

JAERI-M

8118

サンプル反応度価値法による複数本制御棒
反応度価値の測定

1979年3月

中野 正文・溝尾 宣辰

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.

サンプル反応度値法による複数本制御棒反応度値の測定

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

中野正文・溝尾宣辰

(1979年1月30日受理)

高速原型炉級の模擬炉心FCA VII-1/90Z-7 集合体において、サンプル反応度値法の適用性を実験的に検討した。模擬制御棒として主に B_4C ピン・クラスターB73-16P(^{10}B 平均濃縮度73%, $^{10}B \approx 1.8$ kg)を用いた。干渉の効果をあらわす補正係数は3種類の B_4C サンプルB90-1P(90%濃縮 B_4C , $^{10}B \approx 0.14$ kg), BN-16P(天然 B_4C , $^{10}B \approx 0.5$ kg)およびB73-16Pを用いて測定した。B90-1Pサンプルの反応度値はB73-16Pの約1/7であった。

補正係数はサンプルの種類によらず良く一致した値を示した。測定誤差は0.5~1%で、サンプルの反応度値が小さくなると誤差は大きくなる傾向がみられた。補正係数と単一制御棒反応度値から求めた複数本制御棒反応度値は直接測定の値と非常によい一致を示し、サンプル反応度値法の有効性が実験的に確認された。実験に用いるサンプルの選択の自由度は高いが、測定精度の点から、対象とする制御棒の1/2 或はそれ以上の反応度値をもつサンプルを用いるのが望ましいことが判明した。

Measurement of Multiple Rod Worth by Sample Worth Method

Masafumi NAKANO and Nobutatsu MIZOO

Division of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 30, 1979)

Applicability of the sample worth method has been investigated in the rod worth experiment made with FCA Assembly VII-1/90Z-7, mock-up of the prototype fast reactor. A B_4C pin cluster of B73-16P (73 % enriched B_4C , $^{10}B \approx 1.8$ kg) was mainly used for the simulating rod. The correction factor for the rod interaction was measured using three kinds of samples, i.e. B90-1P (90 % enriched B_4C , $^{10}B \approx 0.14$ kg), BN-16P (natural B_4C , $^{10}B \approx 0.5$ kg) and B73-16P. The reactivity worth of B90-1P sample is about 1/7 that of B73-16P.

Agreement was good between the correction factors obtained with each sample, the experimental error being about 0.5 to 1 %. The error tends to increase with decreasing reactivity worth of the sample used. The reactivity worth of the multiple rod worth estimated by using the correction factors and the single rod worths agreed very well with that obtained by direct measurement. The sample worth method is useful for estimating the reactivity worth of a multiple control rod. A sample having more than half the reactivity worth of the control rod is advisable for the experiment.

Keywords: Fast Critical Assembly, Boron Carbide Control Rod, Multiple Rod Worth, Interaction Effect, Single Rod Experiments, Sample Reactivity Worth Method, Reciprocal Relation

目 次

| | |
|----------------------|----|
| 1. 序論 | 1 |
| 2. 測定原理 | 3 |
| 3. 実験方法 | 7 |
| 3.1 実験体系の構成 | 7 |
| 3.2 模擬制御棒およびサンプル | 10 |
| 3.3 反応度値の測定方法 | 12 |
| 4. 実験結果と検討 | 14 |
| 4.1 補正係数 $f_i (R_j)$ | 14 |
| 4.2 複数本制御棒反応度値 | 18 |
| 5. 結論 | 22 |
| 謝 辞 | 23 |
| 参考文献 | 24 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Principle of the Method | 3 |
| 3. Experimental Procedure | 7 |
| 3.1 Assembly | 7 |
| 3.2 Simulating Rods and Samples | 10 |
| 3.3 Measurement of Reactivity Worth | 12 |
| 4. Experimental Results and Discussion | 14 |
| 4.1 Correction Factor $f_i(R_j)$ | 14 |
| 4.2 Multiple Rod Worth | 18 |
| 5. Conclusion | 22 |
| Acknowledgment | 23 |
| References | 24 |

1. 序 論

単一制御棒実験の組合せから任意の複数本制御棒の反応度値を実験的に求める「サンプル反応度値法」が先に提案され、その有効性について数値実験により検討した結果はすでに報告してある⁽¹⁾。本稿は、サンプル反応度値法の適用性を実験的に検証し、具体的な測定方法を確立する目的で高速原型炉級の模擬炉心で実験を行ったので、その結果について報告するものである。

複数本制御棒の反応度値、或は、制御棒間の干渉効果の評価は原子炉の設計上重要な課題であり、そのためには、まず、種々の制御棒挿入パターンに対してその反応度値を精度良く測定することが必要である。ところが、複数本制御棒の反応度値を測定する場合、一般に、(i)取り扱う反応度値が大きくなるために測定精度をあげるのがむずかしいこと、また、現実的な問題として、模擬制御棒実験などでは(ii)対象とする模擬制御棒を多数用意しなければならないこと等の困難を伴う。

大きな負の反応度を測定する場合、従来の1点炉モデルによる解釈では反応度観測値は測定方法や検出器位置によってしばしば異った値を示す。この問題を解決するため、近年、反応度の定義と各測定法による測定量との関係を明確にし、従来の測定方法や測定データの解析方法を改良する努力がなされ、臨界実験装置による反応度測定という問題に限れば、測定方法や検出器位置に依存しない体系固有の反応度が精度良く測定できるようになった^{(2), (3)}。しかしながら、これらの方法は反応度観測値に対して計算にもとづく理論的補正を加えることを基本にしており、その補正が取り扱う反応度の大きさとともに、一般に、大きくなる傾向にあるために、大きな負の反応度測定は必ずしも容易とはいえない。したがって、大きな負の反応度値を精度良く測定する努力とは別に、測定の比較的容易な小さい反応度値測定の組合せから複数本制御棒反応度値を実験的に求める方法の開発が望まれる。

この観点にたつて、単一制御棒実験の組合せから任意の複数本制御棒反応度値を求めるサンプル反応度値法を先に提案した。この方法は、基準となる体系と単一制御棒を挿入した体系において測定したサンプルの反応度値の比からその制御棒による干渉の効果をあらわす補正係数を求め、別に測定した単一制御棒反応度値をこの補正係数を用いて修正することにより複数本制御棒の反応度値を求める方法である。本方法を用いると、高々2本制御棒程度の反応度値測定を組合せることにより、任意の本数の制御棒反応度値を実験的に求めることができる。そのうえ、実験に当って用意すべき制御棒は、各種類ごとに、1本で済み、他に核特性の類似した、適当な大きさの反応度値をもつサンプルを用意すればよい。本方法については、原型炉級の高速炉心をモデルにした数値実験によりその妥当性が確認されているが、本方法を実際に適用する場合の測定精度や問題点の有無を検討するためにFCAを用いて一連の実験を行った。

サンプル反応度値法と同様の目的で、単一制御棒と2本制御棒の反応度値の組合せから複数本制御棒の反応度値を求める方法が三谷により提案されている⁽⁴⁾。本報告では、まず、サンプル反応度値法の測定原理の概要とその特徴、本方法導出の結果導かれた制御棒干渉効果の基本的性質について述べるとともに、三谷の方法と本方法との関連についても若干の考察を加える。

実験はFCA VII-1/90Z-7 集合体で行った。VII-1 集合体は高速原型炉級の模擬実験炉心であり、90Z-7は炉心中心領域に7本のナトリウム・チャンネル(模擬制御棒挿入位置)をもつ臨界体系である。模擬制御棒およびサンプルには ^{10}B 濃縮度や ^{10}B 量の異なるB₄Cピンのクラスターを用いた。模擬制御棒として主に取りあげたのはB73-16Pと呼ばれるB₄Cピン16本のピン・クラスターで、 ^{10}B の平均濃縮度73%で、炉心中心における反応度値は約-1.7% $\Delta k/k$ である。これに対し、サンプルとしては、対象とする模擬制御棒に等しいピン・クラスターから反応度値がその1/7程度のもので、反応度値の大巾に異なる3種類のB₄Cピン・クラスターを用意した。各ナトリウム・チャンネルをこれらのB₄Cピン・クラスターで置きかえた未臨界体系の反応度は中性子源増倍法で測定された。外部中性子源としては炉心に装荷されているPu燃料からの自発核分裂による中性子を利用した。体系内に設置した3系統の中性子検出器によって、反応度観測値の信頼性を確保した。測定方法や検出器位置に依存しない静的反応度を得るために、反応度観測値に対して理論的補正が⁽²⁾ほどこされた。

