

J A E R I - M  
92-098

JMTR 低濃縮燃料炉心の核特性

1992年7月

永岡 芳春・小向 文作・桜井 文雄  
小池須美男・斎藤 実・二村 嘉明

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

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 (株)原子力資料サービス

## JMTR 低濃縮燃料炉心の核特性

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

永岡 芳春・小向 文作・桜井 文雄・小池須美男  
斎藤 実・二村 嘉明

(1992年6月3日受理)

JMTR は、ETR 型板状燃料を使用した軽水減速・冷却タンク型の熱出力 50 MW の汎用型材料試験炉であり、1993 年に MEU 燃料から LEU 燃料への転換が計画されている。このため、LEU 燃料炉心の安全評価の一環として、核特性解析を実施した。

LEU 燃料への移行においては、高ウラン密度のシリサイド ( $U_3Si_2$ ) 燃料を採用するとともに、(1) 連続運転日数を現 12 日から 25 日に延長する、(2) サイクルの初期過剰反応度を低減するために、可燃性吸収体として直径 0.3 mm のカドミウムワイヤを燃料要素の側板に挿入する、の二項目を満足するように変更する予定である。

本報告は、JMTR の LEU 燃料炉心の核特性解析について述べたものである。

解析の結果、LEU 燃料炉心の核特性は MEU 燃料炉心と同様であること、Cd の可燃性吸収体の使用は有効であることを示している。

Neutronics Design of JMTR-LEU Core

Yoshiharu NAGAOKA, Bunsaku KOMUKAI, Fumio SAKURAI  
Sumio KOIKE, Minoru SAITO and Yoshiaki FUTAMURA

Department of JMTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received June 3, 1992)

The core conversion from MEU fuel to LEU fuel of the JMTR, a 50 MW light water moderated and cooled tank type reactor using ETR-type fuel, is scheduled in 1993.

As a part of the safety analyses for the JMTR LEU core, the neutronics characteristics analysis was carried out.

In conversion to LEU fuel, the following things will be changed in JMTR operation: (1) extend the cycle length from 12 days in the present MEU core to 25 days, and (2) introduce cadmium wires with a diameter of 0.3 mm as burnable absorber in the sideplates to reduce the excess reactivity at the beginning of cycle.

This report describes the analytical methods and results of the nuclear characteristics analysis of the JMTR LEU core.

The results show that the LEU fuel core would provide neutronics characteristics similar to those of the MEU fuel core and the use of Cd burnable absorber is effective for the JMTR operation.

Keywords: JMTR, LEU Fuel, Neutronics Design, Neutronics Characteristics, Neutronics Analysis, SRAC, Burnable Absorber, Cd Wire

## 目 次

1. 序 .....	1
2. 炉心構成 .....	3
2.1 概 要 .....	3
2.2 燃料の仕様 .....	3
2.3 制御棒 .....	3
3. 核設計の基本方針 .....	11
4. 計算方法 .....	13
4.1 解析炉心 .....	13
4.2 計算コードおよびライプラリ .....	13
4.3 エネルギー群構造 .....	14
4.4 少数群定数 .....	14
4.5 制御棒領域の境界条件 .....	16
4.6 炉心燃焼計算 .....	17
4.7 臨界計算 .....	17
5. 計算結果 .....	30
5.1 過剰反応度 .....	30
5.2 炉停止余裕 .....	30
5.3 反応度変化率 .....	31
5.4 反応度係数 .....	31
5.5 実効遅発中性子割合及び即発中性子寿命 .....	32
6. 中性子束および出力分布 .....	48
6.1 中性子束および出力密度の分布 .....	48
6.2 出力ピーフィング係数 .....	48
7. 燃 燃 度 .....	55
7.1 炉心燃焼度 .....	55
7.2 燃焼に伴う組成変化 .....	55
8. 結 語 .....	68
謝 辞 .....	68
参考文献 .....	68
付録1 Cd ワイヤ付き LEU 燃料のセル計算方法 (VIM 補正法) .....	69
付録2 LEU 炉心の中性子スペクトル .....	76

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Core Configuration .....	3
2.1	Outline .....	3
2.2	Fuel Specification .....	3
2.3	Control Rod .....	3
3.	Basic Policy in Neutronics Design .....	11
4.	Analytical Method .....	13
4.1	Analytical Cores .....	13
4.2	Computer Codes and Cross Section Libraries .....	13
4.3	Energy Group Structure .....	14
4.4	Few Group Constants .....	14
4.5	Boundary Condition for Control Rod Region .....	16
4.6	Core Burnup Calculation .....	17
4.7	Criticality Calculation .....	17
5.	Results .....	30
5.1	Excess Reactivity .....	30
5.2	Shutdown Margin .....	30
5.3	Reactivity Variation Rate .....	31
5.4	Reactivity Coefficients .....	31
5.5	Effective Delayed-neutron Fraction and Prompt-neutron Lifetime .....	32
6.	Neutron Flux and Power .....	48
6.1	Distribution of Neutron Flux and Power Density .....	48
6.2	Power Peaking Factor .....	48
7.	Burnup .....	55
7.1	Core Burnup .....	55
7.2	Variation of Composition with Burnup .....	55
8.	Conclusion Remarks .....	68
	Acknowledgment .....	68
	References .....	68
	Appendix 1 Cell Calculation Method for LEU Fuel with Cd Wires .....	69
	Appendix 2 Neutron Spectrum in LEU Core .....	76

## 1. 序

材料試験炉（J M T R : Japan Materials Testing Reactor）は、E T R型燃料を使用した出力50MWの軽水減速炉である。J M T Rでは、研究・試験炉の濃縮度低減化（R E R T R）計画の一環として、1986年に45%の中濃縮ウラン（M E U : Medium Enriched Uranium）燃料のアルミナイト燃料に転換後、さらに20%の低濃縮ウラン（L E U : Low Enriched Uranium）燃料のシリサイド燃料への移行のための検討が行われ、1993年に転換の予定である。L E U燃料への移行においては、高ウラン密度のシリサイド（ $U_3Si_2$ ）燃料の開発により燃料要素の寸法、形状の変更なく、 $^{235}U$ の含有量を上げられることになった事から、次の二項目を満足するように変更することとした。（1）連続運転日数を現12日から25日に延長する、（2）サイクルの初期過剰反応度を低減するために、燃料要素の側板部に可燃性毒物を挿入する。

J M T Rでは、上記の二項目を満たすシリサイド燃料の検討を行い、 $U_3Si_2$ のウラン密度が4.8g/cm<sup>3</sup>で、従来必要であるサイクル中間での燃料交換作業を廃止して連続運転が可能であることを確認した。また、可燃性吸収材としては、J M T Rで照射試験等を行ったボロンと新たにカドミウムを候補材として挙げ検討した結果、燃料のウラン密度、炉出力及び運転日数等との兼ね合いから、カドミウムワイヤを要素側板に取り付けることが適することを確認した。<sup>(1)</sup>

シリサイド燃料は、R E R T R計画の中で研究開発され、ORR炉において4.8g/cm<sup>3</sup>の $U_3Si_2$ の高ウラン密度燃料への全炉心転換、サイクル運転を経験し、燃料製作及び実用の面で実証されている。

本報告は、燃料の低濃縮化に伴い構成される炉心の核特性解析について述べている。特に、図1.1に示すような低濃縮化による核特性の変化について明らかにするとともに、設定されている核設計条件を満足していることを確認した。なお、結果については、L E U炉心と同じ解析方法で求めた現行のM E U炉心の数値をできるだけ共に示すこととした。

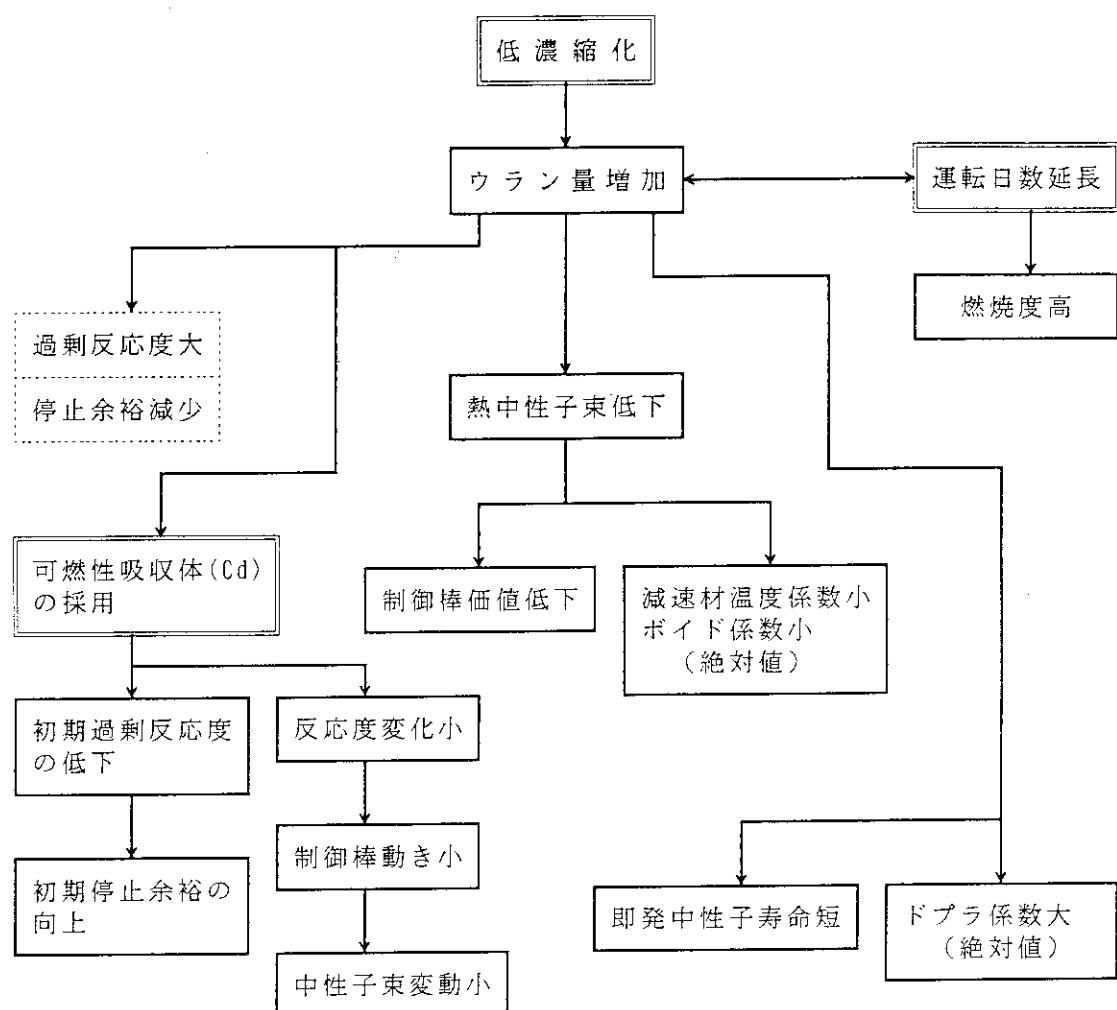


図1.1 低濃縮化に伴う核特性への影響

## 2. 炉心構成

### 2.1 概要

JMTRの原子炉本体は、図2.1に示すように原子炉圧力容器、炉心部および炉プールから構成されている。

JMTRの炉心は、図2.2に示すように、7.72cm角の単位格子を基本として、炉心中央部分を占める $5 \times 7$ 格子配列の燃料領域は、22体のETR型の標準燃料要素と、5本の燃料フォロワ付制御棒そして照射用反射体要素8体で構成される。燃料領域から炉心最外の内部タンクまでは、燃料領域を2層に囲むベリリウム反射体要素、さらにその外側はアルミニウム反射体要素で構成される。各反射体要素には、照射試料を挿入できる照射孔が設けてあり、照射試料が入らないときは反射体と同質のプラグが挿入されている。炉心部の実効高さは75cmである。

### 2.2 燃料の仕様

燃料要素の種類は、標準燃料要素と燃料フォロワの二種類に分けられる。低濃縮(MEU)シリサイド燃料では、どちらの要素とも、可燃性吸収体としてアルミニウム被覆されたカドミウム(Cd)ワイヤが、燃料側板部に燃料実効長(75cm)にわたり挿入される。

燃料芯材は、ウランシリコンアルミニウム分散型合金( $U_3Si_2-Al$ )である。

標準燃料要素は、燃料板19枚から構成され、燃料板間は冷却材の流路を形成している。標準燃料要素は、炉内の格子板に挿入され、自立する構造である。

燃料フォロワは、燃料板16枚から構成される。燃料フォロワの上部は、中性子吸収体(H<sub>2</sub>製)に結合されて、一体となって制御棒案内管内を上下に駆動する構造である。

可燃性吸収体のCdワイヤの直径は、0.3mmで、標準燃料要素には18本、燃料フォロワには16本が挿入される。Cdワイヤの径と本数の組合せについては、運転サイクルに必要な過剰反応度及び運転中の過剰反応度の動きを調べるために燃焼パラメータ解析を行い、その結果から最適となるように決定した。<sup>(2)</sup>

燃料要素の諸元を表2.1に中濃縮ウラン(MEU)燃料と共に示す。

標準燃料要素及び燃料フォロワの形状の断面を図2.3及び図2.4に示す。

### 2.3 制御棒

炉心には、5本の制御棒を備えている。その内、3本は粗調整棒(SH棒と呼ぶ)で、あと2本は安全棒である。安全棒はストロークの上方の1部(600mm ± 50mm)を微調整棒(SR棒と呼ぶ)として使用でき、運転に当たってはこのうち1本を微調整棒に選択して使用する。

制御棒は、図2.5に示すように角型の断面を有し、図2.6の炉心部垂直断面に示すよう

に上部から中性子吸収部（ハフニウム材）、フォロワ部（燃料フォロワ）、連結部の順に機械的に結合され、スクラム時等の落下に伴う衝撃力に対しても耐える構造となっている。

表2.1 燃料要素の主要仕様

区分 項目	M E U 燃 料		L E U 燃 料	
	標準燃料要素	燃料フォロワ	標準燃料要素	燃料フォロワ
型式 燃 料 板 枚 数	改良 ETR 型 19枚	ETR 型 16枚	改良 ETR 型 19枚	ETR 型 16枚
燃料芯材厚さ (mm)	約 0.50	約 0.50	約 0.51	約 0.51
燃料芯材幅 (mm)	約 62	約 50	約 62	約 50
燃料芯材長さ (mm)	約 760	約 750	約 760	約 750
被覆材厚さ (mm)	約 0.385	約 0.385	約 0.380	約 0.380
燃料板厚さ (mm)	約 1.27	約 1.27	約 1.27	約 1.27
燃料板幅 (mm)	約 71	約 60	約 71	約 60
燃料板長さ (mm)	約 780	約 770	約 780	約 770
燃料要素寸法 (mm)	約76×76 × 1,200	約64×64 × 890	約76×76 × 1,200	約64×64 × 890
<sup>235</sup> U 含有量 (g)	約 310	約 205	約 410	約 275
冷却水 流路	流路厚さ (mm) ( ) : 流路数	約2.67 (12) 約2.92 ( 2) 約3.02 ( 4)	約2.59 (15) — —	約2.67 (12) 約2.92 ( 2) 約3.02 ( 4)
	流路数合計	18	15	18 15
燃料 芯材	種類 組成 ウラン密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ウランアルミニウム分散型合金 UA <sub>x</sub> - Al 約 1.6	ウランシリコンアルミニウム分散型合金 U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> - Al 約 4.8	
被覆材	種類 材料規格	アルミニウム合金 DIN A2MgX(X= 1~3)、 JIS A 6061 又は相当品	アルミニウム合金 JIS A 6061、AG3NE * <sup>1</sup> 又は相当品	
可燃性 吸收体	種類 線径 (mm) 長さ (mm) 被覆材種類 被覆材厚さ (mm) 本数		カドミウム 約 0.3 約 760 アルミニウム合金 約 0.25 18本	カドミウム 約 0.3 約 750 アルミニウム合金 約 0.25 16本
最高燃焼度 (要素平均) (%)	40		50	

注: \*<sup>1</sup> ; AG3NE は仏国で開発されたアルミニウム合金である。

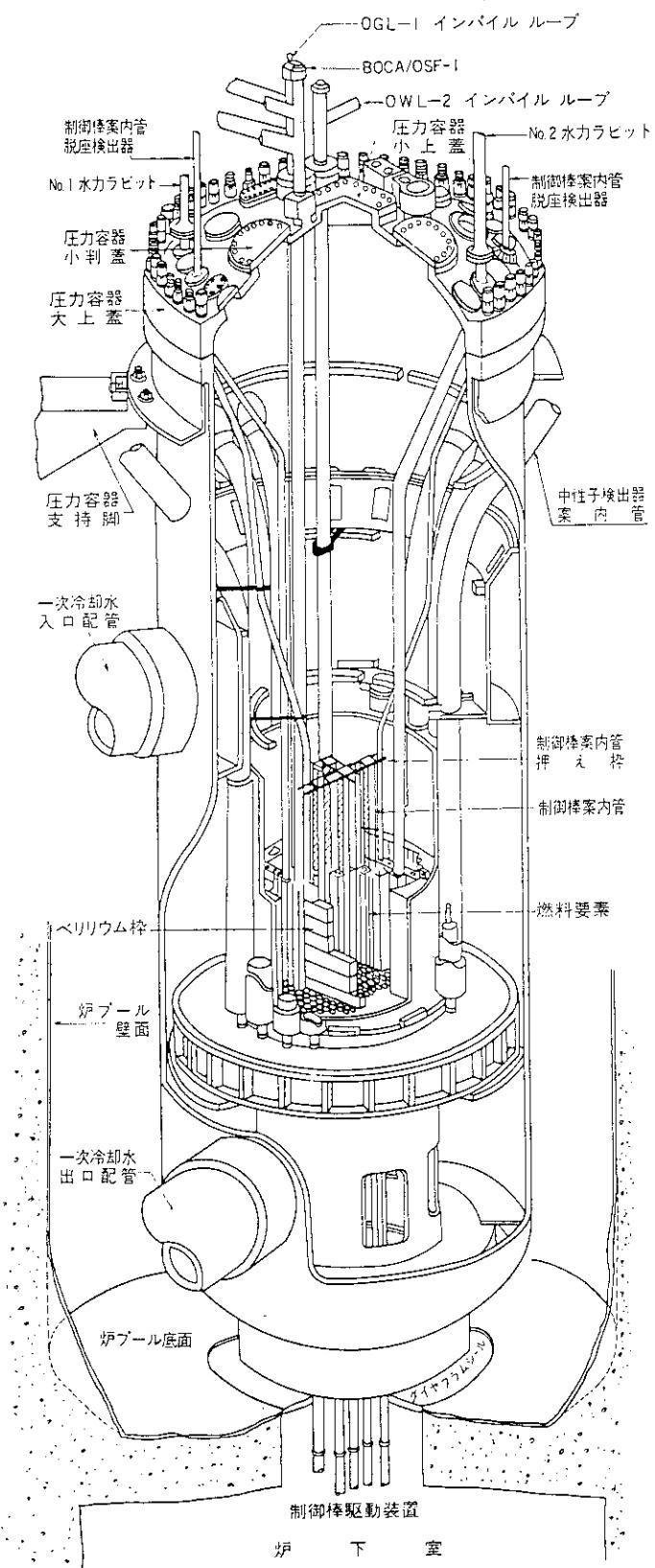


図2.1 J M T R 原子炉本体

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

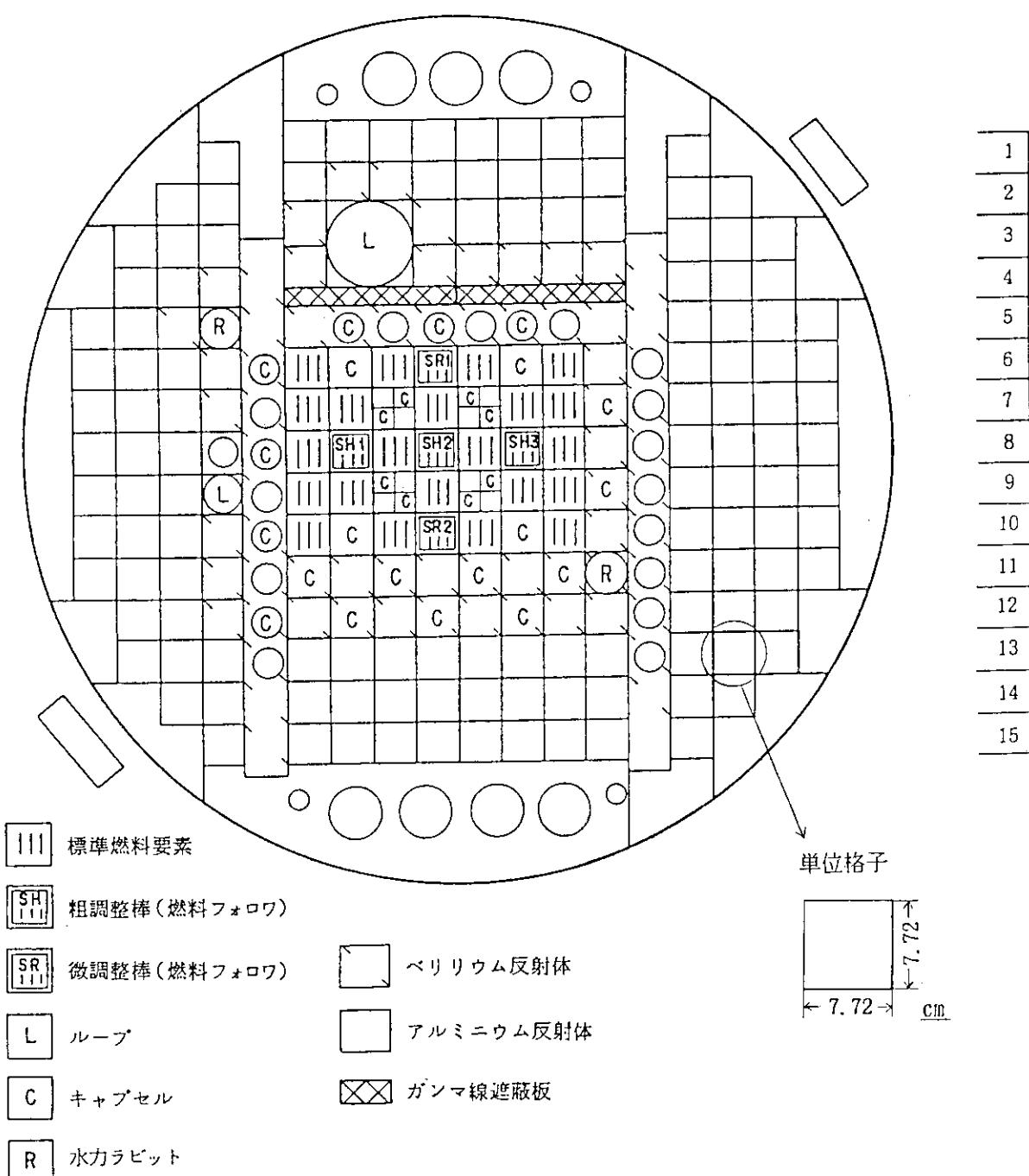


図2.2 J M T R 炉心

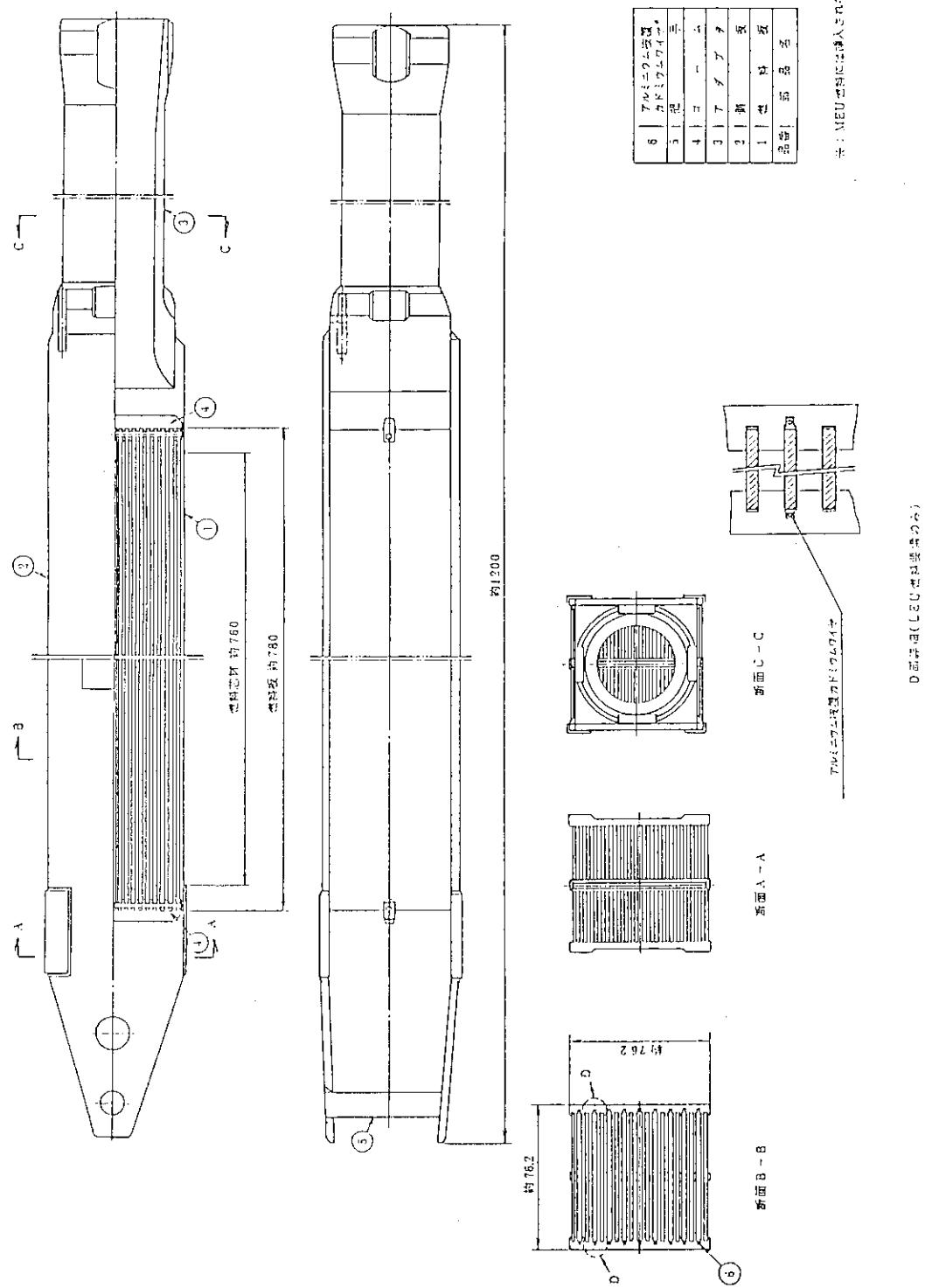
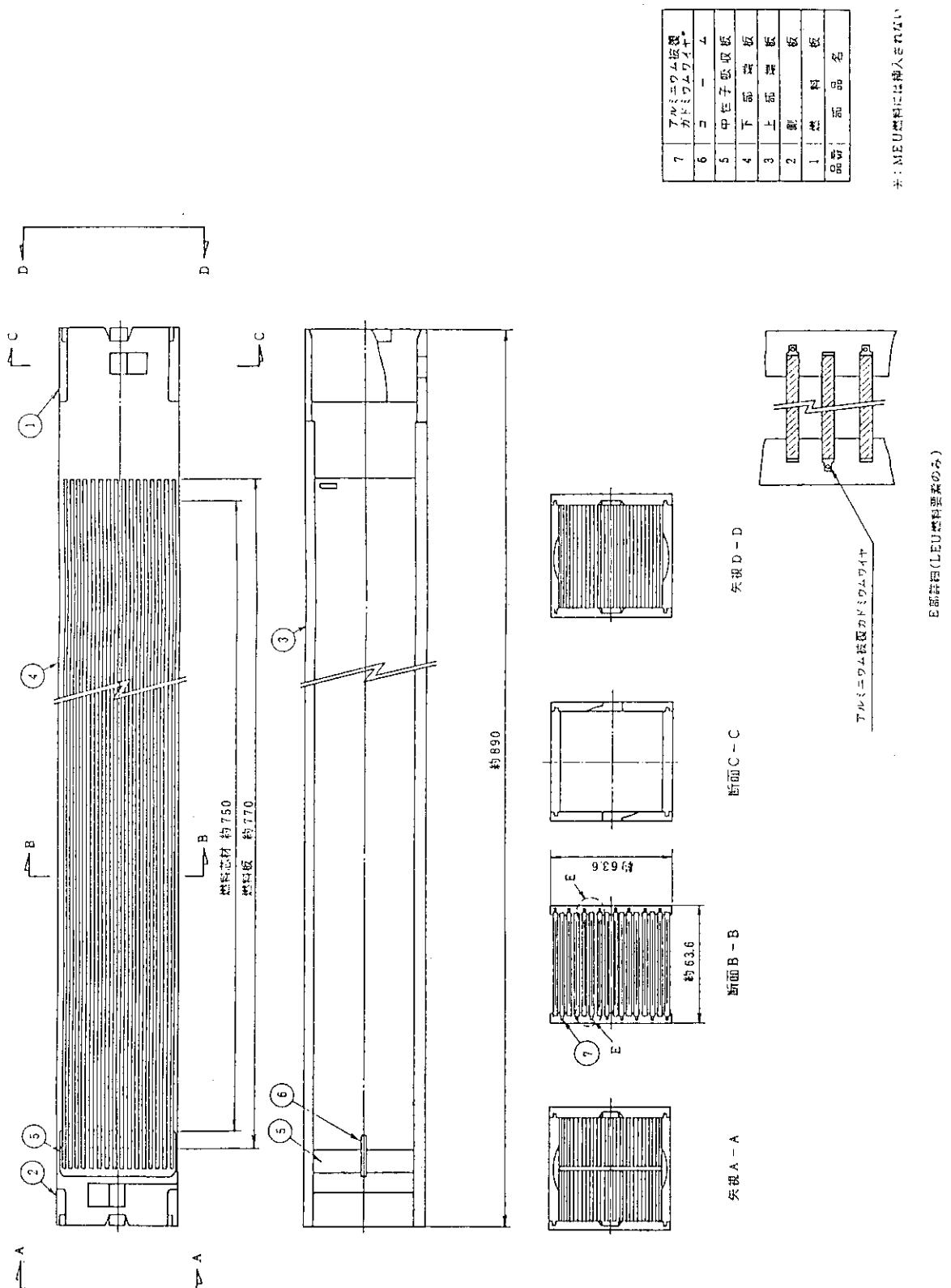


図2.3 標準燃料要素断面図



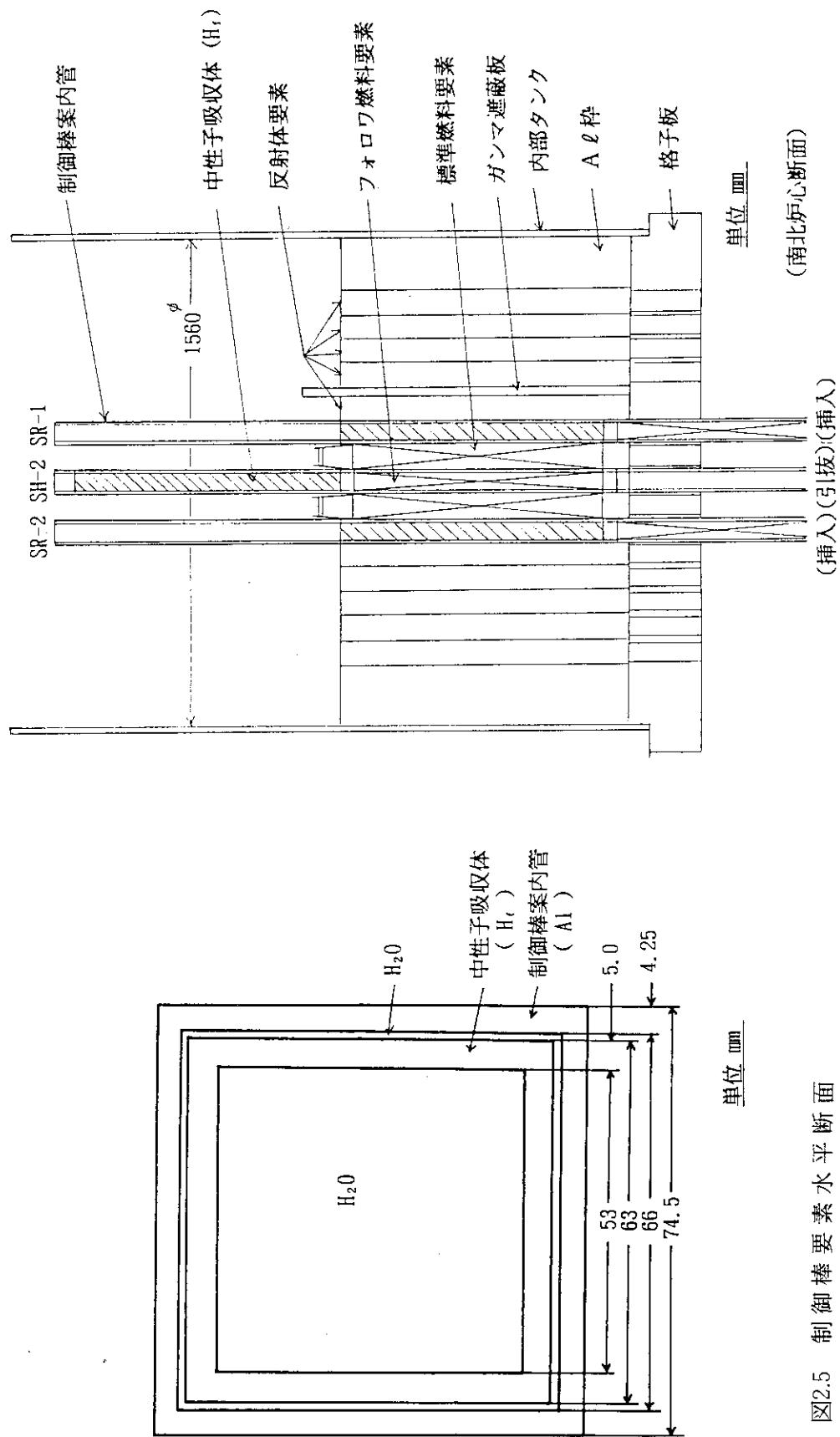


図2.6 炉心部垂直断面

図2.5 制御棒要素水平断面

### 3. 核設計の基本方針

炉心の核設計においては、以下に示す事項を満足することが要求される。

- ① 制御棒は適切な停止余裕を有すること。
- ② すべての運転範囲で負の反応度フィードバック特性を有すること。
- ③ 热設計との関連において、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、燃料板の損傷が起こらないこと。

