

JAERI-M

83-211

FCA XI-1 集合体の選定と特性実験

1983年11月

大杉俊隆・向山武彦・岡嶋成晃

小坪龍男・三田敏男<sup>\*</sup>・吉田弘幸

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 球磨野高速印刷

F C A XI - 1 集合体の選定と特性実験

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

大杉 俊隆・向山 武彦・岡嶋 成晃

小堀 龍男・三田 敏男<sup>\*</sup>・吉田 弘幸

(1983年11月11日受理)

大型高速炉の部分的模擬体系の炉物理特性に関する予備解析を実施し、その結果に基づき、大型炉の内側炉心組成を模擬したテスト領域を有する F C A XI - 1 集合体を選定した。

本報告書では予備解析の結果得られたXI - 1 集合体の炉心特性を記述し、加えて、臨界近接に引続き実施された制御棒較正、温度効果の測定、密着面間隙効果の測定等の特性実験について報告する。

---

\*) 外来研究員；日立エネルギー研究所

Core Design and Critical Experiment on  
FCA XI-1 Assembly

Toshitaka OSUGI, Takehiko MUKAIYAMA, Shigeaki OKAJIMA,  
Tatsuo KOAKUTSU, Toshio SANDA<sup>\*</sup> and Hiroyuki YOSHIDA

Department of Reactor Engineering,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 11, 1983)

A preanalysis was performed to investigate physical properties of a partial mock-up assembly for a conventional large fast reactor. The central region of the FCA XI-1 Assembly was designed to simulate the nuclear characteristics of the inner core of the large fast reactor based on the results from the preanalyses mentioned above.

This report discusses the physical properties obtained from the preanalysis on the FCA XI-1 Assembly, and present the experimental results concerning the critical approach the control rod calibration, the temperature effects and the gap effects.

Keywords : FCA XI-1 Assembly, Preanalysis, Critical Assembly, Partial Mockup, LMFBR, Critical Experiment, Rod Calibration, Temperature Effect, Gap Effect, Critical Approach

---

\* On leave from Energy Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

## 目 次

1. 序	1
2. 模擬炉心の選定	2
2.1 燃料引出内の模擬物質板の配置	2
2.2 臨界量の推定	4
3. FCA XI-1 集合体の核特性の解析	11
3.1 計算モデル	11
3.2 エネルギースペクトルおよびスペクトルインデックスに関する考察	12
3.3 反応率分布に関する考察	12
3.4 反応度価値分布に関する考察	13
3.5 中心 Na ポイド反応度効果に関する考察	13
4. 臨界近接	45
4.1 近接手順	45
4.2 臨界近接曲線	45
4.3 XI-1 集合体の臨界データ	46
5. 特性実験	54
5.1 制御棒較正	54
5.2 密着面間隙効果	57
5.3 密着面不銹鋼反応度効果	58
5.4 温度効果	58
5.5 周辺燃料反応度効果	59
5.6 出力較正	60
6. 臨界性に関する検討	65
7. 結 言	70
謝 辞	71
参考文献	71
付 錄	72

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Core design of the mock-up assembly .....	2
2.1 Plate arrangement in fuel drawers .....	2
2.2 Estimation of critical mass .....	4
3. Discussion on physical properties of the FCA XI-1 Assembly .....	11
3.1 Calculational model .....	11
3.2 Discussion on energy indices .....	12
3.3 Discussion on reaction rate distribution .....	12
3.4 Discussion on reactivity worth distribution .....	13
3.5 Discussion on central Na-void reactivity worth .....	13
4. Critical approach .....	45
4.1 Procedure of critical approach .....	45
4.2 Critical plot .....	45
4.3 Criticality measurement of the FCA XI-1 Assembly .....	46
5. Critical experiment .....	54
5.1 Control rod calibration .....	54
5.2 Measurement of gap effect .....	57
5.3 Measurement of stainless steel reactivity worth distribution .....	58
5.4 Measurement of temperature effects .....	58
5.5 Measurement of edge worths .....	59
5.6 Power calibration .....	60
6. Discussion on criticality .....	65
7. Conclusion .....	70
Acknowledgement .....	71
References .....	71
Appendix .....	72

## 1. 序

今まで F C A では実験炉級から原型炉級までの高速炉を模擬した実験が実施され、得られた種々の測定データは核データ・群定数セット・計算手法等の検証に役立てられてきた。一方、高速原型炉「もんじゅ」の建設を間近に控え、実用規模の大型高速炉の設計が具体化していく今日、これまでに確立された群定数セットと計算手法とが大型炉に対しても同様に適用できるか否かを確認しておく必要がある。これらを踏まえ、大型 Na 冷却高速炉の炉物理特性を実験的に得る目的で F C A XI 集合体シリーズによる実験を計画した。F C A 手持のプルトニウムは、大型炉のフルモックアップに必要とされるプルトニウムの量の約 10 分の 1 程度であるという量的制約から、模擬炉心は部分的モックアップ体系とせざるを得ない。それ故、F C A XI 集合体シリーズによる実験の目的には、部分的モックアップ体系による模擬実験手法の確立も含まれている。

Na 冷却大型高速炉の炉心概念は未だ確立していない、通常の均質炉心の他、炉心の中に内部ブランケットを持込む非均質炉心にも安全性および経済性の観点から興味が持たれている。非均質炉心としては、径方向非均質炉心と軸方向非均質炉心とがあり、径方向非均質炉心に関してはいわゆる“ J U P I T E R 計画 ” の各の下に日米共同研究が米国のアルゴンヌ国立研究所の Z P P R を用いて行われている。F C A XI 集合体シリーズによる実験に際しても均質および非均質炉心の双方に考慮が払われた。但し、部分的モックアップ実験にせざるを得ないという制約から、非均質炉心に関しては当面対象を軸方向非均質炉心に限っている。F C A XI 集合体シリーズの一番目の集合体、XI-1 集合体は均質炉心を模擬したものであり、大型炉の内側炉心を模擬したテスト領域と、系を臨界に保つため燃料の濃縮度を高くしたドライバー領域とからなる。XI-2 集合体はテスト領域の中に厚さ約 20 cm の内部ブランケットを設け、軸方向非均質炉心を模擬したものである。系の臨界性はドライバー領域の厚さを変えることにより維持される。

一般的に、原型炉から大型炉への移行に伴ない、内部転換比を大きくし燃焼による反応度変化を小さくして、高燃焼度を達成しようという要請から燃料の濃縮度は低くなるという傾向がある。例えば、原型炉級では内側炉心及び外側炉心の燃料の濃縮度がそれぞれ 15% / 21% 程度であるのに対し、大型炉ではそれぞれ 10% / 13% 程度に低く設計される例が多い。F C A XI-1 集合体では大型炉の内側炉心の組成を模擬するために、F M 比 ( Fissile to Heavy Metal Ratio ) がそれぞれ 0.056, 0.133 の 2 つの種類の燃料引出を作成し、それらを交互にほぼ等しい数だけ装荷し、平均して F M 比を約 0.09 とし、これをテスト領域としている。ドライバー領域については F C A 所有の燃料（プルトニウム及び濃縮ウラン）を有効に使って、系の臨界性が維持できるようにそれらの組成と配置とを決定した。第 2 章で上記のパラメータの決定に際して実施した予備解析の結果について述べる。

第 3 章では、XI-1 集合体の炉特性を、実用規模の大型高速炉の炉特性と比較して検討した結果を述べる。これは、部分的モックアップ体系にて得られた測定データが、実体系の炉特性とどのような対応を持つかを検討したものである。

第 4 章、5 章では F C A XI-1 集合体の臨界近接及び特性試験について述べる。臨界近接、制御棒較正に引続き特性試験として、密着面間隙効果、温度効果、周辺燃料反応度値等を測定した。第 6

章では、臨界性に関し検討を加えた。第7章に本実験にて得られた主要結果をまとめた。本報告書にて用いた、炉出力と未臨界度との関係式の導出に関しては付録Aにまとめた。また、実験精度に関する検討結果を付録Bに示した。

## 2. 模擬炉心の選定

臨界集合体を使用して模擬実験を行う場合、模擬の対象としている実体系の各領域と対応している模擬体系の各領域について、両者の①物質の組成、および②幾何学的形状と大きさ、とをできるだけ一致させる必要がある。実用規模のNa冷却大型高速炉のモデルとして、電気出力が1000MWe～1500MWeで混合酸化物燃料(Pu-U-O<sub>2</sub>)を使用した円柱型2領域炉心の例をみると、炉心高さは約100cm、等価直径は約350cmで炉心体積が約10000ℓ程度となる。また、内側炉心と外側炉心との体積比は60:40、燃料の濃縮度はそれぞれ10%，13%程度であり、燃料の装荷量は核分裂性プルトニウムにして約4tonである。FCAを用いて大型高速炉の模擬実験を行う際には、手持ちの核分裂性物質の量が充分でないので、上記②の条件には大きな制約を受けることになる。そこで、大略次の方針にて部分的模擬体系を組立てることとした：

- (1) 体系の中央部に大型炉の内側炉心組成を模擬したテスト領域を設ける、
- (2) テスト領域の軸方向の長さ即ち炉心高さを実体系にできるだけ一致させる、
- (3) 模擬体系の臨界性を維持するため、テスト領域の周囲にプルトニウムおよび濃縮ウランを用いたドライバー領域を設ける。

(1)と(2)の条件を満たすことにより、テスト領域の中央部では、軸方向分布を含めて、測定された炉特性と実体系の炉特性とがある程度の対応を持つことが期待できる。対応の程度はテスト領域の大きさに依存し、テスト領域の大きさは所有するプルトニウムの量に依存することになる。本章では、FCAに依存し、テスト領域の大きさは所有するプルトニウムの量に依存することになる。本章では、FCAを用いて、可能な限りテスト領域を大きくした模擬体系を設定し、テスト領域のどの程度の範囲まで実体系の核特性との対応がとれるかは第3章にて検討することにした。

### 2.1 燃料引出内の模擬物質板の配置

FCA XI-1集合体には大きく分けて2つの異なったタイプの燃料引出が使用されている。1つは、テスト領域にて使用されているT1およびT2の2種類の燃料引出である。他のタイプは、ドライバー領域にて使用されているPD(92), PD(81), PUDおよびEUDの4種類のドライバー燃料引出である。以下、各燃料引出について説明する。

#### テスト領域の燃料引出

テスト領域は大型Na冷却高速炉の内側炉心組成を模擬している。大型炉の内側炉心燃料のFM比(Fissile to Heavy Metal Ratio)は約0.10であるが、FCAの場合、格子管の寸法および燃料板の形態等の制約もあり<sup>注)</sup>、また、高速炉の炉心の燃料/Na/構造材の体積比(40/40/20)  
<sup>注)</sup>FCAでは、内側断面が2×2インチの引出に、一辺が2インチの正方形の燃料板または模擬物質板を縦方向に装填して燃料引出を作る。このとき、1つの引出毎に1種類の燃料セルパターンとするのが普通である。また、プルトニウム燃料として、厚さが1/16インチのPu-Al合金を使用しており、ウランは劣化ウラン酸化物板にて模擬している。

章では、臨界性に関し検討を加えた。第7章に本実験にて得られた主要結果をまとめた。本報告書にて用いた、炉出力と未臨界度との関係式の導出に関しては付録Aにまとめた。また、実験精度に関する検討結果を付録Bに示した。

## 2. 模擬炉心の選定

臨界集合体を使用して模擬実験を行う場合、模擬の対象としている実体系の各領域と対応している模擬体系の各領域について、両者の①物質の組成、および②幾何学的形状と大きさ、とをできるだけ一致させる必要がある。実用規模のNa冷却大型高速炉のモデルとして、電気出力が1000MWe～1500MWeで混合酸化物燃料(Pu-U-O<sub>2</sub>)を使用した円柱型2領域炉心の例をみると、炉心高さは約100cm、等価直径は約350cmで炉心体積が約100000ℓ程度となる。また、内側炉心と外側炉心との体積比は60:40、燃料の濃縮度はそれぞれ10%，13%程度であり、燃料の装荷量は核分裂性プルトニウムにして約4tonである。FCAを用いて大型高速炉の模擬実験を行う際には、手持ちの核分裂性物質の量が充分でないので、上記②の条件には大きな制約を受けることになる。そこで、大略次の方針にて部分的模擬体系を組立てることとした：

- (1) 体系の中央部に大型炉の内側炉心組成を模擬したテスト領域を設ける、
- (2) テスト領域の軸方向の長さ即ち炉心高さを実体系にできるだけ一致させる、
- (3) 模擬体系の臨界性を維持するため、テスト領域の周囲にプルトニウムおよび濃縮ウランを用いたドライバー領域を設ける。

(1)と(2)の条件を満たすことにより、テスト領域の中央部では、軸方向分布を含めて、測定された炉特性と実体系の炉特性とがある程度の対応を持つことが期待できる。対応の程度はテスト領域の大きさに依存し、テスト領域の大きさは所有するプルトニウムの量に依存することになる。本章では、FCA手持の燃料を有効に用いて、可能な限りテスト領域を大きくした模擬体系を設定し、テスト領域のどの程度の範囲まで実体系の核特性との対応がとれるかは第3章にて検討することにした。

### 2.1 燃料引出内の模擬物質板の配置

FCA XI-1集合体には大きく分けて2つの異なったタイプの燃料引出が使用されている。1つは、テスト領域にて使用されているT1およびT2の2種類の燃料引出である。他のタイプは、ドライバー領域にて使用されているPD(92), PD(81), PUDおよびEUDの4種類のドライバー燃料引出である。以下、各燃料引出について説明する。

#### テスト領域の燃料引出

テスト領域は大型Na冷却高速炉の内側炉心組成を模擬している。大型炉の内側炉心燃料のFM比(Fissile to Heavy Metal Ratio)は約0.10であるが、FCAの場合、格子管の寸法および燃料板の形態等の制約もあり<sup>注)</sup>、また、高速炉の炉心の燃料/Na/構造材の体積比(40/40/20)

<sup>注)</sup> FCAでは、内側断面が2×2インチの引出に、一辺が2インチの正方形の燃料板または模擬物質板を縦方向に装填して燃料引出を作る。このとき、1つの引出毎に1種類の燃料セルパターンとするのが普通である。また、プルトニウム燃料として、厚さが1/16インチのPu-Al合金を使用しており、ウランは劣化ウラン酸化物板にて模擬している。

を保存する必要もあるので自由に FM 比を設定することができない。そこで、2つの種類の燃料引出を作成し、それらをほぼ等しい数だけ交互に配置し、平均的に FM 比が 0.09 となるようにした。T1 燃料引出は、1 パック（燃料引出の縦方向に 2 インチ（5.08 cm）毎の単位を装填上の便利さを考えて 1 パックと呼んでいる）当りに 1/16 インチ厚さの Pu 板 1 枚を装填しており、FM 比は 0.056 である。T2 燃料引出は、1 パック当り 2 枚の Pu 板を装填して、FM 比を 0.133 とした。

#### ドライバー領域の燃料引出

テスト領域が大型炉の内側炉心組成を模擬する一方、ドライバー領域は系の臨界性を維持するため設けられている。そのため、テスト領域の中性子場に大きな影響を与えない範囲内で可能な限り燃料の FM 比を高く設定した。ドライバー燃料引出には、主として Pu 燃料板 を用いたプルトニウムドライバー燃料引出と濃縮ウランドライバー燃料引出とがある。プルトニウムドライバー燃料引出には、PD(92), PD(81) および PUD の 3 種類の燃料引出があり、1 パック当りの燃料板の装填枚数はそれぞれ 9.2% Pu 板 × 4, 9.2% Pu 板 × 3 + 8.1% Pu 板, 9.2% Pu 板 × 3 + 9.3% EU 板である。濃縮ウランドライバー燃料引出 EUD は 9.3% の EU 板と 20% EU 板とからなる。FCA 所有の核分裂性物質を有効に使用して臨界となる系を得るために上記の如き数種類の燃料引出を使用せざるを得なかった。

高速炉の炉心の燃料 / Na / 構造材 の体積比を保存するため、上記に示した燃料引出には全て、1 パック当り 3 枚の劣化ウラン酸化物板および 4 枚の Na 板（いずれも 1/4 インチ厚さ）が装填されている。FCA 集合体の格子管および燃料引出管の材質は不銹鋼 304 であり、充分な量の構造材が存在することになるので、構造材模擬物質としては特に装填していない。また、各燃料引出共第 1 パックから第 9 パックまでを炉心部としており、テスト領域の燃料引出の場合、第 10 パックから第 13 パックまでを軸方向ブランケットとし、劣化ウラン酸化物板と Na 板を装填し、ドライバー燃料引出には、少しでも中性子の洩れを少なくするため天然ウランブロックを装填し軸方向ブランケットとしている。固定側および移動側とで 2 つの同じ種類の燃料引出が装荷されるので、炉心高さは計 18 パック、3.6 インチ = 9.144 cm となる。軸方向ブランケット厚さは上下それぞれ 4 パック、8 インチ = 20.32 cm である。

上記の燃料引出の他、FCA XI 集合体には、制御・安全棒引出 SCR<sup>注)</sup> と、径方向ブランケットとして DUB 引出とが装荷されている。

以上に述べた FCA XI 集合体にて用いられる各種引出の装填図を Fig. 2.1 に示し、それらの引出平均の核種の原子数密度を Table 2.1 に示す。但し、テスト領域およびドライバー領域の燃料引出（制御・安全棒引出を含む）については、炉心部とブランケット部とを分けてそれぞれの原子数密度を示した。

注) FCA XI 集合体の制御棒引出、安全棒引出は燃料板の配列は同一とし SCR 引出とした。安全上の見地から、全安全棒の反応度価値は合計して 2%  $\Delta k/k$  以上にするという要請があるので、他の燃料引出よりも反応度価値を大きくしてある。また、異常時の引抜の衝撃に耐えられるように、引出管の厚みを増すと共に、燃料板としては Pu 板を使用せず、濃縮ウラン板のみを用いている。引出内の 1 パック当りの 9.3% 濃縮ウラン板（1/16"）の装填枚数は当初の 6 枚（SCR-1）から 4 枚（SCR-2）に変更された（後述）。

## 2.2 臨界量の推定

前節にて示した燃料引出を用いて等価半径が約 30 cm のテスト領域を有する集合体を組み立てた場合どの程度の燃料が必要となるかを計算した。群定数セットには JFS-V-2 25 群セット<sup>2)</sup>を用い、衝突確率法を用いた非均質セル計算コード PIGEON<sup>3)</sup>、方向依存拡散係数を用いた拡散理論コード CITATION-FBR<sup>4)</sup>をそれぞれ使用し、Fig. 2.2 に示した2次元円柱モデルにより臨界量を求めた。FCA XI集合体シリーズとして、均質炉心系のみならず、軸方向非均質炉心系をも計画しているので、均質炉心モデル (FCA XI-A) の他に内部ブランケット厚さが 20 cm (FCA XI-B) および 30 cm (FCA XI-C) の各モデルについてもそれぞれ検討した。Fig. 2.2 のモデルにて、簡単の為、3種類のプルトニウム燃料引出および制御・安全棒引出を PD(92) 引出により代表させ、PD(92) の装荷本数を 152 本とし (プルトニウムドライバー領域の等価半径を 40.00 cm とする) これを固定し、系を臨界とする濃縮ウランドライバー燃料引出 (EUD) の本数を求めた。EUD の追加本数と系の実行増培率を Table 2.2 に示し、Fig. 2.3 に図示した。Fig. 2.3 より系が臨界となる EUD の追加本数を求めると、FCA XI-A, FCA XI-B, FCA XI-C の各モデルについてそれぞれ 176 本、188 本、230 本となる。一方、FCA の制御・安全棒は安全性上の要請から、それらの引出の反応度価値を大きくとってあり、PD(92) 引出の反応度価値との差を補正する必要がある。PD(92) を SCR 引出にて置換したケースの計算結果から、これらの補正をした後の EUD の必要本数を求めると、以下の如くなる。

<u>モデル</u>	<u>系を臨界にするために必要な EUD 本数</u>
FCA XI-A	142 本
FCA XI-B	158 本
FCA XI-C	194 本

FCA の濃縮ウランの在庫量から作成可能な EUD 引出の本数は 220 本であり、10% の推定誤差を見込んでも、上記の 3 つのモデルを臨界にすることは可能であるとの見通しを得た。

Table 2.1-1 Homogeneous atomic number densities  
of drawers in FCA XI Assembly

( $\times 10^{22} n \cdot cm^{-3}$ )

Region Nuclide	Test Region			Driver Region	
	Core		Ax. Blanket DUP	Core	
	T 1	T 2		PD (9 2)	PD (8 1)
Pu-239	0.05229	0.10458	—	0.2092	0.2080
Pu-240	0.00466	0.00933	—	0.01866	0.02614
Pu-241	0.000473	0.000946	—	0.00189	0.00305
U - 235	0.00329	0.00152	0.00329	0.00152	0.00152
U - 238	0.9345	0.6906	0.9345	0.6906	0.6906
O	1.5598	1.7286	1.7286	1.3911	1.3911
Na	0.8296	0.8296	0.8296	0.8296	0.8296
Al	0.1125	0.2250	0.2250	—	—
Cr	0.3226	0.3389	0.3062	0.3715	0.3715
Fe	1.1849	1.2427	1.1272	1.3581	1.3581
Ni	0.1378	0.1508	0.1248	0.1769	0.1769

Region Nuclide	Driver Region			Radial Blanket DUB	
	Core		Ax. Blanket NUB		
	PUD	EUD			
Pu-239	0.1569	—	—	—	
Pu-240	0.01399	—	—	—	
Pu-241	0.00142	—	—	—	
U - 235	0.1148	0.2848	0.0289	0.0086	
U - 238	0.6989	0.6891	3.9885	4.0070	
O	1.3911	1.3499	—	—	
Na	0.8296	0.8296	—	—	
Al	—	0.8999	—	—	
Cr	0.3552	0.2946	0.1827	0.1827	
Fe	1.3004	1.0795	0.6652	0.6652	
Ni	0.1639	0.1274	0.0796	0.0796	

Table 2.1-2 Homogeneous atomic number densities  
of Safety/Control rod drawers in  
FCA XI Assembly

Nuclide	Region		Ax. Blanket NUB
	Core	SCR-1 * SCR-2 **	
U-235	0.6800	0.4533	0.0289
U-238	0.04982	0.03321	3.9885
Al	1.6951	1.8364	—
Cr	0.2605	0.2605	0.1827
Fe	0.9480	0.9480	0.6652
Ni	0.1130	0.1130	0.0796

\* in FCA XI-A Assembly

\*\* in FCA XI-1 Assembly

Table 2.2 Multiplication factor of FCA XI models  
in critical search

Model	Z <sub>B</sub> * (cm)	R <sub>C</sub> (cm)	Number of EUD*	K <sub>eff</sub>
XI - A	—	4.630	112	0.96039
	—	5.031	192	1.01078
	—	5.294	248	1.03868
XI - B	10.16	4.630	112	0.94989
	10.16	5.031	192	1.00139
	10.16	5.294	248	1.02993
XI - C	15.24	4.630	112	0.92322
	15.24	5.294	192	0.97790
	15.24	4.630	248	1.00820

\* See Fig. 2.2

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													

Fig. 2.1-1 Plate configuration in T1 drawer

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													

Fig. 2.1-2 Plate configuration in T2 drawer

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													

Fig. 2.1-3 Plate configuration in PD(92) drawer

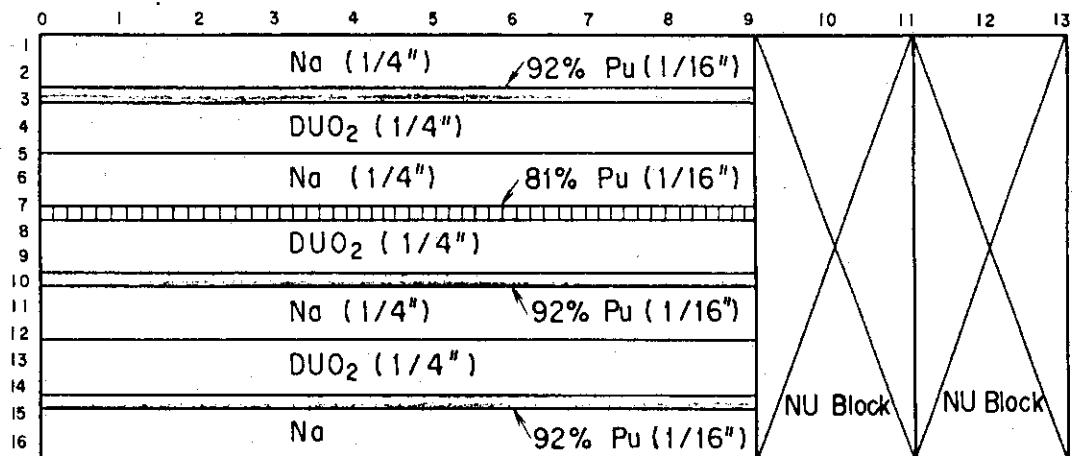


Fig. 2.1-4 Plate configuration in PD (81) drawer

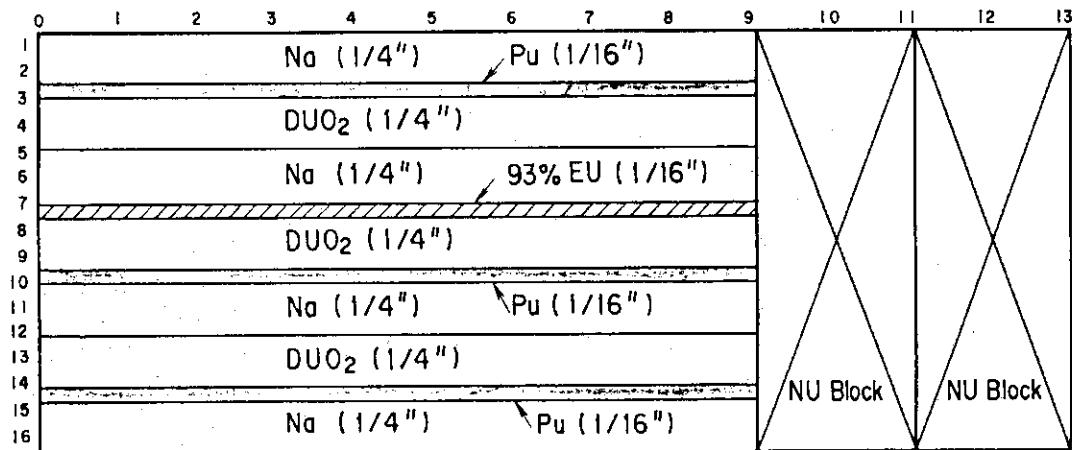


Fig. 2.1-5 Plate configuration in PUD drawer

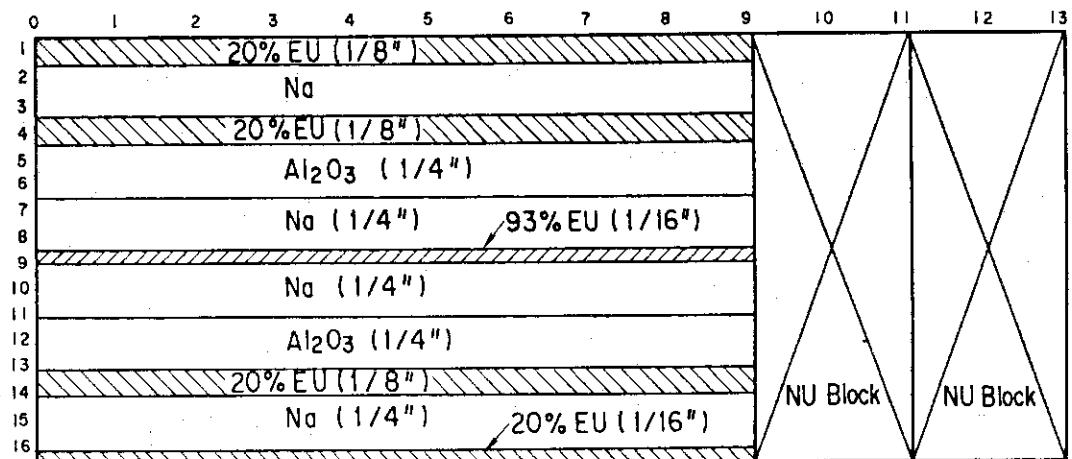


Fig. 2.1-6 Plate configuration in EUD drawer

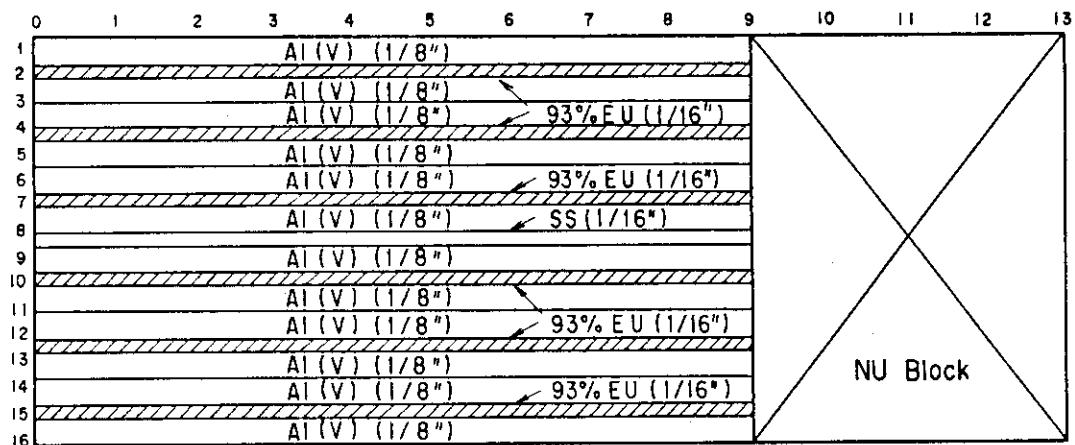


Fig. 2.1-7 Plate configuration in SCR-1 drawer  
(XI - A Assembly)

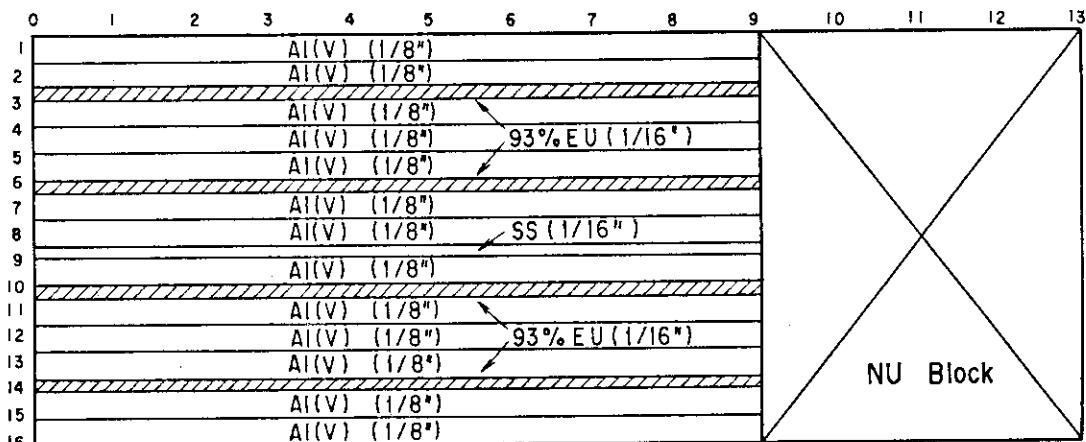


Fig. 2.1-8 Plate configuration in SCR-2 drawer  
(XI - 1 Assembly)

