

# 核設計基本データベースの整備（IX）

— FCA XVII-1実験解析 —

(平成9年度共同研究報告書)

1998年10月

核燃料サイクル開発機構  
日本原子力研究所

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。

〒319-1194 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 319-1194  
Japan

©核燃料サイクル開発機構(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1998

## 核設計基本データベースの整備 (IX) —FCA XVII-1実験解析— (平成9年度共同研究報告書)

核燃料サイクル開発機構

横山 賢治\*, 石川 真\*

日本原子力研究所

大井川 宏之\*\*, 飯島 進\*\*

### 要 旨

高速炉の設計精度の向上を目指して、動力炉・核燃料開発事業団では、これまでにJUPITER実験解析の結果を反映した統合炉定数を作成し、大型炉心の核設計精度の大幅な向上を達成している。現在、核燃料サイクル開発機構は引き続き、更なる精度向上と信頼性の確保を目指して、最新の研究成果を反映し、JUPITER実験以外の積分データの整備を進めている。

本報告書では、日本原子力研究所のFCAの積分データ整備の一環として、FCA XVII-1炉心のC/E値の評価、及び、感度解析を行った。FCA XVII-1炉心はFCAの代表的なMOX燃料Na冷却高速炉心の模擬体系である。解析対象とした核特性は、臨界性、炉中心反応率比、Naボイド反応度値、 $^{238}\text{U}$ ドップラー反応度値である。原研の解析手法に基づくC/E値とJUPITER標準解析手法に基づくC/E値の比較を行った結果、Naボイド反応度を除けば、同等の結果が得られることが分かった。Naボイド反応度については、有意な差が見られるため、今後、詳細な比較・検討が必要であることが分かった。更に、臨界性、反応率比、Naボイド反応度に関して感度解析を行い、JUPITER実験のZPPR-9炉心の感度係数と比較し、FCA XVII-1炉心の特徴を感度係数の面から明らかにした。

---

\*：大洗工学センター システム技術開発部 炉心技術開発グループ

\*\*：日本原子力研究所 東海研究所 エネルギーシステム研究部 炉物理研究室

Development of a Standard Data Base  
for FBR Core Nuclear Design(IX)  
— Analysis of FCA XVII-1 Experiments —

Kenji Yokoyama\*, Makoto Ishikawa\*  
Hiroyuki Oigawa\*\*, Susumu Iijima\*\*

**Abstract**

PNC had developed the adjusted nuclear cross-section library in which the results of the JUPITER experiments were reflected. Using this adjusted library, the distinct improvement of the accuracy in nuclear design of FBR cores had been achieved. As a recent research, JNC develops a database of other integral data in addition to the JUPITER experiments, aiming at further improvement for accuracy and reliability.

In this report, the authors describe the evaluation of the C/E values and the sensitivity analysis for FCA XVII-1 assembly. FCA XVII-1 is a representative mock-up of a MOX fuel sodium cooling FBR core. The criticality, reaction rate ratio, sodium void reactivity worth and  $^{238}\text{U}$  Doppler reactivity worth of FCA XVII-1 were analyzed. The results of C/E values calculated by the standard analytical method for JUPITER experiments are similar to those calculated by the method of JAERI, except for the sodium void reactivity. So, further investigation for sodium void reactivity is necessary. Furthermore, sensitivity analysis shows the characteristics of FCA XVII-1 in comparison with ZPPR-9.

---

\* : Reactor Physics Research Group, System Engineering Technology Division, OEC, JNC

\*\* : Reactor Physics Laboratory, Department of Nuclear Energy System, Tokai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute(JAERI)

## 目 次

第1章 緒言 .....	1
第2章 FCA実験の概要及び実験手法 .....	2
第3章 JUPITER標準解析手法と原研の解析手法 .....	9
3.1 JUPITER標準解析手法 .....	9
3.2 原研の解析手法 .....	12
3.3 輸送メッシュ補正計算における空間・角度メッシュ効果の検討 .....	13
第4章 実験解析結果 .....	26
4.1 臨界性の解析結果 .....	26
4.2 反応率比の解析結果 .....	26
4.3 ナトリウムボイド反応度価値の解析結果 .....	27
4.4 $^{238}\text{U}$ ドップラー反応度価値の解析結果 .....	27
第5章 感度解析 .....	36
5.1 感度解析手法 .....	36
5.2 感度解析結果 .....	36
5.3 まとめ .....	38
第6章 結言 .....	91
謝辞 .....	92
参考文献 .....	93
付録A 解析の詳細データ .....	96

## 表リスト

表3.1-1 中性子エネルギー群構造 .....	16
表3.1-2 FCA XVII-1炉心の各領域の原子数密度 .....	17
表3.1-3 ドップラーサンプルの原子数密度 .....	18
表3.3-1 臨界性輸送計算における空間メッシュ効果と角度メッシュ効果 (FCA XVII-1、3次元XYZ体系) .....	19
表3.3-2 臨界性輸送計算における空間メッシュ効果と角度メッシュ効果 (FCA XVII-1、2次元RZ体系) .....	19
表4.1-1 FCA XVII-1炉心の臨界性解析結果 .....	29
表4.2-1 FCA XVII-1炉心の反応率比解析結果 .....	30
表4.3-1 FCA XVII-1炉心のNaボイド反応度値解析結果(動燃) .....	31
表4.3-2 FCA XVII-1炉心のNaボイド反応度値解析結果(原研) .....	32
表4.3-3 Naボイド反応度値(1-2z)の基準計算値の差の検討 .....	33
表4.4-1 ドップラーサンプル(NUO2-25) 反応度値の解析結果 .....	34
表5.2-1 FCA XVII-1の臨界性(対称炉心)に対する感度係数 .....	40
表5.2-2 FCA XVII-1のC28/F49反応率比に対する感度係数 .....	42
表5.2-3 FCA XVII-1のC28/F25反応率比に対する感度係数 .....	44
表5.2-4 FCA XVII-1のNaボイド反応度(1-2z)に対する感度係数 .....	46
表5.2-5 FCA XVII-1のNaボイド反応度(1-6z)に対する感度係数 .....	48
表5.2-6 FCA XVII-1のNaボイド反応度(1-9z)に対する感度係数 .....	50
表5.2-7 ZPPR-9の臨界性に対する感度係数 .....	52
表5.2-8 ZPPR-9のC28/F49反応率比に対する感度係数 .....	54
表5.2-9 ZPPR-9のC28/F25反応率比に対する感度係数 .....	56
表5.2-10 ZPPR-9のNaボイド反応度(97ドロワ、Z=20inch)に対する感度係数 ..	58
表A-1 FCA XVII-1炉心の臨界性解析の詳細データ(対称炉心) .....	97
表A-2 FCA XVII-1炉心の臨界性解析の詳細データ(非対称炉心) .....	98
表A-3 FCA XVII-1炉心の反応率比解析の詳細データ .....	99
表A-4 FCA XVII-1炉心のNaボイド反応度解析の詳細データ .....	100
表A-5 FCA XVII-1炉心のドップラー反応度解析の詳細データ(NUO2-25) ..	103

## 図リスト

図2-1 FCA XVII-1炉心断面図	4
図2-2 FCA XVII-1炉心のRZ体系	4
図2-3 FCA XVII-1炉心のドロワ内のプレート装荷パターン (T2ドロワ)	4
図2-4 FCA XVII-1の炉中心位置での反応率比測定	5
図2-5 FCA XVII-1のセル内詳細分布測定	6
図2-6 FCA XVII-1のNaボイド反応度測定体系	7
図2-7 ドップラー反応度測定体系	8
図3.1-1 FCA XVII-1炉心計算体系 (1/2対称炉心モデル、As built)	20
図3.1-2 FCA XVII-1炉心計算体系 (1/8対称炉心モデル)	20
図3.1-3 FCA XVII-1炉心Naボイド反応度解析価値の計算体系	21
図3.1-4 ドップラーサンプルの計算体系	22
図3.3-1 基準計算体系の空間・角度メッシュ	23
図3.3-2 空間メッシュ効果・角度メッシュ効果 (XYZ体系)	24
図3.3-3 空間メッシュ効果・角度メッシュ効果 (RZ体系)	25
図4.3-1 ZPPR-9炉心のNaボイド反応度測定ステップ	35
図5.2-1 FCA XVII-1の臨界性 (対称炉心) に対する感度係数	60
図5.2-2 FCA XVII-1のC28/F49反応率比に対する感度係数	63
図5.2-3 FCA XVII-1のC28/F25反応率比に対する感度係数	66
図5.2-4 FCA XVII-1のNaボイド反応度 (1-2z) に対する感度係数	69
図5.2-5 FCA XVII-1のNaボイド反応度 (1-6z) に対する感度係数	72
図5.2-6 FCA XVII-1のNaボイド反応度 (1-9z) に対する感度係数	75
図5.2-7 ZPPR-9の臨界性に対する感度係数	78
図5.2-8 ZPPR-9のC28/F49反応率比に対する感度係数	81
図5.2-9 ZPPR-9のC28/F25反応率比に対する感度係数	84
図5.2-10 ZPPR-9のNaボイド反応度(97ドロワ、Z=20inch)に対する感度係数	87
図5.2-11 弹性散乱断面積感度係数のNaボイド規模依存性	90

## 第1章 緒言

高速増殖炉の研究開発において、核設計精度の向上を図ることは、安全性を確保し、かつ、合理的で高性能な炉心を設計するためにきわめて重要である。このため、臨界実験解析等の炉物理研究の成果を大型高速炉炉心の核設計に反映する手法として、ベイズの定理を基礎とした炉定数調整法が広く採用されている。

これまで、動力炉・核燃料開発事業団（動燃、現：核燃料サイクル開発機構）では1989～1991年度に、日本原子力発電株式会社との共同研究により、JENDL-2<sup>(Ref.3-5)</sup>ベースの基本炉定数を用い、JUPITER実験解析の結果を反映した修正炉定数を作成し、大型炉心の核設計精度の大幅な向上が達成された。しかし、この1991年度に作成された炉定数は、基本ライブラリが1980年代前半に作成されたJENDL-2ベースであったこと、燃焼核特性や温度核特性を取り扱っていないこと、非弾性散乱マトリックスの調整を行っていないこと、そして、積分データとしてJUPITER実験のみを用いていることなど、不十分な点が残されているため、実証炉の基本設計のようなより高度な精度が要求される設計段階においては、最新の研究成果を反映して改良を施す必要がある。

一方、日本原子力研究所（原研）の高速炉臨界実験装置FCAは小型炉心ではあるが、多様な組成を模擬した炉心を構築し積分データを蓄積している。そこで、動燃と原研は共同研究として、統合炉定数作成に用いる積分データの拡張を目指したFCA実験データの整備を進めている。

FCA炉心の内、FCA XVII-1炉心はFCAの代表的なMOX燃料Na冷却高速炉心の模擬体系であり、かつ、反応率比の測定にプルトニウムフォイルを用いる等、最新の実験手法で各種の炉物理パラメータを取得している<sup>(Ref.1-2～1-8)</sup>。本報告書ではFCA XVII-1炉心の実験概要をまとめ、原研及び動燃の双方が行った解析結果を比較・検討することにより、問題点の抽出を行う。更に、感度解析を実施してJUPITER炉心と比較し、FCA XVII-1炉心積分データの特徴を明らかにする。

本報告書で解析対象とする炉物理パラメータは、臨界性、反応率比、Naボイド反応度価値及び、<sup>238</sup>Uドップラー反応度価値である。特に、反応率比及びドップラー反応度価値に関しては、

C28/F49反応率比：内側炉心で約3%の過大評価傾向

ドップラー反応度：20%弱の過小評価傾向

といった課題が残っている<sup>(Ref.2-2)</sup>。これらの核特性について、JUPITER標準解析手法を用いて、FCAの同様な実験を解析し、両者を比較することは、これらの課題が装置固有のものなのか解析手法に起因するものなのかを知るうえで非常に意義深い。

以下、第2章ではFCA実験の概要を、第3章では解析手法を、第4章では実験解析結果を、第5章では感度解析結果を述べる。

## 第2章 FCA実験の概要及び実験手法

本報告書では、FCA実験解析対象として、MOX燃料Na冷却高速炉心の模擬体系であるFCA XVII-1炉心を採り上げる。本章では、解析対象としたFCA XVII-1炉心の臨界性、反応率比、Naボイド反応度価値、<sup>238</sup>Uドップラー反応度価値測定について実験の概要を述べる。

FCA XVII-1炉心は、MOX燃料Na冷却高速炉心の模擬体系である。図2-1にFCA XVII-1の断面図、図2-2に2次元R-Z体系図を示す。FCA XVII-1炉心は、円筒状のテスト領域、径方向外側にドライバー領域を有するゾーン型炉心である。ドライバー領域の外側は径方向ブランケットが、テスト領域の軸方向外側には軸方向ブランケットが配置されている。図2-3にテスト領域を構成している引き出し（ドロワ）の内部のプレート装荷パターンを示す。テスト領域は、Pu富化度が11wt%の炉心を模擬しており、ドライバー領域には濃縮ウラン燃料も含まれる。FCA XVII-1炉心は、JUPITER実験の炉心に比べると小さく、JUPITERの基準体系であるZPPR-9<sup>Ref. 24)</sup>の炉心体積が約4,600 lであるのに対して、FCA XVII-1の炉心体積は約650 lである。

以下、測定された炉物理パラメータの内、①実効増倍率（臨界性）、②反応率比、③ナトリウムボイド反応度価値、及び、④ドップラー反応度価値について実験手法を述べる。

### ①実効増倍率（臨界性）<sup>(Ref. 1-6)</sup>

図2-1～図2-3に示した体系での臨界性を測定した。FCA XVII-1炉心は制御棒工学的模擬等もなく、円筒形状で非常に対称性の良い炉心となっているが、ドライバー領域とブランケット領域にわずかながら径方向に非対称性がある。臨界性の実験値としては、As builtな非対称炉心に対する臨界性に加え、非対称性を作り出しているドロワの反応度価値を測定して、対称炉心とした場合の臨界性も評価されている。ここでは非対称炉心及び対称炉心の両方を解析対象とする。

### ②反応率比<sup>(Ref. 1-2)</sup>

FCA XVII-1炉心では、核分裂箔を用いた放射化箔法により炉中心位置の反応率比が測定された。測定された反応率比は、増殖性能の指標となるU-238捕獲反応率（C28）とPu-239核分裂率（F49）の比、及び、U-238捕獲反応率（C28）とU-235核分裂率（F25）の比である。C28/F25、C28/F49反応率比は、それぞれ、図2-4(a)、(b)に示すように、炉中心燃料セルの中に、放射化箔を装荷して測定された。この図からも分かるように、FCA実験では、JUPITER実験と同様に板状燃料を使用しているため、この板状燃料の非均質性により、セル内に反応率の微細分布が生じる。このため、FCA実験においても、セル非均質性の補正を行いセル平均反応率を評価している。FCA XVII-1炉心では、U-238捕獲反応率及びU-235核分裂率については、図2-5に示すように放射化箔により実験的に補正、Pu-239核分裂率については連続エネルギーモンテカルロコードMVPにより

解析的に補正している。

③ナトリウムボイド反応度価値<sup>(Ref. 1-3)</sup>

FCA XVII-1炉心におけるNaボイド反応度価値の測定は、局所的なボイドを炉心軸方向に移動させたステップボイド、及び、ボイド領域を炉心軸方向に拡大していく累積反応度価値を測定するボイド規模依存性の2種類を行った。図2-6にNaボイド反応度価値を測定した体系を示す。ボイド領域は固定側集合体の3行×3列の領域で行った。移動側集合体ではボイド領域を設けておらず、ボイド領域が作成されたのは、炉心軸方向の半分だけとなる。ここでは、軸方向プランケットを除くテスト領域のナトリウムボイド反応度価値（ステップボイド1z～9z、ボイド規模依存性1-2z, 1-6z, 1-9z）を解析対象とした。

④<sup>238</sup>U ドップラー反応度価値<sup>(Ref. 1-5)</sup>

FCA XVII-1でのドップラー反応度価値測定は、JUPITER実験と同様に、加熱した円筒形のサンプル（図2-7参照）を用いてサンプル反応度価値の温度依存性を測定したものである。測定はサンプルオシレーション法により行った。測定位置は炉中心の引き出しである。ドップラー反応度価値の測定に用いたサンプルには、直径25mm、長さ150mmの天然ウラン金属（NU-25）及び、直径25mm、長さ150mmの天然ウラン酸化物（NUO<sub>2</sub>-25）、直径20mm、長さ150mmの天然ウラン酸化物（NUO<sub>2</sub>-20）の3種類がある。JUPITER実験のZPPR-9炉心で用いられたサンプルは、直径25.4mm、長さ305mmの円筒形であるので、直径はほぼ同じで、長さが約半分の大きさである。

ここでは、直径25mmの天然ウラン酸化物（NUO<sub>2</sub>-25）を解析対象とし、温度点は20°C→550°C、20°C→800°Cの2点とした。

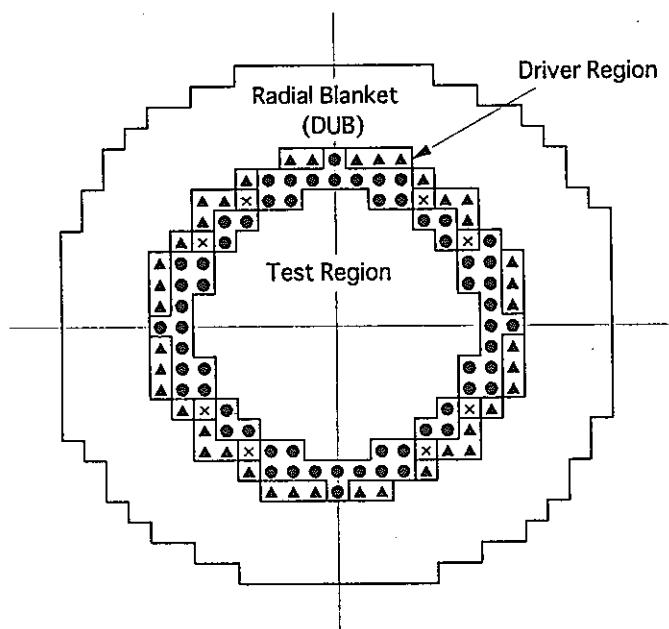


図2-1 FCA XVII-1炉心断面図

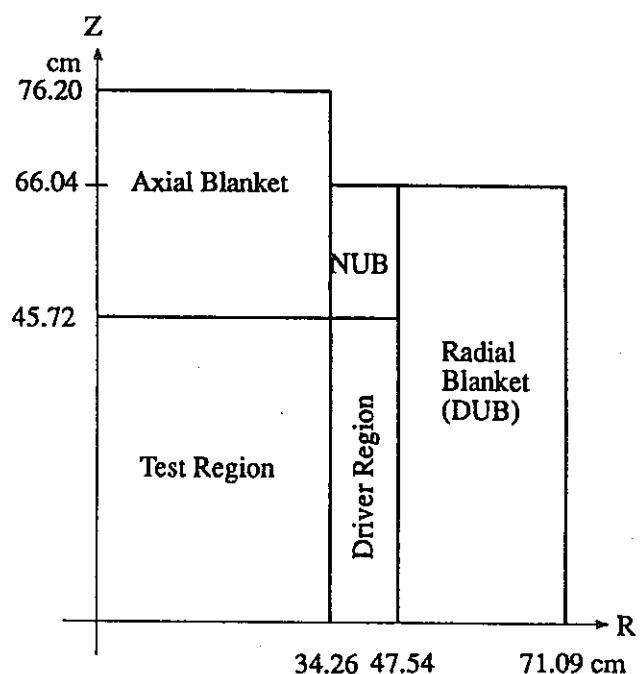


図2-2 FCA XVII-1炉心のRZ体系\*

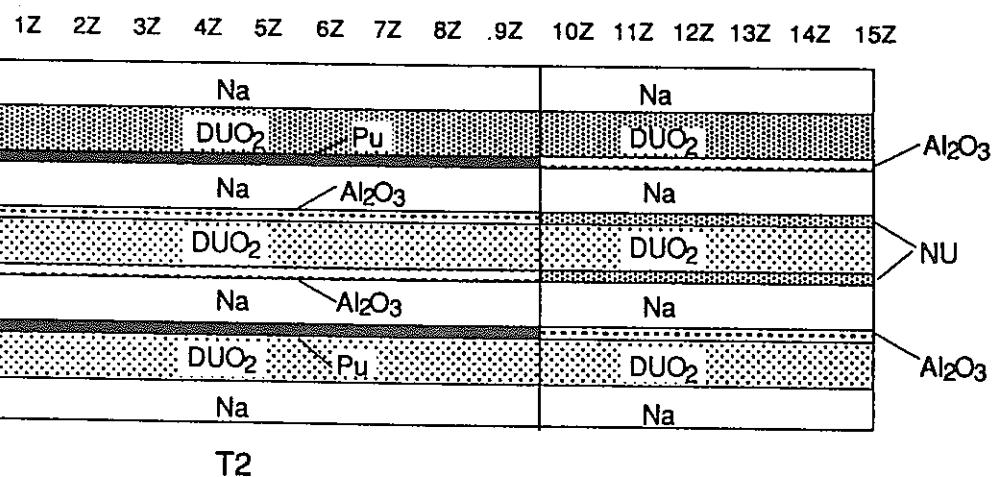
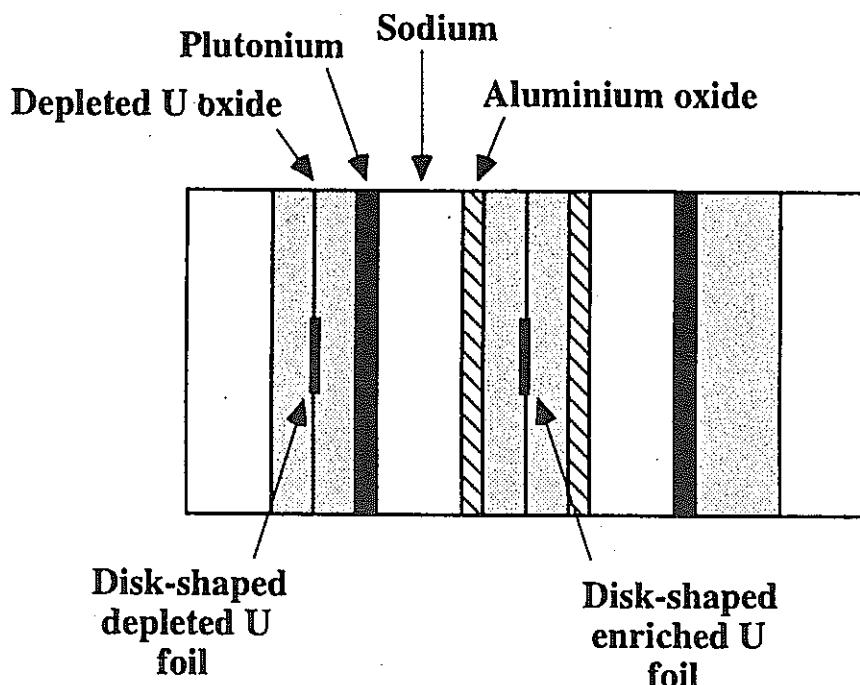
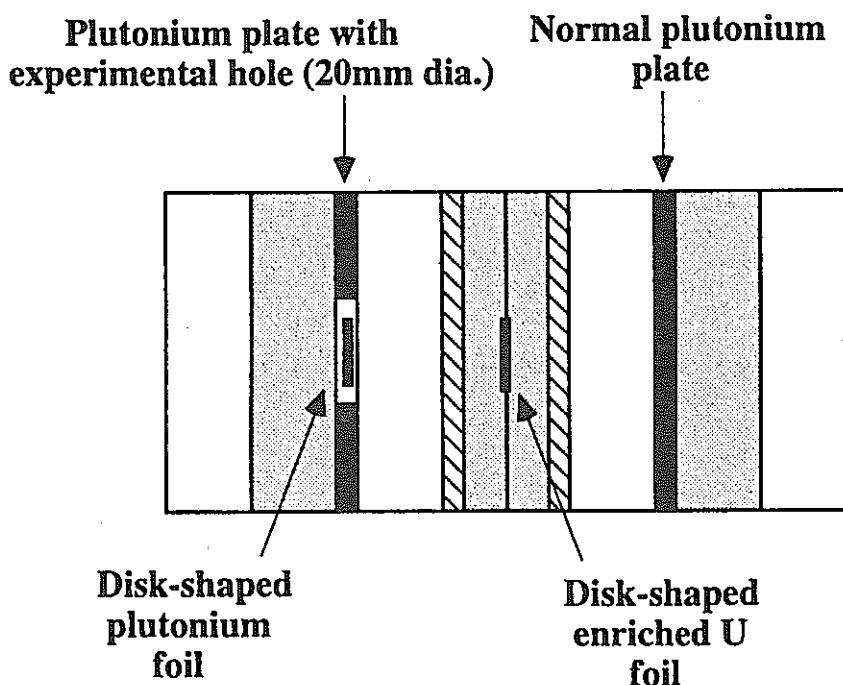


図2-3 FCA XVII-1炉心のテスト領域を構成する引出し燃料板装填図  
(T2 ドロワ) \*

\*: (Ref. 1-7)

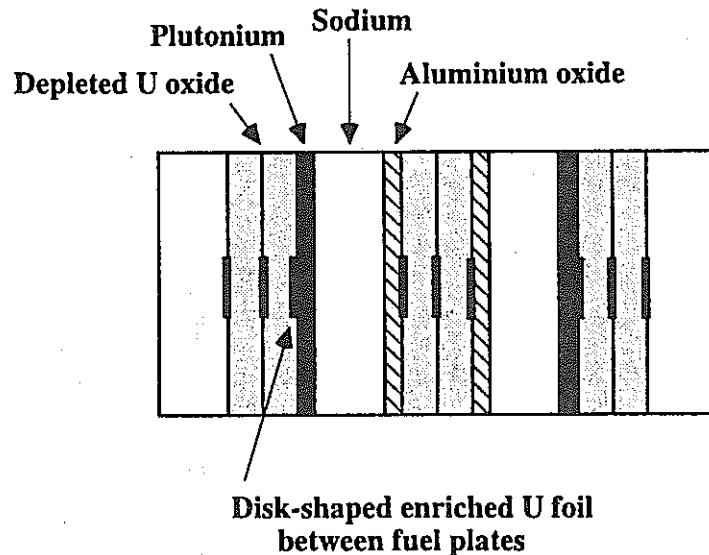


(a)C28/F25反応率比

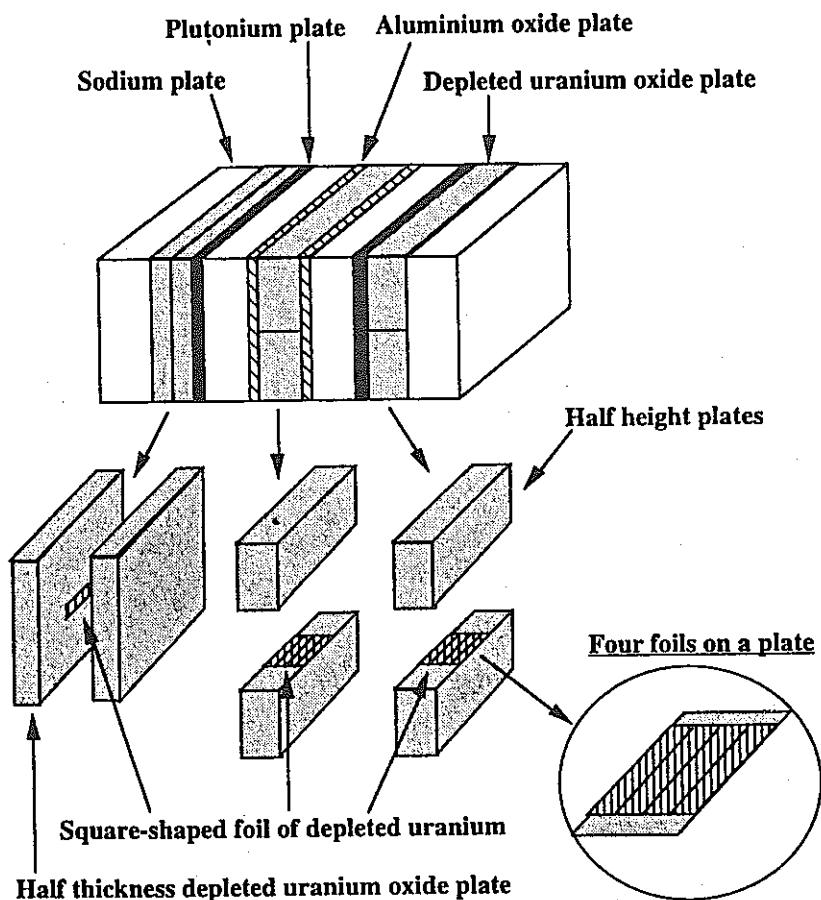


(b)F49/F25反応率比

図2-4 FCA XVII-1の炉中心位置での反応率比測定(Ref. 1-2)

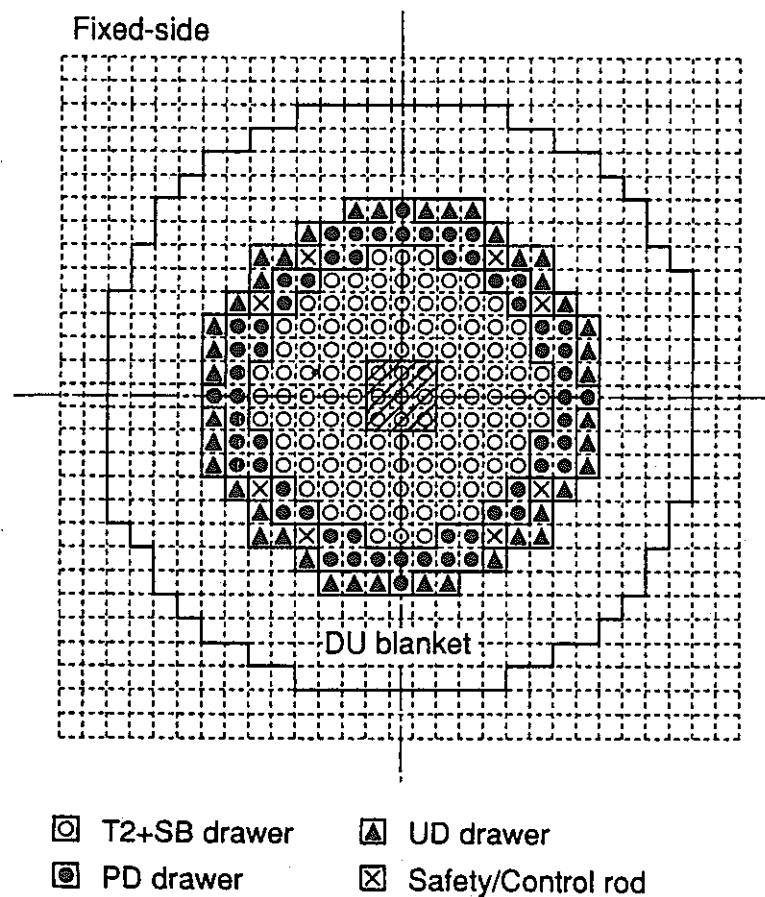


(a)F25反応率

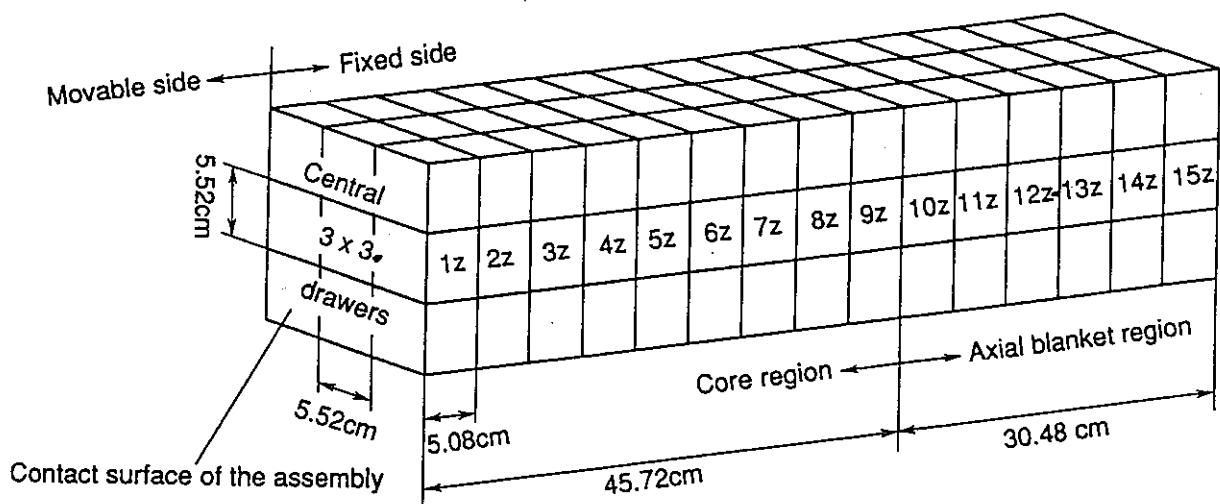


(b)C28反応率

図2-5 FCA XVII-1のセル内詳細分布測定(Ref. 1-2)

