition program, the international collaboration has started between Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) and Russian Institute of Physics and Power Engineering (IPPE). In the frame of the collaboration, analyses have been carried out for a series of critical experiments that simulate BN-600 (Russian commercial fast reactor).

This report summarizes analysis results of the critical experiments on BFS-62-3A and BFS-62-4 cores. BFS-62-3A core models BN-600 hybrid core in which the present BN-600 core is modified so as to partially load MOX fuel assemblies and replace the blanket region with stainless steel. BFS-62-4 core has the same layout as BFS-62-3A core except that the blanket region is not replaced.

The analyses were performed with JNC standard method developed in the analysis of JUPITER experiment. The results show a good agreement with experimental values for the criticality and the reaction rate ratio. For the control rod worth and the reaction rate distribution, the results for BFS-62-4 core are also reasonable. However, for BFS-62-3A, analysis results overestimate the reaction rate in the stainless steel region by 20% and underestimate reactivity worth for one of the control rods by 10%. For the sodium void reactivity, underestimation of more than 20% were observed, but the disagreement were successfully solved by adopting a newly developed nuclear constant set with a fine group structure.

In addition, analysis accuracies were compared among a series of analyses and it was confirmed that the introduction of MOX fuel assemblies does not affect the accuracy.

The final goal of the work is to reflect the analysis results for designing BN-600 hybrid core. Then similarity was investigated between BFS-62-3A core and BN-600 hybrid core.

A good similarity was found in the neutron spectrum, the fission reaction ratio, the fission reaction distribution, and the control rod worth. However, a large difference was found in the sodium void reactivity especially in the non-leakage term. This difference should be recognized in the future discussion to analyze uncertainty of the reactivity in BN-600 hybrid core.

This work was partly performed by Nuclear Engineering System under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

1): Reactor Physics Research Group, System Engineering Technology Division,
O-arai Engineering Center, JNC, Japan

2): Nuclear Engineering System Incorporation

目次

第1章 緒言	1
第2章 BFS 臨界実験解析に関する JNC-IPPE 共同研究の概要	3
2.1 JNC-IPPE 共同研究の全体像及び進捗状況	3
2.2 臨界実験体系	3
2.3 臨界実験における測定項目	4
第3章 BFS-62-3A 及び 62-4 炉心臨界実験の概要	7
3.1 BFS-62 体系概要	7
3.1.1 BFS-62-3A 炉心	8
3.1.2 BFS-62-4 炉心	8
3.2 BFS-62-3A 及び 62-4 炉心の臨界実験項目	8
3.2.1 臨界性	8
3.2.2 炉中心反応率比	8
3.2.3 反応率分布	9
3.2.4 制御棒価値	9
3.2.5 Na ボイド反応度	9
第4章 BFS-62 炉心実験の解析方法	15
4.1 解析データの作成	15
4.2 炉心計算モデル	16
4.3 臨界実験解析方法	16
第5章 BFS-62 炉心の実験解析結果	21
5.1 臨界性	21
5.2 反応率分布	21
5.3 炉中心反応率比	22
5.4 制御棒価値	22
5.5 Na ボイド反応度	22
5.6 まとめ	22
第6章 次世代炉定数システムの適用	35
6.1 次世代炉定数システム	35
6.2 次世代炉定数システムによる解析方法	35
6.3 臨界性	36
6.4 径方向反応率分布	38
6.5 制御棒価値	40
6.6 Na ボイド反応度	40
6.7 次世代炉定数システムの適用効果のまとめ	43
第7章 BFS-62-3A 体系の BN-600 ハイブリッド炉心の模擬性検討	55
7.1 検討方法	55
7.2 検討結果	55
7.2.1 炉心仕様	55
7.2.2 中性子スペクトル、随伴中性子スペクトル、反応率比	56
7.2.3 核分裂反応率分布	57
7.2.4 制御棒価値	57
7.2.5 Na ボイド反応度価値	58

7.2.6 感度係数の比較	59
7.3 まとめ	59
第8章 結言	83
謝辞	85
参考文献	87
付録 A 実験解析に使用した詳細情報	A-1
付録 B BFS-62-3A 及び 62-4 炉心の反応率分布解析結果の詳細	B-1

LIST OF TABLES

- Table 2.1 JNC-IPPE 共同研究の進捗状況 (2002 年 5 月時点)
- Table 2.2 BFS 臨界実験体系と現状 (2002 年 5 月時点)
- Table 2.3 臨界実験における測定項目
- Table 4.1 輸送・メッシュ補正值の評価条件
- Table 5.1 Result of analyses on criticality
- Table 5.2 Result of analyses on spectrum indices
- Table 5.3 Result of analyses on control rod worth for BFS-62-1
- Table 5.4 Result of analyses on control rod worth for BFS-62-2
- Table 5.5 Result of analyses on control rod worth for BFS-62-3A
- Table 5.6 Result of analyses on control rod worth for BFS-62-4
- Table 5.7 Summary of control rod worth analyses
- Table 5.8 Result of analyses on BFS-62-2 Na void reactivity (Cumulative)
- Table 5.9 Result of analyses on BFS-62-3A Na void reactivity (Cumulative)
- Table 5.10 Result of analyses on BFS-62-3A Na void reactivity with correction factor calculated in XYZ geometry
- Table 6.1 UF effect on criticality
- Table 6.2 Comparison of UF effect between BFS-62-3A and ZPPR-9
- Table 6.3 UF effect on control rod worth
- Table 6.4 UF effect on Na void reactivity of BFS-62-2
- Table 6.5 UF effect on Na void reactivity of BFS-62-3A
- Table 6.6 UF effect on effective cross section (contribution of major nuclides) for energy group 33
- Table 6.7 UF effect on effective cross section (contribution of major nuclides) for energy group 24
- Table 7.1 BN-600 ハイブリッド炉心の領域別均質原子数密度
- Table 7.2 BFS-62-3A 炉心と BN-600 ハイブリッド炉心の比較
- Table 7.3 制御棒吸収体領域の仕様の比較
- Table 7.4 核分裂反応率比の比較
- Table 7.5 制御棒価値の比較
- Table 7.6 BN-600 ハイブリッド炉心の制御棒吸収体部の非均質効果評価値
- Table 7.7 BFS-62-3A 炉心と BN-600 ハイブリッド炉心の Na ボイド反応度の比較
- Table 7.8 Na ボイド反応度価値計算時にボイド化した Na の重量
- Table 7.9 ボイド化 Na 単位重量当たりの Na ボイド反応度価値の比較
- Table 7.10 F25 (MOX) / F25 (LEZ) に対する感度係数の内訳

LIST OF FIGURES

- Fig.3.1 Conceptual description of the BFS-2 fuels
 Fig.3.2 The axial arrangements of the cells in the core region
 Fig.3.3 Radial layout of the BFS-62-3A core
 Fig.3.4 Radial layout of the BFS-62-4 core
 Fig.3.5 Schematic description of the reaction rate measurements
 Fig.4.1 Plate stretch modeling for the BFS-2 cell
 Fig.5.1 F49 reaction rate distribution in the radial direction
 Fig.5.2 F25 reaction rate distribution in the radial direction
 Fig.5.3 F28 reaction rate distribution in the radial direction
 Fig.5.4 F49 reaction rate distribution in the axial direction
 Fig.5.5 F25 reaction rate distribution in the axial direction
 Fig.5.6 F28 reaction rate distribution in the axial direction
 Fig.5.7 Result of control rod worth analyses
 Fig.6.1 Comparison of Production term in UF effect
 Fig.6.2 Comparison of UF effect on Fission cross section
 Fig.6.3 UF effect on the reaction rate distribution in the radial direction (F49)
 Fig.6.4 UF effect on the reaction rate distribution in the radial direction (F25)
 Fig.6.5 UF effect on the reaction rate distribution in the radial direction (F28)
 Fig.6.6 Comparison of UF effect between before and after group collapsing
 Fig.6.7 Comparison of non-leakage term between JFS and UF
 Fig.6.8 UF effect on each component of non-leakage term
 Fig.6.9 Flux based UF effect on each component of non-leakage term
 Fig.6.10 UF effect on neutron spectrum
 Fig.6.11 Cross section based UF effect on each component of non-leakage term
 Fig.6.12 UF effect on macro cross section change in perturbation
 Fig.6.13 UF effect on effective macro cross section (capture)
 Fig.6.14 Adjoint flux based UF effect on each component of non-leakage term
 Fig.6.15 Change of removal cross section in perturbation (JFS)
 Fig.6.16 UF effect on adjoint flux increment between neighboring energy groups
 Fig.6.17 UF effect on adjoint flux
 Fig.6.18 UF effect on macro cross section (NuSIGF-SIGA)
 Fig. 7.1 BFS-62-3A 炉心の 2 次元 RZ 体系図
 Fig. 7.2 BN-600 ハイブリッド炉心の 2 次元 RZ 体系図
 Fig. 7.3 BFS-62-3A 炉心配置図
 Fig. 7.4 BN-600 ハイブリッド炉心配置図
 Fig. 7.5 燃料部核分裂中性子数の発生割合
 Fig.7.6 中性子スペクトルの比較 (リニアスケール。BN600、BFS62-3A)
 Fig.7.7 中性子スペクトルの比較 (ログスケール。BN600、BFS62-3A)
 Fig.7.8 随伴中性子スペクトルの比較 (BN600、BFS62-3A)
 Fig. 7.9 F28/F25 反応率比の比較 (炉心中心)
 Fig. 7.10 F28/F25 反応率比の比較 (径方向遮蔽体領域)
 Fig. 7.11 径方向反応率分布(F49)
 Fig.7.12 径方向反応率分布(F25)
 Fig.7.13 径方向反応率分布(F28)
 Fig. 7.14 軸方向反応率分布(F49)

- Fig. 7.15 軸方向反応率分布(F25)
- Fig. 7.16 軸方向反応率分布(F28)
- Fig. 7.17-1 BFS-62-3A 炉心と BN-600 ハイブリッド炉心の Na ボイド反応度価値の比較
- Fig. 7.17-2 BFS-62-3A 炉心と BN-600 ハイブリッド炉心の単位 Na 重量当たりの Na ボイド反応度価値の比較
- Fig. 7.18 臨界性に対する核種・反応毎の感度係数
- Fig. 7.19 F49/F25 炉心中心反応率比に対する核種・反応毎の感度係数
- Fig. 7.20 F28/F25 炉心中心反応率比に対する核種・反応毎の感度係数
- Fig. 7.21 F49/F25 反射体領域反応率比に対する核種・反応毎の感度係数
- Fig. 7.22 F28/F25 反射体領域反応率比に対する核種・反応毎の感度係数
- Fig. 7.23 F49 反応率分布 (MOX 領域) に対する核種・反応毎の感度係数
- Fig. 7.24 F25 反応率分布 (MOX 領域) に対する核種・反応毎の感度係数
- Fig. 7.25 F28 反応率分布 (MOX 領域) に対する核種・反応毎の感度係数
- Fig. 7.26 F49 反応率分布 (径方向遮蔽体領域) に対する核種・反応毎の感度係数
- Fig. 7.27 F25 反応率分布 (径方向遮蔽体領域) に対する核種・反応毎の感度係数
- Fig. 7.28 F28 反応率分布 (径方向遮蔽体領域) に対する核種・反応毎の感度係数
- Fig. 7.29 炉心中心 1 体調整棒全挿入価値に対する核種・反応毎の感度係数

第1章 緒言

現在、ロシアでは解体核 Pu を含む燃料を高速発電炉 BN-600 で燃焼処分することを目的として、設計研究及びその予備実験と解析が行われている。その支援のために、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）ではロシアのオブニンスクにある物理エネルギー研究所（IPPE）との共同研究⁽¹⁾を1999年6月に開始し、その一環として、高速炉臨界実験装置 BFS-2 を用いた BN-600 模擬体系の実験解析（BFS 臨界実験解析）を実施している。

BFS 臨界実験は、高速炉用核設計基本データベースの充実の観点でも重要である。データベースは高速炉核設計の精度検証に不可欠であるが、サイクル機構で整備しているデータベースは現状では JUPITER 臨界実験^{(2)~(7)}が大半を占めている。BFS 臨界実験を加えることによって多様性が向上し、より信頼性の高いデータベースの構築が可能となる。

現時点では予定された6種類の臨界実験体系のうち5体系について測定が終了し、これまで第1体系(BFS-62-1 炉心)、第2体系(BFS-62-2 炉心)、及び第3体系(BFS-62-3A 炉心)について、2000年4月から2002年3月に4回にわたって開催された IPPE との共同研究会合^{(8), (9), (10)}の場で議論・情報交換を行ってきている。BFS-62-1 及び 62-2 炉心の実験解析の詳細については報告書^{(11), (12)}にまとめている。

本報告書は、引き続き BFS-62-3A 炉心及び第4体系（BFS-62-4 炉心）の臨界実験解析に関する詳細情報をまとめたものである。

BFS-62-3A 炉心は、BN-600 への解体核 Pu 装荷の第1段階である BN-600 ハイブリッド炉心（部分的に MOX 燃料を装荷し、ブランケットをステンレス鋼製反射体で置換した炉心）を模擬した体系であり、BN-600 ハイブリッド炉心の特性を把握する上で4体系中最も重要性が高い。BFS-62-4 炉心は BFS-62-3A 炉心のステンレス反射体をブランケットに戻した体系であり、ステンレス鋼製反射体が核特性解析に及ぼす影響を把握することを目的としている。

解析は BFS-62-1 及び 62-2 炉心の実験解析と同様、JUPITER 実験解析で培われた標準解析手法⁽¹³⁾に3次元 Hex-Z 体系計算を導入して実施した。

また、解析精度の向上検討として、現在開発整備中の次世代炉定数システム⁽¹⁴⁾を適用し、その効果の大きい Na ボイド反応度について要因を詳細分析した。

以上の実験解析に加え、BFS-62-3A 炉心と BN-600 ハイブリッド炉心の特性を比較し、類似点及び相違点を検討した。本検討結果は今後 BFS-62-3A 炉心の実験解析結果を BN-600 ハイブリッド炉心の解析精度評価に活用する際に役立つ。

本報告書の構成を以下に述べる。次の第2章では共同研究の全体像と臨界実験の進捗状況について、第3章においては BFS-62-3A 及び 62-4 炉心の構成及びそれぞれを用いて行われた臨界実験の概要を述べる。第4章では BFS-62-3A 及び 62-4 炉心実験の解析方法を、第5章ではそれに基づく解析結果を示す。第6章では第5章で得られた解析結果の一部について次世代炉定数解析システムを適用した結果を、第7章では、BFS-62-3A 炉心と BN-600 ハイブリッド炉心の模擬性検討結果を示し、第8章で以上をまとめる。

第2章 BFS 臨界実験解析に関する JNC-IPPE 共同研究の概要

2.1 JNC-IPPE 共同研究の全体像及び進捗状況

本共同研究は、サイクル機構 (JNC) とロシア・物理エネルギー研究所 (IPPE) との間で 1999 年 6 月に締結した契約 ("AGREEMENT on Experimental Investigation of Excess Weapons Pu Disposition in BN-600 Reactor using BFS-2 Facility") に基づき、1999 年度～2002 年度 (日本会計年度) の 4 年間の研究期間で実施している。

研究目的は、ロシアにおける核兵器の解体によって生じる余剰プルトニウム (Pu) の処分方策として検討されている高速発電炉 BN-600 における燃焼処分「BN-600 バイパック燃料オプション」の実施に先立ち、現在濃縮二酸化ウラン (UO_2) 燃料を装荷している BN-600 炉心にウラン-プルトニウム混合酸化物 (MOX) 燃料を装荷した場合の核特性解析精度を実験データに基づいて検証することである。このため、大きく分けて 5 つの概念から成る臨界実験体系を IPPE の大型臨界実験施設 BFS-2 にて構築し、設計上重要な核的パラメータの測定データを取得し、実験解析によってそれらの解析精度を評価する。さらには、BN-600 に MOX 燃料を装荷した炉心体系 (ベンチマーク計算用体系) における核特性の不確かさ評価を行う。

これらの実験・解析・評価作業は、JNC からの出資の下ですべて IPPE が実施する。一方、JNC は本共同研究の義務ではないが、取得した実験情報をもとに JNC の標準的な解析手法で評価を行い、IPPE の評価結果との比較、実験計画の検討、ZPPR 等の既存臨界実験解析データに基づく技術的アドバイス等を行うことにより、本共同研究成果の信頼性を向上させるように努める。ロシアの高速炉開発において MOX 燃料を大量に装荷した炉心に関する技術的知見はそれほど多くないため、「常陽」、「もんじゅ」、さらには実証炉以降の設計研究等で培ってきた JNC の技術的知見は IPPE 側も強い関心を示しており、一定の貢献を為すことが期待される。また、本共同研究で得られた成果は、両機関の連名で公開の会議・雑誌等に報告することを合意しており、直近では本年 10 月に韓国で開催される国際炉物理専門家会議 (PHYSOR2002) に 2 件の報告を行う計画である。

さらに、JNC による実験解析は上記の対露支援だけにとどまらず、日本の高速炉開発に活用される核設計基本データベースの拡充に資することが十分期待できるので、主要な測定データについてはすべて評価対象として実験解析を行い、既存臨界実験解析データとの整合性評価を行った上で、有用な技術情報を核設計基本データベースに取り込んでいく予定である。

Table 2.1 に本共同研究全体の進捗状況を示す。

2.2 臨界実験体系

BN-600 バイパック燃料オプションにおける MOX 燃料の装荷は二段階のステップを経るよう検討されている⁽¹⁵⁾。第一段階として計画されているのは、炉心の Na ボイド反応度を正にしない範囲で UO_2 燃料を MOX 燃料に置換するものである。MOX 燃料への置換割合は 20%強とされている。また、この際、Pu への不要な転換を抑制するために、現行炉心において燃料部外側に存在する径方向ブランケット集合体 (劣化 UO_2 ペレットが装荷されている) はすべてステンレス鋼製反射体に置換される。このようにして構成される炉心は「ハイブリッド炉心」と呼ばれ、年

間約 0.3t の解体プルトニウムを処分できるとされている。第二段階は全燃料領域を MOX 燃料に置換するものであり、これが実現すれば年間約 1.3t の解体プルトニウムの本格処分が可能となる。ただし、現状の燃料設計のまま全炉心領域に MOX 燃料を装荷すると、Na ボイド反応度が正の値になるのは自明であり、炉心高さの低減や炉上部 Na プレナムの設置等の炉心・燃料設計の変更が検討されている。

本共同研究で実施する臨界実験体系の策定にあたっては、上記の BN-600 炉心構成の変化を適切に模擬できるよう考慮する必要がある。Table 2.2 に、5つの概念についての臨界実験体系の概要と 2002 年 5 月時点の状況を示す。既に BFS-62-1～62-5 体系の測定を終了し、本共研の最終体系となる BFS-66 体系への変更作業が進められている。BFS-2 の Pu 在庫量は BN-600 のフル MOX 炉心を忠実に模擬するには不足しているが、BFS-66 体系では炉心中央部からできるだけ広い範囲に渡って MOX 燃料を配置し、その外側を適切な濃縮度の UO_2 燃料を配置することにより、設計体系の核特性をできるだけ模擬する予定である。

2.3 臨界実験における測定項目

Table 2.3 に、本共同研究で測定される核特性パラメータ、測定方法等を示す。

BN-600 における炉心変更は、二つの重要な特徴を持つ。一つは燃料領域における MOX 燃料の導入であり、もう一つは径方向ブランケット集合体のステンレス鋼製反射体による置換である。前者によって Na ボイド反応度が増加し、ロシアの高速炉安全性に関する基本方針として「Na ボイド反応度が正でないこと」が要求されることとも相俟って、Na ボイド反応度がハイブリッド炉心及び全 MOX 炉心の成立性に関わる重要項目になる。後者の影響は、ハイブリッド炉心における MOX 燃料の局所的な装荷とも相俟って、出力分布（核分裂反応率分布）に影響が生じるため、これも炉心成立性に直結する重要な評価項目となる。これらに加えて、基本的な炉物理特性である臨界性、制御棒価値、中心反応率比が、各実験体系で系統的に測定すべきパラメータとして選択された。

また、JNC の要望に基づいて実現した BFS-62-5 体系では、MOX 燃料領域の中性子スペクトルで決定する炉中心の測定値に注目し、ドップラー反応度価値、U-238 捕獲反応率と U-235 核分裂反応率の比 (C28/F25)、高次 Pu や Am を含む核分裂反応率比、及びサンプル反応度価値について測定値を得た。

Table 2.1 JNC-IPPE 共同研究の進捗状況 (2002年5月時点)

日本会計年度 項目	1999				2000				2001				2002	
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II-IV
BFS-62-1 体系	■													
BFS-62-2 体系	■													
BFS-62-3 体系					■									
BFS-62-4 体系					■									
BFS-62-5 体系									■				(移行中)	
BFS-66 体系													≡≡≡	
BFS 実験解析	■													
BFS以外の臨界実験解析	■													
BN-600 評価	■													
IPPE報告書:														
Technical	●												+ +	
Intermediate					●								+ + +	
Final													+	
共研打合せ	★				★				★				★	

■ 実施済み ● 受領済み

Table 2.2 BFS 臨界実験体系と現状 (2002年5月時点)

(◎終了 ○実施中 △準備中)

	体系ID.	燃料領域の 模擬対象	周辺領域の 模擬対象	主目的	計 画	測 定	解 析	報 告
I	62-1	UO ₂	UO ₂ ブランケット	現行BN-600の 特性評価	◎	◎	◎	○
II	62-2		SUS反射体	ブランケット/反射体 置換効果	◎	◎	◎	○
III	62-3A	UO ₂ + MOX	SUS反射体	ハイブリッド炉心の 特性評価	◎	◎	○	△
IV	62-4		UO ₂ ブランケット	反射体/ブランケット 置換効果	◎	◎	○	△
V	62-5	MOX(中央部) + UO ₂	UO ₂ ブランケット	MOX炉の 炉物理パラメータ評価	◎	◎		
	66	MOX(中央部) +UO ₂ +Na ⁷ リナム	SUS反射体	フルMOX炉心の 特性評価	○			

Table 2.3 臨界実験における測定項目

測定パラメータ	測定方法(制御棒全引抜模擬状態が基準)	備考
臨界性	ペリオド法により、過剰反応度を測定	測定値は10~20 β 程度
スペクトルインデックス (核分裂反応率比)	炉中心。F49/F25, F28/F25。核分裂計数管(小型、セグメント型)をトラバースし、1セル平均値を測定。熱中性子場比較法。	BFS-62-5では高次Pu, Amも測定対象とした
反応率分布	小型核分裂検出器(U235, Pu239, U238)をトラバースし、炉中心の値に規格化。	径方向分布はKey領域 軸方向は炉中心チャンネル
Naボイド反応度 価値	Key領域の中央60°方向の燃料部及び上部軸ブランケット部のNaペレットを空洞ペレットに置換し、その前後の過剰反応度を測定し、その差を求めた。(双方向)	BFS-62-2と3で実施 各燃料領域(LEZ, MEZ, PEZ, HEZ)毎に順次測定 (測定値は総計-20~-30 β 程度)
制御棒反応度価値	基準状態→制御棒フォロワ部引抜→B4C吸収体挿入、各状態変化時の中性束応答から反応度を求めた。	測定値は40~100 β 程度
ドップラー反応度価値	炉中心, U238, Np237, 300~900K	BFS-62-4と5で実施
C28/F25反応率比 (増殖比index)	炉中心。箔放射化法。劣化U箔と37%EU箔を同時に放射化させ、特性 γ 線の強度を測定。熱中性子場比較法	BFS-62-5のみ実施
サンプル反応度価値	炉中心。重核種はU235, Pu239, Pu240, Np237, Am241 サンプルオシレーション法	BFS-62-5のみ実施

第3章 BFS-62-3A 及び 62-4 炉心臨界実験の概要

3.1 BFS-62 体系概要

BFS-62-3A 及び 62-4 炉心の体系は、MOX 燃料を使用するなど燃料要素の一部で組成が異なるだけで、以下に述べる体系構成の基本は BFS-62-1 及び 62-2 炉心と同じである。

体系は基本セル構成の概念図 (Fig. 3.1) で示すように、ステンレス製で外径 5cm の円管チューブを 5.1cm ピッチで六角格子状に配置し、チューブ内に材質によって色分けされた直径 4.6~4.7cm 厚さ 1cm 以下の円盤状のペレットを炉心底部から積み上げていくことによって構成されている。チューブ間のギャップ部には、燃料配列を規則的にするためにステンレス製の棒が挿入されているが、径ブランケット、制御棒近辺、反応率と Na ボイド反応度測定等の実験に必要な装置が挿入されるチューブ周辺には挿入されていない。

BFS-62 シリーズの炉心燃料のセルは、Fig.3.2 に示すように炉心中心面を境にして、上下逆の並びになるように装荷されている。このセルの非対称性の影響 (Mirror 効果、あるいは非対称性効果) については、既報告の BFS-62-1 炉心及び 62-2 炉心の解析において評価しており、非対称性効果は局所的なもので、大局的な影響は小さいという評価結果を得ている⁽¹²⁾。例えば、BFS-62-1 の固有値 (輸送効果を含めた最確値) に関してその影響は 0.1% Δk 未満である。加えて、非対称性を正しく評価するためには、複雑なモデル化が必要であることも示している。

そのため、BFS-62-1 及び 62-2 の解析では非対称性効果は考慮していない。本解析においても同様に非対称性効果は考慮しないものとし、今後より詳細な評価が必要となる場合の検討項目と位置づけた。

また、ナトリウムペレットには、水素不純物が含まれるもの (Green または Old) と含まれないもの (Laser または New) が存在し、New ナトリウムはその在庫の関係から鍵穴状 (次節の炉心配置図参照) に装荷され、Key 領域と称されている。Na ボイド反応度、反応率比、及び径方向反応率分布の測定はこの Key 領域において実施された。

模擬制御棒として、模擬調整棒 (Compensation Rod (CR) Mock-up) と模擬安全棒 (Safety Rod (SR) Mock-up) が設置されている。模擬調整棒の吸収材部分は天然 B_4C ペレット 1 に対し Na ペレット 2 の比で構成されており (ペレット厚さはほぼ同等)、模擬安全棒のものは天然 B_4C ペレットのみにより構成されている。吸収材以外の部分は FOLLOWER であり、Na ペレットとステンレスペレットで構成される。制御棒要素 1 体は 4 つのチューブから構成され、模擬調整棒は炉中心 1 体、第 1 リング 6 体と第 3 リング 12 体に、模擬安全棒は第 2 リング 6 体に配置されている。このうち、炉中心の 1 体については、炉中心の制御棒値を測定する時にのみ設置されるが、その他の模擬制御棒については他の核特性の測定時には、FOLLOWER 部が炉心内に、吸収材部分が上部ブランケット部に位置するように設置され、制御棒挿入を模擬する際には、逆になるように設置される。

実験で設置されている模擬制御棒のうち、測定に使用されたものを Fig.3.3 で略

称により示している。例えば、R1-6（又は Ring1-6）は第1リングの6番目の位置を表す。

3.1.1 BFS-62-3A 炉心

BFS-62 炉心実験シリーズの3番目に構成された BFS-62-3A 炉心は、現行 BN-600 に部分的に MOX 燃料を装荷し、ブランケットをステンレス鋼製反射体で置換した炉心（BN-600 ハイブリッド炉心）を模擬した体系であり、BFS-62-4 までの4体系の中で最も重要な体系として位置づけられる。

体系は、3種類のウラン濃縮度の異なる燃料領域（低濃縮度領域（以下、LEZ）、中濃縮度領域（以下、MEZ）、高濃縮度領域（以下、HEZ））、MOX 領域、劣化ウランのみにより構成される径ブランケット、ナトリウムが含まれる上下軸ブランケット、上部遮へい体、下部支持構造物から構成されている。Fig.3.3 に炉心構成を示す。MOX 領域が追加されている点が BFS-62-1 及び 62-2 との主な相異点である。

また、BFS-62-2 炉心の場合と同様に、Key 領域の延長上にステンレス鋼反射体及び B₄C 遮へい体が設置されている。

各セル構成には、プルトニウム、濃縮金属ウラン（36、90%）、濃縮二酸化ウラン（36%）、劣化二酸化ウラン、ナトリウム、アルミニウム、酸化アルミニウム、ステンレス、炭化ホウ素、銅の各ペレットが用いられ、燃料領域におけるウラン濃縮度は濃縮金属ウラン及び濃縮二酸化ウランの組み合わせにより調整されている。

3.1.2 BFS-62-4 炉心

BFS-62-3A に引き続き構成された BFS-62-4 炉心は、BFS-62-2 に対する BFS-62-1 の関係と同様であり、Fig.3.4 に示すように BFS-62-3A に対して Key 領域の延長上に存在するステンレス鋼製反射体及び B₄C 遮へい体をブランケット領域に戻した体系である。現行 BN-600 のブランケット領域を反射体に置換する効果及びその解析精度の評価を目的としている。

3.2 BFS-62-3A 及び 62-4 炉心の臨界実験項目

BFS-62-3A 体系では、臨界性、炉中心反応率比、径方向及び軸方向反応率分布、制御棒価値、Key 領域における広領域 Na ボイド反応度が測定された。BFS-62-4 では、Na ボイド反応度を除いた同項目について測定が実施された。

以下、各項目の測定方法の概要を述べる。

3.2.1 臨界性

臨界性は、実験装置の臨界制御用の制御棒を全て引き抜き位置に移動させた際の超臨界反応度をペリオド法で測定することによって評価された。実験誤差については、IPPE による評価結果は得られていない。

3.2.2 炉中心反応率比

反応率比の測定は、熱中性子場において反応率比の絶対値が校正されているため、

サンプル定量に関わる不確かさが発生せず、非常に高精度な実験値が得られているものと期待できる。測定は、外径 8mm 有感部 3cm の小型核分裂計数管を径方向中心にある燃料要素横のチューブ間ギャップへ挿入して実施された。軸方向については Fig.3.5 に示すように中心付近で計数管を 5~10mm 程度ステップ状に移動させることによって測定が実施され、セル全長にわたる反応率が測定対象核種毎に求められた。実験誤差は、統計誤差、計数管位置の不確かさ、統計処理時に使用されているデータに起因する不確かさ、熱中性子場に関わるデータが主因子であるが、統計誤差については実験中の配慮として、十分な統計精度が得られるように測定時間が設定されている。

3.2.3 反応率分布

反応率分布の測定は、反応率比の場合と同様に小型核分裂計数管をチューブ間ギャップに挿入して実施された。径方向分布については Fig.3.3 に示す key 領域の中心線上で燃料領域の中心高さに計数管を設置して、軸方向については Fig.3.5 に示すように中心の燃料要素横で燃料領域の中心高さを基点として 2.5cm 間隔に移動させて測定が実施された。実験誤差の因子は反応率比の場合と類似しており、統計誤差、計数管位置の不確かさ、統計処理時に使用されているデータに起因する不確かさである。

3.2.4 制御棒価値

制御棒価値は動的測定法により評価されており、制御棒フォロー引き抜き時（空気との置換）と制御棒吸収材挿入時（空気からの置換）それぞれにおける検出器（径ブランケット領域に装荷された複数のポリエチレン減速材付電離箱）信号の時間変化を基に逆時間方程式を解くことにより反応度を算出し、別途実験的に得られた検出効率の比を用いて補正することにより求められた。実験誤差も報告されている。

3.2.5 Na ボイド反応度

Na ボイド反応度は、BFS-62-3A 炉心においてペリオド法を用いて測定された。ボイド化は燃料要素中の炉心及びブランケット領域について Na ペレットを同形状のアルミ BOX に置き替えることによって実施された。ボイド化する領域は Key 領域中の中心角 60 度の領域内であり、LEZ から HEZ にかけて 4 つのステップにわたって徐々にボイド化領域を拡張していき、その際の余剰反応度を測定することによって測定が実施された。ボイド化領域を拡張する方向と、縮小する方向の 2 パターンが実施され、その結果を基に代表値（平均値）と誤差が評価されている。

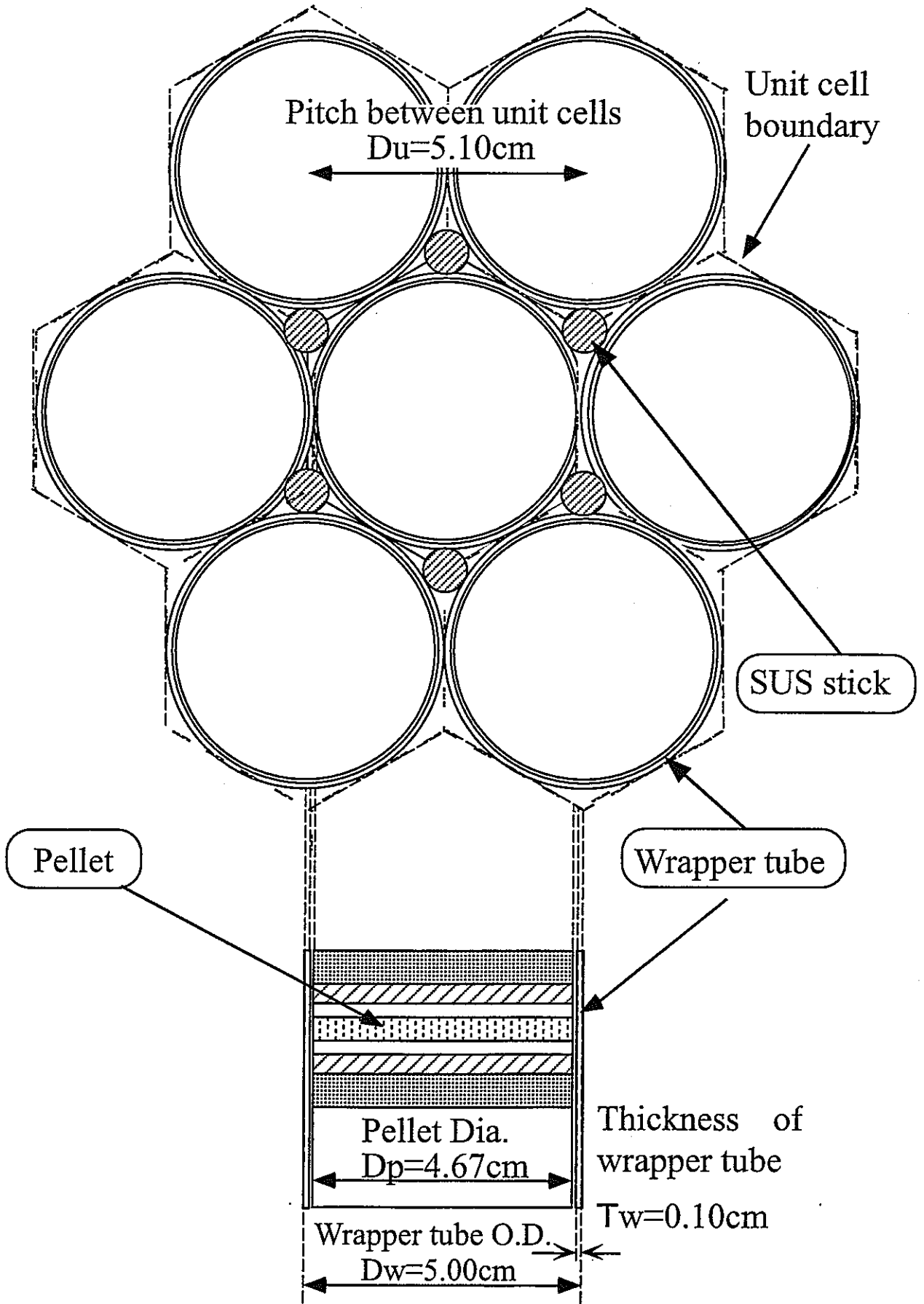


Fig.3.1. Conceptual description of the BFS-2 fuels

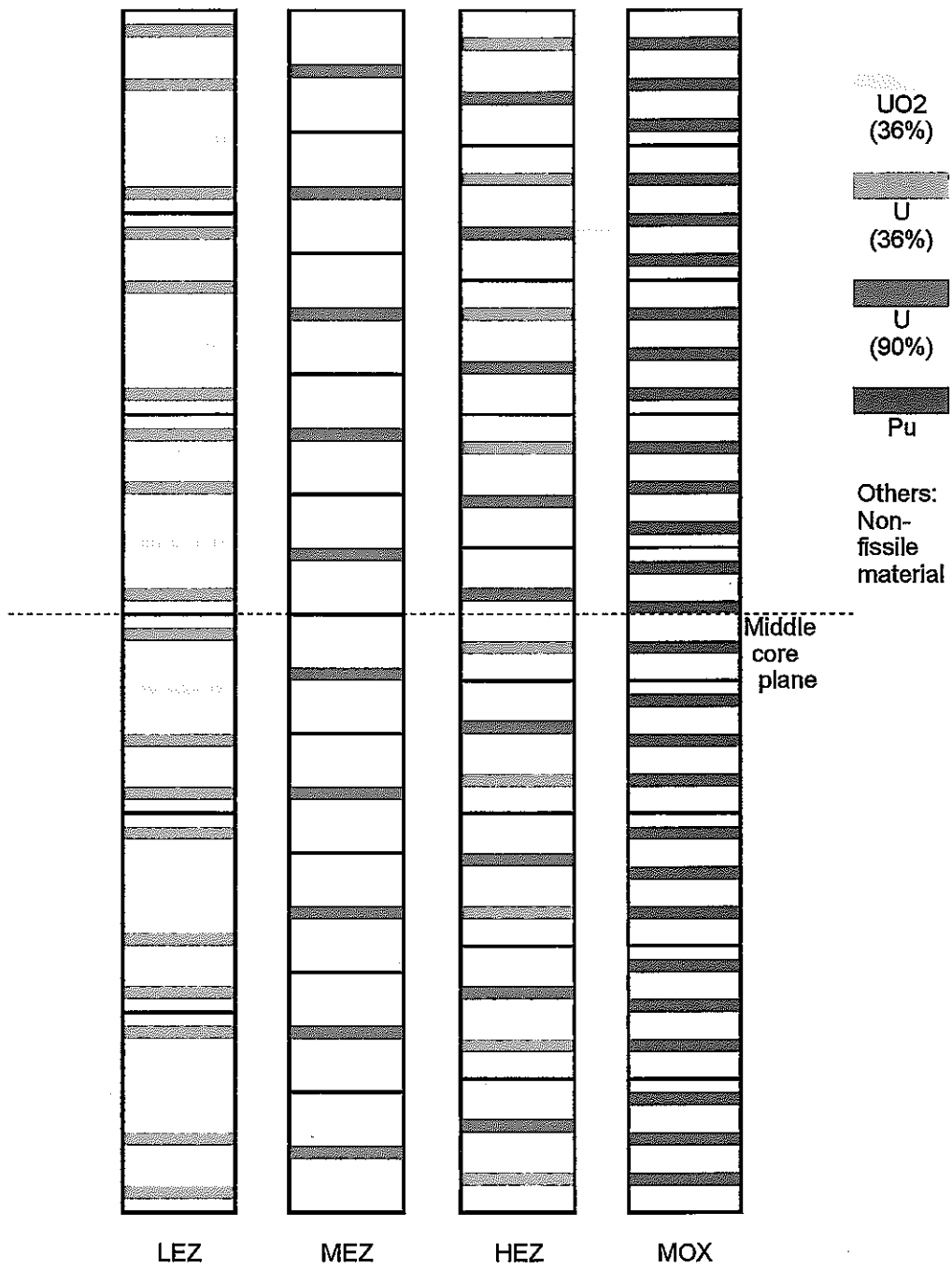


Fig.3.2. The axial arrangements of the cells in the core region

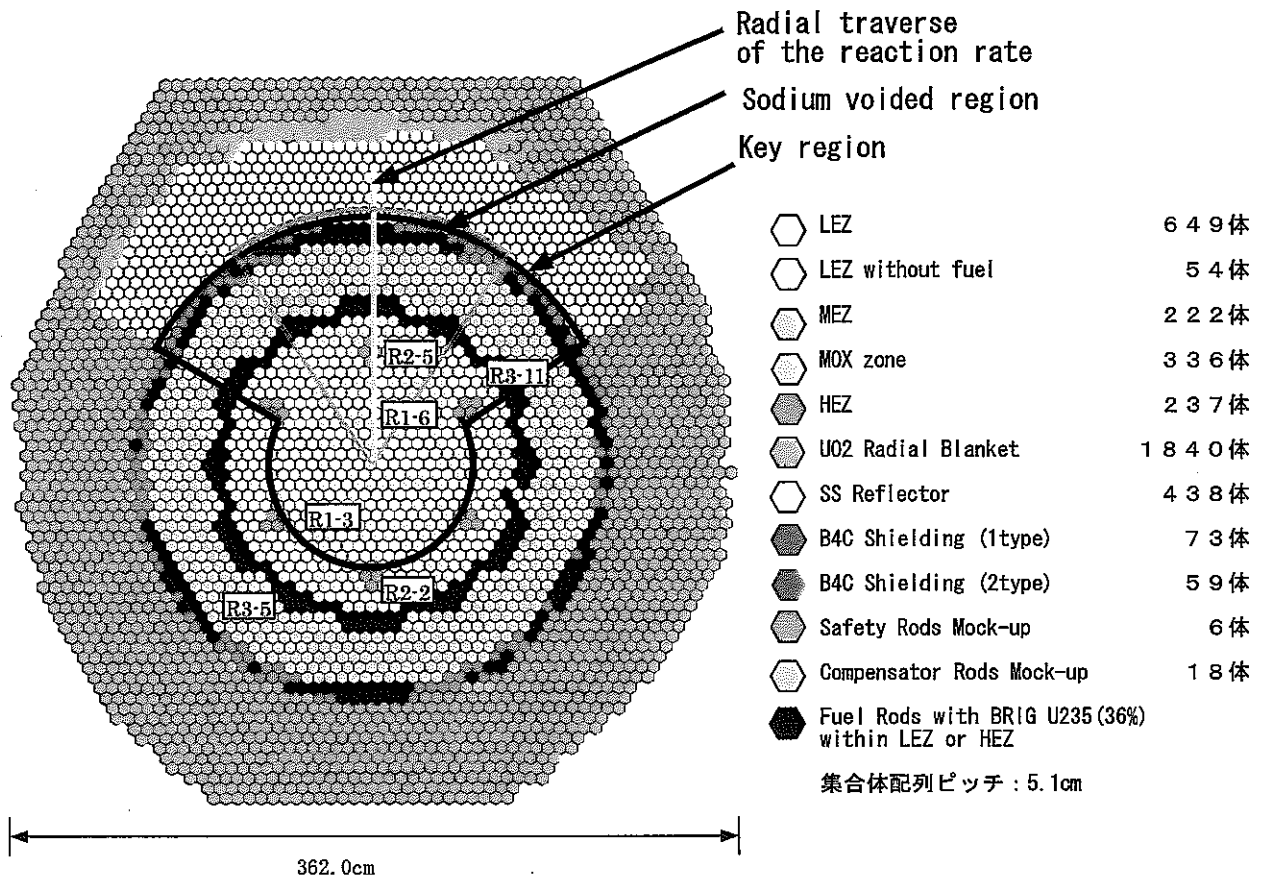


Fig.3.3. Radial layout of the BFS-62-3A core

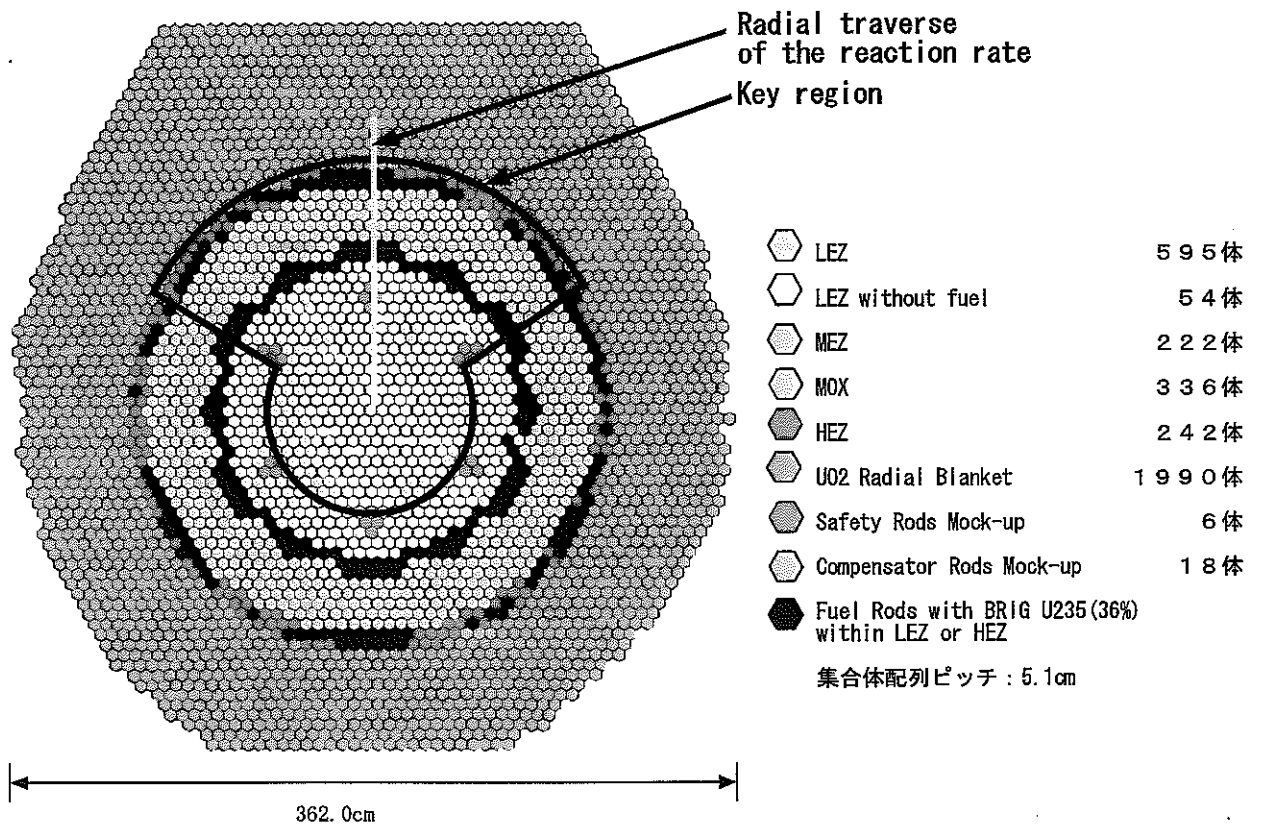


Fig.3.4. Radial layout of the BFS-62-4 core

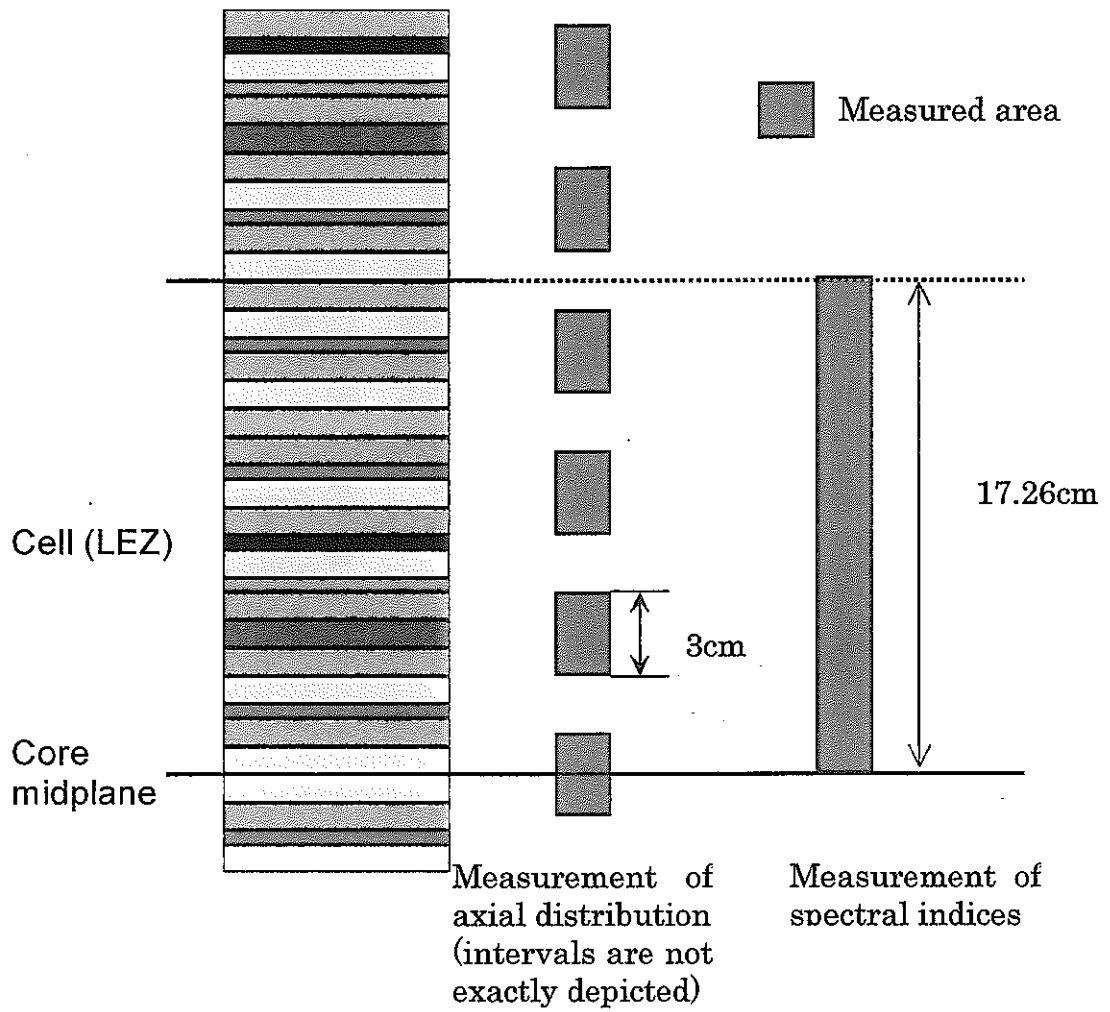


Fig.3.5. Schematic description of the reaction rate measurements

第4章 BFS-62 炉心実験の解析方法

4.1 解析データの作成

BFS-62-3A 及び 62-4 炉心について得られる実験情報には、BFS-62-1 及び 62-2 炉心と同様にペレット内部の構造についての情報が存在しないため、やはり BFS-62-1 及び 62-2 炉心と同様に以下の考え方に基づき、ミート部及びシェル部の高さ、密度を算出した。