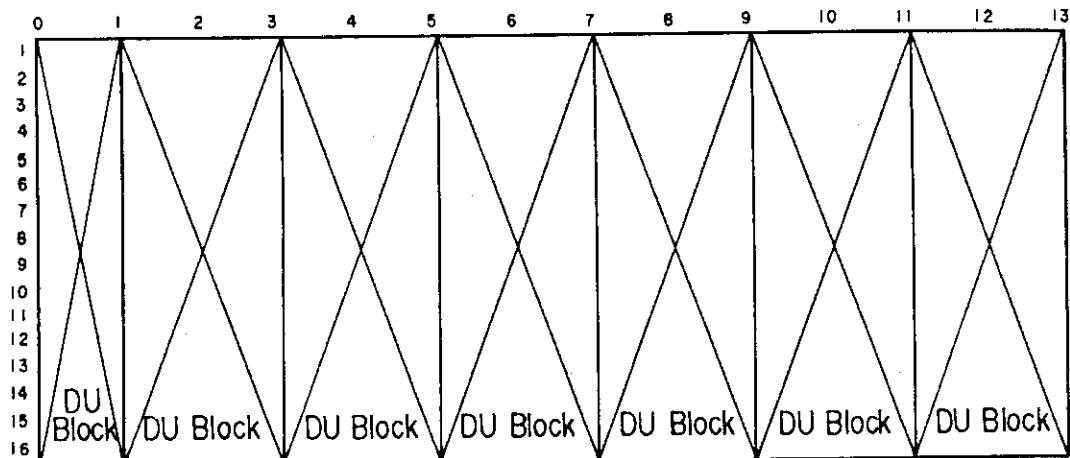


Fig. 2.1-9 Plate configuration in DUB drawer

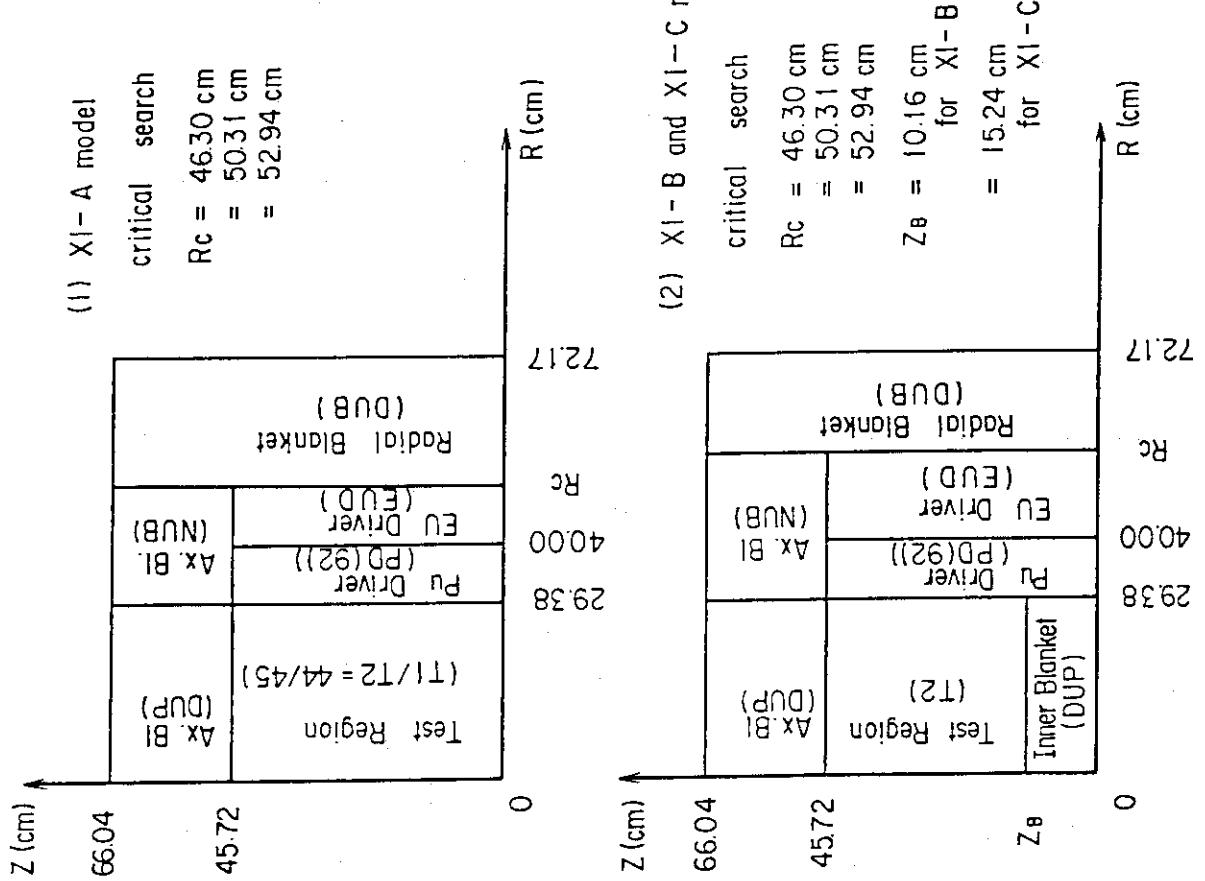


Fig. 2.2 2RZ models of FCA XI models for critical search

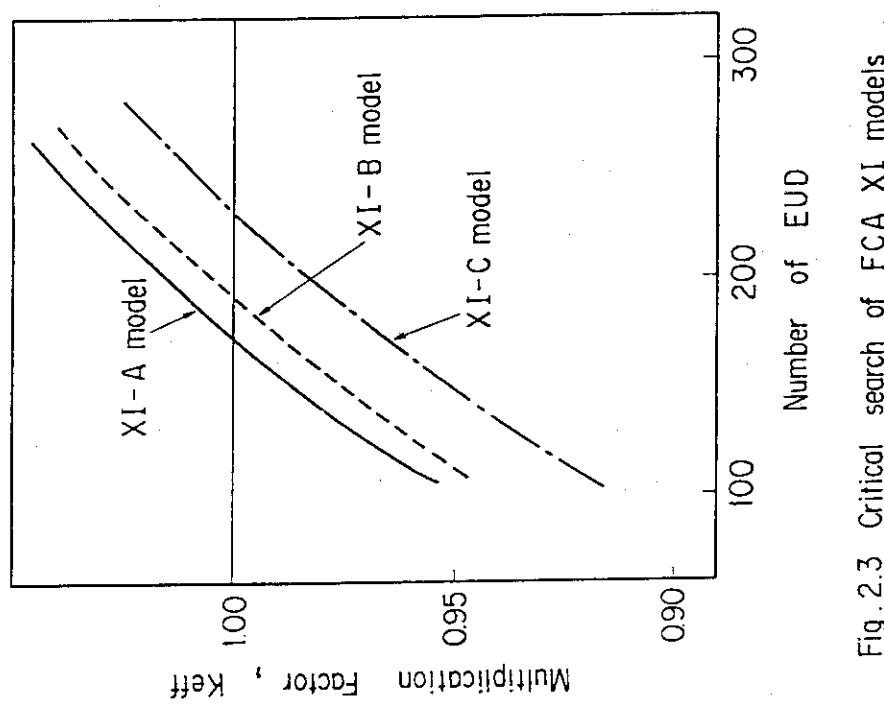


Fig. 2.3 Critical search of FCA XI models

### 3. FCA XI-1集合体の核特性の解析

FCA XI-1集合体は部分的模擬体系であるので、模擬の対象としている大型高速炉と比較して、どのような特性がどの領域の範囲内でどの程度対応しているかあるいは模擬できているかを確認しておく必要がある。特に、テスト領域はFCAにて所有しているプルトニウム燃料の量的制約から等価半径が約30 cmにとどまっているので、周囲のドライバー燃料の影響を強く受けている可能性がある。以下の節では、テスト領域の中央部（等価半径：9.34 cm, テスト領域(1)とする）におけるエネルギースペクトル、反応率分布、反応度価値分布等の諸特性について検討を加えた。

#### 3.1 計算モデル

FCA XI-1集合体の核特性をより明確にするために、FCA XI-1モデルの他に2つのモデル、FCA XI-XモデルおよびFCA XI-Yモデルをとり、それらの核特性を比較検討した。3つのモデル共テスト領域の組成および炉心高さは等しくしてある。XI-Xモデルは、XI-1モデルと比較してテスト領域の体積が3倍になっており、プルトニウム燃料が現在のFCAでの所有量の2～3倍に増えた時に組立が可能となる集合体を想定したものである。また、XI-Yモデルはフルモックアップに近い集合体モデルである。これらの3つのモデルの2次元円柱モデルをFig. 3.1に示す。

テスト領域の中央部における核特性を主として比較検討するため、テスト領域を等価半径が9.34 cmの位置で2領域に分割し、それぞれ、テスト領域(1), テスト領域(2)とした。また、3つのモデルの実効増倍率が等しくなるように、XI-Xモデルではプルトニウムドライバー燃料領域の厚さを、XI-Yモデルではプルトニウムドライバー燃料領域の組成を調整した。

上記の3つのモデルの、テスト領域の体積および燃料装荷量を以下に示す：

		XI-1	XI-X	XI-Y
テスト領域の体積	( $\ell$ )	248	744	5,384
燃料装荷量				
テスト領域	(Pu-fiss. kg)	78	234	1,693
ドライバー領域	(Pu-fiss. kg)	145	564	1,984
	(U-235 kg)	298	—	—
計	(Pu-fiss. + U-235 kg)	521	798	3,677

群定数セットとしてJFS-3-J2<sup>5)</sup>70群セットを用い、セル計算コードSLAROM<sup>6)</sup>を用いてセル平均の実効炉定数を作成し、拡散理論コードCITATION-FBR<sup>4)</sup>、摂動計算コードPERKEY<sup>7)</sup>を使用して核特性を解析した。

### 3.2 エネルギースペクトルおよびスペクトルインデクスに関する考察

テスト領域(1)全体で平均した、中性子束および随伴中性子束のエネルギー分布を、それぞれ、Fig. 3.2, Fig. 3.3 に示す。XI-X モデルと XI-Y モデルとは中性子束、随伴中性子束ともそのエネルギー分布は良く一致している。XI-1 モデルと XI-Y モデルとで中性子束のエネルギー分布について比較すると、20 keV 以上のエネルギーでは XI-1 モデルの方が小さな値をとる。随伴中性子束のエネルギー分布に関しては良く一致している。

次にスペクトルインデクスとして、 $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  の核分裂反応率と  $^{235}\text{U}$  の核分裂反応率との比  $F(\text{Np-237}/\text{U-235})$ ,  $F(\text{U-238}/\text{U-235})$ ,  $F(\text{Pu-239}/\text{U-235})$ ,  $F(\text{Pu-240}/\text{U-235})$ ,  $F(\text{Pu-241}/\text{U-235})$ ，および  $^{238}\text{U}$  の中性子捕獲反応率と  $^{235}\text{U}$  の核分裂反応率との比  $C(\text{U-238})/F(\text{U-235})$  をとり、3つのモデルのそれぞれの体系の中心における値で比較した (Table 3.1)。XI-X モデルと XI-Y モデルとではいずれの反応率比も 0.3 % 程度の相違が見られるのみで良く一致している。XI-1 モデルと XI-Y モデルとを比較すると、 $F(\text{Pu-239}/\text{U-235})$ ,  $F(\text{Pu-240}/\text{U-235})$ ,  $C(\text{U-238})/F(\text{U-235})$  については比較的良好い一致を示すが、 $F(\text{Np-237}/\text{U-235})$ ,  $F(\text{U-238}/\text{U-235})$ ,  $F(\text{Pu-240}/\text{U-235})$  などに核分裂断面積に閾値を持つ核種と  $^{235}\text{U}$  の核分裂率比は、XI-1 モデルの方が 7 ~ 8 % 大きくなる。このことは、XI-1 モデルでは周囲のドライバー領域からの影響がテスト領域の中心にまで及んでおり、より大きなテスト領域をもつ XI-X, XI-Y モデルと比較してスペクトルが硬くなっていることを意味する。このスペクトルの空間的変動を検討するため、 $F(\text{U-238}/\text{U-235})$  を中心にて 1.0 に規格化しテスト領域内の各点について比較した。軸方向に関しては 3 つのモデル共良く一致しており、テスト領域(1)内では中心からの距離による差も小さい。他方、径方向分布については、テスト領域(1)の内側では比較的良好い一致を示すが、中心からの距離が大きくなるに従い XI-1 モデルでは XI-X, XI-Y モデルと比較して  $F(\text{U-238}/\text{U-235})$  が大きくなる (Fig. 3.4)。この傾向は、軸方向に関して異なる 2 点 ( $Z = 0.0 \text{ cm}$ ,  $Z = 25.40 \text{ cm}$ ) を比較してもほぼ同様である。XI-X モデルと XI-Y モデルとの差異は比較的小さく、また、 $F(\text{U-238}/\text{U-235})$  の径方向分布は平坦であり、図に示した領域内でのスペクトルの変動が小さいことが判る。

### 3.3 反応率分布に関する考察

主要核種の軸および径方向の反応率分布を各モデルについて Table 3.2 ~ Table 3.7 に示す。Fig. 3.5, Fig. 3.6 に  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$  の軸方向核分裂率分布をそれぞれ示す。径方向については、 $R = 0.0 \text{ cm}$  および  $R = 9.34 \text{ cm}$  の 2 点をとり、それぞれの位置における軸方向分布を中心面  $Z = 0.0 \text{ cm}$  にて 1.0 に規格化して示してある。XI-1 モデルと XI-Y モデルとを比較すると、炉心と軸方向ブランケットとの境界付近にて、 $^{239}\text{Pu}$  の場合約 10 %,  $^{238}\text{U}$  の場合約 4 % XI-1 モデルの方が小さい。XI-X モデルと XI-Y モデルとでは良く一致している。

Fig. 3.7, Fig. 3.8 に  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$  の径方向核分裂率分布を示す。図中縦線にてテスト領域とドライバー領域との境界を示した。軸方向核分裂率分布とは異なり、径方向核分裂率分布は 3 つのモデル間での相違が著しい。特に、 $^{238}\text{U}$  の核分裂率分布はドライバー領域の中で分布にピークを持つので、その影響を直接に受けている。但し、テスト領域(1)の領域内では、 $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$  とも

3つのモデル間の相違は小さい。

### 3.4 反応度価値分布に関する考察

各モデルの  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$  の軸および径方向の反応度価値分布を Table 3.8 ~ Table 3.11 に示す。これらの反応度価値は拡散理論に基づく摂動計算コード PERKEYにより、各メッシュ点に  $10^{24} \text{n} \cdot \text{cm}^{-3}$  の原子を付加して計算したものである。前節において検討した反応率分布の場合と同じく、テスト領域(1)内での反応度価値の相対的分布は3つのモデル共良い一致を示す。例として、 $^{239}\text{Pu}$  の中心面 ( $Z = 0.0 \text{ cm}$ )における径方向反応度価値分布を、各モデル毎に中心で 1.0 に規格化して、Fig. 3.9 に示す。

### 3.5 中心 Na ボイド反応度効果に関する考察

3.2 節、3.3 節、3.4 節にみてきた如く、XI-1 モデルのテスト領域(1)内では、中性子束および随伴中性子束のエネルギー分布、核分裂反応率分布、反応度価値分布等はフルモックアップ体系を想定した XI-Y モデルにおける分布特性を比較的良く模擬している。しかしながら、テスト領域(1)とテスト領域(2)との境界付近では若干の相違がみられる。これらの分布特性の相違が、FCA XI-1 集合体のテスト領域(1)にて測定される諸特性にどの程度の影響を与えるかを、中心における Na ボイド反応度効果を例にとって検討した。

Fig. 2.2 に示した XI-1, XI-X, XI-Y の各モデルにつき、等価半径が 9.34 cm、高さが 15.24 cm の領域内での Na ボイド反応度効果を摂動法により計算した。体系の大きさが異なり直接の比較は困難であるので、3.4 節にて計算された  $^{239}\text{Pu}$  の中心での反応度価値でそれぞれのモデル毎に規格化した。結果を Table 3.12 に示す。中心での Na ボイド反応度効果を、スペクトル項と漏洩項とに分けた場合、漏洩項は全反応度効果の約 5% 程度であり、かつ、その漏洩項の大部分は軸方向への中性子の洩れに起因する。径方向への中性子の洩れによる反応度効果は無視できる大きさであり、よって、テスト領域(1)の境界近傍において若干の分布特性の相違がみられたとしても、Table 3.12 に示した如く、それらの相違がテスト領域(1)における反応度効果に与える影響は無視できる。

以上の検討により、FCA XI-1 集合体のテスト領域(1)において得られる種々の反応度効果に対する測定データは、それを適当に規格化することにより、フルモックアップ体系にて得られるべきデータと直接対応させることができることを示した。

Table 3.1 Comparison of central reaction rate ratios

	XI-1 model	XI-X model	XI-Y model
F ( $\text{Np-237}/\text{U-235}$ )	0.13853 (8.0%)	0.12838 (0.1%)	0.12830
F ( $\text{U-238}/\text{U-235}$ )	0.01886 (6.9%)	0.01764 (0.0%)	0.01764
F ( $\text{Pu-239}/\text{U-235}$ )	0.88714 (2.7%)	0.86462 (0.2%)	0.86325
F ( $\text{Pu-240}/\text{U-235}$ )	0.17533 (6.7%)	0.16447 (0.1%)	0.16434
F ( $\text{Pu-241}/\text{U-235}$ )	1.28237 (0.5%)	1.27612 (0.1%)	1.27559
C ( $\text{U-238}/\text{F(U-235)}$ )	0.13522 (0.4%)	0.13507 (0.3%)	0.13471

( ) : Figures in parenthesis are relative differences of reaction rate ratios of XI-1 and XI-X models from those of XI-Y model.

Table 3.2-1 Axial reaction rate distribution in XI-1 model

 $R = 0.0 \text{ cm}$ 

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE	8.4788E-04	1.5989E-05	1.1465E-04	7.5219E-04	1.4866E-04	1.0873E-03	1.1746E-04
VALUE							
2.540	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5.080	0.9958	0.9957	0.9958	0.9957	0.9956	0.9957	0.9956
7.620	0.9873	0.9870	0.9873	0.9871	0.9870	0.9873	0.9869
10.160	0.9747	0.9740	0.9747	0.9744	0.9740	0.9746	0.9738
12.700	0.9579	0.9567	0.9580	0.9574	0.9567	0.9578	0.9565
15.240	0.9372	0.9353	0.9373	0.9364	0.9353	0.9371	0.9349
17.780	0.9127	0.9097	0.9128	0.9115	0.9098	0.9125	0.9092
20.320	0.8845	0.8800	0.8847	0.8828	0.8802	0.8842	0.8794
22.860	0.8528	0.8463	0.8531	0.8505	0.8467	0.8524	0.8455
25.400	0.8179	0.8087	0.8184	0.8149	0.8094	0.8174	0.8078
27.940	0.7801	0.7671	0.7808	0.7761	0.7684	0.7794	0.7662
30.480	0.7397	0.7217	0.7406	0.7344	0.7239	0.7388	0.7208
33.020	0.6971	0.6723	0.6984	0.6902	0.6758	0.6959	0.6717
35.560	0.6528	0.6189	0.6544	0.6440	0.6243	0.6513	0.6189
38.100	0.6073	0.5610	0.6094	0.5961	0.5694	0.6054	0.5623
40.640	0.5614	0.4984	0.5639	0.5472	0.5112	0.5590	0.5018
43.180	0.5161	0.4301	0.5188	0.4980	0.4496	0.5130	0.4373
45.720	0.4724	0.3551	0.4751	0.4493	0.3843	0.4684	0.3684
48.260	0.4316	0.2712	0.4340	0.4022	0.3146	0.4265	0.2940
50.800	0.3861	0.2069	0.3881	0.3537	0.2559	0.3804	0.2332
53.340	0.3376	0.1576	0.3391	0.3050	0.2066	0.3318	0.1838
55.880	0.2869	0.1196	0.2880	0.2565	0.1647	0.2815	0.1435
58.420	0.2349	0.0902	0.2356	0.2085	0.1288	0.2302	0.1104
60.960	0.1820	0.0672	0.1823	0.1611	0.0976	0.1783	0.0830
63.500	0.1286	0.0492	0.1285	0.1143	0.0700	0.1260	0.0600
66.040	0.0747	0.0346	0.0741	0.0678	0.0451	0.0735	0.0401

Table 3.2-2 Axial reaction rate distribution in XI-1 model

 $R = 9.34 \text{ cm}$ 

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE VALUE	8.4117E-04	1.6193E-05	1.1358E-04	7.5033E-04	1.5014E-04	1.0797E-03	1.1905E-04
2.540	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5.080	0.9958	0.9956	0.9958	0.9957	0.9956	0.9957	0.9956
7.620	0.9873	0.9870	0.9873	0.9871	0.9869	0.9873	0.9869
10.160	0.9746	0.9739	0.9747	0.9743	0.9739	0.9746	0.9738
12.700	0.9579	0.9567	0.9579	0.9574	0.9567	0.9578	0.9565
15.240	0.9372	0.9352	0.9373	0.9364	0.9352	0.9370	0.9349
17.780	0.9126	0.9095	0.9127	0.9114	0.9097	0.9124	0.9091
20.320	0.8843	0.8798	0.8846	0.8827	0.8800	0.8840	0.8792
22.860	0.8526	0.8461	0.8530	0.8503	0.8465	0.8522	0.8453
25.400	0.8176	0.8083	0.8182	0.8146	0.8091	0.8171	0.8075
27.940	0.7797	0.7667	0.7805	0.7757	0.7680	0.7790	0.7658
30.480	0.7392	0.7211	0.7403	0.7339	0.7233	0.7382	0.7203
33.020	0.6964	0.6715	0.6979	0.6896	0.6750	0.6952	0.6710
35.560	0.6518	0.6178	0.6537	0.6432	0.6234	0.6504	0.6180
38.100	0.6061	0.5598	0.6085	0.5950	0.5683	0.6042	0.5612
40.640	0.5599	0.4969	0.5627	0.5458	0.5099	0.5575	0.5006
43.180	0.5141	0.4287	0.5173	0.4962	0.4480	0.5111	0.4361
45.720	0.4698	0.3538	0.4732	0.4472	0.3827	0.4660	0.3673
48.260	0.4284	0.2706	0.4316	0.3995	0.3132	0.4234	0.2933
50.800	0.3825	0.2065	0.3854	0.3507	0.2546	0.3769	0.2326
53.340	0.3338	0.1572	0.3363	0.3018	0.2052	0.3282	0.1831
55.880	0.2832	0.1191	0.2852	0.2534	0.1633	0.2780	0.1428
58.420	0.2315	0.0896	0.2330	0.2057	0.1274	0.2270	0.1097
60.960	0.1792	0.0667	0.1802	0.1588	0.0964	0.1756	0.0823
63.500	0.1265	0.0486	0.1269	0.1126	0.0691	0.1241	0.0594
66.040	0.0736	0.0342	0.0732	0.0668	0.0445	0.0724	0.0396

Table 3.2-3 Axial reaction rate distribution in XI-1 model

 $R = 18.94 \text{ cm}$ 

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION	NP-237 FISSION	
								1.7366E-04	1.0880E-04
2.540	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5.080	0.9957	0.9956	0.9957	0.9957	0.9956	0.9957	0.9956	0.9957	0.9956
7.620	0.9872	0.9869	0.9873	0.9871	0.9869	0.9872	0.9869	0.9872	0.9869
10.160	0.9745	0.9739	0.9746	0.9743	0.9739	0.9745	0.9739	0.9745	0.9738
12.700	0.9577	0.9566	0.9578	0.9573	0.9566	0.9576	0.9566	0.9576	0.9564
15.240	0.9369	0.9350	0.9371	0.9362	0.9351	0.9368	0.9347	0.9368	0.9347
17.780	0.9122	0.9093	0.9125	0.9111	0.9094	0.9120	0.9089	0.9120	0.9089
20.320	0.8838	0.8794	0.8842	0.8822	0.8797	0.8835	0.8789	0.8835	0.8789
22.860	0.8519	0.8455	0.8525	0.8497	0.8460	0.8515	0.8449	0.8515	0.8449
25.400	0.8166	0.8076	0.8175	0.8138	0.8084	0.8161	0.8069	0.8161	0.8069
27.940	0.7783	0.7656	0.7795	0.7746	0.7670	0.7777	0.7650	0.7777	0.7650
30.480	0.7373	0.7196	0.7390	0.7324	0.7219	0.7365	0.7191	0.7365	0.7191
33.020	0.6940	0.6695	0.6961	0.6876	0.6731	0.6929	0.6694	0.6929	0.6694
35.560	0.6486	0.6151	0.6514	0.6405	0.6207	0.6473	0.6158	0.6473	0.6158
38.100	0.6018	0.5562	0.6054	0.5914	0.5648	0.6002	0.5584	0.6002	0.5584
40.640	0.5543	0.4924	0.5586	0.5411	0.5054	0.5521	0.4971	0.5521	0.4971
43.180	0.5067	0.4233	0.5118	0.4900	0.4425	0.5040	0.4318	0.5040	0.4318
45.720	0.4602	0.3482	0.4660	0.4391	0.3763	0.4567	0.3626	0.3763	0.3626
48.260	0.4160	0.2660	0.4224	0.3892	0.3066	0.4115	0.2891	0.3066	0.2891
50.800	0.3683	0.2018	0.3747	0.3388	0.2472	0.3634	0.2280	0.3634	0.2280
53.340	0.3188	0.1519	0.3248	0.2892	0.1973	0.3138	0.1781	0.3138	0.1781
55.880	0.2685	0.1136	0.2739	0.2409	0.1553	0.2638	0.1374	0.2638	0.1374
58.420	0.2181	0.0842	0.2226	0.1942	0.1199	0.2140	0.1044	0.2140	0.1044
60.960	0.1680	0.0617	0.1713	0.1491	0.0898	0.1648	0.0775	0.1648	0.0775
63.500	0.1183	0.0444	0.1204	0.1054	0.0639	0.1161	0.0554	0.1161	0.0554
66.040	0.0689	0.0310	0.0695	0.0627	0.0411	0.0678	0.0367	0.0678	0.0367

Table 3.3-1 Radial reaction rate distribution in XI-1 model

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	$Z = 0.0 \text{ cm}$		NP-237 FISSION	NP-237 FISSION			
							NORMALIZE VALUE	8.4788E-04	1.5988E-05	1.1465E-04	7.5219E-04	1.4866E-04	1.0873E-03
2-199	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3-110	0.9995	1.0008	0.9994	0.9999	0.9999	1.0006	0.9996	1.0009	0.9996	1.0009	0.9996	1.0009	1.0009
5-391	0.9984	1.0025	0.9981	0.9995	0.9995	1.0020	0.9986	1.0027	0.9986	1.0027	0.9986	1.0027	1.0027
6-961	0.9964	1.0058	0.9957	0.9989	0.9989	1.0046	0.9968	1.0063	0.9968	1.0063	0.9968	1.0063	1.0063
8-237	0.9942	1.0092	0.9932	0.9982	0.9982	1.0072	0.9949	1.0098	0.9949	1.0098	0.9949	1.0098	1.0098
9-340	0.9921	1.0127	0.9906	0.9975	0.9975	1.0099	0.9930	1.0135	0.9930	1.0135	0.9930	1.0135	1.0135
11-897	0.9880	1.0193	0.9858	0.9962	0.9962	1.0150	0.9894	1.0203	0.9894	1.0203	0.9894	1.0203	1.0203
13-994	0.9811	1.0329	0.9776	0.9938	0.9938	1.0244	0.9833	1.0330	0.9833	1.0330	0.9833	1.0330	1.0330
15-815	0.9737	1.0487	0.9688	0.9911	0.9911	1.0350	0.9766	1.0471	0.9766	1.0471	0.9766	1.0471	1.0471
17-448	0.9656	1.0664	0.9592	0.9881	0.9881	1.0464	0.9693	1.0623	0.9693	1.0623	0.9693	1.0623	1.0623
18-940	0.9569	1.0861	0.9489	0.9847	0.9847	1.0587	0.9615	1.0787	0.9615	1.0787	0.9615	1.0787	1.0787
21-439	0.9439	1.1166	0.9335	0.9794	0.9794	1.0773	0.9497	1.1033	0.9497	1.1033	0.9497	1.1033	1.1033
23-675	0.9245	1.1638	0.9105	0.9709	0.9709	1.1046	0.9320	1.1395	0.9320	1.1395	0.9320	1.1395	1.1395
25-718	0.9028	1.2187	0.8849	0.9609	0.9609	1.1349	0.9122	1.1795	0.9122	1.1795	0.9122	1.1795	1.1795
27-610	0.8788	1.2822	0.8565	0.9494	0.9494	1.1682	0.8902	1.2235	0.8902	1.2235	0.8902	1.2235	1.2235
29-380	0.8523	1.3552	0.8254	0.9362	0.9362	1.2049	0.8659	1.2716	0.8659	1.2716	0.8659	1.2716	1.2716
30-830	0.8243	1.4361	0.7924	0.9219	0.9219	1.2437	0.8400	1.3223	0.8400	1.3223	0.8400	1.3223	1.3223
32-215	0.7984	1.4789	0.7629	0.9052	0.9052	1.2610	0.8156	1.3475	0.8156	1.3475	0.8156	1.3475	1.3475
33-543	0.7728	1.4948	0.7347	0.8858	0.8858	1.2627	0.7910	1.3543	0.7910	1.3543	0.7910	1.3543	1.3543
34-820	0.7469	1.4899	0.7069	0.8639	0.8639	1.2519	0.7657	1.3464	0.7657	1.3464	0.7657	1.3464	1.3464
36-185	0.7195	1.4683	0.6781	0.8390	0.8390	1.2308	0.7388	1.3266	0.7388	1.3266	0.7388	1.3266	1.3266
37-500	0.6922	1.4322	0.6506	0.8125	0.8125	1.2003	0.7117	1.2957	0.7117	1.2957	0.7117	1.2957	1.2957
38-770	0.6653	1.3845	0.6244	0.7849	0.7849	1.1624	0.6848	1.2559	0.6848	1.2559	0.6848	1.2559	1.2559
40-000	0.6385	1.3274	0.5991	0.7563	0.7563	1.1184	0.6578	1.2088	0.6578	1.2088	0.6578	1.2088	1.2088
42-126	0.5995	1.2308	0.5635	0.7129	0.7129	1.0454	0.6183	1.1297	0.6183	1.1297	0.6183	1.1297	1.1297
44-149	0.5498	1.0896	0.5190	0.6545	0.6545	0.9394	0.5674	1.0135	0.5674	1.0135	0.5674	1.0135	1.0135
46-083	0.5015	0.9379	0.4764	0.5961	0.5961	0.8277	0.5177	0.8902	0.5177	0.8902	0.5177	0.8902	0.8902
47-940	0.4545	0.7760	0.4352	0.5383	0.5383	0.7116	0.4692	0.7619	0.4692	0.7619	0.4692	0.7619	0.7619
50-406	0.3849	0.5121	0.3737	0.4523	0.4523	0.5356	0.3970	0.5681	0.3970	0.5681	0.3970	0.5681	0.5681
52-757	0.3086	0.3111	0.3037	0.3595	0.3595	0.3799	0.3181	0.3979	0.3181	0.3979	0.3181	0.3979	0.3979
55-007	0.2474	0.1944	0.2462	0.2860	0.2860	0.2741	0.2548	0.2831	0.2548	0.2831	0.2548	0.2831	0.2831
57-169	0.1983	0.1246	0.1991	0.2275	0.2275	0.2005	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041
59-252	0.1587	0.0816	0.1606	0.1809	0.1809	0.1483	0.1632	0.1487	0.1632	0.1487	0.1632	0.1487	0.1487
61-265	0.1265	0.0545	0.1289	0.1435	0.1435	0.1106	0.1301	0.1093	0.1301	0.1093	0.1301	0.1093	0.1093
63-213	0.1001	0.0371	0.1025	0.1130	0.1130	0.0829	0.1029	0.0808	0.1029	0.0808	0.1029	0.0808	0.0808
65-103	0.0782	0.0255	0.0804	0.0880	0.0880	0.0620	0.0804	0.0598	0.0804	0.0598	0.0804	0.0598	0.0598
66-940	0.0597	0.0177	0.0615	0.0671	0.0671	0.0460	0.0614	0.0440	0.0614	0.0440	0.0614	0.0440	0.0440
68-727	0.0438	0.0124	0.0451	0.0493	0.0493	0.0334	0.0451	0.0319	0.0451	0.0319	0.0451	0.0319	0.0319
70-470	0.0299	0.0085	0.0305	0.0338	0.0338	0.0232	0.0307	0.0223	0.0307	0.0223	0.0307	0.0223	0.0223
72-170	0.0173	0.0058	0.0199	0.0173	0.0173	0.0144	0.0178	0.0144	0.0178	0.0144	0.0178	0.0144	0.0144