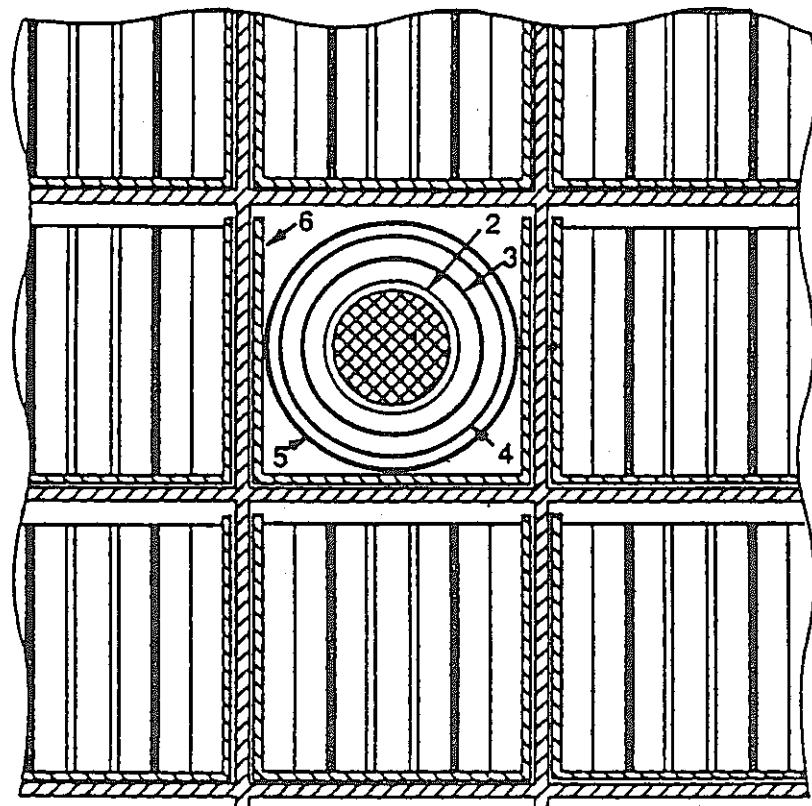


(a)炉心径方向断面図



(b)Naボイド領域（3×3 ドロワ）

図2-6 FCA XVII-1のNaボイド反応度測定体系(Ref. 1-3)



1 : Doppler sample      4 : Vacuum capsule  
2 : Stainless steel can      5 : Stainless steel container  
3 : Electric heater      6 : Doppler drawer

図2-7 ドップラー反応度価値測定用サンプルの配置(Ref. 1-5)

## 第3章 JUPITER標準解析手法と原研の解析手法

本章では、まず、動燃で整備を進めているJUPITER標準解析手法の概要を述べる。続いて、原研での解析手法について、JUPITER標準解析手法との違いに重点を置いて概要を述べる。最後に、輸送・メッシュ効果について検討を行う。なお、断面積ライブラリーとしては評価済み核データライブラリーJENDL-3.2<sup>(Ref. 3-10)</sup>を日本原子力研究所においてTIMS-PGGコード<sup>(Ref. 3-11)</sup>により処理した70群の高速炉用炉定数セットJFS-3-J3.2<sup>(Ref. 3-14)</sup>を用いた。

### 3.1 JUPITER標準解析手法

本節では、FCAXVII-1炉心における臨界性、反応率比、Naボイド反応度値、<sup>238</sup>Uドップラー反応度値の解析手法についてまとめる。ここでは、JUPITER実験解析手法については概要を述べ、JUPITER実験解析と異なる点に重点をおいて記す。JUPITER実験解析手法の経緯については、JUPITER-I解析報告書<sup>(Ref. 2-3)</sup>、及び、JUPITER実験解析の高度化に関する報告書<sup>(Ref. 2-1)</sup>を参照されたい。JUPITER標準解析手法で用いる中性子エネルギー群構造については、表3.1-1に示す。

#### 3.1.1 臨界性の解析手法

燃料領域の格子計算については、1次元プレートストレッチモデルを採用し、Tone氏の手法<sup>(Ref. 3-15)</sup>によりバックグラウンド断面積を求めセルの非均質性を考慮した。表3.1-2にFCAXVII-1炉心の各領域の均質原子数密度を示す。格子計算にはCASUPコード<sup>(Ref. 3-16)</sup>を用いた。

得られた70群実効定数を用いて2次元RZ体系拡散計算により各領域の70群スペクトルを求め、このスペクトルを用いて18群実効定数に縮約した。基準計算はCITAITION-FBR<sup>(Ref. 3-18, 3-19)</sup>コードによる3次元XYZ体系の18群拡散計算とし、拡散係数としてはBenoistの非等方拡散係数<sup>(Ref. 3-17)</sup>を用いた。この基準計算値に対して、群縮約補正、メッシュ補正、輸送補正を行った。後述(3.3節)の検討結果から、空間メッシュは5.52×5.52×5.08cmセルあたり2×2×2メッシュを基準計算体系とした。前章で述べたように、FCAXVII-1炉心には、わずかながら径方向に非対称性がある。このため、炉心計算体系は、非対称炉心に対しては図3.1-1に示すような1/2対称炉心モデル、対称炉心に対しては図3.1-2に示すような1/8対称炉心モデルを作成し、両者による評価を行った。

群縮約補正是、70群及び18群で2次元RZ体系拡散計算を行い、両者の差を群縮約補正值とした。

$$k_{RZ70G} - k_{RZ18G}$$

$k_{RZ70G}$  : 2次元RZ体系70群拡散計算時の実効増倍率

$k_{RZ18G}$  : 2次元RZ体系18群拡散計算時の実効増倍率

メッシュ補正は、FCA実験解析での基準空間メッシュ（ $5.52 \times 5.52 \times 5.08\text{cm}$ あたり  $2 \times 2 \times 2$  メッシュ）に対して、更に、XY方向及びZ方向別々に2倍にメッシュを細かくした計算を行い算出した。エネルギー群数は7群とした。

$$\begin{aligned} k_{XY} &= 1/3 \times (4k_{XY,D} - k_S) \\ k_Z &= 1/3 \times (4k_{Z,D} - k_S) \\ \Delta k_{XYZ} &= (k_{XY} - k_S) + (k_Z - k_S) \\ &= k_{XY} + k_Z - 2k_S \end{aligned}$$

ここで、

- $k_{XY}$  : XY方向無限メッシュ外挿時の実効増倍率
- $k_Z$  : Z方向無限メッシュ外挿時の実効増倍率
- $k_S$  : 基準メッシュ（1ドロワあたり  $2 \times 2$  メッシュ）計算の実効増倍率
- $k_{XY,D}$  : XY方向倍メッシュ計算の実効増倍率
- $k_{Z,D}$  : Z方向倍メッシュ計算の実効増倍率
- $\Delta k_{XYZ}$  : 3次元メッシュ効果補正量

である。

輸送補正是後述の検討結果から、FCA実験解析での基準空間メッシュ、 $S_8$ 角度メッシュの7群輸送計算を行い、以下の式により算出した。

$$\text{輸送補正係数} = k_{TRI} - k_{CIT} - \Delta k_{XYZ}$$

ここで、

- $k_{TRI}$  : TRITAC<sup>(Ref. 3-20)</sup>コードによる3次元XYZ体系輸送計算の実効増倍率
- $k_{CIT}$  : CITATIONコードによる3次元XYZ体系等方拡散計算( $D=1/3 \sum_i$ )の実効増倍率

である。

### 3.1.2 反応率比解析手法

JUPITER実験解析では、セルファクター（セル平均の反応率と放射化箔位置での反応率の比）の測定値に系統的な誤差が含まれていることが分かったため、セルファクターを連続エネルギーモンテカルロコードMVPによる解析で求めることとしている（フォイルベース）<sup>(Ref. 2-1)</sup>。JUPITER実験では、Pu燃料プレートに劣化ウランが含まれているため、Pu燃料プレート内のC28、F28の詳細分布を評価しなければならない。JUPITER実験では、このPu燃料プレート内の詳細分布の測定に問題があることが分かったため、セルファクターの見直しが必要となった。しかし、これに対してFCAのPu燃料プレートには劣化ウランは含まれておらず、JUPITER実験と同様の手法でセルファクターを評価する必要はないと考えられる。したがって、FCA実験解析においてはフォイルベースでの比較は行わず、セル平均の測定値との比較を行うこととする。

JUPITER実験解析においても、箔放射化法によって測定された反応率比を解析対象としており、基本的にJUPITER実験解析の手法と同様に解析を行う。すなわち、解析モデルは、臨界性解析と同様のものを用いる。基準計算であるCITATION-FBRによる3次元

XYZ体系18群拡散計算で得られた中性子スペクトルを用いて、炉中心位置の反応率比を求めた。FCA XVII-1炉心には、ドライバー領域とブランケット領域にわずかに非対称性があるが、炉中心の反応率比解析に与える影響は小さいと考えられるので、1/8対称炉心モデルで解析を行った。

補正計算としては、輸送・メッシュ補正のみを行う。後述（3.3節）の臨界性に対する輸送・メッシュ効果の検討結果から、反応率比に対しても空間2倍メッシュ、 $S_8$ 角度メッシュ輸送計算にメッシュ効果が含まれるとして、輸送・メッシュ補正係数は、3次元XYZ体系中性子エネルギー7群で、輸送計算と等方拡散係数を用いた拡散計算の比から求めた。

### 3.1.3 Naボイド反応度価値の解析手法

炉心計算の基準計算には、臨界性解析と同様に、3次元XYZ体系を用いるが、ナトリウムボイド反応度価値の計算では、中性子スペクトルの変化をより正確に取り扱う必要があるため、中性子エネルギー70群の拡散近似による厳密摂動計算を行った。

補正計算としては、輸送・メッシュ補正を行った。輸送・メッシュ補正係数は、SNPERT-3Dコード<sup>(Ref. 3-21)</sup>による輸送理論に基づく厳密摂動計算結果と、等方拡散係数を用いた拡散近似による厳密摂動計算結果との比から算出した。ここでも、反応率の輸送・メッシュ補正と同様に、輸送計算に空間メッシュ効果が含まれるとしている。JUPITER実験解析では、ナトリウムボイド反応度価値の輸送・メッシュ補正係数の算出法として、反応度比補正、反応度差補正、2成分補正の3種類について検討しているが、最終的に2成分補正を採用している<sup>(Ref. 2-3)</sup>ため、ここでも2成分補正を採用することとした。

前述のように、FCA XVII-1炉心にはドライバー領域とブランケット領域にわざかながら径方向に非対称性があるが、ボイド領域は炉中心の3×3ドロワであり、対称性の良いテスト領域の内側にあるため（図2-6(a)参照）影響は小さいと考えられる。このため、反応率比の解析と同様に、基本的に1/8対称炉心モデルを採用する。しかし、前節で説明したとおり、ボイド領域が作られたのは固定側集合体のみであるため、Naボイド反応度価値測定の実験体系は軸方向にも非対称性を持つ。このため、解析に1/8対称炉心モデルを用いるとボイド領域を忠実に模擬できないので、図3.1-3に示すような軸方向の非対称性を模擬した3次元XYZ体系1/4対称炉心モデルを基準体系とした。

### 3.1.4 $^{238}\text{U}$ ドップラー反応度価値の解析手法

実効断面積の作成は、ドップラーサンプルを除いて、臨界性の解析と同様にして行った。ドップラーサンプルの実効定数作成には、図3.1-4(a)に示すようなIsolated lampモデルを採用した。このモデルはJUPITER標準解析手法で使用されているものであるが、JUPITER実験解析ではドップラー反応度価値解析の高度化が行われており、Isolated lampモデルでは評価できない燃料領域とドップラーサンプルの共鳴干渉効果を別途評価し補正を行っている。この補正には、原研で開発された超微細群セル計算コード

PEACO-X<sup>Ref. 3-11)</sup>を用いるが、ここでの解析ではこの共鳴干渉効果については評価しておらず、原研による評価値を参照することとする。

ドップラー反応度値の評価は、2次元RZ体系の18群拡散近似に基づく1次摂動計算を基準計算として行った。ドップラー反応度値以外の解析では、3次元XYZ体系を基準計算体系としているが、ドップラー反応度値に対しては、2次元RZ体系を基準計算体系としている。この理由は、サンプル形状が円筒であるため、3次元XYZ体系を用いると円筒であるサンプルを直方体に近似しなければならないからである。2次元RZ体系を基準計算体系とすれば、サンプルは炉中心に装荷されているため、炉心計算においても図3.1-4(b)のようにサンプル形状を保持したままモデル化が可能である。

補正計算としては、輸送・メッシュ補正と群縮約補正を行った。輸送・メッシュ補正係数は、2.5cm空間メッシュ、 $S_8$ 角度メッシュの輸送1次摂動計算結果と、等方拡散係数による拡散1次摂動計算結果の比から求めた。群縮約補正係数は、70群及び18群の2次元RZ体系拡散1次摂動計算を行い、両者の比から求めた。ここでも、反応率及びNaボイド反応度値の輸送・メッシュ補正と同様に、輸送計算に空間メッシュ効果が含まれるとしている。

なお、ドップラー反応度値の計算に用いたドップラーサンプルの各領域の原子数密度は表3.1-3に示すとおりである。

## 3.2 原研の解析手法

本節では、原研によるFCA炉心解析手法について、前節で述べたJUPITER標準解析手法との違いに重点を置き、概要を述べる。

### 3.2.1 臨界性の解析手法

原研の解析手法においても、JUPITER標準解析手法と同様に、高速炉用炉定数セットJFS-3-J3.2を用いて計算を行う。格子計算は1次元プレートストレッチモデルによる非均質モデルを採用している。動燃の解析では、原研が作成したモデルと同じものを採用したため、このモデルは全く同じである。ただし、格子計算コードとしては、JUPITER標準解析手法ではCASUPを用いるのに対して、原研の解析手法ではSLAROM<sup>Ref. 3-22, 3-23)</sup>を用いる。両者の主な違いは、バックグラウンド断面積の求め方として、JUPITER標準解析手法ではTone氏の手法を採用しているのに対して、原研の解析手法ではDancoff係数法を採用している点が異なる。

炉心計算の基準計算としては、JUPITER標準解析手法と同様に、CITATION-FBRコードにより3次元XYZ体系での非等方拡散係数を用いた拡散計算を行う。JUPITER標準解析手法とはエネルギー群数が異なり25群である。ただし、両手法ともエネルギー群数は最終的には70群計算相当値となるように補正する。

群縮約補正以外には、輸送・メッシュ補正を行う。これも、JUPITER標準解析手法と

同様であり、輸送計算の $S_N$ 次数は8である。異なるのは、2次元RZ体系を用いている点である。なお、輸送補正のための基準計算には、拡散係数として $1/3 \Sigma_{tr}$ を用いており、これもJUPITER標準解手法と同じである。

### 3.2.2 反応率比の解析手法

JUPITER標準解析手法と同様に、臨界性解析と同じモデルで行う。このため、JUPITER標準解析手法との違いは、前節で述べたとおりである。

### 3.2.3 ナトリウムボイド反応度価値の解析手法

実効断面積の作成は、臨界性解析と同様の手法で行うため、JUPITER標準解析手法との違いは、臨界性解析の節で述べたとおりである。反応度価値計算の基準計算としては、2次元RZ体系70群拡散近似による厳密摂動計算を行う。ここで用いる計算コードはPERKY<sup>Ref. 3-24)</sup>であり、JUPITER標準解析手法も同じである。異なる点は2次元RZ体系を採用しているところにあるが、XYZ体系とRZ体系の差を25群の拡散計算により補正するため、最終的な結果は同等であると考えられる。この補正以外に輸送補正を行うが、 $S_N$ 次数は8であり、輸送補正のための基準計算には拡散係数として $1/3 \Sigma_{tr}$ を用いている点もJUPITER標準解析手法と同じである。

### 3.2.4 $^{238}\text{U}$ ドップラー反応度価値の解析手法

実効断面積の作成は、臨界性解析と同様である。ただし、ドップラーサンプルについては、PEACO-Xコードを用いている点が動燃の解析手法と異なる。PEACO-Xコードは、中性子エネルギー0.2eV～100keVの間を151,700群の超詳細群で取り扱うことにより、ドップラーサンプルと炉心燃料の共鳴干渉効果を評価することができる。

反応度価値計算は、2次元RZ体系70群拡散計算による1次摂動で求められる。エネルギー群数を直接70群で取り扱う点がJUPITER標準解析手法と異なる。

## 3.3 輸送・メッシュ補正計算における空間・角度メッシュ効果の検討

JUPITER実験解析では、図3.3-1上に示すように基準計算体系の空間メッシュを約5cm(単位セル $5.52 \times 5.52 \times 5.09\text{cm}$ あたり1メッシュ)、角度メッシュを $S_4$ として、輸送・メッシュ補正を行うことにより、無限空間メッシュ、無限角度メッシュ計算相当の計算結果が得られるという知見を前提としているが、この知見がFCA XVII-1炉心に対しても成立する保証はない。このため、FCA XVII-1炉心に対して、空間メッシュ及び角度メッシュ効果の検討を行った。従来、2次元RZ体系についてのみ、この検討が行われていたが、本解析では、3次元XYZ体系を基準計算とするため、3次元XYZ体系での検討も行っ

た。また、ドップラー反応度値の解析には、2次元RZ体系を基準計算とするため、2次元RZ体系での検討も行った。

検討は、空間メッシュ及び角度メッシュを無限メッシュに外挿したときの値と、有限メッシュでの値を比較することにより行った。空間メッシュの無限メッシュへの外挿は、空間メッシュ幅の2乗で直線フィッティングした。角度メッシュの無限メッシュへの外挿については、経験的に $S_N$ 次数Nの2乗の逆数に比例することが知られているので<sup>(Ref. 2-1)</sup>、この値を直線フィッティングして求めた。この外挿性についても確認するため、空間メッシュについては、5cm空間メッシュ（ $5.52 \times 5.52 \times 5.08$ cm単位セルあたり $1 \times 1 \times 1$ メッシュ）、空間2倍メッシュ（単位セルあたり $2 \times 2 \times 2$ メッシュ）、空間4倍メッシュ（単位セルあたり $4 \times 4 \times 4$ メッシュ）の3点、角度メッシュについては、 $S_4 \sim S_{16}$ の7点について計算を行った。ただし、XYZ体系については計算機容量の制限のため、空間メッシュは3倍メッシュまでとした。

3次元XYZ体系での検討結果を表3.3-1及び図3.3-2に、2次元RZ体系での検討結果を表3.3-2及び図3.3-3に示す。

### 3.3.1 空間メッシュ効果の無限メッシュ外挿

空間メッシュ効果については、3次元XYZ体系（図3.3-2(a)）、2次元RZ体系（図3.3-3(a)）とも、空間メッシュ幅の2乗に比例していることがわかる。決定係数 $R^2$ はそれぞれ、0.996、0.999と良い直線性を示しており、直線外挿により無限メッシュ相当値が得られると考えられる。

### 3.3.2 角度メッシュ効果の無限メッシュ外挿

空間メッシュを5cm空間メッシュに固定して、角度メッシュを変化させた場合、角度メッシュ効果は、 $S_N$ 次数Nの2乗の逆数への比例性はあまり良くなかった。この傾向は3次元XYZ体系、2次元RZ体系で共通している（図3.3-2(b)、図3.3-3(b)参照）。これは、FCAのような小さな体系では、5cm空間メッシュでは粗く、角度メッシュ効果の線形性が崩れたためと考えられる。これに比べて、空間2倍メッシュに固定したときの角度メッシュ効果を見ると、3次元XYZ体系、2次元RZ体系ともに、角度メッシュ効果は $S_N$ 次数Nの2乗の逆数にほぼ比例し、決定係数 $R^2$ は3次元XYZ体系で0.995、2次元RZ体系で0.988と良い直線性を示した。このため、空間2倍メッシュに固定したときの値を外挿して、無限角度メッシュ相当値を求めた。

### 3.3.3 無限メッシュ相当値との比較

基準計算には、基本的に3次元XYZ体系を用いるため、まず、3次元XYZ体系に注目して検討を行う。常陽MK-IIの解析で推奨されている5cm空間メッシュ $S_8$ 角度メッシュ、あるいは、空間2倍メッシュ $S_8$ 角度メッシュの値を見ると、無限メッシュ外挿値との差は、

前者で0.08%，後者で0.01%となっており，良い一致が見られる。ただし，前述のように，5cm空間メッシュのとき，角度メッシュ効果に非線形性が現れることより，FCA XVII-1炉心に対して，5cm空間メッシュは，粗く不十分である可能性が高いと考えられる。このため，FCAの解析では，空間2倍メッシュの拡散計算を基準計算とする。この基準計算に対して，JUPITER実験解析と同様に，空間メッシュを変更せずに（単位セルあたり $2 \times 2 \times 2$ メッシュ） $S_8$ 輸送計算を行って輸送・メッシュ補正計算とすれば，補正後の値を空間無限メッシュの $S_\infty$ 角度メッシュ相当値と見なすことができる。なお，2次元RZ体系についても，空間2倍メッシュ $S_8$ 角度メッシュの計算値と無限メッシュ外挿値との差は0.01%と小さく，3次元XYZ体系と同様に，空間2倍メッシュ $S_8$ 角度メッシュ計算を空間無限メッシュ $S_\infty$ 角度メッシュ相当値と見なすことができる。

以上の結果から，FCA XVII-1炉心の解析では，2次元RZ体系，3次元XYZ体系によらず，図3.3-1下に示すような空間2倍メッシュ（単位セルあたり $2 \times 2 \times 2$ メッシュ）を基準計算体系として，空間2倍メッシュ $S_8$ 角度メッシュ輸送計算で補正を行うことにより，空間無限メッシュ $S_\infty$ 角度メッシュ相当値が得られるという知見を用いることにする。

表3.1-1 中性子エネルギー群構造

Group			Upper energy	Lower energy	Lethargy Width
7G	18G	70G			
1	1	1	10.0 (MeV)	7.7880 (MeV)	0.250
		2	7.7880	6.0653	0.250
	2	3	6.0653	4.7237	0.250
		4	4.7237	3.6788	0.250
2	3	5	3.6788	2.8650	0.250
		6	2.8650	2.2313	0.250
	4	7	2.2313	1.7377	0.250
		8	1.7377	1.3534	0.250
3	5	9	1.3534	1.0540	0.250
		10	1.0540	0.82085	0.250
	6	11	0.82085	0.63928	0.250
		12	0.63928	0.49787	0.250
		13	0.49787	0.38774	0.250
	7	14	0.38774	0.30197	0.250
		15	0.30197	0.23518	0.250
		16	0.23518	0.18316	0.250
	8	17	0.18316	0.14264	0.250
		18	0.14264	0.11109	0.250
4	9	20	0.11109 (MeV)	0.086517 (MeV)	0.250
		21	86.517 (KeV)	67.379 (KeV)	0.250
		22	67.379	52.475	0.250
		23	52.475	40.868	0.250
	10	24	40.868	31.828	0.250
		25	31.828	24.788	0.250
		26	24.788	19.305	0.250
	11	27	19.305	15.034	0.250
		28	15.034	11.709	0.250
		29	11.709	9.1188	0.250
5	12	30	9.1188	7.1017	0.250
		31	7.1017	5.5308	0.250
	13	32	5.5308	4.3074	0.250
		33	4.3074	3.3546	0.250
		34	3.3546	2.6126	0.250
	14	35	2.6126	2.0347	0.250
		36	2.0347	1.5846	0.250
		37	1.5846	1.2341 (KeV)	0.250
			1.2341 (KeV)	0.96112 (KeV)	0.250

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

表3.1-2 FCA XVII-1炉心の各領域の原子数密度

	T2*	T2(Na Void)*	PD*	UD*	SCR*	SB*	NUB	DUB	Empty matrix
H	-----	-----	7.1148E-05	1.4821E-04	1.4695E-04	6.6199E-05	-----	-----	-----
C	-----	-----	5.9707E-05	1.2439E-04	1.2335E-04	5.5561E-05	-----	-----	-----
O	1.7038E-02	1.7038E-02	1.3134E-02	1.3427E-02	6.3652E-05	1.7067E-02	-----	-----	-----
Na	7.6564E-03	-----	7.6564E-03	7.6564E-03	-----	7.6564E-03	-----	-----	-----
Al	2.3188E-03	2.3188E-03	8.8251E-03	8.8785E-03	1.6951E-02	2.1688E-03	-----	-----	-----
Si	1.9671E-05	1.9671E-05	1.9671E-05	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Cr	3.3850E-03	3.4685E-03	3.3850E-03	3.1174E-03	3.3594E-03	3.1174E-03	1.8101E-03	1.8101E-03	1.2290E-03
Mn	2.5007E-04	2.4562E-04	2.5007E-04	2.2939E-04	2.3264E-04	2.2939E-04	1.2002E-04	1.2002E-04	8.2000E-05
Fe	1.2226E-02	1.2109E-02	1.2226E-02	1.1217E-02	1.2046E-02	1.1217E-02	6.4727E-03	6.4727E-03	4.3930E-03
Ni	1.5471E-03	1.5674E-03	1.5471E-03	1.4131E-03	1.4606E-03	1.4131E-03	7.8944E-04	7.8944E-04	5.3600E-04
U-235	1.3955E-05	1.3955E-05	1.4701E-03	3.7305E-03	5.6515E-03	3.1634E-05	2.8968E-04	8.4422E-05	-----
U-238	6.8690E-03	6.8690E-03	5.8348E-03	6.0049E-03	4.2724E-04	9.3075E-03	3.9888E-02	4.0174E-02	-----
Pu-239	1.0455E-03	1.0455E-03	1.0455E-03	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Pu-240	9.1348E-05	9.1348E-05	9.1348E-05	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Pu-241	3.4442E-06	3.4442E-06	3.4442E-06	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Pu-242	8.0368E-07	8.0368E-07	8.0368E-07	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Am241	5.2071E-06	5.2071E-06	5.2071E-06	-----	-----	-----	-----	-----	-----

(単位 :  $10^{24}/\text{cm}^3$ )

\*: T2、T2(Na Void)、PD、UD、SCR、SBについては、実際の解析では非均質の情報を用いて非均質モデル解析を行った。

表3.1-3 ドップラーサンプルの原子数密度

	ドップラーサンプル (NUO2-25)	キャプセル	濃い鉄
U-238	2.063E-2	-----	-----
U-235	1.503E-4	-----	-----
O	4.157E-2	-----	-----
Fe	-----	1.888E-2	1.000E+1
Cr	-----	5.185E-3	-----
Ni	-----	3.496E-3	-----

単位： $10^{24}$ 個/cm<sup>3</sup>

表3.3-1 臨界性輸送計算における空間メッシュ効果と角度メッシュ効果 (FCA XVII-1、3次元XYZ体系)

	5cm空間メッシュ	2倍メッシュ	3倍メッシュ	無限メッシュ外挿
$S_4$	1.01789(-0.00051)*	1.01849(+0.00009)	1.01855(+0.00015)	1.01865(+0.00026)
$S_6$	1.01764(-0.00075)	1.01833(-0.00006)	-	-
$S_8$	1.01760(-0.00079)	1.01829(-0.00010)	-	-
$S_{10}$	1.01760(-0.00080)	1.01827(-0.00012)	-	-
$S_{12}$	1.01760(-0.00079)	1.01826(-0.00013)	-	-
$S_{14}$	1.01761(-0.00078)	1.01825(-0.00014)	-	-
$S_{16}$	1.01762(-0.00078)	1.01825(-0.00014)	-	-
$S_\infty$ 外挿	-	1.01823(-0.00017)	-	1.01839(Ref.)

表3.3-2 臨界性輸送計算における空間メッシュ効果と角度メッシュ効果 (FCA XVII-1、2次元RZ体系)

	5cm空間メッシュ	2倍メッシュ	4倍メッシュ	無限メッシュ外挿
$S_4$	1.00866(+0.00088)*	1.00907(+0.00128)	1.00917(+0.00138)	1.00920(+0.00142)
$S_6$	1.00744(-0.00034)	1.00817(+0.00038)	-	-
$S_8$	1.00721(-0.00058)	1.00796(+0.00018)	-	-
$S_{10}$	1.00714(-0.00064)	1.00787(+0.00008)	-	-
$S_{12}$	1.00713(-0.00065)	1.00782(+0.00004)	-	-
$S_{14}$	1.00713(-0.00066)	1.00780(+0.00001)	-	-
$S_{16}$	1.00711(-0.00067)	1.00778(-0.00001)	-	-
$S_\infty$ 外挿	-	1.00765(-0.00013)	-	1.00779(Ref.)

