

JAERI-M

6067

高速炉体系における大きな負の
反応度の測定 (II)

中性子源増倍法

1975年3月

向山 武彦・中野 正文・溝尾 宣辰・趙 満*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

高速炉体系における大きな負の反応度の測定(Ⅱ)
中性子源増倍法

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

向山武彦・中野正文・溝尾宣辰

趙 満*

(1975年2月13日受理)

深い未臨界状態にある体系の反応度を可能な限り正確に求める事を目的に一連の実験を行った。反応度測定法として5つの方法を採用したが、本稿はそのうち中性子源増倍法による測定について述べる。

B₄C 量の変化, その挿入位置の変化により-2ドルから-7ドルの間に7つの未臨界状態をつくり, 体系内外の11系統の測定系の観測値の傾向を調べた。体系内の検出器による観測値のバラツキは大きい, 遠くでの観測値は一定の値に収束する事が判明した。

検出器の位置を考慮した検出効率を導入してB₄Cの投入による中性子束の歪の効果を補正すると体系内での観測値は互によく一致するようになり, 反応度の定義と厳密に一致する実験値を十分な精度で求める事が出来た。この実験値と遠方の検出器による観測値と計算値は3%以内で一致した。

* 韓国原研

Reactivity Measurement in a Far-Subcritical Fast System (II)

Neutron Source Multiplication method

Takehiko MUKAIYAMA, Masafumi NAKANO,

Nobutatsu MIZOO and Mann CHO*

Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

(Received February 13, 1975)

Experiments have been made to obtain the reliable values of reactivity of far subcritical fast systems. Five methods were employed for subcriticality measurement. This report presents the procedure and the results of Neutron Source Multiplication method.

Seven subcritical systems of -2% to -7% were constructed in the FCA VI-2 B2 assembly using three kinds of 90% and 80% enriched B_4C pin clusters. With 11 detectors placed in and around the assembly, the reactivity of the systems was measured. The discrepancy is large for the values obtained with the detectors in the assembly, however, the detectors far from the assembly give a position-independent result.

The effect of local perturbation in the flux distribution (rod-shadowing effects) is taken into account by introducing the position-dependent detection efficiency for the detectors in the assembly (MSM method). The values of the detectors in the assembly come to agree very well with each other after the MSM correction, so the experimental values are obtained with good accuracy, which is consistent rigorously with the reactivity defined.

These experimental values, the measured values of detectors far from the assembly and the calculated values agree within 3%.

* Korea Atomic Energy Research Institute

目 次

1. 序 論	1
2. 中性子源増倍法による測定	2
2.1 実験の概要	2
2.1.1 較正定数Aの測定	3
2.1.2 反応度の測定	4
2.2 測定結果	4
3. 修正中性子源増倍法による解析	12
3.1 修正中性子源増倍法	12
3.2 補正係数の計算	13
3.3 実験結果	16
4. 討 論	18
謝 辞	19
参考文献	19
付録「SMR法」	21

1. 序 論

深い未臨界状態にある体系の反応度を可能な限り正確に求める事を目的に一連の実験を行った。大きな負の反応度の測定にはいくつかの方法があるが、本実験においては種々の測定法を相互比較し、それぞれの傾向を適確に把握し、この比較を通してより正確な値に達する事を目標としている。今回の実験においては、臨界つり合い法(CBT法)、中性子源増倍法(SM法)、パルス中性子源法(PNS法)、中性子源引抜き法(SJ法)、Rod drop法(RD法)により、いろいろな未臨界状態の反応度を測定した。本稿はそのうちSM法による測定について報告する。実験全般については文献(1)に述べ、他の測定法による測定についてはそれぞれ別稿において報告する。

SM法は原子炉の歴史と同時に存在した方法であり²⁾、臨界近接の際のモニターとして用いられてきた。Davey⁽³⁾らのように信頼性の範囲は $-2\% \Delta k/k$ 程度迄という意見もあれば、Ackermann⁽⁴⁾のように、LMFBRにおいて、炉停止を越える更に深い未臨界状態までの全領域にわたる唯一の採用可能な未臨界度測定法であるという意見もある。

SM法においては、未臨界状態で測定された検出器の定常的な計数率CRは体系の反応度 ρ と

$$CR = \frac{A}{-\rho} \quad (1)$$

の関係にあり、Aは一度較正されると体系の状態が変化しても不変の較正定数であると仮定する。しかしこの仮定はごく限られた条件のもとでしか成立せず、SM法の適用範囲を狭いものにしてしまう。実験者達はこの仮定を出来るだけそねないようするため、中性子源の状態や、中性子源と検出器の配置に特別の注意を払う。しかし実際には動力炉などではこういう条件は守りにくい。そこでAckermann⁽⁴⁾はこの条件を緩和する方法として(1)式の代りに

$$CR = \frac{W \cdot S}{\nu(-\rho)} \quad (2)$$

を提案している。ここでWは検出器の位置を考慮した検出効率として定義されている量であり(詳しくは第3章参照)、制御棒などの投入による中性子束の歪の効果をWの変化としてとり入れてSM法によって得られた値を計算によって補正しようというものである。このWを使って求めた反応度と、実効増倍係数 k_{eff} により $\rho = \frac{k_{eff}-1}{k_{eff}}$ と定義した反応度が一致するかは明確でない。そこで我々はこのように定義した反応度に厳密に一致するように検出効率と実効中性子源強度を定義し、この変化量によりSM法の値を修正し、SM法の適用範囲を広げる努力をした。これを修正中性子源増倍法(MSM法)と呼ぶ。本報告においては、(1)式のAが定数であるように配慮して行ったSM法による測定と、MSM法による修正について報告する。

2. 中性子源増倍法による測定

2.1 実験の概要

体系の実効増倍係数が k_{eff} である時その体系の反応度を $\rho = \frac{k_{eff}-1}{k_{eff}}$ と定義する。SM法の基本式は

$$-\rho = \frac{A}{CR} \quad (3)$$

と与えられる。CRは未臨界体系における中性子検出器の定常的な計数率であり、その状態での体系の反応度は ρ である。Aは中性子源強度、中性子の生成寿命(Λ ; generation time)と検出器の検出効率を含む。臨界に近い状態でAを較正し、以後Aを定数と考えて計数率の変化が体系の反応度の変化に対応すると考えるのがSM法である。反応度変化が体系内の燃料物質の増減による場合には中性子生成寿命 Λ よりは即発中性子寿命 ℓ_p の方が体系の変化に対しても保存しやすいので、⁽⁵⁾この場合には(3)式の代わりに基本式は

$$1 - k_{eff} = \frac{A'}{CR}$$

とした方が適切である。この A' は(3)式のAの Λ の代わりに ℓ_p を含むことになる。これらを「A定数法」とすれば、その他に、未知未臨界状態に既知反応度 $\Delta\rho$ を加えた時の計数率の変化からその体系の k_{eff} を知る「 $\Delta\rho$ 法」があり、この方法ではAを求める必要はないが、実験誤差が大きく入ってくるので本実験では採用しなかった。詳しくは文献(6)を参照されたい。

(3)式は中性子束が基本モードで分布しているという仮定のもとに得られる関係式である。この仮定は体系が臨界に近ければ正しいが、深い未臨界状態になると中性子束の高調波の存在により有効でなくなってくる。しかし中性子源の挿入位置、検出器の位置、 B_4C など吸収材の投入位置などにより高調波の影響の程度は異なってくる。

我々の実験においては体系内に一様に分布しているPu燃料の自発核分裂中性子を中性子源としているので、中性子源による高調波の励起は少ないものと思われる。測定系は11系統設けたが、前回の実験⁽⁶⁾の経験から、検出器を体系内外の適当と思われる場所に配置した。反応度変化を与えるものとして3種類の B_4C ピン・クラスターを用い、炉心中心に挿入した時と周辺部に挿入した時にそれぞれ挿入 B_4C 量を変えて、各測定系による観測置がどのような傾向を示すかを調べた。

