

JAERI - M
91-186

FCAに於ける高転換軽水炉(HCLWR)
模擬炉心(Phase-1)の出力分布の測定

1991年11月

大野 秋男・大杉 俊隆・佐藤 邦雄

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。
入手の間合わせは、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, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 原子力資料サービス

FCA に於ける高転換軽水炉 (HCLWR) 模擬炉心 (Phase - 1) の出力分布の測定

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

大野 秋男・大杉 俊隆・佐藤 邦雄

(1991年10月11日受理)

高転換軽水炉 (HCLWR) の炉物理量を把握するために、FCA (高速炉臨界実験装置) にウラン燃料及び減速材としてポリスチレンを用いたゾーン型模擬炉心 (FCA XIV) が構築された。この模擬炉心では発泡ポリスチレンを用いることにより減速材ボイド率 (0% 及び 45%)、減速材対燃料体積比及び燃料濃縮度をパラメータに、 γ 線計測法により径及び軸方向の出力分布を測定した。FCA 板状燃料に対する γ 線計測法の特色を活用して、非均質性の強いセル内の核分裂率微細構造を求めた。さらに出力分布の測定から各方向別バックリングを求め、計算により求めた移動面積を用いて炉物理量の一つである無限増倍率 k_{∞} を求めた。

径方向分布については、どの炉心についても SRAC による計算値は実験値を過大評価しているが、他方軸方向分布については、両者は良く一致している。板状燃料配列に伴う非均質性の強いセル内の燃料板核分裂率分布の計算値は、実験値を概ね再現しているものの、スペクトルの軟らかい炉心においては、実験値を過小評価する傾向が認められる。無限増倍率 k_{∞} の SRAC による計算値は、実験値を過大評価する傾向が認められるものの、どの炉心についても実験誤差内で一致しており、C/E 値の減速材ボイド率や燃料濃縮度に対する依存性は認められない。

Measurement of Power Distribution in FCA-HCLWR Core (Phase-1)

Akio OHNO, Toshitaka OSUGI and Kunio SATOH

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

(Received October 11, 1991)

In the report are described experiments with zone-type mock-up cores (FCA XIV) which consisted of uranium fuels and polystyrene plates, assembled at FCA (Fast Critical Assembly), to study a series of physical characteristics for high conversion light water reactors. As one example of those characteristics, power distributions were measured by a γ -counting method in the mock-up cores by changing parametrically voidage states of the moderator, volume ratio of moderator to fuel and fuel enrichment.

Fine structures of fission rate in a plate-array cell having strong heterogeneities were obtained at the center cell of the core to investigate the validity of the SRAC code for the analysis of the high conversion light water reactor.

Furthermore infinite multiplication factors k_{∞} which are an important physical parameter were derived from calculated migration areas and bucklings of each direction. This was obtained by fitting the measured power distributions into a cosine function.

Calculated power distributions of radial directions overestimate largely the measure ones, while those of axial directions agree well with the measured values. Calculations on fine structure of fission ratio in the cell follow generally the measured values, but it is recognized that the calculation underestimates the measurement in a soft neutron spectrum core. As for infinite multiplication factors k_{∞} , calculated values by the SRAC code agree within experimental errors

with measured ones. No trend is observed on different voidage state of moderator and fuel enrichment in the limit of this experiment.

Keywords: FCA, HCLWR, Power Distribution, SRAC, Infinite Multiplication Factors, Voidage States of the Moderator, Volume Ratio of Moderator to Fuel, Fuel Enrichment

目 次

1. 緒 言	1
2. 実 験	2
2.1 実験の概要	2
2.2 FCA-XIV-1 炉心	3
2.3 FCA-XIV-1 (45V) 炉心	4
2.4 FCA-XIV-2 炉心	4
3. 測定手法及びデータ処理	16
3.1 測定方法及び測定系	16
3.2 データ処理	16
4. 解 析	25
5. 無限増倍率 k_{∞} の算出	30
6. 結果及び検討	36
6.1 出力分布	36
6.2 無限増倍率 k_{∞}	37
7. 結 論	62
謝 辞	62
参考文献	63

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	2
2.1 Outline of Experiment	2
2.2 FCA-XIV-1 Core	3
2.3 FCA-XIV-1(45V) Core	4
2.4 FCA-XIV-2 Core	4
3. Measurement and Data Handling	16
3.1 Measurement and it's System	16
3.2 Data Handling	16
4. Analysis	25
5. Reduction of Infinite Multiplication Factor k_{∞}	30
6. Result and Discussion	36
6.1 Power Distribution	36
6.2 Infinite Multiplication Factor k_{∞}	37
7. Conclusion	62
Acknowledgment	62
References	63

1. 緒 言

核燃料有効利用の観点から高転換軽水炉 (HCLWR) の成立性の検討が叫ばれ、国外ではスイス⁽¹⁾⁽²⁾、フランス⁽³⁾及びドイツ⁽⁴⁾で、国内では京大原子炉実験所 (KUCA)⁽⁵⁾で臨界実験が行われている。日本原子力研究所は1986年からHCLWRの基本的な炉心特性を把握するために、高速炉臨界集合体 (FCA) を用いて実験に着手した。FCAにおけるHCLWRに関する実験計画⁽⁶⁾は、(1)濃縮ウラン板状燃料を用いたPhase-1実験と(2)プルトニウム板状燃料を用いたPhase-2実験から構成されている。濃縮ウラン板状燃料を用いたPhase-1実験の最初の炉心であるFCA-XIV-1は、1986年5月29日に臨界に達した。

HCLWRの炉心特性のうち最も特徴的なものは、その中性子スペクトルである。軽水炉 (LWR) では、核分裂反応の殆ど (90%以上) が熱中性子領域で起こり、他方高速炉 (FBR) では、その殆どが100 KeV以上の中性子エネルギー領域で起こっている。これらに比べて、HCLWRでは核分裂反応の約50%が1 eV ~ 1 KeVの共鳴中性子領域で起こり、残り約30%が高速中性子領域で、約20%が熱中性子領域で起きている。このため、HCLWRでは共鳴中性子領域の炉物理が特に重要になる。この共鳴中性子領域の炉物理特性の把握を目的として、1960年代前半にZPR-7に於いて、低濃縮ウラン燃料を用いた一連の炉物理実験⁽⁷⁾が行われたがその後最近まで行われていない。このためHCLWRの設計手法の妥当性や炉心成立性の検証に必要なデータが不足しているのが実状である。高転換軽水炉 (HCLWR) 開発のために臨界実験で確認すべき炉物理特性量として無限増倍率、転換比、ボイド反応度係数、制御棒反応度係数及び出力分布等が挙げられている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これらの特性量は、Full-mockup炉心に於いて確認することが望ましいが、FCAで保有する核燃料イベントリーの制約から困難である。よって、HCLWR炉心を模擬したテスト領域をドライバー領域で囲んだゾーン模型炉心を構築し、このテスト領域の中心領域に於いて諸炉物理特性量の測定を行うこととした。

Phase-1実験は、断面積が比較的詳細に明らかとなっているウラン燃料を用いたHCLWR炉心の炉物理特性を把握し、現在用いているデータ・メソッドの妥当性の検討を目的として計画されたものである。この目的のために、テスト領域の減速材対燃料体積比 (V.R)、燃料濃縮度及び減速材ボイド率をパラメータとし、 γ 線計測法⁽¹⁰⁾によりテスト領域内の出力分布を測定した。また、出力分布のみならず、この分布から求められるバックリングを通じて、炉物理量の一つである無限増倍率 k_{∞} を求めることが可能である。さらに本測定法の特色を活用して、非均質性の強いセル内の核分裂率の微細構造及びスペクトルインデックスの一つとして利用出来る燃料板の出力比を求める。

本報告書では、第2章で実験体系、第3章で測定法及び測定値の処理、第4章で解析手法、第5章で無限増倍率 k_{∞} の算出及び第6章で結果の検討について述べる。

2. 実 験

2.1 実験の概要

高転換軽水炉 (HCLWR) の炉心特性を実験的に把握評価し、設計計算コードの妥当性の検討を行うためには、一般には全炉心を模擬した Full-scale の mock-up 実験を実施するのが望ましい。しかしながら、FCA で保有する核燃料インベントリに制約があることと、減速材として軽水 (H_2O) が使用できないために水素原子を含むポリエチレンやポリスチレン等の固体減速材を使用することになる。本実験で使用する固体減速材としては、水素原子数密度及びその可変範囲、実験精度に直接影響する材質の一様性や加工性さらにコスト面等を考慮してポリスチレンを用いることとした。反面、使用する解析コードではポリスチレンの熱中性子に対する散乱核データが現在のところ整備されていない。本実験に用いたポリスチレンは、ベンゼン核にエチル基のついたポリマーである。ベンゼン及びエチレンに関するスペクトルの実測値は報告されているが、これら2つの散乱核は H_2O のそれとあまり大きく異ならない。ポリスチレンの分子構造は、ベンゼンとエチレンのポリマーであり、かつ HCLWR では中性子スペクトルが軽水炉のそれに比べて硬いことからポリエチレンの散乱核を代用しても解析値に大きな差異は生じないとの判断が、ポリスチレンを選定した理由の一つになっている。

核燃料及び模擬物質の保有量の制約から、測定炉心は部分模擬炉心にならざるをえない。この部分模擬炉心の構築においては、高速炉模擬炉心である FCA XI 炉心¹⁰⁾ を参考にし、中心に HCLWR を模擬したテスト領域を有しそれを高速炉の中性子スペクトルを有するドライバー領域で囲み、さらにその外側にはブランケットを配したゾーン型模擬炉心とすることとした。テスト領域は、炉心中心部に於いて HCLWR 炉心固有の基本モードスペクトルが成立する大きさとし、一辺が約 50 cm の正方断面を有し、高さ約 90 cm の直方体とした。FCA XI 炉心のテスト領域中心部において基本モードスペクトルが成立していたことから、HCLWR 炉心を模擬した本体系では、中性子スペクトルがより軟化し中性子の平均自由行程が短くなることから基本モードスペクトルの成立性は十分予測し得る。しかし本測定では、出力分布のみならず無限増倍率 k_∞ の測定をも目途としているため、測定量に関する精度の観点からテスト領域内のより広範囲にわたり基本モードスペクトルが成立していることが望ましい。この目的のために、テスト領域とドライバー領域の間に厚さ 5 cm のステンレスバッファ層を設けスペクトルマッチングを図ることとした。バッファ層の材質及び厚さについては、予備計算を行い決定した。ドライバー領域は体系を臨界にするために設けられている。この領域の径方向厚さは、各測定炉心で大幅な変更がないようにし、かつ運転制限条件を満足するように燃料種類の異なったドライバー燃料を用いている。

炉心軸方向高さは、現在 HCLWR 炉心設計で考えられている高さ約 200 cm の半分程度とし、その外側にそれぞれに 20 cm のブランケットを設け全体で 130 cm とした。この程度の炉心高さがあれば、軸方向の十分な範囲で基本モードスペクトルが成立し、十分な精度で種々の測定が可

能である。本測定では、減速材対燃料濃縮度及び減速材ポイド率をパラメータとしている。これらのパラメータについて構築された FCA-XIV-1, FCA-XIV-1 (45V) 及び FCA-XIV-2 炉心の特長を以下に述べる。

2.2 FCA-XIV-1 炉心

FCA-XIV-1 炉心は HCLWR を模擬した Phase-1 実験における基本炉心である。テスト領域の単位セルの燃料／減速材／構造材の体積比は、52.9/31.8/15.3 である。テスト領域の単位セル（構造材体積を除いた）内の減速材対燃料体積比 (V.R) は、転換比 0.9 以上を目途として 0.6 とし、セル平均燃料濃縮度 ($^{235}\text{U}/\text{U}$) を 6.47 % とした。Fig. 2.1 に FCA-XIV-1 炉心の垂直断面を示す。単位セル (EU06A セル) は、燃料として 20 % 濃縮ウラン燃料板 (2-2-1/16) 3 枚、天然ウラン燃料板 (2-2-1/16) 3 枚、劣化ウラン燃料板 (2-2-1/4) 2 枚及び酸化物燃料を模擬するためのアルミナ板 (2-2-1/16) 3 枚を用い、減速材としてポリスチレン板 (2-2-1/8) 6 枚を用いて構成された。このセル構成の EU06A ドロワーがテスト領域に装荷された。しかしながら、同形式の 20 % 濃縮ウラン燃料枚数の制約から Fig. 2.7 に示すように一種類ドロワーでテスト領域全てを構成することが出来なかった。よって 2 倍厚さの 20 % 濃縮ウラン燃料を用いたセル (EU06C セル) を作成することとした。このセルでは、20 % 濃縮ウラン燃料板 (2-2-1/8) 2 枚、天然ウラン燃料板 (2-2-1/16) 2 枚、劣化ウラン燃料板 (2-2-1/4) 3 枚を燃料とし、減速材対燃料体積比は EU06A セルと同じ 0.6 である。セル平均燃料濃縮度については、燃料の形状を調整したことから多少小さくなり 6.17 % となった。よって、EU06C セルの無限増倍率 k_{∞} は EU06A セルのそれに比べて小さくなる。そこでテスト領域の中心部における基本モードスペクトルは、EU06A セルで決まるように、EU06C セルで構成された EU06C ドロワーはテスト領域の中心部から離れたコーナに配置された。この EU06C ドロワーの配置については、炉心中心部における反応率及び出力分布に影響を与えていないことを計算により確認している。

テスト領域の外側には、体系を臨界にするためのドライバー領域を設けている。このドライバー領域は高速スペクトルを有する 2 種類のドロワー EUDA 及び PuDA で構成されている。EUDA ドロワーの単位セルは、燃料として 20 % 濃縮ウラン燃料板 (2-2-1/8) 及び天然ウラン燃料板 (2-2-1/8) を各 2 枚、減速材として黒鉛板 (2-2-1/4) 6 枚で構成している。他方 PuDA の単位セルは、燃料として 92 % プルトニウム燃料板 (2-2-1/16) 3 枚、アルミナ板 (2-2-1/8) 2 枚、及び黒鉛板 (2-2-1/4) 6 枚で構成している。配置については、テスト領域の中性子スペクトルとのマッチングを考慮して EUDA ドロワーを内側に、PuDA ドロワーを外側に装荷した。さらに、その外側には中性子の径方向への漏洩を低減することを旨として、厚さ約 20 cm のブランケットを配している。軸方向への中性子の漏洩については、径方向と同様に上下に約 20 cm のブランケットを設けている。したがって、軸方向ブランケットを含めた炉心高さは 130 cm である。

2.3 FCA-XIV-1 (45V) 炉心

FCA-XIV-1 (45V) 炉心は HCLWR のボイド特性を評価するために構築された炉心であり、Fig. 2.2 に炉心の垂直断面を示す。テスト領域を構成しているセル内の燃料板は、FCA-XIV-1 炉心のセルと同じである。ボイド状態を模擬するために、FCA-XIV-1 炉心に装荷された EU06 A 及び EU06C ドロワーで用いられた通常のポリスチレン板の代わりに、通常ポリスチレンの密度 (1.05 g/cm^3) の約 55 % (45 %ボイド相当) の密度を有する発泡ポリスチレン板が使用された。これらのドロワーをそれぞれ EU06A (45V) 及び EU06C (45V) とし、テスト領域への装荷位置は、FCA-XIV-1 炉心のそれと同じである。またセル内の燃料板及び発泡ポリスチレン板の配置は、EU06A 及び EU06C セルのそれと同じである。テスト領域の減速材ボイド率を 45 %にしたことによる炉心の反応度低下を補償するために、ドライバー領域の燃料の追加が必要である。この反応度減少は割合に大きく、EUDA 及び PuDA ドロワーの追加で体系を臨界にするにはドロワーの本数及び運転制限条件の制約から困難であり、新たに EUDA セル内の天然ウラン燃料板の代わりに濃縮ウラン燃料板を装填した EUDC セルを有する EUDC ドロワーを EUDA ドロワーの代わりに装荷することとした。EUDC セルは、20 %濃縮ウラン燃料板 (2-2-1/8) 4 枚及び黒鉛板 (2-2-1/4) 6 枚で構成されている。ドライバー領域への装荷位置については、FCA-XIV-1 炉心の場合と同様に、EUDC ドロワーを内側に PuDA ドロワーを外側に配置している。その他については、FCA-XIV-1 炉心と同じである。

2.4 FCA-XIV-2 炉心

FCA-XIV-2 炉心は、燃料格子間隔を少し大きくした準稠密炉心を模擬したもので Fig. 2.3 に垂直断面を示す。テスト領域のセルの燃料/減速材/構造材の体積比は、42.3/42.3/15.4 である。この単位セル (構造材体積を除く) の V.R は 1.0 である。この値は、現在稼働中の PWR と FCA-XIV-1 炉心の間に近い値である。単位セルは、燃料として 20 %濃縮ウラン燃料板 (2-2-1/16) 2 枚、劣化ウラン燃料板 (2-2-1/4) 2 枚及びアルミナ板 (2-2-1/16) 4 枚を用い、減速材としてポリスチレン板 (2-2-1/8) 8 枚を用いて構成され、セル平均燃料濃縮度は 5.5 % である。このセル (EU05 セル) を有する EU05 ドロワーを構築し、テスト領域全てに装荷した。

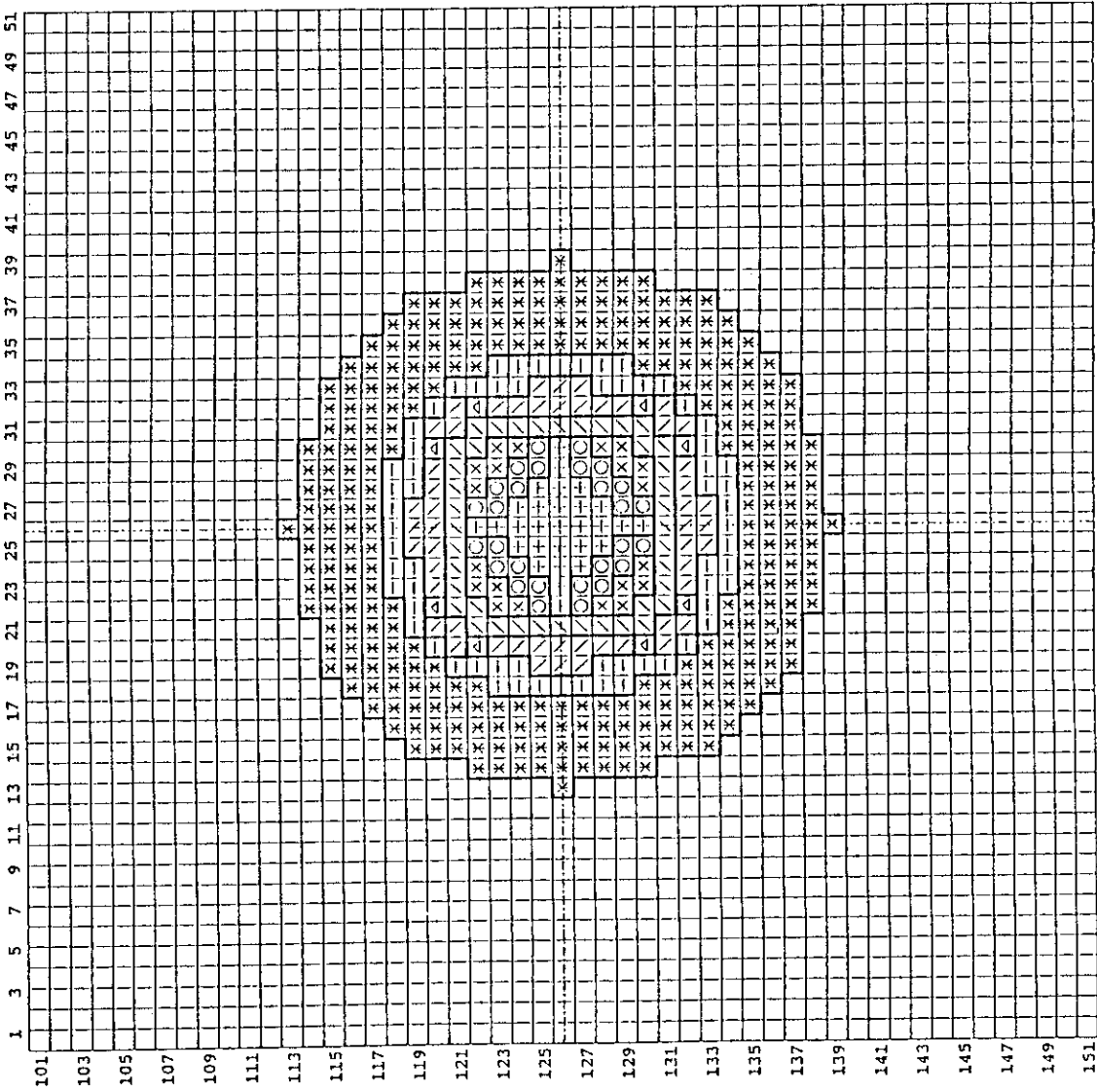
FCA-XIV-2 炉心のテスト領域の炉心高さを他の高さに比べて 20 cm 短くし、約 70 cm とした。炉心高さを 90 cm にするとドライバー燃料が少なくなり過ぎてしまい運転制限条件を満たすことが不可能となるからである。炉心高さ 20 cm 分はブランケットを設け、ブランケットを含めた炉心高さは他の炉心のそれと同じである。このため、FCA-XIV-2 炉心は、テスト領域の高さがドライバー領域のそれより 20 cm 短い変則的な炉心になっている。炉心中心軸方向出力分布への変則形状の効果を計算により評価し、その影響の無視し得ることを確認した。ドライバー領域に装荷された燃料ドロワーは FCA-XIV-1 炉心で用いられた EUDA 及び PuDA ドロワーの 2 種類である。これらのドロワーは Fig. 2.3 に示す位置に装荷されている。