サンプル反応度値法の適用性は2つのステップに分けて検討した。第1は、干渉の効果をあらかず補正係数を測定する際に用いるサンプルの選び方に関するものであり、第2は複数本制御棒反応度値の測定精度に関する実験である。サンプルの選択基準については、いくつかの制御棒位置を選んで、各サンプルを用いて補正係数の測定を行い、用いたサンプルと得られた補正係数の測定精度、測定の容易さ等を検討した。第2の問題については、複数本の制御棒を同時に挿入した場合の反応度値を直接測定し、単一制御棒反応度値と補正係数から得られる結果と比較することによって、サンプル反応度値法の適用性を評価した。実験例として、合計7種類の2本或は3本制御棒反応度値を取りあげた。実験の方法は第3章に、測定結果と適用性については第4章に述べられている。

2. 測定原理

サンプル反応度値法は、任意の複数本制御棒の反応度値或は複数本制御棒反応度値の干渉効果を、単一制御棒実験の組合せにより、実験的に求める方法である。本方法の導出および数値実験による有用性の検討については、すでに、文献(1)に報告されている。ここでは、サンプル反応度値法の測定原理の概要とその特徴について述べる。なお、本報告で取扱う制御棒反応度値は、例えば、ナトリウム・チャンネルに吸収体を挿入する場合のように、基準の体系に対して体系の寸法および核分裂物質（燃料）の量や配置を変えないで、制御棒を挿入した場合の反応度変化である。

基準体系にN本の制御棒 R_1, R_2, \dots, R_N が同時に挿入された場合の反応度値 $\Delta\rho_{12\dots N}$ を、それぞれの制御棒が単独で挿入された場合の反応度値 $\Delta\rho_1, \Delta\rho_2, \dots, \Delta\rho_N$ を用いて、

$$\Delta\rho_{12\dots N} = \sum_{i=1}^N \left[\prod_{j \neq i} f_i(R_j) \right] \cdot \Delta\rho_i \quad (1)$$

と書く。(1)式の係数 $f_i(R_j)$ は単一制御棒 R_i の反応度値 $\Delta\rho_i$ に対する制御棒 R_j の干渉の効果をあらわす補正係数であり、この値は、一般に、1にはならない。サンプル反応度値法では、N本制御棒の反応度値 $\Delta\rho_{12\dots N}$ を直接測定する代わりに、単一制御棒の挿入によるサンプル反応度値の変化から、それぞれの制御棒による補正係数を求め、その値と単一制御棒反応度値 $\Delta\rho_i$ とから(1)式によってN本制御棒反応度値 $\Delta\rho_{12\dots N}$ を求める。

補正係数 $f_i(R_j)$ は、制御棒 R_i の反応度値とは無関係に、単一制御棒 R_j が挿入された体系と R_j が挿入されていない体系の位置 i におけるサンプル反応度値 $\Delta\rho_{si}(R_j)$ および $\Delta\rho_{si}(0)$ から、

$$f_i(R_j) = \left[\Delta\rho_{si}(R_j) / \Delta\rho_{si}(0) \right]^{1/2} \quad (2)$$

によって得られる。ただし、サンプル反応度値を測定する2つの体系は制御棒 R_j を除いて共通である。単一制御棒 R_j 挿入時の反応度値 $\Delta\rho_{si}(R_j)$ は、実際には、サンプル S_i と制御棒 R_j を同時に挿入した体系の反応度 $\rho(R_j + S_i)$ から制御棒 R_j のみが挿入された体系の反応度 $\rho(R_j)$ を差引いて、

$$\Delta\rho_{si}(R_j) = \rho(R_j + S_i) - \rho(R_j) \quad (3)$$

より求められる。用いるべきサンプルの寸法や反応度値の大きさには、原理的には、特に制限はない。しかしながら、測定の容易さや測定精度の点から、適切な大きさの反応度値をもつサンプルを選ぶことが必要である。また、サンプル S_i の核的特性は、位置 i に挿入される制御棒 R_i に類似していることが望ましい。

このように、単一制御棒反応度値とサンプル反応度値をもとに求めた補正係数により、任意の本数の制御棒反応度値を求めることができる。(1)、(2)式は次の2つの仮定のもとに導かれている。

(i) 制御棒 R_j, R_k, \dots, R_l を同時に挿入したことによる位置 i での制御棒 R_i に対する実

効的な中性子束およびインポートランスの歪みは、それぞれの制御棒 R_j, R_k, \dots, R_l を個々に挿入した場合の実効歪みの積で与えられる(重ね合せ)。

- (ii) サンプル S_i の自己遮蔽効果は単一制御棒 R_j の挿入によって影響を受けない。つまり、 R_i の挿入によるスペクトルの歪みは位置 i にまで及ばない。

仮定(i)は、本方法の基本的な仮定である。一方、仮定(ii)はサンプルの寸法や反応度値の大きさが任意であるということに関係しており、実際の測定では重要である。これらの仮定については、原型炉級の高速炉体系をモデルに、種々の制御棒挿入パターンについて数値実験を行い、その妥当性が確認されている⁽¹⁾。

(2)式から、補正係数 $f_i(R_j)$ に関してもう一つの重要な関係式が導かれる。それは、2本制御棒間の干渉効果に関する「相反関係」と呼べる関係であり、補正係数と反応度値は次式で関係付けられる。

$$\Delta f_i(R_j) \cdot \Delta \rho_i = \Delta f_j(R_i) \cdot \Delta \rho_j \quad (4)$$

$$\text{ただし,} \quad \Delta f_i(R_j) = f_i(R_j) - 1$$

(4)式は、制御棒 R_j の挿入による制御棒 R_i の反応度値 $\Delta \rho_i$ の変化量が制御棒 R_i の挿入による $\Delta \rho_j$ の変化量に等しいことを示している。さらに、(4)式の関係を用いると、干渉の効果をあらわす補正量 $\Delta f_i(R_j)$ の大きさは制御棒 R_j の反応度値 $\Delta \rho_j$ に比例することがわかる。つまり、

$$\Delta f_i(R_j) = (\Delta \rho_j' / \Delta \rho_j) \cdot \Delta f_i(R_j) \quad (5)$$

ここに、 $\Delta \rho_j$ および $\Delta \rho_j'$ は、それぞれ、位置 j に挿入された2種類の制御棒 R_j および R_j' の反応度値である。実用的には、例えば、補正係数 $f_i(R_j)$ が得られれば、(4)式により、 $\Delta \rho_i$ および $\Delta \rho_j$ を用いて補正係数 $f_j(R_i)$ が分かる。また、1種類の制御棒に対して補正係数を求めておけば、対象とする制御棒が変わっても反応度値の変化さえ与えられれば、その制御棒に対する補正係数は(5)式から求めることができる。

サンプル反応度値法を用いて複数本制御棒の反応度値を測定する場合、実際は次のような測定を行うことになる。例えば、3本制御棒の場合は、模式的にFig. 2.1に示すように、

- (i) 単一制御棒反応度値の測定(3ケース)、
- (ii) 各制御棒位置におけるサンプル反応度値の測定(3ケース)、および
- (iii) 単一制御棒挿入体系におけるサンプル反応度値の測定(3×2ケース)。

ただし、「相反関係」(4)式を用いれば、(iii)のうち半分の測定は省略できる。結局、3本制御棒の反応度値を求めるためには9ケの独立な測定値が必要になる*。もちろん、これらの測定値から、3組の異った2本制御棒反応度値も求められる。注意したいことは、本方法は、制御棒やサンプルの挿入以外は体系はそのまま保持するという前提で導かれていることである。このような条件下で実際の測定を考えると、制御棒やサンプルの挿入されていない基準体系を臨界体系に選び、その体系に制御棒などを挿入した未臨界体系の反応度を測定することになる。この場合、制御棒挿入体系のサンプル反応度値は、一つの未臨界体系から他の未臨界体系への反応度変化で与え

* 制御棒に対称性があれば、さらにその分だけ測定は省略できる。

られることになり、この値を精度良く測定するためには、単一制御棒反応度値に対して適当な大きさの反応度値をもつサンプルを用いる必要がある。後述するように、本実験では、反応度値の異なる3種類のサンプルを用いて、補正係数の測定精度を比較検討した。

本方法は、複数本制御棒の反応度値を直接測定する場合に生じる困難、即ち、(i)大きな負の反応度値を精度良く測定するのが容易でないこと、(ii)多数の制御棒を用意しなければならないこと等を避けることを目的に提案された。同様の目的で、単一制御棒反応度値と2本制御棒反応度値から複数本制御棒反応度値を求める方法が、三谷により提案されている⁽⁴⁾。この方法とサンプル反応度値法との関係は次のようになっている。

三谷の方法では、N本制御棒の反応度値は

$$\Delta\rho_{12\dots N}(M) = \sum_{i=1}^N \Delta\rho_i + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (\Delta\rho_{ij} - \Delta\rho_i - \Delta\rho_j) \quad (6)$$

