

B<sub>4</sub>C制御棒挿入炉心における冷却材  
ボイド反応度の測定と解析

1984年8月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## B<sub>4</sub>C 制御棒挿入炉心における冷却材 ボイド反応度の測定と解析

小綿泰樹<sup>\*</sup>, 福村信男<sup>\*</sup>, 野口周一郎<sup>\*</sup>  
坂本辰也<sup>\*</sup>, 北山一宏<sup>\*\*</sup>

### 要 旨

B<sub>4</sub>C 制御棒を挿入したプルトニウム燃料部分装荷炉心においてプルトニウム燃料の装荷割合制御棒の挿入本数およびその挿入位置を変化させながら冷却材の0%→100%ボイド率変化による反応度(ボイド反応度)を臨界水位差法により測定した。制御棒の挿入条件は、各制御棒挿入臨界炉心の高さがほぼ一定になるように調整された。使用した燃料は、0.54 wt%または0.87 wt%( $Pu^{fis}/Pu = 91\%$ )PuO<sub>2</sub> 富加プルトニウム燃料および1.2 wt%濃縮ウラン燃料である。主な実験条件は次のとおりである。

① 格子ピッチ：25.0 cm (全燃料体数 97), ② プルトニウム燃料装荷体数：9, 13, 21, 25体 (中央領域), ③ 臨界炉心高さ：(1080 ± 60) mm, ④ 制御棒挿入本数及び位置：③の範囲になるように各2, 4, 6, 8本を選択し、炉心中央領域に分散配置, ⑤ 温度：(19 ± 4) °C, ⑥ 重水中ボロン：0 ppm<sup>10</sup>B, ⑦ 制御棒案内管：なし

実験解析では、WIMS-D 4 コードを用いて群定数を求め、CITATION コードで2群炉心計算を行ってボイド反応度および制御棒反応度値を求めた。

今回の実験および解析から次の事項が明らかになった。

- (1) 制御棒を挿入すれば、ボイド反応度は制御棒全引抜き炉心に比べて最大5\$正側へ移行するが、制御棒挿入本数の増加によるボイド反応度の正側への変化量は、飽和の傾向にある。制御棒反応度値が最大20\$になってもプルトニウム燃料装荷炉心のボイド反応度はウラン燃料一様炉心のボイド反応度より正側にはなりえず、依然として負の値である。
- (2) 制御棒挿入炉心のボイド反応度は、制御棒の挿入本数およびその位置に依存して変化する。制御棒がプルトニウム燃料格子領域に挿入されればボイド反応度の正側への変化量は大きい、ウラン燃料格子領域へ挿入されれば、その正側への変化量は小さい。

\* 大洗工学センタ - 重水臨界実験室

\*\* 新型転換炉ふげん発電所発電課

(3) 制御棒挿入炉心において制御棒反応度価値，プルトニウムの富化度またはプルトニウム燃料装荷割合に対するボイド反応度の変化率は，制御棒を挿入しない場合に比べて減少する。

(4) エネルギー3群，2次元(X-Y)形状の炉心計算から得られた計算値は，それぞれ以下に示す範囲の精度で実験値と一致した。

冷却材ボイド反応度	: ± 0.6\$
制御棒反応度価値	: ( ± $\frac{0}{1.5}$ )\$
軸方向臨界バックリング	: ( ± $\frac{0.25}{0.10}$ ) m <sup>-2</sup>

Coolant Void Reactivity in the Core with B<sub>4</sub>C Control-rods

Y. Kowata\*, N. Fukumura\*, S. Noguchi\*,  
T. Sakamoto\*, K. Kitayama\*\*

## Abstract

Coolant void reactivities due to 0→100% change in void fraction have been measured in two-region core involving B<sub>4</sub>C control-rods fully inserted in order to evaluate the control-rods effect for the void reactivity and an accuracy of reactor calculation codes.

The 28-rod PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters were placed in a central region of the core and the surrounding region was occupied with 28-rod 1.2wt% enriched UO<sub>2</sub> clusters. Fuel clusters are arranged in a square lattice at a 25.0-cm pitch. The PuO<sub>2</sub> enrichments in the mixed oxides are 0.54 and 0.87wt%. The fissile content of plutonium in both mixed oxides is ~91%.

The void reactivity was measured by changing the number and/or position of the control-rods inserted, and loading ratio of mixed-oxide clusters to UO<sub>2</sub> clusters. The void reactivities were obtained by integrating a function of the level reactivity coefficient of moderator ( $\partial\rho/\partial H$ ) for the 100%-voided core between the critical levels at the non-voided and the 100%-voided cores. Values of ( $\partial\rho/\partial H$ ) were measured by converting the doubling time of neutron flux change due to a small rise of moderator level ( $\Delta H$ ) to small reactivity ( $\Delta\rho$ ).

Corrections are given to the void reactivities measured for the reactivity effects of a leakage due to the difference of axial extrapolation distances between 0% and 100% void fractions and of a temperature change during the measurement. Thermal flux distributions were also measured by  $\gamma$ -counting of irradiated copper wire or samples, in order to evaluate the change of flux distributions in the core due to coolant voiding.

---

\* Heavy Water Critical Experimental Section, O-arai Engineering Center, PNC.

\*\* Fugen Power Station, PNC

Experimental void reactivities were compared with calculated ones by WIMS-D4 and CITATION codes. Inserted control-rod is able to deal as a corner rod in unit cell in WIMS-D4 calculation which is applied the square boundary condition.

The following are concluded from the present study.

- (1) Insertion of control-rods makes void reactivity to the more positive in maximum 5\$ than that of the core without control-rods. Since shift in void reactivity to the positive is likely to be saturated, void reactivity in the two-region core would not become positive than that of 1.2wt%UO<sub>2</sub> uniform core, even if control-rods worth come up to ~20\$.
- (2) The void reactivities are independent of the core height in plutonium loaded core involving B<sub>4</sub>C control-rods, but are dependent on the number and the position of the control-rods inserted. Insertion of control-rods into the region of plutonium fuel lattice makes void reactivity to the more large positive, the other hand, insertion into the region of uranium lattice makes it less large compared with the case of a core without control-rods.
- (3) The void reactivities of the core with control-rods have no large dependence on the control-rods worth, plutonium composition in fuel and loading ratio of mixed-oxide fuel clusters compared with the case of the clean core (without control-rods).
- (4) The analysis of this experiment is done using WIMS-D4 and CITATION codes. It is possible to directly solve the square lattice geometry involving cylindrical control-rod as a corner rod in the WIMS-D4 cell calculation. Calculated values agree with each experimental one within a following extent;

Void reactivity	: ±0.6\$
Control-rods worth	: $\begin{pmatrix} +0 \\ -1.5 \end{pmatrix}$ \$
Axial critical buckling	: $\begin{pmatrix} +0.25 \\ -0.10 \end{pmatrix}$ m <sup>-2</sup> .

## 目 次

1. 緒 論 .....	1
2. 実 験 .....	2
2.1 実験体系 .....	2
2.2 反応度の測定方法 .....	2
2.3 熱中性子束分布の測定方法 .....	5
2.4 臨界水位に対する炉心温度等の補正 .....	6
3. 実験結果と考察 .....	18
3.1 臨界水位および重水々位反応度係数 .....	18
3.2 冷却材ボイド反応度 .....	18
3.3 制御棒反応度価値 .....	21
3.4 熱中性子束分布 .....	22
4. 実験解析 .....	76
4.1 解析方法 .....	76
4.2 解析結果 .....	78
4.3 実験値と計算値との比較 .....	79
5. 結 論 .....	96
参考文献 .....	97
謝 辞 .....	97
Appendix 1 制御棒挿入格子計算のWIMS -D 4 コード入力例 .....	98
Appendix 2 制御棒挿入炉心計算のCITATIONコード入力例 .....	101

## 1. 緒 論

重水減速圧力管型の動力炉では、運転中、出力平坦化制御棒が挿入されていたり、またはその他に減速材中にバーナブルポイズンが添加されて臨界を保持するようになっている。特に、燃焼初期においては、余剰反応度が大きいいため、減速材中ポイズン濃度が高いか、または制御棒の挿入本数が比較的多くなる。制御棒の挿入本数が多い場合、炉心内中性子束分布は制御棒未挿入の場合に比べて大きく歪むことになる。したがって冷却材のボイド率に変化が生じた際の反応度は、使用する燃料の種類が同じであっても、制御棒の挿入本数や位置によって中性子束分布や制御棒価値が変化するため、制御棒による影響を受けることになる。

今回は、冷却材の0%→100%ボイド率変化による反応度（以下ボイド反応度とよぶ）の制御棒による効果を把握するため、ボイド反応度と全挿入した制御棒の反応度価値との関係を求めた。炉心中央領域に装荷するプルトニウム燃料の装荷割合をパラメータとして、挿入するB<sub>4</sub>C制御棒の本数および位置を種々変化させながら冷却材ボイド反応度を測定し、制御棒を挿入しない炉心におけるボイド反応度との比較を行った。臨界炉心高さは、使用する燃料組成および制御棒の本数や位置によって変化するが、ここでは、冷却材で満たされた時の炉心の高さを1.2 wt%ウラン燃料一様炉心の臨界水位とほぼ等しくなるように、制御棒の本数や位置を選択した。これによって臨界炉心高さの相異による中性子漏洩量の相異が冷却材ボイド反応度へ及ぼす影響をできるだけ小さくするように考慮した。

制御棒挿入炉心の冷却材ボイド反応度およびその時の制御棒反応度価値の実験値は、WIMS-D4コードおよびCITATIONコードによる計算値と比較され、核計算コードの精度評価を行った。WIMS-D4コードは、円筒格子しか取扱えなかったWIMS-Dコードを直接正方格子にも適用できるように改良されたものであり、制御棒を正方格子のコーナーに設けることにより、直接制御棒挿入格子の群定数を求めることができる。そこで今回WIMS-D4コードを用いて制御棒挿入格子の群定数を求め、制御棒挿入炉心のボイド反応度および制御棒反応度価値の計算精度評価を行うことによりWIMS-D4コードの適用性を検証した。



## 2. 実 験

### 2.1 実験体系

実験は、格子ピッチ 25-cm、炉心全体で 97 体の燃料クラスタが装荷される DCA 炉心（第 2.1 図）を用いて行われた。まず全圧力管内に 1.2 wt% ウラン燃料を装荷した一様炉心を構成し、その炉心の中央領域のウラン燃料を順次プルトニウム燃料で置換してゆき、それぞれの炉心に制御棒を挿入して冷却材の 0% → 100% ボイド率変化に対応するボイド反応度が測定された。

使用したプルトニウム燃料は、プルトニウム富化度（ $\text{PuO}_2/\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$ ）が 0.54 wt% または、0.87 wt% の二種類である。なお、いずれのプルトニウム燃料においても、全プルトニウムに対する核分裂性プルトニウムの同位体比は約 91 wt% である。各プルトニウム燃料の装荷体数は、炉心中心軸に対して 4 回転対称になるように 0 体から順次 9, 13, 21, 25 体と変化させた。燃料の置換方法および燃料集合体の構造をそれぞれ第 2.2 ~ 2.3 図に示す。さらに、プルトニウム燃料の組成および装荷体数を変化させたそれぞれの炉心の適当な位置に、 $\text{B}_4\text{C}$  制御棒を 0 本から 8 本の範囲で適宜選択して全挿入し、冷却材ボイド反応度を測定した。

制御棒の挿入本数や位置は、制御棒挿入後の臨界水位が 1.2 wt% ウラン燃料一様炉心の冷却材ボイド率 0% における臨界水位（1080 mm）とほぼ等しくなるように決定した。以上のことを考慮して、冷却材ボイド反応度を測定した炉心体系は第 2.4 ~ 2.5 図に示すような炉心を対象にし、それぞれの炉心に第 2.1 表に示すような記号を付した。

燃料集合体の構造は、第 2.3 図に示すようにいずれも 28 本燃料棒から構成されているクラスタ型燃料である。冷却材には軽水（0% ボイド率）を用い、圧力管内軽水々位は重水臨界水位とほぼ等水位とした。100% ボイドの冷却材は、圧力管内の軽水が完全に除去され、空気になった状態である。実験に用いた炉心各部の諸元および燃料の組成を第 2.2 ~ 2.3 表に示す。

使用した  $\text{B}_4\text{C}$  制御棒は「ふげん」に使用されている制御棒と同一構造のもので、それらの制御棒は案内管のない状態で支持具を用い、直接上部グリッド板から炉心内の重水減速材中に吊り下げられた。制御棒の構造および組成をそれぞれ第 2.6 図および第 2.4 表に示す。

### 2.2 反応度の測定方法

#### (1) 冷却材ボイド反応度

冷却材ボイド反応度および制御棒反応度値は、正の炉周期法および臨界水位差法を用いて求めた。ボイド反応度  $\rho_{0 \rightarrow V}$  は炉心全圧力管内に軽水冷却材が満たされた（0% ボイド）臨界状態から、軸方向バックリング  $B_{\frac{1}{2}}^2$  が一定に保持されたまま冷却材を完全に除去した際

に炉心に投入される反応度で定義され、次式により求めた。

$$\rho_{0 \rightarrow V} = \int_{B_{ZV}^2}^{B_{Z0}^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial B_Z^2} \right)_V d B_Z^2 \quad [ \$ ] \quad (2.1)$$

ただし、

$(\partial \rho / \partial B_Z^2)_V$  : 100%ボイド炉心におけるバックリング反応度係数

$B_{Z0}^2$  : 0%ボイド炉心の臨界軸方向バックリング

$B_{ZV}^2$  : 100%ボイド炉心の臨界軸方向バックリング

ここで、修正一群理論から導かれる円筒炉心のバックリング反応度係数  $(\partial \rho / \partial B_Z^2)_V$  は、一般的に

$$\left( \frac{\partial \rho}{\partial B_Z^2} \right)_V = - \left( \frac{M_Z^2}{\beta_{\text{eff}} k_{\infty}} \right)_V \quad [ \$ / \text{cm}^{-2} ] \quad (2.2)$$

で表わされ炉心の高さHに依存しない量である。しかし、実際に測定される量は重水々位反応度係数  $(\partial \rho / \partial H)_V$  であるため、(2.1)式は  $(\partial \rho / \partial H)_V$  を用いて求めることになる。

$(\partial \rho / \partial H)_V$  は

$$\left( \frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_V = \left( \frac{2\pi M_Z^2}{\beta_{\text{eff}} k_{\infty}} \right)_V \cdot \frac{1}{(H + \lambda_V)^3} \quad [ \$ / \text{cm} ] \quad (2.3)$$

で表わされ、Hの関数となる。ただし、 $\lambda_V$ は100%ボイド炉心の軸方向外挿距離である。また  $M_Z^2$ 、 $\beta_{\text{eff}}$  および  $k_{\infty}$  はそれぞれ炉心を形成する格子の実効的な軸方向移動面積、遅発中性子発生割合および無限増倍率である。しかし、反応度が加わったことにより、Hが大幅に変化すれば  $(M_Z^2 / \beta_{\text{eff}} k_{\infty})$  の値も変化するが、今実験における反応度の測定範囲で  $(M_Z^2 / \beta_{\text{eff}} k_{\infty})$  の値は一定であるとして、 $(M_Z^2 / \beta_{\text{eff}} k_{\infty})$  は  $\lambda_V$  とともにHと  $(\partial \rho / \partial H)_V$  との最小二乗フィッティングにより求められた。もし、ボイド反応度が投入される前後で炉心高さが変化しない(軸方向外挿距離が冷却材ボイド率に依存しない)としたときのボイド反応度  $\rho'_{0 \rightarrow V}$  は、(2.3)式より

$$\rho'_{0 \rightarrow V} = \int_{H_V}^{H_0} \left( \frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_V dH = \frac{\pi^2 M_Z^2}{\beta_{\text{eff}} k_{\infty}} \left\{ \frac{1}{(H_V + \lambda_V)^2} - \frac{1}{(H_0 + \lambda_V)^2} \right\} \quad (2.4)$$

となり、ボイド率変化の生ずる前後の臨界水位差から容易に求められる。ただし、

$H_0$ 、 $H_V$  : 0%ボイド炉心および100%ボイド炉心の臨界水位

$(\partial \rho / \partial H)_V$  : 100%ボイド炉心の炉心高さHにおける重水水位反応度係数

したがって、直接測定されるボイド反応度は炉心高さが一定の場合のものであり、軸方向バックリングが一定の場合のボイド反応度  $\rho_{0 \rightarrow V}$  は ( 2.1 ) 式を書き換えて

$$\rho_{0 \rightarrow V} = \frac{\pi^2 M_Z^2}{\beta_{\text{eff}} k_{\infty}} \left\{ \frac{1}{(H_V + \lambda_V)^2} - \frac{1}{(H_0 + \lambda_0)^2} \right\} \quad ( 2.5 )$$

となる。ただし、 $\lambda_0$  は 0%ボイド炉心における軸方向外挿距離である。( 2.5 ) 式より  $\rho_{0 \rightarrow V}$  は、炉心高さが一定の場合のボイド反応度  $\rho'_{0 \rightarrow V}$  と比べ、 $\{ \cdot \}$  内第 2 項の外挿距離のボイド率の相異による差の分だけ異なることが分る。したがって、軸方向バックリング一定の場合のボイド反応度  $\rho_{0 \rightarrow V}$  は、炉心高さ一定の場合のボイド反応度  $\rho'_{0 \rightarrow V}$  を測定し、 $\rho'_{0 \rightarrow V}$  に 0%ボイド炉心と 100%ボイド炉心との外挿距離の差が反応度へ及ぼす効果を補正して求めることができる。この場合  $\rho_{0 \rightarrow V}$  は  $\rho'_{0 \rightarrow V}$  を用いて

$$\rho_{0 \rightarrow V} \approx \rho'_{0 \rightarrow V} - \frac{2 \pi^2 M_Z^2}{\beta_{\text{eff}} k_{\infty}} \cdot \frac{\delta \lambda}{(H_0 + \lambda_V)^3} \quad ( 2.6 )$$

で近似できる。ただし、 $\delta \lambda$  は 0%ボイド炉心と 100%ボイド炉心における軸方向外挿距離の差である。

以上のような正炉周期法と臨界水位差法とから冷却材ボイド反応度を求めるためには、重水位反応度係数 ( $\partial \rho / \partial H$ ) の炉心高さ  $H$  に対する依存性を測定する必要がある。このため実験では、100%ボイド炉心に挿入する  $B_4C$  制御棒の本数や位置を種々変化させ、臨界炉心高さを変化させることによって ( $\partial \rho / \partial H$ ) を測定した。そして  $H$  と ( $\partial \rho / \partial H$ ) とのデータを ( 2.3 ) 式に最小二乗フィッティングすることにより、( 2.3 ) 式で示される関数形の任意定数  $a$  ( $= 2 \pi^2 M_Z^2 / \beta_{\text{eff}} k_{\infty}$ ) および  $b$  ( $= \lambda_V$ ) の値を求めた。

## (2) 制御棒反応度値

冷却材ボイド反応度を測定した  $B_4C$  制御棒挿入炉心の制御棒反応度値は、100%ボイド炉心においてボイド反応度と同様に正の炉周期法および臨界水位差法によって測定された。この場合に求まる制御棒反応度値  $\rho_{B_4C}$  は、制御棒未挿入時の臨界炉心から、軸方向バックリング  $B_Z^2$  が一定に保持されたまま、制御棒を炉心に全挿入した際に炉心に投入される反応度を示し、次式により求めた。

$$\rho_{B_4C} \equiv \int_{B_Z^2(B_4C)}^{B_Z^2(\text{clean})} \left( \frac{\partial \rho}{\partial B_Z^2} \right)_V d B_Z^2 \quad ( 2.7 )$$

ただし、

$B_Z^2(\text{clean})$  : 制御棒未挿入炉心の臨界軸方向バックリング

$B_Z^2(B_4C)$  : 制御棒挿入炉心の臨界軸方向バックリング

一方、冷却材のボイド率が一定であれば、第3.4節(2)で述べるように制御棒の挿入の有無によって軸方向外挿距離に差異は見出されないので、(2.7)式は炉心高さ一定としたときの制御棒反応度値  $\rho'_{B_4C}$  と等しくなり、 $\rho_{B_4C}$  は

$$\rho_{B_4C} = \rho'_{B_4C} \equiv \int_{H_{B_4C}}^{H_0} \left( \frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_V dH \quad (2.8)$$

で求められる。

ただし、

$H_0$  : 制御棒未挿入炉心の臨界水位

$H_{B_4C}$  : 制御棒挿入炉心の臨界水位

その他、重水々位反応度係数  $(\partial \rho / \partial H)_V$  の関数形およびそれに含まれる任意定数の決定方法はボイド反応度の測定方法で記述したものと同様である。

## 2.3 熱中性子束分布の測定方法

### (1) 炉心動径方向熱中性子束分布

制御棒挿入炉心における動径方向熱中性子束分布が冷却材ボイド率変化によってどのように変化するかを把握するために、炉心内熱中性子束分布を  $3\phi \times 15^L$  銅試料の放射化法によって測定した。熱中性子束分布はプルトニウム燃料の装荷体数が9体および21体の制御棒挿入炉心についてのみ測定された。熱中性子束分布の測定位置は、単位格子境界の重水減速材中および燃料クラスタ中心であり、測定点の炉心高さは臨界重水々位のほぼ中点の550mmとした。銅試料の挿入位置を第2.7図に示す。

炉心内の所定位置に吊り下げられた銅試料は500Wの出力で20分間照射された。銅の放射化量は  $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$  反応によって生成された  $^{64}\text{Cu}$  (半減期 12.8 hr.) から放出される 0.51 MeV ガンマ線を NaI (Tl) シンチレーション検出器により測定した。

### (2) 軸方向バックリング

軸方向熱中性子束分布は、炉心下部構造材および燃料延長部の存在のために、炉心上下境界付近で余弦分布からずれてくる。すなわち、測定した軸方向放射化量分布の余弦関数へのフィッティング範囲を変化させてゆくと、得られる軸方向バックリングがフィッティング領域に依存して変化することになる。しかし、軸方向バックリングは炉心上下境界から離れるにしたがって、炉心上下部構造材の影響を受けにくくなるため一定値に収束する傾向にある。

冷却材ボイド反応度は、解析条件との整合性を図るため反応度変化の前後で軸方向バックリングを一定として求められている。したがって、①炉心の上下部構造材の影響を除去した軸方向バックリング、および②反射体節約を含めた軸方向外挿距離を求めるため、軸方向バ

ックリングがフィッティング領域に依存しないとみなされる領域での軸方向バックリングが必要となる。

軸方向バックリングは3 mm  $\phi$  銅ワイヤーの放射化法により測定した。この銅ワイヤーは炉心内の任意の重水中および燃料クラスター中心に吊り上げられ、500 W  $\times$  20分照射されたのち、(1)と同様に0.51 MeV ガンマ線をワイヤースキャニング装置を利用してNaI (T $\ell$ ) シンチレーション検出器により測定した。

測定された軸方向放射化量分布はフィッティング領域を変化させながら余弦関数に最小二乗フィッティングされ、軸方向バックリング $B_{\frac{1}{2}}$ のフィッティング領域依存性を求めた。最終的には、フィッティング領域に依存しなくなった軸方向バックリングをもって求めるべきバックリングとした。

#### 2.4 臨界水位に対する炉心温度等の補正

実験では体系によって炉心温度が $\pm$ 約3℃変化する。また0%ボイド炉心では臨界重水々位と圧力管内軽水々位とができるだけ等水位になるように調整したが、必ずしも等水位とはみなされない場合がある。その他、安全棒案内管(A $\ell$ )の位置が異なる場合もあり、各炉心で臨界条件が必ずしも一定ではない。したがって実験で求めたボイド反応度や制御棒反応度値に関し、炉心温度等同一条件で求めた計算値との比較を行うためには各炉心で実験条件を同一にする必要がある。

ここでは、以上に示す炉心条件の相異に基因する反応度変化を実験的に求め、次に示す炉心条件

- ① 炉心温度 22℃
- ② 減速材重水々位と冷却材水位は等水位
- ③ 安全棒案内管反応度の除去

になるように臨界水位を補正してボイド反応度および制御棒反応度値を求めた。

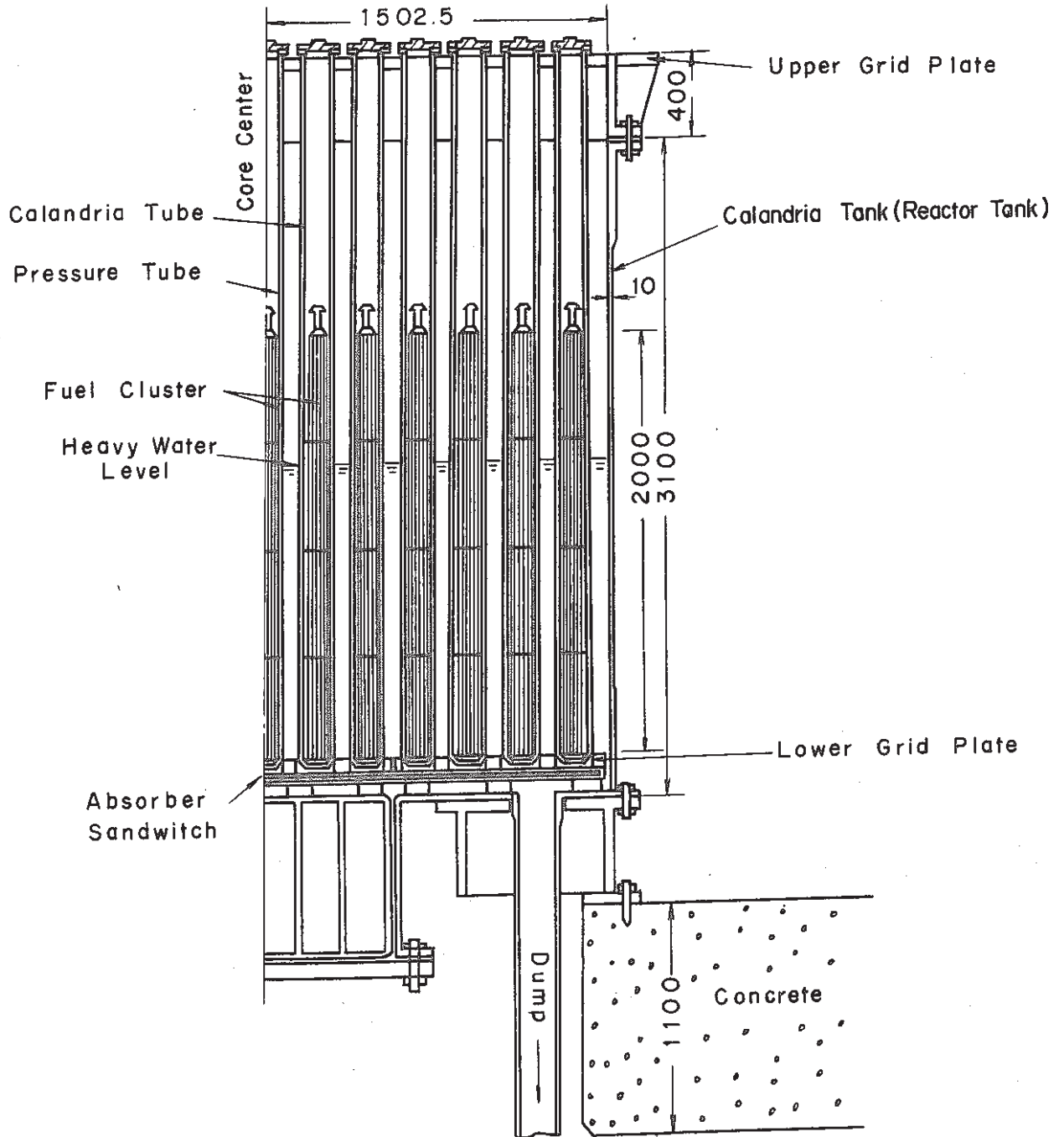


Fig. 2.1 Schematic drawing of the core configuration of Deuterium Critical Assembly (DCA)

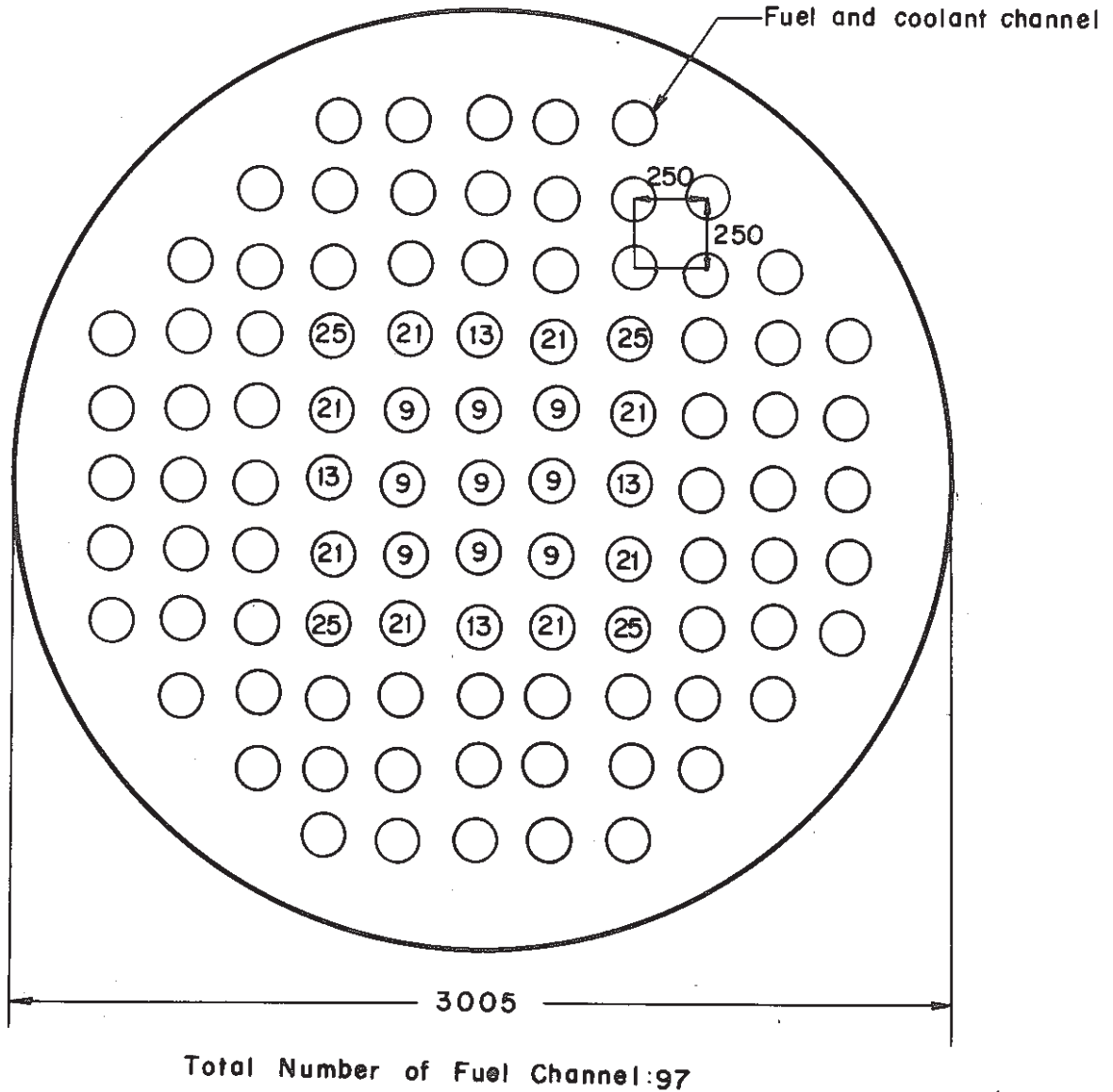


Fig. 2.2 Configuration of DCA core having 25.0-cm pitch lattice and substituting pattern of  $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$  fuel assemblies



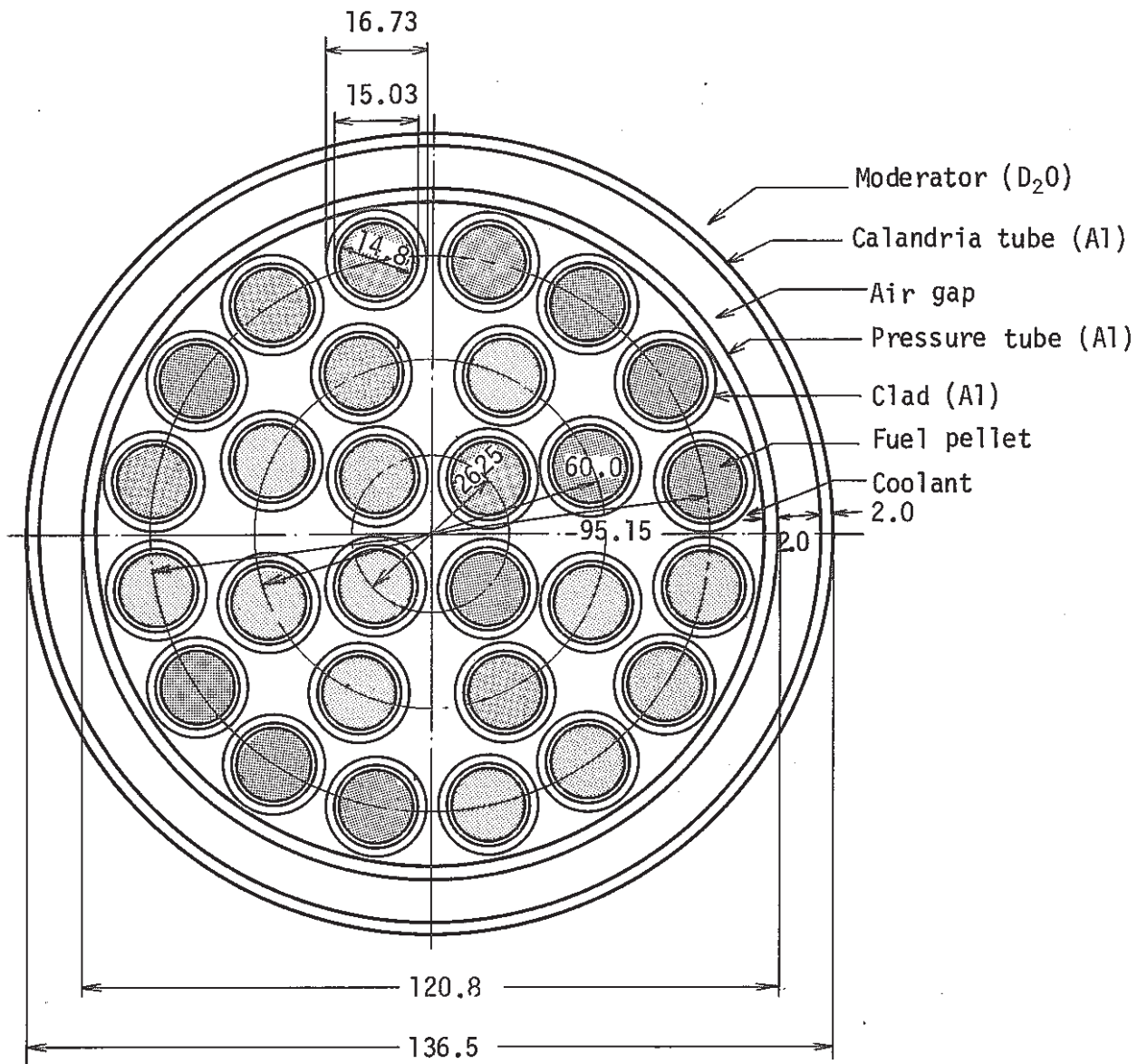


Fig. 2.3 Cross-sectional view of 28-rod fuel assembly



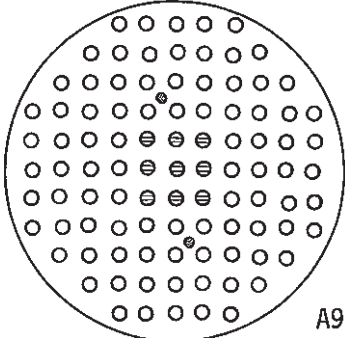
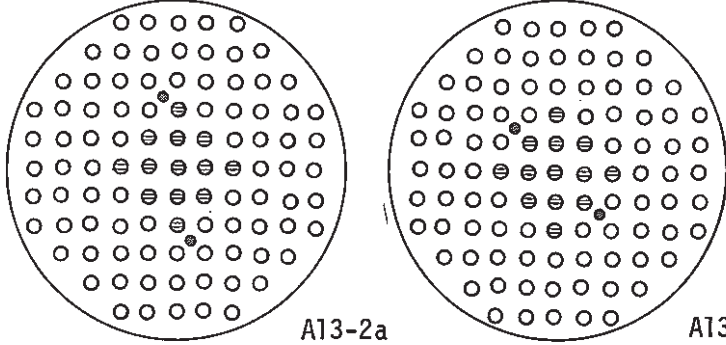
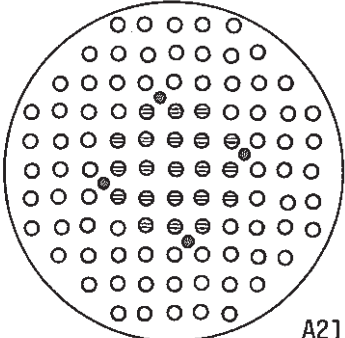
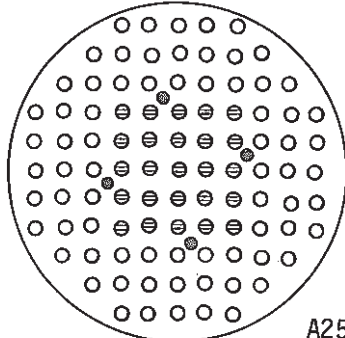
No. of PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> clusters	No. of control-rod	Core pattern and core number
9	2	 <p>A9-2</p>
13	2	 <p>A13-2a      A13-2b</p>
21	4	 <p>A21-4</p>
25	4	 <p>A25-4</p>

Fig. 2.4 Core configuration and position of inserted control-rods in 0.54wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> fueled core

