

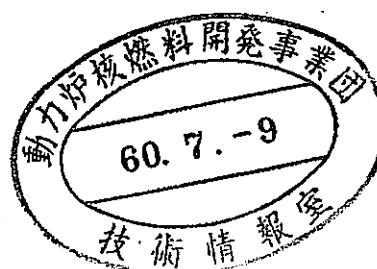
本資料は200/年 7月 31日付で  
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

# JUPITERフェイズII実験解析( I - D )

— ZPPR-13Aの解析と  
ZPPR-10反応率総合評価

(受託研究)

1983年6月



株式会社 日立製作所

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



配 布 限 定  
PNC SJ 202 83-09  
1983 年 6 月 30 日

## J U P I T E R フェイズⅡ 実験解析 (I - D) \*

ZPPR-13A の解析と

ZPPR-10 反応率の総合評価

睦倉 和雄 \*  
瑞慶覧 鶯 \*\*

### 要 旨

大型高速臨界集合体 ZPPR-13 を用いた大型非均質炉心に関して実験計画を検討し、最初の実験である ZPPR-13A を解析するための予備検討を行った。また ZPPR-10 の反応率分布 C/E 値を再検討した。

- I) ZPPR-13 の実験を検討し、ZPPR-13A 及び 13B におけるいくつかの追加実験を提案した。また、ZPPR における軸方向非均質炉心の実験計画案を作成した。
- II) ZPPR-13A の実験データを整理し、解析するための炉心寸法、原子数密度などを設定した。また、解析の基本となる格子計算モデルを決定した。
- III) ZPPR-9, 10 で問題となっていたセル非対称効果、シム制御棒効果等を検討し、ZPPR-10 の反応率分布を再評価した。その結果、x y 軸間における C/E 値の系統的な不一致は小さくなつたが、炉心径方向位置による C/E 値の増加の傾向はより顕著になった。この C/E 値から、大型均質炉心の核設計における出力分布計算誤差は約 7 % と評価される。

\* 本報告書は、株式会社日立製作所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により行った研究の成果である。

\*\* 株式会社日立製作所

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. JUPITER フェイズⅡ実験計画の検討 .....	2
2. 1 径方向非均質炉心模擬臨界実験 (ZPPR-13) 計画 .....	2
2. 2 軸方向非均質炉心実験計画 .....	11
3. JUPITER フェイズⅡ実験解析 .....	19
3. 1 実験データの整理 .....	19
3. 2 解析コードの整備 .....	26
3. 3 群定数の作成 .....	26
3. 4 今後の課題 .....	30
4. ZPPR-10C における反応率分布の再評価 .....	42
4. 1 輸送計算におけるメッシュ効果の補正 .....	42
4. 2 セル非対称効果の補正 .....	58
4. 3 シム制御棒効果の補正 .....	63
5. ZPPR-9 と ZPPR-10 における反応率分布の総合評価 .....	74
5. 1 反応率分布計算法の概要 .....	74
5. 2 反応率分布の総合評価 .....	74
6. 結 言 .....	114
7. 謝 辞 .....	116
8. 参考文献 .....	117
9. 付 錄 .....	119

登録区分  
13.7.31  
変更表示

NOT FOR PUBLICATION  
PNC/J202 83-09  
June 30, 1983

## Analysis of JUPITER Phase II Experiment (I-D)\*

Analysis of ZPPR-13A Experiment and  
- Reevaluation of Reaction Rate Distributions -  
in ZPPR-10

by Kazuo Azekura\*\*  
Atsushi Zukeran\*\*

### Abstract

In relation to a radially heterogeneous fast reactor critical experiment ZPPR-13, its experiment plan has been studied and preliminary study for ZPPR-13A has been performed. Reaction rate distributions in ZPPR-10 have been reevaluated.

- i) As a result of reviewing ZPPR-13 experiment plan, some additional experiments have been added to ZPPR-10A and 10B experiments. Axially heterogeneous fast reactor critical experiments have been suggested.
- ii) Fundamental data of ZPPR-13A such as core dimensions and atomic number densities have been decided. A cell calculation model for ZPPR-13A analysis has been suggested.
- iii) Reaction rate distributions in ZPPR-10 have been reevaluated by correcting for effects such as cell asymmetry and shim rod effects. The systematic difference in C/E-value between x- and y-axes has

\* Work performed under contracts between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp. and Hitachi Ltd.

\*\* Hitachi Ltd.

been reduced. Instead, the spatial dependency of C/E-values has become more appreciable compared to previous analyses. From these C/E-values, calculational error of power distributions in large fast reactors has been estimated to be about 7%.

## 1. 緒 言

大型高速増殖炉の研究開発の一環として、原型炉を対象に開発されてきた現在の核計算法の大型炉への適用性を評価するために、米国のZPPRを用いた大型高速炉模擬臨界実験を、日米が協力して解析する計画（JUPITER計画）が54年度から56年度にかけて実施された。この計画では均質型の炉心が対象となり、ZPPR-9および10における実効増倍率、反応率分布、制御棒価値、ナトリウム・ボイド反応度、ドップラー係数などの核特性が解析された。これらのC/E値から大型均質炉心の核設計精度が評価された。

大型均質炉心の実験解析に続き、57年度からは大型径方向非均質炉心の実験を解析する計画（JUPITERフェイズⅡ計画）がやはり日米協力で始められた。この計画ではZPPR-13の実験が対象となっており、そのうちZPPR-13Aは既に実験が完了し、現在（58年6月）ZPPR-13Bの実験が行われつつある。この後、さらにZPPR-13Cの実験が予定されている。

径方向非均質炉心の実験解析に関しては、米国はすでにZPPR-7及び11で経験しているが、日本は今回が最初である。また、炉心形状が均質炉心と大きく異なるため、これまでの核計算手法を全面的に見直しながら解析作業を進めていく必要がある。そのため、現在、ZPPR-13A実験解析のために種々の予備検討が行われつつある。

本報告書はJUPITERフェイズⅡ計画に関し、日本側で作成したZPPR-13実験計画案と、ZPPR-13Aのこれまでの解析結果をまとめたものである。その他に、ZPPR-9、10解析で問題とされていた、セル非対称効果、輸送計算におけるメッシュ効果などを評価し、それらをもとに再評価したZPPR-10の反応率分布のC/E値もまとめている。さらに、高速炉核設計における出力分布の予測精度について再検討した結果についても記している。

## 2. JUPITERフェイズⅡ実験計画の検討

### 2.1 径方向非均質炉心模擬臨界実験 (ZPPR-13) 計画

#### 2.1.1 ZPPR-13 計画の経緯

米国における最初の非均質炉心の模擬臨界実験は、径方向非均質炉心の CRBR のための ZPPR-7, ZPPR-8 及び ZPPR-11 であった。これらの実験は 1977 年に完了し、その <sup>1), 2)</sup> 解析結果も報告されている。この一連の実験は、米国 DOE が単独に実施したもので、日本は実験データを入手していない。

一方、日米高速炉協定に基づく非均質炉心の模擬臨界実験は、JUPITER フェイズⅡ実験計画で実施されている。この計画の素案は JUPITER フェイズⅠ計画の開始以前 (1979 <sup>3), 4)</sup> 年) に完成していたが、紆余曲折があり、本格的な日米協議のテーマにあがったのは、1981 年日本で開催された「JUPITER 実験解析専門家会議」であった。ここで提示された米国案は以下に示す 3 つの臨界体系から成るものであった。

ZPPR-13A：典型的な径方向非均質高速炉の模擬体系で、図 2.1 に示す 3 個の燃料領域からなり、24 個の制御棒チャンネルを持つ、Pu 富化度が 2 種類からなる体積 3780 l の炉心である。

ZPPR-13B：図 2.2 に示す制御棒チャンネルを持たない、単純形状の炉物理ベンチマーク炉心で、体積は 4110 l、プレート配列は ZPPR-13A と同じ炉心である。

ZPPR-13C：図 2.3 に示すように、ZPPR-13B の内部プランケットの厚さを厚くしたものである。

ZPPR-13A は所謂工学モックアップ実験であり、ZPPR-13B と -13C は炉物理モックアップ実験である。特に後二者における実験データの解析により、径方向非均質炉心での内部プランケットによる decoupling の度合が変わった場合の計算精度の検証に焦点をあてたものである。

その後、米国内の原子炉メーカー (GE, WH 等) との調整の結果、上述の構想が大幅に変更され、図 2.4(a) ~ (g) に示す第 2 次案が提示された。ここで大きく変わっているのは、図 2.2 と図 2.3 に示した炉物理ベンチマーク実験が消えその代り ZPPR-13A で炉物理ベンチマーク実験を行なうとした点である。この第 2 次案における各炉心の特徴と実験項目を表 2.1 と表 2.2 に示す。

上述の第 2 次米国案に対して、日本国内では各社が独自の判断に基づいて検討し、その

結果を JUPITER 検討会に持ち寄って討論し、日本側提案として米国に提出する手順をとった。以下に日立の検討結果を述べる。

### 2. 1. 2 JUPITER フェイズⅡ計画の検討

#### 1) 基本的な考え方

2. 1. 1 の最初に述べたように、米国は ZPPR-7,-8,-11 の実験を既に実施すみであり、その実験解析を通して、核データ及び核計算法に対する適用性の基本的な検証も完了している。これに対して、日本は非均質炉心に関する実験データが皆無であり、実験解析の実績がない。この状況を考慮すると、日本側としては非均質炉心の基本的な問題に立戻って対処する必要がある。そこで次のような基本的な考え方を前提とした。

##### (1) 非均質炉心の基本核特性の把握

炉心（ドライバー）と内部プランケットとの結合の度合（例えば、プランケット厚さ）のちがいによる反応率分布や制御棒価値等の変化を把握する。

##### (2) プランケット分割効果

径方向非均質炉心の場合、制御棒価値や出力分布の最適化のために径方向プランケットを  $\theta$  方向に数個の部分に分割する設計例が多い。この分割により炉心形状が複雑化し、核特性予測に困難をきたすことが考えられる。これを適確に実験的に把握できるよう、円筒形炉心（リンク状プランケット）と切断されたリンク状プランケットを持つ円筒炉心に対して、並行して同一の核特性を測定する。

##### (3) 設計研究対象炉心に拘泥しない

将来の実証炉を目標とした径方向非均質炉心には多種多様の案があり、現段階で特定の炉心に焦点をしぼることは困難である。

##### (4) 径・軸両方向の非均質性に着目

(3) で述べた径方向非均質炉心の多様性と同様、軸方向非均質炉心もその一環と考えるべきである。そこで、可能な限り軸方向非均質炉心の基本特性も測定する。軸方向非均質炉心実験の提案については 2. 2 節で述べる。

##### (5) ピン／プレートの比較

反応率分布等のように炉心内の局所的な中性子束分布に敏感に依存する核特性に対しては、比較の基準を得る目的で、部分的にピン燃料要素を用いる。

### 2. 1. 3 ZPPR-13 実験に対する提案

米国側提案に対する提案を表 2. 2 に示す。以下各炉心毎に提案内容の補足説明を行う。

## I. ZPPR-13A

### (1) Na ポイド反応度に対する制御棒効果の測定

JUPITER フェーズ I の実験解析結果からあきらかに <sup>5)</sup> ように、Na ポイド反応度は制御棒挿入に伴う中性子束分布の歪の影響を顕著に受け、計算値と実験値の一致の度合が悪くなる。

この傾向は、非均質炉心の場合により顕著にあらわれるものと予測されるので、制御棒実験の一環として、Na ポイド反応度の測定を並行して行う。

### (2) Na ポイド実験 Zone 1 と 2 の同時ポイド時の反応度の測定

Na ポイド反応度の実験値と輸送計算値を比較するためには、Zone 1 と 2 の個別の反応度測定だけでなく、これらの 2 領域を同時にポイド化した場合の反応度が、計算法の検証上重要である。

### (3) 炉心と内部プランケット境界近傍のポイド反応度の測定

英國の非均質炉心模擬臨界実験 BIZET の解析結果によると、炉心と内部プランケットの境界近傍における Na ポイド反応度の計算値は約 70% 過大評価される。<sup>6)</sup>

このような炉心・プランケットの境界近傍におけるポイド反応度や反応率分布等の計算法はまだ十分に検証されていないので、境界近傍の Na ポイド反応度の測定値を得る必要がある。

### (4) Z 軸方向 Na ポイド反応度の測定

Na ポイドの軸方向への伝播に伴う反応度変化の計算法の検証のため、炉心部を Z 軸方向に数ステップに分けて測定すべきと考える。

### (5) Na ポイド反応度と反応率分布の Pin/Plate 比較実験

ピン燃料集合体における中性子ストリーミングの計算法を検証するため、Na ポイド反応度と反応率分布に関して、ピン・カランドリア燃料集合体を用いた実験と従来のプレート燃料を用いた場合の比較を行う。

## II. ZPPR-13B

米国案では、ZPPR-13B は Broken Cylinder Core, Dispersed-Blanket Core, Broken Hexagonal Blanket Core の 3 種類の炉心からなっているが、先に述べた基本的な考え方にもとづいて、主要な実験項目を ZPPR-13A に近い Broken Cylinder Core にしほる。

### (1) ドロワ内のプレートに平行方向の反応率分布の測定

セル計算法の検証と反応率分布のセル内中性子束分布の補正值を得る目的で、ドロワ

一内反応率分布を測定するが、通常プレートに垂直方向の中性子束分布が測られている。

上記の目的を達するためには、プレートに平行方向の中性子束分布も測定する。

測定領域は炉心部とプランケット部にまたがる領域を考え、次に述べる径方向反応率分布の測定と重複する点を選点する。

#### (2) 内部プランケットが分割される付近での反応率分布

上で述べたように、半径方向に炉心中心から径方向プランケットの外端まで一貫した測定を行う。

#### (3) Na ポイド反応度のプランケット分割効果

ZPPR-13Aとの比較において、Na ポイド反応度のプランケット分割効果を見るため、ZPPR-13AのZone 2相当領域をポイド化する。

#### (4) 制御擇実験

Broken Hexagonal Blanket Core における一連の制御擇実験を基本方針に従つて Broken Cylinder Core で実施する。

### III. ZPPR-13C

米国案におけるZPPR-13Cは、米国の非均質高速実証炉(Snow Flake)の模擬体系である。これは先に述べた基本的な考え方によれば、時期尚早と考える。

Table.2.1 Plan of JUPITER Phase II Experiment (U.S.Draft)

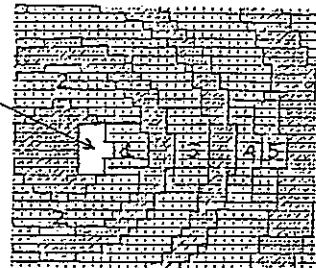
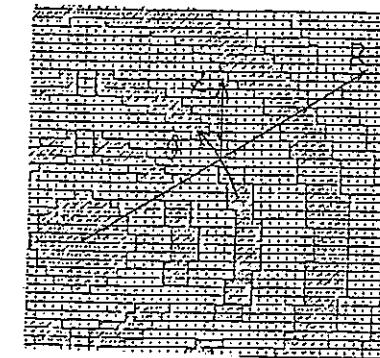
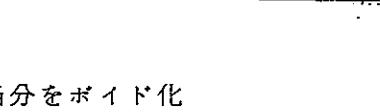
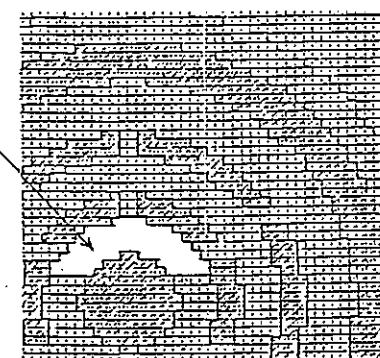
No	項目	ZPPR-13A	ZPPR-13B			ZPPR-13C
		Broken Cylinder	Broken Hexa	Dispersed I.B	SNOW FLAKE	
1.	各体系の特徴	・基礎実験用単純形状 (円筒)炉心	← • 内部ブランケットの配列効果 → • 臨界体系の他に未臨界体系での測定もある。			• $\theta$ 方向のデカップル が強力な炉心 • Zone Substitution experiment
2.	実験内容 <u>(測定項目)</u>					
	i) サンプル・ワース	径・軸両方向	なし	なし	なし	径・軸両方向
	ii) Na ボイド反応度	径・軸両方向	なし	なし	なし	事故時のボイドを模擬
	iii) 反応率分布	径・軸両方向	・径方向 ・ドロワー内反応率分布	径方向とギャップ	径・軸両方向	径・軸・ $\theta$ 方向
	iv) 制御棒価値	(2×2)制御棒で、リ ング毎1本、グループ one rod stuck	なし	(2×3)制御棒で、 グループ	なし	1本、グループ、干渉 効果
	v) ドップラー効果	UO <sub>2</sub> , PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> , SUSサンプル使用	なし	なし	なし	UO <sub>2</sub>
	vi) $\tau$ -dose	径方向	なし	径方向	径方向	径・ $\theta$ 方向
	vii) ゾーン実験	なし	なし	なし	なし	• Pu-isotope, <sup>235</sup> U • ピン/プレート比較
	viii) その他	動特性実験	なし	なし	なし	• Long drawer osci

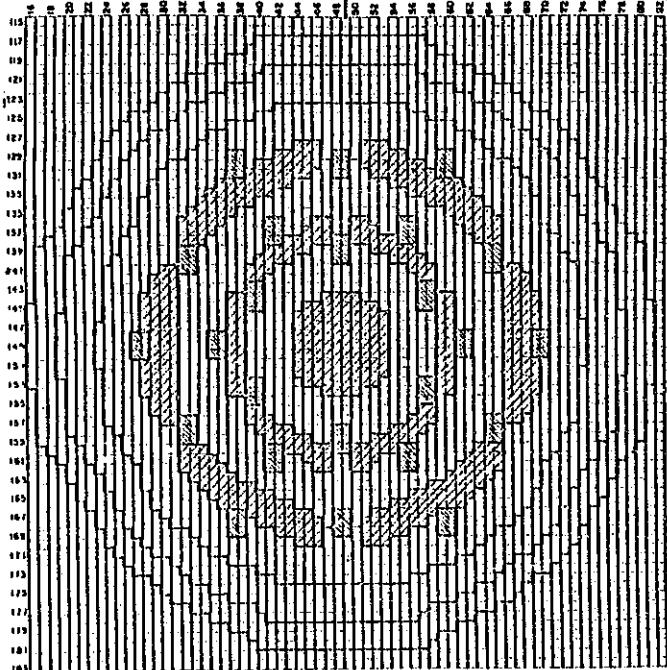
\*) 本資料は炉心設計専門委員会資料 FR-147-5 (FBEC の山本氏作成) を加筆したものである。

Table.2.2 Large Heterogeneous Core Critical Experiment ZPPR-13 (General Work Plan)

体系と実験項目	実験内容	体系と実験項目	実験内容
ZPPR-13A Physics Benchmark Core		ZPPR-13C LDP Physics Mock-up	
i) $K_{eff}$	:	ii) $K_{eff}$	:
ii) サンブルワース分布	: 径・軸方向 サンブル= $^{239}\text{Pu}$ , $^{235}, 238\text{U}$ , $^{10}\text{B}$ , $\text{Fe}$ , $^{252}\text{Cf}$ , SUS	ii) 反応率分布	: 径方向=X, Y軸, $30^\circ$ , $60^\circ$ 軸方向=1st, 2nd F.rings 内 Z 方向 } 第1象限 $\theta$ 方向=Outer F.ring 内 $\theta$ 方向 (追加): Outer F.ring の高出力領域の他の象限も $\gamma$ 線線量率分布=径・ $\theta$ 方向
iii) Na ポイド反応度	: 径方向 5ステップ, ポイド領域高さ=12 in (30 cm) 1st F.ring: $\theta$ 方向 2分割 輸送計算と比較 3rd F.ring: r 方向 2分割 ポイド反応度=0 近傍の詳細測定	iii) サンブルワース分布	: 径・軸方向..... $^{239}\text{Pu}$ , $^{235}, 238\text{U}$ , $^{10}\text{B}$ , $\text{Fe}$ , $^{252}\text{Cf}$ , SUS 測定法=Long drawer oscillator =Shim oscillator ( $^{235}\text{U}$ のみ)
iv) 反応率分布	: 箔(TLD)測定 (含 $\gamma$ 線線量率) 径方向=X, Y軸, $30^\circ$ , $60^\circ$ 方向 軸方向=1st, 2nd F.rings 上 Z 方向	iv) 制御棒	: 単一およびグループ制御棒(CR, CRP) 値値, 干渉効果 制御棒挿入に伴う出力分布の歪
v) 制御棒価値	: 1st F.ring CR 6CR CRP 6CRP 2nd F.ring CR 5CR 6CR 12CR CRP 12CRP 3rd F.ring CR 5CR 6CR 12CR CRP 12CRP (制御棒サイズ=2×2 drawer <sup>2</sup> )	v) ドップラー係数	: 1st, 2nd F.rings 内高出力領域における Nat.UO <sub>2</sub>
vi) ドップラー係数	: 1, 2, 3 F.rings における Nat.UO <sub>2</sub> サンブル・ドップラー どれか1つの F.ring での Mix PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> と SUS サンブル・ドップラー	vi) Kinetics	: ZPPR-13A と同じ
vii) Kinetics	: Low frequency response ..... Rod drop experiment High frequency response ..... Li(glass) noise detector	vii) Na ポイド反応度	: T O P 模擬実験
viii) Flux monitor	: 反応度(制御棒)挿入に対する中性子検出器の相関測定	ZPPR-13C の特徴	
ZPPR-13B Physics Benchmark Core			<ul style="list-style-type: none"> <li>o ZPPR-13シリーズの臨界体系より大きな燃料体積比を持つ LMFBR 実機を想定して</li> <li>* 燃料体積化の大きいゾーンを持たせる。</li> <li>* 将来の大型模擬臨界体系を組むために, <math>^{240}\text{Pu}</math>, <math>^{241}\text{Pu}</math>, <math>^{235}\text{U}</math> の同位体比をえたゾーン実験を行う。</li> <li>* Pin-Carandria zone 実験</li> <li>* T O P を想定した Na ポイドゾーン実験..... stepwise</li> </ul>
i) $K_{eff}$	:		
ii) 反応率分布(箔)	: 径方向=X, Y軸, $30^\circ$ , $60^\circ$ 方向(軸方向なし) ドロワー内反応率分布 内部プランケットのギャップ領域での反応率分布 DISPERED BLANKET 体系での $\gamma$ 線線量率分布 径方向=X, Y軸, $30^\circ$ , $60^\circ$ 軸方向=1st, 2nd F.ring 内 Z 方向		
iii) 制御棒実験	: BROKEN HEXA 体系での制御棒実験 CR, CRP のグループ挿入反応度 CR と CRP 挿入に伴う出力分布の歪測定 制御棒サイズ効果( $2 \times 2 \rightarrow 2 \times 3$ drawer <sup>2</sup> ) *) プランケット間ギャップ挿入		

Table. 2.3 Large Heterogeneous Core Experiment ZPPR-13

米国側提案	コメント
ZPPR-13A ..... Physics Benchmark Core	
i) $K_{eff}$	
ii) サンプルワース分布 : 径・軸方向 サンプル= $^{239}Pu$ , $^{235},^{238}U$ , $^{10}B$ , Fe, $^{252}G$ , SUS	(1) Na ボイドに対する制御棒効果測定(追加)
iii) Na ボイド反応度 : 径方向 5 ステップ, ボイド領域高さ = 12 in (30 cm)	(a) ZPPR-13A mock-up C/R 実験の一環として実施
1st.F.ring : $\theta$ 方向 2 分割 輸送計算と比較	(b) Na ボイド実験 Zone 1 or 2 相当領域をボイド化
3rd.F.ring : r 方向 2 分割 ボイド反応度 = 0 近傍	(2) Na ボイド実験 Zone 1 と 2 の同時ボイド(測定法)
の詳細測定	(3) Na ボイド実験 Zone 1 の中心(内部) ブランケットと炉心(ドライバー)の境界領域のボイド反応度測定(追加, 下図参照)
iv) 反応率分布 : (TLD)測定 (含 $r$ 線線量率)	(4) Z 方向の Void 反応度 = 0 近傍の詳細測定 (a) 1st F.ring 上 Z 方向 or (b) 2nd F.ring 上 Z 方向
径方向=X, Y 軸, $30^\circ$ , $60^\circ$ 方向	
軸方向=1st, 2nd.F.ring 上 Z 方向	
v) 制御棒価値 : 1st.F.ring CR 6CR CRP 6CRP	Pin/Plate 比較実験
2nd.F.ring CR 5CR 6CR 12CR CRP 12CRP	(a) Void Zone 1 における Pin-Carandria と Plate の置換実験 —— $\Delta K/K$ と反応率分布測定
3rd.F.ring CR 5CR 6CR 12CR CRP 12CRP	or (b) 径方向における一連の置換実験
(制御棒サイズ = $2 \times 2$ drawer <sup>2</sup> )	
vi) ドップラー係数 : 1, 2, 3F.rings における Nat.UO <sub>2</sub> サンプル・ドップラー	ドロワー内反応率分布測定点におけるプレート平行方向分布 (炉心/ブランケット境界を含む)
どれか 1 つの F.ring での Mix PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> と SUS サンプル・ドップラー	
vii) Kinetics : Low frequency response ..... Rod drop experiment	
High frequency response ..... Li(glass) noise detector	
viii) Flux monitor : 反応度(制御棒)挿入に対する中性子検出器の相關測定	ブランケット領域まで含むこと
ZPPR-13B ..... Physics Benchmark Core	
BROKEN CYLINDER 体系	
i) $K_{eff}$	
ii) 反応率分布(箔) : 径方向=X, Y, $30^\circ$ , $60^\circ$ 方向(軸方向なし)	Na ボイド反応度に対するブランケット切断効果
ドロワー内反応率分布	ZPPR-13A(Cylinder Blkt) で Void Zone 2相当分をボイド化 —— ZPPR-13A と比較
内部ブランケットのギャップ領域での反応率分布	
DISPERSED BLANKET 体系	これらの実験は Cylinder 体系で行う。
$r$ 線線量率分布 : 径方向=X, Y 軸, $30^\circ$ , $60^\circ$ 軸方向=1st, 2nd, Fring 内 Z 方向	
BROKEN HEXA 体系	
制御棒実験 : CR, CRP のグループ挿入反応度 CR と CRP 挿入に伴う出力分布の歪測定 制御棒サイズ効果( $2 \times 2 \rightarrow 2 \times 3$ drawers)	
ZPPR-13C ..... LDP Physics Mock-up	LDP の Mockup 実験は現時点では時期尚早

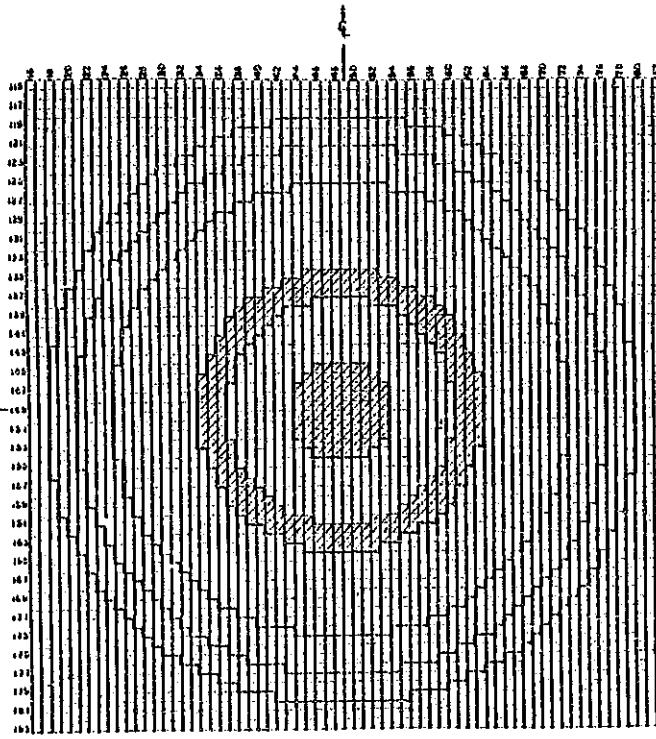


ZPPR HALF I

Control Rod Position

Internal Blanket Zone

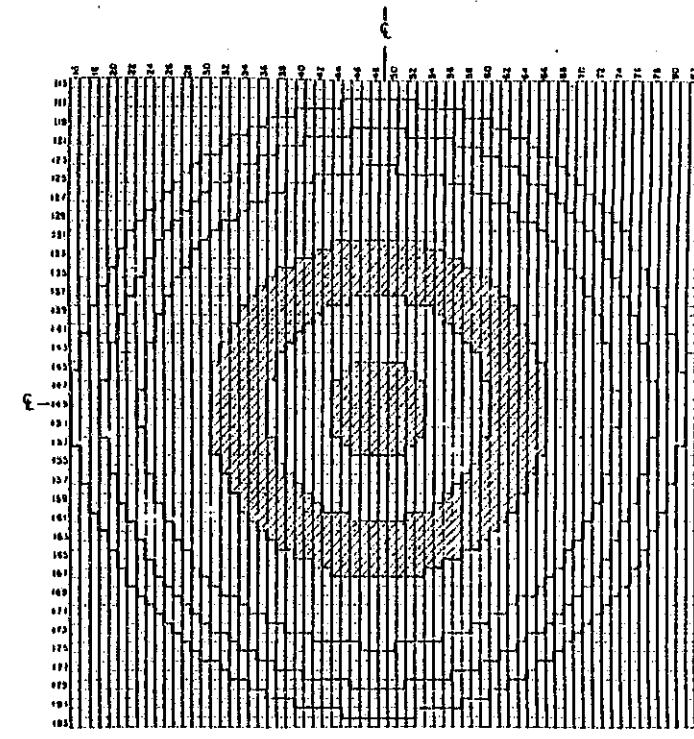
Fig. 2.1 A Proposed ZPPR-13 Engineering  
Benchmark Core.



ZPPR HALF I

Internal Blanket Zone

Fig. 2.2 A Proposed ZPPR-13 Physics  
Benchmark Core.



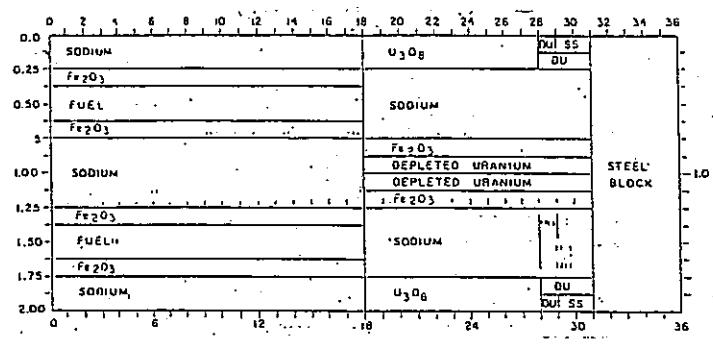
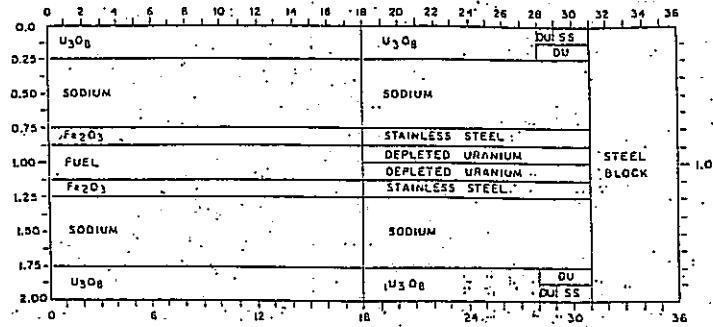
ZPPR HALF I

Internal Blanket Zone

Fig. 2.3 A Proposed ZPPR-13 Loosely-  
coupled Physics Benchmark  
Core.

Fig. 2.4 Fuel Loading Maps of ZPPR-13 Cores for Radially Heterogeneous Fast Breeder(U.S. 2nd pro.)

Cell Structure



Loading Map

ZPPR-13 A

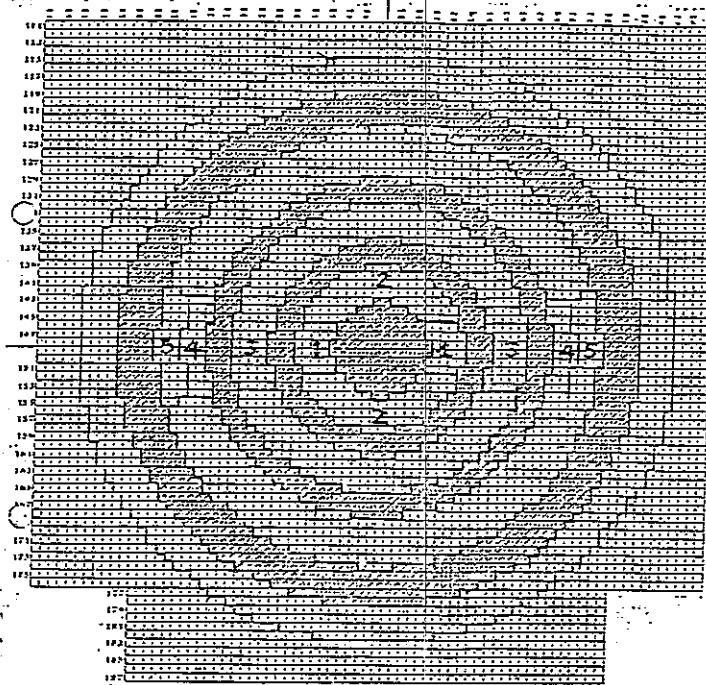


Fig. 2.4(a) Interface diagram of ZPPR-13A

Fig. 2.4(b) Sodium voiding zones for ZPPR-13A

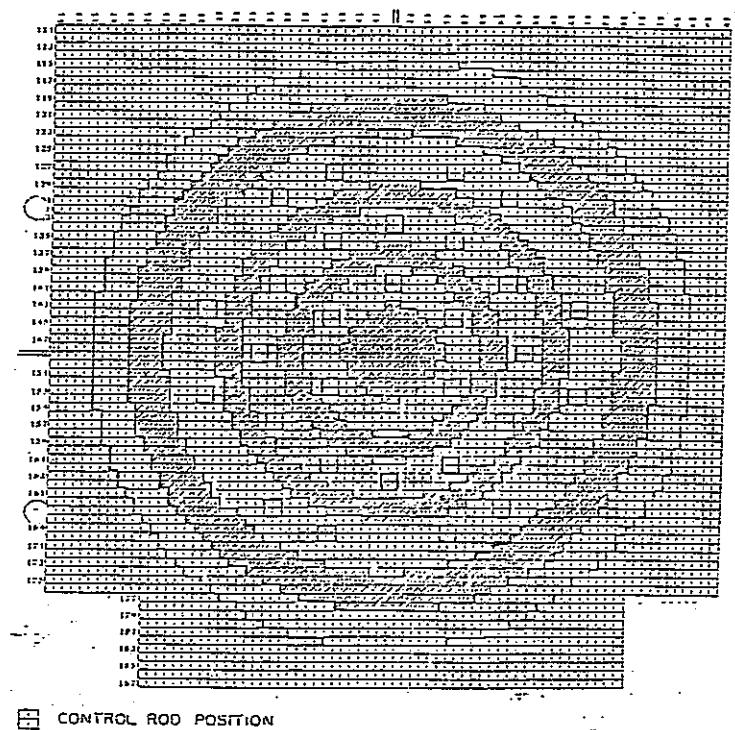
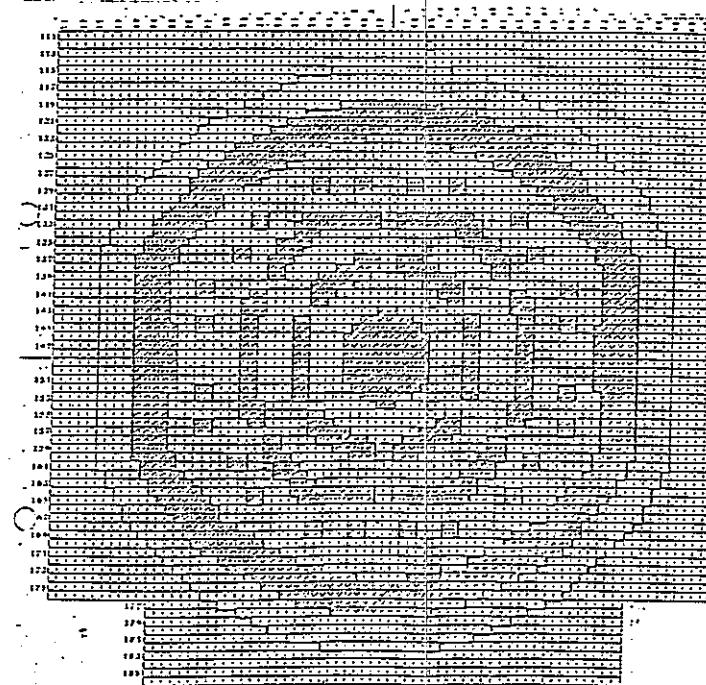


Fig. 2.4(c) Locations of mockup control rods in ZPPR-13A

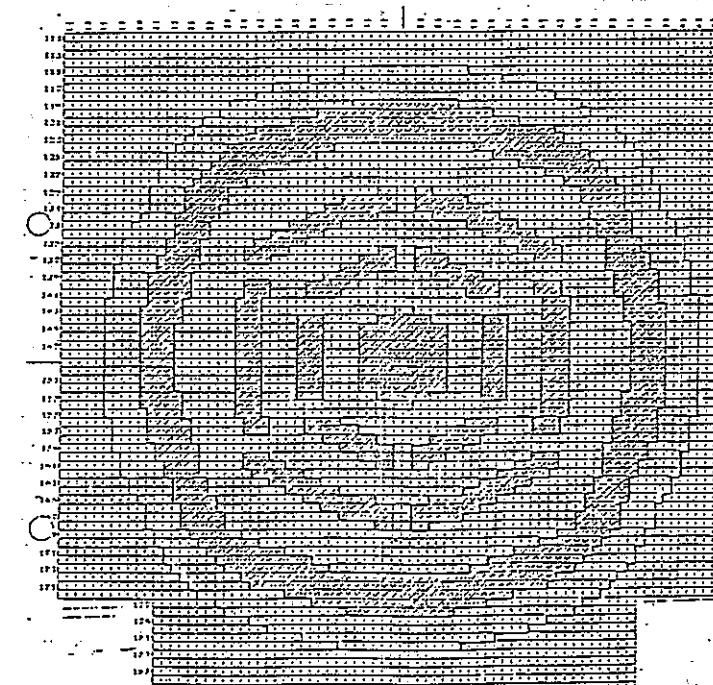
ZPPR-13 C



■ BLANKET

Fig. 2.4(d) Interface diagram of ZPPR-13B with broken cylindrical blanket rings.

ZPPR-13 B



■ BLANKET

Fig. 2.4(e) Interface diagram of ZPPR-13B with broken hexagonal blanket rings.

■ BLANKET

Fig. 2.4(f) Interface diagram of ZPPR-13B with dispersed blankets.

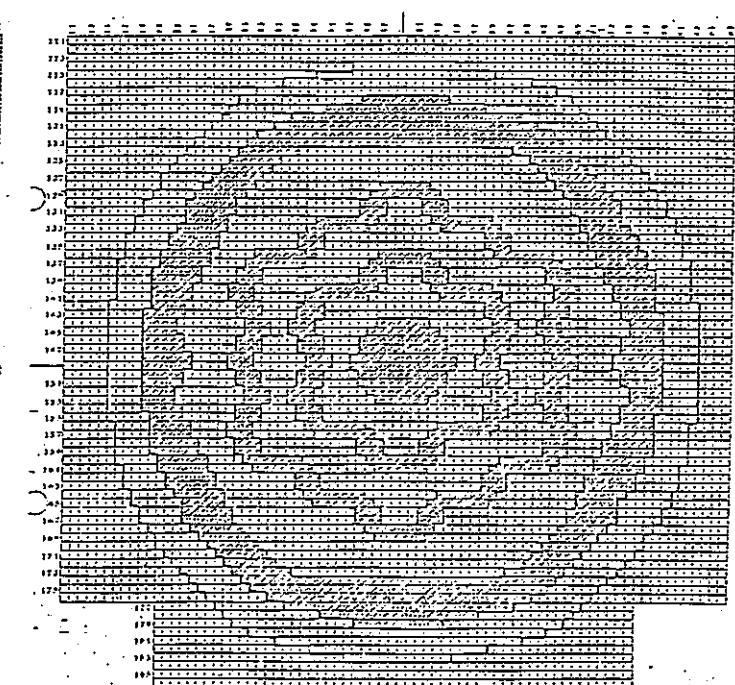


Fig. 2.4(g) Interface diagram ZPPR-13B

## 2.2 軸方向非均質炉心実験計画

ここではまず軸方向非均質炉心の特徴を均質炉心及び径方向非均質炉心と比較する。

### 2.2.1 軸方向非均質炉心の特徴

軸方向非均質炉心は、簡単な炉心構成によって、高い増殖性と安全性を得られる可能性がある。また、径方向非均質炉心のように運転期間中に出力分布が大きく変動することがない。

軸方向非均質炉心の特徴は以下のように要約することができる。

#### A. 均質炉心と比較して

- (1) 増殖率が向上し、燃料倍増時間が短縮
- (2) 燃焼反応度が小さく、制御棒必要ワースが減少
- (3) 燃料のPu富化度は1種類でよい
- (4) Naボイドワースがとくに炉心付近で小さく、燃料の軸方向ワース分布も平坦
- (5) SAS-3D, VENUS モデルによれば最大HCDA(LOF)時の反応度増加、出力増加がゆるやかであり、放出エネルギーが減少
- (6) 炉心構成（集合体、制御棒の配置等）は均質炉心と同じでもよい。

#### B. 径方向非均質炉心と比較して

- (1) 炉心構成が単純
- (2) 炉心部（炉心+プランケット）の体積、燃料インベントリー共に均質炉心と同程度に小さくてよい。
- (3) 制御棒操作及び燃焼による出力分布の変動（集合体出力の変動）が均質炉心と同程度に小さく、従って集合体出口温度が均質炉心と同程度に均一になる。（径方向非均質炉心の内部プランケット集合体の冷却材出口温度は燃焼期間中に150°C程度変動）

### 2.2.2 実験体系の検討

ZPPRにおける非均質炉心実験体系は以下の条件を考慮して選定した。

- (1) 軸方向非均質炉心の一般的特性が模擬でき、設計解析手法の検証に有効であること。
- (2) 体系が単純であること。
- (3) Pu fissile 装荷量がZPPR-10Dでの装荷量以下であること。
- (4) 実験時間の短縮のため、ケース数は必要最小限とし、炉心寸法（外形）は一定とする。

実験体系は、次の3つのフェーズに分けて選定した。

## (A) フェーズ 1

### (1) 実験目的

軸方向非均質炉心の主要設計パラメータである内部プランケット厚と径の影響を検討する。

### (2) 体系

解析を簡単にするため制御棒領域は含まれないものとする。実験体系案（2次元R D モデル）を図 2.5 に示す。体系の選定理由は次下の通り。

- (i) 内部プランケット厚は、実証炉（厚さ 22 cm）に近く、かつ今後の設計範囲をカバーすると考えられる 20 cm, 30 cm とする。
- (ii) 内部プランケットと軸方向プランケットとの間隔は 30 cm (mean free path (約 5 cm) の数倍) 以上とする。
- (iii) 炉心半径は、内部プランケット厚 30 cm で、Pu fissile 量が ZPPR-10D とほぼ同一となる条件で選定。

各体系の特徴は以下の通り。

#### (i) ZPPR-X1

基準体系。出力分布が平坦（ピーピング係数が実証炉程度）出力ピーク位置は炉心中心付近。

#### (ii) ZPPR-X2

内部プランケットの厚さの影響を検討する体系。出力ピークの位置及び出力ピーピング係数が実証炉に近い。

#### (iii) XPPR-X3

内部プランケットの径の影響を検討する体系。出力ピークの位置が実証炉に近い。

#### (iv) ZPPR-X4

内部プランケットの厚さを 40 cm とした体系（参考用）

## (B) フェーズ 2

### (1) 実験目的

制御棒ワース及び制御棒挿入時の反応率分布等を測定する。

### (2) 体系

ZPPR-X1（内部プランケット厚 20 cm）に制御棒領域（19 本）を設けた（ZPPR-X5）。図 2.6 にその X Y 断面図を示す。

### (C) フェーズ 3

#### (1) 実験目的

炉心中心領域の燃料スランピング反応度を測定する。

#### (2) 体系

ZPPR-X1の炉心中心部にテスト領域を設けた。図2.7にその2次元R-Zモデルを示す。

#### 2.2.3 実験項目

各実験体系における主要実験項目を表2.5に示す。

#### 2.2.4 ZPPR-13 燃料の使用に関する検討

これまで、ZPPR-10D体系の燃料をベースにして検討したが、軸方向非均質炉心模擬体系をZPPR-13から組替えることを想定して、ZPPR-13燃料をベースとした場合について検討した。

##### (1) ZPPR-13A 体系

ZPPR-13A体系は、径方向非均質炉心であり、炉心部はSCFD(Single Column Fuel Drawer; Pu富化度13.2%)とDCFD(Double Column Fuel Drawer; Pu富化度25.5%)それぞれ792体、2088体が一様かつ対称に配列されている。

ZPPR-13A体系の特徴をZPPR-10D体系と比較して以下に示す。

	ZPPR-13A	ZPPR-10D
Fissile Pu装荷量	2470kg	2610kg
Pu富化度	22.2%	11.7%
炉心軸方向高さ	91.6cm	101.8cm

##### (2) ZPPR-13A 燃料の使用について

ZPPR-13A燃料をベースにして、SCFDとDCFDの割合を変えて、Fissile Pu装荷量がZPPR-13Aの量以下であるという条件のもとに体系を選定した。

標準体系(ZPPR-X1相当、内部ブランケット厚さ20cm)の寸法及び組織を以下に示す。

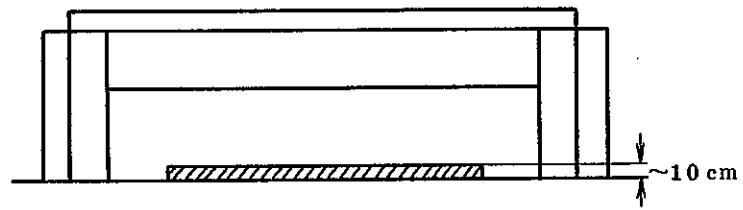
炉心寸法	炉 心	半径 13.8 cm, 高さ 101.8 cm
	内部ブランケット	半径 9.8 cm, 厚さ 20 cm
燃料	SCFD	2827 体
ドロワ数	DCFD	1093 体
Pu 富化度		16.6 %

以上の検討の結果, Pu 富化度を調整することにより, ZPPR-13 の燃料で, これまでの検討とほぼ同様の軸方向非均質模擬実験体系を組むことが可能であると言える。