で与えられる。ただし、 $\Delta\rho_{ij}$ は制御棒 R_i と R_j が同時に挿入された場合の反応度値であり、(6)式右辺第2項は干渉の効果をあらわす補正項である。一方、サンプル反応度値法では、N本制御棒の反応度値は

$$\Delta\rho_{12\dots N}(S) = \sum_{i=1}^N \left[\prod_{j \neq i} f_i(R_j) \right] \cdot \Delta\rho_i \quad (1')$$

で与えられた。補正係数は任意のサンプルを用いて(2)式から求められる。ここで、サンプルとして、特に着目している制御棒そのものを選んだ場合を考えると、(2)式および(3)式から、

$$\begin{aligned} f_i(R_j) &= \left[\Delta\rho_{R_i}(R_j) / \Delta\rho_{R_i}(0) \right]^{1/2} \\ &= \left[\frac{\Delta\rho_{ij} - \Delta\rho_j}{\Delta\rho_i} \right]^{1/2} = 1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta\rho_{ij} - \Delta\rho_i - \Delta\rho_j}{\Delta\rho_i} + O(\Delta^2), \quad (7) \end{aligned}$$

ただし、

$$\Delta = (\Delta\rho_{ij} - \Delta\rho_i - \Delta\rho_j) / \Delta\rho_i \quad (8)$$

(7)式を(1')式に代入して整理すると、

$$\begin{aligned} \Delta\rho_{12\dots N}(S) &= \sum_{i=1}^N \left[1 + \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} \left(\frac{\Delta\rho_{ij} - \Delta\rho_i - \Delta\rho_j}{\Delta\rho_i} \right) + O(\Delta^2) \right] \cdot \Delta\rho_i \\ &= \sum_{i=1}^N \Delta\rho_i + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (\Delta\rho_{ij} - \Delta\rho_i - \Delta\rho_j) + \sum_{i=1}^N \Delta\rho_i \cdot O(\Delta^2) \\ &= \Delta\rho_{12\dots N}(M) + \sum_{i=1}^N \Delta\rho_i \cdot O(\Delta^2) \quad (9) \end{aligned}$$

つまり、三谷の方法はサンプル反応度値法において干渉効果を表わす補正量の高次項を無視したものになっている。したがって、サンプル反応度値と三谷の方法により得られる複数本制御棒反応度値は、結果的にはほぼ等しいと考えられる。しかしながら、本方法は、補正係数 $f_i(R_j)$ の物理的意味が明確であり、2本制御棒間の補正量の間には「相反関係」があること、補正量は制御棒の反応度値に比例することなど制御棒干渉効果の基本的性質を理解する上で有利である。

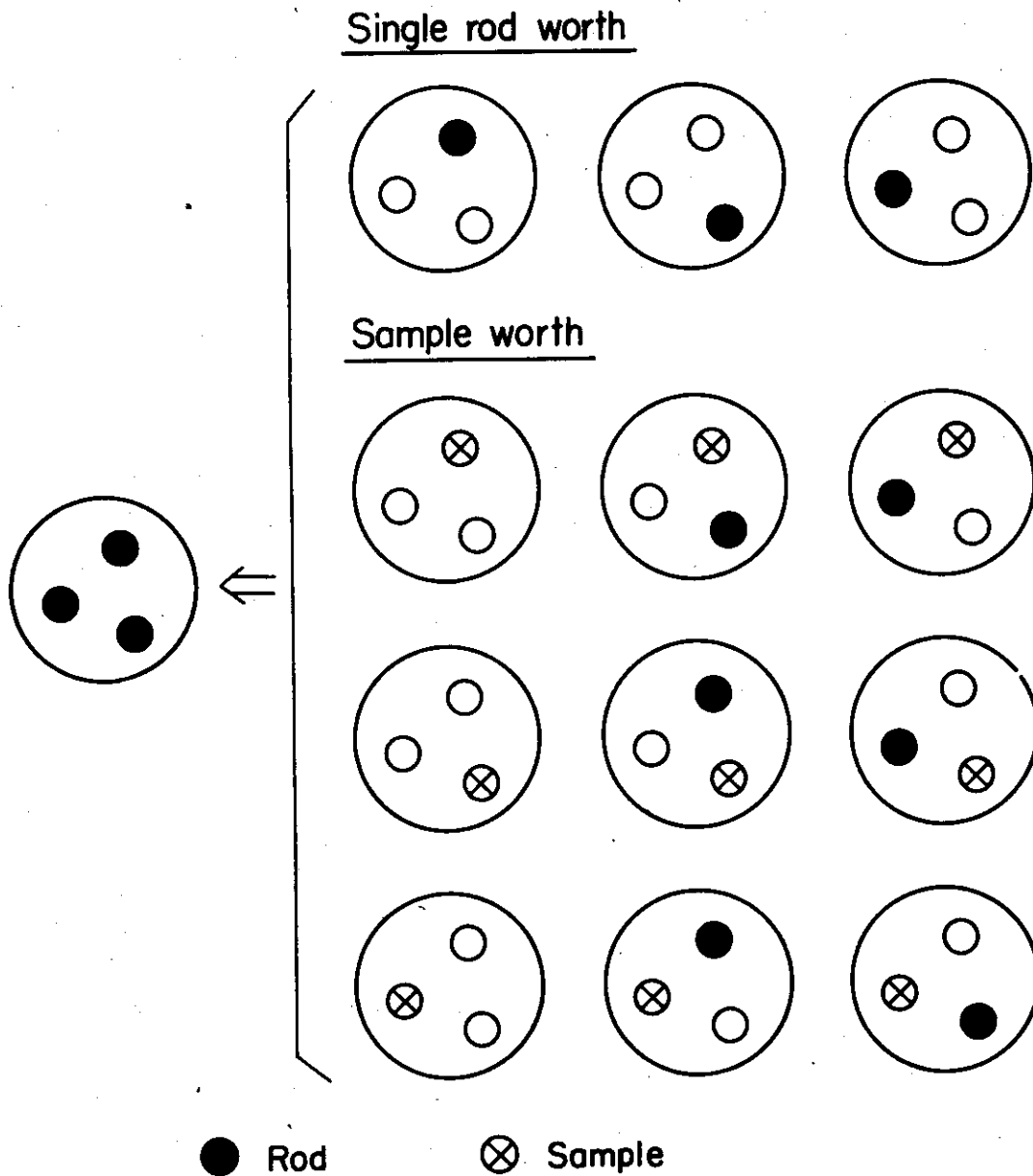


Fig. 2.1 Rod and/or sample patterns to be used for the measurement of 3 rods worth by sample worth method

3. 実験方法

3.1 実験体系の構成

実験は FCA VII-1/90Z-7 集合体で行われた。VII-1 集合体⁽⁵⁾は高速原型炉級の模擬実験を目的とした2領域炉心であり、90Z-7 集合体は模擬制御棒の反応度値実験のため、特に、炉心中心領域に7本のナトリウム・チャンネルを設けた体系である。このナトリウム・チャンネルをB₄C模擬制御棒或はB₄Cサンプルに置きかえた場合の反応度変化を測定し、サンプル反応度値法によって得られる複数本制御棒反応度値を直接測定の結果と比較して、サンプル反応度値の適用性を実験的に検討した。

VII-1/90Z-7 集合体の断面図をFig. 3.1に示す。炉心部は内炉心領域と外炉心領域とに大別できる。内炉心領域はPu燃料の試験領域(T₁)の周りを²³⁵U燃料の内炉心ドライバー領域(D₁)で囲んだゾーン装荷になっており、各領域は中心対称に構成されている。一方、外炉心領域にはPu燃料の試験領域(T₂)、²³⁵U燃料のドライバー(D₂)、²³⁵U燃料とPu燃料を混合したドライバー(D₂')等が用いられている。外炉心要素T₂、D₂、D₂'等の配列はX軸に対して上下対称であるが、Y軸に関しては左右対称になっていない。しかしながら、Pu燃料に含まれる²⁴⁰Puからの自発核分裂中性子(外部中性子源)の分布が左右ほぼ対称になるように各要素の配列を決めた。このように、外炉心領域の構成はやや複雑であるが、内炉心ドライバー要素D₁は試験領域要素T₁に、外炉心ドライバー要素D₂、D₂'等はT₂に核特性を合せてあり、マクロの観点からは内炉心と外炉心から成る2領域内筒炉心体系とみなすことができる。なお、Fig. 3.1では、煩雑さを避けるために、外炉心ドライバー要素D₂、D₂'等の配列は省略した。配列の詳細や各領域の原子数密度は文献(6)に示されている。

臨界時の円筒化した体系の寸法をTable 3.1にまとめた。炉心は直径約140 cm、高さ約91 cmのやや扁平な炉心であり、体積は内炉心が約800 l、外炉心が約600 lで合計約1400 lである。

FCA制御棒および安全棒はD₁領域にあり、中心対称に配置されている。1組の制御安全棒は引出し2本で構成され、固定側および移動側1/2集合体に4組ずつ、互に対向して、設けられている。ブランケットは金属ウラン・ブロックで、半径方向および軸方向の厚さは、ともに、約20 cmである。

