

JAERI - M
84-076

FCAによる大型軸方向非均質炉心の炉物理研究(I)
—実験体系の選定とFCA XI-2集合体の特性試験—

1984年3月

飯島 進・三田 敏男・岡嶋 成晃・中野 正文

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, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

FCA による大型軸方向非均質炉心の炉物理研究(I)
—実験体系の選定と FCA XI-2 集合体特性試験—

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
飯島 進・三田敏男*・岡嶋成晃・中野正文

(1984年3月12日受理)

FCAにおいては、大型軸方向非均質炉心の核特性を研究するために一連の臨界実験を実施中である。この実験計画は、多くの予備計算結果を反映して設定されたものであるが、選定したFCA集合体によって得られる炉物理的特性は、着目する軸方向非均質炉心の特性を比較的よく再現できていると考えられる。この実験計画は、FCA XI, XII, XIII, 集合体において実施されることになる。

本実験計画の最初の炉心であるFCA XI-2は、1984年2月9日に臨界になった。この炉心での実験は以前行われた原型炉規模軸方向非均質炉心に対するFCA VII-3による実験との対比が可能になる。

本報告書では、実験計画設定のための予備計算の結果とFCA XI-2集合体の特性試験の結果について報告する。

本報告書は日本原子力研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により行なった研究の成果である。

* 外来研究員：株式会社日立製作所・エネルギー研究所

JAERI-M 84-076

Experimental study of Large Scale Axially
Heterogeneous LMFBR Cores at FCA (I)

Experimental Program and Critical
Experiment of FCA Assembly XI-2

Susumu IIJIMA, Toshio SANDA*,
Shigeaki OKAJIMA and Masafumi NAKANO

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received March 12, 1984)

A series of physics experiments is being carried out at FCA in order to investigate the nuclear characteristics of large scale axially heterogeneous LMFBR cores. The experimental program was decided basing on extensive calculation works. The calculations show that the physics performances of the selected FCA assemblies well simulate those of the axially heterogeneous LMFBR core concerned. The program will be conducted on FCA assemblies XI, XII and XIII.

The first version of the cores in the program, FCA XI-2, went critical on February 9, 1984. The FCA XI-2 experiment provides useful comparison with the previous FCA VIII-3 experiment for a prototype-scale axially heterogeneous LMFBR core.

The present paper describes the calculational works to decide the experimental program, and the critical experiment of FCA XI-2.

Keywords : Fast Reactor, LMFBR Reactor, Assembly, Critical Experiment
Axially Heterogeneous Core

This work was performed under contracts between the power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation and JAERI

* HITACHI, LTD.

目 次

1. はじめに.....	1
2. 実験体系の選定条件.....	3
2.1 軸方向特性の模擬実験体系.....	3
2.2 径方向特性の模擬実験体系.....	4
3. サーベイ計算による実験体系の選定.....	9
3.1 軸方向特性の模擬実験体系	9
3.1.1 サーベイ計算.....	9
3.1.2 実験体系の選定.....	12
3.2 径方向特性の模擬実験体系	14
3.2.1 軸方向ドライバーを有する体系.....	14
3.2.2 セクター形状実験体系.....	15
4. FCA XI-2集合体の構成と特性試験.....	44
4.1 FCA XI-2集合体の構成	44
4.2 臨界基準体系での特性試験.....	45
4.3 臨界性の検討.....	45
5. 結 言.....	54
謝 辞.....	54
参考文献.....	55

Contents

1.	Introduction	1
2.	Design criteria of FCA assemblies for large-scale axially heterogeneous LMFBR cores	3
2.1	Simulation of physics characteristics in central axial direction	3
2.2	Simulation of physics characteristics in radial direction ...	4
3.	Design study and principal aspects of selected FCA assemblies ..	9
3.1	Assembly design study for physics characteristics in axial direction	9
3.1.1	Physics design calculation	9
3.1.2	Selected FCA assemblies	12
3.2	Assembly design study for physics characteristics in radial direction	14
3.2.1	Investigation on assemblies with axial driver	14
3.2.2	Investigation on sector-type assemblies	15
4.	Critical experiment on FCA Assembly XI-2	44
4.1	Core configuration of FCA XI-2	44
4.2	Experimental results of criticality	45
4.3	Discussion on experimental results	45
5.	Conclusion	54
	Acknowledgement	54
	References	55

1. はじめに

大型高速炉に採用する炉心候補の1つとして軸方向非均質炉心があげられている。軸方向非均質炉心の核特性上の特徴として

- (i) 増殖性能の向上
- (ii) ナトリウムボイド反応度の低減
- (iii) 出力分布の平坦化
- (iv) 高速中性子の最大照射量の低減による燃料の長寿命化
- (v) 制御棒反応度価値の最大値の減少
- (vi) 仮想事故時のエネルギー放出量の低減化

等が考えられており、軸方向非均質炉心によって大型高速炉の核特性を向上させることができる期待されている。

炉心設計のための核計算においては、炉心中心の最も反応度が高い部分にブランケット燃料が装荷されこの内部ブランケット中の核特性の計算精度あるいは内部ブランケットと炉心の境界領域の取扱いが、炉心設計精度に大きな影響を及ぼす。そのため軸方向非均質炉心の核設計においては、均質炉心とは異なる新たな問題が生じてくる。

FCAではXI-1集合体を用いて大型均質炉の炉物理実験¹⁾が行なわれて来たが、この実験に引き続き軸方向非均質炉心の実験を計画した。この実験は軸方向非均質大型高速炉の基本的核特性を把握すること、および核設計における計算精度を確証するために必要な実験データを得ることを目的とする。

実験では、臨界特性、反応率分布、物質反応度価値、ナトリウムボイド反応度、ドップラー反応度、制御棒反応度価値およびγ線加熱の測定を予定している。

また軸方向非均質炉心の安全性に関する実験として、燃料溶融を模擬したスランピング実験、あるいは燃焼に伴なう核特性の変動を考慮した実験を計画している。軸方向非均質炉心ではブランケットと炉心の境界付近あるいは内部ブランケット内で反応率分布を詳細に測定する必要があり、箔による測定を充実させるため、新しい測定装置の開発を行なう。

FCAで使用できるプルトニウム燃料は約300 kgであり、大型炉心を組むために必要な量の1/10程度にすぎない。そのためFCAを用いた大型炉心の模擬実験にあたっては様々な工夫をしなくてはならない。今回の実験では軸方向非均質炉心の核特性を軸方向と径方向に分離し、それぞれの特性を把握できるような別々の炉心を組んで実験を行い、最終的に両者を合成して軸方向非均質炉心の核特性を明らかにする方法により燃料の不足を補うこととした。具体的にはXI-1集合体の実験と同様に大型炉心を模擬した燃料組成を持つテスト領域を炉心中心部に設ける。テスト領域の燃料の軸方向の長さは大型炉心と同じとする。そしてテスト領域周辺に臨界を保つためのドライバー領域を設ける。この領域の燃料としては主に濃縮ウランを使用し、核種組成比の異なるプルトニウム燃料も装填する。軸方向非均質炉心の核特性のうち、軸方向に関する基本的特性をテスト領域中心部で測定する。

この方法で問題となるのは、濃縮ウランを使用しても、大型炉心を模擬するのに十分な大きさの炉心とならないため、ドライバー領域の核分裂物質の密度をテスト領域の燃料よりかなり高くしなくてはならない。そのため体系の臨界性に対するドライバー領域の寄与が大きなものとなり、炉心全体の核特性をドライバー領域が支配してしまう状態も起ってくる。そのため、実験体系の選定にあたっては炉心中心部分へのドライバー領域からの影響をできるだけ小さくするように配慮しなくてはならない。

径方向の特性を測定する方法はFCA VII-1集合体の実験で行ったようなセクター型の部分モックアップ実験が考えられる。この方法は中心断面でみた場合、断面の一部に扇形のテスト領域を設け、そこに大型高速炉の組成を持つ燃料を装荷する。そしてのこりの部分をドライバー領域とする。このやり方を採用すると大型高速炉を径方向に模擬することが可能になるが問題点としてはテスト領域とドライバー領域に装荷された核分裂物質の密度が大幅に異なると、体系中に核分裂物質が片寄って存在することになり、炉心全体が傾いた状態になる。その結果、模擬すべき体系の核特性を十分に再現できないといった問題が生じてくる。

軸方向非均質炉心の核特性に関する実験をFCAを用いて行うため、軸方向非均質大型炉の概念設計等を考慮し、また使用可能な燃料の量を念頭において実験体系の選定を行った。選定は予備計算を中心に行い、FCAにおいて組むことが可能な体系をサーベイするための計算と、候補として考えられる体系と軸方向非均質大型炉の核特性を計算結果により比較した。第2章で選定作業、第3章で予備解析について記す。

FCA XI-1集合体による均質体系の実験に引き続き、今回の軸方向非均質炉心実験計画の最初の炉心であるFCA XI-2集合体での実験を開始した。XI-2集合体の構成と臨界特性試験について第4章で述べる。

以上、本編では軸方向非均質炉心実験の予備解析と実験計画およびFCA XI-2集合体の臨界特性試験までの実験結果について述べる。

2. 実験体系の選定条件

臨界集合体を使用して模擬実験を行う場合、模擬対象の実体系と模擬体系について、両者の(1)物質の組成、及び(2)幾何学的形状と大きさ、をできるだけ一致させる必要がある。例えば、実証炉の軸方向非均質炉心の概念設計案²⁾(以下、単に実証炉と呼ぶ。Fig. 2.1)では、炉心高さ95 cm、炉心直径330 cmで炉心体積が約8000 ℥、燃料の装荷量は核分裂性プルトニウム(Pu)で約3.5tonである。FCAを用いて大型炉の模擬実験を行う際には、FCA所有の核分裂性物質の量(核分裂性Pu:約300 kg, U-235:約550 kg)が充分でないので、上記の(2)の条件には大きな制約を受けることになる。

FCAの場合、U-235量の核分裂性Pu量への換算係数を3/4としても、等価的な核分裂性Pu量は約700 kgであり、大型炉の全炉心規模の模擬実験は不可能と言える。

一方、炉心内部にブランケットを有する軸方向非均質炉心では、その内部ブランケットの形状の違いが炉心全体の核特性に影響を及ぼすため、全炉心規模の模擬実験を行わないとこの炉心概念の基本特性を完全に把握することができない。

このため、実体系の軸方向と径方向特性をそれぞれ分離して、2種類の部分模擬実験を行う必要がある。

軸方向特性の模擬体系としては、これまでFCAで組まれた種々の体系(FCA VII-3³⁾, XI-1等)と同様に、径方向周辺にドライバーを有する体系を検討した。

径方向特性の模擬体系としては、これまでFCAでは実施経験のない炉心上下部にドライバーを有する体系、及び物質の組成の模擬はある程度犠牲してPu富化度を高めたセクタ形状のテスト領域を有する実験体系を検討した。

2.1 軸方向特性の模擬実験体系

実験体系(モデルAと名付ける)は、次の基本条件の下で選定した。

- (1) 体系の中央部に大型炉の炉心組成を模擬したテスト領域(内部ブランケットを含む)を設ける。
- (2) テスト領域の軸方向の長さ、即ち炉心高さをできるだけ実体系に一致させる。内部ブランケットについては、その径と厚さをパラメータとする。
- (3) 実験体系の臨界を維持するため、テスト領域の周囲にプルトニウム及び濃縮ウランのドライバーを設ける。
- (4) すでに実施した大型炉均質炉心模擬実験(FCA XI-1集合体)との比較評価が容易である。
- (5) 過去に実施した原型炉クラスの炉心組成を模擬した軸方向非均質基礎実験(FCA VII-3集合体)との比較評価が容易である。

上記(1), (2)の条件を満すことにより、テスト領域中央部の核特性は大型炉の核特性とある程度

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量に依存する。

FCAでは、内側断面2インチ×2インチの燃料ドロワーに、一辺が2インチの正方形の燃料板と模擬物質板を縦方向に装填して燃料ドロワーを作る。このため、各ドロワーのPu富化度(fissile Pu/heavy metal)はある程度限定される。そこで、テスト領域の燃料セルパターンの選定に先立ち、基本的なセルパターン、つまり各セル当たりPu1枚(パターンF1), 2枚(パターンF2), 3枚(パターンF3), 4枚(パターンF4)の基本特性を整理した(Table 2.1)。本表において、最小臨界量は、各セルパターンで構成された均質炉心(炉心高さ91.4cm)を軸方向及び径方向にそれぞれ20.3cm, 30.0cmのブランケットで囲んだ体系で、炉心の径をパラメータとして70群2次元RZ拡散計算(群定数セットJFS-3-J⁴⁾)で臨界サーチして求めた。Fig. 2.2に炉心中心での中性子スペクトル(基本モードスペクトル)を示す。

前述の条件(1)～(5)のもとで、実験体系の基本仕様を以下のごとく選定した。

- (1) テスト領域の高さ及び直径は、91.4cm, 58.8cmとする。この結果、炉心高さは実証炉の高さ(95cm)にはほぼ一致し、その直径はFCA XI-1集合体に一致する。
- (2) テスト領域の炉心セルパターンは、基本セルパターンF2とし、内部及び軸方向ブランケットは、F2のPu板を天然ウラン板に置換したパターンとする。この結果、炉心のPu富化度(13.2w/o)は実証炉(14.6w/o)に近いものとなる。Table 2.2にモデルA, FCA VII-3-1と実証炉の主要仕様を比較して示す。実証炉のPu富化度はモデルAとFCA VII-3-1の中間に位置している。
- (3) ドライバーは、FCA XI-1集合体で使用したものができるだけ流用する。この結果、テスト領域の直径が等しいためにドライバーのテスト領域に与える影響がFCA XI-1炉心実験と同程度になる。
- (4) 内部ブランケット厚さは20cmおよび30cmとする。この結果、実証炉の中心付近の厚さ(22cm)を十分模擬できる。
- (5) 内部ブランケット径は可変とするが、基準体系はFCAの所有燃料の範囲内で、できるだけ径を大きくする。これは、内部ブランケット径が小さいと、ドライバーの炉心中心軸特性に与える影響が大きくなるためである。

2.2 径方向特性の模擬実験体系

軸方向特性の模擬実験体系としては、基本セルパターンF2を採用した。これに対応する径方向特性の模擬実験体系として、炉心のセルパターンがF2であるテスト領域を有する体系(モデルB)を検討した。

このセルパターンを用いると、Table 2.1で示したごとく、FCA所有の燃料では全炉心規模の模擬実験が不可能であり、Pu富化度あるいは濃縮度の高いドライバを有する体系を考える必要がある。そこで、以下の基本仕様のもとで実験体系を検討した。

- (1) テスト領域の炉心セルパターンは、モデルAと同一のF2とする。
- (2) テスト領域の炉心上下部にFCA XI-1集合体で用いたドライバーを設ける。

(3) テスト領域の軸方向高さは、内部ブランケット中心部へのドライバーの影響を考慮して基準体系では 61.0 cm(12 パック)とする。

次章で述べるごとく、上記の仕様のもとで検討したモデルBは、FCA の所有燃料の制限によりテスト領域の径方向寸法は実証炉（直径約 330 cm）に比べて十分ではなく、その径方向特性は実証炉のそれとは相当異なるものとなる。

そこで、径方向特性模擬実験体系の検討の第 2 ステップとして、実証炉の炉心組成の模擬はある程度犠牲にして、Pu 富化度の高い基本セルパターン F 3 を採用することにした。Table 2.1 から判るように、F 3 で構成された均質炉心の核分裂性 Pu の最小臨界量は約 300 kg であり、(U - 235) を用いると、セクタ形状の非均質炉心模擬実験体系が組める可能性がある。このセクタ形状の実験体系では、モデルBのごとく軸方向にドライバーを有する体系とは異なり、径方向のみならず軸方向特性に関する実験データがえられるという特徴がある。この体系は実証炉の炉心組成の模擬は十分ではないが、軸方向非均質炉心の空間特性を把握する基礎実験体系としては有効な体系と考えられる。そこで、以下の基本仕様のもとで実験体系（モデルC）を検討した。

- (1) テスト領域の炉心セルパターンは F 3 とする（これはFCA VII-3-1 と同一である）。
- (2) セクタ形状のテスト領域を濃縮ウランドライバーで囲んだ体系とする。
- (3) テスト領域の高さは、径方向寸法を大きくするために 80 cm 程度とする。
- (4) ドライバーの組成はできるだけテスト領域のそれに合せて、テスト領域へのドライバーの影響を低減する。

Table 2.1 Characteristics for Fundamental Cell Pattern

Cell Name	F1	F2	F3	F4
Cell Pattern Pu(1/16)/Na(1/4)/NU(1/16)/ DUO ₂ (1/4)/Al ₂ O ₃ (1/16)	1/4/2/ 3/1	2/4/0/ 3/2	3/4/0/ 3/1	4/4/0/ 3/0
Pu Enrichment * (w/o)	5.3	13.2	18.4	23.0
k _{inf}	0.824	1.245	1.514	1.724
Core Radius** (cm)	—	92.1	40.8	28.9
Minimum Critical** Pu Mass(kg)	—	1021.0	300.3	200.3

* Fissile Pu/ Heavy Metal

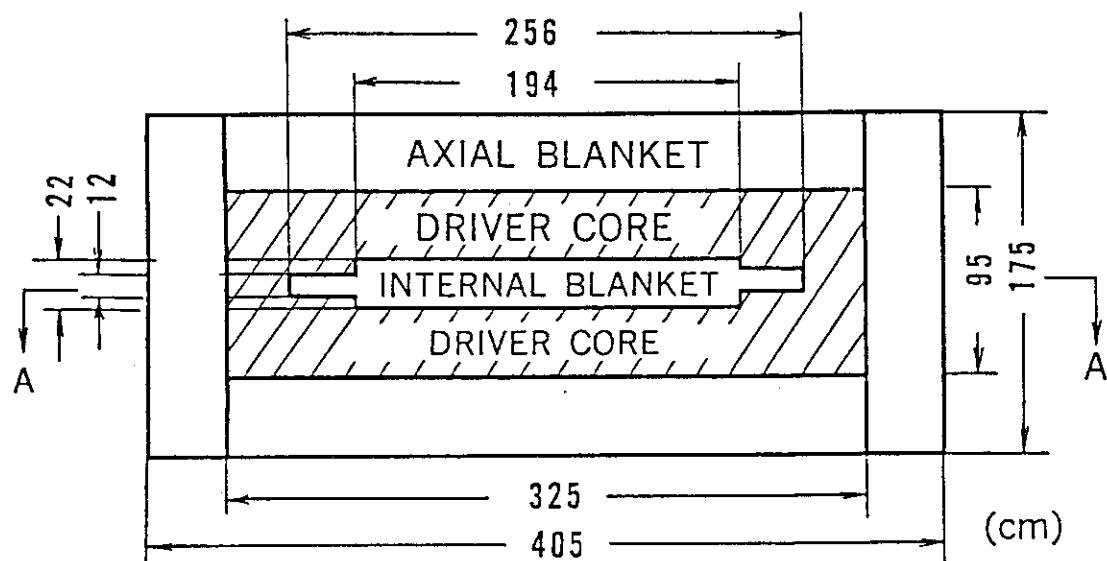
** Core Height : 91.4cm, Axial Blanket : 20.3cm

Radial Blanket : 30.0cm

Table 2.2 Characteristics for Test Regions

Parameter \ Core	Large FBR	Model A	FCA VII-3-1
Core Volume (l)	8020	880 * (max)	1060 *
Fissile Pu Inventory (kg)	3350	225 *	227 *
Core Height (cm)	95	90	90
Internal Blanket Thickness (cm)	22(center) /12 (edge)	20 (30)	30 (20,40)
Pu Enrichment (w/o)	14.6	13.2	18.4
Fuel Composition	Pu-239/Pu-240/ Pu-241/Pu-242 (Core)	58/24/14/4	91/8/1/0
	U-238/U-235 (Core)	99.7/0.3	99.8/0.2
	U-238/U-235 (IB)	99.7/0.3	99.7/0.3

* Including Driver Region.



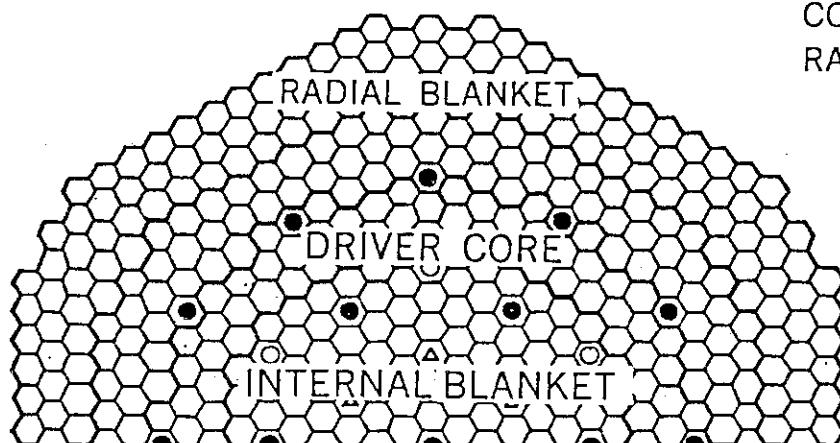
(a) VERTICAL SECTION

NUMBER OF SUBASSEMBLIES

DRIVER CORE 420

CONTROL ROD 31

RADIAL BLANKET 250



CONTROL RODS

PRIMARY ROD

SAFETY ROD

START-UP ROD

(b) A-A HORIZONTAL SECTION

Fig. 2.1 Axially Heterogeneous Core Configuration for Large FBR

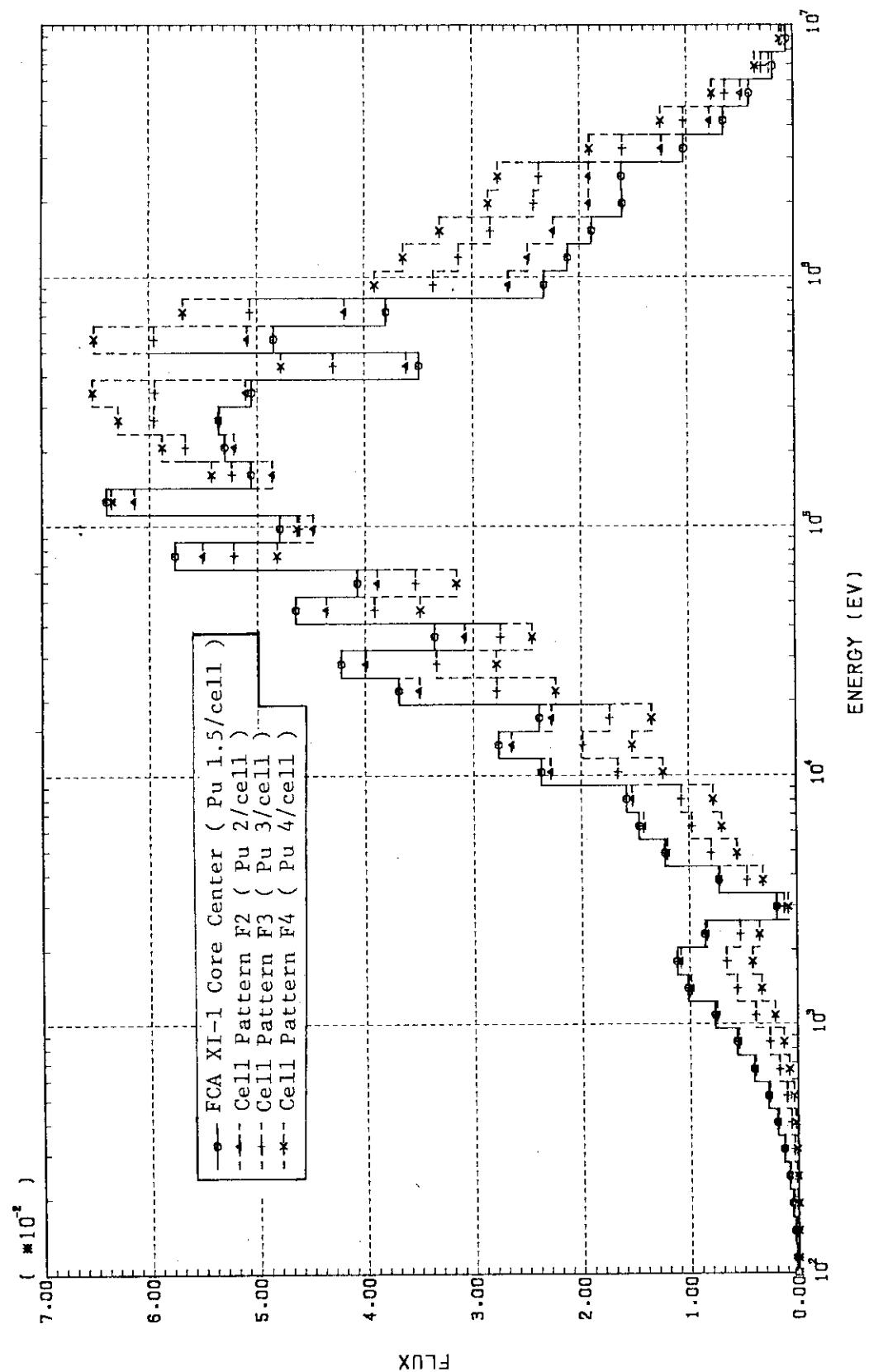


Fig. 2.2 Comparison of Neutron Spectrum at the Center of Cores Composed of Fundamental Cell Patterns