Table 3.3-2 Radial reaction rate distribution in XI-1 model

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	$Z = 15.24 \text{ cm}$			
				PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE	7.9466E-04	1.4954E-05	1.0747E-04	7.0438E-04	1.3904E-04	1.0189E-03	1.0982E-04
VALUE							
2.199	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3.110	0.9995	1.0008	0.9994	0.9998	1.0006	0.9995	1.0009
5.391	0.9984	1.0025	0.9981	0.9995	1.0020	0.9986	1.0027
6.961	0.9963	1.0058	0.9957	0.9989	1.0046	0.9967	1.0062
8.237	0.9942	1.0091	0.9931	0.9982	1.0072	0.9949	1.0098
9.340	0.9920	1.0126	0.9906	0.9975	1.0099	0.9929	1.0134
11.897	0.9879	1.0192	0.9857	0.9961	1.0148	0.9893	1.0202
13.994	0.9810	1.0327	0.9775	0.9937	1.0243	0.9831	1.0329
15.815	0.9734	1.0484	0.9686	0.9909	1.0348	0.9763	1.0469
17.448	0.9653	1.0662	0.9590	0.9879	1.0462	0.9691	1.0621
18.940	0.9566	1.0858	0.9487	0.9844	1.0585	0.9612	1.0785
21.439	0.9435	1.1162	0.9332	0.9790	1.0769	0.9493	1.1030
23.675	0.9240	1.1634	0.9101	0.9704	1.1042	0.9316	1.1592
25.718	0.9022	1.2184	0.8844	0.9604	1.1345	0.9117	1.1793
27.610	0.8781	1.2819	0.8560	0.9488	1.1679	0.8895	1.2233
29.380	0.8516	1.3548	0.8248	0.9356	1.2045	0.8651	1.2715
30.830	0.8234	1.4358	0.7917	0.9211	1.2433	0.8392	1.3222
32.215	0.7975	1.4786	0.7622	0.9044	1.2607	0.8147	1.3475
33.543	0.7718	1.4946	0.7340	0.8850	1.2623	0.7901	1.3542
34.820	0.7459	1.4896	0.7061	0.8630	1.2515	0.7648	1.3463
36.185	0.7185	1.4680	0.6773	0.8381	1.2304	0.7378	1.3265
37.500	0.6912	1.4319	0.6498	0.8116	1.1999	0.7107	1.2955
38.770	0.6643	1.3842	0.6236	0.7840	1.1620	0.6838	1.2557
40.000	0.6375	1.3271	0.5983	0.7554	1.1180	0.6568	1.2087
42.126	0.5985	1.2305	0.5626	0.7120	1.0450	0.6173	1.1296
44.149	0.5488	1.0893	0.5182	0.6536	0.9390	0.5664	1.0133
46.083	0.5006	0.9376	0.4756	0.5953	0.8273	0.5168	0.8901
47.940	0.4536	0.7758	0.4344	0.5375	0.7112	0.4683	0.7617
50.406	0.3841	0.5119	0.3729	0.4516	0.5352	0.3961	0.5679
52.757	0.3079	0.3110	0.3030	0.3589	0.3796	0.3173	0.3977
55.007	0.2468	0.1943	0.2456	0.2854	0.2738	0.2542	0.2829
57.169	0.1977	0.1245	0.1986	0.2271	0.203	0.2036	0.2039
59.252	0.1582	0.0815	0.1602	0.1805	0.1481	0.1628	0.1486
61.265	0.1261	0.0545	0.1285	0.1431	0.1105	0.1297	0.1092
63.213	0.0998	0.0370	0.1022	0.1128	0.0827	0.1026	0.0807
65.103	0.0780	0.0255	0.0801	0.0878	0.0619	0.0801	0.0597
66.940	0.0595	0.0177	0.0613	0.0669	0.0459	0.0612	0.0439
68.727	0.0437	0.0123	0.0449	0.0492	0.0333	0.0449	0.0318
70.470	0.0298	0.0085	0.0304	0.0337	0.0232	0.0306	0.0222
72.170	0.0172	0.0057	0.0173	0.0198	0.0146	0.0178	0.0144

Table 3.3-3 Radial reaction rate distribution in XI-1 model

$Z = 25.40 \text{ cm}$							
MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE VALUE	6.9350E-04	1.2930E-05	9.3834E-05	6.1293E-04	1.2033E-04	8.8874E-04	9.4884E-05
2.199	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3.110	0.9995	1.0008	0.9994	0.9998	1.0006	0.9995	1.0008
5.391	0.9983	1.0024	0.9981	0.9995	1.0019	0.9985	1.0026
6.961	0.9962	1.0056	0.9956	0.9988	1.0044	0.9966	1.0061
8.237	0.9940	1.0089	0.9930	0.9980	1.0070	0.9947	1.0096
9.340	0.9917	1.0123	0.9904	0.9972	1.0095	0.9927	1.0131
11.897	0.9875	1.0187	0.9854	0.9957	1.0144	0.9889	1.0198
13.994	0.9804	1.0320	0.9771	0.9931	1.0236	0.9825	1.0323
15.815	0.9726	1.0476	0.9680	0.9902	1.0339	0.9756	1.0462
17.448	0.9643	1.0651	0.9583	0.9870	1.0452	0.9681	1.0613
18.940	0.9554	1.0846	0.9478	0.9834	1.0574	0.9600	1.0775
21.439	0.9420	1.1149	0.9321	0.9777	1.0757	0.9479	1.1020
23.675	0.9222	1.1620	0.9088	0.9689	1.1028	0.9298	1.1381
25.718	0.9001	1.2170	0.8829	0.9586	1.1330	0.9096	1.1782
27.610	0.8757	1.2806	0.8543	0.9467	1.1663	0.8872	1.2224
29.380	0.8489	1.3538	0.8228	0.9333	1.2030	0.8626	1.2708
30.830	0.8205	1.4351	0.7896	0.9186	1.2419	0.8364	1.3218
32.215	0.7944	1.4781	0.7599	0.9017	1.2593	0.8117	1.3472
33.543	0.7686	1.4941	0.7316	0.8822	1.2609	0.7869	1.3540
34.820	0.7426	1.4892	0.7037	0.8602	1.2501	0.7616	1.3461
36.185	0.7152	1.4675	0.6748	0.8352	1.2289	0.7345	1.3262
37.500	0.6878	1.4313	0.6471	0.8086	1.1983	0.7074	1.2953
38.770	0.6609	1.3837	0.6209	0.7810	1.1604	0.6804	1.2554
40.000	0.6341	1.3265	0.5956	0.7524	1.1164	0.6535	1.2084
42.126	0.5950	1.2299	0.5599	0.7090	1.0435	0.6139	1.1292
44.149	0.5454	1.0887	0.5154	0.6506	0.9375	0.5631	1.0129
46.083	0.4973	0.9370	0.4728	0.5924	0.8258	0.5136	0.8895
47.940	0.4505	0.7751	0.4317	0.5348	0.7098	0.4652	0.7611
59.252	0.1567	0.5113	0.3704	0.4490	0.5339	0.3933	0.5672
52.757	0.3054	0.3104	0.3007	0.3567	0.3785	0.3148	0.3970
55.007	0.2446	0.1938	0.2435	0.2835	0.2728	0.2520	0.2822
57.169	0.1959	0.1241	0.1968	0.2254	0.1995	0.2017	0.2033
59.252	0.1567	0.0813	0.1587	0.1791	0.1475	0.1612	0.1480
61.265	0.1248	0.0543	0.1272	0.1420	0.1099	0.1284	0.1088
63.213	0.0987	0.0369	0.1012	0.1118	0.0823	0.1016	0.0803
65.103	0.0771	0.0254	0.0793	0.0870	0.0616	0.0793	0.0594
66.940	0.0589	0.0176	0.0606	0.0664	0.0457	0.0606	0.0437
68.727	0.0432	0.0123	0.0445	0.0487	0.0331	0.0444	0.0316
70.470	0.0294	0.0085	0.0301	0.0334	0.0230	0.0303	0.0221
72.170	0.0057	0.0171	0.0197	0.0145	0.0176	0.0143	0.0143

Table 3.4-1 Axial reaction rate distribution in XI-X model

 $\text{--- } R = 0.0 \text{ cm }$ 

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE VALUE	4.0826E-04	7.2001E-06	5.5145E-05	3.5299E-04	6.7147E-05	5.2099E-04	5.2411E-05
2.540	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5.080	0.9958	0.9958	0.9958	0.9958	0.9958	0.9958	0.9957
7.620	0.9876	0.9873	0.9875	0.9874	0.9873	0.9875	0.9872
10.160	0.9752	0.9747	0.9751	0.9749	0.9746	0.9751	0.9745
12.700	0.9588	0.9579	0.9587	0.9584	0.9578	0.9587	0.9576
15.240	0.9386	0.9370	0.9384	0.9378	0.9369	0.9384	0.9366
17.780	0.9146	0.9120	0.9144	0.9135	0.9120	0.9143	0.9116
20.320	0.8870	0.8831	0.8867	0.8854	0.8832	0.8867	0.8825
22.860	0.8560	0.8503	0.8558	0.8538	0.8506	0.8556	0.8495
25.400	0.8219	0.8137	0.8217	0.8189	0.8142	0.8214	0.8127
27.940	0.7850	0.7731	0.7848	0.7810	0.7741	0.7843	0.7721
30.480	0.7456	0.7287	0.7454	0.7404	0.7305	0.7447	0.7276
33.020	0.7042	0.6803	0.7040	0.6973	0.6834	0.7030	0.6794
35.560	0.6612	0.6277	0.6610	0.6522	0.6328	0.6596	0.6274
38.100	0.6173	0.5705	0.6170	0.6056	0.5787	0.6152	0.5713
40.640	0.5732	0.5080	0.5728	0.5582	0.5210	0.5706	0.5110
43.180	0.5300	0.4393	0.5292	0.5106	0.4594	0.5266	0.4461
45.720	0.4890	0.3629	0.4872	0.4640	0.3937	0.4846	0.3761
48.260	0.4518	0.2764	0.4484	0.4195	0.3229	0.4460	0.2997
50.800	0.4081	0.2104	0.4036	0.3723	0.2634	0.4016	0.2375
53.340	0.3598	0.1601	0.3547	0.3237	0.2132	0.3532	0.1872
55.880	0.3080	0.1215	0.3028	0.2741	0.1706	0.3018	0.1462
58.420	0.2536	0.0918	0.2487	0.2241	0.1338	0.2482	0.1127
60.960	0.1973	0.0686	0.1930	0.1738	0.1017	0.1929	0.0849
63.500	0.1395	0.0502	0.1361	0.1234	0.0730	0.1366	0.0615
66.040	0.0808	0.0354	0.0783	0.0729	0.0469	0.0793	0.0411

Table 3.4-2 Axial reaction rate distribution in XI-X model  
— R = 9.34 cm —

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE	4.1031E-04	7.2099E-06	5.5438E-05	3.5489E-04	6.7389E-05	5.2366E-04	5.2587E-05
VALUE							
2.540	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5.080	0.9958	0.9958	0.9958	0.9958	0.9958	0.9958	0.9957
7.620	0.9875	0.9873	0.9875	0.9874	0.9873	0.9875	0.9872
10.160	0.9752	0.9746	0.9751	0.9749	0.9746	0.9751	0.9745
12.700	0.9588	0.9578	0.9587	0.9583	0.9578	0.9587	0.9576
15.240	0.9385	0.9369	0.9384	0.9378	0.9369	0.9384	0.9366
17.780	0.9145	0.9120	0.9143	0.9134	0.9120	0.9143	0.9115
20.320	0.8869	0.8830	0.8867	0.8853	0.8831	0.8866	0.8824
22.860	0.8559	0.8502	0.8557	0.8537	0.8504	0.8555	0.8494
25.400	0.8218	0.8135	0.8216	0.8188	0.8140	0.8213	0.8125
27.940	0.7849	0.7729	0.7847	0.7809	0.7740	0.7842	0.7718
30.480	0.7455	0.7285	0.7453	0.7402	0.7303	0.7445	0.7274
33.020	0.7040	0.6800	0.7039	0.6971	0.6832	0.7028	0.6791
35.560	0.6610	0.6274	0.6608	0.6520	0.6326	0.6594	0.6270
38.100	0.6170	0.5702	0.6169	0.6054	0.5784	0.6150	0.5710
40.640	0.5729	0.5077	0.5726	0.5579	0.5207	0.5703	0.5107
43.180	0.5296	0.4391	0.5289	0.5103	0.4592	0.5263	0.4459
45.720	0.4885	0.3628	0.4869	0.4636	0.3936	0.4841	0.3760
48.260	0.4511	0.2766	0.4479	0.4190	0.3230	0.4453	0.2998
50.800	0.4073	0.2108	0.4031	0.3718	0.2635	0.4009	0.2378
53.340	0.3590	0.1605	0.3541	0.3231	0.2134	0.3524	0.1875
55.880	0.3072	0.1219	0.3022	0.2736	0.1708	0.3011	0.1465
58.420	0.2529	0.0921	0.2482	0.2236	0.1340	0.2475	0.1130
60.960	0.1967	0.0688	0.1926	0.1734	0.1018	0.1924	0.0852
63.500	0.1391	0.0504	0.1359	0.1232	0.0731	0.1362	0.0616
66.040	0.0806	0.0356	0.0782	0.0727	0.0470	0.0791	0.0412

Table 3.4-3 Axial reaction rate distribution in XI-X model  
 — R = 18.94 cm —

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE VALUE	4.1639E-04	7.3288E-06	5.6293E-05	3.6127E-04	6.8688E-05	5.3177E-04	5.3648E-05
2.540	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5.080	0.9958	0.9957	0.9958	0.9958	0.9957	0.9958	0.9957
7.620	0.9875	0.9873	0.9875	0.9874	0.9872	0.9875	0.9872
10.160	0.9751	0.9746	0.9751	0.9749	0.9745	0.9751	0.9744
12.700	0.9587	0.9577	0.9587	0.9583	0.9577	0.9586	0.9575
15.240	0.9384	0.9367	0.9383	0.9377	0.9367	0.9383	0.9364
17.780	0.9144	0.9117	0.9142	0.9132	0.9117	0.9141	0.9112
20.320	0.8867	0.8827	0.8866	0.8851	0.8828	0.8864	0.8820
22.860	0.8557	0.8497	0.8555	0.8534	0.8500	0.8553	0.8489
25.400	0.8215	0.8129	0.8214	0.8185	0.8135	0.8209	0.8119
27.940	0.7845	0.7722	0.7844	0.7804	0.7733	0.7837	0.7711
30.480	0.7450	0.7276	0.7449	0.7396	0.7295	0.7440	0.7265
33.020	0.7034	0.6790	0.7034	0.6964	0.6823	0.7021	0.6782
35.560	0.6602	0.6263	0.6603	0.6512	0.6316	0.6586	0.6260
38.100	0.6160	0.5689	0.6162	0.6044	0.5773	0.6140	0.5699
40.640	0.5716	0.5065	0.5717	0.5567	0.5196	0.5690	0.5096
43.180	0.5280	0.4380	0.5278	0.5089	0.4581	0.5247	0.4449
45.720	0.4865	0.3620	0.4855	0.4619	0.3926	0.4822	0.3753
48.260	0.4484	0.2765	0.4461	0.4169	0.3224	0.4428	0.2996
50.800	0.4044	0.2110	0.4011	0.3694	0.2632	0.3980	0.2378
53.340	0.3560	0.1608	0.3521	0.3207	0.2132	0.3495	0.1876
55.880	0.3043	0.1223	0.3003	0.2713	0.1705	0.2983	0.1467
58.420	0.2503	0.0924	0.2464	0.2216	0.1338	0.2450	0.1131
60.960	0.1946	0.0691	0.1912	0.1718	0.1017	0.1904	0.0853
63.500	0.1376	0.0506	0.1348	0.1220	0.0730	0.1347	0.0617
66.040	0.0797	0.0357	0.0776	0.0721	0.0469	0.0783	0.0413

Table 3.5-1 Radial reaction rate distribution in XI-X model

 $Z = 0.0 \text{ cm}$ 

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	U-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE VALUE	4.0826E-04	7.2001E-06	5.5145E-05	3.5299E-04	6.7147E-05	5.2099E-04	5.2411E-05
2.199	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3.110	1.0003	1.0001	1.0004	1.0004	1.0002	1.0003	1.0002
5.391	1.0011	1.0003	1.0011	1.0011	1.0008	1.0011	1.0007
6.961	1.0024	1.0007	1.0025	1.0026	1.0017	1.0024	1.0016
8.237	1.0037	1.0011	1.0039	1.0040	1.0027	1.0038	1.0025
9.340	1.0050	1.0014	1.0053	1.0054	1.0036	1.0051	1.0034
11.897	1.0074	1.0019	1.0078	1.0079	1.0053	1.0075	1.0049
13.994	1.0108	1.0048	1.0113	1.0119	1.0091	1.0110	1.0088
15.815	1.0140	1.0087	1.0147	1.0158	1.0134	1.0144	1.0134
17.448	1.0170	1.0131	1.0178	1.0197	1.0181	1.0176	1.0183
18.940	1.0199	1.0179	1.0208	1.0235	1.0230	1.0207	1.0236
21.439	1.0238	1.0250	1.0248	1.0287	1.0301	1.0248	1.0313
23.675	1.0284	1.0352	1.0293	1.0354	1.0400	1.0298	1.0423
25.718	1.0324	1.0462	1.0332	1.0418	1.0504	1.0342	1.0540
27.610	1.0358	1.0580	1.0364	1.0478	1.0612	1.0381	1.0664
29.380	1.0385	1.0705	1.0388	1.0535	1.0726	1.0414	1.0795
32.848	1.0417	1.0914	1.0413	1.0616	1.0909	1.0454	1.1009
35.983	1.0429	1.1252	1.0407	1.0709	1.1189	1.0480	1.1345
38.866	1.0403	1.1652	1.0358	1.0778	1.1501	1.0470	1.1727
41.550	1.0337	1.2130	1.0261	1.0822	1.1851	1.0422	1.2162
44.071	1.0227	1.2704	1.0111	1.0837	1.2245	1.0332	1.2660
46.455	1.0070	1.3398	0.9903	1.0821	1.2692	1.0196	1.3230
48.723	0.9860	1.4236	0.9634	1.0769	1.3198	1.0011	1.3880
50.890	0.9595	1.5248	0.9298	1.0679	1.3773	0.9773	1.4622
54.078	0.9167	1.6792	0.8767	1.0497	1.4587	0.9383	1.5678
57.088	0.8684	1.7347	0.8223	1.0159	1.4774	0.8923	1.5996
59.947	0.8183	1.7000	0.7707	0.9696	1.4381	0.8428	1.5626
62.676	0.7639	1.5998	0.7183	0.9117	1.3555	0.7880	1.4744
65.291	0.7048	1.4490	0.6637	0.8442	1.2395	0.7277	1.3474
67.806	0.6412	1.2568	0.6065	0.7689	1.0976	0.6626	1.1904
70.230	0.5740	1.0283	0.5469	0.6880	0.9353	0.5935	1.0102
72.559	0.4846	0.6824	0.4683	0.5787	0.7072	0.5011	0.7572

Table 3.5-2 Radial reaction rate distribution in XI-X model  
— Z = 15.24 cm —

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE VALUE	3.8317E-04	6.7462E-06	5.1749E-05	3.3104E-04	6.2912E-05	4.88891E-04	4.9090E-05
2.199	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3.110	1.0003	1.0001	1.0004	1.0004	1.0002	1.0003	1.0002
5.391	1.0011	1.0003	1.0011	1.0011	1.0008	1.0011	1.0007
6.961	1.0024	1.0007	1.0025	1.0025	1.0017	1.0024	1.0016
8.237	1.0037	1.0010	1.0039	1.0039	1.0026	1.0038	1.0024
9.340	1.0050	1.0013	1.0053	1.0053	1.0036	1.0051	1.0033
11.897	1.0073	1.0018	1.0078	1.0079	1.0052	1.0075	1.0048
13.994	1.0107	1.0047	1.0113	1.0118	1.0090	1.0110	1.0087
15.815	1.0139	1.0085	1.0146	1.0157	1.0133	1.0143	1.0132
17.448	1.0169	1.0129	1.0178	1.0195	1.0179	1.0175	1.0181
18.940	1.0198	1.0176	1.0207	1.0233	1.0227	1.0205	1.0233
21.439	1.0236	1.0247	1.0246	1.0285	1.0298	1.0246	1.0310
23.675	1.0282	1.0348	1.0292	1.0351	1.0396	1.0296	1.0419
25.718	1.0321	1.0457	1.0330	1.0415	1.0499	1.0340	1.0535
27.610	1.0355	1.0574	1.0362	1.0474	1.0607	1.0378	1.0658
29.380	1.0382	1.0699	1.0386	1.0531	1.0719	1.0410	1.0788
32.848	1.0413	1.0906	1.0410	1.0611	1.0901	1.0450	1.1001
35.983	1.0423	1.1242	1.0404	1.0703	1.1180	1.0474	1.1335
38.866	1.0397	1.1640	1.0355	1.0771	1.1491	1.0464	1.1715
41.550	1.0330	1.2116	1.0257	1.0814	1.1839	1.0415	1.2150
44.071	1.0219	1.2689	1.0106	1.0828	1.2232	1.0324	1.2646
46.455	1.0061	1.3382	0.9898	1.0811	1.2677	1.0187	1.3215
48.723	0.9850	1.4218	0.9628	1.0759	1.3183	1.0001	1.3864
50.890	0.9584	1.5229	0.9292	1.0667	1.3757	0.9762	1.4605
54.078	0.9154	1.6772	0.8760	1.0485	1.4570	0.9370	1.5660
57.088	0.8671	1.7325	0.8215	1.0145	1.4755	0.8909	1.5978
59.947	0.8170	1.6978	0.7698	0.9682	1.4362	0.8415	1.5608
62.676	0.7626	1.5977	0.7174	0.9103	1.3536	0.7866	1.4727
65.291	0.7034	1.4470	0.6627	0.8428	1.2377	0.7264	1.3457
67.806	0.6399	1.2550	0.6056	0.7676	1.0960	0.6613	1.1889
70.4230	0.5727	1.0268	0.5460	0.6867	0.9338	0.5922	1.0088
72.559	0.4834	0.6813	0.4674	0.5775	0.7060	0.4999	0.7561

Table 3.5-3 Radial reaction rate distribution in XI-X model

 $z = 25.40 \text{ cm}$ 

MESH NORMALIZE VALUE	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
3.3555E-04	5.8585E-06	4.5310E-05	2.8908E-04	5.4669E-05	4.2793E-04	4.2594E-05	
2.199	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3.110	1.0003	1.0001	1.0004	1.0004	1.0002	1.0003	1.0002
5.391	1.0010	1.0003	1.0011	1.0011	1.0007	1.0011	1.0007
6.961	1.0024	1.0006	1.0025	1.0025	1.0016	1.0024	1.0015
8.237	1.0036	1.0009	1.0039	1.0039	1.0025	1.0037	1.0023
9.340	1.0049	1.0011	1.0052	1.0053	1.0034	1.0050	1.0031
11.897	1.0072	1.0015	1.0077	1.0077	1.0050	1.0074	1.0046
13.994	1.0105	1.0043	1.0112	1.0116	1.0087	1.0108	1.0083
15.815	1.0136	1.0080	1.0145	1.0154	1.0129	1.0141	1.0127
17.448	1.0166	1.0123	1.0175	1.0192	1.0174	1.0172	1.0175
18.940	1.0194	1.0169	1.0205	1.0229	1.0221	1.0202	1.0226
21.439	1.0231	1.0238	1.0243	1.0280	1.0290	1.0241	1.0301
23.675	1.0275	1.0337	1.0288	1.0345	1.0386	1.0289	1.0408
25.718	1.0313	1.0443	1.0326	1.0406	1.0487	1.0332	1.0522
27.610	1.0345	1.0558	1.0356	1.0465	1.0593	1.0369	1.0642
29.380	1.0371	1.0680	1.0379	1.0519	1.0703	1.0399	1.0770
32.848	1.0400	1.0883	1.0402	1.0597	1.081	1.0437	1.0979
35.983	1.0407	1.1214	1.0394	1.0685	1.1155	1.0458	1.1309
38.866	1.0377	1.1607	1.0343	1.0751	1.1461	1.0444	1.1684
41.550	1.0307	1.2077	1.0243	1.0790	1.1805	1.0392	1.2114
44.071	1.0193	1.2646	1.0090	1.0802	1.2194	1.0297	1.2607
46.455	1.0031	1.3334	0.9881	1.0781	1.2635	1.0158	1.3173
48.723	0.9817	1.4168	0.9609	1.0726	1.3138	0.9969	1.3821
50.890	0.9547	1.5177	0.9270	1.0632	1.3710	0.9726	1.4561
54.078	0.9114	1.6719	0.8736	1.0445	1.4521	0.9331	1.5617
57.088	0.8628	1.7271	0.8189	1.0103	1.4704	0.8867	1.5934
59.947	0.8125	1.6923	0.7670	0.9638	1.4311	0.8371	1.5564
62.676	0.7581	1.5923	0.7144	0.9059	1.3485	0.7822	1.4682
65.291	0.6989	1.4419	0.6597	0.8384	1.2328	0.7219	1.3414
67.806	0.6355	1.2503	0.6025	0.7633	1.0913	0.6569	1.1848
70.230	0.5685	1.0227	0.5429	0.6826	0.9296	0.5880	1.0051
72.559	0.4795	0.6784	0.4643	0.5737	0.7025	0.4960	0.7529

Table 3.6-1 Axial reaction rate distribution in XI-Y model  
— R = 0.0 cm —

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	CAPTURE	U-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE VALUE	3.2204E-05	5.6822E-07	4.3381E-06	2.7800E-05	5.2923E-06	4.1079E-05	4.1319E-06
2.540	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5.080	0.9959	0.9958	0.9959	0.9958	0.9958	0.9958	0.9958
7.620	0.9876	0.9874	0.9876	0.9875	0.9874	0.9876	0.9874
10.160	0.9754	0.9749	0.9753	0.9751	0.9748	0.9753	0.9748
12.700	0.9591	0.9582	0.9590	0.9587	0.9582	0.9590	0.9580
15.240	0.9390	0.9375	0.9388	0.9383	0.9374	0.9388	0.9372
17.780	0.9151	0.9128	0.9149	0.9141	0.9127	0.9149	0.9123
20.320	0.8877	0.8841	0.8874	0.8862	0.8841	0.8874	0.8835
22.860	0.8569	0.8515	0.8566	0.8548	0.8517	0.8566	0.8507
25.400	0.8231	0.8151	0.8227	0.8202	0.8156	0.8225	0.8141
27.940	0.7864	0.7748	0.7859	0.7825	0.7758	0.7857	0.7737
30.480	0.7472	0.7306	0.7468	0.7420	0.7324	0.7463	0.7295
33.020	0.7060	0.6824	0.7055	0.6991	0.6854	0.7048	0.6815
35.560	0.6632	0.6299	0.6627	0.6543	0.6350	0.6616	0.6296
38.100	0.6196	0.5728	0.6189	0.6079	0.5809	0.6175	0.5736
40.640	0.5758	0.5103	0.5749	0.5607	0.5232	0.5732	0.5134
43.180	0.5329	0.4416	0.5314	0.5134	0.4616	0.5295	0.4484
45.720	0.4924	0.3650	0.4898	0.4671	0.3958	0.4879	0.3782
48.260	0.4558	0.2781	0.4513	0.4231	0.3248	0.4499	0.3015
50.800	0.4125	0.2118	0.4067	0.3761	0.2650	0.4058	0.2390
53.340	0.3642	0.1613	0.3577	0.3273	0.2147	0.3574	0.1884
55.880	0.3121	0.1225	0.3056	0.2776	0.1718	0.3057	0.1473
58.420	0.2572	0.0925	0.2511	0.2271	0.1348	0.2516	0.1136
60.960	0.2002	0.0692	0.1950	0.1763	0.1025	0.1958	0.0856
63.500	0.1417	0.0507	0.1376	0.1252	0.0736	0.1386	0.0620
66.040	0.0820	0.0358	0.0791	0.0739	0.0473	0.0805	0.0415

