

JAERI-M
86-016

FCAによる大型軸方向非均質炉心の炉物理研究(V)
— FCA XII-2集合体による実験と解析 —

1986年2月

岡嶋 成晃・飯島 進・早瀬 保*・大部 誠
小坪 龍男・辻 延昌^{*2}

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。

入手の問合わせは、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、お申しこしてください。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 Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日青工業株式会社

FCAによる大型軸方向非均質炉心の炉物理研究(V)
—— FCA XII-2 集合体による実験と解析 ——

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
岡嶋 成晃・飯島 進・早瀬 保^{*1}・大部 誠
小坪 龍男・辻 延昌^{*2}

(1986 年 1 月 29 日 受理)

FCA XII-2 集合体は軸方向非均質炉心模擬実験計画における3番目の炉心であり、厚さ30 cmの内部ブランケットを有し、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ある。測定項目は、(i)臨界性、(ii)反応率分布と反応率比、(iii)サンプル反応度値とナトリウムボイド反応度値であり、分布測定については軸方向を対象とした。実験結果はJENDL-2と原研における標準的核特性計算手法を用いて解析を行い、軸方向非均質炉心の核特性計算精度について検討した。

東海研究所：茨城県那珂郡東海村白方字白根2の4

*1 日立エネルギー研究所

*2 富士電機

Experimental Study of Large Scale Axially Heterogeneous
LMFBR Core at FCA (V)

- Experiments of FCA Assembly XII-2 and Their Analysis -

Shigeaki OKAJIMA, Susumu IIJIMA, Tamotu HAYASE,^{*1}
Makoto OBU, Tatsuo KOAKUTSU and Nobumasa TSUJI^{*2}

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 29, 1986)

FCA Assembly XII-2, having a 30 cm thickness internal blanket, is the third core in the axially heterogeneous core experiment program at FCA. The purpose of the experiment in this assembly is to examine the influence on the axial nuclear characteristics by increasing the internal blanket thickness from 20 cm to 30 cm. From this point of view, followings were measured: (i) criticality, (ii) reaction rate distributions and its ratios, and (iii) sample reactivity worths and sodium void worth. The experimental results were analyzed by the JAERI's standard calculation system for fast reactors and JENDL-2 library.

Keywords: LMFBR Core, FCA Assembly XII-2, Fast Reactor, Axial Heterogeneous Core, Criticality, Reaction Rates, Sample Reactivity Worth, Sodium Void Worth, Experimental Analysis, JENDL-2

*1 Hitachi, Ltd.

*2 Fuji, Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 実験体系	1
3. 解析手順	8
4. 臨 界 性	11
4.1 臨界特性実験	11
4.2 臨界性の解析	12
5. 反応率分布と反応率比	15
5.1 核分裂率の測定	15
5.2 捕獲反応率分布の測定	16
5.3 反応率の解析	17
6. サンプル反応度値とナトリウムボイド反応度値	26
6.1 サンプル反応度値の測定	26
6.2 サンプル反応度値の解析	26
6.3 ナトリウムボイド反応度値の測定	27
6.4 ナトリウムボイド反応度値の解析	28
7. ま と め	37
謝 辞	37
参 考 文 献	37
付録1 プレート・データ	39
付録2 特性試験	41

Contents

1.	Introduction	1
2.	Description of the Assembly	1
3.	Calculation Method	8
4.	Criticality	11
4.1	Experiment of Criticality	11
4.2	Analysis of Criticality	12
5.	Reaction Rate Distributions and Its Ratios	15
5.1	Measurement of Fission Rate Distributions and Its Ratios	15
5.2	Measurement of Capture Rate Distribution	16
5.3	Analysis of Reaction Rate Distributions and Its Ratios	17
6.	Sample Reactivity Worths and Sodium Void Worth	26
6.1	Measurement of Sample Reactivity Worths	26
6.2	Analysis of Sample Reactivity Worths	26
6.3	Measurement of Sodium Void Worth	27
6.4	Analysis of Sodium Void Worth	28
7.	Conclusion	37
	Acknowledgement	37
	References	37
Appendix 1	Plate Data	39
Appendix 2	Criticality Specification	41

1. はじめに

FCA XII-2 集合体は、大型軸方向非均質炉心の基本的核特性の把握と核設計における計算精度の確証を目的とした高速炉臨界集合体 (FCA) を用いた一連の実験の第3番目の炉心である。本集合体の特徴は、これまでに FCA で行われた2つの軸方向非均質模擬炉心 XI-2 および XII-1 集合体の内部ブランケット厚さが 20 cm であった^{1), 2)} のに対し、30 cm と厚いことである。この内部ブランケットが厚くなったことによる軸方向核特性の変化の把握および計算精度の確証が本集合体の目的である。従って、次の3項目の測定を行ったが、分布測定は中心軸方向を対象とした。

(i) 臨 界 性

(ii) 反応率分布と反応率比

(iii) サンプル反応度値分布とナトリウムボイド反応度値分布

解析は、一連の軸方向非均質模擬炉心に対する解析と同様に原研における標準的核特性計算手法と JENDL-2 に基く JFS-3-J2 70 群断面積セットを用いて行い、実験値と比較することにより、内部ブランケットが厚くなった体系の軸方向核特性の計算精度を検討した。

本報告では、2章で実験体系の概要、3章で解析手順を述べ、続いて測定項目ごとに測定方法と測定結果および解析結果について述べる。

2. 実 験 体 系

FCA XII-2 集合体実験体系の選定は、FCA による大型軸方向非均質炉心の炉物理研究での一連の予備計算結果と FCA XI-2 及び XII-1 集合体を用いた軸方向非均質炉心の実験結果とに基づいて行った。^{1), 2)}

FCA XII-2 集合体は、大型軸方向非均質炉心を模擬したテスト領域が中心にあり、その周辺を体系の臨界を維持するためのドライバ領域、その外側には径方向ブランケット領域が取り囲んだ円筒形ゾーン型体系である。

テスト領域は、中心の高さ 30.5 cm の円盤状内部ブランケット領域、それを挟む高さ 30.5 cm の炉心領域、さらにその外側の厚さ 35.6 cm の軸方向ブランケット領域とから成る。内部ブランケットを含む炉心高さは 91.4 cm あり、炉心高さおよび軸方向ブランケット厚は大型軸方向非均質炉心の値を模擬している。テスト領域の等価半径は 29.4 cm である。このテスト領域の形状は、内部ブランケット厚さを除いては、XI-2 及び XII-1 集合体のそれと同一である。

テスト領域には、軸方向非均質炉心の燃料を模擬した引出しを装荷した。この引出しは、内部ブランケット部、炉心部および軸方向ブランケット部から成り、炉心部には、1 ユニット (2" × 2" × 2") 当りプルトニウム板 (1/16" 厚さ) 2 枚及び劣化ウラン酸化物板 (1/4" 厚さ) 3 枚が装填されている。炉心部のプルトニウム富化度は 13.2 W/O である。これら燃料板以外に、冷却

1. はじめに

FCA XII-2 集合体は、大型軸方向非均質炉心の基本的核特性の把握と核設計における計算精度の確証を目的とした高速炉臨界集合体 (FCA) を用いた一連の実験の第3番目の炉心である。本集合体の特徴は、これまでに FCA で行われた2つの軸方向非均質模擬炉心 XI-2 および XII-1 集合体の内部ブランケット厚さが 20 cm であった^{1), 2)} のに対し、30 cm と厚いことである。この内部ブランケットが厚くなったことによる軸方向核特性の変化の把握および計算精度の確証が本集合体の目的である。従って、次の3項目の測定を行ったが、分布測定は中心軸方向を対象とした。

- (i) 臨 界 性
- (ii) 反応率分布と反応率比
- (iii) サンプル反応度値分布とナトリウムボイド反応度値分布

解析は、一連の軸方向非均質模擬炉心に対する解析と同様に原研における標準的核特性計算手法と JENDL-2 に基づく JFS-3-J2 70 群断面積セットを用いて行い、実験値と比較することにより、内部ブランケットが厚くなった体系の軸方向核特性の計算精度を検討した。

本報告では、2章で実験体系の概要、3章で解析手順を述べ、続いて測定項目ごとに測定方法と測定結果および解析結果について述べる。

2. 実 験 体 系

FCA XII-2 集合体実験体系の選定は、FCA による大型軸方向非均質炉心の炉物理研究での一連の予備計算結果と FCA XI-2 及び XII-1 集合体を用いた軸方向非均質炉心の実験結果とに基づいて行った^{1), 2)}

FCA XII-2 集合体は、大型軸方向非均質炉心を模擬したテスト領域が中心にあり、その周辺を体系の臨界を維持するためのドライバー領域、その外側には径方向ブランケット領域が取り囲んだ円筒形ゾーン型体系である。

テスト領域は、中心の高さ 30.5 cm の円盤状内部ブランケット領域、それを挟む高さ 30.5 cm の炉心領域、さらにその外側の厚さ 35.6 cm の軸方向ブランケット領域とから成る。内部ブランケットを含む炉心高さは 91.4 cm あり、炉心高さおよび軸方向ブランケット厚は大型軸方向非均質炉心の値を模擬している。テスト領域の等価半径は 29.4 cm である。このテスト領域の形状は、内部ブランケット厚さを除いては、XI-2 及び XII-1 集合体のそれと同一である。

テスト領域には、軸方向非均質炉心の燃料を模擬した引出しを装荷した。この引出しは、内部ブランケット部、炉心部および軸方向ブランケット部から成り、炉心部には、1 ユニット (2" × 2" × 2") 当りプルトニウム板 (1/16" 厚さ) 2 枚及び劣化ウラン酸化物板 (1/4" 厚さ) 3 枚が装填されている。炉心部のプルトニウム富化度は 13.2 W/O である。これら燃料板以外に、冷却

材を模擬した金属ナトリウム板および酸化燃料の酸素を模擬するための酸化アルミニウム板が装填されている。内部ブランケットと軸方向ブランケットは同じ燃料セルで構成され、セルパターンは炉心セルのプルトニウム板2枚を天然ウラン板2枚に置換したものである。テスト領域の引出し(T2B3)における模擬物質板装填の様子をFig. 2.1に示す。

テスト領域の周囲は厚さ約20cmのドライバー領域が取囲む。このドライバー領域は、内側のプルトニウムを主な燃料とするプルトニウムドライバー領域と、外側の濃縮ウランを燃料とするウランドライバー領域から成る。ドライバー領域の炉心高さは91.4cmとテスト領域の内部ブランケットを含む炉心高さに等しい。一方、この領域の軸方向ブランケットは、テスト領域と異なり、炉心上下に厚さ20.3cmの天然ウランブロックを用い、さらにプルトニウムドライバー領域ではその外側に劣化ウラン酸化物板で充された厚さ15.2cmのブランケットを配した。ドライバー領域の燃料は、テスト領域の燃料と比べ富化度が約2倍のプルトニウムあるいはそれに相等する濃縮ウランである。さらに、ウランドライバーについては、中性子の吸収を少くし、体系の臨界性に余裕を持たせるために金属ナトリウム板を炭素板に置換した。

プルトニウムドライバー領域中には原子炉を運転するために必要な制御・安全棒が固定側および移動側1/2集合体それぞれに4組(引出し8本)存在する。この制御・安全棒には濃縮ウラン板を使用し、炉心高さはドライバー領域と同じとし、その上下には20cm厚の天然ウランブロックを装填した。ドライバー領域および制御・安全棒、引出しの模擬物質板配置図もFig. 2.1に示す。

ドライバー領域周辺には厚さ約24cmの径方向ブランケット領域として、劣化ウランブロックを装荷した。XII-2集合体の基準臨界体系の断面図をFig. 2.2に、そのR-ZモデルをFig. 2.3に示す。また各領域の均質原子数密度をTable 2.1に示す。ここで、基準臨界体系とは臨界性を求めるための体系を意味し、実験項目によっては、体系の余剰反応度を増すためにウランドライバー領域の外周にEUCD引出しが1ないし2本追加された実験体系と区別するものである。

Table 2.1 Atomic Composition of Each Drawer in FCA Assembly XII-1

 $(\times 10^{22} \text{ n / cm}^3)$

Material	I2B3		PD92B (core)	PD81B (core)	PUDB (core)	EUCD
	core	IB&AB*				
Pu-239	0.10455	—	0.2091	0.2080	0.1568	—
Pu-240	0.00922	—	0.01843	0.02564	0.01382	—
Pu-241	0.00048	—	0.00097	0.00171	0.00073	—
Pu-242	—	—	—	0.00028	—	—
Am-241	0.00038	—	0.00076	0.00150	0.00057	—
U-235	0.00140	0.00316	0.00140	0.00140	0.1144	0.2845
U-238	0.6869	0.9307	0.6869	0.6869	0.6954	0.6892
O	1.7038	1.7038	1.3762	1.3762	1.3762	1.3623
Na	0.7656	0.7656	0.7656	0.7656	0.7656	—
Al	0.2319	0.2169	0.0300	0.03071	0.0225	0.9082
Cr	0.3347	0.3079	0.3615	0.3624	0.3481	0.1772
Fe	1.2351	1.1304	1.3397	1.3431	1.2873	0.6452
Ni	0.1530	0.1396	0.1664	0.1666	0.1597	0.0772
C	—	—	—	—	—	3.5969

Material	CR & SR	NU Block	DU Block	DUO ₂	MATRIX
Pu-239	—	—	—	—	—
Pu-240	—	—	—	—	—
Pu-241	—	—	—	—	—
Pu-242	—	—	—	—	—
Am-241	—	—	—	—	—
U-235	0.4521	0.0289	0.00840	0.0037	—
U-238	0.0342	3.9889	4.0174	1.8317	—
O	—	—	—	3.6699	—
Na	—	—	—	—	—
Al	1.8364	—	—	—	—
Cr	0.2936	0.1846	0.1846	0.1772	0.1228
Fe	1.0684	0.6722	0.6722	0.6452	0.4473
Ni	0.5275	0.0804	0.0804	0.0772	0.0535
C	—	—	—	—	—

* IB:Internal Blanket
AB:Axial Blanket

T2 B3 drawer

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Na			Na						Na							
DUO ₂			DUO ₂						DUO ₂							
NU			Pu (92%)						NU							
Na			Na						Na							
Al ₂ O ₃			Al ₂ O ₃						Al ₂ O ₃							
DUO ₂			DUO ₂						DUO ₂							
Al ₂ O ₃			Al ₂ O ₃						Al ₂ O ₃							
Na			Na						Na							
NU			Pu(92%)						NU							
DUO ₂			DUO ₂						DUO ₂							
Na			Na						Na							

PD81 drawer

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Na									/NU Block			DUO ₂				
Pu (92%)												DUO ₂				
DUO ₂									/NU Block			DUO ₂				
Na												DUO ₂				
Pu (81%)									/NU Block			DUO ₂				
DUO ₂												DUO ₂				
Pu (92%)									/NU Block			DUO ₂				
Na												DUO ₂				
DUO ₂									/NU Block			DUO ₂				
Pu (92%)												DUO ₂				
Na									/NU Block			DUO ₂				
DUO ₂												DUO ₂				
Pu (92%)									/NU Block			DUO ₂				
Na												DUO ₂				

PD92 drawer

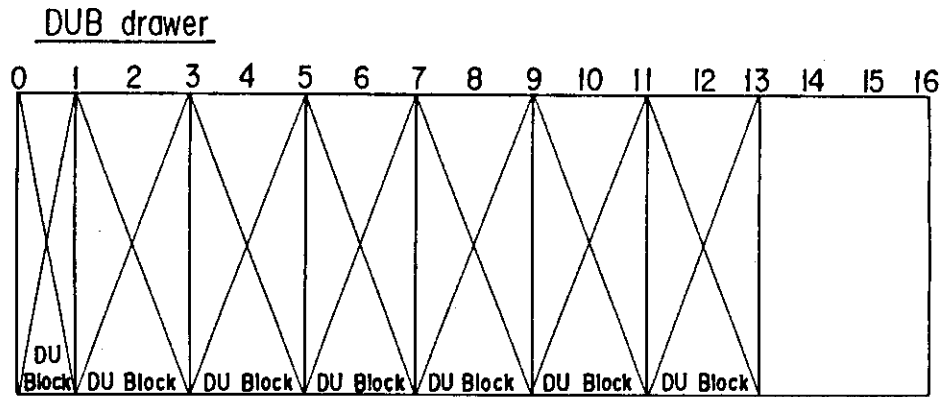
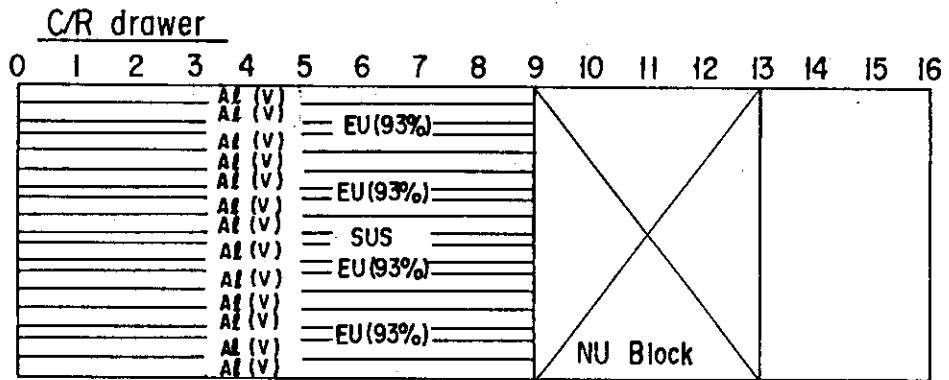
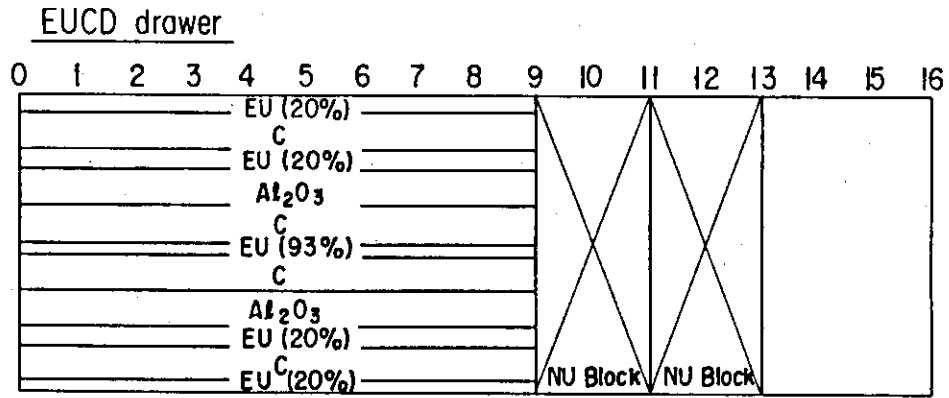
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Na									/NU Block			DUO ₂				
Pu (92%)												DUO ₂				
DUO ₂									/NU Block			DUO ₂				
Na												DUO ₂				
Pu (92%)									/NU Block			DUO ₂				
DUO ₂												DUO ₂				
Pu (92%)									/NU Block			DUO ₂				
Na												DUO ₂				
DUO ₂									/NU Block			DUO ₂				
Pu (92%)												DUO ₂				
Na									/NU Block			DUO ₂				
DUO ₂												DUO ₂				
Pu (92%)									/NU Block			DUO ₂				
Na												DUO ₂				