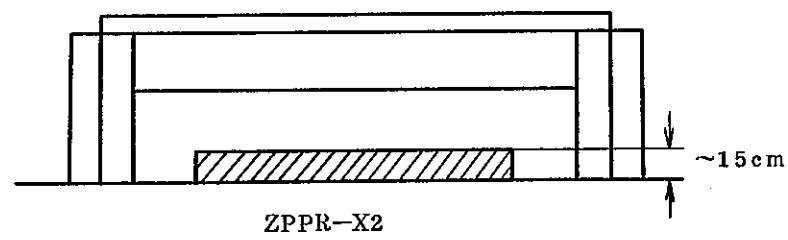
Table.2.5 Main Items of Experiment

実験体系 実験項目		Z PPR X 1	X 2	X 3	X 5	X 6	備 考
臨 界 点		○	○	○	○	○	
反応率分布	Foil Counter	○	○	○	○		径・軸 $^{239}\text{Pu}, ^{235}\text{U}, ^{238}\text{U}$ 方向 $\text{C} : ^{238}\text{U}$
	T L D	○					
サンプルワース		○	○	○			径・軸 $^{239}\text{Pu}, ^{235}\text{U}, ^{238}\text{U}$ 方向
ナトリウム	map	○	○	○	○		径・軸 方 向
	ポイド係数 広領域	○					中心ポイド
ドップラ係数		○			○		I B 中心 $^{238}\text{U}$ 炉心中心
空間動特性		○	○	○			1.Rod Drop法 2.Noise法による $\beta/\ell^*$
制御棒ワース					○		中性子源増倍法 中心 C/R S字カーブ

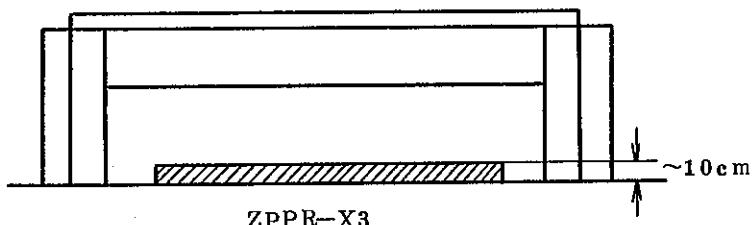
\* 炉心内に多数中性子検出器設置



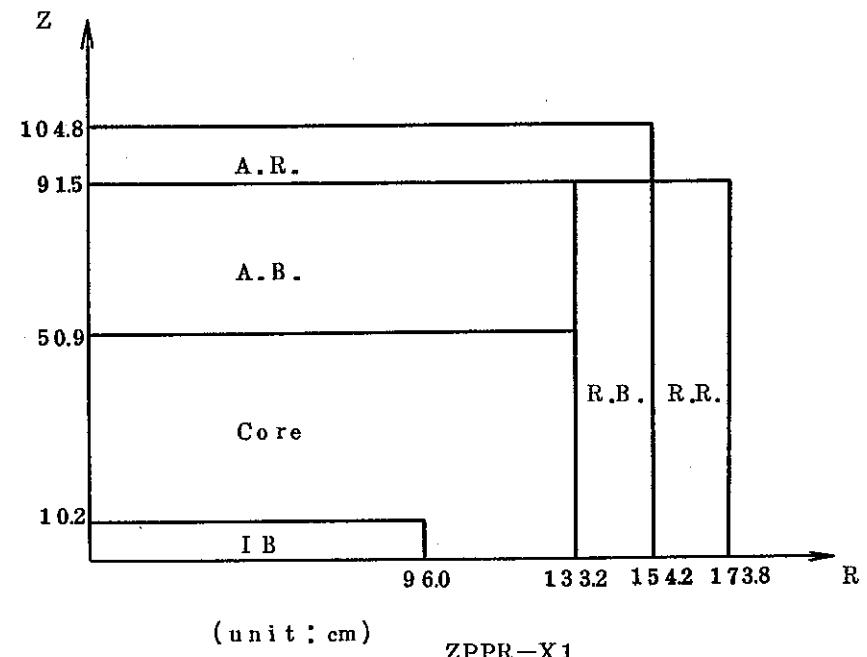
ZPPR-X1



ZPPR-X2



ZPPR-X3



[Core Dimensions]

Fig. 2.5 Axially Heterogeneous Core Experiment Systems

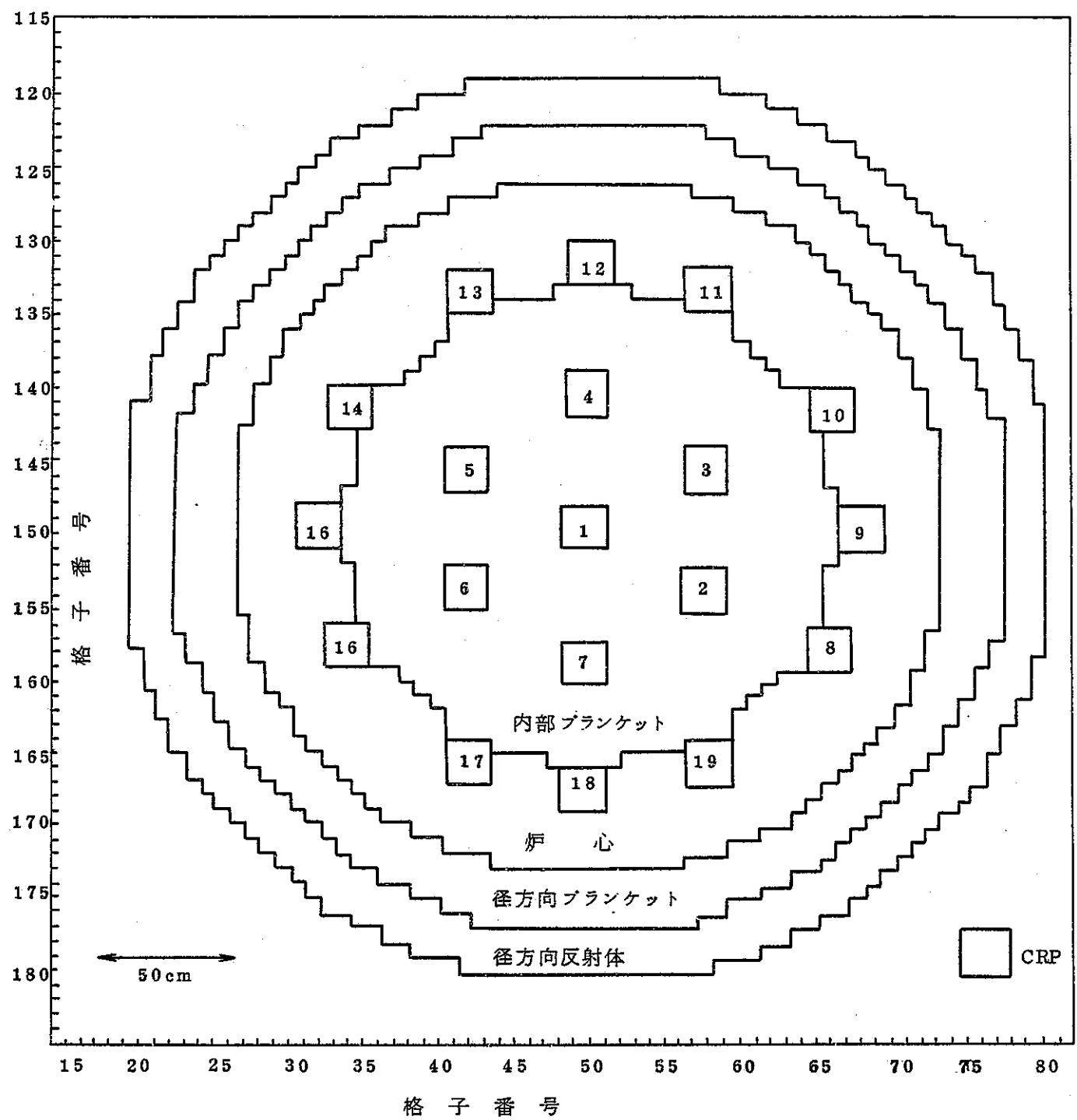


Fig. 2.6 Cross Sectional View of ZPPR-X5

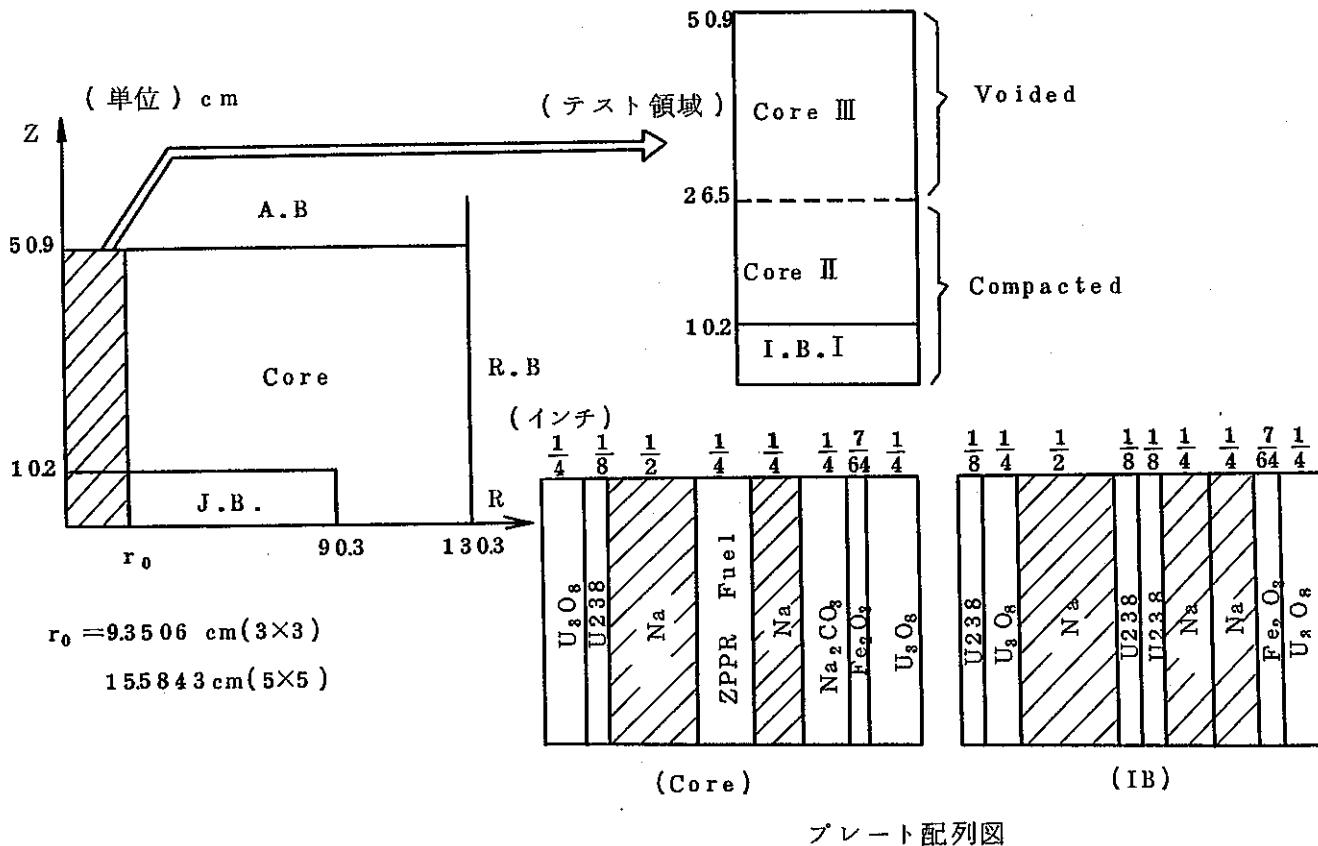


Fig. 2.7 2-D RE Model of ZPPR-X6 (Phase 3)

### 3. JUPITERフェイズⅡ実験解析

JUPITERフェイズⅡ実験は、昭和57年5月から開始され、現在迄ZPPR-13A、-13B/1、-13B/2、-13B/3の各集合体での実験が終了している。今後ZPPR-13B/4、-13Cでの実験が予定されており、全フェイズⅡ実験は、昭和57年か昭和58年初めに終了する見込みである。

昭和57年度JUPITERフェイズⅡ実験解析作業としては、i) 実験データの整理、ii) 解析コードの整備、iii) 群定数の作成、を進めた。この結果は、昭和58年度の解析に引続がれる。

#### 3.1 実験データの整理

昭和57年度は、ZPPR-13Aの条件データを整理し、ZPPR-13A基準臨界体系の形状・寸法及び組成データとしてまとめた。

##### 3.1.1 ZPPR-13A基準臨界体系の形状・寸法

集合体の形状・寸法は、集合体のDrawer Map及びDrawer内の軸方向物質構成によって、ほぼ一義的に定まる。ZPPR-13Aの形状・寸法データ設定上検討を必要とした点は、

- i) 径方向ブランケットにおける低密度Na板使用Drawerの取扱い。
- ii) 径方向反射体の“Steel Block”ドロワの取扱い。
- iii) 下部軸方向反射体領域と上部軸方向反射体領域の境界の設定
- iv) 特殊Drawerの取扱い。

である。以下、基本Drawer Map, Drawer内の軸方向物質構成、上記の検討を要した点の検討内容、推奨形状・寸法データの順に述べる。

###### 1) 基本ドロワ・マップ

図3.1 IC ZPPR-13A基準臨界体系のDrawer Mapを示す。ZPPR-13Aは中心ブランケットを持つ“Closed Cylindrical Blanket Ring”炉心である。燃料領域はDouble Fuel Column Drawerと“Single Fuel Column Drawer”とで構成されているが前者が約70%を占めている(ほぼ炉心体系の等しいフェイズI体系では、Single Fuel Column Drawerが70~80%を占めており、均質炉心と非均質炉心との臨界性の違いを示す)。径方向反射体はほとんど“SS Block”で、一部“Steel Block”となっている。特殊Drawerとして、Detector Drawer, Thermocouple

Drawer, Narrow Drawer( 運転用 PSR (Poison Safty Rod)挿入位置の Drawer )がある。Detector Drawer, Thermocouple Drawer は、それぞれ炉内検出器、Thermocouple を装荷した Drawer であるが、Drawer 内の燃料物質の量は通常の Drawer と同じである。Narrow Drawer は 1.5 in 幅の Drawer( 通常は 2.0 in 幅 )であり、燃料領域の Narrow Drawer 内の燃料物質の量は通常の Drawer と等しく、プランケット領域の Narrow Drawer 内の燃料物質の量は通常の Drawer の約 2/3 となっている。

各領域の体積は、各領域内の Drawer 本数で定まる。表 3. 1 に、各領域の Drawer 本数を示す。

## 2) Drawer 内軸方向物質構成

図 3. 2 に各 Drawer の軸方向物質構成を示す。注意すべき点は、燃料 Drawer 及び内部プランケット Drawer の上部には SS 反射体が設けられているが、外部径方向プランケット及び径方向反射体上部には SS 反射体が設けられていない点である。

## 3) 形状・寸法データ設定上検討した事項

### (1) 低 Na 密度プランケット Drawer の取扱い。

図 3. 3 に Drawer Master Number に基づく詳細な Drawer Map を示す。図 3. 3 の Drawer Master Number は最初の数字で、Drawer の種類がつぎの様に区分されている。

- 1 ..... SCF (Single Column Fuel) Drawer
- 2 ..... DCF (Double Column Fuel) Drawer
- 4 ..... Radial Reflector Drawer
- 5 ..... Blanket Drawer
- 7 ..... Detector Drawer and Thermocouple Drawer
- 8 ..... Narrow Drawer

ここで問題にするのは、508~511 のプランケット Drawer で、それ等の Drawer で使用している Na 板の Na 密度が他の Drawer のものより～10% 小さい点である。この様な Drawer の取扱いとして考えられることは

- i) 508~511 の Drawer が装荷されている領域を別領域として取扱う。
- ii) 別領域とせず、プランケット領域の組成として他の Drawer の物質組成と Drawer 本数で加重平均した組成を用いる。

である。ここでは、プランケット内反応率分布には局所的な中性子束の変化を忠実に考慮する必要があると考え、低Na密度Drawerが装荷されている領域を別領域として取扱うこととした。

(2) 径方向 Steel 反射体 Drawer の取扱い。

図 3.3 の径方向反射体 Drawer の内、Drawer Master #412 の Drawer は Steel の反射体 Drawer となっているが、その他は全て SS の反射体 Drawer となっている。この Steel 反射体 Drawer の取扱いについては、

- i) Steel 反射体 Drawer が装荷されている領域を別領域とする。
- ii) Steel 反射体 Drawer を別領域とせず、反射体領域を全径方向反射体 Drawer について平均した物質組成を持つ領域とする。
- iii) Steel 反射体 Drawer も SS 反射体 Drawer として取扱う。

が考えられる。しかし、i) の取扱いは必要以上に体系モデルを複雑にする。ii) と iii) では、iii)の方がプランケット内反応率評価に対して妥当な取扱いであり、かつ、処理が簡単である。したがって、iii)の取扱いをすることとした。念のため、iii)の取扱いによる誤差を以下の様な簡単な方法で検討した。すなわち、iii)の取扱をした場合の解析誤差の主因子は、取扱いによる mean free path unit での反射厚の違いと考えた。そこで、SS Drawer と Steel Drawer の  $\Sigma_t$  を比較した。代表的なエネルギーでの比較結果を表 3.2 に示す。構造材核種が大きい共鳴断面積を持つ特定のエネルギー領域（例えば表 3.2 の 6.0~7.7 KeV）を除き、全体として SS Drawer と Steel Drawer との  $\Sigma_t$  の違いは ±5% 程度である。これから、Steel Drawer を SS Drawer に置き換えることは、反射体厚を  $\leq 0.2$  cm 変えることに相当する。ところで、JUPITER フェイズ I 解析で、集合体外部の Empty Matrix の影響を評価したが、Empty Matrix の SS 量は ~0.8 cm 厚 SS に相対し、 $K_{eff}$  への影響は 0.005 %△K、制御棒反応度への影響は  $\leq 0.1$  % 程度であった。また、JUPITER フェイズ I では、Empty Matrix より影響が大きいと考えられ、ZPPR Matrix 周辺構造物のプランケット内反応率への影響を検討している。その結果でも、プランケットの外側境界で 1 % の影響であった。これ等の結果から、iii) の取扱いによる解析誤差は無視して良いと考える。

(3) 軸方向反射体境界の設定

図 3.2 に示した様に、Steel Reflector（下部軸方向反射体）と SS Reflector

(上部軸方向反射体)との間に Retainer Spring Gap 部と Drawer の Back Plate とがある。この部分の取扱いとして、

- i) Retainer Spring Gap と Back plate の領域を設ける。
- ii) Drawer Black Plate までを 1 つの領域区分として、Retainer Spring Gap 部と Drawer Back Plate を下部軸方向反射体領域に含める。
- iii) 軸方向ブランケット隣接部の反射体組成を忠実に取扱うこととし、Retainer Spring Gap 部と Back Plate を上部軸方向反射体に含める。

が考えられる。過去の ZPPR 実験の解析において、i) の取扱いをしている場合があるが、そこ迄反射体領域の領域区分を詳細に取扱う必要はないと考える。むしろ、その様な取扱いをした場合には、拡散計算において不要な拡散近似誤差をもたらす可能性もあると考える。ii) と iii) を比較した場合、軸方向ブランケット内の反応率分布への影響から考え、iii) の取扱いが妥当である。したがって、ここでは iii) の取扱いをすることにした。この場合、上部反射体のない外部径方向ブランケット及び径方向反射体については、Retainer Spring Gap 部と Back Plate とは無視することとした。

#### (4) 特殊 Drawer の取扱い。

従来の臨界実験解析では、特殊ドロワが存在することの炉心特性への影響は小さいことから、特殊 Drawer を通常の Drawer (Normal Drawer) として取扱って来た。非均質炉心では領域摂動の効果が大きいとしても従来通りの取扱いで問題がないと考える。しかし、ZPPR-13 実験では 1 つだけ事情の異なる点がある。従来の特殊 Drawer は、Drawer 内の燃料物質の量は通常の Drawer と同じになっており、中性子の吸収発生に関してはほとんど等しい物質構成となっていた。ところが、1)の基本 Drawer Map の所で述べた様に、Narrow Blanket Drawer 内の U 量は通常 Drawer の 2/3 となっており、通常のブランケット Drawer より 30% 中性子吸収が小さい物質構成となっている。そのため、図 3.1 の Matrix Position 134-62, 163-62 の Narrow Blanket Drawer を通常の Blanket Drawer に置き換えると、x 軸第 3 燃料リングの反応率、制御棒反応度が ~2%, ~4% も変ることが報告されている。<sup>7)</sup>

以上のことから、

- i) 燃料物質の量が保存されている特殊 Drawer は通常の Drawer に置き換える。
  - ii) 燃料物質の量が保存されていない特殊 Drawer は、解析においても特殊 Drawer として取扱う。
- こととした。

#### 4) 解析用の形状・寸法モデル

1), 2)の Drawer Map, Drawer 内軸方向物質構成のデータ及び 3)の検討結果に基づき, 以下の様に基準解析の形状・寸法モデルを定めた。

##### (1) ZPPR-13A 臨界基準体系の X Y モデル

図 3.4 IC, ZPPR-13A 臨界基準体系の X Y モデルを示す。図 3.4 で特徴的な点は, Narrow Blanket Drawer を基準解析に考慮した点である。その結果, 集合体は Y 軸に対して対称ではなくなり, X Y 面に関しては 1/2 廉心 (通常は 1/4 廉心) 計算が必要となる。

##### (2) ZPPR-13A 臨界基準体系の R Z モデル

図 3.5 IC, ZPPR-13A 臨界基準体系の R Z モデルを示す。各領域境界の半径は等体積原理で求めた。すなわち,  $i$  領域外側境界の半径  $R_i$  は,

$$R_i = \left( \frac{\left( \sum_{j=1}^i n_j \right) \cdot S}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 5.5245 \times \left( \frac{\sum_{j=1}^i n_j}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{cm})$$

ここで,

$n_j = j$  領域の Drawer 数 (Table 3.1 参照)

$S = \text{単位マトリクスの断面積 } (5.5245^2 \text{ cm}^2)$

で求めた。

#### 3.1.2 ZPPR-13A の原子数密度

原子数密度は, 形状・寸法データと共に, 廉心特性評価上の最も基本的なデータである。臨界集合体の原子数密度を求めるには, まず, 全ての Drawer 内の各種模擬物質板の装荷枚数と各物質板の組成データを正確に把握する必要がある。JUPITER 体系の様に大型炉になると, あらゆる手持の物質板を使用する必要があり, Drawer 内物質配列 (以下 Drawer Diagram と呼ぶ) が同じでも使用物質板が異なる (例えば同じ幅の Pu 板でも長さ及び組成が異なる) いくつかの Drawer (Drawer Master No で識別している) が組み立てられている (図 3.3 参照)。例えば, 通常の Drawer (Normal Drawer) でも, Single Column Fuel Drawer が 3 種類, Double Column Fuel Drawer が 11 種類, プランケット Drawer が 11 種類ある。

まず, Drawer Master No ごとの原子数密度を, 以下の手順に従って求めた (図 3.6 参照)。

Step 1 : Drawer Master No ごとに、使用物質板の種類数と枚数のリスト作成。

全ての物質板は、ANL側は ADEN I.D. で日本側は PLUTO I.D. で識別している。日本側で作成した物質板リストは動・燃事業団の Idaho 駐在員のチェックを受けている。<sup>8)</sup>

リストの基本データは

$P_{k,j}^z$  = Drawer Master No K での軸方向領域 Z (図 3.2 及び 3.5 参照) での j 物質板の枚数。

Step 2 : PLTLIB への物質板データの追加<sup>8)</sup>

JUPITER フェイズ I で入手した物質板データは、物質板データ・ファイル PLTLIB に収納している。物質板リストに基づいて未入手物質板データを取り寄せ、PLTLIB に追加した。PLTLIB に収納されている物質板データは、

$w_j^i$  = 物質板 j 中の i 核種の重量

と物質板の寸法である。

Step 3 : Decay Correction

PLTLIB のデータは、1977年1月1日現在のデータとなっている。そこで、ZPPR-13A の基準臨界体系が臨界になった 1982 年 8 月 5 日への、Decay Correction を加えた。

Step 4 : Drawer Master No ごとの体積平均原子数密度計算

Step 1 の物質板枚数  $P_{k,j}^z$  と Step 3 の Decay Correction を加えた PLTLIB データを入力データとし、PLUTO コードによって、Drawer Master No ごとの各軸方向領域の体積平均原子数密度

$$N_k^{z,i} = \frac{\left[ \sum_j (P_{k,j}^z w_j^i) \right] \cdot A_v}{V^z A^i}$$

ここで、

$N_k^{z,i}$  = Drawer Master No k の軸方向 Z 領域の i 核種の原子数密度

$A_v$  = アボガドロ数

$V^z$  = 単位マトリックスの Z 領域の体積

$A^i$  = i 核種の原子量

を求めた。

つぎに、上で求めた Drawer Master No ごとの原子数密度から、体系計算に用いる Drawer Diagram ごとの領域平均原子数密度を求めた。

その場合、

i) Single Column Fuel Drawer, Double Column Fuel Drawer, Blanket Drawerについて、全燃料領域または全プランケット領域（ただし、外側径方向プランケット（図 3.4 参照）を除く）で平均するか、図 3.4, 3.5 に示す各領域ごとに平均するか。

ii) 特殊 Drawer を含めて平均するかどうか。

が問題になる。非均質炉心は、均質炉心よりも、領域の原子数密度の違いの影響が大きいが、i) 同じ Drawer Diagram の場合、Drawer Master No ごとの原子数密度の違いは極めて小さいことと、ii) ZPPR-13 の全体系を考えた場合に領域ごと平均と言っても一義的な定義にならないこと、から、i) に関しては、全領域での平均を基準解析に用いることとした。しかし検討用に、ZPPR-13A の各領域ごとの平均値も求めた。ii) に関しては、(3)-(4) で述べた考えに従い、特殊 Drawer を含めずして平均することとした。ただし、参考のために、特殊 Drawer を含めた平均値も算した。

表 3.2 に、主要核種についての全領域平均、各領域平均、ANL の解析に用いている平均、の原子数密度の比較を示す。表 3.2 から、

i) 領域ごとの原子数密度の違いは

燃料元素…… Double Column Fuel Drawer で  $\lesssim 0.2\%$ 、それ以外は  $\lesssim 0.1\%$ 。

構造材元素…… Single Column Fuel Drawer で  $\lesssim 1.2\%$ 、それ以外は  $\lesssim 0.5\%$ 。

冷却材元素……  $\lesssim 1\%$

と小さい。

ii) 特殊 Drawer を含めると、特に Na の原子数密度が  $\lesssim 3\%$  異なる。

iii) ANL の原子数密度は、特殊 Drawer を含む全領域平均である。プランケットは、外側径方向 プランケットも含めた全領域平均となっている。また、径方反射体は Steel Block Drawer も含めた平均になっている。

ことがわかる。

### 3.2 解析コードの整備

JUPITER フェイズⅡ実験解析でも、フェイズⅠと同様、JENDL-2B<sup>9)</sup>に基づく多群群定数を用いる。70群中間群定数セットとしては、評価データ処理方法の影響を見るため、部分的に JENDL-2B-70<sup>10)</sup> と部分的に JFS-3-J2 を使用する。

実効群定数計算、炉心特性計算には、フェイズⅠと同じ解析計算コードを用いる。しかし、フェイズⅠで用いた実効群定数計算コード SLAROM では JFS-3-J2 セットが使用出来ないため、日本原子力研究所システム研究室で改良した SLAROM とそれに連なるコードシステム<sup>11)</sup> を用いることとした。そのコードシステムには、フェイズⅠで特性計算に用いた解析コードを全て含んでおり、その基本構成を図 3.7 に示す。図 3.7において、CITATION-FBR 及び CIPER は拡散計算及びその摂動計算コードであり、TWOTRAN 2 及び SNPERT は輸送計算及びその摂動計算コードである。また、MIX コードは、JUPITER 解析からの要望に応じ整備されたサービスコードで、幾つかの Macro.X-sec を荷重平均したものを PDS ファイルに出力する機能と、原子数密度と Micro.X-sec から Macro.X-sec を作成して PDS ファイルに出力する機能とを持つ。

上記コードシステムは動燃事業団大洗計算センターに収納されている。

### 3.3 群定数の作成

群定数作成の基本手順は JUPITER フェイズⅠ解析と同じであり、図 3.8 にそれを示す。

JUPITER フェイズⅠと異なる点は、

- I) 中間群定数として、JFS-3-J2 も使用する、
- II) 70群非均質セル計算モデルとして複数モデルを使用する、

点である。これ等は、非均質炉心では群定数計算誤差の炉心特性評価値に与える影響が大きいので、中間群定数作成法及びセル計算モデルの違いの影響を検討するためである。

昭和 57 年度は、ZPPR-13A の基準臨界体系の Drawer 及び Na ポイド Drawer の実効群定数、放射化箱の実効群定数、の作成を進めた。均質モデル及びゼロバックリングの Single-drawer セルモデルによる 70群ミクロ及びマクロ定数は作成せずである。縮約群定数の作成、臨界バックリングの Single-Drawer セルモデル及び Multi-drawer セルモデルによる群定数の作成が進行中である。

#### 1. 基準臨界体系の Drawer Diagram

図 3.9 に基準臨界体系の Drawer Diagram を示す。フェイズⅠの Drawer Diagram と比較して最も大きい特徴は、フェイズⅡ実験の Drawer Diagram は Drawer 中心面に

対して鏡対称となっていることである。これによって、フェイズ I で問題になった Drawer の非対称効果は生じない。Na ボイド Drawer は、図 3.9 の “Single Column Fuel”, “Double Column Fuel”, “Lower Blanket” の Na 板をボイド缶に置き換えた Drawer Diagram となる。

## 2. 1 次元セル計算

### 1) 1 次元セルモデルリング

2 次元セル構造を 1 次元化する方式は、フェイズ I と同じ方式<sup>12)</sup>に従った。基本的な考えは、

(1) 2 次元セルの均質化原子数密度を保存するように、物質板の密度として物質板の高さを Matrix 高さに延ばした時の値を用い、2 次元セルでの上下構造物はセル内に混ぜる、

(2) ただし、燃料板の燃料部分（ミート）の  $\sigma_0$ （共鳴実効群定数を求める際の background Cross Section）を保存させるため、2 次元セルの上下構造物及び Pu 板の缶は燃料部分に混ぜない、

である。

### 2) 単位セル構成

図 3.1 に見られるように、非均質炉心の炉心部では燃料 Drawer とプランケット Drawer とが共存している。原型炉級非均質炉心の臨界実験 ZPPR-7 の解析において、セル平均群定数を通しての異種 Drawer が共存する効果 (Multi-Drawer Effect) が無視出来ないことが示されているので、単位セル構成として Single-drawer Model = 従来の、单一 Drawer Diagram による無限格子モデル、

Multi-drawer Model = 異種 Drawer Diagram の組合せを単位セルとした無限格子モデル

を考え、Multi-drawer Effect を評価することとした。昭和 57 年度においては、 Single-drawer Model によるセル平均群定数の作成を進めると共に、Multi-drawer Model 設定のための検討を進めた。

Multi-drawer Model 設定のための検討とは、Multi-drawer Effect を適切に考慮出来る 1 次元セルモデルを決めるための検討である。Multi-drawer Effect は、異種 Drawer が物質板に垂直方向に接する場合と平行方向に接する場合とで異なる。<sup>13)</sup> そ

それぞれの場合に応じた1次元セルモデルを設定するには、両Drawer配列のMulti-drawer Effectの炉物理的特徴を把握することが必要と考え、2次元セル計算での検討を計画した。この検討は進行中であり、昭和58年度解析に引き継がれる。

### 3) セル計算によるもの取扱い。

セル計算によるもの取扱いについては、充分確立していない。フェイズⅡ解析では、ゼロバックリングによるセル計算と臨界バックリングによるセル計算とを行い、ものの取扱い方の影を見ることとした。昭和57年度はゼロバックリングによるセル計算が終了した。臨界バックリングによるセル計算は進行中であり、昭和58年度解析に引き継がれる。

## 3. 1次元セル計算結果

先に述べたように、昭和57年度において、均質モデル、ゼロバックリングのSingle Drawer Modelによるセル平均群定数を作成した。このセル計算の結果の内、後の解析の参考になると思われる事項について述べる。

### 1) JENDL-2B-70とJFS-3-J2の $K_{\infty}$

Single Column Fuel DrawerとDouble Column Fuel Drawerの $K_{\infty}$ は、

Single Column Fuel Drawer :

$$JENDL-2B-70 = 1.224460$$

$$JFS-3-J2 = 1.224975$$

Double Column Fuel Drawer :

$$JENDL-2B-70 = 1.691657$$

$$JFS-3-J2 = 1.697207$$

}

であり、Single Column Fuel Drawerでは0.04%，Double Column Fuel Drawerでは0.33%，JFS-3-J2の $K_{\infty}$ の方が大きい。Drawer Diagramによって両群定数セット間の $K_{\infty}$ の差が大きく異なる理由については明確ではない。今後の詳細な分析が必要である。ただし、上記の結果はSingle Column Fuel Drawerが主体であったJUPITERフェイズⅠ体系でJFS-3-J2による $K_{eff}$ とJENDL-2B-70による $K_{eff}$ の差が0.1%以下であった事と合致している。また、上記のDouble Column Fuel Drawerでの差は、原型炉級及びそれ以下の炉心サイズのベンチマーク体系での $K_{eff}$ の差(0.3~0.4%)と同程度である。これは、両セットの $K_{eff}$ の差が、濃縮度によって0%から0.3%程度異なることを示唆している。さらに、Double Column

Fuel Drawer の占める割合の多い ZPPR-13 体系では、フェイズ I 体系の場合よりも、JENDL-2B-70 と JFS-3-J2 による  $K_{eff}$  の差は大きくなる可能性を示している。

### 2) $K_\infty$ に対する非均質効果

Single Column Fuel Drawer, Double Column Fuel Drawer の  $K_\infty$  に対する非均質効果は

	$\frac{\% \Delta K_\infty}{K_\infty}$	
Single Column Fuel Drawer	JENDL-2B-70	1.24
	JFS-3-J2	1.12
Double Column Fuel Drawer	JENDL-2B-70	0.73
	JFS-3-J2	0.60

である。ゼロバックリングであるため、中性子スペクトルは低エネルギー側が大きくなっているため、高エネルギー領域の正の寄与を過小評価している。また、 $K_\infty$  の比較ではもれにに対する非均質効果を無視している。この両因子はほぼ相殺するので、上記の  $K_\infty$  の非均質効果から、良い近似で  $K_{eff}$  の非均質効果を推定出来るであろう。ZPPR-13A では Double Column Fuel Drawer が 70% を占めているので、例えば JENDL-2B-70 での  $K_{eff}$  の非均質効果は、

$$\sim (0.3 \times 1.24 + 0.7 \times 0.73) \approx 0.9$$

程度と推定される。

### 3) $K_\infty$ に対する Na ボイド効果

Single Column Fuel Drawer 及び Double Column Fuel Drawer の  $K_\infty$  に対する Na ボイド効果は

	$\frac{\% \Delta K}{K}$	
	Homo	Hetero
Single Column Fuel Drawer	JENDL-2B-70	6.70
	JFS-3-J2	6.98
Double Column Fuel Drawer	JENDL-2B-70	6.31
	JFS-3-J2	6.23

となる。これは、燃料領域 Na ボイドの “Non-leakage Component” に対する参考データとなる。上記の結果は、i) “Non-leakage Component” に対する非均質効果は

10%弱，ii) JENDL-2B-70 と JFS-3-J2 による “Non-leakage Component” の  
差は 5%かそれ以下，であることを示している。

### 3.4 今後の課題

昭和 57 年度に引き続き，Multi-drawer モデルのセル平均定数の作成，縮約群定数  
の作成，それ等を用いての ZPPR-13 特性解析を進めて行く必要がある。

Table 3.1 Number of Drawers per Half

<u>Region</u>	<u>No. of Drawers</u>	<u>Comments</u>
Central Internal Blanket	96	
1st Fuel Ring	204	SCF <sup>*1</sup> = 56, DCF <sup>*2</sup> = 148
1st Internal Blanket Ring	200	
2nd Fuel Ring	412	SCF = 116, DCF = 296
2nd Internal Blanket Ring	312	
3rd Fuel Ring	824	SCF = 228, DCF = 596
Outer Radial Blanket	804	Low Na Density Drawer = 304
Radial Reflector	844	

\*1 SCF = Single Column Fuel Drawer

\*2 DCF = Double Column Fuel Drawer

Note: All special drawers were counted as normal drawers.

Table 3.2 Examples of Region Average Atomic Densities ( $10^{24}$  atoms/cc)

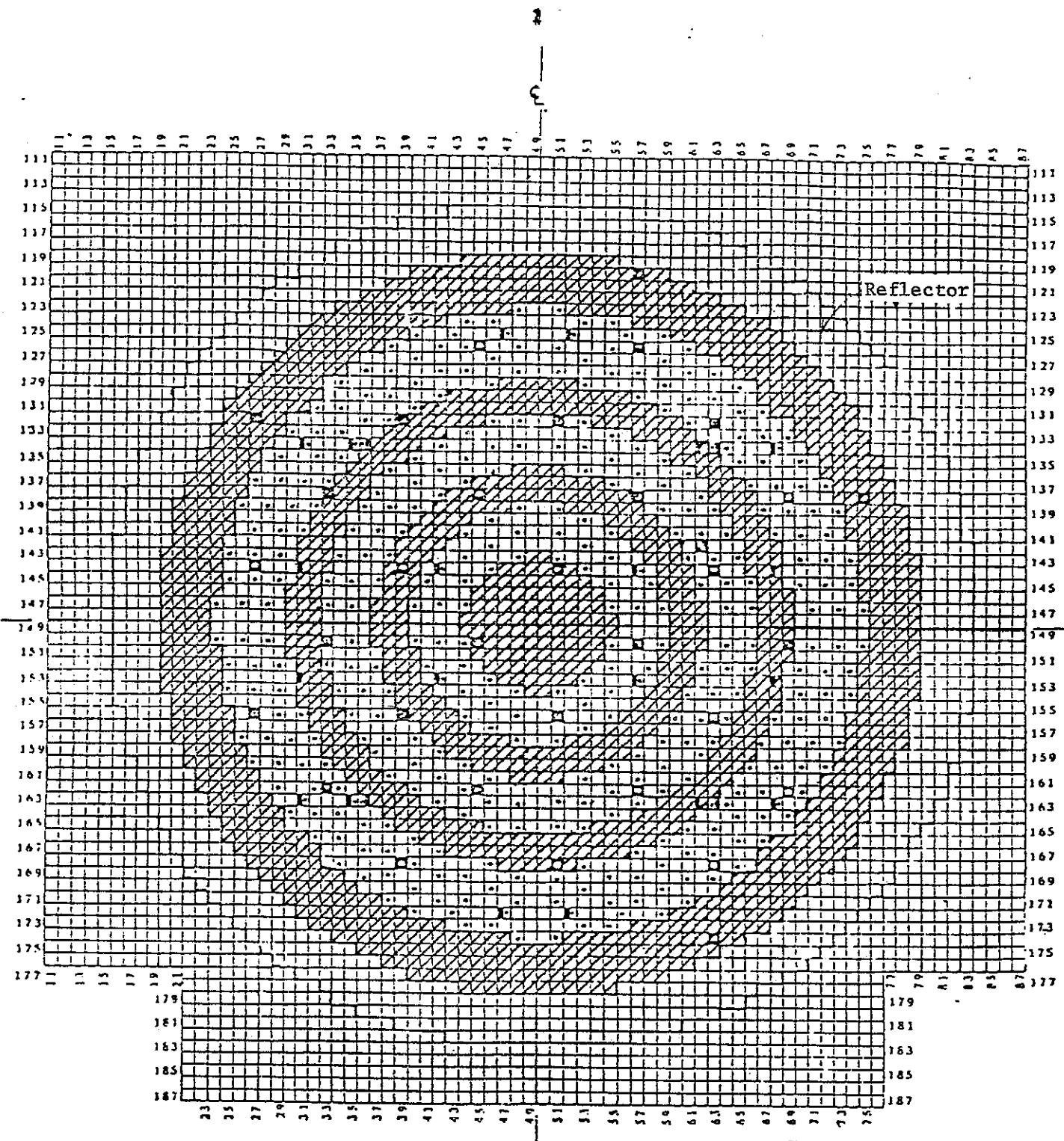
SCF Core Section								
Nucleid	Whole Fuel Reg.	1st Fuel Ring	2nd Fuel Ring	3rd Fuel Ring	Whole FR+SD <sup>2)</sup>	ANL	1) Values in ( ) are ratios relative to Whole Region Values.	
<sup>239</sup> Pu	8.90317-4	(0.99997) <sup>1)</sup> 8.90287-4	(0.99969) 8.90041-4	(1.00018) 8.90474-4	(0.99951) 8.89885-4	(0.9995) 8.899-4	2) Special Drawer	
Na	9.27950-3	(1.00000) 9.27950-3	(1.00000) 9.27950-3	(1.00000) 9.27950-3	(0.97190) 9.01871-3	(0.97192) 9.0189-3	3) Except Outer Radial Blanket	
Fe	1.30515-2	(1.01247) 1.32142-2	(1.01245) 1.32140-2	(0.99027) 1.29245-2	(0.99254) 1.29541-2	(1.00611) 1.31313-2		

DCF Core Section							Radial Reflector		
Nucleid	Whole Fuel Reg.	1st Fuel Ring	2nd Fuel Ring	3rd Fuel Ring	Whole FR+SD <sup>2)</sup>	ANL	Nucleid	Present	ANL
<sup>239</sup> Pu	1.76771-3	(1.00204) 1.77131-3	(0.99976) 1.76729-3	(0.99960) 1.76701-3	(1.00000) 1.76771-3	(0.9999) 1.7677-3	Fe	5.55865-2	5.87994-2
Na	8.85932-3	(0.99985) 8.85801-3	(0.99986) 8.85810-3	(1.00010) 8.81423-3	(0.99491) 8.81423-3	(0.99494) 8.8145-3	Cr	1.55710-2	1.35216-2
Fe	1.81109-2	(0.99874) 1.80880-2	(0.99616) 1.80414-2	(1.00223) 1.81291-2	(1.00100) 1.81291-2	(1.00275) 1.81607-2			

Lower Blanket								
Nucleid	Whole Blanket <sup>3)</sup>	Cent. Bl.	1st Bl. R.	2nd Bl. R.	Inner Rod Bl.	Outer Rod Bl.	Whole Bl+SD <sup>2)</sup>	Outer Rdd Bl+SO <sup>2)</sup> ANL
<sup>238</sup> U	1.32511-2	(0.99392) 1.31706-2	(0.99370) 1.31676-2	(0.99684) 1.32092-2	(1.00557) 1.33249-2	(0.98971) 1.31148-2	(0.99812) 1.32262-2	(0.98959) 1.31132-2 (0.99598) 1.31978-2
Na	4.23235-3	(0.99844) 4.22573-3	(1.00005) 4.23258-3	(0.99865) 4.22664-3	(1.00109) 4.23695-3	(0.91806) 3.88555-3	(0.994801) 4.21033-3	(0.91669) 3.87974-3 (0.9778) 4.1382-3
Fe	8.25461-3	(1.00615) 8.30536-3	(1.00308) 8.28003-3	(1.00043) 8.25813-3	(0.99736) 8.23280-3	(1.00935) 8.33182-3	(1.00307) 8.27999-3	(1.00990) 8.33634-3 (1.00451) 8.2918-3



ZPPR - 13A

- Detector
- Thermocouple
- PSR
- Single Column Fuel
- Blanket

Fig. 3.1 Interface Diagram for the ZPPR-13A Critical Reference,  
Half 1.