3. サーベイ計算による実験体系の選定

前章の基本仕様に基づいて、実験体系の選定のためのサーベイ計算をした。計算は、群定数セットとしてJFS-3-J2 70群セットを用い、セル計算コード「SLAROM」⁵⁾を用いてセル平均の実効炉定数を作成した。拡散計算コード「CITATION-FBR」⁶⁾により、実効増倍率、中性子束分布等を求め、摂動計算コード「PERKY」⁷⁾により核特性を解析した。

3.1 軸方向特性の模擬実験体系

3.1.1 サーベイ計算

サーベイ計算した主な体系の2次元RZモデルをFig. 3.1に示す。ここで、ドライバーはXI-1集合体で用いたものを流用しており、PUDはプルトニウムドライバー、EUD及びEUCDは濃縮ウランドライバーである。本計算では、比較のため実証炉と、FCAの燃料が無制限に有ると仮定したフルモックアップ体系(Full-Mockと呼ぶ)を考える。このFull-Mockは、軸方向寸法が実験体系(モデルA)と等しく、炉心部はテスト領域の組成(F2)のみからなる。このため、各実験体系とFull-Mockの中心軸近傍の炉物理特性を比較すれば、ドライバーの影響の程度がわかる。Fig. 3.1において、モデルA1, A2, A3は内部ブランケットの径の影響を検討するための体系(厚さは20 cm)であり、モデルA3とA4は内部ブランケットの厚さの影響を検討するための体系で、その厚さがそれぞれ20 cm, 30 cmである。

(1) 臨界性

各体系について、濃縮ウランドライバー(EUD)の装荷本数を変えて臨界サーチした。その結果をFig. 3.2に示す。このサーベイ計算では、各体系の実効増倍率 k_{eff} は1.0とした。図から判るように、必要なEUDの本数(集合体片側当り)は、モデルA1(N), A2(N), A3(N), A4(N)でそれぞれ77本, 97本, 103本, 122本となる。FCAの所有燃料を考慮すると、EUDの最大使用本数は集合体片側当り104本であり、モデルA1(N)は実現できない。手持のU-235の制約から臨界値を減すため、EUDの代りに、そのNa板(4枚/パック)を炭素板に置換したEUCDを用いて再びサーベイした。サーベイした実験体系をFig. 3.1に示すが、モデルA1に必要なEUCDは98本であり、実現可能となる。

EUDとEUCDの基本特性を比較するために、両ドライバーの最小臨界量と基本中性子スペクトルを計算した。計算体系は、第2.1節の基本セルパターンの場合と同様に、各ドライバーで構成された均質炉心(炉心高さ91.4 cm)を軸方向及び径方向にそれぞれ20.3 cm, 30 cmのブランケットで囲んだ体系であり、その炉心径をパラメータとして臨界サーチした。最小臨界半径は、EUD, EUCDでそれぞれ32.5 cm, 26.8 cmであり、最小臨界量はU-235でそれぞれ377 kg, 229 kgである。Fig. 3.3に炉心中心部の中性子スペクトル(基本モードスペクトル)を比較して示すが、Na板を炭素板に置換したEUCDは低エネルギー側が大きくなり、スペクトルが軟化している。

炭素入りドライバーの効果をさらに検討するために、モデルA1とA1(N) およびA1のプルトニウムドライバーのNa板を炭素板に置換した体系モデルA1(P)を比較した。各体系（ウランドライバー 104 体）の k_{eff} はそれぞれ 0.9818, 1.0055, 1.0191 である。モデルA1(N)に比べて、モデルA1では k_{eff} が 2.40 % $\Delta k / kk'$ 、モデルA1(P)では 3.73 % $\Delta k / kk'$ 大きくなっている。モデルA1(P)ではモデルA1よりさらに臨界量が減る。Fig. 3.4 に各体系のテスト領域内での中性子スペクトルを比較して示すが、モデルA1とA1(N)では、炉心中心軸上ではスペクトルの差ではなく、ドライバー近傍でもその差は小さい。一方、モデルA(N)とA(P)を比較すると、炉心中心軸上でもスペクトルに差がみられる。

以上の検討の結果、濃縮ウランドライバーとしてEUCDを用いると臨界量は減るが、テスト領域の中心軸上の核特性（中性子スペクトル、Naボイド効果等）はEUDを用いた体系と変化はないことが判った。これは、テスト領域中心部と濃縮ウランドライバーの距離が離れていることと、両者の間にあるプルトニウムドライバーの緩衝効果によるためである。一方、プルトニウムドライバーまで炭素を使用すると、臨界量はさらに減るが、中心軸特性に影響を及ぼす。

(2) 中性子スペクトル

炉物理特性において、もっとも基本的な量である中性子スペクトルを炉心中央部（炉心中心軸上で内部プランケットと軸方向プランケットとの中間点）と内部プランケット中央部において比較した。

(i) 実証炉、モデルA1、VII-3-1の比較 (Fig. 3.5)

炉心中央部では、実証炉はモデルA1とVII-3-1の中間であり、ここで選定したモデルAの炉心組成は、実証炉の模擬体系として適していると言える。内部プランケット中央部ではこれらの3体系はよく一致しており、高エネルギーでVII-3-1が一番低くなっている。これはVII-3-1の内部プランケットの厚さが厚い(30 cm)ためである。

(ii) Full-Mock、モデルA1、モデルA3の比較 (Fig. 3.6)

炉心中央部では、モデルA1とA3とは差がなく、Full-Mockと比べるとスペクトルが硬く両体系ともドライバーの影響を同程度に受けていると言える。内部プランケット中央部では、(1)モデルA3、(2)モデルA1、(3)Full-Mockの順でスペクトルが硬い。これは、ドライバーの影響が内部プランケット径が小さいモデルA3で大きいことを示している。

Table 3.1 に、炉心中央部及び内部プランケット中心部のスペクトルインデックスを比較して示す。炉心中央部ではモデルA1とA3の差はほとんどないが、内部プランケット中心部では差があり、特に高エネルギーに感度の高い $^{28} \sigma_t / {^{29} \sigma_t}$ で差が大きく、モデルA1の方がFull-Mock特性に近づいている。

(iii) モデルA3とA4の比較 (Fig. 3.7)

モデルA3とA4とを比較すると、炉心部での差はわずかであるが、内部プランケット中央部ではプランケットが厚いモデルA4がA3に比べてスペクトルが軟らかくなり、内部プランケットの厚さの違いが顕著にあらわれている。

(3) 中性子束分布

中性子束の中心軸方向分布を高エネルギーの10群(約1 MeV)、スペクトルのピーク付近の

エネルギーの18群(約120KeV)と低エネルギーの30群(約6KeV)について比較した(内部ブランケット中心で規格化)。

(i) Full-Mock, モデルA1, A2, A3の比較 (Fig. 3.8)

内部ブランケット径を大きくするほど、Full-Mock特性に近づくことが判る。FCA所有の燃料内ではほぼ最大の内部ブランケット径を有するモデルA1がFull-Mock特性にもっとも近い。

(ii) 実証炉, Full-Mock, モデルA1の比較 (Fig. 3.9)

内部ブランケット中央部では、実証炉の方が10, 18群のへこみが大きいが、炉心中央部より内側ではその分布形は比較的よく似ている。ただし、軸方向ブランケット近傍では、特に30群で実験体系は実証炉の特性と大きく異なる。これは、反射体等の構造と寸法が異なるためである。

(4) 反応率分布

反応率の中心軸方向分布は、 ^{239}Pu , ^{235}U , ^{238}U の核分裂(n, f)と ^{238}U の中性子捕獲(n, γ)について求め、炉心中央部で規格化した。

(i) Full-Mock, モデルA1, A2, A3の比較 (Fig. 3.10)

中性子束分布と同様に、内部ブランケット径を大きくするほどFull-Mock特性に近づいている。特に ^{238}U (n, γ)で顕著である。

(ii) モデルA1, A3, A4の比較 (Fig. 3.11)

モデルA1とA4を比較すると、内部ブランケットの厚さの影響が判る。特に高エネルギーに感度の高い ^{238}U (n, f)は内部ブランケットの厚さの違いが顕著にあらわれている。

(iii) 実証炉, Full-Mock, モデルA1の比較 (Fig. 3.12)

実験体系と実証炉の特性は、炉心中央部から内部ブランケットにかけては比較的よく一致している。しかし、炉心中央から離れると反射体等の構造と寸法の違いにより、 ^{238}U (n, f)以外は両者に差がみられる。

(5) Naボイド効果

Fig. 3.13に、中心の3×3本のドロアのNa板を1パックづつボイドにした場合のボイド効果の軸方向分布を示す。これは炉心中央部で規格化した分布であるが、内部ブランケット径を大きくするほどFull-Mockに近づいてゆく。内部ブランケット中心付近のボイド効果の漏洩項と非漏洩項の比(負の値)を見ると、内部ブランケット径を大きくするほどその絶対値は大きくなり、結果として中心付近でのボイド効果(正の値)が小さくなり、分布が平坦化している。つまり、非均質炉心の内部ブランケット中央部で正のボイド効果が小さくなり、分布が平坦化するのはこの負の漏洩項の寄与であり、内部ブランケット径が小さすぎると非均質炉心の特徴が実験的に再現できなくなる。この意味からも、内部ブランケット径を大きくしたモデルA1が模擬実験体系として1番適していると言える。なお、内部ブランケット中心付近での漏洩項の径方向成分は、Full-Mock, 実験体系共に5%程度である。

一方、実証炉は炉心の外側では反射体のため、この領域で支配的となる漏洩項が小さくなるので、実験体系に比べてボイド効果(負の値)が小さくなっている。

以上のサーベイ計算で、FCA所有燃料の範囲内で内部ブランケットがもっとも大きいモ

ルA 1がFull-Mock特性にもっとも近いことが判った。一方、これらのサーベイ体系では、制御・安全棒が内部ブランケット近傍あるいは内部に装荷されるので、運転及び実験上その制御棒ストローク曲線を確認しておく必要がある。Fig. 3.14に、各体系における制御棒ストローク曲線（拡散計算値）と示す。XI-1集合体については、実測値も示しているが、計算値と±6%以内で一致している。図から判るように、内部ブランケット部でもストローク曲線に特異な現象はなく、運転および実験上も問題ないと言える。全ストローク（600 mm）の制御棒価値のXI-1集合体に対する比率は、モデルA 1, A 3, A 4でそれぞれ0.91, 1.0, 0.96である。

3.1.2 実験体系の選定

軸方向非均質炉心では、炉心が内部ブランケットによって分離されていることにより、特に制御棒部分挿入時の炉物理特性は、この炉心概念に特徴的なものとなる。事故解析の面では、燃料スランピング時に、特に炉心燃料が内部ブランケット領域に集中したときの反応度変化を精度よく評価しておくことが要求されている。このため、実験体系の選定において、実験を、(1)炉物理基礎実験、(2)制御棒挿入実験、(3)炉心溶融模擬実験に分類して検討を加えた。

(1) 炉物理基礎実験

実証炉の中心軸上の核特性をサーベイ体系の中で一番よく模擬しているモデルA 1を基準体系として選定する。さらに、XI-1集合体との対応を考えて、同一のドライバを用いたモデルA 3(N)を採用し、また内部ブランケットの厚さの効果を検討する体系としてモデルA 3, A 4を選定する。以下に、選定した実験体系の特徴を述べる。

(a) モデルA 1

実証炉の中心軸方向の炉物理特性を比較的よく模擬しており、本実験の基準体系として採用する。この体系で、(i)反応率分布、(ii)サンプルワース、(iii)Naボイド効果、(iv)ドップラー効果、(v)TLDによる γ 線発熱分布等のすべての項目について測定する。さらに、内部ブランケット内にPu板を装荷してPuビルドアップ効果についても実験する。

(b) モデルA 3(N)

本実験では、所有燃料が少ないために全体としては濃縮ウランドライバーとしてはEUCDを用いるのに対し、この体系では、すでに実施済の大型炉均質炉心模擬実験(FCA XI-1)との対応を考えて、EUDを用いる。特に、均質炉心(XI-1)に対する非均質炉心の実効増倍率の計算精度の評価を利用する。このモデルはFCA XI-2と名付けられ、現在特性実験が終了している。その結果については次章で述べる。

(c) モデルA 3, A 4

過去に実施した非均質炉心基礎実験(VII-3集合体、原型炉クラスの炉心組成模擬)に対応する実験で、特に内部ブランケットの厚さの効果を実験的に評価する。実験では、内部ブランケット近傍での厚さの違いが顕著な項目について測定する。

(2) 制御棒挿入実験

XI-1集合体及びモデルA 1, A 3に対して、中心制御棒挿入体系をサーベイした。制御棒領域は、中心 2×2 本のドロア(等価半径約6.2 cm)で、そのセルパターンは第1～第9パックは天然B₄C 4枚、Na板4枚からなり、第10～第13パックはNa板8枚とした。各体系の制御棒全

挿入, 半挿入, 全引抜 (Naチャンネル) 時の制御棒ワースをTable 3.2に示す。ドライバの体積の大きなモデルA 1では試験領域のインポータンスが低いため, 制御棒ワースは小さくなっている。Fig. 3.15, Fig. 3.16にモデルA 1とA 3の制御棒全引抜および半挿入時の中性子束(10群, 18群および30群)の軸方向および径方向分布を示す。軸方向分布は制御棒領域に隣接した炉心部の分布であり, 径方向分布は炉心中心面(FCA密着面)上の分布である。Fig. 3.17, Fig. 3.18に制御棒半挿入時の18群(中性子スペクトルのピーク付近)の中性子束のひずみ割合を示す。ここでひずみ割合は, 制御棒半挿入時と全引抜時の中性子束の比で定義する。特に軸方向分布に関して, 均質のXL-1集合体は炉心中心面に対して対称であるのに対して, 非均質のモデルA 1は非対称性が顕著にあらわれている。モデルA 3は, その非対称性があまり顕著でなく, 制御棒挿入実験もモデルA 1を採用することにした。実験では, 制御棒全挿入及び半挿入時において, 炉心中心軸上及びFCA密着面での反応率径方向分布を測定する。

(3) 炉心溶融模擬実験

炉心溶融模擬実験は, 大型非均質炉心の炉心溶融・燃料移動に伴う反応度効果に関する基礎実験である。実験は, 実証炉特性に近いモデルA 1を用いて, 中心 3×3 本のドロア(等価半径約9.3 cm)を燃料スランピング領域として使用することにした。スランピングモデルとしては事故シーケンスに従って考え, できるだけ単純化されたモデルを選定した。

Fig. 3.19に以下の事故シーケンスに従って選定したスランピングモデルを示す。

- (1) Naが沸騰し, 中心チャンネルがボイドとなる。(モデルS 0)
- (2) 内部ブランケット近傍の炉心燃料が溶けて, 内部ブランケットに稠密化(モデルS 1)
- (3) 溶融領域が炉心全体に広がり, 内部および軸方向ブランケットに稠密化(モデルS 2)
- (4) 上記シーケンスにおいて, 内部ブランケットおよび炉心中央部に稠密化(モデルS 3)
- (5) S 3の稠密化領域の燃料が混合(モデルS 4)
- (6) S 4の混合領域が炉心内に非対称に分布(モデルS 5～S 7)
- (7) S 4の混合領域が炉心全体に均一分布(モデルS 8)

予備解析として, 拡散計算により上記モデルのスランピング反応度を計算した。各モデルはいずれも正味の物質量が保存されているので, 体系間の反応度変化は小さい。モデルA 1の基準体系に対する反応度変化は, S 0モデルで $4.0 \times 10^{-5} \Delta k / kk'$, その最大値は $6.4 \times 10^{-4} \Delta k / kk'$ (モデルS 5), 最小値は $-1.5 \times 10^{-4} \Delta k / kk'$ (モデルS 2)である。

実験では, 燃料移動に伴う反応度変化の計算手法の評価・検討を主目的として, 燃料スランピングに伴う反応度変化を測定する。反応度変化と共に, 事故解析による出力分布の計算精度を検討するために反応率分布とサンプルワースも測定する。上記モデルのうち, 特に特徴的な下記のモデルを実験体系として選定した。

- (1) スランピング反応度測定
モデル S 0, S 2, S 4, S 5, S 7
- (2) 反応率分布・サンプルワース測定
モデル S 0, S 7

3.2 径方向特性の模擬実験体系

3.2.1 軸方向ドライバーを有する体系

径方向特性の模擬実験体系の検討の第1ステップとして、軸方向ドライバを有する体系をサーベイした（モデルB）。

第2.2節で述べたごとく、テスト領域はセル当りPu2枚のセルパターンF2とし、軸方向ドライバーはXI-1集合体のドライバー（プルトニウムドライバーPUD、濃縮ウランドライバーEUD）を流用することにした。

基準体系（モデルB1）として、試験領域の高さ61.0cm(12パック)、内部ブランケット厚さ20.3cm(4パック)の実験体系をサーベイした。FCA所有燃料では、テスト領域の半径は34cm程度と実証炉(約160cm)の1/5程度である。実証炉とモデルB1の炉心中心面での中性子束の径方向分布(10群、18群、30群)を、その2次元RZモデルと共にFig.3.20に示す。実験体系は、実証炉のごとく各群の中性子束分布にピークはみられない。これは、この実験体系では内部ブランケットの吸収効果が小さいこと、および径方向への中性子のもれが大きいためである。このため、中性子束分布は炉心中心から離れるに従い単調に減少する。この中性子束分布をある程度実証炉特性に近づけるため、内部ブランケット形状を変えたり、試験領域の半径を増大(例えば、試験領域の高さ30.5cm、半径47.9cm)したが、その効果は少なかった。

この実験体系の核特性を実証炉に近づけるためには、(1)中性子の径方向のもれをおさえる、(2)内部ブランケットの中性子スペクトルを軟化させる、(3)内部ブランケットの厚さを増大させる、(4)中心部に吸収材を入れることが考えられる。このため、上記の条件に対応して極端な次の4ケースについてサーベイした。

(1) 径方向ドライバーの併用

炉心高さを減少(30.4cm)させると共に径方向ドライバーを併用した。この体系(モデルB2)の2次元RZモデルと炉心中心面上の中性子束径方向分布をFig.3.21に示す。10群にピークはみられるが、18群にはピークは見られない。

(2) 炭素を混入した内部ブランケット

内部ブランケットのNa板(4枚)を炭素板に置換した体系(モデルB3)を検討した。この体系の2次元RZモデルと炉心中心面上の中性子束径方向分布をFig.3.22に示す。18群はテスト領域内では平坦になり、内部ブランケットの形状変化部も分布にあらわれている。また低エネルギー(30群)の分布形が内部ブランケット中心付近で極端にもち上っている。

(3) 内部ブランケットの厚さ増大

テスト領域の高さを30.4cmとし、かつ内部ブランケットの一部をPUD部まで延長した(厚さ67cm)体系(モデルB4)を検討した。この体系の2次元RZモデルと中性子束分布をFig.3.23に示す。18群にピークがあり、ある程度実証炉特性に近づいている。

(4) 中心制御棒挿入

中心部に制御棒を挿入した体系を検討した。この体系(モデルB5)は基準体系の中心1ドロアを制御棒(天然ボロン板4枚、Na板4枚)ドロアに置換したもので、その2次元RZモデルと中性子束分布をFig.3.24に示す。中性子束分布は中心付近で明らかに下っている。

以上の検討の結果、FCA所有燃料の制限から径方向寸法が十分とれず、その核特性は実証炉と大きく異なるものとなる。中心付近に吸収材等を強的に入れてある程度その特性を実証炉に近づけることは可能であるが、大型炉の径方向模擬体系としてはあまり適当とは言えない。そこで、第2ステップとしてテスト領域が基本セルパターンF3(Pu 3枚/セル)で構成された実験体系を検討した。

3.2.2 セクター形状実験体系

モデルBの検討では、大型炉の径方向特性模擬体系を組むことが困難であることが判明した。前述のごとく、軸方向非均質炉心では、内部ブランケットの形状の違いが炉心全体の核特性に影響を及ぼすため、径方向分布の模擬実験が今後の実証炉設計に不可欠である。

径方向分布の模擬実験としては、セクタ形状の実験体系を組むことがもっとも目的にかなっている。しかし、モデルBのごとく、炉心のセルパターンとして実証炉にもっとも近いF2を用いると、テスト領域とドライバー領域の核分裂物質の密度を大幅に変える必要があり、炉心全体の分布が傾いた状態になり、径方向分布の模擬体系としては不適である。このため、実証炉の炉心組成の模擬はある程度犠牲にして、Pu富化度の高い基本セルパターンF3で構成されたセクター形状の実験体系を検討することにした。この体系は、実証炉の炉心組成の模擬は十分ではないが、軸方向非均質炉心の軸方向ブランケットの形状効果を評価する基礎実験体系としては十分と考えられる。

以下にセクタ形状実験体系の概念について説明する。Fig.3.25にセクター形状実験体系とそれに対応するテスト領域のみからなる体系(フルモックアップ体系と呼ぶ)の概念図を示すが、セクタ一体系はフルモックアップ体系のテスト領域Tの一部をドライバーDで置き換えたものである。DとTの性質を合わせることによりセクタ一体系のテスト領域Tでの炉物理量をフルモックアップ体系に合わせることができる。つまり、セクター形状実験体系で、フルモックアップ体系の炉物理量を直接精度よく求められる可能性がある。

一般に、組成の異なる2つの媒質間の中性子束分布を合わせるには両媒質の(1)基本モードスペクトル、(2)物質バックリング、(3)拡散係数の3量を合わせれば良い。(3)の条件は両媒質間での分布の勾配が連続になるために必要である。これらにより両媒質は相互に接していくてもあたかも一領域であるかのように振舞う。

以上の如き指導原理に基づいて最適ドライバー組成の検討が、VII-1集合体においてセルパターンF2およびF3について飯島らによりなされた。⁸⁾ Fig. 3.26にF3に対応する最適ドライバD1のドロア装填図を示す。

サーベイ計算ではまず、基本セルパターンF3のテスト領域を有するフルモックアップ体系(FM-Rと呼ぶ)を次のように決定した。FCA所有の燃料は、Pu換算で約700kgであるので余裕をみてPuが600kgの実験体系をサーベイした。炉心高さは、半径を大きくするために80cmとし、内部ブランケット厚さは吸収効果を大きくするため30cm(VII-3-1と同一)とした。その炉心構成図および2次元RZモデルをFig. 3.27に示す。解析は2次元RZおよび3次元XYZ 18群拡散計算である。FM-R体系の実効増倍率は、2次元RZ計算で1.0407、3次元XYZ計算で1.0383であり、内部ブランケットの形状を変化させた体系も検討できるように実効増倍率に余裕をもた

せている。

次に、セクター形状実験体系を検討した。Puはすべてテスト領域で使用することとし、ドライバーとして前述の最適ドライバーD1を用いる。このドライバーは、93%および20%濃縮ウランを組み合わせて用いているが、FCA所有の濃縮ウランを最大限に使用するため、20%濃縮ウランのみからなるドライバーD2も併用することにした。D2のドロア装填図をFig.3.28に示す。なお、テスト領域(F3), D1, D2の k_{∞} はそれぞれ、1.514, 1.533, 1.368である。これらを用いたセクタ形状実験体系(モデルC1)のFCA密着面での炉心構成図をFig.3.29に示す。この実効増倍率は3次元XYZ計算で1.0224であり、FM-R体系に比べて約1.5%小さい。