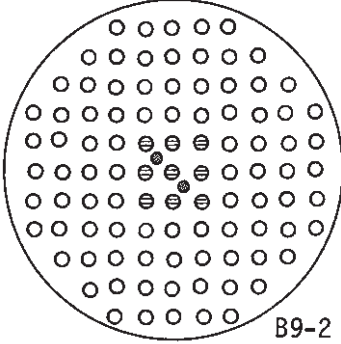
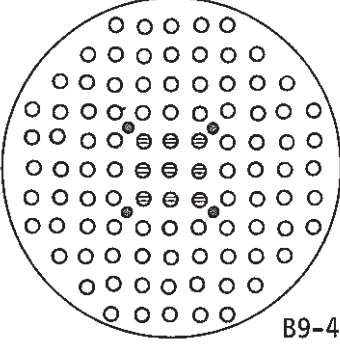
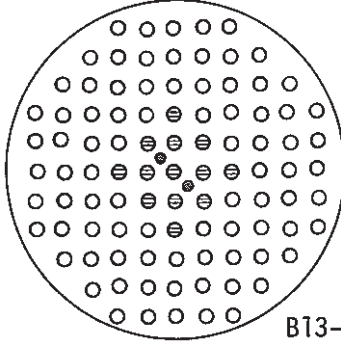
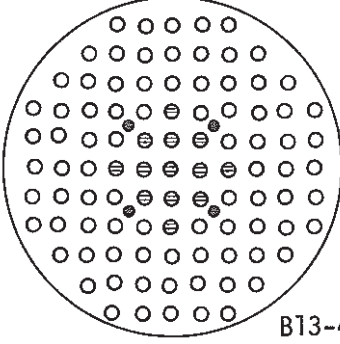
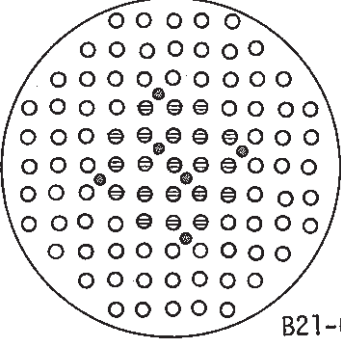
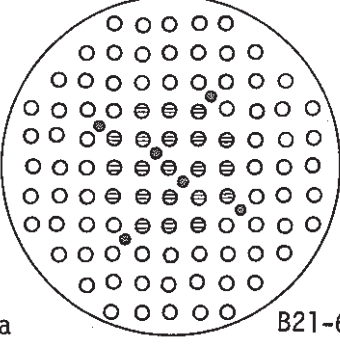
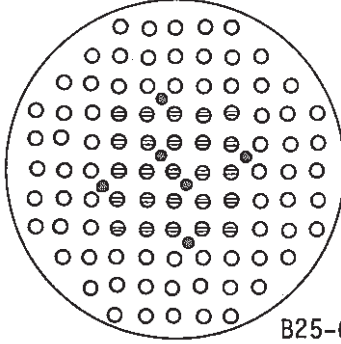
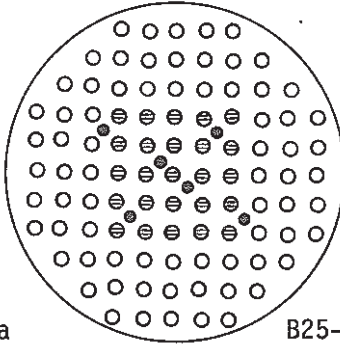
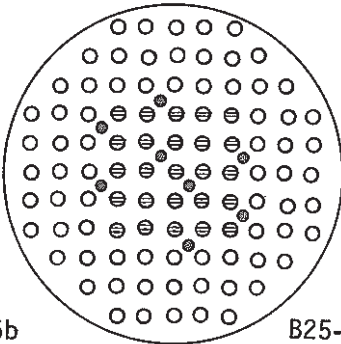
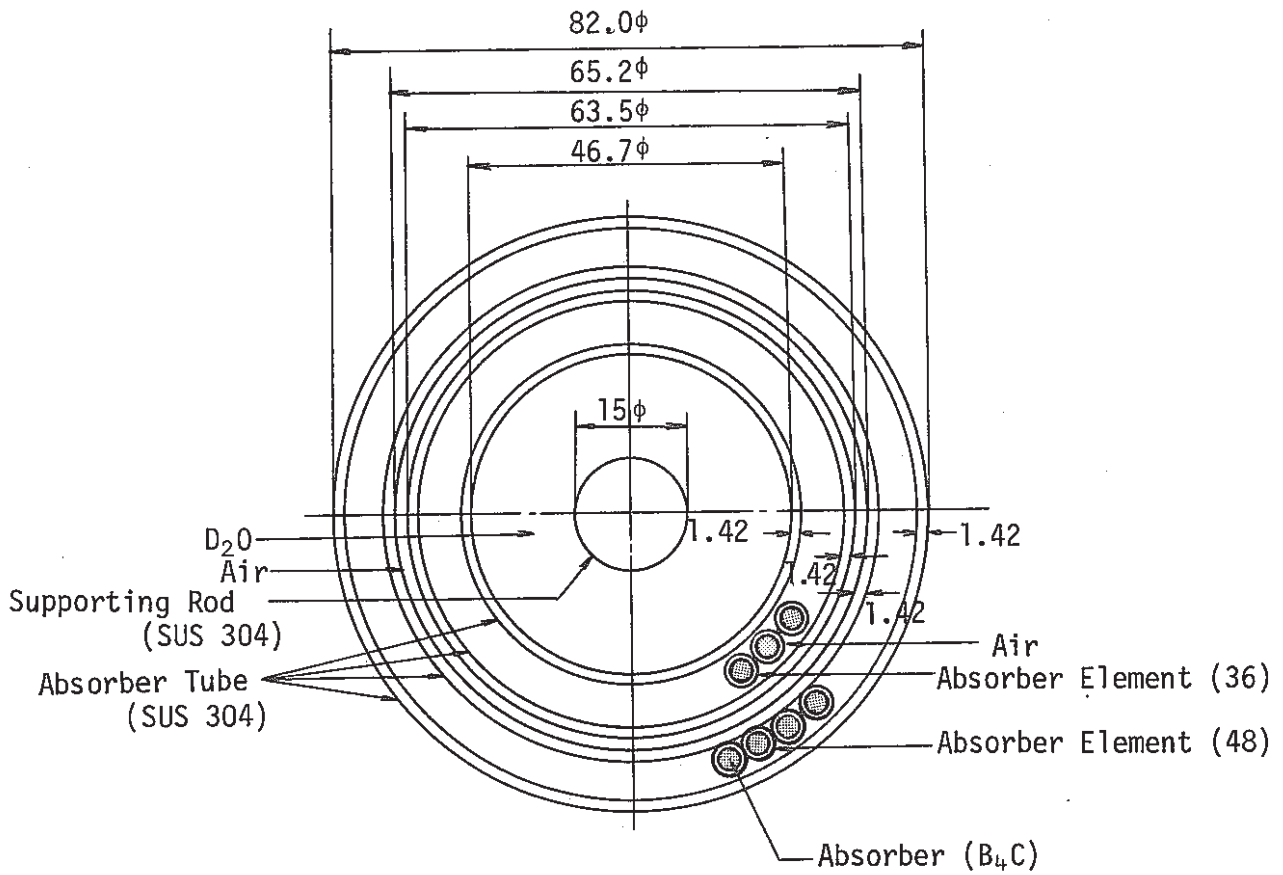
No. of PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> clusters	No. of control-rod	Core pattern and core number			
9	2				
	4			B9-2	B9-4
13	2				
	4			B13-2	B13-4
21	6				
	6			B21-6a	B21-6b
25	6				
	8			B25-6a	B25-6b
	8				B25-8

Fig. 2.5 Core configuration and position of inserted control-rods in 0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> fueled core



Absorber Element		(Unit: mm)
Absorber	B <sub>4</sub> C 34.8±0.5 g	
Effective Length	1975 mm	
Density	70% TD	
Clad (SUS 304)		
Diameter	3.58 mm I.D.	
Thickness	0.59 mm	
Length	1983 mm	

Fig. 2.6 Cross section of B<sub>4</sub>C control-rod

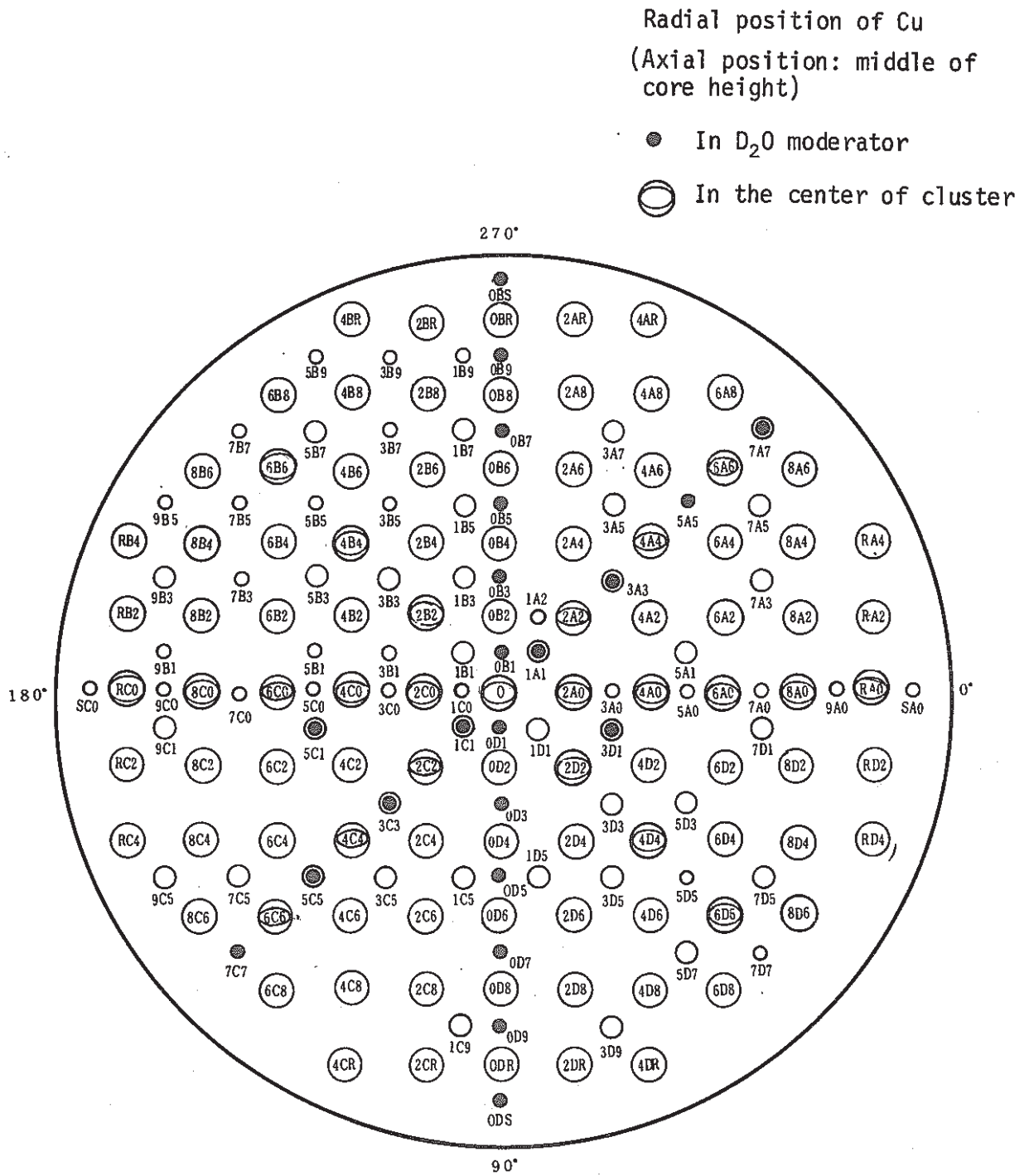


Fig. 2.7 Measurement position of radial flux distribution by  $3\phi \times 10^4$  Cu sample

Table 2.1 Core number of the core used in the experiment

Mixed oxide fuel in central region	No. of loaded clusters		Inserted B <sub>4</sub> C control-rods		Core number
	PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	1.2wt%UO <sub>2</sub>	No.	Position	
—	0	97	0	—	U-0
0.54wt%PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	9	88	2	1B-D5	A9-2
	13	84	2	1B-D5	A13-2a
			2	3B-D3	A13-2b
	21	76	4	5C-A1, 1B-D5	A21-4
25	72	4	5C-A1, 1B-D5	A25-4	
0.87wt%PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	9	88	2	1B-D1	B9-2
			4	3A-B-C-D3	B9-4
	13	84	2	1B-D1	B13-2
			4	3A-B-C-D3	B13-4
	21	76	6	1B-D1, 5C-A1, 1B-D5	B21-6a
			6	1B-D1, 3C-A5, 5B-D3	B21-6b
	25	72	6	1B-D1, 5C-A1, 1B-D5	B25-6a
			6	1B-D1, 3C-A3, 5B-D3	B25-6b
8			1B-D1, 5C-A1, 1B-D5, 5B-D3	B25-8	

Table 2.2 Specification of fuel assembly and composed materials

## (a) Fuel rod

Fuel rod	Name	Outer dia. (mm)	Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )
0.54(0.87)wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	Pellet	14.80	Pu enriched PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> *	10.17
	Gap	15.03	Helium	—
	Sheath	16.73	Zry-2	6.52
1.2wt% UO <sub>2</sub>	Pellet	14.80	1.2wt% UO <sub>2</sub>	10.36
	Gap	15.03	Helium	—
	Sheath	16.73	Al-Mg alloy	2.674

$$* \text{ Enrichment} = \frac{\text{PuO}_2}{\text{PuO}_2 + \text{UO}_2}$$

## (b) Composed material

Fuel assembly	Name	Inner dia. (mm)	Thickness (mm)	Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )
0.54(0.87)wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	Pressure tube	130.3	3.0	Al Mg alloy	2.674
	Gap	136.3	5.1	Air	0.001
	Calandria tube	146.5	3.5	Al Mg alloy	2.674
1.2wt% UO <sub>2</sub>	Pressure tube	116.8	2.0	Al-Mg alloy	2.674
	Gap	120.8	5.9	Air	0.001
	Calandria tube	132.5	2.0	Al-Mg alloy	2.674
—	Moderator	136.5	—	99.45 mol% D <sub>2</sub> O	1.1045
	Coolant	—	—	H <sub>2</sub> O	0.9978

Table 2.3 Composition of fuel pellet and sheath

## (a) Pellet

Pellet	Nuclide	Ingredient (wt%)		Atomic number density ( $\times 10^{24}/\text{cm}^3$ )
		Pu	Whole	
0.54wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	U-235		0.6214	$1.620 \times 10^{-4}$
	U-238		86.782	$2.233 \times 10^{-2}$
	Pu-238	0.021	0.00010	$< 10^{-7}$
	Pu-239	90.360	0.4304	$1.103 \times 10^{-4}$
	Pu-240	8.640	0.04115	$1.050 \times 10^{-5}$
	Pu-241	0.915	0.00436	$1.108 \times 10^{-6}$
	Pu-242	0.064	0.00030	$< 10^{-7}$
	O-16		12.12	$4.640 \times 10^{-2}$
0.87wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	U-235		0.6194	$1.615 \times 10^{-4}$
	U-238		86.503	$2.226 \times 10^{-2}$
	Pu-238	0.019	0.00014	$< 10^{-7}$
	Pu-239	90.314	0.6849	$1.755 \times 10^{-4}$
	Pu-240	8.682	0.06584	$1.680 \times 10^{-5}$
	Pu-241	0.918	0.00696	$1.769 \times 10^{-6}$
	Pu-242	0.067	0.00051	$1.291 \times 10^{-7}$
	O-16		12.12	$4.641 \times 10^{-2}$
1.2wt% UO <sub>2</sub>	U-235		1.057	0.00028
	U-238		86.793	0.02275
	O-16		12.150	0.04738

## (b) Sheath

Fuel rod	Sheath material	Nuclide	Ingredient (wt%)
0.54(0.87)wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	Zry-2	Zr	98.22
		Sn	1.48
		Fe	0.14
		Cr	0.10
		Ni	0.06
1.2wt% UO <sub>2</sub>	Al-Mg alloy	Al	96.98
		Ag	2.60
		Impurity	0.42

Table 2.4 Material composition of experimental control-rod

(1)

Control-rod	Region	Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )
B <sub>4</sub> C	Absorber	B <sub>4</sub> C	1.7535
	Clad & Absorber tube	SUS 304	8.03

(2)

Experimental control-rod	Region	Nuclide	Ingredient (wt%)
B <sub>4</sub> C	Absorber (B <sub>4</sub> C)	B(Nat.)	78.284
		C	21.716
	Clad & Tube (SUS 304)	Fe	70.41
		Cr	19.00
		Ni	9.50
		Mn	1.00
		Si	0.05
		C	0.04



### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 臨界水位および重水々位反応度係数

プルトニウム燃料の装荷体数を0体から順次9, 13, 21, 25体に変化させるとともに, 挿入するB<sub>4</sub>C制御棒の本数および位置を変化させながら, ボイド率が0%および100%の各炉心の臨界水位および重水々位反応度係数を測定した。この結果を第3.1表に示す。なお0%ボイドの場合の圧力管内冷却材水位は, 各炉心の臨界重水々位が1080mm前後になるように制御棒の挿入本数および位置の調整を行い, すべての炉心について1080mmとした。第3.1表に示される臨界重水々位と重水々位反応度係数の関係は第3.1図に示してある。

第3.1表に記載した臨界重水々位の値は, 炉心温度や安全棒案内管位置などが一定の実験条件になっていない。そこで第2.4節に述べたような条件での臨界水位に補正し, 補正を行った臨界水位の値を第3.2表に示す。ここで臨界水位に対する炉心温度等の補正に用いた実験データを第3.3表に示す。

#### 3.2 冷却材ボイド反応度

第3.2表に示す各種の補正をした臨界重水々位を用いて, 炉心高さが一定の場合および軸方向バックリングが一定の場合のボイド反応度をそれぞれ(2.4)式および(2.6)式から求めた。それらの結果を第3.4表に示す。ボイド反応度の測定誤差は, 主に出力2倍時間測定から求まる重水々位反応度係数の測定誤差および(2.3)式のフィッティング誤差に基因しており, その値は±約15%と見積られた。

軸方向バックリングが一定の場合のボイド反応度は, (2.6)式のように炉心高さ一定の場合のボイド反応度に軸方向外挿距離の差による反応度効果を補正して求められた。3.4節(2)に示す外挿距離の測定値の平均値を用いてこの補正量を求めると0.8~1.0%であり, この補正量の燃料組成および制御棒本数などの相異による変化は実験誤差程度で小さいことが分った。

##### 3.2.1 炉心高さ依存性

制御棒が挿入されない炉心の場合, ボイド反応度はバックリングが大きい(体系が小さい)ほど負側へ移行する傾向にある。<sup>(1)~(2)</sup> 制御棒挿入炉心のボイド反応度が軸方向バックリングの大きさによってどのように変化するかを調べるために, 測定されたボイド反応度の0%ボイド炉心軸方向バックリングに対する依存性を第3.2図に示す。なお, ここでの軸方向バックリングは, 第3.2表の臨界水位と3.4節(2)に示す軸方向外挿距離の測定値を用いて変換された値である。この第3.2図から明らかなように, 炉心中央部にプルトニウム燃料を装荷し, かつ制御

棒を挿入した炉心のボイド反応度は、たとえ軸方向バックリングが同一であっても1.2 wt%ウラン燃料一様炉心のボイド反応度より正側にはなりえない。つまり、プルトニウム燃料を装荷することによって増大した余剰反応度を制御棒を用いて相殺したとしても、プルトニウム燃料は依然としてボイド反応度を1.2 wt%ウラン燃料に比べて、1.5 \$以上負側に抑制する効果として働いている。しかし制御棒挿入炉心では、軸方向バックリングが同じであっても、ボイド反応度は制御棒の挿入本数や位置によって-1.5 \$~-6.0 \$程度の範囲で変化しており、ボイド反応度の軸方向バックリングのみの依存性は見出されない。

プルトニウム燃料の装荷体数が同一であれば、(B 9-2)及び(B 13-2)炉心のような極端な制御棒パターン(炉心中央に制御棒2本を接近して挿入)をとらない限り、制御棒の挿入本数に拘らずプルトニウムの富化度が高い燃料ほどボイド反応度はより負側の値をとる。前述したように、制御棒挿入炉心のボイド反応度は、制御棒の挿入本数や位置によって-1.5~6.0 \$の範囲で変化するが、その変化の幅は同一の燃料構成の炉心については第3.2図の(B 13-2)および(B 13-4)炉心で示されたように最大2 \$程度である。しかしプルトニウム燃料の装荷体数が21体以上になると、(B 21-6)~(B 25-8)炉心にみられるように、制御棒の挿入パターンを変化させ、軸方向バックリングを $6.0 \sim 8.0 \text{ m}^{-2}$ の範囲で大幅に変化させてもボイド反応度の変化量は小さく、ボイド反応度は大略(-5.5 ± 0.5) \$の範囲に入ってしまう。このことから制御棒が挿入されれば、プルトニウム燃料の富化度および装荷体数が変化してもボイド反応度のとりうる幅は未挿入炉心の場合に比べて小さくなる。すなわち、制御棒挿入炉心では、制御棒未挿入炉心に比べてボイド反応度に対するプルトニウム燃料の富化度や装荷体数の影響を受けにくくなることを示している。

### 3.2.2 制御棒価値依存性

挿入した制御棒反応度価値  $\rho_{B_4C}$  に対して、冷却材ボイド反応度  $\rho_{0 \rightarrow V}$  の変化の様子を調べるために  $\rho_{0 \rightarrow V}$  の  $\rho_{B_4C}$  依存性を第3.3図に示す。この図で  $\rho_{B_4C} = 0$  (\$) のときのボイド反応度は、プルトニウム燃料を9体から25体部分装荷した制御棒未挿入炉心における測定値<sup>(2)</sup>である。この図から分るように、制御棒が挿入されなければ、ボイド反応度はプルトニウム燃料の装荷体数に応じて-2~-10 \$まで分布しているが、これらの炉心に最大8本の制御棒を挿入することによりボイド反応度は未挿入炉心に比べ0.4~4.0 \$正側へ移行する(第3.5表)。この制御棒挿入にともなうボイド反応度の正側への移行量は装荷するプルトニウム燃料の種類にはよらない。

挿入制御棒がなく、プルトニウム燃料の富化度および装荷体数を変化させた炉心でのボイド反応度については既に報告<sup>(2)</sup>してあるが、炉心に制御棒を挿入することによってボイド反応度がどの程度正側へ移行するかを制御棒反応度価値に対してプロットしたのが第3.4図である。第3.4図から明らかなように、-2~-10 \$に分布するボイド反応度は制御棒が挿入されるこ

とによって0.4～4.0\$正側に移行する。ボイド反応度が正側へ移行する程度は、制御棒反応度値の大きさおよび制御棒挿入パターンによって異なる。その正側への移行量は制御棒反応度値が同じであっても、制御棒パターンによって2～3\$変化する。しかし、今回の実験からはプルトニウム燃料の富加度の相異による正側への移行量の差は見出せなかった。また、制御棒をプルトニウム燃料領域に挿入した場合、制御棒反応度値が大きいほどボイド反応度はより正側に移行する傾向にあるが、制御棒反応度値がある程度大きくなれば、ボイド反応度の変化量は飽和する傾向にある。

### 3.2.3 制御棒位置依存性

ボイド反応度の制御棒挿入位置に対する影響を考察する。第3.4図の0.87wt%プルトニウム燃料を同数装荷した炉心で、制御棒挿入領域が主に異なる炉心のボイド反応度を比較してみる。例えば(B9-4)および(B13-4)炉心のボイド反応度を、それぞれ(B9-2)、(B13-2)炉心の場合と比べると、制御棒挿入による正側への反応度変化量は約2\$も小さくなっている。この2つの炉心だけはいずれも(B21-6a, 6b)炉心や(B25-6a, 6b, 8)炉心に比べて、プルトニウム燃料領域に制御棒が挿入されておらず、ウラン燃料領域にのみ4本の制御棒が挿入されている。したがってこの(B9-4)および(B13-4)炉心では、プルトニウム燃料領域の熱中性子束分布が制御棒挿入炉心に比べて低下していないため、制御棒を分散的に挿入したB21炉心やB25炉心とは異なりプルトニウム燃料によるボイド反応度抑制効果が衰えていないものと考えられる。

このことから(A9-2)～(A25-4)炉心のように、制御棒が挿入されてもプルトニウム燃料領域のインポートランスが大きい炉心のボイド反応度は、(B9-2)または(B13-2)炉心のように顕著に正側に移行しない。

### 3.2.4 制御棒による効果

炉心パラメータが変化すれば臨界炉心高さも異ってくるため、測定したボイド反応度に占める軸方向中性子漏洩の寄与も異ってくる。<sup>(1)</sup>ここではボイド反応度に対する挿入制御棒の効果を明確にするために、測定されたボイド反応度に占める軸方向中性子漏洩反応度を補正して比較する。

摂動論による解析では、格子ピッチおよび減速材中<sup>10</sup>B濃度が一同であればボイド発生にとまなう軸方向漏洩反応度 $\rho_{0 \rightarrow V}^{Z\text{-leakage}}$ は軸方向バックリング $B_{\frac{1}{2}}^2$ に対して単調に負の微係数で変化することが明らかになった。<sup>(1)</sup>そこでこの解析結果を利用し、 $B_{\frac{1}{2}}^2$ に対応する $\rho_{0 \rightarrow V}^{Z\text{-leakage}}$ が一義的に定まるものと仮定して、制御棒挿入炉心の $B_{\frac{1}{2}}^2$ に対応する $\rho_{0 \rightarrow V}^{Z\text{-leakage}}(B_{\frac{1}{2}}^2)$ を見積ってみた。そして $\rho_{0 \rightarrow V}'' (= \rho_{0 \rightarrow V} - \rho_{0 \rightarrow V}^{Z\text{-leakage}})$ の値を比較することによってボイド反応度に及ぼす制御棒の効果を求める。上述したように、異なる高さの臨界炉心でのボイド反

応度に及ぼす軸方向漏洩反応度  $\rho_{0 \rightarrow V}^{Z\text{-leakage}} (B_{\frac{1}{2}}^2)$  は、 $B_{\frac{1}{2}}^2$  にのみ依存するものとして第 3.5 図から読みとった。このようにして求めた  $\rho_{0 \rightarrow V}^{Z\text{-leakage}} (B_{\frac{1}{2}}^2)$  を用いて、ボイド発生にともなう軸方向中性子漏洩反応度がないとした場合のボイド反応度  $\rho_{0 \rightarrow V}''$  を第 3.6 表に示す。

第 3.6 表の結果から、クリーン炉心（制御棒未挿入炉心）と制御棒挿入炉心のボイド反応度を比較すれば、制御棒挿入炉心のボイド反応度は  $\rho_{0 \rightarrow V}^{Z\text{-leakage}}$  の補正を行う前と同様にいずれもクリーン炉心の場合より正側になっている。このことから制御棒はボイド反応度を正側に移行させる効果があるものと結論される。特に、プルトニウム燃料領域に制御棒が挿入されれば、 $\rho_{0 \rightarrow V}''$  の正側への変化量は大きく約 3 \$ に達するが、ウラン燃料領域に挿入されればその正側への変化量は 1 \$ 未満におさまる。したがって、制御棒挿入炉心の場合でも炉心パラメータ変化による  $\rho_{0 \rightarrow V}$  の変化は  $\rho_{0 \rightarrow V}^{Z\text{-leakage}}$  を考慮しなくても、測定された  $\rho_{0 \rightarrow V}$  がそのまま炉心パラメータの変化に基因していることを示している。

以上のことから、プルトニウム燃料を装荷した制御棒挿入炉心のボイド反応度は制御棒の挿入されない炉心の場合に比べて正側に移行し、かつプルトニウムによるボイド反応度抑制効果は相対的に減少することが分った。制御棒の挿入がボイド反応度に与える要因として、主に次の 3 つの効果と考えられる。すなわち、制御棒が挿入されるとクリーン炉心に比べて

- (1) 中性子スペクトルが硬化するため、ボイド発生による中性子スペクトル硬化の影響が減少する（共鳴吸収の増大および熱中性子核分裂率の減少の程度が小さくなる）。
- (2) 制御棒に隣接する燃料中の熱中性子束分布が著しく低下しており、ボイドの発生によって制御棒の中性子吸収率は増大するため、熱中性子利用率の増加割合も小さくなる。
- (3) ボイドの発生によって制御棒反応度値が増加する。

このうち、(1)および(2)項はクリーン炉心の場合に比べてボイド反応度を正側へ移行させるが、(3)項は負側に移行させる効果をもつ。結果的には前 2 項の効果がボイド反応度の正側への変化を支配しているものと考えられる。次に、制御棒挿入本数の相異がボイド反応度に及ぼす要因について考える。プルトニウム燃料の装荷体数が同じである (B 9 - 2) および (B 9 - 4) 炉心、または (B 13 - 2) および (B 13 - 4) 炉心のボイド反応度の比較から分るように、制御棒反応度値が大きくなってもボイド反応度が正側へ移行するとは限らない。これは制御棒の挿入パターンが異なるため、3.2.2 節で述べたように炉心内の中性子束分布が両炉心で大きく異なっており、したがって上記(1)および(2)の効果は炉心領域によって異なることになり、制御棒反応度値だけに単純に依存しない。

### 3.3 制御棒反応度値

炉心温度等の補正を行ったのち、100%ボイド炉心における制御棒挿入前後の臨界重水々位を用いて (2.8) 式により種々の炉心の制御棒反応度値が求められた。この結果を臨界水位とともに第 3.7 表に示す。

制御棒反応度値は2本から8本の挿入本数に対して $-3 \sim -20$  \$の値が得られた。このとき制御棒の挿入位置や本数との組合せにより1本あたりの制御棒反応度値は $(-2.6 \pm 1.0)$  \$の範囲となった。測定誤差は $\pm(20 \sim 40)$  \$であり、反応度値に対する相対誤差は2～5%である。

### 3.4 熱中性子束分布

#### (1) 半径方向分布

熱中性子束分布は、代表的な炉心、すなわちプルトニウム燃料装荷体数が9体および21体の炉心(A 9-2およびB 21-6a炉心)について測定された。試料重量および放射能減衰時間の補正を行ったのち、炉心内550mm高さにおける銅試料の放射化量を求めた。

この銅の放射化量を炉心中心における燃料チャンネルの放射化量に規格化したときの熱中性子束分布を第3.6～3.7図に示す。また正方形格子の直角方向(炉心軸の $0^\circ - 180^\circ$ および $90^\circ - 270^\circ$ 方向)および正方形格子の対角線方向(同 $45^\circ - 225^\circ$ および $135^\circ - 315^\circ$ 方向)の熱中性子束分布を第3.8～3.11に示す。

第3.8～3.11図に示す熱中性子束分布の測定結果から、炉心の同一半径位置における燃料クラスタ中心と重水減速材中での熱中性子束分布を冷却材ポイド率の0%→100%変化に着目すれば次のことが分る。

- ① 燃料クラスタ中心と重水減速材中での熱中性子束分布の比は減少する。
- ② 熱中性子束分布は平坦化する。平坦化率は燃料クラスタ中心では小さいが、重水減速材中では著しい。

#### (2) 軸方向分布

軸方向熱中性子束分布は0.87wt%プルトニウム燃料が9体または21体装荷された炉心(B 9-2およびB 21-6a炉心)の燃料クラスタ中心および重水減速材中において測定された。第3.12～3.15図にそれぞれの測定点での最大値が1.0になるように規格化した軸方向熱中性子束分布を示す。実線は測定値に最小二乗法によりフィットさせた余弦関数を示している。

軸方向放射化量を余弦関数に最小二乗フィッティングする範囲を変化させながら得られた軸方向バックリング( $B_z^2$ )を第3.16～3.19図に、そしてそのバックリングがフィッティング領域に依存しないと判断される領域で平均した軸方向バックリングを各測定位置ごとに第3.9表に示す。さらに各測定位置で求めた軸方向バックリングを平均化して、(B 9-2)および(B 21-6a)の各炉心ごとの値を求め、このバックリングと臨界水位とから反射体節約を含む軸方向外挿距離( $\lambda_z$ )を求めて、同じく第3.8表に示す。 $\lambda_z$ の値は冷却材ポイド率が同じであれば実験誤差範囲内で一致することが分る。したがって各ポイド率ごとの $\lambda_z$ の平均値を求めると、 $\lambda_z$ は次のような値となる。

$$0 \text{ \%ボイド} \quad \lambda_Z = (11.5 \pm 0.4) \text{ cm}$$

$$100 \text{ \%ボイド} \quad \lambda_Z = (12.4 \pm 0.4) \text{ cm}$$

反応度変化で $B_{\frac{1}{2}}^2$ が一定とした時の冷却材ボイド反応度を求める際、使用する $B_{\frac{1}{2}}^2$ は臨界水位と以上のようにして得られた $\lambda_Z$ の値を用いて求められた。

Table 3.1 /Result of critical moderator level and level reactivity coefficient of moderator

(1) Fuel loaded in central region: 0.54wt%(S)PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub>

No. of loaded clusters		Inserted B <sub>4</sub> C control-rods		Void fraction (%)	Coolant level (mm)	Critical level (mm)	Level reactivity coefficient (¢/cm)	Moderator temperature (°C)
0.54wt%(S) PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	1.2wt% UO <sub>2</sub>	No.	Position					
0	97	0	/	0	1080	1080.5	26.9±1.4	21.0
				100	0	1059.4	44.0±2.1	21.5
9	88	2	1B5,1D5	0	1080	1067.7	31.4±1.2	21.5
				100	0	1085.0	44.9 44.2±1.3	22.0
13	84	2	1B5,1D5	0	1080	1040.0	35.6±0.9	21.0
				100	0	1069.8	48.0±1.2	21.8
		2	3B3,3D3	0	1080	1065.5	35.0±1.6 33.9±1.1	23.0
				100	0	1090.8	44.8±1.2	22.0
21	76	4	5C1,1B5 5A1,1D5	0	1080	1094.1	31.4±1.0	20.0
				100	0	1142.3	41.0 40.8±1.2	23.0
25	72	4	5C1,1B5 5A1,1D5	0	1080	1074.0	33.3±1.5	20.0
				100	0	1129.4	42.7 43.7±1.8	22.5
9	88	0	/	100	0	1015.6	51.2±2.6	22.0
13	84	0	/	100	0	1001.7	52.8±1.8	22.0
21	76	0	/	100	0	978.3	62.3±1.9	22.5
25	72	0	/	100	0	978.1	61.8±2.3	22.5
						970.0	65.1±2.3 67.0±3.0	



(2) Fuel loaded in central region : 0.87wt%(S)PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub>

No. of loaded clusters		Inserted B <sub>4</sub> C control-rods		Void fraction (%)	Coolant level (mm)	Critical level (mm)	Level reactivity coefficient (¢/cm)	Moderator temperature (°C)
0.87wt%(S) PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	1.2wt% UO <sub>2</sub>	No.	Position					
0	97	0	/	0	1080	1076.0	28.2±0.6	15.5
				100	0	1055.3	42.2±1.0	16.0
9	88	2	1B1,1D1	0	1080	1082.6	28.8±0.7	21.0
				100	0	1101.8	38.2±1.0	16.2
		4	3A3,3B3 3C3,3D3	0	1080	1090.1	31.0±0.6	21.0
				100	0	1161.4	36.1±0.7	15.8
13	84	2	1B1,1D1	0	1080	1018.6	40.7±0.8	20.5
				100	0	1065.8	44.3±1.1	16.0
		4	3A3,3B3 3C3,3D3	0	1080	1019.7	40.7±1.2	21.0
				100	0	1116.8	41.7±1.0	16.0
21	76	6	1B1,1D1 3C5,3A5 5B3,5D3	0	1080	1049.3	43.0±1.3	20.5
				100	0	1159.6	40.8±1.2	16.3
		6	1B1,1D1 5C1,5A1 1B5,1D5	0	1080	1110.4	29.4±1.1	20.5
				100	1110	1107.8	31.1±0.8	16.8
25	72	6	1B1,1D1 5C1,5A1 1B5,1D5	0	1080	1053.6	37.5±1.0	20.5
				100	0	1168.4	40.0±1.3	16.6
		6	1B1,1D1 3C3,3A3 5B3,5D3	0	1080	1076.0	32.7±0.9	20.5
				100	0	1179.8	37.5±0.8	16.4
		8	1B1,1D1 5C1,5A1 1B5,1D5 5B3,5D3	0	1080	1136.4	27.1±0.9	20.5
				100	0	1264.5	31.1±0.6	16.3
9	88	0	—	100	0	957.6 957.1	65.9±2.3 57.5±1.9	16.0
13	84	0	—	100	0	929.6 929.2	78.7±3.2 71.7±3.1	16.2
21	76	0	—	100	0	885.7	85.2±3.3 84.6±3.0	16.7
		2	1B1,1D1	100	0	1003.7	56.9±1.6 56.3±1.6	16.7
25	72	0	—	100	0	871.7	91.9±4.3 85.7±4.0	16.2
		2	1B1,1D1	100	0	980.6 980.0	62.9±2.2 55.6±1.8	16.0



Table 3.2 Critical moderator level corrected for level difference between moderator and coolant, and core temperature 22°C

(1) Kind of fuel in central region : 0.54wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub>

No. of loaded clusters		Inserted B <sub>4</sub> C control-rods		Void fraction (%)	Corrected critical level (mm)	Core number
0.54wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	1.2wt% UO <sub>2</sub>	No.	Position			
0	97	0		0 100	1080.6 1059.3	U-0
9	88	2	1B5,1D5	0 100	1068.3 1084.7	A9-2
13	84	2	1B5,1D5	0 100	1042.6 1069.6	A13-2a
		2	3B3,3D3	0 100	1065.6 1090.5	A13-2b
21	76	4	5C1,1B5 5A1,1D5	0 100	1093.8 1141.3	A21-4
25	72	4	5C1,1B5 5A1,1D5	0 100	1075.1 1128.8	A25-4

(2) Kind of fuel in central region ; 0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub>

No. of loaded clusters		Inserted B <sub>4</sub> C control-rods		Void fraction (%)	Corrected critical level (mm)	Core number
0.87wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	1.2wt% UO <sub>2</sub>	No.	Position			
0	97	0		0	1080.6	U-0
				100	1059.4	
9	88	2	1B1,1D1	0	1083.1	B9-2
				100	1106.3	
		4	3A3,3B3 3C3,3D3	0	1090.0	B9-4
				100	1166.5	
13	84	2	1B1,1D1	0	1022.4	B13-2
				100	1069.8	
		4	3A3,3B3 3C3,3D3	0	1023.5	B13-4
				100	1121.1	
21	76	6	1B1,1D1 5C1,5A1,1B5,1D5	0	1108.3	B21-6a
				100	1215.7	
		6	1B1,1D1 3C5,3A5,5B3,5D3	0	1051.0	B21-6b
				100	1163.1	
25	72	6	1B1,1D1 5C1,5A1,1B5,1D5	0	1055.7	B25-6a
				100	1172.1	
		6	1B1,1D1 3C3,3A3,5B3,5D3	0	1076.8	B25-6b
				100	1183.9	
		8	1B1,1D1,5B3,5D3 5C1,5A1,1B5,1D5	0	1132.4	B25-8
				100	1269.5	

Table 3.3 Reactivity coefficients used in the correction of critical level

Effect	Void fraction (%)	Reactivity coefficient or change in reactivity
Core temperature	0	-2.0 $\rho$ /°C
	100	-3.0 $\rho$ /°C
Difference in levels between coolant and moderator	0	2.5 $\rho$ /cmH <sub>2</sub> O
	100	—
Change in position of safety-rod guide tube*	0	-0.6 $\rho$ /tube (-12% change)
	100	

\* 3C3 → 3C5 or 3B3 → 5B3

Table 3.4 Experimental value of coolant void reactivity

(1) Constant core height due to coolant voiding

Mixed-oxide fuel in central region	No. of loaded clusters		Inserted $B_4C$ control-rods		Critical height of non-voided core H (cm)	Coolant void reactivity ( $\beta$ )
	$PuO_2-UO_2$	1.2wt% $UO_2$	No.	Position		
	0	97	0	—	108.06	0.88 0.12
0.54wt% $PuO_2-UO_2$	9	88	2	1B-D5	106.83	-0.74 0.13
	13	84	2	1B-D5	104.26	-1.31 0.14
			2	3B-D3	106.56	-1.16 0.13
	21	76	4	5C-A1, 1B-D5	109.38	-2.05 0.12
	25	72	4	5C-A1, 1B-D5	107.51	-2.46 0.13
0.87wt% $PuO_2-UO_2$	9	88	2	1B-D1	108.31	-0.94 0.12
			4	3A-B-C-D3	109.00	-2.88 0.12
	13	84	2	1B-D1	102.24	-2.24 0.14
			4	3A-B-C-D3	102.35	-4.36 0.13
	21	76	6	1B-D1, 5C-A1, 1B-D5	110.83	-4.11 0.12
			6	1B-D1, 3C-A5, 5B-D3	105.10	-4.91 0.14
	25	72	6	1B-D1, 5C-A1, 1B-D5	105.57	-5.01 0.15
			6	1B-D1, 3C-A3, 5B-D3	107.68	-4.43 0.14
		8	1B-D1, 5C-A1, 1B-D5, 5B-D3	113.24	-4.84 0.13	

(2) Constant axial buckling due to coolant voiding

Mixed-oxide fuel in central region	No. of loaded clusters		Inserted B <sub>4</sub> C control-rods		Axial buckling B <sup>2</sup> (m <sup>-2</sup> )	Coolant void reactivity (\$)
	PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	1.2wt%UO <sub>2</sub>	No.	Position		
	0	97	0	—————	6.90±0.08	0.01±0.12
0.54wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	9	88	2	1B-D5	7.05±0.08	-1.64±0.13
	13	84	2	1B-D5	7.37±0.09	-2.27±0.14
			2	3B-D3	7.08±0.08	-2.06±0.13
	21	76	4	5C-A1,1B-D5	6.75±0.08	-2.91±0.12
	25	72	4	5C-A1,1B-D5	6.97±0.08	-3.36±0.13
0.87wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	9	88	2	1B-D1	6.88±0.08	-1.80±0.12
			4	3A-B-C-D3	6.80±0.08	-3.73±0.12
	13	84	2	1B-D1	7.63±0.09	-3.25±0.14
			4	3A-B-C-D3	7.61±0.09	-5.37±0.13
	21	76	6	1B-D1,5C-A1,1B-D5	6.60±0.08	-4.93±0.12
			6	1B-D1,3C-A5,5B-D3	7.26±0.09	-5.85±0.14
	25	72	6	1B-D1,5C-A1,1B-D5	7.20±0.09	-5.94±0.15
			6	1B-D1,3C-A3,5B-D3	6.95±0.08	-5.31±0.14
			8	1B-D1,5C-A1,1B-D5,5B-D3	6.34±0.07	-5.61±0.13