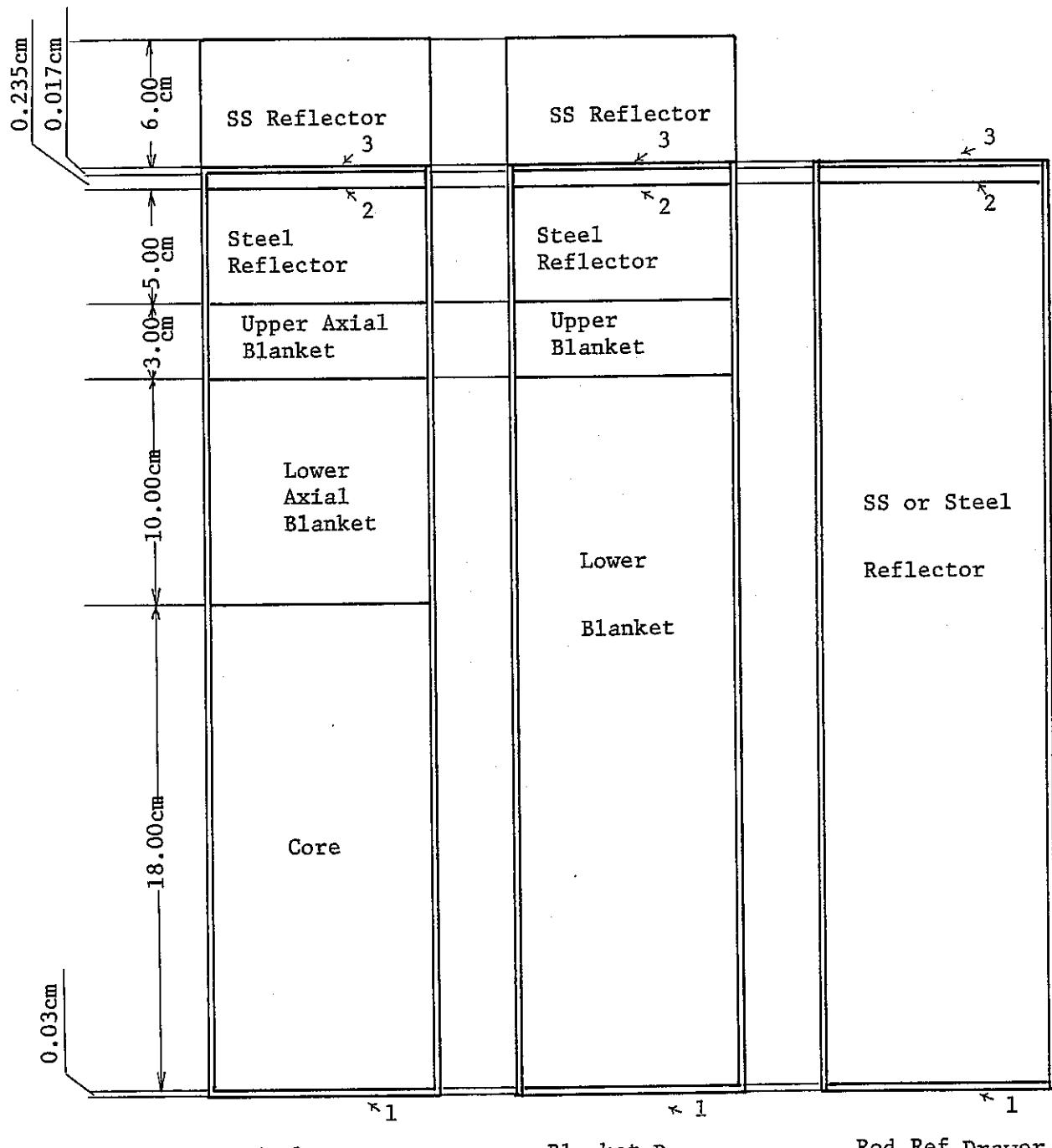


Fig.3.2 Axial Material Arrangement

- |                    |                       |                       |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| <u>Fuel Drawer</u> | <u>Blanket Drawer</u> | <u>Rod.Ref.Drawer</u> |
| 1 Front Plate      | 1 Front Plate         | 1 Front Plate         |
| 2 Retainer Spring  | 2 Retainer Spring     | 2 Retainer Spring     |
| Gap                | Gap                   | Gap                   |
| 3 Back Plate       | 3 Back Plate          | 3 Back Plate          |

12	13	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
114																																					
115																																					
116																																					
117																																					
118																																					
119																																					
120																																					
121																																					
122																																					
123																																					
124																																					
125																																					
126																																					
127																																					
128																																					
129																																					
130																																					
131																																					
132																																					
133																																					
134																																					
135																																					
136																																					
137																																					
138																																					
139																																					
140																																					
141																																					
142																																					
143																																					
144																																					
145																																					
146																																					
147																																					
148																																					
149																																					
150																																					

Fig. 3.3      Drawer Loading Map of the 2nd Quarter of  
ZPPR-13A Critical Reference — Half. 1

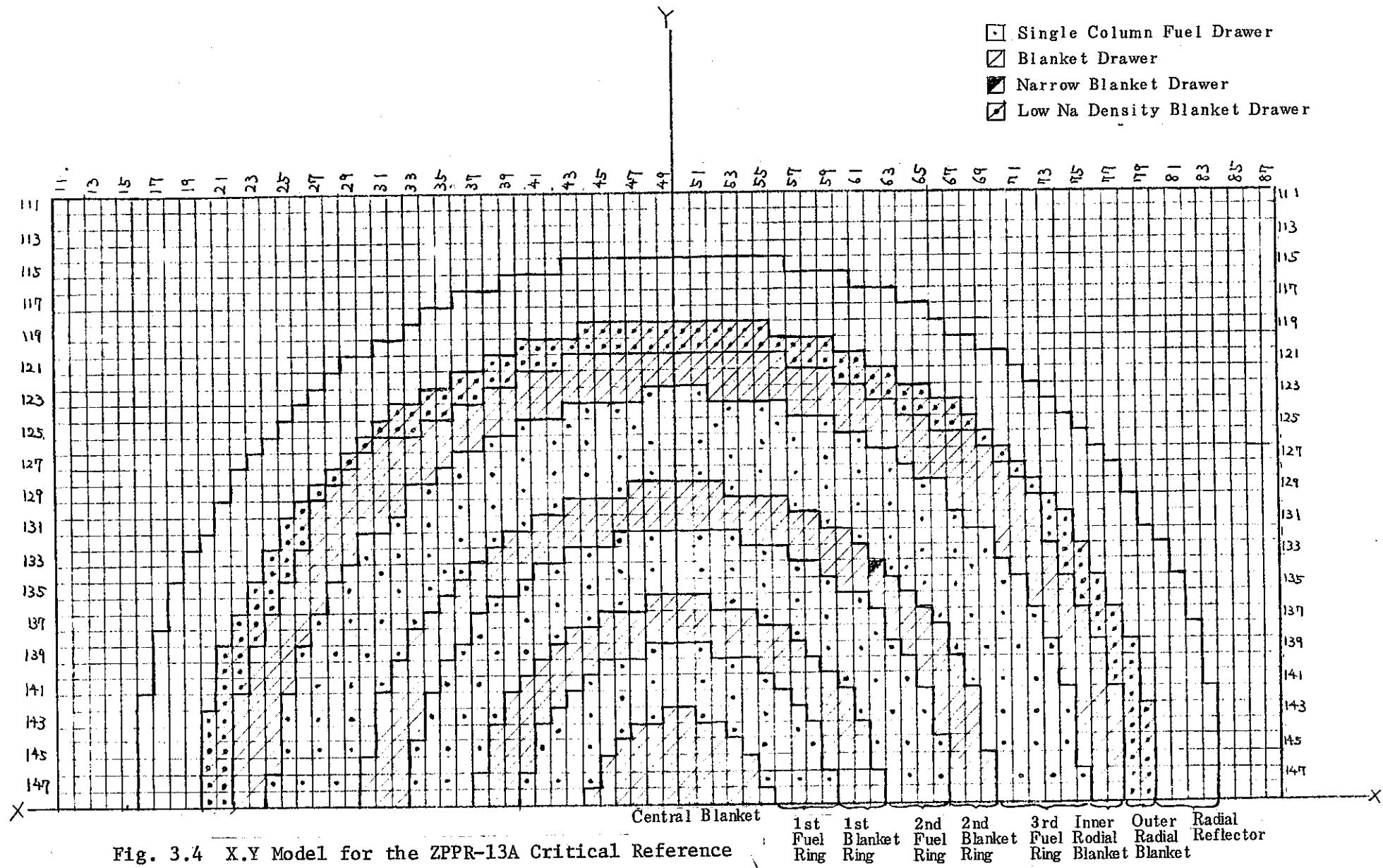


Fig. 3.4 X.Y Model for the ZPPR-13A Critical Reference

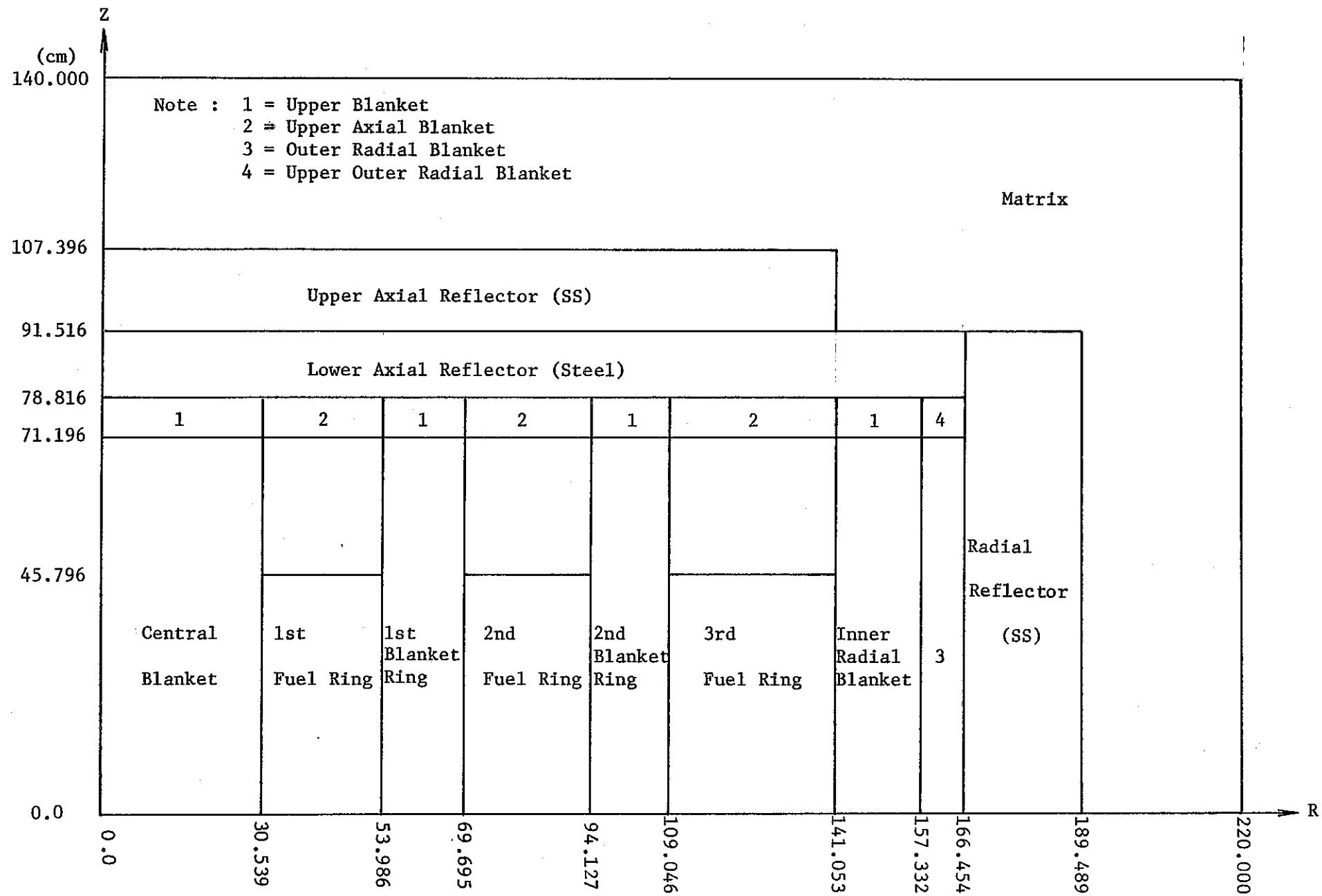


Fig. 3.5 RZ Model for the ZPPR-13A Critical Reference.

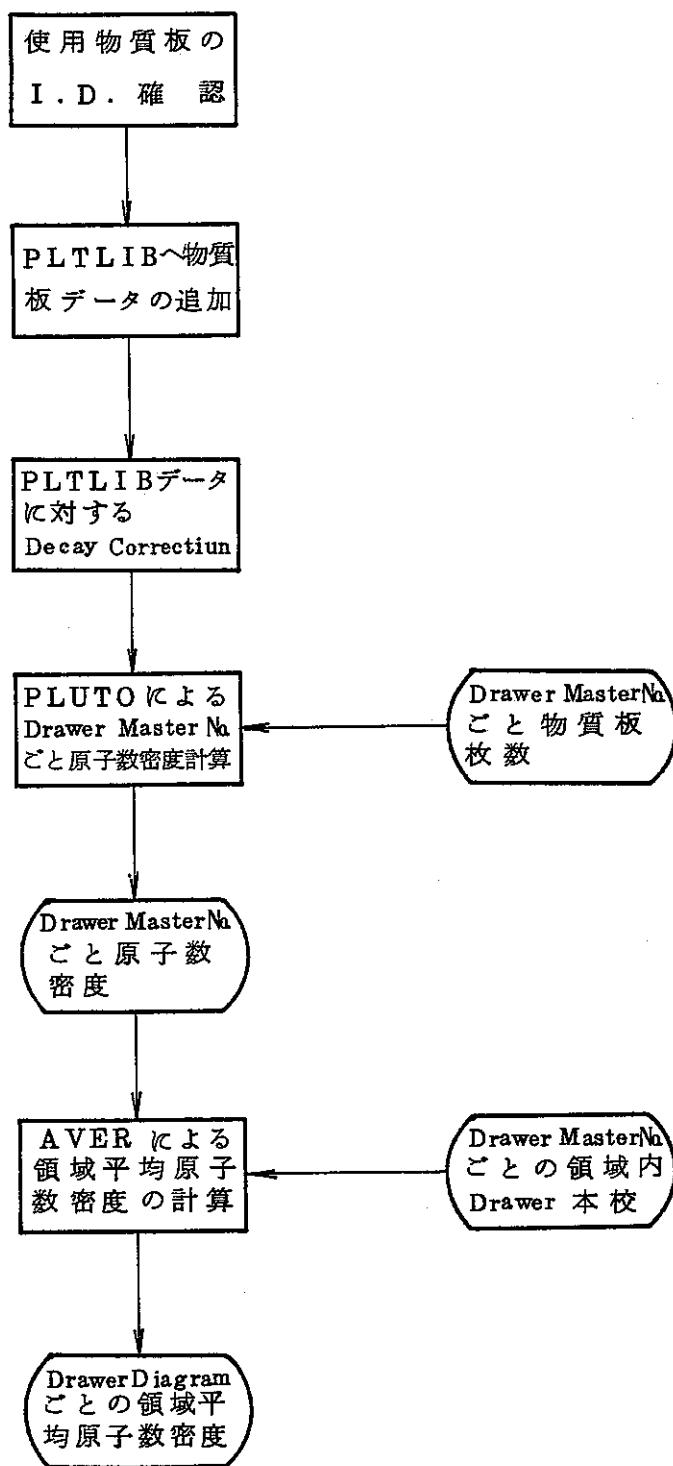
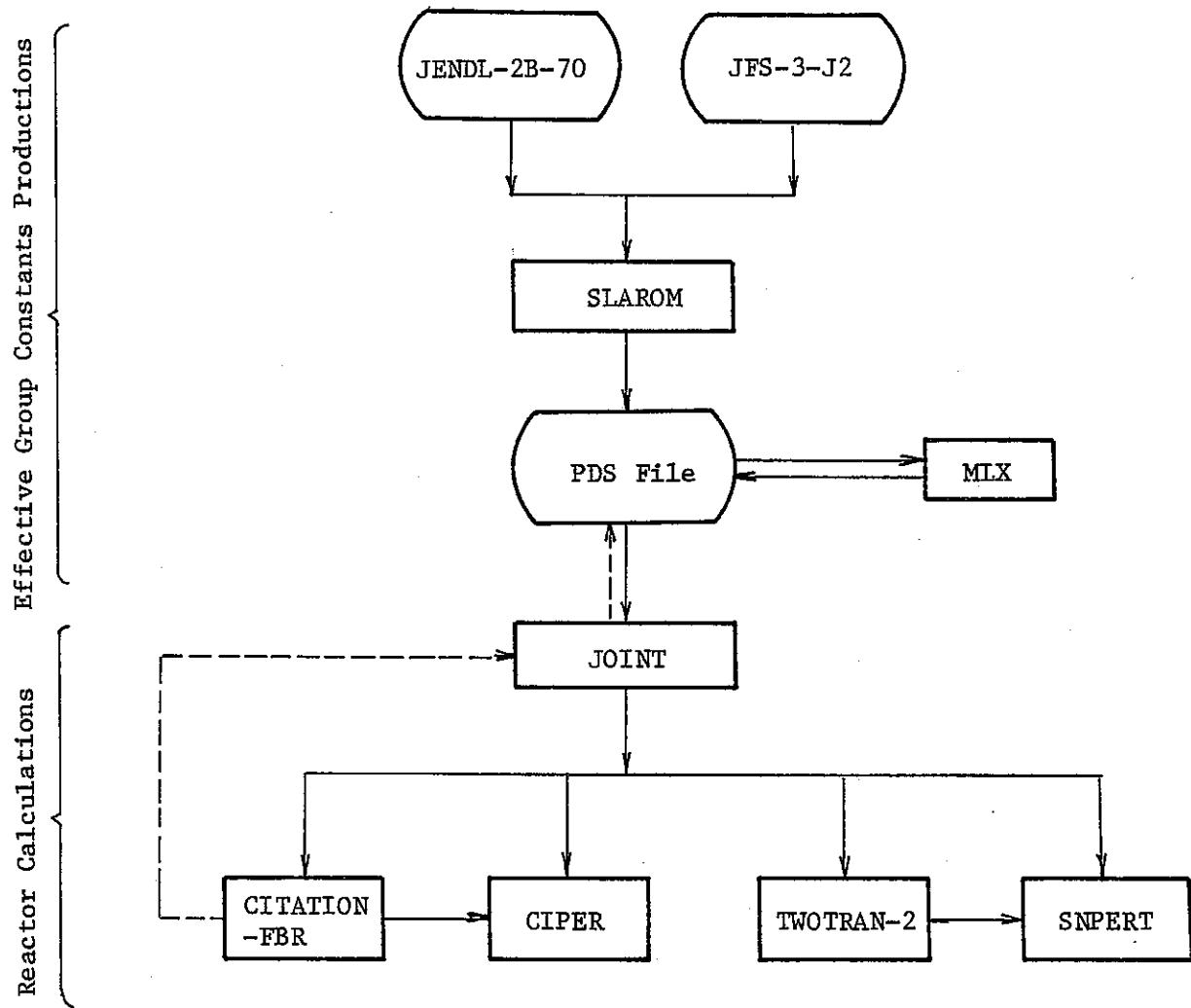


Fig.3.6 General Flow for Volume Average Atomic Density Production.



.....Data Flow for Group Collapsing by  
Two Dimensional Calculation.

Fig. 3.7 Outline of Code System

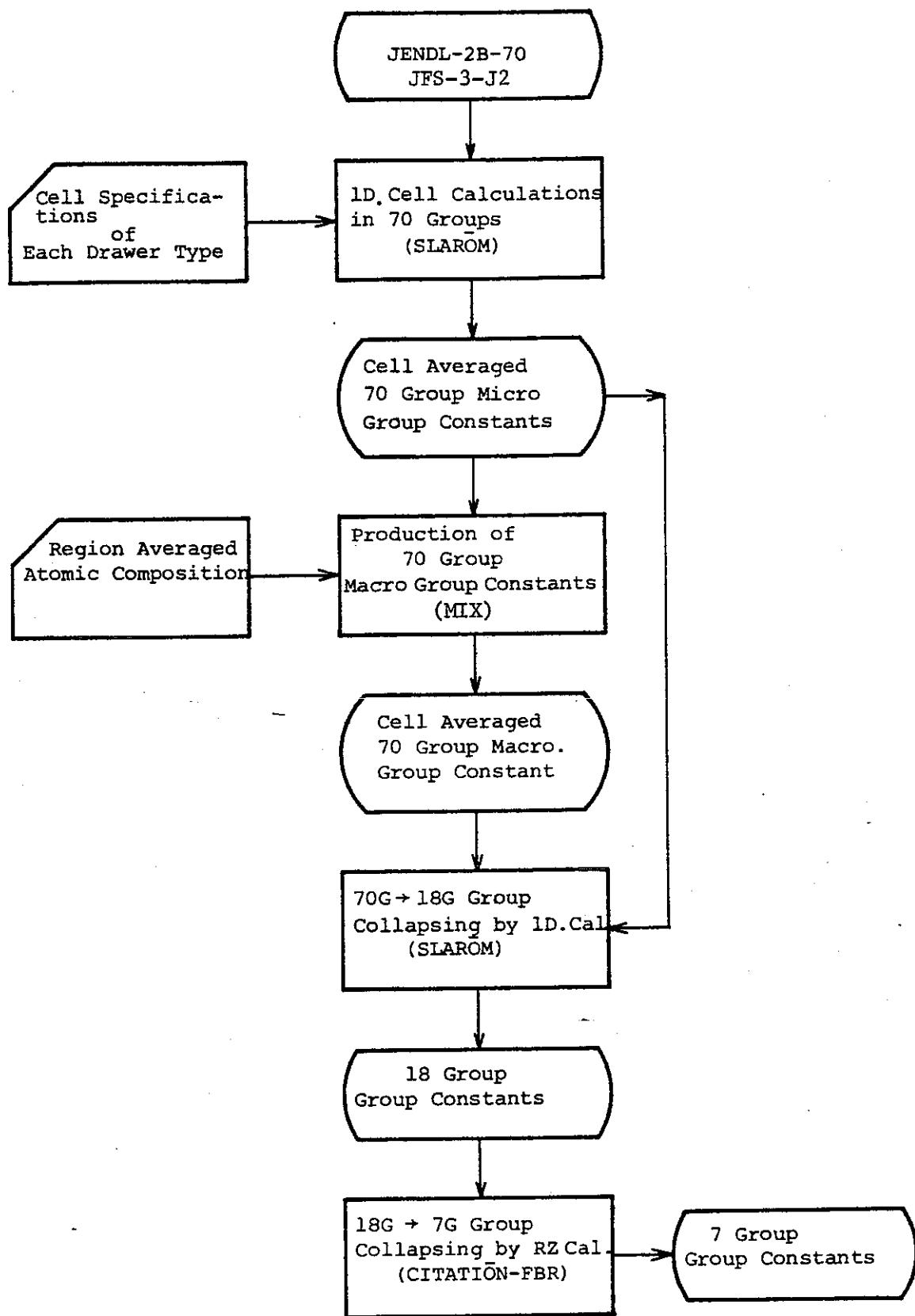


Fig. 3.8 General Procedure of Group Constant Production

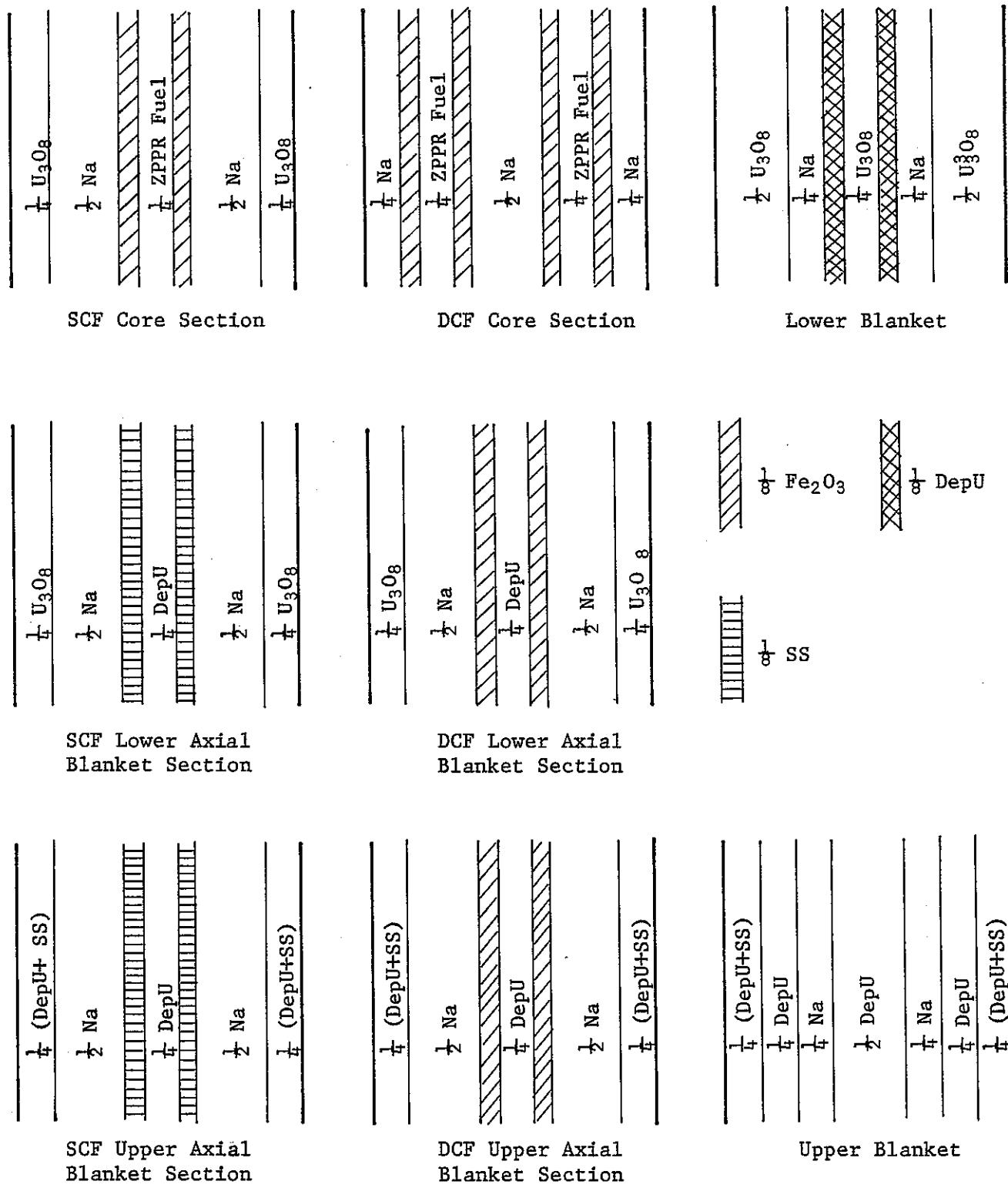


Fig. 3.9      Drawer Diagram for ZPPR-13A Reference Core

## 4. Z P P R - 1 0 C における反応率分布の再評価

Z P P R - 9 及び 1 0 の解析では、輸送効果、群縮約効果などの補正を施した上で C/E 値<sup>12)14)~17)</sup>を求め、評価してきた。<sup>18)</sup>ところがその後、セル非対称効果が反応率分布に数 % もの影響を与えることがわかった。さらに、輸送補正のための 2 次元 XY SN 計算において、1 ドロワー当り 1 メッシュの分割では<sup>238</sup>U(n, f) の反応率分布に 2 ~ 3 % の誤差の生じることも指摘された。そのため、それらの効果を考慮した上で Z P P R - 1 0 の反応率を再評価した。

### 4.1 輸送計算におけるメッシュ効果の補正

Z P P R - 9, 1 0 における反応率分布の解析で問題となったことの一つは、炉心・ブランケット境界及びスパイク燃料ドロワーのところで、とくに<sup>238</sup>U(n, f) の反応率分布の C/E 値が不連続となることである。すなわち、スパイク燃料ドロワーのところで周囲のドロワーに比べて<sup>238</sup>U(n, f) の C/E 値が平均 3 % 低くなり、炉心に接した径方向ブランケット・ドロワーで 15 % ~ 30 % 程度、C/E 値が炉心部よりも高くなつた。<sup>18)</sup>これらの原因の一つは、領域境界に接する燃料ドロワーの格子平均断面積を無限格子モデルで求めたことにあるが、その他に輸送計算におけるメッシュ効果も原因している。そのことを以下に説明する。

#### 4.1.1 従来の中性子束内挿法の問題点

これまで燃料ドロワー内の測定点（一般にメッシュ点の位置：ドロワー中心とは異なる）における中性子束を求めるとき、2 次式、3 次式あるいはそれ以上の高次の多項式を用いてドロワー内の測定点における中性子束分布を内挿した。その際、差分コードで求めたメッシュ毎の中性子束は、メッシュ中心での中性子束に等しいと仮定した。ところが、一般に中性子輸送コードの中では、メッシュ毎の中性子束はメッシュ中心での値ではなく、メッシュ領域の平均値として定義されている。したがって、1 ドロワー当り 1 メッシュの計算で得た中性子束に上記の内挿法を用いた場合、スパイク燃料ドロワー及び炉心・ブランケット境界近傍の反応率分布の計算に誤差を生じる。たとえば高速中性子束分布の形状が上に凸となるスパイク燃料ドロワーの場合、図 4.1 に示すように、ドロワー中心の中性子束は過小評価される。これとは逆に、高速中性子束分布の形状が下に凸となるブランケット領域でのドロワー内測定点の中性子束は過大評価される。このような効果は、高速中性子との反応が大部分を占める<sup>238</sup>U(n, f) の反応率分布にとくに顕著に現われてくる。

一例として、図4.2に示すようなZPPR-9のx軸方向を模擬した1次元スラグ体系において、1ドロワー当たり7個のメッシュを用いて計算した $^{238}\text{U}(\text{n},\text{f})$ 反応率分布を表4.1に示す。表に示しているのはドロワー平均の反応率分布と、ドロワー中心の反応率分布である。表からわかるように、両者の差はスパイク燃料及び炉心・プランケット境界近傍で顕著に現われている。すなわち、ドロワー中心で計算された反応率分布はドロワー平均で計算された反応率分布に比べて、スパイク燃料のところで1.6%程度高く、その隣りのドロワーでは0.1~1%低くなっている（スパイク燃料ドロワーの反応率が周囲の反応率に比べて2%以上高くなる）。また、炉心に接したプランケット燃料ドロワーでは隣接した炉心燃料ドロワーに比べて2.8%低くなっている。これは明らかに $^{238}\text{U}(\text{n},\text{f})$ 反応率分布のC/E値の不連続性を緩和する傾向にあり、したがって、輸送計算において1ドロワー当たりのメッシュ数を増やすことにより $^{238}\text{U}(\text{n},\text{f})$ 反応率分布のC/E値が改善されることが予想できる。

#### 4.1.2 輸送計算におけるメッシュ効果の簡易補正法

輸送計算において、1ドロワー当たりのメッシュ数を4個あるいは9個に増やしてメッシュ効果を評価することは、計算時間の面から容易ではない。そのため、ここでは1ドロワー当たり1メッシュの計算で得た中性子束に以下に示すような中性子束の内挿法を用いることにより、メッシュ効果を評価した。

図4.3に示すように、差分コードで得られるメッシュ点*i*の中性子束を $\phi_i^{(0)}$ とする時、メッシュ境界での中性子束 $\phi_{Si}^{(0)}$ を次のような式で求める。

$$\begin{aligned}\phi_{Si+1}^{(0)} &= \frac{\phi_i^{(0)} + \phi_{i+1}^{(0)}}{2} + \frac{1}{4} \left( \phi_i^{(0)} - \frac{\phi_{i-1}^{(0)} + \phi_{i+1}^{(0)}}{2} + \phi_{i+1}^{(0)} - \frac{\phi_i^{(0)} + \phi_{i+2}^{(0)}}{2} \right) \\ &= \frac{5}{8} \left( \phi_i^{(0)} + \phi_{i+1}^{(0)} \right) - \frac{\phi_{i-1}^{(0)} + \phi_{i+2}^{(0)}}{8} \quad (4.1)\end{aligned}$$

ここで、 $\phi_i^{(0)} - \frac{\phi_{i-1}^{(0)} + \phi_{i+1}^{(0)}}{2}$ ,  $\phi_{i+1}^{(0)} - \frac{\phi_i^{(0)} + \phi_{i+2}^{(0)}}{2}$ はそれぞれ、メッシュ点*i*, *i*+1でのバッククリングに比例する量である。すなわち、メッシュ境界でのバッククリングは境界をはさむ両メッシュ点でのバッククリングの平均値に等しいと仮定して $\phi_{Si}^{(0)}$ を求める。これは中性子カレントが連続であることを近似したものである。

こうして一旦、メッシュ境界での中性子束が決まると、メッシュ中心の中性子束 $\phi_i^{(0)}$ も

用いて、2次曲線でメッシュ領域内の中性子束分布を表わす。その時のメッシュ平均の中性子束  $\bar{\phi}_i^{(0)}$  は次のように与えられる。

$$\bar{\phi}_i^{(0)} = \frac{\phi_{S_i}^{(0)} + 4\phi_i^{(0)} + \phi_{S_{i+1}}^{(0)}}{6} \quad (4.2)$$

この平均値  $\bar{\phi}_i^{(0)}$  は、一般に  $\phi_i^{(0)}$  とは異なる。すなわち、中性子束分布が上に凸ならば  $\phi_i^{(0)}$  より小さく、下に凸ならば  $\phi_i^{(0)}$  より大きくなる。そこで、メッシュ中心における中性子束の近似値として次のような値を計算する。

$$\phi_i^{(1)} = \phi_i^{(0)} \left( \frac{\bar{\phi}_i^{(0)}}{\phi_i^{(0)}} \right) \quad (4.3)$$

この中性子束がより正確なメッシュ中心での値であるとして、式(4.1)と同じ形でメッシュ境界での中性子束  $\phi_{S_i}^{(1)}, \phi_{S_{i+1}}^{(1)}$  を再計算する。それらの結果を用いてメッシュ平均の中性子束  $\bar{\phi}_i^{(1)}$  を式(4.2)と類似の形で求め、それからメッシュ中心における中性子束を次のような形で再計算する。

$$\phi_i^{(2)} = \phi_i^{(1)} \left( \frac{\bar{\phi}_i^{(0)}}{\bar{\phi}_i^{(1)}} \right) \quad (4.4)$$

以上の反復は3回くり返すと十分に収束する。

上記のような反復計算をx軸及びy軸の両方向について行う。すなわち、xy平面上の中性子束  $\phi_{i,j}$  をx軸方向について補正し、補正後の  $\phi_{i,j}$  を使って今度はy軸方向について同じ方法により補正する。

以上のようにして最終的に得られるメッシュ中心及びメッシュ境界での中性子束を用いて、メッシュ内の中性子束分布を2次式で表わすことができる。この2次式により反応率測定点での中性子束を求めて反応率を計算する。

#### 4.1.3 数値計算結果

表4.2～表4.8までにZPPR-10C(図4.4)で測定された4種の反応率分布に対し、上記の方法による内挿因子(上記方法で求めた測定点での反応率/差分コードで得られる中性子束がメッシュ中心での値であるとした時の、メッシュ中心の反応率)を示す。比較のため、従来の方法(差分コードで得られる中性子束がそのまま、メッシュ中心での中性子束に等しいとして2次式で内挿する方法)による内挿因子も示す。なお、この時の中性子束分布は7群S<sub>8</sub>計算で求めた。

表からわかるように、差分コードで得られる値はメッシュ中心での中性子束ではなく、メッシュ領域平均の値であることを考慮したことの効果は、スペイク燃料ドロワー及び炉心・プランケット境界における $^{238}\text{U}(n, f)$ 反応率に顕著に現われる。すなわち、スペイク燃料ドロワーでの反応率が周囲のドロワーに比べて2~3%増加し、径方向プランケット最内層の反応率が炉心最外層の反応率に比べて2%程度小さくなっている。これを先に示した1次元計算の結果と比べた時、とくに1次元モデルで十分と考えられる炉心・プランケット境界での反応率分布への効果が同程度であることから、本方法による補正は有効と考えられる。

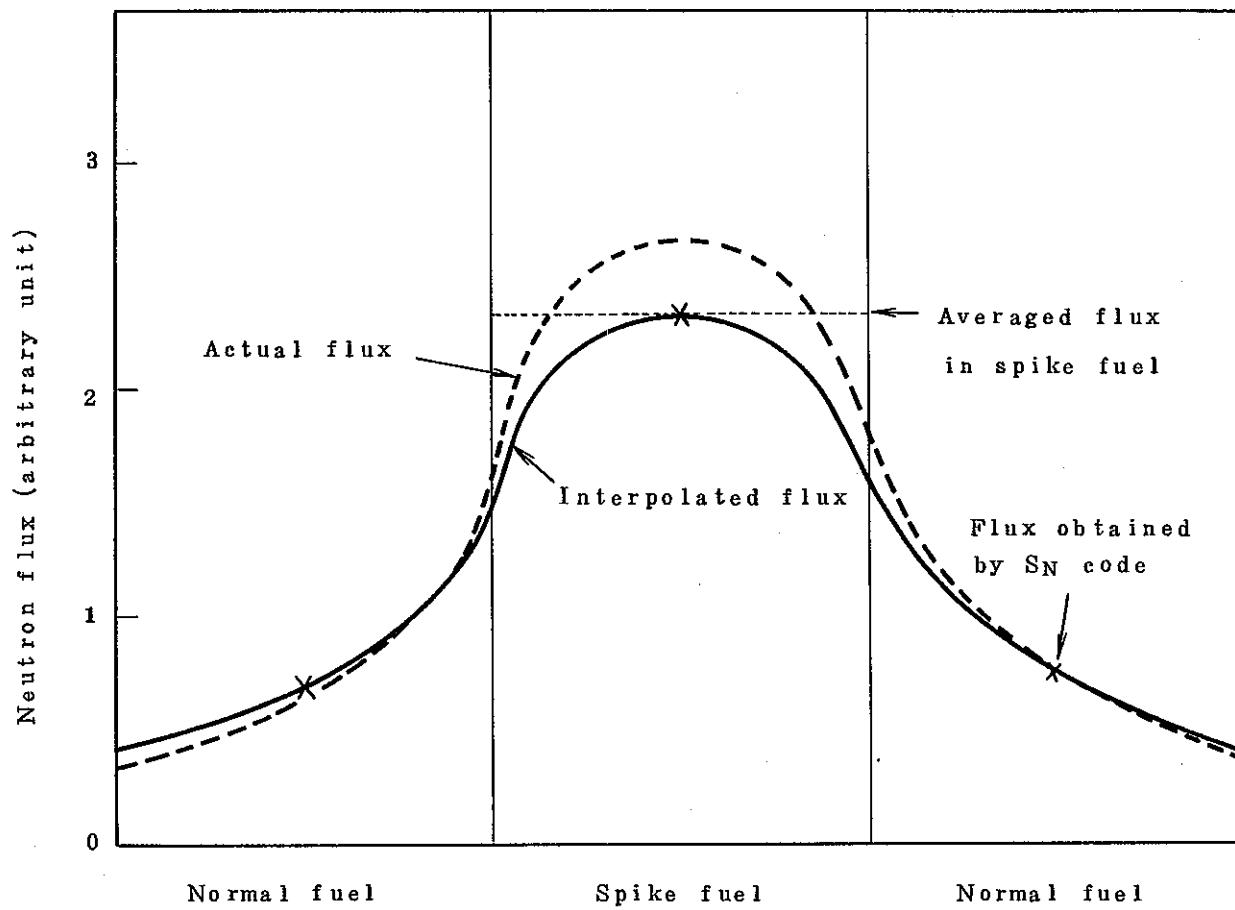


Fig. 4.1 Underestimation of Neutron Flux  
at Spike Fuel Column Drawer

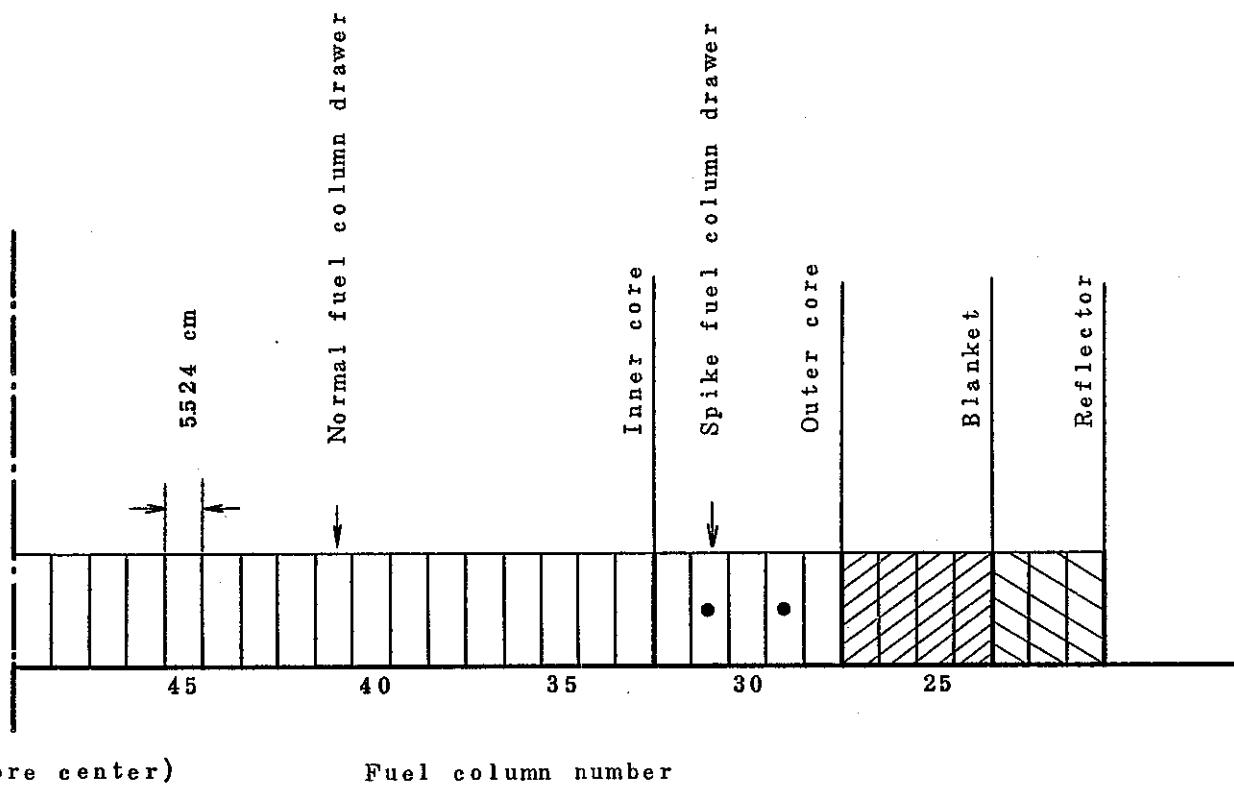


Fig. 4.2 One-Dimensional Slab Model of ZPPR-9 Assembly

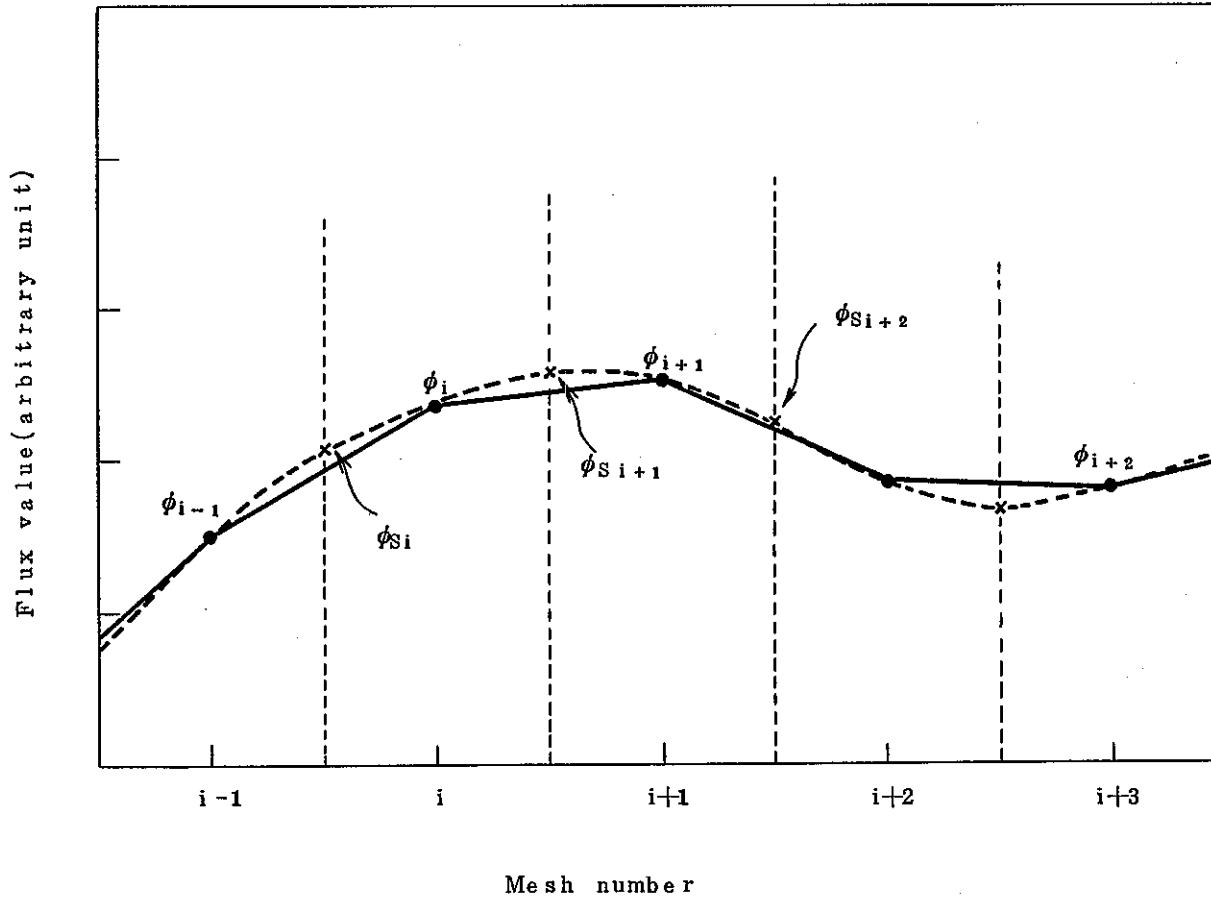
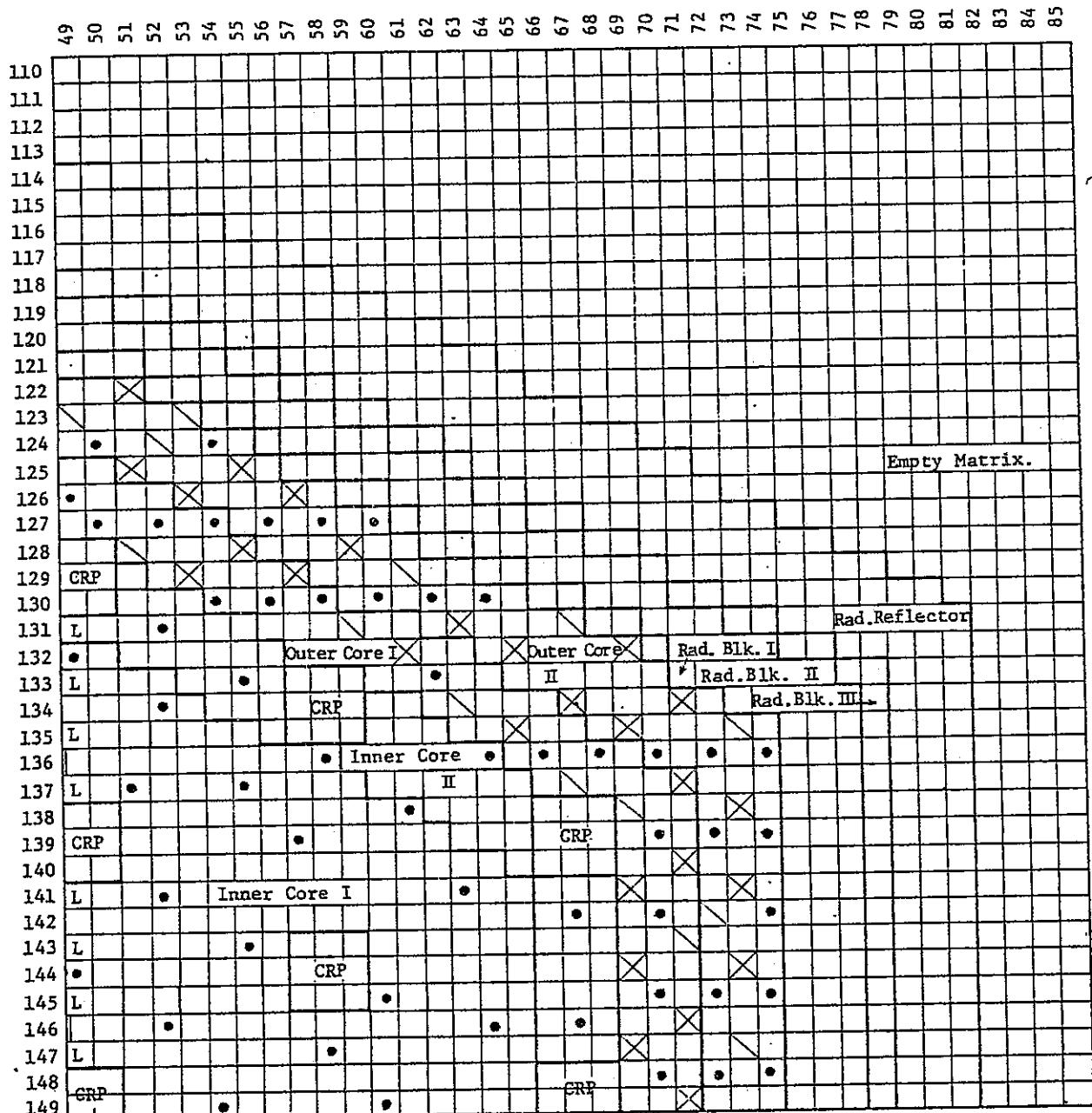


Fig. 4.3 Interpolation of Neutron Fluxes Based on  
Second-Order Polynomials



Drawer Number in Each Zone

Inner Core I	*1	877
Inner Core II	*1	384
Inner Core III	(*1)	1261
Outer Core I		404
Outer Core II		492
Outer Core III	(Total)	896
Rad. Blk. I		160
Rad. Blk. II		332
Rad. Blk. III		180
Rad. Blk. IV	(Total)	672

\* Including CRP.