このため、J M T R の核設計においては、次に示す項目を満足するようにその基本方針としている。

本解析では、各炉心に対し設定した項目について解析し、その制限値を満足しているかを検討することとした。表 3.1 に核設計の基本方針に定められている制限値を核的制限値としてまとめて示す。

#### (1) 過剰反応度

炉心の過剰反応度は、約  $15\% \Delta k/k$  以下になるようにする。

#### (2) 反応度制御効果

- a. すべての制御棒を挿入した状態での実効増倍率を 0.9 以下とする。
- b. いずれかの制御棒 1 本を完全に引き抜いた状態でも原子炉を停止状態に保つことができるようとする。

#### (3) 反応度変化率

反応度変化率は、制御棒が最大駆動速度で引抜かれても  $0.5\% \Delta k/k/s$  以下になるようにする。

#### (4) 反応度係数

減速材温度係数、減速材ボイド係数及びドプラ係数が負となるようにする。

#### (5) 出力分布

炉心は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、熱的制限値を超える異常な出力分布が生じることのないようにする。

#### (6) 燃料燃焼度

燃料要素の平均燃焼度は、L E U 燃料については 50% 以下、M E U 燃料については 40% 以下となるようにする。

表3.1 核 的 制 限 値

項 目	制 限 値
(1) 過剰反応度	1.5 % $\Delta k/k$
(2) 反応度制御効果 全制御棒挿入時	0.9 ( $k_{eff}$ )
	one rod stuck時 1 未満 ( $k_{eff}$ )
(3) 反応度変化率	0.5 % $\Delta k/k/s$
(4) 反応度係数	負
(5) 出力分布	熱的制限値を超えない
(6) 燃焼度 M E U燃料	40 %
	L E U燃料 50 %

## 4. 計 算 方 法

### 4.1 解析炉心

J M T R は、照射実験を目的とする汎用型材料試験炉であり、多種多様な照射試料が炉心に装荷される。J M T R の運転出力、運転日数、炉心構成等の基本計画は、照射実験の動向を長期的に考慮して決定される。この基本計画に基づき、各運転サイクルにおける詳細な炉心配置は、その炉心に対する核計算を行い安全性を確認するとともに個々の照射試料が要求する照射条件を実現できるように決定される。

このため、本解析においては、2章で示した図2.2「炉心配置例」のJ M T R の基本的な炉心構成について検討することとし、炉心の種類としては、表4.1に示すように移行炉心、L E U 炉心及び混合炉心があり、これらの炉心について解析することとした。

移行炉心は、L E U 炉心への移行に先立ち、L E U 標準燃料要素を中濃縮ウラン燃料炉心（M E U 炉心）に混合して使用するもので、図4.1に示すように2体（格子位置H-8及びJ-8）をL E U 標準燃料要素に交換配置した炉心である。L E U 炉心は、L E U 燃料のみで構成した炉心で、図4.2に示すような初装荷炉心と、図4.3に示すような平衡炉心とがある。混合炉心は、燃料の低濃縮化に伴い未使用のM E U 燃料要素をL E U 平衡炉心に混合して使用するもので、図4.4に示すように1体（格子位置F-6又はL-10）又は2体（格子位置F-6及びL-10）をM E U 標準燃料要素に交換配置した炉心である。各炉心の主要な核的仕様を表4.2に示す。

### 4.2 計算コードおよびライブラリ

核特性の計算は、日本原子力研究所で開発・整備された「熱中性子炉体系標準核設計コードシステム（S R A C）」<sup>(3)</sup> を用いて行った。

S R A C システムは、熱中性子炉の核計算のために開発され、炉設計や実験解析に用いられている。その機能には、断面積ライブラリ編集、セル定数計算、炉心計算、燃焼計算などを備えている。

使用した計算コード、ライブラリおよび計算項目との関連を示した核計算フローの概略を図4.5に示す。主な計算コードは次のとおりである。

- (1) P I J : 衝突確率法による中性子スペクトルコード
- (2) T W O T R A N : 2次元 S<sub>N</sub> 輸送理論コード
- (3) C I T A T I O N : 3次元拡散理論コード
- (4) C O R E B N : 拡散理論による3次元燃焼計算コード

本計算に使用する中性子断面積ライブラリ等は次のとおりである。

- (1) パブリックライブラリ
  - 高速中性子群 --- FASTLBB4 + FASTLBB5
  - 熱中性子群 --- THERMLB4 + THERMLB5
- (2) ユーザーライブラリ
  - 高速中性子群 --- UFAST5
  - 熱中性子群 --- UTHML5
- (3) 共鳴断面積ライブラリ --- MCROSS4 + MCROSSJ2 + MCROS85
- (4) 燃焼チェーンライブラリ --- BURN2(ENDFB2)

なお、S R A C システムを使用しての核特性の計算手法の妥当性については、高濃縮ウラン燃料及び中濃縮ウラン燃料を配置した J M T R の運転炉心並びに J M T R C の実験炉心の解析によって、確認している。<sup>(2), (4), (5)</sup>

#### 4.3 エネルギー群構造

セル定数計算で使うユーザーライブラリの核種とエネルギー群は、全核種の 107群の多数群ミクロ断面積データが収められているパブリックライブラリから、本解析に必要な核種を選択し、エネルギー群数を63群に縮約したミクロ断面積を用意した。

炉心計算に用いるセル定数のマクロ断面積ライブラリの少数群定数は、多数群（63群）によるセル定数計算(PIJコード)により得られた中性子スペクトルを用い、エネルギー群の縮約を行うことによって求めた。少数群定数は、反応度計算等の炉心計算には4群を、また、動特性パラメータの計算には、熱群を多くした10群を用いた。

多数群から少数群までのエネルギー群構造の関連を表4.3に示す。

#### 4.4 少数群定数

燃料要素の少数群定数は、原子炉の運転によって U-235の燃焼及び要素側板に挿入する Cd の燃焼に伴い変化する。このため、燃料要素については燃焼依存のセル均質マクロ断面積を作成した。

炉心計算に用いる燃料要素の格子（セル）少数群定数は、次の手順で作成した。

##### 4.4.1 標準燃料要素

標準燃料要素の燃焼依存のセル均質マクロ断面積の作成にあたっては、燃料要素の形状を計算できるような体系にモデル化する必要がある。また、L E U 燃料にあっては、燃料部と可燃性吸収体の Cd を共に一つのモデル体系で燃焼させることは計算コード上難しい。このため、以下に示すように、格子計算を燃料部と Cd 部とを分離して行い、その結果を組合せる計算ステップを取り入れた手法によることとした。図4.6にL E U 標準燃料要素のセル計算フローを示す。

### ① 燃料ミート部格子燃焼計算

図4.7に示すように燃料ミート、 $A_\ell$ 被覆及び水部からなる板状格子モデルでの燃焼計算によりミート部の燃焼依存均質多群断面積を作成する。燃焼ステップは燃焼初期を細かくして、1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.0, 8.5, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 50.0, 95.0 ( $^{235}\text{U}\%$ ) の14燃焼ステップで計算する。

### ② 側板部格子計算

Cdワイヤ入り燃料側板部の群定数作成は、直径 0.3mmのCdワイヤ1本当たりに注目した図4.8に示すような等体積円筒モデルで計算する。

Cdワイヤはモデル的に燃料要素に比べて極めて小さな体積であり、また熱エネルギー群での吸収断面積が約2500 barnと大きい。このため、要素を燃料ミート部と側板部とに分離したモデルでは、本来、要素内で連続している空間スペクトルが崩れてしまい Cd の吸収効果を精度よく評価するのが難しくなってくる。そこで、このような分離したモデルでの Cd の吸収効果をよりよく模擬するような計算手法として VIM 補正法を採用した。この方法は、モンテカルロ計算コード VIM で Cd ワイヤを含む燃料要素の体系をモデル化することなくセル計算ができるところから、VIM でセル計算して求めた Cd の熱群の吸収断面積と中性子束の積、即ち Cd の反応率を求め、この値を基準として、SRAC-PIJ 計算体系での Cd の反応率が一致するように、側板部円筒モデルの最外層領域の燃料部の水の密度を変えることによりスペクトルを調整するものである。この方法で求めた、直径 0.3mmで18本挿入した燃料要素に対する側板円筒モデルの水の密度の補正係数（VIM 補正）は 1.403 であった。（付録1に詳細を示す）

### ③ 燃料要素格子計算

①及び②で求めた均質多群断面積を用いて、両者を合わせた図4.9に示す燃料要素格子計算モデルで燃料要素の4群の少群定数を作成する。

### ④ 側板部格子燃焼計算

Cdの燃焼を模擬するため、②と同じ円筒格子モデルで①の燃料ミート部の燃焼ステップに対応する  $^{235}\text{U}$  の燃焼度で計算する。このとき、側板部の中性子束は、③で計算した側板部の中性子束と同じレベルで Cd を燃焼させるために、②と③の側板部の中性子束の比でステップ燃焼度を補正する。

②から④を各燃焼ステップについて繰り返す。

## 4.4.2 燃料フォロワ

燃料フォロワのセル計算フローを図4.10に示す。標準燃料要素の場合と同じように側板部の格子計算において VIM 補正を行う。

## ① 燃料ミート部格子燃焼計算

標準燃料要素と同様なモデルで燃焼計算を行う。

## ② 側板部格子計算

標準燃料要素と同様なモデルで燃焼計算を行う。但し、P I J 計算モデルにはガイドチューブ部も含まれる。

直径 0.3mmで16本挿入したフォロワ燃料要素に対する側板円筒モデルの水の密度の補正係数（V I M 補正）は 1.971であった。

## ③ 燃料ミート部と側板部及びガイドチューブ部の X 方向均質化計算

①及び②で求めた両領域の均質多群断面積を用いて、燃料要素 X 方向について格子計算を行い X 方向均質化多群断面積を作成する。

## ④ 側板部格子燃焼計算

C d の燃焼を模擬するため、②と同じ円筒格子モデルで①の燃料ミート部の燃焼ステップに対応する $^{235}\text{U}$ の燃焼度で計算する。このとき、側板部の中性子束は、③で計算した側板部の中性子束と同じレベルで C d を燃焼させるために、②と③の側板部の中性子束の比でステップ燃焼度を補正する。

## ⑤ X 方向均質領域とガイドチューブ部の Y 方向均質化計算

③で求めた X 方向均質化多群断面積とガイドチューブ部による Y 方向均質化計算によりフォロワ燃料要素の 4 群の少数群定数を作成する。

## 4.4.3 反射体要素

炉心を構成する反射体要素は、B e 及びA l 製のブロックで照射孔があり、この中に種々の照射試料が装荷される。試料が装荷されない場合は、それぞれの材質のプラグが挿入されている。少数群定数は等体積円筒モデル化した計算体系で作成した。

## 4.5 制御棒領域の境界条件

炉心計算での制御棒領域に対する扱いは、熱群については領域の表面で対数微分境界条件を設定することとし、高速群の 1 ~ 3 群は制御棒領域の外側に標準燃料要素を置いた平板モデルで中性子スペクトル計算を行い、セル定数として炉心計算に用いた。

熱群に対する対数微分境界条件を表わす対数微分定数の計算は、図 4.11 に示すように制御棒の吸収体領域を中心置いた 1/4 対称炉心モデルでエネルギー 18 群の 2 次元輸送理論コード TWOTRAN を用いて、実効増倍率を求め、この実効増倍率を基準として、同一体系での 4 群 2 次元拡散理論コード CORE BN による計算結果での実効増倍率が一致するようにパラメータ計算を行い対数微分定数を求める方法を採用した。

その結果、L E U燃料炉心に対する熱群の対数微分定数は、0.049であった。以後の炉心計算では、この値を使うこととした。因みに、同じ計算方法によるM E U燃料炉心での値は、0.165である。

#### 4. 6 炉心燃焼計算

炉心燃焼計算は、3次元炉心体系モデルでC O R E B Nを用いて行った。燃焼計算の時間ステップは、1運転サイクルの25日を7等分割した8ステップとし、制御棒の引抜きは運転時の制御棒引き抜きパターンに従い臨界調整を行いながら計算した。

##### 4. 6. 1 出力ピーキング係数

熱計算等で熱水路係数として使われる炉心出力分布の最大歪み因子は、出力ピーキング係数として、炉心燃焼計算結果から求めた。各燃焼ステップでの出力分布の結果から炉心水平方向出力分布因子、縦方向出力分布因子を求めた。局所出力分布因子については、燃料要素を微細に分割した炉心モデルから求めた。出力ピーキング係数の定義や結果については、J A E R I - M「J M T R 低濃縮燃料炉心の核的ホットスポットファクタ」<sup>(6)</sup>でまとめて述べている。

#### 4. 7 臨界計算

臨界計算は、炉心拡散計算コードC I T A T I O Nを用いて行った。炉心配置は、燃焼計算と同じ3次元体系モデルとした。燃料要素のセル定数は、炉心燃焼計算より得られた平均個数密度を基に、セル計算を行い求めた。

反応度係数等の計算は、2次元の炉心体系モデルで計算することとし、3次元炉心体系と同じ実効増倍率となるように、バックリングを設定した。

##### 4. 7. 1 過剰反応度及び炉停止余裕

炉心の持つ過剰反応度及び全制御棒挿入時の炉停止余裕は、全制御棒の5本が炉心に挿入又は引抜き状態についての実効増倍率から求めた。

制御棒のワンロッドスタック時の炉停止余裕は、5本ある制御棒の各々について全引抜きとした炉心状態についての実効増倍率から求めた。

##### 4. 7. 2 反応度係数

反応度係数の減速材温度係数、ボイド係数及びドプラ係数は、制御棒全引抜きの炉心状態の2次元炉心モデル計算から求めた。減速材温度及び燃料温度が325 K、ボイド体積率が0%での炉心を基準とし、温度又はボイド率を変えたときの実効増倍率から、それぞれの係数を求めた。この基準とした炉心については実効増倍率が1.0になるようにバックリングを設定した。

また、反応度係数の燃焼度依存性を調べるため、燃焼度を変えて求めた。  
各係数の求め方は次のとおりである。

(1) 減速材温度係数

燃料板間の水の温度をパラメータに、水のミクロ断面積及び個数密度を変えた少数群定数を作成し、炉心の実効増倍率を計算した。減速材温度係数は、反応度変化の水の温度変化に対する比として求めた。

(2) 減速材ボイド係数

燃料板間でのボイド発生に相当する水の個数密度を変えて少数群定数を作成し、炉心の実効増倍率を計算した。減速材のボイド係数は、反応度変化の燃料板間の水の個数密度変化に対する比として求めた。

(3) ドプラ係数

燃料芯材の温度をパラメータに、芯材のミクロ断面積を変えた少数群定数を作成し、炉心の実効増倍率を計算した。燃料のドプラ係数は、反応度変化の燃料芯材部の温度変化に対する比として求めた。

表4.1 炉心構成

炉心 燃料要素	移行炉心	LEU炉心	混合炉心	MEU炉心
LEU標準燃料要素	2 体	22 体	20又は21 体	—
LEU燃料フォロワ	—	5 体	5 体	—
MEU標準燃料要素	20 体	—	2又は1 体	22 体
MEU燃料フォロワ	5 体	—	—	5 体

表4.2 主要な核的仕様

炉心 項目	移行炉心	LEU炉心		混合炉心	MEU炉心
		初装荷炉心	平衡炉心		
核燃料物質	濃縮ウラン (約45%及び約20%)	濃縮ウラン (約20%)	濃縮ウラン (約20%及び約45%)	濃縮ウラン (約45%)	濃縮ウラン (約45%)
<sup>235</sup> U装荷量	約 7.6 kg	約 10.4 kg	約 9.8kg	約 9.6 kg	約 7.4 kg
減速材 反射材	軽水 ベリリウム及びアルミニウム				
運転日数	正味 (11日+11日)/サイクル	正味 25日 / サイクル		正味 (11日+11日)/サイクル	

表4.3 多数群及び少數群のエネルギー群構造

107 G Library		63 G	10 G	4 G	107 G Library		63 G	10 G	4 G	
Group	Upper Energy(ev)		Cell	Core		Group	Upper Energy(ev)	Cell	Core	
1	$1.000 \times 10^7$				55	$1.3710 \times 10^1$				
2	$7.7880 \times 10^6$	1			56	1.0677	20			
3	6.0653				57	$8.3153 \times 10^0$				
4	4.7237				58	6.4760				
5	3.7688	2	1	1	59	5.0435	21			
6	2.8650				60	3.9279				
7	2.2313				61	3.0590				
8	1.7377	3			62	2.3824	22	5		
9	1.3534				63	1.8554				
10	1.0540				64	1.6374	23			
11	$8.2085 \times 10^5$	4			65	1.4450				
12	6.3928				66	1.2752	24			
13	4.9787				67	1.1254				
14	3.8774	5	2	2	68	$9.9312 \times 10^{-1}$	25			
15	3.0197				69	8.7642				
16	2.3518	6			70	7.7344	26			
17	1.8316				71	6.8256	27	1		
18	1.4264	7			72	6.0236	28	2		
19	1.1109				73	5.3158	29	3		
20	$8.6517 \times 10^4$	8			74	4.6912	30	4	6	
21	6.7369				75	4.1399	31	5		
22	5.2475				76	3.8926	32	6		
23	4.0868	9			77	3.6528	33	7		
24	3.1828				78	3.4206	34	8		
25	2.4788				79	3.1961	35	9		
26	1.9305	10	3		80	2.9792	36	10		
27	1.5034				81	2.7699	37	11		
28	1.1709				82	2.5683	38	12	7	
29	$9.1188 \times 10^3$	11			83	2.3742	39	13		
30	7.1017				84	2.1878	40	14		
31	5.5308				85	2.0090	41	15		
32	4.3074	12			86	1.8378	42	16		
33	3.3546				87	1.6743	43	17		
34	2.6126				88	1.5183	44	18		
35	2.0347	13	3		89	1.3700	45	19		
36	1.5846				90	1.2293	46	20	8	
37	1.2341				91	1.0963	47	21		
38	$9.6112 \times 10^2$	14			92	$9.7080 \times 10^{-2}$	48	22		
39	7.4852				93	8.5397	49	23		
40	5.8295				94	7.4276	50	24		
41	4.5400	15			95	6.4017	51	25		
42	3.5358				96	5.4520	52	26		
43	2.7536				97	4.5785	53	27	9	
44	2.1445	16			98	3.7813	54	28		
45	1.6702				99	3.0602	55	29		
46	1.3007				100	2.4154	56	30		
47	1.0130	17			101	1.8467	57	31		
48	$7.8893 \times 10^1$				102	1.3543	58	32		
49	6.1442				103	$9.3805 \times 10^{-3}$	59	33		
50	4.7851	18			104	5.9804	60	34	10	
51	3.7267				105	3.3423	61	35		
52	2.9023				106	1.4663	62	36		
53	2.2603				107	$3.5238 \times 10^{-4}$	63	37		
54	1.7603	19								

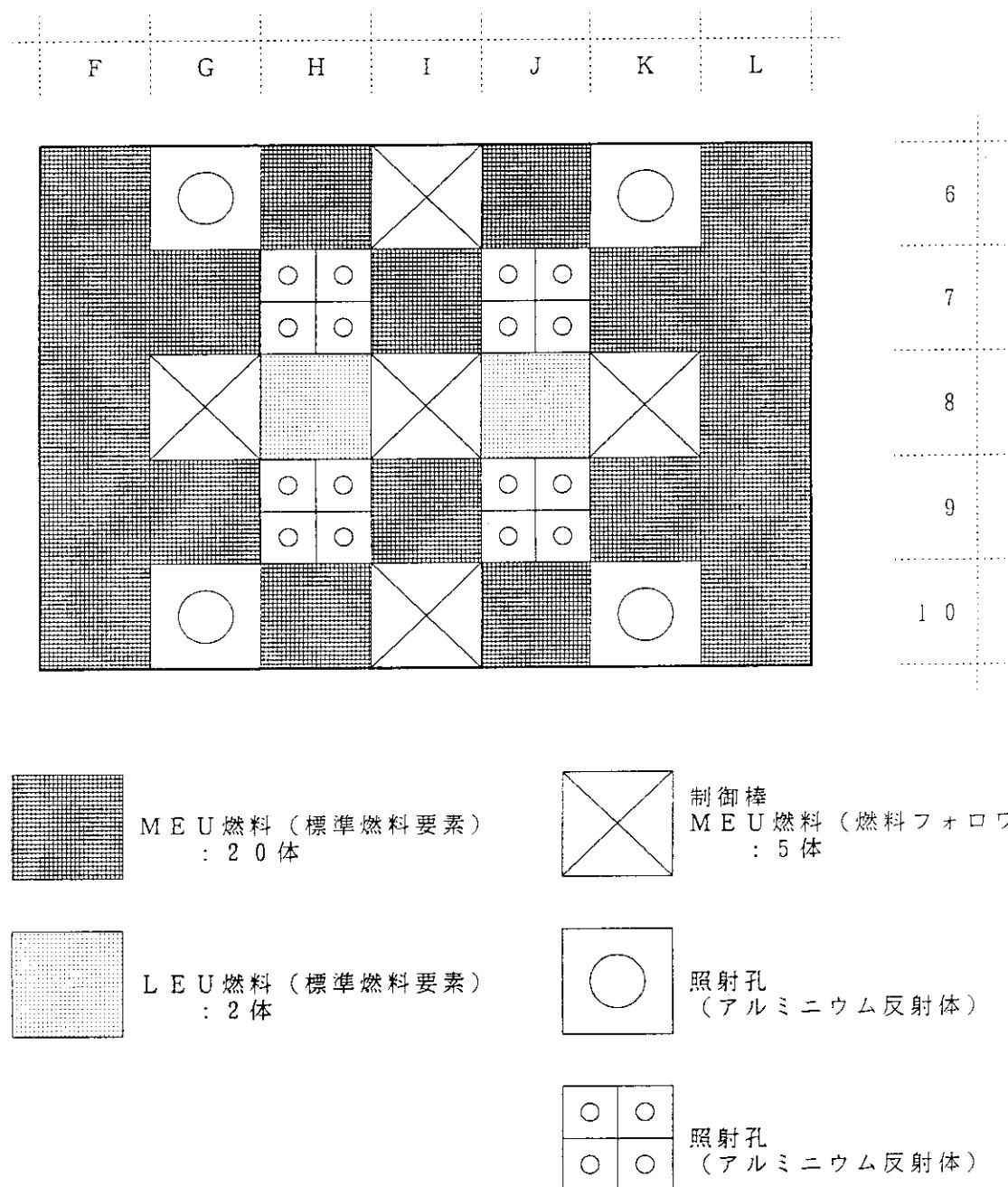
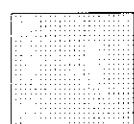
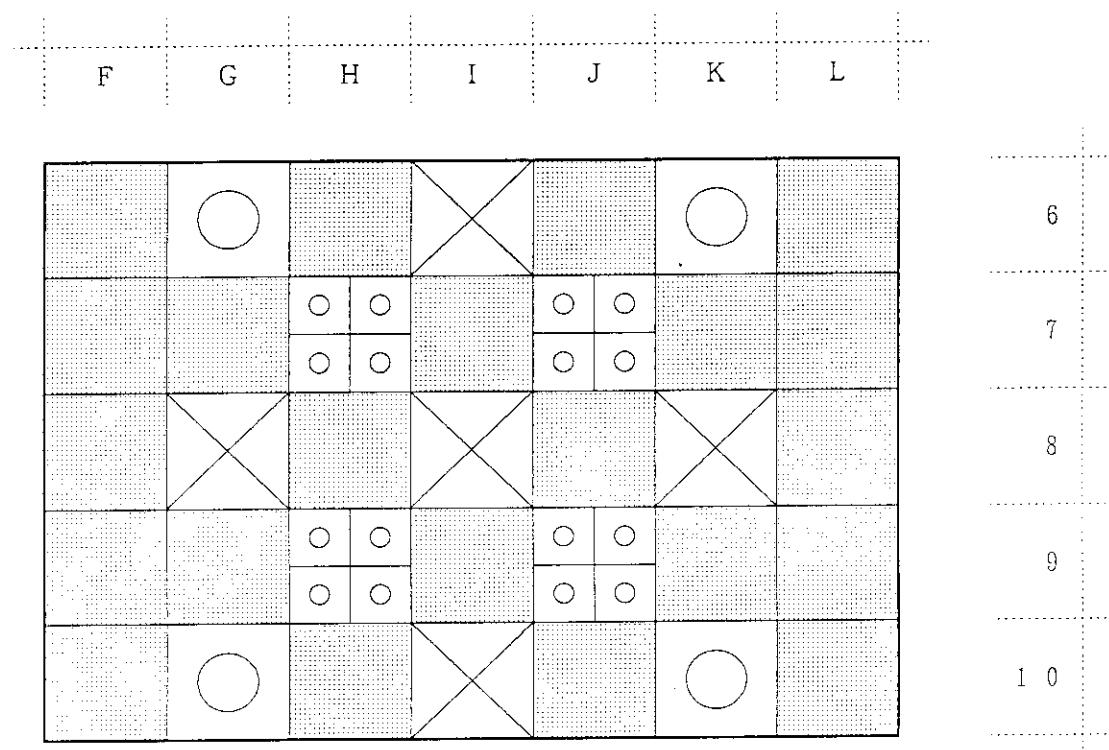
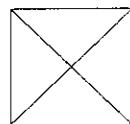


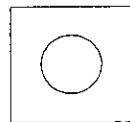
図4.1 移行炉心配置図



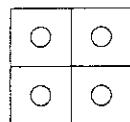
LEU燃料（標準燃料要素）  
：22体



制御棒  
LEU燃料（燃料フォロワ）  
：5体

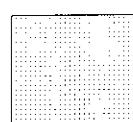
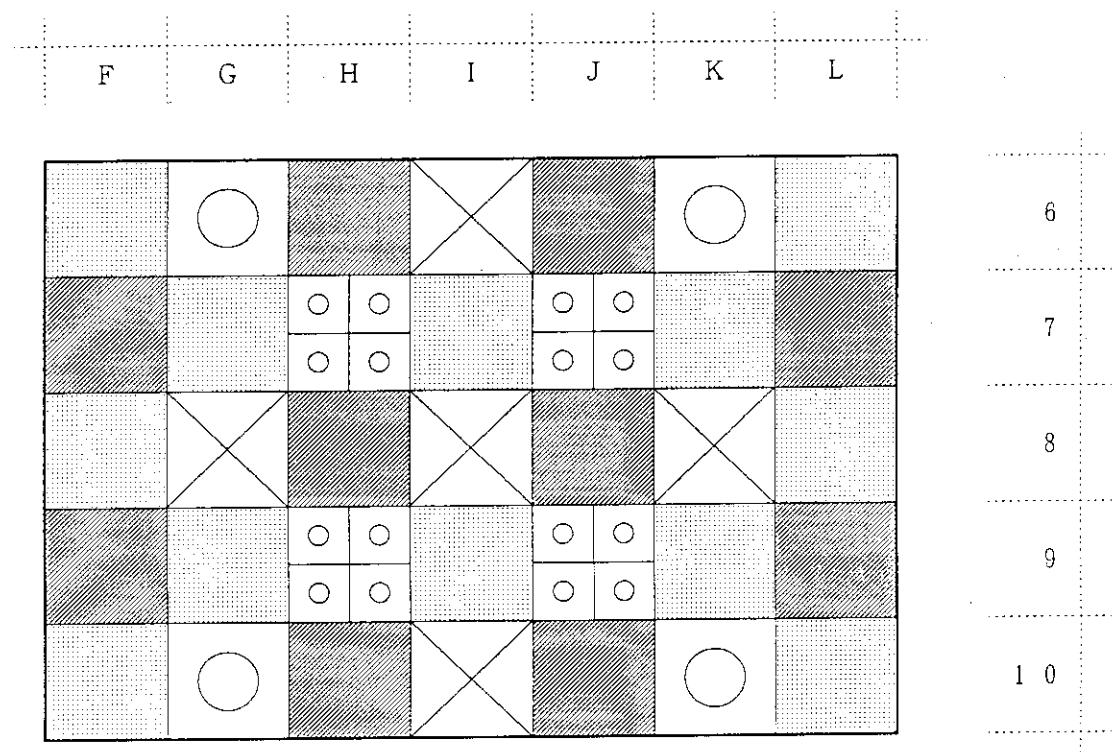


照射孔  
(アルミニウム反射体)

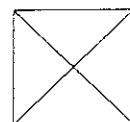


照射孔  
(アルミニウム反射体)

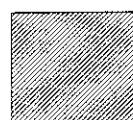
図4.2 LEU初装荷炉心配置図



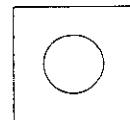
LEU燃料 (標準燃料要素)  
新燃料  
: 12体



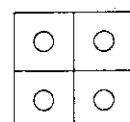
制御棒  
LEU燃料 (燃料フォロワ)  
: 5体



LEU燃料 (標準燃料要素)  
1サイクル使用  
: 10体



照射孔  
(アルミニウム反射体)



照射孔  
(アルミニウム反射体)

