

JAERI - M

85-207

γスキャニング法による大型軸方向
非均質模擬炉心の相対出力分布の測定

1985年12月

佐藤 邦雄・大杉 俊隆・大野 秋男

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

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 株原子力資料サービス

γスキャニング法による大型軸方向非均質
模擬炉心の相対出力分布の測定

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
佐藤邦雄・大杉俊隆・大野秋男

(1985年11月26日受理)

軸方向非均質模擬炉心の相対出力分布をγスキャニング法により測定した。内部ブランケットの存在により軸方向出力分布が平坦化される度合を調べるために、出力ピーピング係数を求めた。軸方向出力ピーピング係数は、厚さ20cmの内部ブランケットを設けることで約12%減少することがわかった。

模擬制御棒を炉心内に部分挿入した場合の出力分布の歪みを測定した。この測定により、制御棒の濃縮度と歪みの大きさの関係、歪みの伝播する範囲、およびその範囲が内部ブランケットの存在によって変化することを明らかにした。

測定した全てのケースについて計算を行った。計算値は、炉心および内部ブランケット領域では実験値をよく再現しているが、外部ブランケット領域では、過小評価していることがわかった。

Measurements of Relative Power Distributions in the
Axially Simulated Heterogeneous FBR Cores
by γ -scanning Method

Kunio SATOH, Toshitaka OSUGI and Akio OHNO

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 26, 1985)

Measurements of relative power distributions were made using the γ -scanning method in the partially simulated cores of the axially heterogeneous FBR in order to study power flattening by introducing the inner blanket at core midplane and power distortion by insertion of simulated B₄C control rod in the core. Power peaking factor was decreased by about 12% in FCA XII-1 assembly in comparison with FCA XI-1 assembly, and the value was $1.11 \pm 1.4\%$.

Distortion in power distribution caused by introducing the simulated B₄C control rod in the FCA XII-1 assembly was obtained from the measured power distributions and propagation distance of the distortion was examined. It was observed that the inner blanket played a role to cease the propagation of distortion from the upper to lower half assembly. Calculations were made for all cores. Calculated results predict the measured results fairly well in the core region and inner blanket. A large discrepancy remains in the outer blanket.

Keywords: LMFBR, Axially Heterogeneous Core, Power Distribution,
 γ -Scanning Method, Peaking Factor, Simulated B₄C Control
Rod, Power Distortion

目 次

1. はじめに	1
2. 実験の概要	2
2.1 測定炉心	2
2.2 測定方法および測定系	3
3. データ処理	11
4. 解析	28
5. 結果および検討	31
6. 結論	41
謝辞	41
参考文献	42

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	2
2.1 Description of the Assembly	2
2.2 Measurement	3
3. Data Processing	11
4. Analysis	28
5. Experimental Result and Discussion	31
6. Conclusion	41
Acknowledgment	41
References	42

1. はじめに

高速炉臨界実験集合体（FCA）を用いて、軸方向非均質高速炉心を模擬した一連の炉物理実験が行われている。

軸方向非均質炉心の核的特性の一つに軸方向の出力分布の平坦化がある。従来FCAでは核分裂計数管または核分裂箔の反応率分布の測定から出力分布を求めていた。出力分布を求めるという観点ではこの手法によると炉心を構成している核物質の各核種について反応率を測定しなければならない。さらに核分裂計数管を炉心内に挿入するため場を乱す可能性がある。これらの欠点を解決し、簡便に炉心内の相対出力分布を測定する方法として、燃料の $F_{\gamma}P_{\gamma}$ 線を測定する γ スキャニング法⁽¹⁾の開発を進めてきた。

この手法を軸方向非均質炉の特性を比較するための均質基準炉心FCA XI-1炉心、軸方向非均質炉心FCA XI-2、XII-1、およびXII-2炉心に適用し、相対出力分布を測定し、それらのデータから、実験的に出力ピーキング係数を求める。また、FCA XII-1炉心では B_4C 模擬制御棒を炉心に部分挿入した体系の制御棒近傍の出力分布を測定し、制御棒の挿入による出力分布の歪みを実験的に明らかにする。また、FCAの実験解析に用いている標準計算法で出力分布の解析を行い実験値との比較検討を行う。

本報告書では、第2章で実験体系および測定方法、第3章で実験値のデータ処理、第4章で解析に用いた計算手法、第5章で実験値と計算値の比較、実験結果の検討について述べる。

2. 実験の概要

2.1 測定炉心

FCAにおいて、XIおよびXIIシリーズの集合体で、軸方向非均質大型高速炉の炉物理特性に関する一連の実験が行われている。以下に、本測定をおこなったそれぞれの集合体について概説する。

FCA XI - 1 集合体

⁽²⁾⁽³⁾ FCA XI - 1 集合体は軸方向非均質炉のそれと比較検討ができる目的として、軸方向非均質炉の実験に先立って計画された均質基準炉心である。この集合体は大型高速炉の内側炉心組成を模擬したテスト領域と、炉を臨界に保つためのドライバー領域より成る。テスト領域の等価半径は約30 cm、ドライバー領域を含む等価半径は約48 cmである。その外側に等価厚さ約24 cmのブランケット領域が設けられている。炉心高さは約90 cmで、その外側に厚さ約20 cmのブランケット領域が設けられている。テスト領域は、富化度の異なる2つの燃料ドロワー、T 1 およびT 2（単位セル当たりのプルトニウム燃料板はT 1 で1枚、T 2 で2枚）で構成され、それぞれ市松状に配置されている。Fig. 2.1 に装荷図、Fig. 2.2 にT 1 およびT 2 ドロワー内の模擬物質板の装填図を示す。

FCA XI - 2 集合体

⁽⁴⁾ FCA XI - 2 集合体は、軸方向非均質模擬炉心である。この炉心はXI - 1 集合体のテスト領域をT 2 B 2 ドロワーで置きかえている。このドロワーの炉心部は1セル当たり2枚のPu燃料板をもっている。Fig. 2.3 に装荷図、Fig. 2.4 にはテスト領域を構成するT 2 B 2 ドロワー内の模擬物質板の装填図を示す。この炉心は中心に厚さ約20 cmの内部ブランケットを有し、内部ブランケットを含めた炉心高さは約90 cmである。ドライバー領域はXI - 1 炉心に比べて臨界を保つために等価半径で約1 cm程大きくなっている。

FCA XII - 1 集合体

⁽⁵⁾ FCA XII - 1 集合体は、XI - 2 集合体に統いて構成した軸方向非均質模擬炉心の基準炉心である。XI - 2 集合体との違いは、内部ブランケットの領域を径方向にプルトニウムドライバー領域にまで拡張し、ドライバー領域からの中性子の流れ込みの影響が可能な限り中心軸で小さくなるようにした集合体である。炉心高さはXI - 2 炉心と同じで内部ブランケットの半径は約40 cmである。炉を臨界にするためウランドライバー領域の模擬物質の組成が変えられている。Fig. 2.5 に装荷図を示している。テスト領域はXI - 2 集合体と同一のT 2 B 2 ドロワーで構成されているが、外側の軸方向ブランケットが約15 cm長くなっている。

FCA XII - 2 集合体

⁽⁶⁾ FCA XII - 2 集合体は、内部ブランケットの厚さを軸方向に20 cmから約30 cmと長くし、径方向をテスト領域のみにした炉心である。Fig. 2.6 には装荷図を示し、Fig. 2.7 にはテスト領域を構成するT 2 B 3 ドロワー内の模擬物質板の装填図を示す。

Fig. 2.8 に上記 4 集合体の R-Z モデル化した体系を示す。

また、FCA XII-1 集合体を用いて、B₄C 模擬制御棒が炉心に部分挿入された場合の出力分布の歪みを調べるために、実効的 ¹⁰B 濃縮度が 20% および 55% の 2 種類の模擬制御棒を準備した。20% 濃縮 B₄C 模擬制御棒は天然 B₄C ペレットをステンレス管に装荷して作成した B₄C ピン 12 本と 4 本のステンレス管をドロワーに装填して構成された。他方 55% 濃縮 B₄C 模擬制御棒は、単位セル (5.52 cm × 5.52 cm × 5.08 cm) 内に天然 B₄C 板 2 枚、90% 濃縮 B₄C 板 2 枚および Na 缶 4 枚を装填して構成された。ドロワー内の B₄C ピンおよび B₄C 板の配列を Fig. 2.9 に示す。各模擬制御棒の単位セル当りの ¹⁰B 重量は、19.92 gr と 46.34 gr である。B₄C ピンおよび B₄C 板の仕様を Table 2.1 に示す。

20% 濃縮 B₄C 模擬制御棒は炉心上部より中心まで挿入 ($\frac{1}{2}$ 挿入) され、他方 55% 濃縮 B₄C 模擬制御棒は約 26 cm まで挿入 ($\frac{5}{18}$ 挿入) された。B₄C 制御棒の下部は Na 缶をドロワーに装填して Na チャンネルを模擬している。

2.2 測定方法および測定系

γ スキャンニング法による出力分布の測定は、炉心内で照射された燃料からの γ 線強度が炉内で照射中に生じた核分裂数に比例するという事実に基づいている。本測定では照射後の燃料板から放出される γ 線のうち 0.6 MeV 以上のものを全て計測している。0.6 MeV 以上の γ 線に着目した理由は、²³⁸U の捕獲反応による ²³⁹Np からの γ 線が 0.5 MeV 以下であること、また 0.6 MeV 近傍に顕著なピークが測定時間範囲（照射後 20～180 分）で認められることによる。

軸方向出力分布の測定は、制御棒挿入炉心を除いて炉心中心ドロワーについて行った。炉心は上下に対称であるから、炉心上部のみについて出力分布を測定している。

XII-1 炉心で B₄C 模擬制御棒を部分挿入した場合の出力分布の測定は、模擬制御棒が炉心中心軸方向に部分挿入されているため、模擬制御棒の隣接ドロワーについて行った。Fig. 2.10 に模擬制御棒挿入位置および測定位置を示す。制御棒挿入による軸方向の出力分布の歪みを測定し、また径方向の分布の歪みを調べるため上部炉心中心部（炉心から 27.94 cm）の位置の径方向についても出力分布を測定した。制御棒挿入による出力分布の変化を見るための基準として、中心に Na チャンネルを挿入した体系の出力分布を測定した。

測定チャンネル（ドロワー）内に含まれている全ての燃料板について、照射に先立ってバックグラウンド計数率を計測した。バックグラウンドの測定後、燃料板をドロワー内の所定の位置に装填し、炉心に装荷した。照射量は全ての測定ケースについて約 150 W·min (10W × 15min) である。照射後約 25 分より、燃料板から放出される 0.6 MeV 以上の全 γ 線を測定した。各燃料板は 2 回測定された。

γ 線の測定にあたっては、測定対象の燃料板の使用履歴によって、バックグラウンド計数率が大きく変わる（3 倍程度の差が認められる）ので、バックグラウンドの測定を精度よく行うことが必要である。照射後の F.P γ 線強度の時間減衰は、照射パターンによって変化することが考えられるので、本測定では、全て同一出力で同一時間の照射を行った。

γ 線測定には、Ge 半導体検出器を使用した。その検出器は鉛で遮蔽し、その上部には直径 2

cmの鉛コリメータが固定されている。鉛コリメータの厚さは10 cmである。検出器からの信号は前置増巾器から線型増巾器に送られ、波形処理されたのち波高弁別器に送られる。ここで0.6 MeV以上の γ 線が弁別され、スケーラで計測される。Fig. 2.11に測定系のブロック図を示した。

Table 2.1 Specification of B_4C pins and plates
used for simulation of control rod

	Natural B_4C	90% B_4C
Dimension (inch)	2-2-1/4	2-2-1/4
Weight (gr)		
B_4C Absorber B	22.72	21.28
C	6.36	6.00
Can (Stainless Steel)	38.94	37.19
^{10}B (atom %)	19.8	90.2
Cr/Fe/Ni (wt.%)	18.72/72.54/8.74	18.72/72.54/8.74

 B_4C Plates

Dimension (mm)	Pellet		Void	Natural B_4C
	Pin tube	Length	—	$11.0 \phi \times 45.3$ L
		Outer dia.	457.2	457.2
		SUS thick.	12.60	12.60
		SUS	0.65	0.65
Weight/pin (gr)	B_4C		84.79	84.79
			—	104.6
		^{10}B	—	14.93
	^{11}B	—	—	66.50
	C	—	—	22.76