ナトリウム・チャンネルは内炉心試験領域内に7本設けられている。炉心中心のナトリウム・チャンネルにはO、周辺6本には上から右廻りにT、RT、RB、B、LBおよびLTと名前を付けた。周辺の6本は、炉心中心からの距離が約20 cm(内炉心半径の約0.4倍)の位置に、近似的に正六角形を形成するように配置されている。各ナトリウム・チャンネルは断面がFCA格子管1本分で、炉心高さに対応する部分はナトリウム板が装填されており、軸方向ブランケット部は試験領域要素T₁と同様に劣化ウラン・ブロックである。Fig. 3.1から分るように、VII-1/90Z-7 集合体は炉心中心を通るX軸に関して上下対称に構成されている。内炉心領域はY軸に関して対称である。反応度測定の基準となる臨界体系は、対称性を保つために、FCA制御

・安全棒を対称に引抜いて達成した。したがって、体系はX軸に関して上下は完全に対称であり、ナトリウム・チャンネルTとB, RTとRBおよびLBとLTは、それぞれ、等価と考えてよい。しかしながら、外炉心領域は、核特性が若干異なる T_2 , D_2 , D_2' 要素等が左右非対称に装荷されているために、体系の左右の対称性はくづれている。事実、制御・安全棒の反応度校正から、体系は上下対称であることが確認されたが、左右には制御・安全棒の反応度値に約10%の非対称性が観測された。

Table 3.1 Critical dimension of Assembly VII-1/90Z-7

| | | |
|------------------------------|---|--------|
| Equivalent radius (cm) | Inner core { T_1 -zone D_1 -zone | 33.11 |
| | | 53.31 |
| | Outer core | 70.61 |
| | Radial blanket | 90.32 |
| Core height (cm) | | 91.44 |
| Axial blanket thickness (cm) | | 20.32 |
| Core volume (ℓ) | Inner core { T_1 -zone D_1 -zone | 314.8 |
| | | 501.5 |
| | Outer core | 601.8 |
| | Snm | 1418.2 |

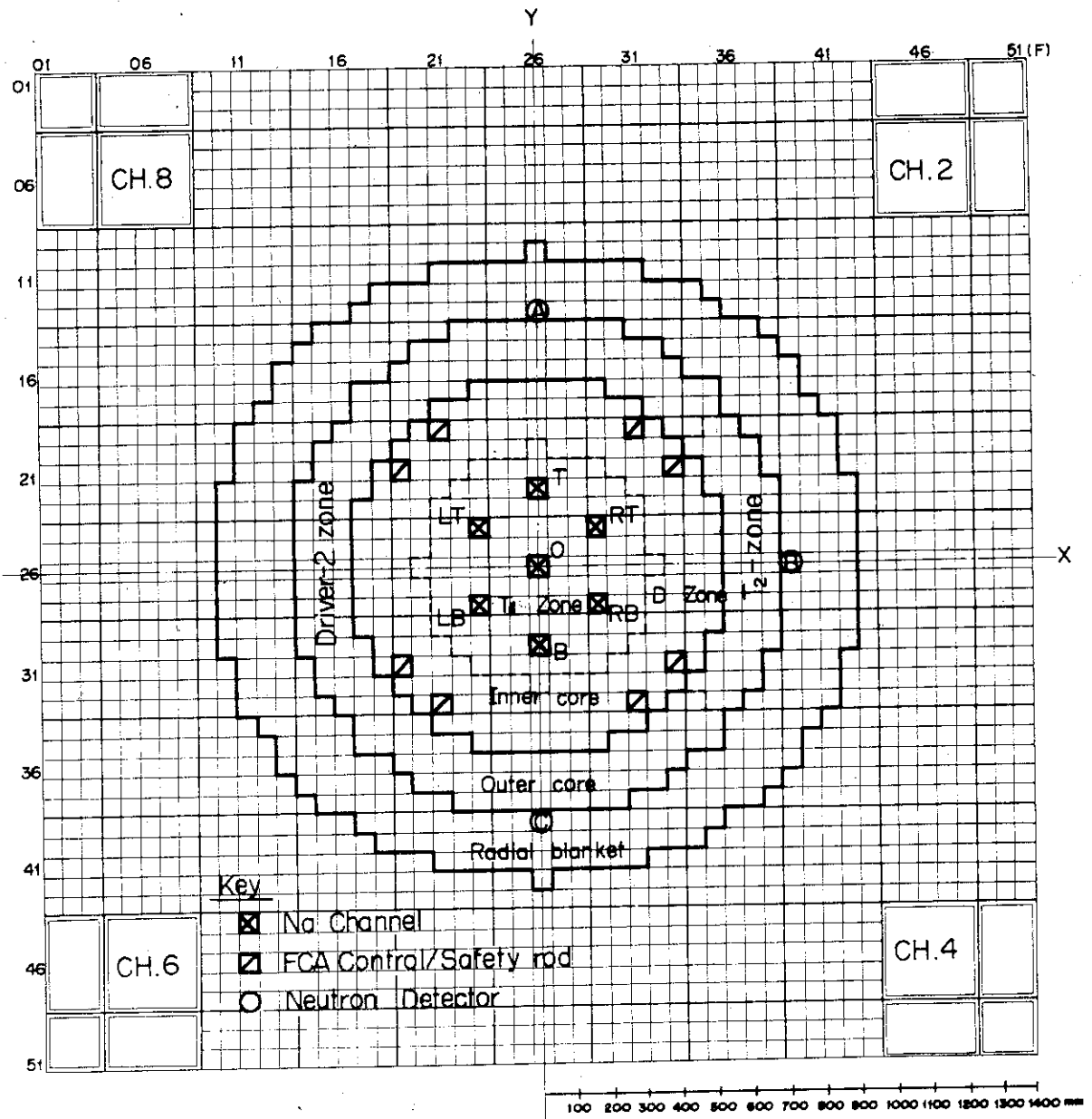


Fig. 3.1 Vertical cross section of FCA Assembly W-1/90Z-7

3.2 模擬制御棒およびサンプル

模擬制御棒およびサンプルには、外径13.1mmの不銹鋼管に直径11.0mmの B_4C ペレットを充填した B_4C ピン或はそれらを把ねたピン・クラスターを用いた。 B_4C ピンの長さは45.7cmであり、ピン2本分が炉心高さに等しい。実験に用いた模擬制御棒およびサンプルの断面図をFig. 3.2に示す。模擬制御棒には2種類の B_4C ピン・クラスターB73-16PおよびBN-16Pを用いた。いずれも、 B_4C ピン16本(4×4)で構成される四角格子であり、その断面は、ナトリウム・チャンネルと同様、FCA格子管1本分である。BN-16Pピン・クラスターは天然 B_4C ピンを用いているのに対し、B73-16Pは ^{10}B 濃度の異なる3種類の B_4C ピンから構成されており、 ^{10}B の平均濃縮度が約73%になっている。いずれのピン・クラスターも、 B_4C ピンの間隙にはナトリウム等の充填物はなくボイドのままである。

B_4C ピン・クラスターの長さは炉心高さに等しく、B73-16Pの ^{10}B 量は約1.8kg、BN-16Pの ^{10}B 量はその約1/4である。本実験では、各ナトリウム・チャンネルのナトリウム部分をこれらの B_4C ピン・クラスターで置きかえた場合の反応度変化を B_4C ピン・クラスターの反応度価値とした。ナトリウム・チャンネルの軸方向ブランケット部は B_4C ピン・クラスター挿入時不変である。次章で示すように、B73-16Pの反応度価値は炉心中心O点で約-1.7% $\Delta k/k$ 、周辺位置ではその0.9~0.95倍になっている。また、BN-16Pの反応度価値はB73-16Pの約1/2である。

サンプルの大きさと補正係数 $f_i(R_j)$ の測定精度(或は測定の容易さ)の関係をみるために、上記2種類の B_4C ピンクラスターと、ナトリウム・カランドリアの中央に90%濃縮 B_4C ピンを1本だけ挿入したB90-1Pの合計3種類をサンプルとして用いた。B90-1Pの長さも炉心高さに等しい。 ^{10}B 量はB73-16Pピン・クラスターの約1/13であるが、反応度価値は1/7程度である。各模擬制御棒、サンプルおよびナトリウム・チャンネルの平均組成、 ^{10}B 量等をTable 3.2にまとめておく。構造材の組成は互によく似ているが、 ^{11}B など ^{10}B 以外の原子数密度も各 B_4C ピン・クラスターで大巾に違っている。

