

# JUPITER実験における反応度測定法とその精度

(研究報告書)

2001年1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 4-9  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001

# JUPITER 実験における反応度測定法とその精度

## (研究報告書)

鈴木 惣十<sup>\*1</sup>、青山 卓史<sup>\*1</sup>、池上 哲雄<sup>\*2</sup>、白方 敬章<sup>\*3</sup>

### 要　旨

JUPITER実験が行われた米国アルゴンヌ国立研究所のZPPR実験装置での反応度測定法とその精度を評価した。

ZPPRでは、炉心領域に均等に配置した64個の<sup>235</sup>U核分裂計数管による修正中性子源増倍法(MSM法)で各種反応度が測定された。このMSM法は、一点炉近似の動特性方程式に基づいて未臨界度を算出するが、64個の検出器を用いることにより中性子束分布の歪みによる空間依存性も考慮している。MSM法で必要となる検出器効率は、測定体系に依存して変化し、その不確定度が反応度測定値の不確定度に効くため、検出器の数を増やすことにより、統計精度を上げる手法がこれまで採用してきた。本研究では、これら64個の検出器による反応度測定値を単純に統計処理するのではなく、検出器効率に対して最小二乗フィッティングすることにより、検出器効率の不確定度が最終的に得られる反応度にほとんど効かないようにする方法を新たに開発した。

本手法の検証として、ZPPRの制御棒価値測定に適用した結果、中性子源強度の比、検出器効率の比は、燃料の移動を伴わない場合や、燃料の移動があってもその割合が小さい場合（例えば、単一制御棒価値）には、反応度と検出器効率比の1次式の最小二乗法フィッティングの結果でかなり精度良く補正できることが明らかとなった。

<sup>\*1</sup> 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部

<sup>\*2</sup> 大洗工学センター システム技術開発部

<sup>\*3</sup> 敦賀本部 もんじゅ建設所

## Reactivity Measurement in the JUPITER Experiment and Its Accuracy

Soju SUZUKI\*, Takafumi AOYAMA\*, Tetsuo IKEGAMI\*\* and Keisho SHIRAKATA\*\*\*

### ABSTRACT

This report describes the reactivity measurement method and its accuracy employed in ZPPR (Zero Power Physics Reactor) test facility at Argonne National Laboratory, USA.

In ZPPR, reactivity measurements were conducted by means of MSM (Modified Neutron Source Multiplication) method using the fission reaction rates by 64  $^{235}\text{U}$  fission chambers which were uniformly located in the core region. The MSM method can evaluate the subcritical reactivity considering the spatial distribution of neutron flux, although its basic equation is the one point approximation reactor dynamic theory. As each detector response varies depending on the core configuration, the uncertainty of the detector response affect directly the accuracy of measured reactivity. Therefore, the average value of many detectors had been conventionally used to reduce the statistical error in the measurement.

In this study, this method was modified to use the linear fitting between measured reaction rates and detector responses. Using this modified method, the uncertainty of each detector response affect the measured reactivity less than the simple averaging method.

This new method was verified by applying to the ZPPR control rod worth measurements. It was found that the ratios of neutron source intensities and detector responses could be corrected accurately by the linear fitting in case of reactivity change without or with little fuel movement such as a unit control rod worth measurement.

---

\*Experimental Reactor Division, Irradiation Center, O-arai Engineering Center, JNC

\*\*System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

\*\*\*Monju Construction Office, Tsuruga Head Office, JNC

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 修正中性子源増倍法 .....	1
2.1 MSM法の基本原理 .....	1
2.2 測定手法 .....	4
2.3 反応度測定値の誤差要因 .....	13
3. 反応度の測定精度 .....	19
3.1 基準体系の未臨界度の再現性 .....	19
3.2 MSM法の中性子源強度比の補正法 .....	24
3.2.1 補正式の導出 .....	24
3.2.2 中性子源強度比の補正法の検討 .....	29
3.2.3 制御棒価値測定値に対する中性子源強度比の補正効果 .....	31
3.2.4 中性子源強度比の補正法の検討課題 .....	33
4. 結 言 .....	35
5. 参考文献 .....	35
付 錄 .....	49

## 図表リスト

図2-1 検出効率比の等高線図の例(制御棒を3本挿入).....	36
図2-2 ZPPR-9の検出効率比のC/E (3CRP+3CR : 制御棒3本と制御棒ポジション3本) .....	37
図2-3 検出器効率比と反応度測定値のフィッティング結果 (ZPPR-10Bの外側制御棒リングに制御棒を1本挿入) .....	38
図3-1 ZPPR-13Cの $(1 - S_R)$ 対 $(1 - \varepsilon)^2$ プロット (制御棒#20) .....	39
表3-1 ZPPR-13のギャップ、温度、 $^{241}\text{Pu}$ 崩壊の各補正係数と $\beta_{\text{eff}}$ .....	40
表3-2 ZPPR-13シリーズの基準未臨界反応度.....	41
表3-3 ZPPR-13Cの検出器効率比と中性子源強度比 .....	42
表3-4 ZPPR-13B/4のNaボイド測定(中性子源強度比の補正効果ケースB) .....	43
表3-5 ZPPR-13B/4のNaボイド実験(中性子源強度比の補正効果ケースC) .....	44
表3-6 ZPPR-13B/4の板状制御棒価値の測定(中性子源強度比の補正なし) .....	45
表3-7 ZPPR-13B/4の板状・ピン制御棒価値(中性子源強度比の補正あり) .....	46
表3-8 ZPPR-13Cのシングル制御棒価値(中性子源強度比の補正なし) .....	47
表3-9 ZPPR-13Cのシングル制御棒価値(中性子源強度比の補正あり) .....	48

## 1. 緒 言

原子炉や臨界集合体等の連鎖核分裂反応を起こす体系の反応度測定に対する修正中性子源増倍法(MSM法)は、原理そのものはかなり前に確立されており、最近の未臨界体系での反応度測定、特に大きな負の反応度測定ではどこにおいてもほとんどこの方法を用いている。しかし、この方法を実際の測定に適用する場合には、種々のやり方が採用されている。米国アルゴンヌ国立研究所のZPPR(Zero Power Physics Reactor: ゼロ出力炉物理炉)でも、設立以来、制御棒価値やNaボイド反応度等の測定には、もっぱらMSM法が用いられてきたが、得られる結果の不確定度を減らすべく多大な努力が払われて、改良に改良を重ねてJUPITER (Japanese-United States Program of Integral Tests and Experimental Researches: 日米共同大型高速炉物理実験) - フェーズI実験までに、ほぼ完成の域に達したと言えるようになった。

本報告では、ZPPRで用いられているMSM法による反応度測定法を重点的に記述し、併せてその不確定度についても報告する。

ZPPRでは、MSM法は主に制御棒価値やNaボイド反応度の測定に用いられている。一般的に言って、後者は前者よりも体系に与える外乱が小さいので、同じMSM法と言っても前者の場合ほど厳密な取り扱いをしないのが普通である。したがって、細部においては、同じMSM法でも両者には違いがある。本報告書では、より厳密な取り扱いをする前者を中心に記述する。

## 2. 修正中性子源増倍法

### 2.1 MSM法の基本原理

元来、中性子源増倍法による反応度測定は、一点炉近似の動特性方程式をベースにしている。そこで、本報でもこれから出発する。

一点炉近似の動特性方程式は、

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{\text{eff}}}{\ell} n(t) + \sum \lambda_i C_i(t) + S_{\text{eff}}$$

2-①

$$\frac{dCi(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad \rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$$

で表される。式中の変数は一般的な表記法に依っているので、ここではその意味は述べない。中性子源増倍法の場合、平衡に達した状態しか興味がないので、2-①式は次のように簡単になる。

$$\frac{\rho - \beta_{eff}}{\ell} n + \sum \lambda_i C_i + S_{eff} = 0$$

$$\frac{\beta_i}{\ell} n - \lambda_i C_i = 0$$

これを解いて、

$$\frac{\rho}{\ell} n + S_{eff} = 0$$

$$\therefore -\rho = \frac{1 - k_{eff}}{k_{eff}} = \frac{\ell S_{eff}}{n}$$

$$\therefore \$ = \frac{-\rho}{\beta_{eff}} = \frac{\ell S_{eff}}{n \beta_{eff}}$$

中性子検出器の計数率をRとし、検出器効率  $\varepsilon$  を次のように定義すると、

$$\varepsilon = \frac{\text{検出器の計数率}}{\text{炉心全体の全核分裂率}}$$

Rは、

$$R = \frac{\varepsilon n}{\ell}$$

となり、結局

$$\$ = \frac{-\rho}{\beta_{eff}} = \frac{\varepsilon S_{eff}}{R \beta_{eff}} \quad 2-②$$

となる。これは平衡状態にある未臨界体系ならば、常に成り立つ。よって、基準体系を添字1、被測定体系を添字2で表すと、

$$\$_2 = \$_1 \frac{R_1 \varepsilon_2 \beta_{eff1} S_{eff2}}{R_2 \varepsilon_1 \beta_{eff2} S_{eff1}} \quad 2-③$$

このように一点炉近似の動特性方程式から修正中性子源増倍法（以降、MSM法と略記）の式が導かれるが、ここで注意すべきことは、検出器効率を考慮したと言うことは、純粹な一点炉近似にある程度の空間依存性を考慮したと言うことである。したがって、中性子束分布に空間的な歪みがあつても、検出器効率の変化が正確に求められる限り2-③式により得られる反応度は正確である。これが、単純な一点炉近似の動特性方程式から出発しているにも拘わらず、空間的な中性子束分布の歪みがある系でMSM法が使えるゆえんである。

さて、2-③式の各量のうち測定で得られる\$<sub>1</sub>、R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>以外の量を計算で求める都合上、2-③式を純粹に炉物理上の観点から表現してみる。定常中性子源Sを持つ未臨界体系は、

$$(L - F)\phi = S \quad 2-④$$

で記述される。ここでLおよびFは中性子の消滅および生成に関するoperatorである。一方、実効増倍率k<sub>eff</sub>は、固有方程式

$$\left( L - \frac{F}{k_{\text{eff}}} \right) \phi = O \quad 2-⑤$$

の最小固有値である。また、2-⑤式のadjointは、

$$\left( L^* - \frac{F^*}{k_{\text{eff}}} \right) \phi^* = O \quad 2-⑥$$

である。

よって、2-④、2-⑥式より

$$\begin{aligned} \frac{1 - k_{\text{eff}}}{k_{\text{eff}}} \langle \phi^*, F\phi \rangle &= \langle \phi^*, S \rangle \\ \therefore -\rho = \frac{1 - k_{\text{eff}}}{k_{\text{eff}}} &= \frac{\langle \phi^*, S \rangle}{\langle \phi^*, F\phi \rangle} \end{aligned} \quad 2-⑦$$

となる。

ところで、現実の測定では中性子検出器を使って反応度を測定する訳であり、検出

器の計数率Rが測定量となる。計数率Rは、 $R = |\Sigma_R \phi|$  ( $\Sigma$ は核分裂のマクロ断面積) であり、これと原子炉内の全核分裂率とは、検出器効率( $\varepsilon$ )を導入することにより、

$$R = |\Sigma_R \phi| = \varepsilon |F\phi| \quad 2-8$$

で関係づけられる。よって、2-7式を実際の測定量Rを使って表すならば、

$$\begin{aligned} -\rho &= \frac{1 - k_{eff}}{k_{eff}} = \frac{\langle \phi^*, S \rangle}{\langle \phi^*, F\phi \rangle} \times \frac{R}{R} = \frac{\langle \phi^*, S \rangle}{\langle \phi^*, F\phi \rangle} \times \frac{|\Sigma_R \phi|}{R} \\ &= \frac{\langle \phi^*, S \rangle}{\langle \phi^*, F\phi \rangle} \times \frac{\varepsilon |F\phi|}{R} = \frac{1}{R} \times \varepsilon \times \frac{|F\phi| \langle \phi^*, S \rangle}{\langle \phi^*, F\phi \rangle} \end{aligned} \quad 2-9$$

となる。

これと純粋に一点炉近似の動特性方程式から導かれた2-2式を比較することにより、

$$S_{eff} = \frac{|F\phi| \langle \phi^*, S \rangle}{\langle \phi^*, F\phi \rangle} \quad 2-10$$

であることが分かる。

ここで、MSM法が通常の中性子源増倍法( $-\rho = A/R$ 、 $A=一定$ )と違う点は、2-2式あるいは2-9式から明らかなように次の2点である。

- ・純粋な一点炉近似の動特性方程式にある程度の空間依存性を考慮することにより、中性子束分布に空間的歪みがあっても、得られる反応度にその影響が出ないようしている。
- ・基準体系と被測定体系との間での実効中性子源強度の差を補正している。

## 2.2 測定手法

前述したMSM法の原理を実際の測定に応用する上では、さまざまな方法がある。ここでは米国アルゴンヌ国立研究所のZPPRで採用されている方法を述べる。

まず、ZPPRでのMSM法の改良の歴史を簡単にたどってみる。前章で述べたMSM法の原理から言って、検出器の効率が正確に求まるならば検出器は1つで充分である。

しかしながら、オフセンターに制御棒が挿入されるような中性子束分布に大きな歪みがあるような体系では検出器効率を正確に求めることは難しく、検出器効率の不確定度がそのまま反応度測定値の不確定度に効いてくる。ZPPRでのMSM法の改良の歴史を一言で言うならば、まさにこの検出器効率の不確定度を減ずること、あるいは最終的に得られる反応度に検出器効率の不確定度がほとんど効いてこないような方法を開発することにあった。

この方法の1つとして考え出されたのが、炉心内にたくさんの検出器を配置することであった。ZPPRでは、JUPITER計画フェーズIのZPPR-9炉心以降、Naボイド実験用のステンレス製ボイド缶を利用した<sup>235</sup>U核分裂計数管を64個、炉心中心面上にほぼ均等に配置している。(それ以前は、長らくこの核分裂計数管を16個だけ用いていた。)

そして、これら64個の検出器の個々に対してMSM法を適用して、64個の反応度測定値を求める。単純にこれら64個の測定値を統計処理するだけでも、不確定度はかなり改善されるが、それでは単に統計精度が上がったと言うだけで、検出器効率の不確定度そのものはあまり改善されない。そこで、これら64個の反応度測定値を単純に統計処理するのではなく、検出器効率に対して最小二乗フィッティングすると言う新たな方法を開発し、検出器効率の不確定度が、最終的に得られる反応度にほとんど効かないようにすることに成功した。

ここで、2-③式の個々の項の求め方を述べる。R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>はそれぞれ基準体系および被測定体系での計数率であり、測定から直接求まる。

### (1) \$<sub>1</sub>(基準体系の未臨界度)

ZPPRでは、通常4つの象限から1体づつダブルカラム燃料ドロワー(燃料板を2枚入れた燃料ドロワー)をシングルカラム燃料ドロワー(燃料板を1枚入れた燃料ドロワー)に置換することにより浅い未臨界の状態を作り出し、ロッド・ドロップ法により\$<sub>1</sub>(通常数10セント)を求めている。

ロッド・ドロップ時の計数率の変化は、逆時間動特性方程式により次式で表される。

$$R(t) = \frac{1}{1 - \$_2} \left( \frac{\varepsilon_2 S_{eff2}}{\beta_{eff2}} + \frac{\varepsilon_2 \beta_{eff1}}{\varepsilon_1 \beta_{eff2}} R_1 \Sigma a_i e^{-\lambda_i t} + \Sigma a_i \lambda_i e^{-\lambda_i t} \int_0^t R(t') e^{\lambda_i t'} dt' \right) \quad 2-⑪$$

(添字1はロッド・ドロップ前、 添字2はロッド・ドロップ後)

これを

$$R(t) = A + BR_1 \Sigma a_i e^{-\lambda_i t} + C \Sigma a_i \lambda_i e^{-\lambda_i t} \int_0^t R(t') e^{\lambda_i t'} dt' \quad 2-⑫$$