- ①ペレット内のミート部とシェル部の高さは、ペレットの寸法、各部の重量及び密度データを基に算出する。
- ②ペレット内のミート部とシェル部間の空隙はシェルに含め、シェルの密度を希釈する。
- ③格子計算を1次元体系で実施する都合上、ペレットの側面部を燃料を挟む上下の領域に含める。

また、これも BFS-62-1 及び 62-2 炉心と同様であるが、ペレットの高さが2種類の Na で1%異なり、同じ LEZ 領域でもセル単位で0.5% (燃料領域全長1mに対して0.5cm) の差異が存在する。さらに、異なる燃料領域間では、燃料領域全長に対して1cm程度のばらつきがある。解析上は、この差異は厳密には扱わず、燃料領域の高さを2種類の LEZ 領域の平均値で統一し、インベントリーのみを保存するように領域毎に組成を調整した。格子計算は調整後の組成を用いてセルの種類に応じた形状で実施した。

なお、格子計算にはサイクル機構の標準解析手法⁽¹³⁾に従い1次元プレートストレッチモデルを適用した。すなわち、3.1節で示した基本セル構造を、Fig.4.1のように正六角単位セルにスミアした。その際、燃料ペレットのミート部側面に存在する円管チューブとステンレス棒についてはミート部を挟む上下のシェル部に均一に含めた。ステンレス棒は、炉心燃料領域とその上下の領域のみに1セル当たり2本挿入され、それ以外の領域に対しては挿入されていないものとした。

4.2 炉心計算モデル

62-3A 炉心及び 62-4 炉心の炉心計算モデルは、62-1 炉心及び 62-2 炉心同様、Hex-Z 体系とし、IPPE より得た炉心レイアウト情報に基づきチューブ単位に領域を区分した。ただし、Na ボイド反応度及び核分裂反応率の輸送・メッシュ補正については、Hex-Z 体系で解析が出来ない、あるいは 3 次元計算では精度のよい解析結果が得られないため、2 次元 RZ 体系とした。その際の体系は上記 2 特性が、key 領域で測定されていることを考慮し、Key 領域モデル (Key 領域含む 120° セクタを全周方向にわたって展開したモデル) とした。

4.3 臨界実験解析方法

解析は、JUPITER 等で用いられている標準解析手法に 3 次元 Hex-Z 炉心計算を導入して実施した。

格子計算は、JENDL-3.2⁽¹⁶⁾, ⁽¹⁷⁾ベースの 70 群 JFS ライブラリ (JFS-3-J3.2⁽¹⁸⁾, ⁽¹⁹⁾) の改訂版 (JFS-3-J3.2R⁽²⁰⁾) を用い、前述のようにプレートストレッチモデルを適用して実施した。実効断面積は、燃料領域については CASUP コードによる非均質計算で TONE の方法⁽²¹⁾を採用し、非燃料領域は SLAROM コードによる均質計算により作成した。なお、制御棒セルの吸収体部については、吸収体部、円管チューブ、及び制御棒を囲む燃料領域それぞれを均質化して R 方向 1 次元スーパーセル計算を実施し、吸収体及び円管チューブを均質化した実効断面積を作成した。制御棒セルのフォロワー部についても同様に評価した。

基準計算は 3 次元 Hex-Z 体系 70 群拡散計算で、Benoist の異方性拡散係数を用いて実施した。ただし、実効遅発中性子割合については、遅発中性子データの制約から 18 群へ縮約して評価した。エネルギー群構造は付録 A Table A.2 に示す。

補正值としては、実効遅発中性子割合を除くすべての核特性について輸送・メッシュ補正值を評価し、それ以外の補正については核特性に応じて追加考慮した。

輸送・メッシュ補正值は、固有値のみから評価可能な核特性については、3 次元 Hex-Z 体系 18 群で 3 次元拡散計算コード CITATION-FBR と 3 次元 Hex-Z 輸送計算コード MINIHEX により算出した。摂動計算などの後処理プログラムが必要な核特性については、2 次元 RZ 体系 70 群で CITATION-FBR と 2 次元輸送計算コード TWOTRAN-II により算出した。その際、拡散係数には異方性拡散係数を平均して求めた等方拡散係数を用い、輸送計算で用いる輸送断面積には等方拡散係数の 3 倍の逆数を使用することによって、拡散係数と輸送断面積が整合するようにした。輸送計算は P0-S4 近似で行った。RZ 計算モデルは付録 A Fig. A.1 に示す。

各核特性の輸送・メッシュ補正值の評価時に用いた炉心体系及びエネルギー群数等を Table 4.1 にまとめる。

Table 4.1. 輸送・メッシュ補正值の評価条件

核特性	炉心体系	群数	後処理プログラム
臨界性	3 次元 Hex-Z	18	なし
反応率分布/比	2 次元 RZ Key 領域	70	LAGOON
Na ボイド反応度	2 次元 RZ Key 領域	70	PERKY、SNPERT
制御棒価値	3 次元 Hex-Z	18	なし

次に、各核特性の計算方法について示す。

(1) 臨界性

炉心計算により得られる固有値から算出し、補正として輸送・メッシュ効果を考慮した。

(2) 反応率分布、反応率比

炉心計算により得られる中性子束分布を Hex-Z 体系対応の LAGOON コードで処理して反応率分布を算出した。その際、JUPITER 実験解析と同様、格子計算によって求めたセルファクター⁽¹¹⁾を考慮した。

補正については、輸送・メッシュ補正に加え、反応率分布、反応率比それぞれについて以下の因子を考慮した。

反応率分布については、セルの非均質構造と検出器有感部（長さ 3cm）との関係を非均質効果として補正した。具体的には、非均質格子計算により炉心軸方向にわたる非均質反応率分布の平均値を計算し、実際に測定が行われた検出器位置の有感部にわたる平均値との比を非均質補正とした。なお、3.2.3 項で述べたように径方向分布測定時の検出器の軸方向位置あるいは軸方向分布測定時の基点は燃料領域の中心であるが、4.1 節で述べたように燃料部の高さは燃料や Na の種類に応じて若干異なるため、異なる領域間での中心位置は厳密には一致しない。径方向分布の測定において軸方向位置を変更することは考えがたいので、本解析では key 領域の LEZ 燃料部の中心に検出器が位置するものと見なし、その位置を基に各領域のセル内における検出器位置を評価した。

また、径方向反応率分布の測定においては、異なる領域間（例えば LEZ 1 体と MEZ 2 体の間）で測定されている場合があるが、その場合には隣接 3 体の非均質補正值を体数で平均した。C/E 値は炉中心に最も近い位置で規格化した。

反応率比については、径方向検出器位置補正を施した。非均質補正は測定がセルの全長に対して実施されているため不要である。逆に反応率分布に対する径方向検出器位置補正は、その影響が各測定点で同程度に表れ、相対値としてはキャンセルされるものと見なし、考慮していない。径方向検出器位置補正は、連続エネルギーモンテカルロコード MVP⁽²²⁾でセル構造を厳密に扱った計算によりミクロの反応率の比（検出器位置での値/セル平均値）を求め、決定論的格子計算によって求めたセルファクターとの比を取ることで評価した。

(3) Na ボイド反応度

LEZ、MEZ、MOX 及び HEZ のステップ毎の反応度変化を厳密摂動論によって評価した。輸送・メッシュ補正についても計算自体はステップ毎に実施したが、補正值の算出は各ステップまでの積算値について反応度の漏洩成分と非漏洩成分それぞれについて実施し、対応する基準計算値に適用した。

(4) 制御棒価値

制御棒価値の計算は、反応度が十分大きいので、直接計算、すなわち制御棒挿入時と引き抜き時の固有値より算出した。補正として輸送・メッシュ効果を考慮した。

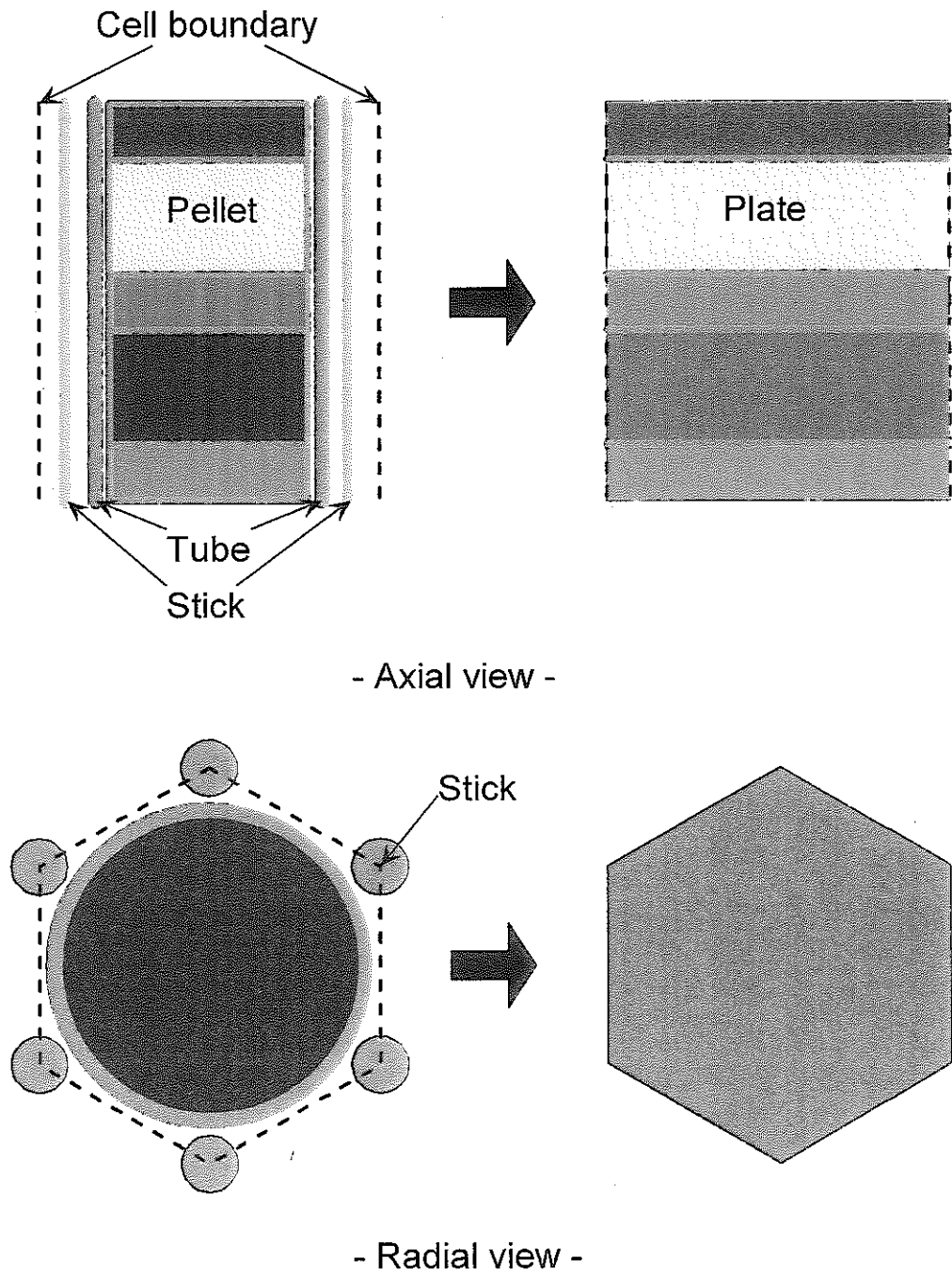


Fig.4.1. Plate stretch modeling for the BFS-2 cell

第5章 BFS-62 炉心の実験解析結果

第4章に述べた手法による BFS-62-3A 及び 62-4 炉心の解析結果を BFS-62-1 及び 62-2 炉心の結果と併せて示す。なお、既報告の BFS-62-1 炉心及び 62-2 炉心の解析結果には高速炉用炉定数 JFS-3-J3.2 の誤りの影響が含まれているため、BFS-62-1 及び 62-2 炉心についても基準計算についてのみ JFS-3-J3.2R を用いて再解析し、その結果を示している。

5.1 臨界性

臨界性の解析結果を Table 5.1 に示す。C/E 値は 62-3A 炉心で 0.9953、62-4 炉心で 0.9936 と 0.5%～0.7%ほどの過小評価が見られた。これは、MOX 燃料主体の炉心である JUPITER 実験シリーズ(ZPPR-9, 13A, 17A)の C/E 値(0.992～0.994)と同程度である。径ブランケットの一部をステンレス鋼製反射体に置換した影響 (BFS-62-3A 炉心と BFS-62-4 炉心との差)、MOX 燃料を装荷した影響 (BFS-62-2 炉心と BFS-62-3A 炉心との差) はいずれも 0.2%以下と小さいことが確認できる。

5.2 反応率分布

Pu-239、U-235、及び U-238 それぞれの核分裂反応率 (F49、F25、F28) の、径方向及び軸方向の実験解析結果を Fig. 5.1～5.6 に、62-1 炉心及び 62-2 炉心の結果と併せて示す。補正值を含む詳細データは付録 B に記載している。

まず、径方向分布について述べる。F49、F25 の C/E 値は、62-3A 炉心と 62-4 炉心は燃料領域では同様の傾向を示している。しかし反射体領域 (62-4 炉心ではブランケット部に相当する領域) では、62-3A 炉心で 30%～40%の過大評価が見られるのに対し、62-4 炉心では極端な C/E 値の悪化は見られない。

F28 については、62-3A 炉心と 62-4 炉心で差が見られない。120cm 以上の測定点では C/E 値に差異が生じているが、この領域では測定値自体が小さく誤差が大きいと考えられる。

62-1 炉心と 62-4 炉心を比較することにより MOX 燃料を追加した影響について見ると、各反応のいずれの場合でも MOX 燃料装荷部 (径方向 80cm～100cm) で中性子束が大きくなっていることが確認できる。C/E 値としては MOX 燃料装荷部付近で数%の差異が存在するが、実験誤差 (F49, F25 の燃料領域で 2%、ブランケット領域で 4%、F28 の燃料領域で 3%、ブランケット領域で 7%) を考慮すると有意な差ではない。

次に、軸方向分布について述べる。F49、F25 の C/E 値の 1 からのずれは、燃料領域及びブランケット領域ともに炉心によらず実験誤差の範囲内にある。

ブランケット上部に位置する遮へい体領域では、炉心によって程度に差があるが、径方向の反射体領域と同様に過大評価しており、やはりステンレス鋼で構成される領域の評価に課題があることが確認できる。

F28 については、燃料領域では F49, F25 の場合と同様に精度良く評価できている。ブランケット及び遮へい体領域では炉心間で C/E 値にばらつきが見られるが、この領域では測定値自体が小さく誤差が大きいことが原因と考えられる。

5.3 炉中心反応率比

F49/F25、F28/F25 の C/E 値を 62-1 炉心、62-2 炉心の結果と併せて Table 5.2 に示す。F49/F25、F28/F25 いずれについても炉心によらず C/E 値は、実験誤差 2% の範囲内にある。値自体もほぼ同じである。この測定が実施された領域は、各炉心間の差異がない炉中心（いずれの場合も LEZ 領域）であり、妥当な結果と言える。

5.4 制御棒価値

Table 5.3～5.7、及び Fig.5.7 に制御棒価値における計算結果を 62-1 炉心及び 62-2 炉心の結果と併せて示す。62-3A 炉心の Ring2（模擬後備炉停止棒）を除けば、C/E 値の 1 からのずれは 6% 以内にあることが確認できる。

62-3A 炉心の Ring2 の C/E 値は、Key 領域では 1.056、非 Key 領域では 0.879 と 1.0 から大きく離れている。Ring2 同士（key 領域と非 key 領域）の値を比較しても、62-3A の解析値のみ大小関係が逆になっている。この原因としては、反応率分布の解析で課題とされたステンレス鋼反射体の影響が 1 つの可能性として挙げられる。62-3A は MOX 燃料が外側炉心に装荷されているため、62-2 炉心に比べると外側炉心での中性子インポートランスが大きく、その分、反射体の影響を受けやすいと考えられる。

5.5 Na ボイド反応度

62-2 炉心の解析結果を Table 5.8 に、62-3A 炉心の結果を Table 5.9 に示す。測定値との比較は各ボイド化領域までの積分値で示している。すなわち、MEZ 領域の値は LEZ 領域と MEZ 領域をボイド化した反応度に相当する。

62-3A 炉心の C/E 値は 62-2 炉心と同様に 20～30% の過小評価となり、炉心内側の領域ほど過小評価が著しい。

この原因としては、炉定数に共鳴干渉効果を十分に考慮できない JFS を使用していること、及び輸送・メッシュ補正の算出時に RZ モデルを使用したことが挙げられる。JFS 使用に伴う問題点については、次世代炉定数を使用することによって非漏洩成分が著しく改善することが示唆されている。この点については、次章で詳しく述べる。輸送・メッシュ補正の評価法については、よりモデル化の近似が少ない 3 次元 XYZ による計算も試みている。結果を Table 5.10 に示す。漏洩項に対する補正効果が -10% もあり、補正後 C/E 値は 2 次元計算による補正値を用いた場合より悪化している。この原因としては、直接計算値と摂動計算値との間に 10% もの差異が存在していること、すなわち中性子束の収束精度の問題が考えられる。

近い将来 Hex-Z 体系での輸送計算が可能な MINIHEx コードが導入されるため、それを使用して補正値を算出することが望まれる。

5.6 まとめ

一連の核特性評価により得られた解析結果を以下にまとめる。

・臨界性

62-3A 炉心で 0.9953、62-4 炉心で 0.9936 と 0.5%～0.7% $\Delta k/k$ の過小評価が見られた。径ブランケットのステンレス鋼製反射体への置換や MOX 燃料の装荷に伴う解析精度への影響は C/E 値で 0.2% 以下と小さい。

- ・反応率分布

62-2 炉心で見られたように、反射体領域において F49、F25 径方向反応率分布が 30%~40%ほど過大評価している。MOX 燃料の装荷については有意な影響は確認できない。

- ・反応率比

F49/F25、F28/F25 いずれについても炉心によらず、実験誤差 2%の範囲内で解析結果が得られている。

- ・制御棒価値

62-3A 炉心の Ring2 以外は C/E 値の 1 からのずれは 6%以内である。62-3A 炉心の Ring2 については反射体の存在が不一致の一因として考えられるが、現時点では特定できない。

- ・Na ボイド反応度

C/E 値が 20~30%の過小評価である。炉定数や輸送補正の評価法に改善の余地がある。

Table 5.1. Result of analyses on criticality

	BFS62-1 ¹⁾	BFS62-2 ²⁾	BFS62-3A ³⁾	BFS62-4 ⁴⁾
Basic value	0.9939	0.9946	0.9924	0.9913
Transport and mesh correction	+0.0026	+0.0029	+0.0035	+0.0031
Corrected keff	0.9965	0.9975	0.9959	0.9945
Experiment	1.0013	1.0009	1.0007	1.0008
C/E value	0.9952	0.9966	0.9953	0.9936

¹⁾17.5 cents super critical in BFS-62-1($\beta_{eff}=7.16E-3$)

²⁾12.0 cents super critical in BFS-62-2($\beta_{eff}=7.16E-3$)

³⁾11.0 cents super critical in BFS-62-3A($\beta_{eff}=6.19E-3$)

⁴⁾14.0 cents super critical in BFS-62-4($\beta_{eff}=6.21E-3$)

Table 5.2. Result of analyses on spectrum indices

	BFS62-1		BFS62-2	
	F49/F25	F28/F25	F49/F25	F28/F25
Basic value	0.9515	0.0222	0.9516	0.0222
Trans effect	1.000	1.000	1.000	1.000
Position effect	0.983	0.982	←	←
Corrected value	0.939	0.0219	0.939	0.0219
Experimental value	0.943	0.0218	0.941	0.0224
C/E value	0.992	0.997	0.994	0.971
Measurement uncertainty (%)	2.1	1.8	2.1	1.8

	BFS62-3A		BFS62-4	
	F49/F25	F28/F25	F49/F25	F28/F25
Basic value	0.9452	0.0210	0.9468	0.0211
Trans effect	1.000	1.000	1.000	1.000
Position effect	0.983	0.982	←	←
Corrected value	0.929	0.0206	0.931	0.0206
Experimental value	0.937	0.0202	0.937	0.0208
C/E value	0.991	1.018	0.993	0.992
Measurement uncertainty (%)	1.6	2.0	1.5	2.4

Table 5.3. Result of analyses on control rod worth for BFS-62-1

	Center	R1-3	R1-6	R2-2	R2-5	R3-5	R3-11
Basic value ^{*1}	70.52	63.56	55.42	96.34	80.95	42.23	33.78
Transport & mesh correction ^{*2}	0.982	0.992	0.998	1.033	1.022	1.019	1.003
Corrected value ^{*1}	69.26	63.06	55.32	99.53	82.70	43.02	33.89
Experiment ^{*1}	71.49	65.11	57.51	100.21	87.53	41.75	34.07
C/E	0.969	0.969	0.962	0.993	0.945	1.030	0.995
Measurement uncertainty (%)	0.28	0.31	0.35	0.20	0.23	0.48	0.59

*1: Cents (Effective delayed neutron 0.00716)

*2: Ref.(12)

Table 5.4. Result of analyses on control rod worth for BFS-62-2

	Center	R1-3	R1-6	R2-2	R2-5	R3-5	R3-11
Basic value ^{*1}	71.82	62.23	59.51	92.88	89.01	38.90	36.16
Transport & mesh correction ^{*2}	0.982	0.992	0.998	1.033	1.022	1.019	1.003
Corrected value ^{*1}	70.54	61.74	59.41	95.95	90.94	39.63	36.28
Experiment ^{*1}	71.90	63.4	59.7	99.5	91.8	39.7	35.5
C/E	0.981	0.974	0.995	0.964	0.991	0.998	1.022
Measurement uncertainty (%)	0.28	0.32	0.34	0.20	0.22	0.50	0.56

*1: Cents (Effective delayed neutron 0.00716)

*2: Ref.(12)

Table 5.5. Result of analyses on control rod worth for BFS-62-3A

	Center	R1-3	R1-6	R2-2	R2-5	R3-5	R3-11
Basic value ^{*1}	55.40	54.19	55.00	82.94	90.01	47.21	47.18
Transport & mesh correction ^{*2}	0.982	0.992	1.007	1.023	1.037	1.018	1.000
Corrected value ^{*1}	54.39	53.75	55.37	84.85	93.35	48.08	47.18
Experiment ^{*1}	56.30	54.8	54.8	95	87.8	45.8	45.3
C/E	0.966	0.981	1.010	0.893	1.063	1.050	1.041
Measurement uncertainty (%)	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

*1: Cents (Effective delayed neutron 0.00619)

*2: Evaluated from MINIHGX18g and CITATION HEXZ 18G(w/ isotropic diffusion coefficient)

Table 5.6. Result of analyses on control rod worth for BFS-62-4

	Center	R1-3	R1-6	R2-2	R2-5	R3-5	R3-11
Basic value ^{*1}	55.67	58.70	50.40	94.13	77.77	49.50	41.47
Transport & mesh correction ^{*2}	0.985	1.017	0.996	1.026	1.025	1.016	1.001
Corrected value ^{*1}	54.82	59.71	50.21	96.59	79.75	50.31	41.50
Experiment ^{*1}	56.20	58.3	50.5	96.3	83.5	49.4	40.7
C/E	0.975	1.024	0.994	1.003	0.955	1.018	1.020
Measurement uncertainty (%)	1.4	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.5

*1: Cents (Effective delayed neutron 0.00621)

*2: Evaluated from MINIHGX18g and CITATION HEXZ 18G(w/ isotropic diffusion coefficient)

Table 5.7. Summary of control rod worth analyses

	Key Region			
	Center	Ring1-6	Ring2-5	Ring3-11
BFS62-1	0.986	0.961	0.934	0.994
BFS62-2	0.998	0.994	0.979	1.021
BFS62-3A	0.966	1.013	1.056	1.044
BFS62-4	0.975	0.992	0.944	1.017

	No Key Region		
	Ring1-3	Ring2-2	Ring3-5
BFS62-1	0.977	0.977	1.023
BFS62-2	0.983	0.948	0.991
BFS62-3A	0.983	0.879	1.053
BFS62-4	1.022	0.994	1.016

Table 5.8. Result of analyses on BFS-62-2 Na void reactivity (Cumulative)

Na voided Region	Basic value*1			Transport and mesh Cor.		Corrected*1 total	Exp. *1 total	C/E value
	Total	Non-leakage	Leakage	Non-leakage	Leakage			
LEZ	-8.76	3.94	-12.70	1.066	0.967	-8.08	-11.1	0.728
MEZ	-13.73	5.31	-19.04	1.063	0.972	-12.86	-16.4	0.784
HEZ	-25.62	5.34	-30.96	1.107	0.974	-24.25	-29.3	0.828

*1 : unit (cent)

Table 5.9. Result of analyses on BFS-62-3A Na void reactivity (Cumulative)

Na voided Region	Basic value*1			Transport and mesh Cor.		Corrected*1 total	Exp. *1 total	C/E value
	Total	Non-leakage	Leakage	Non-leak.	Leakage			
LEZ	-7.27	6.81	-14.08	1.035	0.967	-6.56	-9.2	0.713
MEZ	-9.41	9.32	-18.73	1.035	0.963	-8.39	-11.7	0.717
MOX	-14.84	13.45	-28.29	1.061	0.958	-12.83	-16.9	0.759
HEZ	-25.16	14.33	-39.48	1.062	0.967	-22.94	-28.4	0.808

*1 : unit (cent)

Table 5.10. Result of analyses on BFS-62-3A Na void reactivity with correction factor calculated in XYZ geometry

Na voided Region	Basic value*1			Transport and mesh Cor.		Corrected*1 total	Exp. *1 total	C/E value
	Total	Non-leakage	Leakage	Non-leak.	Leakage			
LEZ	-7.27	6.81	-14.08	1.033	0.896	-5.58	-9.2	0.606
MEZ	-9.41	9.32	-18.73	1.042	0.891	-6.98	-11.7	0.597
MOX	-14.84	13.45	-28.29	1.058	0.881	-10.68	-16.9	0.632
HEZ	-25.16	14.33	-39.48	1.069	0.885	-19.64	-28.4	0.692

*1 : unit (cent)

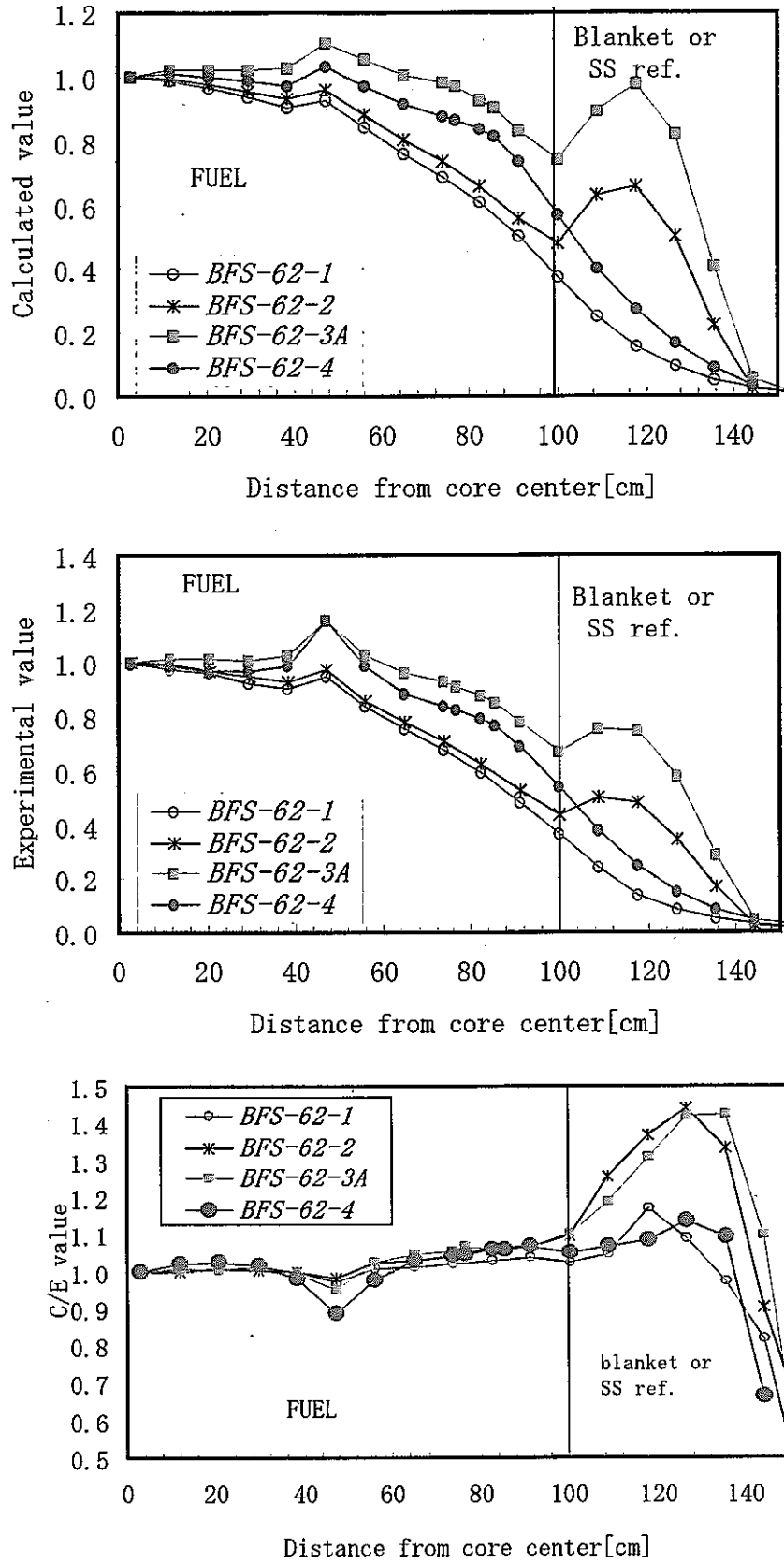


Fig.5.1. F49 reaction rate distribution in the radial direction (upper: calculated value, middle: experimental value, lower: C/E)

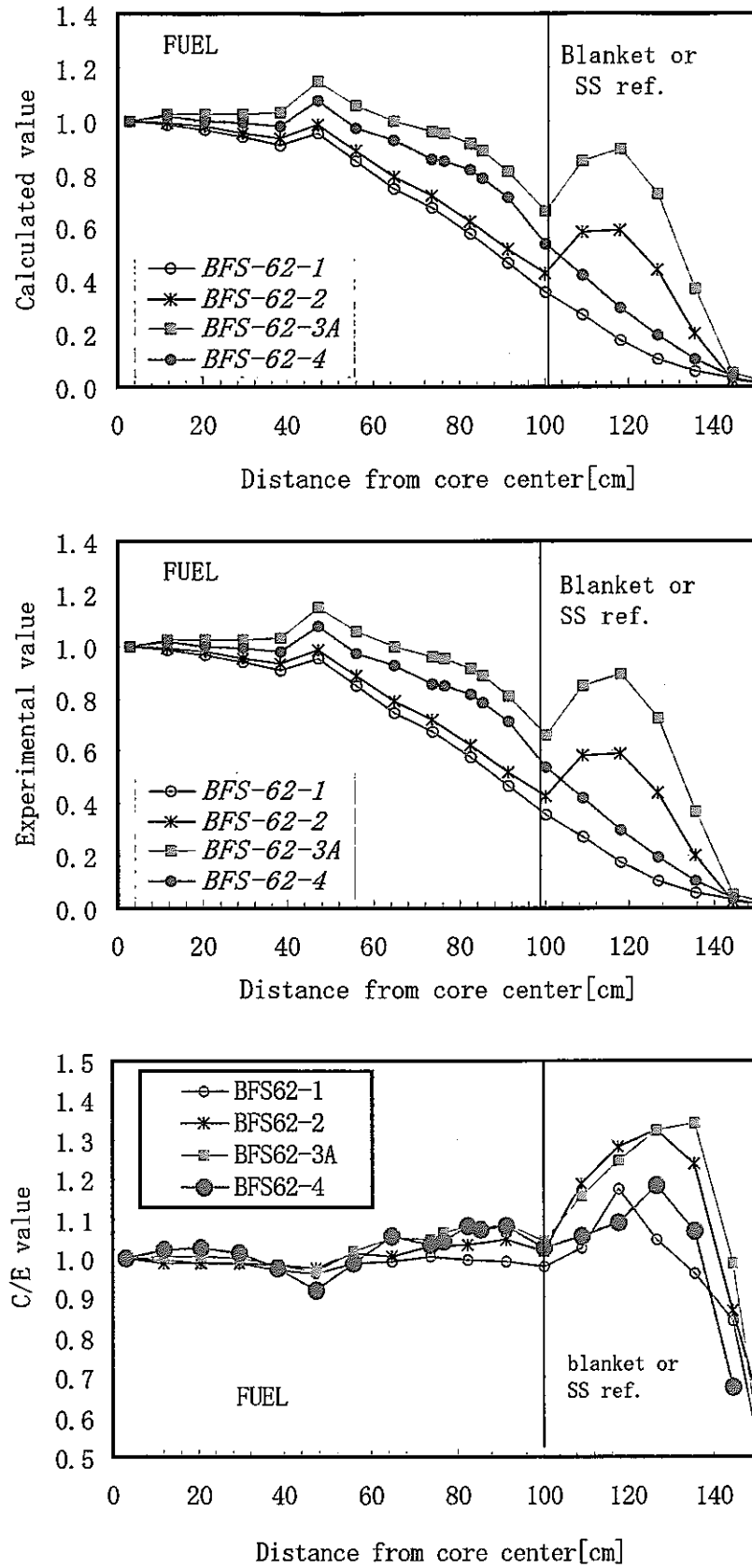


Fig.5.2. F25 reaction rate distribution in the radial direction (upper: calculated value, middle: experimental value, lower: C/E)

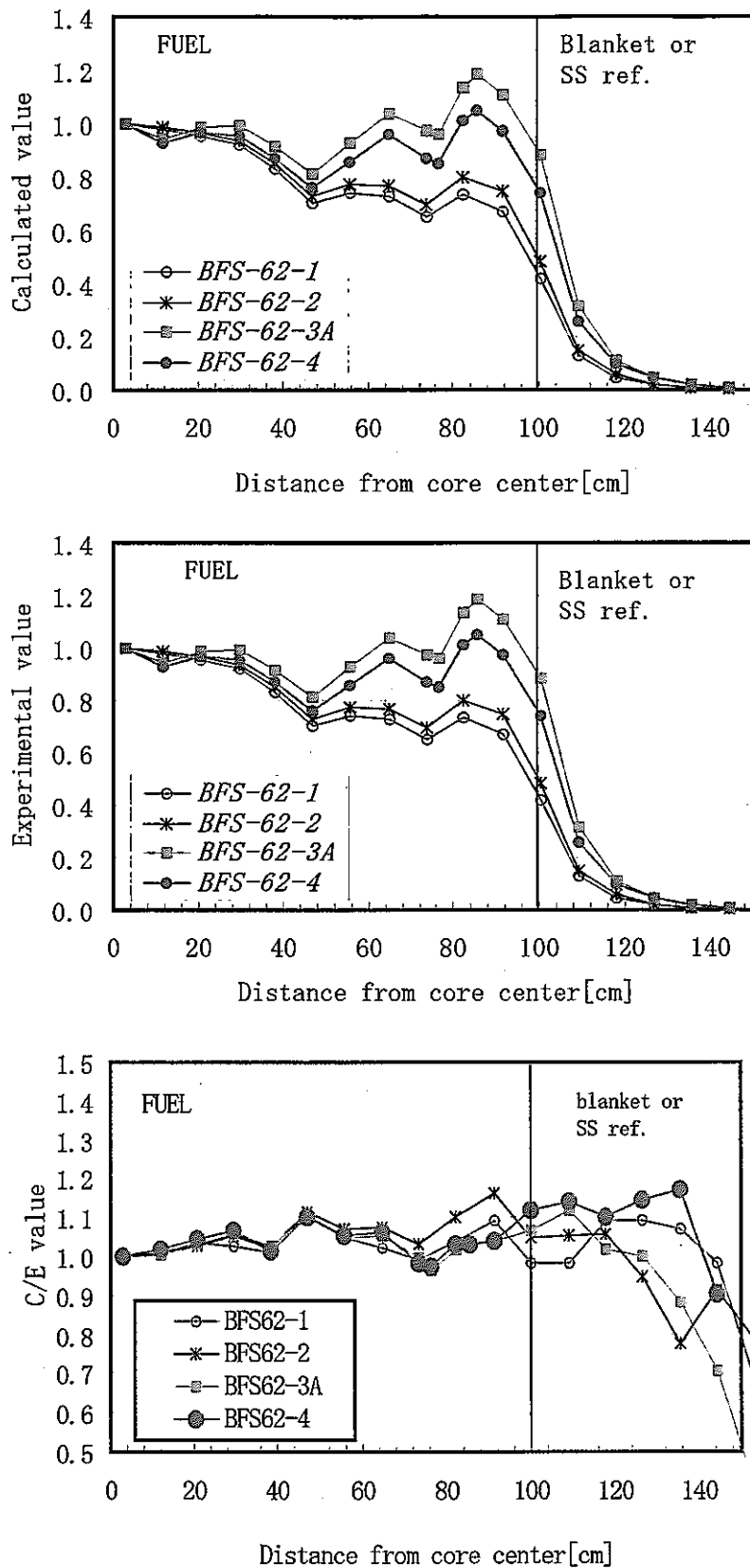


Fig.5.3. F28 reaction rate distribution in the radial direction (upper: calculated value, middle: experimental value, lower: C/E)