PUD drawer

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Na									/NU Block			DUO ₂				
Pu (92%)												DUO ₂				
DUO ₂									/NU Block			DUO ₂				
Na												DUO ₂				
EU (93%)									/NU Block			DUO ₂				
DUO ₂												DUO ₂				
Pu (92%)									/NU Block			DUO ₂				
Na												DUO ₂				
DUO ₂									/NU Block			DUO ₂				
Pu (92%)												DUO ₂				
Na									/NU Block			DUO ₂				
DUO ₂												DUO ₂				
Pu (92%)									/NU Block			DUO ₂				
Na												DUO ₂				

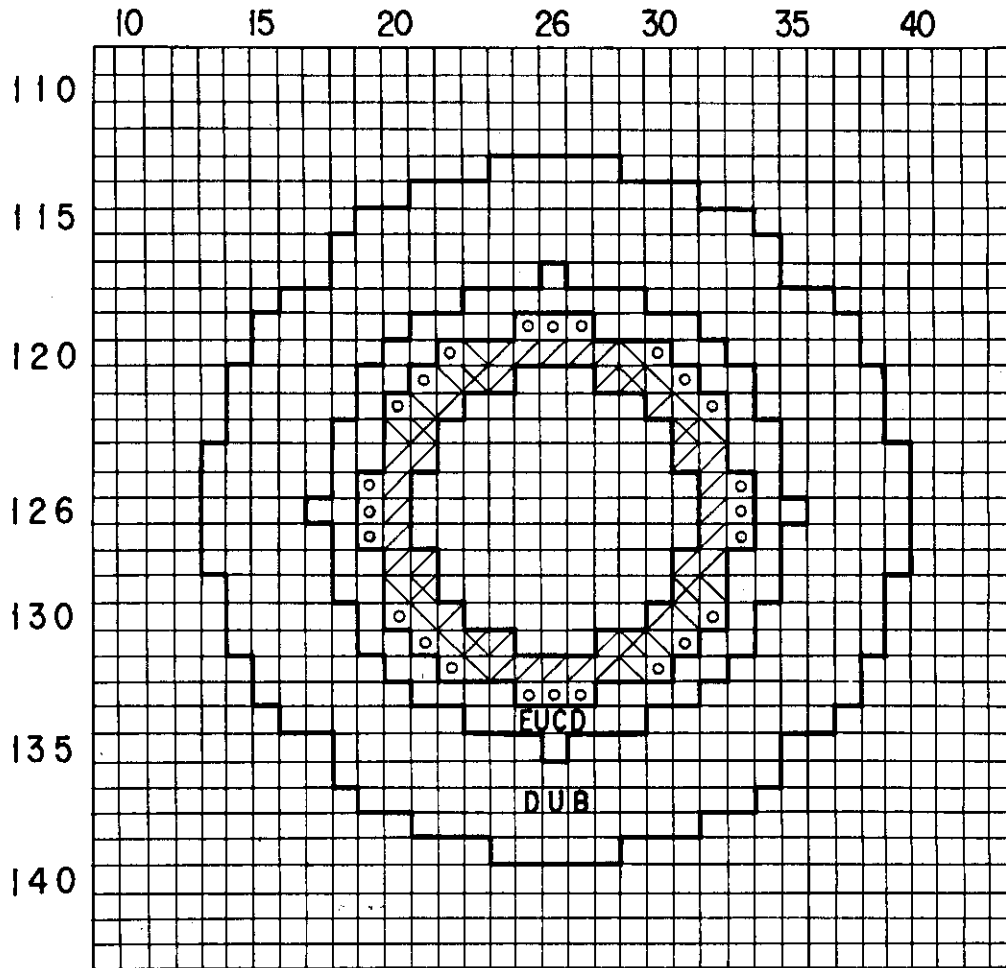
1 unit = 5.08 cm

Fig. 2.1 Plate Configuration of Drawers



1 unit = 5.08 cm

Fig. 2.1 (continued) Plate Configuration of Drawers



□	T2B3	89	
▧	PD81	32	} Pu driver
▨	PD92	16	
◉	PUD	24	
⊠	C/R	8	
□	EUCD	76	U driver
□	DUB	304	

Fig. 2.2 Vertical Cross Section of FCA Assembly XII-2

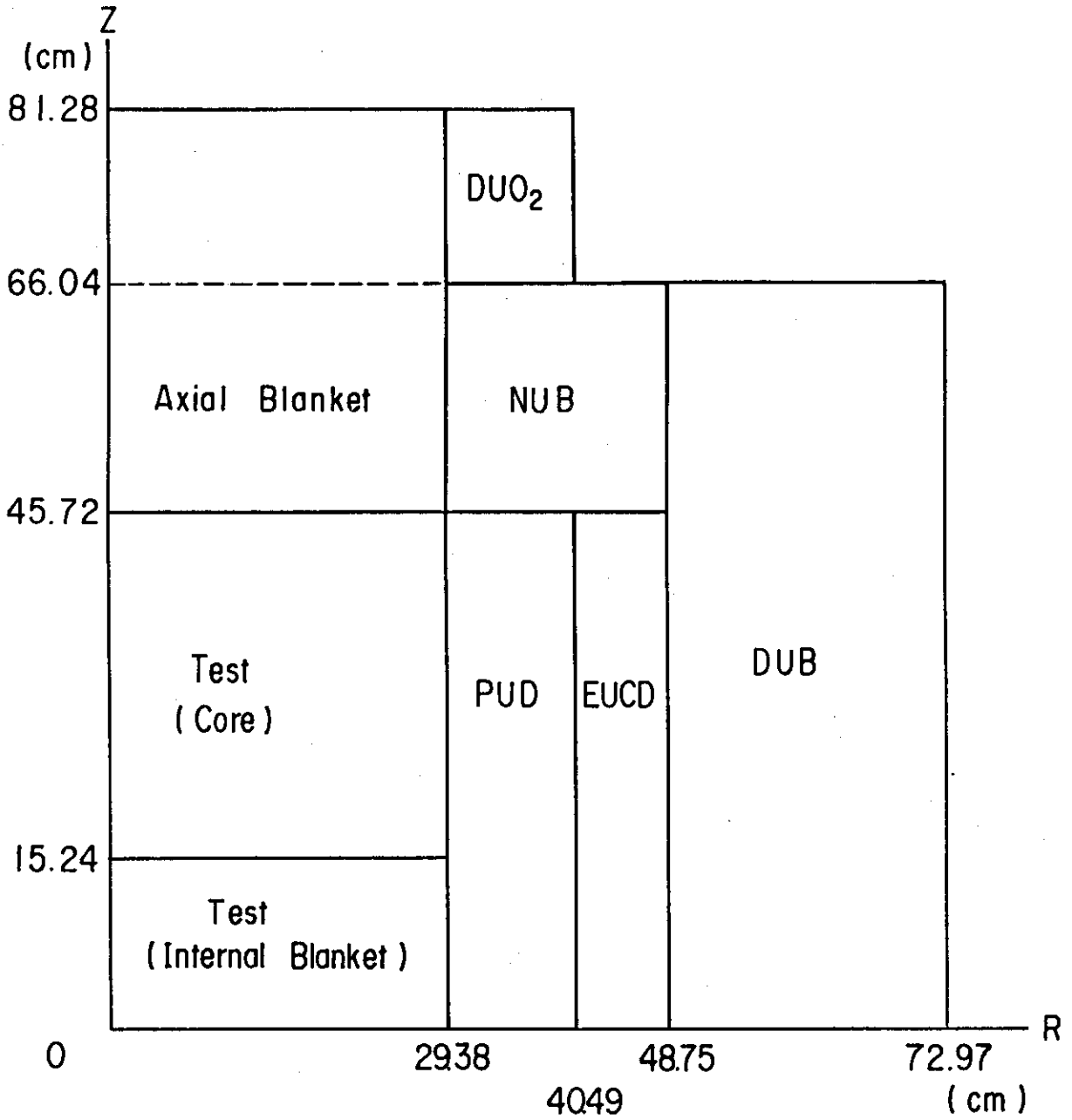


Fig. 2.3 R-Z Model of FCA Assembly XII-2

3. 解 析 手 順

原研の標準的な核特性計算手法を用いて計算を行い、実験値と比較することにより、軸方向非均質炉心核特性の特徴的な問題点および計算手法の精度を検討した。本章では計算手順の全体的な流れについて説明し、計算の詳細や補正計算については個々の項目に関する各章で述べる。解析では核データとして JENDL-2 を用い、これを処理した JES-3-J2 70 群セット (1984.11 修正版)³⁾ を計算の出発点とした。

実効断面積の準備 テスト領域およびドライバー領域のセルごとに衝突確率法に基づくセル計算コード SLAROM⁴⁾ を使用して 70 群セル計算を行い、セル平均実効断面積を計算した。計算は 1 次元無限平板セルモデルを用い、テスト領域の炉心およびドライバー領域のセルについては増倍率が 1.0 になるようバックリングサーチを行った。ブランケットについてはバックリングサーチは行っていない。テスト領域の炉心部の単位格子管断面図を Fig. 3.1 に示す。またこれに基づいて作成したセルモデルを Fig. 3.2 に示す。セル計算の各領域の原子数密度は体系内物質の量を保存するため上部格子管と物質板とのすき間を考慮し、物質板の密度をすき間を含めた体積で均質化した値を使用している。従って、実際の物質板の密度より少し小さな値となっている。ただし、このことによる実効断面積への影響は共鳴エネルギー領域の自己遮蔽因子を決める際に二次的に作用するだけであるから、小さいと考えられる。左右の格子管はセルモデルで考慮されるが、上下の部分については燃料物質以外の領域に均質に混ぜ合わせた。セル計算による実効断面積の算出と並行して、Benoist の式に基づく異方性拡散係数を算出した。

実効断面積の縮約 実験体系の R-Z モデルを使用して拡散計算により中性子束を計算し、各領域平均の中性子スペクトルを重みとして 70 群実効断面積を 25 群に縮約した。25 群エネルギー群構造を Table 3.1 に示す。

体系計算 実験体系を 3 次元 X-Y-Z 体系にモデル化し、各領域に 25 群群定数を適用し、拡散計算により体系計算を行い実効増倍率、中性子束および随伴中性子束を計算した。計算では体系内の物質板配列に方向性があるため、異方性拡散係数を使用した。計算プログラムは CITATIONFBR⁵⁾ である。この結果を用いて反応率分布、サンプル反応度値、ナトリウムボイド反応度値の計算を行なった。ナトリウムボイド反応度値、サンプル反応度値など、その反応度変化が摂動の範囲と考えられる測定値については、拡散理論に基づく摂動計算により計算値を求めた。計算コードは PERKY⁶⁾ を使用した。これらの計算値に対しては、輸送効果を考慮するため TWOTRAN-II⁷⁾ を用いた体系計算と S_n -PERT を用いた摂動計算を行った。計算手法の詳細、実験値との比較検討は次章以降に記述する。

Table 3.1 Energy Structure of 25-Energy Group

Group	Energy	Group	Energy
1	10.00 - 6.065 Mev	14	15.03 - 9.119 Kev
2	6.065 - 3.679	15	9.119 - 5.531
3	3.679 - 2.231	16	5.531 - 3.355
4	2.231 - 1.353	17	3.355 - 2.035
5	1.353 - 0.821	18	2.035 - 1.234
6	0.821 - 0.498	19	1.234 - 0.748
7	0.498 - 0.302	20	0.748 - 0.454
8	0.302 - 0.183	21	0.454 - 0.275
9	0.183 - 0.111	22	0.275 - 0.167
10	111.1 - 67.38 Kev	23	0.167 - 0.101
11	67.38 - 40.87	24	0.101 - 0.061
12	40.87 - 24.79	25	61.44 - 0.251 ev
13	24.79 - 15.03		

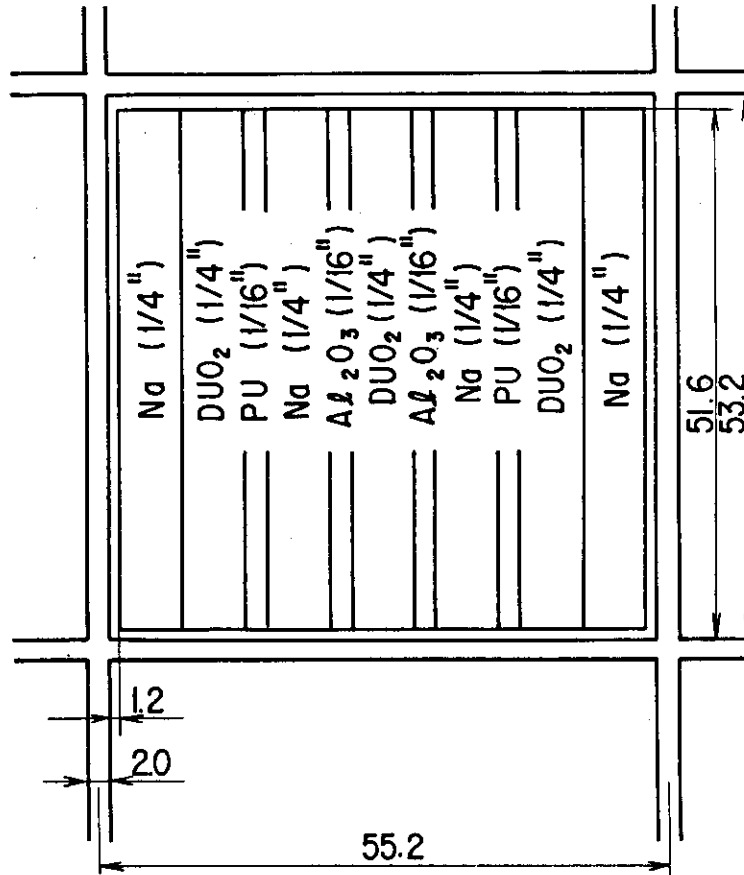


Fig. 3.1 Cross Section of the Core Zone of the Test Region (T2B3 Drawer) in FCA XII-2

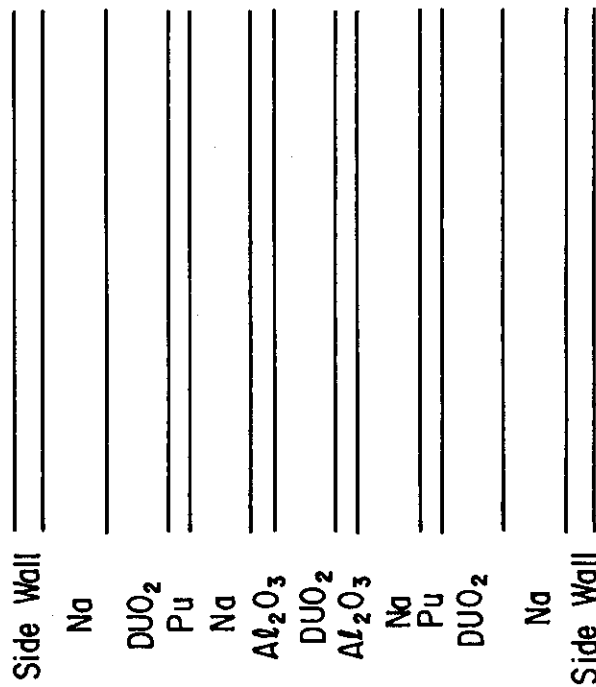


Fig. 3.2 Cell Model for the Core Zone of T2B3 Drawer

4. 臨 界 性

4.1 臨界特性実験

基準臨界体系に対応する計算体系の臨界性を求めるために、as built 体系の反応度測定の他種々の補正のための特性実験を行う必要がある。特性実験としては、

- (i) 制御棒校正
- (ii) 密着面間隙効果
- (iii) 温度効果
- (iv) 密着面不銹鋼反応度効果
- (v) 周辺質量係数

等の測定が行われた。

反応度測定の基準となる標準反応度 ρ_0 としては FCA 安全棒 1 本 50.00 mm から完全挿入までの反応度を選んだ。臨界状態にこの反応度 ρ_0 を印加したときの出力倍増時間として、

$$T_d = 56.5 \pm 0.3 \text{ sec}$$

を得た。本炉心は Pu 燃料約 220 kg を装荷しており、 ^{240}Pu からの自発核分裂による中性子源が存在するので、倍増時間測定では、この外部中性子源の影響を無くするため出力 200 W 程度までの測定が必要であった。この倍増時間 T_d より標準反応度として、

$$\rho_0 = 0.0520\% \Delta K/K$$

を得た。ここで、実効遅発中性子割合 (β_{eff}) は、遅発中性子データとして Tomlinson の評価値を用い、2次元 R-Z モデルと JFS-3-J2 セットを使用して拡散計算に基づく摂動計算により求めた。