として最小二乗フィッティングする。ただし、 $a_i$ 、 $\lambda_i$ 、 $R(t)$ は既知とする。

( $a_i$ は、別途行われるロッド・ドロップ法による $a_i$  searchにより実験的に求められ、 $\lambda_i$ は計算で、 $R(t)$ は測定から直接求まる。)

最小二乗フィッティングの結果から

$$1 - \$_2 = \frac{1}{C}$$

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{\beta_{eff1}}{\beta_{eff2}} = \frac{B}{C}$$

$$\frac{\varepsilon_2 S_{eff2}}{\beta_{eff2}} = \frac{A}{C}$$

により2-⑪式の未知数が求まる。

ここで注意すべきは、 $1/C$ から得られる未臨界度はロッド・ドロップ後の未臨界度である。一方、MSM法の基準体系の未臨界度として求めたいのは、ロッド・ドロップ前(体系内にシムロッド等の異物が入る前)の未臨界度(initial reactivity)である。

initial reactivity はロッド・ドロップ前の平衡状態の計数率( $R_{initial}$ )を測定しておけば、

$$\$_1 = -\frac{1}{R_{initial}} \frac{\varepsilon_1 \beta_{eff2}}{\varepsilon_2 \beta_{eff1}} \frac{\varepsilon_2 S_{eff2}}{\beta_{eff2}} = -\frac{1}{R_{initial}} \frac{C}{B} \frac{A}{C} \quad 2-⑬$$

で求まる。

この2-⑬式は以下のように導出される。MSM法の式、2-③式から、

$$\$_1 = \$_2 \frac{R_2 \epsilon_1 \beta_{eff2} S_{eff1}}{R_1 \epsilon_2 \beta_{eff1} S_{eff2}} \quad 2-14$$

ここで、添字1はロッド・ドロップ前、添字2はロッド・ドロップ後を示す。

ロッド・ドロップ後、充分時間がたって平衡に達した状態では2-12式より、

$$R_2 \equiv R_\infty = A + CR_\infty = \frac{\epsilon_2 S_{eff2}}{\beta_{eff2}(1 - \$_2)} + \frac{R_\infty}{1 - \$_2}$$

$$\therefore R_2 \equiv R_\infty = -\frac{\epsilon_2 S_{eff2}}{\beta_{eff2}} \frac{1}{\$_2}$$

これを2-14式に代入して、

$$\$_1 = -\frac{\epsilon_2 S_{eff2}}{\beta_{eff2}} \frac{1}{R_1} \frac{\epsilon_1 \beta_{eff2}}{\epsilon_2 \beta'_{eff1}} \left( \frac{\beta'_{eff1} S_{eff1}}{\beta_{eff1} S_{eff2}} \right) \quad 2-15$$

ここで、ロッド・ドロップの場合の  $\beta_{eff1}$  ( $\beta'_{eff1}$  と表す)とMSM法での  $\beta_{eff1}$  は、厳密には異なることに注意を要する。  $\beta'_{eff1}$  はロッド・ドロップ前に発生した遅発中性子のうちロッド・ドロップ後まで生き残っているもの(すなわち  $\phi_2^*$  weighted)であり、MSM法の  $\beta_{eff1}$  は、純粹に1の状態で発生して1の状態にある遅発中性子(すなわち  $\phi_1^*$  weighted)である。2-13式の  $\beta_{eff1}$  は、その意味で  $\beta'_{eff1}$  に相当する。そして、2-15式の最終項を1.0としたものが2-13式であり近似式であるが、ZPPRにおいてロッド・ドロップ法で測定されている70セント程度までの反応度差では、この近似は充分な精度で成立する。

## (2) $\beta_{eff1} / \beta_{eff2}$

この項は、厳密には基準体系と被測定体系では  $\beta_{eff1}$  が異なるため、これを補正するためにある。2-2式において明らかなように、この  $\beta_{eff}$  は単に  $\Delta k/kk' \rightarrow$  ドルの変換のためにある項で、実験で求められる反応度( $\$_1$ )が、ドル単位であるために入ってきた項である。したがって、2-3式に含まれる他の項と違ってMSM法の本質を左右する

項ではない。

ZPPRにおいては、通常この項は次の2つの理由により、特に計算値あるいは実験値を用いたりすることはせず単に1.0を代入している。

- (a) 通常、得られた反応度は計算値との比較(C/Eベース)に使われる。このため、  
2-③式において  $\beta_{\text{eff}1}/\beta_{\text{eff}2}=1.0$  としておけば、計算値に同種の補正をすることなく実験値と比較できる。
  - (b) 過去の経験では、最も影響の大きい制御棒挿入パターンでも  $\beta_{\text{eff}1}/\beta_{\text{eff}2}$  は、  
1.0±0.007であった。さらに、未臨界系で  $\beta_{\text{eff}1}/\beta_{\text{eff}2}$  を精度良く計算することが難しいことも理由の1つである。
- (注)  $\beta_{\text{eff}1}/\beta_{\text{eff}2}=1.0$  とすることで、2-③式で得られる反応度が  $\Delta k/k$  単位になる訳ではない。測定値はあくまでドル単位である。

### (3) $S_{\text{eff}2}/S_{\text{eff}1}$

2-⑩式より、

$$\frac{S_{\text{eff}2}}{S_{\text{eff}1}} = \frac{\langle \phi_1^*, F\phi_1 \rangle \langle \phi_2^*, S \rangle |F\phi_2\rangle}{\langle \phi_2^*, F\phi_2 \rangle \langle \phi_1^*, S \rangle |F\phi_1\rangle}$$

である。

ZPPRでは、通常これは計算で求めている。その場合、基準体系は普通数10セントの未臨界で臨界に近いこともあり、 $\phi_1$ 、 $\phi_1^*$ とも入モード計算で求められており、被測定体系については、 $\phi_2$ は固定中性子源計算で求められている。計算は中性子9群の2次元XY拡散計算である。

なお、 $S_{\text{eff}2}/S_{\text{eff}1}$  は定義からも明らかなように、場所に依存せず64個の中性子検出器に対して同一の値を用いる。 $S_{\text{eff}2}/S_{\text{eff}1}$  を実験的に求めることが可能であり、ロッド・ドロップからも求まるが、ここでは別の例を挙げる。

前述の定義において、 $\phi_1^*$ 、 $\phi_2^*$ の分布型は、それぞれ $\sigma_f \phi_1$ 、 $\sigma_f \phi_2$  ( $\sigma_f$ は核分裂のミクロ断面積) の分布型と同じと仮定する。この仮定は、未臨界度の浅いところでは大きな誤差なく成立する。また、前述の定義式で $\phi_1^*$ 、 $\phi_2^*$ とも、

$$\frac{\langle \phi_1^*, F\phi_1 \rangle}{\langle \phi_1^*, S \rangle} \frac{\langle \phi_2^*, S \rangle}{\langle \phi_2^*, F\phi_2 \rangle}$$

の形で現れており、お互いにキャンセルアウトする方向であるため、分布型が同じであれば $\phi_1^* \rightarrow \sigma_f \phi_1$ 、 $\phi_2^* \rightarrow \sigma_f \phi_2$ としても大きな誤差はない。核分裂に関する積分には、炉心内に配置した64個の中性子検出器で得られる測定データを用いるが、これらは $^{235}\text{U}$ 核分裂計数管であることから、別の反応率比の測定から得られるF9/F5( $^{239}\text{Pu}$ と $^{235}\text{U}$ の核分裂反応率の比)、F8/F5( $^{238}\text{U}$ と $^{235}\text{U}$ の核分裂反応率の比)のデータを使い、さらに64個の検出器の各々が炉心内でカバーする領域内の $^{235}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ の重量をweightして求める。

この方法は、前述の仮定が成立する9ドル程度の未臨界までは極めて精度が良く、計算値との差も1%以下である。しかしながら、それより深い未臨界では精度が落ちること及び時間がかかることから、ZPPRでは $S_{\text{eff}2}/S_{\text{eff}1}$ には通常計算値を用いている。

(4)  $\varepsilon_2/\varepsilon_1$

2-⑧式より、

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{|\Sigma_R \phi_2\rangle |F\phi_1\rangle}{|\Sigma_R \phi_1\rangle |F\phi_2\rangle}$$

である。

制御棒の挿入パターンや検出器の位置により異なるので一概に言えないが、通常は0.6~1.2の範囲である。図2-1に $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ の炉内分布の一例を示す。これを測定で求めることは可能である（MSM法の測定のために炉内に配置されている64個の炉内検出器を使って、かなりの精度で炉内の反応率分布を測定することが可能である）が、以下の2つの理由によりZPPRでは計算値を用いている。

- (a) 制御棒価値の測定は、1つの体系で数10ケースも行われるのが普通であり、その各々のケースに対して、64個の検出器の個々の検出器効率を実験で求めるのはかなり大変である。
- (b) 次の項で述べるZPPRで新たに開発された手法を用いると、検出器効率の不確定度は最終的に求まる反応度に余り影響しない。したがって、労力をかけて実験値を求めなくても、より簡便に得られる計算値を用いれば充分である。

$\varepsilon_2 / \varepsilon_1$ は、中性子源比の場合と同様に、通常は中性子9群の2次元XY拡散計算で求められ、基準体系は臨界に近いことから入モードの計算が、また被測定体系では固定中性子源モードの計算が行われる。検出器断面積には、内側炉心、外側炉心、径方向プランケットの領域分けをせずに統一的に内側炉心の断面積を用いている。中性子28群の計算をせず、また領域に依存した検出器断面積を作成しないのは、計算ケースが多いので手間と経費を節約するためと、新たに開発された手法を用いると得られる結果が、検出器効率の不確定度にほとんど影響されなくなるからである。

図2-2に検出器効率のC/Eの一例を示す。実験値には64個の炉内検出器のデータを使用しており、 $|F\phi\rangle$ を求めるにあたっては、前述の中性子源強度比の項で説明したのと同様の方法を用いている。この図から分かるように、制御棒近傍のC/Eは他に比べて良くない。

## (5) データ処理

これまで、(1)～(4)で2-③式の各項の求め方を述べた。したがって、2-③式を用いれば直に目的の反応度 $\$_2$ が求まるのであるが、直接I-③式を用いただけでは、各項に含まれている不確定度( $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$ の不確定度が最も大きい)が、そのまま $\$_2$ に入ってきてしまう。そこで、ZPPRでは次の2つの方法を新たに導入し、2-③式の各項のうち $R_1 \varepsilon_2 / R_2 \varepsilon_1$ の不確定度を極めて小さなものにすることに成功している。

- (a) 検出器の数を64個に増やし、炉心中心面上に均等配置する。
- (b) 2-③式を用いて得られた64個の $\$_2$ を $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$ に対して、1次式で最小二乗フィ

ツティングし、 $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = 1.0$ に相当する点の  $\$_2$  をもって最終的な  $\$_2$  とする。

(a)については、2-③式のうち  $\$_1$  と  $S_{\text{eff}2} / S_{\text{eff}1}$  は場所に依存しないため、検出器の数を増やしてもその統計精度は改善されないが、 $R_1 \varepsilon_2 / R_2 \varepsilon_1$  は場所の関数であるため、検出器の数が増えれば、それだけ統計精度が上がる。特に  $R_1 / R_2$  に対して効果がある。

次に(b)について説明する。制御棒を挿入した時の反応率分布を、図Aの実線で表す。この時、検出器効率を計算するのに用いる、中性子9群の拡散計算による反応率分布の計算結果は一般に真の分布とは一致せず、制御棒の挿入によって生ずる落ち込みを過大評価(図Aのa)するか、過小評価(図Aのb)するかのどちらかである。したがって、64個の検出器のうち、制御棒近傍に位置する検出器(あるいは制御棒が挿入されたことによって逆に中性子束分布が盛り上がる位置にある検出器)の検出器効率は、一般に不確定度が大きい。

そこで、2-③式を用いて求められた64個の  $\$_2$  を、検出器効率比に対してプロットすると図Bのようになる。図Aの右上がりの曲線aは、制御棒の挿入に伴う反応率分布の落ち込みを過大評価した場合であり、右下がりの曲線bはその逆である。(検出器効率の計算に誤差がなければ、水平になる。)

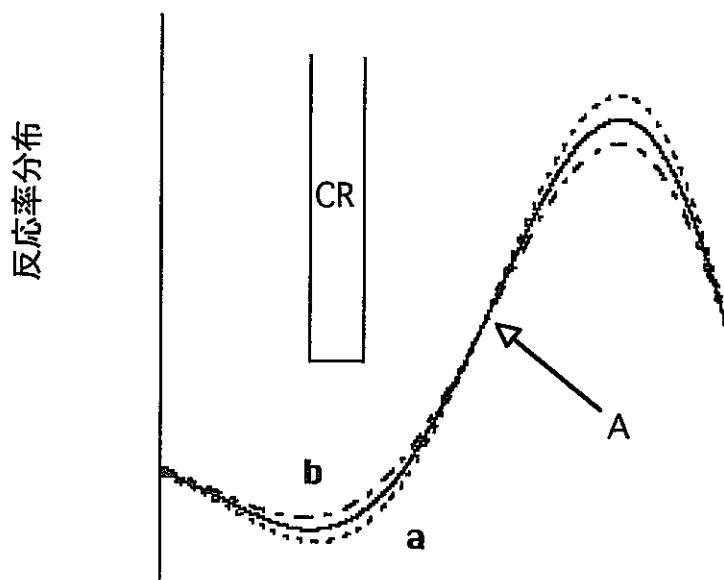


図 A

ここで、図Aにおいて、一般には真の分布と計算で得られる分布とは一致しないが、交わる点（図A中のA点）が少なくとも1つある。この点がまさに求めたい点であり、この点では  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = 1.0$  である。そこで、図Bにおいて、 $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  に対してプロットした64個の  $\$_2$  を1次式で最小二乗フィッティング（厳密には1次式ではないかも知れないが、一般に  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  は 0.6~1.2 の比較的狭い範囲にあるので、第一近似としては1次式で充分である。これは過去の経験からも実証されている。）し、それを  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = 1.0$  の点に内挿してその点の  $\$_2$  を求めれば、検出器効率の不確定さをほとんど含まない結果が得られる。これがZPPRで新たに開発されたMSM法の適用手法の特徴である。

図2-3にZPPR-10Bの測定データでのフィッティング例を示す。誤差を低減する上で、この方法が64個の炉内検出器から得られる  $\$_2$  を単純平均することよりも有利であることは、次の説明でも分かる。

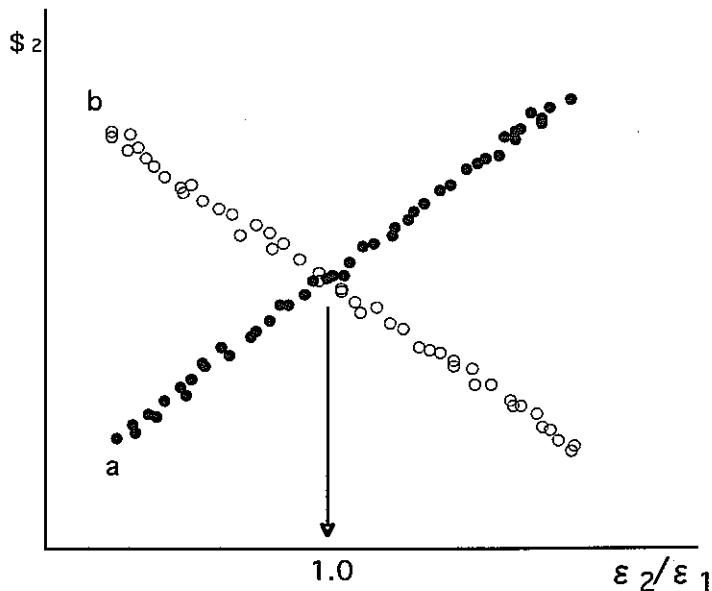


図 B

制御棒の挿入パターンによっては、64個の検出器のうち大部分が  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 > 1.0$  であったり、その逆であることもある。その場合は単純平均をとると、図Bからも明らかのように、 $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = 1.0$  に相当する点の値とは違ったものになる。また、過去において検出器の数が16個しかなかった時代に、その16個を炉心の第1象限だけにかためて設置したことがある。（こうすれば、第1象限に限って言えば検出器が64個あるのと同じ。）

