

JAERI - M
85-047

低濃縮ウラン実験用燃料要素の核的特性測定と
SRACコードシステムによる解析

1985年4月

有金 賢次・大塚 徹雄・葦 肇
渡辺 終吉・両角 実

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, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

低濃縮ウラン実験用燃料要素の核的特性測定とSRACコードシステムによる解析

日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部

有金 賢次・大塚 徹雄・薮 肇
渡辺 終吉・両角 実

(1985年3月6日受理)

20%濃縮ウランによるJRR-4燃料の濃縮度低減化計画が進められている。

本報告は、低濃縮ウラン実証試験用燃料として設計された燃料と同一仕様の燃料要素の核的特性測定の結果とSRACコードシステムによる解析結果について述べたものである。

核的特性測定と解析は、1) 反応度、2) 制御棒価値、3) 熱中性子束分布について実施した。

その結果、低濃縮ウラン燃料の反応度は、現在使用中の高濃縮ウラン燃料とほぼ同等であることが確認された。

また、解析結果は測定結果と良い一致を示し、SRACコードシステムによる解析結果は、JRR-4低濃縮ウラン燃料炉心の核特性を充分予測し得るとの結論が得られた。

Nuclear Characteristic Measurements and Calculation by the SRAC
Code System for LEU Fuel Element

Department of Research Reactor Operation
Tokai Research Establishment, JAERI

Kenji ARIGANE, Tetsuo OTSUKA, Hajimu SHITOMI, Shukichi WATANABE
and Minoru MOROZUMI

(Received March 6, 1985)

The reduced enrichment program for the Japan Research
Reactor No.4 (JRR-4) fuel has been progressed using 20% enriched
uranium.

This report describes nuclear characteristic measurement
results on the experimental fuel element which is designed with
the same specification as the fuel elements to be used for the
LEU demonstration core and neutronic calculation results by the
SRAC Code System. The characteristic measurements were performed
as follows;

- 1) fuel reactivity
- 2) control rod worth
- 3) thermal neutron flux.

These results confirm that the experimental fuel element
has a comparable reactivity performance to that of the HEU fuel
element currently used. The neutronic calculation is in satis-
factory agreement with the measurement and accordingly it might
be concluded that the nuclear characteristics on the LEU demon-
stration core could be estimated with enough accuracy by the
SRAC Code System.

Keywords: JRR-4, RERTR, Low Enriched Uranium, Fuel Element,
Reactivity, Control Rod Worth, Thermal Neutron Flux,
SRAC Code System, Characteristic Measurement,
Calculation

目 次

1. 序	1
2. 低濃縮ウラン実験用燃料要素の概要	1
3. 核特性測定の概要	6
4. 核特性炉心の構成	8
4.1 JRR-4の炉心構成	8
4.2 特性測定基準炉心	9
4.3 質量係数測定基準炉心	9
4.4 E F E 反応度測定および制御棒校正炉心	9
4.5 HEU燃料反応度測定炉心	9
4.6 熱中性子束測定炉心	9
5. 解析手法	18
5.1 計算コードおよびライブラリ	18
5.2 中性子エネルギー群構造	18
5.3 少数群定数の作成	19
5.3.1 新燃料要素	19
5.3.2 燃焼燃料要素	19
5.3.3 燃料以外の炉心構成要素	20
5.3.4 制御棒	20
5.4 2次元炉心計算時の軸方向バックリングの設定	21
6. 制御棒校正と解析	33
6.1 測定方法	33
6.2 測定結果	33
6.3 計算方法	33
6.3.1 2次元計算による制御棒等価反応度	33
6.3.2 3次元計算による制御棒等価反応度	34
6.4 計算と測定結果の比較	34
7. 反応度測定と解析	53
7.1 測定方法	53
7.2 測定結果	53
7.3 計算方法	54
7.4 計算と測定結果の比較	54
8. 熱中性子束測定と解析	58
8.1 測定方法	58
8.2 測定結果	59

8.3 計算方法	60
8.4 計算と測定結果の比較	60
9. 結 論	78
謝 辞	79
参考文献	79
附録 A 燃料板基本セルの原子個数密度	80
附録 B HEU A・B 型混合 16 本燃料炉心の制御棒等価反応度	81

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Description of LEU Experimental Fuel Element	1
3. Outline of Nuclear Characteristic Measurements	6
4. Configuration of Nuclear Characteristic Measurement Core	8
4.1 JRR-4 Fundamental Core	8
4.2 Characteristic Measurement Core	9
4.3 Mass Coefficient Measurement Core	9
4.4 LEU Experimental Fuel Reactivity Measurement Core and Control Rod Calibration Core	9
4.5 HEU Fuel Reactivity Measurement Core	9
4.6 Thermal Neutron Flux Measurement Core	9
5. Calculation Method	18
5.1 Computer Codes and Libraries	18
5.2 Neutron Energy Structure	18
5.3 Creation of Few Group Constants	19
5.3.1 Fresh Fuel Element	19
5.3.2 Burned Fuel Element	19
5.3.3 Other Core Components	20
5.3.4 Control Rod	20
5.4 Setting of Axial Buckling for 2-Dimensional Calculation ...	21
6. Measurement and Calculation of Control Rod Worth	33
6.1 Measurement Method	33
6.2 Measurement Results	33
6.3 Calculation Method	33
6.3.1 Control Rod Worth by 2-Dimensional Calculation	33
6.3.2 Control Rod Worth by 3-Dimensional Calculation	34
6.4 Comparison between Measurement and Calculation Results	34
7. Measurement and Calculation of Reactivity for LEU and HEU Fuel Elements	53
7.1 Measurement Method	53
7.2 Measurement Results	53
7.3 Calculation Method	54
7.4 Comparison between Measurement and Calculation Results	54
8. Measurement and Calculation of Thermal Neutron Flux	58
8.1 Measurement Method	58
8.2 Measurement Results	59

8.3 Calculation Method	60
8.4 Comparison between Measurement and Calculation Results	60
9. Conclusions	78
Acknowledgment	79
Reference	79
Appendix A Atomic Number Density of Fundamental Fuel Plate Cell ..	80
Appendix B Control Rod Worth of HEU A&B Type Mixed 16 Fuel Element Core	81

1. 序

燃料の濃縮度低減化を実施していく上で、低濃縮ウラン用燃料として設計された高密度燃料の核特性と照射健全性をあらかじめ確認しておくことは特に重要である。核特性の確認は、燃料設計に用いた計算コードや解析手法の妥当性を明らかにし、照射健全性の確認は、高密度燃料の製造技術が確立されたものであるか否かを明らかにする。この目的のため、昭和59年度に2本の低濃縮ウラン実験用燃料要素が製作された。1本は核特性確認用である。他の1本は照射健全性確認用であり、昭和59年9月、加速照射試験を行うためJRR-2に装荷された。照射終了は昭和60年6月の予定である。

本報告は、昭和59年10月末から11月にかけてJRR-4で行った低濃縮ウラン実験用燃料要素の核特性測定とSRACコードシステム¹⁾による解析結果について述べたもので、低濃縮ウラン実験用燃料要素の概要、核特性測定の概要、特性測定炉心の構成、少数群定数の作成および特性測定結果などが述べられている。

なお、本報告における解析とまとめは有金が行い、特性測定は大塚、薮、有金、渡辺が主体となりJRR-4管理課が行った。

2. 低濃縮ウラン実験用燃料要素の概要

低濃縮ウラン実験用燃料要素（以下EFEという）は、濃縮度19.75%のETR型燃料で、燃料芯材は、ウラン密度 2.2 g/cm^3 のウラン・アルミニウム分散型合金（UA ℓ x-A ℓ ）であり、14枚の内側燃料板と2枚の外側燃料板から構成され、上下にアダプタが付いている。燃料要素当りのU-235含有量は221.4gで、除熱上の理由から外側燃料板のU-235含有量は内側燃料板の半分になっている。

EFEと現在使用中の高濃縮ウラン燃料要素の主な相違点は次のとおりである。

- 1) 濃縮度が93%から19.75%に低下した。
- 2) 燃料芯材がU・Al合金からUA ℓ x-A ℓ に変わった。
- 3) 燃料芯材厚が0.5 mmから0.89 mmになった。
- 4) 燃料要素あたりの燃料板枚数が1枚増え16枚になった。
- 5) 燃料要素あたりのU-235含有量が166 gから221.4 gに増加した。

表2.1にEFEの諸元をHEU燃料と対比し示す。また、図2.1～2.3に燃料要素および燃料板を示す。なお、EFEの設計は、昭和57年度にJRR-4でSRACコードシステムを用いて行い、昭和58～59年度にかけて仏国CERCA社で製作されたものである。

1. 序

燃料の濃縮度低減化を実施していく上で、低濃縮ウラン用燃料として設計された高密度燃料の核特性と照射健全性をあらかじめ確認しておくことは特に重要である。核特性の確認は、燃料設計に用いた計算コードや解析手法の妥当性を明らかにし、照射健全性の確認は、高密度燃料の製造技術が確立されたものであるか否かを明らかにする。この目的のため、昭和59年度に2本の低濃縮ウラン実験用燃料要素が製作された。1本は核特性確認用である。他の1本は照射健全性確認用であり、昭和59年9月、加速照射試験を行うためJRR-2に装荷された。照射終了は昭和60年6月の予定である。

本報告は、昭和59年10月末から11月にかけてJRR-4で行った低濃縮ウラン実験用燃料要素の核特性測定とSRACコードシステム¹⁾による解析結果について述べたもので、低濃縮ウラン実験用燃料要素の概要、核特性測定の概要、特性測定炉心の構成、少数群定数の作成および特性測定結果などが述べられている。

なお、本報告における解析とまとめは有金が行い、特性測定は大塚、蔭、有金、渡辺が主体となりJRR-4管理課が行った。

2. 低濃縮ウラン実験用燃料要素の概要

低濃縮ウラン実験用燃料要素（以下EFEという）は、濃縮度19.75%のETR型燃料で、燃料芯材は、ウラン密度 2.2 g/cm^3 のウラン・アルミニウム分散型合金（ $\text{UA}\ell_x\text{-A}\ell$ ）であり、14枚の内側燃料板と2枚の外側燃料板から構成され、上下にアダプタが付いている。燃料要素当りのU-235含有量は221.4gで、除熱上の理由から外側燃料板のU-235含有量は内側燃料板の半分になっている。

EFEと現在使用中の高濃縮ウラン燃料要素の主な相違点は次のとおりである。

- 1) 濃縮度が93%から19.75%に低下した。
- 2) 燃料芯材がU・Al合金から $\text{UA}\ell_x\text{-A}\ell$ に変わった。
- 3) 燃料芯材厚が0.5 mmから0.89 mmになった。
- 4) 燃料要素あたりの燃料板枚数が1枚増え16枚になった。
- 5) 燃料要素あたりのU-235含有量が166 gから221.4 gに増加した。

表2.1にEFEの諸元をHEU燃料と対比し示す。また、図2.1～2.3に燃料要素および燃料板を示す。なお、EFEの設計は、昭和57年度にJRR-4でSRACコードシステムを用いて行い、昭和58～59年度にかけて仏国CERCA社で製作されたものである。

表 2.1 EFE および HEU 燃料諸元

項 目	日 期	単 位	HEU FUEL				EFE			
			A 型		B 型 3, 4 次		L 板	外 板		
			1次FUEL	2次FUEL	内 板	外 板	内 板	外 板		
燃料芯材	形 態		U-A θ Alloy	U-A θ Alloy	U-A θ Alloy	U-A θ Alloy	UA θ x-A θ	UA θ x-A θ		
	濃 縮	w/o	8987	898088	93139		1975	1975		
	同位元素比	U-233	w/o	-	-	-	-	0.01	}	
		U-234	w/o	(0.565)	0.5645	0.592		0.12		
		U-235	w/o	8987	898088	93139	同 左	1975		同 左
		U-236	w/o	(0.432)	0.4317	0.416		0.14		
		U-238	w/o	(9.133)	9.195	5853		7998		
	ウラン含有率	w/o	1941	20.593	20.371	11.005	51.606	31.117		
	ウラン密度	g-U/cm ³	0.6284	0.6646	0.6571	0.3264	2.20	1.10		
	ポイド含有率	v/o	-	-	-	-	8	2		
比 重	g/cm ³	3.2377	3.2276	3.2248	2.9646	4.26311	3.53504			
体 積	cm ³	19.543	18.455	19.396	19.441	3.397	33.97			
寸 法	cm	0.05x6.54x59.763	0.05x6.54x58.437	0.05x6.54x59.315	0.05x6.54x59.453	0.089x6.54x58.362	0.089x6.54x58.362			
U 重量	g/枚	12.2813	12.266	12.746	6.345	7.4734	37.367			
U 233 重量	g/枚	-	-	-	-	0.00743	0.00448			
U 234 重量	g/枚	(0.0694)	0.0692	0.0755	0.0376	0.0897	0.0448			
U 235 重量	g/枚	11.0372	11.0159	11.871	5.9097	14.76	7.38			
U 236 重量	g/枚	(0.0531)	0.053	0.053	0.0264	0.1046	0.0523			
U 238 重量	g/枚	(1.1217)	1.1279	0.746	0.3714	59.772	29.886			
UA θ x 重量	g/枚	-	-	-	-	104.210	52.105			
芯材中の A θ の総重量	g/枚	50.992	47.298	49.802	51.29	70.084	82.718			
芯材総重量	g/枚	63.273	59.564	62.548	57.635	144.818	120.085			
被覆材厚さ	cm	0.0385	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038			
被覆材密度	g/cm ³	2.7	2.7	2.7	2.7	2.671	2.671			
燃料板枚数	枚	15	15	13	2	14	2			
燃料要素										
U-235 含有量	g	165.558	165.223		166.142	221.4	221.4			
ウォーターギャップ寸法	cm	0.41	0.41		0.41		0.335			
注 1. A 型 1 次 Fuel の 内数値はウランの同位元素比が不明のため										
注 2. A 型 2 次 Fuel の値を元にした推定値										
			UA θ x		UA θ ₃ /UA θ ₄ (v/o)		1			
					U/UA θ ₃₋₄₇₁₂₃		0.71715			
					密度 (g/cm ³)		6.43			

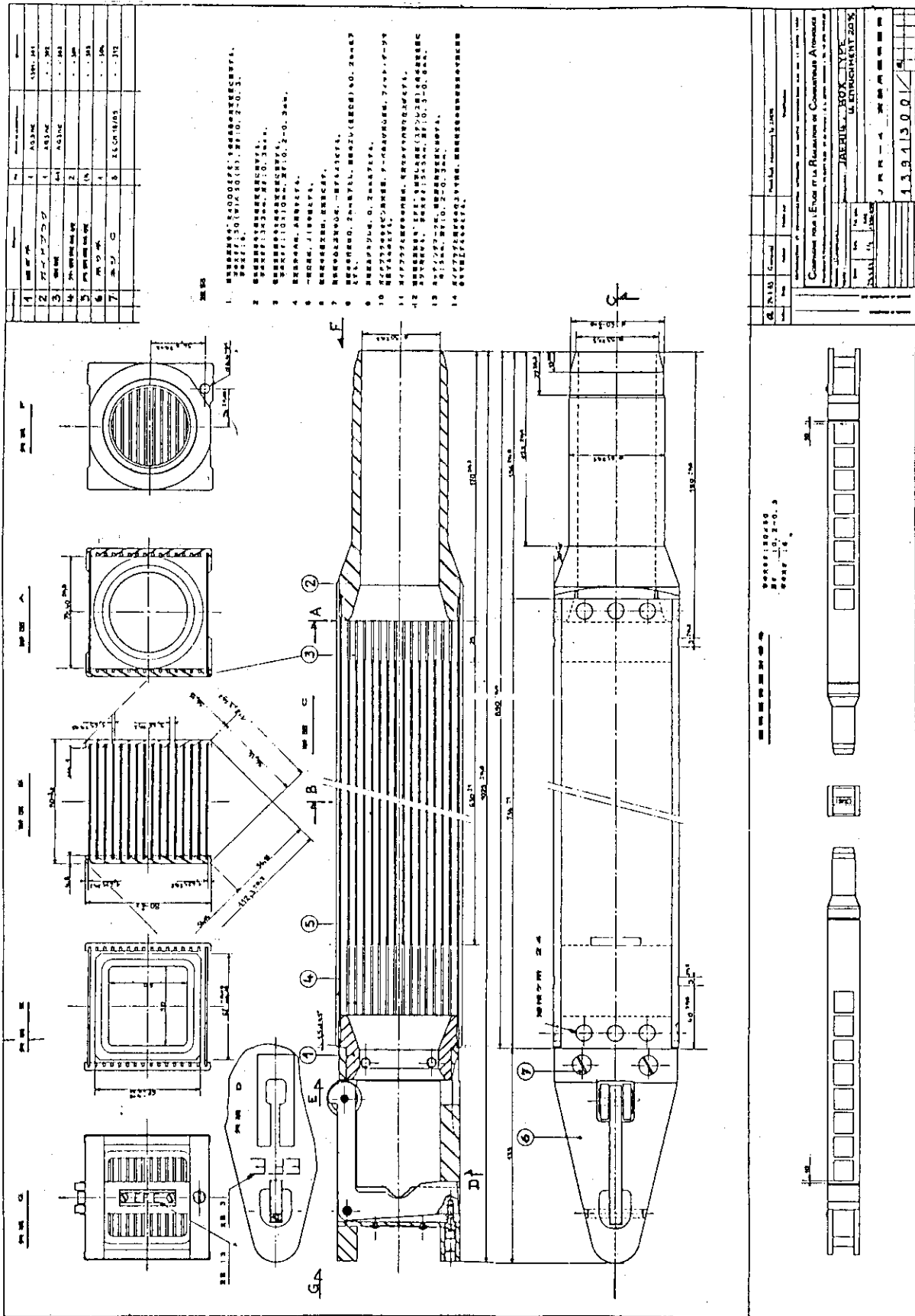


図 2.1 低濃縮ウラン実験用燃料要素組立図

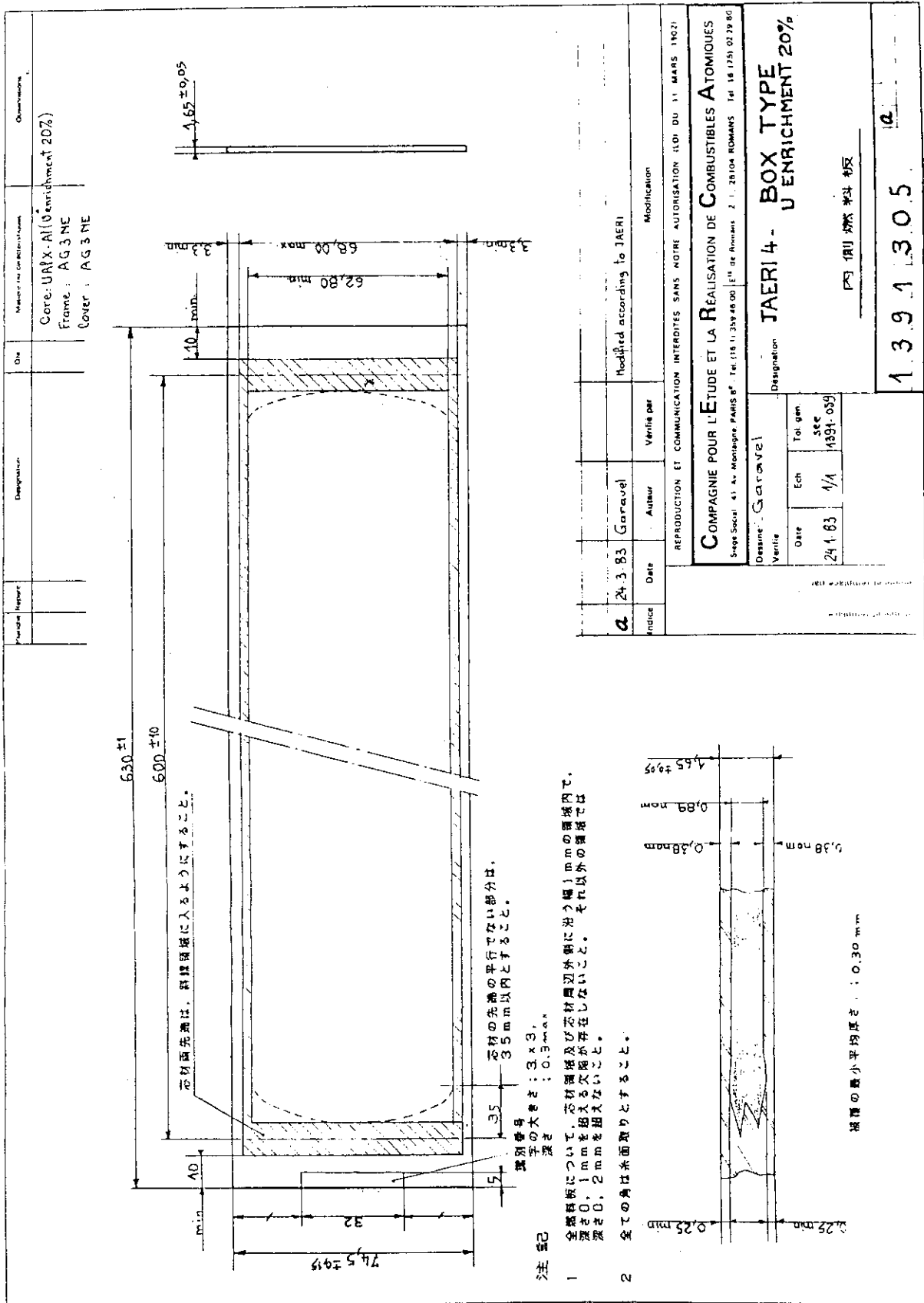


図2.2 低濃縮ウラン実験用燃料内側燃料板

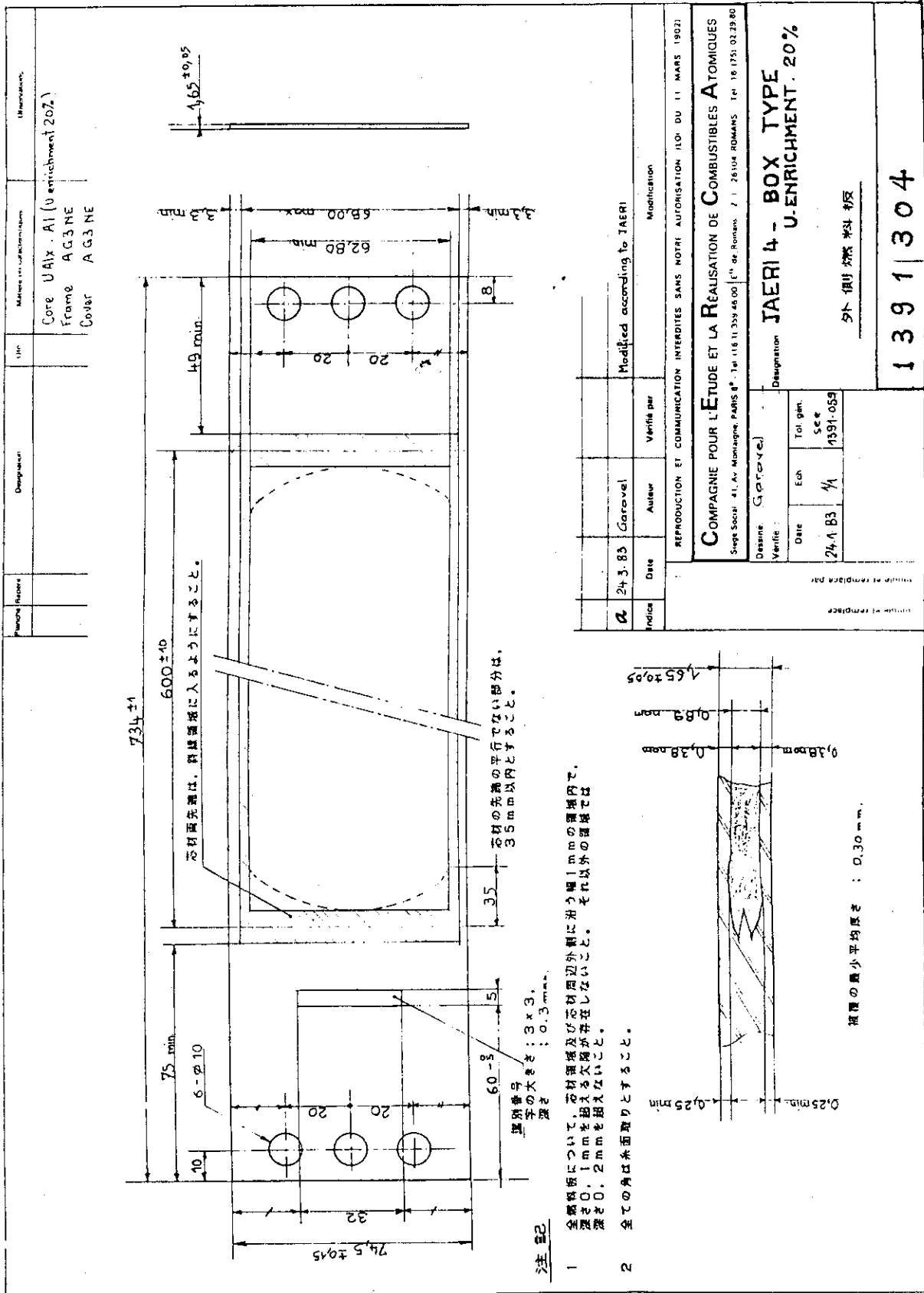


図 2.3 低濃縮ウラン実験用燃料外側燃料板

3. 核特性測定の概要

核特性測定の目的は以下のとおりである。

- (1) 低濃縮ウランによる全炉心実証試験用燃料として設計製作された E F E の核的性能, 特に反応度値が現在の高濃縮ウラン燃料に匹敵することの確認
- (2) 原子炉出力を変更せず, 全燃料を低濃縮ウラン燃料に変更した場合の熱中性子束の減少率の予測
- (3) 核計算手法の妥当性と計算値と測定値の比較

上記目的のため, E F E を 90 ~ 93 % 高濃縮ウラン燃料炉心の炉心中央に装荷し,

- (1) 制御棒等価反応度
- (2) 反応度
- (3) 熱中性子束

の測定を行なった。これらの測定は, 昭和 59 年度下期の 3 週間の定期自主検査終了後, 10 月 22 日から 11 月 2 日までの 2 週間で実施した。表 3.1 に特性測定実施日程表を示す。

表 3.1 LEU 実験用燃料要素特性測定実施日程表

月日	試験項目	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	
10/22 月	準備	実験台, 鉛ダクト, トング等準備 〔月例点検, 総合機能試験〕									
10/23 火	反応度測定 (燃料交換)										
10/24 水	中性子束測定 (過剰反応度) (燃料交換)	燃料交換							Foil Holder 取付		
10/25 木	中性子束測定	燃料装荷									
10/26 金	中性子束測定 (燃料交換)							試料取出 燃料要換		Au-Foil 測定	
10/27 土	中性子束測定	Au-Foil 測定									
10/28 日											
10/29 月	測定準備	抵抗温度計を燃料に取付け									
10/30 火	使用前性能検査 (制御棒校正)					Back up					
10/31 水	同上										
11/1 木	臨界試験 熱出力校正										
11/2 金	予備日										

4. 核特性炉心の構成

EFEの核的特性を測定するため、5つの異った炉心構成で実験を行った。それらは

- (1) 特性測定基準炉心
- (2) 質量係数測定基準炉心
- (3) EFE 反応度測定および制御棒校正炉心
- (4) 高濃縮ウラン (HEU) 燃料反応度測定炉心
- (5) 熱中性子束測定炉心

である。

以下に、JRR-4の炉心構成と各特性測定炉心の構成を簡単に述べる。

4.1 JRR-4の炉心構成

JRR-4は、最大熱出力3.5 MWのスイミングプール型研究用原子炉で、減速材、冷却材は軽水である。

図4.1に炉心配置図を示す。炉心部は、単位ピッチ8.1×8.1 cmの8行8列の格子板上に配置され、炉心中央には20本の燃料要素が4行5列で配置されている。

燃料要素は、90～93%高濃縮ウランを用いたウラン・アルミニウム合金の板状燃料で、燃料要素当りのU-235含有量が 166 ± 1.7 gのETR型燃料である。燃料要素当りの燃料板数は15枚で、13枚の内側燃料板と2枚の外側燃料板があり、外側燃料板のU-235含有量は内側燃料板の半分になっている。炉心の最大燃料装荷数は25本であるが、通常20本燃料炉心で共同利用運転を行っている。図4.2～4.4に高濃縮ウラン燃料（以下HEU燃料という）の燃料要素および燃料板を示す。

燃料領域の外側には黒鉛反射体が1～2層あり、反射体領域に中性子源の入った反射体要素1本と照射筒5本がある。

反射体要素は、アルミニウムケースの中に黒鉛ブロックを封入したもので、普通、大型、後備安全棒用、微調整棒用の4種類の反射体がある。

中性子源は、5CiのAm-Beで、常時炉心に装荷されている。

照射筒は、アルミニウム製のパイプで出来ており、各種試料の照射に利用されている。パイプの中は軽水である。

制御棒は、厚さ5 mmの1.6%天然ボロン入りステンレス鋼でできており、粗調整安全棒、後備安全棒、微調整棒の3種類の制御棒がある。粗調整安全棒は、巾235 mm、長さ1000 mmで4行5列の燃料領域を3領域に分割するよう、4枚の制御棒が配置されている。微調整棒は、巾40 mm、長さ1000 mmで、微調整棒用反射体に付いているガイドの中を上下する。後備安全棒は、巾140 mm、長さ1000 mmで、微調整棒と同様、後備安全棒用反射体に付いているガイドの中を上下する構造になっており、常時上限に引き抜かれている。制御棒のストロークは全て650

mmで、下限位置は燃料芯材下限と同一位置である。

以上の炉心部は、図4.5に示すように炉心タンク内に納められ、炉心ブリッチにより水深9.8mのプール内に吊り下げられている。

炉心冷却水は、燃料上部の吊り手部から燃料板上部に入り、燃料板間を通過して燃料下部から流出する下降流である。

4.2 特性測定基準炉心

図4.6に特性測定基準炉心の炉心配置図を示す。この炉心は、特性測定の基準炉心で、9月30日の運転終了時の炉心配置と同一炉心である。各燃料要素の燃焼度は、JRR-4の燃料管理コードで計算した平均燃焼度である。反応度測定、制御棒校正、熱中性子束測定の各炉心は、この炉心配置の燃料を実験目的に合わせて変更したものである。