\*: ( )内の数値は、無限メッシュ外挿値との差

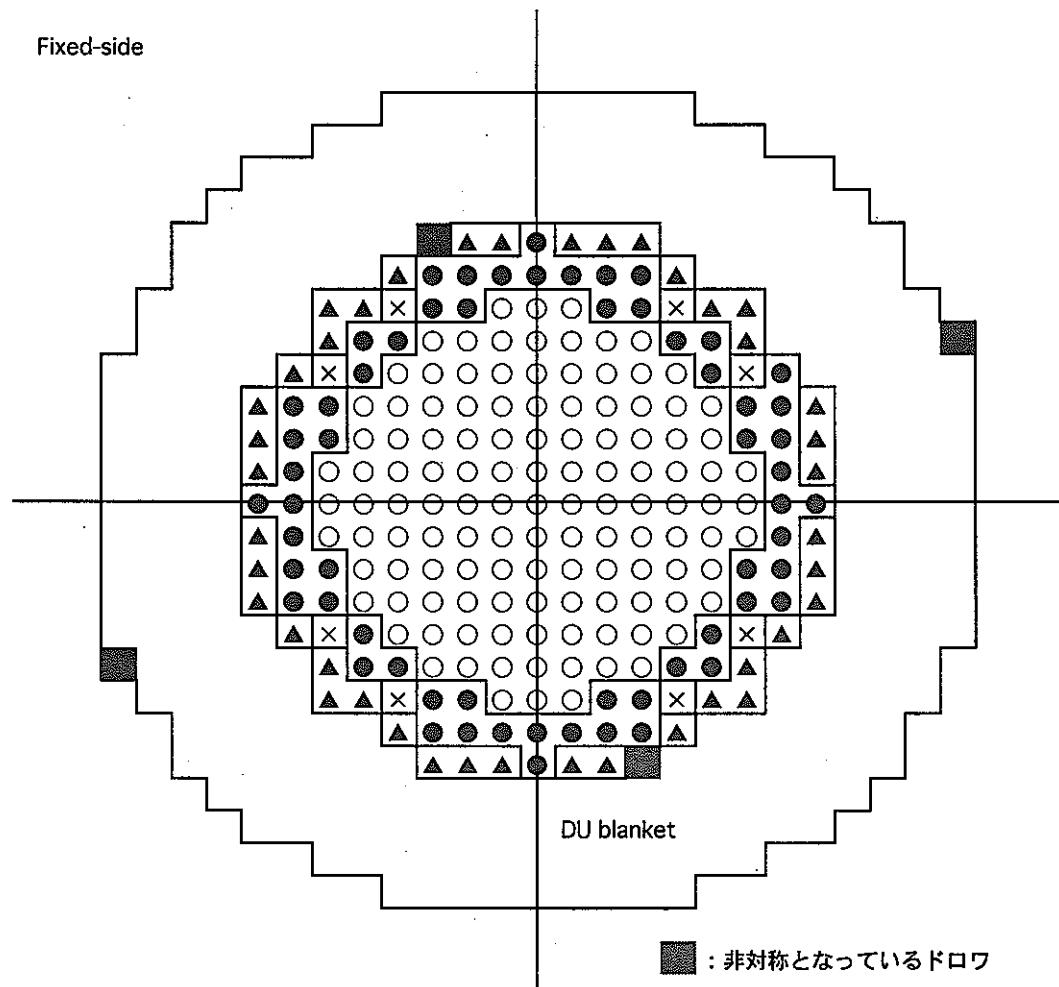


図3.1-1 FCA XVII-1炉心計算体系（1/2対称炉心モデル、As built）

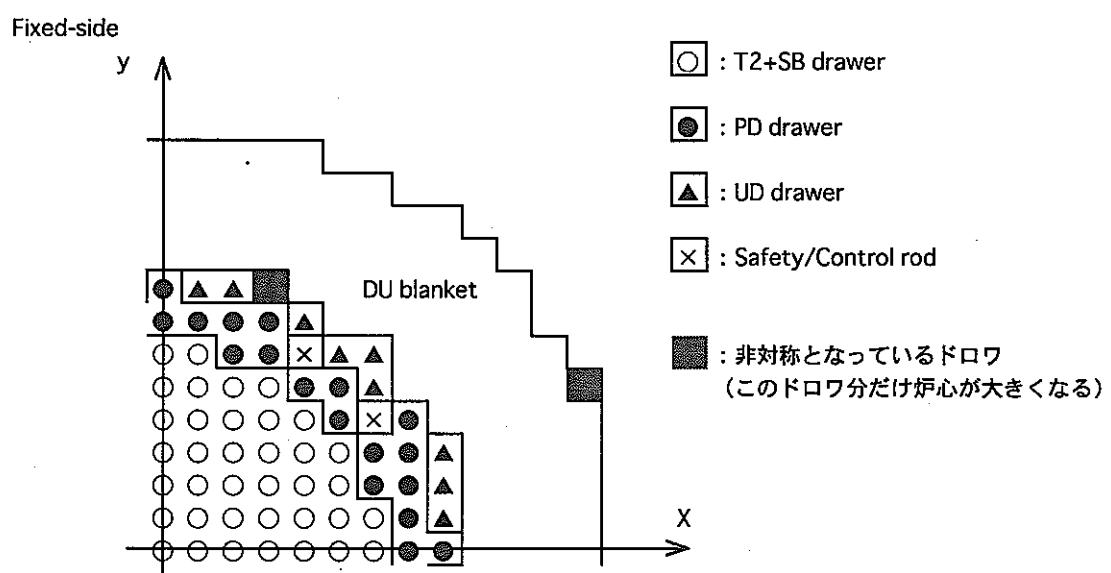


図3.1-2 FCA XVII-1炉心計算体系（1/8対称炉心モデル）

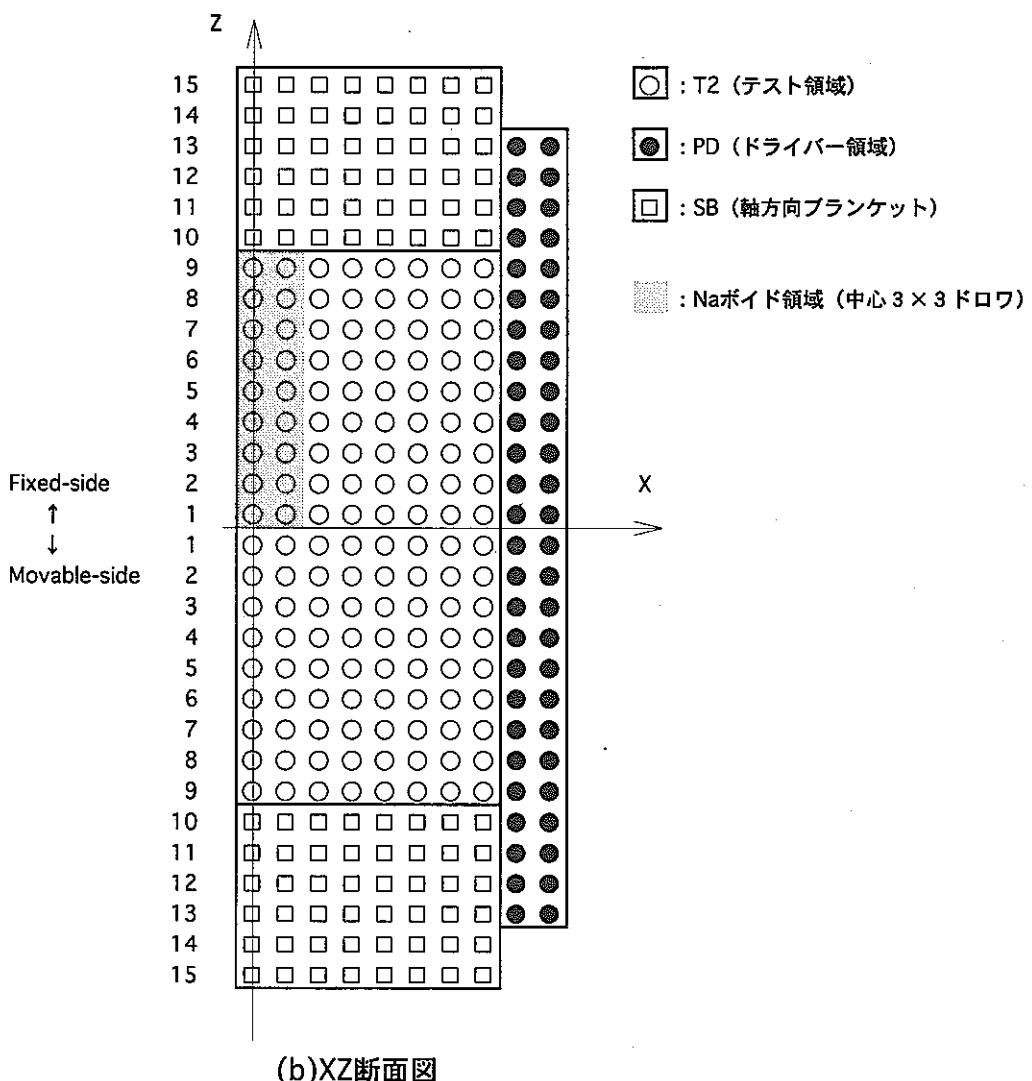
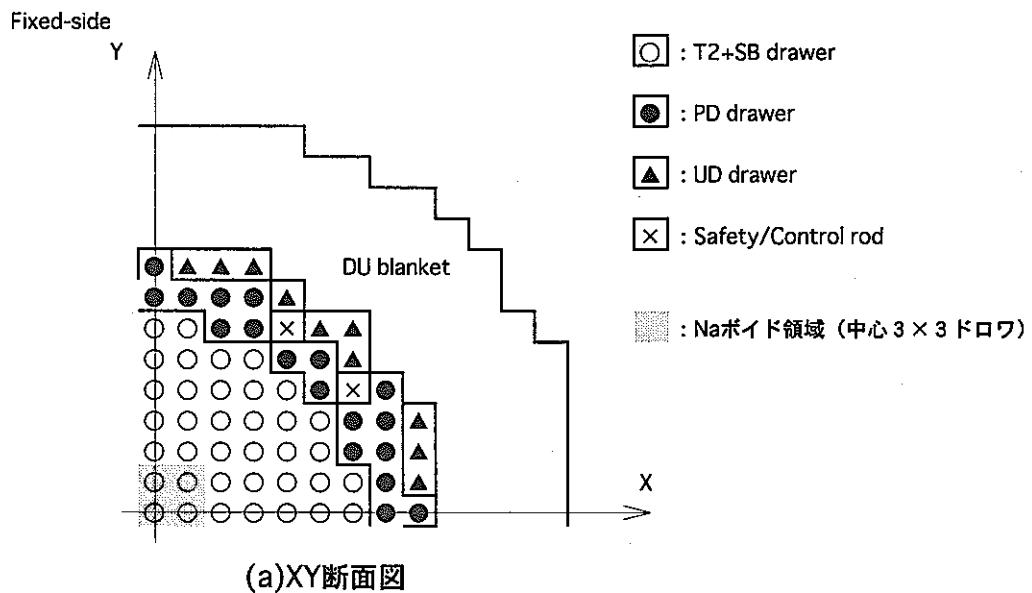
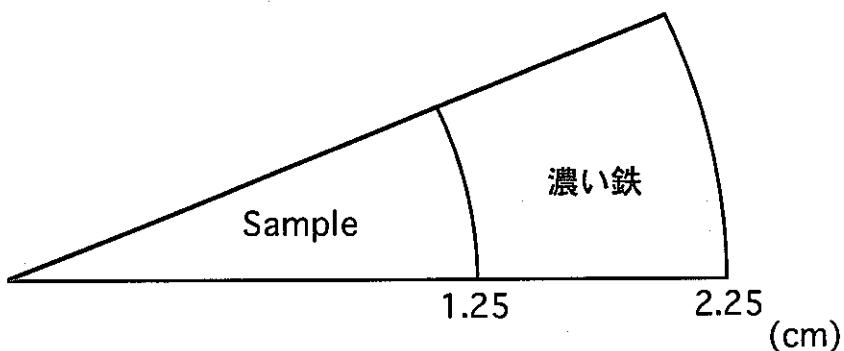
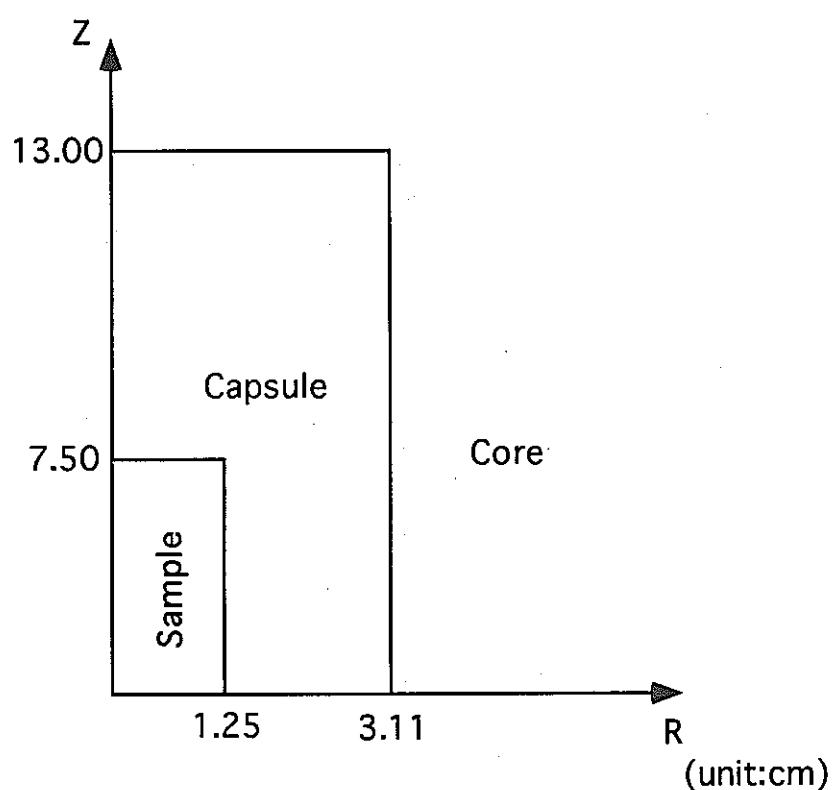


図3.1-3 FCA XVII-1炉心Naボイド反応度価値の計算体系



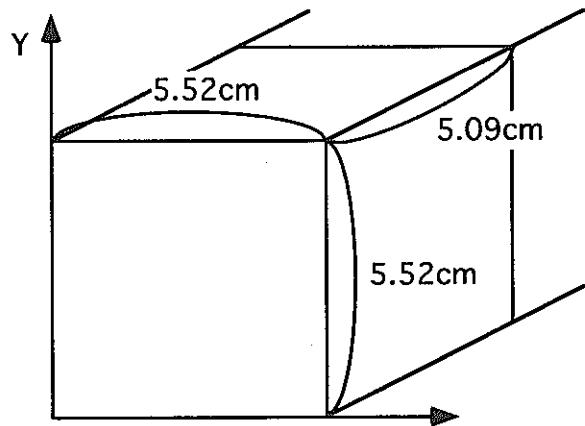
(a)格子計算体系 (Isolated Lampモデル)



(b)炉心計算体系

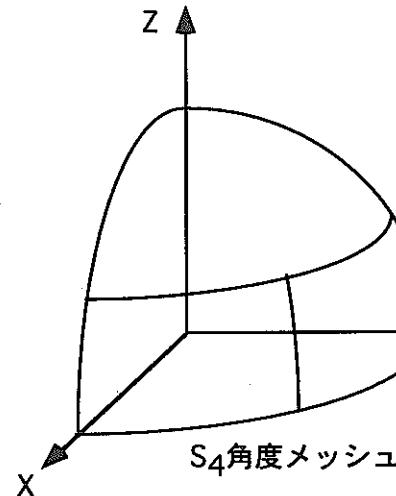
図3.1-4 ドップラーサンプルの計算体系

●基準空間メッシュ

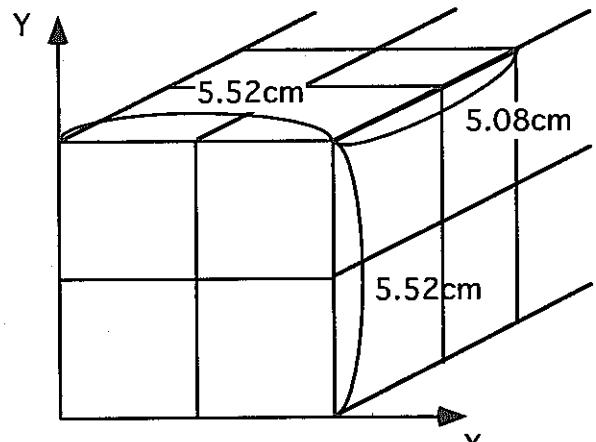


5cm空間メッシュ  
(1単位セルあたり $1 \times 1 \times 1$ メッシュ)

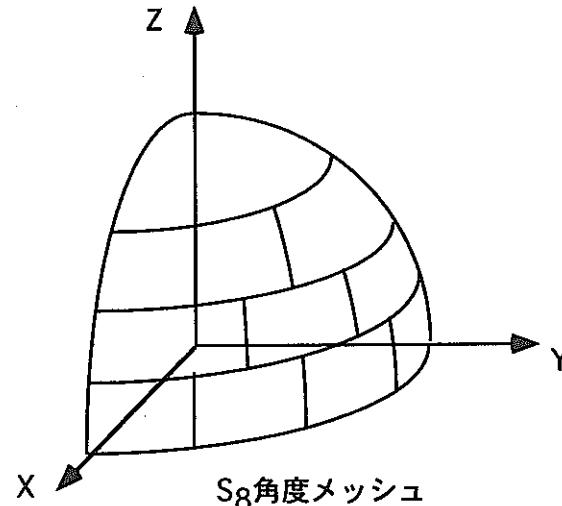
●基準角度メッシュ



→ JUPITER  
実験解析



空間2倍メッシュ  
(1単位セルあたり $2 \times 2 \times 2$ メッシュ)



→ FCA  
実験解析

図3.3-1 基準計算体系の空間・角度メッシュ

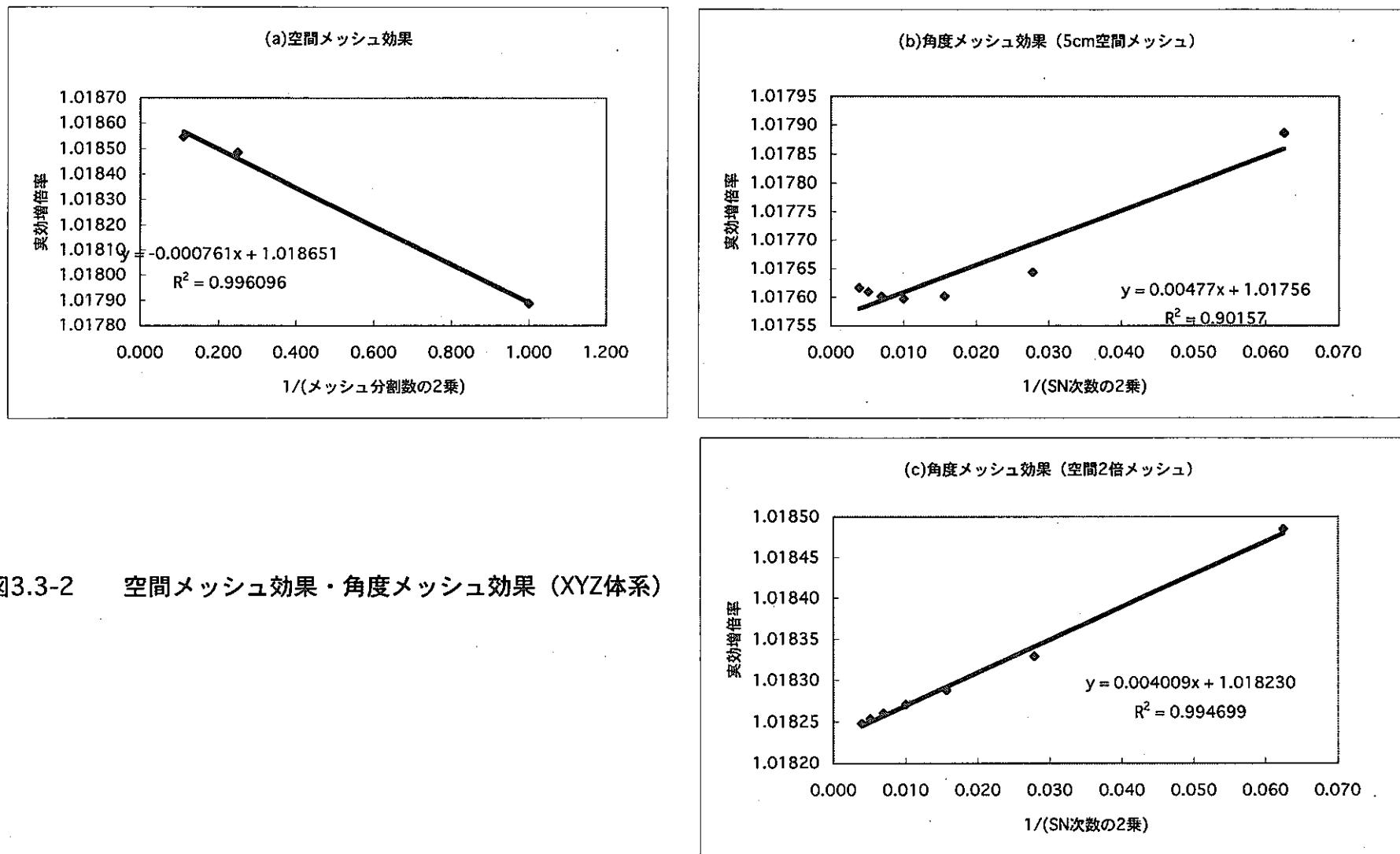


図3.3-2 空間メッシュ効果・角度メッシュ効果 (XYZ体系)

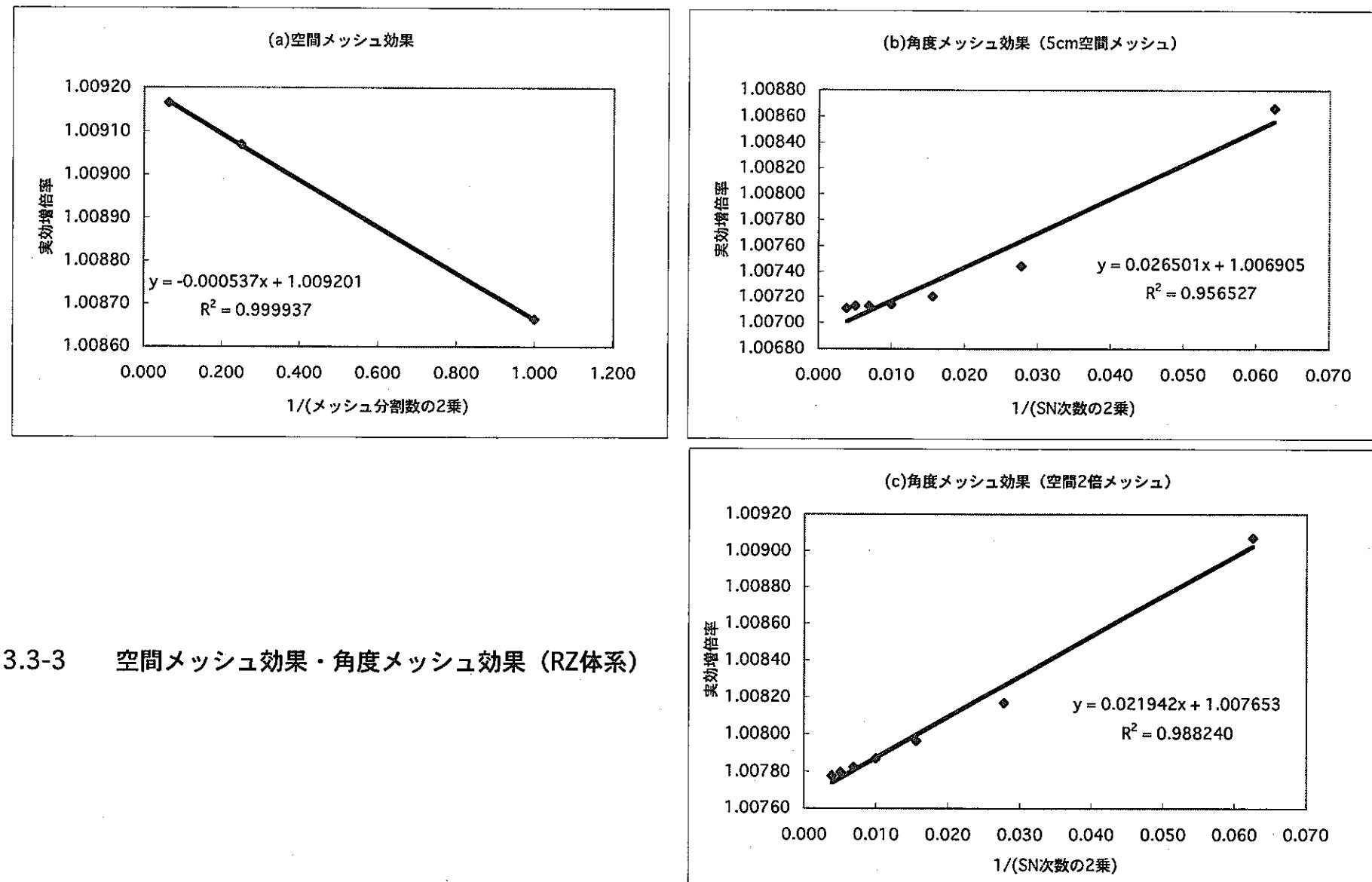


図3.3-3 空間メッシュ効果・角度メッシュ効果 (RZ体系)

## 第4章 実験解析結果

本章では、FCA XVII-1炉心の臨界性、反応率比、Naボイド反応度価値、ドップラー反応度価値の解析結果についてまとめる。JUPITER標準解析手法による解析結果、原研の手法による解析結果、JUPITER実験解析結果を比較し、検討を行う。

### 4.1 臨界性の解析結果

解析結果を表4.1-1に示す。臨界性のC/E値は非対称炉心で0.9950、対称炉心で0.9942であり、非対称炉心及び対称炉心のC/E値は0.1%以下の差で一致している。原研の解析結果（対称炉心）を動燃の結果と比較すると、両者の差は0.01%であり、良く一致していることが分かる。補正係数も、群縮約補正以外はほぼ一致している。群縮約補正の絶対値が原研解析値の方が小さいのは、動燃は70群から18群への縮約効果であるのに対し、原研は70群から25群への縮約効果であるからだと考えられる。

JUPITER標準解析手法を用いて求めたJENDL-3.2に基づくZPPR-9炉心の臨界性のC/E値は0.9935であった<sup>(Ref. 2-2)</sup>。したがって、FCA XVII-1炉心、ZPPR-9炉心ともに0.5～0.7%の過小評価であり傾向は一致していることが分かる。ただし、C/E値の傾向が一致しているだけでは、両炉心のC/E値の整合性が取れているとは判断できず、感度解析結果、炉定数調整結果を用いた分析が必要であると考えられる。

### 4.2 反応率比の解析結果

解析結果及び実験値との比較を表4.2-1に示す。動燃の解析では、FCA XVII-1の炉心中心位置でのC28/F49反応率比のC/E値は0.996とほぼ1となった。一方、原研の解析ではC/E値は0.992であり、同様の結果となっている。JUPITER標準解析手法を用いて求めたZPPR-9の内側炉心でのC28/F49反応率比のC/E値は1.034（JENDL-3.2、フォイルベース）であった<sup>(Ref. 2-2)</sup>。したがって、ZPPR-9では約3%の過大評価となっており<sup>(Ref. 2-2)</sup>、実験と計算がほぼ一致するFCA XVII-1炉心とは傾向が異なることが分かる。反応率比は解析手法による誤差が小さく、感度係数も体系依存性が小さいため断面積調整によりこの差が縮まる可能性は低いと考えられる。

一方、FCA XVII-1炉心のC28/F25反応率比については、動燃の解析によるC/E値は1.029である。原研の解析によるC/E値は1.022であり、両者の差は0.6%と小さい。JUPITER実験ではC28/F25反応率比の測定は行われていないが、JUPITER標準解析手法を用いて求めたJENDL-3.2に基づくZPPR-9の内側炉心でのC28/F49とF25/F49のC/E値がそれぞれ1.034、0.9955であることから、C28/F25のC/E値を推測すると約1.04となる（C28/F25=(C28/F49)/(F25/F49)）。FCA XVII-1炉心が約3%の過大評価、ZPPR-9炉心が約4%の過大評価であり、C28/F49に比べると比較的傾向は一致している。

また、ここでは直接検討していないが、C28/F49とC28/F25のC/E値から、F25/F49の

C/E値を推測すると、動燃が0.968、原研が0.971となり、約3%の過小評価となる。ZPPR-9の内側炉心では0.9955であるので、F25/F49もFCA XVII-1とZPPR-9で傾向が異なるといえる。このため、FCA XVII-1での測定値の見直しを行ったが、現在のところ原因は明らかとなっておらず、今後の検討が必要である。

#### 4.3 ナトリウムボイド反応度価値の解析結果

動燃の解析結果を表4.3-1、原研の解析結果を表4.3-2に示す。Naボイド反応度の測定値の実験誤差は比較的大きく $\pm 0.027 \times 10^4 \Delta k/kk$ である。ボイド化された領域によって、実験値の相対誤差は異なり、漏洩成分と非漏洩成分の相殺が大きいステップボイドの5z, 6z, 7zでは10%を超える。実験誤差が大きいことに注意すれば、ステップボイドについては、実験誤差の範囲内で計算値と実験値は一致していることが分かる。

しかし、Naボイド規模依存性測定の1-2z, 1-6z, 1-9zについては、動燃による解析は、実験誤差の範囲を超えてずれを示す。Naボイド反応度価値については、解析誤差も大きいと考えられており、JUPITER実験解析では、Naボイド反応度の解析誤差を9%と設定している。この解析誤差は、20~30%の過大評価が見られたJENDL-2での解析時の設定値であり、JUPITER実験解析誤差をそのままFCA実験解析誤差に適用できる保証はないが、この解析誤差がそのまま使えるとすれば、C/E値の1からのずれは、誤差の範囲内とみることもできる。今後、モデル化による感度等を検討し、FCAでのNaボイド反応度の解析誤差を評価する必要があると考えられる。

一方、原研の解析では、どの結果も実験誤差範囲内で実験値とほぼ1に一致している。動燃の解析で実験誤差以上にずれの見られた1-2z, 1-6z, 1-9zについてもそれぞれ、C/E値=1.038, 1.012, 0.999<sup>(Ref. 1-8)</sup>となっており、実験誤差の範囲内で一致している。

動燃と原研のC/E値を比較すると、動燃のC/E値はステップボイド、ボイド規模依存性を問わず、原研のC/E値に比べて一様に大きくなっていることが分かる。更に見ていくと、この差は基準計算の段階で既に現れていることが分かる。この差の原因を調べるために、1-2zに注目して検討を行った。1-2zの基準計算値は、原研計算値に比べ動燃計算値は約6%大きくなっていることが分かる。この差について、ナトリウムボイド反応度の内訳を調べたところ、非漏洩成分の散乱項の差が支配的であることが分かった。更に、この差が生じた原因の内訳を調べるために、動燃側でも2次元RZ体系で基準計算を行ったところ、XYZ体系とRZ体系の違いによる差が約2%，実効断面積の違いによる差が4%であることが分かった（表4.3-3参照）。今後、実効断面積に差が生じた原因の追求を含め、更に詳細な検討が必要である。

#### 4.4 $^{238}\text{U}$ ドップラー反応度価値の解析結果

$^{238}\text{U}$  ドップラー反応度価値の解析結果を表4.4-1に示す。動燃の解析によるとC/E値は、 $20^\circ\text{C} \rightarrow 550^\circ\text{C}$ で0.895、 $20^\circ\text{C} \rightarrow 800^\circ\text{C}$ で0.865と、10~13%の過小評価となった。一方、原研の解析ではC/E値は、 $20^\circ\text{C} \rightarrow 550^\circ\text{C}$ で0.977、 $20^\circ\text{C} \rightarrow 800^\circ\text{C}$ で0.971となっており、動燃解

析結果よりも実験と良い一致を示す。ただし、前述の通り、動燃の解析結果は共鳴干渉効果を評価していない。原研の解析によると、FCA XVII-1のNUO2-25サンプル（20°C→800°C）に対して、共鳴干渉効果を考慮した場合（PEACO-Xコード）と考慮しない場合（SLAROMコード）の比は1.077である<sup>(Ref. 1-5)</sup>。この値を共鳴干渉効果の補正係数として用い、温度に依存しないとすると、動燃解析のC/E値は、20°C→550°Cで0.964、20°C→800°Cで0.932となり、原研の解析値にかなり近づくことが分かる。このことから、動燃と原研のC/E値の差は主に共鳴干渉効果の取り扱いによるものであり、この効果を評価すれば、ほぼ等しい結果となると考えられる。

JUPITER標準解析手法を用いて求めたZPPR-9炉心の天然ウラン酸化物サンプル298K(25°C)→1087.0K(814°C)を参照するとC/E値は0.833であり、約17%の過小評価であった<sup>(Ref. 2-2)</sup>。なお、この解析結果はPEACO-Xコードを用いて共鳴干渉効果を補正した値である。このことから、FCA XVII-1炉心とZPPR-9炉心の結果には、10%以上の系統的なずれがあると考えられる。今後、炉定数調整計算を行うことにより、この差が核データに起因するものかどうか等を検討する必要がある。

表4.1-1 FCA XVII-1炉心の臨界性解析結果

	動燃		原研
	非対称炉心	対称炉心	対称炉心
基準計算値	0.9946	0.9976	0.9969
群縮約補正	-0.0008	-0.0008	-0.0001
メッシュ補正	-0.0012	-0.0012	-0.0011
輸送補正	+0.0061	+0.0061	+0.0060
補正後計算値	0.9986	1.0016	1.0017
実験値	1.0036±0.0002	1.0074±0.0002	
C/E値	0.9950	0.9942	0.9943

表4.2-1 FCA XVII-1炉心の反応率比解析結果

		C28/F49		C28/F25	
		動燃	原研	動燃	原研
基準計算値		0.1450	0.1445	0.1360	0.1351
補正值	輸送・メッシュ補正	+0.0001	—	+0.0000	—
補正後計算値		0.1451	0.1445	0.1360	0.1351
実験値 <sup>1)</sup>		0.1457±2.0%		0.1322±1.7%	
C/E値		0.996	0.992	1.029	1.022

1) : Ref. 1-2

表4.3-1 FCA XVII-1炉心のNaボイド反応度価値解析結果(動燃)

	基準計算*			輸送・メッシュ 補正係数		補正後計算値* (2成分補正)	実験値 <sup>3)*</sup> (誤差: ±0.027)	C/E値	C-E値*
	Non-L <sup>1)</sup>	L <sup>2)</sup>	TOTAL	Non-L	L				
1z	0.579	-0.011	0.568	0.970	0.525	0.556	0.536±5.0%	1.037	0.020
2z	0.560	-0.039	0.521	0.970	0.787	0.513	0.504±5.4%	1.018	0.009
3z	0.524	-0.092	0.431	0.971	0.846	0.430	0.387±7.0%	1.112	0.043
4z	0.472	-0.167	0.305	0.972	0.864	0.314	0.296±9.1%	1.062	0.018
5z	0.411	-0.259	0.152	0.973	0.872	0.174	0.180±15%	0.966	-0.006
6z	0.345	-0.360	-0.016	0.975	0.876	0.020	0.024±113%	0.852	-0.004
7z	0.279	-0.462	-0.183	0.978	0.878	-0.133	-0.117±23%	1.137	-0.016
8z	0.220	-0.555	-0.335	0.982	0.880	-0.272	-0.256±11%	1.062	-0.016
9z	0.172	-0.590	-0.418	0.967	0.929	-0.382	-0.361±7.5%	1.057	-0.021
1-2z	1.148	-0.053	1.095	0.971	0.751	1.074	1.006±2.7%	1.068	0.068
1-6z	2.940	-0.987	1.953	0.972	0.882	1.987	1.881±1.4%	1.056	0.106
1-9z	3.629	-2.707	0.922	0.973	0.904	1.085	0.968±2.8%	1.121	0.117