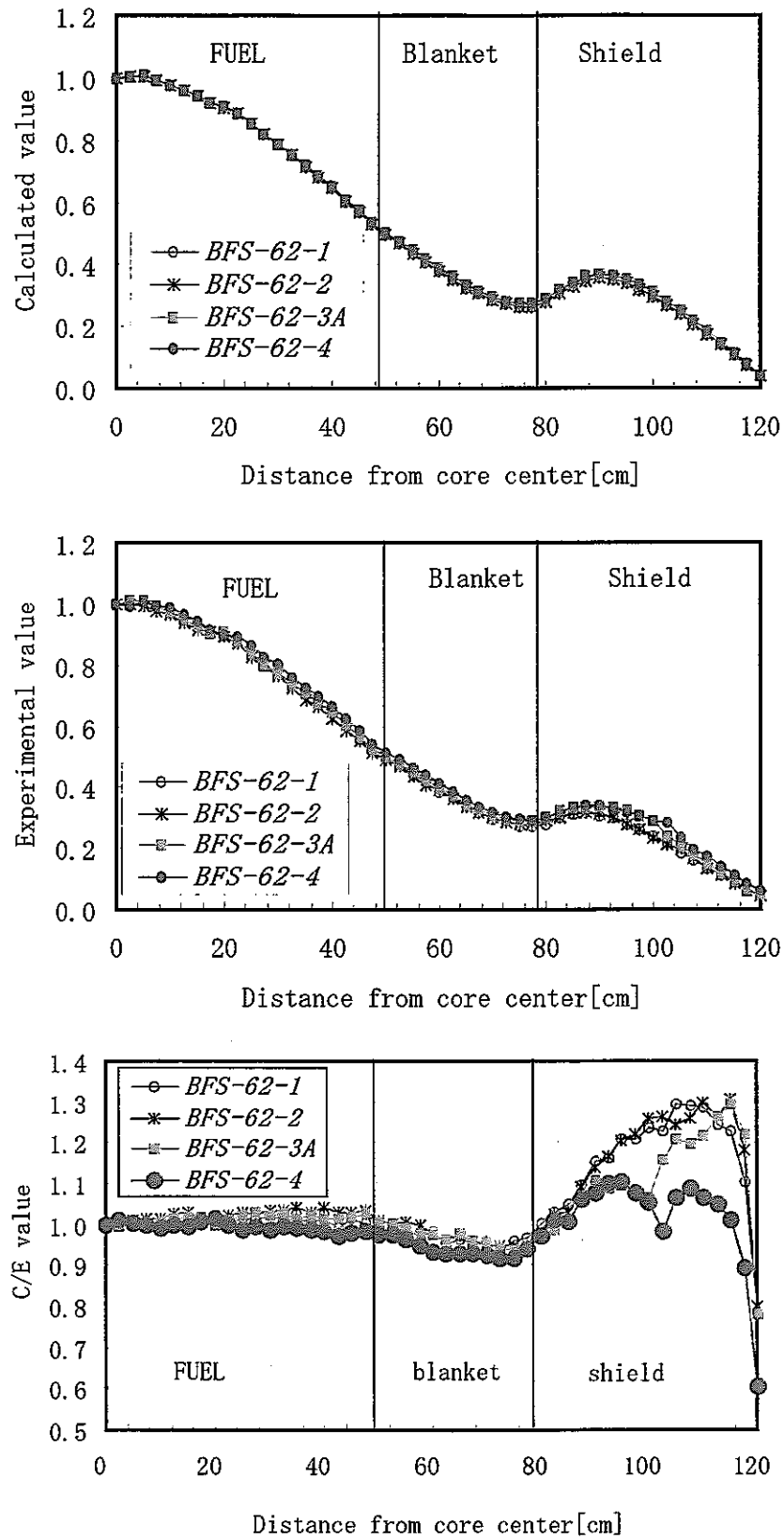


Fig.5.4. F49 reaction rate distribution in the axial direction (upper: calculated value, middle: experimental value, lower: C/E)

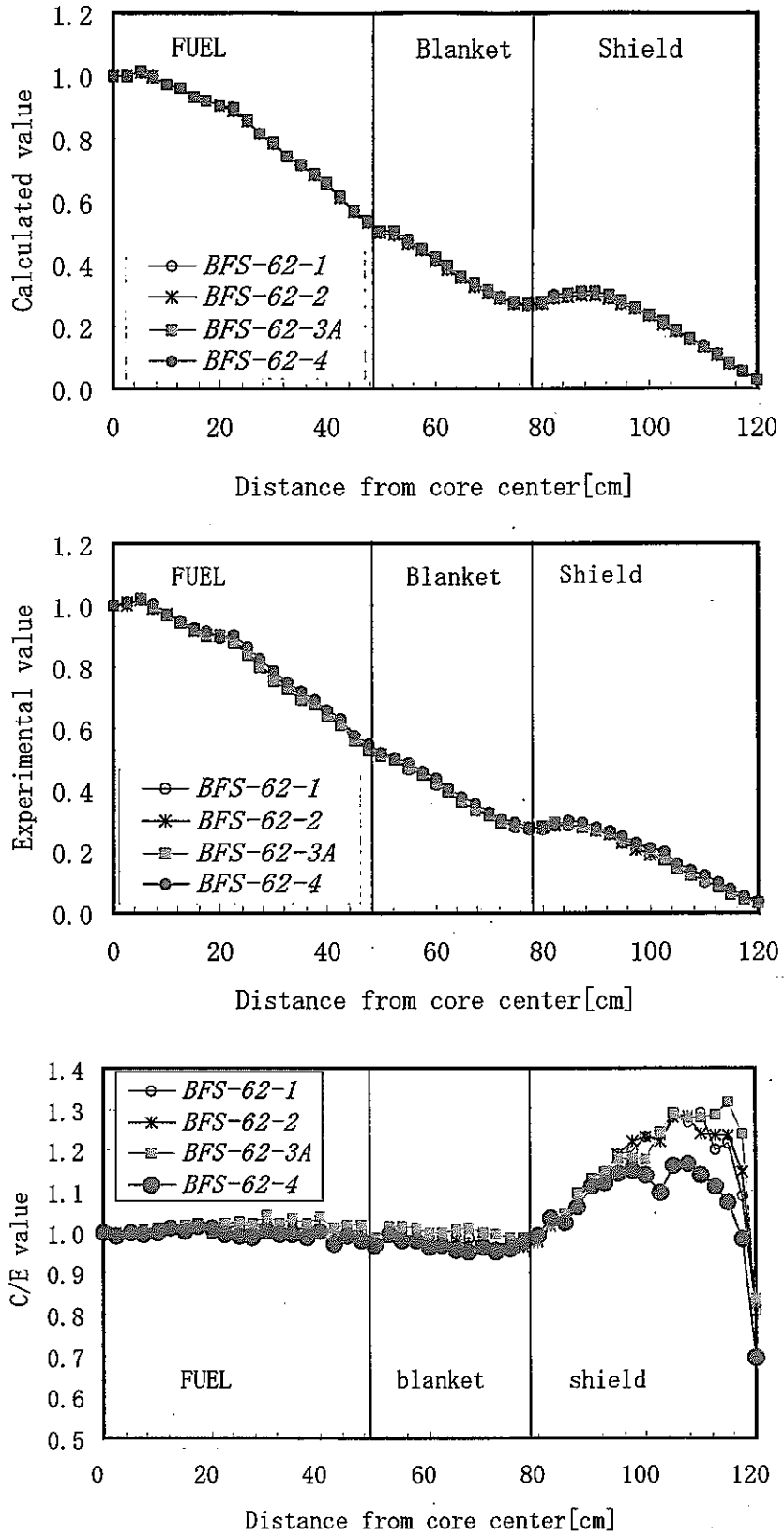


Fig.5.5. F25 reaction rate distribution in the axial direction (upper: calculated value, middle: experimental value, lower: C/E)

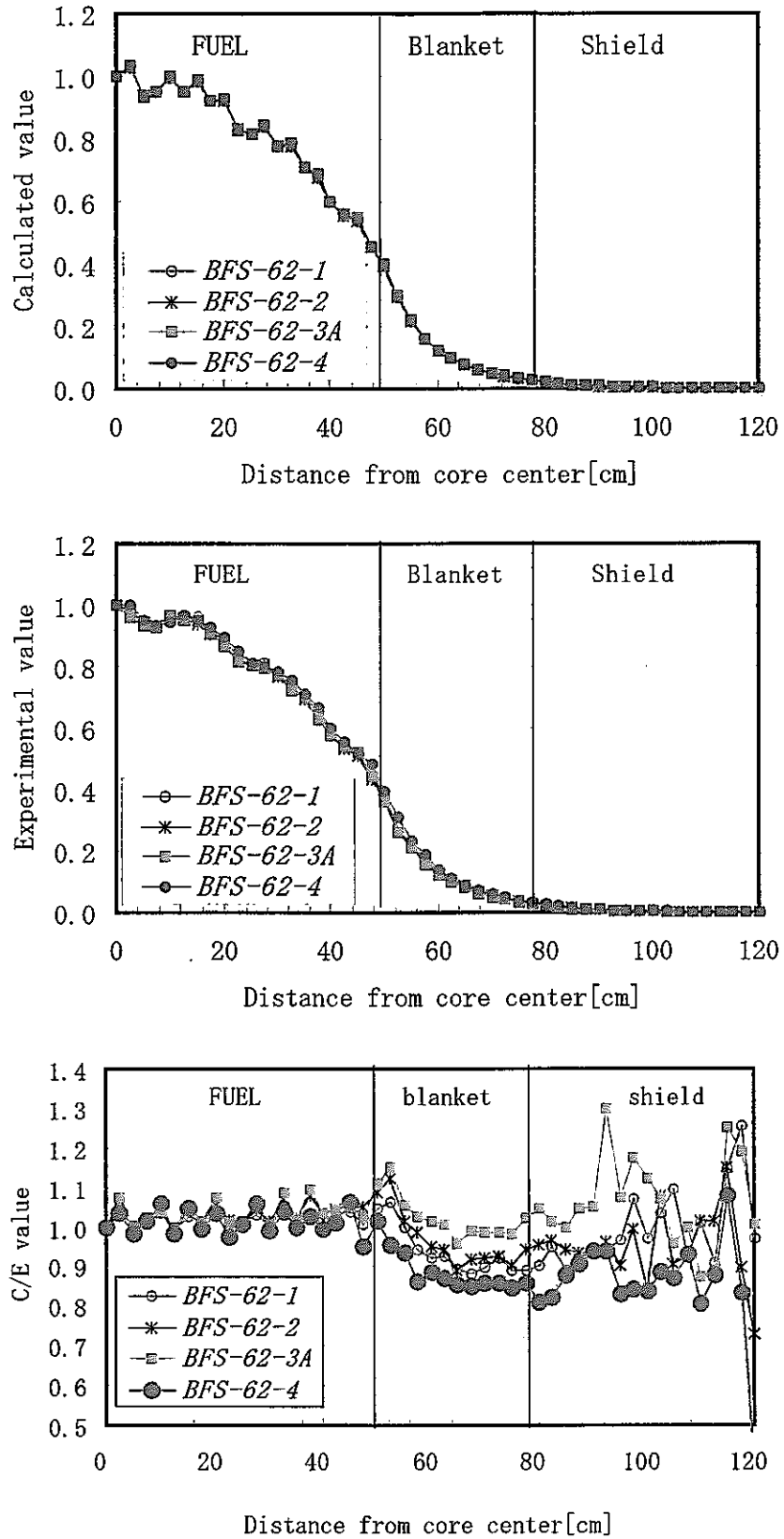


Fig.5.6. F28 reaction rate distribution in the axial direction (upper: calculated value, middle: experimental value, lower: C/E)

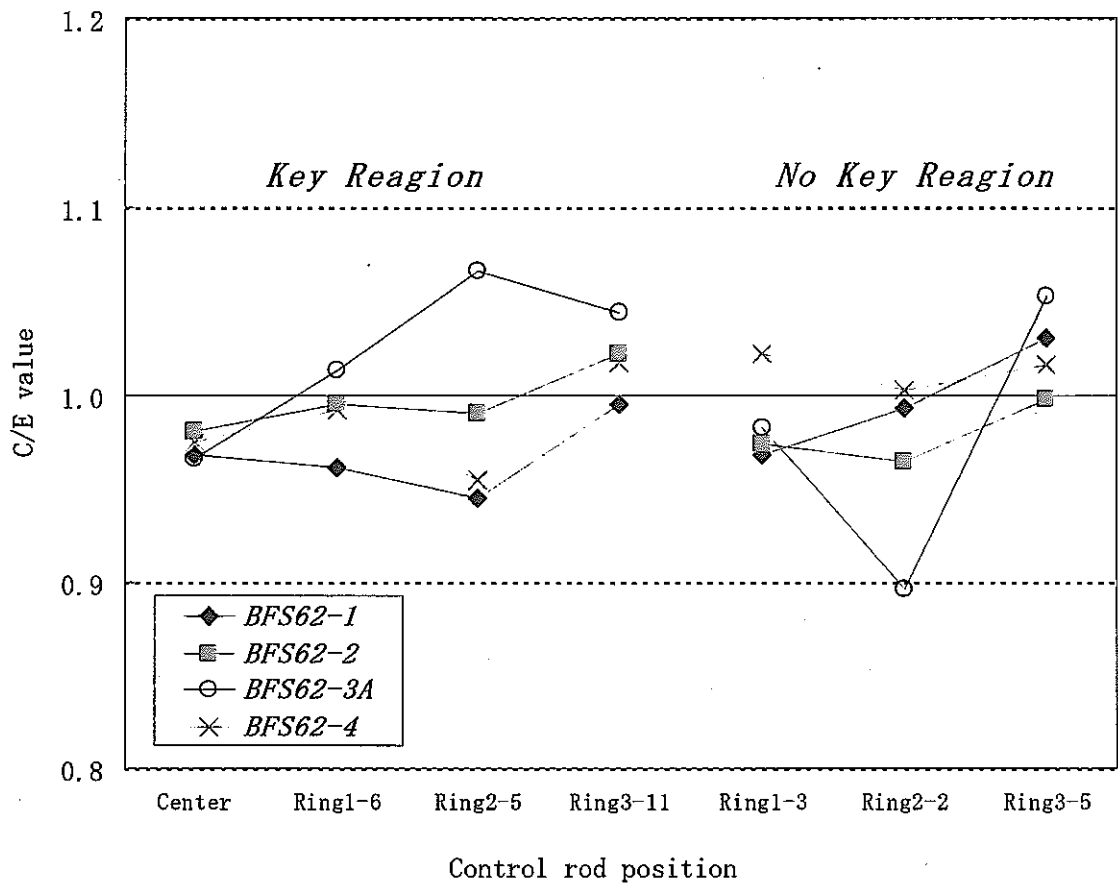


Fig.5.7. Result of control rod worth analyses

第6章 次世代炉定数システムの適用

BFS-62-3A 炉心の Na ボイド反応度の解析において、Na ボイド反応度の過小評価 (20~30%) が課題として挙げられた。同様な過小評価は BFS-62-2 炉心の解析でも現れている。既報告⁽¹²⁾ではその改善には次世代炉定数システム⁽¹⁴⁾が有効であることを近似モデルにより示していた。

また、次世代炉定数システムは、構造材核種の Window 等の構造も詳細に取り扱うことが可能であるため、ステンレス鋼製反射体領域を有する BFS-62-3A 炉心の解析精度向上に資することが期待できる。

本章では、第5章の解析において課題とされた核特性について BFS-62-3A 炉心を中心に次世代炉定数システムを適用した解析を行い、次世代炉定数の使用により JFS による解析値がどの程度改善されるか (以下、UF 効果) を評価した。

6.1 次世代炉定数システム⁽¹⁴⁾

次世代炉定数システムは、現在高速炉解析で一般的に利用されている JFS-3-J3.2R の欠点 (JFS-3-J3.2R 作成時の重み関数の影響が残る点や共鳴の取扱いに制限があること) を解決するためにサイクル機構で開発整備している実効断面積作成システムである。

システム構成は、JFS-3-J3.2 と同様であるが、エネルギー群構造を最大 1000 群に分割可能な基本炉定数と、41keV 以下のみについて個々の共鳴を分離して取り扱える超微細な群構造 (9150 群) を有する超微細群炉定数、及びそれら炉定数を処理するための専用格子計算コード SLAROM-UF(Ultra Fine)から成る。

次世代炉定数システムにおける実効断面積の作成は3段階で実施される。まず基本炉定数のみを用いた格子計算で全エネルギー領域のスペクトルを求める。次にその結果として得られる核分裂、非弾性散乱、及び弾性散乱 (41keV 以上の寄与のみ) の情報を基に、固定中性子源問題を超微細群炉定数を用いて解く。最後に 41keV 以下は超微細群計算で得られたスペクトルを用い、その他のエネルギー群については基本炉定数計算により得られたスペクトルを用いて基本炉定数の群構造に対応した実効断面積を作成する。

本解析では、基本炉定数として遮へい解析用炉定数 VITAMIN-J を参考とした 175 群構造のものを使用した。VITAMIN-J は O、Fe や Na の共鳴付近で群構造がより細分化されている (付録 A Table A.3)。この次世代炉定数を用いると連続エネルギーモンテカルロ計算に匹敵する正確さで核特性が得られることが確認されている。

6.2 次世代炉定数システムによる解析方法

次世代炉定数システム適用による解析手法は、実効断面積の作成を除けば第5章と同一である。格子計算には前述のように次世代炉定数システム用に開発された SLAROM-UF コードを使用した。なお、格子計算で得られる実効断面積は 175 群であるが、縮約による詳細群効果の低下を避けるため炉心計算も 175 群で実施した。

比較は3次元 Hex-Z 拡散計算による基準計算に対して行った。以下に主要核特性に対する UF 効果を示す。JFS-3-J3.2R を用いた結果を JFS、次世代炉定数を用

いた結果を UF-175 と称している。

6.3 臨界性

BFS-62-1～3A 炉心の臨界性に対する UF 効果を Table 6.1 に示す。UF 効果は炉心依存性が小さく +0.2～+0.3% であり、JUPITER 臨界実験に対する評価結果 (0.1%未満) に比べて効果が大きい。

Table 6.1. UF effect on criticality

	BFS-62-1	BFS-62-2	BFS-62-3A
Basic value(JFS)	0.9939	0.9946	0.9924
Basic value(UF-175)	0.9962	0.9970	0.9951
Corrected value(JFS)	0.9965	0.9974	0.9959
Corrected value(UF-175)*1	0.9988	0.9998	0.9986
Experiment	1.0013	1.0009	1.0007
C/E(JFS)	0.9952	0.9965	0.9953
C/E(UF-175)	0.9975	0.9989	0.9980
UF Effect(UF-JFS)	0.0023	0.0024	0.0027

*1 : Same correction factor is applied as in JFS

JUPITER 実験との差異を把握するため、燃料領域の実効断面積に対する UF 効果を摂動としたときの摂動反応度を BFS-62-3A と ZPPR-9 で比較した。ただし、比較の都合上、次世代炉定数の基本炉定数は 70 群としている。Table 6.2 に摂動反応度の内訳を示す。BFS-62-3A については摂動を与えた領域毎の結果も示している。

Table 6.2. Comparison of UF effect between BFS-62-3A and ZPPR-9

Core	Pertured region	Production	Fission	Capture	Scattering	Leakage	Total
BFS-62-3A	LEZ	1.51E-04	-8.57E-05	1.51E-03	-4.47E-06	-1.77E-06	1.57E-03
	MEZ	1.84E-04	-8.56E-05	3.78E-04	-3.06E-05	-5.55E-07	4.46E-04
	HEZ	3.33E-05	-2.03E-05	2.09E-04	-3.15E-05	4.45E-06	1.95E-04
	MOX	-1.70E-04	6.09E-05	4.60E-04	-5.64E-06	-9.98E-07	3.45E-04
	BLANKET	1.58E-05	-5.03E-06	1.49E-04	8.41E-06	-6.30E-06	1.62E-04
	TOTAL	2.15E-04	-1.36E-04	2.71E-03	-6.38E-05	-5.17E-06	2.72E-03
ZPPR-9	TOTAL	-2.32E-03	7.22E-04	2.65E-03	-1.55E-04	-1.17E-04	7.80E-04

unit (dk/k)

ZPPR-9 で寄与の大きい捕獲項と生成項に着目して比較する。捕獲項については両炉心で同程度である。一方、生成項については大きく異なっている。ZPPR-9 の生成項が捕獲項と打ち消し合うのに対し、BFS-62-3A では生成項の寄与は捕獲項の 1/10 以下で、かつ符号も等しい。

BFS-62-3A について領域毎に見ると、MOX 領域だけは、ZPPR-9 と同様な傾向を示していることが分かる。このことから、JUPITER 実験と BFS 実験への UF 効果の差異は燃料組成によるものであると推定できる。

LEZ 領域と MOX 領域について、生成項のエネルギー毎の寄与 Fig.6.1 に、生成項に支配的な寄与を持つ核種に対する UF 効果を Fig.6.2 に示す。U-235 の核分裂

断面積に対する UF 効果が 600eV~1keV で正側に現れることが LEZ 領域の生成項を正側に大きくする主要因であることが分かる。

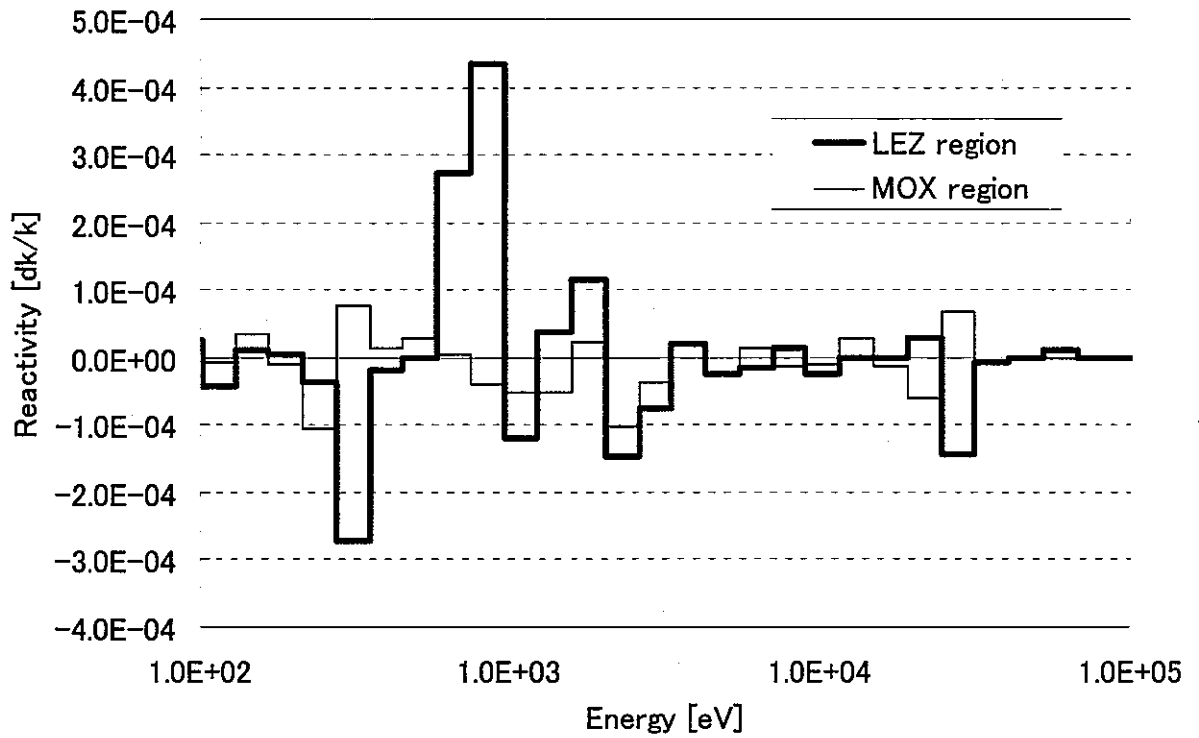


Fig.6.1. Comparison of Production term in UF effect

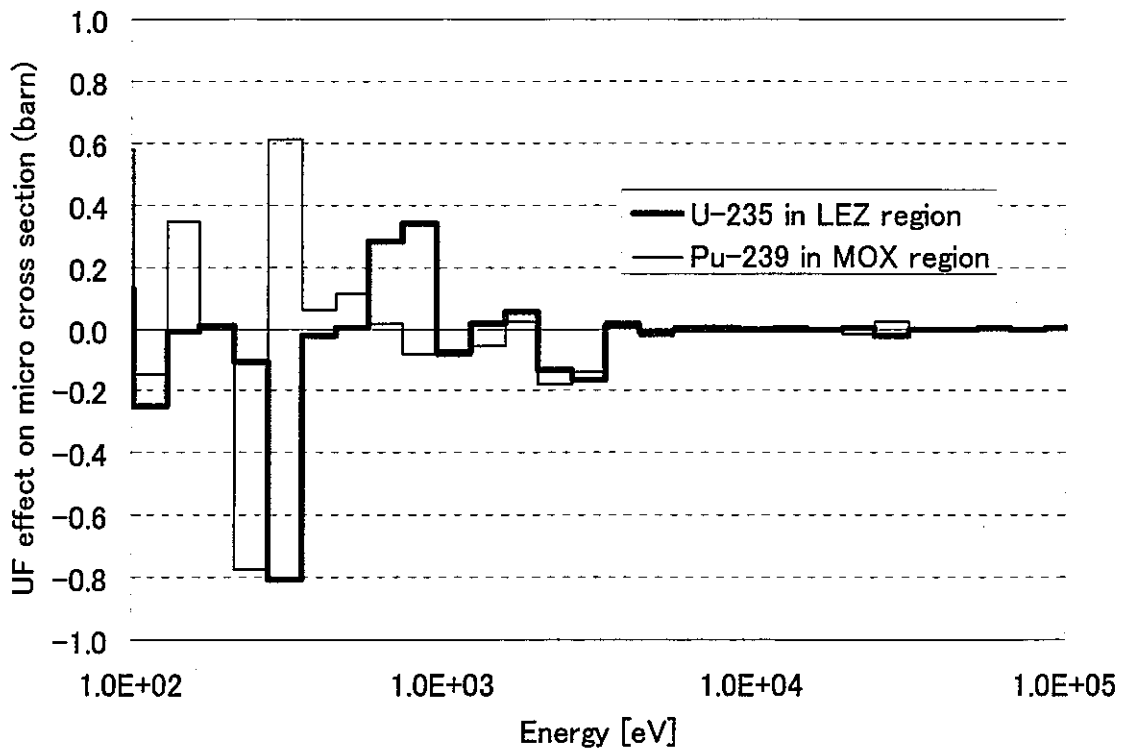


Fig.6.2. Comparison of UF effect on Fission cross section

6.4 径方向反応率分布

Fig. 6.3～6.5 に、BFS-62-3A の径方向核分裂反応率分布 (F49、F25、F28) に対する UF 効果を JFS、UF-175 それぞれの解析値の比較によって示す。

標準解析手法で課題とされた反射体領域の F49 及び F25 反応率について、ピーク値で UF 効果を比較すると、F25 についてはほとんど効果が見られないが、F49 では 10%程度改善されている。しかしながら依然として 20%もの過大評価が残っている。

なお、解析手法の観点からの改善可能性については、同様な過大評価が見られた BFS-62-2 を対象に近似モデルでのモンテカルロ法との比較によって既報告⁽¹²⁾で検討されており、改善の見込みがないことが示唆されている。今回の評価結果はその結論を裏付けるものであり、今後は、炉定数調整や最近公開された JENDL3.3 核データライブラリーに基づく検討が必要と考えられる。

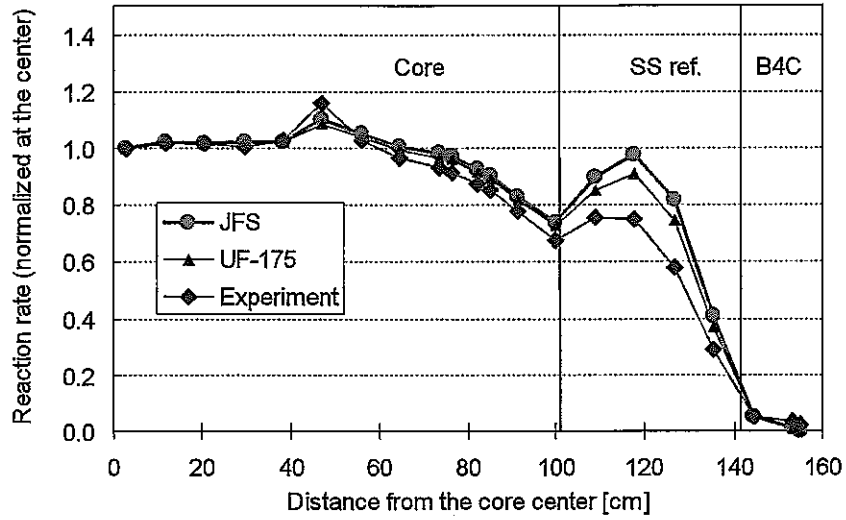


Fig.6.3. UF effect on the reaction rate distribution in the radial direction (F49)

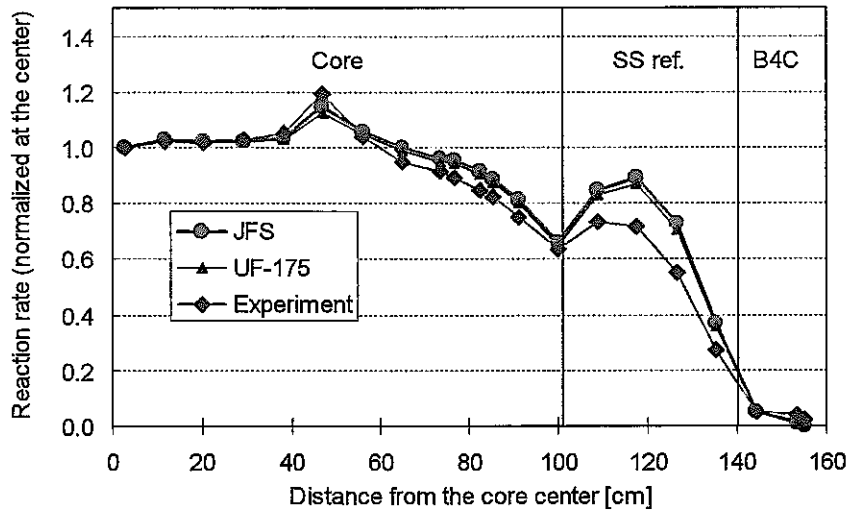


Fig.6.4. UF effect on the reaction rate distribution in the radial direction (F25)

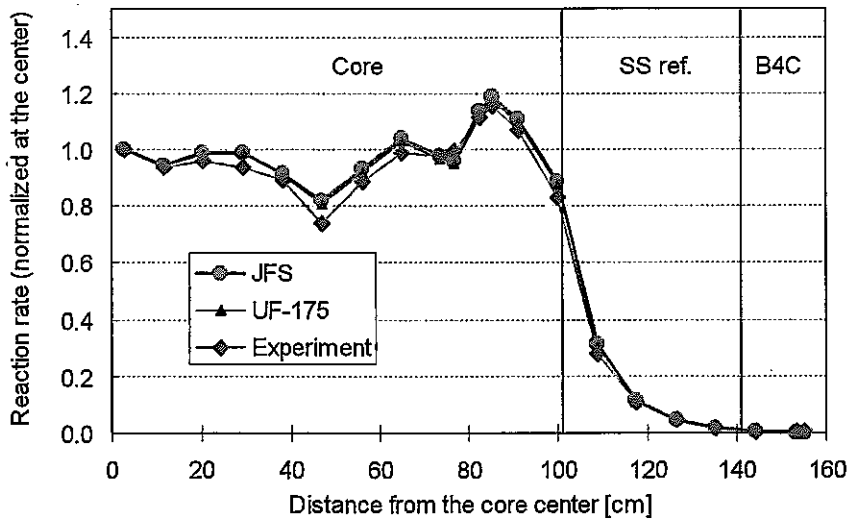


Fig.6.5. UF effect on the reaction rate distribution in the radial direction (F28)

6.5 制御棒価値

BFS-62-3A 炉心の制御棒価値に対する UF 効果を Table 6.3 に示す。数%大きくする効果が確認できるが、第 5 章で課題とされたリング 2-2 の約 10%に及ぶ過小評価を解消するには至っていない。

Table 6.3. UF effect on control rod worth

	Center	R1-3	R1-6	R2-2	R2-5	R3-5	R3-11
Basic value(JFS)	55.40	54.19	55.00	82.94	90.01	47.21	47.18
Basic value(UF-175)	56.62	55.82	55.59	85.23	90.39	47.16	47.16
Corrected value(JFS)	54.39	53.75	55.37	84.85	93.35	48.08	47.18
Corrected value(UF-175)*1	55.60	55.37	55.98	87.19	93.74	48.03	47.15
Experiment	56.30	54.80	54.80	95.00	87.80	45.80	45.30
C/E(JFS)	0.97	0.98	1.01	0.89	1.06	1.05	1.04
C/E(UF-175)	0.99	1.01	1.02	0.92	1.07	1.05	1.04
UF Effect(UF/JFS)*2	1.02	1.03	1.01	1.03	1.00	1.00	1.00

*1 : Same correction factor is applied as in JFS

*2 : Ratio of basic values

6.6 Na ボイド反応度

BFS-62-2 及び 62-3A 炉心の Na ボイド反応度に対する UF 効果を Table 6.4 及び 6.5 に示す。第 5 章とは異なり、ボイド反応度は積分値ではなく各領域のみの寄与で表している。

近似モデルによる評価で予測されたように非漏洩項に効果が現れている。非漏洩項の寄与が大きい炉心内側 (LEZ 領域) ではその寄与 (正值) が 30%小さくなる結果、トータルの効果 (負値) が約 20%大きくなり C/E 値の改善が図られている。一方、漏洩項についてはほとんど効果が現れず、漏洩項の寄与の大きい外側炉心ではトータルでの効果も小さい。その結果、BFS-62-2 炉心については解析値と実験値の差異が LEZ 領域で 24%から 10%に改善し、BFS-62-3A 炉心については炉心最外部の(HEZ 領域)を除いて実験誤差の範囲で一致するようになった。

UF 効果をより詳細に把握するため、BFS-62-3A の LEZ 領域について非漏洩項を詳細分析した。分析に際しては、JFS による解析値 (70 群) との比較を容易にするために、次世代炉定数による解析値を 175 群の炉心計算で得られたスペクトルを用いて縮約した 70 群断面積で改めて評価した。その際、ボイド領域以外は、基準状態 (ボイドなし) のスペクトルを、ボイド領域については、各ボイド状態でのスペクトルを用いた。Fig.6.6 に縮約前後の非漏洩項についての JFS との差異を下限エネルギーからの積算値として示す。縮約後 (UF70C-JFS) でも差異は縮約前 (UF175C-JFS) と同程度に現れており、70 群縮約後の結果を用いても 175 群計算による改善効果が把握できることが分かる。以下では 175 群を 70 群に縮約した結果 (単に UF と記する) を基にした検討結果を示す。

JFS と UF それぞれによる非漏洩項の比較を Fig.6.7 に、非漏洩項に対する次世代炉定数効果 (UF 効果) を捕獲、散乱等の成分毎に分類して Fig.6.8 に示す。散

乱項への UF 効果が最も大きく、生成項、吸収項の順となっている。

厳密摂動論では、摂動後の中性子束、摂動による断面積変化、摂動前の随伴中性子束から反応度を求めるが、それぞれの UF 効果による変化がボイド反応度への UF 効果にどの程度寄与しているかを調べた。その際、例えば中性子束の変化による寄与を見る場合は、中性子束のみを次世代炉定数による結果を用い、断面積変化及び随伴中性子束については、JFS による結果を用いて反応度を評価し、すべて JFS による結果を用いた場合と比較した。

(1) 中性子束への UF 効果による寄与

Fig.6.9 に中性子束のみへ次世代炉定数の結果を使用したときの UF 効果を下限エネルギーからの反応度変化の積算値として示す。Fig.6.8 でトータルの UF 効果が全エネルギー積算で 13pcm 現れていたのに対し、中性子束の変化による寄与は極めて小さいことが確認できる。ボイド領域中心での中性子スペクトル及びその変化を Fig.6.10 に示す。エネルギー群によっては 20%もの変化があるが、摂動による断面積変化の大きい Na の共鳴領域 (3keV 付近) で変化が小さいこと及び変化が系統的ではないことにより、ボイド反応度への UF 効果としては現れていない。

(2) 摂動断面積への UF 効果による寄与

断面積のみへ次世代炉定数の結果を使用したときの UF 効果を下限エネルギーからの積算値及びエネルギー毎の寄与として Fig.6.11 に示す。全エネルギー積算値では UF 効果は 1pcm 未満でありトータルの UF 効果に対して無視できるが、エネルギー毎の寄与では、3keV 付近 (Na の共鳴に対応) において Yield 項に 4pcm もの効果を確認できる。また、30keV 付近 (構造材核種の共鳴に対応) にも 1pcm 程度の効果を確認できる。

その要因を把握するため、核分裂生成断面積と捕獲断面積の摂動量に対する UF 効果を Fig.6.12 に示す。UF 効果は Na の共鳴反応のある 3keV 付近で大きく現れ、核分裂断面積 (核分裂生成断面積) については系統的な差異が確認できる。30keV 付近については摂動断面積の変化自体は小さいものの、この領域ではスペクトルが大きいため、反応度変化としては大きく現れている。核分裂生成断面積については、3keV 付近とは逆に負側に現れており、捕獲断面積についても同程度の変化が見られる。

核分裂生成断面積と捕獲断面積の変化を把握するため、Table 6.6 及び Table 6.7 に、3keV 付近 (エネルギー第 33 群)、30keV 付近 (エネルギー第 24 群) における摂動前後での実効断面積の変化をマクロ断面積及びその主要核種毎の寄与として整理した。

3keV 付近については以下の変化が確認できる。

核分裂生成断面積は U235 の寄与で決まるが、UF 効果はボイド化前で 4% 現れ、ボイド化後ではほとんど現れない。その結果として、摂動断面積への UF 効果は正側に現れている。これは、JFS では共鳴干渉効果 (この場合、核燃料物質の共鳴反応が Na の共鳴反応によって妨げられる効果) を十分に考慮できないため、核燃料物質の共鳴反応量を大きく評価する (その結果、実効断面積を大きく評価する) ためである。

捕獲断面積についても UF 効果は Na が存在する場合に顕著に現れている。しかしながら、U235 で小さくなる方向であるのに対し、U238 では +1% ではあるが逆に大きくなっている。また、Cr や Ni の構造材でも、UF 効果により大きくなって

いる。その結果、U235 への UF 効果がキャンセルされ、摂動断面積全体としては UF 効果がほとんど現れていない。参考までに U235, U238, Ni の捕獲断面積についての UF 効果をエネルギーに対して Fig.6.13 に示すが、U238 についても 1 つ下のエネルギー群では UF 効果が大きく負側に現れており、2 つの群の UF 効果を合計すると負側となる。しかしながら、Ni については明らかに正側に現れているため、UF 効果により実効断面積が大きくなる理由を解明するには、より詳細な分析が必要である。

30keV 付近については以下の変化が確認できる。

核分裂生成断面積への UF 効果はポイド化前で-1%、ポイド化後で-2%現れている。この摂動断面積の変化は、鉄などの構造材の共鳴反応及び window 構造の扱いに起因するものであり、メカニズムは上記 Na の場合と同様である。しかしながら、構造材はポイド化により除去されるわけではない。それでも摂動断面積に差異が生じた原因は、Na が存在しない方がその影響がより明確に現れるためと考えられる。

捕獲断面積への UF 効果は、いずれの核種についてもポイド化前後で核分裂生成断面積の場合と同様な大小関係が見られる。摂動断面積としては、それぞれの寄与は小さいものの相殺しないため、核分裂生成断面積の場合と同程度の UF 効果となっている。

(3) 随伴中性子束への UF 効果による寄与

随伴中性子束のみへ次世代炉定数の結果を使用したときの UF 効果を下限エネルギーからの積算値及びエネルギー毎の寄与として Fig.6.14 に示す。散乱項が非漏洩項と一致しており、他の項の寄与は無視できることが確認できる。UF 効果は Na の 3keV の共鳴付近で 5pcm と最も大きく、全体的に負の効果として現れている。

ここで、散乱項を詳細に分析するために以下の近似を行う。

散乱項 ρ_s に対する随伴中性子束 ψ の寄与は厳密摂動論では、式(6.6-1)のようにそのエネルギー間の差を通して評価される。なお、ここでは効果を把握するだけであるので、位置依存性は無視している。

$$\rho_{s,g} = \frac{\sum_g \phi_g^* (\varphi_g - \varphi_g) \delta \Sigma_{s,g \rightarrow g'}}{\text{摂動分母}} \quad (6.6-1)$$

(ϕ^* : 摂動後の中性子束、 $\delta \Sigma_s$: 散乱除去断面積の摂動量、添え字 g: エネルギー群)

Na ポイド反応度では $\delta \Sigma_s$ は主に除去される Na の散乱断面積で決定され、Na の弾性散乱では 2 群以上減速されないの、以下のように近似できる。

$$\rho_{s,g} = \frac{\phi_g^* (\varphi_{g+1} - \varphi_g) \delta \Sigma_{s,g \rightarrow g+1}}{\text{摂動分母}} \quad (6.6-2)$$

この式を基に Fig.6.14 を分析する。なお、UF 効果により随伴中性子束が変化すると摂動分母も変化するため、以下では摂動分母 (核分裂で発生する中性子のインポートの和) が 1.0 となるように随伴中性子束を規格化している。また、随伴中性子束は、ポイド領域の積算値で代表させている。

まず、散乱除去断面積の摂動量 (JFS での値) を Fig.6.15 に示すが、Fig.6.14 で見られた 3keV でのピークは散乱断面積の摂動量に対応していることが分かる。

次に、Fig.6.16 に随伴中性子束の隣接エネルギー群間の差異に対する UF 効果を

示す。全体的に正側に変化していることが分かる。散乱断面積の摂動量が負であるのでそれらの積である反応度に対する UF 効果としては負となって現れる。

この随伴中性子束に対する UF 効果を解明するため、随伴中性子束及びそれに対する UF 効果を Fig.6.17 に示す。10keV を境にして低エネルギー側では大きく、高エネルギー側では小さくなっている。

この随伴中性子束の変化を考慮すると、随伴中性子束の隣接エネルギー群間の差に対する UF 効果は以下のように説明できる。低エネルギー側では随伴中性子束が 1keV をピークに増加するが、随伴中性子束の傾きがエネルギーに対して負であるため、傾き、ずなわち群間の差 ($\psi_{g+1} - \psi_g$) が正側に強調される方向に働く。一方、高エネルギー成分では UF 効果により随伴中性子束がなだらかに減少するが、随伴中性子束の傾きが正であるため、逆に差が抑制される方向に働く。差は負の値であるので、UF 効果としてはやはり正側となる。

随伴中性子束の変化の要因としては実効断面積への UF 効果が挙げられる。

随伴中性子束に影響を与えるパラメータとして実効マクロ生成断面積と吸収断面積の差を採り上げ、Fig.6.18 にその UF 効果を示す。低エネルギー側での随伴中性子束に対する UF 効果と同様な傾向を示していることが確認できる。高エネルギー成分の低下は低エネルギー成分の増加による相対的なものと考えられる。

以上をまとめると、随伴中性子束への UF 効果によるボイド反応度の変化は以下のように言える。

実効断面積への UF 効果により随伴中性子束が低エネルギー側で増加し、相対的に高エネルギー側では減少となるが、各エネルギー領域での随伴中性子束の傾きの違いにより、その隣接エネルギー群間の差に対する UF 効果は全エネルギーに渡って正側に現れる。その結果、ボイド反応度に対する UF 効果は全体的に負の効果として現れる。

6.7 次世代炉定数システムの適用効果のまとめ

次世代炉定数システムの適用効果を評価した。

臨界性については+0.2~0.3%dk/k の効果が現れた。反射体領域の径方向反応率分布については F25 についてのみ-10%の効果が現れた。制御棒値については、最大+3%の効果が現れた。いずれの場合も UF 効果により実験値に近づく傾向があるが、その効果は顕著なものではなく、反射体領域の反応率分布 (F49,F25) には依然として 20%の過大評価が、制御棒値の一部には 10%の過小評価が残っている。

Na ボイド反応度については、炉心最外部での値を除けば 10%~24%の著しい改善効果が確認された。その結果、BFS-62-2 及び 62-3A 炉心の測定値全体としても約 10%以内で実験値と一致するようになった。

Na ボイド反応度の解析精度改善には非漏洩項が負側に移行することによるものであり、中でも散乱項の寄与が支配的である。

詳細分析の結果、散乱項への UF 効果には、随伴中性子スペクトル形状の微妙な変化が寄与しており、その変化は 1keV 以下の共鳴領域をより正確に評価することによってもたらされたものであることが分かった。

Table 6.4. UF effect on Na void reactivity of BFS-62-2

Voided region & constant type	Basic value			Corrected*1 total value	Experiment	C/E*2
	Non-leakage	Leakage	Total			
LEZ(JFS)	+3.64	-12.71	-9.07	-8.40	-11.1±0.5	0.76±0.03
LEZ(UF-175)	+2.24	-12.84	-10.60	-10.02		0.90±0.04
MEZ(JFS)	+1.27	-6.34	-5.07	-4.88	-5.3±0.3	0.92±0.05
MEZ(UF-175)	+0.80	-6.39	-5.59	-5.42		1.02±0.06
HEZ(JFS)	-0.05	-11.87	-11.92	-11.45	-12.9±0.4	0.89±0.03
HEZ(UF-175)	-0.46	-11.73	-12.19	-11.85		0.92±0.03

*1 : Correction factor is based on JFS

unit (cent)

*2 : Error is from experiment only

Table 6.5. UF effect on Na void reactivity of BFS-62-3A

Voided region & constant type	Basic value			Corrected*1 total value	Experiment	C/E*2
	Non-leakage	Leakage	Total			
LEZ(JFS)	+6.81	-14.08	-7.27	-6.56	-9.2±0.5	0.71±0.04
LEZ(UF-175)	+4.75	-14.13	-9.39	-8.75		0.95±0.05
MEZ(JFS)	+2.51	-4.65	-2.14	-1.83	-2.5±0.3	0.73±0.09
MEZ(UF-175)	+1.95	-4.64	-2.70	-2.41		0.96±0.12
MOX(JFS)	+4.13	-9.57	-5.44	-4.45	-5.2±0.3	0.86±0.05
MOX(UF-175)	+3.42	-9.48	-6.06	-5.19		1.00±0.06
HEZ(JFS)	+0.88	-11.19	-10.31	-10.11	-11.5±0.5	0.88±0.04
HEZ(UF-175)	+0.49	-10.84	-10.34	-10.18		0.89±0.04