基準臨界体系の余剰反応度 ρ (as built) と種々の補正実験から得られる反応度効果の測定値を Table 4.1 に示す。ただし、 ρ (as built) は基準臨界体系で両 1/2 集合体が密着し、炉心平均温度 20 °C の場合の値である。これらの値より、3次元 X Y Z 体系での実効増倍率を求めた。特性実験データは Appendix 2 にまとめる。

1/2 集合体の密着時には、両集合体の引出し前端面の間隙 0.5 ± 0.3 mm と引出し前端面の板厚 0.8 mm を合わせて、引出し装填物質からみれば、平均 2.1 mm の間隙が存在する。間隙効果は、この間隙 2.1 mm を無くした時の反応度効果である。一方、炉心の不銹鋼効果は、引出し前端面の不銹鋼 (8.73 g/引出し) に対する補正である。反応度の補正值としては、間隙効果が非常に大きいことがわかる。

以上より、Fig. 2.2 に示す体系の実効増倍率は、

$$1.00155 \pm 0.00018$$

となる。

4.2 臨界性の解析

実験体系を模擬した3次元X-Y-Z体系を用い、25群群定数および異方性拡散係数を使用した拡散計算により実効増倍率の基準値を計算した。計算モデルでは燃料は中心面で密着し、制御・安全棒は全挿入状態とした。この基準値に対して輸送効果、およびメッシュ効果を補正值として加えた。70群から25群への群縮約効果は、予備解析において小さいことが示されたので補正值から省いた。輸送効果の補正係数は2次元R-Z体系モデルと25群群定数を用い S_N 法に基づく輸送計算と拡散計算の結果から求めた。輸送計算では角度分点を S_8 とし、輸送断面積中の弾性散乱断面積は P_0 。成分をとりこれに $1-\bar{\mu}$ の補正を加えた。XII-2集合体では角度分点を $N=4$ から $N=8$ に上げると実効増倍率は0.159% $\Delta K/K$ 小さくなるが、それ以上分点を増やしても変化は小さい。輸送補正係数を求めるための拡散計算では輸送断面積の逆数から求めた等方拡散係数を使用した。メッシュ効果は2次元R-Z体系計算から無限メッシュに対応する値を補正係数として求めた。臨界特性の解析結果をTable 4.2に示す。

臨界性に関してはドライバーの寄与が大きいと、軸方向非均質炉心の特性を直接には議論することができないことに留意する必要がある。計算値は約0.7%実効増倍率を過大評価する。内部ブランケットを薄くしたXI-2およびXII-1集合体での模擬実験の解析では、計算値は実効増倍率を0.60% $\Delta K/K$ 大きく評価するがXII-2集合体では、さらに0.1% $\Delta K/K$ 過大評価である。実効増倍率での0.7%の差は核設計に及ぼす影響が大きいと、今後さらに解析上の検討を必要とする。輸送補正值は1.03%と大きな値をとり、これは体系が小さいため中性子の漏れの項が大きいためである。

次に2次元R-Z体系で計算した70群中性子スペクトルを内部ブランケット中心(1Z)と炉心中心(6Z)および軸方向ブランケット中心(11Z)の3点で比較しFig.4.1に示し、同じく随伴中性子束の比較をFig.4.2に示す。内部ブランケットで中性子スペクトルがシフトした状態および随伴中性子束の底部の位置の移動と傾きの変化が観測される。

Table 4.1 Measured Reactivity for FCA Assembly XII-2

(unit: ρ_0)

Excess reactivity $\rho_{(as\ built)}$	1.26 \pm 0.029
Correction	
Gap effect	1.83 \pm 0.35
SUS effect at mid-plane	-0.112 \pm 0.039
Sum	<u>1.72 \pm 0.35</u>
Corrected reactivity ρ	2.98 \pm 0.36 (0.155 \pm 0.018% $\Delta k/k$)

Table 4.2 Calculation Results for Criticality of FCA Assembly XII-2

(unit: $\Delta k/k$)

<u>Calculation</u>	
Base calculation K_{eff}	1.0001
Transport correction	0.0103
Mesh correction	-0.0021
Corrected K_{eff}	1.0083
<u>Experiment</u>	1.0016
<u>C/E</u>	1.0067

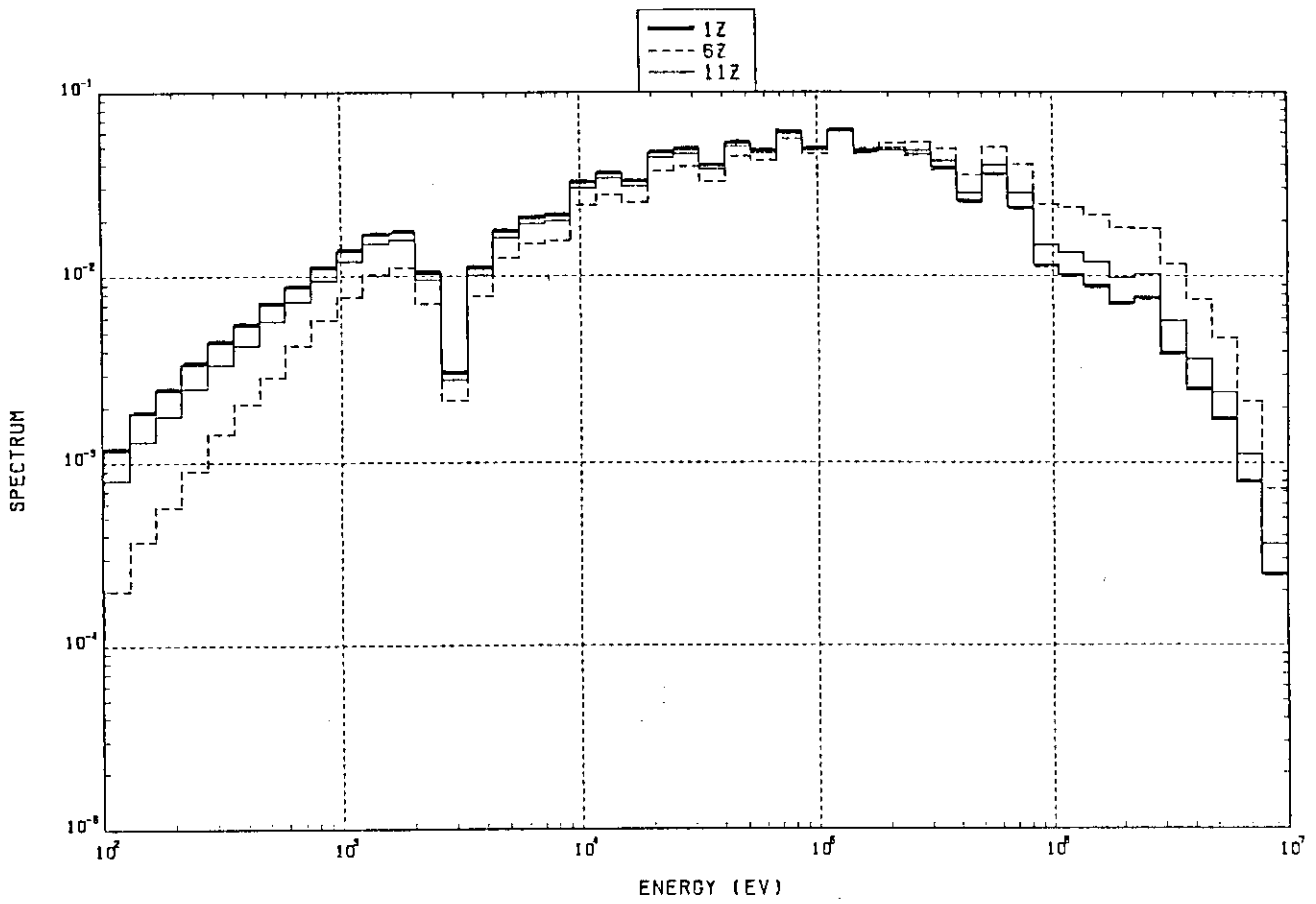


Fig. 4.1 Comparison of Neutron Spectrum at Each Point in FCA XII-2

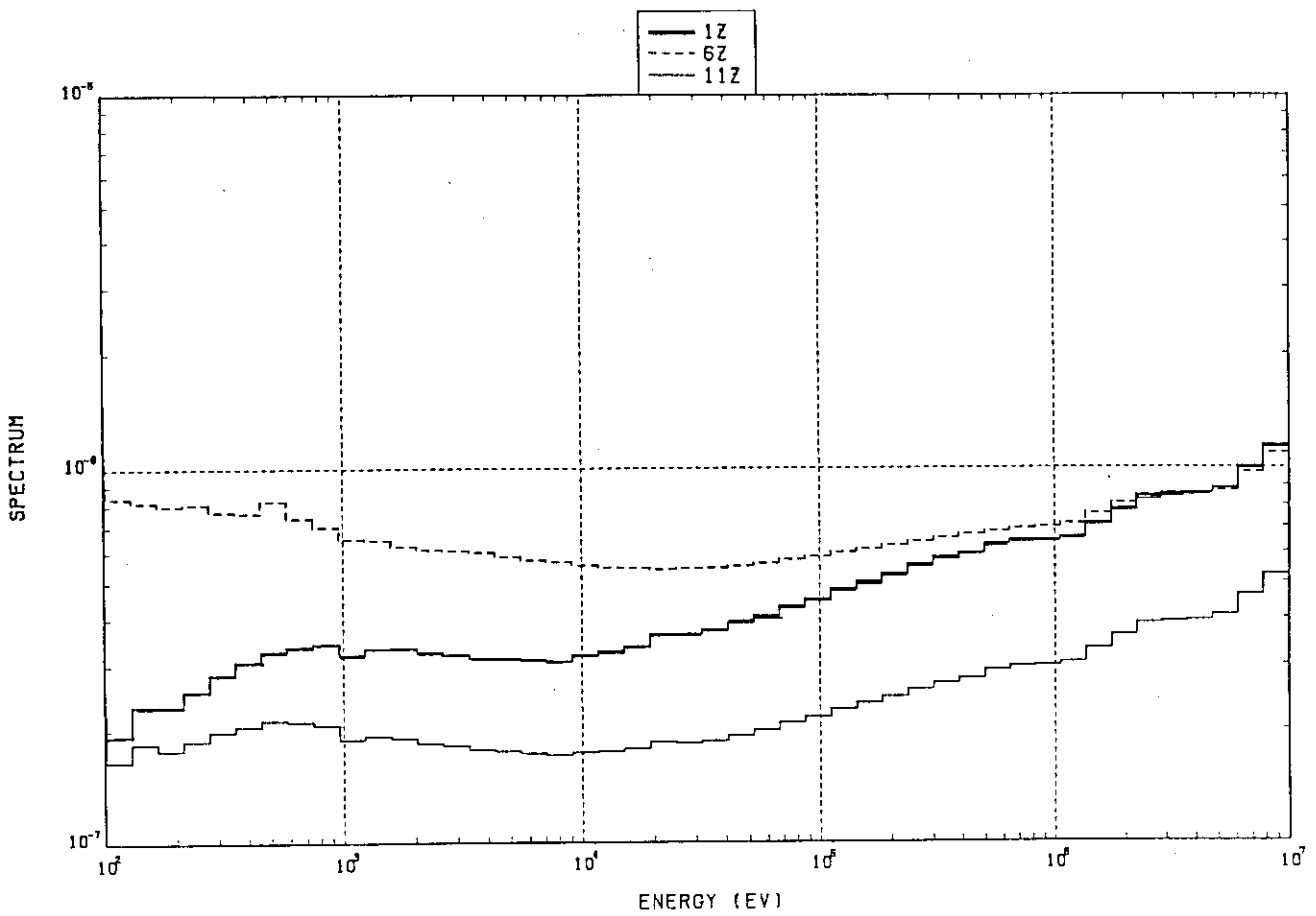


Fig. 4.2 Comparison of Adjoint Neutron Spectrum at Each Point in FCA XII-2

5. 反応率分布と反応率比

5.1 核分裂率の測定

核分裂率の測定では、小型核分裂計数管 (micro fission chamber) を用いて、炉心中心における核分裂比および軸方向の核分裂率分布を測定した。用いた計数管の種類は4種類であり、それらの電極塗布物質は93%濃縮ウラン (EU), 天然ウラン (NU), プルトニウム (Pu) およびネプチウム (Np) である。絶対較正された実効原子数および同位元素組成を Table 5.1 に示す。

核分裂率分布

計数管は円筒形状であり、外径8mm, 肉厚0.6mmの細長いアルミニウム保護管内に装填され、EUとNU及びNpとPuの2本づつを1組として炉内に挿入される。この1組の計数管を、軸方向に深さ1", 幅3/8"の溝が設けられた固定側および移動側の中心引出し (F126-26, M126-26) 内にセットし、その溝の中を小型核分裂計数管を移動させることにより軸方向核分裂率分布を測定した。溝を設けた中心引出しの炉心部およびブランケット部 (内部および軸方向ブランケット) の断面図を Fig. 5.1 に示す。測定中は自動制御により炉出力を一定 (10W) に保った。核分裂計数管の計数は測定時の炉出力の微小変動効果を除くために F138-25 に設置した炉出力モニター (Np 中型核分裂計数管) の計数にて規格化した。計数は1測定点当り6回程度測定し、その平均値を採用した。また、測定誤差はその分散から推定した。実験孔の存在による中性子ストリーミングの効果の補正は無視した。これは、類似した実験体系である FCA XII-1 集合体での評価によると、軸方向の実験孔によるストリーミング効果は非常に小さく、約±1%の測定誤差内で無視できることを確認しており、²⁾ 本集合体においても同様であると考えたことによる。²³⁸U, ²³⁷Np, ²³⁹Pu, ²³⁵Uの各核種の軸方向核分裂率分布を Table 5.2 に示す。この表の測定誤差は、前述した6回程度の計数率の統計変動のみを考慮したものであり、計数管に対する誤差は考慮していない。また、一連の軸方向非均質炉心である FCA XI-2, XII-1 集合体および FCA XII-2 集合体での ²³⁹Puの軸方向核分裂率分布を Fig. 5.2 で比較する。FCA XI-2 および XII-1 集合体は内部ブランケット厚が20cmであり、本炉心のそれは30cmである。図より、内部ブランケットおよび炉心領域の境界近傍でその分布の勾配が一様でないことがわかる。これは、内部ブランケットを設けたことにより、比較的低エネルギーの中性子が炉心領域のそれに比べて増加したことによる。しかし、XI-2 集合体と XII-2 集合体とを比較すると、炉心中心 (6Z) での核分裂率に対する内部ブランケット中心 (1Z) でのその比はほぼ一致しており、内部ブランケット中心での ²³⁹Pu 核分裂率分布の変化は観測できなかった。

核分裂率比

絶対較正された4種類の核分裂率の測定データから ²³⁸U, ²³⁷Np および ²³⁹Pu 核分裂率の

^{235}U 核分裂率に対する比を求めた。測定位置は集合体密着面から中心 Z 軸方向に 2.54cm 離れた内部ブランケット領域 (I. B) および 27.94 cm 離れた炉心領域 (CORE) である。 ^{238}U と ^{235}U の核分裂率は、E U 計数管と N U 計数管の測定値と両計数管に含まれる ^{238}U と ^{235}U の原子数の比から求めた。E U 計数管に含まれる ^{234}U および ^{236}U の核分裂の効果は非常に小さいので無視した。Pu 計数管に含まれている ^{240}Pu および ^{241}Pu の核分裂の効果は計算値を用いて補正し、それぞれ $\pm 10\%$ および $\pm 5\%$ の不確かさがあると仮定して測定誤差に組込んだ。また Np 計数管に含まれている Pu は全て ^{239}Pu であると仮定して補正した。内部ブランケット厚の異なる本炉心と同様な軸方向非均炉心である FCA XII-1 集合体と共に Table 5.3 に示す。両集合体を比較すると、炉心部ではそれぞれの核分裂率比が誤差範囲内で一致しているのに対して、内部ブランケット部では $^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ は誤差範囲内で一致し、一方、 $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ および $^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ は約 20% 程度 XII-2 集合体での値が小さくなっている。従って、本集合体の方が FCA XII-1 集合体より内部ブランケットにおいて中性子スペクトルの軟化の程度が大きいことがわかる。

5.2 捕獲反応率分布の測定

$^{238}\text{U}(n, \gamma)$ 反応率の測定は、劣化ウラン箔 (DU 箔) を用いて、軸方向について行なった。測定に使用した箔は、形状が円板であり、薄いアルミニウム箔で覆ってある。DU 箔の仕様は 12.7 mm dia \times 0.127 thick であり、元素組成比は、 ^{238}U : 99.96% および ^{235}U : 0.04% である。DU 箔を固定側中心引出し (F 126-26) 内に装填し、照射は炉出力を一定にし、300 W - hr (100 W \times 3 hr) で行なった。装填方法は燃料板および模擬物質等表面に密着するように固定した。