 B_4C pellets and pins

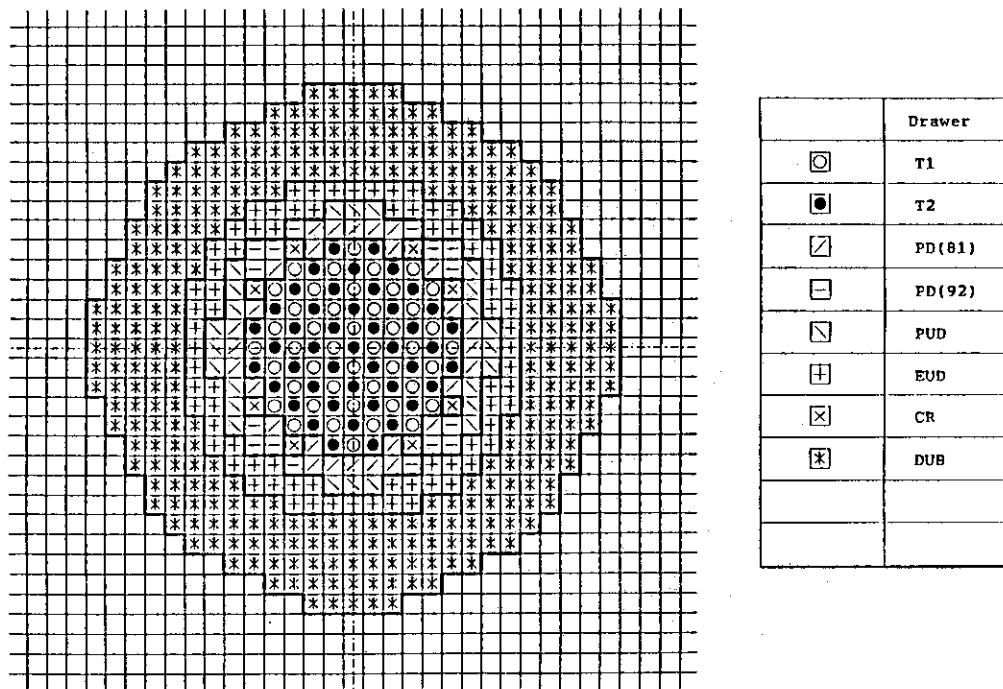


Fig. 2.1 Loading pattern of FCA XI-1 assembly

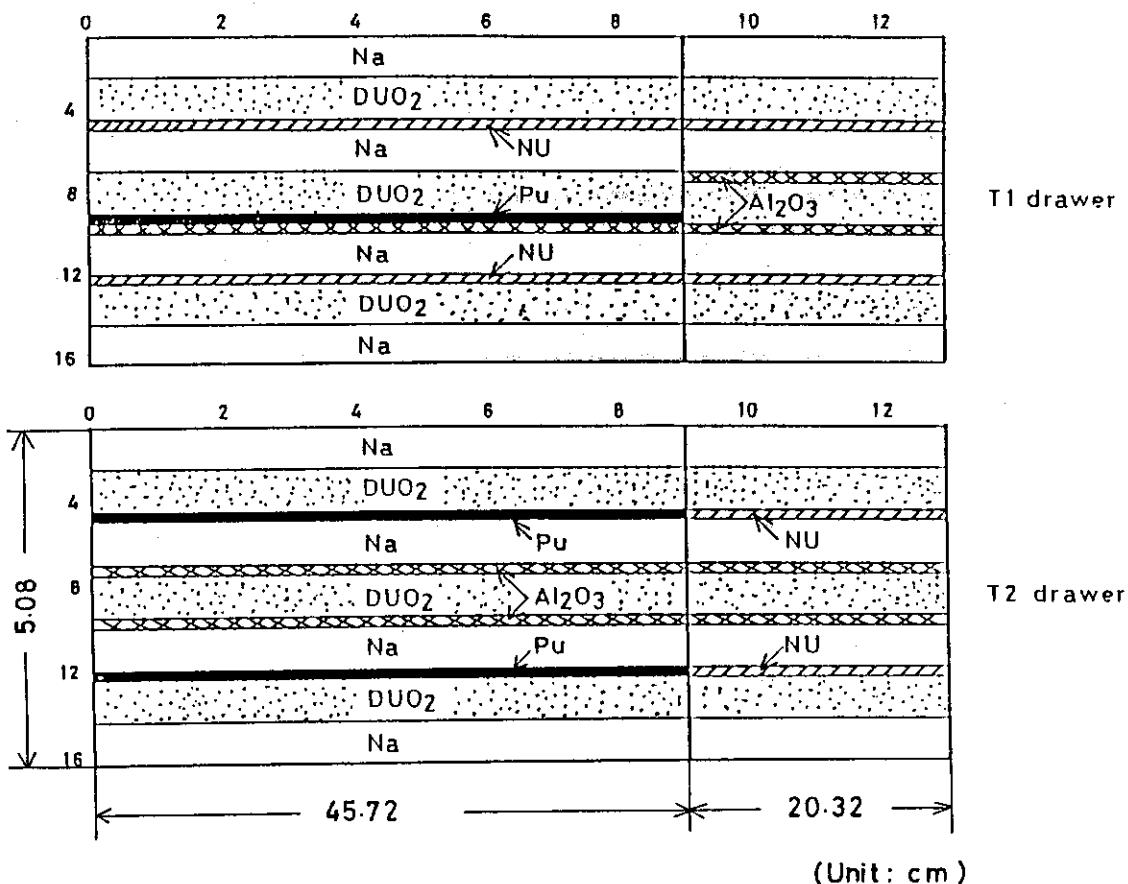


Fig. 2.2 Fuel plate configuration in T1 and T2 drawers

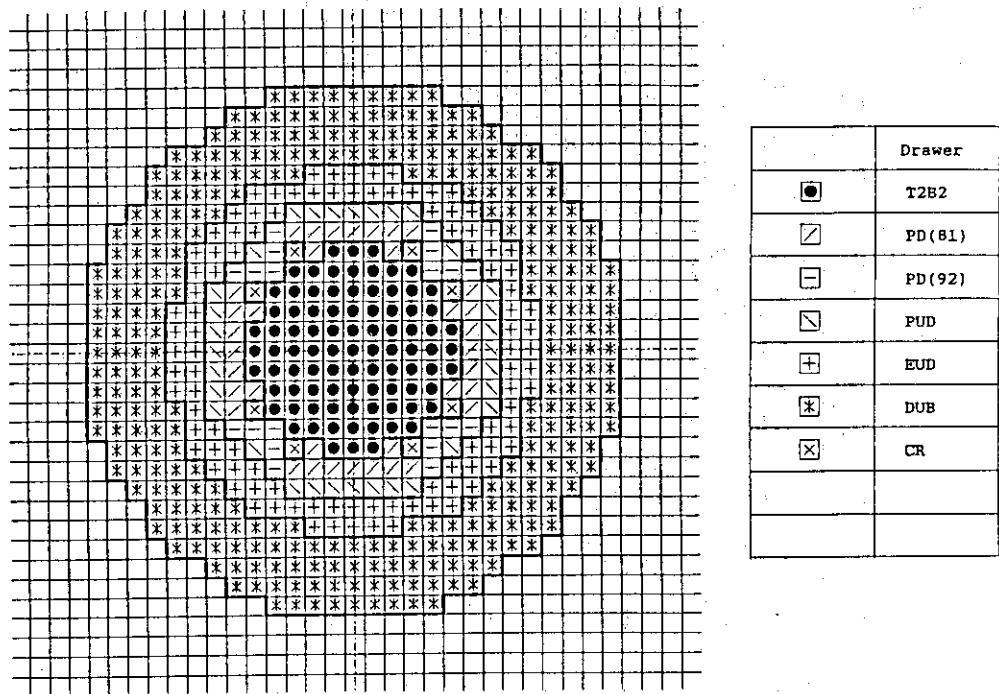


Fig.2.3 Loading pattern of FCA XI-2 assembly

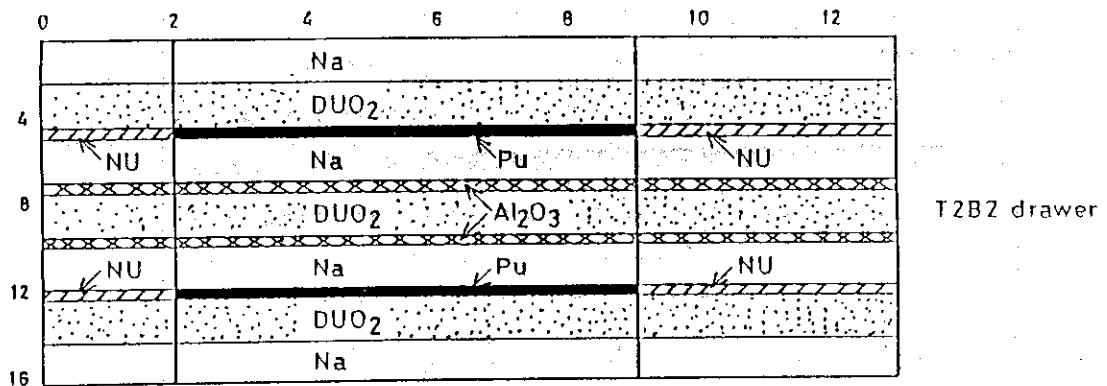


Fig.2.4 Fuel plate configuration in T2B2 drawer

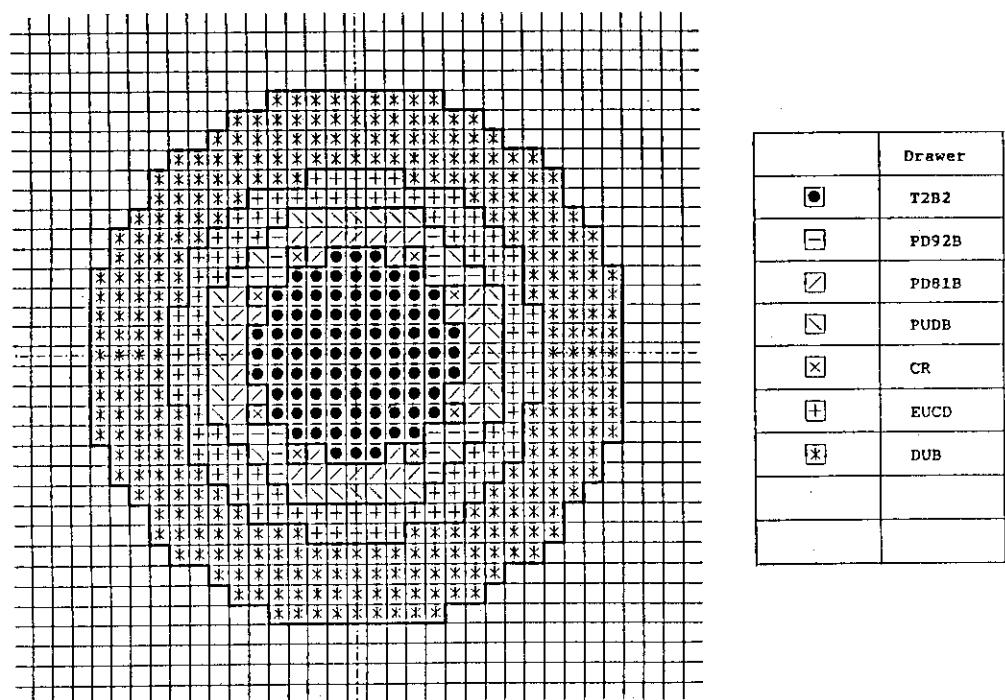
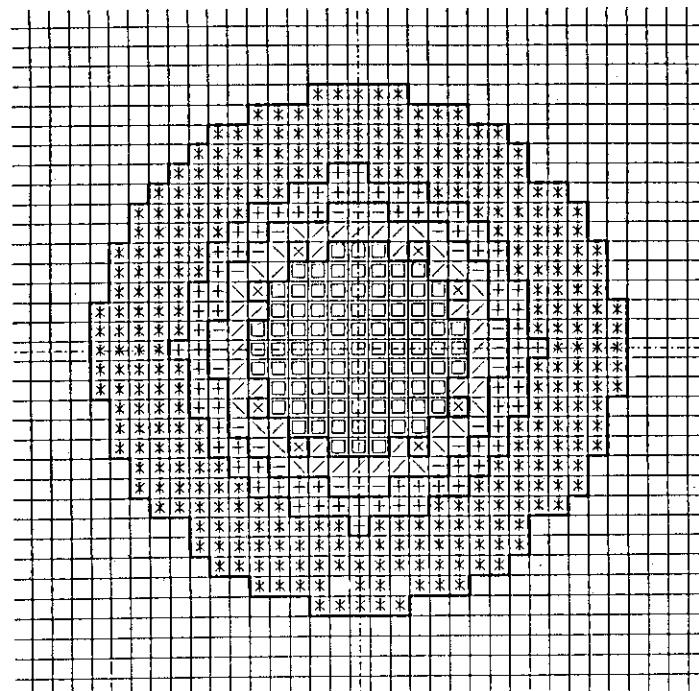


Fig. 2.5 Loading pattern of FCA XII-1 assembly



	Drawer
<input type="checkbox"/>	T2B3
<input checked="" type="checkbox"/>	PD81
<input checked="" type="checkbox"/>	PD92
<input type="checkbox"/>	PUD
<input checked="" type="checkbox"/>	CR
<input type="checkbox"/>	EUCD
<input checked="" type="checkbox"/>	DUB

Fig. 2.6 Loading pattern of FCA XII-2 assembly

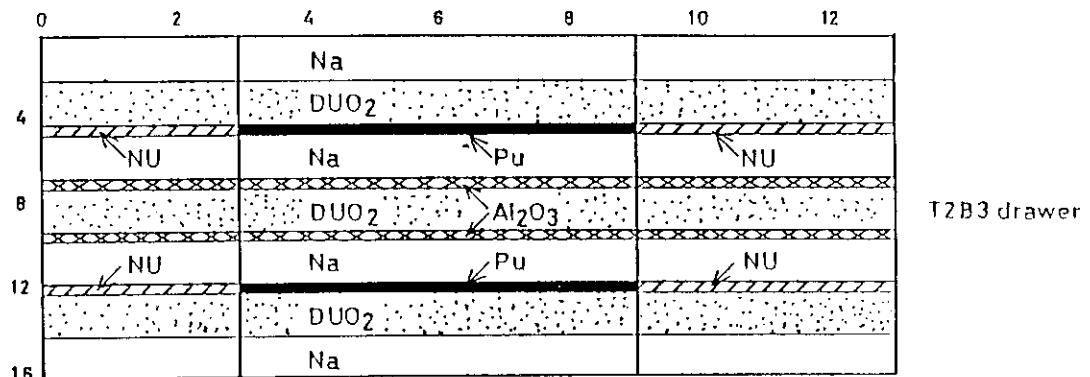


Fig. 2.7 Fuel plate configuration in T2B3 drawer

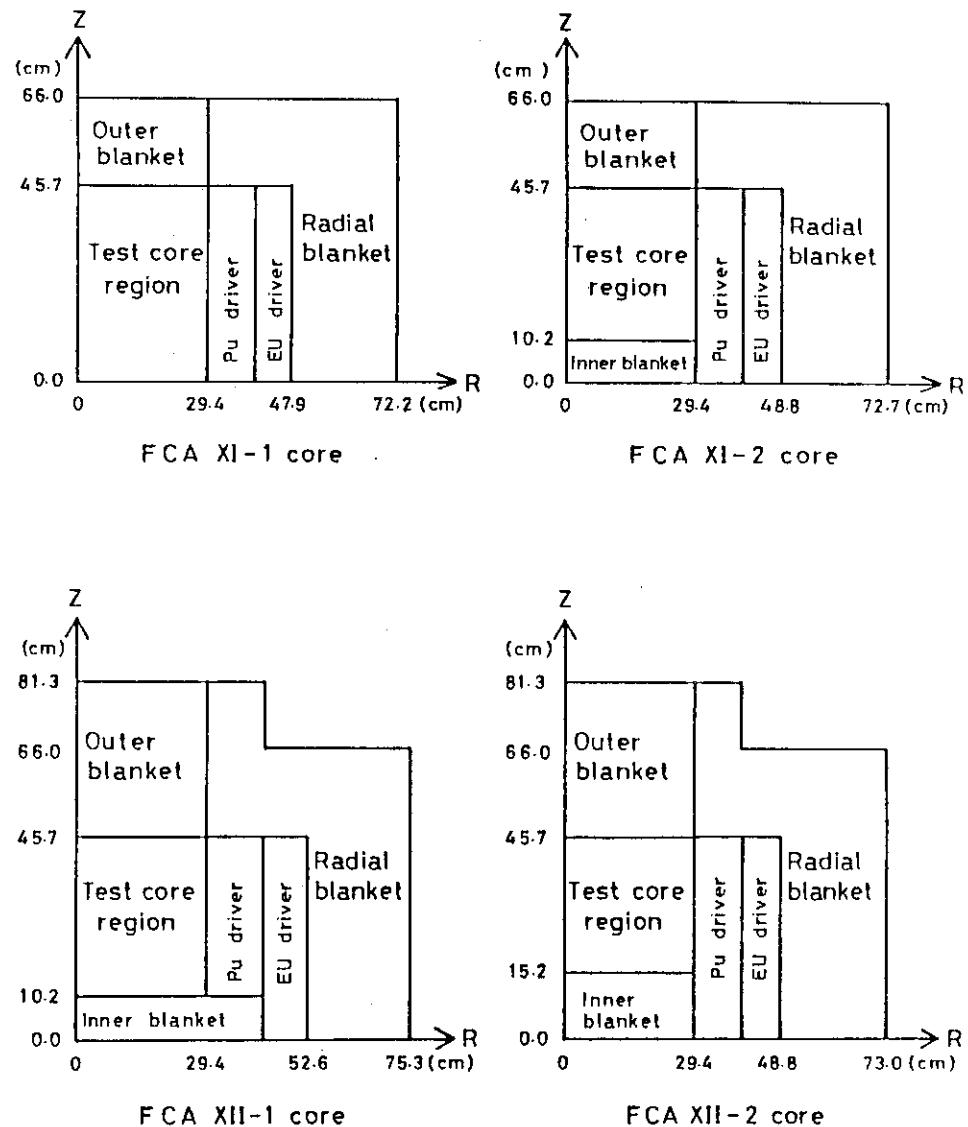


Fig.2.8 R-Z models of FCA assemblies

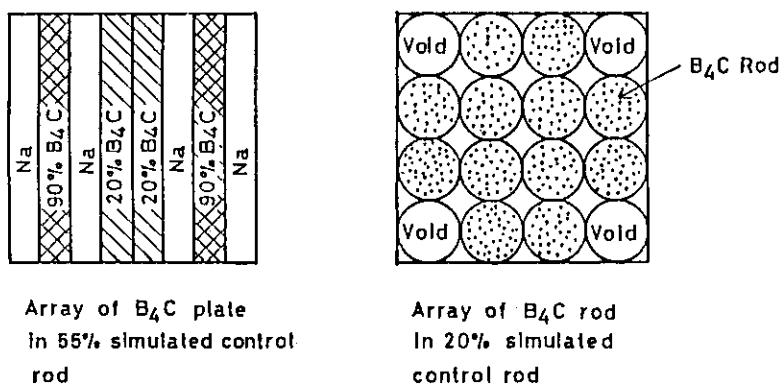


Fig.2.9 Configuration of B_4C pins and plates
in drawer for simulating control rod