*1 : Correction factor is based on JFS

unit (cent)

*2 : Error is from experiment only

Table 6.6. UF effect on effective cross section (contribution of major nuclides) for energy group 33

Reaction	Condition	macro				micro*density						
		JFS	UF	UF effect (UF-JFS)	UF effect (UF/JFS)	Nuclide	JFS	UF	UF effect (UF-JFS)	UF effect (UF/JFS)	Contribution (%)	
											JFS	UF effect
Nu-sigmaF	with Na	1.307E-02	1.260E-02	-4.718E-4	0.96	U235	1.307E-02	1.260E-02	-4.717E-4	0.96	100	100
	without Na	1.331E-02	1.327E-02	-3.850E-5	1.00		1.331E-02	1.327E-02	-3.844E-5	1.00	100	100
	perturbation	2.431E-04	6.764E-04	4.333E-4	2.78		2.426E-04	6.758E-04	4.332E-4	2.79	100	100
Sigma-C	with Na	8.998E-03	8.990E-03	-7.780E-6	1.00	U235	1.827E-03	1.758E-03	-6.943E-5	0.96	20	892
						U238	6.227E-03	6.276E-03	4.841E-5	1.01	69	-622
						Na23	7.391E-04	7.323E-04	-6.798E-6	0.99	8	87
						Cr-Nat	8.542E-05	9.246E-05	7.044E-6	1.08	1	-91
						Ni-Nat	4.619E-05	5.869E-05	1.250E-5	1.27	1	-161
	without Na	7.442E-03	7.431E-03	-1.092E-5	1.00	U235	1.861E-03	1.853E-03	-7.899E-6	1.00	25	72
						U238	5.388E-03	5.381E-03	-7.040E-6	1.00	72	64
						Na23	0.000E+00	0.000E+00	-	-	-	-
						Cr-Nat	8.067E-05	8.249E-05	1.812E-6	1.02	1	-17
						Ni-Nat	4.356E-05	4.524E-05	1.684E-6	1.04	1	-15
	perturbation	-1.556E-03	-1.559E-03	-3.140E-6	1.00	U235	3.376E-05	9.529E-05	6.153E-5	2.82	-2	-1960
						U238	-8.387E-04	-8.942E-04	-5.545E-5	1.07	54	1766
Na23						-7.391E-04	-7.323E-04	6.798E-6	0.99	48	-216	
Cr-Nat						-4.745E-06	-9.978E-06	-5.232E-6	2.10	0	167	
Ni-Nat						-2.628E-06	-1.345E-05	-1.082E-5	5.12	0	345	

Table 6.7. UF effect on effective cross section (contribution of major nuclides) for energy group 24

Reaction	Condition	macro				micro*density						
		JFS	UF	UF effect (UF-JFS)	UF effect (UF/JFS)	Nuclide	JFS	UF	UF effect (UF-JFS)	UF effect (UF/JFS)	Contribution (%)	
											JFS	UF effect
Nu-sigmaF	with Na	5.731E-03	5.667E-03	-6.400E-5	0.99	U235	5.730E-03	5.666E-03	-6.413E-5	0.99	100	100
	without Na	5.730E-03	5.640E-03	-9.019E-5	0.98		5.728E-03	5.638E-03	-9.027E-5	0.98	100	100
	perturbation	-1.000E-06	-2.719E-05	-2.619E-5	27.19		-1.206E-06	-2.734E-05	-2.614E-5	22.67	121	100
Sigma-C	with Na	4.047E-03	4.003E-03	-4.448E-5	0.99	U235	8.172E-04	8.001E-04	-1.714E-5	0.98	20	39
						U238	2.882E-03	2.888E-03	5.800E-6	1.00	71	-13
						Fe-Nat	2.286E-04	2.175E-04	-1.104E-5	0.95	6	25
						Cr-Nat	5.329E-05	2.998E-05	-2.331E-5	0.56	1	52
						Ni-Nat	4.446E-05	4.620E-05	1.742E-6	1.04	1	-4
	without Na	4.034E-03	3.963E-03	-7.044E-5	0.98	U235	8.171E-04	7.946E-04	-2.252E-5	0.97	20	32
						U238	2.873E-03	2.866E-03	-7.672E-6	1.00	71	11
						Fe-Nat	2.240E-04	2.090E-04	-1.496E-5	0.93	6	21
						Cr-Nat	5.293E-05	2.820E-05	-2.474E-5	0.53	1	35
						Ni-Nat	4.438E-05	4.467E-05	2.952E-7	1.01	1	0
	perturbation	-1.378E-05	-3.974E-05	-2.596E-5	2.88	U235	-1.663E-07	-5.547E-06	-5.381E-6	33.36	1	21
						U238	-8.497E-06	-2.197E-05	-1.347E-5	2.59	62	52
						Fe-Nat	-4.565E-06	-8.484E-06	-3.919E-6	1.86	33	15
Cr-Nat						-3.579E-07	-1.788E-06	-1.430E-6	5.00	3	6	
					Ni-Nat	-8.057E-08	-1.528E-06	-1.447E-6	18.96	1	6	

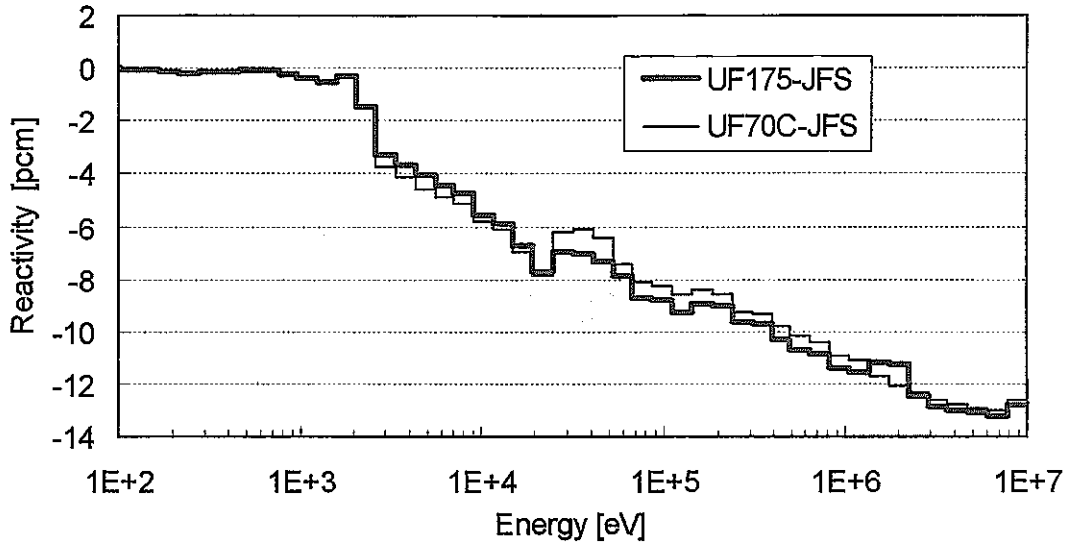


Fig.6.6. Comparison of UF effect between before and after group collapsing (cumulative value from the lowest energy)

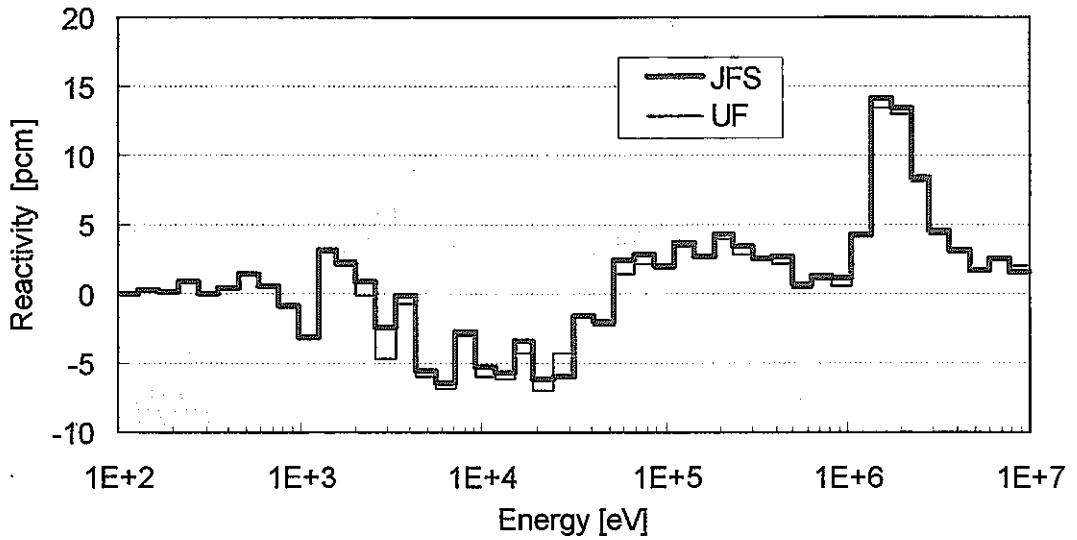


Fig.6.7. Comparison of non-leakage term between JFS and UF

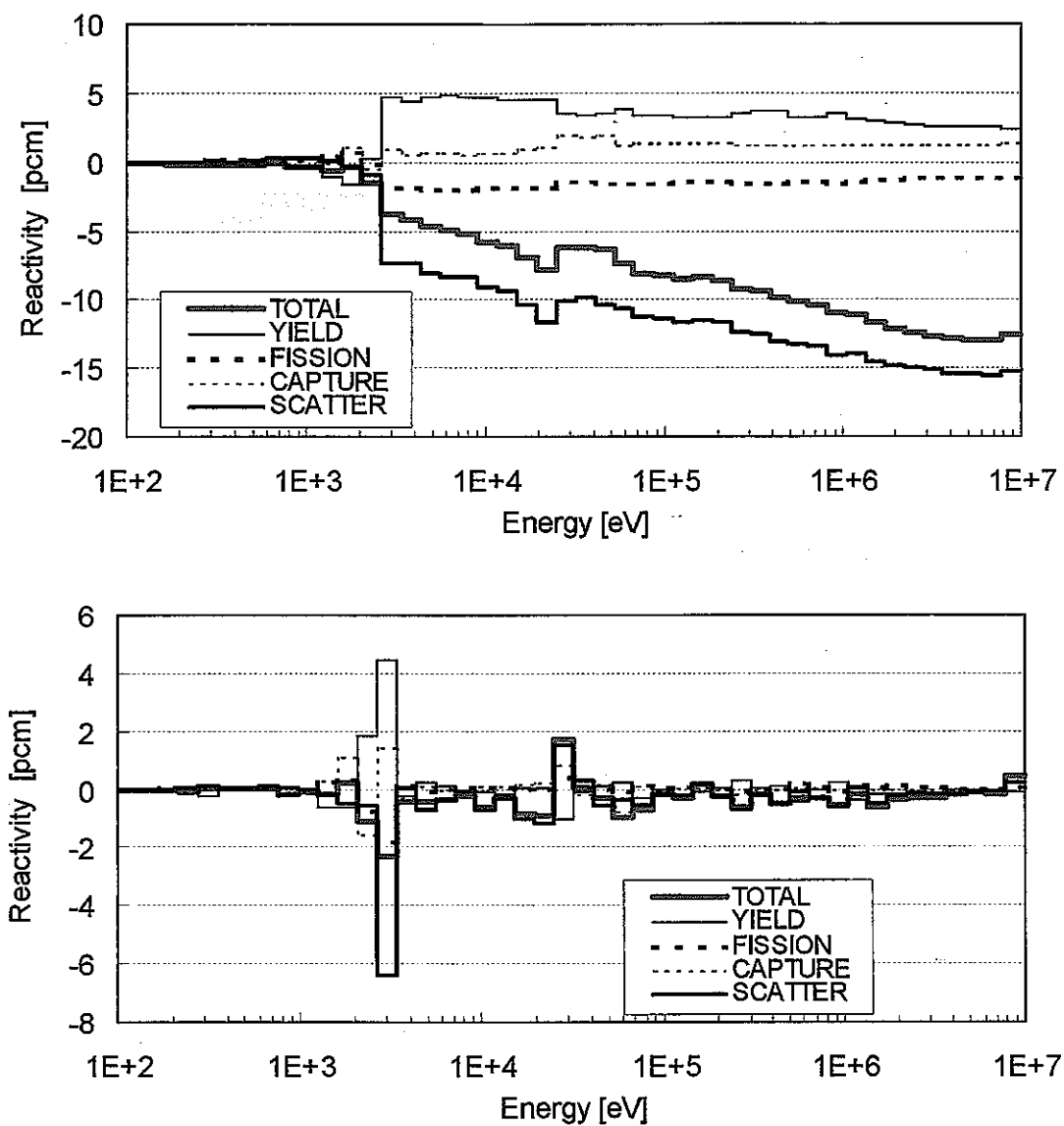


Fig.6.8. UF effect on each component of non-leakage term
(upper : cumulative value, lower: energy wise value)

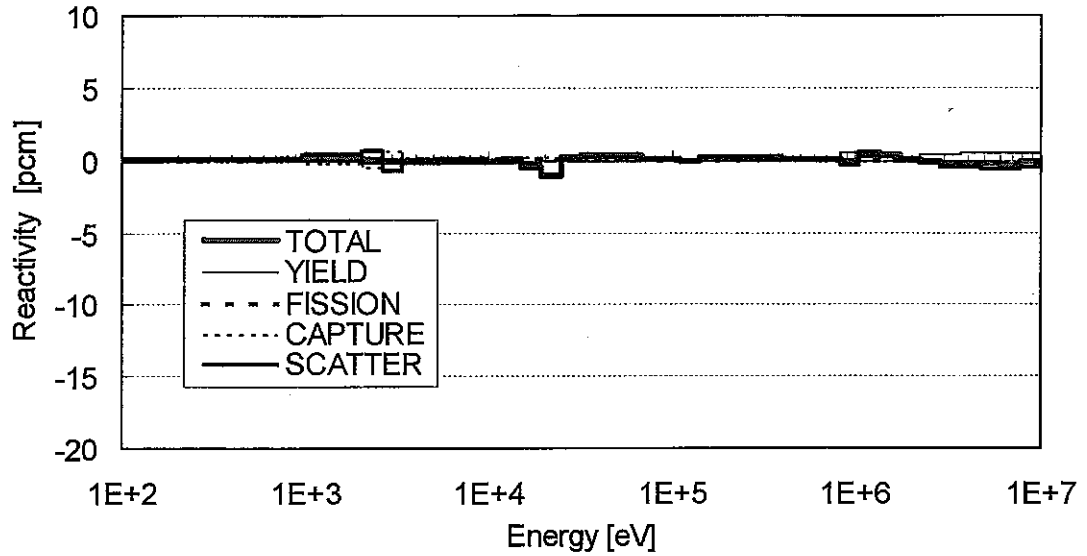


Fig.6.9. Flux based UF effect on each component of non-leakage term (cumulative value from the lowest energy)

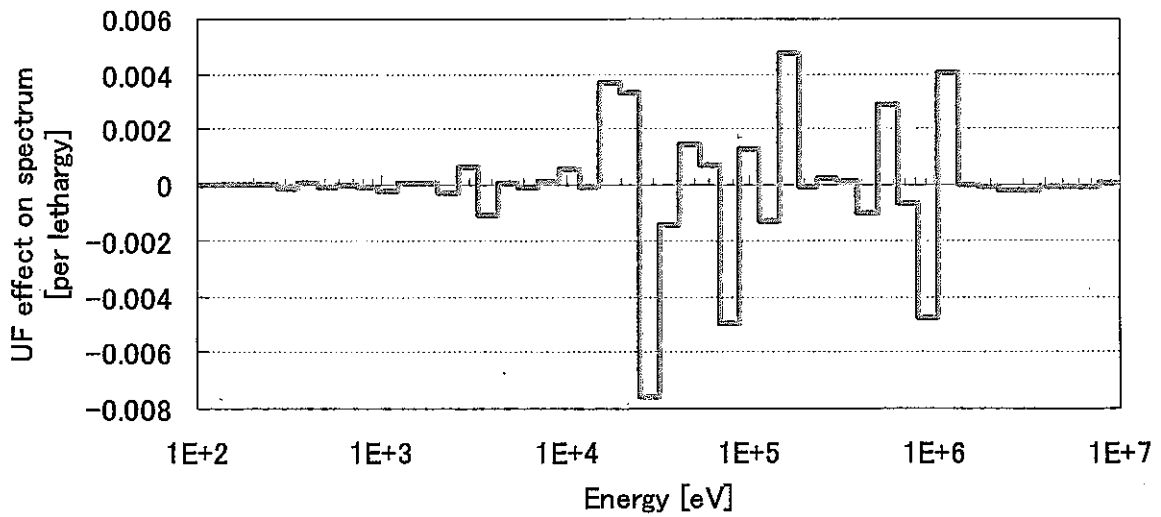
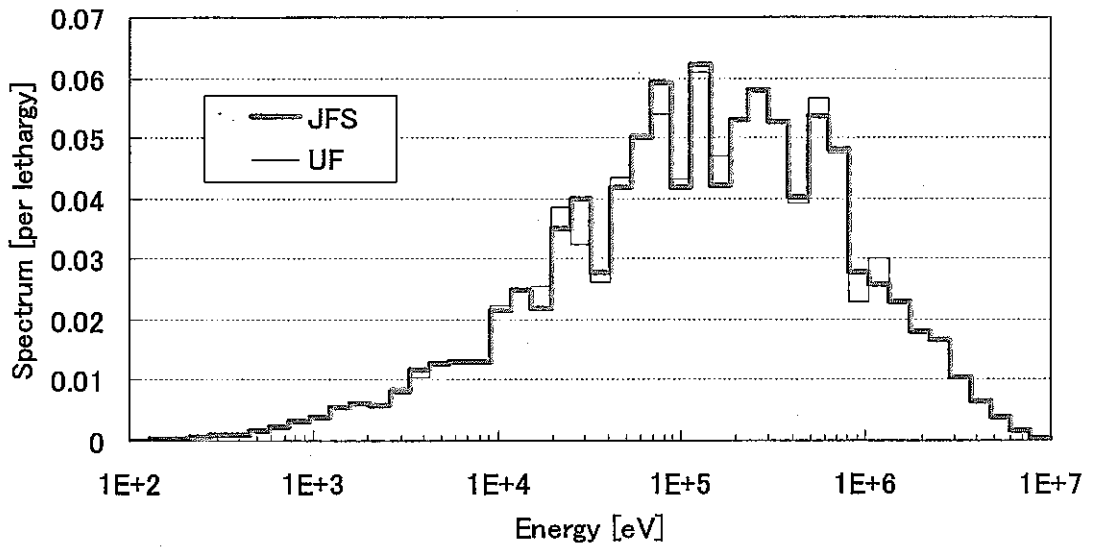


Fig.6.10. UF effect on neutron spectrum (upper: values, lower: difference)

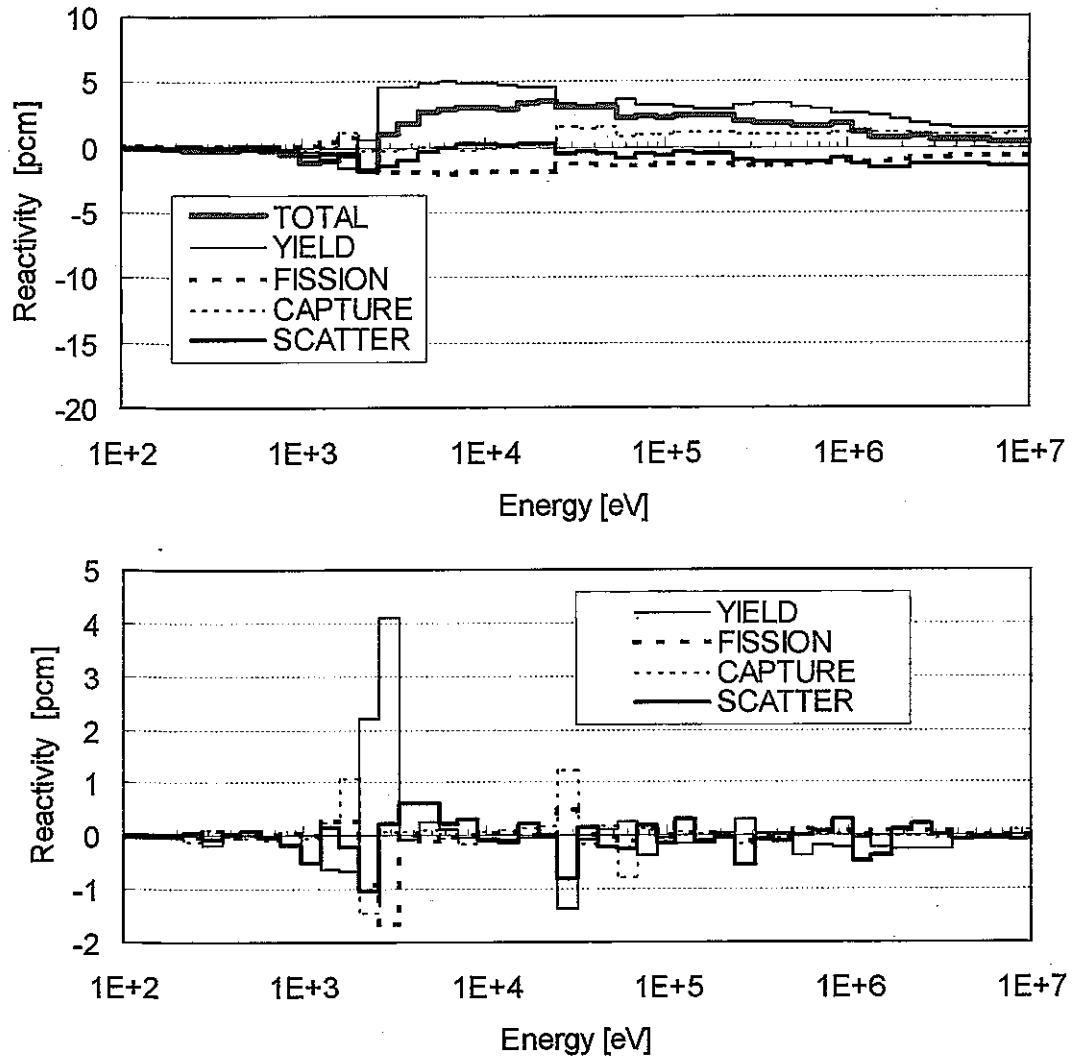


Fig.6.11. Cross section based UF effect on each component of non-leakage term (upper : cumulative value, lower: energy wise value)

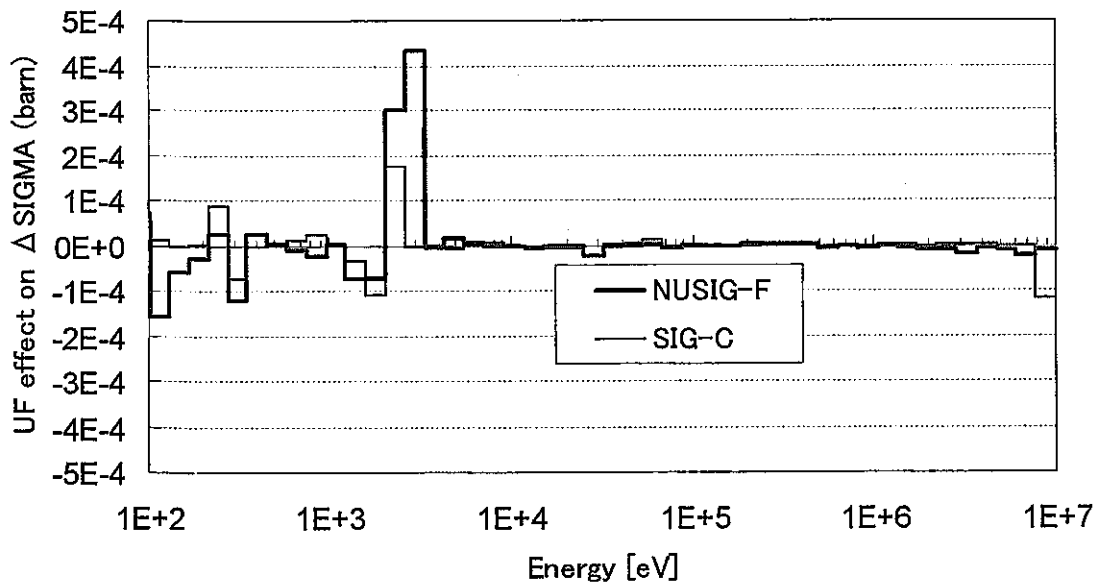


Fig.6.12. UF effect on macro cross section change in perturbation

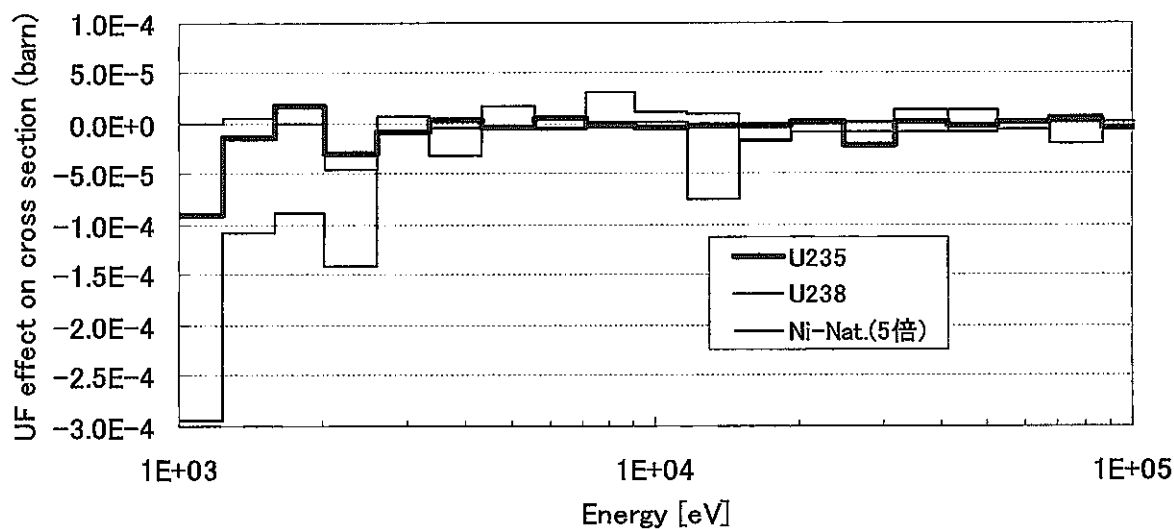
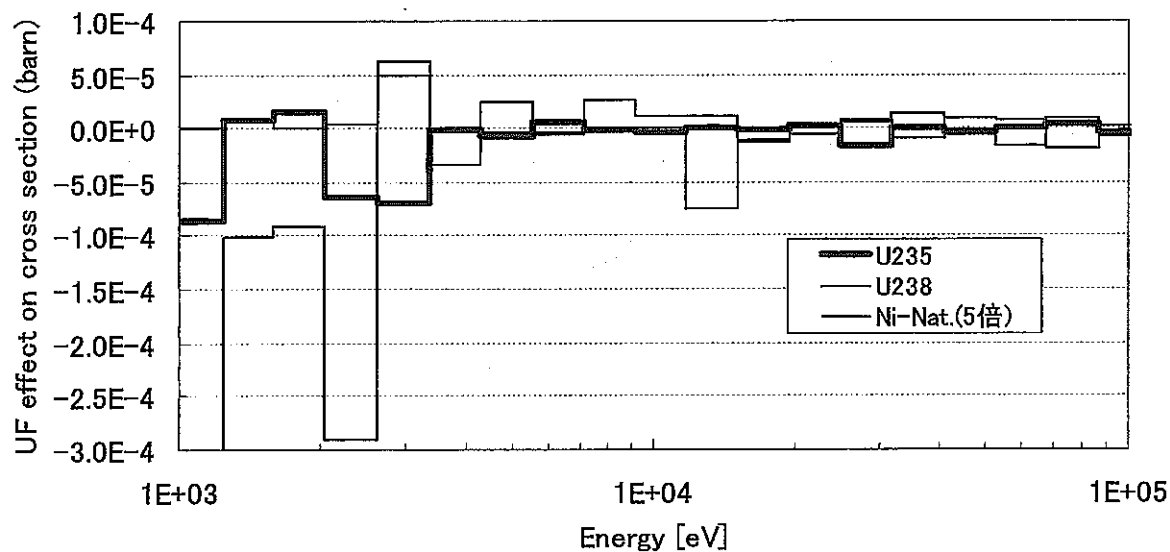


Fig.6.13. UF effect on effective macro cross section (capture)
 (upper : before perturbation, lower: after perturbation)

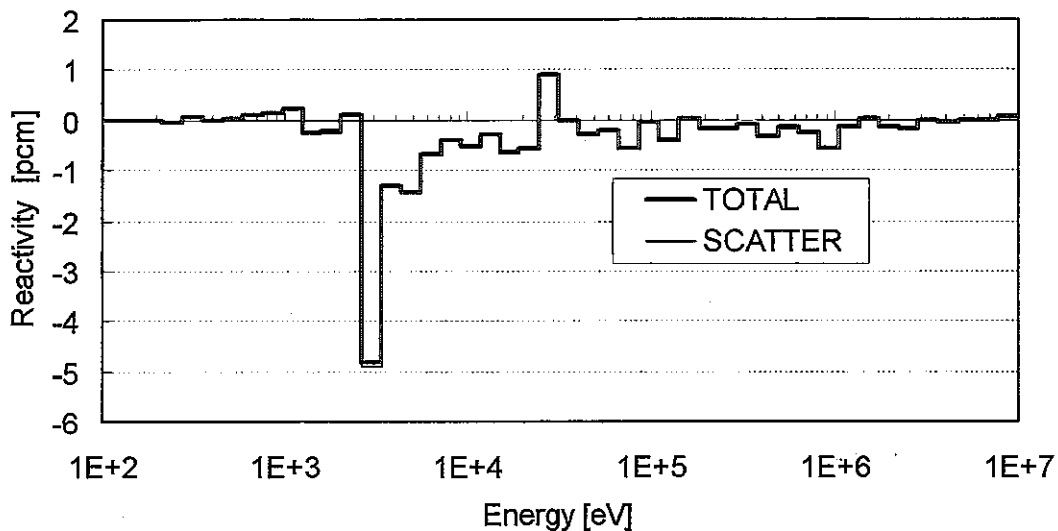
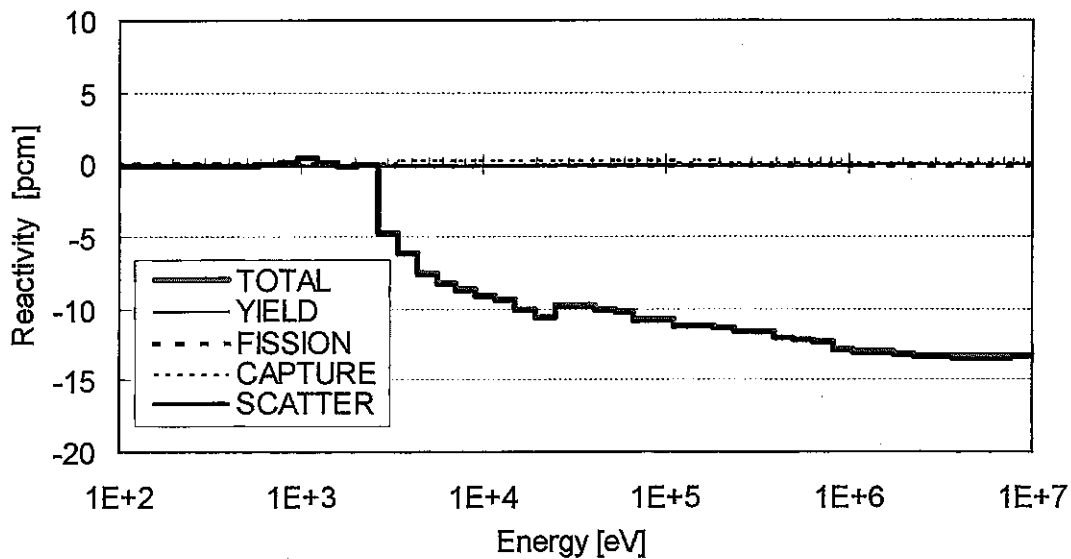


Fig.6.14. Adjoint flux based UF effect on each component of non-leakage term (upper : cumulative value, lower: energy wise value)

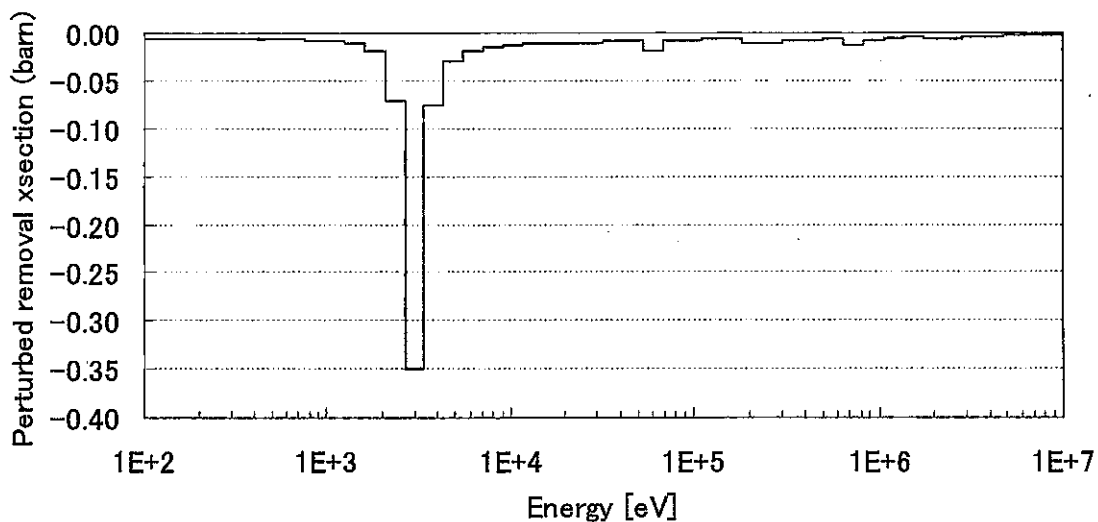


Fig.6.15. Change of removal cross section in perturbation (JFS)

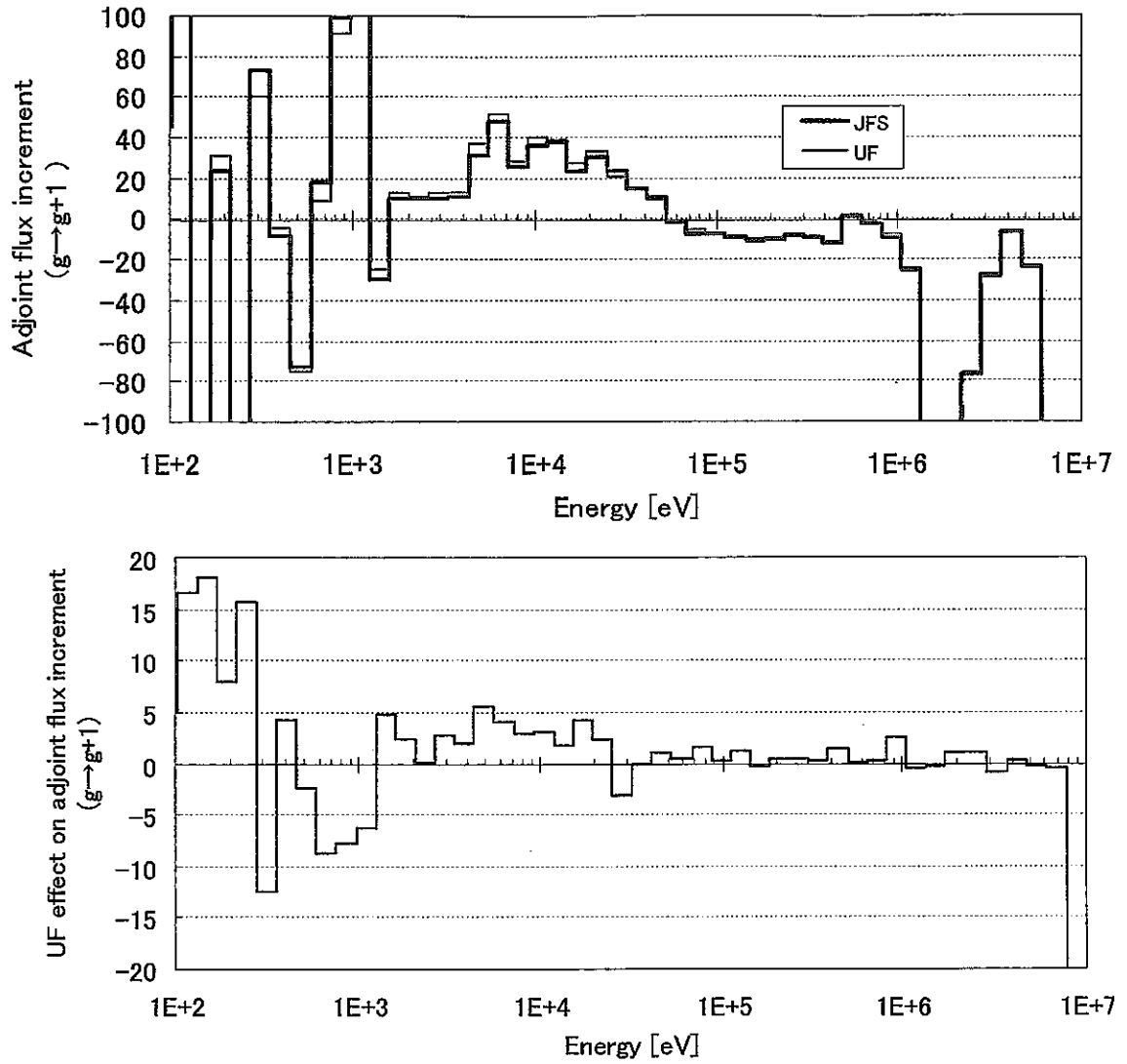


Fig.6.16. UF effect on adjoint flux increment between neighboring energy groups (upper: values, lower: difference)

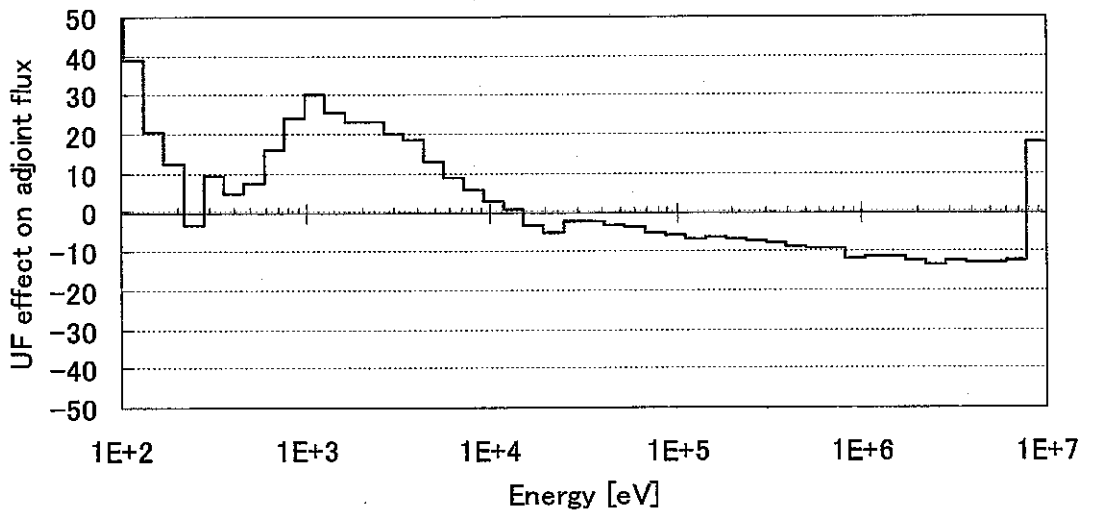
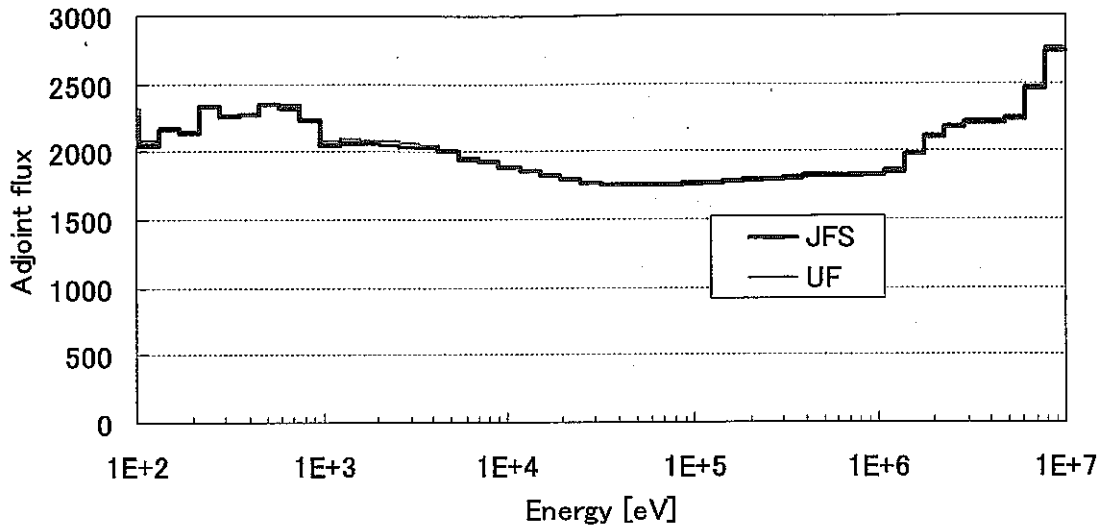


Fig.6.17. UF effect on adjoint flux (upper : values, lower : difference)

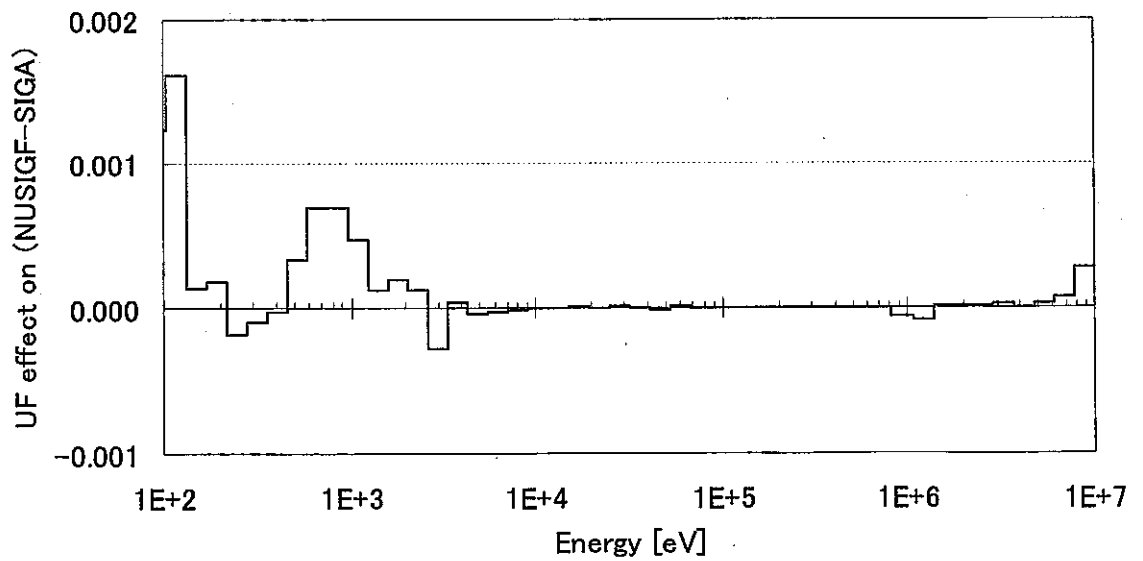


Fig.6.18. UF effect on macro cross section (NuSIGF-SIGA)

第7章 BFS-62-3A 体系の BN-600 ハイブリッド炉心の模擬性検討

7.1 検討方法

BFS-2 は、熱出力 300 万 kW 級までの大型高速炉心を模擬できる規模を有しており、少なくとも外見上は BN-600 にきわめてよく似た配置の炉心構成が可能であるが、将来 BFS-62-3A 炉心の実験解析結果を BN-600 ハイブリッド炉心の解析精度評価に活用するにあたっては、両体系の類似点及び相違点を核特性ごとに正確に把握しておく必要がある。本章では、BFS-62-3A 炉心で測定される核特性と BN-600 ハイブリッド炉心の核特性を比較した結果を示す。解析には、BFS-62-3A 炉心については前章までに示した実験情報を、BN-600 ハイブリッド炉心については、IAEA 主催の「液体金属冷却型高速炉の解析誤差低減のためのコード及び解析手法の向上」に関する研究プロジェクト(Coordinated Research Project ; CRP)でベンチマーク計算に使用されている仕様^{(23),(24)}を用いた。