Fig. 4.4 Fuel Loading Pattern of ZPPR-10C

Table .4.1       $S_N$  Mesh Size Effect on  $^{238}U(n,f)$  Reaction Rate  
Distribution in One-Dimensional System

Column number	Drawer	Reaction rate		
		Average	Center	Difference <sup>*</sup> (%)
49		1.0000	1.0000	—
48		0.9985	0.9985	0.00
47		0.9956	0.9956	0.00
46		0.9913	0.9913	0.00
45		0.9855	0.9855	0.00
44		0.9783	0.9783	0.00
43		0.9696	0.9696	0.00
42		0.9596	0.9595	0.00
41		0.9481	0.9481	0.00
40		0.9353	0.9353	0.00
39		0.9211	0.9212	0.01
38		0.9058	0.9057	0.01
37		0.8893	0.8892	-0.01
36		0.8720	0.8720	0.00
35		0.8548	0.8547	-0.01
34		0.8393	0.8390	-0.04
33		0.8302	0.8294	-0.09
O.C	32	0.8460	0.8410	-0.59
	31      Double **	0.8982	0.9124	1.58
	30	0.7694	0.7611	-1.08
	29      Double	0.6941	0.7056	1.66
	28	0.4685	0.4680	-0.11
R.BL	27	0.2440	0.2372	-2.79
	26	0.1306	0.1285	-1.61
	25	0.0740	0.0730	-1.35
	24	0.0430	0.0425	-1.11

\* Relative difference of  $^{238}U(n,f)$  reaction rate distribution  
between two calculation methods

\*\* Double fuel column drawer

Table .42 Comparison of Interpolation Factors for  
 $^{239}\text{Pu}(n,f)$  Rate Distribution along X-Axis

Foil location	Drawer	Interpolation factor		
		Conventional	Present	Ratio *
149/47	Double **	1.001	1.001	1.000
46		1.000	1.000	1.000
45		1.000	1.000	1.000
44		1.001	1.002	1.001
43		1.000	1.000	1.000
42		1.000	1.000	1.000
41		1.001	1.001	1.000
40		1.000	1.000	1.000
39		1.000	1.000	1.000
38		1.001	1.002	1.001
37		1.001	1.001	1.000
36		1.001	1.001	1.000
35		1.001	1.001	1.000
34		1.001	1.001	1.000
33		1.000	1.000	1.000
CRP	Double	—	—	—
32		—	—	—
31		—	—	—
30		—	—	—
O.C	Pu-Al ***	1.002	1.001	0.999
29		1.002	1.001	0.999
28		1.011	1.007	0.996
27		1.004	1.003	0.999
26		1.004	1.004	1.000
25		1.005	1.006	1.001
R.BL		—	—	—
23	E F	—	—	—
22		—	—	—
21		—	—	—
20		—	—	—

\* Factor by present method/factor by conventional method

\*\* Double fuel column drawer

\*\*\* Pu-Al spike fuel drawer

Table .4.3 Comparison of Interpolation Factors for  
 $^{235}\text{U}(n,f)$  Rate Distribution along X-Axis

Foil location	Drawer	Interpolation factor		
		Conventional	Present	Ratio *
149/47	A	1.001	1.002	1.001
46		1.001	1.000	0.999
45		1.000	1.001	1.001
44		1.000	0.999	0.999
43		1.000	1.000	1.000
42		1.001	1.001	1.000
41		1.000	1.000	1.000
40		1.000	1.001	1.001
39		1.001	1.001	1.000
38		1.000	0.999	0.999
37	Double	1.001	1.001	1.000
36		1.001	1.001	1.000
35		1.000	1.001	1.001
34		1.000	1.000	1.000
33		1.000	1.000	1.000
CRP	I J	—	—	—
32		—	—	—
31		—	—	—
30	O.C	—	—	—
29		1.004	1.004	1.000
28		1.003	1.002	0.999
27		Pu-Al ***	1.003	1.006
26		1.003	1.003	1.000
25		1.004	1.004	1.000
24		1.005	1.005	1.000
R.BL	EF	0.985	0.986	1.001
23		0.981	0.982	1.001
22		0.980	0.982	0.998
21		0.993	0.983	0.990

\* Factor by present method/factor by conventional method

\*\* Double fuel column drawer

\*\*\* Pu-Al spike fuel drawer

Table .44 Comparison of Interpolation Factors for  
 $^{235}\text{U}(n,f)$  Rate Distribution along Y-Axis

Foil location	Drawer	Interpolation factor		
		Conventional	Present	Ratio *
149/47		1.001	1.002	1.001
148	IJ	1.001	1.001	1.000
147		1.001	1.001	1.000
146		1.000	1.000	1.000
145	CH	1.000	1.000	1.000
144		1.000	1.000	1.000
143		1.000	1.000	1.000
142		1.000	1.000	1.000
141		1.001	1.000	0.999
140		1.001	1.001	1.000
139		1.002	1.002	1.000
138		1.001	1.001	1.000
137	Double **	1.000	1.000	1.000
136		1.000	1.000	1.000
135		1.001	1.001	1.000
134	IJ	1.000	1.000	1.000
133		0.999	0.999	1.000
132		1.000	1.000	1.000
131		1.000	1.000	1.000
130		1.001	1.001	1.000
129		1.002	1.001	0.999
128 O.C		1.002	1.002	1.000
127		1.001	1.000	0.999
126	Pu-Al ***	1.001	1.000	0.999
125		1.000	1.002	1.002
124		1.001	1.000	0.999
123		1.001	1.000	0.999
122		0.998	1.001	1.003
121 R.BL	EF	1.001	1.000	0.999
120		1.000	0.999	0.999
119		1.001	0.999	0.998

\* Factor by present method/factor by conventional method

\*\* Double fuel column drawer

\*\*\* Pu-Al spike fuel drawer

Table . 4.5 Comparison of Interpolation Factors for  
 $^{238}\text{U}(n, f)$  Rate Distribution along X-Axis

Foil location	Drawer	Interpolation factor		
		Conventional	Present	Ratio *
149 / 47	Double **	0.997	0.999	1.002
46		0.998	0.999	1.001
45		0.997	0.996	0.999
44		1.000	1.023	1.023
43		1.024	1.002	0.999
42		1.001	0.996	0.995
41		1.001	1.004	1.003
40		1.000	0.991	0.991
39		0.998	0.996	0.998
38		1.006	1.026	1.020
37		1.003	1.004	1.001
36		1.001	0.997	0.996
35		1.001	1.002	1.001
34		1.002	1.007	1.005
33		1.003	1.004	1.001
CRP	Double	—	—	—
32		—	—	—
31		—	—	—
30		—	—	—
O.C	Pu-Al ***	0.997	0.982	0.985
29		0.998	0.988	0.990
28		1.003	1.026	1.023
27		1.006	0.997	0.991
26		1.006	1.003	0.997
25		1.011	1.016	1.005
24		0.940	0.925	0.984
R.BL	EF	0.939	0.940	1.001
23		0.957	0.958	0.998
22		0.954	0.995	1.043
21		—	—	—
20		—	—	—

\* Factor by present method/factor by conventional method

\*\* Double fuel column drawer

\*\*\* Pu-Al spike fuel drawer

Table .46 Comparison of Interpolation Factors for  
 $^{238}\text{U}(n,f)$  Rate Distribution along Y-Axis

Foil location	Drawer	Interpolation factor		
		Conventional	Present	Ratio *
149/47	↑	0.997	0.999	1.002
148	I J	0.998	1.000	1.002
147		0.998	0.998	1.000
146	↓	0.998	0.996	0.998
145	CH	1.000	1.000	1.000
144	↑	1.001	0.999	0.998
143		1.000	0.998	0.998
142		0.999	1.001	1.002
141		0.997	0.993	0.996
140		0.997	1.002	1.005
139		0.996	0.995	0.999
138		0.997	0.997	1.000
137	Double **	0.999	1.011	1.012
136		1.000	0.998	0.998
135		0.999	0.998	0.999
134	I J	0.998	0.997	0.999
133		1.000	0.999	0.999
132		1.000	0.997	0.997
131		0.997	0.996	0.999
130		0.996	0.992	1.006
129		0.996	0.991	0.995
128 O.C		0.997	0.999	1.002
127		1.001	0.999	0.998
126	Pu-Al ***	1.000	0.995	0.995
125		1.001	1.014	1.013
124		1.002	0.995	0.993
123		1.003	1.001	0.998
122	↓	Pu-Al	1.004	1.029
121 R.BL	↑		0.986	0.983
120	EF		0.993	0.993
119	↓		0.991	1.014

\* Factor by present method/factor by conventional method

\*\* Double fuel column drawer

\*\*\* Pu-Al spike fuel drawer

Table 4.7 Comparison of Interpolation Factors for  
 $^{238}\text{U}(n,\gamma)$  Rate Distribution along X-Axis

Foil location	Drawer	Interpolation factor		
		Conventional	Present	Ratio *
149/47	Double **	1.001	1.001	1.000
46		1.001	1.000	0.999
45		1.000	1.000	1.000
44		1.000	0.998	0.998
43		1.000	1.000	1.000
42		1.000	1.000	1.000
41		1.000	1.000	1.000
40		1.000	1.001	1.00
39		1.001	1.001	1.000
38		1.000	0.998	0.998
37		1.000	1.000	1.000
36		1.001	1.001	1.000
35		1.001	1.001	1.000
34		1.001	1.001	1.000
33		1.000	1.000	1.000
CRP	Double	—	—	—
32		—	—	—
31		—	—	—
30		—	—	—
O.C	Pu-Al ***	1.003	1.004	1.001
29		1.003	1.003	1.000
28		1.003	1.004	1.001
27		1.003	1.005	1.002
26		1.004	1.004	1.000
25		1.004	1.004	1.000
24		1.004	1.004	1.000
R.BL	EF	0.983	0.985	1.002
23		0.979	0.979	1.000
22		0.979	0.977	0.998
21		0.982	0.979	0.993

\* Factor by present method/factor by conventional method

\*\* Double fuel column drawer

\*\*\* Pu-Al spike fuel drawer

Table 4.8 Comparison of Interpolation Factors for  
 $^{238}\text{U}(n,\gamma)$  Rate Distribution along Y-Axis

Foil location	Drawer	Interpolation factor		
		Conventional	Present	Ratio *
149/47		1.001	1.001	1.000
148	IJ	1.001	1.000	0.999
147		1.001	1.001	1.000
146		1.000	1.000	1.000
145	CH	1.000	1.000	1.000
144		1.000	1.000	1.000
143		1.000	1.000	1.000
142		1.000	1.000	1.000
141		1.001	1.001	1.000
140		1.001	1.000	0.999
139		1.001	1.001	1.000
138		1.001	1.001	1.000
137	Double	1.001	0.999	0.998
136		1.000	1.000	1.000
135		1.000	1.000	1.000
134	IJ	1.000	1.000	1.000
133		1.000	1.000	1.000
132		1.000	1.000	1.000
131		1.001	1.001	1.000
130		1.001	1.000	0.999
129		1.002	1.002	1.000
128 O.C		1.002	1.002	1.000
127		1.001	1.000	0.999
126	Pu-Al	1.000	1.000	1.000
125		1.000	1.000	1.000
124		1.000	1.000	1.000
123		1.000	0.999	0.999
122	Pu-Al	1.000	1.000	1.000
121 R.BL		0.998	0.999	1.001
120	EF	0.998	0.997	0.999
119		1.000	0.998	0.998

\* Factor by present method/factor by conventional method

\*\* Double fuel column drawer

\*\*\* Pu-Al spike fuel drawer

#### 4.2 セル非対称効果の補正

ZPPR-9 及び 10 の炉心では炉心燃料の一つとして Single fuel column drawer を使用した。この燃料ドロワーは図 4.5 に示すように左右非対称な構造をしており、しかもこのドロワーが炉心内で  $y$  軸に対称となるように装荷されたために、中性子束分布に歪みを生じる。この効果を、上記の Single fuel column drawer を左右に等分割して半領域毎に均質化するいわゆる Half-drawer model で評価した。この Half-drawer model の妥当性は、すでに 1 次元体系における非均質輸送計算との比較により確認され<sup>18)</sup>ている。また、セルが非対象なことにより中性子束の全体的な分布が歪むことの炉物理的な理由は Neutron drift<sup>19)20)</sup>ではなく、炉心  $y$  軸上に  $^{238}\text{U}$  が集中したためである。このことは付録で述べることにする。

図 4.6 に示すのは ZPPR-10C におけるセル非対称効果を補正するための Half-drawer 体系である。図中で斜線部分が  $^{238}\text{U}$  の密度の高い方の Half-drawer を、その右側に接するブランクの部分が  $^{238}\text{U}$  の密度の低い方の Half-drawer を示す。

ここでは 1/4 炉心モデルを使用した。厳密には  $^{238}\text{U}$  が集中するのは炉心  $y$  軸上から半ドロワー分 (2.7623 cm) だけ  $x$  軸方向にずれたところであるため、1/2 炉心モデルを使用するのが正しい。しかし、ZPPR-10C では ZPPR-9 と異なり、炉心  $y$  軸上に Single fuel column drawer (図 4.6 では横線部で示す) が少ないと、 $y$  軸方向の反応率分布は  $y$  軸から 2 ドロワー分 ( $2 \times 5.5245\text{ cm}$ ) だけ離れたところで測定されており、 $y$  軸付近の局所的な中性子束歪みの影響が小さいことのために、1/4 炉心モデルで十分と考えられる。

上記の体系で 7 群 X Y 拡散計算を行い、反応率分布を計算した。また、上記のメッシュ分割のまま、Single fuel column drawer を均質セルとして扱った計算も行い、反応率分布を求めた。これら 2 種類の反応率分布の比からセル非対称効果を評価した。結果を表 4.9 及び表 4.10 に示す。

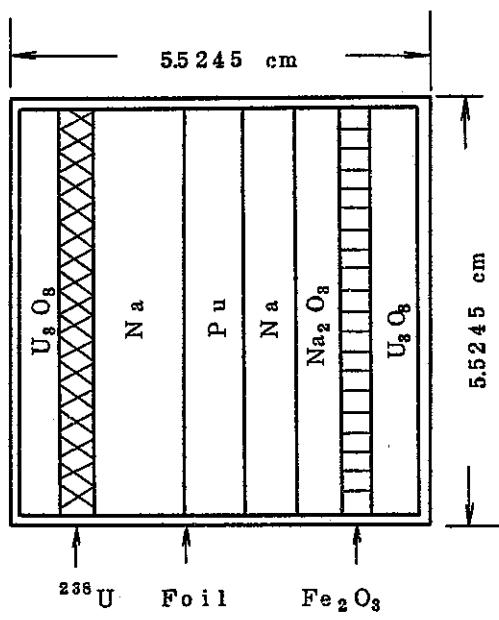
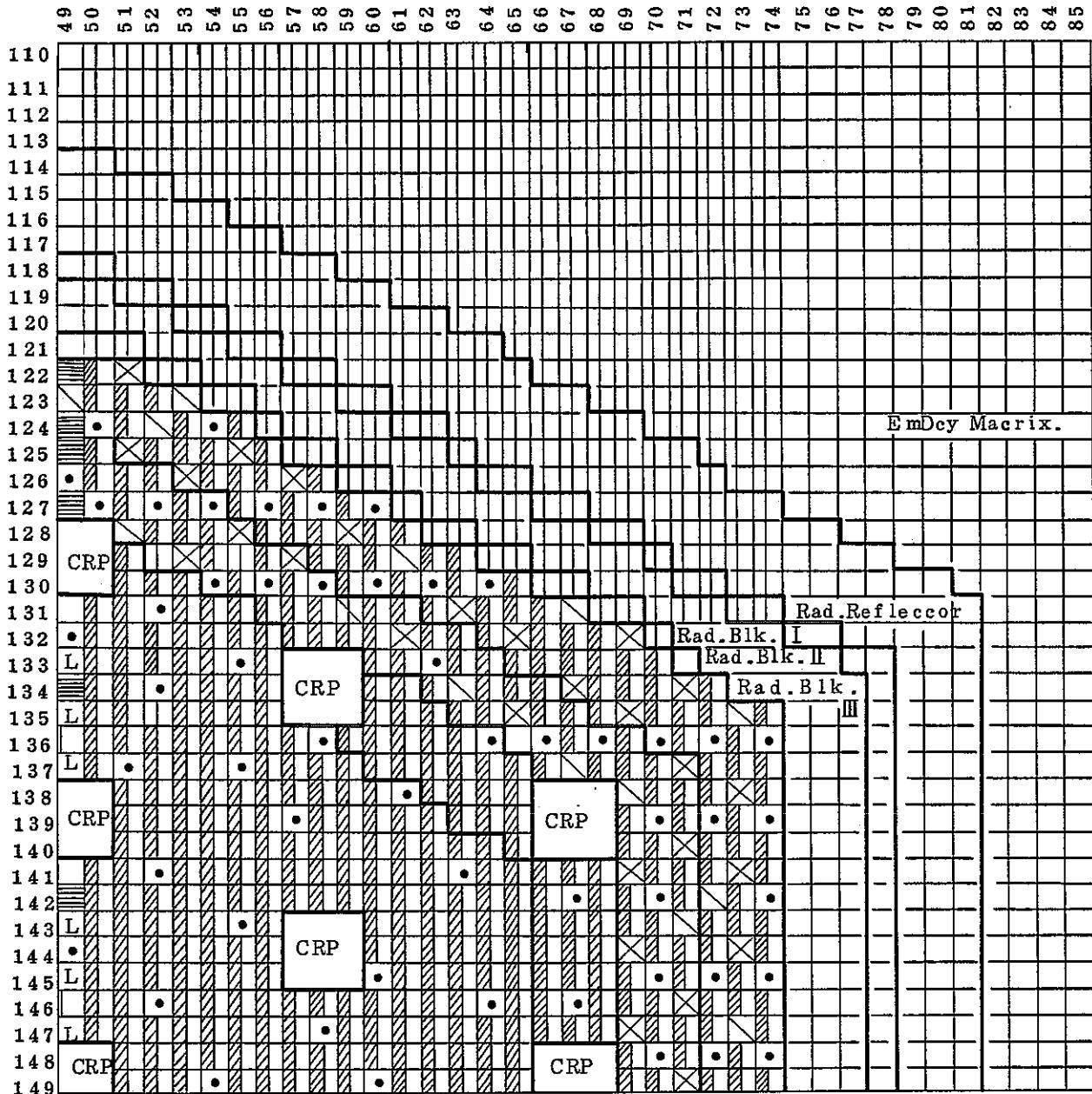


Fig. 4.5 Single fuel column drawer



- PSR
  - ZPPR Fuel Spike
  - PuAl Fuel Spike
  - Single Fuel Column Drawer With Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>
  - HL Type Drawer
  - LL Type Drawer

- Single Fuel Column Drawer  
(homogeneous cell)
  - Single Fuel Column Drawer  
(half-drawer cell)

Fig. 4.6 Half-Drawer Model of ZPPR-10C

Table.4.9 Cell Asymmetry Effect on Reaction Rate

## Distribution along X-Axis

Matrix position	Asymmetry effect			
	$^{239}\text{Pu}(n, f)$	$^{235}\text{U}(n, f)$	$^{238}\text{U}(n, f)$	$^{238}\text{U}(n, \gamma)$
149/47	1.000	1.000	1.000	1.000
46	1.007	1.009	1.003	1.008
45	1.012	1.016	1.006	1.014
44	1.012	1.017	1.008	1.014
43	1.013	1.017	1.010	1.015
42	1.016	1.020	1.012	1.018
41	1.018	1.023	1.013	1.020
40	1.019	1.024	1.014	1.021
39	1.021	1.026	1.016	1.024
38	1.021	1.025	1.017	1.023
37	1.021	1.024	1.018	1.022
36	1.024	1.028	1.020	1.026
35	1.026	1.031	1.022	1.028
34	1.029	1.035	1.024	1.032
33	1.034	1.040	1.027	1.037
CRP	3.2			
	3.1			
	3.0			
O.C	2.9	1.030	1.028	1.031
	2.8	1.034	1.029	1.035
	2.7	1.034	1.030	1.034
	2.6	1.035	1.032	1.034
	2.5	1.038	1.034	1.038
	2.4	1.042	1.036	1.044
R.BL	2.3		1.033	1.045
	2.2	1.048	1.034	1.043
	2.1	1.046	1.036	1.043
	2.0	1.045	1.036	1.042

Table .4.10 Cell Asymmetry Effect on Reaction Rate  
Distribution along Y-Axis

Matrix position	Asymmetry effect		
	$^{235}\text{U}(n, f)$	$^{238}\text{U}(n, f)$	$^{238}\text{U}(n, \gamma)$
149/47	1.000	1.000	1.000
148	1.001	1.000	1.001
147	1.005	1.001	1.004
146	1.009	1.001	1.008
145	1.008	1.001	1.006
144	1.008	1.001	1.006
143	1.008	1.001	1.006
142	1.008	1.002	1.007
141	1.008	1.002	1.007
140	1.003	1.001	1.002
139	1.001	1.001	1.002
138	1.003	1.002	1.002
137	1.007	1.003	1.006
136	1.009	1.003	1.008
135	1.011	1.004	1.009
134	1.013	1.005	1.012
133	1.012	1.005	1.011
132	1.013	1.006	1.011
131	1.014	1.006	1.012
130	1.009	1.006	1.008
129	1.008	1.007	1.007
128	1.008	1.008	1.007
127 O.C	1.012	1.008	1.010
126	1.014	1.009	1.012
125	1.016	1.010	1.013
124	1.017	1.011	1.015
123	1.019	1.012	1.017
122	1.028	1.013	1.021
121 R.BL	1.023	1.012	1.021
120	1.024	1.012	1.022
119	1.024	1.012	1.022

#### 4.3 シム制御棒効果の補正

ZPPR-9 及び 10 を用いた臨界実験では、装置を臨界に保つために、約 20 本のシム制御棒のうち 4 本が中途まで挿入されている。この時の中性子束分布の歪みは、ZPPR-10 A の場合、x 軸及び y 軸間で反応率分布の C/E 値に約 3 % の系統的なくい違いを生じさせることが 3 次元計算による検討からわかっている。しかし、この効果は余剰反応度の小さな他の体系、とくに ZPPR-10C では小さく、表 4.1.1 <sup>18)</sup> に示すように反応率分布の C/E 値に及ぼす影響は 1 % 以下である。したがって ZPPR-10C の反応率分布に対するこの効果は無視することにした。

以上のようにして、輸送計算におけるメッシュ効果及びセル非対称効果の補正を施した後の、ZPPR-10C 反応率分布の解析結果を表 4.1.2 から表 4.1.8 までに示す。また、C/E 値のグラフを図 4.7 及び図 4.8 に一括して示す。

Table 4.11 Change in Ratios of Average C/E between  
X-and Y-axes Due to shim Rod Correction\*

Assembly	Inner core	Outer core	Radial blanket
10A	1.021→1.008	1.036→1.003	0.998→0.965
10B	1.015→1.012	0.995→0.985	1.009→0.998
10C	1.021→1.019	1.017→1.011	1.059→1.053
10D	1.008→1.004	1.003→0.991	1.022→1.010
10D/1	1.029→1.021	0.999→0.981	1.034→1.014
10D/2	1.029→1.014	0.972→0.960	1.010→0.998

\* Correction factors for 10A applied to all assemblies

Table .4.12 Reaction Rates Measured and Calculated along X-axis  
 (  $^{239}\text{Pu}$  Fission )

Foil location	Measured *	Calculated				C / E		
		Base cal **	Transport	Asymmetry	Group			
149/47		5.789	5.789	1.002	1.000	1.010	1.000	
46	↑	5.548	5.684	0.995	1.007	1.009	1.023	
45		5.535	5.636	0.998	1.012	1.007	1.023	
44		5.484	5.499	1.007	1.012	1.005	1.015	
43		5.396	5.534	0.999	1.013	1.004	1.030	
42		5.374	5.465	0.997	1.016	1.004	1.022	
41		5.317	5.394	0.999	1.018	1.004	1.024	
40	IJ	5.214	5.317	0.997	1.019	1.016	1.040	
39	↓	5.060	5.232	0.999	1.021	1.006	1.048	
38		5.139	5.045	1.007	1.021	1.008	1.005	
37		4.820	5.011	1.001	1.021	1.008	1.058	
36		4.755	4.878	0.998	1.024	1.007	1.043	
35		4.613	4.737	0.999	1.026	1.002	1.042	
34		4.567	4.600	0.998	1.029	1.003	1.025	
33	↓	4.427	4.478	1.003	1.034	1.002	1.039	
CRP	32							
	31							
	30							
O.C	29	3.807	3.836	1.001	1.030	1.001	1.028	
	28	3.476	3.525	1.003	1.034	1.002	1.041	
	27	IJ	3.176	3.188	1.008	1.034	1.002	1.035
	26		2.754	2.851	1.004	1.035	1.001	1.064
	25		2.320	2.456	1.002	1.038	0.997	1.085
	24	↓	2.021	2.059	1.003	1.042	0.995	1.047
R.BL	23	↑						
	22	EF						
	21							
	20	↓						

\* Reaction rates are fissions or captures per atom, normalized to an estimated integrated power of one joule.  $\times 10^{-18}$  unit.

\*\* 7-group diffusion calculation using one mesh per drawer

Table .4.13 Reaction Rates Measured and Calculated along X-axis  
 (  $^{235}\text{U}$  Fission )

Foil location	Measured *	Calculated				C/E
		Base cal **	Transport	Asymmetry	Group	
149/47	6.357	6.357	1.008	1.000	1.014	1.000
46	6.133	6.104	0.995	1.009	1.008	0.986
45	5.990	5.986	0.995	1.016	1.004	0.992
44	5.900	5.773	1.009	1.017	0.999	0.981
43	5.833	5.848	0.996	1.017	1.001	0.995
42	5.777	5.789	0.998	1.020	1.003	1.001
41	5.810	5.717	0.997	1.023	1.002	0.984
40	5.666	5.620	1.000	1.024	1.001	0.995
39	5.598	5.526	0.995	1.026	1.000	0.986
38	5.449	5.287	1.009	1.025	0.997	0.979
37	5.242	5.290	0.997	1.024	1.000	1.008
36	5.119	5.167	0.999	1.028	1.001	1.015
35	4.973	5.036	0.999	1.031	1.002	1.022
34	4.941	4.921	0.996	1.035	1.003	1.007
33	4.868	4.866	1.008	1.040	1.006	1.031
CRP	32					
	31					
	30					
O.C	29	4.125	4.069	1.010	1.033	1.002
	28	3.640	3.624	0.999	1.037	0.994
	27	IJ	3.257	3.247	1.004	1.037
	26		2.852	2.892	1.001	1.037
	25		2.529	2.522	0.999	1.041
	24		2.191	2.157	1.005	1.048
R.BL	23	1.863	1.874	0.985	1.049	0.995
	22	EF	1.518	1.538	0.995	1.048
	21		1.286	1.242	1.002	1.046
	20		1.113	1.059	1.030	1.045
						1.005
						1.007

\* Reaction rates are fissions or captures per atom, normalized to an estimated integrated power of one joule.  $\times 10^{-18}$  unit.

\*\* 7-group diffusion calculation using one mesh per drawer

Table 4.14 Reaction Rates Measured and Calculated along Y-axis  
 ( $^{235}\text{U}$  Fission)

Foil location	Measured *	Calculated				C/E
		Base cal **	Transport	Asymmetry	Group	
149/47	6.357	6.357	1.008	1.000	1.014	1.000
148	6.300	6.317	1.000	1.001	1.013	0.995
147 IJ	6.185	6.142	1.003	1.005	1.009	0.988
146	5.929	6.036	0.997	1.009	1.005	1.007
145 CH	5.823	5.984	0.996	1.008	1.003	1.012
144	5.776	5.931	0.998	1.008	1.003	1.014
143	5.817	5.887	0.997	1.008	1.004	0.999
142	5.763	5.840	0.997	1.008	1.005	1.001
141	5.776	5.825	1.002	1.008	1.007	1.004
140	5.812	5.894	1.000	1.003	1.011	1.006
139	5.804	5.850	1.005	1.001	1.012	1.004
138	5.613	5.711	1.001	1.003	1.009	1.008
137	5.403	5.309	1.019	1.007	1.002	0.988
136	5.142	5.264	0.998	1.009	1.002	1.010
135	4.939	5.109	0.999	1.011	1.001	1.023
134 IJ	4.822	4.946	0.997	1.013	0.999	1.013
133	4.616	4.781	0.998	1.012	0.999	1.022
132	4.444	4.586	1.000	1.013	1.001	1.024
131	4.260	4.408	1.003	1.014	1.001	1.031
130	4.104	4.265	1.000	1.009	1.003	1.029
129	3.950	4.037	1.004	1.008	1.003	1.015
128	3.603	3.707	1.003	1.008	1.004	1.022
127 O.C.	3.170	3.274	1.010	1.012	0.998	1.031
126	2.847	2.905	1.003	1.014	0.994	1.009
125	2.543	2.542	1.005	1.016	0.988	0.987
124	2.132	2.186	1.006	1.017	0.991	1.017
123	1.827	1.847	1.004	1.019	0.995	1.007
122	1.597	1.524	1.015	1.028	0.999	0.973
121 R.BL	1.325	1.327	0.995	1.023	1.003	1.000
120 EF	1.097	1.093	0.998	1.024	1.002	0.998
119	0.945	0.925	1.010	1.024	1.010	1.000

\* Reaction rates are fissions or captures per atom, normalized to an estimated integrated power of one joule.  $\times 10^{-18}$  unit.

\*\* 7-group diffusion calculation using one mesh per drawer

Table .4.15 Reaction Rates Measured and Calculated along X-axis  
 ( $^{238}\text{U}$  Fission)

Foil location	Measured *	Calculated				C/E
		Base cal **	Transport	Asymmetry	Group	
149/47	1.113	1.113	0.977	1.000	1.002	1.000
46	1.257	1.190	0.996	1.003	1.004	0.970
45	1.308	1.227	1.020	1.006	1.005	0.988
44	1.474	1.368	1.017	1.008	1.006	0.978
43	1.322	1.227	1.019	1.010	1.004	0.980
42	1.267	1.193	0.983	1.012	1.004	0.961
41	1.258	1.176	1.005	1.013	1.004	0.976
40	IJ	1.245	1.179	0.965	1.014	1.004
39		1.243	1.162	1.017	1.004	0.991
38		1.317	1.264	1.009	1.005	1.011
37		1.197	1.111	1.023	1.003	0.990
36		1.145	1.062	0.985	1.020	1.002
35		1.104	1.016	1.000	1.022	1.001
34		1.078	0.965	1.011	1.024	1.000
33	↓	0.973	0.888	0.975	1.027	0.931
CRP	32					
	31					
	30					
O.C	29	0.881	0.835	0.942	1.028	0.994
	28	0.931	0.857	1.027	1.029	0.996
	27	IJ	0.911	0.865	1.048	0.997
	26		0.924	0.719	1.025	0.996
	25		0.631	0.584	1.024	0.993
	24	↓	0.503	0.449	1.000	0.991
R.BL	23	↑	0.221	0.221	1.019	0.994
	22	EF	0.119	0.122	0.895	0.998
	21		0.064	0.066	0.940	0.989
	20	↓	0.047	0.036	1.073	0.996

\* Reaction rates are fissions or captures per atom, normalized to an estimated integrated power of one joule.  $\times 10^{-19}$  unit.

\*\* 7-group diffusion calculation using one mesh per drawer

Table .4.16 Reaction Rates Measured and Calculated along Y-axis  
 ( $^{238}\text{U}$  Fission)

Foil location	Measured *	Calculated				C/E		
		Base cal **	Transport	Asymmetry	Group			
149/47	↑	1.113	1.113	0.977	1.000	1.002	1.000	
148	IJ	1.105	1.126	0.991	1.000	1.003	1.035	
147		1.240	1.185	1.002	1.001	1.004	0.983	
146	↓	1.309	1.228	1.013	1.001	1.005	0.977	
145	CH	1.293	1.231	1.010	1.001	1.005	0.988	
144	↑	1.332	1.226	0.983	1.001	1.005	0.930	
143		1.258	1.204	0.990	1.001	1.005	0.974	
142		1.262	1.178	1.014	1.002	1.004	0.973	
141		1.225	1.144	0.998	1.002	1.004	0.958	
140		1.122	1.071	1.009	1.001	1.002	0.987	
139		1.037	1.042	0.968	1.001	1.002	1.023	
138		1.025	1.051	1.006	1.002	1.002	1.058	
137		1.220	1.206	0.973	1.003	1.005	0.990	
136		1.145	1.084	1.013	1.003	1.003	0.986	
135		1.101	1.065	1.000	1.004	1.003	0.995	
134	IJ	1.110	1.046	1.012	1.005	1.003	0.982	
133		1.074	1.007	1.007	1.005	1.002	0.971	
132		1.006	0.966	0.995	1.006	1.001	0.983	
131		0.940	0.910	1.002	1.006	1.000	0.997	
130		0.811	0.829	1.009	1.006	0.998	1.058	
129		0.790	0.784	0.955	1.007	0.996	0.971	
128		0.746	0.754	1.010	1.008	0.994	1.045	
127	O.C.	0.786	0.746	1.007	1.008	0.995	0.979	
126		0.714	0.694	1.016	1.009	0.995	1.013	
125		0.691	0.660	0.997	1.010	0.988	0.971	
124		0.516	0.513	1.020	1.011	0.995	1.042	
123		0.434	0.397	1.020	1.012	0.993	0.958	
122		0.332	0.311	0.967	1.013	0.993	0.931	
121	R.BL	↑	0.141	0.142	1.008	1.012	0.994	1.043
120		EF	0.068	0.076	0.874	1.012	0.997	1.007
119		↓	0.043	0.040	0.912	1.012	1.002	0.879

\* Reaction rates are fissions or captures per atom, normalized to an estimated integrated power of one joule.  $\times 10^{-19}$  unit.

\*\* 7-group diffusion calculation using one mesh per drawer

Table . 4.17 Reaction Rates Measured and Calculated along X-axis  
 (  $^{238}\text{U}$  Capture )

Foil location	Measured *	Calculated				C / E
		Base cal **	Transport	Asymmetry	Group	
149/47	8.163	8.163	1.006	1.000	1.006	1.000
46	7.717	7.903	0.996	1.008	1.004	1.020
45	7.680	7.776	0.994	1.014	1.001	1.009
44	7.646	7.699	1.008	1.014	0.996	1.013
43	7.422	7.610	0.996	1.015	1.000	1.024
42	7.401	7.534	0.999	1.018	1.001	1.024
41	7.330	7.437	0.998	1.020	1.000	1.021
40	IJ	7.270	7.305	1.002	1.021	0.999
39	7.038	7.183	1.004	1.024	0.999	1.036
38	6.971	7.048	1.009	1.023	0.994	1.025
37	6.702	6.884	0.997	1.022	0.999	1.033
36	6.596	6.726	1.000	1.026	1.000	1.034
35	6.398	6.551	0.999	1.028	1.000	1.039
34	6.329	6.383	0.997	1.032	1.000	1.025
33	V	6.281	6.268	1.007	1.037	1.000
CRP	32					
	31					
	30					
O.C	29	5.228	5.194	1.010	1.031	0.995
	28	4.637	4.648	0.999	1.035	0.990
	27	IJ	4.341	4.303	1.002	1.034
	26		3.630	3.731	1.000	0.984
	25		3.237	3.269	0.998	0.989
	24	V	2.789	2.806	1.006	1.044
R.BL	23	A	2.202	2.324	0.989	0.996
	22	EF	1.787	1.863	0.998	1.043
	21		1.437	1.443	1.002	1.043
	20	V	1.195	1.134	1.018	1.042
						1.009
						1.004

\* Reaction rates are fissions or captures per atom, normalized to an estimated integrated power of one joule.  $\times 10^{-19}$  unit.

\*\* 7-group diffusion calculation using one mesh per drawer

Table .4.18 Reaction Rates Measured and Calculated along Y-axis  
 (  $^{238}\text{U}$  Capture )

Foil location	Measured *	Calculated				C / E
		Base cal **	Transport	Asymmetry	Group	
149/47	8.163	8.163	1.006	1.000	1.006	1.000
148	IJ	7.961	8.122	1.000	1.001	1.006
147		7.830	7.944	1.001	1.004	1.004
146		7.636	7.831	0.996	1.008	1.002
145	CH	7.275	7.778	0.996	1.006	1.022
144		7.503	7.714	0.999	1.006	1.001
143		7.537	7.654	0.998	1.006	1.002
142		7.460	7.580	0.997	1.007	1.002
141		7.425	7.533	1.001	1.007	1.003
140		7.400	7.579	0.999	1.002	1.004
139		7.346	7.509	1.005	1.002	1.004
138		7.205	7.340	1.000	1.002	1.003
137		6.931	7.056	1.019	1.006	0.996
136		6.512	6.829	0.998	1.008	0.999
135		6.291	6.640	0.999	1.009	0.999
134	IJ	6.188	6.431	0.997	1.012	0.998
133		5.884	6.216	0.998	1.011	0.997
132		5.671	5.953	1.000	1.011	0.999
131		5.381	5.703	1.002	1.012	0.998
130		5.202	5.489	1.000	1.008	0.997
129		4.977	5.183	1.005	1.007	0.996
128		4.581	4.758	1.003	1.007	0.998
127 O.C		4.129	4.206	1.008	1.010	0.993
126		3.621	3.740	1.002	1.012	0.990
125		3.377	3.381	1.006	1.013	0.987
124		2.752	2.828	1.005	1.015	0.989
123		2.362	2.396	1.004	1.017	0.995
122		2.171	2.055	1.016	1.021	1.001
121 R.BL		1.576	1.616	0.997	1.021	1.002
120	EF	1.282	1.276	1.001	1.022	1.002
119		1.044	1.005	1.006	1.022	1.002

\* Reaction rates are fissions or captures per atom, normalized to an estimated integrated power of one joule.  $\times 10^{-19}$  unit.

\*\* 7-group diffusion calculation using one mesh per drawer

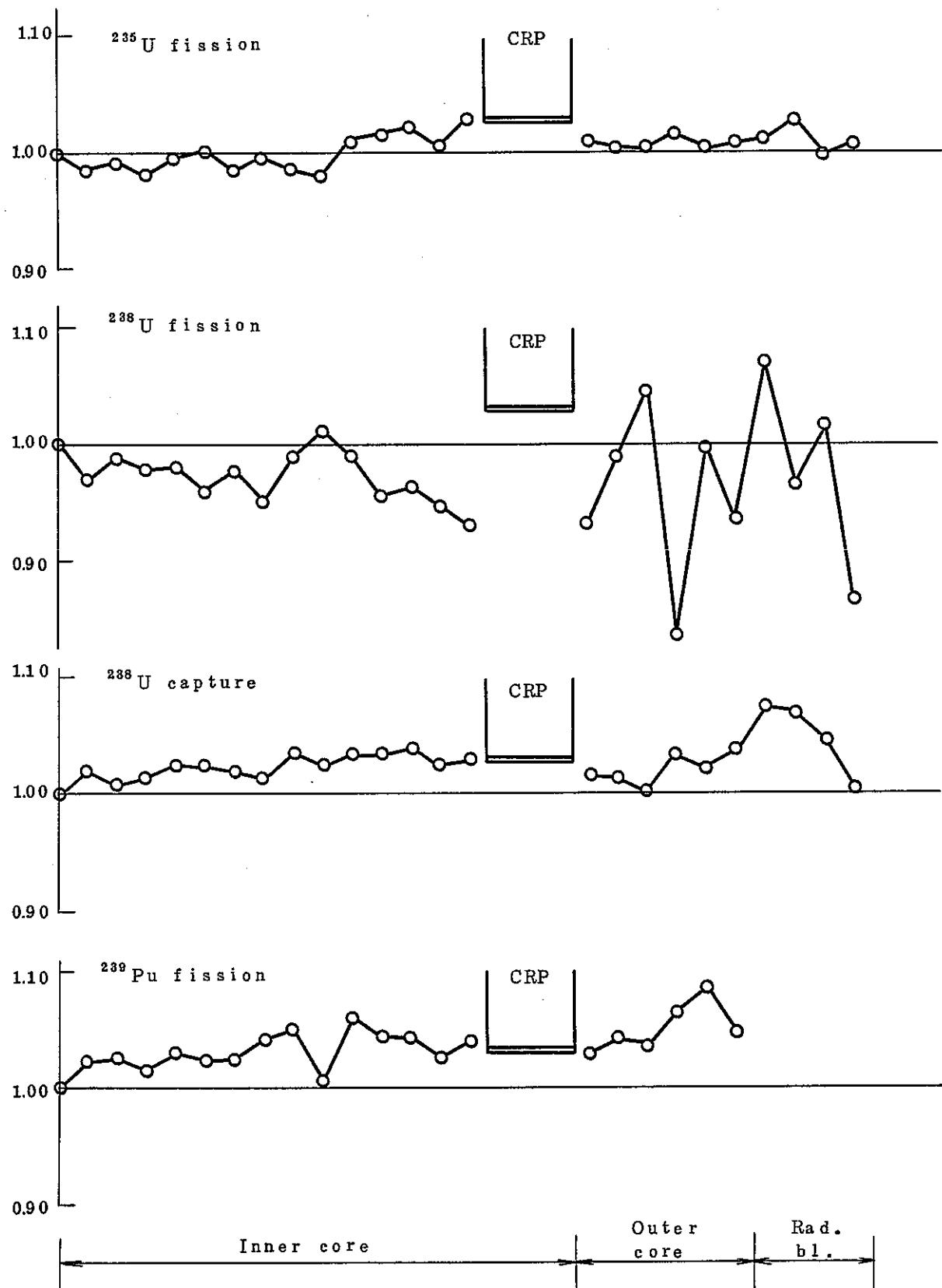


Fig. 4.7 Radial Reaction Rate C/E Distributions in ZPPR-10C  
(X-Axis)

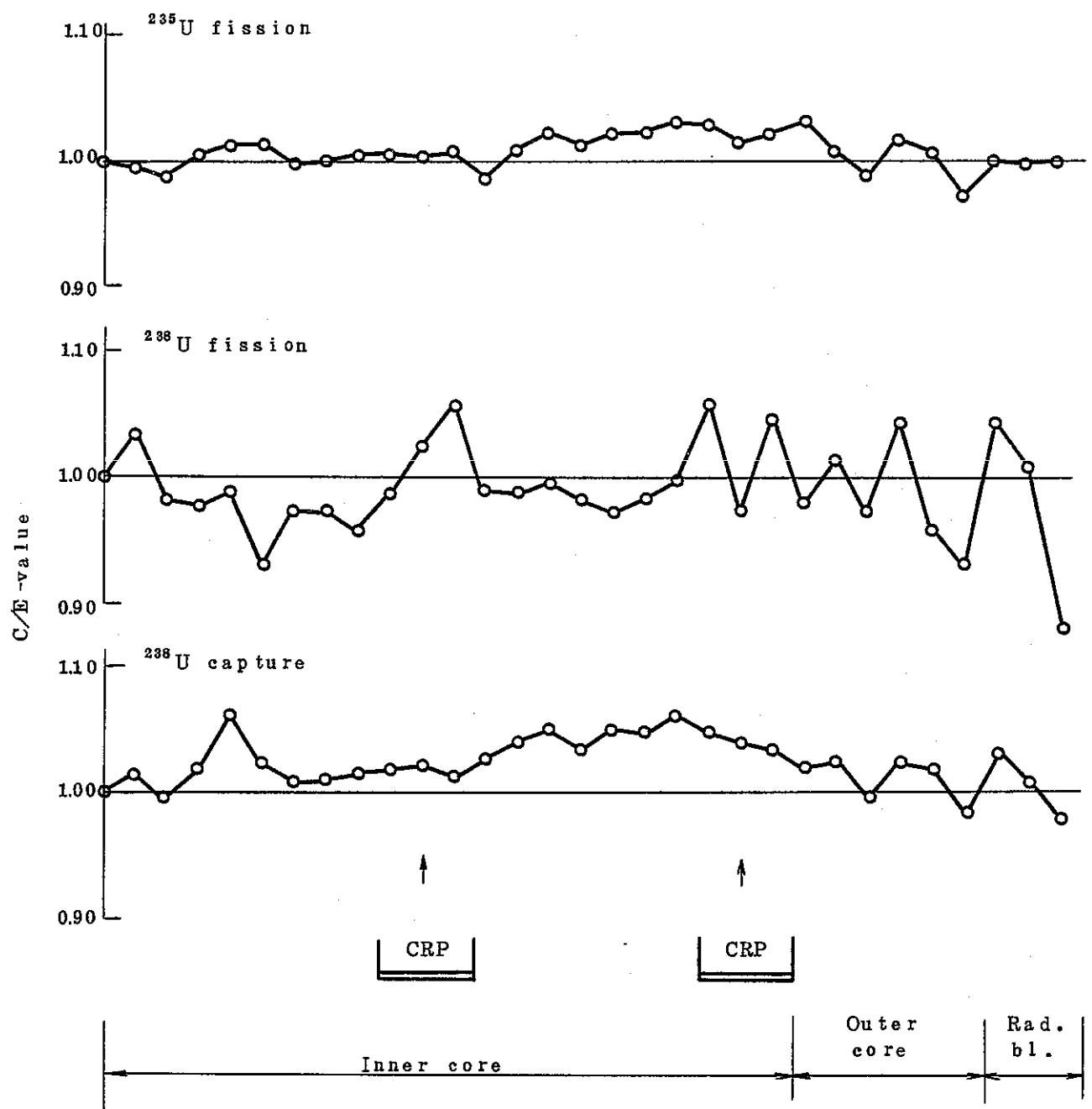


Fig. 4.8 Radial Reaction Rate C/E Distribution in ZPPR-10C  
(Y-Axis)

## 5. ZPPR-9 と ZPPR-10 における反応率分布の総合評価

### 5.1 反応率分布計算法の概要

次節で述べる反応率分布の総合評価のため、ここでは計算法の概要を述べる。基準計算法とセル非対称効果に関する補正以外の4項目の補正項の計算法に関しては、文献14~18に詳細に記されている。セル非対称効果に関しては本報告書の第3章で述べた。

#### (1) 基準計算法

2次元または3次元、7群拡散計算による反応率分布の計算を基準計算と定義する。メッシュ幅はZPPR燃料ドロワー幅 ( $2'' = 5.5245\text{ cm}$ ) にとった。

3次元(XYZ)拡散計算はZPPR-10A, -10Dの反応率分布の計算に適用された。

#### (2) 補正計算

上記の基準計算値の精度をあげるために、以下に示す5項目の補正計算を行った。

- (i) 輸送理論補正
- (ii) メッシュ補正
- (iii) 群数補正
- (iv) シム制御棒補正
- (v) セル非対称効果の補正

(i)~(iii)は自明であるから説明を省くが、(iv)は体系を臨界に保つために挿入されている反応度微調整棒が反応率分布に及ぼす効果を補正するものである。

図5.1に典型的な例として上記(i)~(v)の各補正項の大きさを反応率分布測定点の関数で示す。項目(ii)~(iv)は補正值の大きさも高々1%であり、その空間依存性も比較的ゆるやかである。これらに対して、項目(i)の輸送理論補正是外側炉心領域で急激に大きくなり、最大約4%に達する。さらに項目(v)のセル非対称効果は、炉心中心から外側へゆく程漸次大きくなり、輸送理論効果と同程度の大きさになる。同様の傾向はZPPR-9以外の他の臨界体系に対してもみられる。

### 5.2 反応率分布の総合評価

本節では、JUPITER Phase-I実験における全ての反応率分布測定データの解析によって得られた結果を総合的に比較・検討して、以下の観点から評価を行う。

- (i) C/E値の系統性
- (ii) 反応率分布の計算精度(C/E-1)

(i)は高速炉設計上の出力分布に対するバイアス(補正)値の適用可能性を評価する場合に必要であり、(ii)は現有解析手法の信頼度を与えるとともに、炉設計上の出力分布予測値の不確かさの幅を与える。

図5.2～図5.27にJUPITER Phase-I実験解析で得られた反応率分布のC/E値の空間依存性を示す。ZPPR-10B以外の全ての体系の反応率分布のC/E値の例を示した。