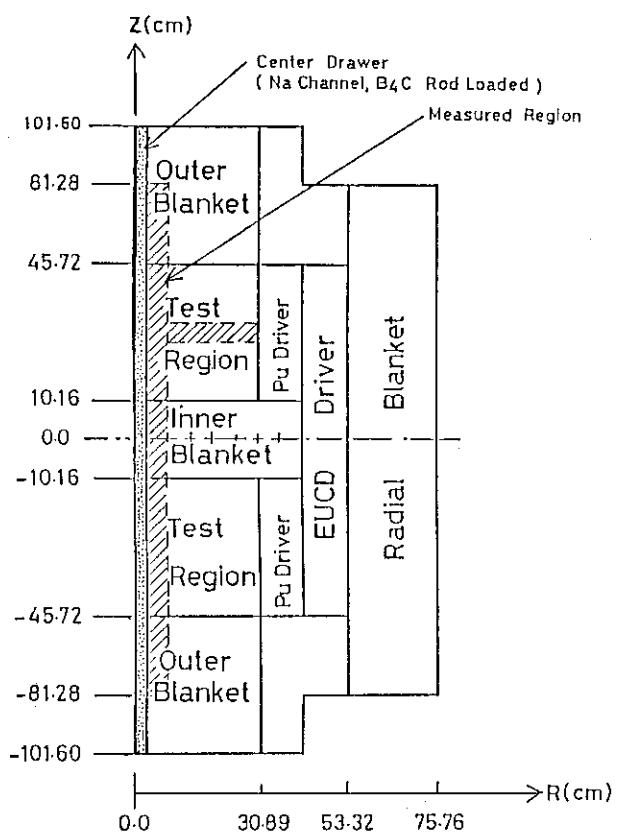


Fig. 2.10 Inserted location of simulated control rod
in FCA X-II-1 assembly and measured position

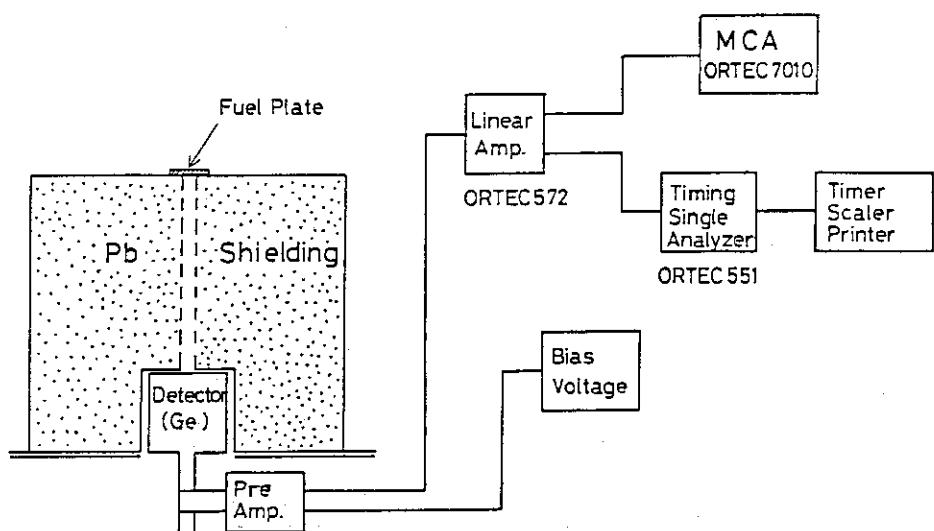


Fig. 2.11 Block diagram of measurement system

3. データ処理

照射後各燃料板について計測された 0.6 MeV 以上の γ 線の計数率 n に、計測系の分解時間 τ ($4.5 \mu\text{sec}$)、照射に先立って計測されたバググランド計数率 B, G 、および F.P. γ 線の照射後の経過時間につれて減衰する時間減衰係数 $F(t)$ の補正を行って、同一時刻の計数率におした。すなわち燃料板 i の計数率 N_i は、

$$N_i = (n / (1 - n\tau) - B, G) \cdot F(t) \quad \dots \quad (3.1)$$

で与えられる。時間減衰係数 $F(t)$ は、予め同一測定条件の下で測定された値から求めた。照射後の経過時間に対する F.P. γ 線強度の減衰曲線を Fig. 3.1 に示す。

単位セルは、燃料物質および模擬物質で構成されている。即ち、内部および外部ブランケット領域の単位セルは燃料物質として、天然ウラン金属燃料板および劣化ウラン酸化物燃料板 (UO_2) と模擬物質として、Na 板およびアルミナ板（酸化物燃料を模擬するために用いられている）で構成されている。他方炉心領域の単位セルは、Pu 燃料板 (Pu-Al 合金)、劣化ウラン酸化物燃料 (UO_2)、Na 板およびアルミナ板で構成されている。測定に用いた燃料板の概略仕様は Table 3.1 に示されている。

単位セル j 当りの相対出力 P_c^j は、そのセルに含まれている燃料板 i の γ 線計数率 N_i^j の和で与えられ

$$P_c^j = \sum_i r_i N_i^j \quad \dots \quad (3.2)$$

で表わされる。ここで r_i は燃料板種類で厚さや密度の違いによる γ 線の燃料板内での自己吸収の割合を補正する係数である。ここでは、照射後燃料板から放出される γ 線のスペクトルを波高分析器で測定し、0.6 MeV 以上を 6 つのエネルギー領域に分割し、各領域の計数値の 0.6 MeV 以上の全計数値に対する割合 $\phi_{\gamma}(E_j)$ を求めた。検出器に対して燃料板はコリメータを用いて測定しているから無限平板とみなし、かつ燃料板内での中性子の自己しゃ蔽はないものと仮定して、次式により γ 線の燃料板内での自己吸収補正係数 r_i を求めた。

$$r_i = \sum_j \frac{(1 - e^{-\mu(E_j) T_i})}{\mu(E_j) T_i} \phi_{\gamma}(E_j) \quad \dots \quad (3.3)$$

ここで μ は燃料板 i の γ 線に対する線吸収係数であり、 T_i は燃料板 i の厚さである。

一般に $\phi_{\gamma}(E_j)$ は、照射後の時間経過につれて変化するから、 r_i の値も変化すると考えられる。 r_i の経過時間に対する変化の値を調べるために、Pu 燃料板について出力分布の測定が行われた時間範囲の 30 分、75 分、150 分の 3 点について、 r_i の値を求めた。この時間範囲内では r_i の変化は最大 0.3 % であった。これよりこの出力分布の測定時間範囲内では、 r_i はほとんど変化しないものと考えられ、Pu 燃料板の値として 75 分の値を用いた。天然ウラン燃料板および劣化ウラン燃料板については、 $\phi_{\gamma}(E_j)$ が Pu 燃料板のそれと同様と仮定して、それぞれ γ 線の自己吸収補正係数を求めた。Pu 燃料板の値を基準にすると、天然ウラン燃料板で 1.05、劣化ウラン燃料板で 1.20 である。

軸方向について各セルについて求められた出力は、炉心領域の中心の値で規格化された。

Fig. 3.2 ~ Fig. 3.5 に測定された出力分布を計算値とともに示し、Table 3.2 ~ Table 3.5 にそれらの値を示している。

B_4C 模擬制御棒が部分挿入された炉心の出力分布は、軸方向については下部炉心の中心 (-27.9 cm)，径方向については、出力がほど平坦になる位置(炉心中心から 22.08 cm)で規格化されている。Fig. 3.6 ~ Fig. 3.12 に測定された出力分布を計算値とともに示し、Table 3.6 ~ Table 3.12 にそれらの値を示している。

図および表に与えられている誤差は、ここでは計数値の統計誤差と時間減衰補正係数 $F(t)$ に含まれる誤差のみを考慮して求められている。

Table 3.1 Specification of fuel plates used
in test region

	Pu Fuel	NU Fuel	DUO ₂ Fuel
Size(inch)	2" × 2" × 1/16"	2" × 2" × 1/16"	2" × 2" × 1/4"
Material form	Pu-Al Alloy	Natural Uranium metal	Uranium Oxide
Thickness of fuel meat(mm)	1.02 ± 0.05	1.59	6.35
Thickness of cladding(mm)	SUS 0.25	—	—
Density(g/cm ³)	14.58	18.34	8.62
Enrichments	91.84%	0.71%	0.21%
Number density (atom/cm ³)			
Pu	3.620×10^{22}	—	—
Al	0.515×10^{22}	—	—
U	—	4.65×10^{22}	2.18×10^{22}
O	—	—	4.37×10^{22}

Table 3.2 Measured and calculated axial powers
in FCA XI-1 assembly

Distance from Core Center(cm)	Uranium Power			Plutonium Power			Total Power		
	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E
2.54	0.165 +/- 2.50	0.173	1.048	1.130 +/- 2.19	1.148	1.016	1.295 +/- 2.05	1.320	1.019
7.62	0.172 +/- 2.50	0.169	0.983	1.150 +/- 2.19	1.128	0.981	1.322 +/- 2.05	1.298	0.982
12.70	0.161 +/- 2.70	0.163	1.012	1.095 +/- 2.19	1.090	0.995	1.256 +/- 2.05	1.253	0.998
17.78	0.152 +/- 2.75	0.155	1.020	1.034 +/- 2.19	1.033	0.999	1.185 +/- 2.06	1.188	1.003
22.86	0.144 +/- 2.75	0.143	0.993	0.968 +/- 2.20	0.959	0.991	1.113 +/- 2.07	1.102	0.990
27.94	0.128 +/- 2.92	0.129	1.008	0.872 +/- 2.21	0.871	0.999	1.000 +/- 2.12	1.000	1.000
33.02	0.110 +/- 3.15	0.112	1.018	0.763 +/- 2.21	0.769	1.008	0.873 +/- 2.16	0.882	1.010
38.10	0.093 +/- 3.15	0.093	1.000	0.682 +/- 2.21	0.660	0.968	0.775 +/- 2.17	0.752	0.970
43.18	0.073 +/- 3.15	0.070	0.951	0.582 +/- 2.22	0.546	0.938	0.655 +/- 2.19	0.616	0.940
48.26	0.071 +/- 3.26	0.067	0.944	-----	-----	-----	0.071 +/- 3.26	0.067	0.944
53.34	0.052 +/- 3.68	0.042	0.808	-----	-----	-----	0.052 +/- 3.68	0.042	0.808
58.42	0.036 +/- 4.28	0.024	0.667	-----	-----	-----	0.036 +/- 4.28	0.024	0.667
63.50	0.021 +/- 5.32	0.019	0.905	-----	-----	-----	0.021 +/- 5.32	0.019	0.905

Note: Errors are indicated in % unit.

Table 3.3 Measured and calculated axial powers
in FCA XI-2 assembly

Distance from Core Center(cm)	Uranium Power		Plutonium Power		Total Power	
	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E
2.54	0.118 +/- 2.96	0.124	1.051	-----	---	0.118 +/- 2.96
7.62	0.139 +/- 2.96	0.150	1.075	-----	---	0.139 +/- 2.96
12.70	0.132 +/- 2.36	0.134	1.014	0.973 +/- 2.11	0.968	0.995
17.78	0.150 +/- 2.26	0.149	0.996	0.947 +/- 2.10	0.951	1.004
22.86	0.151 +/- 2.26	0.153	1.017	0.913 +/- 2.10	0.913	1.000
27.94	0.148 +/- 2.27	0.146	0.987	0.853 +/- 2.12	0.854	1.002
33.02	0.131 +/- 2.27	0.132	1.008	0.780 +/- 2.12	0.776	0.994
38.10	0.113 +/- 2.48	0.113	1.000	0.684 +/- 2.13	0.678	0.992
43.18	0.086 +/- 2.73	0.085	0.996	0.589 +/- 2.13	0.567	0.796 +/- 2.03
48.26	0.069 +/- 3.59	0.076	1.094	-----	---	0.669 +/- 3.59
53.34	0.047 +/- 3.87	0.045	0.964	-----	---	0.047 +/- 3.87
58.42	0.030 +/- 4.24	0.027	0.882	-----	---	0.030 +/- 4.24
63.50	0.017 +/- 4.53	0.013	0.796	-----	---	0.017 +/- 4.53

Note: Errors are indicated in % unit.

Table 3.4 Measured and calculated axial powers
in FCA XII-1 assembly

Distance from Core Center(cm)	Uranium Power			Plutonium Power			Total Power		
	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E
2.54	0.109 + - 1.98	0.110	1.004	-----	-----	-----	0.109 + - 1.98	0.110	1.004
7.62	0.138 + - 1.81	0.136	0.986	-----	-----	-----	0.138 + - 1.81	0.136	0.986
12.70	0.132 + - 1.76	0.125	0.947	0.919 + - 1.45	0.904	0.984	1.051 + - 1.36	1.029	0.979
17.78	0.151 + - 1.70	0.144	0.954	0.906 + - 1.45	0.903	0.997	1.058 + - 1.34	1.048	0.991
22.86	0.158 + - 1.69	0.150	0.949	0.894 + - 1.45	0.889	0.994	1.052 + - 1.34	1.039	0.988
27.94	0.154 + - 1.72	0.146	0.948	0.846 + - 1.45	0.854	1.009	1.000 + - 1.34	1.000	1.000
33.02	0.146 + - 1.77	0.136	0.932	0.800 + - 1.45	0.795	0.994	0.946 + - 1.35	0.931	0.984
38.10	0.125 + - 1.86	0.119	0.952	0.714 + - 1.46	0.716	1.003	0.839 + - 1.36	0.834	0.994
43.18	0.101 + - 2.02	0.092	0.917	0.635 + - 1.46	0.621	0.978	0.737 + - 1.37	0.712	0.966
48.26	0.083 + - 2.44	0.084	1.012	-----	-----	-----	0.083 + - 2.44	0.084	1.012
53.34	0.055 + - 3.13	0.053	0.964	-----	-----	-----	0.055 + - 3.13	0.053	0.964
58.42	0.036 + - 4.32	0.035	0.962	-----	-----	-----	0.036 + - 4.32	0.035	0.962
63.50	0.027 + - 5.54	0.024	0.887	-----	-----	-----	0.027 + - 5.54	0.024	0.887

Note; Errors are indicated in % unit.

Table 3.5 Measured and calculated axial powers
in FCA XII-2 assembly

Distance from Core Center(cm)	Uranium Power			Plutonium Power			Total Power		
	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E
2.54	0.105 +- 1.65	0.103	0.981	-----	-----	-----	0.105 +- 1.65	0.103	0.981
7.62	0.113 +- 1.64	0.112	0.991	-----	-----	-----	0.113 +- 1.64	0.112	0.991
12.70	0.134 +- 1.58	0.138	1.030	-----	-----	-----	0.134 +- 1.58	0.138	1.030
17.78	0.140 +- 1.60	0.127	0.907	0.916 +- 1.54	0.931	1.016	1.055 +- 1.44	1.058	1.003
22.86	0.150 +- 1.60	0.143	0.953	0.884 +- 1.54	0.903	1.021	1.033 +- 1.43	1.046	1.013
27.94	0.150 +- 1.61	0.143	0.953	0.850 +- 1.55	0.857	1.008	1.000 +- 1.43	1.000	1.000
33.02	0.138 +- 1.66	0.133	0.964	0.786 +- 1.55	0.791	1.006	0.924 +- 1.43	0.925	1.001
38.10	0.124 +- 1.73	0.116	0.935	0.712 +- 1.57	0.706	0.992	0.836 +- 1.45	0.822	0.983
43.18	0.097 +- 1.88	0.089	0.918	0.620 +- 1.59	0.608	0.981	0.717 +- 1.48	0.697	0.972
48.26	0.082 +- 1.75	0.082	1.000	-----	-----	-----	0.082 +- 1.75	0.082	1.000
53.34	0.053 +- 2.01	0.051	0.962	-----	-----	-----	0.053 +- 2.01	0.051	0.962
58.42	0.036 +- 2.38	0.034	0.944	-----	-----	-----	0.036 +- 2.38	0.034	0.944
63.50	0.025 +- 2.87	0.023	0.920	-----	-----	-----	0.025 +- 2.87	0.023	0.920

Note: Errors are indicated in % unit.