Table 3.6-2 Axial reaction rate distribution in XI-Y model  
 — R = 9.34 cm —

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE VALUE	3.2436E-05	5.6916E-07	4.3697E-06	2.7985E-05	5.3125E-06	4.1372E-05	4.1451E-06
2.540	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5.080	0.9959	0.9958	0.9959	0.9958	0.9958	0.9959	0.9958
7.620	0.9876	0.9874	0.9876	0.9875	0.9874	0.9876	0.9874
10.160	0.9754	0.9749	0.9753	0.9751	0.9748	0.9753	0.9747
12.700	0.9591	0.9582	0.9590	0.9587	0.9582	0.9590	0.9580
15.240	0.9390	0.9375	0.9388	0.9383	0.9374	0.9388	0.9372
17.780	0.9151	0.9128	0.9149	0.9141	0.9127	0.9149	0.9123
20.320	0.8877	0.8841	0.8874	0.8862	0.8841	0.8874	0.8835
22.860	0.8570	0.8515	0.8566	0.8549	0.8517	0.8566	0.8507
25.400	0.8231	0.8151	0.8227	0.8202	0.8156	0.8225	0.8141
27.940	0.7864	0.7748	0.7860	0.7825	0.7757	0.7857	0.7737
30.480	0.7472	0.7306	0.7468	0.7420	0.7324	0.7463	0.7295
33.020	0.7060	0.6824	0.7055	0.6992	0.6854	0.7048	0.6815
35.560	0.6633	0.6299	0.6627	0.6543	0.6350	0.6617	0.6296
38.100	0.6196	0.5728	0.6189	0.6080	0.5809	0.6176	0.5736
40.640	0.5758	0.5103	0.5749	0.5607	0.5233	0.5732	0.5134
43.180	0.5330	0.4416	0.5315	0.5135	0.4617	0.5296	0.4485
45.720	0.4925	0.3651	0.4898	0.4672	0.3959	0.4880	0.3784
48.260	0.4558	0.2785	0.4513	0.4232	0.3251	0.4499	0.3018
50.800	0.4125	0.2123	0.4066	0.3762	0.2654	0.4058	0.2394
53.340	0.3642	0.1618	0.3577	0.3275	0.2151	0.3574	0.1888
55.880	0.3121	0.1229	0.3055	0.2777	0.1722	0.3057	0.1477
58.420	0.2572	0.0929	0.2511	0.2272	0.1352	0.2516	0.1139
60.960	0.2002	0.0694	0.1950	0.1763	0.1028	0.1958	0.0859
63.500	0.1417	0.0509	0.1376	0.1253	0.0738	0.1386	0.0622
66.040	0.0820	0.0359	0.0791	0.0739	0.0474	0.0805	0.0416

Table 3.6-3 Axial reaction rate distribution in XI-Y model

 $\text{--- } R = 18.94 \text{ cm }$ 

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE VALUE	3.3225E-05	5.7852E-07	4.4765E-06	2.8640E-05	5.4156E-06	4.2372E-05	4.2218E-06
2.540	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5.080	0.9959	0.9958	0.9959	0.9958	0.9958	0.9958	0.9958
7.620	0.9876	0.9874	0.9876	0.9875	0.9874	0.9876	0.9874
10.160	0.9754	0.9749	0.9753	0.9751	0.9748	0.9753	0.9748
12.700	0.9591	0.9582	0.9590	0.9587	0.9582	0.9590	0.9580
15.240	0.9390	0.9375	0.9388	0.9383	0.9374	0.9389	0.9372
17.780	0.9151	0.9128	0.9149	0.9141	0.9127	0.9149	0.9123
20.320	0.8877	0.8841	0.8874	0.8862	0.8841	0.8874	0.8835
22.860	0.8570	0.8515	0.8566	0.8549	0.8517	0.8566	0.8507
25.400	0.8231	0.8151	0.8227	0.8202	0.8156	0.8226	0.8141
27.940	0.7864	0.7748	0.7860	0.7825	0.7757	0.7857	0.7737
30.480	0.7473	0.7306	0.7468	0.7421	0.7324	0.7463	0.7295
33.020	0.7061	0.6823	0.7056	0.6992	0.6854	0.7049	0.6815
35.560	0.6633	0.6299	0.6628	0.6544	0.6350	0.6618	0.6295
38.100	0.6197	0.5727	0.6190	0.6080	0.5810	0.6177	0.5736
40.640	0.5759	0.5103	0.5749	0.5608	0.5233	0.5733	0.5134
43.180	0.5331	0.4417	0.5315	0.5136	0.4618	0.5297	0.4485
45.720	0.4925	0.3653	0.4898	0.4674	0.3962	0.4881	0.3785
48.260	0.4559	0.2790	0.4512	0.4233	0.3256	0.4500	0.3022
50.800	0.4125	0.2130	0.4066	0.3763	0.2660	0.4058	0.2399
53.340	0.3642	0.1624	0.3576	0.3276	0.2156	0.3574	0.1894
55.880	0.3121	0.1235	0.3055	0.2778	0.1727	0.3057	0.1481
58.420	0.2572	0.0933	0.2510	0.2273	0.1356	0.2516	0.1143
60.960	0.2002	0.0698	0.1949	0.1765	0.1031	0.1958	0.0862
63.500	0.1417	0.0512	0.1375	0.1253	0.0741	0.1386	0.0624
66.040	0.0820	0.0361	0.0791	0.0740	0.0476	0.0805	0.0418

Table 3.7-1 Radial reaction rate distribution in XI-Y model

 $\text{--- } Z = 0.0 \text{ cm }$ 

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE	3.2204E-05	5.6822E-07	4.3381E-06	2.7800E-05	5.2923E-06	4.1079E-05	4.1319E-06
VALUE							
2.199	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3.110	1.0005	1.0001	1.0005	1.0004	1.0003	1.0005	1.0002
5.391	1.0015	1.0004	1.0015	1.0014	1.0008	1.0015	1.0007
6.961	1.0034	1.0009	1.0034	1.0031	1.0018	1.0034	1.0015
8.237	1.0053	1.0013	1.0054	1.0049	1.0028	1.0052	1.0024
9.340	1.0072	1.0017	1.0073	1.0066	1.0038	1.0071	1.0032
11.897	1.0107	1.0023	1.0108	1.0098	1.0056	1.0106	1.0047
13.994	1.0160	1.0053	1.0161	1.0148	1.0095	1.0158	1.0083
15.815	1.0212	1.0092	1.0214	1.0199	1.0139	1.0210	1.0125
17.448	1.0265	1.0135	1.0266	1.0250	1.0185	1.0262	1.0170
18.940	1.0317	1.0181	1.0319	1.0302	1.0233	1.0315	1.0218
21.439	1.0391	1.0248	1.0393	1.0375	1.0302	1.0389	1.0286
23.675	1.0490	1.0341	1.0492	1.0473	1.0397	1.0487	1.0379
25.718	1.0590	1.0436	1.0592	1.0572	1.0493	1.0587	1.0475
27.610	1.0690	1.0532	1.0692	1.0671	1.0590	1.0687	1.0572
29.380	1.0790	1.0630	1.0793	1.0772	1.0689	1.0788	1.0670
32.848	1.0947	1.0782	1.0950	1.0928	1.0843	1.0944	1.0823
35.983	1.1167	1.0998	1.1170	1.1147	1.1059	1.1164	1.1039
38.866	1.1390	1.1216	1.1393	1.1369	1.1279	1.1387	1.1258
41.550	1.1615	1.1438	1.1618	1.1594	1.1502	1.1612	1.1481
50.766	1.2155	1.1968	1.2158	1.2132	1.2036	1.2152	1.2013
58.548	1.3095	1.2893	1.3099	1.3070	1.2966	1.3091	1.2942
65.412	1.4073	1.3855	1.4078	1.4046	1.3933	1.4069	1.3907
71.620	1.5091	1.4855	1.5097	1.5062	1.4940	1.5087	1.4911

Table 3.7-2 Radial reaction rate distribution in XI-Y model  
 — Z = 15.24 cm —

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE VALUE	3.0239E-05	5.3270E-07	4.0727E-06	2.6085E-05	4.9612E-06	3.8567E-05	3.8723E-06
2.199	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3.110	1.0005	1.0001	1.0005	1.0004	1.0003	1.0005	1.0002
5.391	1.0015	1.0004	1.0015	1.0014	1.0008	1.0015	1.0007
6.961	1.0034	1.0009	1.0034	1.0031	1.0018	1.0034	1.0015
8.237	1.0053	1.0013	1.0054	1.0049	1.0028	1.0052	1.0024
9.340	1.0072	1.0017	1.0073	1.0066	1.0038	1.0071	1.0032
11.897	1.0107	1.0023	1.0108	1.0098	1.0056	1.0106	1.0047
13.994	1.0160	1.0053	1.0161	1.0148	1.0095	1.0158	1.0083
15.815	1.0212	1.0092	1.0214	1.0199	1.0139	1.0210	1.0125
17.448	1.0265	1.0135	1.0266	1.0251	1.0185	1.0262	1.0170
18.940	1.0317	1.0181	1.0319	1.0302	1.0233	1.0315	1.0218
21.439	1.0391	1.0248	1.0393	1.0375	1.0302	1.0389	1.0286
23.675	1.0490	1.0341	1.0492	1.0473	1.0397	1.0488	1.0379
25.718	1.0590	1.0436	1.0592	1.0572	1.0493	1.0587	1.0475
27.610	1.0690	1.0532	1.0692	1.0671	1.0590	1.0687	1.0572
29.380	1.0790	1.0630	1.0793	1.0772	1.0689	1.0788	1.0670
32.848	1.0947	1.0782	1.0950	1.0928	1.0843	1.0944	1.0823
35.983	1.1167	1.0998	1.1170	1.1147	1.1059	1.1164	1.1039
38.866	1.1390	1.1216	1.1393	1.1369	1.1279	1.1386	1.1258
41.550	1.1615	1.1437	1.1618	1.1594	1.1502	1.1612	1.1480
50.766	1.2155	1.1968	1.2158	1.2132	1.2036	1.2151	1.2013
58.548	1.3095	1.2893	1.3098	1.3070	1.2965	1.3091	1.2941
65.412	1.4073	1.3854	1.4077	1.4046	1.3932	1.4068	1.3906
71.620	1.5090	1.4854	1.5095	1.5061	1.4938	1.5085	1.4909

Table 3.7-3 Radial reaction rate distribution in XI-Y model

 $Z = 25.40 \text{ cm}$ 

MESH	U-235 FISSION	U-238 FISSION	U-238 CAPTURE	PU-239 FISSION	PU-240 FISSION	PU-241 FISSION	NP-237 FISSION
NORMALIZE VALUE	2.6506E-05	4.6314E-07	3.5689E-06	2.2801E-05	4.3161E-06	3.3789E-05	3.3639E-06
2.199	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3.110	1.0005	1.0001	1.0005	1.0004	1.0003	1.0005	1.0002
5.391	1.0015	1.0004	1.0015	1.0014	1.0008	1.0015	1.0007
6.961	1.0034	1.0009	1.0035	1.0031	1.0018	1.0034	1.0015
8.237	1.0053	1.0013	1.0054	1.0049	1.0028	1.0053	1.0024
9.340	1.0072	1.0016	1.0073	1.0066	1.0038	1.0071	1.0032
11.897	1.0107	1.0022	1.0108	1.0098	1.0056	1.0106	1.0047
13.994	1.0160	1.0053	1.0161	1.0149	1.0095	1.0158	1.0083
15.815	1.0213	1.0092	1.0214	1.0200	1.0139	1.0211	1.0125
17.448	1.0265	1.0135	1.0267	1.0251	1.0185	1.0263	1.0170
18.940	1.0318	1.0181	1.0319	1.0303	1.0233	1.0315	1.0217
21.439	1.0392	1.0248	1.0394	1.0376	1.0302	1.0389	1.0286
23.675	1.0491	1.0341	1.0493	1.0474	1.0397	1.0488	1.0379
25.718	1.0590	1.0435	1.0592	1.0572	1.0493	1.0587	1.0475
27.610	1.0690	1.0532	1.0692	1.0672	1.0590	1.0687	1.0571
29.380	1.0791	1.0630	1.0793	1.0772	1.0689	1.0788	1.0670
32.848	1.0948	1.0782	1.0950	1.0928	1.0843	1.0945	1.0823
35.983	1.1167	1.0997	1.1170	1.1147	1.1059	1.1164	1.1039
38.866	1.1390	1.1216	1.1393	1.1369	1.1279	1.1387	1.1258
41.550	1.1615	1.1437	1.1618	1.1594	1.1501	1.1612	1.1480
50.766	1.2155	1.1968	1.2158	1.2132	1.2035	1.2151	1.2012
58.548	1.3094	1.2892	1.3098	1.3070	1.2964	1.3090	1.2940
65.412	1.4072	1.3853	1.4076	1.4045	1.3931	1.4067	1.3904
71.620	1.5088	1.4851	1.5093	1.5059	1.5084	1.5097	1.4907

Table 3.8  $^{239}\text{Pu}$  worth axial distributions in XI-1,  
XI-X and XI-Y models ( $R = 0.0 \text{ cm}$ )

( $\Delta k/k$  per  $10^{24} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$  of  $^{239}\text{Pu}$ )

Model Axial Position ( cm )	XI - 1	XI - X	XI - Y
2.5 4	1.0 4 7 - 3	3.9 2 0 - 4	1.0 7 1 - 5
5.0 8	1.0 3 8 - 3	3.8 8 7 - 4	1.0 6 2 - 5
7.6 2	1.0 2 0 - 3	3.8 2 2 - 4	1.0 4 5 - 5
1 0 . 1 6	9.9 4 0 - 4	3.7 2 6 - 4	1.0 1 9 - 5
1 2 . 7 0	9.5 9 8 - 4	3.6 0 1 - 4	9.8 4 8 - 6
1 5 . 2 4	9.1 8 4 - 4	3.4 4 8 - 4	9.4 3 5 - 6
1 7 . 7 8	8.7 0 4 - 4	3.2 7 2 - 4	8.9 5 7 - 6
2 0 . 3 2	8.1 6 7 - 4	3.0 7 4 - 4	8.4 2 2 - 6
2 2 . 8 6	7.5 8 4 - 4	2.8 5 9 - 4	7.8 3 8 - 6
2 5 . 4 0	6.9 6 5 - 4	2.6 3 1 - 4	7.2 1 8 - 6
2 7 . 9 4	6.3 2 1 - 4	2.3 9 3 - 4	6.5 7 2 - 6
3 0 . 4 8	5.6 6 6 - 4	2.1 5 1 - 4	5.9 1 2 - 6
3 3 . 2 2	5.0 1 0 - 4	1.9 0 8 - 4	5.2 5 0 - 6
3 5 . 5 6	4.3 6 6 - 4	1.6 6 9 - 4	4.5 9 8 - 6
3 8 . 1 0	3.7 4 6 - 4	1.4 3 8 - 4	3.9 6 8 - 6
4 0 . 6 4	3.1 6 2 - 4	1.2 2 1 - 4	3.3 7 3 - 6
4 3 . 1 8	2.6 2 3 - 4	1.0 2 0 - 4	2.8 2 2 - 6
4 5 . 7 0	2.1 4 0 - 4	8.4 0 4 - 5	2.3 3 0 - 6
4 8 . 2 6	1.7 4 7 - 4	7.0 3 3 - 5	1.9 6 0 - 6
5 0 . 8 0	1.3 7 1 - 4	5.6 1 8 - 5	1.5 7 1 - 6
5 3 . 3 4	1.0 4 1 - 4	4.3 3 7 - 5	1.2 1 7 - 6
5 5 . 8 8	7.5 9 5 - 5	3.2 0 9 - 5	9.0 3 3 - 7
5 8 . 4 2	5.2 6 0 - 5	2.2 4 9 - 5	6.3 4 3 - 7
6 0 . 9 6	3.3 9 4 - 5	1.4 6 2 - 5	4.1 3 2 - 7
6 3 . 5 0	1.9 7 6 - 5	8.5 2 7 - 6	2.4 1 1 - 7
6 6 . 0 4	1.2 1 0 - 5	5.0 6 3 - 6	1.4 2 7 - 7

1.0 4 7 - 3 : read as  $1.0 4 7 \times 10^{-3}$

Table 3.9  $^{238}\text{U}$  worth axial distributions in  
 XI-1, XI-X and XI-Y models  
 ( $R = 0.0 \text{ cm}$ )

( $\Delta k/k$  per  $10^{24} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$  of  $^{238}\text{U}$ )

Model Axial Position (cm)	XI - 1	XI - X	XI - Y
2.5 4	-5.803-5	-2.259-5	-6.193-7
5.0 8	-5.746-5	-2.237-5	-6.135-7
7.6 2	-5.633-5	-2.195-5	-6.020-7
10.1 6	-5.465-5	-2.132-5	-5.849-7
12.7 0	-5.247-5	-2.050-5	-5.626-7
15.2 4	-4.892-5	-1.950-5	-5.355-7
17.7 8	-4.675-5	-1.834-5	-5.041-7
20.3 2	-4.332-5	-1.704-5	-4.689-7
22.8 6	-3.959-5	-1.563-5	-4.305-7
25.4 0	-3.564-5	-1.413-5	-3.897-7
27.9 4	-3.152-5	-1.257-5	-3.472-7
30.4 8	-2.733-5	-1.098-5	-3.036-7
33.0 2	-2.314-5	-9.381-6	-2.598-7
35.5 6	-1.903-5	-7.805-6	-2.166-7
38.1 0	-1.507-5	-6.277-6	-1.746-7
40.6 4	-1.134-5	-4.823-6	-1.345-7
43.1 8	-7.886-6	-3.466-6	-9.704-8
45.7 2	-4.763-6	-2.221-6	-6.258-8
48.2 6	-2.368-6	-1.222-6	-3.473-8
50.8 0	-1.198-6	-7.058-7	-2.023-8
53.3 4	-2.721-7	-2.912-7	-8.551-9
55.8 8	4.303-7	2.960-8	5.001-10
58.4 2	9.427-7	2.695-7	7.279-9
60.9 6	1.301-6	4.419-7	1.216-8
63.5 0	1.536-6	5.586-7	1.547-8
66.0 4	3.886-6	1.465-6	4.075-8

-5.803-5 : read as  $5.803 \times 10^{-5}$

Table 3.10  $^{239}\text{Pu}$  worth radial distributions in  
 $\text{XI} = 1$ ,  $\text{XI} - \text{X}$  and  $\text{XI} - \text{Y}$  models  
 $(Z = 0.0 \text{ cm})$

$(\Delta k/k \text{ per } 10^{24} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3} \text{ of } ^{239}\text{Pu})$

Model Radial Position (cm)	XI - 1	XI - X	XI - Y
2.1 9 9	1.0 4 7-3	3.9 2 0-4	1.0 7 1-5
3.1 1 0	1.0 4 7-3	3.9 2 3-4	1.0 7 2-5
5.3 9 1	1.0 4 6-3	3.9 3 0-4	1.0 7 4-5
6.9 6 1	1.0 4 5-3	3.9 4 3-4	1.0 7 8-5
8.2 3 7	1.0 4 5-3	3.9 5 6-4	1.0 8 2-5
9.3 4 0	1.0 4 4-3	3.9 6 9-4	1.0 8 6-5
1 1.8 9 7	1.0 4 3-3	3.9 9 6-4	1.0 9 4-5
1 3.9 9 4	1.0 3 9-3	4.0 3 2-4	1.1 0 5-5
1 5.8 1 5	1.0 3 5-3	4.0 6 8-4	1.1 1 6-5
1 7.4 4 8	1.0 3 0-3	4.1 0 4-4	1.1 2 7-5
1 8.9 4 0	1.0 2 4-3	4.1 4 0-4	1.1 3 9-5
2 1.4 3 9	1.0 1 4-3	4.1 9 0-4	1.1 5 5-5
2 3.6 7 5	9.9 8 9-4	4.2 5 5-4	1.1 7 7-5
2 5.7 1 8	9.8 1 1-4	4.3 1 9-4	1.1 9 9-5
2 7.6 1 0	9.6 0 9-4	4.3 8 2-4	1.2 2 2-5
2 9.3 8 0	9.3 8 4-4	4.4 4 3-4	1.2 4 5-5

1.0 4 7 - 3 : read as  $1.0 4 7 \times 10^{-3}$

Table 3.1.1  $^{238}\text{U}$  worth radial distributions in  
 XI-1, XI-X and XI-Y models  
 ( $Z = 0.0 \text{ cm}$ )

(%  $\Delta k/k$  per  $10^{24} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$  of  $^{238}\text{U}$ )

Model Radial Position (cm)	XI-1	XI-X	XI-Y
2.1 9 9	-5.8 0 3 -5	-2.2 5 9 -5	-6.1 9 3 -7
3.1 1 0	-5.8 0 0 -5	-2.2 6 0 -5	-6.1 9 9 -7
5.3 9 1	-5.7 9 4 -5	-2.2 6 4 -5	-6.2 1 0 -7
6.9 6 1	-5.7 8 1 -5	-2.2 7 0 -5	-6.2 3 0 -7
8.2 3 7	-5.7 6 9 -5	-2.2 7 5 -5	-6.2 5 1 -7
9.3 4 0	-5.7 5 6 -5	-2.2 8 1 -5	-6.2 7 1 -7
1 1.8 9 7	-5.7 2 1 -5	-2.2 8 7 -5	-6.2 9 6 -7
1 3.9 9 4	-5.6 8 1 -5	-2.3 0 4 -5	-6.3 5 5 -7
1 5.8 1 5	-5.6 3 6 -5	-2.3 2 0 -5	-6.4 1 6 -7
1 7.4 4 8	-5.5 8 7 -5	-2.3 3 6 -5	-6.4 7 8 -7
1 8.9 4 0	-5.5 3 3 -5	-2.3 5 2 -5	-6.5 4 0 -7
2 1.4 3 9	-5.4 4 9 -5	-2.3 7 5 -5	-6.6 3 0 -7
2 3.6 7 5	-5.3 1 4 -5	-2.4 0 3 -5	-6.7 5 1 -7
2 5.7 1 8	-5.1 5 4 -5	-2.4 3 0 -5	-6.8 7 4 -7
2 7.6 1 0	-4.9 6 3 -5	-2.4 5 5 -5	-6.9 9 9 -7
2 9.3 8 0	-4.7 3 8 -5	-2.4 7 8 -5	-7.1 2 7 -7

-5.8 0 3 -5 : read as  $5.8 0 3 \times 10^{-5}$

Table 3.1.2 Comparison of Na-void worth normalized  
 with central  $^{239}\text{Pu}$  worth

Component Model	Spectrum	Radial Leakage	Axial Leakage	Total
XI-1	0.38325	0.00008	-0.01693	0.36640
XI-X	0.38318	-0.00039	-0.01533	0.36747
XI-Y	0.38140	-0.00034	-0.01498	0.36608

