

JAERI-M

6066

高速炉体系における大きな負の
反応度の測定 (I)

1975年3月

溝尾 宣辰・中野 正文・向山 武彦・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 (I)

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

溝尾宣辰・中野正文・向山武彦

趙 満*

(1975年2月13日受理)

大きな負の反応度の測定は、LM-FBRにおける安全性および経済性の問題として提起されている。本研究は、FCA VI-2 B2 集合体において、特異点のある深い未臨界体系を作り、体系の反応度の測定および計算を行ったものである。

特異点としては、90%および80%濃縮 B_4C ピン・クラスターを3種用意し、約-2ドルから最大-7ドルの負の反応度をもつ7種の体系を構成した。測定は、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)およびRod drop法(RD法)を用いた。JAERI-FAST2を6群に縮約して、2次元拡散コードにより動特性パラメータおよび反応度の計算を行った。ただし、 B_4C ピン・クラスターの部分は、衝突確率法により実効断面積を計算した。観測値の位置依存性や測定法による違いは、厳密な補正を施すことによりほぼ解消した。

本稿は、体系の説明、各種測定法の観測値とその傾向や特徴、計算手法およびその結果について記述したものである。実験に関する詳細、補正法および得られた実験値については、各測定法ごとに別稿にて詳述する。

SM法の観測値は、 B_4C ピン・クラスターとの位置依存性が極めて強いが、遠方に行くにしたがい一定値への収束的傾向が見られた。そして、この値はCBT法や計算の結果と良く一致している。PNS法およびSJ法においては、観測値は点状中性子源との位置依存性が強く現れることが判明した。

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

Nobutatsu MIZOO, Masafumi NAKANO, Takehiko MUKAIYAMA and Mann CHO*

Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

(Received February 13, 1975)

Reliable knowledge of the subcriticality of a fast reactor system is important for safety and economy in operation of an LMFBR. Experimental and theoretical studies have been made for the negative reactivities of a far-subcritical system with singularity.

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. Critical balance technique (CBT), and source multiplication (SM), pulsed neutron source (PNS), source jerk (SJ) and rod drop (RD) methods were used for the experiments. Kinetic parameters and reactivities were calculated with 2-dimensional diffusion theory using 6 energy group constants condensed from JAERI-Fast-2, with the effective cross sections for each B_4C pin cluster obtained by collision probability calculation.

The following are described : the systems, tendencies and features of the reactivities in each method, procedure of the calculations and the results. The experiments and results including the correction in each method will be given in later reports.

The measured reactivities by the SM method have large spatial effect due to singularity of the B_4C pin cluster for the detector set in and near the assembly. However, the detectors far from the assembly give position-independent results, which agree with those by the CBT method and by calculation in each system. Large spatial effect arising from the position of a point neutron source is observed in the measured reactivities by the PNS and the SJ methods.

* Korea Atomic Energy Research Institute.

目 次

1. 序 論	1
2. 実験体系の構成	4
2.1 基準体系	4
2.2 標準反応度	4
2.3 B ₄ Cビン・クラスター	5
2.4 測定体系	5
3. 反応度の測定	17
3.1 臨界つり合い法による測定	17
3.2 未臨界法による測定	17
3.2.1 中性子源増倍法による測定	18
3.2.2 パルス中性子源法による測定	19
3.2.3 中性子源引抜き法による測定	19
4. 反応度およびその他の核計算	25
4.1 計算の過程	25
4.2 B ₄ Cビン・クラスターの実効断面積	26
4.3 臨界性	27
4.4 動特性パラメータ	27
4.5 各測定体系の反応度	28
5. 討 論	34
謝 辞	35
参考文献	35
付 録	36

1. 序 論

大きな負の反応度の測定法の問題はLMFBRにおける安全性および経済性の立場から提起されている。具体的には、shut down marginとか燃料交換時の安全の確認などが考えられる。この実際的な要求に即して、最適の条件をそなえた測定法を考えておかなければならない。高温、高γ線レベルやノイズの多い測定環境は使用出来る検出器の種類に制限を与えるであろう。実炉の構造上、検出器の設置出来る位置にも制約がある。あるいは測定法に伴って必要とする器機を設置するだけの空間があるかどうかによって、実用出来る測定法かどうか厳しく制限されることになる。さらに、作業の進行に伴ってon-line的に、即座に体系の反応度を求められるような測定法であることも必要な条件となる。

このような条件を考えると、LMFBRにおける測定法としては、パルス中性子法(PNS法)や中性子源引抜き法(SJ法)は適用困難と考えられる。Rod drop法(RD法)では、十分に深い未臨界系において、データの蓄積に困難が予想される。中性子源増倍法(SM法)の場合には、臨界近く、あるいは浅い未臨界体系での反応度較正の適用限界が問題になって来る。

安全性を最大限に強調して、炉内の状況を十分に把握出来ない場合を想定すれば、反応度較正を必要とする手法は好ましくない事になる。あるいは、補正計算において、正確な炉心構成の情報を要求する測定法では、このような事態に対処出来ない。理想的な測定法としては、任意の体系において、その体系からの実験的情報のみでその体系の反応度を決定出来るもの、となる。補正計算については、その計算規模の大小や必要とする時間が問題である。

現在LMFBRでは、-30\$において±20%の精度で測定することが目標とされている。-2~-3\$の浅い所では多種の測定法が適用されるが、深い所はSM法が主体となっている。このSM法は、-2~-3\$の所で他の測定法により較正し、深い未知反応度の体系については、計算による補正を行う。浅い所での測定法は、上記の制約上、RD法やノイズ法が注目されている。さらに検出器としては、核分裂計数管が唯一の実用上使用可能なものとされている。

これに対して、臨界実験装置における実験は制約が大きく緩和されている。そして、ここでの実験は別の意義をもつことになる。まづ第一段階としては種々の測定法を用い、各測定法に合った厳密な補正を行うことにより、体系の真の反応度を知ることである。そして次の段階として、上に述べた測定条件下のLMFBRへの適用において、どの測定法でどのようなデータ処理が誤差も含めて最も適しているかを追求することになる。

未臨界度の指標としては、実効増倍係数(静的な計算における第一固有値 k_{eff})を用いて、 $\rho = (k_{eff} - 1) / k_{eff}$ により定義するのが一般的であり簡便である。ただし、この量は系の未臨界度が深くなるにつれて、体系全体の実際の中性子の生成/損失とは一致しなくなる。後者は、その系の中性子源の分布状況にも敏感に依存することになる。すなわち、体系全体の実際の中性子の生成/損失は、体系固有の量とはいえず、未臨界度の指標としては不適当と考える。

上述のように反応度を定義すれば、各測定法における測定値を定義されたものになるように、実験の補正を行わなければならない。測定法の理論的背景として1点炉モデルの動特性方程

式がある場合、この式の中の反応度 ρ と実際の測定の場合との差異を吟味する必要がある。1 点炉モデルの動特性方程式の導出にあたって、重み関数が、静的な随伴方程式の第 1 固有関数であれば、動特性方程式の中の ρ は確かに前述の反応度 $\rho = (k_{eff} - 1) / k_{eff}$ に一致する。そして、実験的立場からは、この重み関数は検出器に対する寄与の割合を示す分布関数（検出器の分布関数）と物理的に解釈することが可能である。一般的に、この検出器の分布関数は第 1 随伴固有関数と異っており、したがって検出器の見こむ系の反応度（検出器の観測値）は定義された ρ と異なる可能性がある。未臨界系の反応度の測定において、しばしば検出器の位置によって反応度の観測値が異なるのも、それぞれの位置によって検出器の分布関数が異なることに起因すると考える。そこで、各検出器の反応度の観測値は、式によって表現出来て、定義された系の反応度 ρ の式との差異を計算によって各測定法毎、各検出器位置毎に補正することが考えられる。この補正の結果、定義に合った実験的な系の反応度（実験値）を得ることになり、各測定法間および計算値との比較が意味をなすことになる。なお、この補正は検出器の実効的効率に対する補正係数、中性子源の実効的強度に対する補正係数等に分けて用いることが出来る。

以上のことをふまえて、FCAにおいて未臨界系の反応度を得ることを試みた。実験を行った体系は VI-2B2 集合体である。これは VI-2 集合体⁽¹⁾の軸方向ブランケットを劣化ウラン酸化物およびナトリウムに変更したものである。VI-2 集合体は高速原型炉「もんじゅ」の内側炉心を模擬した試験領域をもち、その外側を濃縮ウラン燃料のドライバーで取り巻いた 2 領域ゾーン体系である。VI-2B2 集合体の基準体系は、その試験領域内にナトリウム・チャンネルを有して臨界になっている。未臨界系は、そのナトリウム・チャンネルを 90% あるいは 80% 濃縮 B_4C ピン・クラスターで置換して実現した。測定法は、臨界つりあい法（CBT 法）、SM 法、RD 法、SJ 法、PNS 法を用いて、同一体系の反応度の測定を行った。FCA においては、このような特異点のある大きな負の反応度の測定は、高速実験炉「常陽」の模擬実験において、CBT 法、SM 法および PNS 法によって行った⁽²⁾。CBT 法は燃料の在庫量の関係で $\sim -2.5\% \Delta k/k$ 迄用いられたが、SM 法に比べ 2~3% 浅い未臨界度を示した。PNS 法は $\sim -7\% \Delta k/k$ 迄測定されたが、SM 法に比べ約 10% 浅い未臨界度を示した。なお、この「常陽」模擬実験においては、前述の計算による補正は行なわれなかった。しかしながら、SM 法では 10 個の検出器の観測値の重みつき平均により実験値を定め、この実験値は種々の模擬制御棒挿入パターンについて、相互に矛盾なく、また計算値対実験値（C/E）も 1.00~1.03 の間にランダムに分散していた。今回の VI-2B2 集合体における実験でも、SM 法における検出器位置は前回とほぼ同様とした。ただし、計算による補正の方法を検証するため、体系内の位置を重視し、体系内に 1 系統増設し計 11 個の検出器によって測定した。今回も前回と同様に、炉心外の遠くにある検出器は一定値に収束する傾向が認められた。今回新たに用いられた SJ 法は、コック・クロフト加速器のビーム・シャッターを閉じることにより中性子源引き抜きを瞬時に行った。RD 法は FCA の制御棒、安全棒をスクラムにより全引抜き（ ~ 600 ms）、およびドブブラー駆動装置を用いた B_4C ピン・クラスターの引抜き（ ~ 3 sec）によって行った。PNS 法、SJ 法および RD 法などの時間変化を追う実験では、PDP-9 小型電子計算機を利用した。測定データは磁気テープに収められ、計算センターの大型計算機によりこのテープを読み取って、本格的な処理を行った。

多群計算において、群定数はJAERI-FAST (version 2)⁽³⁾の25群を使用した。B₄C特異点の部分は衝突確率法を用いて実効断面積を求めた。系全体の計算は6群縮約の2次元拡散計算である。

前に述べたごとく、臨界集合体における実験の第一段階として、多種の測定法で、それぞれに補正を施して各系の反応度を求めたので、その結果を報告する。この一連の研究について、本稿は、体系の説明、各種実験法および得られた観測値、その特徴および傾向、計算の手法およびその結果について記述したものである。実験に関する詳細、補正法および得られた実験値に⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾ついては、各測定法ごとに稿を別にして詳述する。

2. 実験体系の構成

2.1 基準体系

VI-2 B2 集合体の炉心部は試験領域とドライバー領域により構成された2領域ゾーン体系である。試験領域およびドライバー領域の組成は、VI-2 集合体⁽¹⁾のそれらと全く同様であり、前者は「もんじゅ」の内側炉心を模擬したPu燃料の領域であり、後者はU-235燃料の領域である。

径方向ブランケットは、炉心部長さ迄は天然ウランブロックとし、さらにその外側(軸方向に)を20.32 cm 厚の劣化ウランブロックにより構成している。軸方向ブランケット(炉心部分のみの軸方向)は、ナトリウムおよび劣化ウラン酸化物(DUO₂)により構成された模擬ブランケットで、厚さは35.56 cmとなっている。

VI-2 B2 集合体の制御安全棒はVI-2 集合体のそれらと同組成、同位置にある。すなわち、14-14とX軸、Y軸に対称な4点に設置されている。

この集合体の試験領域には2引出し分の断面(5.52^{cm} × 11.04^{cm})をもつ1本のナトリウム・チャンネルが存在し、(17-18, 18-18)にある場合をNC体系、(14-18, 15-18)にある場合をNP体系と称している。両体系はともに臨界体系であり、この実験の基準体系である。各部の組成をまとめてTable 1 に示しておく。セルのパターンは全てVI-2 集合体のそれと同様である。ナトリウム・チャンネルは、炉心部長さ迄を全てナトリウム板で装填し、軸方向ブランケット部は、前述の模擬ブランケットにより構成している。

VI-2 B2集合体の断面図をFig.1 に示す。18-5から18-10迄の固定側第一パック(5.08^{cm})はコック・クロフト加速器の延長管で占有されている。この円筒炉心の中心水平断面図をFig.2 に示す。

本実験はNC, NP体系のナトリウム・チャンネルをB₄Cビン・クラスターに置換して未臨界系を実現し、それらの体系の反応度測定を目的とする。したがって、基準体系(NC, NP体系)と未臨界体系の間にはほぼ共通と考えてよいGap効果の測定は省略した。また、実験目的から2次元解析を主体とするので、VI-2 B2集合体のC/R, S/R singularity およびEdge効果の測定は必ずしも必要でなく、これらの測定も省略した。Table 2 に実験体系の諸元および余剰反応度値をNCおよびNP体系について示しておく。その他の特性はVI-2相当と考えここの記述は省略する。

2.2 標準反応度

制御棒の較正はVI-2 集合体の場合と対向のNo.10 S/Rの0.00~50.00^{mm}の反応度値を単位(1 ρ_0)として求めた。NC体系およびNP体系の制御棒較正曲線をFig.3~4に示す。

標準反応度 ρ_0 の絶対値を求めるのは、通常行なわれているようにNo.10 S/Rが50.00^{mm}で臨界になっている体系(Pu燃料による中性子源が存在するため出力が無限大の場合の外挿臨界点)において、これを0.00^{mm}に挿入したときの出力倍増に要する時間 T_D より求め

た。 T_D の測定は従来のストップ・ウォッチによる方法の他に PDP-9 小型電算機を使用する方法も行って比較した。この方法は、FOAの核計装 CH.6 の出力レベルを3秒毎に測定してデジタル量として記録し、後に $N_0 \exp\left(\frac{t}{T}\right)$ に最小二乗法により fitting を行ってペリオド T を求め、同時に T_D を知るものである。NC体系およびNP体系において測定された T_D を Table 3 に示す。測定結果は両方法の間に有意の差を認めることが出来るが、測定値の数および各測定の精度を考慮して、最小二乗法による値を採用した。

逆時間方程式に使用する $\beta_{eff, i}$ の算出法は 4.4 に述べるように、6群の2次元 R-Z 計算により求めた。遅発中性子データは Keepin-Sandmeier⁽⁸⁾ の他に Tomlinson⁽⁹⁾, Kriek & Evans⁽¹⁰⁾ の3種によりそれぞれ ρ_0 を求めた。Tomlinson の場合に比べて Keepin-Sandmeier は約3%小さく、Kriek & Evans は1%大きな値を示す。我々は中間の値を示す Tomlinson の値を採用して、各体系の ρ_0 および β_{eff} を Table 4 に示す。

2.3 B₄Cピン・クラスター

今回の実験では負の反応度の大きさをいろいろ変える目的で3種類のピン・クラスターを用いた。それぞれ7ピン、16ピン、32ピンで構成されている。個々のピンはB₄Cペレットと、それらを入れるSUSのチューブより成っている。7ピン・クラスターは「常陽」模擬制御棒用に作られたカランドリヤに7本のB₄Cピンを挿入したものであり、燃料用引出しに入れて炉心に装荷される。16ピン・クラスターは断面がピンを4×4本の正方形に組み上げてあり、引出しには入れずに、そのまま炉心の格子に挿入される (Photo.1 参照)。32ピン・クラスターは上記の16ピン・クラスター2本により構成され、隣接する2本の格子に1本ずつ挿入され、格子番号18-18と17-18に入れられた場合に最も深い未臨界状態になる。(Photo.2 参照)。7ピンおよび16ピン・クラスターには90%濃縮ボロンのB₄Cペレットが使われているが、32ピン・クラスターの場合には手持ちB₄Cペレットの制限により、1本(16ピン)には90%濃縮B₄Cペレットを、他の1本(16ピン)には80%濃縮B₄Cペレットを用いている。B₄Cペレットの化学組成、同位元素存在比を Table 5 に示し、ペレットおよびピンの寸法、重量を Table 6 に示す。各ピン・クラスターの断面を Fig.5 (a), Fig.6 (a), Fig.7 (a) に示した。各種ピン・クラスターの原子数密度を Table 1 に示す。