図4.3 LEU平衡炉心配置図

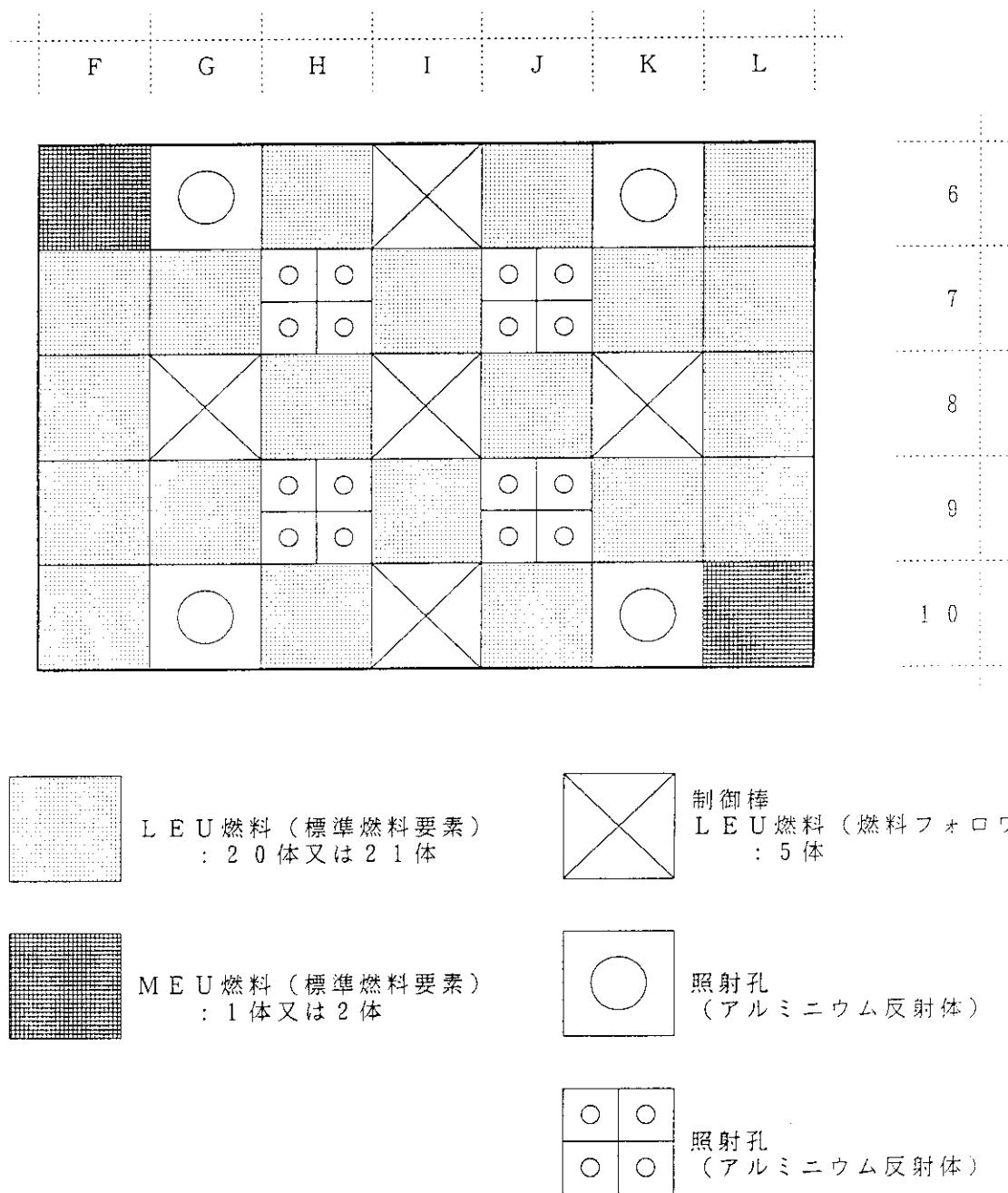


図4.4 混合炉心配置図

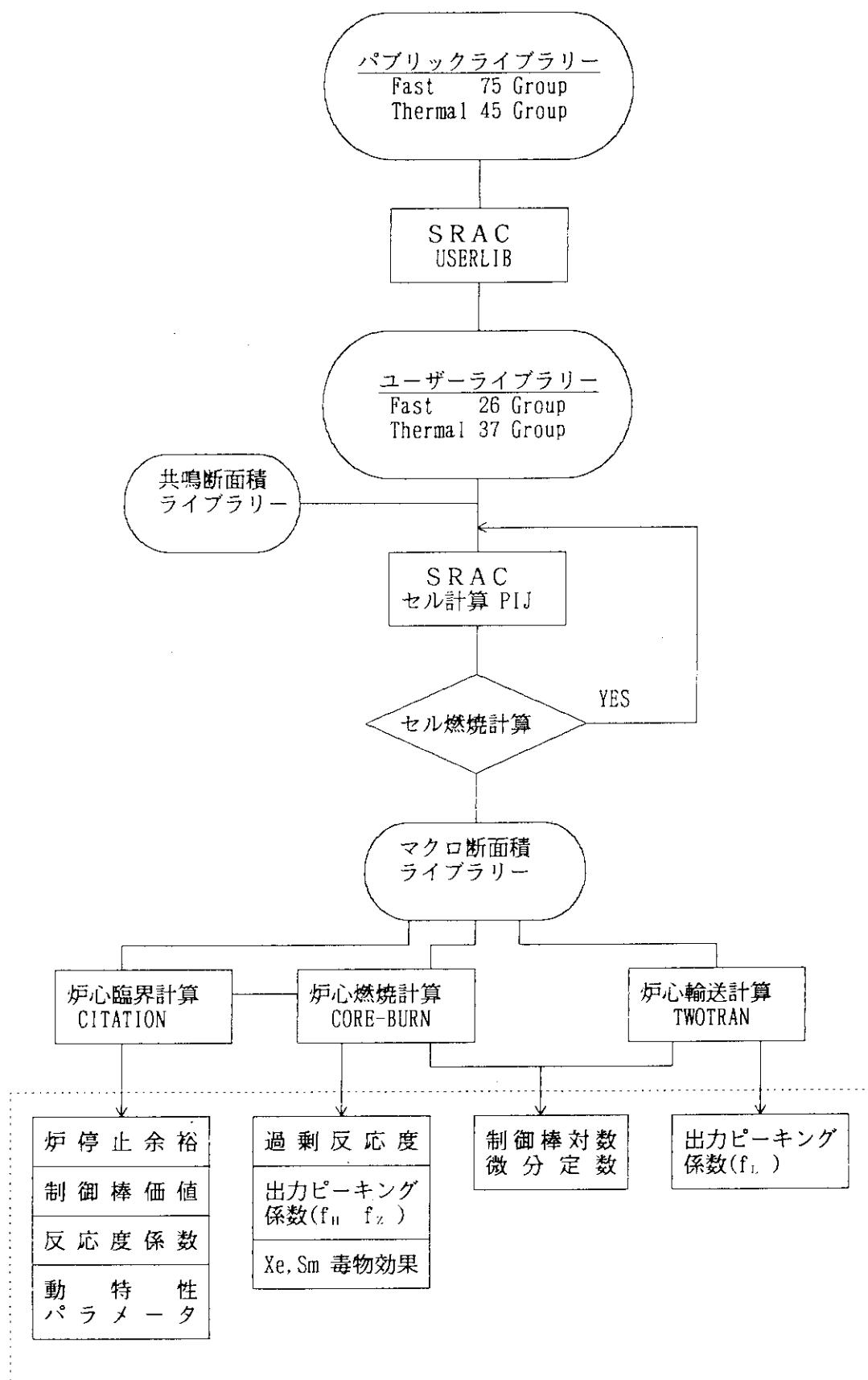


図4.5 核 計 算 フ ロ ー

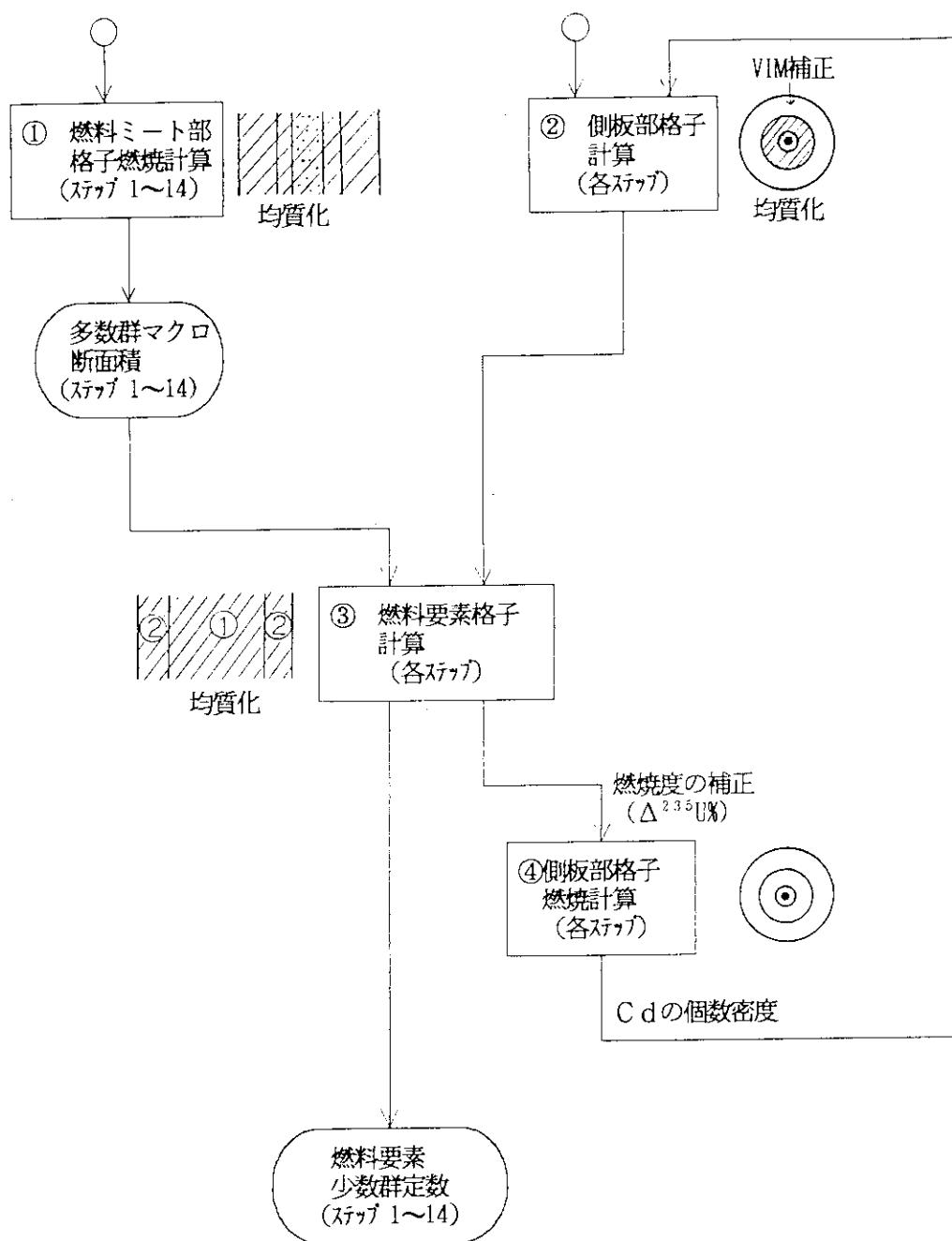


図4.6 L EU標準燃料セル計算フロー

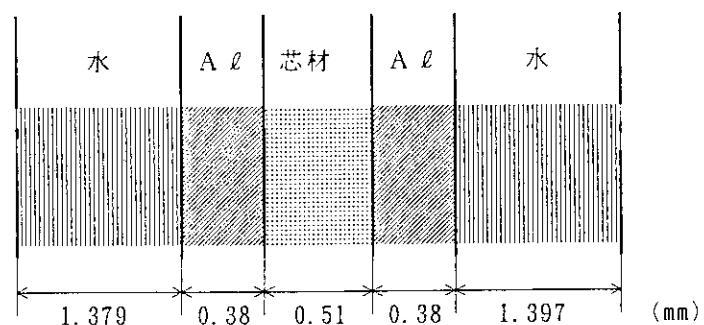


図 4.7 標準燃料芯材部の格子計算モデル

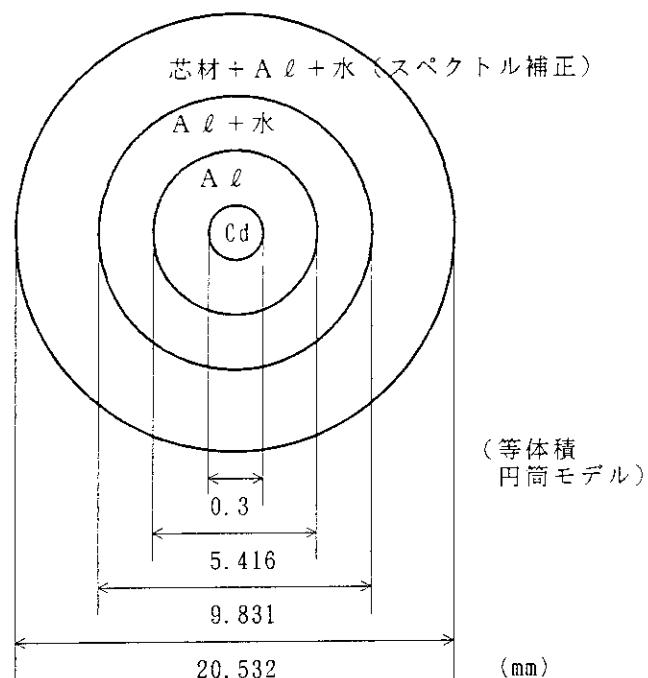


図 4.8 標準燃料側板部の計算モデル

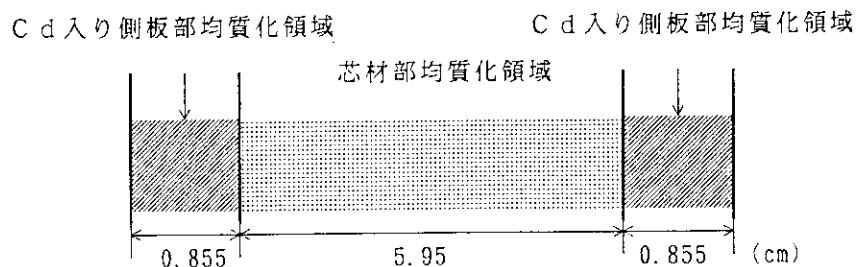


図4.9 標準燃料要素格子計算モデル

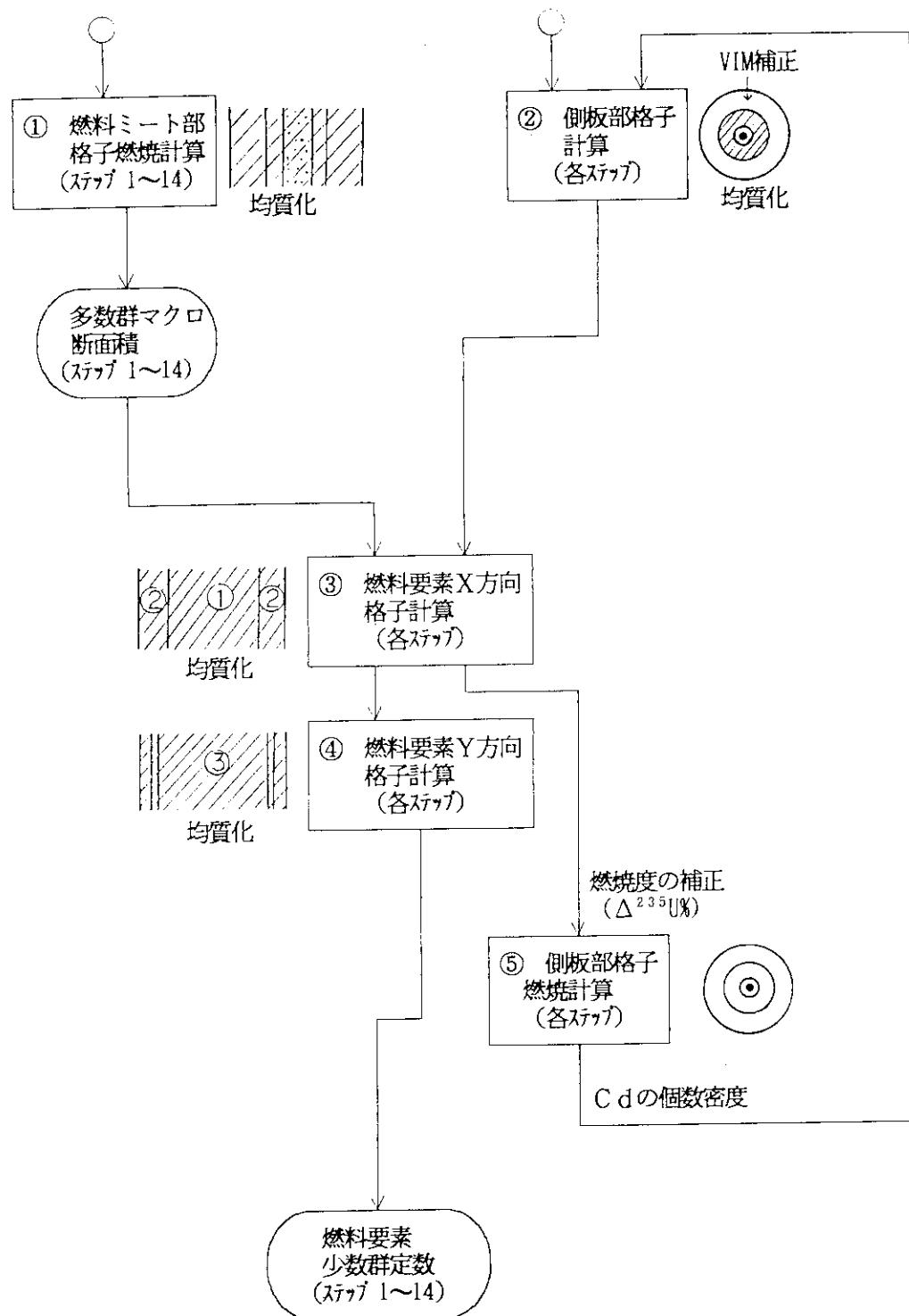


図4.10 L EU燃料フォロワセル計算フロー

CR	S.E.	F.E.	S.E.					3.86②
SE	A1	S.E.	S.E.	Be反射体				7.72④
FE	S.E.	A1	S.E.					7.72④
								7.72④
								7.72④
								7.72④
								7.72④
								7.72④
								15.44⑧

3. 86 ②	7.72 ④	15.44 ⑧						
---------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------

○数字はメッシュ数

CRは制御棒引き抜き時はフォロワ燃料

S.E.は標準燃料

F.E.はフォロワ燃料

図4.11 制御棒対数微分定数計算モデル

## 5. 計 算 結 果

移行炉心、LEU炉心の初装荷炉心及び平衡炉心、並びに混合炉心の核特性の計算結果を表5.1にMEU炉心の値と共に示す。表中の値は、各炉心で構成されるであろう燃料配置でサイクルをとおして、定めた核的制限値に対して厳しい側となる値をまとめて示したものである。全炉心の値については、表5.2に示す。

### 5.1 過剰反応度

各炉心の持つ過剰反応度については、運転開始時（燃焼初期）におけるクリーン状態で最大となり、移行炉心においては $11.21\% \Delta k/k$ 、初装荷炉心においては $9.90\% \Delta k/k$ 、平衡炉心においては $9.61\% \Delta k/k$ 、また混合炉心においては $9.67\% \Delta k/k$ である。各炉心での燃焼末期における過剰反応度は、移行炉心においては $4.11\% \Delta k/k$ 、初装荷炉心においては $5.14\% \Delta k/k$ 、平衡炉心においては $3.00\% \Delta k/k$ 、また混合炉心においては $2.98\% \Delta k/k$ である。ここで、運転開始直後に蓄積する核分裂生成物、Xe, Sm等による反応度の減少は $4.60\% \Delta k/k$ である。

図5.1に燃焼に伴う過剰反応度の変化及び可燃性吸収体（Cd）の吸収反応度の変化を併せて示す。過剰反応度は運転開始に伴うF, Pの蓄積によって急激に減少し、その後、燃料の燃焼とCdの燃焼に伴ってゆっくりと変化しながら低下する。運転末期において可燃性吸収体のCdは、ほぼ燃焼しきっている。また、LEU平衡炉心における運転に伴う制御棒の動きについて、MEU炉心での実際の動きの例と共に図5.2に示す。LEU化に伴い運転中の過剰反応度の変化と同様に制御棒の動きも緩慢となると推測される。

過剰反応度が最大となるクリーン状態（運転初期）における各炉心の反応度収支を表5.3に示す。

### 5.2 炉停止余裕

すべての制御棒を挿入した状態及び最大反応度を有する制御棒を1本を完全に引き抜いた状態での実効増倍率の最大値は、LEU初装荷炉心の場合であって、すべての制御棒を挿入した状態のとき約0.864、また、最大反応度を有する制御棒1本を完全に引き抜いた状態のとき約0.960である。LEU炉心及び混合炉心では、移行炉心及びMEU炉心と比べLEU燃料の使用により燃料領域の熱中性子束が低下し、そのため制御棒価値が小さくなり実効増倍率が大きくなっている。

各炉心での炉停止余裕は、全制御棒挿入時の制限値である実効増倍率0.9に対して十分余裕を持っているとともに、最大反応度価値を持つ制御棒のワンロッドスタック時でも未臨界の条件を満足している。

### 5.3 反応度変化率

制御棒の反応度価値は、周辺の制御棒の引抜き状態による干渉効果により大きく変化する。このため、各制御棒の反応度価値曲線は、J M T R の運転時の制御棒引抜きパターンに従い制御棒位置を変えて、3次元の炉心体系モデルで計算した。

制御棒引抜きパターンは、①微調整安全棒 S R - 1, 2 の同時引抜きから始まり、次に②粗調整棒 S H - 1, 3 の同時引抜き、最後の③粗調整棒 S H - 2 の引抜きである。このような手順で求めた各炉心での各制御棒の反応度価値及び全制御棒価値を表 5.4 に示す。

図 5.3 に制御棒引抜きパターン①～③の相対反応度価値曲線（積分曲線）を示す。各炉心並びに燃焼に伴い制御棒反応度の絶対値は変化するが、相対値は不变である。

図 5.4 には、相対反応度価値曲線から求めた相対反応度変化率（微分曲線）を示す。この曲線から、S R - 1, 2 及び S H - 2 の制御棒は 375mm 近傍で、また、S H - 1, 3 は 325mm 近傍で反応度変化率が最大となる。従って、各制御棒の最大の反応度変化率は、この位置で最大駆動速度で引き抜かれた場合となる。各炉心での各制御棒の反応度変化率を表 5.5 に示す。最大の反応度変化率は、移行炉心の運転末期において微調整棒の S R - 1 を最大駆動速度の 2,000mm/min で引き抜いたときであり約 0.46%Δk/k/s である。また、粗調整棒については、同じく移行炉心の運転末期において S H - 1 を最大駆動速度の 200 mm/min で引き抜いたときであり約 0.063 %Δk/k/s である。各炉心とも制限値の 0.5%Δk/k/s 以下を満足している。

なお、表 5.1 及び表 5.2 に示した制御棒最大価値は、炉停止状態の全制御棒挿入時から最大反応度価値を有する制御棒（解析の結果、粗調整棒の S H - 1 に相当）を引き抜いた場合であり、その反応度価値を示している。

### 5.4 反応度係数

反応度係数は、各炉心に対して炉心平均燃焼度 0 % (初期)、約 2 %、約 8 %、約 15 % (末期) の時点で求め、燃焼度依存性も調べた。

表 5.1 に示す各係数は、燃焼初期から末期までを通して最小から最大の値を示している。

#### 5.4.1 減速材温度係数

各炉心における減速材温度係数の減速材温度による変化を図 5.5 から図 5.8 に示す。減速材温度係数は常に負であり、燃焼が進むにつれて、その絶対値は小さくなる。

#### 5.4.2 減速材ボイド係数

各炉心における減速材のボイド係数のボイド率による変化を図 5.9 から図 5.12 に示す。ボイド係数は常に負であり、燃焼が進むにつれて、その絶対値は小さくなる。

#### 5.4.3 ドプラ係数

各炉心における燃料のドプラ係数の燃料ミート温度による変化を図5.13から5.16に示す。ドプラ係数は常に負であるが、燃焼が進んでもその差はほとんどない。

#### 5.5 実効遅発中性子割合及び即発中性子寿命

動特性の解析に必要となる実効遅発中性子割合 ( $\beta_{eff}$ ) 及び即発中性子寿命 ( $\ell$ ) は、摂動理論に基づいて計算できるSRACのCITATIONで計算した。炉心は2次元x-y体系で、エネルギー群数を10群で計算した。

各炉心の運転初期と末期における計算結果を表5.6に示す。

表5.1 核 特 性

炉心 項目	移行炉心	L E U 炉心		混合炉心	M E U 炉心
		初装荷炉心	平衡炉心		
過剰反応度 [%Δk/k]	約 11.2	約 9.9	約 9.6	約 9.7	約 11.3
反応度制御効果 (k,,)					
a. 全制御棒挿入時	約 0.832 (約 -20.3) <sup>**</sup>	約 0.864 (約 -15.8) <sup>**</sup>	約 0.862 (約 -16.0) <sup>**</sup>	約 0.863 (約 -15.9) <sup>**</sup>	約 0.828 (約 -20.8) <sup>**</sup>
b. 最大反応度効果を有する制御棒 1 本完全引抜き時	約 0.956 (約 -4.6) <sup>**</sup>	約 0.960 (約 -4.2) <sup>**</sup>	約 0.959 (約 -4.3) <sup>**</sup>	約 0.960 (約 -4.2) <sup>**</sup>	約 0.955 (約 -4.7) <sup>**</sup>
制御棒価値 [%Δk/k]					
a. 全制御棒価値	約 31.5	約 25.7	約 25.6	約 25.6	約 32.1
b. 制御棒最大価値	約 15.7	約 11.6	約 11.7	約 11.7	約 16.1
反応度変化率 [%Δk/k/s]	約 0.46	約 0.38	約 0.40	約 0.40	約 0.47
反応度係数					
a. 減速材温度係数 (27 °C ~ 177°C) [%Δk/k/°C]	約 (-2.7~ -5.2) × 10 <sup>-2</sup>	約 (-2.3~ -5.1) × 10 <sup>-2</sup>	約 (-2.3~ -4.7) × 10 <sup>-2</sup>	約 (-2.3~ -4.8) × 10 <sup>-2</sup>	約 (-2.7~ -5.2) × 10 <sup>-2</sup>
b. 減速材ボイド係数 (0~15%void) [%Δk/k/%void]	約 (-2.3~ -4.0) × 10 <sup>-1</sup>	約 (-2.4~ -4.0) × 10 <sup>-1</sup>	約 (-2.3~ -3.7) × 10 <sup>-1</sup>	約 (-2.3~ -3.7) × 10 <sup>-1</sup>	約 (-2.2~ -4.0) × 10 <sup>-1</sup>
c. ドプラ係数 (27 °C ~ 427°C) [%Δk/k/°C]	約 (-0.8~ -1.4) × 10 <sup>-3</sup>	約 (-1.7~ -2.7) × 10 <sup>-3</sup>	約 (-1.7~ -2.6) × 10 <sup>-3</sup>	約 (-1.7~ -2.6) × 10 <sup>-3</sup>	約 (-0.7~ -1.4) × 10 <sup>-3</sup>
動特性パラメータ					
a. 即発中性子寿命 [s]	約 5.7 × 10 <sup>-5</sup>	約 4.8 × 10 <sup>-5</sup>	約 5.1 × 10 <sup>-5</sup>	約 5.1 × 10 <sup>-5</sup>	約 5.9 × 10 <sup>-5</sup>
b. 実効遅発中性子割合	約 7.6 × 10 <sup>-3</sup>	約 7.5 × 10 <sup>-3</sup>	約 7.4 × 10 <sup>-3</sup>	約 7.4 × 10 <sup>-3</sup>	約 7.6 × 10 <sup>-3</sup>

\*; は %Δk/k で表した値

表5.2 炉心核特性一覧（その1）

項目	炉心	移行			炉心			初期(BOC)			中期(BOC)			装荷炉心			平衡炉心A(10/12)…		
		前期(BOC)	中期(EOC)	後半炉心	初期(BOC)	中期(EOC)	後半炉心	初期(BOC)	中期(BOC)										
過剰反応度	(%Δk/k)	約 10.6	約 3.6	約 11.2	約 4.1	約 9.9	約 5.1	約 9.6	約 5.1	約 9.9	約 0.864	約 0.814	約 0.859	約 0.790	約 3.0				
反応度制御効果 a 全制御棒挿入時	(k <sub>eff</sub> )	約 0.823	約 0.762	約 0.832	約 0.766	約 (-30.6) *	約 (-15.8) *	約 (-16.4) *	約 (-22.8) *	約 0.864	約 (-15.8) *	約 (-16.4) *	約 0.790						
b 最大反応度効果を有する 制御棒1本完全引抜き時		約 (-21.5) *	(-31.2) *	約 (-20.3) *	約 (-30.6) *	約 0.956	約 0.882	約 (-13.3) *	約 0.960	約 (-4.2) *	約 (-10.1) *	約 0.959	約 0.955	約 0.884					
制御棒価値	(%Δk/k)																		
a 全制御棒価値		約 32.1	約 34.8	約 31.5	約 34.7	約 25.7	約 27.9	約 26.0	約 29.6										
b 制御棒最大価値		約 16.2	約 17.5	約 15.7	約 17.3	約 11.6	約 12.7	約 11.7	約 13.5										
反応度変化率 (%Δk/k/s)		約 0.43	約 0.46	約 0.43	約 0.46	約 0.35	約 0.38	約 0.34	約 0.40										
反応度係数																			
a 減速材温度係数 (27 ~ 177°C)	(%Δk/ k/°C)	約-(2.8 ~ 5.2) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.7 ~ 4.1) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.7 ~ 4.1) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.4 ~ 5.1) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.3 ~ 4.2) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.3 ~ 4.2) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.4 ~ 4.7) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.3 ~ 4.0) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.3 ~ 4.0) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.4 ~ 5.1) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.4 ~ 4.7) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.3 ~ 4.0) ×10 <sup>-2</sup>						
b 減速材ボイド係数 (0 ~ 15%void)	(%Δk/ k/%Void)	約-(3.0 ~ 4.0) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.3 ~ 2.9) ×10 <sup>-1</sup>	約-(3.0 ~ 4.0) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.3 ~ 2.9) ×10 <sup>-1</sup>	約-(3.1 ~ 4.0) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.4 ~ 3.3) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.7 ~ 3.7) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.3 ~ 3.0) ×10 <sup>-1</sup>										
c ドップラ係数 (27 ~ 427°C)	(%Δk/k/°C)	約-(0.8 ~ 1.4) ×10 <sup>-3</sup>	約-(1.1 ~ 2.7) ×10 <sup>-3</sup>	約-(1.7 ~ 2.4) ×10 <sup>-3</sup>	約-(1.7 ~ 2.4) ×10 <sup>-3</sup>	約-(1.7 ~ 2.6) ×10 <sup>-3</sup>													
動特性パラメータ																			
a 即発中性子寿命 (s)		約 5.3 × 10 <sup>-5</sup>	約 5.8 × 10 <sup>-5</sup>	約 5.3 × 10 <sup>-5</sup>	約 5.7 × 10 <sup>-5</sup>	約 4.3 × 10 <sup>-5</sup>	約 4.8 × 10 <sup>-5</sup>	約 4.5 × 10 <sup>-5</sup>	約 5.1 × 10 <sup>-5</sup>										
b 実効運発中性子割合		約 7.7 × 10 <sup>-3</sup>	約 7.6 × 10 <sup>-3</sup>	約 7.7 × 10 <sup>-3</sup>	約 7.6 × 10 <sup>-3</sup>	約 7.7 × 10 <sup>-3</sup>	約 7.5 × 10 <sup>-3</sup>	約 7.6 × 10 <sup>-3</sup>	約 7.4 × 10 <sup>-3</sup>										

注) \* : %Δk/k で表した値  
\*\* : (新標準燃料要素数 / 1サイクル使用標準燃料要素数)

注) \* : 表5.1に記載した数値を示す。

表5.2 炉心核特性一覧(その2)

項目	炉心		L E U 炉心		平衡炉心A+MEU2体装荷		平衡炉心B+MEU2体装荷		平衡炉心B+MEU1体装荷	
	初期(B0C)	末期(E0C)								
過剰反応度 (%)Δk/k)	約 9.6	約 3.2	約 9.6	約 3.0	約 9.7	約 3.0	約 9.6	約 3.0	約 3.1	約 3.1
反応度制御効果 (Keff)										
a 全制御棒挿入時	約 0.862 (-16.0) *	約 0.793 (-26.1) *	約 0.858 (-16.5) *	約 0.789 (-26.7) *	約 0.863 (-15.9) *	約 0.791 (-26.5) *	約 0.862 (-16.0) *	約 0.792 (-26.3) *		
b 最大反応度効果を有する制御棒1本完全引きき時	約 0.959 (-4.3) *	約 0.888 (-12.6) *	約 0.954 (-4.8) *	約 0.884 (-13.1) *	約 0.959 (-4.2) *	約 0.886 (-12.8) *	約 0.959 (-4.3) *	約 0.887 (-12.7) *		
制御棒価値 (%Δk/k)										
a 全制御棒価値	約 25.6	約 29.3	約 26.1	約 29.7	約 25.6	約 29.5	約 25.6	約 29.4		
b 制御棒最大価値	約 11.7	約 13.5	約 11.7	約 13.6	約 11.7	約 13.7	約 11.7	約 13.6		
反応度変化率 (%Δk/k/s)	約 0.34	約 0.40								
反応度係数										
a 減速材温度係数 (%Δk/k/°C) (27 ~ 177°C)	約-(2.4 ~ 4.7) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.3 ~ 4.0) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.4 ~ 4.8) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.3 ~ 4.0) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.4 ~ 4.8) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.3 ~ 4.0) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.4 ~ 4.8) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.3 ~ 4.0) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.3 ~ 4.0) ×10 <sup>-2</sup>	約-(2.3 ~ 4.0) ×10 <sup>-2</sup>
b 減速材ボイド係数 (%Δk/k/Void) (0 ~ 15%Void)	約-(2.7 ~ 3.7) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.3 ~ 3.0) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.7 ~ 3.7) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.3 ~ 3.0) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.7 ~ 3.7) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.3 ~ 3.0) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.7 ~ 3.7) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.3 ~ 3.0) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.3 ~ 3.0) ×10 <sup>-1</sup>	約-(2.3 ~ 3.0) ×10 <sup>-1</sup>
c ドブラー係数 (%Δk/k/°C) (27 ~ 427°C)	約-(1.7 ~ 2.6) ×10 <sup>-3</sup>									
動特性パラメータ										
a 即発中性子寿命 (s)	約 4.5 ×10 <sup>-5</sup>	約 5.1 ×10 <sup>-5</sup>	約 4.5 ×10 <sup>-5</sup>	約 5.1 ×10 <sup>-5</sup>	約 4.5 ×10 <sup>-5</sup>	約 5.1 ×10 <sup>-5</sup>	約 4.5 ×10 <sup>-5</sup>	約 5.1 ×10 <sup>-5</sup>	約 5.1 ×10 <sup>-5</sup>	約 5.1 ×10 <sup>-5</sup>
b 実効遅発中性子割合	約 7.6 ×10 <sup>-3</sup>	約 7.4 ×10 <sup>-3</sup>	約 7.6 ×10 <sup>-3</sup>	約 7.4 ×10 <sup>-3</sup>	約 7.6 ×10 <sup>-3</sup>	約 7.4 ×10 <sup>-3</sup>	約 7.6 ×10 <sup>-3</sup>	約 7.4 ×10 <sup>-3</sup>	約 7.4 ×10 <sup>-3</sup>	約 7.4 ×10 <sup>-3</sup>

\*\* : (新標準燃料要素本数/1サイクル使用標準燃料要素本数)

注) \* : %Δk/k で表した値  
      \*\*: 表5.1に記載した数値を示す。

表5.2 炉心核特性一覧（その3）

項目	炉心	M E U		炉心	
		初期(BOC)	前期(BOC)	中期(BOC)	后期(BOC)
過剰反応度	(%Δk/k)	約 11.1	約 3.4	約 11.3	約 3.6
反応度制御効果 a 全制御棒挿入時	( $k_{eff}$ )	約 0.826 (-21.1) *	約 0.758 (-31.9) *	約 0.828 (-20.8) *	約 0.761 (-31.4) *
b 最大反応度効果を有する 制御棒1本完全引抜き時		約 0.953 (-4.9) *	約 0.877 (-14.1) *	約 0.955 (-4.7) *	約 0.879 (-13.7) *
制御棒価値	(%Δk/k)	約 32.2	約 35.3	約 32.1	約 35.0
a 全制御棒価値		約 16.2	約 17.8	約 16.1	約 17.7
反応度変化率	(%Δk/k/s)	約 0.43	約 0.47	約 0.43	約 0.47
反応度係数					
a 減速材温度係数 ( $27 \sim 177^\circ\text{C}$ )	(%Δk/ $\text{k}/^\circ\text{C}$ )	約-(2.7 ~5.2) $\times 10^{-2}$	約-(2.7 ~4.2) $\times 10^{-2}$	約-(2.7 ~5.2) $\times 10^{-2}$	約-(2.7 ~4.2) $\times 10^{-2}$
b 減速材ボイド係数 (%Δk/ $\text{k}/\%$ Void)	(0 ~15%Void)	約-(2.9 ~4.0) $\times 10^{-1}$	約-(2.2 ~2.9) $\times 10^{-1}$	約-(2.9 ~4.0) $\times 10^{-1}$	約-(2.2 ~2.9) $\times 10^{-1}$
c ドプラ係数 ( $27 \sim 427^\circ\text{C}$ )	(%Δk/ $\text{k}/^\circ\text{C}$ )	約-(0.7 ~1.3) $\times 10^{-3}$	約-(0.7 ~1.4) $\times 10^{-3}$	約-(0.7 ~1.3) $\times 10^{-3}$	約-(0.7 ~1.4) $\times 10^{-3}$
動特性パラメータ					
a 即発中性子寿命	(s)	約 $5.5 \times 10^{-5}$	約 $5.9 \times 10^{-5}$	約 $5.5 \times 10^{-5}$	約 $5.9 \times 10^{-5}$
b 実効遅発中性子割合		約 $7.7 \times 10^{-3}$	約 $7.6 \times 10^{-3}$	約 $7.7 \times 10^{-3}$	約 $7.6 \times 10^{-3}$

注) \* :  $\% \Delta k/k$  で表した値  
: 表5.1に記載した数値を示す。

表5.3 反応度収支

単位  $\% \Delta k/k$ 

項目	炉心 移行炉心	L E U 炉心		混合炉心	M E U 炉心
		初装荷炉心	平衡炉心		
過剰反応度	約 11.2	約 9.9	約 9.6	約 9.7	約 11.3
Xe, S <sub>m</sub>	約 4.5	約 4.6	約 4.6	約 4.6	約 4.5
燃焼	約 6.4	約 9.0	約 7.3	約 7.2	約 6.3
運転余裕	約 0.5	約 0.5	約 0.5	約 0.5	約 0.5
Cd吸収	約 -0.2	約 -4.2	約 -2.8	約 -2.6	—