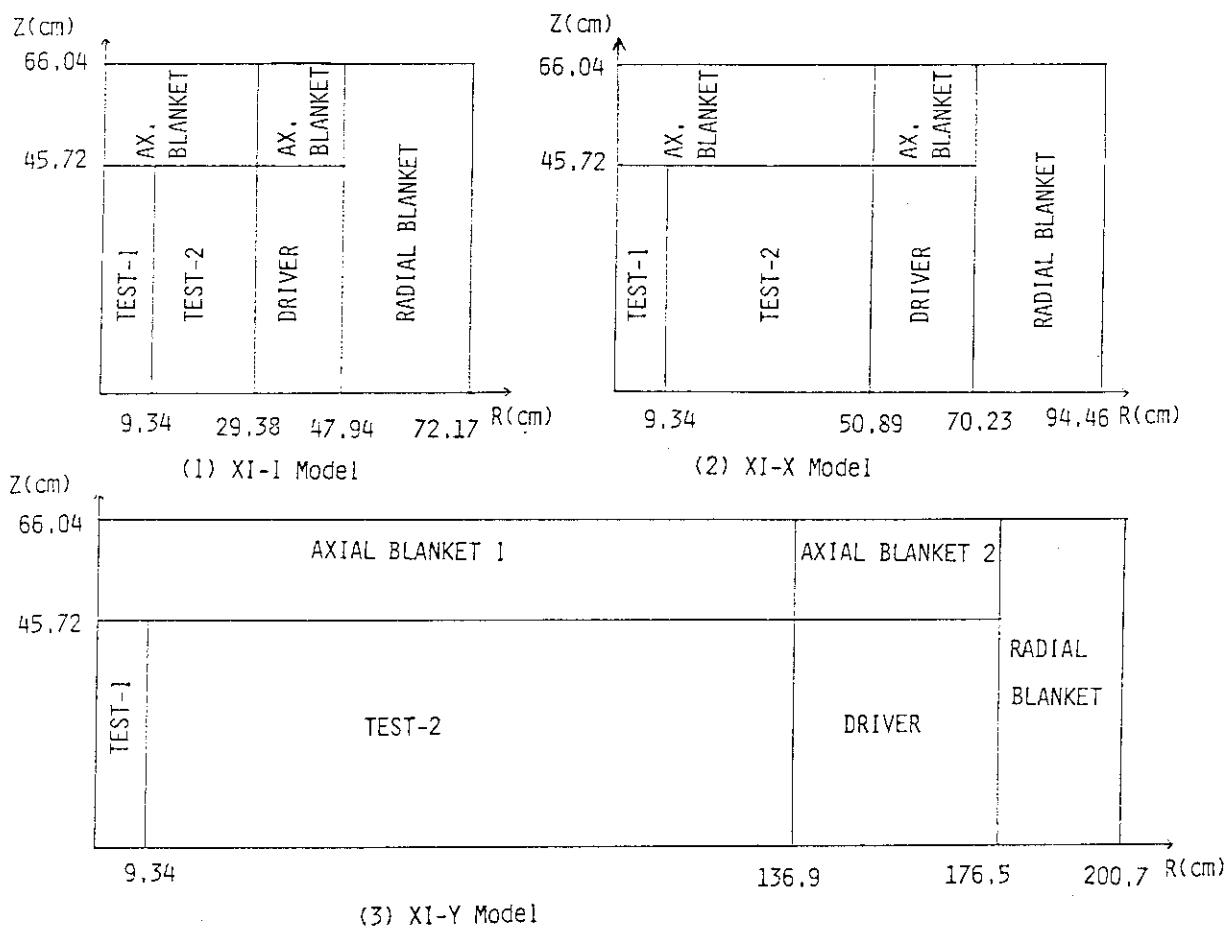


Fig. 3.1 Cylindrical models of XI-I, XI-X and XI-Y

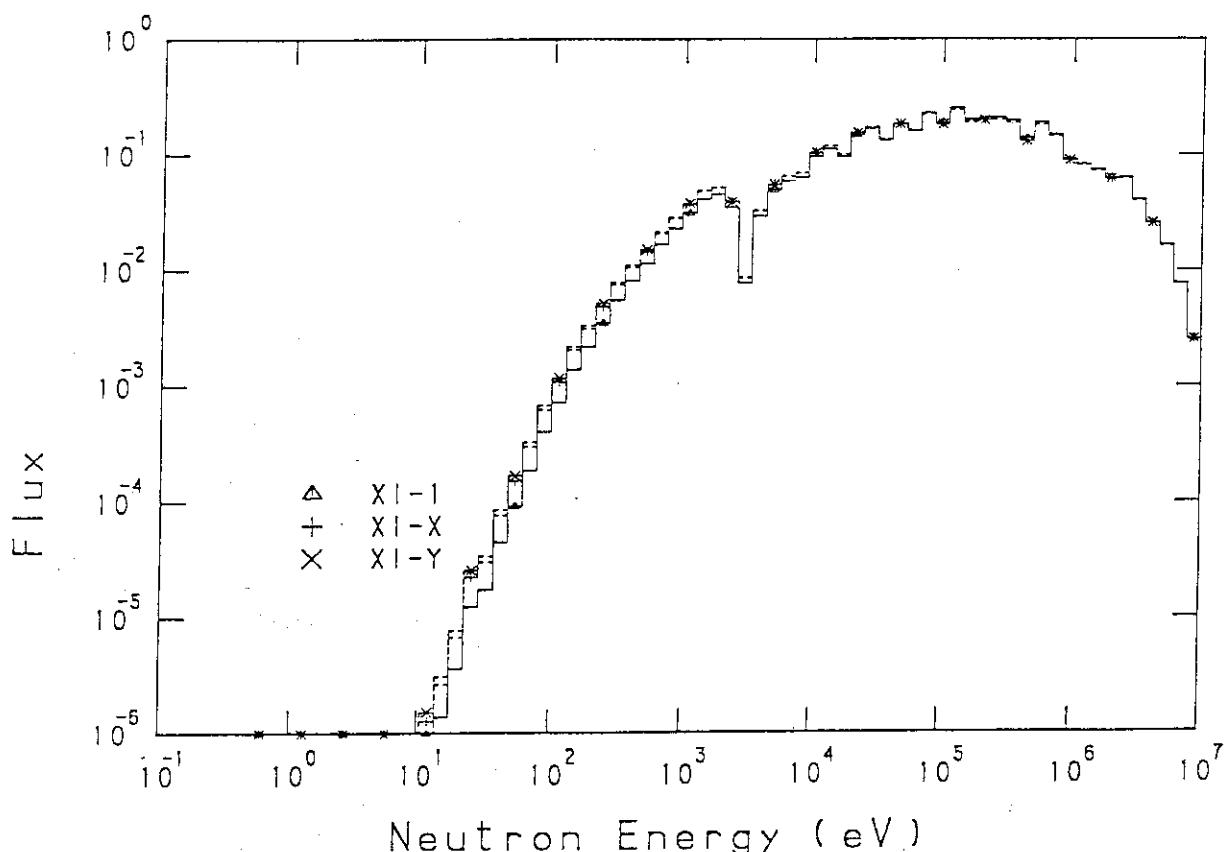


Fig. 3.2 Comparison of neutron flux energy distribution

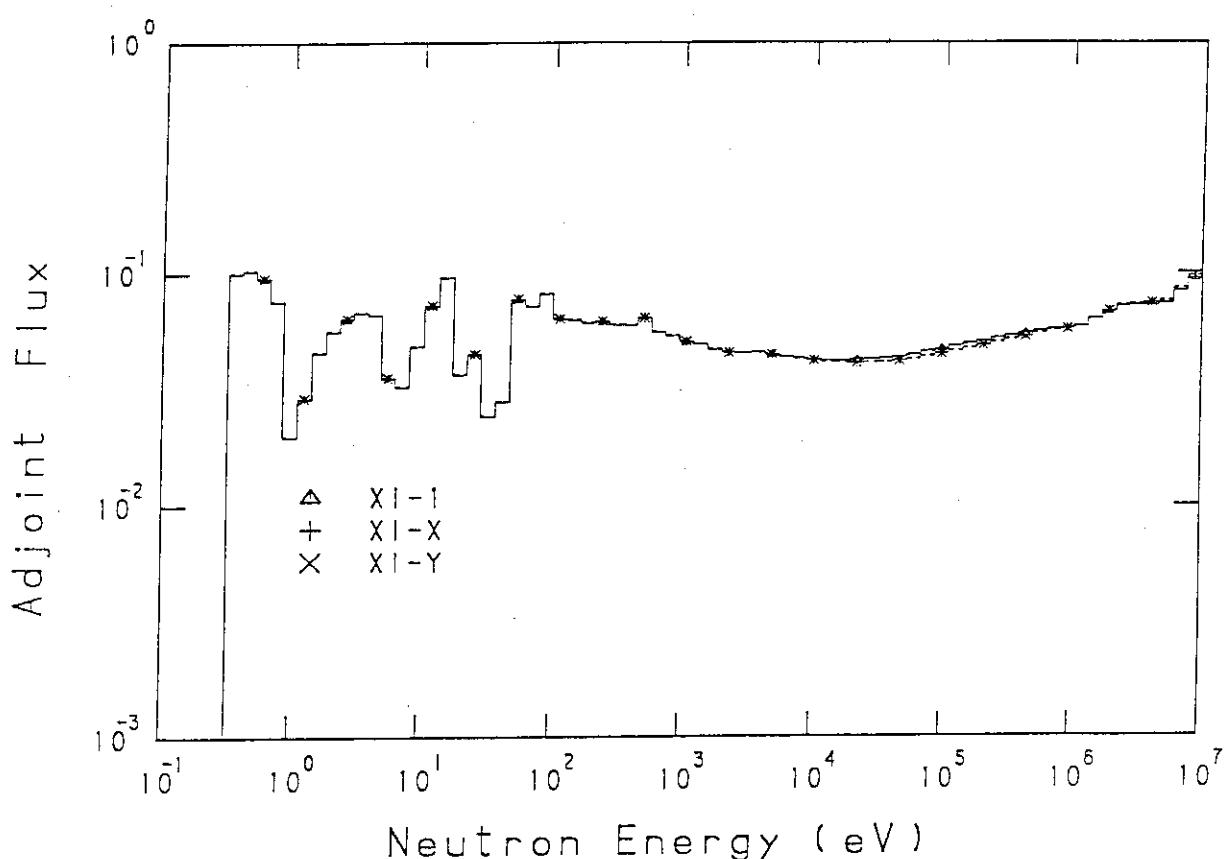


Fig. 3.3 Comparison of adjoint flux energy distribution

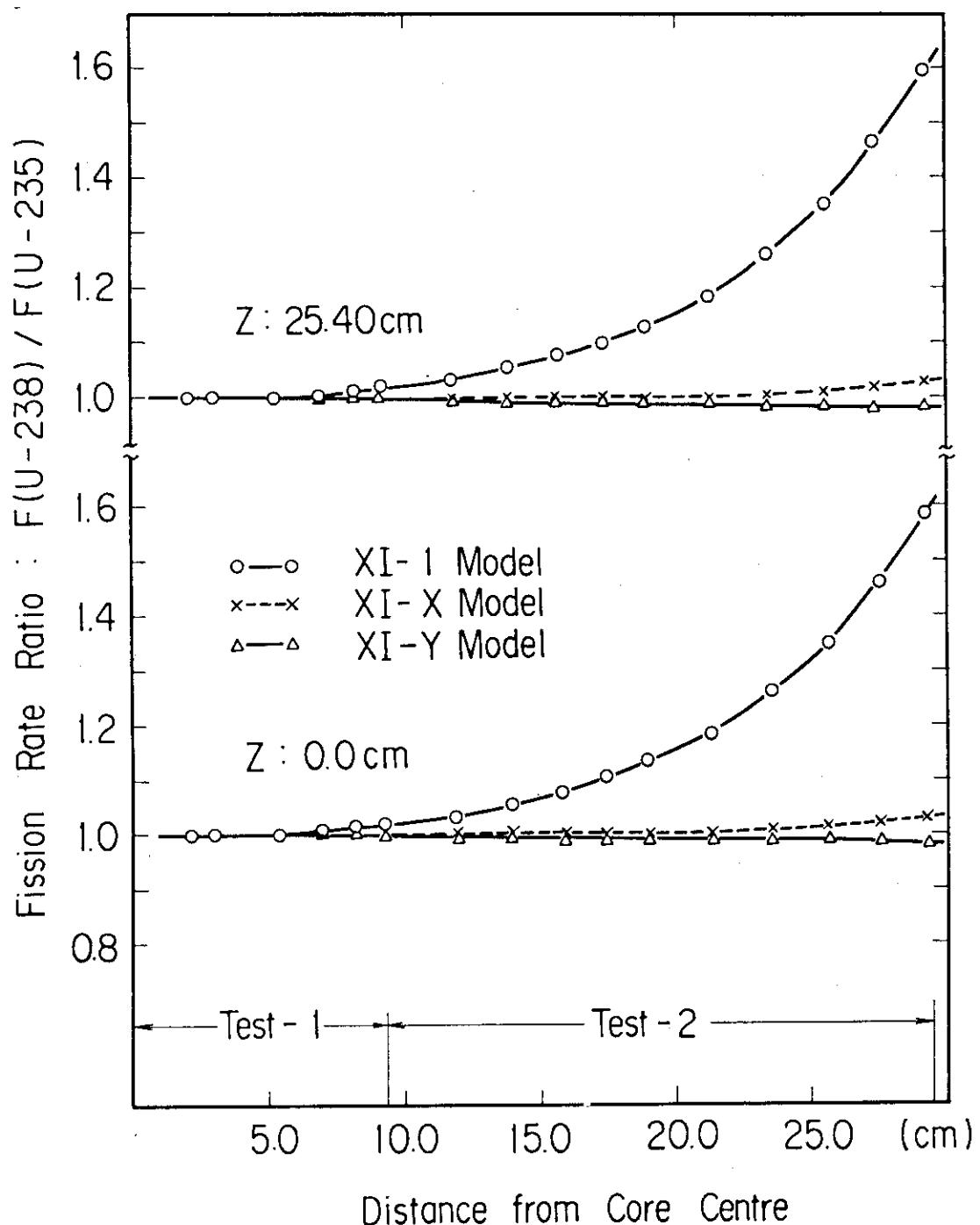
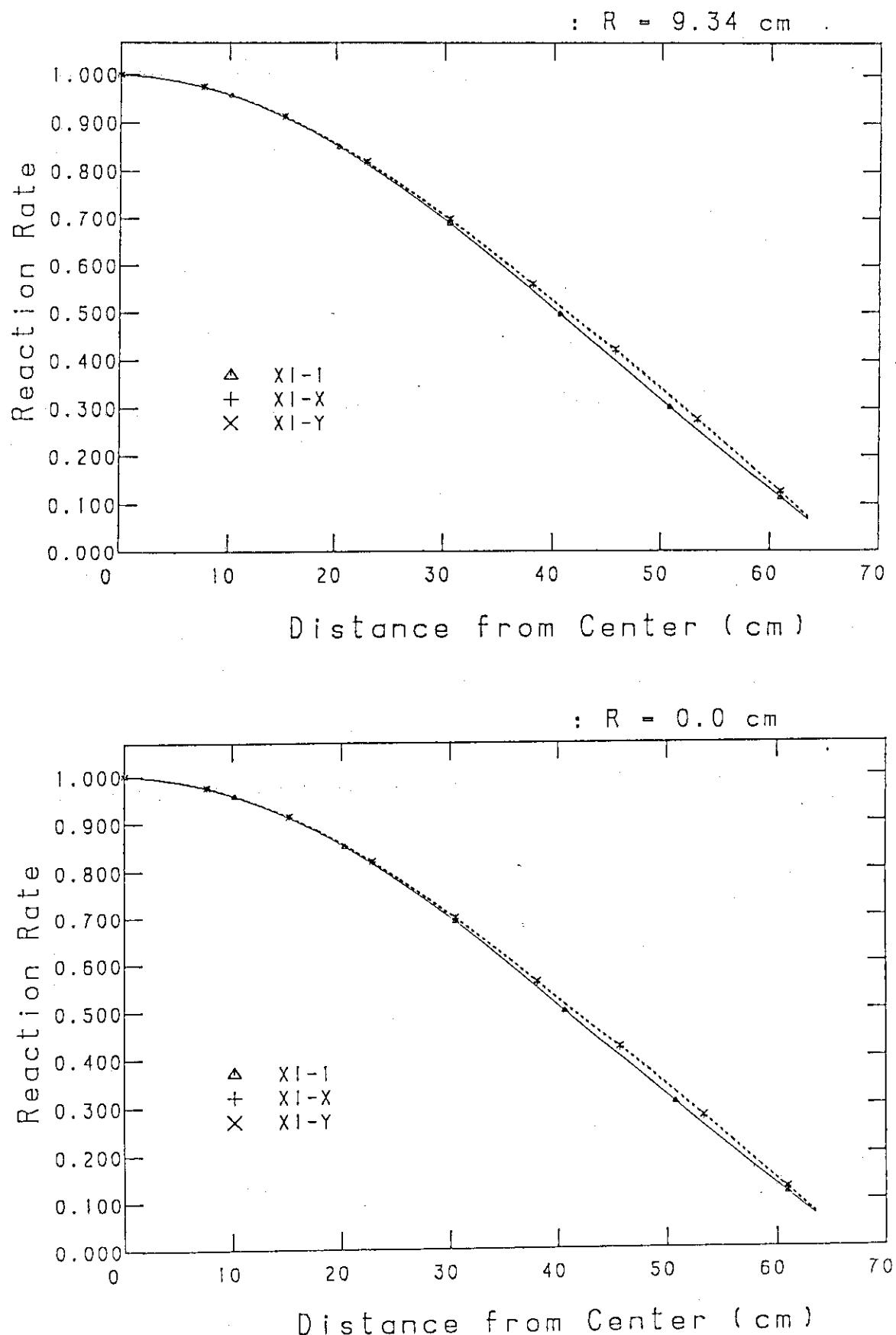
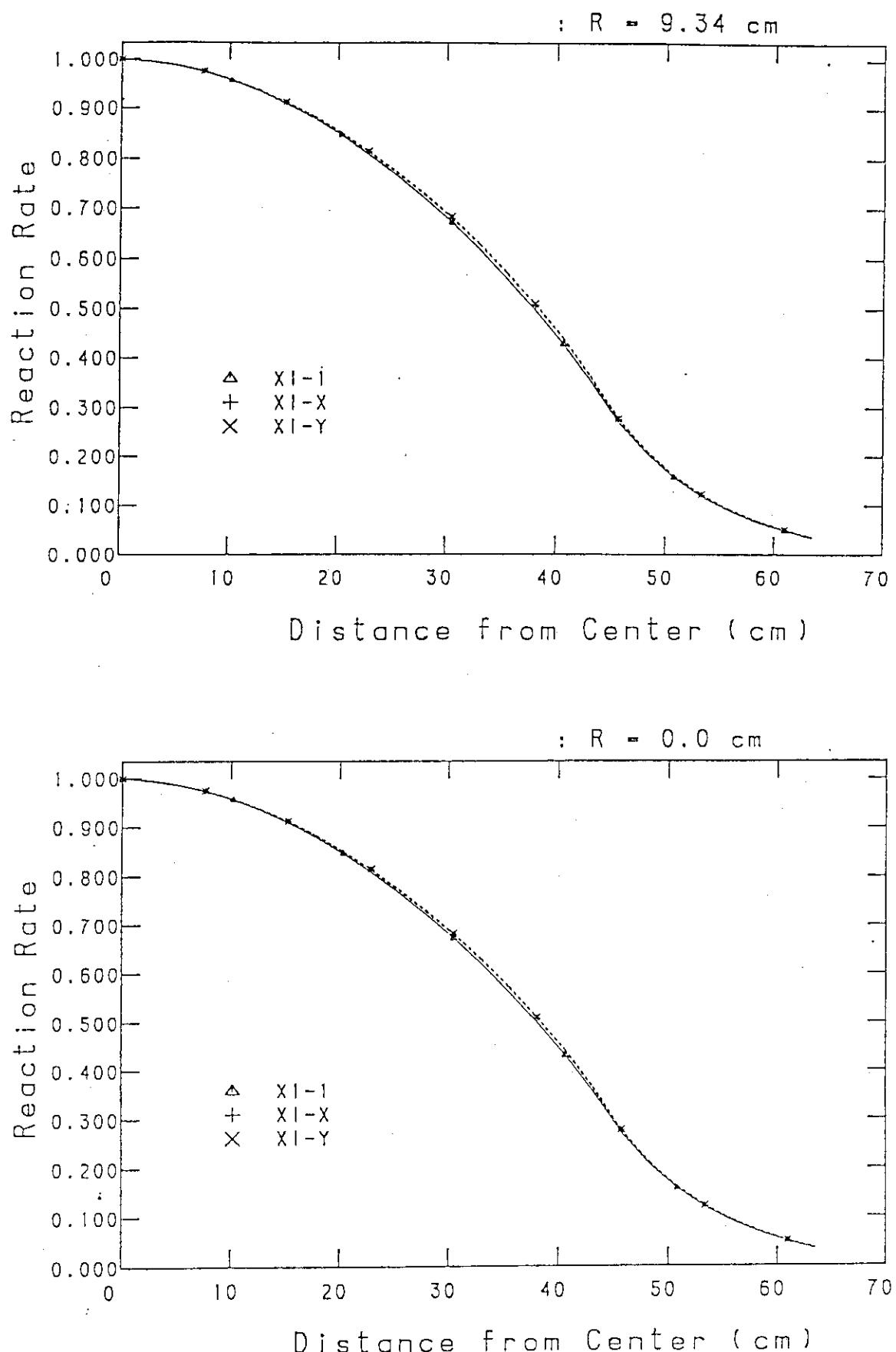
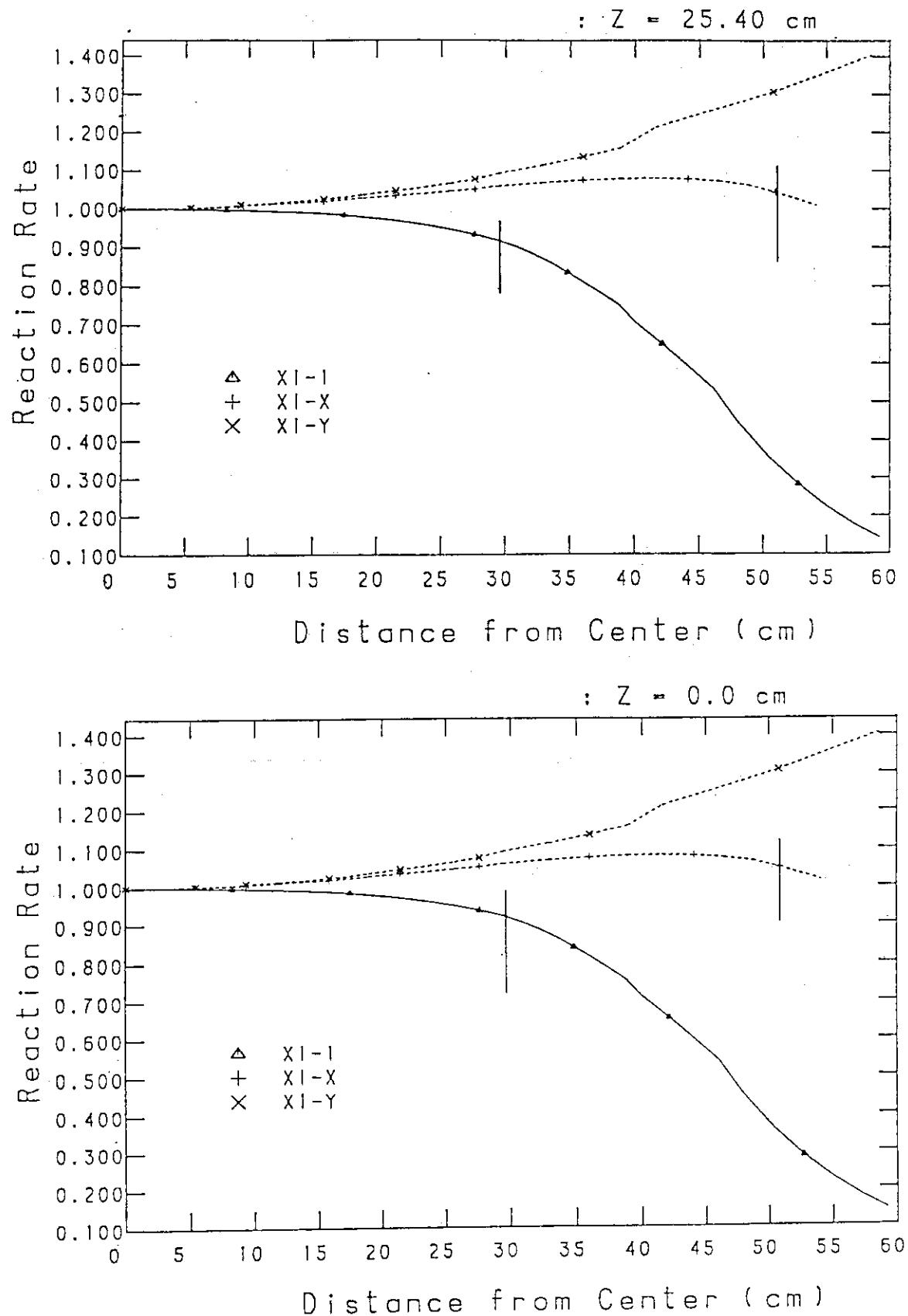
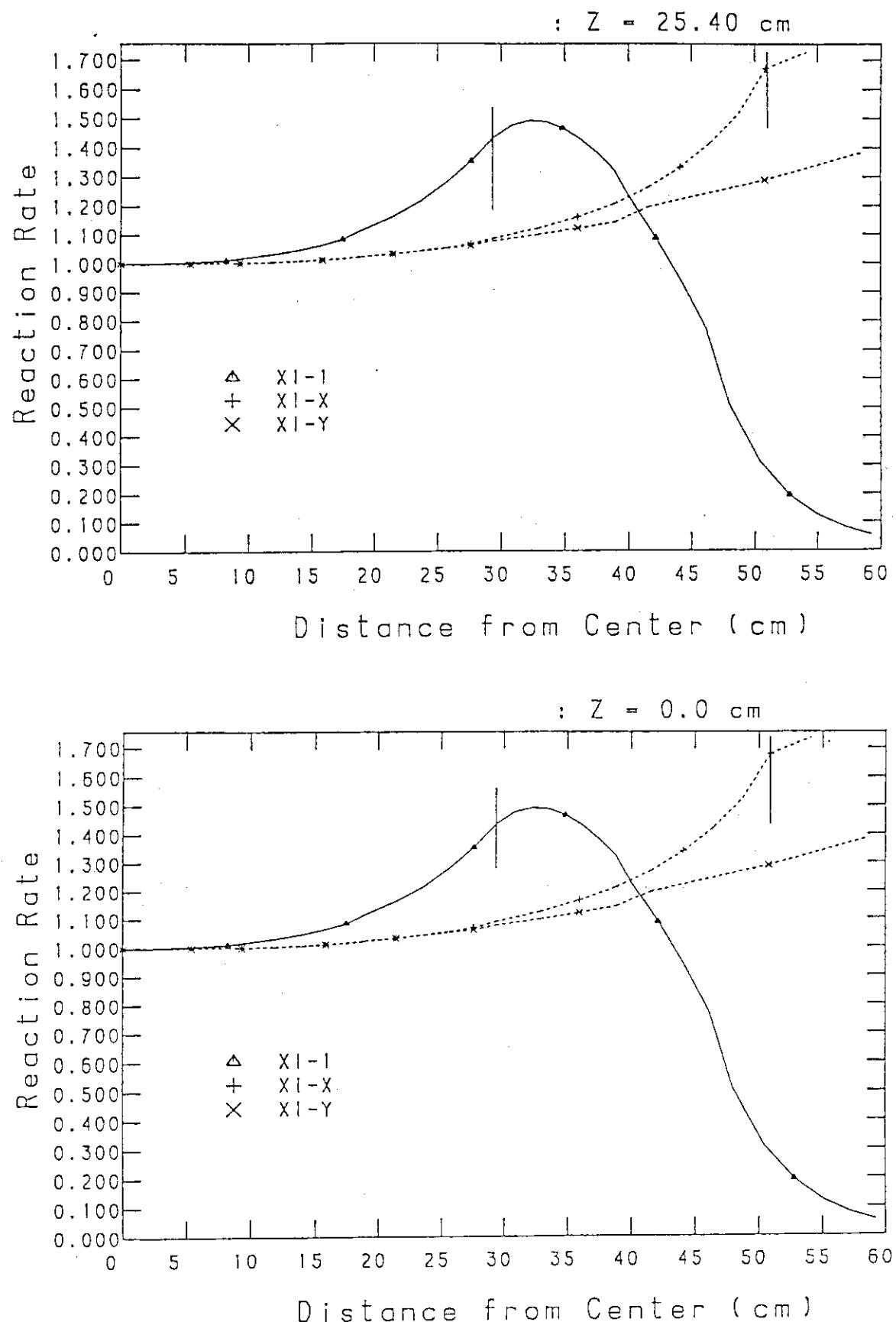


Fig. 3.4 Radial Fission Rate Ratio Distribuiton of XI-1, XI-X and XI-Y Model

Fig. 3.5  $^{239}\text{Pu}$  axial fission rate distribution

Fig 3.6  $^{238}\text{U}$  axial fission rate distribution

Fig. 3.7  $^{239}\text{Pu}$  radial fission rate distribution

Fig. 3.8  $^{238}\text{U}$  radial fission rate distribution

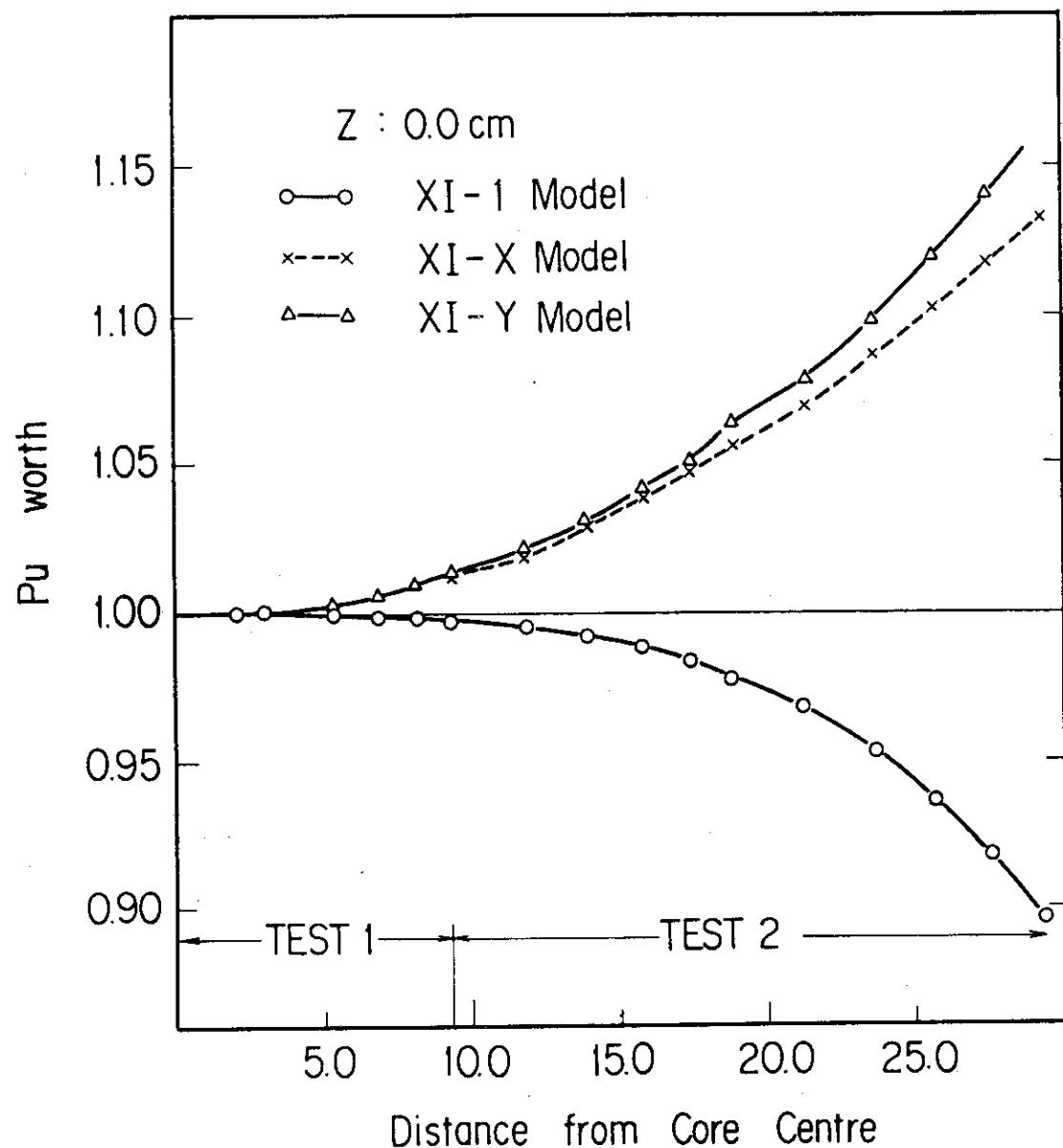


Fig. 3.9 Radial distribution of Pu worth in XI-1, XI-X and XI-Y models

## 4. 臨界近接

### 4.1 近接手順

臨界近接作業は、Fig. 4.1 に示されている装荷図（XI-A 集合体）の濃縮ウランドライバー燃料（EUD）領域全体に劣化ウランブロック（DUB）を装荷しておき、各装荷ステップ毎に図に示した番号順に劣化ウランブロックを濃縮ウランドライバー燃料に置き換えていくという方法で行なった。但し、劣化ウランブロックは、まず、図に示した鎖線の領域まで装荷しておき、最終的な径方向ブランケット境界に至るまで内側から外側に順次移動させた。XI-A 集合体は第 5 ステップ（EUD 144 本装荷）にて臨界となった。この後、①制御安全棒の全反応度価値を大きくするため、および②炉心領域の特異点の影響を小さくするために制御安全棒に関する装荷変更が行なわれた。これを XI-1 集合体とする。

XI-1 集合体では、①制御安全棒引出 1 パック当たりの濃縮ウラン板（1/16 インチ幅）6 枚を 4 枚にし（Fig. 2.1-7, Fig. 2.1-8 参照）、かつ、②制御安全棒機構を一連から二連構造にして全体の制御安全棒の本数を 2 倍にした。EUD を固定側に 7 5 本、移動側に 7 4 本装荷した XI-1 集合体にて、制御棒較正曲線および集合体間隙効果を測定した。その後両 1/2 集合体の形状すなわち濃縮ウランドライバー燃料の装荷本数を等しくし、かつ、以後の実験における余剰反応度を適切な大きさにするため、固定側集合体の濃縮ウランドライバー燃料を 1 本減らし固定側、移動側共 7 4 本にした。

### 4.2 臨界近接曲線

臨界近接時の計数測定（出力測定）は起動系（ch 1, ch 2）、線型出力系（ch 5, ch 6）各 2 系統の計 4 チャンネルを用いて、測定体系 A, B, C, D においてそれぞれ行なった。ここで、A 体系は分離状態、B 体系は両 1/2 集合体密着で制御棒 2 本を完全引抜状態、C 体系は制御棒 1 本のみを完全挿入、D 体系は制御棒 2 本完全挿入の状態を云う。全ての体系において全安全棒は完全挿入の状態である。中性子源はプルトニウムの自発核分裂中性子のみを利用し、外部中性子源は用いていない。各体系における各計数チャンネルの読取値および増倍率の逆数を Table 4.1 に示す。起動系 ch 1, ch 2 の計数率の値は各々 3 回づつ測定したものの平均であり、かつ、測定系の不感時間を 5  $\mu$ s として補正した値である。

体系 B, C, D における装荷ステップ毎の計数の逆数をプロットした臨界近接曲線を Fig. 4.2 に示す。計数チャンネルは ch. 1, ch. 5, ch. 6 のものを示したが、各チャンネル共近接曲線は良い一致を示している。第 4 ステップ終了後各体系毎に近接曲線を外挿して臨界量として濃縮ウランドライバー燃料の装荷本数をとると下記の如くなつた。

測定体系	濃縮ウランドライバー燃料装荷本数
B	148～149
C	145～146
D	139～140

上記の結果から、濃縮ウランドライバー燃料を141～144本装荷すれば、体系CとDとの間に臨界となると推定できる。そこで、第5ステップとして濃縮ウランドライバー燃料を計144本装荷して計数を行なった。体系Cでは、臨界に非常に近いため出力が一定値に達するのに時間がかかり計数の測定が不能であった。制御棒No.1(CR#1)を約50mm引抜きNo.2(CR#2)を挿入していく、CR#2引抜位置約330mmにて臨界となった。XI-A集合体での臨界データを Table 4.2 に示す。また、XI-A集合体の燃料の装荷量は以下の通りである。

	$^{235}\text{U}$ (kg)	$^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$ (kg)
テスト領域	—	78.2
ドライバー領域	281.8	154.2
計	281.8	232.4

#### 4.3 XI-1集合体の臨界データ

XI-A集合体は臨界に達した後、制御・安全棒引出に関して下記の如き装荷変更がなされた：

- ① 制御・安全棒引出の全反応度価値を大きくするため、制御・安全棒駆動機構を一連構造から二連構造に変更し、引出の本数を2倍にした。
- ② 中性子源分布の特異点の影響（制御・安全棒引出は周囲のドライバー燃料引出より核分裂性物質の濃度が高い）を小さくするため、1パック当たりの93%濃縮ウラン板の装填枚数を6枚から4枚に減らした。

以上の装荷変更の後、改めて臨界点を調整し、EUDを固定側に75本、移動側に74本装荷した体系で臨界点を測定した。この体系を FCA XI-1集合体とし、その燃料装荷図を Fig. 4.3 に示し、臨界データを Table 4.3 に示す。また、この体系での燃料装荷量を以下に示す。

	$^{235}\text{U}$ (kg)	$^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$ (kg)
テスト領域	—	78.2
ドライバー領域 (EUD 149本装荷)	299.3	144.9
計	299.3	223.1

Table 4.1 Critical approach data of XI-A assembly

Pattern	Step No.	Channel 1		Channel 2		Channel 5		Channel 6	
		cpm	no/n	cpm	no/n	A	no/n	A	no/n
B	0	12795	1.000	11758	1.000	0.072-9	1.00	0.074-9	1.00
	1	25214	0.507	16985	0.692	0.146-9	0.49	0.148-9	0.50
	2	51577	0.248	31641	0.372	0.305-9	0.24	0.306-9	0.24
	3	96911	0.132	—	—	0.576-9	0.13	0.575-9	0.13
	4	181865	0.070	—	—	0.105-8	0.07	0.106-8	0.07
	5	463726	0.028	—	—	0.276-8	0.03	0.276-8	0.03
C	0	12857	1.000	12055	1.000	0.077-9	1.00	0.078-9	1.00
	1	26202	0.491	17937	0.672	0.157-9	0.49	0.159-9	0.49
	2	56887	0.226	32573	0.370	0.352-9	0.22	0.352-9	0.22
	3	137068	0.094	—	—	0.752-9	0.10	0.745-9	0.11
	4	285857	0.045	—	—	0.175-8	0.04	0.176-8	0.04
	5	—	—	—	—	—	—	—	—
D	0	13392	1.000	12774	1.000	0.077-9	1.00	0.079-9	1.00
	1	28252	0.474	19694	0.649	0.166-9	0.46	0.167-9	0.47
	2	66069	0.203	43111	0.296	0.397-9	0.19	0.395-9	0.20
	3	164881	0.081	—	—	0.096-8	0.08	0.098-8	0.08
	4	670285	0.020	—	—	0.412-8	0.02	0.409-8	0.02
	5	—	—	—	—	—	—	—	—