照射終了後、約 20 時間の冷却時間を置き、DU 箔からの崩壊 γ 線を同軸型 Ge 検出器を備えた箔測定システムで測定した。測定は、冷却後 130 時間の間に各箔について 6 回行なった。 ^{238}U の捕獲反応率測定に使用した γ 線フォトピークは、 ^{238}U の中性子捕獲反応より生ずる ^{239}Np からの 106.1 KeV、209.8 KeV および 277.6 KeV の 3 ピークである。各 γ 線エネルギーピークの計数率を求め、箔重量、時間減衰の補正を行い、測定誤差 (計数率に対する統計誤差、崩壊定数の誤差等) を考慮して、 ^{238}U の捕獲反応率分布を求めた。一連のデータ処理は FCA における箔データ処理システム^{8), 9)}を用いて行った。またセル内では燃料板が非均質に配列されていることからセル内中性子束分布の微細変化により、測定された反応率は、セル平均反応率ではなく、箔の挿入場所に依存したものとなる。この箔の場所依存性は当然、セルの構成により異なる。そこで、実験的に補正し各測定点をセル平均反応率に変換 (この係数を Cell averaging factor と称する。) するためセル内微細分布測定を行った。微細分布測定の測定位置は 1Z (I. B), 3Z (I. B), 4Z (CORE) および 6Z (CORE) の 4 点である。Fig. 5.3 に DU 箔の照射位置を示す。測定結果より Cell averaging factor は、CORE 部を 1.0 とした時内部ブランケット部で $0.961 \pm 0.6\%$ であった。また、セル構造が等しいことにより軸方向ブランケットでの値は、内部ブランケット部での値と同じ係数であるとした。Table 5.4 に ^{238}U 捕獲反応率分布を示す。

5.3 反応率の解析

軸方向反応率分布と反応率比の測定値を計算結果と比較し検討を行った。計算は群定数ライブラリーとして JENDL-2 に基く JFS-3-J2 セット³⁾ を用い、SLAROM⁴⁾ によりセル平均実効断面積を作成する FCA の標準解析法に依っている。計算は 2 次元 RZ70 群非等方拡散計算を基準計算とし、輸送補正係数を求めこれを基準計算に乗じて計算結果とした。体系計算には CITATION (拡散) および TWOTRAN (輸送) を用いた。

反応率分布の C/E

反応率分布の解析結果を Table 5.5 ~ Table 5.9 に示し、C/E 値の軸方向分布を Fig. 5.3 に示す。

計算値は各核種とも炉心内で測定値と良い一致を示しているが、内部ブランケットで各核種に特有な不一致がみられる。内部ブランケットでは、 $^{235}\text{U}(n, f)$ 、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 、 $^{237}\text{Np}(n, f)$ の計算値が 2 ~ 4 % の過小評価、 $^{238}\text{U}(n, f)$ の計算値が 4 ~ 9 % の過大評価 (NU 核分裂計数管による測定値との比較) を示す。 $^{238}\text{U}(n, f)$ は最も高いしきい核分裂断面積 (約 0.5 MeV) をもつ核種であることから、計算値が内部ブランケットで中性子スペクトルを硬く評価していることが考えられる。

XI-2 集合体の各核種の反応率分布の C/E 値は、XI-2 と XII-1 集合体 (内部ブランケット厚 20 cm) の C/E 値²⁾ とほぼ同じ値を示す。内部ブランケット厚さの増加による、内部ブランケット部での C/E 値の悪化はみられない。

反応率比の C/E

内部ブランケット内の一点 ($R = 0.0 \text{ cm}$, $Z = 2.54 \text{ cm}$) と炉心の一点 ($R = 0.0 \text{ cm}$, $Z = 27.94 \text{ cm}$) で求めた反応率比の C/E 値を Table 5.10 に示す。C/E 値は、内部ブランケット領域での予測精度が良くないことを示している。 $^{238}\text{U}(n, f) / ^{235}\text{U}(n, f)$ の内部ブランケットでの C/E 値は、約 1.1 であり、反応率分布と同様、計算値が内部ブランケット部でスペクトルを硬く評価していることに対応している。

XI-2 集合体の各反応率比の C/E 値は、XI-2 と XII-1 集合体の C/E 値と実験誤差の範囲で一致しており、内部ブランケット厚さの増加にともなう、C/E 値の悪化はみられない。

Table 5.1 Effective Atoms and Isotopic Composition of Fission Chambers

Detector		Enriched U	Natural U	Plutonium	Neptuim
Effective atom		3.04×10^{17} $\pm 2.0\%$	4.16×10^{18} $\pm 2.0\%$	7.10×10^{17} $\pm 2.0\%$	1.42×10^{18} $\pm 4.0\%$
Ingredient	U-234	0.0095 ± 0.0001	0.007204 ± 0.000007		0.9949 } 0.00506*
	U-235	0.9331 ± 0.0005			
	U-236	0.0041 ± 0.0001			
	U-238	0.0534 ± 0.0004	0.9928		
	Np-237				
	Pu-239		0.9443 ± 0.0002		
	Pu-240		0.0522 ± 0.0002		
	Pu-241		0.00338 ± 0.00002		
Pu-242		≈ 0.00013			

* Isotopic composition of this Pu is not known.
Regarded as 100% Pu-239 in this report.

Table 5.2 Axial Fission Rate Distributions in FCA Assembly XII-2

Position Z (cm)	U-238 F. RATE	%ERR	NP-237 F. RATE	%ERR	PU-239 F. RATE	%ERR	U-235 F. RATE	%ERR
-0.50 (-2.54)	0.1003E-01	4.28	0.1104E+00	0.53	0.1575E+01	0.36	0.1883E+01	0.30
0.00 (0.00)	0.9892E-02	4.36	0.1099E+00	0.67	0.1579E+01	0.30	0.1883E+01	0.29
0.25 (1.27)	0.9997E-02	4.03	0.1113E+00	0.66	0.1579E+01	0.31	0.1895E+01	0.25
0.50 (2.54)	0.1002E-01	4.00	0.1109E+00	0.56	0.1580E+01	0.31	0.1887E+01	0.30
0.75 (3.81)	0.1048E-01	3.78	0.1124E+00	0.60	0.1581E+01	0.34	0.1876E+01	0.23
1.50 (7.62)	0.1174E-01	3.35	0.1223E+00	0.57	0.1546E+01	0.24	0.1829E+01	0.28
2.25 (11.43)	0.1460E-01	2.69	0.1420E+00	0.32	0.1513E+01	0.33	0.1777E+01	0.17
2.50 (12.70)	0.1595E-01	2.36	0.1495E+00	0.33	0.1492E+01	0.30	0.1743E+01	0.24
2.75 (13.97)	0.1936E-01	1.85	0.1628E+00	0.52	0.1468E+01	0.30	0.1712E+01	0.19
3.25 (16.51)	0.2381E-01	1.56	0.1920E+00	0.44	0.1403E+01	0.24	0.1639E+01	0.40
3.50 (17.78)	0.2586E-01	1.48	0.2037E+00	0.48	0.1377E+01	0.26	0.1609E+01	0.38
3.75 (19.05)	0.2722E-01	1.35	0.2131E+00	0.56	0.1368E+01	0.32	0.1595E+01	0.25
4.50 (22.86)	0.2892E-01	1.15	0.2277E+00	0.69	0.1317E+01	0.22	0.1502E+01	0.23
5.50 (27.94)	0.2988E-01	1.04	0.2262E+00	0.50	0.1250E+01	0.23	0.1411E+01	0.28
6.50 (33.02)	0.2754E-01	1.16	0.2111E+00	0.22	0.1148E+01	0.50	0.1297E+01	0.21
7.50 (38.10)	0.2386E-01	1.19	0.1842E+00	0.55	0.1035E+01	0.49	0.1168E+01	0.20
8.50 (43.18)	0.1803E-01	1.55	0.1459E+00	0.67	0.9074E+00	0.41	0.1051E+01	0.31
9.50 (48.26)	0.9925E-02	2.21	0.9196E-01	0.76	0.8061E+00	0.45	0.9289E+00	0.25

* Distance from core center

Table 5.3 Comparison of Fission Rate Ratios in FCA Assemblies
XII-1 and XII-2

Assembly	Region	$^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	$^{239}\text{Np}/^{235}\text{U}$
XII-1	Internal*	0.8624 \pm 3.2%	0.006861 \pm 5.3%	0.07130 \pm 4.8%
XII-2	Blanket	0.8437 \pm 3.2%	0.005332 \pm 6.0%	0.05910 \pm 4.8%
XII-1	Core**	0.9122 \pm 3.2%	0.02202 \pm 3.8%	0.1707 \pm 4.8%
XII-2		0.8890 \pm 3.2%	0.02115 \pm 3.7%	0.1594 \pm 4.8%

* Position : R = 0.0 cm, Z = 2.54 cm

** Position : R = 0.0 cm, Z = 27.94 cm

Table 5.4 Axial Distribution of U-238 Capture Rate in FCA
Assembly XII-2

Region	Position* (cm)	Measured Value	Cell Averaging factor	Corrected Capture Rate
Internal Blanket	2.54	1.277 (\pm 0.3%)	0.961 (\pm 0.6%)	1.227 (\pm 0.8%)
	7.62	1.249 (\pm 0.3)	0.961 (\pm 0.6)	1.200 (\pm 0.8)
	11.43	1.205 (\pm 0.5)	1.0	1.205 (\pm 0.5)
	13.97	1.171 (\pm 0.3)	1.0	1.171 (\pm 0.3)
Core	16.51	1.160 (\pm 0.3)	1.0	1.160 (\pm 0.3)
	19.05	1.131 (\pm 0.3)	1.0	1.131 (\pm 0.3)
	22.86	1.073 (\pm 0.3)	1.0	1.073 (\pm 0.3)
	27.94	1.0 (\pm 0.3)	1.0	1.0 (\pm 0.3)
	33.02	0.910 (\pm 0.3)	1.0	0.910 (\pm 0.3)
	38.10	0.825 (\pm 0.3)	1.0	0.825 (\pm 0.3)
	43.18	0.739 (\pm 0.4)	1.0	0.739 (\pm 0.4)
Axial Blanket	48.26	0.652 (\pm 0.3)	1.0	0.652 (\pm 0.3)
	53.34	0.540 (\pm 0.4)	0.961 (\pm 0.6)	0.519 (\pm 0.8)
	58.42	0.445 (\pm 0.3)	0.961 (\pm 0.6)	0.428 (\pm 0.8)
	63.50	0.357 (\pm 0.4)	0.961 (\pm 0.6)	0.343 (\pm 0.8)

* Distance from core center

** Normalized at position 27.94 cm

Table 5.5 Comparison of Measured and Calculated $^{239}\text{Pu}(n,f)$ Axial Reaction Rate in FCA Assembly XII-2

Distance (cm)	Experi.	Error (%)	Base Cal.	T.C.	Corrected	C/E
0.0	1.263	0.300	1.252	0.977	1.223	0.969
1.27	1.263	0.310	1.252	0.977	1.223	0.969
2.54	1.264	0.310	1.251	0.977	1.222	0.967
3.81	1.265	0.340	1.249	0.977	1.220	0.964
7.62	1.237	0.240	1.234	0.977	1.206	0.975
11.43	1.210	0.330	1.209	0.980	1.185	0.980
12.70	1.194	0.300	1.197	0.982	1.175	0.984
13.97	1.174	0.300	1.184	0.983	1.164	0.991
16.51	1.123	0.240	1.104	0.990	1.092	0.972
17.78	1.102	0.260	1.094	0.992	1.086	0.985
19.05	1.095	0.320	1.085	0.994	1.079	0.985
22.86	1.054	0.220	1.056	0.999	1.054	1.000
27.94	1.000	0.230	1.000	1.000	1.000	1.000
33.02	0.919	0.500	0.922	0.999	0.921	1.002
38.10	0.828	0.490	0.822	0.999	0.821	0.991
43.18	0.726	0.410	0.709	0.994	0.705	0.971
48.26	0.645	0.450	0.624	0.986	0.616	0.955

Base Cal. : Anisotropic diffusion calculation

T.C. : Transport correction factor.

Corrected : Result corrected by T.C.

Table 5.6 Comparison of Measured and Calculated $^{235}\text{U}(n,f)$ Axial Reaction Rate in FCA Assembly XII-2

Distance (cm)	Experi.	Error (%)	Base Cal.	T.C.	Corrected	C/E
0.0	1.334	0.290	1.332	0.982	1.309	0.981
1.27	1.343	0.250	1.332	0.982	1.309	0.974
2.54	1.337	0.300	1.329	0.982	1.305	0.976
3.81	1.329	0.230	1.326	0.982	1.302	0.980
7.62	1.296	0.280	1.303	0.983	1.281	0.988
11.43	1.259	0.170	1.265	0.985	1.246	0.990
12.70	1.235	0.240	1.244	0.986	1.227	0.993
13.97	1.213	0.190	1.224	0.986	1.208	0.995
16.51	1.162	0.400	1.170	0.993	1.161	1.000
17.78	1.140	0.380	1.148	0.994	1.141	1.001
19.05	1.130	0.250	1.127	0.994	1.120	0.991
22.86	1.065	0.230	1.072	0.998	1.070	1.005
27.94	1.000	0.280	1.000	1.000	1.000	1.000
33.02	0.919	0.210	0.918	1.000	0.918	0.999
38.10	0.828	0.200	0.825	0.999	0.824	0.996
43.18	0.745	0.310	0.730	0.997	0.727	0.976
48.26	0.658	0.250	0.643	0.991	0.637	0.968

Base Cal. : Anisotropic diffusion calculation

T.C. : Transport correction factor.

Corrected : Result corrected by T.C.

Table 5.7 Comparison of Measured and Calculated ^{238}U (n,f) Reaction Rate in FCA Assembly XII-2

Distance (cm)	Experi.	Error (%)	Base Cal.	T.C.	Corrected	C/E
0.0	0.331	4.360	0.403	0.884	0.356	1.076
1.27	0.335	4.030	0.403	0.884	0.356	1.064
2.54	0.336	4.000	0.411	0.880	0.361	1.076
3.81	0.351	3.780	0.418	0.876	0.366	1.045
7.62	0.393	3.350	0.476	0.867	0.413	1.050
11.43	0.489	2.690	0.579	0.890	0.515	1.053
12.70	0.534	2.360	0.632	0.920	0.582	1.090
13.97	0.648	1.850	0.686	0.946	0.649	1.003
16.51	0.797	1.560	0.816	0.981	0.800	1.005
17.78	0.865	1.480	0.865	0.998	0.863	0.997
19.05	0.911	1.350	0.913	1.013	0.925	1.016
22.86	0.968	1.150	0.988	1.013	1.000	1.034
27.94	1.000	1.040	1.000	1.000	1.000	1.000
33.02	0.922	1.160	0.934	0.990	0.924	1.003
38.10	0.798	1.190	0.805	0.992	0.799	1.000
43.18	0.603	1.550	0.614	0.978	0.601	0.996
48.26	0.332	2.210	0.384	0.907	0.348	1.049

Base Cal. : Anisotropic diffusion calculation

T.C. : Transport correction factor

Corrected : Result corrected by T.C.

Table 5.8 Comparison of Measured and Calculated ^{237}Np (n,f) Reaction Rate in FCA Assembly XII-2

Distance (cm)	Experi.	Error (%)	Base Cal.	T.C.	Corrected	C/E
0.0	0.486	0.670	0.521	0.910	0.474	0.975
1.27	0.492	0.660	0.521	0.910	0.474	0.963
2.54	0.490	0.560	0.527	0.909	0.479	0.978
3.81	0.497	0.600	0.534	0.907	0.485	0.975
7.62	0.541	0.570	0.584	0.905	0.529	0.977
11.43	0.628	0.320	0.668	0.920	0.615	0.979
12.70	0.661	0.330	0.710	0.939	0.667	1.009
13.97	0.720	0.520	0.753	0.956	0.719	0.999
16.51	0.849	0.440	0.863	0.980	0.845	0.996
17.78	0.901	0.480	0.900	0.992	0.893	0.992
19.05	0.942	0.560	0.938	1.004	0.941	0.999
22.86	1.007	0.690	0.996	1.006	1.003	0.996
27.94	1.000	0.500	1.000	1.000	1.000	1.000
33.02	0.933	0.220	0.933	0.994	0.928	0.994
38.10	0.814	0.550	0.808	0.995	0.804	0.987
43.18	0.645	0.670	0.631	0.983	0.620	0.962
48.26	0.407	0.760	0.418	0.935	0.391	0.961

Base Cal. : Anisotropic diffusion calculation

T.C. : Transport correction factor.

Corrected : Result corrected by T.C.

Table 5.9 Comparison of Measured and Calculated ^{238}U (n, γ) Reaction Rate in FCA Assembly XII-2

Distance (cm)	Experi.	Error (%)	Base Cal.	T.C.	Corrected	C/E
2.54	1.227	0.800	1.261	0.982	1.238	1.009
7.62	1.200	0.800	1.240	0.984	1.220	1.017
11.43	1.205	0.600	1.208	0.986	1.192	0.989
13.97	1.171	0.500	1.175	0.988	1.160	0.991
16.51	1.160	0.500	1.170	0.993	1.162	1.002
19.05	1.131	0.500	1.128	0.994	1.121	0.992
22.86	1.073	0.500	1.073	0.997	1.070	0.998
27.94	1.000	0.500	1.000	1.000	1.000	1.000
33.02	0.910	0.500	0.918	1.001	0.918	1.009
38.10	0.825	0.500	0.826	1.000	0.826	1.001
43.18	0.739	0.500	0.732	0.998	0.731	0.989
48.26	0.652	0.500	0.621	0.994	0.617	0.946
53.34	0.519	0.800	0.519	0.992	0.515	0.993
58.42	0.428	0.800	0.414	0.993	0.411	0.960
63.50	0.343	0.800	0.314	0.998	0.313	0.913

Base Cal. : Anisotropic diffusion calculation

T.C. : Transport Correction factor.

Corrected : Result corrected by T.C.