Table 3.6 Measured and calculated axial powers
in FCA XII-1 assembly with Na channel

Distance from Core Center(cm)	Uranium Power			Plutonium Power			Total Power		
	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E
2.54	0.1112 + - 1.75	0.1112	1.000	-----	-----	-----	0.1112 + - 1.75	0.1112	1.000
7.62	0.1311 + - 1.67	0.136	1.038	-----	-----	-----	0.1311 + - 1.67	0.136	1.038
12.70	0.1333 + - 1.80	0.123	0.925	0.917 + - 1.46	0.914	0.998	1.049 + - 1.37	1.037	0.989
17.78	0.1511 + - 1.75	0.142	0.940	0.920 + - 1.46	0.910	0.989	1.071 + - 1.36	1.052	0.982
22.94	0.1533 + - 1.74	0.147	0.961	0.893 + - 1.46	0.893	1.000	1.045 + - 1.36	1.040	0.995
27.94	0.1511 + - 1.76	0.144	0.954	0.849 + - 1.46	0.856	1.008	1.000 + - 1.36	1.000	1.000
33.02	0.1399 + - 1.81	0.134	0.964	0.791 + - 1.47	0.797	1.008	0.930 + - 1.36	0.931	1.001
38.10	0.1255 + - 1.88	0.117	0.936	0.727 + - 1.47	0.718	0.988	0.851 + - 1.37	0.834	0.980
43.18	0.0933 + - 2.10	0.090	0.968	0.639 + - 1.48	0.623	0.975	0.731 + - 1.39	0.713	0.976
48.26	0.0833 + - 2.09	0.084	1.012	-----	-----	-----	0.083 + - 2.09	0.084	1.012
53.34	0.0566 + - 2.60	0.053	0.950	-----	-----	-----	0.056 + - 2.60	0.053	0.950
58.42	0.0388 + - 3.42	0.036	0.947	-----	-----	-----	0.038 + - 3.42	0.036	0.947
63.50	0.0266 + - 4.58	0.024	0.923	-----	-----	-----	0.026 + - 4.58	0.024	0.923

Note: Errors are indicated in % unit.

Table 3.7 Measured and calculated axial powers in
FCA X II-1 assembly with 1/2 insertion
of 20% B₄C simulated control rod

Distance from Core Center(cm)	Uranium Power			Plutonium Power			Total Power		
	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E
2.54	0.105 +-	2.23	0.104	0.990	---	---	0.105 +-	2.23	0.104
7.62	0.121 +-	2.13	0.123	1.017	---	---	0.121 +-	2.13	0.123
12.70	0.120 +-	2.00	0.112	0.933	0.787 +-	1.88	0.791	1.005	0.117
17.78	0.136 +-	1.94	0.129	0.949	0.796 +-	1.88	0.791	0.994	0.996
22.86	0.138 +-	1.94	0.134	0.971	0.779 +-	1.91	0.778	0.999	0.987
27.94	0.136 +-	1.97	0.131	0.963	0.758 +-	1.91	0.745	0.983	0.993
33.02	0.123 +-	2.04	0.121	0.984	0.691 +-	1.97	0.692	1.001	0.876
38.10	0.108 +-	2.10	0.105	0.972	0.629 +-	2.00	0.618	0.983	0.979
43.18	0.086 +-	2.30	0.081	0.942	0.536 +-	2.10	0.531	0.991	0.812
48.26	0.071 +-	2.49	0.074	1.042	---	---	0.071 +-	2.49	0.999
53.34	0.044 +-	3.28	0.047	1.068	---	---	0.044 +-	3.28	0.981
58.42	0.031 +-	4.12	0.031	1.000	---	---	0.031 +-	4.12	0.982
63.50	0.021 +-	5.47	0.020	0.952	---	---	0.021 +-	5.47	0.982
-2.54	0.109 +-	2.30	0.107	0.982	---	---	0.109 +-	2.30	0.107
-7.62	0.130 +-	2.12	0.132	1.015	---	---	0.130 +-	2.12	0.132
-12.70	0.131 +-	2.14	0.122	0.931	0.922 +-	1.88	0.894	0.970	0.965
-17.78	0.150 +-	2.06	0.142	0.947	0.889 +-	1.92	0.900	1.012	1.003
-22.86	0.156 +-	2.06	0.147	0.942	0.885 +-	1.92	0.889	1.005	1.016
-27.94	0.149 +-	2.09	0.144	0.966	0.851 +-	1.94	0.856	1.006	1.000
-33.02	0.139 +-	2.25	0.134	0.964	0.787 +-	1.94	0.799	1.015	0.996
-38.10	0.125 +-	2.21	0.117	0.936	0.728 +-	2.00	0.720	0.989	0.993
-43.18	0.100 +-	2.46	0.090	0.900	0.667 +-	1.99	0.626	0.939	0.984
-48.26	0.084 +-	2.44	0.084	1.000	---	---	0.084 +-	2.44	0.977
-53.34	0.057 +-	3.03	0.054	0.947	---	---	0.057 +-	3.03	0.971
-58.42	0.040 +-	3.68	0.036	0.900	---	---	0.040 +-	3.68	0.900
-63.50	0.026 +-	5.01	0.024	0.923	---	---	0.026 +-	5.01	0.923

Note: Errors are indicated in % unit.

Table 3.8 Measured and calculated axial powers in
FCA XII-1 assembly with 5/18 insertion
of 55% B₄C simulated control rod

Distance from Core Center(cm)	Uranium Power			Plutonium Power			Total Power		
	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E
2.54	0.112 +- 2.10	0.108	0.964	-----	-----	-----	0.112 +- 2.10	0.108	0.964
7.62	0.127 +- 2.00	0.128	1.008	-----	-----	-----	0.127 +- 2.00	0.128	1.008
12.70	0.123 +- 2.14	0.115	0.935	0.861 +- 1.50	0.850	0.987	0.984 +- 1.42	0.965	0.981
17.78	0.142 +- 2.04	0.130	0.914	0.803 +- 1.50	0.816	1.016	0.946 +- 1.42	0.946	1.000
22.86	0.135 +- 2.08	0.131	0.970	0.743 +- 1.51	0.760	1.023	0.878 +- 1.41	0.891	1.015
27.94	0.135 +- 2.10	0.126	0.933	0.693 +- 1.52	0.704	1.016	0.828 +- 1.41	0.830	1.002
33.02	0.122 +- 2.20	0.115	0.943	0.634 +- 1.52	0.643	1.014	0.757 +- 1.42	0.758	1.001
38.10	0.105 +- 2.35	0.099	0.943	0.564 +- 1.53	0.570	1.011	0.669 +- 1.44	0.669	1.000
43.18	0.081 +- 2.70	0.076	0.938	0.483 +- 1.54	0.484	1.002	0.563 +- 1.46	0.561	0.996
48.26	0.068 +- 2.89	0.070	1.029	-----	-----	-----	0.668 +- 2.89	0.070	1.029
53.34	0.043 +- 4.01	0.043	1.000	-----	-----	-----	0.043 +- 4.01	0.043	1.000
58.42	0.030 +- 5.42	0.029	0.933	-----	-----	-----	0.030 +- 5.42	0.029	0.933
63.50	0.018 +- 8.36	0.018	1.000	-----	-----	-----	0.018 +- 8.36	0.018	1.000
-2.54	0.112 +- 2.56	0.110	0.982	-----	-----	-----	0.112 +- 2.56	0.110	0.982
-7.52	0.133 +- 2.35	0.133	1.000	-----	-----	-----	0.133 +- 2.35	0.133	1.000
-12.70	0.141 +- 2.38	0.123	0.872	0.907 +- 1.52	0.903	0.996	1.049 +- 1.44	1.026	0.978
-17.78	0.147 +- 2.38	0.142	0.966	0.891 +- 1.52	0.904	1.015	1.036 +- 1.44	1.046	1.010
-22.86	0.148 +- 2.38	0.147	0.993	0.875 +- 1.52	0.891	1.018	1.023 +- 1.44	1.038	1.015
-27.94	0.158 +- 2.33	0.144	0.911	0.842 +- 1.52	0.856	1.017	1.000 +- 1.43	1.000	1.000
-33.02	0.140 +- 2.33	0.134	0.957	0.812 +- 1.52	0.798	0.983	0.952 +- 1.44	0.932	0.979
-38.10	0.127 +- 2.62	0.117	0.921	0.717 +- 1.53	0.719	1.003	0.844 +- 1.45	0.836	0.991
-43.18	0.098 +- 3.04	0.091	0.929	0.642 +- 1.54	0.625	0.974	0.740 +- 1.48	0.716	0.968
-48.26	0.091 +- 3.09	0.084	0.923	-----	-----	-----	0.091 +- 3.09	0.084	0.923
-53.34	0.060 +- 4.16	0.053	0.883	-----	-----	-----	0.060 +- 4.16	0.053	0.883
-58.42	0.042 +- 5.55	0.036	0.857	-----	-----	-----	0.042 +- 5.55	0.036	0.857
-63.50	0.030 +- 7.68	0.024	0.800	-----	-----	-----	0.030 +- 7.68	0.024	0.800

Note: Errors are indicated in % unit.

Table 3.9 Measured and calculated radial powers
in FCA XII-1 assembly

Distance from Core Center(cm)	Uranium Power			Plutonium Power			Total Power		
	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E
0.00	0.153 ± 1.73	—	—	0.839 ± 1.46	—	—	0.991 ± 1.36	—	—
5.52	0.155 ± 1.91	0.146	0.942	0.842 ± 1.47	0.845	1.004	0.997 ± 1.36	0.9905	0.993
11.04	0.158 ± 1.91	0.148	0.937	0.840 ± 1.47	0.845	1.006	0.997 ± 1.36	0.9929	0.995
16.56	0.161 ± 1.91	0.152	0.944	0.842 ± 1.47	0.844	1.002	1.003 ± 1.36	0.9956	0.993
22.08	0.164 ± 1.92	0.162	0.988	0.841 ± 1.47	0.838	0.996	1.000 ± 1.36	1.000	1.000
27.60	0.180 ± 1.91	0.180	1.000	0.820 ± 1.47	0.830	1.012	1.000 ± 1.36	1.0103	1.0103

Note : Errors are indicated in % unit.

Table 3.10 Measured and calculated radial powers
in FCA XII-1 assembly with Na channel

Distance from Core Center(cm)	Uranium Power			Plutonium Power			Total Power		
	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E
5.52	0.152 ± 1.84	0.141	0.928	0.855 ± 1.56	0.845	0.988	1.008 ± 1.46	0.986	0.978
11.04	0.158 ± 1.98	0.147	0.930	0.851 ± 1.56	0.844	0.992	1.010 ± 1.47	0.991	0.981
16.56	0.166 ± 1.98	0.151	0.910	0.831 ± 1.56	0.843	1.014	0.997 ± 1.43	0.995	0.998
22.08	0.171 ± 1.98	0.162	0.947	0.829 ± 1.56	0.839	1.012	1.000 ± 1.45	1.000	1.000
27.60	0.181 ± 1.98	0.181	1.000	0.805 ± 1.56	0.831	1.032	0.987 ± 1.46	1.001	1.024

Note : Errors are indicated in % unit.

Table 3.11 Measured and calculated radial powers
in FCA XII-1 assembly with 1/2
insertion of 20% B₄C simulated control rod

Distance from Core Center(cm)	Uranium Power				Plutonium Power				Total Power	
	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E	
5.52	0.142 ± 2.01	0.133	0.937	0.787 ± 1.96	0.758	0.963	0.929 ± 1.83	0.890	0.958	
11.04	0.154 ± 2.23	0.143	0.929	0.810 ± 2.06	0.808	0.998	0.964 ± 1.91	0.951	0.987	
16.56	0.160 ± 2.24	0.150	0.938	0.836 ± 2.06	0.828	0.990	0.996 ± 1.90	0.978	0.982	
22.08	0.170 ± 2.21	0.162	0.953	0.830 ± 2.07	0.838	1.010	1.000 ± 1.90	1.000	1.000	
27.60	0.185 ± 2.18	0.183	0.989	0.822 ± 2.09	0.837	1.018	1.007 ± 1.90	1.020	1.013	

Note : Errors are indicated in % unit.

Table 3.12 Measured and calculated radial powers
in FCA XII-1 assembly with 5/18
insertion of 55% B₄C simulated control rod

Distance from Core Center(cm)	Uranium Power				Plutonium Power				Total Power	
	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E	
5.52	0.140 ± 2.09	0.130	0.929	0.716 ± 1.50	0.723	1.010	0.856 ± 1.41	0.853	0.996	
11.04	0.150 ± 2.24	0.141	0.940	0.782 ± 1.50	0.798	1.020	0.931 ± 1.41	0.940	1.010	
16.56	0.161 ± 2.20	0.150	0.932	0.819 ± 1.50	0.825	1.007	0.981 ± 1.41	0.975	0.993	
22.08	0.172 ± 2.17	0.162	0.942	0.828 ± 1.50	0.838	1.012	1.000 ± 1.40	1.000	1.000	
27.60	0.182 ± 2.15	0.183	1.005	0.810 ± 1.50	0.839	1.036	0.992 ± 1.40	1.021	1.029	

Note : Errors are indicated in % unit.

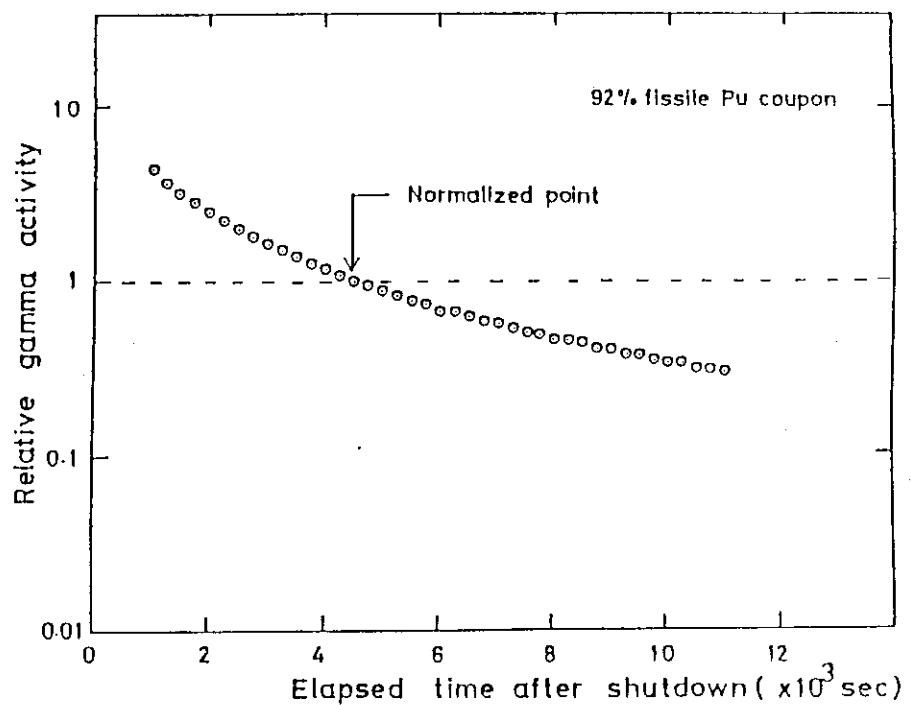


Fig.3.1 Profile of γ -activity decay in Pu fuel plate with time elapse after shutdown