0.072-9 : read as  $0.072 \times 10^{-9}$ 

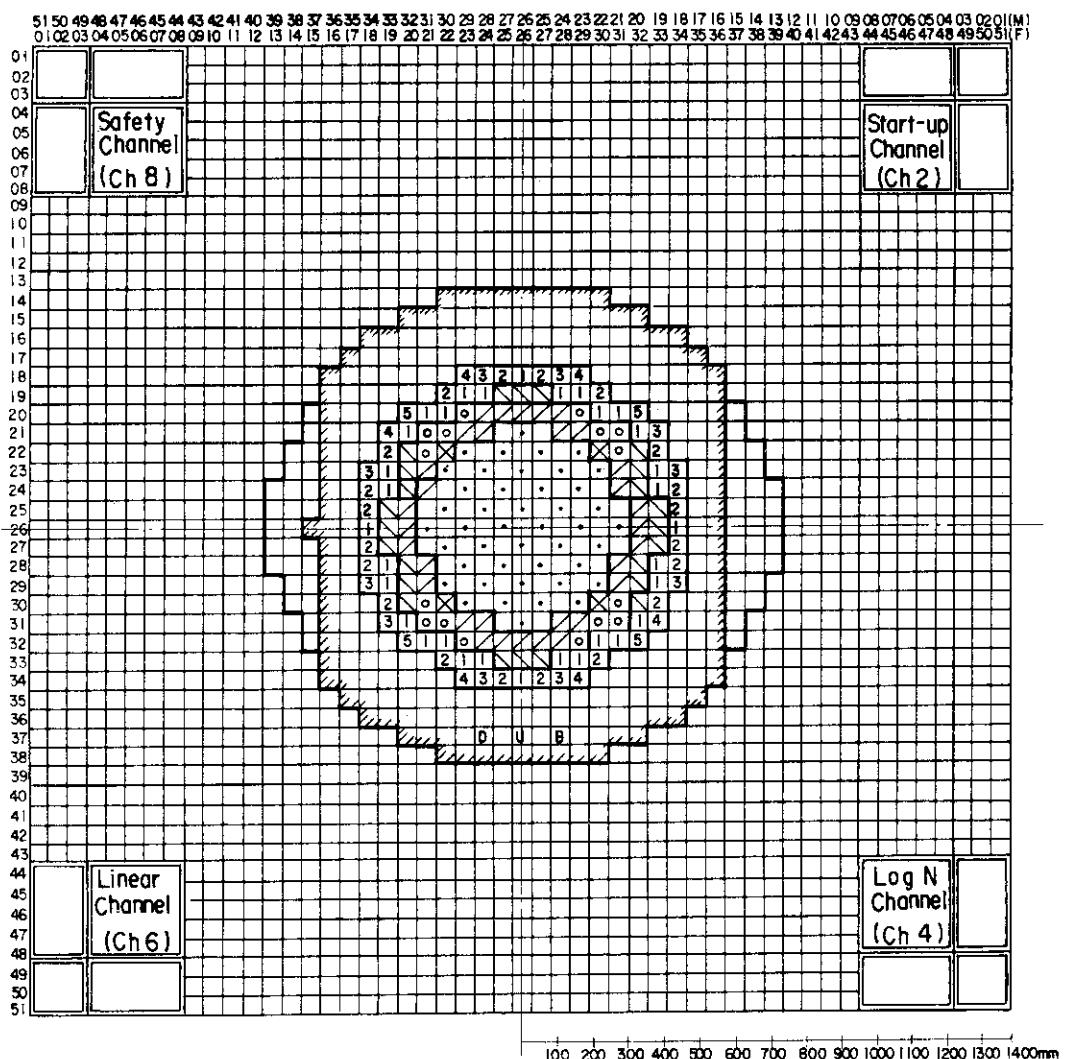
Table 4.2 Critical data of FCA XI-A assembly

Item		Data
<u>Power : A</u>		
Ch. 5		$0.504 \times 10^{-6}$
Ch. 6		$0.500 \times 10^{-6}$
<u>Rod Position : mm</u>		
C R # 1 / 1		5 1.2 6
C R # 2 / 6		3 3 1.7 4
S R # 3 / 1 2		0.1 4
S R # 4 / 1 0		0.1 3
S R # 5 / 1 4		0.1 5
S R # 6 / 8		0.0 7
S R # 7 / 5		0.1 4
S R # 8 / 2		0.0 0
<u>Temperature : °C</u>		
F. M Average		1 9.4 0
<u>Gap : mm</u>		
Average		- 0.0 3 5
Date : 1983. 3. 3		

Table 4.3 Critical data of FCA XI-1 assembly  
(No. of EUD : 149)

Item \ Power Level	Ch. 5, 6 $0.5 \times 10^{-7}$ A	Ch. 5, 6 (1) $0.5 \times 10^{-6}$ A	Ch. 5, 6 (2) $0.5 \times 10^{-6}$ A	Ch. 5, 6 $0.5 \times 10^{-5}$ A
<u>Power : A</u>				
Ch. 5	$0.504 \times 10^{-7}$	$0.502 \times 10^{-6}$	$0.509 \times 10^{-6}$	$0.508 \times 10^{-5}$
Ch. 6	$0.501 \times 10^{-7}$	$0.499 \times 10^{-6}$	$0.505 \times 10^{-6}$	$0.505 \times 10^{-5}$
<u>Rod Position : mm</u>				
CR#1/1	0.03	0.03	95.30	93.86
CR#2/6	299.24	275.97	108.67	108.67
SR#3/12	0.14	0.14	50.15	50.15
SR#4/10	0.12	0.12	0.12	0.12
SR#5/14	0.07	0.07	0.07	0.07
SR#6/8	0.10	0.10	0.10	0.10
SR#7/5	0.16	0.16	0.16	0.16
SR#8/2	0.03	0.03	0.03	0.03
<u>Temperature : °C</u>				
F, M Average	20.92	20.85	20.43	20.46
<u>Gap : mm</u>				
Average	-0.042	-0.042	-0.045	-0.045

Date : 1983. 4. 5



- : T1 drawer      } Test Region
  - : T2 drawer
  - : PD(92) drawer
  - : PD(81) drawer      } Pu Driver Region
  - : PUD drawer
  - : SCR-1 drawer      Safety and Control Rod
  - : EUD drawer ( Loaded at step n of critical approach )
- DUB : Radial Blanket

Fig. 4.1 Loading pattern of FCA XI-A assembly in fixed half

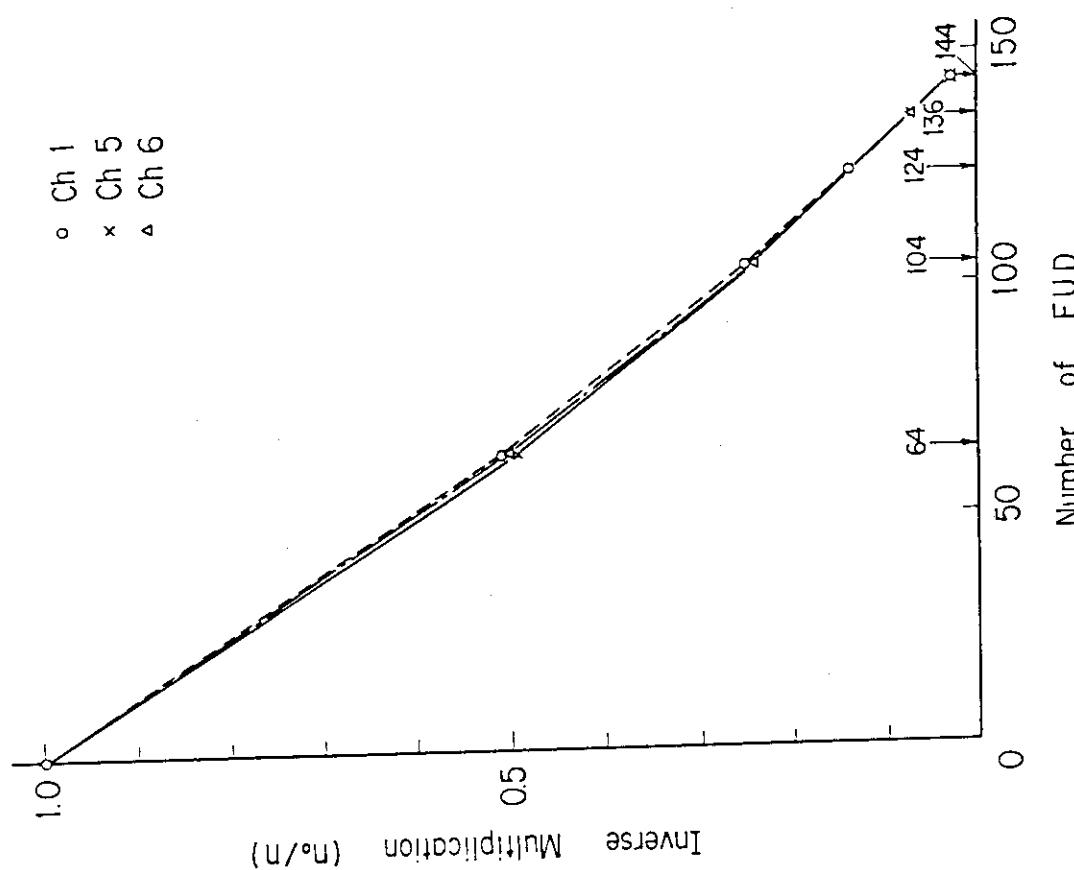
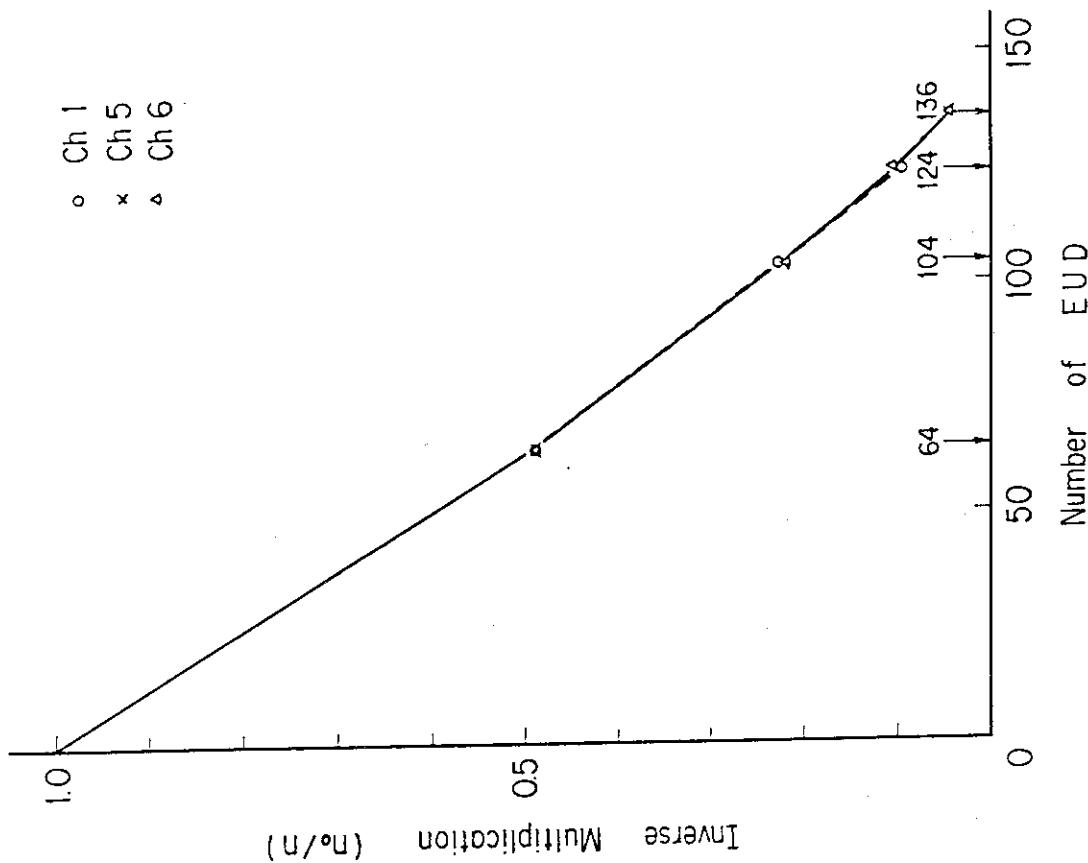


Fig. 4.2-1 Inverse multiplication curve for pattern B  
at critical approach of FCA XI-A assembly

Fig. 4.2-2 Inverse multiplication curve for pattern C  
at critical approach of FCA XI-A assembly

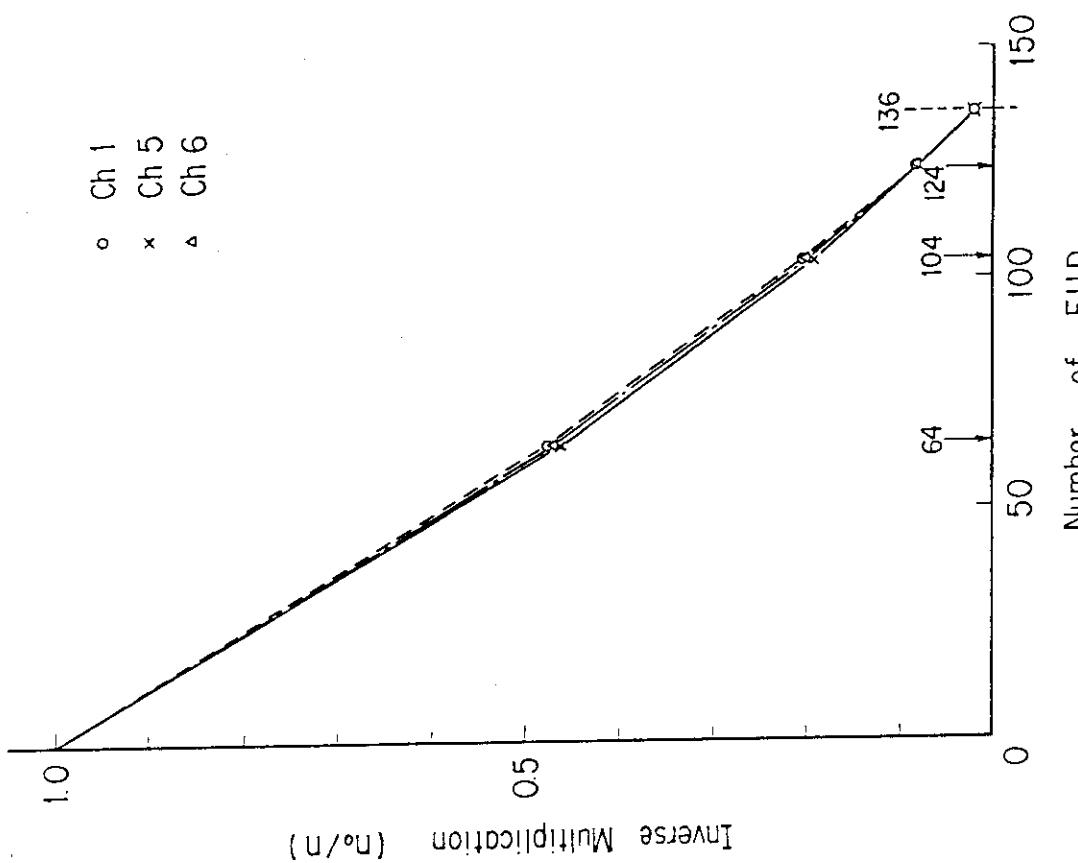
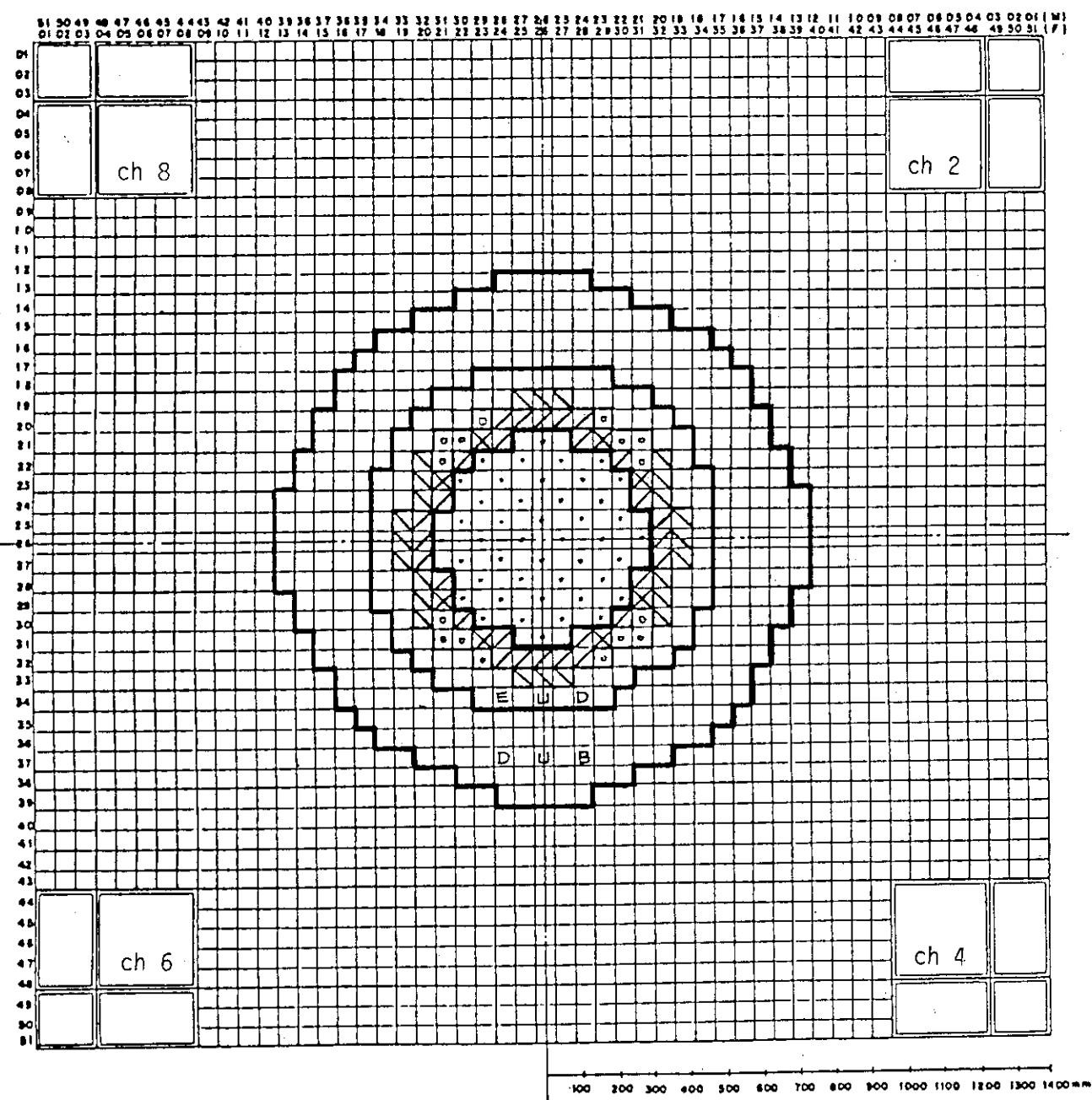


Fig. 4.2-3 Inverse multiplication curve for pattern D  
at critical approach of FCA XI-A assembly



: T1-Drawer      } Test Region

: T2-Drawer

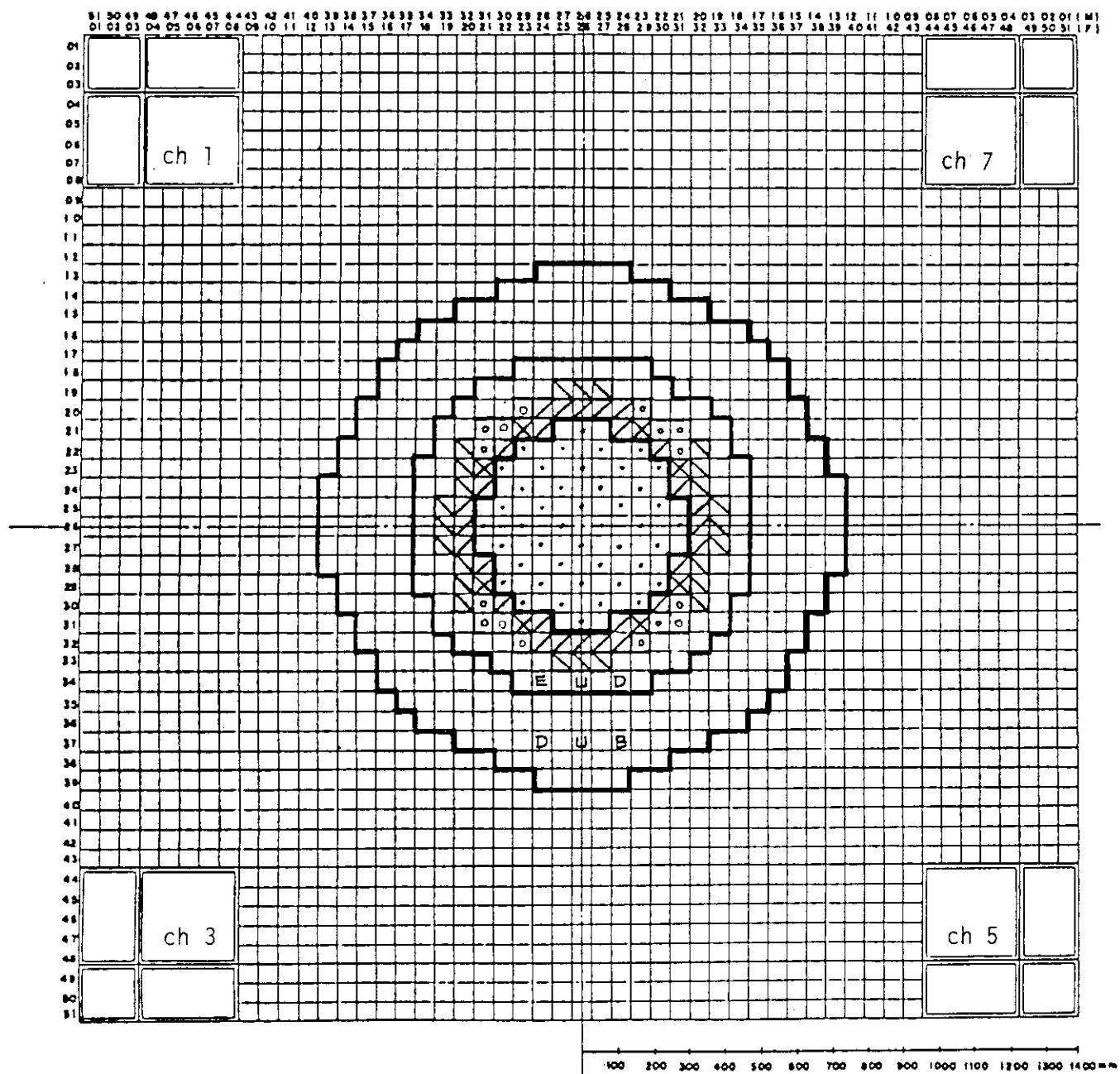
,  ,  : Pu-Driver

: Safety/Control Drawer

E U D : Enriched Uranium Driver

D U B : Radial Blanket

Fig. 4.3-1. Loading pattern of FCA XI-1 assembly (fixed side)



- |  |             |                        |                         |
|--|-------------|------------------------|-------------------------|
| <span style="border: 1px solid black; width: 10px; height: 10px; display: inline-block;"></span>                           | : T1-Drawer | {                      | Test Region             |
| <span style="border: 1px solid black; width: 10px; height: 10px; display: inline-block;"></span>                           | : T2-Drawer |                        |                         |
| <span style="border: 1px solid black; width: 10px; height: 10px; display: inline-block; transform: rotate(45deg);"></span> | : Pu-Driver |                        | : Safety/Control Drawer |
| E U D : Enriched Uranium Driver  |             | D U B : Radial Blanket |                         |

Fig. 4.3-2 Loading pattern of FCA XI-1 assembly (movable side)

## 5. 特 性 実 験

### 5.1 制御棒較正

FCA XI-1 集合体 (Fig. 4.3) の制御・安全棒の反応度較正を標準反応度法（臨界法）および未臨界法により実施し、制御棒 No. 1 (CR # 1), No. 2 (CR # 2) の反応度曲線、各制御棒および全安全棒の反応度価値を求めた。標準反応度  $\rho_0$  として移動側の安全棒 No. 3 (CR # 3) の 50.00 mm から完全挿入までの反応度が採用された。標準反応度として SR # 3 を用いたのは、CR # 1 および CR # 2 から距離的に離れているので、それらの間の干渉効果が小さいと考えられたからである。

#### 制御棒 No. 1 (CR # 1) および制御棒 No. 2 (CR # 2) の反応度曲線

SR # 3 の 50.00 mm と完全挿入とに対応する反応度印加  $\rho_0$  に対して、臨界を保つように CR # 1 の引抜および CR # 2 の挿入を行なう置き換えにより、CR # 1 および CR # 2 の反応度曲線を求めた。これらの置き換えの各ステップにおける制御棒の臨界位置を Table 5.1 に示す。得られた制御棒の反応度曲線（較正曲線）を Fig. 5.1 に示す。

#### 標準反応度 $\rho_0$ の較正

系に標準反応度  $\rho_0$  を印加したときの倍増時間  $T_D$  を測定し以下の式により  $\rho_0$  を較正した。

$$\rho_0 (\Delta k/k) = \frac{A}{T} + \sum_m \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{i,m}}{1 + \lambda_{i,m}} \quad (5.1)$$

$$T = \frac{T_D}{\ln 2} \quad (5.2)$$

ここで、

$A$  : 中性子生成時間

$\beta_{i,m}$  : m 核種, i グループの実効遅発中性子割合,

$\lambda_{i,m}$  : m 核種, i グループの中性子の崩壊定数,

$T$  : ペリオド

倍増時間  $T_D$  の測定は、出力レベル無限大に対応する真の臨界点を制御棒 No. 1 で求めておき、次に炉出力を充分 ( $0.1 \times 10^{-7}$  A レベル) 下げた後、制御棒 No. 1 を真の臨界点まで挿入し、かつ、安全棒 No. 3 を 50.00 mm から完全挿入して系に 1  $\rho_0$  の反応度を印加し、出力レベル  $0.1 \times 10^{-7}$  A ~  $0.8 \times 10^{-5}$  A の範囲の出力上昇曲線を用いて測定した。

真の臨界点は（式の導出は付録 A を参照）Table 4.3 の XI-1 集合体の臨界データより、

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= 0.505 \times 10^{-5} \text{ A}, X_1 = 9.386 \text{ mm} \\ P_2 &= 0.505 \times 10^{-6} \text{ A}, X_2 = 9.530 \text{ mm} \end{aligned} \right\}$$

なる測定データを用い、(A. 10) 式に代入して、

$$\begin{aligned}\triangle \rho_{1 \rightarrow 2} &= 1.44, \\ \rho_1 &= 0.16, \\ X_\infty &= 93.70,\end{aligned}$$

を得た。即ち、EUD を 149 本装荷した体系における真の臨界点は制御棒 No.1 の引抜距離にして 93.70 mm となる（制御棒 No.2 および安全棒の引抜位置、その他の条件は Table 4.3 の右端の 2 カラムのデータと同じとする）。

倍増時間は、線型出力計 No.6 の出力レベルで  $10^{-7}$  A から  $10^{-5}$  A まで順次測定したが、出力レベル  $10^{-7}$  A および  $10^{-6}$  A のデータは Pu 燃料の自発核分裂による系への反応度への影響が残っているので不採用とし、 $10^{-5}$  A 出力レベルにて測定された以下のデータを平均して求めた。

線型出力計 No.6 の出力範囲	倍増時間	$T_D$
$0.2 \times 10^{-5} \sim 0.4 \times 10^{-5}$ A	4.2.1	sec
	4.2.2	sec
$0.3 \times 10^{-5} \sim 0.6 \times 10^{-5}$ A	4.2.8	sec
	4.2.6	sec
$0.4 \times 10^{-5} \sim 0.8 \times 10^{-5}$ A	4.2.4	sec
	4.2.5	sec
平均	$4.2.4_3 \pm 0.2_6$ sec	

倍増時間  $T_D = 4.2.4_3$  sec を (5.1) 式および (5.2) 式に代入して、印加反応度  $\rho_0$  を得た。

$$\rho_0 = 6.29 \times 10^{-4} \triangle k/k,$$

(5.1) 式にて用いられる遅発中性子に関するデータは Tomlinson<sup>8)</sup>により評価されたデータを用いた。体系の中性子束、随伴中性子束は 2 次元円柱モデルにて、群定数セットに JFS-3-J2 (70 群)<sup>5)</sup>、セル計算コードとして SLAROM<sup>6)</sup>を用い、CITATION-FBR<sup>4)</sup>により計算した。拡散近似に基づく摂動計算コード PERKEY<sup>7)</sup>にて計算した、上記の  $\rho_0$  以外の動特性パラメータは以下の通りである。

$$\begin{aligned}\text{ペリオド} & T = 6.1.2 \text{ sec} \\ \text{中性子生成時間} & A = 2.70 \times 10^{-7} \text{ sec} \\ \text{全遅発中性子割合} & \beta = \sum_m \sum_{i=1}^6 \beta_{i,m} \\ & = 5.05 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

#### 未臨界法による制御・安全棒の反応度価値の測定

制御棒および安全棒の挿入位置を以下に示すケースに種々変化させて、出力計の読み取り値から系の未臨界度  $\rho$  を求め、制御棒 No.1, No.2, 全安全棒の反応度価値を計算した。各ケースでの制御・安全棒の挿入位置および各出力計の読み取り値を Table 5.2 に示す。出力計としては、起動系 No.1 (Ch 1), 線型出力計 No.5 (Ch 5), No.6 (Ch 6) をそれぞれ独立に用い、得られたそれぞれの未臨界度の平均値を取った。但し、Ch 1 の計数率には  $5 \mu\text{sec}$  の dead time 補正をほどこした。

ケース1(未臨界度:  $\rho_1$ )

出力レベルが Ch 6 にて  $0.508 \times 10^{-6} \text{ A}$  における基準系である。この系の未臨界度  $\rho_1$  は、Table 4.3 の測定データと (A. 14) 式を用いて、 $0.031 \pm 0.002 \rho_0$  である。CR #1, CR #2 の引抜位置はそれぞれ 254.94 mm, 14.11 mm であり安全棒は全て完全挿入である。制御棒較正曲線よりこの系の余剰反応度  $\rho_{\text{ex}}$  は、CR #1, CR #2 が完全挿入されたとして、 $5.284 \pm 0.025 \rho_0$  となる。