この場合は制御棒の挿入パターンの影響をより受けやすく、単純平均が意味をなさなかつた。

ここで、なぜ  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = 1.0$  の点をもって最終的な  $\$_2$  とするかについて、さらに補足説明する。2-③式において、検出器効率比の補正をしない  $\$_2$  を  $\$_u$ 、補正をしたもの  $\$_T$  とすると、

$$\$_T = \$_u \times \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

(ここでは、検出器効率比以外の補正はすべて1.0とする。)

一方、

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{|\Sigma_R \phi_2\rangle |F\phi_1\rangle}{|\Sigma_R \phi_1\rangle |F\phi_2\rangle}$$

である。

$$\text{そこで, } \phi_2 = \phi_1 + g \quad |Fg\rangle = O$$

とし、 $|F\phi_1\rangle$  /  $|F\phi_2\rangle$  は規格化のための項なので、簡単のためこれを1.0とすれば、

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} &= 1 + \frac{|\Sigma_R g\rangle}{|\Sigma_R \phi_1\rangle} = 1 + \delta \\ \therefore \$_T &= \$_u \times \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \$_u(1 + \delta) \end{aligned}$$

ここで、検出器効率比の不確定度は  $\delta$  の中に含まれるので、 $\delta = 0$  の点すなわち  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = 1.0$  の点では  $\$_T$  の不確定度もなくなる。

### 2.3 反応度測定値の誤差要因

2-③式に示したように、

$$\$_2 = \$_1 \frac{R_1 \varepsilon_2 \beta_{eff1} S_{eff2}}{R_2 \varepsilon_1 \beta_{eff2} S_{eff1}}$$

であるが、2.2 (2)項で述べたように  $\beta_{\text{eff}1}/\beta_{\text{eff}2}$  は通常1.0とされることもあり、ここでは不確定度の考察の対象から除く。

上式のうち、 $\$_1$  と  $S_{\text{eff}2}/S_{\text{eff}1}$  に対しては、64個の検出器に対して同一の値が使われ、かつ  $R_1 \varepsilon_2/R_2 \varepsilon_1$  には依存しないため、検出器効率比に対する最小二乗フィッティングによる統計処理を行ってもその不確定度は変わらない。よって、 $\$_2$  の不確定度  $\sigma_{\$2}$  は、 $\$_1$ 、 $S_{\text{eff}2}/S_{\text{eff}1}$ 、 $R_1 \varepsilon_2/R_2 \varepsilon_1$  の不確定度をそれぞれ  $\sigma_{\$1}$ 、 $\sigma_{\text{source}}$ 、 $\sigma_{R\varepsilon}$  とすると、

$$\frac{\sigma_{\$2}}{\$2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\$1}}{\$1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{source}}}{S_{\text{eff}2}/S_{\text{eff}1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R\varepsilon}}{R_1 \varepsilon_2/R_2 \varepsilon_1}\right)^2}$$

2-16

で表される。

制御棒価値としては、この  $\$_2$  と基準体系との差 ( $\$_2 - \$_1$ ) が使われる所以、この不確定度を  $\sigma_c$  とすると

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_{\$1}^2 + \sigma_{\$2}^2}$$

(厳密には  $\$_1$  と  $\$_2$  は独立ではないので、この式には若干の補正が必要)

であるが、基準体系の反応度 ( $\$_1$ ) と被測定体系の反応度 ( $\$_2$ ) は同時には測定されず、この間に炉心マトリックスはいったん Half1 と Half2 に切り離されて制御棒ドロワーの詰め替え等の炉心構成が変更されるため、これにさらに

- ・ギャップ補正(炉心の固定側 (Half1) と可動側 (Half2) の密着度の補正)
- ・ $^{241}\text{Pu}$  の減衰補正
- ・温度補正
- ・運転用制御棒の補正

の不確定度が加わり、最終的な不確定度は、

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_{\$1}^2 + \sigma_{\$2}^2 + \sigma_{gap}^2 + \sigma_{pu}^2 + \sigma_{temp}^2 + \sigma_{rod}^2}$$

2-⑯

となる。

そこで、2-⑯、2-⑯式の個々の不確定度を見積もってみる。

(不確定度は測定される制御棒価値の大小や制御棒の挿入パターンにより異なるため、一概には言えないが、ZPPRでのMSM法の不確定度がどの程度かの目安を得る意味で、代表的な例について評価してみる。)

### (1) $\sigma_{\$1}$

このロッド・ドロップにより求まる $\$_1$ の不確定度は基準体系の未臨界度によって異なるが、代表例として20~30セントの未臨界度を例にとると、

- ・統計精度(主に計数率の統計精度や最小二乗法の際の統計精度)………… 0.4%
- ・ $a_i$ 、 $\lambda_i$ 等のインプットデータの不確定度に起因するもの ..... ~1%

よって、

$$\sigma_c = \sim 1.1\%$$

### (2) $\sigma_{source}$

これの計算精度の評価は難しいが、 $S_{eff2}/S_{eff1}$ の定義から言って基準体系では比較的良好く、被測定体系では未臨界度の深いところで特に悪くなる。しかし、一般にこの種の計算精度は10%より悪いことはないと考えられるので、計算誤差を10%とすると、 $S_{eff2}/S_{eff1}$ は0.9~1.05の範囲なので、 $\sigma_{source}$ は1%以下とみなせる。

### (3) $\sigma_{R\varepsilon}$

これは64個の $\$_2$ を $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ に対し最小二乗フィッティングして、 $\varepsilon_2/\varepsilon_1=1.0$ に相当する $\$_2$ を求める際の統計誤差であるが、2.2 (5)項の説明でも分かるとおり、この中に

は64個の検出器の計数率の統計誤差と共に  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  の計算誤差も含まれていると理解できる。

これは制御棒の挿入パターンにより変わるため、一概には言えないが、これまでの実験から～0.2%であることが知られている。

以下に述べるギャップ、 $^{241}\text{Pu}$ 減衰、温度、運転用制御棒の効果は、データ処理の過程で補正されている。すなわち、( $\$_2 - \$_1$ )を求める過程で、これら4つの効果から生じる反応度差は補正されている。したがって、これらに起因する不確定度とは、これらの補正の不確定度にほかならず、一般に極めて小さい。

#### (4) $\sigma_{\text{gap}}$

基準体系と被測定体系では、炉心のギャップ(Half1とHalf2の密着度)に相対的な差があり、この補正の誤差でJUPITER-フェーズ I (ZPPR-9, 10)でのギャップ補正係数は約 -0.1 セント/mil である。通常の測定では、異なる測定間の相対的なギャップ差は 2mil 以下である。よって、補正是通常2セント以下であり、仮にこれに10%の誤差があるとすると、

$$\sigma_{\text{gap}} = \sim 0.02 \text{ セント}$$

#### (5) $\sigma_{\text{Pu}}$

これは、 $^{241}\text{Pu}$ の減衰補正の不確定度に起因する誤差である。被測定体系の測定が、基準体系の測定からどのくらい時間がたってから行われたかによるが、ここでは代表例として1ヶ月とする。(通常はほとんど1ヶ月以内である。)

$^{241}\text{Pu}$ の半減期を14.4y とすると、

$$\lambda = 0.0481/\text{y}$$

よって、1ヶ月での $^{241}\text{Pu}$ の原子数Nの変化 $\Delta N$ は、

$$\Delta N/N = 0.0481/12 = 0.004$$

$^{241}\text{Pu}$ の崩壊の反応度に対する感度を0.0164 ( $\Delta k/k$ ) / ( $\Delta N/N$ ) とすると、1ヶ月間の

反応度変化は、 $6.56 \times 10^{-5} \Delta k/k \approx 2$ セント である。

仮にこの補正に10%の誤差がある(かなり過大評価)とすると、

$$\sigma_{\text{Pu}} = \sim 0.2 \text{セント}$$

(6)  $\sigma_{\text{temp}}$

これは、基準体系と被測定体系の炉心温度の差に起因する反応度差の補正の不確定度である。ZPPR-9、10の温度係数は約-1セント/°Cで、一般的に異なる2つの測定間の温度差は2°C程度である。よって、この補正は約2セントである。仮にこの補正に10%の誤差があるとして、

$$\sigma_{\text{temp}} = \sim 0.2 \text{セント}$$

(7)  $\sigma_{\text{rod}}$

基準体系と被測定体系とで運転用制御棒の位置に違いがある場合はこの補正が効く。しかし、ZPPR-9およびZPPR-10の両実験とも、どちらの体系においても運転用制御棒は常に全引き抜きの位置にあったので、実際にはこの補正を施していない。

よって、

$$\sigma_{\text{rod}} = 0$$

以上から、まず  $\sigma_{\$2}$  を求めてみる。ここでは  $\$_1 = 20$ セントと仮定すると、

$$\left( \frac{\sigma_{\$2}}{\$2} \right)^2 = 0.011^2 + 0.01^2 + 0.002^2 = 2.25 \times 10^{-4}$$

$$\therefore \frac{\sigma_{\$2}}{\$2} = 0.015$$

次に2-17式より、

$$\sigma_c^2 = (0.015\$_2)^2 + (0.011 \times 0.2)^2 + 0.002^2 + 0.002^2 + 0.002^2$$

$$= (0.015\$_2)^2 + 1.288 \times 10^{-5}$$

$$\therefore \sigma_c = \sqrt{(0.015\$_2)^2 + 1.288 \times 10^{-5}}$$

2-⑯

よって、

$$\$_2 = 0.5 \text{セントのとき, } \sigma_c = 0.0083 \text{ドル} \rightarrow 1.7\%$$

$$\$_2 = 1 \text{ドルのとき, } \sigma_c = 0.0154 \text{ドル} \rightarrow 1.5\%$$

$$\$_2 = 5 \text{ドルのとき, } \sigma_c = 0.0751 \text{ドル} \rightarrow 1.5\%$$

$$\$_2 = 10 \text{ドルのとき, } \sigma_c = 0.150 \text{ドル} \rightarrow 1.5\%$$

となる。

以上から言えることは、

① 検出器の数が少なくかつ検出器効率比の不確定度を減ずることができなかった時代には、 $\sigma_{R_\varepsilon}$  が測定結果の不確定度の支配的因子であった。しかし、新たな手法を開発することにより、これを極めて小さいものにすることことができた。

② 反応度のトータルな精度に対する主たる不確定度の源は、基準体系の未臨界度測定（ロッド・ドロップ法）に伴う誤差で、これ単独で1.1%である。

③ ギャップ、 $^{241}\text{Pu}$ 崩壊、温度、運転用制御棒効果補正の不確定度は、他のものに比べて小さいので、ここではあまり厳密な取り扱いはせず、これらの補正に伴う誤差を一律10%としたが、実際にはこれよりも小さいと考えられる。そして、制御棒価値が1ドル以上ではほとんど効いてこない。

ただし、測定する反応度が比較的小さい領域ナトリウムボイド価値の実験では、これらも効いてくるのでより厳密な取り扱いが必要である。

④ ここでの見積もり（基準体系の未臨界度が20セント程度）では、1ドル以上の

制御棒価値に対しては全不確定度は1.5%であった。これはZPPRの技術レポート(TM356)で報告されている全不確定度(1ドル以上のものに対しておおよそ1.1%)より大きいが、その主たる原因是、

- ・  $\sigma_{\$1}$ として統計的なものとインプット・データの不確定度を合わせて1%としている。
- ・  $\sigma_{\text{source}}$ を1%より小さいとしている。
- ・  $\sigma_{\$1}$ と  $\sigma_{\$2}$ は独立でないとしている。

ためと思われる。しかしながら、これらの誤差評価は全体として過小評価傾向に感じられるし、現実の測定においてはここで評価しきれていない不確定度もあるわけで、本検討で算出した1.5%という数値は妥当なものと考えられる。

⑤ 2-18式から分かるように、制御棒価値が1ドル以上では、全不確定度は1.5%で変わらない。これは①、②でも触れたが、全不確定度は基準体系の未臨界度測定の不確定度でほとんど決まってしまい、これまで被測定体系の不確定度を大きく左右してきた  $R_1 \varepsilon_2 / R_2 \varepsilon_1$  の不確定度が極めて小さく、かつ未臨界度が深くなってもほとんど変わらないからである。これは、ZPPRで新たに開発された手法の大きな長所である。いずれにせよ、数10ドルの未臨界度も1.5%程度の精度で測定できることは、極めて優れた測定法であると言える。

### 3. 反応度の測定精度

#### 3.1 基準体系の未臨界度の再現性

JUPITER実験が行われた米国アルゴンヌ国立研究所のZPPRでは、制御棒価値、ナトリウムボイド反応度、炉心移行時のステップ反応度、臨界近接等のほぼ全ての反応度は、炉心領域に均等に配置した64個の $^{235}\text{U}$ 核分裂計数管(64 in-core detector)を用いたMSM法(修正中性子源増倍法)により求められている。このMSM法における基準反応度は、ロッドドロップ法で測定され、これがMSM法による各種反応度の精度を支配し

ている。本章では、基準反応度の再現性から評価したMSM法の精度について記述する。

ZPPRでは、通常以下のように基準体系が構成されて、MSM法のための基準反応度が測定される。

- ・制御棒価値測定

測定開始時と終了時にロッド・ドロップ法により測定され、再現性が確認される。通常、制御棒価値測定のMSM法の基準には、開始時の結果が用いられる。

- ・Naボイド反応度測定

JUPITER計画で実験された炉心のNaボイド反応度は正であることから、ナトリウムボイド反応度測定の基準未臨界体系(ボイドがない体系)は、制御棒価値測定のそれより深い未臨界にされる。このため、基準未臨界体系では、MSM法の基準反応度は測定されない。通常、full void step(未臨界度が一番浅いステップ)においてMSM法の基準反応度が、ロッド・ドロップ法により測定される。

- ・炉心移行時のステップ反応度測定と臨界近接

炉心移行直前の基準未臨界体系の反応度または終了後の最初のそれが、MSM法の基準反応度<sup>1</sup>として使われる。

(この場合、炉心移行中に64 in-core detector 自体の位置や検出器が挿入されるドロワーのタイプが変わるため、検出器のin-cell locationが変わるが、これはMSM法コード "McCrunch"では考慮できない。)

ここで、ナトリウムボイド測定だけは特別であるのでここでは言及しないが、full void zone stepでのロッド・ドロップ法の結果を基準として、測定前後のナトリウムボイド基準未臨界体系の未臨界度(炉心温度、ギャップ(可動炉心側・固定炉心側の密着度)、<sup>241</sup>Pu崩壊<sup>2</sup>の補正後)を比べると次のようになる。

---

<sup>1</sup> 通常、制御棒価値測定の基準体系と同じ構成であるが、数個のin-core detectorの位置が異なる。

<sup>2</sup> <sup>241</sup>Pu崩壊の補正係数は、 $-3.175 \times 10^{-2}$  セント/day である。

基準未臨界体系の未臨界度	ZPPR-13Aでの ナトリウムボイド実験	ZPPR-13B/4での ナトリウムボイド実験
(実験前)	-80.82セント	-64.06セント
(実験後)	-77.95セント	-65.55セント
ゲイン(実験前後の差)	+2.87セント(-3.6%)	-1.49セント(2.3%)

この違いは、MSM法の不確定度(これは後述するが、ロッド・ドロップ法で直に測定した反応度と、他の未臨界体系の反応度を基準にしてMSM法で予測した反応度は、通常  $\rho=10$ セントに対して0.5セント以内で十分一致する)によるものではなく、ドロワーの装荷、脱荷に伴う真の反応度変化と考えられる。