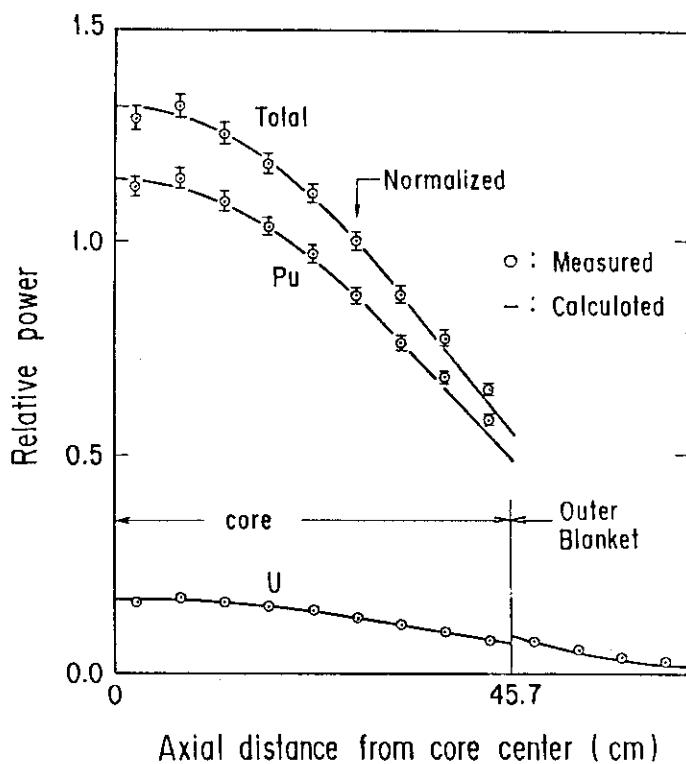


Fig.3.2 Measured and calculated axial power distribution in FCA XI-1 assembly

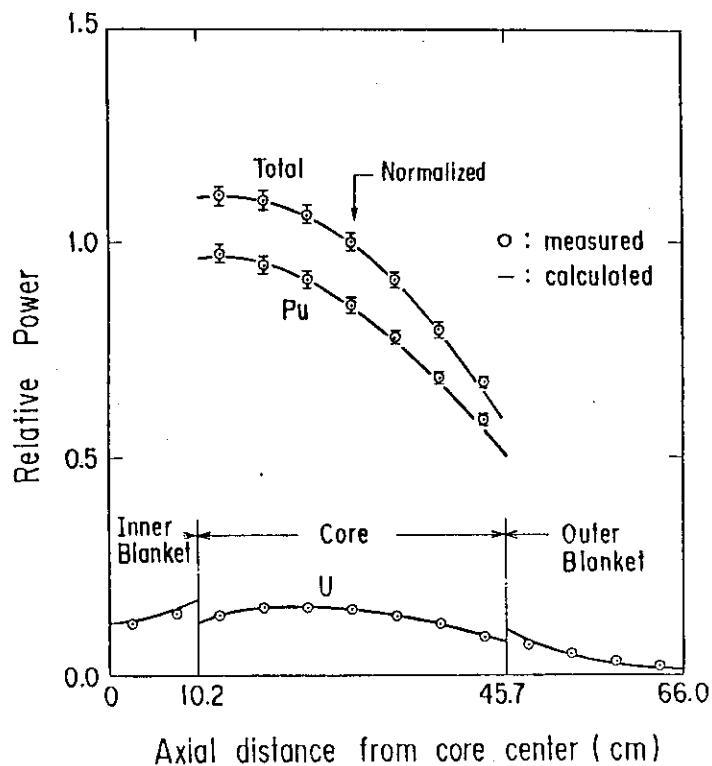


Fig. 3.3 Measured and calculated axial power distribution in FCA XI-2 assembly

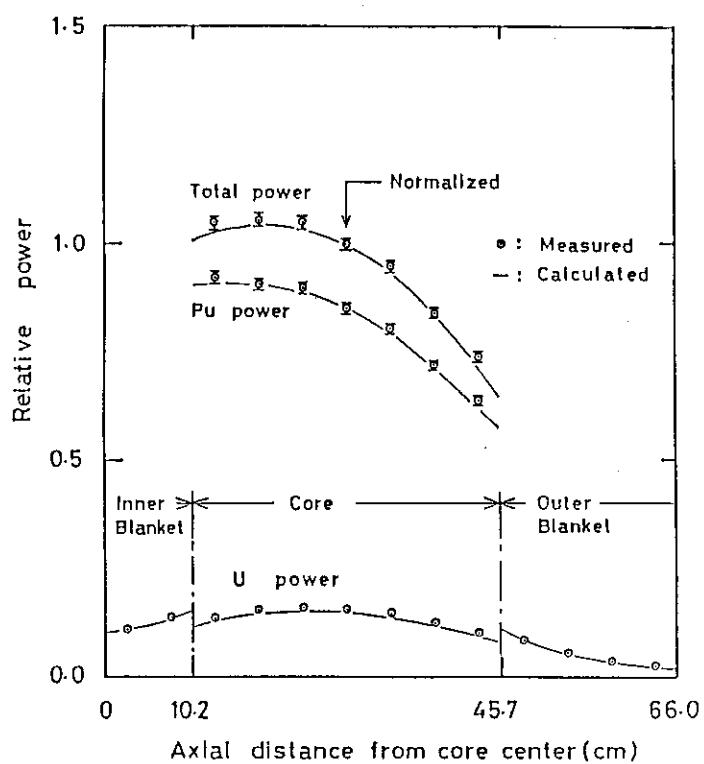


Fig. 3.4 Measured and calculated axial power distribution in FCA XII-1 assembly

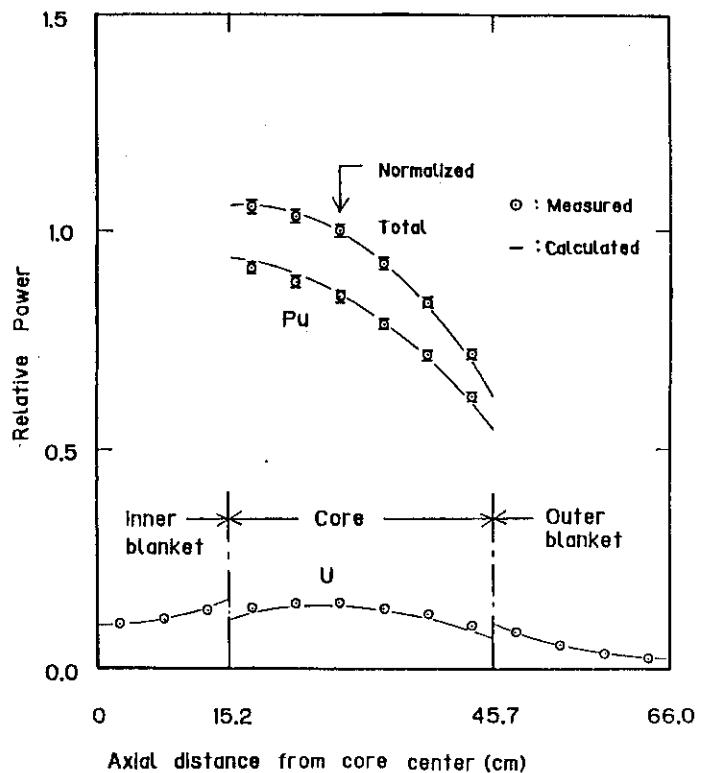


Fig. 3.5 Measured and calculated axial power distribution in FCA X II -2 assembly

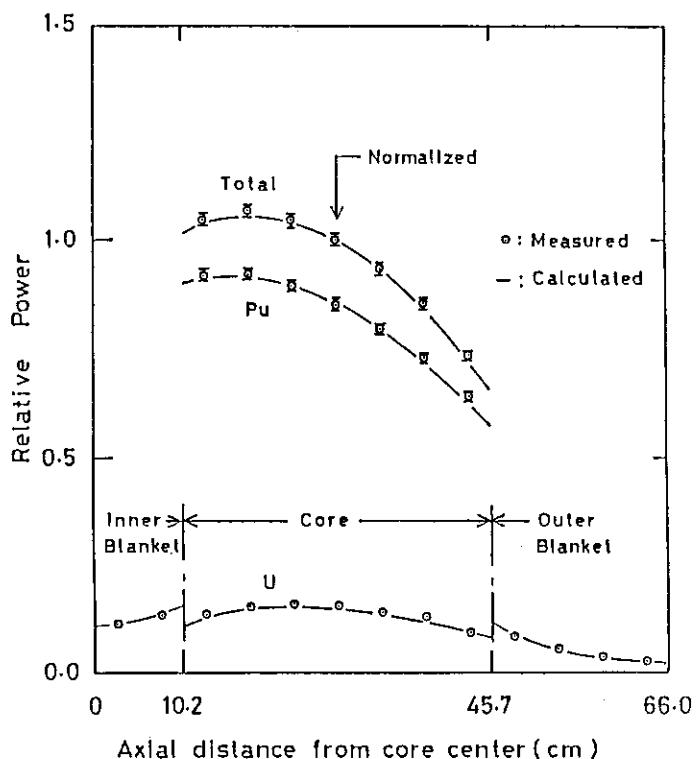


Fig. 3.6 Measured and calculated axial power distribution in FCA X II -1 assembly with Na channel

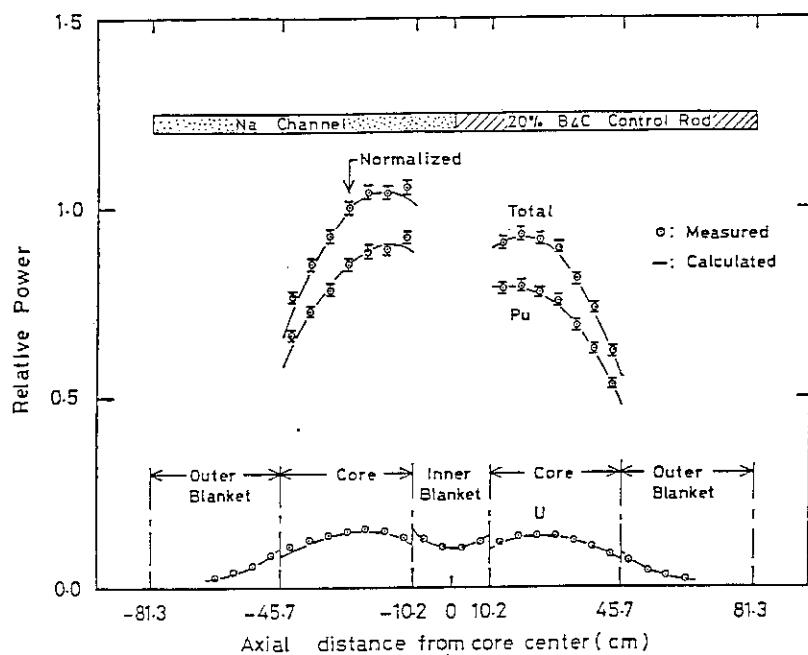


Fig. 3.7 Measured and calculated axial power distribution in FCA XII-1 assembly with 1/2 insertion of 20% B₄C control rod

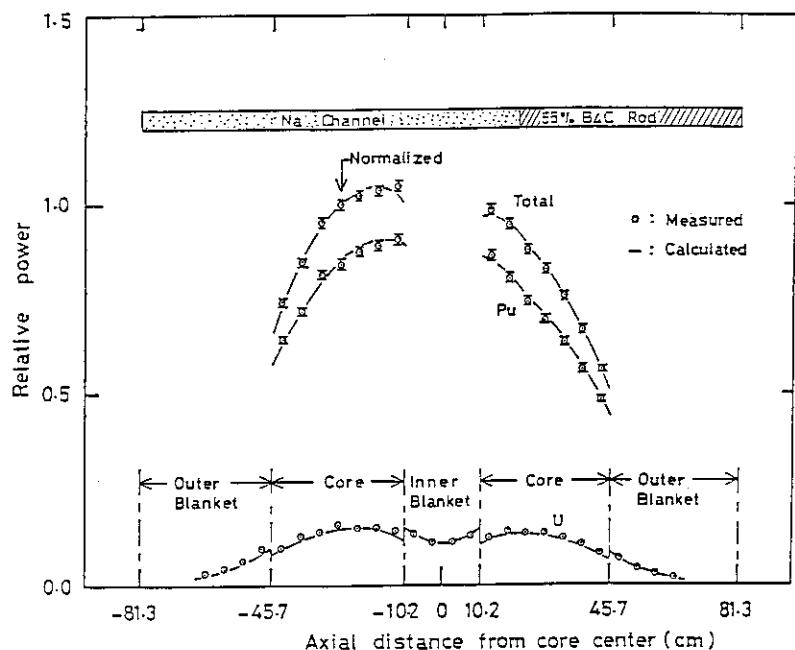


Fig. 3.8 Measured and calculated axial power distribution in FCA XII-1 assembly with 5/18 insertion of 55% B₄C control rod

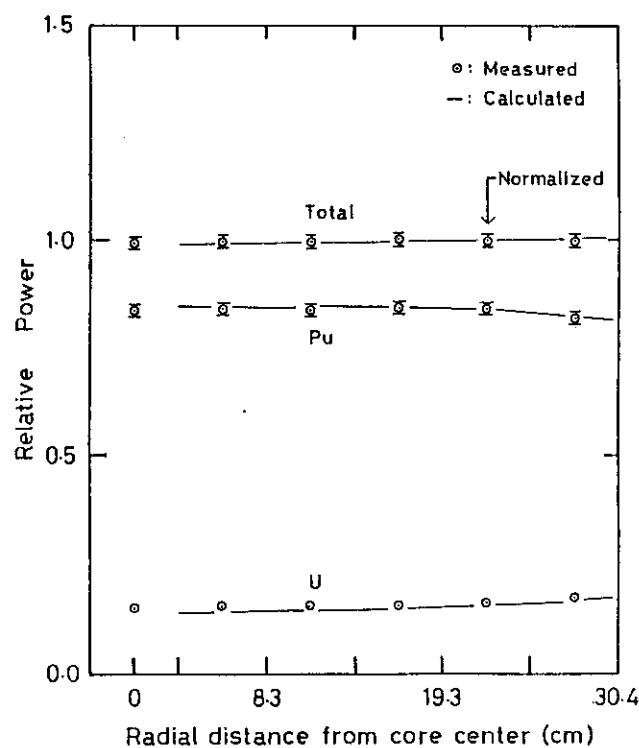


Fig. 3.9 Measured and calculated radial power distribution in FCA X II -1 assembly ($Z=27.94\text{cm}$)

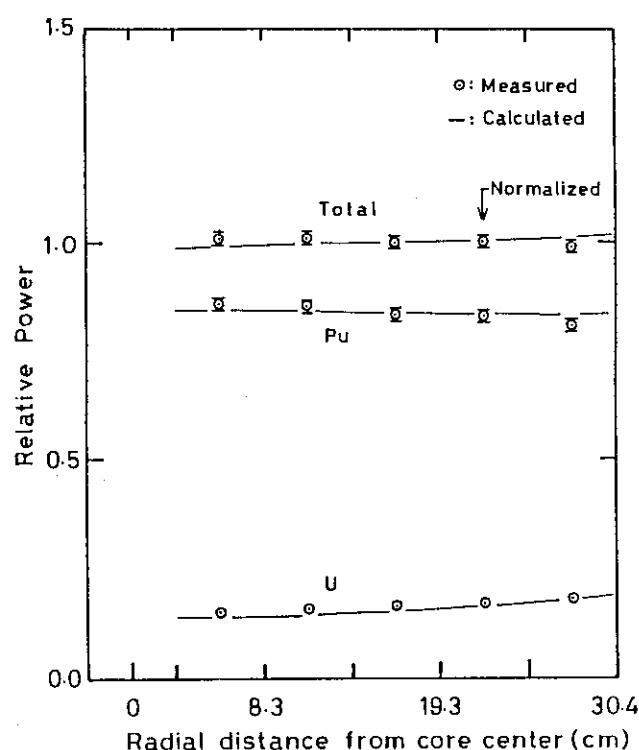


Fig. 3.10 Measured and calculated radial power distribution in FCA X II -1 assembly with Na channel ($Z=27.94\text{cm}$)

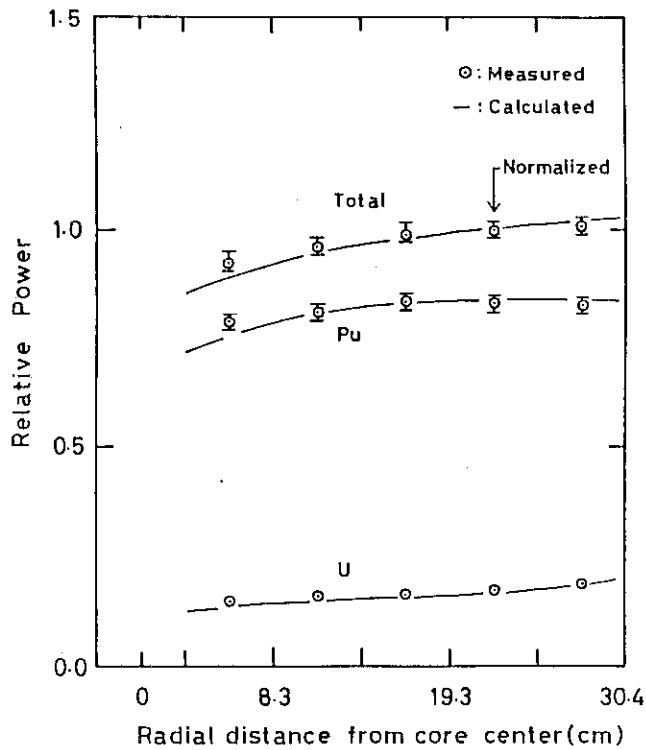


Fig. 3.11 Measured and calculated radial power distribution in FCA XII-1 assembly with 1/2 insertion of 20% B₄C control rod (Z=27.94cm)