Table 3.2 Composition of B₄C pin-clusters and sodium channel*
(10²² atom/cm³)

| | | B73-16P | BN-16P | B90-1P | Na channel |
|--|------------------|---------|--------|--------|------------|
| Atomic density (10 ²² atom/cm ³) | ¹⁰ B | 3.856 | 1.033 | 0.302 | — |
| | ¹¹ B | 1.434 | 4.182 | 0.032 | — |
| | C | 1.278 | 1.131 | 0.079 | — |
| | Na | — | — | 1.505 | 1.531 |
| | Cr | 0.459 | 0.432 | 0.472 | 0.444 |
| | Fe | 1.629 | 1.580 | 1.688 | 1.636 |
| | Ni | 0.213 | 0.196 | 0.199 | 0.204 |
| Total Weight(kg) | B ₄ C | 3.243 | 3.346 | 0.202 | — |
| | ¹⁰ B | 1.784 | 0.478 | 0.140 | — |

* Homogenized in the whole volume of B₄C pin-cluster or sodium channel including FCA matrix tube

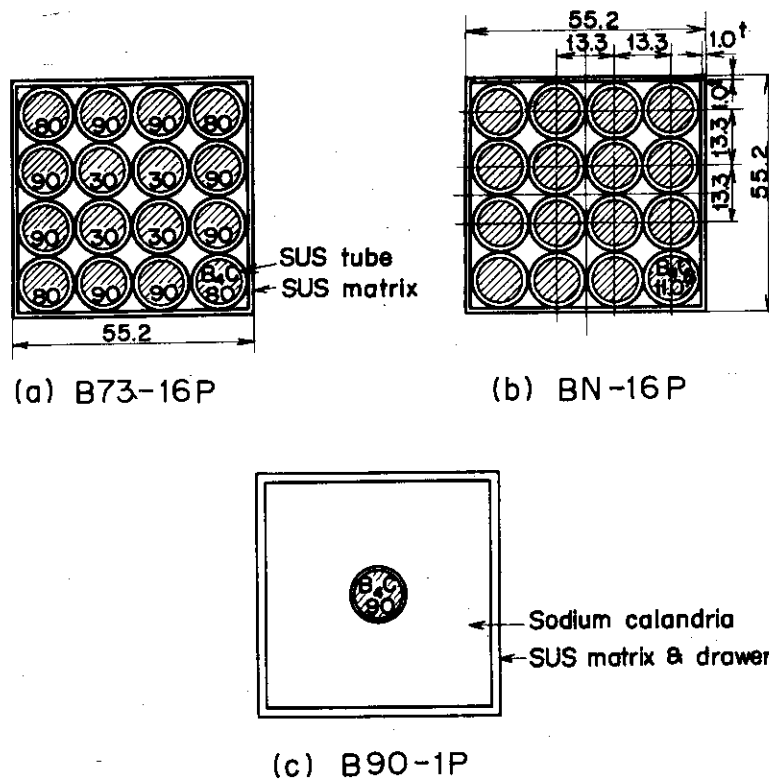


Fig. 3.2 Cross section of B₄C pin-cluster

3.3 反応度価値の測定法

反応度価値測定の基準となる体系は臨界体系であり、該当するナトリウム・チャンネルを前述の模擬制御棒やサンプルで置きかえた未臨界体系の反応度を中性子源増倍法により測定した。模擬制御棒やサンプルを挿入した未臨界体系は、基準体系の炉の構成や形状を保持し、FCA制御・安全棒の位置も臨界点に完全に合せた。したがって、測定された反応度 ρ は模擬制御棒やサンプルの反応度価値 $\Delta\rho$ そのものになる。外部中性子源には炉心に装荷されているPu燃料からの自発核分裂中性子を利用した。外炉心要素の配列から、外炉心領域の中性子源は左右に偏在し、上下方向の強度は弱くなっている。

中性子源増倍法によれば、未臨界体系の反応度 ρ は

$$-\rho = f_e \cdot f_s \cdot (A/CR) \quad (10)$$

から求められる⁽⁵⁾。ここに、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、Aは中性子源強度、中性子生成寿命(generation time)、検出器の中性子検出効率(neutron detection efficiency)などによって決まる係数であり、基準となる未臨界状態の反応度 ρ_1 と計数率 CR_1 とから $A = -\rho_1 \cdot CR_1$ により求める。係数Aの値は、B、Cピン・クラスターの挿入されていない基準体系において、 $\rho_1 \approx -0.12\% \Delta k/k$ の浅い未臨界状態で測定した。反応度 ρ_1 は標準反応度 ρ_0 ($= 0.0411\% \Delta k/k$)^{*}を基準に較正されたFCA制御・安全棒の移動距離から求めた。

(10)式における係数 f_e および f_s は、係数Aを測定した体系と反応度 ρ を測定すべき体系における実効中性子検出効率および実効中性子源強度の違いを補正する補正係数である。一点炉近似にもとづく通常の中性子源増倍法では $f_e = f_s = 1$ と仮定するが、その場合、(10)式より得られる反応度観測値は検出器位置によってしばしば異なる。この問題を除くために、本実験では、上記の補正係数 f_e および f_s を用いて反応度観測値に理論的補正をほどこした。補正係数は計算によって求めなければならないが、補正係数は計算方法や用いるデータには鈍感であることが確かめられている⁽⁷⁾。本実験では f_e および f_s の値は6群2次元XY拡散計算によって求めた。

中性子検出器は、Fig. 3.1に示すように、半径方向ブランケット領域に3系統(A, BおよびC)設置した。検出器AおよびBは²³⁵U大型核分裂計数管(2"φ, ~1 gr ²³⁵U)であり、検出器Cには³He計数管(1"φ)を用いた。³He計数管はr線遮蔽のために厚さ約10mmの鉛の筒に入れて使用した。各検出器の計数率は、係数A測定時($\rho_1 \approx -3\rho_0$)で $6 \sim 8 \times 10^3$ cpsであった。波形形成後の全測定系の不感時間を実測した結果、各測定系とも、約3μsの値を得、係数A測定に対する不感時間の補正は2~3%となった。したがって、不感時間の測定誤差を±10%とすると、それに伴う係数Aの不確かさは±0.2~0.3%になる。

検出器AとCは上下方向に中心対称に、検出器Bはそれらと直角方向に設置されている。炉心は上下対称に構成されているために、上下対称な模擬制御棒挿入パターンに対しては検出器Aと

* ペリオド測定とTomlinson⁽⁸⁾の遅発中性子パラメータから求めた値

Cの反応度値は同じ値を示すはずであるし、上下非対称のパターンに対しては中性子束の歪みによる影響が逆方向にあらわれる。一方、外部中性子源との関係からみると、検出器AおよびCは外部中性子源から遠いのに対し、検出器Bは外部中性子源の強い T_2 領域に隣接しているために実効的な外部中性子源の変化に対しては検出器A、Cとは異った振舞をする。これらのことから、3個の検出器による反応度観測値の傾向や理論的補正をほどこした後の測定値のばらつきが実験値の信頼性を示す目安になると考えられる。

4. 実験結果と検討

4.1 補正係数 $f_i(R_j)$

いくつか制御棒位置について、3種類のサンプルを用いて、模擬制御棒挿入体系と模擬制御棒の挿入されていない基準体系におけるサンプル反応度値を測定し、各サンプルごとに、干渉の効果をあらわす補正係数 $f_i(R_j)$ を求めた。結果をTable 4.1に示す。対象とした模擬制御棒は主にB73-16Pピン・クラスターであるが、LT点についてはBN-16Pを挿入した場合も測定した。例えば、T点に模擬制御棒B73-16Pを挿入した場合のO点に対する干渉の効果をあらわす補正係数 $f_o(T)$ を2種類のサンプルB90-1PおよびB73-16Pを用いて測定した結果が表の第1列に示されている。この場合、B73-16Pサンプルによる補正係数は、T点とO点における単一制御棒B73-16Pの反応度値とT点とO点とに同時にB73-16Pを挿入した場合の反応度値の測定から得られた値である。炉心中心O点における反応度値はB73-16Pが $-4.22\rho_0$ ($\rho_0=0.0411\%\Delta k/k$) であるのに対し、B90-1Pサンプルは約1/7の $-6.17\rho_0$ であった。一方、BN-16Pの反応度値はLB点で $-2.02\rho_0$ を示し、同じ点におけるB73-16Pの反応度値 $-3.71\rho_0$ の1/2強であった。