表5.4 制御棒反応度値

単位 % $\Delta k/k$ 

制御棒		微調整棒		粗調整棒			全制御 棒値
		SR-1	SR-2	SH-1	SH-2	SH-3	
炉心	初期	5.58	5.23	7.53	6.34	6.78	31.46
	末期	6.14	5.75	8.31	7.00	7.49	34.68
LEU 初装荷炉心	初期	4.65	4.39	5.96	5.36	5.32	25.68
	末期	5.07	4.78	6.49	5.79	5.81	27.94
LEU 平衡炉心	初期	4.57	4.32	6.02	5.33	5.40	25.64
	末期	5.29	4.98	6.85	6.04	6.14	29.30
混合炉心	初期	4.57	4.30	6.00	5.33	5.39	25.59
	末期	5.31	5.01	6.88	6.06	6.17	29.43
MEU炉心	初期	5.69	5.33	7.67	6.47	6.91	32.07
	末期	6.20	5.82	8.40	7.08	7.57	35.07

表5.5 反応度変化率

単位 % $\Delta k/k/s$ 

制御棒		微調整棒		粗調整棒		
		SR-1	SR-2	SH-1	SH-2	SH-3
炉心	初期	0.43	0.40	0.058	0.049	0.052
	末期	0.46	0.43	0.063	0.053	0.056
LEU 初装荷炉心	初期	0.35	0.33	0.045	0.040	0.040
	末期	0.38	0.36	0.049	0.043	0.044
LEU 平衡炉心	初期	0.34	0.32	0.045	0.040	0.041
	末期	0.40	0.37	0.051	0.045	0.046
混合炉心	初期	0.34	0.32	0.045	0.040	0.040
	末期	0.40	0.38	0.052	0.045	0.046
MEU炉心	初期	0.43	0.40	0.058	0.049	0.052
	末期	0.47	0.44	0.063	0.053	0.057

表5.6 動特性パラメータ

運送中性子群 崩壊定数 (1/s)	移行炉心	運送発中性子割合						M E U 炉心	
		L E U 炉心			混合炉心				
		初装荷炉心	平衡炉心	末期	初期	末期	初期		
初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	
1	$1.272 \times 10^{-2}$	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	
2	$3.174 \times 10^{-2}$	0.211	0.212	0.212	0.212	0.212	0.212	0.212	
3	$1.160 \times 10^{-1}$	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	
4	$3.110 \times 10^{-1}$	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	
5	1.400	0.130	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.128	
6	3.870	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.026	
$\beta_{eff}$	—	$7.659 \times 10^{-3}$	$7.608 \times 10^{-3}$	$7.677 \times 10^{-3}$	$7.508 \times 10^{-3}$	$7.603 \times 10^{-3}$	$7.440 \times 10^{-3}$	$7.615 \times 10^{-3}$	
$\rho$ (s)	—	$5.668 \times 10^{-5}$	$4.271 \times 10^{-5}$	$4.810 \times 10^{-5}$	$4.495 \times 10^{-5}$	$5.061 \times 10^{-5}$	$4.502 \times 10^{-5}$	$5.067 \times 10^{-5}$	
$\beta_{eff} / \rho$	—	145.5	134.2	179.7	156.1	169.1	147.0	169.1	
								147.1	
								140.6	
								128.5	

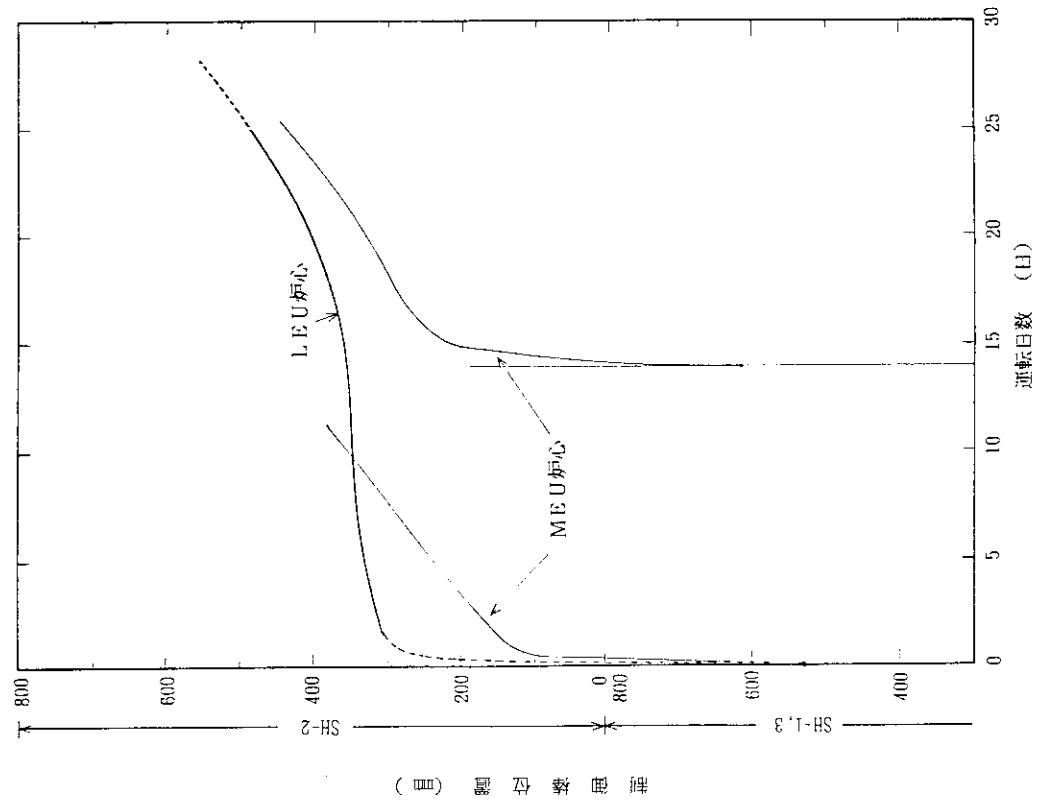
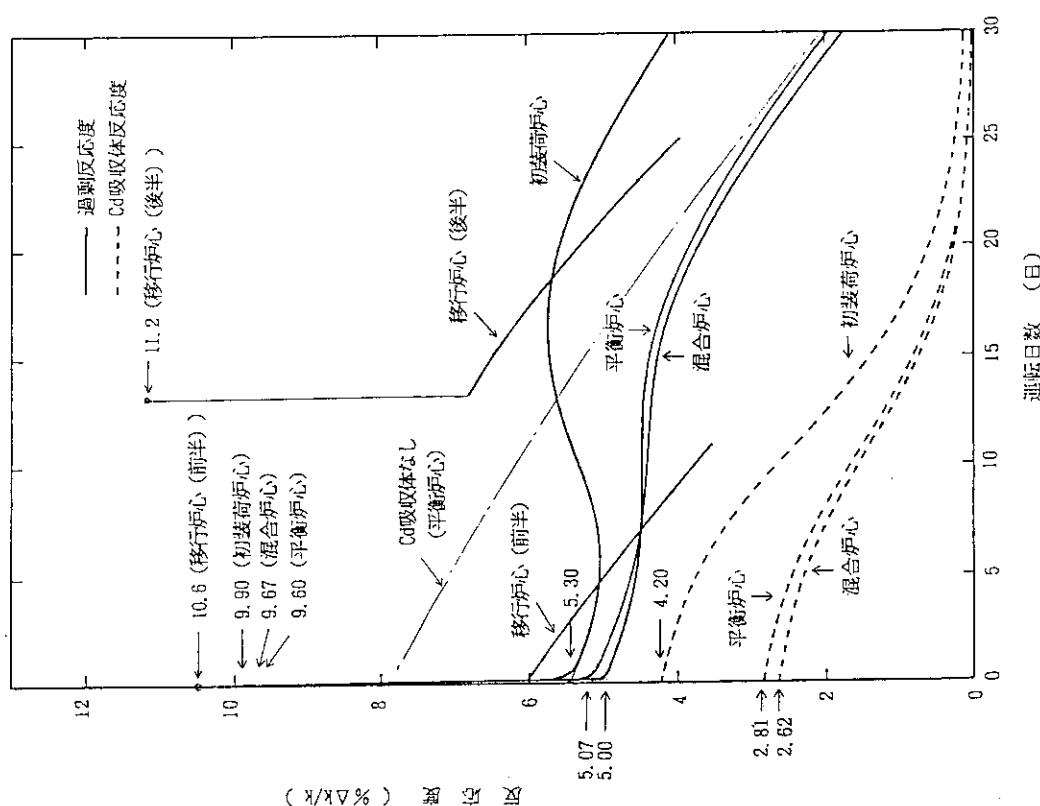


図5.2 運転に伴う制御棒の動き



## 図5.1 運転に伴う反応度変化

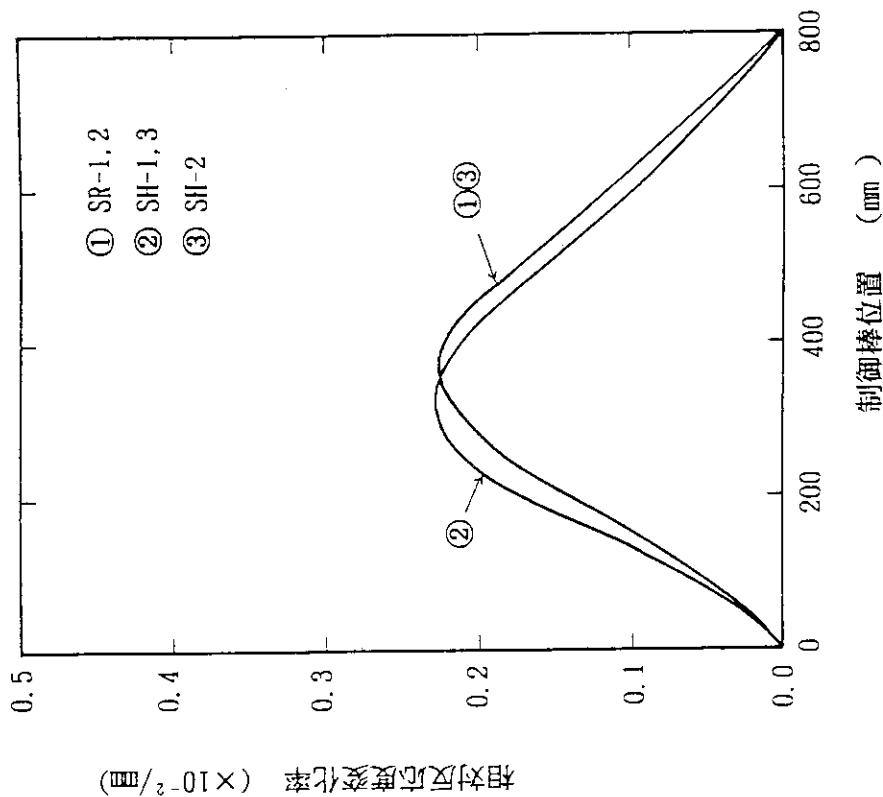


図5.4 制御棒反応度変化率曲線

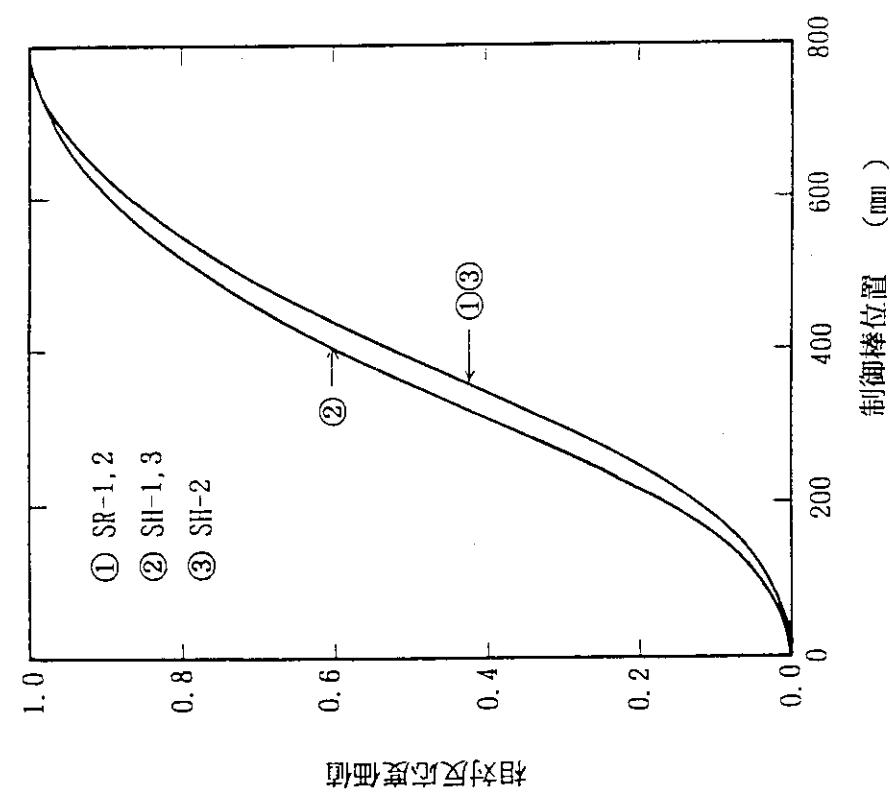


図5.3 制御棒反応度値曲線

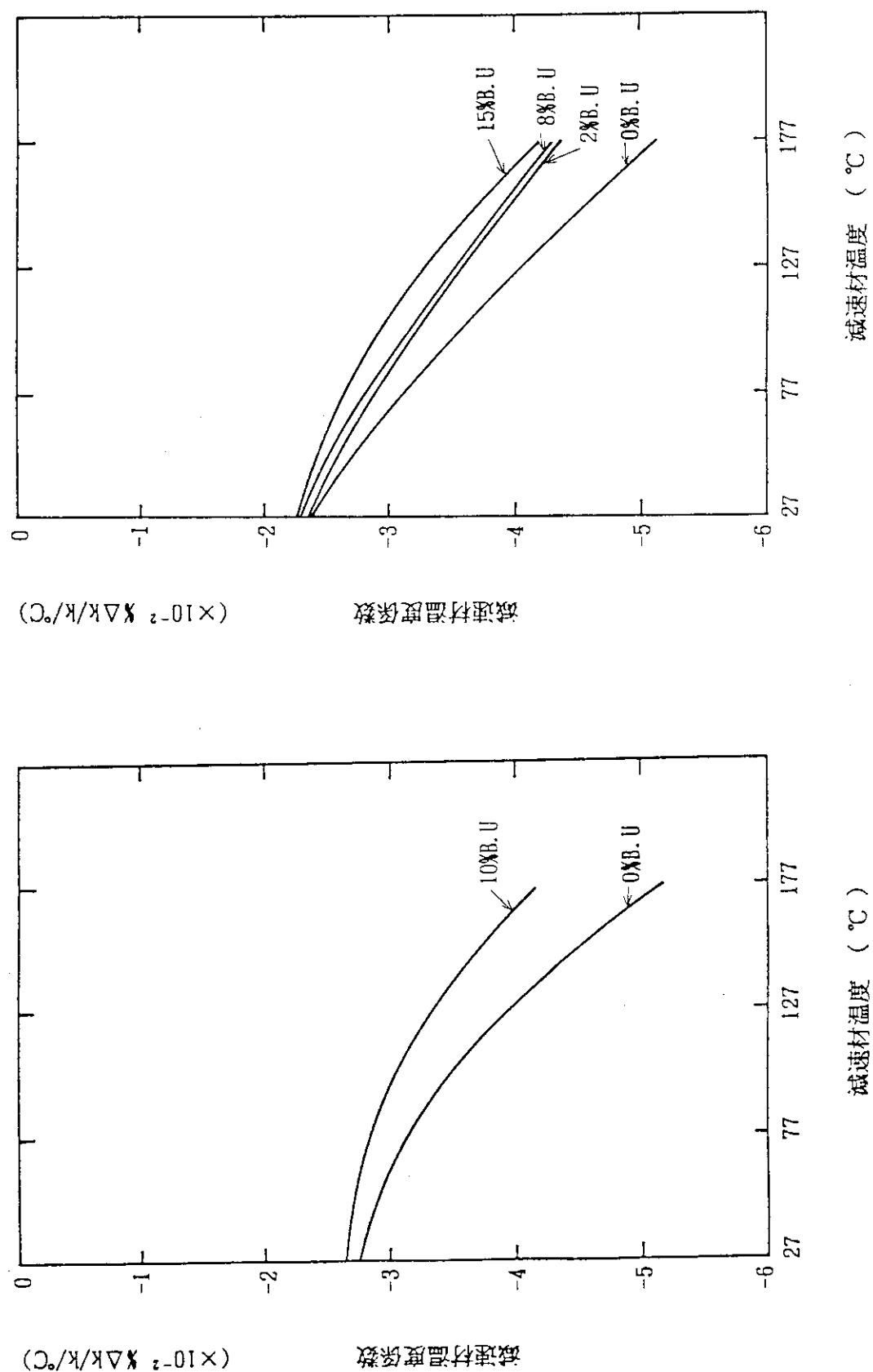


図5.5 減速材温度係数(移行炉心)

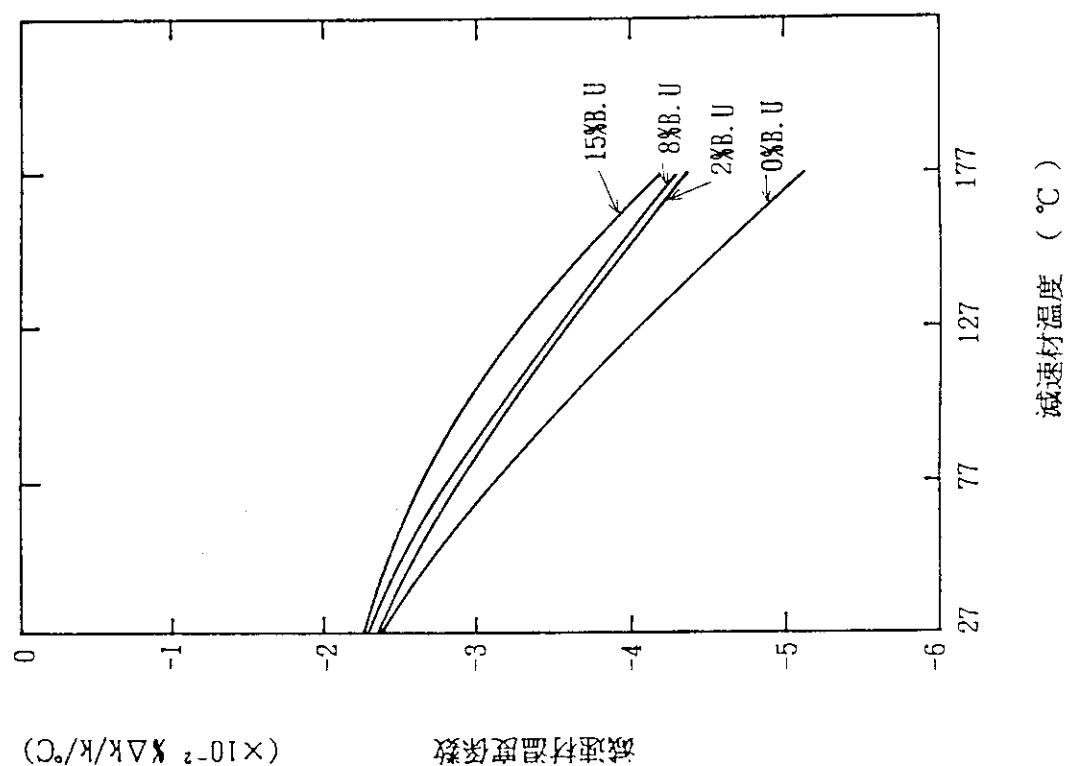


図5.6 減速材温度係数(L EU初装荷炉心)

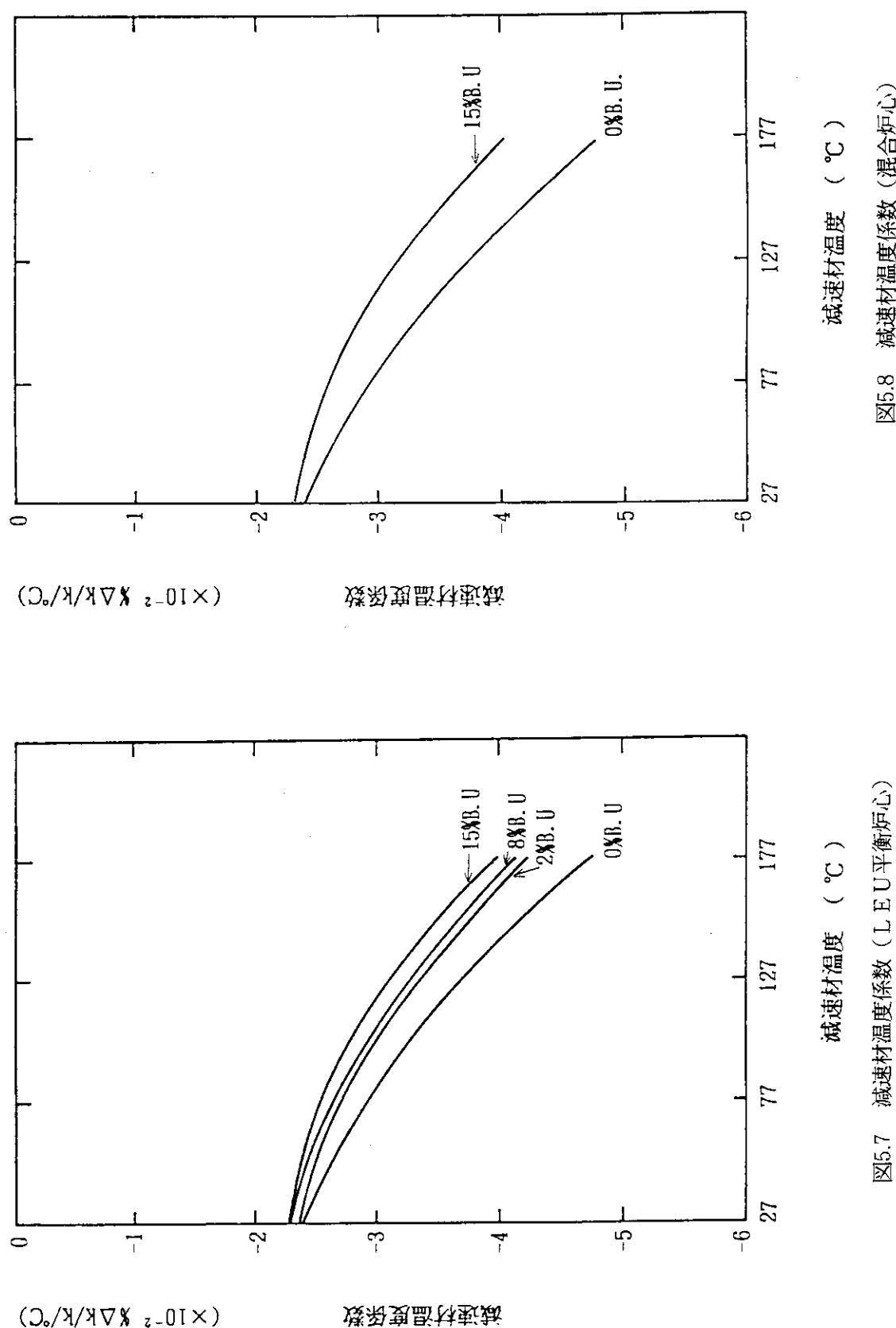


図5.7 減速材温度係数 (LEU平衡炉心)

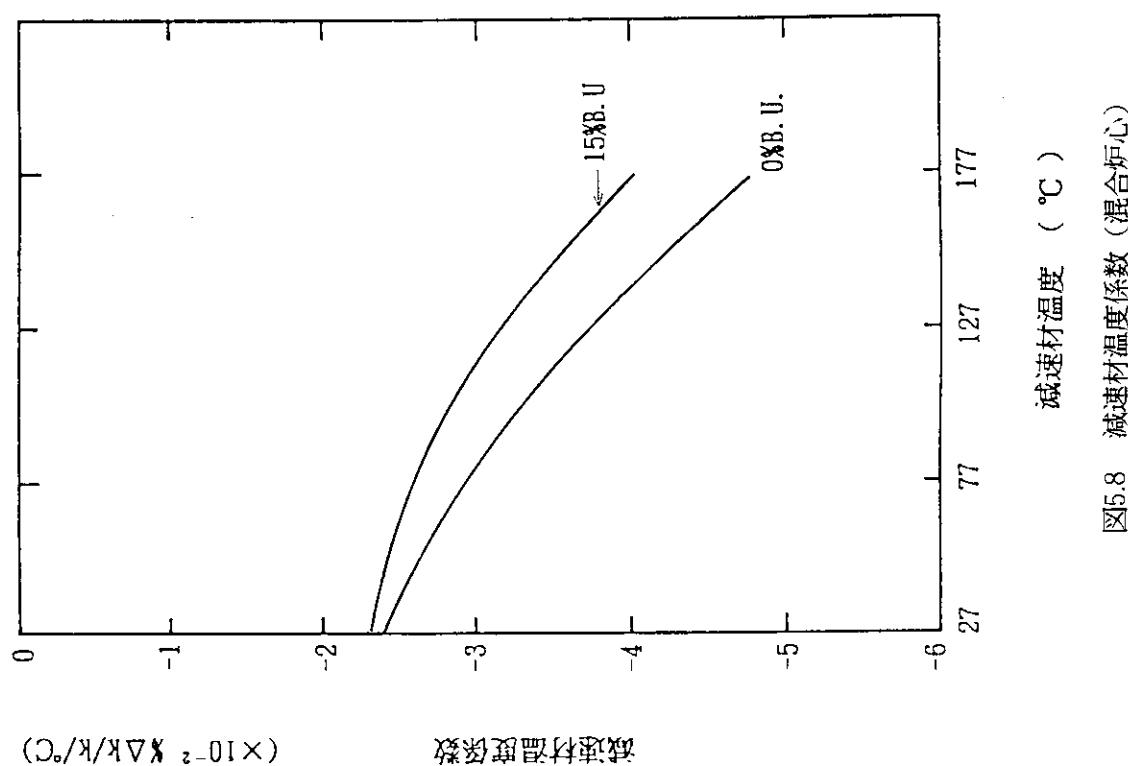


図5.8 減速材温度係数 (混合炉心)

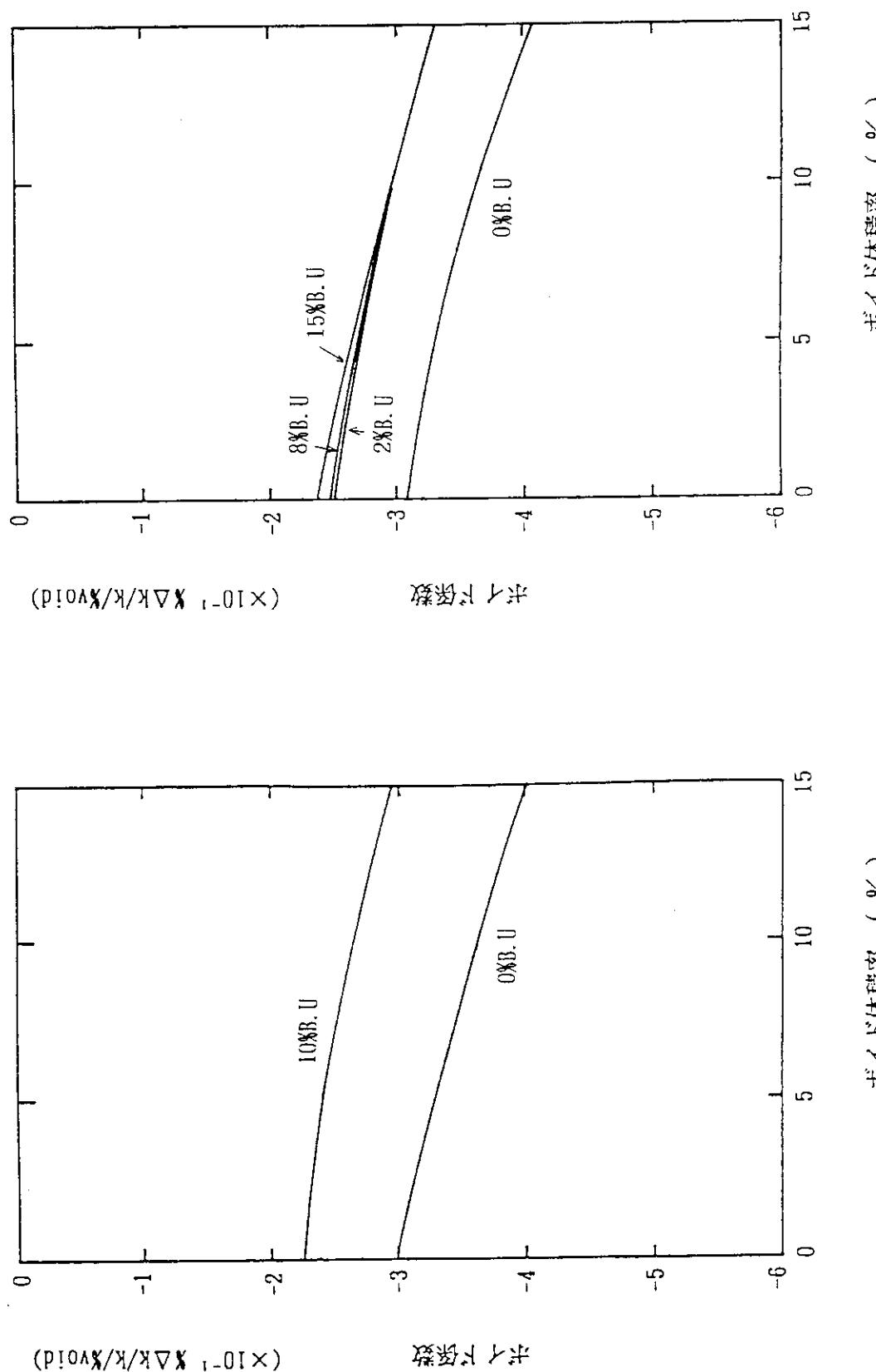
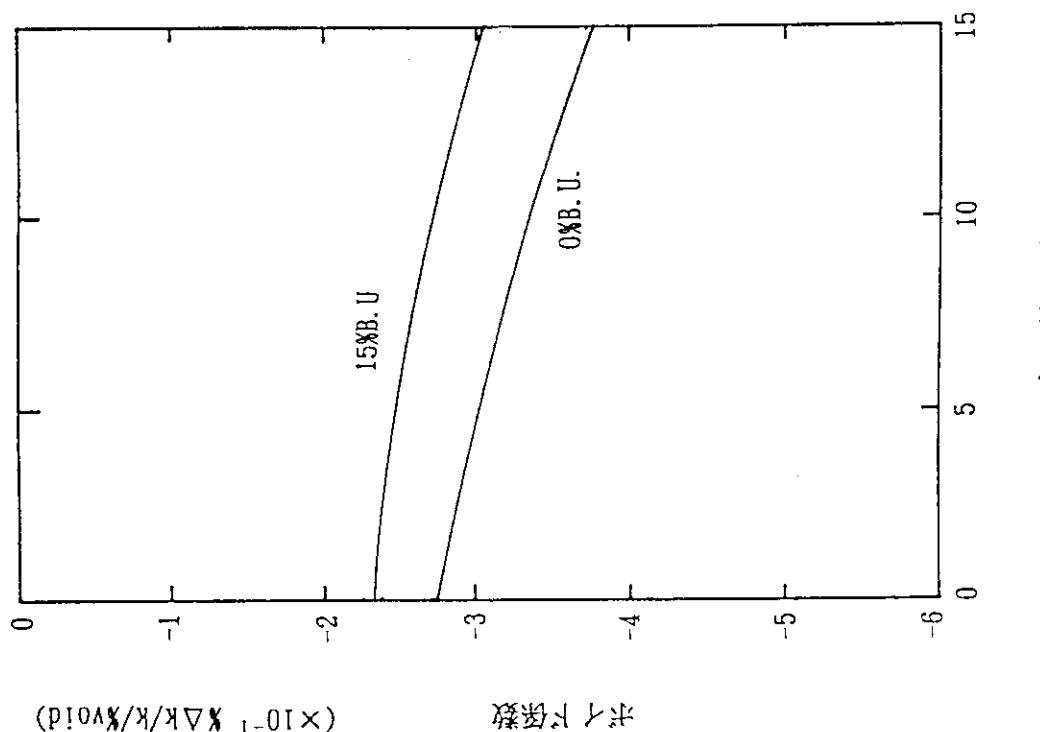


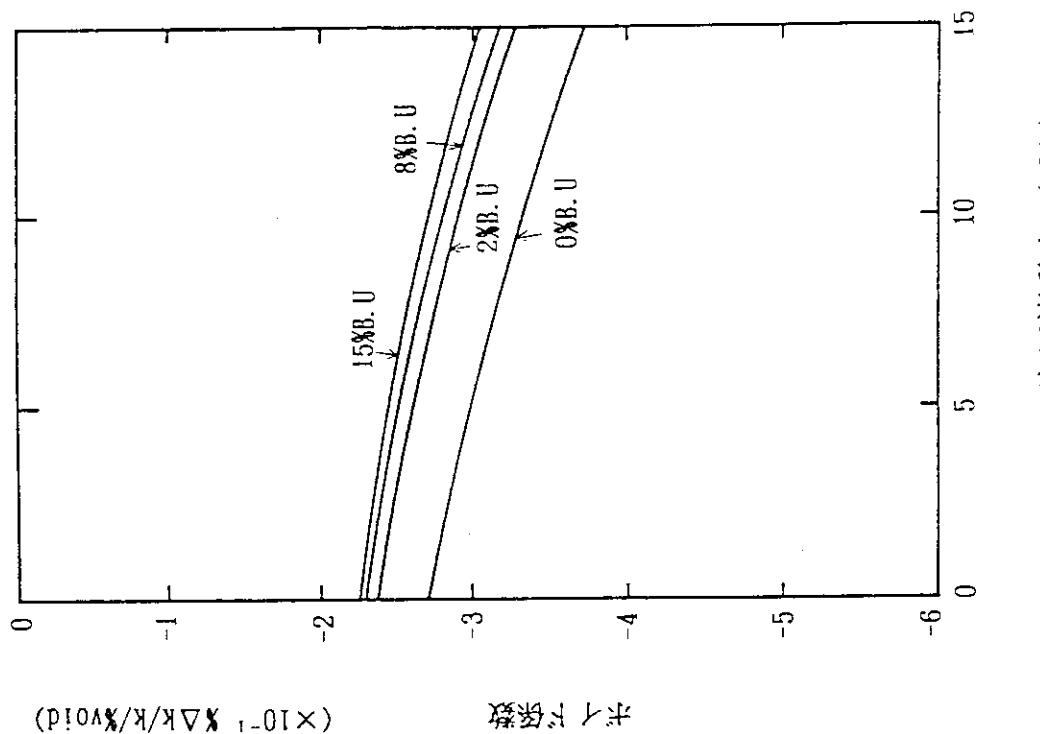
図5.9 減速材ボイド係数(移行炉心)