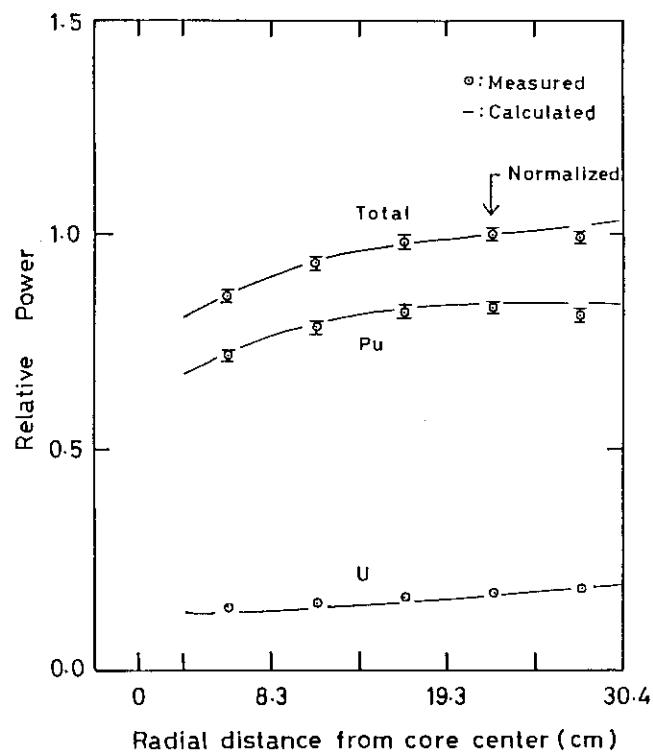


Fig. 3.12 Measured and calculated radial power distribution in FCA XII-1 assembly with 5/18 insertion of 55% B₄C control rod (Z=27.94cm)

4. 解析

出力分布の解析手法の概略を Fig. 4.1 に示す。解析では核データセットとして JENDL-2⁽⁷⁾ から作成された JFS-3-J2⁽⁸⁾ 70 群セットを用い、各領域セルごとに衝突確率法に基づくセル計算コード SLAROM⁽⁹⁾ で 70 群セル計算を行ないセル平均実効断面積を作成した。実効断面積の計算においては、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、セル計算に際し実効増倍率 (k_{eff}) が 1.0 になるようにバックリングサーチがなされている。また、このセル計算において、Benoist の式に基づく方向依存拡散係数 (D_{\perp} , D_{\parallel}) も計算された。ここで D_{\perp} および D_{\parallel} はセル内の物質板に対して、それぞれ垂直および平行な方向の拡散係数である。セル計算の各領域の原子数密度は体系内の物質量を保存するよう上部格子管と物質板との空隙を含めて、均一にスミアした値になっている。

以上のごとく作成された実効断面積と方向依存拡散係数を用いて R-Z 体系の 70 群拡散計算を CITATION-FBR⁽¹¹⁾ で行った。拡散計算に対して、輸送効果を考慮するために、70 群拡散計算で得られた中性子束を重みとして 10 群縮約断面積を計算した。10 群縮約群構造を Table 4.1 に示す。R-Z 体系について 10 群の拡散計算を CITATION-FBR, 輸送計算を TWOTRAN-II⁽¹²⁾ で行った。この輸送計算では、 $P_0 - S_8$ 近似を用いた。この計算より輸送補正係数 F^j は $F^j = P_T^j / P_D^j$ (P_T : 輸送計算による出力, P_D : 拡散計算による出力) で与えられる。ここで計算された輸送補正係数を 70 群拡散計算の値に乗じて、出力分布が計算された。計算値は Fig. 3.2 ~ Fig. 3.12 と Table 3.2 ~ Table 3.12 に示されている。計算値は実験値と同じ位置で 1.0 に規格化されている。

Table 4.1 Energy group structure for calculation of
Transport correction

group	Upper Energy	Lower Energy	Lethargy Width	Corresponding 70 Group
1	10.0 MeV	2.23 MeV	1.5	1 - 6
2	2.23 MeV	0.498 MeV	1.5	7 - 12
3	0.498 MeV	0.111 MeV	1.5	13 - 18
4	0.111 MeV	24.8 keV	1.5	19 - 24
5	24.8 keV	5.53 keV	1.5	25 - 30
6	5.53 keV	1.23 keV	1.5	31 - 36
7	1.23 keV	0.275 keV	1.5	37 - 42
8	0.275 keV	61.4 eV	1.5	43 - 48
9	61.4 eV	13.7 eV	1.5	49 - 54
10	13.7 eV	10^{-5} eV	14.4	55 - 70

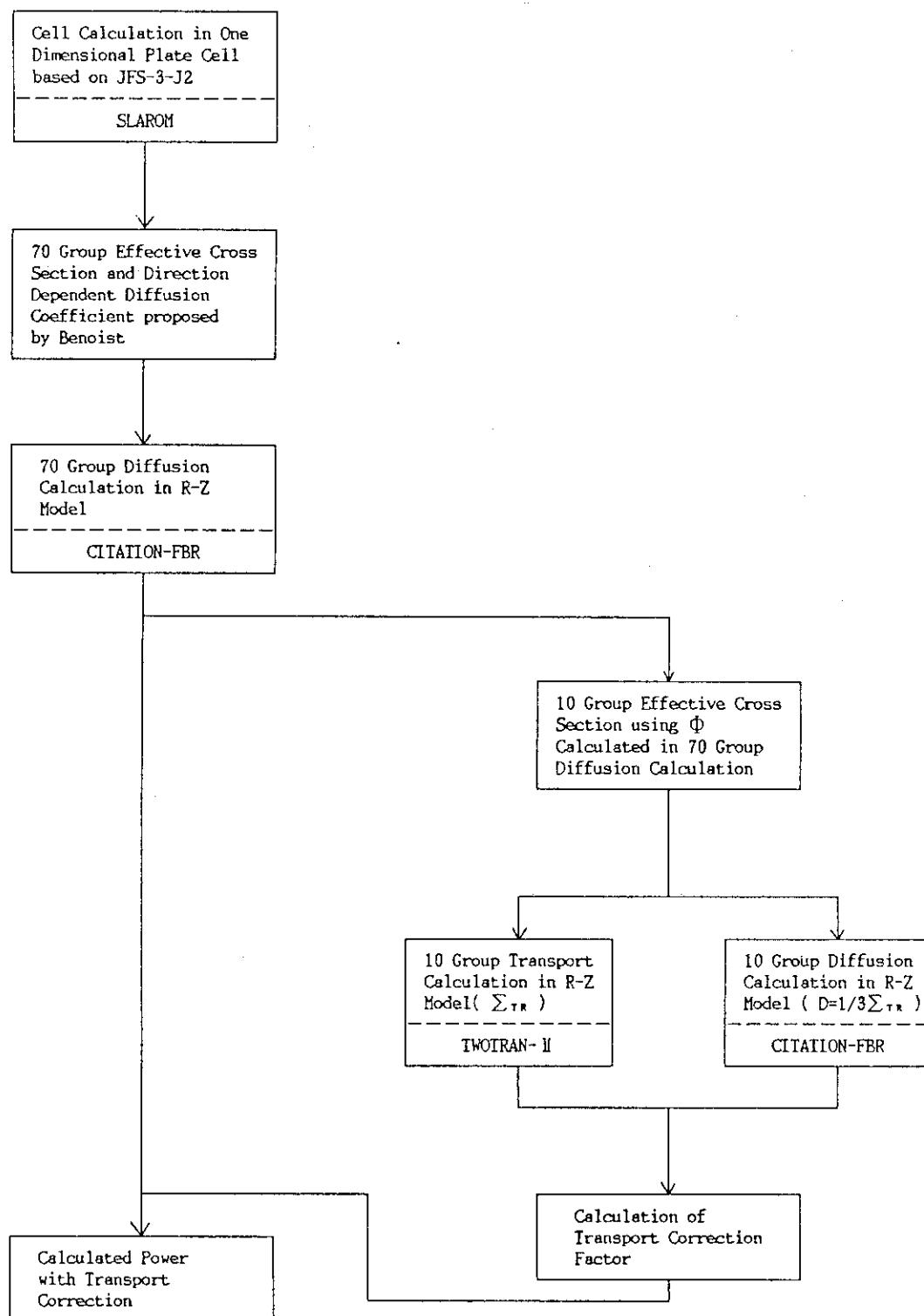


Fig. 4.1 Calculation flow used for analysis of power distribution

5. 結果および検討

出力分布の平坦化

各炉心の炉心中心ドロワーにおける、軸方向出力分布の測定結果を Fig. 3.2 ~ Fig. 3.5 に示した。これらの図から炉心軸方向中心に内部ブランケットを設けると軸方向の出力分布が平坦化されることがわかる。炉心領域では、ウラン燃料による核分裂が全出力の約20%を占めているが、ウラン燃料による出力成分が内部ブランケットへ向って、減少することにより出力分布の平坦化がより促進される。

出力分布の平坦化を定量的に示す指標として出力ピーピング係数が一般に用いられている。このピーピング係数は、通常炉心部の平均出力に対するピーク出力の比で表わされるが、ここでは炉心中心ドロワーについてのピーピング係数を求めた。その結果を Table 5.1 に示す。この表からわかるように、均質炉心 FCA XI-1 の 1.26 に対して、非均質炉心 FCA XII-1 では 1.11 と約12%と大きく減少している。非均質炉心 FCA XI-2, XII-1, および XII-2 のピーピング係数はそれぞれ 1.16, 1.11 および 1.14 である。

内部ブランケットの厚さが XI-2 と XII-1 が 20.3 cm であるのに対して XII-2 では 30.4 cm と約 10 cm 厚さを増した炉心である。一般に内部ブランケットの厚さの増加は、軸方向について考えると、炉心領域から内部ブランケットに向って流れ込む中性子の割合が増えるため内部ブランケットに接した炉心領域の出力が低下し、逆に外側の方の中性子が相対的に増加し、全体的に出力平坦化が進みピーピング係数が小さくなる。この傾向を調べるために、均質炉心 FCA XI-1 炉心の出力分布を基準として、非均質炉心の出力歪みを求めた。その結果を Fig. 5.1 に示す。この図から FCA XI-2 と XII-2 を比較すると、内部ブランケットの厚さを増した XII-2 炉心の方が、明らかに内部ブランケットに接した側の出力が低下し、反対側の外部ブランケットに接した側で増加していることが解る。しかし FCA XII-1 炉心についてみると、内部ブランケットの厚さが、XI-2 炉心と同じで、径方向に内部ブランケットを増した場合でも、内部ブランケットに接した側の出力は XII-2 と同程度に低下し、外側ブランケットに接した側では大きく増加している。このことは炉心中心軸の出力分布に径方向から中性子の流れ込みが起こり、内部ブランケットの径が小さい XII-2 炉心ではそれによって内部ブランケットに接した側の出力の低下が抑制され、さらにそのため外部ブランケットに接した側の出力の持ち上がりも小さくなっていると考えられる。そのため XII-2 炉心のピーピング係数は XII-1 炉心よりも大きくなっている。

制御棒による出力歪み

FCA XII-1 炉心に模擬制御棒を部分挿入した場合の隣接ドロワーの軸方向出力分布を Fig. 3.7 と Fig. 3.8 に示している。これらの図から制御棒の挿入による出力の歪みが明らかであり、その歪みの大きさは、20%濃縮 B_4C 模擬制御棒で約13%, 55%濃縮 B_4C 模擬制御棒では約21%である。炉心領域の Pu 出力と U 出力について見ると、おおむね同程度の出力の歪みが観測されている。制御棒による径方向の出力分布に与える効果を見るために、上部炉心中心の径方向について出力分布が測定された。それらの結果については、Fig. 3.11 と Fig. 3.12 に示されている。

これらの効果を調べるための基準として XII - 1 炉心、および XII - 1 に Na チャンネルを挿入した場合についても同様な測定が行われ、その結果が Fig. 3.9 と Fig. 3.10 に示されている。Fig. 3.9 と Fig. 3.10 から、XII - 1 および XII - 1 に Na チャンネルを挿入した場合の径方向分布はほぼ平坦である。制御棒が挿入された場合、制御棒隣接チャンネルの出力は、20% 濃縮 B₄C 模擬制御棒で約 8%，55% 濃縮 B₄C 模擬制御棒で約 15% 歪んでいる。Fig. 5.2 にそれらの様子が示されている。この制御棒による歪みは、制御棒から約 15 cm 程度離れた位置ではほぼ回復している。この実験の範囲では、20% および 55% 濃縮 B₄C 模擬制御棒の両方について、歪みのおよぶ範囲は約 15 cm であり、制御棒の ¹⁰B 濃縮度に依存していないことがわかる。このことは、制御棒の炉心への挿入によって、その回りの中性子スペクトルが大きく変化しなければ、中性子の制御棒への流れ込みの形は、炉心部の巨視的吸収断面積 Σ_a^m と拡散距離 D で決定され、その大きさは制御棒の吸収断面積 Σ_a^c で概略決定されることになる。このことによって均一媒質内での歪みの回復はおおむね同じ距離で回復することが予想される。

軸方向についても歪みの回復について調べた。Na チャンネル入りの出力分布を基準にして、制御棒が挿入された炉心の出力分布の比を Fig. 5.3 に示す。この図から、制御棒の挿入による軸方向の出力分布の歪みの様子が明らかである。55% 濃縮 B₄C 模擬制御棒は、炉心上部から 26 cm まで挿入されている。制御棒は上部炉心内に部分的に挿入された状態で、内部ブランケット領域に到達していない。この場合も歪みが回復する距離は 15 cm 程度で、径方向での値と変わっていない。他方 20% 濃縮 B₄C 模擬制御棒は、内部ブランケット中心まで挿入されている。この場合歪みの回復は 10 cm 以内と短縮されている。また、下部炉心部の出力分布の比の値はほぼ 1.0 で一定値であり、出力分布に歪みが与えられていないことがわかる。このことから内部ブランケットは上部炉心に与えられた擾動を、下部炉心に対して弱める減衰器の役割を果していると考えられる。これは、内部ブランケット内の中性子スペクトルが炉心部に比べて軟化し中性子の平均自由行程が小さくなっていることがひとつの要因と考えられる。

制御棒が挿入したことによる制御棒隣接チャンネルの出力の歪みと制御棒の反応度価値との関係を Fig. 5.4 に示す。55% の制御棒の反応度価値は、20% 制御棒と同じく炉心中心まで挿入した時の反応度を用い、出力歪みは 26 cm まで挿入した時の値を用いている。この図から制御棒の反応度価値と出力歪みに比例関係のあることが考えられる。このことを調べるために、制御棒の濃縮度を 20, 30, 55, 80, および 90% と変化させた時の反応度と出力歪みを計算により求めた。その結果も同図に示されており、直線相関の成立を予測している。直線相関が成立すると、制御棒の反応度価値が与えられると出力分布に与える歪みの大きさの予測を容易に行うことができる。

計算値と実験値の比較

測定を行った全てのケースについて計算が行われ、実験値との比較を行っている。実験値、計算値および C/E 値は、Table 3.2 ~ Table 3.12 で与えられ、C/E 値は Fig. 5.5 ~ Fig. 5.15 に示されている。

計算値は実験値をおおむね良く再現している。内部ブランケットと炉心領域においては、ほぼ実験誤差内で一致しているのに対して、外部ブランケット領域で、全てのケースについて、計算値は実験値を約 10% 過小評価している。しかし制御棒が挿入された場合、挿入された側の外部ブランケット内については、計算値は実験値と良く一致しその傾向は消滅している。

Table 5.1 Measured and calculated power peaking factor

Core Name	Peaking Factor		
	Measured	Calculated	C/E
XI - 1	1.26 \pm 2.17%	1.26	1.00
XI - 2	1.16 \pm 2.13%	1.17	1.00
XII - 1	1.11 \pm 1.43%	1.11	1.00
XII - 1*	1.12 \pm 1.45%	1.12	1.00
XII - 2	1.14 \pm 1.56%	1.14	1.00

* Na channel was loaded in the core center.

