

J A E R I - M  
83-157

非均質炉心高速臨界集合体(ZPPR-7A)  
における炉物理実験の解析

1983年9月

大杉俊隆・宿谷弘行<sup>\*</sup>・吉田弘幸

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 紗高野高速印刷

非均質炉心高速臨界集合体 (ZPPR-7A) に  
おける炉物理実験の解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部  
大杉俊隆・宿谷弘行<sup>\*</sup>・吉田弘幸

(1983年9月5日受理)

本研究の主目的は、非均質高速炉炉心の炉物理特性を評価するに際し、多群断面積作成および原子炉計算の両側面から従来の近似的方法に対する影響を明らかにすることである。このための検討を、非均質炉心概念を適用したクリンチリバー増殖炉に関するベンチマーク炉心であるZPPR-7Aでの実験を解析することによって、行なった。

解析に用いる基本的群定数は18群であり、共鳴および空間的自己遮蔽効果を考慮し、SLAROMコードを用いてJFS-3-J2 70群断面積セットから作成した。積分量の計算に用いた基本的方法としては、(1)各ドロワーが無限に配列されているとして縮約した群定数を用いること、(2)R-Z体系に対して拡散理論を適用すること、などである。非均質炉心の内部構造は非常に複雑であることを考慮して、種々の詳細解析法について検討を加えた。それらは、炉心一ブランケットの結合セルに基づく群定数の作成、輸送理論、方向依存拡散係数および3次元拡散理論を使用することなどである。詳細解析法を適用したことの効果について、本報告書で詳述した。

---

\* 外来研究員；(株)日本情報サービス

On Analysis of Reactor Physics Experiments at  
a Heterogeneous Fast Critical Assembly (ZPPR-7A)

Toshitaka OSUGI, Hiroyuki SHUKUYA<sup>\*</sup> and Hiroyuki YOSHIDA

Department of Reactor Engineering,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 5, 1983)

The principal purpose of the present study is to investigate sensitivities to approximations for both the multigroup cross-section generation and the reactor calculation to predict physics properties of heterogeneous fast reactor cores. The investigation has been made by analysing the physics measurements at ZPPR-7A which is a benchmark heterogeneous core for the Clinch River Breeder Reactor.

The SLAROM code was used to generate 18 group constants from the JFS-3-J2 70-group cross-section set, which accounted for resonance and spatial self-shielding effects in the plates. The standard method of calculating integral parameters included, (1) use of group constant set collapsed by treating each drawer type in an infinite medium of identical drawers and (2) use of diffusion theory in R-Z geometry. Because of the complex internal geometry of the heterogeneous core, a number of refinements in method were investigated. These included use of group constants from coupled core-blanket drawers, transport theory, directional diffusion coefficients and three-dimensional diffusion theory. The impact of these refinements is discussed in the present paper.

**Keywords:** Heterogeneous Core LMFBR, Cell Averaged Group Constants,  $K_{eff}$ , Reaction Rate Distribution, Sample Worth Distribution, Na-void Reactivity Effect, Cell Model, R-Z Diffusion Theory, X-Y-Z Diffusion Theory, Directional Diffusion Coefficient, Transport Theory.

---

\* Japan Information Service Co., Ltd.

## 日 次

1. 序 論.....	1
2. ZPPR-7Aの概要.....	2
2.1 ZPPR-7Aの実験概要.....	2
2.2 ZPPR-7Aのモデル化.....	2
3. 計算方法.....	3
3.1 セルモデル.....	3
3.2 実効断面積の作成と炉物理特性の計算法.....	4
4. 炉物理特性に対するセルモデル効果.....	5
4.1 実効断面積.....	6
4.2 実効増倍率.....	7
4.3 反応率分布.....	8
4.4 サンプル反応度価値分布.....	9
4.5 Na ボイド反応度効果.....	9
4.6 セル計算におけるバックリング効果.....	10
5. 輸送効果, 中性子ストリーミング効果, 2次元円筒モデル化効果および断面積縮約効果, と実験値との比較.....	13
5.1 実効増倍率.....	13
5.2 反応率分布.....	13
5.3 サンプル反応度価値分布.....	14
5.4 Na ボイド反応度効果.....	14
5.5 実験値と解析値の比較.....	15
6. 結 論.....	15
参考文献.....	17

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Brief Description of ZPPR-7A .....	2
2.1	Reactor Physics Measurements at ZPPR-7A .....	2
2.2	Modelling of ZPPR-7A for Analyses .....	2
3.	Calculation Methods .....	3
3.1	Cell Models .....	3
3.2	Preparation of Effective Cross-sections and Physics Calculation Methods .....	4
4.	Effects of Cell Model on Predicting Reactor Physics Performances .....	5
4.1	Effective Cross-sections .....	6
4.2	Effective Multiplication Factor .....	7
4.3	Reaction Rates Distributions .....	8
4.4	Sample Reactivity Worths Distributions .....	9
4.5	Na-void Reactivity Effects .....	9
4.6	Effect of Transverse Buckling on Cell Calculation .....	10
5.	Transport Effect, Neutron Streaming Effect, Cylindrical Reactor Modelling Effect and Cross-section Collapsing Effect, and Comparison of Experiments and Calculations .....	13
5.1	Effective Multiplication Factor .....	13
5.2	Reaction Rates Distributions .....	13
5.3	Sample Reactivity Worths Distributions .....	14
5.4	Na-void Reactivity Effects .....	14
5.5	Comparison of Experiments and Calculations .....	15
6.	Concluding Remarks .....	15
	References .....	17

## 1. 序論

非均質炉心高速炉は、ブランケット集合体を炉心内に適切に分散配置することによって、高速炉の重要な安全性に係わる炉物理因子である正の Na ボイド反応度効果の問題を緩和すると共に増殖性を高めることが可能となる高速炉概念である。この非均質炉心では、炉心燃料集合体とブランケット集合体のように組成が大巾に異なる領域が近接配置されるので、通常の 2 領域均質炉心高速炉とは異なる核特性解析上の問題が存在する可能性がある。また、高速臨界実験装置を用いた模擬実験の場合には、板状模擬物質を用いて対象とする炉心組成を模擬することが多いので、近接した領域の境界近傍での物質板配列に伴なう非均質性を充分に考慮しなければならないという解析上の注意が必要となる。

このような異なる組成を有する領域が近接配置することによって生ずる問題は、非均質炉心の場合ばかりではなく、部分模擬実験体系における実験の解析においても起る可能性がある。部分模擬実験体系では、その中心に対象とする領域組成を模擬するテスト領域を設け、それを臨界性保持目的のドライバー領域で囲む、いわゆるゾーン装荷の形をとる。テスト領域がドライバー領域との境界近傍と比較して充分体積が大きいとは云えず、加えて両領域の組成が大巾に異なるものであれば、前述の解析上の問題はこゝでも起ることになる。

異なる組成を有する領域が近接配置され、しかも模擬物質板によって領域組成を模擬する臨界集合体による測定結果を解析する場合には、拡散近似の有効性が疑わしくなること、および実効断面積作成に通常の無限セル概念の適用性が疑わしくなることが考えられる。前者については拡散近似の有効性範囲の点から自明である。後者については異なる領域が近接配置されるので、それぞれの領域が独立であるとしてその組成を無限のセルで代表する通常の方法では領域間の相互作用が考慮されないと考えられるからである。

本論文では、非均質炉心高速炉の模擬実験を対象とし、主に無限セルを仮定した従来のセルモデルと領域間の相互作用を考慮したセルモデルに基づき、実効断面積を介して核特性に与えるセルモデル効果を検討評価する。また、輸送理論の効果、中性子ストリーミング効果、2 次元円筒化モデル効果についても検討を加え、セルモデル効果と比較しながら非均質炉心高速炉の模擬実験解析上の特徴を明らかにする。

解析対象とした模擬実験体系は、米国のクリンチリバー高速原型炉の模擬実験体系である ZPPR-7A である。検討対象とした炉物理特性は、実効増倍率、反応率分布、サンプル反応度価値分布、Na ボイド反応度効果であるが、その多くについては測定値が明らかではないので、測定値が明らかな特性についてのみ測定値と解析値の比較を行なった。解析に関しては、実効断面積作成にはセル計算コード SLAROM<sup>(1)</sup>、拡散計算には CITATION-FBR<sup>(2)</sup>、拡散近似に基づく摂動計算には PERKY<sup>(3)</sup>、輸送計算には TWOTRAN<sup>(4)</sup>、をそれぞれ使用した。核断面積セットとしては、JENDL-2<sup>(5)</sup>に基づく 70 群構造を有する JFS-3-J2 を一貫して使用した。

第 2 章では解析対象の ZPPR-7A の概要とそのモデル化について、第 3 章では選定したセルモデルと核特性解析手法の概要について述べる。第 4 章では各セルモデルに基づく実効断面積による炉物理特性解析を行ない、セルモデル効果について検討する。第 5 章では、輸送理論適用の効果、中性子ストリーミング効果、2 次元円筒化モデル効果について検討し、測定値が明確な項目については測定値と解析値の比較を行なう。

## 2. Z P P R - 7 A の概要とそのモデル化

### 2.1 Z P P R - 7 A の実験概要

米国高速原型炉 C R B R の炉物理的モックアップ実験を目的として、アルゴンヌ国立研究所 (ANL) (6),(7)においてZ P P R - 7 集合体が構築され、多くの炉物理実験がなされた。この集合体は8つの臨界体系のシリーズであり、それぞれZ P P R - 7 A ~ 7 H と名付けられている。こゝでは、解析対象としたZ P P R - 7 A の体系と測定データの概要について述べる。

Z P P R - 7 A は、Fig.1に示したように炉心中心とクローズドリング状の3層の内部ブランケットを有し、制御棒位置チャンネル (C R P 領域) を設けない比較的クリーンな体系である。炉心は、Pu 富化度 28% の Pu-U-Mo 板 2枚を含むドロワー (Fig.2参照) のみから構成されている。内部ブランケットのドロワーは径方向ブランケットと同じであり、軸方向ブランケットと共にそのドロワー内模擬物質板配列をFig.2に併記した。この体系を用いて、実効増倍率、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ ,  $^{235}\text{U}(n, f)$   $^{238}\text{U}(n, r)/^{239}\text{Pu}(n, f)$  という反応率および反応率比の空間分布、9.8 w/o  $^{239}\text{Pu}$ , 9.3.2 w/o  $^{235}\text{U}$ , 9.9.8 w/o  $^{238}\text{U}$ , 8.9.6 w/o  $^{10}\text{B}$ , SUS 304 などのサンプル反応度価値空間分布、および非常に多くのNa ボイドパターンについてのNa ボイド反応度効果に関する測定が行なわれている。しかし、公表されたZ P P R - 7 に関するレポート Ref.(6) と Ref.(7) に記載され、解析可能な様式で与えられた測定データは、わずかに実効増倍率とNa ボイド反応度効果のみであり、他の測定項目についてはANLにおける解析結果との比であるC/Eの形でしか記載されていない。Table 1には、Z P P R - 7 で用いられた主要ドロワーの平均原子数密度を示した。Z P P R - 7 A では、Table 中の 'Core', 'Two Columns of Fuel', 'Radial Blanket', 'Axial Blanket' の3種類のドロワーが用いられている。後述するが、Z P P R - 7 で用いられた模擬物質板のデータについても不明な点が多いので、我々の解析では、この平均原子数密度を用いて逆算することによって物質板データを作成している。Table 2には、Z P P R - 7 A の実効増倍率についての測定値とANLの計算値を示し、Table 3~5には、反応率分布についてANLで評価したC/Eを示した。Table 6とFig.3には、サンプル反応度価値の測定値を示した。Fig.4にはNa ボイド反応度効果の測定炉心内位置を、Table 7~9にはその測定値をそれぞれ示した。

### 2.2 Z P P R - 7 A のモデル化

Z P P R - 7 A を構成する領域を代表するドロワーの模擬物質板配列はFig. 2に示され、ドロワー内の平均原子数密度はTable 1に示されている。このドロワーの実効断面積を求めるために、Fig. 5に示した物質配列を仮定した。すなわち、被覆された模擬物質板 (Pu-U-Mo, Na) については被覆材とミートを分離し、別々の領域に区分けした。更に被覆材は隣合う被覆材あるいは構造材と合体し1領域を形成している。Z P P R の格子管およびドロワーアー下部の不銹鋼は、格子管側面および被覆材に均一に混入するモデルを考え、各物質領域の組成データを定めることにした。各物質領域の組成データは、Z P P R - 9 の実験解析に用いたデータに基づきながら、ドロワー平均原子数密度がTable 1に示した値と一致するように作成した。Fig.5に示した物質領域にしたがって、Table 10~13 に炉

心、軸方向ブランケット、内部ブランケットと径方向ブランケット、軸および径方向反射体ドロワーの物質領域の組成データを原子数密度の形で示した。たゞし、軸および径方向反射体ドロワーに関しては均質1物質領域を仮定した。

次にZPPR-7Aの体系のモデル化については、2次元円筒モデルと2次元円筒モデルの妥当性を検討するための3次元X-Y-Zモデルを選定した。Fig.6に円筒モデルを示したが、各領域の体積を保存するように寸法を設定した。Fig.7には、ZPPR-7Aの1/4平面図を示したが、1個の正方形がZPPRの1格子管に相当し、その寸法は5.5245cm×5.5245cmである。したがって、3次元X-Y-Zモデルは、Fig.6とFig.7を組合せたものになる。

### 3. 計 算 方 法

#### 3.1 セルモデル

Fig.1から明らかなように、径方向非均質炉心の実効断面積を作成する際に、単純なセルモデルには問題がありそうであり、また従来のセルの概念を適用できるか否か疑問がある。本論文では、セルの概念が適用できるものと仮定し、Fig.1で見られるような炉心領域と内部ブランケット領域が極めて近接配置していることを考慮し、領域間の相互干渉効果による各領域内の微細中性子束分布への影響がどの程度領域平均実効断面積に反映されるかを検討する。この観点から、均質炉心高速炉に適用してきた単純なセルモデルに加えて、領域間の相互干渉効果を考慮した2種類の多重セルモデルを設定した。

##### (1) セルモデル・1

均質炉心高速炉の解析に用いてきた従来のセルモデルと同じであり、炉心領域と内部ブランケット領域を代表するセルはそれぞれ独立であり、領域間の相互干渉効果は無視したセルモデルである。それぞれのセルは無限につながり、Fig.5に示した1ドロワーを単位とするセルに周期的境界条件を課するものとする。

##### (2) セルモデル・2

1つの炉心ドロワーと1つの内部ブランケットドロワーが結合したものを単位セルとし、炉心と内部ブランケットの相互干渉効果を考慮する。この異なる領域が結合した単位セル（多重セル）に対して周期的境界条件を課する。

##### (3) セルモデル・3

2つの炉心ドロワーと2つの内部ブランケットドロワーが結合したものを単位セルとし、周期的境界条件を課する。

セルモデル・1は、炉心と内部ブランケットの実効断面積に領域間の相互干渉効果を考慮しない場合に相当し、セルモデル・2は2つの領域の実効断面積に対する領域間相互干渉効果が1次元セルモデルとして最大となる場合に相当している。セルモデル・3は、Fig.7の炉心断面図のX軸方向を見た時の物質配列に近いモデルであり、領域間相互作用は中程度である。非均質炉心高速炉の実効断面積の作成にセル概念が適用できると仮定しても、上述のセルモデルの内いずれが適切であるかは、Fig.7を見るかぎり断言できないが、実効断面積に与える領域間相互干渉効果の大きさの程度を知る

心、軸方向ブランケット、内部ブランケットと径方向ブランケット、軸および径方向反射体ドロワーの物質領域の組成データを原子数密度の形で示した。たゞし、軸および径方向反射体ドロワーに関しては均質1物質領域を仮定した。

次にZPPR-7Aの体系のモデル化については、2次元円筒モデルと2次元円筒モデルの妥当性を検討するための3次元X-Y-Zモデルを選定した。Fig.6に円筒モデルを示したが、各領域の体積を保存するように寸法を設定した。Fig.7には、ZPPR-7Aの1/4平面図を示したが、1個の正方形がZPPRの1格子管に相当し、その寸法は5.5245cm × 5.5245cmである。したがって、3次元X-Y-Zモデルは、Fig.6とFig.7を組合せたものになる。

### 3. 計 算 方 法

#### 3.1 セルモデル

Fig.1から明らかなように、径方向非均質炉心の実効断面積を作成する際に、単純なセルモデルには問題がありそうであり、また従来のセルの概念を適用できるか否か疑問がある。本論文では、セルの概念が適用できるものと仮定し、Fig.1で見られるような炉心領域と内部ブランケット領域が極めて近接配置していることを考慮し、領域間の相互干渉効果による各領域内の微細中性子束分布への影響がどの程度領域平均実効断面積に反映されるかを検討する。この観点から、均質炉心高速炉に適用してきた単純なセルモデルに加えて、領域間の相互干渉効果を考慮した2種類の多重セルモデルを設定した。

##### (1) セルモデル・1

均質炉心高速炉の解析に用いてきた従来のセルモデルと同じであり、炉心領域と内部ブランケット領域を代表するセルはそれぞれ独立であり、領域間の相互干渉効果は無視したセルモデルである。それぞれのセルは無限につながり、Fig.5に示した1ドロワーを単位とするセルに周期的境界条件を課するものとする。

##### (2) セルモデル・2

1つの炉心ドロワーと1つの内部ブランケットドロワーが結合したものを単位セルとし、炉心と内部ブランケットの相互干渉効果を考慮する。この異なる領域が結合した単位セル（多重セル）に対して周期的境界条件を課する。

##### (3) セルモデル・3

2つの炉心ドロワーと2つの内部ブランケットドロワーが結合したものを単位セルとし、周期的境界条件を課する。

セルモデル・1は、炉心と内部ブランケットの実効断面積に領域間の相互干渉効果を考慮しない場合に相当し、セルモデル・2は2つの領域の実効断面積に対する領域間相互干渉効果が1次元セルモデルとして最大となる場合に相当している。セルモデル・3は、Fig.7の炉心断面図のX軸方向を見た時の物質配列に近いモデルであり、領域間相互作用は中程度である。非均質炉心高速炉の実効断面積の作成にセル概念が適用できると仮定しても、上述のセルモデルの内いずれが適切であるかは、Fig.7を見るかぎり断言できないが、実効断面積に与える領域間相互干渉効果の大きさの程度を知る

ことはできる。

炉心領域と炉心内の内部ブランケット領域を除く、外部径方向ブランケット、軸方向ブランケットとその領域内の内部ブランケット、反射体領域については、炉心核特性に与える影響が小さいので従来通りの1領域1単位セルの取扱いをしている。

### 3.2 実効断面積の作成と炉物理特性の計算法

実効断面積作成に用いた核断面積セットは、JENDL-2Bに基づく70エネルギー群のJFS-3-J2である。この核断面積セットを衝突確率法に基づくセル計算コードSLAROMを用い、前節に述べた3種類のセルモデルに対して周期的境界条件下でセル内物質領域のエネルギー依存中性子束分布を求める。この中性子束分布を重みとして着目する領域平均の70群実効断面積を求める。この場合、セルモデル・1～3の実効増倍率は1になるようにバックリングを定めている。ただし、セルモデル1の炉心以外の領域、セルモデル2、3の炉心+内部ブランケット以外の領域については、トランスポースバックリングを0と設定している。このバックリング選定がセル内微細中性子束分布に影響し、したがって実効断面積に影響を及ぼす可能性があるので、それについても後に検討を加える。

得られた70群実効断面積を用い、Fig.6の円筒原子炉モデルに対して拡散計算を行ない、各領域の平均70群中性子スペクトルを重みとして18群縮約断面積を作成した。この18群縮約断面積を用いて、ZPPR-7Aをモデル化した円筒体系の拡散計算と輸送計算、あるいはX-Y-Z体系の拡散計算を行なった。この結果を総合することによってZPPR-7Aの炉物理特性の計算値が得られる。

中性子ストリーミング効果を考慮する場合、Benoistの定義する方向依存拡散係数を使用するが、この拡散係数についてはセルモデル・1に対してのみ考慮した。拡散係数も1つの実効断面積であると考えると、以下に示す4種類の実効断面積(Effective Cross-Section; ECS)が用意されることになる。すなわち、

- (1) ECS-1 ; セルモデル・1+等方拡散係数
- (2) ECS-2 ; セルモデル・1+非等方拡散係数
- (3) ECS-3 ; セルモデル・2+等方拡散係数
- (4) ECS-4 ; セルモデル・3+等方拡散係数

である。輸送計算用の実効断面積はECS-1、3、4に相当するものを用意している。また、炉心および炉心内の内部ブランケット以外の領域の実効断面積は、(1)～(4)に対応して等方拡散係数あるいは非等方拡散係数を用意した。

1領域1単位セル、すなわちセルモデル・1に相当する場合、gエネルギー群のX反応実効断面積 $\tilde{\Sigma}_{x,g}$ は、

$$\tilde{\Sigma}_{x,g} = \frac{\sum_{\ell \in \text{cell}} \sum_{x,g}^{\ell} \phi_g^{\ell} V_{\ell}}{\sum_{\ell \in \text{cell}} \phi_g^{\ell} V_{\ell}} \quad (1)$$

と定義し、等方拡散係数 $\tilde{D}_g$ と非等方拡散係数 $\tilde{D}_g^J$ (Jは方向を表示)は、

$$\tilde{D}_g = \frac{1}{3 \sum \tilde{\Sigma}_{tr,g}} \quad (2)$$

$$\tilde{D}_{g,J} = \frac{\sum_{\ell \in \text{cell}} \sum_{\ell' \in \text{cell}} \phi_g^{\ell'} V_{\ell'} P_{\ell', \ell, g}^J / \sum_{\ell \in \text{cell}} \phi_g^{\ell} V_{\ell}}{\sum_{\ell \in \text{cell}} \phi_g^{\ell} V_{\ell}} \quad (3)$$

と定義する。ここで  $\Sigma_{x,g}^{\ell}$  はセル内物質領域  $\ell$  の  $x$  反応断面積、 $\phi_g^{\ell}$  と  $V_{\ell}$  はその領域での中性子束と体積である。 $P_{\ell', \ell, g}^J$  はセル内物質領域  $\ell'$  で発生した中性子が物質領域  $\ell$  にて衝突する確率の  $J$  方向成分である。非等方拡散係数を用いる 3 次元 X-Y-Z 拡散計算の場合には、ZPPR-7A の物質板配列を考慮し、X, Y, Z 方向の拡散係数として、 $\tilde{D}_X = \tilde{D}_{\perp}$ ,  $\tilde{D}_Y = \tilde{D}_Z = \tilde{D}_{\parallel}$  を用いた。 $\tilde{D}_{\perp}$ ,  $\tilde{D}_{\parallel}$  は(3)式において物質板の垂直および平行方向の拡散係数である。また、2 次元円筒拡散計算の場合には、Z-方向について  $\tilde{D}_Z = \tilde{D}_{\parallel}$ , R-方向について  $\tilde{D}_R = \frac{1}{2}(\tilde{D}_{\perp} + \tilde{D}_{\parallel})$  を用いた。

セルモデル・2 およびセルモデル・3 の多重セルモデルに対する実効断面積作成 (ECS-3, ECS-4) の場合には、セル内の炉心および内部ブランケット領域の実効断面積を分けて求める必要がある。この場合、(1)式においてセル内物質領域についての和 ( $\sum_{\ell \in \text{cell}}$ ) を、セル内の炉心領域と内部ブランケット領域について別々に和をとることにすればよい。この場合、拡散係数として(2)式に相当する等方拡散係数のみを考慮する。

以上の実効断面積を用意することによって、ECS-1, ECS-3, ECS-4 を用いた拡散計算と輸送計算の結果から、セルモデルの相違による核特性に与える効果およびその輸送効果を知ることができる。ECS-1 と ECS-2 を用いた 2 次元および 3 次元拡散計算の結果から、中性子ストリーミング効果および 3 次元効果 (2 次元円筒モデル化効果) を知ることができる。また、70 群と縮約 18 群構造の 4 種類の実効断面積を用いた 2 次元拡散計算の結果から、エネルギー群縮約効果を知ることができる。18 群のエネルギー群構造を Table 14 に示した。

以上の計算によって、セルモデルの相違による炉物理特性に対する影響が検討可能となり、かつ ZPPR-7A の測定データが取得できた時点で、種々の補正量を含めて測定データと対比可能な計算値を与えることができる。

#### 4. 炉物理特性に対するセルモデル効果

これまでの均質炉心高速炉の臨界実験体系でも、広い範囲を单一セルでカバーする例は少なく、例えば、炉心と軸または径方向ブランケットの境界、標準燃料炉心ドロワーとスパイク燃料炉心ドロワーの炉心内での混在、制御棒ドロワーと燃料ドロワーの隣接などが多く存在し、いずれの場合についてもセルモデル選定の検討が行なわれてきた。これらの均質炉心高速炉でのセルモデル効果は比較的、空間的に局所的であったが、非均質炉心高速炉の場合には、組成が大巾に異なる領域が近接し、かつその状況が体系全体に亘っているので、セルモデル効果は、均質炉心高速炉の場合と比較して、より大きくなると考えられる。以下に、前章の方法で求めた ECS-1, 3, 4 の 3 種類の実効断面積を用いて、ZPPR-7A の炉物理特性に対するセルモデル効果を検討する。解析の対象とした炉物理特性は、実効増倍率、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ ,  $^{235}\text{U}(n, f)$ ,  $^{238}\text{U}(n, f)$ ,  $^{238}\text{U}(n, \gamma)$  の反応率分布、 $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{10}\text{B}$  のサンプル反応度価値分布および Na ポイド反応度効果である。

$$\tilde{D}_{g,J} = \frac{\sum_{\ell \in \text{cell}} \sum_{\ell' \in \text{cell}} \phi_g^{\ell'} V_{\ell'} P_{\ell', \ell, g}^J / \sum_{\ell \in \text{cell}} \phi_g^{\ell} V_{\ell}}{\sum_{\ell \in \text{cell}} \phi_g^{\ell} V_{\ell}} \quad (3)$$

と定義する。ここで  $\Sigma_{x,g}^{\ell}$  はセル内物質領域  $\ell$  の  $x$  反応断面積、 $\phi_g^{\ell}$  と  $V_{\ell}$  はその領域での中性子束と体積である。 $P_{\ell', \ell, g}^J$  はセル内物質領域  $\ell'$  で発生した中性子が物質領域  $\ell$  にて衝突する確率の  $J$  方向成分である。非等方拡散係数を用いる3次元X-Y-Z拡散計算の場合には、ZPPR-7Aの物質板配列を考慮し、X, Y, Z方向の拡散係数として、 $\tilde{D}_X = \tilde{D}_{\perp}$ ,  $\tilde{D}_Y = \tilde{D}_Z = \tilde{D}_{\parallel}$  を用いた。 $\tilde{D}_{\perp}$ ,  $\tilde{D}_{\parallel}$  は(3)式において物質板の垂直および平行方向の拡散係数である。また、2次元円筒拡散計算の場合には、Z-方向について  $\tilde{D}_Z = \tilde{D}_{\parallel}$ , R-方向について  $\tilde{D}_R = \frac{1}{2}(\tilde{D}_{\perp} + \tilde{D}_{\parallel})$  を用いた。

セルモデル・2およびセルモデル・3の多重セルモデルに対する実効断面積作成(ECS-3, ECS-4)の場合には、セル内の炉心および内部ブランケット領域の実効断面積を分けて求める必要がある。この場合、(1)式においてセル内物質領域についての和 ( $\sum_{\ell \in \text{cell}}$ ) を、セル内の炉心領域と内部ブランケット領域について別々に和をとることにすればよい。この場合、拡散係数として(2)式に相当する等方拡散係数のみを考慮する。

以上の実効断面積を用意することによって、ECS-1, ECS-3, ECS-4を用いた拡散計算と輸送計算の結果から、セルモデルの相違による核特性に与える効果およびその輸送効果を知ることができる。ECS-1とECS-2を用いた2次元および3次元拡散計算の結果から、中性子ストリーミング効果および3次元効果(2次元円筒モデル化効果)を知ることができる。また、70群と縮約18群構造の4種類の実効断面積を用いた2次元拡散計算の結果から、エネルギー群縮約効果を知ることができる。18群のエネルギー群構造をTable 14に示した。

以上の計算によって、セルモデルの相違による炉物理特性に対する影響が検討可能となり、かつZPPR-7Aの測定データが取得できた時点で、種々の補正量を含めて測定データと対比可能な計算値を与えることができる。

#### 4. 炉物理特性に対するセルモデル効果

これまでの均質炉心高速炉の臨界実験体系でも、広い範囲を单一セルでカバーする例は少なく、例えば、炉心と軸または径方向ブランケットの境界、標準燃料炉心ドロワーとスパイク燃料炉心ドロワーの炉心内での混在、制御棒ドロワーと燃料ドロワーの隣接などが多く存在し、いずれの場合についてもセルモデル選定の検討が行なわれてきた。これらの均質炉心高速炉でのセルモデル効果は比較的、空間的に局所的であったが、非均質炉心高速炉の場合には、組成が大巾に異なる領域が近接し、かつその状況が体系全体に亘っているので、セルモデル効果は、均質炉心高速炉の場合と比較して、より大きくなると考えられる。以下に、前章の方法で求めたECS-1, 3, 4の3種類の実効断面積を用いて、ZPPR-7Aの炉物理特性に対するセルモデル効果を検討する。解析の対象とした炉物理特性は、実効増倍率、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ ,  $^{235}\text{U}(n, f)$ ,  $^{238}\text{U}(n, f)$ ,  $^{238}\text{U}(n, \gamma)$  の反応率分布、 $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{10}\text{B}$  のサンプル反応度分布およびNaボイド反応度効果である。

#### 4.1 実効断面積

炉物理特性に対するセルモデル効果をみる前に、異なるセルモデルを用いた場合の実効断面積に与える影響を調べてみる。炉心第1領域と中心ブランケット領域の18群マクロ実効断面積について、ECS-1とECS-3の結果をTable 15とTable 16に示した。ECS-4の値はECS-1とECS-3の値の中間にある。また、その他の炉心および内部ブランケット領域についても、70群から18群への縮約に伴なう若干の相違があるが、セルモデルに関する傾向はTable 15とTable 16でみられるECS-1とECS-3の相違傾向と同じである。Table 17には、実効核分裂断面積と中性子捕獲断面積に対するセルモデル効果を、ECS-1に対するECS-3の相違の形で示した。

Table 17においてECS-1とECS-3の相違をみると、特に高エネルギー側での相違が顕著である。炉心領域においては、核分裂断面積は、10 MeV～180 KeVと2 KeV以下でECS-3の方が大きく、180 KeV～2 KeVでECS-1の方が大きい。中性子捕獲断面積は、10 MeV～2 MeV、20 KeV～2 KeVでECS-1の方が大きく、2 MeV～20 KeVと2 KeV以下ではECS-3の方が大きい。Fig. 2の炉心ドロワー内物質板配列をみると、核分裂断面積に寄与するPuとU核種はすべて同一の物質板Pu-U-Moに入っており、高エネルギー側(>2 MeV)の中性子捕獲断面積に寄与する<sup>16</sup>O、Feなどはセルモデル的にはPu-U-Mo以外の領域に入っている。したがって、異なる領域間の相互作用を考慮したセルモデルでは、Pu-U-Mo内の高エネルギー中性子束レベルが従来のセルモデルと比較して高くなり、相対的にPu-U-Mo板以外の物質板中の中性子束レベルが低くなることが、セルモデルによって実効断面積の高エネルギー側での顕著な相違になって現われているものと考えられる。

内部ブランケット領域における実効断面積に対するセルモデル効果は、炉心領域におけるそれと異なる傾向を示している。すなわち、この領域の核分裂断面積は、全エネルギー範囲に亘ってECS-1と比べECS-3が小さく、中性子捕獲断面積に対するセルモデル効果は、2 KeVまでの広範囲に亘って炉心領域のそれと逆傾向にある。