実験はFCA IV-2B2集合体において行った。体系の断面図をFig.1に示す。測定系は体系内のブランケット領域に4系統(A, B, C, D); 体系外に3系統(E, F, G)設け、核計装としてFCA格子管集合体の四隅に設けられている起動系(CH.1とCH.2)と線形出力系(CH.5とCH.6)も用いた。体系内の検出器A, B, CとCH.1, CH.2, CH.5, CH.6の位置をFig.1に、体系内検出器Dと体系外検出器E, G, Fの位置をFig.2に示す。検出器の種類と炉心中心からの距離をTable 1に示す。3種類の B_4C ピン・クラスターはそれぞれ B_4C ピンが、7本、16本、32本で構成されている(Fig.3, 4 and 5)。これらをB-7, B-16, B-32と書くことにする。B-7とB-16の B_4C

は90%濃縮 B_4C であり、B-32では手持ち B_4C ペレットの制限から16ピンは90%濃縮 B_4C 、残りの16ピンは80%濃縮 B_4C であり、それぞれの濃縮度の B_4C ピン16本ずつで1組のクラスターを作り、隣接する格子管に挿入する。ピン1本当りの B_4C 量は平均100gである。これらの B_4C ピン・クラスターを試験領域の中心に入れた場合をC系、周辺に入れた時をP系と称す。(但しB-16については実験時間の制約からC系のみで実験を行った。)B-32のC系(BC-32と記す)では炉心の軸方向の中性子束分布を歪ませる目的で、集合体の固定側のみにB-32を挿入した体系と移動側のみに挿入した体系を作った。それぞれBC-32(F)、BC-32(M)と記す。このように未臨界体系はBC-7、BP-7、BC-16、BC-32、BP-32、BC-32(F)とBC-32(M)と7体系あることになる。基本体系は B_4C ピン・クラスターの挿入さるべき位置にナトリウムを挿入したものである。32ピンの場合、隣接する2本の格子にピン・クラスターを挿入することになるので、ナトリウム・チャンネルも2本設け、この状態を全ての体系の基準とした。BC系の基準体系は格子番号17-18と18-18にナトリウム・チャンネルが設けられた体系でNC系と呼ぶ。BP系の基準体系は14-18、15-18の格子にナトリウム・チャンネルが設けられていてNP系と呼ぶ。BC-7とBC-16では18-18、BP-7では14-18のナトリウム・チャンネルが B_4C ピン・クラスターと置換され、BCおよびBP-32では2本のナトリウム・チャンネルが置換される事になる。BC-32(F)とBC-32(M)ではそれぞれ固定側、移動側のみの2本のナトリウム・チャンネルが置換されることになる。炉の構成、形状は基準体系のそれらを完全に保持しておき、NC系とBC系、NP系とBP系とでは該当するナトリウム・チャンネルが B_4C ピン・クラスターと置換された効果のみが測定されるようになっている。

2.1.1 較正定数Aの測定

(3)式の定数AはNCおよびNP体系において浅い未臨界状態(ρ_1)における計数率 CR_1 からそれぞれ

$$A = -\rho_1 \cdot CR_1$$

として求めた。基準となる反応度 ρ_1 はその状態を作り出したFCAの制御棒の位置から求められる。FCAの制御棒はベリオド法により較正されている。ベリオドからドル単位の反応度への変換はTomlinsonのデータ⁽¹⁾によった。

NC系とNP系とでAに差があるのは主に実効的な中性子源強度の違いによるものであるが、今回の実験ではその差は小さい。距離的にナトリウム・チャンネルの移動の影響が最も大きい検出器Aでその差は2%、CH.1およびCH.2で1%、その他の検出器では0.5%程度であった。これは試験領域のまわりをそれよりreactiveなドライバー領域がかこんでいる事が差を小さくする方向に働いたと考えられる。較正定数Aを求める際の浅い未臨界状態(ρ_1)として3つの状態(~ -0.8 , ~ -0.4 , $\sim -0.2\% \Delta k/k$)でAを求めた。それぞれの状態でのAの違いは1%程度であり、従ってAの値には1%程度の不確かさがある。Aは $-0.2\% \Delta k/k$ における値を採用した。これは反応度測定の際のFCAの制御棒の挿入位置との関係で決められた。なお、定数Aの測定には、臨界体系に外部中性子源を投入した時の体系の中性子束レベルの直線的増加の勾配から求める方法もある(SMR法)。詳細は付録に述べる。

2.1.2 反応度の測定

未臨界体系の反応度は計数率CRを測定して、2.1.1で述べた較正定数Aを用いて(3)式から

求められる。測定に際して FCA の制御棒を BC 系では NC 系の臨界時における位置に、BP 系では NP 系の臨界時における位置においた。計数率の測定は 3 ~ 7 回行いその平均値を用い、その誤差としては分散と統計誤差の大きい方を採用した。検出器の不感時間に対する補正は小さかった。バック・グラウンドは体系の中性子束レベルに比例しないカウントであるが、これには測定系の電氣的ノイズや Fission chamber では α 粒子によるカウントがあり、これらを除くようにディスクリ・レベルを設定した。

2.2 測定結果

2.1 で述べた方法により測定した結果を BC-7, BP-7 および BC-16 体系については Table 2 に示し、BC-32, BP-32, BC-32(F) および BC-32(M) 体系については、Table 3 に示した。これらの Table には各体系における 11 測定系統の観測値の平均値を NC 系のドル単位で示し、各測定系の観測値は平均値との比 ($\rho/\bar{\rho}$) で示した。11 系統の平均値を求める際に、測定精度 (σ^{-2}) と各検出器の炉心中心からの距離 R の 2 乗 (R^2) との積 $\sigma^{-2} \cdot R^2$ を重みとした。 R^2 も重みとしたのは前回の実験⁽⁶⁾において反応度の観測値が炉心から離れるに従って検出器の位置によらない一定の値に近づく傾向を確認したからである。平均値の誤差は各観測値の平均値のまわりの分散から求めた。BC-7, BP-7 体系について各測定系の観測値の平均との比を検出器の炉心中心からの距離との関係で Fig. 6 に示した。

C 体系から P 体系にする事により B_4C ピン・クラスターに近づく検出器 A, CH.1 および CH.2 では反応度を大きく * 観測し、反対に遠ざかる検出器 B, C, D, CH.5, CH.6 では反応度を小さく観測する傾向があり、又 B_4C ピン・クラスターの位置の変化の影響は炉心から検出器が遠ざかるにつれて小さくなること、Fig. 6, Table 2 および Table 3 からわかる。検出器 D については B-7 系では誤差も考慮すると上記の傾向があるといえる。BC-32(F) と BC-32(M) の軸方向での B_4C ピン・クラスターの移動に対しても同様の傾向が現われている。

体系から遠くにある検出器 E, F および G においては B_4C 量の変化や B_4C ピン・クラスターの位置の変化によらず $\rho/\bar{\rho}$ の値が常に 0.99 ± 0.01 となっている。但し G では BC-32(F) と BC-32(M) の場合に B_4C ピン・クラスターの位置の移動の影響が大きいので事情は異なる。即ち体系から遠くにある検出器はその位置によらず体系の反応度と 1 対 1 に対応する値を与える事が確認された。ここで $\sigma^{-2} \cdot R^2$ を重みとして得た平均値について考えてみる。遠い位置の検出器 E, F および G による観測値の収束値 (検出器の位置によらない値) と常に 1% 以内で一致する平均値を与えるような検出器の配置、および平均操作は妥当であったと言えよう。平均値が収束値より 1% 小さいのは、次の理由によるものと考えられる。 B_4C ピン・クラスターに対して対向する位置関係にある CH.1, CH.2 と CH.5, CH.6 においてどんな場合にも大きめの観測値を与える CH.1 と CH.2 の誤差が小さめの値を与える CH.5 と CH.6 の誤差の $\frac{1}{2}$ 程度であるためほぼ同じ距離にある両グループでは σ^{-2} の重みがきいて平均値を大きめの値にしていると考えられる。