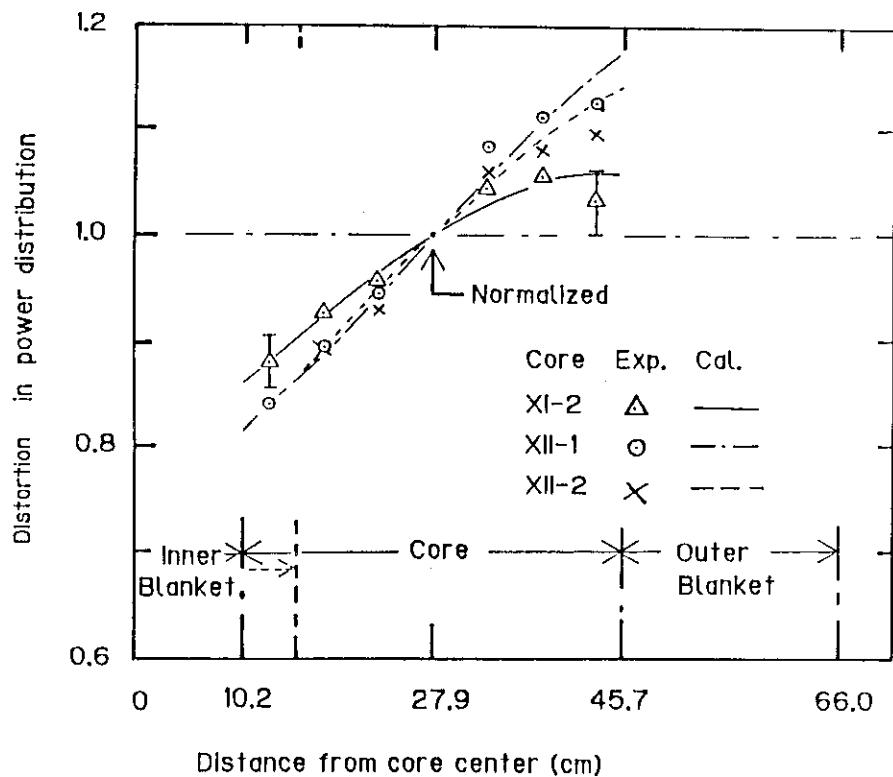


Fig.5.1 Distortion in axial power distribution due to change in size of inner blanket

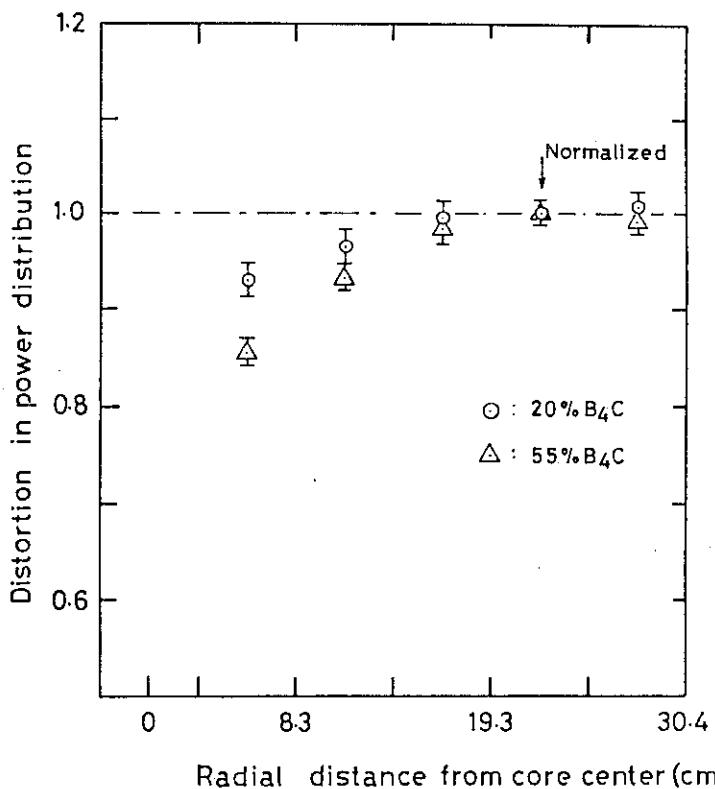


Fig. 5.2 Distortion in radial power distribution due to partial insertion of simulated control rod

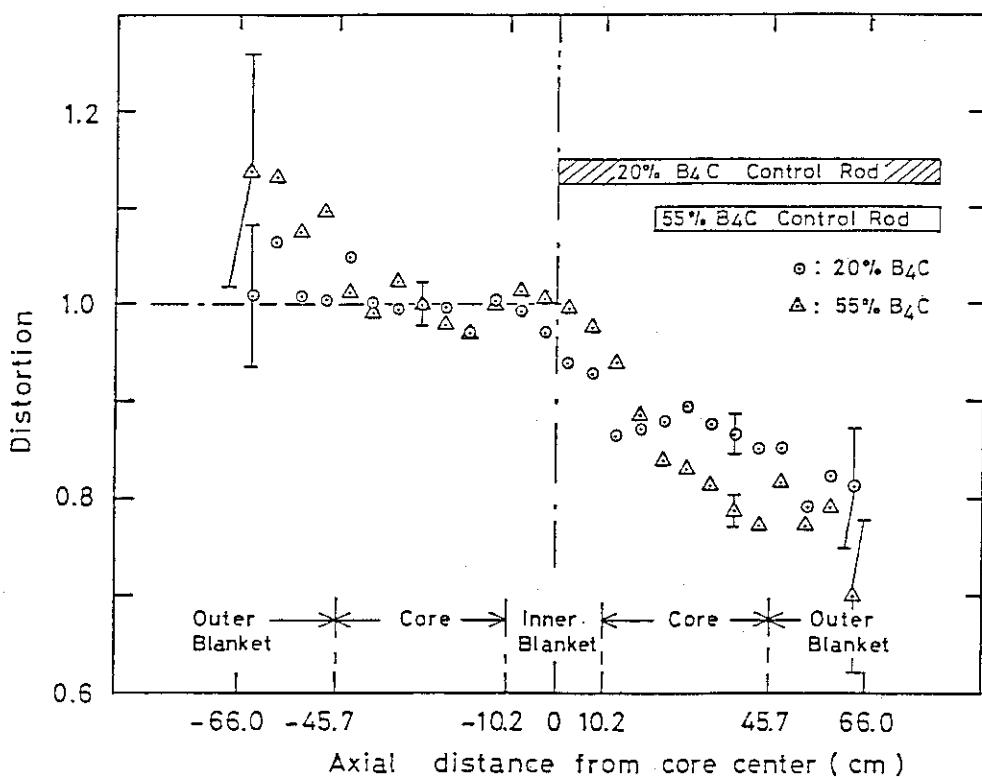


Fig. 5.3 Distortion in axial power distribution due to partial insertion of simulated control rod in FCA X II -1 assembly

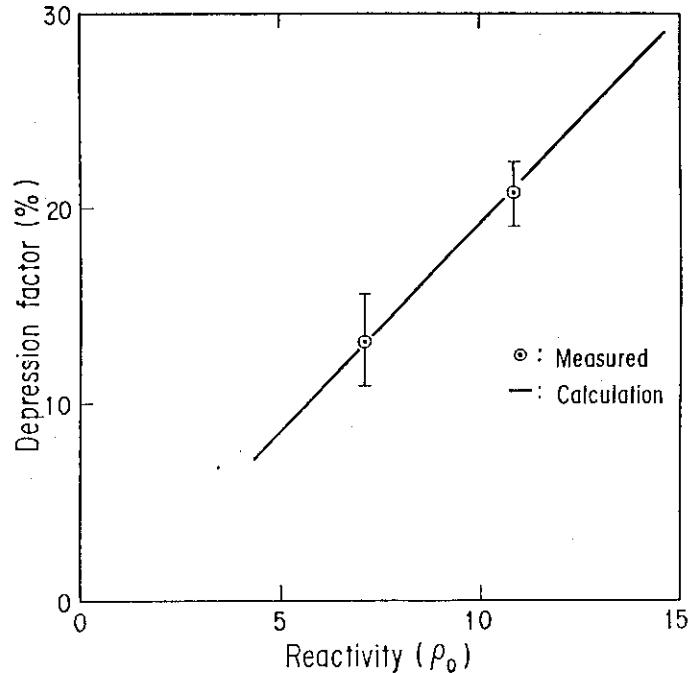


Fig. 5.4 Correlation between depression in power and reactivity of simulated control rod in FCA XII-1 assembly ($\rho_0 = 0.0452\% \Delta k/k$)