特に高エネルギー側での実効核分裂断面積に対するセルモデル効果が大きいことが、後に示すように炉物理特性に対するセルモデル効果の支配的因子となる。セル内の高エネルギー中性子束分布は<sup>238</sup>U(n, f)反応率分布から推定することが可能である。Fig. 8～Fig. 10に3種類のセルモデルに対して求めた<sup>238</sup>U(n, f)のセル内反応率分布を示した。<sup>\*</sup>この結果、炉心セル内の<sup>238</sup>U(n, f)反応率は、領域間相互作用を考慮したセルモデル・2、3では、考慮しないセルモデル・1と比較してPu-U-Mo領域でのピークが確かに高くなることが示されている。Fig. 11～Fig. 13およびFig. 14～Fig. 16には、異なるセルモデルによる<sup>238</sup>U(n, r)と<sup>239</sup>Pu(n, f)のセル内反応率分布をそれぞれ示した。いずれの反応率分布についても、着目する物質が存在しないセル内物質領域ではその物質を微量加えることで各物質領域のミクロ断面積を求め、用いている。このセル内反応率分布では、<sup>239</sup>Pu(n, f)の分布に対するセルモデル効果が顕著である。すなわち、領域間相互作用を無視したセルモデル・1(ECS-1)では、Pu-U-Mo領域において<sup>239</sup>Pu(n, f)反応率のピー-

---

\* <sup>238</sup>U(n, f)反応率分布および以降の<sup>239</sup>Pu(n, f), <sup>238</sup>U(n, r)反応率分布では、セルの実効増倍率を1にするようにバックリングを求め中性子漏洩効果を考慮した場合の分布とバックリングを0として中性子漏洩効果を考慮しない場合の分布を併せて示しているが、こゝでの議論は前者についてであり、両者の比較は4.6において論ずる。

クが現われるが、領域間相互作用を考慮したセルモデル・2, 3 (ECS-3, ECS-4) では逆にシンクとして現われている。しかし、無中性子漏洩モデル (バックリング=0) では、この傾向は現われない。このことについては 4.6 で論ずる。

#### 4.2 実効増倍率

18群実効断面積ECS-1, 3, 4を用いた2次元円筒体系に対する等方拡散計算によって得られた実効増倍率は、以下に示す通りである。

	ECS-1	ECS-3	ECS-4
K <sub>eff</sub>	0.99043	0.99512	0.99375
ΔK/K	—	0.48%	0.34%

この結果から、非均質炉心高速炉の実効増倍率に与えるセルモデル効果はかなり大きく、後述の輸送効果、中性子ストリーミング効果に匹敵する量であることがわかる。領域間相互作用を無視したセルモデル・1に基づく実効断面積ECS-1を用いて得られる実効増倍率と比較して、領域間相互作用が最大となるセルモデル・2に基づく実効断面積ECS-3を用いた場合の実効増倍率は0.48%ΔK/K'大きくなり、ZPPR-7Aの物質板配列に近いと考えられるセルモデル・3に基づく実効断面積ECS-4による結果は0.34%ΔK/K'大きくなる。

このような非均質炉心高速炉の実効増倍率に与えるセルモデル効果の支配的因子を検討するために、1次摂動論を用いて解析した。その結果をECS-1を基準とした時のECS-3, ECS-4との相違として領域別、反応別にTable 18に示した。また、Table 19には炉心第1領域と中心内部ブランケット領域について、ECS-1とECS-3間の実効増倍率の相違のエネルギー群依存性を示した。解析には、拡散近似に基づく摂動論コードPERKYを用いている。ここで、Table 18, 19に示した反応別、エネルギー群別の実効増倍率差は、以下の方式で定義した。実効増倍率の変化ΔK/Kは、領域 $\ell$ 、エネルギー群gについて、

$$\Delta K/K = \sum_{\ell, g} (F_{\ell, g} + C_{\ell, g} + S_{\ell, g} + L_{\ell, g})$$

と表わし、右辺の各項は、

$$F_{\ell, g} = \frac{1}{I_p} \left[ \frac{1}{K_{\text{eff}}} \Delta \nu \Sigma_{f, g} \phi_g \cdot \sum_{g'} \chi_{g'} \phi_{g'}^* - \Delta \Sigma_{f, g} \phi_g \phi_g^* \right]$$

$$C_{\ell, g} = \frac{1}{I_p} \left[ -\Delta \Sigma_{c, g} \phi_g \phi_g^* \right]$$

$$S_{\ell, g} = \frac{1}{I_p} \left[ \phi_g \left( \sum_{g' \neq g} \Delta \Sigma_{g \rightarrow g'} \phi_{g'}^* - \Delta \Sigma_{s, g} \phi_g^* \right) \right]$$

であるが、領域 $\ell$ についての添字は省略されている。第1項から、それぞれエネルギー群gの核分裂断面積、中性捕獲断面積、散乱断面積および拡散係数の変化に伴なう反応度変化への寄与を表わしている。

Table 18 の結果から、ECS-1 と比較して領域間相互作用の強い ECS-3, 4 は、炉心領域では実効増倍率を高め、内部ブランケット領域では実効増倍率を低めるように働くが、全体として実効増倍率を高めていることがわかる。実効増倍率を高める支配的因子は実効核分裂断面積に対するセルモデル効果である。Table 19 の結果と共に考察すると、領域間相互作用を考慮したセルモデルに基づく実効断面積を用いることによる実効増倍率增加の主要素は、Table 17 からも推測できたように、10 MeV ~ 400 KeV の高エネルギー領域での実効核分裂断面積の増加であることが明らかとなった。また、内部ブランケット領域での実効増倍率低下のセルモデル効果は、領域間相互作用を考慮することによって、 $^{238}\text{U}(n, f)$  実効断面積の低下と 20 KeV での中性子捕獲実効断面積の増加が生ずることによっている。

#### 4.3 反応率分布

ECS-1, 3, 4 に相当する 18 群実効ミクロ断面積を用いて、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ ,  $^{235}\text{U}(n, f)$ ,  $^{238}\text{U}(n, f)$ ,  $^{238}\text{U}(n, r)$  の ZPPR-7A 炉心中心面径方向反応率分布を計算し、セルモデルの相違による影響を検討した。中性子束分布としては、2 次元円筒体系に対する 18 群等方拡散計算によって得られた結果を用いている。Fig. 17 と Fig. 18 には、ECS-1 を用いた  $^{239}\text{Pu}(n, f)$  と  $^{235}\text{U}(n, f)$ ,  $^{238}\text{U}(n, f)$  と  $^{238}\text{U}(n, r)$  の径方向反応率分布をそれぞれ示した。 $^{238}\text{U}(n, f)$  以外の反応では、炉心と内部ブランケット領域間では大きな凹凸はなく、領域境界近傍での解析上の特殊性はないと考えられる。しかし  $^{238}\text{U}(n, f)$  は、炉心内で高く、内部ブランケット内で低く、両領域境界で急激に変化しているので、Ref. (7) に指摘されているように、炉心一内部ブランケット境界近傍での  $^{238}\text{U}(n, f)$  反応率分布の解析ではち密な解析を要するものと考えられる。

Fig. 19 と Fig. 20 には ECS-1 によって求めた反応率分布に対する ECS-3, 4 によって求めたものとの比の形で、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$  と  $^{235}\text{U}(n, f)$ ,  $^{238}\text{U}(n, f)$  と  $^{238}\text{U}(n, r)$  についてそれぞれ示した。いずれも、中心内部ブランケット中心において規格化している。 $^{239}\text{Pu}(n, f)$  と  $^{235}\text{U}(n, f)$  については、セルモデル効果は同傾向にあり、最大 2 % 程度である。これらの反応のセルモデル効果は、領域間相互作用を考慮することによって、相対的に内部ブランケット領域に比較して炉心領域で大きくなるが、その程度は小さい。 $^{238}\text{U}(n, r)$  については、 $^{238}\text{Pu}(n, f)$  と  $^{235}\text{U}(n, f)$  の場合と比較して、領域的には逆傾向にある。すなわち、セルモデル効果は、内部ブランケット領域と比べて炉心領域で相対的に低くなるが、その大きさは 1 % 以下で非常に小さい。一方、 $^{238}\text{U}(n, f)$  については、予測したようにセルモデルによる影響は大きく、最大 7 % 程度に達している。

いずれの場合も、中心内部ブランケット中心において規格化した反応率分布に基づいているため、ほとんどの反応に対するセルモデル効果は正となり、特に炉心領域において大きくなっているが、規格化方法を変えればその傾向も当然変わってくる。そのことを考慮しても、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ ,  $^{235}\text{U}(n, f)$ ,  $^{238}\text{U}(n, r)$  の反応率分布に与えるセルモデルの影響は小さいが、 $^{238}\text{U}(n, f)$  反応率分布に対する影響は無視できない量であると云える。 $^{238}\text{U}(n, f)$  反応率については、領域間相互作用を考慮したセルモデル（セルモデル・2, 3）での  $^{238}\text{U}(n, f)$  実効断面積が、相互作用を考慮しないセルモデル（セルモデル・4）と比べて、炉心領域で著しく高くなり、内部ブランケット領域で低くなる、という結果をそのまま反映している。

#### 4.4 サンプル反応度価値分布

$^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{10}\text{B}$  の反応度価値分布を、各核種  $10^{22}\text{n/cm}^2\text{添加時}$  の反応度変化として 1 次摂動論によって計算した。中性子束および随伴中性子束は、18群実効断面積 ECS-1, 3, 4 を用いて 2 次元円筒体系に対する拡散計算によって求めたものである。反応度価値計算に用いたミクロ断面積は 18 群であり、ECS-1, 3, 4 と同様にして求めたセル平均断面積である。ただし、炉心領域の  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$  および内、外部プランケット領域の  $^{238}\text{U}$  のミクロ断面積については、(1)式から求め、領域内に存在しない核種である炉心領域の  $^{10}\text{B}$ , プランケット領域の  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{10}\text{B}$  のミクロ断面積については、着目している核種の微小量を特定のセル内物質領域に添加することによって求めているので、測定に対応する計算値にならない可能性がある。しかし、セルモデルの相違による反応度価値分布への影響を論ずる場合には、充分な計算モデルであると考える。

Fig.2.1 に  $^{239}\text{Pu}$  と  $^{238}\text{U}$ ,  $^{10}\text{B}$  について、領域間相互作用を無視した実効断面積 ECS-1 を用いて計算した反応度価値の炉心中心面上の径方向分布を、まとめて図示した。 $^{239}\text{Pu}$  と  $^{238}\text{U}$ ,  $^{10}\text{B}$  では正負の相違はあるが、炉心第 2 層領域で反応度価値が最大となる曲線を描き、 $^{239}\text{Pu}$  では炉心領域と内部プランケット領域間の変動がほとんどみられないが、 $^{238}\text{U}$ ,  $^{10}\text{B}$  では若干変動があり、炉心領域内での反応度価値が若干大きくなる傾向がみられる。

Fig.2.2 には、セルモデルの相違によるサンプル反応度価値分布への影響を  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{10}\text{B}$  について ECS-1 を用いた計算結果に対する ECS-3, 4 を用いた計算結果の比の形で、示した。 $^{239}\text{Pu}$  については、セルモデル効果は炉心領域で最大 1%, 内部プランケットで最大 3% である。 $^{238}\text{U}$  についてのセルモデル効果は無視できる程度に小さく、炉心と外部径方向プランケット境界 ( $\sim 100\text{cm}$ ) 近傍でみられる大きな効果は、この位置で  $^{238}\text{U}$  の反応度価値が急激に 0 に近づき微妙な正負の相殺効果がセルモデルによって現われるためである。 $^{10}\text{B}$  についてのセルモデル効果は、炉心領域で最大 1%, 内部プランケット領域で最大 3% であるが、外部径方向プランケット領域内への波及効果がかなり存在している。

以上のことから、サンプル反応度価値の解析現状を考慮すると、この計算へのセルモデル効果は無視できる程度に小さいと云える。

#### 4.5 Na ポイド反応度効果

異なるセルモデルに基づく 3 種類の実効断面積 ECS-1, 3, 4 を用い、2 次元円筒体系に対する拡散計算によって Na ポイド反応度効果を求め、この特性に対するセルモデル効果を検討した。ZPPR-7A では数多くの Na ポイドパターンについて測定されているが、こゝでは Fig.2.3 に示した炉心第 1 層領域と炉心第 1 層領域 + 炉心第 2 層領域の 2 つのポイドパターンについてのみ計算を加えた。この 2 つのポイドパターンの選択理由は、比較的炉心中心を対象としており、セルモデルによる Na ポイド反応度効果への影響は、中性子漏洩の相違は小さく、セルモデルによる実効断面積の相違によっては決まるものと考えられるからである。しかし、この 2 つのポイドパターンは、厳密に云えば測定項目と対比できるパターンであるとは云えない。炉心第 1 層領域のポイドパターンに対する Na ポイド反応度効果は Table 9 の Step Number 2 の値、炉心第 1 層領域 + 炉心第 2 層領域のポイドパターンに対する反応度効果は Table 9 の Step Number 1 と 2 の値の和に近似的に対応できる。す

なわち、各 Step Number に対する Na ボイド反応度効果間に干渉がなく、着目する領域の Na ボイド反応度効果は、各 Step Number の値の単純な和として与えられると仮定すれば、我々の選択したボイドパターンに対する Na ボイド反応度効果は測定値と対比できる値となる。

ECS-1, 3, 4 を用いて解析した Na ボイド反応度効果を Table 20 に示した。この解析には拡散係数の異方性による中性子ストリーミング効果は含まれていない。炉心第 1 層領域の Na がボイドした場合、領域間の相互干渉効果を考慮しない実効断面積 ECS-1 を基準とすると、相互干渉効果を考慮した実効断面積 ECS-3, 4 による正の Na ボイド反応度効果は、それぞれ 15.5%, 16.2% 小さくなる。また、炉心第 1 層領域 + 炉心第 2 層領域の Na がボイドした場合、ECS-3, 4 による Na ボイド反応度効果は、ECS-1 による結果と比較して、16.3%, 17.0% それぞれ小さくなる。いずれのボイドパターンに対しても、Na ボイドした領域の実効断面積は、セルモデル・1, 2, 3 の炉心領域における Na 領域の Na 原子数密度を ~0 としたセル計算によって求めたものである。

セルモデルによる Na ボイド反応度効果に与える影響が 15% 以上あることから、その原因を 1 次摂動論による計算によって検討してみた。Table 21 に、ECS-1 と ECS-3 を用いた場合の Na ボイド反応度効果を 1 次摂動論によって計算した結果を示した。直接計算と比較して、1 次摂動論の結果は、炉心第 1 層領域の Na ボイドに対して 6%，炉心第 1 層領域 + 炉心第 2 層領域に対して 8% それぞれ過小評価しているが、傾向を論ずる場合には不都合はないと考える。2 つのボイドパターンについての Na ボイド反応度効果に対する ECS-1 と ECS-3 の結果の相違は、傾向的には類似している。両方のボイドパターンは比較的炉心中心に形成されているので、Na がボイドしたための散乱項の変化の寄与が Na ボイド反応度効果に対して最大となり、軸方向中性子漏洩の増加による項および中性子捕獲の減少による項の寄与は符号は異なるがほど同程度の寄与をしている。この事情はセルモデルの異なる実効断面積 ECS-1 と ECS-3 を用いたいずれの場合でも同様である。一方、セルモデルの相違による Na ボイド反応度効果に対する影響をみると、両者の相違はほど核分裂項によって支配されているように見える。核分裂項が Na ボイド反応度効果に占める寄与は他の項と比較すると小さいが、炉心領域においては ECS-1 の核分裂項は正であるが、ECS-3 では負となる。Table 22 に実効断面積 ECS-1 と ECS-3 に対する Na ボイド反応度効果の核分裂項のエネルギー依存性を示したが、いずれの場合も高エネルギー側の負と低エネルギー側の正の相殺で定まる形であるが、ECS-1 の場合には後者の効果が大となり、ECS-3 の場合には前者の効果が大となることによって、核分裂項が正あるいは負となっている。

以上の結果、Na ボイド反応度効果に対するセルモデル効果は、ZPPR-7A の炉心中心近傍のボイドパターンに対して、15% 以上であり、この効果のはとんどが、Na挿入時と Na ボイド時の炉心領域セル平均核分裂断面積の相違がセルモデルによって変るためであることがわかる。

#### 4.6 セル計算におけるバックリングの効果

非均質炉心高速炉では、炉心領域と内部ブランケット領域が近接配置されているので、領域間相互作用を考慮したセルモデルと考慮しないセルモデルに基づく実効断面積にはかなりの相違がある。その結果として非均質炉心高速炉の炉物理特性に対するセルモデル効果はかなり大きく、無視できない量になった。しかし、このセルモデル効果には、単に領域間相互作用の効果のみではなく、セルを臨界に保つための中性子漏洩を模擬したバックリングの効果も考慮しなければならない。セルモデル・

1の炉心領域および多重セルモデルのセルモデル・2, 3の $K_{\infty}$ およびセルを臨界に保つバックリング $B^2$ を以下に示した。

	$K_{\infty}$		$B^2$	
	Homo	Hete	Homo	Hete
Cell-1	1.6955	1.7064	$2.6059 \times 10^{-3}$	$2.6879 \times 10^{-3}$
Cell-2	1.0795	1.0973	$3.7335 \times 10^{-4}$	$4.6186 \times 10^{-4}$
Cell-3	1.0795	1.0988	$3.7335 \times 10^{-4}$	$4.7370 \times 10^{-4}$

セルモデル・1のバックリングは、多重セルモデルのバックリングと大巾に相違し、この相違が仮想的吸収DB<sup>2</sup>を通して、セル内物質板領域の中性子バランスに影響を与える、セル内中性子束分布に影響を与えることになる。セルモデルの領域間相互作用効果のみをみるために、すべてのセルのバックリングを0とする。

Fig.8～Fig.16に示した $^{238}\text{U}(n, f)$ ,  $^{239}\text{Pu}(n, f)$ ,  $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ のセル内反応率分布には、各セルモデルのバックリングを0にした場合についても併記している。これらの図から、バックリング効果はセルモデル・1に対して最大となり、特に $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 反応率分布において顕著である（Fig.11参照）。すなわち、セルモデル・1における $^{239}\text{Pu}(n, f)$ セル内分布において、セルの実効増倍率を1にするようにバックリングを定めた場合には、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 反応率はPu-U-Mo板内でピークを形成するのに対して、バックリング0の場合には逆にPu-U-Mo板内でシンクを形成し、セルモデル・2, 3の場合と同傾向になる。したがって、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ セル内分布がセルモデル・1とその他の多重セルモデルとで大巾に相違した理由は、領域間相互作用の有無というよりは、実効増倍率が1になるようにバックリングを定めたことによっていることがわかる。 $^{238}\text{U}(n, f)$ と $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ のセル内反応率分布に対するバックリング依存性をみると、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ に対するより小さいが、バックリング0の場合にはPu-U-Mo板内の高エネルギー側での寄与が大である $^{238}\text{U}(n, f)$ 反応率のピークを低め、かつ低エネルギー側での寄与が大である $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ 反応率のシンクの度合をより深めるようになる。

体系の実効増倍率に与えるセルのバックリング効果をTable 23に示した。ZPPR-7Aの中心ブランケット領域（炉心高さまで）の軸方向バックリング $B_z^2$ は、セルモデル・1と2に対して、それぞれ $5.34 \times 10^{-4}$ ,  $5.33 \times 10^{-4}$ であり、炉心第1層領域の軸方向バックリング $B_z^2$ は、セルモデル・1と2に対して、それぞれ $6.19 \times 10^{-4}$ ,  $6.21 \times 10^{-4}$ である。したがって、軸方向バックリングのセルモデル依存性は小さく、かつ領域間のバックリングの相違も小さい。加えて、内部ブランケット領域全体および炉心領域全体を考えると、軸方向バックリングは上述の値より低くなるものと考えられ、セルモデル・2および3に採用したバックリングとの相違はより小さくなるものと期待される。以上の検討から、セルモデルのバックリングとして、多重セルに用いた値をセルモデル・1にも適用する方がセルモデルの実効増倍率を1にするバックリングを与えるよりも妥当性が高いと考えられる。以上の検討結果に基づき、セルモデル・1のバックリングを $4.65 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$ とし、体系の実効増倍率を求め、セルモデル・2, 3に基づく体系の実効増倍率を下に比較した。

	ECS-1	ECS-3	ECS-4
$K_{\text{eff}}$	0.98822	0.99512	0.99375
$\Delta K/K$	—	0.70%	0.52%

この結果、従来の領域間相互作用を考慮しないセルモデルに対して、領域間相互作用を考慮した多重セルモデルに基づく体系の実効増倍率は、ZPPR-7Aについては0.5~0.7% $\Delta K/K$ 程度高くなる。

ZPPR-7Aにおいてセルモデルによって顕著な相違が現われる炉物理特性には、実効増倍率の他にNaボイド反応度効果があった。Naボイド反応度効果に対しても、セルのバックリング効果を実効増倍率と同様に計算し、Table 24にまとめて示した。この結果、バックリングを0とした場合には、いずれのNaボイド・パターンに対してもNaボイド反応度効果のセルモデル依存性はなく、いずれのセルモデルによってもほど等しいNaボイド反応度効果が得られることがわかる。したがって、セルの実効増倍率を1に保つバックリングを設定した時のセルモデル・1による大きな正のNaボイド反応度効果は、セルの領域間相互作用効果ではなく、セルに対するバックリング効果として現われたものであると考えることができる。すなわち、バックリング0の場合には、Table 22に示したNaボイド反応度効果に対する核分裂項の寄与のセルモデル依存性がなくなると考えられるからであり、このことはFig.11~13のセル内 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 反応率分布のバックリング依存性の傾向からも推測できる。

実効増倍率の場合と同様に、Naボイドパターンに対する軸方向バックリング $B_z^2$ のセルモデル依存性は小さいので、セルモデル・2、3で設定したセルのバックリングをセルモデル・1に対しても採用した場合のNaボイド反応度効果をTable 25に示した。この結果、従来の領域間相互作用を考慮しないセルモデルに対して、領域間相互作用を考慮した多重セルモデルに基づくNaボイド反応度効果は、ボイドパターン1、2共に約6%低くなると考えることができる。

## 5. 輸送効果、中性子ストリーミング効果、2次元円筒モデル化効果および断面積縮約効果、と実験値との比較

炉物理実験解析では、基準となる拡散計算による解析結果に対して多くの補正を加えて実験値と比較しうる解析値を求める。こゝでは、特に非均質炉心高速炉の実験解析上重要となる拡散近似に対する輸送理論適用による効果、2次元円筒化モデルに対する3次元モデル適用による効果、断面積縮約効果、および臨界集合体における板状模擬物質使用に伴なう中性子ストリーミング効果などについて検討を加える。

断面積縮約効果は、比較的小さいと考えられるが、2次元円筒モデルに対するECS-1を用いた70群と18群拡散計算の結果から求める。対象とした特性は実効増倍率とNaボイド反応度効果である。中性子ストリーミング効果は、ECS-1とそれを求めたセルモデル・1においてBenoistの異方性拡散係数を採用したECS-2を用いたR-Z体系に対する18群拡散計算の結果から求めた。対象とした特性は実効増倍率、反応率分布、物質反応度価値分布とNaボイド反応度効果である。3次元拡散計算の効果は、上述の異方性拡散係数を有する18群実効断面積ECS-2を用い、R-Z体系と3次元X-Y-Z体系に対する拡散計算の結果から求めた。輸送理論効果は、ECS-1を用いたR-Z体系に対するS<sub>4</sub>-P<sub>0</sub>輸送計算と拡散計算の比較から求めた。

これらの効果に対するセルモデル効果はいずれも小さく2次のオーダーであることは計算によって確認されている。

### 5.1 実効増倍率

Table 26に、上述の種々の効果を計算の基本となる実効増倍率と共に示した。70群から18群への断面積縮約では、70群拡散計算による各領域の平均中性子スペクトルを重みとして各領域の18群断面積を求めており、断面積縮約効果は+0.024%ΔK/KK' と非常に小さい。中性子ストリーミング効果は、-0.34%ΔK/KK' と無視できない大きさであるが、非均質炉心高速炉の臨界実験に特有のものではなく、通常の均質炉心高速炉の場合と同程度である。3次元拡散計算の2次元拡散計算に対する効果は+0.20%ΔK/KK' であり、形状的にみても円筒形で模擬することには若干問題があることを示している。輸送効果は+1.07%ΔK/KK' と非常に大きく、ZPPR-7Aと同規模の均質炉心高速炉の場合と比較して、2倍以上大きくなる。

### 5.2 反応率分布

反応率分布に与える中性子ストリーミング効果を、中心内部ブランケット中心で規格化し、<sup>239</sup>Pu(n, f)と<sup>235</sup>U(n, f)についてFig.24に、<sup>238</sup>U(n, f)と<sup>238</sup>U(n, r)についてFig.25にそれぞれ示した。<sup>239</sup>Pu(n, f), <sup>235</sup>U(n, f), <sup>238</sup>U(n, r)の各反応率分布に対するストリーミング効果は1%以下であり、<sup>238</sup>U(n, f)分布に対しても若干大きくなるが1.5%以下である。

反応率分布に与える輸送効果を、中心内部ブランケット中心で規格化し、R-Z体系の拡散計算結

果に対する  $S_4 - P_0$  による結果との相違の形で Fig. 26 と Fig. 27 に示した。反応率分布に与える輸送効果は特に  $^{238}\text{U}(n, f)$  に対して顕著である。規格化位置を相違の中心近傍にしてみると、 $^{239}\text{Pu}$  ( $n, f$ ) の輸送効果は ±4 %,  $^{235}\text{U}(n, f)$ ,  $^{238}\text{U}(n, r)$  では ±3 % であるのに対して、 $^{238}\text{U}(n, f)$  の輸送効果は ±15 % である。中心内部ブランケット中央で規格化すると、中心から離れるにしたがって輸送効果も大きくなる傾向がある。

Fig. 28 には、 $^{238}\text{U}(n, f)$  について 3 次元拡散計算によって求めた炉心中心面上 X 軸方向、Y 軸方向の反応率分布を示した。特に、 $^{238}\text{U}(n, f)$  の X 軸と Y 軸方向分布の形が特徴的であり、内部ブランケット配列によって  $^{238}\text{U}(n, f)$  分布は敏感に影響を受けることを示している。中心面上の反応率分布を Fig. 29 ~ Fig. 32 に示した。現在実験データの詳細が不明であるが、それが明らかになつた時点では基本的解析値として利用できる。

### 5.3 サンプル反応度価値分布

サンプル反応度価値分布に対する中性子ストリーミング効果は小さく、 $^{239}\text{Pu}$  で ±1 %,  $^{10}\text{B}$  で ±2 %,  $^{238}\text{U}$  で ~0 であった。3 次元拡散計算による  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{10}\text{B}$  のサンプル反応度価値の中心面上の分布を Fig. 33 ~ Fig. 35 に示した。これは、各ドロワーの中心に当該物質が  $10^{24} \text{n/cm}^2$  加わった時の反応度価値であり、3 次元拡散近似に基づく 1 次摂動論によって計算したものである。

### 5.4 Na ボイド反応度効果

炉心領域 1, 炉心領域 1, 2 において軸方向に中心の 6.1 cm から Na 全量が抜けた場合（ボイド・パターン 1 と 2）の Na ボイド反応度効果を種々の方法によって計算し、その結果を Table 27 にまとめて示した。この計算結果を適当に組合せることにより、その差として Na ボイド反応度効果に対する断面積縮約効果、中性子ストリーミング効果、3 次元効果、輸送効果を求めることができ、各々の効果を Table 28 に示した。ZPPR-7A では、Na ボイド反応度効果に対する中性子ストリーミング効果と輸送効果が大きいが、前者に負、後者は正となり、互に相殺するように働いている。3 次元効果は最も小さいが、輸送効果と共にボイド領域が大きくなる場合、円筒形モデル化からのずれ、および中性子漏洩の増加によって問題視されることがあると考えられ、その検討をしておく必要がある。

今回、取扱った Na ボイド反応度効果のボイド領域としては炉心中心近傍に限定したため、非均質炉心高速炉に特有の解析上の問題点は現われていない。しかし、大型炉では、全炉心領域からの Na ボイド反応度効果に対する輸送効果が、均質炉心高速炉に対して ~7 %、非均質炉心高速炉に対して ~20 % となり、非均質炉心高速炉の Na ボイド反応度効果の解析では輸送理論の適用が必須であるという結論を得ている。しかも、この輸送効果が顕著に現われるのは中性子漏洩が最大となる炉心最外端領域であった。この点からも、広領域の Na ボイド反応度効果に対する検討は更に進める必要がある。

## 5.5 実験値と解析値の比較

以上の計算結果をまとめることによって測定値と比較しうる計算値を得ることが可能となるが、前にも述べたように公表された測定値が少なく、比較可能な測定値は実効増倍率と、Na ボイド反応度効果である。この2つの物理量について測定値と計算値の比較を行なう。

Table 29 には、従来のセルモデルに基づく実効断面積 ECS-1 を用いた2次元拡散計算結果を基準計算値として、その他の補正項と共に C/E を求め、示した。この結果 ZPPR-7A の実効増倍率に関する C/E は 1.0039 となり、計算値は約 0.4% AK/K 過大評価する。

Table 26 には、Na ボイド反応度効果に関する実験値と計算値についても比較した。基準計算値として、セルモデル・1において臨界バックリングを採用した実効断面積 (ECS-1) に基づく2次元 R-Z 拡散計算結果を用いているので、セルモデル補正が大きくなつた。ZPPR-7A の Na ボイド反応度効果に対する C/E は、2つのボイドパターン、Fuel Ring-1 および Fuel Ring-(1+2) に対して、それぞれ 1.27, 1.38 を得た。<sup>(5)</sup> この計算の過大評価は JENDL-2 断面積ライブラリーの一般的傾向のようである。

## 6. 結論

非均質炉心高速炉の炉心構成は複雑であり、その炉物理的モックアップ実験の解析に際しては充分注意を払う必要があり、また実験計画に際しては解析上の問題点を充に考慮に入れ、その問題点を解決すべく計画を立案する必要がある。こゝでは、米国高速原型炉CRBRP の炉物理的モックアップ体系のうち最も単純な形状をした ZPPR-7A を用いた実験に関する解析を行なつた。残念なことには解析結果と対比可能な公表された実験値はわずかに、系の実効増倍率と Na ボイド反応度効果のみであった。

しかし、燃料ドロワーと内部ブランケットドロワーが近接配置された非均質炉心構成を有する ZPPR-7A の解析上の問題点をいくつか挙げることができ、今後の研究に資することができると思える。その1つは実効断面積作成に際しての適正なセルモデル選定であることであり、他は輸送理論を含む詳細な解析法の必要性に関するものである。以下に得られた知見をまとめて示した。

### セルモデルの選定

均質炉心高速炉の解析で用いられる1領域を1セルで代表する領域間相互作用を無視したセルモデルに対して、炉心と内部ブランケット領域を連結することによって両領域間の相互作用を考慮した2つのセルモデルを設定し、それによって得られる実効断面積が非均質炉心 ZPPR-7A の炉物理特性に与える影響を検討した。この場合、単なる領域間相互作用ばかりではなく、セルに与えるトランスバースバックリングによる影響も大きいことが明らかとなった。

セルのトランスバースバックリングをセルが臨界になるような臨界バックリングを使用すると、以

---

\* これらの C/E 値の相違は、Fuel Ring-(1+2) のボイドパターンの反応度効果が、Fuel Ring-1 と Fuel Ring-2 の和として与えられるとした仮定に無理があったためと思われる。しかしながらセルモデル効果等の計算手法について検討してきた議論はそのまま成立する。

## 5.5 実験値と解析値の比較

以上の計算結果をまとめることによって測定値と比較しうる計算値を得ることが可能となるが、前にも述べたように公表された測定値が少なく、比較可能な測定値は実効増倍率と、Na ポイド反応度効果である。この2つの物理量について測定値と計算値の比較を行なう。