FM-R体系の中性子束の軸方向及び径方向分布を70群及び18群計算についてそれぞれFig.3.30, Fig.3.31に示す。径方向分布は、FCA密着面上の分布であり、Fig.3.27で10群, 18群にピークをもっており、前述の実証炉特性に比較的近い。70群計算の10群, 18群, 30群は18群計算では5群, 8群, 12群に対応しており、対応するエネルギー群では分布形はほぼ一致している。

Fig.3.32にFM-R体系とモデルC1の反応率分布の比較を示す。テスト領域内では軸方向分布はよく一致しているが、FCA密着面X軸方向の分布は炉心中心で規格化するとモデルC1の分布がテスト領域で全体に大きい。これは、ドライバーの方が k_{∞} が小さいためである。ドライバーの k_{∞} を大きくするために、D1についてはNa板1枚を、D2についてはNa板2枚を炭素板に置換したD1', D2'を用いた。この体系をモデルC2と名付けるが、その k_{eff} は1.0393であり、FM-R体系と0.1%以内で一致する。Fig.3.33にFM-R体系とモデルC2の反応率分布の比較を示すが、試験領域内では軸方向およびX軸方向の分布は0.5%以内で一致している。

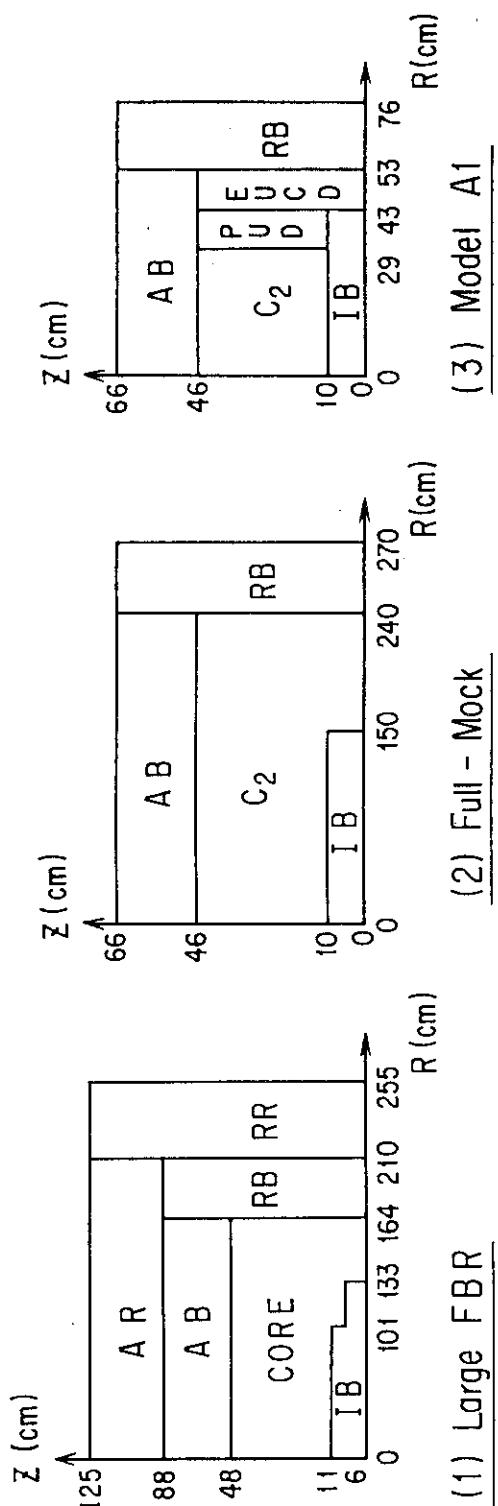
以上の検討により、D1', D2'ドライバーを用いたセクター形状実験体系により、実証炉の炉心構成の模擬は十分ではないが、軸方向非均質炉心の空間特性(内部プランケット形状効果)を把握するのに有効な基礎実験ができる見通しを得た。

Table 3.1 Comparison of Spectrum Indices for FCA XII Assembly

Spectrum Indices	Assembly	Full-Mock	FCA XII-1	FCA XII-2
28σf/49σf	IB	0.00855	0.0102	0.00940
	CORE	0.0242	0.0247	0.0247
40σf/49σf	IB	0.105	0.121	0.114
	CORE	0.211	0.216	0.216
25σf/49σf	IB	1.194	1.178	1.188
	CORE	1.134	1.109	1.111
28σc/49σf	IB	0.148	0.152	0.152
	CORE	0.151	0.149	0.149

Table 3.2 Comparison of Control Rod Worth for
Central 4 Drawers (unit) %Δk/kk'

Rod Position	Assembly	XI-1	XII-1	XII-2
Half Insertion		0.97	0.73	0.83
Full Insertion		1.84	1.38	1.59



(2) Full - Mock

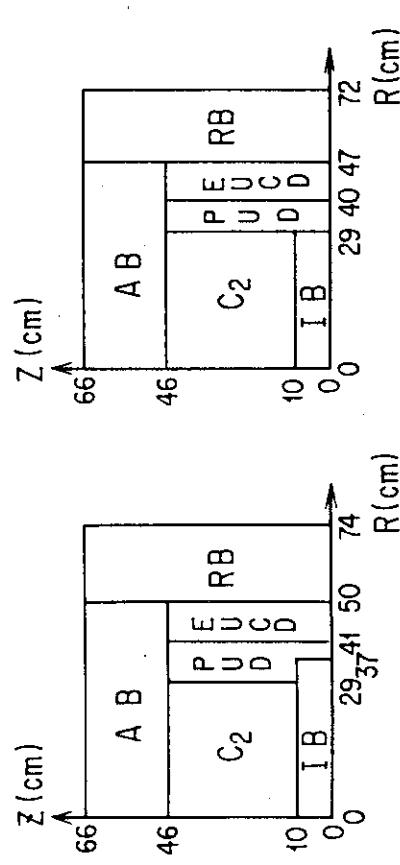
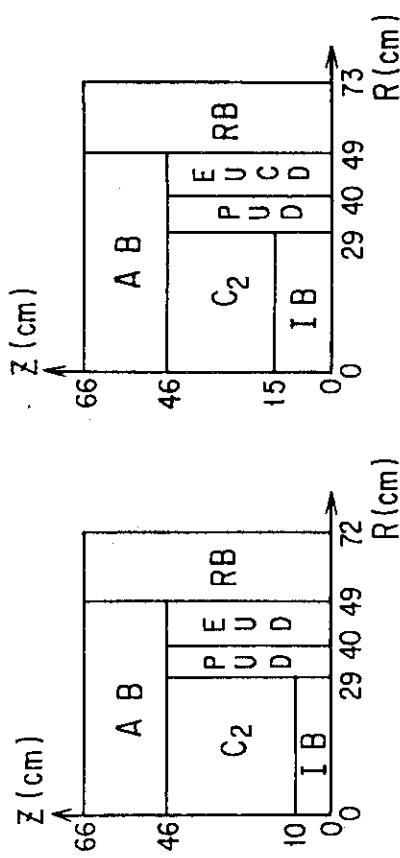
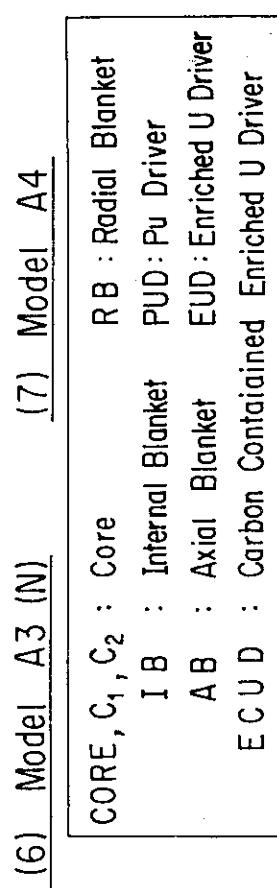
(5) Model A3(3) Model A1

Fig. 3.1 R-Z Configuration of Calculational Models
for Experimental Plan.

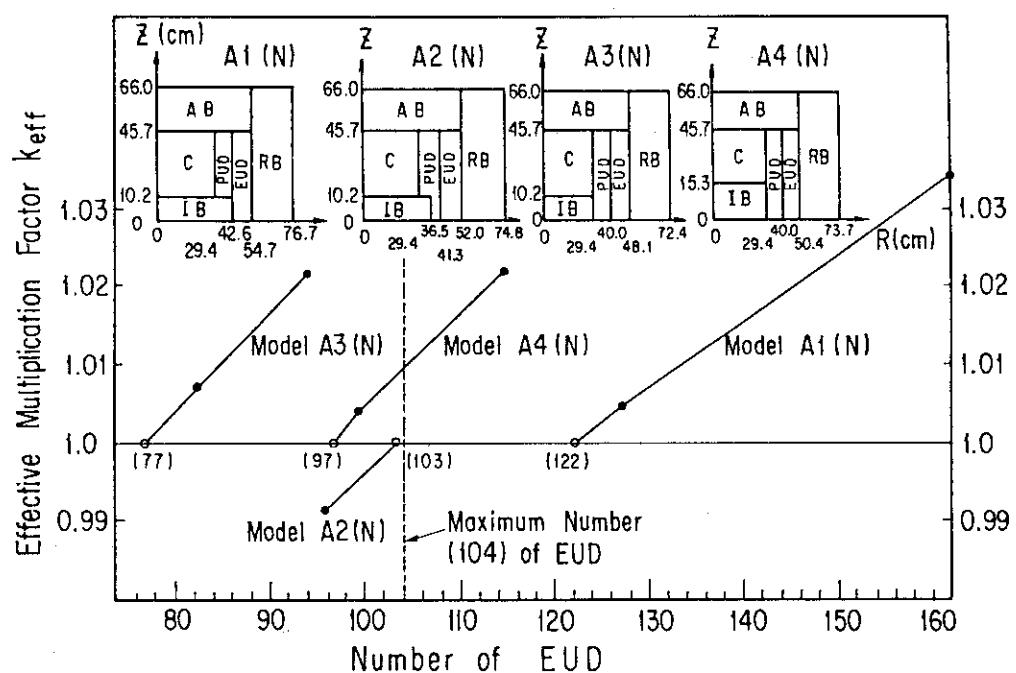


Fig. 3.2 Critical Search of Model A

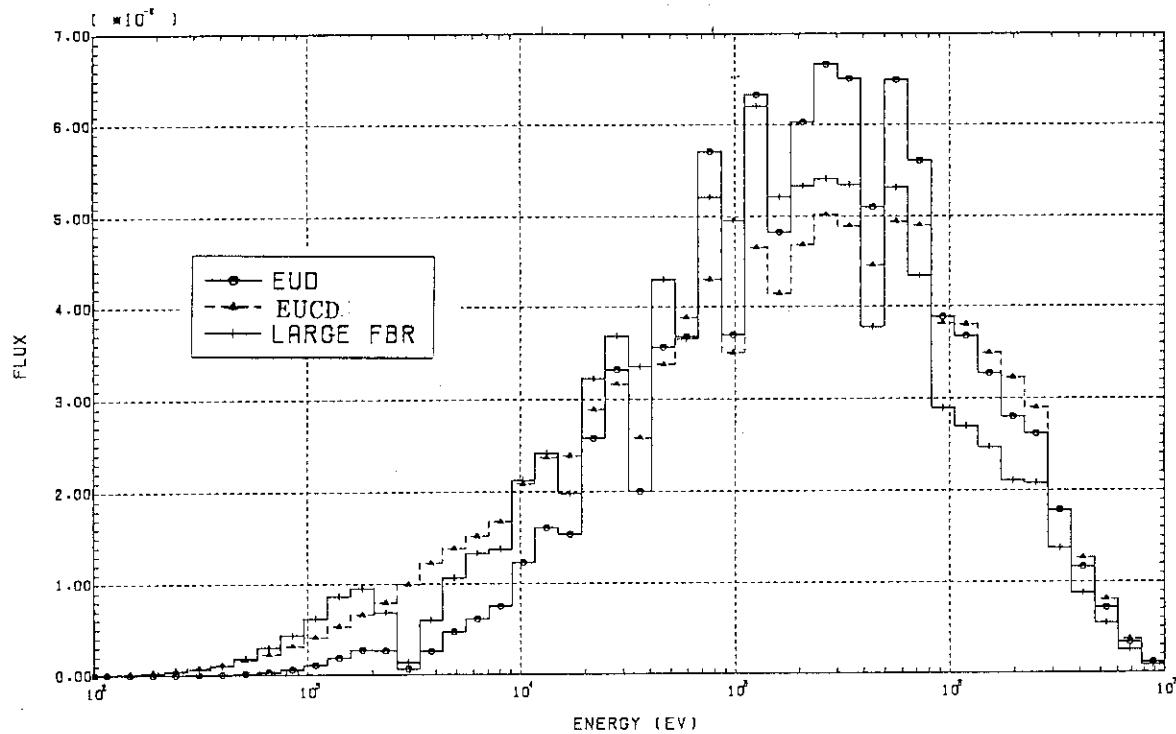


Fig. 3.3 Comparison of Neutron Spectra at the Center of Cores Composed of EUD and EUCD Drivers

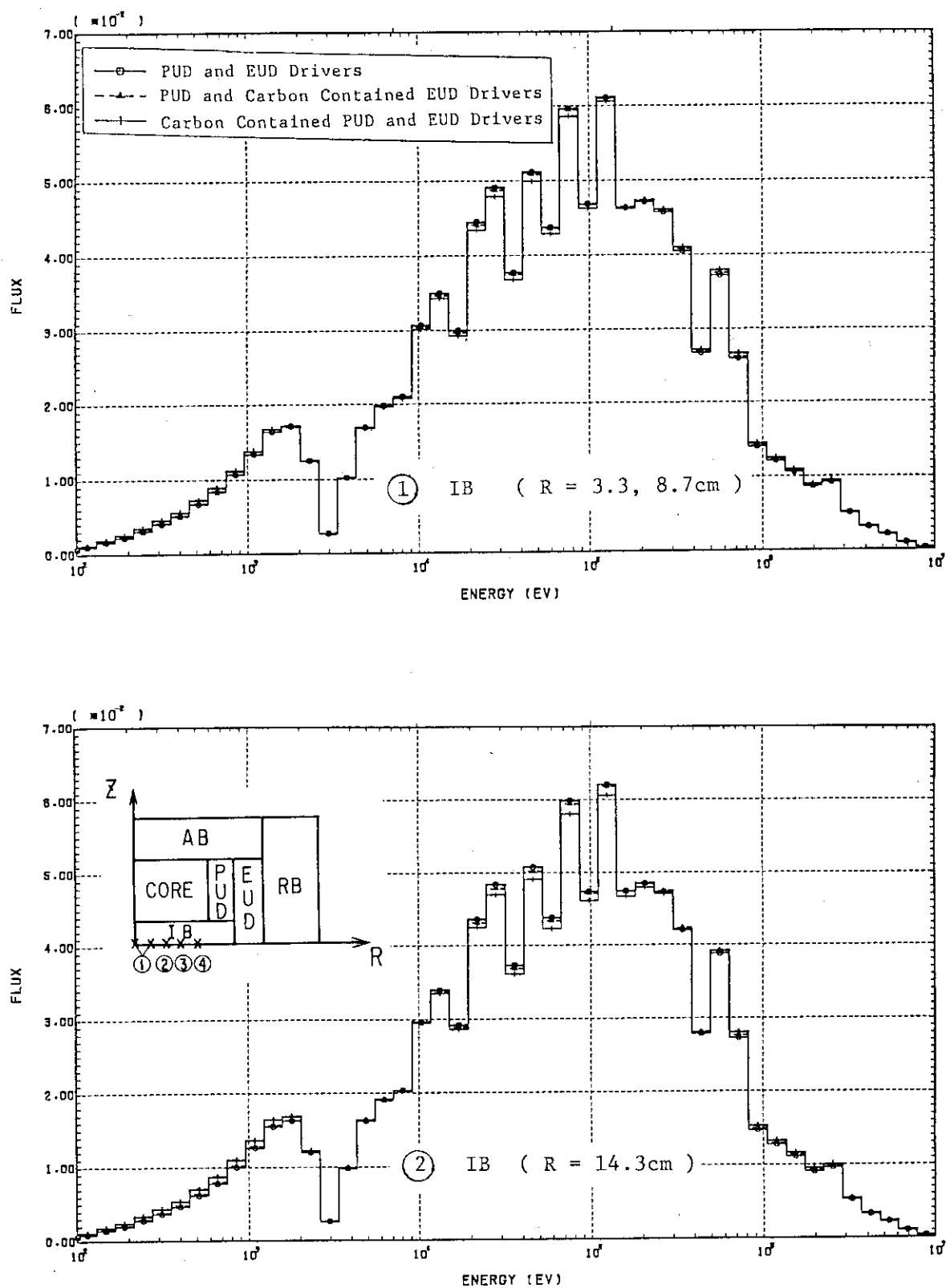


Fig. 3.4-1 Effect on Neutron Spectra of Carbon Contained Drivers

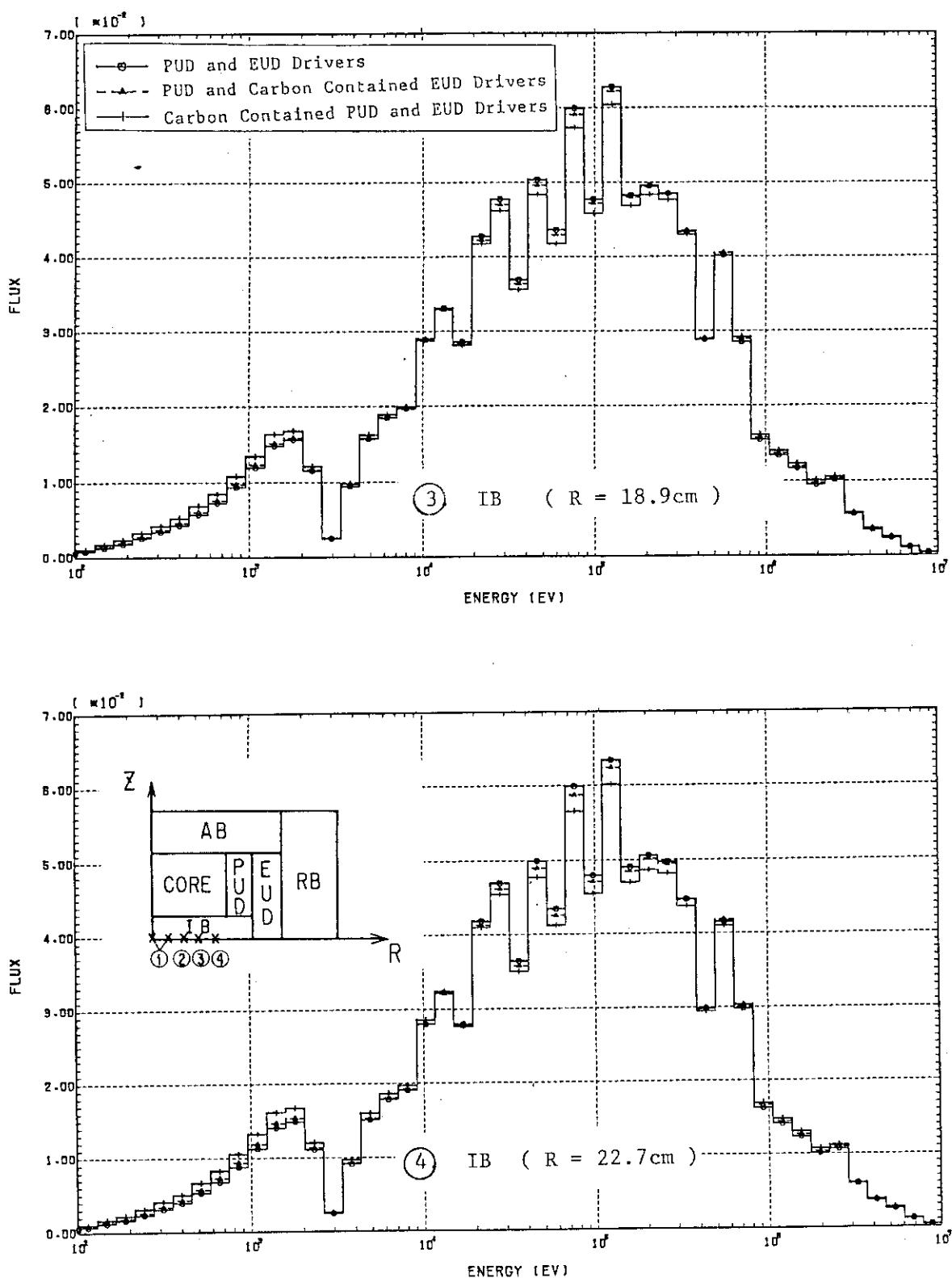


Fig. 3.4-1 Effect on Neutron Spectra of Carbon Contained Drivers(Continue)