2.4 測定体系

それぞれ系の反応度を異にする7体系について系の反応度の測定を行った。すでに記述したように、VI-2 B2集合体の基準体系は中心(17-18および18-18)にナトリウム・チャンネルをもったNC系と、周辺(14-18, 15-18)にナトリウム・チャンネルを持ったNP系がある。さらに、これらのナトリウム・チャンネルに置換すべきB₄Cピン・クラスターとして、7ピン・クラスター90%濃縮B₄C(B-7)、16ピン・クラスター90%濃縮B₄C(B-16)およびB-16に16ピン・クラスター80%濃縮B₄Cを追加した(B-32)の3種がある。本実験においては、NC系で上記3種のB₄Cピン・クラスターで置換した5体系、およびNP系でB-7およびB-32で置換した2体系、計7体系について反応度測定を行った。各体系にはそれぞれ名称を付した。名称の構成は、例えばNC系でB-7で置換した場合、この体系をBC-7体系と呼び、NP系でB-32で置換した場

合、これをBP-32体系と称し、以下同様である。Table 7 に名称、B₄Cピン・クラスターの位置の一覧表を示してある。注意すべきことは、BC-7では18-18、BP-7では14-18の引出しが置換されており、BC-32体系では、18-18が90%濃縮、17-18が80%濃縮のB₄Cピン・クラスターにそれぞれ置換されているのに対して、BP-32体系では、14-18が90%濃縮、15-18が80%濃縮のB₄Cピン・クラスターにそれぞれ置換されている。体系の反応度測定における、FCAの制御棒位置はBC系ではNC系の臨界時における位置、BP系ではNP系の臨界時における位置にしてある。炉の構成、形状は完全に基準体系のそれらを保持しているから、NC系とBC系、NP系とBP系では、それぞれ該当のナトリウム・チャンネルがB₄Cピン・クラスターに置換された効果のみが生じるようにしてある。

BC系は特異点のある対称性のよい未臨界系における反応度測定を目的とし、BP系は特異点のある対称性の良くない未臨界系の反応度測定を目的としている。これらの体系は対称性に関して両極限を示していると考えられる。例えば、2本のB₄Cピン・クラスターが炉心中心に対して180°の角度で存在する場合よりも90°の角度で存在している方が、一般的には対称性が悪いと考えられ、したがって両者が隣接した場合は対称性が最も悪い極限としてとらえられる。すなわち、これがBP系である。当然ながらBC系に比べてBP系は測定条件が悪く、検出器の観測値の位置依存性は、特にSM法の場合顕著に表われる。多数本の制御棒の入った状態や、制御棒の干渉効果の測定などを考えると対称性の良くないBP系の状態の方が実際に即している。しかし中心に特異点を持ったBC系は、計算にあたって近似が少なく、特異点を含む系の解析に関しては基本的な体系と考えられる。BC-32 (F)およびBC-32 (M)は、BC-32が固定側半分または移動側半分のみが置換された状態である。これは軸方向に非対称な体系の構成である。観測値の位置依存性は、径方向非対称な系とは、別の様相を呈する可能性が有る。VI-2 B2集合体では、軸方向にはドライバーが無く、ブランケット組成も径方向のそれと異なっている。これらの相異も考慮におく必要がある。

各体系の動特性パラメータの計算は標準体系と同様の手法により計算され、Table 8 に示してある。計算の詳細は後章で述べるが、6群縮約2次元R-Z拡散計算であり、ソースデータはJAERI-FAST (version-2)およびTomlinsonである。表中のBC/7C、BP/7CはそれぞれBC-7、BP-7体系にドライバーを追加して臨界体系にしたものである。これは後章で述べるように、CBT法のために構成された体系である。実効遅発中性子の割合 β_{eff} は¹⁰B量の増加にしたがい、次第に大きくなるがBC-32体系でもNC体系に比べて3%の増加であり、それほど大きく変化するものではない。一方、即発中性子寿命 β_0 は¹⁰B量が増えるにしたがい、次第に短くなって行くが、その変化は極めて大きい。BC-32体系ではNC体系に比べ β_0 は10%以上短くなっている。BC-7体系とBC/7C体系では β_0 に関してほぼ同じ値であることは注目される。なお、これらの計算はR-Z計算の関係上NC、BC系についてのみ行い、同じ値をそれぞれのNP、BP系に採用した。また、これらの動特性パラメータの計算に際して用いられた中性子束、随伴中性子束は固有値計算の結果のそれらである。表の脚注の $\sum_{i,m} \beta_{\text{eff } i}^m / \lambda_i^m$ はS.J法のデータ処理において使用されるものである。

Table 1 Atomic number densities

(10^{22} cm^{-3})

Nuclide	Core					Blanket			Nach.	B_4C (hetero.)								
	Test Driver	S/R	NT	SCR-homo	Pu-driver	Radial	Axial	Axial-2-Plate		7-pin	16-pin	32-pin	7-pin		16-pin(90%)		16-pin(80%)	
									B_4C	Na	B_4C	SUS	B_4C	SUS	B_4C	SUS	B_80T	B_90T
Pu-239	0.10458			0.0893	0.0339	0.0523											0.0893	
Pu-240	0.00933			0.0080	0.0030	0.0047											0.0080	
Pu-241	0.00092			0.0008	0.0003	0.0005											0.0008	
U-235	0.00152	0.28483	0.67794	0.0013	0.2209	0.1718	0.0289	0.0086	0.00187								0.0013	
U-238	0.69057	0.68915	0.05124	0.5898	0.6445	0.6806	3.9885	4.0070	0.9228								0.5898	
O	1.7286	1.3619		1.4764	1.3844	1.3619			1.8596								1.4764	
Na	0.7656	0.7656		0.8773	0.7115	0.7656			0.7656	1.5312	1.0229						0.6539	
Al	0.2403	0.9079	1.6951	0.2052	0.7473	0.9079											0.2052	
Cr	0.3413	0.3134	0.2511	0.3563	0.3180	0.3273	0.1827	0.1827	0.3134	0.4443	0.4771	0.4368	0.4544			0.9470	0.3604	0.3552
Fe	1.2504	1.1504	1.0547	1.3066	1.1760	1.2004	0.6652	0.6652	1.1504	1.6356	1.7370	1.5905	1.6542			3.4466	1.3186	1.3000
Ni	0.1566	0.1420	0.1094	0.1636	0.1444	0.1493	0.0796	0.0796	0.1420	0.2044	0.2080	0.1904	0.1981			0.4129	0.1638	0.1615
B-10											2.1273	4.8484	4.5327	9.6965		8.4095	0.6153	0.7074
B-11											0.2322	0.5232	0.8513	1.0583		2.3400	0.1712	0.0772
C											0.5628	1.2826	1.2763	25651		25326	0.1853	0.1871

Table 2 Critical parameters of Assembly VI-2 B2

	Experiment	Calculation
R (test zone)	29.38 (cm)	
R (driver)	46.85 ± 0.05 (cm)	
R (blanket)	72.17 (cm)	
V (test zone)	247.97 (ℓ)	
V (whole core)	630.5 ± 1 (ℓ)	
Pu- fissile	101.64 (Kg)	
U - 235 (driver)	424.95 ± 0.8 (Kg)	
k - effective	1.000	0.998

Table 3 Measured doubling time for $1 \rho_0$

	Power	NC	NP
Stop watch	$(0.2 \rightarrow 0.4) \times 10^{-6}$ A	70.8 sec	69.5 sec
	$(0.3 \rightarrow 0.6) \times 10^{-6}$	71.6	70.0
	$(0.4 \rightarrow 0.8) \times 10^{-6}$	72.6	70.8
	$(0.2 \rightarrow 0.4) \times 10^{-5}$	72.8	71.5
	$(0.3 \rightarrow 0.6) \times 10^{-5}$	72.8	71.2
	$(0.4 \rightarrow 0.8) \times 10^{-5}$	73.8	71.7
Least square fitting		73.80 ± 0.03	72.00 ± 0.03

ρ_0 : 0 ~ 50.00 mm of S/R No 10

Table 4 β_{eff} and standard reactivity ρ_0

System		NC	NP
ρ_0 (% $\Delta k/k$)		0.04903	0.05000
β_{eff}^m (%)	Pu- 239	0.0600	
	Pu- 240	0.0017	
	Pu- 241	0.0020	
	U - 235	0.3403	
	U - 238	0.1909	
β_{eff} (%)		0.5950	

By Tomlinson's delayed data.

Table 5 Chemical and isotopic analysis
of B₄C pellet

90 % B ₄ C		80 % B ₄ C	
B	779 w/o	B	77.95 w/o
C	21.2 "	C	21.65 w/o
Fe	0.13 "	Fe	800 ppm
Si	0.20 "	Ca	113 ppm
Al	0.05 "	Al	<200 ppm
B ₂ O ₃	< 0.1 "	B ₂ O ₃	0.045 w/o
Ti, Cu, Mn, Na	<100 ppm	Ti, Cu, Mn	420 ppm
Cl + F	<100 ppm	Halogens	< 70 ppm
Co	< 50 ppm	Co	10 ppm
¹⁰ B (a/o)	90.16 ± 0.02	¹⁰ B (a/o)	79.914 ± 0.004

Table 6 Specification of B₄C pellet and pin

		90 % B ₄ C pin	80 % B ₄ C pin
Dimension (mm)	Pellet	11.0 φ × 15.0 L	11.0 φ × 45.3 L
	Pin tube	length	457.2
		inner dia.	11.1
		SUS thick.	1.0
Weight/pin (gr)	B ₄ C	100.64	100.02
	SUS	141.74	141.73

Table 7 NC, NP, BC and BP system configurations

Lattice no. System	18-18	17-18	14-18	15-18
NC	Na	Na	Fuel	Fuel
BC-7	B-7	Na	Fuel	Fuel
BC-16	B-16(90%)	Na	Fuel	Fuel
BC-32	B-16(90%)	B-16(80%)	Fuel	Fuel
BC-32(F)	B ₄ C is only in fixed half		Fuel	Fuel
BC-32(M)	B ₄ C is only in movable half		Fuel	Fuel
NP	Fuel	Fuel	Na	Na
BP-7	Fuel	Fuel	B-7	Na
BP-32	Fuel	Fuel	B-16(90%)	B-16(80%)

Table 8 Kinetic parameters for the measured systems*

System	β_{eff} (%)	ℓ_p (10^{-6} sec)	A (10^{-6} sec)
NC, NP	0.595	0.272	0.270
BC-7, BP-7	0.603	0.253	0.255
BC-16	0.608	0.244	0.249
BC-32, BP-32	0.614	0.235	0.243
BC/7C, BP/7C	0.607	0.254	0.253

* Calculated values by 6-group 2-D diffusion eq.(R-Z) with Tomlinson's delayed data.

$$\frac{1}{\beta_{eff, i, m}} \sum \frac{\beta_{eff, i}^m}{\lambda_i^m} = 11.258 \text{ sec. for NC system.}$$

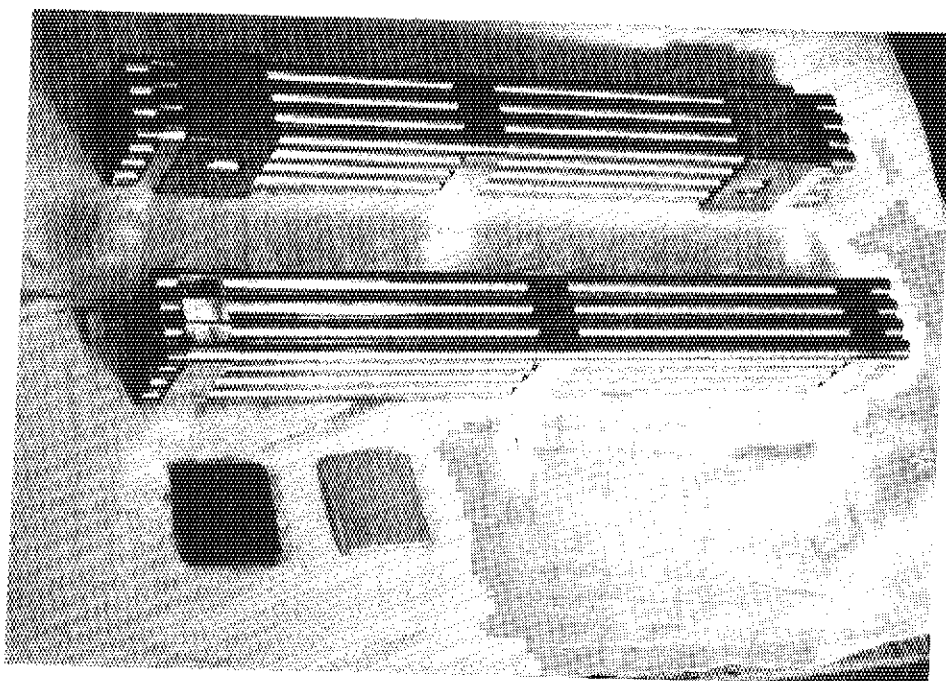


Photo. 1 B₄C 16-pin clusters

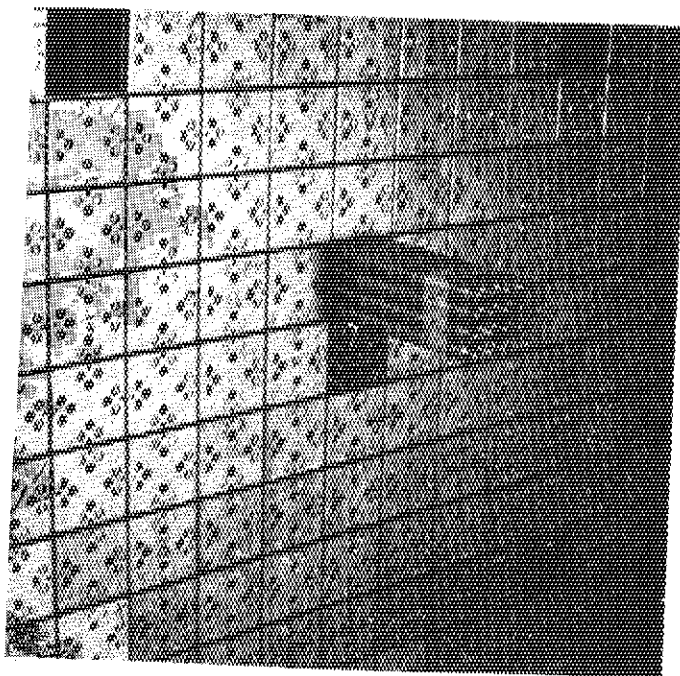


Photo. 2 B₄C 32-pin cluster in assembly VI-2 B2

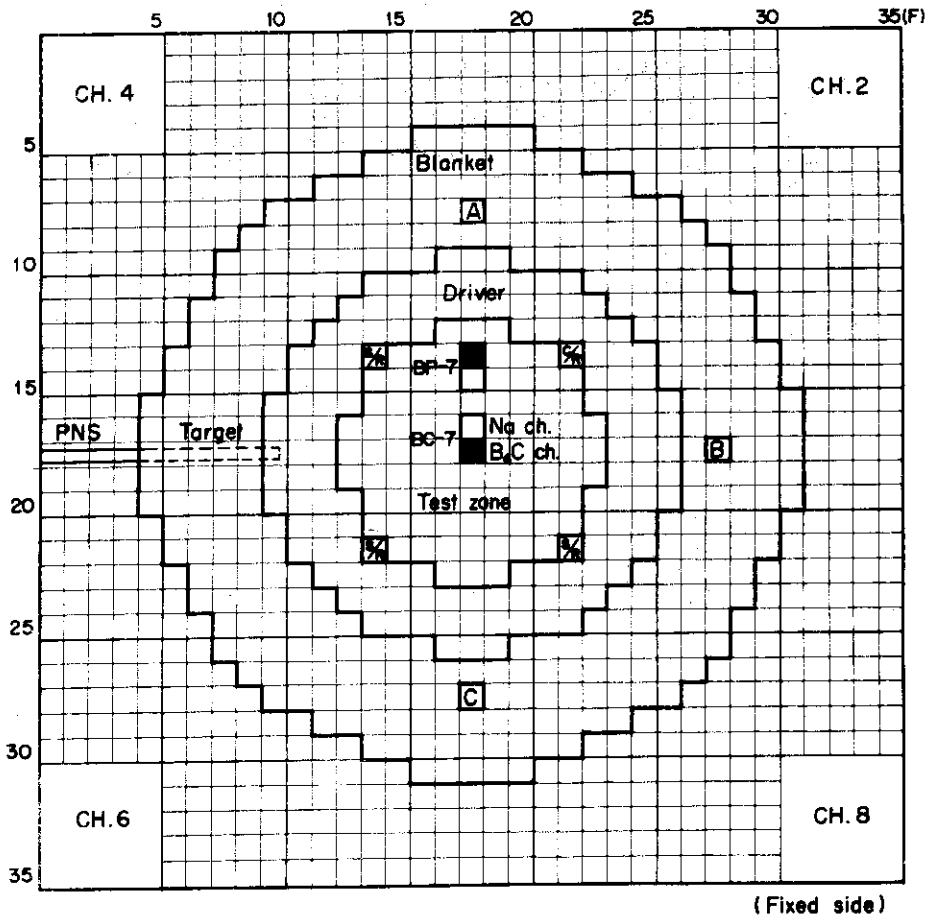


Fig. 1 Detector arrangement in the core (BC-7 or BP-7 system)