HCLWR 模擬実験 (Phase-1) で構築した炉心で用いた燃料板及び模擬物質板の仕様を Table 2.1 に示す。各炉心の 2 次元 (R-Z) モデルを Fig. 2.4 ~ 2.6 に示し、Fig. 2.7 ~ 2.17 に制御安全棒

として用いたドロワーを含め炉心構築に用いた全てのドロワーの燃料及び模擬物質板装填図を示す。

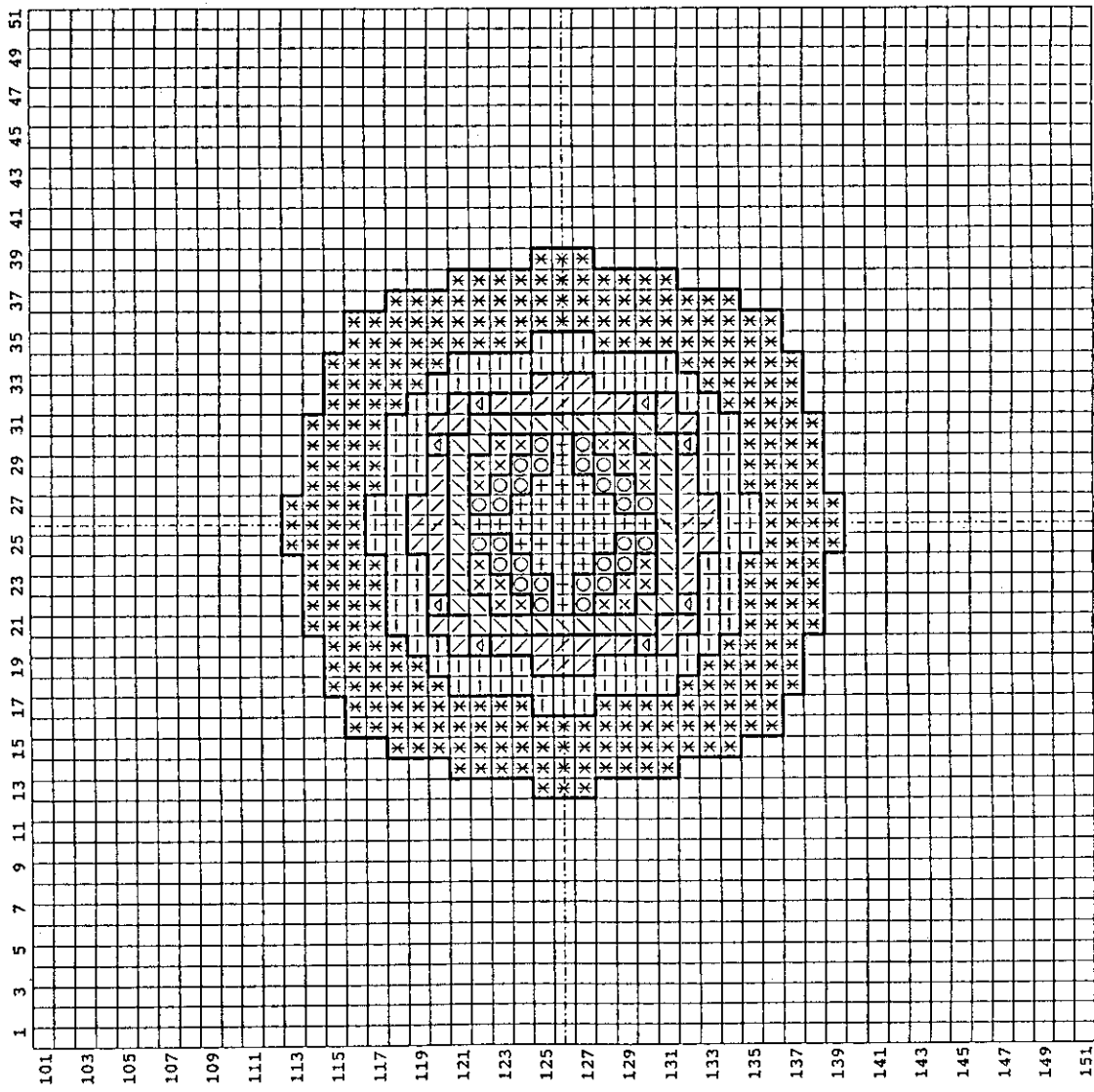
Table 2.1 Specification of material plate loaded in the drawer of FCA-HCLWR core

Name*	Material	Thickness (mm)	Weight (g)
93% EU	93% enriched uranium metal	1.5875	73.510
20% EU	20% enriched uranium metal	1.5875	74.271
20% EU(1/8)	" " "	3.175	148.600
NU	natural uranium metal	1.5875	75.123
NU(1/8)	" " "	3.175	150.25
DUO ₂	depleted uranium metal	6.35	140.370
Al ₂ O ₃	aluminum oxide	1.5875	14.255
Al ₂ O ₃ (1/8)	" "	3.175	28.510
Al(hole)	aluminum metal with hole	3.175	9.796
(CH)n	polystyrene (0% void)	3.175	7.953
(CH)n	" (45% void)	3.175	4.444
(CH ₂)n	polyethylene	1.5875	3.720
SS	stainless steel	1.5875	31.010
C	graphite	6.35	27.760
C(1/16)	"	1.5875	6.940
92% Pu	92% fissile plutonium-aluminum alloy with SS cladding	1.5875	46.06 Pu:35.23 SS:10.31 Al: 0.52



	Drawer	Number
+	EU06A	29
○	EU06B	28
⊗	EU06C	20
∇	SSB	40
∇	EU0A	52
-	PUDA	64
⊗	DUB	288
△	SC3B	8
Total		529
Fissile Weight		Kg
Pu-239+241		Kg

Fig. 2.1 Loading pattern of FCA-XIV-1 core



Drawer	Number
+	EU06A(V) 29
o	EU06B(V) 28
x	EU06C(V) 20
∇	SSB 40
∇	EU06C(V) 20
∇	EU06B(V) 28
∇	EU06A(V) 29
-	PU06A(V) 20
-	PU06B(V) 28
-	PU06C(V) 20
Δ	SCRA 8
Total 565	
Fissile Weight	U-235 Kg
	Pu-239+241 Kg

Fig. 2.2 Loading pattern of FCA-XIV-1(45V) core

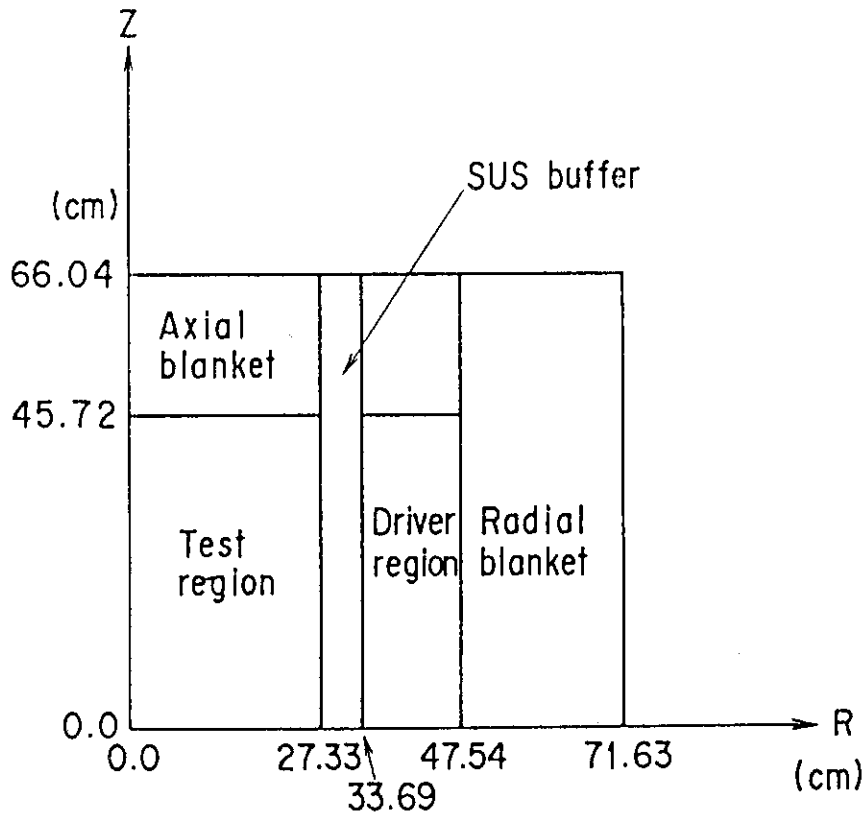


Fig. 2.4 R-Z model of FCA-XIV-1 core

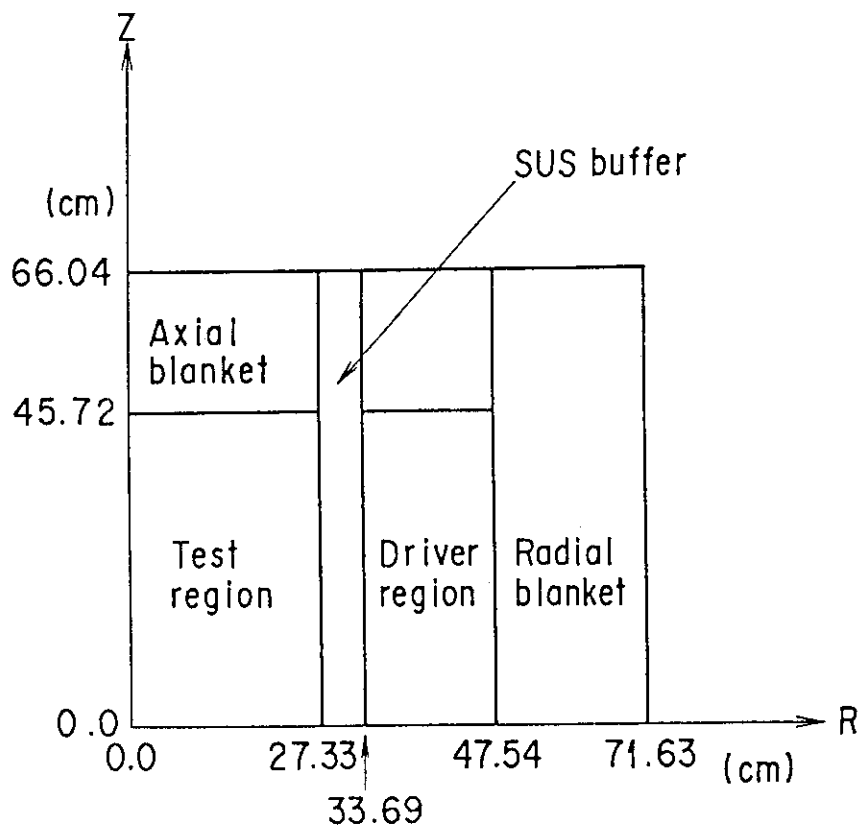


Fig. 2.5 R-Z model of FCA-XIV-1(45V) core

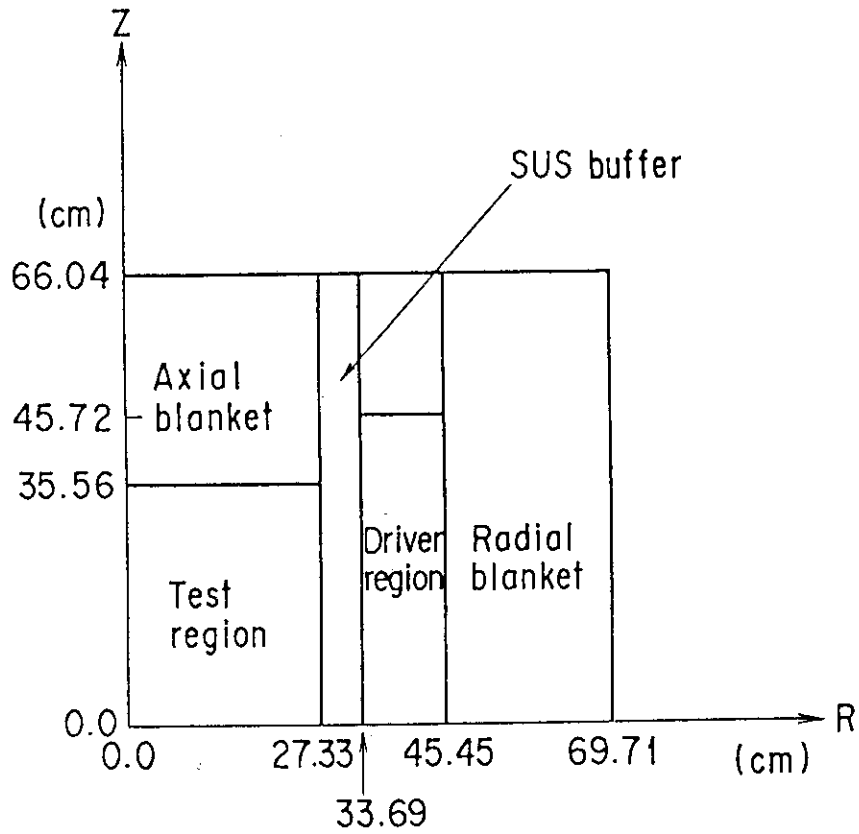
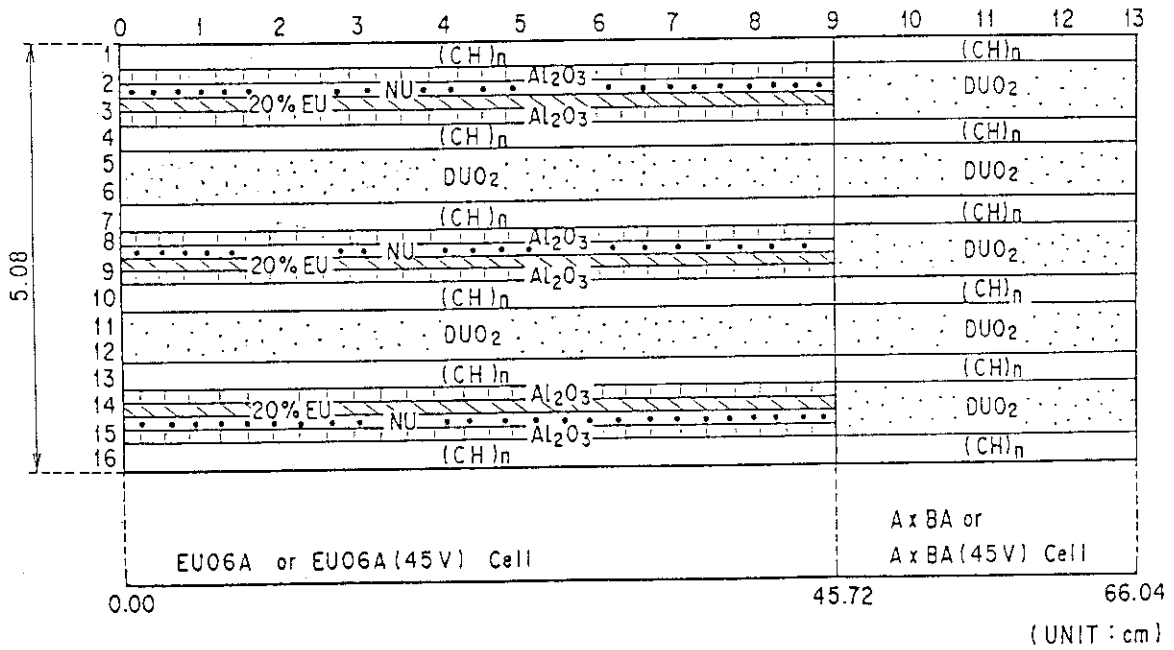
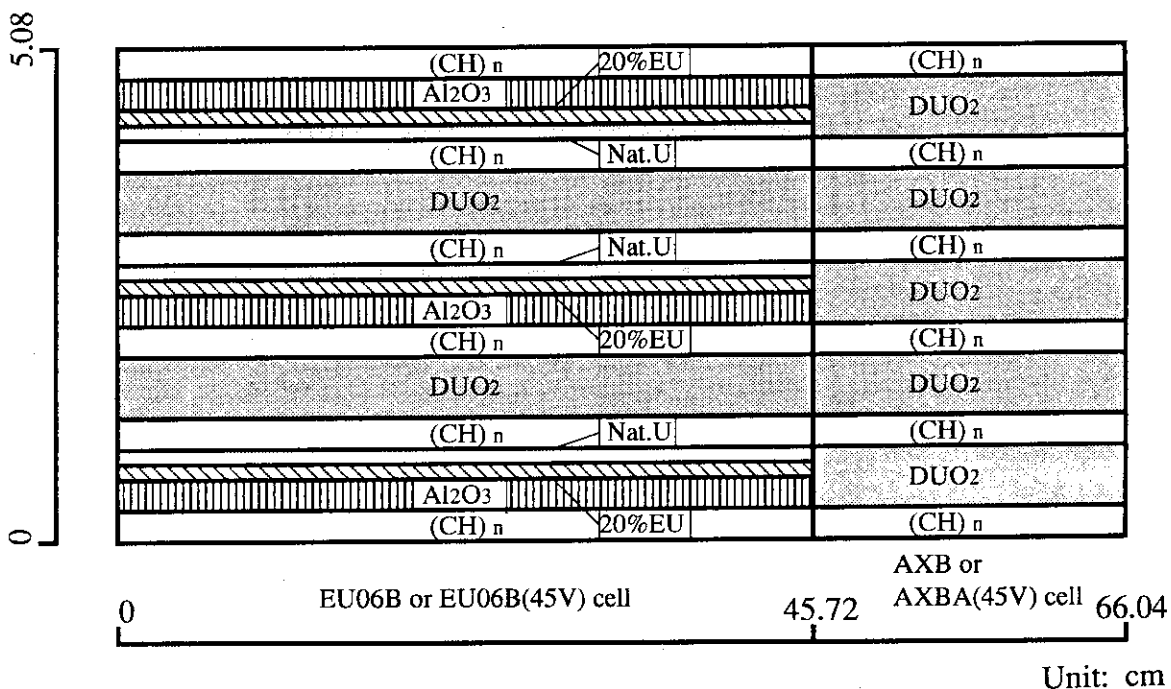