解析は、基本的に BFS-62-3A 炉心の実験解析手法に合わせて行った。すなわち、JENDL3.2 ベースの 70 群炉定数 JFS-3-J3.2R を使用し、燃料領域及び制御棒吸収体領域の実効マイクロ断面積を、CASUP コードを用いた非均質セル計算により求めた。その他の領域については、SLAROM コードによる均質セル計算で実効マイクロ断面積を求めた。炉心計算は、非等方拡散係数を用いた CITATION-FBR コード(3 次元 Hex-Z 体系)による拡散計算で実施した。

7.2 検討結果

7.2.1 炉心仕様

Fig. 7.1 及び Fig. 7.2 に、BFS-62-3A 炉心及び BN-600 ハイブリッド炉心の 2 次元 RZ 体系図を示す。また、Fig. 7.3 及び Fig. 7.4 に、BFS-62-3A 炉心及び BN-600 ハイブリッド炉心の配置図(炉心の 1/4)を示す。Table 7.1 に BN-600 ハイブリッド炉心の計算に使用した領域別均質原子数密度を示す。BFS-62-3A 炉心の計算に使用した領域別均質原子数密度は付録 A Table A.1 に示すとおりである。実際の解析は 3 次元モデルによって行った。

Fig. 7.1~7.4 の図より、二つの炉心は 3 種類の濃縮度の UO₂ 燃料 (LEZ, MEZ, HEZ)、MOX 燃料、径方向遮蔽体、B4C 遮蔽体、制御棒がほぼ同様に配置されていることがわかる。基本構成要素である集合体(BFS-2 の場合は「燃料ロッド」)の配列ピッチは、BFS-62-3A 炉心が 5.10cm, BN-600 ハイブリッド炉心が 9.84cm と異なるが、BFS-2 の燃料ロッド約 4 本(正確には約 3.72 本)が BN-600 の 1 本の燃料集合体の大きさに対応することを考慮して炉心構成が行われている。

Table 7.2 に、二つの炉心に関する定量的な比較結果を示す。BFS-62-3A 炉心の燃料部の高さ及び等価半径は BN-600 ハイブリッド炉心に比べてやや小さいが、いずれも 1%以内の差であり、燃料部体積の差は 2%以内である。

BFS-62-3A 炉心の燃料ロッド数と BN-600 ハイブリッド炉心の燃料集合体数の比を求めると、LEZ, MEZ, MOX, 制御棒チャンネルはいずれも 3.7~3.8 であり形状を考慮した理論値(約 3.72)と一致するが、HEZ は約 3.3(=236/72)と小さい。したがって、HEZ 以外の領域の大きさは BN-600 ハイブリッド炉心を忠実に模擬しており、臨界性測定に都合が良い過剰反応度(+20¢以内)を確保するように HEZ

の燃料ロッド数が調整されたと考えられる。この結果、燃料部の各領域の体積割合は、表中に示すように、約2%以内の差で一致している。

燃料部の組成については、LEZ及びMEZのU濃縮度が0.5w/o以内の差であるのに対し、MOX領域のPu富化度及びHEZのU濃縮度はBFS-62-3A炉心の方が約3w/o小さい。Pu富化度の差については、BN-600ハイブリッド炉心の核分裂性Pu割合が91.8w/o（平衡サイクル初期を想定していると推測される）であるのに対し、BFS-62-3A炉心のPuペレットの核分裂性Pu割合が95.4W/oとより高純度なので差は緩和される方向だが、これを考慮しても全重金属重量に占める核分裂性Puの割合はBN-600ハイブリッド炉心の方がやや大きい。

燃料部（BFS-62-3A炉心のブランケット部を除く）各領域で発生する核分裂中性子数の発生割合は、HEZで最大の差を示すが、2.5%以内で一致している（Fig. 7.5に図示）。

原子個数比（MOX領域の値）をTable 7.2の下部に示す。構造材と重金属の原子個数比はほぼ同等である。重金属に対するNaの原子個数比はBFS-62-3A炉心が約3割小さいが、Alを加えて比を求めるとほぼ等しくなる。これは、BFS-62-3A炉心で使用される劣化UO₂ペレットの被覆材にAlが用いられているためである。このことは、BFS-62-3A炉心で行われたNaボイド反応度値測定時にNaペレットのボイド化によって実験体系に加えられた摂動の大きさがBN-600ハイブリッド炉心に比べて小さいことを示している。

酸素と重金属の原子個数比はBFS-62-3A炉心の方が約2割小さい。これは、BFS-62-3A炉心で使用される濃縮UやPuが金属組成であることによる。これらより、中性子減速能が大きな軽核（Na, Al, Oなど）の存在割合はBFS-62-3A炉心の方が相対的に少ない。ただし、中性子スペクトルを考える際に考慮すべきもう一つの要因としてBFS-62-3A炉心のKey領域以外で使用されるNaペレットに含有するH原子核の存在（ $2\sim 3 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 程度）があげられる。

径方向遮蔽体領域の平均密度については、BFS-62-3A炉心はBN-600ハイブリッド炉心に比べて約23%小さい。BFS-2では、直径約8mmのステンレス鋼ロッドを十数本燃料ロッド内部に垂直に差し込むことによりこの領域を構成しており、ギャップ部の割合が大きいためBN-600ハイブリッド炉心の径方向遮蔽体領域の平均密度を十分には模擬できていない。

制御棒吸収体領域の仕様に関する比較結果を、制御棒と安全棒に分類してTable 7.3に示す。B-10の濃縮度については、制御棒の場合いずれの炉心も天然組成だが、安全棒の場合、BN-600ハイブリッド炉心が約78%濃縮Bを使っているのに対してBFS-62-3A炉心では天然組成を用いている。B4Cペレットを多数配置することによりB-10の原子個数を増加させてはいるが、BN-600ハイブリッド炉心に比べて原子個数密度で約33%、線密度で約29%小さい。

7.2.2 中性子スペクトル、随伴中性子スペクトル、反応率比

BFS-62-3A炉心及びBN-600ハイブリッド炉心の中性子スペクトルを、Fig. 7.6（縦軸リニアスケール）及びFig. 7.7（縦軸ログスケール）に示す。評価位置は、炉心中心、MOX領域、及び径方向遮蔽体領域（燃料部外端から約20cm外側）の3カ所である。また、同じ位置における随伴中性子スペクトルの比較をFig. 7.8に示す。

炉心中心及びMOX領域では、BFS-62-3A炉心の中性子スペクトル成分が

BN-600 ハイブリッド炉心に比べて、MeV 領域でやや小さく約 10keV 以下でやや大きい傾向、すなわち若干軟らかい特性を示している。これは、BFS-62-3A 炉心の Key 領域以外に存在する H の影響と思われる。

一方、径方向遮蔽体領域では、この関係が逆転しており、BN-600 ハイブリッド炉心の中性子スペクトルの方が BFS-62-3A 炉心に比べてより軟化する傾向を示す。これは、7.1.1 に示したように径方向遮蔽体領域の密度が BFS-62-3A 炉心の方が小さいために中性子が減速されにくいためであると思われる。

炉心中心位置及び径方向遮蔽体領域（燃料部外端から約 20cm 外側）における核分裂反応率比の比較を Table 7.4 に示す。F28/F25 については、上述の中性子スペクトルの比較結果と対応する相違が見られており、BFS-62-3A 炉心の値は BN-600 ハイブリッド炉心の値に比べ、炉心中心において 10%強小さいのに対し、径方向遮蔽体領域では 2 倍以上大きい。それぞれの位置における F28/F25 のエネルギー分布を Fig. 7.9 及び Fig. 7.10 に示す（分母は F25 の全エネルギー積分値である）。F49/F25 については、両炉心の値の差は小さく、炉心中心において約 3%、径方向遮蔽体領域で約 6%にとどまる。なお、BFS-62-3A 炉心における核分裂反応率比（スペクトルインデックス）の測定は、炉心中心でのみ実施されている。

7.2.3 核分裂反応率分布

径方向の核分裂反応率分布を、Fig. 7.11～7.13 に示す。BN-600 ハイブリッド炉心の分布は、半挿入されている調整棒の影響を避けるために、炉心中心面より 10cm 下方の値を用いた。また、いずれの分布も、炉心中心から 20cm の位置で規格化した。燃料領域の径方向の分布において、制御棒（調整棒、安全棒）フォロー位置では F49 及び F25 の増加ならびに F28 の減少が見られる。これは Na によって中性子スペクトルが軟化する影響が表れるものである。（注；炉心中心部は、BN-600 ハイブリッド炉心のみ調整棒フォロー部（大半が Na）が存在する） 径方向遮蔽体領域では、F49 及び F25 について、BN-600 ハイブリッド炉心の値が BFS-62-3A 炉心の値より大きい傾向を示すが、これは 7.1.1 に示した径方向遮蔽体領域の平均密度の差に起因して中性子遮蔽性能及び中性子スペクトルの軟化の度合いが異なることに対応している。

軸方向の核分裂反応率分布を Fig. 7.14～7.16 に示す。BN-600 ハイブリッド炉心については、炉心中心が調整棒チャンネルなので、炉心中心から約 20cm 外側の位置で軸方向の分布を求めた。なお、調整棒はすべて全引抜状態として計算を行った。F49 及び F25 の分布には燃料部より上方（上部反射体領域）で、BFS-62-3A 炉心のみ盛り上がりが見られる。これは BN-600 ハイブリッド炉心の計算体系の上部反射体厚さが 20cm と薄いことによるものであり、この厚さを BFS-62-3A 炉心と同一の 40cm に設定したチェック計算により、同様の盛り上がり傾向が見られることを確認した。F28 の分布については、BFS-62-3A 炉心と BN-600 ハイブリッド炉心の分布はほぼ同等である。

7.2.4 制御棒価値

炉心中心の調整棒 1 体、安全棒 6 体のそれぞれについて、制御棒価値を両炉心で計算した結果を Table 7.5 に示す。BFS-62-3A 炉心では炉心中心に調整棒は配置されていないが、他の調整棒チャンネルで実験に用いた制御棒吸収体及び Na フォロ

ワ部の組成データを炉心中心に設定して計算に使用した。吸収体部の設定は、BFS-62-3A 炉心については実験条件に合わせて燃料部上端から約 80cm 長としたのに対し、BN-600 ハイブリッド炉心ではベンチマーク問題の設定通り燃料部の全長（約 104cm）に渡って吸収体を配置した。また、BN-600 ハイブリッド炉心の制御棒の非均質構造は、ベンチマーク計算で支給されたものをいずれの計算にも適用した。これは、BN-600 の調整棒の構造をモデル化したものであり、実際の安全棒とは異なる構造であることに留意する必要がある。

両炉心の制御棒価値は $\Delta k/k'$ ベースで約 4% 以内で一致した。 $\$$ ベースで比較すると、安全棒価値はほぼ一致するのに対し、炉心中心の調整棒価値は BFS-62-3A 炉心の方が約 9% 小さい。

本論から少しはずれるが、BN-600 ハイブリッド炉心の制御棒吸収体部の非均質効果評価値に関して現在入手している情報を Table 7.6 に整理した。調整棒の非均質構造は上述のように計算モデルが提示されており、各国が評価値を報告しているが、JNC の評価値が 0.97 であるのに対し、IPPE は 0.94 と小さい値を報告している。安全棒については、JNC の今回の計算では調整棒の非均質効果をそのまま適用したことになるが、IPPE は独自の評価値を求めており、0.88 と調整棒に比べてより小さく評価している。

7.2.5 Na ボイド反応度価値

Na ボイド反応度価値(SVRE)を両炉心について比較した。BFS-62-3A 炉心における実験は、LEZ, MEZ, MOX, 及び HEZ の各燃料領域を上部軸ブランケット部も含めて Na ペレットをボイド化することによって測定が行われた。測定対象領域は、Key 領域中心部の 60° セクタ内である。BN-600 ハイブリッド炉心でもこれと同等の範囲の Na の原子数密度をゼロにすることによる反応度変化量を 3 次元 Hex-Z モデルによる拡散計算により求めた。また、厳密摂動理論により、非漏洩成分と漏洩成分の寄与を求めた。これらの計算結果を Table 7.7 の上半分に示す。全燃料領域の SVRE は、BFS-62-3A 炉心が -22ϵ に対し、BN-600 ハイブリッド炉心では約 -4ϵ ときわめてゼロに近い値となった。各燃料領域ごとの SVRE を Fig. 7.17-1 に図示した。これより、BN-600 ハイブリッド炉心では LEZ 及び MEZ で正の値が算出されていることが明らかな相違点である。特に、LEZ の非漏洩成分の値については、BFS-62-3A 炉心が約 $+7\epsilon$ 、BN-600 ハイブリッド炉心が約 $+24\epsilon$ と顕著な差が生じている。両体系の相違点の一つとして BN-600 ハイブリッド炉心の UO₂ 燃料領域に存在する Pu の影響を調べるために、LEZ の Pu-239 をすべて U-235 に置換した計算を行ったが、前記の非漏洩成分を約 3ϵ 減少させるにとどまり、これだけが原因とは言えないことがわかった。また、ボイド化した Na 重量 (Table 7.8 参照) の差異を取り除いた比較をするために、SVRE とボイド化 Na 重量の比を Table 7.9 及び Fig. 7.17-2 に示す。いずれの燃料領域においても、BN-600 ハイブリッド炉心の非漏洩成分 (正の値) は BFS-62-3A 炉心より顕著に大きい傾向を示す (1.7~3.2 倍)。一方、漏洩成分 (負の値) は両炉心でほぼ同等だが、BFS-62-3A 炉心の方が外側に行くにつれて絶対値の増大が顕著な傾向が見られる。

BFS-62-3A 炉心と BN-600 ハイブリッド炉心の SVRE 特性に見られる差異の原因は、Pu 組成以外にも、両炉心の非均質効果の相違を初めとして、中性子スペクトルの相違、両炉心の燃料部周囲の遮蔽性能の相違、BN-600 ハイブリッド炉心のみ存在する FP の影響等があげられる。本報告書ではこれらの要因に関する定量

的な検討は行わないが、このように両炉心で Na ボイド反応度価値の絶対値や燃料領域毎の分布に相違が見られることは、将来 BFS-62-3A 炉心の実験解析結果を BN-600 ハイブリッド炉心の Na ボイド反応度価値の解析精度評価に活用する際に十分慎重に考慮すべき事項である。

なお、3次元輸送計算コード TRITAC を用いて全燃料領域及び上部軸ブランケット部の Na をボイド化させた場合の SVRE を求めて比較したが、Table 7.7 の最下段に示すように、BFS-62-3A 炉心が -12% と有意な負の値を示したのに対し、BN-600 ハイブリッド炉心では 0.1% とほぼゼロの値を示し、拡散計算による評価結果と類似の傾向を示した。

7.2.6 感度係数の比較

2次元均質計算に基づく各核特性に対する感度解析結果を Fig. 7.18～7.29 に示す。(注；BFS-62-3A 炉心の臨界性及び核分裂反応率分布については3次元 XYZ 体系計算に基づく結果である。) 評価した核特性(臨界性、核分裂反応率比(F49/F25, F28/F25)、核分裂反応率分布(F49, F25, F28)、制御棒価値)のいずれについても、BFS-62-3A 炉心と BN-600 ハイブリッド炉心の感度係数はよく似た分布を示している。

両炉心の値に若干の相違が見られる項目についてその原因を考察する。径方向遮蔽体領域の F28/F25 に対する感度係数(Fig. 7.22)は、鉄の断面積に対する感度係数が BN-600 ハイブリッド炉心の方が大きい傾向を示すが、これは7.2.1に記した径方向遮蔽体領域の平均密度が大きいことに対応している。核分裂反応率分布に対する感度係数(Fig. 7.23～7.28)では、BN-600 ハイブリッド炉心の感度係数が総じて小さめの値を示す。これは、BN-600 ハイブリッド炉心の濃縮 UO₂ 燃料領域に存在する Pu の影響によるものと考えられる。本件について、F25 反応率分布(MOX 領域の値と炉心中心の値の比)に対する感度係数を例にとって考察する。この感度係数に関して最も大きな寄与をなす核断面積である Pu-239 ν 値(正の効果)と U-235 ν 値(負の効果)のそれぞれについて、合計値だけでなく、LEZ 領域、MOX 領域、その他の領域の寄与とともに Table 7.10 に示す。U-235 ν 値の感度係数は LEZ 領域の寄与が支配的だが、BN-600 ハイブリッド炉心では Pu が U-235 の 1 割程度存在することにより U-235 の感度係数が小さくなっており、この差が合計値(の絶対値)を小さくしている。また、Pu-239 ν 値の感度係数は MOX 領域の感度係数が主要因子だが、BN-600 ハイブリッド炉心では LEZ 領域に Pu が存在することにより負の影響が生じており、これによって感度係数合計値が BFS-62-3A 炉心に比べて小さくなっている。

また、いずれの核特性についても、BFS-62-3A 炉心に存在する H の感度係数は十分小さいことを確認した。

7.3 まとめ

BFS-62-3A 炉心と BN-600 ハイブリッド炉心の仕様を比較した結果、BFS-62-3A 炉心は BN-600 ハイブリッド炉心の形状、燃料各領域・制御棒・径方向遮蔽体等の配置をよく模擬できており、核分裂中性子の領域別発生割合がほぼ同等であることを確認した。細かな相違点としては、径方向遮蔽体領域の平均密度が BN-600 ハイブリッド炉心に比べて小さいことがあげられる。

両炉心の核特性を比較した結果、中性子スペクトル、核分裂反応率比、核分裂反応率分布及び制御棒価値について、BFS-62-3A 炉心は BN-600 ハイブリッド炉心の特性をよく模擬していることを確認するとともに、若干見られる相違についてはその原因を考察した。また、感度係数を比較することにより、各核特性に影響を及ぼす核反応断面積が類似の寄与割合を示すことを確認した。

ただし、Na ボイド反応度価値(SVRE)については、両炉心の傾向が「同等」とは言い難い面がある。全燃料領域及びその上部の軸方向ブランケット部をボイド化した状態の SVRE は両炉心とも負の値ではあるが、BFS-62-3A 炉心が有意な負の値を示すのに対し、BN-600 ハイブリッド炉心はほぼゼロに近い傾向を示した。領域毎の SVRE を摂動計算によって分析した結果、炉心中央領域の UO₂ 燃料領域の非漏洩成分に最も大きな差異が生じることを確認した。この点については、BFS-62-3A 炉心の実験解析結果を用いて BN-600 ハイブリッド炉心の核特性解析精度を検討する際に十分慎重に考慮する必要がある。

Table 7.1. BN-600 ハイブリッド炉心の領域別原子数密度 (1/3)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	LEZ(inner) Fissile part	LEZ(outer)) Fissile part	MEZ Fissile part	MOX Fissile part	HEZ Fissile part	LEZ(inner) Lower part of lower axial blanket	LEZ(outer) Lower part of lower axial blanket	MEZ Lower part of lower axial blanket	MOX Lower part of lower axial blanket	HEZ Lower part of lower axial blanket	LEZ(inner)) Upper part of lower axial blanket	LEZ(outer) Upper part of lower axial blanket
U235	1.169E-03	1.180E-03	1.485E-03	1.686E-05	1.932E-03	2.490E-05	2.490E-05	2.520E-05	2.560E-05	2.560E-05	2.340E-05	2.360E-05
U236	5.324E-05	5.092E-05	5.612E-05	5.805E-07	5.158E-05	6.001E-07	6.001E-07	5.000E-07	4.000E-07	4.000E-07	9.000E-07	7.999E-07
U238	6.674E-03	6.688E-03	6.377E-03	6.377E-03	6.014E-03	8.899E-03	8.899E-03	8.912E-03	8.930E-03	8.930E-03	8.825E-03	8.834E-03
Pu239	1.392E-04	1.329E-04	1.136E-04	1.504E-03	7.588E-05	7.680E-05	7.680E-05	6.469E-05	5.110E-05	5.110E-05	1.337E-04	1.264E-04
Pu240	4.380E-06	3.911E-06	2.878E-06	1.343E-04	1.371E-06	1.500E-06	1.500E-06	1.000E-06	6.998E-07	6.998E-07	3.800E-06	3.300E-06
Pu241	1.151E-07	8.038E-08	5.896E-08	8.571E-06	3.803E-08	3.000E-08	3.000E-08	2.000E-08	2.000E-08	2.000E-08	9.000E-08	6.998E-08
Pu242	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.862E-07	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
FP	2.427E-04	2.315E-04	2.530E-04	2.229E-04	2.125E-04	8.200E-06	8.200E-06	6.600E-06	4.598E-06	4.598E-06	2.580E-05	2.400E-05
O	1.658E-02	1.658E-02	1.658E-02	1.653E-02	1.658E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02
Na	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03
Fe	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02
Cr	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03
Ni	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03
Mo	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04
B10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Table 7.1. BN-600 ハイブリッド炉心の領域別原子数密度 (2/3)

	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	MEZ Upper part of lower axial blanket	MOX Upper part of lower axial blanket	HEZ Upper part of lower axial blanket	LEZ(inner) Lower part of upper axial blanket	LEZ(outer) Lower part of upper axial blanket	MEZ Lower part of upper axial blanket	MOX Lower part of upper axial blanket	HEZ Lower part of upper axial blanket	LEZ(inner) Upper part of upper axial blanket	LEZ(outer) Upper part of upper axial blanket	MEZ Upper part of upper axial blanket	MOX Upper part of upper axial blanket
U235	2.400E-05	2.440E-05	2.480E-05	2.440E-05	2.460E-05	2.470E-05	2.490E-05	2.510E-05	2.560E-05	2.560E-05	2.570E-05	2.580E-05
U236	6.998E-07	6.001E-07	6.001E-07	6.001E-07	6.001E-07	5.000E-07	5.000E-07	5.000E-07	4.000E-07	4.000E-07	3.000E-07	3.000E-07
U238	8.851E-03	8.873E-03	8.895E-03	8.869E-03	8.877E-03	8.886E-03	8.891E-03	8.908E-03	8.930E-03	8.930E-03	8.934E-03	8.934E-03
Pu239	1.107E-04	9.568E-05	7.750E-05	9.900E-05	9.341E-05	8.567E-05	7.951E-05	6.701E-05	5.250E-05	5.250E-05	4.869E-05	4.629E-05
Pu240	2.500E-06	1.800E-06	1.400E-06	1.900E-06	1.600E-06	1.300E-06	1.200E-06	1.000E-06	6.001E-07	6.001E-07	5.000E-07	5.000E-07
Pu241	5.000E-08	4.000E-08	6.001E-08	3.000E-08	2.000E-08	2.000E-08	2.000E-08	4.000E-08	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
Pu242	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
FP	2.110E-05	1.770E-05	1.260E-05	1.710E-05	1.610E-05	1.540E-05	1.420E-05	1.060E-05	4.900E-06	4.900E-06	4.498E-06	4.200E-06
O	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02	1.803E-02
Na	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03	7.550E-03
Fe	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02	1.287E-02
Cr	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03	2.848E-03
Ni	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03	1.627E-03
Mo	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04	2.176E-04
B10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Table 7.1. BN-600 ハイブリッド炉心の領域別原子数密度 (3/3)

	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
	HEZ Upper part of upper axial blanket	SHR Absorbing part	SHR Follower	SCR Absorbing part	SCR Follower	SCR Follower	SS1	SS2	Radial reflector	Axial reflector
U235	2.580E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
U236	3.000E-07	-	-	-	-	-	-	-	-	-
U238	8.943E-03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pu239	4.130E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pu240	5.000E-07	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pu241	2.000E-08	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pu242	0.000E+00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FP	3.400E-06	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O	1.803E-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na	7.550E-03	8.647E-03	1.958E-02	1.260E-02	1.958E-02	2.027E-02	5.638E-03	5.875E-03	4.860E-03	1.729E-02
Fe	1.287E-02	1.310E-02	7.111E-03	1.097E-02	7.111E-03	5.060E-03	5.252E-02	5.179E-02	4.630E-02	1.368E-02
Cr	2.848E-03	2.798E-03	1.216E-03	2.262E-03	1.216E-03	8.655E-04	7.636E-03	7.530E-03	1.340E-02	2.344E-03
Ni	1.627E-03	1.322E-03	1.212E-04	9.930E-04	1.212E-04	1.438E-05	7.447E-04	7.332E-04	6.280E-03	4.948E-05
Mo	2.176E-04	3.140E-04	7.655E-05	2.478E-04	7.655E-05	8.620E-05	3.589E-04	3.550E-04	-	1.487E-04
B10	-	5.113E-03	-	1.780E-02	-	-	-	-	-	-
B11	-	2.045E-02	-	4.450E-03	-	-	-	-	-	-
C	-	6.394E-03	-	5.601E-03	-	-	-	-	-	-

Table 7.2 BFS-62-3A 炉心と BN-600 ハイブリッド炉心の比較

	BFS-62-3A炉心	BN-600ハイブリッド炉心
燃料部高さ(cm)	103.8	104.4
燃料部等価半径(cm)	105.1	105.7
燃料部体積(liter)	3,602	3,664
燃料ロッド(BFS)／集合体(BN-600)の数		
LEZ	649	174
MEZ	222	60
MOX	336	90
HEZ	236	72
制御棒チャンネル	96	25
燃料ロッド(BFS)／集合体(BN-600)の単位面積(炉中心水平断面)、単位: cm ²		
	22.5	84.9
燃料部体積割合(%)		
LEZ	42.2	41.3
MEZ	14.4	14.3
MOX	21.8	21.4
HEZ	15.3	17.1
制御棒チャンネル	6.2	5.9
U濃縮度/Pu富化度(w/o)		
LEZ	14.9 / 0.0	14.6 / 1.7
MEZ	18.0 / 0.0	18.5 / 1.5
MOX	0.3 / 17.4	0.2 / 20.5
HEZ	21.0 / 0.0	23.9 / 1.0
ブランケット部	0.4 / 0.0	0.3 / 0.7
核分裂中性子数の発生割合(%); 燃料部		
LEZ	42.5	42.5
MEZ	16.9	15.9
MOX	26.1	24.8
HEZ	14.4	16.9
原子個数比(MOX領域の値)		
構造材/重金属の原子個数比	2.21	2.18
Na/重金属の原子個数比	0.65	0.94
(Na+Al)/重金属の原子個数比	0.95	0.94
O/重金属の原子個数比	1.65	2.05
径方向遮蔽体部平均密度(g/cm ³)	4.83	6.25
遅発中性子割合(β_{eff})	0.00619	0.00587

Table 7.3 制御棒吸収体領域の仕様の比較

(a) 原子数密度 (単位: $\times 10^{24}/\text{cm}^3$)

	炉心中心調整棒		安全棒 (6体)	
	BN-600	BFS-62-3A	BN-600	BFS-62-3A
	SHR Absorbing part	Compensation Rod Absorber (New Na)	SCR Absorbing part	SafetyRod Absorber
Na	8.65E-03	9.74E-03	1.26E-02	
Fe	1.31E-02	6.89E-03	1.10E-02	4.22E-03
Cr	2.80E-03	1.92E-03	2.26E-03	1.18E-03
Ni	1.32E-03	8.97E-04	9.93E-04	5.50E-04
Mn		1.51E-04		9.28E-05
Mo	3.14E-04		2.48E-04	
Ti		7.17E-05		4.40E-05
Al		1.75E-04		1.07E-04
B10	5.11E-03	4.77E-03	1.78E-02	1.19E-02
B11	2.05E-02	1.92E-02	4.45E-03	4.79E-02
C	6.39E-03	6.04E-03	5.60E-03	1.50E-02

(b) B-10組成

B-10 濃縮度 (w/o)	18.5	18.4	78.4	18.4
組成	天然	天然	濃縮	天然

(c) 領域の水平断面積 (cm^2)

84.9	90.1	509.5	540.6
------	------	-------	-------

(d) B-10の線密度 (単位: $\times 10^{24}/\text{cm}$)

4.34E-01	4.30E-01	9.07E+00	6.44E+00
----------	----------	----------	----------

Table 7.4 核分裂反応率比の比較

評価位置	核分裂反応率比	BFS62-3A炉心	BN600ハイブリッド炉心
炉心中心	F28/F25	2.22E-02	2.49E-02
	F49/F25	9.62E-01	9.66E-01
径方向遮蔽体領域*	F28/F25	1.51E-03	6.41E-04
	F49/F25	1.07E+00	1.14E+00

* Key領域の中心で燃料部外端から約20cm外側の位置

Table 7.5 制御棒価値の比較

計算条件	BN600炉心		BFS62-3A炉心		比 (BFS-62-3A/BN-600)
	keff	反応度 ($\Delta k/kk'$)	keff	反応度 ($\Delta k/kk'$)	
全制御棒 (19体) 引き抜き ^{*1)}	1.03745	-	0.99157	-	
炉心中心調整棒1体挿入時 ^{*2)}	1.03362	-3.57E-03	0.98820	-3.43E-03	0.96
調整棒13体半挿入時	1.00800	-			
安全棒6体挿入時 ^{*3)}	0.97562	-3.29E-02	0.95904	-3.42E-02	1.04
実効遅発中性子割合 (β_{eff})	0.00587		0.00619		
炉心中心調整棒1体の反応度価値 (\$)	0.61		0.55		0.91
安全棒6体の反応度価値 (\$)	5.6		5.5		0.99

*1): 全制御棒 (中心調整棒1体、Ring1安全棒 6体、Ring3調整棒 12体) 未挿入時

*2): BN-600はベンチマーク条件の調整棒吸収体部を全挿入、BFS-62-3Aは実験時の挿入状態 (吸収体部約80cm)

*3): BN-600はベンチマーク条件の安全棒吸収体部を全挿入、BFS-62-3Aは実験時の挿入状態 (吸収体部約80cm)

Table 7.6 BN-600 ハイブリッド炉心の制御棒吸収体部の非均質効果評価値

	JNC評価値	IPPE評価値**
調整棒	0.97	0.94
安全棒	0.97 [*]	0.88

* IAEAのベンチマーク計算では安全棒の非均質構造が与えられていないので、調整棒吸収体部の非均質セル計算によって求めた実効マイクロ断面積を炉心計算に適用して安全棒の価値を算出した。

** IPPEのY. Khomyakov氏からの情報 (2002. 5. 21付けe-mail)

Table 7.7 BFS-62-3A 炉心と BN-600 ハイブリッド炉心の Na ボイド反応度の比較

BFS-62-3A炉心：Naボイド反応度解析結果（拡散計算）			
	非漏洩成分	漏洩成分	Total反応度(Δk/kk')
LEZ+軸ブランク	4.22E-04	-8.72E-04	-4.50E-04
MEZ+軸ブランク	1.55E-04	-2.88E-04	-1.32E-04
MOX+軸ブランク	2.56E-04	-5.93E-04	-3.37E-04
HEZ+軸ブランク	5.44E-05	-6.93E-04	-6.39E-04
全燃料+軸ブランク	8.59E-04	-2.23E-03	-1.37E-03
β _{eff} =		6.19E-03	

BN600炉心：Naボイド反応度解析結果（拡散計算）			
	非漏洩成分	漏洩成分	Total反応度(Δk/kk')
LEZ+軸ブランク	1.41E-03	-9.98E-04	4.14E-04
MEZ+軸ブランク	3.65E-04	-3.22E-04	4.21E-05
MOX+軸ブランク	5.41E-04	-6.52E-04	-1.11E-04
HEZ+軸ブランク	1.59E-04	-7.23E-04	-5.64E-04
全燃料+軸ブランク	2.48E-03	-2.70E-03	-2.18E-04
β _{eff} =		5.87E-03	

LEZ+軸ブランク (LEZのPu-239を U-235に置換)	1.23E-03	-9.50E-04	2.76E-04
--	----------	-----------	----------

BFS-62-3A炉心：Naボイド反応度解析結果（拡散計算）			
	非漏洩成分	漏洩成分	Total反応度(cent)
LEZ+軸ブランク	6.8	-14.1	-7.3
MEZ+軸ブランク	2.5	-4.6	-2.1
MOX+軸ブランク	4.1	-9.6	-5.4
HEZ+軸ブランク	0.9	-11.2	-10.3
全燃料+軸ブランク	13.9	-36.0	-22.1

BN600炉心：Naボイド反応度解析結果（拡散計算）			
	非漏洩成分	漏洩成分	Total反応度(cent)
LEZ+軸ブランク	24.1	-17.0	7.1
MEZ+軸ブランク	6.2	-5.5	0.7
MOX+軸ブランク	9.2	-11.1	-1.9
HEZ+軸ブランク	2.7	-12.3	-9.6
全燃料+軸ブランク	42.3	-46.0	-3.7

LEZ+軸ブランク (LEZのPu-239を U-235に置換)	20.9	-16.2	4.7
--	------	-------	-----

BFS-62-3A炉心：Naボイド反応度解析結果 (全燃料+軸ブランク(輸送計算結果))			
	非漏洩成分	漏洩成分	Total反応度(Δk/kk')
摂動計算	-	-	-
直接計算	ref体系	1.0008633	Total反応度(Δk/kk')
	void体系	1.0001450	-7.176E-04

-11.6cent

BN-600炉心：Naボイド反応度解析結果 (全燃料+軸ブランク(輸送計算結果))			
	非漏洩成分	漏洩成分	Total反応度(Δk/kk')
摂動計算 ⁽¹⁾	2.499E-03	-2.469E-03	3.00E-05
直接計算	ref体系	1.010181	Total反応度(Δk/kk')
	void体系	1.010186	4.900E-06

0.1cent

(1) 中性子束収束判定条件：10⁻³

解析手法

拡散計算： 3次元Hex-Z拡散計算CITATION-FBR、エネルギー群数：70群、摂動計算コードPERKY

輸送計算： 3次元XYZ輸送計算コードTRITAC、エネルギー群数：18群、摂動計算コードSN-PERT-3D

Total反応度は、計算値を6で除した値

Table 7.8 Na ボイド反応度値計算時にボイド化したNaの重量

BFS62-3A炉心				BN-600ハイブリッド炉心			
	燃料部	上部軸ブラ部	計		燃料部	上部軸ブラ部	計
LEZ	69.3	16.5	85.8	LEZ	74.1	21.4	95.5
MEZ	20.7	5.2	25.9	MEZ	25.6	7.4	32.9
MOX	29.2	8.1	37.3	MOX	38.3	11.1	49.4
HEZ	23.1	6.4	29.6	HEZ	30.7	8.9	39.5
合計	142.3	36.2	178.5	合計	168.6	48.8	217.4

(単位 ; kg)

(単位 ; kg)

Table 7.9 ボイド化Na単位重量当たりのNaボイド反応度値の比較
(拡散計算に基づく厳密摂動計算値、単位 ; β /kgNa)

BFS-62-3A炉心				BN600ハイブリッド炉心			
	非漏洩成分	漏洩成分	Total反応度		非漏洩成分	漏洩成分	Total反応度
LEZ +軸ブランケット	0.079	-0.164	-0.085	LEZ +軸ブランケット	0.252	-0.178	0.074
MEZ +軸ブランケット	0.097	-0.180	-0.083	MEZ +軸ブランケット	0.189	-0.167	0.022
MOX +軸ブランケット	0.111	-0.257	-0.146	MOX +軸ブランケット	0.187	-0.225	-0.038
HEZ +軸ブランケット	0.030	-0.379	-0.349	HEZ +軸ブランケット	0.068	-0.312	-0.243
全燃料 +軸ブランケット	0.078	-0.202	-0.124	全燃料 +軸ブランケット	0.195	-0.212	-0.017

Table 7.10 F25(MOX)/F25(LEZ) に対する感度係数の内訳

核種・反応	炉心	感度係数 合計	LEZ領域の感 度係数	MOX領域の 感度係数	その他の領 域の感度係 数
U-235 NU*	BFS-62-3A	-1.69	-3.54	0.03	1.82
	BN-600	-1.21	-2.75	0.90	0.64
Pu-239 NU*	BFS-62-3A	1.76	0.00	1.77	0.00
	BN-600	1.23	-0.38	1.52	0.09

* NU ; ν 値のこと

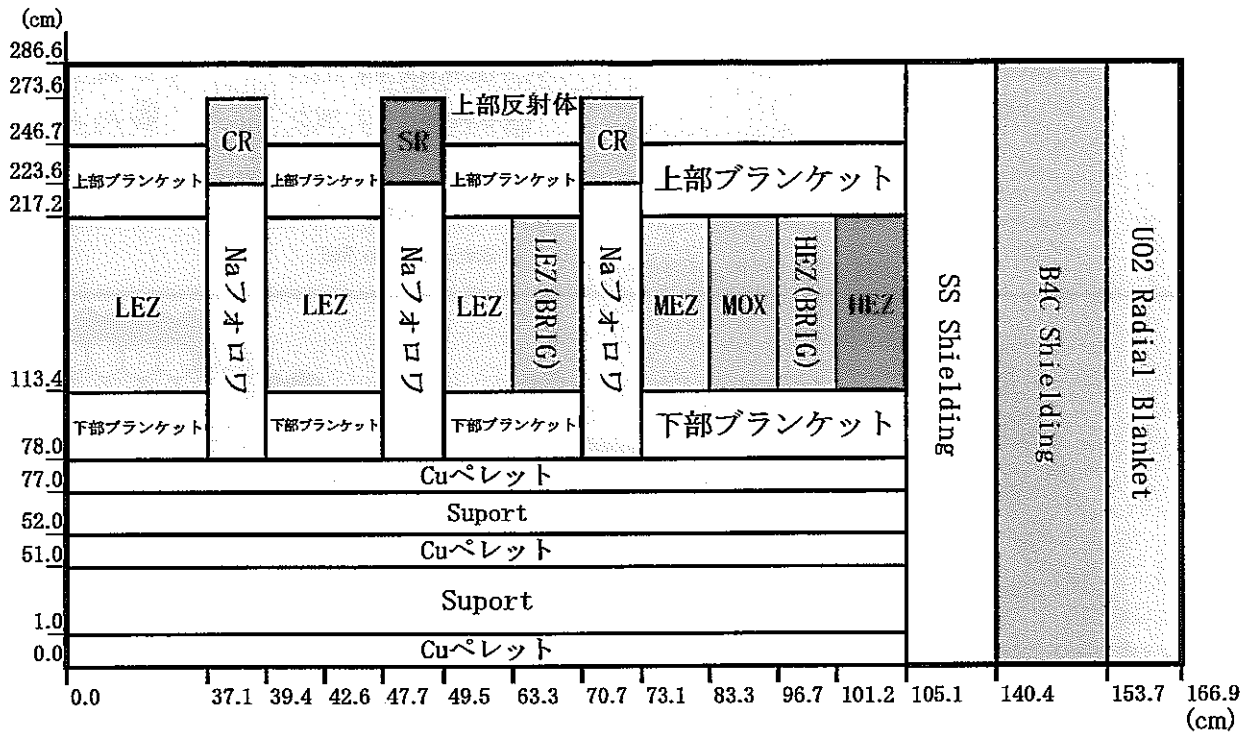


Fig. 7.1 BFS-62-3A炉心の2次元RZ体系図

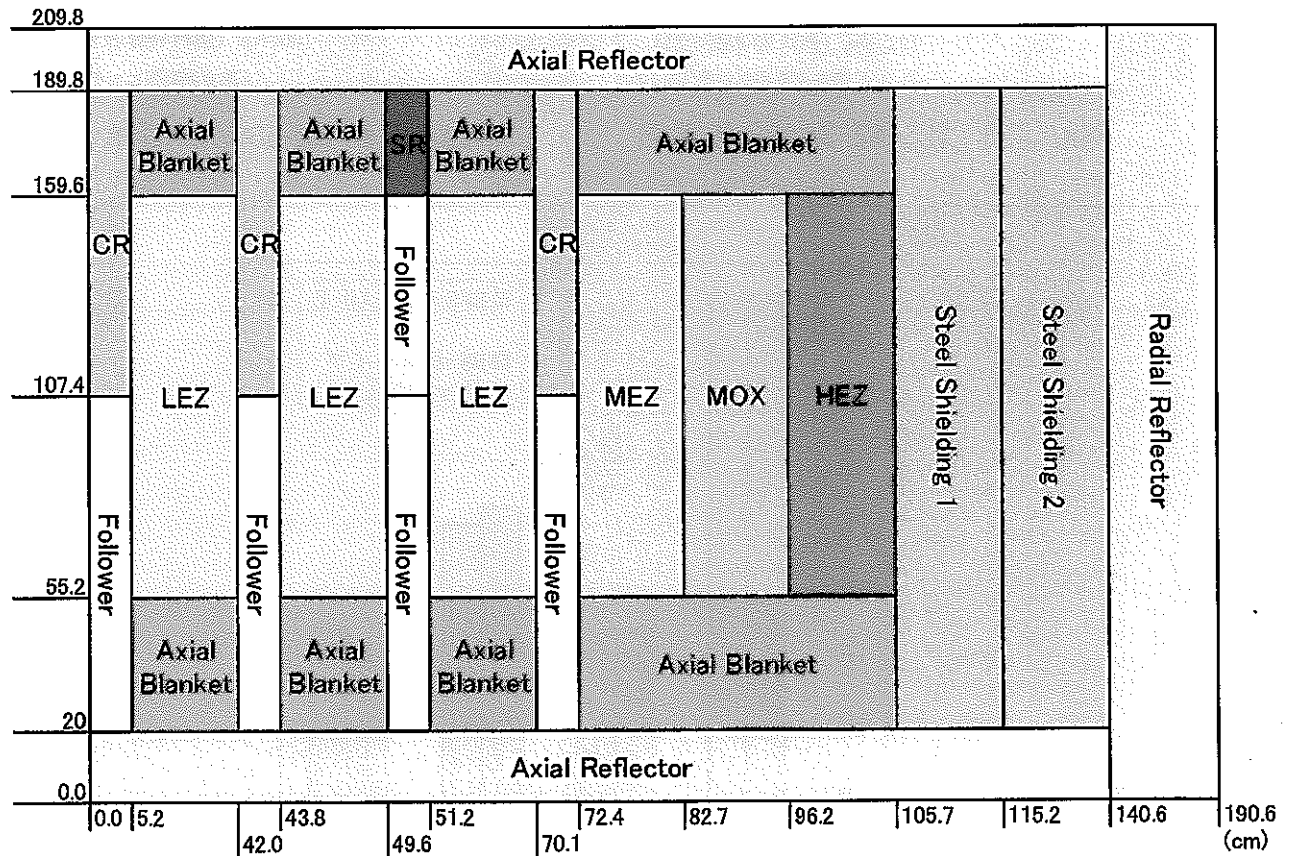


Fig. 7.2 BN-600ハイブリッド炉心の2次元RZ体系図

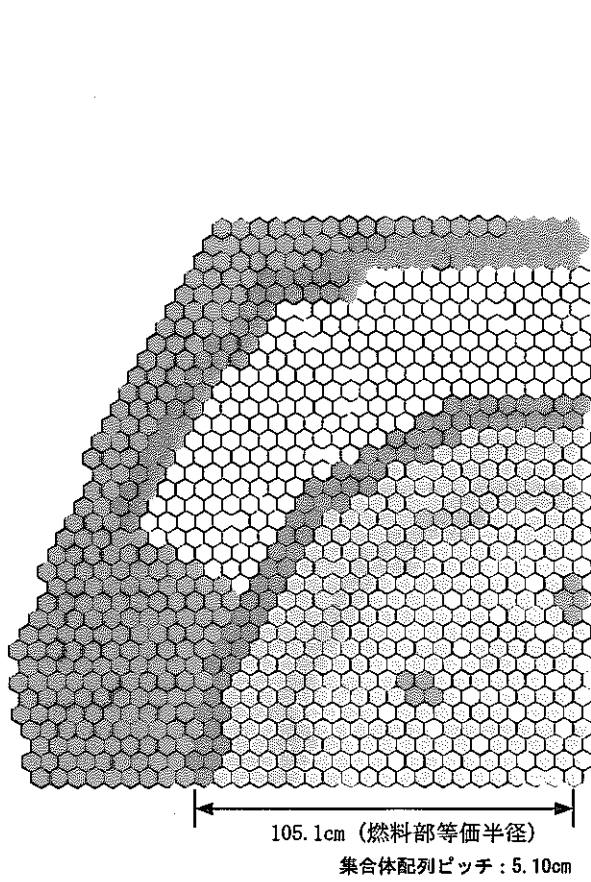


Fig. 7.3 BFS-62-3A 炉心配置図

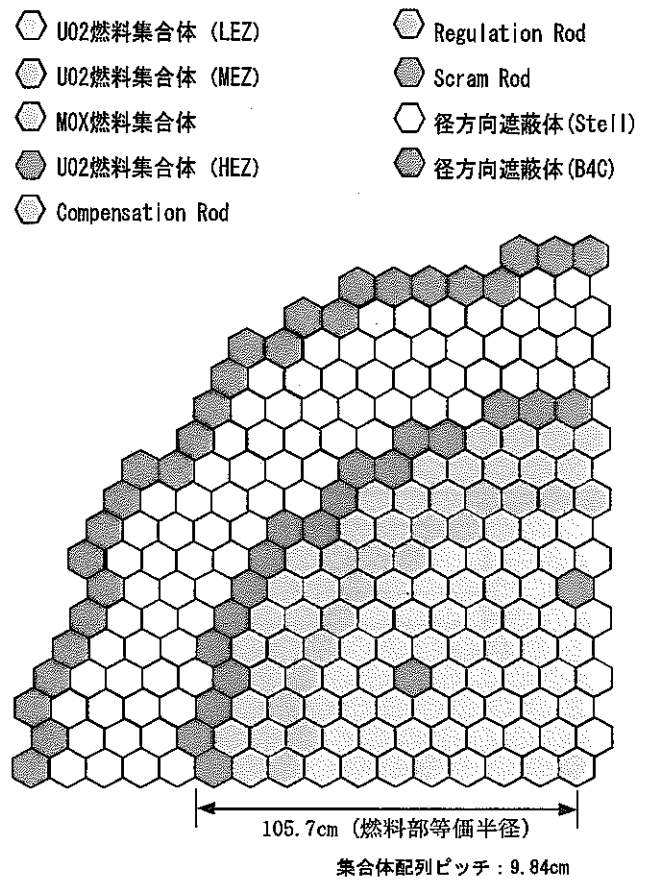


Fig. 7.4 BN-600ハイブリッド炉心配置図

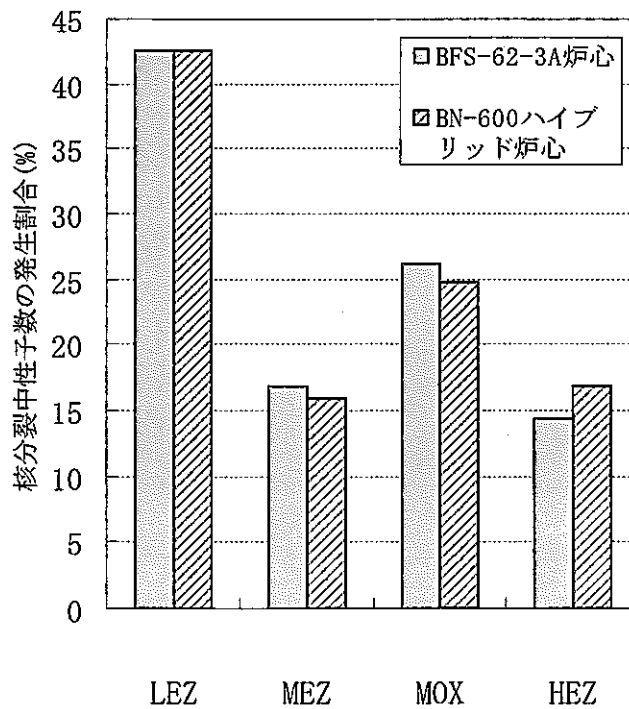


Fig. 7.5 燃料部核分裂中性子数の発生割合

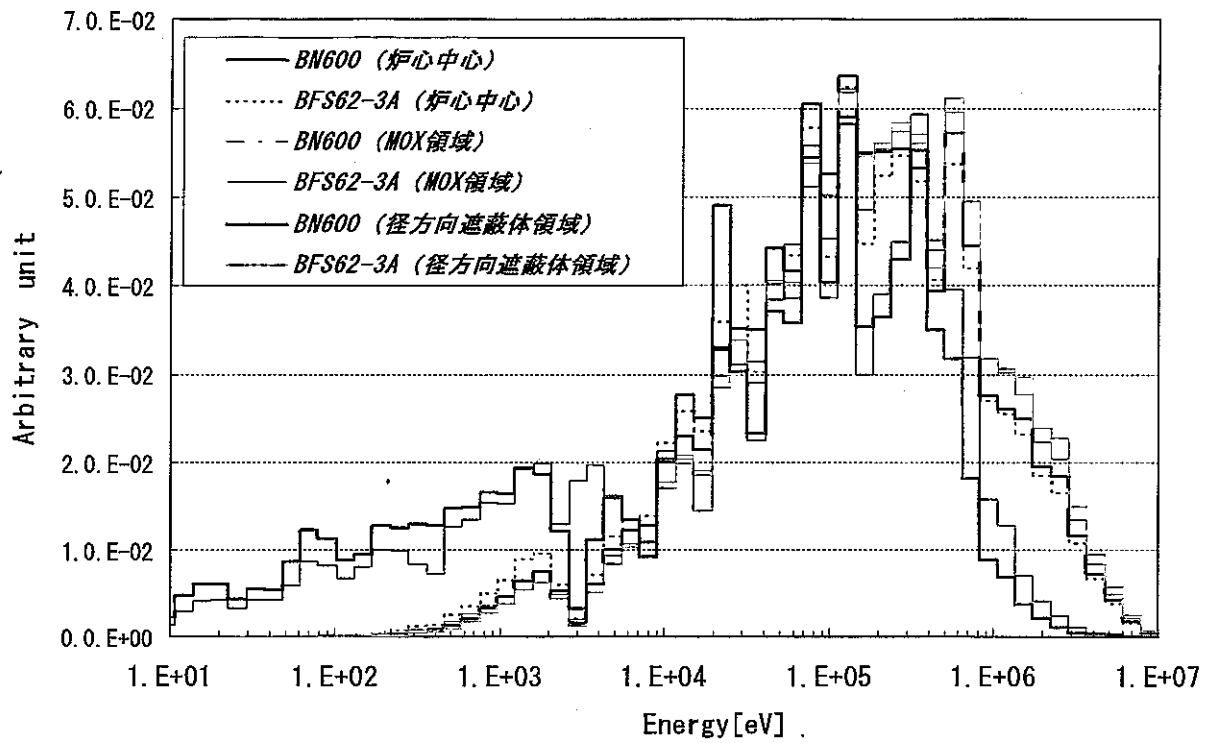


Fig. 7.6 中性子スペクトルの比較 (リニアスケール。BN600、BFS62-3A)