* 以下、体系の反応度をすべて絶対値で議論する。したがって「反応度が大きい」とは「深い未臨界状態」という意味である。

次に平均操作の影響について考えて見よう。重みとして前述の $\sigma^{-2} \cdot R^2$ と σ^{-2} および単純平均をとった3つの場合をTable 4に示す。ここで R^2 を重みとするのは体系全体を平均的に見ようとするものである。 σ^{-2} を重みとする値は $\sigma^{-2} \cdot R^2$ を重みとする場合に比べてC系で1%~3%, P系で3%~6%大きな値になっている。これは σ^{-2} 重みでは体系内の計数率の大きかった検出器の観測値に大きな重みがかかることになり、平均操作でのバランスがくずれている事を示している。単純平均の値は $\sigma^{-2} \cdot R^2$ 重みの値より0.5~2%大きくなっている。これは炉心近くの検出器が大きめの値を示している事に対応している。以上述べてきたように $\sigma^{-2} \cdot R^2$ を重みとする平均操作は妥当なものであろう。

次に遠い検出器の観測値と11系統の観測値の平均値($\sigma^{-2} \cdot R^2$ 重み)の関係について考えて見る。遠い検出器の観測値としてBC-32(F)とBC-32(M)系では検出器EとFの観測値の単純平均値, その他の体系でE, FとGの観測値の単純平均値をとって比較する。Table 4の第4欄にこれらの値を示した。 $\sigma^{-2} \cdot R^2$ 重みの値と比較してみると1%以下の差で両者は一致している。

衝突確率法により求めた B_4C ピン・クラスター領域の実効断面積を用いた2次元拡散コードCITATION-2⁽⁷⁾による体系の反応度の計算値と観測値の一致は良かった。計算の詳細は文献(1)を参照されたい。

Table 1 Detector type and position used for SM method

Detector	Detector type	Detector position	Distance from core center(cm)
A	F.C.(U-235)	F8-18	55.2
B	BF ₃	F18-28	55.2
C	F.C.(U-235)	F28-18	55.2
D	BF ₃	Axial blanket of F19-18	66.3
E	³ He	Side wall of reactor room	689.5
F	³ He	Floor in reactor room	615.1
G	³ He	Back side of movable half	423.3
CH.1	F.C.(U-235)	Start up ch. on movable half	139.3
CH.2	F.C.(U-235)	Start up ch. on fixed half	139.3
CH.5	Ion chamber	Linear ch. on movable half	150.2
CH.6	Ion chamber	Linear ch. on fixed half	150.2

Table 2 Measured reactivities of BP-7, BC-7 and BC-16 systems

11 channels' average value^(a) and $\rho/\bar{\rho}$ of each channel are shown

System		BP-7	BC-7	BC-16
	$-\bar{\rho}(\%)$	2.209±0.014	2.784±0.009	4.686±0.014
$\rho/\bar{\rho}$	A	1.101±0.004	1.001±0.004	1.007±0.003
	B	0.964±0.006	1.008±0.004	1.002±0.007
	C	0.959±0.004	1.003±0.004	1.011±0.003
	D	1.017±0.016	1.010±0.009	1.081±0.005
	E	0.992±0.005	0.994±0.004	0.998±0.003
	F	0.987±0.004	0.996±0.005	0.992±0.005
	G	1.003±0.003	1.006±0.003	1.003±0.003
	CH.1	1.034±0.003	1.014±0.003	1.016±0.003
	CH.2	1.070±0.002	1.035±0.003	1.042±0.003
	CH.5	0.975±0.015	1.005±0.015	0.992±0.002
CH.6	0.968±0.014	0.985±0.014	1.001±0.002	

(a): Weighting function = $\sigma^{-2} \cdot R^2$

(b): 1\$ = 0.595% $\Delta k/k$ (from Tomlinson's data)

Table 3 Measured reactivities of BC-32, BP-32, BC-32(F) and BC-32(M) systems

11 channels' average value^(a) and ρ/ρ^- of each channel are shown

		BC-32	BP-32	BC-32(F)	BC-32(M)
$-\bar{\rho} (\$)^{(b)}$		7.098±0.035	5.741±0.069	3.620±0.025	3.730±0.026
ρ/ρ^-	A	1.054±0.005	1.304±0.008	1.060±0.003	0.990±0.004
	B	1.036±0.005	0.968±0.009	1.039±0.005	0.989±0.005
	C	0.993±0.005	0.910±0.005	1.029±0.004	0.975±0.004
	D	1.084±0.007	0.954±0.014	1.157±0.008	0.918±0.005
	E	0.994±0.004	0.983±0.006	1.012±0.003	0.984±0.003
	F	0.993±0.004	0.983±0.005	0.989±0.004	1.002±0.005
	G	1.013±0.004	1.001±0.004	0.981±0.003	1.034±0.003
	CH. 1	1.042±0.004	1.088±0.003	1.996±0.003	1.055±0.003
	CH. 2	1.061±0.003	1.123±0.003	1.103±0.003	0.990±0.002
	CH. 5	1.000±0.003	0.924±0.020	0.985±0.016	1.026±0.018
CH. 6	0.959±0.012	0.932±0.019	1.038±0.017	0.946±0.015	

(a), (b): see Table 2

Table 4 Effect of weighting function on average value of measured reactivities and comparison between 11 chs. averaged value and three (or two) far detectors' averaged value

Weighting System	$\sigma^{-2} \cdot R^2$	σ^{-2}	Eqi-weight	Detector E,F,G ^(a) average value
BC-7	2.784±0.009 ^(b)	2.816±0.013	2.795±0.011	2.780±0.011
BC-16	4.586±0.014	4.765±0.030	4.742±0.032	4.674±0.015
BC-32	7.098±0.035	7.297±0.067	7.237±0.075	7.100±0.046
BP-7	2.209±0.014	2.274±0.031	2.235±0.030	2.196±0.010
BP-32	5.741±0.069	6.061±0.155	5.860±0.195	5.678±0.035
BC-32(F)	3.620±0.025	3.725±0.053	3.743±0.056	3.621±0.042
BC-32(M)	3.730±0.026	3.734±0.043	3.695±0.046	3.701±0.034

(a): eqi-weight averaged values; for BC-32(F) and (M) detector E and F's values are averaged, for the other systems, detector E, F and G's values are averaged