Table 3.5 Difference between two kind of cores with or without control-rods for the coolant void reactivity

Mixed-oxide fuel in central region	No. of loaded clusters		Coolant void reactivity ( $\beta$ )			Difference of both *** reactivities ( $\beta$ )
			Clean core* (without control-rods)	Core No.	Poisoned core** (with control-rods)	
	PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	1.2wt%UO <sub>2</sub>				
—	0	97	-0.47±0.12	U-0	0.01±0.12	—
0.54wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	9	88	-2.27±0.36	A9-2	-1.64±0.13	0.15
	13	84	-2.99±0.43	A13-2a	-2.27±0.14	0.24
				A13-2b	-2.06±0.13	0.45
	21	76	-4.11±0.53	A21-4	-2.91±0.12	0.72
	25	72	-4.39±0.56	A25-4	-3.36±0.13	0.55
0.87wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	9	88	-5.41±0.60	B9-2	-1.80±0.12	3.13
				B9-4	-3.73±0.12	1.20
	13	84	-6.81±0.71	B13-2	-3.25±0.14	3.08
				B13-4	-5.37±0.13	0.96
	21	76	-9.52±0.97	B21-6a	-4.93±0.12	4.11
				B21-6b	-5.85±0.14	3.19
	25	72	-10.06±1.01	B25-6a	-5.94±0.15	3.64
				B25-6b	-5.31±0.14	4.27
				B25-8	-5.61±0.13	3.97

\* Measurement by pulsed neutron method

\*\* Present measurement

\*\*\* Considered the difference between two methods at U-0 core

Table 3.6 Coolant void reactivity being eliminated axial leakage effect due to voiding

Mixed-oxide fuel in central region	No. of loaded PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> clusters	No. of inserted B <sub>4</sub> C rods	Core No.	$B_z^2$ (m <sup>-2</sup> )	$\rho_{o \rightarrow v}^{z\text{-leakage}}$ (§)	$\rho_{o \rightarrow v}''$ (= $\rho_{o \rightarrow v}^{z\text{-leakage}}$ ) (§)
—	0	0	U-0	6.90	-1.85	1.86
0.54wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	9	0	A9-0	8.13	-2.07	-0.06
		2	A9-2	7.05	-1.87	0.23
	13	0	A13-0	8.49	-2.13	-0.72
		2	A13-2a	7.37	-1.93	-0.34
		2	A13-2b	7.08	-1.88	-0.18
	21	0	A21-0	9.10	-2.24	-1.73
		4	A21-4	6.75	-1.82	-1.09
	25	0	A25-0	9.31	-2.27	-1.98
		4	A25-4	6.97	-1.86	-1.50
	0.87wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	9	0	B9-0	9.78	-2.34
2			B9-2	6.88	-1.85	0.05
4			B9-4	6.80	-1.83	-1.90
13		0	B13-0	10.62	-2.48	-4.19
		2	B13-2	7.63	-1.98	-1.27
		4	B13-4	7.61	-1.97	-3.40
21		0	B21-0	11.95	-2.68	-6.70
		6	B21-6a	6.60	-1.79	-3.14
		6	B21-6b	7.26	-1.91	-3.94
25		0	B25-0	12.40	-2.75	-7.17
		6	B25-6a	7.20	-1.90	-4.04
		6	B25-6b	6.95	-1.86	-3.45
		8	B25-8	6.34	-1.75	-3.86

Table 3.7 Experimental value of B<sub>4</sub>C control-rod reactivity worth on the 100%-voided core

Kind of mixed-oxide fuel in central region	No. of loaded clusters		Core number	Critical level of clean core (mm)	Inserted B <sub>4</sub> C control-rods		Critical level (mm)	Control-rod reactivity worth (\$)
	PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	1.2wt%UO <sub>2</sub>			No.	Position		
0.54wt%PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	9	88	A9-2	101.52	2	1B-D5	108.47	-3.36±0.16
	13	84	A13-2a	100.15	2	1B-D5	106.96	-3.43±0.14
			A13-2b		2	3B-D3	109.05	-4.41±0.14
	21	76	A21-4	97.79	4	5C-A1,1B-D5	114.13	-8.22±0.15
25	72	A25-4	96.96	4	5C-A1,1B-D5	112.88	-8.41±0.18	
0.87wt%PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	9	88	B9-2	95.49	2	1B-D1	110.63	-7.61±0.21
			B9-4		4	3A-B-C-D3	116.65	-9.82±0.24
	13	83	B13-2	92.74	2	1B-D1	106.98	-7.90±0.20
			B13-4		4	3A-B-C-D3	112.11	-10.06±0.22
	21	76	B21-6a	88.38	6	1B-D1,5C-A1,1B-D5	121.57	-17.83±0.25
			B21-6b		6	1B-D1,3C-A5,5B-D3	116.31	-15.95±0.24
	25	72	B25-6a	86.98	6	1B-D1,5C-A1,1B-D5	117.21	-17.42±0.34
			B25-6b		6	1B-D1,3C-A3,5B-D3	118.39	-17.86±0.34
B25-8			8		1B-D1,5C-A1,1B-D5,5B-D3	126.95	-20.68±0.38	



Table 3.8 Axial buckling and axial extrapolation distance  
of 0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> loaded core

Core No.	Void fraction (%)	Critical height (cm)	Position	B <sub>z</sub> <sup>2</sup> (m <sup>-2</sup> )		λ <sub>z</sub> (cm)
				Measured	Averaged	
B9-2	0	108.38	0D2	6.88±0.06	6.90±0.05	11.2±0.4
			2D6	6.89±0.07		
			3B1	6.91±0.04		
	100	110.30	0D2	6.55±0.03	6.57±0.03	12.3±0.3
			2D6	6.54±0.03		
			3B1	6.73±0.04		
B21-6a	0	110.94	2C2	6.53±0.07	6.56±0.05	11.7±0.5
			6D2	6.45±0.05		
			3B1	6.64±0.06		
	100	121.22	0D2	5.51±0.04	5.52±0.03	12.5±0.4
			2C6	5.54±0.03		
			3B1	5.51±0.03		

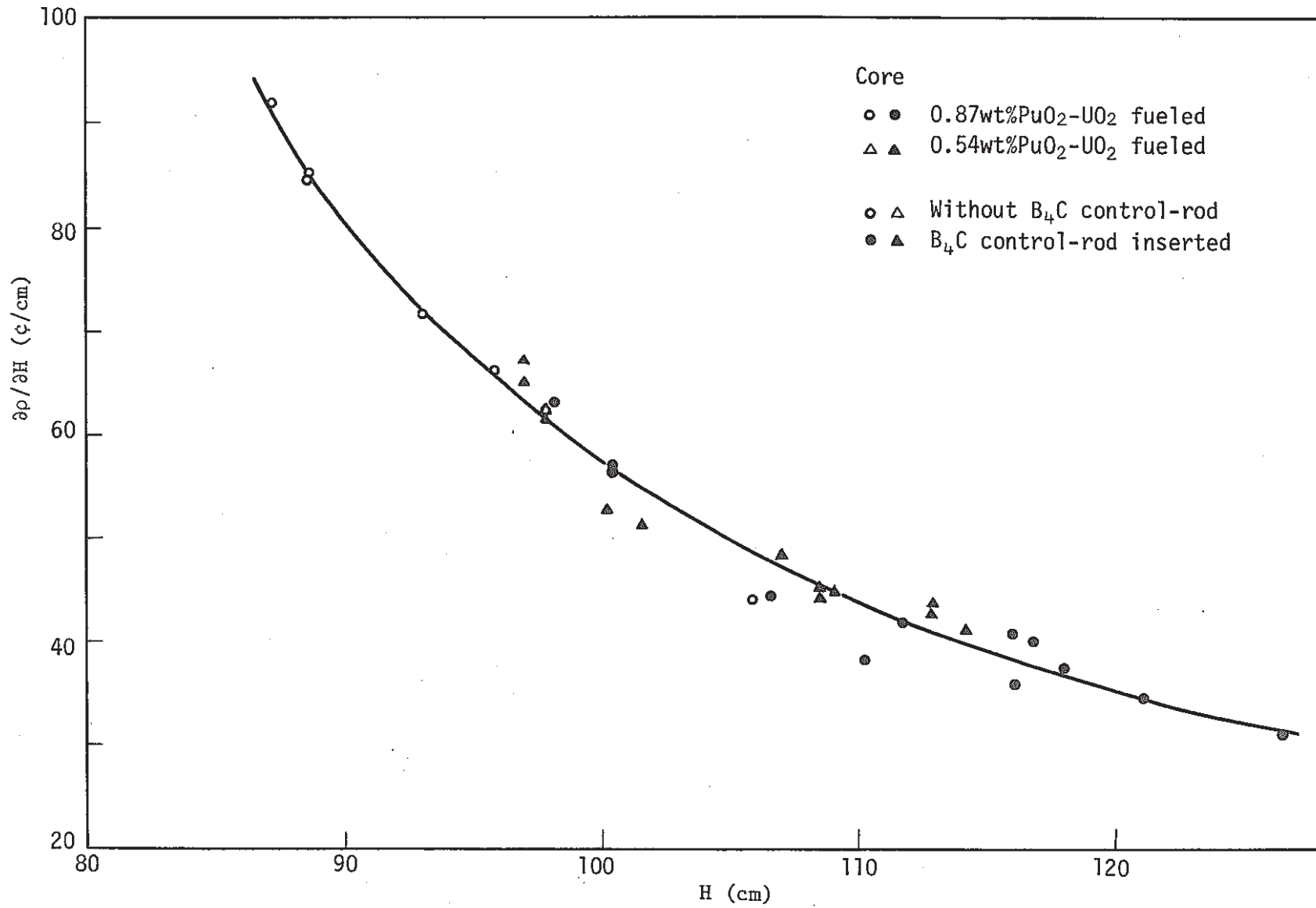


Fig. 3.1 Relation between level reactivity coefficient of moderator and critical moderator level in the 100%-voided core

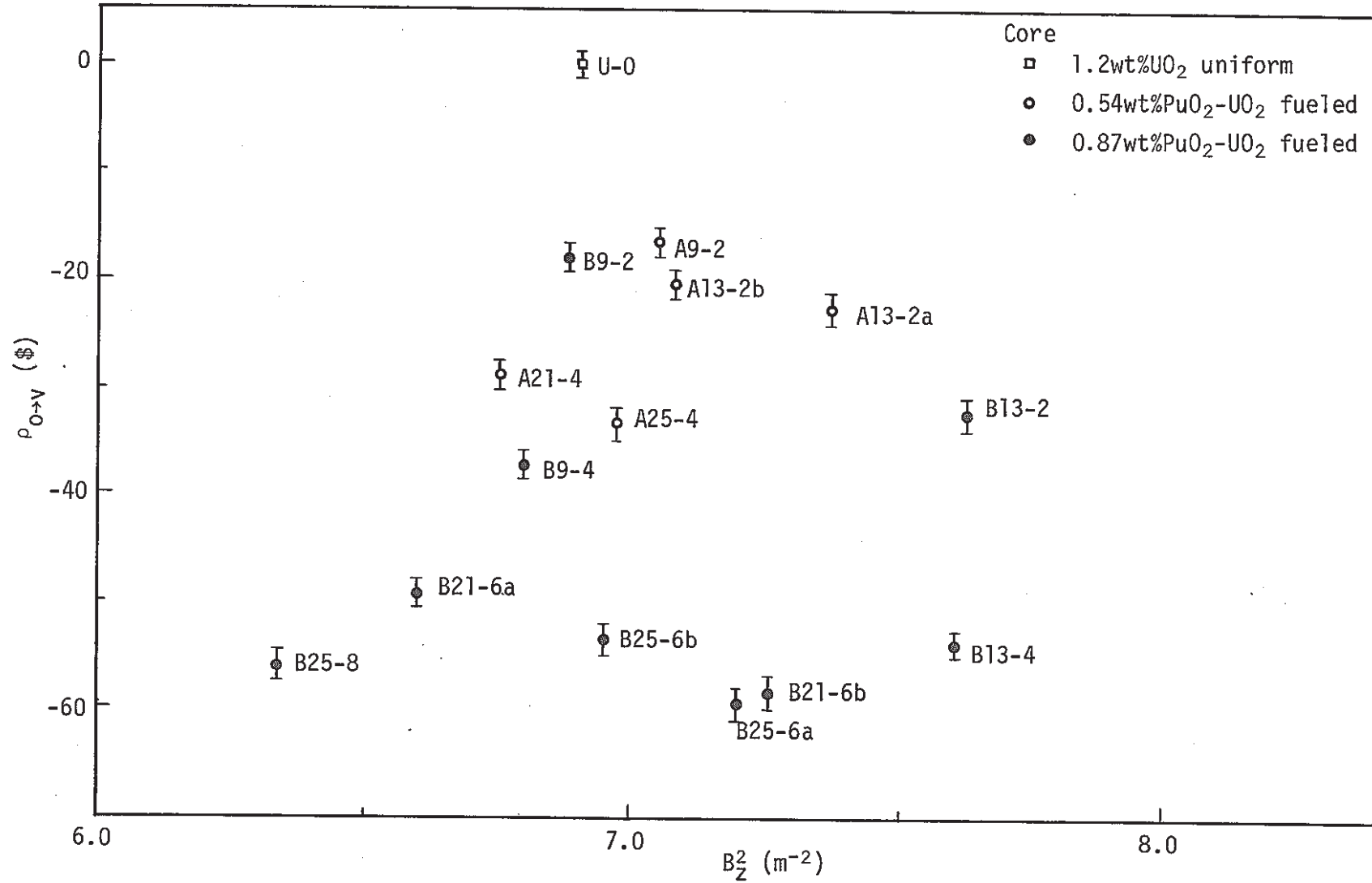


Fig. 3.2 Relation between void reactivity on the core with B<sub>4</sub>C control-rods and axial buckling of non-voided core

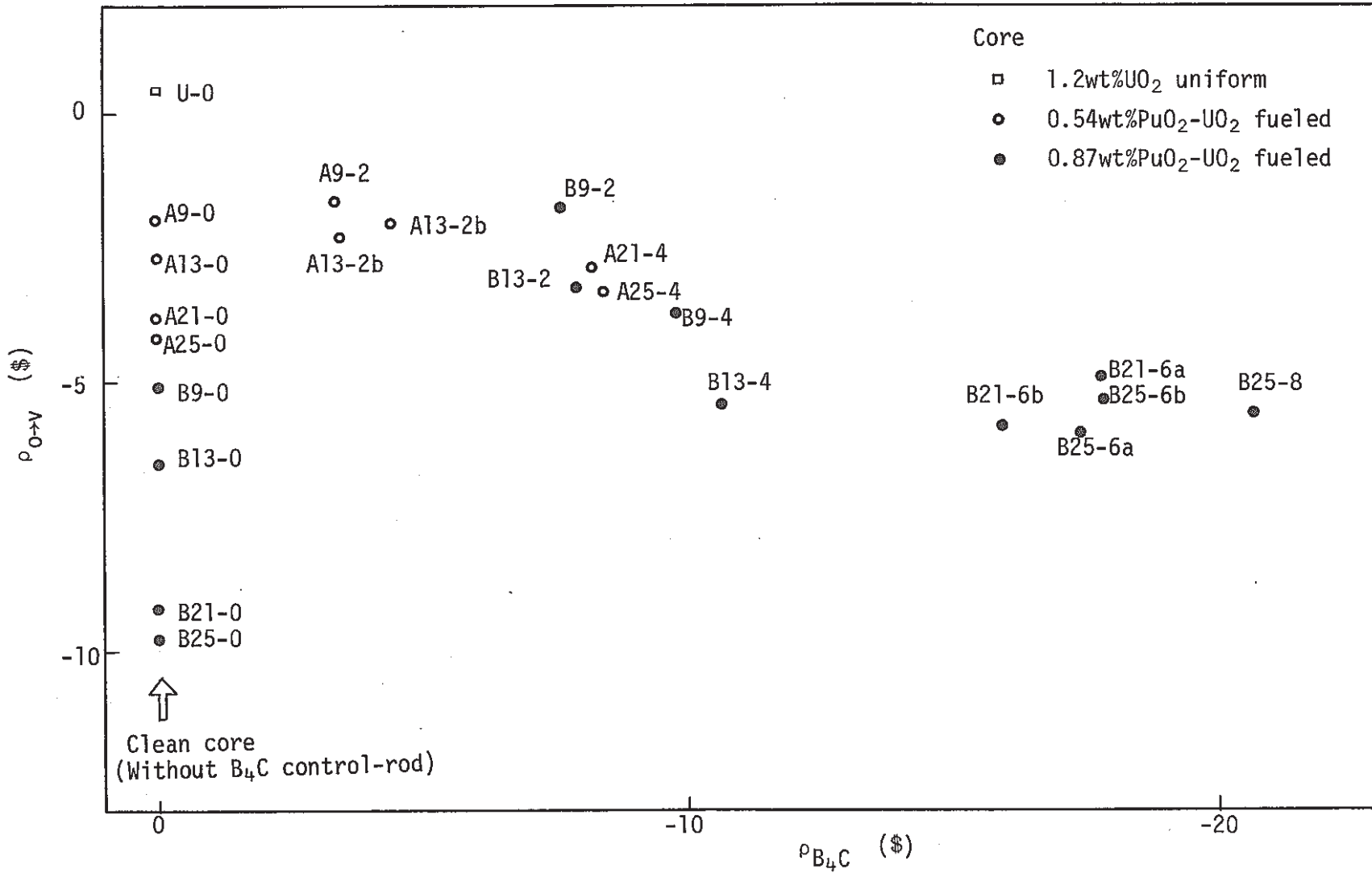


Fig. 3.3 Relation between void reactivity and reactivity worth of B<sub>4</sub>C control-rod inserted

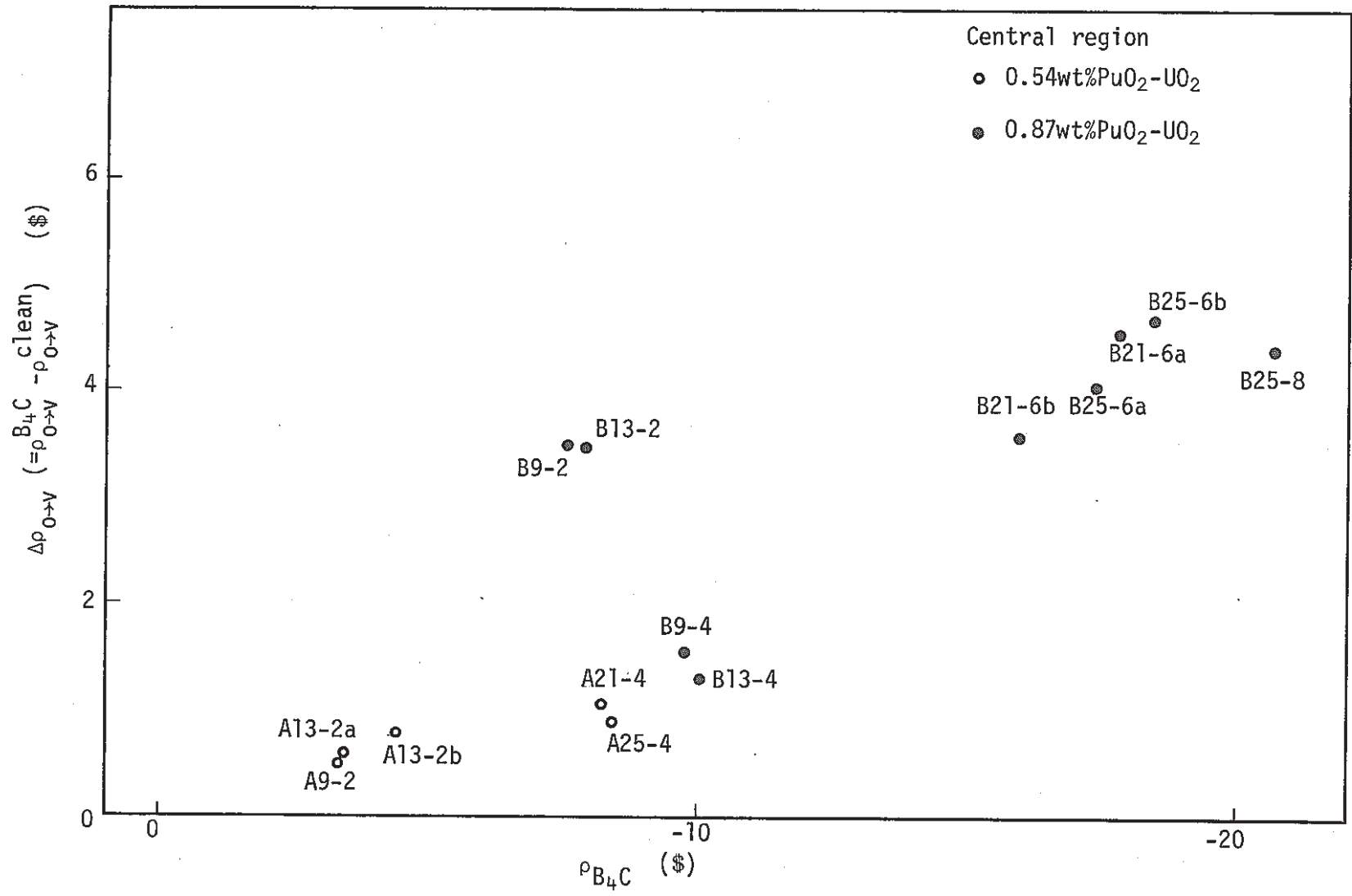


Fig. 3.4 Relation between reactivity worth of B<sub>4</sub>C control-rod inserted and difference of void reactivity from that of clean core

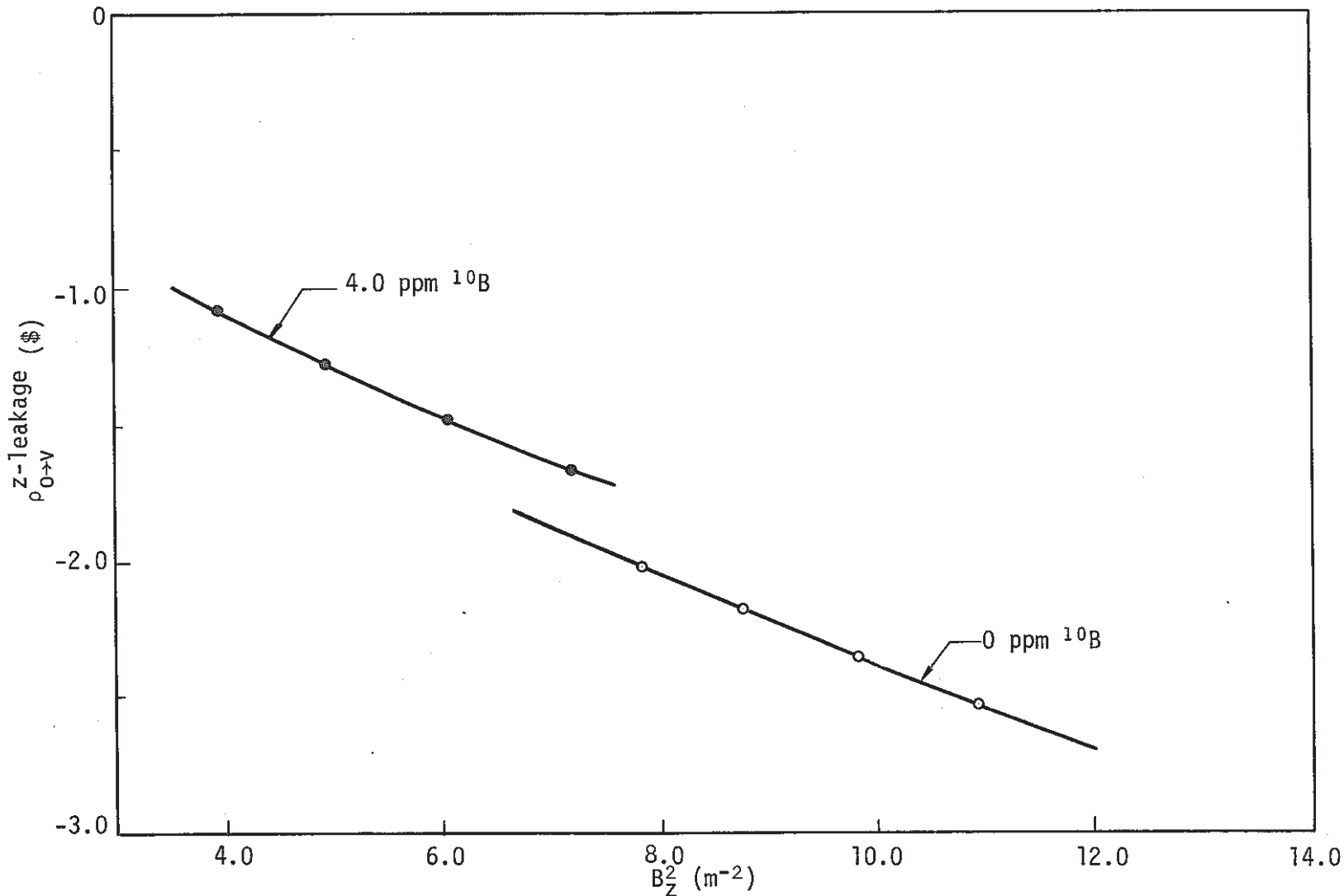
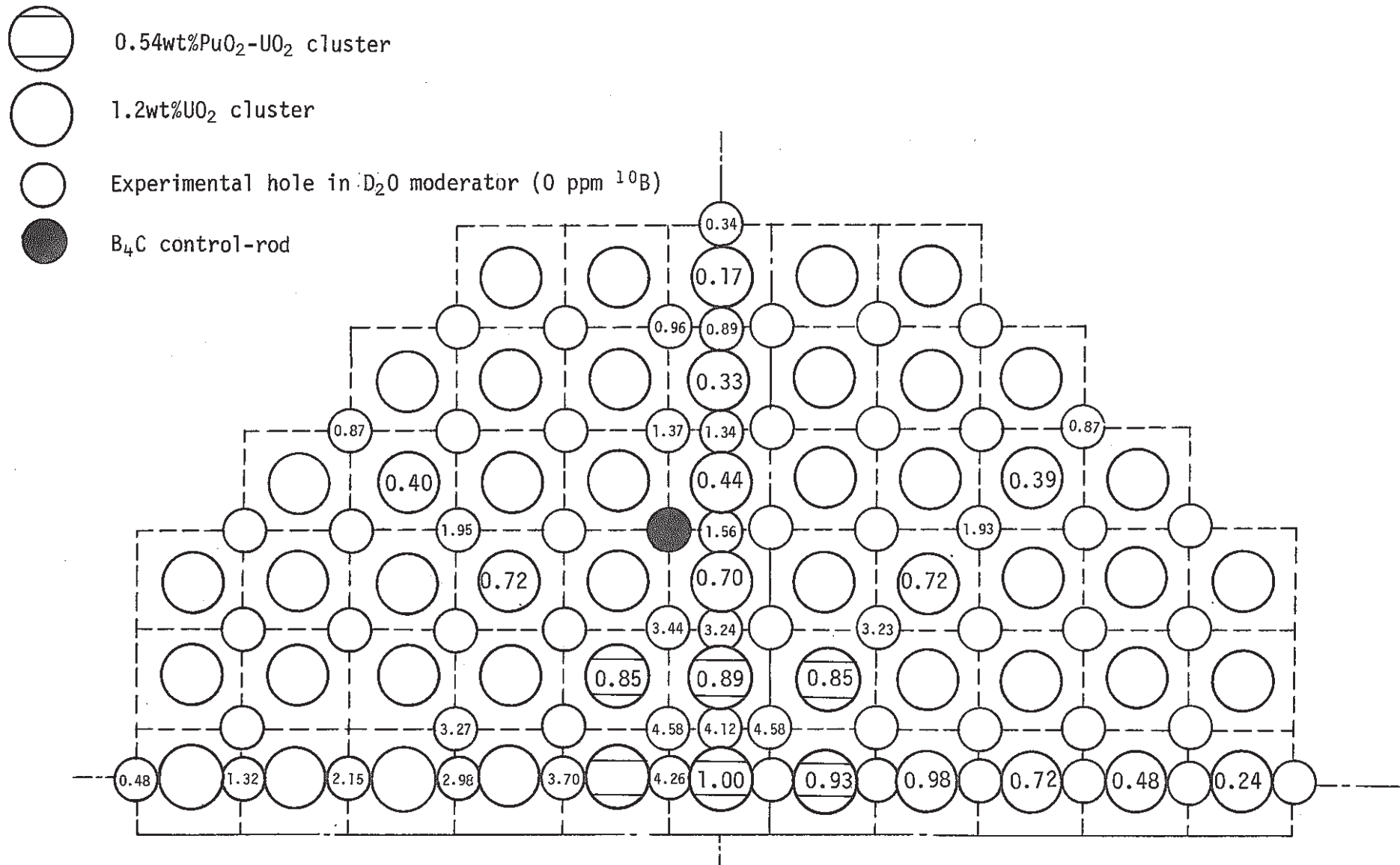






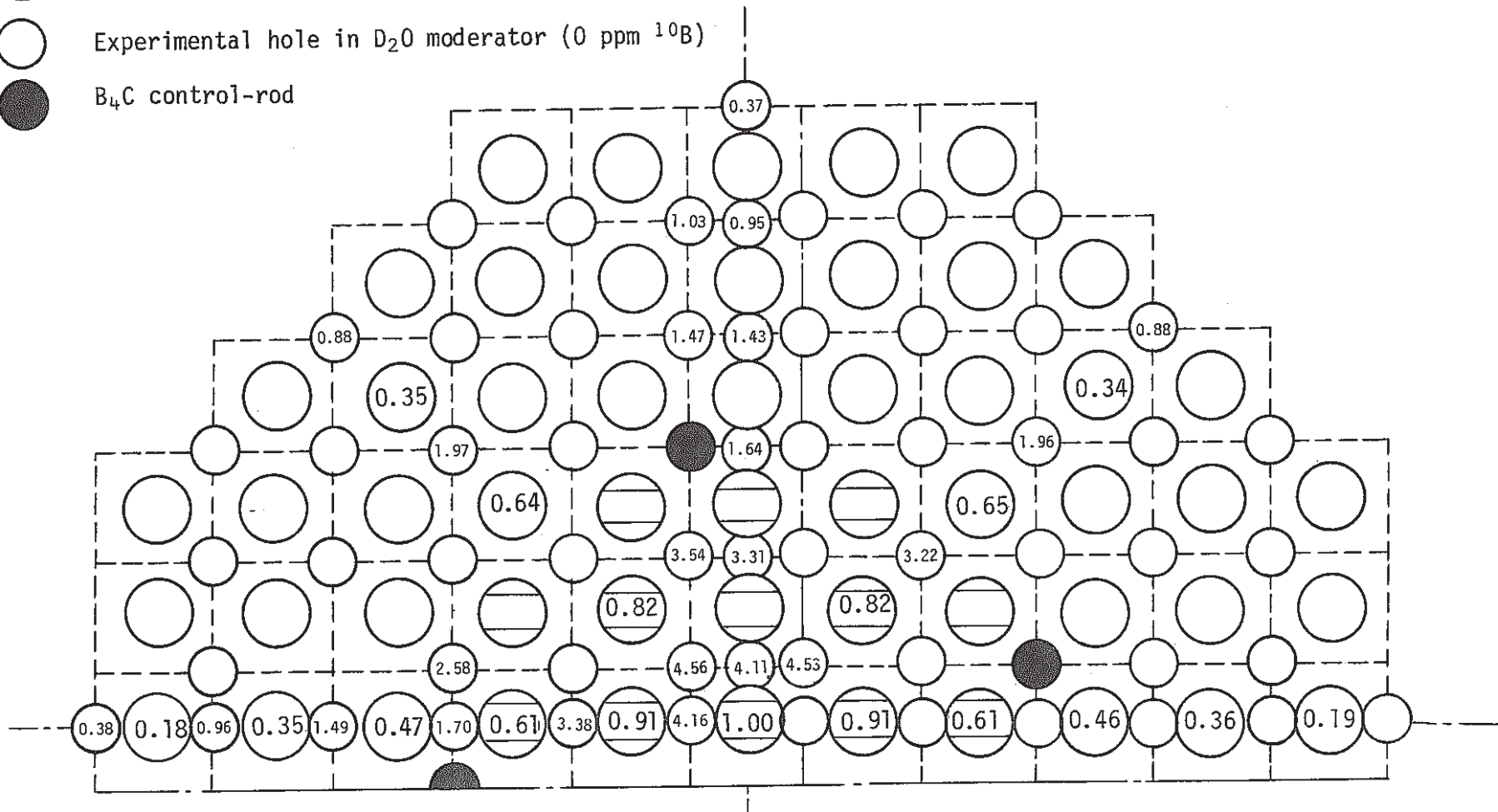
Fig. 3.5 Relation between axial buckling and axial leakage reactivity due to coolant voiding calculated by perturbation method using METHUSELAH and CITATION codes



(1) Core No. : A9-2

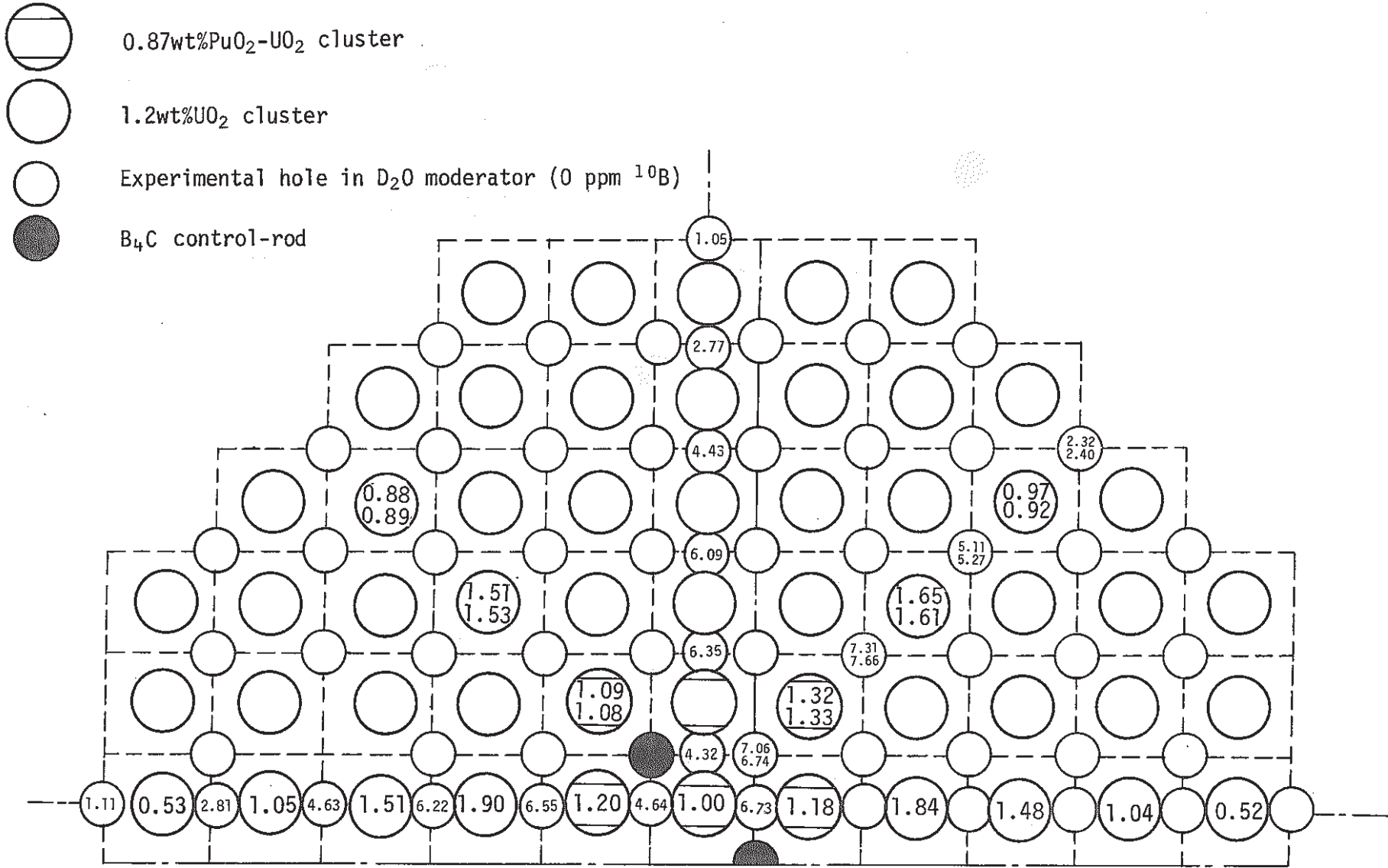
Fig. 3.6 Radial Cu reaction rate distribution at the center of cluster and D<sub>2</sub>O moderator in the non-voided core

-  0.54wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> cluster
-  1.2wt%UO<sub>2</sub> cluster
-  Experimental hole in D<sub>2</sub>O moderator (0 ppm <sup>10</sup>B)
-  B<sub>4</sub>C control-rod