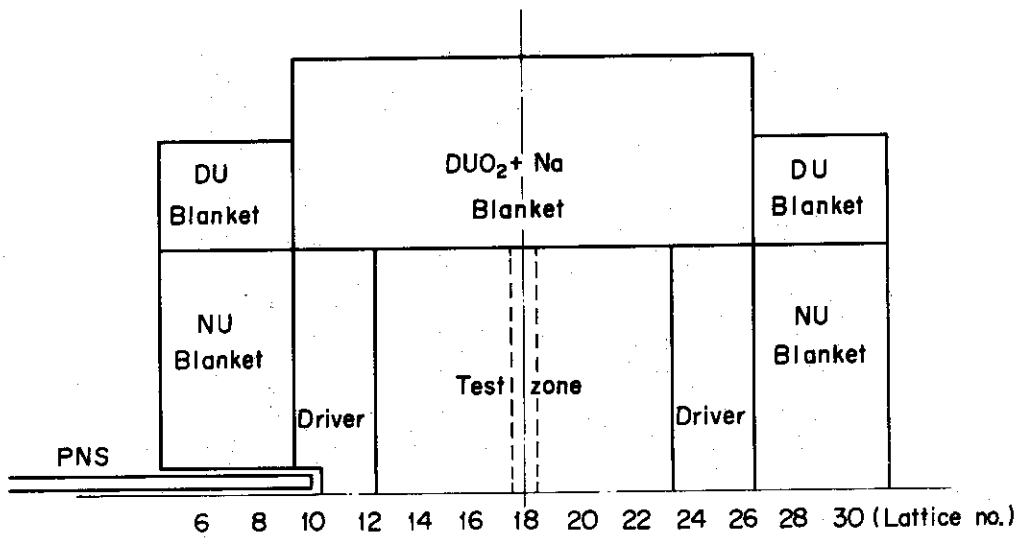


Fig. 2 Horizontal cross section of VI-2 B2 NC system

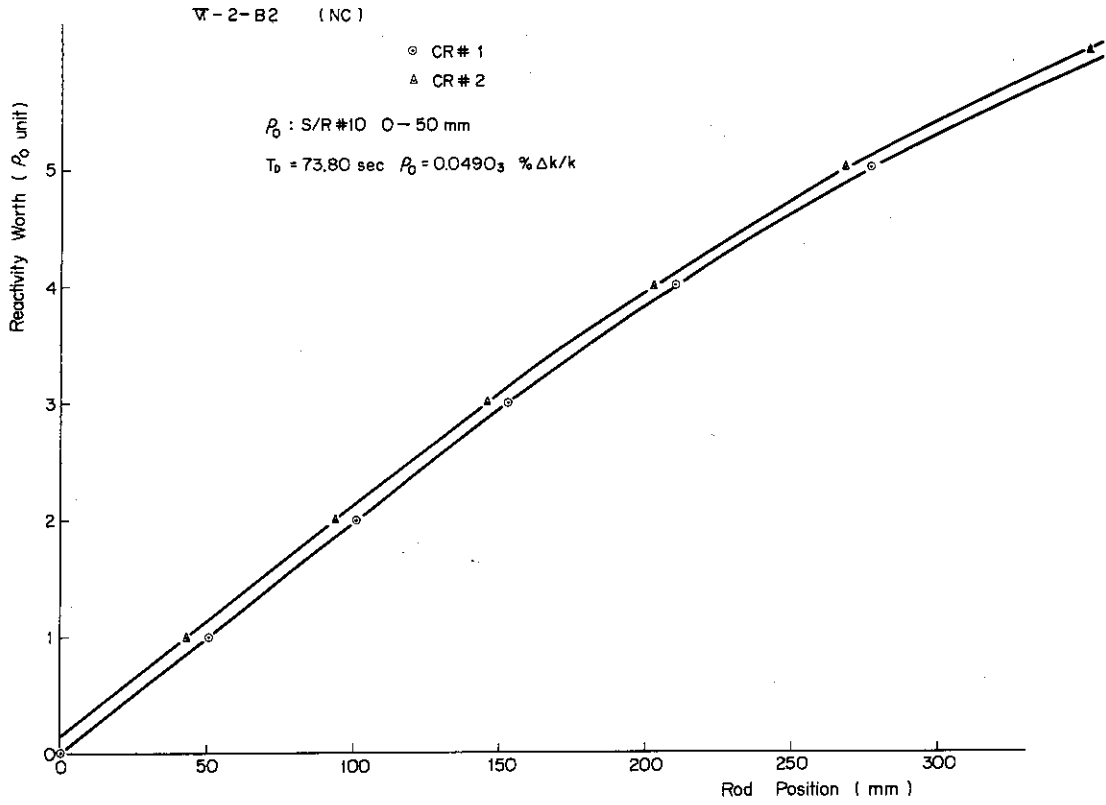


Fig. 3 Calibration curve of control rods of assembly VI-2 B2 (NC)

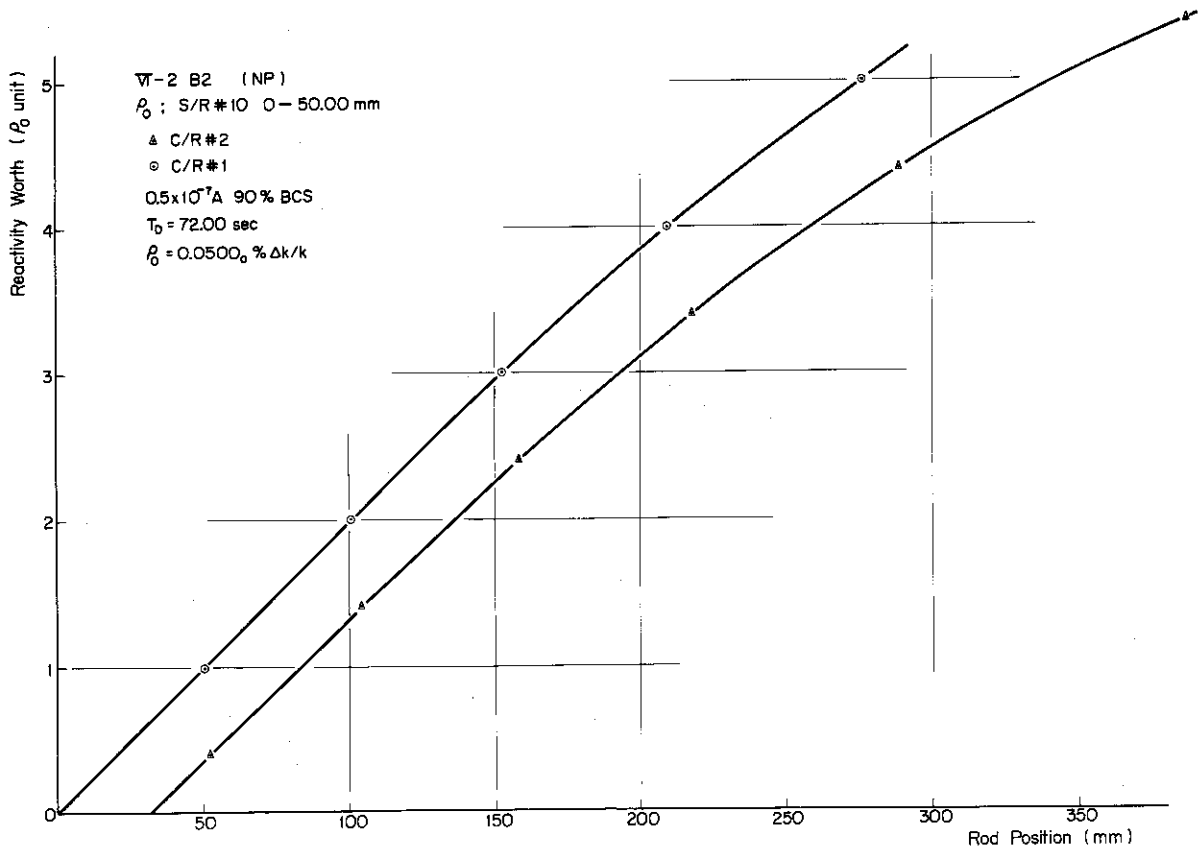
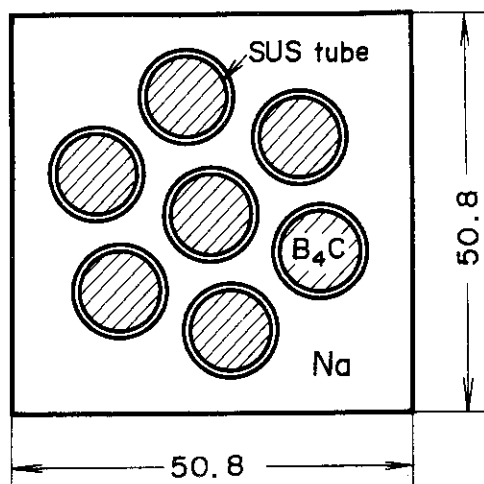
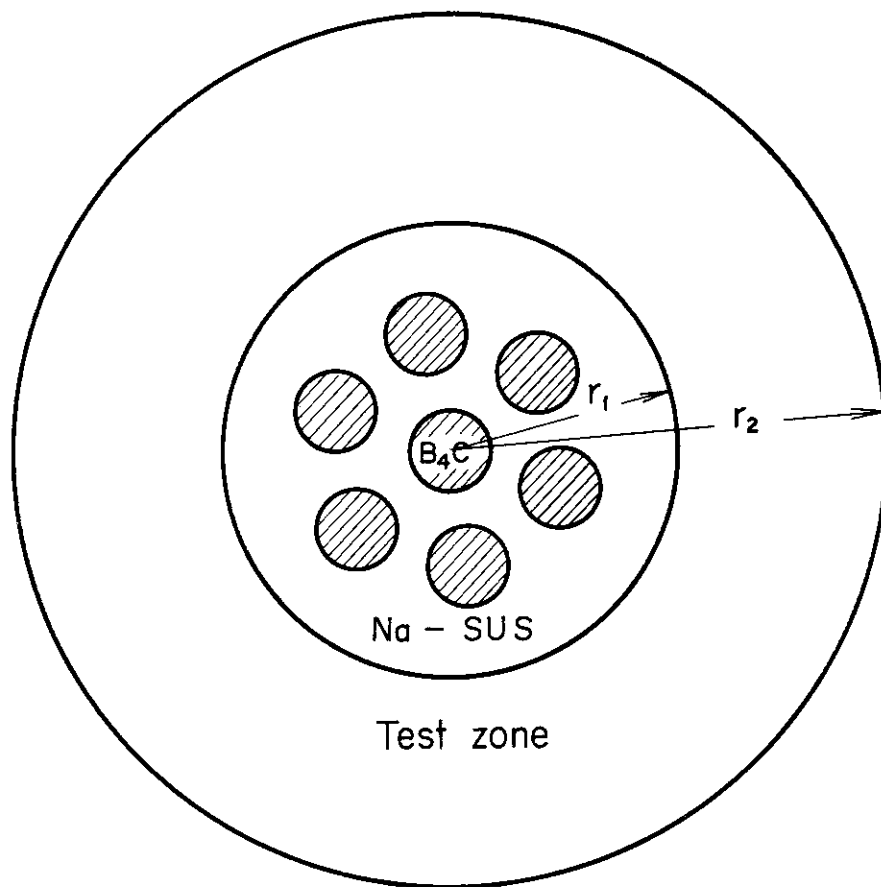


Fig. 4 Calibration curve of control rods of assembly VI-2 B2 (NP)



B_4C pellet $11.0^\phi \times 15^L$
 SUS tube
 inner dia. 11.1
 SUS thick. 1.0
 length 457.2
 Pin pitch 16.11
 (units in mm)

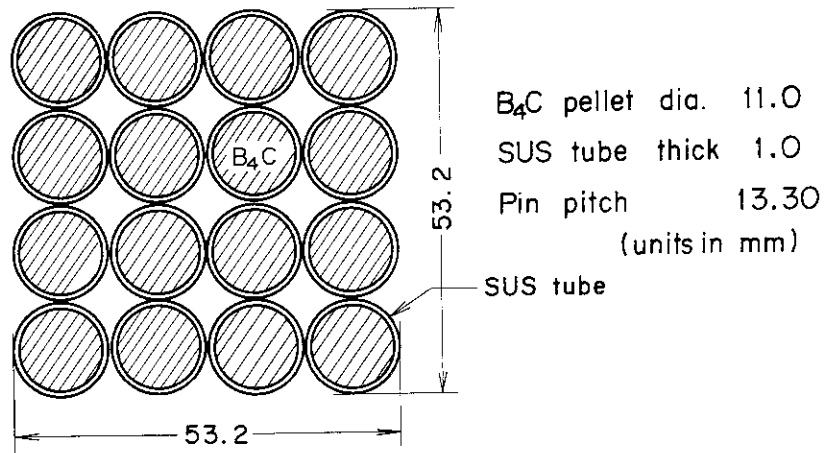
(a) Used rod



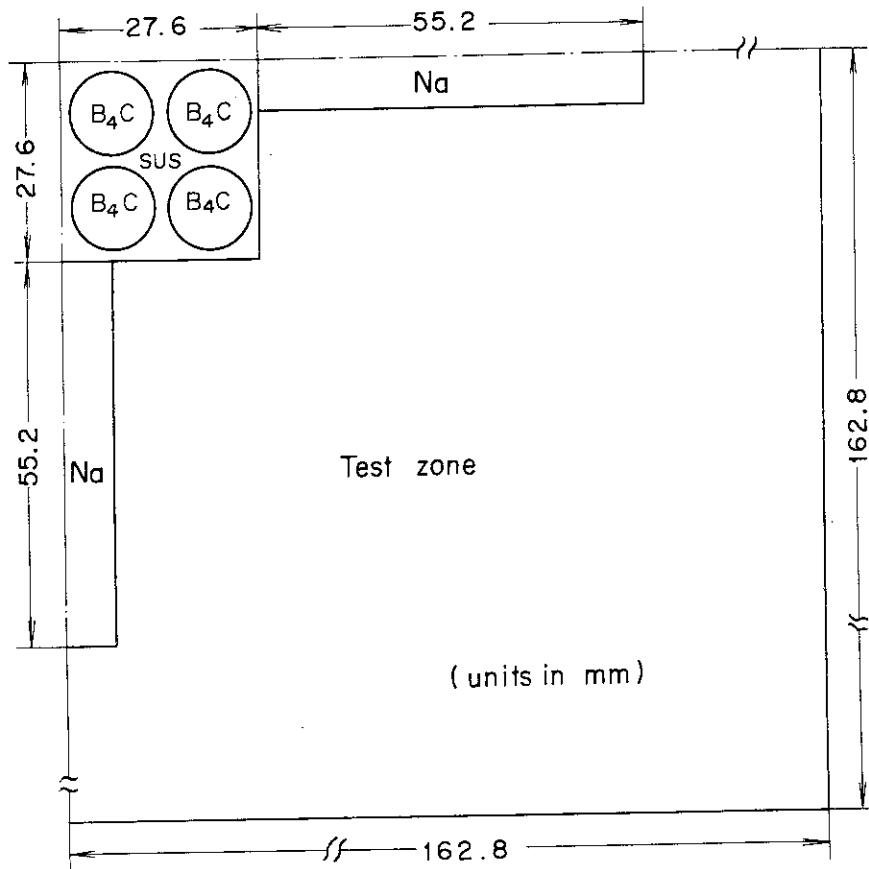
$r_1 = 31.14$
 $r_2 = 142.0$
 B_4C radius = 5.515
 Pin pitch = 16.11
 (units in mm)