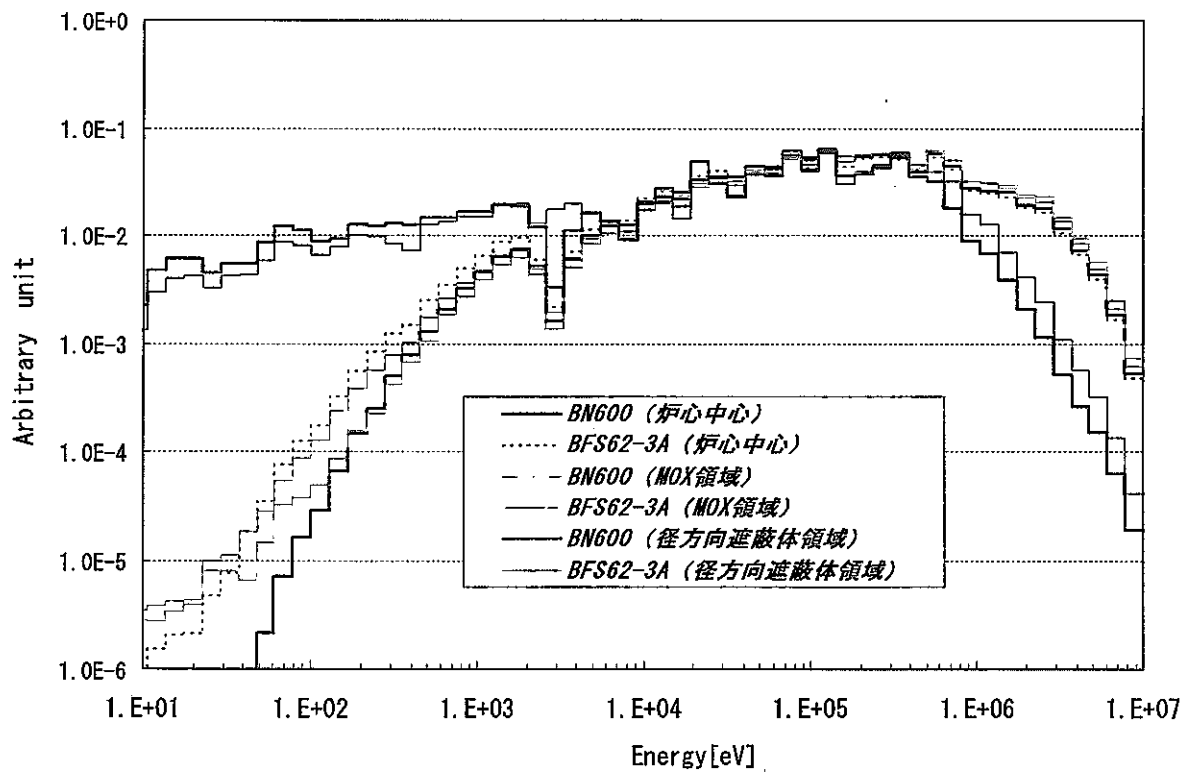


Fig. 7.7 中性子スペクトルの比較 (ログスケール。BN600、BFS62-3A)

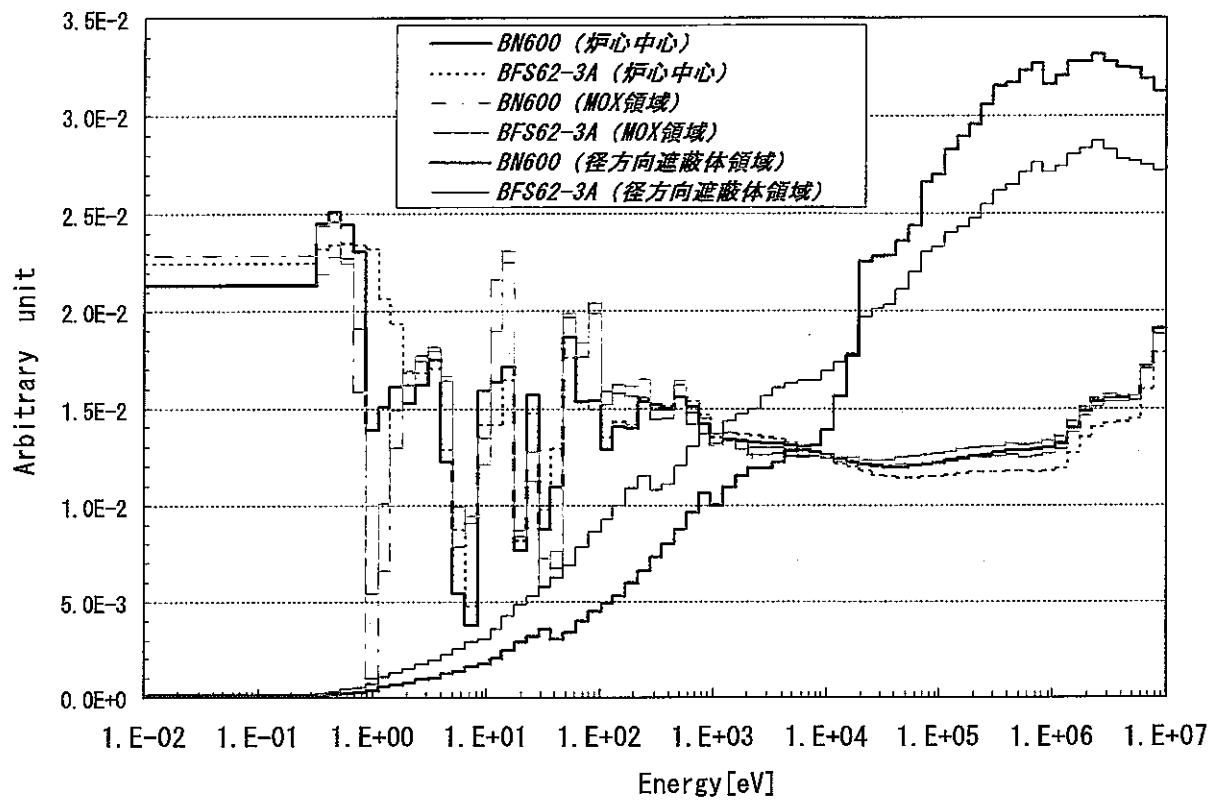


Fig. 7.8 随伴中性子スペクトルの比較 (BN600、BFS62-3A)

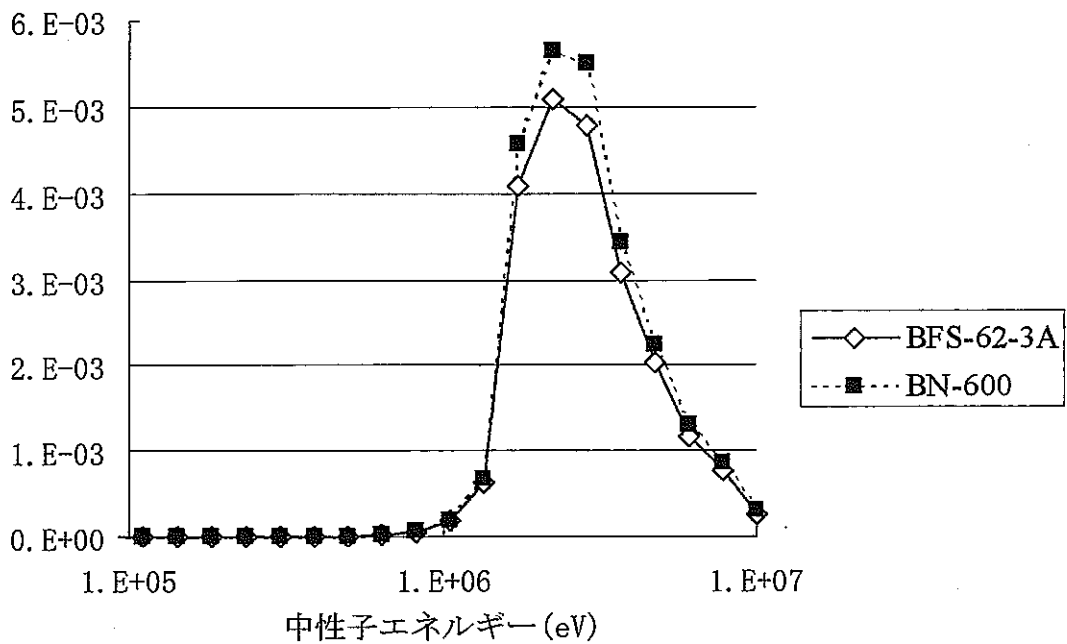


Fig. 7.9 F28/F25反応率比の比較 (炉心中心)

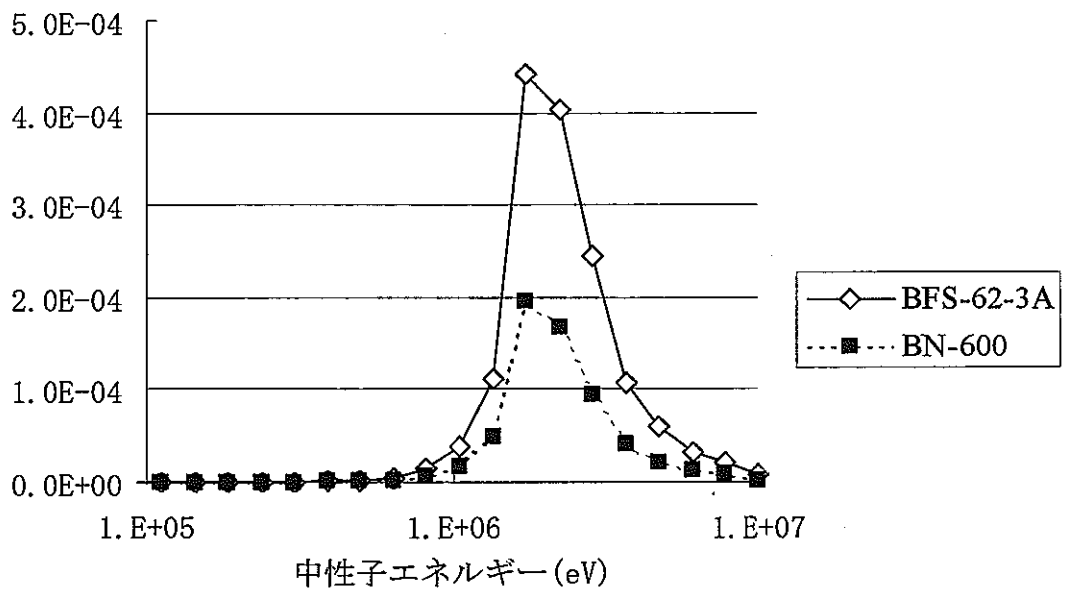
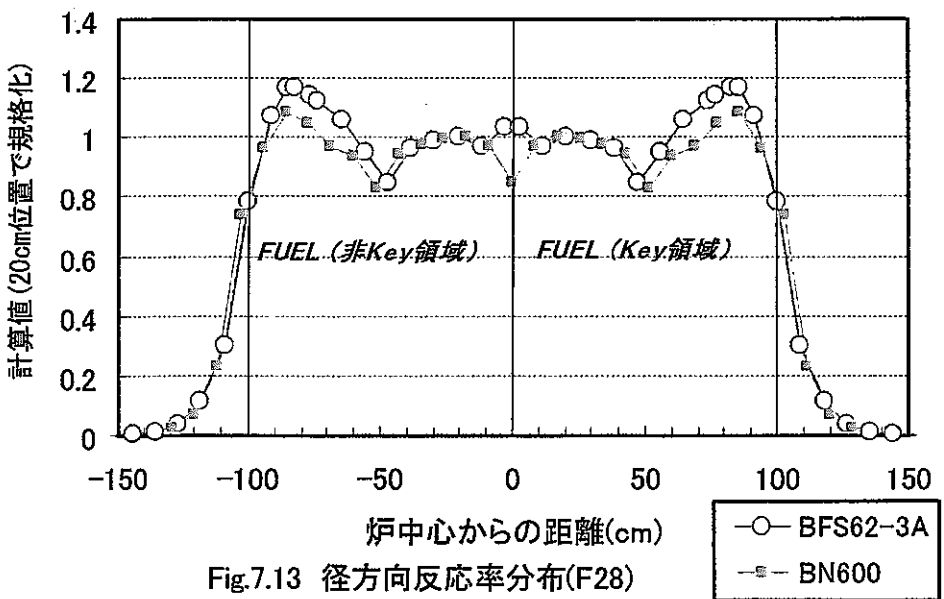
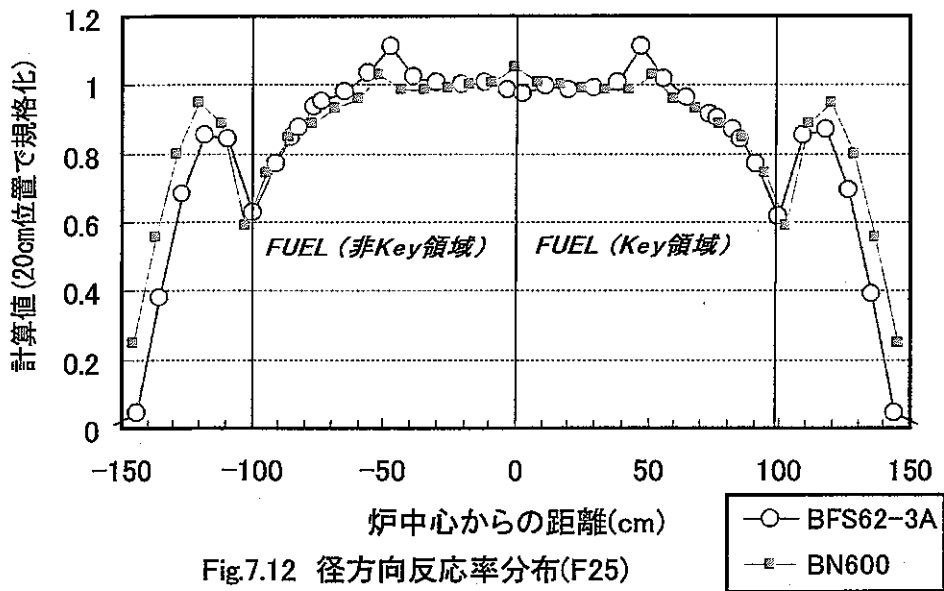
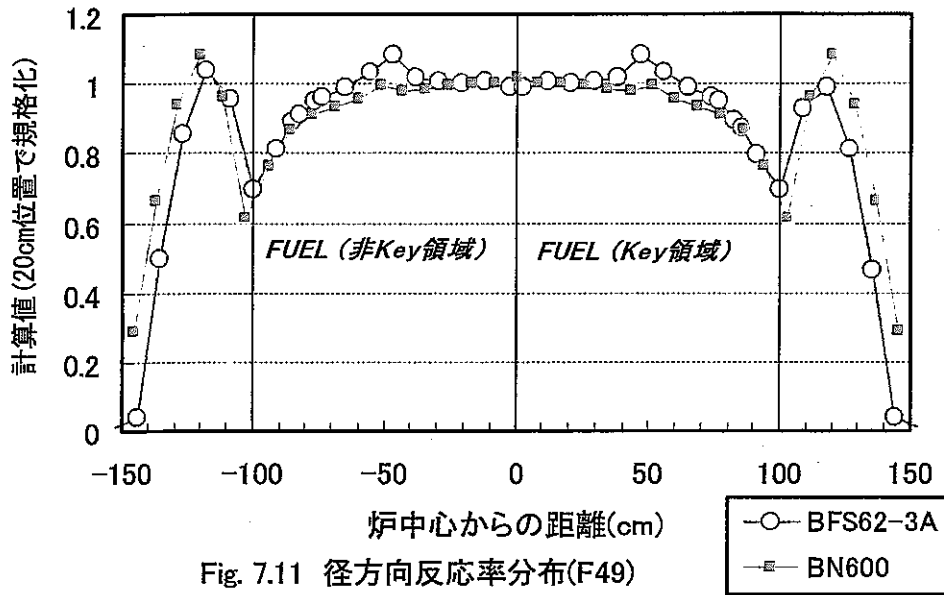


Fig. 7.10 F28/F25反応率比の比較 (径方向遮蔽体領域)



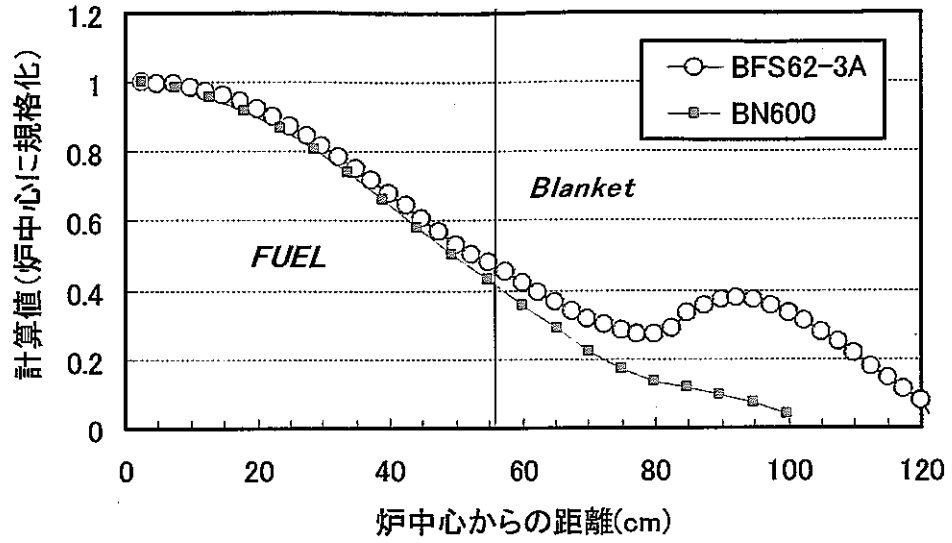


Fig. 7.14 軸方向反応率分布(F49)

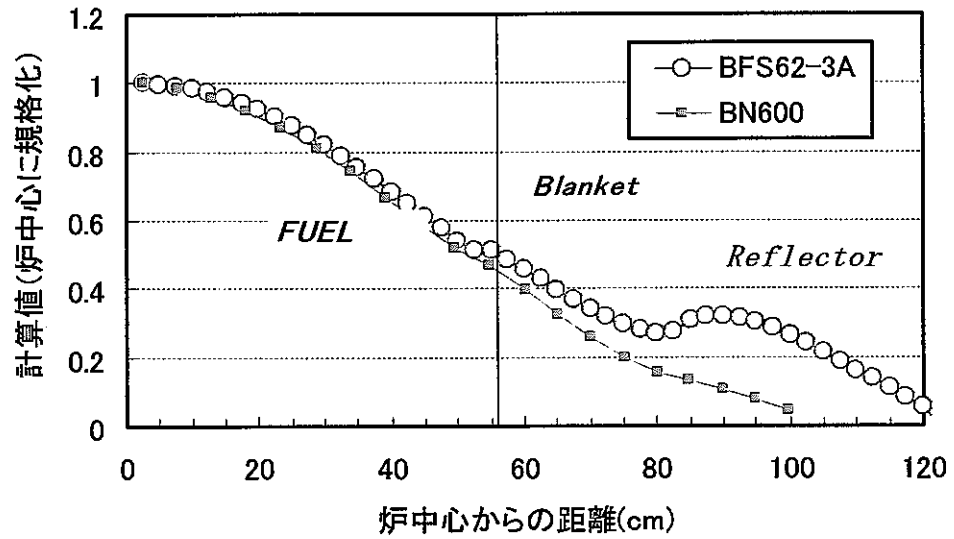


Fig. 7.15 軸方向反応率分布(F25)

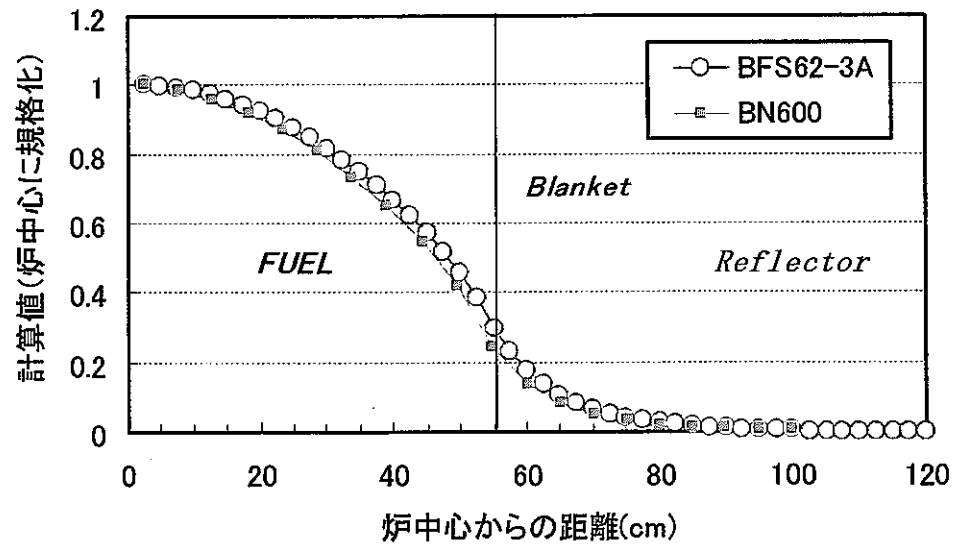


Fig. 7.16 軸方向反応率分布(F28)

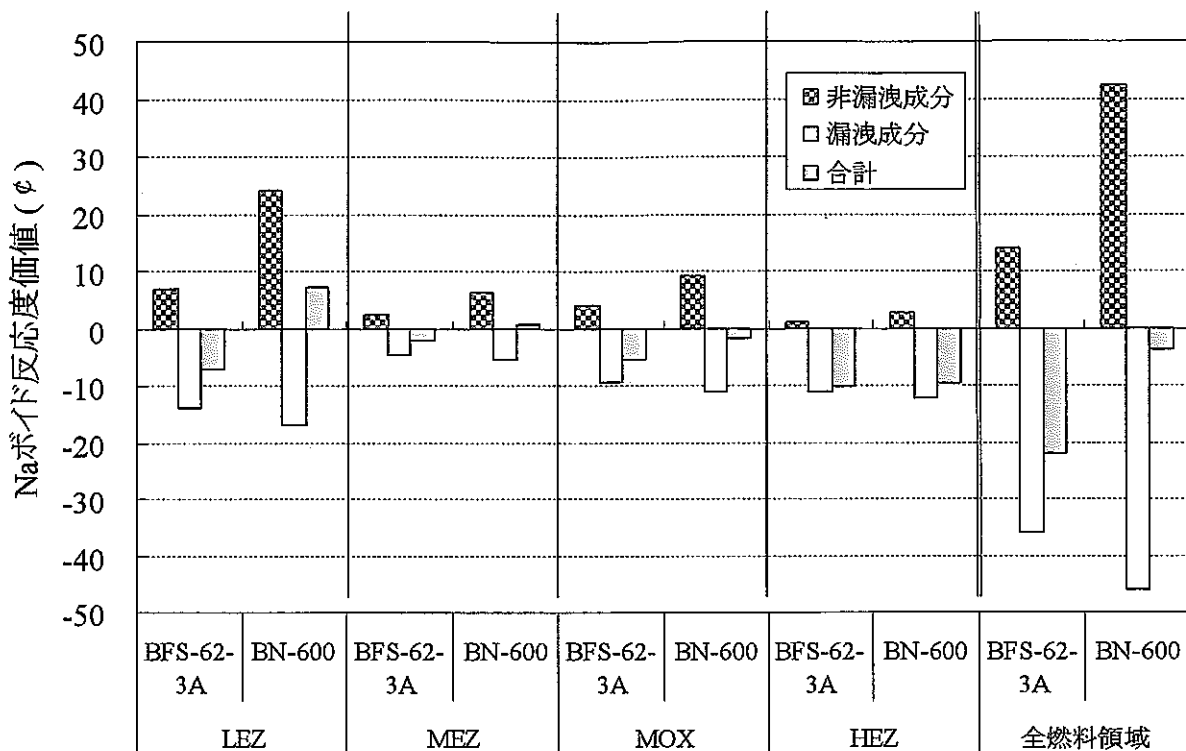


Fig. 7.17-1 BFS-62-3A炉心とBN-600ハイブリッド炉心のNaボイド反応度係数の比較
(3次元 Hex-Zモデルによる拡散計算結果に基づく摂動計算結果)

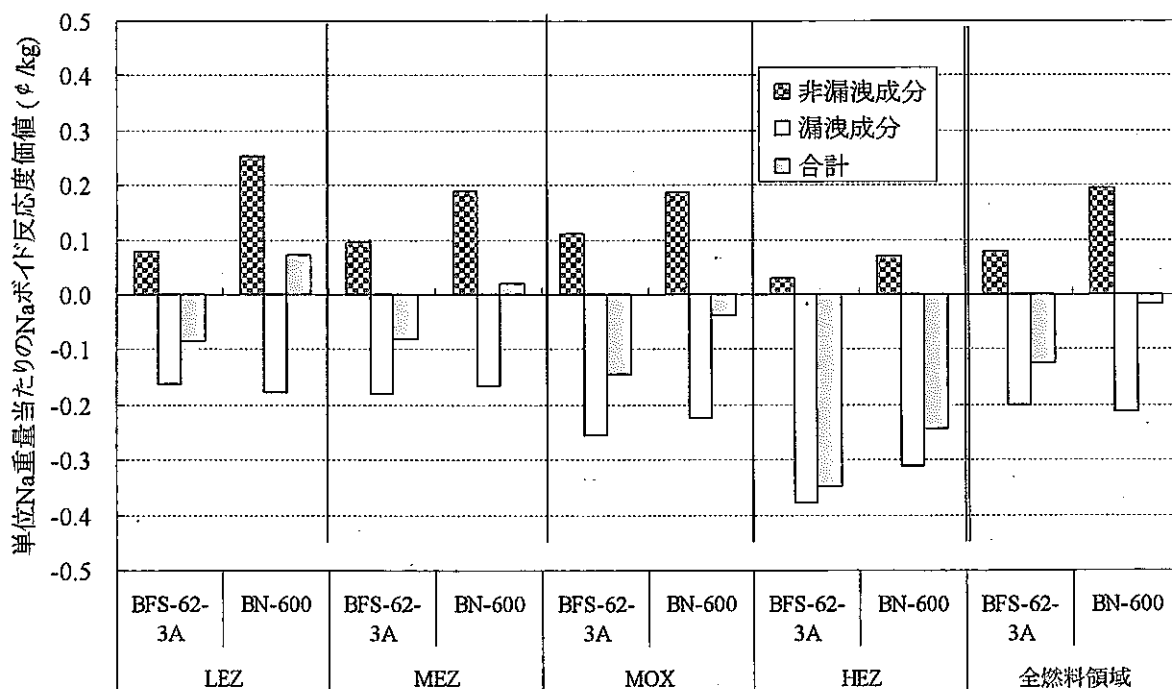


Fig. 7.17-2 BFS-62-3A炉心とBN-600ハイブリッド炉心の単位Na重量当たりのNaボイド反応度係数の比較
(3次元 Hex-Zモデルによる拡散計算結果に基づく摂動計算結果)

