

JNC TN9400 2003-###

# マイナーアクチニド添加炉心の核特性評価 - BFS-67 臨界実験の解析 -

(研究報告)

2003年5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

電話:029-282-1122(代表)

ファックス:029-282-7980

電子メール:[jserv@jnc.go.jp](mailto:jserv@jnc.go.jp)

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)

2003

## マイナーアクチニド添加炉心の核特性評価 - BFS-67 臨界実験の解析 - (研究報告書)

羽様 平<sup>1)</sup>、佐藤 若英<sup>2)</sup>、石川 眞<sup>1)</sup>、庄野 彰<sup>1)</sup>、

### 要旨

「多量の Np を種々の臨界集合体に添加したときの炉物理特性の変化に関する研究」としてロシアの物理エネルギー研究所(IPPE)と共同研究を実施している。

その第1報として BFS-67 体系に関する実験情報とサイクル機構(JNC)の解析結果をまとめた。

BFS-67 体系では Np の装荷量や装荷位置を変えた4種類の炉心について臨界性、Na ボイド反応度、制御棒価値、反応率比などの核特性が測定されている。BFS-62 臨界実験解析で実績のあるサイクル機構の標準解析手法で解析し、以下の結果を得た。

Na ボイド反応度、制御棒反応度の Np の捕獲断面積に対する感度係数が U-238 や Pu-239 と同程度に大きいことを確認した。本実験データは Np 装荷炉心の核設計精度の向上に活用できるものであるといえる。

臨界性の解析では炉心の種類によらず同程度の C/E 値 0.995 が得られ、JNC の解析システムで本実験を高精度で解析できることを確認した。

Na ボイド反応度の解析値は 1cent 以内で実験値と一致しており、Np を装荷した場合でも高精度で解析できることを確認した。

制御棒反応度の解析値は、濃縮 B<sub>4</sub>C の制御棒については実験誤差内で一致した。天然 B<sub>4</sub>C の制御棒については若干過大評価している。Np の装荷による影響は確認できない。

炉心中心反応率比の解析値は、核分裂反応率比について実験値と 5%以内で一致した。補獲反応率比については実験値との差異が 10%近く、測定に用いられた放射化箔の位置を正確に反映させる必要がある。

---

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)

Evaluation of Nuclear Characteristics of Minor Actinide Loaded Core  
- An Analysis of BFS-67 Critical Experiment -

Taira Hazama<sup>1)</sup>, Wakaei Sato<sup>2)</sup>, Makoto Ishikawa<sup>1)</sup>, Akira Shono<sup>1)</sup>,

**ABSTRACT**

Collaboration between Russian Institute of Physics and Power Engineering (IPPE) and Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) named "Investigation of neutronic-physical characteristics and their change when introducing large quantity of neptunium (Np) at different BFS critical assemblies" is under progress.

This is the first report of the collaboration to describe experimental information and JNC analysis results on BFS-67 critical experiment.

In BFS-67 experiment, nuclear characteristics (criticality, control rod worth, sodium void reactivity, reaction ratio, etc) were measured in 4 different cores with various amounts of Np and locations. JNC analysis was performed based on a JNC standard analysis scheme as in the analyses of BFS-62 critical experiments.

Sensitivity coefficients of Np capture cross section for the sodium void reactivity and control rod worth are large enough and comparable to those of U-238 and Pu-239. This indicates the experimental data can be used to improve design accuracy of Np loaded core.

C/E values for the criticality show high accuracy of 0.995 independent of core patterns, indicating accuracy of the calculation is high enough.

Calculated values for the sodium void reactivity agree with experimental values within 1cent and there is no influence of Np loading on calculation accuracy.

Calculated values for the control rod worth agree with experimental values within experimental errors for enriched B<sub>4</sub>C control rod. Those for natural B<sub>4</sub>C slightly overestimate. An influence of Np loading is not observed.

Calculated values for the reaction ratio agree with experimental values within 5% for fission reactions, whereas those for capture reactions show nearly 10% of differences. Positions of foils used in the measurement should be reflected.

---

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-67臨界実験の概要	3
2.1 BFS-67体系の概要	3
2.2 測定の概要	4
2.2.1 臨界性	4
2.2.2 Naボイド反応度	4
2.2.3 制御棒価値	4
2.2.4 炉中心反応率比	4
2.2.5 微少サンプル反応度	5
第3章 予備解析(BFS-67R臨界実験の有効性の確認)	11
3.1 評価対象の核特性と炉心	11
3.2 解析手法	11
3.3 解析結果	11
3.3.1 中性子スペクトル	11
3.3.2 臨界性の感度係数	11
3.3.3 Naボイド反応度の感度係数	11
3.3.4 制御棒価値の感度係数	12
第4章 BFS-67臨界実験の解析	21
4.1 解析手法	21
4.1.1 原子個数密度の算出	21
4.1.2 格子計算	21
4.1.3 基準計算	21
4.1.4 補正計算	22
4.2 解析結果	23
4.2.1 中性子スペクトル	23
4.2.2 臨界性	23
4.2.3 Naボイド反応度	23
4.2.4 制御棒価値	24
4.2.5 炉心中心反応率比	24
第5章 結言	37
謝辞	38
参考文献	38

## LIST OF TABLES

Table 2.1	反応率比の測定項目	3
Table 2.2	サンプル反応度の測定核種	3
Table 3.1	70群炉定数と縮約後(18群)のエネルギー群構造	13
Table 3.2	BFS-67-1Rと-2Rの臨界性に対する感度係数	14
Table 3.3	BFS-67-1Rと-2RのNaボイド反応度に対する感度係数	15
Table 3.4	BFS-67-1Rと-2Rの制御棒価値に対する感度係数	16
Table 3.5	BFS-67-3Rと-3RBの制御棒価値に対する感度係数	17
Table 4.1	Np装荷領域(LEZ領域)の均質原子個数密度	25
Table 4.2	臨界性の解析結果	25
Table 4.3	Naボイド反応度の解析結果	26
Table 4.4	Naボイド反応度の内訳	26
Table 4.5	制御棒価値の解析結果	27
Table 4.6	制御棒価値の解析結果(BFS-67-1R)	28
Table 4.7	制御棒価値の解析結果(BFS-67-2R)	29
Table 4.8	制御棒価値の解析結果(BFS-67-3R)	30
Table 4.9	制御棒価値の解析結果(BFS-67-3BR)	31
Table 4.10	反応率比の解析結果(BFS-67-1R)	32
Table 4.11	反応率比の解析結果(BFS-67-2R)	32
Table 4.12	反応率比の解析結果(BFS-67-3BR)	32

## LIST OF FIGURES

Fig. 2.1	BFS-67実験の炉心構成	6
Fig. 2.2	BFS-67-1R,2R,3R,3BRの燃料構成	7
Fig. 2.3	BFS-67-1R,2R,3R,3BRの燃料セル構成	8
Fig. 2.4	制御棒の構成と燃料集合体との位置関係	9
Fig. 2.5	反応率比測定におけるウラン箔の設置位置	10
Fig. 3.1	Naボイド反応度解析用RZモデル	18
Fig. 3.2	中性子スペクトルの比較	19
Fig. 3.3	Np-237とU-238の捕獲断面積の比較	19
Fig. 3.4	随伴中性子スペクトルの比較	20
Fig. 4.1	集合体に対するプレートストレッチモデルの適用概念図	33
Fig. 4.2	解析で使用した制御棒モデル	34
Fig. 4.3	Naボイド反応度の散乱項の炉心間での比較	35
Fig. 4.4	反応率比C/E値の炉心間の比較	35
Fig. 4.5	Np装荷による反応率比の変化の比較(BFS-67-2R)	36
Fig. 4.6	Np装荷による反応率比の変化の比較(BFS-67-3BR)	36

# 第1章 緒言

## 1.1. 研究の背景

JNC(サイクル機構)では現在実用化戦略調査研究を実施している。そのフェーズ1(～2001年3月)では、革新的技術の導入と広範な技術オプションのレビューによって実現可能性の高い候補概念を抽出してきた。続くフェーズ(2001年4月から約5年間)においてもユニークで創造的なアイデアを集めるため、JNCは革新的技術研究として魅力的な研究項目を国内のみならず国外からも募集している。

IPPE(ロシア物理エネルギー研究所)は、マイナーアクチニド(MA)を装荷した高速炉炉心の核特性評価に関してその解析手法と核データの妥当性を確認するための「多量のNpを種々の臨界集合体に添加したときの炉物理特性の変化に関する研究」を提案した。

環境負荷低減の観点から将来のFBRサイクルシステムではMA燃焼は最も重要な技術の一つであること、主要MAの1つであるNp装荷炉心の臨界実験の詳細データを入手し、JNCの高速炉核特性解析システムのMA装荷炉心に対する検証、精度向上を図ることは非常に有意義であると判断し、共同研究を実施することとなった。

## 1.2. 研究の目的

Np装荷炉心の臨界実験解析を行って、その予測精度を確認し、Np装荷炉心の核設計精度の向上に反映する。

## 1.3. 実施項目とスケジュール

共同研究は3カ年(平成13年度～15年度)の予定で実施している。平成15年度の契約は追加実験を実施する場合に成立する。

第1期(平成13年度)では、Npを装荷した臨界実験体系(BFS-67体系)での実験及び解析結果に関する報告書をIPPE側から入手する。

第2期(平成14年度)では、JNC側で第1期の情報を基にBFS-67体系の解析評価を実施するとともに、IPPE側から異なるPu富化度の炉心(BFS-69体系)についての実験及び解析結果に関する報告書を入手する。

第3期(平成15年度)では、第1期及び第2期の情報を基にJNC側で解析評価を実施する。JNCとIPPE間で協議し合意が得られた場合には追加実験を実施する。

現在(平成15年4月)までの進捗は以下の通りである。

BFS-67体系の実験解析に関する報告書をIPPEから入手(平成14年2月)。

BFS-67体系に関する情報交換をロシアで実施(平成14年9月)。

BFS-69体系の実験解析に関する報告書をIPPEから入手(平成15年2月)。

BFS-67体系の解析をJNC側で実施。(平成14年度から継続中)。

本報では第 1 期の契約で入手した BFS-67 体系に関する実験情報とそれを基に JNC で実施した解析結果を報告する。

## 第 2 章 BFS-67 臨界実験の概要

本章では BFS-67 臨界実験の概要を述べる。

### 2.1 BFS-67 体系の概要

BFS-67 臨界実験は IPPE の臨界実験装置 BFS-1 で実施された。燃料集合体はステンレス TUBE (外径約 5cm) 内に燃料やナトリウムなどのペレットを一定のパターン (1つのパターンをセルと称す) で積み重ねることによって構成され、炉心はその集合体を 5.1cm ピッチで六角格子状に配置することによって構成されている。

炉心は径方向中心から順に Pu 領域 (LEZ 領域、富化度 19wt%)、U 領域 (HEZ 領域、濃縮度 21wt%)、ブランケット領域の 3 領域からなる。ブランケット領域は LEZ 領域及び HEZ 領域の上下にも設置されている。燃料ペレットには金属 Pu ペレット (Pu-239 94wt%)、金属 U ペレット (濃縮度 90wt%)、 $UO_2$  ペレット (濃縮度 0.4wt%) が使用されている。本実験はフランスとロシアの共同研究で実施された<sup>[1]</sup>ものであり、炉心は SUPERPHENIX の内側炉心を模している。

Np の装荷は LEZ 領域の  $UO_2$  ペレットを  $NpO_2$  ペレットに置換することによって実施される。Np の装荷量は最大 10kg で装荷量や装荷位置によって以下の 4 種類の炉心が構成され、それぞれの炉心について同様な核特性 (臨界性、制御棒価値、ポイド反応度など) が測定されている。各炉心の炉心構成、LEZ 領域と HEZ 領域のセル構成、燃料セルのペレット構成を Fig.2.1~2.3 に示す。

BFS-67-1R (BFS-67 炉心シリーズの基準炉心、Np 装荷なし)

LEZ 領域 (集合体 169 体)、HEZ 領域 (集合体 417 体)、径ブランケット (集合体 688 体) で構成される。

BFS-67-2R (Np 装荷量 10kg)

BFS-67-1R の炉心中心燃料 31 体について、それぞれ 1 体中に含まれる 8 燃料セルの内、中心部 4 燃料セルの  $UO_2$  ペレット (2 カ所) を  $NpO_2$  ペレットに置換した炉心である。燃料に占める Np の割合は 13.1%、装荷総重量は 10kg である。Np 装荷による反応度低下を補償するために、HEZ 領域の燃料が 5 体追加されている。

BFS-67-3R (Np 装荷量 5kg)

Np を装荷する燃料体の数は BFS-67-2R と同様 31 体であるが、セル中の  $NpO_2$  ペレットが BFS-67-2R の半分 (1 カ所) のみに装荷される。燃料セル中の Np の割合は BFS-67-2R と比べ半分の 6.5% になり、装荷総重量も半分の 5kg になる。また、HEZ 領域の燃料も BFS-67-1R より 1 体多いだけの 418 体である。

BFS-67-3BR (Np 装荷量 10kg、装荷集合体数は BFS-67-2R の約 2 倍)

Np を装荷する燃料体の数が BFS-67-3R の約 2 倍の 61 体である。従って、Np の濃縮

度は BFS-67-3R と同じ 6.5% であるが、Np の装荷総重量は BFS-67-3R の 2 倍、BFS-67-2R と同じ 10kg である。HEZ 領域の燃料は BFS-67-1R より 4 体多い 421 体である。

## 2.2 測定の概要

BFS-67 体系で測定された核特性（臨界性、Na ボイド反応度、制御棒価値、炉中心反応率比、サンプル物質反応度）について概要を述べる。

### 2.2.1 臨界性

臨界性（過剰反応度）は実験装置の運転制御用の制御棒を引き抜いた際のペリオド測定によって評価された。

### 2.2.2 Na ボイド反応度

測定は BFS-67-1R、BFS-67-2R の 2 炉心で実施され、炉心中心燃料 31 体、軸高さ 38cm（炉心中心領域 4 セルに対応）の全 Na ペレット 16 枚を SUS 缶に置換し、置換前後の過剰反応度の差異によって Na ボイド反応度が評価されている。Na 除去量の合計は 6.9kg である。

なお、その他にも 5 種類の測定データが IPPE の報告書には提示されているが、Na の置換量が少ないため反応度が 1¢ 以下と小さく、有意な解析結果が期待できないため評価の対象外とした。

### 2.2.3 制御棒価値

4 種類全ての炉心について実施された。測定は炉心中心の集合体 1 体に制御棒置換することによって実施された。制御棒には Fig.2.4 に示すような "Long rod" という  $B_4C$  吸収体を Na で挟んだものが使用される。吸収体には天然  $B_4C$  と濃縮  $B_4C$  (B-10 : 81.7%) の 2 種類が使用される。"Long rod" 中の吸収体サイズも 2 種類存在し、それらの組み合わせからなる 4 種類の制御棒について反応度が測定された。

Fig.2.4 のように制御棒引き抜き状態（Long rod の下部を炉心に挿入した状態）では炉心及びブランケット領域に対応する位置には Na のみが存在し、制御棒挿入時（Long rod の上部を炉心に挿入した状態）には吸収体部の中心が炉心中心に位置する。制御棒引き抜き状態ではわずかに超過臨界である。測定は、制御棒引き抜き状態で出力を上昇させ必要な計数率を得た後、制御棒を挿入し、出力の時間変化から制御棒価値の求めることによって実施された。