Table 29 には、従来のセルモデルに基づく実効断面積 ECS-1 を用いた2次元拡散計算結果を基準計算値として、その他の補正項と共に C/E を求め、示した。この結果 ZPPR-7A の実効増倍率に関する C/E は 1.0039 となり、計算値は約 0.4%  $\Delta K/K$  過大評価する。

Table 26 には、Na ポイド反応度効果に関する実験値と計算値についても比較した。基準計算値として、セルモデル・1において臨界バックリングを採用した実効断面積 (ECS-1) に基づく2次元 R-Z 拡散計算結果を用いているので、セルモデル補正が大きくなつた。ZPPR-7A の Na ポイド反応度効果に対する C/E は、2つのポイドパターン、Fuel Ring-1 および Fuel Ring-(1+2) に対して、それぞれ 1.27<sup>(5)</sup>, 1.38 を得た。<sup>\*</sup> この計算の過大評価は JENDL-2 断面積ライブラリーの一般的傾向のようである。

## 6. 結論

非均質炉心高速炉の炉心構成は複雑であり、その炉物理的モックアップ実験の解析に際しては充分注意を払う必要があり、また実験計画に際しては解析上の問題点を充に考慮に入れ、その問題点を解決すべく計画を立案する必要がある。こゝでは、米国高速原型炉CRBRPの炉物理的モックアップ体系のうち最も単純な形状をした ZPPR-7A を用いた実験に関する解析を行なつた。残念なことには解析結果と対比可能な公表された実験値はわずかに、系の実効増倍率と Na ポイド反応度効果のみであった。

しかし、燃料ドロワーと内部ブランケットドロワーが近接配置された非均質炉心構成を有する ZPPR-7A の解析上の問題点をいくつか挙げることができ、今後の研究に資することができると思われる。その1つは実効断面積作成に際しての適正なセルモデル選定であることであり、他は輸送理論を含む詳細な解析法の必要性に関するものである。以下に得られた知見をまとめて示した。

### セルモデルの選定

均質炉心高速炉の解析で用いられる1領域を1セルで代表する領域間相互作用を無視したセルモデルに対して、炉心と内部ブランケット領域を連結することによって両領域間の相互作用を考慮した2つのセルモデルを設定し、それによって得られる実効断面積が非均質炉心 ZPPR-7A の炉物理特性に与える影響を検討した。この場合、単なる領域間相互作用ばかりではなく、セルに与えるトランスバースバックリングによる影響も大きいことが明らかとなつた。

セルのトランスバースバックリングをセルが臨界になるような臨界バックリングを使用すると、以

---

\* これらの C/E 値の相違は、Fuel Ring-(1+2) のポイドパターンの反応度効果が、Fuel Ring-1 と Fuel Ring-2 の和として与えられるとした仮定に無理があったためと思われる。しかしながらセルモデル効果等の計算手法について検討してきた議論はそのまま成立する。

以下の結果が得られた。

- (1) 領域間相互作用を考慮したセルモデルに基づく実効増倍率は、相互作用を無視した従来のセルモデルに基づく実効増倍率と比較して、 $0.4\% \Delta K / KK'$  大きくなる。これは主に中性子の高エネルギー領域における核分裂実効断面積がセルモデルによって相違することによっている。
- (2) 核反応率分布に関しても上述の高エネルギー領域でのセル内中性子束分布がセルモデルによって異なるため、特に $^{238}\text{U}(n, f)$  分布のセルモデル依存性が顕著であり、領域間相互作用を考慮したセルモデルと相互作用を無視したセルモデルでの $^{238}\text{U}(n, f)$  の炉心内径方向反応率分布の相違は約 7 % に達する。
- (3) Na ボイド反応度効果については、中性子スペクトル項を強調するため、比較的炉中心の Na ボイドパターンに対して解析した。領域間相互作用を考慮したセルモデルに基づけば、相互作用を無視したセルモデルと比較して、正の Na ボイド反応度を約 15 % 低下させる。この相違の多くは、Na 充填時とボイド時の核分裂実効断面積の相違がセルモデルによって異なることによる。セルを臨界に保つトランスバースバンクリングは、特に燃料ドロワーのみで内部ブランケットとの相互作用を無視したセルモデルに対して著しく大きくなる。ZPPR-7 A 体系の炉心と軸方向ブランケット境界における中性子漏洩から求めた燃料ドロワー平均の軸方向バックリングはセルモデルによらず、それも領域間相互作用を考慮したセルモデルの臨界バックリングと同程度であった。このことから、すべてのセルモデルのトランスバースバックリングとして上述の意味での共通の軸方向バックリングを用いると、以下の知見が得られた。
- (4) 臨界バックリングを用いた場合よりも、実効増倍率のセルモデル間の相違は大きくなり、約  $0.7\% \Delta K / KK'$  である。
- (5) Na ボイド反応度効果に関しては、臨界バックリングを用いた場合の顕著なセルモデル依存性はなくなり、セルモデル間の Na ボイド反応度効果の相違は高々 8 % 程度になる。また、トランスバースバックリングを 0 とすると、セルモデル間の Na ボイド反応度効果の相違はなくなる。このことから、Na ボイド反応度効果のセルモデル依存性は領域間相互作用よりむしろセルのトランスバースバックリングの選び方によって生ずることがわかる。
- (6) セル内核反応率分布に関するセルモデル依存性は、特に臨界バックリングを適用した時の $^{239}\text{Pu}(n, f)$  に対して著しい。この場合、領域間相互作用を考慮したセルモデルではセル内 Pu-U-Mo 板での $^{239}\text{Pu}(n, f)$  反応率はシンクを形成するが、相互作用を無視したセルモデルでは逆にピークを形成する。しかし、セルのトランスバースバックリングとして系の軸方向バックリングを用いると、上述の $^{239}\text{Pu}(n, f)$  反応率分布のセルモデル依存性はなくなる。

#### 詳細解析法の必要性

中性子ストリーミング効果は大きいが非均質炉心高速炉に特有の問題ではない。一方、異なる組成を有する領域が近接配置される炉心構成となる非均質炉心高速炉の核特性評価には輸送理論を用いることが必須であり、また ZPPR-7 A のような臨界集合体では炉心の円筒モデル化には無理があり、その形状を考慮に入れた解析が必要となる。以下に個々についての知見をまとめた。

- (7) 中性子ストリーミング効果を Benoist の拡散係数を用いて評価すると、実効増倍率に対して  $-0.34\% \Delta K / KK'$ 、Na ボイド反応度効果に対して  $-5.4\%$  と無視できない量であるが、非均質炉心高速炉に特有のものとは云えない。

- (8) 拡散理論に対する輸送理論を用いることの効果は、均質炉心高速炉と比較して、非均質炉心高速炉において著しい。この所謂輸送効果は、実効増倍率に対して  $1.1\% \Delta K / KK'$ 、Na ボイド反応度効果に対して 5 %、 $^{238}\text{U}(n, f)$  反応率分布に対して ± 15 %、であった。中性子漏洩の大きな大規模 Na ボイド・パターンではこの輸送効果は更に著しくなる。
- (9) 領域境界形状が円筒形とはかなり異なる臨界集合体における非均質炉心高速炉の核特性を円筒モデル化によって解析することには若干の問題がある。
- 数少ない非均質炉心高速炉の炉物理モックアップ実験について、ZPPR-7A に関してはかなり詳細に報告されている方であるが、それでも解析値と対比できる実験値は実効増倍率と Na ボイド反応度効果のみである。両者についての実験値と解析値の比較から以下のことが明らかとなった。
- (10) 実効増倍率に関しては、解析値は約  $0.4\% \Delta K / KK'$  実験値を過大評価する。今回用いた断面積セット JFS-3-J 2 に基づく ZPPR-7A と同規模の均質炉心高速炉では実験値を過小評価する傾向があった。
- (11) Na ボイド反応度効果に関しては、Fuel Ring-1 の場合解析値は実験値を約  $27\%$ <sup>(5)</sup> 過大評価するが、均質炉心高速炉に対しても同じ傾向が見られる。

以上、本研究によって得られた知見は、米国高速原型炉CRBRP（非均質炉心高速炉）の炉物理的モックアップ体系 ZPPR-7A の解析において得られたものであり、一般的な非均質炉心高速炉に関して論ずる場合には、数値の大小については変ることがあっても、こゝで示摘した非均質炉心高速炉の解析上の特徴は変わらないと考える。現在、より大型の非均質炉心高速炉に関する炉物理実験が日米共同で ZPPR-13 集合体において実施されている。この実験結果を解析することによって、本論文で示摘した解析上の特徴を一般性を持たせ、かつ定量的に論ずることが可能になる。

## 参 考 文 献

- (1) 中川正幸、土橋敬一郎；SLAROM，高速炉の非均質系炉心解析コード，JAERI-M 5916 (1974).
- (2) 飯島進；CITATION-FBR，公刊予定
- (3) 飯島進、他；2次元・3次元摂動理論計算コード；PERKY, JAERI-M 6993 (1977).
- (4) Lathrop K. et al. ; Theory and Use of the General Geometry TWOTRAN Program, LA-4432 (1970).
- (5) Takano H. and Ishiguro Y. ; Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J 2, JAERI-M 82-135 (1982).
- (6) Collins P. J. et al. ; Experimental Studies of 350MWe Heterogeneous LMFBR Cores at ZPPR, Proceedings of a Symposium on Fast Reactor Physics 1979, Vol. 2, P57-69 (1979).
- (7) Lineberry M. J. et al. ; Physics Studies of a Heterogeneous Liquid-Metal Fast Breeder Reactor, Nuclear Technology, Vol. 44, P21-43 (1979).

- (8) 拡散理論に対する輸送理論を用いることの効果は、均質炉心高速炉と比較して、非均質炉心高速炉において著しい。この所謂輸送効果は、実効増倍率に対して  $1.1\% \Delta K / KK'$ 、Na ボイド反応度効果に対して 5 %、 $^{238}\text{U}(n, f)$  反応率分布に対して ± 15 %、であった。中性子漏洩の大きな大規模 Na ボイド・パターンではこの輸送効果は更に著しくなる。
- (9) 領域境界形状が円筒形とはかなり異なる臨界集合体における非均質炉心高速炉の核特性を円筒モデル化によって解析することには若干の問題がある。
- 数少ない非均質炉心高速炉の炉物理モックアップ実験について、ZPPR-7A に関してはかなり詳細に報告されている方であるが、それでも解析値と対比できる実験値は実効増倍率と Na ボイド反応度効果のみである。両者についての実験値と解析値の比較から以下のことが明らかとなった。
- (10) 実効増倍率に関しては、解析値は約  $0.4\% \Delta K / KK'$  実験値を過大評価する。今回用いた断面積セット JFS-3-J 2 に基づく ZPPR-7A と同規模の均質炉心高速炉では実験値を過小評価する傾向があった。
- (11) Na ボイド反応度効果に関しては、Fuel Ring-1 の場合解析値は実験値を約 27 %<sup>(5)</sup>過大評価するが、均質炉心高速炉に対しても同じ傾向が見られる。

以上、本研究によって得られた知見は、米国高速原型炉CRBRP（非均質炉心高速炉）の炉物理的モックアップ体系 ZPPR-7A の解析において得られたものであり、一般的な非均質炉心高速炉に関して論ずる場合には、数値の大小については変ることがあっても、ここで示摘した非均質炉心高速炉の解析上の特徴は変わらないと考える。現在、より大型の非均質炉心高速炉に関する炉物理実験が日米共同で ZPPR-13 集合体において実施されている。この実験結果を解析することによって、本論文で示摘した解析上の特徴を一般性を持たせ、かつ定量的に論ずることが可能になる。

## 参 考 文 献

- (1) 中川正幸、土橋敬一郎；SLAROM，高速炉の非均質系炉心解析コード，JAERI-M 5916 (1974).
- (2) 飯島進；CITATION-FBR，公刊予定
- (3) 飯島進、他；2次元・3次元摂動理論計算コード；PERKY, JAERI-M 6993 (1977).
- (4) Lathrop K. et al. ; Theory and Use of the General Geometry TWOTRAN Program, LA-4432 (1970).
- (5) Takano H. and Ishiguro Y. ; Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J 2, JAERI-M 82-135 (1982).
- (6) Collins P. J. et al. ; Experimental Studies of 350MWe Heterogeneous LMFBR Cores at ZPPR, Proceedings of a Symposium on Fast Reactor Physics 1979, Vol. 2, P57-69 (1979).
- (7) Lineberry M. J. et al. ; Physics Studies of a Heterogeneous Liquid-Metal Fast Breeder Reactor, Nuclear Technology, Vol. 44, P21-43 (1979).

TABLE 1 Atomic Number Densities of  
Major Drawer Types in ZPPR-7A (7)

Isotope	Core, Two Columns of Fuel	Radial Blanket	Axial Blanket
$^{239}\text{Pu}$	0.1691		
$^{240}\text{Pu}$	0.0225		
$^{241}\text{Pu}$	0.0024		
$^{242}\text{Pu}$	0.0004		
$^{241}\text{Am}$	0.0010		
$^{235}\text{U}$	0.0011	0.0028	0.0016
$^{238}\text{U}$	0.4799	1.2657	0.7061
Na	0.8468	0.4471	0.8883
O	0.9430	2.1351	1.3961
Fe	1.7118	0.7208	1.0481
Cr	0.3069	0.2061	0.2739
Ni	0.1428	0.0915	0.1232
Mn	0.0261	0.0180	0.0239
Mo	0.0450	0.0019	0.0019
C	0.0034	0.0029	0.0036
Al	0.0010	0.0001	0.0003
Si	0.0164	0.0104	0.0140
Cu	0.0044	0.0035	0.0039
$^{10}\text{B}$			
$^{11}\text{B}$			

TABLE 2

Eigenvalue Calculations for ZPPR-7 (7)

	ZPPR-7A
Experiment $k_{\text{eff}}$	1.0003
Calculation $k_{\text{eff}}$	
rz diffusion	0.9792
xy diffusion	0.9801
xy transport $S_4$	0.9851
Corrections	
streaming in xy plane	-0.0016
axial streaming <sup>a</sup>	-0.0035
axial transport <sup>a</sup>	+0.0014
C/E	
transport $S_4$ corrected	0.9811

TABLE 3

(7)  
Analysis of Calculations for  $^{235}\text{U}(n,f)$  in  
Annular Zones\* in ZPPR-7A

Zone	Number of Positions	Average C/E	Standard Deviation of Distribution
Center blanket	5	0.999	0.005
Core ring 1	5	0.994	0.013
Blanket ring 1	6	1.016	0.005
Core ring 2	7	1.010	0.004
Blanket ring 2	6	1.025	0.008
Core ring 3	7	1.028	0.008
Blanket ring 3	4	1.039	0.009
Core ring 4	13	1.037	0.010
Radial blanket	14	1.031	0.019

\*Transport  $S_4$  calculation.

TABLE 4  
ZPPR-7A Reaction Rate Comparisons at the Midplane<sup>(7)</sup>

Reaction	Zone	Number of Positions	Average C/E <sup>a</sup>	
			Diffusion	Transport
$^{239}\text{Pu}(n,f)$	Core	19	1.000	1.000
	Internal blankets	15	1.029	1.003
$^{235}\text{U}(n,f)$	Core	32	1.023	1.023
	Internal blankets	21	1.041	1.019
$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	Core	24	1.112	1.107
	Internal blankets	19	1.099	1.080
$^{238}\text{U}(n,\gamma)/^{239}\text{Pu}(n,f)$ ratio	Core	19	1.111	1.104
	Internal blankets	15	1.068	1.075

<sup>a</sup>The statistical error in each data point is ~0.9% except for  $^{238}\text{U}(n,f)$ , for which it is ~2%. Since the C/E values have been normalized for  $^{239}\text{Pu}(n,f)$ , significant differences would be ~0.4% (~9 entries or more for each set). For  $^{235}\text{U}(n,f)$  and  $^{238}\text{U}(n,f)$ , an additional 1.5% systematic error should be included. For  $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ , the systematic error is 2%; for the  $^{238}\text{U}(n,\gamma)/^{239}\text{Pu}(n,f)$  ratio, it is 0.9%.

TABLE 5  
ZPPR-7A Comparison of Calculations for  $^{238}\text{U}(n,f)$ <sup>(7)</sup>

Calculation Method	Average C/E		Difference in C/E Between Core and Blankets (%)
	Core Drawers (24 Positions)	Internal Blanket Drawers (20 Positions)	
Diffusion theory	~0.860	1.079	25
Transport $S_4$	0.891	0.989	11
Transport $S_4$ with coupled core/blanket cell data	0.929	0.949	2
Standard deviation of distribution	0.021	0.039	

TABLE 6  
Reactivity Coefficients in the First Fuel Ring of ZPPR-7A<sup>(7)</sup>

Sample	Principal Composition	Average Specific Worth in First Fuel Ring (cent/kg)	C/E
Plutonium	98 wt% $^{239}\text{Pu}$	$18.53 \pm 0.04$	1.14
Enriched uranium	93.2 wt% $^{235}\text{U}$	$13.34 \pm 0.03$	1.18
Depleted uranium	99.8 wt% $^{238}\text{U}$	$-0.93 \pm 0.02$	1.13
Enriched boron	89.6 wt% $^{10}\text{B}$	$-207.13 \pm 0.30$	1.04
Stainless steel	Type 304	$-0.60 \pm 0.01$	1.20

TABLE 7  
 Results of Single-Drawer Sodium Void Measurements in ZPPR-7A (7)

Matrix Position	Axial Extent of Void (mm)	Zone	Sodium Mass (g)	Measured Worth <sup>a</sup> (cents)
137-37	305	Central blanket	165	0.162 ± 0.002
137-37	457	Central blanket	247	0.180 ± 0.002
138-41	305	Fuel ring 1	315	0.256 ± 0.003
138-41	457	Fuel ring 1	473	0.210 ± 0.003
138-43	305	Blanket ring 1	165	0.152 ± 0.002
138-45	305	Fuel ring 2	315	0.244 ± 0.002
138-47	305	Blanket ring 2	165	0.165 ± 0.002
138-48	305	Fuel ring 3	315	0.247 ± 0.001
136-24	305	Fuel ring 3	315	0.173 ± 0.002
136-23	305	Blanket ring 3	165	0.109 ± 0.002
136-22	305	Fuel ring 4	315	0.122 ± 0.002
136-21	305	Fuel ring 4	315	0.027 ± 0.002
136-20	305	Fuel ring 4	315	-0.103 ± 0.002
136-19	305	Fuel ring 4	315	-0.221 ± 0.002

<sup>a</sup>Results taken from differences of single-drawer oscillator worth measurements. Positioning uncertainties as well as statistical uncertainties are included in the error estimates.

TABLE 8  
 Comparison of Extrapolated Single-Drawer Results with Zone Sodium Void Results in ZPPR-7A (7)

Step Number	Description	Step Worth (dollars)	Extrapolated Single-Drawer Result <sup>a</sup> (dollars)
1	Fuel ring 2 voided ±305 mm	0.499 ± 0.018	0.493 ± 0.004
2	Fuel ring 1 voided ±305 mm	0.282 ± 0.003	0.265 ± 0.003
3	Blanket ring 1 voided ±305 mm	0.230 ± 0.012	0.195 ± 0.003
4	Fuel ring 1 voided ±305 to 457 mm	-0.059 ± 0.020	-0.048 ± 0.003
5	Fuel ring 1 voided ±457 to 610 mm	-0.075 ± 0.016	---
6	Central blanket voided ±305 mm	+0.093 ± 0.013	0.090 ± 0.003
7	Central blanket voided ±305 to 457 mm	-0.005 ± 0.014	0.010 ± 0.003
8	Central blanket voided ±457 to 610 mm	-0.011 ± 0.009	---
9	Restore sodium to blankets	-0.287 ± 0.007	---
10	Restore sodium to fuel ring 2	-0.523 ± 0.011	-0.493 ± 0.003

<sup>a</sup>The single-drawer measurement result scaled by the sodium mass in the zone.

TABLE 9  
(7)  
Zone Sodium Void Reactivities in ZPPR-7A

Step Number	Regions Voided (Cumulative)	Voiding (mm)	Reactor Sodium Mass Change This Step (kg)	Measured Step Worth (E) <sup>a</sup> (dollars)	Calculated Step Worth (C) <sup>b</sup> (dollars)	C/E
1	Fuel ring 2	±305	-63.612	0.499 ± 0.018	0.553	0.054
2	Fuel ring 2	±305	-32.583	0.282 ± 0.003	0.276	-0.006
	Fuel ring 1	±305				
3	Fuel ring 2	±305	-21.097	0.230 ± 0.012	0.269	0.039
	Fuel ring 1	±305				
	Blanket ring 1	±305				
4	Fuel ring 2	±305	-16.321	-0.059 ± 0.020	-0.086	-0.027
	Blanket ring 1	±305				
	Fuel ring 1	±457				
5	Fuel ring 2	±305	-17.118	-0.075 ± 0.016	-0.096	-0.021
	Blanket ring 1	±305				
	Fuel ring 1	±610				
6	Fuel ring 2	±305	-9.151	0.093 ± 0.013	0.091	-0.002
	Blanket ring 1	±305				
	Fuel ring 1	±610				
	Central blanket	±305				
7	Fuel ring 2	±305	-4.618	-0.005 ± 0.014	-0.003	0.002
	Blanket ring 1	±305				
	Fuel ring 1	±610				
	Central blanket	±457				
8	Fuel ring 2	±305	-4.618	-0.011 ± 0.009	-0.010	0.001
	Blanket ring 1	±305				
	Fuel ring 1	±610				
	Central blanket	±610				
9	Fuel ring 2	±305	+39.484	-0.287 ± 0.007	-0.345	-0.058
	Fuel ring 1	±610				
10	Fuel ring 1	±610	+63.612	-0.523 ± 0.011	-0.566	-0.043
11	None	---	+66.022	-0.146 ± 0.020	-0.084	0.062

<sup>a</sup>Taken from inverse kinetics results.<sup>b</sup>Calculated dollars =  $\Delta k/k_1 k_2 \beta_{\text{eff}}$ ;  $\beta_{\text{eff}} = 0.003443$  for ZPPR-7A.

TABLE 10 Modelled Plate Data for Core Cell

(unit ;  $10^{24} n/cm^3$ )

Nuclide	PU-U-M04 (0.55880)	NA4C & 2C (0.55880) (1.11760)	MATCC (0.26035)	FEOCC (0.39370)	Homogeneous Density
Pu-239	8.3589 -3	0	0	0	1.6910 -3
240	1.1122 -3	0	0	0	2.2500 -4
241	1.1864 -4	0	0	0	2.4001 -5
242	1.9773 -5	0	0	0	4.0001 -6
Am-241	4.9432 -5	0	0	0	1.0000 -5
U-235	5.4375 -5	0	0	0	1.1000 -5
238	2.3722 -2	0	0	0	4.7989 -3
O	0	1.4884 -6	0	3.3079 -2	9.4300 -3
Na	0	2.0239 -2	0	0	8.4678 -3
Fe	0	4.4929 -3	4.9874 -2	3.6966 -2	1.7118 -2
Cr	0	1.2406 -3	1.3762 -2	4.3951 -3	3.0690 -3
Ni	0	5.4302 -4	6.0696 -3	2.2056 -3	1.4280 -3
Mn	0	1.1059 -4	1.1353 -3	3.7003 -4	2.5875 -4
Mo	2.1609 -3	7.3859 -6	7.8537 -5	8.2665 -6	4.5000 -4
C	0	2.1974 -5	1.6970 -4	3.0910 -5	3.4000 -5
Al	0	1.5474 -6	1.9769 -5	2.6274 -5	1.0000 -5
Si	0	8.3689 -5	8.0822 -4	1.8526 -4	1.6400 -4
Cu	0	3.1569 -5	1.9156 -5	4.5010 -5	4.4094 -5
H	0	0	0	0	0

( ) : thickness (cm)

TABLE 11 Modelled Plate Data for Axial Blanket Cell

(unit ;  $10^{24} \text{n/cm}^3$ )

Nuclide	U3084AB (0.63500)	DU8AB (0.31750)	NA2AB (1.19380)	MATAB (0.22225)	CANAB (0.03810)	FEOCAB (0.35560)
Pu-239	0	0	0	0	0	0
240	0	0	0	0	0	0
241	0	0	0	0	0	0
242	0	0	0	0	0	0
Am-241	0	0	0	0	0	0
U-235	3.0732 -5	9.4780 -5	0	0	0	0
238	1.3772 -2	4.0227 -2	0	0	0	0
O	3.3719 -2	0	1.3530 -6	0	0	3.6250 -2
Na	0	0	2.0554 -2	0	0	0
Fe	0	0	5.9340 -3	5.0591 -2	5.9397 -2	4.0656 -2
Cr	0	0	1.8823 -3	1.5947 -2	1.9365 -2	3.7554 -3
Ni	0	0	8.2738 -4	6.7845 -3	1.0186 -2	1.8301 -3
Mn	0	0	1.6684 -4	1.4431 -3	1.4933 -3	3.0896 -4
Mo	0	0	1.4540 -5	1.3796 -4	2.8272 -5	1.6011 -5
C	2.9752 -5	9.6985 -5	1.4982 -5	1.2925 -4	9.0711 -5	2.1990 -5
Al	0	0	2.1807 -6	2.1807 -6	1.3618 -4	1.6538 -5
Si	0	0	9.4114 -5	9.4114 -5	1.0260 -3	1.9396 -4
Cu	8.9334 -6	2.9055 -5	3.1569 -5	3.1569 -5	1.5746 -4	3.6716 -5
H	4.7621 -6	1.5783 -5	0	0	0	0

( ) : thickness (cm)

TABLE 12 Plate Data for Internal and Radial Blankets

(unit ;  $10^{24} \text{n/cm}^3$ )

Nuclide	U3084 & 2 (0.63500) (1.27000)	DU8 (0.31750)	NA2 (1.19380)	MAT (0.22225)	CAN (0.0381)	Homogeneous Density
Pu-239	0	0	0	0	0	0
240	0	0	0	0	0	0
241	0	0	0	0	0	0
242	0	0	0	0	0	0
Am-241	0	0	0	0	0	0
U-235	3.0156 -5	9.3005 -5	0	0	0	2.8021 -5
238	1.3902 -2	4.0607 -2	0	0	0	1.2657 -2
O	3.7150 -2	0	1.5218 -6	0	0	2.1351 -2
Na	0	0	2.0690 -2	0	0	4.4710 -3
Fe	0	0	6.9300 -3	5.9082 -2	6.9365 -2	7.2080 -3
Cr	0	0	1.9824 -3	1.6795 -2	2.0394 -2	2.0610 -3
Ni	0	0	8.7504 -4	7.1753 -3	1.0773 -2	9.1500 -4
Mn	0	0	1.7384 -4	1.5035 -3	1.5559 -3	1.8000 -4
Mo	0	0	1.8880 -5	1.7914 -4	3.6709 -5	1.9000 -5
C	2.0003 -5	6.5204 -5	1.0073 -5	8.6897 -5	6.0986 -5	2.9000 -5
Al	0	0	0	0	0	0
Si	0	0	1.1966 -5	1.0368 -3	1.3044 -3	1.0400 -5
Cu	9.3753 -6	3.0492 -5	3.3131 -5	2.0717 -4	1.6525 -4	3.5000 -5
H	4.7621 -6	1.5783 -5	0	0	0	4.5510 -6

( ) : thickness (cm)

TABLE 13      Atomic Number Densities of  
Radial/Axial Reflectors of ZPPR-7A

(unit ;  $10^{24} n/cm^3$ )

Nuclide	Axial	Ref.	Radial	Ref.
C	5.73699	-4	2.14199	-4
Si	8.75998	-5	8.62598	-4
Cr	1.49650	-3	1.50379	-2
Mn	6.18399	-4	1.52370	-3
Fe	7.30524	-2	5.30857	-2
Ni	6.00199	-4	6.65989	-3
Cn	7.11998	-5	9.55998	-5
Mo	8.99997	-6	8.19997	-6

TABLE 14      Energy Structure of 18-Group Cross-sections

Group	Energy range	Group	Energy range
1	10.00 - 6.065 MeV	10	40.87 - 19.31 KeV
2	6.065- 3.679	11	19.31 - 9.12
3	3.679- 2.231	12	9.12 - 4.31
4	2.231- 1.353	13	4.31 - 2.03
5	1.353- 0.821	14	2.03 - 0.96
6	0.821- 0.388	15	0.96 - 0.45
7	0.388- 0.183	16	0.45 - 0.21
8	0.183- 0.087	17	0.21 - 0.10
9	86.52 -40 87 KeV	18	101 eV - Thermal

TABLE 15 Comparison of 18-Group Macroscopic Cross-Sections  
of Fuel Ring-1 obtained by Different Cell Models (ECS-1 & 3)

ECS-1

Group	D	$\Sigma_r$	$v\Sigma_f$	$\Sigma_f$	$\Sigma_c$
1	3.81542E+00	6.63993E-02	3.46192E-02	9.32950E-03	3.62357E-03
2	3.40063E+00	6.35217E-02	2.24120E-02	6.71890E-03	1.55383E-03
3	3.13881E+00	5.12251E-02	2.07018E-02	6.73206E-03	4.48663E-04
4	2.80772E+00	4.93260E-02	1.80319E-02	6.12089E-03	4.50578E-04
5	2.32647E+00	4.28408E-02	1.11512E-02	3.71941E-03	7.99631E-04
6	2.04301E+00	2.28474E-02	8.94150E-03	3.03364E-03	9.33954E-04
7	1.75041E+00	2.10323E-02	7.94876E-03	2.73162E-03	1.12047E-03
8	1.51874E+00	1.96259E-02	7.86736E-03	2.71928E-03	1.58113E-03
9	1.33703E+00	2.07695E-02	8.21310E-03	2.84807E-03	2.43091E-03
10	1.09839E+00	2.12010E-02	8.43542E-03	2.92838E-03	3.73434E-03
11	1.03304E+00	2.57234E-02	8.92385E-03	3.10006E-03	4.95729E-03
12	6.89401E-01	3.47044E-02	1.03633E-02	3.60102E-03	6.85089E-03
13	4.58724E-01	6.65403E-02	1.48566E-02	5.16396E-03	9.71393E-03
14	8.76242E-01	3.16255E-02	1.86630E-02	6.48930E-03	1.30460E-02
15	8.89418E-01	3.89878E-02	3.12120E-02	1.08523E-02	1.75013E-02
16	6.81863E-01	5.10062E-02	4.46039E-02	1.55036E-02	2.44194E-02
17	7.37018E-01	6.22886E-02	6.39020E-02	2.22084E-02	3.13645E-02
18	7.08109E-01	8.71471E-02	1.33231E-01	4.62845E-02	4.08622E-02

ECS-3

		$\Sigma_r$	$v\Sigma_f$	$\Sigma_f$	$\Sigma_c$
1	3.80074E+00	6.66196E-02	3.62563E-02	9.77006E-03	3.56843E-03
2	3.38957E+00	6.37813E-02	2.34824E-02	7.04019E-03	1.53888E-03
3	3.12975E+00	5.16413E-02	2.15279E-02	7.00001E-03	4.48190E-04
4	2.79274E+00	4.98640E-02	1.87892E-02	6.37791E-03	4.62670E-04
5	2.31744E+00	4.30308E-02	1.14939E-02	3.83366E-03	8.19772E-04
6	2.03296E+00	2.28542E-02	9.01644E-03	3.05908E-03	9.40209E-04
7	1.73436E+00	2.11797E-02	7.95318E-03	2.73312E-03	1.12374E-03
8	1.50338E+00	1.96952E-02	7.86075E-03	2.71701E-03	1.59068E-03
9	1.31633E+00	2.08602E-02	8.19987E-03	2.84349E-03	2.44292E-03
10	1.07666E+00	2.12941E-02	8.42049E-03	2.92319E-03	3.74183E-03
11	1.03064E+00	2.57400E-02	8.91841E-03	3.09816E-03	4.94921E-03
12	6.87440E-01	3.47279E-02	1.03535E-02	3.59761E-03	6.83016E-03
13	4.54698E-01	6.71750E-02	1.47375E-02	5.12256E-03	9.63890E-03
14	8.75644E-01	3.18100E-02	1.87493E-02	6.51926E-03	1.33006E-02
15	8.88060E-01	3.90790E-02	3.14526E-02	1.09358E-02	1.75153E-02
16	6.75592E-01	5.11162E-02	4.46166E-02	1.55079E-02	2.45013E-02
17	7.33804E-01	6.23752E-02	6.41401E-02	2.22910E-02	3.13759E-02
18	7.02411E-01	8.68881E-02	1.32839E-01	4.61478E-02	4.07399E-02