ケース2(未臨界度:  $\rho_2$ )

基準系に対し 5  $\rho_0$  だけ未臨界度を深くした系である。SR #3 を 50 mm 引抜き ( $1 \rho_0$ ), CR #2 を 14.10 mm から 21.210 mm まで引抜いた ( $4 \rho_0$ )。この系の出力計の読取値から (A. 11) 式を使い  $B = \rho_2 \cdot C_2$  なる関係式から比例定数  $B$  を決めることができる。 $\rho_2 = \rho_1 + 5.0 = 5.031 \rho_0$  とし、Table 5.2 の各出力計の読取値から、

$$\begin{aligned} B(\text{Ch } 1) &= 2843556, \\ B(\text{Ch } 5) &= 1.726 \times 10^{-8}, \\ B(\text{Ch } 6) &= 1.721 \times 10^{-8}, \end{aligned}$$

を得る。

ケース3(未臨界度:  $\rho_3$ )

CR #2, SR #3 の引抜位置をそれぞれ 21.210 mm, 50.12 mm とし、CR #1 を完全引抜とした。CR #1 を完全挿入、CR #2 = 21.210 mm, SR #3 = 50.12 mm なる系は反応度に関し基準系と等価である (Table 5.1 参照) から、この系の未臨界度  $\rho_3$  は制御棒 No.1 (CR #1) の完全引抜による全反応度価値に等しい。 $\rho_3$  は、各出力計の読取値との定数  $B$  を用いて、

$$\begin{aligned} \rho_3(\text{Ch } 1) &= 7.60 \rho_0 \\ \rho_3(\text{Ch } 5) &= 7.85 \rho_0 \\ \rho_3(\text{Ch } 6) &= 7.79 \rho_0 \end{aligned}$$

と計算できる。上記の 3 つの値の平均を探り、制御棒 No.1 の反応度価値を  $7.75 \pm 0.13 \rho_0$  とする。

ケース4(未臨界度:  $\rho_4$ )

SR #3 の引抜位置を 50.12 mm とし、CR #1, CR #2 を完全引抜とした。CR #2 を完全挿入し CR #1 = 21.097 mm, SR #3 = 50.12 mm なる系は反応度に関し基準系と等価である (Table 5.1 参照) から、この系の未臨界度  $\rho_4$  は以下の如く表わすことができる。

$$\begin{aligned} \rho_4 &= \Delta\rho(\text{CR } \#2 : \text{full in} \rightarrow \text{full out}) + \Delta\rho(\text{CR } \#1 : \text{full in} \rightarrow \text{full out}) \\ &\quad - (\rho_{\text{ex}} - 1.0) \end{aligned} \tag{5.3}$$

$\rho_4$  は、各出力計の読取値と定数  $B$  とを用いて、

$$\begin{aligned} \rho_4(\text{Ch } 1) &= 11.11 \rho_0 \\ \rho_4(\text{Ch } 5) &= 11.36 \rho_0 \\ \rho_4(\text{Ch } 6) &= 11.18 \rho_0 \end{aligned}$$

と計算でき、3 つの値の平均を探って  $\rho_4 = 11.22 \pm 0.13 \rho_0$  とする。(5.3) 式を用いて、制御棒 No.2 (CR #2) の反応度価値として、 $7.75 \pm 0.13 \rho_0$  となり、CR #1, CR #2 の反応度価値は等しくなった。

ケース 5 (未臨界度 :  $\rho_s$ )

C R # 1, C R # 2 を完全挿入とし, 全ての安全棒を完全引抜とする。系の未臨界度  $\rho_s$  は各出力計の読み取り値と定数 B とから計算できる。

$$\rho_s (\text{Ch } 1) = 3.9.6.1 \quad \rho_0,$$

$$\rho_s (\text{Ch } 5) = 3.9.5.0 \quad \rho_0,$$

$$\rho_s (\text{Ch } 6) = 3.9.7.5 \quad \rho_0.$$

上記 3 つの値の平均を取り  $\rho_s = 3.9.6.2 \pm 0.1.3 \quad \rho_0$  とする。全安全棒の反応度値は,  $\rho_s$  に基準系の余剰反応度  $\rho_{ex}$  を加えたものになるから  $4.4.9.0 \pm 0.1.3 \quad \rho_0$  となる。各制御・安全棒は同じ組成であるが, この場合, 加算性は成立していない。

以上をまとめて, 制御棒 No. 1, 制御棒 No. 2, 全安全棒の反応度値を以下に示す。

反応度値		
	( $\rho_0$ )	(% $\Delta k / k$ )
制御棒 No. 1 (C R # 1)	$7.7.5 \pm 0.1.3$	$0.487 \pm 0.008$
制御棒 No. 2 (C R # 2)	$7.7.5 \pm 0.1.3$	$0.487 \pm 0.008$
全安全棒 (SR # 3 ~ SR # 8)	$4.4.9.0 \pm 0.1.3$	$2.824 \pm 0.008$

(1  $\rho_0 = 0.0629 \quad \% \Delta k / k$ )

## 5.2 密着面間隙効果

$\frac{1}{2}$  集合体が密着した状態では固定側, 移動側の引出前端間には約  $(0.5 \pm 0.3) \text{ mm}$  の間隙があり, また, 引出端面の不鏽鋼の厚さは  $0.8 \text{ mm}$  である。したがって, 両  $1/2$  集合体が密着状態にあるとき, 両側の燃料板の間には,

$$0.8 \times 2 + (0.5 \pm 0.3) = (2.1 \pm 0.3) \text{ mm},$$

の間隙があることになる。これは, 臨界質量の決定の際に補正すべき項目となる。また,  $1/2$  集合体の密着状態は系の反応度に影響を与えるので, 反応度差の評価に際し密着度の補正が必要となる。そこで,  $1/2$  集合体間の間隙を,  $0.25 \text{ mm}$ ,  $0.5 \text{ mm}$ ,  $1.0 \text{ mm}$ ,  $2.0 \text{ mm}$  とすることにより, この密着面間隙効果を測定した。結果を Table 5.3, Fig. 5.2 に示す。間隙効果  $f_G$  として, 間隙  $0.25 \text{ mm}$  のケースと基準状態(2) (間隙  $0.0 \text{ mm}$ )との反応度変化より, 以下の値を得た。

$$\begin{aligned} f_G &= (-0.187 \pm 0.003) \div (0.230 \pm 0.015) \\ &= (-0.81 \pm 0.06) \quad (\rho_0 / \text{mm-gap}) \\ &= (-0.051 \pm 0.004) \quad (\% \Delta k / k / \text{mm-gap}) \end{aligned}$$

上記の間隙距離は, 密着面の四隅についている間隙メータの指示値を平均したものであり, 測定誤差を  $\pm 0.01 \text{ mm}$  とした。反応度変化は, 制御棒 No. 2 (C R # 2) の引抜距離の変化から, 前節の制御棒較正曲線を用いて算出し, 温度補正 (第 5.4 節参照) をほどこしたものである。制御棒引抜距離の指示誤差を 1 臨界当たり  $\pm 0.05 \text{ mm}$  ( $\pm 0.001 \rho_0$  に相当), 2 つの臨界点に対する反応度の変化分に対し,  $\pm 0.002 \rho_0$  とし, 温度の変化分の指示誤差を  $\pm 0.01^\circ\text{C}$  ( $\pm 0.001 \rho_0$  に相当) と

して測定誤差を算出した。

$f_G$  の値を用いて、燃料板自体が密着した状態から間隙距離 ( $2.1 \pm 0.3$ ) mm に対する反応度差を計算すると、

$$(-0.81 \pm 0.06) \times (2.1 \pm 0.3) = 1.70 \pm 0.28 \rho_0 \\ = 0.107 \pm 0.018 \% \Delta k/k$$

となる。

### 5.3 密着面不銹鋼反応度効果

1/2 集合体の引出前端面の存在は、集合体密着面部における不銹鋼の量を増し、他方、格子管が集合体密着面からそれぞれ 5 mm ずつ後退していることはここでの不銹鋼の量を減らしている。引出 1 本当りの引出前端面の不銹鋼の重量は 17.29 g であり、一方、集合体密着面間に格子管がないことによる不銹鋼の重量の減少は 17.13 g である。したがって両 1/2 集合体間の 1 cm の間隙中にある不銹鋼の量が標準のものより多い分は  $5.52 \times 5.52 \times 1.0$  cm (但し、5.52 cm は格子管の外寸法) の直方体中で、

$$\frac{17.29 \times 2 - 17.13}{(5.52)^2 \times 1.0} = 0.573 \text{ g/cm}^3$$

となる。この余分に存在する不銹鋼が系の臨界性におよぼす影響を、中心面上にて不銹鋼の反応度価分布を測定することにより評価した。不銹鋼の反応度価分布は、各燃料引出の第 1 パックに装填した 1/4 インチ厚さの不銹鋼板 3 枚 (重量は計 373 g) を同じ厚さのボイド缶 3 枚 (不銹鋼重量は 72 g) と置換することにより測定した。不銹鋼 1 g 当りの径方向反応度価分布を Fig. 5.3 に示す。不銹鋼の反応度価は炉心部では中性子吸収効果により負であり、周辺のブランケット部に至って反射効果により正となる。集合体の中心面を同心円にて区切り、円環状の各リング内に余分に存在する不銹鋼の量を求め、Fig. 5.3 の不銹鋼の反応度価分布を用いて、各リング内の不銹鋼による反応度効果を算出し加え合わせると Table 5.4 に示した如く、 $0.069 \pm 0.123 \rho_0$ 、あるいは、 $0.0044 \pm 0.0077 \% \Delta k/k$  となった。

### 5.4 温度効果

Pu を燃料として装荷する臨界集合体では、Pu の  $\alpha$  崩壊による発熱が系の反応度にどの程度影響をおよぼすかを検討しておく必要がある。FCA で両 1/2 集合体は空気により強制冷却されるが、密着の前後で空気の流れが変わり冷却条件が変わるために炉心温度が変化する。炉心温度を複数点にて測定し、それらが密着後の時間経過に対してどのように変化するかを測定して以下の結果を得た。

密着から 1.5 時間

密着直後から各点の温度は上昇し始める。<sup>注)</sup> 上昇速度、温度のピーク値、ピーク値に達する時間

注) 分離状態では冷却風を集合体中心面から取り入れている。密着状態では固定側から移動側へと冷却風を流す。

このため密着直後では、冷却能力が下がり Pu の発熱により一時的に炉心温度は上昇する。

等は各点毎に異なり、最も不安定な状態である。1時間を経過した時点では、各測定点とも温度は下降し始める。

#### 1.5時間から3時間

各点の温度は、下降速度は大きく ( $0.11 \sim 0.05^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ ) ほぼ一様に下降する。

#### 3時間以降

下降速度はほぼ一定 ( $0.04 \sim 0.02^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ ) で小さくなり各点とも安定した状態にあると言える。

温度変化が反応度に及ぼす影響を小さくするために、微小反応度の測定は両集合体密着後3時間を経過した後に行なうこととし、かつ、温度効果を実験的に求めて補正することとした。

ある基準状態から、室温調整により約 $8^{\circ}\text{C}$ 炉心温度を上昇させ ( $16.47^{\circ}\text{C} \rightarrow 24.27^{\circ}\text{C}$ ) それらの反応度変化から温度係数  $f_T (\rho_0 / ^\circ\text{C})$ を求めた。炉心温度としては、各 $1/2$ 集合体の炉心中央部の異なる3点にて温度を測定し、計6点 (F1, F2, F3, M1, M2, M3) の温度の平均値を採用した。温度係数の測定値は、

$$f_T = -\frac{-0.400 \pm 0.014}{7.80 \pm 0.14} = -0.051 \pm 0.002 \quad \rho_0 / ^\circ\text{C}$$

$$= -0.0032 \pm 0.0002 \quad \% \Delta k / k / ^\circ\text{C}$$

である。上記の測定誤差は、1回の測定につき制御・安全棒の引抜距離にそれぞれ $\pm 0.05\text{ mm}$ 、四隅指示計の読み取り値の平均値に $0.01\text{ mm}$ 、炉心温度に $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ をそれぞれ仮定して算出した。

上記の場合は、炉心温度が安定するのを待ち、数日間の間を置いて2つの臨界点を測定している。この他、密着したままの状態で1日放置しておき、温度変化による臨界点のドリフトを測定し、これらのデータから温度係数  $f_T$  として  $-0.056 \pm 0.003 \quad \rho_0 / ^\circ\text{C}$ を得た。この方法はトランジェントな状態にある臨界点の測定から温度係数を求める方法であるが、安定状態にある臨界点の測定から求めた温度係数より、やや高めの値となった。

### 5.5 周辺燃料反応度効果

臨界集合体を用いて実験を行なう場合、系の臨界点を測定するためには適切な余剰反応度が必要となる。また、臨界計算を実施するため系の形状を簡略化し、計算を容易にする必要もある。これらに関する情報を得るために、周辺の濃縮ウランドライバー燃料引出 (EUD) とブランケット燃料引出 (DUB) との置換反応度効果を測定した。下記に結果を示す。

位 置	反応度効果 ( $\rho_0 - \text{unit}$ )
F 19-21	DUB → EUD $1.154 \pm 0.015$
F 20-19	DUB → EUD $0.749 \pm 0.015$
F 18-22	DUB → EUD $0.870 \pm 0.015$
F 20-20	DUB → EUD $1.193 \pm 0.015$

## 5.6 出力較正

線型出力計No.6の読み取り値(Ch 6)が $0.5 \times 10^{-6}$  A時の炉出力 P(Watt)を、系の未臨界度  $\rho_{\text{sub}}(\Delta k/k)$ と系に装荷されている $^{240}\text{Pu}$ の自発核分裂数から算出する。

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{F}{3.1 \times 10^{10}} \quad (\text{Watt}) \\ F &= \frac{S}{\nu} = \frac{1}{\nu} \frac{S_0}{\rho_{\text{sub}}} \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

ここで、 F : 系全体の核分裂の数 ( $\text{fiss} \cdot \text{sec}^{-1}$ ) ,

S : 系全体の核分裂により発生する中性子の数 ( $n \cdot \text{sec}^{-1}$ ) ,

$\nu$  : 1核分裂当たり発生する中性子の数 ( $n \cdot \text{fiss}^{-1}$ ) = 2.73 ,

$S_0$  :  $^{240}\text{Pu}$  の自発核分裂により発生する中性子の数 ( $n \cdot \text{sec}^{-1}$ ) 。

上式で、1 Watt のエネルギーを発生させるのに必要な核分裂の数を  $3.1 \times 10^{10}$  ( $\text{fiss} \cdot \text{Watt}^{-1}$ ) とし、 $\nu$ は体系計算により 2.73 ( $n \cdot \text{fiss}^{-1}$ ) と算出された。系の未臨界度は  $\rho_{\text{sub}} = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{-5} \Delta k/k$  である。FCA XI-1 集合体の $^{240}\text{Pu}$ の装荷量は 2.18 kg であり、 $^{240}\text{Pu}$  1 g 当りの中性子発生数は  $(9.0 \pm 0.9) \times 10^2 n \cdot \text{sec}^{-1}$  であるから  $S_0 = (1.96 \pm 0.20) \times 10^7 n \cdot \text{sec}^{-1}$  となる。これらを (5.4) 式に代入して、

$$F = \frac{(1.96 \pm 0.20) \times 10^7}{2.73 \times (1.9 \pm 0.2) \times 10^{-5}} = (3.78 \pm 0.56) \times 10^{11} \quad \text{fiss} \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$P = \frac{(3.78 \pm 0.56) \times 10^{11}}{3.1 \times 10^{10}} = (1.22 \pm 0.18) \times 10 \quad \text{Watt}$$

以上の検討により、FCA XI-1 集合体の炉出力を、線型出力計No.6の読み取り値が  $0.5 \times 10^{-6}$  A の時  $1.2 \pm 0.2$  Watt とした。

Table 5.1 Reactivity calibration by substitution  
of rods at FCA XI-1 assembly

Step No	Position of safety rod № 3 (mm)	Position of control rod № 1 (mm)	Position of control rod № 2 (mm)	Core temperature (°C)	Gap ( $10^{-2}$ mm)
0	0.14	0.03	275.97	20.85	-4.2
1	5.013	0.03	212.11	—	—
2	0.15	48.30	212.11	20.67	-4.4
3	5.013	48.30	157.84	—	—
4	0.14	94.87	157.84	—	—
5	5.015	94.87	108.66	20.58	-4.4
6	0.14	143.12	108.66	—	—
7	5.015	143.12	61.58	—	—
8	0.14	195.03	61.58	20.50	-4.5
9	5.016	195.03	14.10	—	—
10	0.15	254.94	14.10	—	—
11	5.015	210.97	0.05	20.48	-4.5
12	0.14	274.34	0.05	—	—

Table 5.2 Data of safety/control rod reactivity  
worth measurement by sub-critical  
method at FCA XI-1 assembly

Case No.	Power			Rod Position			
	Ch 1 (cpm)	Ch 5 (A)	Ch 6 (A)	CR#1 (mm)	CR#2 (mm)	SR#3 (mm)	SR#4 ~SR#8
1	—	$0.511 \times 10^{-6}$	$0.508 \times 10^{-6}$	254.94	14.11	full in	full in
2	565207	$0.343 \times 10^{-8}$	$0.342 \times 10^{-8}$	254.94	212.10	5.013	full in
3	374703	$0.220 \times 10^{-8}$	$0.221 \times 10^{-8}$	full out	212.10	5.012	full in
4	255857	$0.152 \times 10^{-8}$	$0.154 \times 10^{-8}$	full out	full out	5.012	full in
5	62053	$0.033 \times 10^{-8}$	$0.036 \times 10^{-8}$	full in	full in	full out	full out

Table 5.3 Critical data on gap effect measurements  
at FCA XI-1 assembly

Item	Control rod position		Core temperature (°C)	Gap (mm)
	CR #1 (mm)	CR #2 (mm)		
Reference 1	9 4.8 8	1 5 6.0 8	2 1.1 8	- 0.0 3 7
2.0 mm	9 4.8 7	6 3.0 5	2 1.1 2	2.0 9 9
1.0 mm	9 4.8 7	1 1 3.3 6	2 1.0 7	0.9 8 9
0.5 mm	9 4.8 7	1 3 6.8 3	2 0.9 3	0.4 5 0
0.25 mm	9 4.8 7	1 4 8.0 5	2 0.8 0	0.1 9 0
Reference 2	9 4.8 7	1 5 7.5 9	2 0.7 6	- 0.0 4 0

Table 5.4 Reactivity worth of stainless steel at  
mid-plane of FCA XI-1 assembly

Ring No. i	Area : Si (cm <sup>2</sup> )	Excess SS:Wi ( g )	SSworth: ρ <sub>i</sub> ( 10 <sup>-5</sup> ρ <sub>o</sub> / g · SS )	Worth: Wi × ρ <sub>i</sub> ( ρ <sub>o</sub> )
1	3 0.4 7	1 7.4 6	- 9.7 ± 1.7	- 0.0 0 1 7 ± 0.0 0 0 3
2	1 8 5	1 0 6	- 9.7 ± 1.7	- 0.0 1 0 3 ± 0.0 0 1 8
3	3 8 3	2 1 9	- 9.7 ± 1.7	- 0.0 2 1 2 ± 0.0 0 3 7
4	5 7 5	3 2 9	- 9.7 ± 1.7	- 0.0 3 1 9 ± 0.0 0 5 6
5	7 6 5	4 3 8	- 9.7 ± 1.7	- 0.0 4 2 5 ± 0.0 0 7 4
6	9 5 8	5 4 9	- 9.7 ± 1.7	- 0.0 5 3 3 ± 0.0 0 9 3
7	1 1 4 8	6 5 8	- 1.7 ± 1.7	- 0.0 1 1 2 ± 0.0 1 1 2
8	1 3 4 1	7 6 8	7.6 ± 1.7	0.0 5 8 4 ± 0.0 1 3 1
9	1 5 3 1	8 7 7	1 2.0 ± 1.7	0.1 0 5 2 ± 0.0 1 4 9
10	1 7 2 3	9 8 7	6.0 ± 1.7	0.0 5 9 2 ± 0.0 1 6 8
11	1 9 1 5	1 0 9 7	1.7 ± 1.7	0.0 1 8 6 ± 0.0 1 8 6
12	2 1 0 6	1 2 0 7	0.0 ± 1.7	0.0 0 0 0 ± 0.0 2 0 5

$$\sum_{i=1}^{12} W_i \rho_i = 0.0 6 9_3 \pm 0.1 2 3_2 \rho_o$$

$$= 0.0 0 4 4 \pm 0.0 0 7 7 \% \Delta k/k$$

$$(1 \rho_o = 0.0 6 2 9 \% \Delta k/k)$$

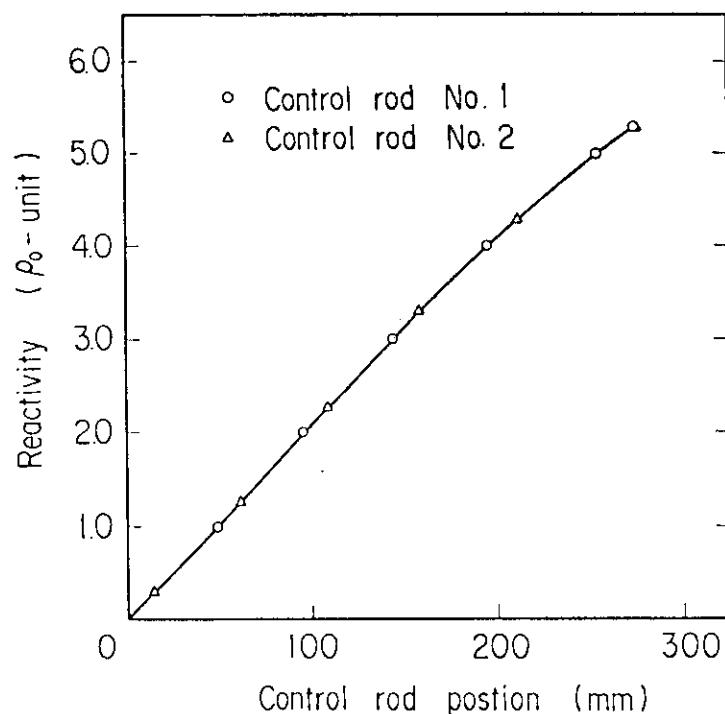


Fig. 5.1 Calibration curve of control rods No. 1 and No. 2 of FCA XI-1 assembly

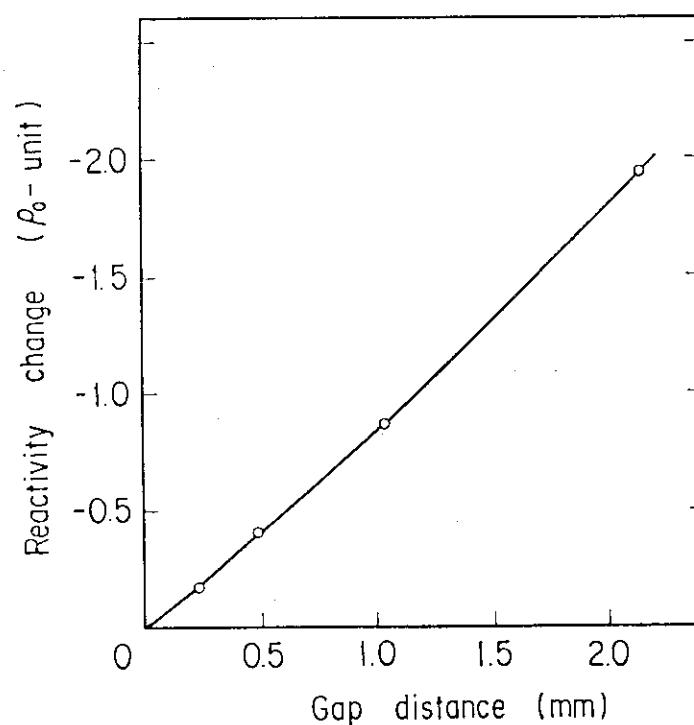


Fig. 5.2 Reactivity change versus gap distance at FCA XI-1 assembly

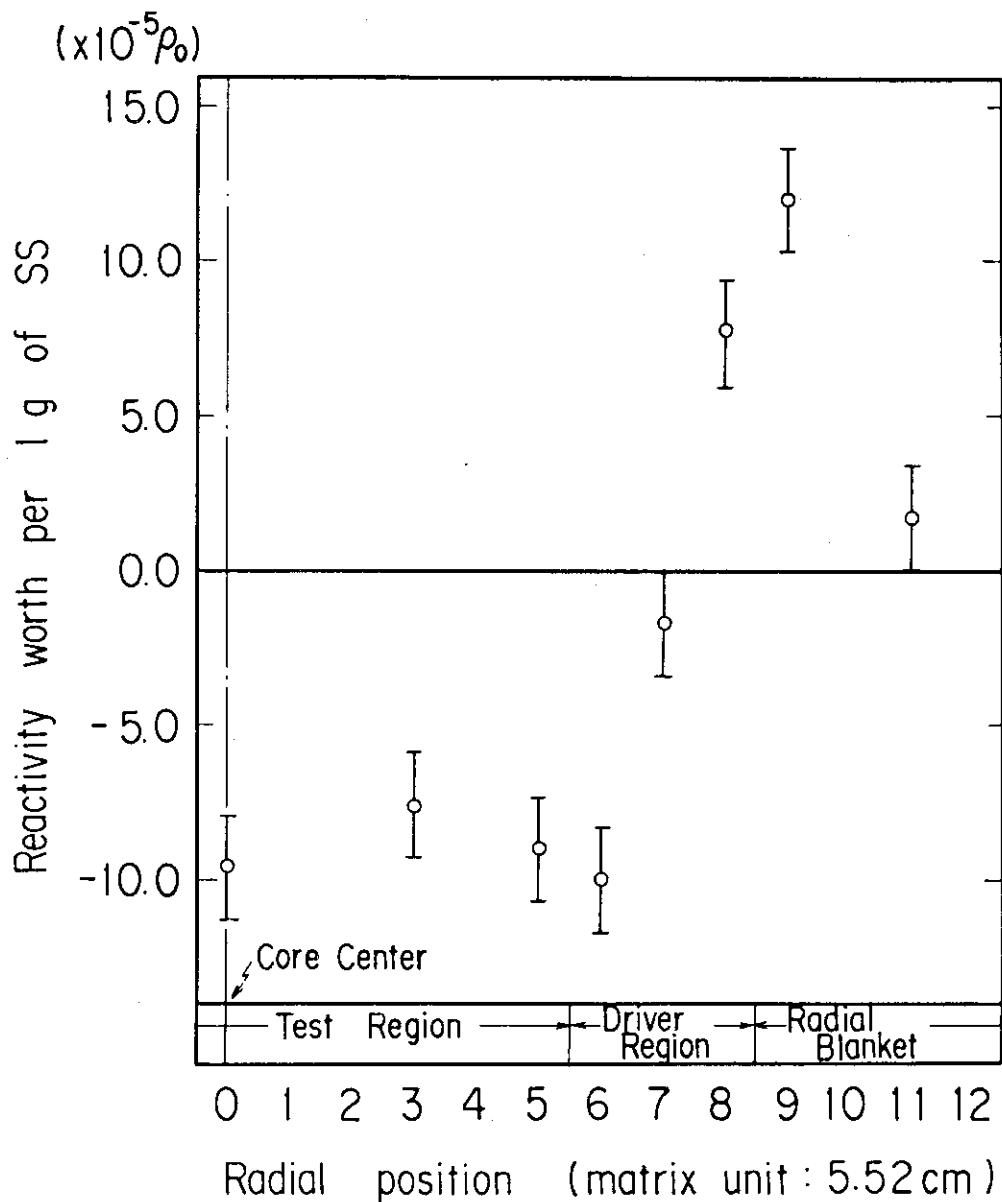


Fig. 5.3 Radial distribution of stainless steel reactivity worth at FCA XI-1 assembly

## 6. 臨界性に関する検討

実験にて臨界点を決定した系の実効増倍率に種々の補正を加えて計算可能な体系の実効増倍率  $K_{eff}(E_{xp})$  を求める。

$$K_{eff}(E_{xp}) = 1.0 + \Delta K(\text{sub}) + \Delta K(\text{Excess}) + \Delta K(\text{Gap}) + \Delta K(\text{ss}) + \Delta K(\text{Edge}) \quad (6.1)$$

$\Delta K(\text{sub})$ : 未臨界度に対する補正,

$\Delta K(\text{Excess})$ : 余剰反応度に対する補正,

$\Delta K(\text{Gap})$ : 密着面間の間隙に対する補正,

$\Delta K(\text{ss})$ : 密着面間に余分に存在する不銹鋼に対する補正,

$\Delta K(\text{Edge})$ : 形状補正。

上記の各項目別に以下補正量を検討する。臨界データとして Table 4.3 の第3カラムに与えたデータを用いた。

### $\Delta K(\text{sub})$ : 未臨界度に対する補正

$Pu$  を燃料とした体系では  $Pu$  の自発核分裂中性子による反応度効果が存在する。この効果は出力レベルの相違による見かけの臨界点の推移を測定することにより(5.1.6)式を用いて算出が可能である。Table 5.3 より、線型出力計 No. 6 (Ch 6) の出力レベルを  $0.505 \times 10^{-6} A$  から  $0.505 \times 10^{-5} A$  に変えたとき、制御棒 No. 1 の引抜距離は 9.530 mm から 9.386 mm に変化した。炉心温度も 20.43 °C から 20.46 °C に変化しているので、この効果を補正して、反応度変化は  $\Delta \rho_{1 \rightarrow 2} = -0.028 \pm 0.002 \rho_0$  となる。(5.1.6)式に代入して出力レベル Ch 6 =  $0.505 \times 10^{-6} A$  における未臨界度  $\rho_{\text{sub}}$  は、

$$\rho_{\text{sub}} = \frac{-0.028 \pm 0.002}{\frac{0.505 \times 10^{-6}}{0.505 \times 10^{-5}} - 1} = 0.031 \pm 0.002 \rho_0 ,$$

$$\therefore \Delta K(\text{sub}) = -0.000019 \pm 0.000002 \quad \Delta k/k$$

### $\Delta K(\text{Excess})$ : 余剰反応度に対する補正

出力レベル Ch 6 =  $0.505 \times 10^{-6} A$  で制御棒 No. 1 は 9.530 mm, No. 2 は 10.867 mm, 安全棒 No. 3 は 5.015 mm 引抜かれている。これらが完全に挿入され、かつ、温度が 20 °C、四隅指示計の指示値が零になる状態の反応度  $\rho_{ex}$  を求めると、

$$\rho_{ex} = (5.294 \pm 0.003) + (0.022 \pm 0.005) - (0.036 \pm 0.008) + (\pm 0.022)$$

$$= 5.280 \pm 0.025 \rho_0 ,$$

$$\therefore \Delta K(\text{Excess}) = 0.00332 \pm 0.00002 \quad \Delta k/k$$

#### $\Delta K(\text{Gap})$ : 密着面間隙に対する補正

5.2節にて検討した如く  $2.1 \pm 0.3$  mm の間隙に対する反応度補正是  $1.70 \pm 0.28 \rho_0$  であるから,

$$\Delta K(\text{Gap}) = 0.00107 \pm 0.00018 \quad \Delta k/k$$

#### $\Delta K(\text{ss})$ : 密着面間の不銹鋼に対する補正

5.3節における考察により、密着面間に余分に存在する不銹鋼に対する反応補正是  $0.0069 \pm 0.1232 \rho_0$  と求められているから、

$$\Delta K(\text{ss}) = -0.000044 \pm 0.000077 \quad \Delta k/k$$

#### $\Delta K(\text{Edge})$ : 形状補正

実験体系は、実験に必要な余剰反応度を確保するという要請から形状的には不規則なものになっている。そこで計算の便利さを考慮して  $1/4$  象限にて対称となるように周辺の燃料を減らした体系を考える。Fig. 4.3 に示した XI-1 集合体は濃縮ウランドライバー引出 (EUD) が固定側に 75 本、移動側に 74 本装荷されている。この体系の固定側から 3 本 (F 19-21, F 19-31, F 33-21), 移動側から 2 本 (M 19-31, M 33-21) EUD を装脱し、固定側、移動側共 EUD を 72 本計 144 本を装荷した体系を XI-1 集合体の臨界体系とする。装脱された 5 本の EUD の中心からの等価半径は等しく、また、その 1 本当りの反応度価値 (径方向ブランケット引出 DUB を EUD にて置き換えた際の反応度変化) は測定されており、 $1.154 \pm 0.015 \rho_0$  である。従って、 $\Delta K(\text{Edge})$  は、加算性を仮定して、

$$\begin{aligned} \Delta K(\text{Edge}) &= -5 \times (1.154 \pm 0.015) \times 0.000629 \\ &= -0.00363 \pm 0.00005 \quad \Delta k/k \end{aligned}$$