図5.10 減速材ボイド係数(LEU初装荷炉心)



ボイド体積率 (%)

図5.12 減速材ボイド係数(混合炉心)



ボイド体積率 (%)

図5.11 減速材ボイド係数(LEU平衡炉心)

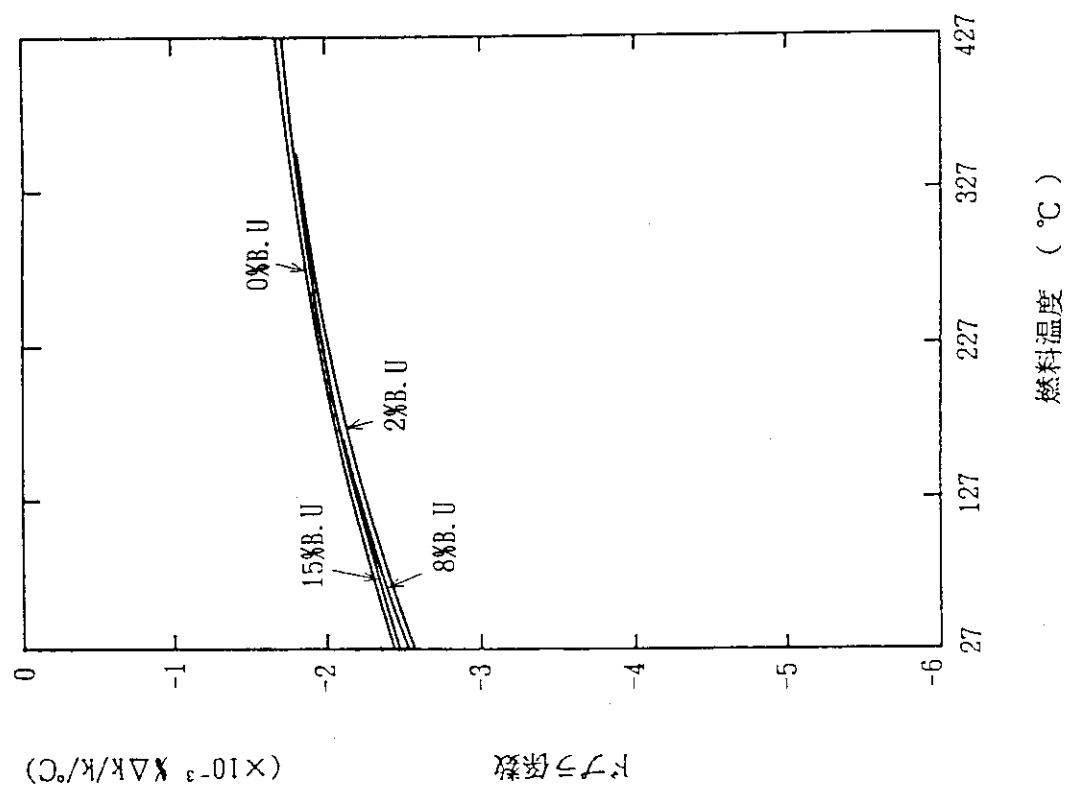


図5.14 ドブーラ係数 (LEU初装荷炉心)

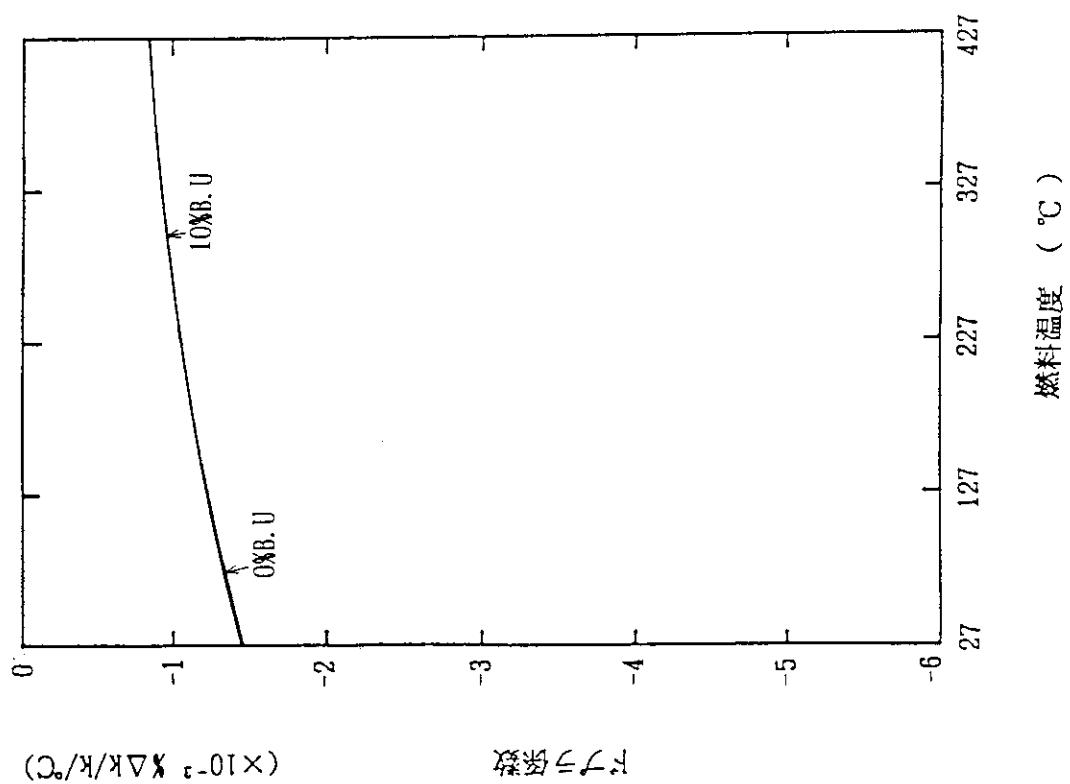


図5.13 ドブーラ係数 (移行炉心)

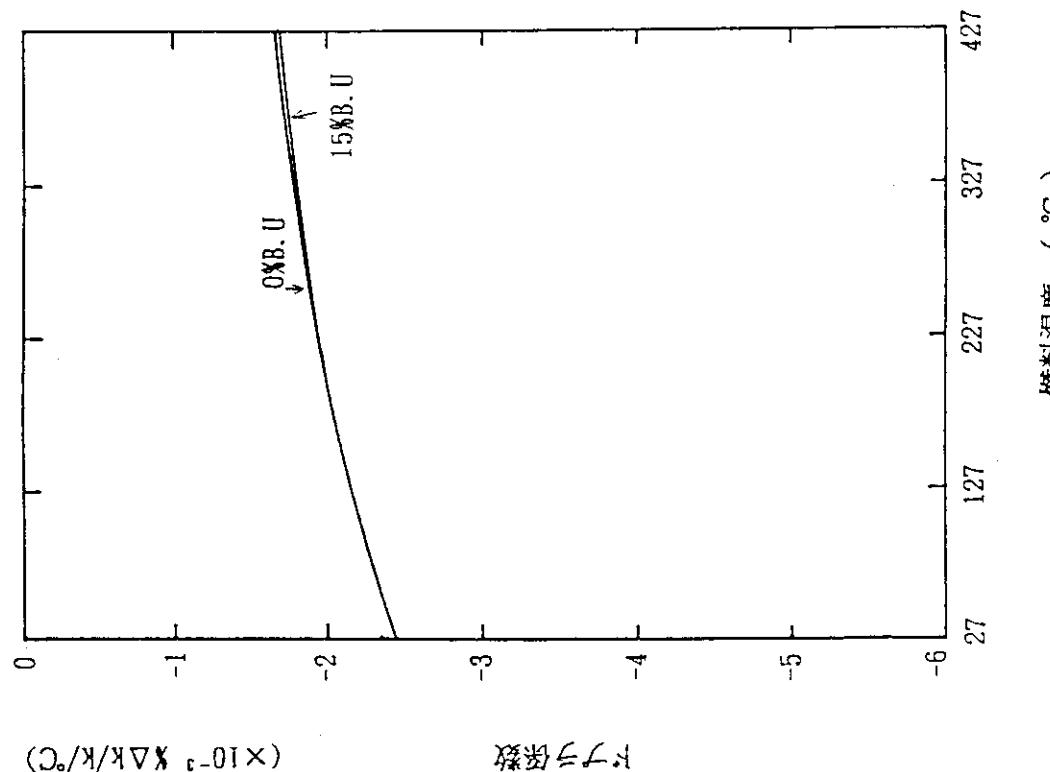


図5.16 デプロラ係数(混合炉心)

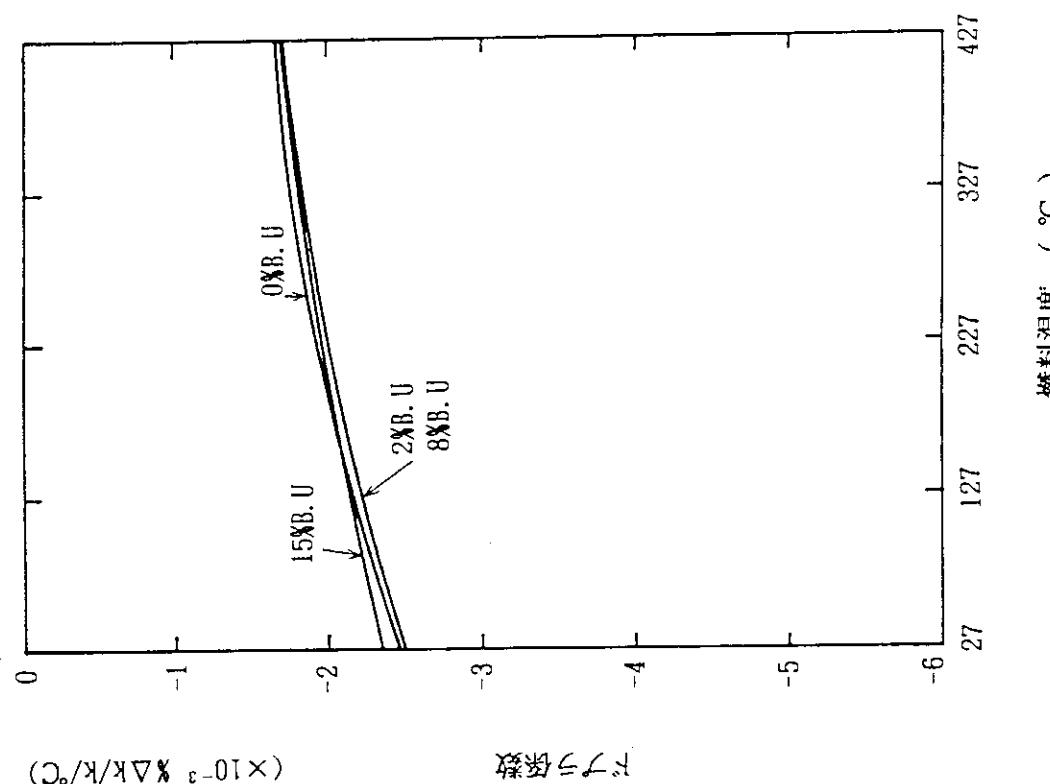


図5.15 ドプロラ係数(LEU平衡炉心)

## 6. 中性子束および出力分布

### 6.1 中性子束および出力密度の分布

定格出力(50 MW)時の炉心内の中性子束分布については、3次元炉心計算により求めた。炉心を燃料要素及び照射領域を反射体別に区分して、それぞれの領域での平均中性子束を表6.1に示す。炉心は移行炉心、LEU炉心の初装荷炉心及び平衡炉心、更に比較のためMEU炉心の値も併せて示した。なお、混合炉心の中性子束は平衡炉心とほぼ同じである。また、MEU炉心からLEU炉心(平衡炉心)になった場合の中性子束の変動割合を表6.2に示す。

炉心断面でみたときの中性子束のうち、高速中性子束( $\phi_{\text{hv}} > 1.0 \text{ MeV}$ )と熱中性子束( $\phi_{\text{th}} < 0.683 \text{ eV}$ )の分布および出力密度分布を、LEU炉心(平衡炉心)とMEU炉心と比較した。炉心位置H-8での縦方向分布を運転初期(制御棒位置が、SR-1,2が600mm、SH-1,3が800mm、SH-2が300mm)の場合を図6.1及び図6.2に示す。また、運転末期(制御棒位置が、SR-1,2が600mm、SH-1,3が800mm、SH-2が450mm)の場合の分布を図6.3及び図6.4に示す。水平方向分布については、炉心8列で、高さ方向が炉中心(燃料有効長の1/2; 375mm)位置での中性子束分布を運転初期の場合を図6.5及び図6.6に示す。また、運転末期の場合の分布を図6.7及び図6.8に示す。

炉心のうち特に燃料領域での中性子束分布および出力密度の分布は、制御棒引抜き状態に大きく影響をうける。LEU炉心においては、中性子束分布の炉心による差はほとんどなく、燃焼が進むにつれ<sup>235</sup>Uの減少により燃料領域の熱中性子束(4群)のみが変化し、燃焼末期で約15%上昇する。本変更のLEU燃料の使用により炉心に装荷されるウラン量の増加に伴い、熱中性子束は燃料領域で約20%程度低下するが、高速中性子束の変化は小さい。燃料要素の出力分布はLEU炉心(平衡炉心)とMEU炉心とで燃料要素の本数及び装荷位置が同じであることから、両炉心でほぼ同じである。

最高中性子束は、燃料領域において、熱中性子束(4群)は約 $3.4 \times 10^{14}$ 、高速中性子束(1群)は約 $3.2 \times 10^{14}$ であり、また反射体領域において、熱中性子束(4群)は約 $4.0 \times 10^{14}$ 、高速中性子束(1群)は約 $1.5 \times 10^{14}$ である。

### 6.2 出力ピーピング係数

炉心の出力密度分布から決まつくる出力ピーピング係数( $F_N$ )は、各炉心の運転サイクルを通しての出力ピーピング係数( $f_N$ )の最大となる値をサーベイした。その結果、全ての炉心を通しての最大値の出力ピーピング係数(核的ホットスポットファクタ)は、LEU炉心(平衡炉心)で炉心位置F-8に現れる。<sup>(6)</sup>

各炉心での各因子の値を表6.3に示す。

表6.1 炉心中性子束（制御棒全引抜き状態）

## 1. 移行炉心

領域	1群 >1Mev	2群 1-0.1Mev	3群 0.1M-0.683ev	4群 <0.683ev
燃料要素	$1.80 \times 10^{14}$	$1.61 \times 10^{14}$	$2.90 \times 10^{14}$	$2.26 \times 10^{14}$
照射領域	燃料領域	$1.60 \times 10^{14}$	$1.54 \times 10^{14}$	$2.88 \times 10^{14}$
	B e 1層	$4.56 \times 10^{13}$	$5.75 \times 10^{13}$	$1.55 \times 10^{14}$
	B e 2層	$9.39 \times 10^{12}$	$1.43 \times 10^{13}$	$5.08 \times 10^{13}$
	A ℓ 1層	$2.71 \times 10^{12}$	$4.95 \times 10^{12}$	$1.77 \times 10^{13}$

## 2. L E U 初装荷炉心

領域	1群 >1Mev	2群 1-0.1Mev	3群 0.1M-0.683ev	4群 <0.683ev
燃料要素	$1.79 \times 10^{14}$	$1.62 \times 10^{14}$	$2.88 \times 10^{14}$	$1.70 \times 10^{14}$
照射領域	燃料領域	$1.61 \times 10^{14}$	$1.56 \times 10^{14}$	$2.87 \times 10^{14}$
	B e 1層	$4.57 \times 10^{13}$	$5.80 \times 10^{13}$	$1.55 \times 10^{14}$
	B e 2層	$9.37 \times 10^{12}$	$1.43 \times 10^{13}$	$5.07 \times 10^{13}$
	A ℓ 1層	$2.70 \times 10^{12}$	$4.94 \times 10^{12}$	$1.76 \times 10^{13}$

## 3. L E U 平衡炉心

領域	1群 >1Mev	2群 1-0.1Mev	3群 0.1M-0.683ev	4群 <0.683ev
燃料要素	$1.84 \times 10^{14}$	$1.66 \times 10^{14}$	$2.95 \times 10^{14}$	$1.80 \times 10^{14}$
照射領域	燃料領域	$1.65 \times 10^{14}$	$1.60 \times 10^{14}$	$2.95 \times 10^{14}$
	B e 1層	$4.67 \times 10^{13}$	$5.92 \times 10^{13}$	$1.58 \times 10^{14}$
	B e 2層	$9.53 \times 10^{12}$	$1.45 \times 10^{13}$	$5.16 \times 10^{13}$
	A ℓ 1層	$2.74 \times 10^{12}$	$5.02 \times 10^{12}$	$1.79 \times 10^{13}$

## 4. M E U 炉心

領域	1群 >1Mev	2群 1-0.1Mev	3群 0.1M-0.683ev	4群 <0.683ev
燃料	$1.90 \times 10^{14}$	$1.69 \times 10^{14}$	$3.00 \times 10^{14}$	$2.26 \times 10^{14}$
照射領域	燃料領域	$1.63 \times 10^{14}$	$1.56 \times 10^{14}$	$2.89 \times 10^{14}$
	B e 1層	$5.32 \times 10^{13}$	$6.69 \times 10^{13}$	$1.78 \times 10^{14}$
	B e 2層	$1.14 \times 10^{13}$	$1.72 \times 10^{13}$	$6.05 \times 10^{13}$
	A ℓ 1層	$3.28 \times 10^{12}$	$6.01 \times 10^{12}$	$2.13 \times 10^{13}$

表6.2 中性子束変動割合

〔M E U炉心 - L E U平衡炉心〕 (単位: %)

炉心領域 エネルギ群	1群 >1Mev	2群 1Mev~ 0.1Mev	3群 0.1M~ 0.683ev	4群 <0.683ev	
	燃 料				
照 射 領 域	燃料4孔	4.4	5.3	3.3	-12.6
	燃料1孔	1.4	2.1	0.7	-15.0
	B e 1層	0.4	0.9	0.6	-7.1
	B e 2層	-1.8	-0.6	-0.7	-4.3
	A ℓ 1層	-0.9	-1.0	-0.9	-3.2

$$\left( \frac{L E U}{M E U} - 1 \right) \times 100 \quad (\%)$$

表6.3 核的ホットスポットファクタ

燃 料 位 置	移行炉心	L E U 炉 心		混合炉心
		初 装 荷	平 衡	
$F_N = F_H \times F_Z \times F_L \times F_E$	H-8	F-8	F-8	F-8
$F_H$ (水平方向出力分布因子)	1.22	1.15	1.17	1.17
$F_Z$ (垂直方向出力分布因子)	1.50	1.49	1.48	1.48
$F_L$ (局部出力分布因子)	1.18	1.23	1.26	1.26
$F_E$ (不確定因子)	1.44	1.44	1.44	1.44