4.3 質量係数測定基準炉心

図4.7に質量係数測定基準炉心の炉心配置図を示す。この炉心は、EFEとHEU燃料の質量係数および等価反応度を測定するための基準となる炉心で、特性測定基準炉心の炉心格子位置E-5の燃料を引き抜いた19本燃料炉心である。燃料要素を引き抜いたE-5は、軽水で置換される。

4.4 EFE 反応度測定および制御棒校正炉心

図4.8にEFE反応度測定および制御棒校正炉心の炉心配置を示す。この炉心は、特性測定基準炉心のE-5の燃料をEFEと交換した炉心で、EFEの等価反応度を反応度測定基準炉心と比較することによって求める。制御棒校正もこの炉心で実施した。

4.5 HEU 燃料反応度測定炉心

図4.9にHEU燃料反応度測定炉心の炉心配置図を示す。この炉心は、特性測定基準炉心のE-5の燃料をHEU新燃料と交換した炉心で、HEU新燃料要素の等価反応度を質量係数測定基準炉心と比較することによって求める。

4.6 熱中性子束測定炉心

図4.10に熱中性子束測定炉心の炉心配置図を示す。熱中性子束は、金箔による放射化法で測定した。U-238を多量に含んでいるEFEをHEU燃料だけで構成されている炉心の中に入れた場合の熱中性子減衰効果が隣接する燃料に及ぼす影響を見るため、E-5のEFEとその他のE列の全燃料要素について熱中性子束を測定した。

特性測定基準炉心のE-3, 4, 6, 7の燃料要素は定常運転に使用してきた燃料要素でその

放射能は非常に高く、測定のための金箔を取り付けることはできない。そこで、一時的に HEU 新燃料要素を用いることにし、余剰反応度調整のため、D-3とD-7の燃料をより燃焼度の進んだ燃料要素と交換した。従って、この炉心は、E列全部の燃料要素が新燃料の炉心である。

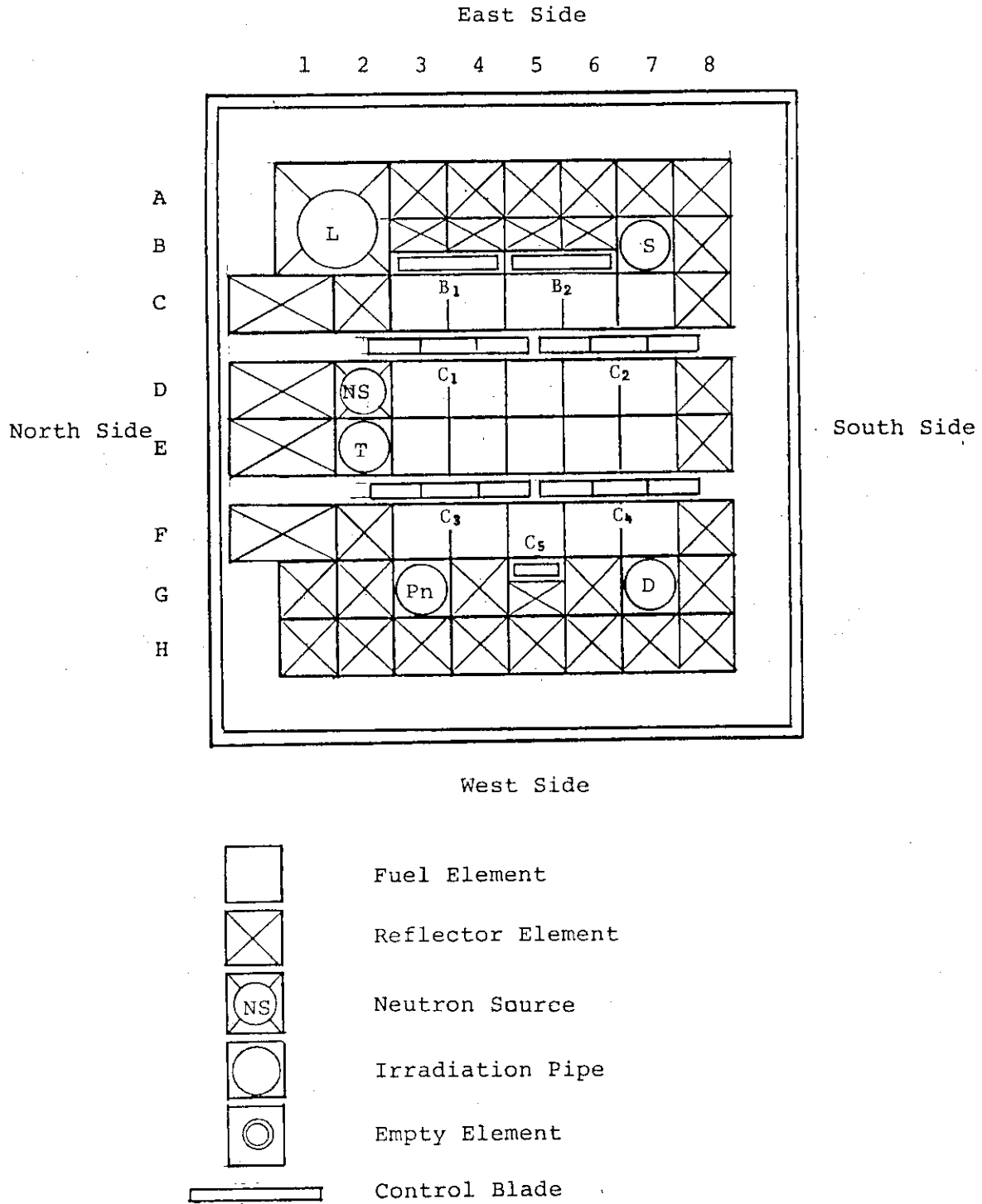


図4.1 JRR-4 炉心配置図

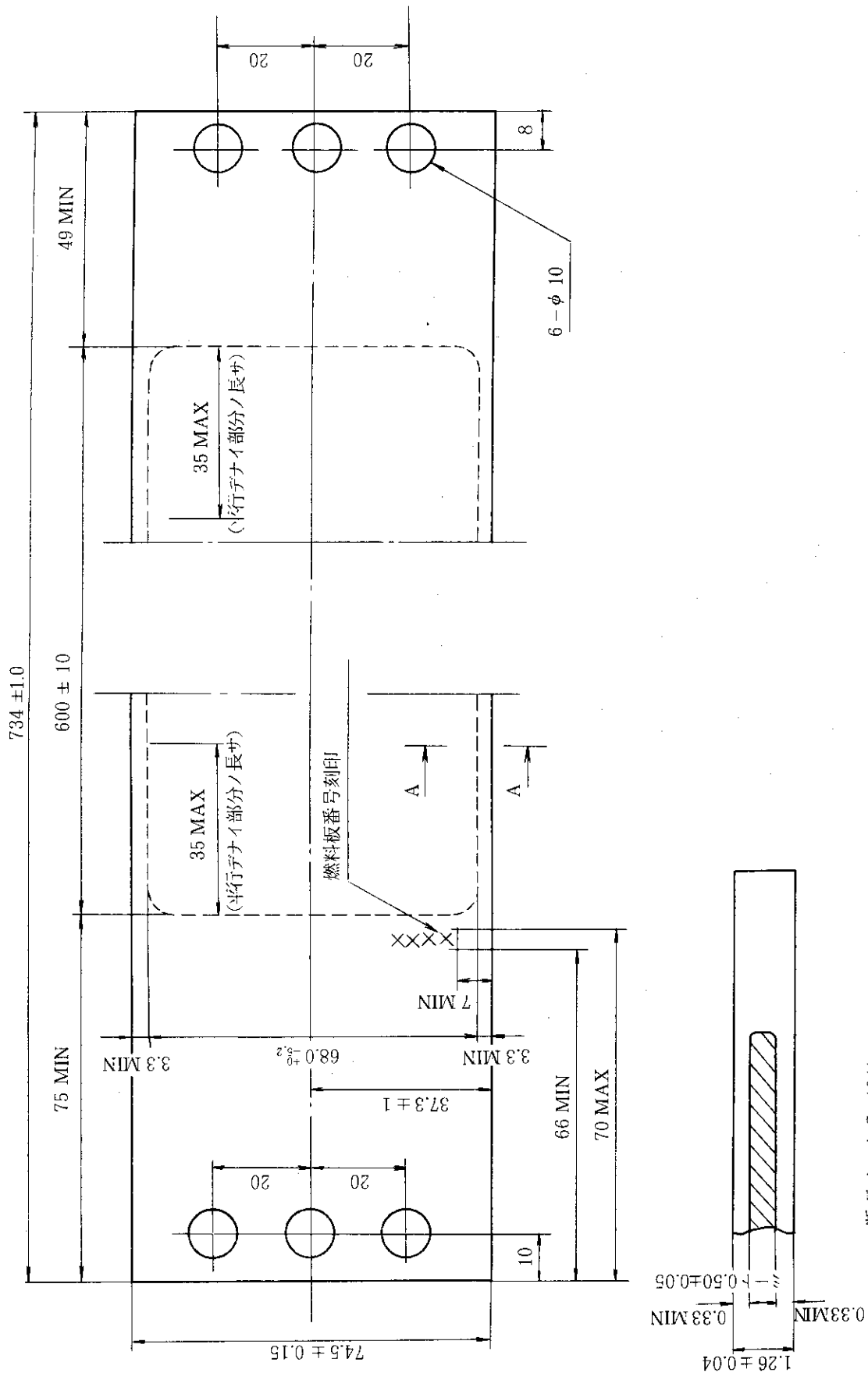


図 4.4 HEU B 型燃料要素外側燃料板

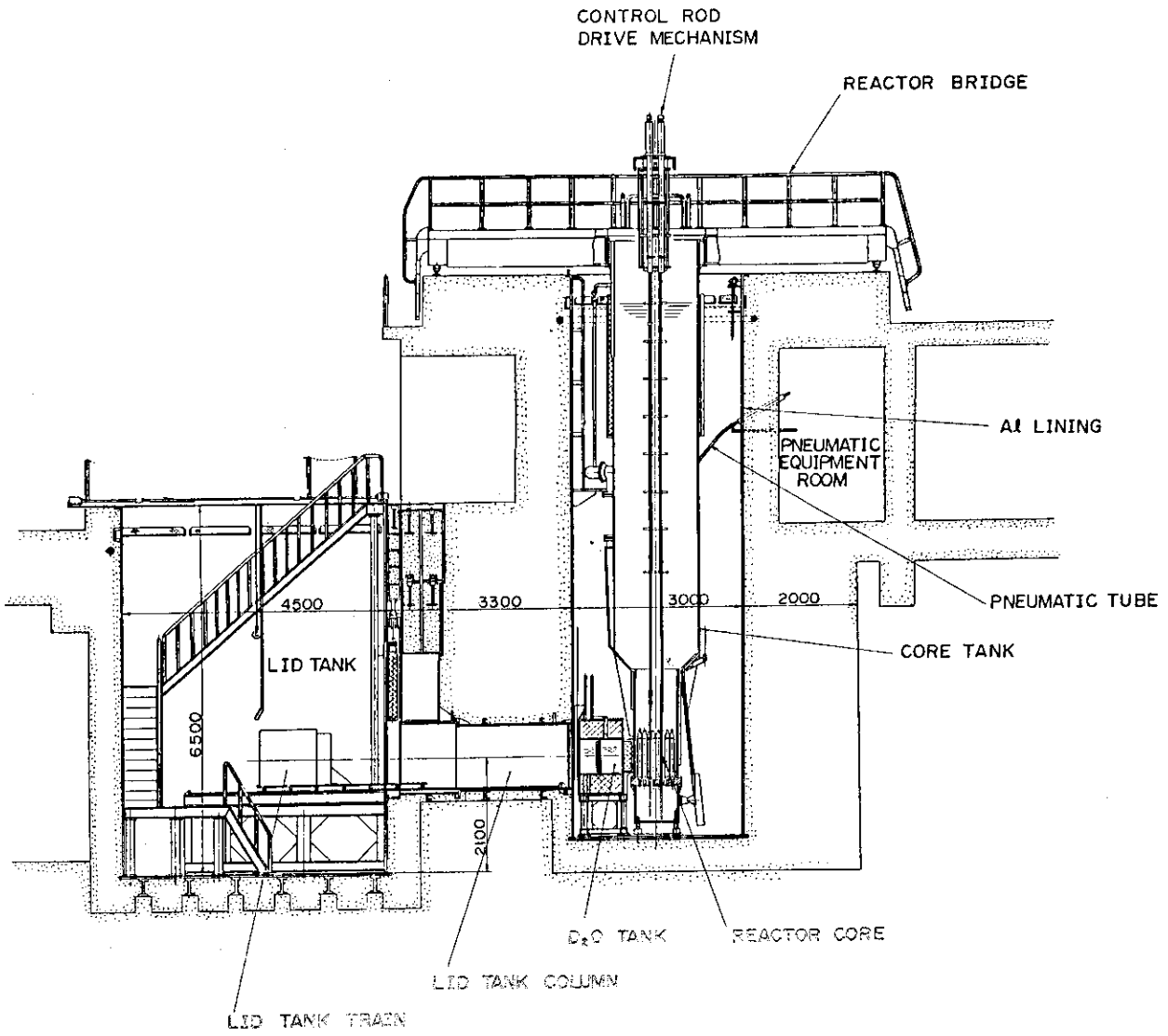
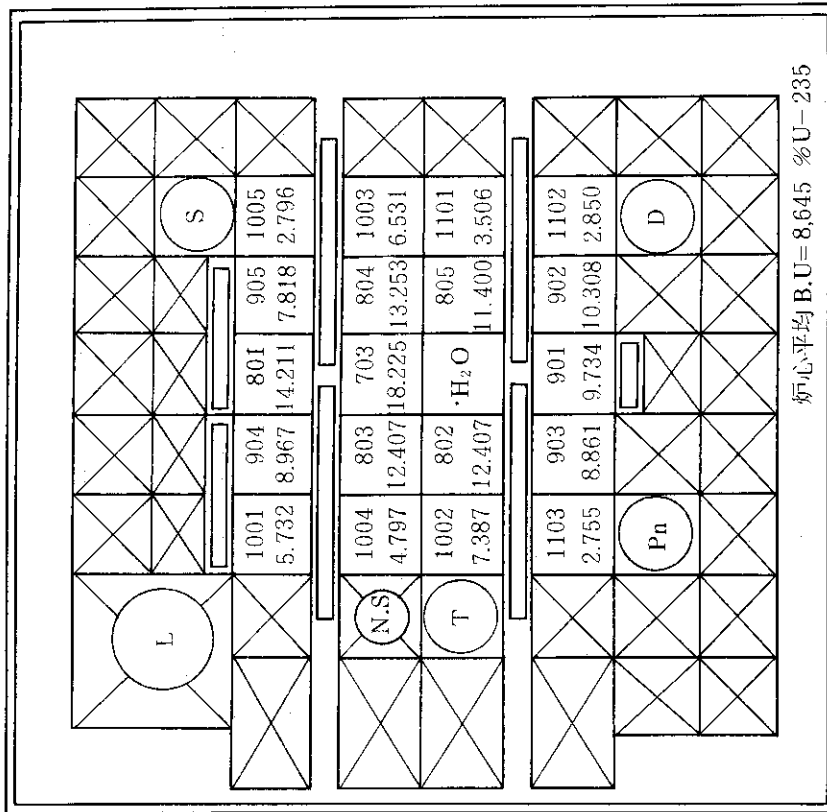
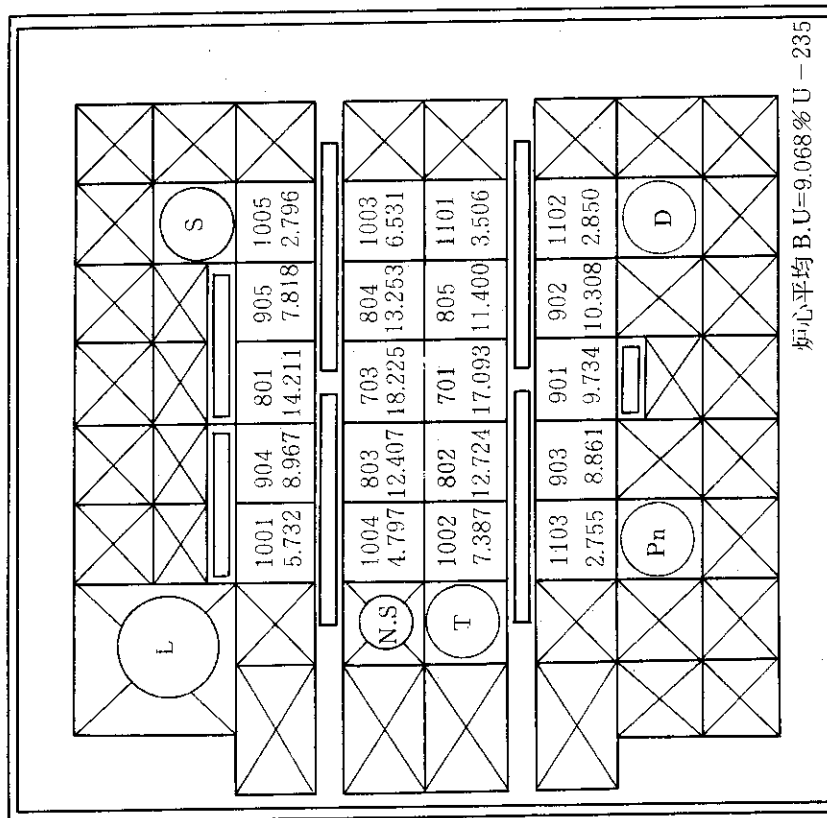


图4.5 JRR-4 断面图



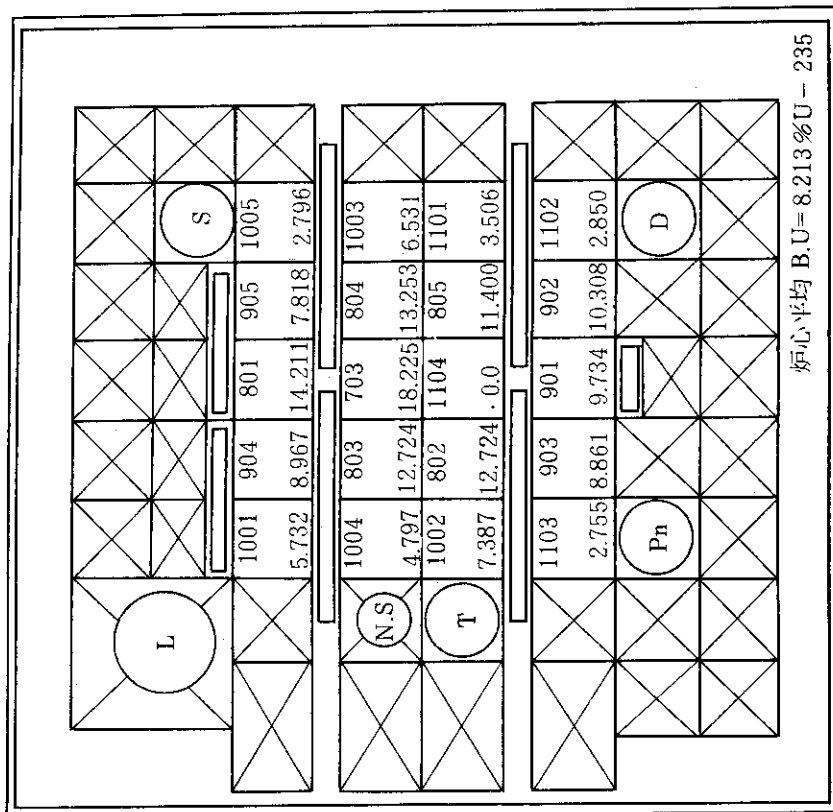
上段：要素番号
下段：燃焼度 (%U-235)

图 4.7 質量係数测定基准炉心



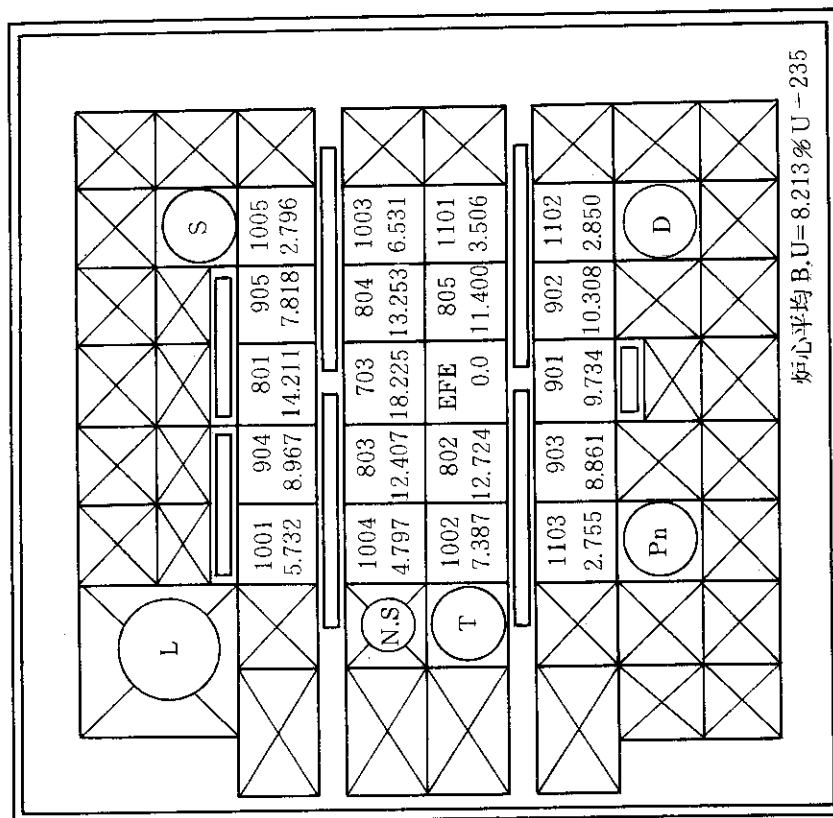
上段：要素番号
下段：燃焼度 (%U-235)

图 4.6 特性测定基准炉心配置图



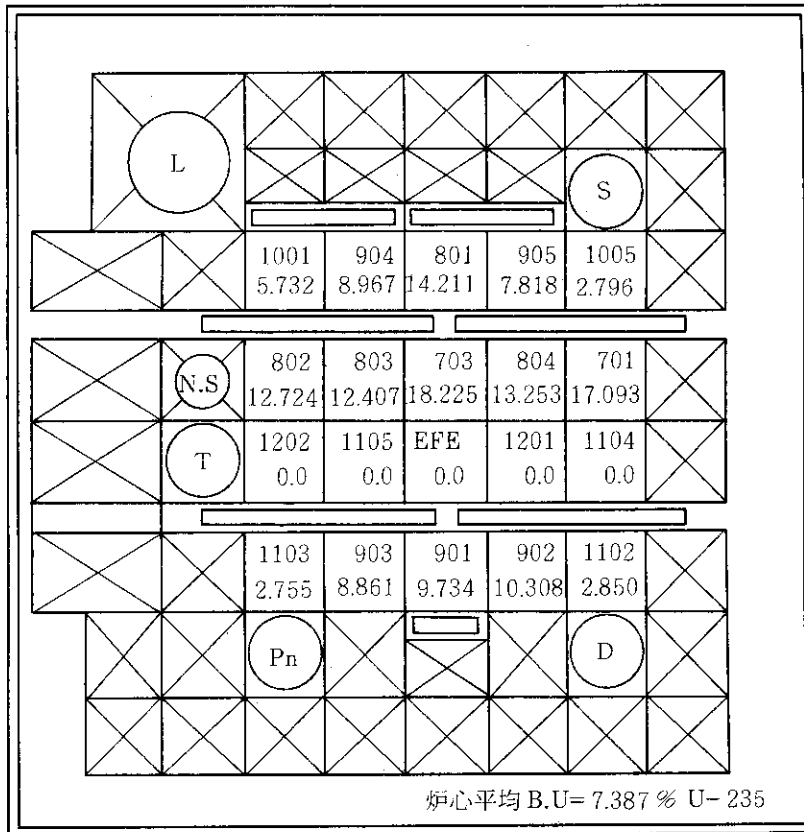
上段：要素番号
下段：燃焼度 (%U-235)

图 4.9 HEU 燃料反应度测定炉心配置图



上段：要素番号
下段：燃焼度 (%U-235)

图 4.8 EFE 反应度测定および制御棒校正炉心配置图



上段：要素番号
 下段：燃焼度（%U-235）

図 4.10 熱中性子束測定炉心配置図

5. 解析手法

核特性解析は、SRACコードシステムを用いて行った。解析手法は、ミシガン大学の2 MWスイミングプール型研究用原子炉「FNR」のLEU初期臨界炉心についてベンチマーク計算²⁾を行った時と同じ手法である。この解析手法は、JRR-4のLEU実証試験炉心の解析手法とも同じである。

本章では、少数群定数の作成、2次元臨界計算時の軸方向バックリングおよび制御棒等価反応度計算時の対数微分定数の設定について述べ、各特性測定毎の炉心解析法については、6, 7, 8章で述べる。

5.1 計算コードおよびライブラリ

SRACコードシステムは、熱中性子炉の核設計と解析を行うためのコードであり、中性子断面積ライブラリとそのための処理コード、種々の輸送、拡散理論コードおよび燃焼計算コード等で構成されている。その主なコードは次のとおりである。

- (1) PIJ : 衝突確率法による中性子スペクトルコード
- (2) TUD : 1次元体系拡散計算コード
- (3) CITATION : 1～3次元拡散計算コード
- (4) ANISN : 1次元体系 S_n 輸送理論コード
- (5) TWOTRAN : 2次元体系 S_n 輸送理論コード
- (6) CORE-BURN : 2～3次元体系拡散燃焼計算コード

使用したライブラリは、SRACのために用意されているもののうちENDF/B-IVを元に作成されている次のライブラリを使用した。

- (1) Fast LibraryFASTLIB
- (2) Thermal LibraryTHRMALB3, THRMALB2
- (3) Burn-up LibraryBURN (ENDFB2)

5.2 中性子エネルギー群構造

本解析のエネルギー群構造は、多数群61群、少数群3群である。この他に、少数群10群の群構造も用意した。これは、2次元炉心計算時の軸方向バックリングを決定する時、比較的エネルギー群構造の影響を受けない10群3次元で炉心計算を行い、その結果に合うようにバックリングを設定するようにしたためである。熱中性子カットオフエネルギーは0.6825 eVで、3群構造のエネルギー範囲は次のとおりである。

- (1) 高速中性子群 : 10 MeV ~ 1.83 KeV
- (2) 熱外中性子群 : 1.83 KeV ~ 0.6825 eV

(3) 熱中性子群 : 0.6825eV ~ 0.0eV

表 5.1 に多数群, 少数群のエネルギー群構造を示す。

5.3 少数群定数の作成

5.3.1 新燃料要素

新燃料要素の少数群定数作成は, 次の3ステップにより作成した。

ステップ1 燃料板基本セルの格子計算 (内・外側燃料板)

図 5.1 に示す燃料芯材, 被覆材, 減速材からなる単位燃料板セルについて, 1次元板状体系, 61群で燃料板基本セルの均質化断面積を作成した。このステップの計算条件は次のとおりである。

- (1) 体系温度 : 300 °K
- (2) 形状バックリング : k_{eff} が 1.0 になる値 (表 5.2 参照)
- (3) セル境界条件 : 全反射
- (4) 均質化断面積の作成 : 衝突確率法
- (5) ダンコフ係数 : 衝突確率法
- (6) 共鳴積分 : I R A 法
- (7) 縮約用スペクトル : B_1 近似

ステップ2 側板の断面積計算

側板は, アルミニウム金属のみの物質としたため, SRAC コードシステムに内蔵されている漸近スペクトルを用いて 61 群断面積を作成した。この漸近スペクトルは, 核分裂スペクトル, $1/E$ スペクトルおよびマックスウェルスペクトルで構成されている。

ステップ3 燃料要素基本セルの格子計算

図 5.2 に示す燃料板, 側板, 減速材からなる燃料要素セルについて, 2次元 X-Y 体系, 61 群で燃料要素基本セルについて均質化計算を行い, その後少数群に縮約し, 10 群および 3 群定数を作成した。この時, 燃料板および側板の多群断面積は, ステップ 1 および 2 で作成したものをを用いる。計算条件はステップ 1 と同じである。

図 5.3 ~ 図 5.4 に計算用体系図を示す。

5.3.2 燃焼燃料要素

HEU 燃料の燃焼が進んだ燃料要素の少数群定数は, 新燃料要素と同じ条件で次の 4 ステップにより作成した。

ステップ1 燃料板基本セルの格子燃焼計算 (内・外側燃料板)

新燃料要素と同じ体系, 計算方法により, 燃料板基本セルの燃焼計算を行う。燃焼計算の入力データは次のとおりである。

- (1) 燃焼ステップ : 5, 10, 15, 20, 30 (% ^{235}U)