1) : 非漏洩成分

\*: 単位は  $10^{-4} \Delta k/kk'$ 

2) : 漏洩成分

3) : Ref. 1-8

表4.3-2 FCA XVII-1炉心のNaボイド反応度価値解析結果(原研)

	基準計算 <sup>4)*</sup>			輸送・メッシュ 補正係数		補正後計算値 <sup>*</sup> (2成分補正)	実験値 <sup>3)*</sup> (誤差: ±0.027)	C/E値	C-E値 <sup>*</sup>
	Non-L <sup>1)</sup>	L <sup>2)</sup>	TOTAL	Non-L	L				
1z	0.536	-0.009	0.527	0.995	0.360	0.530	0.536±5.0%	0.989	-0.006
2z	0.519	-0.039	0.480	0.994	0.719	0.488	0.504±5.4%	0.968	-0.016
3z	0.485	-0.096	0.389	0.995	0.781	0.408	0.387±7.0%	1.053	0.021
4z	0.437	-0.176	0.261	0.997	0.801	0.295	0.296±9.1%	0.997	-0.001
5z	0.381	-0.274	0.106	0.998	0.809	0.158	0.180±15%	0.876	-0.022
6z	0.319	-0.382	-0.063	1.002	0.814	0.009	0.024±113%	0.373	-0.015
7z	0.259	-0.491	-0.232	1.007	0.816	-0.140	-0.117±23%	1.199	-0.023
8z	0.205	-0.590	-0.385	1.009	0.819	-0.277	-0.256±11%	1.081	-0.021
9z	0.161	-0.663	-0.502	0.996	0.823	-0.386	-0.361±7.5%	1.068	-0.025
1-2z	1.085	-0.055	1.030	0.999	0.723	1.044	1.006±2.7%	1.038	0.038
1-6z	2.780	-0.977	1.803	1.001	0.899	1.904	1.881±1.4%	1.012	0.023
1-9z	3.436	-2.707	0.729	1.002	0.915	0.967	0.968±2.8%	0.999	-0.001

1) : 非漏洩成分

\*: 単位は  $10^{-4} \Delta k/kk'$ 

2) : 漏洩成分

3) : Ref. 1-8

4) : 基準計算は、70群RZ体系計算値にXYZ/RZ体系の補正を加えたもの

表4.3-3 Naボイド反応度価値(1-2z)の基準計算値の差の検討

	基準計算値( $10^{-4} \Delta k/kk'$ )
①動燃解析 (CASUPコード、3次元XYZ体系)	1.095
②追加解析 (CASUPコード、2次元RZ体系)	1.074
③原研解析 (SLAROMコード、2次元RZ体系)	1.030
	基準計算値の差
動燃解析と原研解析の差 (①-③)/③	6.3%
計算体系の違いによる差 (①-②)/②	2.0%
実効断面積の違いによる差 (②-③)/③	4.3%

表4.4-1 ドップラーサンプル(NUO2-25)反応度価値の解析結果

		20°C→550°C		20°C→800°C	
		動燃	原研	動燃	原研
基準計算値*		-5.513	—	-7.045	—
補正値	輸送・メッシュ	0.969	—	0.968	—
	群縮約	1.051	—	1.051	—
補正後計算値*		-5.613 <sup>1)</sup>	—	-7.173 <sup>1)</sup>	—
実験値 <sup>*3)</sup>		$-6.27 \pm 0.18$		$-8.29 \pm 0.18$	
C/E値		0.895 (0.964 <sup>2)</sup> )	0.977 <sup>4)</sup>	0.865 (0.932 <sup>2)</sup> )	0.971 <sup>4)</sup>

1)：共鳴干渉効果の補正は行っていない。

\*: 単位は  $10^6 \Delta k/kk'$ 

2)：共鳴干渉効果補正係数1.077を乗じた時のC/E値

3) : Ref. 1-5

4) : Ref. 1-4

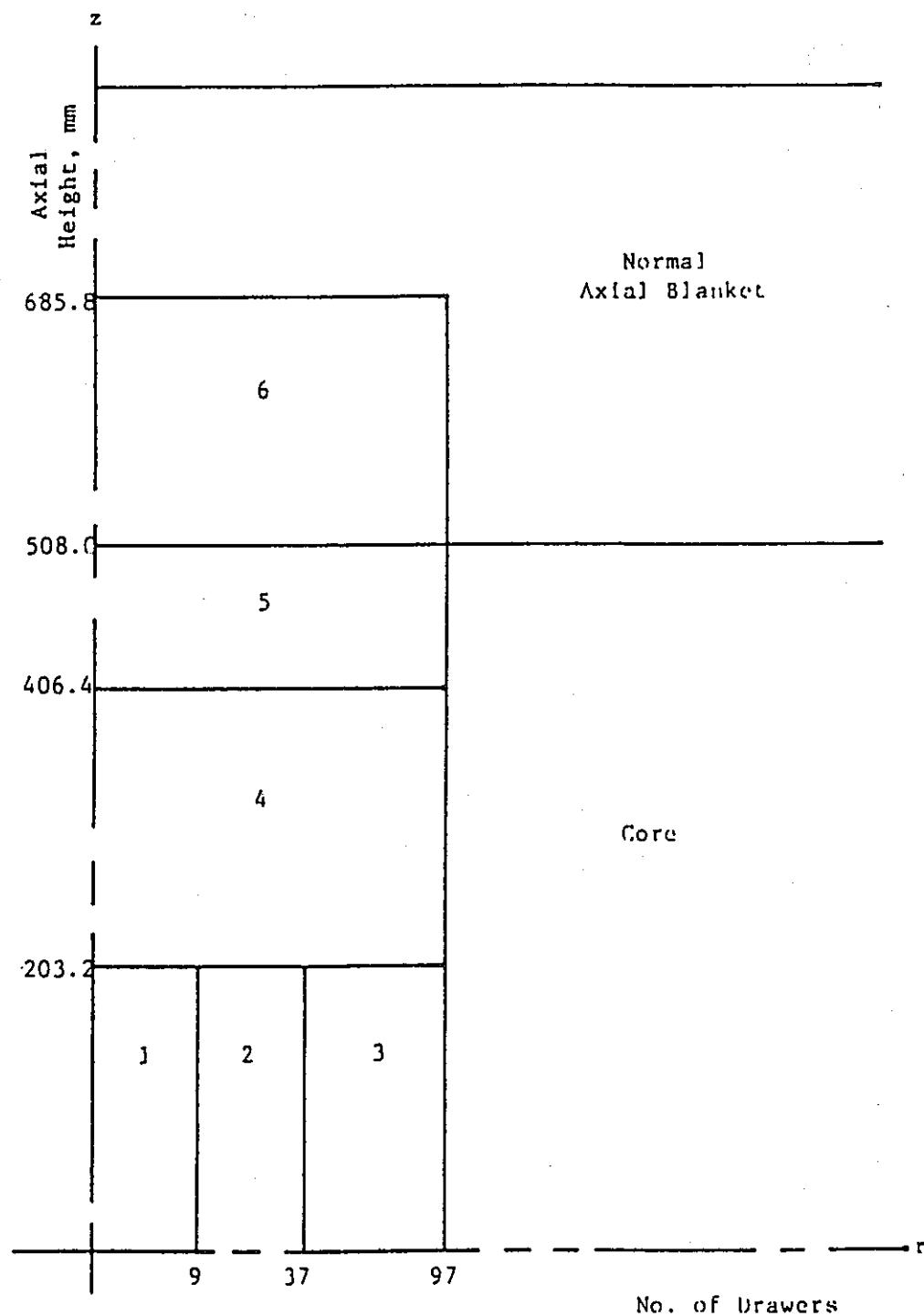


図4.3-1 ZPPR-9炉心のNaボイド反応度測定ステップ

## 第5章 感度解析

本章では、FCA XVII-1炉心の臨界性、反応率比、Naボイド反応度価値の感度解析結果についてまとめる。なお、ドップラー反応度価値については感度解析は行っていない。ここで計算された感度係数は、次年度に予定しているFCA XVII-1炉心の核特性を含めた炉定数調整計算を行うために必要となる。また、感度係数から炉心の特徴を知ることもできる。このため、ここではJUPITER実験のZPPR-9炉心の感度係数との比較を行い、FCA XVII-1炉心の特徴を調べる。

### 5.1 感度解析手法

感度解析は一般化摂動論に基づくSAGEPコード<sup>(Ref. 3-12)</sup>を用いて行った。ここで行った感度解析はすべて2次元RZ体系での計算であり、核データとしては前章までの解析と同様にJENDL-3.2に基づく高速炉用炉定数セットJFS-3-J3.2を用いた。

### 5.2 感度解析結果

FCA XVII-1炉心の感度解析結果を、表5.2-1～表5.2-6に臨界性（対称炉心）、反応率比（C28/F49, C28/F25）、Naボイド反応度価値（1-2z, 1-6z, 1-9z）の順に示す。同じ結果を、感度係数の絶対値の大きなものから5核種とPu-239の核分裂スペクトルについてグラフ化したものを図5.2-1～図5.2-6に示す。なお、図中のC, F, E, Iは、それぞれ、中性子捕獲、核分裂、弾性散乱、非弾性散乱断面積を表す。

比較のため、ZPPR-9炉心の感度解析結果を、表5.2-7～表5.2-10に臨界性、反応率比（C28/F49, C28/F25）、Naボイド反応度価値（97ドロワ、Z軸方向=20inch）の順に示す。同様にグラフ化したものを図5.2-7～図5.2-10に示す。なお、ZPPR-9では、C28/F25反応率比の測定は実際には行われていないので、C28/F25の感度係数は仮想的に計算されたものである。

#### 5.2.1 臨界性の感度解析結果

臨界性感度係数は、中性子生成量に直接影響を与えるPu-239、U-235の核分裂断面積及び $\nu$ が大きな正の感度を持っており、中性子吸収量に直接影響を与えるU-238捕獲断面積が大きな負の感度を持っていることが確認できる。この傾向は、ZPPR-9でもほとんど同じである。ただし、ZPPR-9では、U-235の核分裂断面積、 $\nu$ の感度係数はほぼ零であることが分かる。ZPPR-9では燃料としてPuのみを用いているのに対して、FCA XVII-1炉心は炉心周辺部にウラン燃料領域を持っているためである。

#### 5.2.2 反応率比の感度解析結果

表5.2-3及び表5.2-4から、反応率比感度係数の絶対値が大きい反応は、感度係数の直接項として働く反応であることが分かる。すなわち、C28/F49ではU-238捕獲断面積とPu-238核分裂断面積、C28/F25ではU-238捕獲断面積とU-235核分裂断面積である。当然のことながら、反応率比の分子にあるU-238捕獲は正の感度、分母にあるPu-239核分裂とU-235核分裂は負の感度となっていることも確認できる。

以上の傾向は、ZPPR-9でもほとんど同じとなっており、感度係数の絶対値もほぼ等しい。反応率比の感度係数に関しては、FCA XVII-1、ZPPR-9は傾向の良く似た感度を持っているといえる。

### 5.2.3 Naボイド反応度価値の感度解析結果

#### (1) 感度係数の絶対値の大きい反応

Naボイド反応度価値の感度係数が決定されるメカニズムは、臨界性、反応率比に比べると複雑である。まず、感度係数の絶対値が大きいものに注目する。

表5.2-5～表5.2-7から、Pu-239核分裂と、U-235核分裂とは大きな負の感度を持つことが確認できる。これらの反応はNaボイド反応度価値の摂動分母と核分裂項に影響を与えるが、負の感度を持っていることから、摂動分母への影響が支配的であると推測される。また、U-238、Pu-239の捕獲の感度も大きく、エネルギー群合計としては正の感度となっているが、エネルギー群毎に見ると高エネルギー側で負の感度、低エネルギー側では正の感度となっている。これは、高エネルギー群では吸収項への影響が大きく、低エネルギー群では中性子捕獲の増大による中性子スペクトル硬化の影響が大きくなつたためではないかと推測される。このように、Na反応度価値の感度係数が決定されるメカニズムは複雑であり、今後、一般化摂動論の各項の計算結果を用いた詳細な分析が必要である。その他、U-238の非弾性散乱は大きな負の感度を持つことも分かる。これは、この反応断面積の増大により中性子スペクトルが軟らかくなるためであると考えられる。

続いて、JUPITER実験との比較を行う。比較対象としては、炉心高さまでボイド化した、FCA XVII-1の1-9zとZPPR-9のNaボイドstep5（97ドロワ、Z=20inch、図4.3-1参照）とする。上に述べた点については、U-235核分裂とを除けば、ZPPR-9でも同様の傾向を示している。ZPPR-9では、U-235核分裂との感度係数は、臨界性感度と同様、FCA XVII-1に比べて小さい。これは、臨界性感度解析結果の節でも述べたとおり、FCA XVII-1がウラン燃料領域を持っていることの特徴が表れた結果であると考えられる。

#### (2) 感度係数のボイド規模依存性の大きい反応

次に、ボイド規模依存性に注目して検討を行う。表5.2-5～表5.2-7から、1-2z、1-6z、1-9zの感度係数を比較すると、U-238、Na、O、Feの弾性散乱の感度は、他の反応に比べてボイド規模依存性が大きいことが分かる。これらの感度係数を改めて図5.2-12に示す。

この図から、U-238, O, Feはボイド領域が大きくなるにつれて、感度係数が大きくなる（正に）なるのに対して、Naの感度係数は小さく（負に）なっていることが分かる。また、FCA XVII-1でボイド規模依存性が大きいため、FCA XVII-1とZPPR-9で感度係数の絶対値が大きく異なったり、正負の符号が逆転することがある。例えば、FCA XVII-1の1-9zとZPPR-9のstep4とを比較すると感度係数の符号がすべて逆転している。炉定数調整計算では、感度係数の符号が変われば断面積を調整する方向が逆向きになるので、特徴のあるデータとなる。

これら核種の弾性散乱断面積の感度係数に大きなボイド規模依存性が表れた原因を調べるために、漏洩項に与える影響について検討する。ZPPR-9に比べて炉心の小さいFCA XVII-1では、ボイド領域拡大による漏洩項の寄与増大の効果が大きいと考えられる。確認のため、漏洩項と非漏洩項の比（基準計算値）を比較すると、炉中心ボイドのFCA XVII-1の1-2zで0.05、ZPPR-9のstep1で0.07<sup>(Ref. 2-2)</sup>と大差ないのに対して、炉心高さまでボイド化した場合、FCA XVII-1の1-9zで0.75、ZPPR-9のstep5で0.46<sup>(Ref. 2-2)</sup>となっており、FCA XVII-1の方が中性子漏洩の影響が大きいことが分かる。

Na以外のU-238, O, Feについては、散乱断面積が大きくなれば、中性子は漏れにくくなるのでNaボイド反応度値は大きくなる。中性子漏洩の寄与はボイド領域が大きくなるほど大きくなるので、ボイド領域が大きくなるにつれてU-238, O, Feの感度係数が大きくなつたと考えられる。一方、Naも散乱断面積が大きくなれば中性子は漏れにくくなるが、Naは摂動後はボイド化してなくなってしまうので影響を受けないが、摂動前の体系では散乱断面積が大きくなると中性子が漏れにくくなり、結果として、摂動による中性子漏洩の変化量は大きくなる。すなわち、Naの散乱断面積が大きくなるとNaボイド反応度値を小さくする方向に働くと考えられる。中性子漏洩の寄与はボイド領域とともに大きくなるので、この効果が大きくなり、Naの散乱断面積の感度係数はボイド領域が大きくなるにつれて小さくなつたと考えられる。

以上のことから、FCA XVII-1の炉心がZPPR-9に比べて小さく中性子漏洩量が大きいため、感度係数のボイド規模依存性が大きくなり、ZPPR-9の感度係数と絶対値が大きく異なつたり、正負の符号が異なつたり、異なつた特徴を示したと考えられる。

### 5.3 まとめ

FCA XVII-1炉心の臨界性、反応率比、Naボイド反応度値について感度解析を行った。これまで炉定数調整に用いてきたJUPITER実験の代表炉心として、ZPPR-9炉心を探り上げ感度係数を比較することにより、FCA XVII-1の特徴を調べた。

反応率比の感度係数はZPPR-9と符号、絶対値ともにほぼ同じ結果となった。一方で、臨界性、Naボイド反応度値の感度係数には、FCA XVII-1が炉心周辺にウラン燃料領域を持っている特徴（U-235の感度が大きい）が表れていることが確認できた。また、Naボイド反応度値の感度係数は、ZPPR-9に比べて、ボイド規模依存性が大きいことも分かった。これは、FCAが小型炉であることによる特徴（中性子漏洩量が大きい）が表れたものと考えられる。

以上のように、FCA XVII-1は感度係数から見ても、JUPITER炉心とは異なった特徴を持った炉心であるといえる。FCA XVII-1の積分データを追加して、炉定数調整計算を行うことにより、統合炉定数の更なる精度向上と信頼性向上を図ることができると考えられる。









































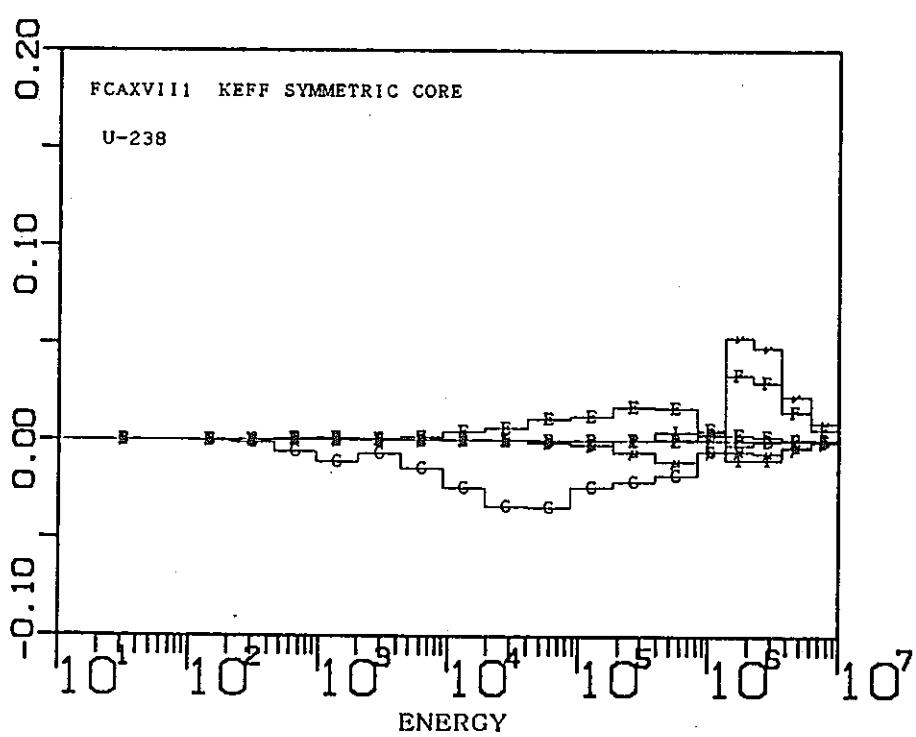
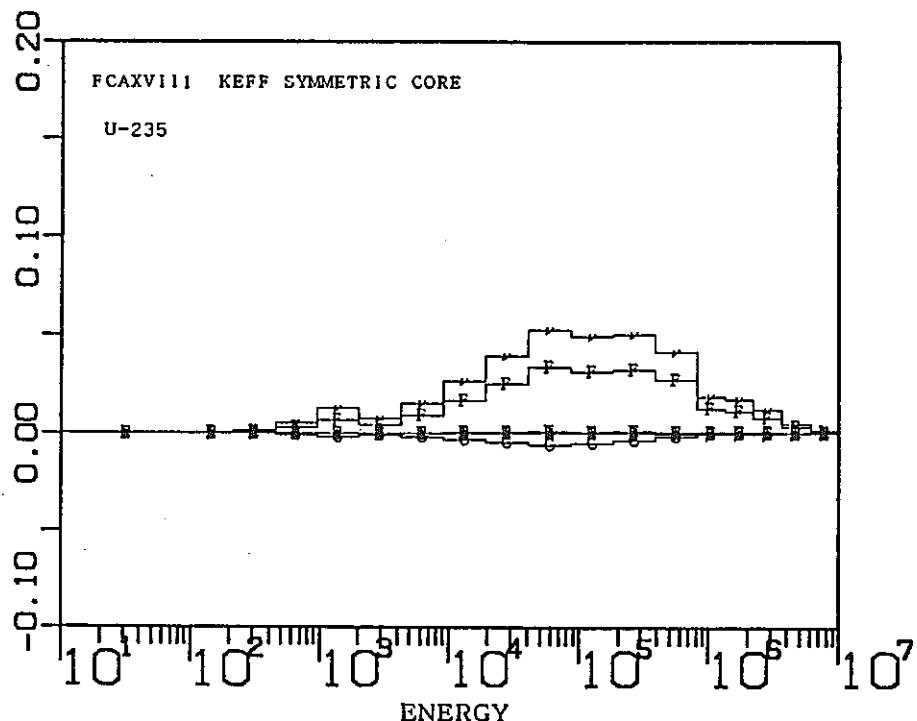


図5.2-1 FCA XVII-1の臨界性（対称炉心）に対する感度係数(1/3)

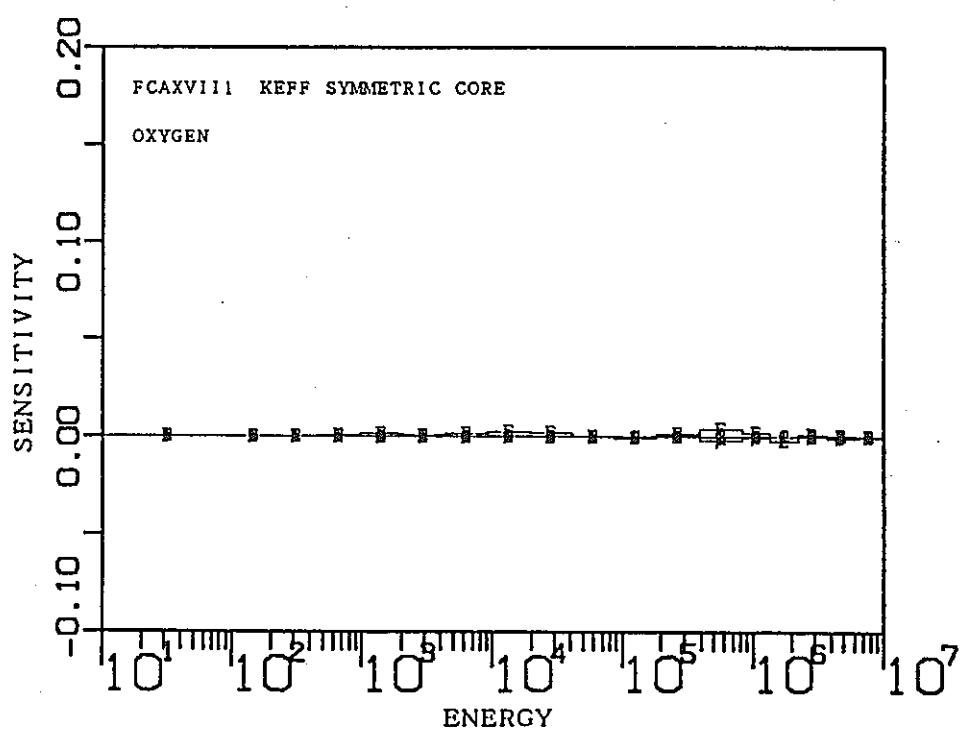
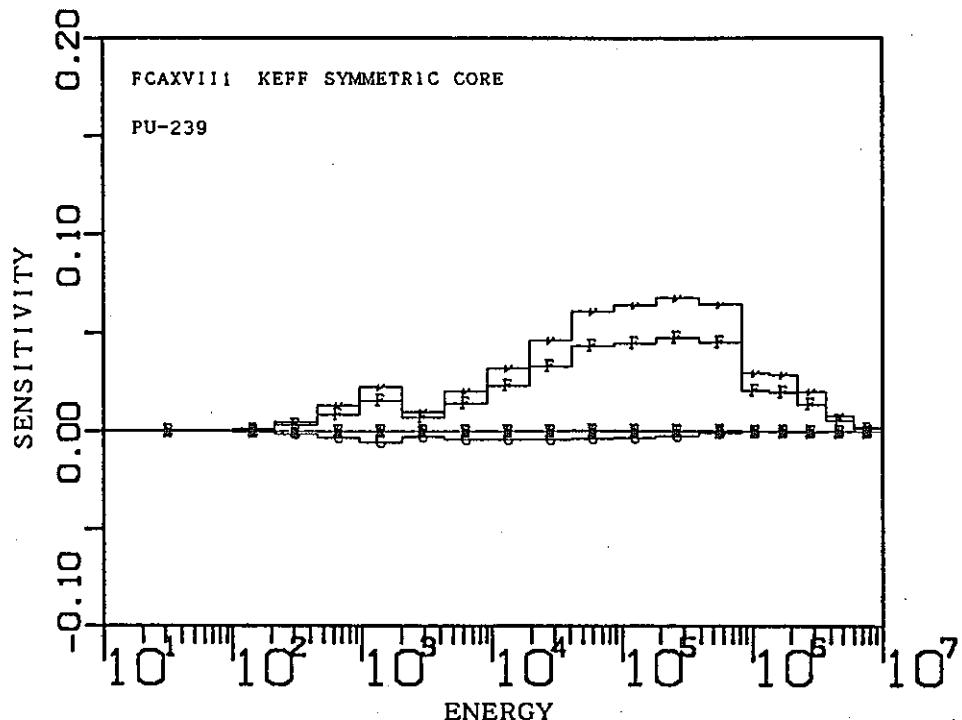


図5.2-1 FCA XVII-1の臨界性（対称炉心）に対する感度係数(2/3)

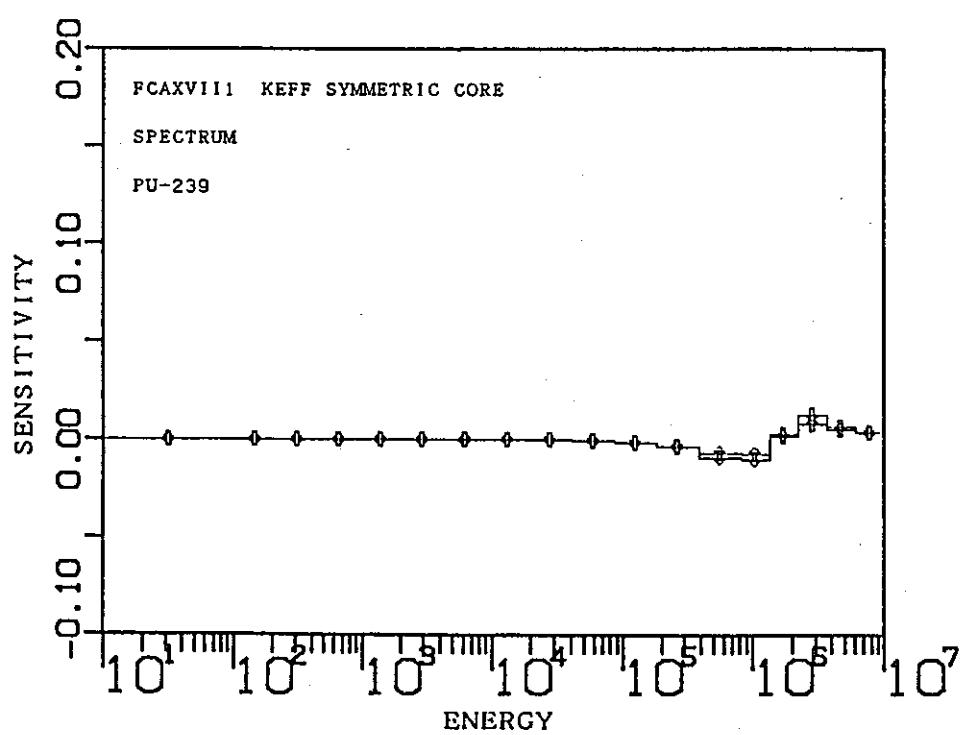
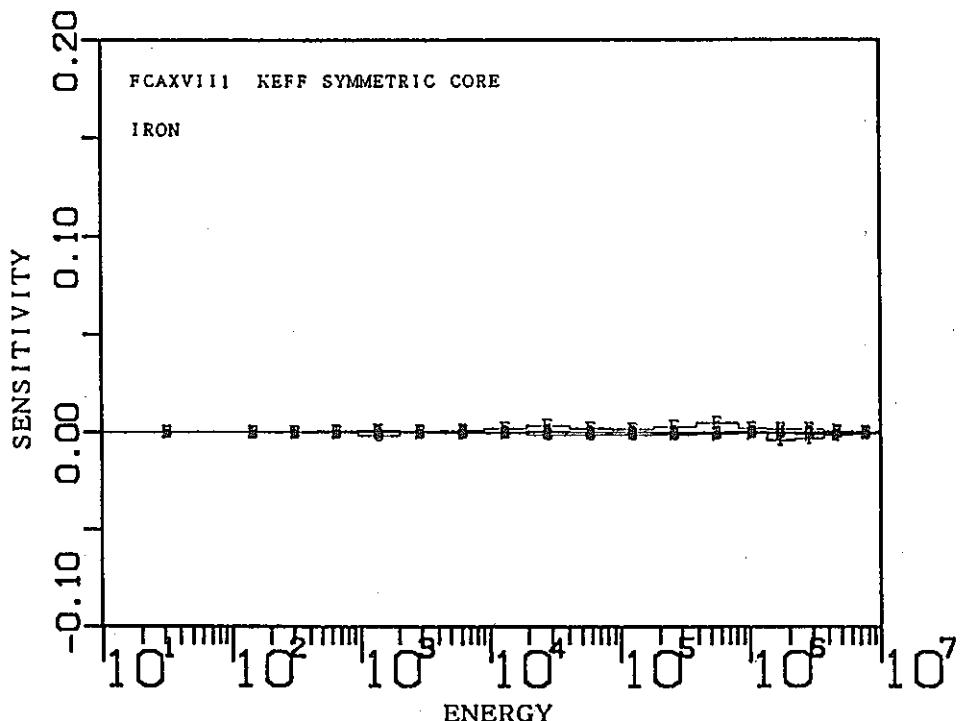


図5.2-1 FCA XVII-1の臨界性（対称炉心）に対する感度係数(3/3)