(b): in dollar units 1\$=0.5950% $\Delta k/k$

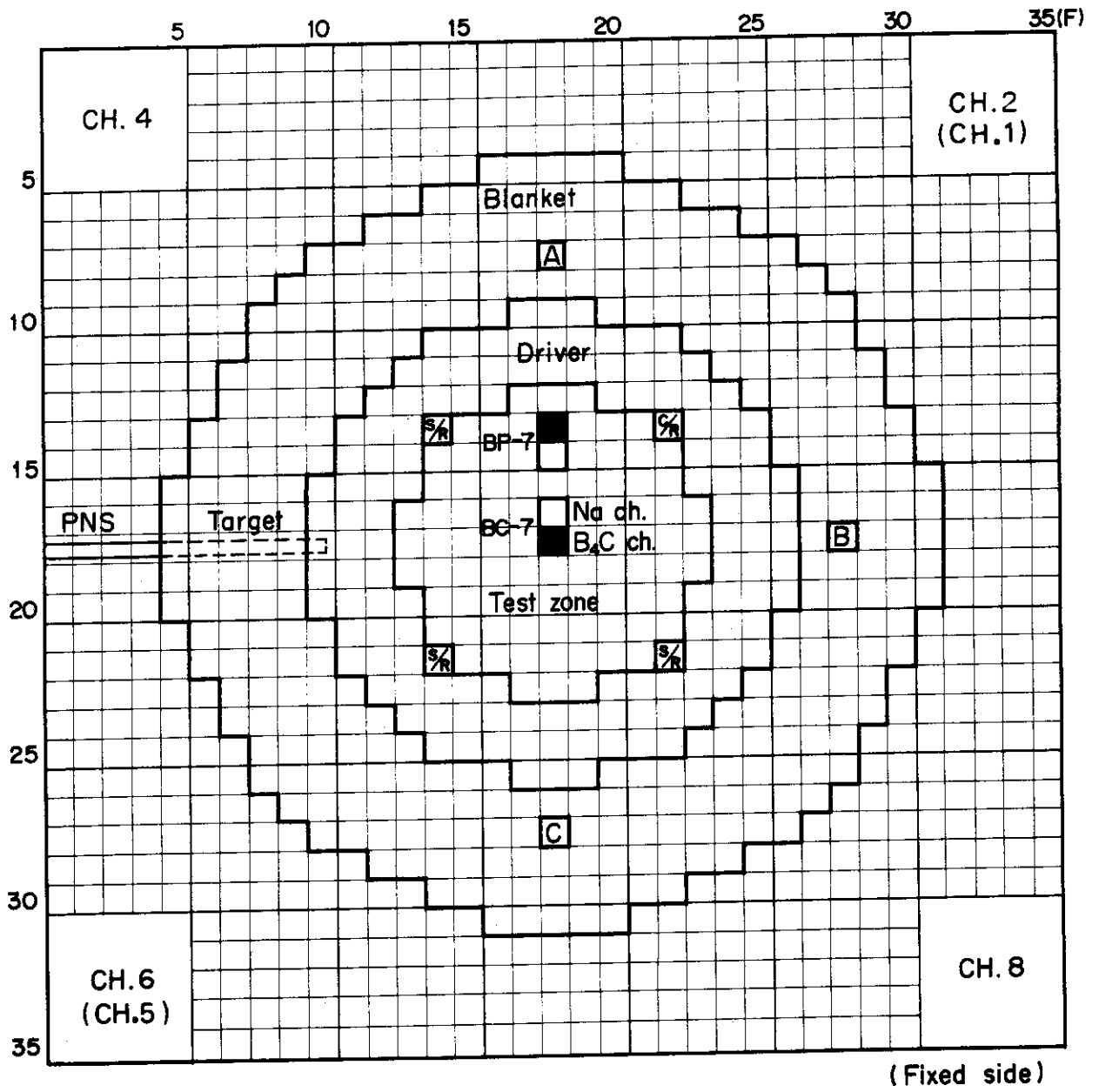


Fig. 1 Detector arrangement in the core (BC-7 or BP-7 system)