Fig. 2.6 R-Z model of FCA-XIV-2 core



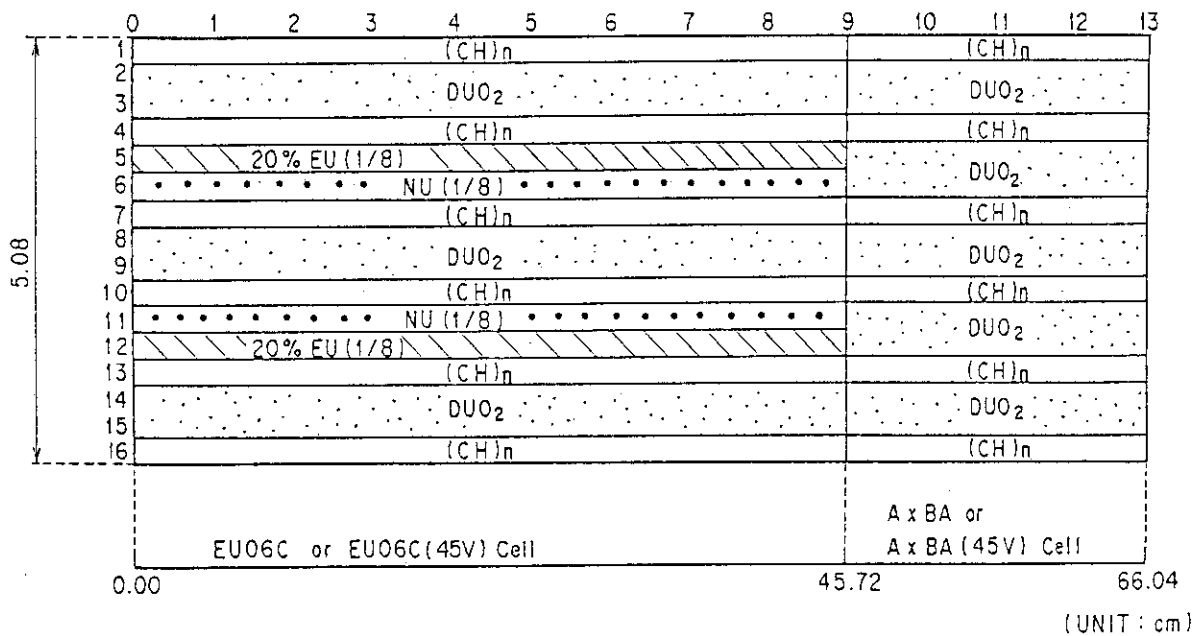
(a) EU06A or EU06A(45V) Drawer

Fig. 2.7 Fuel plate configuration in EU06A or EU06A(45V) drawer



(b) EU06B or EU06B (45V) Drawer

Fig. 2.8 Fuel plate configuration in EU06B or EU06B(45V) drawer



(c) EU06C or EU06C (45V) Drawer

Fig. 2.9 Fuel plate configuration in EU06C or EU06C(45V) drawer

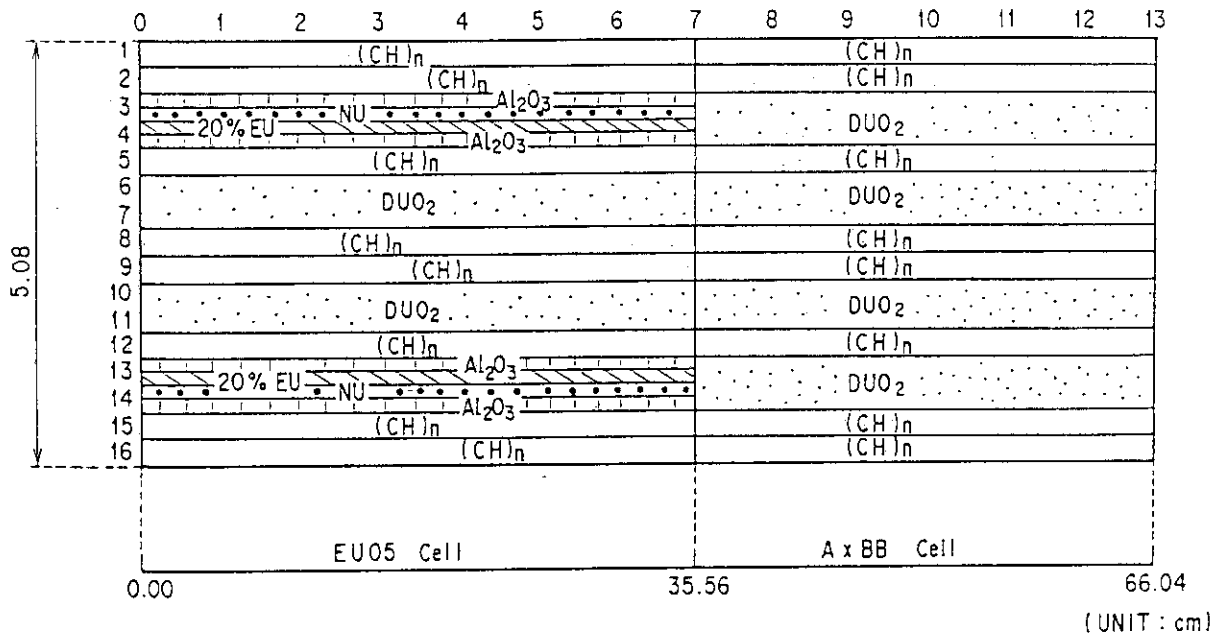


Fig. 2.10 Fuel plate configuration in EU05 drawer

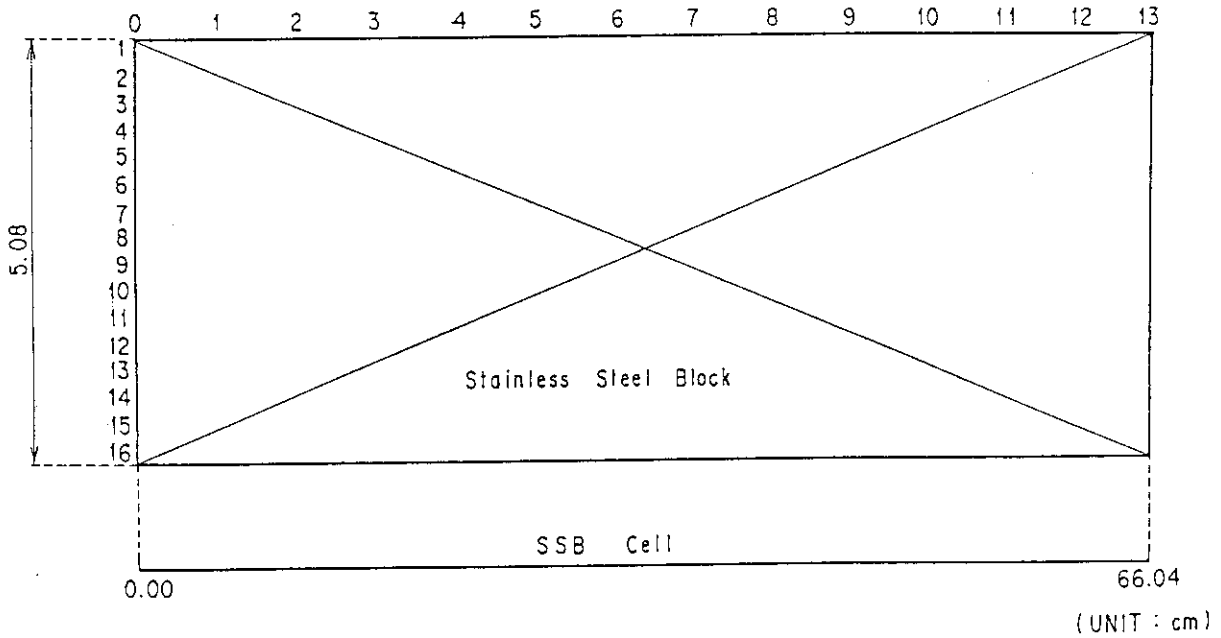
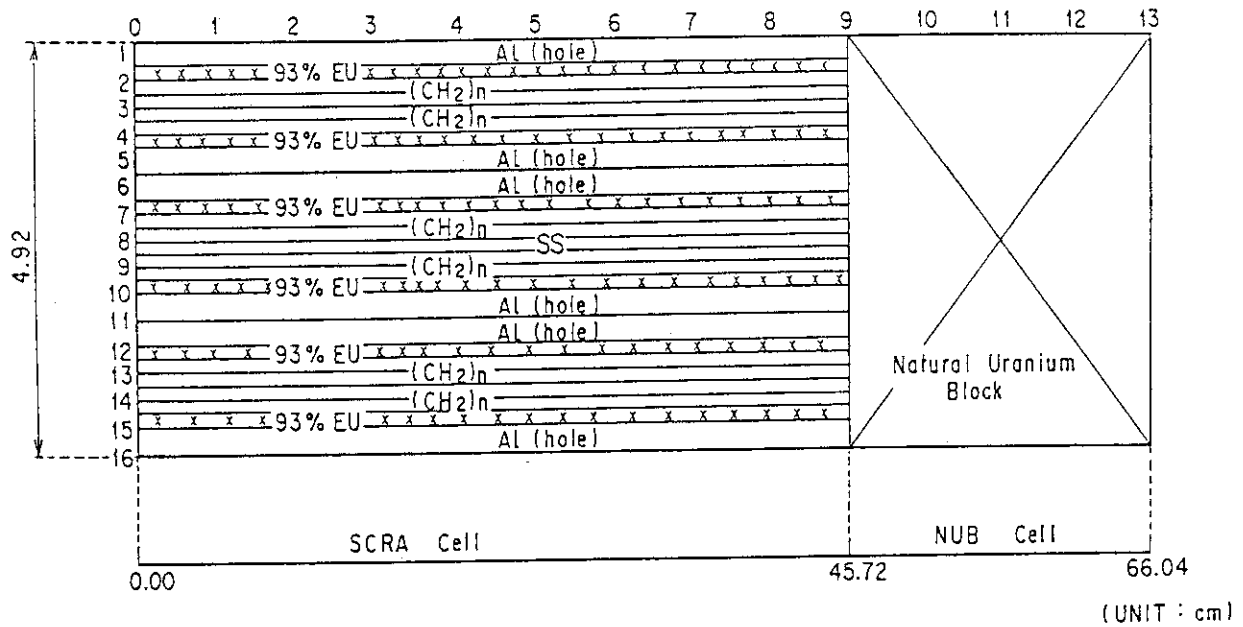
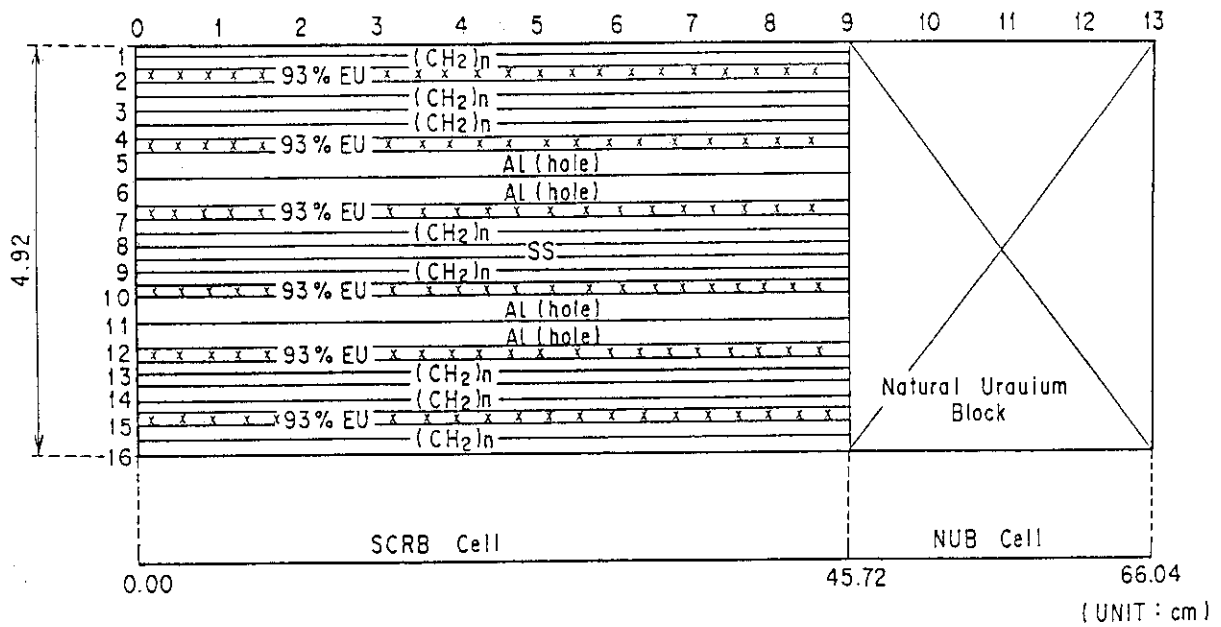


Fig. 2.11 Fuel plate configuration in SSB drawer



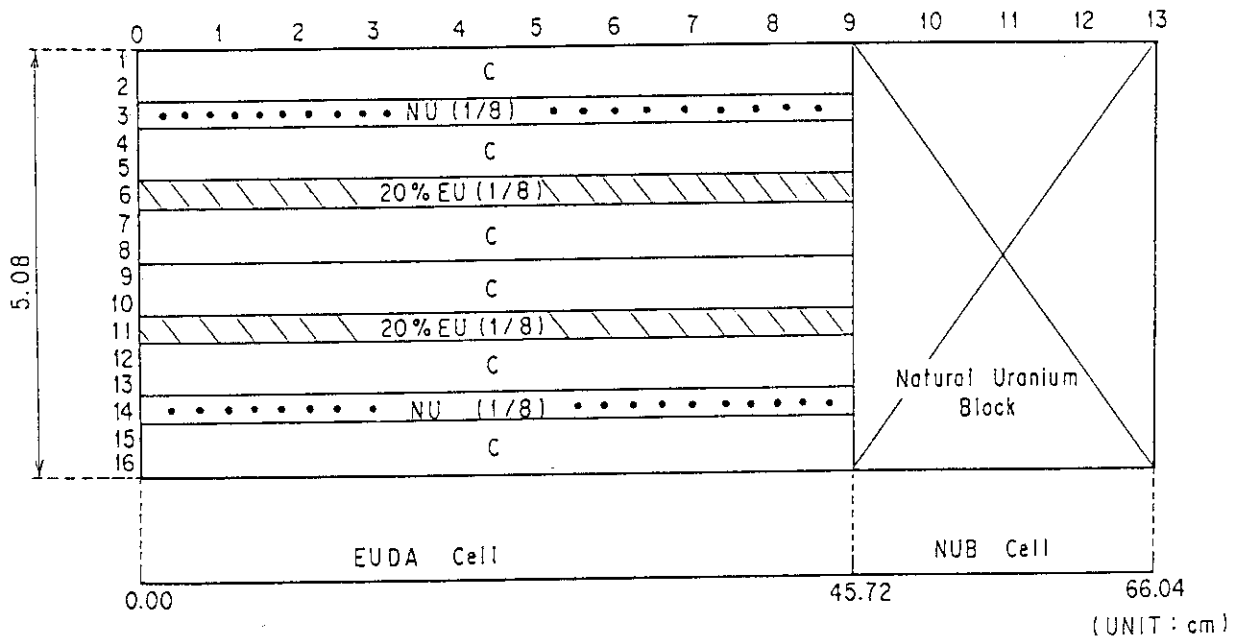
(f) SCRA Drawer

Fig. 2.12 Fuel plate configuration in SCRA drawer



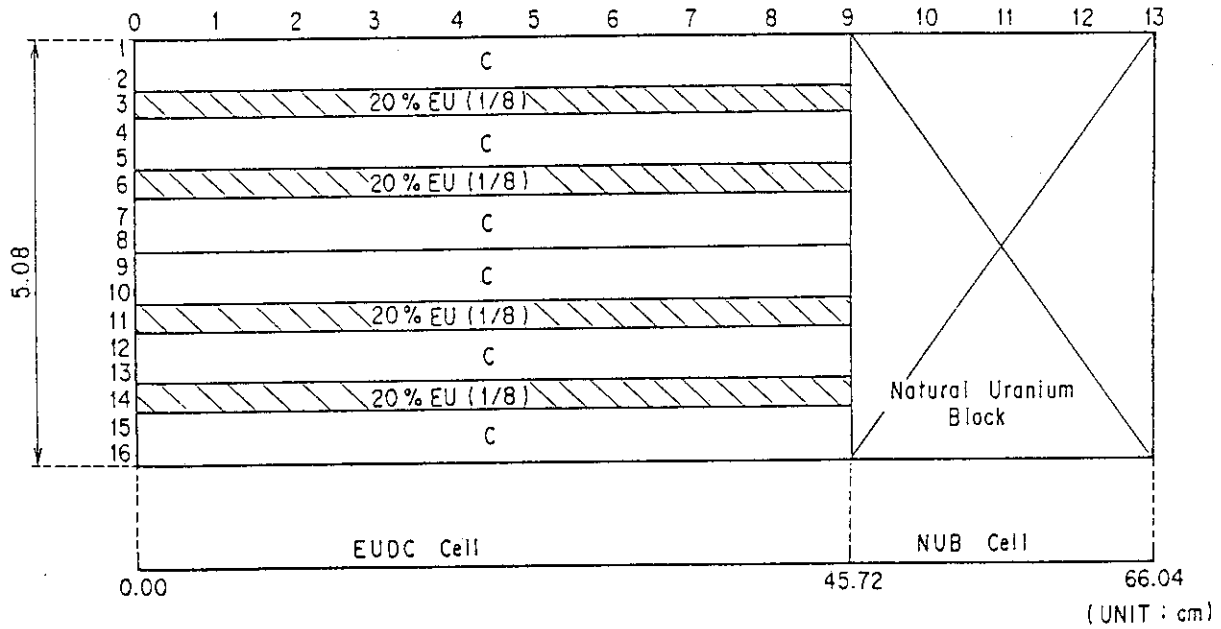
(g) SCRB Drawer

Fig. 2.13 Fuel plate configuration in SCRB drawer



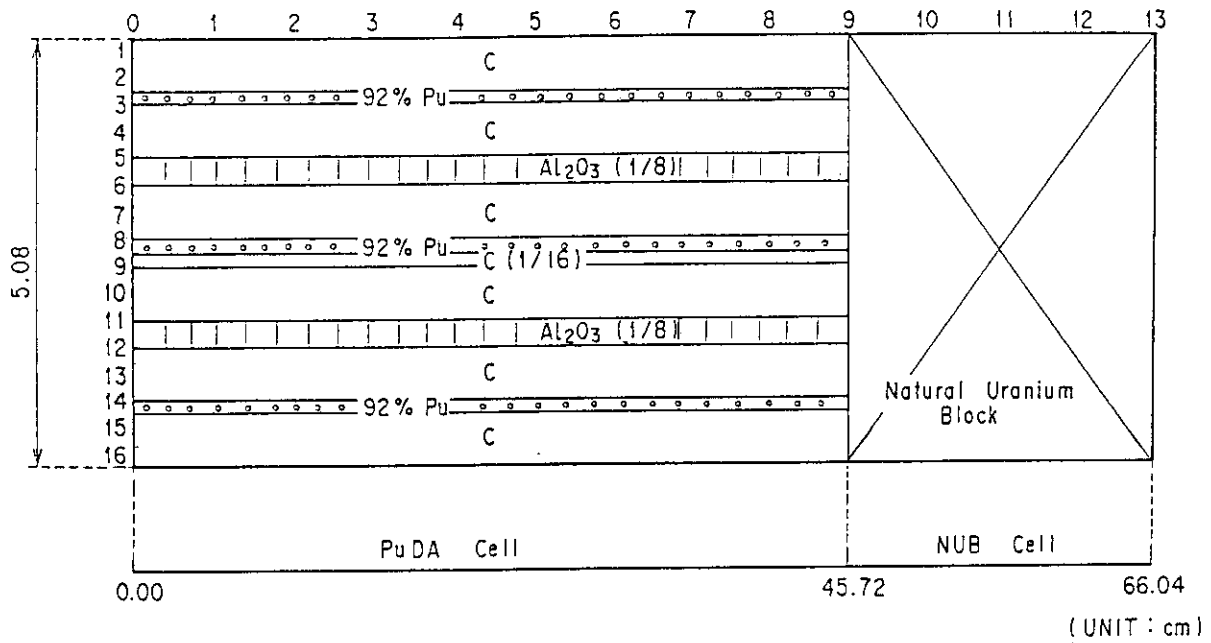
(h) EUDA Drawer

Fig. 2.14 Fuel plate configuration in EUDA drawer



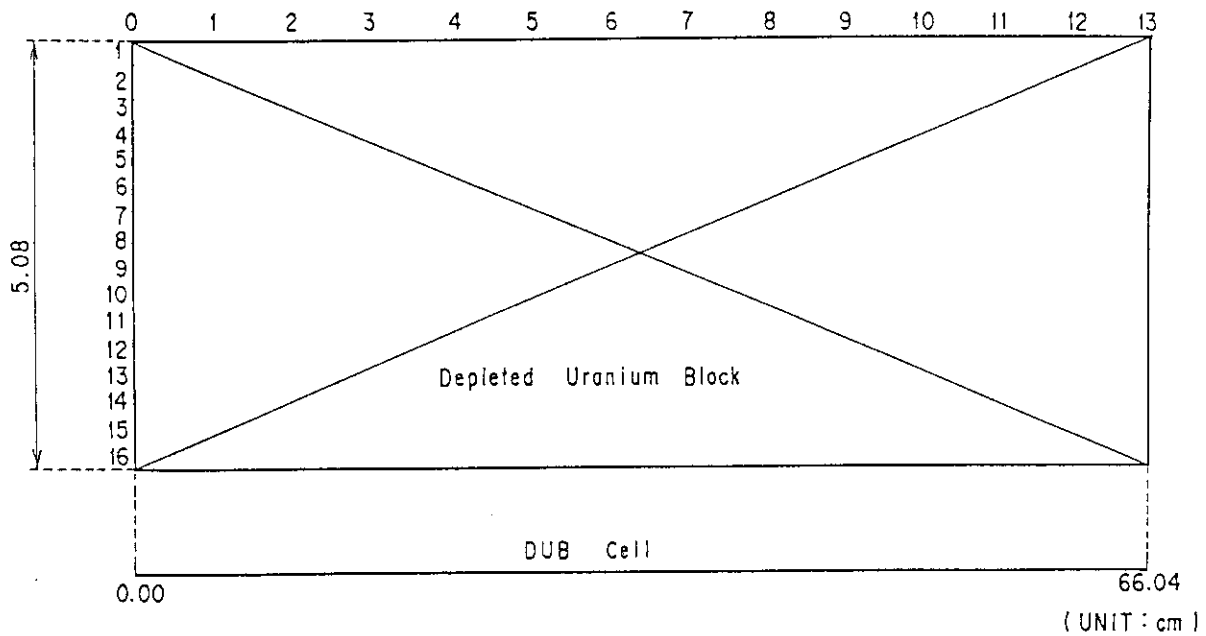
(i) EUDC Drawer

Fig. 2.15 Fuel plate configuration in EUDC drawer



(j) PuDA Drawer

Fig. 2.16 Fuel plate configuration in PuDA drawer



(k) DUB Drawer

Fig. 2.17 Fuel plate configuration in DUB drawer

3. 測定手法及びデータ処理

3.1 測定方法及び測定系

γ 線計測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 線強度が炉心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以上の全てを計測している。このエネルギー以上に着目した理由は、 ^{238}U の捕獲反応による ^{239}Np 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内(照射後30～180分)で認められないことによる。