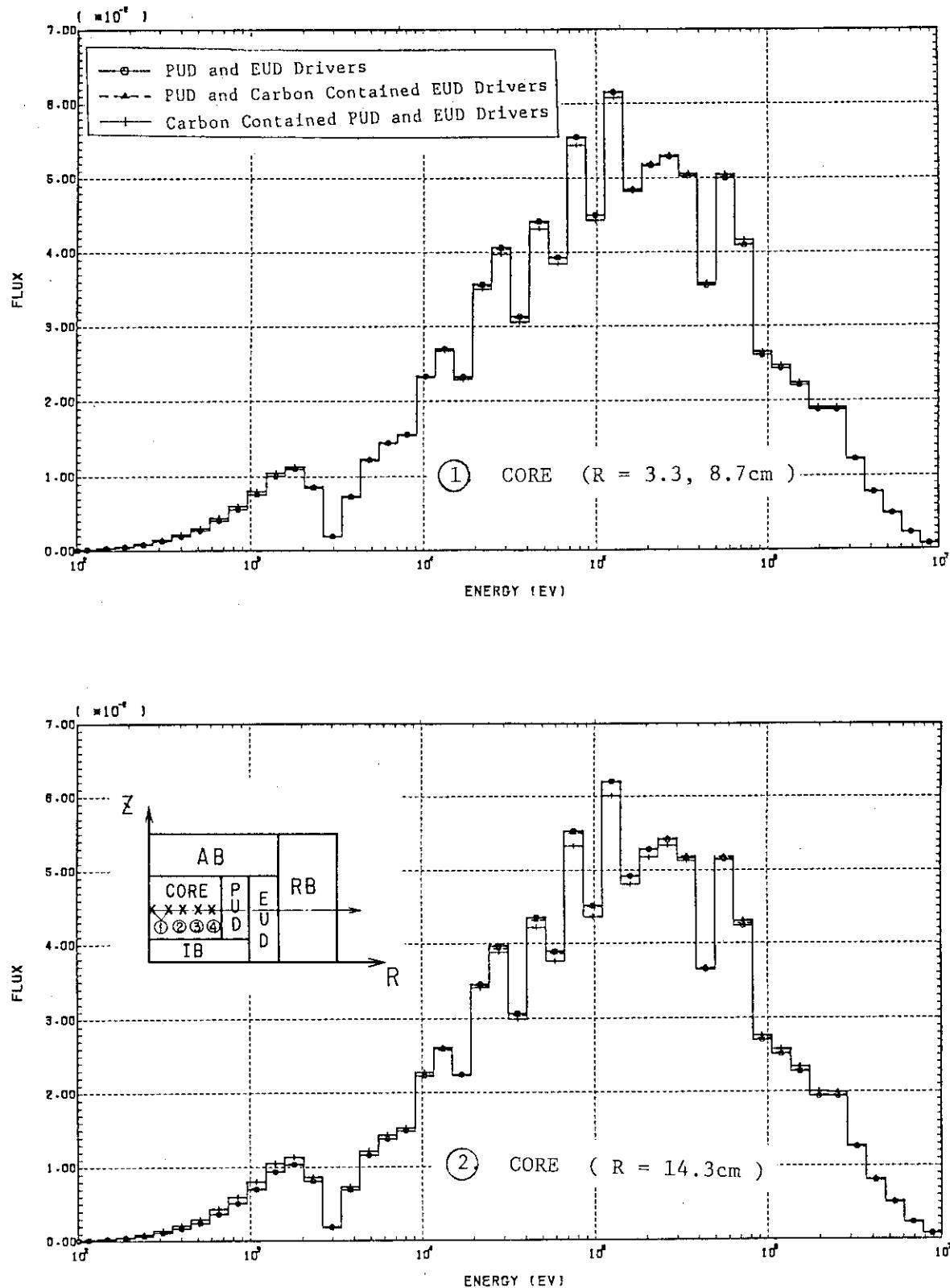


Fig. 3.4-2 Effect on Neutron Spectra of Carbon Contained Drivers

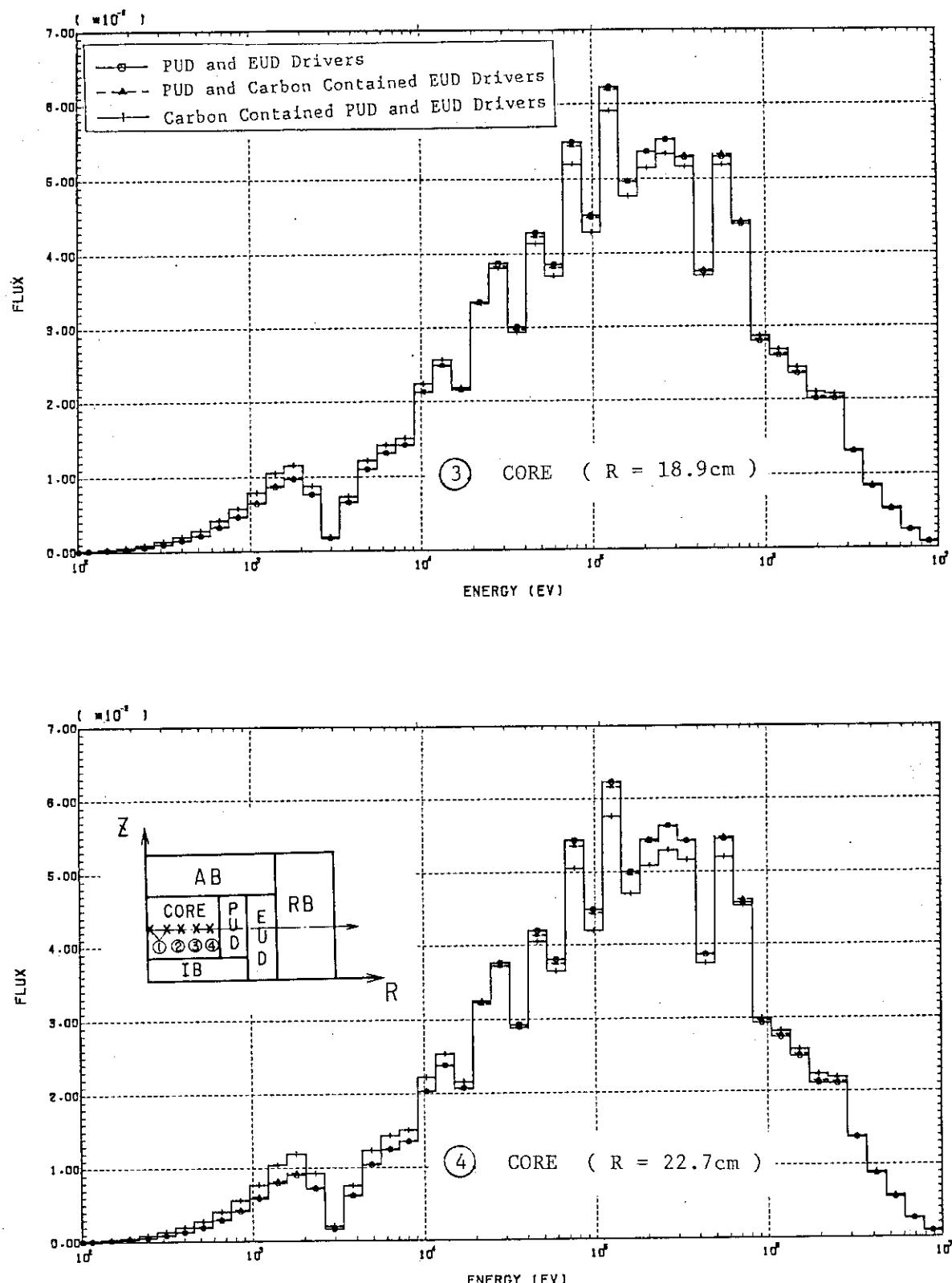


Fig. 3.4-2 Effect on Neutron Spectra of Carbon Contained Drivers (Continue)

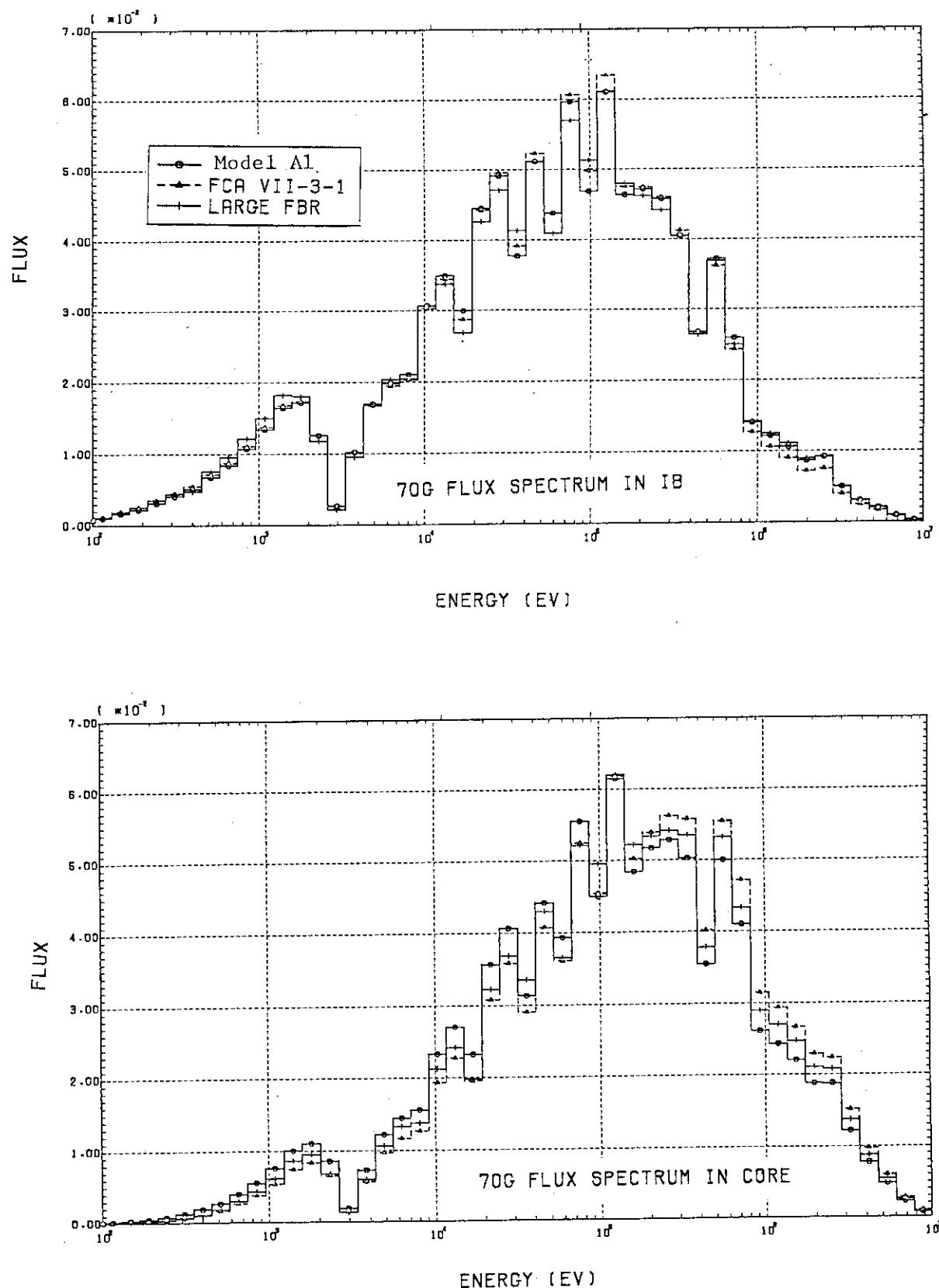


Fig. 3.5 Comparison of Neutron Spectra of Model Al, VII-3-1 and Large FBR

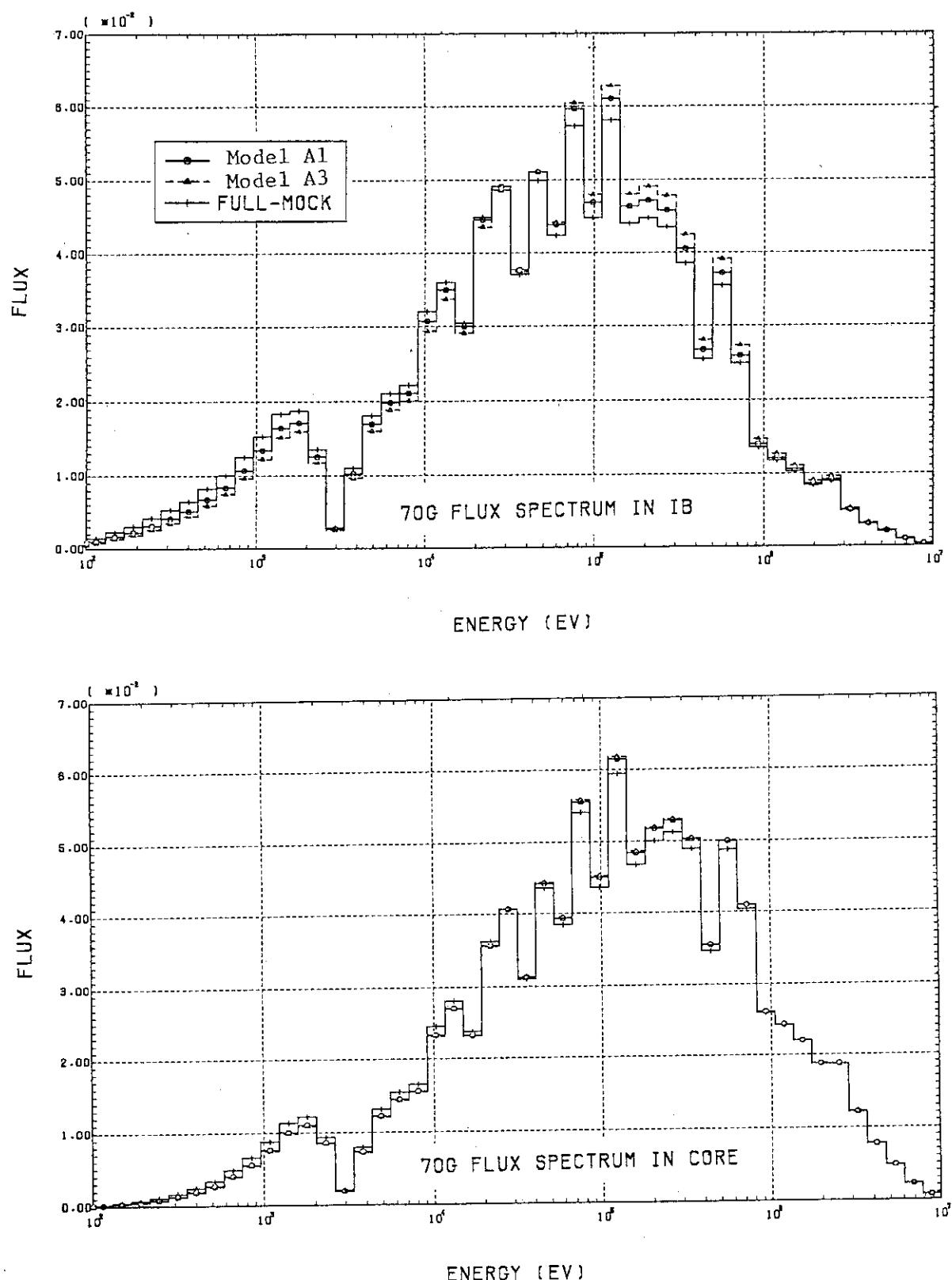


Fig. 3.6 Comparison of Neutron Spectra of Model A1, A3 and Full-Mock

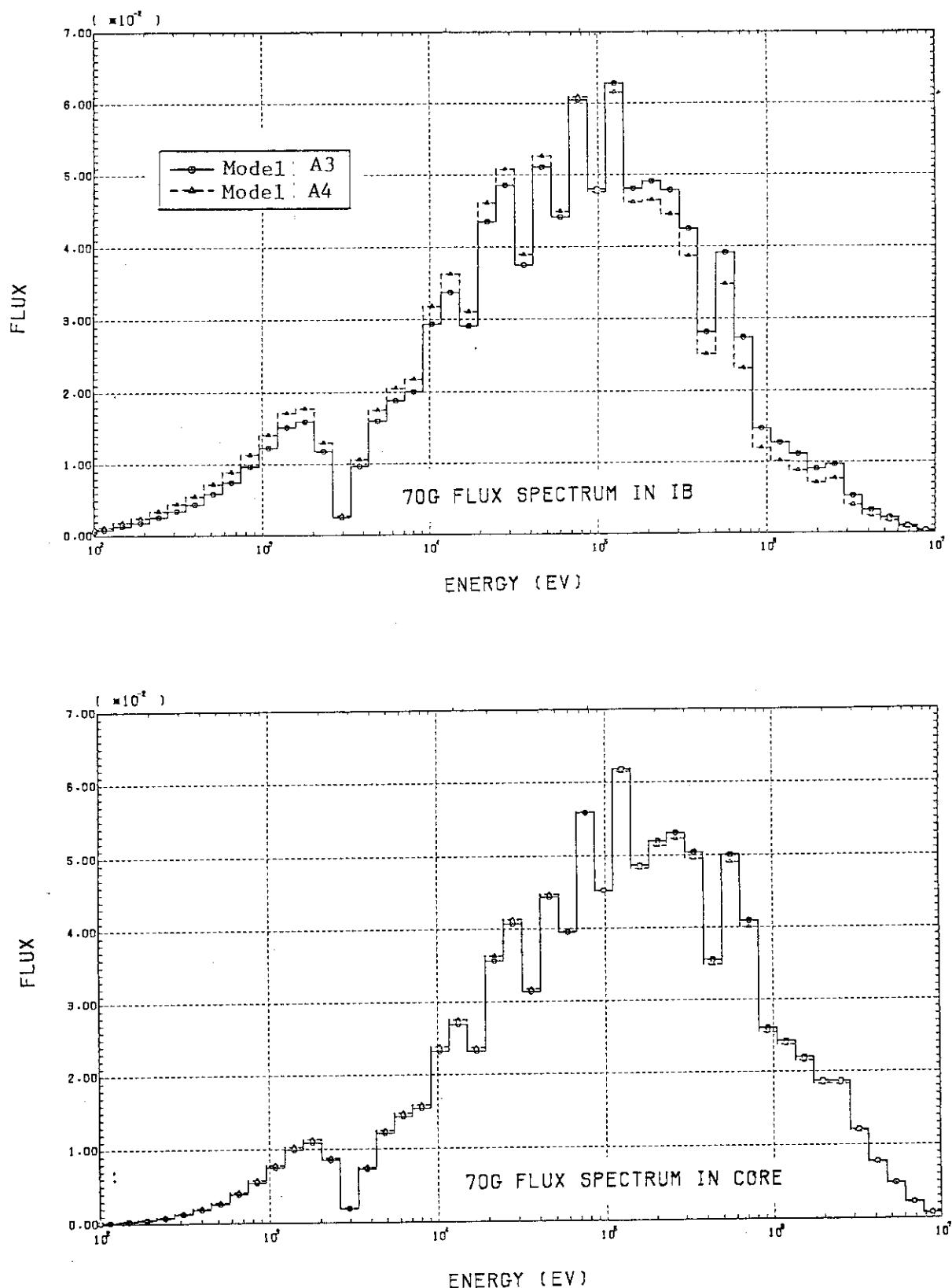


Fig. 3.7 Comparison of Neutron Spectra of Model A3 and A4

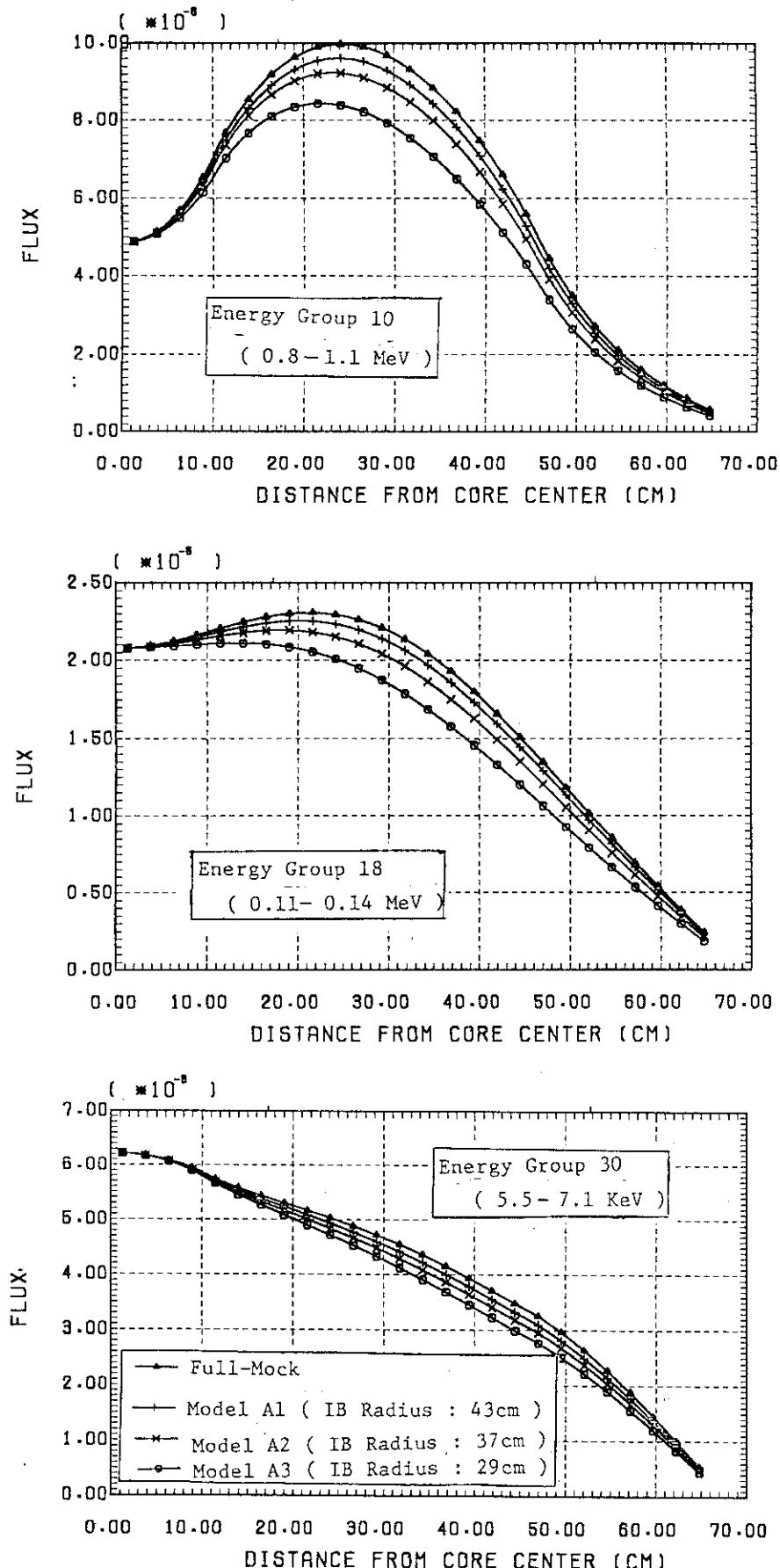


Fig. 3.8 Comparison of Neutron Flux Axial Distributions of Model A1, A2, A3

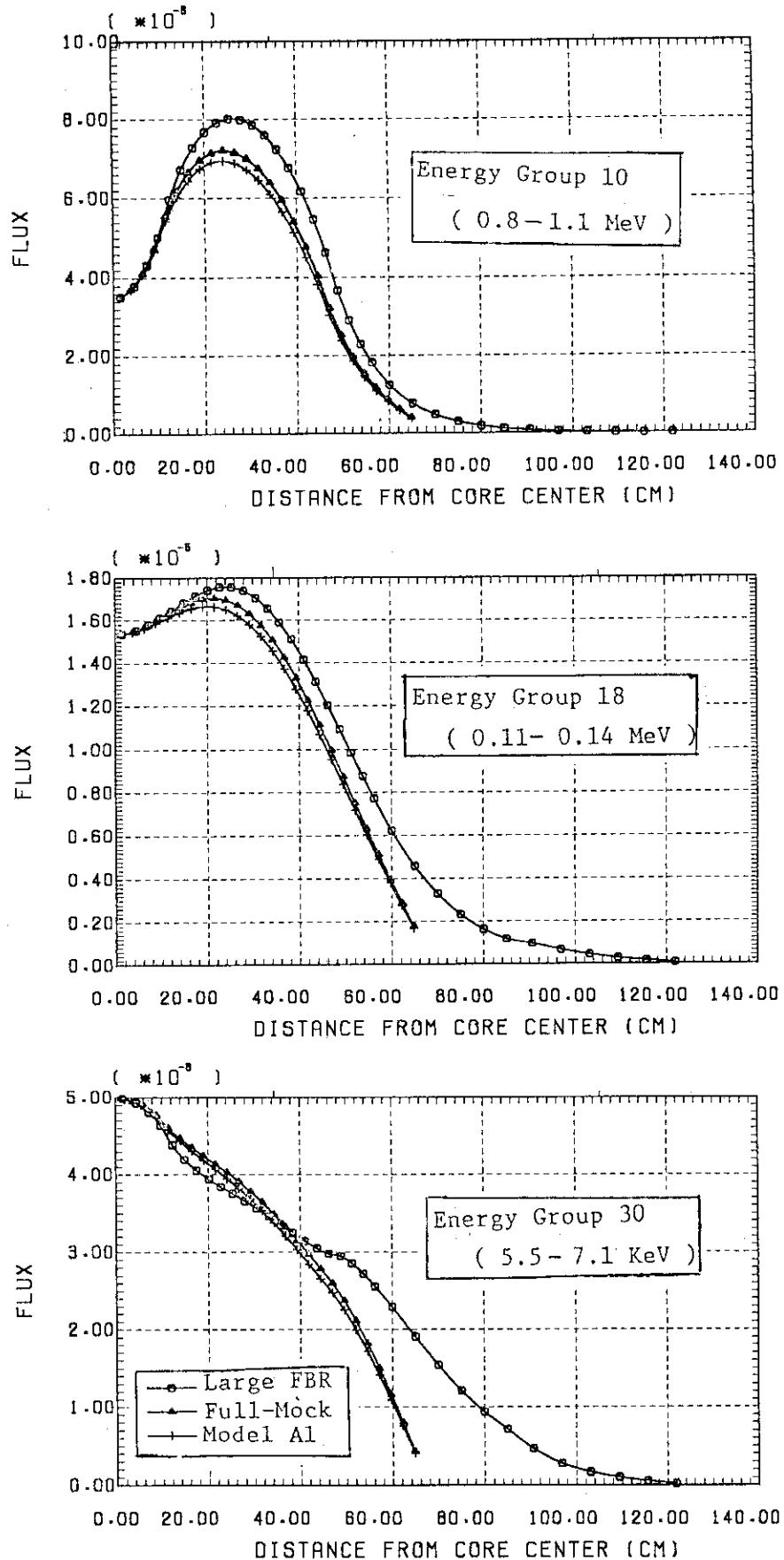


Fig. 3.9 Comparison of Neutron Flux Axial Distributions of Model A1, Full-Mock and Large FBR