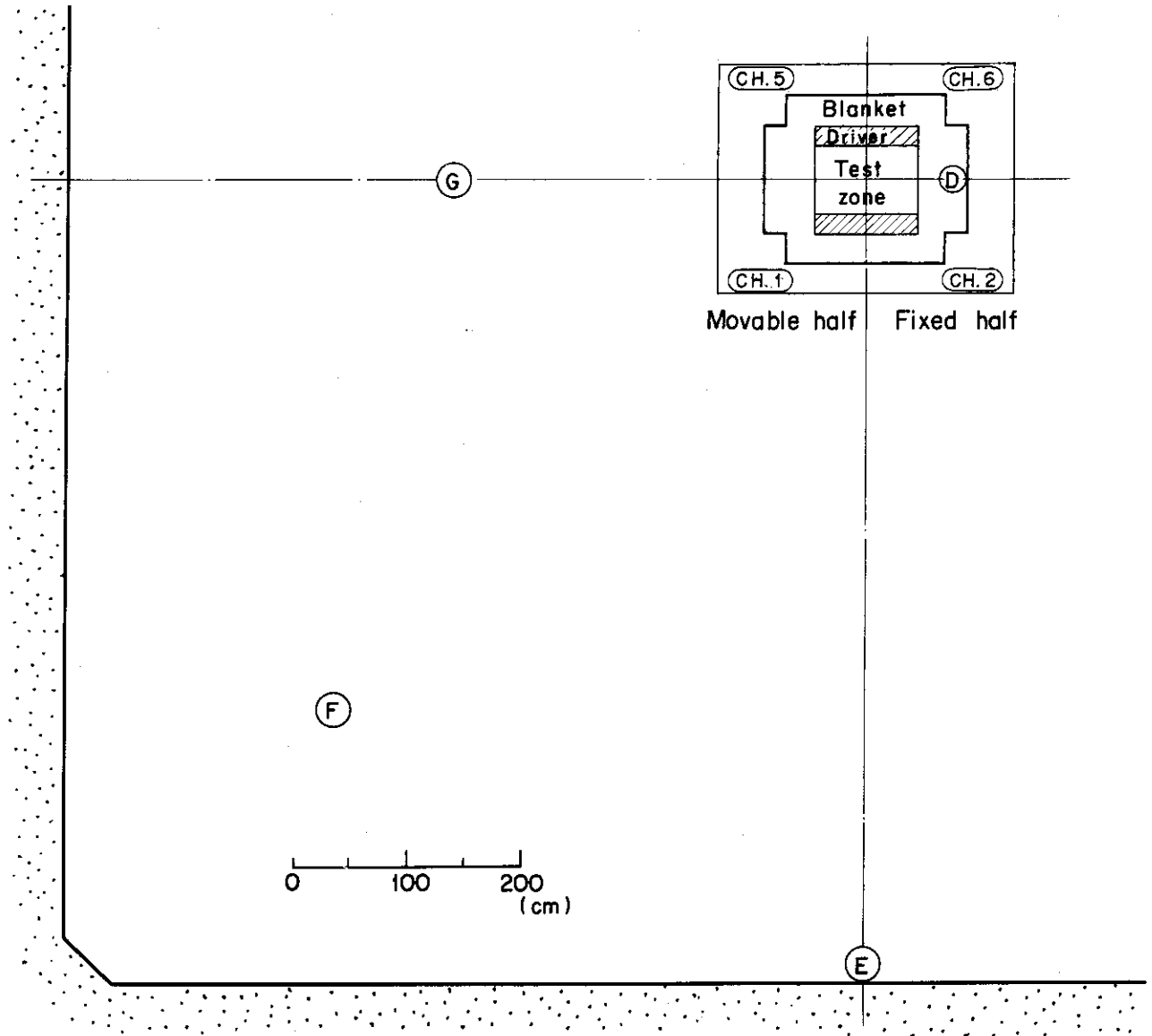


Fig. 2 Detector arrangement in FCA reactor room

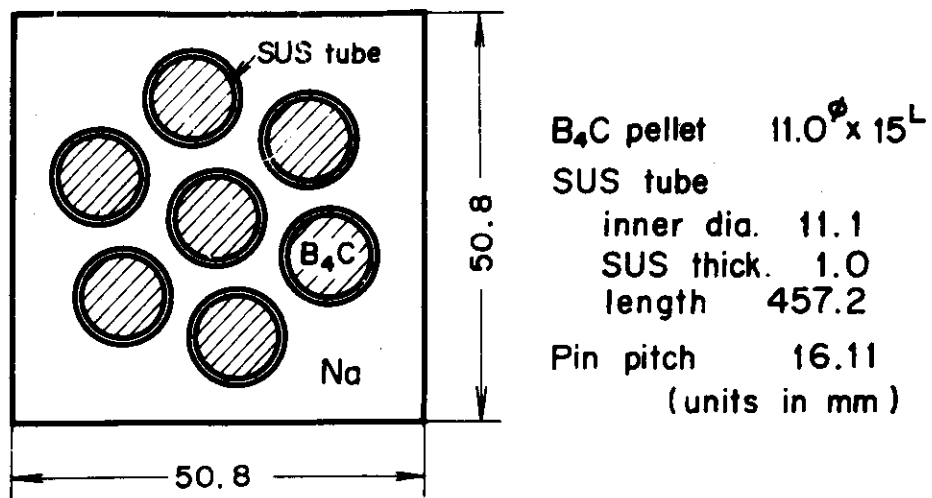


Fig. 3 B₄C 7 pin cluster

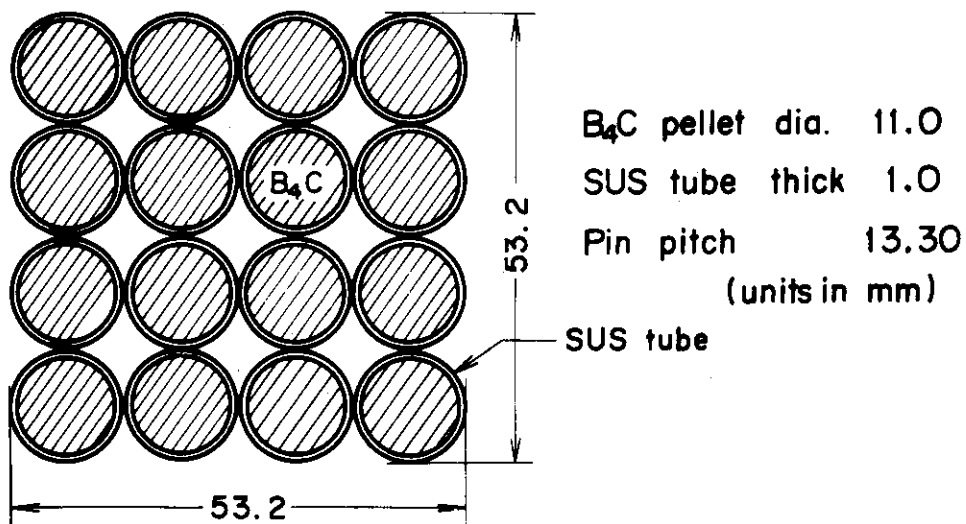


Fig. 4 B₄C 16 pin cluster

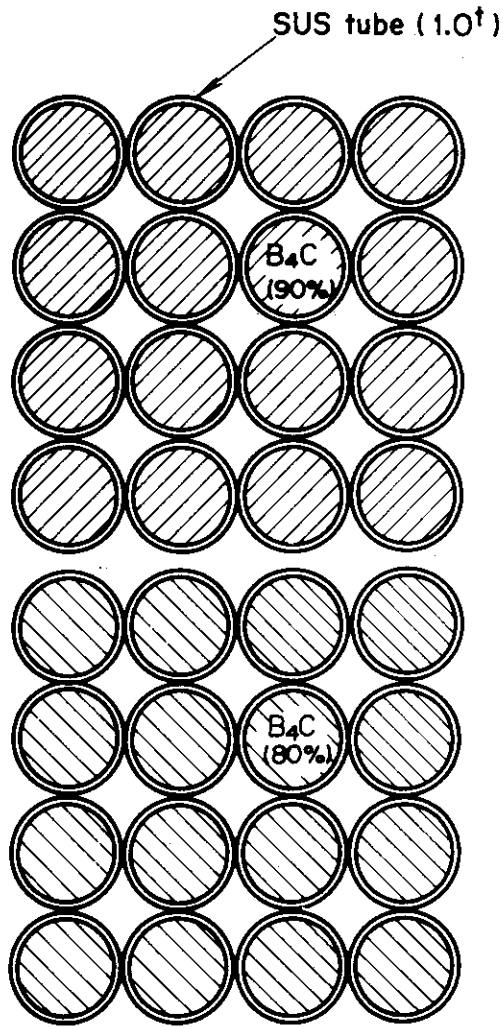


Fig. 5 B₄C 32 pin cluster

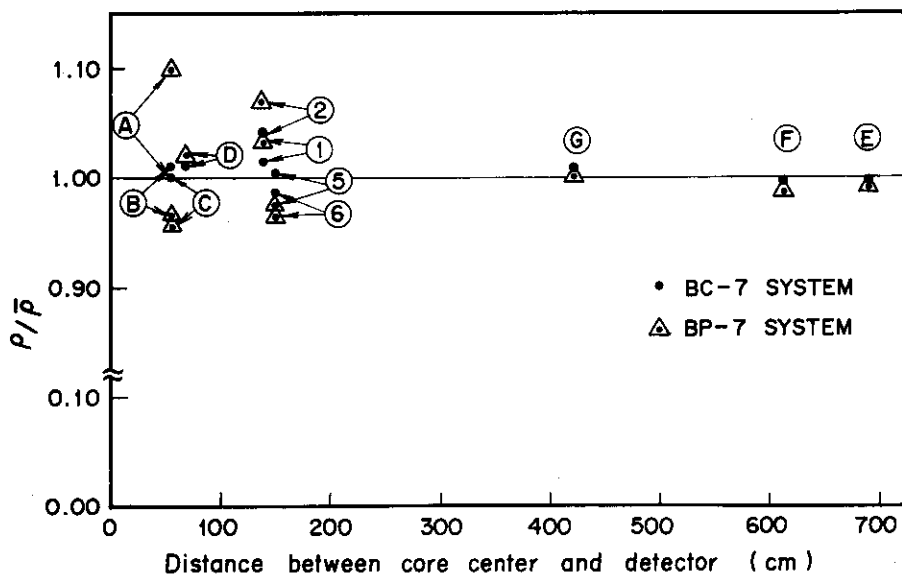


Fig. 6 Dependence of measured reactivity on detector position

3. 修正中性子源増倍法による解析

3.1 修正中性子源増倍法

中性子源増倍法の基本式は

$$-\rho = A / CR \quad (3)$$

である。前章では、中性子源の状態が変わらない限り、反応度の分かった基準の未臨界体系で $A = -\rho_1 \cdot CR_1$ から求めた A の値が反応度測定を行うべき体系でも不変であると仮定して測定データを解析した。しかし、特異点をもつ未臨界体系の反応度を測定する場合、この仮定の成立する範囲は限られており、Table 2 および Table 3 の結果にみられるように、体系内および体系近くでは観測値の位置依存性が著しい。

この問題を解決する一つの方法として Ackermann⁽⁴⁾ は(3)式の代わりに

$$-\rho(\%) = \frac{W \cdot S}{\nu \cdot \beta} \frac{1}{CR} \quad (4)$$

に基づいて測定データを解析することを提案している。彼等の解析では、高速炉系の場合、 B_4C 制御棒が挿入されても核分裂当り発生する平均中性子数 ν および実効的な遅発中性子の割合 β は不変であると仮定し、さらに、外部中性子源として炉心内に分布した Pu 燃料の自発核分裂を利用する場合は中性子源強度の変化も小さいと考えて、中性子束分布の歪みによる検出器の検出効率

$$W = \frac{\int_{V_d} \int_E \Sigma_d \phi dE dv}{\int_{V_c} \int_E \Sigma_f \phi dE dv} \quad (5)$$

の変化のみを考慮することによって反応度を十分な精度で測定出来るとしている。ここに Σ_d および Σ_f は検出器の中性子検出および体系の核分裂の断面積、 V_d および V_c は検出器および炉心の体積である。この場合、反応度は

$$-\rho = R_w \cdot A / CR = R_w \cdot (-\rho_{SM}) \quad (6)$$

から求められる。ここに $A = -\rho_1 \cdot CR_1$ 、 R_w は検出効率の比 W/W_1 である。つまり、この取扱いは、通常の SM 法で最も大きな問題点と考えられる中性子束分布の歪みの効果を検出効率 W の変化として取り入れて、 A の値を不変と仮定して得られた反応度 ρ_{SM} を修正する。しかし、(6)式から得られる反応度が我々の求めようとする反応度、即ち、体系の実効増倍係数 k_{eff} から

$$\rho = (k_{eff} - 1) / k_{eff} \quad (7)$$

によって定義される反応度と一致しているかどうかは必ずしも明確でない。

定常中性子源 S をもつ未臨界体系はボルツマン方程式

$$L\phi = M\phi + S \quad (8)$$

で記述される。L および M はそれぞれ中性子の消滅および生成に関する演算子である。一方、実効増倍係数 k_{eff} は固有値方程式

$$L\phi = \frac{1}{k_{eff}} M\phi \quad (9)$$

の第一固有値で定義される。(9)式の随伴方程式

$$L^+ \varphi^+ = \frac{1}{k_{\text{eff}}} M^+ \varphi^+ \quad (10)$$

を導入すると、(8)式と(10)式とから

$$\left(1 - \frac{1}{k_{\text{eff}}}\right) \langle \varphi^+ M \phi \rangle + \langle \varphi^+ S \rangle = 0 \quad (11)$$

したがって、反応度 ρ は

$$-\rho = \frac{1 - k_{\text{eff}}}{k_{\text{eff}}} = \frac{\langle \varphi^+ S \rangle}{\langle \varphi^+ M \phi \rangle} \quad (12)$$