出力分布の測定は正方断面の直方体の各中心軸について行った。測定セル内に含まれる全ての燃料板について、照射に先立ってバックグランド計数率を測定した。バックグランドの測定後、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。照射量はすべてのケースについて約150 Wmin (10W×15 min)である。照射後約30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、バックグランド計数率が大きく変化する(3倍程度の差が認められる)ので、バックグラ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。その検出器の横方向は鉛で遮蔽し、その上部には幅1 cm×長さ2.5 cmのダングステンコリメータが固定されている。コリメータの厚さは15 cmである。検出器からの信号は前置増幅器から線型増幅器に送られ、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 線が弁別されスケアラで計測される。Fig. 3.1に測定系のブロック図を示す。

3.2 データ処理

照射後各燃料板について測定された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 μsec)、照射に先立って測定されたバックグランド計数率B.G.、及び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なおした。すなわち燃料板 i の計数率 N_i は、

$$N_i = (n / (1 - n\tau) - \text{B.G.}) \cdot F(t) \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

で与えられる。時間減衰補正係数 $F(t)$ は、あらかじめ同一測定条件のもとで測定した値から求めた。

単位セル j 当たりの相対出力 P_j^i は、そのセルに含まれる燃料板 i の γ 線計数率 N_i^j の和で与えられ、

$$P_i^j = \sum \gamma_i N_i^j \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

で表される。ここで γ_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ことから無限平板とみなし、かつ燃料板内での中性子の自己遮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計数 γ_i を求めた。

$$\gamma_i = \sum (\phi_\gamma(E_j) \times (1 - \text{EXP}(-\mu(E_j) T_i)) / (\mu(E_j) T_i) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

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、 γ_i の値も変化すると考えられる。 γ_i の経過時間に対する値を調べ、出力分布の測定時間範囲内では最大0.3%の変化であった。これよりこの出力分布の測定時間範囲内では、 γ_i はほぼ一定であると考えられる。天然ウラン燃料板及び劣化ウラン燃料板の γ_i の値は、20%濃縮ウラン燃料板の値を基準にするとそれぞれ1.00及び1.15である。

各軸方向について求められた出力は、炉心中心セルの値で規格化された。Fig. 3.2 ~ 3.4 に出力分布の測定と計算値を示し、Table 3.1 ~ 3.9 にそれらの値を示している。図及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ている。

Table 3.1 Total power distribution of X-direction in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured	Calculated	C/E
22.08	0.698±1.6	0.750	1.074
16.56	0.855±1.6	0.876	1.025
11.04	0.926±1.6	0.944	1.019
5.52	0.986±1.6	0.986	1.000
0.0	1.000	1.000	1.000
- 5.52	0.970±1.6	0.986	1.016
-11.04	0.929±1.6	0.944	1.016
-16.56	0.835±1.6	0.876	1.049
-22.08	0.692±1.7	0.750	1.084

Table 3.2 Total power distribution of Y-direction in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured	Calculated	C/E
22.08	0.697±1.7	0.750	1.076
16.56	0.852±1.6	0.876	1.028
11.04	0.928±1.6	0.944	1.017
5.52	0.980±1.6	0.986	1.006
0.0	1.000	1.000	1.000
- 5.52	0.985±1.6	0.986	1.001
-11.04	0.930±1.7	0.944	1.015
-16.56	0.846±1.7	0.876	1.035
-22.08	0.715±1.7	0.750	1.049

Table 3.3 Total power distribution of Z-direction in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured	Calculated	C/E
2.54	1.000	1.000	1.000
7.62	0.992±1.6	0.981	0.989
12.70	0.945±1.6	0.942	0.997
17.78	0.896±1.6	0.884	0.987
22.86	0.820±1.6	0.808	0.985
27.94	0.714±1.7	0.716	1.003
33.02	0.616±1.7	0.608	0.987
38.10	0.494±1.7	0.491	0.994
43.18	0.399±1.8	0.397	0.995
48.26	0.044±2.4	—	—
53.34	0.032±2.5	—	—

Table 3.4 Total power distribution of X-direction in FCA-XIV-1(45V) core

Distance(cm)	Measured	Calculated	C/E
22.08	0.896±1.5	0.947	1.057
16.56	0.975±1.5	0.995	1.021
11.04	0.992±1.5	0.999	1.007
5.52	0.998±1.5	1.002	1.004
0.0	1.000	1.000	1.000
- 5.52	0.996±1.5	1.002	1.006
-11.04	0.989±1.5	0.999	1.010
-16.56	0.975±1.5	0.995	1.021
-22.08	0.902±1.5	0.947	1.050

Table 3.5 Total power distribution of Y-direction in FCA-XIV-1(45V) core

Distance(cm)	Measured	Calculated	C/E
22.08	0.903±1.5	0.947	1.049
16.56	0.976±1.5	0.995	1.019
11.04	0.997±1.5	0.999	1.002
5.52	1.001±1.5	1.002	1.001
0.0	1.000	1.000	1.000
- 5.52	0.996±1.5	1.002	1.006
-11.04	0.993±1.5	0.999	1.006
-16.56	0.983±1.5	0.995	1.012
-22.08	0.919±1.5	0.947	1.030

Table 3.6 Total power distribution of Z-direction in FCA-XIV-1(45V) core

Distance(cm)	Measured	Calculated	C/E
22.08	0.649±1.6	0.700	1.079
16.56	0.829±1.6	0.856	1.033
11.04	0.919±1.6	0.935	1.017
5.52	0.974±1.6	0.985	1.011
0.0	1.000±1.6	1.000	1.000
- 5.52	0.970±1.6	0.985	1.015
-11.04	0.920±1.6	0.935	1.016
-16.56	0.827±1.6	0.856	1.035
-22.08	0.639±1.6	0.700	1.095

Table 3.7 Total power distribution of X-direction in FCA-XIV-2 core

Distance(cm)	Measured	Calculated	C/E
53.35	0.040 ± 2.1	—	—
48.26	0.053 ± 2.1	—	—
43.18	0.462 ± 1.5	0.454	0.983
38.10	0.534 ± 1.5	0.527	0.987
33.02	0.640 ± 1.5	0.632	0.988
27.94	0.742 ± 1.5	0.731	0.985
22.86	0.821 ± 1.5	0.816	0.994
17.78	0.901 ± 1.5	0.890	0.988
12.70	0.956 ± 1.5	0.945	0.988
7.62	0.982 ± 1.7	0.982	1.000
2.54	1.000	1.000	1.000
- 2.54	0.995 ± 1.7	1.000	1.005
- 7.62	0.979 ± 1.7	0.982	1.003
-12.70	0.948 ± 1.7	0.945	0.997
-17.78	0.886 ± 1.7	0.890	1.005
-22.86	0.813 ± 1.7	0.816	1.004
-27.94	0.728 ± 1.7	0.731	1.004
-33.02	0.631 ± 1.7	0.632	1.002
-38.10	0.527 ± 1.8	0.527	1.000
-43.18	0.452 ± 1.8	0.454	1.004
-48.26	0.053 ± 2.5	—	—
-53.35	0.040 ± 2.5	—	—

Table 3.8 Total power distribution of Y-direction in FCA-XIV-2 core

Distance(cm)	Measured	Calculated	C/E
22.08	0.667 ± 1.6	0.700	1.049
16.56	0.828 ± 1.6	0.856	1.034
11.04	0.922 ± 1.6	0.935	1.014
5.52	0.977 ± 1.6	0.985	1.008
0.0	1.000 ± 1.6	1.000	1.000
- 5.52	0.970 ± 1.6	0.985	1.015
-11.04	0.922 ± 1.6	0.935	1.014
-16.56	0.824 ± 1.6	0.856	1.039
-22.08	0.667 ± 1.6	0.700	1.049

Table 3.9 Total power distribution of Z-direction in FCA-XIV-2 core

Distance(cm)	Measured	Calculated	C/E
43.18	0.040 ± 2.3	—	—
38.10	0.057 ± 2.2	—	—
33.02	0.469 ± 1.6	0.471	1.004
27.94	0.584 ± 1.6	0.583	0.998
22.86	0.725 ± 1.5	0.715	0.986
17.78	0.839 ± 1.5	0.827	0.986
12.70	0.930 ± 1.5	0.913	0.982
7.62	0.985 ± 1.5	0.971	0.986
2.54	1.000 ± 1.5	1.000	1.000
- 2.54	0.995 ± 1.5	1.000	1.005
- 7.62	0.971 ± 1.5	0.971	1.000
-12.70	0.915 ± 1.6	0.913	0.998
-17.78	0.829 ± 1.6	0.827	0.996
-22.86	0.713 ± 1.6	0.715	1.003
-27.94	0.581 ± 1.6	0.583	1.003
-33.02	0.463 ± 1.6	0.471	1.017
-38.10	0.058 ± 2.3	—	—
-48.18	0.040 ± 2.4	—	—

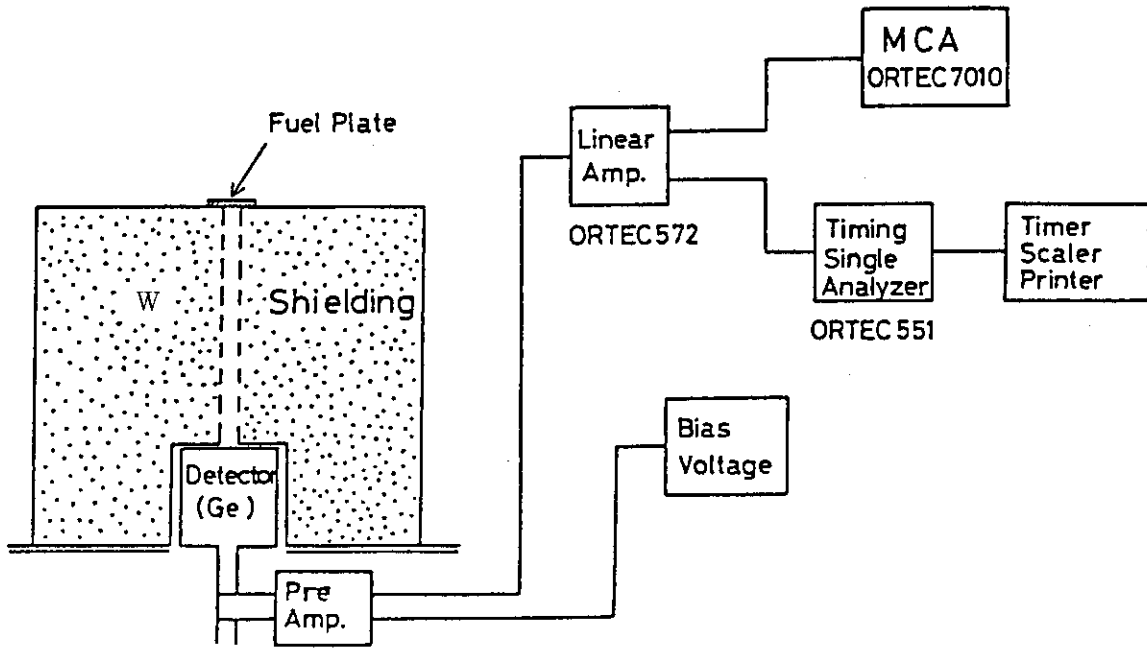


Fig. 3.1 Block diagram of measurement system

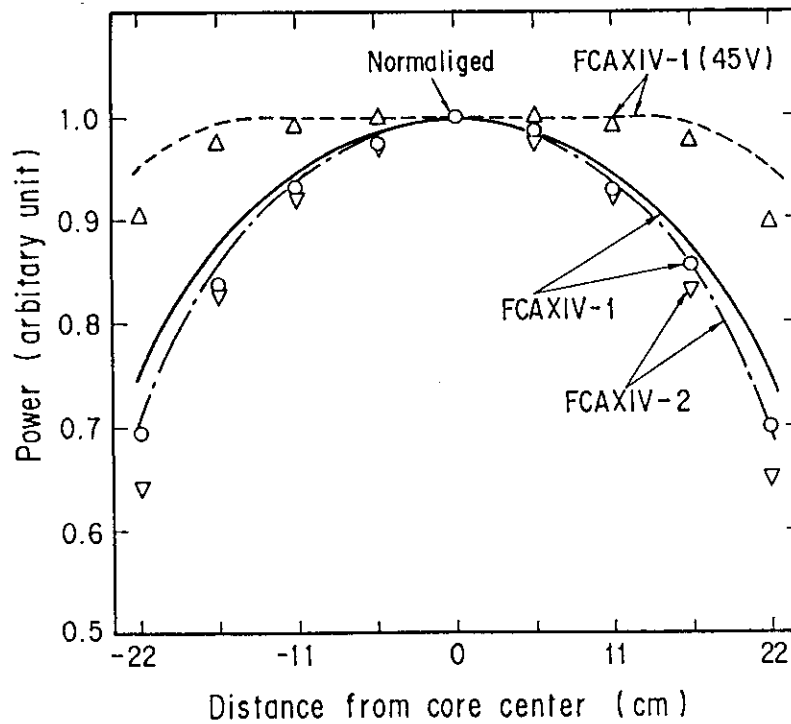


Fig. 3.2 Measured and calculated X-direction power distribution in FCA-HCLWR core

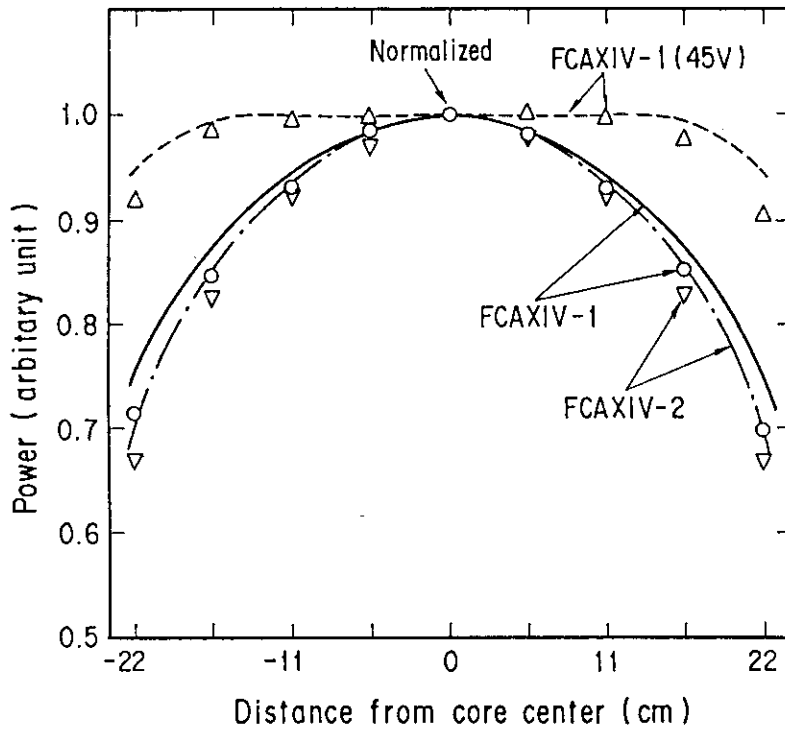


Fig. 3.3 Measured and calculated Y-direction power distribution in FCA-HCLWR core

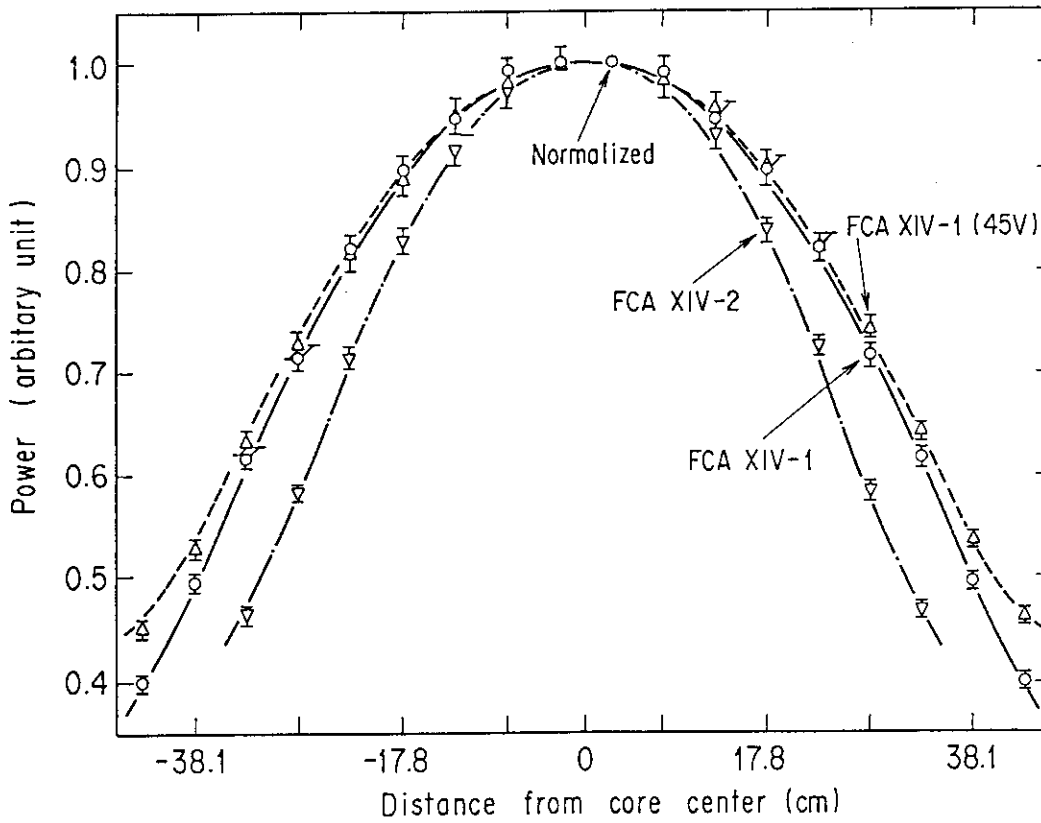


Fig. 3.4 Measured and calculated Z-direction power distribution in FCA-HCLWR core

4. 解 析

出力分布の解析は、Fig. 4.1 に示す計算フローチャートに従って行った。各領域の実効断面積は SRAC コード¹⁰⁾ に組み込まれている評価済み核データファイル JENDL-2 に基づく 86 群断面積と一次元板状モデルで、衝突確立法により計算した。各セルの実効断面積の計算においては、それらのセルについて一次元無限板状モデルで実効増倍率 (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。

エネルギー群構造は、10 MeV \sim 0.683 eV を 66 群に、0.683 eV \sim 10^{-5} eV を 10 群に分割している。エネルギー群構造を Table 4.1 に示す。共鳴領域の断面積は、NR 近似により、SRAC コードに組み込まれている Table-look-up 法により計算している。

SRAC コードには、現時点ではポリスチレンに対して熱中性子の散乱核データが整備されていない。このため本解析においてはポリエチレンの散乱核データを代用した。この実験に用いたポリスチレンは、ベンゼン核にエチル基のついたポリマーである。ベンゼン及びエチレンに関するスペクトルの実測値は報告されているが、これら 2 つの散乱核は H_2O のそれとあまり大きく異ならない。ポリスチレン分子構造は、ベンゼンとエチレンのポリマーであること、さらに高転換軽水炉心 HCLWR の中性子スペクトルは軽水炉のそれと比べて硬いことからポリエチレンの散乱核データを用いても核特性へのその影響は小さいと考えられる。

非等方拡散係数 (D_{\parallel} 及び D_{\perp}) は、SRAC コードに組み込まれている Benoist の方法に基づいて計算した。ここで D_{\parallel} 及び D_{\perp} はセル内の物質板に対し、平行及び垂直な方向の拡散係数である。セル計算では各領域の原子数密度は、体系内の物質量を保存するように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。本実験体系の構築に用いたセルの原子数密度を Table 4.2 に示す。

10 群縮約群定数を求めるために、実験体系を 2 次元 R-Z モデル化し、上で求めた実効断面積及び方向依存の拡散係数を用い、拡散計算コード CITATION¹¹⁾ で拡散計算を行った。この計算で得られた各領域の中性子スペクトルを重みとして、86 群実効断面積を 10 群に縮約した。この 10 群縮約断面積を用い、3 次元 X-Y-Z 拡散計算を行いベース計算値とした。輸送効果の補正係数は、2 次元 R-Z 体系化し 10 群群定数を用い、SN 法に基づく TWOTRAN による輸送計算と CITATION による拡散計算の出力分布の結果から求めた。輸送計算では、Po-S₀ 近似を用いた。ここで求めた輸送補正係数をベース計算である 3 次元拡散計算の値に乗じて、輸送補正された出力分布が計算された。計算値は、Table 3.1 \sim 3.9 に示されている。また計算値は実験値と同じ位置で 1.0 に規格化されている。輸送補正量は約 1% 程度であり大きくはない。