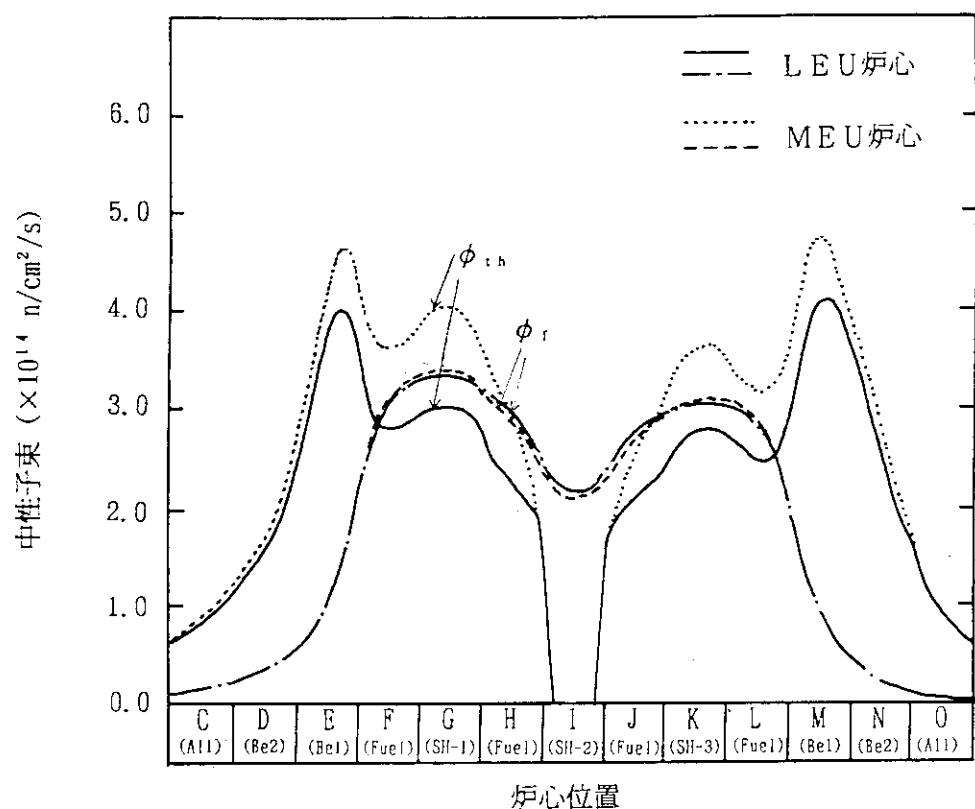


図6.1 中性子束分布（縦方向：H-8, 運転初期）

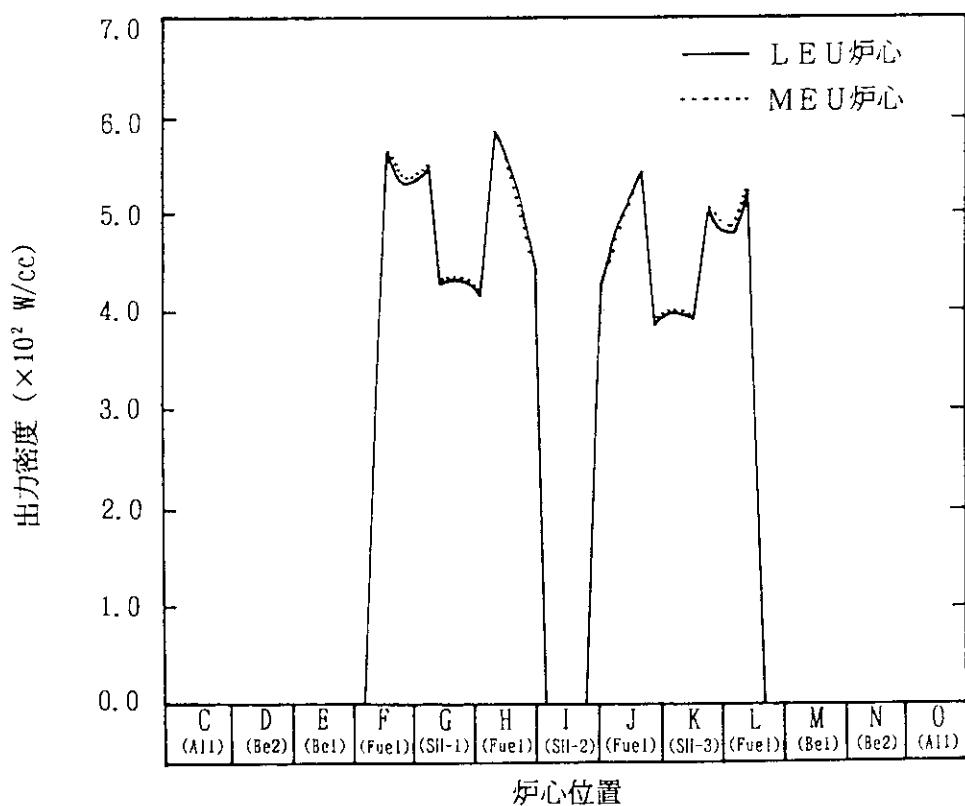


図6.2 出力分布（縦方向：H-8, 運転初期）

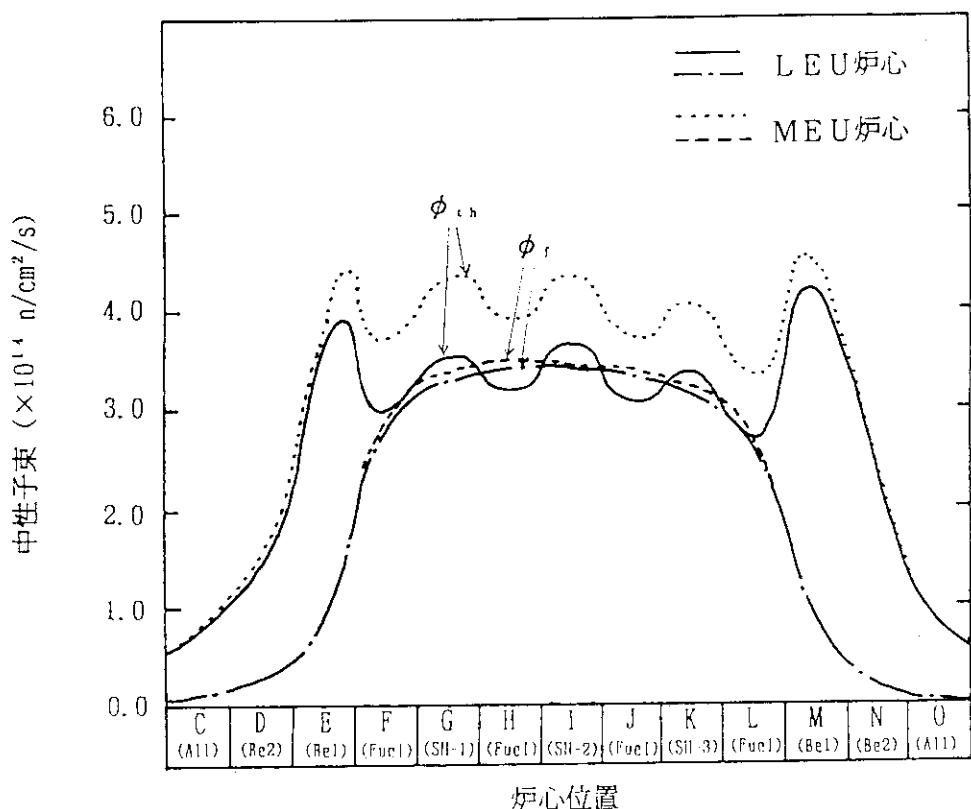


図6.3 中性子束分布（縦方向：H-8，運転末期）

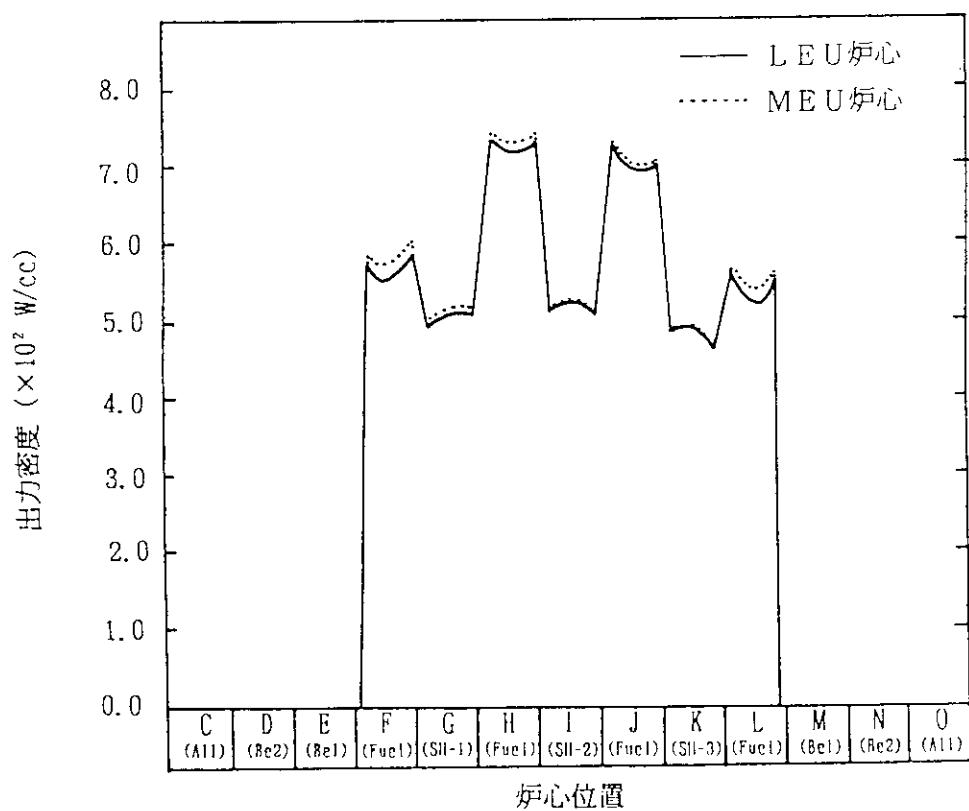


図6.4 出力分布（縦方向：H-8，運転末期）

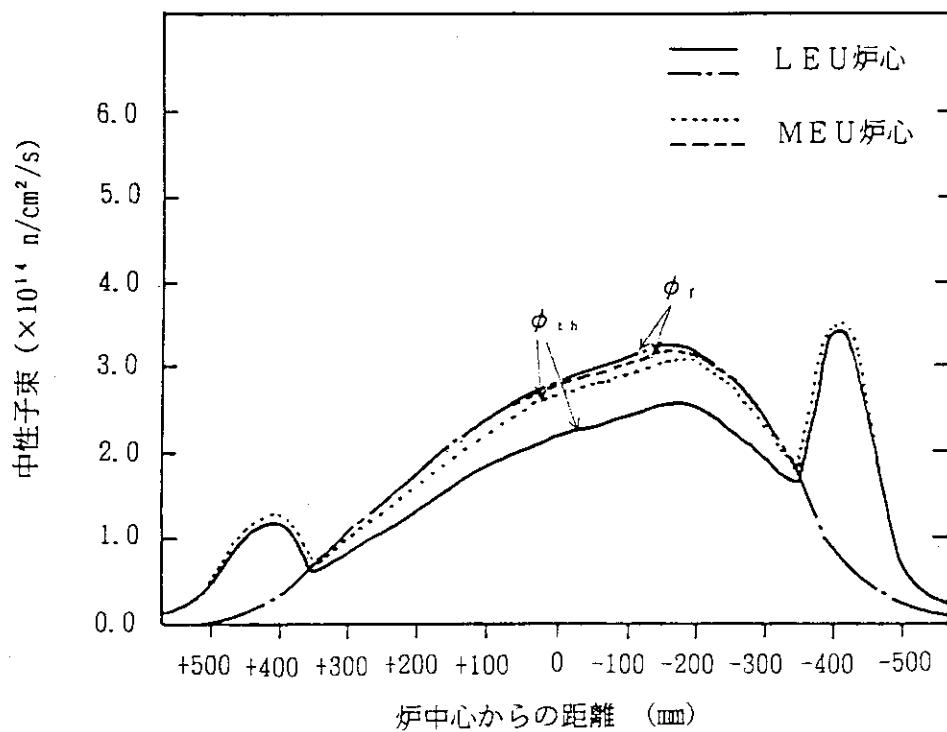


図6.5 中性子束分布（水平方向：炉心8列、運転初期）

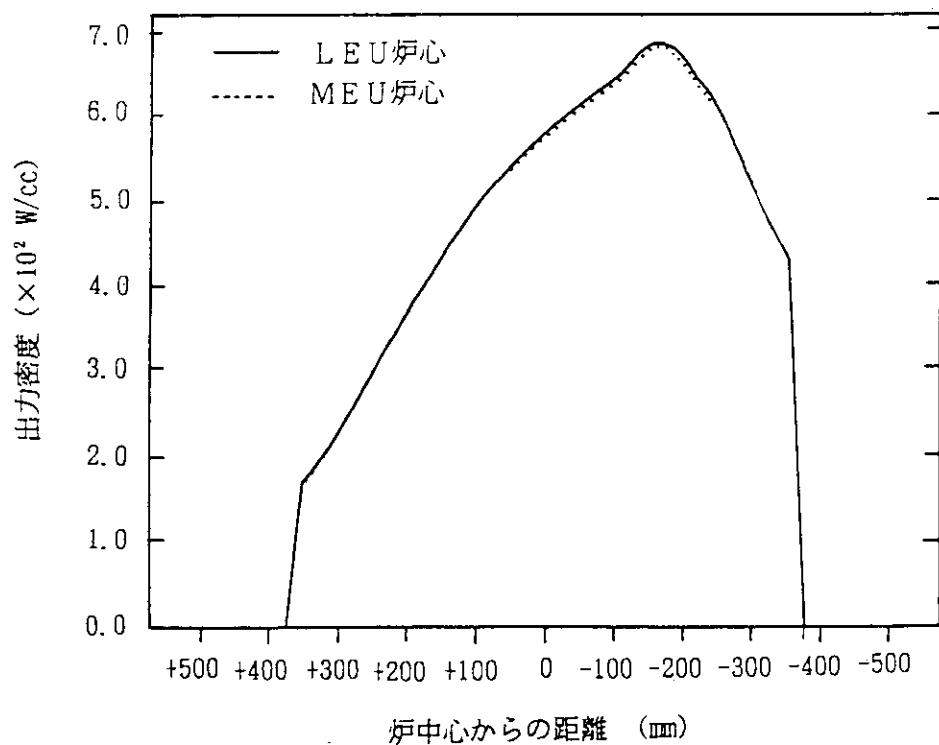


図6.6 出力分布（水平方向：炉心8列、運転初期）

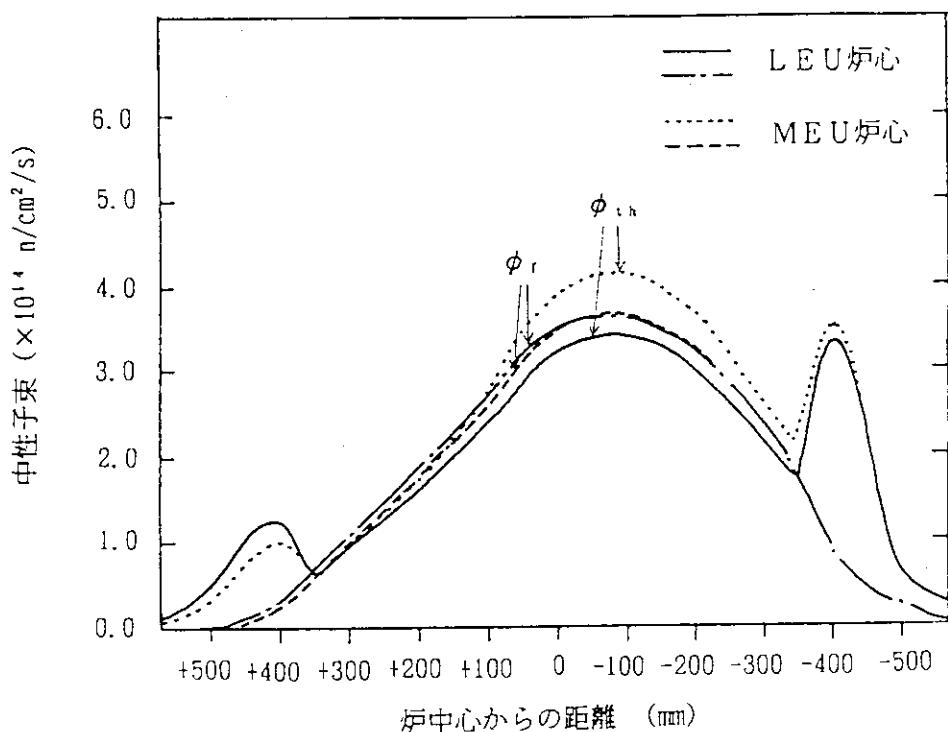


図6.7 中性子束分布（水平方向：炉心8列、運転末期）

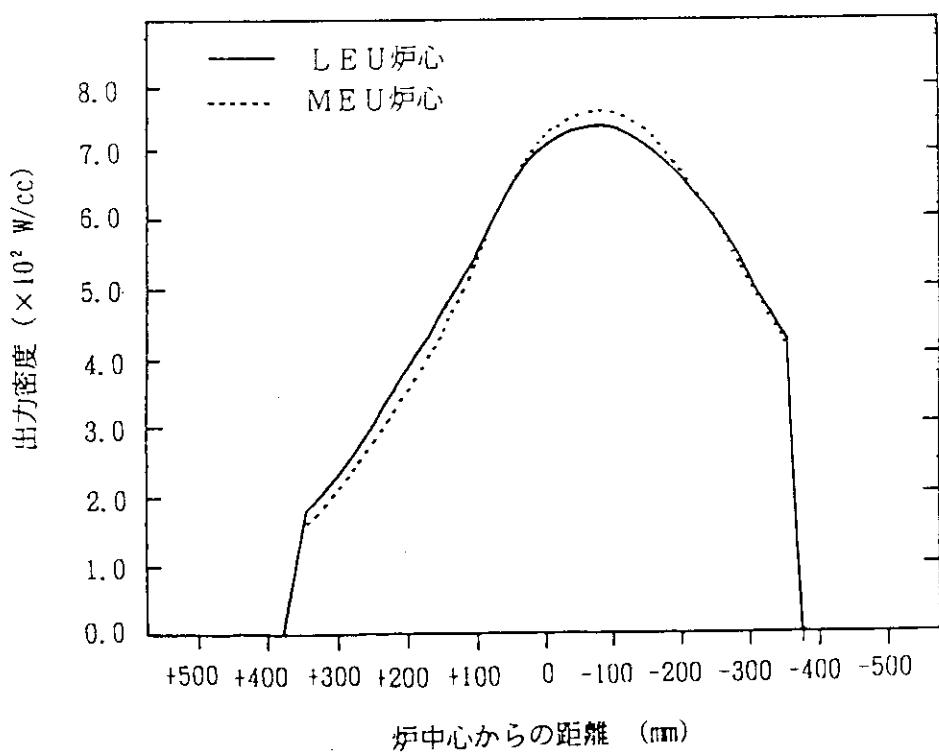


図6.8 出力分布（水平方向：炉心8列、運転末期）

## 7. 燃 燃 度

### 7.1 炉心燃焼度

炉心に装荷されるLEU燃料の使用は、標準燃料要素は、2バッチ交換方式、即ち2サイクル使用後に炉心から取り出される。燃料フォロワは毎サイクル交換されたとしたLEU炉心（平衡炉心）の燃焼計算の結果を図7.1に示す。燃料交換は平衡炉心の交換パターンに従っており、図中の平衡炉心（A）の値は、2サイクル使用した燃料を交換して10体の新標準燃料要素と12体の1サイクル使用の標準燃料要素で1サイクル運転した後の燃焼度を示している。平衡炉心（B）の値は、平衡炉心（A）の2サイクル使用した燃料を新燃料に交換して1サイクル運転した後の燃焼度を示している。標準燃料要素の要素平均燃焼度の最高は2サイクルで約32%であり、1サイクルでは約17%である。炉心平均では、2サイクルで約30%であり、1サイクルでは約15%である。いずれもLEU燃料要素の制限値である要素平均燃焼度50%以下である。運転日数と炉心平均の燃焼度の関係をMEU炉心の場合とを併せて図7.2に示す。

なお、炉心に装荷される照射試料の動向等によっては、LEU燃料については、燃焼度50%以内で3サイクル使用するなどの燃料配置で運転される。

### 7.2 燃焼に伴う組成変化

燃料ミート部の燃焼に伴う燃料組成の変化をミート部セル燃焼計算により求めた。 $^{235}\text{U}$ の燃焼に伴う組成核種の個数密度の変化を、標準燃料については、表7.1及び図7.3に、燃料フォロワについては、表7.2及び図7.4に示す。核種は、 $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ および $^{242}\text{Pu}$ である。さらに、F. P. として、 $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{235}\text{U}$ から生成されるもの（F 5 R, F 5 S, F 5 N）および $^{239}\text{Pu}$ から生成されるもの（F 9 R, F 9 S, F 9 N）がある。F 5 RとF 9 Rは、F. P. のうち急速に飽和するもの（Rapidly Saturating）を、F 5 SとF 9 Sは、ゆっくりと飽和するもの（Slowly Saturating）を、またF 5 NとF 9 Nは、飽和しないもの（Nonsaturating）をまとめたものであって、それぞれ1つの核種として取扱っている。

また、燃焼に伴う燃料側板部のCdの組成の変化は、側板部セル燃焼計算により求めた。Cdワイヤを径方向に等面積で5領域に分割し、 $^{235}\text{U}$ の燃焼度0から50%までの範囲の燃焼に伴う各領域および平均の $^{113}\text{Cd}$ の組成の変化を、標準燃料については、表7.3に、燃料フォロワについては、表7.4に示す。 $^{235}\text{U}$ の燃焼度に対する $^{113}\text{Cd}$ の燃焼度の変化を、図7.5及び図7.6に示す。また、Cdワイヤ内での燃焼の進み具合を標準燃料要素について図7.7に示す。

燃焼に伴う組成変化からプルトニウムの生成のうち $^{238}\text{Pu}$ の燃料要素1体あたりの生成量を図7.8にMEU燃料のそれと併せて示す。LEU燃料での $^{239}\text{Pu}$ の生成量は、最高燃焼度50%で1要素当たり約14gとなる。従って、燃焼度50%における燃料要素での $^{239}\text{Pu}$ の核分裂に寄与する割合は、約6%である。

表7.1 標準燃料要素の燃料板の燃焼に伴う組成変化（初期に Xe, Sm を含めた）

燃 焼 度 ( $^{235}\text{U}\%$ )	組 成										$(\times 10^{24} \text{ 個}/\text{cc})$					
	$^{233}\text{U}$	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	$^{238}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$	$^{242}\text{Pu}$	$^{133}\text{Xe}$	$^{135}\text{Xe}$	$^{140}\text{Sm}$	$F_{\text{SN}}$	$F_{\text{SR}}$	$F_{\text{SS}}$	$F_{\text{SN}}$	$F_{\text{SR}}$
0	2.430X10 <sup>-1</sup>	0.0	9.748X10 <sup>-3</sup>	0.0	0.0	1.182X10 <sup>-4</sup>	1.118X10 <sup>-4</sup>	0.0	3.101X10 <sup>-9</sup>	2.128X10 <sup>-9</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	2.405	4.207X10 <sup>-4</sup>	9.745	2.621X10 <sup>-3</sup>	5.192	4.428	9.332	1.859X10 <sup>-10</sup>	3.052	2.101	3.117X10 <sup>-9</sup>	7.631X10 <sup>-9</sup>	8.581X10 <sup>-9</sup>	3.286X10 <sup>-9</sup>	8.582X10 <sup>-9</sup>	2.153X10 <sup>-11</sup>
2	2.381	8.406	9.742	1.260X10 <sup>-4</sup>	9.140	7.713	9.849	1.116X10 <sup>-9</sup>	3.031	2.081	6.234	1.525X10 <sup>-9</sup>	1.315X10 <sup>-9</sup>	3.430X10 <sup>-9</sup>	7.760	1.581X10 <sup>-10</sup>
3	2.357	1.018X10 <sup>-4</sup>	9.137	1.018X10 <sup>-4</sup>	9.137	7.305	4.890	1.550X10 <sup>-11</sup>	3.007	2.046	9.353	1.247X10 <sup>-9</sup>	3.041	2.284	2.110	2.553
4	2.333	1.678	9.734	1.261	1.411X10 <sup>-4</sup>	2.672	1.411X10 <sup>-4</sup>	1.192X10 <sup>-10</sup>	2.953	2.030	1.559	1.247X10 <sup>-9</sup>	3.041	2.555	5.257	3.686X10 <sup>-11</sup>
5	2.308	2.095	9.734	1.261	5.117	3.789	4.559	2.915	1.997	2.182	3.796	2.907	8.211	2.135	2.135	3.637
7	2.260	2.927	9.728	1.731	7.412	6.663	9.884	2.874	1.972	2.650	5.298	3.397	1.639X10 <sup>-6</sup>	4.173	5.992	6.141
8.5	2.223	3.549	9.724	2.071	1.085X10 <sup>-4</sup>	1.085X10 <sup>-4</sup>	1.887X10 <sup>-9</sup>	2.836	1.946	3.118	6.418	3.623	2.372	7.824	7.824	
10	2.187	4.169	9.719	2.400	9.402	9.450	2.139	2.730	1.866	4.678	1.120X10 <sup>-4</sup>	3.880	7.405	1.902X10 <sup>-6</sup>	9.656	9.656
15	2.065	6.222	9.704	3.430	2.139	3.402	9.450	2.730	1.778	6.238	1.481	3.732	3.373	2.076	2.076	
20	1.944	8.252	9.688	4.344	3.588	7.564	2.958X10 <sup>-4</sup>	2.600	1.688	1.834	3.501	2.078	5.263	2.533	2.533	
25	1.822	1.026X10 <sup>-4</sup>	9.672	5.147	5.289	1.378X10 <sup>-6</sup>	7.140	2.466	1.789	2.330	1.597	2.179	3.248	7.580	7.925	
30	1.701	1.224	9.655	5.841	7.188	2.213	1.482X10 <sup>-6</sup>	1.862	1.936	2.330	1.561X10 <sup>-1</sup>	3.455	2.353	8.923	2.161X10 <sup>-3</sup>	
50	1.215	1.990	9.516	1.846	1.516X10 <sup>-5</sup>	7.980	1.093X10 <sup>-6</sup>	1.862	1.273	2.963	1.559X10 <sup>-1</sup>	5.024	3.367X10 <sup>-4</sup>	4.162X10 <sup>-4</sup>	4.164	
95	1.379X10 <sup>-4</sup>	3.399	9.241	8.423	3.105	2.606X10 <sup>-5</sup>	1.558X10 <sup>-5</sup>	6.174X10 <sup>-7</sup>	4.345X10 <sup>-7</sup>	2.963	5.024	3.367X10 <sup>-4</sup>	4.162X10 <sup>-4</sup>	9.801	5.257	

表7.2 燃料フオロワの燃料板の燃焼に伴う組成変化（初期に Xe, Sm を含めた）

燃 焼 度 ( $^{235}\text{U}\%$ )	組 成										$(\times 10^{24} \text{ 値}/\text{cc})$						
	$^{233}\text{U}$	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	$^{238}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$	$^{242}\text{Pu}$	$^{133}\text{Xe}$	$^{135}\text{Xe}$	$^{140}\text{Sm}$	$F_{\text{SN}}$	$F_{\text{SR}}$	$F_{\text{SS}}$	$F_{\text{SN}}$	$F_{\text{SR}}$	
0	2.430X10 <sup>-1</sup>	0.0	9.748X10 <sup>-3</sup>	0.0	0.0	1.316X10 <sup>-10</sup>	2.079X10 <sup>-11</sup>	0.0	3.134X10 <sup>-9</sup>	2.142X10 <sup>-9</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	2.405	4.250X10 <sup>-4</sup>	9.745	2.717X10 <sup>-3</sup>	5.381	4.685	1.041X10 <sup>-1</sup>	3.436X10 <sup>-9</sup>	3.429X10 <sup>-12</sup>	3.062	2.095	3.111X10 <sup>-9</sup>	7.624X10 <sup>-9</sup>	8.583X10 <sup>-9</sup>	3.451X10 <sup>-9</sup>	9.011X10 <sup>-11</sup>	2.265X10 <sup>-11</sup>
2	2.381	8.491	9.742	1.272X10 <sup>-3</sup>	9.739	7.993	1.055X10 <sup>-5</sup>	3.466	1.735X10 <sup>-11</sup>	3.038	2.077	6.223	1.555X10 <sup>-9</sup>	1.523X10 <sup>-9</sup>	1.381X10 <sup>-10</sup>	3.601X10 <sup>-11</sup>	8.177
3	2.357	1.695	9.733	1.116	1.306	1.562X10 <sup>-6</sup>	8.121	5.472	3.014	2.060	2.077	9.335	2.280	2.117	3.105	8.690	1.668X10 <sup>-10</sup>
4	2.333	2.333	9.733	1.733	1.793	1.793	1.793	1.562X10 <sup>-6</sup>	1.333X10 <sup>-10</sup>	2.989	2.044	1.556	3.036	2.567	2.117	3.105	1.436X10 <sup>-7</sup>
5	2.308	2.116	9.733	2.956	9.727	5.395	4.205	5.094	2.946	2.011	2.179	5.287	3.126	3.925	8.617	2.240	3.847
7	2.260	3.584	9.723	2.144	7.807	7.389	1.103X10 <sup>-9</sup>	2.905	1.986	2.646	6.405	3.660	3.444	2.489	6.441	6.348	8.299
8.5	2.223	4.209	9.718	2.485	1.060X10 <sup>-4</sup>	1.180X10 <sup>-7</sup>	2.105	2.868	2.868	3.113	7.517	3.808	3.444	8.396	8.396	1.025X10 <sup>-9</sup>	
10	2.187	6.282	9.702	3.548	3.759	3.759	1.051X10 <sup>-8</sup>	2.761	1.881	4.670	1.118X10 <sup>-4</sup>	3.937	7.765	7.765	1.993X10 <sup>-6</sup>	1.649	
15	2.065	8.329	9.686	4.491	3.752	8.331	3.282	2.630	1.793	6.228	1.477	3.191	1.386X10 <sup>-5</sup>	3.532	2.298	2.298	
20	1.944	1.035X10 <sup>-4</sup>	9.669	5.317	5.514	1.513X10 <sup>-6</sup>	7.897	2.496	1.703	1.787	1.829	3.557	2.178	5.510	2.694	2.694	
25	1.822	1.235	9.651	6.031	7.472	2.422	1.612X10 <sup>-7</sup>	2.359	1.612	9.347	2.172	3.300	3.160	7.931	3.111	3.111	
30	1.701	1.215	9.639	8.079	8.626	1.619X10 <sup>-5</sup>	1.194X10 <sup>-6</sup>	1.889	1.287	3.339	2.388	9.340	4.417X10 <sup>-4</sup>	4.971	4.449	4.449	
50	1.205	3.406	9.221	8.638	3.113	2.732X10 <sup>-5</sup>	1.640X10 <sup>-5</sup>	6.349X10 <sup>-7</sup>	4.447X10 <sup>-9</sup>	2.959	4.417X10 <sup>-4</sup>	4.965X10 <sup>-4</sup>	4.965X10 <sup>-4</sup>	1.016X10 <sup>-4</sup>	5.554	5.554	
95	1.378X10 <sup>-4</sup>	3.406	9.221	8.638	3.113	2.732X10 <sup>-5</sup>	1.640X10 <sup>-5</sup>	6.349X10 <sup>-7</sup>	4.447X10 <sup>-9</sup>	2.959	4.417X10 <sup>-4</sup>	4.965X10 <sup>-4</sup>	4.965X10 <sup>-4</sup>	1.016X10 <sup>-4</sup>	5.554	5.554	

表7.3 標準燃料要素の Cd ワイヤの燃焼に伴う組成変化

(ワイヤ径 0.3mm, 18本)

燃焼度 ( <sup>235</sup> U%)	組 成					$\times 10^{24}$ 個/cc)
	領域 1	領域 2	領域 3	領域 4	領域 5	
0.0	$5.677 \times 10^{-3}$					
1.0	5.365	5.248	5.084	4.838	4.406	4.988
2.0	5.008	4.771	4.453	4.012	3.335	4.316
3.0	4.601	4.246	3.796	3.224	2.455	3.665
4.0	4.141	3.681	3.134	2.500	1.753	3.042
5.0	3.629	3.086	2.491	1.864	1.212	2.456
7.0	2.594	1.995	1.433	$9.445 \times 10^{-4}$	$5.357 \times 10^{-4}$	1.501
8.5	1.759	1.239	$8.154 \times 10^{-4}$	$4.938 \times 10^{-4}$	$2.596 \times 10^{-4}$	$9.130 \times 10^{-4}$
10.0	1.023	$6.615 \times 10^{-4}$	$4.026 \times 10^{-4}$	$2.285 \times 10^{-4}$	$1.137 \times 10^{-4}$	$4.858 \times 10^{-4}$
15.0	$8.587 \times 10^{-5}$	$4.402 \times 10^{-5}$	$2.204 \times 10^{-5}$	$1.074 \times 10^{-5}$	$4.746 \times 10^{-6}$	$3.348 \times 10^{-5}$
20.0	$1.915 \times 10^{-6}$	$9.513 \times 10^{-7}$	$4.645 \times 10^{-7}$	$2.225 \times 10^{-7}$	$9.720 \times 10^{-8}$	$7.301 \times 10^{-7}$
25.0	$2.942 \times 10^{-8}$	$1.460 \times 10^{-8}$	$7.122 \times 10^{-9}$	$3.410 \times 10^{-9}$	$1.489 \times 10^{-9}$	$1.121 \times 10^{-8}$
30.0	$3.459 \times 10^{-10}$	$1.717 \times 10^{-10}$	$8.368 \times 10^{-11}$	$4.007 \times 10^{-11}$	$1.750 \times 10^{-11}$	$1.318 \times 10^{-10}$
50.0	$6.428 \times 10^{-20}$	$3.194 \times 10^{-20}$	$1.553 \times 10^{-20}$	$7.429 \times 10^{-21}$	$3.244 \times 10^{-21}$	$2.448 \times 10^{-20}$

注) ; 領域 1 が最内側、領域 5 が最外側

表7.4 燃料フォロワの Cd ワイヤの燃焼に伴う組成変化

(ワイヤ径 0.3mm, 16本)

燃焼度 ( <sup>235</sup> U%)	組 成					$\times 10^{24}$ 個/cc)
	領域 1	領域 2	領域 3	領域 4	領域 5	
0.0	$5.677 \times 10^{-3}$					
1.0	5.271	5.120	4.911	4.606	4.087	4.799
2.0	4.790	4.486	4.091	3.570	2.823	3.952
3.0	4.227	3.783	3.251	2.623	1.863	3.150
4.0	3.583	3.035	2.438	1.814	1.170	2.408
5.0	2.874	2.282	1.703	1.171	$6.949 \times 10^{-4}$	1.745
7.0	1.584	1.089	$7.006 \times 10^{-4}$	$4.165 \times 10^{-4}$	$2.154 \times 10^{-4}$	$8.011 \times 10^{-4}$
8.5	$7.592 \times 10^{-4}$	$4.719 \times 10^{-4}$	$2.774 \times 10^{-4}$	$1.531 \times 10^{-4}$	$7.452 \times 10^{-5}$	$3.472 \times 10^{-4}$
10.0	$2.775 \times 10^{-4}$	$1.610 \times 10^{-4}$	$8.957 \times 10^{-5}$	$4.742 \times 10^{-5}$	$2.237 \times 10^{-5}$	$1.196 \times 10^{-4}$
15.0	$3.978 \times 10^{-6}$	$2.069 \times 10^{-6}$	$1.059 \times 10^{-6}$	$5.282 \times 10^{-7}$	$2.382 \times 10^{-7}$	$1.575 \times 10^{-6}$
20.0	$2.638 \times 10^{-8}$	$1.369 \times 10^{-8}$	$6.991 \times 10^{-9}$	$3.482 \times 10^{-9}$	$1.569 \times 10^{-9}$	$1.042 \times 10^{-8}$
25.0	$1.300 \times 10^{-10}$	$6.747 \times 10^{-11}$	$3.444 \times 10^{-11}$	$1.715 \times 10^{-11}$	$7.729 \times 10^{-12}$	$5.137 \times 10^{-11}$
30.0	$4.633 \times 10^{-13}$	$2.404 \times 10^{-13}$	$1.226 \times 10^{-13}$	$6.107 \times 10^{-14}$	$2.752 \times 10^{-14}$	$1.830 \times 10^{-12}$
50.0	$4.461 \times 10^{-26}$	$2.318 \times 10^{-26}$	$1.178 \times 10^{-26}$	$5.863 \times 10^{-27}$	$2.643 \times 10^{-27}$	$1.762 \times 10^{-26}$

注) ; 領域 1 が最内側、領域 5 が最外側

F	G	H	I	J	K	L	
26.17	(○)	15.21	12.87	15.09	(○)	23.47	6
15.84	31.36	(○) (○) ○ ○	29.99	(○) (○) ○ ○	28.92	13.42	7
31.99	15.16	17.19	8.95	16.25	14.15	29.60	8
15.66	30.58	(○) (○) ○ ○	28.86	(○) (○) ○ ○	29.23	14.98	9
24.23	(○)	14.51	12.64	14.87	(○)	24.61	10

平衡炉心 (A)

F	G	H	I	J	K	L	
13.71	(○)	28.73	12.83	28.48	(○)	12.17	6
29.91	16.68	(○) (○) ○ ○	15.84	(○) (○) ○ ○	15.26	25.59	7
17.09	15.02	32.16	8.69	30.50	13.98	15.67	8
29.58	16.23	(○) (○) ○ ○	15.20	(○) (○) ○ ○	15.43	28.35	9
12.62	(○)	27.48	12.59	28.09	(○)	12.80	10

平衡炉心 (B)

単位 : %

図7.1 L E U炉心(平衡炉心)の燃焼度

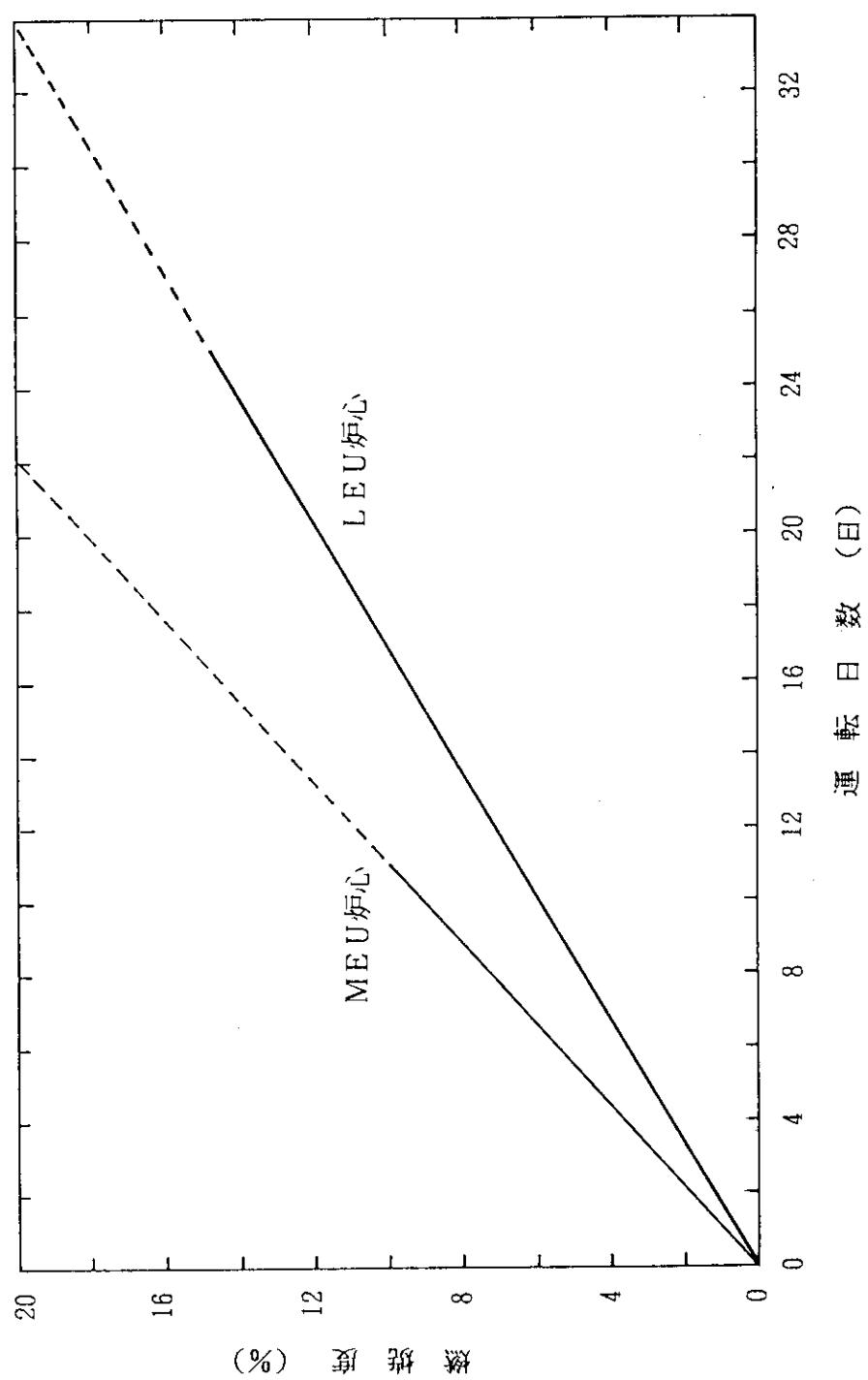


図7.2 原子炉運転日数と燃焼度の関係

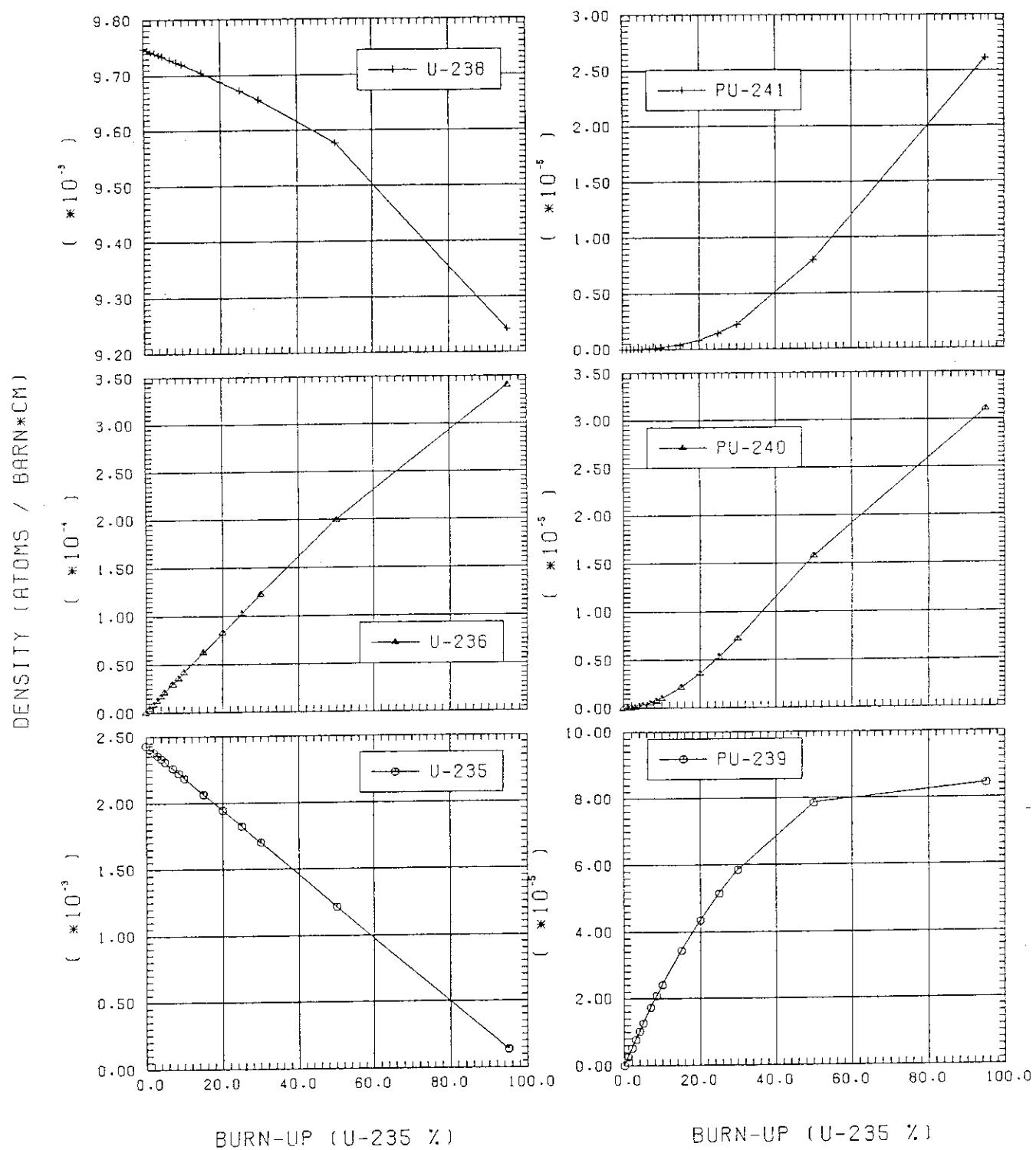


図7.3 燃料板の燃焼に伴う組成変化（標準燃料要素）

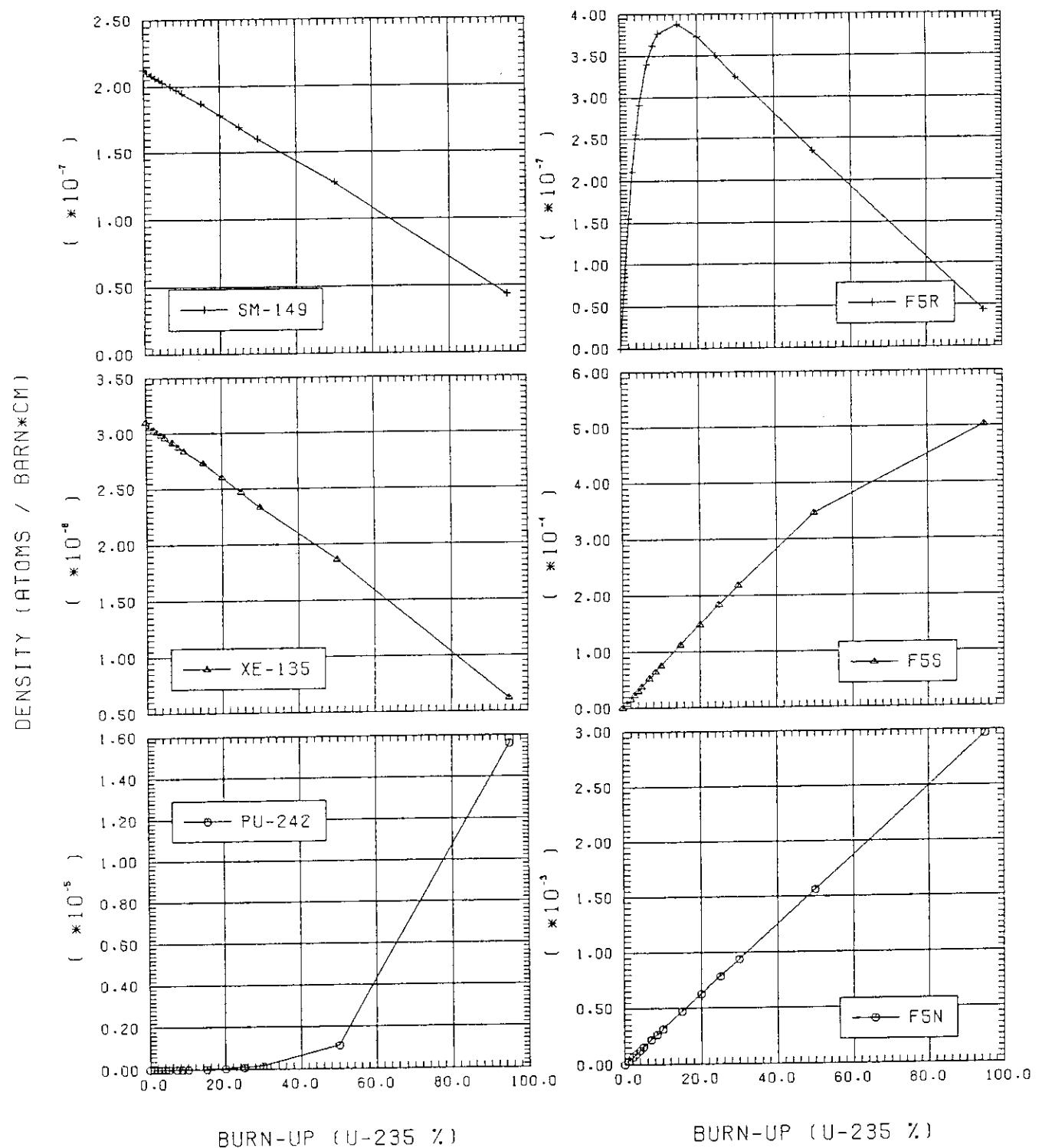


図7.3 (続き)