Table 5.10 Fission Rate Ratios in FCA Assembly XII-2

Fission Rate Ratio	Region	Position (cm)	Experiment	Calculation	C/E
$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	I.B* Core	2.54	0.00533 \pm 6.0%	0.00590	1.107
		27.94	0.02115 \pm 3.7%	0.02133	1.008
$^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	I.B* Core	2.54	0.844 \pm 3.2%	0.8374	0.993
		27.94	0.889 \pm 3.2%	0.8948	1.007
$^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$	I.B* Core	2.54	0.0591 \pm 4.8%	0.05473	0.926
		27.94	0.1594 \pm 4.8%	0.1491	0.935

* Internal Blanket

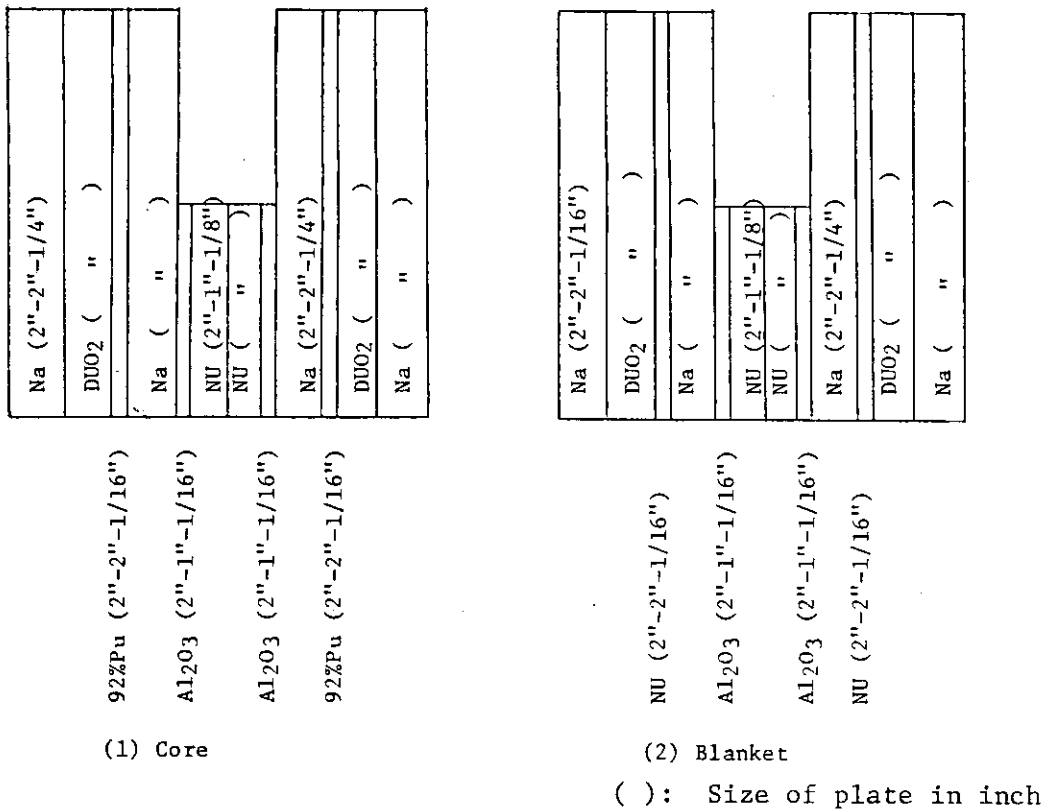


Fig. 5.1 Plate Configuration in Central Drawer for Fission rate Measurement at FCA XII-2 Assembly

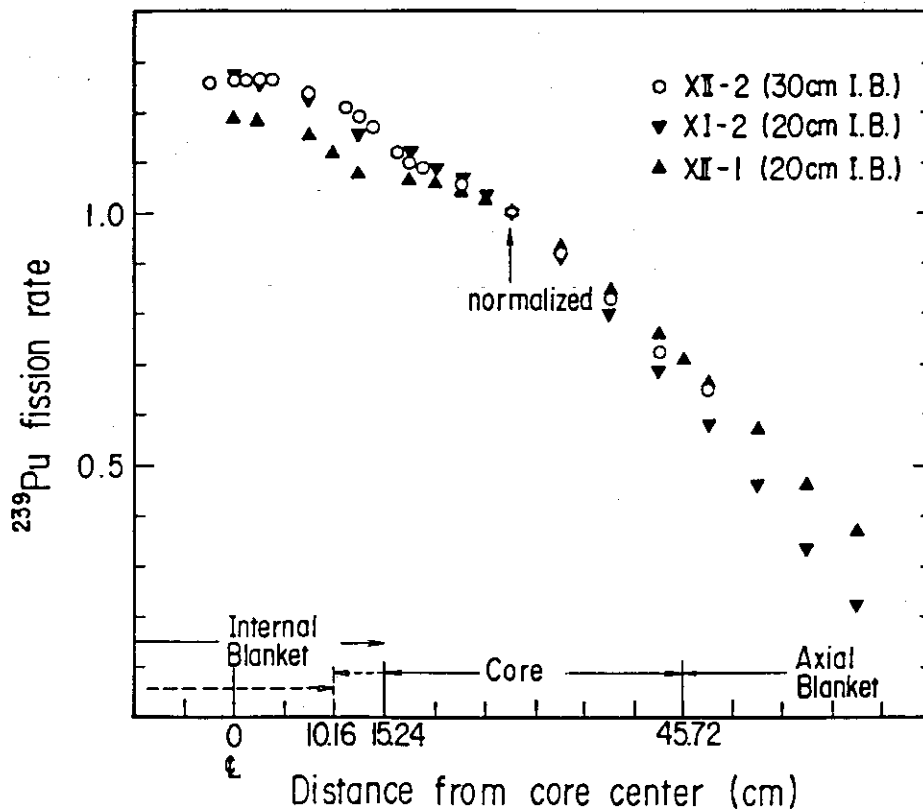


Fig. 5.2 Comparison of ²³⁹Pu Fission Rate Distributions in FCA Assemblies XII-2, XI-2 and XII-1

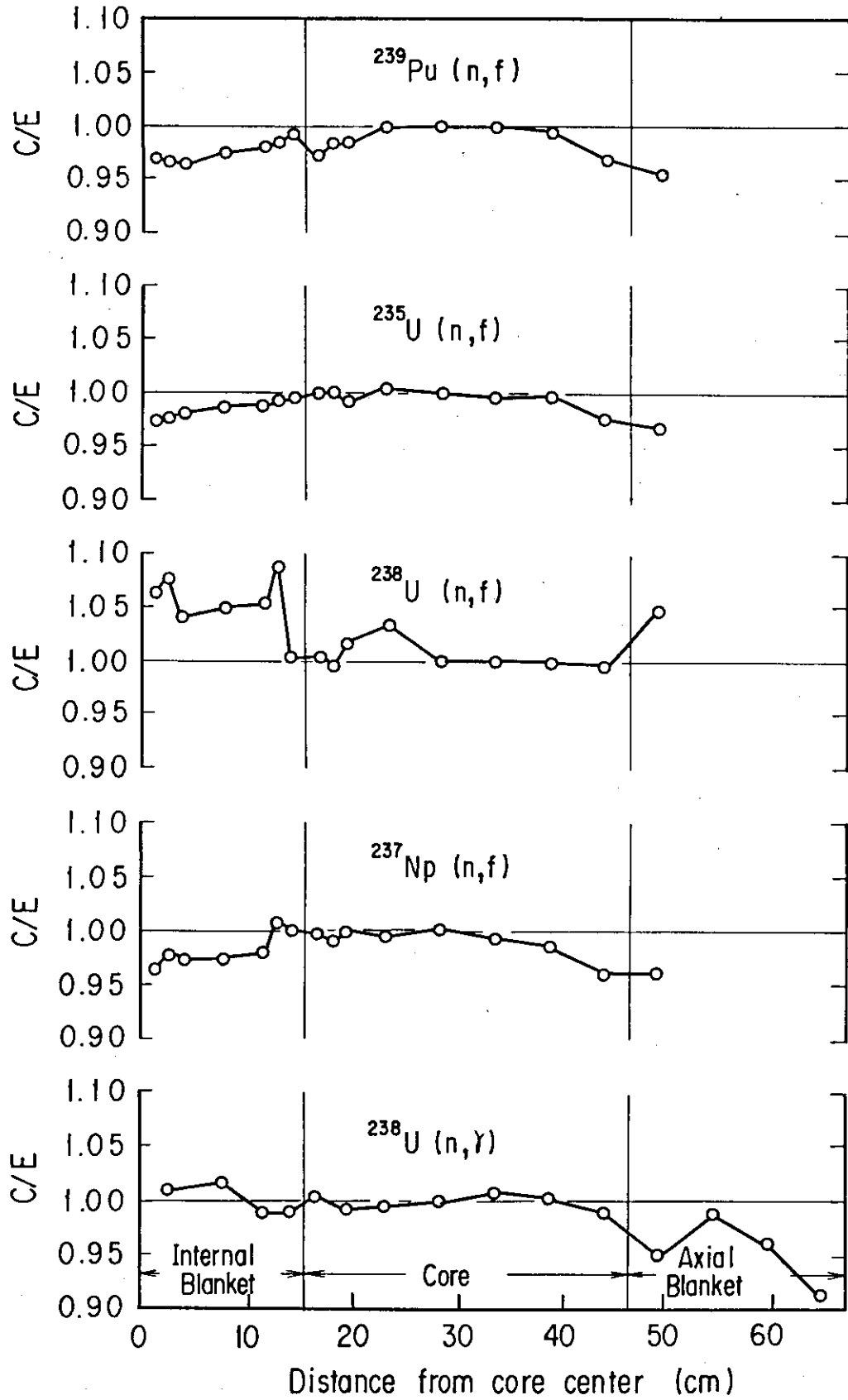


Fig. 5.3 C/E Values of Axial Reaction Rate Distribution in FCA Assembly XII-2

6. サンプル反応度値とナトリウムボイド反応度値

軸方向非均質炉心の核特性を調べる目的で、92%Pu, DUO₂, SUS, 天然B₄Cの各サンプルについてサンプル反応度値およびナトリウムボイド反応度値の中心軸方向分布を測定した。これらの分布は体系が対称であることを考慮して、固定側1/2集合体でのみ測定を行った。ここでは、これらの測定方法および結果、さらに一次摂動法を用いて解析した結果について述べる。

6.1 サンプル反応度値の測定

各物質のサンプル反応度値は、92%Pu板(核分裂性プルトニウムが92W/0, 以下Pu(92))に対しては1/2 SUS板(2"×1"×1/16", SUS重量15.5g)との置換反応度, その他の物質についてはボイド缶(2"×2"×1/4", SUS重量24.05g)との置換反応度としてそれぞれ測定した。さらに、1/2 SUS板, ボイド缶およびPu板, B₄C板の被覆材等のSUSの反応度値を, SUS サンプル反応度値測定結果から求め, 上記の置換反応測定結果に対して補正を行い, 正味のサンプル反応度値を求めた。

測定では, Pu サンプル反応度値では固定側1/2集合体の中心引出し(F126-26)1本の1セル当り2枚の燃料板をステンレス板に置換し, 内部および軸方向ブランケット部では酸化アルミニウム板2枚の位置での燃料板とステンレス板の置換反応度を測定した。これらの各測定点での測定精度は±0.003ρ₀(±0.00016%ΔK/K)であり, これは内部ブランケットから炉心中央部までの測定値に対して2%以下の値である。

DUO₂ サンプル反応度値では, 中心引出しをはさむ上下および左右合計4本の引出しで, 1パック当りDUO₂板2枚ボイド缶(SUS製)に置換した場合の反応度値を求めた。またSUS サンプル反応度値では, DUO₂ サンプル反応度値測定位置のDUO₂板をSUS板に置き換え, これとボイド缶との置換反応度を求めた。これらの測定誤差は, ±0.004ρ₀(±0.00021%ΔK/K)であった。

B₄C サンプル反応度値では, 中心引出し(F126-26)1本の1セルごとのNa板装置において, 天然B₄C板2枚とボイド缶の置換反応を求めた。

これらサンプル反応度値測定位置をFig. 6.1に示す。また, 各サンプル反応度値軸方向分布測定結果をTable 6.1に示す。

6.2 サンプル反応度値の解析

サンプル反応度値の解析は軸方向分布については, 実験体系を模擬した2次元R-Z計算モデルを用い, 拡散理論に基づく摂動計算により反応度値を計算し, これに輸送補正を加えた。使用した群定数は70群である。Pu(92)およびB₄Cサンプルの計算では, 引出し1本に相当する領域を計算体系の中心部に設定し, これを1パックごとに区分して, それぞれの区分で反応

度値を求めた。DUO₂およびSUSサンプルについては4本の引出しにより測定を行ったので、周辺引出しを含む9本の引出しに相当する領域で計算を行いこれに体積比4/9を乗じて反応度値を求めた。置換したサンプルの実効断面積は、セル計算により求めたが、計算体系は物質板を置換したセルの両側を標準引出しの組成を均質にした領域ではさんだスーパーセルモデルを使用した。これは置換した引出しは周囲を標準引出しで囲まれており、この影響をセル計算において考慮するためである。

輸送補正係数は2次元R-Z体系と25群群定数を用い、S_N法による体系計算と摂動計算を行い、その結果と25群拡散計算の結果から求めた。PU(92)サンプル反応度値軸方向分布の結果をTable 6.2に示す。計算値はPU(92)の反応度値を過少に評価する傾向があり、その値は炉心部、内部ブランケット部ともに14～15%である。輸送効果は炉心部で約5%、内部ブランケットで9～10%の補正值であり、内部ブランケットでの補正効果が大きい。

次にDUO₂サンプル反応度値軸方向分布の結果をTable 6.3に示す。計算結果は、DUO₂サンプル反応度値を内部ブランケットにおいて11～12%過少に評価し、炉心部において6～7%過少に評価する。輸送補正は炉心ではほとんど影響が無く、内部ブランケットで5～7%である。

SUSサンプル反応度値の計算値は内部ブランケット1～3Zと炉心4Zで9～12%実験値を過少評価し、4Zを除く炉心部では±3%の範囲で一致する。結果をTable 6.4に示す。B₄Cサンプル反応度値の計算値は内部ブランケットにおいて1～5%過少に評価し、炉心部において6～13%過少評価する。結果をTable 6.5に示す。

XII-2集合体の各サンプル反応度値のC/E値は、XI-2とXII-1集合体(内部ブランケット厚20cm)のC/E値の軸方向分布形と同じ傾向を示すが、過少評価幅が6～10%拡大している。内部ブランケットと炉心部のC/E値の相異は、XI-2、XII-1、XII-2とも同様な相異幅を示し、内部ブランケットと炉心部とのC/E値の相異に対する、内部ブランケット厚を変えたことによる影響は小さい。従って、この過少評価幅の拡大は、中心軸チャンネル全体に対する特性と考えられる。原因の1つとして、次の2点より、径方向の体系計算の計算精度の不確かさがあげられる。

- 1) XII-1集合体(XII-2と同じゾーンタイプ模擬集合体)における径方向サンプル反応度値のC/E値(計算手法はXI-2と同一)は、ドライバー領域で1～3%過大評価し、中心軸領域で5～10%過少評価する²⁾
- 2) XII-2集合体は、他の集合体に比しドライバー領域の反応の持ち分が大きく(XI-2、XII-1は、炉心の2倍、XII-2は炉心の3倍)、1)の傾向を強調する可能性がある。

これは、ゾーンタイプ模擬方式に依存する問題であり、ドライバーと炉心間の中性子の流れ込みの評価手法の精度向上が必要と思われる。

6.3 ナトリウムボイド反応度値の測定

ナトリウムボイド反応度値は、固定側1/2集合体の中心引出し(F126-26)を含む3行×3列の9本の引出しを用いて、1セル当たり4枚のナトリウム板をボイド缶に置換することに

よる反応度変化として測定された。ナトリウム除去量は1セル当り45.2 gである。ナトリウム板はステンレス鋼で被覆され、その被覆缶重量は1枚当り24.13 gである。一方、ボイド缶の重量は、1枚当り24.05 gである。従って、ナトリウム板をボイド缶に置換することによるステンレス鋼被覆材の測定値に対する影響は、その重量がほぼ等しいことから無視した。測定は、内部ブランケットから炉心部まで1セル毎に行い、軸方向分布を求めた。その結果をTable 6.1に示す。測定精度は、 $\pm 0.005 \rho_0$ (0.00026% $\Delta K/K$)である。これは一回の測定に9本の引出しを取り扱うことによりサンプル反応度値の測定精度より少し悪い。

6.4 ナトリウムボイド反応度値の解析

1パックごとに測定したボイド反応度値の軸方向分布はボイドが小領域であることから1次摂動計算によりボイド反応度値を計算した。ナトリウム板をステンレスボイド板に置換した領域の実効断面積は、基準体系の場合と同様、衝突確率法に基づくセル計算により求めた。セルモデルにおいてステンレスボイド板の領域には、被覆のステンレスをボイドを含む板全体の体積で均質化した原子数密度を適用した。体系計算は実験体系を模擬した2次元R-Z計算モデルと、70群実効断面積を用いた拡散計算により行った。サンプル反応度値と同様にボイド反応度値は拡散理論に基づく体系計算により基準値を求め、これに輸送効果の補正を加えた。補正計算では25群に縮約した実効断面積を用い S_N 法に基づく体系計算と摂動計算により、ボイド反応度値を計算し、これと25群拡散計算の結果から補正值を求めた。計算値は実験値と比較するため、先に求めた係数を用いて、 $\Delta K/K$ 単位から ρ_0 単位に変換した。ナトリウムボイド反応度値の解析結果をTable 6.6に示す。計算値は内部ブランケット部で約13% (ボイド反応度値を) 過少に評価し、炉心部で約7%程度過大に評価する結果となった。従って、C/E値の向上の一つとして、炉心から内部ブランケットへの中性子の流れ込みを考慮した実効断面積作成手法等の評価が必要と思われる。輸送補正值についてみると内部ブランケットで計算値を下げる方向に、炉心部で計算値を上げる方向に作用する。これは、内部ブランケット厚20 cmのXI-2及びXII-1集合体の場合と同じ傾向にある。

XII-2のC/E値は、XI-2とXII-2集合体のC/E値に比べ、内部ブランケット(境界除く)と炉心(境界と反応度値が小さい点を除く)を通じ6~7%小さな値を示す。これは、サンプル反応度値と同様、中心軸チャンネル全体に対する特性と考えられ、径方向の体系計算の計算精度の不確かさが原因の1つと思われる(サンプル反応度値解析参照)。