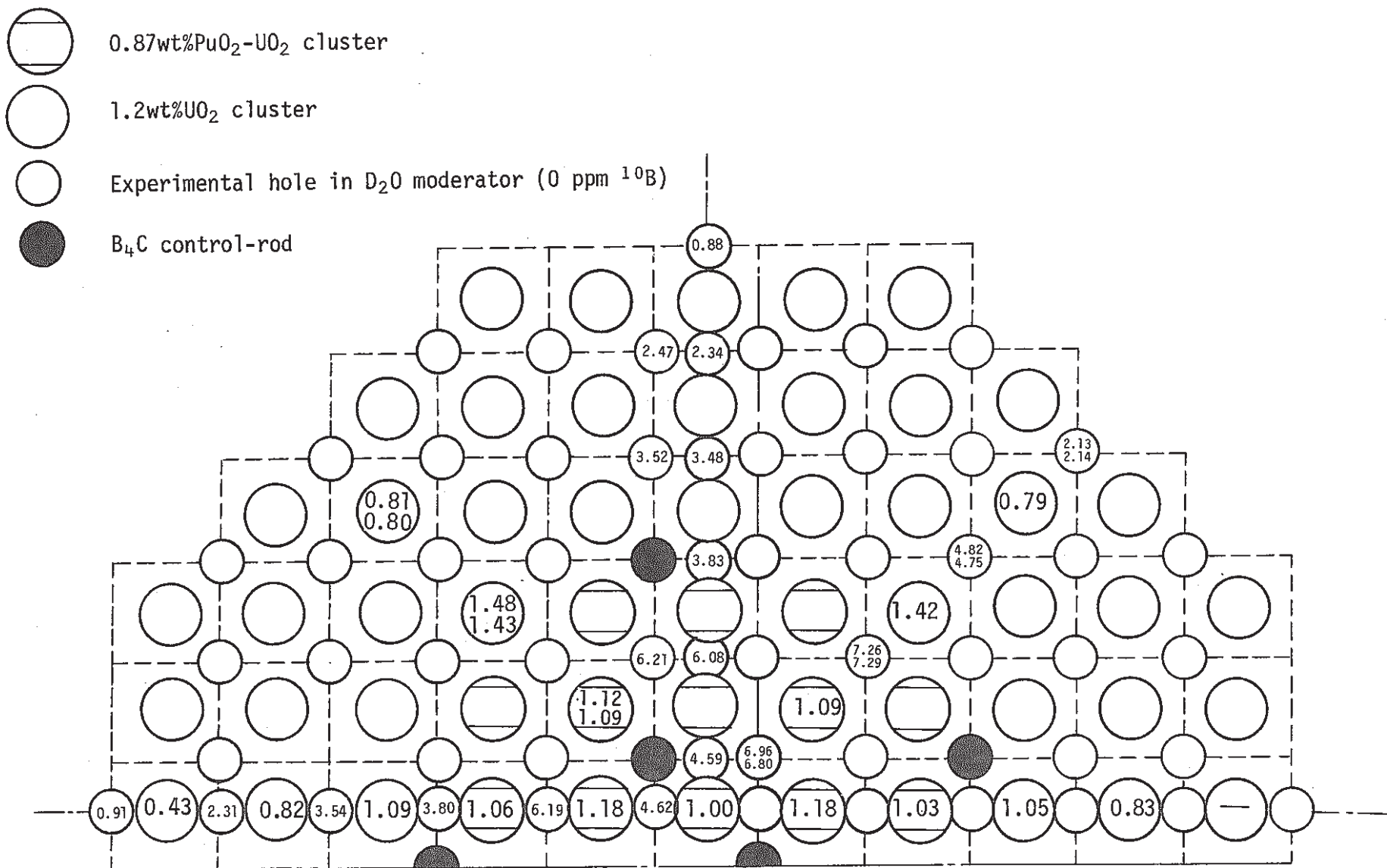


(2) Core No. : A21-4





(3) Core No. : B9-2



(4) Core No. : B21-6a

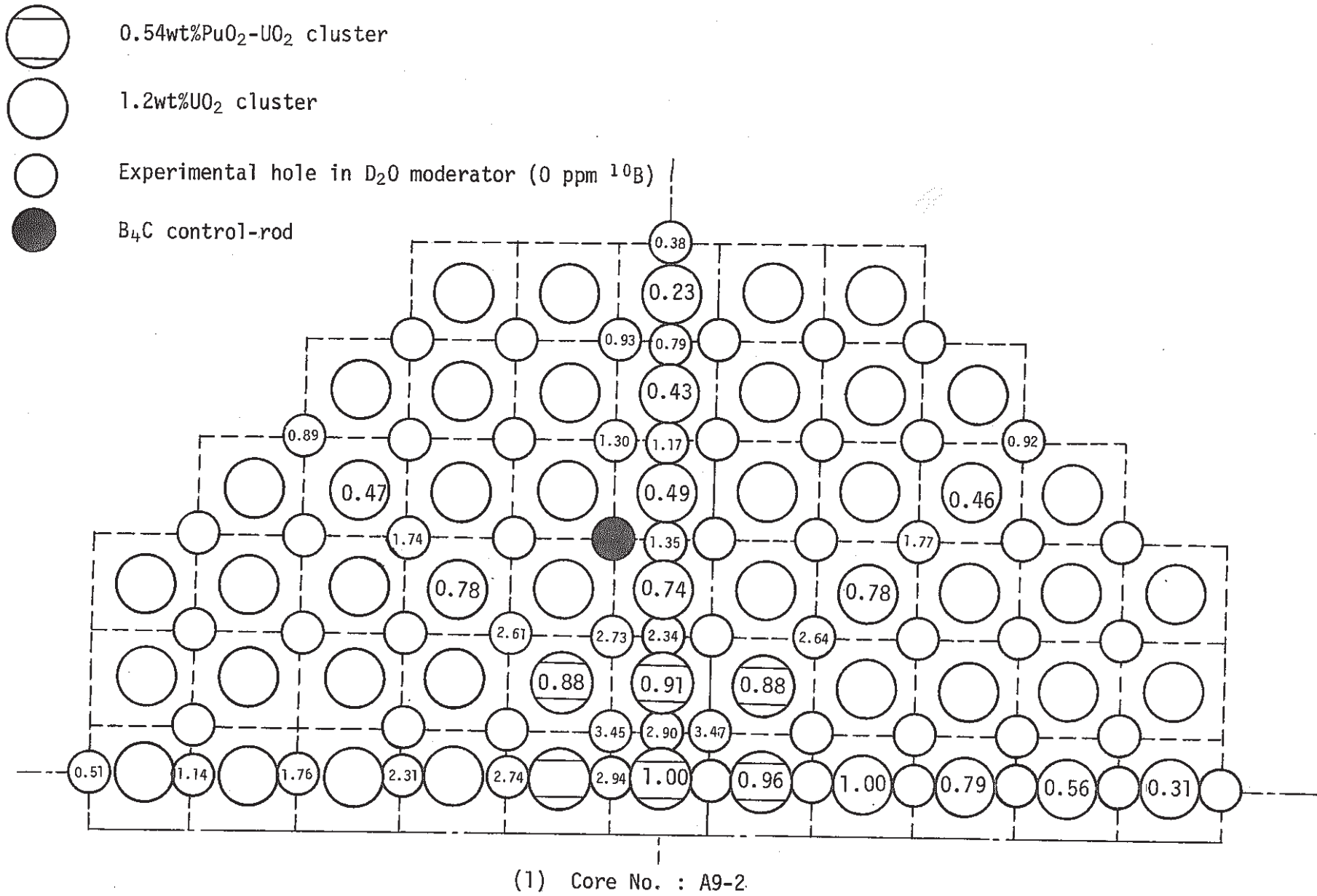




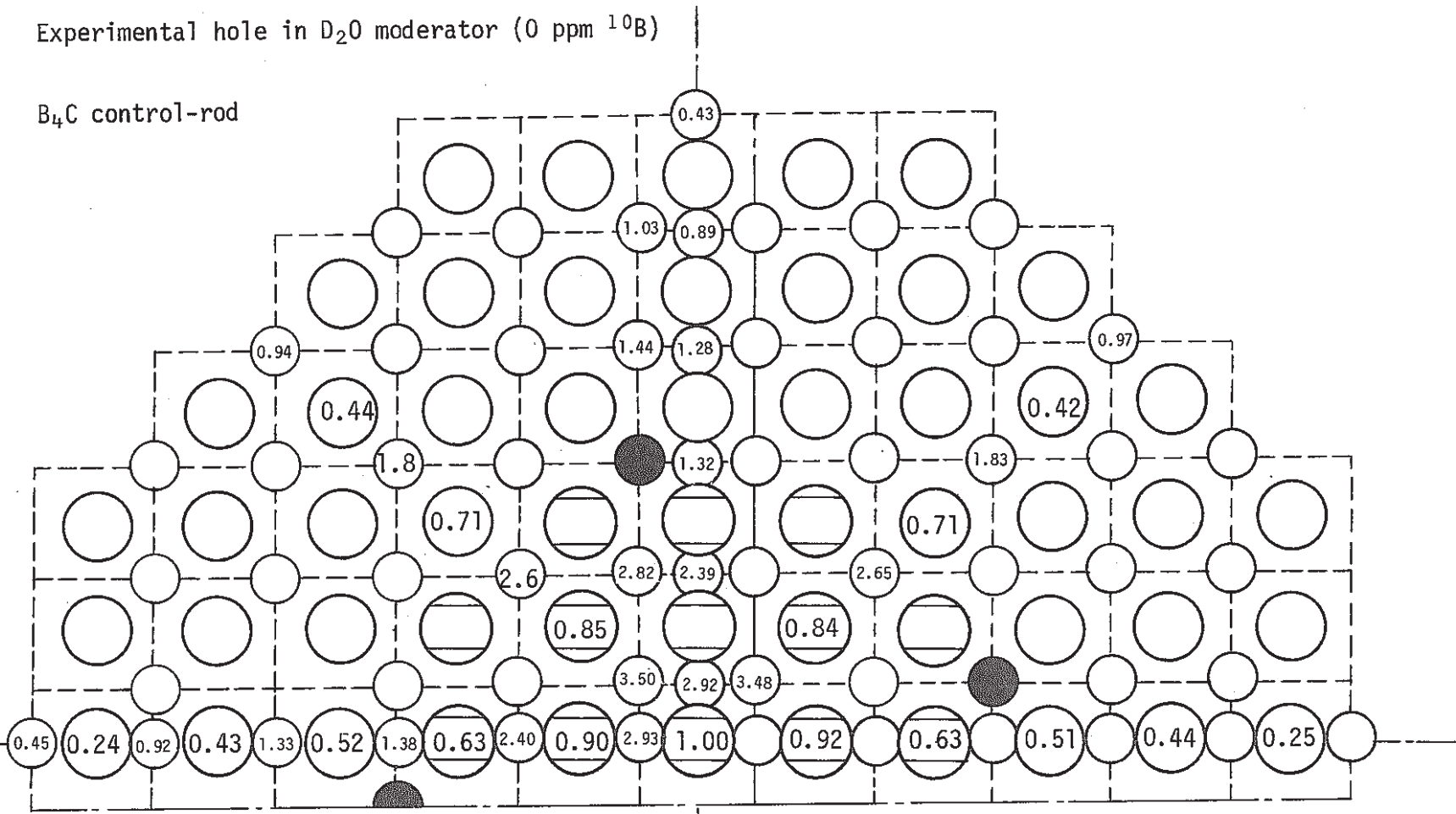






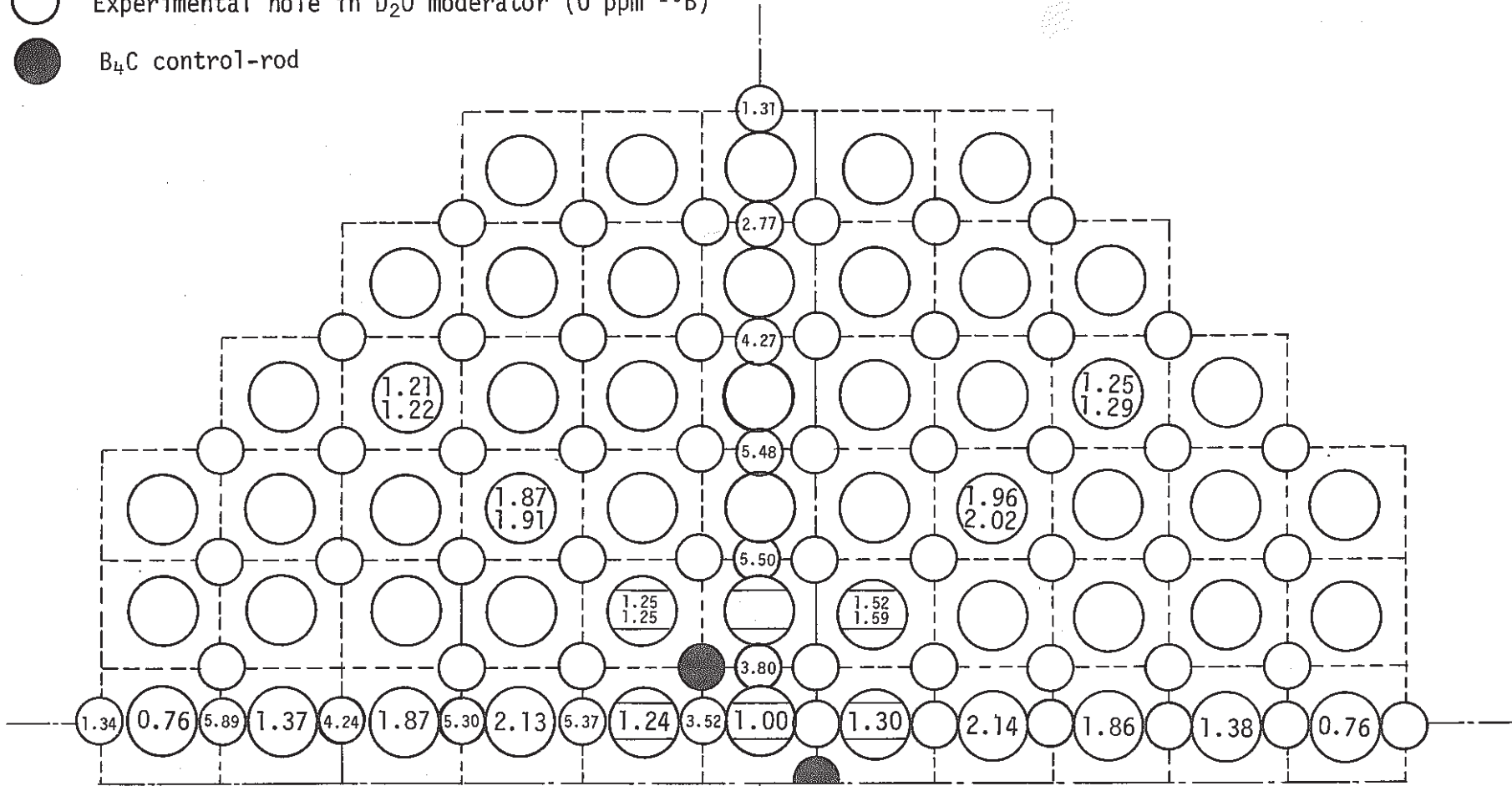
Fig. 3.7 Radial Cu reaction rate distribution at the center of cluster and D<sub>2</sub>O moderator in the 100% voided core

-  0.54wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> cluster
-  1.2wt%UO<sub>2</sub> cluster
-  Experimental hole in D<sub>2</sub>O moderator (0 ppm <sup>10</sup>B)
-  B<sub>4</sub>C control-rod





(2) Core No. : A21-4

-  0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> cluster
-  1.2wt%UO<sub>2</sub> cluster
-  Experimental hole in D<sub>2</sub>O moderator (0 ppm <sup>10</sup>B)
-  B<sub>4</sub>C control-rod




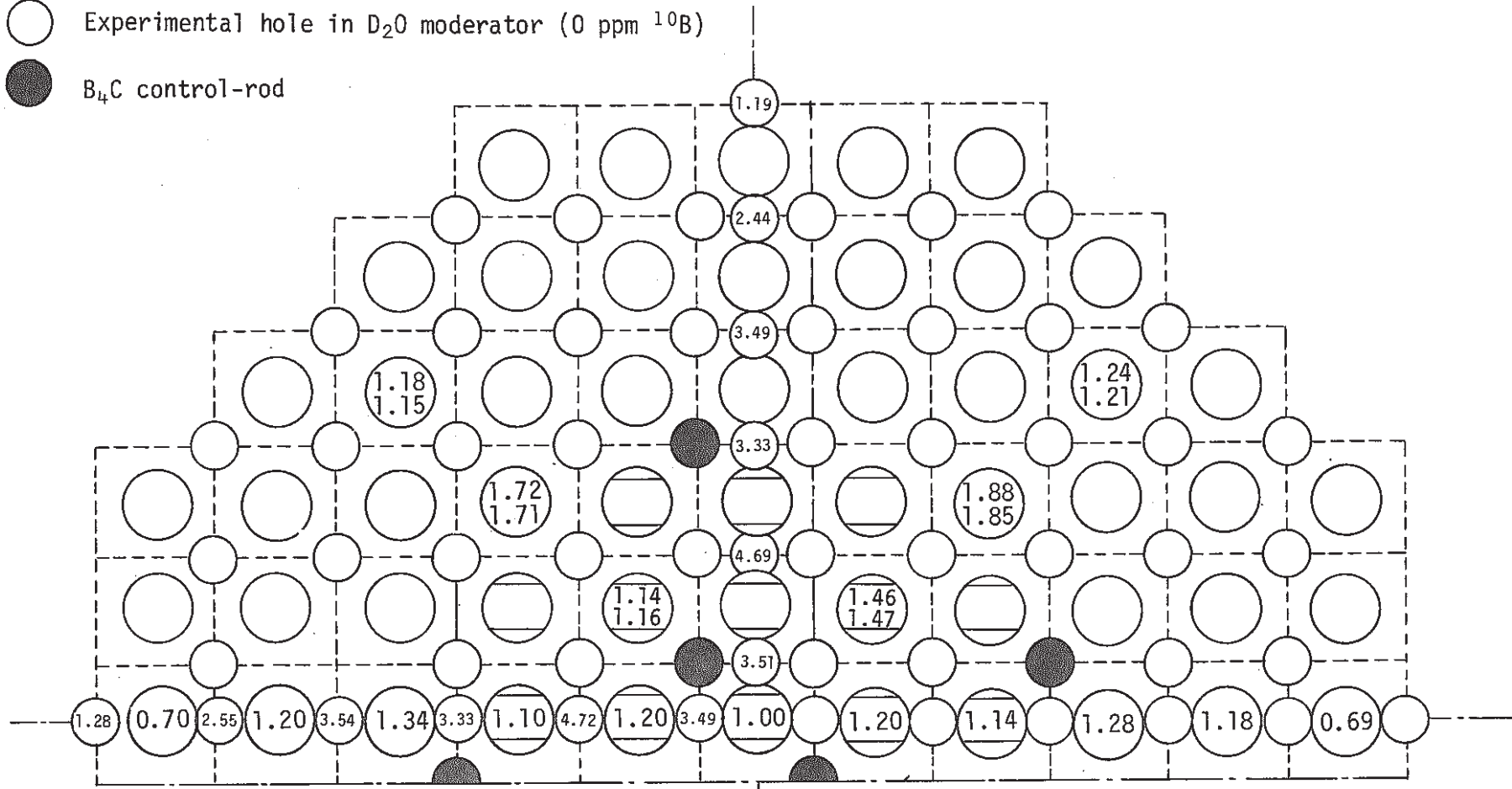
(3) Core No. : B9-2

 0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> cluster

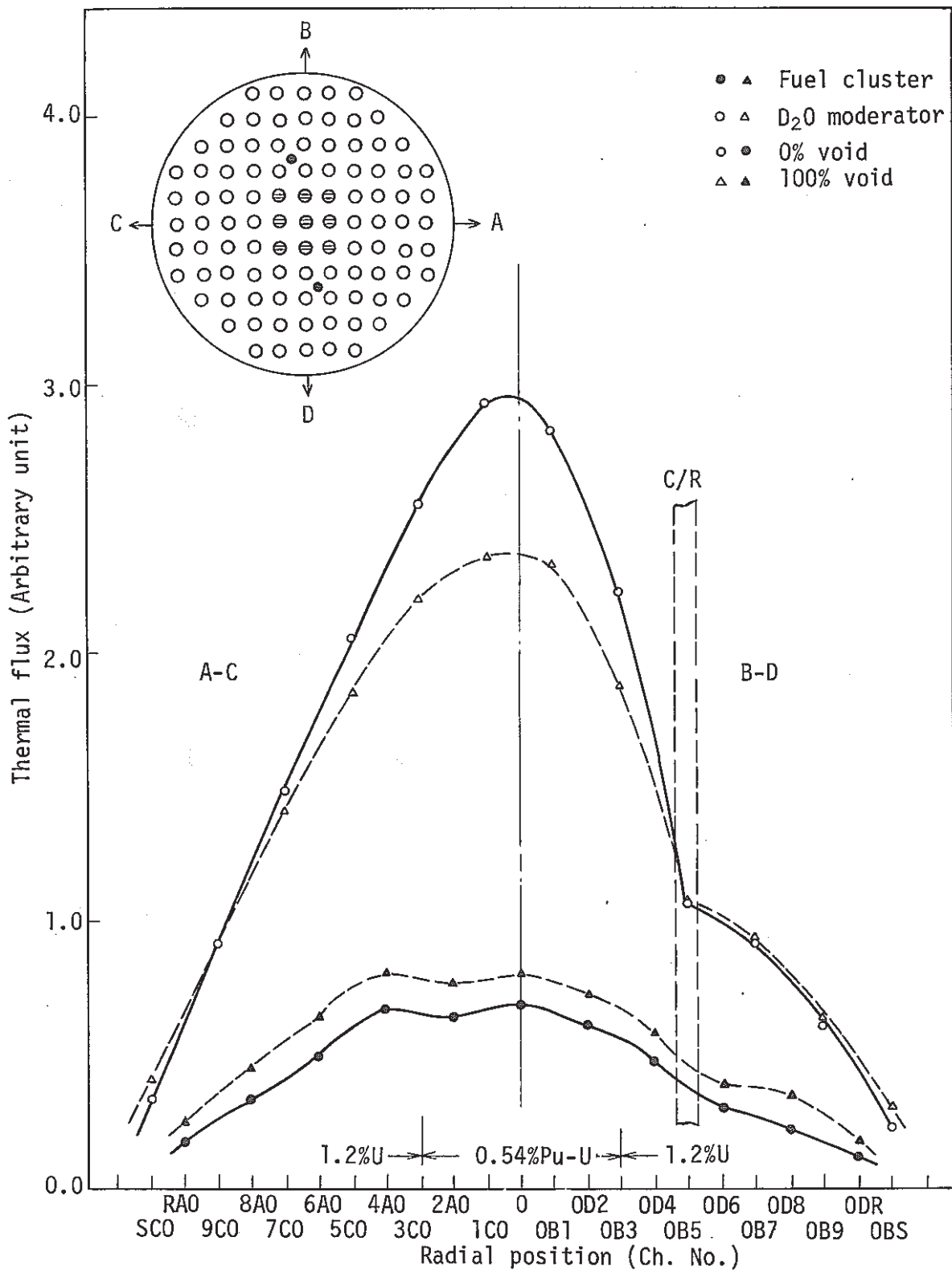
 1.2wt%UO<sub>2</sub> cluster

 Experimental hole in D<sub>2</sub>O moderator (0 ppm <sup>10</sup>B)

 B<sub>4</sub>C control-rod

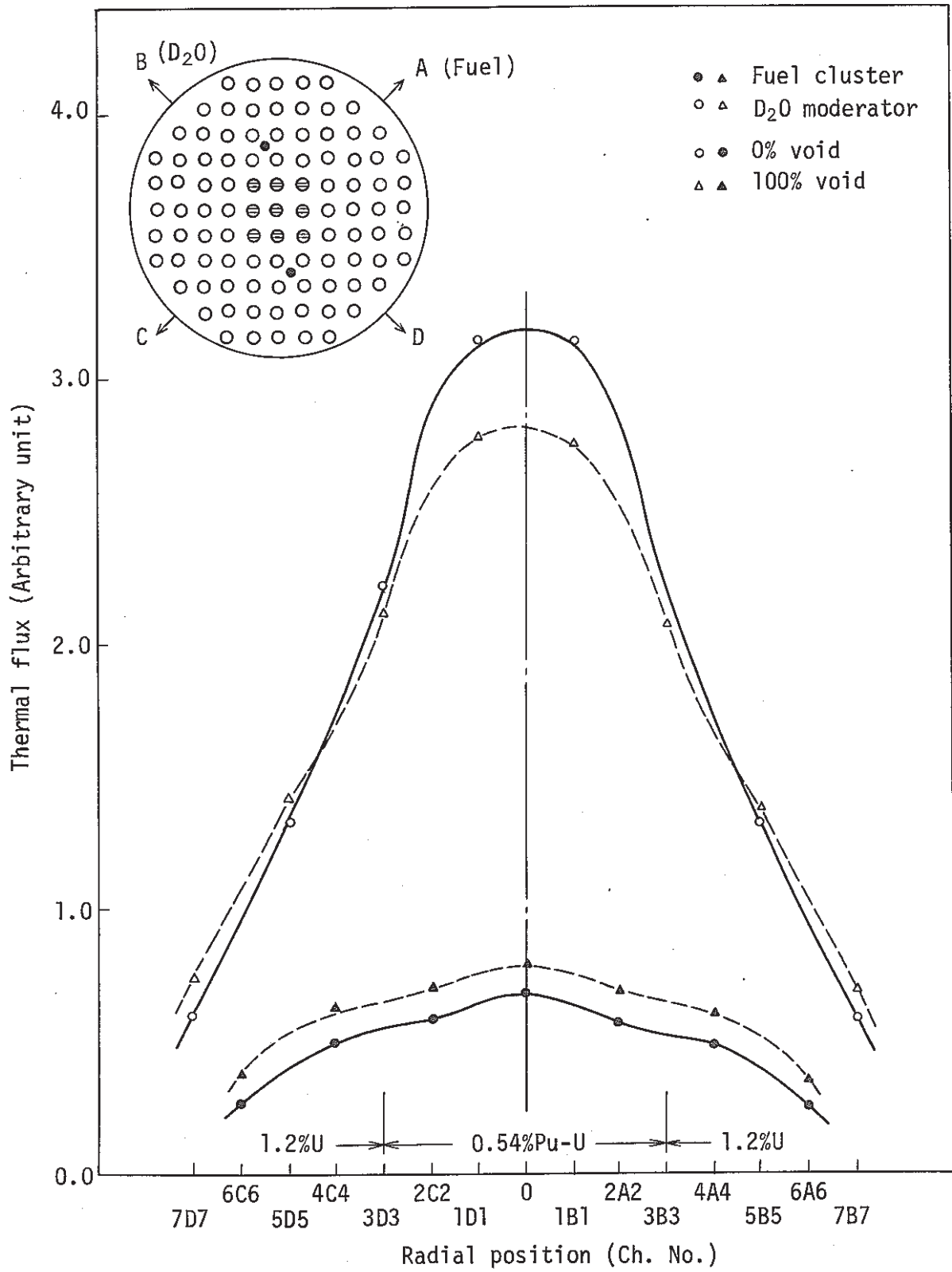


(4) Core No. : B21-6a



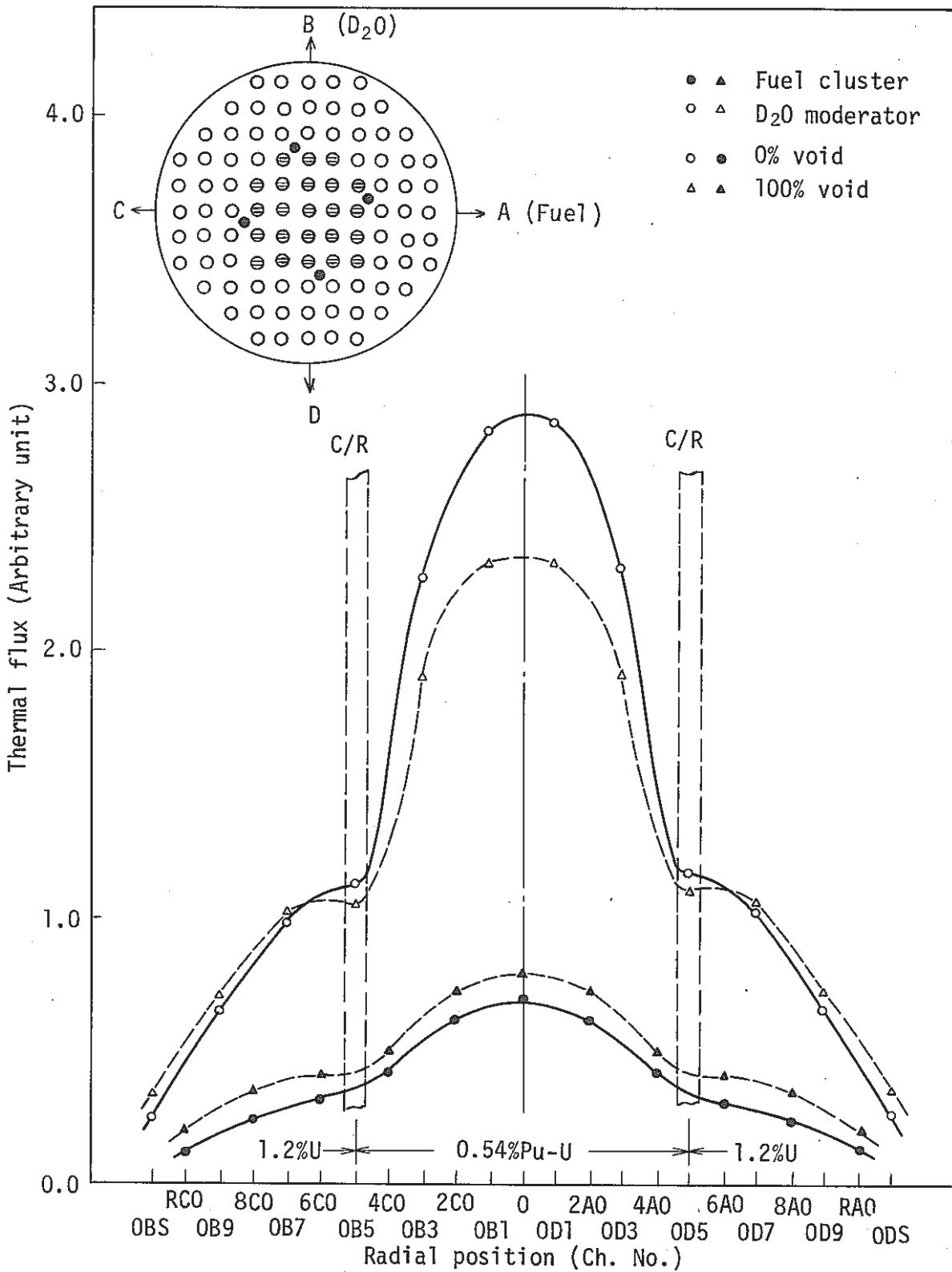
(1) Direction : 0-180°, 90-270°

Fig. 3.8 Radial thermal flux distribution in the core fueled with 9-0.54wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters (A9-2 core)



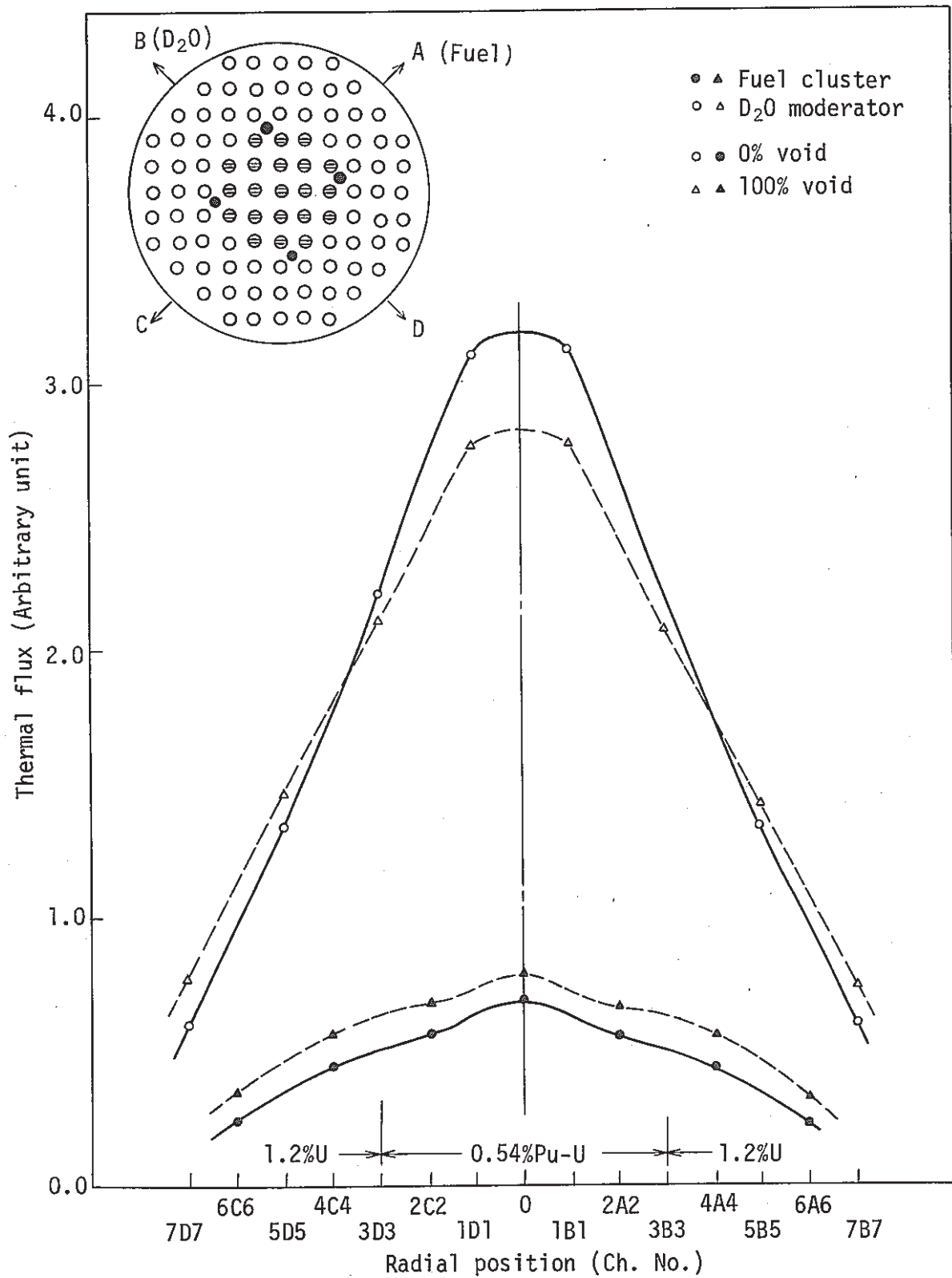
(2) Direction : 45-225°, 135-315°



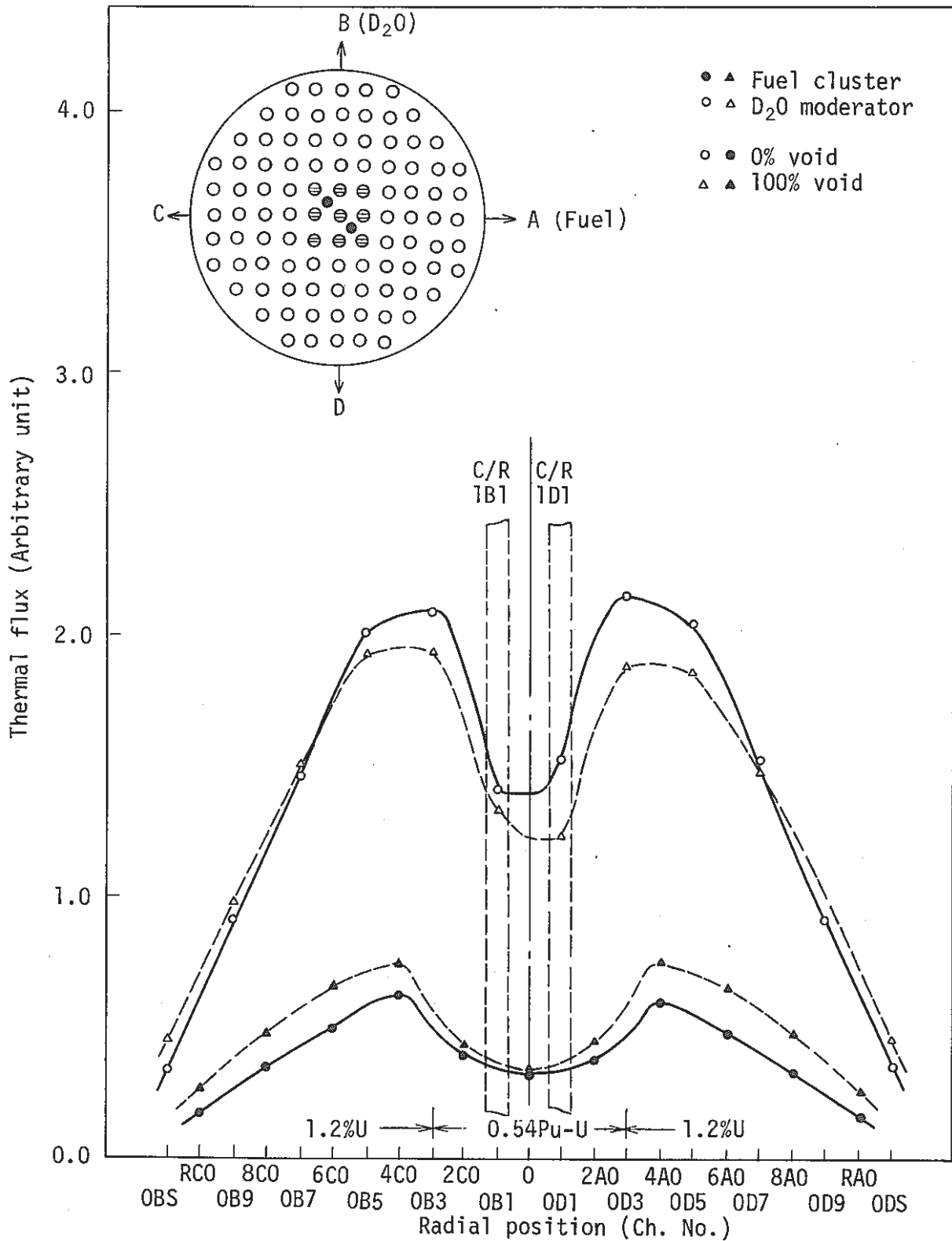


(1) Direction : 0-180°, 90-270°

Fig. 3.9 Radial thermal flux distribution in the core fueled with 21-0.54wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters (A21-4 core)

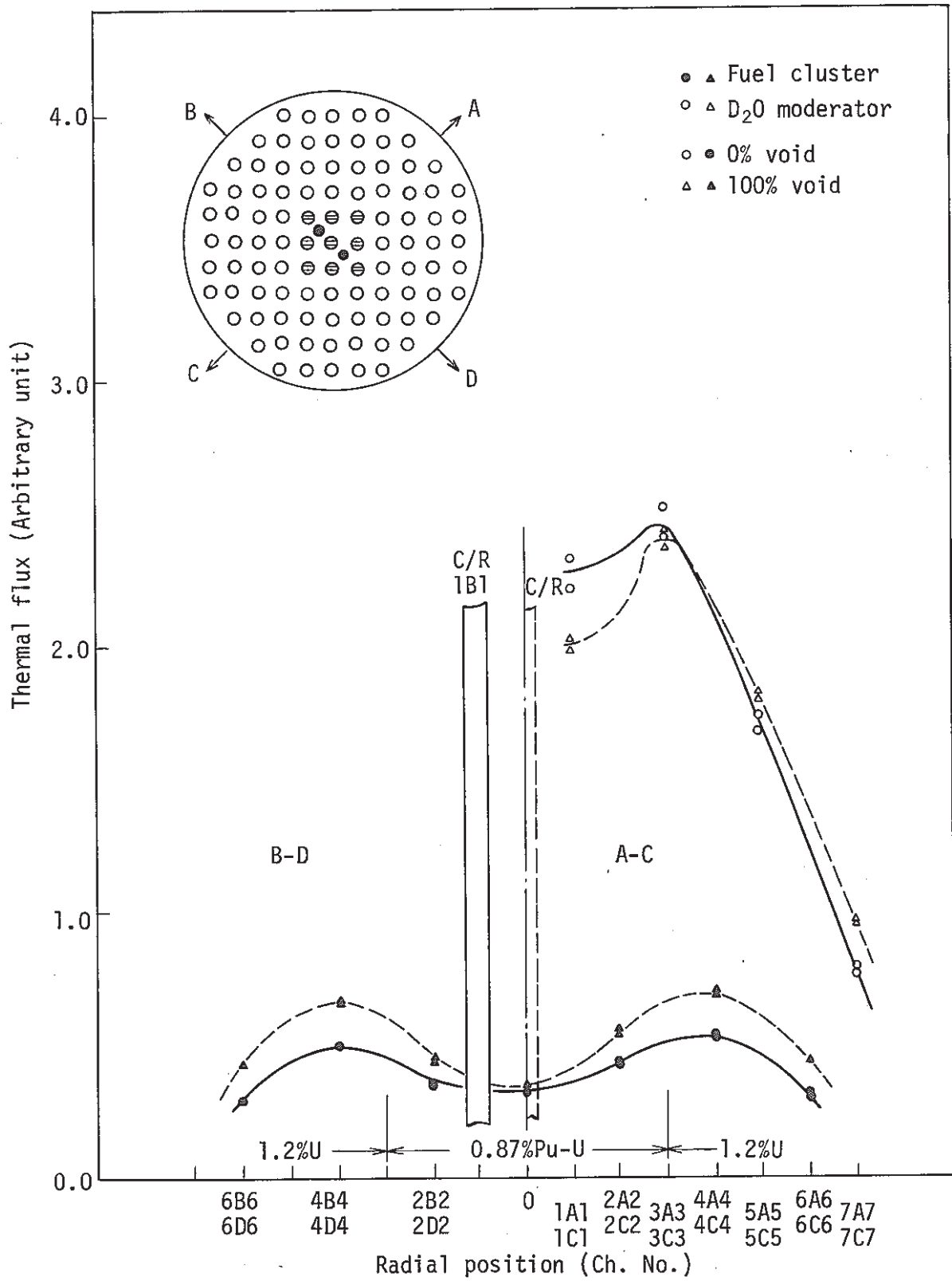


(2) Direction : 45-225°, 135-315°

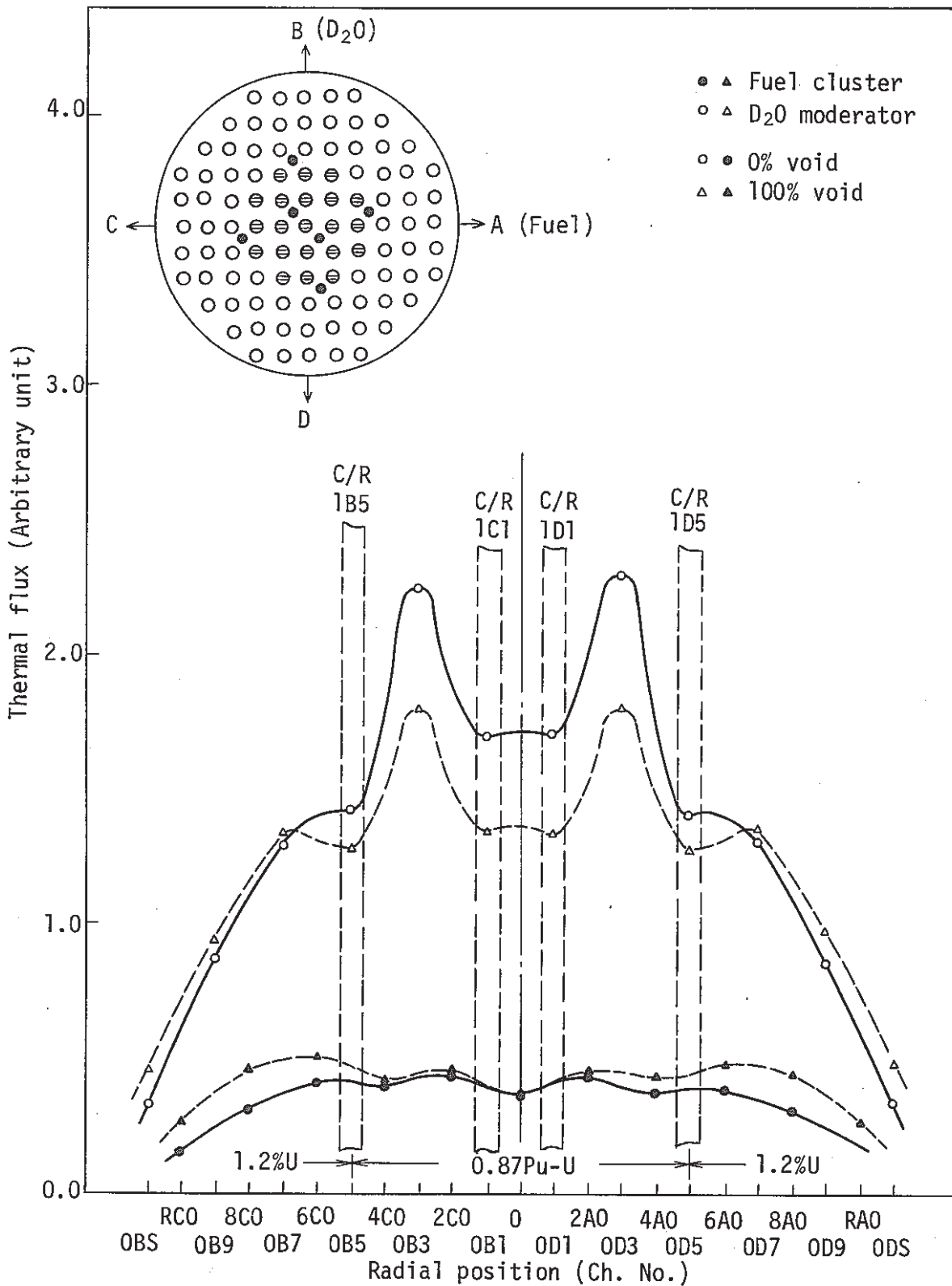


(1) Direction : 0-180°, 90-270°

Fig. 3.10 Radial thermal flux distribution in the core fueled with 9-0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters (B9-2 core)