- (2) 出力 : 3.223321×10^{-5} MW / (燃料芯材 $0.05 \times 1.0 \times 1.0$ cm)
 (3) 体積修正係数 : 1.0

ステップ2 ^{135}Xe を除外した燃料板基本セルの格子計算 (内・外側燃料板)

ステップ1で得られた燃焼時の組成から ^{135}Xe を除き、新燃料要素のステップ1と同じ方法で燃料板基本セルの格子計算を行い、各燃焼度に対応する多群均質化断面積を作成した。 ^{135}Xe を除外したのは、EFE核特性測定を3週間の定期自主検査の後行ったので、それ以前の運転で蓄積していた ^{135}Xe は特性測定時には完全に崩壊し、また、特性測定時の最大出力が1KW以下であるので、 ^{135}Xe の蓄積は無いと考えられたからである。

ステップ3 側板の断面積計算

新燃料要素の側板の断面積計算と同じ方法、同じ組成で側板の断面積を計算した。

ステップ4 燃焼燃料要素基本セルの格子計算

ステップ2および3で作成した断面積を用い、新燃料要素のステップ3と同じ方法により、各燃焼ステップに応じた燃焼燃料要素の10群および3群定数を作成した。

5.3.3 燃料以外の炉心構成要素

制御棒を除く燃料以外の構成要素については、軽水が含まれる構成要素については、新燃料要素基本セルの格子計算と同時に組成を与え、GAM・P1B1ステップで計算する燃料要素のスペクトルを用いて縮約を行った。軽水を含まない金属のみの物質は、側板と同じように漸近スペクトルを用いて縮約した。

5.3.4 制御棒

制御棒領域の少数群定数については、臨界計算での制御棒の取扱いを簡単にするため、周囲に軽水を含まない中性子吸収体(1.6%天然ボロン入りステンレス)のみの組成について3群定数を作成した。

制御棒の3群定数として、全ての群について衝突確率法で作成したマクロ断面積をそのまま用いると、制御棒の等価反応度を小さく計算するので、1,2群には衝突確率法で作成したマクロ断面積を用い、3群に対数微分定数を設定した。

(1) 衝突確率法による定数作成

図5.5に示す燃料要素、制御棒および軽水からなる1次元板状体系で61群計算を行い縮約し、制御棒だけの3群定数を作成した。主な計算条件は次のとおりである。

- (イ) 体系温度 : 300°K
 (ロ) 形状バックリング : $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-2}$
 (ハ) セル境界条件 : 全反射
 (ニ) 共鳴積分 : IRA法
 (ホ) 縮約用スペクトル : Extended Transport 近似

(2) 対数微分定数の設定

制御棒の3群に設定した対数微分定数は、図 5.6 に示す 1/4 炉心 2 次元体系で拡散計算 (CITATION による) と輸送計算 (TWO TRAN による) を行い、拡散計算で求めた粗調整安全板 4 板の等価反応度が輸送計算の結果と一致するように定数の値を調整することにより求めた。

輸送計算は P_0 , S_4 のオーダで行い、バックリングに対するオプションは、インプットしたバックリング高さに外挿距離を含めないオプションを選択した。

計算に使用したバックリングは、拡散計算には 3 群 2 次元拡散計算の結果が 10 群 3 次元拡散計算の結果に一致するようなバックリング $1.67276 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ を用いた。また、輸送計算には、3.1416 を拡散計算に用いたバックリングの平方根で除した値 76.81288 cm を用いた。

その結果、対数微分定数として 0.38915 を用いると拡散計算で求めた制御棒の等価反応度が輸送計算時の値と一致することが解ったので、この値を対数微分定数として設定した。

表 5.3 に輸送計算による制御棒の等価反応度と対数微分定数を 0.1 から完全黒体である 0.4692 まで変化させた場合の拡散計算による制御棒の等価反応度を示す。表中、対数微分定数の項で MACRO とあるのは、3 群にも衝突確率法で求めたマクロ断面積を使用した場合を示す。

5.4 2 次元炉心計算時の軸方向バックリングの設定

2 次元炉心計算時に使用する軸方向バックリングは、3 群 2 次元全炉心体系で計算した k_{eff} が 10 群 3 次元全炉心体系で計算した k_{eff} に一致するようなバックリングの値を 2 次元炉心計算時の軸方向バックリングとして設定した。設定時の炉心体系としては、3 次元計算時の計算精度を評価するため、図 5.7 に示す HEU 燃料 16 本炉心を選んだ。この炉心は、昭和 51 年 10 月、JRR-4 の最大熱出力を 2.5 MW から 3.5 MW に上昇する際の特異測定用炉心である。この炉心は燃焼度 0.0, 1.887, 2.808, 3.273 % ^{235}U の 4 本の HEU A 型燃料と 12 本の HEU B 型新燃料で構成されておりほぼコールドクリーンの炉心と言える。ここで、A 型燃料とは、燃料要素当りのウラン 235 含有量は B 型燃料と同一であるが、B 型燃料が外側燃料板のウラン 235 含有量が内側の半分になっているのに対し、全ての燃料板のウラン 235 含有量が均等になっている燃料要素である。

計算は、先ず 3 次元計算を行い、次いで 2 次元計算をバックリングを変化させて行い、3 次元計算の k_{eff} に一致するバックリングを求めた。3 次元計算は、10 群で全炉心を一度に計算するとメッシュ数が多く計算機の容量を超えるので、炉心を中央から 2 分割した東側 1/2 炉心と西側 1/2 炉心について計算し、両者の平均値を全炉心体系の計算値とした。制御棒位置は、全制御棒とも上限である。図 5.8 に Z 方向の計算体系図を示す。2 次元計算は、3 群全炉心で制御棒が無い体系で計算した。

以上の計算により設定した 2 次元炉心計算時の軸方向バックリングは $1.67276 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ である。表 5.4 にこのバックリングを用いた 2 次元と 3 次元計算の結果および実験値との比較を示す。なお、実験値は実験時の炉心温度が 24.5 °C であったので、計算と比較するため計算体系温度 27 °C に換算した等高臨界時の値である。用いた温度係数は、20 本燃料炉心で測定した -0.0132

% $\Delta k/k$ / $^{\circ}C$ である。表から、10群3次元全炉心体系の計算値は実験値に対し-0.22%の差で良い一致を示した。また、2次元計算の結果は3次元計算と一致しているの、設定したバックリングによる計算結果は実験値に対し約0.2%低めの結果を与えることになる。

表5.5は、16本燃料炉心配置で設定した軸方向バックリングを用い燃料本数の異なる炉心の計算を行った場合の計算誤差を評価したものである。評価は、図5.7に示した炉心体系の燃料本数を12, 16, 20本に変化させた3炉心について、東側1/2炉心の10群3次元計算と3群2次元全炉心計算の k_{eff} を比較する方法で行った。図5.9に12本, 20本燃料炉心の燃料配置図を示す。この計算に用いた2次元計算時の軸方向バックリングは、16本燃料2次元全炉心の k_{eff} が、同じ16本燃料炉心の3次元東側1/2炉心の k_{eff} に合うようなバックリングで、その値を他の炉心の計算にも用いた。その結果、2次元計算の k_{eff} は3次元計算に対し12本燃料炉心では0.02%低く、20本炉心では逆に0.02%高くなった。しかし、その差は小さく、本項で述べた方法によって求めた2次元炉心計算時の軸方向バックリングを燃料本数が異なる他の炉心の計算に適用しても問題ないことが明らかとなった。

表5.1 中性子エネルギー群構造

107G Library		61G	10G	3G
Group	Upper energy(eV)	Cell	Core	Core
1	1000 × 10 ⁰			
2	77880 × 10 ⁰	1		
3	60853		1	
4	47237			
5	36788	2		
6	28650			
7	22313			
8	17377	3		1
9	13534			
10	10540			
11	82085 × 10 ⁰	4		
12	63928		2	
13	49787			
14	38774	5		
15	30197			
16	23518	6		
17	18316			
18	14264	7		
19	11109			
20	86517 × 10 ⁰	8		
21	67379			
22	52475			
23	40868			
24	31828	9	3	
25	24788			
26	19305			
27	15034	10		
28	11709			
29	91188 × 10 ⁰	11		
30	71017			
31	55308			
32	43074	12		
33	33546			
34	26126			
35	20347			
36	15846	13		2
37	12341			
38	96112 × 10 ⁰	14		
39	74852			
40	58295			
41	45400			
42	35358	15	4	
43	27536			
44	21445			
45	16702	16		
46	13007			
47	10130			
48	78893 × 10 ⁰	17		
49	61442			
50	47851			
51	37267	18		
52	29023			
53	22603			
54	17603	19		
55	13710			

107G Library		61G	10G	3G
Group	Upper energy(eV)	Cell	Core	Core
56	10677 × 10 ⁰			
57	83153	20		
58	64760		5	
59	50435			
60	39279	21		
61	30590			
62	23824			
63	18554	22		
64	16374			
65	14450			
66	12752	23		
67	11254			
68	99312 × 10 ⁻¹			
69	87642	24		
70	77344			
71	68256	25	1	
72	60236	26	2	
73	53158	27	3	
74	46912	28	4	
75	41399	29	5	
76	38926	30	6	
77	36528	31	7	
78	34206	32	8	
79	31961	33	9	
80	29792	34	10	
81	27699	35	11	
82	25683	36	12	
83	23742	37	13	
84	21878	38	14	
85	20090	39	15	
86	18378	40	16	
87	16743	41	17	
88	15183	42	18	
89	13700	43	19	
90	12293	44	20	
91	10963	45	21	
92	97080 × 10 ⁻¹	46	22	
93	85397	47	23	
94	74276	48	24	
95	64017	49	25	
96	54520	50	26	
97	45785	51	27	
98	37813	52	28	
99	30602	53	29	
100	24154	54	30	
101	18467	55	31	
102	13543	56	32	
103	93805 × 10 ⁻¹	57	33	
104	59804	58	34	
105	33423	59	35	
106	14663	60	36	
107	35238 × 10 ⁻¹	61	37	

表 5.2 LEU, HEU 燃料の 1 点 B₁ 近似スペクトル計算に用いた形状バックリング
($k_{eff} = 1.0000$)

計算ステップ	LEU 燃料	HEU 燃料
内側燃料板基本セル計算	0.0114515	0.013713
外側燃料板基本セル計算	0.008830	0.0091235
燃料要素基本セル計算	0.008966	0.010205

表 5.3 輸送計算との比較による拡散計算用熱中性子群の対数微分定数の設定

計算コード	エネルギー群数	制御棒	対数微分定数	k_{eff}	$\rho(\% \Delta k/k)$	ρ_{CIT} / ρ_{TWO}
輸送計算 (TWO TRAN)	10	Full Out		1.14517307		
		Full In		0.92468828	20.822	
		Full Out		1.1108599		
拡散計算 (CITATION)	3	Full In	MACRO	0.9178953	18.963	0.911
			0.1	0.9588087	14.274	0.686
			0.2	0.9266033	17.901	0.860
			0.3	0.9107659	20.009	0.961
			0.38915	0.9021791	20.822	1.000
	0.4	0.9013458	20.925	1.005		
	0.4692	0.8967867	21.489	1.032		

注 内は最終設定値を示す。

表 5.4 2次元炉心計算時の軸方向バックリングの設定結果

炉心	実験 k_{eff} (E)	エネルギー群数	計算体系	軸方向バックリング (cm^{-2})	計算 k_{eff}	$C/E-1$ (%)
A・B混合16本燃料炉心	1.0692	10	3次元東側1/2炉心	—	1.0704	0.11
			3次元西側1/2炉心	—	1.0632	-0.56
			3次元全炉心 (東側+西側)/2	—	1.0668	-0.22
		3	2次元全炉心	1.67276×10^{-3}	1.0668	-0.22

表 5.5 12, 16, 20本燃料炉心の2次元と3次元炉心計算の計算誤差

炉心	3次元10群計算		2次元3群計算		C_2/C_3-1 (%)	
	計算体系	k_{eff} (C_3)	計算体系	軸方向バックリング (cm^{-2}) k_{eff} (C_2)		
B型12本炉心	東側1/2炉心	1.0110	全炉心	1.60652×10^{-3}	1.0108	-0.02
A・B型混合16本炉心	同上	1.0704	同上	同上	1.0704	0.0
A・B型混合20本炉心	同上	1.1069	同上	同上	1.1071	0.02

		減速材 H ₂ O	被覆 Al	燃料芯材 U+Al	被覆 Al	減速材 H ₂ O
M-Region		3	2	1	2	3
Sub-Region		1	2	3	4	5
T-Region		3	2	1	2	3
R-Region		3	2	1	2	3
X-Region		1	1	1	1	1
△X (cm)	LEU	0.205	0.0385	0.05	0.0385	0.205
	HEU	0.1675	0.038	0.089	0.038	0.1675

図 5.1 内側および外側燃料板基本セル格子計算モデル図

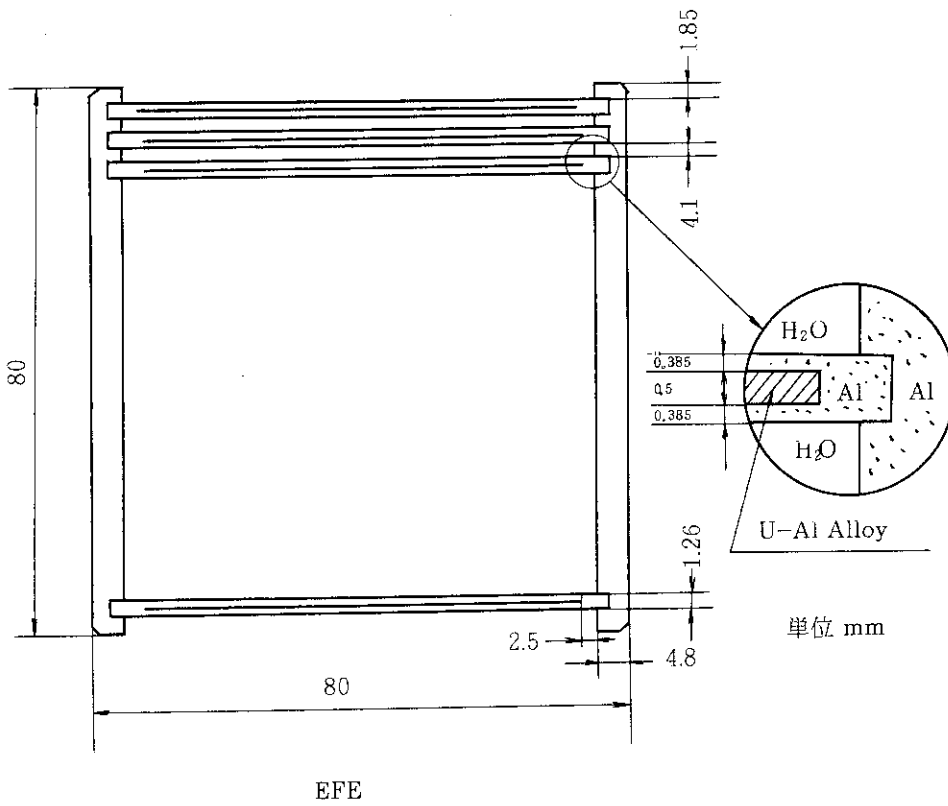
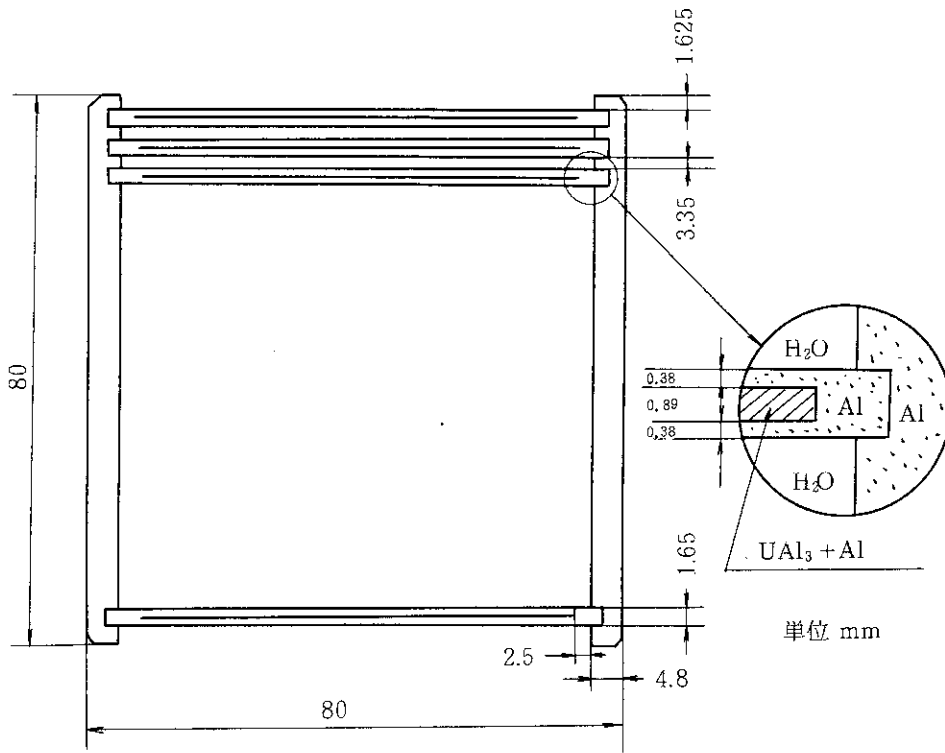
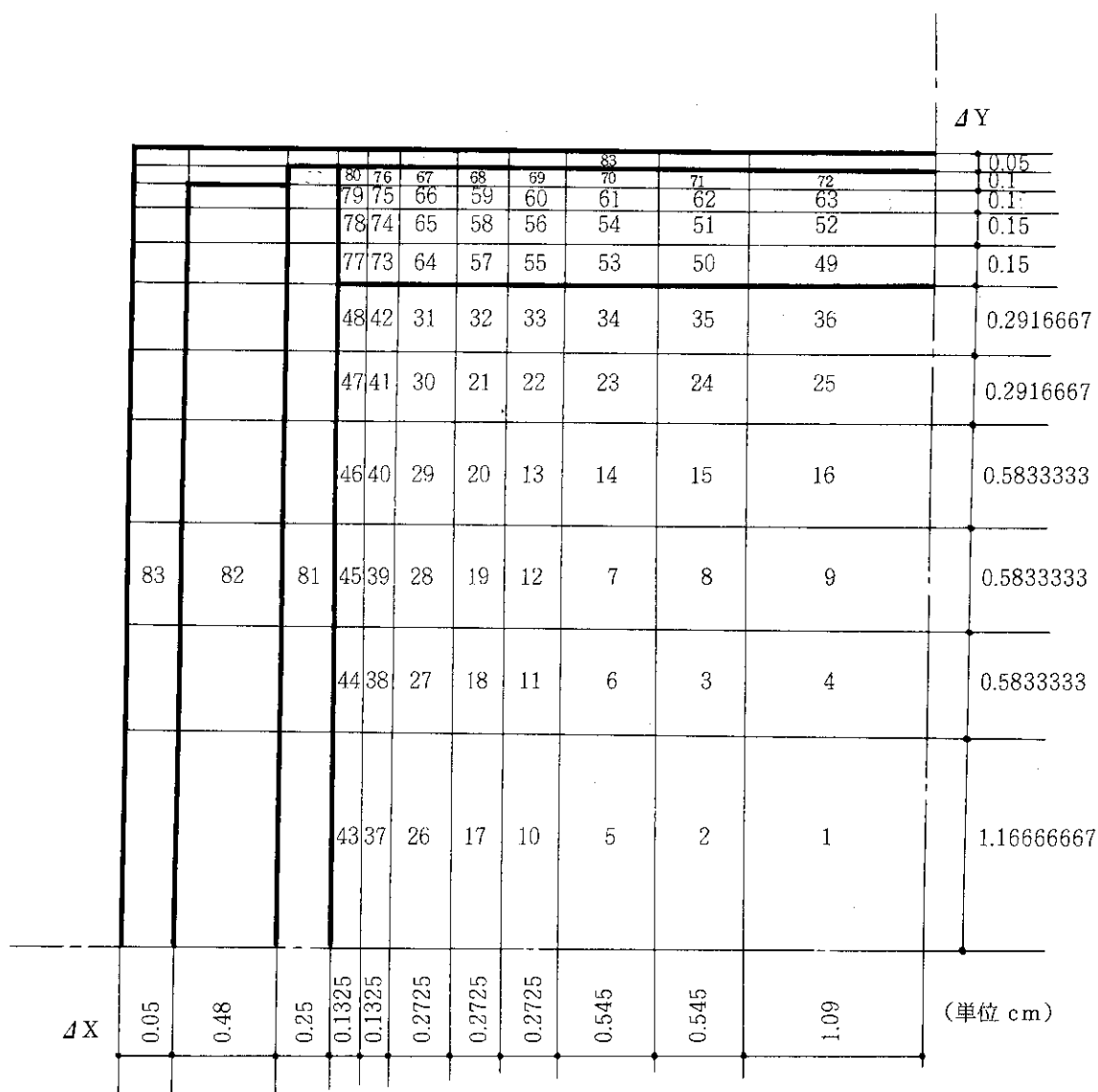
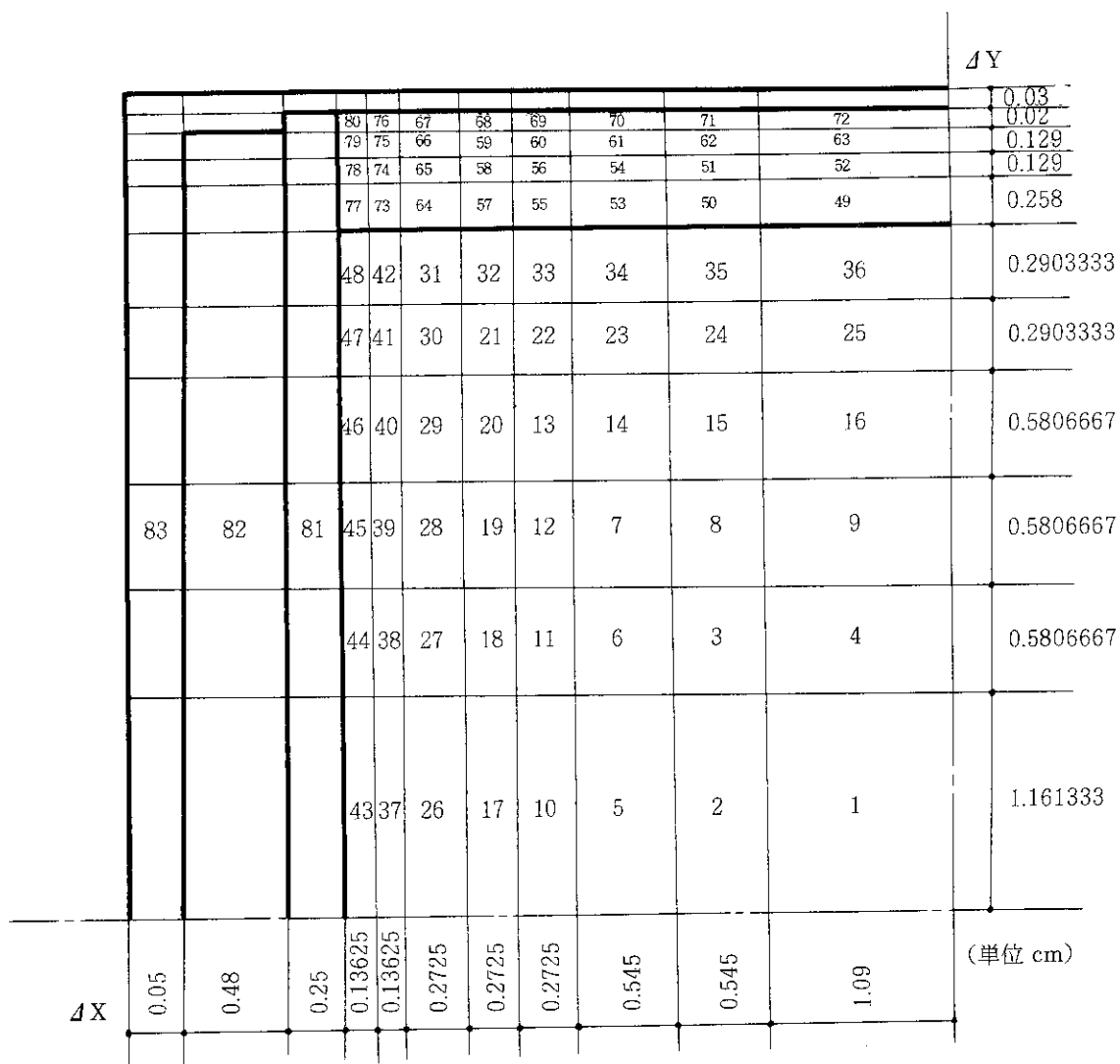


图 5.2 燃料要素断面图



T-Region	R-Region	M-Region	Mixture
1 ~ 9	1	1	Inner Fuel Plate Zone
10 ~ 36	2	1	
37 ~ 48	3	1	
49 ~ 63	4	2	Outer Fuel Plate Zone
64 ~ 80	5	2	
81	6	3	Al+H ₂ O
82	7	4	Side Plate
83	8	5	H ₂ O

図 5.3 EFE 群定数計算体系図



T-Region	R-Region	M-Region	Mixture
1 ~ 9	1	1	Inner Fuel Plate Zone
10 ~ 36	2	1	
37 ~ 48	3	1	
49 ~ 63	4	2	Outer Fuel Plate Zone
64 ~ 80	5	2	
81	6	3	Al+H ₂ O
82	7	4	Side Plate
83	8	5	H ₂ O

図 5.4 HEU 燃料群定数計算体系図

	HEU 均質化燃料要素	H ₂ O	制御板	H ₂ O	HEU 均質化燃料要素
M-Region	1	2	3	2	1
Sub-Region	1	2	3	4	5
T-Region	1~8	9, 10	11, 12, 12, 11	10, 9	8~1
R-Region	1	2	3	2	1
ΔX (cm)	5 * 1.35, 1 * 0.675, 2 * 0.3375	2 * 0.125	4 * 0.125	2 * 0.125	2 * 0.3375, 1 * 0.675, 5 * 1.35

図 5.5 制御棒群定数計算体系図

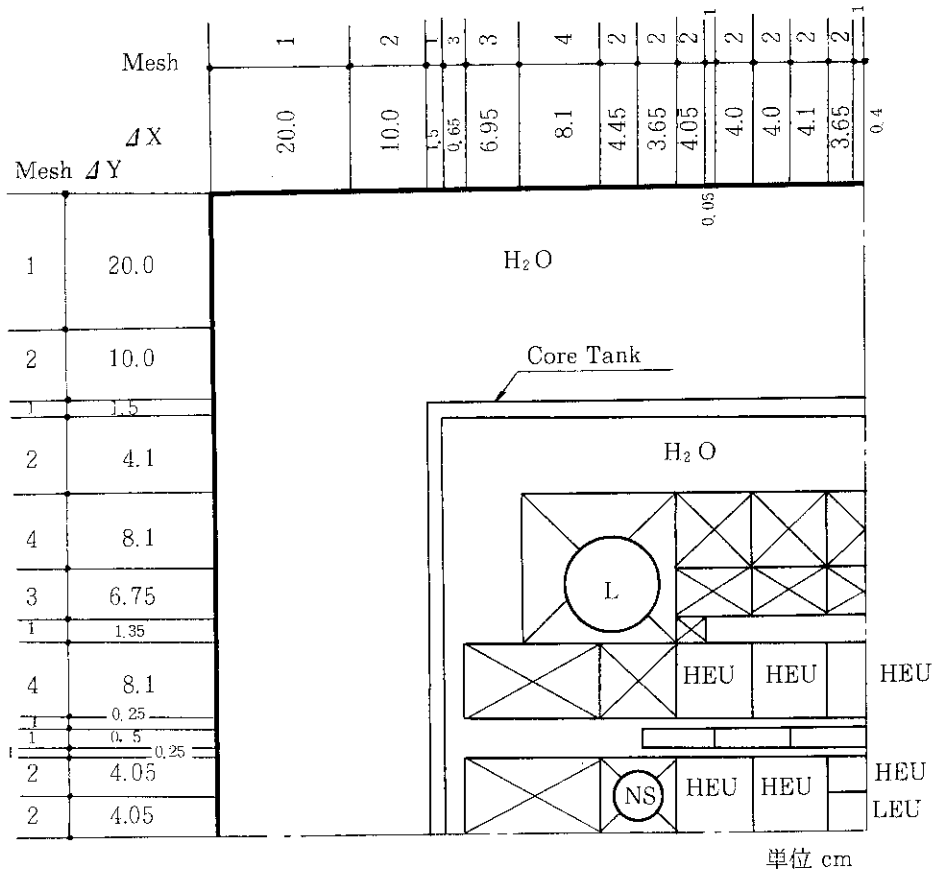
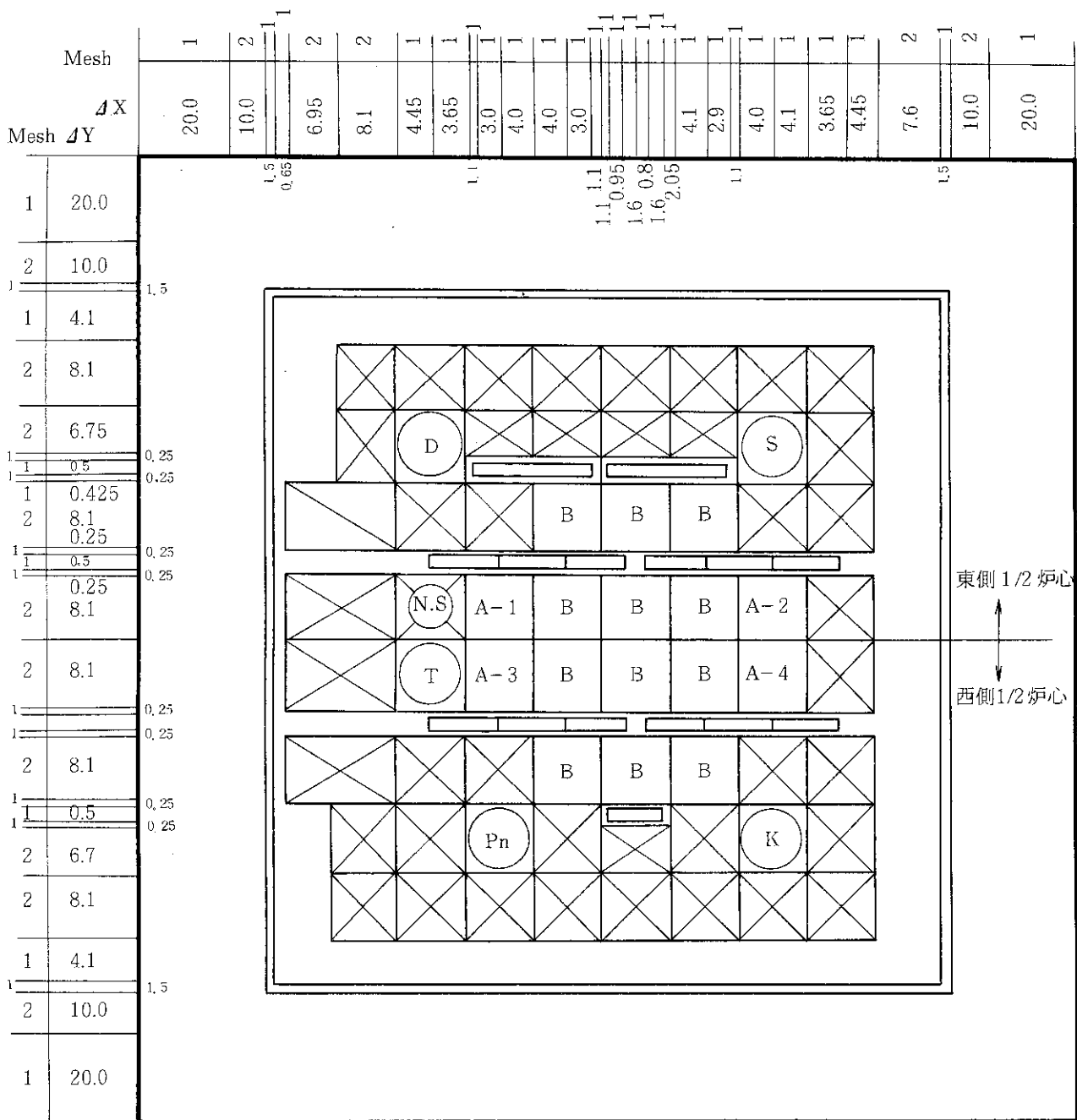