と書ける。ここに $\langle \rangle$ はエネルギーおよび体系全体の空間積分をあらわす。検出器 d の計数率は $CR = \langle \Sigma_d \phi \rangle$ であるから、反応度と計数率との関係は

$$-\rho = \frac{\varepsilon \cdot \langle \varphi^+ S \rangle}{CR} \quad (13)$$

と書ける。*ここに、 ε は検出器の検出効率とも呼ぶべき量で

$$\varepsilon = \int_{V_r} \int_E \Sigma_d \phi dE dv / N \quad (14)$$

で与えられるが、規格化積分 N は(5)式とは違って

$$N = \langle \varphi^+ M \phi \rangle = \int_{V_r} \left[\int_E \chi \varphi^+ dE \cdot \int_{E'} \nu \Sigma_f \phi dE' \right] dv \quad (15)$$

である。ここに V_r は体系全体の体積である。結局、(7)式で定義される反応度 ρ は、既知の反応度 ρ_1 とそのときの計数率 CR_1 の積 $A = -\rho_1 \cdot CR_1$ を基準に

$$-\rho = f_s \cdot f_\varepsilon \cdot A / CR = f_s \cdot f_\varepsilon \cdot (-\rho_{SM}) \quad (16)$$

から求められる。ここに

$$f_s = \langle \varphi^+ S \rangle / \langle \varphi_1^+ S_1 \rangle \quad (17)$$

$$f_\varepsilon = \varepsilon / \varepsilon_1$$

である。つまり、通常の SM 法で得られる反応度 ρ_{SM} に対して実効的な中性子源強度 $\langle \varphi^+ S \rangle$ および中性子検出効率 ε の体系による違いを補正することにより体系内の任意の位置でその体系の反応度を測定することが出来る。したがって、検出器位置の選択が許されない場合、反応度測定体系の中性子源の状態や検出器位置などが A の値を測定した基準体系と異なる場合などでも、(16)式によって定義に合った体系の反応度を求めることが可能となる。

3.2 補正係数の計算

測定体系の断面を忠実に記述した2次元 $X-Y$ モデルにより検出器 A, B および C に対する補正係数を求めた。外部中性子源 S をもつ体系の中性子束分布 ϕ および、固有値方程式の随伴方程式を満足する φ^+ は拡散コード CITATION-2 により計算した。用いた断面積、軸方向バックリングの値、空間メッシュなどは文献(1)に示す反応度計算に用いたのと同じである。外部中性子源としては Pu 燃料を含む試験領域に核分裂スペクトルをもつ一様な値を与えた。

半径方向ブランケット内に置いた検出器 A, B および C に対する補正係数 f_ε, f_s および A ckermann

* 反応度は $-\rho = \frac{\varepsilon' \cdot \Lambda \cdot \langle \varphi^+ S \rangle}{CR}$ と書くのが一般的である。 Λ は generation time で $\Lambda = \langle \frac{\varphi^+ \phi}{v} \rangle / \langle \varphi^+ M \phi \rangle$ で定義され、この場合中性子検出効率 ε' は $\varepsilon' = \langle \Sigma_d \phi \rangle / \langle \frac{\varphi^+ \phi}{v} \rangle$ で与えられる。これに対して(13)式では ε' と Λ の積を検出効率 ε と定義した。

の提案した R_w 値と f_s との比を Table 5 に示す。定数 A の測定を行った NC および NP 基準体系は B_4C ピン・クラスターを挿入した体系に比べて十分臨界に近かった ($\rho \approx -0.2\% \Delta k/k$) ので Fixed source mode の計算で求めるべき中性子束分布 ϕ は臨界計算の結果で代用した。予想されたように、実効的な中性子源強度 $\langle \phi^+ S \rangle$ の変化はあまり大きくないが、深い未臨界状態になると、この変化も必ずしも無視出来ない (BC-32 体系で約 2% の補正を必要とする)。一例として、NP および BP-32 体系における Y 軸方向 (炉心中心, 検出器 A および C および B_4C ピン・クラスターを通る方向) の検出効率 ϵ および BP-32 体系における補正数 f_s の空間変化を Fig. 7 に示す。

測定体系はいずれも炉心断面の Y 軸に対称であるが、特に炉心中心に対しては Δ 対称な BC-7 および BC-16 体系では検出器 A, B および C とも検出効率 ϵ の変化の様子はほぼ同様で、検出効率の変化に対する補正はあまり大きくない。 B_4C ピン・クラスターの偏心した体系では 3 つの検出器に対する補正量の違いは大きい。対称軸に直角な X 軸上に置いた検出器 B に関しては補正量はいずれの体系に対しても $\pm 1\%$ 以内である。

中性子検出効率の変化に対する補正係数 f_s と R_w との違いは検出効率の定義における規格化積分の違いによるが、ここで取扱った体系では R_w 値の方がつねに f_s 値よりも大きな値を示し、未臨界状態が深くなるとともに、両者の違いが大きくなる。体系内の検出器位置による観測値のばらつきは、補正係数 R_w を用いることによっても無くすことが出来る。しかし、この場合に得られる値は、実効増倍係数から (7) 式で定義される反応度とはならない。実効的な中性子源強度の変化も考慮すると、 R_w 値のみで補正して得られる値は反応度を 1~6% 過大評価することになる。なお、Ackermann の検出効率 W の規格化は (5) 式に従って炉心領域の積分により行なったが積分を体系全体に広げても補正係数 R_w の違いは 0.2% 以下であった。

Table 5 に示した補正係数は 2 次元 X-Y モデルにより計算した値である。この近似の妥当性を調べるために、断面がほぼ Δ 中心対称である BC-7 体系を例にとり、2 次元 R-Z モデルと 1 次元 R モデルにより計算した補正係数 f_s および f_s の値を比較した。計算に用いた断面横、メッシュ等は軸方向バックリングの計算 (文献 1) と同一である。計算の結果、2 次元

Table 5 Correction factors

System	Detector	$f_s = \frac{\langle \phi^+ S \rangle}{\langle \phi_1^+ S_1 \rangle}$	$f_s = \epsilon / \epsilon_1$	$f_s \cdot f_s$	R_w / f_s
BC-7	A	0.999 ₆	0.991	0.991	1.017
	B		0.994	0.993	
	C		0.996	0.995	
BC-16	A	0.993 ₁	0.986	0.979	1.031
	B		0.990	0.983	
	C		0.993	0.987	
BC-32	A	0.980 ₅	0.957	0.939	1.041
	B		0.991	0.972	
	C		1.017	0.997	
BP-7	A	1.001 ₄	0.883	0.884	1.012
	B		1.009	1.011	
	C		1.051	1.052	
BP-32	A	0.991 ₃	0.732	0.726	1.036
	B		1.011	1.003	
	C		1.115	1.105	