ZPPR-13AとZPPR-13B/4でゲインの符号が逆になった原因是、はっきりとは分かっていないが、このNaボイド実験は、ドロワーをマトリックスにきっちりと装荷するためのドロワープッシュ以前に行われていることから、ドロワープッシュにより今までマトリックスの奥(炉のより外側)に入っていたものがわずかにinterface(炉心中心面)側に移動したことが、理由の一つと考えられている。

ここで、制御棒価値測定用の基準未臨界体系、炉心移行ステップ、臨界近接用基準未臨界体系のMSM法とロッド・ドロップ法の全ての測定結果を表3-2に示す。McCrunchコードの中性子源強度の比と検出器の感度比は、全て1.0とした。また、ギャップ、温度、 $^{241}\text{Pu}$ 崩壊の補正係数には表3-1に示す値を用いている。

表3-2から分かるようにロッド・ドロップ法の結果とMSM法による予想値は、極めて良く一致している。このMSM法では、中性子源強度の比と検出器感度の比は計算で求めることなく一律に1.0を入力するので、得られる反応度の誤差には寄与しない。ここで考えられる未臨界度の再現性の不確かさの原因として、

- ①計数率の統計精度
- ②検出器の系統的不確定度
  - ・ディスクリ電圧の変動

- ・アンプゲインの変動等に伴う見かけの計数率変化

### ③補正計数の不確定度

が挙げられるが、MSM法とロッド・ドロップ法の比の平均値が、 $1.0008 \pm 0.0031$ であり、上記の不確定度の寄与は極めて小さいことが分かる。そして、ZPPRの64個の炉内検出器を用いたMSM法は、ロッド・ドロップ法とほとんど等価な測定法と言うことができる。

しかし、基準体系に対してギャップ、温度、 $^{241}\text{Pu}$ 崩壊の補正を行った後の各基準体系の反応度を比べると、同一炉心構成でありながら明らかな違いが見られる。これは、ZPPR-13Aで特に顕著で、表3-2から分かるようにドロワーを押し込むことで、約7セントの反応度が発生したことになる。これらは、計算では考慮できないため、測定誤差を取り扱わざるを得ない。また、異なる基準未臨界度を用いたMSM法で求めた、制御棒価値や炉心移行ステップ毎の反応度変化を評価する上で考慮する必要がある。

炉心構成	未臨界度（セント）	基 準 日	備 考
ZPPR-13A	$-9.60 \pm 0.04$	1982.9/17	ドロワープッシュ前
ZPPR-13A	$-2.52 \pm 0.52$	1982.9/17	" 後
ZPPR-13B/1	$-8.20 \pm 0.21$	1983.2/21	
ZPPR-13B/3	$-3.77 \pm 0.02$	1983.5/11	
ZPPR-13B/4	$-7.80 \pm 0.22$	1983.6/8	
ZPPR-13C	$-12.87 \pm 0.32$	1983.11/1	

ちなみに、各体系の反応度の平均値を求めると上記の表のようになる。この表から分かるように、未臨界度の大きさによらず0.2~0.3セント(ZPPR-13Aは例外)の再現性の不確定性<sup>3</sup>が存在する。

<sup>3</sup>  $k_{\text{eff}}$  の計算から言えば、十分小さい。

MSM法でNaボイド反応度、制御棒価値、炉心移行時の反応度変化を測定する場合、基準反応度には、一律0.7%の誤差<sup>4</sup>を与えたが、これは再現性の観点からは、少し過小評価していると考えられ、今後さらに検討する必要がある。

---

<sup>4</sup> ロッド・ドロップ法の測定精度から算出した誤差

### 3.2 MSM法の中性子源強度比の補正法

#### 3.2.1 補正式の導出

MSM法については2章で詳しく記述したが、ここでは本研究で実施した中性子源強度の比（計算値）の補正法について述べる。

ZPPRで使用しているMSM法のデータ処理コード McCrunchでは、64個の炉内中性子検出器の計数率から次式に基づいて反応度を算出している。

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{\varepsilon_2 S_{e_2} R_1 \beta e_1}{\varepsilon_1 S_{e_1} R_2 \beta e_2} \quad 3-①$$

ここで用いられている各変数は、2章で記述したものと同様の記述法によったので、ここでは説明しないが、添字1、2はそれぞれ基準体系及び被測定体系を示す。ただし、2章で\$\$\_1, \ \$\$\_2と表記した基準体系と被測定体系の反応度は、本章ではそれぞれ\$\$\rho\_1, \ \rho\_2\$\$で表す。

3-①式の\$\$\rho\_1\$\$は、前章で述べたようにロッド・ドロップ法で得られる反応度の測定値であり、64個の炉内検出器の計数率の比\$\$R\_1/R\_2\$\$も同じく測定値である。これら測定値の誤差は測定法に依存するものであり、ここでは触れない。通常、残りの3つの変数\$\$\varepsilon\_2/\varepsilon\_1, \ S\_{e\_2}/S\_{e\_1}, \ \beta e\_1/\beta e\_2\$\$は核計算で求めており、これまで McCrunchコードの入力データとして次のようにして比較的少數群の拡散計算結果から求めてきた。

(1) \$\$\varepsilon\_2/\varepsilon\_1

$$\varepsilon = \frac{\int \sigma_d \phi_d dE}{\langle F\phi \rangle} \quad 3-②$$

F : fission production operator

$\sigma_d$  :  $^{235}\text{U}$  detector cross section

$\phi_d$  : 検出器位置の中性子束

で計算された\$\$\varepsilon\$\$との比で得られる。

もし、核計算が正確な  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  を与えてくれるならば<sup>5</sup>、64個の中性子検出器から得られる  $\rho_2$  は各検出器位置の  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  によらず一定であり、この  $\rho_2$  が被測定体系の正確な反応度である。しかし、通常はこうなることは期待できない。つまり、各々の検出器から得られる  $\rho_2$  は、大なり小なり  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  に依存する。この  $\rho_2$  の  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  への依存性は、これらを1次式

$$\rho = (A + B \varepsilon_2 / \varepsilon_1)$$

A, Bはフィティング係数

で最小二乗フィティングして  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = 1.0$  (実際はある補正值を用いる) に内挿することで排除してきた。これにより、 $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  の計算誤差の  $\rho_2$  への波及を極めて小さくすることができた。

## (2) $\beta e_1 / \beta e_2$

McCrunchコードでは、この値として1.0が用いられる（勿論、実際にはこれは極めて1.0に近い値であって正確には1.0でない）。これは、過去の計算例では1.000 ± 0.007であったことと、計算値W(\$)は、

$$W(\$) = \frac{k_2 - k_1}{k_1 k_2 \beta_{eff}}$$

で算出されるが、 $\beta_{eff}$ には基準体系に対する計算値を用いており、被測定体系との違いを考慮しないことによる。

それでは、残る最後の計算値  $Se_2 / Se_1$  は、と言うと

## (3) $Se_2 / Se_1$

これに関しては、計算値がそのまま使われて McCrunchコードでは何の補正も行わない。ここで、Seは、

<sup>5</sup> 中性子束分布の変化が、正しく計算されたということであり、 $Se_2 / Se_1$  も正確な値となる。

$$Se = \frac{\langle \phi^*, S \rangle \cdot \langle F_\phi \rangle}{\langle \phi^*, F_\phi \rangle} \quad 3-③$$

ここで生じる疑問は、 $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  が正しく計算されていないにも拘わらず、つまり各中性子検出器の位置の中性子束  $\phi$ （多分、 $\phi^*$  も）が、正確に計算されなかったのにも拘わらず  $Se_2 / Se_1$  が精度良く求まっているかと言うことである。 $\phi$ 、 $\phi^*$  が炉心内で大きく変化する非均質炉心では、 $\varepsilon$  や  $Se$  の計算精度が均質炉心に比べて落ちることは、充分予想される。さらに、内部プランケットを雪片状に何層か配置した ZPPR-13C のような flux tilt に敏感な炉心における制御棒装荷体系では、実際の  $\phi$ 、 $\phi^*$  から大きくなれる可能性がある。3-①式から分かるように、 $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  と  $Se_2 / Se_1$  は反応度測定値に対して同等の誤差波及効果を持つが、何の考慮もされていない。

よって、本研究では、 $\rho_2$  の  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  への依存性  $\rho_2 = A + B \varepsilon_2 / \varepsilon_1$  の関係から、 $Se_2 / Se_1$  を補正することを試みた。（ここで、 $B = 0$  ならば、 $\rho_2$  は  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  に依存せず、どの中性子検出器に対しても一定値となる。つまり、 $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  ひいては  $\phi$  が正確に求まっていたことになる。）

3-②、3-③式より、 $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$ 、 $Se_2 / Se_1$  はそれぞれ  $\phi$ 、 $\phi^*$  の 1 次、2 次式で真値の周りに分布していると近似できる。ここで簡単化のために  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = \varepsilon_R$ 、 $Se_2 / Se_1 = S_R$  とおく。 $\varepsilon_R$ 、 $S_R$  は基準体系に対してともに  $\varepsilon_R = 1.0$ 、 $S_R = 1.0$  であることから、その誤差は  $1 - \varepsilon_R$ 、 $1 - S_R$  に比例しているはずである。

よって、次式が  $S_R$  と  $\varepsilon_R$  の関係は次のように表される。

$$\frac{1 - (S_{RO} + \Delta S_{RO})}{1 - S_{RO}} = \left\{ \frac{1 - (\varepsilon_{RO} + \Delta \varepsilon_{RO})}{1 - \varepsilon_{RO}} \right\}^2 \quad 3-④$$

$\Delta S_{RO}$ ：中性子源強度比の補正量

$\Delta \varepsilon_{RO}$ ：検出効率比の補正量

$S_{RO}$ ：計算で得られる中性子源強度比

$\varepsilon_{RO}$ ：計算で得られる検出効率比

$S_R$ の補正值を $S_{RC} = S_{RO} + \Delta S_{RO}$ とおくと3-④式より、

$$\frac{1 - S_{RC}}{1 - S_{RO}} = \left\{ \frac{1 - (\varepsilon_{RO} + \Delta\varepsilon_{RO})}{1 - \varepsilon_{RO}} \right\}^2$$

3-⑤

ここでMcCrunchコードの最小二乗フィティングルーチンにより、

$$\rho_2 = A + B\varepsilon_R$$

A : y切片

B : 傾き

が得られるから、この式を変形して、

$$\rho_2 = A + B - B(1 - \varepsilon_R)$$

また、

$$\frac{1 - (\varepsilon_{RO} + \Delta\varepsilon_{RO})}{1 - \varepsilon_{RO}} = 1 - \frac{\Delta\varepsilon_{RO}}{1 - \varepsilon_{RO}}$$

であるから、

$$\frac{1 - (\varepsilon_{RO} + \Delta\varepsilon_{RO})}{1 - \varepsilon_{RO}} = 1 - \frac{B}{A + B}$$

3-⑥

3-⑥式を3-⑤式に代入すると

$$1 - S_{RC} = (1 - S_{RO}) \left( 1 - \frac{B}{A + B} \right)^2$$

したがって、

$$S_{RC} = S_{RO} + (1 - S_{RO}) \left\{ \frac{2B}{A + B} - \left( \frac{B}{A + B} \right)^2 \right\}$$

3-⑦

が得られる。これが、最小二乗フィティングで得られる $\rho_2$ と $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$ の関係式を用いて中性子源強度の比を補正する式であるが、これは以下の方法でも算出できる。

ZPPR-13Cの制御棒価値測定のうち、単一制御棒CR# 20および12CRs (FR1<sup>6</sup>の6本とFR2の奇数番号のもの6本)に対し、B<sub>4</sub>Cのマクロ断面積<sup>7</sup>を実際のものの10%、40%、60%、80%、100%、200%にして、基準計算（中性子8群の2次元XY拡散計算）でそれぞれのケースの検出器効率比と中性子源強度比を計算した。この時、DB<sup>2</sup>（軸方向への漏れ項）には全ケース同じ値を用いた。得られた中性子源強度比と幾つかの検出器の検出器効率比を表3-3に示す。これを(1 - S<sub>R</sub>) 対 (1 - ε)<sup>2</sup>でプロットしたのが、図3-1、3-2である。これらから分かるようにCR# 20に対しては、次式の関係が成り立つ<sup>8</sup>。

$$1 - S_{RC} = a(1 - \varepsilon_{RO})^2 \quad 3-8$$

ここで、

$$1 - (S_{RO} + \Delta S_{RO}) = a \{1 - (\varepsilon_{RO} + \Delta \varepsilon_{RO})\}^2$$

とし、S<sub>RC</sub> = S<sub>RO</sub> + ΔS<sub>RO</sub> とすると

$$1 - S_{RC} = a \{1 - (\varepsilon_{RO} + \Delta \varepsilon_{RO})\}^2 \quad 3-9$$

3-8式より

$$a = \frac{1 - S_{RO}}{(1 - \varepsilon_{RO})^2}$$

これを3-9式に代入して

$$1 - S_{RC} = \frac{1 - S_{RO}}{(1 - \varepsilon_{RO})^2} \{1 - (\varepsilon_{RO} + \Delta \varepsilon_{RO})\}^2$$

<sup>6</sup> fuel ring 1 : ZPPR-13 体系は径方向非均質炉心で、同心円上に何層か燃料領域があり、FR1 は内側から 1 番目の領域。

<sup>7</sup> より正確には、制御棒ドロワーの均質化マクロ断面積

<sup>8</sup> 制御棒近傍に位置する数個の検出器に対しては、3-8式が成立しない。これらに対する(1 - S<sub>R</sub>) と(1 - ε)<sup>2</sup> の関係には直線性はあるが、必ずしも原点を通らない。これは、制御棒近傍では B<sub>4</sub>C のマクロ断面積を変化させることにより与えた perturbation に比例しない成分(検出器位置の中の計算値が、相対変化に対してさえ正確でないことによる)が、相対的に大きいことによると考えられる。

$$1 - S_{RC} = (1 - S_{RO}) \left( 1 - \frac{\Delta \varepsilon_{RO}}{1 - \varepsilon_{RO}} \right)^2$$

ここで前述したように

$$\frac{\Delta \varepsilon_{RO}}{1 - \varepsilon_{RO}} = \frac{B}{A + B}$$

であるから、

$$1 - S_{RC} = (1 - S_{RO}) \left( 1 - \frac{B}{A + B} \right)^2$$

したがって、

$$S_{RC} = S_{RO} + (1 - S_{RO}) \left\{ \frac{2B}{A + B} - \left( \frac{B}{A + B} \right)^2 \right\}$$

3-⑩

となり、3-⑦式と全く同じ式が導出できた。

この式の妥当性をZPPR-13B/4のナトリウム・ボイド実験の結果を用いて調べた。

### 3.2.2 中性子源強度比の補正法の検討

まず、ZPPR-13B/4 の ナトリウムボイド実験の測定データ処理法について、ここで簡単に触れる。

通常、ナトリウムボイド測定で用いられるMcCrunch コードには、検出器効率の比 ( $\varepsilon_R = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$ ) と中性子源強度の比 ( $S_R = Se_2 / Se_1$ ) は計算せず、全て1.0 が入力される。このため、最小二乗法による  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  の統計処理は行われない。この方法でも、Flux tilt に対して敏感でない体系やZPPR-13Aのナトリウムボイド実験のように、ボイド領域が1/4炉心対称に設けられFlux tiltが小さい場合には、大きな誤差は生じないことは容易に予想できる。実際、64個の炉内中性子検出器の測定値を単純平均するだけでも、結構良い結果が得られる。しかし、ZPPR-13B/4は非均質炉心であるため中性子工学的結合度が弱くてFlux tilt により敏感である上に、ボイド領域が1/2炉心対称であることから多くの検出器が、 $\chi^2$ 検定 (3.6 $\sigma$ 以内) ではねられた。最悪のケースでは、16個の検出器のみしか使われなかった。このため、今までの方法では、比較