図 5.6 対数微分定数設定のための 2次元
1/4 炉心計算体系図



(単位 cm)

- Note : B.....HEU B 型新燃料
 A-1HEU A 型燃料 燃焼度 2.808 %
 A-2 " " 0.0 %
 A-3 " " 1.887 %
 A-4 " " 3.273 %

図 5.7 HEU A・B 混合 16 本燃料炉心 2 次元および 3 次元計算体系図 (X-Y 平面)

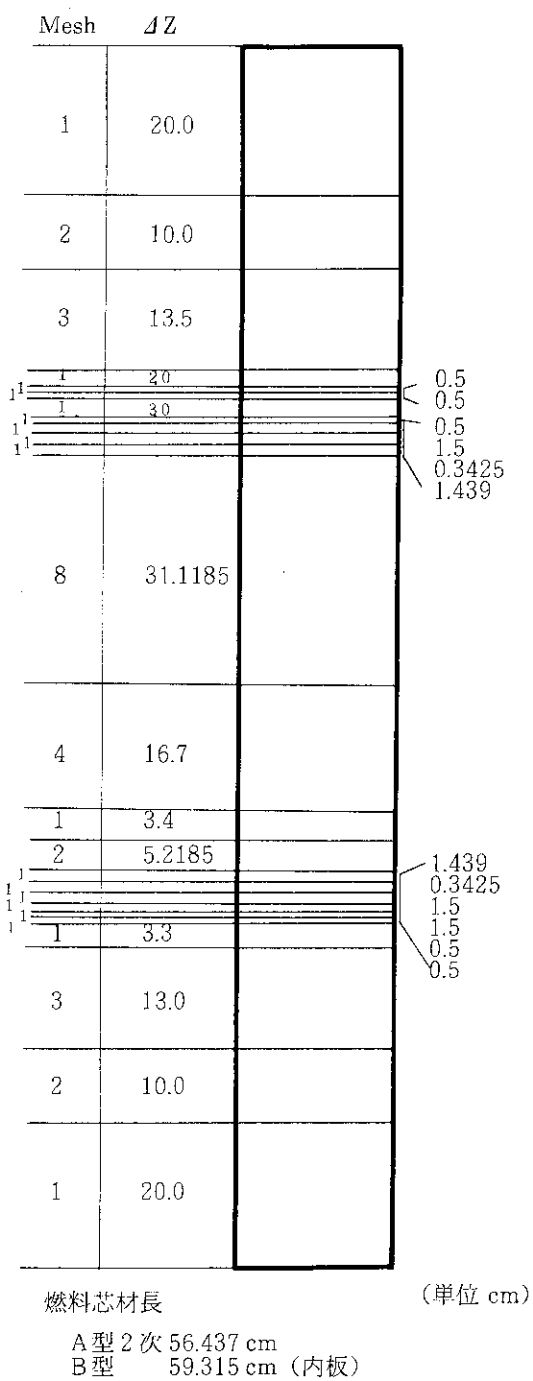


図 5.8 HEU A.B 混合燃料炉心
 Z方向メッシュ分割図

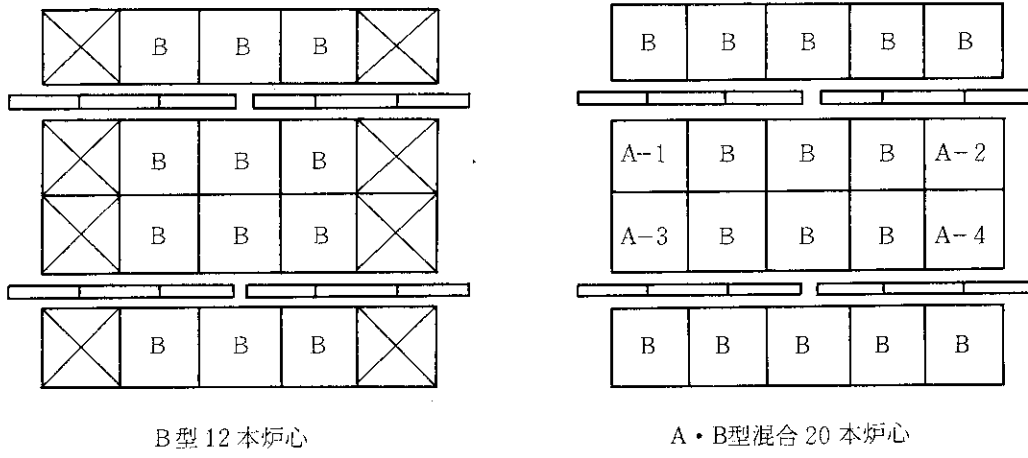


图 5.9 HEU 12, 20 本炉心燃料配置图

6. 制御棒校正と解析

JRR-4には粗調整安全棒 ($C_1 \sim C_4$) 4本, 微調整棒 (C_5) 1本, 後備安全棒 (B_1, B_2) 2本の制御棒がある。制御棒校正実験では, これらの制御棒の等価反応度と微調整, 粗調整安全棒の等価反応度の微分値を測定した。

解析は, 2次元および3次元体系で3群計算を行い, 各制御棒の等価反応度を求めた。

6.1 測定方法

測定は, 通常 JRR-4 で行なわれている Positive Period 法と比較法を用いた。測定時の炉心配置は図 4.8 に示したとおりである。この炉心は, HEU燃料 20 本で構成されている炉心の E-5 の燃料を EFE と置き換えた炉心である。測定時の制御棒の組み合わせは, 粗調整安全棒については C_4 と C_1 , C_3 と C_2 を組み合わせ, Period 法と比較法を併用し 2 本同時に測定した。Period 法で測定した制御棒は C_4 と C_3 である。微調整棒は Period 法で測定し C_1 で補償した。また, 後備安全棒は校正済みの C_3 と C_4 との比較法で測定した。

6.2 測定結果

測定の結果, 全ての制御棒の等価反応度は制限値内であった。

表 6.1 に測定結果を, 表 6.2 ~ 6.4 に後備安全棒, 粗調整安全棒, 微調整安全棒の測定データを示す。また, 図 6.1 ~ 6.2 に粗調整安全棒および微調整棒の等価反応度の積分, 微分曲線を示す。

6.3 計算方法

制御棒等価反応度計算は, CORE-BURN コードを用い, エネルギー群 3 群で 2 次元, 3 次元の両体系で $C_1 \sim C_5$, B_1, B_2 の制御棒 1 本毎の等価反応度と B_1, B_2 同時挿入時の等価反応度を求めた。計算時の炉心配置は制御棒校正実験時と同じである。3 群定数は, 燃料要素については各燃料の燃焼度に応じた定数を用いたが, 燃料以外の構成物質については, コールドクリーン時のものを用いた。これは, 他の項目についても同じである。制御棒の 3 群に適用する対数微分定数は, 5.3.4(2)で設定した値を用いた。

6.3.1 2次元計算による制御棒等価反応度

2次元体系による制御棒等価反応度計算は, 図 6.3 に示す 2次元体系で, 全制御棒が引き抜かれた状態と, 計算しようとする制御棒が挿入された状態の k_{eff} からその制御棒の等価反応度を次式で求めた。

$$\rho (\% \Delta k / k) = \left(\frac{k_{OUT} - k_{IN}}{k_{OUT} \times k_{IN}} \right) \times 100$$

この時、他の制御棒は全て引き抜きの状態とし、軸方向バックリングは5.4で求めた値を用いた。

表6.5に計算結果と測定値との比較を示す。

6.3.2 3次元計算による制御棒等価反応度

3次元体系のX-Y平面の計算体系を図6.4に、Z方向のメッシュ分割図を図6.5に示す。この計算での燃料要素のZ方向の燃焼度分布は、各燃料要素とも全長にわたりその燃料要素の平均燃焼度で均一に燃焼しているものとした。また、制御棒の初期設定は、10月23日に制御棒校正炉心と同じ炉心配置でEFEの反応度を測定した時の臨界時の制御棒位置（C₁～C₄：354 mm, C₅：279 mm, B₁, B₂：上限）に設定した。

C₁～C₅の各制御棒の等価反応度は、計算する制御棒を初期設定状態から上限および下限位置に移動し、その時のk_{eff}の差から求めた。この時、他の制御棒位置は初期設定の状態とした。また、B₁, B₂については初期設定状態からB₁, B₂, B₁+B₂下限の各計算を行い、初期設定時のk_{eff}との差から等価反応度を求めた。

表6.6に計算結果と測定値との比較を示す。

6.4 計算と測定結果の比較

2次元計算における制御棒等価反応度の計算結果は、測定値と比較した場合、粗調整安全棒で約-5～9%、微調整棒で約-0.7%で比較的良好一致を示した。しかし、後備安全棒の比較では約-18～-26%となり、計算値がかなり低い値を示した。

3次元計算における計算結果と測定値との比較では、粗調整安全棒のうちC₁～C₃は約+2～4%、C₄は約-2%で測定値と良好一致を示したが、微調整棒のそれは約-8%と2次元計算より約7%低い値を示した。後備安全棒については、2次元計算とほぼ同じ結果であった。

2次元計算と3次元計算の計算結果の差は、2次元計算では、計算しようとする制御棒だけを挿入状態にし、他の制御棒は全引抜きの状態で計算するのに対し、3次元計算は、他の制御棒についても測定時の制御棒パターンに近い状態に設定しているため、この違いによって生じたものと思われる。また、後備安全棒の等価反応度が測定値に対し1本毎では約25%、同時挿入では約19%低いのは、対数微分定数を設定する時の体系の燃料を全て新燃料で計算したのに対し、本解析では各燃料の燃焼度を各々考慮したのでこの影響が反射体の前面に置かれている後備安全棒の等価反応度に現われたものと考えられる。この事は、図5.7に示したHEU A・B混合16本燃料炉心について本解析と同じ手法により制御棒の等価反応度を計算した結果（附録A-2参照）、後備安全棒の計算結果がB₁で約-3%、B₂で約-10%、同時挿入で+4%と測定値と比較的良好一致を示したことから推定できる。

制御棒の等価反応度を計算から予測する上では、以上の結果から3次元計算の方が良い結果を

与えるが、2次元計算でも予測可能である。後備安全棒については、今後の検討が必要である。

表 6.1 制御棒等価反応度測定結果

測定日：1984・10・30～31

制 御 棒		等価反応度 (% $\Delta k/k$)	規 制 値 (% $\Delta k/k$)
粗調整安全棒	C ₁	4.085	< 6
	C ₂	4.203	< 6
	C ₃	4.096	< 6
	C ₄	4.485	< 6
粗調整安全棒合計	C ₁ ~C ₄	16.869	> 14
微調整棒	C ₅	0.550	> 0.2
後備安全棒	B ₁	1.072	-
	B ₂	1.397	-
	B ₁ +B ₂	2.001	> 1.5

表 6.2 後備安全棒等価反応度測定データ

測定日：1984・10・30

	1	2		3		4	
		B ₁ 下限臨界時		B ₁ B ₂ 下限臨界時		B ₂ 下限臨界時	
	測定開始時の制御棒位置 (mm)	制 御 棒 位 置 (mm)	ステップ1 に対して加わった- ρ (%)	制 御 棒 位 置 (mm)	ステップ1 に対して加わった- ρ (%)	制 御 棒 位 置 (mm)	ステップ1 に対して加わった- ρ (%)
C ₅	300	300	0.0	300	0.0	300	0.0
C ₁	353	484	1.072	484	1.072	353	0.0
C ₂	353	353	0.0	460	0.929	563	1.397
C ₃	353	353	0.0	353	0.0	353	0.0
C ₄	353	353	0.0	353	0.0	353	0.0
B ₁	上 限	下 限	-	下 限	-	上 限	-
B ₂	上 限	上 限	-	下 限	-	下 限	-
	等価反応度 (% $\Delta k/k$)		1.072		2.001		1.397
測定結果							
1. B ₁ のみを落下させた時炉に加わる反応度 ; 1.072 % $\Delta k/k$							
2. B ₂ " " ; 1.397 "							
3. B ₁ , B ₂ 同時に落下させた時に加わる反応度; 2.001 "							

表 6.3.1 粗調整安全棒等価反応度測定データ (C₄-C₁)

Rod calibration by period & comparison method												Initial power 10W						
Rod calibration by period & comparison method												Core temperature 21.5°C						
Rod calibration by period & comparison method												Coolant flow 1.0 d/min						
Rod calibration by period & comparison method												Date 1984.10.30 CR						
Rod calibration by period & comparison method												Group 大塚 幸彦 有全 茂也						
Rod calibration by period & comparison method												C-4 (Period method)						
Rod calibration by period & comparison method												C-1 (Comparison method)						
No	Rod position (mm)		Waiting time	Doubling time (sec)		ρ	ρ 650-H (%)	ΔH at H (%/mm)	Rod position (mm)		ρ 650-H (%)	ΔH at H (%/mm)	Other rods position (mm)					
	Indication	Δ H		H	H				H									
1	10 → 92	92	46	10.2	14.9	15.0	15.3	15.4	15.2	0.2047	4.8496	0.002234	649 → 338	111	493.5	0.20457	0.001843	C-5 300
2	130	38	111	24.6	16.4	16.4	16.6	16.6	16.5	0.19447	4.28039	0.005144	494	44	516	0.46004	0.004443	C-2 434
3	152	28	144	24.2	15.1	15.0	15.2	15.3	15.2	0.20457	4.08492	0.007306	460	34	477	0.60461	0.004017	C-3 438
4	181	23	169	27.6	15.6	15.5	15.7	15.8	15.7	0.20095	3.88235	0.008737	432	28	446	0.80556	0.007177	
5	201	20	191	28.0	15.3	15.5	15.5	15.5	15.5	0.20238	3.67940	0.010119	408	24	420	1.00794	0.008433	
6	219	18	210	30.4	16.0	15.9	16.4	16.4	16.2	0.19748	3.47282	0.010971	386	22	397	1.20542	0.008976	
7	236	17	227	31.1	16.1	16.0	16.4	16.3	16.2	0.19748	3.27954	0.011616	365	21	375.5	1.40290	0.009404	
8	252	16	244	34.6	17.3	17.4	17.6	17.6	17.5	0.18907	3.08206	0.011817	346	19	355.5	1.59197	0.009951	
9	268	16	260	31.9	16.4	16.4	16.5	16.4	16.4	0.19613	2.89299	0.012258	327	19	336.5	1.78310	0.010223	SCRAM
10	284	16	276	30.3	15.7	15.7	15.8	15.8	15.8	0.20025	2.69686	0.012516	309	18	318	1.98235	0.011125	
11	300	16	292	29.9	15.7	15.6	15.9	15.8	15.8	0.20025	2.49661	0.012516	292	17	300.5	2.18860	0.011779	
12	316	16	308	32.4	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	0.19415	2.29636	0.012124	274	18	283	2.38275	0.010789	
13	332	16	324	35.0	18.0	17.9	17.9	18.1	18.0	0.18605	2.10221	0.011628	258	16	266	2.56880	0.011628	
14	349	17	340.5	30.1	16.1	16.2	16.1	16.2	16.2	0.19748	1.91616	0.011616	240	18	249	2.76628	0.010971	
15	367	18	358	29.2	16.0	15.9	16.1	16.1	16.0	0.19885	1.71868	0.011047	221	19	230.5	2.96573	0.010466	
16	386	19	376.5	28.4	15.8	15.7	15.9	15.9	15.8	0.20025	1.51983	0.010539	202	19	211.5	3.16538	0.010539	
17	407	21	396.5	24.2	14.5	14.5	14.7	14.7	14.6	0.20911	1.31958	0.009958	179	23	190.5	3.37449	0.009092	
18	430	23	418.5	23.3	14.7	14.7	14.5	14.6	14.6	0.20911	1.11047	0.009092	153	26	166	3.58360	0.008043	
19	456	26	443	22.3	14.8	14.7	14.9	14.9	14.9	0.20881	0.90136	0.007954	120	33	136.5	3.79041	0.006267	
20	488	32	472	16.5	13.2	13.2	13.5	13.5	13.4	0.21895	0.69455	0.006842	64	56	92	4.00936	0.003910	
21	525	37	506.5	19.9	15.9	16.0	15.9	15.9	15.9	0.19995	0.47556	0.005404						C-3 300
22	570	45	542.5	34.0	22.1	22.8	23.0	23.1	23.0	0.16689	0.27665	0.003575	0 → 64					C-2 414
23	649	79	609.5	51.1	38.3	38.5	38.7	38.7	38.6	0.11476	0.11476	0.001453						C-3 414
24																		
25																		
26	0 → 64	64			65.7	65.7	68.8	68.8	67.8	0.07579								
27																		

表 6.3.2 粗調整安全棒等価反応度測定データ (C₃-C₂)

Rod calibration by period & comparison method

(L型実用燃料要素 使用前検査)

Date 1984. 10. 31 (水)

測定場所: 原子力研究所

Initial power 10W

Core temperature C 21.3

Coolant flow 1.0 m³/min

C-3 (Period method)										C-2 (Comparison method)										Other rods position (mm)
Rod position (mm)		Wait-log time	Doubling time (sec)		Mean	ρ (650-H) (%)	ρ ΔH at H (%/mm)	Rod position (mm)		ρ (650-H) (%)	ρ ΔH at H (%/mm)	Rod position (mm)		ρ (650-H) (%)	ρ ΔH at H (%/mm)					
N _i Indication	Δ H		100W-200W	300W-600W				H	H			H	H							
1	0 → 92	23.3	19.3	19.6	19.7	19.7	19.6	0.17708	4.09598	0.001924	0.001924	650	59.8	0.17708	0.0017027	C ₃ 300				
2	130	28.4	17.7	17.7	17.8	17.8	17.8	0.18725	3.91890	0.004928	0.004928	501	45	0.36433	0.004161	C ₁ 400				
3	158	31.1	17.6	17.5	17.4	17.5	17.5	0.18307	3.073165	0.006753	0.006753	467	34	0.85340	0.005561	C ₁ 420				
4	181	31.4	17.0	16.9	17.1	17.0	17.0	0.19221	3.54358	0.008357	0.008357	439	28	0.74561	0.008865					
5	201	33.9	17.3	17.3	17.5	17.5	17.4	0.18969	3.35037	0.009485	0.009485	416	23	0.93330	0.008247					
6	219	35.6	17.7	17.7	17.9	18.0	17.8	0.18725	3.16068	0.010403	0.010403	395	21	1.12255	0.008917					
7	236	36.1	17.9	17.9	17.8	17.8	17.9	0.18665	2.97343	0.010979	0.010979	375	20	1.30920	0.009333					
8	252	41.0	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	0.17761	2.78678	0.011101	0.011101	357	18	1.48681	0.009847					
9	268	36.8	17.9	18.0	18.1	17.9	18.0	0.18546	2.42312	0.011226	0.011226	340	17	1.67286	0.010944					
10	284	36.9	17.9	17.9	18.3	18.3	18.3	0.18546	2.42312	0.011591	0.011591	324	16	1.85832	0.011591					
11	300	35.5	17.7	17.7	17.8	17.8	17.8	0.18725	2.23766	0.011703	0.011703	308	16	2.04557	0.011703					
12	316	36.9	18.1	18.2	18.3	18.3	18.2	0.18487	2.05041	0.011584	0.011584	292	16	2.23044	0.011584					
13	332	37.2	19.2	19.2	19.3	19.3	19.3	0.17869	1.86154	0.011168	0.011168	277	15	2.41534	0.011913					
14	349	38.0	18.6	18.8	19.0	19.2	18.9	0.18088	1.67885	0.010640	0.010640	262	15	2.59001	0.012059					
15	367	36.6	18.6	18.7	18.7	18.8	18.7	0.18200	1.50597	0.010111	0.010111	247	15	2.77201	0.012132					
16	386	35.4	18.0	18.2	18.3	18.2	18.2	0.18487	1.32397	0.009730	0.009730	231	16	2.95688	0.011554					
17	407	34.4	17.9	18.0	18.4	18.3	18.3	0.18087	1.13910	0.009803	0.009803	214	17	3.14175	0.010875					
18	430	35.8	18.7	18.6	18.9	18.9	18.8	0.18124	0.95423	0.009289	0.009289	196	18	3.32319	0.010080					
19	456	33.2	18.7	18.6	18.7	18.8	18.7	0.18200	0.77279	0.009700	0.009700	177	19	3.50519	0.009579					
20	488	27.6	17.6	17.8	—	17.9	17.8	0.18725	0.59079	0.008852	0.008852	154	23	3.69244	0.008247					
21	525	35.1	21.3	21.3	21.6	21.6	21.5	0.16761	0.40354	0.004530	0.004530	129	25	4.11386	0.006704					
22	570	32.6	29.3	29.4	29.8	29.8	29.6	0.13719	0.23593	0.003049	0.003049	102	27	3.99724	0.005081	C ₃ 300				
23	610	26.3	47.5	47.5	47.8	47.8	47.7	0.08874	0.09874	0.001219	0.001219	72	30	4.09598	0.003291	C ₁ 420				
24	Period											0	72	4.20371	0.001422	C ₁ 420				
25	Period																			
26	0 → 72	26	85.8	42.5	42.5	42.5	42.8	0.10673	4.20271	0.001422	0.001422									
27																				

表 6.4 微調整棒等価反応度測定データ (C5)

Initial power 10W
 Core temperature 21.4°C
 Coolant flow 1.0 m³/min

Rod calibration by period & comparison method

Date 1984.10.31 (木)
 Group 大塚 邦 稔 彦 博

(L型実験用燃料棒等価 使用前検査)

C-5 (Period method)										C-1 (Comparison method)					Other rods position (mm)
Rod position (mm)		Waiting time	Doubling time (sec)			Mean	ρ (%)	ρ_{650-H} (%)	ΔH at H (%/mm)	Rod position (mm)		ρ_{650-H} (%)	ΔH at H (%/mm)		
No.	Indication		1.0 W-2.0 W	3.0 W-6.0 W	time					H	H				
1	103	103	51.5	121.2	104.3	104.3	112.5	112.5	108.4	0.05185	0.54979	0.000503	363		
2	181	78	142	44.0	45.0	45.1	48.1	48.0	46.6	0.10042	0.49774	0.001287	345		
3	241	60	211	46.0	46.4	46.2	48.9	48.8	47.6	0.04559	0.39752	0.001648	335		
4	290	49	265.5	61.4	58.1	58.2	61.8	61.5	59.9	0.08336	0.29863	0.001701	326		
5	349	59	319.5	61.6	58.4	58.6	61.8	61.2	60.0	0.08326	0.2527	0.001411	318		
6	440	91	394.5	58.4	57.9	58.2	61.7	61.6	59.9	0.08336	0.23201	0.000916	309		
7	651	211	545.5	118.6	113.0	112.9	120.8	121.0	116.9	0.04865	0.04665	0.000231			
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															
23															
24															
25															
26															
27															

表 6.5 2次元計算による各制御棒の等価反応度と測定値の比較

制御棒 *	k_{eff}	$\rho_{\text{Cal}} (\% \Delta k/k)$	$\rho_{\text{Exp}} (\% \Delta k/k)$	$\rho_{\text{Cal}} / \rho_{\text{Exp}}$
All Out	1.0607758	—	—	—
C ₁	1.0198555	3.782	4.085	0.926
C ₂	1.0190115	3.864	4.203	0.919
C ₃	1.0188551	3.879	4.096	0.947
C ₄	1.0167246	4.084	4.485	0.911
C ₅	1.0546656	0.546	0.550	0.993
B ₁	1.0519218	0.793	1.072	0.740
B ₂	1.0489683	1.061	1.397	0.759
B ₁ + B ₂	1.0427179	1.633	2.001	0.816

* 他の制御棒は Full Out

表 6.6 3次元計算による各制御棒の等価反応度と測定値との比較

制御棒	制御棒 IN/OUT *	k_{eff}	$\rho_{\text{Cal}} (\% \Delta k/k)$	$\rho_{\text{Exp}} (\% \Delta k/k)$	$\rho_{\text{Cal}} / \rho_{\text{Exp}}$
C ₁	OUT	1.0081301	4.264	4.085	1.044
	IN	0.9665828			
C ₂	OUT	1.0081453	4.288	4.203	1.020
	IN	0.9663671			
C ₃	OUT	1.0077362	4.241	4.096	1.035
	IN	0.9664313			
C ₄	OUT	1.0082941	4.405	4.485	0.982
	IN	0.9654176			
C ₅	OUT	0.9973447	0.511	0.550	0.929
	IN	0.9922880			
B ₁	OUT	0.9953533	0.790	1.072	0.737
	IN	0.9875882			
B ₂	OUT	0.9953533	1.051	1.397	0.752
	IN	0.9850440			
B ₁ +B ₂	OUT	0.9953533	1.616	2.001	0.808
	IN	0.9795935			