Table 4.1 Collapsed 10-Energy group structure

Group number	Corresponding fine group number ^{a)}	Energy range	
1	1 ~ 10	10.0 ~ 0.821	MeV
2	11 ~ 20	821 ~ 67.4	keV
3	21 ~ 30	67.4 ~ 5.53	keV
4	31 ~ 45	5.53 ~ 0.130	keV
5	46 ~ 55	130 ~ 10.7	eV
6	56 ~ 58	10.7 ~ 5.04	eV
7	59 ~ 66	5.04 ~ 0.683	eV
8	67 ~ 72	0.683 ~ 0.320	eV
9	73 ~ 78	0.320 ~ 0.110	eV
10	79 ~ 86	0.110 ~ 10^{-5}	eV

a) Used in the cell calculation

Table 4.2 Nuclide number density in the cell of FCA-HCLWR core including structural material

(unit : $10^{22} \cdot \text{cm}^{-3}$)

Cell Nuclide	EU06A	EU06A(45V)	EU06C	EU06C(45V)	EU05
U-235	0.0771	0.0771	0.1029	0.1029	0.0517
U-238	1.1153	1.1153	1.5635	1.5635	0.8962
H	1.426	0.797	1.426	0.797	1.901
C	1.426	0.797	1.426	0.797	1.901
O	1.900	1.900	1.376	1.376	1.573
Al	0.651	0.651	—	—	0.434
Cr	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177
Mn	0.0090	0.0090	0.0090	0.0090	0.0090
Fe	0.636	0.636	0.636	0.636	0.636
Ni	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077

Cell Nuclide	A x BA	A x BA(45V)	A x BB	SCRA	SCRB
U-235	0.00232	0.00232	0.00186	0.6782	0.6782
U-238	1.1448	1.1448	0.9159	0.0513	0.0513
H	1.426	0.797	1.901	2.581	3.441
C	1.426	0.797	1.901	1.291	1.722
O	2.294	2.294	1.835	—	—
Al	—	—	—	0.848	0.565
Cr	0.177	0.177	0.177	0.294	0.294
Mn	0.0090	0.0090	0.0090	0.0149	0.0149
Fe	0.636	0.636	0.636	1.056	1.056
Ni	0.077	0.077	0.077	0.127	0.127

Table 4.2 (Continued)

Cell Nuclide	EUDA	EUDC	PuDA	NUB	DUB
Pu-239	—	—	0.1568	—	—
Pu-240	—	—	0.0138	—	—
Pu-241	—	—	0.00061*	—	—
Am-241	—	—	0.00069*	—	—
U-235	0.1015	0.1960	—	0.0289	0.0084
U-238	0.8766	0.7780	—	3.9889	4.0174
H	—	—	—	—	—
C	5.395	5.395	5.620	—	—
O	—	—	0.665	—	—
Al	—	—	0.456	—	—
Cr	0.177	0.177	0.217	0.177	0.177
Mn	0.0090	0.0090	0.0118	0.0090	0.0090
Fe	0.636	0.636	0.790	0.636	0.636
Ni	0.077	0.077	0.097	0.077	0.077

* As of 1986.6

Cell Nuclide	SSB
Cr	1.601
Mn	0.0813
Fe	5.749
Ni	0.698

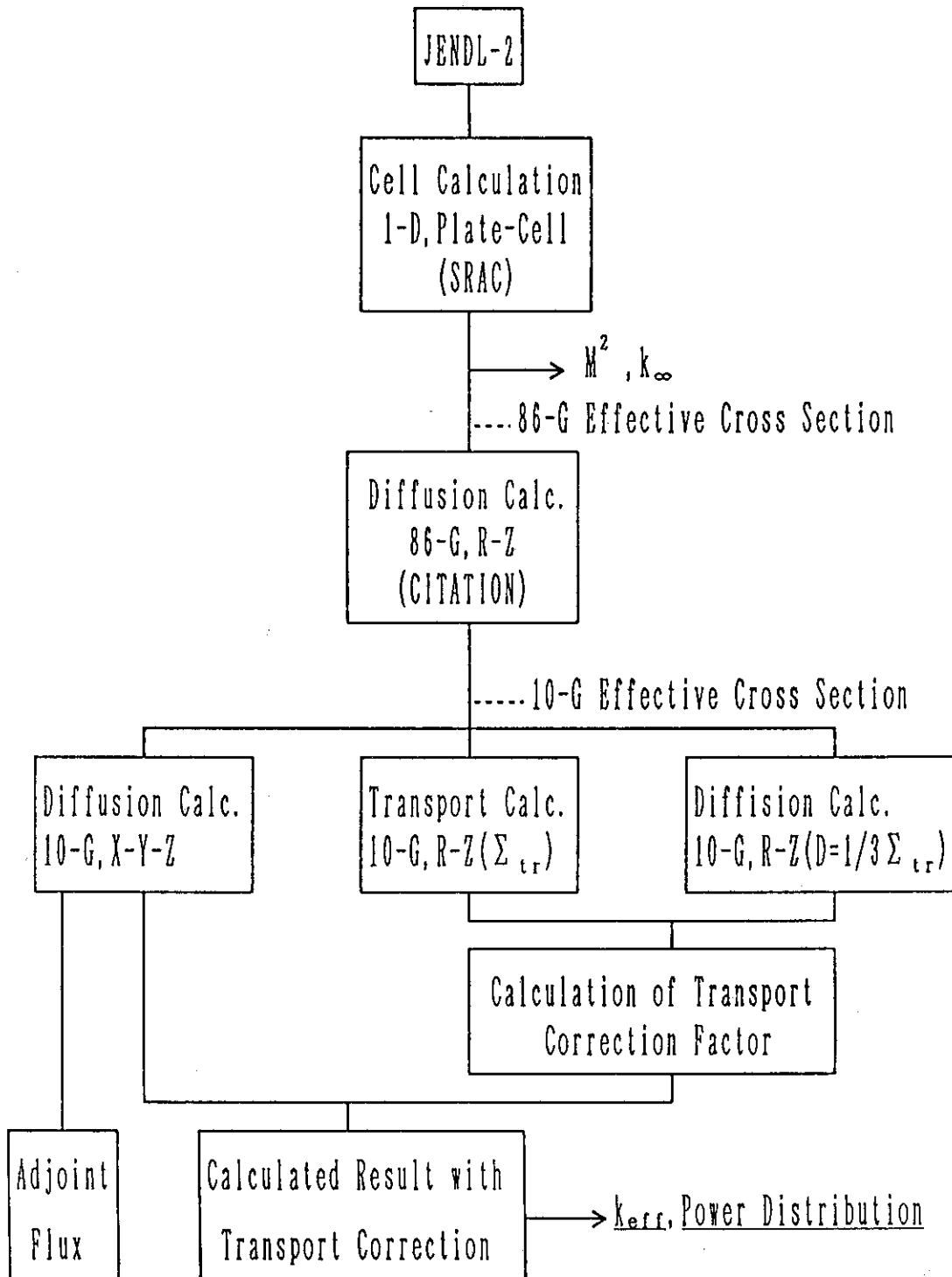


Fig. 4.1 Calculation flow used for power distribution

5. 無限増倍率 k_{∞} の算出

高転換軽水炉 HCLWR の炉特性の上で、特に安全性の観点から重要と考えられるものの一つが無限増倍率 k_{∞} の減速材ボイド特性である。また、無限増倍率 k_{∞} は無限に大きな体系における、ある世代に起こった核分裂中性子数の 1 世代前の核分裂中性子数の比として定義される。即ち、中性子の漏れのない体系であることから、ある世代の中性子の生成と消滅（吸収）の比と等価であり、この量は解析に使用している核データセット及び解析手法の妥当性を直接検証できる意味で重要な積分データの一つである。しかしながら、FCA では無限増倍率 k_{∞} を直接測定することが困難であることから、一部計算値を用いて無限増倍率 k_{∞} を算出することとした。

修正一群理論による臨界方程式では、無限増倍率 k_{∞} は体系の材料バックリング B_m^2 と移動面積 M^2 とにより次の式で関係付けられる。

$$k_{\infty} = 1 + B_m^2 M^2 \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

体系が臨界状態にあるとき、材料バックリング B_m^2 は形状バックリング B_g^2 に等しくなる。形状バックリング B_g^2 は、炉心の形と大きさが決まれば一義的に決まる。FCA における HCLWR 模擬炉心のテスト領域が直方体であることから、形状バックリング B_g^2 は各方向のバックリング B_x^2 、 B_y^2 及び B_z^2 の和として定義される。即ち、

$$B_m^2 = B_g^2 = B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

を得る。構築したテスト領域は、XY 断面が 50 cm × 50 cm の正方形で高さ (Z) 90 cm の直方体である。減速材ボイド率が 0 % の場合、中性子の平均自由行程は 3 cm 程度であることから、テスト領域の境界約 10 cm を除いた範囲ではほぼ基本モードスペクトルが成立していると考えられる。

テスト領域各方向の中性子束分布は、余弦関数で表されることから、各方向のバックリングは中性子束を余弦関数にフィッティングして求めることが出来る。本測定では、中性子束と等価な出力分布を各方向について測定していることから、各方向のセル出力を余弦関数にフィッティングし各方向のバックリングを求めた。フィッティングには、セル内の劣化ウラン燃料板出力の 20 % 濃縮ウラン燃料板出力に対する比が一定となった範囲のデータを使用した。減速材ボイド率が 0 % の場合でも、劣化ウラン燃料板出力のうちその約 70 % 以上が U-238 の核分裂によるものであり、他方 20 % 濃縮ウラン燃料板出力はその殆どが U-235 の核分裂によるものである。よって、劣化ウラン燃料板出力の 20 % 濃縮ウラン燃料板出力に対する比は、スペクトルインデックスを表していると考えられる。この出力の比が一定となっている範囲では、基本モードスペクトルが成立していると思ふことが出来る。Fig. 5.1 ~ 5.3 に各炉心の X 及び Y 方向の、Fig. 5.4 ~ 5.6 に Z (高さ) 方向のスペクトルインデックスとしての劣化ウラン燃料板と 20 % 濃縮ウラン燃料板の出力比及びフィッティングに使用したデータの範囲を示す。Table 5.1 に各炉心について、フィッティングにより求めた各方向のバックリング、材料バックリング及び無限増倍率

k_{∞} を示す。無限増倍率 k_{∞} は、(5.1) 式により求めた。移動面積 M^2 は 86 群セル計算により求めた値である。実験誤差は、フィッティングの当てはめによる誤差の伝播から求めた。

無限増倍率 k_{∞} の計算値は、セル計算により得られた 86 群セル実効断面積を用いた 1 点炉 B1 近似により求めた。この際、セルのバックリングを調整して系の実効増倍率 k_{eff} を 1 とした。実効増倍率 k_{eff} が 1 のバックリングの値をセルの材料バックリング Bm^2 とし、この材料バックリング Bm^2 とこのとき無限増倍率 k_{∞} の値を用いて (5.1) 式により移動面積 M^2 を求めた。上記により求めた材料バックリング Bm^2 及び無限増倍率 k_{∞} の計算値と C/E 値を Table 5.2 に示している。

Table 5.1 Measured material buckling and infinite multiplication factor

Item \ Core Name	FCA XIV-1	FCA XIV-1(45V)	FCA XIV-2
B_x^2 (10^{-4}cm^{-2})	11.39 ± 1.13	1.51 ± 1.37	12.58 ± 0.87
B_y^2 (10^{-4}cm^{-2})	11.27 ± 0.85	0.81 ± 1.25	12.79 ± 0.87
B_z^2 (10^{-4}cm^{-2})	7.59 ± 0.25	7.18 ± 0.18	11.39 ± 0.41
B_m^2 (10^{-4}cm^{-2})	30.25 ± 1.43	9.50 ± 1.86	36.76 ± 1.30
M^2 (cm^2) [*]	58.30	88.55	55.97
k_∞	1.176 ± 0.008	1.084 ± 0.017	1.206 ± 0.007

* Migration area M^2 is calculated using B_m^2 and k_∞ obtained by the 86 energy group cell calculation.

Table 5.2 Calculated material buckling, infinite multiplication factor and C/E value

Item \ Core Name	FCA XIV-1	FCA XIV-1 (45V)	FCA XIV-2
B_m^2 (10^{-4}cm^{-2})	27.70	8.02	35.37
C/E	0.916	0.844	0.962
k_∞	1.161	1.071	1.198
C/E	0.987	0.988	0.993

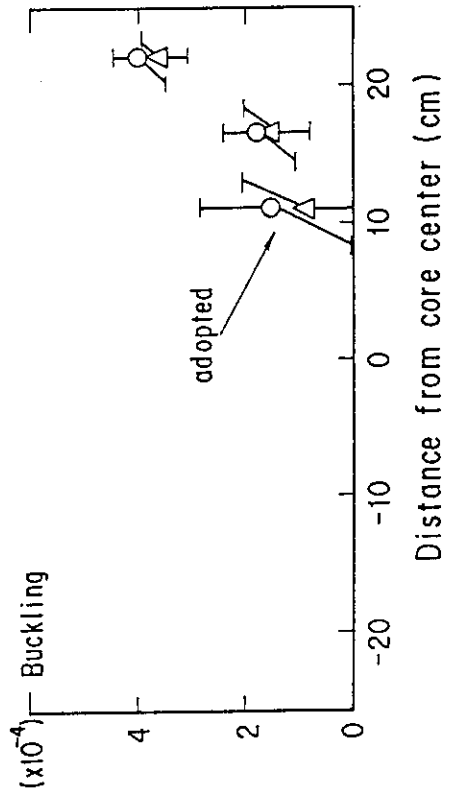
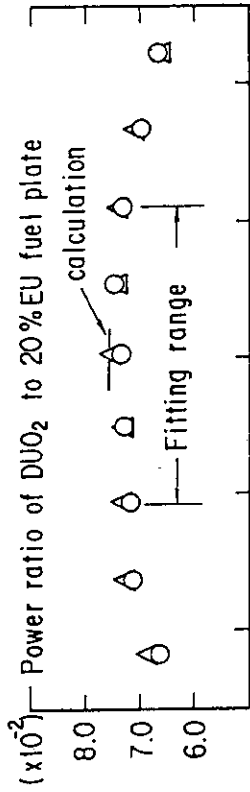
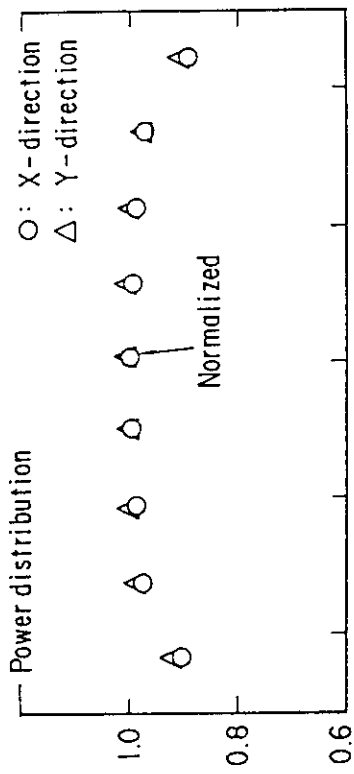


Fig. 5.2 Measured power distribution and power ratio of X,Y-direction in FCA-XIV-1(45V) core

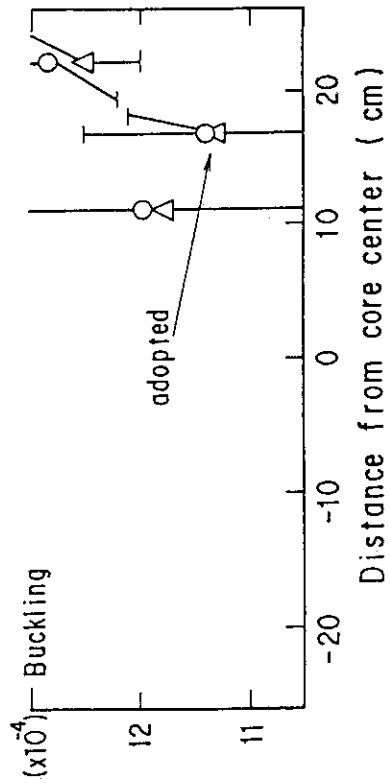
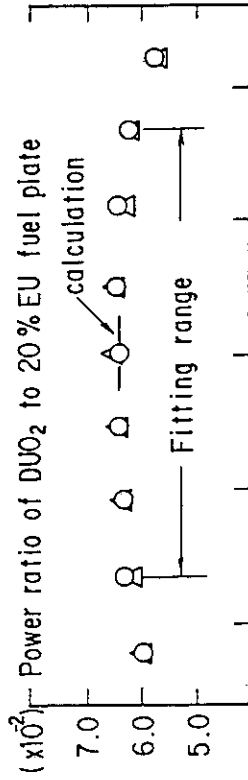
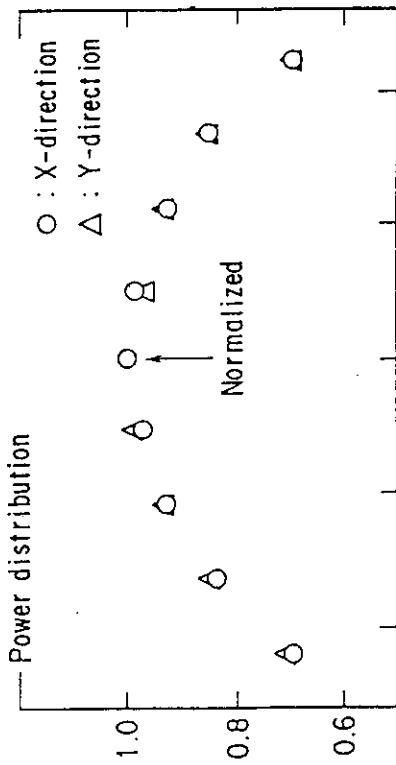


Fig. 5.1 Measured power distribution and power ratio of X,Y-direction in FCA-XIV-1 core

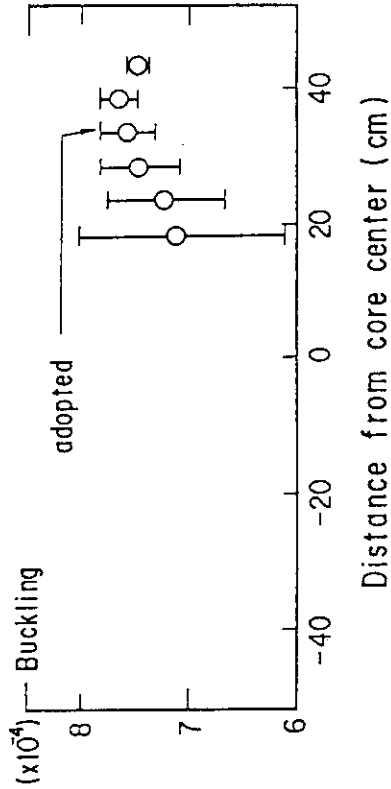
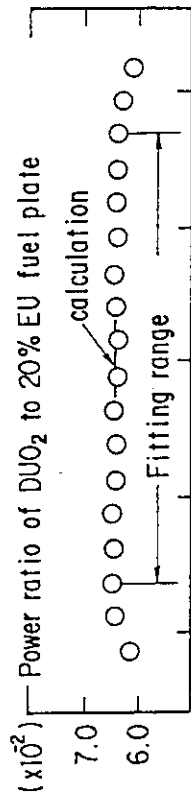
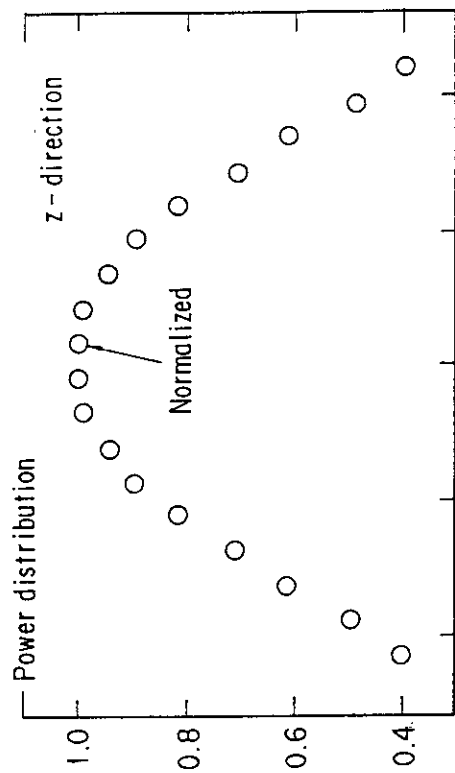


Fig. 5.4 Measured power distribution and power ratio of Z-direction in FCA-XIV-1 core