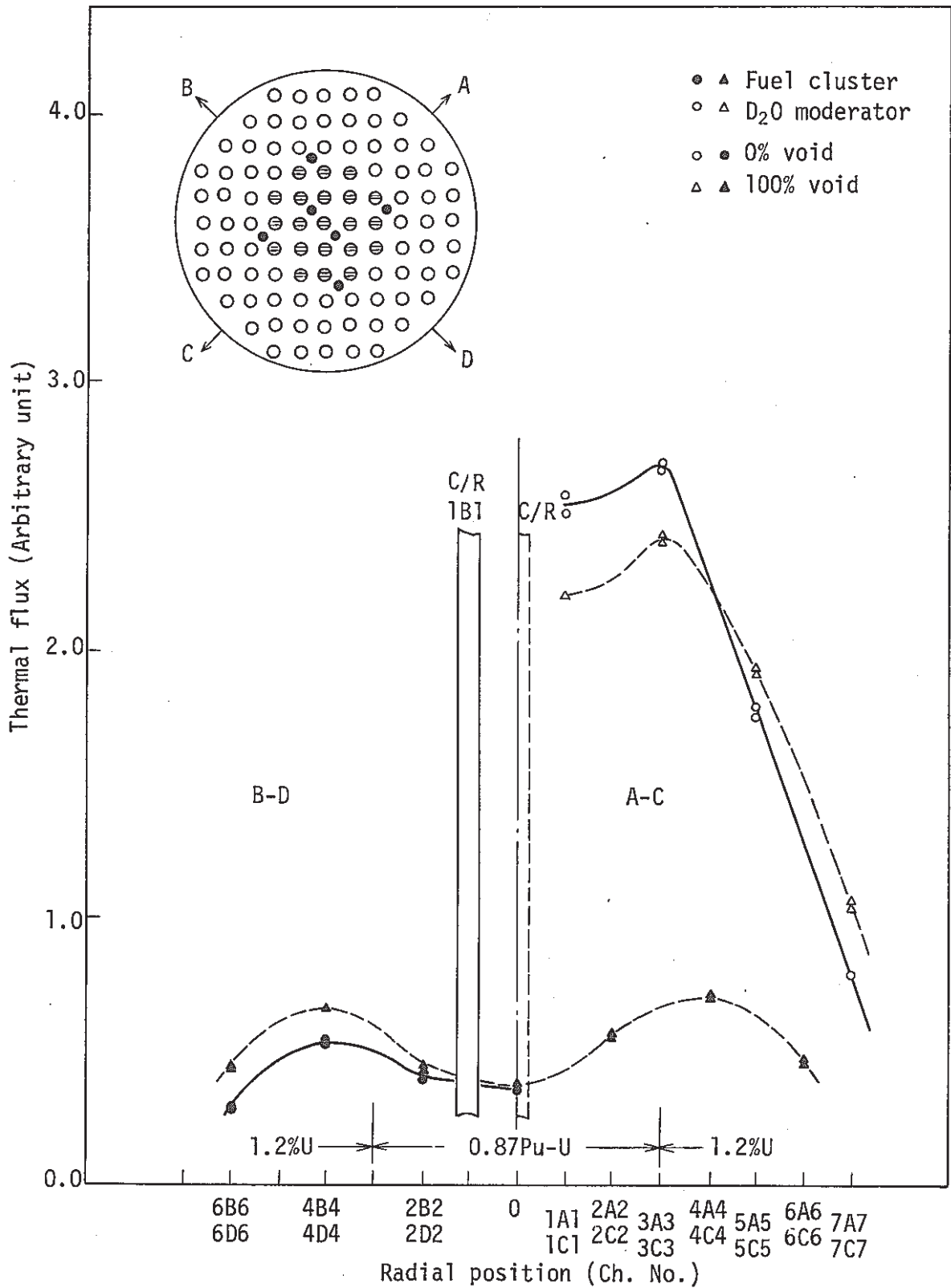


(2) Direction : 45-225°, 135-315°

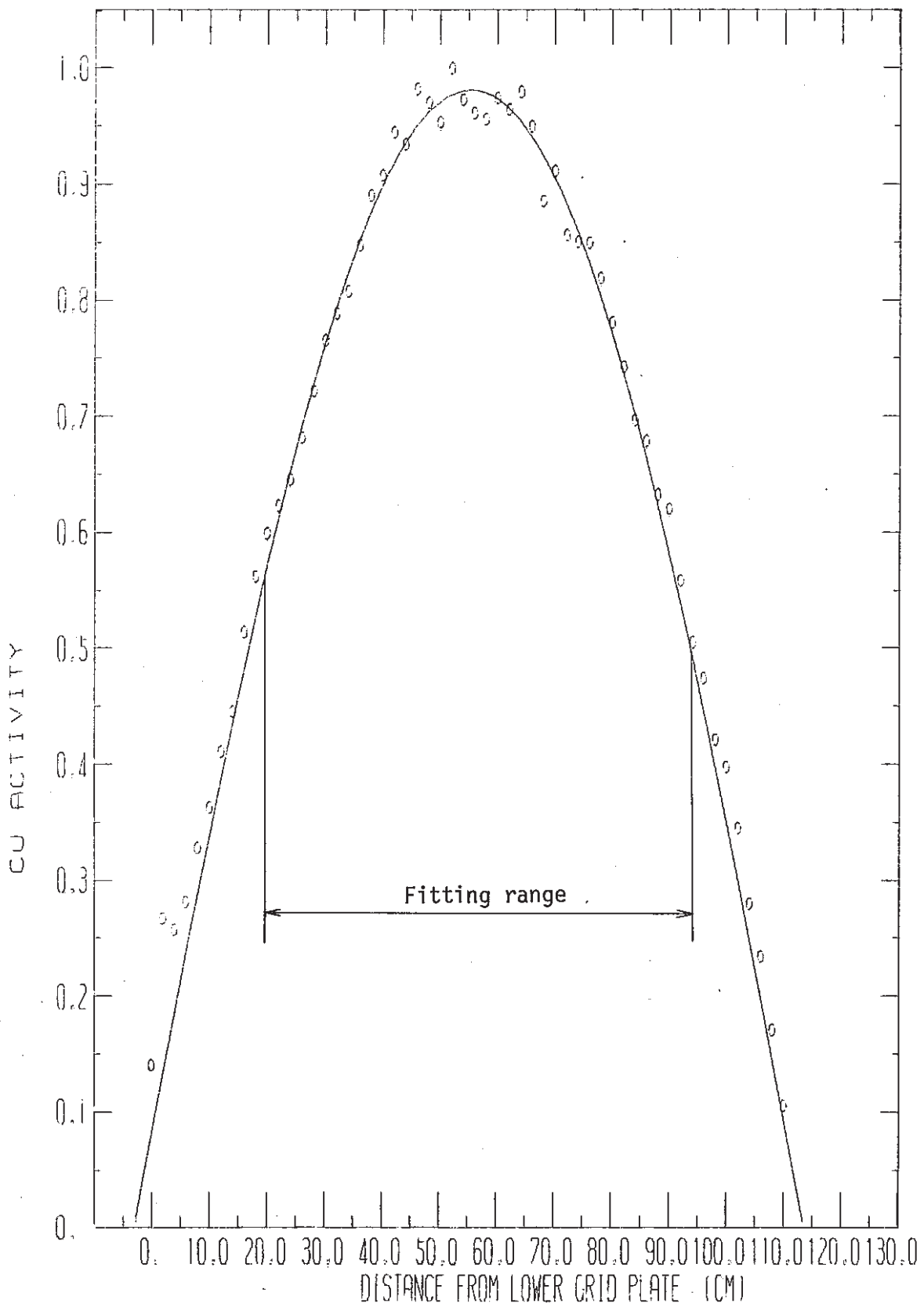


(1) Direction : 0-180°, 90-270°

Fig. 3.11 Radial thermal flux distribution in the core fueled with 21-0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters (B21-6a core)

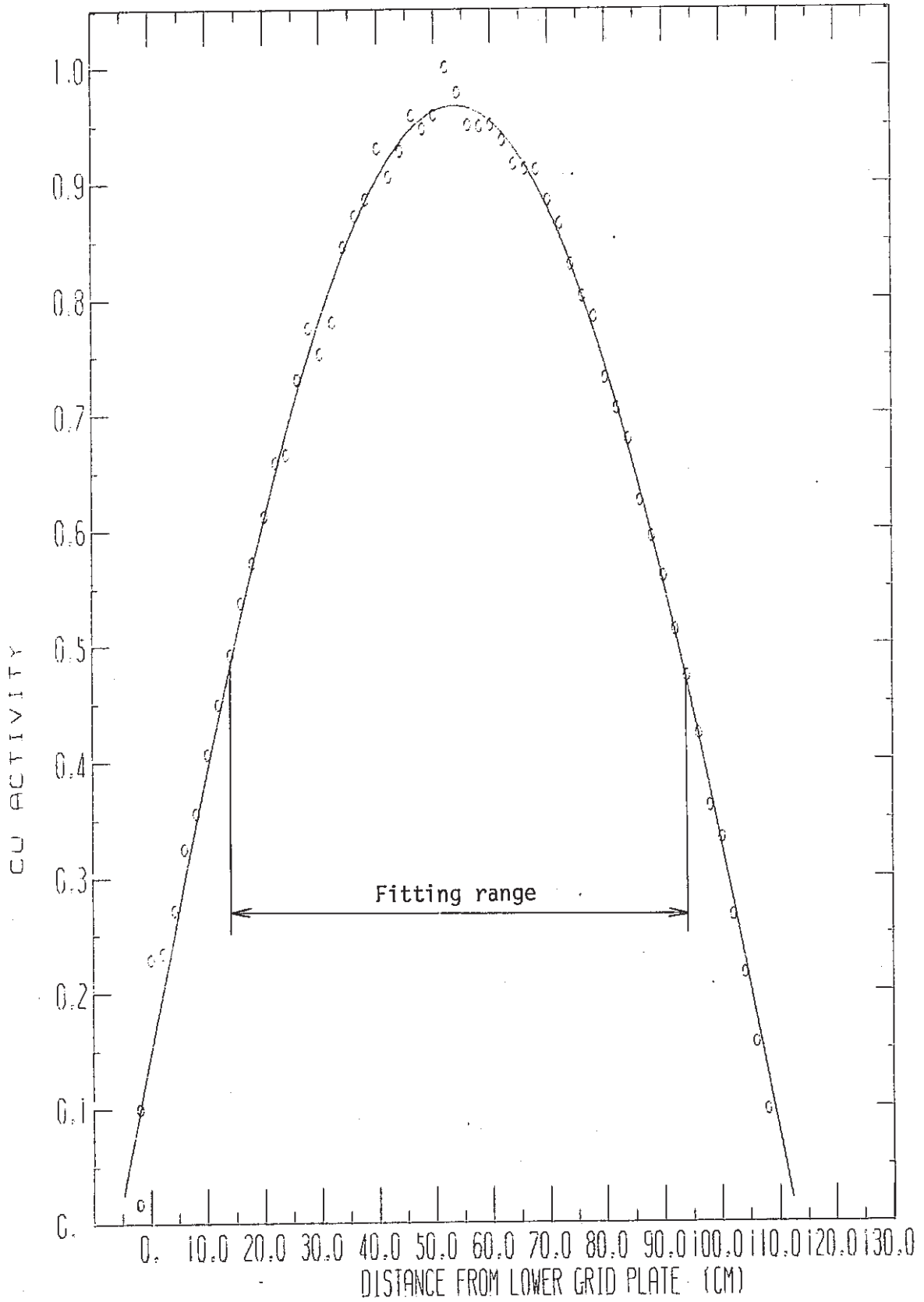


(2) Direction : 45-225°, 135-315°



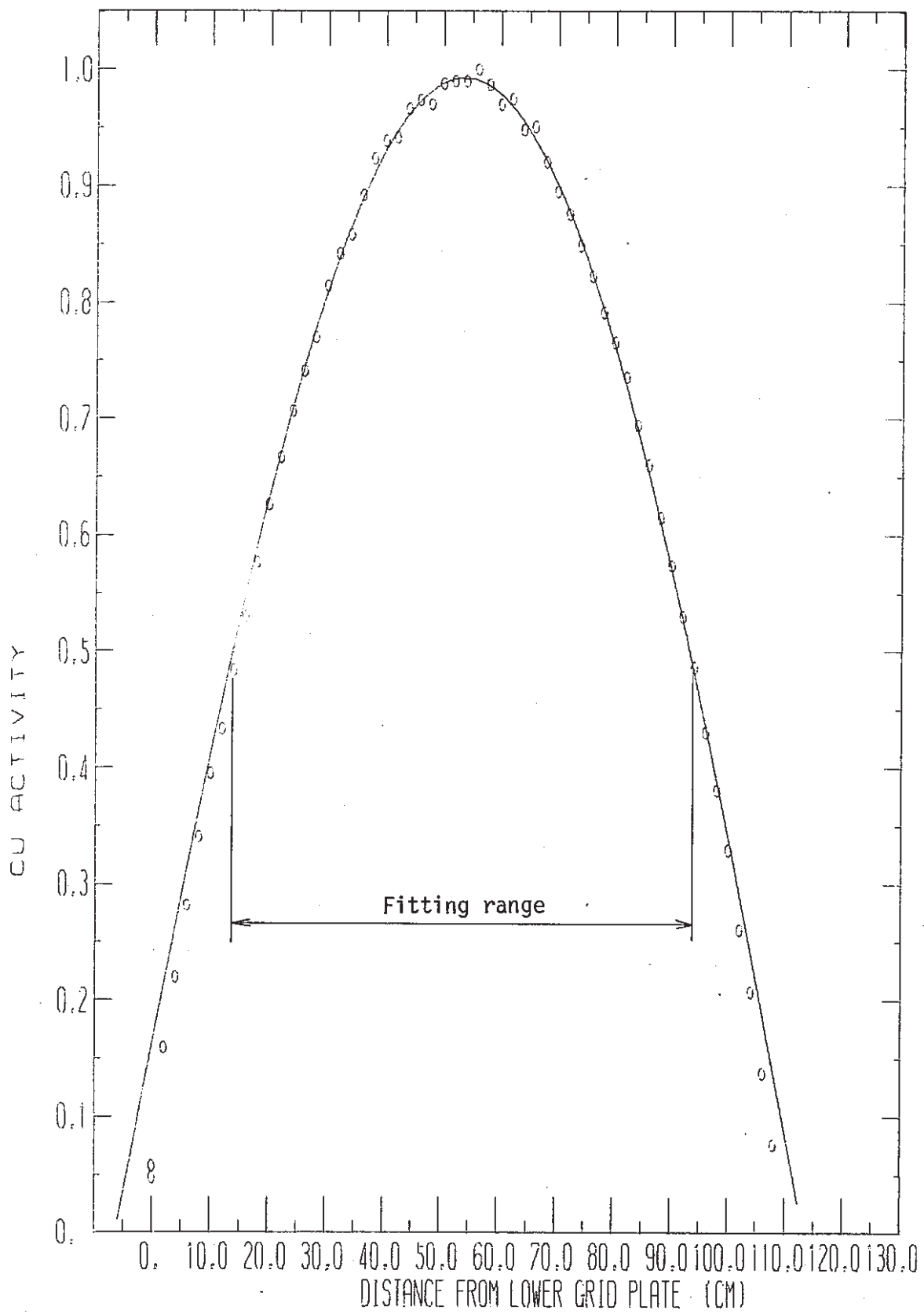
(1) Position : OD2 (in fuel)

Fig. 3.12 Axial thermal flux distribution in the non-voided core fueled with 9-0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters (B9-2 core)

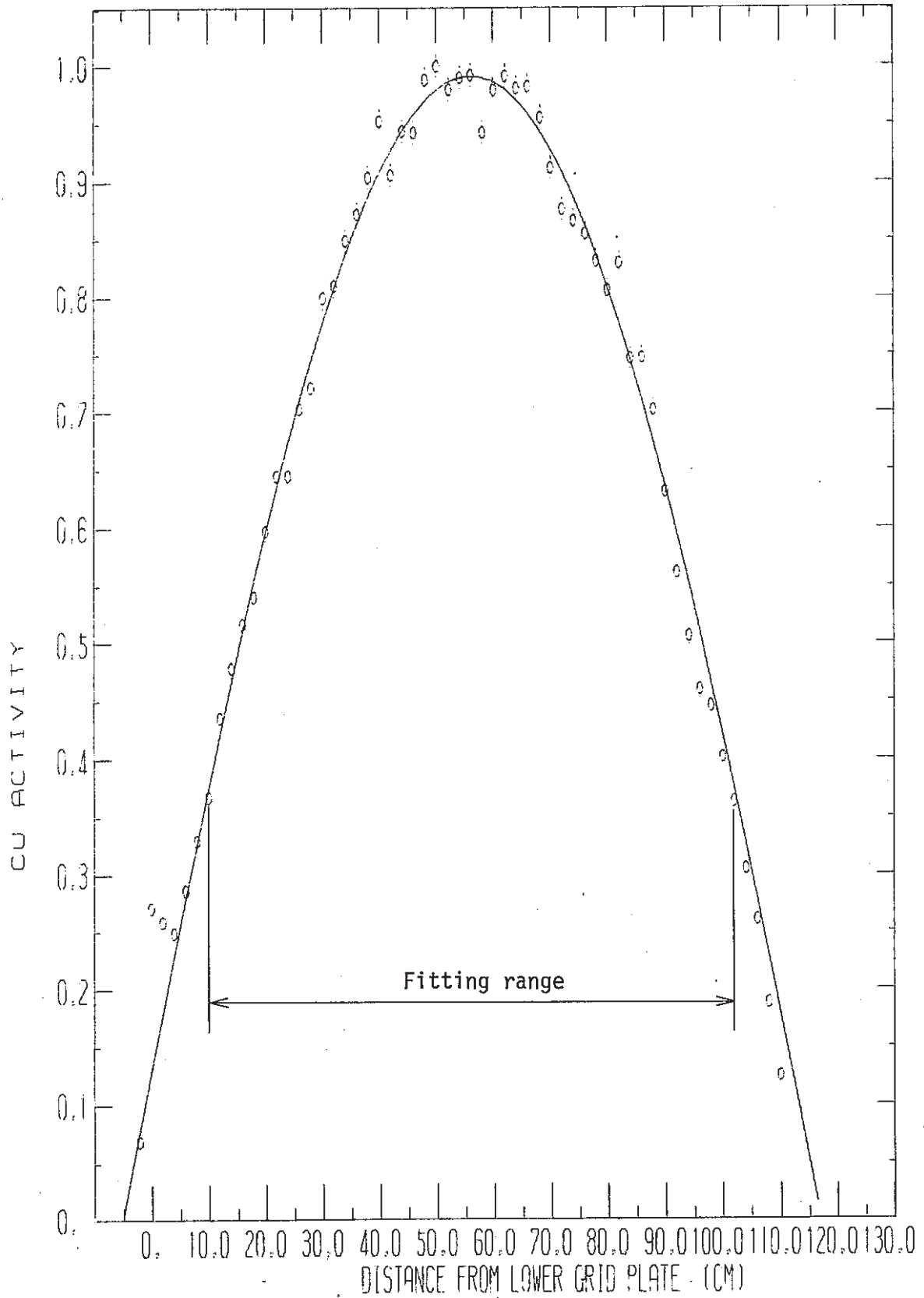


(2) Position : 2D6 (in fuel)



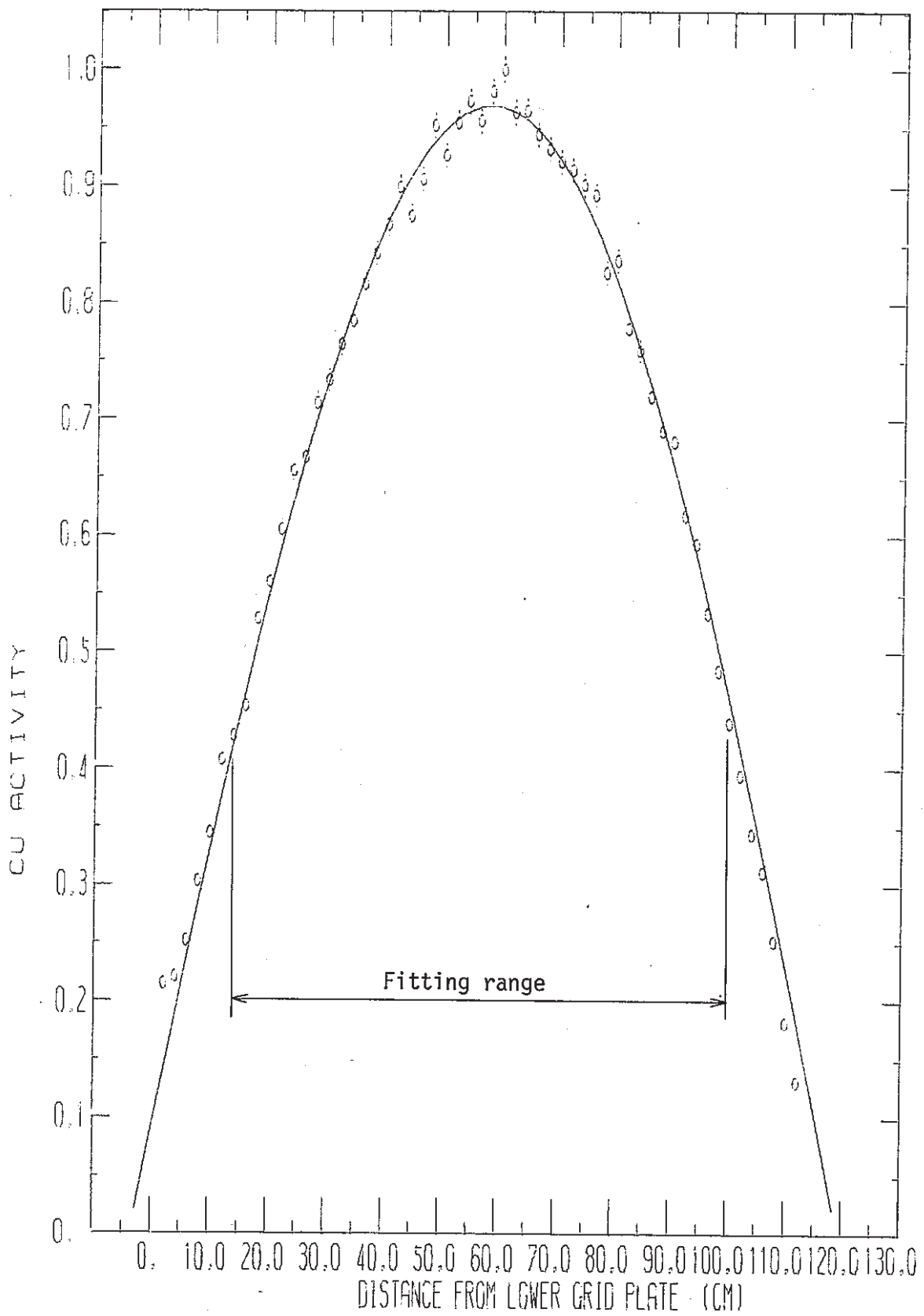


(3) Position : 3B1 (in D<sub>2</sub>O)

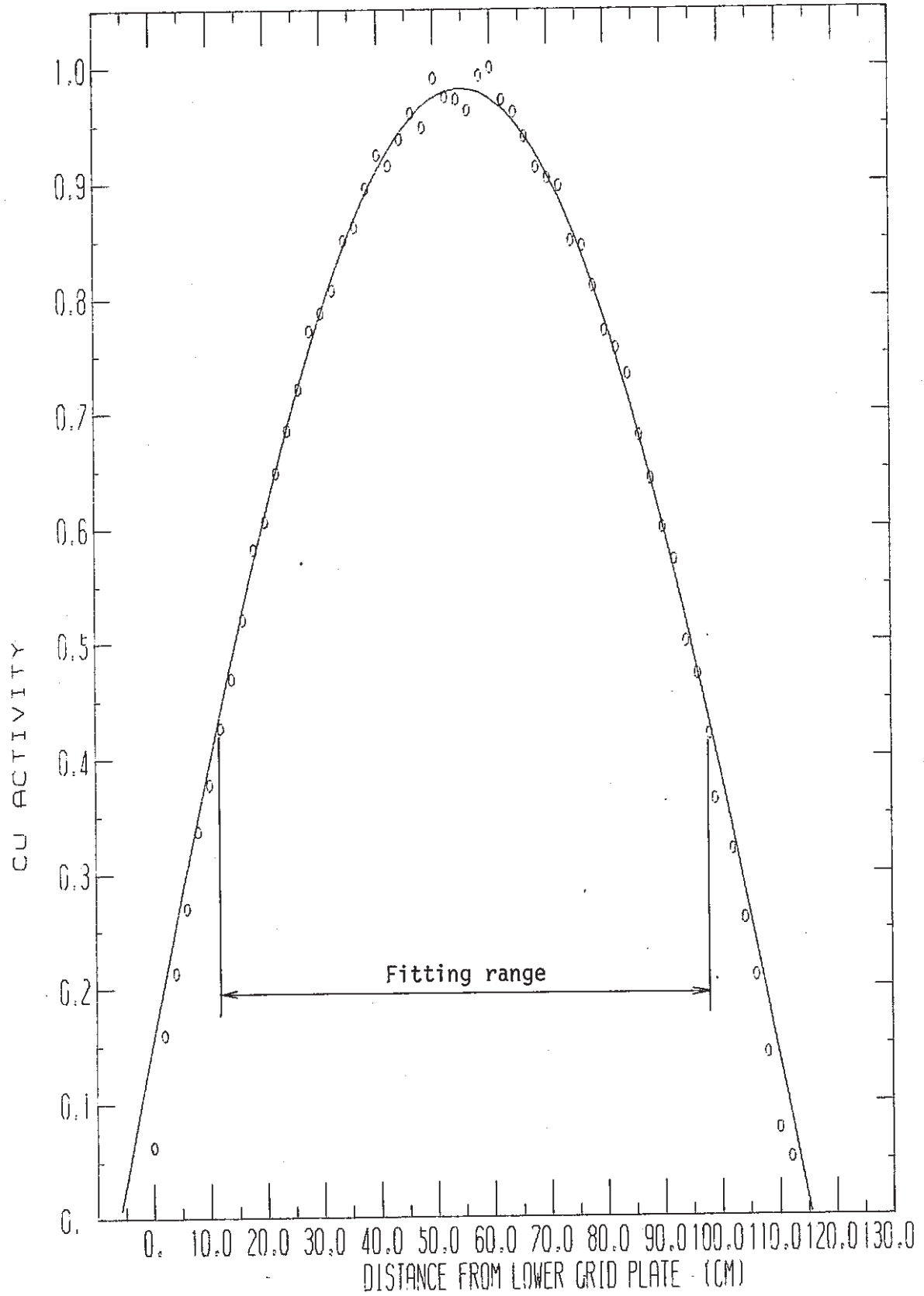


(1) Position : 2C2 (in fuel)

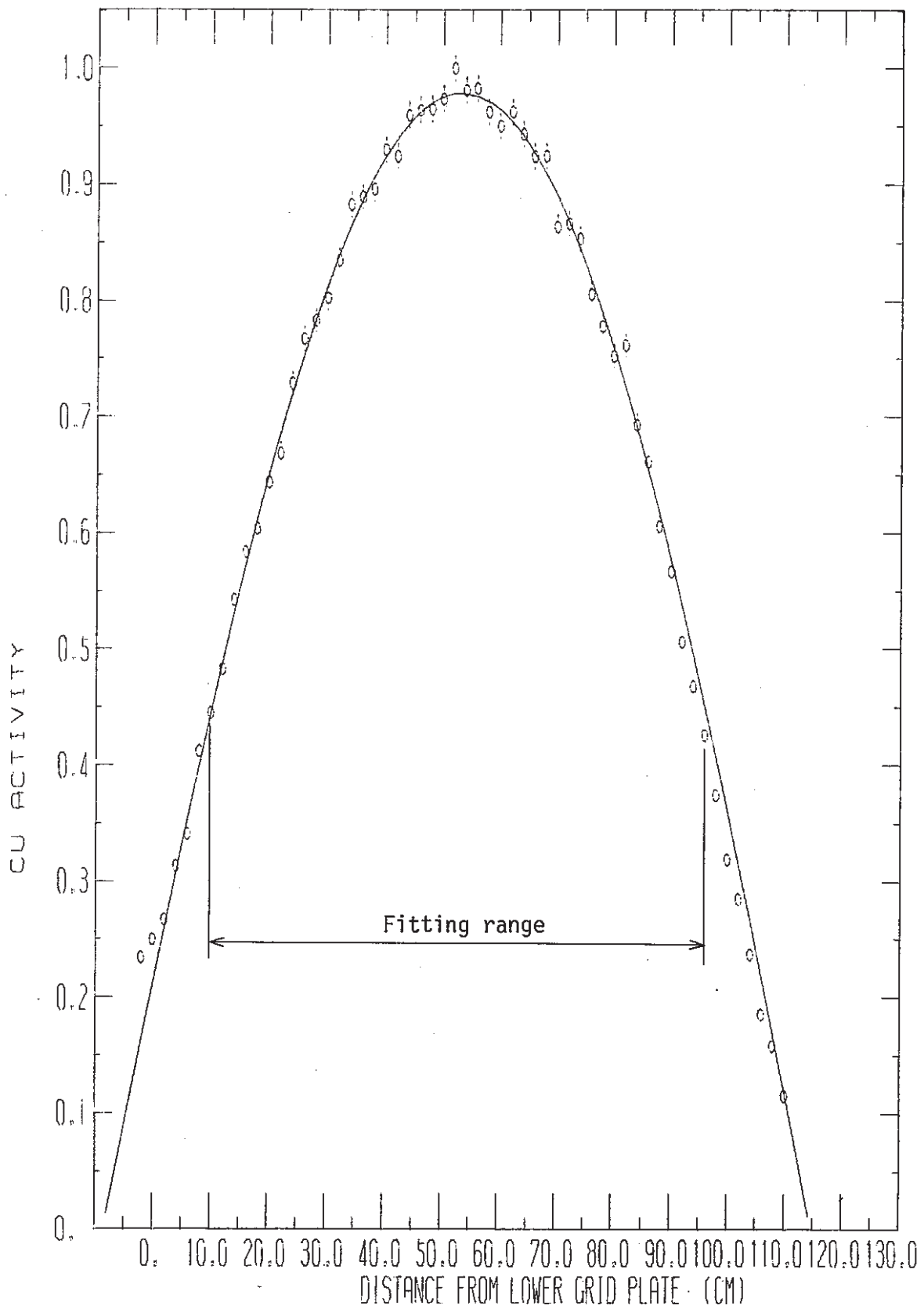
Fig. 3.13 Axial thermal flux distribution in the non-voided core fueled with 21-0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters (B21-6a core)



(2) Position : 6D2 (in fuel)

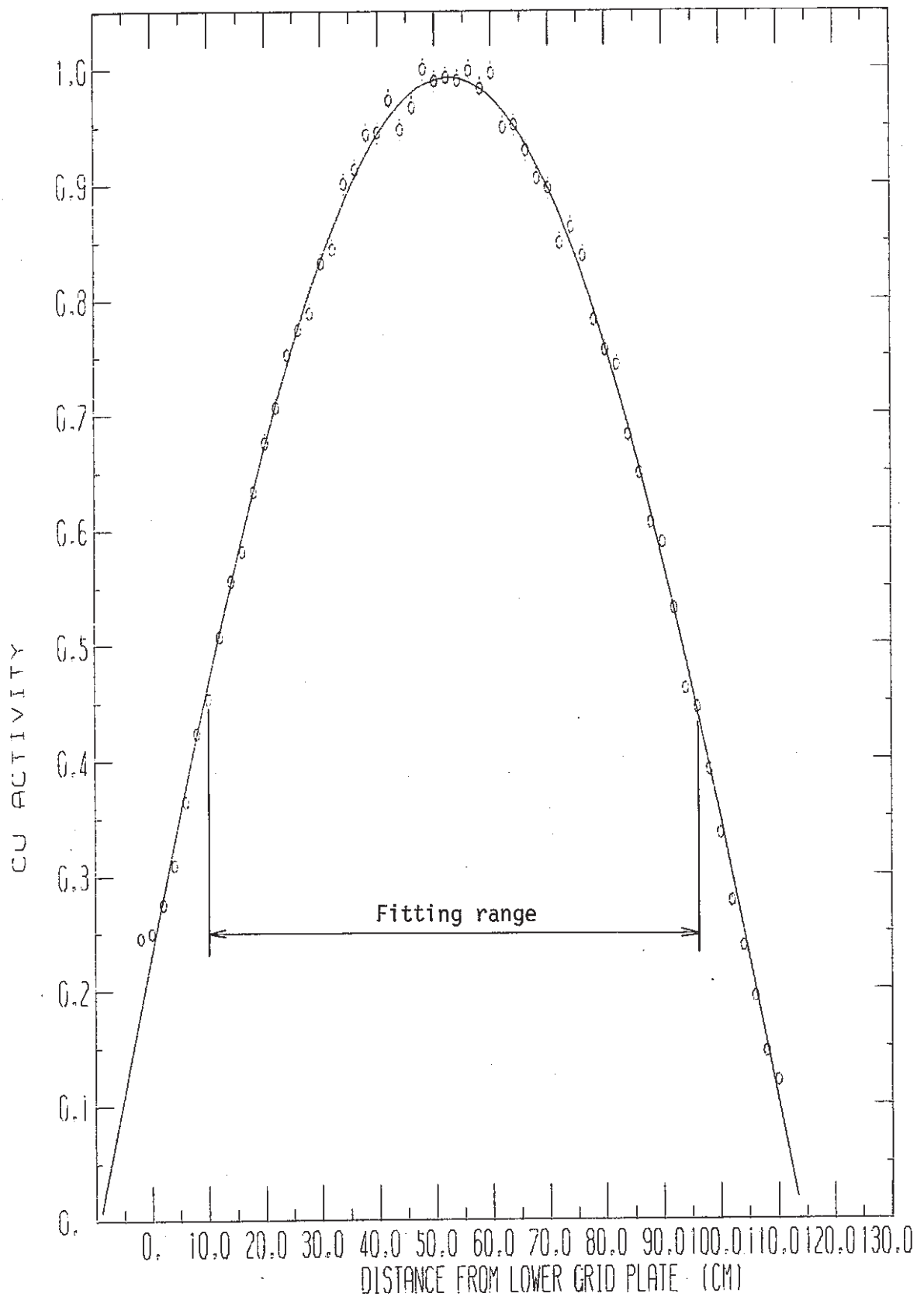


(3) Position : 3B1 (in D<sub>2</sub>O)

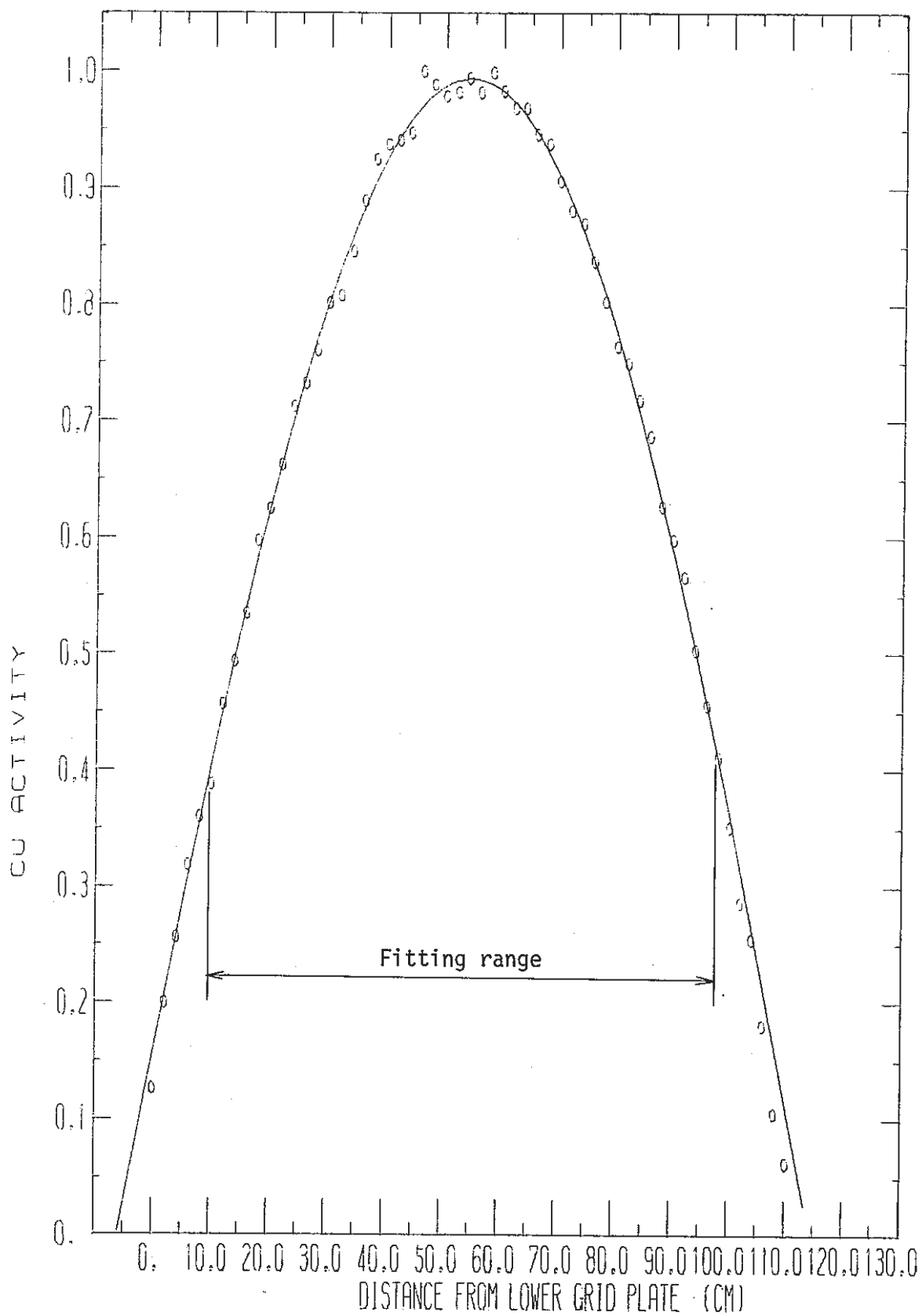


(1) Position : OD2 (in fuel)