Table 6.1 Axial Distribution of Sample Worths and Sodium Void Worths at FCA XII-2 Assembly

unit : $\rho_0(0.0520\% \Delta K/K)$

Region	Position (cm)*	Sample (weight)					
		92% Pu (70.2g)	DUO (1123.2g)	Nat.B C (58.2g)	SUS (803.2g)	Na void (407.2g)	
Internal blanket	1Z (2.54)	0.245+0.003	-0.242+0.004	-0.363+0.003	-0.077+0.004	0.125+0.005	
	2Z (7.62)	0.242+0.003	-0.251+0.004	-0.368+0.003	-0.079+0.004	0.121+0.005	
	3Z (12.70)	0.236+0.003	-0.256+0.004	-0.421+0.003	-0.085+0.004	0.110+0.005	
Core	4Z (17.78)	0.230+0.003	-0.258+0.004	-0.461+0.003	-0.087+0.004	0.100+0.005	
	5Z (22.86)	0.214+0.003	-0.238+0.004	-0.457+0.003	-0.075+0.004	0.078+0.005	
	6Z (27.94)	0.199+0.003	-0.200+0.004	-0.432+0.003	-0.062+0.004	0.056+0.005	
	7Z (33.02)	0.169+0.003	-0.150+0.004	-0.352+0.003	-0.037+0.004	0.020+0.005	
	8Z (38.10)	0.139+0.003				-0.013+0.005	
	9Z (43.18)	0.103+0.003					

* Distance from core center to sample center

Table 6.2 Calculated and C/E Value for Axial Pu(92) Sample Worth Distribution
in FCA Assembly XII-2 (Unit : ρ_0)

Position (cm)	Base Cal.	T.C.	Corrected		Total	C/E	C-E
			Non-Leak.	Leak			
1Z (2.54)	0.234	0.900	0.211	0.000	0.211	0.860	-0.034
2Z (7.62)	0.231	0.903	0.209	-0.000	0.209	0.862	-0.033
3Z (12.70)	0.225	0.914	0.206	-0.000	0.205	0.871	-0.031
4Z (17.78)	0.209	0.942	0.197	-0.001	0.196	0.854	-0.034
5Z (22.86)	0.198	0.953	0.189	-0.000	0.189	0.881	-0.025
6Z (27.94)	0.180	0.954	0.172	0.000	0.172	0.865	-0.027
7Z (33.02)	0.154	0.952	0.146	0.001	0.147	0.869	-0.022
8Z (38.10)	0.123	0.955	0.116	0.002	0.118	0.847	-0.021
9Z (43.18)	0.092	0.940	0.084	0.002	0.087	0.841	-0.016

$\rho_0 = 0.0520$ % Δ K/K

Base Cal. : First order perturbation calculation based on diffusion theory.

T.C. : Transport Correction factor.

Table 6.3 Calculated and C/E Values for Axial DUO₂ Sample Worth Distribution
in FCA Assembly XII-2 (Unit : ρ_0)

Position (cm)	Base Cal.	T.C.	Corrected		Total	C/E	C-E
			Non-Leak.	Leak			
1Z (2.54)	-0.231	0.931	-0.217	0.001	-0.215	0.890	0.027
2Z (7.62)	-0.235	0.939	-0.223	0.002	-0.221	0.880	0.030
3Z (12.70)	-0.238	0.950	-0.228	0.002	-0.226	0.884	0.030
4Z (17.78)	-0.243	0.990	-0.231	-0.010	-0.241	0.933	0.017
5Z (22.86)	-0.225	0.991	-0.216	-0.007	-0.223	0.937	0.015
6Z (27.94)	-0.185	1.017	-0.193	0.005	-0.188	0.941	0.012
7Z (33.02)	-0.128	1.089	-0.164	0.025	-0.139	0.928	0.011

$\rho_0 = 0.0520$ % Δ K/K

Base Cal. : First order perturbation calculation based on diffusion theory.

T.C. : Transport Correction factor.

Table 6.4 Calculated and C/E Values for Axial SUS Sample Worth Distribution in FCA Assembly XII-2 (Unit : ρ_0)

Position (cm)	Base Cal.	T.C.	Corrected		Total	C/E	C-E
			Non-Leak.	Leak			
1Z (2.54)	-0.075	0.911	-0.069	0.001	-0.068	0.889	0.009
2Z (7.62)	-0.076	0.913	-0.070	0.000	-0.070	0.883	0.009
3Z (12.70)	-0.081	0.932	-0.073	-0.002	-0.075	0.884	0.010
4Z (17.78)	-0.079	1.000	-0.072	-0.007	-0.079	0.913	0.008
5Z (22.86)	-7.074	1.031	-0.071	-0.006	-0.076	1.016	-0.001
6Z (27.94)	-0.056	1.088	-0.064	0.004	-0.060	0.974	0.002
7Z (33.02)	-0.026	1.398	-0.054	0.018	-0.036	0.967	0.001

$$\rho_0 = 0.0520 \quad \% \Delta K/K$$

Base Cal. : First order perturbation calculation based on diffusion theory.

T.C. : Transport Correction factor.

Table 6.5 Calculated and C/E Values for Axial B₄C Sample Worth Distribution in FCA Assembly XII-2 (Unit : ρ_0)

Position (cm)	Base Cal.	T.C.			Total	C/E	C-E
			Non-Leak.	Leak			
1Z (2.54)	-0.371	0.932	-0.346	0.000	-0.346	0.952	0.017
2Z (7.62)	-0.390	0.935	-0.365	0.000	-0.365	0.991	0.003
3Z (12.70)	-0.424	0.946	-0.401	-0.001	-0.401	0.953	0.020
4Z (17.78)	-0.452	0.957	-0.431	-0.002	-0.433	0.939	0.028
5Z (22.86)	-0.433	0.966	-0.417	-0.002	-0.419	0.916	0.038
6Z (27.94)	-0.391	0.966	-0.378	0.001	-0.377	0.873	0.055
7Z (33.02)	-0.327	0.966	-0.321	0.005	-0.316	0.897	0.036

$$\rho_0 = 0.0520 \quad \% \Delta K/K$$

Base Cal. : First order perturbation calculation based on diffusion theory.

T.C. : Transport Correction factor.

Table 6.6 Calculated and C/E Values for Axial Sodium Void Worth
Distribution in FCA Assembly XII-2

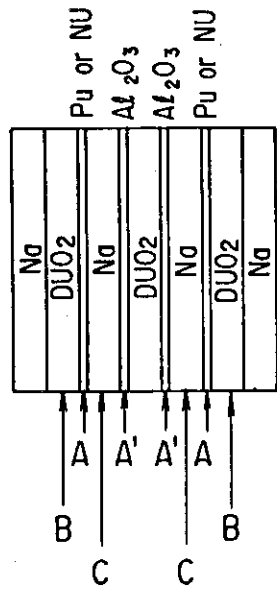
(Unit : ρ_0)

Position (cm)	Base Cal.	T.C.	Corrected			C/E	C-E
			Non-Leak.	Leak	Total		
1Z (2.54)	0.120	0.908	0.110	-0.001	0.109	0.872	-0.016
2Z (7.62)	0.115	0.906	0.107	-0.002	0.105	0.864	-0.016
3Z (12.70)	0.110	0.914	0.102	-0.002	0.100	0.912	-0.010
4Z (17.78)	0.092	0.981	0.084	0.006	0.090	0.900	-0.010
5Z (22.86)	0.079	1.048	0.076	0.007	0.083	1.059	0.005
6Z (27.94)	0.055	1.106	0.065	-0.005	0.061	1.080	0.005
7Z (33.02)	0.020	1.472	0.055	-0.025	0.030	1.495	0.010
8Z (38.10)	-0.018	0.221	0.044	-0.048	-0.004	0.312	0.009

$$\rho_0 = 0.0520 \quad \% \Delta K/K$$

Base Cal. : First order perturbation calculation based on diffusion theory.

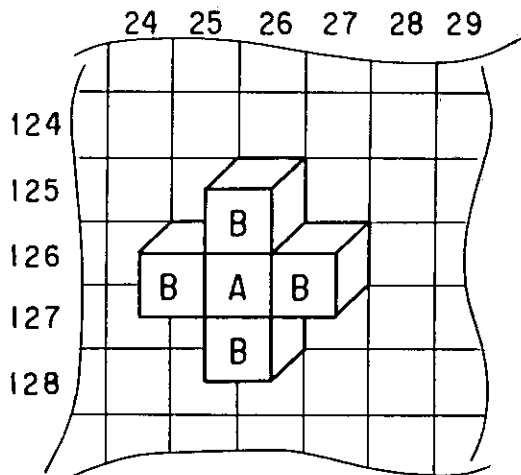
T.C. : Transport Correction factor.



Sample material used

- Pos. (A) for core : 2* 92% Pu (1/16)
- Pos. (A') for I.B. : 2* 92% Pu (1/16)
- Pos. (B) : 2* DUO₂ (1/4)
2* SUS (1/4)
- Pos. (C) : 2* B₄C (1/4)

(a) Sample Position in a Drawer and Plate Samples used for Substitution Experiment



- Pos. (A) : Pu Sample Worth
B₄C Sample Worth
- Pos. (B) : DUO₂ Sample Worth
SUS Sample Worth

(b) Drawer Position used for Sample Reactivity Worth Measurement

Fig. 6.1 Sample Position for Sample Reactivity Worth Measurement in FCA Assembly XII-2