(b) Rod model for effective cross section calculation

Fig. 5 7-pin B_4C pin cluster

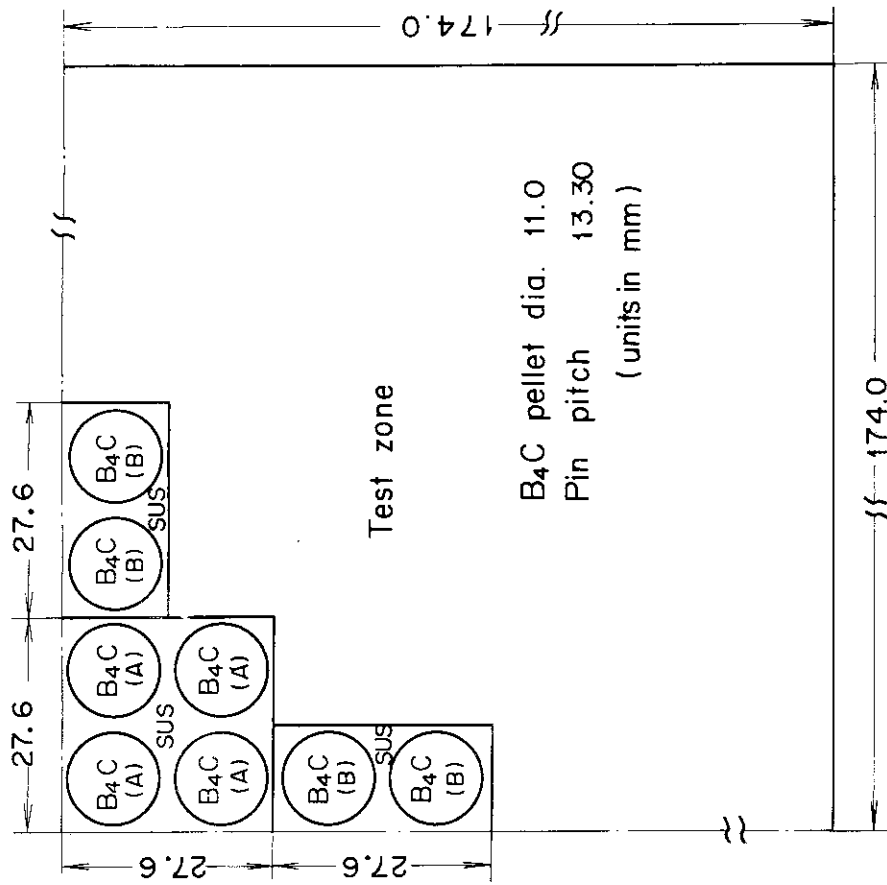


(a) Used rod

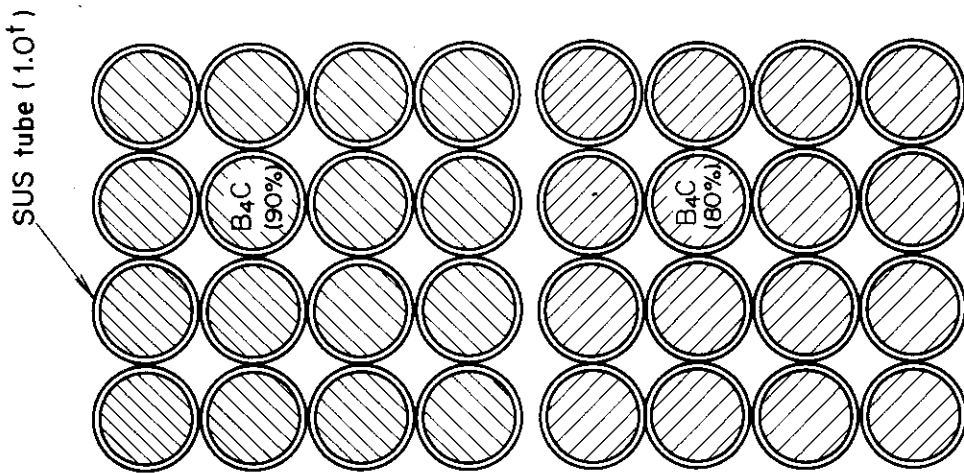


(b) Rod model for effective cross section calculation
(one quarter)

Fig. 6 16-pin B_4C pin cluster



(b) Rod model for the calculation of $B_4C-(A)$ effective cross section (one quarter)



(a) Used rod

Fig. 7 32 pin B_4C pin cluster

3. 反応度の測定

3.1 臨界つり合い法による測定

臨界つり合い法は反応度を測定すべき未臨界体系に何らかの方法で、正の反応度値を付加して臨界とし、この付加反応度値の量からもとの未臨界体系の反応度を求める方法である。付加すべき正の反応度値としては燃料棒の追加が考えられる。この方法は特異点 (B_4C 制御棒など)をもつ体系の場合は特別の意味をもつことになる。すなわち、特異点をもった臨界系を実現することになり、これは特異点に関する計算手法の検定に有効である。実験的には臨界点の確認は、体系内の特異点の存在の有無にほぼ左右されない。したがって、特異点のある場合とない場合の系の反応度の計算値が確実に実験と比較可能になる。さらに特異点が B_4C 制御棒であり、燃料棒の付加を行う場合には、制御棒値は等価な燃料の量と直接関係づけられ、burn up の補償に関して有益な情報となる。

実験はドライバー引出しを炉心周辺に付加して行った。付加すべき位置は Table 9 に示す A, B, C の 3 種で計 16 個所である (Fig. 8 参照)。A, B は通常の濃縮ウランによるドライバーであるが、C は Pu によるドライバーを付加した。燃料の在庫の関係上これ以上のドライバーを用意することは出来なかった。したがって BC-7, BP-7 の両体系についてこの方法は適用されたが、未臨界度の深い他の体系では、臨界にするだけのドライバーが無いために適用不可能であった。A, B, C の各点にドライバー引出しを付加したときの反応度値は NC 体系, BC/7C 体系 (BC-7 にドライバーを付加して臨界とした体系), NP 体系および BP/7C 体系 (BP-7 について同様に臨界とした体系) について求めた。反応度値の測定は、A, B 点についてはその象元の他の点に付加が行われていない状態で求めた。C 点の場合は、必ずその象元の B 点が付加されている状態で、B 点の斜め両隣の双方に付加した状態で値を求めた。すなわち、C 点が付加されるときは常に B 点がすでに付加されていること、C 点については常にペアで付加されること、を前提としている。実際に、BC/7C および BP/7C におけるドライバー引出しの付加状態は A を 4 本、B を 4 本完全に付加し、残り C の 4 組 (8 本) のうち何組かを付加するようにした。そして BC/7C では 2 組、BP/7C では 1 組の C 点にドライバー引出しが付加されることになった。

求めるべき未臨界体系の反応度は、付加されたドライバー引出しのそれぞれの値の単純な加算によって算出した。ドライバー引出しの反応度値は NC, BC/7C および NP, BP/7C の各体系で測定されたから、BC-7, BP-7 の各体系について二つずつの反応度が求められた。結果を Table 10 に示してある。いつれの体系についても、 B_4C ピン・クラスタの入っていない状態でのドライバー引出しの値から求めた未臨界度の方が、2~3% 深くなっている。Table 10 におけるドル単位による表示では、各体系の β_{eff} を使用しているから、 $\% \Delta k/k$ への換算はそれぞれの体系の β_{eff} を使用しなければならない。

3.2 未臨界法による測定

未臨界法による反応度測定のうち、ここでは、中性子源増倍法 (SM法)、パルス中性子源

法 (PNS法) および中性子源引抜き法 (S J法) について、実験の概要とそれぞれの方法により得られる反応度の観測値の特徴、傾向などを示す。実験の詳細ならびに特異点 (B_4C ピン、外部中性子源など) が存在することによる中性子束分布の歪みの影響、反応度の定義などの問題を考慮した実験結果については、測定方法ごとに、別に報告する。^{(4),(5),(6)}

一連の実験のため、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) の中性子測定系を設けた。検出器の位置を Fig. 1 および Fig. 9 に示す。SM実験では、さらに、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, CH. 2) および線形出力計 (CH. 5, CH. 6) も用いた。

中性子束の時間変化を観測する動的測定法 (PNS法およびS J法) では既存のマルチチャンネル・アナライザーの他に、今回新たに、多目的データ集積分析装置 MPDA-9 に設けられたインターフェース NL-01 を用いて、小型計算機 PDP-9 をマルチチャンネル・アナライザーとして利用した。⁽¹¹⁾ この結果、測定の能率が上がると同時に、測定系と時間分析器との組合せを適宜変更することによって、観測値の信頼性を上げることが出来た。また、大型計算機によるデータ解析のために大部分の測定データは MPDA-9 を用いて磁気テープに保存した。

3.2.1 中性子源増倍法による測定⁽⁴⁾

中性子検出器として、体系内に設けた4系統、体系外に置いた3系統の他に FCA核計装のうちの4系統を加えた合計11系統を採用した (Fig. 1 および 9 参照)。体系外の検出器 E, F および G の位置は FCA V-3 集合体における「常陽」の模擬実験の経験から決めた。⁽²⁾ 外部中性子源としては試験領域に含まれる Pu 燃料の自発核分裂中性子を用いた。

反応度の観測値は各測定系ごとに $-\rho = A / CR$ により求めた。ただし、CR は計数率である。定数 A は中性子源の状態が変らない限り不変であると仮定し、NC および NP 体系の浅い未臨界状態における計数率 CR_1 から $A = -\rho_1 \cdot CR_1$ により求めた値をそれぞれ BC および BP 体系に適用して、各体系の反応度を求めた。基準となる未臨界体系の反応度 ρ_1 はベリウド法に基づいて較正された FCA 制御棒の移動距離から算出した。反応度の単位を決めるベリウドの測定値は Tomlinson のデータ (Table 4) を用いてドル単位に変換した。反応度をドル単位で表わす限り、この変換に用いる遅発中性子データの不確かさの影響は小さい。

各測定系から得られた反応度の観測値をそれぞれの測定精度と炉心中心から検出器までの距離の2乗とを重みにして求めた平均値 $-\bar{\rho}$ を Table 11 に示す。誤差は観測値の分散から求めた。後述するように、 B_4C ピン・クラスターの偏心した BP 体系は、BC 体系に比べて、各測定系による観測値のばらつきが大きく、その結果誤差が大きくなっている。ドル単位の反応度は 0.595×10^{-2} 倍することにより Tomlinson のデータを用いた場合の $4k/k$ 単位の値になる (Table 4 参照)。

BC-7 および BP-7 体系について、各測定系がどのような反応度を与えるかを平均値との比 $\rho/\bar{\rho}$ で Fig. 10 に示す。炉心中心に B_4C ピン・クラスターを挿入した BC-7 体系の場合、検出器位置による観測値のばらつきは大きくない。一方、 B_4C ピン・クラスターの偏心した BP-7 体系の場合には体系内および体系近くでは観測値の位置依存性が著るしい。しかし、この場合でも体系から遠く離れた検出器 E, F および G による観測値のばらつきは小さく、3者

の差は2%以内であった。

3.2.2 パルス中性子源法による測定⁽⁵⁾

中性子検出器位置として半径方向ブランケット内のBおよび軸方向ブランケット内のDを選んだ。ターゲットは炉心中心に対して検出器Bとは反対方向のドライバー外側境界近くに置いた(Fig.1 参照)。パルス中性子投入に伴う検出器出力の時間変化は、従来用いていたTMC-256の他、PDP-9を用いて測定した。

即発中性子成分 C_p と遅発中性子成分 C_d から面積法 $-\rho(\beta) = C_p / C_d$ により求めたドル単位の反応度をTable 12に示す。測定誤差としてはカウント数の統計誤差しか取り入れていない。同一体系における2つの観測値の差は主として遅発中性子成分 C_d を求める際のリーク電流によるバックグラウンド成分の不確かさによるものと考えられる。TMCとPDP-9による測定結果には有意な差はないと考える。ドル単位の反応度をTomlinsonのデータに対応する $\Delta k/k$ 単位の値に変換する際は、Table 8に示す各体系の β_{eff} 値を用いなければならない。^{*}

未臨界度の比較的浅いBC-7やBP-7体系では半径方向ブランケットと軸方向ブランケットでの観測値は良く一致しているが、未臨界度が深くなると、半径方向ブランケットに比べて、軸方向ブランケットに置いた検出器は反応度の絶対値(簡単のため以下絶対値という言葉^{**}を省略する)をやや小さく見積る傾向がみられる。静的測定方法であるSM法に比べると、PNS法による観測値は一樣に小さい反応度を示し、反応度が大きくなるとともに両者の差が大きくなる。この傾向はV-3集合体における「常陽」の模擬実験でも観測された。⁽²⁾

3.2.3 中性子源引抜き法による測定⁽⁶⁾

中性子検出器として半径方向ブランケット中のA、B、Cおよび体系外のFを選んだ。外部中性子源としてコック・クロフト型加速器による14 MeVの中性子を用い、中性子源引抜きはビームシャッターを閉じることで実現した。中性子源位置はPNS法の場合と同一である。検出器の出力を測定するマルチ・スケラーとしてPackard, ND-3300の他にPDP-9を用いた。測定データの一例を付録A2に示す。

測定データは積分法および外挿法によって解析した。積分法の場合、一点炉近似によると、ドル単位の反応度は $-\rho(\beta) = \left[\sum_{i,m} (\beta_{eff,i}^m / \lambda_i^m) \right] / \beta_{eff} \cdot CR_0 / \int_0^\infty CR(t) dt$ から得られる。ただし、 $CR(t)$ は定常中性子源によるバックグラウンドを差引いた計数率、 CR_0 はバックグラウンド成分を差引いた中性子源挿入時の計数率である。外挿法による解析方法は付録A2に示す。積分法による反応度の観測値をTable 13に示す。遅発中性子データにはTable 20~21に示すNC体系のデータを用いた。反応度をドル単位であらわす限り遅発中性子データの不確かさの効率は小さい。

測定誤差には計数の統計誤差の他に測定系の不感時間および中性子源引抜き時刻の不確かさの効果を取り入れた。外挿法による結果もおおむね良く一致した値を示したが、測定誤差は積分法の場合に比べて2~4倍であった。

* ドルの値がSM法の場合と異なる(BC-32体系では約3%大きい)。したがって、SM法による結果とPNS法(3.2.3に示すS.J法も同様)による結果を比較するときは、両者のドルの値の差を考慮しなければならない。

** 未臨界状態を取扱っているため、この用法に従うと、「反応度が大きい」という表現は「未臨界度が深い」という意味である。

中性子源を同じように見込む検出器AとCとの観測値の間には、SM法の場合と違って、B、Cピン・クラスターが2つの検出器の方向に大きく偏心したBP体系でも有意な差はみられない。これは、SJ法(PNS法も同様)では体系の反応度をその体系での測定データのみから直接求めることが出来るためと考えられる。一方、中性子源位置に対する検出器の位置依存性が大きく、中性子源と炉心中心をはさんで反対側にある検出器Bは、これと直角方向の検出器AおよびCによる観測値に比べて各体系とも一様にかなり小さい値を示した。体系から遠く離れた検出器FはAおよびCに近い値を示している。SM法による観測値に比べると、SJ法は、PNS法の場合と同様に、反応度を小さく見積る傾向があり、反応度が大きくなるとともに両者の差は大きくなる。

Table 9 Positions of added driver drawers for CBT

Edge name		Lattice no.	BC/7C	BP/7C
A	A1	10-20	Driver	Driver
	A2	26-20	Driver	Driver
	A3	26-16	Driver	Driver
	A4	10-16	Driver	Driver
B	B1	12-24	Driver	Driver
	B2	24-24	Driver	Driver
	B3	24-12	Driver	Driver
	B4	12-12	Driver	Driver
C	C11	11-23	Blanket	Blanket
	C12	13-25	Blanket	Blanket
	C21	23-25	Pu-Driver	Blanket
	C22	25-23	Pu-Driver	Blanket
	C31	25-13	Blanket	Blanket
	C32	23-11	Blanket	Blanket
	C41	13-11	Pu-Driver	Pu-Driver
	C42	11-13	Pu-Driver	Pu-Driver

Table 10 Measured reactivities by Critical Balance Technique

System	$-\rho$ (\$)	
	N-base	B-base
BC-7	2.77 ± 0.01	2.65 ± 0.01
BP-7	2.20 ± 0.01	2.15 ± 0.01