補正係数 $f_i(R_j)$ は各検出器ごとに(2)式を用いて算出した。この場合、反応度測定のスケールを決める係数A(10式参照)が(2)式の分子分母に共通で消えるために係数Aの不確かさは測定結果に影響を与えない。Table 4.1に示した測定値の誤差は反応度測定時の計数の統計誤差とFCA 1/2集合体の分離密着による系の反応度の再現性から評価した値であり、反応度観測値に対して理論的補正を行う際の補正係数 f_e および f_s の不確かさは含まれていない。対象とする模擬制御棒と同一のサンプルを用いた場合、補正係数 $f_i(R_j)$ の測定精度は0.7%程度であるのに対し、B73-16Pピン・クラスターに比べて反応度値が約1/7しかないB90-1Pサンプルを用いた場合は測定誤差は1%強となった。これは、(3)式から分るように、模擬制御棒挿入体系におけるサンプル反応度値が、(模擬制御棒+サンプル)挿入体系の反応度と模擬制御棒のみを挿入した体系の反応度との差として得られるために、模擬制御棒の反応度値を比べてサンプルの反応度値が小さいこと、結果として得られるサンプル反応度値の誤差がその分だけ増倍されるためである。しかしながら、各検出器ごとに求めた補正係数 $f_i(R_j)$ は、用いたサンプルの反応度値が大巾に異なるにもかかわらず、互に良く一致している。サンプルの違いによる測定値の差は検出器位置の違いによる差よりもむしろ小さいといえる。

Table 4.1には3個の検出器により得られた補正係数の平均値が与えられている。平均値の誤差としては各検出器による測定誤差の平均値を採った。3個の検出器による測定値の分散から推定される誤差は、いずれの場合も、この値を越えていない。したがって、本実験では上の手続きによって求めた平均値を補正係数の実験値として採用するのが適当であると考えられる。

平均値は、いずれの場合も、用いたサンプルにはよらず非常に良く一致している。測定精度は0.5~1%程度である。測定誤差は反応度値の小さいB90-1Pサンプルの場合、反応度値の大きいB73-16Pサンプルに比べてやや悪くなる。一方、BN-16Pサンプルを用いた場合は

反応度値がB73-16Pサンプルの約 $1/2$ であるにもかかわらず誤差はほとんど変わらず、いずれのサンプルを用いても補正係数の測定結果には実質的な差がないといえる。

以上のことから、補正係数の測定に用いるサンプルの選択の自由度は反応度値の点からも、組成の面からも、極めて高いと考えてよい。反応度値が対象とする制御棒の $1/7$ 程度のサンプルを用いても補正係数は1%程度の精度で測定できる。しかしながら、一般にサンプルの反応度値が大きくなるとともに測定精度があがること、反応度値が $1/2$ 以上になると、測定精度が事実上変わらないことを考えると、実際の測定では、対象とする制御棒の $1/2$ 或はそれ以上の反応度値をもつサンプルを用いるのが望ましいと考えられる。

一連の実験で得た補正係数の実験値をTable 4.2にまとめた。Table 4.1に示した結果の他に、種々の制御棒位置に対する干渉の効果がB73-16Pサンプルを用いて測定された。前にみたように、この結果は用いたサンプルの種類には依らないと考えてよい。測定精度は0.5~1%程度である。測定精度と補正量(干渉の効果の大きさ)の間には相関はみられない。体系は上下対称に構成されているために補正係数にも対称性がある。例えば $f_B(O)$ は $f_T(O)$ に等しく、また、B点、RT点およびLT点の模擬制御棒に対する補正係数は、それぞれ、T点、RB点およびLB点に挿入した模擬制御棒に対して得られた補正係数に等しいと考えてよい。

各模擬制御棒の干渉の効果をみると、炉心中心O点におけるB73-16Pは周辺の制御棒位置に対して6~7%の負の干渉効果を示す。T点に対する効果よりもLB点に対する効果の方がやや大きいのは、T点よりもLB点の方が炉心中心までの距離が短いためであると考えられる。T点に挿入されたB73-16Pは中心O点に対して負の干渉効果を示すが、中心を越えて反対側にあるB点に対しては約5%の正の干渉効果を示す。RB点やLB点の模擬制御棒についても同様の傾向がみられる。RB点とLB点との間の干渉効果は小さい。LB点におけるBN-16Pピン・クラスターのLT点に対する干渉の効果はB73-16Pの場合と同様負の値を示すが、反応度値が約 $1/2$ のBN-16Pの場合はその分だけ補正量が小さくなっている。これは補正量に関する相反関係(4)式の妥当性を示している。

Table 4.1 Correction factors $f_i(R_j)$ measured with various samples

| Rod position j | Sample position i | Sample used | Correction factor $f_i(j)$ | | | Average |
|------------------|---------------------|-------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | Det. A | Det. B | Det. C | |
| T | O | B90-1P | 0.954±0.012 | 0.963±0.010 | 0.954±0.009 | 0.957±0.011 |
| | | B73-16P | 0.944±0.006 | 0.956±0.006 | 0.958±0.007 | 0.953±0.006 |
| O | T | B90-1P | 0.935±0.010 | 0.953±0.012 | 0.943±0.011 | 0.944±0.011 |
| | | B73-16P | 0.935±0.006 | 0.950±0.006 | 0.953±0.007 | 0.946±0.006 |
| B | T | B90-1P | 1.042±0.009 | 1.060±0.011 | 1.046±0.010 | 1.049±0.010 |
| | | B73-16P | 1.054±0.006 | 1.062±0.007 | 1.038±0.007 | 1.051±0.007 |
| LT | LB | BN-16P | 0.922±0.008 | 0.941±0.008 | 0.948±0.009 | 0.937±0.008 |
| | | B73-16P | 0.928±0.006 | 0.934±0.007 | 0.946±0.007 | 0.936±0.007 |
| LT(N) | LB | BN-16P | 0.966±0.006 | 0.970±0.006 | 0.955±0.006 | 0.964±0.006 |
| | | B73-16P | 0.958±0.004 | 0.968±0.005 | 0.972±0.005 | 0.966±0.005 |

* Symbol N in the parentheses means BN-16P pin-cluster, while only rod position is given for B73-16P.

Table 4.2 Summary of measured $f_i(R_j)$

| Rod * position j | Sample position i | Correction factor $f_i(R_j)$ (Sample used) |
|------------------------|-------------------------|--|
| O | T | { 0.944±0.011 (B90-1P) 0.946±0.006 (B73-16P) |
| | LB | 0.933±0.006 (B73-16P) |
| T | O | { 0.957±0.011 (B90-1P) 0.953±0.006 (B73-16P) |
| | B | { 1.049±0.010 (B90-1P) 1.051±0.007 (B73-16P) |
| | LB | 1.020±0.007 (B73-16P) |
| RB | LB | 1.006±0.006 (B73-16P) |
| | LT | 1.047±0.011 (") |
| LB | O | 0.941±0.005 (B73-16P) |
| | T | 1.020±0.007 (") |
| | RT | 1.045±0.008 (") |
| | RB | 1.006±0.005 (") |
| | LT | { 0.937±0.008 (BN -16P) 0.936±0.007 (B73-16P) |
| LB(N) | LT | { 0.964±0.006 (BN -16P) 0.966±0.005 (B73-16P) |

* Symbol N in the parentheses means BN-16P pin-cluster,
while only rod position is given for B73-16P.

4.2 複数本制御棒の反応度値

サンプル反応度値法によって複数本制御棒反応度値を求めるためには補正係数と単一制御棒反応度値が必要である。各制御棒位置における単一模擬制御棒反応度値の実験値を Table 4.3 に示す。体系は上下対称であるため独立な制御棒位置は中心 O 点と周辺 3 点の合計 4 点である。反応度値の測定はこの 4 点についてのみ行った。模擬制御棒としては主に B73-16 P ピン・クラスターを取り上げたが、LB 点では BN-16 P の場合も測定した。反応度値の実験値として、3 個の検出器 (Det. A, B および C) により得た値の平均値が示されている。測定誤差は 3 個の検出器による誤差の平均値と 3 個の測定値の分散から推定される誤差のうち大きい値を採った。取扱った反応度が比較的小さい (約 $-1.7\% \Delta k/k$ 以下) こともあって測定精度は良く、単一模擬制御棒の反応度値は $0.5 \sim 0.7\%$ の精度で得られた。これらの値と前節で求めた補正係数とから、(1) 式によって、数多くの組合せの複数本制御棒反応度値が得られる。

Table 4.2 に示す補正係数と Table 4.3 の単一制御棒反応度値からサンプル反応度値法によって得た 2 本或は 3 本制御棒の反応度値を直接測定によって得た値と比較して Table 4.4 に示す。制御棒挿入パターン $T*O$ は T 点と O 点に B73-16 P ピン・クラスターを同時挿入した場合であり、 $LB(N)*LT(N)$ は LB 点と LT 点に BN-16 P ピン・クラスターを同時に挿入した場合をあらわしている。反応度値は標準反応度 ρ_0 ($=0.0411\% \Delta k/k$) 単位であらわした。ここで取り上げた制御棒挿入パターンは Fig. 4.1 に示してある。

直接測定による反応度値は単一制御棒反応度値の場合と同様に 3 個の検出器により得た測定値の平均値である。 $LB(N)*LT(N)$ の場合は反応度値が比較的小さく、測定精度は $\pm 0.5\%$ 程度であるが、反応度値の大きい 3 本制御棒 (約 $-4\% \Delta k/k$) などの場合には測定精度は $\pm 1\%$ 前後になった。一方、サンプル反応度値法により合成された反応度値の測定誤差は、補正係数の誤差と単一制御棒反応度値の誤差から誤差伝播則により求めた値である。サンプル反応度値法により求めた値には、補正係数の測定に用いたサンプルの種類が () で示されている。