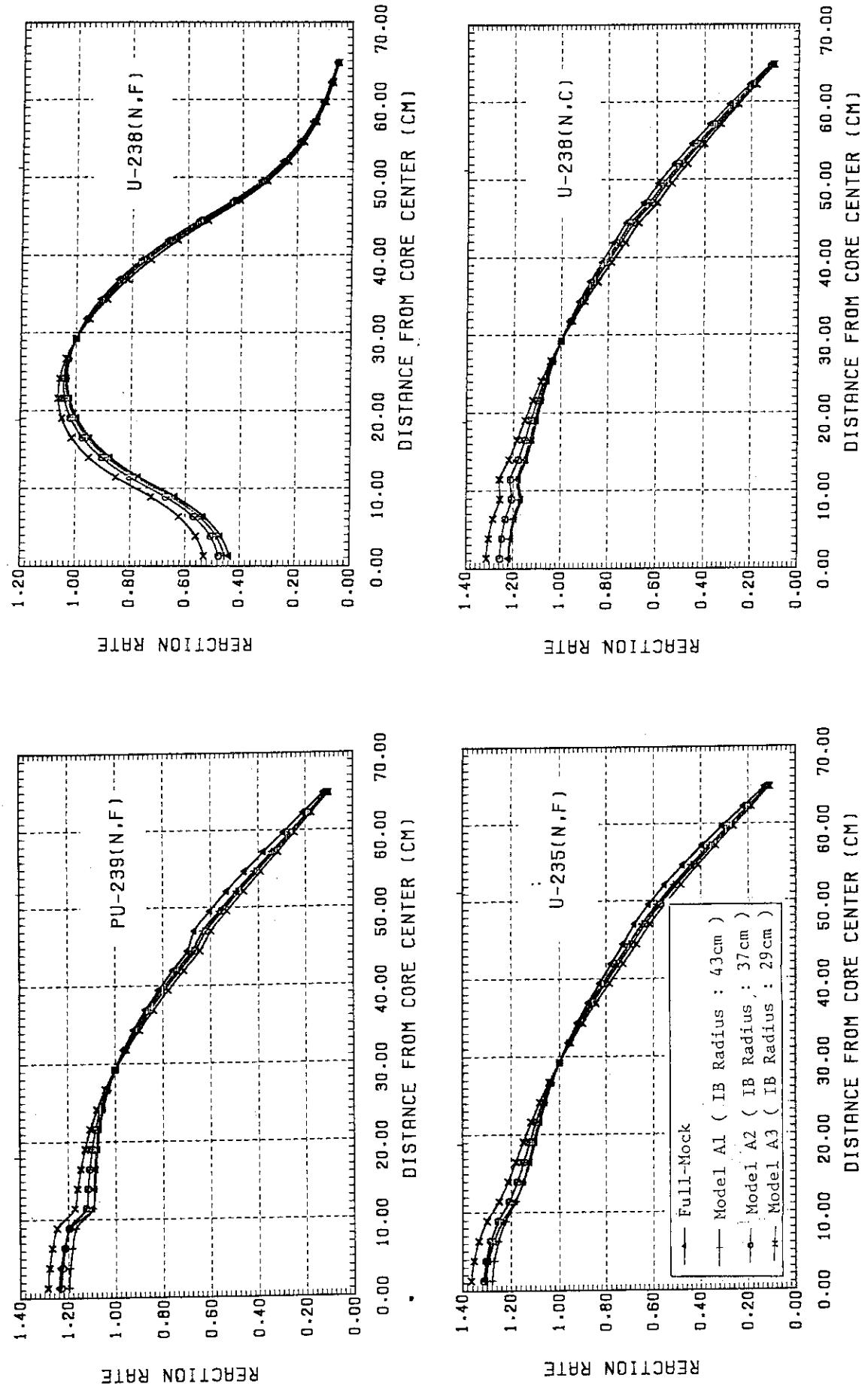


Fig. 3.10 Comparison of Reaction Rate Axial Distributions of Model
A1, A2, A3

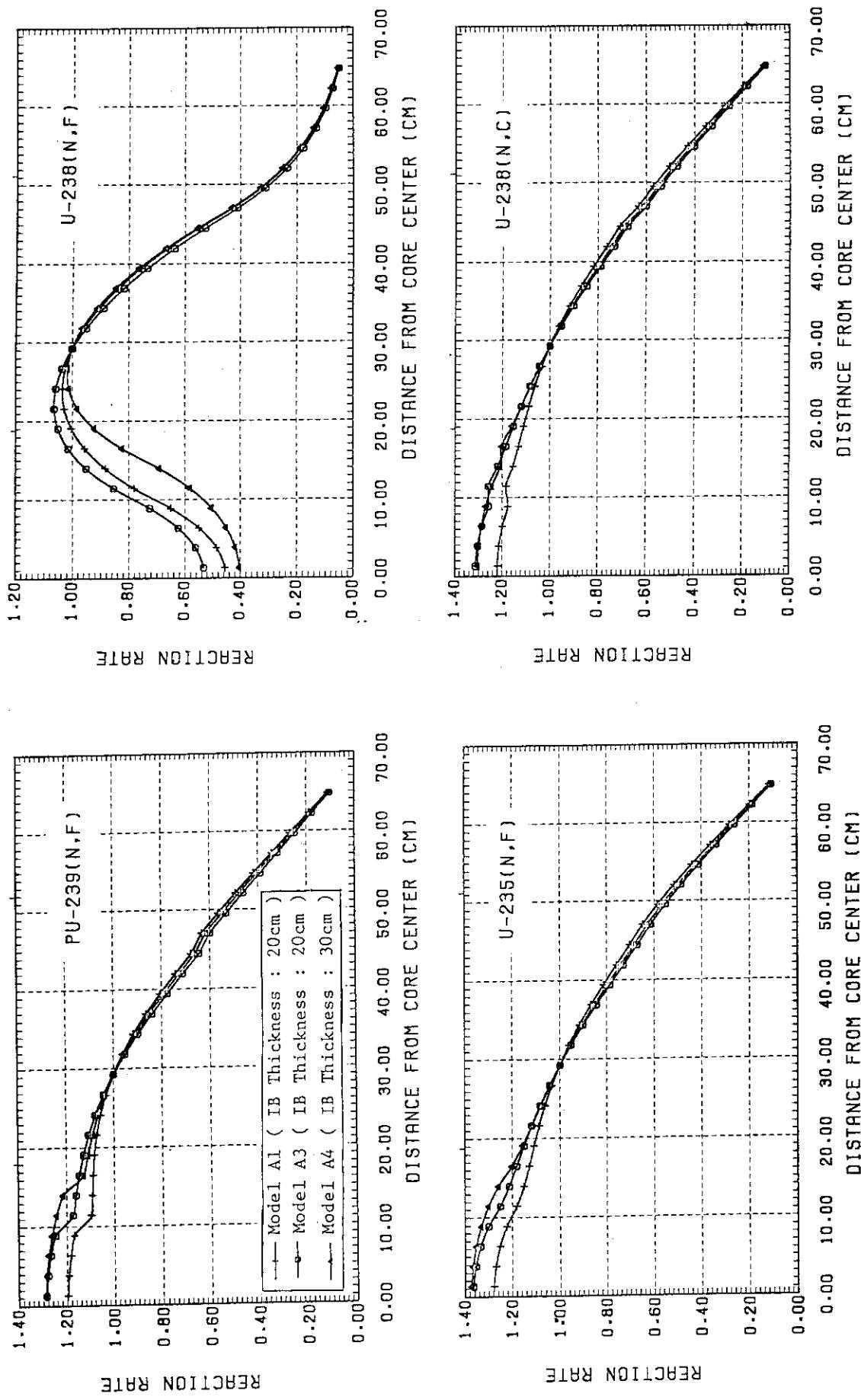


Fig. 3.11 Comparison of Reaction Rate Axial Distributions of Model A1, A3 and A4

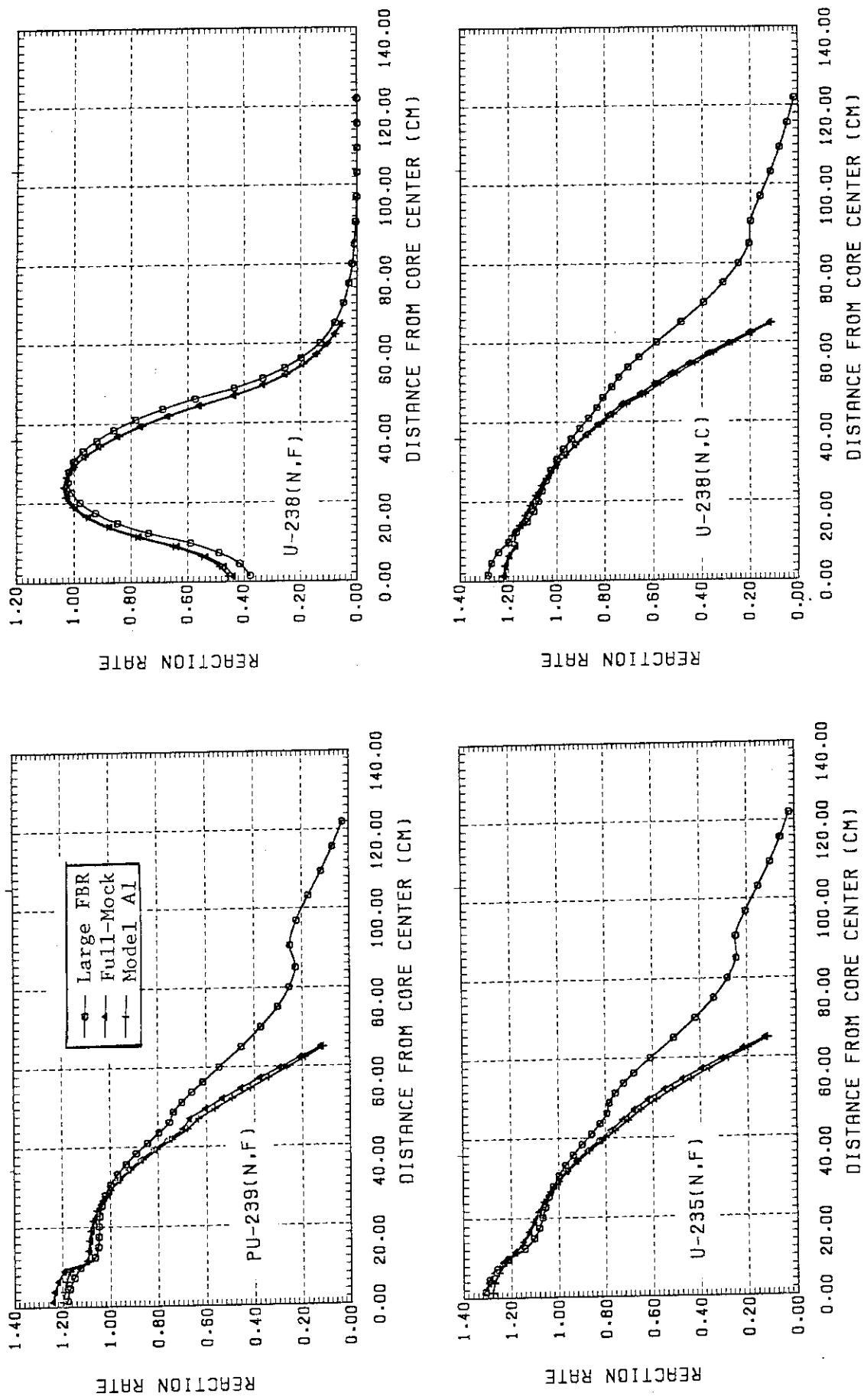


Fig. 3.12 Comparison of Reaction Rate Axial Distributions of Model A1, Full-Mock and Large FBR

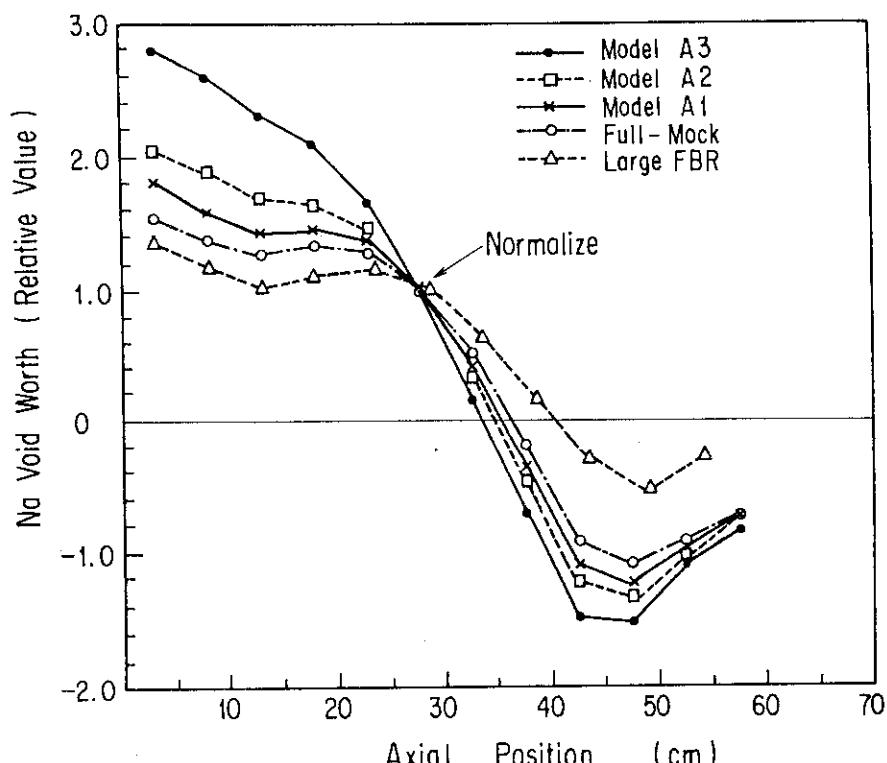


Fig. 3.13 Comparison of Na Void Effects

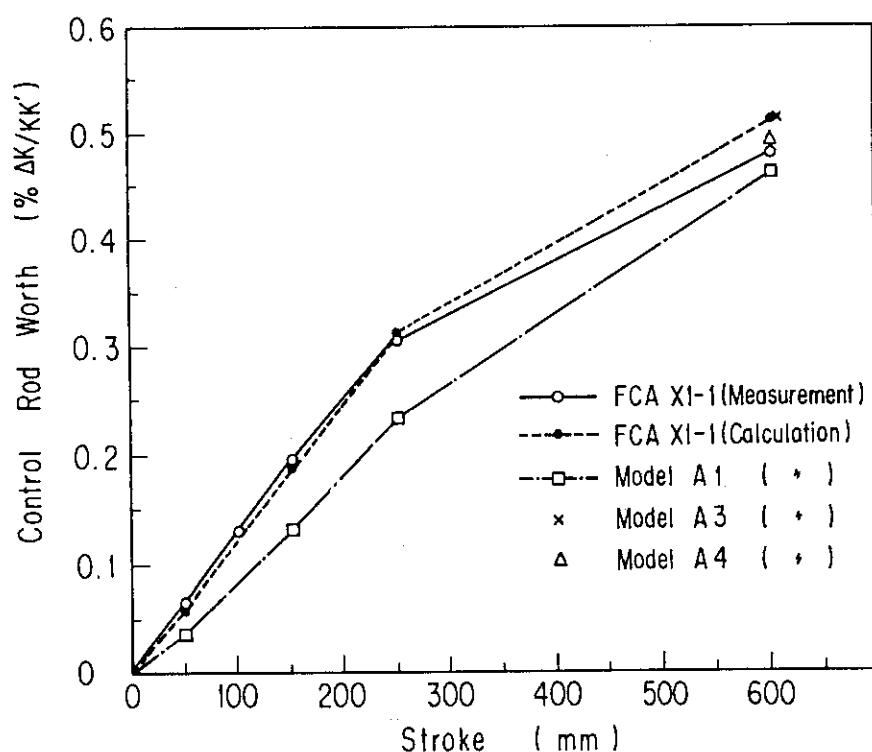
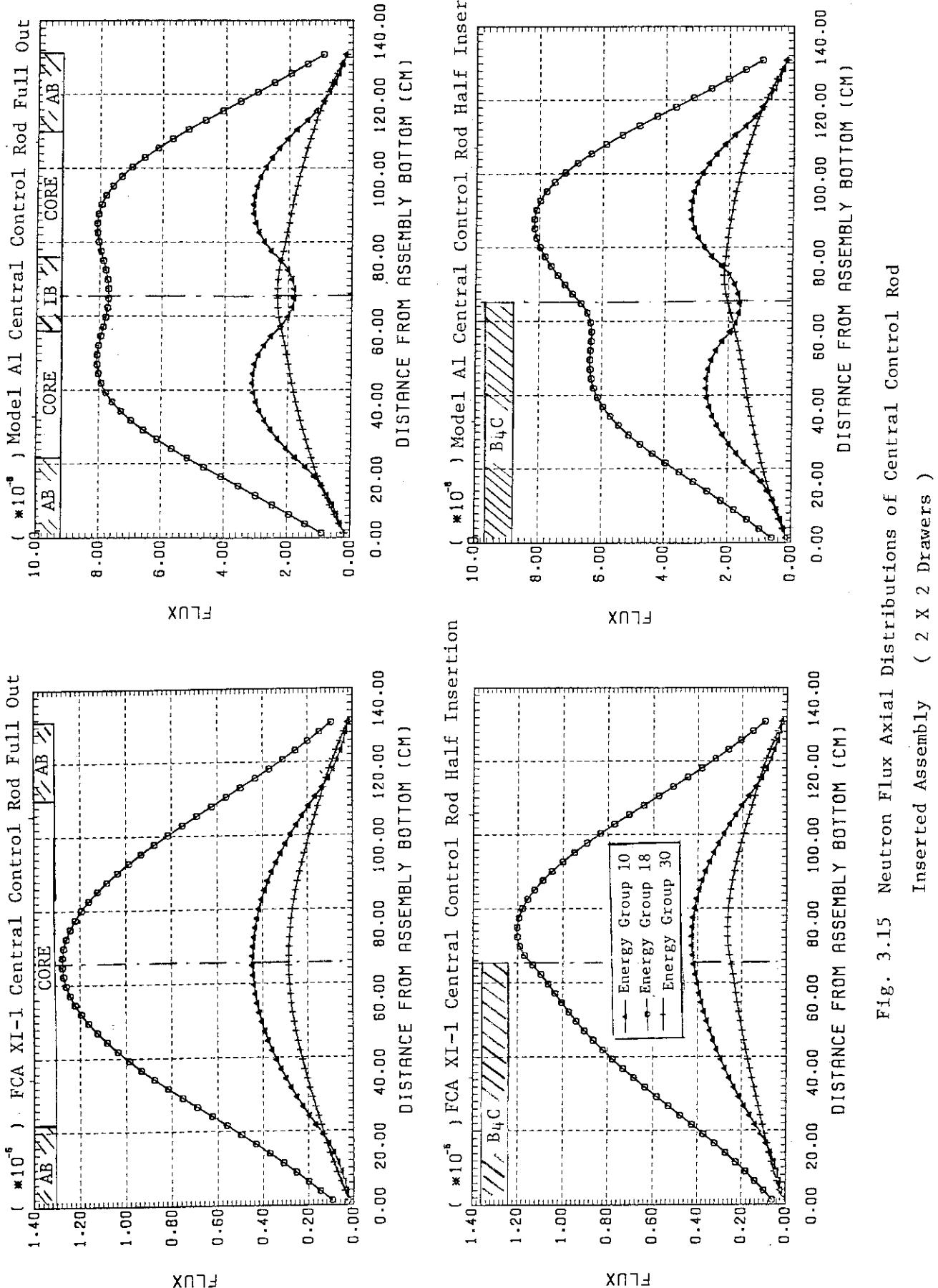


Fig. 3.14 Comparison of Control Rod Stroke Curve



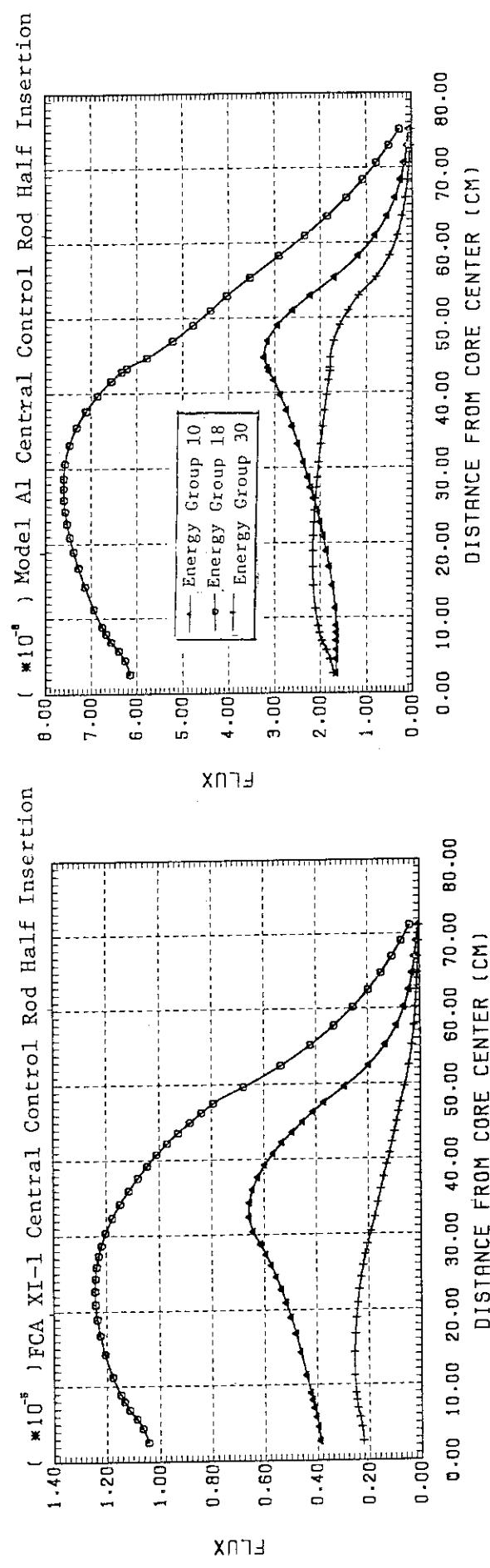
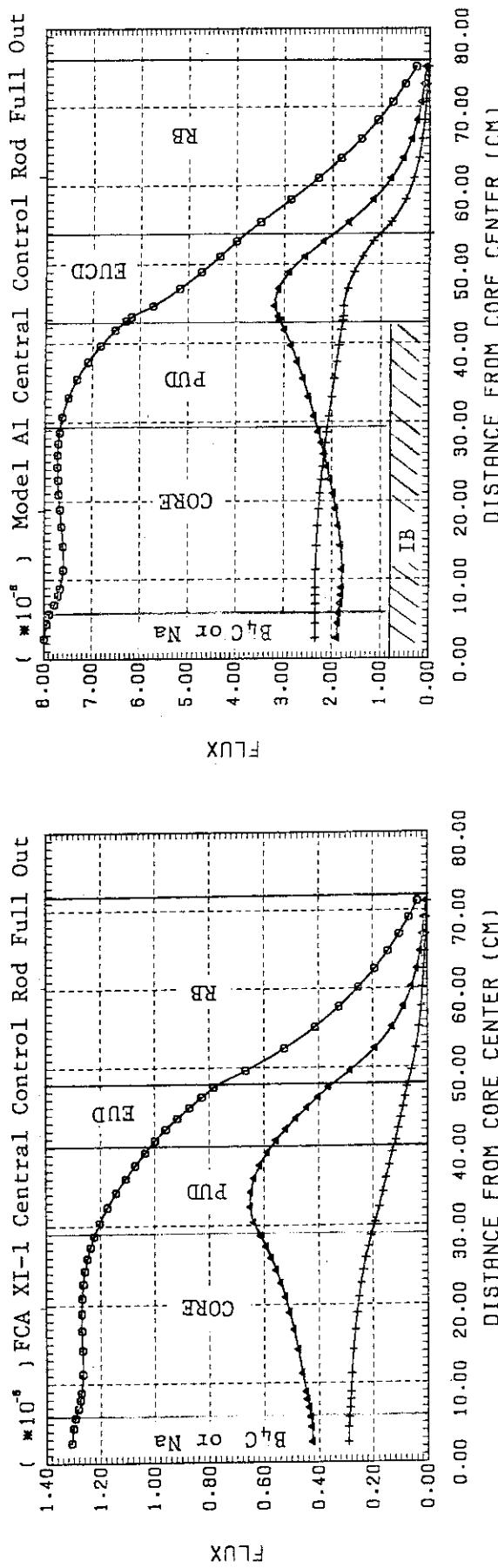