### 2.2.4 炉中心反応率比

BFS-67-1R、BFS-67-2R、BFS-67-3BR の 3 炉心について、Table 2.1 に示す 14 種類の反応率比が測定されている。測定には核分裂反応率比については小型核分裂計数管が、捕獲反応を含む反応率比については放射化箔が使用された。小型核分裂計数管を用いた場合は、

計数管を中心集合体の周囲の隙間に挿入し、軸方向中心のセルについてセル平均値が得られるように 1cm 間隔ですらした複数点の平均値で反応率比を評価している。捕獲反応を含む反応率比の測定についてはウラン箔（濃縮度 37wt%、厚さ 0.1mm）が用いられている。ウラン箔は縦に 2 分割した UO<sub>2</sub> ペレット間及び軸方向ペレット間に同時に設置され (Fig.2.5)、それらの平均値から反応率比が評価されている。

### 2.2.5 微少サンプル反応度

BFS-67-1R、BFS-67-2R、BFS-67-3BR の 3 炉心について、Table 2.2 に示す 8 種類の物質の微少サンプル反応度が測定されている。測定にはオシレーター法（サンプルを周期的に出し入れしたときの炉出力の振動を解析することによって反応度を評価する方法）が用いられている。報告書にはサンプルサイズをゼロに補正した結果が記載されている。

Table 2.1 反応率比の測定項目

No.	略称	反応率比の種類
1	F28/F25	U238 と U235 の核分裂反応率の比
2	F49/F25	Pu239 と U235 の核分裂反応率の比
3	F37/F49	Np237 と Pu239 の核分裂反応率の比
4	F48/F49	Pu238 と Pu239 の核分裂反応率の比
5	F40/F49	Pu240 と Pu239 の核分裂反応率の比
6	F41/F49	Pu241 と Pu239 の核分裂反応率の比
7	F42/F49	Pu242 と Pu239 の核分裂反応率の比
8	F51/F49	Am241 と Pu239 の核分裂反応率の比
9	F53/F49	Am243 と Pu239 の核分裂反応率の比
10	F64/F49	Cm244 と Pu239 の核分裂反応率の比
11	C28/F25	U238 の捕獲反応率と U235 の核分裂反応率の比
12	C97/F25	Au237 の捕獲反応率と U235 の核分裂反応率の比
13	C37/C28	Np237 と U238 の捕獲反応率の比
14	C37/F25	Np237 の捕獲反応率と U235 の核分裂反応率の比

Table 2.2 サンプル反応度の測定核種

No.	核種
1	U238
2	B10
3	C12
4	H
5	Pu239
6	Np237
7	Am241
8	Na

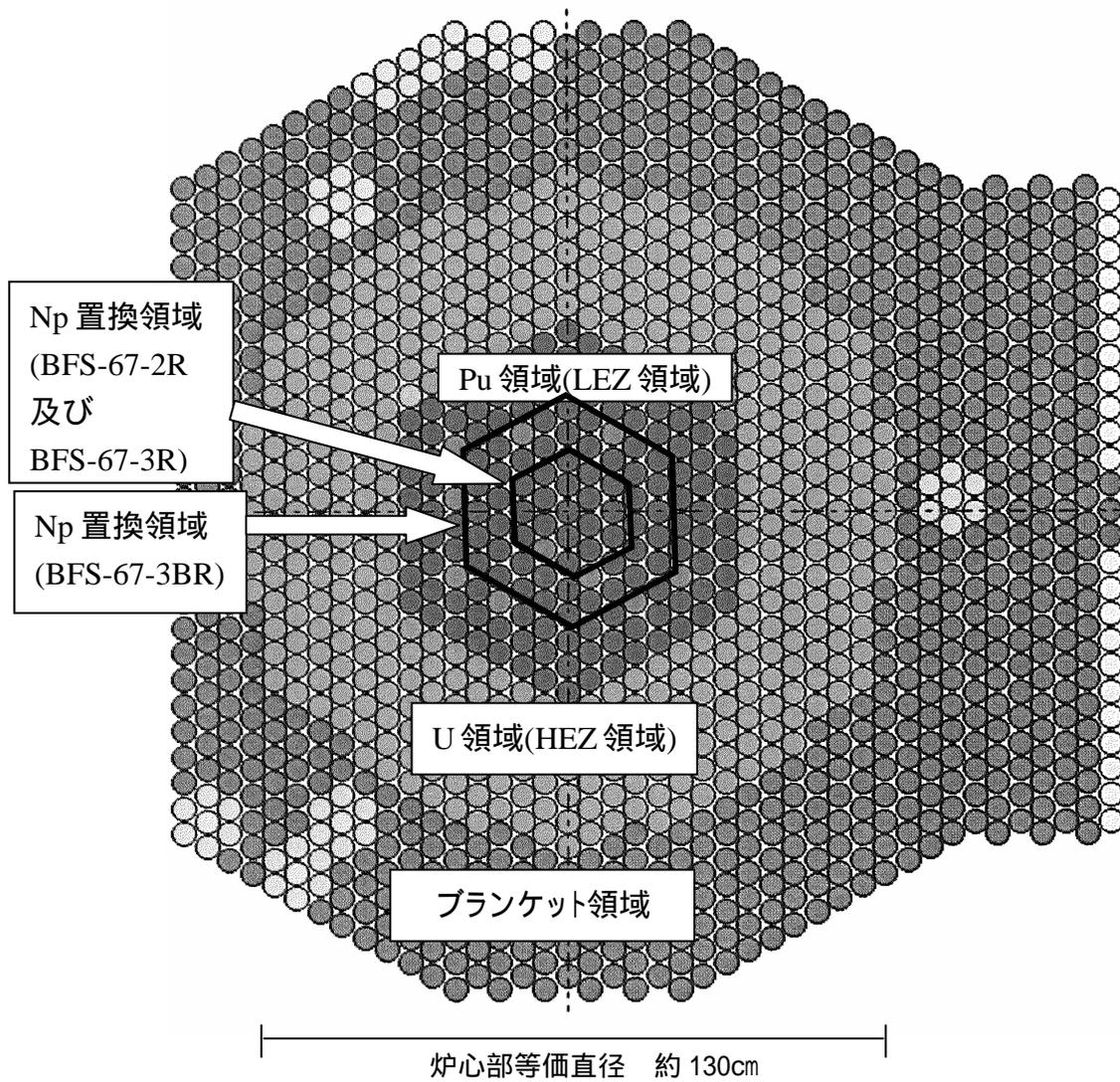


Fig.2.1 BFS-67 実験の炉心構成 (BFS-67-1R は Np 置換無し)

39 pellets UO <sub>2</sub>	↑ 380.3 ↓
8 cells LEZ-67-1R	↑ 761 ↓
40 pellets UO <sub>2</sub>	↑ 390 ↓
Steel pellet	10
Steel support	↑ 250 ↓
Steel pellet	10
<b>Fuel Rod LEZ-67-1R</b>	
39 pellets UO <sub>2</sub>	↑ 380.3 ↓
9 cells HEZ-67-1R,2R,3R,3BR	↑ 762 ↓
40 pellets UO <sub>2</sub>	↑ 390 ↓
Steel pellet	10
Steel support	↑ 270 ↓
Steel pellet	10
<b>Fuel Rod HEZ-67-1R,2R,3R,3BR</b>	
39 pellets UO <sub>2</sub>	↑ 380.3 ↓
2 cells LEZ-67-2R,3R,3BR+2 cells LEZ-67-1R	↑ 761 ↓
40 pellets UO <sub>2</sub>	↑ 390 ↓
Steel pellet	10
Steel support	↑ 270 ↓
Steel pellet	10
<b>Fuel Rod LEZ-67-2R,3R,3BR</b>	

Fig.2.2 BFS-67-1R,2R,3R,3BR の燃料構成 (unit:mm)

Cell of LEZ-67-1R

Na-new	3UO <sub>2</sub> -2	Steel ring	Pu	UO <sub>2</sub> -1	Na-new	UO <sub>2</sub> -1	Na-new	Pu	2UO <sub>2</sub> -2	Al	Steel ring	Na-new	UO <sub>2</sub> -1
Down	9.51cm											Up	
←												→	

Cell of HEZ-67-1R,2R,3R,3BR

Na-green	UO <sub>2</sub> -1	Na-green	UO <sub>2</sub> -1	U-235 (90%)	Na-green	UO <sub>2</sub> -1	Na-green	UO <sub>2</sub> -1
Down	8.47 cm							Up
←								→

Cell of LEZ-67-2R.

Na-new	NpO <sub>2</sub>	Pu	UO <sub>2</sub> -1	Na-new	UO <sub>2</sub> -1	Na-new	Pu	NpO <sub>2</sub>	Na-new	UO <sub>2</sub> -1
Down	9.48 cm									Up
←										→

(Np loaded)

Cell of LEZ-67-3R, 3BR.

Na-new	3UO <sub>2</sub> -2	Steel ring	Pu	UO <sub>2</sub> -1	Na-new	UO <sub>2</sub> -1	Na-new	Pu	NpO <sub>2</sub>	Na-new	UO <sub>2</sub> -1
Down	9.52 cm										Up
←											→

(Np loaded)

Fig.2.3 BFS-67-1R,2R,3R,3BR の燃料セル構成

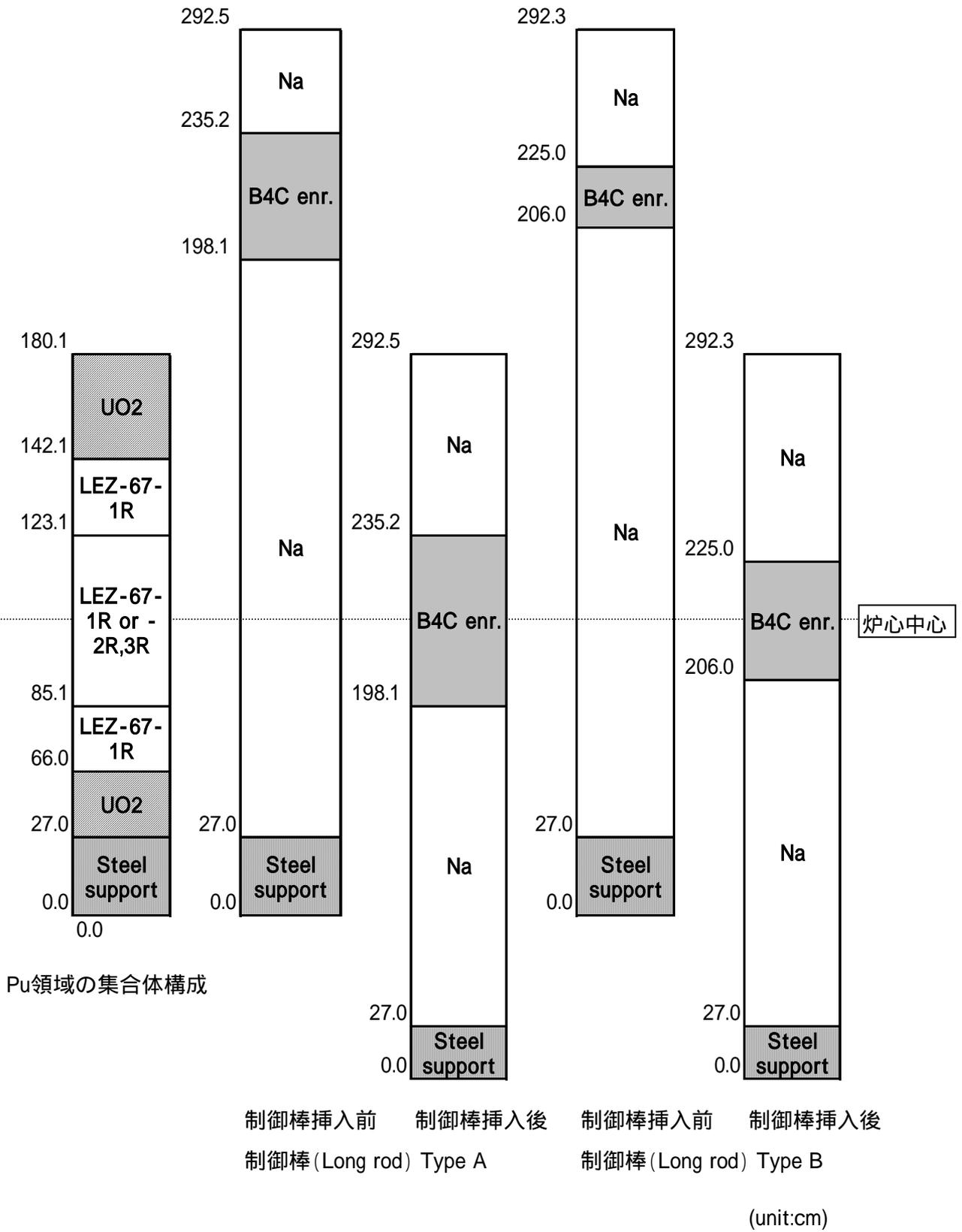


Fig.2.4 制御棒の構成と燃料集合体との位置関係

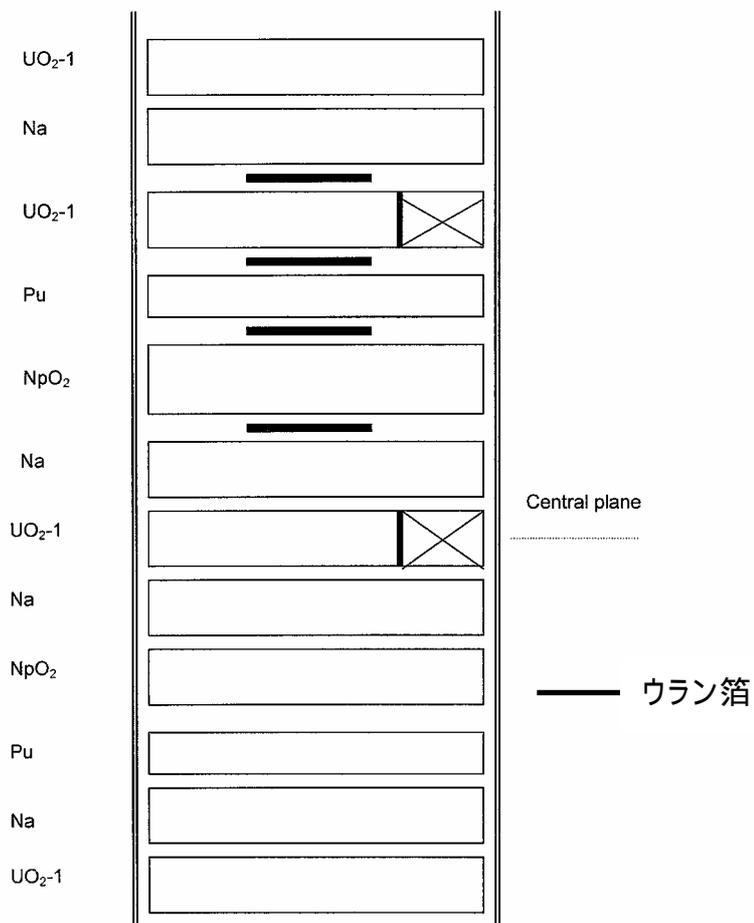


Fig.2.5 反応率比測定におけるウラン箔の設置位置  
(BFS-67-2R の LEZ セル)