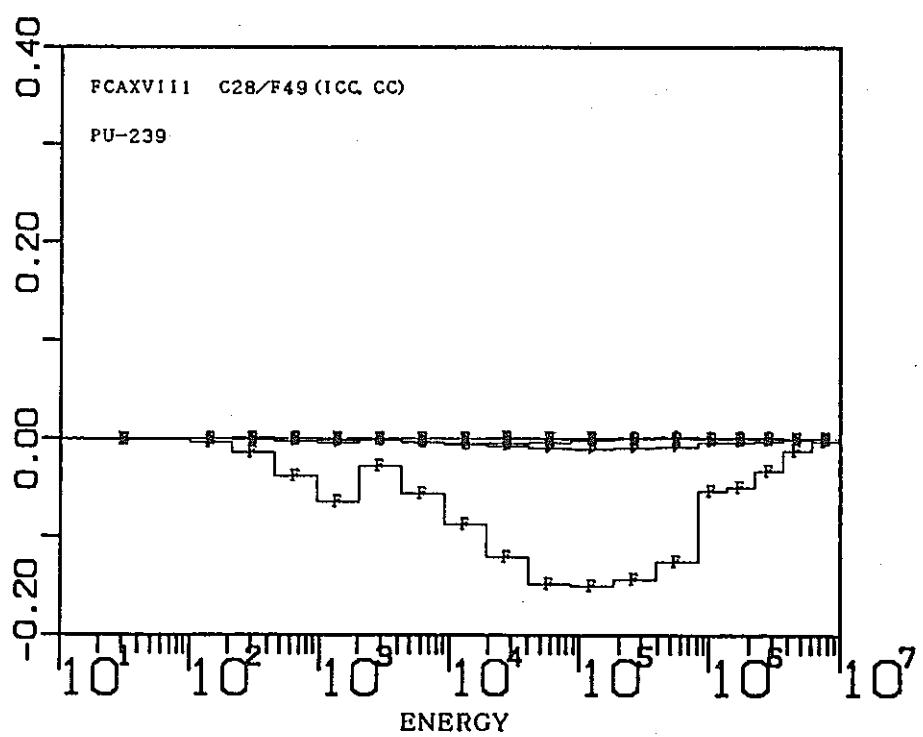
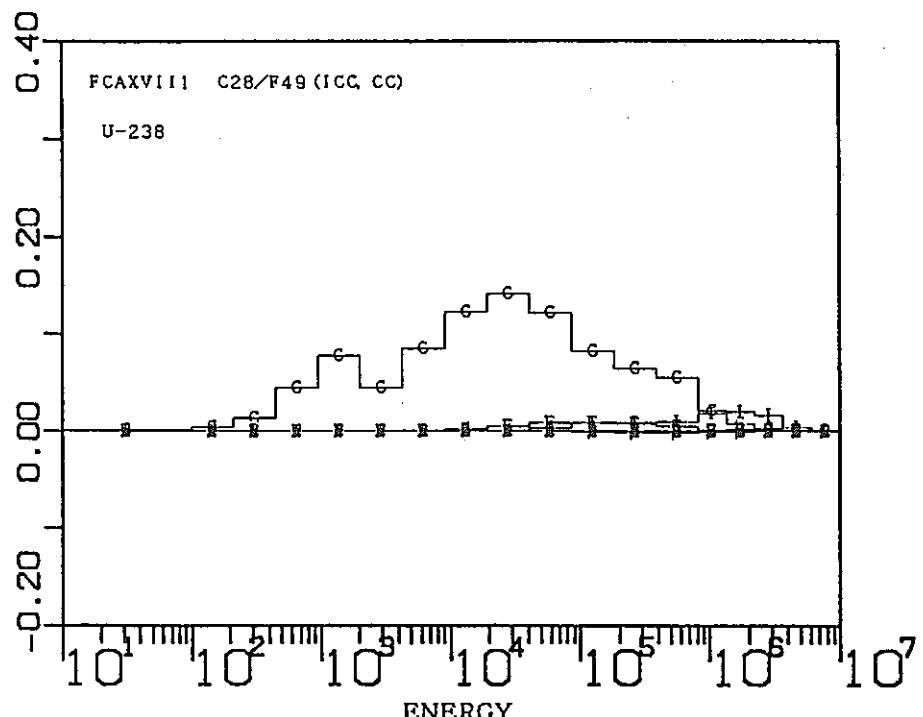


図5.2-2 FCA XVII-1のC28/F49反応率比に対する感度係数(1/3)

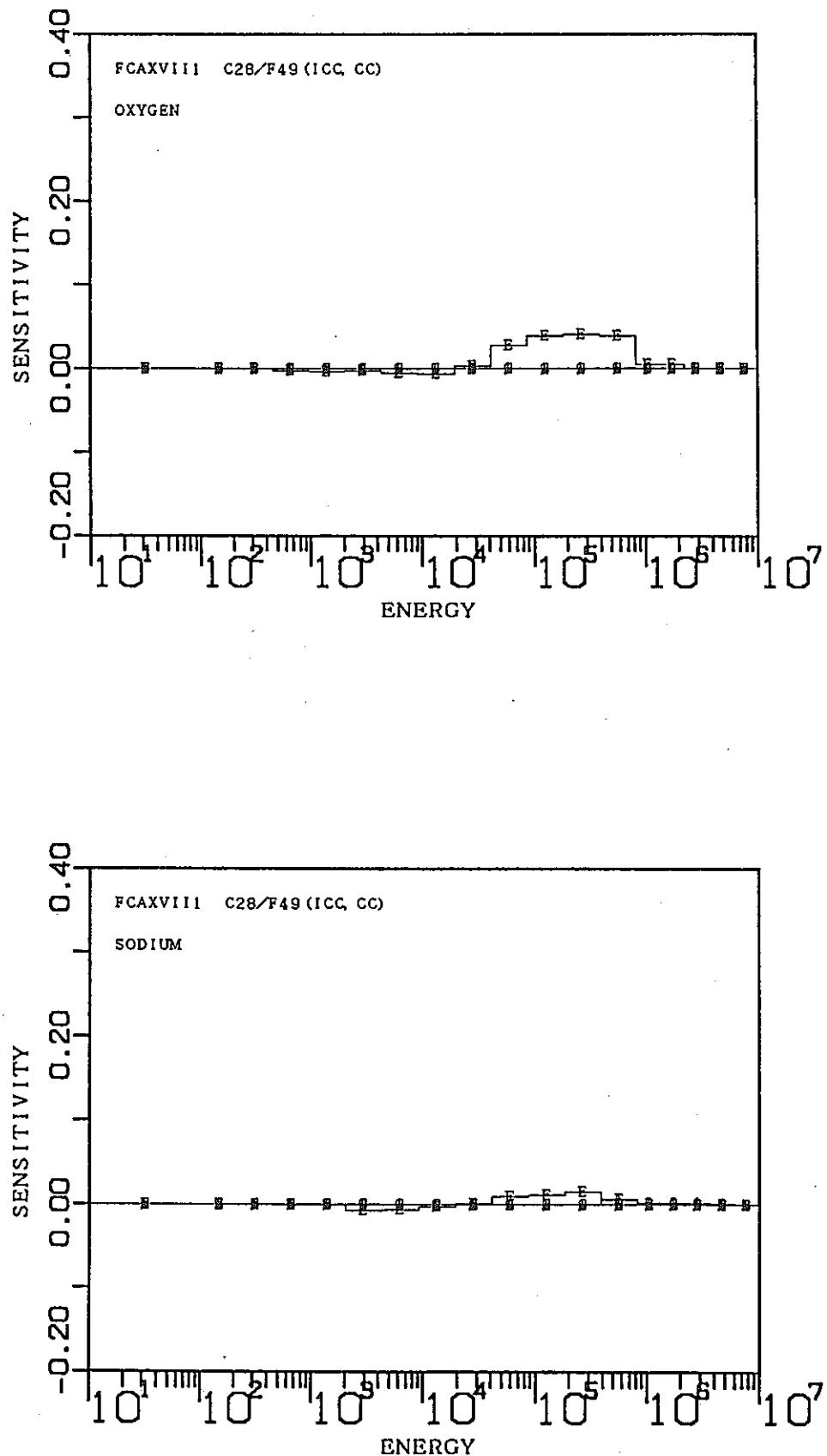


図5.2-2 FCA XVII-1のC28/F49反応率比に対する感度係数(2/3)

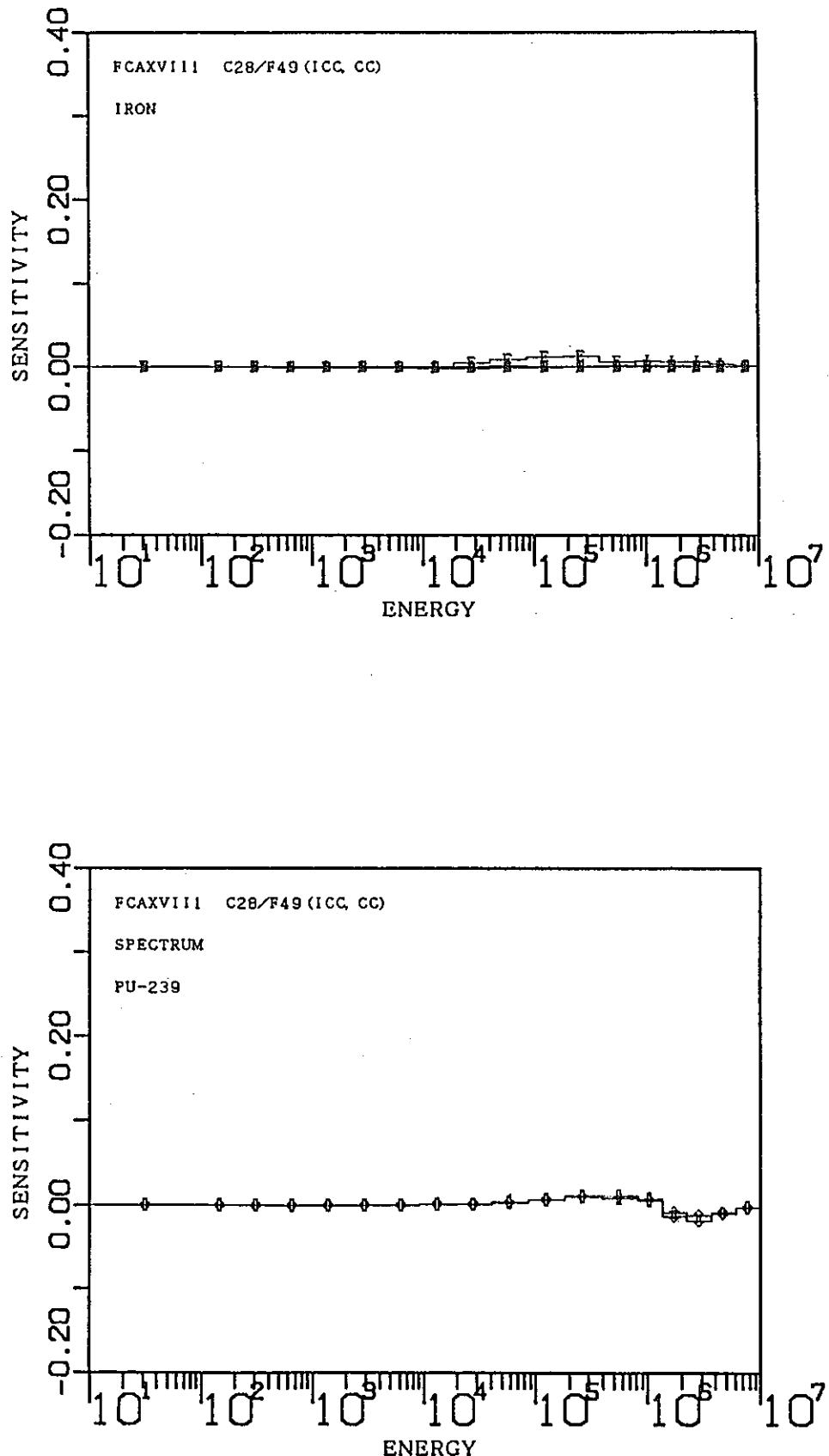


図5.2-2 FCA XVII-1のC28/F49反応率比に対する感度係数(3/3)

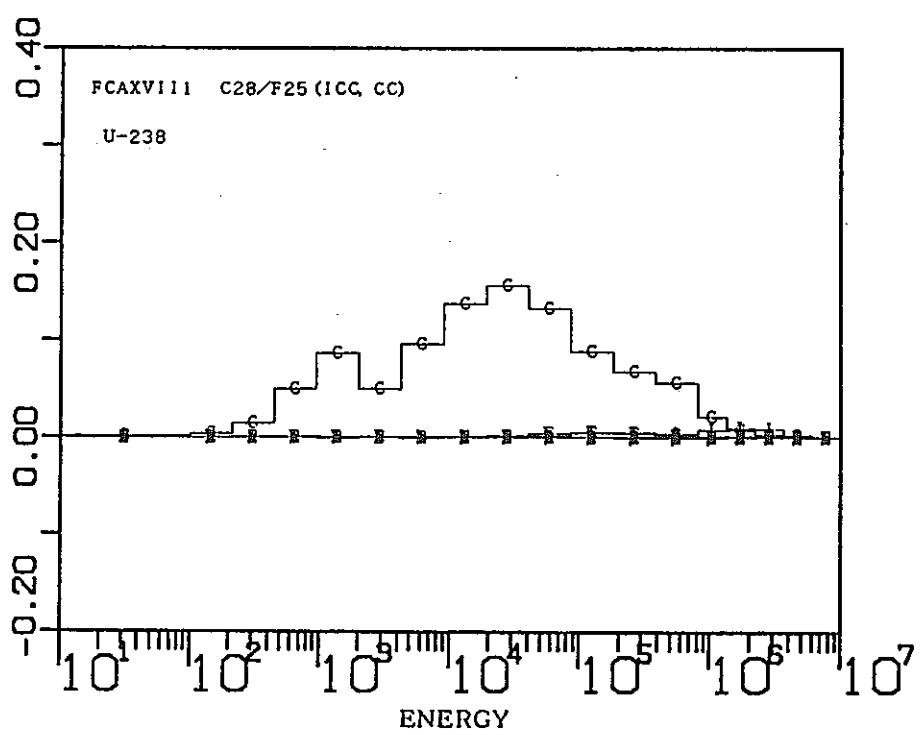
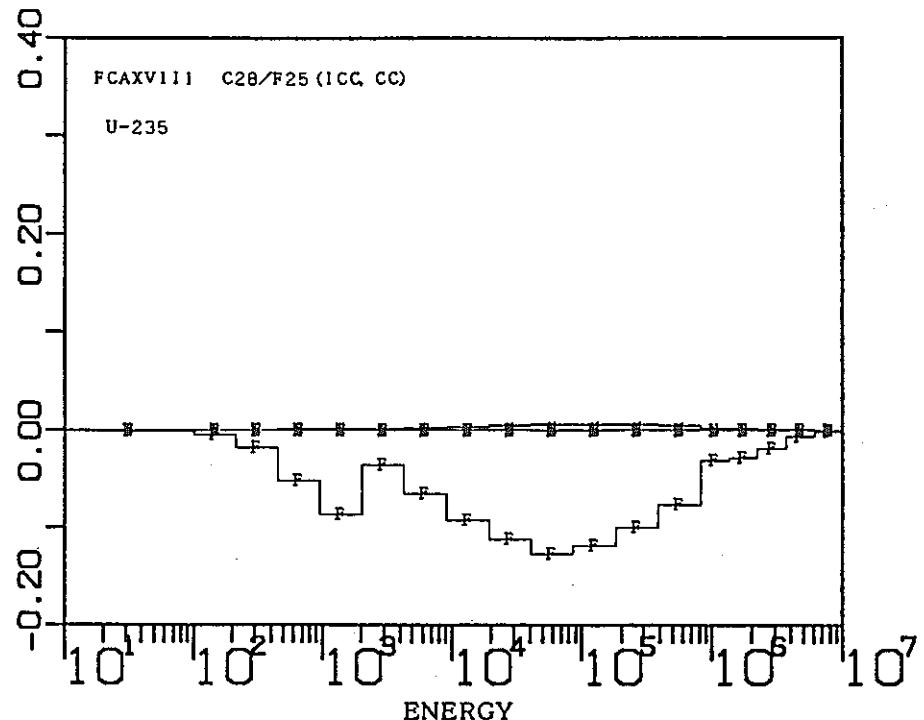


図5.2-3 FCA XVII-1のC28/F25反応率比に対する感度係数(1/3)

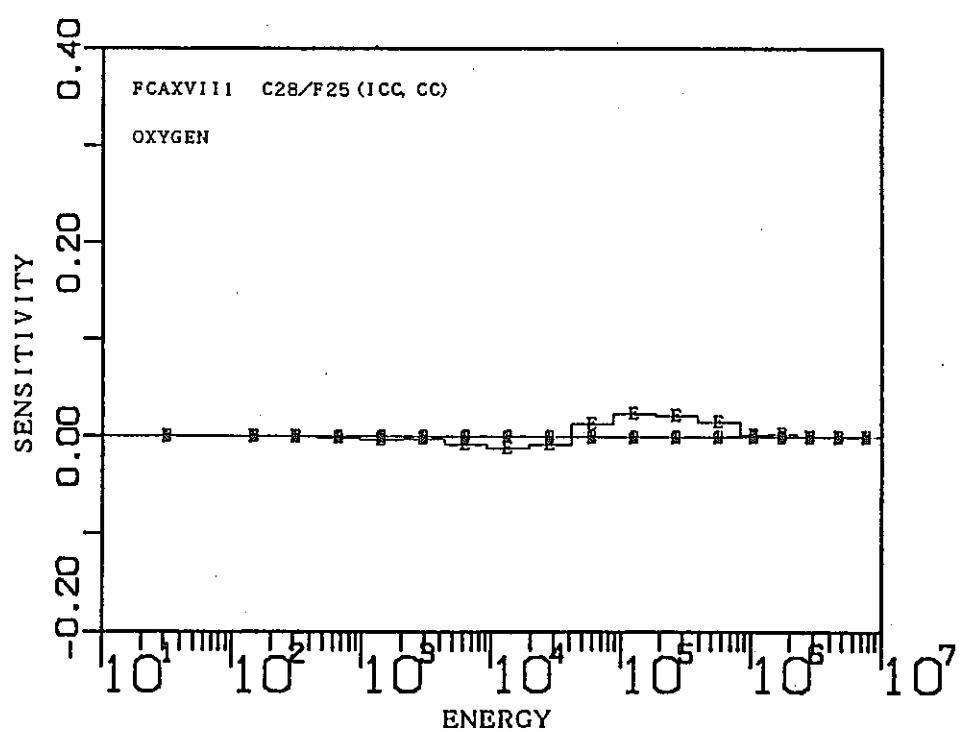
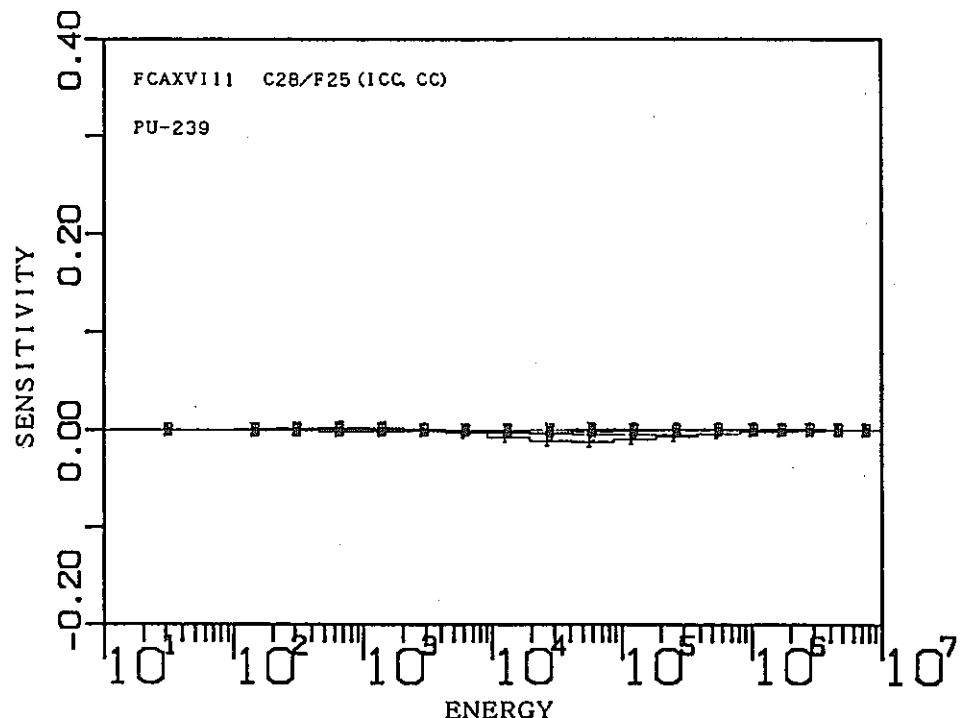


図5.2-3 FCA XVII-1のC28/F25反応率比に対する感度係数(2/3)

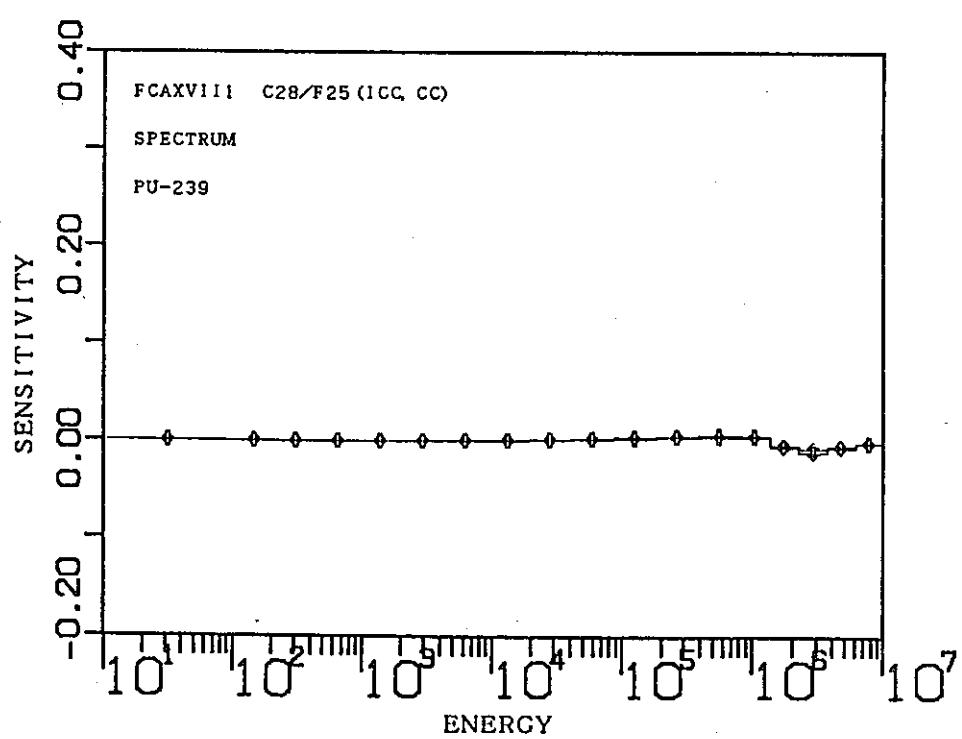
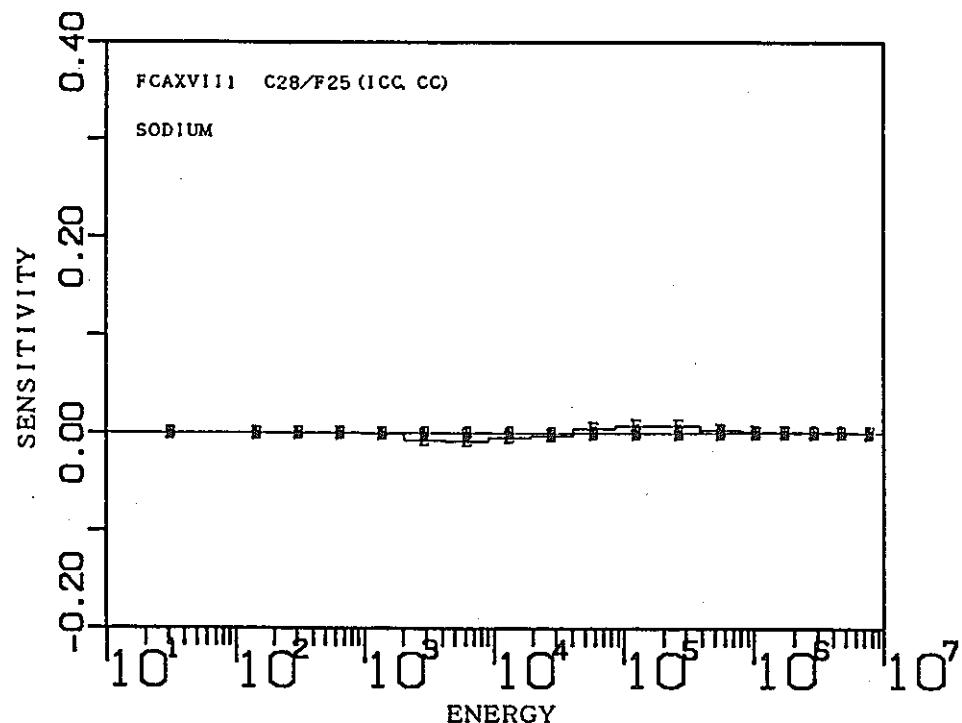


図5.2-3 FCA XVII-1のC28/F25反応率比に対する感度係数(3/3)

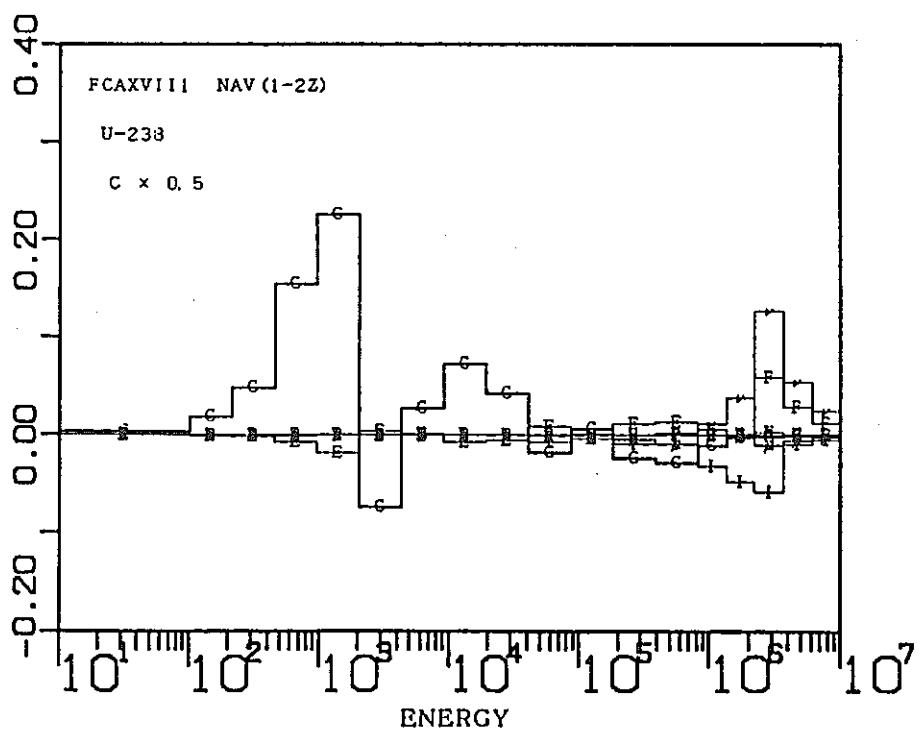
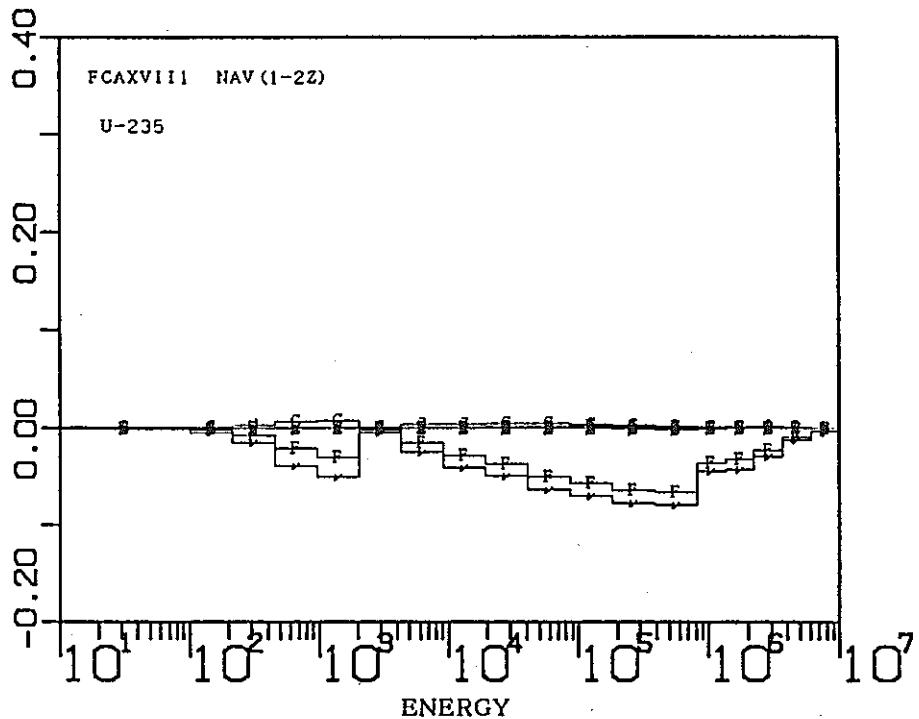


図5.2-4 FCA XVII-1のNaボイド反応度 (1-2z) に対する感度係数(1/3)

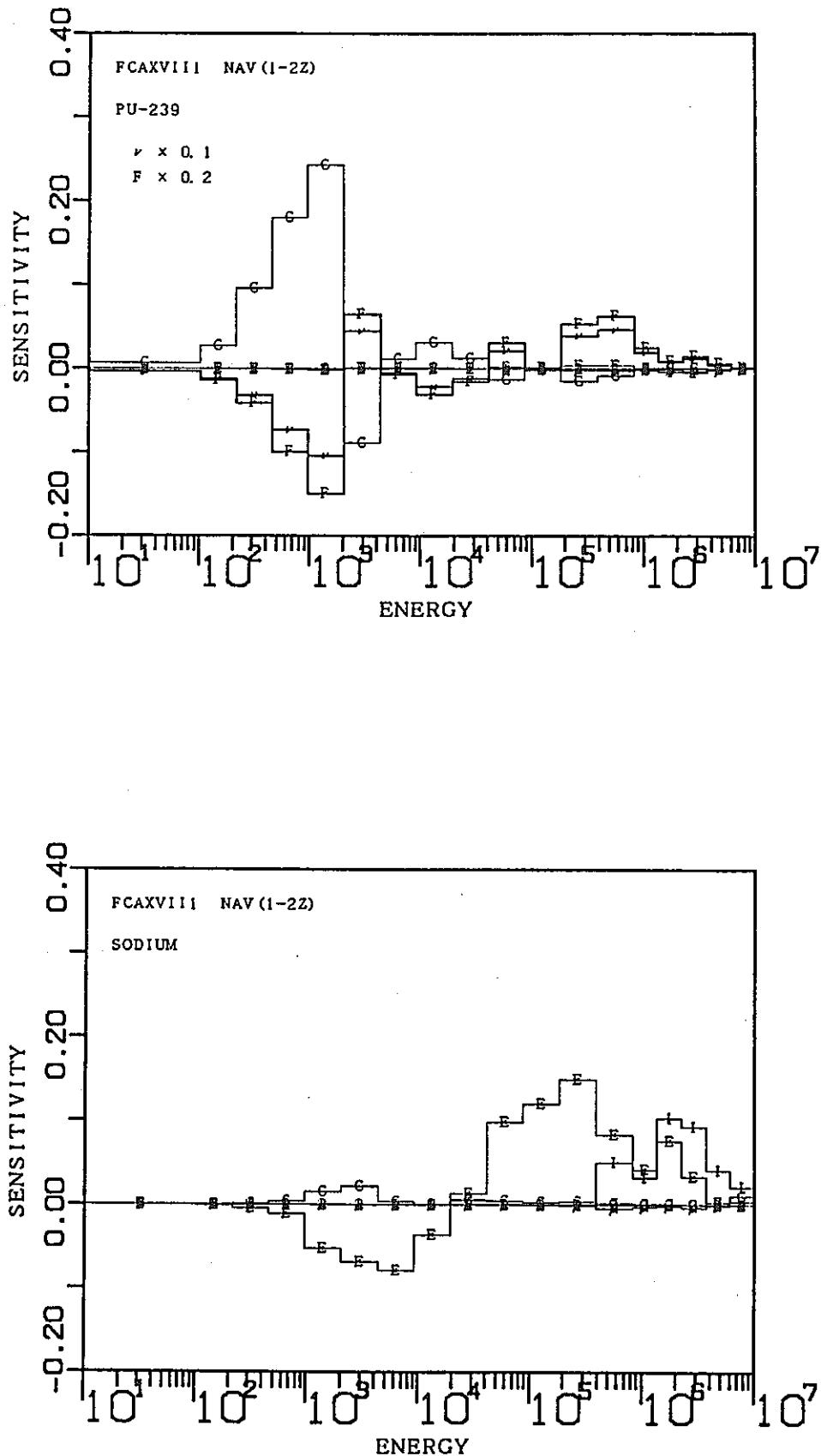


図5.2-4 FCA XVII-1のNaボイド反応度 (1-2z) に対する感度係数(2/3)