Fig. 3.16 Neutron Flux Radial Distributions at Core Mid Plane of
Central Control Rod Inserted Assembly (2 X 2 Drawrs)

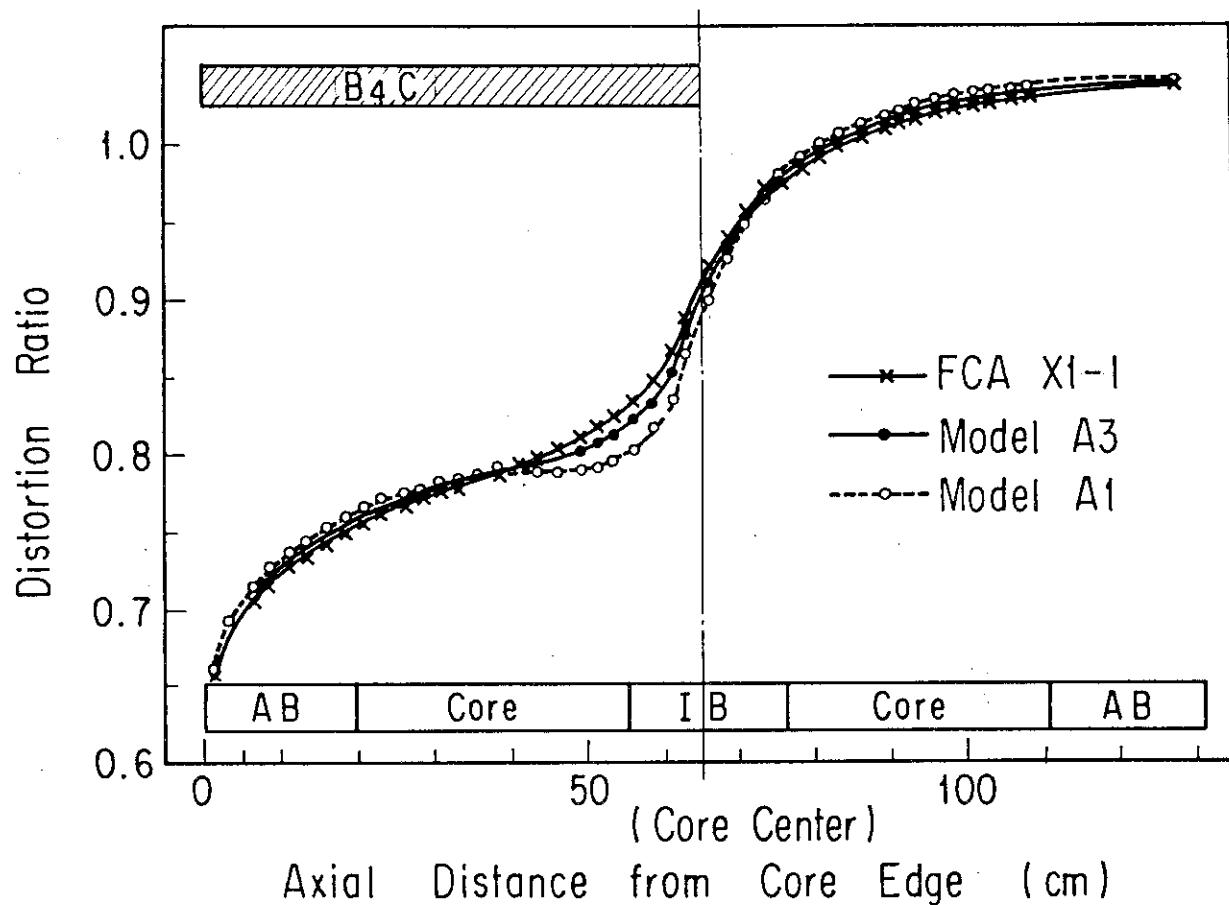


Fig. 3.17 Distortion Ratio of Axial Flux Distribution
at Half Insertion of Central Control Rod

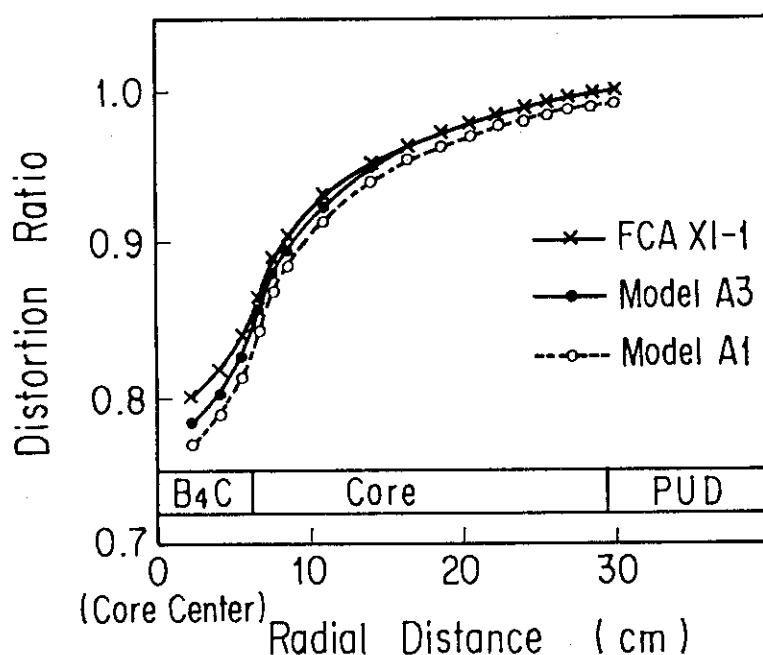


Fig. 3.18 Distribution Ratio of Radial Flux Distribution
at Half Insertion of Central Control Rod

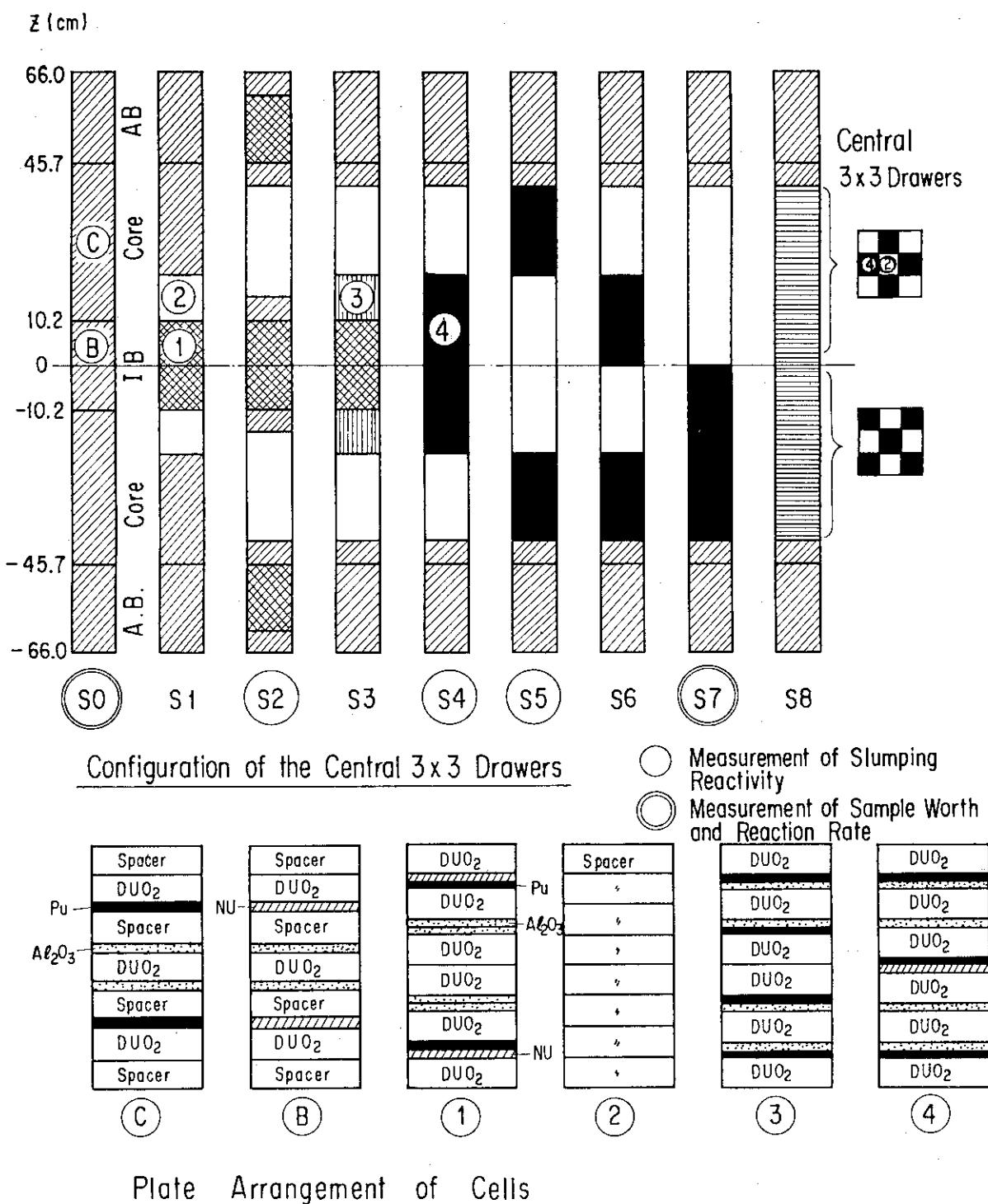


Fig. 3.19 Fuel Slumping Model

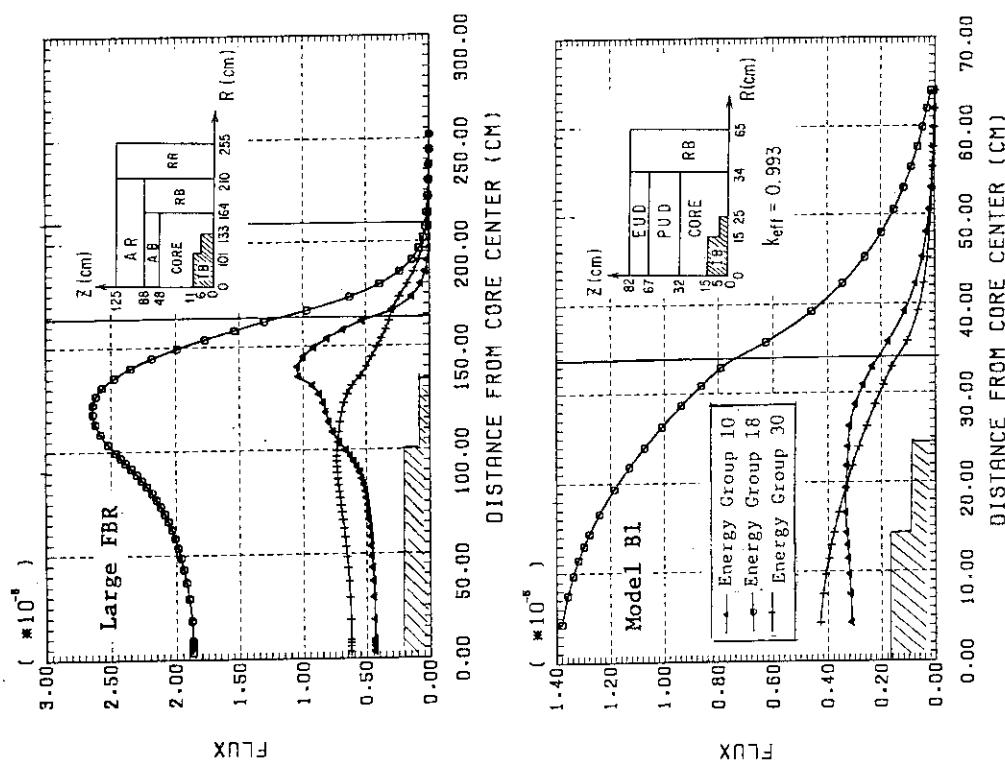


Fig. 3.20 Neutron Flux Radial Distributions
at Core Mid Plane of Model B1 and
Large FBR

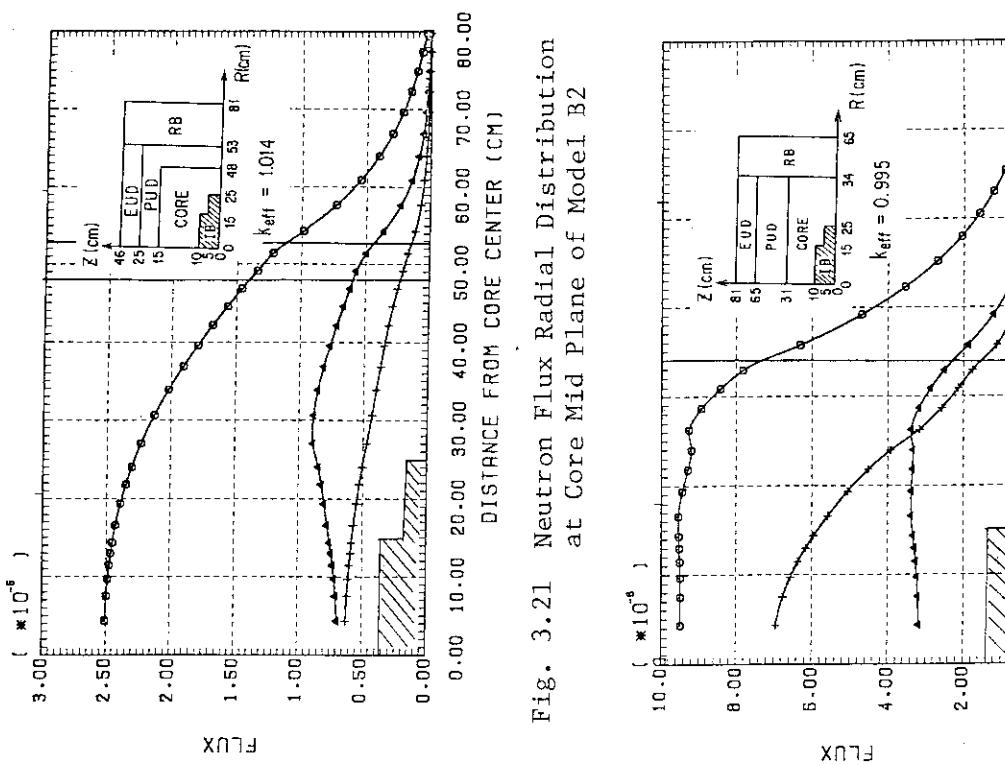


Fig. 3.21 Neutron Flux Radial Distribution
at Core Mid Plane of Model B2

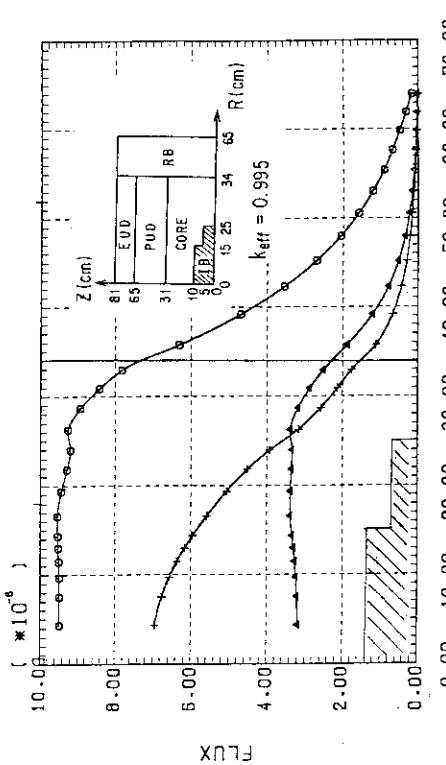


Fig. 3.22 Neutron Flux Radial Distributions
at Core Mid Plane of Model B3

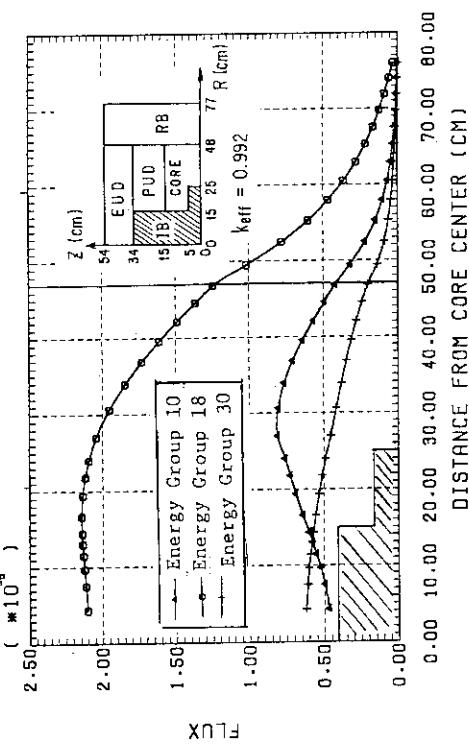


Fig. 3.23 Neutron Flux Radial Distributions at Core
Mid Plane of Model B4

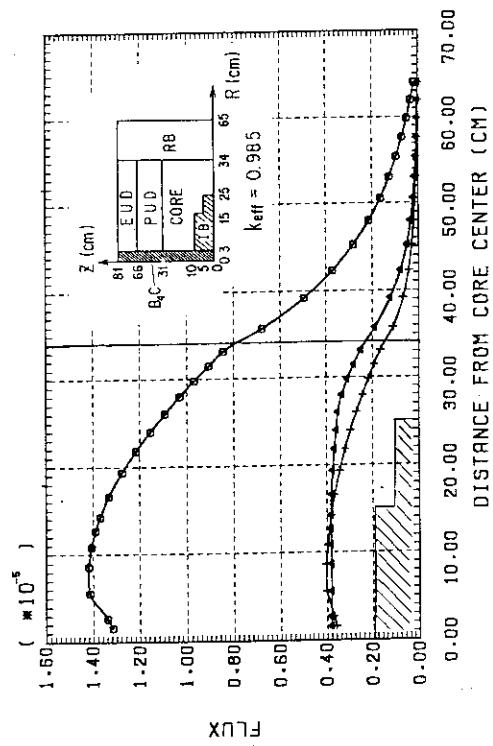
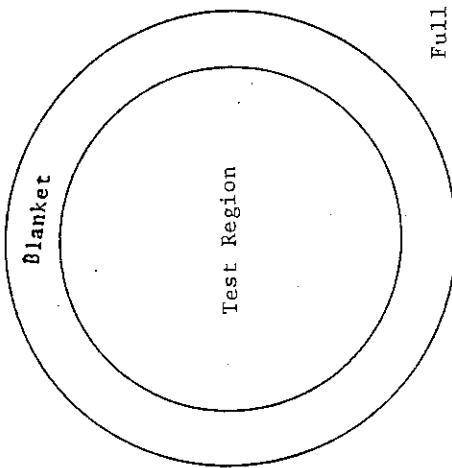
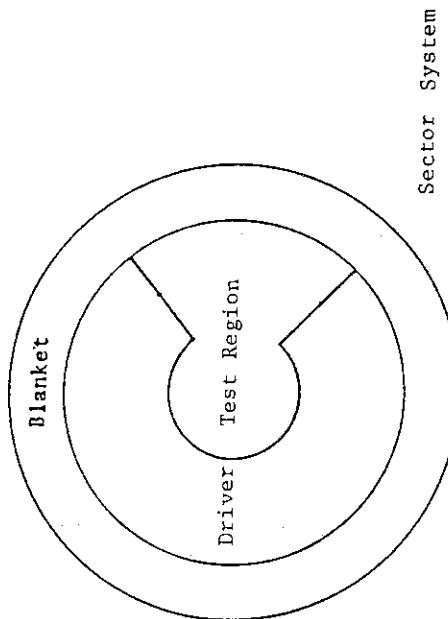