TABLE 16 Comparison of 18-Group Macroscopic Cross-Sections  
of Central Blanket obtained by Different Cell Models (ECS-1 & 3)

ECS-1

Group	D	$\Sigma_r$	$v\Sigma_f$	$\Sigma_f$	$\Sigma_c$
1	3.82189E+00	6.43166E-02	4.01363E-02	1.16165E-02	3.32167E-03
2	3.34301E+00	6.35231E-02	2.18095E-02	7.19593E-03	1.87320E-03
3	3.12064E+00	5.42448E-02	1.92147E-02	6.98274E-03	4.22303E-04
4	2.56359E+00	5.91062E-02	1.43157E-02	5.51245E-03	6.57428E-04
5	1.86999E+00	5.24769E-02	1.15926E-03	4.62779E-04	1.45073E-03
6	1.75899E+00	2.83570E-02	1.18812E-04	4.80804E-05	1.50935E-03
7	1.38986E+00	2.51674E-02	9.38178E-05	3.82345E-05	1.60718E-03
8	1.24387E+00	2.38712E-02	1.07025E-04	4.38530E-05	2.26503E-03
9	1.11565E+00	2.45490E-02	1.25470E-04	5.15588E-05	3.89846E-03
10	9.98348E-01	2.34560E-02	1.47652E-04	6.07437E-05	5.64678E-03
11	9.81338E-01	2.52079E-02	1.81463E-04	7.46587E-05	6.82128E-03
12	7.86043E-01	2.98355E-02	2.42905E-04	1.00027E-04	7.86800E-03
13	5.74412E-01	4.72170E-02	3.46392E-04	1.42651E-04	8.70678E-03
14	9.22757E-01	2.52263E-02	5.08537E-04	2.09434E-04	1.02200E-02
15	9.68845E-01	2.44446E-02	7.63436E-04	3.14720E-04	1.13865E-02
16	7.72852E-01	2.63001E-02	1.02498E-03	4.22019E-04	1.25249E-02
17	8.37035E-01	2.87089E-02	1.48715E-03	6.12308E-04	1.81504E-02
18	9.23678E-01	2.13288E-02	2.18766E-03	9.00827E-04	2.04273E-02

ECS-3

Group	D	$\Sigma_r$	$v\Sigma_f$	$\Sigma_f$	$\Sigma_c$
1	3.79477E+00	6.47766E-02	3.96584E-02	1.14786E-02	3.39162E-03
2	3.31722E+00	6.39649E-02	2.15635E-02	7.11453E-03	1.89918E-03
3	3.10085E+00	5.43793E-02	1.90451E-02	6.92141E-03	4.27928E-04
4	2.55133E+00	5.91898E-02	1.41887E-02	5.46361E-03	6.54962E-04
5	1.86056E+00	5.27378E-02	1.15178E-03	4.59791E-04	1.44402E-03
6	1.75948E+00	2.84940E-02	1.18621E-04	4.80030E-05	1.50746E-03
7	1.39382E+00	2.50919E-02	9.37828E-05	3.82203E-05	1.60520E-03
8	1.24886E+00	2.38609E-02	1.07022E-04	4.38515E-05	2.25990E-03
9	1.12299E+00	2.45167E-02	1.25485E-04	5.15650E-05	3.89046E-03
10	1.01247E+00	2.34219E-02	1.47663E-04	6.07485E-05	5.64615E-03
11	9.82664E-01	2.52220E-02	1.81446E-04	7.46518E-05	6.83953E-03
12	7.87792E-01	2.98463E-02	2.42888E-04	1.00020E-04	7.90784E-03
13	5.76584E-01	4.72885E-02	3.46365E-04	1.42640E-04	8.83560E-03
14	9.20545E-01	2.52342E-02	5.08830E-04	2.09555E-04	1.01973E-02
15	9.69652E-01	2.46053E-02	7.62700E-04	3.14419E-04	1.16322E-02
16	7.81010E-01	2.62860E-02	1.02451E-03	4.21826E-04	1.26105E-02
17	8.40406E-01	2.89665E-02	1.48637E-03	6.11987E-04	1.84959E-02
18	9.34288E-01	2.17013E-02	2.19017E-03	9.01861E-04	2.07987E-02

TABLE 17 Effect of Cell Models on 18-Group Effective  
Fission and Capture Cross-sections  
:  $(ECS-3 - ECS-1)/ECS-1 (\%)$

Group	Core Fuel Ring-1		Central Blanket	
	Fission	Capture	Fission	Capture
1	4.72	-1.52	-1.19	2.11
2	4.78	-0.96	-1.13	1.39
3	3.98	-0.11	-0.88	1.32
4	4.20	2.68	-0.89	-0.37
5	3.07	2.52	-0.61	0.47
6	0.84	0.67	-0.15	-0.12
7	0.05	0.29	-0.04	-0.12
8	-0.08	0.60	-0.00	-0.23
9	-0.16	0.49	0.01	-0.21
10	-0.18	0.20	0.01	-0.01
11	-0.06	-0.16	-0.02	0.26
12	-0.09	-0.30	-0.01	0.51
13	-0.80	-0.77	-0.01	1.48
14	0.46	1.97	0.06	-0.22
15	0.77	0.08	-0.09	2.16
16	0.03	0.34	-0.05	0.69
17	0.37	0.03	-0.06	1.88
18	-0.28	-0.34	0.02	1.62

TABLE 18 Effect of cell Models on  $K_{\text{eff}}$  of ZPPR-7A  
Obtained by First-order Perturbation Theory

Region	$K_{\text{eff}}(\text{ECS-3}) - K_{\text{eff}}(\text{ECS-1})$			$K_{\text{eff}}(\text{ECS-4}) - K_{\text{eff}}(\text{ECS-1})$			Sum
	Non-Leak	Leakage	Sum	Non-Leak	Leakage		
Central Blanket	-4.41 -5	2.61 -6	-4.14 -5	-2.02 -5	1.83 -6	1.84 -5	
Fuel Ring-1	4.14 -4	2.69 -5	4.41 -4	2.65 -4	2.55 -5	2.90 -4	
Inner Blanket-1	-1.45 -4	2.56 -6	-1.43 -4	-7.65 -5	1.12 -6	-7.54 -5	
Fuel Ring-2	9.58 -4	6.03 -5	1.02 -3	6.21 -4	5.70 -5	6.78 -4	
Inner Blanket-2	-2.35 -4	4.24 -6	-2.31 -4	-1.27 -4	2.05 -6	-1.25 -4	
Fuel Ring-3	1.40 -3	9.16 -5	1.50 -3	9.24 -4	8.69 -5	1.01 -3	
Inner Blanket-3	-2.21 -4	-3.28 -7	-2.21 -4	-1.30 -4	2.58 -6	-1.32 -4	
Fuel Ring-4	2.24 -3	3.43 -4	2.58 -3	1.50 -3	3.27 -4	1.83 -3	
Outer Radial Blanket	-1.32 -4	-8.48 -6	-1.41 -4	-6.42 -5	-2.41 -5	-8.83 -5	
Sum	4.23 -3	5.22 -4	4.76 -3	2.89 -3	4.80 -4	3.37 -3	

(Unit ;  $\Delta k/kk$ )

TABLE 19 Energy Group Contribution of Different Cell Models (ECS-1 and ECS-3) on  $K_{\text{eff}}$  in Fuel Ring-1 and General Blanket of ZPPR-7A.  
 - Unperturbed ; ECS-1, Perturbed ; ECS-3 -

Fuel Ring-1

GROUP	FISSION	CAPTURE	SCATTERING	LEAKAGE	(DEL K/K)IG
1	2.64729E-05	1.93013E-06	3.28620E-06	1.75706E-07	3.18649E-05
2	7.57080E-05	1.83234E-06	-5.64253E-06	5.68340E-07	7.24661E-05
3	1.33322E-04	1.35323E-07	-1.85219E-05	1.12958E-06	1.16065E-04
4	1.67523E-04	-4.12164E-06	-2.37144E-05	2.58000E-06	1.42267E-04
5	1.01613E-04	-7.57309E-06	-5.31808E-06	1.81445E-06	9.05364E-05
6	5.63635E-05	-5.69398E-06	8.19973E-07	3.94736E-06	5.54368E-05
7	4.12464E-06	-3.40235E-06	-1.08786E-05	6.09364E-06	-4.06265E-06
8	-6.69543E-06	-9.64877E-06	-4.41872E-06	5.10643E-06	-1.56565E-05
9	-1.13761E-05	-9.37996E-06	-3.17459E-06	4.25815E-06	-1.96725E-05
10	-1.03669E-05	-4.41040E-06	-6.92451E-08	2.55749E-06	-1.22891E-05
11	-2.46133E-06	3.11425E-06	6.60052E-07	6.16379E-08	1.37462E-06
12	-2.47067E-06	4.78697E-06	7.33662E-07	-7.79896E-08	2.97198E-06
13	-1.16848E-05	7.35214E-06	1.18876E-07	-3.51846E-07	-4.56562E-06
14	1.43268E-05	-4.26281E-05	-2.54508E-06	6.83023E-10	-3.08456E-05
15	1.51444E-05	-1.08645E-06	-1.14278E-08	-1.07346E-07	1.39392E-05
16	2.35022E-07	-2.05535E-06	4.28008E-08	-4.94454E-07	-2.27198E-06
17	1.20282E-06	-8.41031E-08	-2.71826E-08	-1.45817E-07	9.45717E-07
18	-3.55031E-07	3.16931E-07	2.72645E-10	-1.80320E-07	-2.18147E-07
SUM	5.50624E-04	-7.06160E-05	-6.86597E-05	2.69356E-05	4.38284E-04

Central Blanket

GROUP	FISSION	CAPTURE	SCATTERING	LEAKAGE	(DEL K/K)IG
1	-2.11762E-06	-7.78697E-07	-1.58008E-06	1.68458E-07	-4.30793E-06
2	-4.71794E-06	-9.74889E-07	-1.51662E-06	7.44306E-07	-6.46514E-06
3	-7.70548E-06	-4.93287E-07	-1.02791E-06	1.40366E-06	-7.82302E-06
4	-7.66611E-06	2.46423E-07	-4.07239E-07	1.39692E-06	-6.43000E-06
5	-6.10853E-07	7.76821E-07	-1.18107E-06	1.45240E-06	4.37296E-07
6	-4.74861E-08	6.14586E-07	-3.16341E-06	-2.02947E-07	-2.79926E-06
7	-1.28057E-08	8.09770E-07	2.76585E-06	-1.01846E-06	2.54435E-06
8	-2.35388E-09	2.15638E-06	9.01474E-07	-9.93281E-07	2.06221E-06
9	6.12081E-09	2.59436E-06	1.01961E-06	-6.95536E-07	2.92455E-06
10	3.90396E-09	1.39544E-07	3.89230E-07	-4.77950E-07	5.47275E-08
11	-6.75902E-09	-2.85499E-06	5.36212E-08	2.53989E-08	-2.78273E-06
12	-3.39709E-09	-3.65220E-06	-7.92437E-08	6.15329E-08	-3.67331E-06
13	-2.19716E-09	-5.34969E-06	-5.41808E-08	8.67971E-08	-5.31927E-06
14	2.70031E-08	1.42339E-06	3.12225E-07	-3.68012E-08	1.72582E-06
15	-3.17798E-08	-8.34840E-06	3.56374E-08	4.37559E-08	-8.30078E-06
16	-9.82404E-09	-1.15177E-06	-2.43391E-08	3.78748E-07	-8.07180E-07
17	-5.89229E-09	-1.72066E-06	-1.03491E-07	9.83164E-08	-1.73172E-06
18	1.16176E-09	-6.74657E-07	7.23841E-10	1.75365E-07	-4.97406E-07
SUM	-2.29022E-05	-1.72380E-05	-3.65922E-06	2.61068E-06	-4.11887E-05

TABLE 20 Effect of Cell Model on Na-Void Reactivity Worth  
calculated by R-Z Diffusion Approximation

Cross-section (Cell Model)	$K_o$	Na-voided from Fuel Ring-1		Na-voided from Fuel Ring-1&2	
		$K_1$	Worth	$K_1$	Worth
ECS-1	0.99043	0.99188	0.148	0.99501	0.465
ECS-3	0.99512	0.99636	0.125	0.99899	0.389
ECS-4	0.99375	0.99498	0.124	0.99758	0.386

$K_o$  and  $K_1$  : K-eff's of non-voided and voided cores.  
Worth : Na-void reactivity worth,  $\% \Delta K / K_o K_1$ .

TABLE 22 Energy Group Dependence of Fission Term  
of Na-Void Reactivity Worth in Fuel Ring-1  
( $\Delta K / K$ )

Group	ECS-1	ECS-3
1	-8.53774E-06	-1.35807E-05
2	-2.12854E-05	-3.57314E-05
3	-3.15803E-05	-6.37062E-05
4	-1.25454E-05	-5.13974E-05
5	-1.92712E-05	-4.87049E-05
6	1.73431E-05	-3.65676E-05
7	1.02925E-05	-1.86777E-05
8	1.74487E-05	3.43702E-06
9	1.44926E-05	6.55788E-06
10	1.54987E-05	5.52840E-06
11	1.25743E-05	6.19772E-06
12	-2.08689E-06	-2.54458E-06
13	5.61576E-05	6.77100E-05
14	3.46289E-05	3.10436E-05
15	3.70746E-06	2.45257E-06
16	2.09919E-06	6.97505E-07
17	1.71668E-06	7.23240E-07
18	3.18309E-06	1.13872E-06
SUM	9.38358E-05	-1.45423E-04

TABLE 21 Effect of Cell Model on Na-Void Reactivity Worth calculated by First-Order Perturbation Theory in R-Z Geometry (  $\Delta K/K$  )

Perturbed Region	Fission	Capture	Scattering	Radial Leakage	Axial Leakage	Total
<u>Na-void from Fuel Ring-1</u>						
<u>Cross-section : ECS-1</u>						
Central Blanket	0.00005	0.00054	0.00340	-0.00011	-0.00003	0.00385
Fuel Ring-1	0.00926	0.01588	0.13128	-0.00378	-0.02353	0.12910
Inner Blanket-1	0.00008	0.00123	0.00442	-0.00004	-0.00005	0.00564
Sum	0.00938	0.01765	0.13909	-0.00393	-0.02360	0.13859
<u>Cross-section : ECS-3</u>						
Central Blanket	-0.00001	0.00162	0.00323	-0.00011	-0.00003	0.00469
Fuel Ring-1	-0.01445	0.01584	0.12958	-0.00362	-0.02228	0.10507
Inner Blanket-1	-0.00008	0.00439	0.00422	-0.00007	-0.00007	0.00839
Sum	-0.01454	0.02184	0.13703	-0.00379	-0.02239	0.11815
<u>Na-void from Fuel Ring-1&amp;2</u>						
<u>Cross-section : ECS-1</u>						
Central Blanket	0.00005	0.00059	0.00354	-0.00011	-0.00003	0.00404
Fuel Ring-1	0.00759	0.01664	0.13115	-0.00379	-0.02354	0.12805
Inner Blanket-1	0.00020	0.00239	0.00936	-0.00011	-0.00011	0.01174
Fuel Ring-2	0.01629	0.03537	0.28287	-0.00525	-0.05425	0.27502
Inner Blanket-2	0.00015	0.00221	0.00824	-0.00007	-0.00009	0.01043
Sum	0.02427	0.05720	0.43515	-0.00933	-0.07802	0.42927
<u>Cross-section : ECS-3</u>						
Central Blanket	-0.00001	0.00166	0.00337	-0.00011	-0.00003	0.00487
Fuel Ring-1	-0.01613	0.01667	0.12945	-0.00363	-0.02229	0.10408
Inner Blanket-1	-0.00002	0.00537	0.00906	-0.00013	-0.00013	0.01418
Fuel Ring-2	-0.03747	0.03557	0.28098	-0.00498	-0.05161	0.22248
Inner Blanket-2	-0.00012	0.00723	0.00784	-0.00010	-0.00014	0.01471
Sum	-0.05370	0.06650	0.43069	-0.00895	-0.07421	0.36033

TABLE 23 Effect of Transverse Buckling used to Cell Calculation on  $K_{\text{eff}}$  of ZPPR-7A

	Critical $B^2$	$B^2 = 0.0$	Difference
Cell model-1	0.99043	0.98776	-0.272% $\Delta k$
Cell model-2	0.99512	0.99458	-0.055% $\Delta k$
Cell model-3	0.99375	0.99323	-0.053% $\Delta k$

TABLE 24 Effect of Transverse Buckling used to Cell Calculation on Na-Void Reactivity Effects of ZPPR-7A

	Buckling	Na-void from Fuel Ring-1	Na-void from Fuel Ring 1&2
Cell model-1	Critical $B^2$	0.148	0.465
	$B^2 = 0.0$	0.123	0.383
Cell model-2	Critical $B^2$	0.125	0.389
	$B^2 = 0.0$	0.124	0.385
Cell model-3	Critical $B^2$	0.124	0.386
	$B^2 = 0.0$	0.121	0.380

Unit : %  $\Delta k/kk$ ,

TABLE 25 Effect of Cell Model on Na-Void Reactivity Effects of ZPPR-7A

	Na-void from Fuel Ring-1	Na-void from Fuel Ring 1&2
Cell model-1*	0.133	0.412
Cell model-2	0.125	0.389
Cell model-3	0.124	0.386

Unit : %  $\Delta k/kk$ ,

\* Buckling used to cell calculation,  $B^2$  is  $4.65 \cdot 10^{-4}$ .

TABLE 26 Energy Group Collapsing, Neutron Streaming, Three Dimensional and Transport Effects on  $K_{eff}$  of ZPPR-7A

(1) Group Collapsing Effect ; + 0.024 %Δk/kk'	
R-Z 70 group isotopic diffusion cal. (ECS-1)	; $K_{eff} = 0.99067$
R-Z 18 group isotopic diffusion cal. (ECS-1)	; $K_{eff} = 0.99043$
(2) Neutron Streaming Effect : - 0.341 %Δk/kk'	
R-Z 18 group unisotropic diffusion cal. (ECS-2)	; $K_{eff} = 0.98710$
R-Z 18 group isotopic diffusion cal. (ECS-1)	; $K_{eff} = 0.99043$
(3) Three Dimensional Diffusion Effect ; + 0.199 %Δk/kk'	
X-Y-Z 18 group unisotropic diffusion cal. (ECS-2)	; $K_{eff} = 0.98904$
R-Z 18 group unisotropic diffusion cal. (ECS-2)	; $K_{eff} = 0.98710$
(4) Transport Theory Effect ; + 1.068 %Δk/kk'	
R-Z 18 group $S_4-P_0$ cal. (ECS-1)	; $K_{eff} = 1.00102$
R-Z 18 group isotopic diffusion cal. (ECS-1)	; $K_{eff} = 0.99043$

TABLE 27 Na-Void Reactivity Effects Calculated by Various Methods  
(Unit : % Δk/kk')

Calculation Method	Na-void from Fuel Ring 1	Na-void from Fuel Ring 1&2
R-Z 18 group isotropic diffusion cal.(ECS-1)	0.148	0.465
R-Z 18 group unisotropic diffusion cal.(ECS-2)	0.140	0.440
R-Z 70 group isotropic diffusion cal.(ECS-1)	0.143	0.454
X-Y-Z 18 group unisotropic diffusion cal.(ECS-2)	0.138	0.432
R-Z 18 group $S_4-P_0$ transport cal. (ECS-1)	0.155	0.492

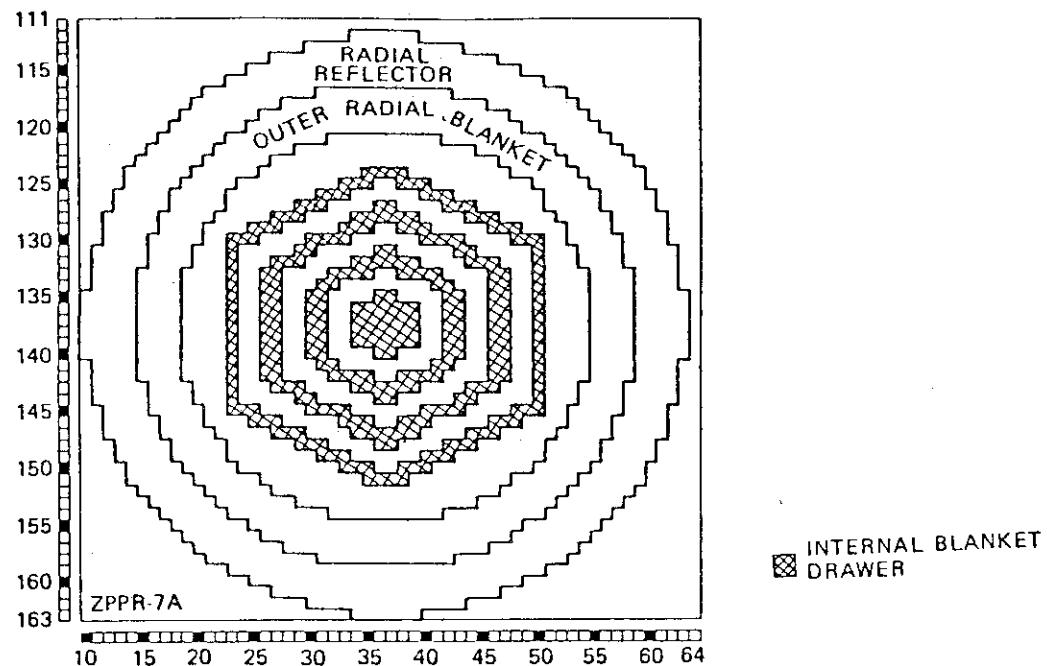
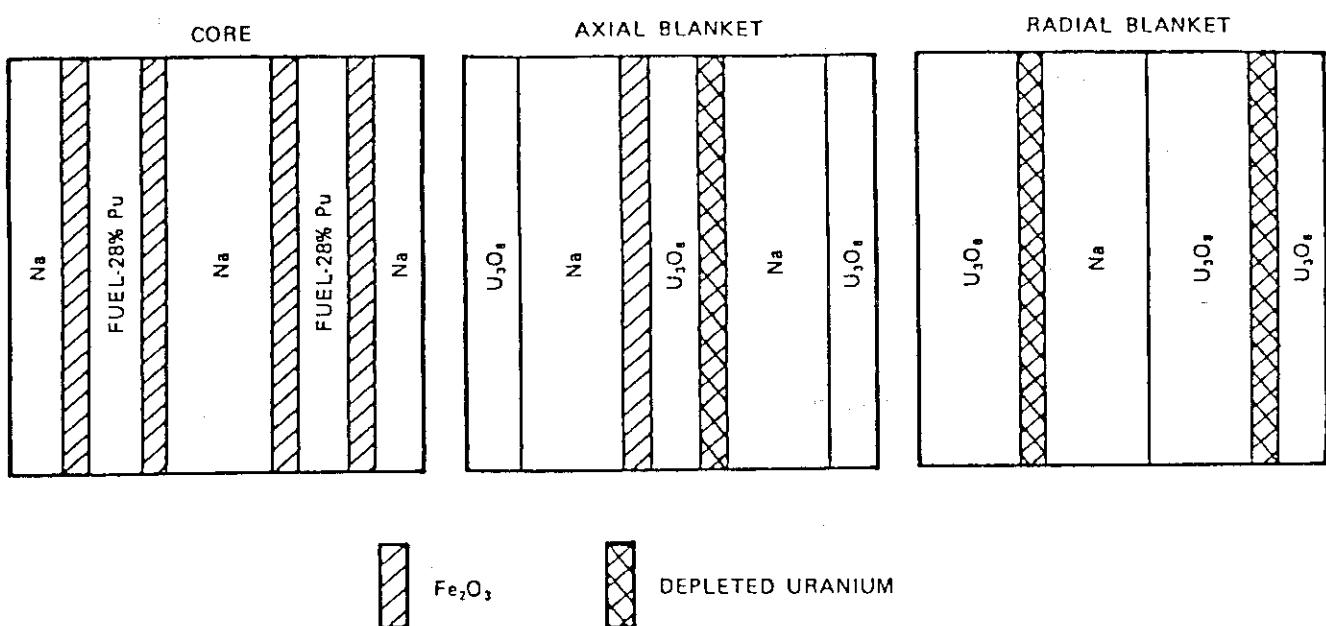
TABLE 28 Various Effects on Na-Void Reactivity Effects of ZPPR-7A  
calculated by Standard Method

	Na-void from Fuel Ring 1	Na-void from Fuel Ring 1&2
Group collapsing effect	-3.38 %	-2.37 %
Neutron streaming effect	-5.40	-5.38
Three dimensional diffusion effect	-1.43	-1.82
Transport effect	+4.73	+5.81
	-5.48 %	-3.76 %

TABLE 29 Comparison of Calculated and Measured  $K_{eff}$  and Na-Void  
Reactivity Effects of ZPPR-7A

$K_{eff}$	Na-void reactivity effect	
	Fuel Ring 1	Fuel Ring 1&2
<u>Experiment</u>	1.0003	$0.092 \pm 0.001^*$
<u>Standard Cal.</u>	0.99043	0.148 <sup>*</sup>
<u>Correction</u>		
- Cell model	1.0034	0.838
- Neutron streaming	0.9976	0.946
- Transport	1.0107	1.047
- 3 dimensional diffusion	1.0020	0.986
- Group collapsing	1.0002	0.966
- total correction	1.0139	0.791
<u>Corrected value</u>	1.0042	0.116 <sup>*</sup>
<u>C/E</u>	1.0039	1.27
		0.370 <sup>*</sup>
		1.38

\* %  $\Delta k/kk'$

Fig. 1 Configuration of ZPPR-7A<sup>(7)</sup>Fig. 2 Plate Arrangements in Major Drawers of ZPPR-7A<sup>(7)</sup>

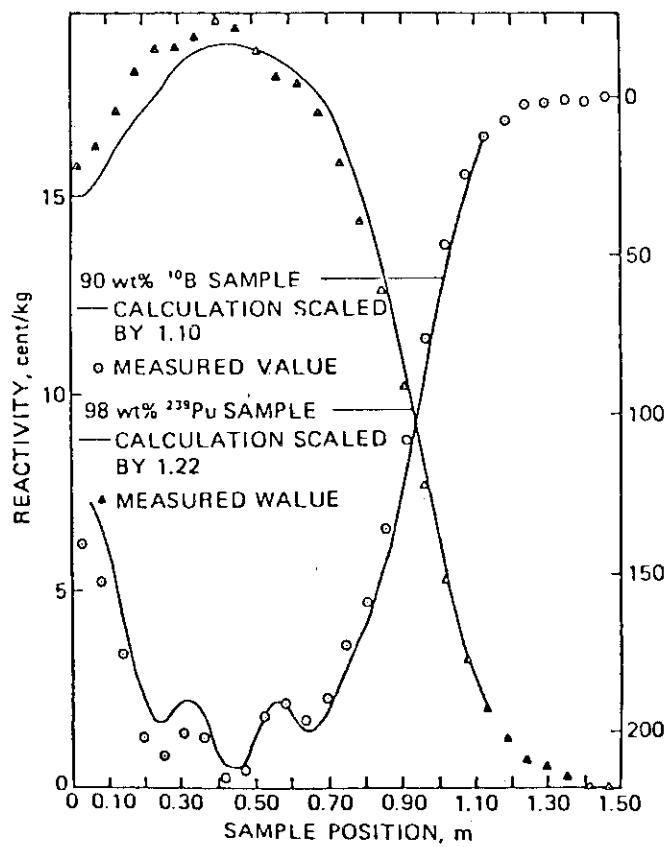


Fig. 3 The specific worths of  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{10}\text{B}$   
in ZPPR-7A<sup>(7)</sup>