* 他の制御棒の位置 C₁ ~ C₄ : 354 mm
C₅ : 279 mm

測定日：1984年10月30日（火）

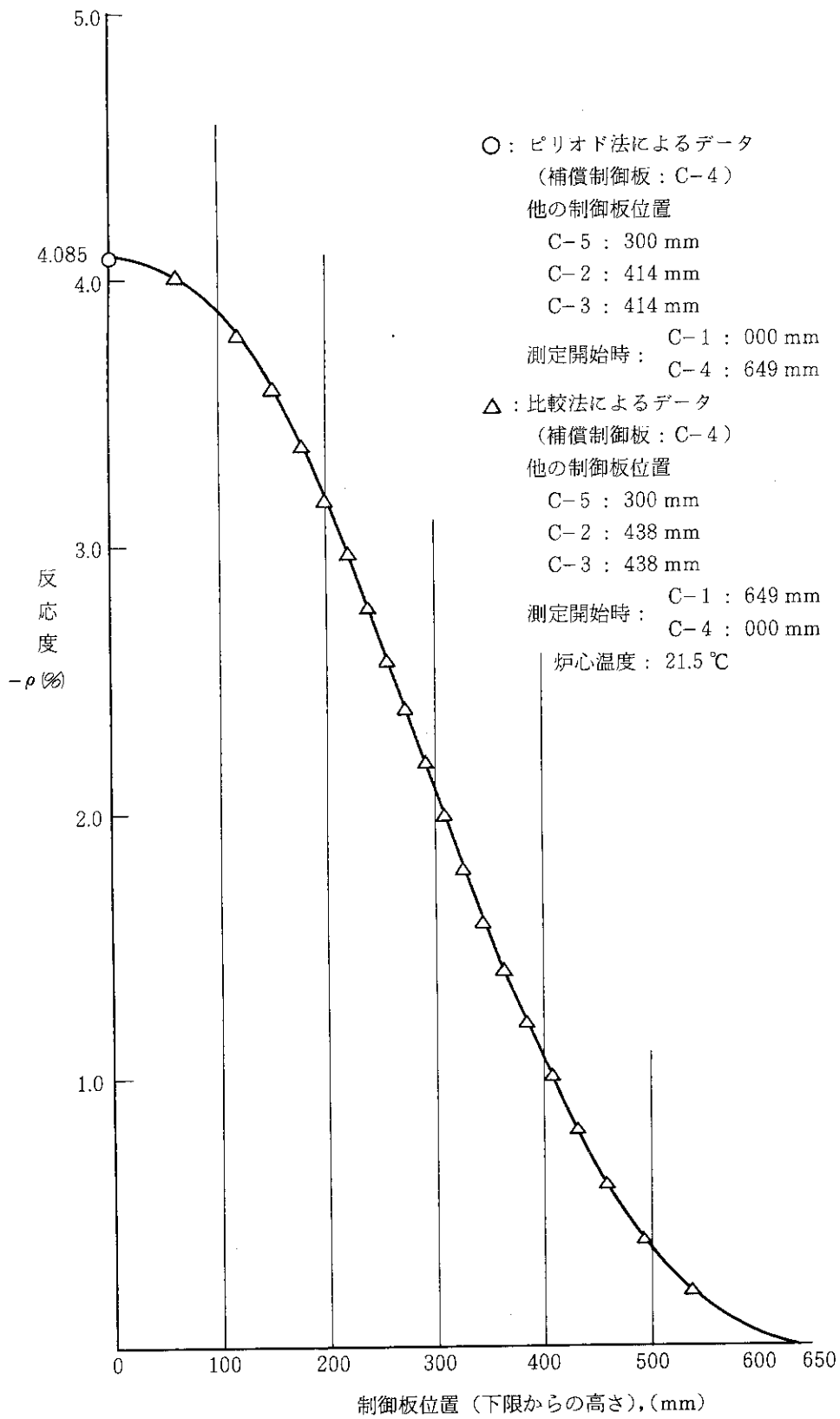


図 6.1.1 JRR-4 制御板較正, 積分曲線
 測定制御板：C-1

測定日：1984年10月31日（水）

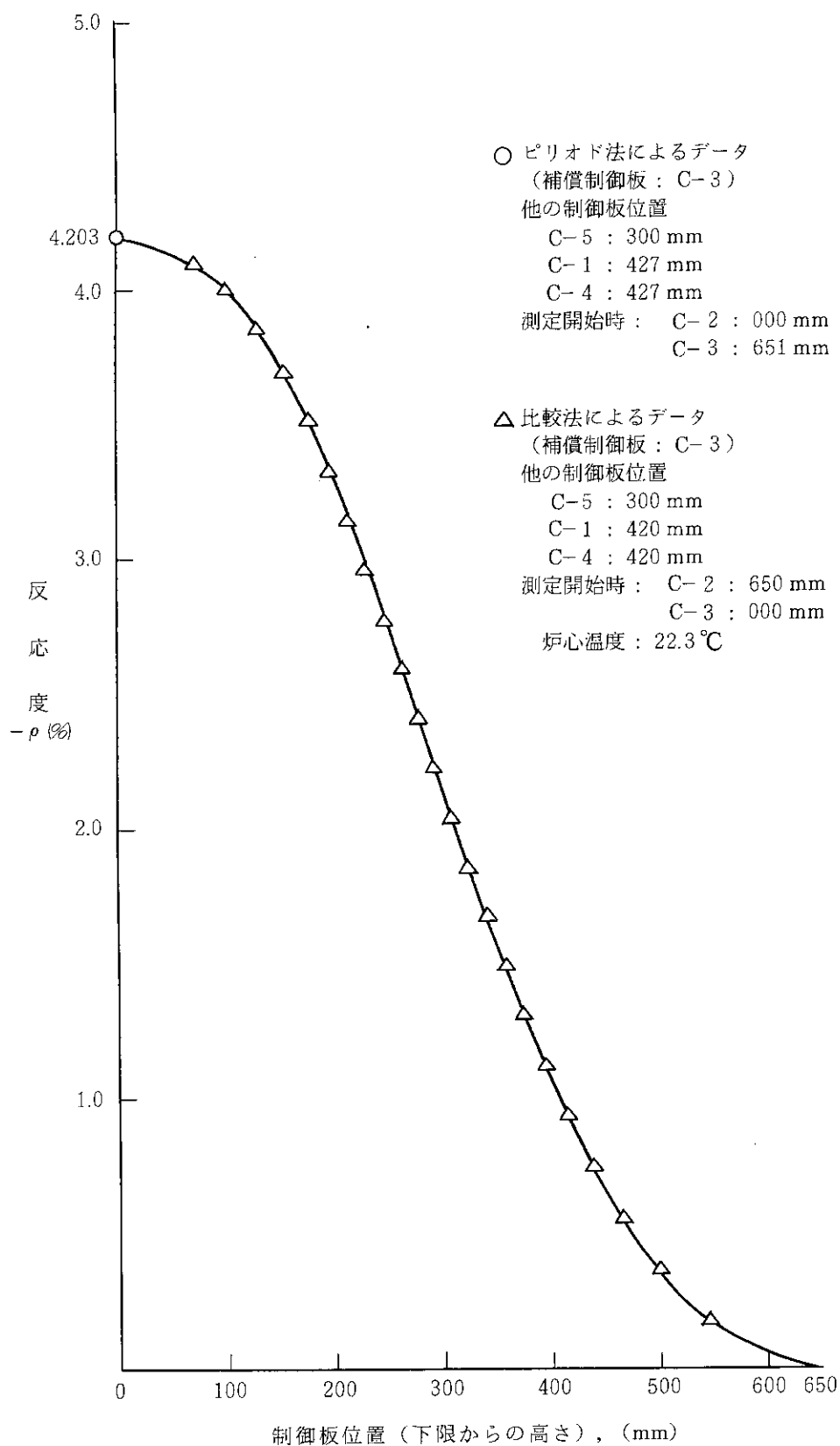


図 6.1.2 JRR-4 制御板校正, 積分曲線
 測定制御板：C-2

測定日：1984年10月31日（水）

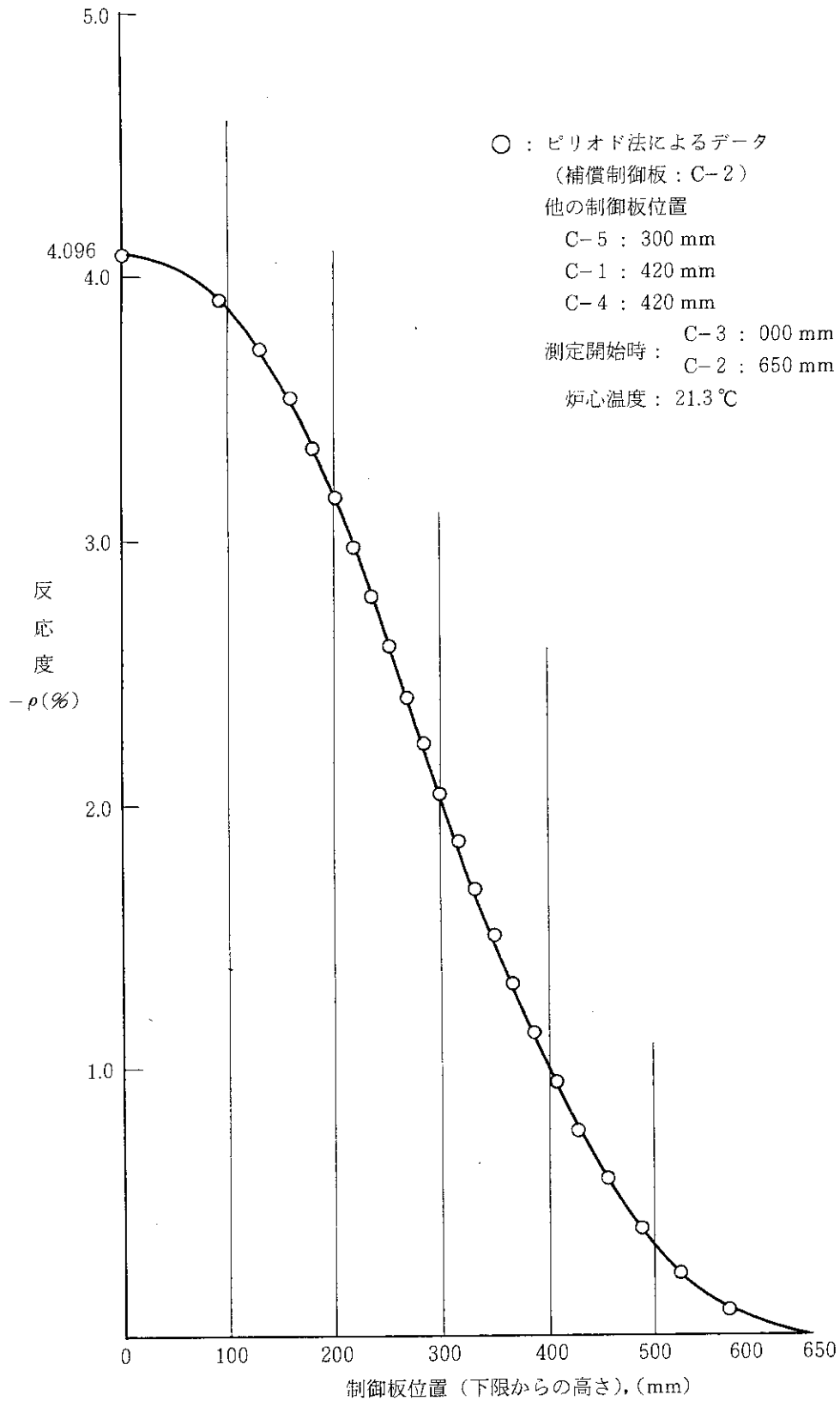


図 6.1.3 JRR-4 制御板校正，微分曲線
 測定制御板：C-3

測定日：1984年10月30日（火）

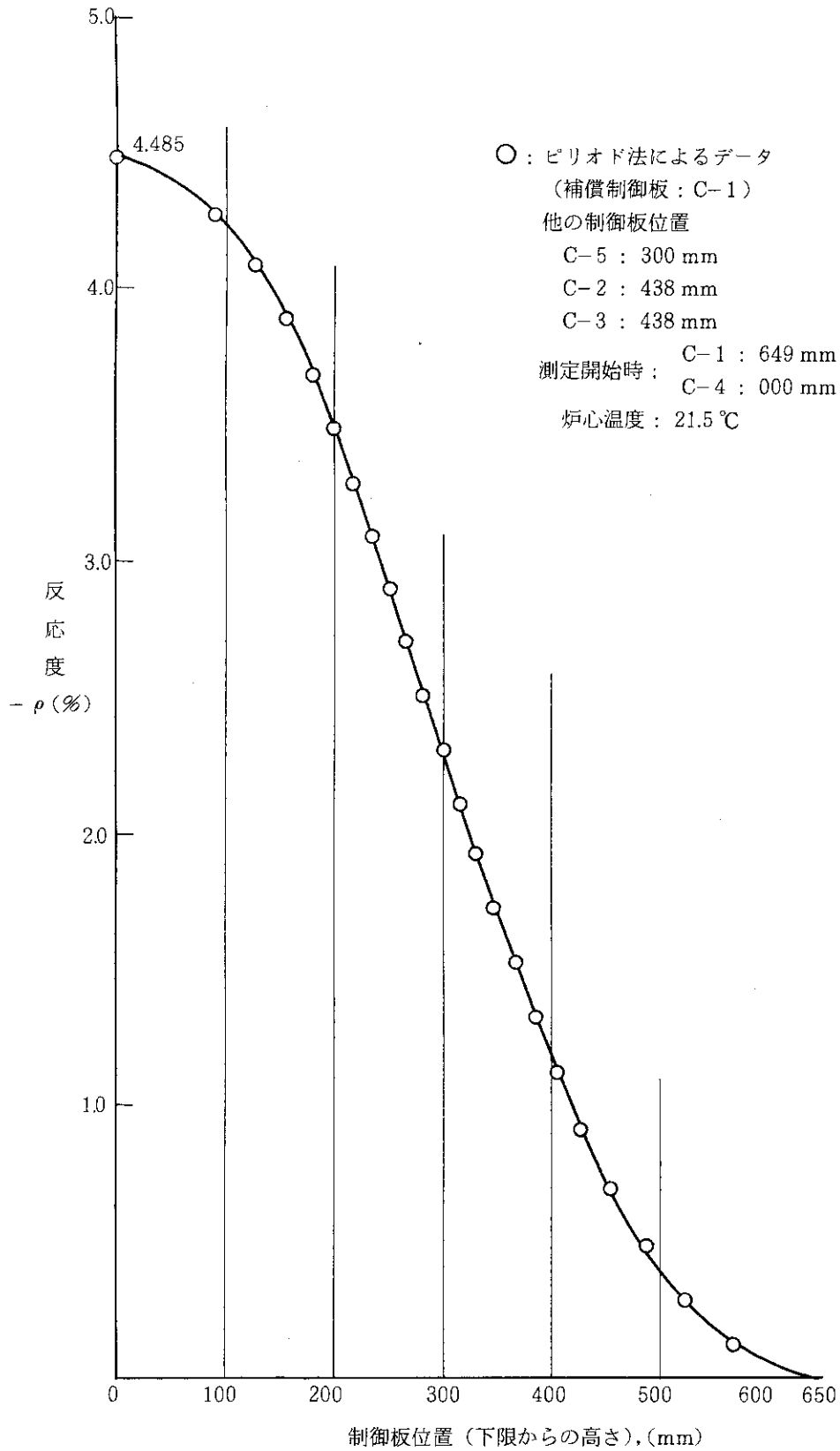


図 6. 1. 4 JRR-4 制御板校正, 積分曲線
 測定制御板：C-4

測定日：1984年10月31日（水）

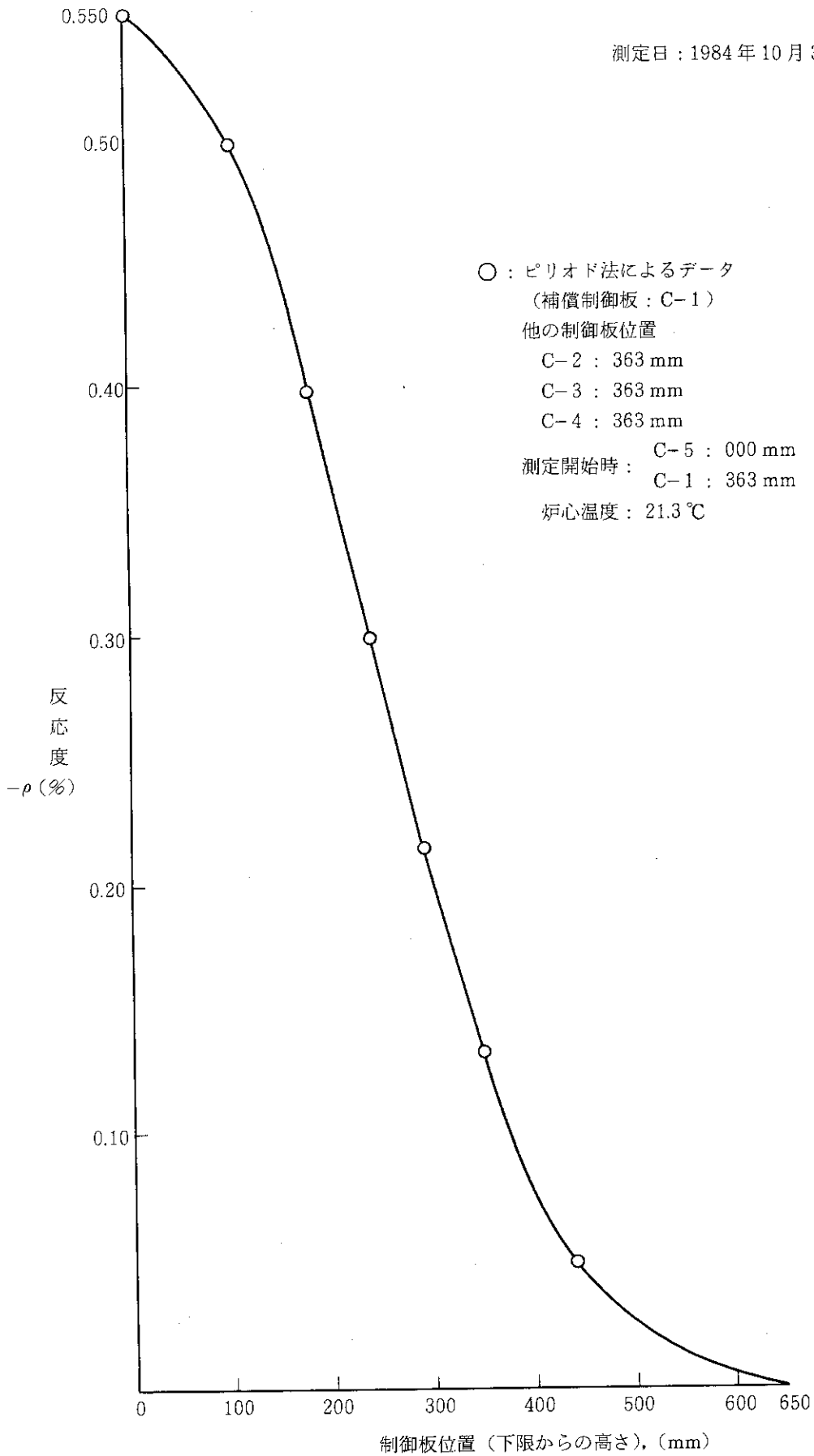


図 6.1.5 JRR-4 制御板校正，積分曲線
 測定制御板：C-5

測定日：1984年10月30日（火）

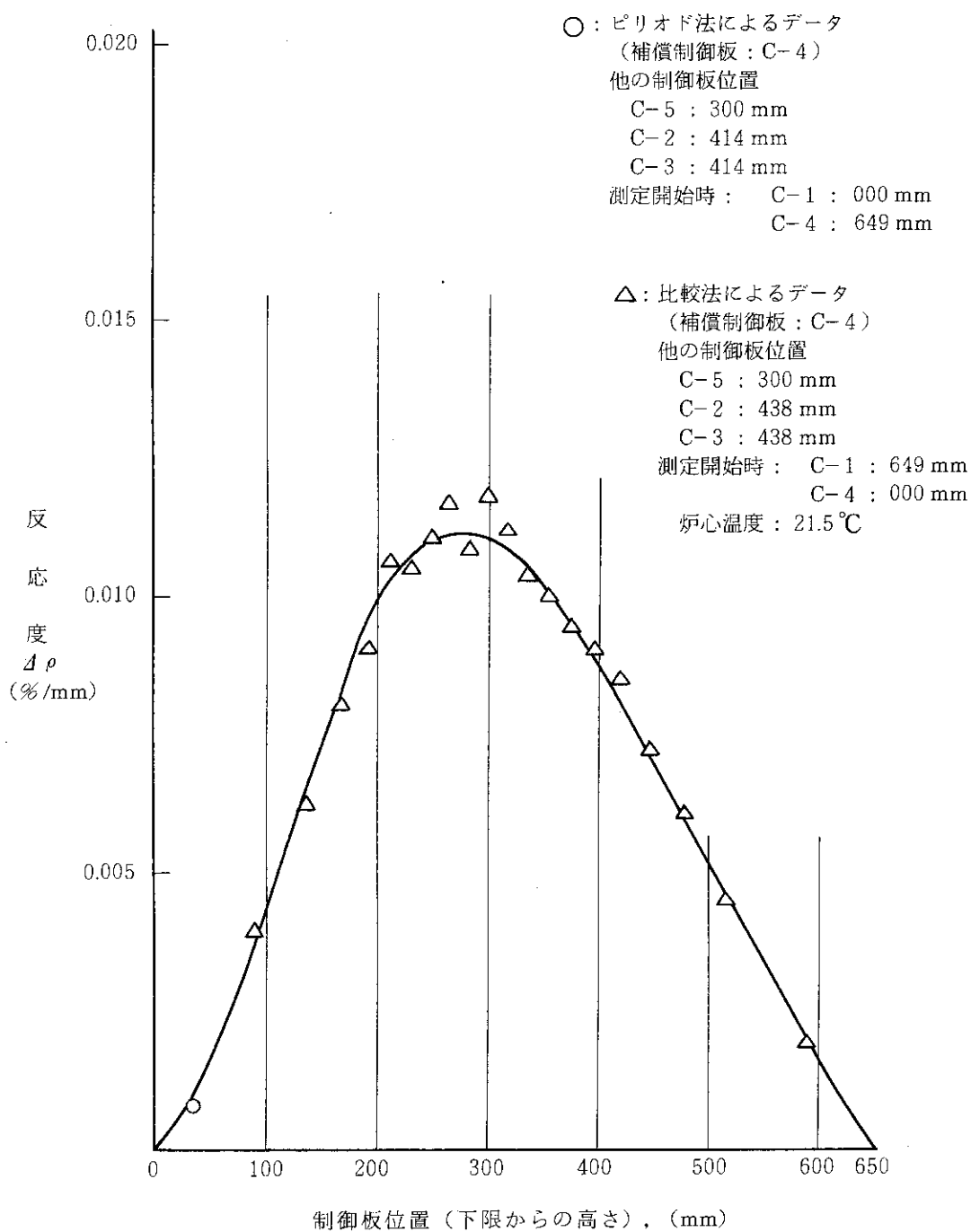


図 6.2.1 JRR-4 制御板較正, 微分曲線
 測定制御板：C-1

測定日：1984年10月31日（水）

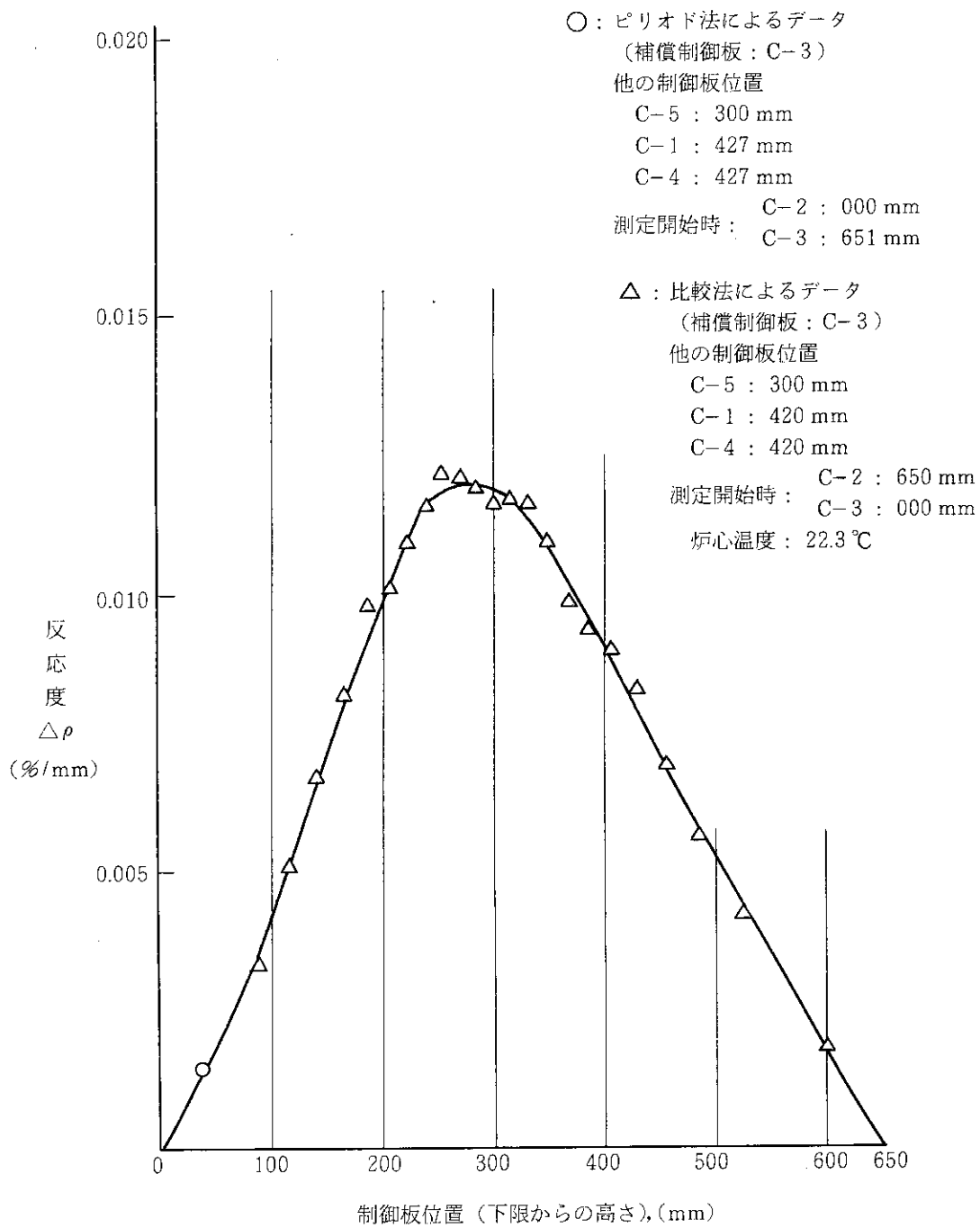


図 6. 2. 2 JRR-4 制御板較正，微分曲線
 測定制御板：C-2

測定日：1984年10月31日（水）

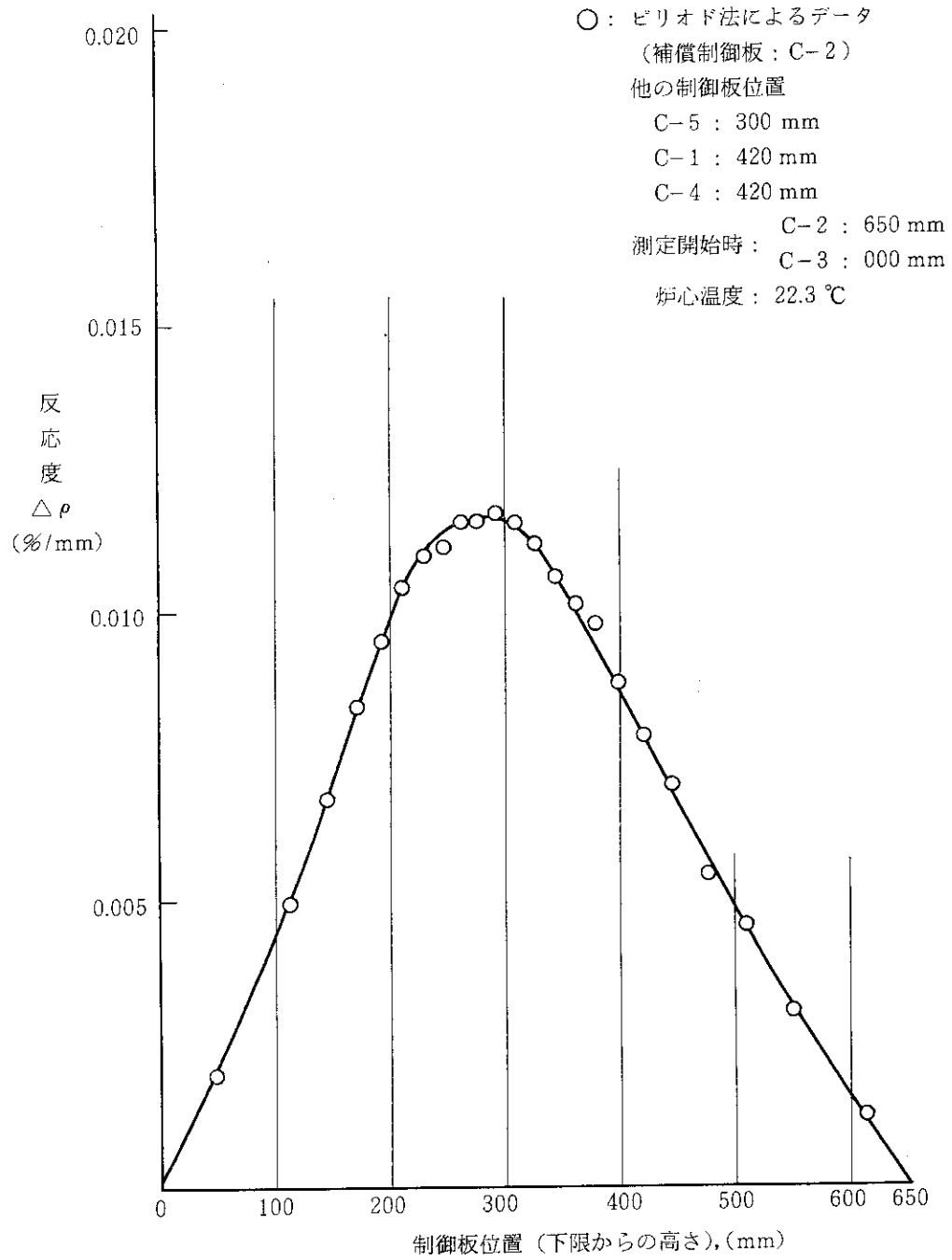


図 6. 2. 3 JRR-4 制御板校正, 微分曲線
 測定制御板：C-3

測定日：1984年10月30日（火）

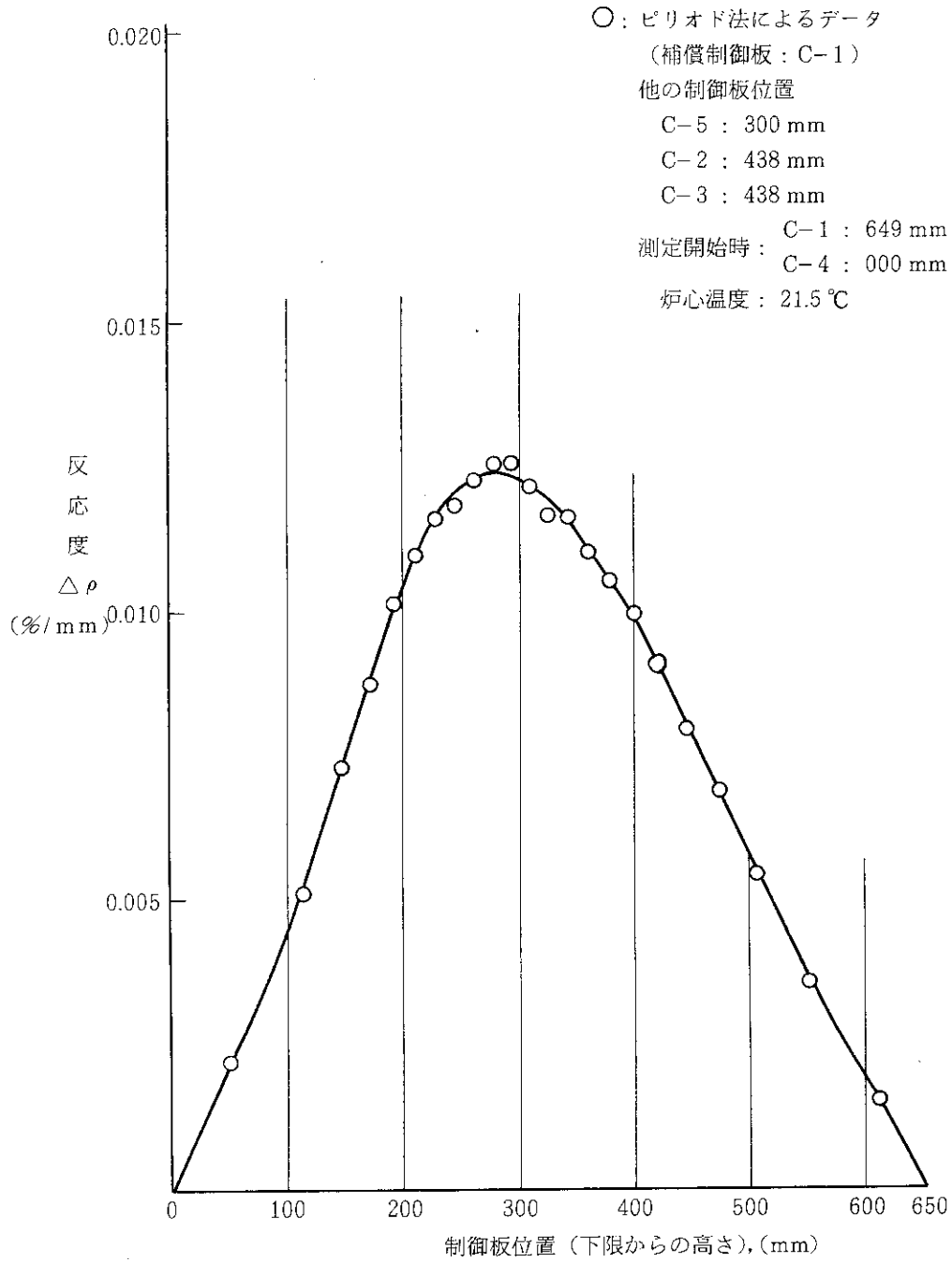


図 6.2.4 JRR-4 制御板較正, 微分曲線
 測定制御板: C-4

測定日：1984年10月31日（水）

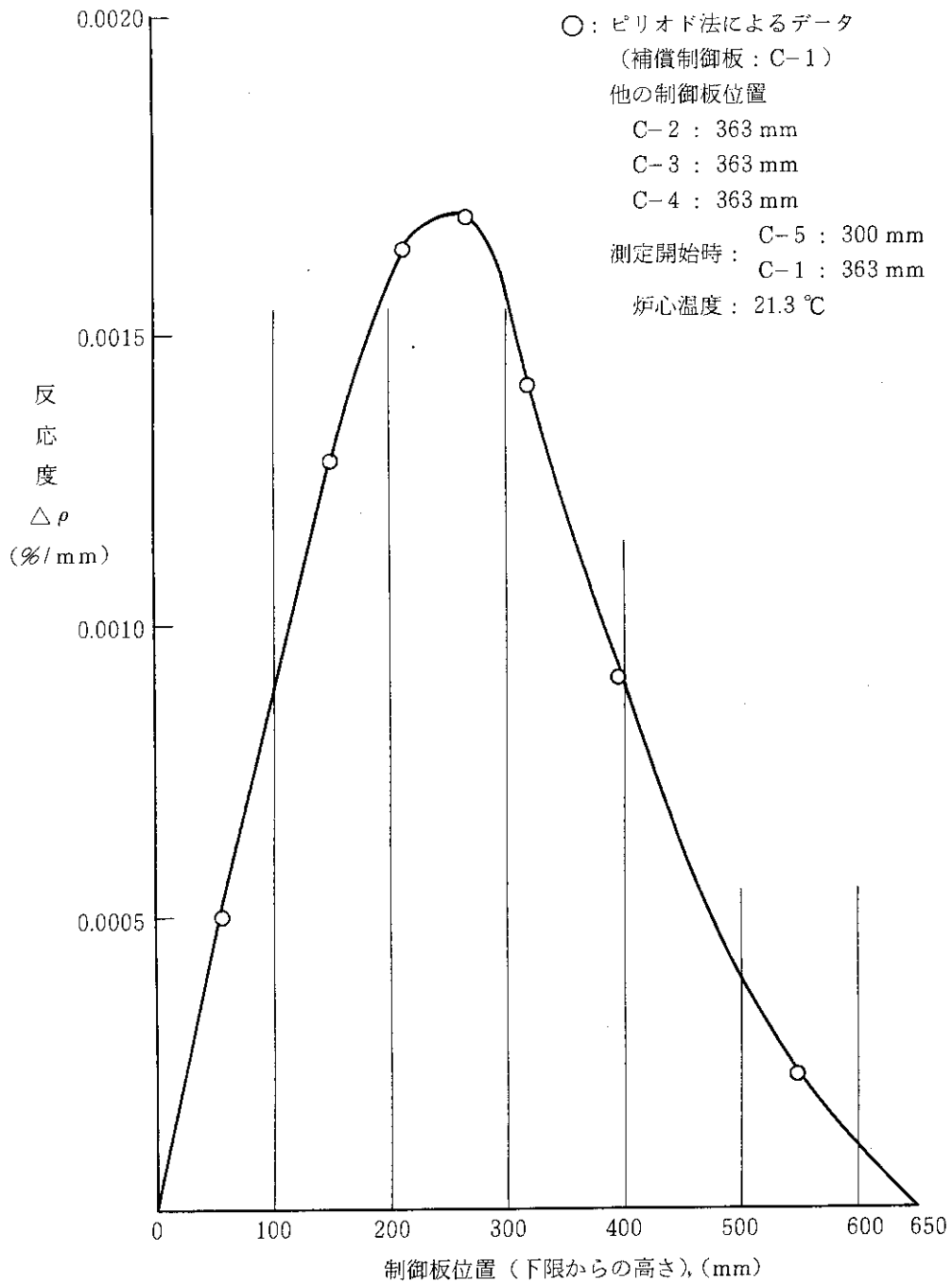
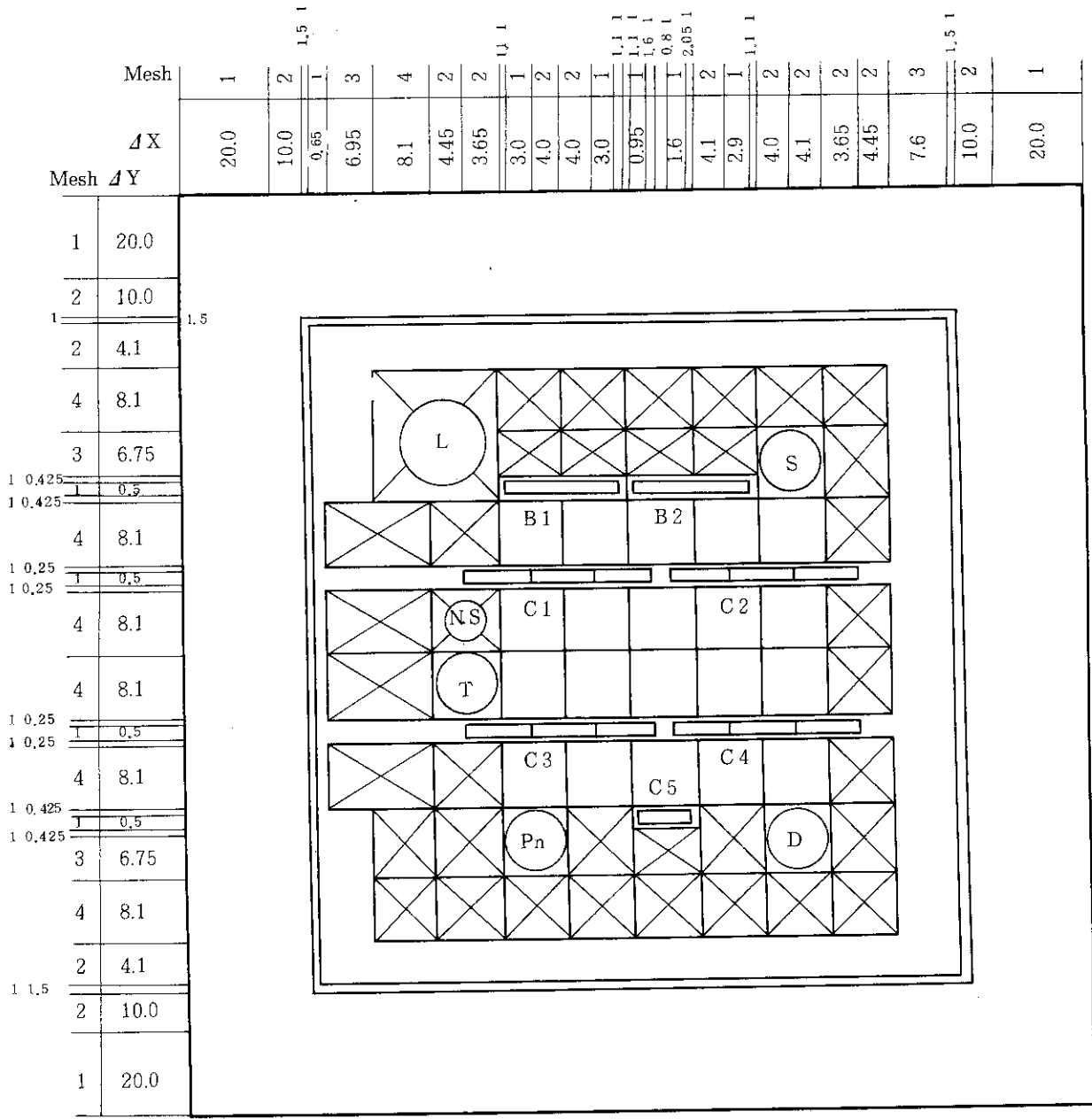
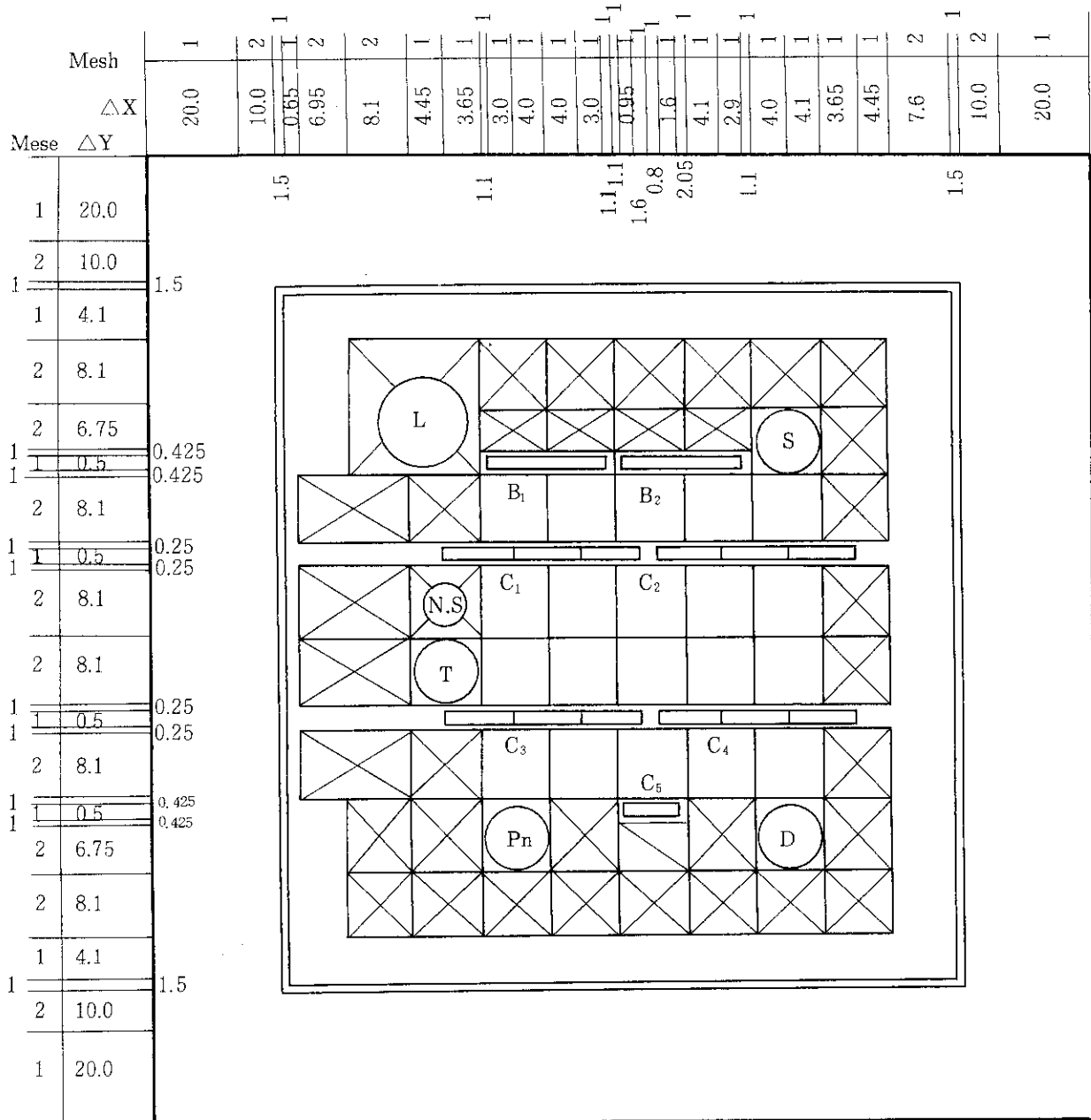


図 6.2.5 JRR-4 制御板較正，微分曲線
 測定制御板：C-5



(单位 cm)

图 6.3 制御棒等価反応度 2 次元計算体系图



(单位 cm)

図 6.4 制御棒等価反応度 3次元計算体系図 (X-Y平面)

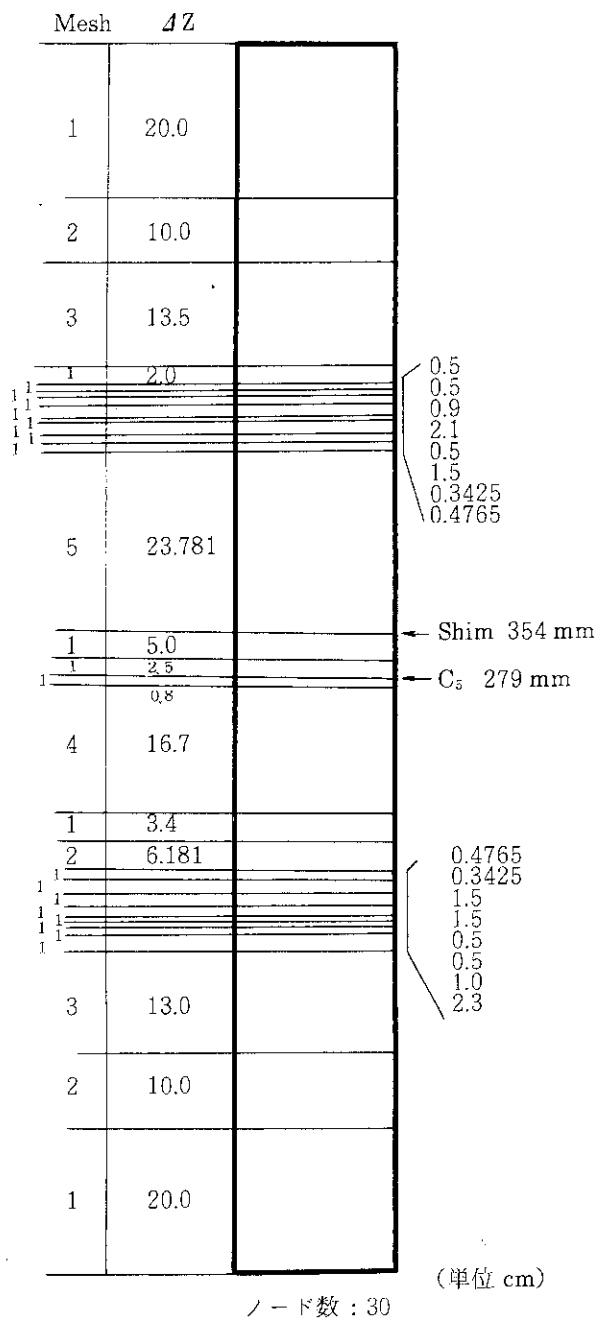


図 6.5 制御棒等価反応度 3次元計算
Z 方向メッシュ分割図

7. 反応度測定と解析

反応度測定と解析は、炉心格子位置 E-5 で次の項目について測定と解析を行った。

- (1) E F E と H E U 燃料の質量係数の比較
- (2) E F E と H E U 燃料の反応度の比較

7.1 測定方法

測定は、図 4.7 ~ 4.9 に示した質量係数測定基準炉心、E F E 反応度測定炉心、H E U 燃料反応度測定炉心の各炉心ごとに原子炉を臨界にし、臨界時の制御棒位置から各炉心の余剰反応度を求め、余剰反応度を比較することにより E F E と H E U 燃料の質量係数および反応度を求めた。臨界時の原子炉出力は 10 W で、制御棒パターンは不等高と等高*の両パターンで測定した。ただし、質量係数測定基準炉心については E-5 の燃料を引き抜いたため、余剰反応度がほとんどない炉心構成となったので、C₅ が 300 mm, C₁ ~ C₃ 上限で C₄ により臨界点を確認した。

7.2 測定結果

表 7.1 ~ 表 7.3 に各炉心の臨界時の制御棒位置と余剰反応度および k_{eff} を示す。余剰反応度の算出に用いた制御棒校正曲線は、今回の特性測定で測定したデータを用いた。表中、温度補正後の余剰反応度は、解析計算と比較するため解析計算時の体系温度 300 °K に換算した値である。換算に使用した温度係数は、H E U 20 本燃料炉心で測定した値 $-0.0132\% \Delta k/k / ^\circ C$ を用いた。また、 k_{eff} は 300 °K に換算した余剰反応度から計算した値である。

表 7.4 に等高パターンの余剰反応度の値から求めた E-5 における E F E および H E U 燃料要素の反応度および質量係数を示す。反応度の算出に等高パターンの時の余剰反応度を用いたのは通常運転時の制御棒パターンが等高パターンであり、かつ、質量係数測定基準炉心の臨界時の粗調整安全棒の制御棒位置が C₁ ~ C₃ 上限、C₄ が 512 mm で全ストロークの 78 % 引き抜かれればほぼ等高パターンと見なせるためである。また、質量係数の算出に用いた燃料要素 1 本当りの U-235 含有量は、E F E が 219.81 g, H E U 燃料が 166.31 g で燃料製造時のデータを用いた。その結果、温度補正後の E-5 における E F E および H E U 燃料要素の反応度は、それぞれ 5.85, および 5.94 % $\Delta k/k$ で、その差は 0.09 % $\Delta k/k$ であった。この差は、H E U 燃料要素の反応度の約 1.3 % で、E F E は H E U 燃料とほぼ同等の性能を持っていると見なせる。

質量係数は、燃料要素 1 本当りの反応度をその燃料要素に含まれる U-235 含有量で割ること

* 不等高パターンとは微調整棒 (C₅) が 300 mm, 粗調整安全棒の C₁ と C₂ が上限, C₄ が下限で C₃ で臨界にするパターンを言い、等高パターンとは、C₅ が 200 ~ 300 mm の範囲内で臨界になるように C₁ ~ C₄ を同じ位置まで引き抜き臨界にする制御棒パターンで、定常運転の制御棒パターンである。

によって求めた。その結果、E-5におけるEFEとHEU燃料の質量係数は、それぞれ0.0266、0.0357% $\Delta k/k/g^{235}\text{U}$ で、EFEとHEU燃料の質量係数の比は1/1.34であった。この測定結果は、JRR-4においては低濃縮ウラン燃料の反応度を高濃縮ウラン燃料と同等にするためには、U-235含有量を高濃縮ウラン燃料の1.34倍にしなければならない事を示しているものと思われる。この観点でEFEの設計仕様を見ると、U-235含有量は 221.4 ± 4.4 gで高濃縮燃料の1.33倍になっており前記の倍率にはほぼ近い値を示している。従って、今後の低濃縮ウラン実証炉心用燃料の製作に際してもEFEの設計仕様を変更する必要は無いものと考えられる。

7.3 計算方法

等価反応度および質量係数の計算は、CORE-BURNコードを用い、3群2次元全炉心体系で制御棒が全引抜きの状態で計算した。軸方向バックリングは、5.4で設定した値を用いた。計算は、先ず各燃料要素の% ^{235}U 表示の燃焼度をMWD表示の燃焼度に対応させる必要があるためこのためのチェック計算として図4.6に示した特性測定基準炉心の計算を行い、次に図4.7～4.9の各炉心の計算を順次行った。計算体系は図6.3に示した2次元による制御棒等価反応度の計算と同じである。なお、質量係数の算出に用いた要素当りのU-235含有量は、EFEについては設計仕様値の221.4g、HEU燃料については166.14gを用いてある。これは、この値を用いて燃料要素の群定数を作成したためである。

7.4 計算と測定結果の比較