## 第3章 予備解析（BFS-67R 臨界実験の有効性の確認）

本実験結果を Np 装荷炉心の核特性設計精度の向上に反映するためには、測定された核特性に Np の装荷による変化が現れている必要がある。そこで本格的な解析に先んじて Np の装荷による核特性の変化を感度解析によって暫定評価した。ここで「暫定」とは解析情報の一部に推定値を使用していることを意味する。

### 3.1 評価対象の核特性と炉心

2.2 節で述べた核特性の中から主要なものとして、BFS-67-1R と -2R の臨界性、BFS-67-1R と -2R の Na ボイド反応度及び制御棒価値を採り上げた。

### 3.2 解析手法

解析は 2 次元 RZ 体系モデルを用いて実施した。例として Na ボイド反応度解析時の体系モデルを Fig.3.1 に示す。炉定数には JFS-3-J3.2R<sup>[2]</sup>を用いた。格子計算は SLAROM<sup>[3]</sup>を用いた均質計算とし、その際に用いる原子数密度は IPPE の報告書に記載されているペレットの重量、組成比、セル内のペレット枚数の情報から算出した。体系計算は拡散計算コード CITATION-FBR<sup>[3]</sup>を用いたエネルギー 70 群の 2 次元 RZ 拡散計算で行い、エネルギー群数を 70 群から 18 群に縮約した後、改めて 18 群の 2 次元 RZ 拡散計算を実施し、感度係数計算コード SAGEP<sup>[3]</sup>を用いて感度係数を評価した。70 群及び 18 群のエネルギー群構造を Table 3.1 に示す。

### 3.3 解析結果

#### 3.3.1 中性子スペクトル

炉心中心における中性子スペクトルの比較を Fig.3.2 に示す。Np を装荷しない BFS-67-1R 炉心、Np を 10kg 装荷した BFS-67-2R 炉心に加え、同様に BFS 臨界実験装置で構成された MOX 炉心である BFS-62-5 炉心について比較した。Np を装荷すると中性子スペクトルが硬くなることを確認できる。次章の Table 4.1 に示すが Np を装荷した分は U-238 の原子個数密度の減少となるため、スペクトルの変化は U-238 と Np-237 の断面積の差異によって生じているといえる。Fig.3.3 には Np-237 と U-238 の捕獲断面積(JFS-3-J3.2R の 70 群無限希釈断面積)を示すが、Np-237 は低エネルギーの中性子をより多く吸収するためスペクトルが硬くなることを理解できる。BFS-62-5 炉心は BFS-67-1R, -2R 炉心に比べてスペクトルが軟らかいが炉心体積が BFS-62-5 炉心の約 1/4 と小さいことが原因である。

Fig.3.4 には随伴中性子スペクトルを示す。中性子スペクトルと同様にエネルギー 10keV を境界に大小関係が逆転しており、Np 装荷の影響が表れている。

#### 3.3.2 臨界性の感度係数

寄与の比較的大きな核種の感度係数を Table 3.2 に示す。臨界性に対して大きな感度を

示す核種・反応は、BFS-67-1R、-2R 炉心ともに、U-235、Pu-239、U-238 の核分裂あたりの発生中性子数(NU)、核分裂反応(FISSION)、U-238 の捕獲反応(CAPTURE)である。

BFS-67-2R に装荷されている Np-237 の感度は無視できるほど小さい。

### 3.3.3 Na ボイド反応度の感度係数

寄与の比較的大きな核種の感度係数を Table 3.3 に示す。

BFS-67-1R 炉心では U-238 および Pu-239 の捕獲反応、核分裂あたりの発生中性子数、核分裂反応の感度係数が非常に大きな値を示した。一方、構造材の感度は、酸素の弾性散乱反応(ELAS.SCT)、ナトリウムの非弾性散乱反応(INEL.SCT)で若干大きい程度で、それ以外は小さい結果となった。

BFS-67-2R 炉心では、BFS-67-1R 炉心と比べ、Pu-239 および U-238 の感度係数が小さくなっている。また、Np-237 に比較的大きな感度が現れている。

U-235 の感度係数の正負が両炉心間で逆になっているが、これは随伴中性子スペクトルが Np-237 の装荷により変化したためである(参考 Fig.3.4)。

このように Na ボイド反応度については Np-237 装荷の影響が有意に表れており、Np 装荷炉心の核設計精度の向上に反映する上で有効なデータであると言える。

### 3.3.4 制御棒反応度の感度係数

寄与の比較的大きな核種の感度係数を Table 3.4 及び 3.5 に示す。

BFS-67-1R 炉心では、U-235、U-238 および Pu-239 の捕獲反応、核分裂あたりの発生中性子数、核分裂反応の感度係数が大きな値を示した。特に、U-235 の核分裂あたりの発生中性子数と核分裂反応の感度が大きい。それ以外には B-10 の捕獲反応の感度が大きい。

BFS-67-2R、-3R、-3RB 炉心は、いずれも Np-237 に対する感度係数がある以外は BFS-67-1R 炉心とほぼ同程度の感度を示している。Np-237 の捕獲反応に対する感度は他の燃料核種のものと同程度で有意な寄与を示しており、制御棒価値についても Np 装荷炉心の核設計精度の向上に反映する上で有効なデータであると言える。

Table 3.1 70 群炉定数と縮約後 (18 群) のエネルギー群構造

Group		Upper energy	Lower energy	Lethargy Width	Group		Upper energy	Lower energy	Lethargy Width
18G	70G				18G	70G			
1	1	10.0 (MeV)	7.7880 (MeV)	0.250	15	38	961.12 (eV)	748.52 (eV)	0.250
	2	7.7880	6.0653	0.250		39	748.52	582.95	0.250
2	3	6.0653	4.7237	0.250		40	582.95	454.00	0.250
	4	4.7237	3.6788	0.250	16	41	454.00	353.58	0.250
3	5	3.6788	2.8650	0.250		42	353.58	275.36	0.250
	6	2.8650	2.2313	0.250		43	275.36	214.45	0.250
4	7	2.2313	1.7377	0.250	17	44	214.45	167.02	0.250
	8	1.7377	1.3534	0.250		45	167.02	130.07	0.250
5	9	1.3534	1.0540	0.250		46	130.07	101.30	0.250
	10	1.0540	0.82085	0.250	18	47	101.30	78.893	0.250
6	11	0.82085	0.63928	0.250		48	78.893	61.442	0.250
	12	0.63928	0.49787	0.250		49	61.442	47.851	0.250
	13	0.49787	0.38774	0.250		50	47.851	37.267	0.250
7	14	0.38774	0.30197	0.250		51	37.267	29.023	0.250
	15	0.30197	0.23518	0.250		52	29.023	22.603	0.250
	16	0.23518	0.18316	0.250		53	22.603	17.603	0.250
8	17	0.18316	0.14264	0.250		54	17.603	13.710	0.250
	18	0.14264	0.11109	0.250		55	13.710	10.677	0.250
	19	0.11109 (MeV)	0.086517 (MeV)	0.250		56	10.677	8.3153	0.250
9	20	86.517 (KeV)	67.379 (KeV)	0.250		57	8.3153	6.4760	0.250
	21	67.379	52.475	0.250		58	6.4760	5.0435	0.250
	22	52.475	40.868	0.250		59	5.0435	3.9279	0.250
10	23	40.868	31.828	0.250		60	3.9279	3.0590	0.250
	24	31.828	24.788	0.250	61	3.0590	2.3824	0.250	
	25	24.788	19.305	0.250	62	2.3824	1.8554	0.250	
11	26	19.305	15.034	0.250	63	1.8554	1.4450	0.250	
	27	15.034	11.709	0.250	64	1.4450	1.1254	0.250	
	28	11.709	9.1188	0.250	65	1.1254	0.87642	0.250	
12	29	9.1188	7.1017	0.250	66	0.87642	0.68256	0.250	
	30	7.1017	5.5308	0.250	67	0.68256	0.53158	0.250	
	31	5.5308	4.3074	0.250	68	0.53158	0.41399	0.250	
13	32	4.3074	3.3546	0.250	69	0.41399	0.32242	0.250	
	33	3.3546	2.6126	0.250	70	0.32242 (eV)	10 <sup>-5</sup> (eV)	10.65	
	34	2.6126	2.0347	0.250					
14	35	2.0347	1.5846	0.250					
	36	1.5846	1.2341	0.250					
	37	1.2341 (KeV)	0.96112 (KeV)	0.250					

Table 3.2 BFS-67-1R と-2R の臨界性に対する感度係数

		BFS-67-1R KEFF																	UNIT: 1.0E-4	
NUCL.	REACTION	TOTAL	18G	17G	16G	15G	14G	13G	12G	11G	10G	9G	8G	7G	6G	5G	4G	3G	2G	1G
U-235	CAPTURE	-518	-8	-9	-17	-33	-58	-23	-42	-52	-64	-72	-65	-43	-23	-6	-3	0	0	0
U-235	NU	4986	35	40	91	190	347	163	290	400	494	592	618	584	491	221	205	148	59	18
U-235	FISSION	3050	17	20	44	97	188	91	168	243	308	374	391	372	318	144	130	94	39	12
U-235	ELAS.SCT	42	0	0	0	0	0	0	0	2	4	6	8	9	7	2	2	2	0	0
U-235	INEL.SCT	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	2	-4	-7	-2	0
U-235	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U-235	MU-AVE.	-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-3	-5	-2	-4	-5	-3
U-238	CAPTURE	-2077	-11	-16	-29	-86	-153	-110	-197	-281	-324	-287	-200	-164	-138	-53	-21	-6	-1	0
U-238	NU	1352	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	42	516	485	223	83
U-238	FISSION	862	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	28	327	303	147	55
U-238	ELAS.SCT	574	0	0	0	2	13	1	11	29	49	86	103	108	100	27	23	16	5	1
U-238	INEL.SCT	-116	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-3	9	40	17	-70	-80	-22	-6
U-238	N2N	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
U-238	MU-AVE.	-300	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-6	-17	-38	-66	-28	-44	-58	-34	-8
PU-239	CAPTURE	-257	-1	-2	-9	-22	-39	-17	-28	-29	-29	-27	-24	-18	-9	-2	-1	0	0	0
PU-239	NU	3581	5	10	28	82	148	61	132	206	301	406	466	510	501	238	234	167	68	18
PU-239	FISSION	2489	2	5	17	53	100	42	92	146	214	287	325	354	350	167	160	114	48	13
PU-239	ELAS.SCT	6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	1	0	0	0	0	0	0
PU-239	INEL.SCT	-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3	-3	-1	0	0
PU-239	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PU-239	MU-AVE.	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1	0	0

		BFS-67-2R KEFF																	UNIT: 1.0E-4	
NUCL.	REACTION	TOTAL	18G	17G	16G	15G	14G	13G	12G	11G	10G	9G	8G	7G	6G	5G	4G	3G	2G	1G
U-235	CAPTURE	-515	-7	-9	-16	-33	-57	-23	-42	-52	-64	-72	-65	-43	-23	-6	-3	0	0	0
U-235	NU	4954	35	39	90	188	344	162	287	397	490	589	615	581	488	220	204	148	59	18
U-235	FISSION	3036	17	20	44	96	187	90	167	241	307	372	390	371	317	144	129	93	39	12
U-235	ELAS.SCT	41	0	0	0	0	0	0	0	2	4	6	8	8	7	2	2	2	0	0
U-235	INEL.SCT	-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	1	-4	-7	-3	0
U-235	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U-235	MU-AVE.	-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-3	-5	-2	-4	-5	-3	0
U-238	CAPTURE	-2022	-11	-15	-28	-82	-146	-107	-191	-272	-315	-281	-196	-161	-136	-53	-21	-6	-1	0
U-238	NU	1342	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	42	512	481	221	83
U-238	FISSION	856	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	27	325	301	146	55
U-238	ELAS.SCT	563	0	0	0	2	12	1	10	28	48	84	101	106	99	27	23	16	5	1
U-238	INEL.SCT	-132	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-4	9	38	13	-74	-83	-23	-6
U-238	N2N	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
U-238	MU-AVE.	-298	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-6	-17	-37	-65	-28	-44	-58	-34	-8
PU-239	CAPTURE	-241	-1	-2	-7	-19	-35	-16	-26	-28	-28	-26	-23	-18	-9	-2	-1	0	0	0
PU-239	NU	3544	4	9	25	74	139	58	127	201	296	402	465	510	501	240	237	169	68	19
PU-239	FISSION	2480	2	5	16	49	95	40	90	144	213	287	327	356	351	168	161	115	48	13
PU-239	ELAS.SCT	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0
PU-239	INEL.SCT	-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3	-4	-1	0	0
PU-239	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PU-239	MU-AVE.	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1	0	0
NP-237	CAPTURE	-61	0	0	0	-3	-6	-2	-5	-7	-10	-11	-9	-6	-2	0	0	0	0	0
NP-237	NU	75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	19	17	18	13	5	1
NP-237	FISSION	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12	11	11	8	3	1
NP-237	ELAS.SCT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NP-237	INEL.SCT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NP-237	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NP-237	MU-AVE.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 3.3 BFS-67-1R と-2R の Na ボイド反応度に対する感度係数

BFS-67-1R Na VOID REACTIVITY																		UNIT:1.0E-4		
NUCL.	REACTION	TOTAL	18G	17G	16G	15G	14G	13G	12G	11G	10G	9G	8G	7G	6G	5G	4G	3G	2G	1G
U-235	CAPTURE	-34	31	54	129	286	286	0	53	39	-73	-226	-250	-227	-105	-21	-8	-2	0	0
U-235	NU	4744	-131	-227	-698	-1680	-1858	19	-404	-372	478	1681	2072	2685	1809	545	322	330	128	45
U-235	FISSION	2792	-63	-114	-343	-885	-1078	16	-252	-254	266	1000	1209	1581	1043	292	131	156	65	22
U-235	ELAS.SCT	205	0	-1	-2	-12	-16	-1	-8	-22	-12	21	45	95	70	17	13	13	4	1
U-235	INEL.SCT	-62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4	-2	16	1	-27	-33	-11	-2
U-235	N2N	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
U-235	MU-AVE.	-209	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-8	-37	-51	-19	-22	-40	-23	-7
U-238	CAPTURE	19686	112	436	1274	5100	8891	-1358	2115	4143	3066	-297	291	-1669	-1488	-681	-146	-85	-16	-2
U-238	NU	12820	0	0	0	-11	-6	0	0	-1	-1	0	0	4	60	519	2944	5493	2686	1133
U-238	FISSION	7691	0	0	0	-6	-3	0	0	0	0	0	0	2	39	338	1655	3254	1724	689
U-238	ELAS.SCT	2169	-4	-31	-68	-334	-818	111	-118	-627	-728	254	-226	1743	1757	546	272	301	109	30
U-238	INEL.SCT	-2455	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-154	-159	151	716	205	-1398	-1376	-286	-154
U-238	N2N	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56
U-238	MU-AVE.	-4762	0	0	0	1	3	0	1	10	24	-24	29	-621	-1151	-576	-525	-1078	-653	-202
PU-239	CAPTURE	15195	100	388	1663	4096	6904	-1372	983	1533	1061	104	334	-348	-170	-58	-14	-9	0	0
PU-239	NU	-34861	-453	-1511	-5070	-15237	-26586	6657	-4281	-9892	-9985	-631	-6230	10087	11487	7002	2779	4471	1933	599
PU-239	FISSION	-21498	-236	-874	-3137	-9843	-18082	4593	-2851	-6782	-6839	-260	-4245	7137	8319	5005	1809	3020	1369	399
PU-239	ELAS.SCT	-143	0	-3	-10	-64	-154	25	-13	-109	-152	-18	-147	155	167	68	36	52	19	5
PU-239	INEL.SCT	-179	0	0	0	0	0	0	-1	-6	-15	-12	-23	17	91	23	-101	-112	-30	-10
PU-239	N2N	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
PU-239	MU-AVE.	-612	0	0	0	0	0	0	0	2	6	0	30	-65	-127	-83	-68	-169	-104	-34
OXYGEN	CAPTURE	-255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-1	0	0	-152	-99
OXYGEN	ELAS.SCT	3480	-2	-30	-104	-355	-1163	24	168	-536	-755	-473	-616	1551	3351	1259	16	737	408	0
OXYGEN	INEL.SCT	-36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-36
OXYGEN	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OXYGEN	MU-AVE.	-1465	0	0	1	8	16	-2	3	13	14	-5	-1	210	-1117	-152	-102	-104	-200	-47
SODIUM	CAPTURE	1752	1	4	15	63	270	434	81	4	134	100	75	106	53	12	12	8	75	305
SODIUM	ELAS.SCT	672	0	-15	-71	-218	-1170	-1432	-1724	-1363	-718	629	1010	1483	416	891	1921	870	50	113
SODIUM	INEL.SCT	7320	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	369	686	2500	2216	985	564
SODIUM	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SODIUM	MU-AVE.	-58	0	0	0	2	10	-3	3	9	13	14	28	0	-24	-47	39	-64	-26	-12