的大きな誤差を生じることが予想された。よって、以下の3つの方法によるデータ処理法を試みた。

- ・ケースA : 中性子源強度比と検出器効率比を1.00
- ・ケースB : 中性子28群の2次元XY拡散計算(標準DB<sup>2</sup>使用)による  $\varepsilon_R$  ,  $S_R$
- ・ケースC : 上記の拡散計算によるナトリウムボイド反応度のC/E (EはケースAの値) が、1.00~1.06になるようにナトリウムボイド領域のDB<sup>2</sup>をアジャスト (adjusted DB<sub>A</sub><sup>2</sup>=1.09×DB<sup>2</sup>) して  $\varepsilon_R$  ,  $S_R$  を計算

ケースAでは、McCrunchコードでは基準反応度 (full void step) から遠ざかるにつれて  $\chi^2$  検定で生き残る検出器が減り、20個前後の検出器だけが反応度算出に使われる。また、ケースBでは、ナトリウムボイド価値のC/Eは2.1~2.4であり、明らかに flux tilt は正しく予測されていない (これは  $\chi^2$  検定をパスする検出器の数が7~30個であることでも明らか) にも拘わらず、最小二乗法フィッティング後は53個以上の検出器が  $\chi^2$  検定にパスしてしまう。最小二乗法フィッティング後の  $\chi^2$  検定をパスしない検出器は、ナトリウムボイド領域内か、その領域のごく近傍にある検出器のみである。このため、 $\varepsilon_R$  の誤差は  $\rho_2$  にほとんど効いてこない。しかし、 $S_R$  は 1.006~1.023 であり、過去の例からしても過大評価していることは明らかである。このように、 $\varepsilon_R$  ,  $\rho_2$  が一次式でよくフィッティングできることにより  $\chi^2$  が改善され、一見良い測定値が得られたように見えても、 $S_R$  の計算値が正確に求まっていないため、得られた反応度や価値が正しくなかった例が過去のデータに存在するかも知れない。

ケースCでは、ケースAで得られたナトリウムボイド反応度に対するC/Eが1.0に近くなるように、ナトリウムボイド領域のDB<sup>2</sup>の係数をサーチして1.09を得た。これを用いてケースBと同様の計算により  $\varepsilon_R$  ,  $S_R$  を求めて McCrunch コードにより各ステップの反応度を算出した。そして、これが最良の値であることはこれまでのデータの  $\chi^2$  検定の結果から経験的に分かっていた。

ケースCでは、答え (各ステップの反応度) を知ってからその導出のつじつま ( $\varepsilon_R$  ,

$S_R$ ) を合わせて“やはり、それ程間違ってはいなかった”との自己満足、本末転倒の感は免れない。また、各ステップ毎の $\phi$ 、 $\phi^*$ を計算するため、ステップ数×2回の28群拡散計算とDB<sup>2</sup>の係数のサーチ計算するのには計算費も手間も結構かかる。でき得るならば、制御棒価値測定のように少々粗い $\varepsilon_R$ 、 $S_R$ 計算値でも何とかそれを補正して最良の結果を得たい。

そこで、前節で導出した3-⑦式でケースB、ケースCの $S_R$ を補正してみて、3-⑦式の妥当性を検討しその有効性を確認した。この結果を表3-4、3-5に示す。これらから分かるように、ケースB、ケースCとも $S_R$ 補正後は極めて良く一致する。また、ケースCでは、予想通り $S_R$ 、ステップ反応度ともほとんど変化しない。領域1-3のステップ反応度のみ比較的大きな差（ケースBで5.46セント、ケースCで5.34セント）がみられるが、この原因は分かっていない。

このようにナトリウムボイド反応度の場合、その中性子源強度比の補正は極めてうまくできる。しかし、ここで注意しなければならないのは、 $\rho_2$ と $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ が一次式でよくフィッティングできる場合に限ることである。もし、フィッティング後に $\chi^2$ 検定をパスする（3.6 $\sigma$ 以内の）中性子検出器の数NDが少ないならば、これはあまり良い結果を与えないであろう。このため、McCrunchコードに中性子源強度比の補正ルーチンを加えることを検討し、NDの下限の目安として全検出器の半数である32を選んだ。

### 3.2.3 制御棒価値測定値に対する中性子源強度比の補正効果

次の節で述べるが、3-⑦式はまだ検討の余地があるため、ここではZPPR-13B/4の制御棒価値測定の結果およびZPPR-13Cの単一制御棒価値の結果の3-⑦式による補正結果についてだけ記述する。

表3-6には制御棒価値測定の第1測定シリーズ（ $B_4C$ 板を用いた制御棒ドロワー2×2）の結果を、表3-7には第2測定シリーズ（ $B_4C$ ピンと $B_4C$ 板を用いた制御棒ドロワー2×2、2×3）の結果を示す。第1シリーズの結果では、ナトリウムボイド測定に比べて最小二乗フィッティング直線の傾きが大きいが、 $S_R$ が1.0に近いため $S_R$ の補正量は

全体的に小さい。これは3-⑦式の右辺第2項（補正項）

$$(1 - S_{R0}) \left\{ \frac{2B}{A+B} - \left( \frac{B}{A+B} \right)^2 \right\}$$

A : y切片

B : 傾き

A+B :  $\rho_2$  (反応度)

のなかの $1 - S_{R0}$ が、ほぼ0であるということである。このことは、ZPPR-13B/4炉心がZPPR-13AやZPPR-13Cに比べてより均質体系に近く、中性子工学的結合度が相対的に強いことに関係していると考えられる。この $S_{R0}$ の補正による制御棒価値補正の程度を見ると全体で-0.6～+0.3%変化するだけに留まり、 $S_{R0}$ の計算誤差は小さかったと結論できる。

次に第2シリーズの結果を見ると、 $S_{R0}$ は1.0に近くBも第1シリーズのグループ制御棒に比べ小さい。これは、NDがほぼ64であることからして  $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  がかなり正確に計算できたことに他ならない。制御棒価値の補正は-0.7～+0.5と小さいが、注意しなければならぬのは、 $B_4C$ 板の制御棒価値では $S_R$ を過大評価しており、濃縮 $B_4C$ ピンでは過小評価していることである。このため、 $B_4C$ 板の制御棒価値と濃縮 $B_4C$ ピンを比較すると統一的に～0.7%の差が見られる。CR#03では小さいが、これは第1燃料領域リングにあるため、 $S_R$ の変化が小さいことによると考えられる。

表3-8にZPPR-13Cでの単一制御棒の価値の結果 ( $S_R$ の補正是なされていない) を、また表3-9に $S_R$ を補正した結果を示す。これは、ZPPR-13 Cが flux tilt に対して極めて敏感な炉心であることからある程度予想されていた。 $S_R$ が 1.0から遠ざかるならば、 $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  が正確に求まっている限り（つまり、 $\rho_2 = A+B \varepsilon_R$  の B が小さくならない限り）、 $S_R$ の補正是大きくなる。単一制御棒については、ZPPR-13CのBはZPPR-13B/4に比べてむしろ良い結果が得られている。しかし、NDはZPPR-13Bではほぼ64であったが、ZPPR-13Cでは全体的に小さくなっている。これは、局所的な perturbation に対して、 $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  が正確に求まらない位置の検出器が  $\chi^2$  検定ではねら

れた結果であり、そのためのBがより小さくなつたためと考えられる。

表3-9の $S_R$ 、制御棒価値補正量は±30° 方向の第3燃料領域リングに位置する制御棒（#20、21、24、25、26、27、30、31）に対し1.4～2.0%、また第2燃料領域リングのX軸上の制御棒#13、19に対し1.0、1.3%と大きい。これらの位置は、今までの計算から局所perturbationに対して最も敏感な位置でかつ高出力領域であることが分かっており、これからも予想される結果である。その他の制御棒に対しては、補正量は-0.3～0.9でZPPR-13B/4の単一制御棒のものとほぼ同等である。

ZPPR-13Cの領域置換反応度測定は、第2および第3燃料リングにまたがる高出力領域（具体的には、制御棒#19の領域と制御棒#20、31のX軸側の領域）で行われるが、 $S_R$ の補正は制御棒価値の場合と同様に重要であると考えられる。また、ZPPR-13A、13B/1、13B/3の制御棒価値、炉心移行のステップ反応度変化に対する $S_R$ 補正については未検討であり、これについても今後検討する必要がある。

### 3.2.4 中性子源強度比の補正法の検討課題

3.2.2、3.2.3 節で述べた中性子源強度比は $1-S_R$ が  $(1-\varepsilon_R)^2$ と直線関係にあり、かつこの直線は原点を通過すると仮定した。これは、ナトリウムボイドおよびZPPR-13B/4の制御棒価値測定（制御棒価値は、制御棒ポジション価値との相対価値である）ではほぼ問題ない。つまり、基準体系と被測定体系間で燃料の移動がないため、perturbation（今の場合、ナトリウムボイドまたは $B_4C$ 濃度）を→0.0とすれば、 $S_R \rightarrow 1.0$ 、 $\varepsilon_R \rightarrow 1.0$ が成立する。また、単一制御棒価値の場合、燃料の移動は炉心全体の燃料に比べて十分小さいため、3-⑦式は極めて良い近似である。これは、図3-3の各直線が原点に収束することからも明らかである（制御棒#20については、制御棒に置換される燃料の炉心全体に対する割合は、0.241%で極めて小さい）。ZPPR-13A、13B/1、13B/3、13Cの制御棒価値測定では、制御棒価値は燃料との相対値として測定された。この場合、 $S_R$ 、 $\varepsilon_R$ を1.0から変化させる主な効果は、

i) 燃料が炉心からなくなる効果

（核分裂性物質の減少、中性子源である $^{241}Pu$ の減少）

ii)  $B_4C$ による中性子吸収効果

iii) 制御棒ドロワーと燃料ドロワーの組成の差（金属U、 $U_3O_8$ 、 $Fe_2O_3$ 、Na等）

であるが、iii)は一般に小さく制御棒から遠い検出器に対しては $\varepsilon_R$ にほとんど効かないし、 $S_R$ の変化も小さい。また、i)も単一制御棒のように燃料置換量が少ない時は、ii)に比べて十分小さい。これが、図3-1および3-8式で示した $(1-S_R)$ と $(1-\varepsilon_R)^2$ の直線関係が成立する理由である。

しかし、グループ制御棒のように多数の燃料ドロワーが制御棒ドロワーに置換される時は、i)のii)に対する効果は、制御棒から遠い検出器に対してさえ無視できなくなる。図3-2は、ZPPR-13Cの制御棒12本（第1燃料リングに6本、第2燃料リングに6本（奇数番のもの））に対して $B_4C$ のマクロ断面積（正確には制御棒ドロワーの断面積）を実際のものの10%、40%、60%、80%、100%（ノーマル $\Sigma_{CR}$ ）、200%として $S_R$ と $\varepsilon_R$ を求めたものを $(1-S_R)$ 対 $(1-\varepsilon_R)^2$ で示したものである（DB<sup>2</sup>は一定）。ここで、i)は考慮されていないため直線ではあるが、原点ではなく別の一点に収束するようになる。ちなみに制御棒12本のために置換された燃料の割合は3.02%である。検出器No.47の直線は他と少し異なる挙動を示すが、これはこの検出器が制御棒近傍にあるため、中性子束（その相対値さえも）を正しく計算できなかったことによると考えられる。

今、この収束点を $(1-C_\varepsilon, 1-C_S)$ とすると、

$$C_S - S_{RO} = a(C_\varepsilon - \varepsilon_{RO})^2 \quad 3-8'$$

となり、

$$S_{RC} = S_{RO} + (C_S - S_{RO}) \left\{ \frac{2\Delta\varepsilon_R}{C_\varepsilon - \varepsilon_R} - \left( \frac{\Delta\varepsilon_R}{C_\varepsilon - \varepsilon_R} \right)^2 \right\}$$

$\rho_2 = A + B\varepsilon_R$ の関係より

$$S_{RC} = S_{RO} + (C_S - S_{RO}) \left\{ \frac{2B}{A + BC_e} - \left( \frac{B}{A + BC_e} \right)^2 \right\}$$

3-10'

が得られる。ここで、 $C_S$ 、 $C_e$ をどのように評価するかが、今後さらに検討すべき課題となる。

#### 4. 結 言

これまで述べてきたように、中性子源強度の比、検出器効率の比は、燃料の移動を伴わない場合（例えば、ZPPR-13B/4の制御棒価値測定、ナトリウムボイド測定）や、燃料の移動があってもその割合が小さい場合（例えば、単一制御棒価値）には、反応度と検出器効率比の1次式の最小二乗法フィッティングの結果でかなり精度良く補正できることが明らかとなった。

しかし、燃料の移動量の割合が大きい場合は、燃料自身の移動に伴う中性子源強度の比、検出器効率の比の変化を把握する必要がある。これは、制御棒位置に $B_4C$ がないとして全ケースにつき計算しなければならない。このため、前節に示した $C_S$ 、 $C_e$ をどのようにして近似的に簡便に算出するかが今後の課題である。

#### 5. 参考文献

- 1) M. J. LINEBERRY, " II-59. Interpretation of Static Source-multiplication Measurements in a ZPPR ", ANL-8010, Applied Physics Division Annual Report, July, 1971 to June 30, 1972.
- 2) S. G. Carpenter et al., " Measurement of Control Rod Worths Using ZPPR ", Proceeding of A Specialists' Meeting on Control Rod Measurement Techniques : Reactivity Worth and Power Distribution, Cadarache (France), April 21 and 22, 1976.
- 3) S. G. Carpenter et al., " CONCLUSION DRAWN FROM SUBCRITICAL MULTIPLICATION RESULTS IN ZPPR ", CONF-780401, Proceeding of ANS Topical Meeting, Gatlingburg, April 1978.
- 4) 白方敬章、池上哲雄、" JUPITER計画の概要 - 日米共同大型高速炉物理実験 - ", 動燃技報No.37, 1981年3月。