### 5.2.1 反応率分布C/E値の系統性

図5.2～図5.27に示したC/E値の中で、X軸またはY軸方向の反応率分布に注目すると、全般的な傾向として、半径方向に炉心の外側にゆく程増大し、径方向プランケット領域で減少する傾向がみられる。その典型的な例をZPPR-10AとZPPR-10Cの場合について図5.28～図5.31に示す。これらの例からあきらかに、基準計算(base calculation)では、X軸方向(点線)とY軸方向(実線)のC/E値の半径方向変化に顕著な差がみられたが、補正済みの計算値に対するC/E値は、X軸とY軸方向で同じ傾向を示す。すなわち、

系統性-1：径方向反応率分布のC/E値は、炉心中心から外側炉心領域まで漸次増加する。

この傾向は主として、セル非対称効果によるものである。結果的には、X-Y両軸間の傾向は矛盾しなくなったが、燃料プレート面に平行なY軸方向のC/E値は悪くなる。

図5.28～図5.31に矢印で示したように、スペイク燃料の位置で反応率分布のC/E値が鋸歯状に変化している。

系統性-2：スペイク燃料の位置で、反応率分布C/E値は約2%小さくなる。この傾向は、補正前後で顕著な変化はみられない。

図5.32にはZPPR-10Cにおける<sup>238</sup>Uのx軸方向核分裂反応率分布C/E値の空間分布を示す。内側炉心領域におけるC/E値の変化は比較的安定しているが、外側炉心及び軸方向プランケット領域で大きく変動し、補正後のC/E値は約0.84となる点がある。すなわち、

系統性-3：<sup>238</sup>Uのx軸方向核分裂率分布のC/E値は、プランケット領域で顕著な空間依存性を示し、C/E値の上限は約1.07、下限は0.84である。補正計算によってC/E値は約4%改善されるが、空間変動は改善されない。

制御棒による反応率分布C/E値の系統性をみるために、ZPPR-10CとZPPR-10D/-0,-10D/1,-10D/2のC/E値を比較した。ZPPR-10CとZPPR-10D/0は制御棒引

抜き状態の模擬炉心であり、この両者の反応率分布 C/E 値の比較によって、体系の相違による C/E 値のちがいがわかる。

系統性-4：図 5.1.1 と図 5.1.8 の比較からあきらかに、ZPPR-10C と ZPPR-10D の  $^{235}\text{U}$  の核分裂反応率分布 C/E 値の変化は、内側炉心領域では近似的に同じ傾向を示すが、外側炉心では ZPPR-10D/0 の方が約 4 % 大きな C/E 値を与える。

上述の ZPPR-10D/0 外側炉心における C/E 値の傾向は、図 5.2.4 と図 5.2.6 に示すように、制御棒挿入体系にもみられる。すなわち、

系統性-5：ZPPR-10D における制御棒挿入状態（引抜き、挿入）に関係なく、外側炉心領域における  $^{235}\text{U}$  核分裂反応率分布は約 4 % 過大評価になる。

図 5.1.9, 5.2.5, 5.2.7 には、Y 軸方向の反応率分布 C/E 値の空間依存性を示した。これからあきらかに、上述の系統性-5 でみられるような外側炉心領域での系統的な過大評価の傾向はみられない。ところがドロワー版 145 にみられるように、

系統性-6：シム制御棒の側面を通る反応率分布はその周辺にくらべて約 4 % 大きな C/E 値を与える。

この傾向から推察すると、反応率分布に対するシム制御棒近傍の反応率分布への効果が完全に補正されていないことが考えられる。

次に、制御棒の挿入による反応率分布 C/E 値の変化を検討する。図 5.2.4 と図 5.2.5 に示したように、制御棒挿入位置近傍の  $^{235}\text{U}$  核分裂率分布の C/E 値は顕著に変化している。すなわち、

系統性-7：制御棒挿入によって、 $^{235}\text{U}$  核分裂反応率分布の C/E 値は制御棒引き抜き状態と比較して、約 5 % 小さくなり、計算は約 7 % 反応率分布を過小評価する傾向がある。

図 5.3.3 には y 軸に平行な両側と、Y 軸を横切る 3 点における  $^{235}\text{U}$  核分裂反応率分布の C/E 値を示す。図 5.3.4 には X 軸と  $45^\circ$  の直線上における同様な C/E 値を、図 5.3.5 には  $30^\circ$  及び  $\theta$  方向の反応率分布に対する C/E 値の変化を示す。

これらの図に示したように、 $30^\circ$ ,  $45^\circ$  及び  $\theta$  方向の反応率分布に対しても特筆すべき特異な傾向はみられない。

### 5.2.2 反応率分布の計算精度

計算精度の指標として、ここでは<sup>235</sup>U核分裂反応率分布C/E値の平均値とその標準偏差(1σ)を用いる。炉設計上の出力分布との関連では<sup>239</sup>Pu核分裂率分布の方が適しているが、ZPPR-10Dではその反応率分布の測定値がなく、<sup>235</sup>Uに関する測定がなされている。ところが、<sup>239</sup>Puと<sup>235</sup>Uの核分裂率分布のC/E値は近似的に同じ傾向を示すので、一貫した指標核種としては<sup>235</sup>Uを探る。

表5.1 IC ZPPR-10炉心の各領域における<sup>235</sup>U核分裂反応率分布C/E値の平均値と標準偏差値を示す。C/E値の全体系に対する平均値は1.0049±0.0016で、約5%の過大評価になっている。一方、PNC実証炉の模擬炉心であるZPPR-10D IC着目すると、C/E値の平均値と分散は

$$\overline{C/E} = \begin{cases} 0.9821 \pm 0.0048 & \text{内側炉心} \\ 1.0199 \pm 0.0225 & \text{外側炉心} \end{cases}$$

となる。内側炉心で約7%の過大評価になっているのは、ZPPR-10D/1の中心制御棒挿入時の反応率分布の顕著な過小評価によるものである(図5.2.4参照)。

表5.1及び上述の事から総合的に判断すると、<sup>235</sup>U核分裂率分布の計算精度は約7%であると考えられる。これは上記のC/E値の平均値の1からのずれを偶然誤差(random error)とみなした結果である。

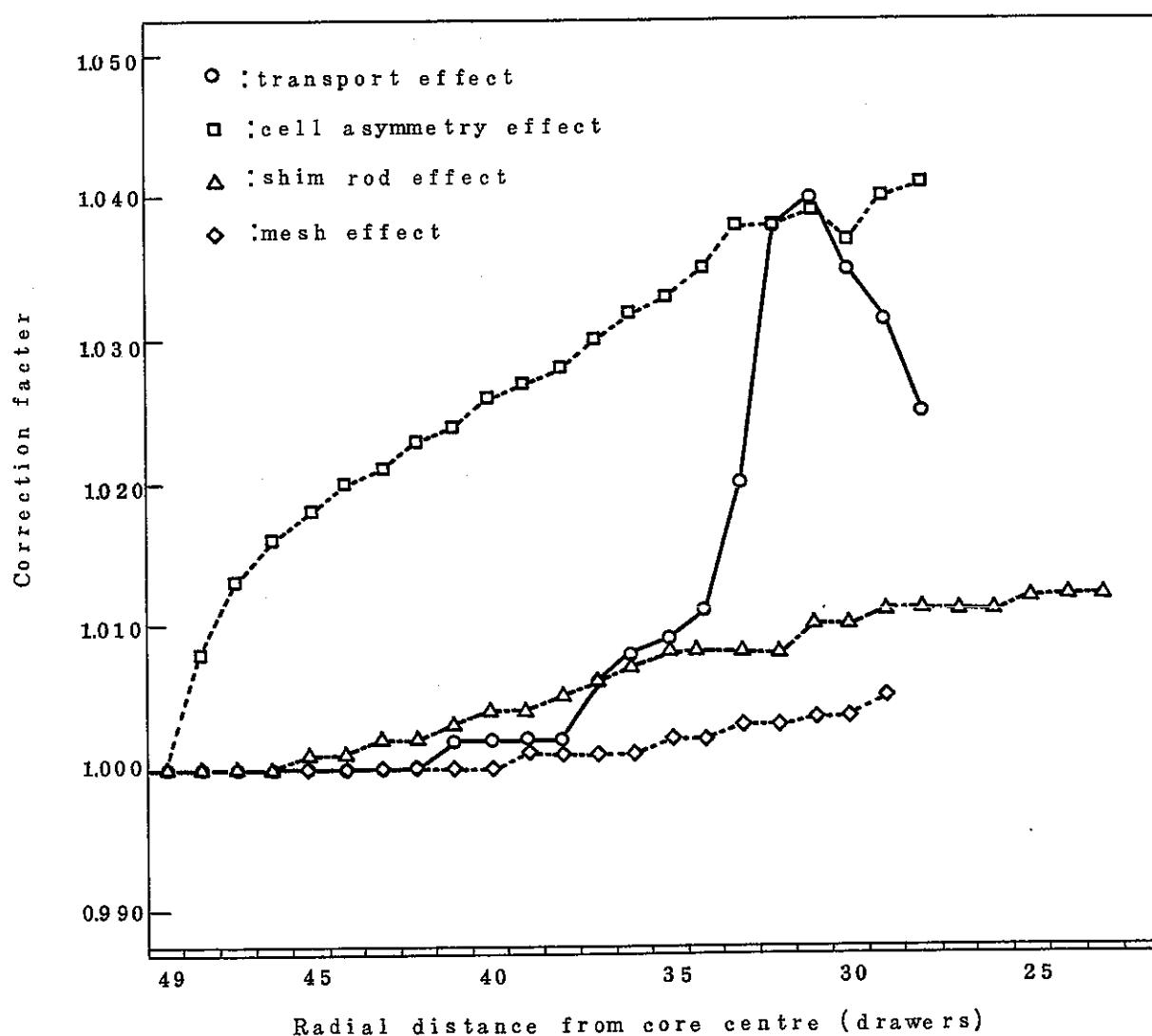


Fig.5.1 Correction factors for Pu239 fission reaction rate distribution in ZPPR-9 core.

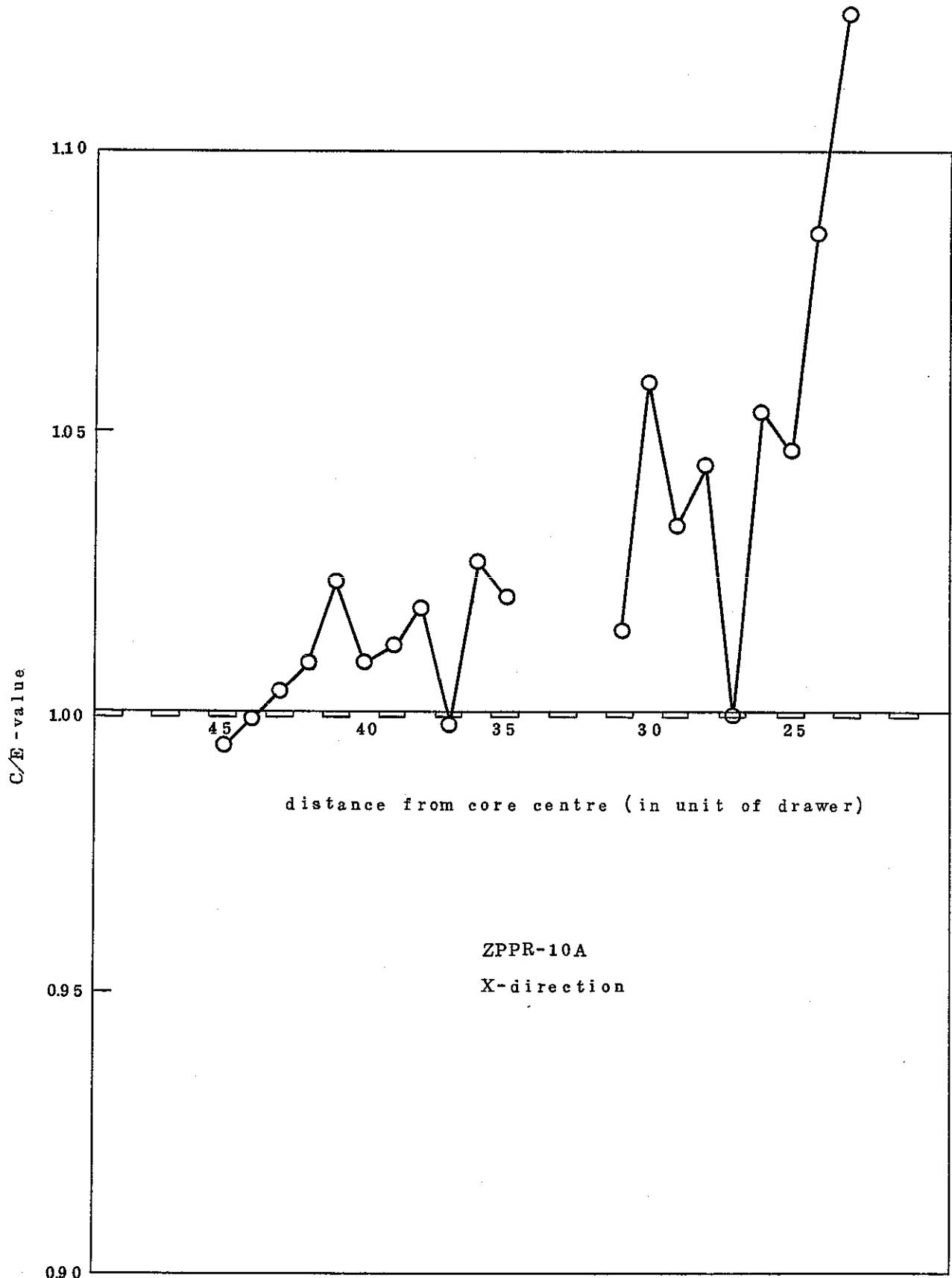


Fig. 5.2  $C/E$ -values of  $^{239}\text{Pu}$  Fission Reaction Rate Distribution

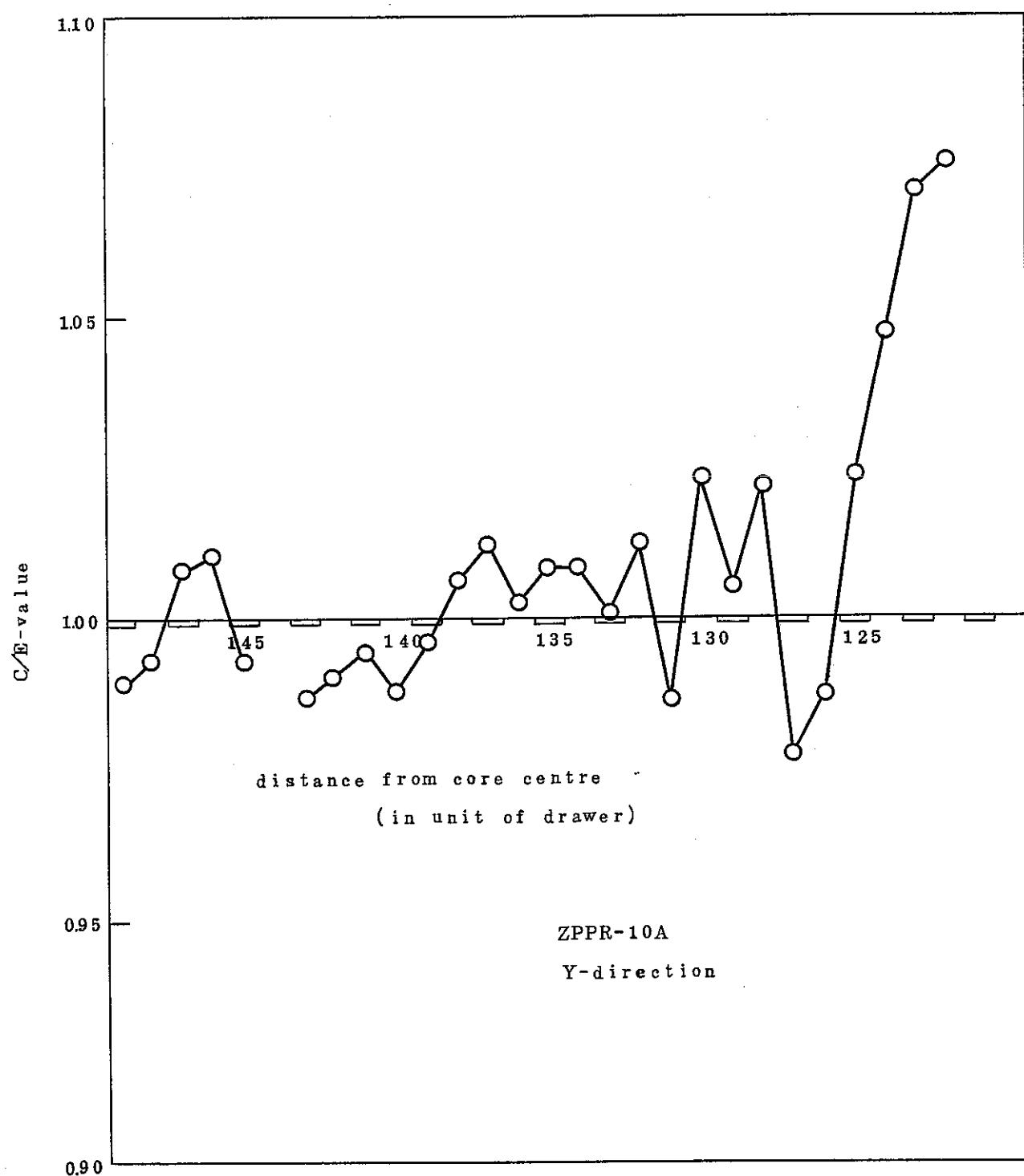
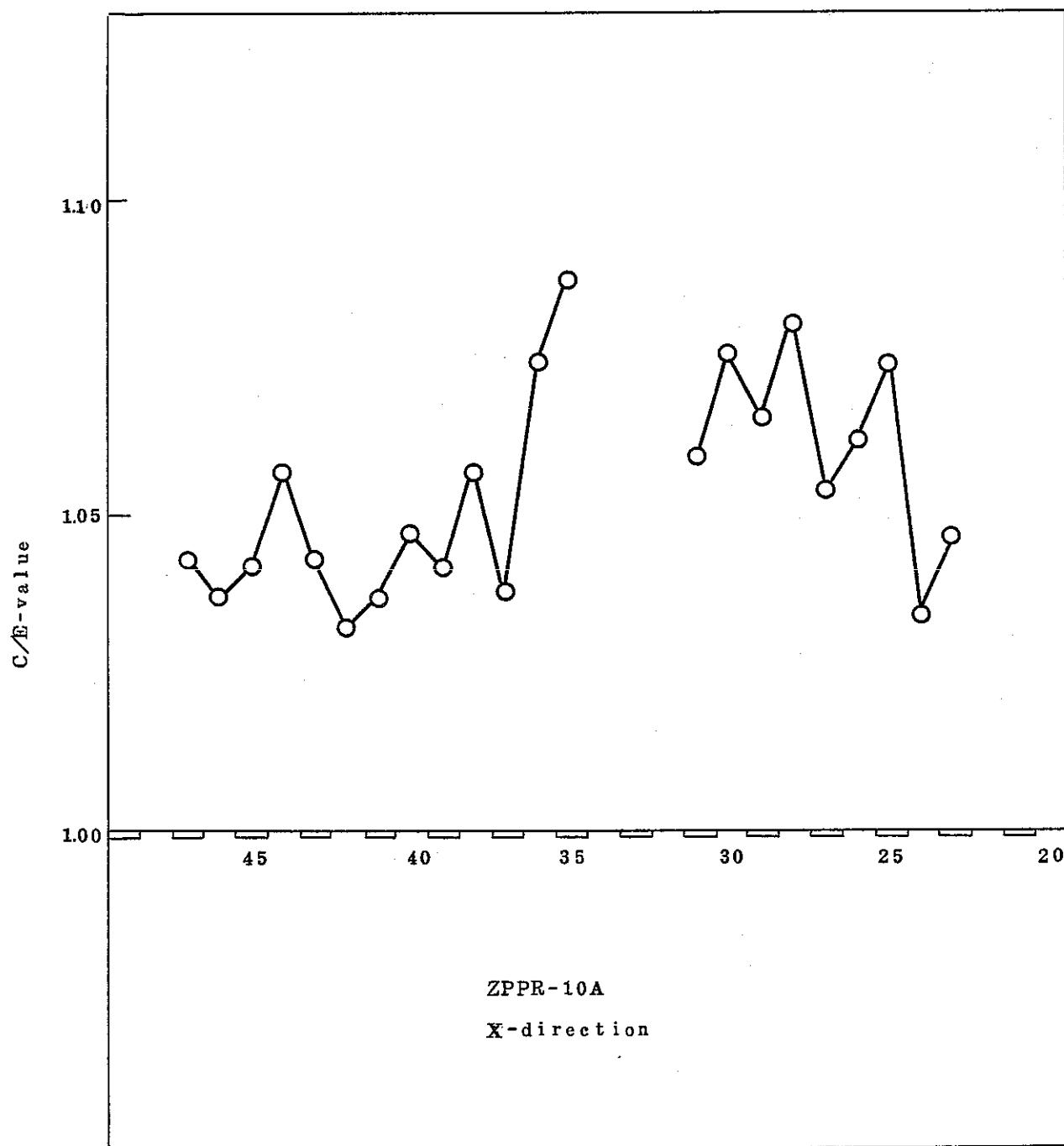


Fig. 5.3 C/E-values of  $^{239}\text{Pu}$  Fission Reaction Rate Distribution



Distance from core centre (in unit of drawer)

Fig. 5.4 C/E-values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

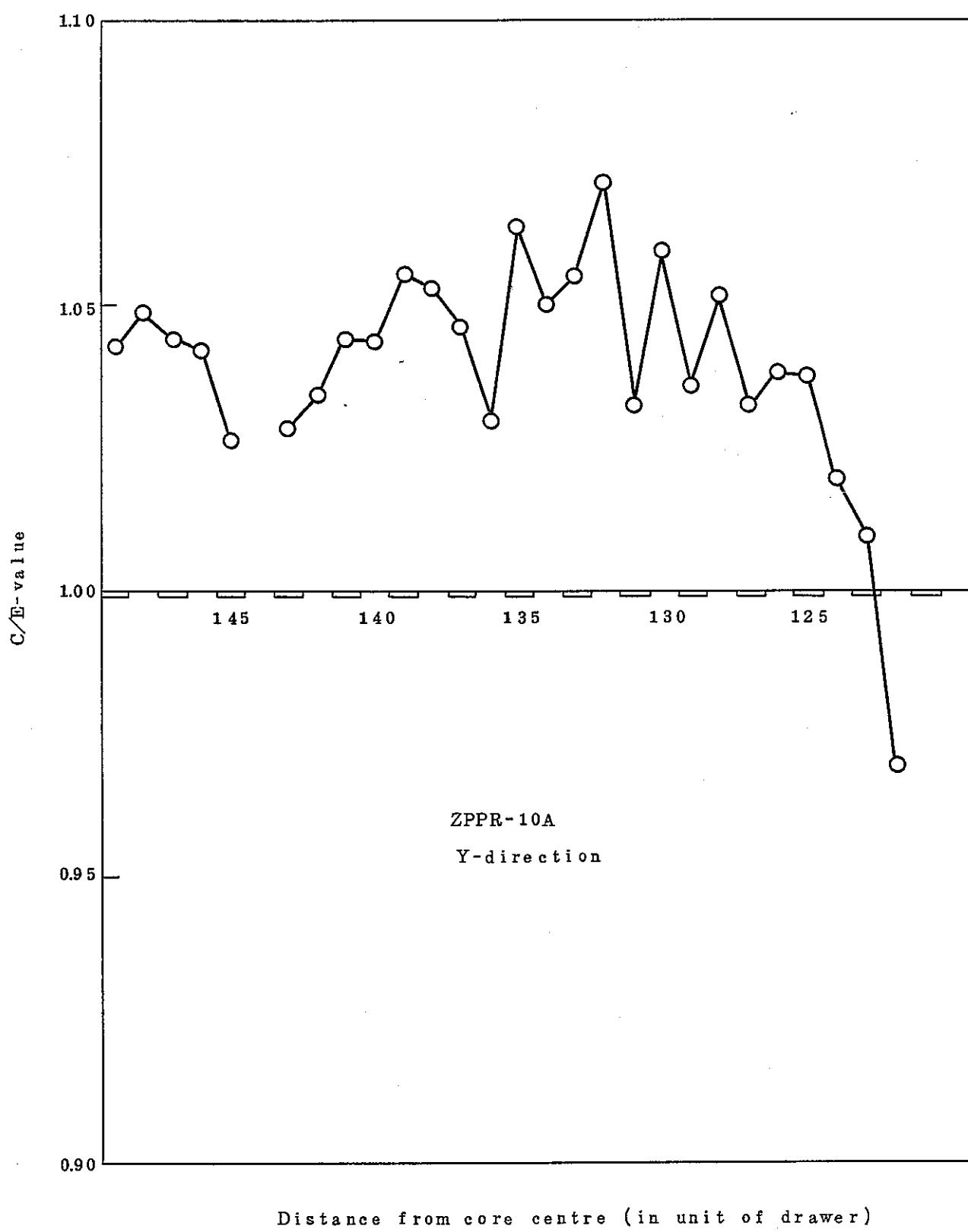


Fig. 5.5  $C/E$ -values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distributions

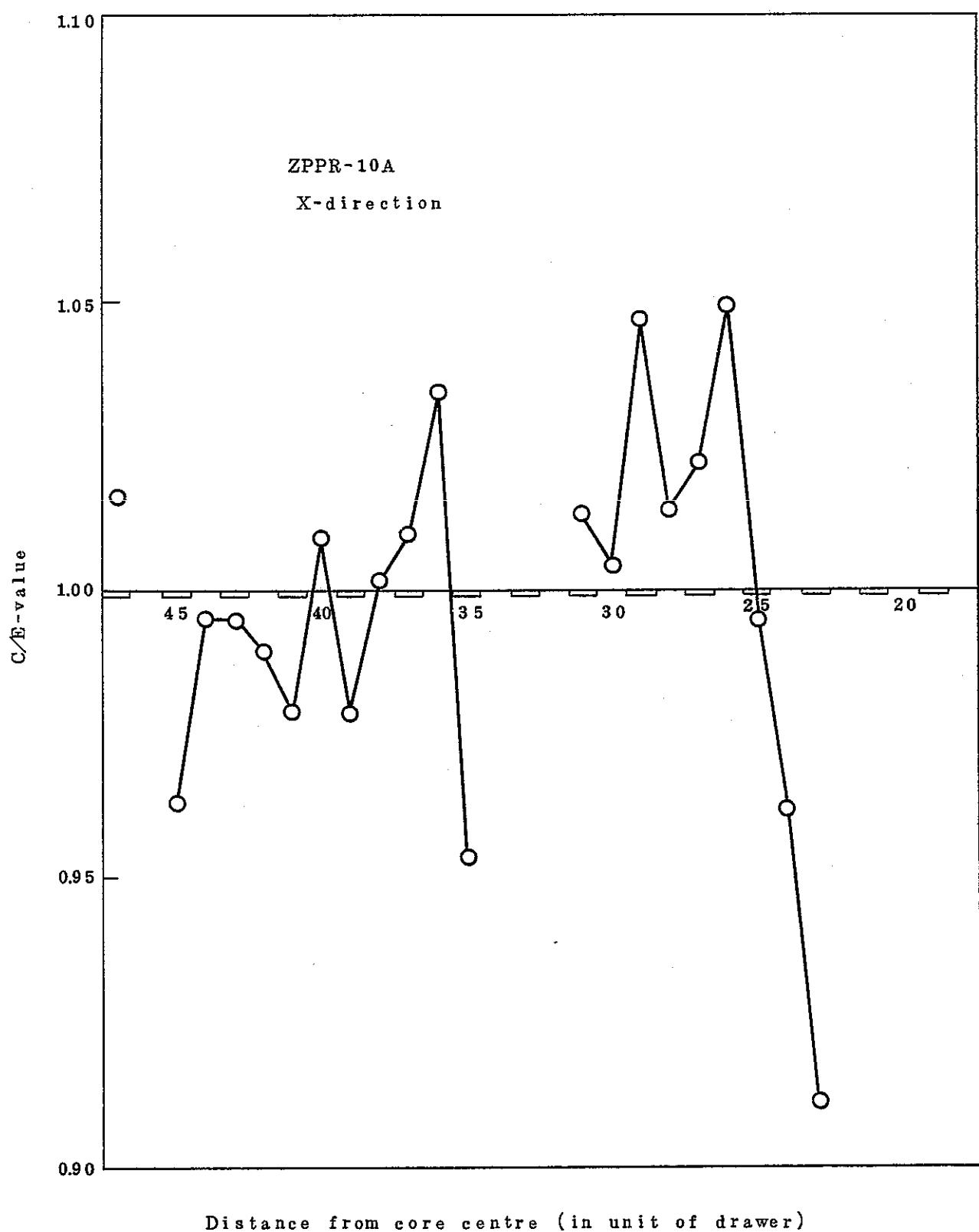
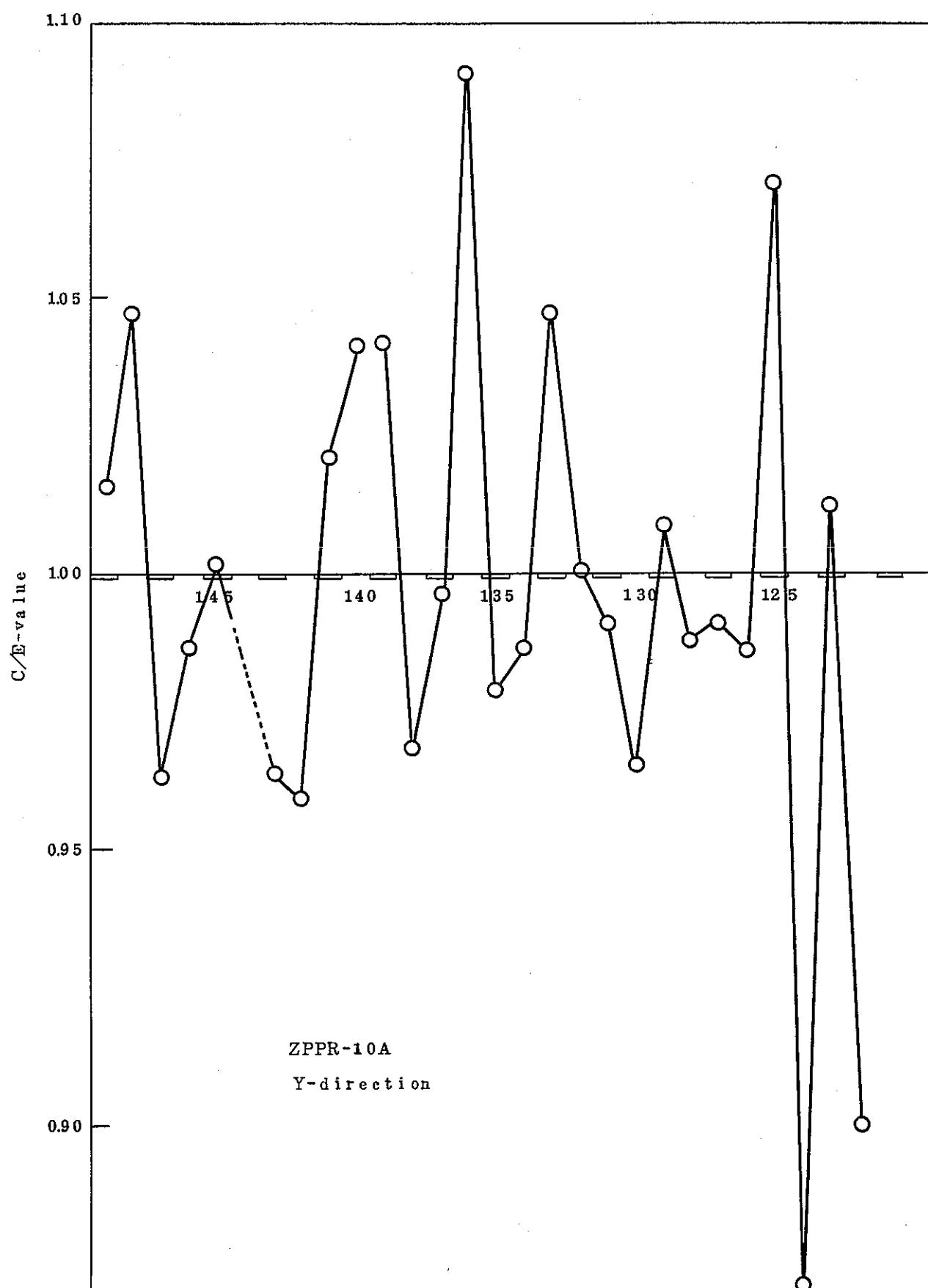


Fig. 56 C/E-values of  $^{238}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distributions



Distance from core centre (in unit of drawer)

Fig. 5.7 C/E-values of  $^{238}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distributions