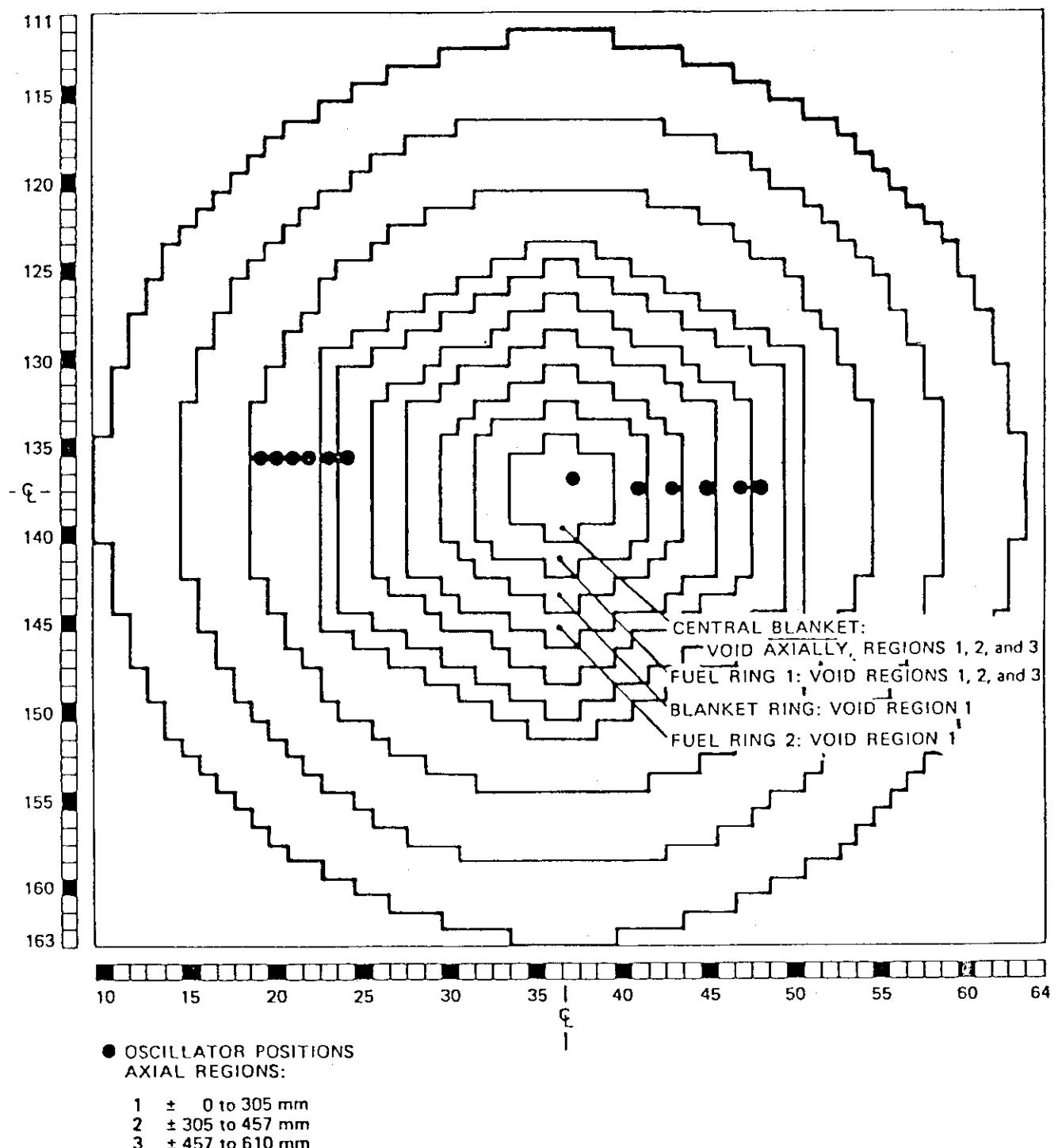
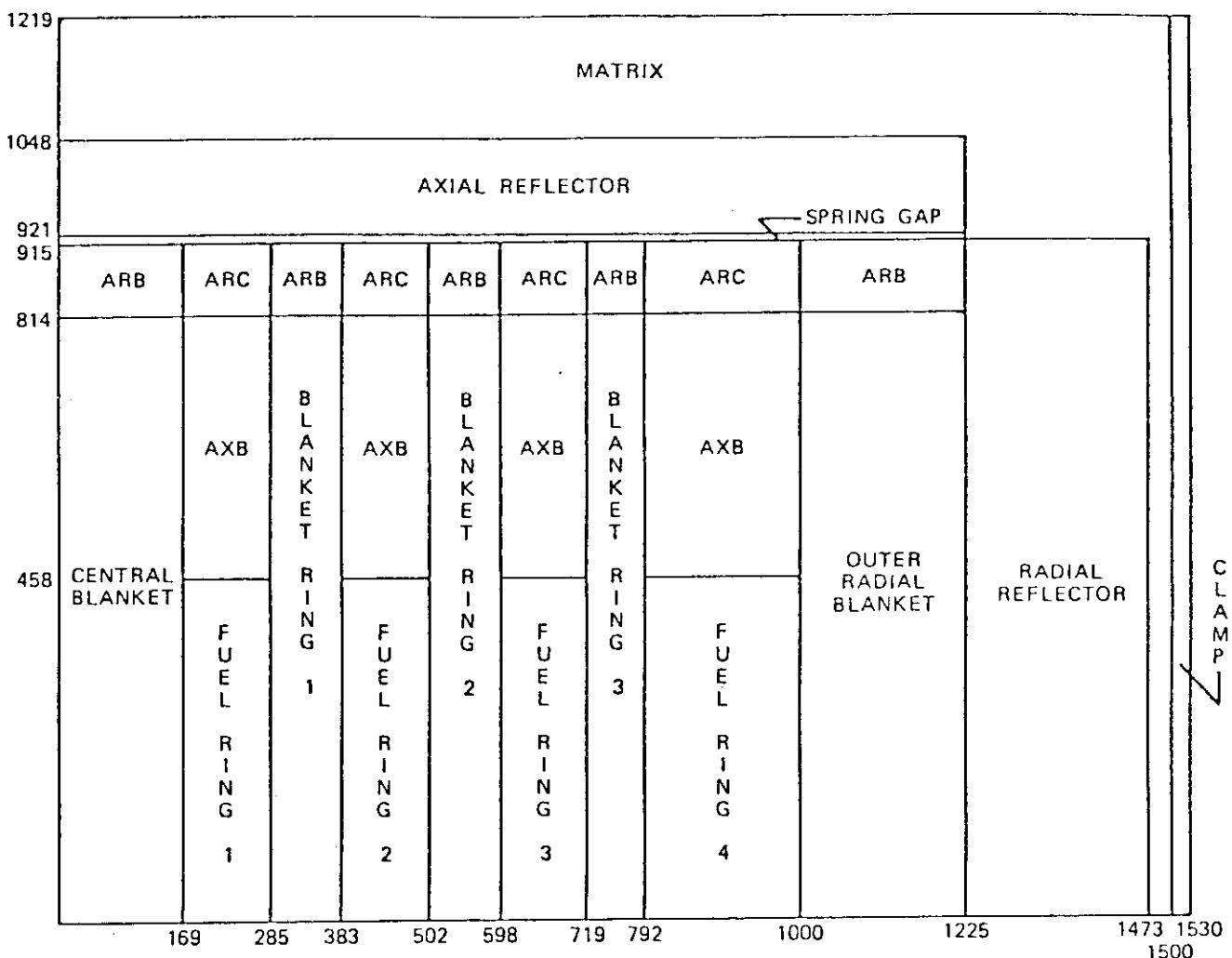


Fig. 4 Locations of the sodium void experiments in ZPPR-7A. (7)

		Core		Axial Blanket			
		MATCC	NA4C	NA2AB	U308-4AB	CAN	MAT
		0.26035			0.22225		0.22225
			0.55880		0.63500		0.63500
				CANAB	0.03810		0.31750
					1.19380		
						1.27000	
FEOCC		0.39370			0.03810		
			0.55880		0.31750		
				DU8AB		CAN	0.03810
					0.63500		
						1.19380	
FEOCC		0.39370			0.35560		
			0.55880		1.19380		
				FEOCAB			
					0.63500		
						1.27000	
NA4C		0.55880			0.03810		
				CANAB			
					0.63500		
						0.31750	
MATCC		0.26035			0.22225		
				MATAB			
					0.22225		
		(cm)			(cm)		(cm)

Internal & Radial Blanket

Fig. 5 Modelled Material Arrangement for Core and Blanket of ZPPR-7A



AXB-AXIAL BLANKET  
 ARC-UPPER CORE REFLECTOR  
 ARB-UPPER BLANKET REFLECTOR

Fig. 6 A cylindrical model of ZPPR-7 (dimensions in millimeters).

□ ; 5.5245 cm x 5.5245 cm

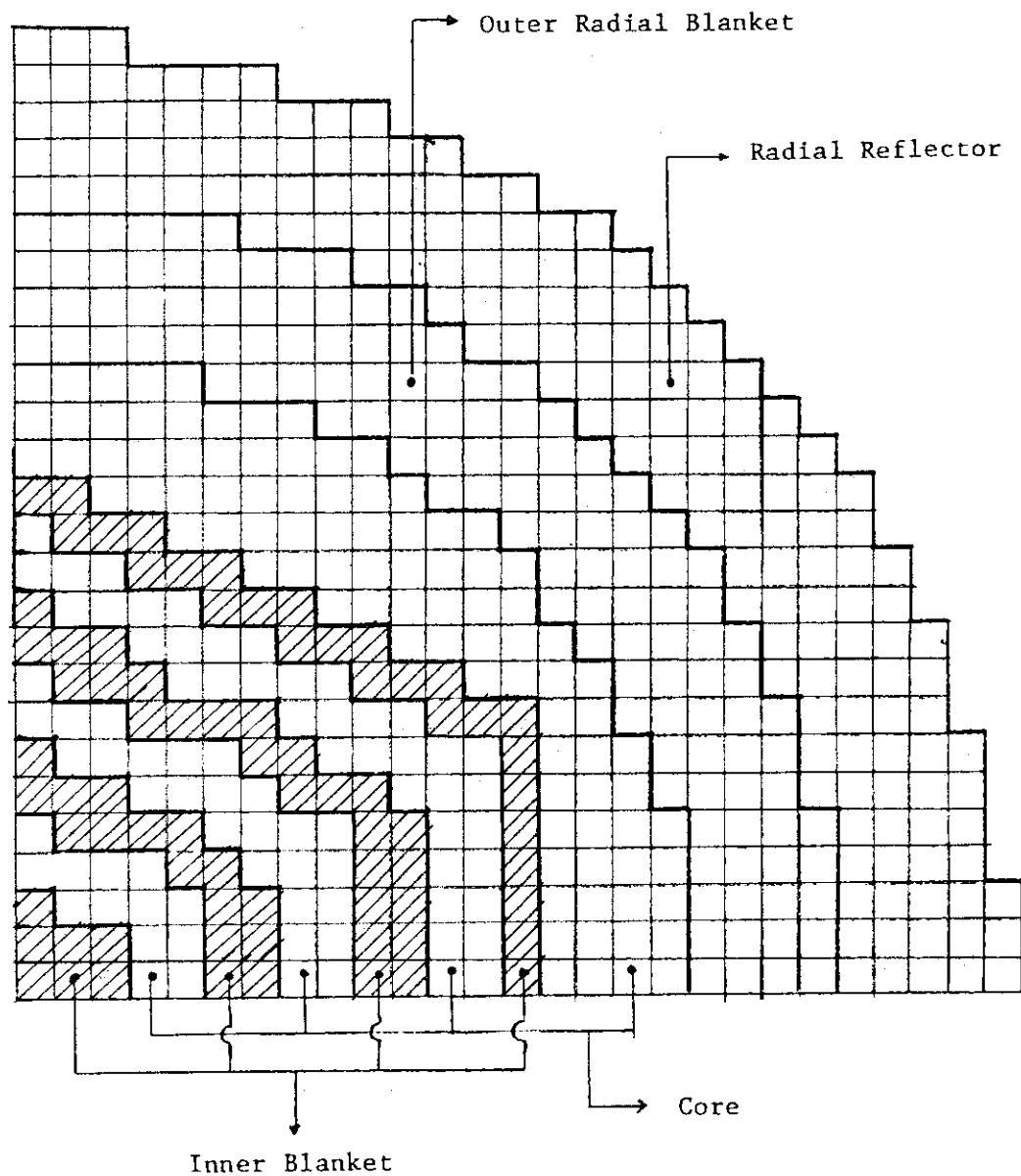


Fig. 7 Cross-Sectional View of ZPPR-7A

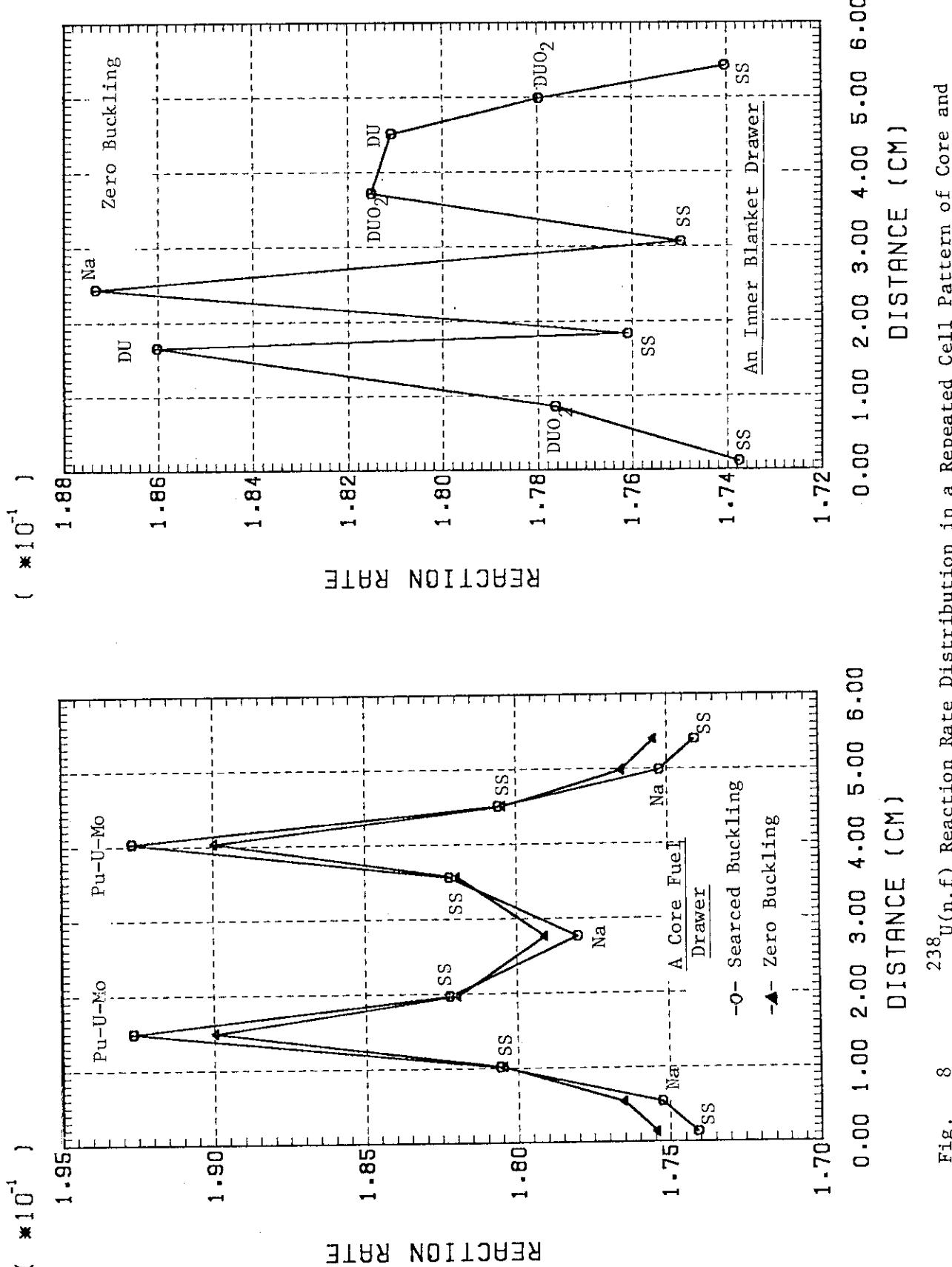


Fig. 8 U(n,f) Reaction Rate Distribution in a Repeated Cell Pattern of Core and Inner Blanket

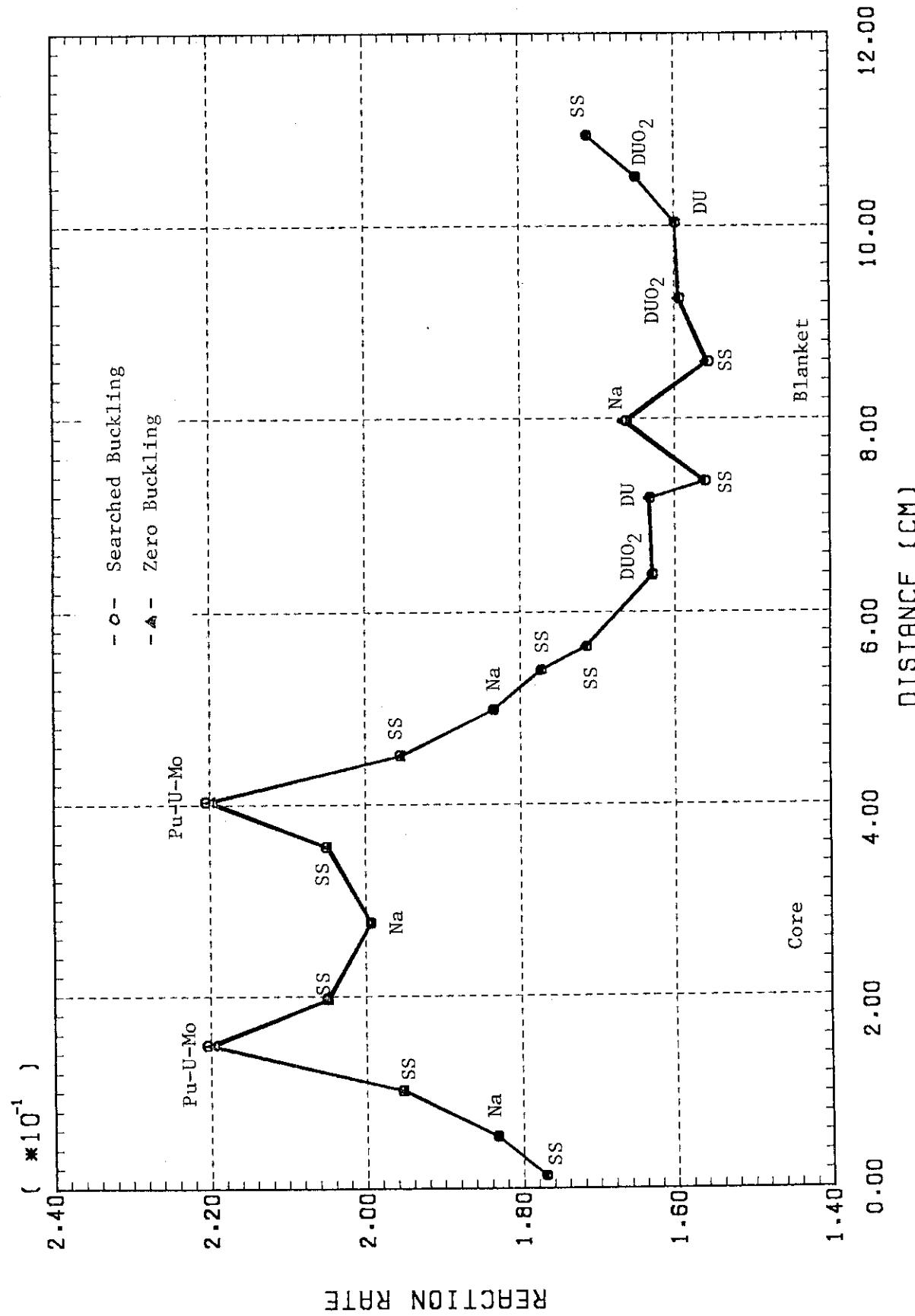


Fig. 9       $^{238}\text{U}(\text{n},\text{f})$  Reaction Rate Distribution in a Repeated Cell Pattern Composed of  
a Core Drawer Followed by an Inner Blanket Drawer

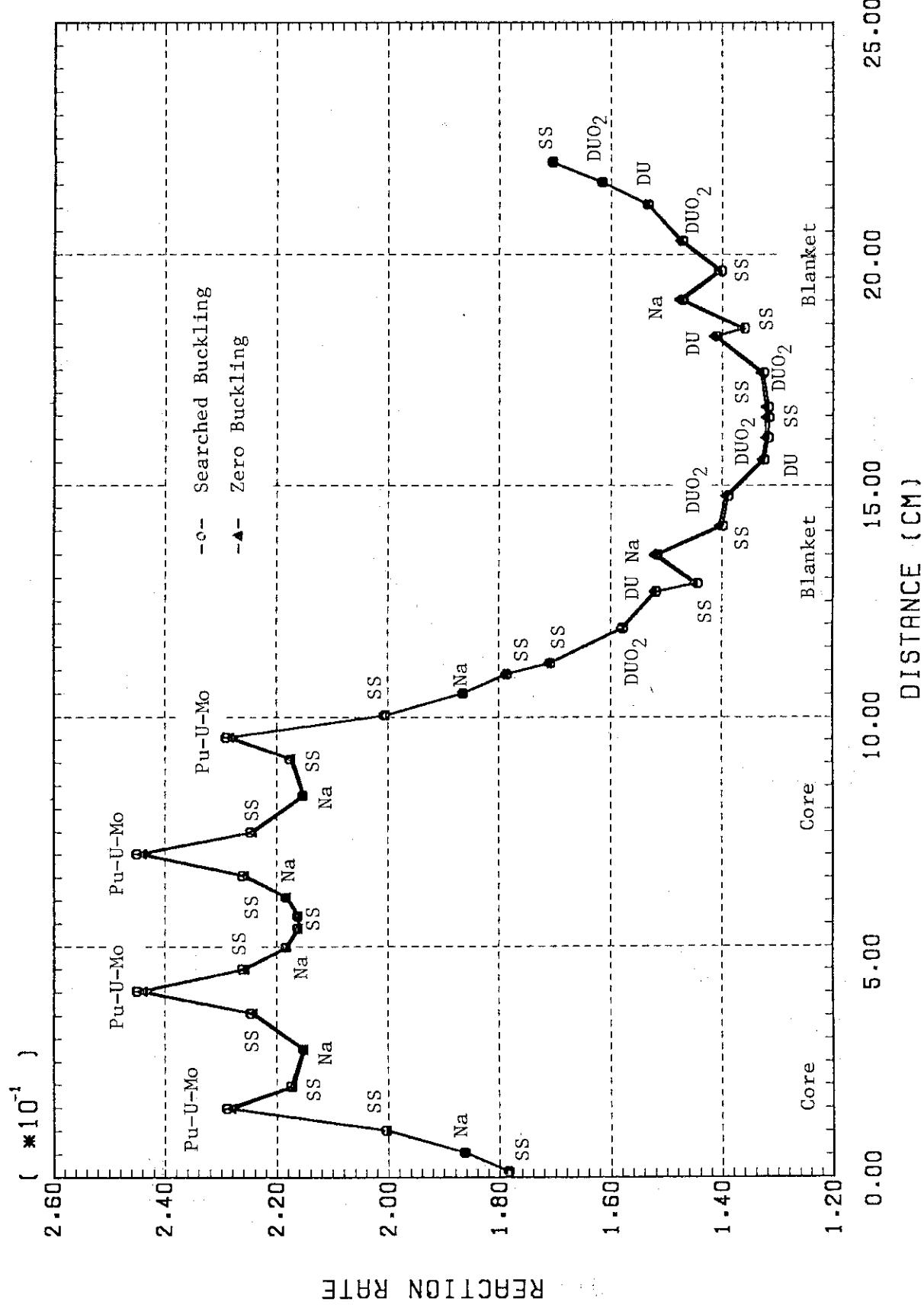


Fig. 10  $^{238}\text{U}(n,f)$  Reaction Rate Distribution in a Repeated Cell Pattern Composed of Two Core Drawers Followed by Two Inner Blanket Drawers

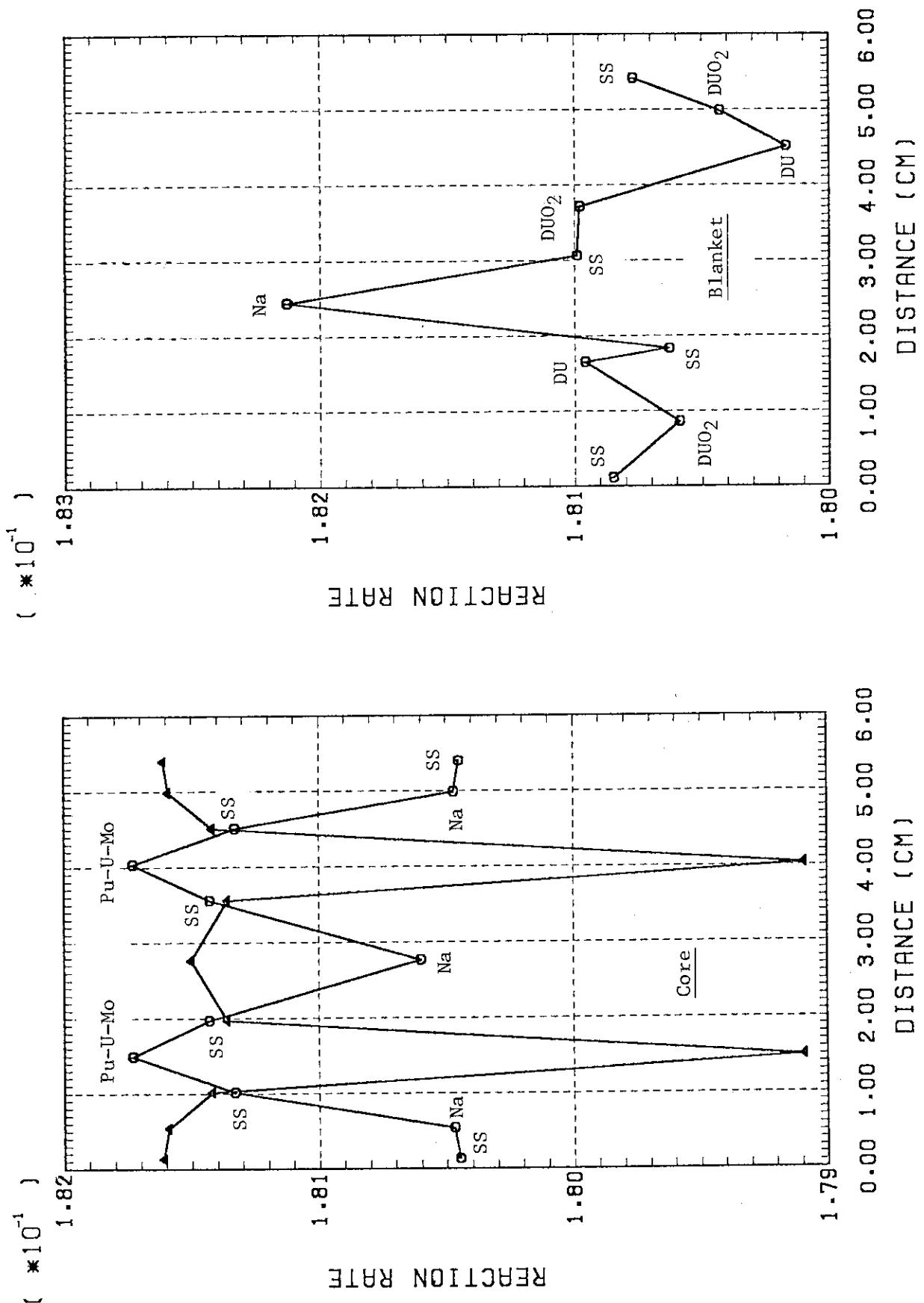


Fig. 11  $^{239}\text{Pu}(n,f)$  Reaction Rate Distribution in a Repeated Cell Pattern of Core or Inner Blanket

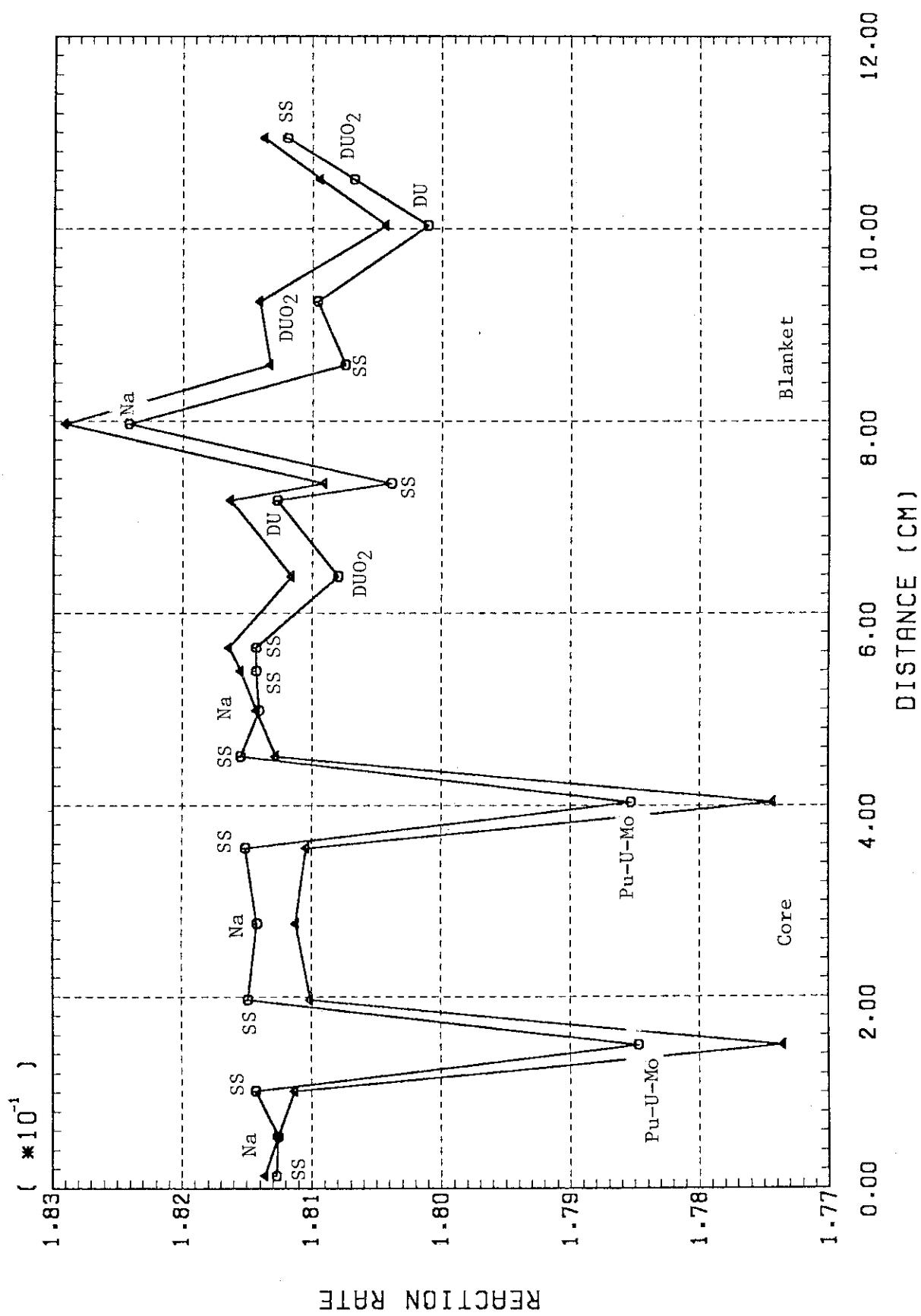
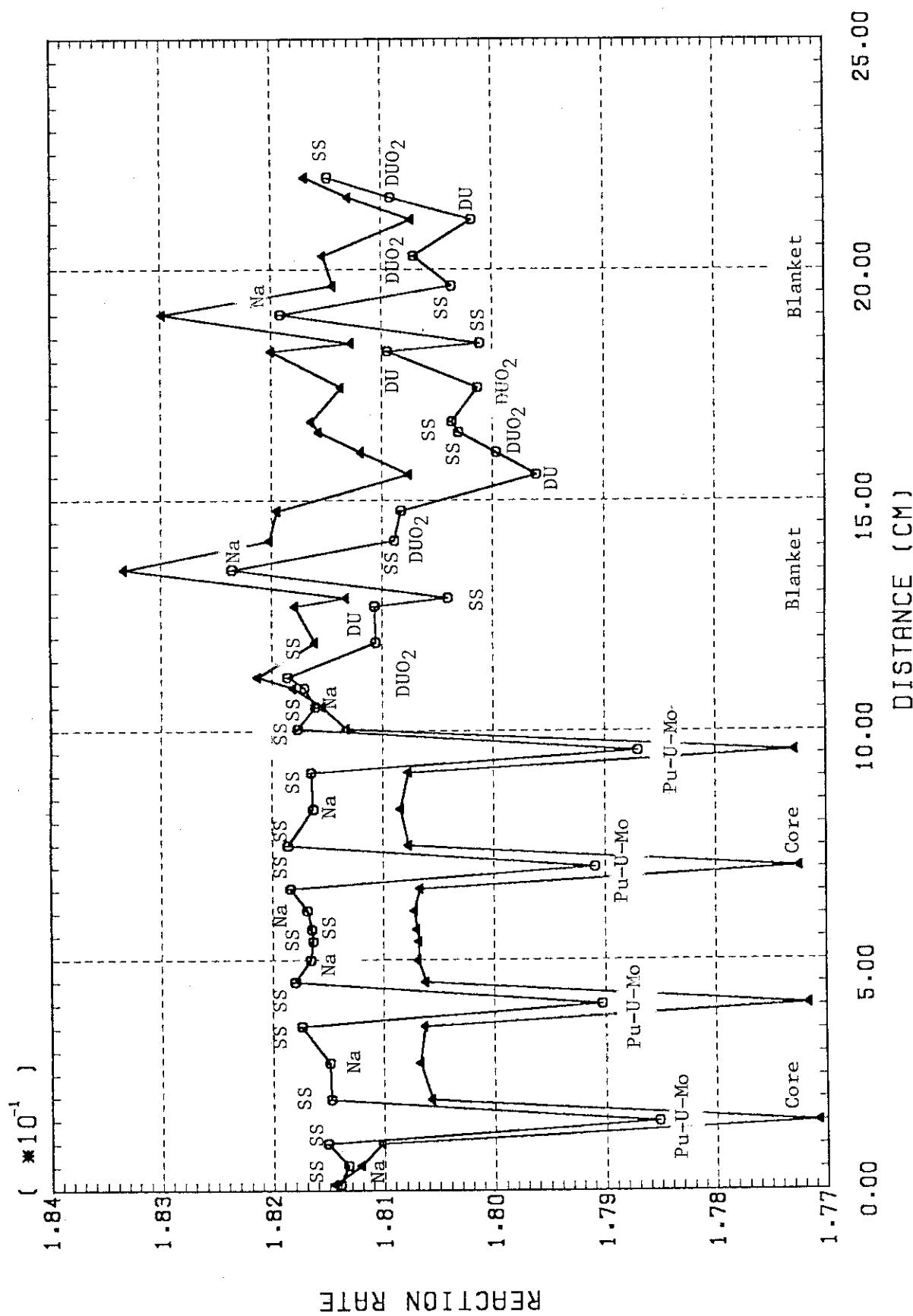