Fig. 3.24 Neutron Flux Radial Distributions at Core
Mid Plane of Model B5



Full Mockup System



Sector System

Fig. 3.25 Sector and Full Mockup System

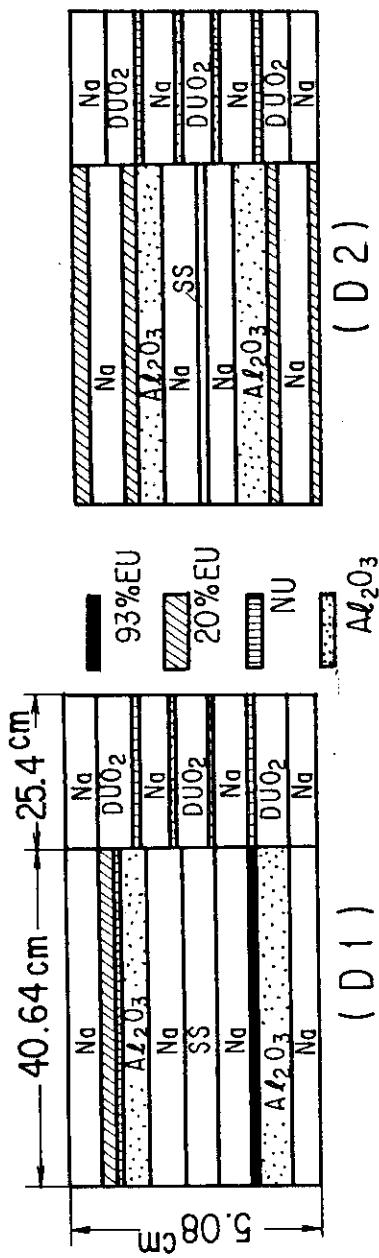


Fig. 3.26 Plate Configurations in Driver Drawers of Model C1

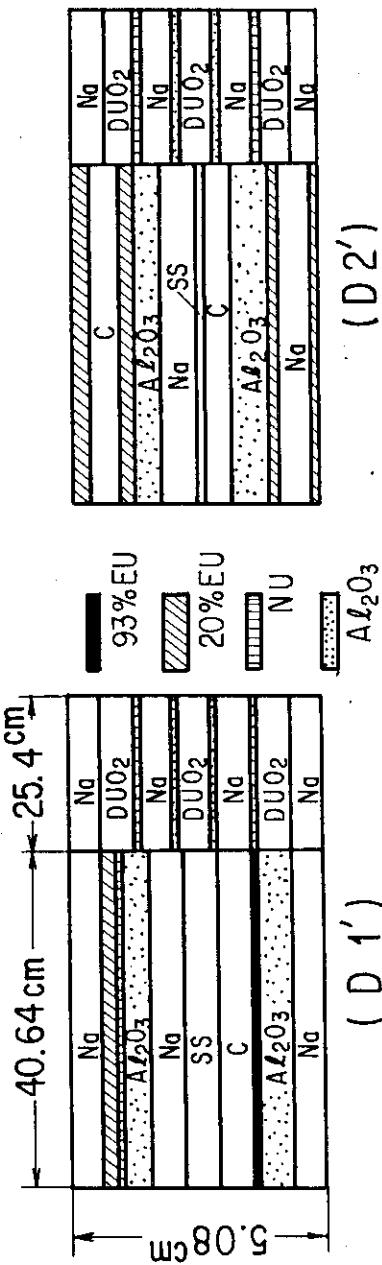


Fig. 3.28 Plate Configurations in Driver Drawers of Model C2

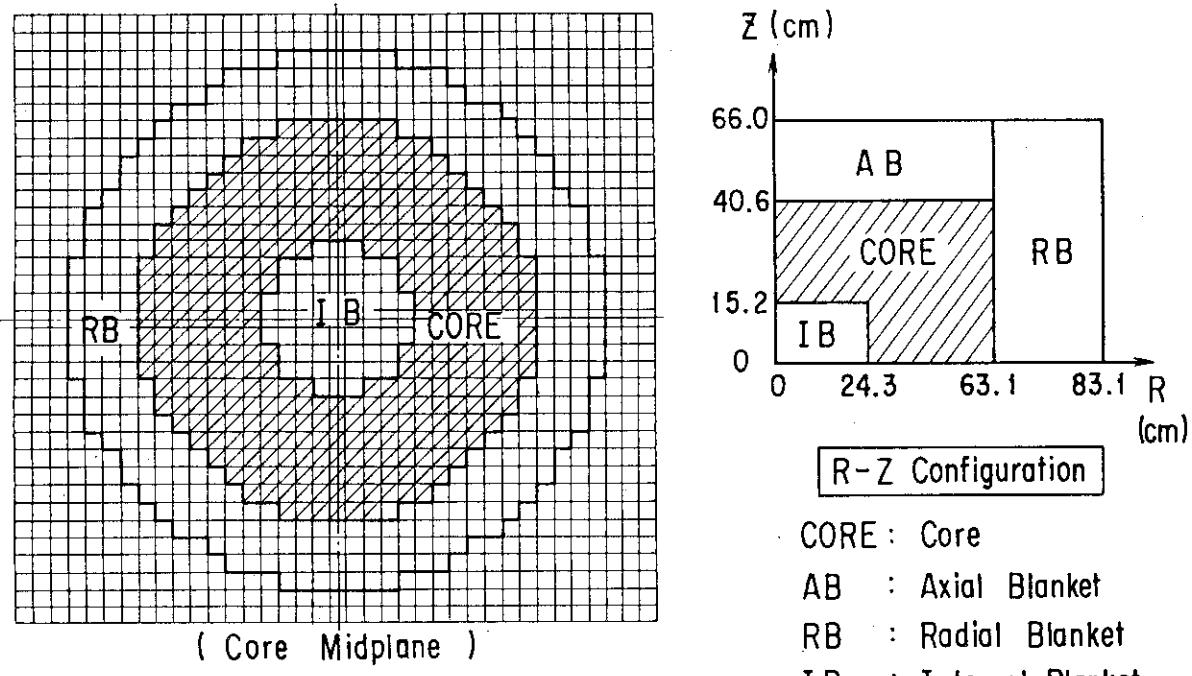


Fig. 3.27 Full Mockup Assembly

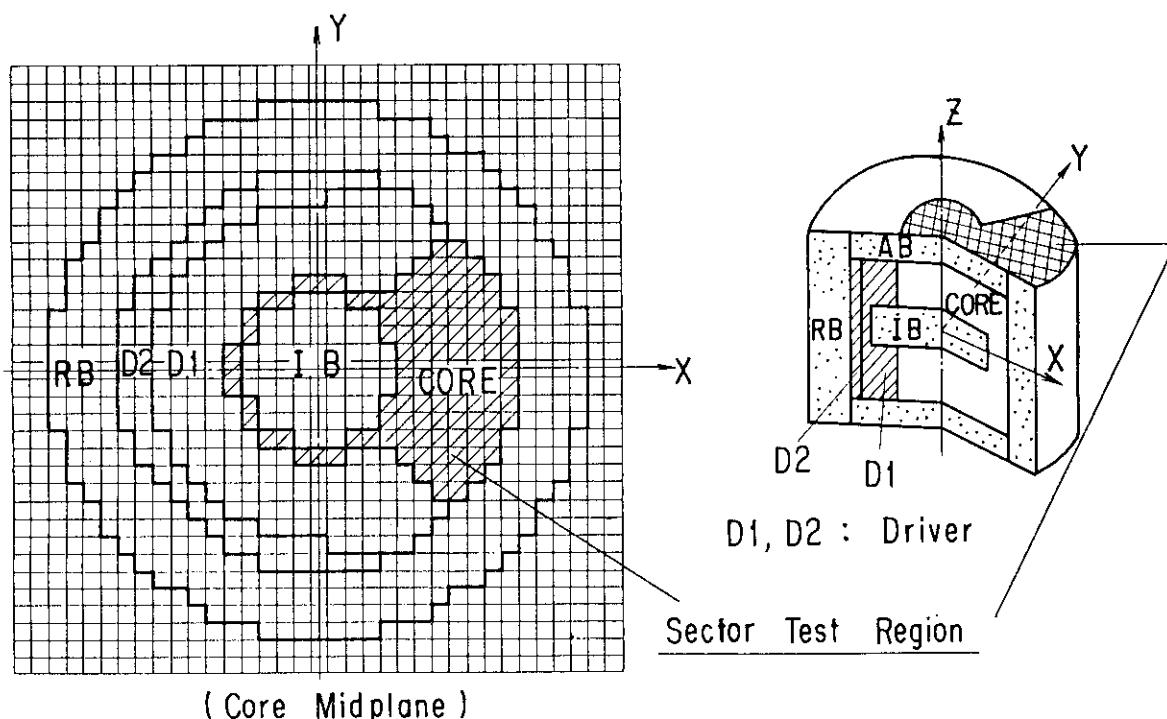


Fig. 3.29 Sector Type Mockup Model C

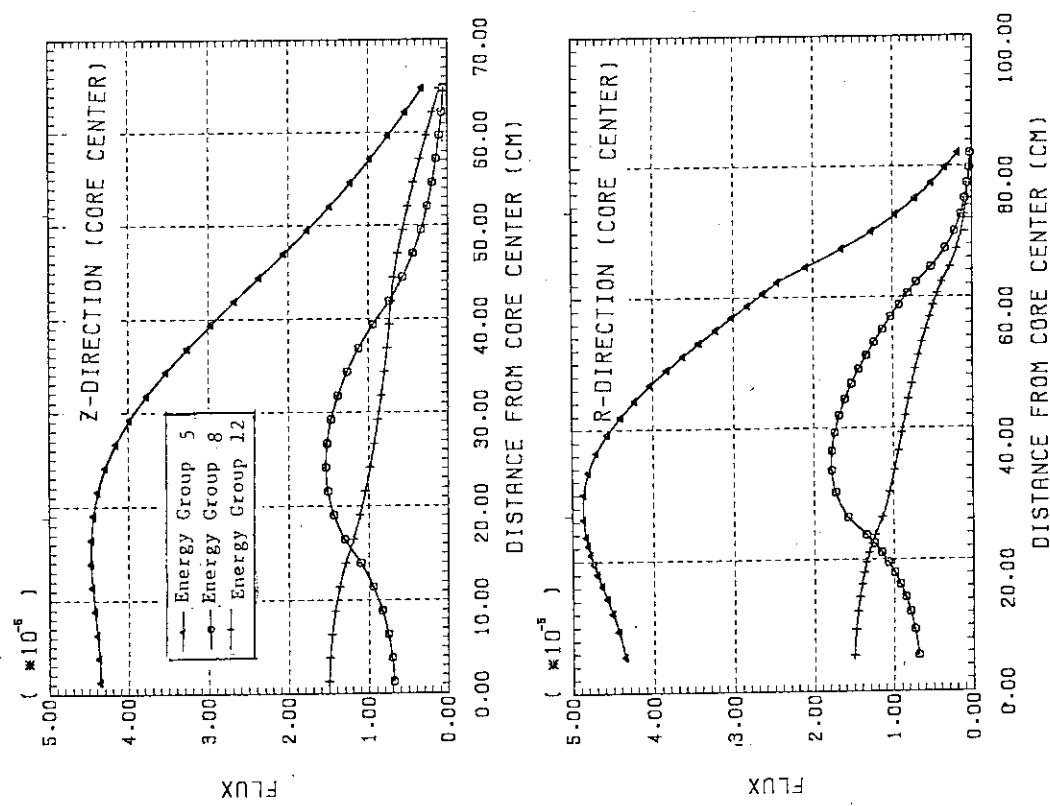


Fig. 3.30 Flux Distributions (18 Energy Groups) of Full Mockup Assembly FM-R

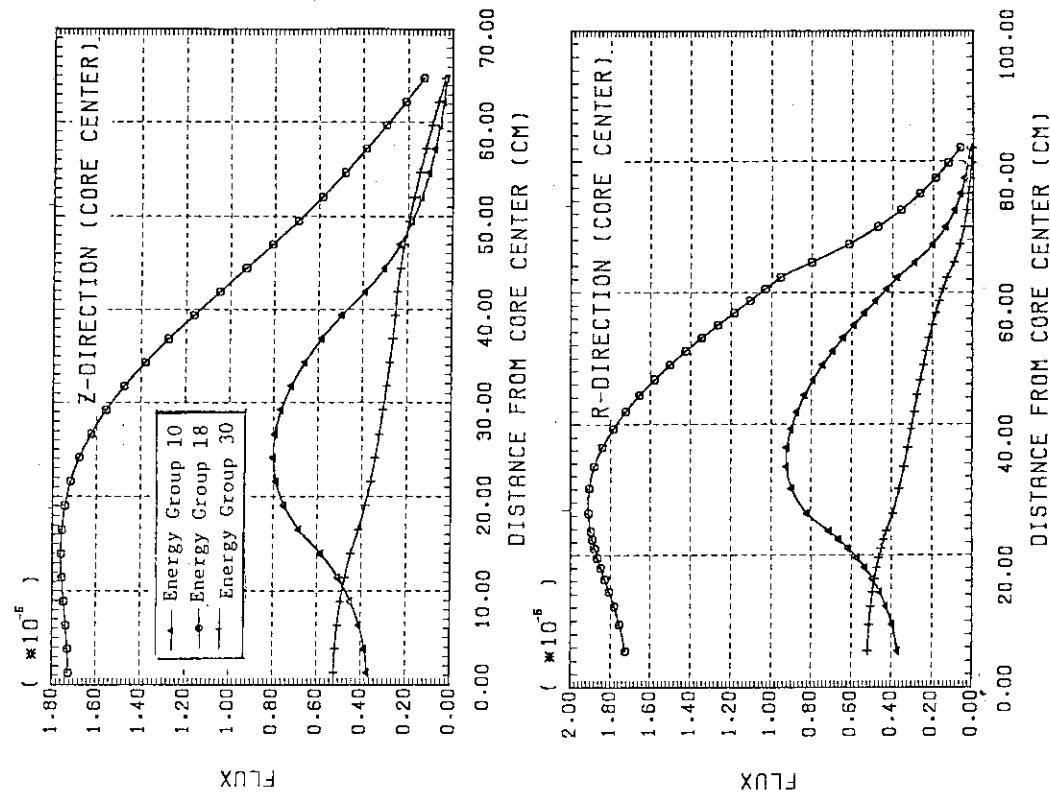


Fig. 3.31 Flux Distributions (70 Energy Groups) of Full Mockup Assembly FM-R

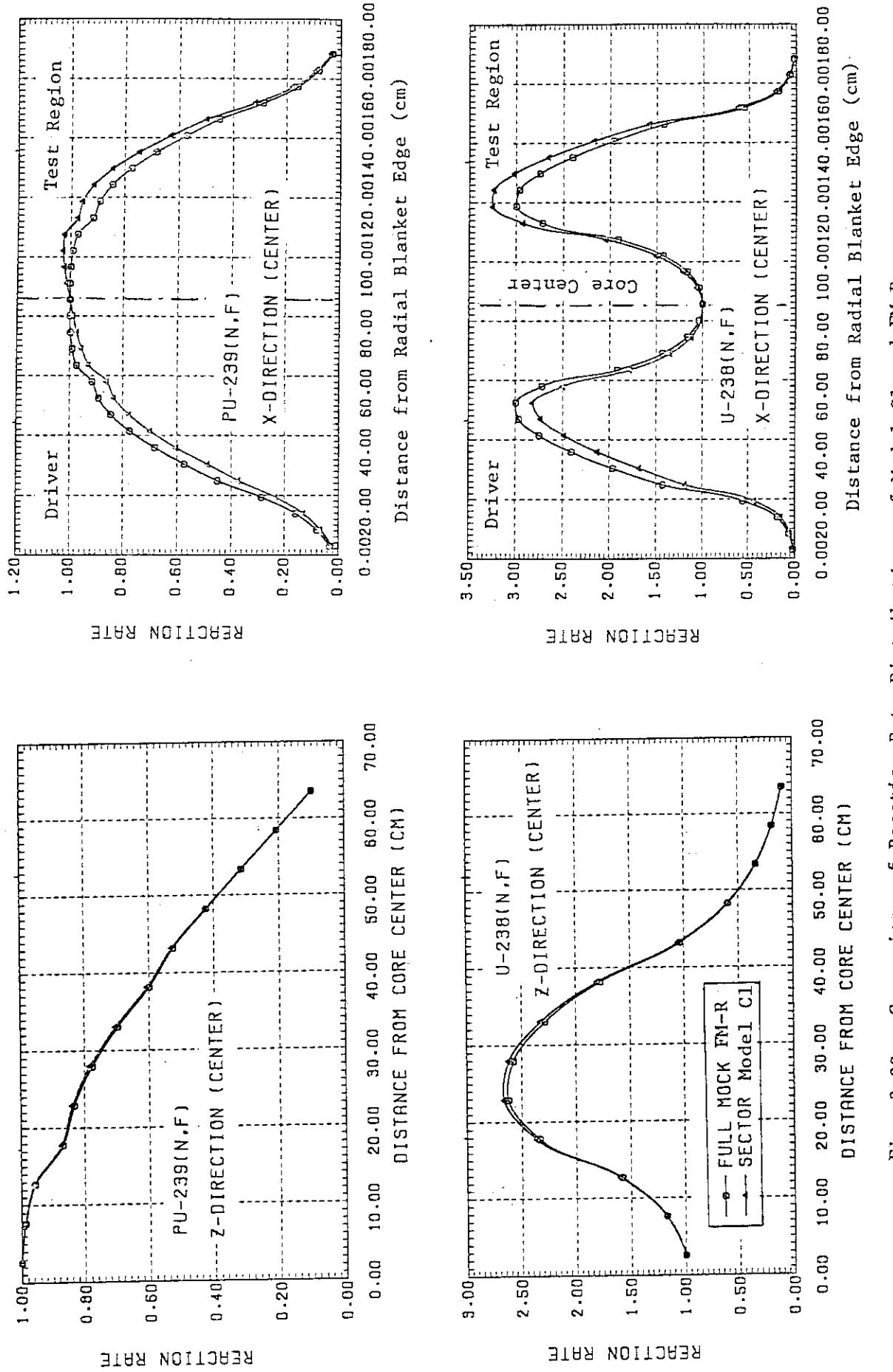


Fig. 3.32 Comparison of Reaction Rate Distributions of Model C1 and FM-R

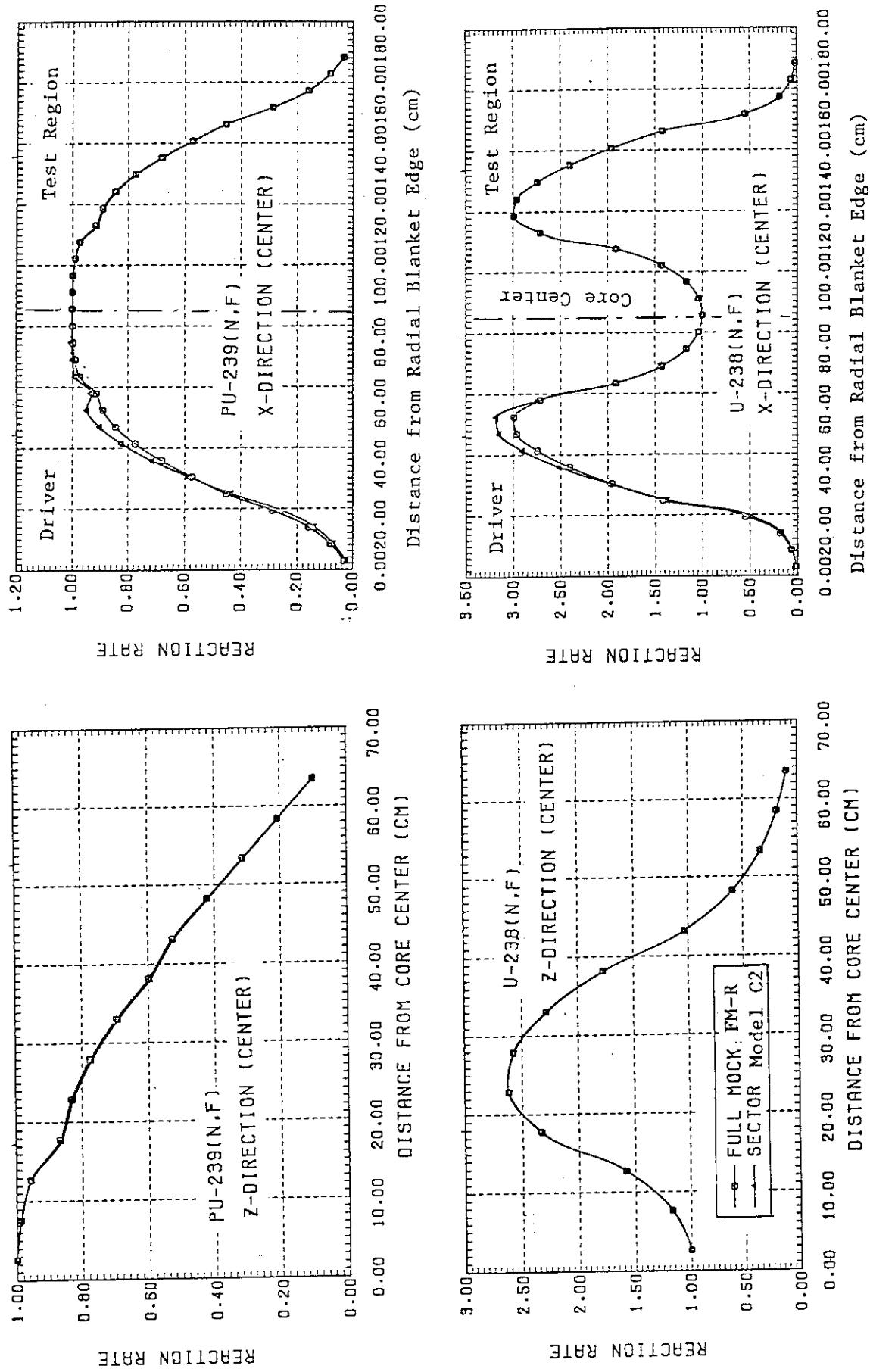


Fig. 3.33 Comparison of Reaction Rate Distributions of Model C2 and FM-R

4. FCA XI-2 集合体の構成と特性試験

軸方向特性を測定する体系が決定したことから、均質体系であるFCA XI-1集合体から、軸方向非均質炉心の最初の体系であるFCA XI-2集合体への装荷変更を行った。XI-2集合体は均質炉心と軸方向非均質の核特性を比較することを考慮し、テスト領域の体積と軸方向ブランケットの厚さおよびドライバーの組成をXI-1集合体と同じにとり、ドライバー領域の体積も良く似た値となるよう配慮した体系である。XI-2集合体では軸方向非均質炉心の核特性の概要を把握できるような項目について実験を行い、また実験手法の検討を行うことを主な目的とする。測定項目は臨界性、反応率分布、物質反応度価値およびナトリウムボイド反応度価値である。本編ではXI-2集合体の臨界基準体系と特性試験について述べる。

4.1 FCA XI-2集合体の構成

XI-2集合体には中央部に等価半径 29.4 cm のテスト領域があり、その周辺をドライバー領域と径方向ブランケット領域が囲んでいる。テスト領域中心には軸方向に厚さ 20.3 cm の内部ブランケット領域があり、その上下に約 35 cm 厚の炉心領域さらに軸方向ブランケット領域がある。軸方向ブランケット厚はXI-1集合体と合せるため 20 cm とした。XI-2集合体の臨界基準体系の断面図をFig. 4.1 に、また各領域の体積を保存してモデル化したR-Z 体系をFig. 4.2 に示す。ドライバー領域にはFCA の運転に必要な制御棒と安全棒が移動側と固定側 1/2 集合体に各 4 組装荷されている。XI-2集合体では制御・安全棒 1 組は 2 本のドロワーで構成されている。FCA の実験では制御・安全棒による中性子束の歪みを避けるためボロン等の中性子吸収材は使用せず、濃縮ウランを燃料とするドロワーを使用している。この制御・安全棒を周辺のドライバードロワーと置換した場合の反応度価値は特性試験で測定し、その値については後述する。

XI-2集合体のテスト領域は 1 種類の燃料ドロワー(T 2B 2) から構成されている。中心面から第 2 パック(約 10 cm) までは内部ブランケットセル、第 3 パック～第 9 パック(約 35 cm) には炉心燃料セルそして第 10 パック～第 13 パック(約 20 cm) には軸方向ブランケットセルが装填されている。内部ブランケットセルと軸方向ブランケットセルは同一であり、天然ウラン金属燃料板、劣化ウラン酸化物燃料板およびナトリウム板から構成され、そのほかに燃料の酸素の量を調整するため、アルミの酸化物が加えられている。炉心領域はプルトニウム燃料板(約 1.5 mm 厚、Pu fis 92 %) と劣化酸化物ウラン燃料板およびナトリウム板から構成され、プルトニウム富化度は 13.2 w/o である。軸方向ブランケットの厚さは約 20 cm である。XI-2集合体に装荷したドロワーパターンをFig. 4.3 に、また各領域の均質原子数密度をTable 4.1 に示す。均質原子数密度は格子管を含めた 5.52 cm × 5.52 cm の断面積を持つ領域で平均化した値である。

4.2 臨界基準体系での特性試験

XI-2集合体の臨界基準体系の構成に続いて特性試験を行った。特性試験の目的は実験に必要な標準反応度 ρ_0 の値を定めること、臨界性の計算に必要なデータおよびFCAの運転に必要なデータを得ることであり、測定項目は

- (i) 制御棒校正
- (ii) 標準反応度較正
- (iii) 1/2集合体間隙効果
- (iv) 温度効果
- (v) 周辺質量係数
- (vi) 制御・安全棒の特異性

である。これらの項目の詳しい測定方法と数値導出過程についてはFCA XI-1のレポート（参考文献1）に述べられているので、本編では各項目の内容と数値のみを記す。

制御棒較正は制御棒挿入位置とそのときの反応度を対応させるためのものである。測定値の単位となる標準反応度 ρ_0 は安全棒1組を50 mm引抜いた位置から完全挿入したときに印加される反応度である。臨界体系にこの反応度 ($1\rho_0$) を加え、そのときの出力倍増時間を測定し $T_d = 54.6 \text{ sec}$ を得た。出力倍増時間と計算で求めた実効遅発中性子割合 β_{eff} から標準反応度は

$$\rho_0 = 0.0546 \% \Delta k/k$$

となる。 β_{eff} は Tomlinson の評価した遅発中性子データ⁹⁾ と群定数として JFS-3-J 2 70 群セットを用い高速炉核特性計算コードシステム^{10) 11)} により計算した。

測定項目(iii)～(vi)は臨界性に関する実験値と計算値を対応させるために必要な量である。

1/2集合体間隙効果：集合体が密着した状態において、移動側と固定側の燃料は約2.1 mm離れた状態にある。それは集合体間のすき間とドロワー前端面にステンレスの板が有るためである。両側の燃料が中心面で完全に密着したことを想定しその反応度変化に対応する補正值を実験的に求めたものである。

周辺質量係数：臨界計算をR-Zモデルで行うことを想定し、テスト領域とドライバー領域、ドライバー領域と径方向ブランケット境界が等価円からずれていることを評価したものである。

制御・安全棒の特異性：制御・安全棒をPD(81)ドライバーに置換したことによる反応度変化を制御・安全棒の特異性として評価した。

XI-2集合体の臨界性に関する実験値をTable 4.2に示す。炉心温度は27°Cとして余剰反応度を求めた。

従来の実験では1/2集合体間隙効果以外にドロワー前端面のステンレス板を取り除いたことによる反応度値を補正值に加えていたが、XI-1集合体の実験結果から非常に小さい値であることが明らかであるためXI-2集合体の実験では、補正值から除くこととした。

4.3 臨界性の検討

FCA XI-2集合体の燃料装荷量を先に実験したXI-1集合体の値と比較し、臨界性に関する検討を行った。XI-1集合体からXI-2集合体への装荷変更ではテスト領域のドロワーでは、中心

の第1パックと第2パックの炉心燃料セルがブランケット燃料セルに差替えられ、その際出て来たプルトニウム板が第3パック以降の炉心領域に装填された。その結果テスト領域全体のプルトニウム燃料の量はあまり変化せず、FCA XI-2集合体の方が3.3%，約2.6 kgの増加である。しかしプルトニウム燃料が、炉心中心から軸方向外側に移動したため、炉心全体の反応度を下げるようになった。この効果がプルトニウムが増えた効果以上に大きいため、反応度の低下をドライバーで補う必要があり、EUDドロワーを12本追加した。その結果、ドライバー領域の²³⁵Uの量が約6%（18.5 kg）増加した。以上の結果、XI-2集合体では臨界性へのテスト領域の寄与の割合がXI-1集合体に比べて小さくなっていると考えられ、今後両者の測定結果を比較する際、注意しなくてはならない。両集合体の燃料装荷量の比較をTable 4.3に示す。