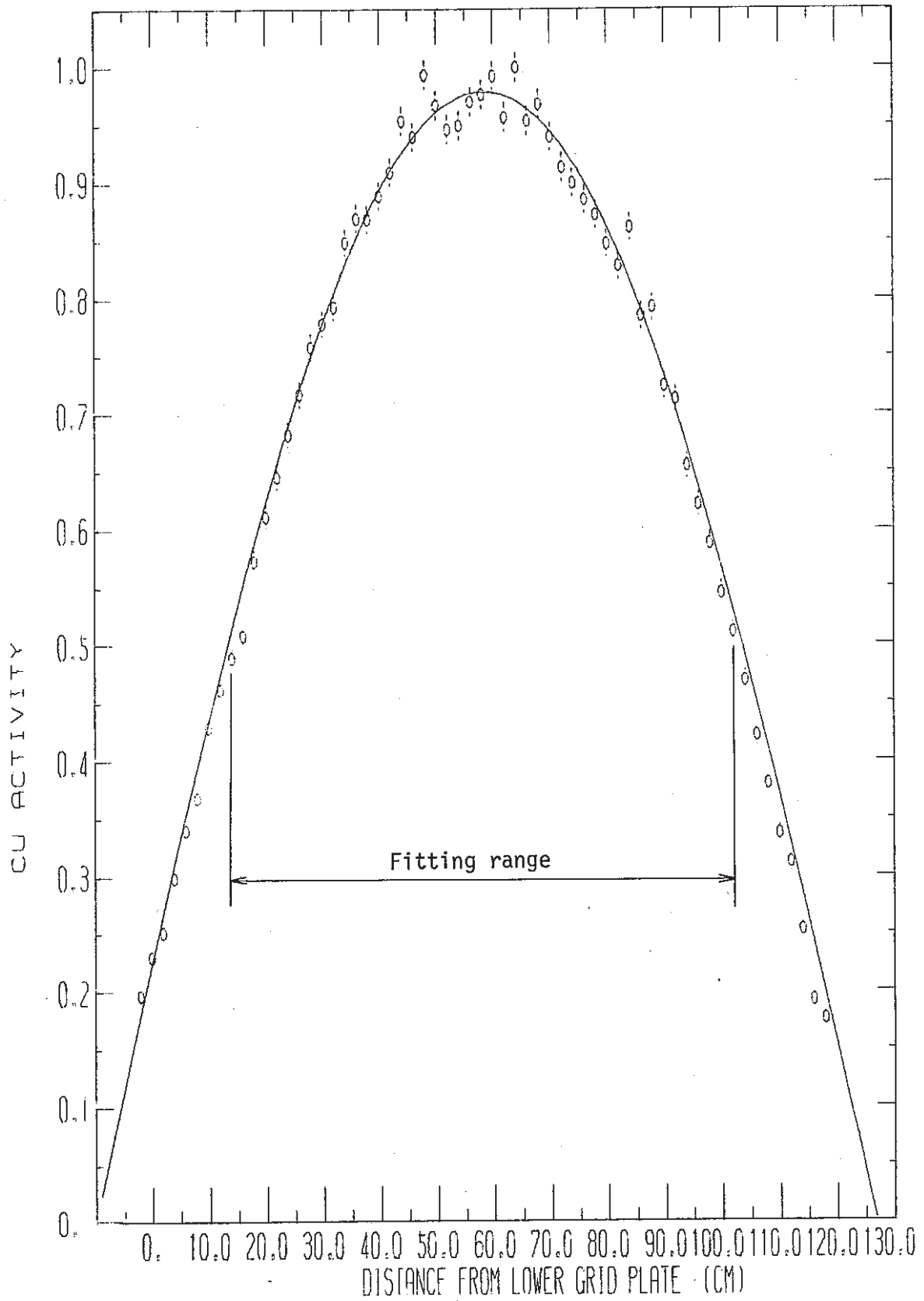
Fig. 3.14 Axial thermal flux distribution in the 100%-voided core fueled with 9-0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters (B9-2 core)



(2) Position : 2D6 (in fuel)



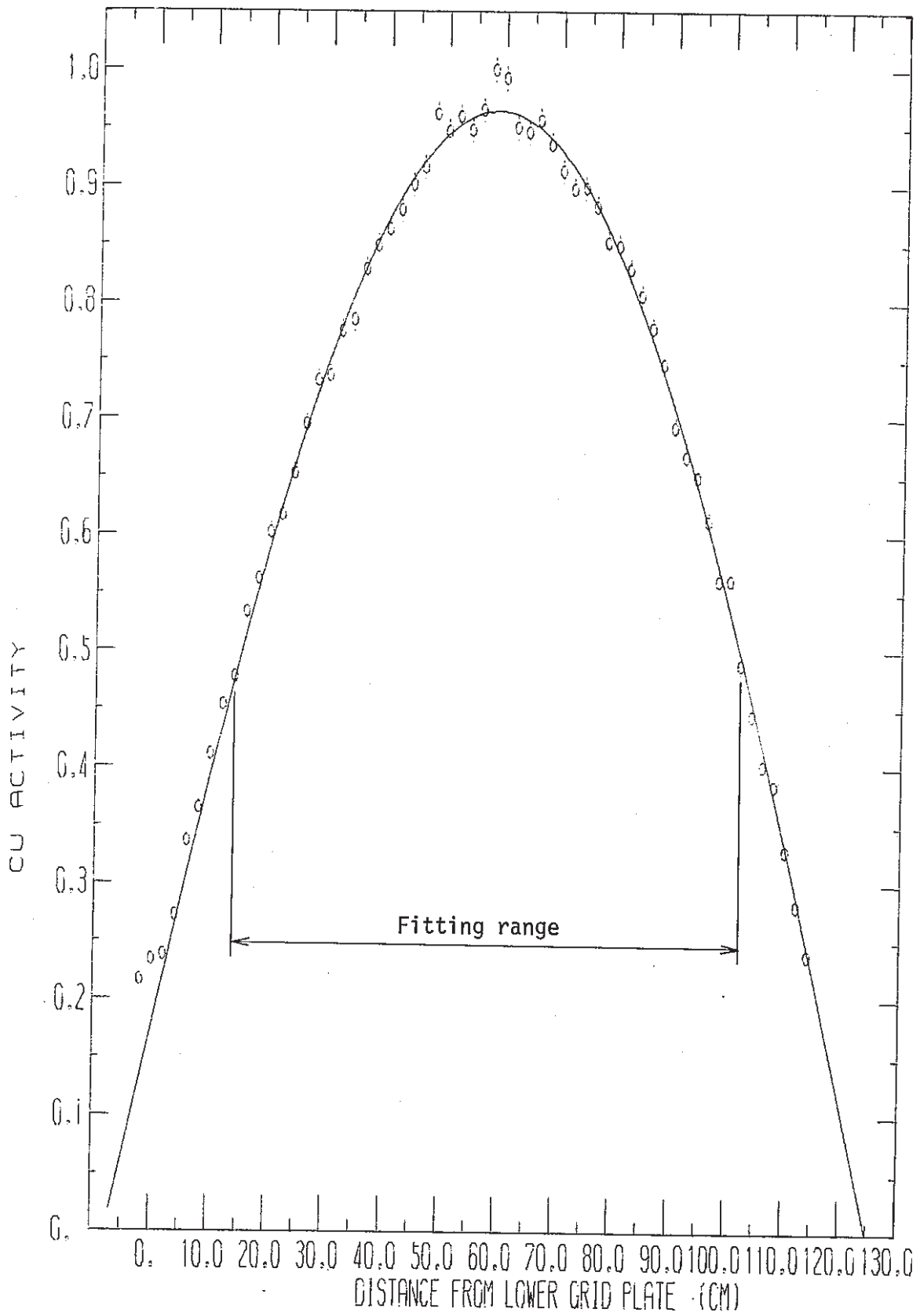
(3) Position : 3B1 (in D<sub>2</sub>O)



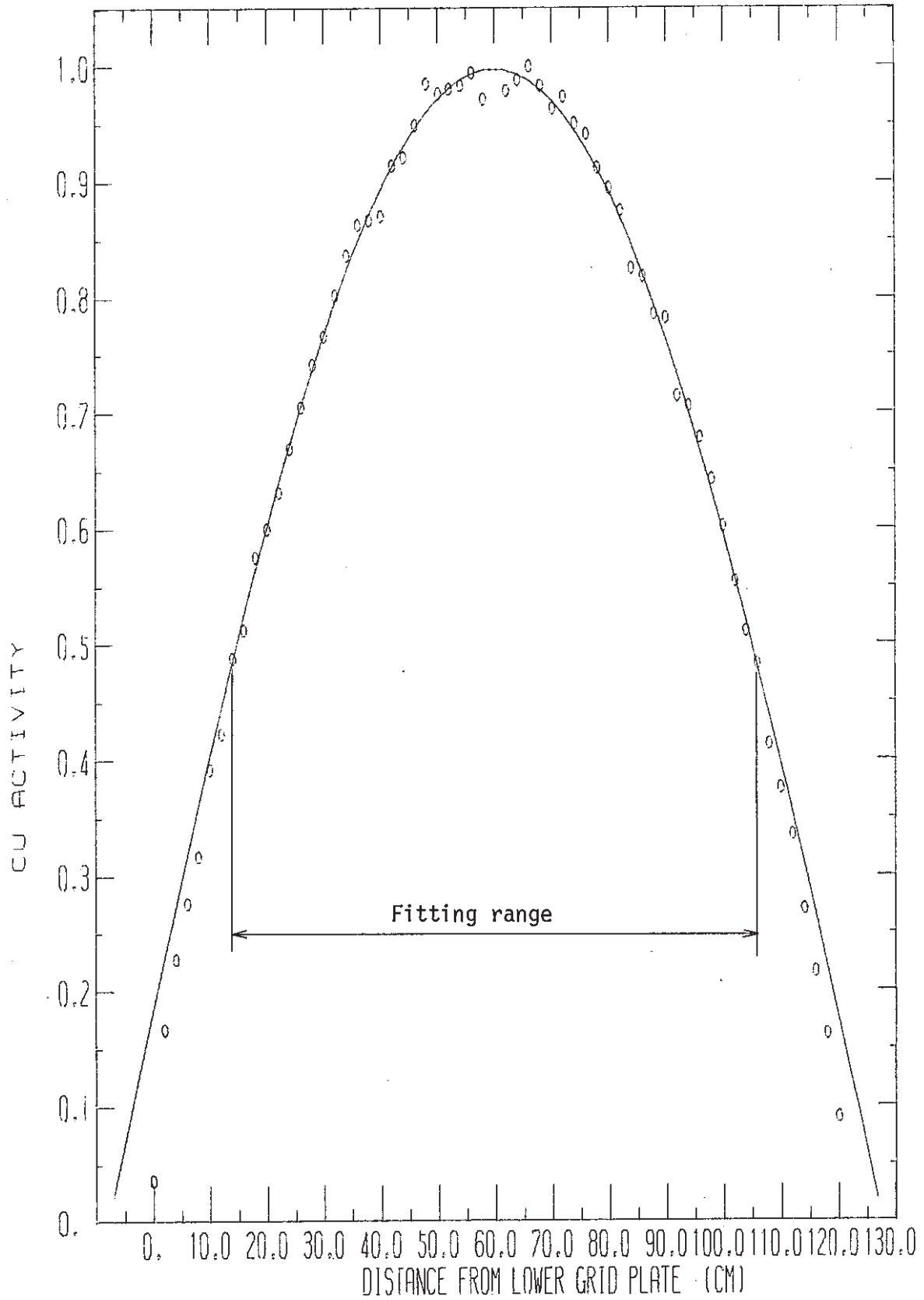
(1) Position : OD2 (in fuel)

Fig. 3.15 Axial thermal flux distribution in the 100% voided core fueled with 21-0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters (B21-60 core)





(2) Position : 2C6 (in fuel)



(3) Position : 3B1 (in D<sub>2</sub>O)

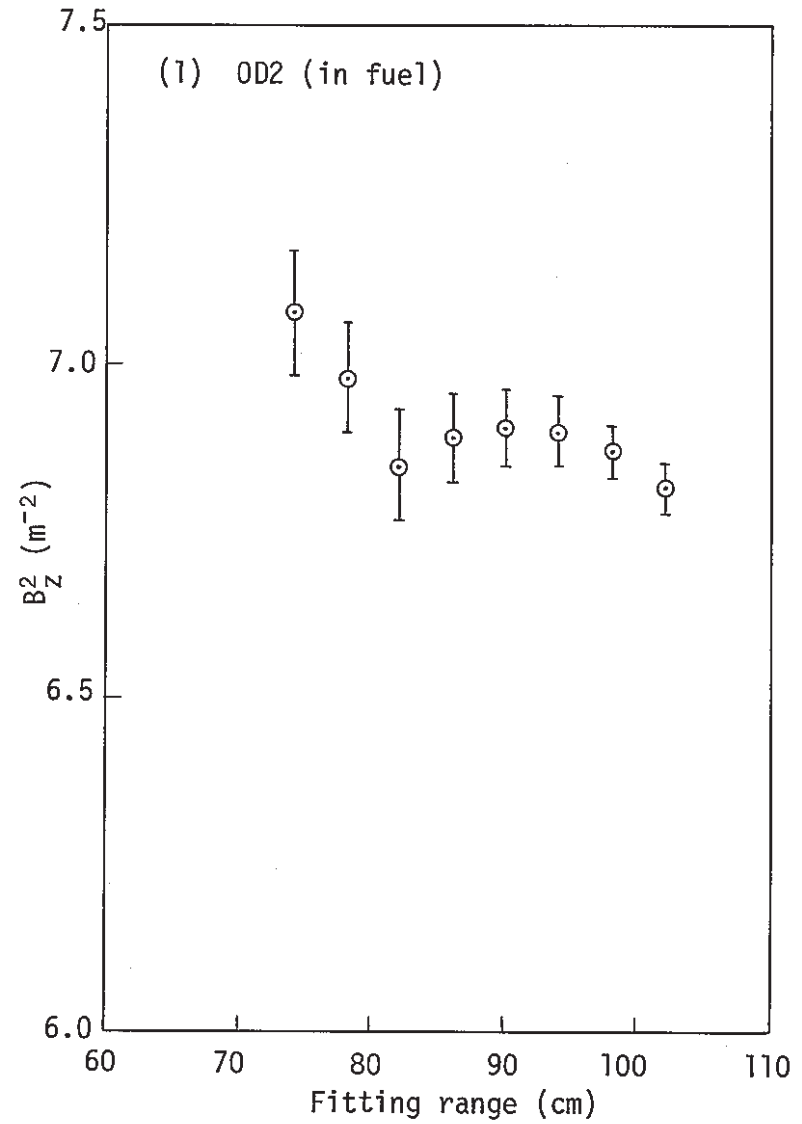
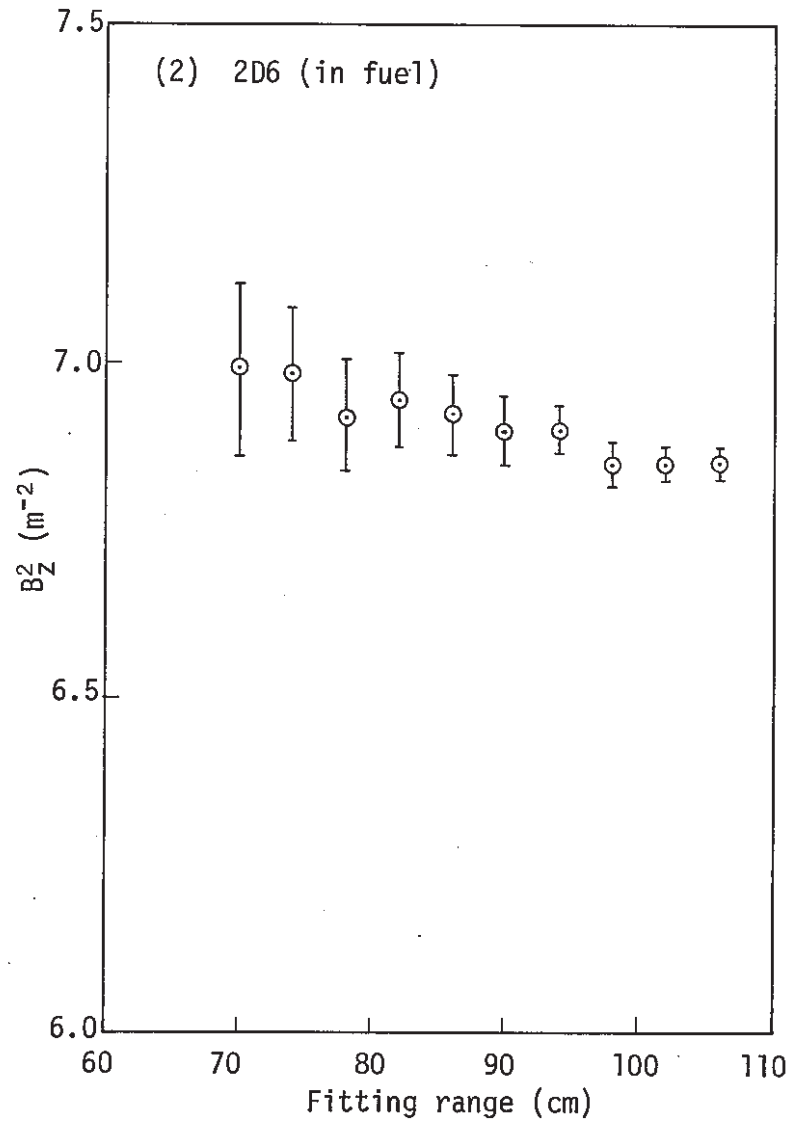
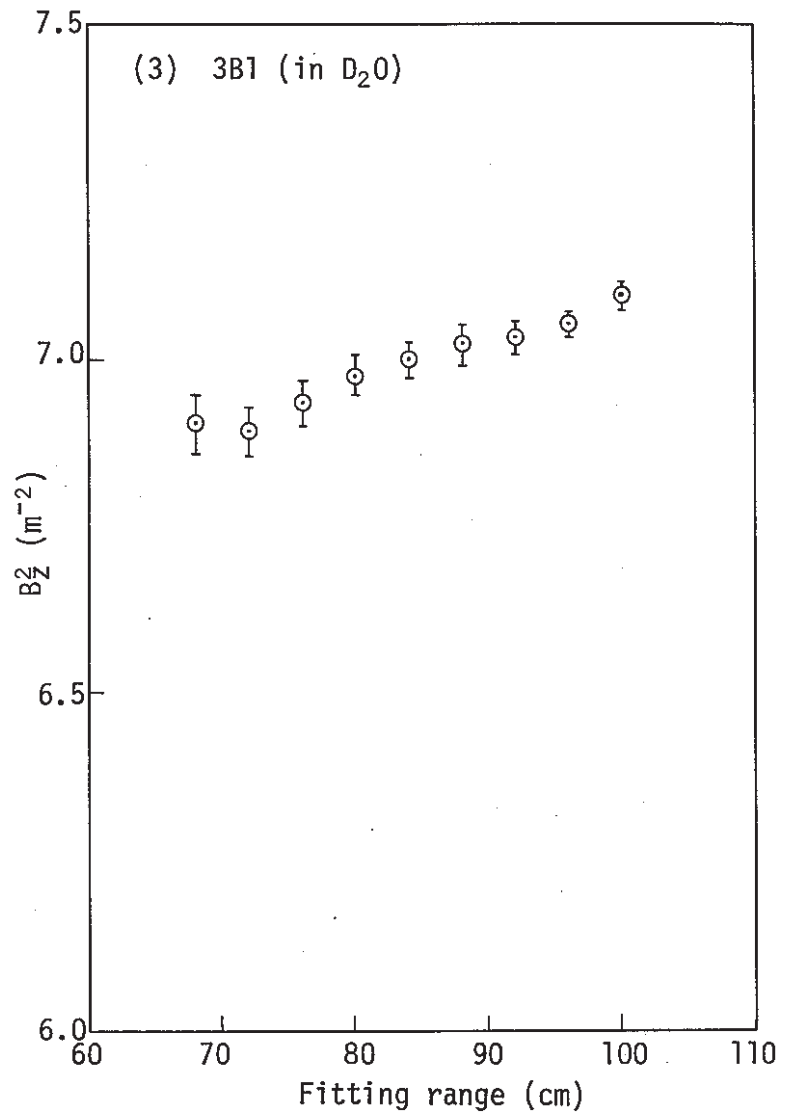


Fig. 3.16 Dependence of axial buckling on fitting range in the non-voided core fueled with 9-0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters (B9-2 core)



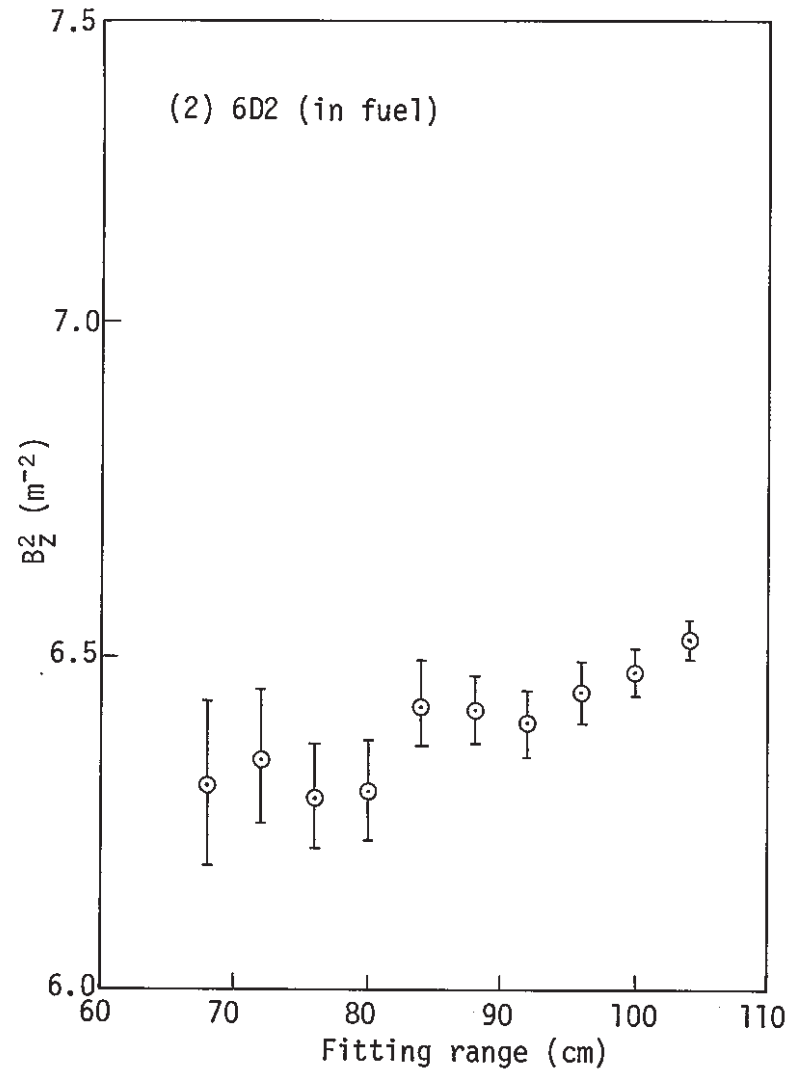
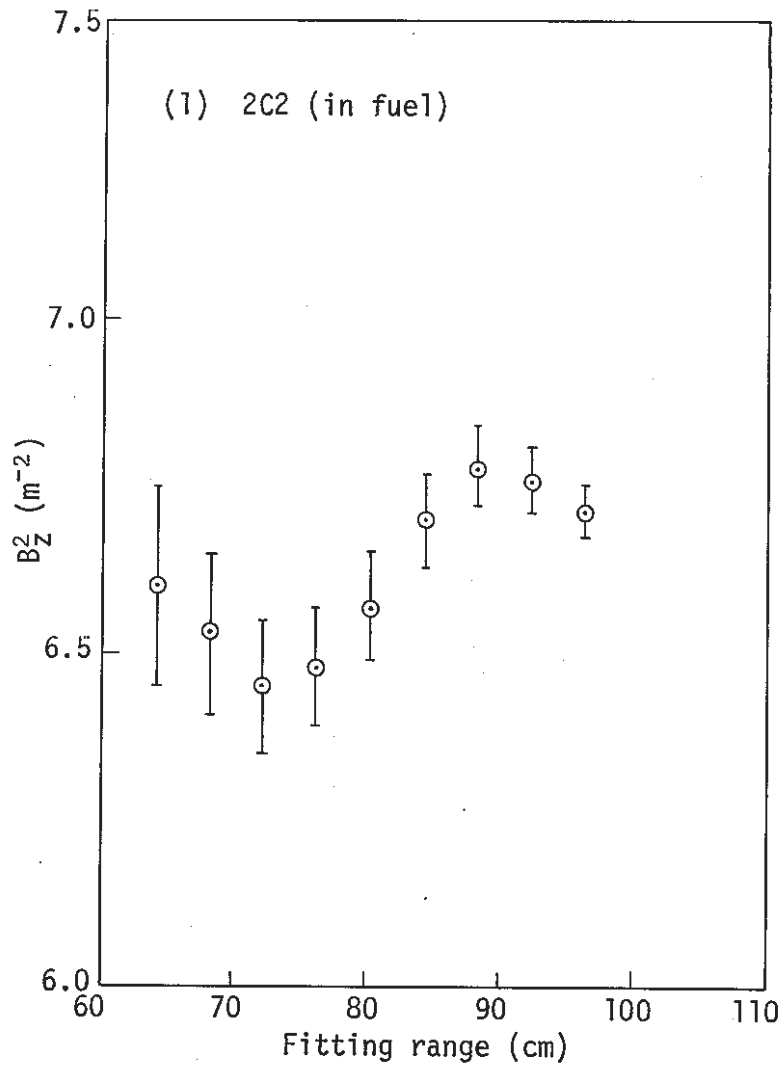
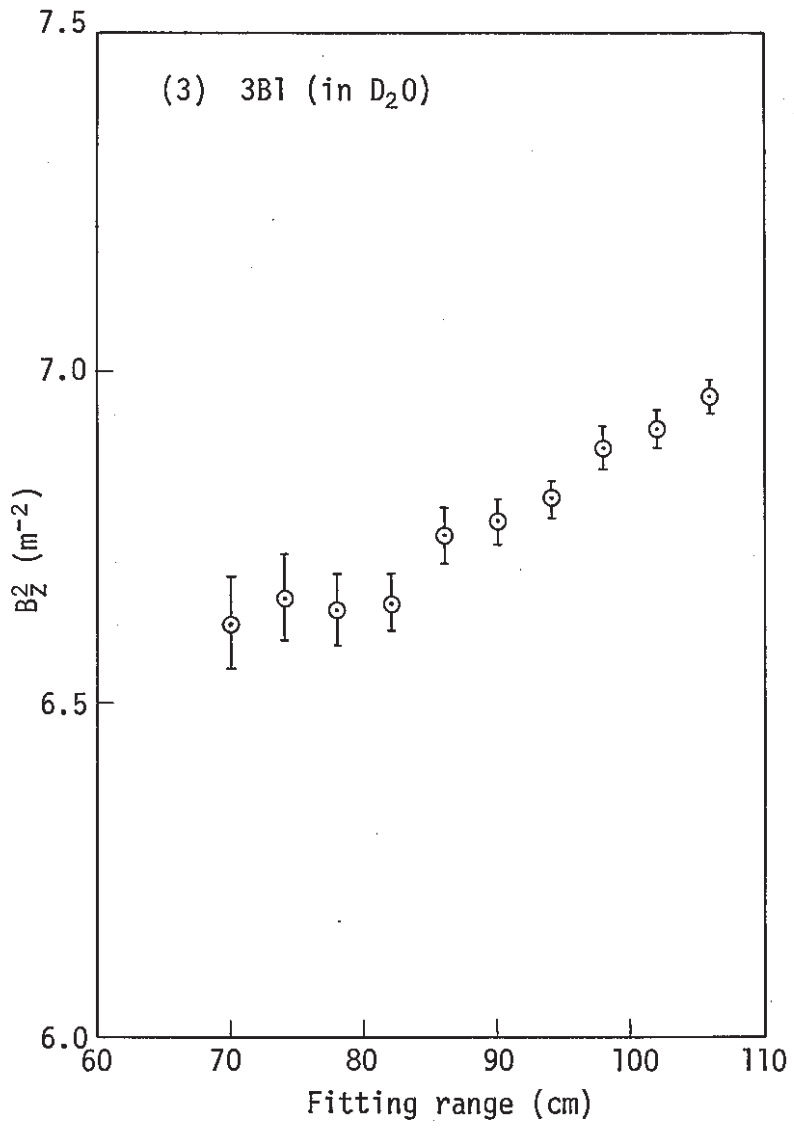


Fig. 3.17 Dependence of axial buckling on fitting range in the non-voided core fueled with 21-0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters (B21-6a)



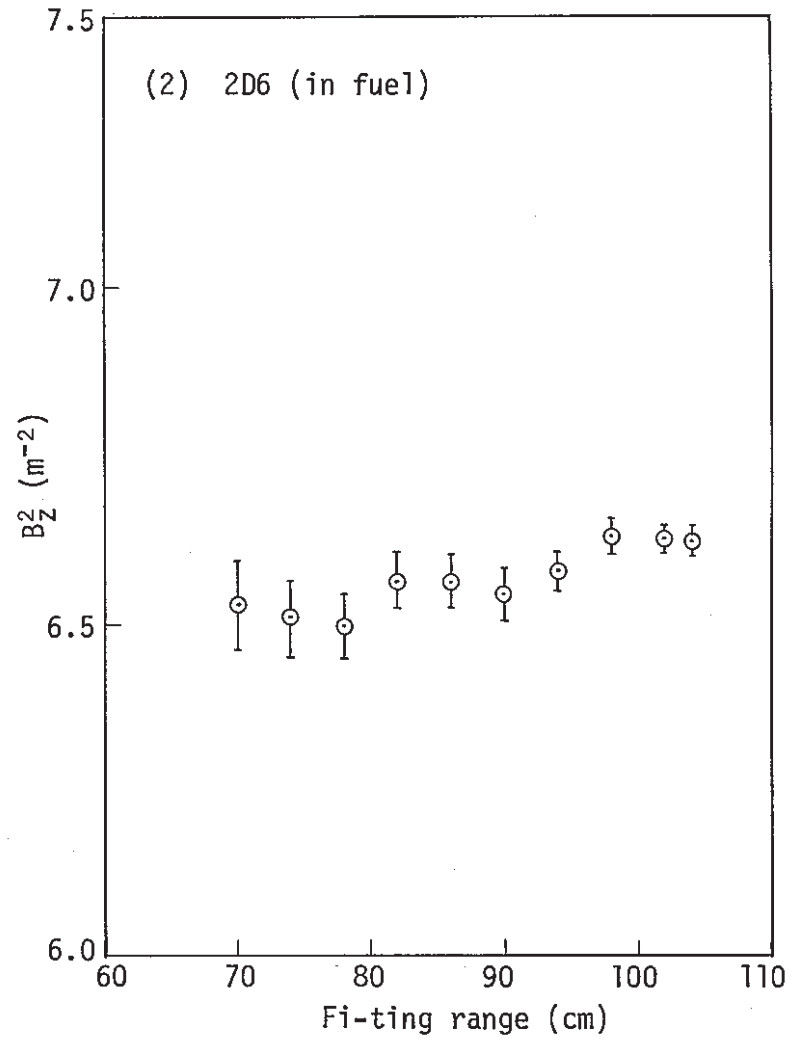
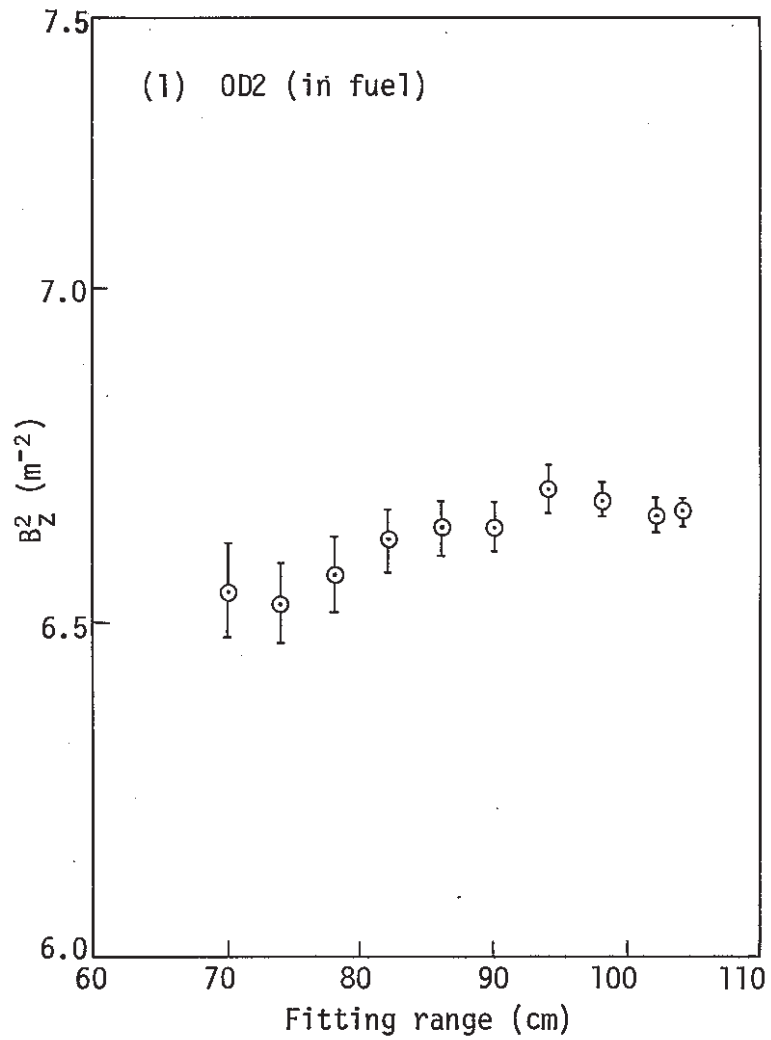
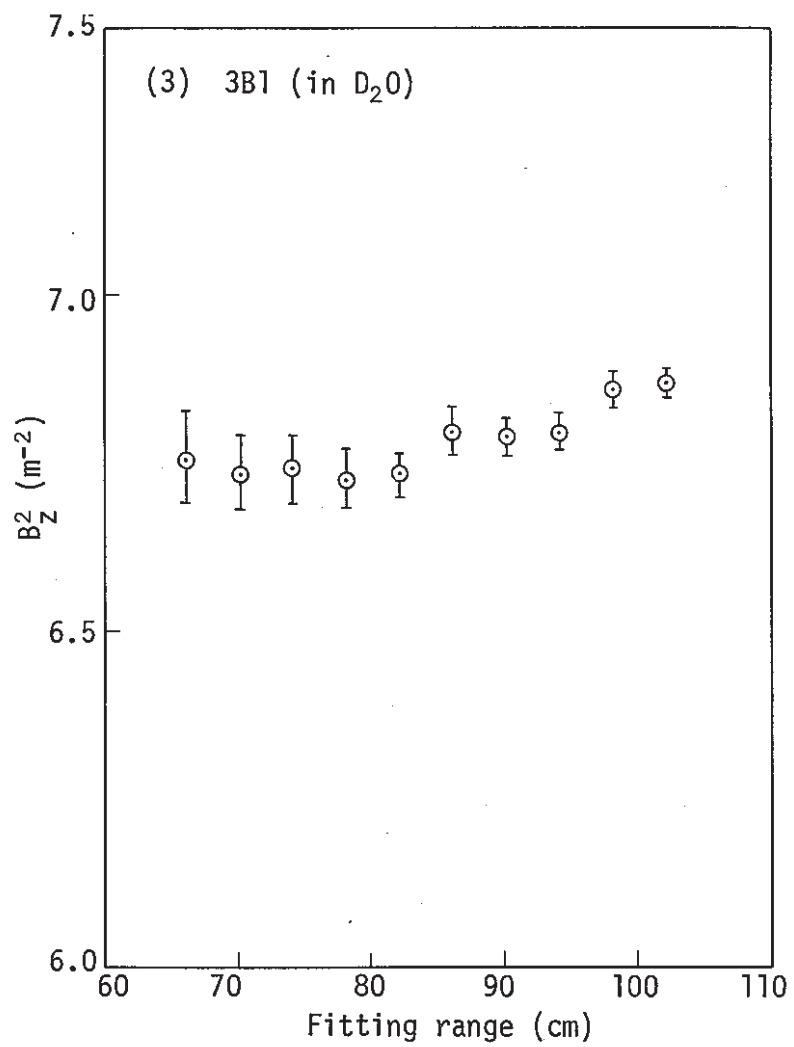


Fig. 3.18 Dependence of axial buckling on fitting range in the 100%-voided core fueled with 9-0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters (B9-2 core)