表7.5に各炉心の k_{eff} の計算値と測定値の比較を、表7.6にEFEとHEU燃料の等価反応度と質量係数の計算値と測定値の比較を示す。両者の k_{eff} の差は1%以下で良い一致を示した。また、EFEとHEU燃料の等価反応度の差は、計算値が0.07% $\Delta k/k$ 、測定値が0.09% $\Delta k/k$ で、計算値と測定値ともEFEの方が若干低い値になったが、両者は良い一致を示した。燃料要素1本の等価反応度および質量係数については、共に計算値の方が10%低かった。

表 7.1 質量係数測定基準炉心の余剰反応度と k_{eff}

制 御 棒	不等高臨界時		等高臨界時	
	制御棒位置 (mm)	残余反応度 (% $\Delta k/k$)	制御棒位置 (mm)	残余反応度 (% $\Delta k/k$)
C ₁	649	0.0		
C ₂	650	0.0		
C ₃	651	0.0		
C ₄	512	0.347		
C ₅	300	0.20		
余剰反応度 (C ₁ ~C ₅ 総計)	0.547			
臨界時炉心温度	温 度	補正量	温 度	補正量
	21.3 °C	-0.0752	°C	
温度補正後余剰 反 応 度	27 °C	0.4718	°C	
k_{eff}	27 °C	1.0047	°C	

温度係数：-0.0132 % $\Delta k/k/°C$

Rad Cal. データ：59年10月

表 7.2 E F E 反応度測定炉心の余剰反応度と k_{eff}

制 御 棒	不等高臨界時		等高臨界時	
	制御棒位置 (mm)	残余反応度 (% $\Delta k/k$)	制御棒位置 (mm)	残余反応度 (% $\Delta k/k$)
C ₁	649	0.0	354	1.514
C ₂	650	0.0	354	1.518
C ₃	327	1.745	354	1.456
C ₄	000	4.485	354	1.658
C ₅	300	0.20	279	0.234
余剰反応度 (C ₁ ~C ₅ 総計)	6.43		6.380	
臨界時炉心温度	温 度	補正量	温 度	補正量
	22.5 °C	-0.0594	22.5 °C	-0.0594
温度補正後余剰 反 応 度	27 °C	6.3706	27 °C	6.3206
k_{eff}	27 °C	1.0680	27 °C	1.0675

温度係数：-0.0132 % $\Delta k/k/°C$

Rad Cal. データ：59年10月

表 7.3 HEU 燃料反応度測定炉心の余剰反応度と k_{eff}

制 御 棒	不等高臨界		等高臨界時	
	制御棒位置 (mm)	残余反応度 (% $\Delta k/k$)	制御棒位置 (mm)	残余反応度 (% $\Delta k/k$)
C ₁	649	0.0	354	1.514
C ₂	650	0.0	354	1.518
C ₃	320	1.818	354	1.456
C ₄	000	4.485	354	1.658
C ₅	300	0.20	226	0.324
余剰反応度 (C ₁ ~C ₅ 総計)	6.503		6.470	
臨界時炉心温度	温 度	補正量	温 度	補正量
	22.5 °C	-0.0594	22.5 °C	-0.0594
温度補正後余剰 反 応 度	27 °C	6.4436	27 °C	6.4106
k_{eff}	27 °C	1.0689	27 °C	1.0685

温度係数：-0.0132 % $\Delta k/k/^\circ C$

Rad Cal. データ：59年10月

表 7.4 E-5 における EFE および HEU 燃料の反応度と質量係数 (測定値)

燃 料	U-235 量/要素 (g)	反 応 度		質 量 係 数	
		反 応 度 (% $\Delta k/k$)	EFE/HEU	質量係数 (% $\Delta k/k/g^{235}U$)	EFE/HEU
EFE	219.81	5.86	0.987	2.67×10^{-2}	0.748
HEU	166.31	5.94	1.0	3.57×10^{-2}	1.0

表 7.5 各炉心の k_{eff} の計算値と測定値の比較

炉 心	計 算 値 (C)	測 定 値 (E)	C/E
質量係数測定基準炉心	1.0047	1.0047	1.0
EFE 反応度測定炉心	1.0608	1.0675	0.9937
HEU 燃料反応度測定炉心	1.0616	1.0685	0.9935

表 7.6 EFE および HEU 燃料要素の反応度と質量係数の計算値と測定値の比較

燃 料	計 算 / 測 定	U-235 量 / 要素 (g)	反 応 度		質 量 係 数	
			反 応 度 (%Δk/k)	C/E	質 量 係 数 (%Δk/k/g ²³⁵ U)	C/E
EFE	計 算 値 (C)	221.40 *1	5.26	0.90	2.38×10 ⁻²	0.89
	測 定 値 (E)	219.81 *2	5.85		2.66×10 ⁻²	
HEU	計 算 値 (C)	166.14 *1	5.33	0.90	3.21×10 ⁻²	0.90
	測 定 値 (E)	166.31 *3	5.94		3.57×10 ⁻²	

(注) *1 燃料要素の群定数作成に用いた値

*2 EFE 製造データによる値

*3 B 型 ²³⁵U 1104 製造データによる値

8. 熱中性子束測定と解析

熱中性子束測定は金箔による放射化法で行い、炉心格子位置 E-5 に EFE を装荷した時の E 列の熱中性子束分布と E-4, 5, 7 の Z 方向の熱中性子束分布を測定した。

解析は、エネルギー群 3 群で各燃料要素の Z 方向の燃焼度分布を考慮し、3次元全炉心体系で解析した。この時、Z 方向の燃焼度分布は炉心内の燃料要素をその装荷位置によって 4 グループに分け、各グループの燃焼度分布は同じ分布をしているものと仮定した。また、低濃縮ウラン燃料を高濃縮ウラン燃料だけで構成される炉心に装荷した時の中性子束の変化を見るため、HEU ウラン燃料だけで構成される炉心の計算を行い比較した。

8.1 測定方法

熱中性子束測定は、E-5 に装荷した EFE の熱中性子束と EFE を装荷したことによる HEU 燃料への影響を調べるため、E-3, 4, 6, 7 に HEU 新燃料要素を装荷し、E 列全部の燃料の熱中性子束を金箔による放射化法で測定した。測定時の炉心配置は図 4.10 に示したとおりである。

測定に使用した金箔は、大きさ 5×5 mm、重量約 4.5 mg で、カドミウム比を測定するためのカドミウムカバーは厚さ 0.5 mm の板を 2 つ折にし 9×9 mm に仕上げたものを用い、金箔をサンドウィッチ状にはさみ込んだ。

燃料要素への試料の取り付けは、図 8.1 に示すアクリル製のホイルホルダーとスペーサーを用い図 8.2 に示すように各燃料要素のウォーターギャップに挿入し、取り付けた。ホイルホルダーへの試料の取り付けは、E-4, 5, 7 の燃料要素については Z 方向の熱中性子束分布を測定するため、燃料芯材下端から 5 cm 毎に裸とカドミウムでカバーした金箔を交互に取り付け、さらに EFE については Z 方向の中性子束が最も高いと予想された燃料芯材下端から 20 cm の所の燃料要素内熱中性子束分布を測定するため、そこに 9 個の試料を配置した。E-3 と E-6 については、燃料芯材下端から 20 cm の所に裸の金箔だけを取り付け、この位置のカドミウム比は対称位置の燃料要素 E-7 と E-4 の同じ位置のカドミウム比を用い評価することにした。図 8.3 に各燃料要素の試料配置図を示す。

試料の照射は、10月25日、原子炉出力 200 W で 30 分間照射し、10時39分手動によるスクラムで原子炉を停止した。照射時の制御棒位置は、 $C_1 \sim C_4$ が 340 mm、 C_5 が 230 mm で、炉心冷却水温度は 22.0°C であった。

照射済試料の測定は、翌日の 15 時 02 分から研究炉利用課所有の Ge(Li) 検出器を用い、 ^{196}Au の 0.411 MeV の光電ピークを測定し、各試料の放射能を求めた。