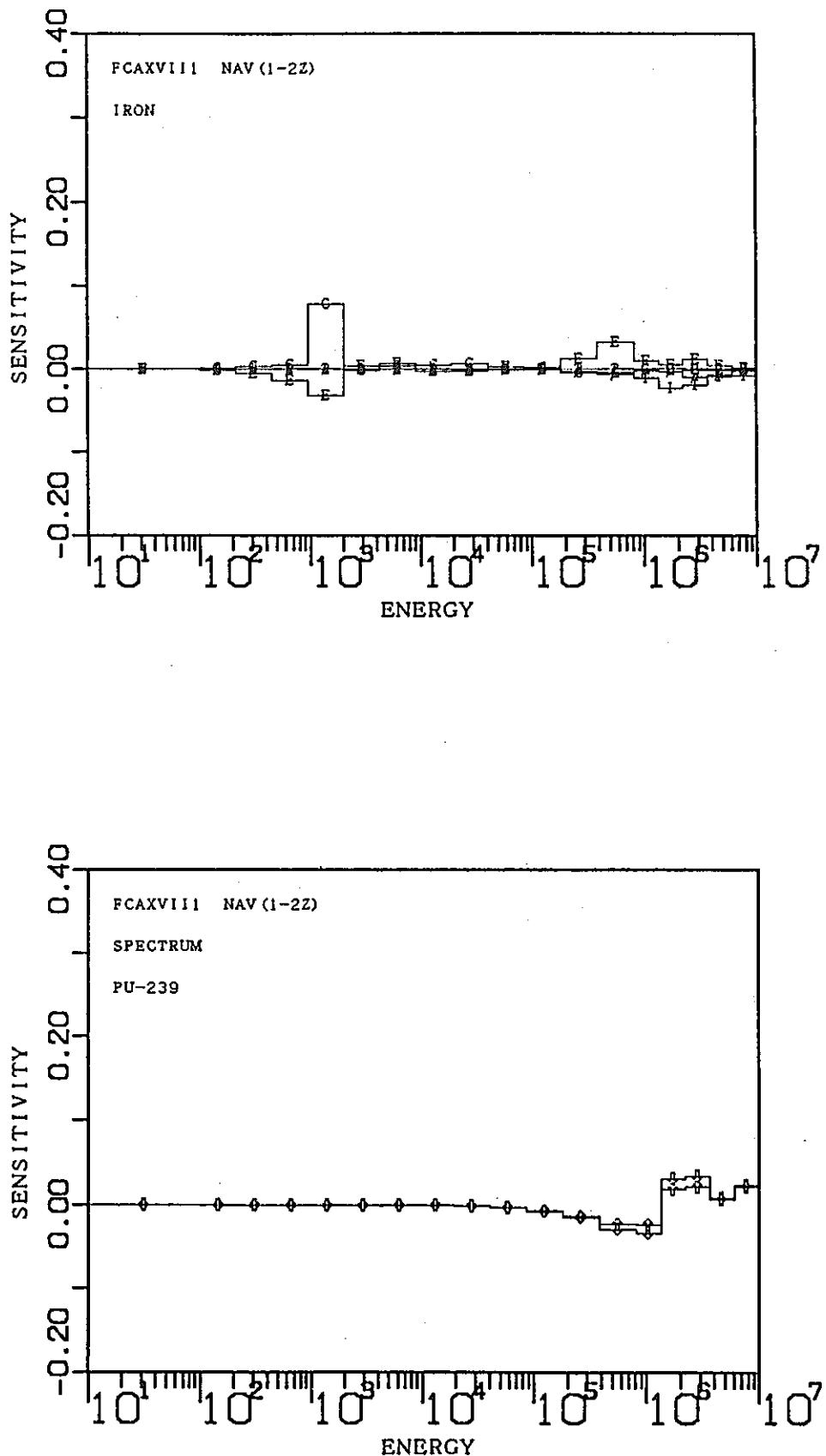


図5.2-4 FCA XVII-1のNaボイド反応度（1-2z）に対する感度係数(3/3)

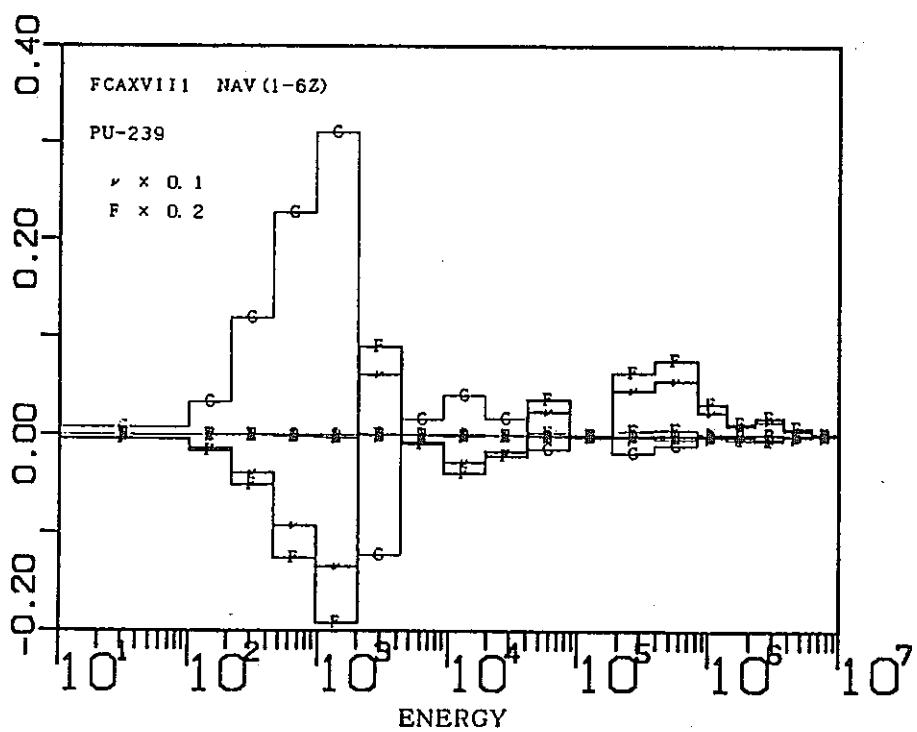
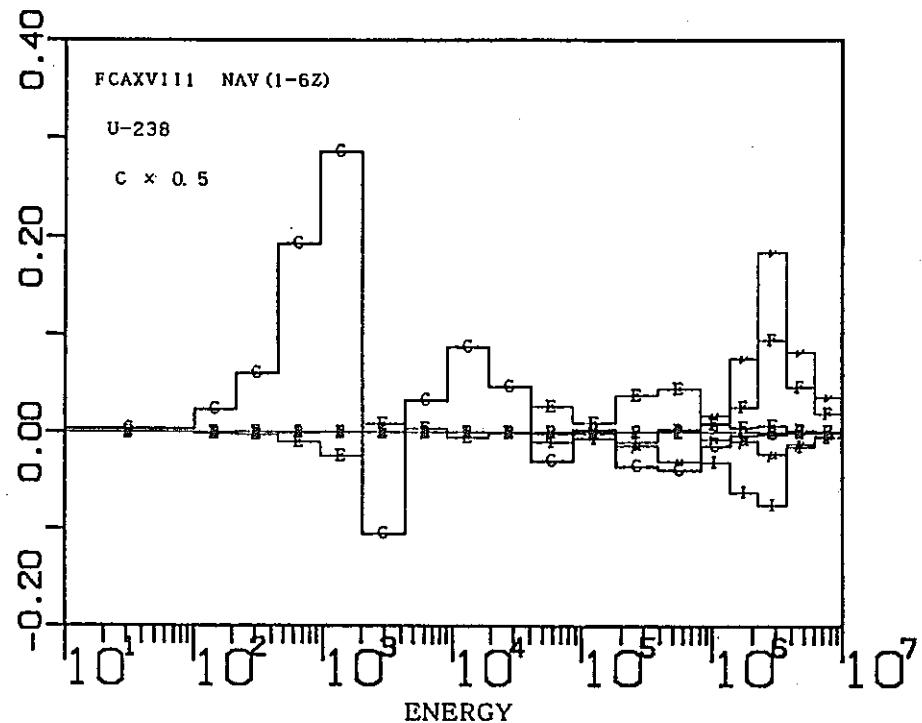


図5.2-5 FCA XVII-1のNaボイド反応度 (1-6z) に対する感度係数(1/3)

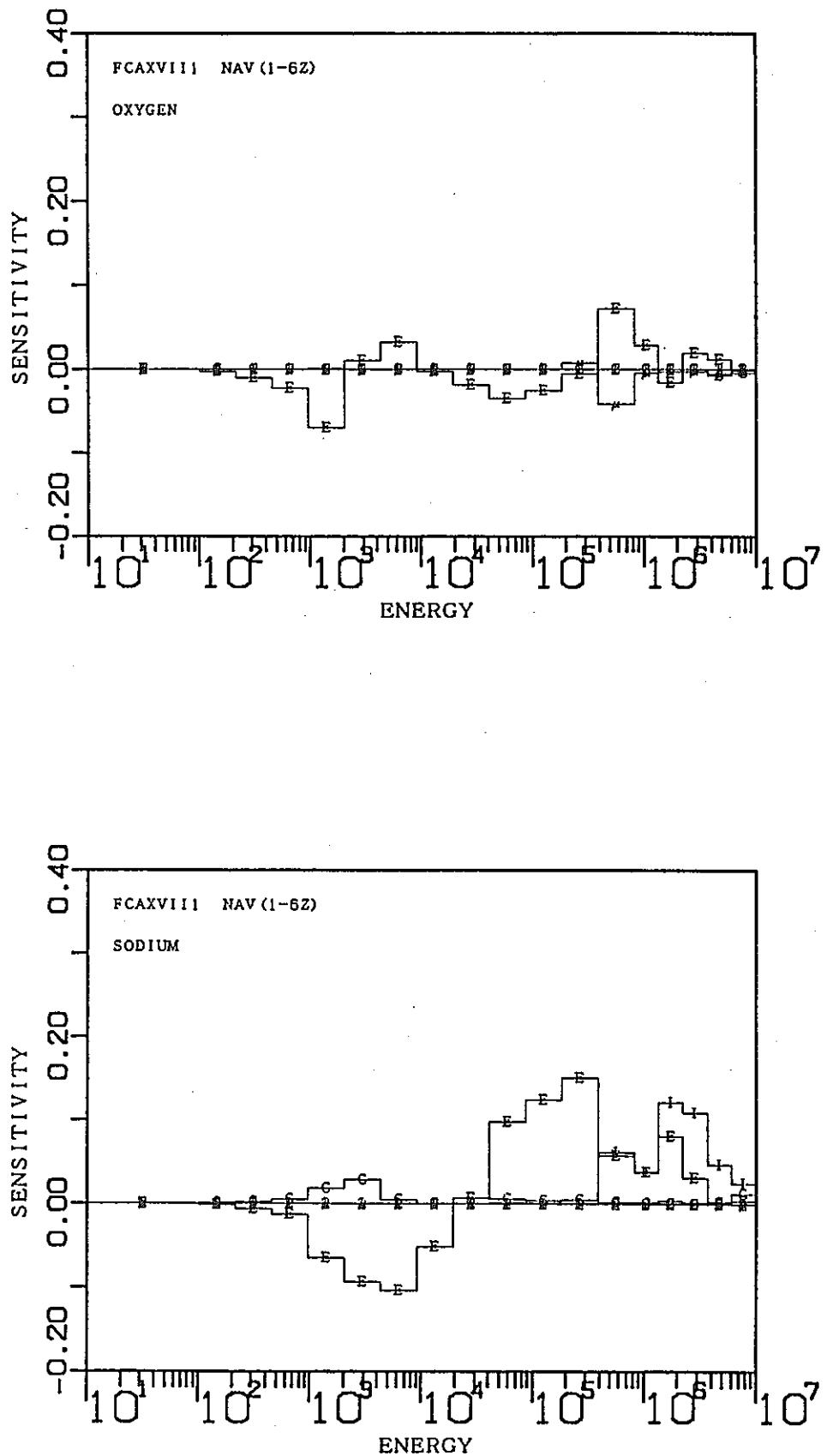


図5.2-5 FCA XVII-1のNaボイド反応度 (1-6z) に対する感度係数(2/3)

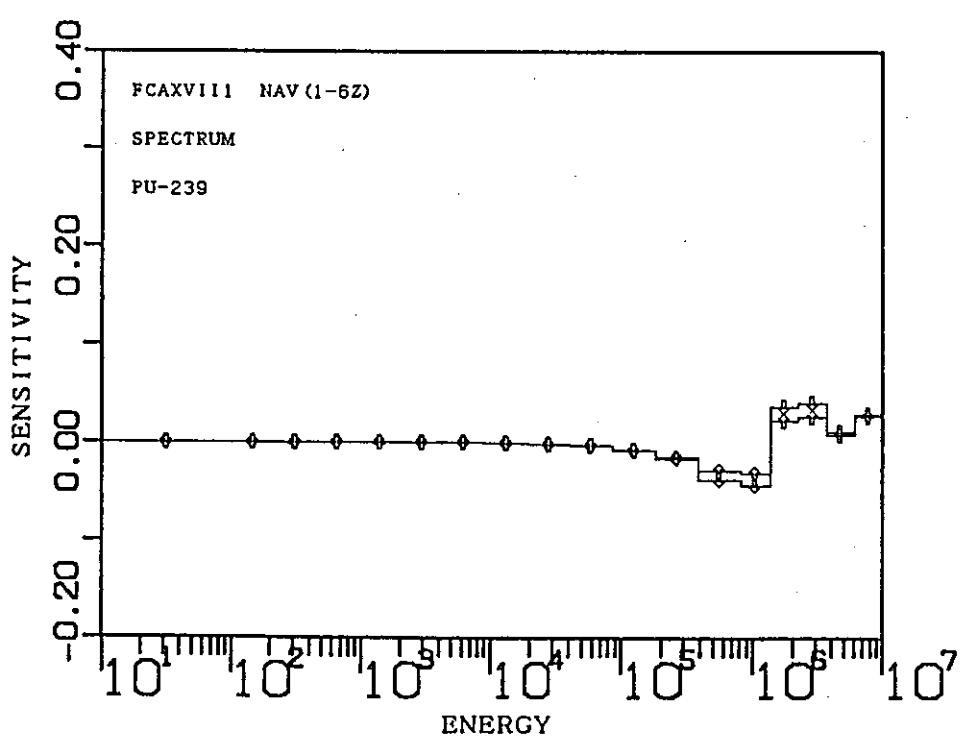
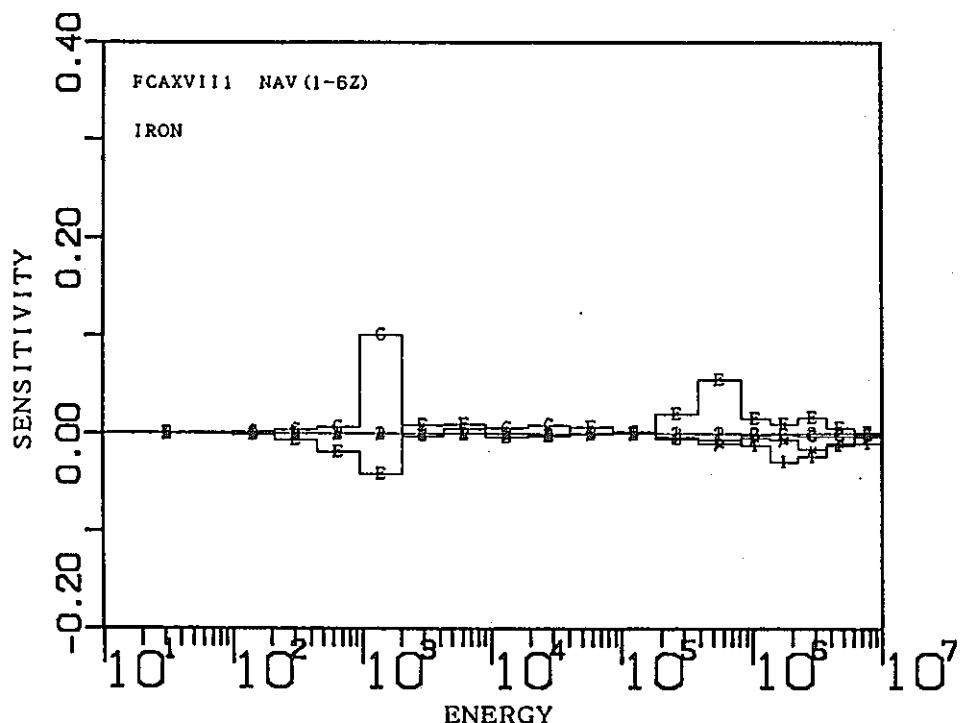


図5.2-5 FCA XVII-1のNaボイド反応度 (1-6z) に対する感度係数(3/3)

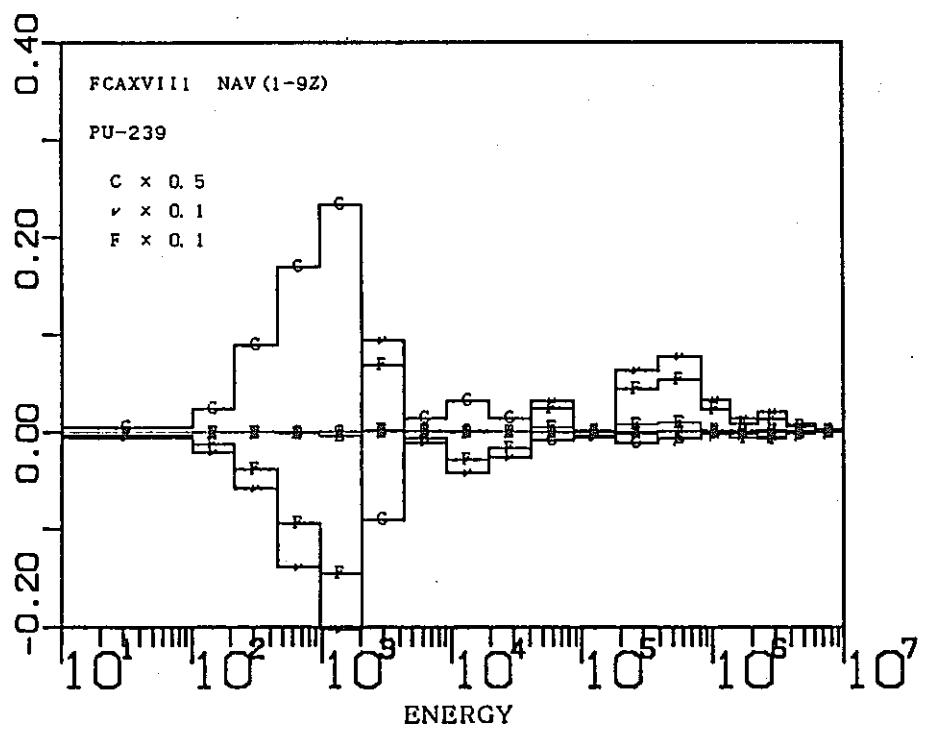
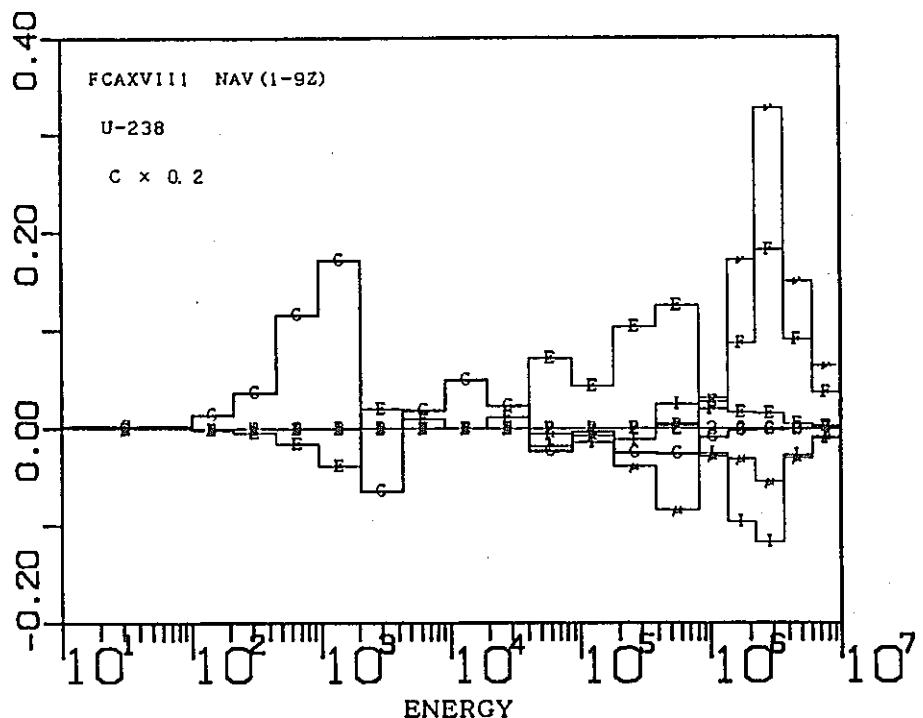


図5.2-6 FCA XVII-1のNaボイド反応度 (1-9z) に対する感度係数(1/3)

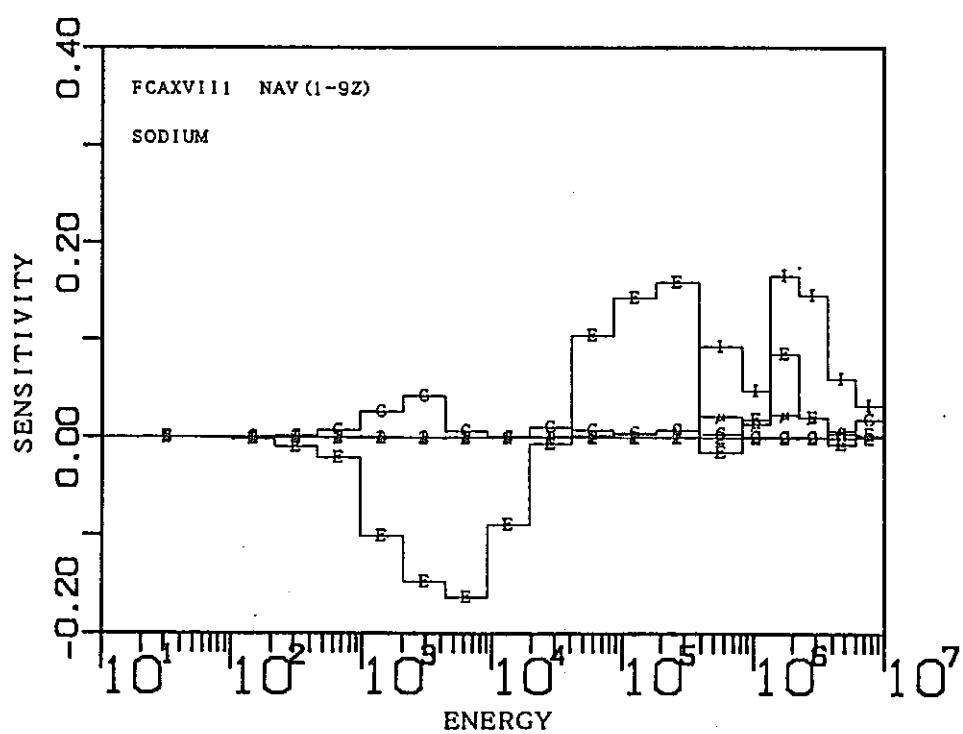
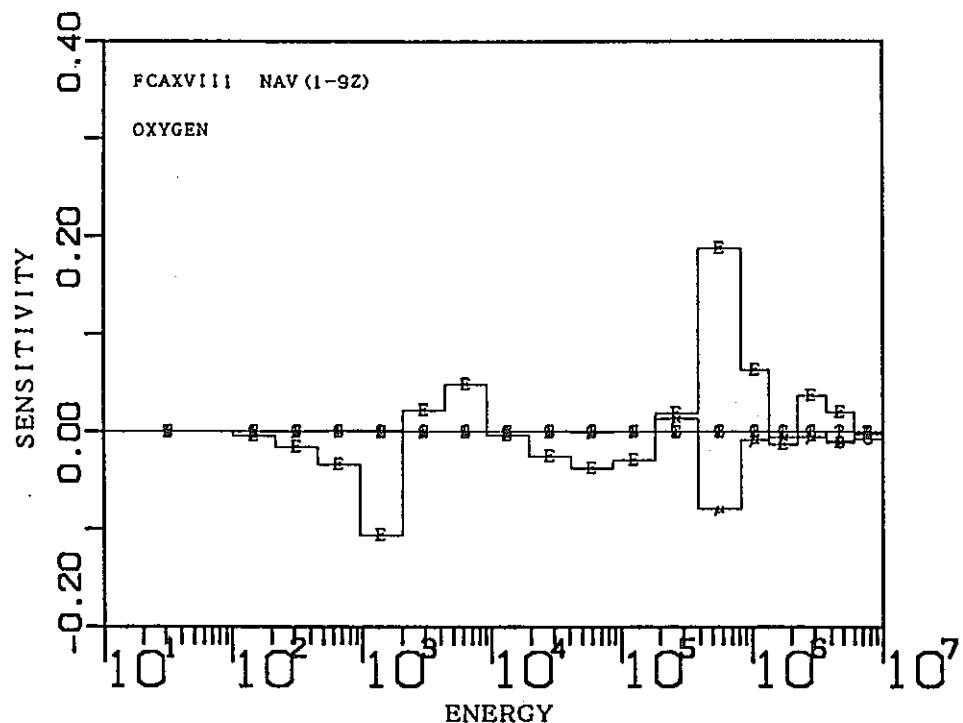


図5.2-6 FCA XVII-1のNaボイド反応度 (1-9z) に対する感度係数(2/3)

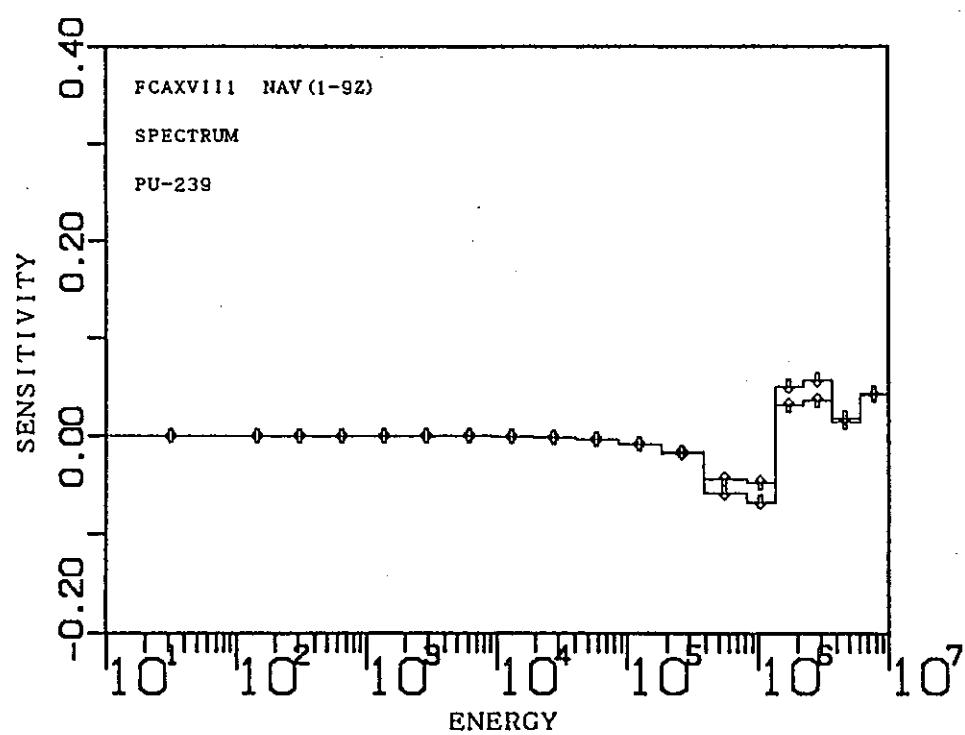
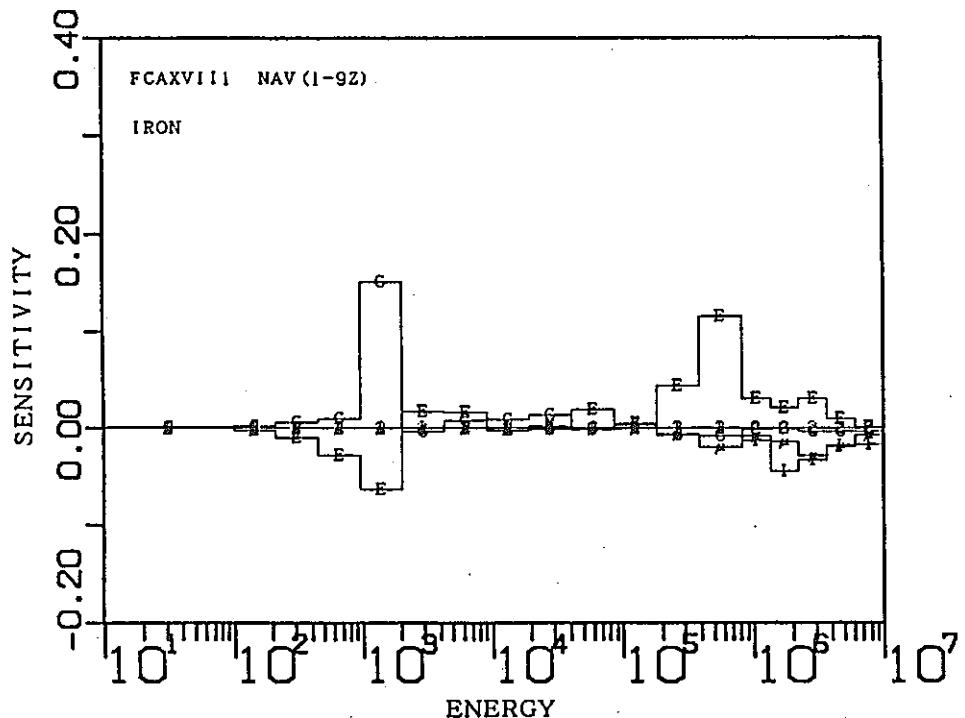


図5.2-6 FCA XVII-1のNaボイド反応度 (1-9z) に対する感度係数(3/3)

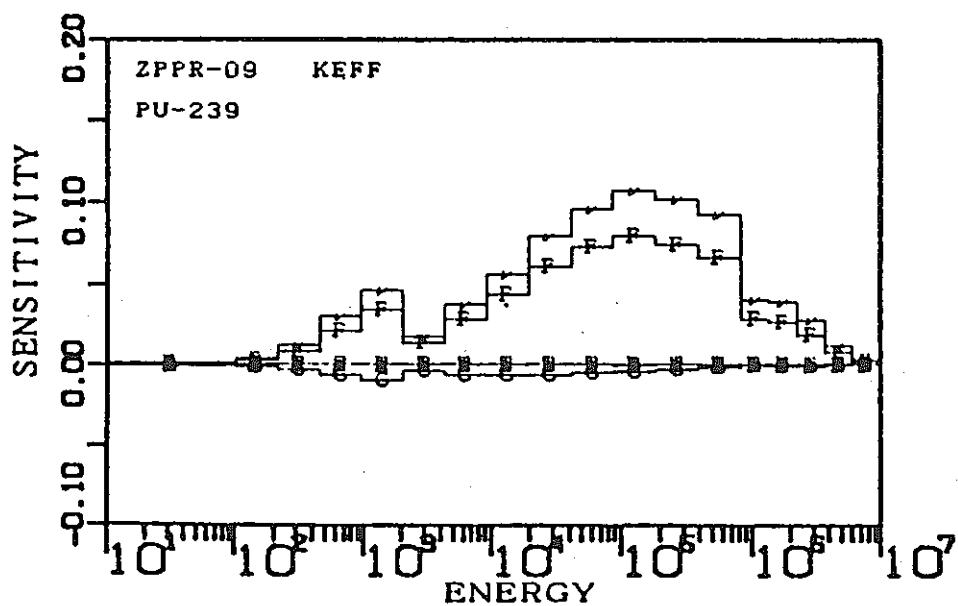
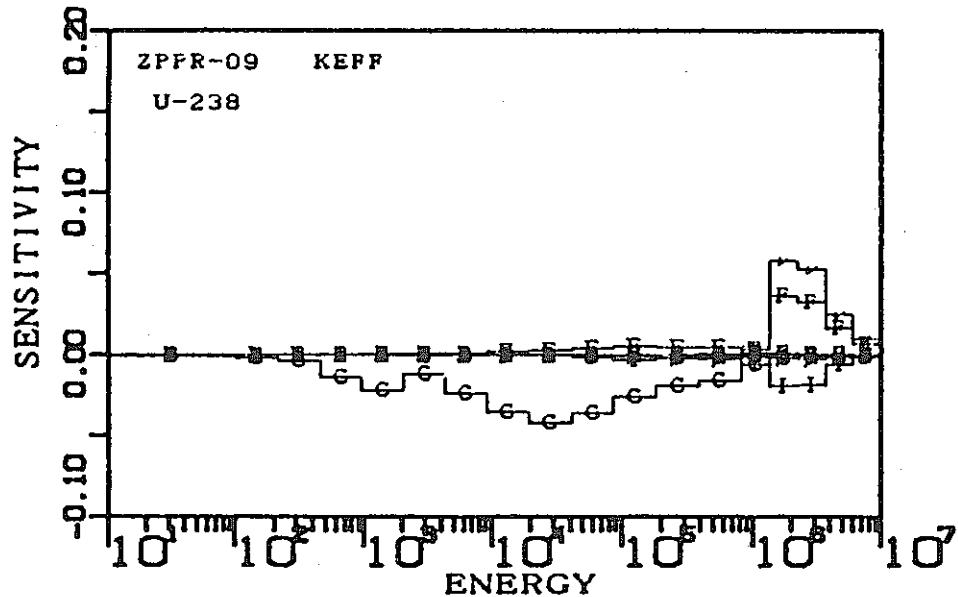