Fig. 12       $^{239}\text{Pu}(n, f)$  Reaction Rate Distribution in a Repeated Cell Pattern Composed of  
a Core Drawer Followed by an Inner Blanket Drawer



$^{239}\text{Pu}(n,f)$  Reaction Rate Distribution in a Repeated Cell Pattern Composed of Two Core Drawers Followed by Two Inner Blanket Drawers

Fig. 13

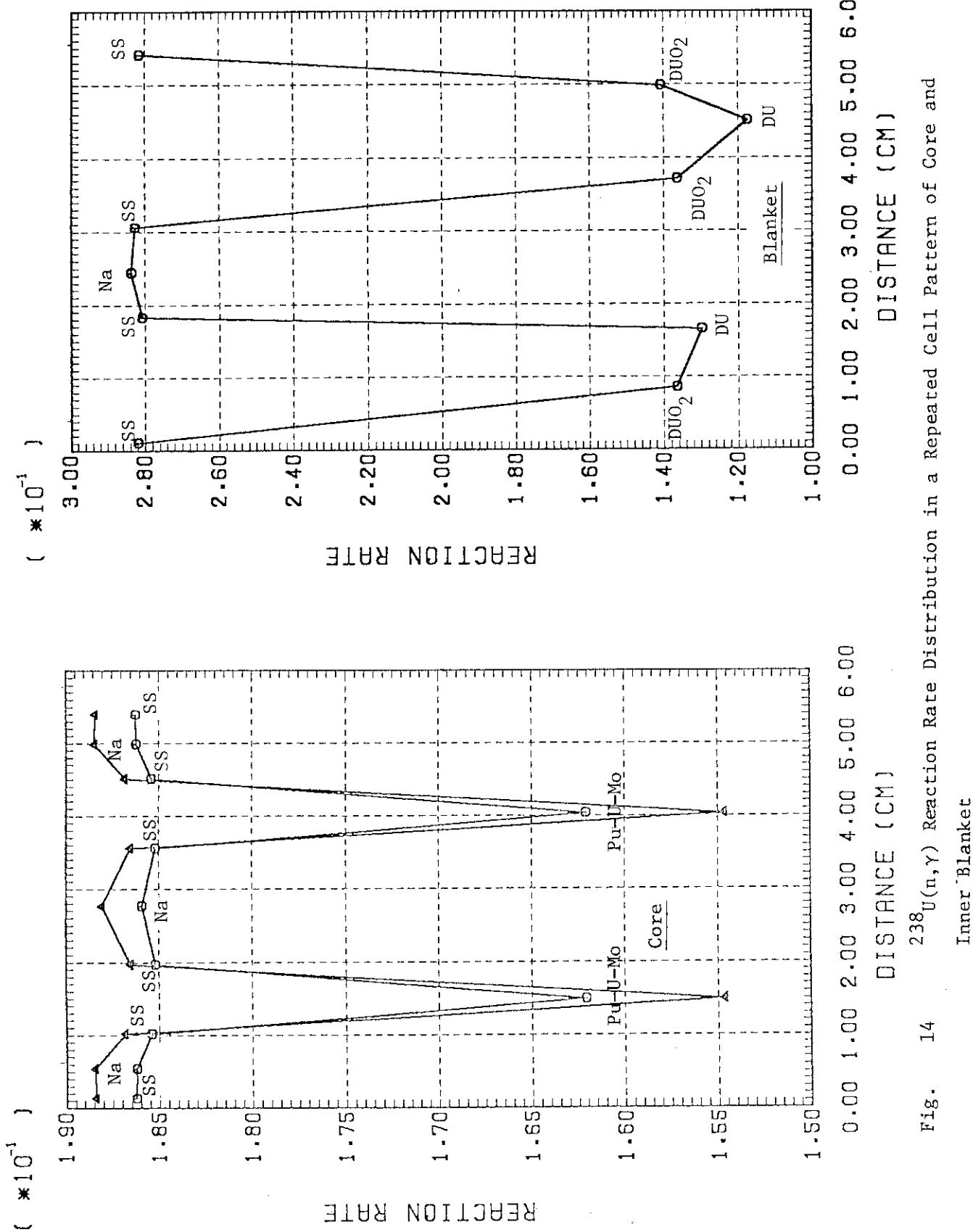


Fig. 14  $^{238}\text{U}(\text{n},\gamma)$  Reaction Rate Distribution in a Repeated Cell Pattern of Core and Inner Blanket

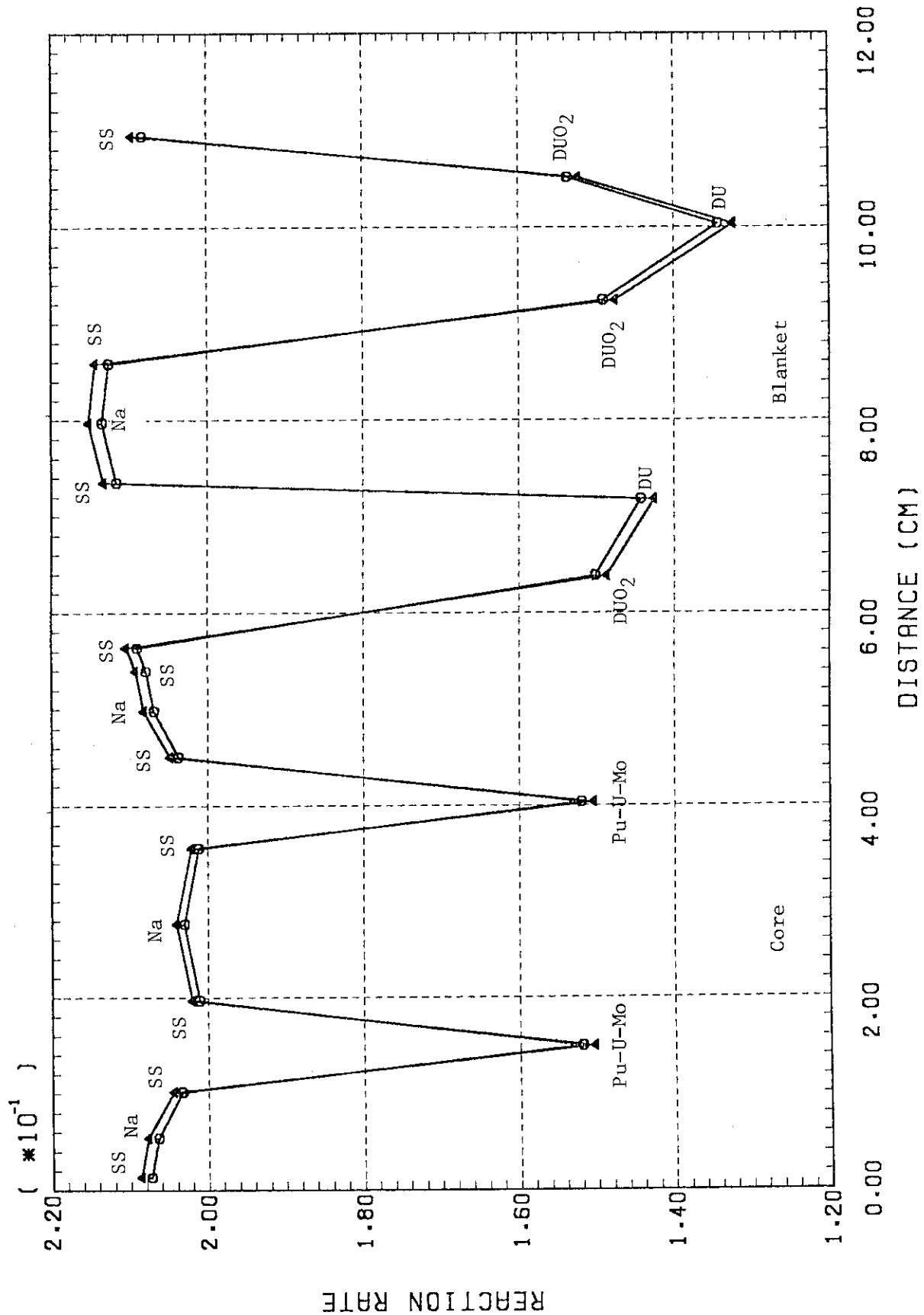


Fig. 15  $^{238}\text{U}(\text{n},\gamma)$  Reaction Rate Distribution in a Repeated Cell Pattern Composed of  
a Core Drawer Followed by an Inner Blanket Drawer

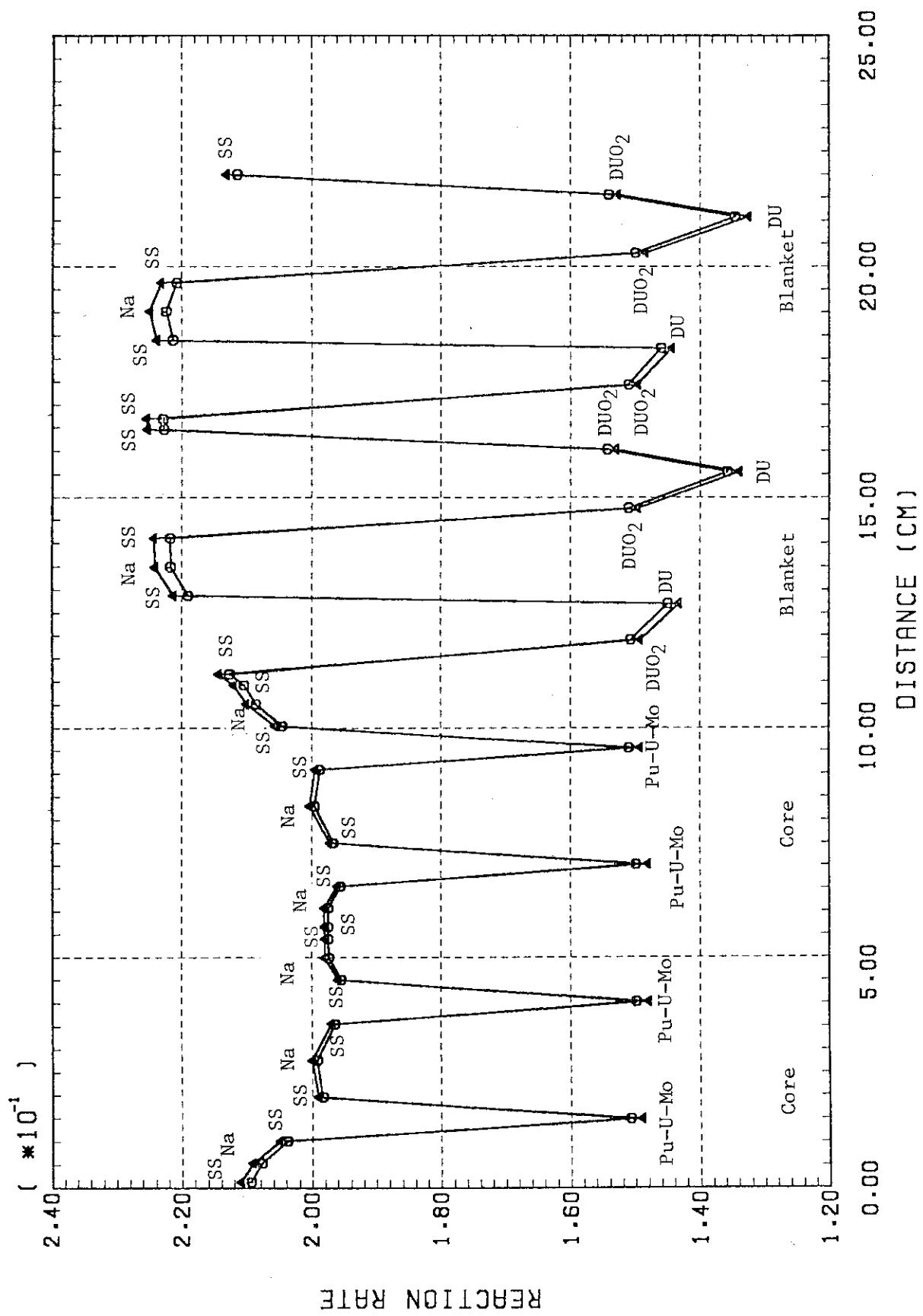


Fig. 16  $^{238}\text{U}(n,\gamma)$  Reaction Rate Distribution in a Repeated Cell Pattern Composed of Two Core Drawers Followed by Two Inner Blanket Drawers

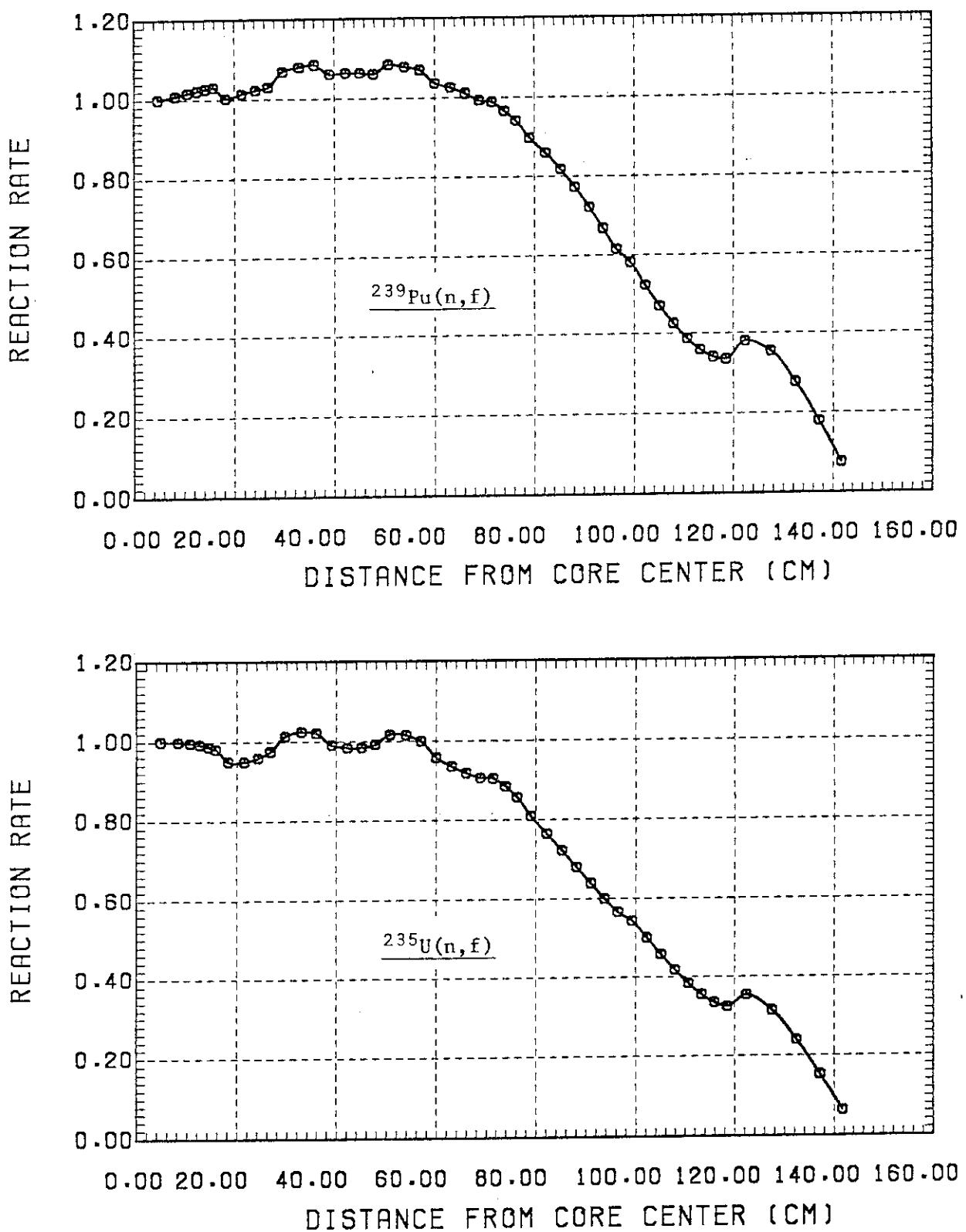


Fig. 17 Radial Reaction Rate Distributions of  $^{239}\text{Pu}(n, f)$  and  $^{235}\text{U}(n, f)$  in R-Z Model of ZPPR-7A Obtained by Cross-Section Set, ECS-1.

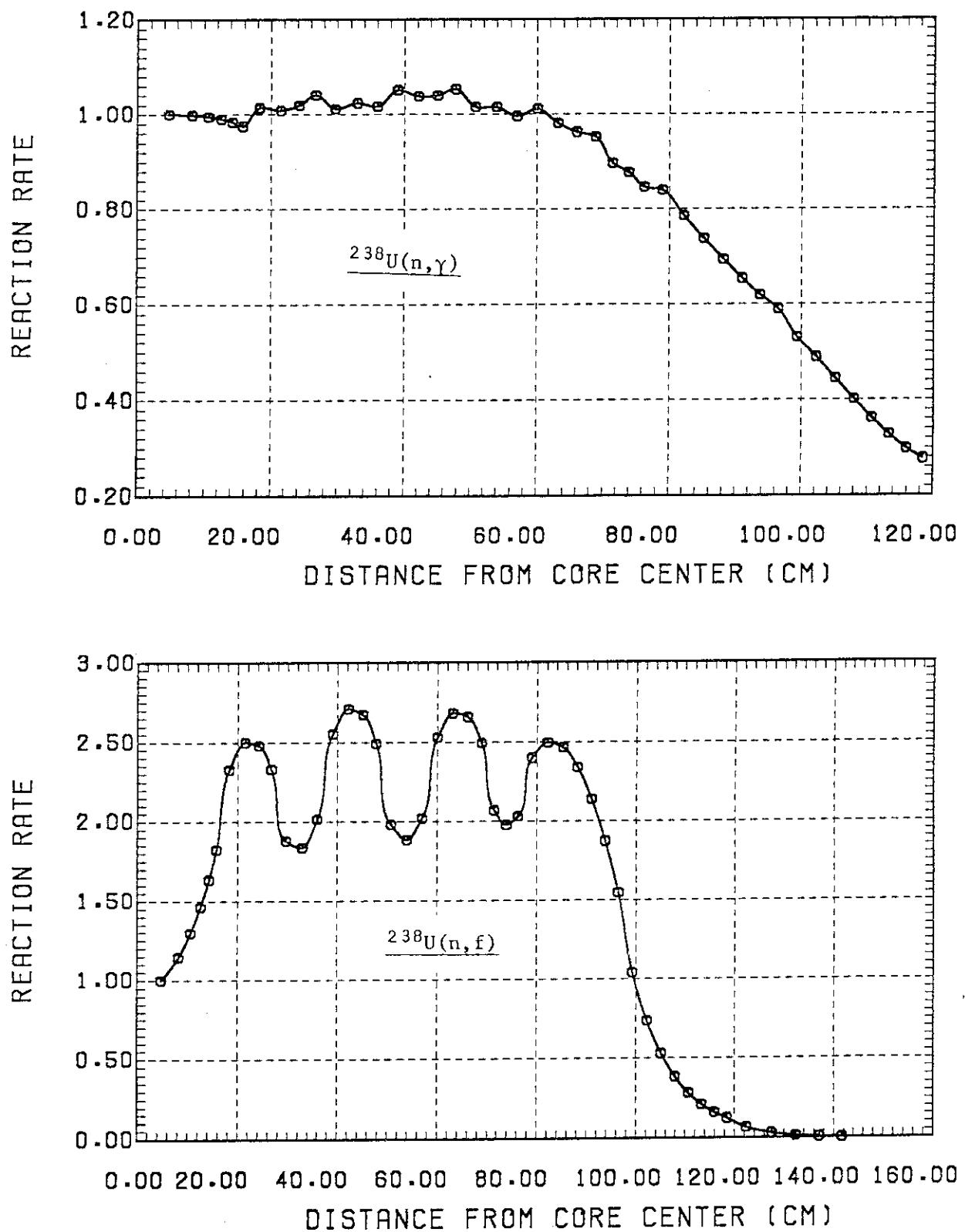


Fig. 18 Radial Reaction Rate Distributions of  $^{238}\text{U}(n, f)$  and  $^{238}\text{U}(n, \gamma)$  in R-Z Model of ZPPR-7A Obtained by Cross-Section Set, ECS-1.

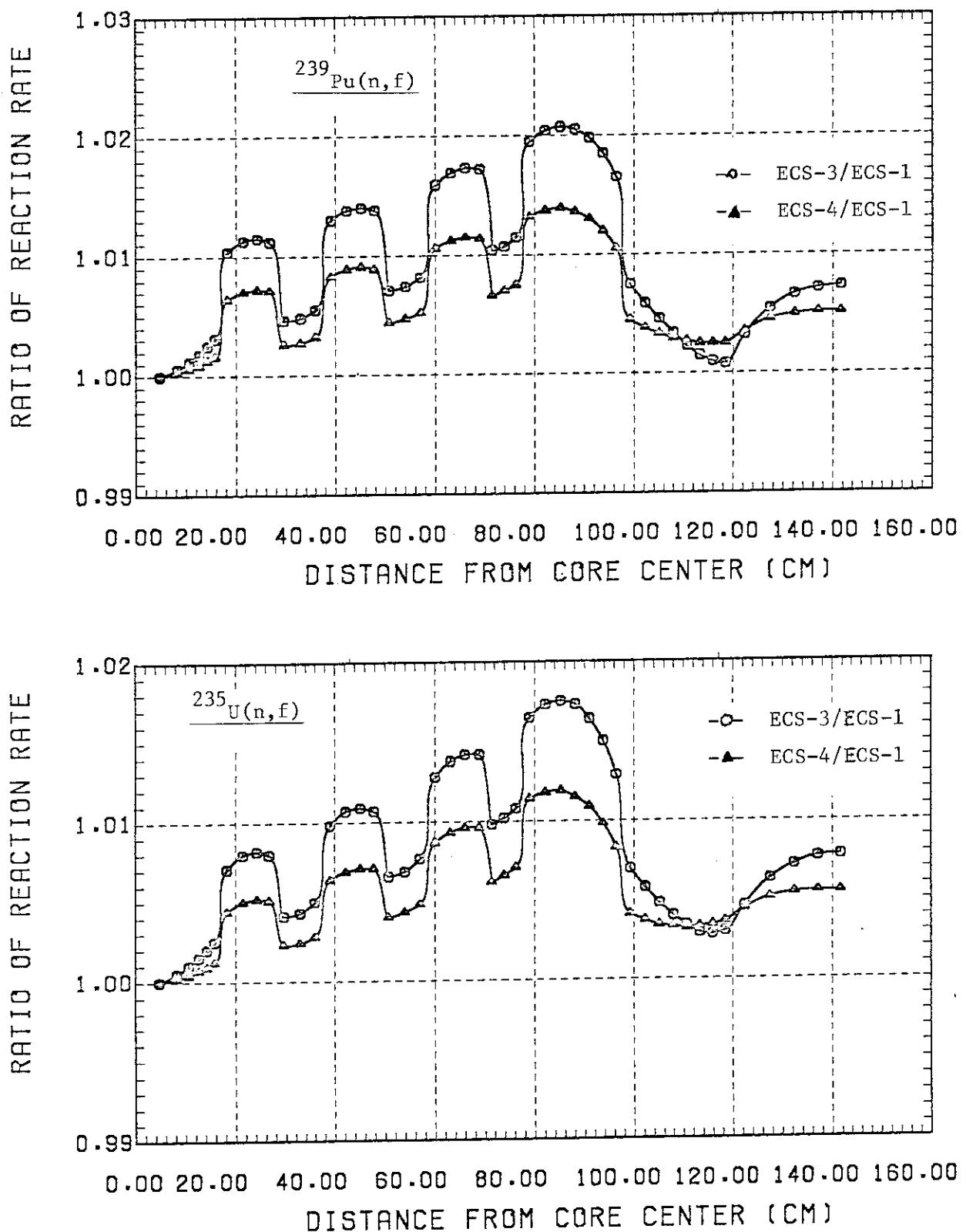


Fig. 19 Comparison of Radial Distributions of  $^{239}\text{Pu}(n, f)$  and  $^{235}\text{U}(n, f)$  Reaction Rates Obtained from Different Cell Models

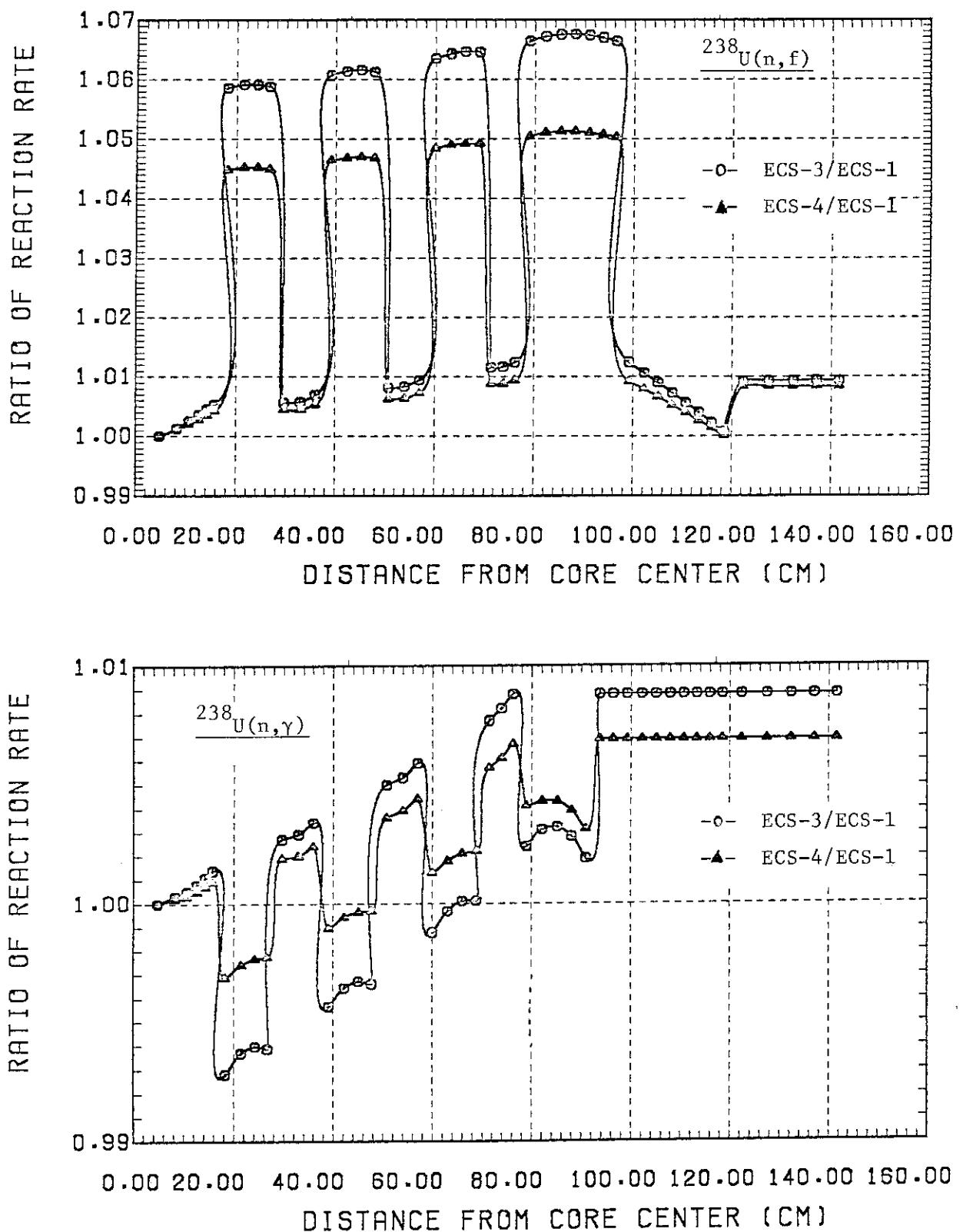


Fig. 20 Comparison of Radial Distributions of  $^{238}\text{U}(n, f)$  and  $^{238}\text{U}(n, \gamma)$  Reaction Rates Obtained from Different Cell Models

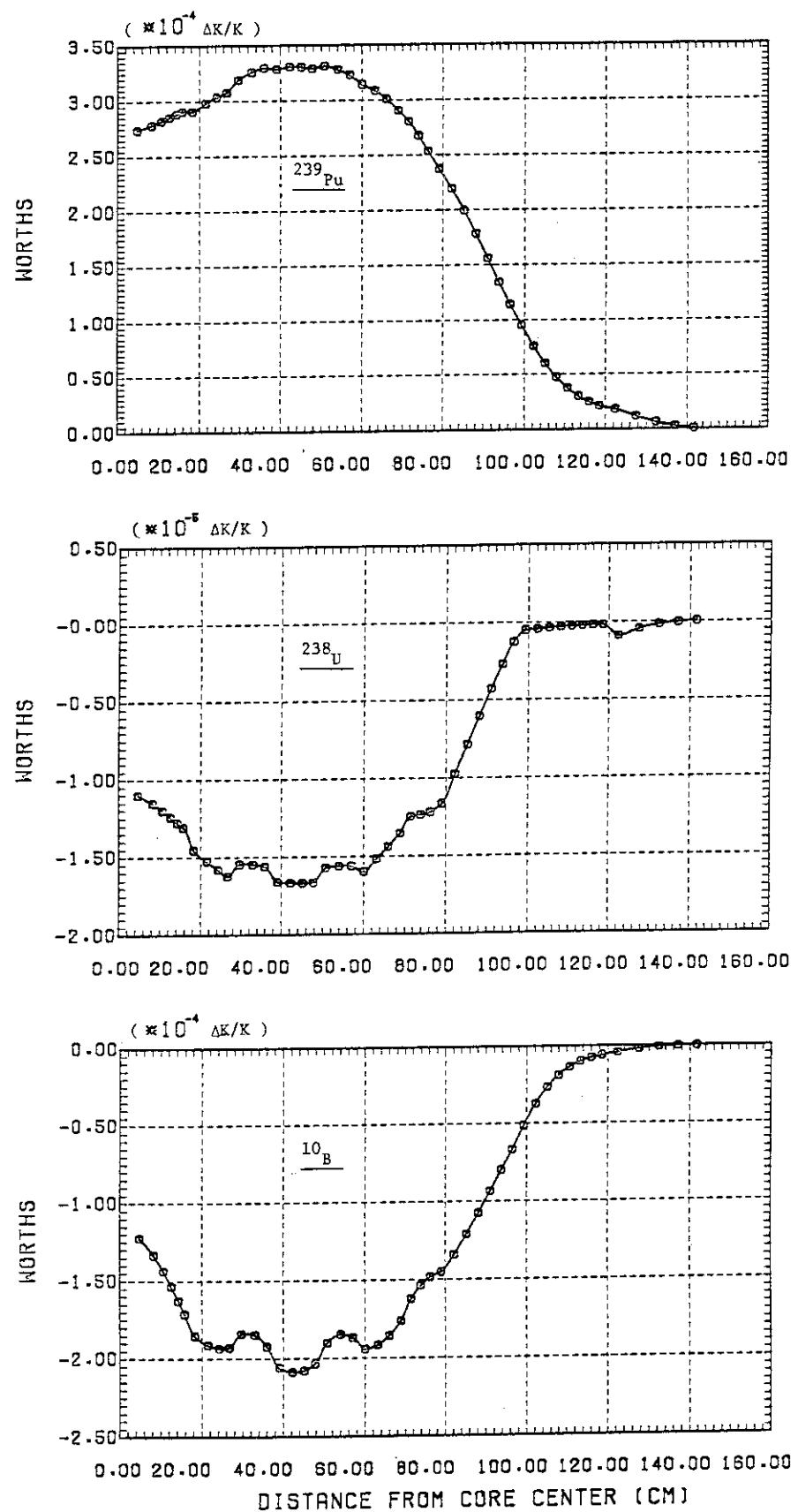


Fig. 21 Radial Worth Distributions of Pu-239, U-238 and B-10 in R-Z Model of ZPPR-7A obtained by ECS-1