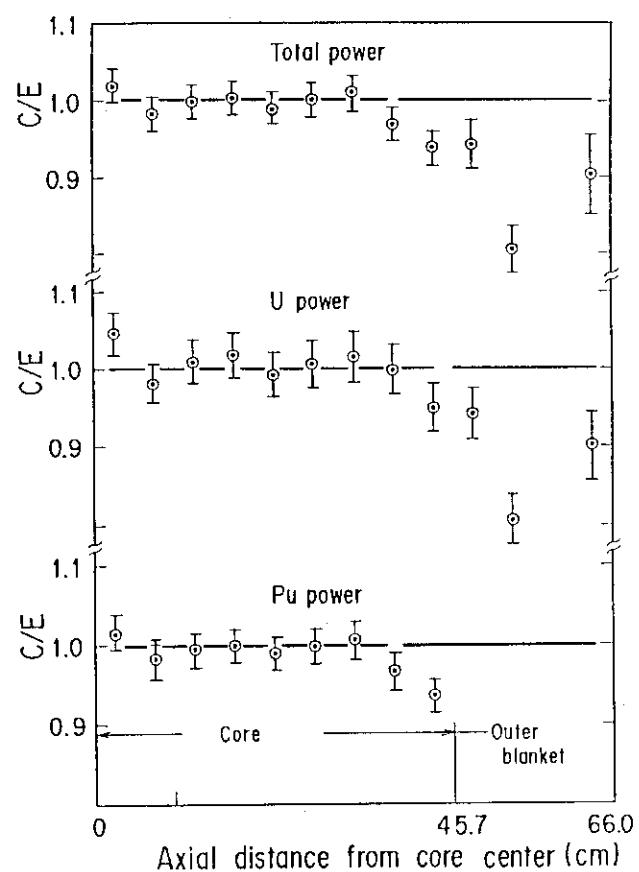


Fig. 5.5 C/E value of axial power in FCA XI-1 assembly

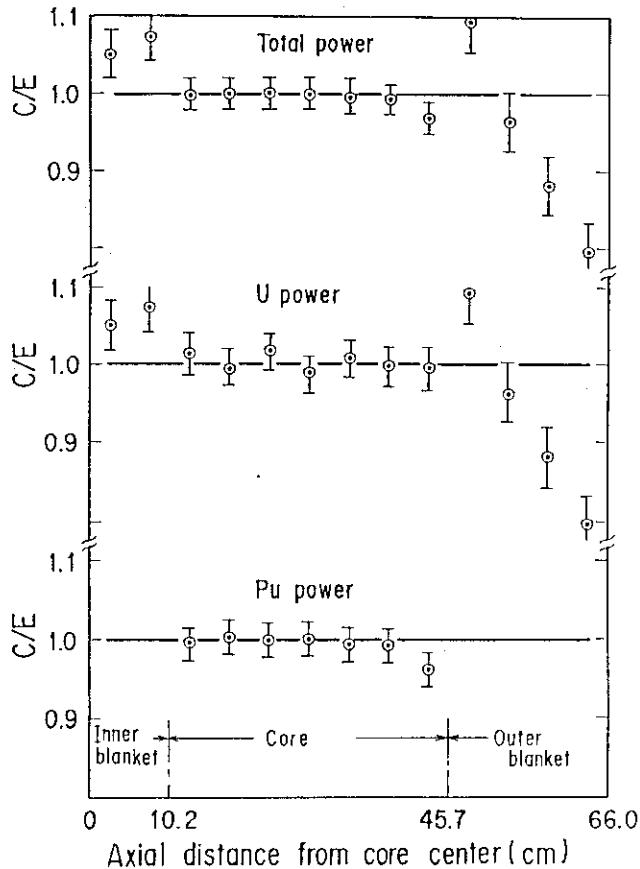


Fig. 5.6 C/E value of axial power in FCA XI-2 assembly

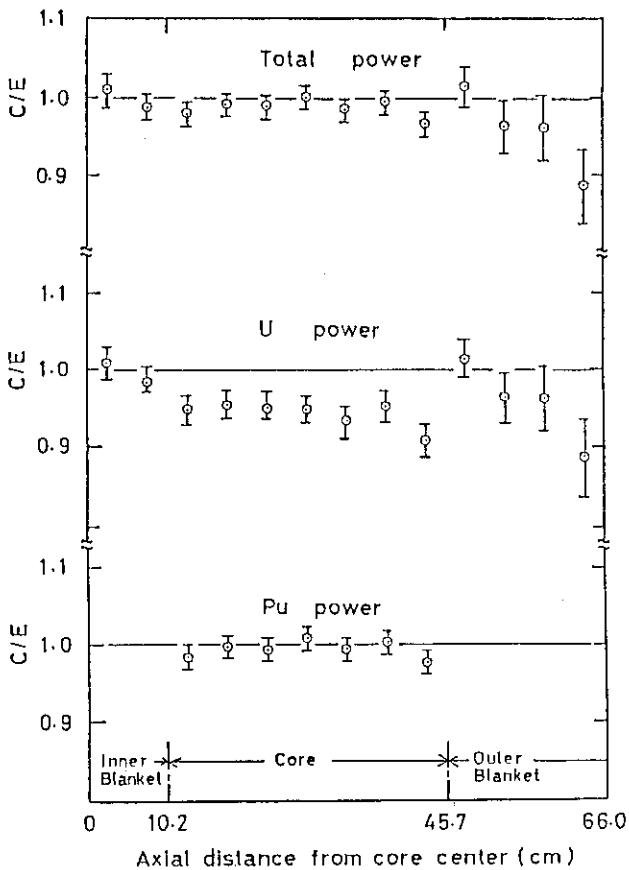


Fig. 5.7 C/E value of axial power in FCA XII-1 assembly

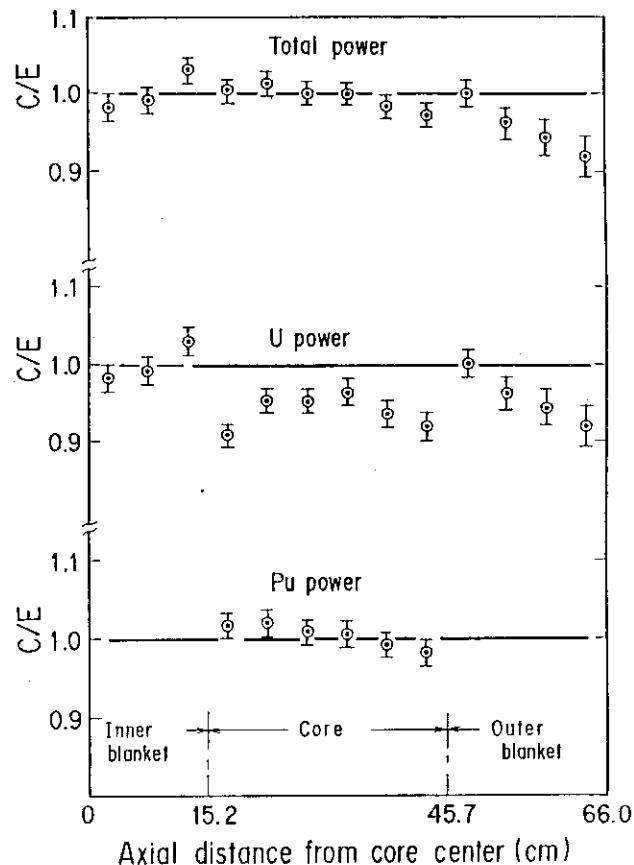


Fig. 5.8 C/E value of axial power in FCA X II -2 assembly

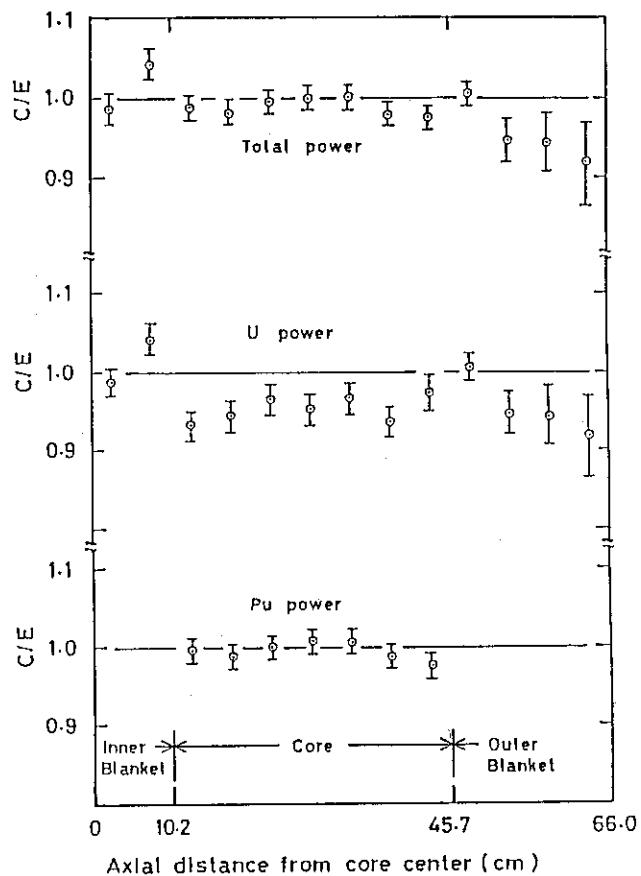


Fig. 5.9 C/E value of axial power in FCA X II -1 assembly with Na channel

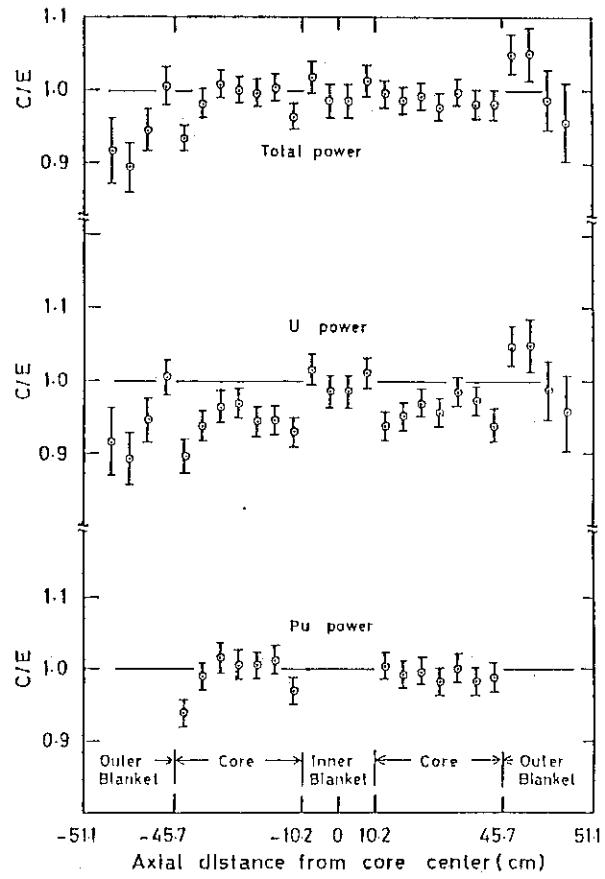


Fig. 5.10 C/E value of axial power in FCA XII-1 assembly with 1/2 insertion of 20% B₄C control rod

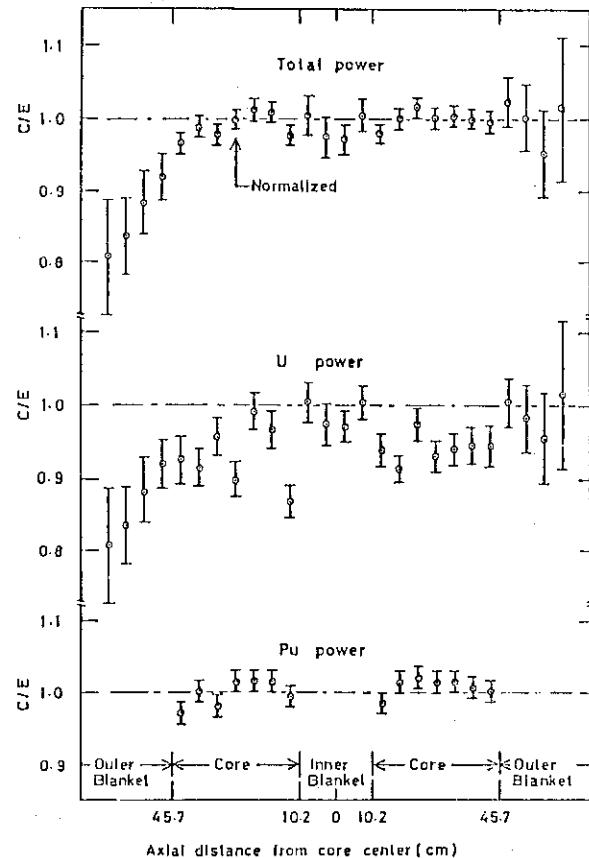


Fig. 5.11 C/E value of axial power in FCA XII-1 assembly with 5/18 insertion of 55% B₄C control rod

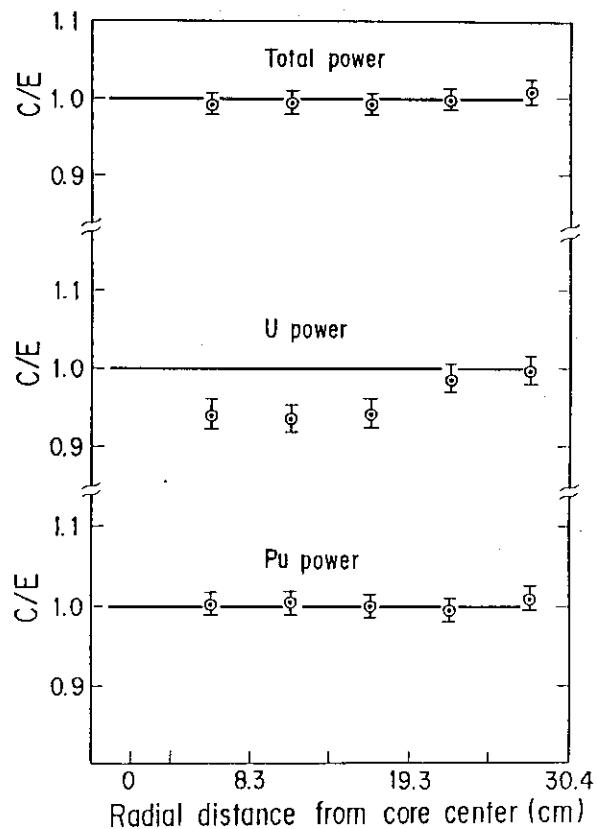


Fig.5.12 C/E value of radial power in FCA XII-1 assembly

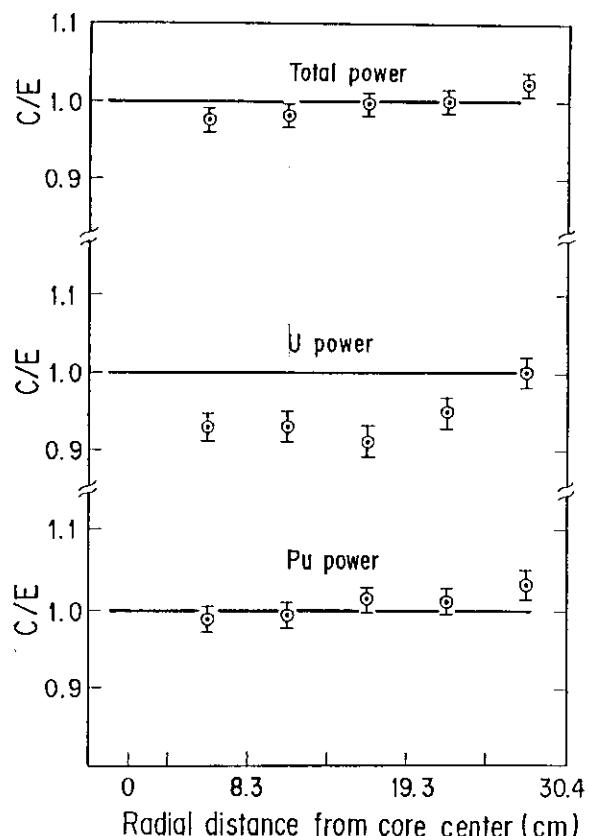


Fig.5.13 C/E value of radial power in FCA XII-1 assembly with Na channel

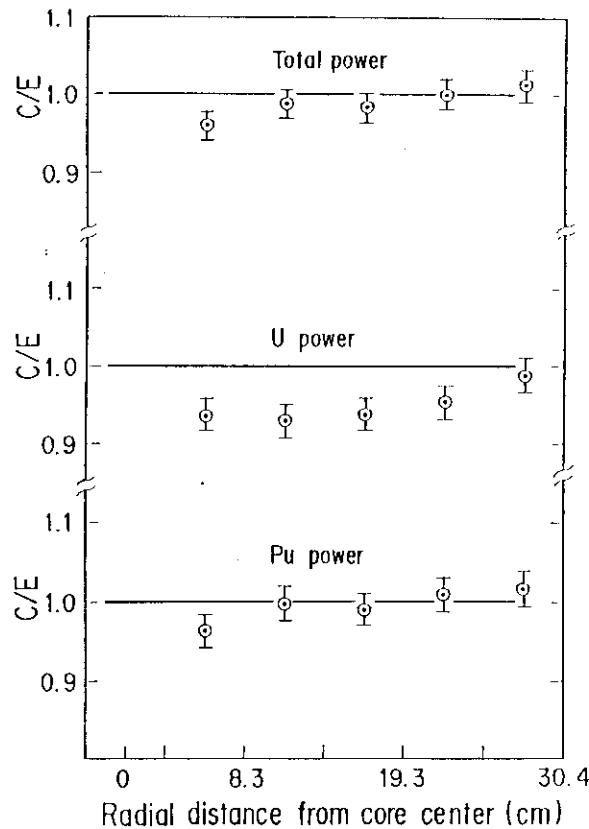


Fig.5.14 C/E value of radial power in FCA XII-1 assembly
with 1/2 insertion of 20% B₄C control rod

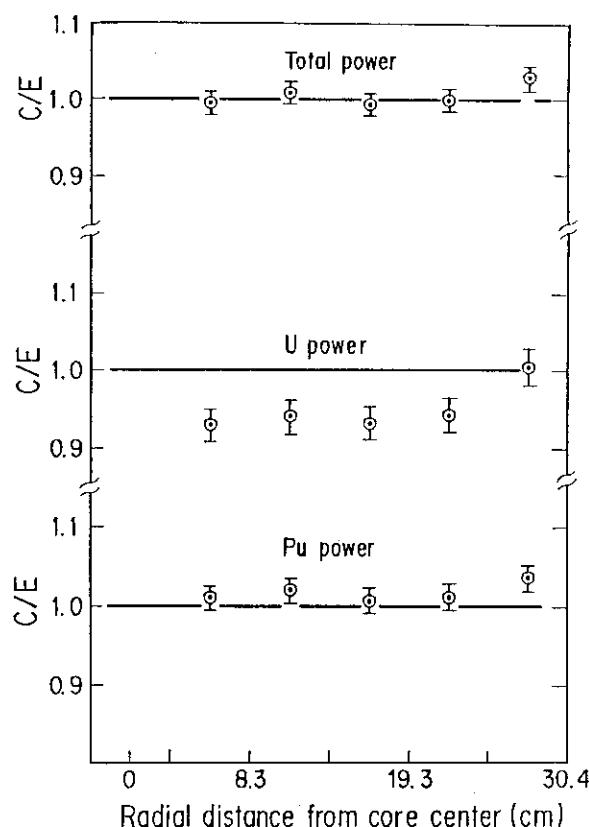


Fig.5.15 C/E value of radial power in FCA XII-1 assembly
with 5/18 insertion of 55% B₄C control rod

6. 結 論

軸方向非均質模擬炉心の出力分布をアスキャンニング法により測定をした。これらの測定から以下の結論を得た。

- (1) 軸方向非均質炉心の軸方向出力分布は均質炉に比べて平坦化され、内部ブランケットの厚さが20 cmの場合、炉心中心軸のピーキング係数が約12%小さくなることがわかった。
- (2) 内部ブランケットは上部炉心に与えられた摂動を下部炉心に対して減衰させる役割をする。
- (3) 20%濃縮B₄C模擬制御棒によって、その隣接ドロワーの出力は約15%減少し、55%濃縮B₄C模擬制御棒では約21%減少することがわかった。ただし歪のおよぶ範囲は制御棒の濃縮度に依存せず、約15 cmである。
- (4) 制御棒を炉心の同じ位置まで挿入した時の、制御棒反応度係数と出力歪みの大きさとは、比例関係にあることがわかった。
- (5) 計算値はおおむね実験値を良く再現し、内部ブランケットおよび炉心領域では誤差内で一致するが、外部ブランケット領域で過小評価する。

謝 辞

本実験を進めるにあたり、種々御指導いただいた高速炉物理研究室 吉田弘幸室長ならびに炉物理施設管理室 中野正文室長に深く感謝いたします。また実験におけるFCA管理機関員の皆様の協力を深く感謝いたします。

6. 結 論

軸方向非均質模擬炉心の出力分布を γ スキャニング法により測定をした。これらの測定から以下の結論を得た。

- (1) 軸方向非均質炉心の軸方向出力分布は均質炉に比べて平坦化され、内部ブランケットの厚さが20 cmの場合、炉心中心軸のピーキング係数が約12%小さくなることがわかった。
- (2) 内部ブランケットは上部炉心に与えられた摂動を下部炉心に対して減衰させる役割をする。
- (3) 20%濃縮B₄C模擬制御棒によって、その隣接ドロワーの出力は約15%減少し、55%濃縮B₄C模擬制御棒では約21%減少することがわかった。ただし歪のおよぶ範囲は制御棒の濃縮度に依存せず、約15 cmである。
- (4) 制御棒を炉心の同じ位置まで挿入した時の、制御棒反応度価値と出力歪みの大きさとは、比例関係にあることがわかった。
- (5) 計算値はおおむね実験値を良く再現し、内部ブランケットおよび炉心領域では誤差内で一致するが、外部ブランケット領域で過小評価する。

謝 辞

本実験を進めるにあたり、種々御指導いただいた高速炉物理研究室 吉田弘幸室長ならびに炉物理施設管理室 中野正文室長に深く感謝いたします。また実験におけるFCA管理機関員の皆様の協力を深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) Ohno A, Osugi T, and Satoh K.: "Measurement of Relative Power Distribution at Fast Critical Assembly by Using Gamma Counting Method" J. Nucl. Sci. Technol., 22 (1985)
- (2) 大杉俊隆, 他: "FCA XI-1集合体の選定と特性実験" JAERI-M 83-211 (1983)
- (3) 大杉俊隆, 他: "FCA XI-1集合体による大型高速炉臨界実験" JAERI-M 84-075 (1984)
- (4) 飯島進, 他; "FCAにおけ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—" JAERI-M 84-076 (1984)
- (5) 飯島進, 他: "FCAによる大型軸方向非均質炉心の炉物理研究(III) FCA XII-1集合体による実験と解析" JAERI-M 85-045 (1985)
- (6) 岡嶋成晃: 私信
- (7) Nakagawa T. (Ed.): "Summary of JENDL-2 General Purpose File," JAERI-M 84-103 (1984)
- (8) Takano H., et al.: "Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constants Set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135 (1982)
- (9) Nakagawa M., et al.: "SLAROM", JAERI-1294 (1984)
- (10) Benoist, P.: "Théorie du Coefficient de Diffusion des Neutrons dans un Réseau Comportant des Cavités", CEA-R-2278 (1964)
- (11) 飯島進, 他: "CITATION-FBR" (公刊予定)
- (12) Lathrop K., et al.: "TWOTRAN-II", LA-4848-MS (1973)