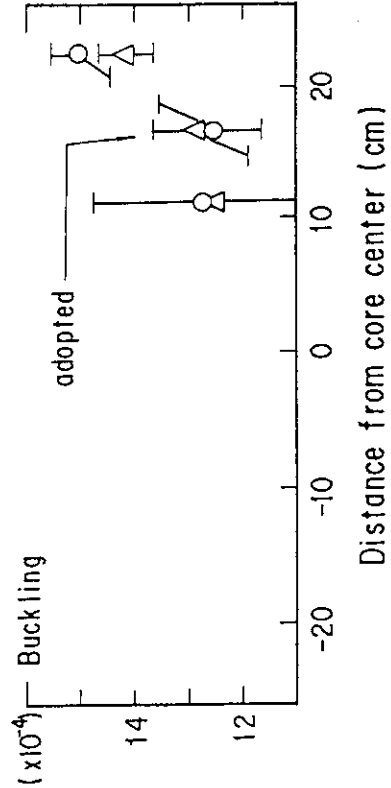
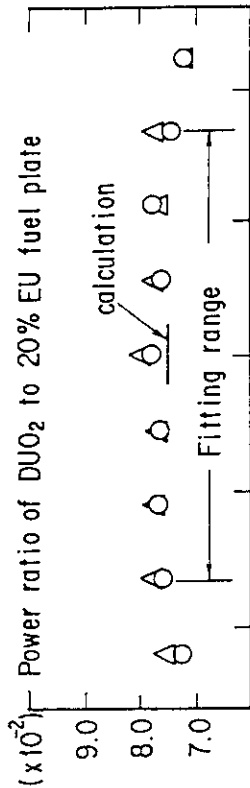
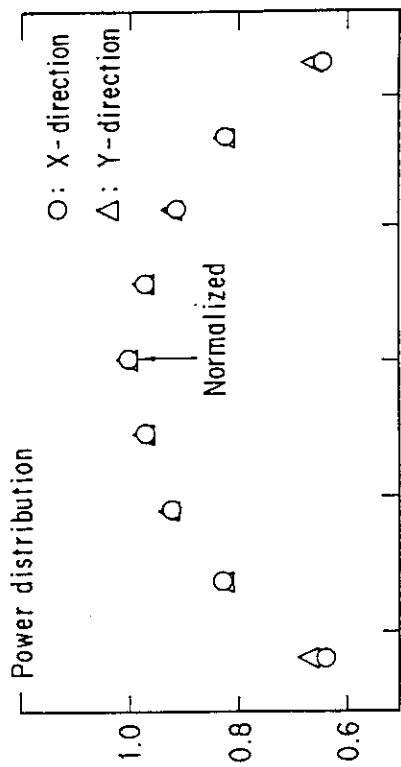


Fig. 5.3 Measured power distribution and power ratio of X,Y-direction in FCA-XIV-2 core

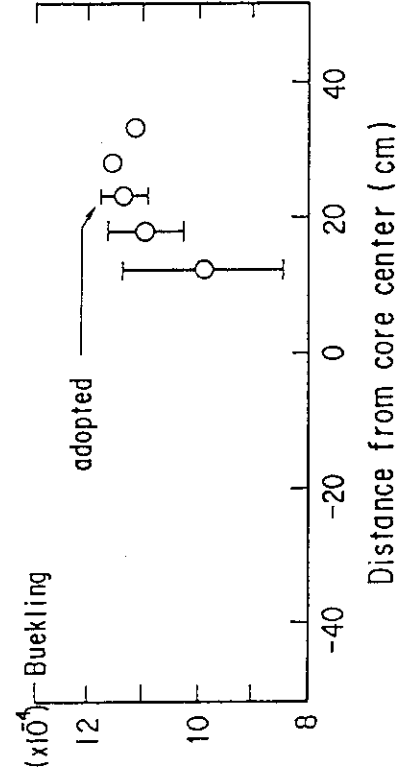
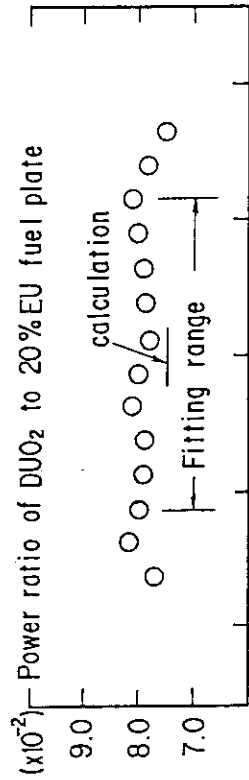
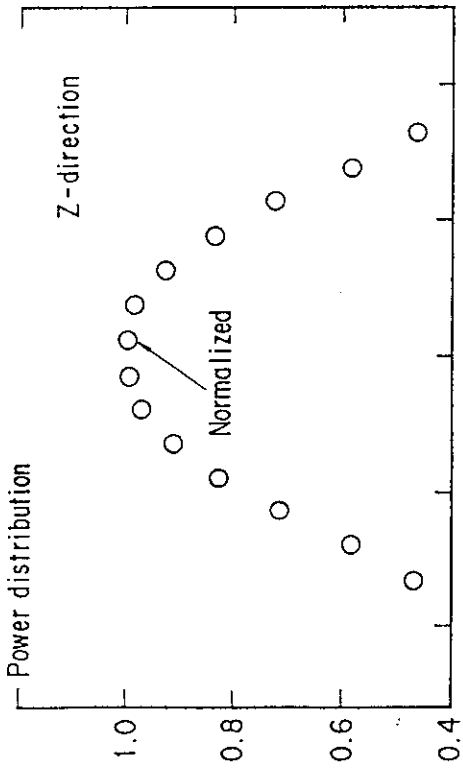


Fig. 5.6 Measured power distribution and power ratio of z-direction in FCA-XIV-2 core

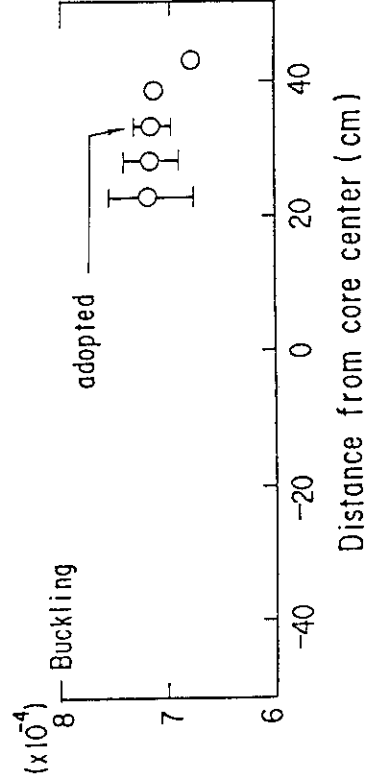
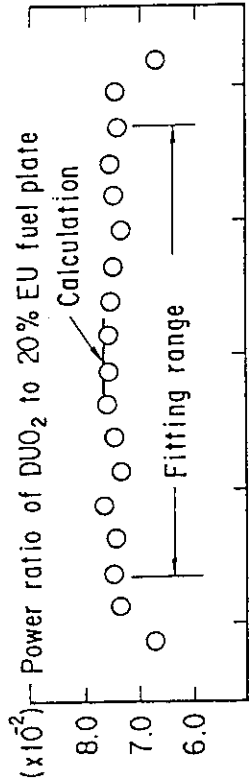
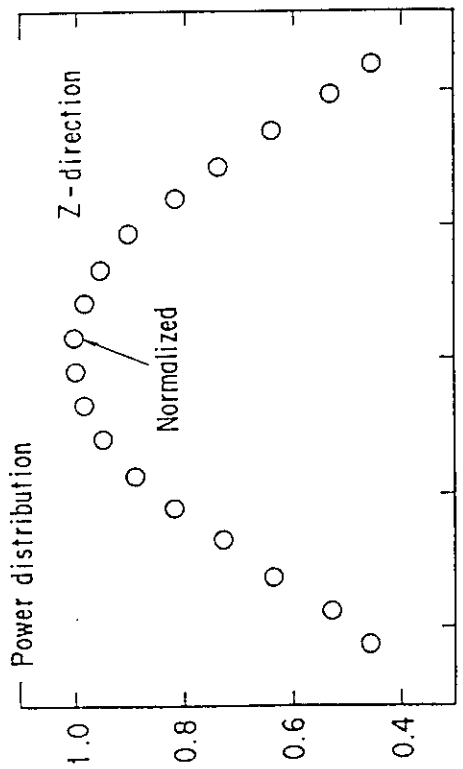


Fig. 5.5 Measured power distribution and power ratio of Z-direction in FCA-XIV-1(45V) core

6. 結果及び検討

6.1 出力分布

FCAにおける高転換軽水炉模擬炉心(Phase-1)として構築したFCA-XIV-1, FCA-XIV-1(45V)及びFCA-XIV-2炉心の各方向について求めたセル出力分布の実験値と計算値を, Table 3.1~3.9及びFig. 3.2~3.4に示している。全ての炉心について, X及びY方向の計算値はテスト領域の境界で実験値を約10%と大きく過大評価している。他方Z方向については, 全ての範囲で計算値と実験値は実験誤差内で一致している。テスト領域の径方向(X, Y)境界での実験値と計算値の差は, テスト領域とドライバー領域の間にスペクトルマッチングを行うために設けた5cm厚のステンレスバッファ層の評価が適切に計算されていないためと考えられる。

テスト領域を構成しているEU06Aセルには, 燃料として20%濃縮ウラン燃料板, 天然ウラン燃料板及び劣化ウラン燃料板が使用されている。20%濃縮ウラン燃料板出力は, U-235の核分裂によるものが主であり, 天然ウラン燃料板出力はU-235及びU-238の核分裂が約半々であり, 劣化ウラン燃料板出力はU-238の核分裂によるものが最もソフトスペクトルであるFCA-XIV-2炉心でも60%以上と支配的である。セル計算で求めた核燃料板内の出力分担率をTable 6.1に示す。このことから, 20%濃縮ウラン燃料板は低エネルギー側に感度を持ち, 他方劣化ウラン燃料板は高エネルギーに感度を有している。全ての炉心の各方向について, それぞれの燃料板ごとの出力分布の実験値と計算値及びC/EをTable 6.2~6.28に示す。実験値と計算値の双方とも, 炉心中心の燃料板出力を1.0に規格化している。これらの表から, どの燃料板についても計算値は実験値を径方向(X, Y)境界で同程度過大評価している。しかし, 軸方向(Z)については境界近傍に於いても計算値は誤差範囲内で実験値と一致している。計算では高速中性子のみならず, 低速中性子についても径方向(X, Y)境界近傍における中性子束の落ち込みを過小評価している。このことから, テスト領域とドライバー領域の間に設けたステンレススチールの効果を, 現在使用している解析手法は適切に評価していないと思われる。

テスト領域中心における中性子スペクトルの計算予測精度を評価するために, 各測定炉心について20%濃縮ウラン燃料板に対する天然ウラン燃料板及び劣化ウラン燃料板の出力比を求めた。出力比の測定値と計算値及びC/EをTable 6.29及びFig. 6.1に示す。この図から, 天然ウラン燃料板及び劣化ウラン燃料板の20%濃縮ウラン燃料板に対する出力比は中性子スペクトルが軟化するに連れて, 即ちH/U比が増加するに連れて小さくなる。20%濃縮ウラン燃料板に対する天然ウラン燃料板出力比は, 最もスペクトルの硬いFCA-XIV-1(45V)(H/U比=0.668)からスペクトルの軟化したFCA-XIV-2(H/U比=2.006)になると約20%減少しているのに対し, 劣化ウラン燃料板出力比は約40%と大きく減少している。SRACによる計算値は天然ウラン燃料板及び劣化ウラン燃料板出力とも実験値をよく再現している。しかしながら, 中性子スペクトルが軟化するに連れて計算値は実験値を若干過小評価する傾向を示している。また, 劣化ウラン燃料板出力比は, 中性子スペクトルに対する感度が大きいことからスペクトルインデック

スとして利用できることが分かる。Table 6.30 及び Fig. 6.2 ~ 6.4 に、各炉心中心セル内の燃料板出力を 20 %濃縮ウラン燃料板出力を 1.0 に規格化して示している。これより板状燃料の非均質配列に対して計算は出力分布を求めるための実効断面積及び中性子束分布の評価は既ね妥当と思われる。

6.2 無限増倍率 k_{∞}

高転換軽水炉の核特性の一つである無限増倍率 k_{∞} の計算予測精度を検証するために、方向別出力分布の測定値をフィッティングして求めた材料バックリング Bm^2 と 86 群セル計算から求めた移動面積 M^2 を使って無限増倍率 k_{∞} を求めた。Table 5.1 に測定した各方向バックリング (Bx^2 , By^2 , Bz^2)、材料バックリング Bm^2 、移動面積 M^2 と無限増倍率 k_{∞} を、Table 5.5 に計算で求めた材料バックリング Bm^2 、無限増倍率 k_{∞} 及び C/E を示している。

各方向バックリングは、Fig. 5.1 ~ 5.6 に示している劣化ウラン燃料板の 20 %濃縮ウラン燃料板に対する出力比がほぼ一定値の範囲の測定値を余弦関数にフィッティングして求めた。径方向の出力比は、45 % ボイドの中性子スペクトルの硬い FCA-XIV-1 (45V) を除き炉心中央部の広い範囲で一定値を示している。しかし FCA-XIV-1 (45V) では、出力比は炉心中央部の約 20 cm の範囲でしか一定値が成立しておらず基本モードスペクトルの成立範囲が狭いことを示している。他方軸方向については、全ての炉心について炉心境界の点を除いた広い範囲で出力比が一定しており、この範囲で基本モードスペクトルが成立している。このことから、FCA-XIV-1 (45V) の径方向で基本モードスペクトルの成立範囲がやや狭いものの炉心中心領域では HCLWR 炉心のスペクトルを十分に模擬したものとなっている。

Fig. 5.1 ~ 5.6 に、データの範囲を変えてフィッティングしたときの方向別バックリング値の変化の様子をも示している。この図から出力比が一定になっている範囲では方向別バックリングの値も一定になる傾向が認められる。このことから各方向のバックリングはこの出力比が一定になっている範囲のデータをフィッティングして得られた値であることから実験値として概ね妥当と思われる。径方向バックリングの誤差が軸方向バックリングの値に比べて大きくなっているのは、フィッティングのデータ点が少ないためである。また FCA-XIV-1 (45V) の径方向バックリングの値は、出力分布が平坦に近いことから小さくなっており、かつ誤差も非常に大きくなっている。しかしながら Table 6.31 に示しているように材料バックリング Bm^2 に占める径方向バックリングの割合が 3 割程度で小さいことから、径方向バックリングの誤差が大きくなっても無限増倍率 k_{∞} への誤差伝播はそれ程大きくはならない。

高転換軽水炉の無限増倍率 k_{∞} の解析手法の妥当性の検討のためには、測定精度として 1 % を要求している。計算による移動面積 M^2 の誤差が小さく無視し得るとすると、材料バックリング Bm^2 に許容される相対測定誤差は以下の式で評価できる。

$$\delta Bm^2 / Bm^2 = k_{\infty} / (k_{\infty} - 1) (\delta k_{\infty} / k_{\infty})$$

無限増倍率 k_{∞} が約 1.1 及び 1.2 では材料バックリング Bm^2 に 11 % 及び 6 % の誤差が許容される。減速材ボイド率 45 % の FCA-XIV-1 (45V) の材料バックリング Bm^2 の誤差が約 19 % と

大きな値となっているが、他の炉心については無限増倍率 k_{∞} の目標精度である 1% 以下を満足している。しかしながら高精度の測定が望ましいことから今後の課題として、今回のように減速材ボイド率をもパラメータとした炉心について材料バックリング B_m^2 の測定から無限増倍率 k_{∞} を評価する場合には、特に径方向の大きさを大きくすべきである。

無限増倍率 k_{∞} の測定値を Table 5.1 及び 5.2 に示している。SRAC による解析値は、どの炉心についても実験値を約 1% 過小評価しているが実験誤差内で一致している。ウラン燃料を用いた高転換軽水炉において、減速材対燃料体積比及び減速材ボイド率を変えたこの実験の範囲では SRAC による計算値は実験値と良く一致している。

Table 6.31 に各炉心の軸方向反射体節約 λ_z の実験値と計算値を示している。軸方向反射体節約 λ_z は炉心高さ H と軸方向バックリング Bz^2 を用いて次式により求めた。

$$\lambda_z = \pi / Bz - H$$

FCA-XIV-1 (45V) では 27 cm であるのに対し FCA-XIV-2 では 22 cm と小さくなっており、その変化は炉心スペクトルの硬さの度合いに対応している。計算値は実験値を 2% 程度過大評価となっているものの誤差内で一致している。

Table 6.1 calculated power portion in fuel plate of each type

Core Name	H/U Ratio	Fuel plate	$^{25}\text{F}/\text{F}^{\text{t}}$	$^{28}\text{F}/\text{F}^{\text{t}}$
FCA XVI-1	1.196	EU	0.97	0.03
		NU	0.49	0.51
		DUO ₂	0.26	0.74
FCA XVI-1 (45V)	0.668	EU	0.96	0.04
		NU	0.43	0.57
		DUO ₂	0.19	0.81
FCA XVI-2	2.006	EU	0.98	0.02
		NU	0.60	0.40
		DUO ₂	0.38	0.62

Note ^{25}F , ^{28}F and F^{t} denote fissions of U-235, U-238 and total, respectively.

Table 6.2 Measured and calculated EU plate power of X-direction in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
23.91	0.6233±2.1	0.6607	1.060
22.16	0.7096±2.1	0.7528	1.061
20.25	0.7750±2.1	0.8096	1.045
18.39	0.8250±2.1	0.8479	1.028
16.64	0.8814±2.1	0.8769	0.995
14.73	0.8603±2.1	0.9041	1.051
12.87	0.8951±2.1	0.9263	1.035
11.12	0.9176±2.1	0.9444	1.029
9.21	0.9516±2.1	0.9622	1.011
7.35	0.9873±2.1	0.9764	0.989
5.60	0.9712±2.1	0.9863	1.016
3.69	0.9855±2.1	0.9946	1.009
1.83	0.9985± —	1.0000	1.002
0.08	0.9914±2.1	1.0000	1.009
-1.83	1.0015± —	1.0000	0.998
-3.69	0.9812±2.1	0.9946	1.014
-5.44	0.9580±2.1	0.9870	1.030
-7.35	0.9598±2.1	0.9764	1.017
-9.21	0.9488±2.1	0.9622	1.014
-10.96	0.9332±2.1	0.9460	1.014
-12.87	0.9011±2.1	0.9263	1.028
-14.73	0.8623±2.1	0.9041	1.048
-16.48	0.8359±2.1	0.8793	1.052
-18.39	0.8053±2.1	0.8479	1.053
-20.25	0.7669±2.1	0.8096	1.056
-22.00	0.7031±2.1	0.7584	1.079
-23.91	0.6180±2.2	0.6607	1.069

Table 6.3 Measured and calculated NU plate power of X-direction in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
24.06	0.5699±5.5	0.6144	1.078
22.00	0.6661±5.3	0.7194	1.080
20.10	0.7495±5.1	0.7808	1.042
18.54	0.7847±5.1	0.8180	1.042
16.48	0.8527±5.1	0.8581	1.006
14.58	0.8476±5.1	0.8894	1.049
13.02	0.9439±5.0	0.9105	0.965
10.96	0.9449±5.1	0.9348	0.989
9.06	0.9323±5.1	0.9554	1.025
7.50	0.9780±5.0	0.9711	0.993
5.44	0.9777±5.1	0.9853	1.008
3.54	1.0232±5.0	0.9942	0.972
1.98	0.9755± —	1.0000	1.025
- 0.08	0.9893±5.1	1.0000	1.011
- 1.98	1.0245± —	1.0000	0.975
- 3.54	0.9937±5.1	0.9942	1.001
- 5.60	0.9928±5.1	0.9845	0.992
- 7.50	0.9412±5.3	0.9711	1.032
- 9.06	0.9322±5.3	0.9554	1.025
-11.12	0.9189±5.3	0.9330	1.015
-13.02	0.9119±5.3	0.9105	0.998
-14.58	0.8622±5.4	0.8894	1.032
-16.64	0.7841±5.5	0.8553	1.091
-18.54	0.7854±5.6	0.8180	1.042
-20.10	0.7678±5.6	0.7808	1.017
-22.16	0.6534±6.0	0.7133	1.092
-24.06	0.5255±6.5	0.6144	1.169

Table 6.4 Measured and calculated DUO₂ plate power of X-direction in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
23.03	0.6034 ± 5.0	0.6541	1.084
21.13	0.6755 ± 4.9	0.7318	1.083
17.51	0.8343 ± 4.8	0.8269	0.991
15.61	0.8521 ± 4.8	0.8635	1.013
11.99	0.9283 ± 4.8	0.9170	0.988
10.09	0.9476 ± 4.8	0.9393	0.991
6.47	1.0046 ± 4.8	0.9784	0.974
4.57	0.9947 ± 4.8	0.9897	0.995
0.95	0.9797 ± —	1.0000	1.021
- 0.95	1.0203 ± —	1.0000	0.979
- 4.57	0.9701 ± 4.8	0.9897	1.020
- 6.47	0.9714 ± 4.8	0.9784	1.007
-10.09	0.9311 ± 4.9	0.9393	1.009
-11.99	0.9070 ± 4.9	0.9170	1.011
-15.61	0.8448 ± 5.0	0.8635	1.022
-17.51	0.8177 ± 5.0	0.8269	1.011
-21.13	0.7027 ± 5.1	0.7318	1.041
-23.03	0.5994 ± 5.4	0.6541	1.091