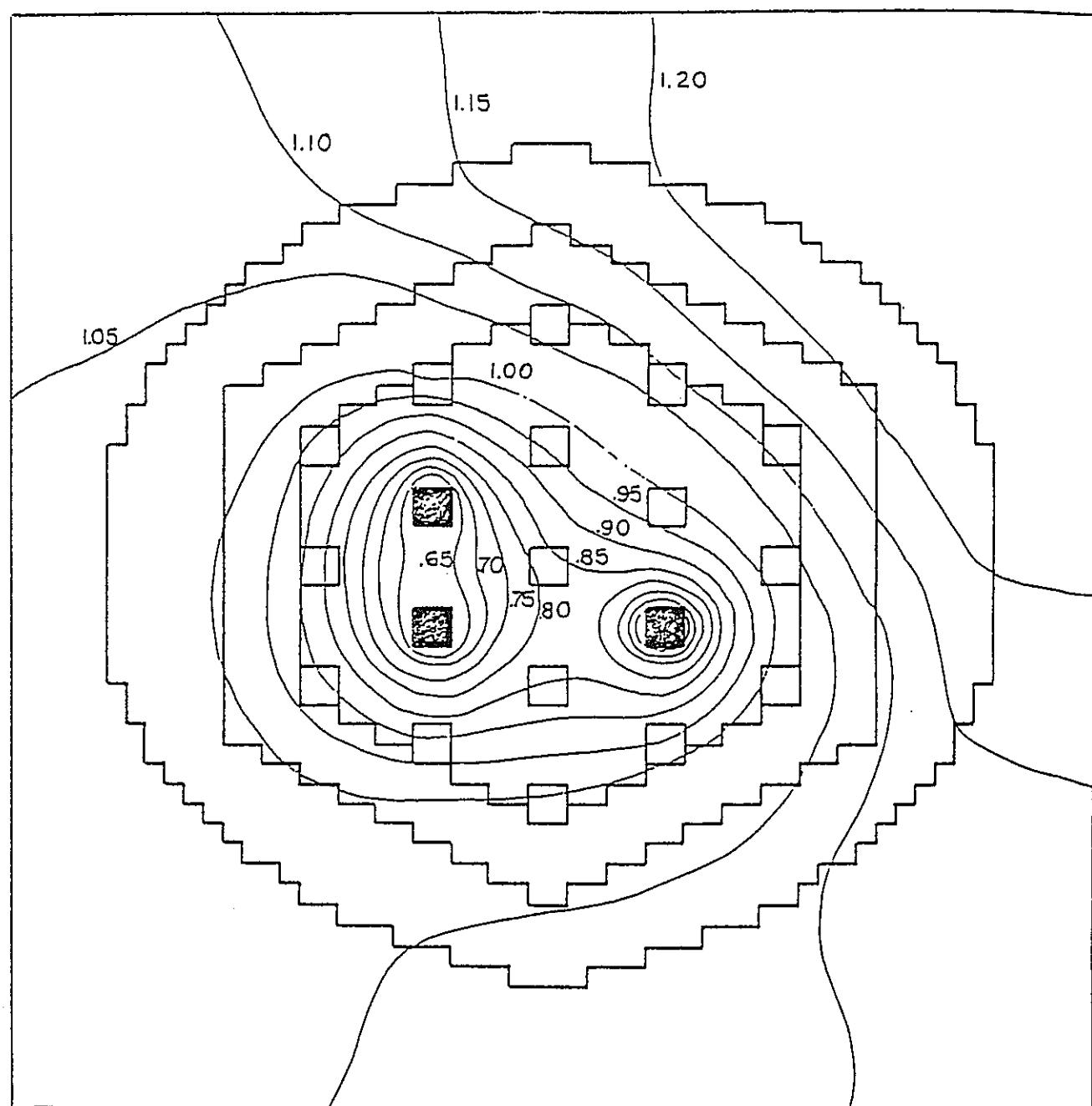


図2-1 検出効率化の等高線図の例（制御棒を3本挿入）

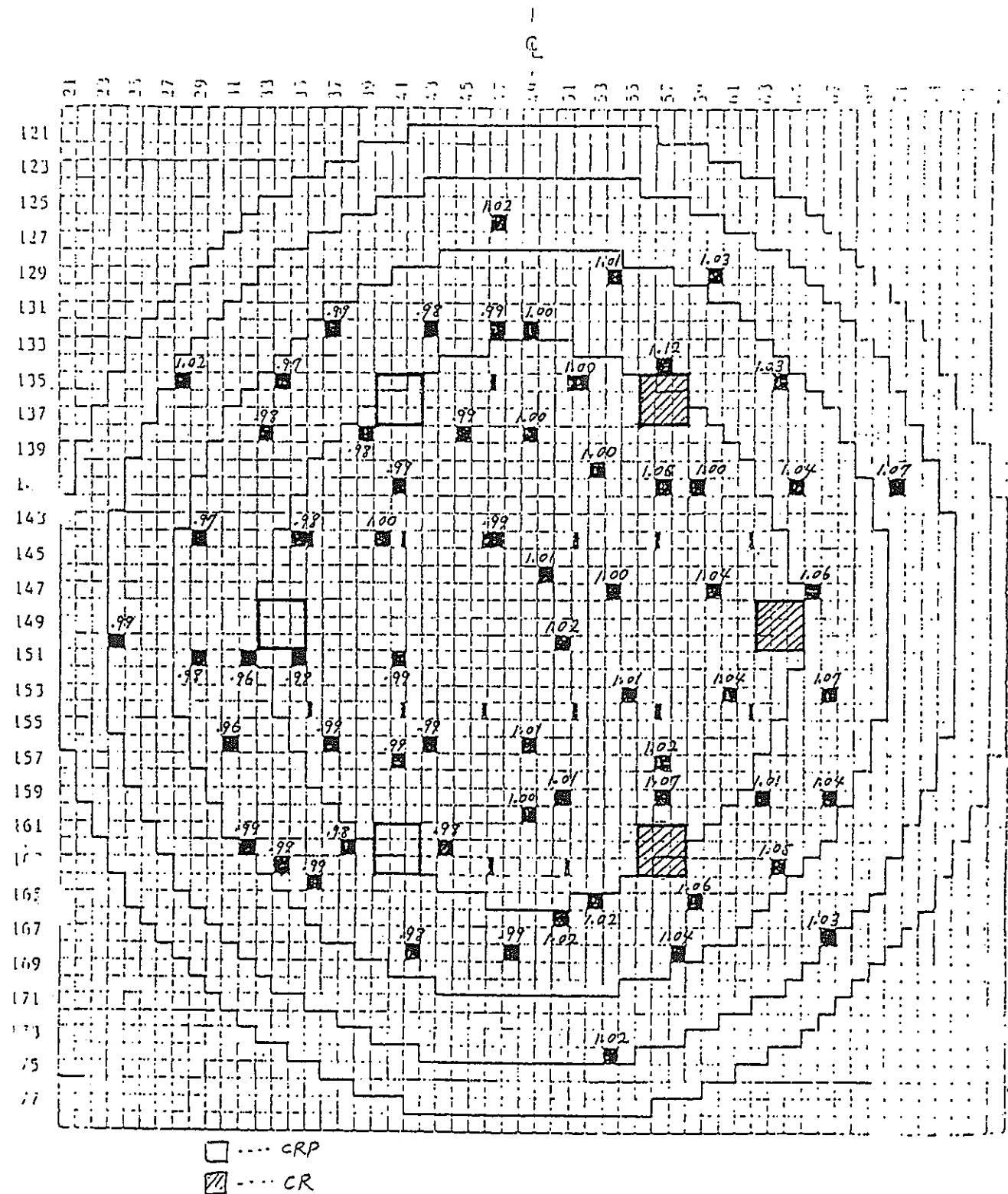


図2-2 ZPPR-9の検出効率比のC/E

(3CRP+3CR : 制御棒 3 本と制御棒ポジション 3 本)

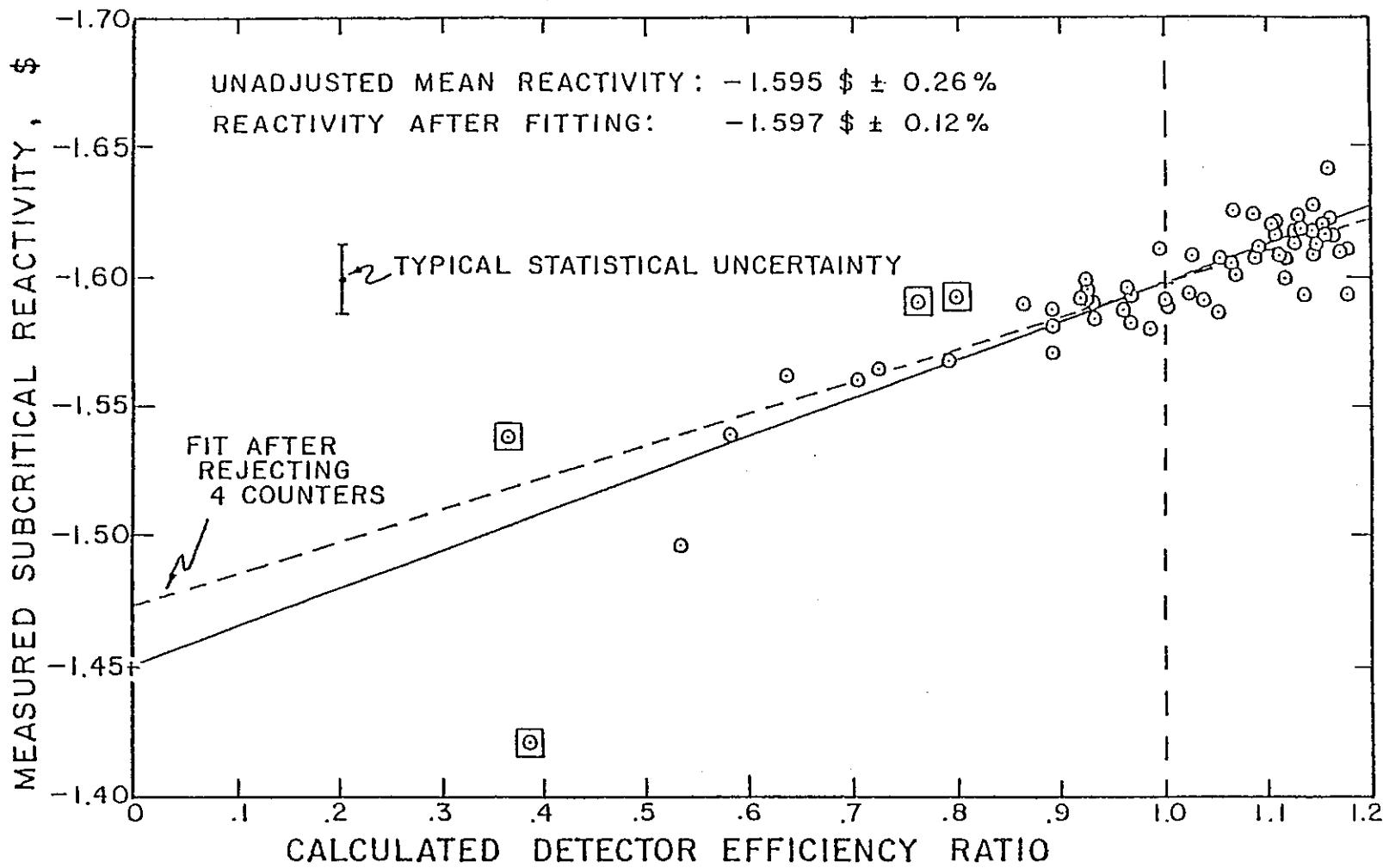


図2-3 検出器効率比と反応度測定値のフィッティング結果

(ZPPR-10Bの外側制御棒リングに制御棒を1本挿入)

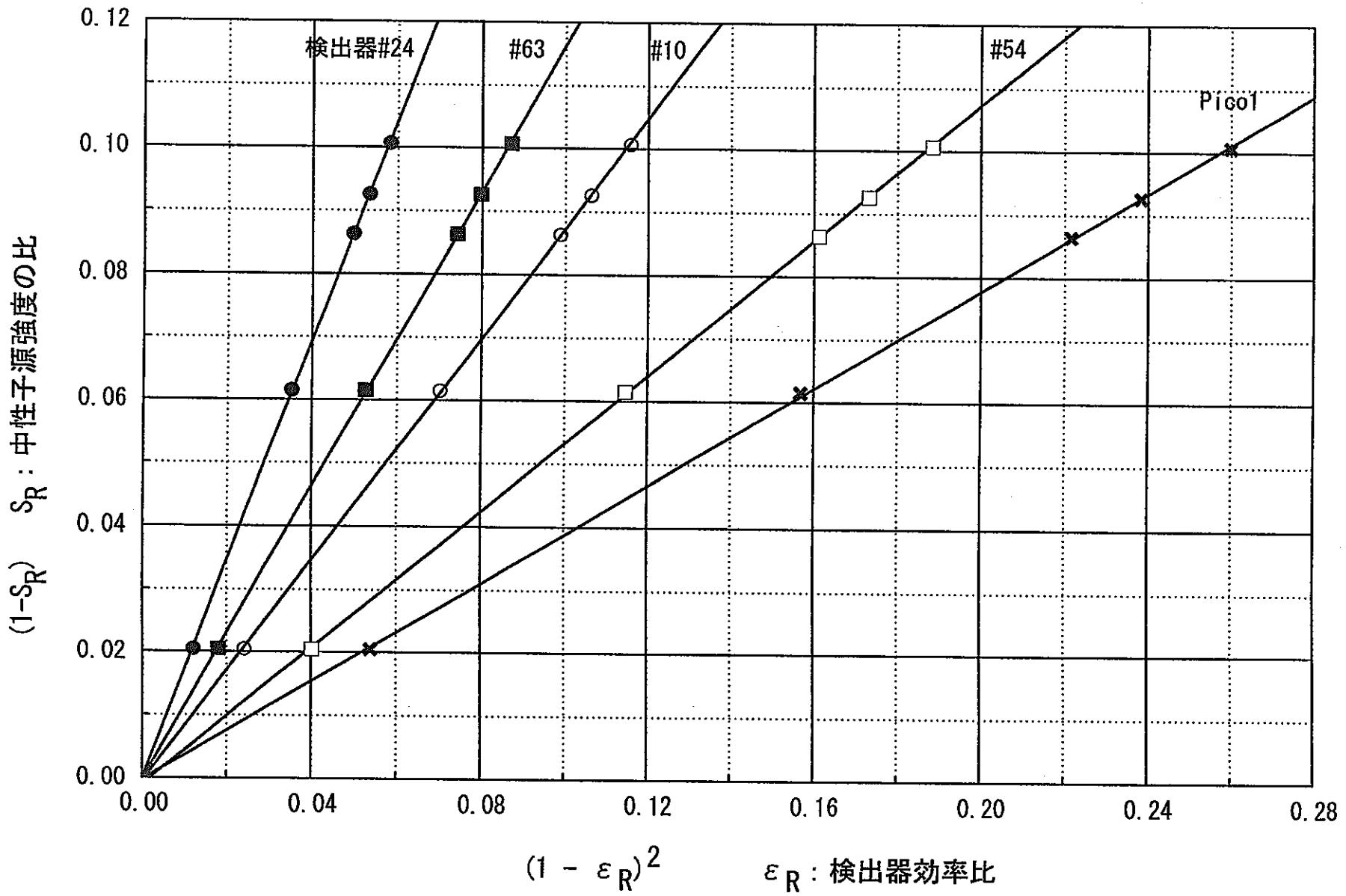
図3-1 ZPPR-13Cの $(1 - S_R)$ 対 $(1 - \varepsilon )^2$ プロット (制御棒#20)

表3-1 ZPPR-13のギャップ、温度、 $^{241}\text{Pu}$ 崩壊の各補正係数と  $\beta_{\text{eff}}$ 

体 系	ギャップ補正 セント/mil	温度補正 セント/°C	$^{241}\text{Pu}$ 崩壊補正 セント/day	$\beta_{\text{eff}}$
ZPPR13A	-1.01±0.10	-0.180±0.02	-0.03175*	0.003312
ZPPR13B/1	-1.10±0.10	-0.170±0.02	"	0.003314
ZPPR13B/3	-1.14±0.10	-0.156±0.02	"	0.003328
ZPPR13B/4	-1.18±0.10	-0.160±0.02	"	0.003343
ZPPR13C	-1.14±0.10	-0.110±0.02	"	0.003315

\*過去の制御棒価値測定、Naボイド測定、移行炉心時の反応度変化に対しては、

$^{241}\text{Pu}$ 補正係数として0.0470セント/dayが使われた。その後の見直しにより、

Naボイドでは1%程度の影響するが、その他の実験では無視できることが分かっている。

例えば、基準体系と測定体系に20日の時間間隔があるとすると $^{241}\text{Pu}$ 崩壊補正の差は、

$$(-0.047 + 0.03175)*20 = -0.305 \text{セント}$$

となり、~1.00ドル以上の制御棒価値に対しては無視できる。また、炉心移行時の反応度測定でも、各ステップ間の時間間隔が短いことと反応度変化が大きいため無視できる。