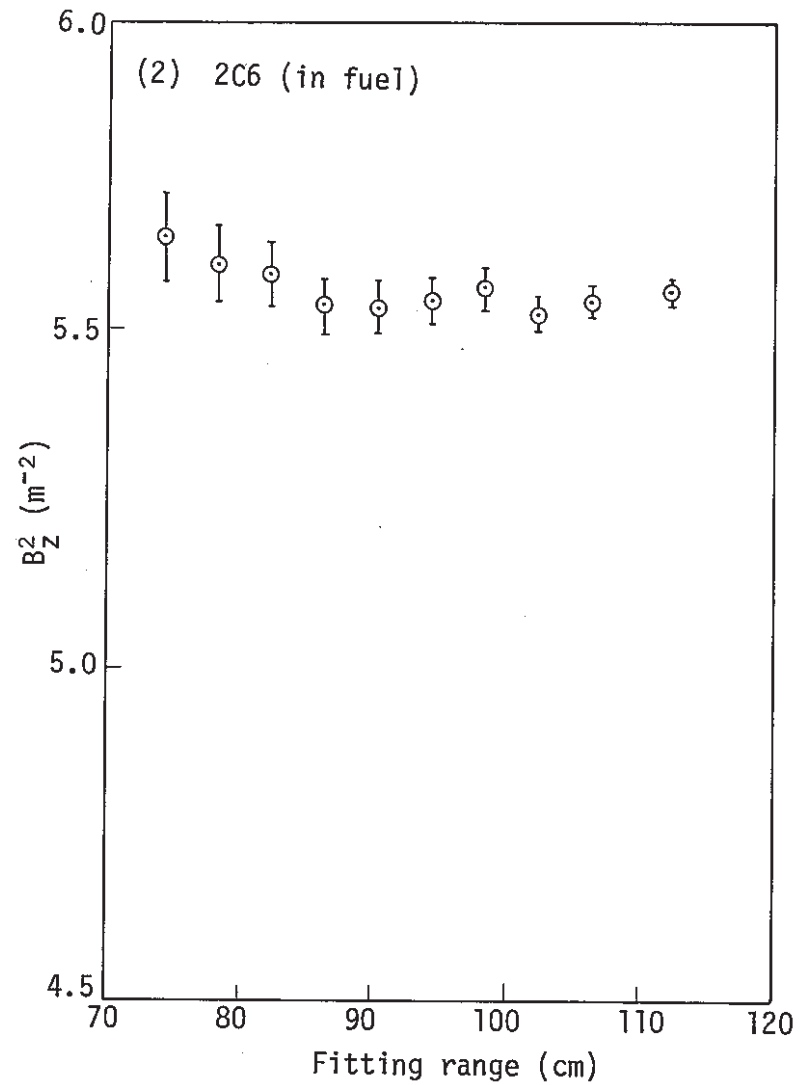
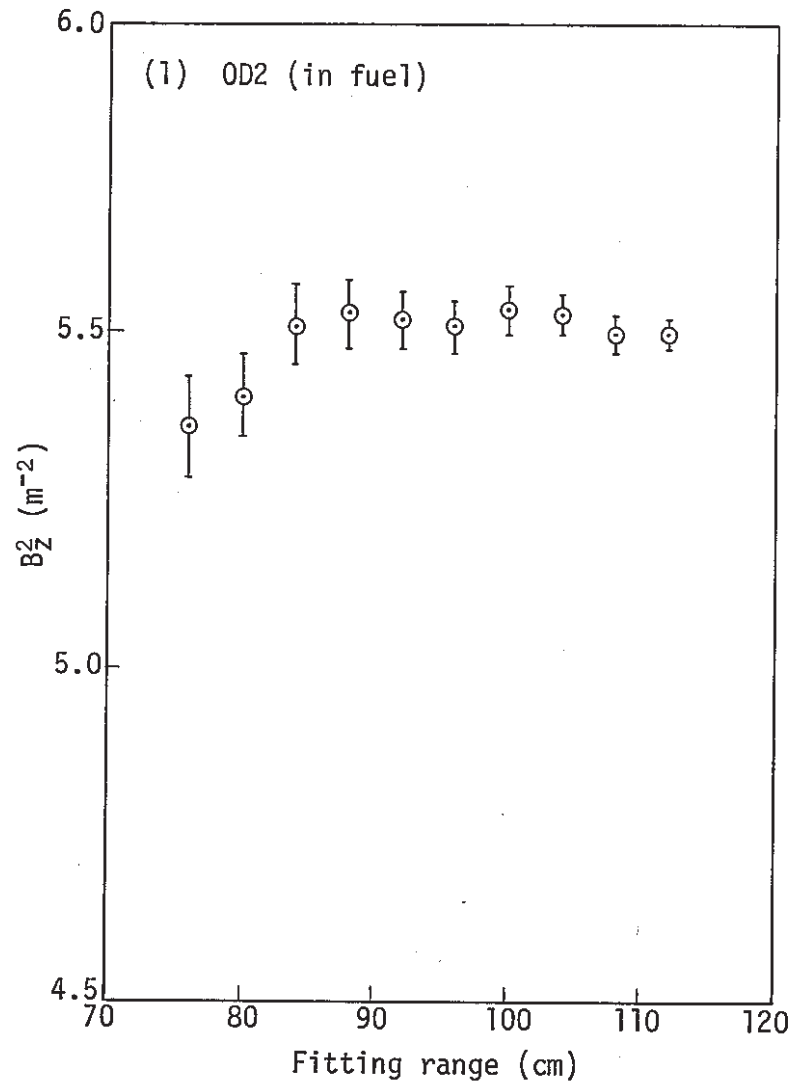
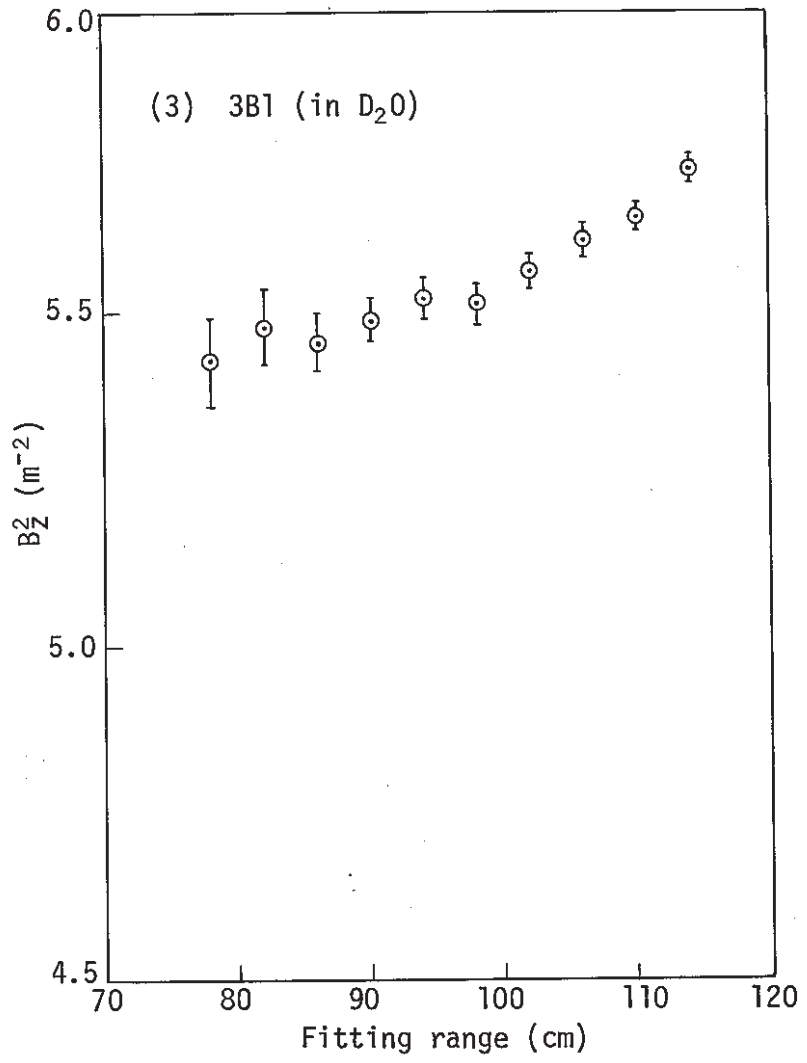


Fig. 3.19 Dependence of axial buckling on fitting range in the 100%-voided core fueled with 21-0.87wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> clusters (B21-6a core)



## 4. 実験解析

### 4.1 解析手法

B<sub>4</sub>C制御棒全挿入炉心における冷却材ボイド反応度および100%ボイド炉心の制御棒反応度値の実験値を、核計算コードWIMS-D4<sup>(3)</sup>および炉心計算コードCITATION<sup>(4)</sup>を用いて解析し、計算コードの精度評価を行った。実験では、半径3mの炉心においてB<sub>4</sub>C制御棒の挿入本数、冷却材ボイド率等を変化させながら臨界を達成させ、それぞれの炉心の臨界水位差および重水々位反応度係数とから軸方向バックリング一定の時のボイド反応度および制御棒反応度値を測定している。解析においても実験に対応させて炉心半径を固定し、反応度変化が生ずる前の炉心の臨界軸方向バックリング $B_{\frac{1}{2}}$ を臨界サーチによって求め、この $B_{\frac{1}{2}}$ を保持したまま反応度変化を生じた炉心で求めた固有値の変化から反応度を算出している。

#### (1) WIMS-D4コードの特徴

今回、格子計算に始めて使用したWIMS-D4コードは、従来より円筒状圧力管型重水格子の群定数計算に使用してきたWIMS-D<sup>(5)</sup>コードを正方格子の境界条件でも計算できるように改良されたもので、本質的な計算手法はWIMS-Dコードと全く同様である。このためWIMS-D4コードでは、WIMS-Dコードのようにこれまで実際の配置で取扱えなかった制御棒や案内管をコーナーロッドとして直接取扱うことができるようになった。これにより制御棒挿入格子等の領域毎の群定数が容易に得られるようになった。またコードの改良により計算時間の短縮も計られている。WIMS-D4コードによる計算時間をIBM-308におけるCPU時間でみると、クリーン格子に関してはWIMS-Dコードの場合のほぼ1/2となっている。B<sub>4</sub>C制御棒挿入格子の場合ではWIMS-Dコードの4マルチセルモデルによる計算とほぼ同程度(約2.5min)であった。

WIMSコードを用いて制御棒挿入格子の群定数を求める場合、これまではマルチセルモデル計算に依存していたが、このマルチセルモデルによる計算手法では次のような問題点

① 炉心計算コードに入力するため、制御棒の周囲にある適当な領域を設けなければならない。

② 制御棒による中性子束の低下を非対称形状で取扱えない。

があった。一方、WIMS-D4コードでは、①のような任意性がなく、また実際の形状で直接衝突確率計算を行うため、既述したように計算時間もマルチセルモデルの場合と殆んど差はない。WIMS-D4コードにおける制御棒の取扱いは、ひとつのコーナーに燃料クラスタと同じように制御棒をRODSUB領域として設けるだけでよい。制御棒のないクリーン格子では、このコーナーロッド領域を重水減速材に置き換えれば通常のクリーン格子の計算に帰

着される。クリーン格子で求めた群定数は、WIMS-D 4 および D 両コード間で差は見出されなかったため、両者は同一精度であると考えられる。以上の点から、WIMS-D 4 コードは WIMS-D コードに比べ、使用性および計算時間に関し有利であると考えられる。

## (2) 格子計算手法

WIMS-D 4 コードを用いた格子計算は第 4.1 表に示すような 9 群のエネルギー区分で行われた。計算に使用した制御棒挿入格子のメッシュ構成および領域区分の概略モデルを第 4.1 図に示す。制御棒を含むコーナーに設ける RODSUB 領域の大きさは、制御棒近傍の熱中性子束分布が実験値<sup>(6)</sup>と合うように半径 9.5 cm に定めた。制御棒挿入格子計算では、各領域毎および格子平均の群定数が中性子束一体積平均で求まるが、炉心計算における制御棒領域の取扱いを簡単化するため、ここでは第 4.1 図に示すように制御棒領域は制御棒を中心として一辺が格子ピッチの長さの領域と考えた。すなわち、制御棒の 1/4 断面を含む単一セルについては、第 4.1 図に示すように制御棒を含む 1/4 セル（制御棒領域）および制御棒を含まない 3/4 セル（制御棒隣接セル領域）とに分割した。炉心計算に必要なそれぞれの領域の 3 群定数は冷却材ボイド率および燃料組成依存で求められた。

制御棒を挿入しない通常のクリーンセルの 3 群定数については、既述したように、WIMS-D および D 4 コード間で差がないので、従来どおり WIMS-D コードで求めたものを使用した。また重水反射体の群定数は、1.2 wt% ウラン燃料格子の最外格子境界点における重水減速材の 3 群定数を使用した。

以上のようにして求めたボイド率および燃料依存ごとの単位格子各領域の 3 群定数を第 4.2 表に示す。また、WIMS-D 4 コードによって求められた制御棒周辺の熱中性子束分布を一例として第 4.2 図に示す。第 4.2 図における計算結果は、冷却材ボイド率をパラメータとして B<sub>4</sub>C 制御棒を挿入した 0.54 wt% PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> 燃料格子における方位角 45° 方向の熱中性子束分布である。

## (3) WIMS-D 4 による制御棒挿入格子計算の課題

WIMS-D 4 コードによる制御棒挿入格子計算の問題点を挙げると次のようになる。

- 1) 隣接チャンネルに他の種類の燃料が装荷された場合、群定数に及ぼす影響は取り入れられない。
- 2) 制御棒表面および燃料集合体内での方位角方向の異方性が取扱えない（制御棒表面ではどこでも同一の中性子束をもつ）。
- 3) コーナーロッドのために設けた RODSUB 領域の大きさによって群定数に変化する。

このうち 1) 項についてはクリーン格子でも取扱っておらずここでは問題としない。2) 項については各領域で平均中性子束を求めているので群定数による影響は大きいとは思えないが、今後の検討による。最後の 3) 項については、RODSUB 領域の大きさを 9.5 cm から次第に小さくしてゆけば制御棒と燃料集合体の間の熱中性子束分布のピークは制御棒寄りに移動す

るため実験と合わなくなる傾向を示す。熱中性子束分布の実験値との比較から考えると、RODSUB領域の大きさはできるだけ大きくした方がよいことが分った。RODSUB領域の大きさが、計算値に与える効果を実際に見積ってみた。RODSUB領域の半径を9.5cmから8.5cmに変化させてみたところ、熱群の群定数では制御棒領域の $\nu\Sigma_f$ の変化が最も大きく最大4%であるが、その群定数を用いて計算した制御棒反応度値は最大1.6%の変化にとどまる。

以上のことから、計算結果に及ぼす影響としては3)項の効果が最も大きいと思われる。しかし吸収の大きいB<sub>4</sub>C制御棒に関しても制御棒反応度値に及ぼす影響は小さいことから、SUS制御棒のようにさらに小さな吸収断面積をもつ吸収体に置き換えてもその影響はもっと小さくなるものと考えられる。したがってRODSUB領域の半径は現状の9.5cmで妥当と考えられる。

### (3) 炉心計算

炉心計算には拡散計算コードCITATIONを使用した。計算体系は2次元X-Y形状の1/2回転対象炉心である。軸方向の組成は一樣のためバックリングを適用した。中性子エネルギー群は次のような区分の3群である。①高速群(10MeV~821KeV)、②共鳴群(821KeV~0.625eV)、③熱群(0.625eV~0eV)、また空間メッシュ構成は、1格子ピッチ(25-cm)あたりすべて4分割(6.25cm)とした。

炉心計算を行った1/2炉心計算体系の一例を、(A9-2)、(A25-4)、(B13-2)、(B13-4)、(B21-6a)および(B21-6b)の各炉心について第4.3図に示す。

## 4.2 解析結果

WIMS-D4コードによって得られた3群定数を用いて、第4.3図に示す2次元形状の炉心でCITATIONコードによる拡散計算を実行した。反応度の計算では、まず反応度が加わる前の炉心において軸方向バックリングサーチを行い臨界となるバックリングを求めた。次に、得られた軸方向バックリングを固定したまま反応度が加わった後の炉心の群定数に置きかえて実行増倍係数を求めた。

ボイド反応度および制御棒反応度値を求める際、バックリングサーチによって得られた種々の炉心の臨界軸方向バックリングの計算値を実験値とともに第4.3表に示す。ボイド反応度および制御棒反応度値は実効増倍率から求められるが、実験値と対応させるためそれぞれの炉心の実効遅発中性子発生割合 $\beta_{\text{eff}}$ を用いて\$反応度へ変換された。 $\beta_{\text{eff}}$ の値は通常、反応度が加わった炉心の $(\nu\Sigma_f\phi)$ と随伴中性子束 $\phi^+$ の内積をとり全空間、全エネルギー群で積分して求められるが、ここでは $\phi^+$ を $\phi$ で近似して求めた。求めた\$単位のボイド反応度および制御棒反応度値をそれぞれ第4.4表および第4.5表に示す。

### 4.3 実験値と計算値との比較

#### (1) 臨界軸方向バックリング

WIMS-D 4 およびCITATION コードで求めた軸方向臨界バックリングは、第 4.3 表に示すように実験値と  $(+0.25 / -0.10) \text{m}^{-2}$  (約  $\pm 3\%$ ) 以内で一致する。実験値に対する計算値の傾向は、制御棒の挿入されない炉心 (100%ボイド) では、装荷する燃料の種類に依存せずに 2~3% 過大評価である。この結果、制御棒未挿入炉心においては、臨界バックリングの計算精度の燃料組成依存性は見出されない。一方、制御棒が 2, 4, 6, 8 本挿入された炉心 (0%ボイド) では、実験値と計算値との差は、若干制御棒の本数に依存する。即ち、制御棒挿入本数が少ない場合は、制御棒未挿入炉心の場合と同様に計算値は実験値を 2~3% 過大評価するが、制御棒挿入本数が多くなれば、逆に計算値は実験値を約 1% 過小評価する。

以上を要約すれば次のとおりである。

- ① 制御棒が挿入されない炉心では、計算値は過大評価であるが、制御棒挿入炉心では、過大評価の程度は小さくなるか、又は過小評価になる。
- ② 制御棒が挿入されることにより、臨界バックリングの計算精度が低下することはない。
- ③ 臨界バックリングの計算値は、平均約 2% で実験値と一致する。

#### (2) 冷却材ボイド反応度

第 4.4 表に示すように、WIMS-D 4 およびCITATION コードにより求めたボイド反応度の計算値 (\$) は、 $-1.0 \sim -6.0$  \$ の範囲のボイド反応度に対して、実験値と  $-0.6 \sim +0.4$  \$ の範囲で一致する。

実験値と計算値との差 (\$) は、装荷する燃料の種類および制御棒の挿入本数によって上述の範囲で変化するが、制御棒の挿入本数によって計算精度が大きく変化することはない。制御棒挿入炉心で測定されたボイド反応度はすべて負の値であり、その絶対値で実験値と計算値との比較を行ってみると、概して計算値は制御棒挿入本数が少ない場合に過小評価し、多い場合に過大評価の傾向にある。つまり、計算精度に関する制御棒挿入本数依存性については制御棒の挿入本数が 2 本以下であれば計算値は  $0.2 \sim 0.3$  \$ 正側に評価し、挿入本数が 4 本以上になると逆に計算値は  $0.1 \sim 0.6$  \$ 負側に評価する。

以上のことより、制御棒挿入本数が多くなるほど計算精度が系統的に低下することはなく、計算精度は平均  $\pm 10\%$  と見積られる。

#### (3) 制御棒反応度価値

WIMS-D 4 およびCITATION コードで求めた 100%ボイド炉心の制御棒反応度価値は、第 4.5 表に示すように  $-3.0 \sim -2.0$  \$ の範囲の制御棒反応度価値に対して実験値と  $-1.5 \sim 0.0$  \$ の範囲で一致する。この場合、計算値は制御棒が 2 本ないし 4 本挿入した A 9~A 25 炉心で  $0.2 \sim 1.2$  \$、同様に 2, 4, 6, 8 本挿入した B 9~B 25 炉心で  $0.0 \sim 1.5$  \$ それぞれ過大評価する。

計算値の過大評価の程度は、概ね制御棒挿入本数に比例して増大する傾向にあるが、制御棒反応度値の絶対値が約 8 \$ を境界にして、8 \$ 以下ではその程度は比較的小さく（～0.4 \$ ）、8 \$ 以上ではやや大きくなる（0.8～1.5 \$ ）傾向にある。しかし、計算値と実験値との割合は、挿入制御棒本数に依存せず、計算値は平均 8 %（過大評価）で実験値と一致する。

Quarter cell name

A : Control-rod region

B : Fuel cell arround A

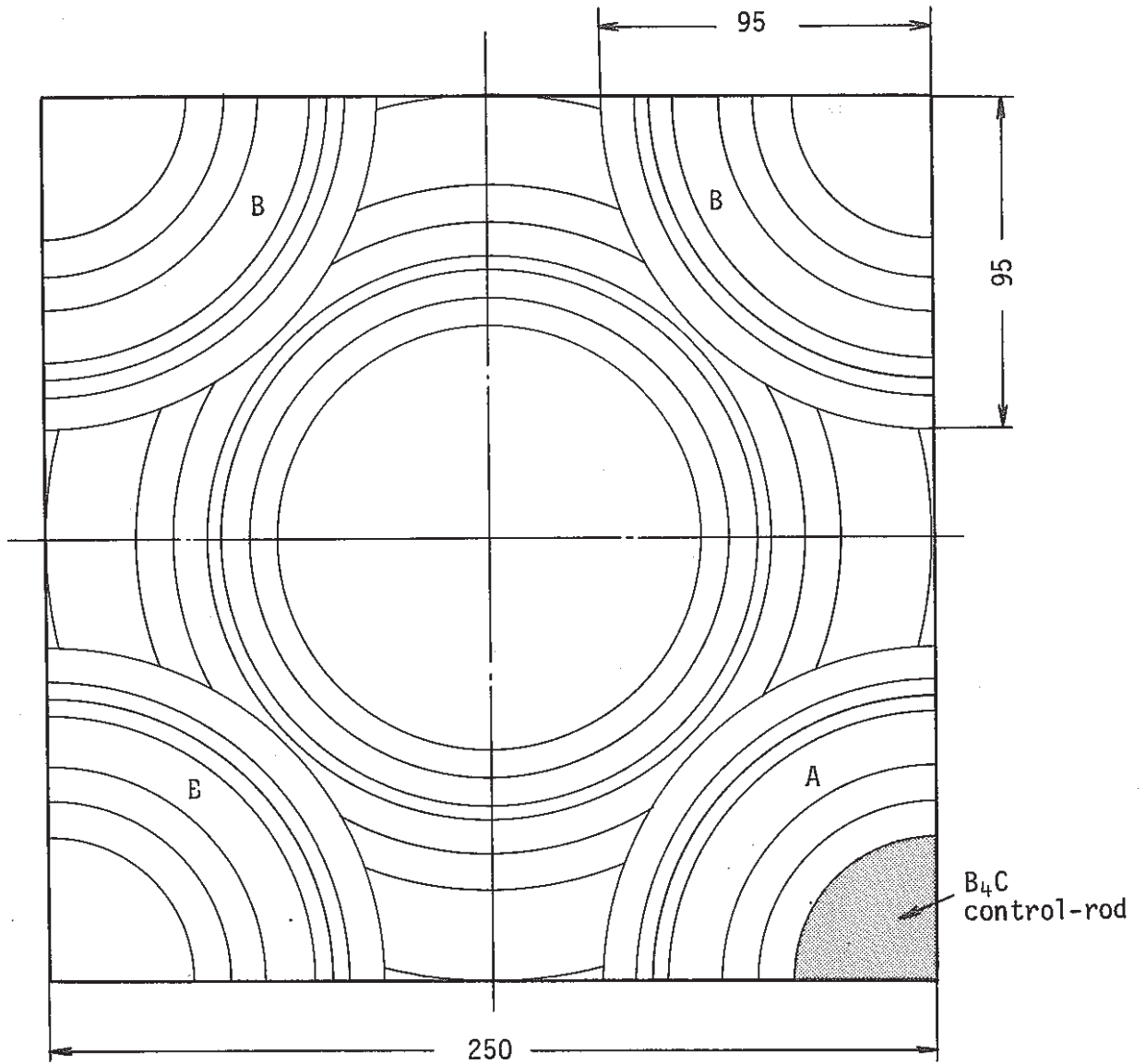


Fig. 4.1 Unit cell model being inserted control-rod for WIMS-D4 calculation



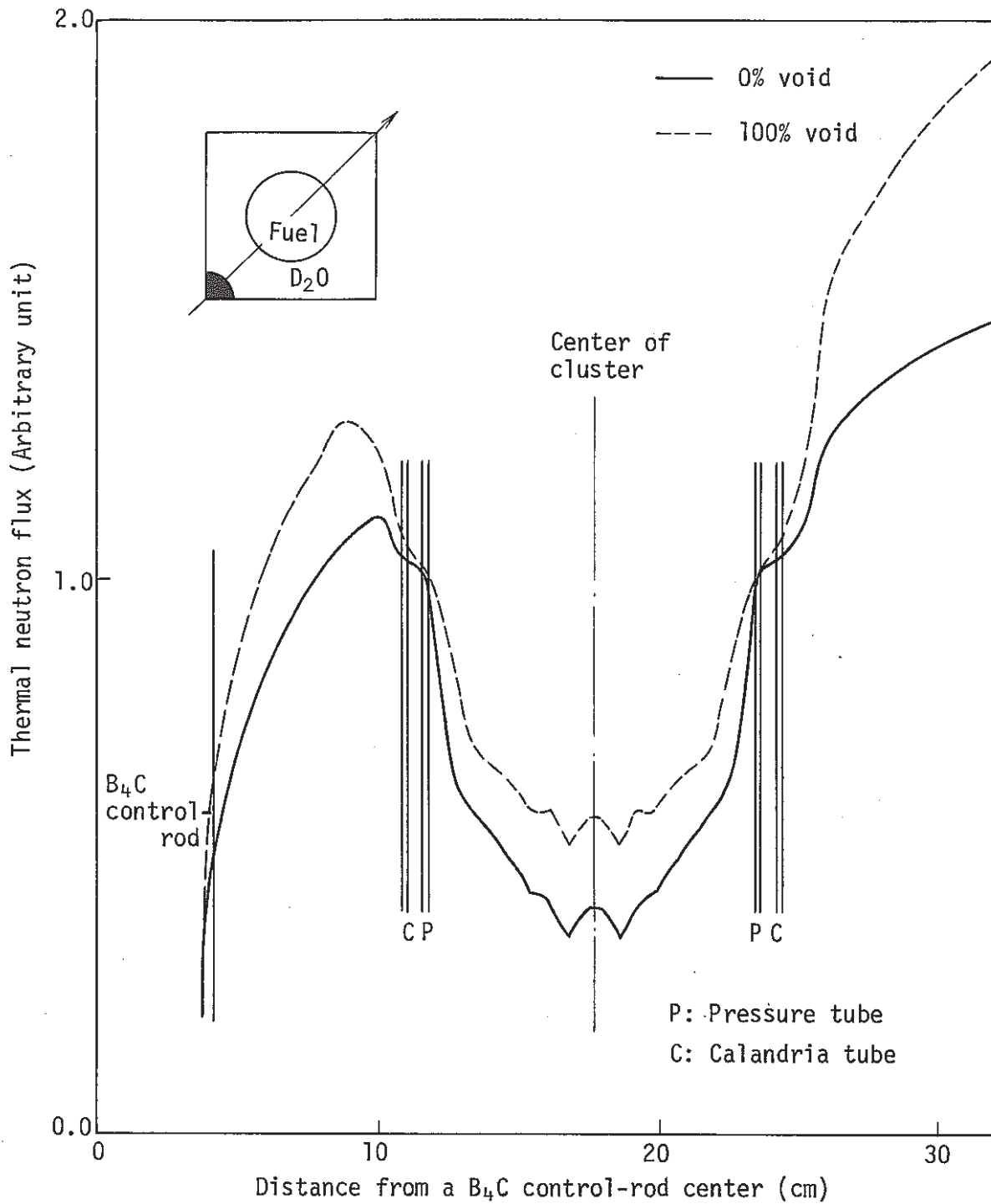
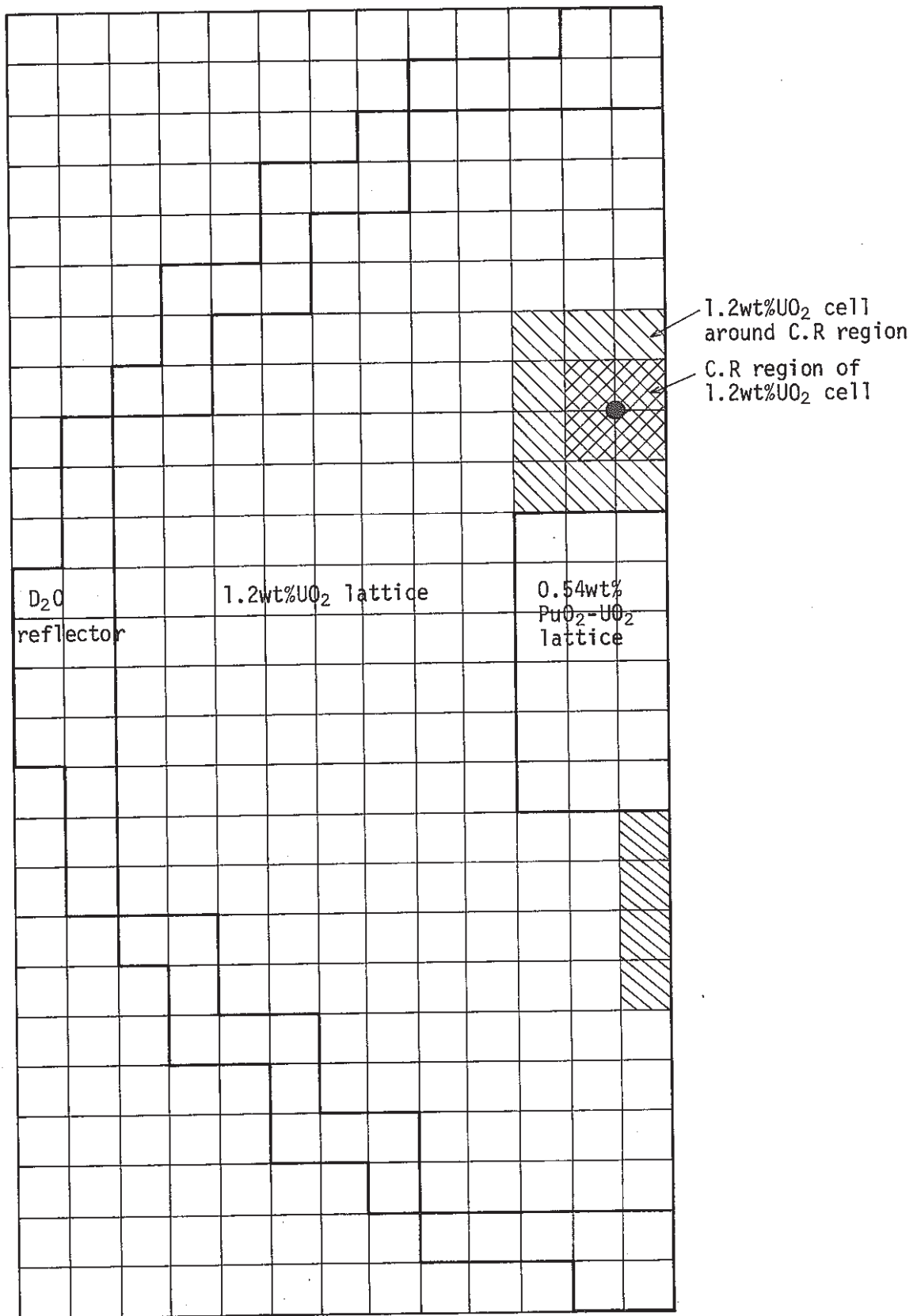
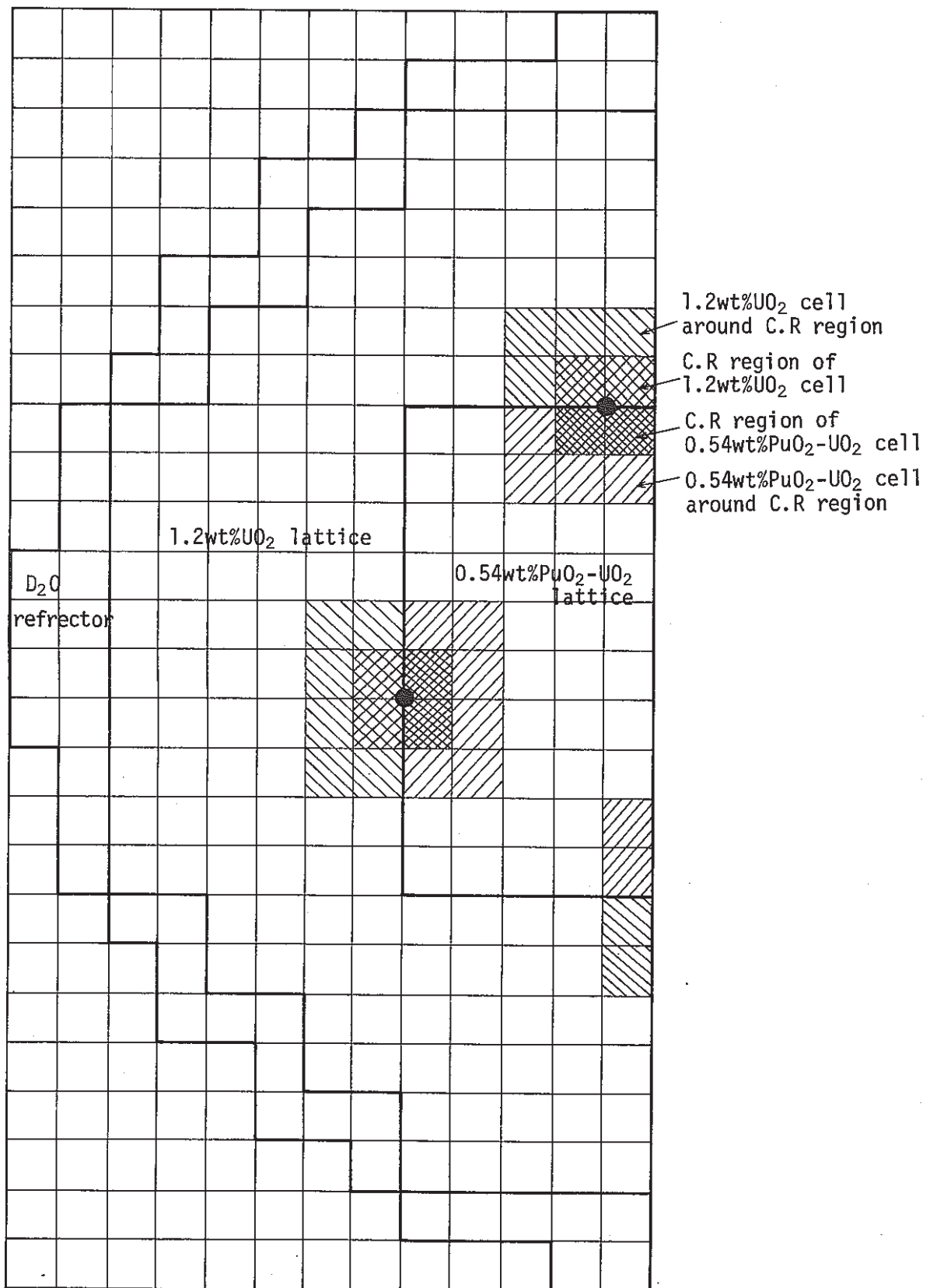


Fig. 4.2 Thermal neutron flux distribution in a 0.54wt%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> cell with a B<sub>4</sub>C control-rod obtained by WIMS-D4 code

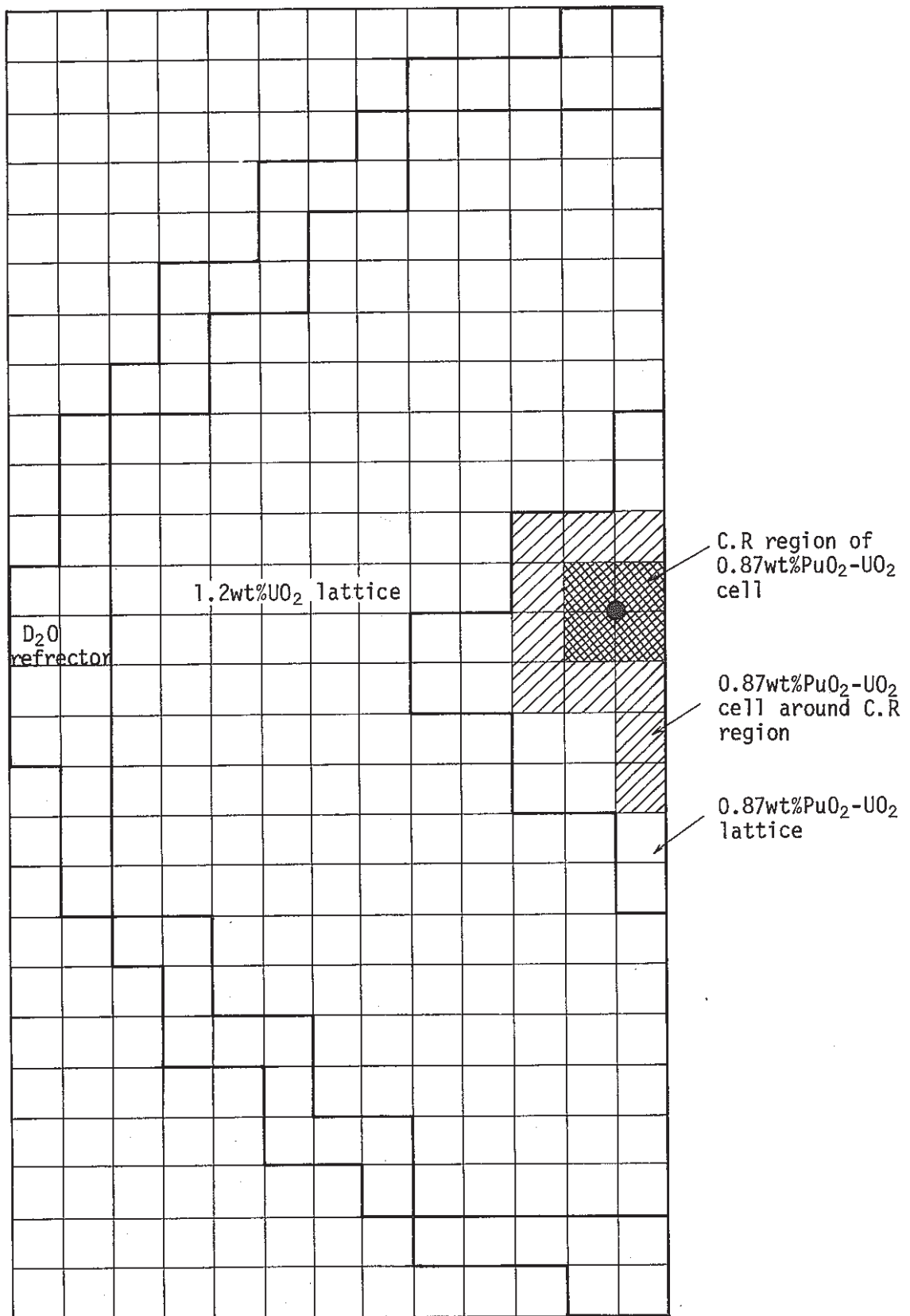


(1) Core No. : (A9-2)

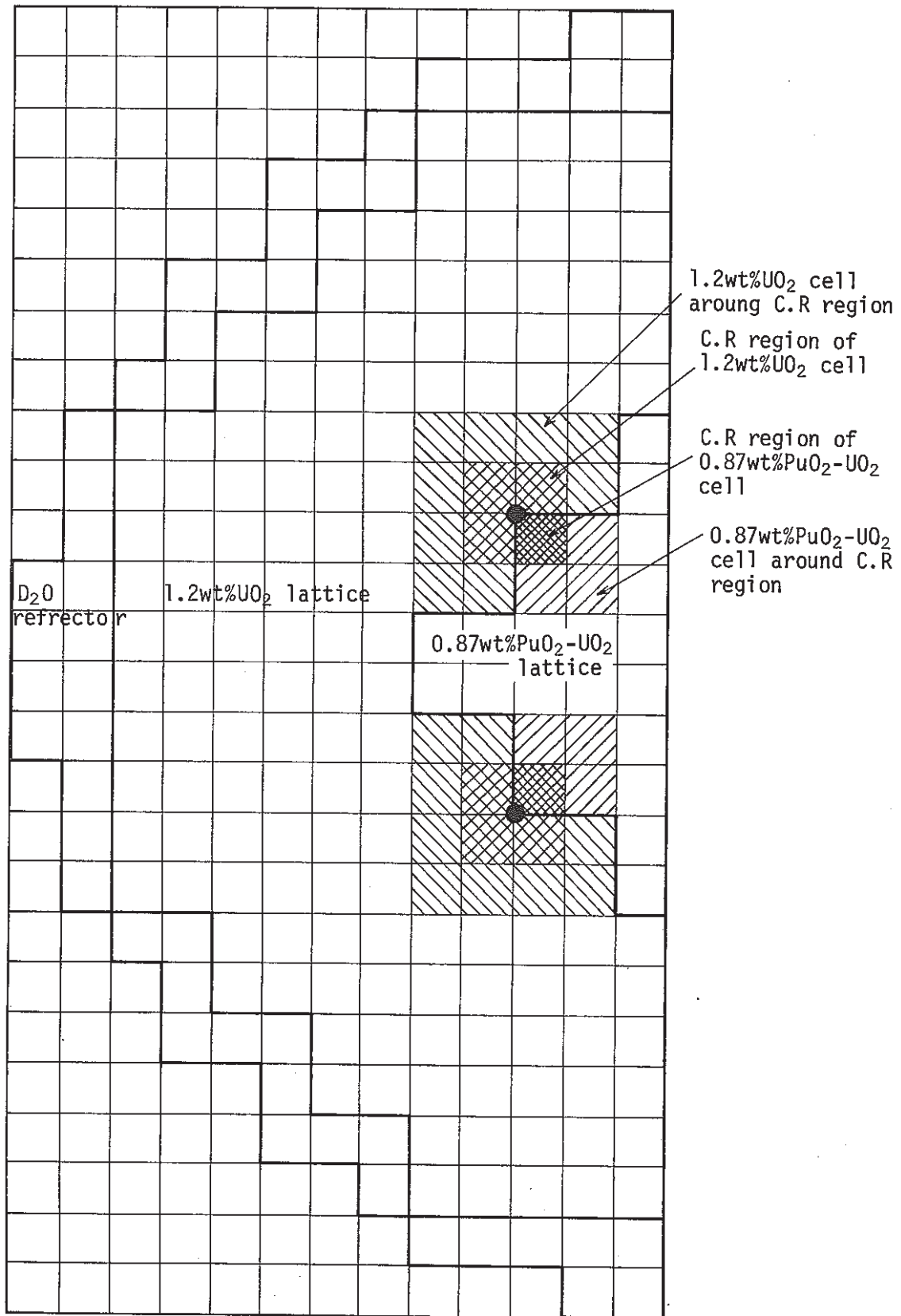
Fig. 4.3 Example of X-Y half geometry for two dimensional diffusion calculation