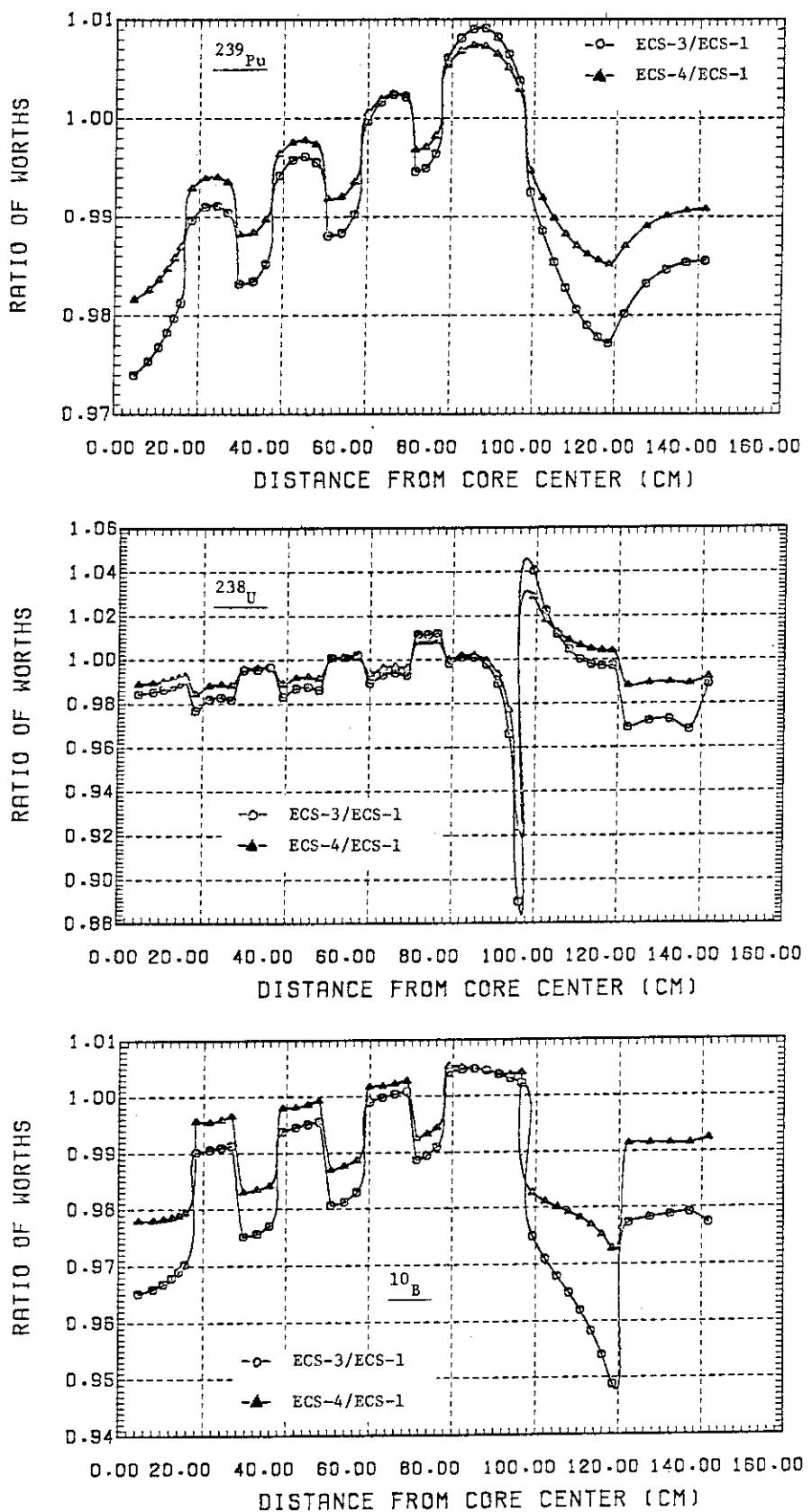
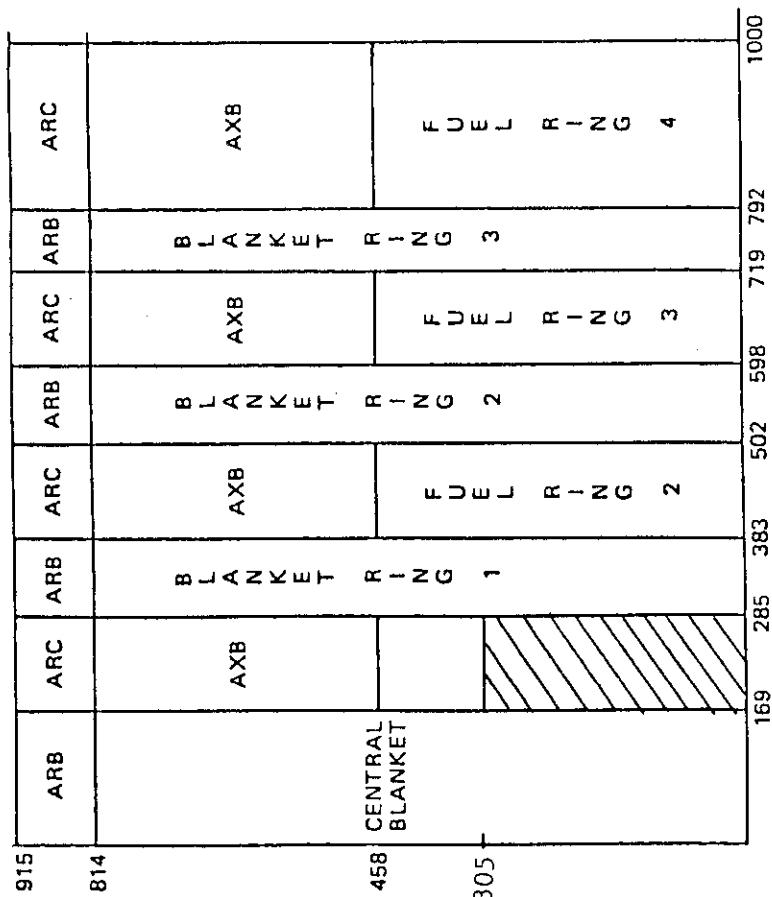


Fig. 22 Comparison of Radial Worth Distributions of Pu-239, U-238 and B-10 obtained by different cell models

## Na-void configuration-1

Na-void configuration-2



AXB-AXIAL BLANKET  
ARC-UPPER CORE REFLECTOR  
ARB-UPPER BLANKET REFLECTOR

|||||

Unit ; mm

Fig. 23 Cylindrical Core and Inner Blanket Configurations used for Analysis of Na-Void Reactivity Worth Measurements at ZPPR-7A

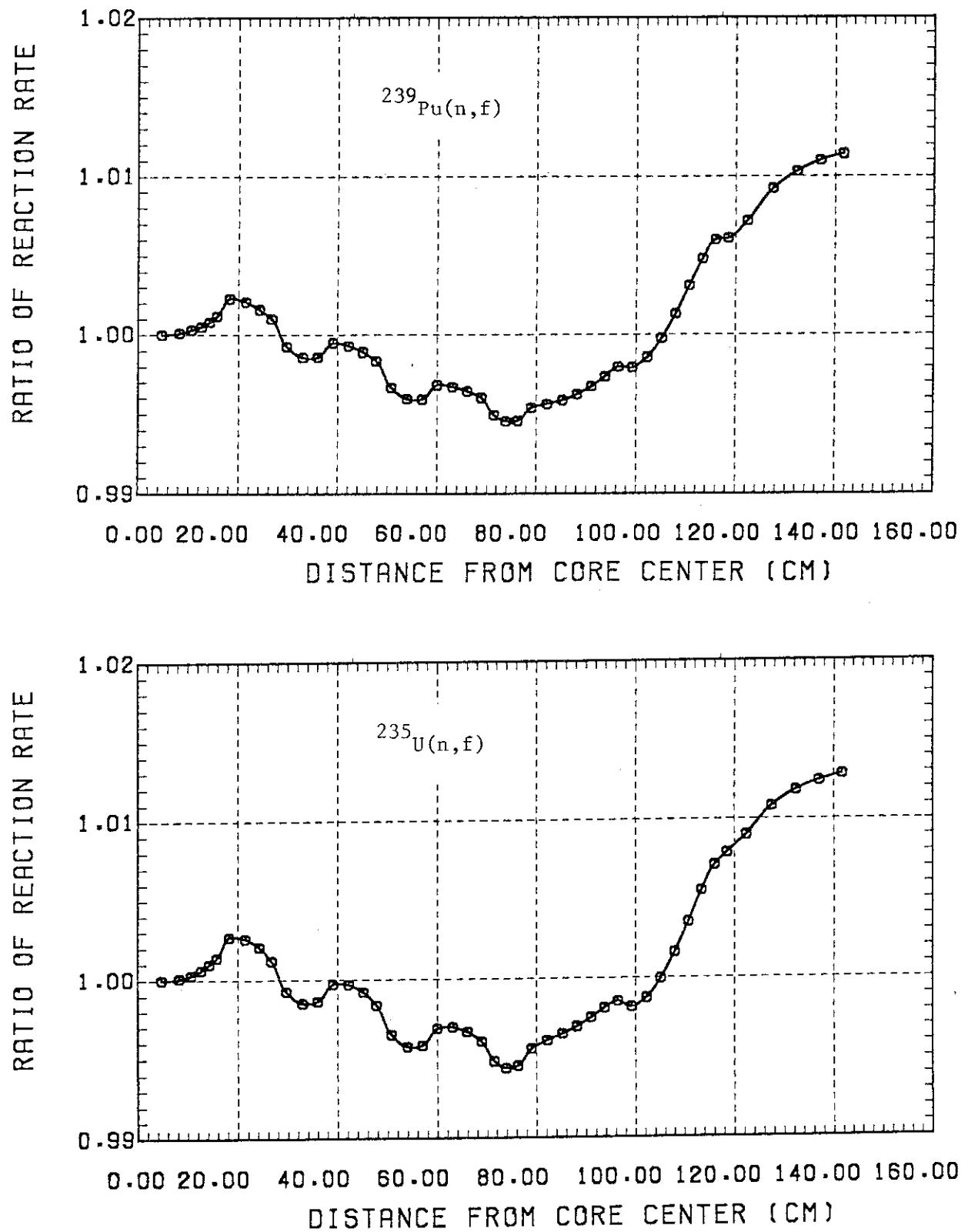


Fig. 24

Streaming Effect on  $^{239}\text{Pu}(n,f)$  and  $^{235}\text{U}(n,f)$  Radial Reaction Rate Distributions (ECS-2/ECS-1)

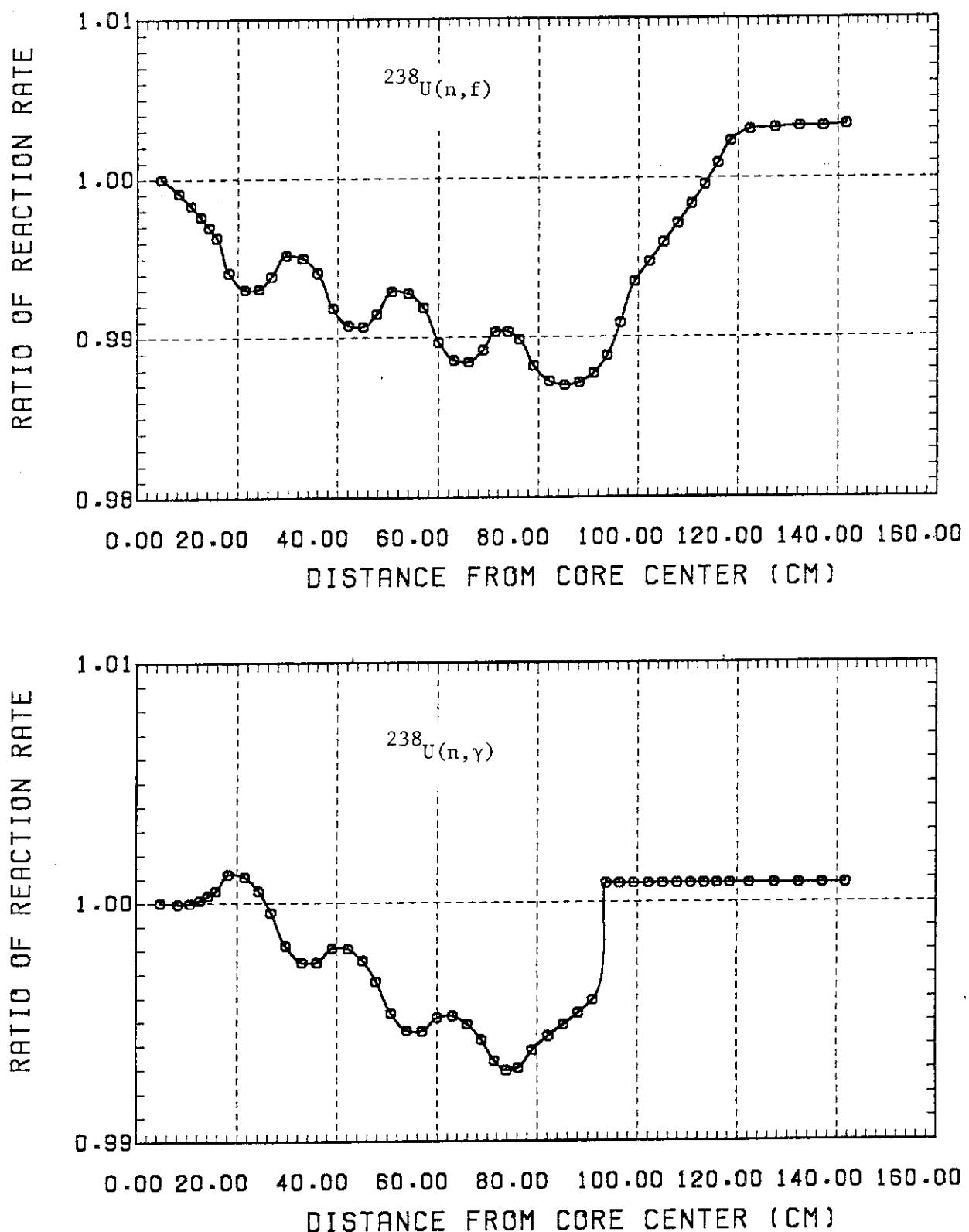


Fig. 25 Streaming Effect on  $^{238}\text{U}(n,f)$  and  $^{238}\text{U}(n,\gamma)$  Radial Reaction Rate Distributions (ECS-2/ECS-1)

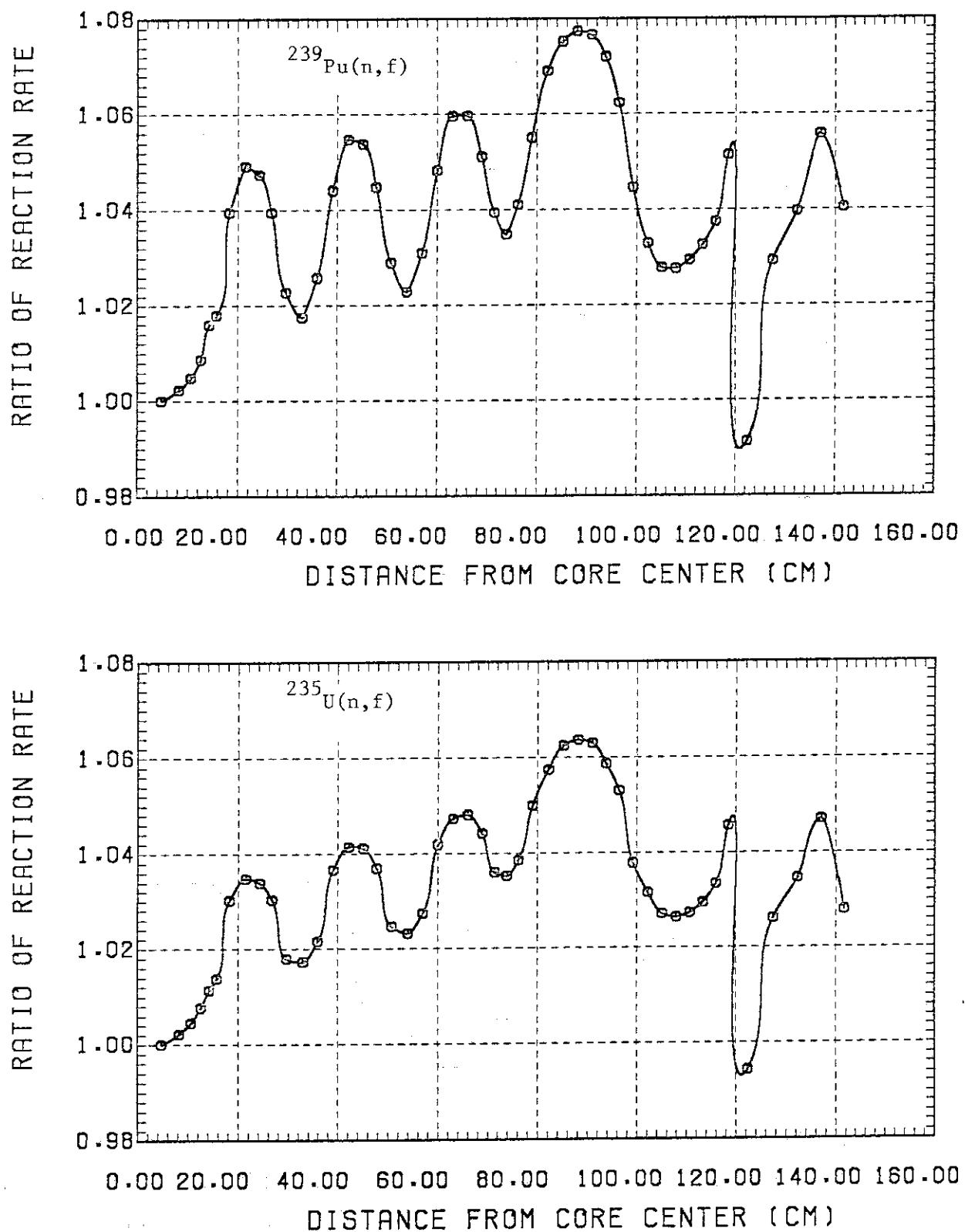


Fig. 26 Transport Effect on  $^{239}\text{Pu}(n, f)$  and  $^{235}\text{U}(n, f)$  Radial Reaction Rate Distributions. ( $S_4 - P_0 / \text{Diffusion}$ )

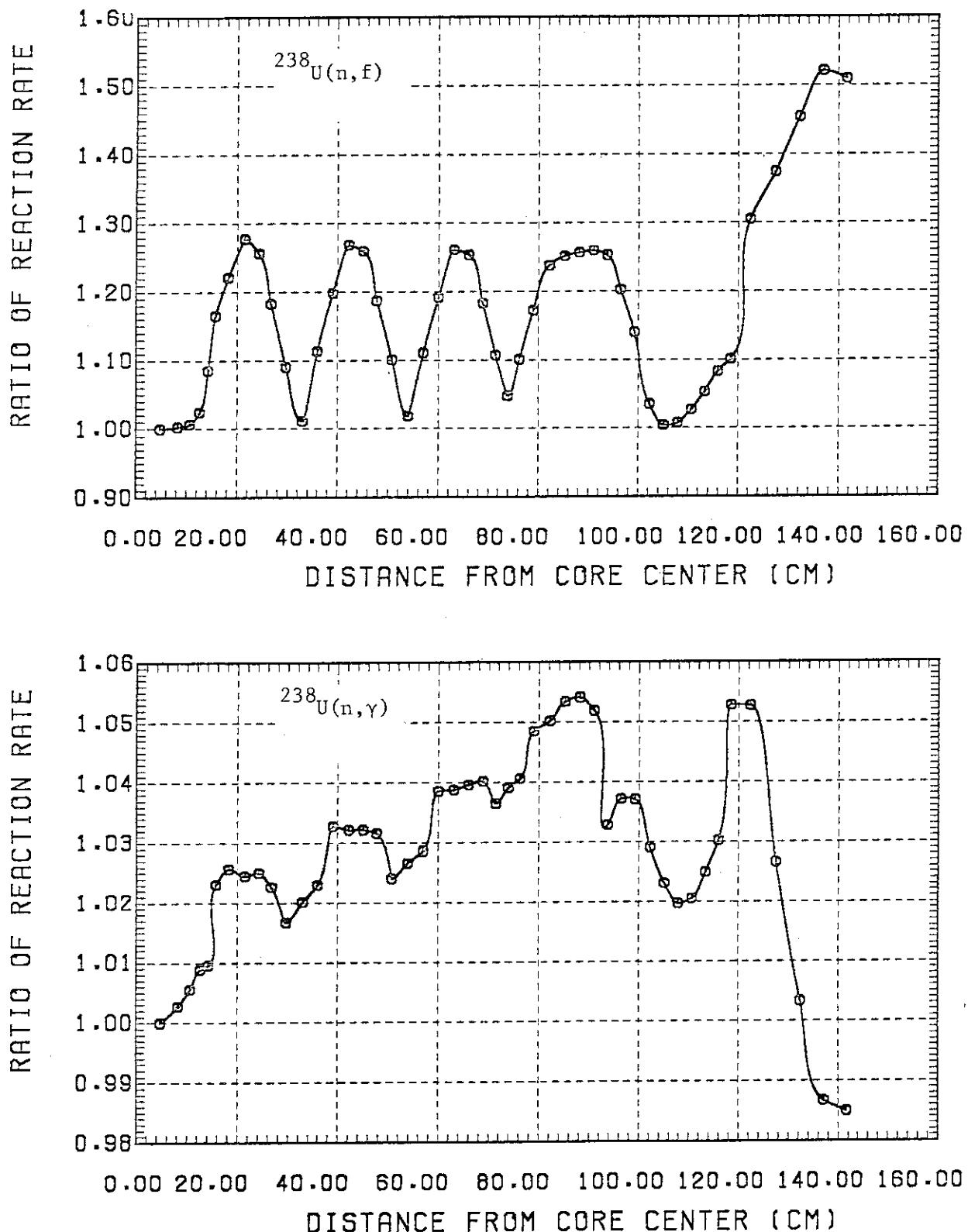


Fig. 27 Transport Effect on  $^{238}\text{U}(n, f)$  and  $^{238}\text{U}(n, \gamma)$  Radial Reaction Rate Distributions (  $S_4-P_0$ /Diffusion )

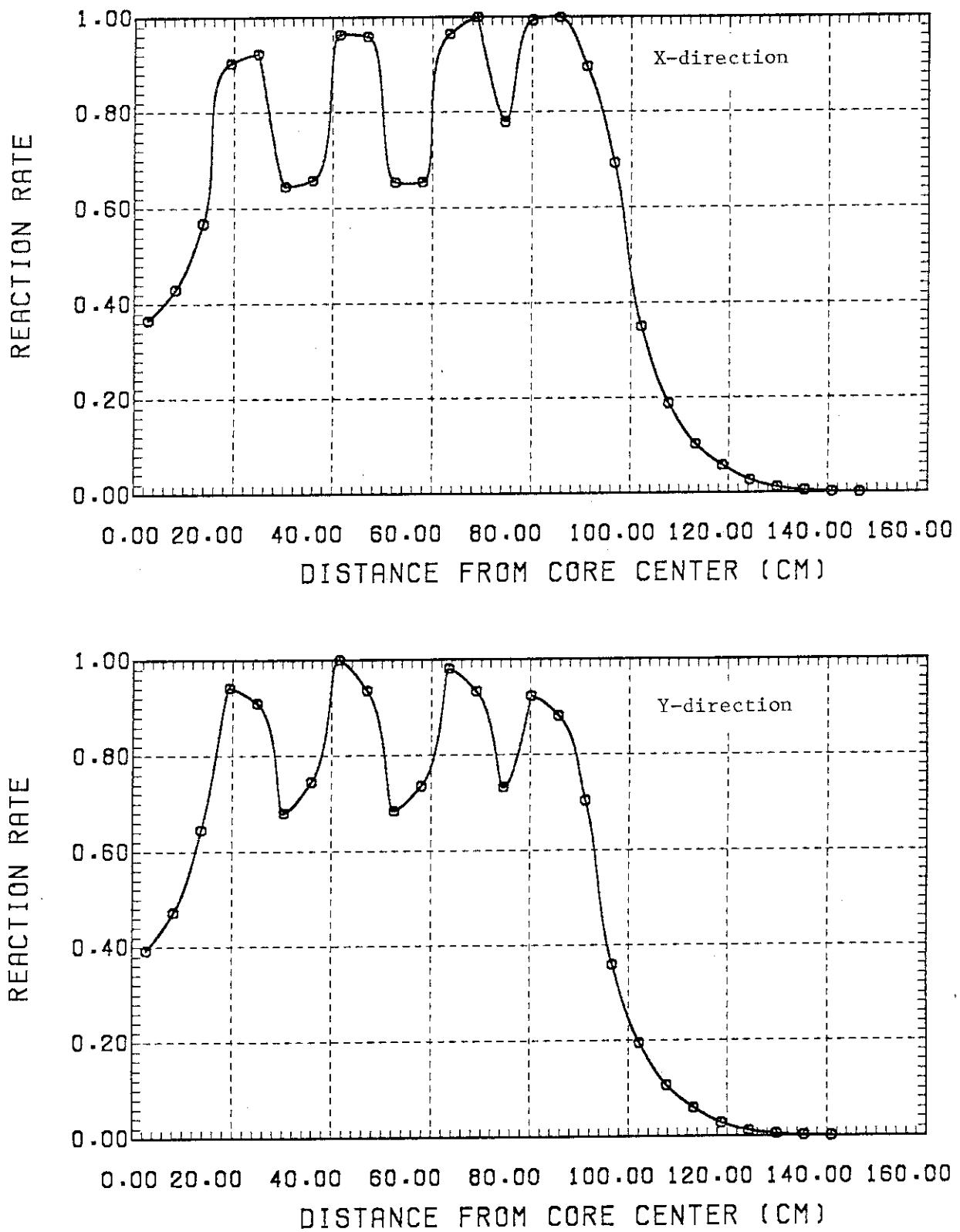


Fig. 28

$^{238}\text{U}(n,f)$  Reaction Rate Distributions along X- and Y-Axes of ZPPR-7A Calculated by X-Y-Z Diffusion Theory

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
149.84	0.078	0.068	0.047	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
138.11	0.186	0.170	0.166	0.114	0.098	0.080	0.061	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
132.68	0.298	0.268	0.270	0.244	0.222	0.198	0.186	0.115	0.087	0.053	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
127.08	0.381	0.314	0.380	0.341	0.321	0.301	0.218	0.244	0.209	0.168	0.105	0.055	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
121.54	0.408	0.400	0.380	0.378	0.385	0.354	0.368	0.339	0.311	0.277	0.229	0.177	0.108	0.059	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
118.01	0.349	0.345	0.359	0.350	0.322	0.321	0.372	0.376	0.362	0.365	0.327	0.287	0.254	0.174	0.102	0.053	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
110.49	0.381	0.387	0.381	0.371	0.380	0.351	0.346	0.335	0.329	0.372	0.372	0.386	0.354	0.282	0.218	0.148	0.085	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
104.97	0.471	0.480	0.460	0.460	0.435	0.417	0.399	0.578	0.358	0.346	0.385	0.395	0.355	0.312	0.245	0.183	0.089	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
88.44	0.574	0.571	0.683	0.652	0.654	0.611	0.484	0.484	0.422	0.392	0.368	0.365	0.402	0.393	0.374	0.325	0.256	0.167	0.070	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
89.92	0.858	0.854	0.848	0.836	0.819	0.819	0.590	0.553	0.511	0.468	0.428	0.391	0.365	0.345	0.381	0.377	0.311	0.258	0.188	0.088	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
88.38	0.766	0.785	0.752	0.744	0.730	0.709	0.877	0.658	0.613	0.552	0.505	0.452	0.405	0.386	0.348	0.382	0.377	0.320	0.261	0.181	0.086	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
82.87	0.836	0.858	0.836	0.836	0.827	0.810	0.782	0.743	0.695	0.837	0.589	0.632	0.489	0.412	0.368	0.345	0.370	0.369	0.318	0.240	0.161	0.059	0.000	0.000	0.000	0.000	
77.54	0.914	0.915	0.902	0.904	0.802	0.892	0.871	0.838	0.792	0.735	0.869	0.620	0.646	0.474	0.411	0.363	0.357	0.366	0.365	0.302	0.224	0.134	0.047	0.000	0.000	0.000	
71.82	0.947	0.988	0.970	0.971	0.956	0.950	0.957	0.911	0.873	0.820	0.768	0.682	0.600	0.644	0.487	0.400	0.360	0.324	0.362	0.341	0.261	0.194	0.080	0.000	0.000	0.000	
88.29	0.954	0.987	0.981	1.014	1.015	1.010	0.982	0.982	0.931	0.807	0.828	0.757	0.676	0.589	0.629	0.449	0.382	0.334	0.313	0.364	0.326	0.250	0.153	0.051	0.000	0.000	
80.17	1.034	1.011	1.019	1.027	1.031	1.047	1.036	1.015	0.971	0.933	0.982	0.819	0.741	0.656	0.691	0.504	0.425	0.362	0.328	0.360	0.357	0.298	0.205	0.093	0.000	0.000	
65.24	1.052	1.057	1.055	1.046	1.057	1.058	1.049	1.050	1.022	0.984	0.921	0.883	0.794	0.713	0.826	0.660	0.474	0.398	0.344	0.322	0.384	0.334	0.253	0.151	0.048	0.000	
46.72	1.035	1.058	1.058	1.072	1.076	1.071	1.057	1.035	1.019	0.974	0.917	0.835	0.761	0.878	0.689	0.626	0.440	0.372	0.352	0.366	0.359	0.293	0.193	0.080	0.000	0.000	
44.20	1.041	1.047	1.058	1.095	1.106	1.110	1.107	1.074	1.057	1.029	0.981	0.887	0.894	0.820	0.728	0.643	0.675	0.484	0.404	0.347	0.324	0.384	0.323	0.230	0.107	0.000	0.000
38.67	1.071	1.046	1.055	1.074	1.087	1.093	1.115	1.107	1.058	1.048	1.016	0.974	0.819	0.855	0.776	0.684	0.501	0.529	0.440	0.369	0.352	0.377	0.350	0.267	0.167	0.049	0.000
35.16	1.084	1.072	1.084	1.071	1.088	1.088	1.119	1.098	1.078	1.025	0.997	0.981	0.804	0.820	0.742	0.648	0.672	0.476	0.394	0.344	0.374	0.366	0.286	0.191	0.078	0.000	
21.82	1.018	1.058	1.074	1.080	1.105	1.090	1.088	1.091	1.076	1.084	1.061	1.011	0.975	0.835	0.658	0.784	0.690	0.688	0.609	0.417	0.362	0.325	0.382	0.318	0.216	0.082	0.000
22.10	1.002	1.012	1.029	1.047	1.092	1.106	1.088	1.085	1.076	1.086	1.087	1.020	0.991	0.859	0.888	0.818	0.726	0.619	0.698	0.584	0.326	0.370	0.333	0.288	0.111	0.000	
18.67	1.026	0.993	1.014	1.036	1.050	1.095	1.104	1.078	1.070	1.085	1.070	1.026	1.003	0.976	0.911	0.843	0.763	0.648	0.656	0.465	0.376	0.334	0.389	0.353	0.264	0.162	0.046
11.06	1.031	1.022	1.036	1.023	1.036	1.086	1.095	1.088	1.084	1.084	1.071	1.030	1.010	0.988	0.926	0.860	0.771	0.883	0.875	0.487	0.365	0.342	0.394	0.368	0.282	0.175	0.067
6.52	1.000	1.013	1.032	1.034	1.051	1.079	1.090	1.083	1.061	1.085	1.072	1.092	1.014	0.994	0.933	0.869	0.780	0.872	0.881	0.473	0.380	0.341	0.400	0.376	0.292	0.185	0.074
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