BFS-67-2R Na VOID REACTIVITY																		UNIT:1.0E-4		
NUCL.	REACTION	TOTAL	18G	17G	16G	15G	14G	13G	12G	11G	10G	9G	8G	7G	6G	5G	4G	3G	2G	1G
U-235	CAPTURE	993	28	38	80	171	230	57	114	124	98	46	17	-14	-2	3	3	0	0	0
U-235	NU	-9290	-127	-167	-442	-1009	-1471	-399	-827	-1049	-917	-645	-530	-230	-401	-319	-381	-243	-104	-29
U-235	FISSION	-6377	-64	-87	-219	-535	-842	-225	-500	-677	-633	-505	-468	-299	-416	-283	-312	-202	-85	-25
U-235	ELAS.SCT	66	0	0	0	-4	-6	0	-4	-11	-8	5	15	35	27	6	5	5	1	0
U-235	INEL.SCT	-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-6	-10	-12	-7	1	11	6	1
U-235	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U-235	MU-AVE.	-77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3	-14	-20	-7	-8	-15	-8	-2
U-238	CAPTURE	8009	47	120	353	1494	2790	-47	1030	1739	1430	159	252	-510	-519	-250	-45	-29	-5	0
U-238	NU	3751	0	0	0	-3	-2	0	0	0	0	0	0	1	18	155	608	1734	862	378
U-238	FISSION	1991	0	0	0	-2	-1	0	0	0	0	0	0	0	11	89	202	944	527	221
U-238	ELAS.SCT	1234	0	-5	-10	-47	-57	-39	-61	-197	-242	27	-83	627	715	260	134	145	52	15
U-238	INEL.SCT	-477	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-54	-29	45	215	-56	-304	-274	16	-36
U-238	N2N	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27
U-238	MU-AVE.	-2128	0	0	0	0	0	0	0	3	8	-3	12	-224	-475	-276	-248	-515	-313	-97
PU-239	CAPTURE	4527	17	75	376	1100	2113	-294	362	533	386	25	114	-155	-85	-29	-7	-4	0	0
PU-239	NU	-9324	-86	-326	-1294	-4546	-9176	1825	-1908	-4004	-4269	-512	-2611	4176	5155	3245	1486	2246	976	299
PU-239	FISSION	-7141	-47	-199	-850	-3109	-6579	1337	-1381	-2920	-3119	-427	-1932	2877	3592	2250	952	1518	694	202
PU-239	ELAS.SCT	161	0	0	0	-3	3	-6	-4	-23	-37	0	-38	71	87	40	25	32	11	3
PU-239	INEL.SCT	-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	10	27	3	-26	-30	-4	-3
PU-239	N2N	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
PU-239	MU-AVE.	-370	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	8	-29	-67	-49	-46	-104	-64	-20
NP-237	CAPTURE	4073	6	34	172	717	1957	-589	170	541	606	154	350	-27	4	-18	-2	-2	0	0
NP-237	NU	1925	0	0	-2	-8	-31	9	-4	-14	-21	-7	-37	10	663	551	117	422	206	71
NP-237	FISSION	1285	0	0	-1	-5	-21	6	-3	-10	-15	-5	-26	6	456	372	71	274	141	45
NP-237	ELAS.SCT	72	0	0	0	2	6	-3	1	0	-1	6	-3	15	22	10	6	8	3	0
NP-237	INEL.SCT	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	12	32	0	-6	-14	-5	-3
NP-237	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NP-237	MU-AVE.	-85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-6	-19	-14	-11	-20	-12	-4
OXYGEN	CAPTURE	-94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-57	-37
OXYGEN	ELAS.SCT	2018	0	-5	-16	-62	-205	-68	-19	-171	-207	-127	-111	567	1021	581	219	401	213	7
OXYGEN	INEL.SCT	-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-10
OXYGEN	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OXYGEN	MU-AVE.	-690	0	0	0	1	0	0	1	4	5	0	0	78	-477	-76	-50	-53	-100	-23
SODIUM	CAPTURE	654	0	0	3	17	83	142	28	1	52	39	31	45	23	5	5	3	35	142
SODIUM	ELAS.SCT	5095	0	-3	-14	-37	-220	-466	-223	-65	188	762	911	1245	884	786	893	386	16	52
SODIUM	INEL.SCT	4324	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	584	680	1200	1111	478	271
SODIUM	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SODIUM	MU-AVE.	-17	0	0	0	0	1	1	1	2	3	3	9	-2	-21	-20	32	-16	-6	-4

Table 3.4 BFS-67-1R と-2R の制御棒価値に対する感度係数

		BFS-67-1R CONTROL ROD WORTH																	UNIT:1.0E-4	
NUCL.	REACTION	TOTAL	18G	17G	16G	15G	14G	13G	12G	11G	10G	9G	8G	7G	6G	5G	4G	3G	2G	1G
U-235	CAPTURE	1352	23	26	46	84	149	65	112	133	162	182	167	111	62	18	10	2	0	0
U-235	NU	-16431	-107	-120	-260	-510	-952	-483	-830	-1155	-1485	-1883	-2087	-2074	-1834	-876	-827	-616	-253	-79
U-235	FISSION	-11346	-56	-65	-133	-275	-546	-284	-510	-757	-1019	-1336	-1511	-1533	-1386	-660	-598	-437	-184	-56
U-235	ELAS. SCT	10	0	0	0	0	0	0	0	1	2	5	2	0	0	0	0	0	0	0
U-235	INEL. SCT	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4	-10	-18	-24	-7	26	44	19	3
U-235	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U-235	MU-AVE.	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	2	3	2	0
U-238	CAPTURE	1004	31	33	38	17	14	127	105	88	75	99	88	95	106	50	26	10	2	0
U-238	NU	-3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-8	-90	-1118	-1090	-515	-190
U-238	FISSION	-2335	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-7	-77	-890	-826	-394	-141
U-238	ELAS. SCT	-102	0	3	4	1	-30	3	-23	-37	-30	7	14	16	-10	-2	-5	-9	-3	-1
U-238	INEL. SCT	1243	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-22	-7	15	16	96	452	481	177	35
U-238	N2N	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2
U-238	MU-AVE.	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-4	9	6	19	39	25	7
PU-239	CAPTURE	-1439	-1	-10	-50	-144	-251	-103	-175	-183	-172	-138	-105	-71	-29	-5	-2	0	0	0
PU-239	NU	9334	7	35	140	458	779	279	600	853	1067	1154	1052	1004	854	348	335	247	96	26
PU-239	FISSION	4719	3	18	80	267	466	166	354	481	562	544	430	409	388	164	171	139	60	17
PU-239	ELAS. SCT	74	0	0	0	0	-3	-1	-4	-5	0	13	20	23	17	5	5	3	1	0
PU-239	INEL. SCT	110	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	2	9	29	21	22	19	9	0
PU-239	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PU-239	MU-AVE.	-59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-4	-8	-12	-5	-9	-12	-7	-1
BORON-10	CAPTURE	5135	0	-1	-5	-24	-30	9	82	299	590	974	1147	970	607	135	214	106	52	10
BORON-10	ELAS. SCT	260	0	0	0	-3	-8	-2	-7	-10	-4	14	33	79	85	38	25	18	1	1
BORON-10	INEL. SCT	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	5	2	1
BORON-10	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BORON-10	MU-AVE.	6	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0
		BFS-67-2R CONTROL ROD WORTH																	UNIT:1.0E-4	
NUCL.	REACTION	TOTAL	18G	17G	16G	15G	14G	13G	12G	11G	10G	9G	8G	7G	6G	5G	4G	3G	2G	1G
U-235	CAPTURE	1398	24	27	48	89	155	67	115	137	167	188	172	115	63	18	10	3	0	0
U-235	NU	-16724	-110	-124	-271	-532	-982	-493	-847	-1177	-1508	-1910	-2116	-2105	-1861	-889	-839	-624	-256	-80
U-235	FISSION	-11482	-58	-67	-138	-285	-559	-288	-518	-765	-1027	-1345	-1523	-1548	-1403	-668	-605	-442	-186	-57
U-235	ELAS. SCT	5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	4	1	0	-1	-1	0	0	0	0
U-235	INEL. SCT	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4	-10	-19	-26	-8	25	44	19	3
U-235	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U-235	MU-AVE.	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	2	0
U-238	CAPTURE	1769	33	41	59	95	128	180	204	210	188	174	125	119	120	54	27	10	2	0
U-238	NU	-3086	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-8	-93	-1147	-1116	-528	-194
U-238	FISSION	-2383	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-7	-79	-908	-842	-403	-144
U-238	ELAS. SCT	-195	0	3	4	0	-34	5	-25	-50	-51	-22	-4	3	-12	0	-2	-7	-3	0
U-238	INEL. SCT	1087	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-32	-23	-5	-4	55	423	463	175	35
U-238	N2N	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
U-238	MU-AVE.	79	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-2	8	3	12	31	20	6
PU-239	CAPTURE	-1157	0	-3	-24	-85	-173	-77	-141	-157	-156	-130	-104	-71	-29	-5	-2	0	0	0
PU-239	NU	9134	1	15	79	314	623	249	558	827	1073	1193	1119	1064	893	368	359	267	104	28
PU-239	FISSION	4928	0	8	50	202	407	164	361	508	615	616	508	469	418	177	187	154	65	19
PU-239	ELAS. SCT	52	0	0	0	-1	-4	-1	-5	-9	-6	6	16	21	18	6	6	4	1	0
PU-239	INEL. SCT	90	0	0	0	0	0	0	0	-3	-2	-1	0	6	23	18	21	19	9	0
PU-239	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PU-239	MU-AVE.	-64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3	-8	-13	-6	-10	-14	-8	-2
NP-237	CAPTURE	-1190	0	-3	-14	-65	-136	-56	-120	-170	-200	-191	-129	-73	-27	-4	-2	0	0	0
NP-237	NU	557	0	0	0	0	1	0	1	2	4	5	7	16	140	117	120	95	38	11
NP-237	FISSION	334	0	0	0	0	1	0	0	1	2	3	3	8	79	70	73	60	26	8
NP-237	ELAS. SCT	-49	0	0	0	-1	-3	0	-4	-9	-11	-11	-7	-3	0	0	0	0	0	0
NP-237	INEL. SCT	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	14	7	5	3	1	0
NP-237	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NP-237	MU-AVE.	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0
BORON-10	CAPTURE	5368	0	0	-1	-13	-20	7	69	272	569	978	1202	1032	665	156	252	126	62	12
BORON-10	ELAS. SCT	347	0	0	0	-1	-5	-1	-5	-8	-2	18	40	92	113	54	30	20	1	1
BORON-10	INEL. SCT	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	6	6	2	2	2
BORON-10	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BORON-10	MU-AVE.	6	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0