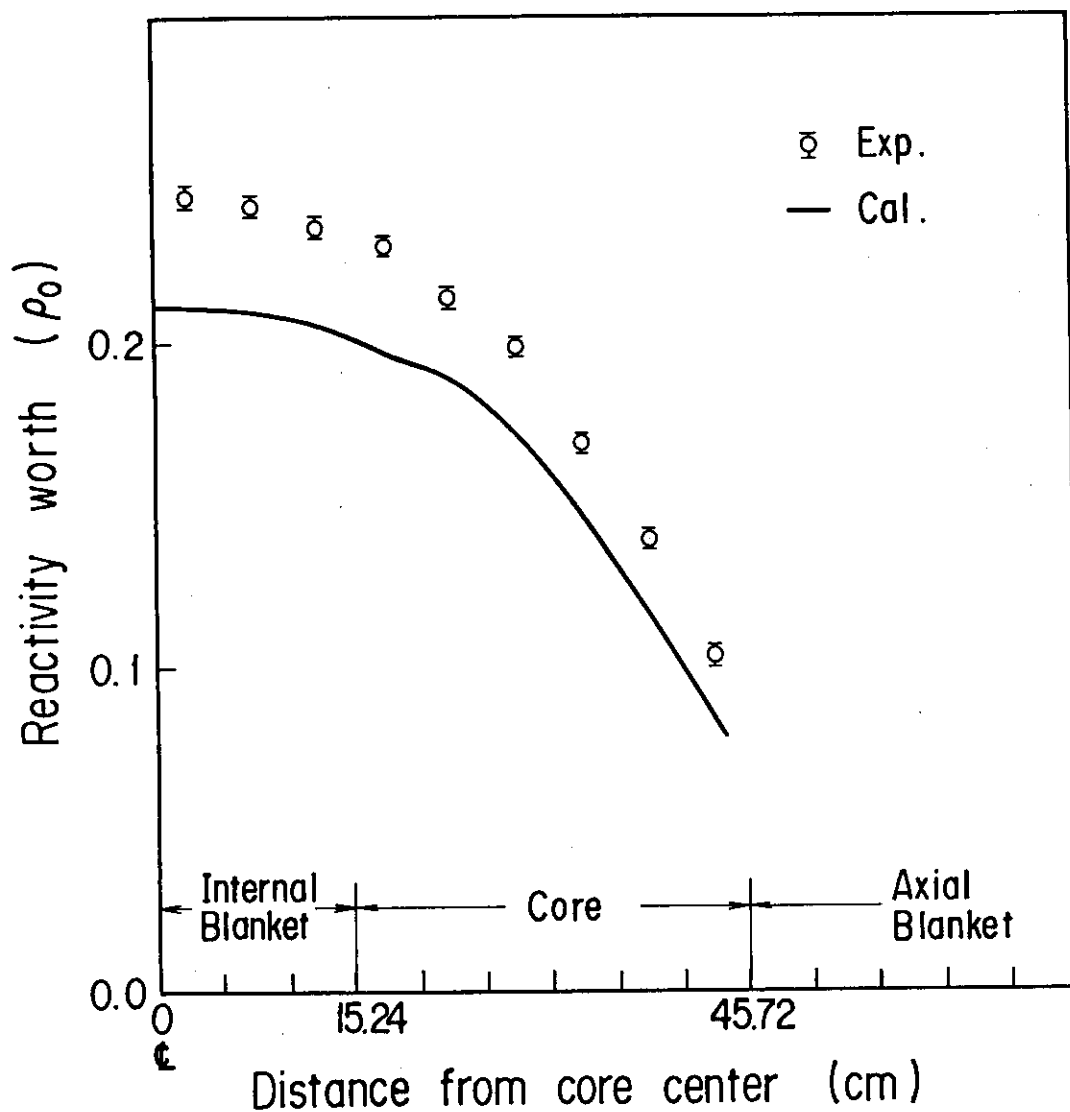


Fig. 6.2 Axial Distribution of Pu Sample Worth in FCA Assembly XII-2

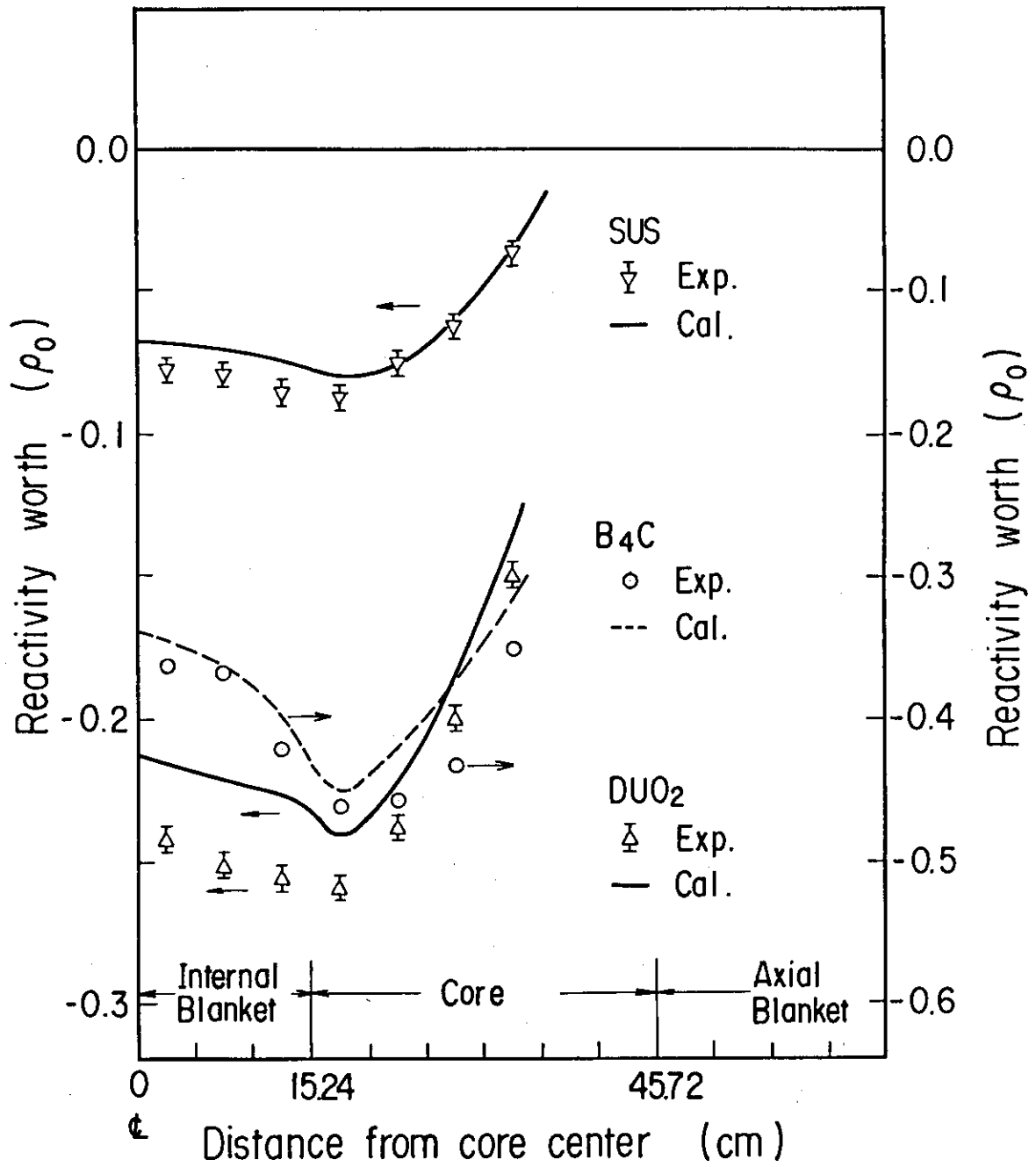


Fig. 6.3 Axial Distributions of Sample Worths in FCA Assembly XII-2

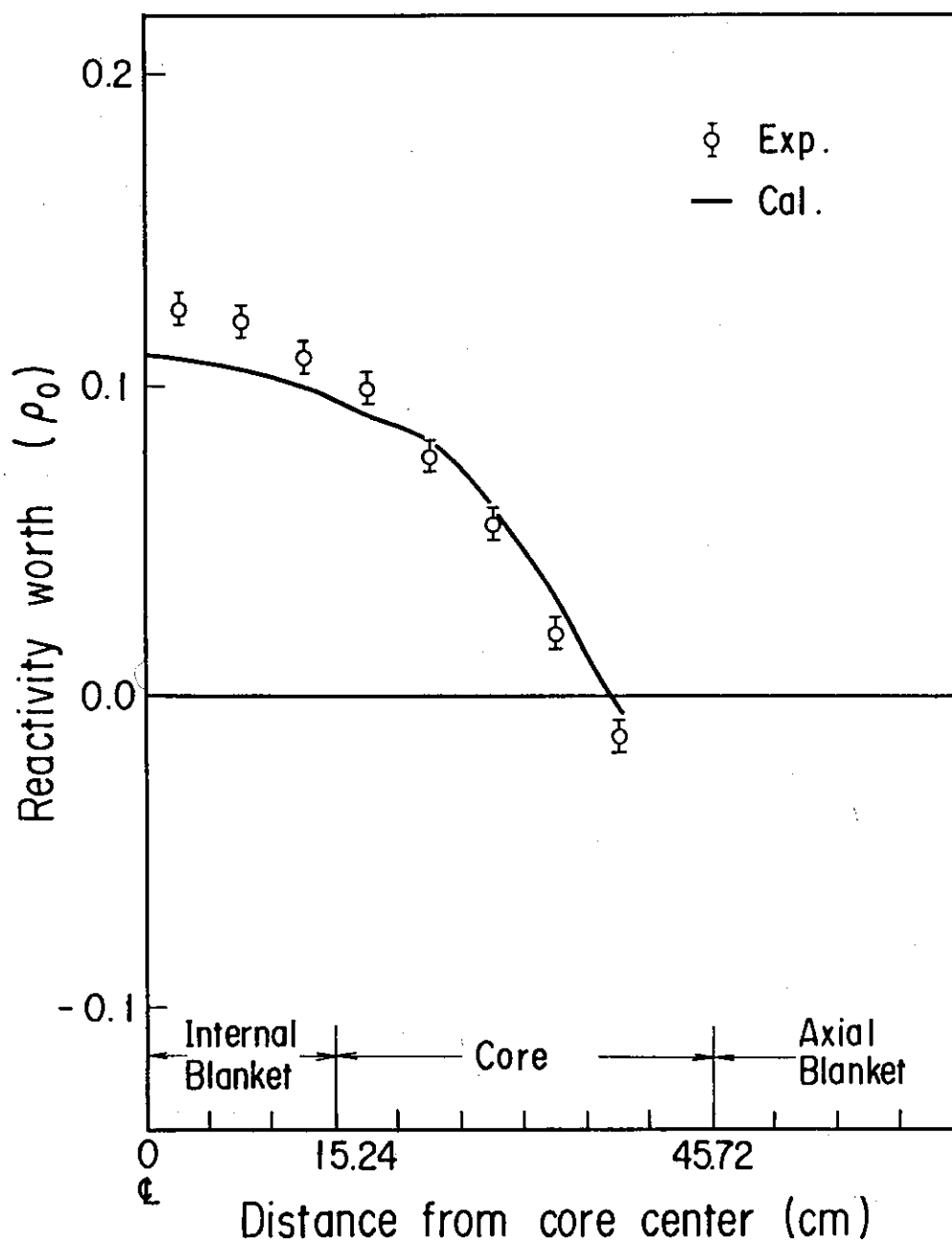


Fig. 6.4 Axial Distribution of Na Void Worth in FCA Assembly XII-2

7. ま と め

FCA XII-2 集合体は、軸方向非均質炉心模擬実験計画の第3炉心であり、内部ブランケットを厚くしたことによる軸方向核特性への影響及び計算精度の確証を目的とする体系である。本集合体では、臨界性・反応率分布と核分裂率比・サンプル及びナトリウムボイド反応度値分布の測定を行った。実験解析は、一連の軸方向非均質模擬炉心と同様、JENDL-2を用いた原研における標準的な解析手法によって行った。

臨界性に関してはドライバーの寄与が大きい軸方向非均質炉心の特性を直接には議論することができないが、これまでの内部ブランケット厚20 cmの模擬炉心(XI-2, XII-1)でのC/E値が1.006であったのに対して、本集合体(内部ブランケット厚30 cm)でのC/E値が1.007と計算が臨界性を過大に評価する程度が若干増した。

反応率分布では、炉心領域で計算値と実験値は良い一致を示すが、内部ブランケット領域で計算が1~2%過少評価した。この傾向は、一連の軸方向非均質模擬炉心と同様であり、内部ブランケット厚の増加によるC/E値の悪化はみられなかった。また、核分裂率比でも、内部ブランケット増加にともなうC/E値の悪化はみられなかった。

サンプル反応度値については、そのC/E軸方向分布は一連の軸方向非均質集合体のそれと同じ傾向を示すが、過少評価幅が6~10%増加している。この過少評価幅の原因の1つとして、計算ではドライバー領域のテスト領域への影響(模擬体系固有の問題)評価が不十分であることが考えられるが、詳細についてはここでは詰められなかった。今後、この原因の詳細について、軸方向非均質模擬炉心の総合的な比較検討を行っていく必要がある。

謝 辞

本実験計画の立案および解析において多くの助言をいただいた日立エネルギー研究所三田敏男氏および原研高速炉物理研究室吉田弘幸室長に感謝の意を表します。また、実験遂行に当りFCA管理機関員の皆様の協力を深く感謝いたします。

本研究の一部は、動力炉核燃料開発事業団からの委託により行われたものである。

7. ま と め

FCA XII-2 集合体は、軸方向非均質炉心模擬実験計画の第3炉心であり、内部ブランケットを厚くしたことによる軸方向核特性への影響及び計算精度の確証を目的とする体系である。本集合体では、臨界性・反応率分布と核分裂率比・サンプル及びナトリウムボイド反応度値分布の測定を行った。実験解析は、一連の軸方向非均質模擬炉心と同様、JENDL-2を用いた原研における標準的な解析手法によって行った。

臨界性に関してはドライバーの寄与が大きいため軸方向非均質炉心の特性を直接には議論することができないが、これまでの内部ブランケット厚20cmの模擬炉心(XI-2, XII-1)でのC/E値が1.006であったのに対して、本集合体(内部ブランケット厚30cm)でのC/E値が1.007と計算が臨界性を過大に評価する程度が若干増した。

反応率分布では、炉心領域で計算値と実験値は良い一致を示すが、内部ブランケット領域で計算が1~2%過少評価した。この傾向は、一連の軸方向非均質模擬炉心と同様であり、内部ブランケット厚の増加によるC/E値の悪化はみられなかった。また、核分裂率比でも、内部ブランケット増加にともなうC/E値の悪化はみられなかった。

サンプル反応度値については、そのC/E軸方向分布は一連の軸方向非均質集合体のそれと同じ傾向を示すが、過少評価幅が6~10%増加している。この過少評価幅の原因の1つとして、計算ではドライバー領域のテスト領域への影響(模擬体系固有の問題)評価が不十分であることが考えられるが、詳細についてはここでは詰められなかった。今後、この原因の詳細について、軸方向非均質模擬炉心の総合的な比較検討を行っていく必要がある。

謝 辞

本実験計画の立案および解析において多くの助言をいただいた日立エネルギー研究所三田敏男氏および原研高速炉物理研究室吉田弘幸室長に感謝の意を表します。また、実験遂行に当りFCA管理機関員の皆様の協力を深く感謝いたします。

本研究の一部は、動力炉核燃料開発事業団からの委託により行われたものである。

参考文献

- 1) 飯島 進, 他: “FCAによる大型軸方向非均質炉心の炉物理研究(I)”, JAERI-M 84-076 (1984)
- 2) 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)”, JAERI-M 85-045 (1985)
- 3) Takano H., et al.: “Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Coustants Set JFS-3-J2”, JAERI-M 82-135 (1982)
- 4) Nakagawa M., et al.: “SLAROM”, JAERI-1294 (1984)
- 5) 飯島 進, 他: “CITATION-FBR” (公刊予定)
- 6) 飯島 進, 他: “PERKY”, JAERI-M 6993 (1977)
- 7) Lathrop K., et al.: “TWOTRAN-II”, LA-4848-MS (1973)
- 8) 小坪龍男, 大部 誠: “箔実験におけるデータ処理コードシステム”, JAERI-M 84-147 (1984)
- 9) 小坪龍男: “小型計算機による γ 線スペクトル解析コード GSFIT”, JAERI-M 84-104 (1984)

Appendix 1 プレート・データ

92% fissile plutonium (92% Pu)

Type	2-2-1-/16			
Weight	<u>Meet</u>		<u>Can</u>	
	^{239}Pu	32.166 g	Cr	1.774 g
	^{240}Pu	2.835 g	Fe	7.374 g
	^{241}Pu	0.253 g *	Ni	1.002 g
	Al	0.520 g		

* determined on 1st. January, 1973.

20% Enriched uranium (20% EU)

Type	2-2-1/8		
Weight	^{235}U	29.603 g	
	^{238}U	119.00 g	

Depleted uranium oxide (DUO_2)

Type	2-2-1/4		
Weight	U (total)	140.4 g	
	^{235}U	0.200 w/o	

Depleted uranium block (DUB)

Type	2-2-2		
Weight	U (total)	4,926 g	
	^{235}U	0.206 w/o	

Sodium (Na)

Type	2-2-1/4		
Weight	Na	11.310 g	
	SS	24.13 g	
	Cr	18.10 w/o	
	Fe	72.15 w/o	
	Ni	9.75 w/o	

Aluminium oxide (Al_2O_3)

Type		2-2-1/16	2-2-1/8
Weight	Al_2O_3	14.74 g	28.51 g

93% Enriched uranium (93% EU)

Type	2-2-1/16	
Weight	^{235}U	68.282g
	^{238}U	5.228g

Natural uranium (NU)

Type	^{235}U	1.070g
Weight	^{238}U	149.4g

Stainless steel (SS)

Type	2-2-1/4	
Weight	SS	124.45g
	Cr	18.91w/o
	Fe	71.75w/o
	Ni	9.34w/o

Appendix 2 特性試験

A.2.1 制御棒較正

制御棒較正の際の基準となる反応度 ρ_0 の倍増時間測定データを Table A. 2.1 に、臨界法による制御棒較正データを Table A. 2.2 に示す。倍増時間として、炉出力 0.2×10^{-5} A から 0.8×10^{-5} A (ch. No.6) までの値

$$T_d = 56.5 \pm 0.3 \quad (\text{sec})$$

を採用した。

C/R #1 の制御棒較正曲線とその勾配 $\Delta\rho/\Delta X$ を Fig. A. 2.1 に示す。勾配は連続した4点の測定データを3次曲線にフィッティングを行って求めた。制御棒位置 100 mm から 200 mm までは較正曲線は直線に極めて近い。C/R #2 も同様の結果を得た。

Table A.2.1 Doubling Time for the Standard Reactivity ρ_0

Power Range (A) (ch. 6)	Doubling Time (sec)
$(0.2 \rightarrow 0.4) \times 10^{-6}$	53.0 / 53.0
$(0.3 \rightarrow 0.6) \times 10^{-6}$	54.6 / 54.4
$(0.4 \rightarrow 0.8) \times 10^{-6}$	55.0 / 55.2
$(0.2 \rightarrow 0.4) \times 10^{-5}$	56.2 / 56.4
$(0.3 \rightarrow 0.6) \times 10^{-5}$	56.6 / 56.2
$(0.4 \rightarrow 0.8) \times 10^{-5}$	56.8 / 56.8

Table A.2.2 Control Rod Calibration by Substitution Method

step	C/R #1 Pos. (mm)	C/R #2 Pos. (mm)	S/R #3 Pos. (mm)
1	0.52	262.53	0.06
2	↑	212.49	50.01
3	51.14	↑	0.05
4	↑	166.65	50.00
5	95.97	↑	0.06
6	↑	123.75	50.01
7	139.34	↑	0.05
8	↑	82.11	49.99
9	183.02	↑	0.05
10	↑	40.70	49.99
11	228.17	↑	0.04
12	224.17	0.21	50.01
13	272.69	↑	0.04

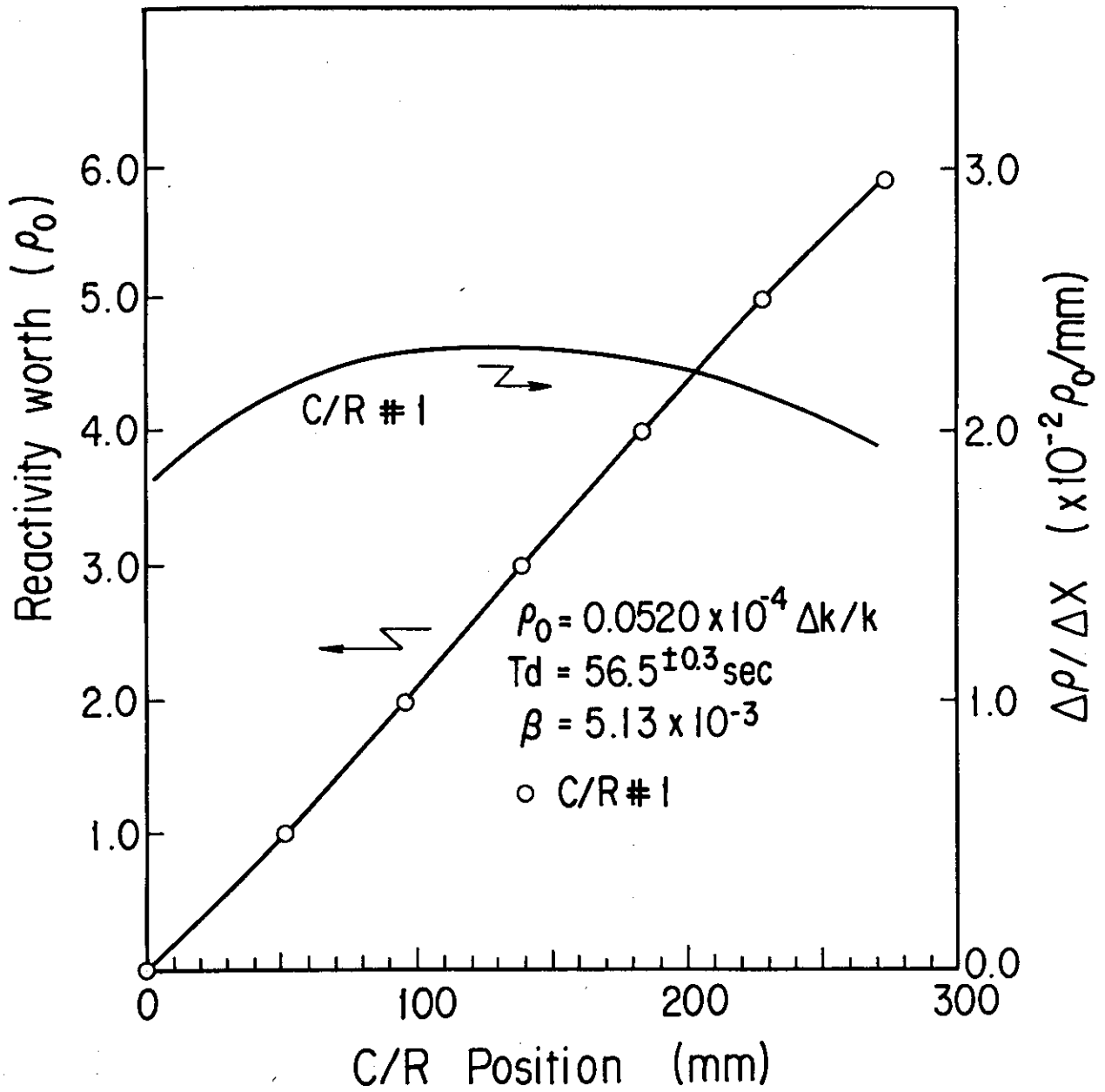


Fig. A.2.1 C/R Calibration Curve in FCA Assembly XII-2

A.2.2 密着面間隙効果

1/2集合体が密着した状態では、固定側及び移動側の引出し前端面間には約(0.5 ± 0.3) mmの間隙があり、また、引出端面に厚さ0.8 mmの不銹鋼が存在するために、両1/2集合体が密着状態にある時、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の補正項目となる。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、両1/2集合体間の間隙を0.25 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mmと変化させることにより、密着面間隙効果を測定した。結果をTable A. 2.3, Fig.A. 2.2に示す。間隙効果 f_G として、間隙0.25 mmの測定値及びRef. 2の測定値より以下の値を得た。

$$\begin{aligned} f_G &= -0.112 (\pm 0.005) \% \div 0.128 (\pm 0.015) \text{ mm} \\ &= -0.875 \pm 0.110 \quad \rho_0 / \text{mm} \\ &= (-0.0455 \pm 0.0057) \% \Delta K / K / \text{mm} \end{aligned}$$

Table A.2.3 Critical Data on Gap Effect Measurements at FCA Assembly XII-2

Item	C/R #1 Pos. (mm)	C/R #2 Pos. (mm)	Temp. (°C)	Gap. (mm)
Ref. 1	0.52	263.54	19.27	-0.059
2.00	0.52	169.24	19.42	1.834
1.50	0.52	193.89	19.44	1.332
1.00	0.52	215.86	19.41	0.888
0.50	0.52	241.72	19.28	0.376
0.25	0.52	257.74	19.16	0.064
Ref. 2	0.52	264.53	19.02	-0.064