図5.2-7 ZPPR-9の臨界性に対する感度係数(1/3)

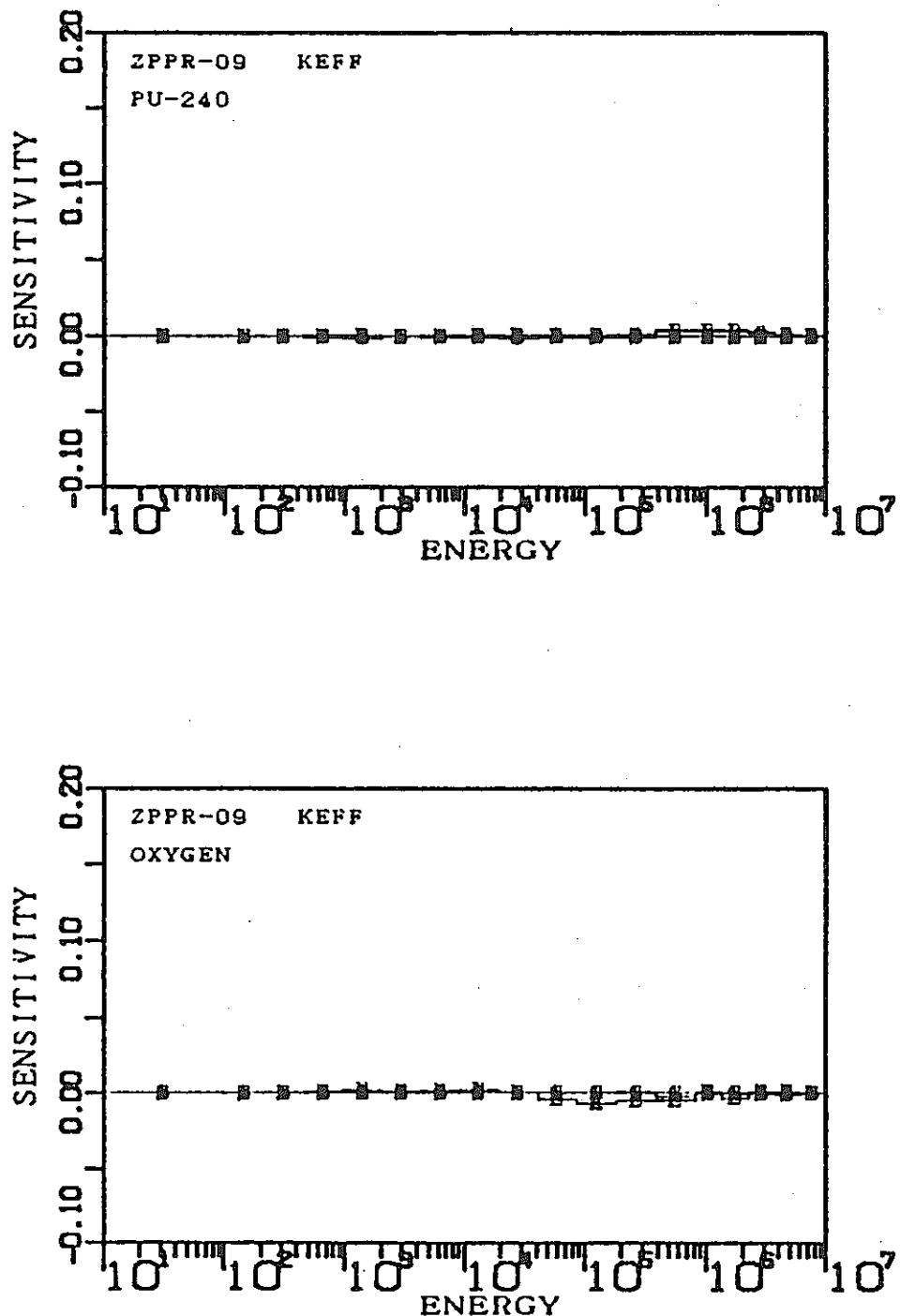


図5.2-7 ZPPR-9の臨界性に対する感度係数(2/3)

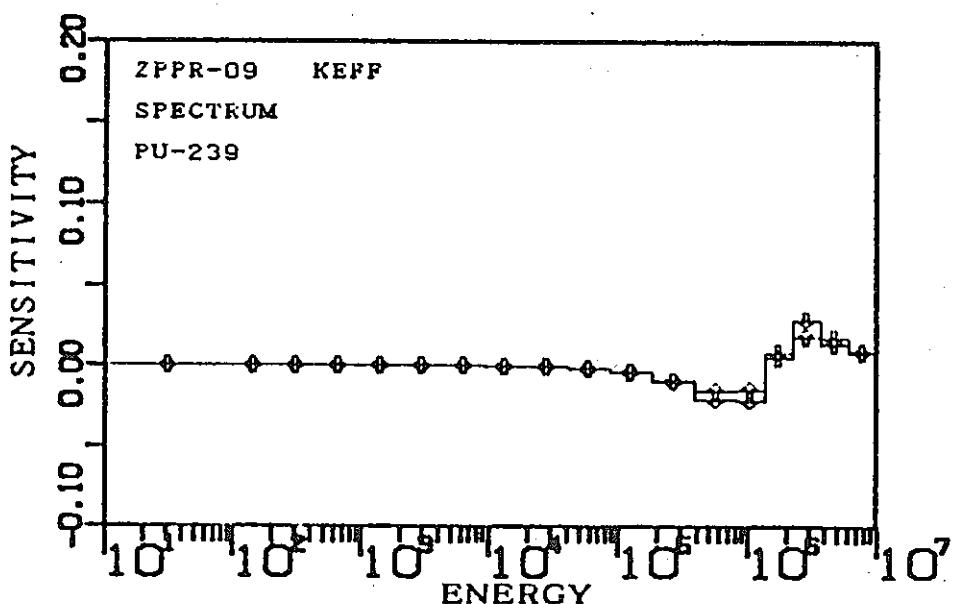
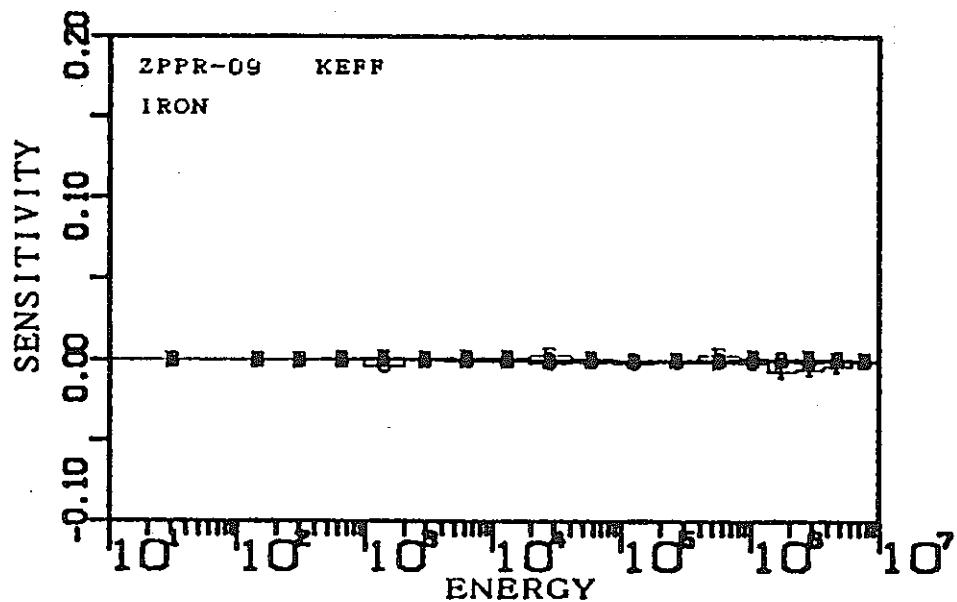


図5.2-7 ZPPR-9の臨界性に対する感度係数(3/3)

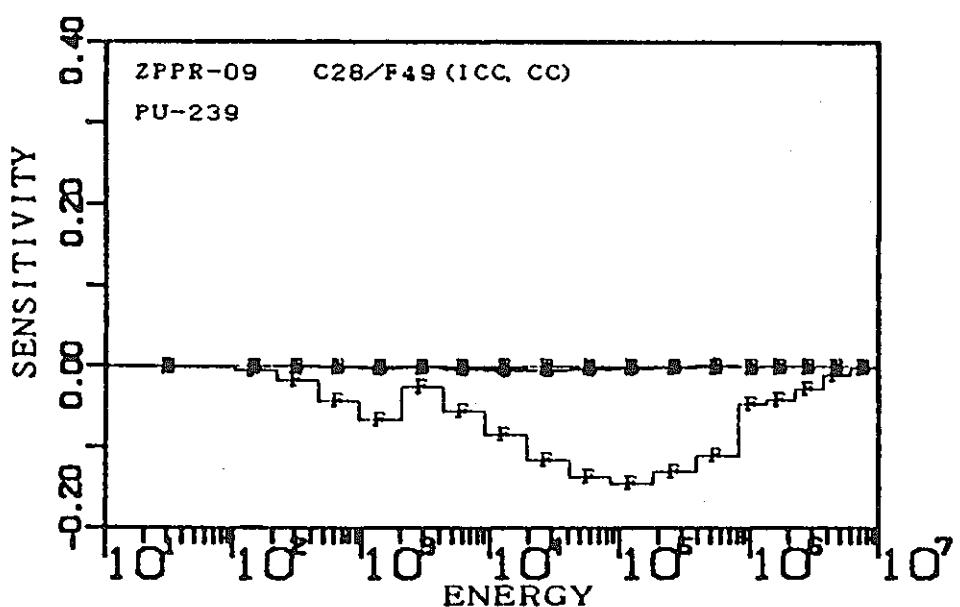
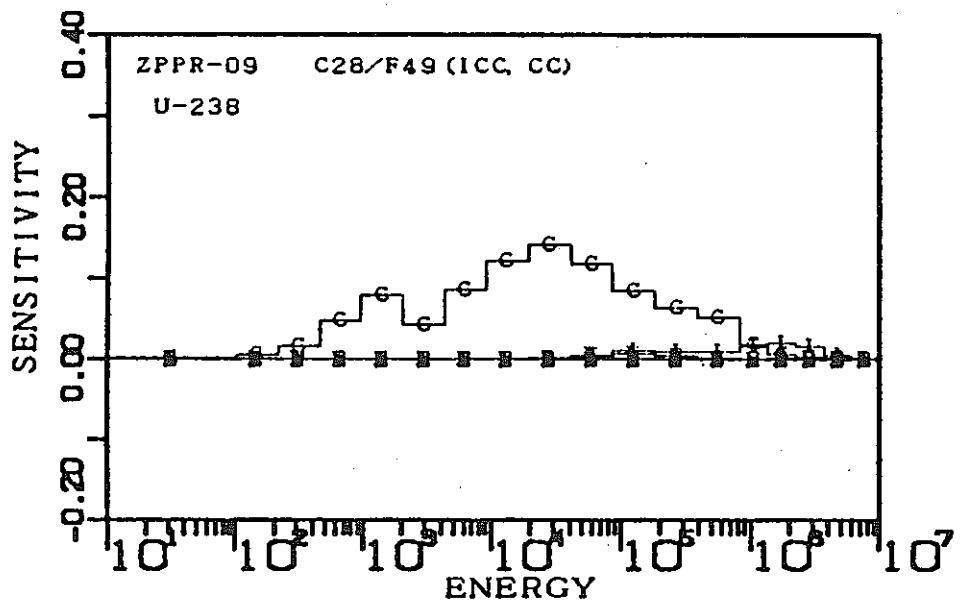


図5.2-8 ZPPR-9のC28/F49反応率比に対する感度係数(1/3)

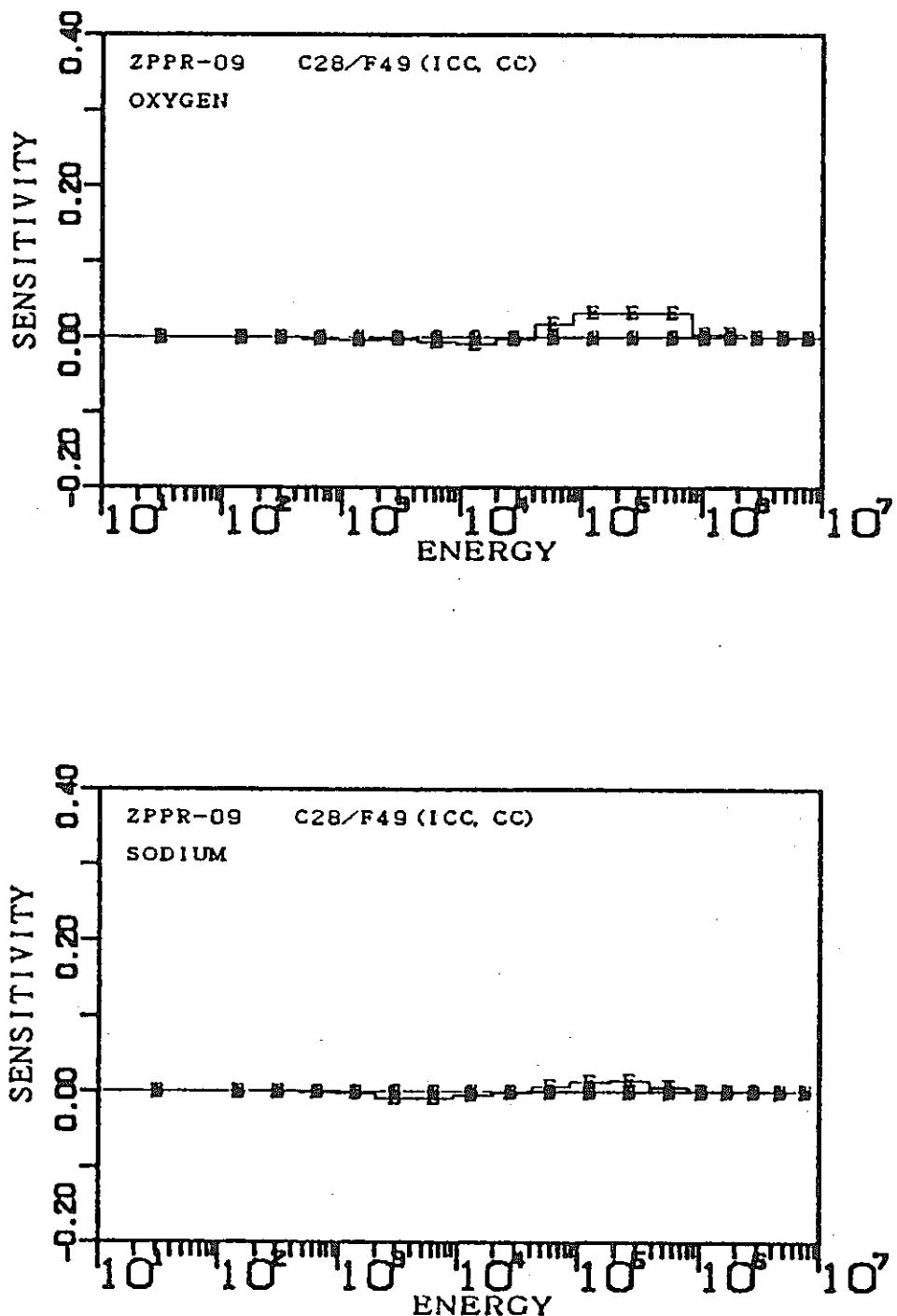


図5.2-8 ZPPR-9のC28/F49反応率比に対する感度係数(2/3)

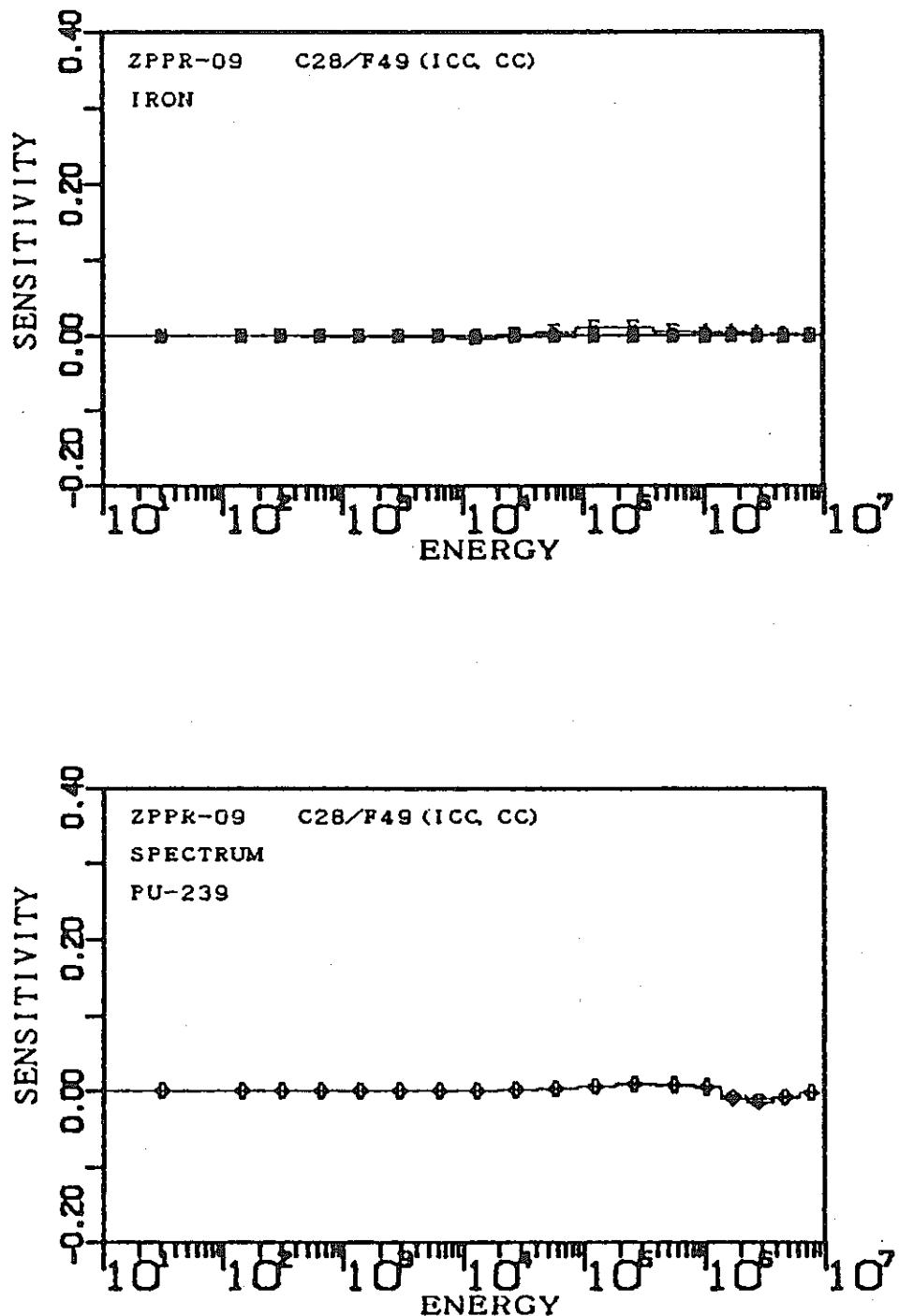


図5.2-8 ZPPR-9のC28/F49反応率比に対する感度係数(3/3)

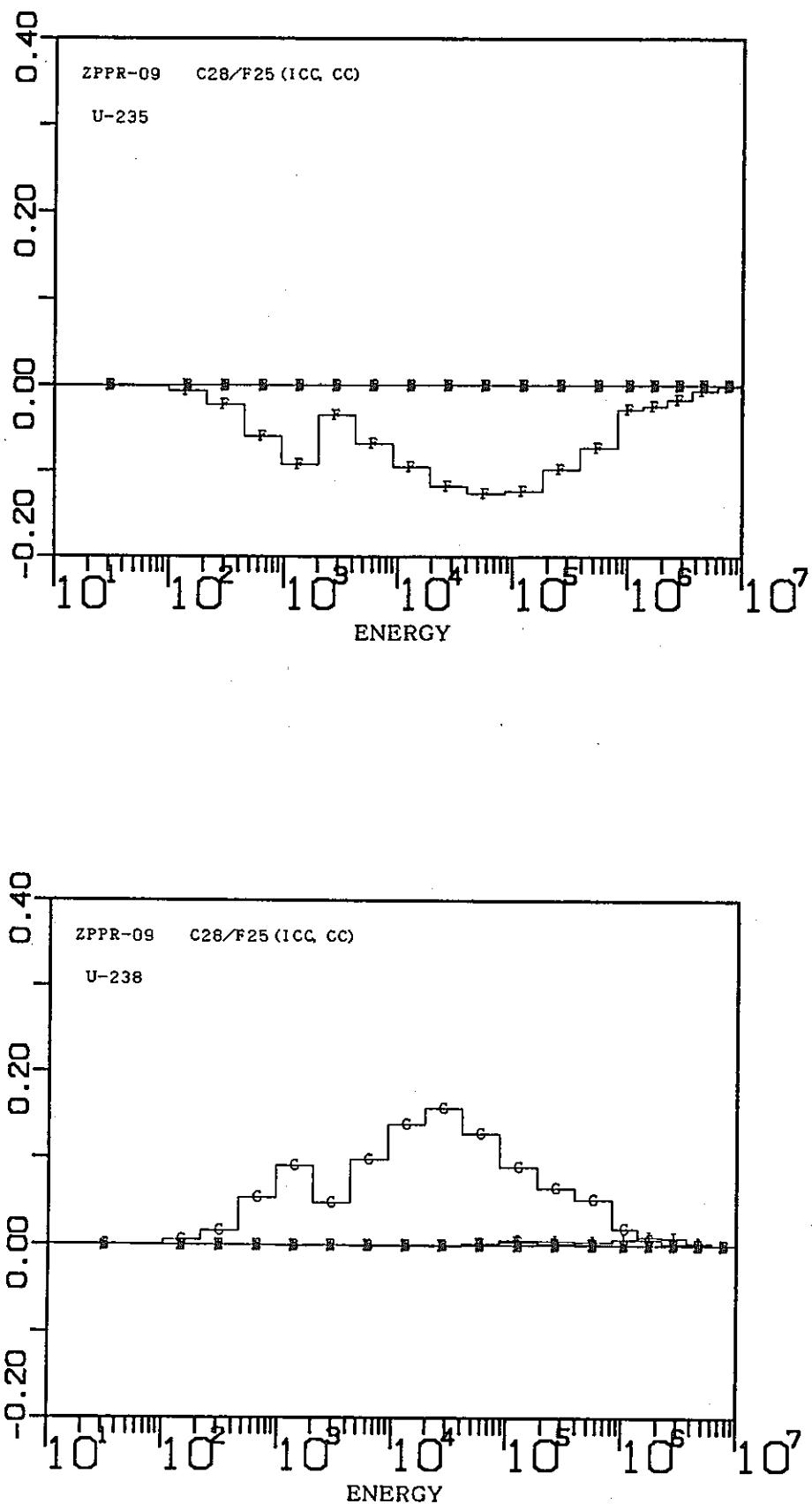


図5.2-9 ZPPR-9のC28/F25反応率比に対する感度係数(1/3)

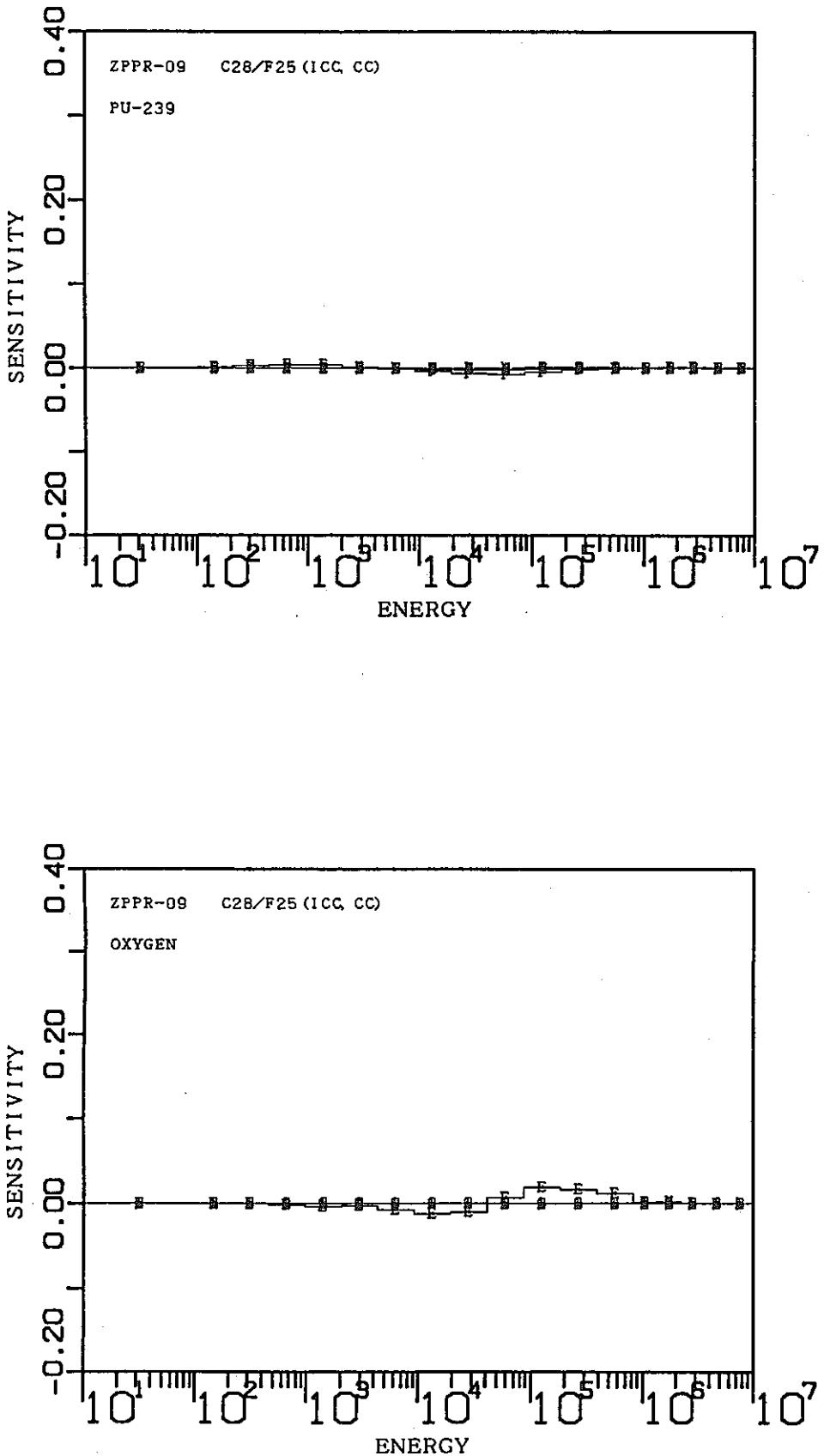


図5.2-9 ZPPR-9のC28/F25反応率比に対する感度係数(2/3)

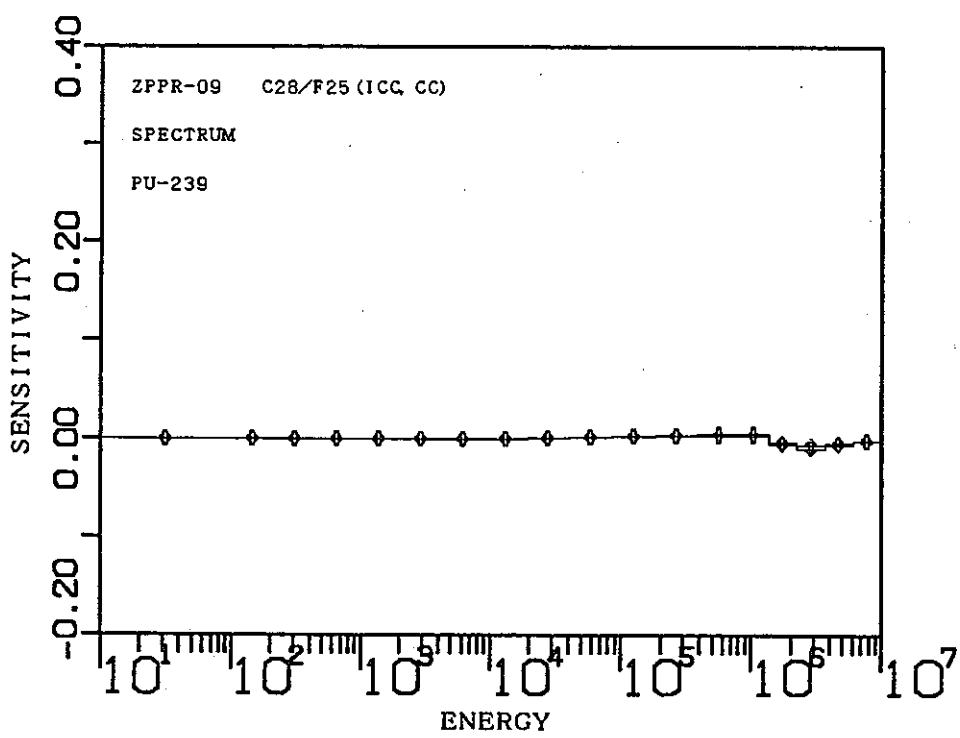
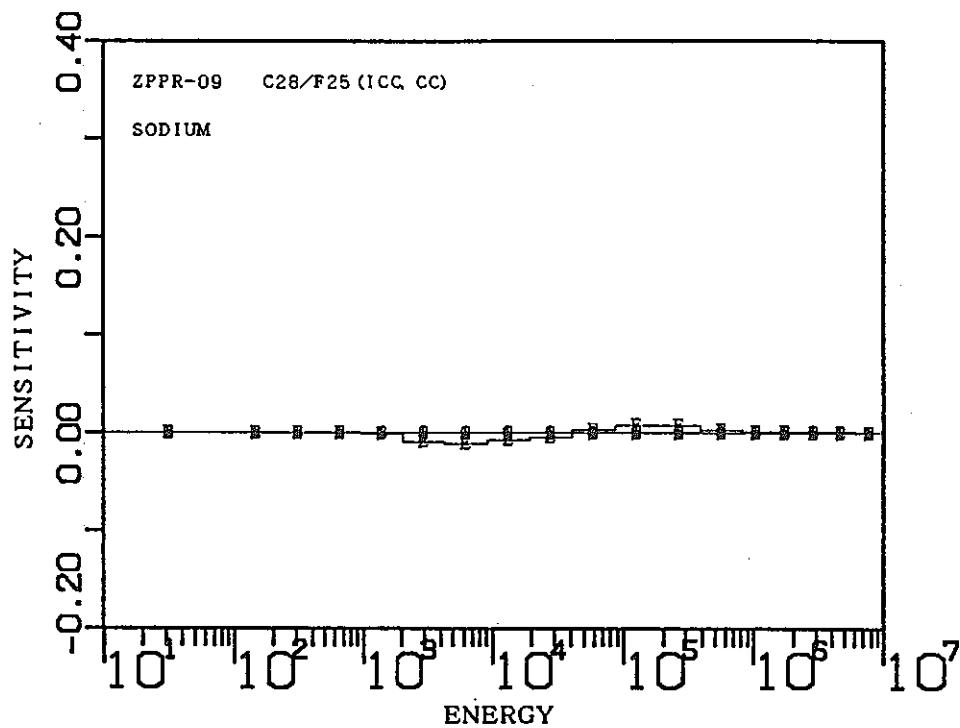