熱中性子束は次式から求めた。なお、自己遮蔽効果、中性子束減衰効果および ^{197}Au の補獲反応断面積の温度補正は、金箔の厚さが約 18 mg/cm^2 であり、炉心冷却水温度も常温に近かったため、その影響は微少と考え考慮しなかった。

$$\phi_{th} = \frac{A_{bare} - A_{cd}}{N \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sigma_0 (1 - e^{-\lambda t_i})}$$

A_{bare} , A_{cd} は,

$$A_{bare}, A_{cd} = \frac{N_p / t}{\eta \cdot R_b \cdot W \cdot t_c}$$

ここで

ϕ_{th}	: 熱中性子束 ($n/cm^2 \cdot s$)
A_{bare}, A_{cd}	: 裸およびカドミウムカバー付金箔の照射直後における単位重量当りの生成放射能 (dps/g)
N	: 金箔の単位重量当りの原子数 (n/g)
σ_0	: 0.0253 eV の中性子に対する補獲反応断面積 (98.8 burn)
λ	: ^{198}Au の崩壊定数 ($T_{1/2} = 2.696 \text{ day}$)
t_i	: 照射時間 (30 分)
N_p	: ^{198}Au の 0.411 eV の光電ピーク面積 (counts)
t	: 計測時間
η	: 0.411 eV の光電ピークに対する計数効率
	: $75.5 \text{ cm} = 9.7 \times 10^{-3}$
	: $78.5 \text{ cm} = 5.2 \times 10^{-3}$
R_b	: γ 線放出率 (95.5%)
W	: 金箔の重量 (g)
t_c	: 照射終了から計測開始までの金箔の冷却時間

8.2 測定結果

表 8.1 に各試料の放射能、カドミウム比および原子炉出力 3.5 MW に換算した時の熱中性子束を示す。なお、Z 方向のカドミウム比は、裸とカドミウムカバー付金箔を交互に配置したので、各測定点におけるカドミウム比は、その測定点におけるもう一方の金箔の放射能をラグランジュ補間によって内・外挿し、その値を用い計算した。また、燃料芯材下端から 20 cm の所のカドミウム比は、E-5 の中心を対称軸とした対称位置については同じ値をとるものとし、E-4, 5, 7 の 20 cm の所のカドミウム比から E 列のカドミウム曲線を作成し、その曲線から各測定点に対応するカドミウム比を求めた。

図 8.4 に各燃料要素の Z 方向の熱中性子束分布を、図 8.5 に燃料芯材下端から 20 cm の所の E 列の熱中性子束分布を示す。

8.3 計算方法

中性子束計算は、CORE-BURNコードを用い、3群3次元全炉心体系でZ方向の燃焼度分布を考慮し計算した。計算は、図4.10に示した熱中性子束測定炉心とその炉心のE-5に装荷されているEFEをHEU新燃料要素に入れ換えた炉心の2ケースである。計算時の制御棒位置は両ケースとも金箔照射時の制御棒位置（ $C_1 \sim C_4$: 335 mm, C_5 : 237 mm, B_1, B_2 : 上限）と同じ位置で、制御棒の対数微分定数は5.3.4(2)で設定した値を用いた。また、3次元計算時のX-Y平面のメッシュ分割は、計算点が測定点とほぼ一致するようにするため格子位置4, 6, 7行とE列のメッシュ点を制御棒等価反応度計算時より若干増やした。図8.6, 8.7に3次元計算時のX-Y平面の計算体系図およびZ方向のメッシュ分割図を示す。

Z方向の燃焼度分布は、炉心内の燃料要素をその装荷位置の対称性と炉心内半径方向出力分布割合を考慮し4グループに分け、各グループのZ方向燃焼度分布は同じ分布をしているものと仮定した。各グループに属する燃料要素は次のとおりである。

第1グループ D-5, E-5

第2グループ D-4, 6 E-4, 6

第3グループ C-4, 5, 6 D-3, 7 E-3, 7 F-4, 5, 6

第4グループ C-3, 7 F-3, 7

各グループのZ方向の燃焼度分布は、JRR-4の燃料管理コードで9月末の燃焼計算をした時の熱中性子束分布と同じ分布をしていると見なし、第1グループにはD-5、第2グループにはE-4、第3グループにはE-7、第4グループにはF-7の分布を用いた。各グループのZ方向の燃焼度分布を図8.8に示す。実際の計算に当っては、各ノードの燃焼度は、図8.8で示した燃焼度分布から各ノード毎に規格化した燃焼度分担割合を求め、その割合に各燃料要素の平均燃焼度を乗じて得られる燃焼度で一様に燃焼しているものとした。なお、E列の燃料要素は全て新燃料要素であるので、当然のことながら各ノードは新燃料の状態で計算した。

中性子束の規格化は、原子炉出力3.5 MWで行った。

8.4 計算と測定結果の比較

図8.9に熱中性子束の計算値と測定値の比較を示す。図は、計算と測定の熱中性子束分布を比較するため、Z方向分布については燃料芯材下端から20 cmの位置で、水平方向についてはE-5中心位置で測定値を計算値に規格化したものである。規格化因子は、E-4で1.101、E-5で1.081、E-7で1.088、水平分布は1.094である。その結果、Z方向分布についてはE-4、E-7の分布は良い一致を示した。しかし、E-5については、Z方向に約4.8 cmのピークのずれが生じた。このピークのずれは、E-4, 7の計算と測定の分布が良い一致を示していることから、照射時にホイルホルダが上方に移動したものと考えられる。計算に見られる燃料芯材上・下端部のピークは、燃料要素上下の軽水の反射体効果によるものである。水平方向の分布については、E列の中心ラインおよびE-5の東側と西側の燃料要素内分布とも両者は良い一致を示している。また、EFEの燃料芯材下端から20 cmの所の燃料要素内熱中性子束分布は、中心がへ

こみ、周囲が持ち上った凹形になっていることが測定および計算の両方で確認できた。

熱中性子束の絶対値については、計算値は測定値に対し9～10%高い値を示した。金箔の自己遮蔽効果および中性子束減衰効果の補正を無視したことによる誤差は、測定値を約2%低く評価する。また、測定値は、金箔の照射出力および時間を200 W、30分として計算してあるが、実際の照射は、金箔を燃料要素にセットしてから原子炉を起動したので、原子炉起動から200 W到達までの間の照射は考慮されていない。この積算出力は、運転データから約150 W・minであるので、結果として測定値を約2.5%高めに評価したことになるが、この誤差は、自己遮蔽効果および中性子束減衰効果は無視したことによる誤差とほぼ相殺される。従って、計算値と測定値の差の主な要因は、計算では0.6825 eV以下の中性子を熱中性子として取り扱っているのに対し、カドミウムフィルターのCut Off Energyは約0.5 eVであるので、熱中性子のUpper Energyの違いによるものと考えられる。

図8.10、8.11は、熱中性子束測定炉心と、その炉心のE-5に装荷されているEFEをHEU燃料に交換した炉心の南北および東西方向の中性子束分布および出力分布を計算によって比較したもので、南北方向はE列の中心、東西方向は5行の中心の燃料芯材下端から20 cmの所の分布である。図8.10の3群の中性子分布でE-3の外側のピークはT-パイプ、E-7の外側の持ち上りは黒鉛反射体によるものである。また、図8.11の3群の分布でC列とD列およびE列とF列の間の2つのピークは制御棒が上下するスペースの軽水によるピーキングである。出力分布でD列とE列の出力密度が異なるのは、E-5の燃料が新燃料であるのに対し、D-5の燃料の燃焼度が18.2%²³⁵Uであるためである。E-5にEFEを装荷した場合のE-5中心の中性子束は、E-5がHEU燃料の時に比べ1群で2.7%、2群で0.6%高く、3群では逆に24%低くなり、その影響は隣接するHEU燃料の中心附近にまで及んでいる。これは、EFEのU-238含有量が、U-235含有量の33%の増量と20 w/o濃縮ウランの使用により約74倍にも増加したため、高濃縮ウラン燃料炉心の中に低濃縮ウラン燃料を入れると中性子吸収体として作用してしまうためだと考えられる。

表 8.1 熱中性子束測定結果

1) E-4 Z 方向分布							2) E-7 Z 方向分布						
番号	燃料 下端 からの距離	裸の金箔の放射 能 (dps/g)	Cd で覆った金箔の 放射能 (dps/g)	カドミ比	3.5M 換算時の熱中 性子束 ($n/cm^2 \cdot s$)	番号	燃料 下端 からの距離	裸の金箔の放射 能 (dps/g)	Cd で覆った金箔の 放射能 (dps/g)	カドミ比	3.5MW 換算時の熱中 性子束 ($n/cm^2 \cdot s$)		
1	60 cm	1.62×10^6	0.67×10^6 △	2.43	1.17×10^{13}	1	60 cm	1.16×10^6	0.53×10^6 △	2.18	7.67×10^{12}		
2	55	2.21	0.953 △	2.32	1.55	2	55	1.65	0.752 △	2.19	1.10×10^{13}		
3	50	2.84	1.40 △	2.02	1.76	3	50	2.19	1.09 △	2.00	1.34		
4	45	3.71	1.89 △	1.96	2.23	4	45	2.88	1.44 △	2.00	1.77		
5	40	4.88	2.46 △	1.98	2.96	5	40	3.59	1.83 △	1.96	2.16		
6	35	6.22	3.07 △	2.02	3.86	6	35	4.60	2.25 △	2.05	2.88		
7	30	7.51	3.64 △	2.06	4.74	7	30	5.63	2.64 △	2.13	3.66		
8	25	8.47	4.07 △	2.08	5.40	8	25	6.25	2.92 △	2.14	4.08		
9	20	8.84	4.23 △	2.09	5.65	9	20	6.48	3.04 △	2.13	4.22		
10	15	8.47	4.07 △	2.08	5.39	10	15	6.10	2.92 △	2.09	3.90		
11	10	7.40	3.53 △	2.10	4.75	11	10	5.40	2.56 △	2.11	3.48		
12	5	6.03	2.66 △	2.27	4.13	12	5	4.70	1.98 △	2.37	3.33		
13	0	5.18	1.8 △	2.88	4.15	13	0	3.98	1.41 △	2.83	3.15		

△印はラグランジュ補間により求めた値

表 8.1 熱中性子束測定結果

3) E-5 Z 方向分布

番号	燃料下端からの距離	裸の金箔の放射能 (dps/g)	Cd で覆った金箔の放射能 (dps/g)	カドミ比	3.5MW 換算時の熱中性子束 ($n/cm^2 \cdot s$)
1	60 cm	1.61×10^6	0.72×10^6 △	2.24	1.09×10^{13}
2	55	2.02	1.03 △	1.97	1.22
3	50	2.65	1.63 △	1.63	1.25
4	45	3.50	2.01 △	1.74	1.82
5	40	4.56	2.52 △	1.81	2.49
6	35	5.55	3.18 △	1.74	2.90
7	30	6.51	3.83 △	1.70	3.28
8	25	7.50	4.24 △	1.77	4.00
9	20	8.19	4.21 △	1.95	4.88
10	15	7.75	3.72 △	2.08	4.94
11	10	6.82	3.04 △	2.24	4.62
12	5	6.00	2.83 △	2.12	3.88
13	0	5.34	2.38 △	2.24	3.63

4) E列水分布 (芯材下端から 20 cm)

モニター番号	裸の金箔の放射能 (dps/g)	カドミ比	3.5MW換算時の熱中性子束 ($n/cm^2 \cdot s$)
21	6.38×10^6	2.13	4.15×10^{13}
22	6.49	2.13	4.22
23	8.57	2.11	5.52
28	8.85	2.09	5.65
41	9.02	1.99	5.49
35	8.19	1.95	4.88
42	8.91	1.99	5.43
46	8.82	2.09	5.64
47	8.46	2.11	5.45
52	6.48	2.13	4.22
55	5.74	2.13	3.73
38	9.52	1.99	5.80
39	8.95	1.95	5.34
40	9.55	1.99	5.82
43	9.66	1.99	5.89
44	8.66	1.95	5.17
45	9.38	1.99	5.72

(注) △印はラグランジュ補間により求めた値

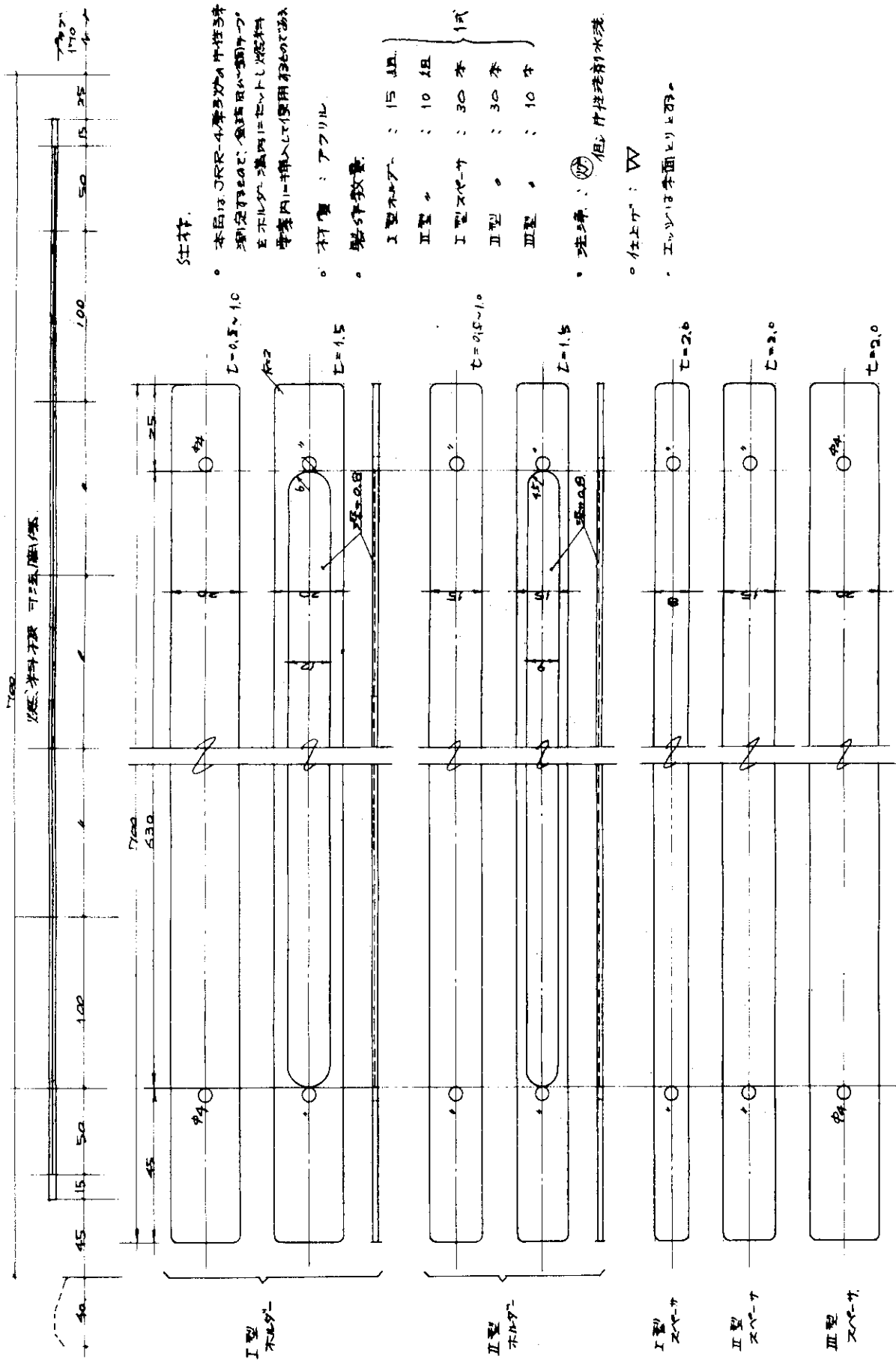


図 8.1 熱中性子束測定用ホイルホルダおよびスペース

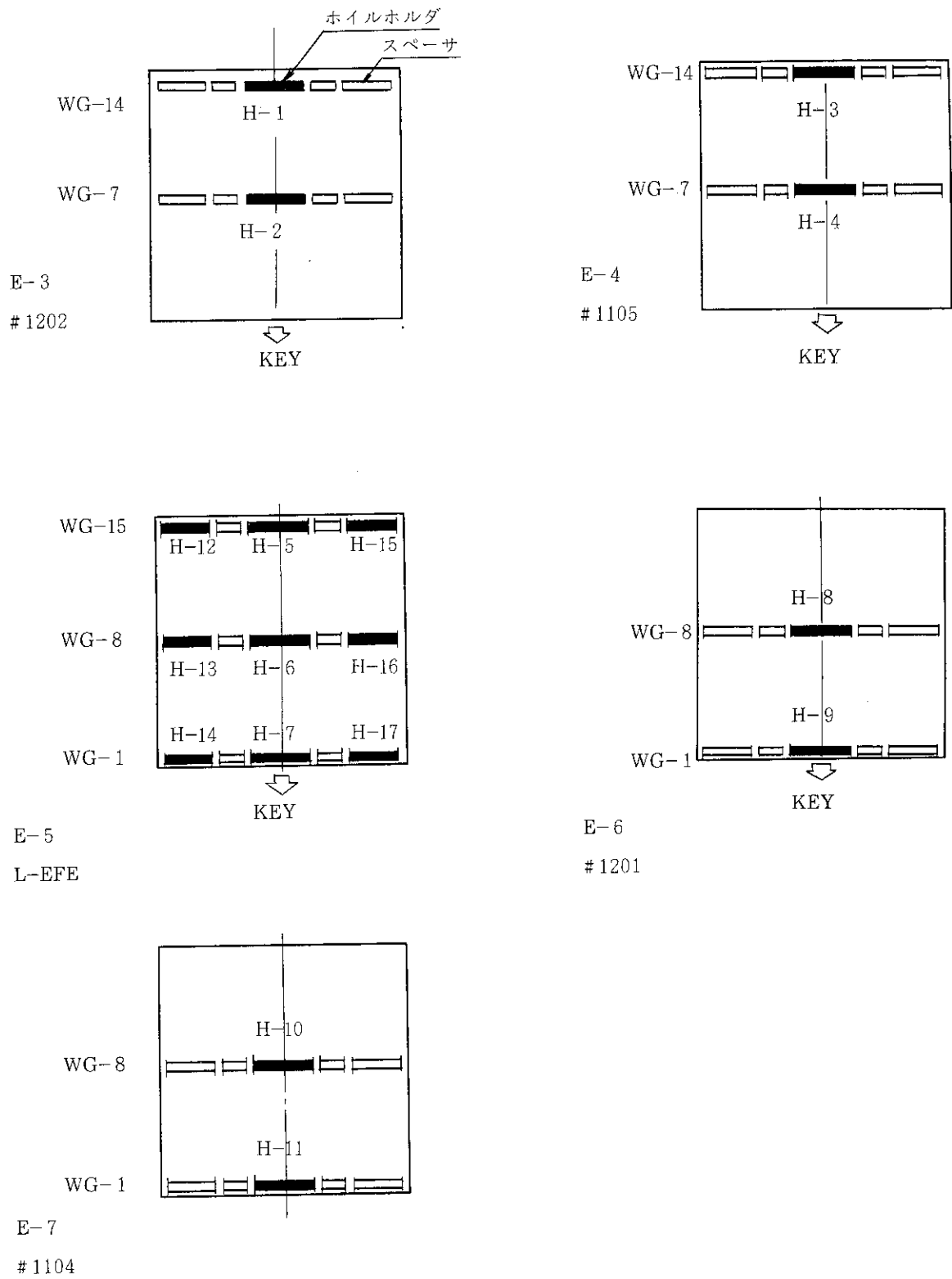


図 8.2 ホイルホルダ取付図

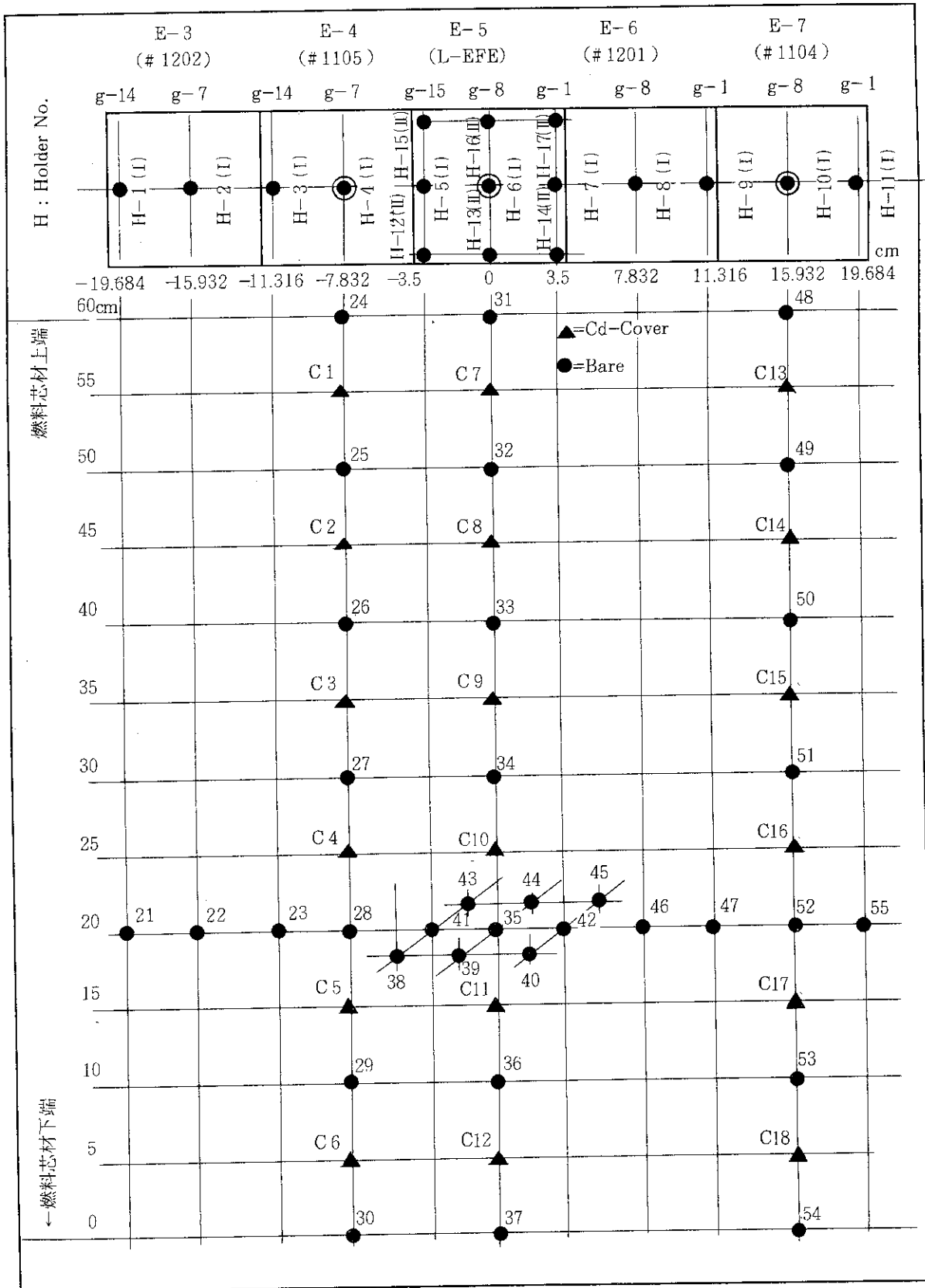


図 8.3 熱中性子束測定試料配置図

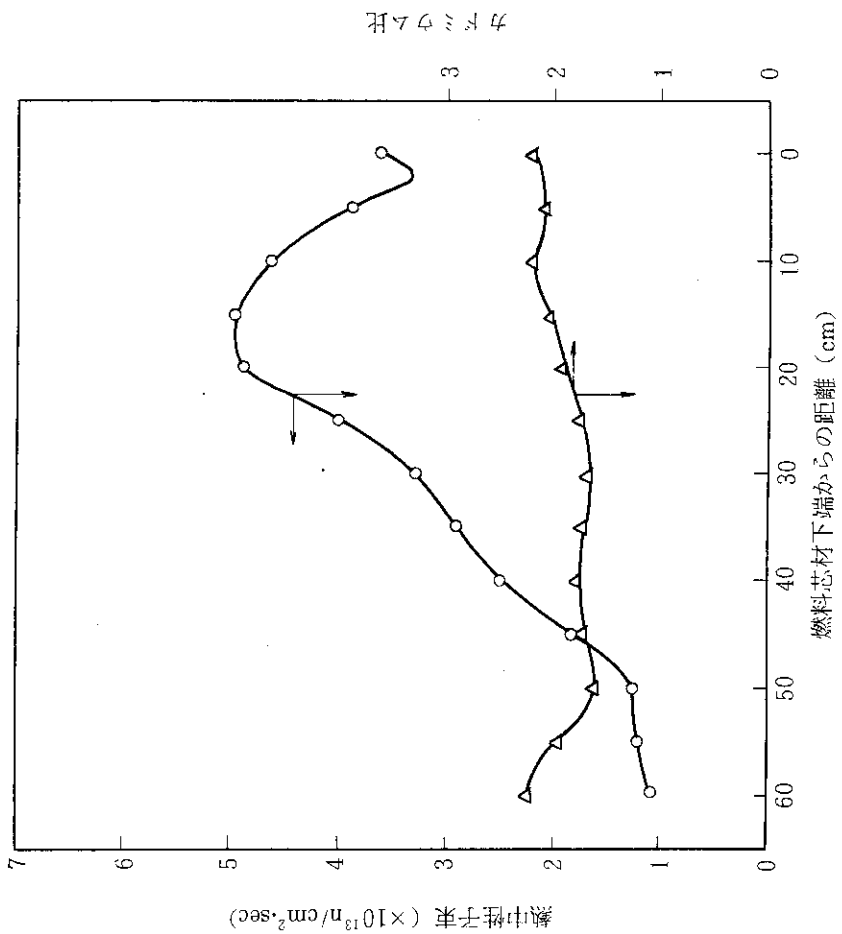


図 8.4.2 E-5 Z 方向熱中性子束分布

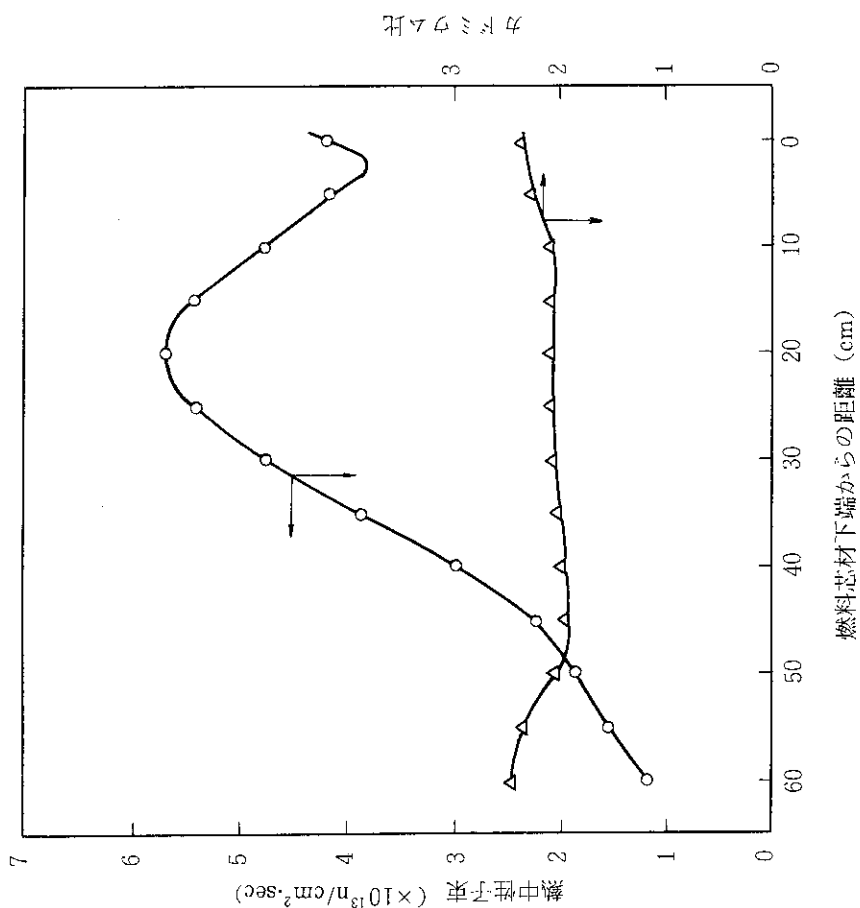


図 8.4.1 E-4 Z 方向熱中性子束分布

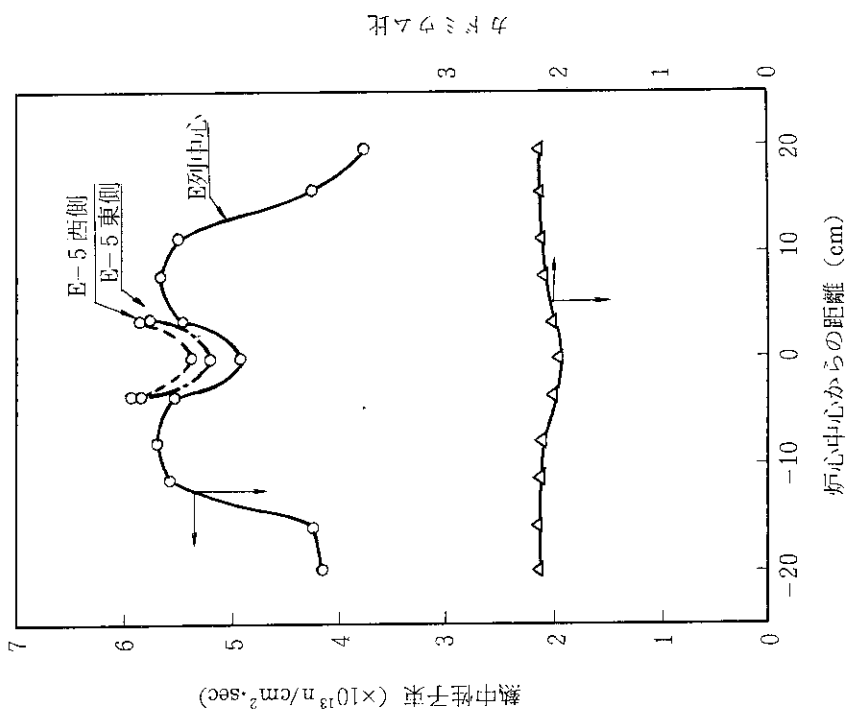


図 8.5 E列熱中性子束分布 (燃料芯材下端から 20 cm)