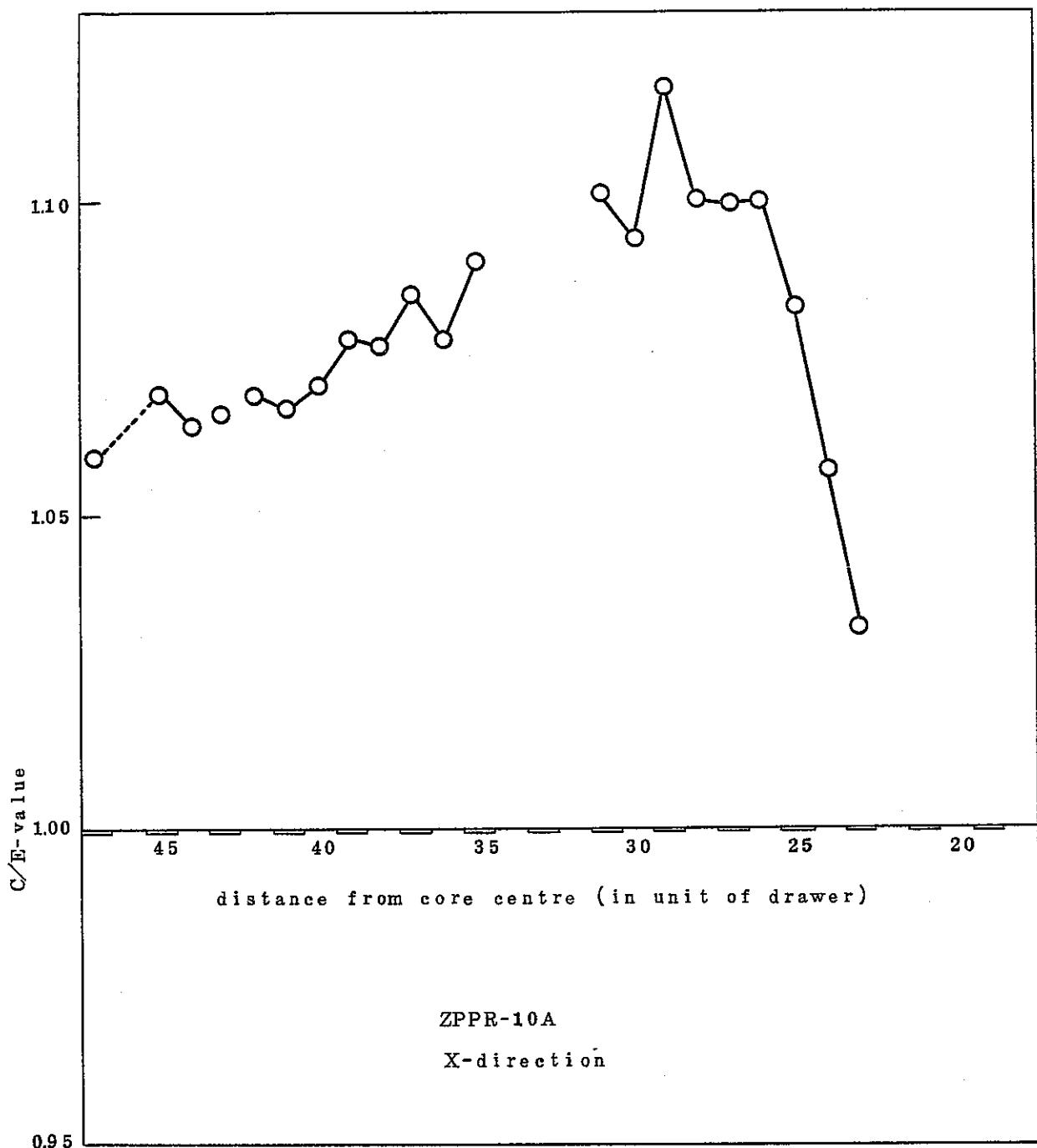


Fig. 5.8 C/E-values of  $^{238}\text{U}$  Capture Reaction Rate Distributions

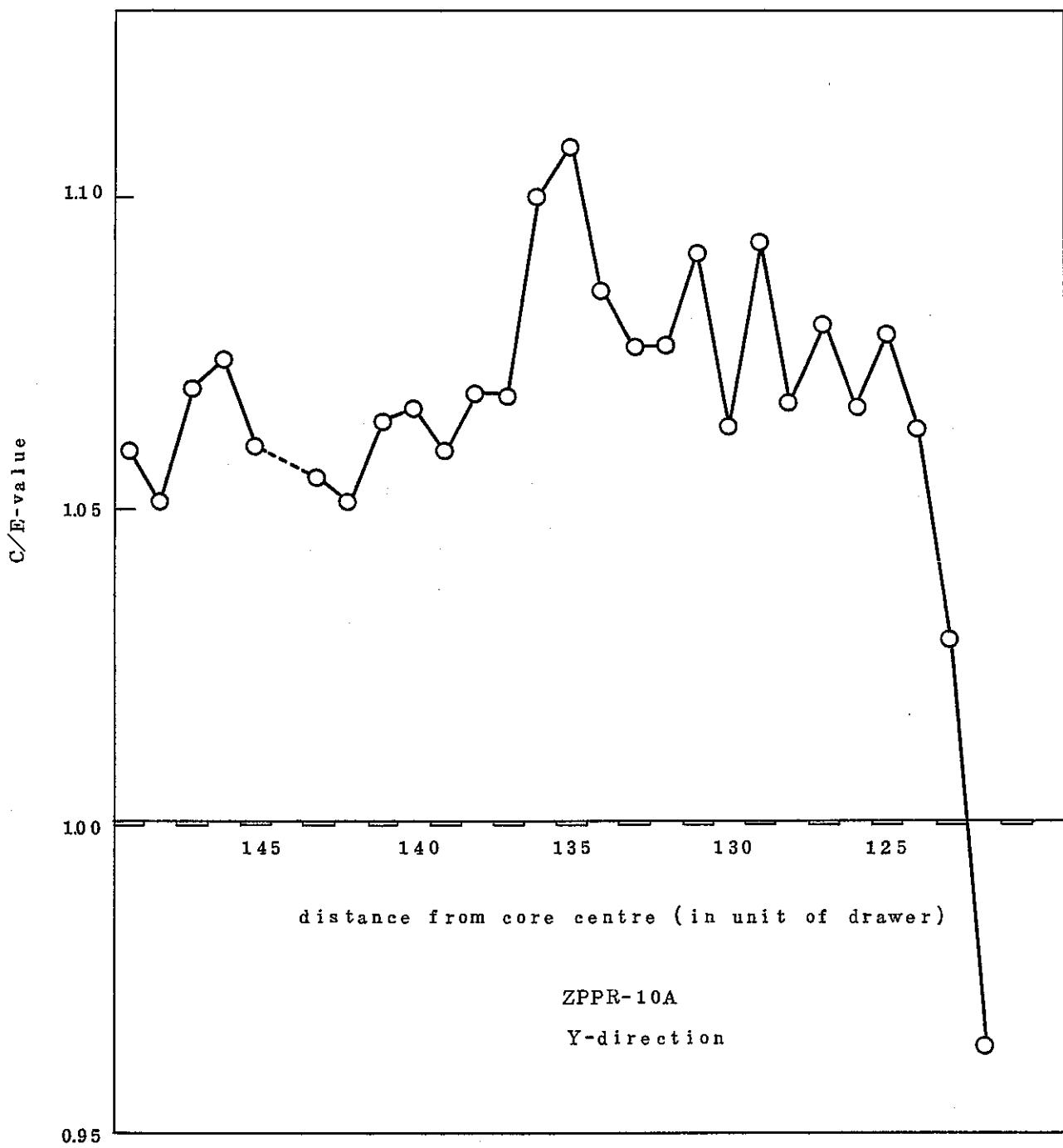


Fig. 59 C/E-values of  $^{238}\text{U}$  Capture Reaction Rate Distributions

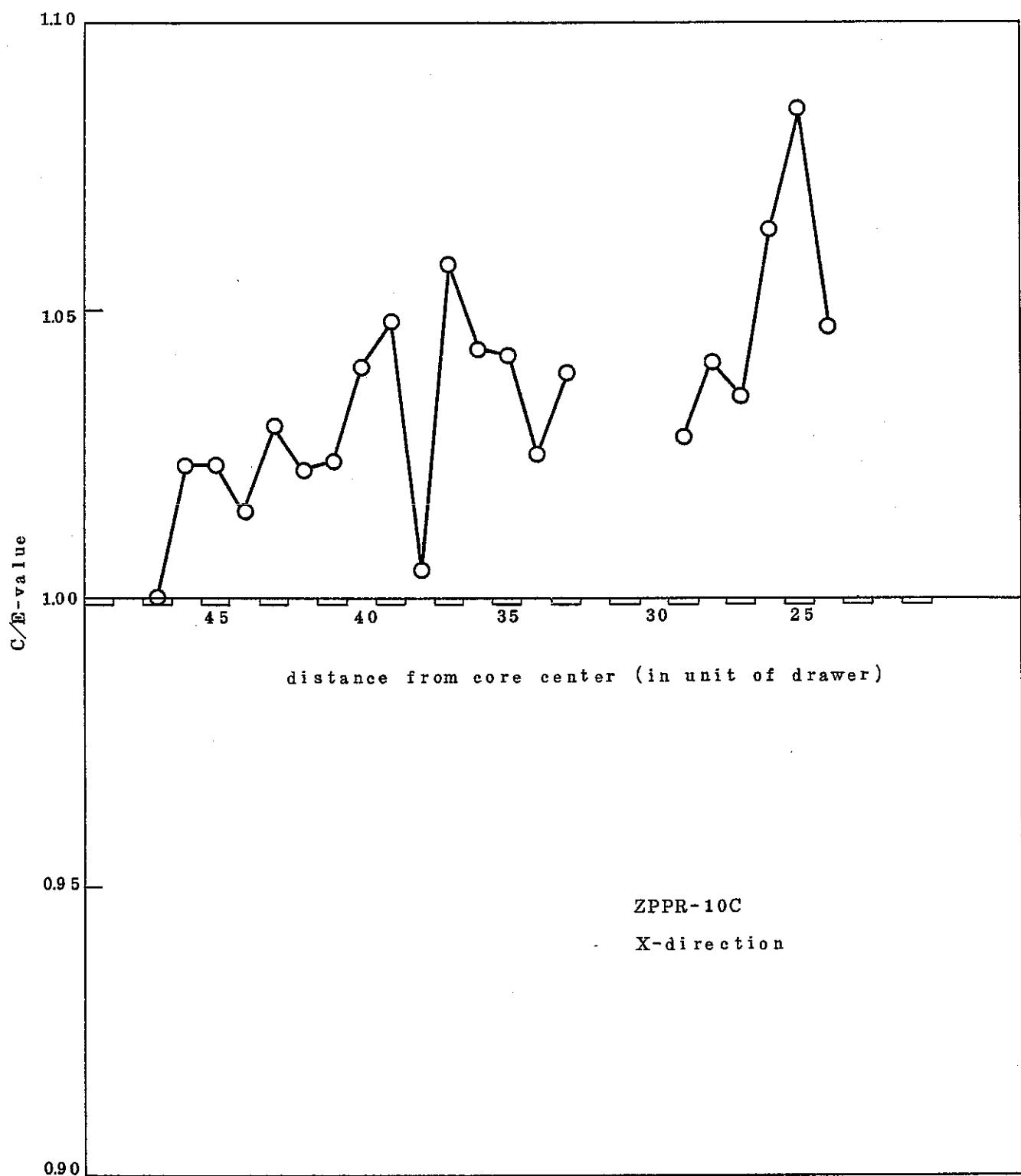


Fig. 5.10 C/E Values of  $^{239}\text{Pu}$  Fission Reaction Rate Distribution

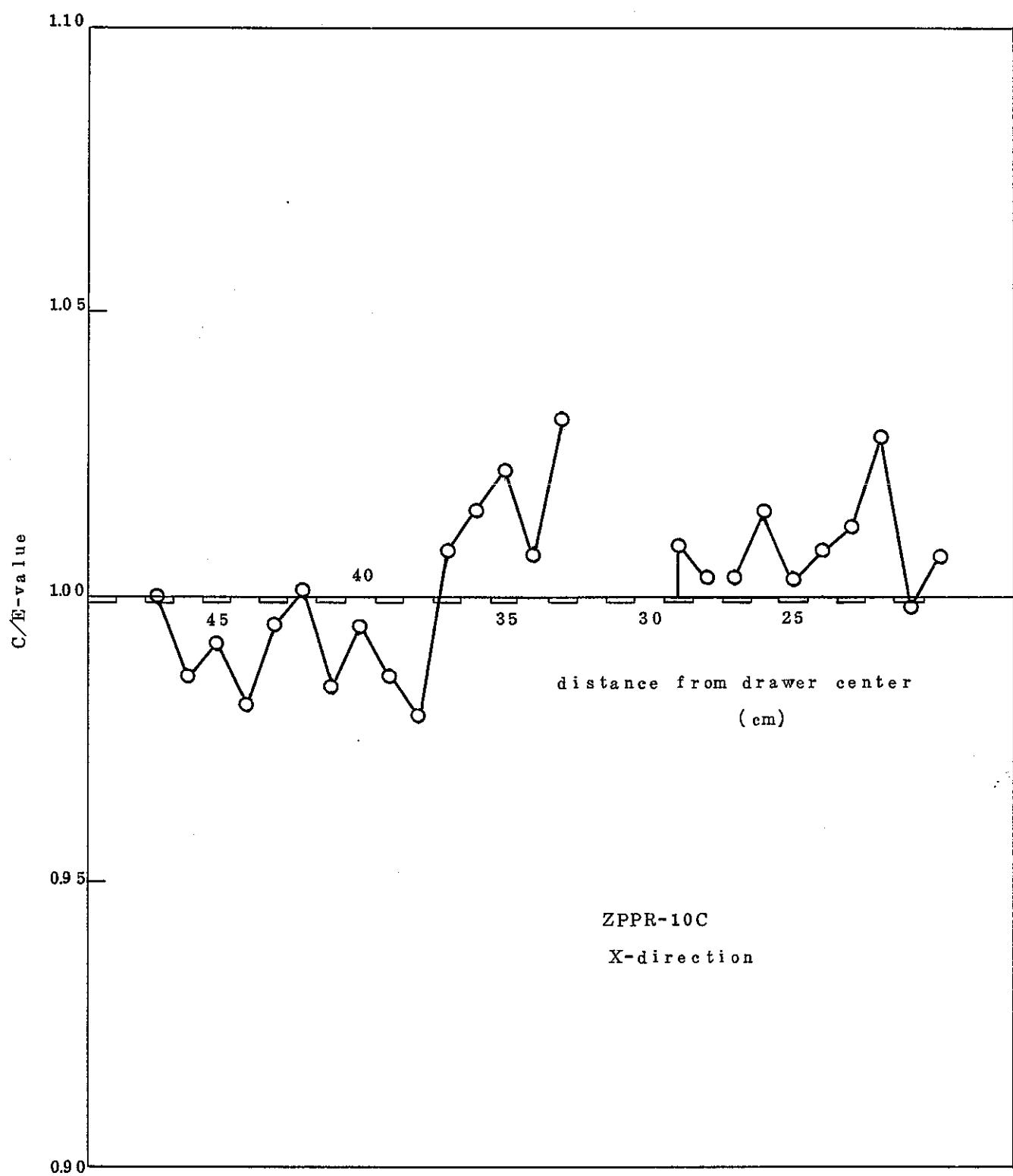


Fig. 5.11 C/E Values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

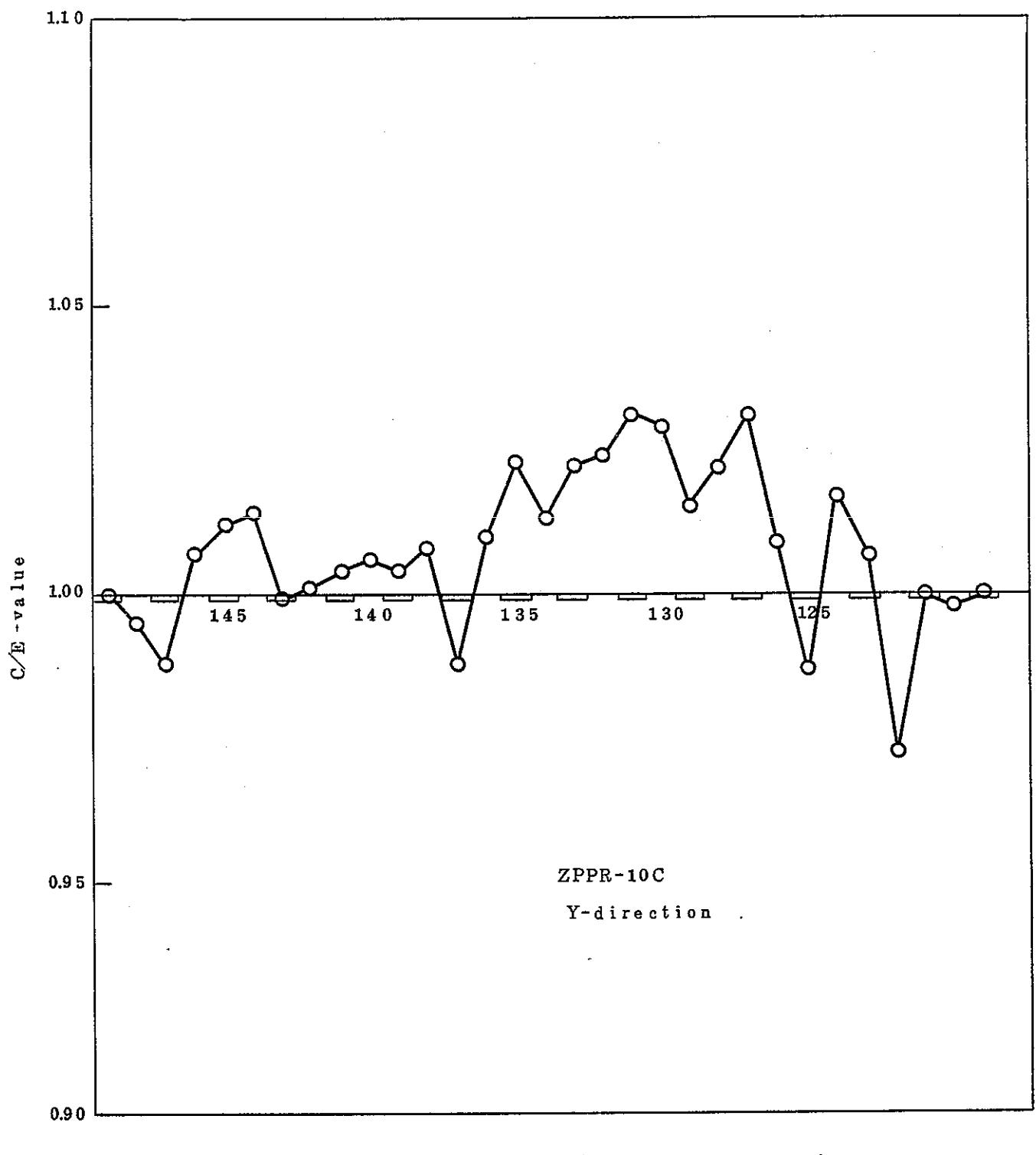
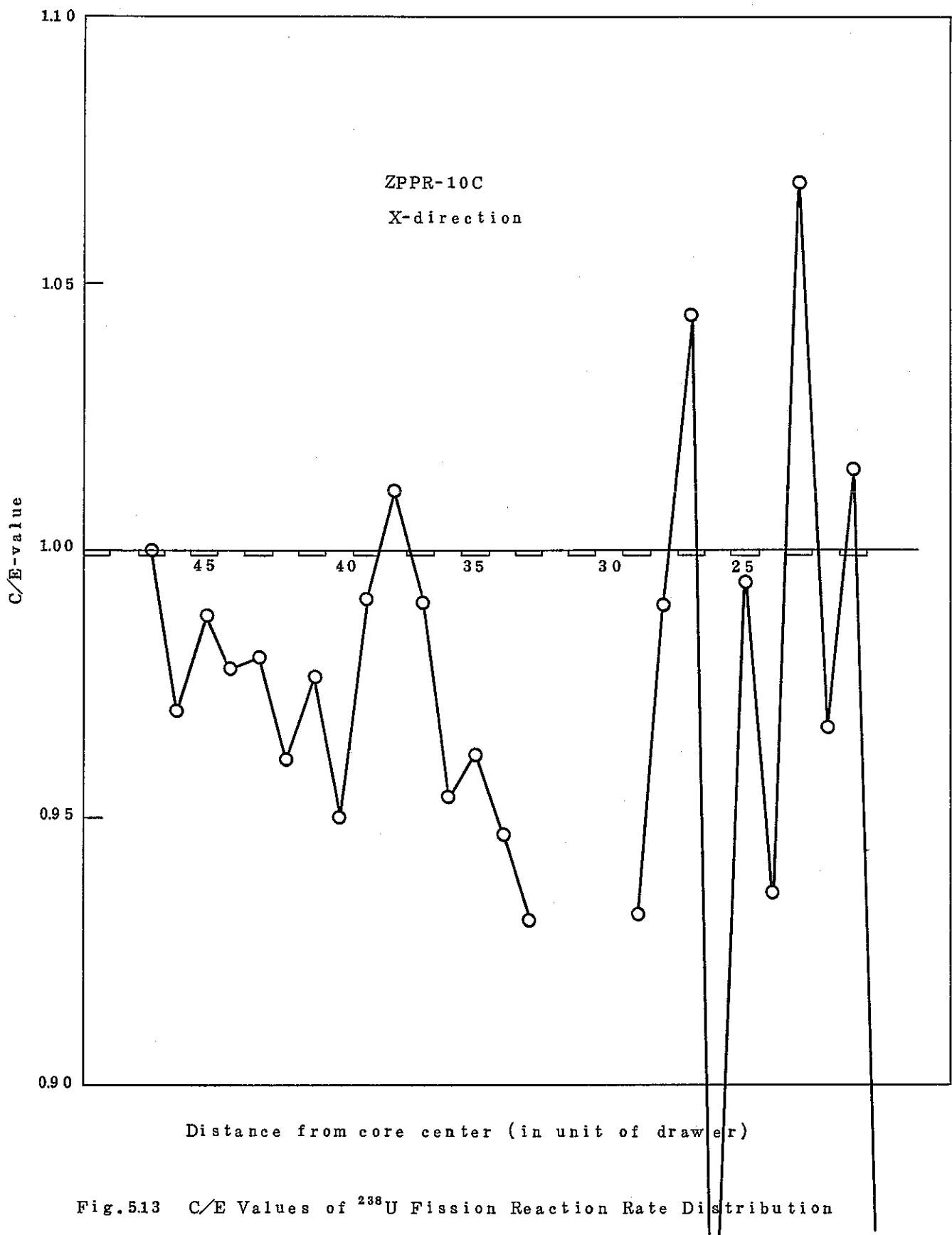


Fig.5.12 C/E Values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution



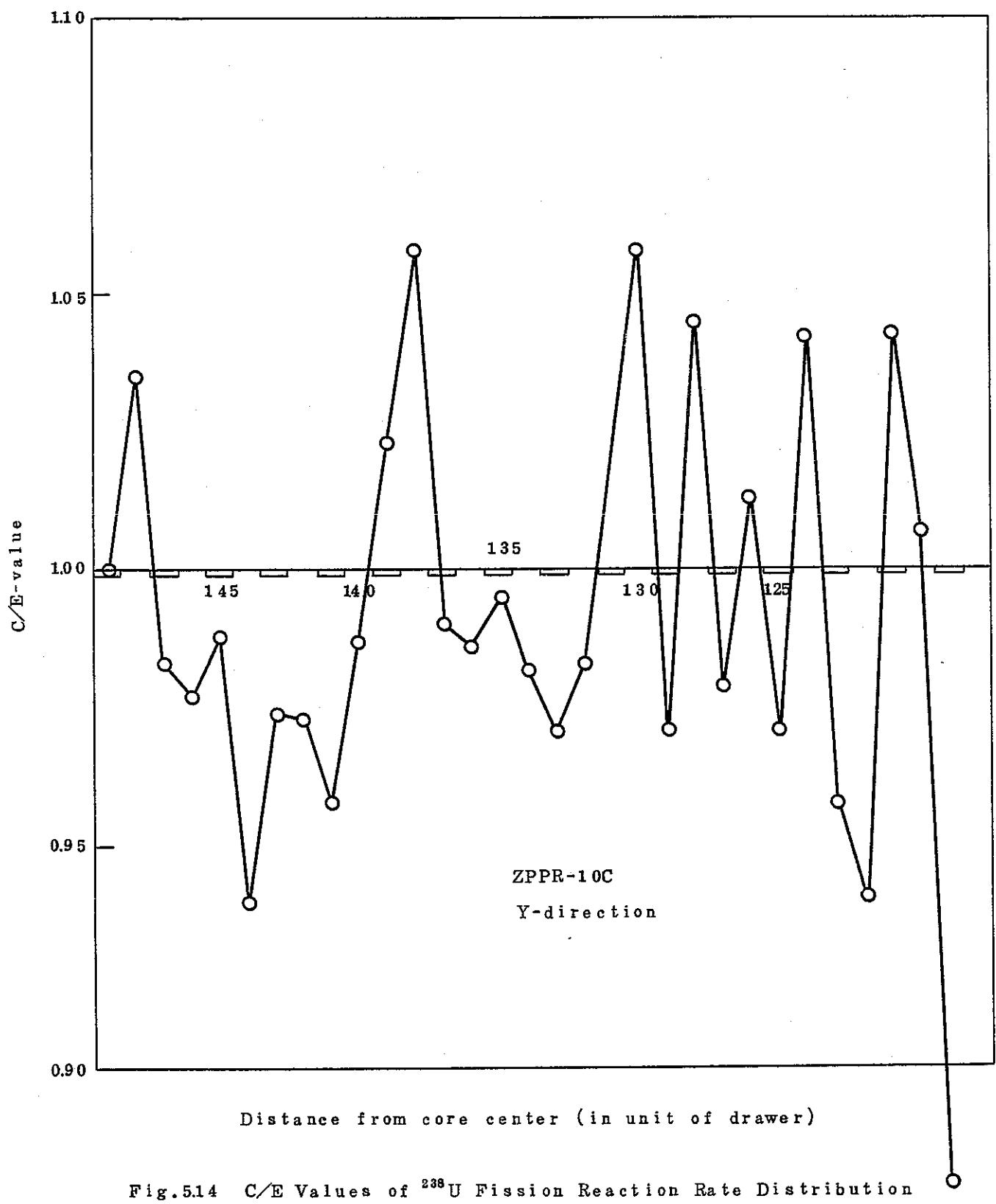


Fig. 5.14 C/E Values of  $^{238}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

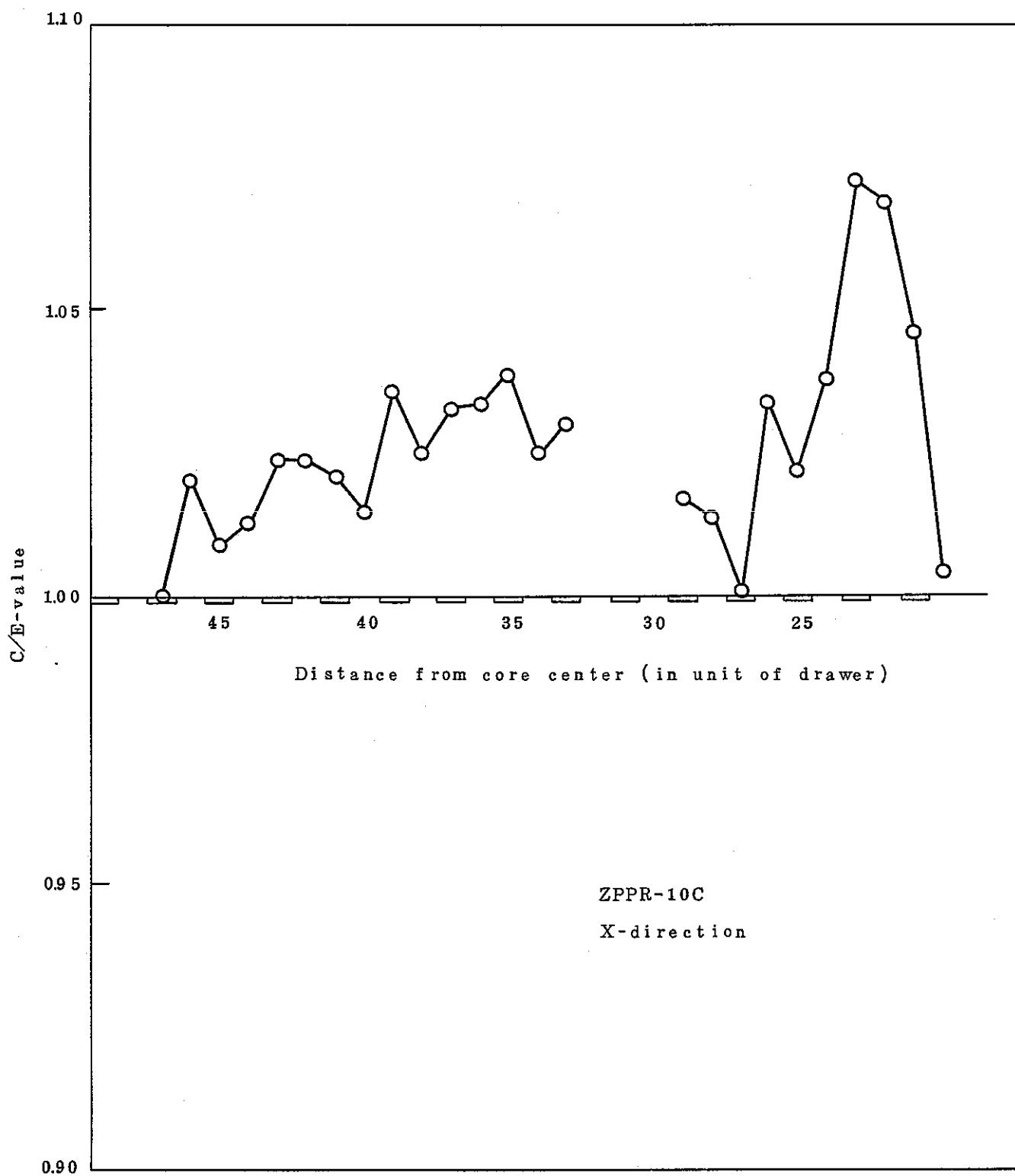


Fig. 5.15 C/E Values of  $^{238}\text{U}$  Capture Reaction Rate Distribution

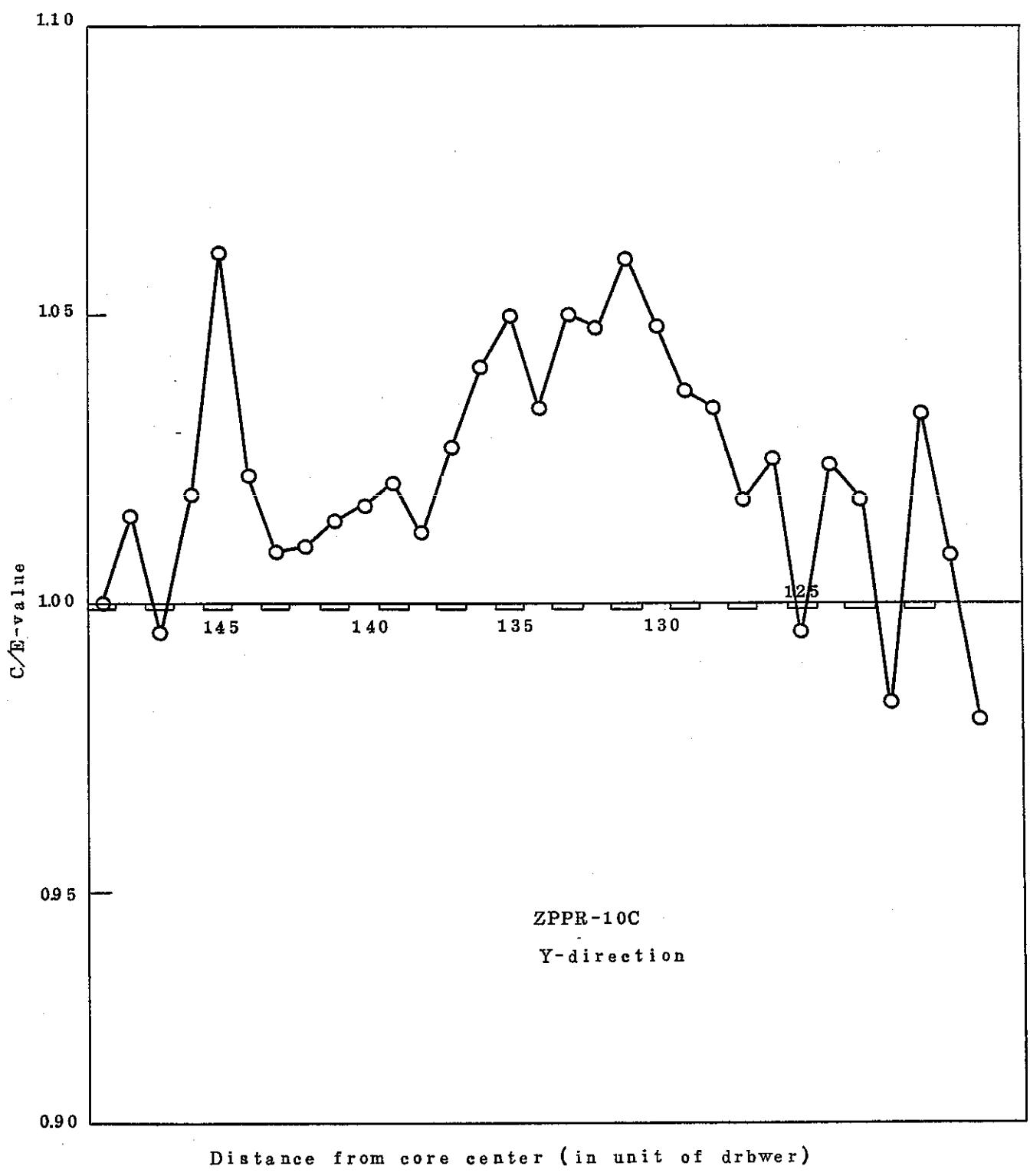


Fig. 5.16 C/E Values of  $^{238}\text{U}$  Capture Reaction Rate Distribution

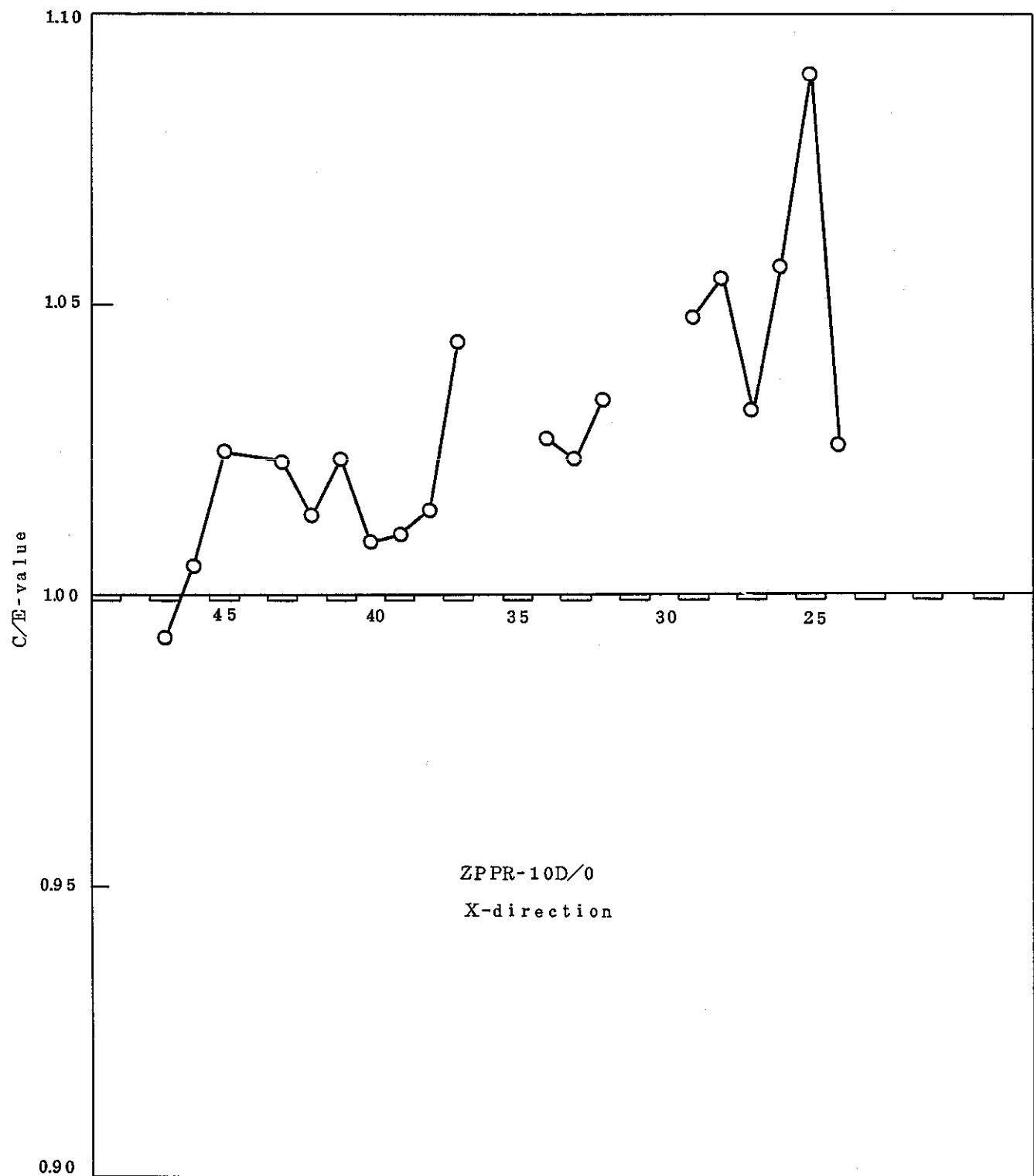


Fig. 5.17 C/E-Values of  $^{239}\text{Pu}$  Fission Reaction Rate Distribution

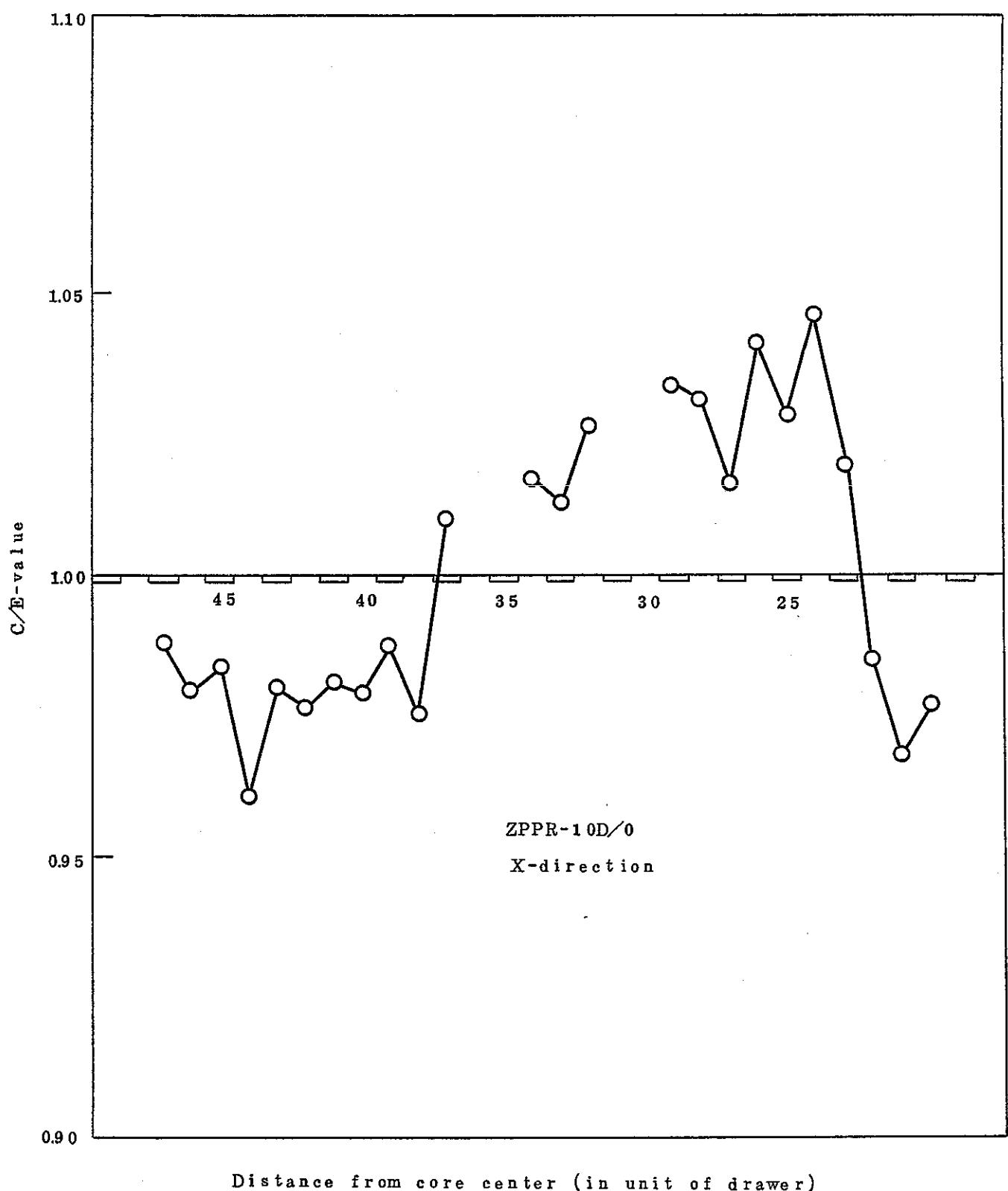


Fig. 5.18 C/E Values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

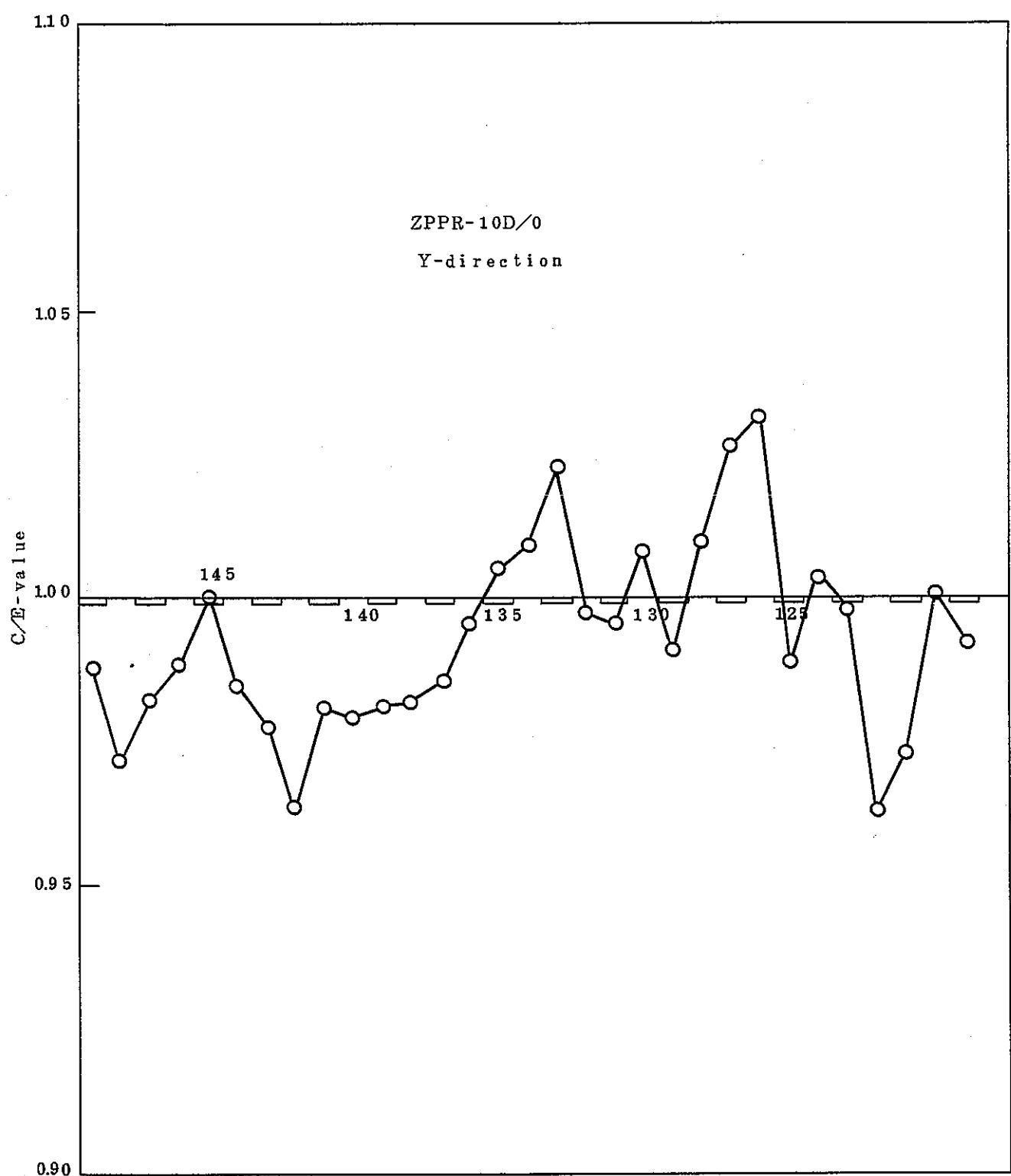


Fig.5.19 C/E Values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

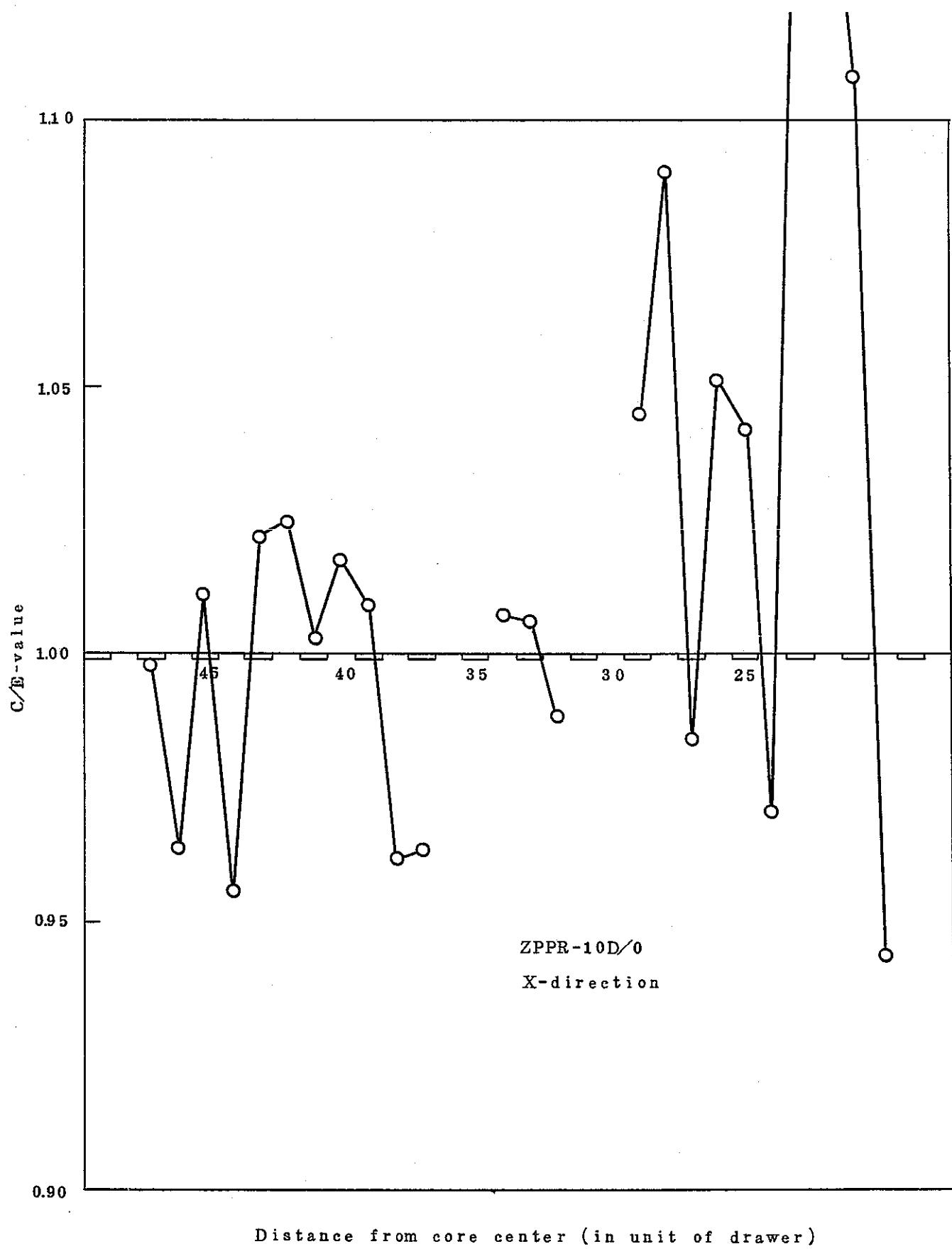


Fig. 5.20 C/E Values of  $^{238}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

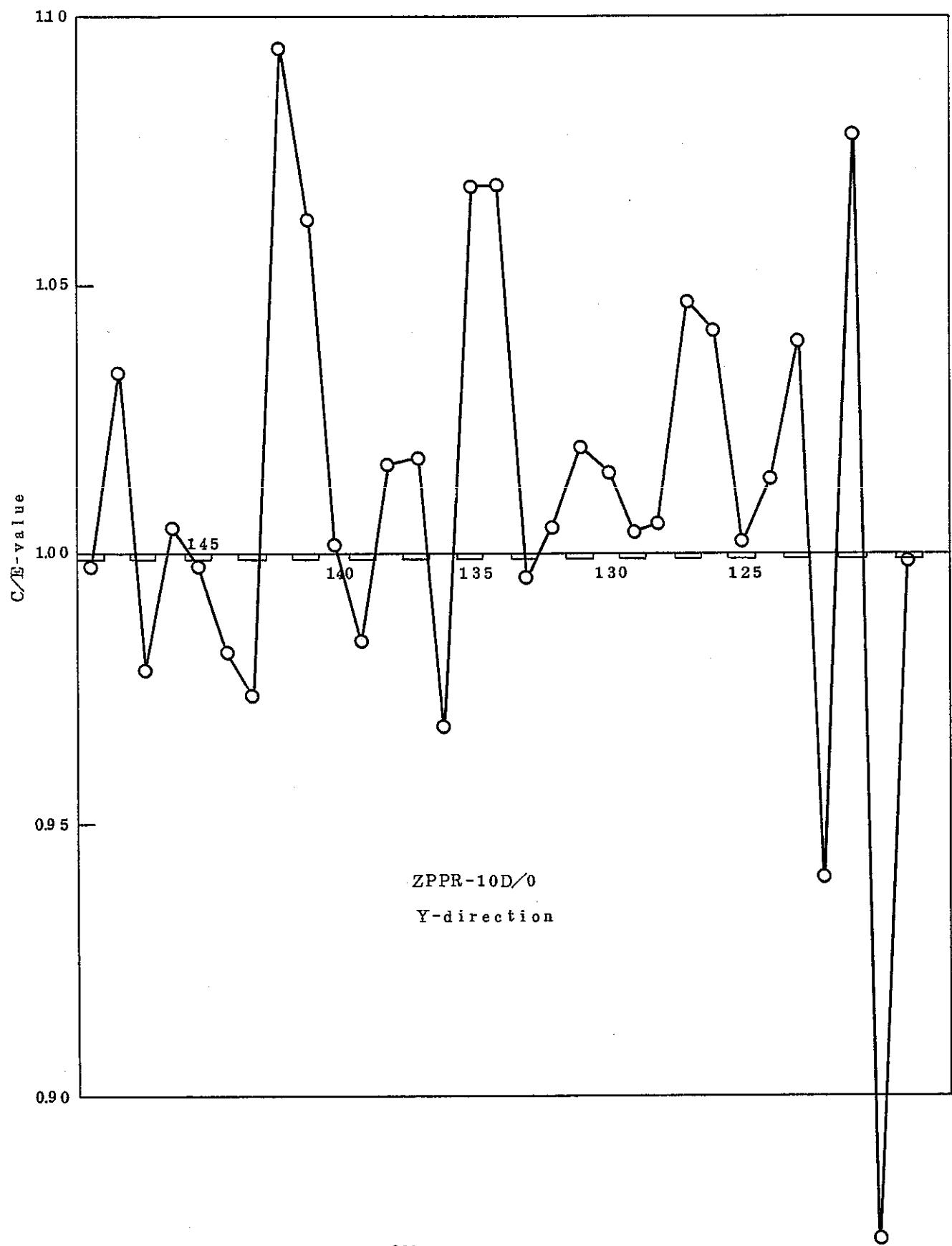


Fig. 5.21 C/E Values of  $^{238}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