表3-2 ZPPR-13シリーズの基準未臨界反応度

測定日	実験体系	MSM法の結果 と1σ誤差(セント)	基準体系への 補正值*(セント)	反応度(セント)		MSM Rod Drop	備考
				補正済MSM値	Rod Drop値		
1982.9.17 10/1	ZPPR-13A MSM法基準体系	-9.63 ± 0.08	0.00		-9.634		
		-9.57 ± 0.08	-0.06	-9.63	-9.625	1.001	drawer push 前 同上
		-2.15 ± 0.02	-7.11	-9.26	-9.272	0.999	drawer push 後 同上
		-2.88 ± 0.02	-5.29	-8.17	-8.161	1.001	
1983.2.15 2/21 3/8 3/17	ZPPR-13B/1 MSM法基準体系	-8.45 ± 0.06	-0.38	-8.83	-8.826	1.000	
		-8.28 ± 0.06	0.00		-8.276		
		-7.99 ± 0.06	0.53	-7.46	-7.456	1.001	
		-8.06 ± 0.06	0.26	-7.80	-7.775	1.003	
1983.5.11 5/19 5/25	ZPPR-13B/3 MSM法基準体系	-5.83 ± 0.04	-0.41				
		-3.78 ± 0.03	0.00		-3.783		special blkt 装荷前
		-3.75 ± 0.03	-1.61	-5.36	-5.403	0.992	
1983.6.3 6/8 6/27 6/30 7/12	ZPPR-13B/4 MSM法基準体系	-7.55 ± 0.05	0.55	-7.00	-6.997	1.000	
		-7.58 ± 0.05	0.00		-7.584		
		-7.99 ± 0.05	-1.88	-9.87	-9.872	1.000	
		-7.95 ± 0.05	-1.81	-9.76	-9.743	1.002	
		-7.94 ± 0.05	-0.85	-8.79	-8.791	1.000	
1983.10/11 11/1 11/14 12/8	ZPPR-13C MSM法基準体系	-13.08 ± 0.09	2.56	-10.52	-10.453	1.006	
		-13.14 ± 0.09	0.00		-13.142		
		-12.81 ± 0.09	1.40	-11.41	-11.369	1.004	
		-12.43 ± 0.09	1.05	-11.38	-11.354	1.002	
							平均1.0008±0.0032

\*基準体系に対するギャップ、温度、<sup>241</sup>Pu崩壊の補正の合計

表3-3 ZPPR-13Cの検出器効率比と中性子源強度比

## (1)CR#20

$B_4C$ のマクロ 断面積 <sup>1*</sup> の倍数	$S_R$	検出効率の比 $\varepsilon_R$				
		検出器#10	検出器#24	検出器#54	検出器#63	Pico.1 <sup>2*</sup>
0.1×normal	0.97954	1.1558	1.1099	0.79961	1.1345	0.76757
0.4	0.93848	1.2651	1.1879	0.66139	1.2296	0.60387
0.8	0.91364	1.3145	1.2230	0.59851	1.2725	0.52926
1.0	0.90741	1.3260	1.2313	0.58386	1.2825	0.51180
2.0	0.89934	1.3403	1.2415	0.56597	1.2950	0.49004

1\* 正確には制御棒ドロワーの均質化マクロ断面積

2\* ZPPRの運転用核計装#1

- 42 -

## (2)12CR(FR1の制御棒6体とFR2の奇数番号の制御棒6体)

$B_4C$ のマクロ 断面積 <sup>1*</sup> の倍数	$S_R$	検出効率の比 $\varepsilon_R$				
		検出器#14	検出器#29	検出器#42	検出器#47	Pico.1 or 2
0.1×normal	0.94930	1.0959	1.1229	0.86862	1.1152	1.1372
0.4	0.91084	1.1584	1.2215	0.71898	1.1984	1.2485
0.6	0.89371	1.1791	1.2554	0.67073	1.2266	1.2868
0.8	0.88151	1.1925	1.2775	0.64033	1.2448	1.3118
1.0	0.87304	1.2012	1.2920	0.62099	1.2566	1.3282
2.0	0.86009	1.2131	1.3110	0.59797	1.2708	1.3492

表3-4 ZPPR-13B/4のN a ポイド測定(中性子源強度比の補正効果ケースB)

- 43 -

ポイドStep No.	未補正 $S_R^{1*}$	1次式LSFIT <sup>2*</sup> $y = Ax+B$		$\varepsilon_R$	反応度 <sup>3*</sup> (セント)	ND <sup>4*</sup>	補正済 $S_R$	補正済反応度 (セント)	補正済ステップ 反応度(セント)
		A	B						
基準未臨界体系	1.0228	-0.3668	-0.2869	1.000	-65.37	54	1.0044	-64.19	
Zone-1	1.0223	-0.3451	-0.2661	1.000	-61.12	53	1.0042	-60.04	4.15
Zone-2	1.0213	-0.3202	-0.2291	1.000	-54.93	54	1.0037	-53.98	
Zone-2 repeat	1.0213	-0.3149	-0.2336	1.000	-54.85	54	1.0039	-53.92	6.09
Zone-3	1.0202	-0.2923	-0.2008	1.000	-49.31	58	1.0033	-48.49	5.46
Zone-4	1.0156	-0.2260	-0.1330	1.000	-35.90	58	1.0021	-35.42	13.07
Zone-5	1.0093	-0.1656	-0.09782	1.000	-26.34	61	1.0013	-26.13	9.29
Zone-6	1.0073	-0.1351	-0.07098	1.000	-20.61	63	1.0009	-20.48	5.65
Zone-7	1.0061	-0.1177	-0.05983	1.000	-17.75	61	1.0007	-17.65	2.83
Zone-8	reference			1.000	(-12.228)			-12.228	5.422
re-flood	1.0228	-0.3825	-0.2867	1.000	-66.92	50	1.0042	-65.70	-1.51

<sup>1\*</sup> 28群、2次元XY拡散計算、基準バックリングを使用(ポイド領域のDB<sup>2</sup>は未調整)<sup>2\*</sup> McCrunchコードによる最小二乗法の結果<sup>3\*</sup> 絶対未臨界反応度<sup>4\*</sup> 最小二乗法で使われた検出器の数( $\chi^2$ 検定をパスした検出器の数)

表3-5 ZPPR-13B/4のN a ポイド実験(中性子源強度比の補正効果ケースC)

ポイドStep No.	未補正S <sub>R</sub> <sup>1*</sup>	1次式LSFIT <sup>2*</sup> y= Ax+B		ε <sub>R</sub>	反応度 <sup>3*</sup> (セント)	ND <sup>4*</sup>	補正済 S <sub>R</sub>	補正済反応度 (セント)	補正済ステップ 反応度(セント)
		A	B						
基準未臨界体系	1.0050	-0.05579	-0.5848	1.000	-64.06	64	1.0042	-64.01	
Zone-1	1.0048	-0.06696	-0.5322	1.000	-59.92	64	1.0038	-59.86	4.15
Zone-2	1.0046	-0.06443	-0.4743	1.000	-53.87	64	1.0036	-53.82	
Zone-2 repeat	1.0046	-0.05076	-0.4870	1.000	-53.78	64	1.0038	-53.74	6.09
Zone-3	1.0044	-0.05639	-0.4285	1.000	-48.49	64	1.0034	-48.44	5.34
Zone-4	1.0032	-0.06454	-0.2897	1.000	-35.42	64	1.0021	-35.38	13.06
Zone-5	1.0022	-0.04690	-0.2145	1.000	-26.14	63	1.0012	-26.11	9.27
Zone-6	1.0017	-0.05433	-0.1506	1.000	-20.49	64	1.0009	-20.47	5.64
Zone-7	1.0015	-0.06021	-0.1164	1.000	-17.66	64	1.0007	-17.65	2.82
Zone-8	reference			1.000	(-12.228)			-12.228	5.42
re-flood	1.0050	-0.04574	-0.6097	1.000	-65.54	54	1.0043	-65.49	-1.48

<sup>1\*</sup> 28群、2次元XY拡散計算、基準バックリングを使用(ポイド領域のDB<sup>2</sup>を1.090に調整)<sup>2\*</sup> McCrunchコードによる最小二乗法の結果<sup>3\*</sup> 絶対未臨界反応度<sup>4\*</sup> 最小二乗法で使われた検出器の数(χ<sup>2</sup>検定をパスした検出器の数)

表3-6 ZPPR-13B/4の板状制御棒価値の測定(中性子源強度比の補正なし)

制御棒パターン	未補正S <sub>R</sub> <sup>1*</sup>	1次式LSFIT <sup>2*</sup> y = Ax+B		ε <sub>R</sub>	ND <sup>4*</sup>	補正済 S <sub>R</sub>	補正済制御棒 価値(ドル)	補正率% (補正/未補正-1.0)
		A	B					
CR#03	0.9907	0.1336	-1.221	1.000	63	0.9883	1.009	-0.3
CR#06	0.9907	0.1493	-1.253	1.000	63	0.9880	1.025	-0.3
6FR1	0.9893	0.8918	-7.524	1.000	60	0.9862	6.535	-0.3
6FR1+6IB2	0.9872	1.428	-16.070	1.000	50	0.9846	14.524	-0.3
6FR1+6 behinds IB2	0.9977	1.811	-17.880	1.000	57	0.9972	15.981	-0.1
6FR1+6FR3	0.9855	1.605	-15.170	1.000	56	0.9819	13.441	-0.4
6FR1+5IB2	0.9711	1.024	-14.030	1.000	49	0.9664	12.864	-0.5
6FR1+CR#15	0.9828	0.7379	-8.171	1.000	47	0.9671	7.316	-0.6
5FR1	0.9877	0.6123	-6.238	1.000	58	0.9849	5.534	-0.3
CR#10	0.9819	0.04512	-1.246	1.000	62	0.9805	1.123	-0.2
6FR2	0.9996	0.6960	-8.628	1.000	58	0.9995	7.855	-0.01
5FR2	0.9712	0.2590	-6.472	1.000	51	0.9687	6.121	-0.3
CR#18	0.9829	0.1018	-1.130	1.000	62	0.9793	0.949	-0.4
CR#15	0.9829	0.0912	-1.105	1.000	61	0.9797	0.935	-0.3
6IB2	1.0082	0.1448	-10.160	1.000	57	1.0112	8.666	0.3
6IB2+6 behinds IB2	1.0005	2.2020	-19.430	1.000	52	1.0006	17.155	0.01
6IB2+6FR2	0.9956	1.4710	-17.500	1.000	51	0.9948	15.942	-0.1
5IB2	0.9841	0.4710	-7.301	1.000	58	0.9818	6.738	-0.2
CR#25	0.9742	-0.0365	-0.929	1.000	58	0.9761	0.892	0.2
CR#22	0.9742	-0.0344	-0.935	1.000	62	0.9760	0.895	0.2
5 behind IB2	0.9426	0.0310	-5.523	1.000	50	0.9419	5.412	-0.1
6 behind IB2	0.9862	0.8390	-8.411	1.000	60	0.9830	7.472	-0.3
CR#30	0.9852	0.0160	-0.739	1.000	63	0.9845	0.647	-0.05
CR#27	0.9852	0.0272	-0.738	1.000	64	0.9840	0.635	-0.1
CR#26	0.9834	-0.0274	-0.695	1.000	61	0.9846	0.648	0.1
CR#28	0.9834	-0.0060	-0.723	1.000	64	0.9837	0.653	0.05
6FR3	0.9748	0.3561	-5.599	1.000	59	0.9713	5.148	-0.4
6FR3	0.9684	0.1273	-4.256	1.000	55	0.9664	4.045	-0.2

表3-7 ZPPR-13B/4の板状・ピン制御棒価値(中性子源強度比の補正あり)

制御棒パターン	未補正 $S_R^{1*}$	1次式LSFIT <sup>2*</sup> $y = Ax + B$		$\varepsilon_R$	ND <sup>4*</sup>	補正済 $S_R$	補正済制御棒 価値(ドル)	補正率% (補正/未補正-1.0)
		A	B					
CR#15				1.000				
100%B <sub>4</sub> C板	0.9829	0.0977	-1.134	1.000	62	0.9795	0.932	-0.7
20%B <sub>4</sub> C板・50%N a	0.9899	0.1065	-0.955	1.000	63	0.9872	0.748	-0.4
64ピン天然B <sub>4</sub> C	0.9920	0.0532	-0.792	1.000	62	0.9908	0.640	-0.1
64ピン濃縮B <sub>4</sub> C	0.9778	0.0460	-1.166	1.000	64	0.9759	1.020	-0.2
32ピン濃縮B <sub>4</sub> C	0.9855	-0.0554	-0.079	1.000	63	0.9873	0.752	0.1
CR#03				1.000				
100%B <sub>4</sub> C板	0.9907	0.1148	-1.223	1.000	64	0.9887	1.009	-0.2
20%B <sub>4</sub> C板・50%N a	0.9987	0.1181	-1.014	1.000	62	0.9983	0.798	0.01
32ピン濃縮B <sub>4</sub> C	0.9968	-0.0510	-0.846	1.000	64	0.9972	0.800	0.00
CR#10				1.000				
100%B <sub>4</sub> C板	0.9819	0.5720	-1.276	1.000	63	0.9802	1.120	-0.2
20%B <sub>4</sub> C板・50%N a	0.9903	0.0730	-1.069	1.000	63	0.9888	0.897	0.2
32ピン濃縮B <sub>4</sub> C	0.9846	-0.1054	-0.890	1.000	64	0.9877	0.901	0.4
CR#27				1.000				
100%B <sub>4</sub> C板	0.9852	0.0257	-0.755	1.000	64	0.9841	0.631	-0.2
20%B <sub>4</sub> C板・50%N a	0.9896	0.0403	-0.642	1.000	64	0.9882	0.504	-0.1
32ピン濃縮B <sub>4</sub> C	0.9856	-0.0862	-0.526	1.000	64	0.9894	0.517	0.4
CR#16				1.000				
100%B <sub>4</sub> C板	0.9769	0.0483	-1.201	1.000	64	0.9749	1.053	-0.2
20%B <sub>4</sub> C板・50%N a	0.9867	0.0563	-0.990	1.000	63	0.9850	0.835	-0.3
32ピン濃縮B <sub>4</sub> C	0.9802	-0.1148	-0.818	1.000	64	0.9848	0.840	0.5
2X3 CR#15E				1.000				
CRP	1.0119	-0.0377	-0.283	1.001	64	1.0093	0.222	-0.4
100%B <sub>4</sub> C板	0.9723	0.0868	-1.384	1.000	61	0.9685	1.194	-0.4
16ピン+SS	0.9742	-0.0496	-1.100	1.001	63	0.9764	1.055	0.3
56ピン+SS+燃料ピン	0.9816	0.1056	-1.210	1.000	63	0.9779	1.003	-0.4

表3-8 ZPPR-13Cのシングル制御棒価値(中性子源強度比の補正なし)