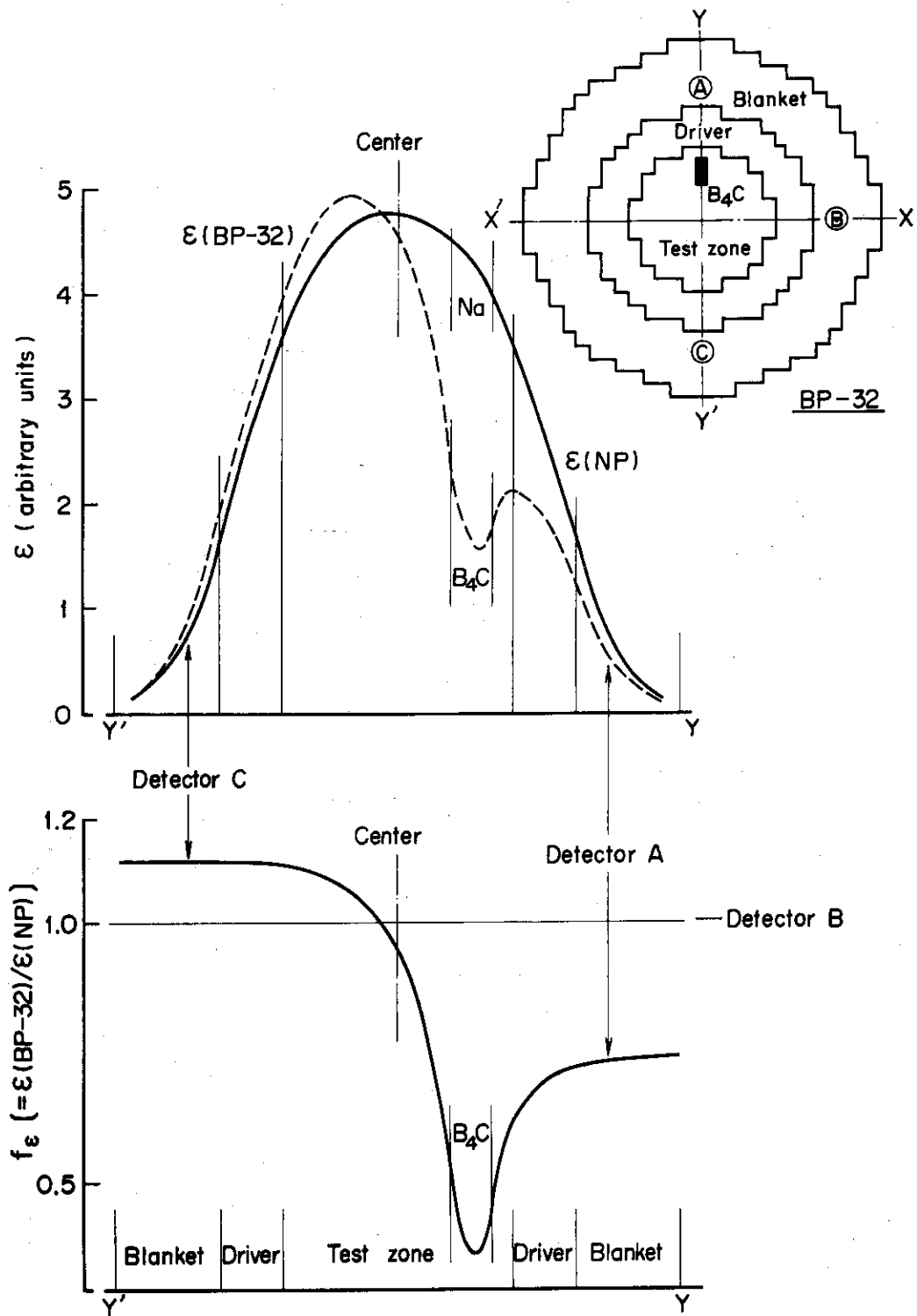


Fig. 7 Spatial distributions of neutron-detection efficiency ϵ and correction factor f_ϵ for BP-32 system

R-Zモデルと1次元Rモデルによる補正係数の違いは小さく、1次元計算は2次元計算に比べて f_s を0.2%過少評価するが、検出効率の変化に対する補正係数 f_e を逆に0.16%過大評価し、その結果正味の補正係数 $f_s \cdot f_e$ の違いは非常に小さいことが分かった。したがって、軸方向に対してバックリングを用いて近似したX-Yモデルは補正係数の計算には十分良い近似であると考えてよい。

3.3 実験結果

検出器A, BおよびCによる反応度の観測値 ρ_{SM} に前節で求めた補正係数(Table 5)を掛けて得られる修正後の反応度およびその平均値をTable 6に示す。誤差には補正係数の不確

Table 6 Corrected reactivities by Modified Source
Multiplication method $-\rho(\%)$

Detector	BC-7	BC-16	BC-32	BP-7	BP-32
A	2.763±0.010	4.621±0.016	7.022±0.036	2.150±0.008	5.435±0.032
B	2.787±0.010	4.615±0.033	7.150±0.032	2.152±0.013	5.576±0.051
C	2.779±0.011	4.676±0.015	7.028±0.034	2.228±0.010	5.775±0.035
Average	2.78±0.01	4.64±0.02	7.07±0.05	2.18±0.03	5.60±0.10

かさの効果は含まれていない。炉心中心部に B_4C ピン・クラスターを挿入したBC体系では、3個の検出器から得られる反応度の違いは測定誤差の範囲を γ 越えているが、そのばらつきは1~2%で小さい。BC体系に比べると、 B_4C ピン・クラスターの偏心したBP体系ではばらつきがやや大きい。補正前の観測値の違いは大巾に改善されている。

BP-32体系では補正前の反応度の観測値が検出器A, B, Cの順に小さくなっていたのに対し補正後の値の大小関係が逆転していること、BP-7体系の値にも同様の傾向がみられることなどを考えると、BP体系に対しては補正係数の計算値になお若干の問題が残っていると考えられる。しかし、BC-32体系では補正前の観測値にBP体系の場合と同様の傾向がみられたにもかかわらず、補正後の結果にはBP体系のような傾向が特にみられず、BC体系に対しては補正計算がほぼ正しく行われていると考えてよい。

上述のように、BP体系の場合3個の検出器による反応度の値の違いがやや大きい。しかし、補正係数 f_e の値は検出器AとCでは1をはさんでいるために、計算値 f_e の不確かさの効果は平均値に対して2次の微量になる。したがって、体系の実効増倍係数から(7)式によって定義される体系固有の反応度の実験値として3個の検出器A, BおよびCから得た補正後の反応度の平均値を採用するのが妥当であると考えられる。

Table 6に示す平均値は検出器A, BおよびCの算術平均値である。観測精度という点では検出器Bの誤差が検出器AおよびCの誤差に比べてやや大きい傾向がみられるが、各検出器から得られた反応度の値のばらつきが誤差の範囲を越えていること、検出器Bは検出効率の変化が小さく、検出器AおよびCに比べて検出効率の変化に対する補正係数の計算精度が良いと予想されることなどを考慮すると、実験値として算術平均値を採用するのが妥当であると考えられる。誤差は分散から求めた。

実験値の誤差を評価する場合、補正係数の不確かさも考慮しなければならない。まず、補正係数 f_c に関しては、補正の方向が異なる検出器 A, C による値を含めた分散から誤差を評価することによって、第 1 近似では、 f_c の不確かさの効果が誤差に取り入れられていると考えられる。一方、中性子源強度の変化に対する補正係数 f_s は各検出器に共通であるため誤差の評価は困難であるが、補正量は最大 2% 程度であり、 f_s 値の不確かさによる誤差は小さいと思われる。

4. 討 論

これまでに得られた結果について簡単にまとめておく。SM法における観測値の検出器位置の依存性がはっきりわかった。検出器の配置に充分注意を払えば、体系内に挿入した検出器の観測値も含めて $\sigma^{-2} \cdot R^2$ の重みでの平均値は妥当と思われる値になった。又体系から遠くにある検出器は体系の反応度の精度の良いモニターとなり得ることがはっきりした。SM法による観測値をMSM法で修正するとバラツキの大きかった体系内検出器の値が良く一致するようになり、MSM法の妥当性が証明され、反応度の定義と厳密に一致した十分な精度の実験値が得られた。

ここで、SM法で位置依存性の小さかった、体系から遠く離れた検出器E、FおよびGによる反応度の観測値と修正中性子源法によって得た実験値との関係をTable 7に示す。まず、

Table 7 Comparison of reactivities between SM and MSM methods(in dollar units)

Method		BC-7	BC-16	BC-32	BP-7	BP-32
MSM		2.78±0.01	4.64±0.02	7.07±0.05	2.18±0.03	5.60±0.10
SM	E	2.77±0.02	4.68±0.02	7.06±0.03	2.19±0.02	5.64±0.04
	F	2.77±0.02	4.65±0.03	7.05±0.03	2.18±0.01	5.64±0.03
	G	2.80±0.01	4.70±0.02	7.19±0.04	2.22±0.01	5.75±0.03
	11 ch's Av.	2.78±0.01	4.69±0.02	7.10±0.04	2.21±0.02	5.74±0.07

B₄C ピン・クラスターの挿入された試験領域をドライバー領域を通して見込む検出器Eによる観測値は、いずれの体系でも、実験値と非常に良い一致を示している。一方、ドライバーのない軸方向の検出器Gによる観測値は、各体系とも一様に、反応度をやや大きく見積る傾向を示しているがその違いは1~2%にすぎない。また両者の中間方向にある検出器Fは検出器Eの観測値に近い値を示した。このように、偏心した特異点をもつ深い未臨界体系に対しても、体系から遠く離れた検出器による計数率の測定から(3)式のAを一定とする簡単な解析によって、体系の反応度を精度良く求めることが出来た。この事実は、LMFBRにおける実用的な反応度測定法を検討する上で、非常に興味深い。