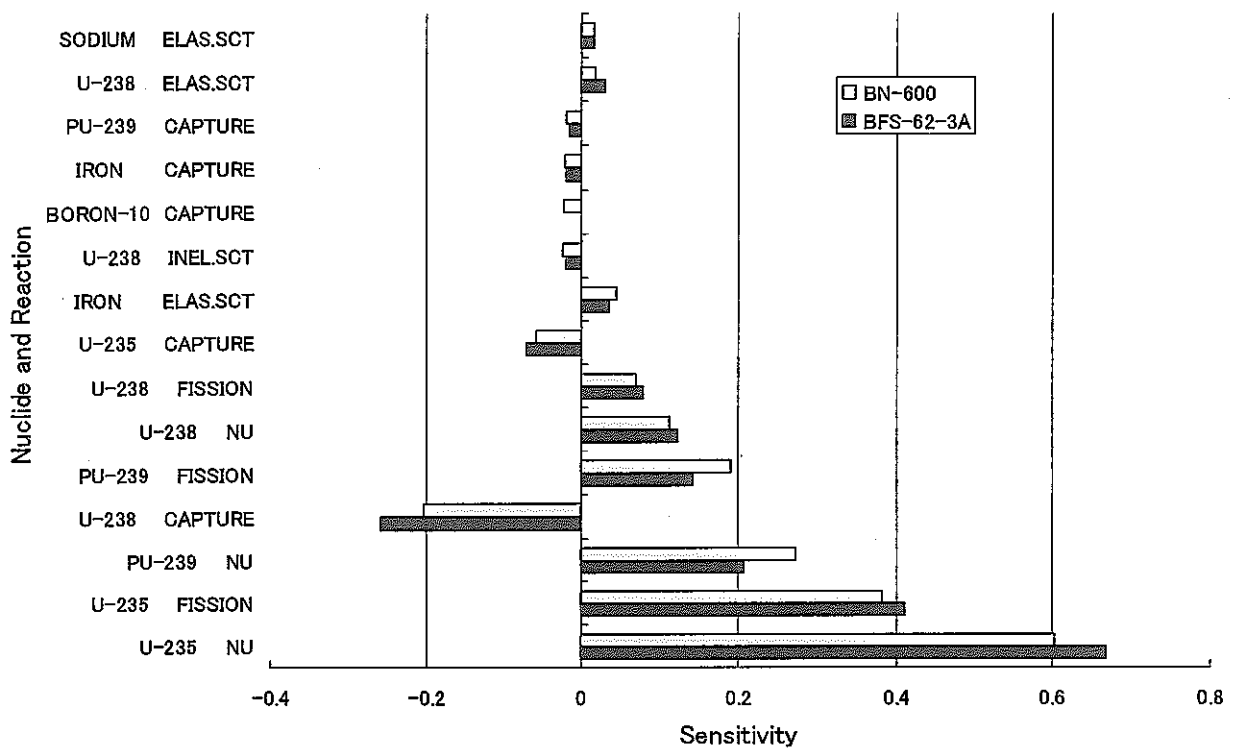


Fig. 7.18 臨界性に対する核種・反応毎の感度係数

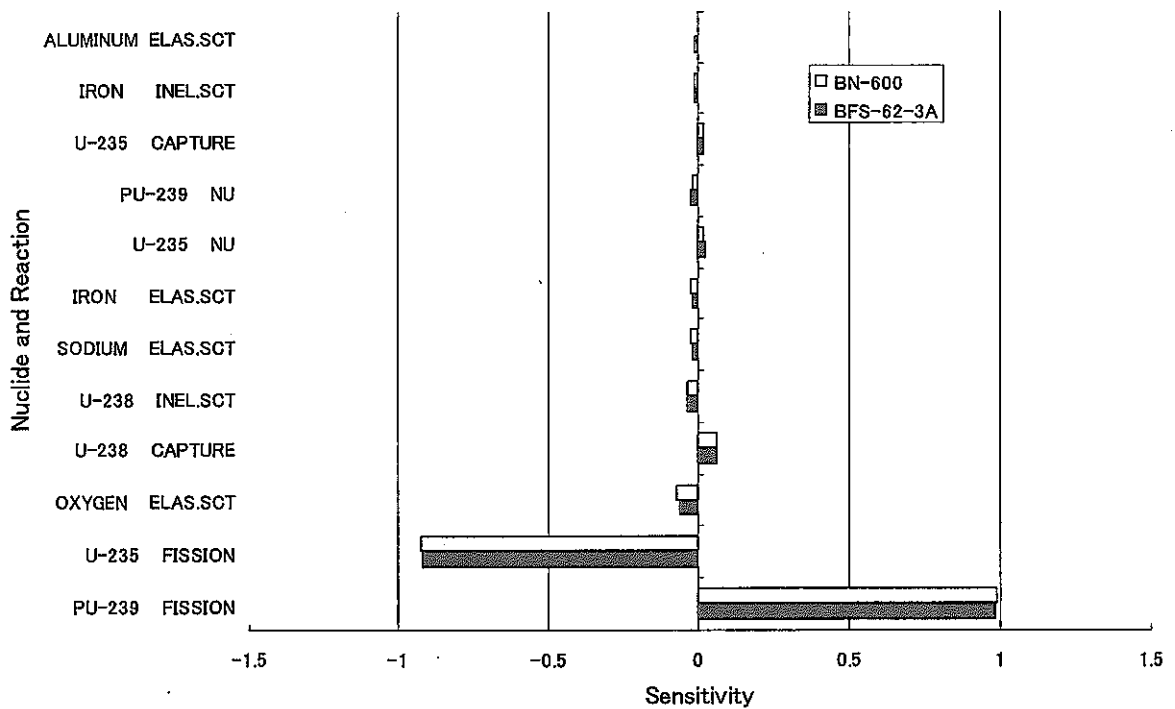


Fig. 7.19 F49/F25炉心中心反応率比に対する核種・反応毎の感度係数

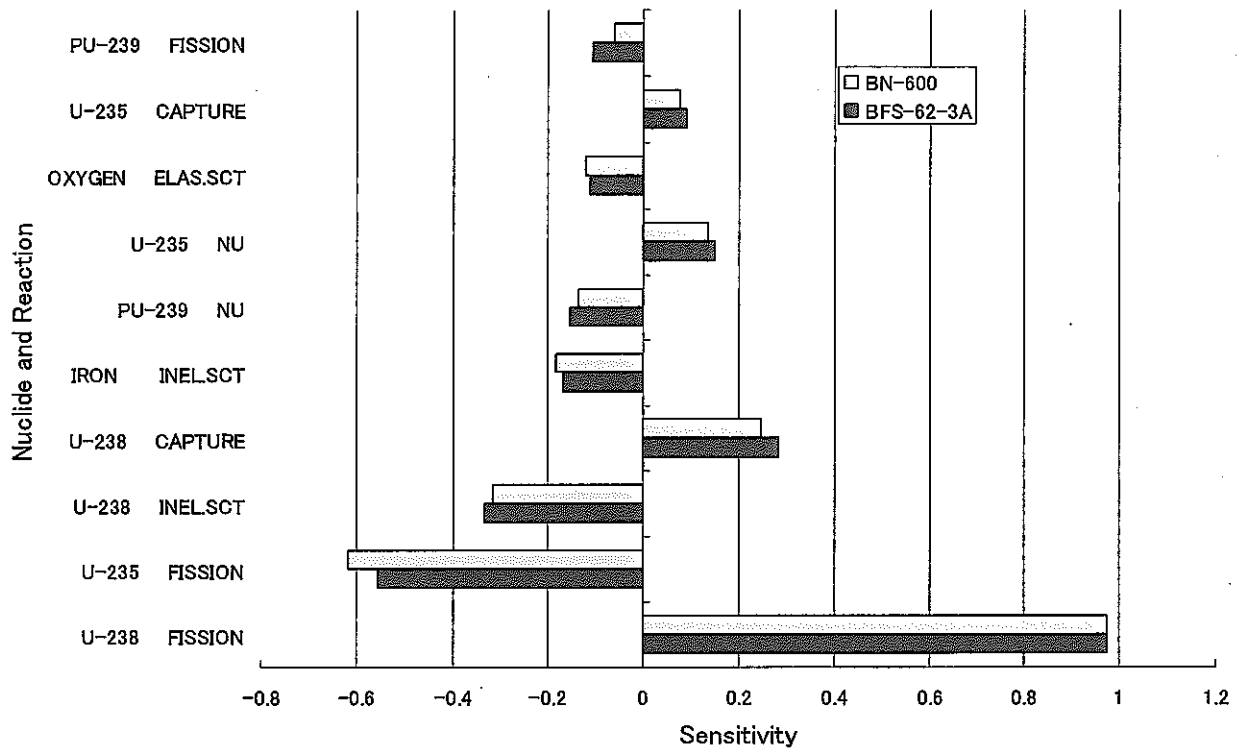


Fig. 7.20 F28/F25炉心中心反応率比に対する核種・反応毎の感度係数

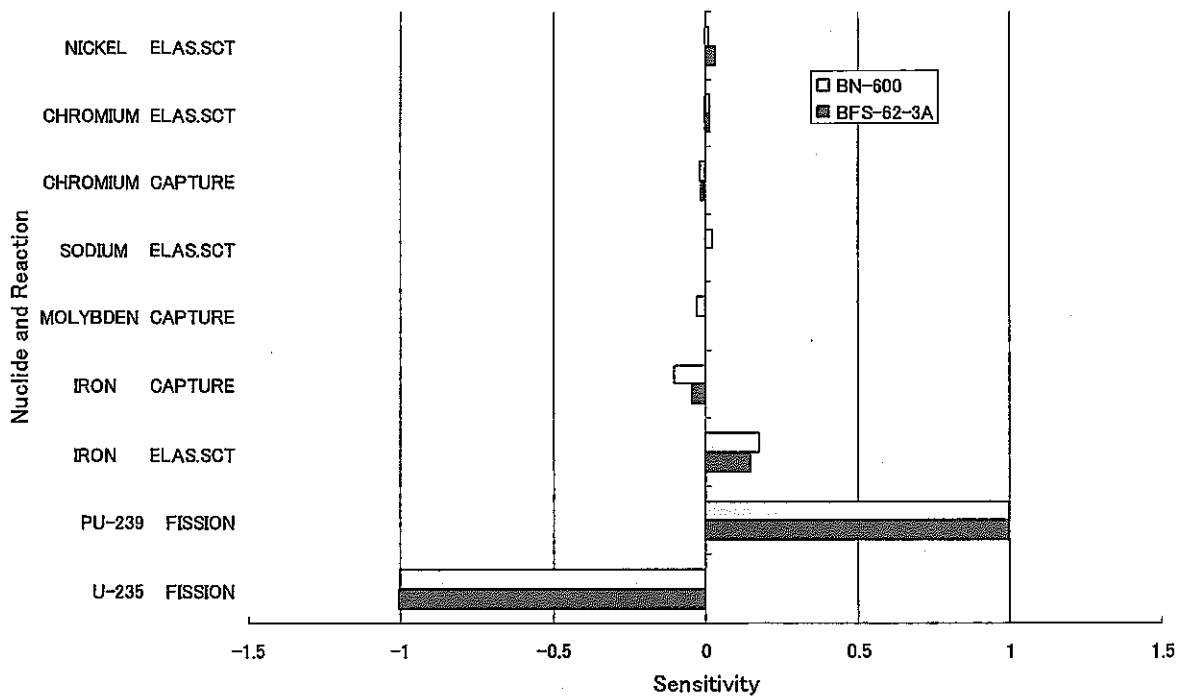


Fig. 7.21 F49/F25反射体領域反応率比に対する核種・反応毎の感度係数

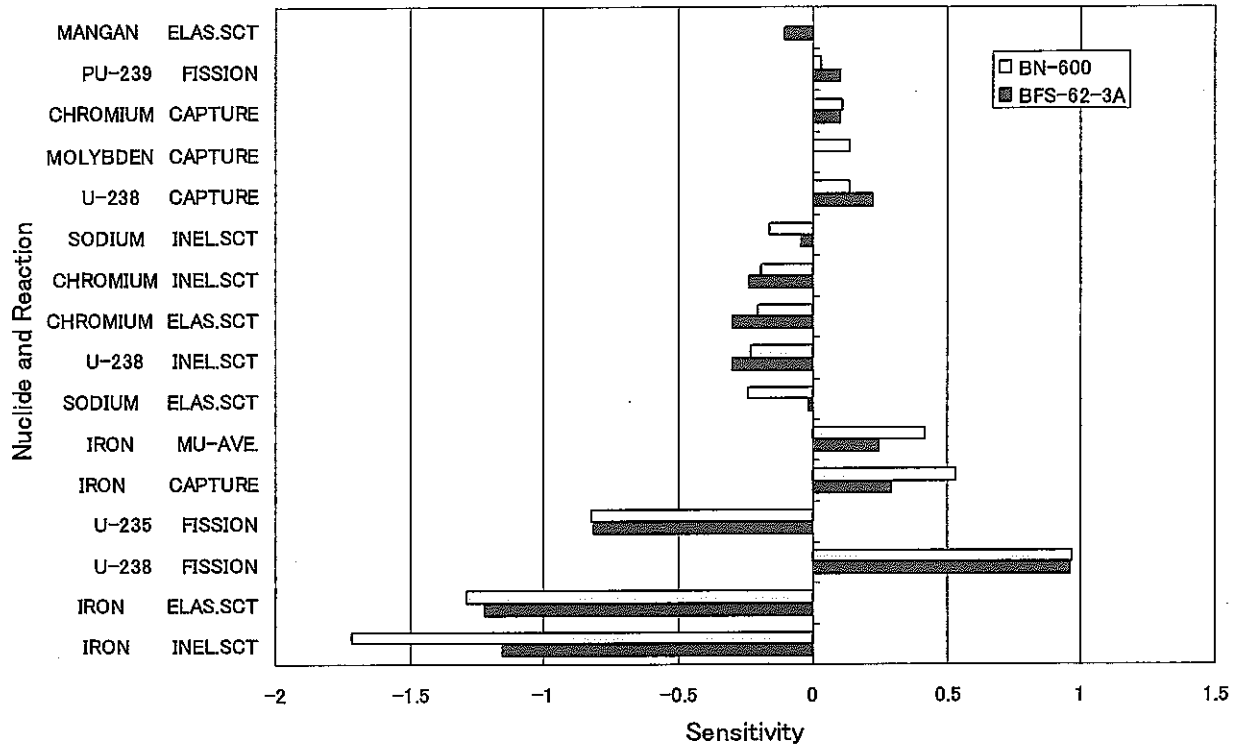


Fig. 7.22 F28/F25反射体領域反応率比に対する核種・反応毎の感度係数

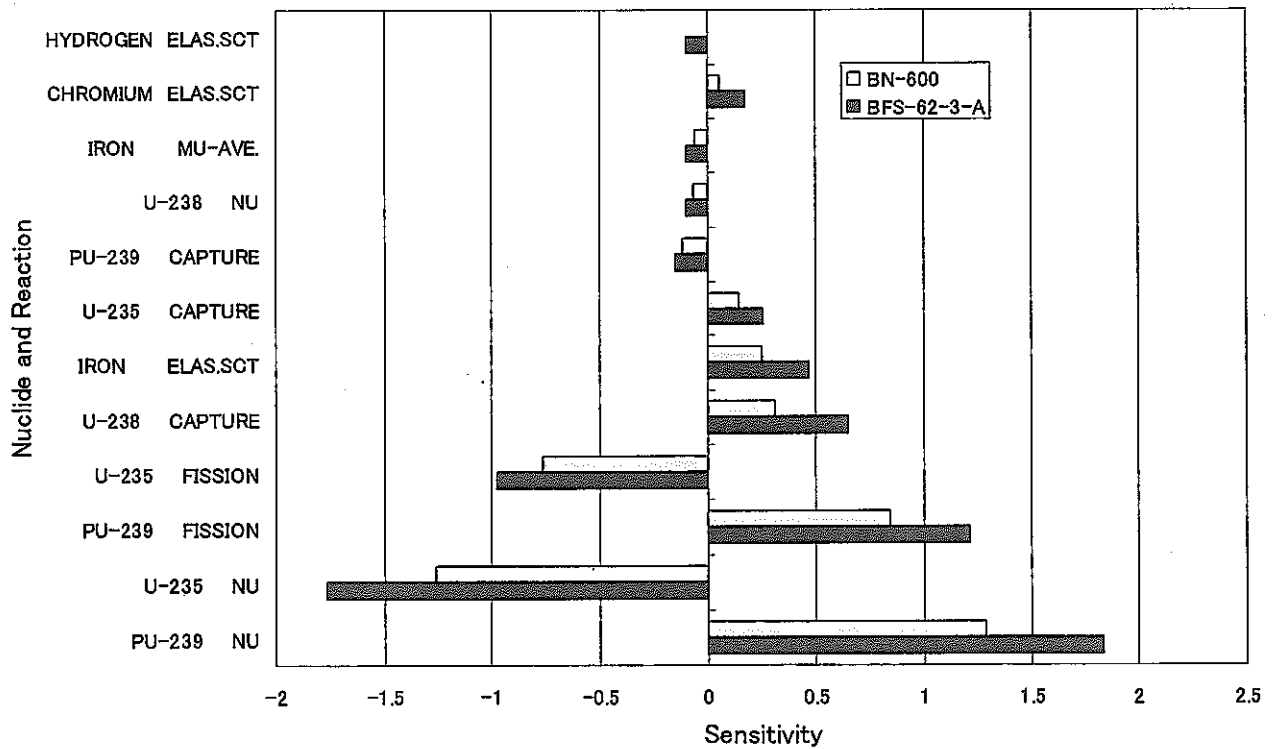


Fig. 7.23 F49反応率分布(MOX領域)に対する核種・反応毎の感度係数

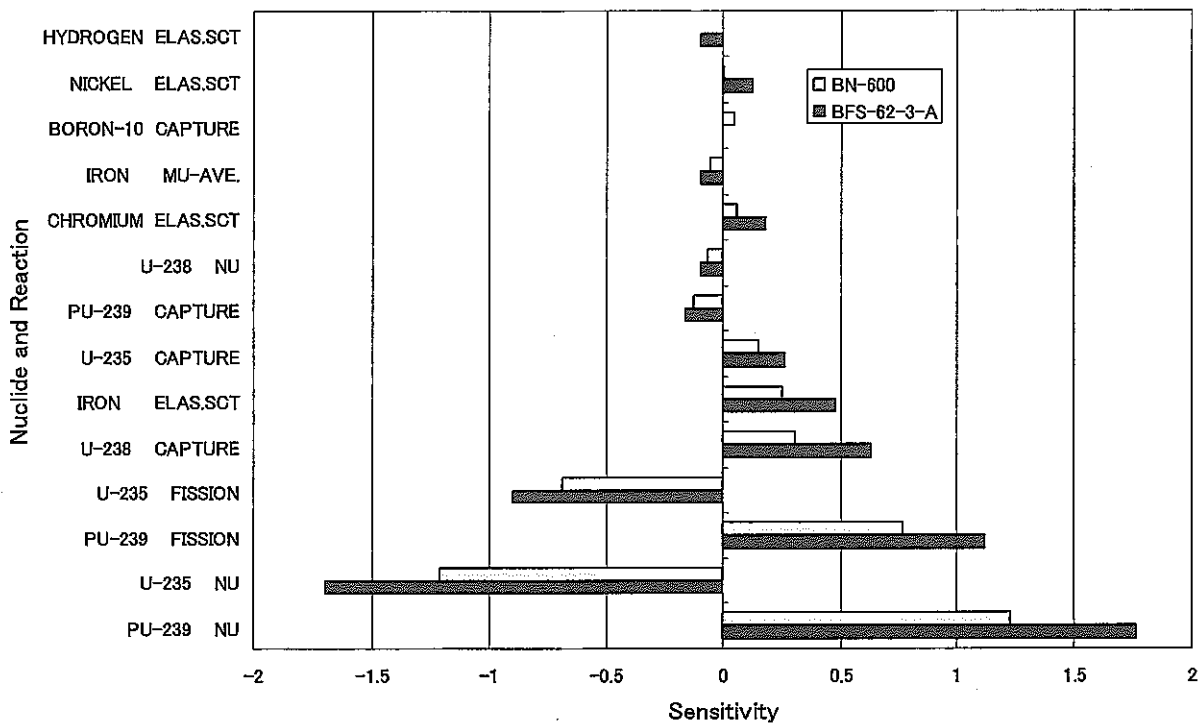


Fig. 7.24 F25反応率分布(MOX領域)に対する核種・反応毎の感度係数

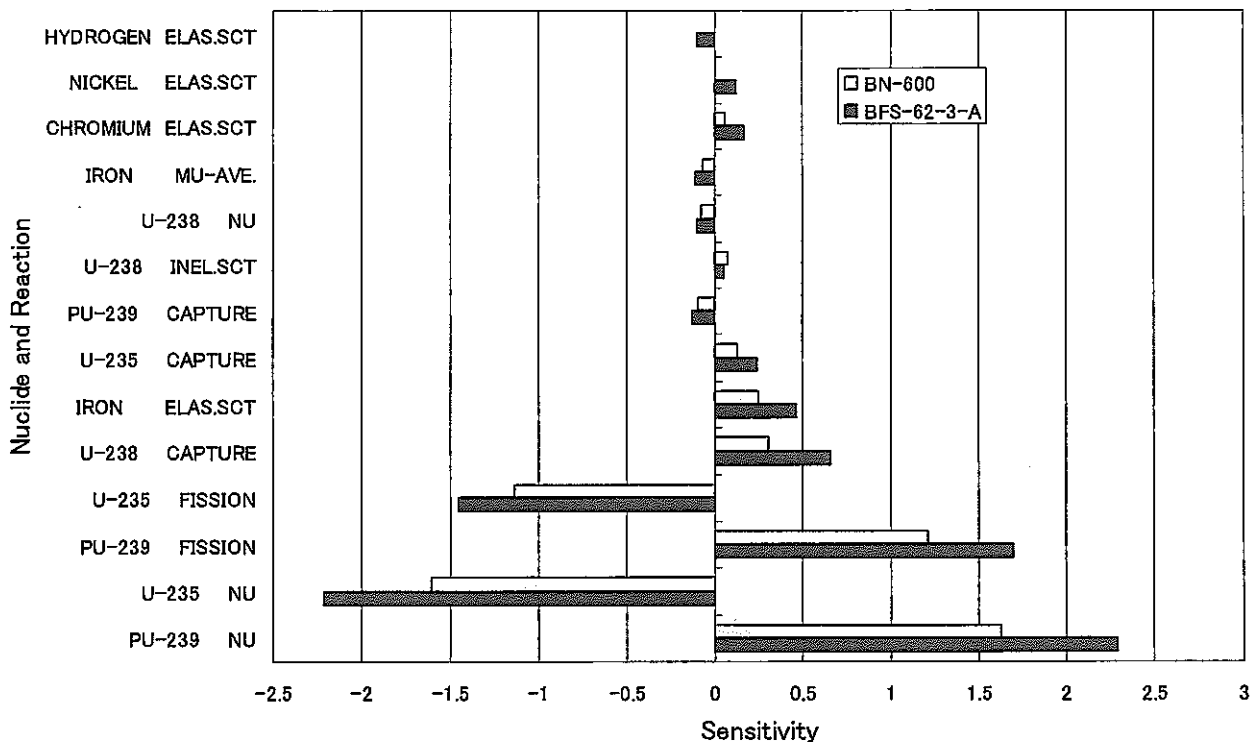


Fig. 7.25 F28反応率分布(MOX領域)に対する核種・反応毎の感度係数

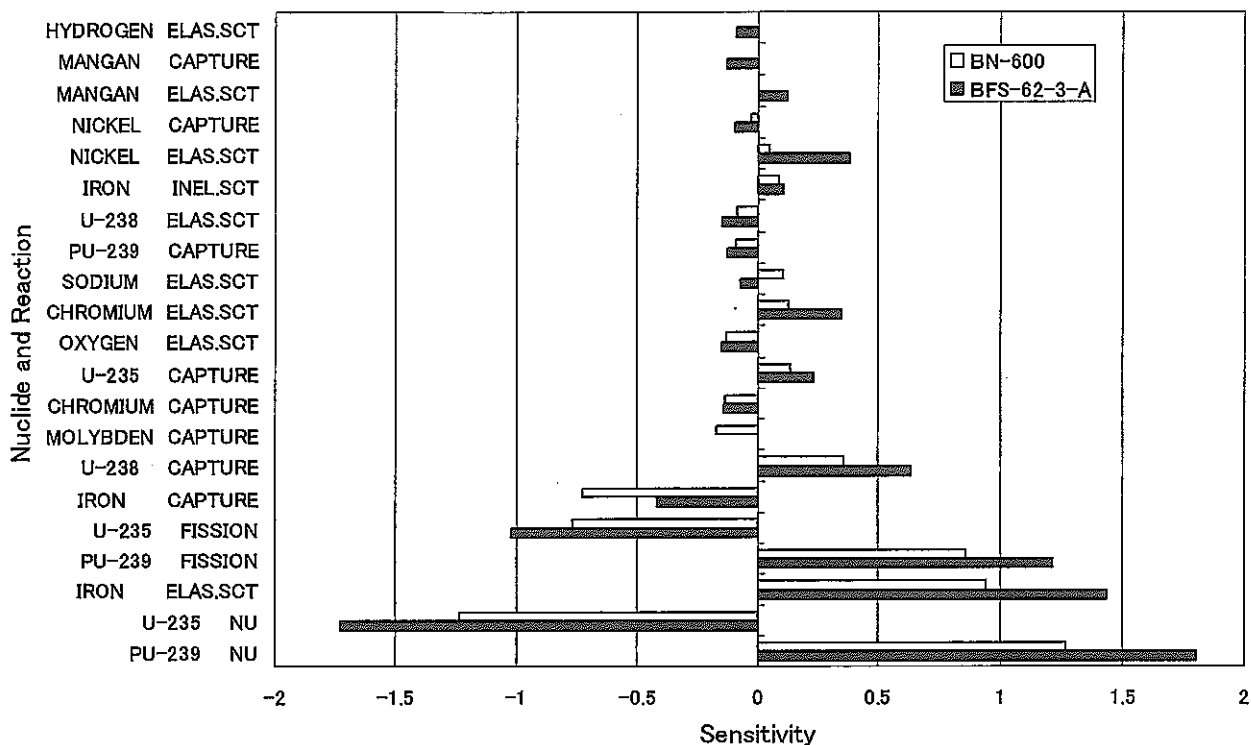


Fig. 7.26 F49反応率分布(径方向遮蔽体領域)に対する核種・反応毎の感度係数

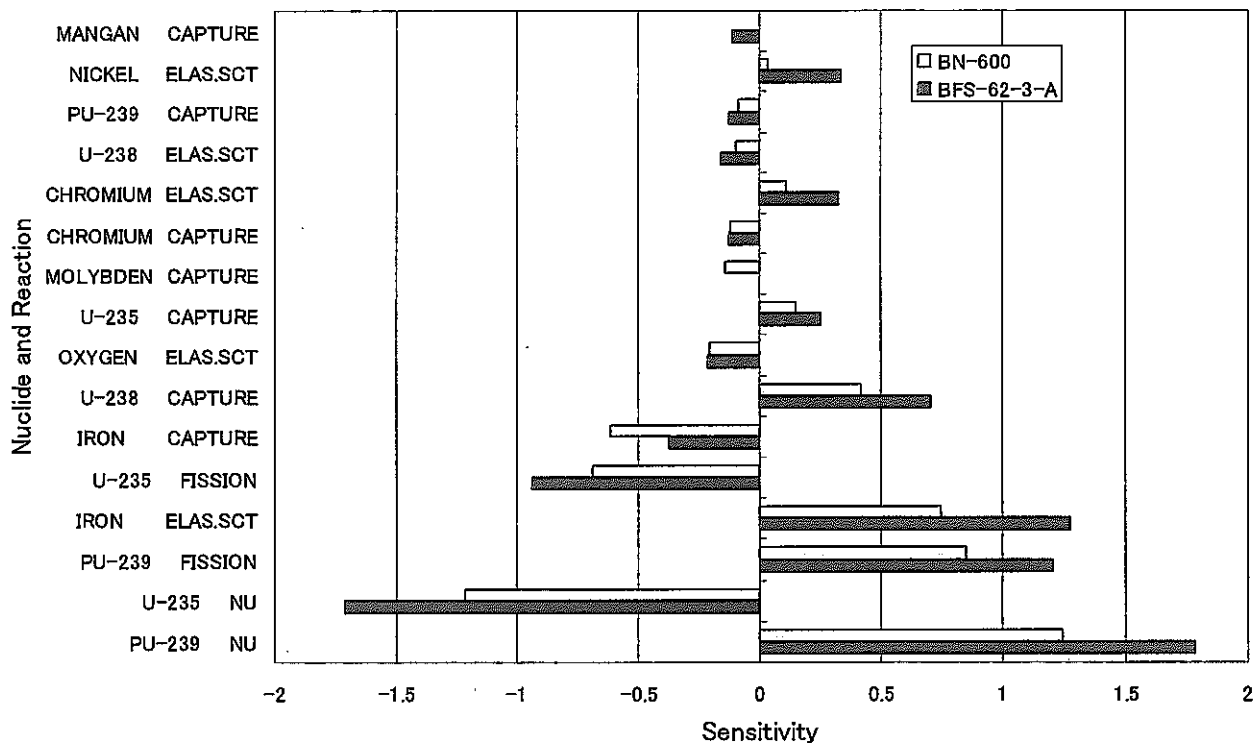


Fig. 7.27 F25反応率分布(径方向遮蔽体領域)に対する核種・反応毎の感度係数

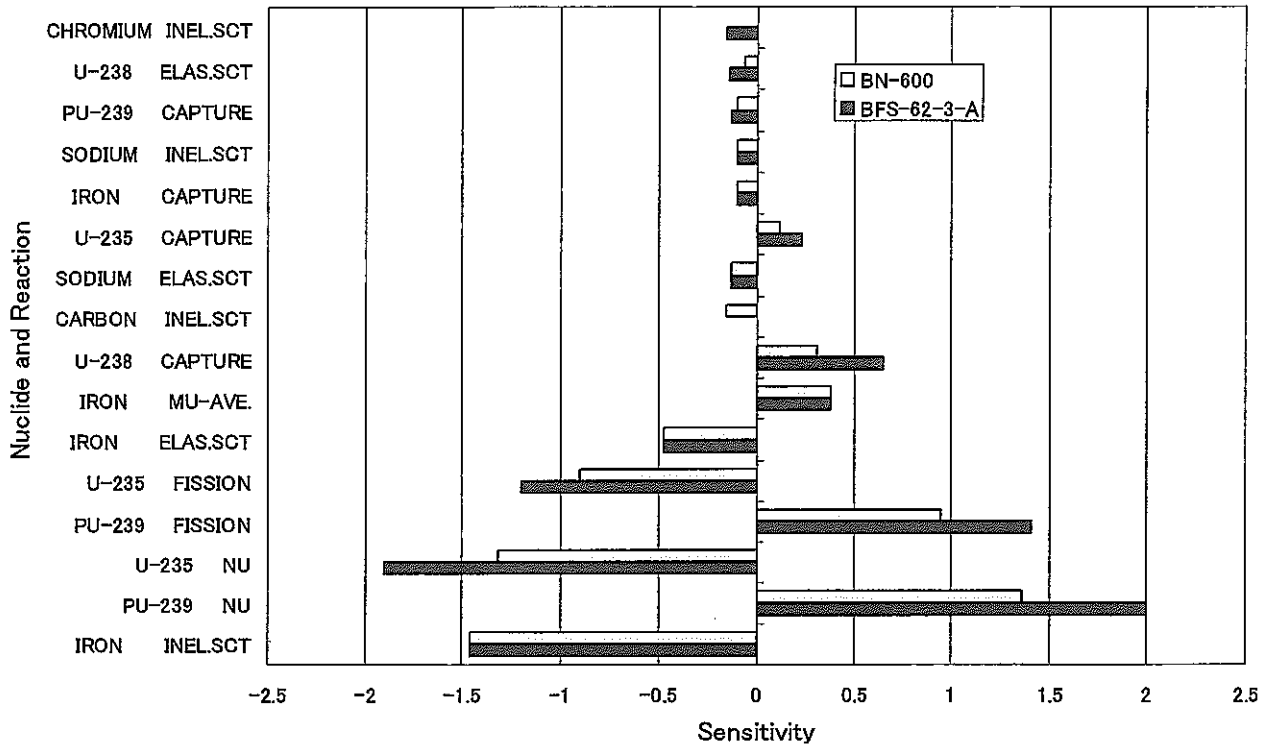


Fig. 7.28 F28反応率分布(径方向遮蔽体領域)に対する核種・反応毎の感度係数

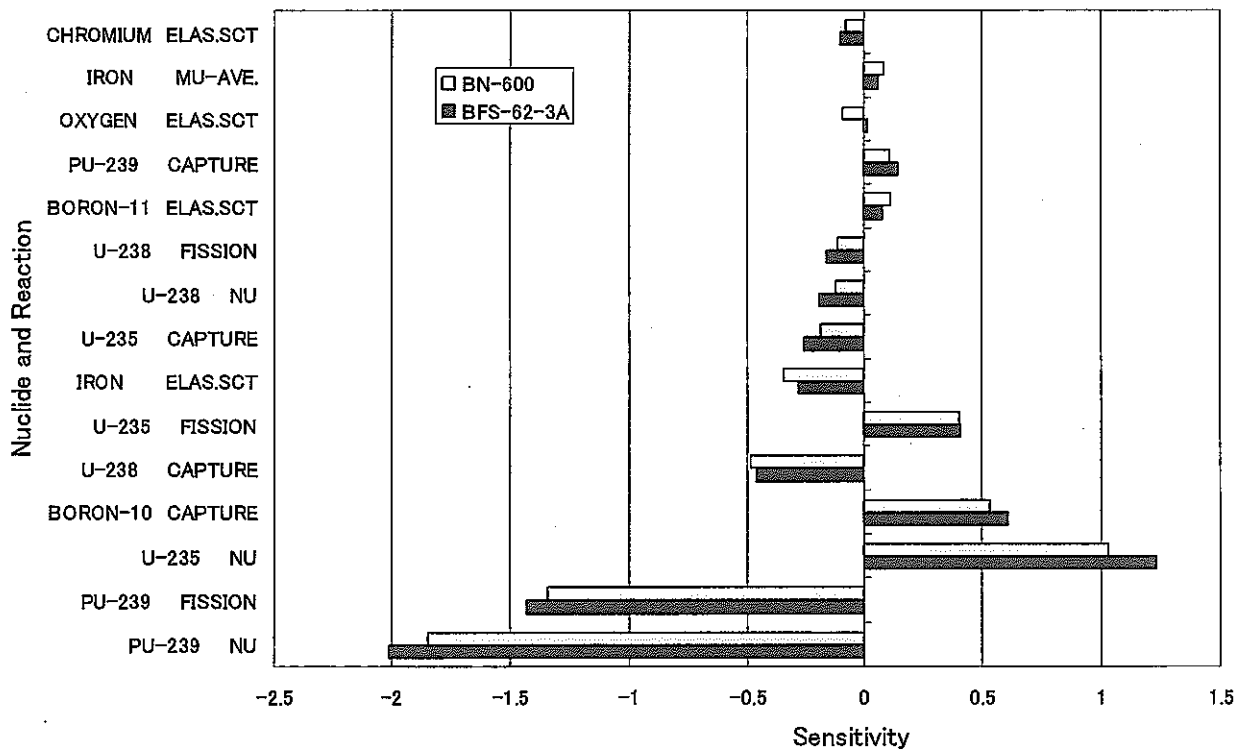


Fig. 7.29 炉心中心1体調整棒全挿入値に対する核種・反応毎の感度係数

第8章 結言

BFS 臨界実験シリーズの第3及び第4体系(BFS-62-3A及び62-4炉心)の解析を実施し、第1及び第2体系(BFS-62-1及び62-2炉心)を含めた比較により、MOX燃料の装荷及び径ブランケットのステンレス鋼への置換が解析精度に与える影響を評価した。また、一部の核特性については、炉定数の高度化による改善効果の評価を以下にまとめる。

臨界性： C/E 値は 0.5%～0.7%の過小評価となった。前2体系と同程度である。MOX燃料の装荷及びステンレス鋼製反射体への置換が C/E 値に与える影響はいずれも 0.2%以下と小さい。炉定数の高度化は+0.2%の改善効果がある。

反応率分布： ステンレス鋼領域(反射体及び遮蔽体)では、U-235, Pu-239の核分裂反応率に 20%の過大評価が見られた。炉定数を高度化しても改善効果は限定的であり、今後、炉定数調整や最新核データ JENDL3.3 の利用等による検討が必要である。

炉中心反応率比： 解析値と実験値は実験誤差の範囲で一致しており、特に問題はない。

制御棒価値： 62-3A炉心の第2リングを除いて C/E 値の1からのずれは6%以内である。62-3A炉心の第2リングについては10%以上過小評価している。炉定数の高度化により最大3%の改善が見られたが、依然として10%近くの過小評価が残っており、今後、反応率分布と同様な検討が必要である。

Na ボイド反応度： C/E 値は 0.7～0.8 であり大幅に改善の余地がある。炉定数を高度化すると、炉心最外部を除いて実験誤差の範囲でほぼ一致するようになった。炉定数の高度化による解析精度改善には非漏洩項が負側に移行することによるものであり、中でも散乱項への改善効果が支配的である。詳細分析の結果、炉定数の高度化による散乱項の変化は、随伴中性子スペクトル形状の変化によるものであり、その変化は 1keV 以下の共鳴領域をより正確に評価することによってもたらされたことが分かった。炉心最外部での C/E 値については、炉定数を高度化しても5%の過小評価が残るが、輸送・メッシュ補正の評価において近似の度合いが大きい2次元 RZ モデルを使用していることが一因と考えられる。

上記の実験解析に加え、BFS-62-3A と BN600 ハイブリッド炉心の仕様及び核特性解析値を比較し、BFS-62-3A による BN600 ハイブリッド炉心の模擬性を評価した。

仕様に関しては、炉心形状、燃料各領域・制御棒・反射体等の配置について高い模擬性を有していることを確認した。核特性や断面積変化に対する感度に関しては、中性子スペクトル、核分裂反応率比、核分裂反応率分布及び制御棒価値について高い模擬性を有していることを確認した。課題は Na ボイド反応度価値の炉心中央領域の非漏洩成分に大きな差異が存在する点であり、今後、BN-600 ハイブリッド炉心の Na ボイド反応度の解析精度を BFS-62-3A 炉心の実験解析結果を基に評価する際には十分慎重に考慮する必要がある。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、ロシア物理エネルギー研究所 (IPPE) の Anatoly L. Kotchetkov 氏を初めとする臨界実験部門の研究者・技術者の方々には、実験情報の提供及び実験方法の詳細な説明を行っていただき、深く感謝している次第であります。また、IPPE の Mikhail Semenov 氏 (現、大洗工学センター国際特別研究員) を初めとする核特性解析部門の研究者の方々には、IPPE による BFS 臨界実験解析方法について大変親切にご教授していただき、本実験解析におきまして大変参考になりましたこととお礼申し上げたいと思います。この場を借りて、謹んでお礼申し上げます。

参考文献

- (1) A.Yamato et al., The Present Status of International Cooperation Pertaining to Russian Surplus Weapons Plutonium Disposition, pp103-106, The 2nd Annual JNC International Forum on the Peaceful Use of Nuclear Energy, Tokyo, Japan (2000).
- (2) M.J.Lineberry, et al.: Experimental Studies of Large Conventional LMFBR Cores at ZPPR, Proc. of Fast Reactor Physics 1979, Aix-en-Provence, IAEA-SM-244/86, Vol.1, P.187 (Sep. 1979).
- (3) S.G.Carpenter, et al.: Experimental Studies of 6000-Litre LMFBR Cores at ZPPR, Proc. of Conf. 1980 Advances in Reactor Physics and Shielding, Sun Valley, Idaho, P.521 (Sep. 1980).
- (4) H.F.McFarlane, S.G.Carpenter, P.J.Collins, et al.: Experimental Studies of Radially Heterogeneous Liquid-Metal Fast Breeder Reactor Critical Assemblies at the Zero-Power Plutonium Reactor, Nucl. Sci. Eng., Vol.87, P.204 (1984).
- (5) 石川眞, 斉藤正幸, 佐藤若英, 他: 核設計基本データベースの整備(II) - JUPITER-I 実験データ集 -, PNC TN9410 93-010 (1992年12月).
- (6) 杉野和輝, 石川眞, 斉藤正幸, 他: 核設計基本データベースの整備(VI) - JUPITER-II 実験データ集 -, PNC TN9450 96-052 (1996年10月).
- (7) 三田敏男, 白方敬章, 早瀬保, 他: JUPITER-III 実験データ集, PNC TN9410 90-018 (1990年3月).
- (8) 庄野彰, 杉野和輝: ロシア解体核処分支援のためのJNC-IPPE共同研究に関する第2回打合せ -BFS-2 臨界実験・解析及びBN-600 炉心特性評価-, JNC ZY9200 2000-001 (2000年5月).
- (9) 庄野彰, 杉野和輝: ロシア解体核処分支援のためのJNC-IPPE共同研究に関する第3回打合せ -BFS-2 臨界実験への参加、実験解析及び実験計画等に関する議論-, JNC ZY9200 2001-001 (2001年1月).
- (10) 庄野彰, 杉野和輝: ロシア解体核処分支援のためのJNC-IPPE共同研究に関する第4回打合せ -実験解析及び実験計画等に関する議論-, JNC ZY9200 2001-004 (2001年10月).
- (11) 杉野和輝, 岩井武彦, 庄野彰: BFS 臨界実験解析 -BFS-62-1 体系の解析-, JNC TN9400 2000-098 (2000年7月).
- (12) 杉野和輝, 庄野彰, 岩井武彦, 沼田一幸: “BFS 臨界実験解析 BFS-62-1 及び62-2 炉心の解析”, JNC TN9400 2002-008 (2002年4月).

- (13) M.Ishikawa, Consistency Evaluation of JUPITER Experiment and Analysis for Large FBR Cores, Proc. of Int. Conf. on the Physics of Reactors (PHYSOR96), Mito, Japan, Vol.2, P.E-36 (Session E05), Sep. 1996.
- (14) 杉野和輝: 次世代炉定数システムを用いた JUPITER 臨界実験解析, JNC TN9400 2001-091 (2001年8月).
- (15) B.A.Vasiliev, "Natrium Coolant Technologies for Nuclear Reactors", Proc. of the ISTC-TITech Japan Workshop on Nuclear Technologies in Russia/CIS, p.42-65, Tokyo, Japan, July 9, (2001)
- (16) T.Nakagawa: JENDL-3 Revision 2, Proc. of the 1993 Symposium on Nuclear Data, Tokai, Japan, JAERI-M 94-019, P.68 (Nov. 1993).
- (17) T.Nakagawa, et al.: Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2, J. Nucl. Sci. Technol., 32, P.1259 (Dec. 1995).
- (18) H.Takano and Y.Ishiguro: Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2, JAERI-M 82-135 (1982).
- (19) 高野秀機、金子邦男: 高速炉用群定数セット JFS-3-J2 の改訂版, JAERI-M 89-141 (1989年).
- (20) 千葉豪, 沼田一幸: " JENDL-3.2 に基づく高速炉用炉定数 JFS-3-J3.2R の作成", JNC TN9400 2001-124(2002年2月).
- (21) T.Tone: A Numerical Study of Heterogeneity Effects in Fast Reactor Critical Assemblies, J. of Nucl. Sci. and Technol. 12 (8), P.467 (1975).
- (22) 森貴正、中川正幸: MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード, JAERI-Data/Code 94-007 (1994年8月).
- (23) " Working Material: Updated Codes and Methods to Reduce the Calculational Uncertainties of the LMFR Reactivity Effects, First Research Co-ordination Meeting," , Vienna, 24-26 November 1999, IAEA-RC-803, IWGFR/100.
- (24) " Working Material: Updated Codes and Methods to Reduce the Calculational Uncertainties of the LMFR Reactivity Effects, Second Research Co-ordination Meeting," , Vienna, 24-26 November 2000, IAEA-RC-803.2, IWGFR/103.

付録 A 実験解析に使用した詳細情報

Table A.1 BFS-62 体系の領域別均質原子及び核種数密度

Table A.2 JFS-3 炉定数の 70 群構造及び少数群構造

Table A.3 次世代炉定数(175G)と縮約時(70G)の群構造

Fig.A.1. BFS-62-3A、BFS-62-4 炉心の 2 次元 RZ 計算モデル

Table A.1 BFS-62 体系の領域別均質原子及び核種数密度 (1/3)

(単位 : n/barn · cm)

領域 核種	LEZ Fuel (Old Na)	LEZ Fuel (New Na)	LEZ Fuel (Old Na) U-235 36% BRIG Fuel	LEZ Fuel (New Na) U-235 36% BRIG Fuel	LEZ for FR without FM (Old Na)	LEZ for FR without FM (New Na)	MEZ Fuel (Old Na)	MEZ Fuel (New Na)	Radial Blanket
U-235	1.18788E-03	1.18789E-03	1.18362E-03	1.18362E-03	1.98190E-05	1.98190E-05	1.47861E-03	1.47861E-03	5.85995E-05
U-238	6.78209E-03	6.78211E-03	6.77788E-03	6.77789E-03	4.74262E-03	4.74260E-03	6.75803E-03	6.75804E-03	1.40273E-02
Ni	1.47832E-03	1.47830E-03	1.47832E-03	1.47830E-03	1.58448E-03	1.58446E-03	1.70410E-03	1.70408E-03	5.50080E-04
Fe	1.14680E-02	1.14678E-02	1.15039E-02	1.15037E-02	1.22569E-02	1.22568E-02	1.31856E-02	1.31854E-02	4.47145E-03
Mn	2.49347E-04	2.49343E-04	2.49347E-04	2.49343E-04	2.67253E-04	2.67249E-04	2.90142E-04	2.90138E-04	9.27812E-05
Cr	3.16148E-03	3.16144E-03	3.16148E-03	3.16144E-03	3.38851E-03	3.38846E-03	3.63974E-03	3.63968E-03	1.17638E-03
Ti	1.20335E-04	1.20333E-04	1.20335E-04	1.20333E-04	1.28824E-04	1.28823E-04	1.37022E-04	1.37021E-04	4.39907E-05
Al	5.02916E-03	5.02916E-03	5.14154E-03	5.14154E-03	5.00094E-03	5.00093E-03	2.41703E-03	2.41703E-03	4.54887E-03
Na	6.57865E-03	6.57408E-03	6.57865E-03	6.57408E-03	6.57720E-03	6.57265E-03	6.26408E-03	6.25972E-03	-
O	1.32930E-02	1.32930E-02	1.32930E-02	1.32930E-02	1.25101E-02	1.25101E-02	1.32427E-02	1.32427E-02	2.82009E-02
C	3.02519E-04	3.02518E-04	3.02519E-04	3.02518E-04	3.07934E-04	3.07933E-04	4.02363E-04	4.02362E-04	6.97845E-04
H	3.00705E-04	1.58302E-05	3.02811E-04	1.79363E-05	2.88431E-04	3.61851E-06	2.76279E-04	5.02576E-06	1.07026E-05

Table A.1 BFS-62 体系の領域別均質原子及び核種数密度 (2/3)

(単位 : n/barn · cm)

領域 核種	MOX Fuel (Old Na)	MOX Fuel (New Na)	HEZ Fuel (Old Na) 36% New Fuel	HEZ Fuel (New Na) 36% New Fuel	HEZ Fuel (Old Na) U-235 36% BRIG Fuel	HEZ Fuel (New Na) U-235 36% BRIG Fuel	Upper and Lower Axial Blanket (Old Na)	Upper and Lower Axial Blanket (New Na)	SS Supporter
Pu-239	1.44967E-03	1.4497E-03	-	-	-	-	-	-	-
Pu-240	7.02136E-05	7.0214E-05	-	-	-	-	-	-	-
Pu-241	7.86654E-07	7.8666E-07	-	-	-	-	-	-	-
Am-241	3.05530E-06	3.0553E-06	-	-	-	-	-	-	-
U-235	2.97193E-05	2.97193E-05	1.86457E-03	1.86457E-03	1.86100E-03	1.86100E-03	3.87374E-05	3.87373E-05	-
U-238	7.11287E-03	7.11290E-03	7.01266E-03	7.01265E-03	7.00848E-03	7.00847E-03	9.27199E-03	9.27197E-03	-
GA	8.76686E-05	8.76684E-05	-	-	-	-	-	-	-
Ni	1.71541E-03	1.71539E-03	1.62249E-03	1.62247E-03	1.62249E-03	1.62247E-03	1.08452E-03	1.08451E-03	8.88038E-04
Fe	1.33000E-02	1.32999E-02	1.25835E-02	1.25833E-02	1.25833E-02	1.25832E-02	8.49258E-03	8.49243E-03	6.82046E-03
Mn	2.89335E-04	2.89332E-04	2.76104E-04	2.76101E-04	2.76105E-04	2.76102E-04	1.82925E-04	1.82922E-04	1.49784E-04
Cr	3.66851E-03	3.66846E-03	3.46565E-03	3.46561E-03	3.46567E-03	3.46562E-03	2.31933E-03	2.31928E-03	1.89913E-03
Ti	1.37184E-04	1.37182E-04	1.32008E-04	1.32006E-04	1.32008E-04	1.32007E-04	8.67309E-05	8.67297E-05	7.10177E-05
Al	2.58616E-03	2.58617E-03	4.00904E-03	4.00904E-03	4.00888E-03	4.00888E-03	3.14708E-03	3.14707E-03	1.72823E-04
Na	5.63677E-03	5.63287E-03	5.63758E-03	5.63368E-03	5.63763E-03	5.63373E-03	5.51085E-03	5.50703E-03	-
O	1.42999E-02	1.42999E-02	1.41546E-02	1.41546E-02	1.41547E-02	1.41547E-02	1.86406E-02	1.86406E-02	-
C	4.27808E-04	4.27807E-04	3.66694E-04	3.66693E-04	3.66697E-04	3.66696E-04	4.98385E-04	4.98384E-04	4.57159E-05
H	2.49517E-04	5.42697E-06	2.54749E-04	1.06242E-05	2.54747E-04	1.06207E-05	2.45712E-04	7.07433E-06	-

Table A.1 BFS-62 体系の領域別均質原子及び核種数密度 (3/3)

(単位: n/barn・cm)

領域 核種	Compensation Rod Absorber (Old Na)	Compensation Rod Absorber (New Na)	B4C SaftyRod Absorber	B4C Shielding (Type 1)	B4C Shielding (Type 2)	SS Shielding	Axial Shiled (Upper)	Control Rod Follower (Old Na)	Control Rod Follower (New Na)
B10	4.76824E-03	4.76824E-03	1.19063E-02	8.64820E-03	9.06331E-03	-	-	-	-
B11	1.91927E-02	1.91927E-02	4.79244E-02	3.48101E-02	3.64810E-02	-	-	-	-
Ni	8.97154E-04	8.97154E-04	5.50001E-04	5.49990E-04	5.49990E-04	4.71294E-03	4.05083E-03	2.86664E-03	2.86660E-03
Fe	6.89046E-03	6.89046E-03	4.22420E-03	4.22412E-03	4.22412E-03	3.61972E-02	3.11119E-02	2.20168E-02	2.20165E-02
Mn	1.51322E-04	1.51322E-04	9.27679E-05	9.27660E-05	9.27660E-05	7.94926E-04	6.83247E-04	4.83513E-04	4.83506E-04
Cr	1.91862E-03	1.91862E-03	1.17621E-03	1.17619E-03	1.17619E-03	1.00789E-02	8.66295E-03	6.13048E-03	6.13040E-03
Ti	7.17465E-05	7.17465E-05	4.39843E-05	4.39834E-05	4.39834E-05	3.76901E-04	3.23951E-04	2.29249E-04	2.29246E-04
Al	1.74597E-04	1.74597E-04	1.07037E-04	1.07034E-04	1.07034E-04	9.17194E-04	7.88342E-04	5.57882E-04	5.57874E-04
Na	9.74661E-03	9.73964E-03	-	-	-	-	8.15692E-03	1.09434E-02	1.09359E-02
C	6.03643E-03	6.03643E-03	1.49860E-02	1.08929E-02	1.14144E-02	2.42621E-04	2.08535E-04	1.47573E-04	1.47571E-04
H	4.22052E-04	-	-	-	-	-	1.70871E-04	4.73886E-04	-

Table A.2 JFS-3 炉定数の 70 群構造及び少数群構造

7G	Group		Upper energy	Lower energy	Lethargy Width	Pu-239 Fission Spectrum	
	18G	70G				JENDL-3.2	JENDL-2
1	1	1	10.0 (MeV)	7.7880 (MeV)	0.250	6.7563E-03	8.3498E-03
		2	7.7880	6.0653	0.250	2.0776E-02	2.2710E-02
	2	3	6.0653	4.7237	0.250	4.5128E-02	4.5869E-02
		4	4.7237	3.6788	0.250	7.5223E-02	7.3294E-02
2	3	5	3.6788	2.8650	0.250	1.0288E-01	9.7428E-02
		6	2.8650	2.2313	0.250	1.1999E-01	1.1210E-01
	4	7	2.2313	1.7377	0.250	1.2243E-01	1.1520E-01
		8	1.7377	1.3534	0.250	1.1226E-01	1.0837E-01
3	5	9	1.3534	1.0540	0.250	9.5183E-02	9.5137E-02
		10	1.0540	0.82085	0.250	7.7814E-02	7.9137E-02
	6	11	0.82085	0.63928	0.250	6.0822E-02	6.3114E-02
		12	0.63928	0.49787	0.250	4.5993E-02	4.8710E-02
		13	0.49787	0.38774	0.250	3.3801E-02	3.6643E-02
	7	14	0.38774	0.30197	0.250	2.4291E-02	2.7021E-02
		15	0.30197	0.23518	0.250	1.7212E-02	1.9618E-02
		16	0.23518	0.18316	0.250	1.2080E-02	1.4072E-02
	8	17	0.18316	0.14264	0.250	8.4245E-03	9.9987E-03
		18	0.14264	0.11109	0.250	5.8271E-03	7.0524E-03
19		0.11109 (MeV)	0.086517 (MeV)	0.250	4.0659E-03	4.9459E-03	
4	9	20	86.517 (KeV)	67.379 (KeV)	0.250	2.8177E-03	3.4531E-03
		21	67.379	52.475	0.250	1.9453E-03	2.4025E-03
		22	52.475	40.868	0.250	1.3412E-03	1.6671E-03
	10	23	40.868	31.828	0.250	9.2389E-04	1.1543E-03
		24	31.828	24.788	0.250	6.3601E-04	7.9794E-04
		25	24.788	19.305	0.250	4.3739E-04	5.5087E-04
	11	26	19.305	15.034	0.250	3.0039E-04	3.7995E-04
		27	15.034	11.709	0.250	2.0594E-04	2.6185E-04
28		11.709	9.1188	0.250	1.4208E-04	1.8035E-04	
5	12	29	9.1188	7.1017	0.250	9.8079E-05	1.2416E-04
		30	7.1017	5.5308	0.250	6.7423E-05	8.5444E-05
		31	5.5308	4.3074	0.250	4.6342E-05	5.8784E-05
	13	32	4.3074	3.3546	0.250	3.1845E-05	4.0433E-05
		33	3.3546	2.6126	0.250	2.1874E-05	2.7806E-05
		34	2.6126	2.0347	0.250	1.5026E-05	1.9120E-05
	14	35	2.0347	1.5846	0.250	1.0311E-05	1.3146E-05
		36	1.5846	1.2341	0.250	7.0733E-06	9.0376E-06
		37	1.2341 (KeV)	0.96112 (KeV)	0.250	4.8576E-06	5.3758E-06