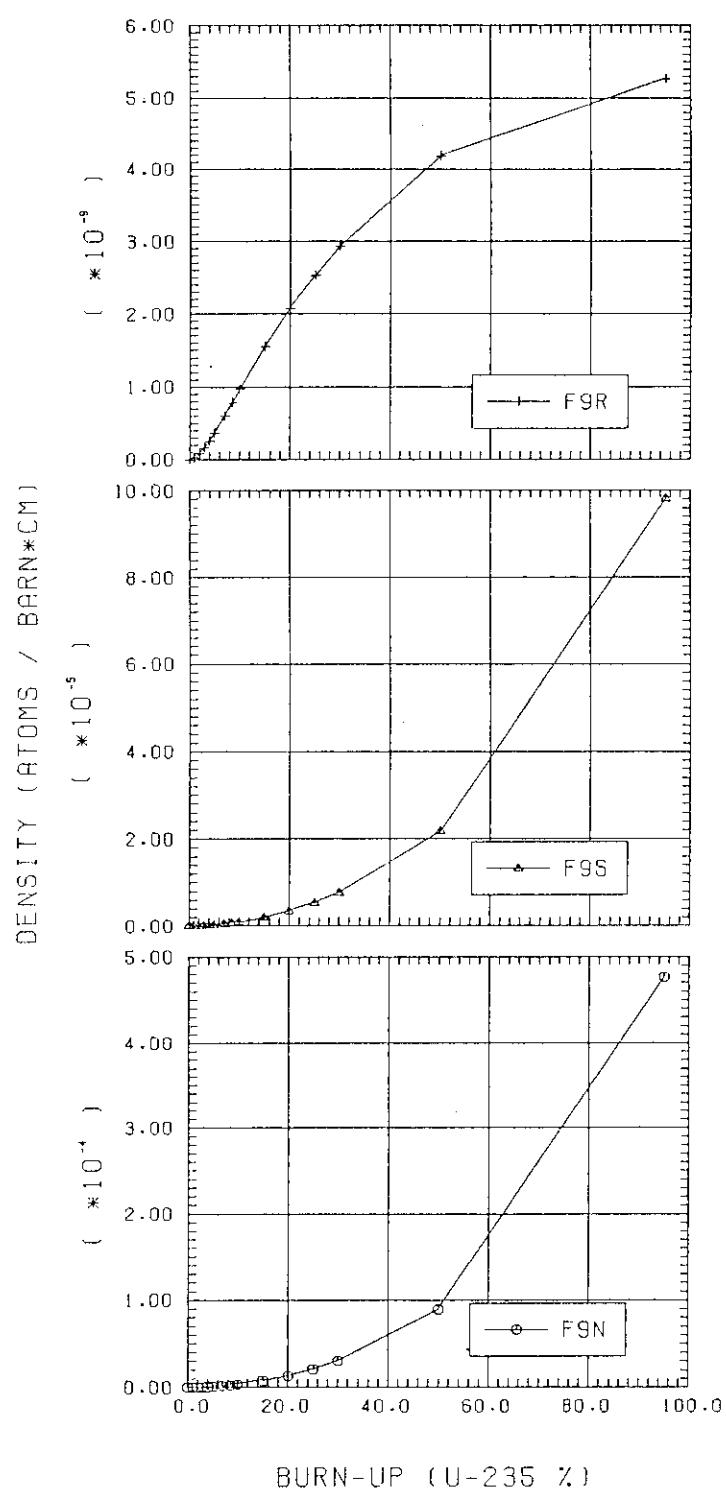


図7.3 (続き)

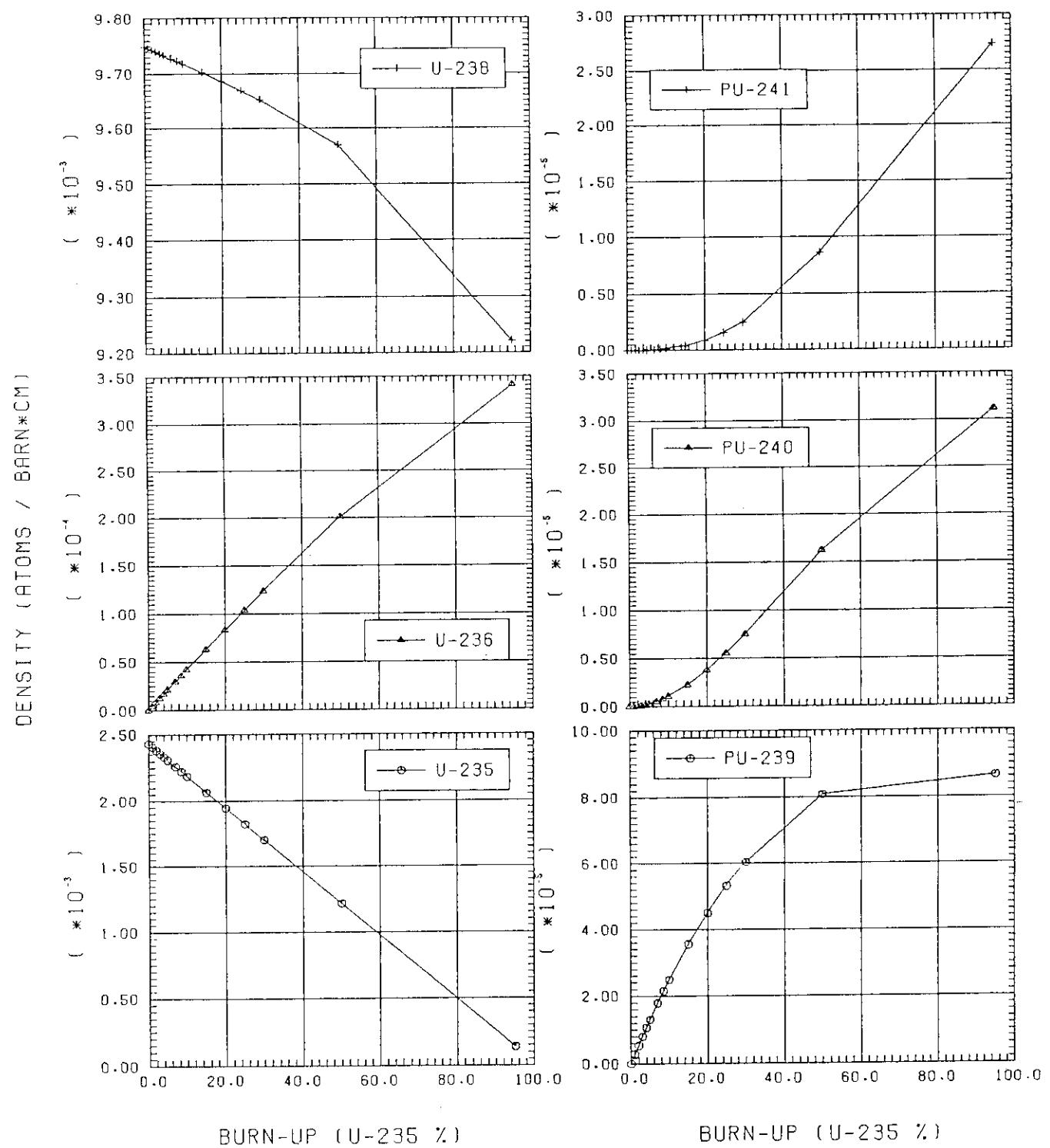


図7.4 燃料板の燃焼に伴う組成変化（燃料フォロワ）

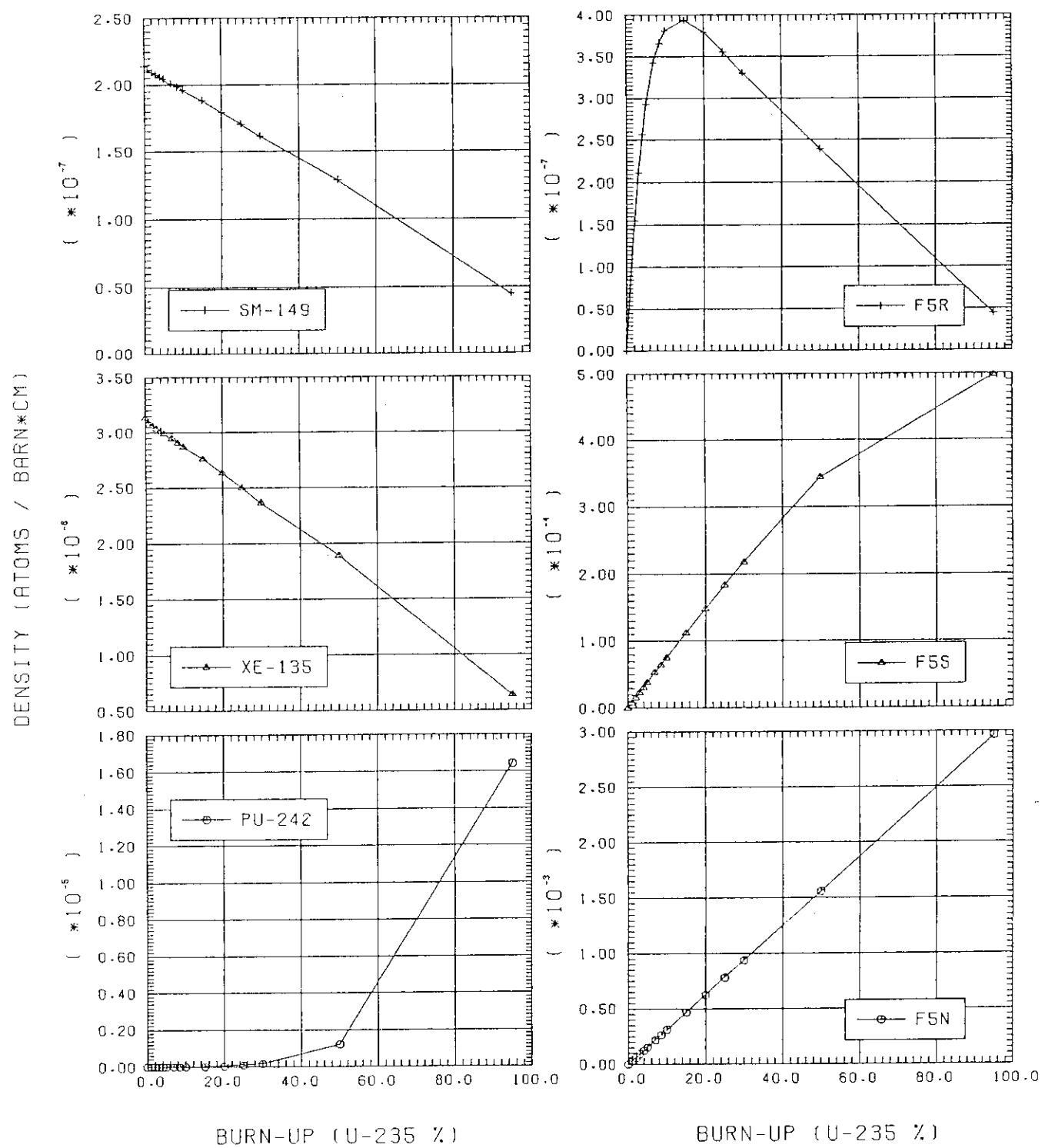


図7.4 (続 次)

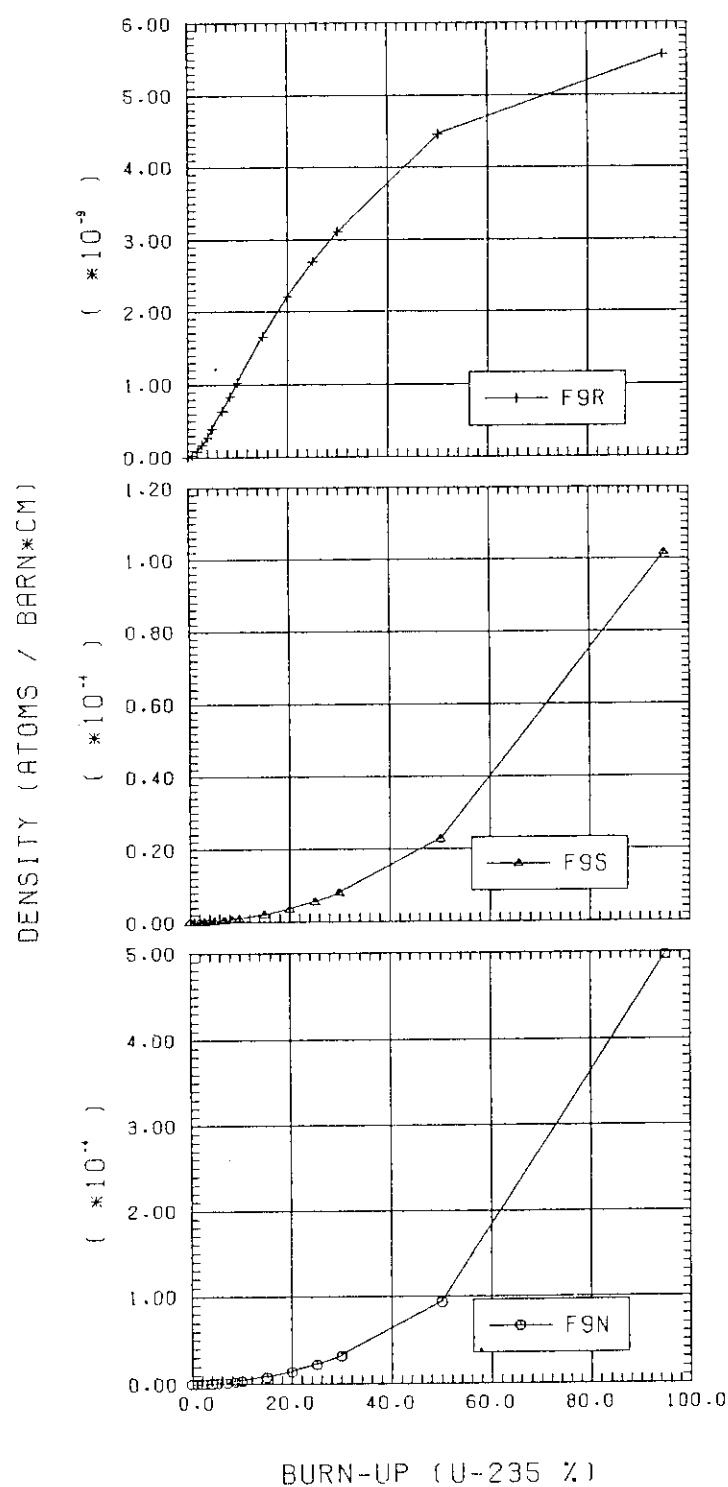


図7.4 (続き)

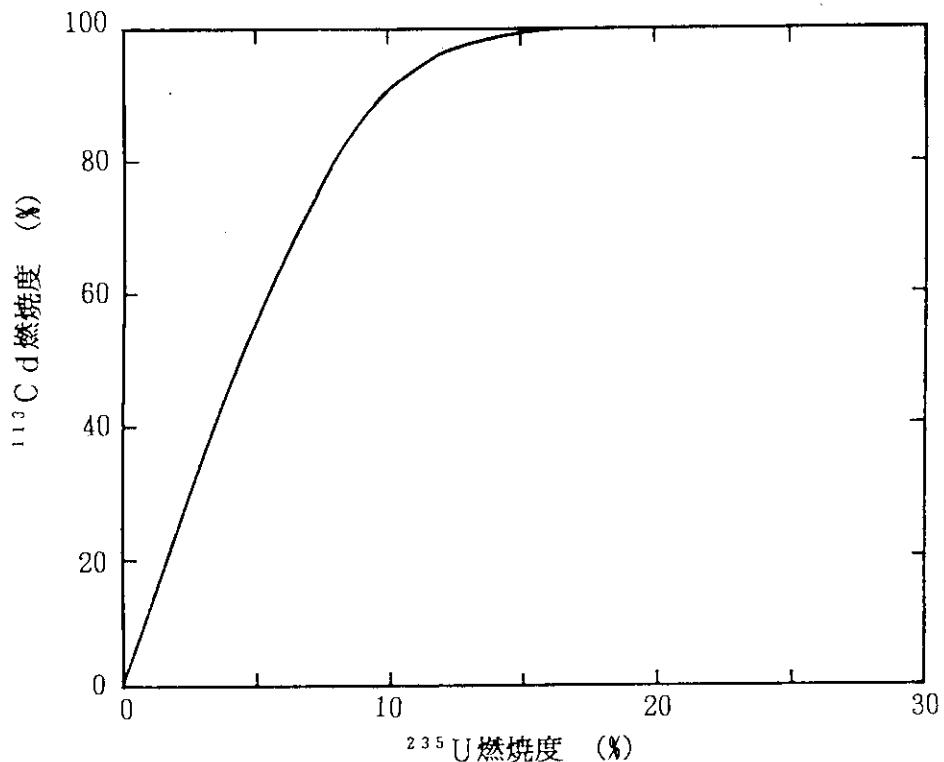


図7.5 標準燃料要素 Cd ワイヤの燃焼特性

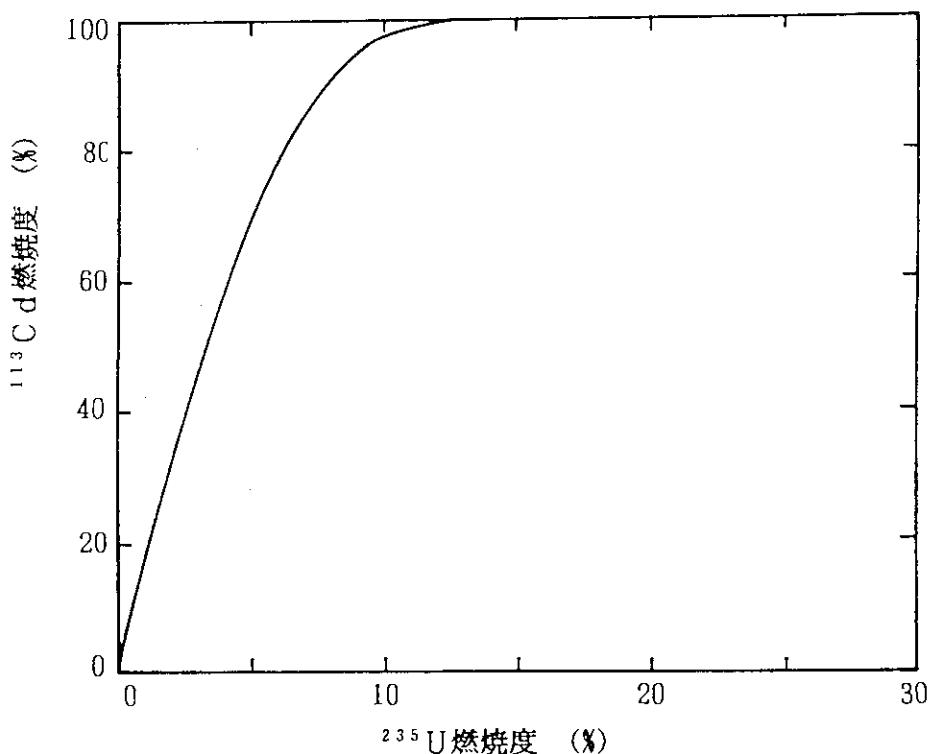


図7.6 燃料フォロワ Cd ワイヤの燃焼特性

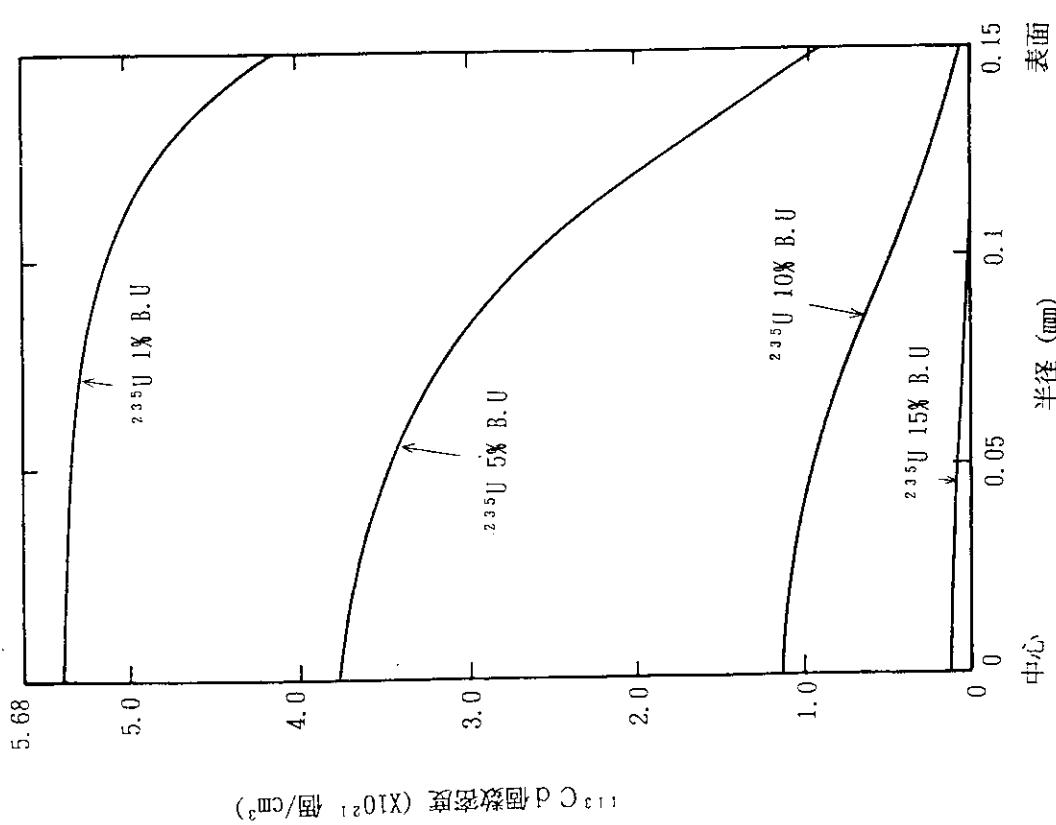
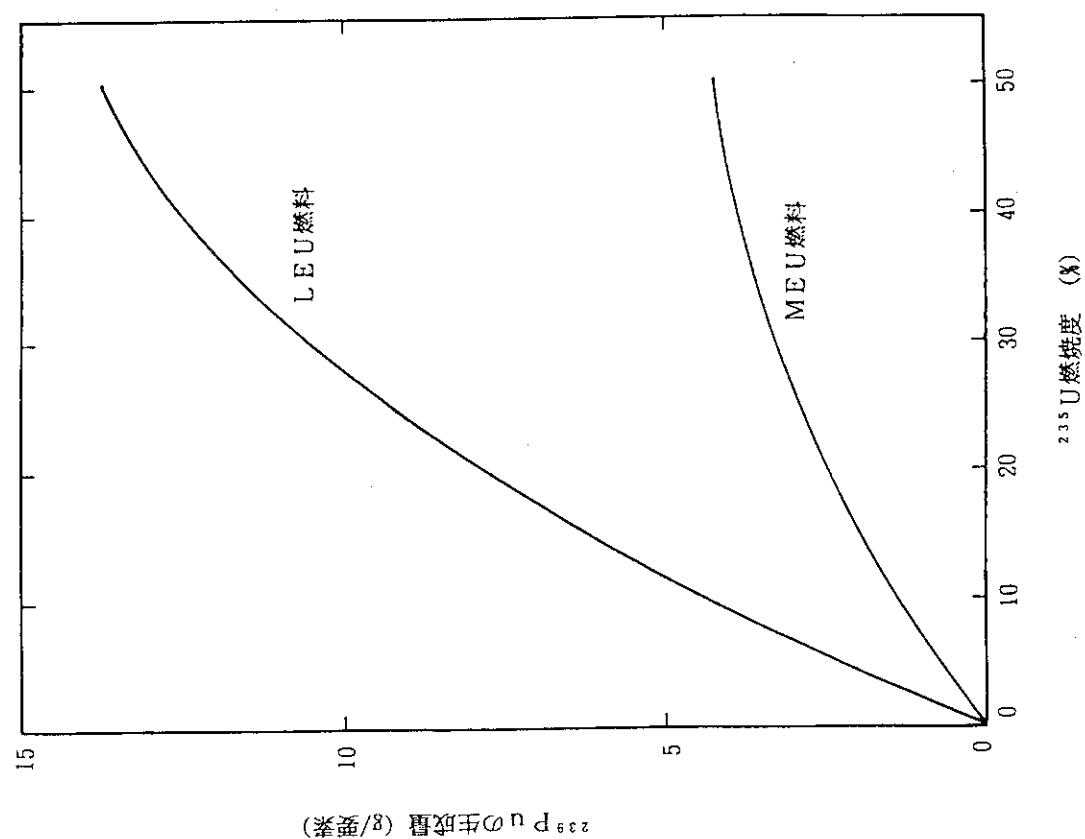


図7.7 標準燃料要素のCdワイヤの燃焼

図7.8 燃料要素1体当たりの $^{239}\text{Pu}$ の生成量

## 8. 結 語

J M T R 低濃縮炉心の核特性解析を行った。その結果、設定した炉心の核的な設計方針は満足されており、その安全性が確保されていることを確認した。また、現行のM E U 炉心との比較においても、採用した核特性の計算手法及び解析結果の妥当性を確認した。

## 謝 辞

本解析は、原研の研究・試験炉燃料濃縮度低減化計画に基づいて材料試験炉部において進められている低濃縮化作業の一環として行われたものである。本報告書は、低濃縮化に携わっている関係諸氏の協力の賜物である。特に、安藤弘栄照射第1課長には、内容について貴重なご意見を頂いた。ここに深く感謝します。

## 参 考 文 献

- (1) Y.Nagaoka, et al.; "Neutronic Analysis of the JMTR with LEU Fuel and Burnable Poison" ,RERTR Meeting,(1984).
- (2) F.Sakurai, et al.; "Progress in Safety Evaluation for the JMTR Core Conversion to LEU Fuel" ,RERTR Meeting,(1989).
- (3) K.Tsuchihashi, et al.; "Revised SRAC Code System" ,JAERI 1302,(1986).
- (4) Y.Nagaoka, et al.; "Critical Experiments of JMTRC MEU Cores" ,RERTR Meeting,(1983).
- (5) S.Shimakawa, et al.; "Critical Experiments of JMTRC MEU Cores(Ⅱ)" , RERTR Meeting,(1986).
- (6) 永岡 芳春, 他 ; "J M T R 低濃縮燃料炉心の核的ホットスポットファクタ" , JAERI-M 92-042,(1992).

## 8. 結 語

J M T R 低濃縮炉心の核特性解析を行った。その結果、設定した炉心の核的な設計方針は満足されており、その安全性が確保されていることを確認した。また、現行のM E U 炉心との比較においても、採用した核特性の計算手法及び解析結果の妥当性を確認した。

## 謝 辞

本解析は、原研の研究・試験炉燃料濃縮度低減化計画に基づいて材料試験炉部において進められている低濃縮化作業の一環として行われたものである。本報告書は、低濃縮化に携わっている関係諸氏の協力の賜物である。特に、安藤弘栄照射第1課長には、内容について貴重なご意見を頂いた。ここに深く感謝します。

## 参 考 文 献

- (1) Y.Nagaoka, et al.; "Neutronic Analysis of the JMTR with LEU Fuel and Burnable Poison" ,RERTR Meeting,(1984).
- (2) F.Sakurai, et al.; "Progress in Safety Evaluation for the JMTR Core Conversion to LEU Fuel" ,RERTR Meeting,(1989).
- (3) K.Tsuchihashi, et al.; "Revised SRAC Code System" ,JAERI 1302,(1986).
- (4) Y.Nagaoka, et al.; "Critical Experiments of JMTRC MEU Cores" ,RERTR Meeting,(1983).
- (5) S.Shimakawa, et al.; "Critical Experiments of JMTRC MEU Cores(Ⅱ)" , RERTR Meeting,(1986).
- (6) 永岡 芳春, 他 ; "J M T R 低濃縮燃料炉心の核的ホットスポットファクタ" , JAERI-M 92-042,(1992).

## 8. 結 語

J M T R 低濃縮炉心の核特性解析を行った。その結果、設定した炉心の核的な設計方針は満足されており、その安全性が確保されていることを確認した。また、現行の M E U 炉心との比較においても、採用した核特性の計算手法及び解析結果の妥当性を確認した。

## 謝 辞

本解析は、原研の研究・試験炉燃料濃縮度低減化計画に基づいて材料試験炉部において進められている低濃縮化作業の一環として行われたものである。本報告書は、低濃縮化に携わっている関係諸氏の協力の賜物である。特に、安藤弘栄照射第1課長には、内容について貴重なご意見を頂いた。ここに深く感謝します。

## 参 考 文 献

- (1) Y.Nagaoka, et al.; "Neutronic Analysis of the JMTR with LEU Fuel and Burnable Poison" ,RERTR Meeting,(1984).
- (2) F.Sakurai, et al.; "Progress in Safety Evaluation for the JMTR Core Conversion to LEU Fuel" ,RERTR Meeting,(1989).
- (3) K.Tsuchihashi, et al.; "Revised SRAC Code System" ,JAERI 1302,(1986).
- (4) Y.Nagaoka, et al.; "Critical Experiments of JMTRC MEU Cores" ,RERTR Meeting,(1983).
- (5) S.Shimakawa, et al.; "Critical Experiments of JMTRC MEU Cores(II)" , RERTR Meeting,(1986).
- (6) 永岡 芳春, 他 ; "J M T R 低濃縮燃料炉心の核的ホットスポットファクタ" , JAERI-M 92-042,(1992).