制御棒番号	$\chi^2$ 検定によるrejectなし			$\chi^2$ 検定によるrejectあり				最小二乗フィティング						$\chi^2$	SR
	制御棒価値(ドル)	$\sigma_1(\%)$	$\chi^2$	制御棒価値(ドル)	$\sigma_1(\%)$	$\chi^2$	ND	制御棒価値(ドル)	$\sigma_1(\%)$	$\sigma_2(\%)$	$\sigma_t(\%)$	ND	$\chi^2$		
CR#6	0.803	0.08	2.0	0.803	0.08	2.0	64	0.804	0.06	0.26	0.79	57	1.1	0.977	
CR#7	0.955	0.16	4.2	0.953	0.06	1.0	62	0.953	0.05	0.21	0.88	62	0.9	0.957	
CR#8	1.123	0.15	6.9	1.124	0.14	4.4	54	1.126	0.07	0.15	1.23	48	0.9	0.911	
CR#9	0.817	0.14	5.9	0.818	0.10	3.1	58	0.818	0.07	0.14	0.87	44	1.2	0.957	
CR#10	0.621	0.14	5.6	0.620	0.09	2.6	62	0.620	0.05	0.28	0.79	63	1.1	0.979	
CR#11	0.819	0.10	3.4	0.819	0.10	3.0	62	0.818	0.06	0.15	0.87	51	1.1	0.957	
CR#12	1.125	0.14	6.0	1.125	0.13	4.1	54	1.126	0.08	0.16	1.23	52	1.3	0.911	
CR#13	1.112	0.19	9.0	1.111	0.15	4.7	49	1.110	0.07	0.18	1.31	61	1.2	0.903	
CR#14	1.127	0.15	5.9	1.128	0.14	4.7	59	1.126	0.07	0.14	1.23	56	1.1	0.911	
CR#15	0.824	0.09	3.1	0.824	0.09	2.4	61	0.823	0.06	0.16	0.87	51	1.2	0.957	
CR#16	0.628	0.09	2.6	0.627	0.07	1.8	61	0.627	0.04	0.28	0.79	64	0.9	0.979	
CR#17	0.823	0.09	2.6	0.824	0.08	2.3	63	0.823	0.06	0.18	0.87	48	1.1	0.957	
CR#18	1.125	0.12	4.5	1.125	0.12	3.3	59	1.124	0.07	0.13	1.23	60	1.3	0.911	
CR#19	1.105	0.17	8.7	1.106	0.15	4.3	48	1.101	0.07	0.12	1.30	56	1.1	0.903	
CR#20	0.953	0.28	27.1	0.952	0.27	3.7	18	0.951	0.07	0.11	1.27	60	1.3	0.907	
CR#21	0.920	0.27	23.8	0.919	0.25	5.0	22	0.917	0.07	0.24	1.24	47	1.1	0.914	
CR#22	0.323	0.04	1.1	0.323	0.04	1.1	64	0.323	0.04	0.52	0.91	64	1.1	0.981	
CR#23	0.323	0.05	1.3	0.323	0.05	1.3	64	0.323	0.04	0.26	0.79	64	1.1	0.981	
CR#24	0.919	0.26	21.5	0.922	0.22	5.0	24	0.917	0.07	0.12	1.22	50	1.1	0.914	
CR#25	0.949	0.30	28.4	0.954	0.23	5.0	22	0.947	0.07	0.10	1.27	60	1.3	0.907	
CR#26	0.955	0.28	24.8	0.958	0.24	4.7	22	0.953	0.07	0.21	1.28	55	1.2	0.907	
CR#27	0.926	0.26	21.6	0.925	0.22	5.1	25	0.923	0.07	0.14	1.22	50	1.1	0.914	
CR#28	0.328	0.08	2.1	0.328	0.04	1.1	63	0.328	0.04	0.20	0.78	63	1.0	0.981	
CR#29	0.327	0.05	1.2	0.327	0.05	1.2	64	0.327	0.04	0.25	0.79	64	1.0	0.981	
CR#30	0.934	0.23	17.8	0.936	0.20	4.8	28	0.934	0.07	0.16	1.22	51	1.2	0.914	
CR#31	0.960	0.27	23.6	0.961	0.25	4.6	21	0.959	0.07	0.13	1.27	58	1.2	0.907	

MSM法の基準体系の反応度  $\rho = -13.14 \pm 0.09$ セント

表3-9 ZPPR-13Cのシングル制御棒価値(中性子源強度比の補正あり)

制御棒番号	補正前の 中性子源強度比	1次式LSFIT $y = Ax + B$		$\epsilon_R$	検出効率比 ND	補正後の 中性子源強度比	補正後の制御棒 価値(ドル)	補正率% (補正/未補正-1.0)
		A	B					
CR#6	0.9773	0.02137	-0.9565	1.001	57	0.9763	0.803	-0.1
CR#7	0.9573	-0.00939	-1.0750	1.001	62	0.9580	0.954	0.1
CR#8	0.9106	-0.03497	-1.2220	1.001	48	0.9155	1.133	0.6
CR#9	0.9574	-0.02025	-0.9291	1.001	44	0.9592	0.820	0.2
CR#10	0.9793	0.04703	-0.7986	1.001	63	0.9766	0.618	-0.3
CR#11	0.9574	-0.01918	-0.9299	1.001	51	0.9591	0.819	0.1
CR#12	0.9106	-0.03617	-1.2220	1.001	52	0.9157	1.133	0.6
CR#13	0.9026	-0.05273	-1.1890	1.001	61	0.9107	1.121	1.0
CR#14	0.9106	-0.04737	-1.2100	1.001	56	0.9172	1.135	0.8
CR#15	0.9574	-0.02878	-0.9254	1.001	51	0.9599	0.825	0.3
CR#16	0.9793	0.04159	-0.8002	1.001	64	0.9769	0.625	-0.3
CR#17	0.9574	-0.09383	-0.9453	1.001	48	0.9647	0.831	0.9
CR#18	0.9106	-0.03853	-1.2170	1.001	60	0.9160	1.131	0.7
CR#19	0.9026	-0.06779	-1.1640	1.001	56	0.9130	1.115	1.3
CR#20	0.9074	-0.09252	-0.9900	1.001	60	0.9225	0.969	1.9
CR#21	0.9136	-0.08483	-0.9637	1.001	47	0.9270	0.933	1.7
CR#22	0.9811	0.00343	-0.4575	1.001	64	0.9808	0.323	-0.2
CR#23	0.9811	0.00952	-0.4639	1.001	64	0.9803	0.323	-0.2
CR#24	0.9136	-0.08298	-0.9654	1.001	50	0.9267	0.932	1.7
CR#25	0.9074	-0.09413	-0.9844	1.001	60	0.9229	0.966	2.0
CR#26	0.9074	-0.08298	-1.0010	1.001	53	0.9210	0.969	1.7
CR#27	0.9136	-0.08476	-0.9698	1.001	50	0.9269	0.939	1.7
CR#28	0.9811	-0.00820	-0.4674	1.001	63	0.9818	0.328	0.0
CR#29	0.9811	-0.00907	-0.4678	1.001	64	0.9818	0.328	0.2
CR#30	0.9136	-0.06217	-1.0050	1.001	51	0.9233	0.947	1.4
CR#31	0.9074	-0.08283	-1.0080	1.001	54	0.9209	0.976	1.7

## (付 錄)

表Cに、ZPPR-13Cにおけるグループ制御棒価値の測定結果（中性子源強度の比の補正はしていない）を示した。

このうち3.3.4節で検討した制御棒12本（第1燃料リングに6本、第2燃料リングに6本（奇数番のもの））について、 $C_S$ 、 $C_\varepsilon$ を考慮した時としない時の補正済 $S_R$ 、制御棒価値を検討してみる。

このケースに対しては、McCrunchコードにより次の結果が得られている。

最小二乗フィティングの結果

未補正 $S_R$	傾き	y切片	反応度(ドル)	ND	基準体系に対する相対制御棒価値(ドル)
0.87304	+0.6661	-13.42	12.743	50	12.612

別の計算でFER (for Efficiency Ratioの略で、 $\rho_2 = A + B \varepsilon$  で  $\rho_2$  を求める時に  $\varepsilon$  に代入すべき値) は、1.0114であった。

3-⑦式で補正済 $S_{RC}$ およびそれより補正済制御棒価値 $W(\$)$ を求める。

$$S_{RC} = 0.8594$$

$$W(\$) = 12.415$$

また、図Dから $C_\varepsilon = 1.064$ 、 $C_S = 0.9616$ を読みとり、3-⑩式で同じように $S_{RC}$ および $W(\$)$ を求める。

$$S_{RC} = 0.8635$$

$$W(\$) = 12.474$$

であり、これらを比較すると3-⑦式では-1.6%、3-⑩式では-1.1%補正される。これより分かるように補正の割合に-0.5%と無視できない差が生じる。

表C ZPPR-13Cのバンク制御棒価値(中性子源強度比の補正なし)

制御棒パターン	$\chi^2$ 検定によるrejectなし			$\chi^2$ 検定によるrejectあり				最小二乗フィティング						SR
	制御棒価値(ドル)	$\sigma_1(\%)$	$\chi^2$	制御棒価値(ドル)	$\sigma_1(\%)$	$\chi^2$	ND	制御棒価値(ドル)	$\sigma_1(\%)$	$\sigma_2(\%)$	$\sigma_t(\%)$	ND	$\chi^2$	
20,30	1.363	0.41	61.7	1.364	0.27	2.9	11	1.359	0.07	0.08	2.33	56	1.2	0.798
21,27	2.733	0.11	1.7	2.735	0.09	1.1	63	2.732	0.08	0.10	0.85	63	0.9	0.954
21,27,30	3.858	0.21	6.2	3.862	0.18	4.0	56	3.844	0.11	0.11	1.69	54	1.3	0.852
21,24,27,30	7.552	0.15	1.9	7.552	0.15	1.9	64	7.514	0.12	0.12	0.72	59	1.1	0.999
20,24-27,30,31	13.394	0.17	2.6	13.391	0.15	2.1	62	13.324	0.13	0.13	0.79	56	1.2	0.965
21-30	10.727	0.19	4.9	10.731	0.15	3.3	60	10.638	0.10	0.10	1.94	36	0.9	0.821
20-30	13.948	0.17	3.9	13.949	0.16	3.1	61	13.849	0.11	0.11	1.38	44	1.2	0.882
20-31	16.712	0.19	4.2	16.696	0.15	2.7	60	16.701	0.12	0.12	1.13	43	1.0	0.913
6FR3(even)	8.757	0.14	3.3	8.747	0.10	1.9	61	8.723	0.08	0.08	0.74	54	1.1	0.978
6FR3(odd)	8.734	0.12	2.8	8.726	0.11	2.2	62	8.702	0.09	0.09	0.74	55	1.3	0.978
6FR1+6FR3(odd)	16.528	0.25	7.5	16.501	0.16	3.0	53	16.430	0.12	0.12	0.91	50	1.3	0.944
6FR2(odd)+6FR3(odd)	20.046	0.21	4.8	19.995	0.14	2.1	58	19.994	0.12	0.12	0.82	49	1.2	0.959
6FR2(odd)+5FR3(odd)	13.779	0.20	5.1	13.766	0.16	3.0	60	13.688	0.11	0.11	2.12	45	1.2	0.802
5FR3(odd)	4.925	0.18	8.0	4.934	0.15	3.8	49	4.901	0.08	0.08	1.77	49	1.1	0.842
6FR1	4.694	0.24	12.6	4.669	0.10	2.6	46	4.680	0.06	0.07	0.98	61	1.2	0.934
6FR1+19	5.471	0.26	12.9	5.465	0.14	3.2	44	5.461	0.10	0.11	1.74	34	1.3	0.845
6FR1+6FR2(odd)	12.663	0.28	10.2	12.616	0.18	3.3	50	12.612	0.09	0.09	1.46	51	1.1	0.873
6FR1+5FR2(odd)	8.633	0.30	12.9	8.601	0.17	3.3	44	8.597	0.11	0.12	2.68	32	1.1	0.745
5FR2(odd)	5.213	0.19	4.7	5.202	0.11	1.8	60	5.197	0.09	0.10	2.01	58	1.3	0.817
6FR2(odd)	8.958	0.19	3.7	8.941	0.09	1.1	61	8.943	0.08	0.08	0.83	61	0.9	0.957
13,19	3.668	0.15	2.3	3.663	0.11	1.3	62	3.668	0.10	0.12	0.73	63	1.2	1.017
10,16	1.326	0.14	3.2	1.325	0.09	1.6	63	1.324	0.06	0.18	0.85	63	0.8	0.960
6FR2(even)	9.363	0.15	4.4	9.348	0.11	2.6	62	9.361	0.07	0.07	0.81	54	1.0	0.961
6FR1+6FR2(even)	12.078	0.31	11.3	12.023	0.17	2.7	44	12.040	0.09	0.10	1.41	51	1.2	0.879
12FR2	16.688	0.25	7.0	16.662	0.17	3.0	55	16.597	0.11	0.11	1.28	46	1.1	0.894
22,23,28,29	1.183	0.12	2.5	1.182	0.05	1.0	62	1.181	0.04	0.22	1.03	62	0.7	0.935
20,25,26,31	6.967	0.12	2.2	6.963	0.11	1.9	62	6.945	0.09	0.10	0.72	59	1.2	1.013

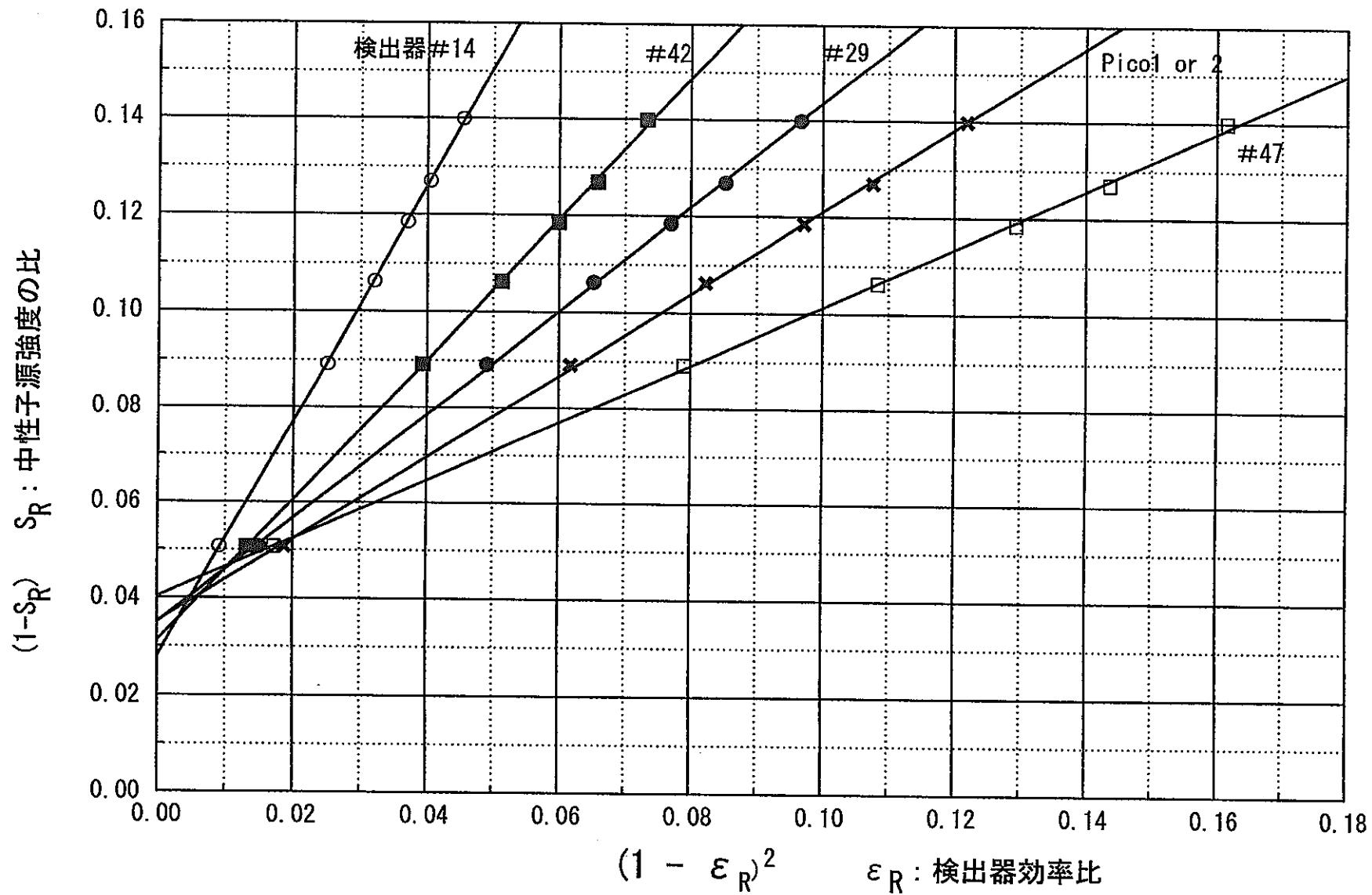


図 D ZPPR-13Cの $(1 - S_R)$ 対 $(1 - \varepsilon )^2$ プロット  
(燃料領域1の制御棒6本と燃料領域2の制御棒6本)