7G	Group		Upper energy	Lower energy	Lethargy Width	Pu-239 Fission Spectrum		
	18G	70G				JENDL-3.2	JENDL-2	
6	15	38	961.12 (eV)	748.52 (eV)	0.250	0.0	0.0	
		39	748.52	582.95	0.250	0.0	0.0	
		40	582.95	454.00	0.250	0.0	0.0	
	16	41	454.00	353.58	0.250	0.0	0.0	
		42	353.58	275.36	0.250	0.0	0.0	
		43	275.36	214.45	0.250	0.0	0.0	
	17	44	214.45	167.02	0.250	0.0	0.0	
		45	167.02	130.07	0.250	0.0	0.0	
		46	130.07	101.30	0.250	0.0	0.0	
	7	18	47	101.30	78.893	0.250	0.0	0.0
			48	78.893	61.442	0.250	0.0	0.0
			49	61.442	47.851	0.250	0.0	0.0
50			47.851	37.267	0.250	0.0	0.0	
51			37.267	29.023	0.250	0.0	0.0	
52			29.023	22.603	0.250	0.0	0.0	
53			22.603	17.603	0.250	0.0	0.0	
54			17.603	13.710	0.250	0.0	0.0	
55			13.710	10.677	0.250	0.0	0.0	
56			10.677	8.3153	0.250	0.0	0.0	
57			8.3153	6.4760	0.250	0.0	0.0	
58			6.4760	5.0435	0.250	0.0	0.0	
59			5.0435	3.9279	0.250	0.0	0.0	
60			3.9279	3.0590	0.250	0.0	0.0	
61			3.0590	2.3824	0.250	0.0	0.0	
62			2.3824	1.8554	0.250	0.0	0.0	
63			1.8554	1.4450	0.250	0.0	0.0	
64			1.4450	1.1254	0.250	0.0	0.0	
65			1.1254	0.87642	0.250	0.0	0.0	
66			0.87642	0.68256	0.250	0.0	0.0	
67	0.68256	0.53158	0.250	0.0	0.0			
68	0.53158	0.41399	0.250	0.0	0.0			
69	0.41399	0.32242	0.250	0.0	0.0			
70	0.32242 (eV)	10 ⁻⁵ (eV)	10.65	0.0	0.0			

Table A.3 次世代炉定数(175G)と縮約時(70G)の群構造

Group		Upper energy (eV)	Lower energy (eV)	Lethargy Width	Group		Upper energy (eV)	Lower energy (eV)	Lethargy Width	Group		Upper energy (eV)	Lower energy (eV)	Lethargy Width	Group		Upper energy (eV)	
70G	175G				70G	175G				70G	175G				70G	175G		
1	1	20000000	17333000	0.143	7	48	2231300	2122500	0.050	17	95	183160	174220	0.050	37	142	1234.1	
	2	17333000	16905000	0.025		49	2122500	2019000	0.050		96	174220	165730	0.050	38	143	961.12	
	3	16905000	16487000	0.025		50	2019000	1920500	0.050		97	165730	157640	0.050	39	144	748.52	
	4	16487000	15683000	0.050		51	1920500	1826800	0.050		98	157640	149960	0.050	40	145	582.95	
	5	15683000	14918000	0.050		52	1826800	1737700	0.050		99	149960	142640	0.050	41	146	454	
	6	14918000	14550000	0.025	8	53	1737700	1653000	0.050	18	100	142640	135690	0.050	42	147	353.58	
	7	14550000	14191000	0.025		54	1653000	1572400	0.050		101	135690	129070	0.050	43	148	275.36	
	8	14191000	13840000	0.025		55	1572400	1495700	0.050		102	129070	122770	0.050	44	149	214.45	
	9	13840000	13499000	0.025		56	1495700	1422700	0.050		103	122770	116790	0.050	45	150	167.02	
	10	13499000	12840000	0.050		57	1422700	1353400	0.050		104	116790	111090	0.050	46	151	130.07	
	11	12840000	12523000	0.025	9	58	1353400	1287300	0.050	19	105	111090	98037	0.125	47	152	101.3	
	12	12523000	12214000	0.025		59	1287300	1224600	0.050		106	98037	86517	0.125	48	153	78.893	
	13	12214000	11618000	0.050		60	1224600	1164800	0.050		20	107	86517	82500	0.048	49	154	61.442
	14	11618000	11052000	0.050		61	1164800	1108000	0.050			108	82500	79500	0.037	50	155	47.851
	15	11052000	10513000	0.050		62	1108000	1002600	0.100			109	79500	72000	0.099	51	156	37.267
	16	10513000	10000000	0.050	10	63	1002600	961640	0.042	110	72000	67379	0.066	52	157	29.023		
	17	10000000	9512300	0.050		64	961640	907180	0.058	21	111	67379	56562	0.175	53	158	22.603	
	18	9512300	9048400	0.050		65	907180	862940	0.050		112	56562	52475	0.075	54	159	17.603	
	19	9048400	8607100	0.050		66	862940	820850	0.050	22	113	52475	46309	0.125	55	160	13.71	
	20	8607100	8187300	0.050	11	67	820850	780820	0.050		114	46309	40868	0.125	56	161	10.677	
	21	8187300	7788000	0.050		68	780820	742740	0.050	23	115	40868	34307	0.175	57	162	8.3153	
2	22	7788000	7408200	0.050		69	742740	706510	0.050		116	34307	31828	0.075	58	163	6.476	
	23	7408200	7046900	0.050		70	706510	672060	0.050	24	117	31828	28500	0.110	59	164	5.0435	
	24	7046900	6703200	0.050		71	672060	639280	0.050		118	28500	27000	0.054	60	165	3.9279	
	25	6703200	6592400	0.017	12	72	639280	608100	0.050		119	27000	26058	0.036	61	166	3.059	
	26	6592400	6376300	0.033		73	608100	578440	0.050	120	26058	24788	0.050	62	167	2.3824		
27	6376300	6065300	0.050	74		578440	550230	0.050	25	121	24788	24176	0.025	63	168	1.8554		
3	28	6065300	5769500	0.050	75	550230	523400	0.050		122	24176	23579	0.025	64	169	1.445		
	29	5769500	5488100	0.050	76	523400	497870	0.050		123	23579	21875	0.075	65	170	1.1254		
	30	5488100	5220500	0.050	13	77	497870	450490	0.100	124	21875	19305	0.125	66	171	0.87642		
	31	5220500	4965900	0.050		78	450490	407620	0.100	125	19305	15034	0.250	67	172	0.68256		
	32	4965900	4723700	0.050		79	407620	387740	0.050	126	15034	11709	0.250	68	173	0.53158		
4	33	4723700	4493300	0.050	14	80	387740	368830	0.050	28	127	11709	10595	0.100	69	174	0.41399	
	34	4493300	4065700	0.100		81	368830	333730	0.100		128	10595	9118.8	0.150	70	175	0.1	
	35	4065700	3678800	0.100		82	333730	301970	0.100	29	129	9118.8	7101.7	0.250				
	5	36	3678800	3328700		0.100	83	301970	298500		0.012	130	7101.7	5530.8	0.250			
37		3328700	3166400	0.050	84	298500	297200	0.004	131	5530.8	4307.4	0.250						
38		3166400	3011900	0.050	85	297200	294520	0.009	32	132	4307.4	3707.4	0.150					
39		3011900	2865000	0.050	86	294520	287250	0.025		133	3707.4	3354.6	0.100					
6		40	2865000	2725300	0.050	87	287250	273240	0.050	33	134	3354.6	3035.4	0.100				
	41	2725300	2592400	0.050	88	273240	247240	0.100	135		3035.4	2747	0.100					
	42	2592400	2466000	0.050	89	247240	235180	0.050	136		2746.5	2612.6	0.050					
	43	2466000	2385200	0.033	16	90	235180	223710	0.050	34	137	2612.6	2485.2	0.050				
	44	2385200	2365300	0.008		91	223710	212800	0.050		138	2485.2	2249	0.100				
	45	2365300	2345700	0.008		92	212800	202420	0.050		139	2248.7	2034.7	0.100				
	46	2345700	2306900	0.017		93	202420	192550	0.050	140	2034.7	1584.6	0.250					
	47	2306900	2231300	0.033		94	192550	183160	0.050	141	1584.6	1234.1	0.250					

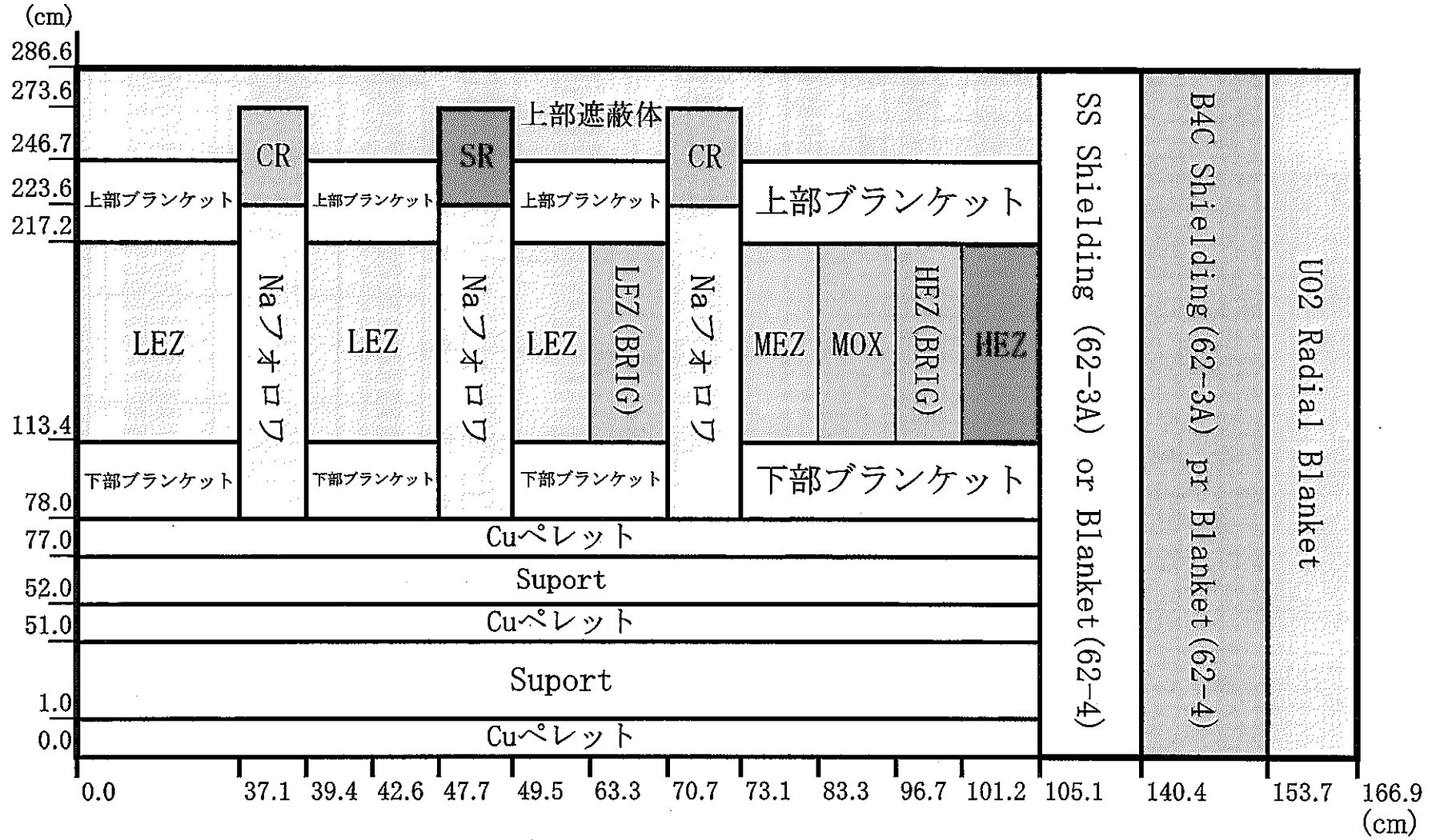


Fig.A.1. BFS-62-3A、BFS-62-4 炉心の 2次元 RZ 計算モデル

付録 B BFS-62-3A 及び 62-4 炉心の反応率分布解析結果の詳細

Table B.1. F49 reaction rate distribution in the radial direction (BFS-62-3A)

Table B.2. F25 reaction rate distribution in the radial direction (BFS-62-3A)

Table B.3. F28 reaction rate distribution in the radial direction (BFS-62-3A)

Table B.4. F49 reaction rate distribution in the axial direction (BFS-62-3A)

Table B.5. F25 reaction rate distribution in the axial direction (BFS-62-3A)

Table B.6. F28 reaction rate distribution in the axial direction (BFS-62-3A)

Table B.7. F49 reaction rate distribution in the radial direction (BFS-62-4)

Table B.8. F25 reaction rate distribution in the radial direction (BFS-62-4)

Table B.9. F28 reaction rate distribution in the radial direction (BFS-62-4)

Table B.10. F49 reaction rate distribution in the axial direction (BFS-62-4)

Table B.11. F25 reaction rate distribution in the axial direction (BFS-62-4)

Table B.12. F28 reaction rate distribution in the axial direction (BFS-62-4)

Table B.1. F49 reaction rate distribution in the radial direction (BFS-62-3A)

Distance[cm]	Basic value	Tra. and mesh Cor	Het. Cor	Corrected	Exp.	C/E value
2.9	1.000	0.995	0.995	1.000	1.000	1.000
11.8	1.015	1.000	0.997	1.021	1.018	1.003
20.6	1.009	1.006	0.995	1.019	1.017	1.003
29.5	1.015	1.003	0.995	1.023	1.008	1.015
38.3	1.029	0.992	0.995	1.025	1.030	0.995
47.1	1.096	0.996	1.000	1.102	1.162	0.949
55.9	1.044	1.002	0.997	1.052	1.026	1.025
64.8	1.000	1.002	0.995	1.006	0.964	1.043
73.6	0.973	1.004	0.995	0.981	0.933	1.052
76.6	0.959	1.010	0.996	0.974	0.913	1.067
82.4	0.906	1.016	0.998	0.927	0.878	1.056
85.4	0.880	1.019	0.999	0.905	0.854	1.059
91.3	0.803	1.027	0.999	0.832	0.781	1.065
100.1	0.705	1.030	1.010	0.741	0.674	1.099
108.9	0.936	0.947	1.000	0.895	0.755	1.186
117.8	0.998	0.972	1.000	0.979	0.749	1.307
126.6	0.818	0.992	1.000	0.819	0.578	1.417
135.4	0.468	0.867	1.000	0.410	0.288	1.422
144.3	0.042	1.267	1.000	0.053	0.049	1.098
153.1	0.013	1.010	1.000	0.013	0.035	0.370
154.0	-0.003	1.001	1.000	-0.003	0.023	-0.122

Tra. and mesh Cor: Transport and mesh Correction

Het. Cor: Heterogeneity Correction

Table B.2. F25 reaction rate distribution in the radial direction (BFS-62-3A)

Distance[cm]	Basic value	Tra. and mesh Cor	Het. Cor	Corrected	Exp.	C/E value
2.9	1.000	0.996	0.996	1.000	1.000	1.000
11.8	1.022	1.000	0.997	1.027	1.025	1.002
20.6	1.013	1.005	0.996	1.023	1.018	1.004
29.5	1.020	1.001	0.996	1.025	1.026	1.000
38.3	1.035	0.993	0.996	1.032	1.049	0.984
47.1	1.142	0.997	1.000	1.148	1.191	0.964
55.9	1.048	1.002	0.997	1.057	1.041	1.015
64.8	0.991	1.002	0.996	0.997	0.950	1.050
73.6	0.941	1.004	1.005	0.958	0.914	1.049
76.6	0.926	1.011	1.010	0.953	0.894	1.066
82.4	0.895	1.014	1.001	0.916	0.848	1.080
85.4	0.866	1.017	0.996	0.885	0.822	1.077
91.3	0.790	1.024	0.996	0.813	0.747	1.087
100.1	0.636	1.030	1.000	0.661	0.634	1.042
108.9	0.877	0.957	1.000	0.846	0.730	1.159
117.8	0.895	0.988	1.000	0.892	0.715	1.247
126.6	0.715	1.011	1.000	0.729	0.551	1.324
135.4	0.401	0.908	1.000	0.368	0.274	1.340
144.3	0.043	1.181	1.000	0.052	0.053	0.985
153.1	0.013	1.002	1.000	0.013	0.039	0.347
154.0	-0.003	0.989	1.000	-0.003	0.025	-0.101

Tra. and mesh Cor: Transport and mesh Correction

Het. Cor: Heterogeneity Correction

Table B.3. F28 reaction rate distribution in the radial direction (BFS-62-3A)

Distance[cm]	Basic value	Tra. and mesh Cor	Het. Cor	Corrected	Exp.	C/E value
2.9	1.000	0.992	0.997	1.000	1.000	1.000
11.8	0.935	0.999	0.998	0.942	0.939	1.004
20.6	0.967	1.013	0.997	0.987	0.959	1.030
29.5	0.954	1.031	0.997	0.991	0.937	1.058
38.3	0.930	0.977	0.997	0.916	0.892	1.027
47.1	0.818	0.987	1.000	0.816	0.739	1.104
55.9	0.917	1.005	0.998	0.930	0.886	1.049
64.8	1.025	1.005	0.997	1.038	0.987	1.052
73.6	1.084	0.979	0.911	0.977	0.980	0.997
76.6	1.107	0.989	0.867	0.960	0.995	0.965
82.4	1.132	1.025	0.967	1.134	1.115	1.017
85.4	1.128	1.025	1.017	1.188	1.151	1.032
91.3	1.039	1.039	1.017	1.111	1.069	1.039
100.1	0.757	1.041	1.113	0.887	0.831	1.067
108.9	0.293	1.058	1.000	0.314	0.280	1.120
117.8	0.110	1.005	1.000	0.111	0.109	1.018
126.6	0.040	1.117	1.000	0.046	0.046	0.999
135.4	0.015	1.167	1.000	0.017	0.020	0.883
144.3	0.005	1.230	1.000	0.006	0.008	0.706
153.1	0.002	1.455	1.000	0.002	0.006	0.401
154.0	-0.001	1.474	1.000	-0.001	0.003	-0.295

Tra. and mesh Cor: Transport and mesh Correction

Het. Cor: Heterogeneity Correction

Table B.4. F49 reaction rate distribution in the axial direction (BFS-62-3A)

Distance[cm]	Basic value	Tra. and mesh Cor	Het. Cor	Corrected	Exp.	C/E value
1.265	1.000	0.995	0.995	1.000	1.000	1.000
3.765	0.998	0.995	1.002	1.004	1.009	0.995
6.265	0.993	0.995	1.012	1.009	1.012	0.997
8.765	0.985	0.995	1.003	0.993	0.991	1.002
11.265	0.974	0.995	0.999	0.978	0.972	1.006
13.765	0.960	0.995	0.999	0.963	0.949	1.014
16.265	0.943	0.995	0.995	0.942	0.924	1.019
18.765	0.923	0.995	0.995	0.923	0.906	1.019
21.265	0.901	0.995	1.002	0.907	0.907	1.000
23.765	0.876	0.995	1.012	0.890	0.881	1.010
26.265	0.849	0.995	1.003	0.855	0.837	1.021
28.765	0.819	0.995	0.999	0.822	0.799	1.029
31.265	0.787	0.995	0.998	0.789	0.772	1.022
33.765	0.754	0.995	0.994	0.753	0.735	1.024
36.265	0.718	0.996	0.996	0.719	0.709	1.014
38.765	0.682	0.996	1.003	0.688	0.674	1.021
41.265	0.645	0.997	1.011	0.656	0.646	1.015
43.765	0.607	0.996	1.001	0.611	0.603	1.013
46.265	0.570	0.996	0.999	0.573	0.562	1.020
48.765	0.533	0.997	0.998	0.536	0.523	1.024
51.265	0.504	0.994	0.994	0.502	0.500	1.005
53.765	0.480	0.984	1.000	0.477	0.476	1.002
56.265	0.452	0.979	1.000	0.447	0.450	0.993
58.765	0.423	0.978	1.000	0.418	0.426	0.981
61.265	0.394	0.977	1.000	0.388	0.399	0.974
63.765	0.365	0.979	1.000	0.361	0.374	0.965
66.265	0.339	0.980	1.000	0.335	0.342	0.979
68.765	0.316	0.983	1.000	0.313	0.327	0.959
71.265	0.296	0.985	1.000	0.294	0.308	0.957
73.765	0.281	0.985	1.000	0.279	0.296	0.944
76.265	0.273	0.990	1.000	0.273	0.292	0.935
78.765	0.269	1.004	1.000	0.272	0.292	0.932
81.265	0.290	0.995	1.000	0.292	0.301	0.970
83.765	0.330	0.962	1.000	0.320	0.325	0.985
86.265	0.356	0.948	1.000	0.340	0.336	1.011
88.765	0.372	0.960	1.000	0.361	0.337	1.070
91.265	0.376	0.975	1.000	0.370	0.334	1.108
93.765	0.369	0.981	1.000	0.365	0.335	1.090
96.265	0.355	0.986	1.000	0.353	0.322	1.097
98.765	0.334	0.991	1.000	0.334	0.310	1.079
101.265	0.308	0.996	1.000	0.310	0.291	1.065
103.765	0.279	1.000	1.000	0.281	0.243	1.159
106.265	0.247	1.002	1.000	0.250	0.207	1.209
108.765	0.214	1.004	1.000	0.217	0.181	1.199
111.265	0.180	1.006	1.000	0.182	0.150	1.216
113.765	0.145	1.010	1.000	0.148	0.117	1.262
116.265	0.110	1.014	1.000	0.113	0.087	1.295
118.765	0.075	1.008	1.000	0.076	0.062	1.223
121.265	0.040	0.953	1.000	0.038	0.049	0.779

Tra. and mesh Cor: Transport and mesh Correction

Het. Cor: Heterogeneity Correction

Table B.5. F25 reaction rate distribution in the axial direction (BFS-62-3A)

Distance[cm]	Basic value	Tra. and mesh Cor	Het. Cor	Corrected	Exp.	C/E value
1.265	1.000	0.996	1.001	1.000	1.000	1.000
3.765	0.998	0.996	1.004	1.001	1.011	0.990
6.265	0.993	0.996	1.027	1.019	1.022	0.997
8.765	0.985	0.996	1.015	0.999	0.992	1.006
11.265	0.974	0.996	1.000	0.973	0.964	1.009
13.765	0.960	0.996	1.002	0.961	0.945	1.016
16.265	0.943	0.996	0.991	0.934	0.917	1.018
18.765	0.924	0.996	0.999	0.921	0.902	1.022
21.265	0.901	0.995	1.006	0.905	0.906	0.999
23.765	0.877	0.995	1.027	0.898	0.878	1.023
26.265	0.849	0.995	1.014	0.860	0.838	1.026
28.765	0.820	0.995	1.000	0.818	0.800	1.023
31.265	0.788	0.995	1.002	0.788	0.758	1.041
33.765	0.755	0.995	0.991	0.747	0.730	1.023
36.265	0.720	0.996	0.999	0.719	0.696	1.032
38.765	0.684	0.996	1.008	0.689	0.675	1.020
41.265	0.648	0.996	1.026	0.664	0.639	1.039
43.765	0.611	0.995	1.012	0.618	0.611	1.011
46.265	0.575	0.996	0.999	0.574	0.563	1.019
48.765	0.540	0.997	1.001	0.541	0.530	1.019
51.265	0.511	0.995	0.991	0.505	0.512	0.988
53.765	0.511	0.985	1.000	0.505	0.498	1.014
56.265	0.487	0.982	1.000	0.479	0.473	1.013
58.765	0.458	0.982	1.000	0.452	0.448	1.009
61.265	0.429	0.980	1.000	0.422	0.423	0.998
63.765	0.399	0.981	1.000	0.392	0.393	0.997
66.265	0.369	0.982	1.000	0.364	0.361	1.006
68.765	0.342	0.985	1.000	0.338	0.335	1.009
71.265	0.318	0.986	1.000	0.314	0.315	0.999
73.765	0.297	0.986	1.000	0.294	0.296	0.993
76.265	0.282	0.991	1.000	0.280	0.284	0.988
78.765	0.271	1.001	1.000	0.272	0.276	0.987
81.265	0.277	0.995	1.000	0.277	0.282	0.980
83.765	0.306	0.967	1.000	0.297	0.292	1.018
86.265	0.318	0.954	1.000	0.304	0.291	1.044
88.765	0.321	0.966	1.000	0.311	0.284	1.095
91.265	0.315	0.980	1.000	0.310	0.274	1.130
93.765	0.303	0.985	1.000	0.299	0.261	1.145
96.265	0.285	0.989	1.000	0.283	0.240	1.177
98.765	0.264	0.993	1.000	0.263	0.222	1.183
101.265	0.240	0.998	1.000	0.240	0.204	1.177
103.765	0.215	1.000	1.000	0.215	0.173	1.246
106.265	0.188	1.003	1.000	0.190	0.147	1.290
108.765	0.162	1.003	1.000	0.163	0.127	1.277
111.265	0.135	1.004	1.000	0.136	0.106	1.281
113.765	0.108	1.007	1.000	0.109	0.085	1.287
116.265	0.082	1.012	1.000	0.083	0.063	1.320
118.765	0.056	1.006	1.000	0.056	0.045	1.242
121.265	0.030	0.950	1.000	0.028	0.034	0.839

Tra. and mesh Cor: Transport and mesh Correction

Het. Cor: Heterogeneity Correction

Table B.6. F28 reaction rate distribution in the axial direction (BFS-62-3A)

Distance[cm]	Basic value	Tra. and mesh Cor	Het. Cor	Corrected	Exp.	C/E value
1.265	1.000	0.992	0.981	1.000	1.000	1.000
3.765	0.998	0.993	1.017	1.035	0.964	1.074
6.265	0.993	0.993	0.923	0.935	0.932	1.004
8.765	0.985	0.992	0.943	0.947	0.926	1.023
11.265	0.974	0.992	1.009	1.002	0.964	1.040
13.765	0.960	0.992	0.970	0.950	0.950	1.000
16.265	0.943	0.993	1.031	0.991	0.949	1.045
18.765	0.923	0.993	0.979	0.922	0.910	1.013
21.265	0.901	0.993	1.010	0.928	0.865	1.073
23.765	0.876	0.992	0.928	0.829	0.819	1.011
26.265	0.848	0.992	0.944	0.815	0.806	1.011
28.765	0.817	0.992	1.015	0.846	0.795	1.063
31.265	0.783	0.993	0.971	0.776	0.771	1.007
33.765	0.747	0.995	1.031	0.787	0.723	1.089
36.265	0.708	0.997	0.981	0.712	0.699	1.019
38.765	0.666	1.001	1.002	0.687	0.627	1.095
41.265	0.621	1.005	0.934	0.599	0.580	1.034
43.765	0.572	1.011	0.947	0.562	0.540	1.041
46.265	0.517	1.013	1.017	0.547	0.519	1.054
48.765	0.458	1.000	0.972	0.457	0.446	1.026
51.265	0.387	0.985	1.027	0.402	0.362	1.109
53.765	0.297	0.975	1.000	0.297	0.258	1.151
56.265	0.229	0.937	1.000	0.220	0.209	1.053
58.765	0.176	0.890	1.000	0.161	0.157	1.025
61.265	0.135	0.896	1.000	0.125	0.123	1.015
63.765	0.106	0.908	1.000	0.098	0.098	1.007
66.265	0.083	0.915	1.000	0.078	0.081	0.958
68.765	0.065	0.938	1.000	0.063	0.063	0.992
71.265	0.051	0.976	1.000	0.052	0.052	0.987
73.765	0.041	1.013	1.000	0.043	0.043	0.987
76.265	0.032	1.044	1.000	0.035	0.036	0.980
78.765	0.026	1.051	1.000	0.028	0.027	1.024
81.265	0.020	1.067	1.000	0.022	0.021	1.048
83.765	0.015	1.078	1.000	0.017	0.017	1.014
86.265	0.012	1.117	1.000	0.014	0.014	0.998
88.765	0.009	1.204	1.000	0.011	0.011	1.045
91.265	0.007	1.248	1.000	0.009	0.008	1.051
93.765	0.005	1.278	1.000	0.007	0.005	1.301
96.265	0.004	1.306	1.000	0.005	0.005	1.073
98.765	0.003	1.356	1.000	0.004	0.004	1.174
101.265	0.002	1.423	1.000	0.003	0.003	1.122
103.765	0.002	1.488	1.000	0.003	0.003	1.070
106.265	0.001	1.553	1.000	0.002	0.002	0.958
108.765	0.001	1.560	1.000	0.002	0.002	0.997
111.265	0.001	1.477	1.000	0.001	0.001	0.873
113.765	0.001	1.573	1.000	0.001	0.001	0.889
116.265	0.0004	1.904	1.000	0.001	0.001	1.250
118.765	0.0003	1.813	1.000	0.001	0.0005	1.192
121.265	0.0002	1.305	1.000	0.0003	0.0003	1.005

Tra. and mesh Cor: Transport and mesh Correction

Het. Cor: Heterogeneity Correction

Table B.7. F49 reaction rate distribution in the radial direction (BFS-62-4)

Distance[cm]	Basic value	Tra. and mesh Cor	Het. Cor	Corrected	Exp.	C/E value
2.9	1.000	0.998	0.995	1.000	1.000	1.000
11.8	1.003	1.003	0.997	1.009	0.991	1.018
20.6	0.985	1.010	0.995	0.996	0.974	1.023
29.5	0.978	1.007	0.995	0.986	0.974	1.013
38.3	0.978	0.993	0.995	0.973	0.990	0.982
47.1	1.028	0.996	1.000	1.031	1.163	0.886
55.9	0.967	1.001	0.997	0.971	0.994	0.977
64.8	0.913	0.999	0.995	0.913	0.888	1.029
73.6	0.876	0.999	0.995	0.878	0.843	1.041
76.6	0.860	1.005	0.996	0.866	0.827	1.047
82.4	0.826	1.010	0.998	0.838	0.793	1.056
85.4	0.798	1.012	0.999	0.813	0.767	1.059
91.3	0.719	1.018	0.999	0.736	0.690	1.067
100.1	0.551	1.014	1.010	0.568	0.542	1.047
108.9	0.388	1.029	1.000	0.403	0.378	1.065
117.8	0.245	1.102	1.000	0.272	0.251	1.082
126.6	0.144	1.166	1.000	0.169	0.148	1.136
135.4	0.075	1.195	1.000	0.090	0.083	1.092
144.3	0.027	1.189	1.000	0.032	0.048	0.664

Tra. and mesh Cor: Transport and mesh Correction

Het. Cor: Heterogeneity Correction

Table B.8. F25 reaction rate distribution in the radial direction (BFS-62-4)

Distance[cm]	Basic value	Tra. and mesh Cor	Het. Cor	Corrected	Exp.	C/E value
2.9	1.000	0.998	0.996	1.000	1.000	1.000
11.8	1.009	1.003	0.997	1.015	0.994	1.021
20.6	0.989	1.009	0.996	0.999	0.975	1.025
29.5	0.982	1.005	0.996	0.989	0.978	1.011
38.3	0.984	0.993	0.996	0.979	1.004	0.975
47.1	1.073	0.996	1.000	1.075	1.171	0.918
55.9	0.971	1.001	0.997	0.975	0.987	0.988
64.8	0.924	0.999	0.996	0.924	0.876	1.056
73.6	0.846	1.000	1.005	0.855	0.827	1.033
76.6	0.829	1.006	1.010	0.846	0.811	1.044
82.4	0.807	1.008	1.001	0.819	0.759	1.079
85.4	0.777	1.011	0.996	0.787	0.735	1.071
91.3	0.698	1.016	0.996	0.711	0.658	1.080
100.1	0.525	1.014	1.000	0.535	0.521	1.028
108.9	0.411	1.022	1.000	0.423	0.401	1.056
117.8	0.273	1.095	1.000	0.300	0.276	1.090
126.6	0.165	1.159	1.000	0.192	0.163	1.182
135.4	0.088	1.191	1.000	0.105	0.098	1.068
144.3	0.031	1.186	1.000	0.037	0.055	0.676

Tra. and mesh Cor: Transport and mesh Correction

Het. Cor: Heterogeneity Correction

Table B.9. F28 reaction rate distribution in the radial direction (BFS-62-4)

Distance[cm]	Basic value	Tra. and mesh Cor	Het. Cor	Corrected	Exp.	C/E value
2.9	1.000	0.996	0.997	1.000	1.000	1.000
11.8	0.924	1.003	0.998	0.932	0.917	1.016
20.6	0.944	1.018	0.997	0.965	0.925	1.043
29.5	0.920	1.035	0.997	0.956	0.897	1.066
38.3	0.884	0.978	0.997	0.869	0.858	1.013
47.1	0.767	0.987	1.000	0.763	0.692	1.102
55.9	0.848	1.005	0.998	0.856	0.815	1.051
64.8	0.953	1.003	0.997	0.960	0.903	1.063
73.6	0.975	0.975	0.911	0.872	0.886	0.984
76.6	0.990	0.985	0.867	0.852	0.874	0.976
82.4	1.019	1.020	0.967	1.012	0.982	1.030
85.4	1.009	1.019	1.017	1.054	1.022	1.031
91.3	0.919	1.031	1.017	0.971	0.933	1.041
100.1	0.645	1.024	1.113	0.740	0.662	1.118
108.9	0.237	1.086	1.000	0.259	0.226	1.143
117.8	0.086	1.100	1.000	0.095	0.087	1.103
126.6	0.032	1.286	1.000	0.042	0.037	1.144
135.4	0.013	1.375	1.000	0.018	0.015	1.172
144.3	0.005	1.367	1.000	0.007	0.007	0.903

Tra. and mesh Cor: Transport and mesh Correction

Het. Cor: Heterogeneity Correction

Table B.10. F49 reaction rate distribution in the axial direction (BFS-62-4)

Distance[cm]	Basic value	Tra. and mesh Cor	Het. Cor	Corrected	Exp.	C/E value
1.265	1.00E+00	0.998	0.995	1.000	1.000	1.000
3.765	9.98E-01	0.998	1.002	1.004	0.995	1.009
6.265	9.93E-01	0.998	1.012	1.009	1.006	1.003
8.765	9.85E-01	0.998	1.003	0.993	0.995	0.998
11.265	9.74E-01	0.998	0.999	0.978	0.988	0.990
13.765	9.60E-01	0.998	0.999	0.963	0.965	0.998
16.265	9.43E-01	0.998	0.995	0.942	0.945	0.996
18.765	9.23E-01	0.998	0.995	0.923	0.917	1.007
21.265	9.01E-01	0.998	1.002	0.907	0.896	1.012
23.765	8.76E-01	0.998	1.012	0.890	0.891	0.999
26.265	8.49E-01	0.998	1.003	0.855	0.867	0.985
28.765	8.19E-01	0.998	0.999	0.822	0.828	0.993
31.265	7.87E-01	0.998	0.998	0.789	0.801	0.985
33.765	7.53E-01	0.998	0.994	0.753	0.758	0.993
36.265	7.18E-01	0.998	0.996	0.719	0.726	0.990
38.765	6.82E-01	0.999	1.003	0.687	0.697	0.986
41.265	6.44E-01	0.999	1.011	0.656	0.667	0.983
43.765	6.07E-01	0.999	1.001	0.611	0.627	0.973
46.265	5.70E-01	0.999	0.999	0.573	0.586	0.978
48.765	5.33E-01	1.000	0.998	0.535	0.544	0.984
51.265	5.03E-01	0.997	0.994	0.502	0.514	0.976
53.765	4.80E-01	0.987	1.000	0.476	0.489	0.974
56.265	4.52E-01	0.982	1.000	0.447	0.464	0.963
58.765	4.23E-01	0.980	1.000	0.417	0.440	0.947
61.265	3.93E-01	0.979	1.000	0.388	0.415	0.934
63.765	3.65E-01	0.981	1.000	0.360	0.388	0.929
66.265	3.38E-01	0.982	1.000	0.334	0.360	0.929
68.765	3.15E-01	0.985	1.000	0.313	0.336	0.930
71.265	2.96E-01	0.987	1.000	0.294	0.317	0.925
73.765	2.81E-01	0.986	1.000	0.279	0.303	0.919
76.265	2.72E-01	0.992	1.000	0.272	0.297	0.916
78.765	2.68E-01	1.006	1.000	0.272	0.289	0.939
81.265	2.90E-01	0.997	1.000	0.291	0.300	0.970
83.765	3.29E-01	0.963	1.000	0.319	0.316	1.012
86.265	3.55E-01	0.950	1.000	0.339	0.337	1.007
88.765	3.71E-01	0.962	1.000	0.359	0.339	1.060
91.265	3.75E-01	0.976	1.000	0.368	0.342	1.079
93.765	3.68E-01	0.982	1.000	0.364	0.331	1.100
96.265	3.54E-01	0.987	1.000	0.352	0.318	1.105
98.765	3.33E-01	0.993	1.000	0.333	0.308	1.079
101.265	3.07E-01	0.998	1.000	0.309	0.293	1.055
103.765	2.78E-01	1.001	1.000	0.280	0.285	0.984
106.265	2.47E-01	1.004	1.000	0.249	0.234	1.064
108.765	2.13E-01	1.005	1.000	0.216	0.198	1.089
111.265	1.79E-01	1.007	1.000	0.182	0.171	1.064
113.765	1.45E-01	1.011	1.000	0.147	0.140	1.048
116.265	1.10E-01	1.015	1.000	0.112	0.111	1.011
118.765	7.46E-02	1.010	1.000	0.076	0.085	0.893
121.265	3.94E-02	0.955	1.000	0.038	0.062	0.606

Tra. and mesh Cor: Transport and mesh Correction

Het. Cor: Heterogeneity Correction

Table B.11. F25 reaction rate distribution in the axial direction (BFS-62-4)

Distance[cm]	Basic value	Tra. and mesh Cor	Het. Cor	Corrected	Exp.	C/E value
1.265	1.00E+00	0.998	1.001	1.000	1.000	1.000
3.765	9.98E-01	0.998	1.004	1.000	1.008	0.992
6.265	9.93E-01	0.998	1.027	1.019	1.019	1.000
8.765	9.85E-01	0.998	1.015	0.999	1.006	0.993
11.265	9.74E-01	0.998	1.000	0.973	0.974	0.998
13.765	9.60E-01	0.998	1.002	0.960	0.952	1.009
16.265	9.43E-01	0.998	0.991	0.934	0.930	1.004
18.765	9.24E-01	0.998	0.999	0.921	0.909	1.014
21.265	9.01E-01	0.998	1.006	0.905	0.897	1.009
23.765	8.76E-01	0.998	1.027	0.898	0.904	0.993
26.265	8.49E-01	0.998	1.014	0.859	0.867	0.991
28.765	8.20E-01	0.998	1.000	0.818	0.830	0.986
31.265	7.88E-01	0.998	1.002	0.788	0.788	1.001
33.765	7.55E-01	0.998	0.991	0.747	0.752	0.993
36.265	7.20E-01	0.998	0.999	0.718	0.723	0.993
38.765	6.84E-01	0.998	1.008	0.689	0.697	0.988
41.265	6.48E-01	0.999	1.026	0.664	0.662	1.003
43.765	6.11E-01	0.998	1.012	0.617	0.634	0.973
46.265	5.75E-01	0.998	0.999	0.574	0.580	0.990
48.765	5.40E-01	0.999	1.001	0.540	0.552	0.978
51.265	5.11E-01	0.997	0.991	0.505	0.522	0.968
53.765	5.11E-01	0.988	1.000	0.505	0.507	0.995
56.265	4.87E-01	0.984	1.000	0.479	0.489	0.979
58.765	4.58E-01	0.984	1.000	0.451	0.462	0.978
61.265	4.29E-01	0.982	1.000	0.421	0.437	0.964
63.765	3.98E-01	0.983	1.000	0.392	0.405	0.967
66.265	3.69E-01	0.984	1.000	0.363	0.379	0.958
68.765	3.42E-01	0.987	1.000	0.338	0.355	0.952
71.265	3.18E-01	0.988	1.000	0.314	0.326	0.963
73.765	2.97E-01	0.988	1.000	0.294	0.308	0.954
76.265	2.82E-01	0.992	1.000	0.280	0.292	0.959
78.765	2.71E-01	1.003	1.000	0.272	0.278	0.977
81.265	2.77E-01	0.997	1.000	0.276	0.278	0.991
83.765	3.08E-01	0.968	1.000	0.298	0.289	1.033
86.265	3.19E-01	0.956	1.000	0.305	0.298	1.024
88.765	3.22E-01	0.967	1.000	0.312	0.294	1.060
91.265	3.17E-01	0.981	1.000	0.311	0.279	1.113
93.765	3.04E-01	0.986	1.000	0.300	0.268	1.119
96.265	2.86E-01	0.990	1.000	0.284	0.248	1.143
98.765	2.65E-01	0.995	1.000	0.264	0.229	1.151
101.265	2.41E-01	0.999	1.000	0.241	0.212	1.139
103.765	2.16E-01	1.002	1.000	0.216	0.197	1.095
106.265	1.89E-01	1.004	1.000	0.190	0.163	1.163
108.765	1.62E-01	1.004	1.000	0.163	0.140	1.164
111.265	1.35E-01	1.005	1.000	0.136	0.120	1.139
113.765	1.09E-01	1.009	1.000	0.110	0.099	1.110
116.265	8.21E-02	1.013	1.000	0.083	0.078	1.073
118.765	5.58E-02	1.007	1.000	0.056	0.057	0.985
121.265	2.96E-02	0.951	1.000	0.028	0.041	0.694

Tra. and mesh Cor: Transport and mesh Correction

Het. Cor: Heterogeneity Correction

Table B.12. F28 reaction rate distribution in the axial direction (BFS-62-4)

Distance[cm]	Basic value	Tra. and mesh Cor	Het. Cor	Corrected	Exp.	C/E value
1.265	1.00E+00	0.996	0.981	1.000	1.000	1.000
3.765	9.98E-01	0.996	1.017	1.035	1.001	1.034
6.265	9.93E-01	0.996	0.923	0.935	0.952	0.982
8.765	9.85E-01	0.996	0.943	0.947	0.933	1.015
11.265	9.74E-01	0.996	1.009	1.002	0.946	1.060
13.765	9.60E-01	0.996	0.970	0.950	0.969	0.980
16.265	9.43E-01	0.996	1.031	0.991	0.948	1.045
18.765	9.23E-01	0.996	0.979	0.922	0.926	0.996
21.265	9.01E-01	0.997	1.010	0.928	0.896	1.036
23.765	8.75E-01	0.996	0.928	0.829	0.849	0.976
26.265	8.47E-01	0.996	0.944	0.815	0.809	1.008
28.765	8.17E-01	0.996	1.015	0.846	0.798	1.059
31.265	7.83E-01	0.997	0.971	0.776	0.785	0.989
33.765	7.47E-01	0.998	1.031	0.787	0.757	1.039
36.265	7.08E-01	1.000	0.981	0.712	0.712	1.000
38.765	6.66E-01	1.004	1.002	0.687	0.668	1.027
41.265	6.21E-01	1.009	0.934	0.599	0.602	0.996
43.765	5.71E-01	1.015	0.947	0.562	0.556	1.011
46.265	5.17E-01	1.016	1.017	0.547	0.515	1.061
48.765	4.57E-01	1.004	0.972	0.457	0.481	0.950
51.265	3.86E-01	0.989	1.027	0.402	0.396	1.014
53.765	2.97E-01	0.979	1.000	0.297	0.311	0.955
56.265	2.28E-01	0.940	1.000	0.220	0.235	0.934
58.765	1.76E-01	0.893	1.000	0.161	0.187	0.860
61.265	1.35E-01	0.899	1.000	0.124	0.140	0.886
63.765	1.05E-01	0.910	1.000	0.098	0.113	0.869
66.265	8.25E-02	0.918	1.000	0.077	0.091	0.854
68.765	6.49E-02	0.941	1.000	0.063	0.074	0.848
71.265	5.13E-02	0.979	1.000	0.051	0.060	0.859
73.765	4.08E-02	1.017	1.000	0.042	0.049	0.858
76.265	3.24E-02	1.047	1.000	0.035	0.041	0.847
78.765	2.59E-02	1.055	1.000	0.028	0.033	0.858
81.265	2.03E-02	1.071	1.000	0.022	0.027	0.810
83.765	1.54E-02	1.082	1.000	0.017	0.021	0.822
86.265	1.18E-02	1.121	1.000	0.014	0.015	0.876
88.765	9.02E-03	1.207	1.000	0.011	0.012	0.905
91.265	6.89E-03	1.251	1.000	0.009	0.009	0.938
93.765	5.29E-03	1.283	1.000	0.007	0.007	0.937
96.265	4.03E-03	1.311	1.000	0.005	0.007	0.831
98.765	3.08E-03	1.360	1.000	0.004	0.005	0.840
101.265	2.35E-03	1.428	1.000	0.003	0.004	0.837
103.765	1.80E-03	1.493	1.000	0.003	0.003	0.885
106.265	1.36E-03	1.555	1.000	0.002	0.003	0.868
108.765	1.04E-03	1.564	1.000	0.002	0.002	0.928
111.265	7.95E-04	1.487	1.000	0.001	0.002	0.806
113.765	5.97E-04	1.583	1.000	0.001	0.001	0.879
116.265	4.42E-04	1.909	1.000	0.001	0.001	1.078
118.765	3.16E-04	1.804	1.000	0.001	0.001	0.833
121.265	2.22E-04	1.293	1.000	0.0003	0.001	0.367

Tra. and mesh Cor: Transport and mesh Correction

Het. Cor: Heterogeneity Correction