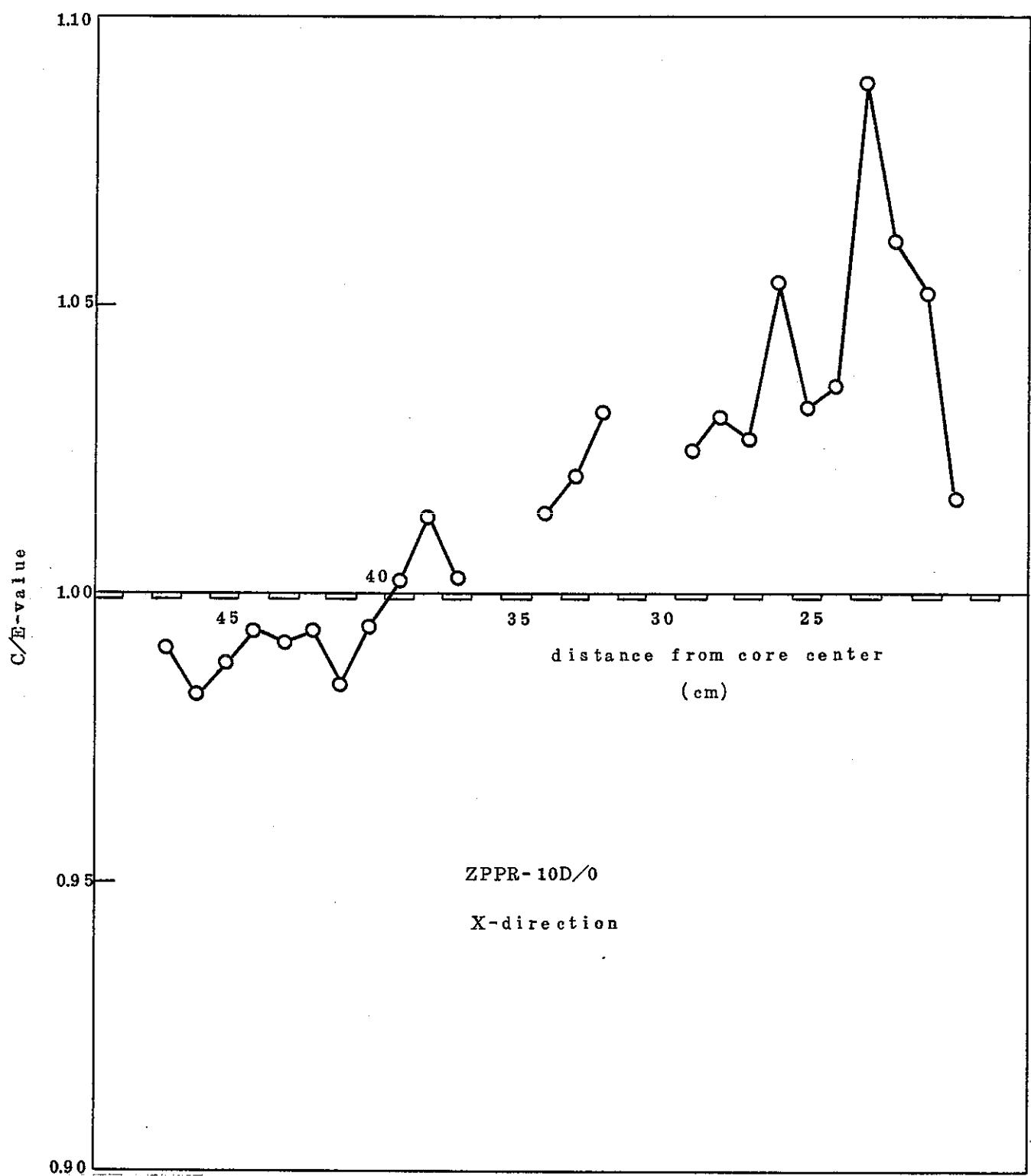


Fig. 5.22 C/E Values of  $^{238}\text{U}$  Capture Reaction Rate Distribution

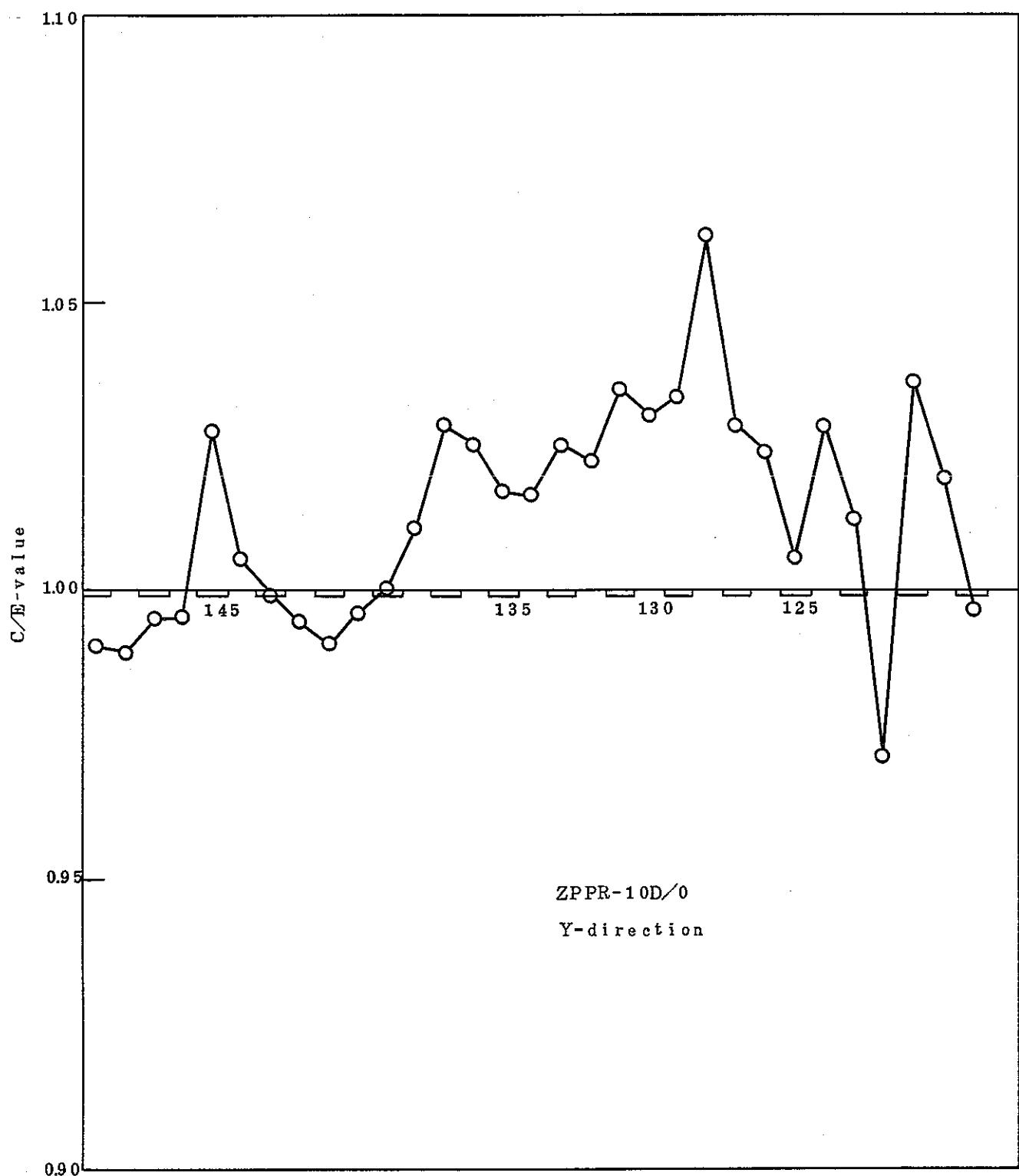


Fig. 5.23 C/E Values of  $^{238}\text{U}$  Capture Reaction Rate Distribution

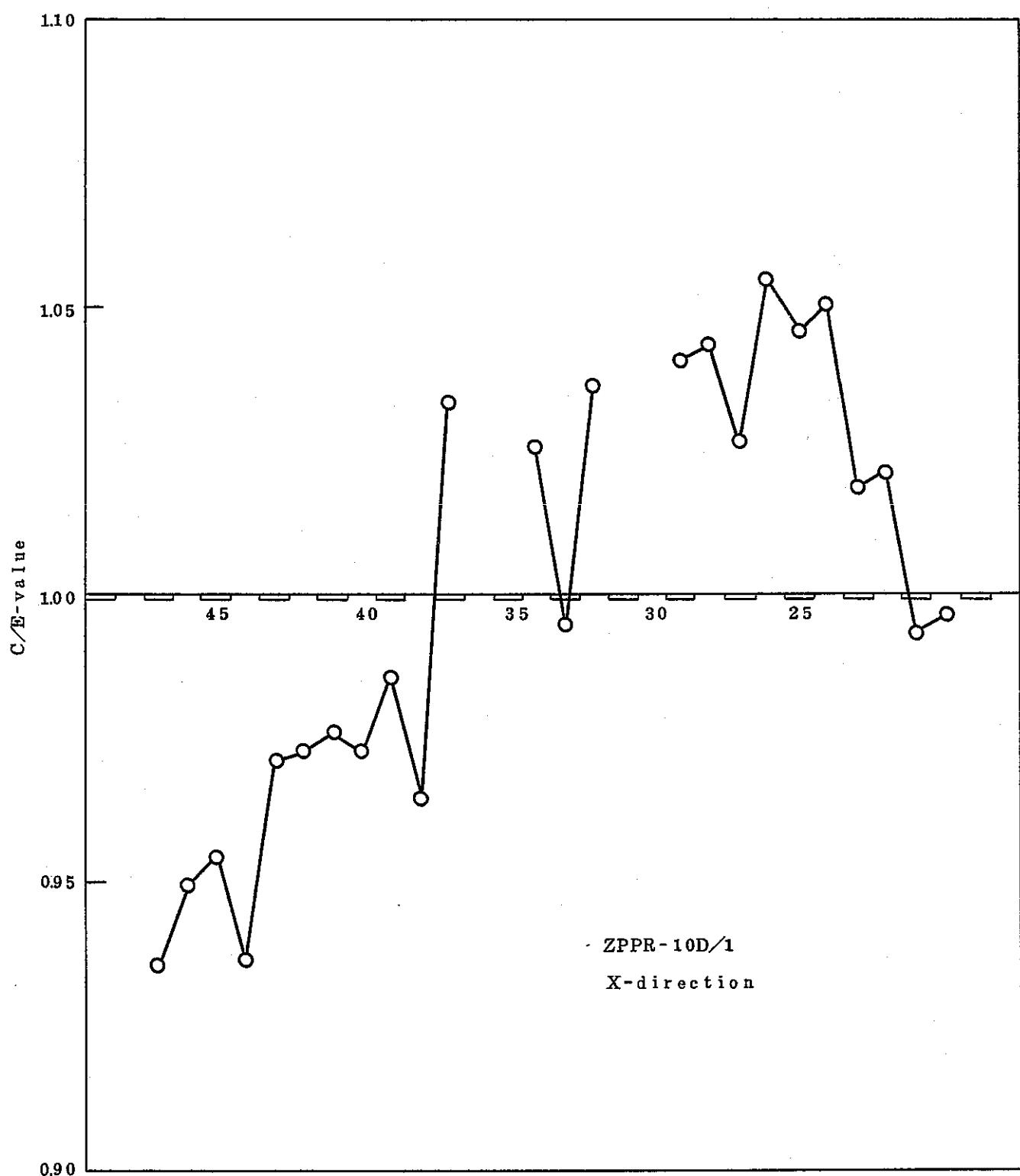


Fig. 524 C/E Values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

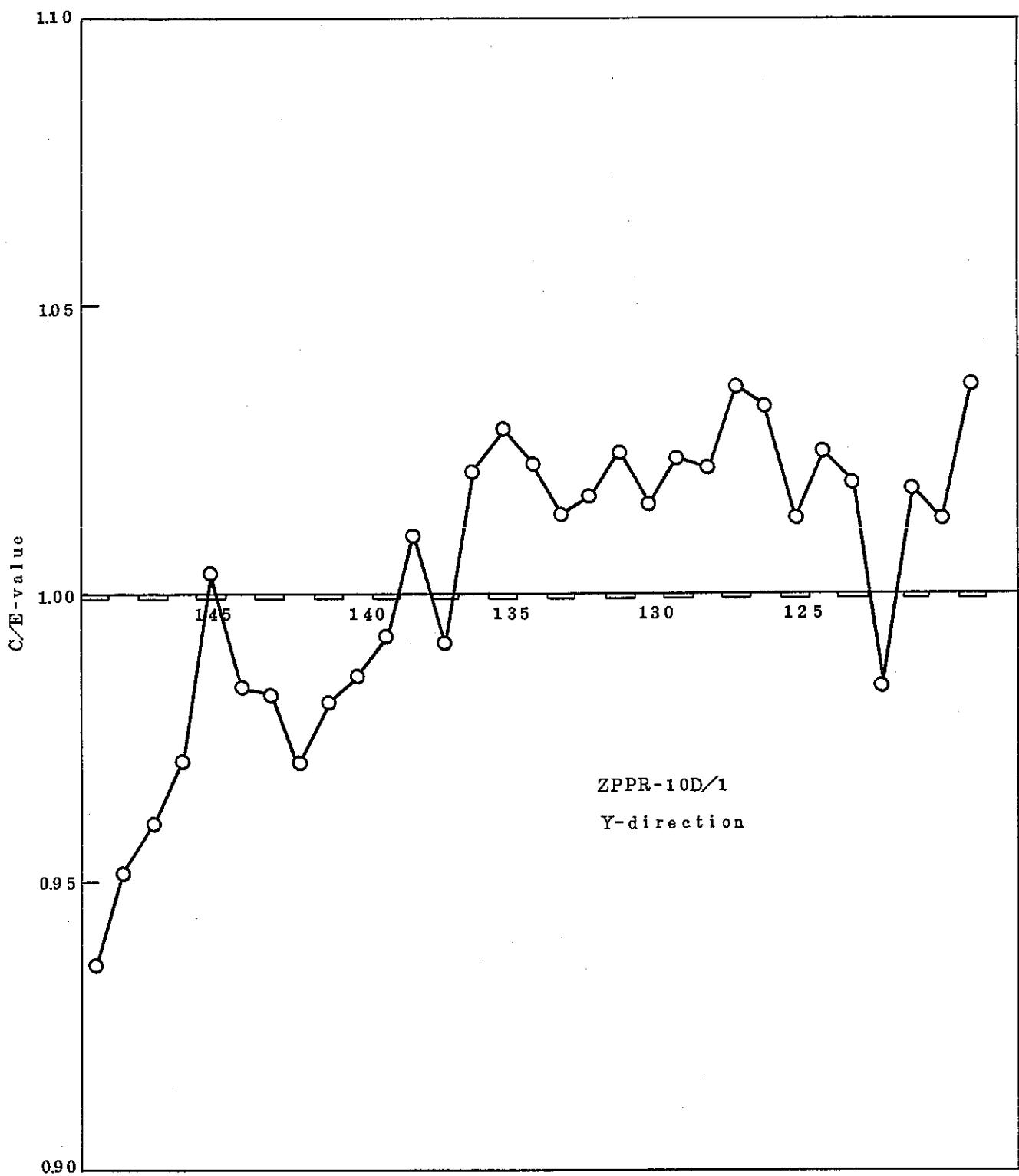


Fig.5.25 C/E Values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

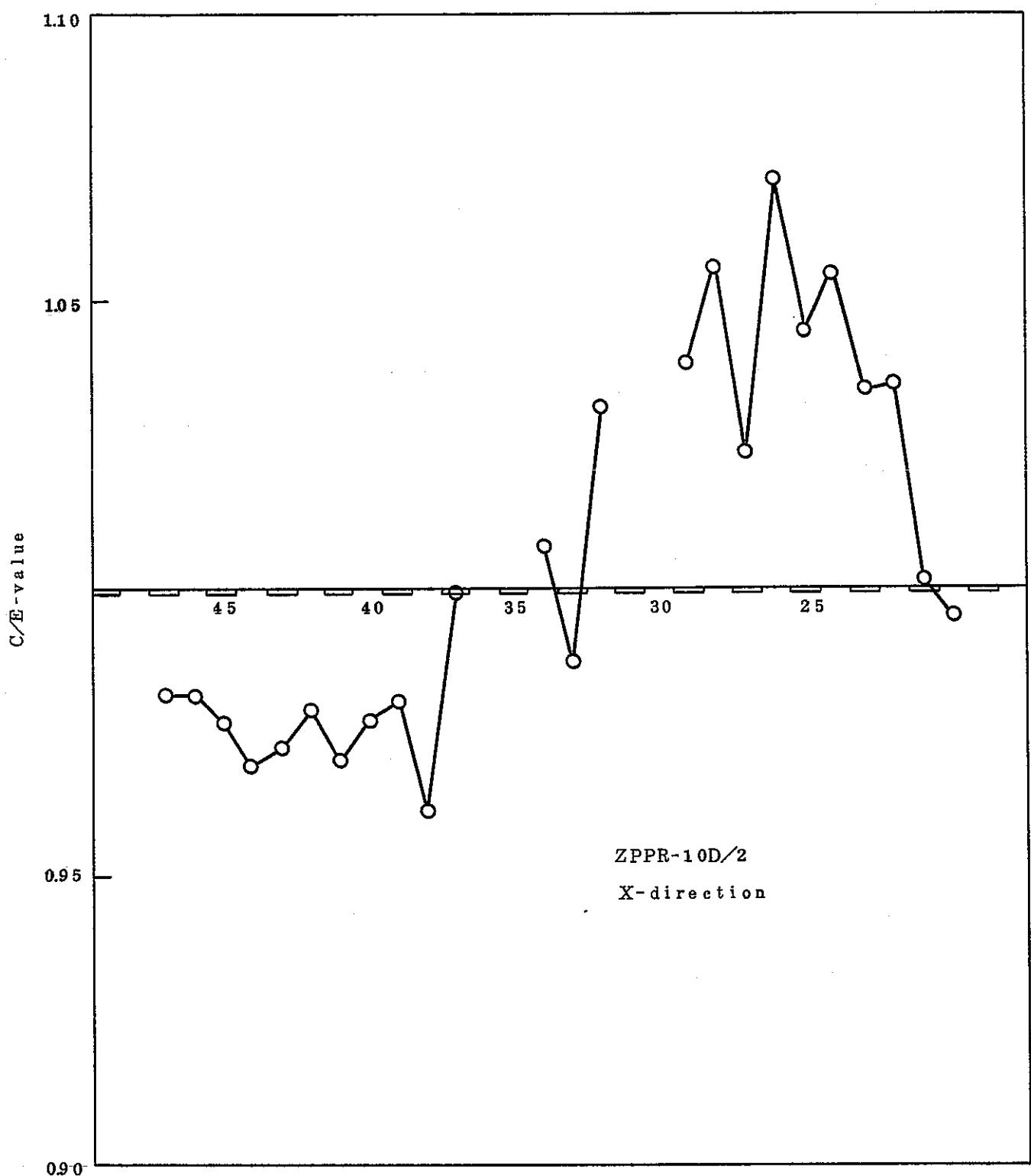


Fig.5.26 C/E Values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

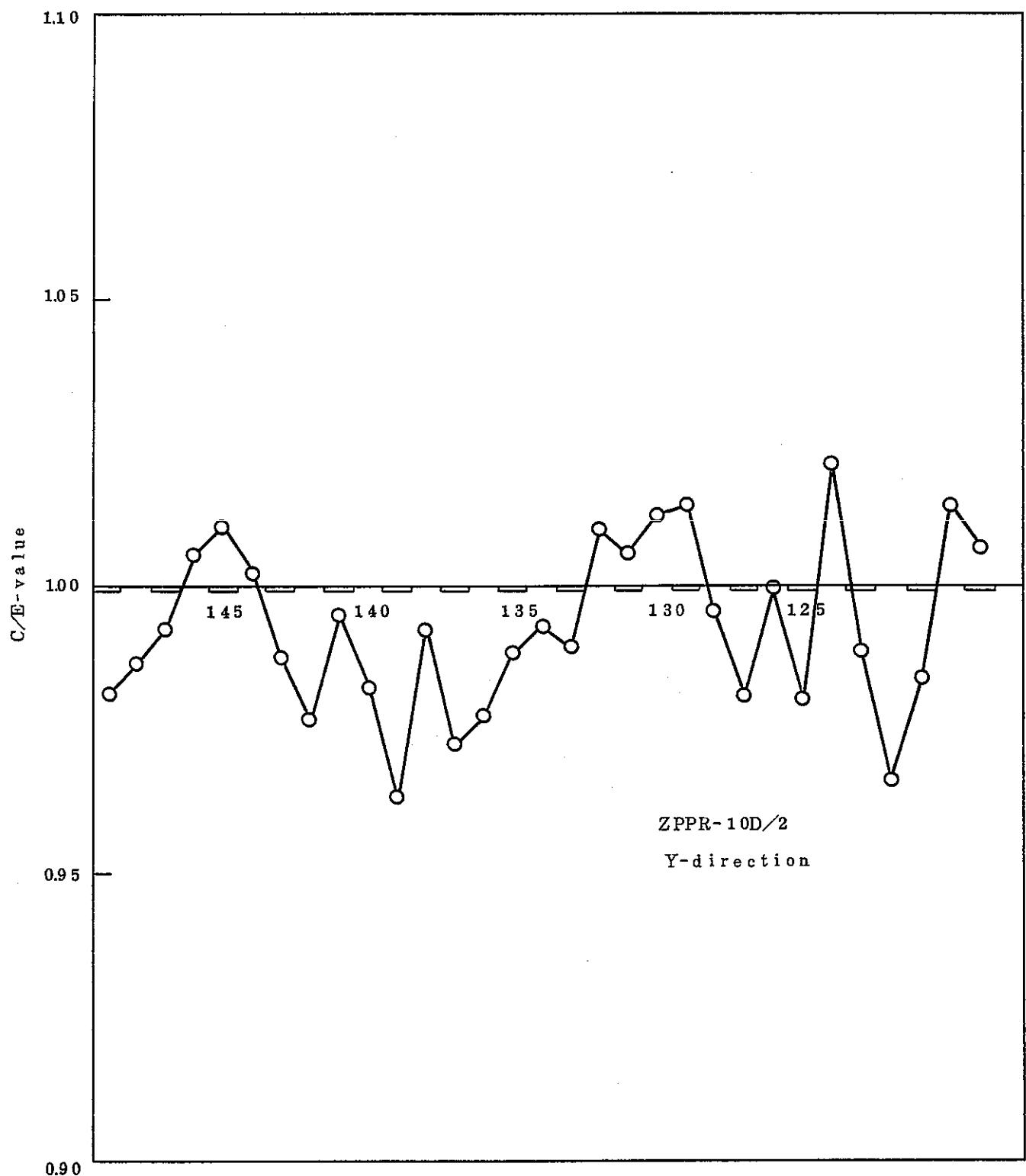


Fig. 5.27 C/E Values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

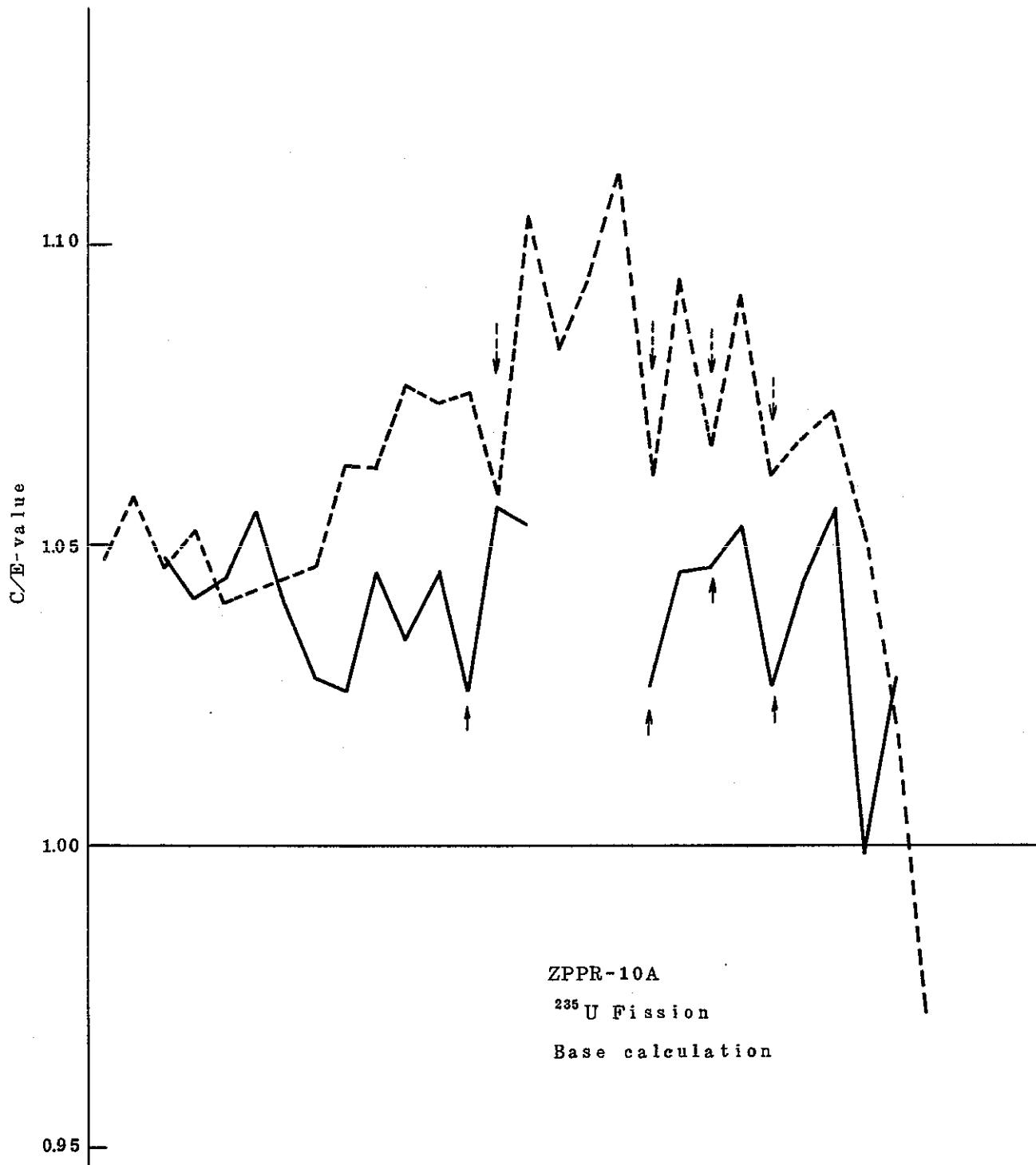


Fig. 5.28 Comparison of C/E Values between X and Y-Axes

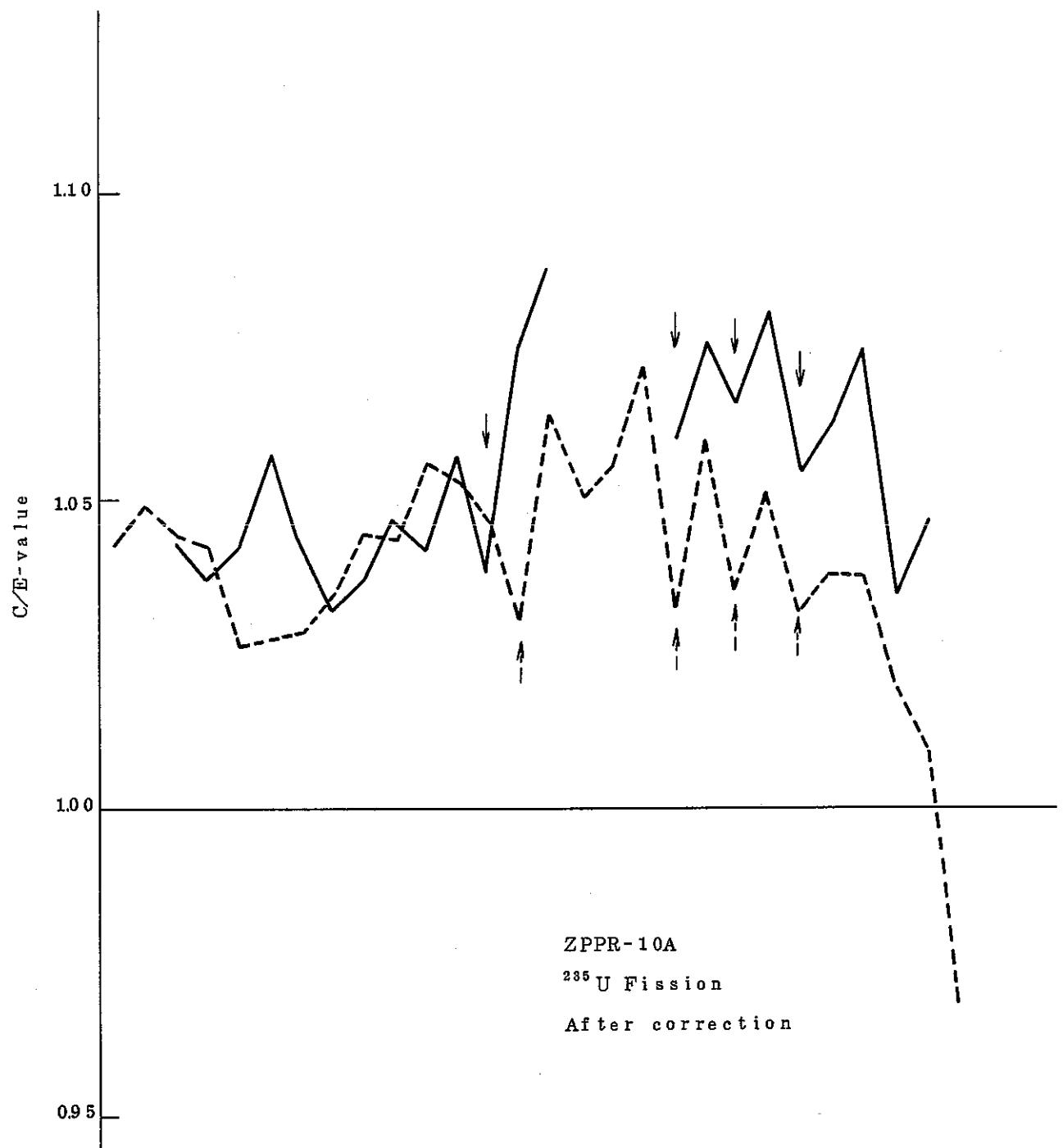


Fig. 529 Comparison of  $C/E$  Values between X and Y-Axes

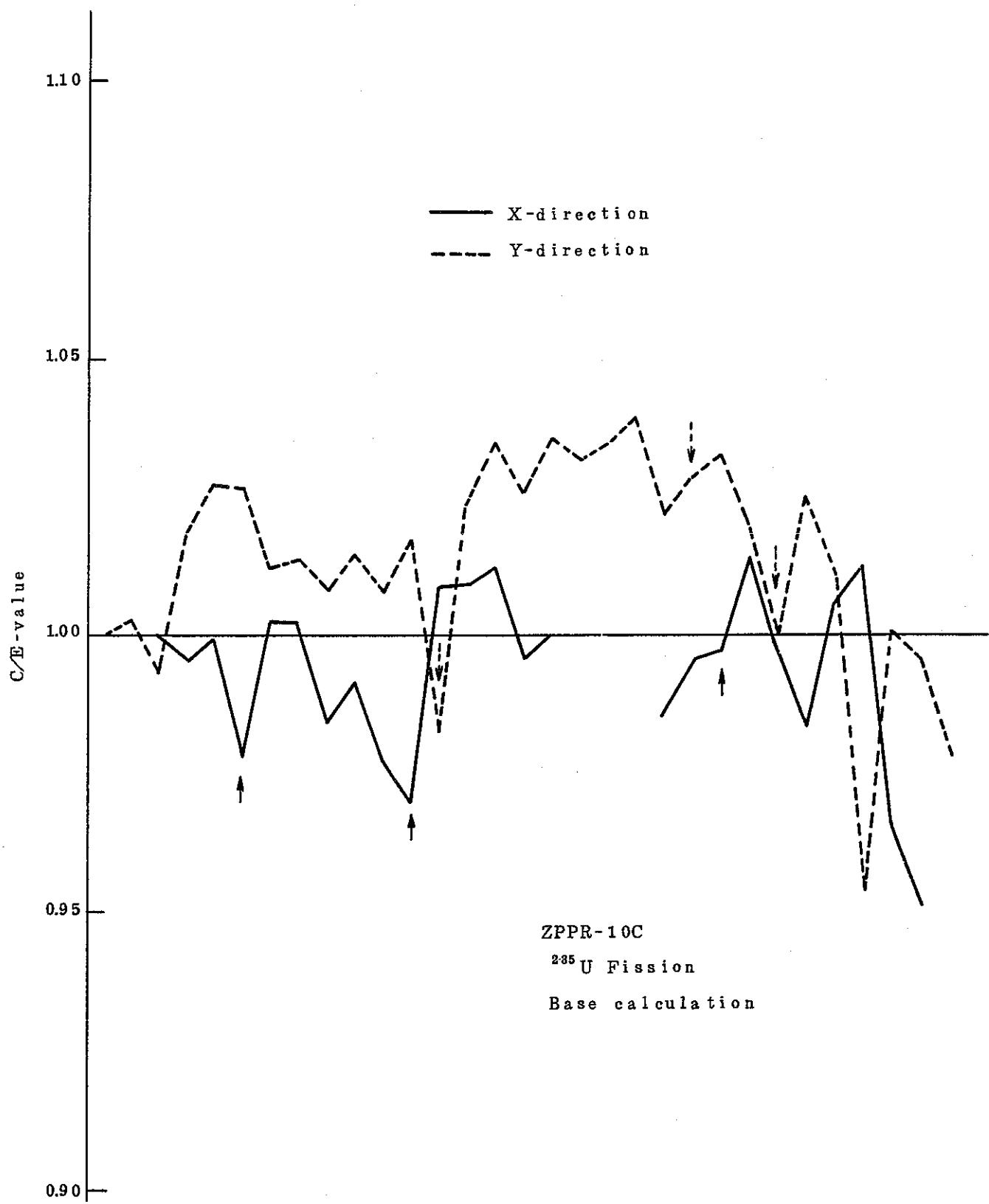


Fig. 5.30 Comparison of C/E Values between X and Y-Axes

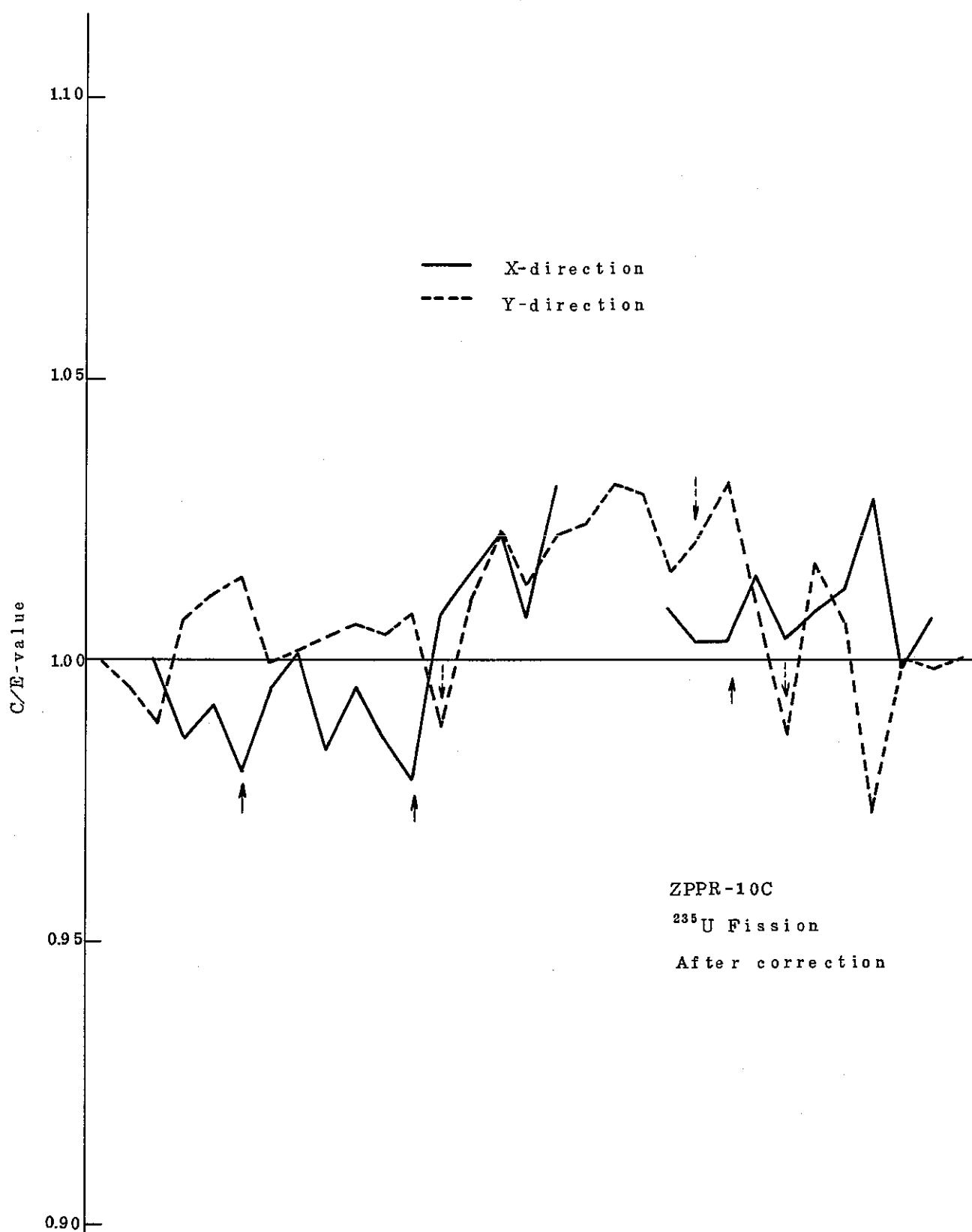


Fig. 5.31 Comparison of C/E-Values between X and Y-Axes

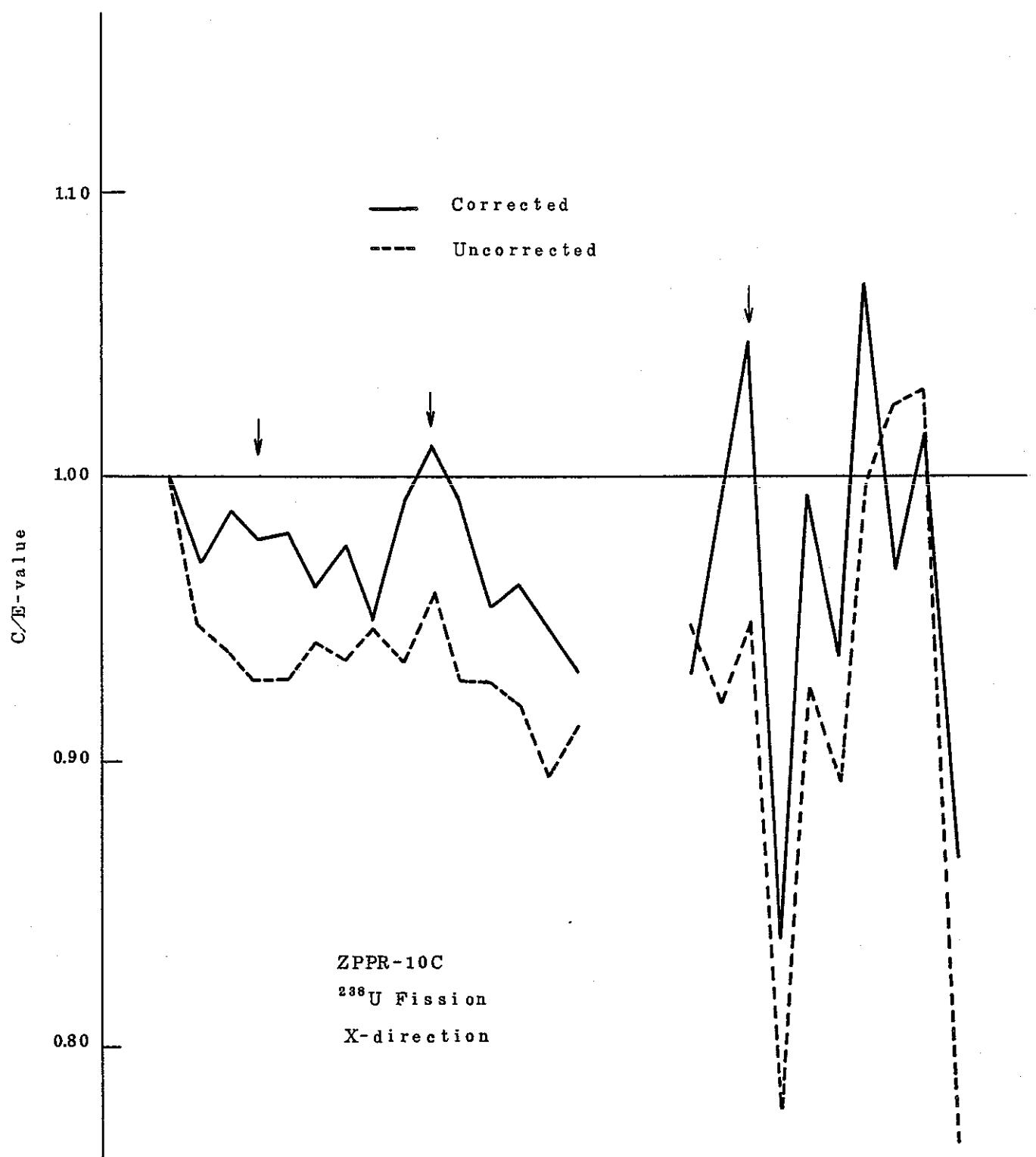


Fig. 5.32 Comparison of Corrected and Uncorrected  
 $^{238}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

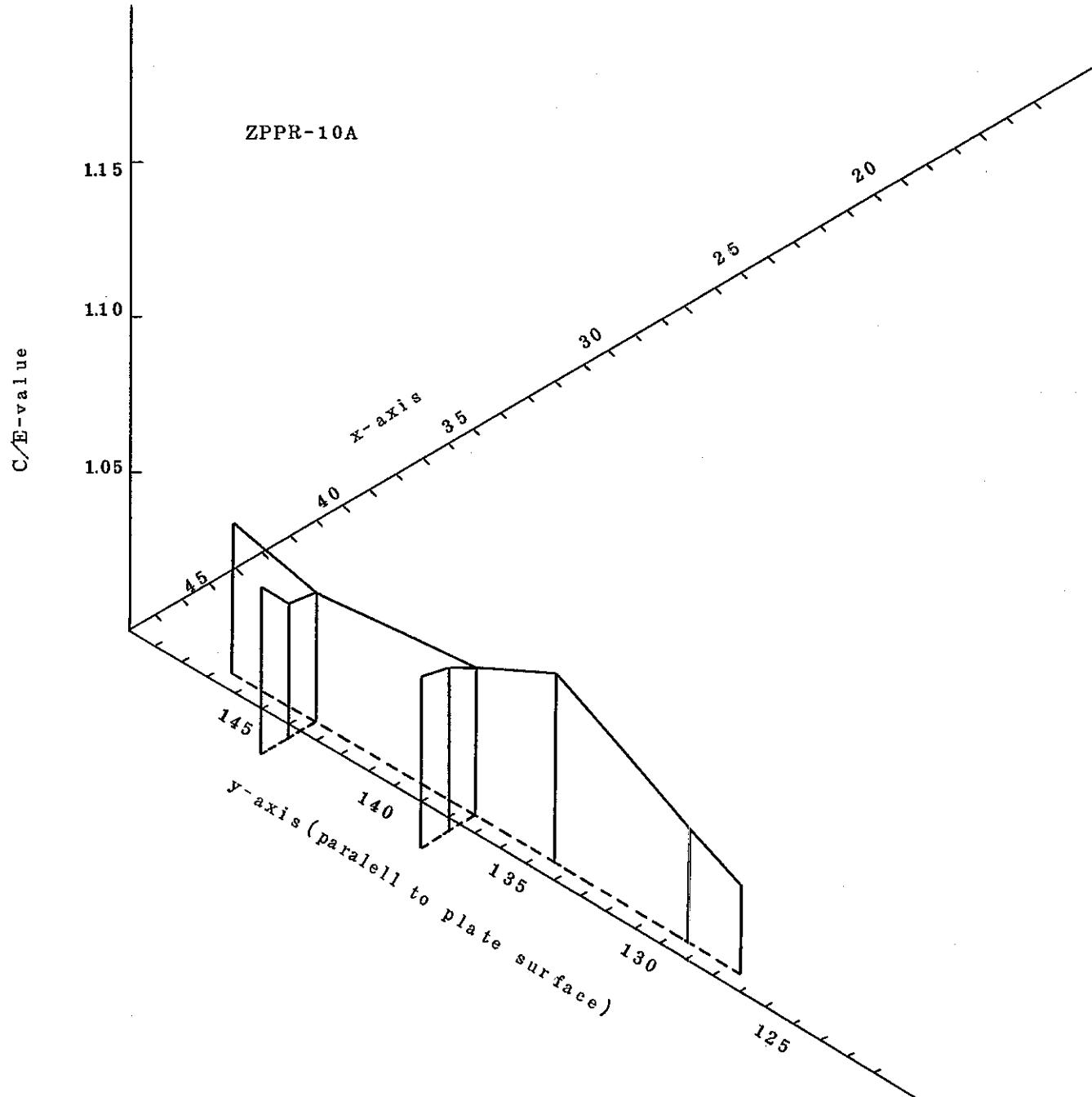


Fig. 5.33 C/E-Values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distributions

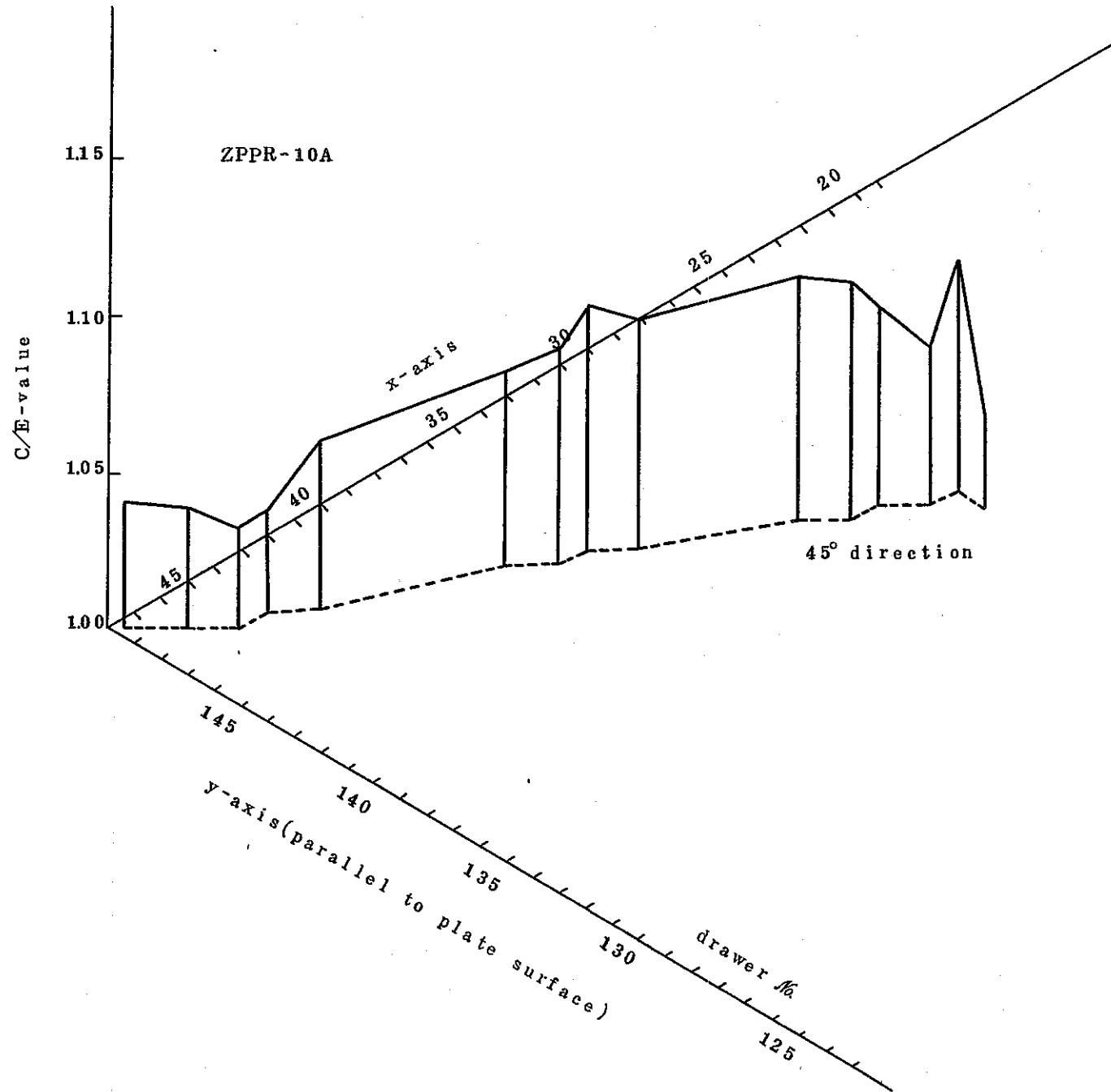


Fig. 5.34  $C/E$ -values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distributions

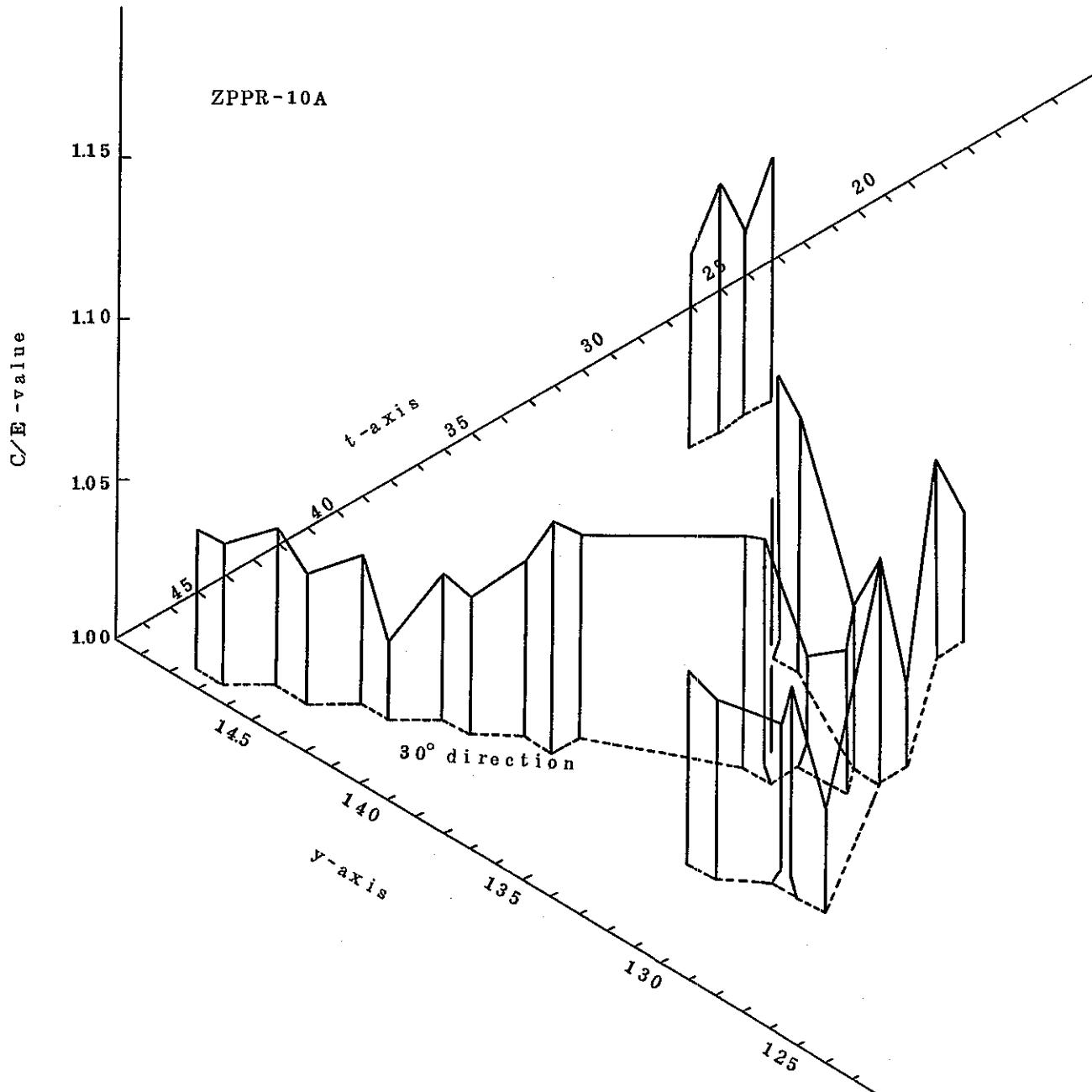


Fig. 5.35 C/E-values of  $^{235}\text{U}$  Fission Reaction Rate Distribution

Table 5.1 Mean C/E-values of reaction rate distributions for ZPPR-10 cores

Reaction	Region <sup>*)</sup>	ZPPR-10		ZPPR-10D/1		ZPPR-10D/2		average
		X	Y	X	Y	X	Y	
<sup>235</sup> U Fission	I . C .	0.9904 ±0.0020	0.9903 ±0.0138	0.9824 ±0.0320	0.9946 ±0.0266	0.9842 ±	0.9929 ±0.0146	0.9821 ±0.0048
	O . C .	1.0150 ±0.0280	1.0034 ±0.0231	1.0435 ±0.0097	1.0187 ±0.0172	1.0481 ±0.0163	0.9904 ±0.0176	1.0199 ±0.0225
	I . C .	0.9951 ±0.0251	1.0143 ±0.0340					
	O . C .	1.0307 ±0.0450	1.0118 ±0.0401					
Capture	I . C .	1.0011 ±0.0149	1.0188 ±0.0275					
	O . C .	1.0342 ±0.0106	1.0188 ±0.0275					
	I . C .	1.0166 ±0.0141						
		1.0509 ±0.0226						
<sup>239</sup> Pu Fission								

\*) I.C. and O.C. stand for inner core and outer core , respectively.