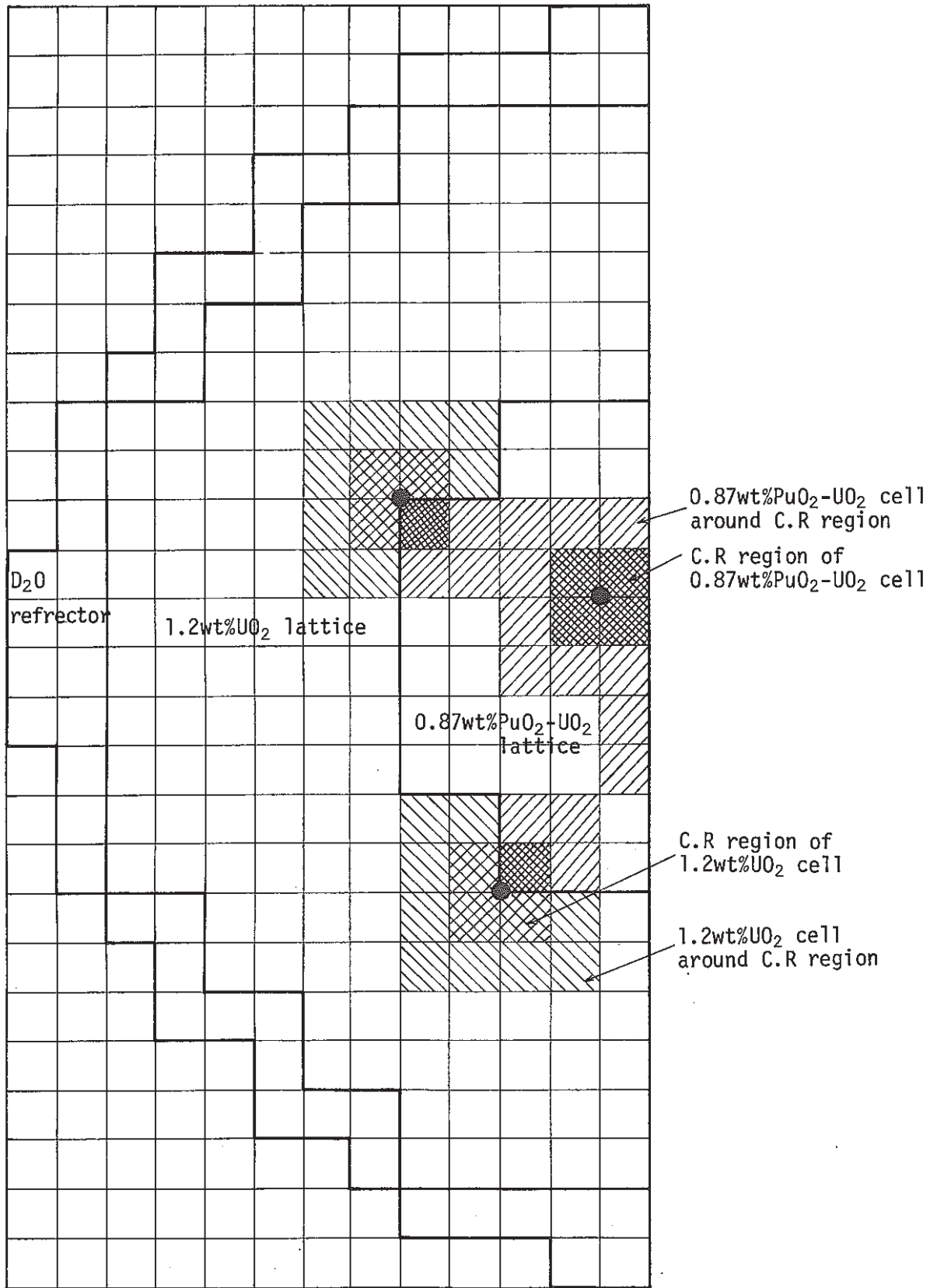
(2) Core No. : (A25-4)



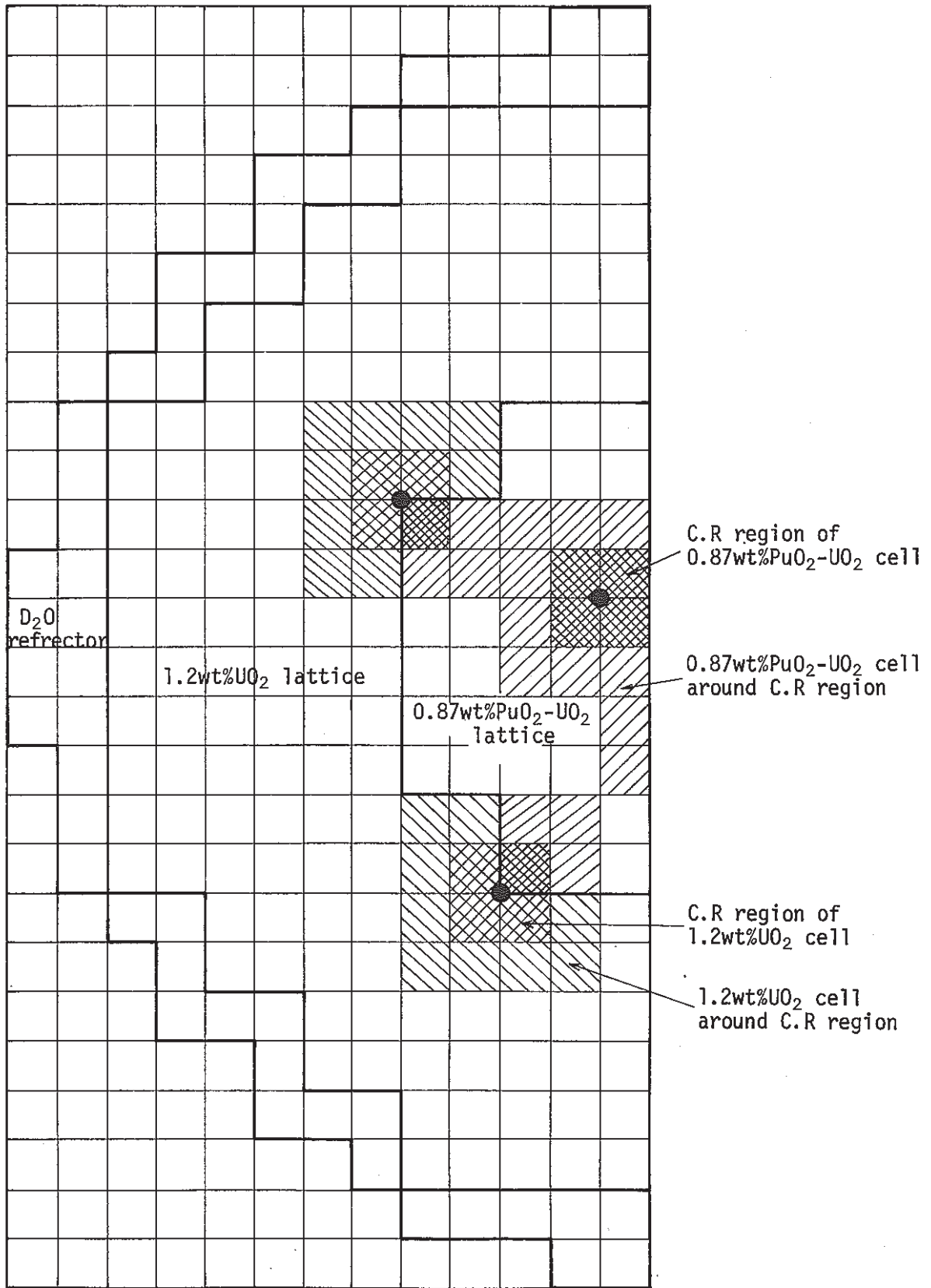
(3) Core No. : (B13-2)



(4) Core No. : (B13-4)



(6) Core No. : (B21-6b)



(5) Core No. : (B21-6a)

Table 4.1 9-group energy boundaries for lattice cell calculation by WIMS-D4

Group	Energy region	Energy range	Energy width	Lethergy width
1	Fast (keV)	10000 ~ 821	9179	2.4998
2		821 ~ 5.53	815.47	5.0003
3	Epi-thermal (eV)	5530 ~ 0.625	5529.4	9.0879
4	Thermal (eV)	0.625 ~ 0.35	0.275	0.5798
5		0.35 ~ 0.22	0.13	0.4643
6		0.22 ~ 0.10	0.12	0.7884
7		0.10 ~ 0.05	0.05	0.6931
8		0.05 ~ 0.03	0.02	0.5108
9		0.03 ~ 0.0	0.03	-



Table 4.2 Three energy group constants used in the reactor core calculation

## (1) Clean cell (without control-rod)

Cell	Void fraction (%)	Energy group	D (cm)	$\Sigma_a$ (cm <sup>-1</sup> )	$\nu\Sigma_f$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_r$ (cm <sup>-1</sup> )
0.87wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	0	1	1.4299	1.2240-3	1.7295-3	2.6788-2
		2	1.2531	4.0052-3	1.4342-3	2.3356-2
		3	8.2645-1	9.1091-3	1.3622-2	0
	100	1	1.5556	1.1280-3	1.4199-3	1.7136-2
		2	1.3669	2.9884-3	1.3051-3	1.4035-2
		3	9.4853-1	9.3210-3	1.5074-2	0
0.54wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	0	1	1.4312	1.2119-3	1.6833-3	2.6932-2
		2	1.2521	3.7674-3	1.1756-3	2.3710-2
		3	8.2145-1	8.4357-3	1.1838-2	0
	100	1	1.5572	1.1142-3	1.3733-3	1.7214-2
		2	1.3703	2.8155-3	1.0836-3	1.4212-2
		3	9.5777-1	8.4698-3	1.3033-2	0
1.2wt% UO <sub>2</sub>	0	1	1.4317	1.2419-3	1.7074-3	2.6983-2
		2	1.2591	3.4424-3	1.1689-3	2.4049-2
		3	8.1735-1	7.7339-3	1.0092-2	0
	100	1	1.5649	1.1432-3	1.3940-3	1.7286-2
		2	1.3877	2.5818-3	1.0986-3	1.4437-2
		3	9.7996-1	7.4700-3	1.0834-2	
D <sub>2</sub> O reflector	0	1	1.5448	-5.1856-5	0	2.5802-2
		2	1.2416	6.8886-6	0	1.8899-2
		3	8.2724-1	1.3334-4	0	0
	100	1	1.5045	-4.3717-5	0	2.7181-2
		2	1.2423	6.6827-6	0	1.8071-2
		3	8.4122-1	1.2840-4	0	0

(2) Cell involving B<sub>4</sub>C control-rod (C.R)

Region of control-rod cell	Void fraction (%)	Energy group	D (cm)	$\Sigma_a$ (cm <sup>-1</sup> )	$\nu\Sigma_f$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_r$ (cm <sup>-1</sup> )
C.R region of 0.87wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	0	1	1.5690	1.5609-3	1.7311-3	2.6154-2
		2	1.0492	1.2130-2	1.7377-3	2.4310-2
		3	7.0407-1	2.0536-2	1.9296-2	0
	100	1	1.8219	1.5306-3	1.4301-3	1.6590-2
		2	1.2340	1.0969-2	1.5466-3	1.3288-2
		3	9.0825-1	2.0777-2	2.0394-2	0
0.87wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> around C.R	0	1	1.5655	1.2406-3	1.7512-3	2.7277-2
		2	1.1121	4.1892-3	1.4965-3	2.3717-2
		3	7.4370-1	9.6392-3	1.4476-2	0
	100	1	1.8230	1.1776-3	1.4458-3	1.7596-2
		2	1.2896	3.0728-3	1.3283-3	1.4156-2
		3	9.0866-1	9.1264-3	1.4756-2	0
C.R region of 0.54wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	0	1	1.5661	1.5478-3	1.6821-3	2.6243-2
		2	1.0494	1.1830-2	1.4230-3	2.4563-2
		3	6.9490-1	1.9320-2	1.6602-2	0
	100	1	1.8194	1.5168-3	1.3815-3	1.6626-2
		2	1.2357	1.0754-2	1.2823-3	1.3414-2
		3	9.1538-1	1.9294-2	1.7444-2	0
0.54wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> around C.R	0	1	1.5626	1.2270-3	1.7017-3	2.7369-2
		2	1.1121	3.9313-3	1.2257-3	2.3945-2
		3	7.3477-1	8.8925-3	1.2538-2	0
	100	1	1.8207	1.1613-3	1.3966-3	1.7633-2
		2	1.2909	2.8873-3	1.1016-3	1.4285-2
		3	9.1328-1	8.2870-3	1.2755-2	0

(2) Cell involving B<sub>4</sub>C control-rod (C.R) (continued)

Region of control-rod cell	Void fraction (%)	Energy group	D (cm)	$\Sigma_a$ (cm <sup>-1</sup> )	$\nu\Sigma_f$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_r$ (cm <sup>-1</sup> )
C.R region of 1.2wt% UO <sub>2</sub>	0	1	1.5729	1.5779-3	1.7048-3	2.6245-2
		2	1.0593	1.1437-2	1.4143-3	2.4845-2
		3	6.9112-1	1.8045-2	1.3948-2	0
	100	1	1.8293	1.5485-3	1.4045-3	1.6676-2
		2	1.2494	1.0487-2	1.3002-3	1.3620-2
		3	9.3383-1	1.7531-2	1.4203-2	0
1.2wt%UO <sub>2</sub> around C.R	0	1	1.5695	1.2569-3	1.7248-3	2.7375-2
		2	1.1215	3.5797-3	1.2181-3	2.4196-2
		3	7.3027-1	8.0991-3	1.0607-2	0
	100	1	1.8308	1.1944-3	1.4200-3	1.7685-2
		2	1.3032	2.6418-3	1.1170-3	1.4493-2
		3	9.2663-1	7.2570-3	1.0516-2	0

Table 4.3 Comparison between experiment and calculation for critical axial buckling

Void fraction (%)	Mixed-oxide fuel in central region	No. of control-rod inserted	Core number	Axial buckling $B_z^2$ ( $m^{-2}$ )	
				Experiment	Calculation
0	0.54wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	2	A9-2	7.05±0.08	7.206
		2	A13-2a	7.37±0.09	7.556
		2	A13-2b	7.08±0.08	7.216
		4	A21-4	6.75±0.08	6.914
		4	A25-4	6.97±0.08	7.139
	0.87wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	2	B9-2	6.88±0.08	6.930
		4	B9-4	6.80±0.08	6.780
		2	B13-2	7.63±0.09	7.724
		4	B13-4	7.61±0.09	7.621
		6	B21-6a	6.60±0.08	6.514
		6	B21-6b	7.26±0.09	7.244
		6	B25-6a	7.20±0.09	7.154
		6	B25-6b	6.95±0.08	6.894
		8	B25-8	6.34±0.07	6.264
100	0.54wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	0	A9-0	7.61±0.07	7.775
		0	A13-0	7.79±0.07	7.988
		0	A21-0	8.13±0.07	8.367
		0	A25-0	8.25±0.08	8.503
	0.87wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	0	B9-0	8.48±0.08	8.613
		0	B13-0	8.93±0.08	9.096
		0	B21-0	9.72±0.10	9.918
		0	B25-0	9.99±0.10	10.190

Table 4.4 Comparison between experiment and calculation for coolant void reactivity

Mixed-oxide fuel in central region	Core number	Coolant void reactivity $\rho_{o \rightarrow v}$ (\$)		$\beta_{\text{eff}}$ (%)
		Experiment	Calculation	
0.54wt%PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	A9-2	-1.64±0.13	-1.44	0.664
	A13-2a	-2.27±0.14	-2.07	0.639
	A13-2b	-2.06±0.13	-1.81	0.646
	A21-4	-2.91±0.12	-3.35	0.589
	A25-4	-3.36±0.13	-3.78	0.574
0.87wt%PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	B9-2	-1.80±0.12	-1.52	0.692
	B9-4	-3.73±0.12	-4.07	0.645
	B13-2	-3.25±0.14	-2.93	0.661
	B13-4	-5.37±0.13	-5.69	0.616
	B21-6a	-4.93±0.12	-5.06	0.614
	B21-6b	-5.85±0.14	-6.26	0.594
	B25-6a	-5.94±0.15	-6.25	0.596
	B25-6b	-5.31±0.14	-5.55	0.602
	B25-8	-5.61±0.13	-6.19	0.598

Table 4.5 Comparison between experiment and calculation for B<sub>4</sub>C control-rod reactivity worth

Mixed-oxide fuel in central region	Core number	B <sub>4</sub> C control-rod worth $\rho_{B_4C}$ (%)		$\beta_{eff}$ (%)
		Experiment	Calculation	
0.54wt%PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	A9-2	-3.36±0.16	-3.54	0.664
	A13-2a	-3.43±0.14	-3.71	0.639
	A13-2b	-4.41±0.14	-4.73	0.646
	A21-4	-8.22±0.15	-9.36	0.589
	A25-4	-8.41±0.18	-9.53	0.574
0.87wt%PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	B9-2	-7.61±0.21	-7.55	0.692
	B9-4	-9.82±0.24	-10.98	0.645
	B13-2	-7.90±0.20	-8.00	0.661
	B13-4	-10.06±0.22	-11.45	0.616
	B21-6a	-17.83±0.25	-18.63	0.614
	B21-6b	-15.95±0.24	-17.14	0.594
	B25-6a	-17.42±0.34	-18.58	0.596
	B25-6b	-17.86±0.34	-18.90	0.602
	B25-8	-20.68±0.38	-22.21	0.598

## 5. 結 論

25 cm ピッチ格子のDCA 炉心を用いてプルトニウム燃料部分装荷炉心を構成し、プルトニウム燃料とウラン燃料の装荷割合、B<sub>4</sub>C 制御棒の挿入本数および位置を変化させることにより冷却材ボイド反応度に及ぼす制御棒の影響が実験的に明らかになった。

ボイド反応度および制御棒反応度値の実験値は、WIMS-D4 および CITATION コードによる計算値と比較され、単一セル計算による制御棒挿入格子の群定数の精度評価を行った。WIMS-D4 コードによる格子計算では、正方格子の境界条件を適用して制御棒はコーナーロッドとして取扱われた。

プルトニウム燃料を部分装荷した制御棒挿入炉心における冷却材ボイド反応度および制御棒反応度値の実験および解析により次のことが明らかになった。

- (1) 制御棒を最大 8 本炉心に全挿入することにより、プルトニウム燃料装荷炉心のボイド反応度は最大 5 \$ 正側へ移行する。制御棒挿入本数の増加によるボイド反応度の正側への変化量は飽和する傾向にある。この場合、0.54 wt % または 0.87 wt % プルトニウム燃料装荷炉心における挿入制御棒反応度値が最大 20 \$ になっても、ボイド反応度は 1.2 wt % ウラン燃料一様炉心のボイド反応度より正側にはなりえない。
- (2) 制御棒を挿入したプルトニウム燃料装荷炉心のボイド反応度の軸方向バックリング依存性は見出されず、ボイド反応度は制御棒の挿入本数およびその位置に依存する。その場合、制御棒がプルトニウム格子領域に挿入されれば、ボイド反応度の正側への変化量は大きい、ウラン格子領域へ挿入されれば正側への変化量は小さい。
- (3) プルトニウム燃料装荷炉心において挿入する制御棒反応度値を大きく変化させても、ボイド反応度が増加する幅は制御棒を挿入しない炉心に比べて小さくなる。また同様に挿入制御棒反応度値を一定にしてプルトニウム燃料の富化度および装荷割合を変化させてもボイド反応度の変化する幅は小さくなる。このことから制御棒挿入炉心におけるボイド反応度の制御棒反応度値およびプルトニウム富化度に対する依存性は制御棒を挿入しない場合に比べて減少する。
- (4) 中性子エネルギー 3 群、(X-Y) 2 次元体系の炉心計算によって、プルトニウム燃料を部分装荷した制御棒挿入炉心の冷却材ボイド反応度、制御棒反応度値および軸方向臨界バックリングに関する実験解析を行った。この結果、各々の計算値は以下に示す範囲で実験値と一致し、WIMS-D4 コードの適用性が確認された。

- ① 冷却材ボイド反応度 : ±0.6 \$ (約±10%)
- ② 制御棒反応度値 : ± $\begin{matrix} 0 \\ 1.5 \end{matrix}$  \$ (約±8%)
- ③ 軸方向臨界バックリング :  $(\begin{matrix} +0.25 \\ -0.10 \end{matrix}) \text{m}^{-2}$  (約±3%)

## 参 考 文 献

- (1) 小綿泰樹, 他: PNC報告書, SN941 79-19, (1979).
- (2) 小綿泰樹: PNC報告書, ZN941 82-185, (1982).
- (3) Halsall, M.J.: "A summary of WIMSD4 input options", AEEW-M 1327, (1980).
- (4) Fower, T.B., Vondy, D.R.: ORNL-TM-2496, (1970).
- (5) Askew, J.R., Fayers, F.J., Kemshell, P.B.: "A general description of the lattice code WIMS", Journal of the British Nuclear Energy Society, (1966).
- (6) 竹村守雄, 他: PNC報告書, ZN941 82-93, (1982).

## 謝 辞

本実験解析にあたっては、日本アイ・ビー・エム(株)の栗田康男氏から幾多のコメントならびに多大の御協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。



Appendix 1 制御棒挿入格子計算のWIMS-D4コード入力例

```

* NATRAS DCA 0.54PU 25.0LP 0 VOID B10 0.00 PPM
** LP=25.0CM DCA TIME CONST ANALYSIS
*** 0 VOID
INITIATE
ANNULUS 1 0.4000 1
ANNULUS 2 0.73333 1
ANNULUS 3 1.06667 1
ANNULUS 4 1.40000 1
ANNULUS 5 1.73333 1
ANNULUS 6 2.06667 1
ANNULUS 7 2.4000 2
ANNULUS 8 2.73333 2
ANNULUS 9 3.06667 2
ANNULUS 10 3.40000 2
ANNULUS 11 3.73333 2
ANNULUS 12 4.06667 3
ANNULUS 13 4.4000 3
ANNULUS 14 4.7100 3
ANNULUS 15 5.0200 3
ANNULUS 16 5.3300 3
ANNULUS 17 5.6400 3
ANNULUS 18 5.840 4
ANNULUS 19 6.050 5
ANNULUS 20 6.625 6
ANNULUS 21 6.825 7
ANNULUS 22 7.4125 8
ANNULUS 23 8.000 8
ANNULUS 24 8.500 8
ANNULUS 25 9.000 8
ANNULUS 26 9.500 8
ANNULUS 27 10.000 8
SQUARE 28 12.500 8
MATERIAL 1 0.997766 295.0 3 2001 11.1901 16 88.8099
MATERIAL 2 0.997766 295.0 3 2001 11.1901 16 88.8099
MATERIAL 3 0.997766 295.0 3 2001 11.1901 16 88.8099
MATERIAL 4 0.997766 295.0 3 2001 11.1901 16 88.8099
MATERIAL 5 2.674 295.0 3 27 100.0
MATERIAL 6 0.001205 295.0 4 16 23.5204 14 76.4796
MATERIAL 7 2.6740 295.0 4 27 100.0
MATERIAL 8 1.10498 295.0 4 2001 0.05500 4002 20.01400 16 79.9310 ¥
10 0.0000000
MATERIAL 9 10.17 295.0 1 235.4 0.6214 2238.4 86.782 3239.1 0.4304 ¥
242 0.000303 1240 0.04115 241. 0.004359 16 12.12
MATERIAL 10 10.17 295.0 1 235.4 0.6214 2238.4 86.782 3239.1 0.4304 ¥
242 0.000303 1240 0.04115 241. 0.004359 16 12.12
MATERIAL 11 10.17 295.0 1 235.4 0.6214 2238.4 86.782 3239.1 0.4304 ¥
242 0.000303 1240 0.04115 241. 0.004359 16 12.12
MATERIAL 12 -1 295 2 52 6.2502E-5 56 8.1455E-5 58 3.3220E-5 ¥
91 3.4999E-2 1000 2.4862E-4
MATERIAL 13 8.030 295.0 -3 12 0.04 29 0.05 52 19.00 55 1.0 ¥
56 70.41 58 9.50
MATERIAL 14 1.1045 295.0 -3 2001 0.05036 4002 20.0223 16 79.9283
MATERIAL 15 8.030 295.0 -3 12 0.04 29 0.05 52 19.00 55 1.0 ¥
56 70.41 58 9.50
MATERIAL 16 0.001205 295.0 -3 16 23.5204 14 76.4796
MATERIAL 17 8.030 295.0 -3 12 0.04 29 0.05 52 19.00 55 1.0 ¥
56 70.41 58 9.50
MATERIAL 18 1.1045 295.0 -4 2001 0.05036 4002 20.0223 16 79.9283
MATERIAL 19 1.764 295.0 -1 11 78.261 12 21.7390 235.4 0.0001

```

```

2238.4 0.0001
MATERIAL 20 1.764 295.0 -1 11 78.261 12 21.7390 235.4 0.0001
2238.4 0.0001
MATERIAL 21 8.03 295.0 -2 12 0.04 29 0.05 52 19.00 55 1.0 ¥
56 70.41 58 9.50
MATERIAL 22 1.10498 295.0 4 2001 0.05500 4002 20.01400 16 79.9310 ¥
10 0.0000000
MATERIAL 23 1.10498 295.0 4 2001 0.05500 4002 20.01400 16 79.9310 ¥
10 0.0000000
ARRAY 1 1 4 1.3125 0.7854
ARRAY 2 1 8 3.0000 0.3927
ARRAY 3 1 16 4.7575 0.1963
ARRAY 4 1 1 17.677668 0.0
ARRAY 5 1 2 17.677668 1.5707963
ARRAY 6 1 1 17.677668 3.1415926
RODSUB 1 1 0.7345 9
RODSUB 1 2 0.834 12
RODSUB 2 1 0.7345 10
RODSUB 2 2 0.834 12
RODSUB 3 1 0.7345 11
RODSUB 3 2 0.834 12
*****
RODSUB 6 1 0.7500 13
RODSUB 6 2 1.2783 14
RODSUB 6 3 1.8067 14
RODSUB 6 4 2.3350 14
RODSUB 6 5 2.4770 15
RODSUB 6 6 2.6758 16
RODSUB 6 7 2.8833 19
RODSUB 6 8 3.0330 21
RODSUB 6 9 3.1750 15
RODSUB 6 10 3.2600 16
RODSUB 6 11 3.4020 15
RODSUB 6 12 3.5982 16
RODSUB 6 13 3.8059 20
RODSUB 6 14 3.9580 21
RODSUB 6 15 4.1000 17
RODSUB 6 16 4.6000 18
RODSUB 6 17 5.1000 18
RODSUB 6 18 5.6000 18
RODSUB 6 19 6.1000 18
RODSUB 6 20 7.5000 18
RODSUB 6 21 8.5000 18
RODSUB 6 22 9.5000 18
*****
RODSUB 5 1 2.0000 22
RODSUB 5 2 3.0000 22
RODSUB 5 3 4.0000 22
RODSUB 5 4 5.0000 22
RODSUB 5 5 6.0000 22
RODSUB 5 6 7.5000 22
RODSUB 5 7 8.5000 22
RODSUB 5 8 9.5000 22
*****
RODSUB 4 1 2.0000 23
RODSUB 4 2 3.0000 23
RODSUB 4 3 4.0000 23
RODSUB 4 4 5.0000 23
RODSUB 4 5 6.0000 23
RODSUB 4 6 7.5000 23

```





ATR CONTROL ROD EFFECT EXPERIMENT	DCA KOWATA	D-3 (4-ROD)	1
DCA 25CM STANDARD CORE (PU-5S)-21ASS. 1.2EU-76ASS.	0 VOID		2
000			3
8			4
DCA 25CM STANDARD CORE CROSS SECTIONS			5
-2 7 3 1 0 0			6
1.0 0.0			7
1.0 +7 5.53 +3 0.625			8
6.738 +4 58.7 0.0253			9
6.10 -4 0.0207 1.0			10
			11
			12
			13
			14
1 1 0 0 0 PU REGION			15
1.0 1.22847E-11			16
1.0 295.0			17
			18
			19
			20
			21
			22
			23
			24
			25
1.21213E-03 1.68349E-04 2.32906E-01 1.00000E 01			26
3.76804E-03 1.17581E-04 2.66234E-01 1.00000E 01			27
8.42904E-03 1.18283E-03 4.05783E-01 1.00000E 01			28
0.0 2.69329E-02 0.0 0.0 0.0 2.37116E-02			29
0.0 0.0 0.0			30
2 2 0 0 0 1.2EU02			31
1.0 1.22847E-11			32
1.0 295.0			33
			34
			35
			36
			37
			38
			39
			40
			41
			42
1.24221E-03 1.70751E-04 2.32819E-01 1.00000E 01			43
3.44297E-03 1.16910E-04 2.64758E-01 1.00000E 01			44
7.72825E-03 1.00846E-03 4.07818E-01 1.00000E 01			45
0.0 2.69835E-02 0.0 0.0 0.0 2.40504E-02			46
0.0 0.0 0.0			47
3 3 0 0 0 D20 REGION			48
1.0 1.22847E-11			49
1.0 295.0			50

PNC-TN941 84-123

-5.18665E-05 0.0 2.15774E-01 1.00000E 01  
 6.88904E-06 0.0 2.68461E-01 1.00000E 01  
 1.33347E-04 0.0 4.02956E-01 1.00000E 01  
 0.0 2.58004E-02 0.0 0.0 0.0 1.89006E-02  
 0.0 0.0 0.0  
 4 4 0 0 0 CROD ASSEMBLY(5S)  
 1.0 1.22847E-11  
 1.0 295.0

1.54784E-03 1.68214E-04 2.12848E-01 1.00000E+01  
 1.18300E-02 1.42296E-04 3.17637E-01 1.00000E+01  
 1.93204E-02 1.66020E-03 4.79686E-01 1.00000E+01  
 0.0 2.62434E-02 0.0 0.0 0.0 2.45634E-02  
 0.0 0.0 0.0  
 5 5 0 0 0 PU NEIBORING TO ROD  
 1.0 1.22847E-11  
 1.0 295.0

1.22703E-03 1.70167E-04 2.13325E-01 1.00000E+01  
 3.93130E-03 1.22569E-04 2.99720E-01 1.00000E+01  
 8.89255E-03 1.25376E-03 4.53656E-01 1.00000E+01  
 0.0 2.73695E-02 0.0 0.0 0.0 2.39447E-02  
 0.0 0.0 0.0  
 6 6 0 0 0 CROD ASSEMBLY(1.2EU)  
 1.0 1.22847E-11  
 1.0 295.0

51  
 52  
 53  
 54  
 55  
 56  
 57  
 58  
 59  
 60  
 61  
 62  
 63  
 64  
 65  
 66  
 67  
 68  
 69  
 70  
 71  
 72  
 73  
 74  
 75  
 76  
 77  
 78  
 79  
 80  
 81  
 82  
 83  
 84  
 85  
 86  
 87  
 88  
 89  
 90  
 91  
 92  
 93  
 94  
 95  
 96  
 97  
 98  
 99  
 100

1.57791E-03 1.70476E-04 2.11916E-01 1.00000E+01  
 1.14374E-02 1.41434E-04 3.14687E-01 1.00000E+01  
 1.80451E-02 1.39475E-03 4.82307E-01 1.00000E+01  
 0.0 2.62453E-02 0.0 0.0 0.0 2.48451E-02  
 0.0 0.0 0.0  
 7 7 0 0 0 URAN NEIBORING TO ROD  
 1.0 1.22847E-11  
 1.0 295.0

1.25686E-03 1.72482E-04 2.12385E-01 1.00000E+01  
 3.57966E-03 1.21808E-04 2.97226E-01 1.00000E+01  
 8.09906E-03 1.06068E-03 4.56450E-01 1.00000E+01  
 0.0 2.73748E-02 0.0 0.0 0.0 2.41955E-02  
 0.0 0.0 0.0

001  
 1 1 1 1 1 1 1 1 1  
 500500

003  
 6 0 0 3 0 08

004  
 1 6.25 1 6.25 2 12.5 2 12.5 2 12.5 2 12.5  
 2 12.5 2 12.5 2 12.5 2 12.5 2 12.5 2 12.5  
 2 12.5  
 1 6.25 1 6.25 2 12.5 2 12.5 2 12.5 2 12.5  
 2 12.5 2 12.5 2 12.5 2 12.5 2 12.5 2 12.5  
 2 12.5 2 12.5 2 12.5 2 12.5 2 12.5 2 12.5  
 1 6.25 1 6.25

005  
 08 08 08 08 08 08 08 08 08 08 08 3 3  
 08 08 08 08 08 08 08 08 3 3 3 3 3  
 08 08 08 08 08 08 08 3 2 2 2 2 2  
 08 08 08 08 08 3 3 3 2 2 2 2 2

101  
 102  
 103  
 104  
 105  
 106  
 107  
 108  
 109  
 110  
 111  
 112  
 113  
 114  
 115  
 116  
 117  
 118  
 119  
 120  
 121  
 122  
 123  
 124  
 125  
 126  
 127  
 128  
 129  
 130  
 131  
 132  
 133  
 134  
 135  
 136  
 137  
 138  
 139  
 140  
 141  
 142  
 143  
 144  
 145  
 146  
 147  
 148  
 149  
 150

PNC-TN941 84-123

08 08 08 08 08 3 2 2 2 2 2 2 2 2	151
08 08 08 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2 2	152
08 08 08 3 2 2 2 2 2 2 2 7 7 7	153
08 08 3 3 2 2 2 2 2 2 2 7 6 6	154
08 3 2 2 2 2 2 2 2 2 2 5 4 4	155
08 3 2 2 2 2 2 2 2 2 2 5 5 5	156
08 3 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1	157
3 3 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1	158
3 3 2 2 2 2 7 7 5 5 1 1 1	159
3 3 2 2 2 2 7 6 4 5 1 1 1	160
3 3 2 2 2 2 7 6 4 5 1 1 1	161
08 3 2 2 2 2 7 7 5 5 1 1 1	162
08 3 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 5	163
08 3 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 5	164
08 08 3 3 2 2 2 2 2 2 2 2 7	165
08 08 08 3 2 2 2 2 2 2 2 2 7	166
08 08 08 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2	167
08 08 08 08 08 3 2 2 2 2 2 2 2	168
08 08 08 08 08 3 3 3 2 2 2 2 2	169
08 08 08 08 08 08 08 3 2 2 2 2 2	170
08 08 08 08 08 08 08 3 3 3 3 3	171
08 08 08 08 08 08 08 08 08 08 3 3	172
012	173
1 1 1 -1 PU (5S)	174
2 2 1 -1 1.2EU	175
3 3 1 -1 D20	176
4 4 1 -1 CROD(P)	177
5 5 1 -1 PU(CROD)	178
6 6 1 -1 CROD(U)	179
7 7 1 -1 U(CROD)	180
8 8 1 -1	181
	182
020	183
1 1	184
1 1.0	185
2 2	186
2 1.0	187
3 3	188
3 1.0	189
4 4	190
4 1.0	191
5 5	192
5 1.0	193
6 6	194
6 1.0	195
7 7	196
7 1.0	197
	198
024	199
1 1.0 -3	200





PTS	REGION	HEIGHT								
1	6.250000E 00		1	6.250000E 00	2	1.250000E 01	2	1.250000E 01	2	1.250000E 01
2	1.250000E 01		2	1.250000E 01	2	1.250000E 01	2	1.250000E 01	2	1.250000E 01
2	1.250000E 01		2	1.250000E 01	2	1.250000E 01	2	1.250000E 01	2	1.250000E 01
2	1.250000E 01		2	1.250000E 01	2	1.250000E 01	2	1.250000E 01	2	1.250000E 01
1	6.250000E 00		1	6.250000E 00						

X-DIR. POINTS 24            Y-DIR. POINTS 48

DISTANCES TO MESH INTERVAL INTERFACES

J	DIST.										
2	6.250	3	12.500	4	18.750	5	25.000	6	31.250	7	37.500
11	62.500	12	68.750	13	75.000	14	81.250	15	87.500	16	93.750
20	118.750	21	125.000	22	131.250	23	137.500	24	143.750	25	150.000

I	DIST.										
2	6.250	3	12.500	4	18.750	5	25.000	6	31.250	7	37.500
11	62.500	12	68.750	13	75.000	14	81.250	15	87.500	16	93.750
20	118.750	21	125.000	22	131.250	23	137.500	24	143.750	25	150.000
29	175.000	30	181.250	31	187.500	32	193.750	33	200.000	34	206.250
38	231.250	39	237.500	40	243.750	41	250.000	42	256.250	43	262.500
47	287.500	48	293.750	49	300.000						

DISTANCES TO FLUX POINTS

J	DIST.										
1	3.125	2	9.375	3	15.625	4	21.875	5	28.125	6	34.375
10	59.375	11	65.625	12	71.875	13	78.125	14	84.375	15	90.625
19	115.625	20	121.875	21	128.125	22	134.375	23	140.625	24	146.875

I	DIST.										
1	3.125	2	9.375	3	15.625	4	21.875	5	28.125	6	34.375
10	59.375	11	65.625	12	71.875	13	78.125	14	84.375	15	90.625
19	115.625	20	121.875	21	128.125	22	134.375	23	140.625	24	146.875
28	171.875	29	178.125	30	184.375	31	190.625	32	196.875	33	203.125
37	228.125	38	234.375	39	240.625	40	246.875	41	253.125	42	259.375
46	284.375	47	290.625	48	296.875						

ZONE INPUT BY REGION

8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	3	3
8	8	8	8	8	8	8	8	3	3	3	3	3
8	8	8	8	8	8	8	3	2	2	2	2	2
8	8	8	8	8	3	3	3	2	2	2	2	2
8	8	8	8	8	3	2	2	2	2	2	2	2
8	8	8	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2
8	8	8	3	2	2	2	2	2	2	2	7	7
8	8	3	3	2	2	2	2	2	2	2	7	6
8	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	4
8	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	5
8	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
3	3	2	2	2	2	2	7	7	5	5	1	1
3	3	2	2	2	2	7	6	4	5	1	1	1
3	3	2	2	2	2	7	6	4	5	1	1	1
8	3	2	2	2	2	7	7	5	5	1	1	1
8	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	5
8	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	5



ZONE MACROSCOPIC CROSS SECTIONS

ZONE	NAME	GRP	D	SIGR	SIGA	NUSIGF	BSQ	POWER/FLUX
1	PU (SS)	1	1.43119E 00	2.69329E-02	1.21213E-03	1.68349E-03	1.00000E-03	2.06812E-15
		2	1.25203E 00	2.37116E-02	3.76804E-03	1.17581E-03	1.00000E-03	1.44445E-15
		3	8.21458E-01	0.0	8.42904E-03	1.18283E-02	1.00000E-03	1.45307E-14
2	1.2EU	1	1.43173E 00	2.69835E-02	1.24221E-03	1.70751E-03	1.00000E-03	2.09762E-15
		2	1.25901E 00	2.40504E-02	3.44297E-03	1.16910E-03	1.00000E-03	1.43620E-15
		3	8.17358E-01	0.0	7.72825E-03	1.00846E-02	1.00000E-03	1.23886E-14
3	D2O	1	1.54483E 00	2.58004E-02	-5.18665E-05	0.0	1.00000E-03	0.0
		2	1.24164E 00	1.89006E-02	6.88904E-06	0.0	1.00000E-03	0.0
		3	8.27221E-01	0.0	1.33347E-04	0.0	1.00000E-03	0.0
4	CROD(P)	1	1.56606E 00	2.62434E-02	1.54784E-03	1.68214E-03	1.00000E-03	2.06646E-15
		2	1.04942E 00	2.45634E-02	1.18300E-02	1.42296E-03	1.00000E-03	1.74806E-15
		3	6.94899E-01	0.0	1.93204E-02	1.66020E-02	1.00000E-03	2.03951E-14
5	PU(CROD)	1	1.56256E 00	2.73695E-02	1.22703E-03	1.70167E-03	1.00000E-03	2.09045E-15
		2	1.11215E 00	2.39447E-02	3.93130E-03	1.22569E-03	1.00000E-03	1.50572E-15
		3	7.34771E-01	0.0	8.89255E-03	1.25376E-02	1.00000E-03	1.54021E-14
6	CROD(U)	1	1.57295E 00	2.62453E-02	1.57791E-03	1.70476E-03	1.00000E-03	2.09425E-15
		2	1.05925E 00	2.48451E-02	1.14374E-02	1.41434E-03	1.00000E-03	1.73747E-15
		3	6.91123E-01	0.0	1.80451E-02	1.39475E-02	1.00000E-03	1.71341E-14
7	U(CROD)	1	1.56948E 00	2.73748E-02	1.25686E-03	1.72482E-03	1.00000E-03	2.11889E-15
		2	1.12148E 00	2.41955E-02	3.57966E-03	1.21808E-03	1.00000E-03	1.49637E-15
		3	7.30274E-01	0.0	8.09906E-03	1.06068E-02	1.00000E-03	1.30301E-14
8		1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0