Table 3.5 BFS-67-3R と-3RB の制御棒価値に対する感度係数

		BFS-67-3R CONTROL ROD WORTH																	UNIT:1.0E-4	
NUCL.	REACTION	TOTAL	18G	17G	16G	15G	14G	13G	12G	11G	10G	9G	8G	7G	6G	5G	4G	3G	2G	1G
U-235	CAPTURE	1380	23	27	47	87	152	66	114	136	165	186	170	113	63	18	10	3	0	0
U-235	NU	-16633	-109	-123	-267	-523	-970	-490	-842	-1170	-1501	-1902	-2108	-2097	1854	-885	-836	-622	-255	-79
U-235	FISSION	-11444	-57	-66	-136	-281	-554	-287	-515	-763	-1025	-1343	-1521	-1545	1399	-666	-603	-441	-185	-57
U-235	ELAS.SCT	8	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	2	0	-1	0	0	0	0	0
U-235	INEL.SCT	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4	-10	-19	-25	-8	25	44	19
U-235	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U-235	MU-AVE.	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	2	3	2	0
U-238	CAPTURE	1411	32	38	50	61	78	156	159	154	134	137	105	105	112	52	26	10	2	0
U-238	NU	-3049	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-8	-92	-1132	1103	-522	-192
U-238	FISSION	-2360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-7	-78	-899	-835	-399	-142
U-238	ELAS.SCT	-166	0	3	4	0	-33	4	-24	-46	-44	-12	3	8	-12	-2	-4	-8	-3	0
U-238	INEL.SCT	1148	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-28	-17	3	4	73	434	469	175	35
U-238	N2N	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
U-238	MU-AVE.	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-3	9	4	16	36	23	7
PU-239	CAPTURE	-1280	0	-5	-34	-110	-207	-89	-156	-169	-163	-134	-105	-72	-29	-5	-2	0	0	0
PU-239	NU	9297	3	23	105	381	700	267	582	843	1077	1185	1104	1049	882	361	350	258	100	27
PU-239	FISSION	4903	1	13	65	236	442	169	363	501	597	591	483	450	410	173	181	147	63	18
PU-239	ELAS.SCT	61	0	0	0	-1	-4	-1	-4	-7	-3	9	18	22	17	5	5	4	1	0
PU-239	INEL.SCT	95	0	0	0	0	0	0	0	-2	-1	-1	0	7	26	19	21	18	8	0
PU-239	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PU-239	MU-AVE.	-59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-3	-8	-12	-6	-9	-12	-7	-1
NP-237	CAPTURE	-659	0	-2	-12	-45	-86	-34	-68	-92	-105	-98	-65	-36	-13	-2	-1	0	0	0
NP-237	NU	267	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	3	8	68	57	58	45	18	5
NP-237	FISSION	160	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	4	39	34	35	29	12	4
NP-237	ELAS.SCT	-22	0	0	0	0	-2	0	-2	-4	-5	-5	-3	-1	0	0	0	0	0	0
NP-237	INEL.SCT	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	8	3	2	1	0	0
NP-237	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NP-237	MU-AVE.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BORON-10	CAPTURE	5251	0	0	-3	-17	-24	8	74	280	576	975	1180	1005	638	145	232	115	56	11
BORON-10	ELAS.SCT	307	0	0	0	-2	-6	-1	-6	-9	-3	16	37	86	100	46	28	19	1	1
BORON-10	INEL.SCT	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5	2	2	2
BORON-10	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BORON-10	MU-AVE.	6	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0
-----																				
		BFS-67-3RB CONTROL ROD WORTH																	UNIT:1.0E-4	
NUCL.	REACTION	TOTAL	18G	17G	16G	15G	14G	13G	12G	11G	10G	9G	8G	7G	6G	5G	4G	3G	2G	1G
U-235	CAPTURE	1368	23	26	47	87	151	66	113	135	164	184	168	112	62	18	10	2	0	0
U-235	NU	-16492	-109	-122	-266	-522	-965	-487	-835	-1159	-1486	-1883	-2087	-2077	-1838	-878	-829	-617	-253	-79
U-235	FISSION	-11349	-57	-66	-136	-280	-551	-285	-511	-756	-1014	-1329	-1506	-1531	-1388	-662	-599	-438	-184	-56
U-235	ELAS.SCT	7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	4	2	0	-1	0	0	0	0	0
U-235	INEL.SCT	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4	-10	-19	-25	-8	25	44	19	3
U-235	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U-235	MU-AVE.	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	2	0
U-238	CAPTURE	1575	32	39	54	77	103	166	180	183	162	154	112	109	114	52	26	10	2	0
U-238	NU	-3063	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-8	-92	-1137	-1108	-525	-193
U-238	FISSION	-2370	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-7	-78	-903	-838	-401	-143
U-238	ELAS.SCT	-235	0	3	4	-1	-34	4	-25	-52	-57	-30	-11	-3	-16	-2	-4	-8	-3	0
U-238	INEL.SCT	1098	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-31	-22	-4	-2	61	424	463	174	35
U-238	N2N	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
U-238	MU-AVE.	101	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	12	5	16	36	23	7
PU-239	CAPTURE	-1194	0	-4	-28	-96	-186	-82	-145	-158	-155	-130	-103	-71	-29	-5	-2	0	0	0
PU-239	NU	9062	2	18	91	346	652	255	560	820	1059	1176	1102	1041	868	353	342	252	98	27
PU-239	FISSION	4841	1	11	58	219	421	165	358	499	602	601	493	451	400	167	174	143	60	18
PU-239	ELAS.SCT	48	0	0	0	-1	-4	-1	-5	-8	-6	5	15	20	17	5	6	4	1	0
PU-239	INEL.SCT	88	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-1	0	6	23	18	20	18	8	0
PU-239	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PU-239	MU-AVE.	-59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3	-7	-12	-6	-10	-13	-7	-1	-1
NP-237	CAPTURE	-872	0	-3	-14	-56	-108	-42	-86	-119	-141	-135	-92	-53	-19	-3	-1	0	0	0
NP-237	NU	383	0	0	0	0	1	0	1	2	2	4	5	11	96	81	82	64	26	8
NP-237	FISSION	221	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	5	53	47	48	40	17	5
NP-237	ELAS.SCT	-21	0	0	0	0	-2	0	-2	-4	-5	-5	-3	0	0	0	0	0	0	0
NP-237	INEL.SCT	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	9	4	3	2	1	0
NP-237	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NP-237	MU-AVE.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BORON-10	CAPTURE	5169	0	0	-2	-14	-20	6	64	253	538	940	1164	1006	650	151	243	120	59	11
BORON-10	ELAS.SCT	354	0	0	0	-1	-5	-1	-5	-7	-1	19	42	95	113	52	30	21	1	1
BORON-10	INEL.SCT	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	6	2	2
BORON-10	N2N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BORON-10	MU-AVE.	5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0



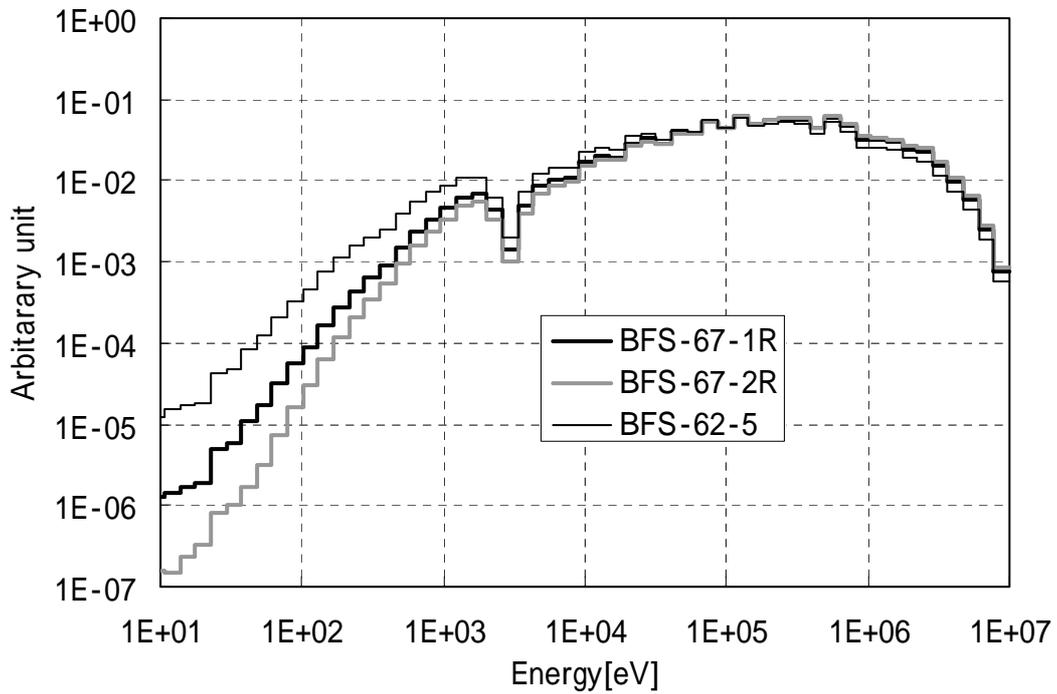


Fig.3.2 中性子スペクトルの比較

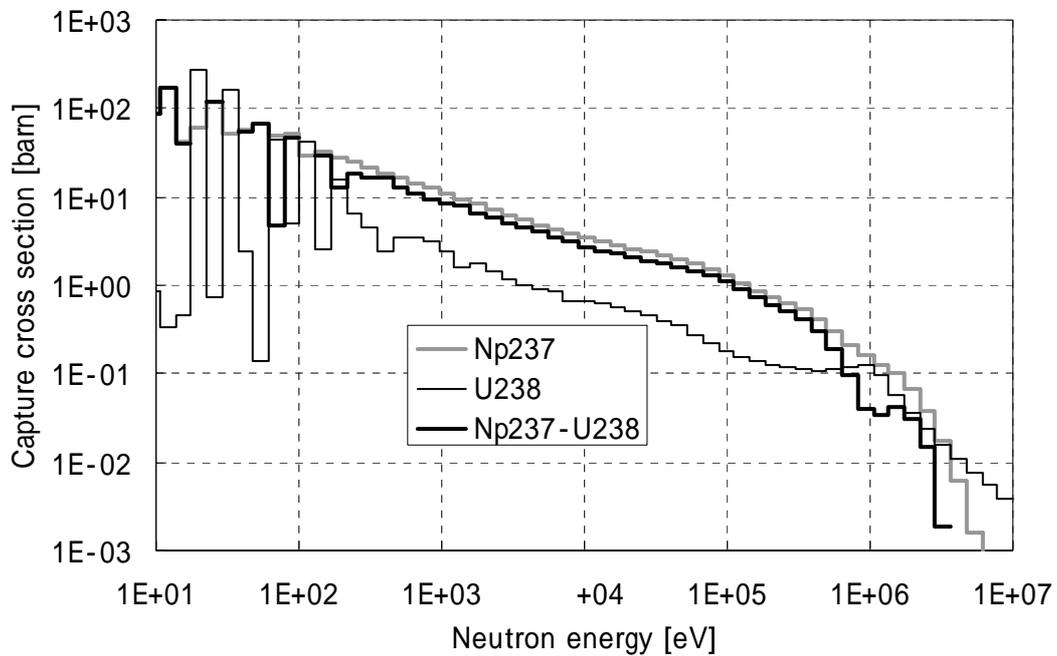


Fig.3.3 Np-237 と U-238 の捕獲断面積の比較

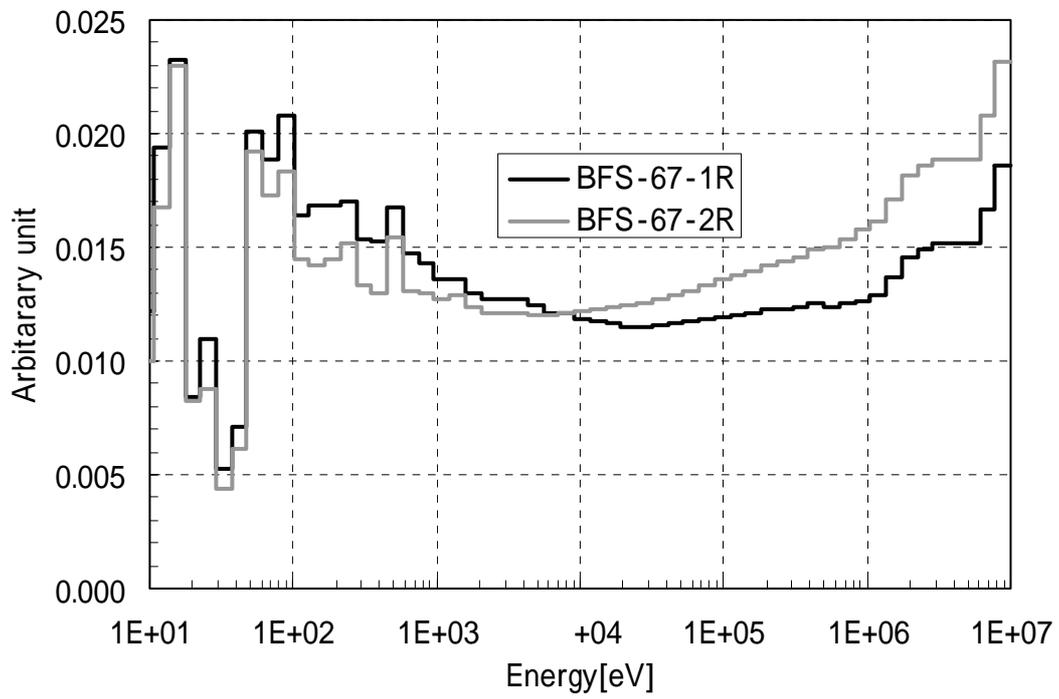


Fig.3.4 随伴中性子スペクトルの比較

## 第4章 BFS-67 臨界実験の解析

BFS-67 の4つの炉心 (BFS-67-1R、-2R、-3R、-3BR) で測定された主要核特性 (臨界性、Na ボイド反応度、制御棒価値、炉心中心反応率比) の解析手法及び結果を述べる。

### 4.1 解析手法

解析は BFS-62 体系での臨界実験解析<sup>[4]</sup>と同様、3次元 Hex-Z 体系の拡散計算結果を基準計算値とし、輸送補正などを適用して最確計算値を求めた。

#### 4.1.1 原子個数密度の算出

BFS-67 体系の実験情報には BFS-62 体系と同様ペレット内部の構造についての情報が存在しないため、以下の考え方に基づきミート部及びシェル部 (被覆) の高さ、密度を算出した。また、格子計算を1次元体系で実施する都合上、ペレットの側面部のシェル及びチューブ、SUS スティックをミート部を挟む上下領域に含めた。(プレートストレッチモデル、Fig.4.1)

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。

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。

参考までに Np 装荷領域 (LEZ 領域) の均質原子個数密度を Table 4.1 に示す。Np の装荷によって U238 の原子個数密度が減少し、その分 Np-237 の原子個数密度が加わっていることが確認できる。置換に伴い AL や Fe の密度も変化しているが核特性への影響は感度が小さく無視できる。

#### 4.1.2 格子計算

格子計算は燃料・非燃料ともに格子計算コード CASUP<sup>[3]</sup>を使用した。炉定数には高速炉用70群炉定数 JFS-3-J3.2R を用い、燃料を含むセル (ブランケットを除く) については1次元非均質計算を実施し、臨界バックリングを設定した。非均質セルのバックグラウンド断面積の算出には TONE の手法<sup>[5]</sup>を用いた。

#### 4.1.3 基準計算

体系計算は6角体系用拡散計算コード MINIHEx<sup>[7]</sup>を用いてエネルギー18群3次元 Hex-Z 体系で実施した。燃料領域の拡散係数には Benoist の異方性拡散係数<sup>[6]</sup>を用い、スペクトルには領域依存性を考慮した。エネルギー70群から18群への縮約には2次元 RZ 拡散計算で求めたスペクトルを用いた。反応度の単位変換に用いる実効遅発中性子割合は、摂動計算コード PERKY<sup>[3]</sup>に Tuttle(1979)の Yield、Saphier(1977)の遅発中性子スペクトル、

Keepin(1965)の比率、崩壊定数<sup>[3]</sup>を用いて評価した。

Na ボイド反応度については PERKY を用いた厳密摂動計算で評価した。

制御棒値については制御棒挿入前後の実効増倍率から反応度を算出した。制御棒の挿入モデルについては Fig.4.2 に示す SUPPORT 部を無視したモデルを使用した。この影響については無視できることを基準計算値で確認している。

反応率比については拡散計算で得られた炉心中心位置での中性子スペクトルにその位置で使用された燃料セルのセル平均実効マイクロ断面積を乗じ、エネルギー群で総和した反応率から評価した。

#### 4.1.4 補正計算

補正值としては、輸送・メッシュ効果と次世代炉定数効果を考慮した。反応率比については加えてセルフファクターも考慮した。臨界性については輸送・メッシュ効果における輸送効果、メッシュ効果それぞれの寄与も評価した。Na ボイド反応度については漏洩項、非漏洩項に区分して補正した。

##### (1)輸送・メッシュ効果

臨界性については、3次元 Hex-Z 体系計算によって、その他の核特性については2次元輸送計算コード TWOTRAN<sup>[3]</sup>を用いた2次元 RZ 計算によって輸送計算値を求めた。いずれの場合もエネルギー18群とし、約5cm/メッシュ、Pn 次数は0、スペクトルにはPu領域のものを全領域に適用した。輸送効果におけるメッシュ効果は無視できることを確認している。

Sn 次数については、臨界性、反応率比についてはS4を、その他の核特性については BFS-67-1R 炉心でのパラメータサーベイに基づき S8 を無限メッシュ、無限 Sn の結果に相当するものとした。

輸送・メッシュ効果を算出するための拡散計算値には Benoist の等方拡散係数、Pu 領域のスペクトルを使用した結果を使用した。

輸送・メッシュ効果は得られた輸送計算値と拡散計算値による核特性の比によって評価した。

臨界性については、輸送・メッシュ効果の内訳も評価した。3次元 Hex-Z と Tri-Z の拡散計算を実施し、両者の結果から無限メッシュ相当値を算出し、メッシュ効果を評価した。各体系計算ともに、エネルギー群(18群) 拡散係数(Benoist の等方拡散係数)