Table 6.5 Measured and calculated EU plate of Y-direction in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
22.08	0.7052 ± 1.2	0.7556	1.071
16.56	0.8573 ± 1.2	0.8781	1.024
11.04	0.9300 ± 1.2	0.9452	1.016
5.52	0.9791 ± 1.2	0.9867	1.008
0.00	1.0000 ± —	1.0000	1.000
- 5.52	0.9865 ± 1.2	0.9867	1.000
-11.04	0.9308 ± 1.2	0.9452	1.015
-16.56	0.8482 ± 1.2	0.8781	1.035
-22.08	0.7196 ± 1.2	0.7556	1.050

Table 6.6 Measured and calculated NU plate power of Y-direction in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
22.08	0.6504 ± 3.1	0.7164	1.101
16.56	0.8063 ± 5.4	0.8567	1.063
11.04	0.9193 ± 2.8	0.9339	1.016
5.52	0.9841 ± 2.8	0.9849	1.001
0.00	$1.0000 \pm -$	1.0000	1.000
- 5.52	0.9812 ± 2.9	0.9849	1.004
-11.04	0.9328 ± 3.1	0.9339	1.001
-16.56	0.8361 ± 3.2	0.8567	1.025
-22.08	0.7028 ± 5.4	0.7163	1.019

Table 6.7 Measured and calculated DUO₂ plate power of Y-direction in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
22.08	0.6259 ± 3.6	0.6963	1.112
16.56	0.8259 ± 3.6	0.8459	1.024
11.04	0.9157 ± 3.4	0.9282	1.014
5.52	0.9820 ± 3.4	0.9841	1.002
0.00	$1.0000 \pm -$	1.0000	1.000
- 5.52	0.9719 ± 3.4	0.9841	1.013
-11.04	0.9186 ± 3.4	0.9282	1.010
-16.56	0.8247 ± 3.6	0.8459	1.026
-22.08	0.6673 ± 3.8	0.6963	1.043

Table 6.8 Measured and calculated EU plate power of Z-direction
in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
43.18	0.4014 ± 1.3	0.4005	0.998
38.10	0.4953 ± 1.3	0.4907	0.991
33.02	0.6151 ± 2.0	0.6084	0.989
27.94	0.7233 ± 1.3	0.7141	0.987
22.86	0.8197 ± 1.3	0.8082	0.986
17.78	0.8945 ± 1.3	0.8838	0.988
12.70	0.9454 ± 1.3	0.9415	0.996
7.62	0.9936 ± 1.3	0.9806	0.987
2.54	$1.0000 \pm -$	1.0000	1.000

Table 6.9 Measured and calculated NU plate power of Z-direction
in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
43.18	0.3751 ± 3.8	0.3809	1.015
38.10	0.4809 ± 3.5	0.4895	1.018
33.02	0.6126 ± 3.2	0.6083	0.993
27.94	0.7247 ± 3.2	0.7158	0.998
22.86	0.8114 ± 3.0	0.8082	0.996
17.78	0.9137 ± 3.0	0.8838	0.967
12.70	0.9366 ± 2.9	0.9416	1.005
7.62	0.9679 ± 2.9	0.9806	1.013
2.54	$1.0000 \pm -$	1.0000	1.000

Table 6.10 Measured and calculated DUO₂ plate power of Z-direction in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
53.34	0.2283±2.7	—	—
48.26	0.3169±2.5	—	—
43.18	0.3841±4.0	0.3712	0.966
38.10	0.4953±3.9	0.4888	0.987
33.02	0.6211±3.6	0.6067	0.977
27.94	0.7283±3.5	0.7157	0.983
22.86	0.8306±3.5	0.8082	0.973
17.78	0.8969±3.5	0.8838	0.985
12.70	0.9517±3.5	0.9415	0.989
7.62	1.0043±3.5	0.9927	0.988
2.54	1.0000± —	1.0000	1.000

Table 6.11 Measured and calculated EU plate power of X-direction in FCA-XIV-1(45V) core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
23.91	0.8647±2.0	0.9003	1.041
22.16	0.9014±2.0	0.9545	1.059
20.25	0.9576±2.0	0.9826	1.026
18.39	0.9736±2.0	0.9957	1.023
16.64	0.9763±2.0	1.0012	1.026
14.73	0.9920±2.0	1.0036	1.012
12.87	0.9856±2.0	1.0036	1.018
11.12	0.9861±2.0	1.0029	1.017
9.21	1.0147±2.0	1.0024	0.988
7.35	1.0058±2.0	1.0030	0.997
5.60	0.9861±2.0	1.0024	1.017
3.69	1.0028±2.0	1.0014	0.999
1.83	0.9975± —	1.0000	1.003
0.08	1.0048±2.0	1.0000	0.995
- 1.83	1.0025± —	1.0000	0.998
- 3.69	0.9991±2.0	1.0014	1.002
- 5.44	0.9910±2.0	1.0023	1.011
- 7.35	0.9988±2.0	1.0030	1.004
- 9.21	1.0025±2.0	1.0024	1.000
-10.96	0.9872±2.0	1.0029	1.016
-12.87	0.9951±2.0	1.0036	1.009
-14.73	0.9807±2.0	1.0036	1.023
-16.48	0.9800±2.0	1.0015	1.022
-18.39	0.9849±2.0	0.9557	1.011
-20.25	0.9448±2.0	0.9826	1.040
-22.00	0.9205±2.0	0.9575	1.040
-23.91	0.8777±2.0	0.9003	1.026

Table 6.12 Measured and calculated NU plate power of X-direction in FCA-XIV-1(45V) core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
24.06	0.7551±4.6	0.8389	1.111
22.00	0.8311±4.6	0.9031	1.087
20.10	0.8815±4.6	0.9358	1.062
18.54	0.9119±4.6	0.9512	1.043
16.48	0.9409±4.6	0.9641	1.025
14.58	0.9749±4.6	0.9718	0.997
13.02	0.9723±4.6	0.9757	1.003
10.96	0.9407±4.6	0.9797	1.041
9.06	0.9774±4.6	0.9853	1.008
7.50	0.9877±4.6	0.9941	1.006
5.44	1.0106±4.6	0.9985	0.988
3.54	0.9794±4.6	0.9995	1.021
1.98	1.0043± —	1.0000	0.996
- 0.08	0.9754±4.6	1.0000	1.025
- 1.98	0.9957± —	1.0000	1.004
- 3.54	1.0284±4.6	0.9995	0.972
- 5.60	0.9727±4.6	0.9984	1.026
- 7.50	0.9964±4.6	0.9941	0.998
- 9.06	0.9658±4.6	0.9853	1.020
-11.12	0.9139±4.7	0.9794	1.072
-13.02	0.9702±4.7	0.9757	1.006
-14.58	0.9397±4.7	0.9718	1.034
-16.64	0.9254±4.7	0.9633	1.041
-18.54	0.9240±4.7	0.9512	1.029
-20.10	0.8814±4.7	0.9358	1.062
-22.16	0.8354±4.8	0.8995	1.077
-24.06	0.7674±4.8	0.8389	1.093

Table 6.13 Measured and calculated DUO₂ plate power of X-direction in FCA-XIV-1(45V) core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
23.03	0.8066 ± 4.4	0.8517	1.056
21.13	0.8544 ± 4.4	0.8972	1.050
17.51	0.9354 ± 4.4	0.9401	1.005
15.61	0.9533 ± 4.4	0.9524	0.999
11.99	0.9888 ± 4.4	0.9664	0.977
10.09	1.0024 ± 4.4	0.9715	0.969
6.47	1.0251 ± 4.4	0.9955	0.971
4.57	1.0118 ± 4.4	0.9978	0.986
0.95	1.0075 ± —	1.0000	0.993
- 0.95	0.9925 ± —	1.0000	1.008
- 4.57	0.9996 ± 4.4	0.9978	0.998
- 6.47	0.9857 ± 4.4	0.9955	1.010
-10.09	0.9697 ± 4.4	0.9715	1.002
-11.99	0.9719 ± 4.4	0.9664	0.994
-15.61	0.9624 ± 4.4	0.9524	0.990
-17.51	0.9407 ± 4.4	0.9401	0.999
-21.13	0.8628 ± 4.4	0.8972	1.040
-23.03	0.7939 ± 4.6	0.8517	1.073

Table 6.14 Measured and calculated EU plate power of Y-direction in FCA-XIV-1(45V) core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
22.08	0.9158 ± 1.1	0.9560	1.044
16.56	0.9814 ± 1.1	1.0013	1.020
11.04	0.9984 ± 1.1	1.0036	1.005
5.52	1.0025 ± 1.1	1.0024	1.000
0.00	1.0000 ± —	1.0000	1.000
- 5.52	0.9995 ± 1.1	1.0024	1.003
-11.04	0.9967 ± 1.1	1.0036	1.007
-16.56	0.9885 ± 1.1	1.0013	1.013
-22.08	0.9284 ± 1.1	0.9560	1.030

Table 6.15 Measured and calculated NU plate power of Y-direction in FCA-XIV-1(45V) core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
22.08	0.8345 ± 2.6	0.9013	1.080
16.56	0.9510 ± 2.6	0.9637	1.013
11.04	0.9922 ± 2.6	0.9796	0.987
5.52	0.9977 ± 2.6	0.9985	1.001
0.00	1.0000 ± —	1.0000	1.000
- 5.52	0.9779 ± 2.6	0.9985	1.021
-11.04	0.9760 ± 2.6	0.9796	1.004
-16.56	0.9614 ± 2.6	0.9637	1.002
-22.08	0.8704 ± 2.6	0.9013	1.036

Table 6.16 Measured and calculated DUO₂ plate power of Y-direction in FCA-XIV-1(45V) core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
22.08	0.8122 ± 3.2	0.8770	1.080
16.56	0.9343 ± 3.2	0.9467	1.013
11.04	0.9767 ± 3.2	0.9690	0.992
5.52	0.9911 ± 3.2	0.9967	1.006
0.00	1.0000 ± —	1.0000	1.000
- 5.52	0.9728 ± 3.2	0.9967	1.025
-11.04	0.9669 ± 3.2	0.9690	1.002
-16.56	0.9393 ± 3.2	0.9467	1.008
-22.08	0.8435 ± 3.2	0.8770	1.040

Table 6.17 Measured and calculated EU plate power of Z-direction in FCA-XIV-1 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
43.18	0.4683±1.2	0.4588	0.980
38.10	0.5335±1.2	0.5267	0.987
33.02	0.6407±1.2	0.6307	0.984
27.94	0.7426±1.2	0.7297	0.983
22.86	0.8207±1.2	0.8164	0.983
17.78	0.8894±1.2	0.8878	0.998
12.70	0.9559±1.2	0.9425	0.986
7.62	0.9815±1.2	0.9796	0.998
2.54	1.0000± —	1.0000	1.000
- 2.54	1.0000± —	1.0000	1.000
- 7.62	0.9847±1.2	0.9796	0.995
-12.70	0.9535±1.2	0.9425	0.988
-17.78	0.8926±1.2	0.8878	0.995
-22.86	0.8179±1.2	0.8164	0.998
-27.94	0.7337±1.2	0.7297	0.995
-33.02	0.6352±1.2	0.6307	0.993
-38.10	0.5323±1.2	0.5267	0.989
-43.18	0.4595±1.2	0.4588	0.998

Table 6.18 Measured and calculated NU plate power of Z-direction in FCA-XIV-1(45V) core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
43.18	0.4315 ± 2.9	0.4233	0.981
38.10	0.5436 ± 2.8	0.5221	0.960
33.02	0.6406 ± 2.7	0.6308	0.985
27.94	0.7319 ± 2.7	0.7310	0.999
22.86	0.8298 ± 2.7	0.8180	0.986
17.78	0.9033 ± 2.7	0.8896	0.985
12.70	0.9668 ± 2.7	0.9446	0.977
7.62	0.9888 ± 2.7	0.9818	0.993
2.54	$1.0000 \pm -$	1.0000	1.000
- 2.54	$1.0000 \pm -$	1.0000	1.000
- 7.62	0.9771 ± 2.7	0.9818	1.005
-12.70	0.9506 ± 2.8	0.9446	0.994
-17.78	0.8914 ± 2.8	0.8896	0.998
-22.86	0.8105 ± 2.7	0.8180	1.010
-27.94	0.7169 ± 2.7	0.7310	1.020
-33.02	0.6377 ± 2.8	0.6308	0.989
-38.10	0.5167 ± 2.7	0.5221	1.010
-43.18	0.4307 ± 3.1	0.4233	0.983

Table 6.19 Measured and calculated DUO₂ plate power of Z-direction in FCA-XIV-1(45V) core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
53.34	0.2449 ± 2.2	—	—
48.26	0.3286 ± 2.2	—	—
43.18	0.4182 ± 3.5	0.4064	0.972
38.10	0.5286 ± 3.5	0.5194	0.983
33.02	0.6308 ± 3.5	0.6302	0.999
27.94	0.7470 ± 3.4	0.7308	0.978
22.86	0.8151 ± 3.4	0.8179	1.003
17.78	0.8776 ± 3.4	0.8894	1.014
12.70	0.9465 ± 3.4	0.9445	0.998
7.62	0.9799 ± 3.4	0.9817	1.002
2.54	1.0000 ± —	1.0000	1.000
- 2.54	1.0000 ± —	1.0000	1.000
- 7.62	0.9860 ± 3.5	0.9817	0.996
-12.70	0.9440 ± 3.5	0.9445	1.001
-17.78	0.8675 ± 3.5	0.8894	1.025
-22.86	0.8251 ± 3.5	0.8179	0.991
-27.94	0.7236 ± 3.5	0.7308	1.010
-33.02	0.6285 ± 3.5	0.6302	1.003
-38.10	0.5174 ± 3.5	0.5194	1.004
-43.18	0.4115 ± 3.6	0.4064	0.998
-48.26	0.3254 ± 2.3	—	—
-53.34	0.2472 ± 2.3	—	—

Table 6.20 Measured and calculated EU plate power of X-direction in FCA-XIV-2 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
23.59	0.5830 ± 1.8	0.6029	1.034
20.57	0.7284 ± 1.8	0.7643	1.049
18.07	0.8059 ± 1.8	0.8298	1.030
15.05	0.8565 ± 1.8	0.8851	1.033
12.55	0.9039 ± 1.8	0.9202	1.018
9.53	0.9328 ± 1.8	0.9543	1.023
7.03	0.9630 ± 1.8	0.9764	1.014
4.01	0.9844 ± 1.8	0.9931	1.009
1.51	0.9994 ± —	1.0000	1.001
- 1.51	1.0006 ± —	1.0000	0.999
- 4.01	0.9822 ± 1.8	0.9931	1.011
- 7.03	0.9582 ± 1.8	0.9764	1.019
- 9.53	0.9394 ± 1.8	0.9543	1.016
-12.55	0.9041 ± 1.8	0.9202	1.018
-15.05	0.8557 ± 1.8	0.8851	1.034
-18.07	0.7994 ± 1.8	0.8298	1.038
-20.57	0.7137 ± 1.8	0.7643	1.071
-23.59	0.5688 ± 1.8	0.6029	1.060

Table 6.21 Measured and calculated NU plate power of X-direction in FCA-XIV-2 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
23.75	0.5157 ± 5.0	0.5709	1.107
20.41	0.6856 ± 4.7	0.7424	1.083
18.23	0.7851 ± 4.7	0.8029	1.023
14.89	0.8728 ± 4.7	0.8698	0.997
12.71	0.9239 ± 4.6	0.9029	0.977
9.37	0.9447 ± 4.6	0.9448	1.000
7.19	0.9707 ± 4.6	0.9715	1.001
3.83	1.0112 ± 4.6	0.9930	0.982
1.67	1.0041 ± —	1.0000	0.996
- 1.67	0.9959 ± —	1.0000	1.004
- 3.83	1.0072 ± 4.6	0.9930	0.986
- 7.19	0.9621 ± 4.7	0.9715	1.010
- 9.39	0.9266 ± 4.7	0.9448	1.020
-12.71	0.9114 ± 4.7	0.9029	0.991
-14.89	0.8843 ± 4.7	0.8698	0.984
-18.23	0.7995 ± 4.8	0.8029	1.004
-20.41	0.7520 ± 4.8	0.7424	0.987
-23.75	0.5285 ± 5.2	0.5709	1.080

Table 6.22 Measured and calculated DUO₂ plate power of X-direction in FCA-XIV-2 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
22.72	0.5837±4.7	0.6248	1.070
21.45	0.6331±4.6	0.6883	1.087
17.20	0.7587±4.6	0.8120	1.070
15.93	0.8302±4.6	0.8404	1.012
11.68	0.9117±4.5	0.9082	0.997
10.41	0.9110±4.6	0.9247	1.015
6.16	0.9653±4.5	0.9785	1.014
4.89	0.9550±4.5	0.9868	1.033
0.64	1.0030± —	1.0000	0.997
- 0.64	0.9967± —	1.0000	1.003
- 4.89	0.9471±4.6	0.9868	1.042
- 6.16	0.9561±4.6	0.9785	1.023
-10.41	0.9055±4.6	0.9247	1.021
-11.68	0.8995±4.6	0.9082	1.010
-15.93	0.8064±4.7	0.8404	1.042
-17.20	0.7974±4.7	0.8120	1.018
-21.45	0.6501±4.8	0.6883	1.059
-22.72	0.5732±5.0	0.6248	1.090

Table 6.23 Measured and calculated EU palte power of Y-direction in FCA-XIV-2 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
22.08	0.6740±1.3	0.7043	1.045
16.56	0.8302±1.3	0.8595	1.035
11.04	0.9248±1.3	0.9376	1.014
5.52	0.9804±1.3	0.9852	1.005
0.00	1.0000± —	1.0000	1.000
- 5.52	0.9724±1.3	0.9852	1.013
-11.04	0.9261±1.3	0.9376	1.012
-16.56	0.8265±1.3	0.8595	1.040
-22.08	0.6730±1.3	0.7043	1.047

Table 6.24 Measured and calculated NU palte power of Y-direction in FCA-XIV-2 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
22.08	0.6360 ± 3.4	0.6591	1.036
16.56	0.8105 ± 3.4	0.8273	1.021
11.04	0.9183 ± 3.4	0.9165	0.998
5.52	0.9559 ± 3.4	0.9827	1.028
0.00	$1.0000 \pm -$	1.0000	1.000
- 5.52	0.9802 ± 3.4	0.9827	1.003
-11.04	0.8960 ± 3.4	0.9165	1.023
-16.56	0.8157 ± 3.4	0.8273	1.014
-22.08	0.6521 ± 3.6	0.6591	1.011

Table 6.25 Measured and calculated DUO₂ plate power of Y-direction in FCA-XIV-2 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
22.08	0.6101 ± 3.4	0.6591	1.080
16.56	0.8159 ± 3.3	0.8273	1.014
11.04	0.8928 ± 3.3	0.9165	1.027
5.52	0.9514 ± 3.3	0.9827	1.033
0.00	$1.0000 \pm -$	1.0000	1.000
- 5.52	0.9333 ± 3.3	0.9827	1.053
-11.04	0.8977 ± 3.3	0.9165	1.021
-16.56	0.8003 ± 3.4	0.8273	1.034
-22.08	0.6096 ± 3.4	0.6591	1.081

Table 6.26 Measured and calculated EU palte power of Z-direction in FCA-XIV-2 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
33.02	0.4723 ± 1.3	0.4739	1.003
27.94	0.5866 ± 1.3	0.5834	0.994
22.86	0.7252 ± 1.3	0.7151	0.986
17.78	0.8397 ± 1.3	0.8269	0.985
12.70	0.9319 ± 1.3	0.9128	0.979
7.62	0.9879 ± 1.3	0.9709	0.983
2.54	1.0049 ± —	1.0000	0.995
- 2.54	0.9951 ± —	1.0000	1.005
- 7.62	0.9809 ± 1.3	0.9709	0.990
-12.70	0.9171 ± 1.3	0.9128	0.995
-17.78	0.8315 ± 1.3	0.8269	0.994
-22.86	0.7144 ± 1.3	0.7151	1.001
-27.94	0.5807 ± 1.3	0.5834	1.005
-33.02	0.4666 ± 1.3	0.4739	1.016

Table 6.27 Measured and calculated NU plate power of Z-direction in FCA-XIV-2 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
33.02	0.4650 ± 3.3	0.4583	0.986
27.94	0.5817 ± 3.1	0.5827	1.002
22.86	0.7280 ± 3.1	0.7152	0.982
17.78	0.8439 ± 3.1	0.8270	0.980
12.70	0.9435 ± 3.1	0.9128	0.967
7.62	0.9849 ± 3.1	0.9710	0.986
2.54	0.9822 ± —	1.0000	1.018
- 2.54	1.0178 ± —	1.0000	0.983
- 7.62	0.9815 ± 3.1	0.9710	0.989
-12.70	0.9326 ± 3.1	0.9128	0.979
-17.78	0.8376 ± 3.1	0.8270	0.988
-22.86	0.7166 ± 3.2	0.7152	0.998
-27.94	0.5887 ± 3.3	0.5827	0.990
-33.02	0.4471 ± 3.4	0.4583	1.025