N-base ; from edge worths in NC or NP system,

$$1 \$ = 0.595 \% \Delta k / k$$

B-base ; from edge worths in BC/7C or BP/7C system,

$$1 \$ = 0.607 \% \Delta k / k$$

Table 11 Measured reactivities by Source Multiplication method (11 channels averaged)

System	$-\rho$ (\$)
BC-7	2.78 ± 0.01
BC-16	4.69 ± 0.02
BC-32	7.10 ± 0.04
BC-32(F)	3.62 ± 0.03
BC-32(M)	3.73 ± 0.03
BP-7	2.21 ± 0.02
BP-32	5.74 ± 0.07

1\$ = 0.595% $\Delta k/k$ (Table 4)

Table 12 Measured reactivities by Pulsed Neutron Source method

System	Run no.	$-\rho$ (\$)	
		B(Radial bl.)	D(Axial bl.)
BC-7	1	2.50 ± 0.01	$2.50 \pm 0.01^*$
	2	$2.51 \pm 0.01^*$	2.49 ± 0.01
BC-16	3	4.03 ± 0.02	$3.92 \pm 0.02^*$
	4	$4.14 \pm 0.02^*$	4.06 ± 0.02
BC-32	5	5.61 ± 0.04	—
	6	—	5.46 ± 0.05
BP-7	7	1.97 ± 0.01	$1.94 \pm 0.01^*$
	8	$2.04 \pm 0.01^*$	2.05 ± 0.01
BP-32	9	4.89 ± 0.02	—
	10	—	4.59 ± 0.03

* PDP-9, otherwise TMC-256

Table 13 Measured reactivities by Source Jerk method

System	$-\rho$ (\$)			
	A	B	C	F
BC-7	2.66 ± 0.03	2.60 ± 0.05	2.70 ± 0.02	—
BC-16	4.34 ± 0.04	4.03 ± 0.07	4.36 ± 0.05	—
BC-32	6.07 ± 0.26	5.43 ± 0.16	6.04 ± 0.09	6.12 ± 0.08
BP-7	2.24 ± 0.03	2.15 ± 0.03	2.22 ± 0.02	—
BP-32	5.35 ± 0.15	4.87 ± 0.07	5.15 ± 0.09	5.19 ± 0.30

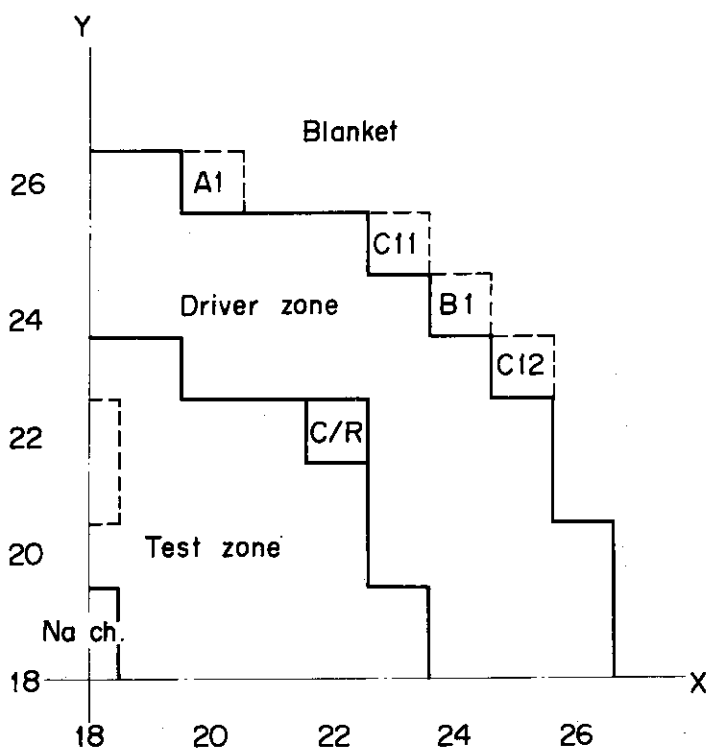


Fig. 8 Positions of the edge-A, -B and -C

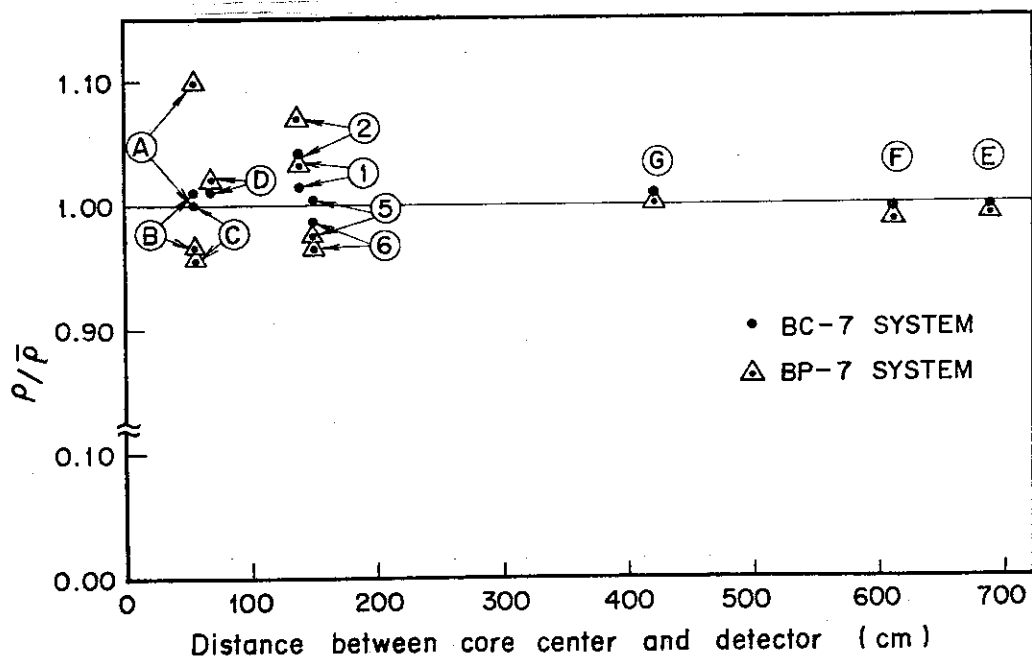


Fig. 10 Dependence of measured reactivity on detector position

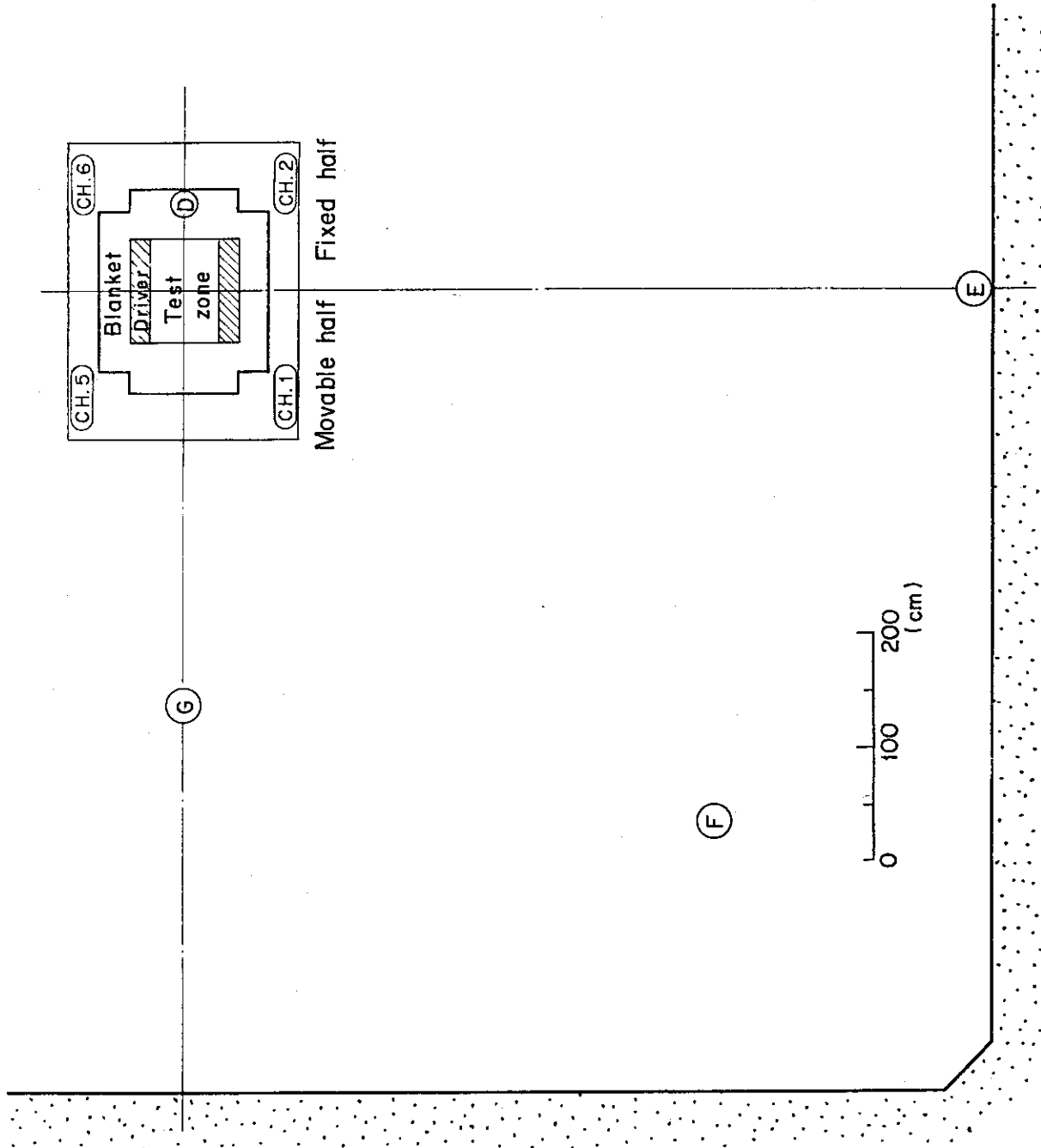


Fig. 9 Detector arrangement in FCA reactor room

4. 反応度およびその他の核計算

4.1 計算の過程

計算の流れを Fig. 11 に示す。JAERI-FAST (Version 2) 25 群断面積セットを用いて、1次元拡散コード EXPANDA-4⁽¹²⁾ により1次元サーベイ計算および6群縮約断面積セットを作成した。この6群縮約断面積セットは以降の B₄C ピン・クラスターの実効断面積を求める衝突確率法のコード CLUP⁽¹³⁾ および CLUP-77⁽¹⁴⁾ に使用され、さらに体系の計算を行う2次元拡散コード CITATION-2⁽¹⁵⁾ に使用された。2次元計算では R-Z 体系で動特性パラメータおよび軸方向バックリング B₂² を求めた。この B₂² を使用して、2次元 X-Y 計算を行い、体系の反応度を求めた。

計算の群数を減少する効果は1次元計算でサーベイされた。結果は Table 14 に示すように、固有値で見ると少しづつ変化しているが、BC系の反応度を臨界系(NC系)で規格化して見ると* 6群に縮約しても系の反応度は0.04%の減少を見るのみで、縮約群数は6群とした。群分けは25群の4, 6, 8, 11, 14, 25の各群で区切って行った。Table 14のBC体系はBC-16に近いモデル体系である。1次元サーベイ計算ではメッシュ巾の効果も調べられた。BC系のB₄Cピン・クラスターの入っている試験領域のメッシュ巾に注意を要することが分った。群縮約と同様のモデルでNC系で規格化して比べると、試験領域のメッシュ巾を小さくするに従いBC系の反応度は大きくなり、その変化分の百分率はメッシュ巾2 cm と1 cm では4%, 1 cm と0.7 cm では0.8%, 0.7 cm と0.5 cm では0.3%の差が生じた。

2次元計算用の6群縮約断面積は1次元円筒体系の25群固有値計算の中性子束を重み関数として求めた。未臨界系では本来 Fixed source mode の計算結果の中性子束を重み関数とすべきものであるが、その差異が極めて少いことから固有値計算の方を用いた。Fixed source mode の結果を使用する方法を取ると、実際の測定法ごとに縮約断面積の用意をする必要を生じ、しかも差は少いので労力のみ多く要して不便である。縮約は領域毎に行い、ブランケットだけは内側と外側の2領域に分けて求めた。縮約計算はNC, BC-7, BC-16, BC-32, BC/7Cの各体系について行い、結果は対応するNP, BP系にも使用した。ただし、FCAの制御棒、安全棒、ナトリウム・チャンネル、およびブランケットについてはNC系の結果を全ての体系に用いた。B₄Cピン・クラスターの実効断面積の算出はあとでのべる。6群縮約の核分裂中性子スペクトル χ_g は、1次元NC体系の円筒計算による²³⁵Uおよび²³⁹Puによるそれぞれの核分裂生成中性子数を重みとした両者の核分裂中性子スペクトルの平均のスペクトルを、全体系、全領域に共通に使用した。

軸方向バックリング B₂² はNC, BC-7, BC-16, BC-32, BC/7Cの各体系毎に2次元R-Zの固有値と1次元円筒の固有値を等しくするように定めた。すなわち、各体系ごとに領域および群に依存しない1つのB₂² を求めた。これらの値は対応するNP, BP体系にも共通に用いた。未臨界体系では、外部中性子源に依存して中性子束が形成されることに

* NC系で計算値が零となるようにする。i. e.
$$\rho = \frac{k_{eff}-1}{k_{eff}} - \frac{k_{eff}^{NC}-1}{k_{eff}^{NC}}$$

なるが、全体系について上記の方式で計算することにした。計算結果をTable 15に示してある。BC-32体系では、 B_4C ピン・クラスターは18-18に90%濃縮、17-18に80%濃縮が入っているが、2次元R-Zおよび1次元円筒計算では、炉心中心に2格子分に等しい面積をもった円筒領域を設け、その中に両者の実効断面積の平均値の断面積を持った物質で埋めるようにモデル化して計算した。

以上の過程により得られた6群縮約断面積、平均核分裂中性子スペクトル、軸方向バックリングを用いて、2次元X-Y計算により測定体系に忠実な形状をとり入れて固有値計算およびFixed source modeの計算を行った。後者の計算目的は補正計算にあり、ここでは省略する。

4.2 B_4C ピン・クラスターの実効断面積

B_4C ピン・クラスターの巨視的実効断面積を衝突確率法を用いて求めた。拡散近似による計算では B_4C 領域における中性子束分布を余り正確には求める事が出来ず、大きな実効断面積を与え、結果的には B_4C の入った体系の反応度を大きく見積り過ぎることになる。衝突確率法による計算コードはCLUP/CLUP77-PIJF^{(13),(14)}を使用した。

7ピン・クラスターのように同心円上に B_4C ピンが配列されているクラスターに対してはCLUPを用い、16ピンや32ピン・クラスターのように正方形にピンが配列されている場合にはCLUP77を用いて、それぞれ衝突確率を求め、それをPIJFのinputとして多群方程式を解き中性子束を得て巨視的実効断面積を求める。計算にはAppendix A4にのべた6群縮約断面積を用いている。計算モデルをFig.5(b), Fig.6(b), Fig.7(b)に示した。CLUP77では対象が対角線に対して対称でなければならず、このようなモデルになる。Fig.12に計算で求められた中性子束分布を7ピン・クラスターについて示した。図中なめらかな曲線はピン・クラスター領域を B_4C , NaとSUSの均質混合物として拡散近似により求めたものである。中心から3番目の領域に衝突確率法により求めた階段状の線が2本あるが、下の線は、 B_4C ピン内部の中性子束分布を示し、上の線はピンとピンの間のNa中での分布を示している。

このようにして求めた7ピンと16ピン・クラスターの実効吸収断面積と拡散定数をTable 16に示す。これらの値は7ピン・クラスターの場合には B_4C , Na, SUS(ピン・チューブ, カランドリヤ, 引出しおよび格子管)の均質混合物に対する値であり、16ピン・クラスターの場合は、 B_4C , SUS(ピン・チューブ, 引出しおよび格子管)の均質混合物に対する値である。比較のために拡散近似による結果も併記した。中性子束の多い2, 3, 4群で Σ_a を比較してみると、拡散近似は衝突確率法より、7ピン・クラスターで6%から17%, 16ピン・クラスターで3~6%大きな値を与えている。Table 17に32ピン・クラスターの Σ_a とDの値を示した。Fig.7(b)の $B_4C(A)$ の部分に90%濃縮 B_4C が、 $B_4C(B)$ の部分に80%濃縮 B_4C があるとして計算した値が90%濃縮 B_4C の欄に示してある。但し値は90%濃縮 B_4C とSUS(ピン・チューブ, 引出しと格子管)の均質混合物に対する値である。80%濃縮 B_4C に対する値は、上記の90%と80%濃縮 B_4C を入れ換えて計算したものである。計算モデルが異なるので直接比較は出来ないが、90%と80%濃縮 B_4C ピン・クラスターの均質混