スペクトル(Pu領域のものを全炉心に適用)とした。輸送効果は輸送・メッシュ効果からメッシュ効果を差し引いて評価した。

##### (3)セルフファクター

反応率比のみに考慮するものである。対象核種がセル内に均質に薄く分布している場合と、燃料セル内のペレット構成に従って分布している場合の2種類のセル平均反応率を CASUP によって評価し、それらの比をセルフファクターとする。前者は核分裂計数管に

よる測定値に、後者は基準計算値に対応する。その比で基準計算値を補正することによって測定値に対応する反応率が得られる。

なお、反応率比がウラン箔で測定されている場合は、箔が局部的に設置されるため、軸方向に均質分布しているとは言い難いが、Fig.2.5のように箔は複数位置に設置されているため、セル全体に箔が挿入されているものと見なし、核分裂計数管に対する場合と同じセルファクターを適用した。

#### (4)次世代炉定数効果

次世代炉定数は41keV以下を超微細群(91500群)炉定数、41keV以上を遮へい解析用炉定数VITAMIN-Jの175群構造で扱うことにより、断面積の共鳴構造等を正確に考慮することができる炉定数である<sup>[8]</sup>。

臨界性については3次元Hex-Z拡散計算を、その他の核特性については2次元RZ拡散計算によって次世代炉定数を用いた計算値を求めた。いずれの場合もエネルギー群は175群である。燃料領域の拡散係数にはBenoistの非等方拡散係数を用い、スペクトルには領域依存性を考慮した。次世代炉定数を用いた場合とJFS-3-J3.2Rを用いた場合の評価結果の比を次世代炉定数効果とした。

## 4.2 解析結果

### 4.2.1 臨界性

Table 4.2に臨界性の解析結果を示す。C/E値は平均0.995で炉心間のばらつきも少ない。補正係数についても各炉心で同程度の値となっている。

次世代炉定数効果は0.1%未満と小さい。参考までにBFS-62-5炉心では約0.3%である。BFS-67体系では中性子スペクトルが硬いためエネルギー10keV以下の寄与が小さく、共鳴の扱いを改善する効果が現れにくいものと考えられる。

### 4.2.2 Naボイド反応度

Table 4.3にNaボイド反応度の解析結果を示す。BFS-67-2R炉心についての解析値は実験値と実験誤差の範囲で一致しているが、BFS-67-1R炉心では12%の過大評価となった。過大評価の原因としては、反応度が小さく、かつ漏洩成分と非漏洩成分の絶対値差が小さいことが考えられる。解析値と実験値の差で見ると、BFS-67-1R炉心では0.8cent、BFS-67-2R炉心では0.2centとともに1cent以内に収まっている。

Npの装荷(BFS-67-1RからBFS-67-2Rへの変化)によってボイド反応度の実験値は約3倍(反応度差で約+13cents)になっている。Table 4.4に解析値でボイド反応度の内訳を示すが、散乱項(散乱の減少に伴うスペクトルの硬化による寄与)に差異が現れていることが分かる。その差異の分析としてFig.4.3には散乱項のエネルギー毎の内訳を示すが、BFS-67-2Rでは30keV以上での正の効果が大きく、30keV以下での負の効果が小さくなっており、中性子スペクトルがNpの装荷により硬くなることが影響していることが分かる。

Np装荷に伴うボイド反応度の変化13centsに対し解析精度の炉心間の差異は1cent以内

であり、Np を装荷しても Na ボイド反応度の解析精度に影響は現れないといえる。

#### 4.2.3 制御棒価値

Table 4.5 に結果をまとめて、Table 4.6~4.9 には炉心毎に解析結果の詳細を示す。補正值のうち次世代炉定数効果については BFS-67-1R 炉心の結果で 1.00 (効果なし) と得られたため、炉心依存性も無視できるものと判断し、その他の炉心についても適用していない。

濃縮  $B_4C$  の制御棒については実験値と実験誤差約 5%以内で一致し、Np 装荷に伴う解析精度の差異も現れていない。一方、天然  $B_4C$  の制御棒については最大 10%の過大評価となっている。炉心毎の C/E 値の平均及び分散を見ると、天然  $B_4C$  の結果は濃縮  $B_4C$  のものに比べて概して過大評価となっていることが確認できる。炉心間のばらつきはいずれの場合も数%以内であり、Np 装荷の影響は現れていないことが分かる。

#### 4.2.4 炉心中心反応率比

Table 2.1 に示した 14 種類の反応率比のうち、主要な核種である 11 種類について解析した。

Fig.4.4 には各炉心の C/E 値をまとめて、Table 4.10~4.12 には炉心毎に解析結果の詳細を示す。輸送・メッシュ効果および次世代炉定数効果は、BFS-67-1R 炉心で評価した結果、効果が小さいためその他の炉心では考慮していない。

Fig.4.4 より核分裂反応 (F28 など) の反応率比については C/E 値の 1.0 からのずれはほぼ実験誤差 (数%) の範囲にあることが分かる。捕獲反応 (C28 など) を含む反応率比については炉心によっては 5%を超えるずれが現れている。この原因としてはセルフアクターをセル全体に箔が挿入されていると見なして評価したことが考えられる。

Fig.4.5 及び 4.6 には Np の装荷に伴う反応率比の変化 (BFS-671R 炉心での反応率との差異) を実験値と解析値で比較した。

BFS-67-2R (Fig.4.5)、BFS-67-3BR (Fig.4.6) いずれの炉心の場合でも核分裂反応率比については Np 装荷に伴う変化を解析で再現できていることが確認できる。一方、捕獲反応を含む反応率比については解析値が差異を負側に評価する傾向があり、やはりセルフアクターに課題があることを示唆している。

Table 4.1 Np 装荷領域(LEZ 領域)の均質原子個数密度

核種	BFS-67-1R	BFS-67-2R	BFS-67-3R, -3BR	BFS-67-1Rからの変化	
				BFS-67-2R	BFS-67-3R, -3BR
U-235	2.1688E-05	1.8086E-05	2.0200E-05	0.0000	0.0000
U-238	5.1946E-03	4.3295E-03	4.8374E-03	-0.0009	-0.0004
Pu-239	1.1728E-03	1.1766E-03	1.1714E-03	0.0000	0.0000
Pu-240	5.6803E-05	5.6988E-05	5.6737E-05	0.0000	0.0000
Pu-241	3.1081E-06	3.1183E-06	3.1046E-06	0.0000	0.0000
Np-237	0.0000E+00	8.4128E-04	4.1878E-04	0.0008	0.0004
H	3.2919E-06	3.3027E-06	3.2881E-06	0.0000	0.0000
C	2.6403E-04	2.5820E-04	2.6114E-04	0.0000	0.0000
O	1.0479E-02	1.0388E-02	1.0585E-02	-0.0001	0.0001
Na	6.8346E-03	6.8569E-03	6.8267E-03	0.0000	0.0000
Al	2.2230E-03	1.5664E-03	1.6285E-03	-0.0007	-0.0006
Ti	9.0267E-05	8.0158E-05	8.6144E-05	0.0000	0.0000
Cr	2.4135E-03	2.1431E-03	2.3032E-03	-0.0003	-0.0001
Mn	1.5112E-04	1.2980E-04	1.4242E-04	0.0000	0.0000
Fe	8.8344E-03	7.8627E-03	8.4372E-03	-0.0010	-0.0004
Ni	1.1287E-03	1.0023E-03	1.0771E-03	-0.0001	-0.0001
Ga	7.0924E-05	7.1156E-05	7.0842E-05	0.0000	0.0000
Si	8.4606E-05	8.4606E-05	8.4606E-05	0.0000	0.0000

(unit :  $10^{-24}/\text{cm}^3$ )

Table 4.2 臨界性の解析結果

	BFS-67-1R	BFS-67-2R	BFS-67-3R	BFS-67-3BR
基準計算値(3次元Hex-Z、18群、Benoist-D)	0.99160	0.99122	0.99153	0.99095
輸送計算値(3次元Hex-Z、18群)	0.99832	0.99782	0.99809	0.99753
等方拡散計算(3次元Hex-Z、18群、Disotropic)	0.99481	0.99427	0.99458	0.99402
径メッシュ増計算(3次元Tri-Z、18群、Benoist-D)	0.99075	同左	同左	同左
軸メッシュ増計算(3次元Tri-Z、18群、Benoist-D)	0.99096	同左	同左	同左
次世代炉定数計算値(3次元Hex-Z、175群、Benoist-D)	0.99212	0.99178	0.99209	0.99151
メッシュ補正	-0.00179	-0.00179	-0.00179	-0.00179
輸送補正	0.00530	0.00534	0.00531	0.00531
次世代炉定数効果	0.00052	0.00057	0.00056	0.00056
補正後計算値	0.99563	0.99533	0.99560	0.99502
実験値	1.00038	1.00034	1.00038	1.00048
C/E値	0.9912	0.9909	0.9911	0.9905
補正後C/E値	0.9953	0.9950	0.9952	0.9945
平均C/E値	0.9950 ± 0.0003			

Table 4.3 Na ボイド反応度の解析結果

( BFS-67-1R 炉心 )

	Non-Leakage ( k/kk')	Leakage ( k/kk')	Total ( k/kk')	Total( $\phi$ )	C/E value
Base calc. <sup>(*1)</sup>	6.19E-04	-2.32E-04	3.87E-04	7.1	1.14
Transport&mesh correction factor	1.02	0.87			
Transport calc. <sup>(*2)</sup>	6.35E-04	-1.99E-04			
Isotropic Diffusion calc. <sup>(*2)</sup>	6.23E-04	-2.28E-04			
UF correction factor	0.94	1.04			
UF constant 175g calc. <sup>(*3)</sup>	5.78E-04	-2.33E-04			
JFS-3-J3.2R 70g calc. <sup>(*3)</sup>	6.16E-04	-2.24E-04			
Corrected calc.	5.93E-04	-2.11E-04	3.82E-04	7.0	1.12
					Exp. Error
Experiment value				6.2	4.8%

( BFS-67-2R 炉心 )

	Non-Leakage ( k/kk')	Leakage ( k/kk')	Total ( k/kk')	Total( $\phi$ )	C/E value
Base calc. <sup>(*1)</sup>	1.21E-03	-2.60E-04	9.55E-04	17.6	0.94
Transport&mesh correction factor	1.03	0.86			
Transport calc. <sup>(*2)</sup>	1.24E-03	-2.15E-04			
Isotropic Diffusion calc. <sup>(*2)</sup>	1.21E-03	-2.51E-04			
UF correction factor	0.98	0.97			
UF constant 175g calc. <sup>(*3)</sup>	1.18E-03	-2.58E-04			
JFS-3-J3.2R 70g calc. <sup>(*3)</sup>	1.20E-03	-2.67E-04			
Corrected calc.	1.22E-03	-2.15E-04	1.01E-03	18.6	0.99
					Exp. Error
Experiment value				18.8	4.3%

(\*1)Hex-Z system,70groups,Benoist-D,Region X

(\*2)RZ system,70groups,Dave

(\*3)RZ system,175groups &amp; 70groups,Benoist-D,Region X

(\*4)Effective delayed neutron ratio, BFS-67-1R=5.48E-03, BFS-67-2R=5.42E-03

(\*5)Exact perturbation in calculation

Table 4.4 Na ボイド反応度の内訳<sup>\*1</sup>

CORE	非漏洩項					漏洩項	合計
	生成項	核分裂項	捕獲項	散乱項	小計		
BFS-67-1R	-0.00029	0.00009	0.00020	0.00062	0.00062	-0.00022	0.00039
BFS-67-2R	-0.00028	0.00009	0.00012	0.00127	0.00120	-0.00027	0.00093
差異 (2R-1R)	0.00002	0.00000	-0.00008	0.00065	0.00058	-0.00004	0.00054

\*1 : 基準計算値による評価

(unit: dk/kk')

Table 4.5 制御棒価値の解析結果まとめ

	炉心名	Absorber type and height of absorber column			
		B <sub>4</sub> C enr. (38.13cm)	B <sub>4</sub> C enr. (19.16cm)	B <sub>4</sub> C nat. (38.08cm)	B <sub>4</sub> C nat. (19.05cm)
実験値(\$)	BFS-67-1R	-2.16	-1.26	-0.88	-0.49
	BFS-67-2R	-2.06	-1.15	-0.79	-0.43
	BFS-67-3R	-2.10	-1.20	-0.81	-0.46
	BFS-67-3BR	-2.13	-1.20	-0.83	-0.46
基準計算値 (\$)	BFS-67-1R	-2.17	-1.24	-0.91	-0.49
	BFS-67-2R	-2.04	-1.18	-0.83	-0.47
	BFS-67-3R	-2.09	-1.22	-0.87	-0.49
	BFS-67-3BR	-2.06	-1.20	-0.85	-0.48
輸送・メッシュ効果	BFS-67-1R	0.99	1.00	1.01	1.02
	BFS-67-2R	0.97	0.98	1.00	1.00
	BFS-67-3R	0.98	0.99	1.01	1.02
	BFS-67-3BR	0.98	0.99	1.01	1.01
最確計算値 (\$)	BFS-67-1R	-2.14	-1.24	-0.93	-0.51
	BFS-67-2R	-1.97	-1.16	-0.84	-0.47
	BFS-67-3R	-2.05	-1.21	-0.88	-0.50
	BFS-67-3BR	-2.02	-1.19	-0.86	-0.49
C/E値	BFS-67-1R	0.99	0.98	1.06	1.03
	BFS-67-2R	0.96	1.01	1.06	1.10
	BFS-67-3R	0.97	1.01	1.08	1.10
	BFS-67-3BR	0.95	0.99	1.04	1.07
平均C/E値		0.97	1.00	1.06	1.08
C/E値分散		0.02	0.01	0.02	0.03

Table 4.6 制御棒価値の解析結果(BFS-67-1R)

	Absorber type and height of absorber column			
	B4C enr. (38.13cm)	B4C enr. (19.16cm)	B4C nat. (38.08cm)	B4C nat. (19.05cm)
Base calc. ( \$ ) <sup>(*1)</sup>	-2.17	-1.24	-0.914	-0.493
keff in CR withdraw	0.98964			
keff in CR inserted	0.97811	0.98303	0.98476	0.98700
Reactivity( k/kk')	-1.19E-02	-6.79E-03	-5.01E-03	-2.70E-03
Transport&mesh correction factor	0.99	1.00	1.01	1.02
Transport calc. <sup>(*2)</sup>				
keff in CR withdraw	0.99731			
keff in CR inserted	0.98432	0.98982	0.99210	0.99445
Reactivity( k/kk')	-1.32E-02	-7.59E-03	-5.26E-03	-2.88E-03
Isotropic Diffusion calc. <sup>(*2)</sup>				
keff in CR withdraw	0.99290			
keff in CR inserted	0.97990	0.98548	0.98781	0.99012
Reactivity( k/kk')	-1.34E-02	-7.58E-03	-5.19E-03	-2.83E-03
UF correction factor	1.00	1.00	1.00	1.01
UF constant 175g calc. <sup>(*3)</sup>				
keff in CR withdraw	0.99149			
keff in CR inserted	0.97757	0.98331	0.98595	0.98827
Reactivity( k/kk')	-1.44E-02	-8.39E-03	-5.67E-03	-3.29E-03
JFS-3-J3.2R 18g calc. <sup>(*3)</sup>				
keff in CR withdraw	0.99091			
keff in CR inserted	0.97694	0.98272	0.98538	0.98773
Reactivity( k/kk')	-1.44E-02	-8.40E-03	-5.66E-03	-3.25E-03
Corrected calc. ( \$ )	-2.14	-1.24	-0.928	-0.507
Experiment value ( \$ )	-2.16	-1.26	-0.879	-0.493
Exp. Error(%)	5.6	4.8	4.4	4.3
C/E	1.01	0.98	1.040	1.000
Final C/E	0.99	0.98	1.06	1.03