Table 6.28 Measured and calculated DUO₂ plate power of Z-direction in FCA-XIV-2 core

Distance(cm)	Measured(%)	Calculated	C/E
43.18	0.2918 ± 2.6	—	—
38.10	0.4141 ± 2.1	—	—
33.02	0.4480 ± 3.0	0.4505	1.006
27.94	0.5834 ± 3.0	0.5825	0.998
22.86	0.7484 ± 2.9	0.7153	0.956
17.78	0.8547 ± 2.9	0.8271	0.968
12.70	0.9324 ± 2.9	0.9129	0.979
7.62	0.9838 ± 2.9	0.9711	0.987
2.54	0.9925 ± —	1.0000	1.008
- 2.54	1.0075 ± —	1.0000	0.992
- 7.62	1.0001 ± 2.9	0.9711	0.971
-12.70	0.9081 ± 2.9	0.9129	1.005
-17.78	0.8284 ± 3.0	0.8271	0.998
-22.86	0.7224 ± 3.0	0.7153	0.990
-27.94	0.6018 ± 3.0	0.5825	0.968
-33.02	0.4512 ± 3.2	0.4505	0.998
-38.10	0.4208 ± 2.3	—	—
-48.18	0.2907 ± 2.3	—	—

Table 6.29 Measured and calculated single plate power ratio in cell

Core Name	NU/20%EU(x10 ⁻²)			DUO ₂ /20%EU (x10 ⁻²)		
	Measured	Cal.	C/E	Measured	Cal.	C/E
FCA XIV-1	8.00 ± 0.20	8.07	1.01	9.55 ± 0.16	9.69	1.01
FCA XIV-1(45V)	8.69 ± 0.21	8.98	1.03	11.19 ± 0.19	11.51	1.03
FCA XIV-2	7.06 ± 0.18	7.00	0.99	7.12 ± 0.18	7.49	0.95

Table 6.30 Measured and calculated fuel plate power normalized with 20% EU fuel plate power in central cell

Core Name	Fuel Plate	Measured	Calculated	C/E
FCA XIV-1	NU	0.0820±0.0021	0.0804	0.981
	EU	0.9989±0.0081	1.0028	1.004
	DUO ₂	0.0959±0.0014	0.0967	1.008
	NU	0.0791±0.0010	0.0810	1.024
	EU	0.9968±0.0033	0.9996	1.003
	DUO ₂	0.0950±0.0018	0.0971	1.022
	EU	1.0043±0.0049	0.9975	0.993
	NU	0.0787±0.0018	0.0804	1.022
FCA XIV-1 (45V)	NU	0.0869±0.0009	0.0897	1.032
	EU	0.9985±0.0067	1.0035	1.005
	DUO ₂	0.1105±0.0019	0.1147	1.038
	NU	0.0871±0.0017	0.0899	1.032
	EU	1.0009±0.0040	0.9970	0.996
	DUO ₂	0.1127±0.0019	0.1155	1.025
	EU	1.0007±0.0044	0.9995	0.999
	NU	0.0875±0.0013	0.0898	1.026
FCA XIV-2	NU	0.0707±0.0011	0.0699	0.989
	EU	0.9974±0.0071	1.0000	1.003
	DUO ₂	0.0785±0.0009	0.0747	0.952
	DUO ₂	0.0786±0.0009	0.0747	0.950
	EU	1.0026±0.0056	1.0000	0.997
	NU	0.0703±0.0012	0.0699	0.994

Table 6.31 Measured and calculated axial reflector savings

Core Name	Measured(cm)	Calculated(cm)	C/E
FCA XVI-1	21.98±1.39	22.49	1.023
FCA XVI-1 (45V)	26.27±1.06	26.95	1.026
FCA XVI-2	21.12±1.08	21.54	1.020

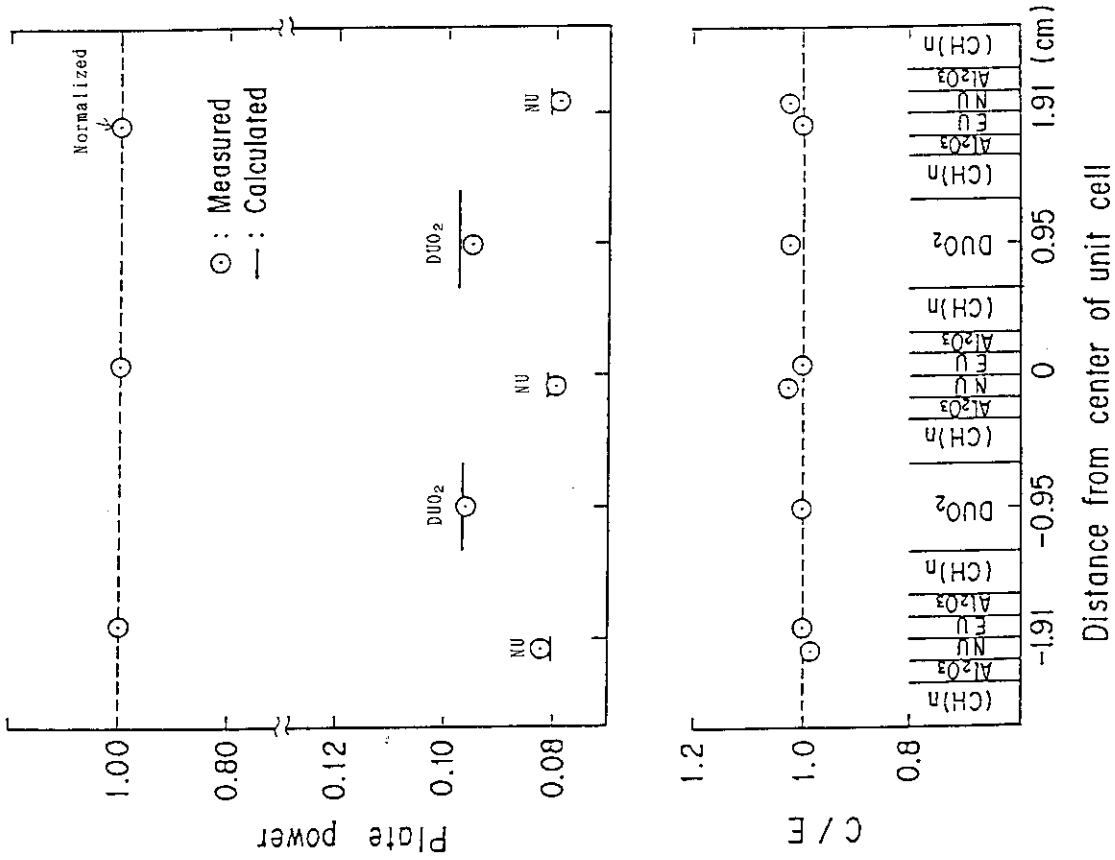


Fig. 6.2 Measured and calculated plate power ratio in central cell of FCA-XIV-1 core

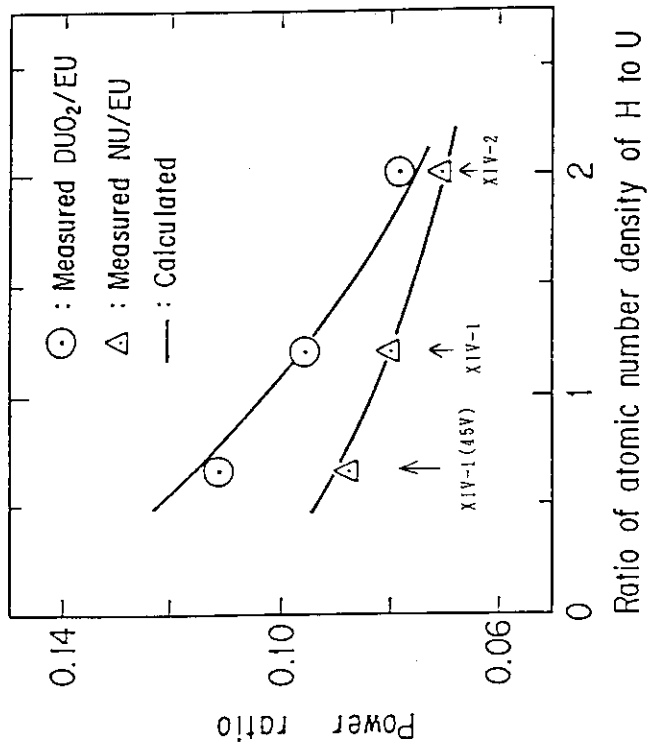


Fig. 6.1 Measured and calculated single plate power ratio in central cell

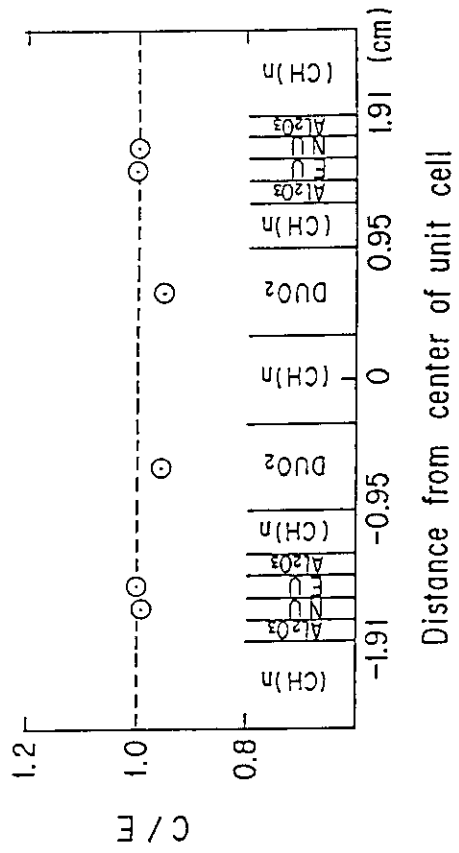
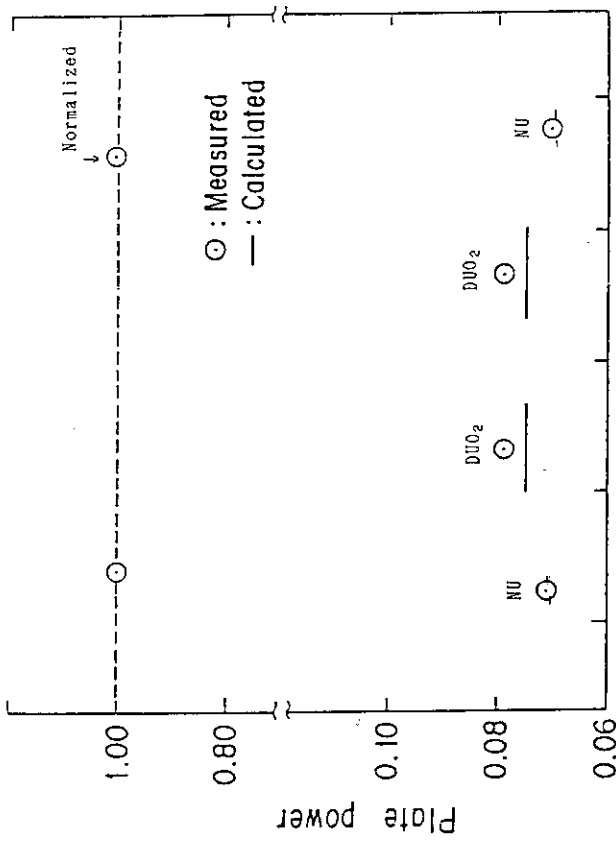


Fig. 6.3 Measured and calculated plate power ratio in central cell of FCA-XIV-1(45V) core

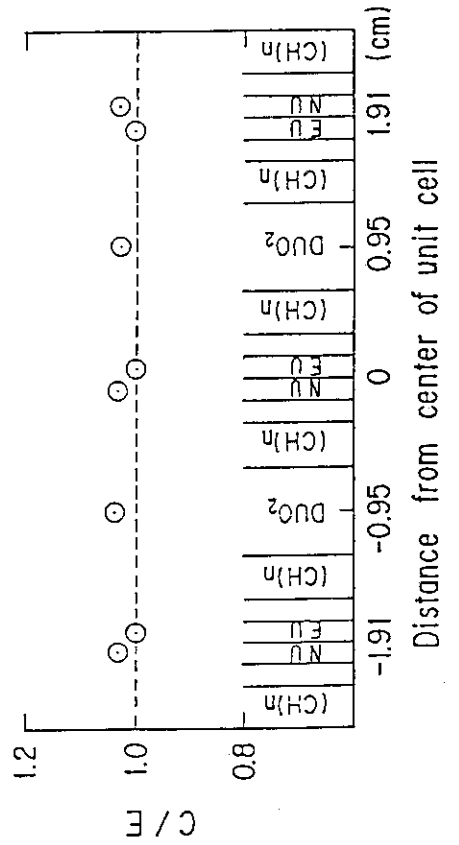
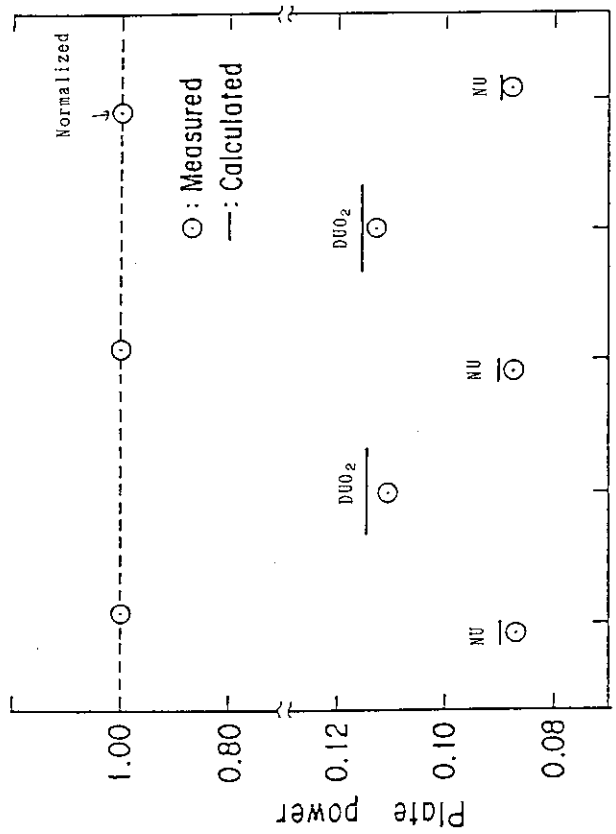


Fig. 6.4 Measured and calculated plate power ratio in central cell of FCA-XIV-2 core

7. 結 論

高転換軽水炉 (HCLWR) の核特性の計算手法の妥当性を評価するために FCA にウラン燃料を用いて構築された HCLWR 模擬炉心 Phase-1 で γ 線計測法でテスト領域の各方向の出力分布を測定した。さらに出力分布から材料バックリング B_m^2 を求め計算で得られた移動面積 M^2 を用いて炉物理量の一つである無限増倍率 k_∞ を算出した。その結果以下の結論を得た。

- (1) 径方向の出力分布については、全ての炉心について計算値は実験値を過大評価しており、特にステンレスバッファ近傍でその不一致が大きい。
- (2) 軸方向出力分布については、どの炉心についても計算値と実験値は良く一致している。
- (3) 板状燃料を用いた非均質性の強いセルにおいても、SRAC によるセル内の各燃料板の出力の計算値は概ね実験値を再現している。しかしながら、スペクトルの軟らかい FCA-XIV-2 では劣化ウラン燃料板の出力の計算値は実験値を約 5% 過小評価している。
- (4) セル内の 20% 濃縮ウラン燃料板に対する天然ウラン燃料板又は劣化ウラン燃料板の出力比については、計算値と実験値は概ね一致しており、ボイド模擬炉心 FCA-XIV-1 (45V) の径方向を除きテスト領域の広い範囲で一定値を示しており、この範囲で基本モードスペクトルが成立している。FCA-XIV-1 (45V) では、径方向の炉心中央の 20 cm の範囲でしか基本モードスペクトルが成立していない。
- (5) 無限増倍率 k_∞ の計算値は、どの炉心についても実験値を約 1% 過小評価しているものの実験誤差内で一致している。また C/E 値の減速材ボイド率や燃料濃縮度に対する依存性は認められない。

謝 辞

本実験を進めるにあたり、種々ご指導頂いた前高速炉物理研究室 吉田弘幸室長及び現高速炉物理研究室 中野正文室長に深く感謝いたします。また解析における (株) アイ・エス・エルの永谷睦美氏及び実験における FCA 管理機関員の皆様の協力を感謝いたします。

7. 結 論

高転換軽水炉 (HCLWR) の核特性の計算手法の妥当性を評価するために FCA にウラン燃料を用いて構築された HCLWR 模擬炉心 Phase-1 で γ 線計測法でテスト領域の各方向の出力分布を測定した。さらに出力分布から材料バックリング B_m^2 を求め計算で得られた移動面積 M^2 を用いて炉物理量の一つである無限増倍率 k_∞ を算出した。その結果以下の結論を得た。

- (1) 径方向の出力分布については、全ての炉心について計算値は実験値を過大評価しており、特にステンレスバッファ近傍でその不一致が大きい。
- (2) 軸方向出力分布については、どの炉心についても計算値と実験値は良く一致している。
- (3) 板状燃料を用いた非均質性の強いセルにおいても、SRAC によるセル内の各燃料板の出力の計算値は概ね実験値を再現している。しかしながら、スペクトルの軟らかい FCA-XIV-2 では劣化ウラン燃料板の出力の計算値は実験値を約 5% 過小評価している。
- (4) セル内の 20% 濃縮ウラン燃料板に対する天然ウラン燃料板又は劣化ウラン燃料板の出力比については、計算値と実験値は概ね一致しており、ボイド模擬炉心 FCA-XIV-1 (45V) の径方向を除きテスト領域の広い範囲で一定値を示しており、この範囲で基本モードスペクトルが成立している。FCA-XIV-1 (45V) では、径方向の炉心中央の 20 cm の範囲でしか基本モードスペクトルが成立していない。
- (5) 無限増倍率 k_∞ の計算値は、どの炉心についても実験値を約 1% 過小評価しているものの実験誤差内で一致している。また C/E 値の減速材ボイド率や燃料濃縮度に対する依存性は認められない。

謝 辞

本実験を進めるにあたり、種々ご指導頂いた前高速炉物理研究室 吉田弘幸室長及び現高速炉物理研究室 中野正文室長に深く感謝いたします。また解析における (株) アイ・エス・エルの永谷睦美氏及び実験における FCA 管理機関員の皆様の協力に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) Rakesh Chawla, Rudolf Seiler and Kurt Gmur ; Effects of Fuel Enrichment on the Physics Characteristics of Plutonium-Fueled Light Water High Conversion Reactors, Nuclear Technology Vol. 73 June 1986.
- (2) Rudolf Seiler et al. ; Investigation of the void coefficient and other integral parameters in the PROTEUS-LWHCR Phase II program, Nuclear Technology Vol. 80 Feb. 1988.
- (3) L. Martin-Deider et al. ; ERASME ; An extensive experiment for LWHCR design qualification, Proc. of ANS Topical Meeting on Reactor Physics and Safety p. 375-385 (1986).
- (4) R. Chawla and R. Bohme ; LWHCR Physics Experiments and Their Interpretation, Proc. of ANS Topical Meeting on Reactor Physics and Safety, p. 362-374 (1986).
- (5) 代谷誠治 他 ; 決定論的手法による KUCA 稠密格子炉心実験の解析, 日本原子力学会 年会 B31 (1990).
- (6) 大杉俊隆 他 ; FCA における高転換軽水炉の炉物理実験(I), 日本原子力学会 昭和 60 年度秋の分科会 B35 (1985).
- (7) A. R. Boynton et al. ; High Conversion Critical Experiments, ANL-7203 (1967).
- (8) 松浦祥次郎 ; 高転換加圧水炉の概念と技術課題, 日本原子力学会 26 468~473 (1984).
- (9) 石黒幸雄, 吉田弘幸 ; 高転換軽水炉の最近の研究開発の動向, 原子力工業第 33 卷 第 3 号 (1987).
- (10) A. Ohno, T. Osugi and K. Satoh ; Measurement of Reactive Power Distribution in Axially heterogeneous Core by γ -Counting of Each Fuel Plate, J.N.S.T Vol. 25 No. 1 January 1988.
- (11) 大杉俊隆 他 ; FCA XI-1 集合体の選定と特性実験, JAERI-M 83-211 (1983).
- (12) Keichiro Tsuchihashi et al. ; SRAC : JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis, JAERI 1285 (1983).
- (13) Fowler T. B. et al. ; Nuclear reactor Core Analysis Code : CITATION, ORNL-T M-2496 (1969).