合物に対する拡散近似による値を併記した。

4.3 臨 界 性

体系の臨界点は実験的に極めて明確に求められる。これに対する計算値の傾向を調べることは、計算手法の最も簡単な検定となる。この実験においては、基準体系であるNC、NP体系およびBC/7C、BP/7Cの4体系が臨界体系である。これらの体系の反応度の計算値を実験値と比較することにより、計算手法の全体や特異点の無い場合(NC、NP)と有る場合(BC/7C、BP/7C)や特異点またはナトリウム・チャンネルが中心にある場合(BC/7C、NC)と周辺に有る場合(BP/7C、NP)の信頼性の度合が分る。

計算体系と実験体系の相異は計算値に補正を施して、比較可能にした。したがって反応度の実験値は零である。体系の細かな相異に基づく補正は実験的に求められる。Table 18に結果を示してある。Gap効果はVI-2 集合体で測定したものを⁽¹⁾使用してある。また、X-Y計算は6群で行なわれたが、1次元サーベイ計算による25群と6群計算での体系の反応度の差異(-0.051%Δk/k)を補正し、結果的には25群計算相当の計算結果になっている。

Table 18によると計算値は全て負になっているが、均質拡散計算に対して、実際は板状セルによる非均質構造を成している。この効果に対する補正量はよく分っていないが正であり、計算値が負になることと矛盾しない。非均質効果やS_N効果はこの実験の各体系についてほぼ同じ大きさの補正になると考えて、無視してある。例えば、これらの補正量の合計が0.2%Δk/kあるとして、この補正量についてNC系とBC系では10%の差異を生じているとすると、-2%Δk/kの未臨界系の反応度の計算値は1%の変動を生じる。NC、NP体系とBC/7C、BP/7C体系と比較すると平均約0.02%Δk/kの差を生じており、これが全てB₄Cピン・クラスターの存在によるものとすれば、例えば-2%Δk/kの未臨界系の反応度は約1%深く見積る傾向にあるといえる。BC/7CとBP/7C体系の計算値は非常によい一致を示しているのに対して、NCとNP系では0.02%Δk/kの差を生じている。これらの傾向について判断を下すことは困難であるが、この実験の特異点のある体系の反応度の計算値には%オーダーの不確かさが有り得ることが推測される。メッシュ巾の効果、非均質効果やS_N補正を厳密に取扱うことは、計算の流れ全体にかかわって来ることである。計算の信頼性をさらに向上することは、原理上可能でも事実上非常に大きな困難を伴う。

4.4 動特性パラメータ

各測定体系のβ_{eff}やβ_pについてはすでにTable 8に示してあり、ここではその算出過程と基礎のデータについて記述する。計算は全て6群縮約の2次元R-Zの固有値計算によって行なわれた。β_i^mはすでに述べたように3種用いて計算したが、TomlinsonおよびKrick&Evansの場合は各核分裂性核種ごとに核分裂毎の中性子生成数 $\bar{\nu}^m$ を必要とする。この $\bar{\nu}^m$ はNC体系について一次元25群で求め、他の体系にも共通に用いた。実際は他の体系についても求めたが差は無視し得る大きさであった。遅発中性子生成のスペクトル $\lambda_{i,g}^m$ は完全なデータが無いが、ここではCutter & Shalev⁽⁹⁾の第2組の遅発中性子の生成スペクトルの図より6

群スペクトルを作成し、これを全ての組の遅発中性子に共通に用いた。Cutter & Shalev のデータは ^{235}U , ^{238}U および ^{239}Pu の 3 核種が有り、各核種について 6 群スペクトルを作成した。高次プルトニウムは ^{239}Pu のもので代用したが、核分裂率が小さいことから、この近似の効果は極めて小さいと考える。6 群の v^{-1} はまづ 25 群の v^{-1} を作成し、次に 1 次元計算の 25 群中性子束を重み関数として縮約して作成した。25 群の v^{-1} は $1/E$ の重み関数をつけて各群エネルギー巾で積分して平均値を求めた。

以上のデータおよび使用した各核種各組の遅発中性子の減衰定数 λ_i^m を Table 19 ~ 21 に示す。

4.5 各測定体系の反応度

測定を行った未臨界体系に対して、6 群縮約 2 次元 X-Y 計算により、実体系の形状を忠実にとり入れて実効増倍係数を求めた。さらに体系の反応度の計算値としては、基準体系 (NC, NP) により規格化して、以下のようにしてある。

$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}} - \frac{k_{\text{eff}}^{\text{ref}} - 1}{k_{\text{eff}}^{\text{ref}}} = \frac{k_{\text{eff}} - k_{\text{eff}}^{\text{ref}}}{k_{\text{eff}} \cdot k_{\text{eff}}^{\text{ref}}}$$

ここに、 k_{eff} は未臨界体系の実効増倍係数であり、 $k_{\text{eff}}^{\text{ref}}$ は NC または NP 体系の実効増倍係数の計算値である。(以下において未臨界系の反応度の計算値を $\Delta k/k$ で示すものは全てこのようにして求めたものである。) このような算出法の根本には、基準体系の臨界点は実験的に確実に分っており、その体系の計算の実効増倍係数 $k_{\text{eff}}^{\text{ref}}$ が 1.000 になっていないのは実体系と計算モデルの相異 (FCA の制御棒の位置による余剰反応度、Gap 効果等)、この計算手法に取り入れられていない効果 (非均質効果、 S_N 効果等) や炉定数の誤りに原因するものであり、しかもこのような原因となるものが未臨界系の測定体系においても同様に存在し、同じ大きさの反応度値を持ち、反応度と反応度値について加算性が有る、と考えているのである。実際には B_4C という今迄に無いものが入ってきたり、特異点の存在により中性子束分布やスペクトルの変化を生じ、4.3 の臨界性に関連して検討したように、 ρ オーダーの不確かさが有り得る。

各体系の反応度の計算結果および実効増倍係数を Table 22 に示してある。数値計算における収束の状況から判断すると、実効増倍係数について 10^{-4} の桁造はほぼ信頼してさしつかえないものと考えられる。メッシュの取り方については、NC, BC 体系では共通の取り方をし、NP, BP 体系についても同様にした。

実験においては、体系の反応度がしばしばドル単位で求められる。しかし計算においてはドル単位が特別の意味を持つとは考えられない。体系の反応度をドル単位で示す場合、その体系の β_{eff} を使用するの当然であるが、ある効果の反応度値が $\Delta k/k$ で同じでも、ドル単位で示す場合は体系によって異って来る。このことは、 $\Delta k/k$ 単位の反応度値の加算性とドル単位のそれとは両立しないことを意味する。摂動論的には前者により妥当性があると考えられる。ドル単位による表記は、各体系の β_{eff} によって示した。最後の欄は、NC 系の β_{eff} を全ての系に適用したもので、SM 法の観測値に対応するものである。

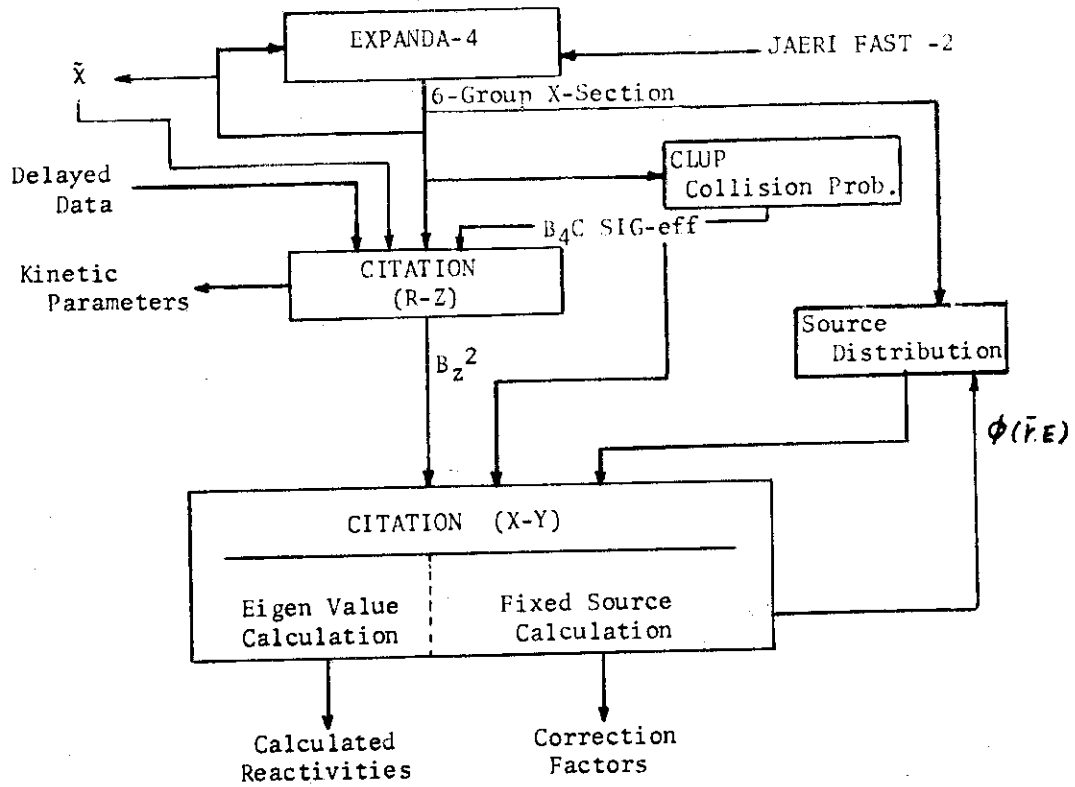


Fig. 11 Calculation Block Diagram

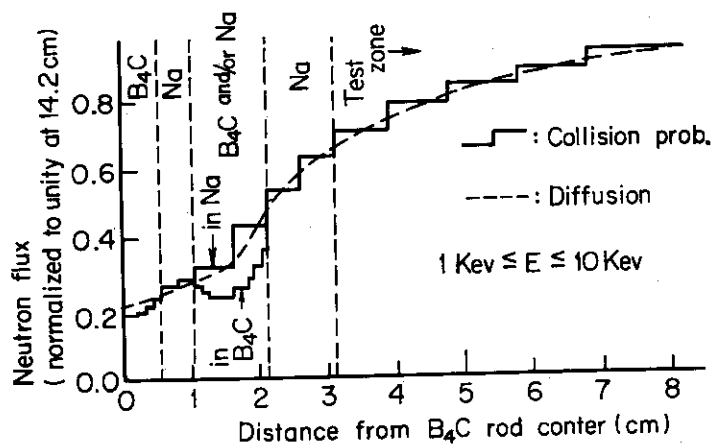


Fig. 12 Neutron flux distribution in and around B₄C rod (7-pin)

Table 14 Collapsing effect on the reactivity

G	NC k_{eff}	BC k_{eff}	$-\Delta k$ (%)	$-\rho$ ($\% \Delta k/k$)
25	1.00922	0.97902	3.020	3.056
10	1.00973	0.97950	3.023	3.056
8	1.00973	0.97950	3.023	3.056
6	1.00973	0.97951	3.023	3.055

$$\Delta k = k_{eff}^{BC} - k_{eff}^{NC}, \quad \rho = \frac{k_{eff}^{BC} - k_{eff}^{NC}}{k_{eff}^{NC} \cdot k_{eff}^{BC}}$$

Table 15 Axial buckling B_z^2 for the measured systems

System	NC, NP	BC-7, BP-7	BC-16	BC-32, BP-32	BC/7C, BP/7C
$B_z^2 (\times 10^{-3})$	0.6745	0.6767	0.6780	0.6795	0.6754

B_z^2 ; Region and group independent system-wise axial buckling.

Table 16 Effective macroscopic absorption cross section and diffusion constant of 7-pin and 16-pin cluster calculated by collision probability method and diffusion approximation

		Diffusion Const. D		Absorption cross section Σ_a	
G		Colli. prob.	Diff.	Colli. prob.	Diff.
7-pin cluster	1	3.3884	2.9797	6.7713 (-3)	6.9754 (-3)
	2	2.6016	2.0084	8.6884 (-3)	9.1739 (-3)
	3	2.1214	1.4027	2.7237 (-2)	2.9475 (-2)
	4	1.6060	1.0969	5.9690 (-2)	6.9853 (-2)
	5	0.6449	0.4555	1.2708 (-1)	2.1669 (-1)
	6	0.9273	0.3461	1.9061 (-1)	6.1067 (-1)
16-pin cluster	1	2.5173	2.2136	1.5190 (-2)	1.5439 (-2)
	2	2.1329	1.4488	1.9929 (-2)	2.0514 (-2)
	3	1.7543	0.9239	6.4452 (-2)	6.6708 (-2)
	4	1.3636	0.7568	1.4541 (-1)	1.5460 (-1)
	5	0.5710	0.3460	3.8464 (-1)	4.7700 (-1)
	6	0.6127	0.1857	7.3190 (-1)	1.3847 (0)

Table 17 Effective macroscopic absorption cross section and diffusion constant of 32-pin cluster calculated by collision probability method and diffusion approximation for comparison

G	Collision probability method				Diffusion approximation	
	90% enriched B ₄ C		80% enriched B ₄ C		90%/80% B ₄ C mixed	
	D	Σ_a	D	Σ_a	D	Σ_a
1	2.5382	1.4811(-2)	2.3855	1.2954(-2)	2.1620	1.4471(-2)
2	2.1676	1.9268(-2)	2.0437	1.6809(-2)	1.4512	1.9017(-2)
3	1.7855	6.2608(-2)	1.6746	5.4733(-2)	0.9259	6.2245(-1)
4	1.3918	1.3830(-1)	1.3012	1.2193(-1)	0.7565	1.4292(-1)
5	0.5502	3.5601(-1)	0.5158	3.1947(-1)	0.3539	4.3732(-1)
6	0.6117	7.1438(-1)	0.5589	6.6719(-1)	0.1943	1.2861(0)

Table 18 Criticality of system calculation

System		NC	NP	BC/7C	BP/7C
Model calc. ρ (% $\Delta k/k$)		+0.152	+0.191	-0.027	+0.115
Correction term	Gap effect (% $\Delta k/k$)	-0.168 ± 0.03	-0.168 ± 0.03	-0.168 ± 0.03	-0.168 ± 0.03
	Excess reactivity	-0.171 ± 0.003	-0.230 ± 0.003	-0.021 ± 0.002	-0.162 ± 0.010
	Collapsing effect	-0.051	-0.051	-0.051	-0.051
Corrected calc. ρ (% $\Delta k/k$)		-0.238 ± 0.003	-0.258 ± 0.003	-0.267 ± 0.002	-0.266 ± 0.010

Experimental ρ 's are equal zero for all cases.

Table 19 6-Group constants of $\bar{\chi}_g$, ν_g^{-1} and $\chi_{d,g}^m$

G	$\bar{\chi}_g$	ν_g^{-1}	$\chi_{d,g}^m$		
			U-235	U-238	Pu-239, Pu-240 Pu-241
1	0.5 58 3	0.4663 -9	0.	0.	0.
2	0.34 35	0.8637 -9	0.74	0.78	0.79
3	0.08 57	1.6368 -9	0.26	0.22	0.21
4	0.01 25	3.7066 -9	0.	0.	0.
5	0.	11.9700 -9	0.	0.	0.
6	0.	34.786 -9	0.	0.	0.