## 付録 1 Cdワイヤ付きLEU燃料のセル計算方法 ( VIM 補正法 )

### 1. 概要

LEU燃料で採用したCdワイヤの燃料要素内で占める割合は、極めて小さな体積であり、また熱エネルギー群での吸収断面積が約2500barnと大きい。このため、要素を燃料ミート部と側板部とに分離したモデルでは、本来、要素内で連続している空間スペクトルが崩れてしまいCdの吸収効果の評価に影響を及ぼすこととなる。そこで、分離モデルでの吸収効果をよりよく模擬するような計算手法としてVIM補正法を採用した。VIM補正法は、モンテカルロ計算コードVIMを用いてCdワイヤを含む燃料要素そのままの体系で（モデル化することなく）セル計算を実施し、熱中性子エネルギー群のCdの吸収断面積と中性子束の積、即ちCdの吸収反応率を基準として、SRAC-PIJ計算体系の側板部円筒モデルの最外層領域の燃料部の水の密度を調整してCdの反応率を一致させる方法である。

### 2. 格子計算モデル

SRAC-PIJ計算体系のCdワイヤ入り燃料側板部の格子計算モデルは、直径0.3mmのCdワイヤ1本当たりに注目して、Cdワイヤの本数、即ち標準燃料要素は18本、燃料フォロワは16本から決まってくる等体積円筒モデルとし、円筒中心からCd領域、側板部のAl領域、芯材のない燃料板部と側板の一部を混合したAl+H<sub>2</sub>O領域、そして最外層領域として燃料芯材部のMeat+Al+H<sub>2</sub>O領域の4領域に分割する。各領域の寸法と組成を表1に示す。

### 3. 計算結果

標準燃料要素及び燃料フォロワのCd領域の中性子スペクトルを図1及び図2に、VIMコードで求めたスペクトル、VIM補正する前及びVIM補正したスペクトルをそれぞれについて示す。Cd領域での熱中性子エネルギー領域における中性子束、断面積および吸収反応率を標準燃料要素及び燃料フォロワについて表2及び表3に示す。SRAC-PIJ計算体系モデルにVIM補正する、即ち最外層領域の水の密度を変える（標準燃料要素では1.403倍、燃料フォロワでは1.971倍する）ことにより中性子スペクトルを調整し、Cdの反応率を合わせることができる。この方法を用いることによりCdによる吸収反応度をよりよく評価することができる。

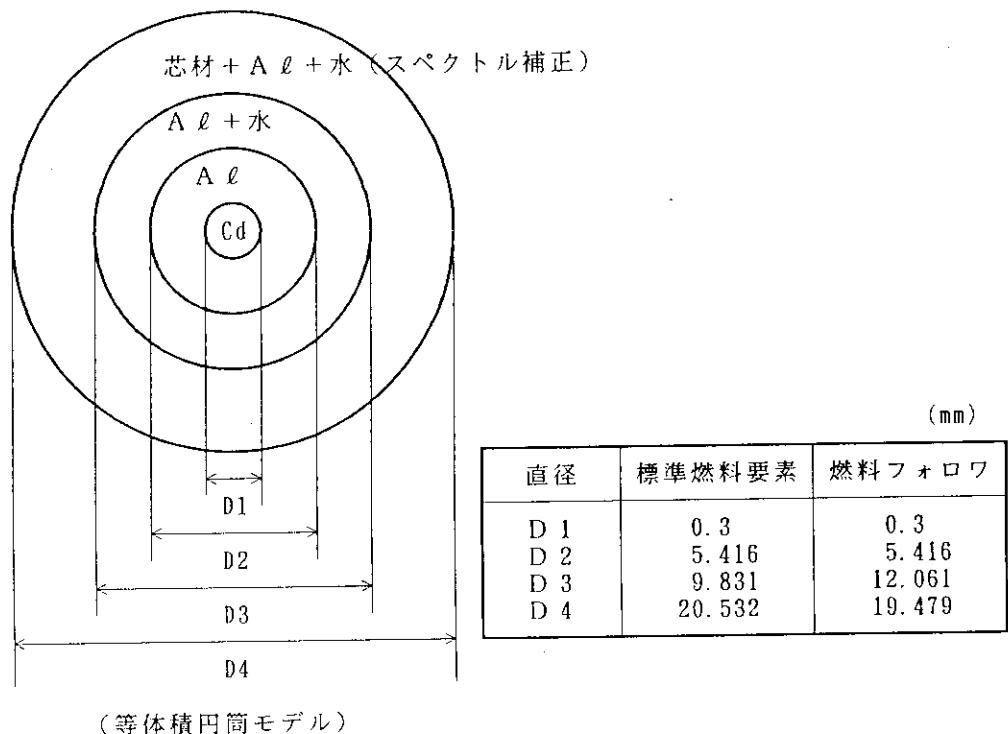
#### 4. 実測との比較

以上に述べた計算手法の検証を J M T R C の M E U 燃料炉心で行った。実験では直径が 0.4 mm の Cd ワイヤを用いた。図 3 に示すように Cd ワイヤを取り付けた標準燃料要素を 4 体用意し、2 体及び 4 体を炉心に装荷した場合の反応度を測定した。計算では直径 0.4 mm の Cd ワイヤが図 3 に示すように取付けたとして、先の格子計算方法に従って燃料要素の少数群定数を作成し炉心計算を行った。表 4 に結果を示す。Cd の反応度効果の実験値と計算値は良く一致している。

#### 5. 燃焼依存性

VIM 補正は燃焼していない燃料要素に対して設定したが、燃焼による依存性について検討した。燃焼中間の 12 日と燃焼末期の 25 日に相当する燃料及び Cd 組成を用いて、各燃焼時の VIM 補正值を求め、燃焼 0 時との Cd の吸収反応率の比較を行った。検討は標準燃料要素で Cd ワイヤ径 0.4 mm のものを 18 本挿入したケースで行った。結果を表 5 に示す。燃焼 0 時の VIM 補正值をサイクルとおして用いても、Cd の吸収反応率は、約 3 % 以内で一致しており、また、燃焼 20 日位で Cd は殆ど燃焼してしまうことから、反応度評価への影響は更に小さくなる。従って、VIM 補正の燃焼依存については考慮しなくとも結果への影響は無視できる。

表1 格子寸法と組成



核種	標準燃料要素の各領域の組成 (個 × 10 <sup>24</sup> /cm <sup>3</sup> )				
	Cd	Al	Al+H <sub>2</sub> O	<sup>1</sup> Meat+Al+H <sub>2</sub> O	<sup>2</sup> Meat+Al+H <sub>2</sub> O
<sup>235</sup> U				3.0490E-4	3.0490E-4
<sup>238</sup> U				1.2233E-3	1.2233E-3
Si				1.0390E-3	1.0390E-3
Al		6.0299E-2	3.0819E-2	1.4865E-2	1.4865E-2
H			3.2241E-2	4.5338E-2	6.3609E-2
O			1.6120E-2	2.2669E-2	3.1805E-2
<sup>113</sup> Cd	5.6769E-3				

1) 標準体系、2) VIMの結果に合わせた体系 (1.403 倍)

核種	燃料フォロワの各領域の組成 (個 × 10 <sup>24</sup> /cm <sup>3</sup> )				
	Cd	Al	Al+H <sub>2</sub> O	<sup>1</sup> Meat+Al+H <sub>2</sub> O	<sup>2</sup> Meat+Al+H <sub>2</sub> O
<sup>235</sup> U				3.2101E-4	3.2101E-4
<sup>238</sup> U				1.2879E-3	1.2879E-3
Si				1.0939E-3	1.0939E-3
Al		6.0299E-2	3.6362E-2	1.5651E-2	1.5651E-2
H			2.6179E-2	4.4248E-2	8.7213E-2
O			1.3090E-2	2.2124E-2	4.3606E-2
<sup>113</sup> Cd	5.6769E-3				

1) 標準体系、2) VIMの結果に合わせた体系 (1.071 倍)

表2 標準燃料要素のVIM補正

		$\phi_{cd}$ (任意単位)	$\sigma_{cd}$ ( barn )	Cd反応率 $\phi_{cd} \times \sigma_{cd}$
VIM計算		0.0641	2066.8	132.5
SRAC 円筒計算	補正なし	0.0506	2027.8	102.6
	F=1.403	0.0615	2152.6	132.4

表3 燃料フォロワのVIM補正

		$\phi_{cd}$ (任意単位)	$\sigma_{cd}$ ( barn )	Cd反応率 $\phi_{cd} \times \sigma_{cd}$
VIM計算		0.0736	2186.8	160.9
SRAC 円筒計算	補正なし	0.0503	2022.6	101.7
	F=1.971	0.0717	2244.0	160.9

表4 VIM補正の検証

単位 : %Δk/k

項目	実験値	計算値	C/E値
基準炉心の過剰反応度	11.70	11.69	1.00
G-7, K-9 に 2 体装荷時の Cd ワイヤ反応度価値	0.58	0.58	1.00
G-7, K-9, G-9, K-7 に 4 体装荷 時の Cd ワイヤ反応度価値	1.17	1.16	0.99

表5 VIM補正の燃焼依存性

## (1) 12日燃焼燃料

		$\phi_{cd}$ (任意単位)	$\sigma_{cd}$ (barn)	Cd反応率 $\phi_{cd} \times \sigma_{cd}$	反応率の差 (%)
VIM計算		0.0924	2322.5	214.6	—
SRAC 円筒計算	補正なし	0.0775	2287.1	177.3	-17.38
	<sup>1</sup> F=1.285	0.0902	2361.7	213.0	-0.75
	<sup>2</sup> F=1.299	0.0907	2364.6	214.5	-0.05

1) 燃焼 0 の時の補正係数 2) 反応率を合わせた補正係数

## (2) 25日燃焼燃料

		$\phi_{cd}$ (任意単位)	$\sigma_{cd}$ (barn)	Cd反応率 $\phi_{cd} \times \sigma_{cd}$	反応率の差 (%)
VIM計算		0.1814	2757.9	500.3	—
SRAC 円筒計算	補正なし	0.1519	2722.3	413.5	-17.35
	<sup>1</sup> F=1.285	0.1765	2754.2	486.1	-2.84
	<sup>2</sup> F=1.345	0.1813	2759.2	500.2	-0.02

1) 燃焼 0 の時の補正係数 2) 反応率を合わせた補正係数

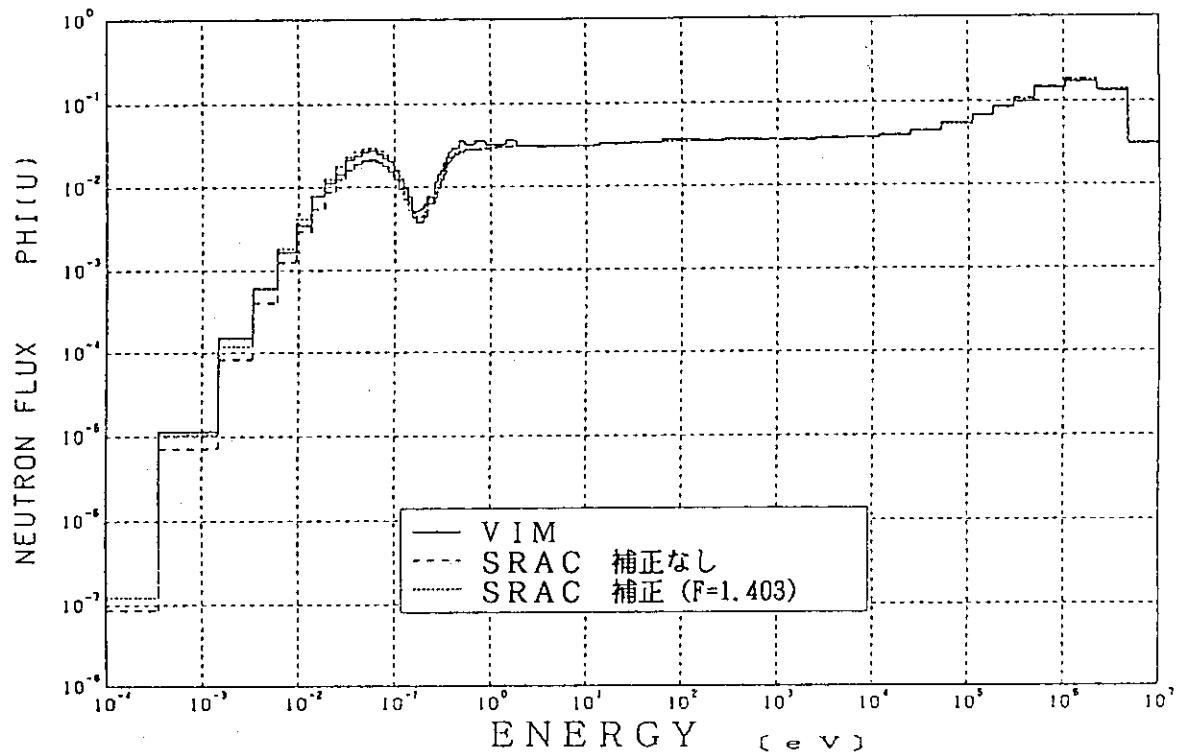


図1 標準燃料要素のCd領域での中性子スペクトル

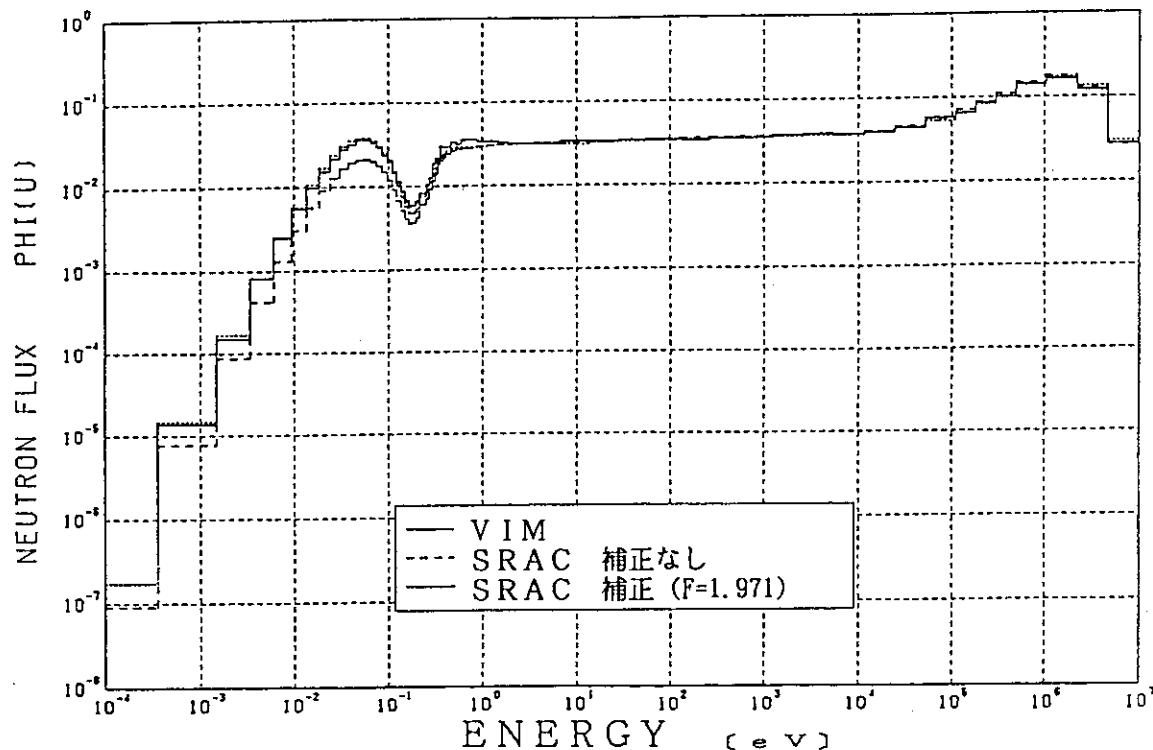


図2 燃料フォロワのCd領域での中性子スペクトル

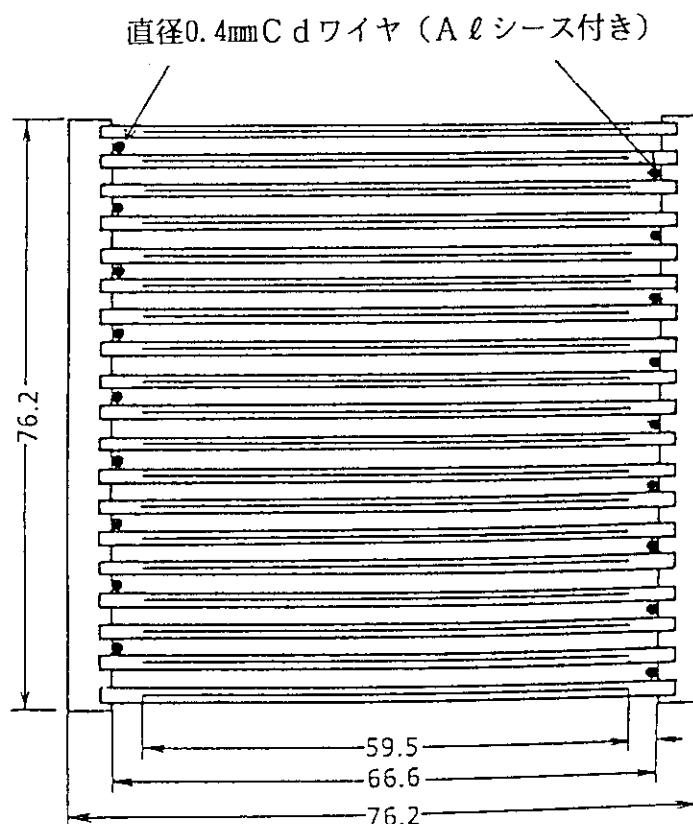


図3 Cd ワイヤの JMTRC MEU 燃料要素への取付け

## 付録 2 L E U 炉心の中性子スペクトル

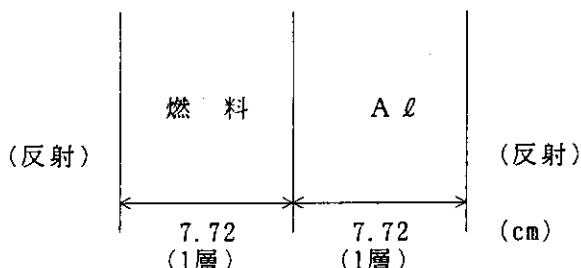
L E U 炉心の中性子スペクトル計算を行い、炉心照射孔におけるM E U 炉心とのスペクトルの変化について検討した。

### 1. 計算条件

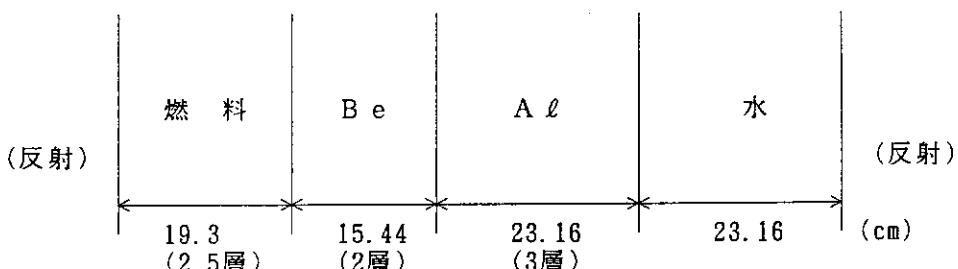
計算条件は次の通りとした。

計算コード : A N I S N  
 断面積ライブラリ : M G C L  
 エネルギー群数 : 1 3 7 群 P1 S4  
 計算体系 : 下図に示す

(1) 燃料領域照射孔



(2) 反射体領域照射孔



### 2. 計算結果

濃縮度が変わることによる照射孔での中性子スペクトル変化の影響が大きいのは、図1に示すように燃料領域の A ℓ 照射孔であり、熱中性子領域におけるL E U 炉心のスペクトル硬化がみられる。反射体領域の B e 1 層照射孔（図2）でも同様の変化がみられるが程度は小さくなり、B e 2 層照射孔（図3）では殆ど影響がなくなる。高速中性子領域も含む熱外中性子領域での低濃縮化によるスペクトル変化は、何れの照射孔で影響を受けていない。反射体領域の A ℓ 1 層照射孔のスペクトルを図4に示す。

また、L E U 炉心において可燃性吸収体（C d）が燃焼して無くなつた場合のスペクトル変化を図5に燃料領域照射孔について示す。

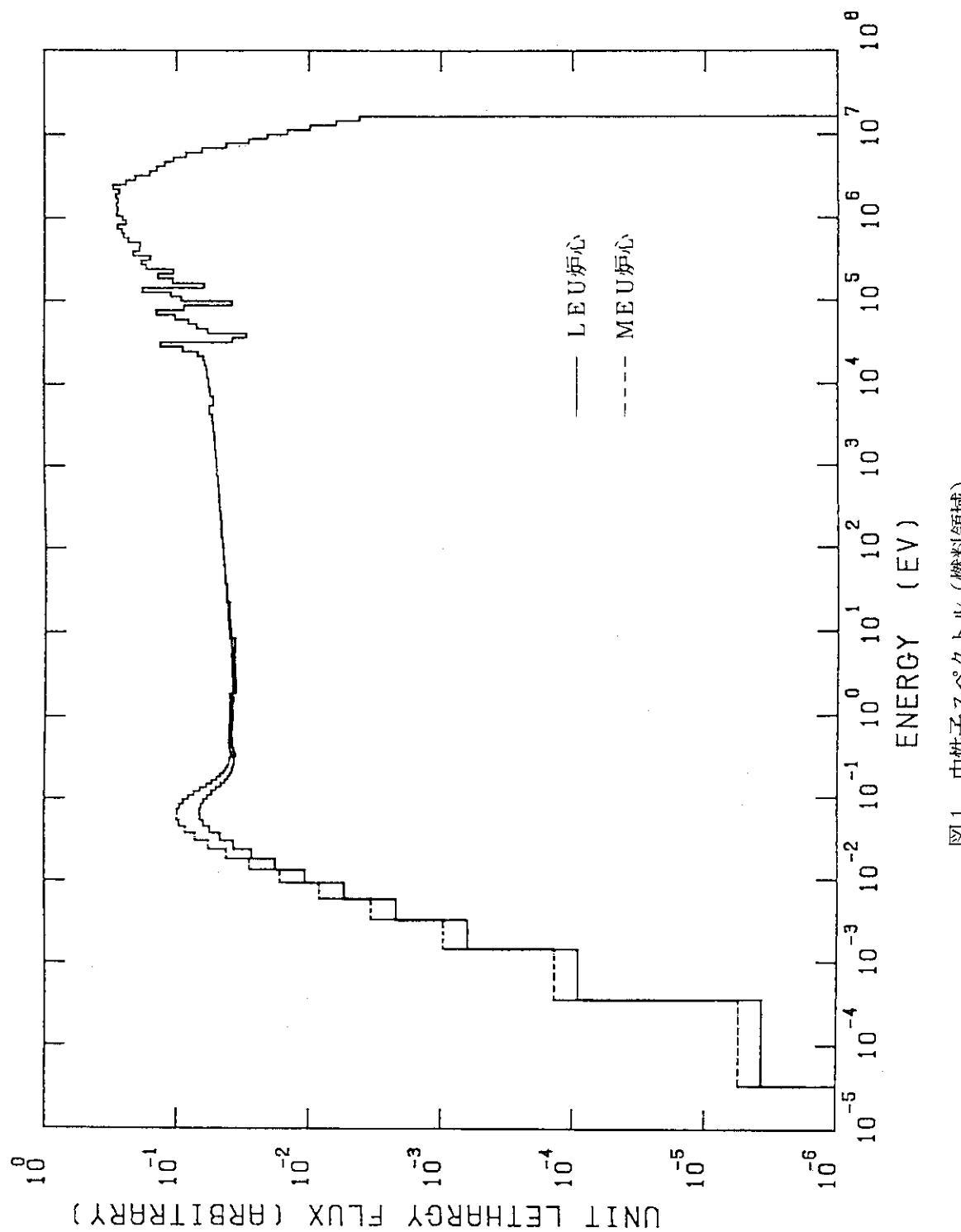


図1 中性子スペクトル(燃料領域)

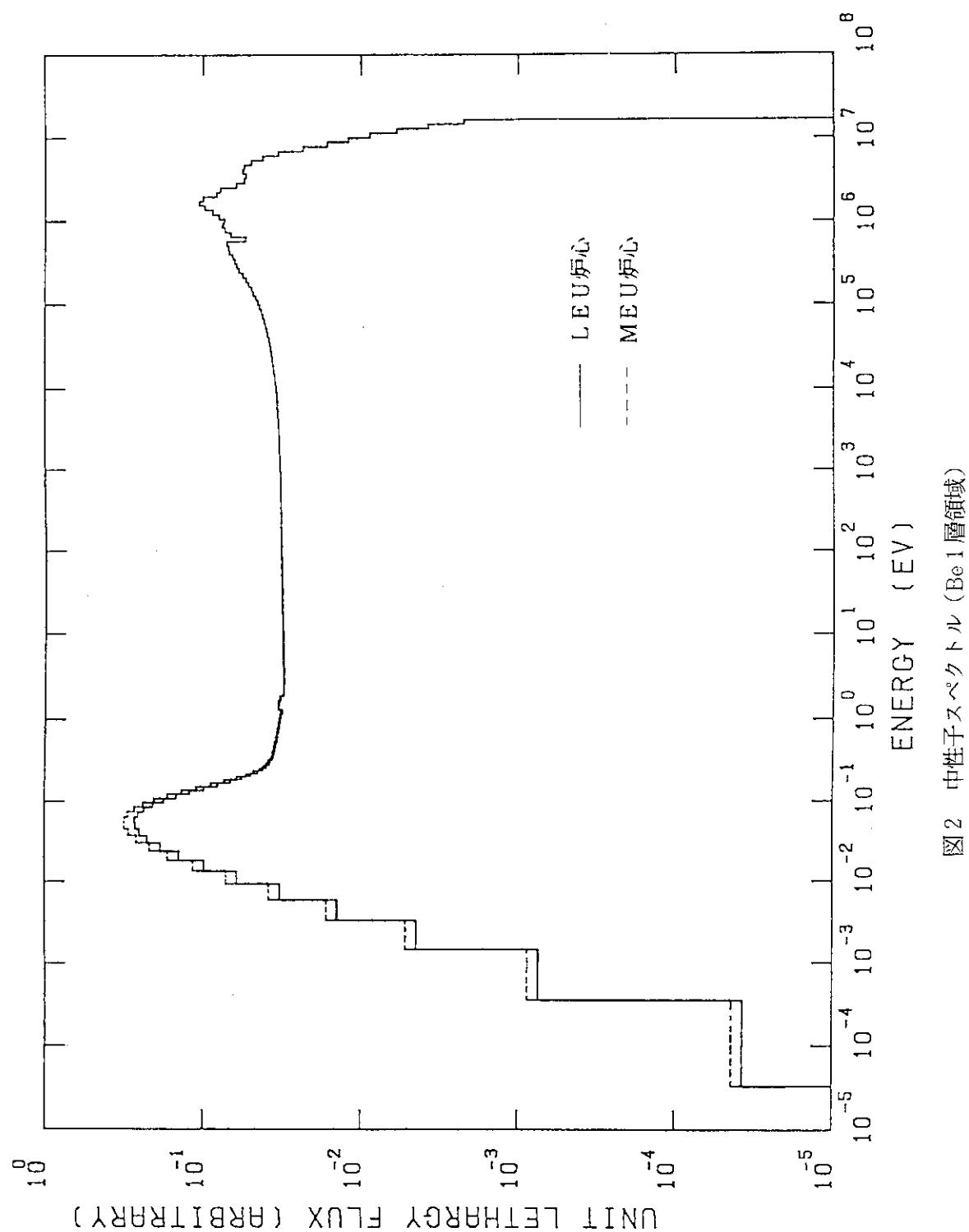


図2 中性子スペクトル (Be 1層領域)

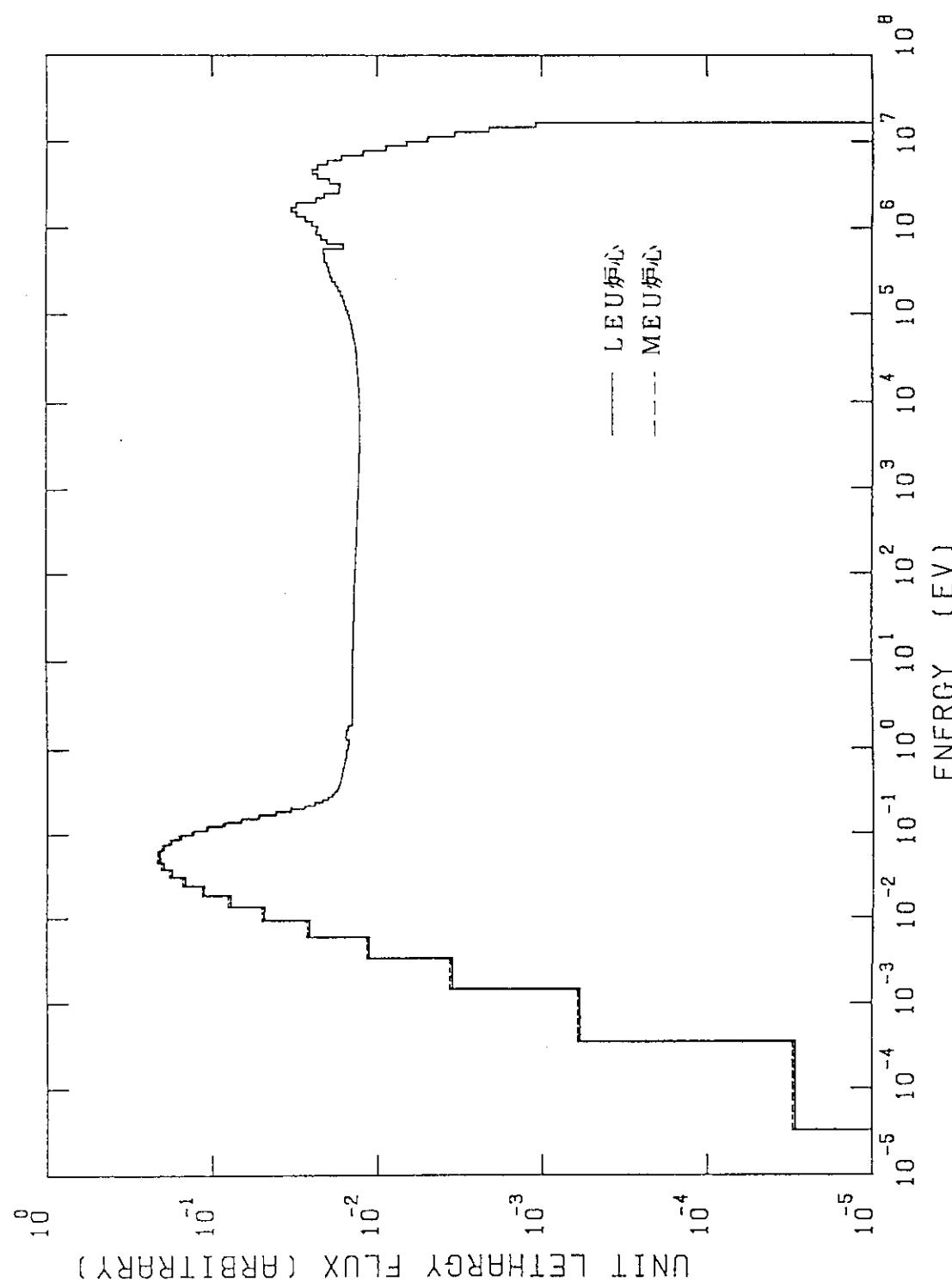
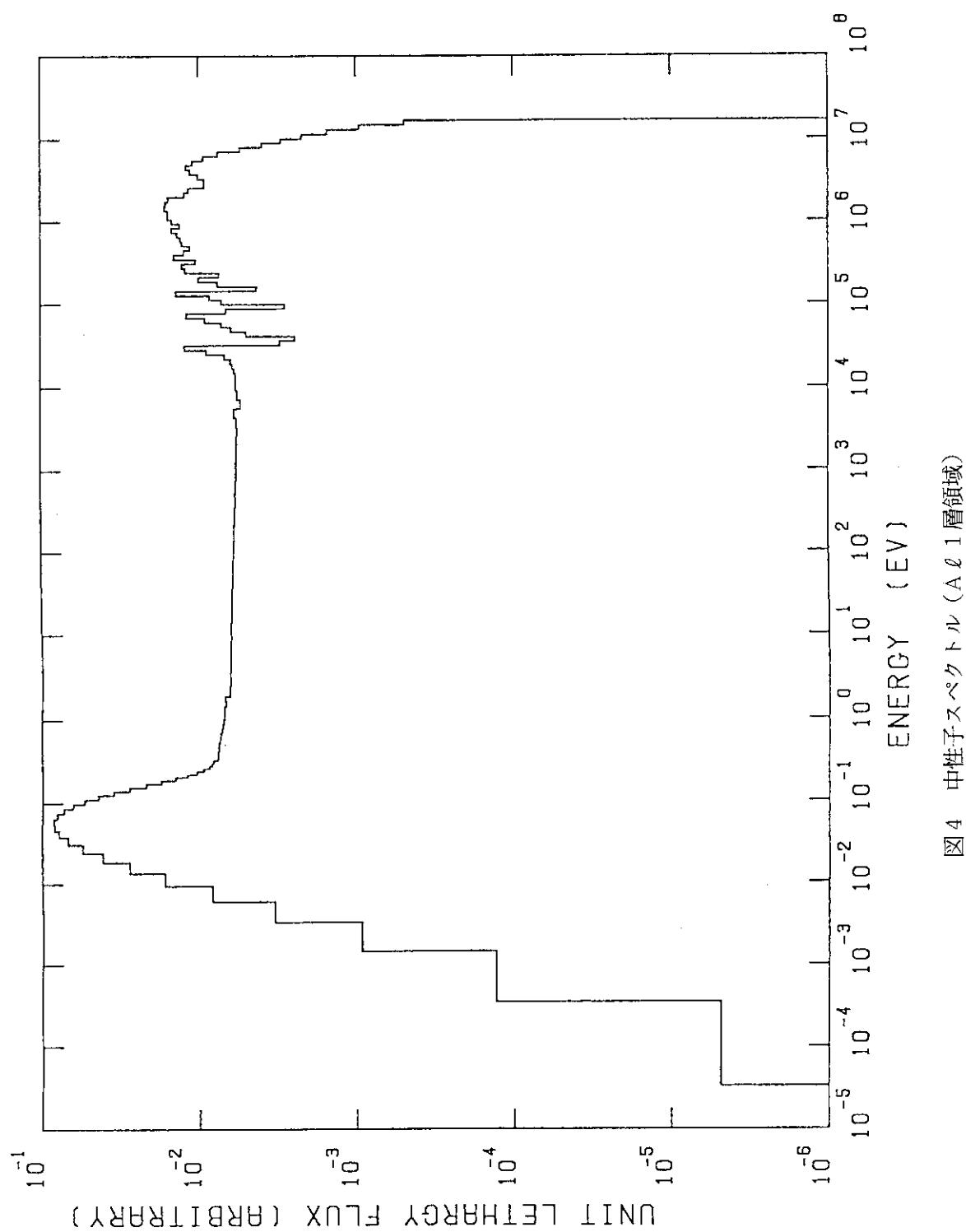


図3 中性子スペクトル (Be2層領域)

図4 中性子スペクトル ( $\Lambda \ell = 1$  層領域)

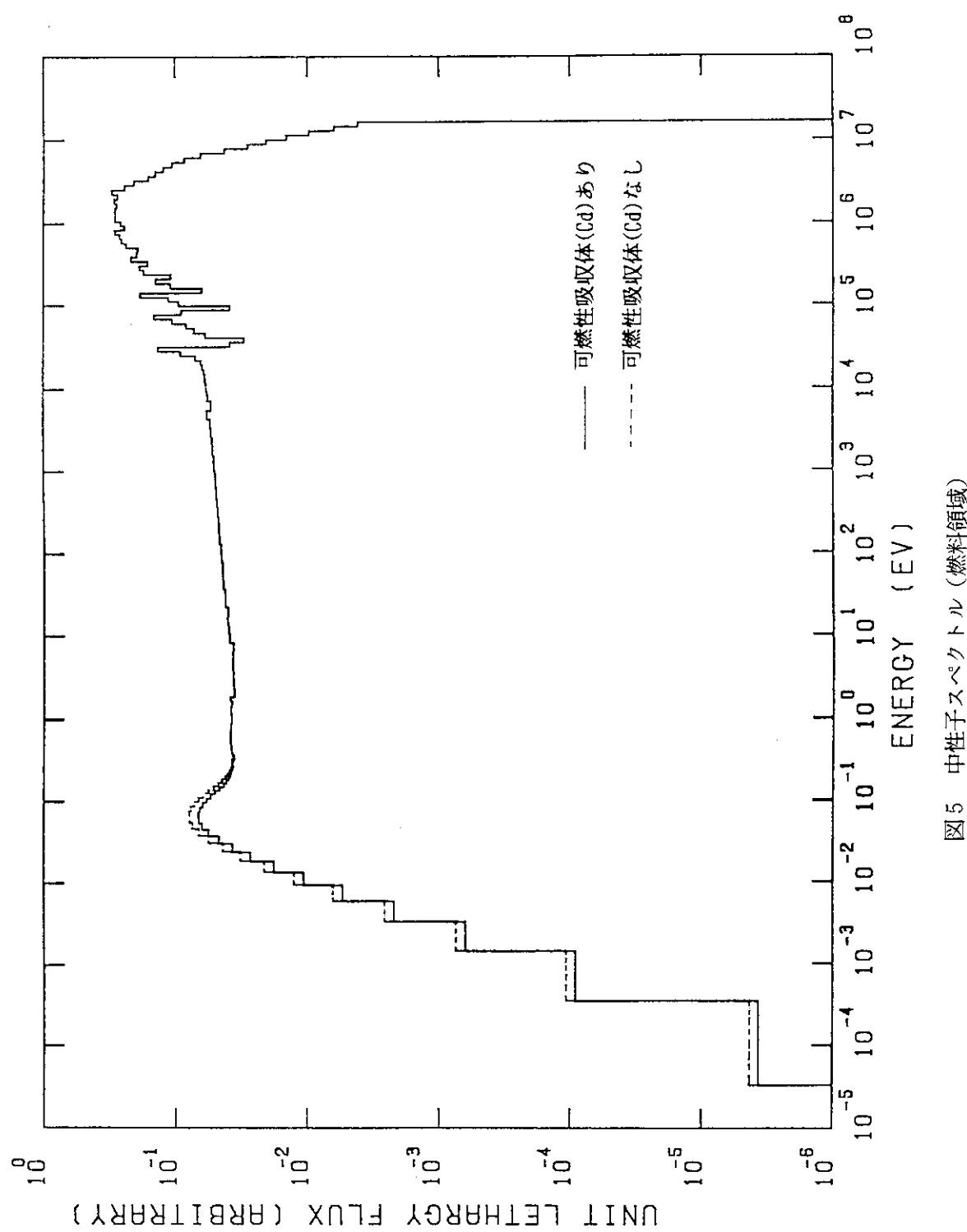


図5 中性子スペクトル(燃料領域)