図5.2-9 ZPPR-9のC28/F25反応率比に対する感度係数(3/3)

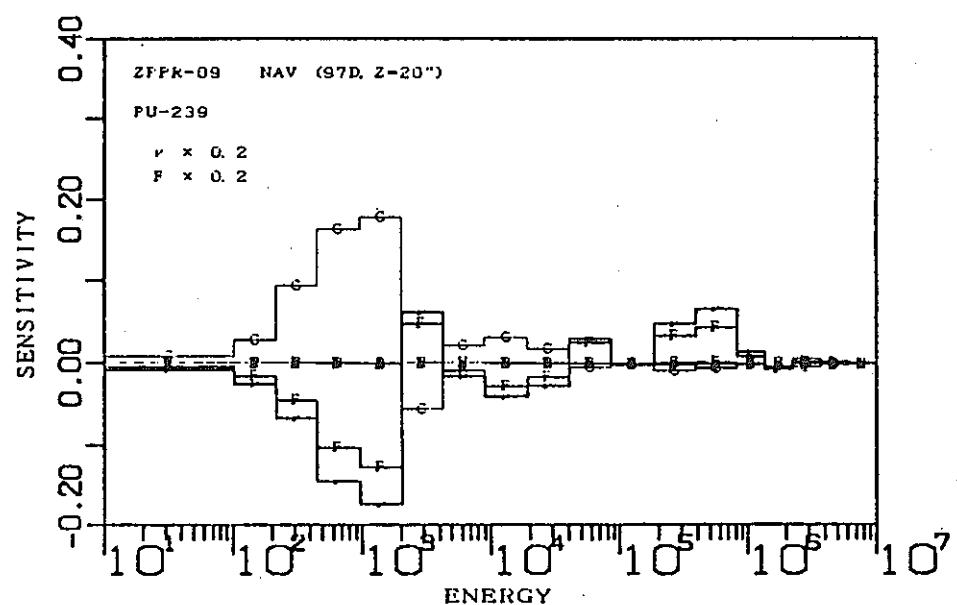
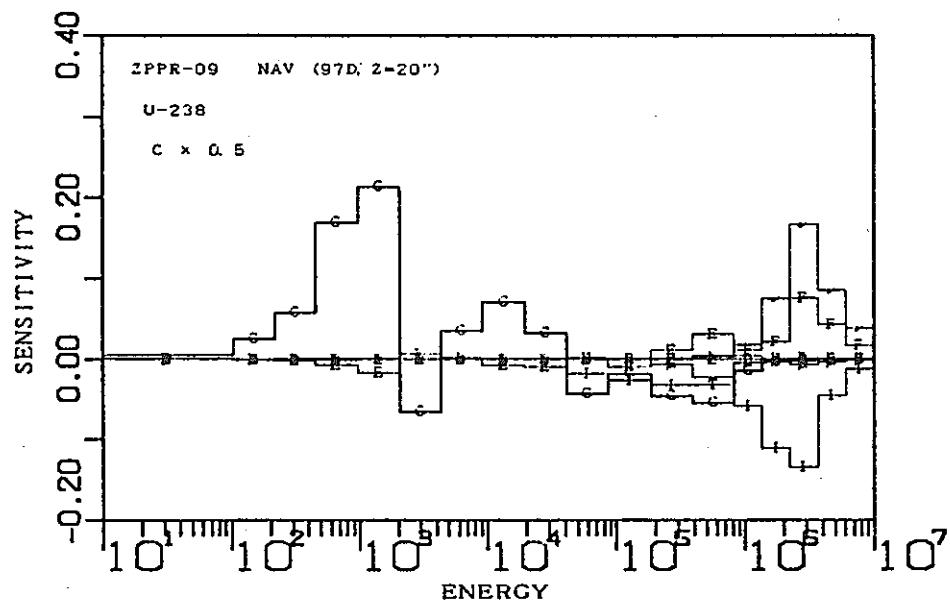


図5.2-10 ZPPR-9のNaボイド反応度（97 ドロワ、Z=20inch）に対する感度係数(1/3)

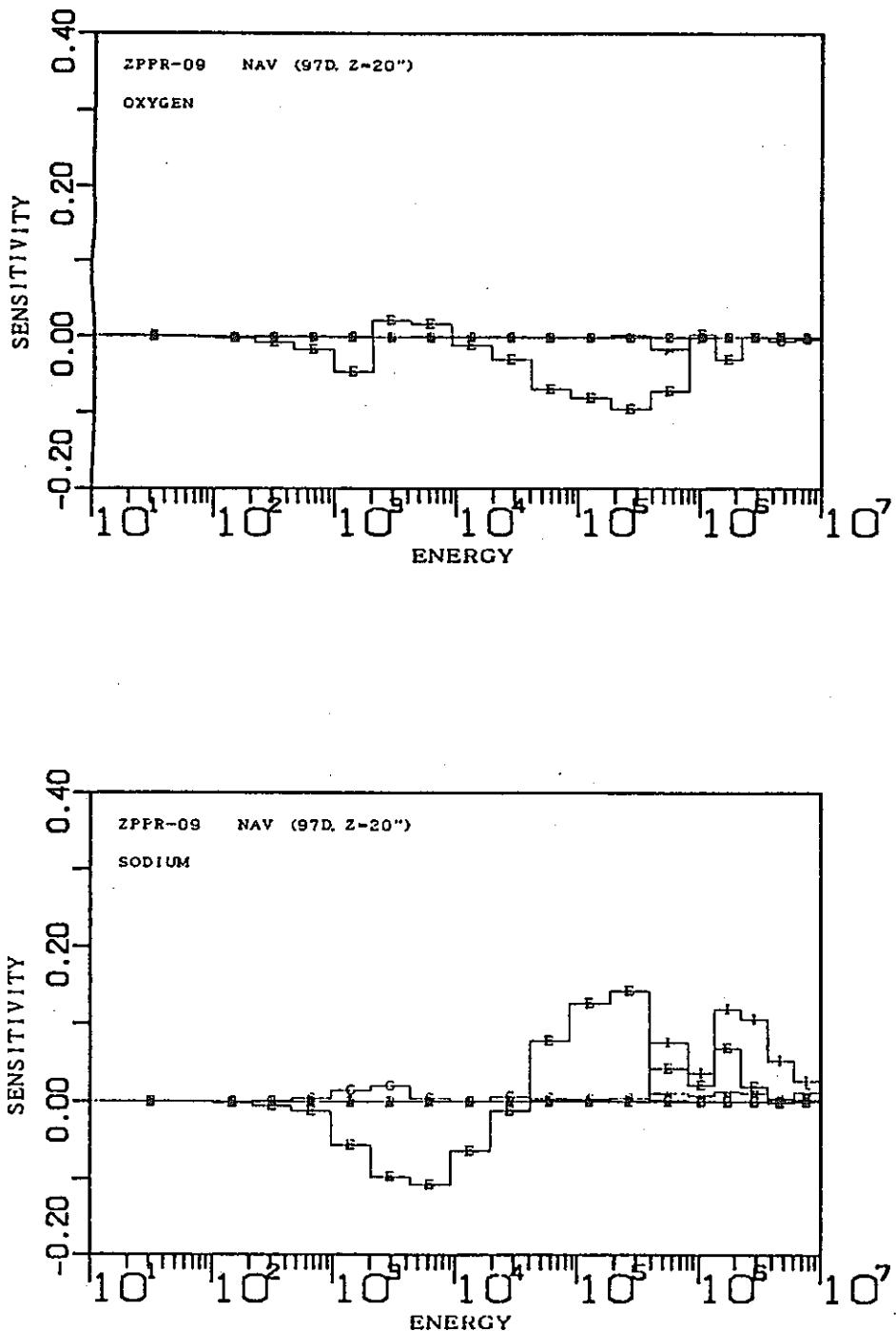


図5.2-10 ZPPR-9のNaボイド反応度 (97ドロワ、Z=20inch) に対する感度係数(2/3)

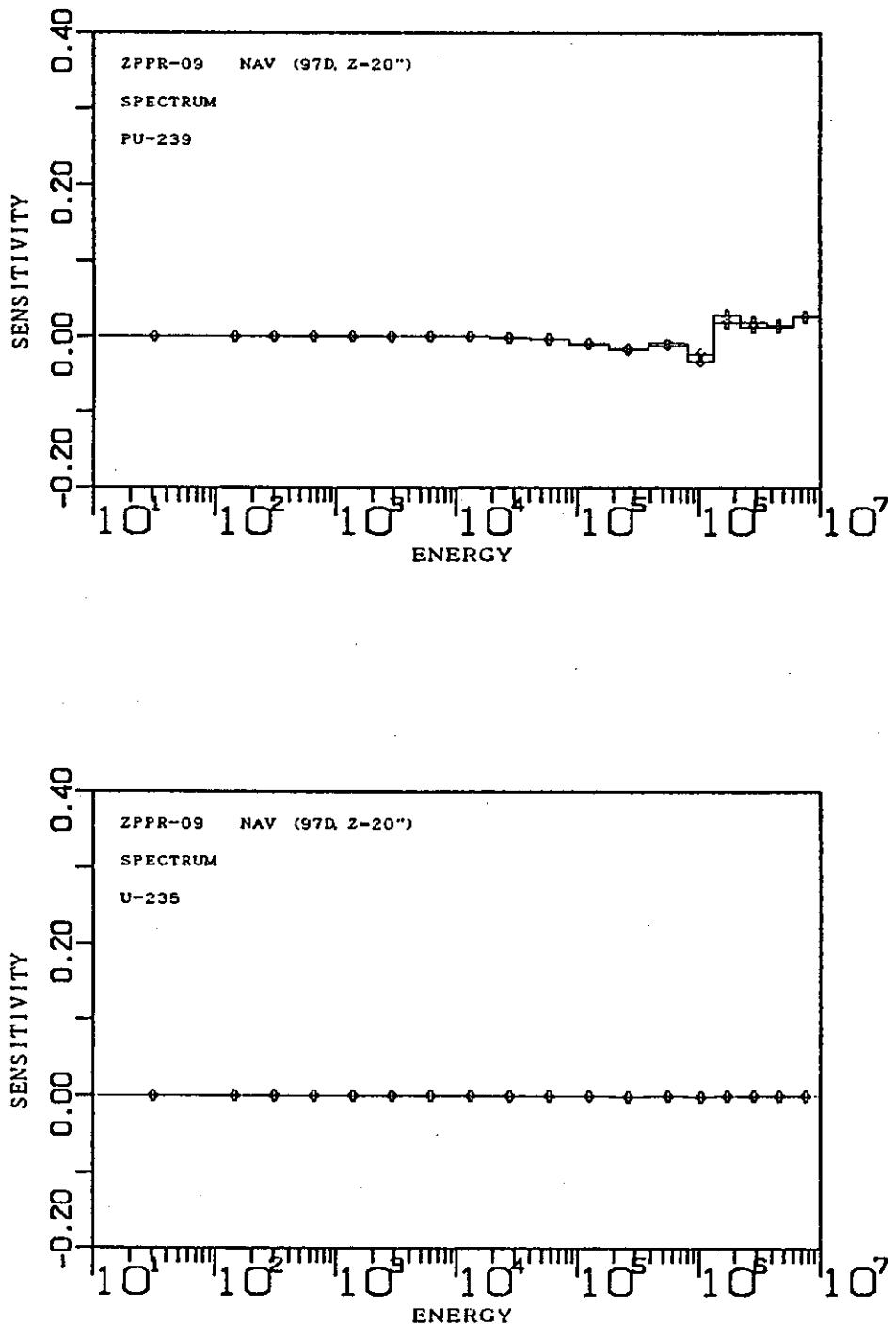


図5.2-10 ZPPR-9のNaボイド反応度（97 ドロワ、Z=20inch）に対する感度係数(3/3)

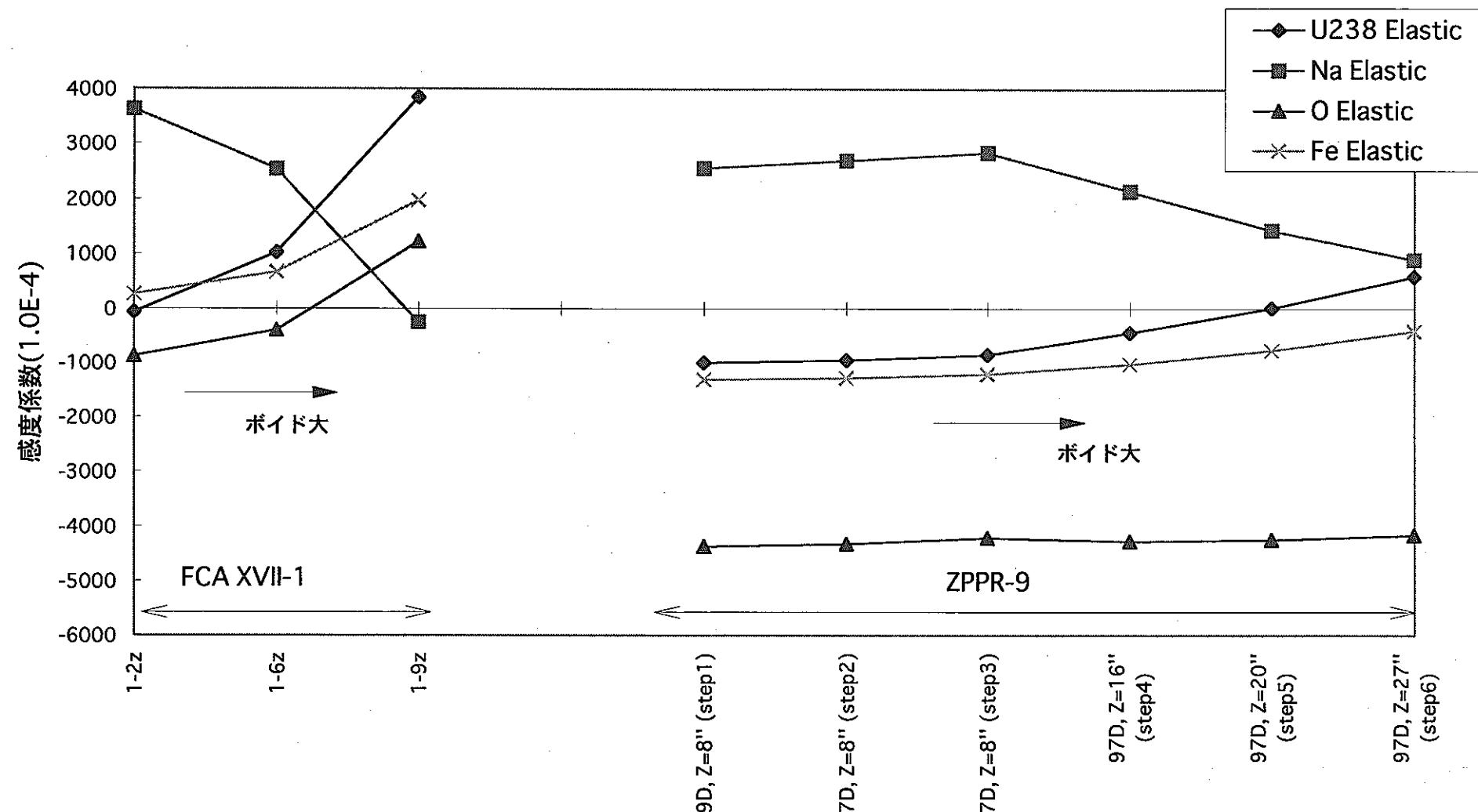


図5.2-11 弹性散乱断面積感度係数のNaボイド規模依存性

## 第6章 結言

統合炉定数作成に用いる積分データの拡張を目指し、FCAの代表的なMOX燃料Na冷却高速炉心の模擬体系であるFCA XVII-1で測定された主要な核特性（臨界性、反応率比、Naボイド反応度、ドップラー反応度）の解析を、JUPITER標準解析手法（動燃の解析手法）に基づいて行い、解析値と実験値の比（C/E値）を求めた。

また、原研の解析手法による解析結果との比較・検討を行った結果、臨界性、反応率比、ドップラー反応度については、動燃の解析手法、原研の解析手法とともに、同等の結果が得られることが分かった。一方、Naボイド反応度については、動燃の解析手法は、原研の解析手法に比べて、ボイド領域依存性（1-2z、1-6z、1-9z）を6～12%大きく評価することが分かった。この原因是、実効断面積作成方法の違いによると考えられるが、今後、詳細な検討が必要である。

更に、ドップラー反応度を除く核特性について感度解析を行い、炉定数調整計算に必要となる感度係数を求めた。また、FCA XVII-1炉心の感度係数と、JUPITER実験のZPPR-9炉心の感度係数の比較も行った。この結果、FCA XVII-1の特徴である、ウラン燃料領域を持つ影響や、小型炉心である影響が感度係数にも表れていることが確認できた。このように感度係数の観点からもFCA XVII-1はJUPITER炉心とは異なった特徴を持つ炉心であり、統合炉定数作成のための積分データとして用いることにより、高速炉の設計精度及び信頼性の向上を図ることができると考えられる。

なお、本共同研究は平成10年度も継続し、本報告書でまとめたC/E値と感度係数を用いて、JUPITER実験のZPPR炉心及びFCA炉心の核特性を含めた炉定数調整計算を行い、両者の整合性を検討する予定である。

## 謝 辞

本研究を進めるに当たって、多くの有益な助言と激励をいただいた日本原子力研究所炉物理研究室長の大杉俊隆氏、並びに、動力炉・核燃料開発事業団炉心技術開発室長の若林利男氏（現：核燃料サイクル開発機構 経営企画本部 事業計画部 FBRサイクル技術統合化グループ）に感謝いたします。また、日本原子力研究所炉物理研究室の桜井健氏、岡嶋成晃氏、安藤真樹氏には、実験結果のとりまとめや解析作業への助言などで多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。最後になりましたが、本報告書の解析作業に関して、原子力システムの沼田一幸氏に多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

### (FCA実験関連)

- 1-1 大井川宏之, 他: 「FCA XVI-1及びXVI-2炉心における<sup>238</sup>U ドップラー反応度値の測定と解析」, JAERI-M 92-113 (1992年8月)
- 1-2 桜井健, 根本龍男: 「高速炉臨界集合体FCAにおける増殖性能指標<sup>238</sup>U捕獲反応/<sup>239</sup>Pu核分裂比と<sup>238</sup>U捕獲反応/<sup>235</sup>U核分裂比の測定と解析」, JAERI-Research 95-054 (1995年8月)
- 1-3 大井川宏之, 飯島進: 「FCAを使った金属燃料及び酸化物燃料高速炉模擬体系におけるナトリウムボイド反応度値の測定と解析」, JAERI-Research 95-007 (1995年2月)
- 1-4 S. Okajima: "Analysis of Doppler Effect Measurement in FCA Cores using JENDL-3.2 Library," Proc. of International Conference on the Physics of Reactors(PHYSOR 96), Mito, Vol.2 E-247 (Sep. 1996)
- 1-5 S. Okajima, et al.: "Resonance Interaction Effect between Hot Sample and Cold Core in Analysis of Doppler Effect Measurement," Journal of Nuclear Science and Technology, 31[10], pp.1097-1104 (Dec. 1993)
- 1-6 S. Iijima, et al.: "Benchmark Experiment for Physics Parameters of Metallic-Fueled LMFBR at FCA," Proc. of International Conference on the Physics of Reactors(PHYSOR 96), Mito, Vol.2 E-46 (Sep. 1996)
- 1-7 S. Iijima, et al: "Mockup Experiments of MOX-fueled LMFBR in FCA Assembly XVII-1," JAERI-Review 94-009, p. 80 (Nov. 1994)
- 1-8 H. Oigawa, et al: "Experiments and Analyses on Sodium Void Reactivity Worth in Mock-up Cores of Metallic Fueled and MOX Fueled Fast Reactors at FCA, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.35, No.4, pp.264-277 (Apr. 1998)

### (JUPITER実験関連)

- 2-1 杉野和輝, 他: 「核設計基本データベースの整備 (VII) —JUPITER実験解析の高度化—」, PNC TN9410 97-098 (1997年11月)
- 2-2 石川眞, 他: 「核設計基本データベースの整備 (VIII) —JUPITER実験解析結果の集大成—」, PNC TN9410 97-099 (1997年11月)
- 2-3 核設計データベースWG: 「核設計基本データベースの整備—最新手法によるJUPITER-I実験解析—」, PNC TN9410 92-278 (1992年9月)
- 2-4 "ZPPR-9 Monthly Report for June 1978," ZPR-TM-323, Argonne National Laboratory

- (核データ, 解析コード, 解析手法関連)
- 3-1 中川正幸, 他:「高速炉の核特性解析コードシステム」, JAERI-M 83-066 (1983年4月)
- 3-2 中川正幸, 他:「SLAROM: 高速炉の非均質系炉心解析コード」, JAERI-M 5916 (1974年)
- 3-3 M. Nakagawa, et al.: "SLAROM : A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor," JAERI 1294 (1984)
- 3-4 飯島進, 他:「高速炉設計用計算プログラム・2(2次元・3次元拡散摂動理論計算コード: PERKY)」, JAERI-M 6993 (1977年2月)
- 3-5 T.Nakagawa: "Summary of JENDL-2 General Purpose File," JAERI-M 84-103 (1984)
- 3-6 Japanese Nuclear Data Committee: "Graphs of Evaluated Neutron Cross Sections in JENDL-2," JAERI-M 84-052 (1984)
- 3-7 H.Takano and Y.Ishiguro: "Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2," JAERI-M 82-135 (1982)
- 3-8 K. Shibata, et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 -JENDL-3-," JAERI 1319 (Jun. 1990)
- 3-9 T. Nakagawa, et al.: "Curves and Tables of Neutron Cross Sections -Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3-," JAERI-M 90-099 (Jul. 1990)
- 3-10 T. Nakagawa, et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2," Journal of Nuclear Science and Technology 32, p.1259 (Dec. 1995)
- 3-11 岡嶋成晃, 大井川宏之, 向山武彦: 「FCAにおける高温ドップラー効果測定(3)  
—超微細群によるセル計算コード(PEACO-X)の開発—」, JAERI-M 92-185 (1992年11月)
- 3-12 原昭浩, 竹田敏一, 菊池康之: 「SAGEP:一般化摂動理論に基づく二次元感度解析コード」, JAERI-M 84-027 (1984年2月)
- 3-13 高野秀機, 他: 「速中性子エネルギー領域群定数作成コードシステム: TIMS-PGG」, JAERI-M 82-072(1982年7月)
- 3-14 高野秀機, 他: 「高速炉用炉定数ライブラリーJFS-3-J2の作成」, PNC ZJ 250 80-16(1980年)
- 3-15 T. Tone,: "A Numerical Study of Heterogeneity Effects in Fast Reactor Critical Assemblies," Jounal of Nuclear Science and Technology 12, p.467 (Aug. 1975)
- 3-16 S. Ono, et al.: Technol. Rep. Osaka Univ. 33, 1708, 207 (1983)
- 3-17 P. Benoit: "Streaming Effects and Collision Probabilities in Lattices," Nuclear Science and Engineering 34, p.285 (1968)
- 3-18 T. B. Fowler, et al.: "Nuclear Reactor Analysis Code: CITATION," ORNL-TM-2496, Rev.2 (1971)
- 3-19 中川正幸, 阿部純一, 佐藤若英: 「高速炉の核特性解析コードシステム」, JAERI-M 83-006 (1983年4月)
- 3-20 M. Bando, et al.: "Three-Dimensional Transport Calculation Method for Eigenvalue Problems Using Diffusion Synthetic Acceleration," Jounal of Nuclear Science and Technology

22(10), p.841 (1985)

- 3-21 佐々木誠, 市川真一: 「『常陽』輸送コードシステムの作成—Sn輸送コード・使用マニュアルー」, PNC TN952 81-08 (1981年8月)
- 3-22 中川正幸, 他: 「SLAROM: 高速炉の非均質系炉心解析コード」, JAERI-M 5916 (1974年)
- 3-23 M. Nakagawa, et al.: "SLAROM: A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor," JAERI 1294 (1984)
- 3-24 飯島進, 吉田弘幸, 桜木廣隆: 「高速炉設計計算プログラム・2 (2次元・3次元拡散摂動理論計算コード: PERKY」, JAERI-M 6993 (1977年2月)

## 付録A 解析の詳細データ

- 表A-1 FCA XVII-1炉心の臨界性解析の詳細データ（対称炉心）
- 表A-2 FCA XVII-1炉心の臨界性解析の詳細データ（非対称炉心）
- 表A-3 FCA XVII-1炉心の反応率比解析の詳細データ
- 表A-4 FCA XVII-1炉心のNaボイド反応度解析の詳細データ
- 表A-5 FCA XVII-1炉心のドップラー反応度解析の詳細データ (NUO2-25)

表A-1 FCA XVII-1炉心の臨界性解析の詳細データ（対称炉心）

	モデル	実効増倍率	補正係数
基準計算	拡散18群XYZ体系	0.9976	-----
群縮約効果	拡散70群RZ体系	0.9940	-0.0008
	拡散18群RZ体系	0.9948	
メッシュ効果	拡散7群XYZ体系	1.0012	-0.0012
	拡散7群R方向倍メッシュXYZ体系	1.0005	
	拡散7群Z方向倍メッシュXYZ体系	1.0011	
輸送効果	輸送7群XYZ体系	1.0183	0.0061
	拡散7群XYZ体系	1.0135	
補正後計算値		1.0016	-----

表A-2 FCA XVII-1炉心の臨界性解析の詳細データ（非対称炉心）

	モデル	実効増倍率	補正係数
基準計算	拡散18群XYZ体系	0.9946	----
群縮約効果	拡散70群RZ体系	0.9940	-0.0008
	拡散18群RZ体系	0.9948	
メッシュ効果	拡散7群基準XYZ体系	1.0012	-0.0012
	拡散7群R方向倍メッシュXYZ体系	1.0005	
	拡散7群Z方向倍メッシュXYZ体系	1.0011	
輸送効果	輸送7群XYZ体系	1.0183	0.0061
	拡散7群XYZ体系（等方拡散係数）	1.0135	
補正後計算値		0.9986	----

表A-3 FCA XVII-1炉心の反応率比解析の詳細データ

	モデル	C28	F49	F25	C28/F49	補正係数	C28/F25	補正係数
基準計算	拡散18群XYZ体系	4.7863E-04	3.3016E-03	3.5204E-03	0.1450	-----	0.1360	-----
輸送・メッシュ補正	拡散18群XYZ体系 (等方拡散係数)	4.6963E-04	3.2486E-03	3.4540E-03	0.1446	0.0001	0.1360	0.0001
	輸送18群XYZ体系	4.7401E-04	3.2758E-03	3.4849E-03	0.1447		0.1360	
補正後計算値					0.1451	-----	0.1360	-----

表A-4 FCA XVII-1炉心のNaボイド反応度解析の詳細データ (1/3)

基準計算 (拡散70群XYZ体系、非等方拡散係数)	実効増倍率	直接計算	摂動計算		
			非漏洩成分	漏洩成分	TOTAL
非摂動体系	0.996695	-----	-----	-----	-----
step1	0.996750	5.597E-05	5.792E-05	-1.106E-06	5.681E-05
step2	0.996746	5.154E-05	5.601E-05	-3.874E-06	5.214E-05
step3	0.996737	4.288E-05	5.235E-05	-9.214E-06	4.314E-05
step4	0.996725	3.080E-05	4.724E-05	-1.675E-05	3.049E-05
step5	0.996711	1.631E-05	4.109E-05	-2.592E-05	1.517E-05
step6	0.996695	2.013E-07	3.445E-05	-3.603E-05	-1.581E-06
step7	0.996679	-1.570E-05	2.790E-05	-4.623E-05	-1.834E-05
step8	0.996665	-3.030E-05	2.201E-05	-5.548E-05	-3.347E-05
step9	0.996654	-4.117E-05	1.723E-05	-5.903E-05	-4.180E-05
1-2z	0.996802	1.077E-04	1.148E-04	-5.315E-06	1.095E-04
1-6z	0.996887	1.933E-04	2.940E-04	-9.866E-05	1.953E-04
1-9z	0.996784	8.938E-05	3.629E-04	-2.707E-04	9.222E-05

単位は  $\Delta k/kk'$

表A-4 FCA XVII-1炉心のNaボイド反応度解析の詳細データ (2/3)

補正計算 (拡散18群XYZ体系、等方拡散係数)	実効増倍率	直接計算	摂動計算		
			非漏洩成分	漏洩成分	TOTAL
非摂動体系	1.004922	----	----	----	----
step1	1.004981	5.862E-05	6.079E-05	-8.241E-07	5.997E-05
step2	1.004978	5.476E-05	5.878E-05	-2.949E-06	5.583E-05
step3	1.004970	4.703E-05	5.490E-05	-7.046E-06	4.786E-05
step4	1.004959	3.634E-05	4.949E-05	-1.282E-05	3.666E-05
step5	1.004946	2.337E-05	4.297E-05	-1.985E-05	2.312E-05
step6	1.004932	9.308E-06	3.590E-05	-2.759E-05	8.309E-06
step7	1.004918	-4.258E-06	2.890E-05	-3.541E-05	-6.513E-06
step8	1.004904	-1.802E-05	2.257E-05	-4.255E-05	-1.999E-05
step9	1.004895	-2.743E-05	1.736E-05	-4.554E-05	-2.818E-05
1-2z	1.005037	1.137E-04	1.195E-04	-3.978E-06	1.155E-04
1-6z	1.005149	2.240E-04	3.030E-04	-7.459E-05	2.284E-04
1-9z	1.005087	1.636E-04	3.719E-04	-2.049E-04	1.670E-04

単位は  $\Delta k/kk'$

表A-4 FCA XVII-1炉心のNaボイド反応度解析の詳細データ (3/3)

補正計算 (輸送18群XYZ体系)	実効増倍率	直接計算	摂動計算		
			非漏洩成分	漏洩成分	TOTAL
非摂動体系	1.010181	-----	-----	-----	-----
step1	1.010241	5.830E-05	5.897E-05	-4.328E-07	5.854E-05
step2	1.010237	5.468E-05	5.703E-05	-2.320E-06	5.471E-05
step3	1.010229	4.723E-05	5.330E-05	-5.958E-06	4.734E-05
step4	1.010219	3.675E-05	4.809E-05	-1.108E-05	3.701E-05
step5	1.010206	2.450E-05	4.182E-05	-1.731E-05	2.451E-05
step6	1.010192	1.088E-05	3.502E-05	-2.417E-05	1.085E-05
step7	1.010178	-2.842E-06	2.827E-05	-3.109E-05	-2.818E-06
step8	1.010169	-1.147E-05	2.217E-05	-3.744E-05	-1.527E-05
step9	1.010159	-2.166E-05	1.679E-05	-4.230E-05	-2.552E-05
1-2z	1.010296	1.128E-04	1.160E-04	-2.989E-06	1.130E-04
1-6z	1.010414	2.280E-04	2.945E-04	-6.579E-05	2.287E-04
1-9z	1.010365	1.799E-04	3.618E-04	-1.852E-04	1.767E-04

単位は  $\Delta k/kk'$

表A-5 FCA XVII-1炉心のドップラー反応度解析の詳細データ (NUO2-25)

	モデル	20°C→550°C		20°C→800°C	
		摂動計算	補正係数	摂動計算	補正係数
基準計算	拡散18群RZ体系	-5.5132E-06	----	-7.0458E-06	----
輸送・メッシュ補正	拡散18群RZ体系 (等方拡散係数)	-5.5237E-06	0.9685	-7.0596E-06	0.9683
	輸送18群RZ体系	-5.3498E-06		-6.8359E-06	
群縮約補正	拡散70群RZ体系	-5.7952E-06	1.0512	-7.4075E-06	1.0513
補正後計算値		-5.6128E-06	----	-7.1728E-06	----

単位は  $\Delta k/kk'$