以上の考察から、実験的に決められた XI-1 集合体 (EUD 144 本装荷) の実効増倍率  $K_{\text{eff}}$  ( $E_{\text{xp}}$ ) は、以下の補正項、

$$\begin{array}{ll} \Delta K(\text{sub}) & : -0.000019 \pm 0.000002, \\ \Delta K(\text{Excess}) & : +0.00332 \pm 0.00002, \\ \Delta K(\text{Gap}) & : +0.00107 \pm 0.00018, \\ \Delta K(\text{ss}) & : -0.000044 \pm 0.000077, \\ \Delta K(\text{Edge}) & : \frac{-0.00363 \pm 0.00005,}{\text{計}} \quad \Delta k/k \end{array}$$

を (6.1) 式に代入して、

$$\begin{aligned} K_{\text{eff}}(E_{\text{xp}}) &= 1.00070 \pm 0.00020 \\ &\text{となる。} \end{aligned}$$

実験値と対応する実効増倍率の計算値は、通常の拡散理論の他、方向依存拡散係数を用いた拡散理

論および輸送理論にてそれぞれ求めた。群定数セットに JFS-3-J2 セル計算コードに SLAROM<sup>6)</sup>を用いて、セル平均の非均質炉定数を作成した。このとき、テスト領域およびドライバー領域の燃料セルに対しては、セルの実効増倍率が 1.0 になるようにバックリングを調整した。セル平均の g エネルギー群の X 反応実効炉定数  $\tilde{\Sigma}_{x,g}$ 、通常の拡散係数  $\tilde{D}_g$ 、方向依存拡散係数  $\tilde{D}_{g,J}$  (J は方向を表わす) は以下の如く定義した。

$$\tilde{\Sigma}_{x,g} = \frac{\sum_{\ell} \Sigma_{x,g}^{\ell} \phi_g^{\ell} V^{\ell}}{\sum_{\ell} \phi_g^{\ell} V^{\ell}} \quad (6.2)$$

$$\tilde{D}_g = \frac{1}{3 \tilde{\Sigma}_{TR,g}} \quad (6.3)$$

$$\tilde{D}_{g,J} = \frac{\sum_{\ell'} \sum_{\ell} \phi_g^{\ell'} V^{\ell'} P_{g,J}^{\ell' \ell} / \Sigma_{TR,g}^{\ell}}{\sum_{\ell} \phi_g^{\ell} V^{\ell}} \quad (6.4)$$

ここで、 $\Sigma_{x,g}^{\ell}$  はセル内物質領域  $\ell$  の X 反応断面積、 $\phi_g^{\ell}$  と  $V^{\ell}$  はその領域での中性子束と体積である。 $P_{g,J}^{\ell' \ell}$  はセル内物質領域  $\ell'$  で発生した中性子が物質領域  $\ell$  にて衝突する確率の J 方向成分である。方向依存拡散係数を用いる 2 次元 X-Y 拡散計算の場合には、FCA XI-1 集合体の物質板配列を考慮し、X, Y 方向の拡散係数として、 $\tilde{D}_x = \tilde{D}_{\perp}$ ,  $\tilde{D}_y = \tilde{D}_{\parallel}$  を用いた。 $\tilde{D}_{\perp}$ ,  $\tilde{D}_{\parallel}$  は (6.6) 式において物質板に対して垂直および平行方向の拡散係数である。また、2 次元円柱拡散計算の場合には、Z, R 方向の拡散係数として、 $\tilde{D}_z = \tilde{D}_{\parallel}$ ,  $\tilde{D}_R = \frac{1}{2} (\tilde{D}_{\perp} + \tilde{D}_{\parallel})$  を用いた。

2 次元円柱計算モデルを Fig. 6.1 に示す。各領域の実効断面積は、個々に求めたセル平均の実効炉定数を図に示した各領域を構成するセルの体積比を重みとして混合し作成した。2 次元 X-Y 計算 (モデルを Fig. 6.2 に示す) では、各セルを 1 つの領域とみなし、それぞれの実効炉定数を適用した。輸送計算は、70 群の 2 次元円柱拡散計算によって求めた各領域の中性子束を重みとして 18 群に縮約した炉定数を用いた。

18 群 2 次元 X-Y 計算の場合テスト領域 1 の T1, T2 セルの縮約炉定数はテスト領域(1)の 70 群中性子束を重みとして、また、テスト領域(2)の T1, T2 セルの縮約炉定数はテスト領域(2)の 70 群中性子束を重みとして縮約した。ドライバー燃料セルに対しても同様である。18 群のエネルギー構造を Table 6.1 に示す。

また、2 次元 X-Y 計算における軸方向への中性子の洩れの補正として、2 次元円柱計算においてが心から軸方向ブランケットへの洩れから、領域依存、エネルギー依存のバックリング  $B_g^{\ell}$  を求め ( $B_g^{\ell}$ )<sup>2</sup> •  $\tilde{D}_g^{\ell}$  を吸収項として付加えた (g : エネルギー群,  $\ell$  : 領域)。

以上の如く作成された実効炉定数と、拡散理論コード CITATION-FBR<sup>4)</sup> および輸送理論コード TWOTRAN<sup>9)</sup> とを用いて FCA XI-1 集合体の臨界体系の実効増倍率を計算した。結果

を以下の表に示す。

エネルギー					
理論	モデル	群数	拡散係数	実効増倍率	
(1)	拡散	2 R Z	7 0	$\tilde{D}_{g,J}$	0.99953
(2)	拡散	2 R Z	1 8	$\tilde{D}_{g,J}$	1.00052
(3)	拡散	2 R Z	1 8	$\tilde{D}_g$	1.00515
(4)	拡散	2 X Y	7 0	$\tilde{D}_{g,J}$	0.99730
(5)	拡散	2 X Y	1 8	$\tilde{D}_{g,J}$	0.99815
(6)	輸送	2 X Y	1 8	—	1.02162

エネルギー群縮約効果は上記(1)と(2)とをまたは(4)と(5)とを比較することにより、また、方向依存拡散係数を用いたことによる効果は(2)と(3)とからそれぞれ求めることができる。FCA XI-1集合体はX-Y断面の形状が複雑なため、実験値と比較すべき実効増倍率の計算値として、2次元X-Yモデルでの実効増倍率を採用する。実効増倍率の計算値と実験値との比 C/Eは、方向依存拡散係数を用いた拡散計算と輸送計算とに対して、それぞれ、0.9966, 1.0209となる。

Table 6.1 Energy structure of 18-group cross-sections

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

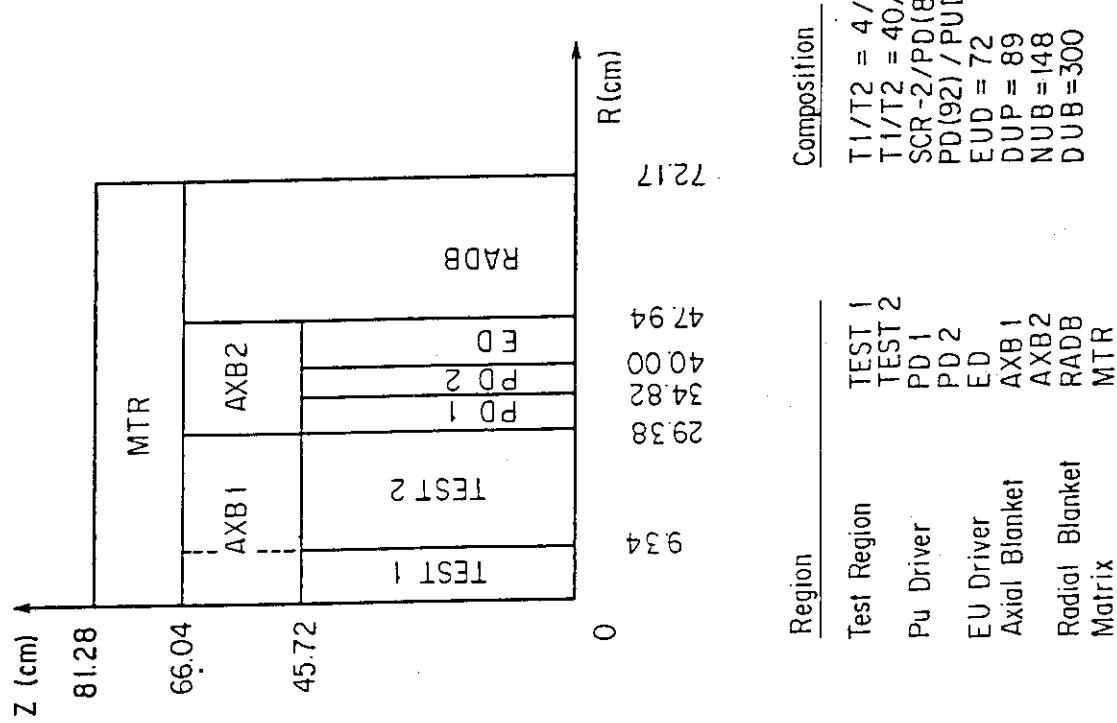


Fig. 6.1 Calculational 2RZ model of FCA XI-1 assembly

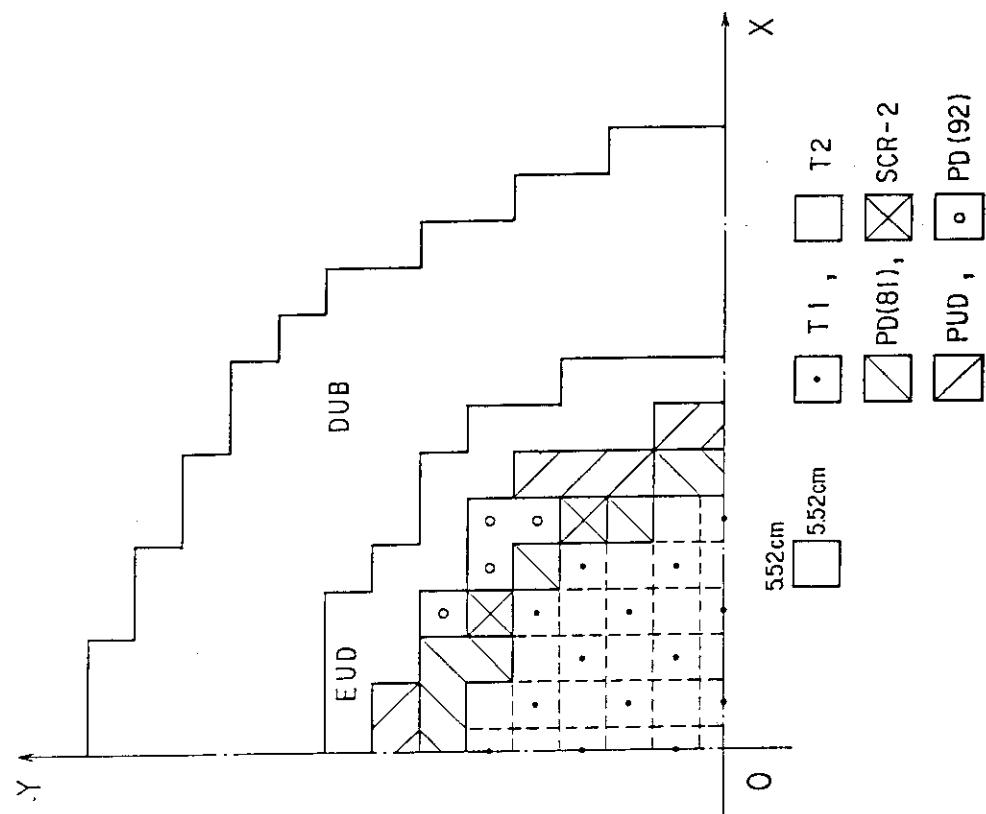


Fig. 6.2 Calculational 2XY model of FCA XI-1 assembly

## 7. 結 言

ゾーン装荷炉心により大型高速炉の内側炉心の部分模擬実験を実施した。実験を開始する前にゾーン装荷炉心（FCA XI-1集合体）の炉物理特性に関する予備解析を実施し、その中央領域ではフルモックアップを想定した体系の炉物理特性と良い対応がとれていることを示した。臨界近接に引続き、以後の実験に必要となる制御棒較正、測定データに対する補正係数を求めるための特性実験を実施した。得られた結果を以下にまとめた。

### (1) 臨界質量

濃縮ウランドライバー燃料引出（EUD）を固定側・移動側共72本、計144本装荷した体系での燃料装荷量は、核分裂性  $P_u$  ( $^{239}P_u + ^{241}P_u$ )が223 kg,  $^{235}U$ が292 kgである。また、この体系にて実験的に求められた実効増倍率は  $1.00070 \pm 0.00020$  であり、JFS-3-J 270群群定数セットを用いた二次元XY計算による計算値と比較して、

方向依存拡散係数を用いた拡散近似の  $C/E : 0.9966$

輸送近似の  $C/E : 1.0209$

を得た。

### (2) 制御棒較正

標準反応度  $\rho_0$  として、安全棒No.3の引抜距離 50 mm から完全挿入までの反応度印加を採用した ( $1 \rho_0 = 6.29 \times 10^{-4} \Delta k/k$ )。制御・安全棒の引抜距離 0 - 600 mm の全ストロークに対する反応度価値は以下の通りである。

	反応度価値	
	$(\rho_0)$	$(\% \Delta k/k)$
制御棒No.1	$7.75 \pm 0.13$	$0.487 \pm 0.008$
制御棒No.2	$7.75 \pm 0.13$	$0.487 \pm 0.008$
全安全棒	$44.90 \pm 0.13$	$2.824 \pm 0.008$

### (3) 補正係数

1/2集合体間の間隙に対する補正係数  $f_G$ 、および炉心温度に対する補正係数  $f_T$  は以下の値である。

$$\begin{aligned}
 f_G &= -0.81 \pm 0.06 \quad \rho_0/\text{mm-gap}, \\
 &= -0.051 \pm 0.004 \quad \% \Delta k/k/\text{mm-gap}, \\
 f_T &= -0.051 \pm 0.002 \quad \rho_0/^\circ\text{C}, \\
 &= -0.0032 \pm 0.0002 \quad \% \Delta k/k/^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

### (4) 出力較正

FCA XI-1集合体の炉出力を、系の未臨界度と  $^{240}P_u$  の自発核分裂とを利用して算出した。その結果、線型出力計No.6の読み取り値が  $0.5 \times 10^{-6} \text{ A}$  の時の炉出力を  $12 \pm 2 \text{ Watt}$  と推定した。

## 謝 詞

本実験を遂行するにあたり種々の御協力をいただいた高速炉物理研究室の中野正文氏およびFCA管理機関諸氏に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) Till C. E. : NEACRP-A-272 (1976)
- 2) Takano H. et al. : "JAERI Fast Reactor Group Constants Set, Version II", JAERI 1225 (1978)
- 3) 大杉俊隆 他："衝突確率法を用いたセル計算コード PIGEON", JAERI-M 6038 (1975)
- 4) 飯島 進 : CITATION-FBR, 公刊予定
- 5) Takano H. et al. :"Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135 (1982)
- 6) 中川正幸 他："SLAROM, 高速炉の非均質系炉心解析コード", JAERI-M 5916 (1974)
- 7) 飯島 進 他："2次元・3次元摂動理論計算コード:PERKY", JAERI-M 6993 (1977)
- 8) Tomlinson L. :"Delayed Neutrons from Fission", AERE-R 6993 (1972)
- 9) Lathrop K. et al. :"Theory and Use of the General Geometry TWOTRAN Program", LA-4432 (1970)

## 謝 辞

本実験を遂行するにあたり種々の御協力をいただいた高速炉物理研究室の中野正文氏およびFCA管理機関諸氏に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) Till C. E. : NEACRP-A-272 (1976)
- 2) Takano H. et al. : "JAERI Fast Reactor Group Constants Set, Version II", JAERI 1225 (1978)
- 3) 大杉俊隆 他："衝突確率法を用いたセル計算コード PIGEON", JAERI-M 6038 (1975)
- 4) 飯島 進 : CITATION-FBR, 公刊予定
- 5) Takano H. et al. :"Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135 (1982)
- 6) 中川正幸 他："SLAROM, 高速炉の非均質系炉心解析コード", JAERI-M 5916 (1974)
- 7) 飯島 進 他："2次元・3次元摂動理論計算コード:PERKY", JAERI-M 6993 (1977)
- 8) Tomlinson L. :"Delayed Neutrons from Fission", AERE-R 6993 (1972)
- 9) Lathrop K. et al. :"Theory and Use of the General Geometry TWOTRAN Program", LA-4432 (1970)

## 付録 A 出力と未臨界度との関係式

真の臨界点の算出

今、中性子源  $S$  を持つ原子炉が臨界未満の状態にあるとする。1点炉の近似が成り立つと仮定して、この原子炉の未臨界度  $\rho$  と原子炉の出力  $P$  との関係を求める。原子炉の増倍率を  $k$ 、その他の記号も従来の表示法に従うとして動特性方程式を書き表わすと、

$$\frac{dP}{dt} = \frac{k(1-\rho)-1}{\ell} P + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + S \quad , \quad (A. 1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{k \beta_i}{\ell} P - \lambda_i C_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad , \quad (A. 2)$$

定常状態では、

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dC_i}{dt} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad . \quad (A. 3)$$

従って (A. 1) 式、(A. 2) 式より、

$$P = \frac{S \ell}{1-k} \quad (A. 4)$$

という関係が導かれる。増倍率  $k$  が 1.0 に近いとき、未臨界度  $\rho$  は

$$\rho = 1 - k \quad , \quad (A. 5)$$

としてよいから、(A. 4) 式は、

$$P = \frac{S \ell}{\rho} \quad , \quad (A. 6)$$

となる。中性子源の強さ  $S$ 、即発中性子寿命  $\ell$  は系に対して一定であるとしてよいから、原子炉の出力  $P$  と未臨界度  $\rho$  との間には定数  $A$  を介して、

$$P \rho = A \quad , \quad (A. 7)$$

と書き表わせる。出力レベル  $P_1, P_2$  に対応する未臨界度を  $\rho_1, \rho_2$  とすると、(A. 7) 式より

$$P_1 \rho_1 = P_2 \rho_2 \quad , \quad (A. 8)$$

が得られる。ここで、未臨界度  $\rho$  を制御棒 No. 1 の引抜位置  $X$  の差により定義するものとし、炉出力を無限大、 $P_1, P_2$  にしたときの制御棒 No. 1 の引抜位置をそれぞれ、 $X_\infty, X_1, X_2$  とすると、以下の関係式が得られる。

$$\left. \begin{array}{l} \rho_1 = X_1 - X_\infty, \\ \rho_2 = X_2 - X_\infty, \\ \Delta \rho_{1 \rightarrow 2} = \rho_2 - \rho_1 \\ = X_2 - X_1 \end{array} \right\} \quad (A. 9)$$

(A. 8) 式と (A. 9) 式を用いて、炉出力を無限大にしたときの制御棒No.1の引抜距離  $X_\infty$  (真の臨界点) は以下の如く求めることができる。

$$\left. \begin{array}{l} X_\infty = X_1 - \rho_1 \\ \rho_1 = \frac{\Delta \rho_{1 \rightarrow 2}}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \end{array} \right\} \quad (A. 10)$$

#### 未臨界法による制御棒および安全棒の反応度値

出力計の読取値  $C$  は原子炉出力  $P$  と比例しているから、(A. 7) 式を用いると、 $C$  とそのときの未臨界度  $\rho$  との間には以下の関係が成立する。

$$C = \frac{B}{\rho} \quad (A. 11)$$

ここで、 $B$  は中性子源の強さ、即発中性子寿命、検出器 (出力計) の効率等により決まる定数である。そこで、未臨界度  $\rho_1$  における出力計の読取値が  $C_1$  であったとすると、

$$C_1 = \frac{B}{\rho_1}, \quad (A. 12)$$

の関係式が得られる。次にこの状態に既知の反応度  $\Delta \rho_{1 \rightarrow 2}$  を投入した場合の読取値が  $C_2$  であったとすると、

$$C_2 = \frac{B}{\rho_2} = \frac{B}{\rho_1 + \Delta \rho_{1 \rightarrow 2}} \quad (A. 13)$$

(A. 12) 式、(A. 13) 式より

$$\rho_1 = \frac{\frac{\Delta \rho_{1 \rightarrow 2}}{C_1} - 1}{\frac{C_2}{B}} \quad (A. 14)$$

となり、(A. 10) 式と同様な式が導かれ、出力の読取値  $C_1, C_2$  とから系の未臨界度  $\rho_1$  を実験的に求めることができる。また、この状態を基準にして、未知の反応度  $\Delta \rho_{2 \rightarrow i}$  を投入した場合の出力の読取値が  $C_i$  であったとすると、

$$C_i = \frac{B}{\rho_i} = \frac{B}{\rho_1 + \Delta \rho_{1 \rightarrow 2} + \Delta \rho_{2 \rightarrow i}} \quad (A. 15)$$

となり、(A. 13) 式と (A. 15) 式とより

$$\rho_i = \frac{C_2}{C_1} \rho_2 \quad (\text{A. 16})$$

$$\Delta \rho_{2 \rightarrow 1} = (\rho_1 + \Delta \rho_{1 \rightarrow 2}) \left( \frac{C_2}{C_1} - 1 \right) \quad (\text{A. 17})$$

となって、出力計の讀取値  $C_i$  より、系の未臨界度  $\rho_i$  を求めることができ、また、投入反応度  $\Delta \rho_{2 \rightarrow 1}$  を導くことができる。

## 付録 B 実験精度

2つの異なる状態 I, IIの反応度をそれぞれ  $\rho_I$ ,  $\rho_{II}$ としたとき, それらの反応度変化  $\Delta \rho_{I \rightarrow II}$  および測定誤差  $\delta \rho_{I \rightarrow II}$  は以下の如く定義される,

$$\Delta \rho_{I \rightarrow II} = \rho_{II} - \rho_I$$

$$= \sum_{j=1}^J \rho_{II}(CR_j) - \sum_{j=1}^J \rho_I(CR_j) - f_G \cdot \Delta G_{I \rightarrow II} - f_T \cdot \Delta T_{I \rightarrow II}$$

(B. 1)

$$\delta \rho_{I \rightarrow II} = \sqrt{\delta \rho_I(CR)^2 + \delta \rho_{II}(CR)^2 + \delta \rho_G^2 + \delta \rho_T^2 + \delta \rho_L^2}$$

(B. 2)

ここで,

- $\rho_I(CR_j)$ ,  $\rho_{II}(CR_j)$  : 制御・安全棒No. j によって定義される状態 I, IIの反応度,
- $\delta \rho_I(CR)$ ,  $\delta \rho_{II}(CR)$  :  $\sum_{j=1}^J \rho_I(CR_j)$ ,  $\sum_{j=1}^J \rho_{II}(CR_j)$ に対する測定誤差であり,  
制御・安全棒No. j の位置表示に  $\pm 0.05$  mm の不確かさがあると仮定,
- $f_G$  : 5.2節にて求めた間隙係数,  
 $-0.81 \pm 0.06 \rho_0 / \text{mm-gap}$
- $f_T$  : 5.4節にて求めた温度係数,  
 $-0.051 \pm 0.002 \rho_0 / ^\circ\text{C}$
- $\Delta G_{I \rightarrow II}$ ,  $\Delta T_{I \rightarrow II}$  : 状態 I と II との間隙差および温度差,
- $\delta \rho_G$ ,  $\delta \rho_T$  : 上記の間隙差および温度差に対する補正に伴う誤差,
- $\delta \rho_L$  : 状態 I から II への装荷変更に際して生ずる誤差。

以下, 上記諸量を個々に検討していく。

#### 制御・安全棒位置表示の誤差

位置表示計の読み取り値に  $\pm 0.05$  mm の表示誤差をそれぞれ仮定した。引抜距離 50 mm を  $1 \rho_0$  と定義しているので, 上記表示誤差は  $\pm 0.001 \rho_0$  に相当する。考慮すべき制御・安全棒の本数 J として, 状態 I から状態 II への変更に際し操作した本数を採用した。即ち, 制御棒No. 1 あるいはNo. 2 のみで反応度変化を測定した場合には  $J = 1$  であり  $\delta \rho_I(CR)$ ,  $\delta \rho_{II}(CR)$  はそれぞれ  $\pm 0.001 \rho_0$  となる。また, 全ての制御・安全棒を操作して測定した場合には  $J = 8$  であり,

$$\delta \rho_I(CR) \text{ or } \delta \rho_{II}(CR) = \pm \sqrt{8} \times 0.001$$

$$= \pm 0.003 \rho_0$$

となる。状態 I, IIの反応度は  $\rho_0$  単位にて小数点以下 3 衔までで表わしているので,  $\delta \rho_I(CR)$ ,

$\delta \rho_{II}$  (CR) も小数点以下4桁目を切上げて小数点以下3桁までそれぞれ別個に計算した。他方、5.1節にて求められた制御棒較正曲線には $\pm 0.5\%$ の誤差があると仮定し、これによる誤差と $2 \times \delta \rho_I$  (CR)あるいは $2 \times \delta \rho_{II}$  (CR)とを比較して大きい方を、制御棒の引抜距離の差から反応度変化への変換誤差とした。

#### 密着面間隙測定誤差

分離密着に伴う密着面間隙距離の測定誤差を1回につき $\pm 0.01\text{ mm}$ とした。従って、2回の測定から得られる間隙の変化分 $\Delta G_{I \rightarrow II}$ に対する測定誤差は $\pm 0.014\text{ mm}$ となり、これは反応度変化にして $\pm 0.012\rho_0$ に相当する。また、密着状態のまま測定した間隙の変化分に対する測定誤差を $\pm 0.001\text{ mm}$ とした。これは反応度変化に対して $\pm 0.001\rho_0$ に相当する。

#### 炉心温度測定誤差

分離密着に伴う炉心温度の測定誤差を1回の測定につき $\pm 0.1^\circ\text{C}$ とした。従って、2回の測定から得られる炉心温度の変化分 $\Delta T_{I \rightarrow II}$ に対する測定誤差は $\pm 0.14^\circ\text{C}$ となり、これは反応度変化にして $\pm 0.008\rho_0$ に相当する。また、密着状態のまま測定した温度の変化分に対する測定誤差は $\pm 0.01^\circ\text{C}$ とした。これは反応度変化にして $\pm 0.001\rho_0$ に相当する。

#### 装荷変更に伴う誤差

装填・装荷・装脱時の燃料移動による反応度変化を1本当たりにつき $\pm 0.001\rho_0$ と仮定し、測定誤差に含めた。FCA XI-1集合体(EUD 148本装荷)には、制御・安全棒を除いて462本の燃料引出が装荷されている。これらの全ての燃料引出がそれらの装荷変更により同じ反応度変化をもたらすという保証は無いが、1本につき $\pm 0.001\rho_0$ の反応度変化をもたらすと仮定すると $\sqrt{462} \times 0.001 = \pm 0.022\rho_0$ となる。2つの臨界点に対する反応度変化に対しては $\pm \sqrt{2} \times 0.022 = \pm 0.031\rho_0$ となる。これは、制御棒の引抜距離にして約1.6 mmに相当し、大量の燃料引出の装荷変更時に経験的に得られる臨界点の不確かさと良い対応を示している。

以上の検討に基づき、2, 3の場合についてそれらの実験精度を評価してみる。

- ① 密着状態のまま、1本の燃料引出を装荷変更し、制御・安全棒を全て操作して反応度変化を測定した場合(サンプルワースの測定等)。

$$\begin{aligned}\delta \rho_{I \rightarrow II} &= \pm \sqrt{\delta \rho_I (\text{CR})^2 + \delta \rho_{II} (\text{CR})^2 + \delta \rho_G^2 + \delta \rho_T^2 + \delta \rho_L^2} \\ &= \pm \sqrt{0.003^2 + 0.003^2 + 0.001^2 + 0.001^2 + 0.001^2} \\ &= \pm 0.005 \rho_0\end{aligned}$$

- ② 上記と同じ測定を分離・密着を繰返すことにより測定した場合。この場合には $\delta \rho_G = \pm 0.012\rho_0$ ,  $\delta \rho_T = \pm 0.008\rho_0$ となり,

$$\begin{aligned}\delta \rho_{I \rightarrow II} &= \pm \sqrt{0.003^2 + 0.003^2 + 0.012^2 + 0.008^2 + 0.001^2} \\ &= \pm 0.015 \rho_0\end{aligned}$$

③ 余剰反応度に対する誤差。この場合  $\delta \rho_{(C R)} = \pm 0.003 \rho_0$ ,  $\delta \rho_G = \pm 0.008 \rho_0$ ,  $\delta \rho_T = \pm 0.005 \rho_0$  となる。また、多量の装荷変更を仮定して  $\delta \rho_L = \pm 0.022 \rho_0$  とすると、

$$\begin{aligned}\delta \rho &= \pm \sqrt{0.003^2 + 0.008^2 + 0.005^2 + 0.022^2} \\ &= \pm 0.025 \rho_0\end{aligned}$$

を得る。