(\*1)Hex-Z system,18groups,Benoist-D,Region X

(\*2)RZ system,18groups,Dave

(\*3)RZ system,175groups&18groups,Benoist-D,Region X

(\*4)Effective delayed neutron ratio = 5.48E-03

Table 4.7 制御棒価値の解析結果(BFS-67-2R)

	Absorber type and height of absorber column			
	B4C enr. (38.13cm)	B4C enr. (19.16cm)	B4C nat. (38.08cm)	B4C nat. (19.05cm)
Base calc.( \$ ) <sup>(*1)</sup>	-2.04	-1.18	-0.832	-0.471
keff in CR withdraw	0.98925			
keff in CR inserted	0.97857	0.98301	0.98486	0.98676
Reactivity( k/kk')	-1.10E-02	-6.42E-03	-4.51E-03	-2.55E-03
Transport&mesh correction factor	0.97	0.98	1.00	1.00
Transport calc. <sup>(*2)</sup>				
keff in CR withdraw	0.99678			
keff in CR inserted	0.98498	0.99007	0.99218	0.99429
Reactivity( k/kk')	-1.20E-02	-6.80E-03	-4.65E-03	-2.51E-03
Isotropic Diffusion calc. <sup>(*2)</sup>				
keff in CR withdraw	0.99238			
keff in CR inserted	0.98036	0.98560	0.98783	0.98992
Reactivity( k/kk')	-1.23E-02	-6.93E-03	-4.63E-03	-2.50E-03
UF correction factor	1.00	1.00	1.00	1.00
UF constant 175g calc. <sup>(*3)</sup>				
keff in CR withdraw	0.98968			
keff in CR inserted	0.97759	0.98287	0.98509	0.98709
Reactivity( k/kk')	-1.25E-02	-7.01E-03	-4.72E-03	-2.66E-03
JFS-3-J3.2R 18g calc. <sup>(*3)</sup>				
keff in CR withdraw	0.98916			
keff in CR inserted	0.97703	0.98231	0.98457	0.98657
Reactivity( k/kk')	-1.26E-02	-7.04E-03	-4.71E-03	-2.65E-03
Corrected calc.( \$ )	-1.97	-1.16	-0.837	-0.474
Experiment value ( \$ )	-2.06	-1.15	-0.787	-0.433
Exp. Error(%)	5.8	5.2	4.4	3.9
C/E	0.99	1.03	1.06	1.09
Final C/E	0.96	1.01	1.06	1.10

(\*1)Hex-Z system,18groups,Benoist-D,Region X

(\*2)RZ system,18groups,Dave

(\*3)RZ system,175groups&18groups,Benoist-D,Region X

(\*4)Effective delayed neutron ratio = 5.42E-03

Table 4.8 制御棒価値の解析結果(BFS-67-3R)

	Absorber type and height of absorber column			
	B4C enr. (38.13cm)	B4C enr. (19.16cm)	B4C nat. (38.08cm)	B4C nat. (19.05cm)
Base calc. ( \$ ) <sup>(*1)</sup>	-2.09	-1.22	-0.866	-0.493
keff in CR withdraw	0.98959			
keff in CR inserted	0.97858	0.98312	0.98499	0.98697
Reactivity( k/kk')	-1.14E-02	-6.65E-03	-4.72E-03	-2.68E-03
Transport&mesh correction factor	0.98	0.99	1.01	1.02
Transport calc. <sup>(*2)</sup>				
keff in CR withdraw	0.99668			
keff in CR inserted	0.98439	0.98963	0.99182	0.99402
Reactivity( k/kk')	-1.25E-02	-7.15E-03	-4.93E-03	-2.69E-03
Isotropic Diffusion calc. <sup>(*2)</sup>				
keff in CR withdraw	0.99227			
keff in CR inserted	0.97985	0.98523	0.98749	0.98968
Reactivity( k/kk')	-1.28E-02	-7.20E-03	-4.87E-03	-2.64E-03
UF correction factor	1.00	1.00	1.00	1.00
Corrected calc. ( \$ )	-2.05	-1.21	-0.876	-0.502
Experiment value ( \$ )	-2.10	-1.20	-0.809	-0.455
Exp. Error(%)	5.7	5.0	4.3	4.4
C/E	0.99	1.02	1.07	1.08
Final C/E	0.97	1.01	1.08	1.10

(\*1)Hex-Z system,18groups,Benoist-D,Region X

(\*2)RZ system,18groups,Dave

(\*3)RZ system,175groups&18groups,Benoist-D,Region X

(\*4)Effective delayed neutron ratio = 5.45E-03

Table 4.9 制御棒価値の解析結果(BFS-67-3BR)

	Absorber type and height of absorber column			
	B4C enr. (38.13cm)	B4C enr. (19.16cm)	B4C nat. (38.08cm)	B4C nat. (19.05cm)
Base calc. ( \$ ) <sup>(*1)</sup>	-2.06	-1.20	-0.852	-0.484
keff in CR withdraw	0.98902			
keff in CR inserted	0.97821	0.98268	0.98452	0.98646
Reactivity( k/kk')	-1.12E-02	-6.52E-03	-4.62E-03	-2.62E-03
Transport&mesh correction factor	0.98	0.99	1.01	1.01
Transport calc. <sup>(*2)</sup>				
keff in CR withdraw	0.99629			
keff in CR inserted	0.98428	0.98943	0.99156	0.99372
Reactivity( k/kk')	-1.22E-02	-6.96E-03	-4.79E-03	-2.60E-03
Isotropic Diffusion calc. <sup>(*2)</sup>				
keff in CR withdraw	0.99190			
keff in CR inserted	0.97975	0.98502	0.98725	0.98938
Reactivity( k/kk')	-1.25E-02	-7.04E-03	-4.76E-03	-2.57E-03
UF correction factor	1.00	1.00	1.00	1.00
Corrected calc. ( \$ )	-2.02	-1.19	-0.858	-0.489
Experiment value ( \$ )	-2.13	-1.20	-0.825	-0.455
Exp. Error(%)	6.1	5.0	4.4	4.4
C/E	0.97	1.00	1.03	1.06
Final C/E	0.95	0.99	1.04	1.07

(\*1)Hex-Z system,18groups,Benoist-D,Region X

(\*2)RZ system,18groups,Dave

(\*3)RZ system,175groups&18groups,Benoist-D,Region X

(\*4)Effective delayed neutron ratio = 5.42E-03

Table 4.10 反応率比の解析結果(BFS-67-1R)

Reaction Type	Base Calc.	Cell factor	Transport mesh correction factor	UF correction factor	Corrected calc.	Exp.	C/E	Exp. Error(%)
F28/F25	0.033	1.016	0.999	1.006	0.033	0.032	1.034	1.9
F49/F25	1.006	0.987	1.000	1.002	0.995	1.003	0.992	1.0
F37/F49	0.234	1.012	0.999	1.003	0.237	0.236	1.004	2.1
F48/F49	0.669	1.012	1.000	1.002	0.678	0.644	1.052	3.0
F40/F49	0.280	0.917	0.999	1.002	0.257	0.246	1.044	1.6
F41/F49	1.334	1.008	1.000	0.997	1.341	1.314	1.020	1.3
F42/F49	0.185	1.012	0.999	1.001	0.187	0.181	1.033	1.7
F51/F49	0.197	1.012	0.999	0.999	0.199	0.203	0.981	2.0
C28/F25	0.130	1.016	1.000	0.996	0.132	0.134	0.983	2.2
C37/C28	6.134	0.982	1.000	0.999	6.018	5.520	1.090	4.0
C37/F25	0.798	0.998	1.000	0.995	0.793	0.750	1.057	2.7

Table 4.11 反応率比の解析結果(BFS-67-2R)

Reaction Type	Base Calc.	Cell factor	Exp.	C/E	Exp. Error(%)
F28/F25	0.037	1.034	0.038	1.013	1.8
F49/F25	1.035	0.981	1.038	0.979	1.0
F37/F49	0.261	0.993	0.258	1.004	2.3
F48/F49	0.690	1.019	0.670	1.050	3.0
F40/F49	0.297	0.937	0.267	1.043	1.5
F41/F49	1.297	1.010	1.273	1.028	1.3
F42/F49	0.202	1.019	0.199	1.034	1.5
F51/F49	0.217	1.019	0.224	0.988	1.8
C28/F25	0.129	1.018	0.135	0.969	2.2
C37/C28	5.670	1.000	5.350	1.060	3.9
C37/F25	0.729	1.018	0.710	1.045	2.8

Table 4.12 反応率比の解析結果(BFS-67-3BR)

Reaction Type	Base Calc.	Cell factor	Exp.	C/E	Exp. Error(%)
F28/F25	0.035	1.030	0.036	1.015	2.0
F49/F25	1.025	0.984	1.024	0.986	1.1
F37/F49	0.254	0.984	0.248	1.008	2.4
F48/F49	0.682	1.016	0.661	1.047	3.0
F40/F49	0.290	0.928	0.260	1.037	1.5
F41/F49	1.309	1.009	1.285	1.028	1.0
F42/F49	0.195	1.016	0.193	1.027	1.6
F51/F49	0.209	1.016	0.217	0.979	1.8
C28/F25	0.129	1.014	0.139	0.942	2.2
C37/C28	5.733	1.015	5.500	1.058	3.8
C37/F25	-	-	-	-	-