Table 20 $\beta_{eff,i}^m$ and $\bar{\nu}^m$ of VI-2 B2 NC system*

		Pu-239	Pu-240	Pu-241	U-235	U-238
$\beta_{eff,i}^m$ (%)	1	0.0023	0.0000	0.0000	0.0129	0.0025
	2	0.0168	0.0005	0.0005	0.0725	0.0262
	3	0.0130	0.0003	0.0004	0.0640	0.0309
	4	0.0197	0.0006	0.0008	0.1385	0.0741
	5	0.0062	0.0002	0.0004	0.0436	0.0430
	6	0.0021	0.0000	0.0000	0.0088	0.0143
$\bar{\nu}^m$		2.950	3.066	3.010	2.480	2.758

* Results of 6-group 2-D R-Z calculation with Tomlinson's delayed data

Table 21 Values of λ_i^m (sec⁻¹)

Group Isotope	1	2	3	4	5	6
Pu - 239	0.0128	0.0301	0.1238	0.3254	1.122	2.697
Pu - 240	0.0129	0.0313	0.1349	0.3332	1.356	4.030
Pu - 241	0.0128	0.0299	0.1238	0.3519	1.612	4.621
U - 235	0.0127	0.0317	0.115	0.311	1.40	3.87
U - 238	0.0132	0.0321	0.139	0.358	1.41	4.02

Table 22 Calculated reactivities

System	k_{eff}	$-\rho$ (% $\Delta k/k$) ^(a)	$-\rho$ (\$)	$-\rho$ (% $\Delta k/k$)/0.595 ^(b)
NC	1.00152	0	0	0
BC-7	0.98511	1.664	2.760	2.797
BC-16	0.97357	2.867	4.715	4.818
BC-32	0.96107	4.202	6.844	7.062
NP	1.00191	0	0	0
BP-7	0.98893	1.310	2.173	2.202
BP-32	0.96964	3.322	5.410	5.583

$$(a) \rho = \frac{k_{eff} - k_{eff}^{ref}}{k_{eff}^{ref} \cdot k_{eff}}, \quad ref = NC \text{ or } NP$$

(b) 0.595% is β_{eff} of the reference systems (NC and NP)

5. 討 論

各測定法によって得られた体系の反応度の観測値の傾向を見ると、SM法の平均値が最も大きな反応度を常に示し、次にSJ法、PNS法の順になっている。CBT法は例が少ないがSM法の平均値にほぼ等しい。またSM法の平均値は測定例全体にわたって計算値と大きな差異を生じていない。さらに、この方法における検出器の位置依存性、特異点位置との関係や遠方にある程一定の値に近づく収束的傾向は、V-3集合体における「常陽」模擬実験のときの現象を再確認することになった。SJ法の検出器の位置依存性は、今回の実験ではB₄Cピン・クラスター位置との関係よりも中性子源位置との関係が主要な役割をしていることが判明した。PNS法やSJ法について、検出器の位置依存性に関して、SM法の収束的傾向を見るに足る十分な測定は出来なかった。

SM法の測定では、他の方法と異なり、必要なだけ時間をかけて計数を蓄積することにより、1回の測定の誤差を下げることができる。しかしながら、この方法には再現性に不安がある。それは、SM法では既知反応度系での較正と未知反応度系での計数との2回の測定によって反応度の観測値を得ており、その間の検出器効率の電氣的なドリフトに原因する。SJ法の場合は中性子源強度を上げて計数率を稼げば、パルス型の検出器ではその不感時間の誤差がきいてきて、1回の測定精度には限界がある。これに対しては、電流型の検出器を使用することによって、この難点を避けることができる。PNS法やSJ法ではその系の測定で反応度の観測値を得ることから、慎重な加速器の調整や入念なデータ処理によって、再現性に対する不安は除くことが出来る。未臨界系からさらに深い未臨界系にするRD法では、計数率の減少は防げない。したがって、未臨界度が深くなるにつれ誤差の増大は避けられないが、再現性についてはPNS法等と同様に有利である。

CBT法やSM法は静的な状態の測定であり、その補正計算の過程に大きな困難は無いと考えられる。今回のPNS法やSJ法の実験のような、点状中性子源が炉心の端にあり、しかも出て来る中性子が14 MeVの高エネルギーを持っている場合には、補正計算の過程で仮定の入る余地が多くなると推測される。また、体系の真の反応度がSM法の平均値あたりにあるとすれば、PNS法やSJ法に対する補正係数は最大で約1.2と大きなものになり、この誤差は無視し得なくなる。しかし、補正係数が1より大きいことは、安全性の観点から好ましいこととされている。PNS法やSJ法について、以上の問題は中性子源位置に関連しており、中性子源の位置を変えることにより、事情は変えて来る。

臨界性に関する計算結果は、B₄Cピン・クラスターの有る場合も無い場合も概ね良い結果を得た。特異点に関する計算の妥当性も反応度で見てもオーダーの範囲内で確認出来た、と考えてよい。しかし、さらに1%またはそれ以下の範囲内で、妥当性の判定を可能にするには、均質拡散近似の前提について評価を必要とする。このことは、他の種の実験を必要とするであろうし、計算においても相当の困難を伴うものと考えられる。

今回の実験においては、MPDA-9 systemが極めて有効に使用された。このsystemによって得たPNS法およびSJ法の観測値は、他のマルチ・チャンネル・アナライザーの結果

と比較して妥当であることが確認された。実験について今後の課題として P N S 法や S J 法において中性子源位置を変えて観測値の位置依存性を知ることがある。この際、データの迅速な処理が重要になって来るが、MPDA-9 system の活用が期待される。

謝 辞

本実験の遂行にあたり、高速炉物理研究室および F C A 管理機関の諸氏の多大なる協力に感謝の意を表します。高速炉物理研究室 渡辺秀明氏には、実験準備の段階および実験期間中にわたってお世話になりました。解析にあたって原子炉工学部土橋敬一郎氏の快い御協力を得ました。本実験は、その目的および意義について原子炉工学部主任研究員弘田実弥氏の御理解によって完成し、報告をまとめるにあたり高速炉物理研究室長黒井英雄氏の温い御支援を戴きました。以上の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 飯島勉他： FCA VI-2 集合体の臨界実験 (1974)。
- 2) Mizoo, N. et al: JAERI-M 5867 (1974)。
- 3) Katsuragi, S. et al: JAERI-1195 (1970), JAERI-1199 (1970)
and JAERI-1199 supplement 2 (1971)。
- 4) 向山武彦他： JAERI-M 6067 (1975)。
- 5) 中村知夫他： JAERI-M (1975) 刊行予定。
- 6) 中野正文他： JAERI-M (1975) 刊行予定。
- 7) 溝尾宣辰, 中野正文, 向山武彦, 趙 満： JAERI-M (1975) 刊行予定。
- 8) Keepin, G.R.: "Physics of nuclear kinetics", Addison-Wesley (1964)。
- 9) Tomlinson, L.: AERE-R6993 (1972)。
- 10) Krick, M.S. and Evans, A.E.: Nucl.Sci.Eng., 47, 311 (1971)
and Nucl.Sci.Eng., 50, 80 (1972)。
- 11) 山岸耕二郎： JAERI-memo (1975) 刊行予定。
- 12) Suzuki, T.: JAERI-memo 3660 (1970)。
- 13) Tsuchihashi, K.: JAERI-memo 3034 (1968)。
- 14) Tsuchihashi, K.: JAERI-1196 (1971)。
- 15) Fowler, T. et al: ORNL-TM-2496, Rev.2 (1969)。

と比較して妥当であることが確認された。実験について今後の課題として P N S 法や S J 法において中性子源位置を変えて観測値の位置依存性を知ることがある。この際、データの迅速な処理が重要になって来るが、MPDA-9 system の活甲が期待される。

謝 辞

本実験の遂行にあたり、高速炉物理研究室および F C A 管理機関の諸氏の多大なる協力に感謝の意を表します。高速炉物理研究室 渡辺秀明氏には、実験準備の段階および実験期間中にわたってお世話になりました。解析にあたって原子炉工学部土橋敬一郎氏の快い御協力を得ました。本実験は、その目的および意義について原子炉工学部主任研究員弘田実弥氏の御理解によって完成し、報告をまとめるにあたり高速炉物理研究室長黒井英雄氏の温い御支援を戴きました。以上の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 飯島勉他： FCA VI-2 集合体の臨界実験 (1974)。
- 2) Mizoo, N. et al: JAERI-M 5867 (1974)。
- 3) Katsuragi, S. et al: JAERI-1195 (1970), JAERI-1199 (1970)
and JAERI-1199 supplement 2 (1971)。
- 4) 向山武彦他： JAERI-M 6067 (1975)。
- 5) 中村知夫他： JAERI-M (1975) 刊行予定。
- 6) 中野正文他： JAERI-M (1975) 刊行予定。
- 7) 溝尾宣辰, 中野正文, 向山武彦, 趙 満： JAERI-M (1975) 刊行予定。
- 8) Keepin, G.R.: "Physics of nuclear kinetics", Addison-Wesley (1964)。
- 9) Tomlinson, L.: AERE-R6993 (1972)。
- 10) Krick, M.S. and Evans, A.E.: Nucl.Sci.Eng., 47, 311 (1971)
and Nucl.Sci.Eng., 50, 80 (1972)。
- 11) 山岸耕二郎： JAERI-memo (1975) 刊行予定。
- 12) Suzuki, T.: JAERI-memo 3660 (1970)。
- 13) Tsuchihashi, K.: JAERI-memo 3034 (1968)。
- 14) Tsuchihashi, K.: JAERI-1196 (1971)。
- 15) Fowler, T. et al: ORNL-TM-2496, Rev.2 (1969)。

と比較して妥当であることが確認された。実験について今後の課題として P N S 法や S J 法において中性子源位置を変えて観測値の位置依存性を知ることがある。この際、データの迅速な処理が重要になって来るが、MPDA-9 system の活用が期待される。

謝 辞

本実験の遂行にあたり、高速炉物理研究室および F C A 管理機関の諸氏の多大なる協力に感謝の意を表します。高速炉物理研究室 渡辺秀明氏には、実験準備の段階および実験期間中にわたってお世話になりました。解析にあたって原子炉工学部土橋敬一郎氏の快い御協力を得ました。本実験は、その目的および意義について原子炉工学部主任研究員弘田実弥氏の御理解によって完成し、報告をまとめるにあたり高速炉物理研究室長黒井英雄氏の温い御支援を戴きました。以上の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 飯島勉他： FCA VI-2 集合体の臨界実験 (1974)。
- 2) Mizoo, N. et al: JAERI-M 5867 (1974)。
- 3) Katsuragi, S. et al: JAERI-1195 (1970), JAERI-1199 (1970)
and JAERI-1199 supplement 2 (1971)。
- 4) 向山武彦他： JAERI-M 6067 (1975)。
- 5) 中村知夫他： JAERI-M (1975) 刊行予定。
- 6) 中野正文他： JAERI-M (1975) 刊行予定。
- 7) 溝尾宣辰, 中野正文, 向山武彦, 趙 満： JAERI-M (1975) 刊行予定。
- 8) Keepin, G.R.: "Physics of nuclear kinetics", Addison-Wesley (1964)。
- 9) Tomlinson, L.: AERE-R6993 (1972)。
- 10) Krick, M.S. and Evans, A.E.: Nucl.Sci.Eng., 47, 311 (1971)
and Nucl.Sci.Eng., 50, 80 (1972)。
- 11) 山岸耕二郎： JAERI-memo (1975) 刊行予定。
- 12) Suzuki, T.: JAERI-memo 3660 (1970)。
- 13) Tsuchihashi, K.: JAERI-memo 3034 (1968)。
- 14) Tsuchihashi, K.: JAERI-1196 (1971)。
- 15) Fowler, T. et al: ORNL-TM-2496, Rev.2 (1969)。

付 録

A 1. BC/7C およびBP/7C 体系の制御棒校正

基準体系NCおよびNP体系と同様に、BC/7CおよびBP/7C体系は臨界体系である。基準体系と同様にSRNo.10の50.00mmに対応する炉出力のダブリング・タイム T_D を求めた。Fig.A1およびA2にそれぞれBC/7CおよびBP/7C体系の制御棒校正曲線を示す。BP/7C体系の偏心の様子が明確に認められる。標準反応度 ρ_0 および T_D は、これらの体系では以下のようになる。

$$BC/7C ; T_D = 84.6 \pm 0.03 \text{ sec.} \quad \rho_0 = 0.04487 \% \Delta k/k$$

$$BP/7C ; T_D = 69.2 \pm 0.03 \text{ sec.} \quad \rho_0 = 0.05270 \% \Delta k/k$$

A 2. 中性子源引抜き法の測定データ

検出器の出力はマルチ・スケーラーを用いて、中性子源引抜きの300秒前から約1500秒にわたってチャンネル巾1秒で、その間引抜きの3秒前から最低10秒間は特にチャンネル巾10 msecで測定した。測定は中性子源強度が安定し、炉出力がほぼ定常になってから開始した。測定データの一例をFig.A3に示す。検出器の計数率は中性子源引抜きと同時に急激に落ち、その後ゆるやかに減少して引抜き後500秒程度でバックグラウンド・レベルに達する。

測定データから体系の反応度を求める方法として、(i)中性子源挿入時の計数率と引抜き後の計数の積分値との比から求める積分法(本文参照)と、(ii)中性子源挿入時の計数率 CR_0 と引抜き直後の計数率の減衰曲線を引抜き時刻へ外挿した計数率 CR_1 との比から $-\rho(s) = CR_0/CR_1 - 1$ により求める外挿法とがある。ただし、 CR_0 および CR_1 はともにバックグラウンド成分を差引いた計数率である。計数率 CR_0 は、物理的には、中性子源引抜き時における遅発中性子先行核の密度を決めるのに関係している。したがって、中性子源強度の変動により計数率がゆらいでいる場合も、中性子源引抜き前の計数率を遅発中性子データを甲いて平均することにより、中性子源引抜き時の実効的な CR_0 を求めることが出来る。

反応度の観測値の測定誤差としては計数の統計誤差の他測定系の不感時間の不確かさ、中性子源引抜き時刻の不確かさなどの効果が考えられる。測定に甲いた検出器の種類と測定系の不感時間の測定値をTable A1に示す。検出器A'は1/2集合体の密着面をけさんでAと対向している。各体系とも原則として測定系の不感時間による補正があまり大きくならない範囲で出来るだけ計数率を上げるように中性子源強度を調節した。その結果、不感時間の測定誤差を10%と仮定すると、積分法の場合統計誤差と不感時間の不確かさによる誤差(これは CR_0 に対して効く)とは同程度であったが、外挿法では外挿値 CR_1 の推定精度が悪く、全体として、測定誤差は積分法に比べて2~4倍になった。一方、中性子源引抜き時刻はFig.A3にみられるように20 msec程度の精度で決定することができたので、引抜き時刻の不確かさによる誤差はいずれの方法でも小さかった。

A 3. 6群縮約断面積の算出

1次元25群拡散計算は円筒モデルで行った。実体系は炉心中心に関して、NC、BC体系においても対称性がくずれている。

NC、BC-7、BC-16およびBC/7C体系については、中心に1格子の面積と等価な半径を持つ領域を作る。この中はナトリウム、B-7あるいはB-16が均質に存在するとした。その外側に17-18のナトリウム・チャンネルと試験領域の混合領域（NT領域）を約1格子分の巾で取りまく。その外側に試験領域があり、さらにその外側に、試験領域、FCAの制御安全棒およびドライバー領域の混合領域を作る。その外側はドライバー領域、ブランケット領域と続いて体系の境界となる。なお、ブランケット領域は、2領域に分け、それぞれに縮約断面積を求めた。これは、ブランケット中でのスペクトル変化の激しさを考慮したものである。

BC-32体系の場合は、中心に2格子分の面積に等価な半径を持つ領域を作った。この領域はB-16（90%）とB-16（80%）の混合領域とした。その外側は他と同様で試験領域である。

X-Y計算のためには、FCAの制御安全棒の領域の縮約断面積も必要である。そのためには、試験領域とドライバー領域の間に4格子分の面積に等価となる巾をもつ領域を作り、この中に制御安全棒の物質のみを満たした。

このようなモデル化は、2次元R-Z計算のR方向の領域の取り方について、全く同様に行なわれた。Table A2に数値を示す。

A 4. CLUP用の縮約断面積

B₄Cピン・クラスターの実効断面積を求める衝突確率法のための6群縮約断面積は、クラスター内のB₄C領域、ナトリウム領域またはSU S領域についてそれぞれ必要である。

B-7の場合は、A3で均質とした中心領域を、4領域に分けた。まず、中心にB₄Cの1103 cmの径の領域、次にナトリウムの領域、次に外側6本のピンに等価な面積となる巾を持ったB₄Cのみの領域、さらにその外側にナトリウムの領域とした。それぞれの領域の縮約断面積を求めた。

B-16の場合は、同上の中心領域を5領域に分けた。中心はSU Sとし、その外側に4本のピンに等価な面積となる巾を持ったB₄Cのみの領域、次にSU Sの領域、次に12本のピンに等価な面積となる巾を持ったB₄Cの領域、そして最後にSU Sの領域とした。