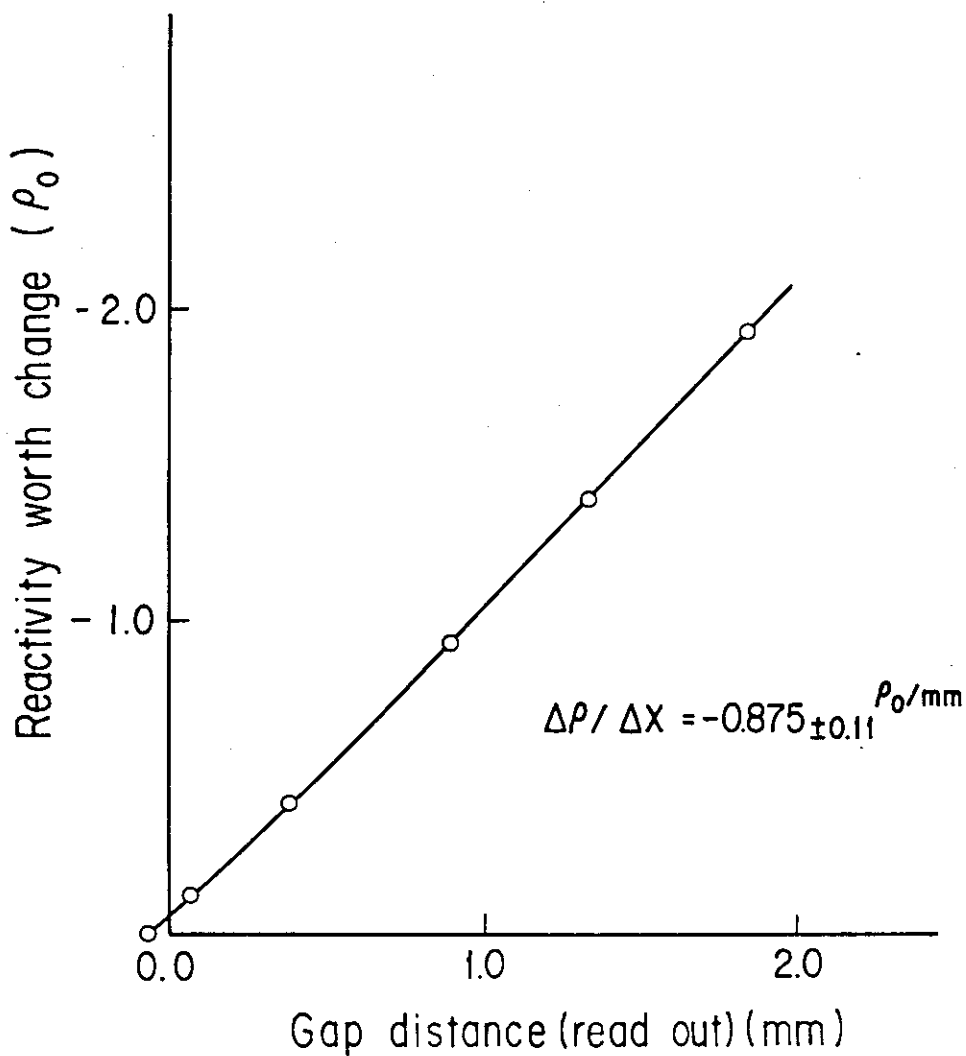


Fig. A.2.2 Gap Effect in FCA Assembly XII-2

A.2.3 温度効果

Puを燃料として装荷された炉心では、Puの α 崩壊による発熱が併い、FCAでは両1/2集合体に対して、空気により強制冷却を行うことにより、この発熱による炉心温度上昇を排除している。しかし、密着の前後では空気の流れが変わり、冷却条件が変わるため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。上昇速度温度ピーク値、ピーク値に達する時間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、各測定点とも下降し始める。

1.5時間から3時間

炉内の温度分布がほぼ一定となり、下降速度は大きく(0.5~0.05℃/hr)ほぼ一様に下降する。

3時間以降

下降速度はほぼ一定(0.04~0.02℃/hr)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。

温度係数の測定は、上述の密着後1.5時間から3時間の時間経過中の温度変化による臨界点のドリフト測定より求めた。密着後からの臨界点の変化を制御棒位置変化として捕え、その結果をFig. A. 2.3に示す。この測定値に、密着面間隙効果による補正を施し、密着後1.5時間から3時間の間の臨界点と温度の関係を直線に最小2乗法でフィッティングを行って、温度係数を求めた。その結果、温度係数 f_T は、

$$\begin{aligned} f_T &= -0.065_1 (\pm 0.003) \rho_0 / ^\circ\text{C} \\ &= -0.0034 (\pm 0.0002) \% \Delta K / K / ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

であった。

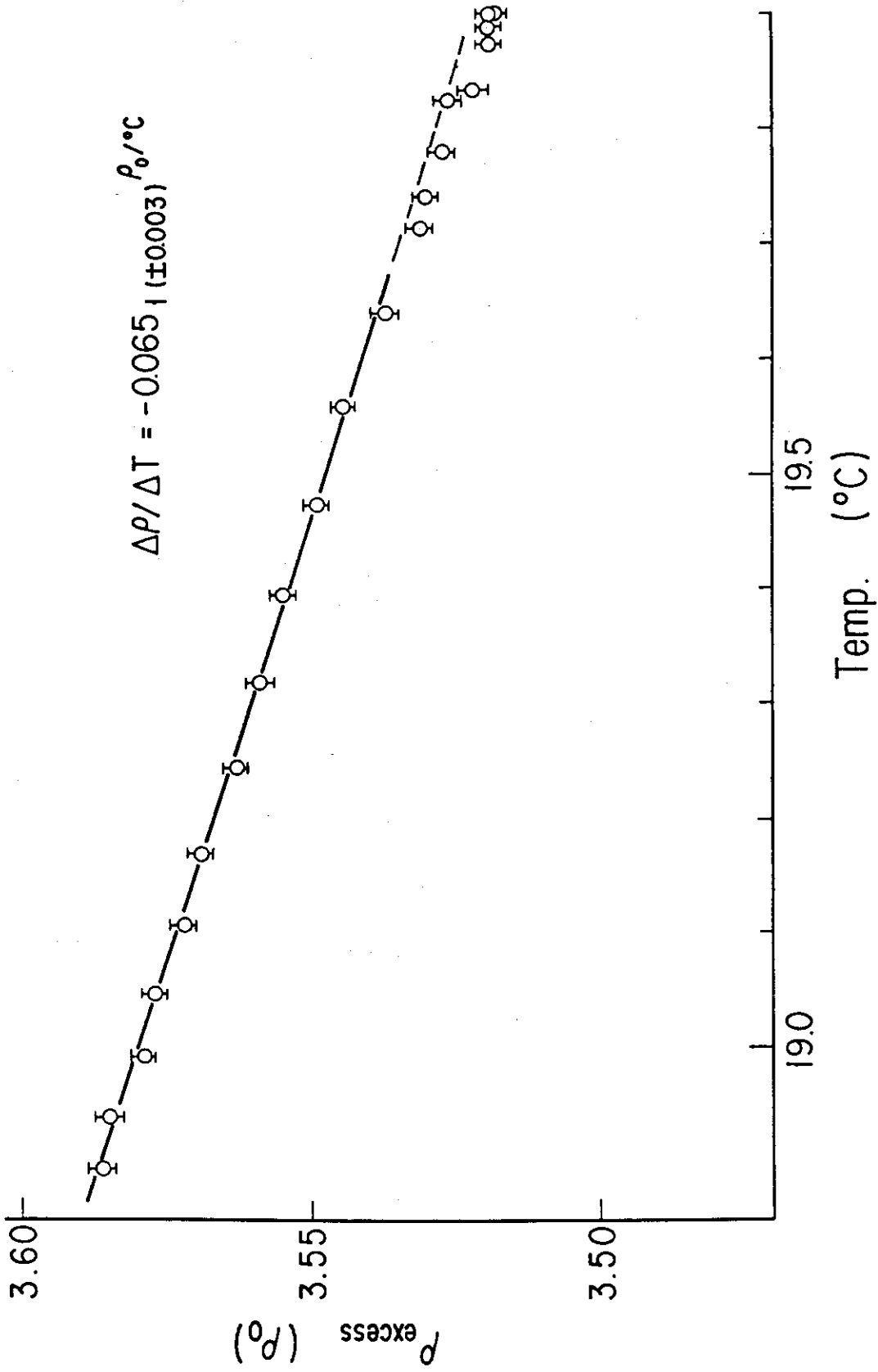
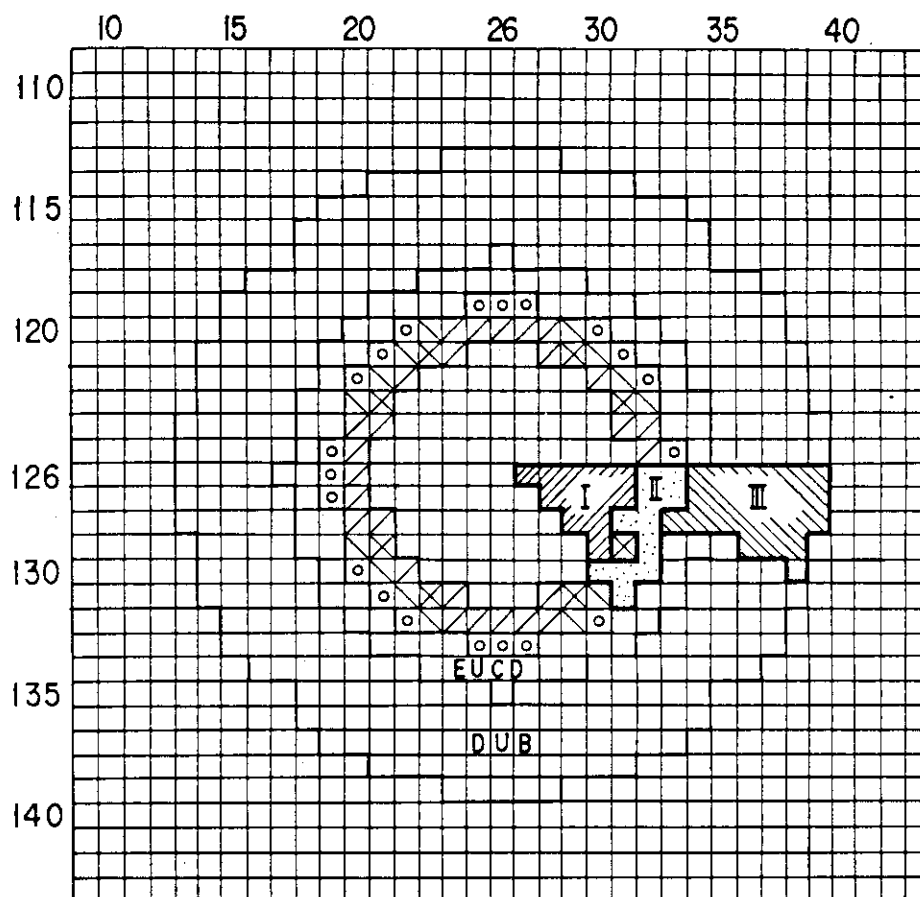


Fig. A.2.3 Temperature Coefficient Measurement in FCA Assembly XII-2

A.2.4 密着面不銹鋼効果

1/2集合体の引出前端面が存在することにより、集合体密着面部において不銹鋼の量が増加している。一方、格子管が集合体密着面からそれぞれ5mmずつ後退しているために、ここでの不銹鋼の量を減少している。これらの両方の収支量は、密着面において格子管1ユニット(5.52 cm × 5.52 cm) 当り 17.46 g 標準の部分に比べて不銹鋼が多い、この余分に存在する不銹鋼の系の臨界性に対する反応度寄与を評価する。測定は、各引出し第1セルに装填した SUS 板2枚をポイド缶に置換することによって得られる反応度係置を、Fig.A.2.4 に示すような3領域にわけて測定した。これらのデータより、全領域の密着面不銹鋼効果を評価した。



Experimental Results

Region	No. of drawer	SUS worth (2000.8g)
I	12	$-0.311 \pm 0.019^{\rho_0}$
II	11	-0.213 ± 0.019
III	23	0.153 ± 0.019

$\rho_0 = 0.0520\% \Delta K/K$

Fig. A.2.4 Measurement Regions for SUS Effect Associated with the Front of Each Drawer

A.2.5 体系の未臨界度

FCA XII-2 集合体には、Pu 223kg 装荷されていることから、 ^{240}Pu からの自発核分裂による中性子源が存在する。この中性子源の存在のために、ある一定出力のもとで体系はみかけ上臨界であり、実際には未臨界である。そこで真の臨界点を知るために、一定出力での未臨界度を評価する必要がある。

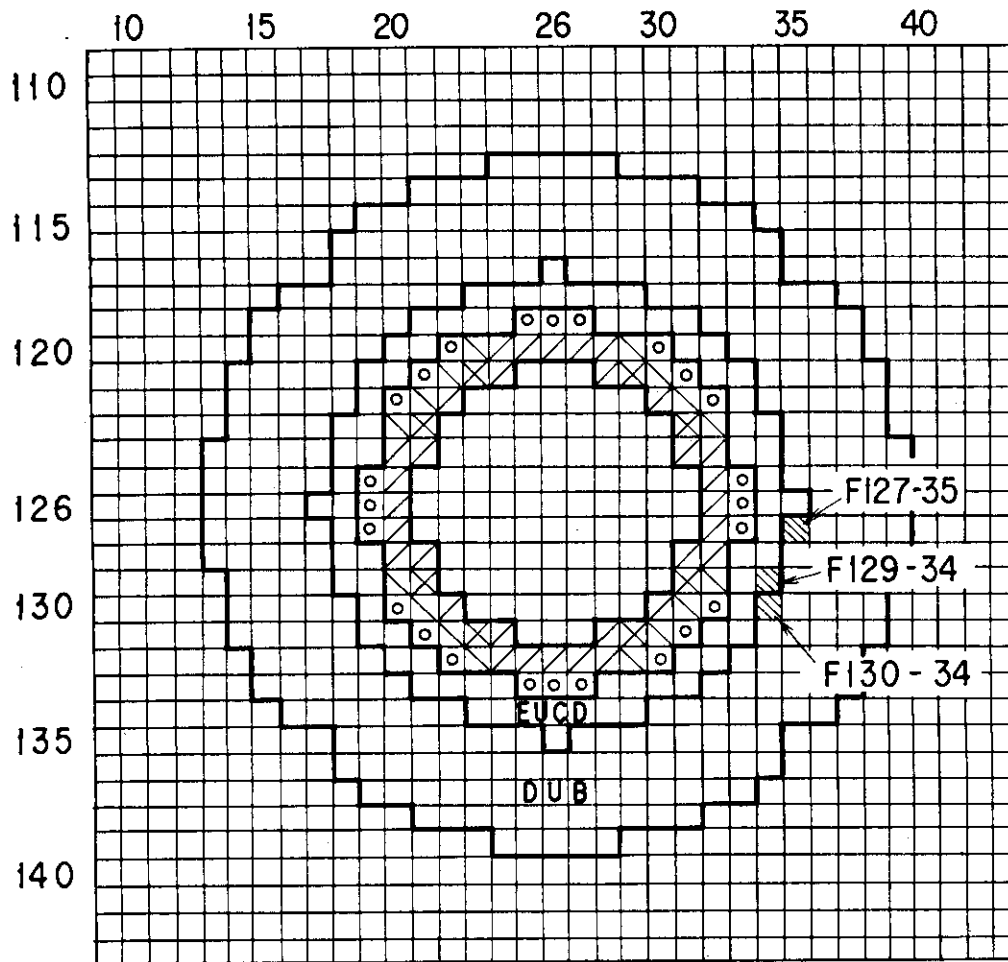
測定は、 $0.2 \times 10^{-6} \text{ A}$ と $0.2 \times 10^{-5} \text{ A}$ の 2 レンジを用いて、自発核分裂による中性子源の反応度寄与を、臨界法により評価した。その結果、出力 $0.2 \times 10^{-6} \text{ A}$ 時の体系の未臨界度は、

$$\Delta\rho_{\text{SUB}} = \frac{-0.104_4\%}{1 - \frac{0.2 \times 10^{-6}}{0.2 \times 10^{-5}}} = -0.116 (\pm 0.002)\%$$

であった。

A.2.6 周辺質量係数

今まで、FCA では各炉心に対して 2 次元 R-Z モデル化を行うために、周辺質量係数の測定が行われ、この測定値より円筒化体系への反応度寄与が評価された。しかし、本集合体に於ては、3 次 X-Y-Z での計算値と比較を行うため、従来のように詳細に測定は行わなかった。ただし、実験および原子炉の運転の都合上、体系に適当な余剰反応度を与えるために、基準臨界体系にさらに燃料ドロワー EUCD を追加することがある。その時の参考データを得る目的で EUCD 引出しに対する周辺質量係数を測定した。その測定位置及び結果を Fig.A.2.5 に示す。



Experimental Results

Pos.	$\Delta\rho$ (DUB \rightarrow EUCD)
F127-35	$1.469 \pm 0.013^{\rho_0}$
F129-34	1.884 ± 0.013
F130-34	1.588 ± 0.013

$\rho_0 = 0.0520\% \Delta K/K$

Fig. A.2.5 Edge Worth Measurements in FCA Assembly XII-2

A.2.7 出力較正

線出力計～0.6において、読取値 0.2×10^{-6} A時の炉出力P (Watt) を算出した。
体系全体での核分裂数をF (fission \cdot sec $^{-1}$)とすると、体系の出力Pは、

$$P = 200 \times 1.602 \times 10^{-13} \times F$$

と表わせる。またFは以下の式より求めることができる。

$$F = \frac{S}{\nu} = \frac{1}{\nu} \frac{S_0}{(1-k)} = \frac{1}{\nu} \frac{S_0}{\rho_{\text{SUB}}}$$

S : 核分裂により発生する体系全体の中性子数

ν : 1核分裂当り発生する中性子数

S_0 : ^{240}Pu の自発核分裂により発生する中性子数

ρ_{SUB} : 体系の未臨界度

0.2×10^{-6} A 時の体系の未臨界度は、 $\rho_{\text{SUB}} = 5.43 \times 10^{-5} \Delta K/K$ であり、 ^{240}Pu の装荷量は、22.28kgである。また ^{240}Pu 1g当りの中性子発生数は $(9.0 \pm 0.9) \times 10^2 \text{ n}\cdot\text{sec}^{-1}$ であるから、 $S_0 = (2.01 \pm 0.2) \times 10^7 \text{ n}\cdot\text{sec}^{-1}$ となる。これらの値より、

$$P = 4.36 \text{ (W)}$$

を得る。