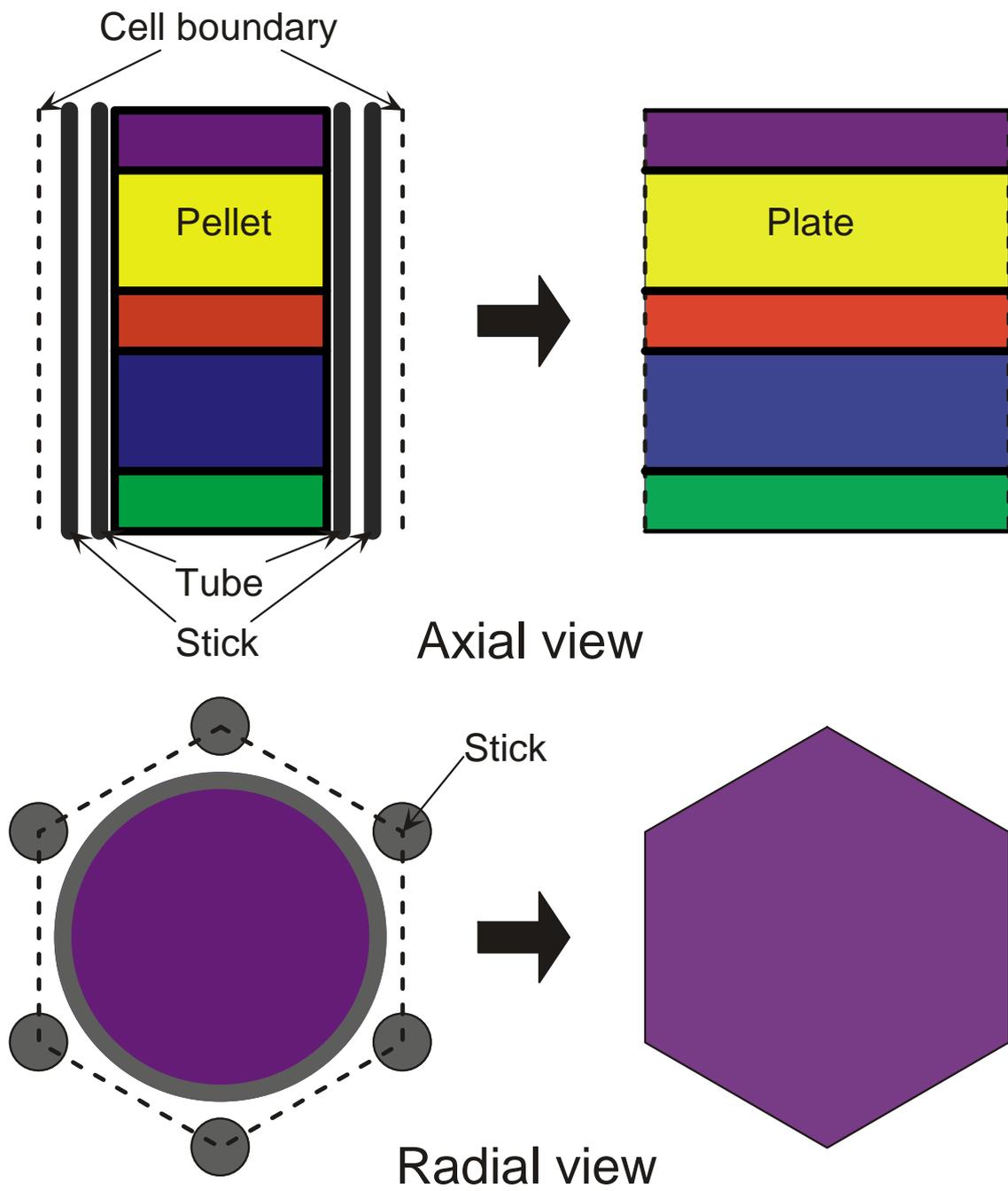


Fig.4.1 集合体に対するプレートストレッチモデルの適用概念図

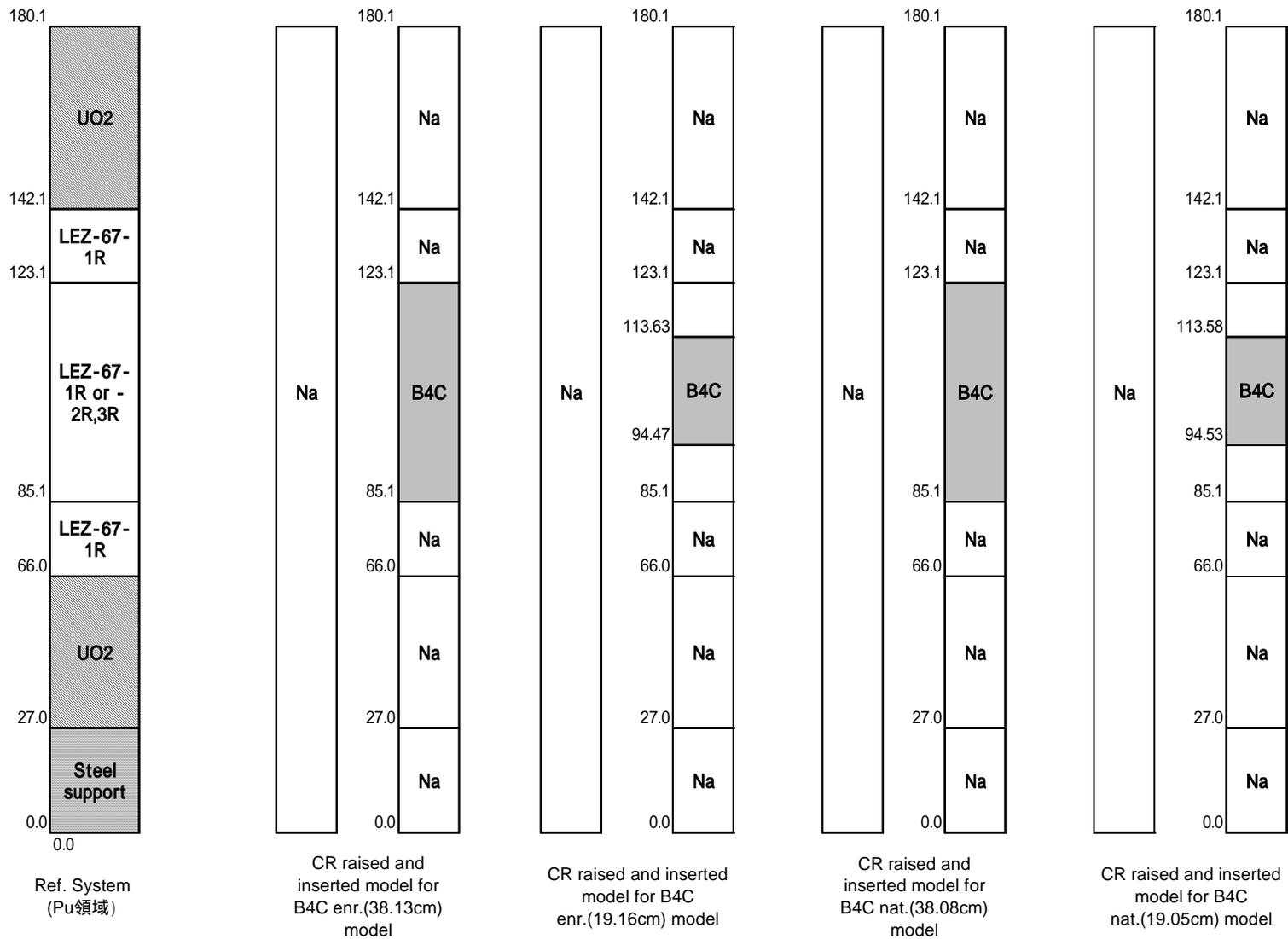


Fig.4.2 解析で使した制御棒モデル (unit:cm)

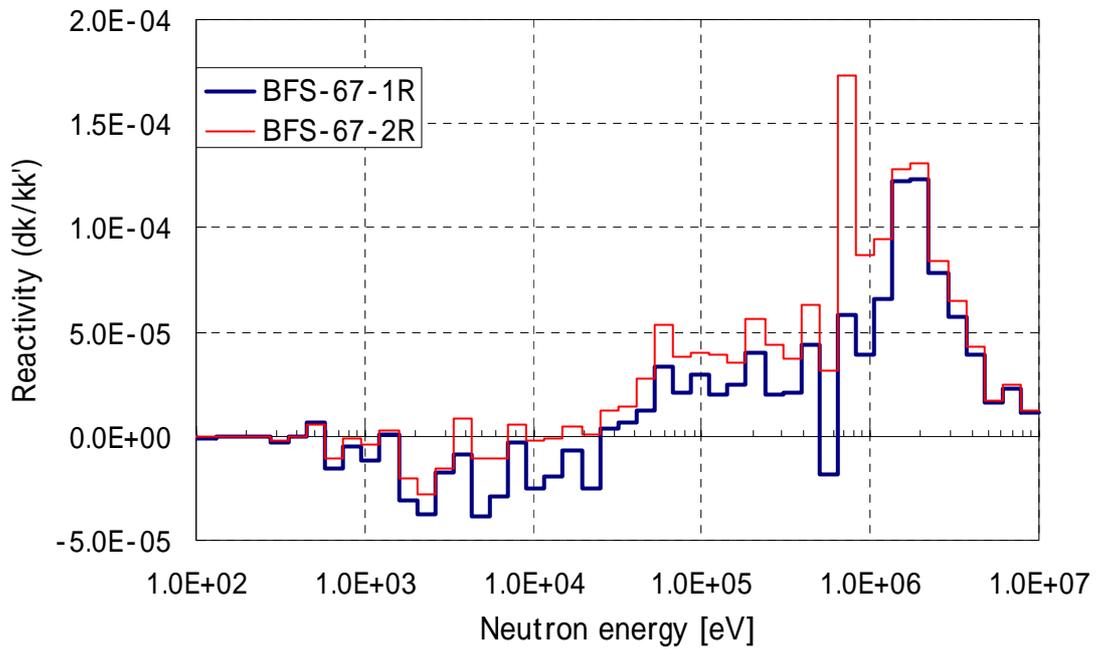


Fig.4.3 Na ボイド反応度の散乱項の炉心間での比較

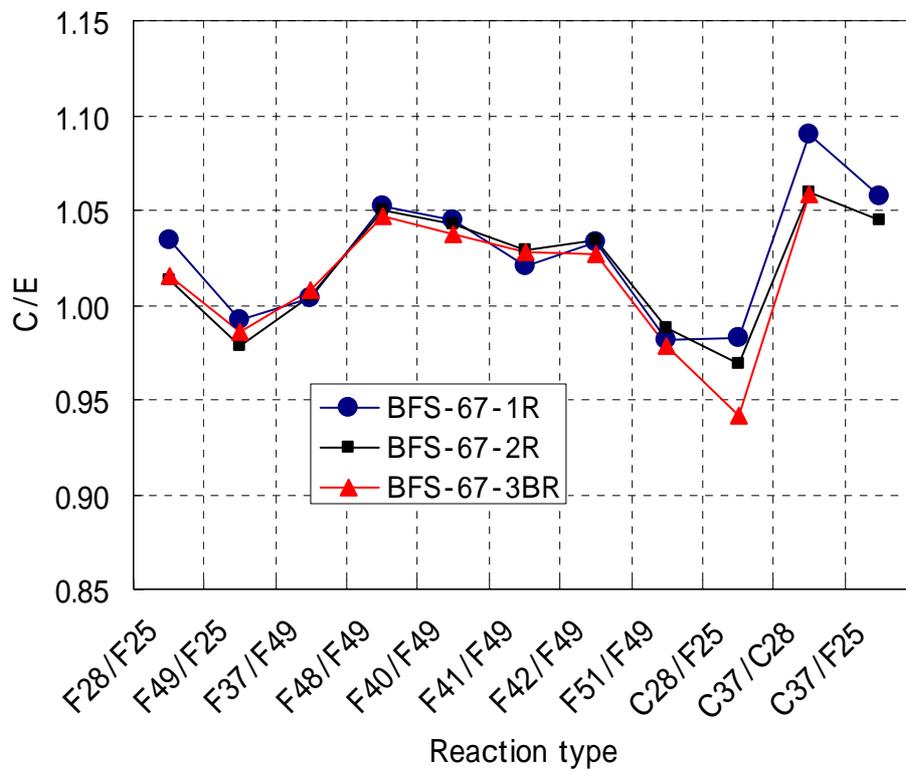


Fig.4.4 反応率比 C/E 値の炉心間の比較

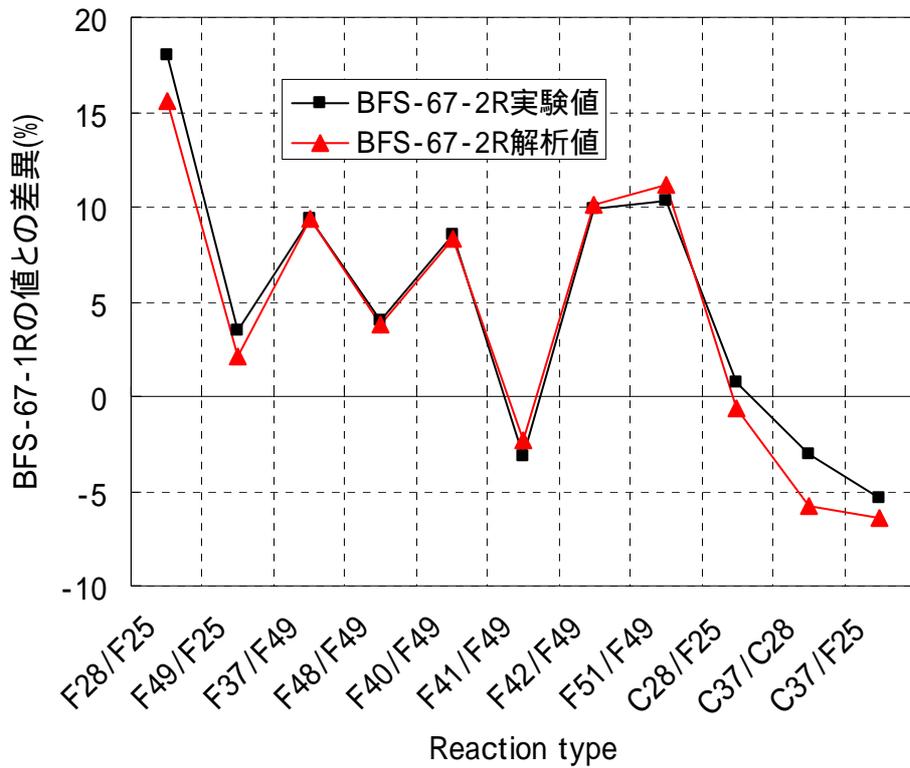


Fig. 4.5 Np 装荷による反応率比の変化の比較(BFS-67-2R)

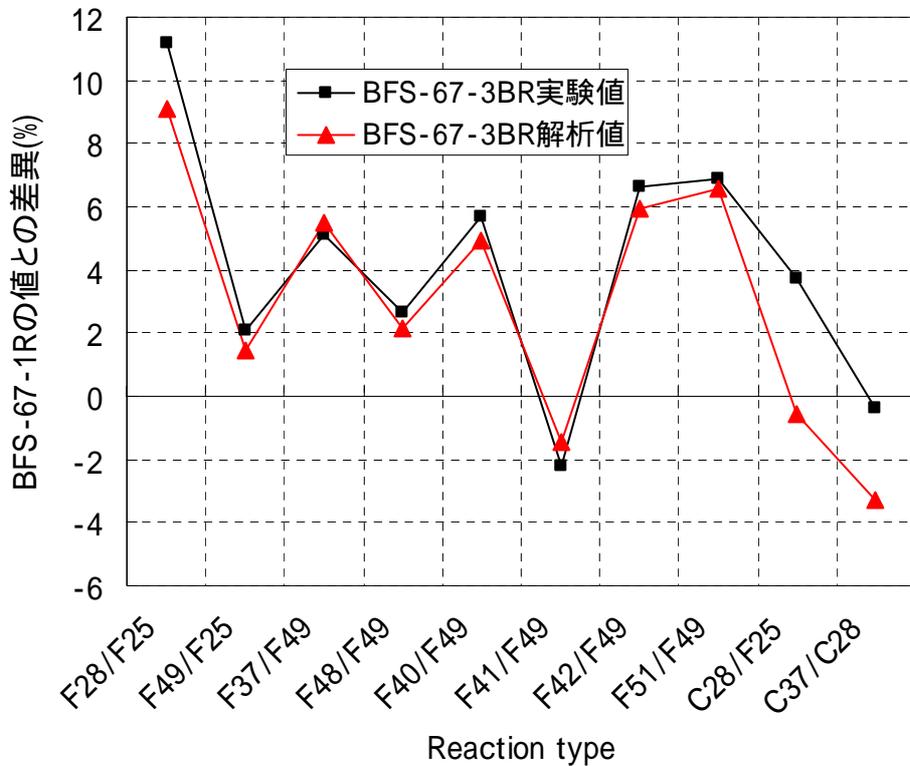


Fig. 4.6 Np 装荷による反応率比の変化の比較(BFS-67-3BR)

## 第5章 結言

「多量の Np を種々の臨界集合体に添加したときの炉物理特性の変化に関する研究」に関する共同研究（平成 13 年度～15 年度）の第 1 報として契約 1 年目で入手した BFS-67 体系に関する実験情報とそれを基に JNC で実施した解析結果をまとめた。

BFS-67 体系では Np の装荷量（最大 10kg）や装荷位置を変えた 4 種類の炉心について核特性（臨界性、制御棒価値、ポイド反応度など）が測定されている。JNC の標準的な解析手法で評価し、以下の知見を得た。

Na ポイド反応度、制御棒反応度の Np の捕獲断面積に対する感度係数は U-238 や Pu-239 と同程度に大きいことを確認した。本実験データは Np 装荷炉心の核設計精度の向上に活用できるといえる。また、中性子スペクトルにも Np 装荷による変化が現れているため、反応率比についても有用な実験データであるといえる。

臨界性（実効増倍率）については BFS-67 体系の 4 炉心について同程度の C/E 値 0.995 が得られ、本実験について高精度の解析が可能であることが確認できた。

Na ポイド反応度については、炉心によらず 1cent 以内で解析値は実験値と一致しており、Np を装荷しても高精度で解析できることが分かった。

制御棒反応度の解析値は、濃縮 B<sub>4</sub>C の制御棒については実験値と 5%以内で一致した。天然 B<sub>4</sub>C の制御棒については最大 10%の過大評価となっている。Np 装荷に伴う解析精度の差異は現れていない。

炉心中心反応率比の解析値は、核分裂反応率比については実験値と 5%以内で一致し、Np 装荷に伴う反応率比の変化を解析で再現できている。一方、補獲反応を含む反応率比については実験値との差異が 10%近い場合もある。セルフアクターに近似的な値を使用していることが原因と考えられる。

今後は、BFS-67 体系の実験について解析評価、検討を継続するとともに、契約 2 年目で入手した BFS-69 体系について解析を進め、得られた解析結果を用いて Np 装荷炉心の核設計精度の向上を図る予定である。また、追加実験については実施する方向で IPPE 側と内容を協議中である。

## 謝辞

本共同研究は炉心燃料システム Gr の林 秀行氏（現所属 日本原子力研究所）によって開始されたものであります。また、本社 国際・核物質管理部 国際協力課の田崎 真樹子氏には IPPE との調整にご尽力して頂き、契約を円滑に遂行することができました。

この場を借りてお礼申し上げます。

## 参考文献

- (1) S.P.Belov, et al., PROC. of International Conference on the Physics of Reactors(PHYSOR 96), M-82, Mito, 1996.
- (2) 千葉豪、羽様平、石川眞：“高速炉用炉定数セット JFS-3-J3.2 の改訂”，日本原子力学会誌，1[4], 335(2002).
- (3) 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( ) - 核特性解析コードシステムの整備 - 」, PNC TN9440 94-004 (1994 年 3 月).
- (4) 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).
- (5) T.Tone, "A Numerical Study of Heterogeneity Effects in Fast Reactor Critical Assemblies," J. of Nucl. Sci. and Technol. 12 (8), P.467 (1975).
- (6) P.Benoist, "Streaming Effects and Collision Probabilities in Lattices," Nucl. Sci. and Eng. 34, P.285 (1968).
- (7) 船曳淳, 角田弘和：“BN 及び BFS 炉心解析システムの整備( ) - 3 次元 Hex-Z 体系用輸送核特性解析コードの整備 - ”, JNC TJ9410 2002-001 (2002 年 3 月).
- (8) 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).