取上げた制御棒パターンの干渉効果 ε^* は $+5\%$ ($T*O$) から -6% ($LB*LT$) にわたっている。3 本制御棒 $RT*LB*LT$ の場合は、みかけの干渉効果は -1% と小さいが、これは $RT*LB$ の正の効果 (約 $+5\%$) と $LB*LT$ の負の効果 (-6%) 等の合成の結果であり、それぞれの模擬制御棒間の干渉の効果は必ずしも小さくない。

サンプル反応度値法により求めた 2 本および 3 本制御棒の反応度値は直接測定によって得られた値と非常によく一致しており、測定精度も 1% 程度であった。直接測定との違いの程度や測定精度は、ここで取り上げた範囲では、干渉の大きさとは関係がない。反応度値の大きい 3 本制御棒の場合には、直接測定よりもサンプル反応度値法を用いた方が反応度値の測定精度が上がる傾向がみられる。これは、サンプル反応度値法により得られる値の測定誤差は制御棒本数が増えても単一制御棒反応度値や補正係数の誤差程度に止まるのに対し、直接測定の場合

$$* \quad \varepsilon = \left(\frac{\Delta \rho_{i_1} \cdots \rho_{i_l}}{\Delta \rho_{i_1} + \Delta \rho_{i_2} + \cdots + \Delta \rho_{i_l}} - 1 \right)$$

は取り扱う反応度値が大きくなるとともに、一般に、測定精度が悪くなる傾向があるためである。本実験で取りあげた制御棒パターンは干渉の効果が±5%程度と比較的小さかった。しかしながら、干渉の効果が大きくなっても補正係数の測定という点では困難はとくに生じないと考えられ、より広い範囲の制御棒パターンに対しても、サンプル反応度値法によって直接測定と同程度の精度で複数本制御棒の反応度値が測定できると考えられる。

第2章において、干渉の効果をあらわす補正係数の間には相反関係のあることを示した。

Table 4.4 に示した2本制御棒T*Oの反応度値は補正係数 $f_0(T)$ および $f_T(O)$ としてそれぞれ独立に測定した値を用いて求めた結果であるが、相反関係(4)式は、例えば $f_0(T)$ の値が、T点とO点における単一制御棒の反応度値と $f_T(O)$ とから得られることを示している。補正係数 $f_0(T)$ として測定値を用いる代わりに $f_T(O)$ から相反関係を使って求めた値を用いると制御棒パターンT*Oの反応度値は $-7.56 \pm 1.0 \rho_0$ となり、逆に $f_0(T)$ の測定値から得られる $f_T(O)$ を用いた場合には $-7.51 \pm 0.6 \rho_0$ となった。これはTable 4.4の値 $-7.53 \pm 0.6 \rho_0$ と良く一致している。このように、補正係数の測定を省略すると、結果として得られる反応度値の測定誤差は若干ふえる傾向にあるが、実用的には十分な精度で反応度値を求めることができる。

Table 4.3 Reactivity worth of single rod

| B ₄ C pin cluster | Position | Reactivity worth $-\Delta\rho(\rho_0\text{-unit}^*)$ |
|------------------------------|----------|---|
| B73-16P | O | 4.221 ± 0.19 |
| | T | 3.698 ± 0.26 |
| | RB | 3.897 ± 0.24 |
| | LB | 3.714 ± 0.23 |
| BN -16P | LB | 2.020 ± 0.09 |

$\rho_0 = 0.0411\% \Delta k/k$ (by Tomlinson's
delayed neutron data)

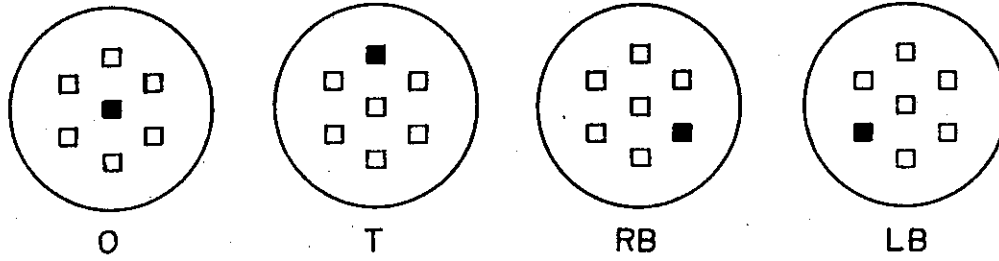
Table 4.4 Comparison of multiple-rod worths obtained by direct measurement and by sample worth method

| Rod pattern (a) | Worth $-\Delta\rho$ (ρ_0 -unit) ^(b) | | Interaction effect ϵ (%) ^(c) |
|-----------------|--|---|--|
| | Direct | Sample method (sample used) | |
| T*O | 75.3±0.8 | 75.3±0.6 (B90-1P) | -4.9 |
| T*B | 77.9±0.8 | 77.6±0.9 (B90-1P) | +5.3 |
| LB*LT | 69.7±0.4 | 69.6±0.7 (BN-16P) | -6.2 |
| LB(N)*LT(N) | 39.0±0.2 | 39.0±0.2 (B73-16P) | -3.5 |
| T*O*B | 112.4±1.2 | { 111.9±1.2 (B90-1P) 111.9±1.1 (B73-16P) | -3.2 |
| T*O*LB | 108.9±1.0 | 108.9±0.8 (B73-16P) | -6.4 |
| RT*LB*LT | 112.2±1.1 | 112.4±0.9 (B73-16P) | -0.9 |

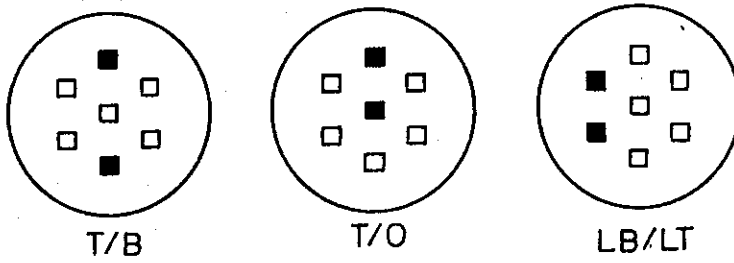
Notes: (a) Symbol N in the parentheses means BN-16P, while only rod position is given for B73-16P.
 (b) $\rho_0 = 0.0411\% \Delta k/k$ (by Tomlinson's delayed neutron data).

$$(c) \epsilon = \left[\frac{\Delta\rho_i + \Delta\rho_j + \dots + \Delta\rho_l}{\Delta\rho_i + \Delta\rho_j + \dots + \Delta\rho_l} - 1 \right] \text{ (direct measurement).}$$

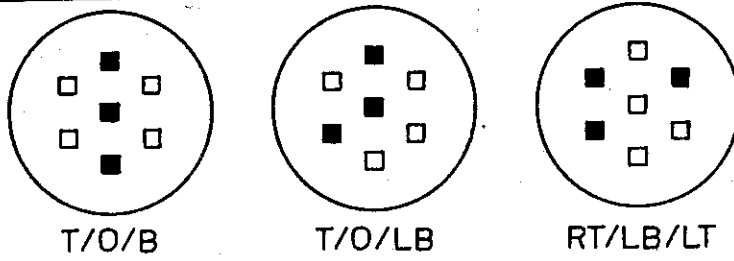
Single rod



Two rods



Three rods



Reference

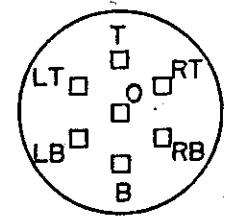


Fig. 4.1 Rod patterns used for the experiment

5. 結 論

サンプル反応度値法は、単一制御棒実験の組合せから、任意の複數本制御棒反応度値を実験的に求める方法である。サンプル反応度値法では、個々の制御棒挿入による干渉の効果を単一制御棒反応度値に対する補正係数としてあらわす。各制御棒による補正係数は、基準体系と対象とする制御棒1本を挿入した体系において測定したサンプル反応度値の比から求められる。本方法を用いることにより、測定すべき反応度値は小さくてすむ（高々2本制御棒程度）。また、実験に当って用意すべき制御棒は、対象とする制御棒の種類ごとに、1本ですみ、その他に、適当な大きさの反応度値をもつサンプルを用意すればよい。本方法の適用性を実験的に検証し、具体的な測定方法を確立する目的でFCAを用いて一連の実験を行った。