次にFCA XI-2集合体と良く似た構造を持つFCA VII-3-3集合体による実験と比較してみる。VII-3-3集合体は非均質炉心の基本的核特性を測定することを目的としたFCA VII-3実験の中の1炉心である。FCA VII-3実験の一連の炉心では原型炉クラスの燃料組成を基準としていることから、XI-2集合体に比べて炉心のプルトニウム富化度が高い値となっている。VII-3-3集合体はXI-2集合体と同じくテスト領域をドライバー領域が囲み、テスト領域には炉心中心軸方向に20 cm厚の内部ブランケット領域がある。内部ブランケットの燃料組成はXI-2とVII-3-3はまったく同じである。炉心領域ではXI-2集合体では単位セル当たりプルトニウム燃料板2枚を装填したのに対してVII-3-3集合体では半分のサイズの燃料板が追加され、単位セル当たり2.5枚のプルトニウム燃料板が装填されている。その結果、VII-3-3集合体テスト領域の炉心部プルトニウム富化度は15.9 w/oと高い値となっている。内部ブランケットの厚さ、炉心高さはXI-2、VII-3-3とも同じ値である。テスト領域の体積はXI-2集合体の248 lに対しVII-3-3集合体は337 lとかなり大きい。両者のテスト領域の比較をTable 4.4に示す。

XI-2集合体はVII-3-3集合体に比べテスト領域炉心部のプルトニウム富化度が低く、また体積も小さいことから、臨界性に占めるテスト領域の割合が小さい炉心と言える。

今後の実験解析を通じて、XI-2集合体の実験データはXI-1集合体およびVII-3集合体の結果と比較することになるが、以上のような炉心の特徴を十分考慮することが必要である。

Table 4.1 Homogeneous atomic number densities of drawers in FCA
Assembly XI-2
($\times 10^{22} \text{n/cm}^3$)

Region Nuclide	Test Region T2B2			Radial Blanket	Control Rod
	Core	Internal Blanket	Axial Blanket		
Pu-239	0.10455	—	—	—	—
Pu-240	0.00922	—	—	—	—
Pu-241	0.000865	—	—	—	—
U -235	0.00140	0.00316	0.00316	0.0084	0.4521
U -238	0.6869	0.9307	0.9307	4.0174	0.0342
O	1.7038	1.7038	1.7038	—	4.2584
Na	0.7656	0.7656	0.7656	—	—
Al	0.2319	0.2169	0.2169	—	2.8194
Cr	0.3347	0.3079	0.3079	0.1846	0.2819
Fe	1.2351	1.1304	1.1304	0.6722	1.0258
Ni	0.1530	0.1396	0.1396	0.0804	0.5224

Region Nuclide	Driver Region				Axial Blanket	
	Core					
	PUD	EUD	PD(92)	PD(81)		
Pu-239	0.1568	—	0.2091	0.2080	—	
Pu-240	0.01382	—	0.01843	0.02597	—	
Pu-241	0.00130	—	0.00173	0.00321	—	
U -235	0.1144	0.2845	0.00140	0.00140	0.0289	
U -238	0.6954	0.6892	0.6869	0.6869	3.9889	
O	1.3762	1.3623	1.3762	1.3762	—	
Na	0.7656	0.7656	0.7656	0.7656	—	
Al	0.0225	0.9082	0.0300	0.0307	—	
Cr	0.3481	0.3079	0.3615	0.3624	0.1846	
Fe	1.2873	1.1304	1.3397	1.3431	0.6722	
Ni	0.1597	0.1396	0.1664	0.1666	0.0804	

Table 4.2 Criticality in FCA Assembly X1-2

(Unit : ρ_0 ^(a))

Excess reactivity (as built)	4.13 ± 0.02
<u>Correction</u>	
Gap effect	1.76 ± 0.21
Edge irregularity	2.51 ± 1.71
CR/SR singularity (replaced to PUD drawers)	-26.73 ± 0.18

(a) $\rho_0 = 0.0546 \text{ \%}\Delta k/k$

Table 4.3 Comparison of Fissile Material Inventory

(Unit : kg)

	X1-1	X1-2	$\delta(\%)$
<u>Test region</u>			
Plutonium fis.	78.2	80.8	3.3
<u>Driver region</u>			
Plutonium fis.	144.9	144.9	0.0
Uranium fis.	297.8	316.3	5.8

Table 4.4 Comparison of Characteristics for Test Regions of FCA X1-2 and FCA VII-3-3

	X1-2	VII-3-3
Volume (l)	248	337
<u>Material (gr/unit cell)</u>		
◦ Inner blanket U(NU and DUO ₂)	571.4	571.4
◦ Core Pu(92% Enriched)	70.5	88.1
U(DUO ₂)	421.1	421.1

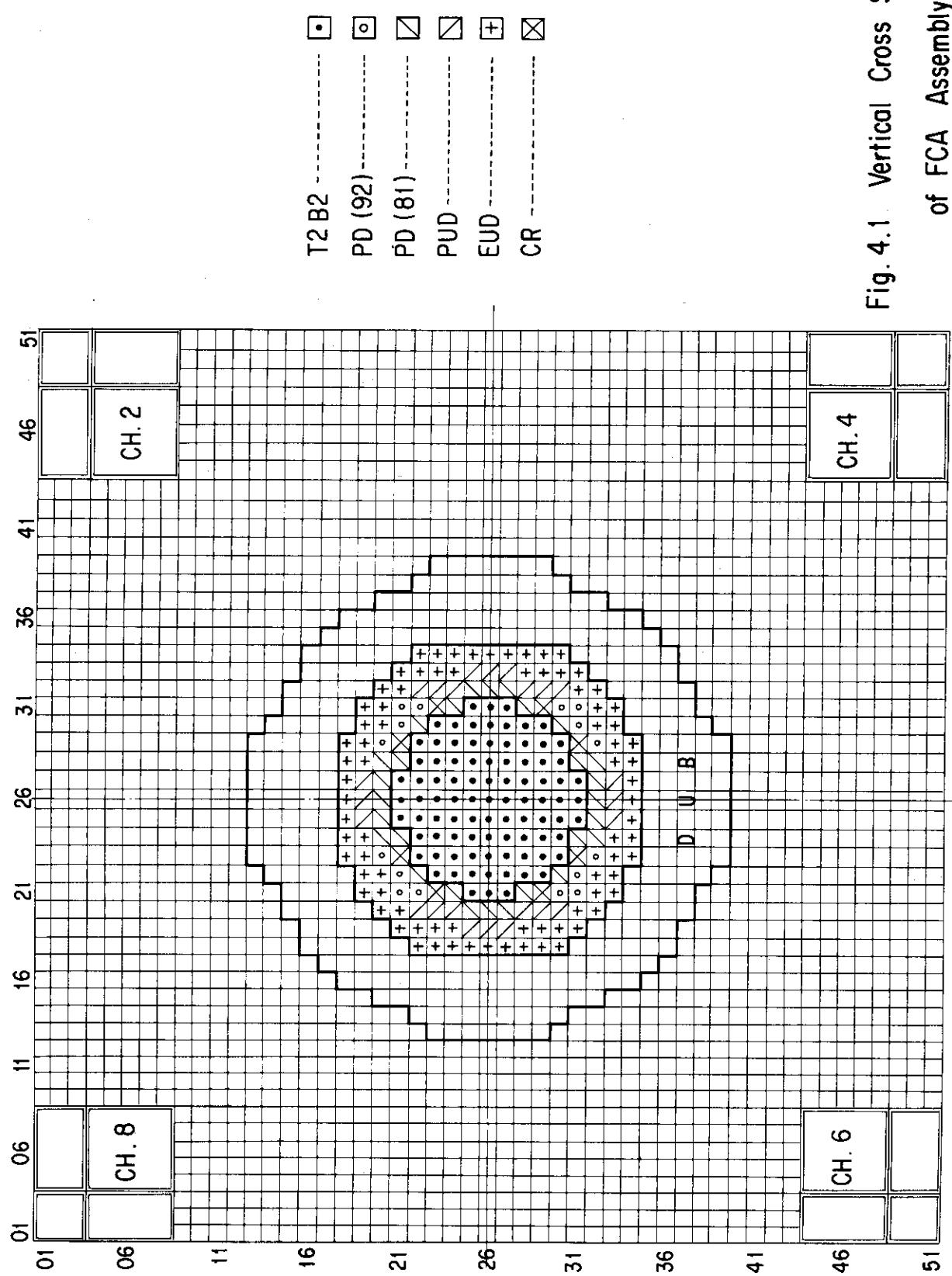


Fig. 4.1 Vertical Cross Section
of FCA Assembly XI-2

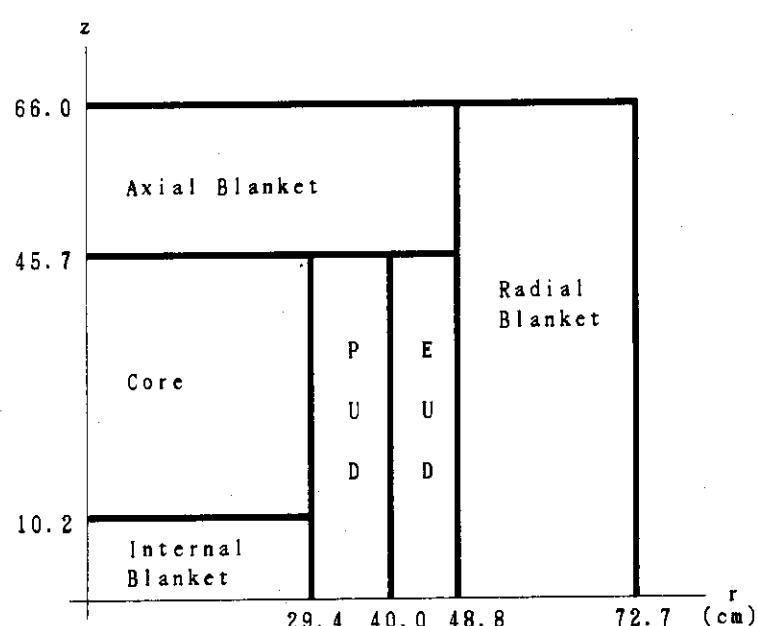


Fig. 4.2 RZ Model of FCA Assembly XI-2

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Na				Na (1/4")					Na (1/4")				
2														
3	DUO ₂	NU			DUO ₂ (1/4")		Pu (1/16")			DUO ₂ (1/4")	NU (1/16")			
4														
5														
6	Na	Al ₂ O ₃			Na (1/4")		Al ₂ O ₃ (1/16")			Na (1/4")	Al ₂ O ₃ (1/16")			
7														
8	DUO ₂	Al ₂ O ₃			DUO ₂ (1/4")					DUO ₂ (1/4")				
9														
10														
11	Na	NU			Na (1/4")		Al ₂ O ₃ (1/16")			Na (1/4")	Al ₂ O ₃ (1/16")			
12														
13	DUO ₂				DUO ₂ (1/4")		Pu (1/16")			DUO ₂ (1/4")	NU (1/16")			
14														
15	Na				Na (1/4")					Na (1/4")				
16														

Fig. 4.3-1 Plate configuration in T2B2 drawer

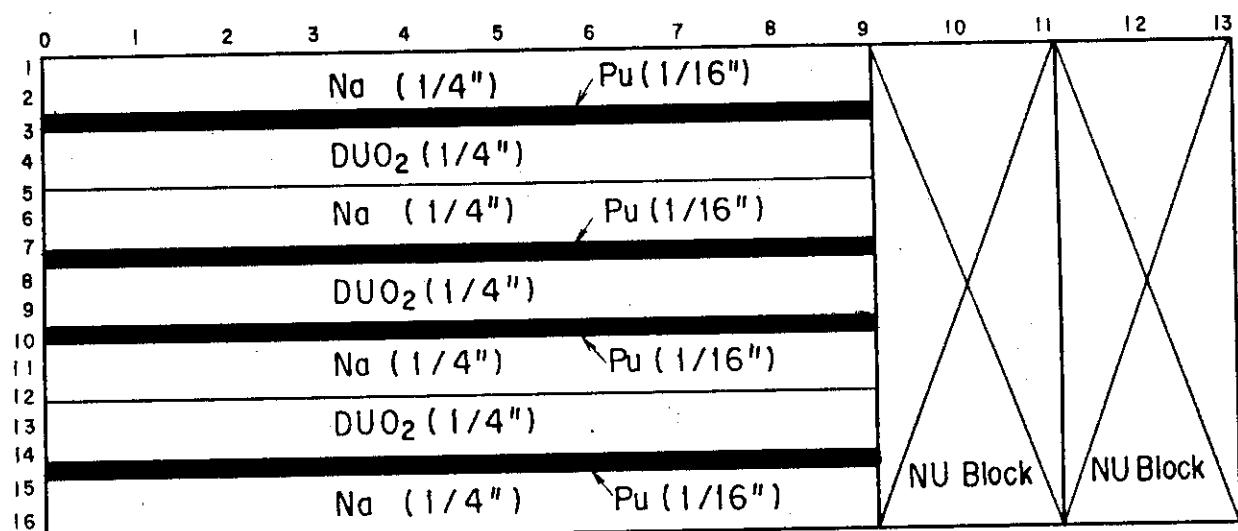


Plate configuration in PD(92) drawer

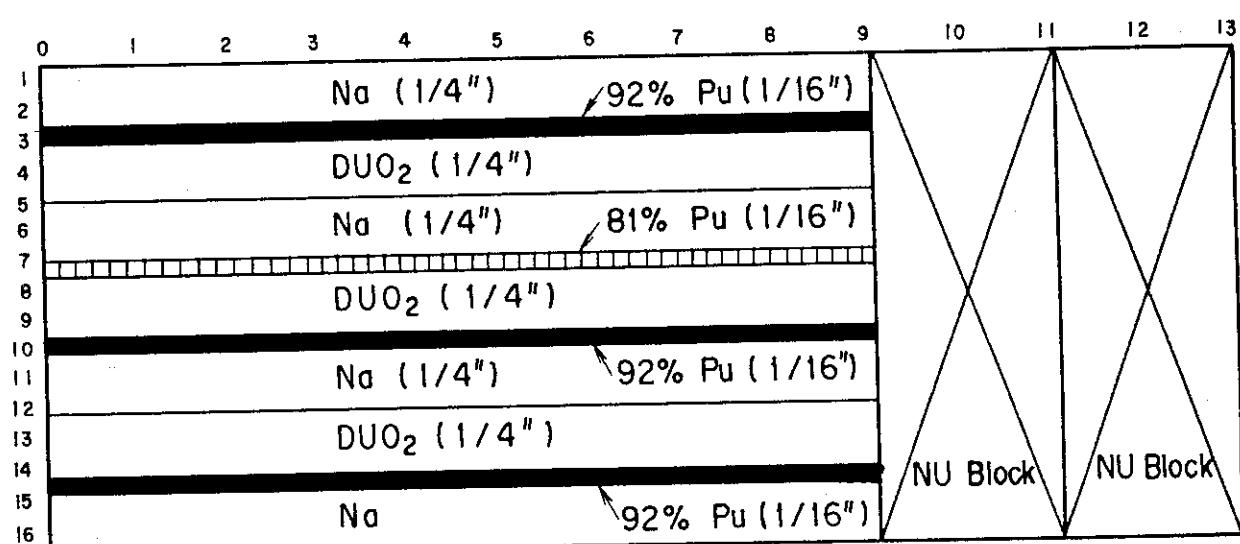


Fig. 4.3-2 Plate configuration in PD(81) drawer

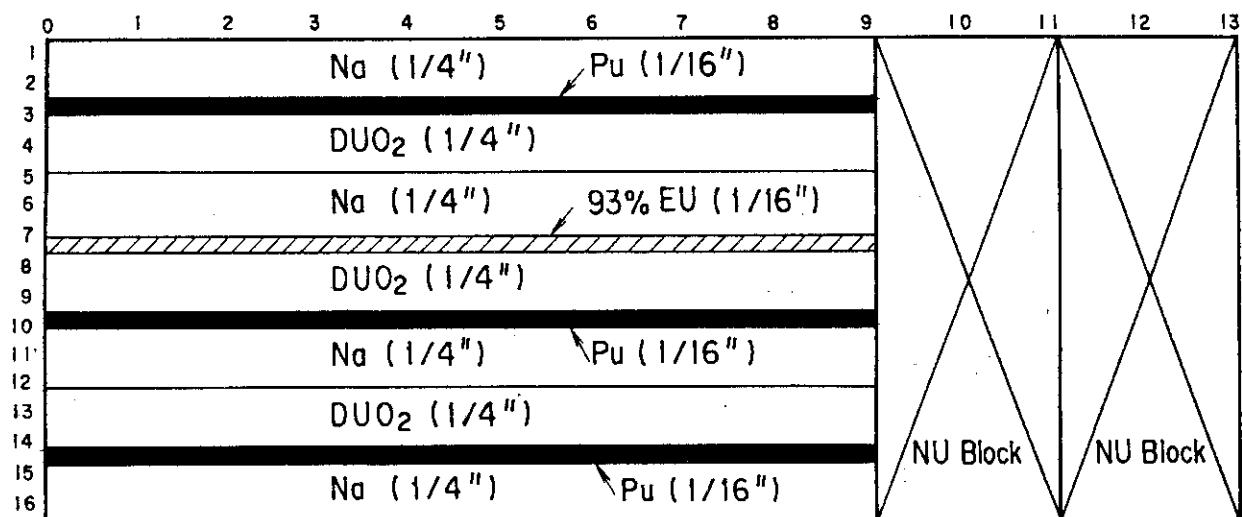


Plate configuration in PUD drawer

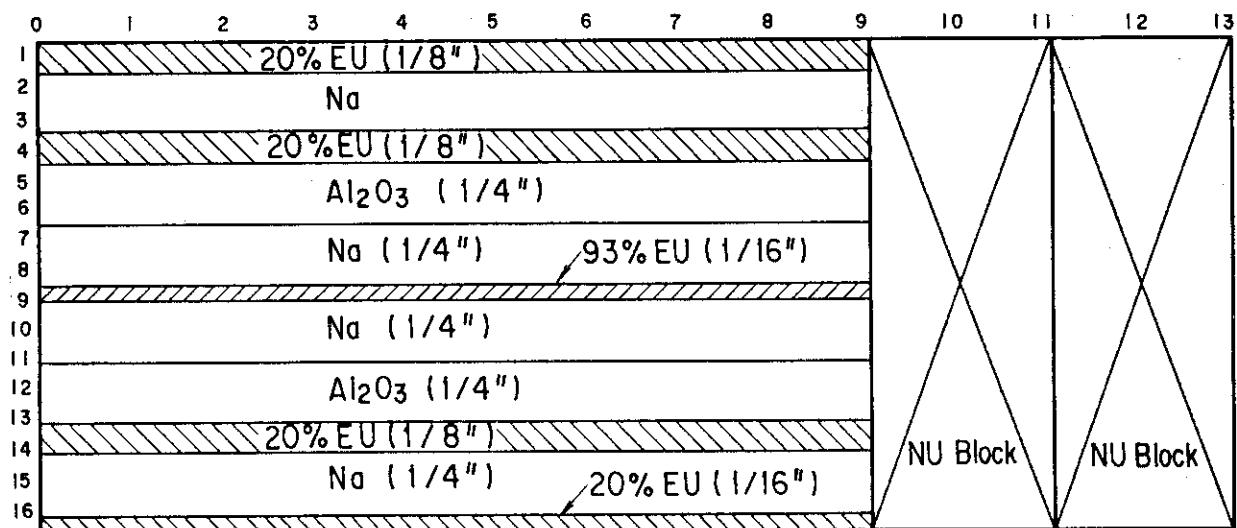


Fig. 4.3-3 Plate configuration in EUD drawer

5. 結 言

高速臨界集合体 FCA を用い、軸方向非均質大型高速炉の臨界模擬実験を計画した。最初に軸方向非均質炉の概念設計等を参考にし、実験体系の選定作業を行った。選定作業では軸方向非均質炉心の核特性について特徴的な点を明確に捉えることができること、そして手持ちの燃料で組むことが可能であることを考慮してサーベイ計算を繰り返した。また燃料溶融に関する実験あるいは制御棒部分挿入実験についても検討した。

予備解析により、軸方向非均質炉心の軸方向の基本的核特性を測定する体系、燃料溶融実験のための体系および制御棒部分挿入実験に関しては、体系を選定することができた。径方向の基本的核特性を測定する体系および燃焼を考慮した体系については選定作業を継続中である。

実験計画の最初の炉心である FCA XI-2 集合体は、予定どおり臨界に達し、臨界特性試験を終了した。その後反応率分布、ナトリウムボイド反応度価値、および物質反応度価値の測定が現在行われている。これらの測定値は今後の解析を通じて、FCA XI-1 集合体あるいは FCA VII-3 集合体の結果と比較検討する予定である。FCA XI-2 集合体での実験はまもなく終了し、引き続いて今回の実験計画の標準炉心である FCA XII-1 集合体での実験を開始する。この体系では軸方向非均質炉心の軸方向の基本的核特性を全項目にわたって測定する予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、軸方向非均質炉心概念設計の資料を提供してくださり、また実験体系の選定に際し助言をいただいた(株)日立製作所エネルギー研究所井上孝太郎氏に深く感謝いたします。そして実験計画の立案に際し助言をいただいた高速炉物理研究室吉田弘幸室長、ならびに実験を助力して下さったFCA管理機関員の方々に感謝の意を表します。

5. 結 言

高速臨界集合体FCAを用い、軸方向非均質大型高速炉の臨界模擬実験を計画した。最初に軸方向非均質炉の概念設計等を参考にし、実験体系の選定作業を行った。選定作業では軸方向非均質炉心の核特性について特徴的な点を明確に捉えることができること、そして手持ちの燃料で組むことが可能であることを考慮してサーベイ計算を繰り返した。また燃料溶融に関する実験あるいは制御棒部分挿入実験についても検討した。

予備解析により、軸方向非均質炉心の軸方向の基本的核特性を測定する体系、燃料溶融実験のための体系および制御棒部分挿入実験に関しては、体系を選定することができた。径方向の基本的核特性を測定する体系および燃焼を考慮した体系については選定作業を継続中である。

実験計画の最初の炉心であるFCA XI-2集合体は、予定どおり臨界に達し、臨界特性試験を終了した。その後反応率分布、ナトリウムボイド反応度価値、および物質反応度価値の測定が現在行われている。これらの測定値は今後の解析を通じて、FCA XI-1集合体あるいはFCA VII-3集合体の結果と比較検討する予定である。FCA XI-2集合体での実験はまもなく終了し、引き続いて今回の実験計画の標準炉心であるFCA XII-1集合体での実験を開始する。この体系では軸方向非均質炉心の軸方向の基本的核特性を全項目にわたって測定する予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、軸方向非均質炉心概念設計の資料を提供してくださり、また実験体系の選定に際し助言をいただいた(株)日立製作所エネルギー研究所井上孝太郎氏に深く感謝いたします。そして実験計画の立案に際し助言をいただいた高速炉物理研究室吉田弘幸室長、ならびに実験を助力して下さったFCA管理機関員の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大杉俊隆, 他: " FCAXI - 1集合体の選定と特性実験 ", JAERI - M 83 - 211 (1983)
- 2) Inoue K. et al., "An Axially Heterogeneous Core Concept for Large LMFBRs and its HCDA Behavior", Nucl. Technol., 63, 215 (1983)
- 3) Nakano M. et al. : "Experimental Study of LMFBR Heterogeneous Core at FCA", JAERI-M 8117 (1979)
- 4) Takano H. et al. : "Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constants Set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135 (1982)
- 5) 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)
- 6) 飯島 進, 他: CITAION - FBR, 公刊予定
- 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) 飯島 勉, 他: " FCAVII - 1集合体の臨界実験 ", 私信
- 9) Tomlinson L. : Delayed Neutrons from Fission, AERE-R 6993 (1972)
- 10) 中川正幸, 他: 高速炉の核特性解析コードシステム, JAERI - M 83 - 066 (1983)
- 11) 飯島 進, 他: 刊行予定