Fig. 29  $^{239}\text{Pu}(n,f)$  Reaction Rate Distribution on the Central X-Y Plane  
of ZPPR-7A calculated by X-Y-Z Diffusion Code

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
145.84	0.083	0.057	0.059	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
138.11	0.160	0.160	0.151	0.087	0.081	0.058	0.044	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28	
132.66	0.254	0.248	0.251	0.210	0.190	0.170	0.142	0.098	0.076	0.048	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	26	
127.08	0.356	0.350	0.316	0.301	0.285	0.284	0.242	0.212	0.181	0.145	0.090	0.061	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	24	
121.54	0.376	0.371	0.382	0.360	0.336	0.325	0.321	0.302	0.276	0.212	0.198	0.162	0.083	0.051	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	23	
118.01	0.342	0.338	0.332	0.314	0.311	0.354	0.351	0.334	0.320	0.290	0.261	0.202	0.149	0.087	0.046	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22	
110.48	0.387	0.384	0.377	0.388	0.367	0.347	0.341	0.329	0.319	0.363	0.314	0.326	0.294	0.245	0.188	0.128	0.063	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21	
104.87	0.460	0.456	0.460	0.440	0.427	0.412	0.394	0.374	0.364	0.340	0.326	0.353	0.359	0.323	0.272	0.211	0.155	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	19	
88.44	0.642	0.639	0.552	0.522	0.608	0.492	0.470	0.444	0.416	0.388	0.363	0.350	0.302	0.364	0.335	0.286	0.220	0.143	0.059	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	18	
85.82	0.695	0.692	0.888	0.877	0.567	0.674	0.653	0.524	0.492	0.458	0.419	0.388	0.355	0.335	0.358	0.341	0.291	0.221	0.142	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	17	
88.38	0.871	0.889	0.884	0.858	0.848	0.832	0.808	0.680	0.669	0.531	0.490	0.443	0.399	0.360	0.337	0.380	0.341	0.288	0.217	0.157	0.055	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	16	
82.87	0.749	0.747	0.742	0.754	0.724	0.705	0.686	0.655	0.621	0.581	0.658	0.609	0.466	0.405	0.383	0.356	0.357	0.334	0.279	0.207	0.128	0.050	0.000	0.000	0.000	0.000	16	
77.94	0.640	0.639	0.814	0.807	0.795	0.780	0.768	0.729	0.692	0.549	0.605	0.673	0.518	0.482	0.404	0.366	0.329	0.346	0.320	0.284	0.192	0.115	0.039	0.000	0.000	0.000	14	
71.82	0.669	0.694	0.694	0.891	0.861	0.615	0.823	0.798	0.780	0.718	0.686	0.610	0.651	0.612	0.483	0.398	0.347	0.318	0.391	0.308	0.244	0.185	0.078	0.000	0.000	0.000	13	
68.28	0.905	0.908	0.910	0.936	0.933	0.923	0.883	0.865	0.819	0.778	0.724	0.686	0.503	0.843	0.803	0.439	0.370	0.331	0.304	0.327	0.267	0.218	0.129	0.043	0.000	0.000	12	
60.77	0.971	0.940	0.939	0.940	0.942	0.933	0.951	0.928	0.874	0.891	0.779	0.721	0.857	0.893	0.651	0.485	0.418	0.380	0.321	0.342	0.231	0.176	0.079	0.000	0.000	0.000	11	
65.74	0.989	1.000	0.999	0.989	0.961	0.961	0.956	0.965	0.938	0.900	0.830	0.772	0.707	0.839	0.576	0.626	0.460	0.394	0.342	0.313	0.337	0.295	0.218	0.128	0.041	0.000	10	
48.72	0.971	1.008	1.017	1.016	0.987	0.982	0.976	0.982	0.942	0.935	0.893	0.840	0.757	0.887	0.514	0.516	0.601	0.431	0.369	0.327	0.346	0.322	0.254	0.185	0.088	0.000	8	
44.20	0.971	0.976	0.986	1.025	1.020	1.025	0.983	0.957	0.933	0.800	0.877	0.820	0.782	0.688	0.688	0.539	0.486	0.399	0.343	0.313	0.336	0.284	0.197	0.091	0.000	0.000	8	
38.87	1.013	0.982	0.985	0.892	0.899	1.008	1.038	1.027	0.979	0.952	0.917	0.879	0.835	0.792	0.698	0.625	0.553	0.503	0.430	0.365	0.326	0.361	0.230	0.134	0.041	0.000	7	
35.16	1.018	1.020	1.023	0.986	0.888	1.000	1.007	1.033	1.021	1.001	0.941	0.886	0.867	0.826	0.734	0.689	0.685	0.633	0.488	0.368	0.359	0.366	0.326	0.261	0.183	0.086	0.000	6
27.82	0.985	1.004	1.017	1.024	1.033	1.008	1.000	0.998	0.986	1.017	0.988	0.919	0.879	0.862	0.765	0.690	0.633	0.536	0.484	0.409	0.347	0.313	0.332	0.275	0.184	0.078	0.000	5
22.16	0.948	0.951	0.962	0.978	1.026	1.037	1.004	0.983	0.982	1.024	1.003	0.932	0.895	0.874	0.790	0.717	0.639	0.681	0.508	0.427	0.368	0.317	0.342	0.294	0.204	0.094	0.000	4
18.67	0.988	0.948	0.961	0.989	0.982	1.039	1.037	0.994	0.990	1.027	1.010	0.941	0.807	0.880	0.808	0.797	0.680	0.681	0.525	0.449	0.371	0.326	0.356	0.311	0.226	0.128	0.050	3
11.06	0.986	0.988	0.982	0.958	0.971	1.052	1.059	0.892	0.989	1.028	1.013	0.948	0.914	0.900	0.821	0.751	0.674	0.695	0.636	0.464	0.381	0.354	0.366	0.324	0.242	0.147	0.058	2
6.62	1.000	1.001	0.998	0.983	0.987	1.029	1.038	0.980	0.987	1.028	1.014	0.948	0.918	0.905	0.827	0.788	0.682	0.602	0.548	0.388	0.339	0.372	0.351	0.280	0.188	0.082	1	
0.00	0.00	2.31	5.01	11.11	19.87	22.11	27.82	30.15	38.87	44.20	48.72	55.24	60.77	65.25	70.71	77.34	82.87	88.35	93.82	104.85	110.49	121.54	127.08	132.66	138.11	145.84	149.15	

Fig. 30  $^{235}\text{U}(n,f)$  Reaction Rate Distribution on the Central X-Y Plane  
of ZPPR-7A calculated by X-Y-Z Diffusion Code

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
148.84	0.001	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
138.11	0.008	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	25	
132.56	0.013	0.013	0.012	0.011	0.010	0.009	0.007	0.008	0.004	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	25	
127.08	0.050	0.050	0.028	0.027	0.024	0.021	0.017	0.013	0.010	0.007	0.005	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	24	
121.54	0.071	0.070	0.069	0.064	0.068	0.060	0.056	0.050	0.023	0.017	0.012	0.008	0.008	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	23	
118.01	0.152	0.149	0.145	0.137	0.125	0.110	0.089	0.089	0.064	0.036	0.027	0.018	0.011	0.007	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22	
110.48	0.271	0.256	0.261	0.247	0.226	0.198	0.171	0.143	0.116	0.084	0.060	0.039	0.024	0.018	0.009	0.008	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21	
104.91	0.485	0.491	0.480	0.456	0.416	0.357	0.303	0.255	0.204	0.162	0.123	0.082	0.060	0.032	0.019	0.011	0.008	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	19	
98.44	0.913	0.909	0.898	0.856	0.782	0.847	0.844	0.453	0.360	0.280	0.211	0.158	0.102	0.058	0.039	0.023	0.012	0.007	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	18	
89.82	1.795	1.791	1.780	1.753	1.595	1.165	0.593	0.031	0.840	0.490	0.361	0.280	0.187	0.150	0.080	0.044	0.024	0.013	0.006	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	17	
88.39	2.245	2.285	2.285	2.277	2.208	2.059	1.884	1.682	1.127	0.887	0.816	0.434	0.304	0.210	0.143	0.085	0.046	0.024	0.012	0.008	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	16	
82.87	2.350	2.387	2.808	2.874	2.895	2.847	2.448	2.271	1.966	1.865	1.052	0.717	0.501	0.540	0.226	0.147	0.083	0.045	0.022	0.011	0.006	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	16	
77.94	1.885	2.422	2.870	2.730	2.782	2.769	2.673	2.492	2.221	1.822	1.181	0.856	0.663	0.352	0.221	0.139	0.076	0.039	0.019	0.009	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	14		
71.82	2.376	1.917	1.941	2.006	2.584	2.794	2.655	2.657	2.778	2.696	2.517	1.944	1.859	0.901	0.841	0.326	0.199	0.123	0.068	0.032	0.015	0.007	0.003	0.000	0.000	13		
66.29	2.488	2.509	2.480	2.020	2.057	2.108	2.670	2.774	2.894	2.783	2.687	2.551	1.977	1.486	0.794	0.488	0.281	0.170	0.104	0.082	0.024	0.011	0.006	0.002	0.000	12		
60.77	1.876	2.414	2.859	2.841	2.840	2.125	2.114	2.123	2.696	2.877	2.659	2.602	2.236	1.818	1.083	0.850	0.392	0.239	0.143	0.077	0.037	0.017	0.006	0.003	0.000	11		
55.24	1.741	1.788	1.938	2.696	2.828	2.802	2.693	2.126	2.089	2.053	2.484	2.444	2.328	2.046	1.809	0.929	0.560	0.325	0.193	0.116	0.058	0.028	0.012	0.006	0.002	0.000	10	
49.72	2.383	1.851	1.878	2.059	2.894	2.814	2.807	2.775	2.678	2.084	1.992	1.898	2.216	2.087	1.870	1.448	0.766	0.442	0.268	0.153	0.080	0.037	0.017	0.007	0.003	0.000	9	
44.20	2.645	2.858	2.628	2.078	2.146	2.179	2.732	2.883	2.757	2.684	1.972	1.828	1.685	1.985	1.718	1.004	0.889	0.542	0.196	0.114	0.054	0.023	0.010	0.004	0.000	8		
38.87	1.880	2.450	2.619	2.732	2.815	2.771	2.180	2.160	2.716	2.772	2.790	2.650	2.420	1.601	2.155	1.985	1.828	0.798	0.449	0.265	0.145	0.071	0.031	0.014	0.008	0.002	7	
33.16	1.751	1.790	1.951	2.824	2.820	2.938	2.804	2.189	2.120	2.079	2.642	2.779	2.807	1.920	2.322	2.210	1.809	1.023	0.876	0.320	0.181	0.090	0.040	0.018	0.007	0.003	6	
27.82	2.316	1.858	1.873	2.019	2.119	2.768	2.941	2.872	2.664	1.924	2.007	2.704	2.867	2.002	2.481	2.989	2.081	1.601	0.788	0.391	0.213	0.117	0.063	0.022	0.009	0.004	0.000	5
22.10	2.387	2.454	2.842	2.882	2.044	2.071	2.733	2.928	2.731	1.884	1.886	2.058	2.693	2.057	2.667	2.840	2.294	1.886	0.859	0.448	0.241	0.133	0.081	0.028	0.011	0.004	4	
18.87	1.842	2.238	2.600	2.888	2.855	1.888	2.034	2.778	2.883	1.828	1.818	2.640	2.712	2.098	2.642	2.859	2.348	1.805	0.903	0.482	0.261	0.144	0.087	0.028	0.012	0.005	0.002	3
11.05	1.202	1.425	1.763	2.688	2.851	1.802	1.868	2.677	2.847	1.800	1.797	2.630	2.726	2.120	2.891	2.701	2.414	1.887	0.939	0.804	0.273	0.151	0.071	0.030	0.013	0.005	2	
5.62	1.000	1.179	1.864	2.488	2.825	1.785	1.800	2.832	2.821	1.787	1.788	2.836	2.792	2.132	2.714	2.751	2.448	1.898	0.988	0.814	0.279	0.155	0.072	0.031	0.013	0.005	1	
0.00																												
D-80	5.52	11.05	15.57	22.10	27.62	33.15	38.67	44.20	48.72	52.77	55.25	57.82	61.34	77.34	82.87	88.39	92.52	96.49	104.55	110.01	121.54	127.95	132.59	138.11	143.64	149.84	1	

Fig. 31  $^{238}\text{U}(n, f)$  Reaction Rate Distribution on the Central X-Y Plane  
of ZPPR-7A calculated by X-Y-Z Diffusion Code

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
143.84	0.002	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
138.11	0.008	0.008	0.008	0.004	0.004	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28
132.58	0.013	0.013	0.012	0.011	0.010	0.009	0.007	0.005	0.004	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	26
127.06	0.030	0.030	0.029	0.027	0.024	0.021	0.017	0.013	0.010	0.007	0.005	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	24
121.64	0.071	0.070	0.068	0.064	0.068	0.060	0.058	0.050	0.023	0.017	0.012	0.008	0.006	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22
118.01	0.152	0.148	0.146	0.137	0.128	0.110	0.088	0.059	0.064	0.058	0.027	0.018	0.011	0.007	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21
110.40	0.471	0.298	0.281	0.247	0.226	0.190	0.171	0.145	0.118	0.064	0.080	0.039	0.024	0.018	0.006	0.005	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	20
104.97	0.488	0.491	0.480	0.468	0.418	0.357	0.303	0.259	0.204	0.162	0.123	0.092	0.050	0.052	0.018	0.011	0.006	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	18
88.44	0.913	0.809	0.806	0.856	0.762	0.847	0.844	0.483	0.350	0.280	0.211	0.158	0.102	0.086	0.056	0.025	0.012	0.007	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	16
85.82	1.723	1.781	1.780	1.733	1.693	1.168	0.883	0.851	0.840	0.490	0.361	0.280	0.187	0.150	0.080	0.044	0.024	0.013	0.006	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	17
88.36	2.245	2.269	2.285	2.277	2.209	2.059	1.894	1.882	1.127	0.867	0.818	0.434	0.304	0.210	0.143	0.085	0.048	0.024	0.012	0.008	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	18
82.87	2.350	2.387	2.506	2.874	2.898	2.847	2.446	2.271	1.998	1.865	1.052	0.717	0.501	0.340	0.225	0.147	0.085	0.045	0.022	0.011	0.008	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	16
77.94	1.865	1.889	2.422	2.878	2.730	2.782	2.789	2.673	2.492	2.221	1.822	1.161	0.858	0.853	0.362	0.221	0.159	0.078	0.039	0.019	0.009	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	14
71.82	2.376	1.917	1.941	2.008	2.584	2.734	2.055	2.857	2.776	2.098	2.317	1.944	1.633	0.901	0.841	0.328	0.193	0.125	0.056	0.032	0.016	0.007	0.003	0.000	0.000	0.000	15
88.26	2.498	2.609	2.480	2.020	2.057	2.108	2.670	2.774	2.654	2.783	2.597	2.351	1.977	1.498	0.784	0.468	0.281	0.170	0.104	0.062	0.024	0.011	0.008	0.002	0.000	0.000	12
80.77	1.875	2.414	2.659	2.841	2.840	2.126	2.114	2.125	2.858	2.677	2.659	2.502	2.255	1.616	1.083	0.650	0.392	0.236	0.143	0.077	0.037	0.017	0.008	0.003	0.000	0.000	11
56.24	1.741	1.788	1.938	2.505	2.828	2.607	2.893	2.126	2.089	2.053	2.484	2.444	2.329	2.048	1.808	0.923	0.650	0.328	0.193	0.115	0.066	0.028	0.012	0.006	0.002	0.000	10
48.72	2.353	1.891	1.876	2.032	2.894	2.814	2.801	2.775	2.878	2.084	1.592	1.898	2.216	2.087	1.870	1.448	0.788	0.442	0.258	0.163	0.080	0.037	0.017	0.007	0.003	0.000	8
44.20	2.615	2.656	2.626	2.076	2.148	2.179	2.177	2.732	2.883	2.767	2.594	1.972	1.528	1.085	1.715	1.034	0.589	0.342	0.198	0.114	0.054	0.023	0.010	0.004	0.000	0.000	6
58.87	1.898	2.458	2.619	2.732	2.818	2.771	2.180	2.180	2.715	2.772	2.798	2.858	2.420	1.801	2.165	1.986	1.528	0.788	0.449	0.258	0.146	0.071	0.051	0.014	0.006	0.002	7
59.15	1.751	1.780	1.957	2.824	2.820	2.998	2.804	2.189	2.120	2.079	2.842	2.778	2.607	1.920	2.322	2.210	1.809	1.023	0.678	0.320	0.181	0.080	0.040	0.018	0.007	0.003	6
27.62	2.318	1.855	1.873	2.039	2.119	2.768	2.541	2.672	2.654	1.924	2.007	2.704	2.657	2.002	2.461	2.398	2.081	1.801	0.735	0.391	0.213	0.117	0.065	0.022	0.009	0.004	5
22.10	2.387	2.454	2.542	2.862	2.044	2.071	2.733	2.826	2.731	1.864	1.885	2.858	2.883	2.057	2.587	2.840	2.254	1.855	0.859	0.448	0.241	0.153	0.081	0.026	0.011	0.004	4
18.67	1.842	2.238	2.500	2.668	2.555	1.888	2.054	2.776	2.885	1.826	1.816	2.840	2.712	1.086	2.842	2.839	2.348	1.806	0.803	0.482	0.281	0.144	0.057	0.028	0.012	0.005	3
11.05	1.202	1.425	1.783	2.688	2.551	1.802	1.868	2.877	2.847	1.600	1.787	2.858	2.728	2.120	2.891	2.701	2.414	1.887	0.939	0.504	0.273	0.181	0.071	0.030	0.013	0.005	2
6.62	1.000	1.176	1.854	2.488	2.623	1.783	1.800	2.652	2.621	1.787	1.789	2.838	2.732	2.152	2.714	2.731	2.448	1.895	0.958	0.514	0.279	0.165	0.072	0.031	0.015	0.005	0.002
0.00																											

Fig. 32  $^{238}\text{U}(n,\gamma)$  Reaction Rate Distribution on the Central X-Y Plane  
of ZPPR-7A calculated by Diffusion Code

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
145.84	0.005	0.005	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
138.21	0.026	0.024	0.018	0.012	0.009	0.007	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
132.69	0.056	0.052	0.056	0.047	0.040	0.032	0.023	0.015	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
127.08	0.127	0.122	0.114	0.103	0.091	0.078	0.085	0.050	0.036	0.023	0.011	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
121.64	0.187	0.192	0.182	0.169	0.164	0.140	0.128	0.107	0.086	0.085	0.044	0.025	0.012	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
118.01	0.248	0.241	0.231	0.217	0.201	0.188	0.193	0.175	0.160	0.128	0.097	0.070	0.046	0.025	0.010	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
110.49	0.370	0.384	0.360	0.351	0.307	0.281	0.267	0.227	0.199	0.191	0.152	0.151	0.097	0.065	0.039	0.018	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
104.97	0.603	0.574	0.568	0.528	0.491	0.445	0.398	0.344	0.293	0.250	0.211	0.197	0.163	0.121	0.081	0.047	0.022	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
99.44	0.895	0.885	0.867	0.850	0.776	0.702	0.624	0.540	0.454	0.374	0.308	0.254	0.230	0.182	0.136	0.091	0.052	0.023	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
89.82	1.254	1.236	1.235	1.194	1.129	1.053	0.958	0.839	0.701	0.673	0.457	0.360	0.284	0.222	0.180	0.143	0.094	0.053	0.023	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
85.39	1.568	1.666	1.656	1.629	1.570	1.482	1.363	1.198	1.041	0.861	0.683	0.528	0.400	0.300	0.231	0.184	0.144	0.093	0.050	0.021	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
82.87	2.018	2.024	2.042	2.036	2.005	1.926	1.803	1.833	1.430	1.199	0.987	0.764	0.575	0.422	0.308	0.231	0.190	0.150	0.086	0.045	0.018	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000		
77.34	2.339	2.341	2.346	2.353	2.357	2.321	2.223	2.084	1.851	1.595	1.523	1.083	0.809	0.581	0.422	0.300	0.219	0.177	0.126	0.076	0.038	0.014	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	
71.82	2.589	2.820	2.892	2.642	2.634	2.614	2.554	2.425	2.292	1.980	1.685	1.371	1.062	0.807	0.574	0.389	0.277	0.199	0.155	0.110	0.083	0.029	0.008	0.000	0.000	0.000		
66.29	2.779	2.803	2.820	2.589	2.886	2.857	2.788	2.683	2.525	2.297	2.013	1.686	1.347	1.024	0.769	0.527	0.369	0.247	0.177	0.142	0.092	0.049	0.018	0.003	0.000	0.000	0.000	
60.77	2.945	2.924	2.978	3.037	3.087	3.074	3.011	2.894	2.726	2.624	2.289	1.956	1.615	1.268	0.982	0.881	0.488	0.315	0.219	0.176	0.124	0.072	0.032	0.008	0.000	0.000	0.000	
55.24	3.048	3.076	3.125	3.149	3.214	3.225	3.175	3.094	2.936	2.719	2.452	2.183	1.839	1.480	1.160	0.859	0.596	0.401	0.270	0.192	0.153	0.096	0.050	0.018	0.003	0.000	0.000	
49.72	3.047	3.149	3.204	3.270	3.295	3.325	3.289	3.225	3.097	2.920	2.658	2.355	2.020	1.684	1.347	1.020	0.746	0.505	0.396	0.229	0.181	0.125	0.070	0.029	0.008	0.000	0.000	
44.20	3.092	3.128	3.189	3.217	3.388	3.418	3.401	3.311	3.220	3.081	2.844	2.600	2.250	1.880	1.541	1.214	0.909	0.525	0.414	0.273	0.190	0.149	0.090	0.042	0.011	0.000	0.000	
38.87	3.136	3.119	3.203	3.302	3.367	3.427	3.455	3.401	3.277	3.150	2.978	2.746	2.468	2.111	1.753	1.414	1.063	0.762	0.604	0.327	0.221	0.175	0.112	0.067	0.020	0.003	0.000	
33.35	3.109	3.140	3.222	3.275	3.378	3.449	3.448	3.430	3.349	3.221	3.039	2.872	2.628	2.303	1.958	1.618	1.243	0.899	0.800	0.387	0.255	0.195	0.152	0.072	0.029	0.008	0.000	
27.62	2.933	3.058	3.164	3.268	3.381	3.397	3.458	3.413	3.324	3.257	3.116	2.944	2.761	2.483	2.140	1.802	1.409	1.014	0.809	0.446	0.284	0.102	0.146	0.085	0.037	0.009	0.000	
22.10	2.852	2.906	3.013	3.126	3.276	3.356	3.373	3.308	3.315	3.253	3.147	2.902	2.643	2.581	2.292	1.981	1.558	1.198	0.788	0.600	0.314	0.208	0.151	0.098	0.046	0.012	0.000	
16.67	2.815	2.785	2.924	3.054	3.159	3.280	3.346	3.323	3.280	3.254	3.181	3.028	2.907	2.686	2.408	2.086	1.874	1.233	0.858	0.645	0.342	0.224	0.176	0.110	0.054	0.016	0.002	
11.05	2.795	2.795	2.906	2.976	3.071	3.220	3.280	3.263	3.245	3.240	3.187	3.047	2.949	2.749	2.468	2.159	1.754	1.301	0.905	0.677	0.352	0.236	0.168	0.118	0.061	0.023	0.005	
5.62	2.685	2.761	2.851	2.910	3.027	3.182	3.264	3.229	3.220	3.291	3.160	3.057	2.870	2.780	2.528	2.212	1.784	1.335	0.930	0.594	0.373	0.245	0.184	0.124	0.054	0.028	0.005	
0.00	0.00	5.52	11.05	18.57	22.10	27.62	33.15	38.57	44.20	49.72	55.24	60.77	65.75	71.82	77.34	82.87	88.35	93.87	99.44	104.96	110.49	116.01	121.64	127.08	132.69	138.21	145.84	149.15

( UNIT : \*1.E-4 %DELK/K )

Fig. 33  $^{239}\text{Pu}$  Reactivity Worth Distribution on the Central X-Y Plane of ZPPR-7A calculated by 3-Dimensional First-order Perturbation Theory Code. Added material is of  $10^{24} \text{n/cm}^3$  at each position.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
145.84	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
138.31	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
132.56	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
127.08	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	0.000	
121.54	-0.010	-0.010	-0.010	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	0.000	
118.01	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	0.000	
110.49	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0.000	
104.87	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	0.000	
89.44	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	0.000	
69.82	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	0.000	
68.38	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	
62.87	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	
77.84	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	0.000	
71.82	-0.105	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	0.000	
88.29	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	-0.121	0.000	
60.77	-0.140	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	0.000	
65.24	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	-0.144	0.000	
49.72	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	0.000	
44.20	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	0.000	
38.67	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	0.000	
33.16	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	-0.155	0.000	
27.62	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147	0.000	
22.10	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	0.000	
19.57	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	-0.146	0.000	
11.05	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	0.000	
6.62	-0.107	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	-0.111	0.000	
0.00	0.000	5.52	11.05	15.57	22.10	27.62	33.16	38.67	44.20	49.72	55.24	60.77	65.25	71.34	77.34	82.87	88.39	93.92	98.44	104.95	110.49	115.01	121.54	127.05	132.56	138.01	143.54

(UNIT \*1.E-4 XDEL K/K)

Fig. 34  $^{238}\text{U}$  Reactivity Worth Distribution on the Central X-Y Plane

of ZPPR-7A calculated by 3-Dimensional First-order Perturbation

Theory Code - Added material is of  $10^{24} \text{n/cm}^3$  at each position.-

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
148.84	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
135.11	-0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	26	
132.59	-0.000	-0.001	-0.001	-0.000	-0.000	-0.001	-0.001	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	26	
127.08	-0.022	-0.022	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	-0.019	24	
121.64	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	22	
119.01	-0.071	-0.071	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	21	
110.49	-0.125	-0.125	-0.125	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	-0.117	20	
104.87	-0.245	-0.233	-0.222	-0.198	-0.176	-0.145	-0.117	-0.093	-0.076	-0.061	-0.052	-0.045	-0.038	-0.032	-0.027	-0.021	-0.016	-0.010	-0.005	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	19	
88.44	-0.482	-0.457	-0.444	-0.420	-0.384	-0.327	-0.271	-0.222	-0.173	-0.132	-0.089	-0.071	-0.065	-0.045	-0.027	-0.011	-0.007	-0.002	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	18		
89.82	-0.751	-0.751	-0.750	-0.708	-0.663	-0.575	-0.493	-0.415	-0.321	-0.242	-0.176	-0.125	-0.093	-0.084	-0.050	-0.030	-0.016	-0.000	-0.001	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	17	
88.99	-1.015	-1.012	-1.001	-0.979	-0.938	-0.879	-0.791	-0.691	-0.655	-0.433	-0.311	-0.215	-0.141	-0.093	-0.074	-0.053	-0.031	-0.015	-0.000	-0.002	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	16	
62.87	-1.242	-1.242	-1.242	-1.235	-1.205	-1.185	-1.071	-0.986	-0.843	-0.707	-0.522	-0.364	-0.245	-0.182	-0.105	-0.071	-0.052	-0.022	-0.01	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	15	
77.84	-1.347	-1.351	-1.452	-1.446	-1.407	-1.351	-1.234	-1.102	-0.946	-0.777	-0.573	-0.405	-0.286	-0.186	-0.102	-0.061	-0.045	-0.023	-0.011	-0.004	-0.003	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	14	
71.82	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	-1.681	13	
68.29	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	-1.726	12	
60.77	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	-1.860	11	
55.24	-1.866	-1.715	-1.708	-1.952	-2.000	-1.985	-1.931	-1.771	-1.882	-1.885	-1.495	-1.324	-1.122	-0.803	-0.685	-0.455	-0.270	-0.182	-0.086	-0.056	-0.036	-0.010	-0.006	-0.002	-0.000	0.000	10	
48.72	-1.893	-1.765	-1.801	-2.045	-2.067	-2.041	-1.985	-1.881	-1.672	-1.521	-1.365	-1.231	-1.021	-0.804	-0.803	-0.588	-0.225	-0.130	-0.075	-0.041	-0.032	-0.018	-0.005	-0.002	-0.000	0.000	9	
44.20	-1.861	-1.985	-1.891	-1.862	-1.955	-1.986	-1.971	-2.045	-1.896	-1.885	-1.733	-1.471	-1.204	-1.084	-0.943	-0.724	-0.495	-0.285	-0.186	-0.085	-0.055	-0.034	-0.015	-0.003	-0.000	0.000	8	
38.87	-1.803	-1.965	-2.015	-2.076	-2.12	-2.15	-2.00	-1.95	-2.025	-1.844	-1.684	-1.481	-1.205	-1.07	-0.865	-0.621	-0.595	-0.215	-0.115	-0.061	-0.048	-0.021	-0.008	-0.000	-0.000	7		
39.15	-1.725	-1.763	-1.851	-2.051	-2.175	-2.141	-1.956	-1.851	-1.851	-1.802	-1.780	-1.501	-1.321	-1.194	-0.976	-0.741	-0.485	-0.275	-0.147	-0.055	-0.027	-0.016	-0.005	-0.000	-0.000	6		
27.82	-1.844	-1.761	-1.802	-1.893	-1.95	-2.131	-2.165	-2.142	-2.051	-1.822	-1.703	-1.824	-1.743	-1.623	-1.506	-1.090	-0.842	-0.693	-0.344	-0.180	-0.091	-0.055	-0.035	-0.014	-0.000	5		
22.10	-1.825	-1.861	-1.92	-1.80	-1.905	-1.95	-2.111	-2.14	-2.075	-1.601	-1.76	-1.865	-1.744	-1.645	-1.493	-1.181	-0.830	-0.67	-0.398	-0.208	-0.10	-0.086	-0.056	-0.016	-0.000	4		
18.57	-1.859	-1.777	-1.878	-1.862	-1.96	-1.865	-1.851	-2.096	-2.051	-1.793	-1.744	-1.880	-1.781	-1.685	-1.471	-1.255	-0.995	-0.72	-0.43	-0.23	-0.116	-0.066	-0.045	-0.015	-0.000	-0.002	3	
11.05	-1.331	-1.47	-1.65	-1.910	-1.86	-1.79	-1.84	-2.06	-2.055	-1.761	-1.74	-1.895	-1.81	-1.693	-1.303	-1.046	-0.76	-0.485	-0.244	-0.126	-0.071	-0.046	-0.021	-0.007	-0.000	2		
5.62	-1.192	-1.525	-1.55	-1.87	-1.93	-1.78	-1.60	-2.05	-2.021	-1.775	-1.74	-1.802	-1.82	-1.614	-1.333	-1.070	-0.76	-0.477	-0.253	-0.131	-0.071	-0.048	-0.022	-0.007	-0.001	1		
0.00	0.00	0.52	1.15	1.37	2.10	2.52	3.15	3.67	4.20	4.72	5.24	5.77	6.29	6.82	7.34	7.87	8.39	8.92	9.44	10.56	11.04	12.15	12.70	13.25	13.81	14.36	14.91	

( UNIT : 1.E-4 DEL K/K )

Fig. 35  $^{10}$ B Reactivity Worth Distribution on the Central X-Y Plane  
of ZPPR-7A calculated by 3-Dimensional First-order Perturbation Theory Code. Added material is  $10^{24}$  n/cm<sup>3</sup> at each position.