実験はFCVII-1/90Z-7集合体で行った。FCVII-1集合体は高速原型炉級の模擬炉心で、炉心は内炉心と外炉心の2領域から成り、炉心体積は約1,400ℓである。90Z-7は、特に、内炉心中心領域に7本の制御棒挿入位置（ナトリウム・チャンネル）が設けられた体系である。模擬制御棒およびサンプルにはB₄Cピンのクラスターを用いた。模擬制御棒として主に用いたB73-16PはB₄Cピン16本のピン・クラスターで、¹⁰Bの平均濃縮度73%、¹⁰B量は約1.8kgであり、炉心中心における反応度値は約-1.7%Δk/kであった。サンプルと補正係数の測定精度との関係を見るために、サンプルとして上記のB73-16PとBN-16PおよびB90-1Pの合計3種類のB₄Cピン・クラスターを用いた。BN-16Pは天然B₄Cピン16本、B90-1Pは90%濃縮B₄Cピン1本から成る。それぞれの¹⁰B量は0.5kgおよび0.14kgであり、¹⁰B量や組成はB73-16Pと大巾に異なる。それぞれの反応度値は、B73-16Pに比べて、BN-16Pが約1/2、B90-1Pは約1/7であった。

基準の体系は臨界体系であり、B₄C模擬制御棒やサンプルを挿入した未臨界体系の反応度を測定してそれらの反応度値を求めた。未臨界体系の反応度は中性子源増倍法により測定した。外部中性子源には体系に装荷されているPu燃料からの自発核分裂による中性子を利用した。径方向ブランケット中に3個の中性子検出器を設け、反応度観測値の信頼性を高めた。各検出器による反応度観測値には理論的補正をほどこし、測定方法や検出器位置に依存しない静的反応度を求めた。制御棒挿入体系におけるサンプル反応度値は、（制御棒+サンプル）挿入体系の反応度とその制御棒が単独で挿入された体系の反応度の差として求めた。

制御棒の干渉の効果をあらわす補正係数 $f_i(R_j)$ は、測定に用いた3種類のサンプルの反応度値が大巾に異なるにもかかわらず、互によく一致した値が得られた。測定精度は0.5~1%程度であった。B73-16Pサンプルに比べて反応度値が約1/7のB90-1Pサンプルを用いた場合測定精度はやや悪くなった。しかしながら、BN-16Pサンプルを用いた場合は、反応度値がB73-16Pサンプルの約1/2であるにもかかわらず、測定精度はほとんど変らなかった。いずれのサンプルを用いた場合も測定上の困難は特になかった。サンプルの反応度値が大きくなるとともに補正係数の測定精度が良くなる傾向にあること、反応度値が対象とする制御棒の1/2以上になると測定精度が事実上ほとんど変化しないことを考慮すると、実際の実験では、制御棒

の1/2 或はそれ以上の反応度値をもつサンプルを用いるのが望ましいと考えられる。サンプルの組成についても自由度は高く、例えばB₄C制御棒を対象とする場合は、サンプルの¹⁰B濃縮度は制御棒のそれとは無関係に選んでよいことが明らかになった。具体的には、高濃縮ボロン制御棒の干渉効果を測定する場合にも、サンプルには天然ボロンを用いることができる。また、一連の測定結果から制御棒の干渉効果を示す補正量の間に相反関係が成立することおよび補正量は制御棒の反応度値に比例することが実験的に確認された。

補正係数と単一制御棒反応度値からサンプル反応度値法により求めた2本および3本制御棒の反応度値は直接測定により得た値と非常に良い一致を示した。測定精度は両者とも同程度であり1%前後の場合が多かったが、反応度値の大きい3本制御棒の場合(約-4%Δk/k)には、直接測定よりもサンプル反応度値を用いた方が測定精度が上がる傾向がみられた。これは、サンプル反応度値法の測定誤差は、制御棒の本数が増えても、単一制御棒反応度値や補正係数の測定誤差程度に止まるためである。補正係数の測定を一部省略して相反関係を用いると、結果として得られる複数本制御棒の反応度値の測定誤差は若干増加するが、実用的には十分な精度で反応度値を求められることが確認された。

以上、補正係数の測定方法と測定精度との関係が明確になり、サンプル反応度値法によって、任意の複数本制御棒の反応度値の実験値が十分な精度で得られることが確認された。

本研究で取り扱った制御棒は干渉効果が±5%程度であった。しかしながら、(i) 補正係数の測定精度は干渉効果の大きさとは直接関係がないこと、(ii) 原型炉級の高速炉体系をモデルに、本方法の妥当性が、干渉効果20%程度まで、数値実験により確認されていることから、サンプル反応度値法は、原型炉級の複数本制御棒反応度値に対しては適用可能であると考えられる。

実用規模の大型高速炉、特に増殖性能の向上や正のナトリウム・ボイド効果減少の観点から最近検討の進められている非均質大型炉では制御棒の干渉効果が非常に大きくなると報告されている⁽¹⁰⁾。複数本制御棒の反応度値測定にサンプル反応度値法が広く応用されるためには、このような干渉効果の大きい体系についても本方法の妥当性(或は近似の程度)を検討することが必要である。この場合、数値実験による確認のみで十分であり、補正係数の測定方法は本実験で確立されたと考えてよい。

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管理機関の諸氏に感謝の意を表します。報告をまとめるに当り御支援をいただ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。

の1/2 或はそれ以上の反応度値をもつサンプルを用いるのが望ましいと考えられる。サンプルの組成についても自由度は高く、例えばB₄C制御棒を対象とする場合は、サンプルの¹⁰B濃縮度は制御棒のそれとは無関係に選んでよいことが明らかになった。具体的には、高濃縮ボロン制御棒の干渉効果を測定する場合にも、サンプルには天然ボロンを用いることができる。また、一連の測定結果から制御棒の干渉効果を示す補正量の間に相反関係が成立することおよび補正量は制御棒の反応度値に比例することが実験的に確認された。

補正係数と単一制御棒反応度値からサンプル反応度値法により求めた2本および3本制御棒の反応度値は直接測定により得た値と非常に良い一致を示した。測定精度は両者とも同程度であり1%前後の場合が多かったが、反応度値の大きい3本制御棒の場合(約-4%Δk/k)には、直接測定よりもサンプル反応度値を用いた方が測定精度が上がる傾向がみられた。これは、サンプル反応度値法の測定誤差は、制御棒の本数が増えても、単一制御棒反応度値や補正係数の測定誤差程度に止まるためである。補正係数の測定を一部省略して相反関係を用いると、結果として得られる複数本制御棒の反応度値の測定誤差は若干増加するが、実用的には十分な精度で反応度値を求められることが確認された。

以上、補正係数の測定方法と測定精度との関係が明確になり、サンプル反応度値法によって、任意の複数本制御棒の反応度値の実験値が十分な精度で得られることが確認された。

本研究で取り扱った制御棒は干渉効果が±5%程度であった。しかしながら、(i) 補正係数の測定精度は干渉効果の大きさとは直接関係がないこと、(ii) 原型炉級の高速炉体系をモデルに、本方法の妥当性が、干渉効果20%程度まで、数値実験により確認されていることから、サンプル反応度値法は、原型炉級の複数本制御棒反応度値に対しては適用可能であると考えられる。

実用規模の大型高速炉、特に増殖性能の向上や正のナトリウム・ボイド効果減少の観点から最近検討の進められている非均質大型炉では制御棒の干渉効果が非常に大きくなると報告されている⁽¹⁰⁾。複数本制御棒の反応度値測定にサンプル反応度値法が広く応用されるためには、このような干渉効果の大きい体系についても本方法の妥当性(或は近似の程度)を検討することが必要である。この場合、数値実験による確認のみで十分であり、補正係数の測定方法は本実験で確立されたと考えてよい。

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管理機関の諸氏に感謝の意を表します。報告をまとめるに当り御支援をいただ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) Nakano, M. : Proposal of a Method for Estimating Multiple-Rod Worth by Single-Rod Experiments, J. Nucl. Sci. Technol., 14 (6), 457 (1977).
- (2) Mizoo, N., et al. : Reactivity Measurement on Far-subcritical Fast System, Proc. Specialist Meeting on Control Rod Measurement Technique, Cadarache, April 1976.
- (3) Kaneko, Y., et al. : Measurement of Multiple Control Rods Reactivity Worths in Semi-Homogeneous Critical Assembly, *ibid.*, 1976.
- (4) Mitani, H. : Estimation of Multiple Control Rod Worth with Strong Interaction Effect in Large Fast Reactors, J. Nucl. Sci. Technol., 13 (9), 517 (1976).
- (5) Iijima, T., et al. : JAERI-M 6710, pp41 (1976).
- (6) 溝尾宣辰, 中野正文 : JAERI-M 7139 (1977).
- (7) 溝尾宣辰 : JAERI-M 7135 (1977).
- (8) Tomlinson, L. : AERE-R 6993 (1972).
- (9) Collins, P. J., McFarlane, H. F. : NEACRP-L-222 (1978).