## 6. 結 言

大型高速臨界集合体 ZPPRによる大型非均質炉心臨界実験 ZPPR-13 の計画案を検討した。また、最初の実験である ZPPR-13A を解析するための予備検討を行った。さらに、ZPPR-10 の解析に関し、これまで問題となっていたセル非対称効果、シム制御棒効果などを評価し、反応度分布の C/E 値を再検討した。その結果をもとに、大型均質炉心核設計における出力分布の計算精度を見直した。

ZPPR-13 実験計画については、非均質炉心の基本的な問題を把握したいという日本側の要望に従い、次のような提案を行った。

- 非均質炉心においては均質炉心に比べて Na ポイド反応度の計算精度が悪くなる。そのため、ZPPR-13A では制御棒が Na ポイド反応度に与える効果を評価する実験、炉心・内部プランケット境界近傍における Na ポイド反応度マップの実験、炉心軸方向の同反応度マップの実験、Na ポイド領域における Pin/Plate ドロワーの比較実験を加える。
- ZPPR-13B では、内部プランケット領域の分割効果をみるために、分割される内部プランケットの形状を ZPPR-13A と同じ円筒状に限定し、その体系で ZPPR-13A と同様の方法を用いて制御棒価値、Na ポイド反応度などを測定する。とくに、内部プランケットの欠けた領域での反応率分布を測定する。

この他に、日本独自の案として軸方向非均質炉心の実験を提案した。

ZPPR-13A の解析に関しては、実験データを整理し、解析するための体系寸法及びプレート毎及びドロワー平均の原子数密度を設定した。また、解析の基本となる格子計算モデルを評価するために、2 次元格子計算による多重格子モデルの検討を行うこととした。当面の解析のためには、無限格子モデルを使用するが、比較のため、バックリングを無視した場合と、バックリングを考慮した場合とで格子計算を行い、両者のモデルで作成した群定数で並行して解析することとする。この ZPPR-13A の解析は 58 年度に行うことを考えている。

ZPPR-9 及び 10 の実験解析で、これまで問題とされていたセル非対称効果、シム制御棒の効果及び輸送計算におけるメッシュ効果を検討し、それらを補正した上で、ZPPR-10 各体系における反応率分布の C/E 値を評価した。

セル非対称及びシム制御棒効果の補正を施した結果、これまで ZPPR-9, 10 の各体系

で生じていた炉心 x y 軸間における C/E 値の系統的な不一致は改善された。しかし、これまで問題となっていた炉心内の径方向位置による C/E 値の空間依存性はより顕著になった（炉心中心から炉心外側に向かって C/E 値が 5 %程度増加）。今後、この原因をさらに追求していく必要がある。

この他、スパイク燃料及び炉心プランケット境界などの領域境界における C/E 値の不連続性、軸方向及び径方向プランケット領域における  $^{238}\text{U}(n,f)$  反応率分布の過少評価などの問題は、前回と殆んど同様に現われている。

以上の ZPPR-10 の結果をもとに、大型均質炉心の核設計における出力分布の計算精度を評価した結果、計算誤差は約 7 %となった。

## 7. 謝 辞

今回の解析を進めるに当たり、動力炉・核燃料開発事業団、高速増殖炉開発本部の白方敬  
章氏には有益な御指導を頂いた。深く感謝する次第である。

## 8. 参考文献

- 1) Lineberry,M.J.,et al. "Physics Studies of a Heterogeneous Liquid metal Fast Breeder Reactor", Nucl.Tech.44,P.21~43,(1978)
- 2) Collins,P.J.,et al. "Experimental Studies of 350-MW(e) Heterogeneous LMFBR Cores at ZPPR", Proc.of a symp. on Fast Reactor Physics", vol.2,P.57~69,(1980)
- 3) Ducat,G.A., "Assembly Document for ZPPR Assembly 11, an Experiment in Support of the LMFBR Program", internal memorandum. (1979)
- 4) Lineberry,M.L.and McFarlane,H.F., "Planning for the ZPPR-11 Program : Benchmark Critical Experiments for Heterogeneous LMFBR in 600-700 MWe Class", ZPRTM-340 (1979)
- 5) MINUTES of the Second Analysis Meeting of the JUPITER Program. edited by PNC Head Office, PNC ZA382 81-01 (1981)
- 6) Giese,H.et al., "Some Characteristics of Two Heterogeneous Cores and their Experimental Confirmation", ibid 2.,P.17
- 7) 鈴木,川島: 私信
- 8) 東芝,他: PLUTO使用説明書, PNC SJ278 79-20(2) (1979)
- 9) Y.Kikuchi et.al. : J.Nucl.Sci.Technol.17,567 (1980)
- 10) 高野,他: 高速炉用炉定数ライブラリー, JFS-3-J2の作成 PNC SJ250 80-16 (1980)
- 11) 中川,他: 高速炉の核特性コードシステム, JAERI-M 83-066 (1983)
- 12) PNC Report, SJ298 81-01 (1981)
- 13) M.Yamaoka,et.al. : Technology Report of the Osaka University, 31,229 (1981)
- 14) PNC Report, SJ201 80-26 (1982)
- 15) PNC Report, SJ201 81-32 (1981)
- 16) PNC Report, SJ298 81-01 (1981)
- 17) PNC Report, SJ202 81-10 (1981)

- 18) PNC Report, SJ 202 82-04
- 19) Larsen, E.W. and Williams, M., Nucl. Sci. Eng., 65, 290 (1978)
- 20) Hughes, R.P., Nucl. Sci. Eng., 69, 430 (1979)

## 9. 付 錄

Appendix : Cell Asymmetry Effect on Reaction Rate Distributions  
in Fast Reactor Critical Experiments\*

A-1. Introduction

In the analysis of the large fast reactor critical experiments ZPPR-9 and 10<sup>1</sup>), it was observed that there was a systematic difference in C/E values of reaction rate distributions between x- and y-axes on the core midplane. This difference, which is 2 to 5% in magnitude, is said to be caused mainly by the use of asymmetric fuel drawers. That is, single fuel column drawers, each of which contains one plutonium fuel plate at its center, were used as inner core fuel elements and as part of outer core fuel elements. Their plate arrangement is asymmetric about the drawer center (cell center) as shown in Fig. 1, i.e. the amount of depleted uranium is twice as much on one side as on the other. This kind of drawers were loaded such that the sides of higher <sup>238</sup>U density were all closer to the core center. As a result, a long region of high <sup>238</sup>U density appeared along the y-axis as shown in Fig. 2, and the neutron fluxes of low energy groups decreased there. This is said to cause the difference in C/E values between the x- and y-axes.

The C/E values derived from the analysis of ZPPR-9 and 10 experiments are to be used to evaluate bias factors for large fast reactor design. The C/E difference causes uncertainty of the bias factor for power distribution. From the standpoint of improving design accuracy, therefore, it is desirable to eliminate the C/E difference by a calculation

model which can treat the above phenomena. In this note, accuracy of one such model is numerically evaluated and the main cause of an appreciable global change in reaction rate distributions is explained from a neutronics viewpoint. A simple correction method is suggested.

#### A-2. Half-Drawer Model and its Accuracy

To take into account the effect of fuel cell asymmetry on reaction rate distributions in ZPPR-9, Collins<sup>2)</sup> divided each single fuel column drawer cell into two subregions (called 'half-drawers') of the same volume as in Fig. 2, calculated their macroscopic cross sections by a conventional cell homogenization (neutron flux and volume weighting) method, and performed a two-dimensional XY diffusion calculation to obtain reaction rate distributions. This model is called a half-drawer model.

The half-drawer model, as explained above, is based on the homogenization of each half-drawer. Differing from the homogenization of each unit drawer cell as a whole, such a homogenization has not yet been verified. To evaluate the accuracy, reaction rate distributions in a one-dimensional slab system were calculated by the half-drawer model and by a heterogeneous transport model treating inner plate structures of cells. The one-dimensional system is shown in Fig. 3, which models the ZPPR-9 assembly.

In the heterogeneous transport model, the plate structure of single fuel column drawers was taken into account by assuming that each single fuel column drawer is composed of

seven plates as shown in the figure, while the other kinds of drawers were treated as homogeneous cells. Transverse bucklings were assumed to be zero to avoid ambiguity caused by a neutron streaming calculation, and reaction rates at the plutonium fuel plates, i.e. near measurement foils, were calculated by a 7-group  $S_{16}$  calculation. The final reaction rate distributions were compared with those of a conventional homogeneous calculation, which was also done by the  $S_{16}$  transport model and the same mesh division to avoid transport and mesh size effects. The half-drawer model calculation was also done in a similar manner, i.e. by the 7-group  $S_{16}$  calculation with almost the same mesh spacings.

The cell asymmetry effect on  $^{235}U(n,f)$  reaction rate distribution, which was normalized to unity at the innermost drawer, is shown in Fig. 4 as a deviation from that of the homogeneous calculation. Results from two-dimensional XY diffusion calculation using the half-drawer model are also plotted for comparison. This two-dimensional half-drawer model calculation yields almost the same results as the one-dimensional one, which means that this one-dimensional model satisfactorily reproduces cell asymmetry effect in the two-dimensional system.

The figure indicates that reaction rate distributions change up to 5% due to the cell asymmetry effect. This change is too big to be neglected, i.e. reaction rate distributions must be corrected accordingly. The figure also shows that the difference in cell asymmetry effect between the half-drawer and heterogeneous transport models is 1.0% at most in

the inner and outer core regions. Measurement errors in experiments are said to be of the same order. Therefore, the half-drawer model has sufficient accuracy to correct reaction rate distributions in ZPPR-9 and 10 for cell asymmetry effect.

### A-3. Main Cause of Cell Asymmetry Effect

Though Fig. 4 indicates that the half-drawer model is sufficient as a correction model for reaction rate distributions in ZPPR-9 and 10 assemblies, it also shows that the curves for cell asymmetry effect have gradients at a far distance from the lattice irregularities; the gradient is particularly appreciable in the half-drawer model calculation. This means that reaction rate distributions undergo significant global change. The reason for this is explained below.

Figure 5 plots the curves of the cell asymmetry effect on  $^{235}\text{U}$  ( $n, f$ ) reaction rate distributions in ZPPR-9 due to individual half-drawer cells, i.e. changes of reaction rates due to exchanging homogeneous cells with half-drawer cells. These were calculated by the same one-dimensional slab model which was used previously. The broken lines show effects of individual half-drawer cells, and the solid lines their total effects. It is evident from this figure that the cell asymmetry effect on reaction rate distributions is the superposition of effects of all asymmetric cells.

Figure 6a shows the same kind of curves in an infinite lattice; the broken lines stand for cell asymmetry effects of individual half-drawer cells and the solid line their super-

position. This case differs from that of Fig. 5 in that the finite lattice of half-drawer cells is asymmetric about the center. In this case, cell asymmetry effect causes reaction rates to increase on one side of the finite lattice and decrease on the other. The figure shows that cell asymmetry effect is caused mainly by the outermost half-drawers of the finite lattice. It can also be said that the solid line in Fig. 6a represents the homogenization error of half-drawer cells.

It is reasonable to expect that the curve of homogenization error will change its sign and its magnitude will be almost the same if other half-drawer regions are added at both ends of this finite lattice of half-drawer cells as shown in Fig. 6b. It is also evident from Figs. 6a and b that the homogenization error will almost vanish if the thickness of the added half-drawers is reduced to one half (see Fig. 6c). This is because Fig. 6c can be considered to lie between Figs. 6a and b.

Figure 6c means that, in homogenizing a finite lattice of half-drawer cells, one quarter of the half-drawer cells at both ends ( $1/2 \times$  the half-drawer regions at both ends) should be left unhomogenized. In other words, cell boundaries must be shifted near lattice boundaries as shown in Fig. 7, before the half-drawer cells are homogenized. This is equivalent to treating half-drawer cells as symmetric ones near boundaries.

Figure 8 shows the curve of cell asymmetry effect on  $^{235}\text{U}$  ( $n, f$ ) reaction rate distributions in the one-dimensional

slab model of ZPPR-9 obtained by the above method. The region of the consecutive half-drawer cells was homogenized in the half-drawer model. The other half-drawer cells (ones in the outer core region) were treated as they were. The curve agrees well with that of the half-drawer model calculation.

It is concluded from this that the gradient of the curves in Fig. 4 is caused mainly by regions of higher and lower  $^{238}\text{U}$  densities appearing at core center and edge, respectively.

The results of the above numerical experiments also show that a calculation model simpler than the half-drawer model can be used to correct reaction rate distributions for cell asymmetry effect. That is, it suffices to put regions of higher and lower  $^{238}\text{U}$  densities at both ends of a finite lattice of single fuel column drawer in the usual homogeneous model. There is no need to double the number of meshes as in the half-drawer model. Figure 9 shows the results thus obtained. This differs from Fig. 8 only in that the single fuel column drawers in the outer core region are homogenous cells. Correction of reaction of reaction rate distribution thus can be made easier by this new method.

#### A-4. Discussions on Neutron Drift

Before this study was performed, some people emphasized on the possibility of neutron drift phenomenon in asymmetric cells causing the global change in reaction rate distributions. It, however, has been denied by discussions in the last section. This is reconfirmed here from another viewpoint.

In a medium consisting of asymmetric cells, neutrons can 'drift' or diffuse in a special preferred direction. This is because such a medium can have different shielding performances against neutrons proceeding in opposite directions. In such cases, neutron flux distribution is shifted to one direction compared with that in a usual medium. This can be taken into account by adding one term to the conventional neutron diffusion equation as shown below.<sup>3), 4)</sup>

$$V \cdot DV\Phi_O + K \cdot V\Phi_O - \Sigma_a \Phi_O + \frac{v \Sigma_f}{K_{eff}} \Phi_O = 0, \quad (1)$$

where  $D$ ,  $\Sigma_a$  and  $v \Sigma_f$  are one-group constants;  $K$  is a quantity called a drift coefficient, which appears in case of asymmetric cells and vanishes in case of symmetric cells;  $\Phi_O$  is a neutron scalar flux; and  $K_{eff}$  is an effective multiplication factors.

The added term  $K \cdot V\Phi_O$  causes the shift of neutron flux distribution to one direction. That is, in case of one-dimensional slab systems, Eq.(1) yields solutions of the following form.

$$\Phi_O = e^{-\delta x} \cos \beta x, \quad (2)$$

where

$$\delta = \frac{|K|}{2D}$$

Expression (2) shows that the neutron flux distribution in an infinite lattice of asymmetric cells differs from usual solutions by the factor  $e^{-\delta x}(1-\delta x$  in case of a small  $\delta$ ); this distortion of neutron flux distribution has nothing to do with boundary conditions and cannot be predicted by methods

based on usual cell homogenization. This was thought to be the main cause of the global change in reaction rate distributions in ZZPR-9 and 10.

Now, Hughes<sup>4)</sup> has derived the following relation, under the assumption that neutron flux distribution is expressed as the product of a global distribution and a local distribution within a cell.

$$\delta \propto \frac{1}{2D} \iint \phi^+ \mu \phi \, d\mu \, dv \quad (3)$$

where  $\phi$  and  $\phi^+$  are normal angular flux and adjoint angular flux, respectively, within a unit cell;  $\mu$  is the cosine component of neutron flight direction;  $\int dv$  stands for a volume integral over a unit cell region. Eq.(3) means that neutrons drift in the direction of a higher importance.

In case of the half-drawer cell, periodic functions  $\phi$  and  $\phi^+$  are symmetric about planes located at the center of half-drawer. That is, the following equations hold when the original point of the space coordinate  $x$  is moved appropriately.

$$\begin{aligned}\phi(x, \mu) &= \phi(-x, -\mu), \\ \phi^+(x, \mu) &= \phi^+(-x, -\mu),\end{aligned}$$

Substitution of these equations into Eq. 93) and use of the fact that these are periodic functions leads to

$$\delta = 0$$

This means that the global change in reaction rate distributions in the half-drawer model calculation is not caused by

$e^{-\delta x}$  in Eq.(2). That is, neutron drift cannot occur in a lattice of half-drawer cells.

The above discussion cannot completely deny the possibility of neutron drift in the actual ZPPR-9 and 10 systems. It can be considered, however, that, if it occurs, it is a quite small effect. This is because, firstly, the gradient of the curve by the heterogeneous transport model is much smaller than that by the half-drawer model, and secondly, because even this small gradient is thought to be caused mainly by the same reason which was shown in the last section.

Reference

- (1) Lineberry, M.J., et al., "Experimental Studies of Large Conventional LMFBR Cores at ZPPR", IAEA-SM-244/186 (1979)
- (2) Collins, P., Private communication
- (3) Larsen, E.W. and Williams, M., Nucl. Sci. Eng., 65, 290 (1978)
- (4) Hughes, R.P., Nucl. Sci. Eng., 69, 430 (1979)

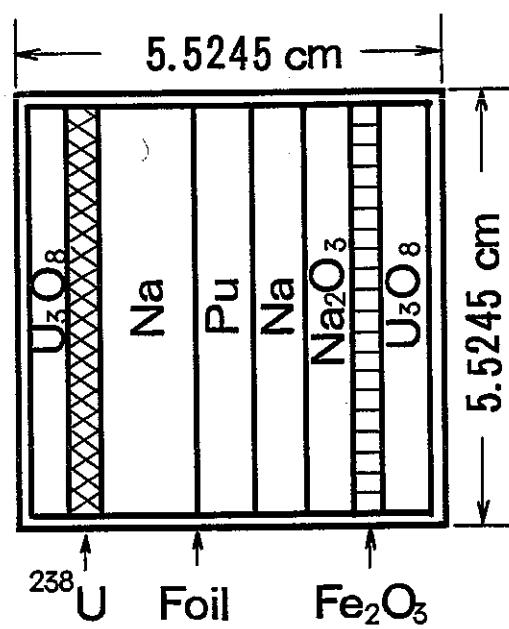


Fig. 1. Single fuel column drawer

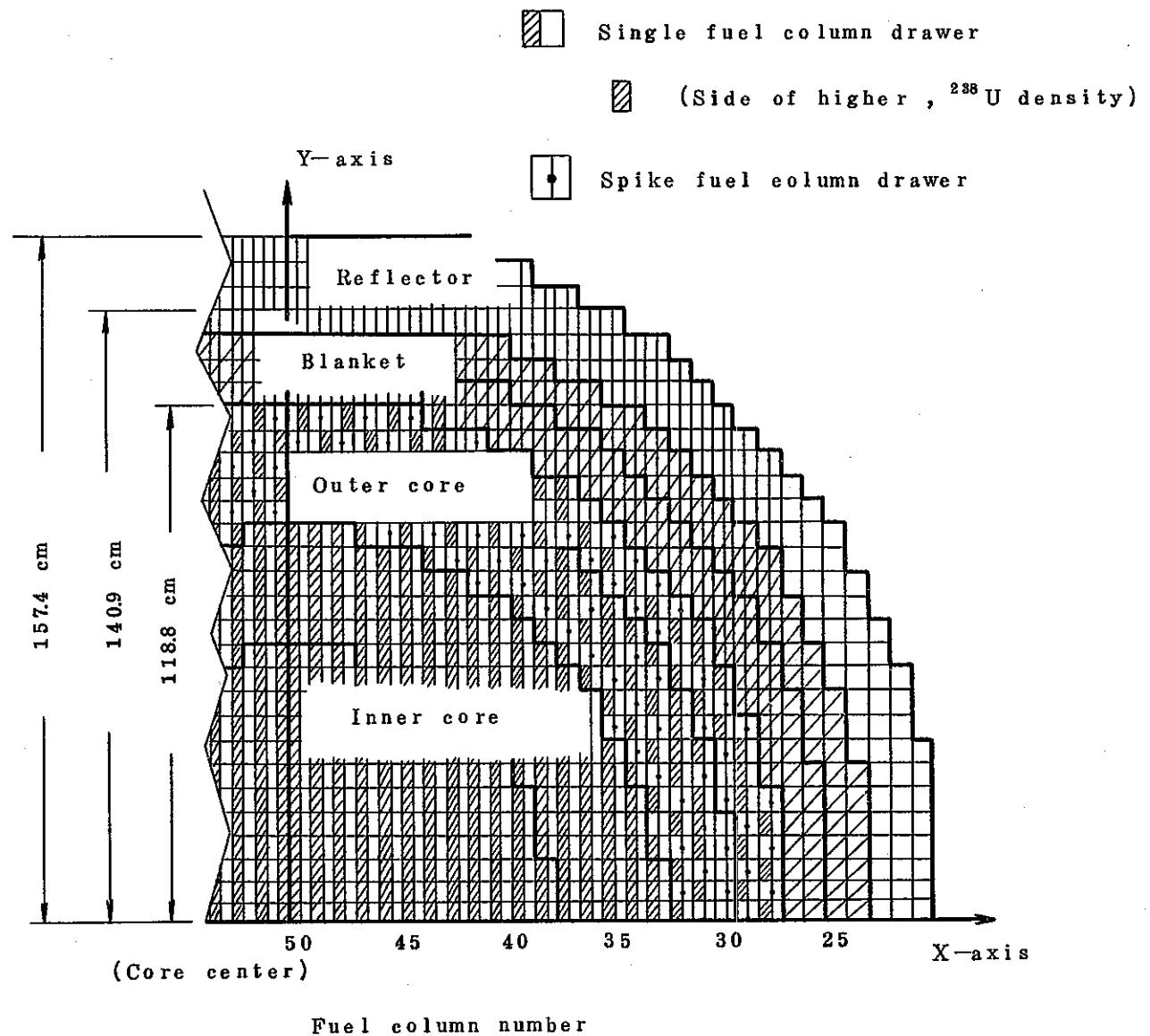


Fig. 2. Loading Map in ZPPR-9 Assembly

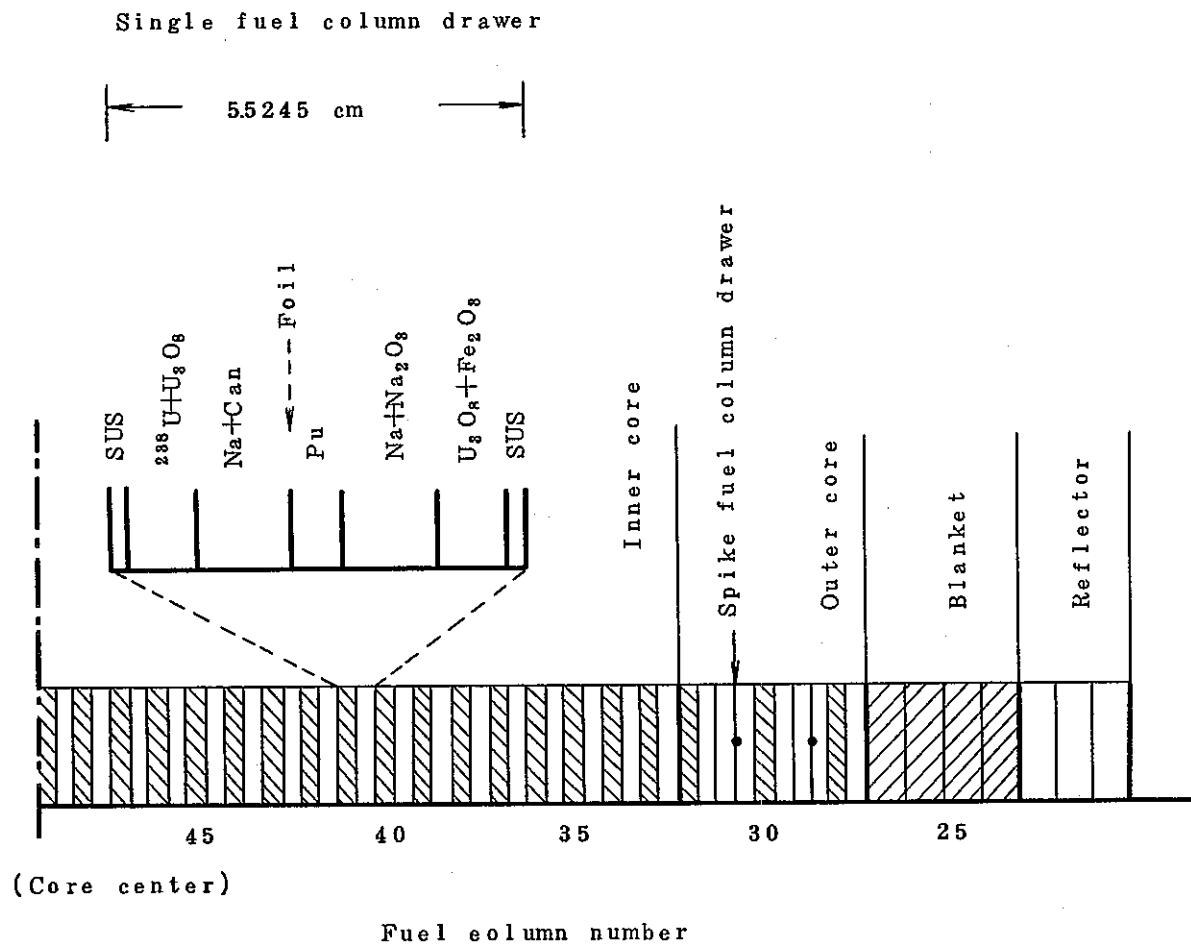


Fig. 3 One-Dimensionnal Slab Model of ZPPR-9 Assembly

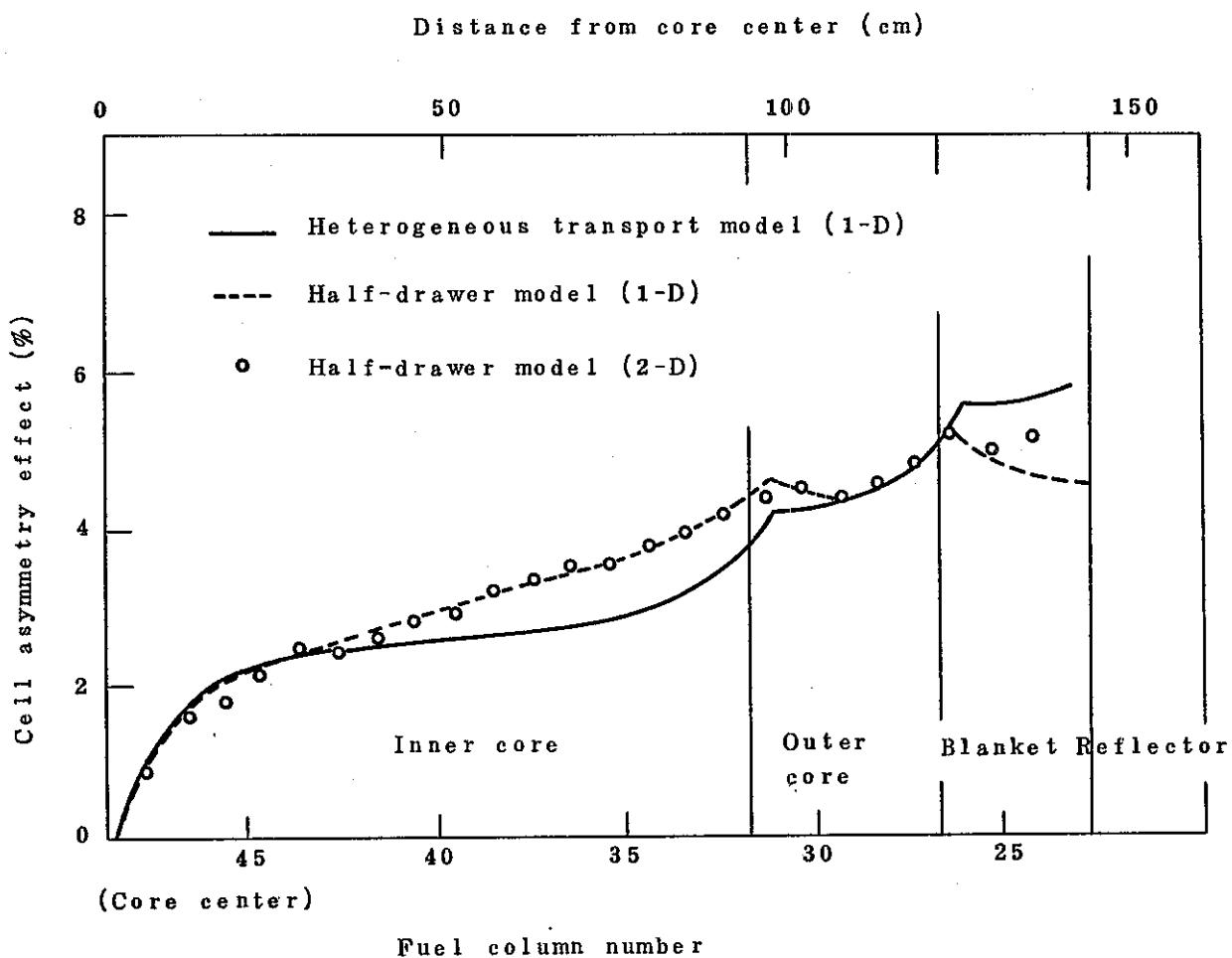


Fig. 4 Cell Asymmetry Effect on  $^{235}\text{U}(n,f)$  Reaction Rate  
Distributions by One-Dimensional Model

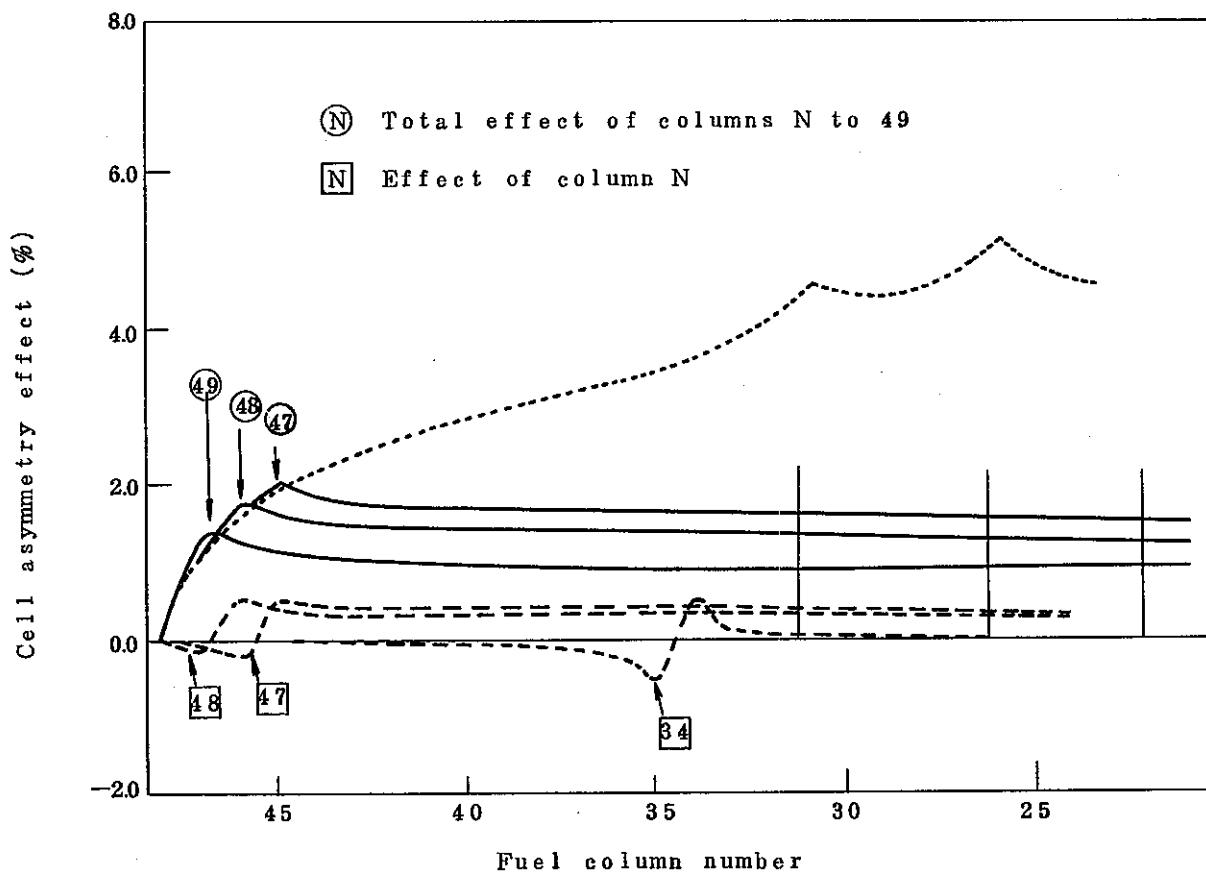
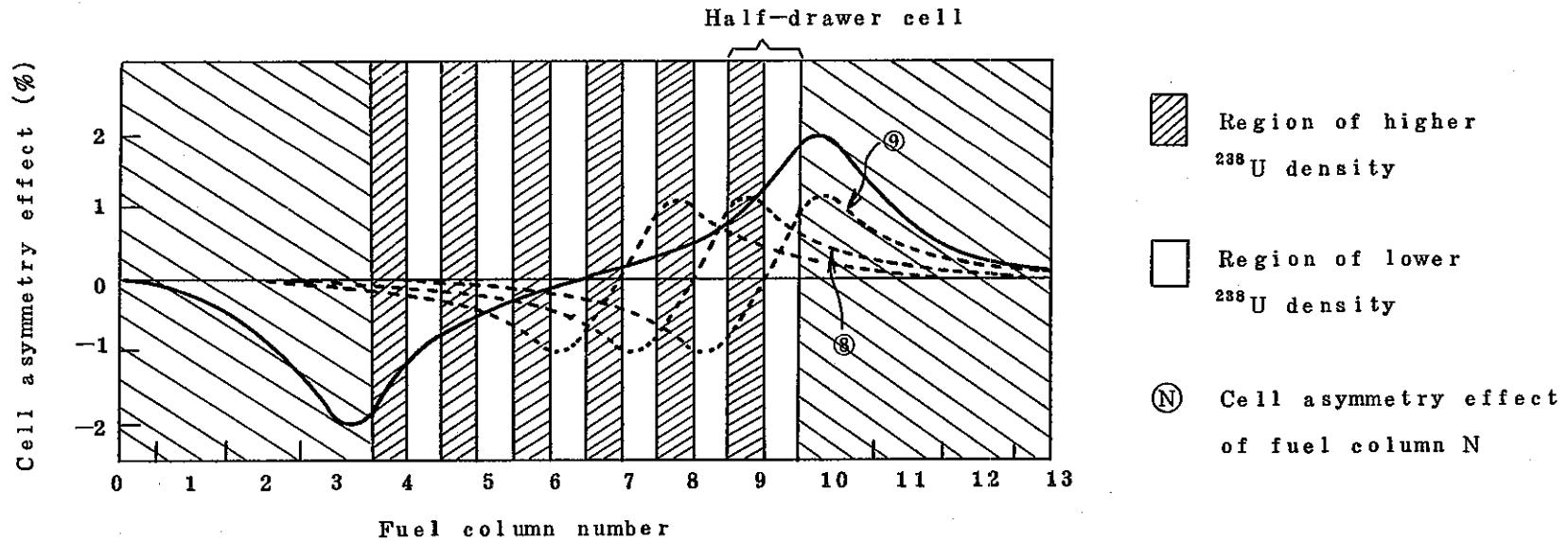
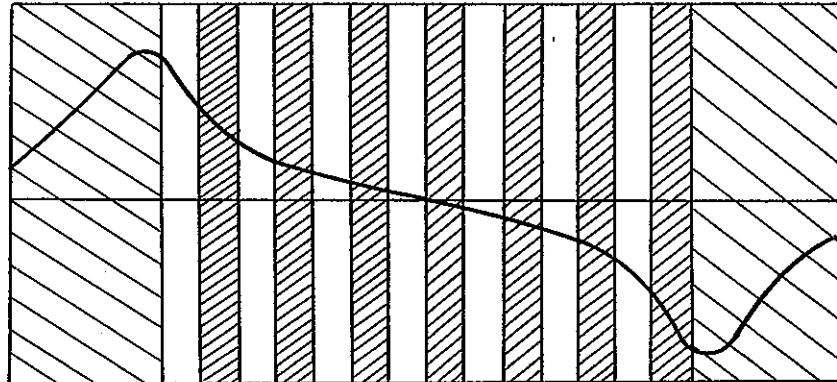


Fig.5 Cell Asymmetry Effect on  $^{235}\text{U}(n,f)$  Reaction Rate  
Distributions due to Individual Half-Drawer Cells

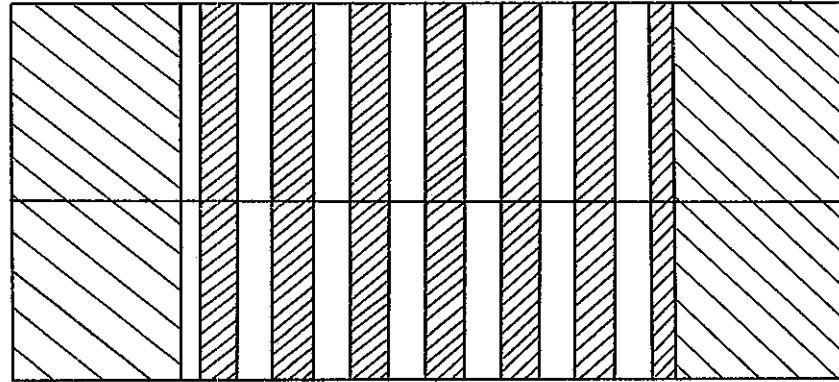


6a Cell asymmetry effect of several half-drawer cell

- 981 -



6b Case of other regions added



6c Thickness of added regions  
reduced to one half

Fig. 6 Reaction Rate Changes due to Exchange of Homogeneous Cells

With Half-Drawer Cell

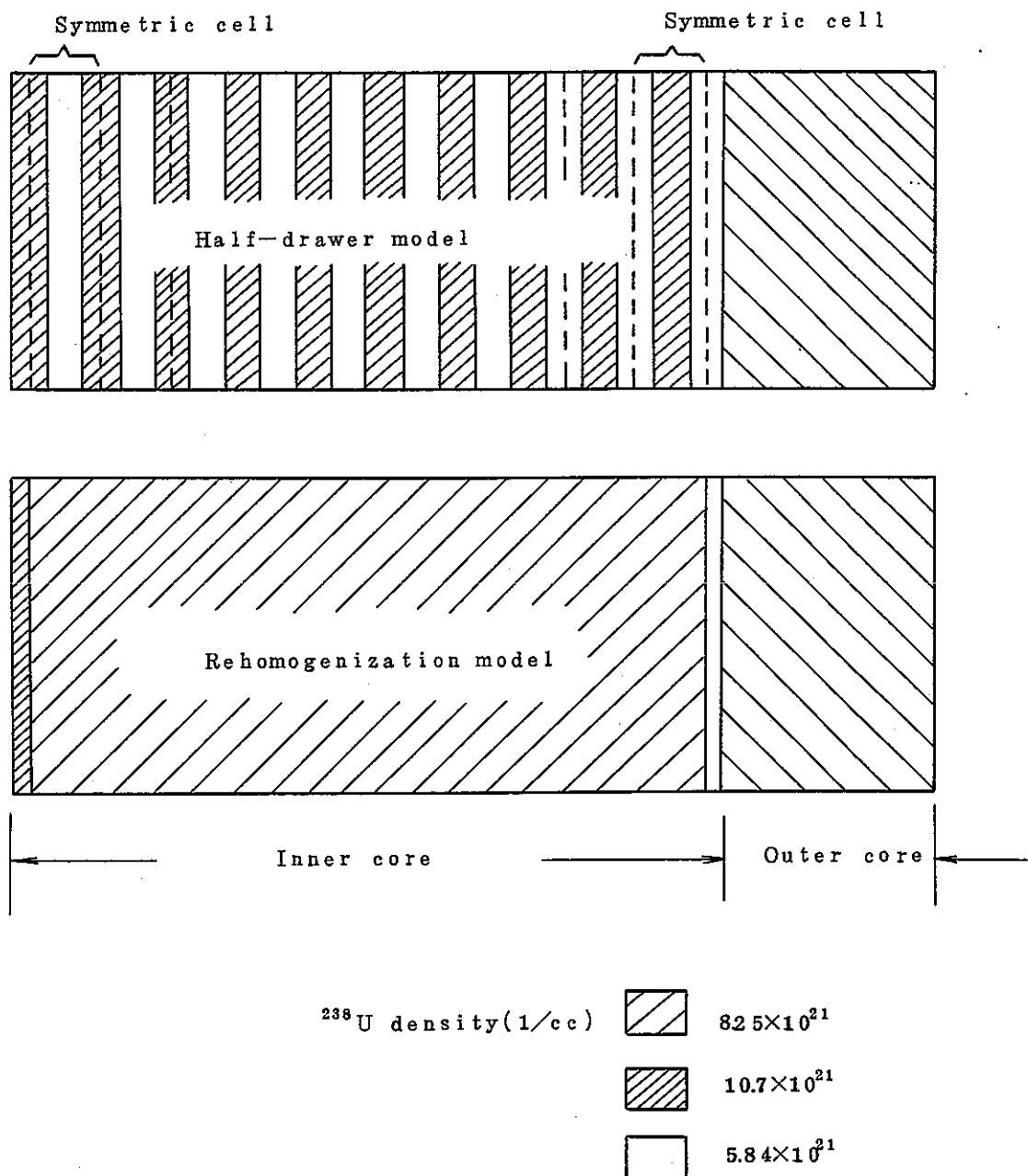


Fig. 7 Rehomogenization of Half-Drawer Cell

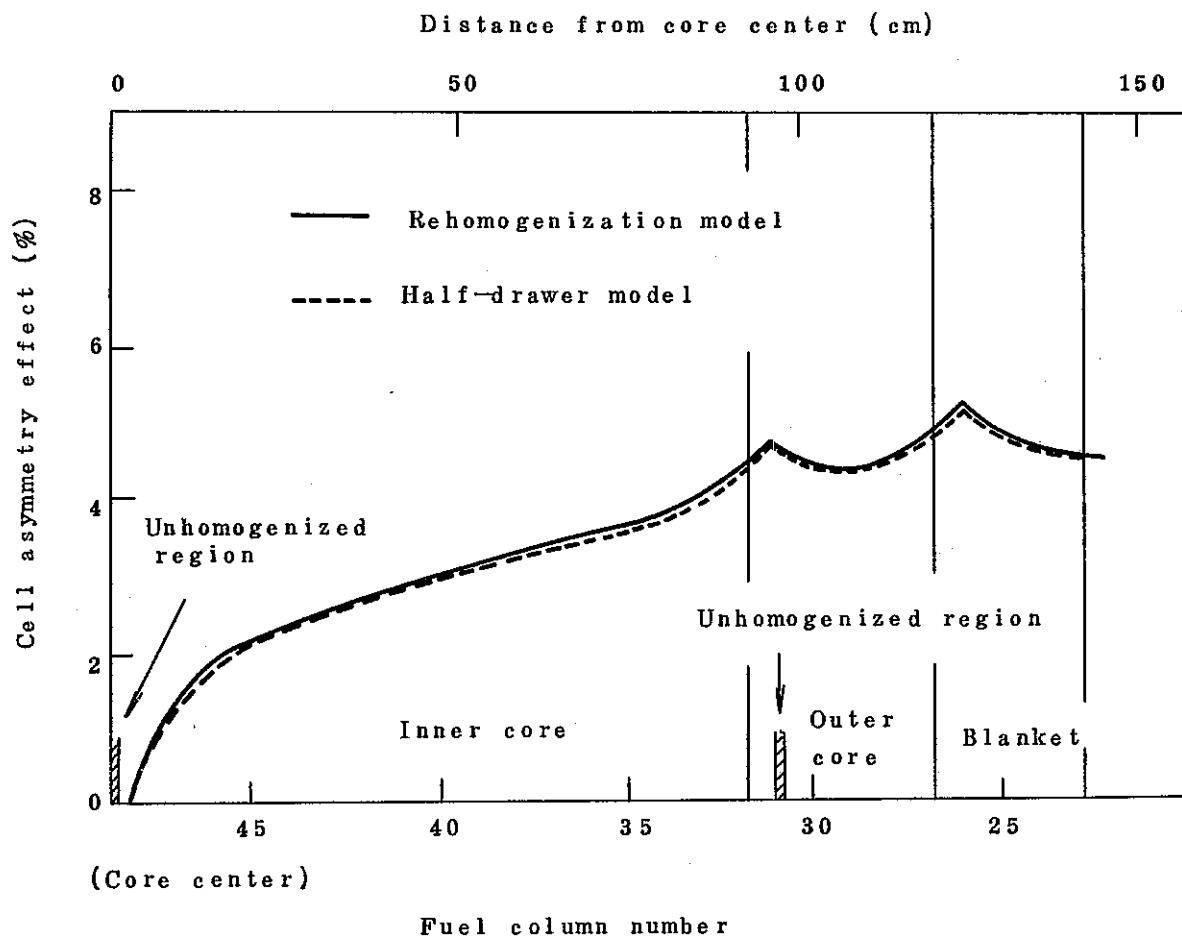


Fig. 8 Cell Asymmetry Effect on  $^{235}\text{U}(n,f)$  Reaction Rate  
Distribution by Rehomogenization Model  
(Half-Drawer Cell in Outer Core Not Homogenized)

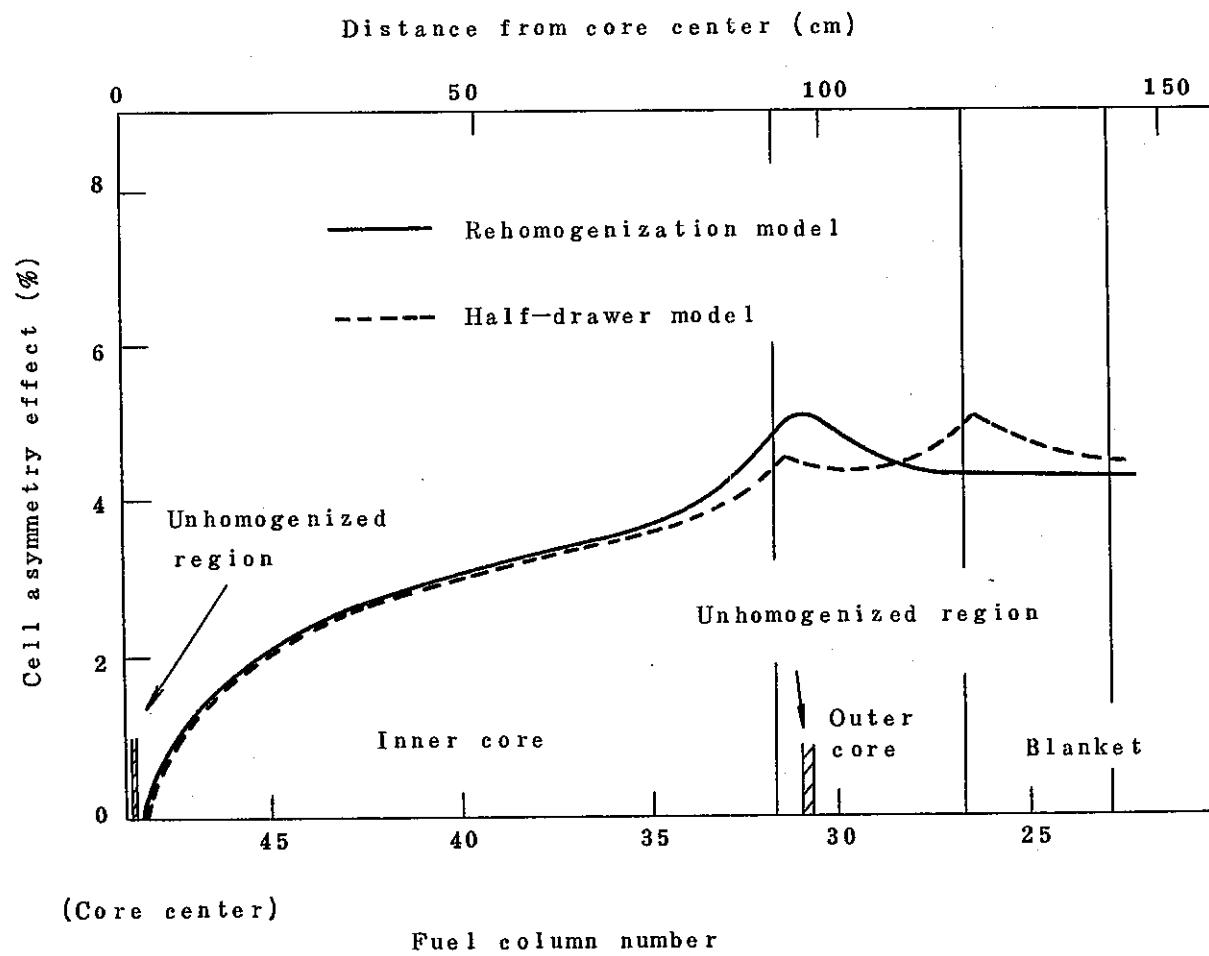


Fig. 9. Cell Asymmetry Effect on  $^{235}\text{U}(n,f)$  Reaction Rate

Distribution by Rehomogenization Model

(Homogeneous Model Used in Outer Core)