B-32の場合は、同上の中心領域はB-16と全く同様の領域割当てを行った。ただし、その外側はB₄Cピン・クラスターと試験領域の混合領域に変更してある。そして、内側が90%濃縮のB₄Cの場合は、混合領域のB₄Cは80%濃縮とし、内側が80%濃縮の場合は反対に混合領域のB₄Cを90%濃縮とした。Table A3に数値を示す。

A 5 各体系の縮約効果

NC、BC-7、BC-16、BC-32およびBC/7Cの各体系において、25群計算と6群計算の固有値を比較して、縮約の効果を見た。

計算は1次元拡散コードEXPANDA-4を改造して行った。すなわち、まず25群計算を行い、中性子束および固有値を求め6群縮約断面積を作る。次に、その6群断面積によって6群計算を行なわせて、固有値等を求めるようにした。

上記の全ての体系について、6群計算の固有値は25群計算のそれよりも大きくなった。そして、その差はあまり変わらず、約0.051% $\Delta k/k$ であった。Table A4にデータを示す。

A 6. ソースデータによる β_{eff} の相異

Table A5に各体系について、ソースデータの相異に基づく β_{eff} の計算結果の一覧を示す。

A 7. 2次元計算X-Yのメッシュの取り方

Fig. A4にCITATION-2の計算における mesh overlayを示す。

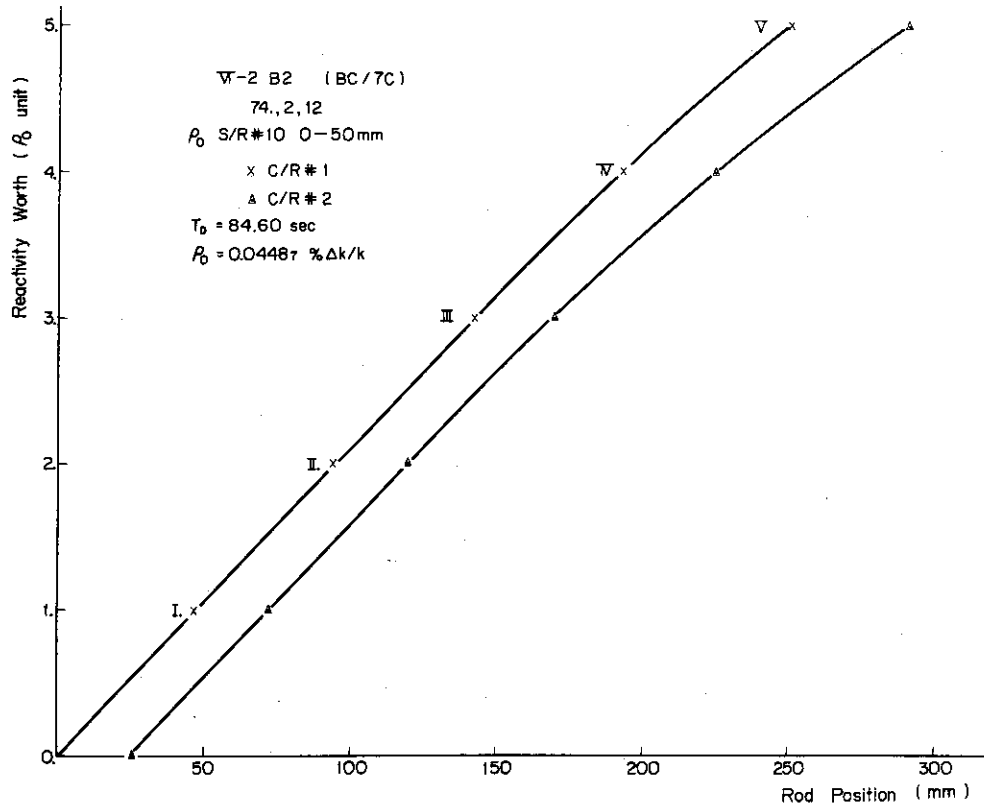


Fig. A.1 Calibration curve of control rods of assembly VI-2 B2 (BC/7C)

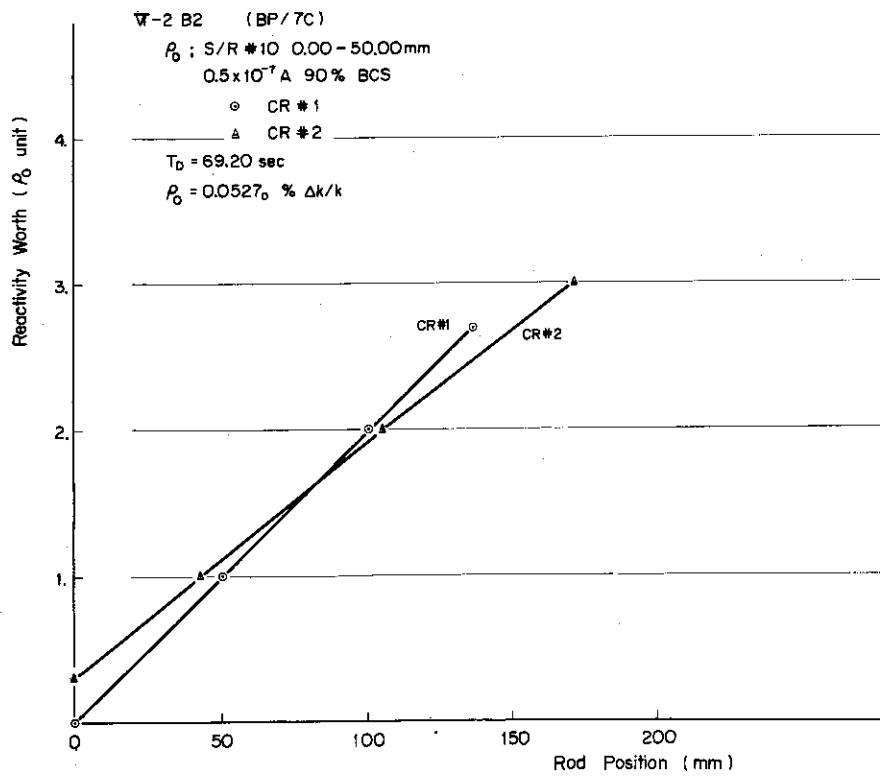


Fig. A.2 Calibration curve of control rods of assembly VI-2 B2 (BP/7C)

Table A 1 Detector type and Dead time

Detector position	Detector type	Dead time (μsec)	Counting rate at 0.4×10^{-7} A of CH.6
A	FC (U-235)	5.8	1.7×10^4 cps
A'	^3He	6.0	2.7
B	^3He	10	2.4
C	FC (U-235)	7.0	1.6
F	^3He	5.9	2.2

Table A 2 1-D cylinder calculation for cross-section collapsing

Outer (cm) radius	3.1143	8.728	26.184	35.129	45.983	57.62	72.196
Material	Na B-7 B-16	NT	Test	SCR-hom	Driver	Blanket	Blanket
	B-32 ⁴⁴⁰⁴						

Table A 3 1-D cylinder calculation for collapsing of B_4C cross-section

B-7	Outer (cm) radius	0.5515	1.3278	1.8942	3.1143	8.728	
	Material	$\text{B}_4\text{C}(90)$	Na	$\text{B}_4\text{C}(90)$	Na	NT	
B-16	Outer (cm) radius	0.6171	1.2639	1.6690	2.5368	3.1143	8.728
	Material	SUS	$\text{B}_4\text{C}(90)$	SUS	$\text{B}_4\text{C}(90)$	SUS	NT
B-32	Material	SUS	$\text{B}_4\text{C}(90 \text{ or } 80)$	SUS	$\text{B}_4\text{C}(90 \text{ or } 80)$	SUS	B80T or B90T

Table A4 6-group collapsing effect on the reactivities ρ
(% $\Delta k/k$)

System	25 G calc.	6 G calc.	$\Delta \rho$
NC	1.145	1.196	-0.051
BC-7	-0.610	-0.558	-0.052
BC-16	-1.644	-1.594	-0.050
BC-32	-2.748	-2.700	-0.048
BC/7C	2.044	2.095	-0.051

$$\rho = \frac{k_{eff}-1}{k_{eff}}, \quad \Delta \rho = \rho^{25} - \rho^6, \quad \text{1-D R model calc.}$$

Table A5 β_{eff} by three kinds of delayed data

(%)

System \ Data	Keepin - Sandmeier	Tomlinson	Krick & Evans
NC, NP	0.5775	0.5950	0.6081
BC-7, BP-7	0.5851	0.6028	0.6162
BC-16	0.5904	0.6083	0.6219
BC-32, BP-32	0.5959	0.6140	0.6278
BC/7C, BP/7C	0.5890	0.6069	0.6199

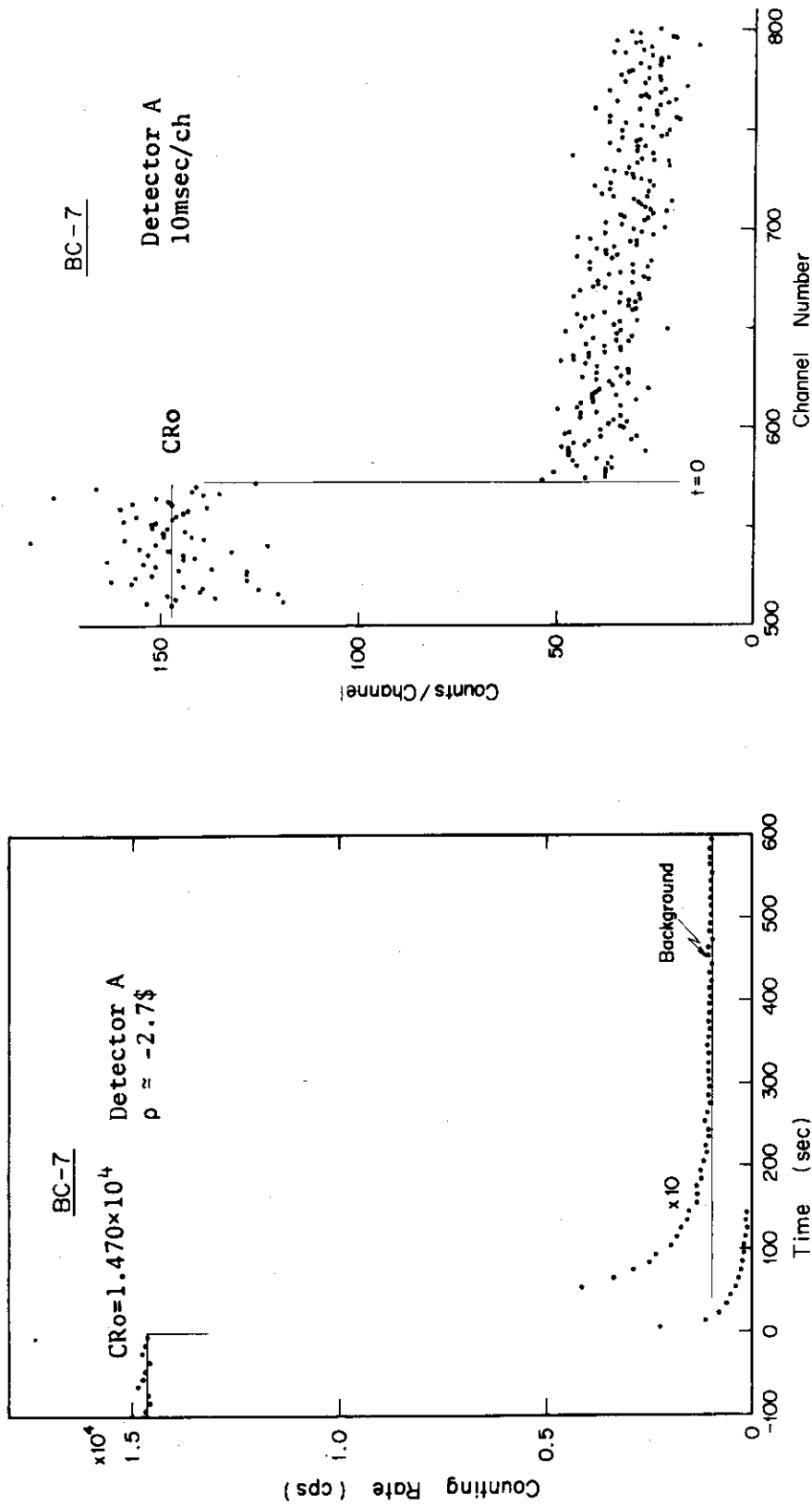
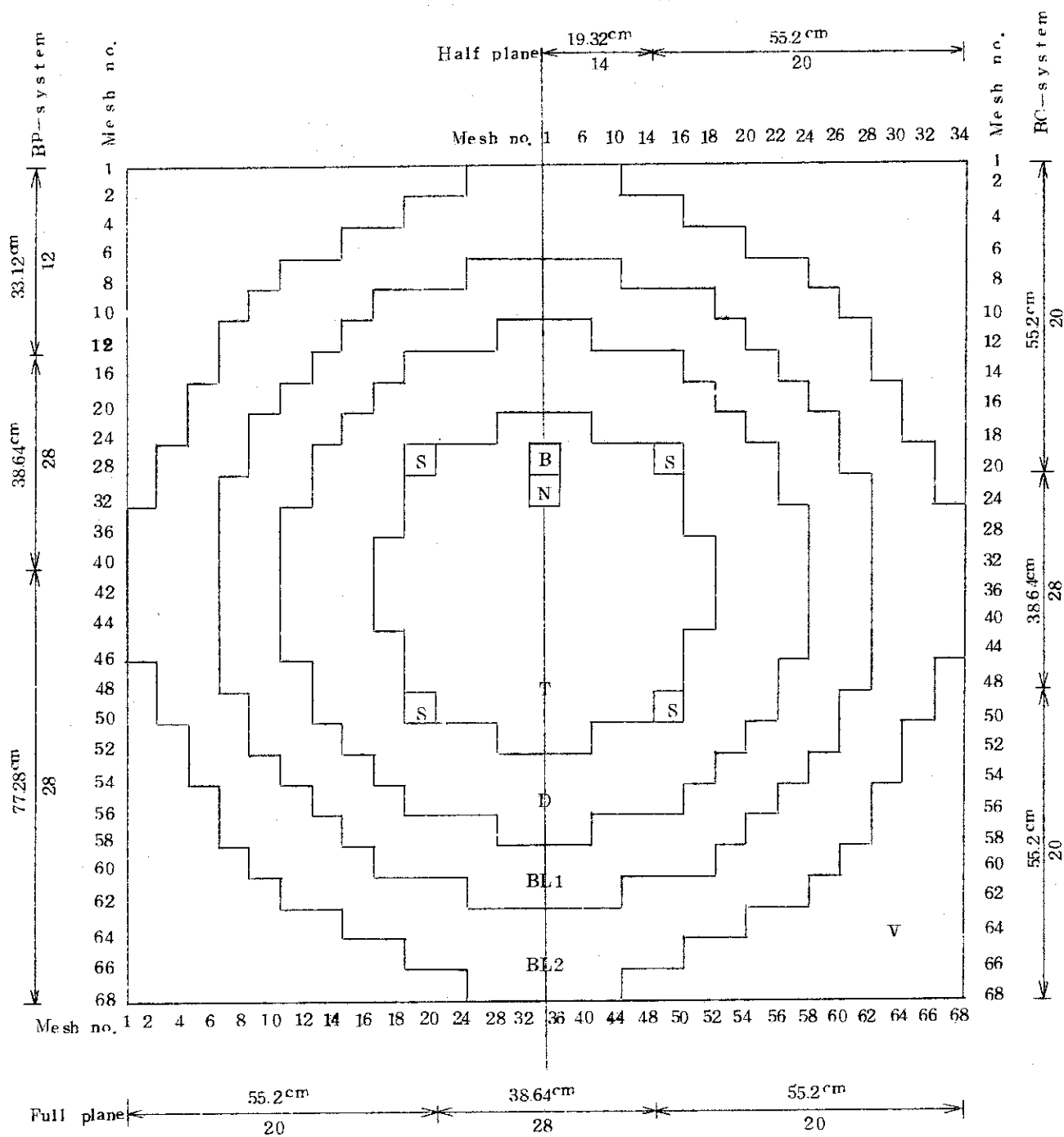


Fig. A. 3 Typical data from Source Jerk experiment



Zones

- | | |
|----------------------------------|-----------------|
| B : B ₄ C pin cluster | D : Driver |
| N : Na | BL1 : Blanket 1 |
| T : Test | BL2 : Blanket 2 |
| S : SCR | V : Black |

Fig. A4 VI-2 B2 X-Y model