今回の実験で検出器E、FおよびGに対して定数Aの変化が小さかった要因として、(i)単位強度の中性子源を増倍に關与する実効的な中性子源強度に換算する重み関数の空間分布を考えると、反応度測定体系のB₄C ピン・クラスター近傍では、その値が基準体系に比べて小さいが、B₄C ピン・クラスターから離れると逆に大きくなる。したがって、中性子源が試験領域に一様に分布している場合両者の効果が打消し合い、その結果基準体系と測定体系における実効中性子源強度の違いが小さくなったこと、(ii)試験領域の外側に試験領域よりもreactiveなドライバー領域があるために体系から遠く離れた検出器では検出効率の変化もあまり大きくなかったことなどが考えられる。このようにして、今回の測定ではAの変化が大きくなかったこ

とは理解出来る。しかしこの範囲では、前述のように簡単な解析による観測値が厳密な取扱いによって得た実験値と非常に良く一致するという事実を説明するには不十分である。

SM法の基本式をもう一度書くと

$$-p = A/CR, \quad A = \epsilon \cdot \Lambda \cdot S$$

である。定数Aの測定を行った基準体系に対してB₄Cピン・クラスターを挿入した体系では実効的な中性子生成寿命 Λ および実効的な中性子源強度Sの値が小さくなる傾向にある。したがって、この範囲では、Aを不変と仮定して得られる観測値は体系の反応度を過大評価する傾向にある。一方、炉心領域にB₄Cピン・クラスターを挿入することによって体系の中性子束分布は平坦化され、その結果体系の外に置いた検出器の検出効率 ϵ は基準体系に比べて一般に大きくなる傾向にあると考えて良い。本実験では上述のような正負の効果が互に打消し合った結果Aの値がほとんど変化しなかったと考えられる。Aの値が一定となる条件については定量的な評価を加えた詳細な検討が必要であるが、本実験の結果から、一般的なLMFBRでも、Aの値を一定と近似する簡単な解析で体系の反応度を適切な精度で測定することに対する見通しは明るいと考えられる。

今後の課題としては、(1)SM法(MSM法による修正も含んだもの)の適用限界を知るためにより深い未臨界状態での実験が必要であり、(2)MSM法による修正の限界を知るために、中性子源強度や分布状態を変えた実験も必要であり、(3)定数Aの較正体系と反応度測定のための検出器の位置を変えて修正が正しく行なえるかを調べる必要もある。更にLMFBRへの適用という観点からは、(4)MSM法の計算の単純化、(5)体系外の検出器に対するMSM法による修正を可能性にする必要がある。

謝 辞

本実験を遂行するにあたり種々の御協力を頂いた高速炉物理研究室およびFCA管理機関の諸氏に深甚の感謝の意を表します。実験の遂行上、多くの御支援と励ましを戴いた主任研究員弘田実弥氏と、報告をまとめるに当り御支援を戴いた高速炉物理研究室長黒井英雄氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 溝尾宣辰他；“大きな負の反応度の測定(I)”，JAERI-M 6066(1975)。
- (2) Serber, R.; “The Definition of Neutron Multiplication”, LA-335 (1945)。
- (3) Davey, W.G. et al; “Techniques in Fast Reactor Experiments”, Gordon and Breach(1970)。
- (4) Ackermann, Jr., N.J.; “Subcriticality Measurement in an LMFBR”, Nuclear Safety 12(6), 583(1971)。
- (5) Lewins, J.; “The Use of the Generation Time in Reactor Kinetics”, Nucl. Sci. and Eng. 7, 122(1960)。
- (6) Mizoo, N. et al; “Experiment and Analysis of B₄C Simulating

とは理解出来る。しかしこの範囲では、前述のように簡単な解析による観測値が厳密な取扱いによって得た実験値と非常に良く一致するという事実を説明するには不十分である。

SM法の基本式をもう一度書くと

$$-p = A/CR, \quad A = \epsilon \cdot \Lambda \cdot S$$

である。定数Aの測定を行った基準体系に対して B_4C ピン・クラスターを挿入した体系では実効的な中性子生成寿命 Λ および実効的な中性子源強度Sの値が小さくなる傾向にある。したがって、この範囲では、Aを不変と仮定して得られる観測値は体系の反応度を過大評価する傾向にある。一方、炉心領域に B_4C ピン・クラスターを挿入することによって体系の中性子束分布は平坦化され、その結果体系の外に置いた検出器の検出効率 ϵ は基準体系に比べて一般に大きくなる傾向にあると考えて良い。本実験では上述のような正負の効果が互に打消し合った結果Aの値がほとんど変化しなかったと考えられる。Aの値が一定となる条件については定量的な評価を加えた詳細な検討が必要であるが、本実験の結果から、一般的なLMFBRでも、Aの値を一定と近似する簡単な解析で体系の反応度を適切な精度で測定することに対する見通しは明るいと考えられる。

今後の課題としては、(1)SM法(MSM法による修正も含んだもの)の適用限界を知るためにより深い未臨界状態での実験が必要であり、(2)MSM法による修正の限界を知るために、中性子源強度や分布状態を変えた実験も必要であり、(3)定数Aの較正体系と反応度測定体系での検出器の位置を変えて修正が正しく行なえるかを調べる必要もある。更にLMFBRへの適用という観点からは、(4)MSM法の計算の簡単化、(5)体系外の検出器に対するMSM法による修正を可能性にする必要がある。

謝 辞

本実験を遂行するにあたり種々の御協力を頂いた高速炉物理研究室およびFCA管理機関の諸氏に深甚の感謝の意を表します。実験の遂行上、多くの御支援と励ましを戴いた主任研究員弘田実弥氏と、報告をまとめるに当り御支援を戴いた高速炉物理研究室長黒井英雄氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 溝尾宣辰他；“大きな負の反応度の測定(I)”，JAERI-M 6066(1975)。
- (2) Serber, R.；“The Definition of Neutron Multiplication”，LA-335(1945)。
- (3) Davey, W.G. et al；“Techniques in Fast Reactor Experiments”，Gordon and Breach(1970)。
- (4) Ackermann, Jr., N.J.；“Subcriticality Measurement in an LMFBR”，Nuclear Safety 12(6), 583(1971)。
- (5) Lewins, J.；“The Use of the Generation Time in Reactor Kinetics”，Nucl. Sci. and Eng. 7, 122(1960)。
- (6) Mizoo, N. et al；“Experiment and Analysis of B_4C Simulating

JAERI-M 6067

control rod on FCA V-3 Assembly (I), JAERI-M 5867(1974).

(7) Fowler, T., et al; ORNL-TM-2496, Rev. 2 (1969).

付録「SMR法」(Source Multiplication and Rate of power increase method)

SM法の基本式(3)式のAを求める方法として、臨界の体系に外部中性子源を持ち込んだ時の体系の中性子束レベルの直線的な増加の勾配からAを求める方法がある。勾配をR〔counts/sec²〕とすると

$$A \approx R \cdot \sum \left(\frac{\beta_i}{\lambda_i} \right)$$

と書く事が出来る。*

5系統の測定系により、マルチ・チャンネル・アナライザーで体系の出力の変化を解析し、データを最小2乗法で直線にfittingした。測定は2度行なわれたが結果に有意の差は無かった。この方法によって得られたAの値と既知反応度 ρ_1 とこの状態の計数率 CR_1 から $A = -\rho_1 / CR_1$ として求めたAの値をTable 8に示す。

Table 8 Comparison between SMR method and SM method for constant A measurement

〔% $\Delta k/k \cdot$ counts/sec〕

Detector	SMR method	SM method*
A	1.764 \pm 0.004	1.666 \pm 0.005
B'	3.036 \pm 0.018	2.757 \pm 0.009
C	1.701 \pm 0.002	1.599 \pm 0.006
E	3.128 \pm 0.002	2.902 \pm 0.008
F	2.454 \pm 0.007	2.157 \pm 0.007

* $\rho = -0.22\% \Delta k/k$

両者は6%~14%の違いがある。SMR法によるA測定の信頼性の確認にまで到らなかったため、この値は今回の実験では採用しなかった。

* Greenspan, E., et al; "The measurement of neutron importance functions," J. of Nucl. Energy 24, 529(1970).