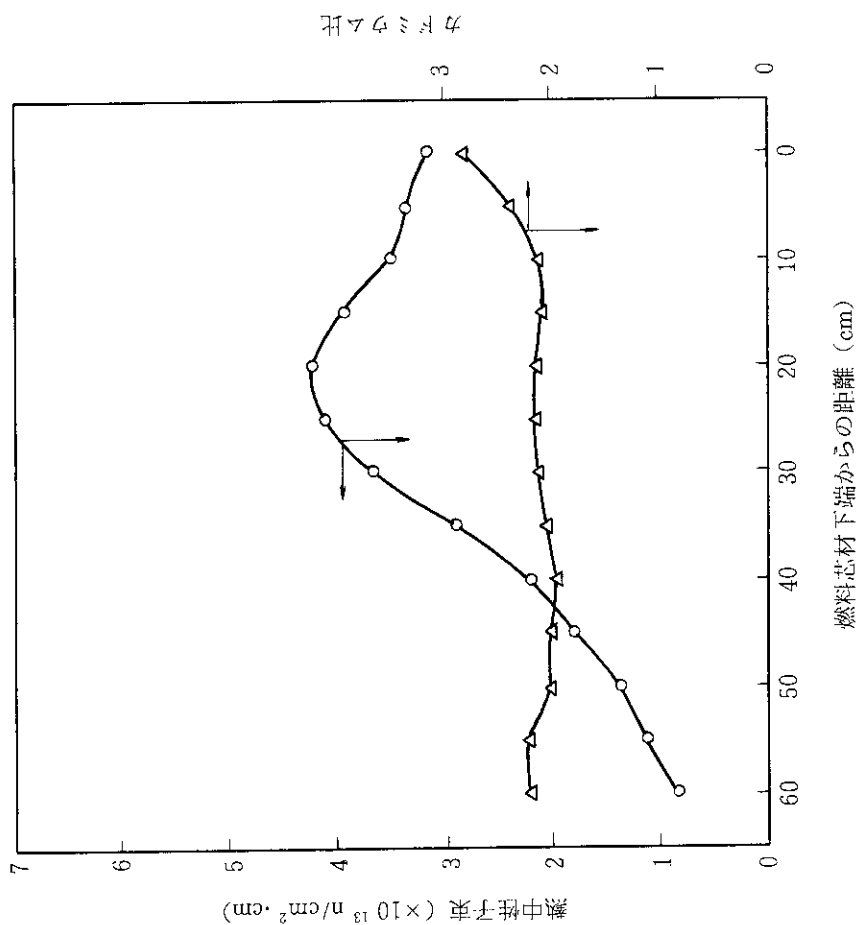
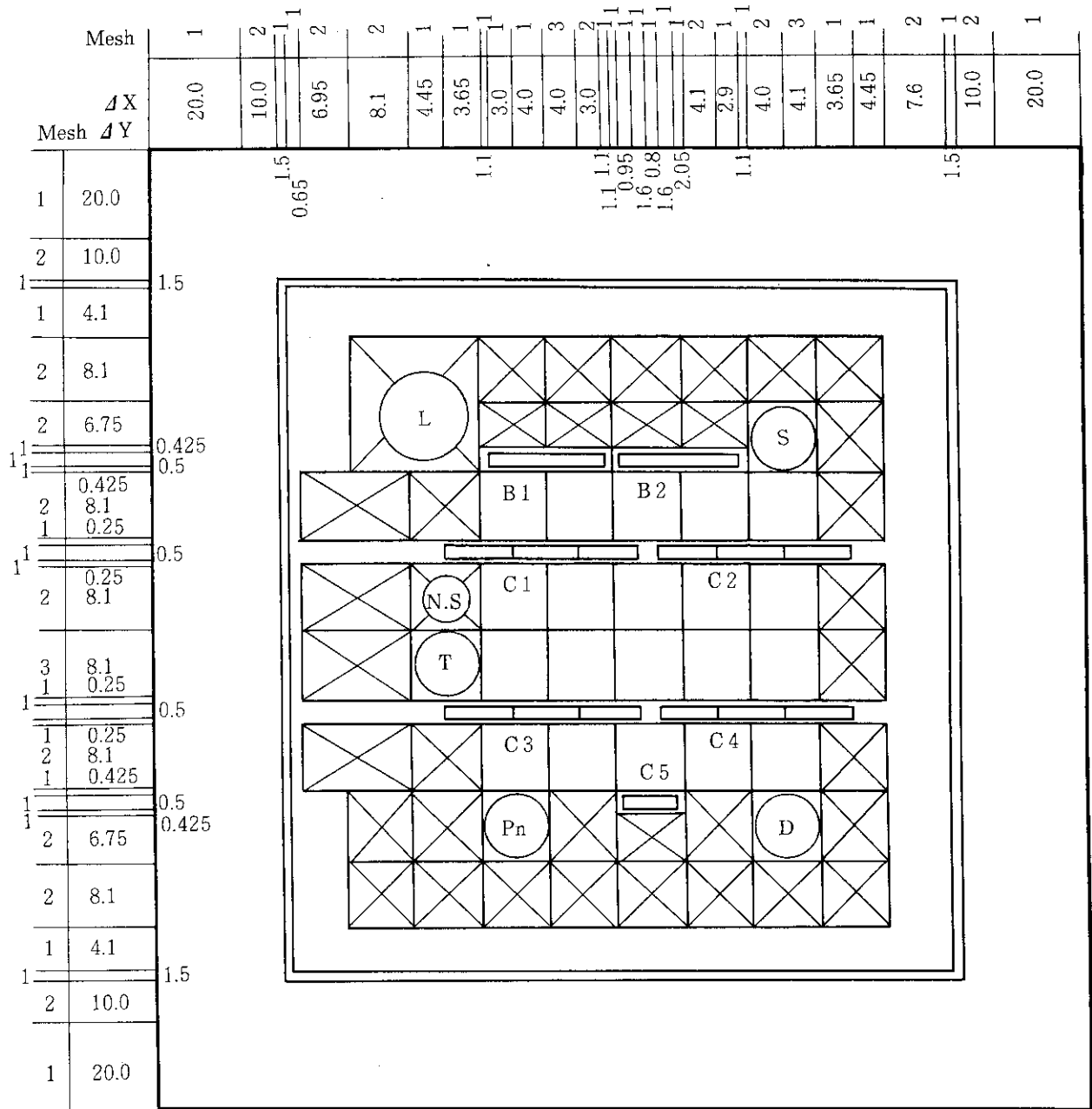


図 8.4.3 E-7 Z 方向熱中性子束分布



(単位 cm)

図 8.6 中性子束 3次元計算体系図 (X-Y 平面)

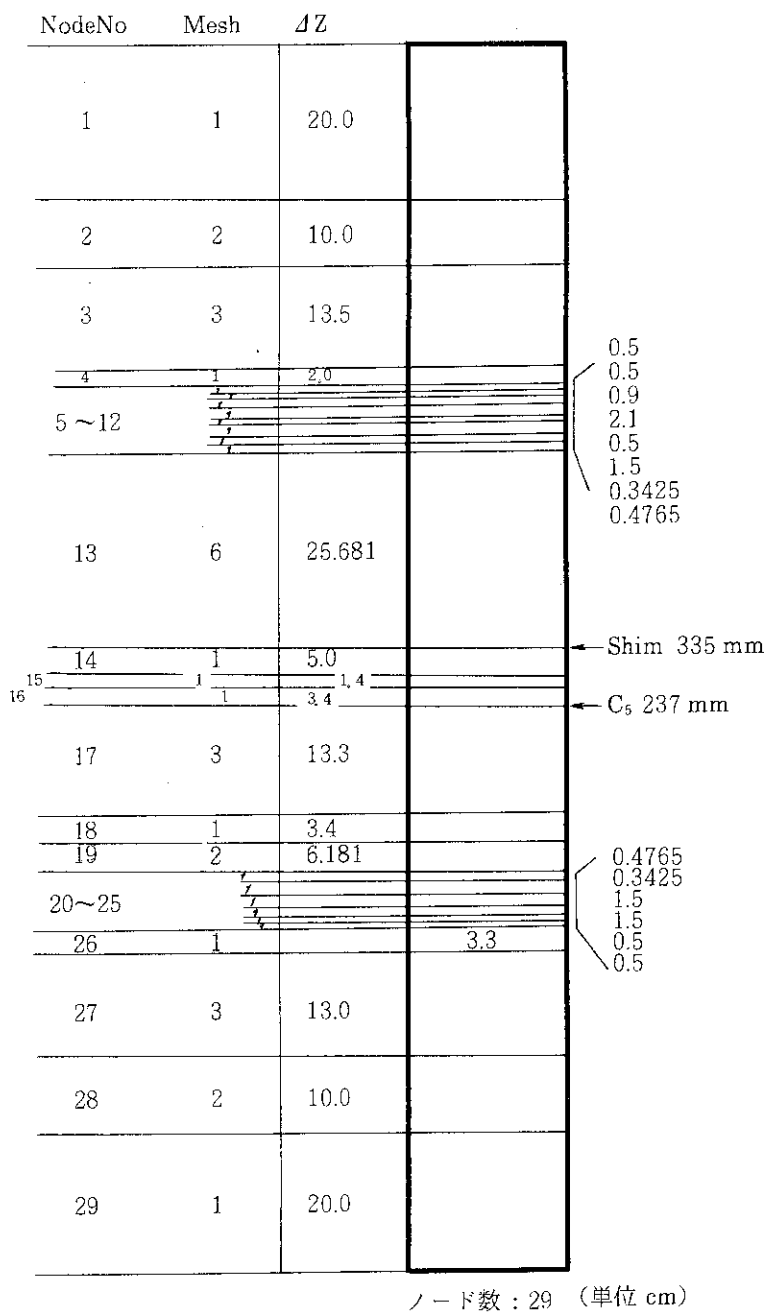


図 8.7 中性子束 3次元計算 Z方向メッシュ分割図

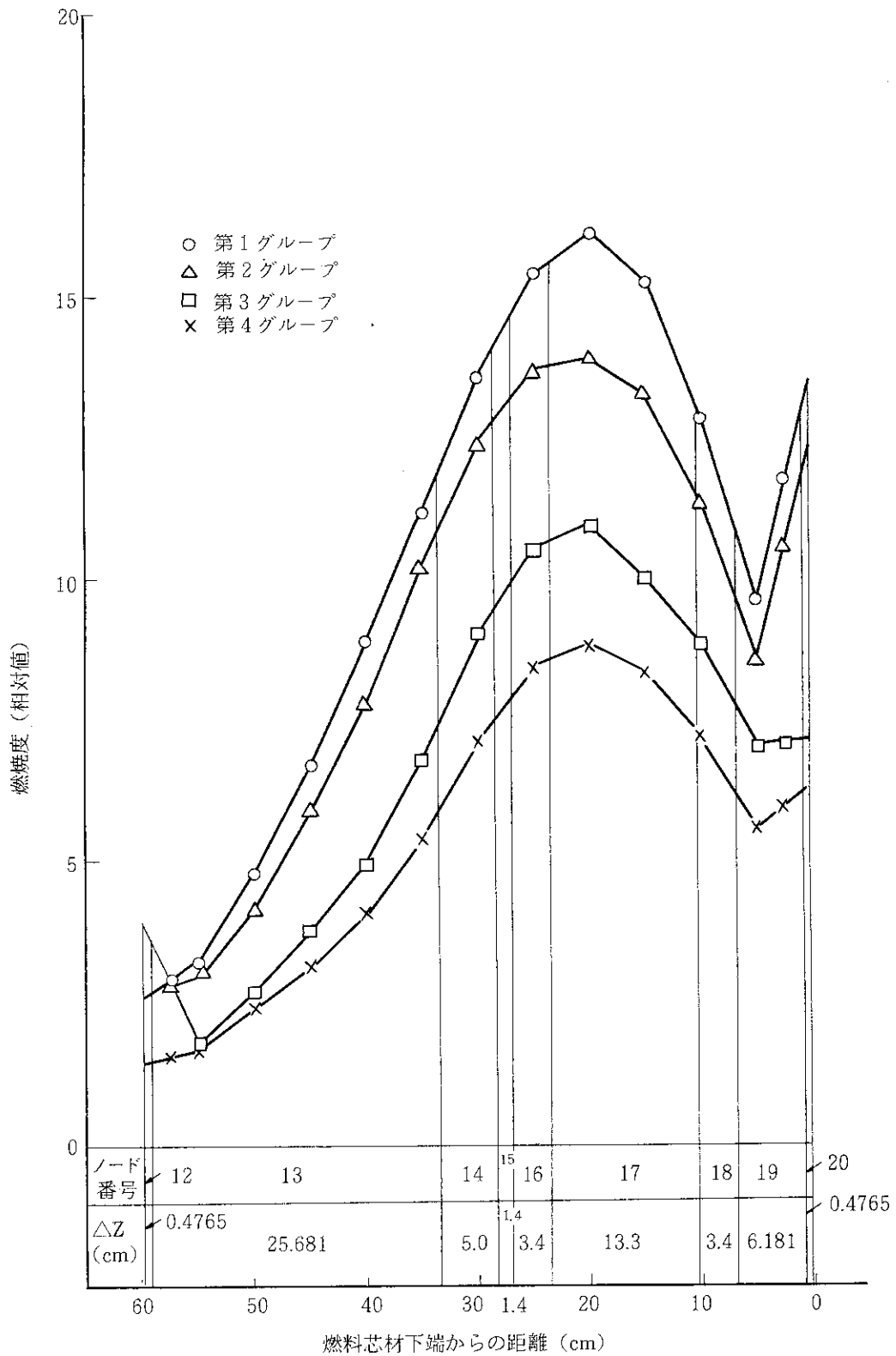


図 8.8 Z方向燃焼分布

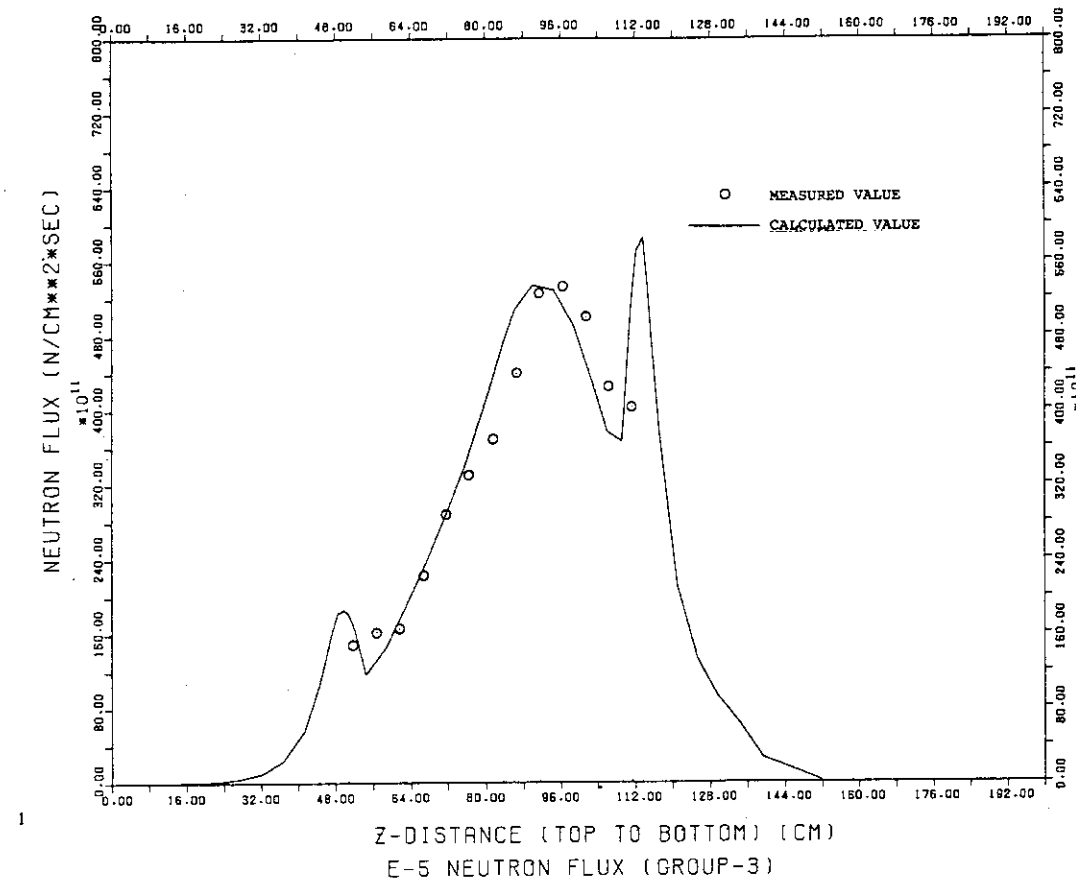
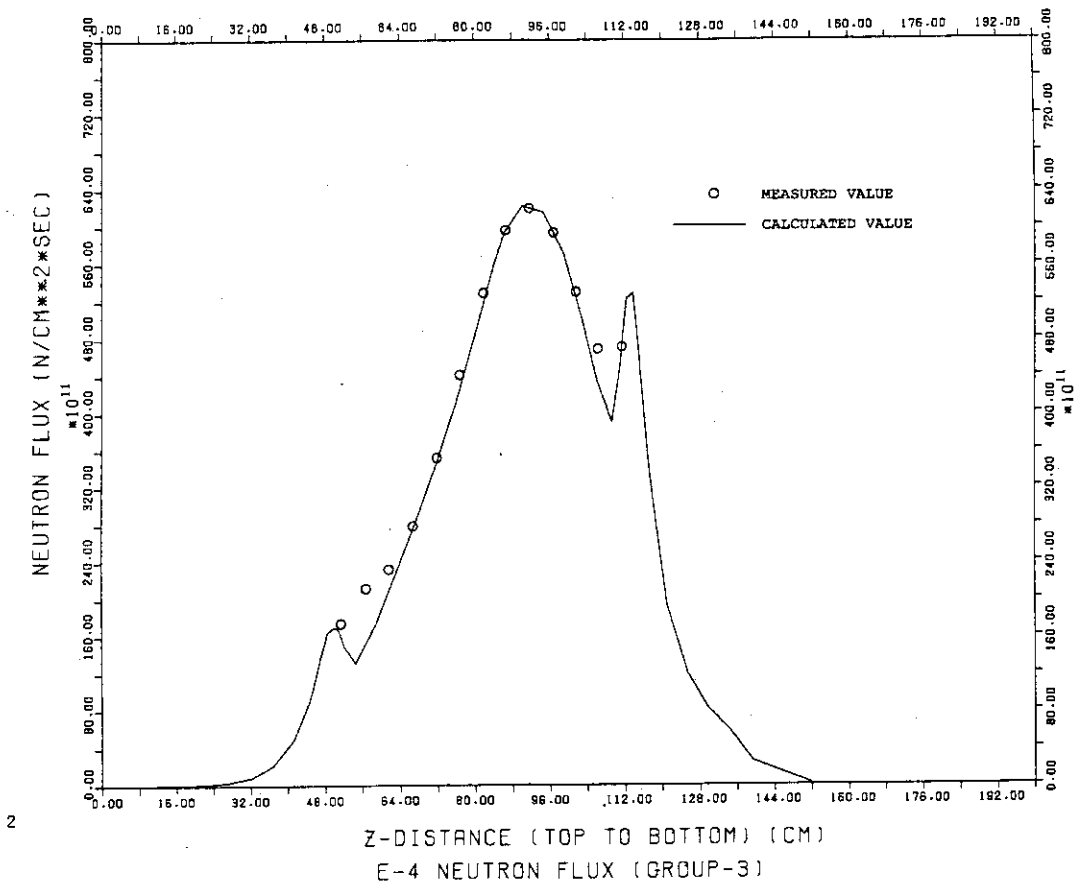


図8.9 熱中性子束の計算値と測定値の比較

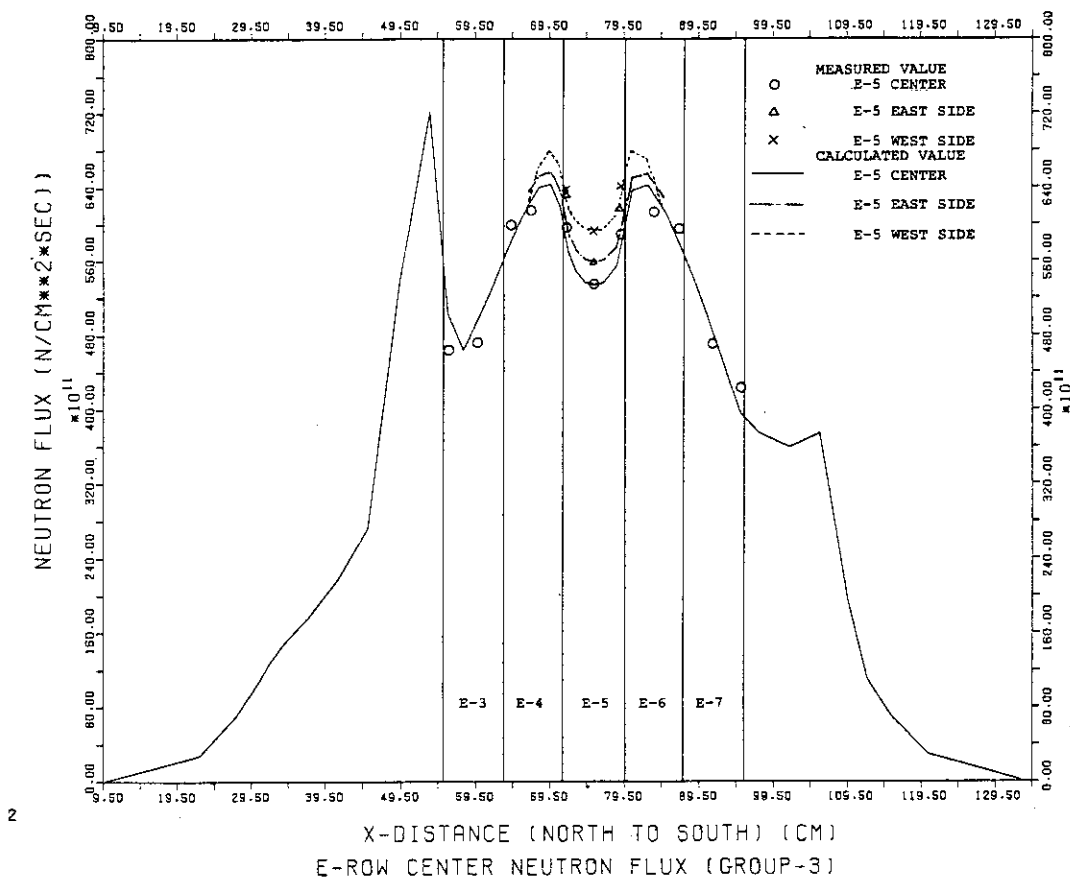
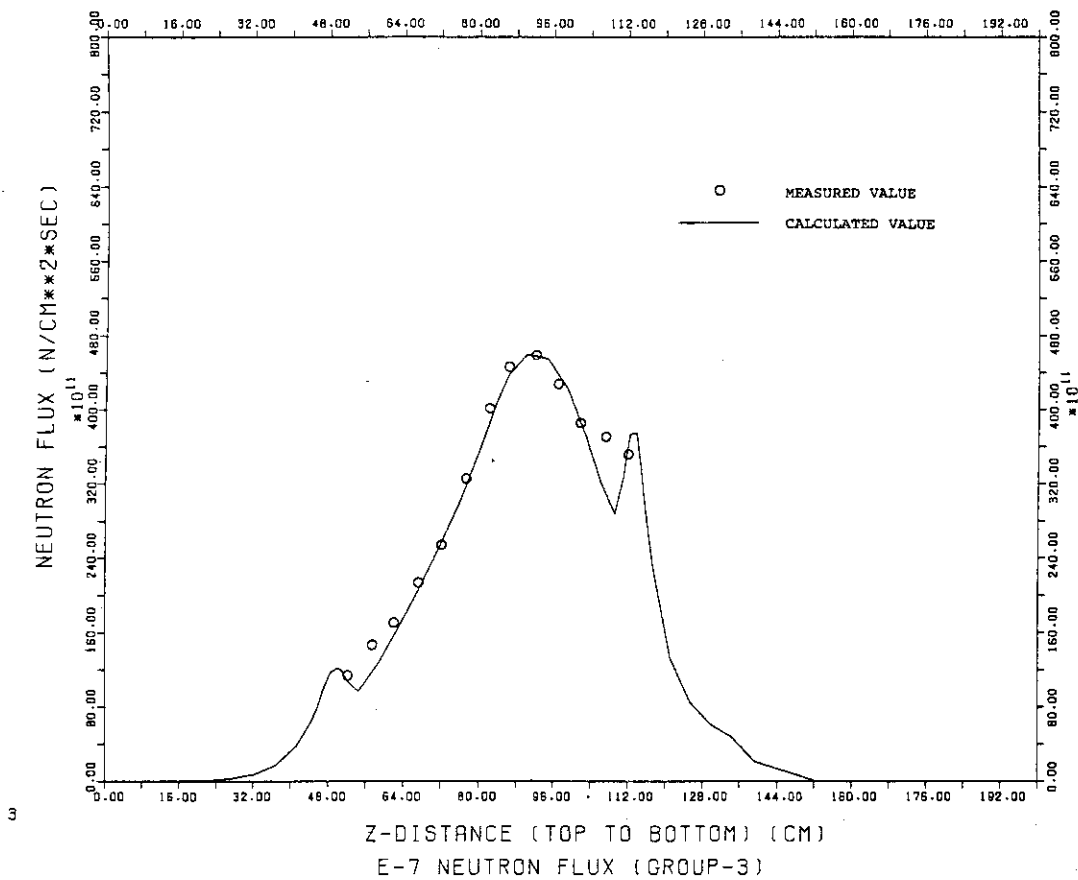


図 8.9 (続き)

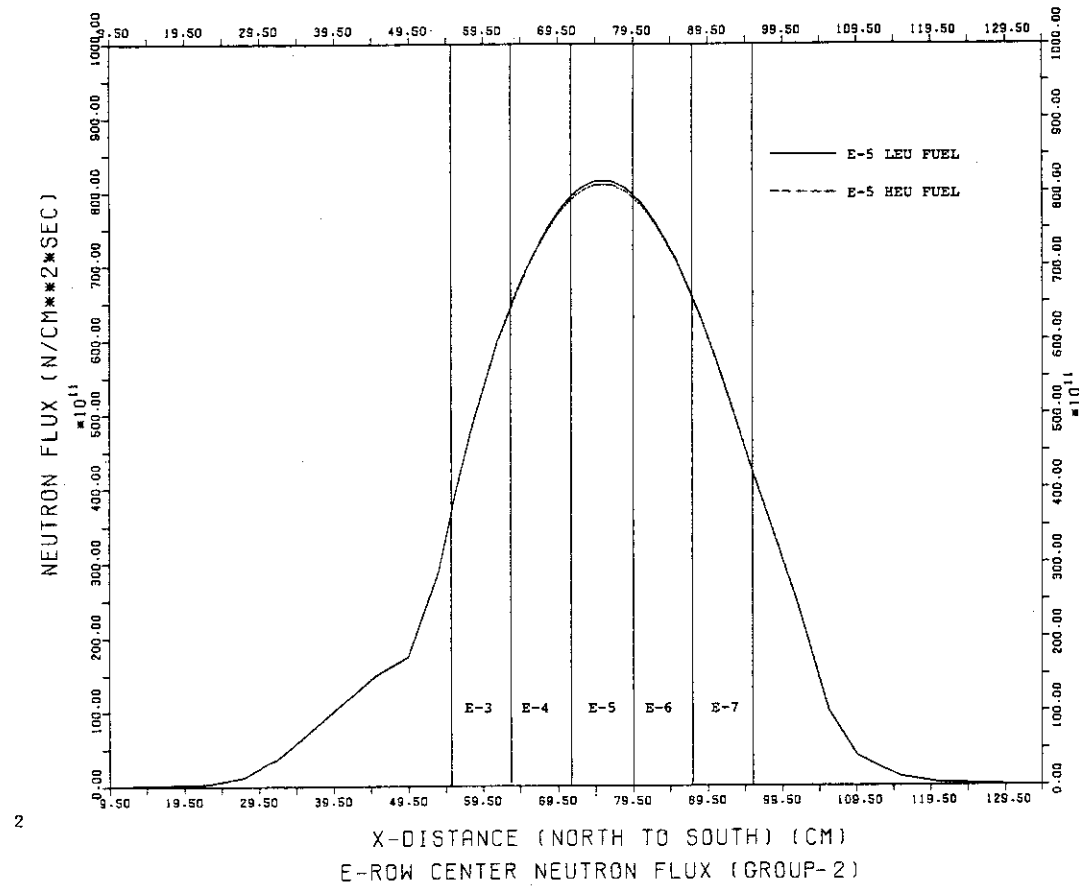
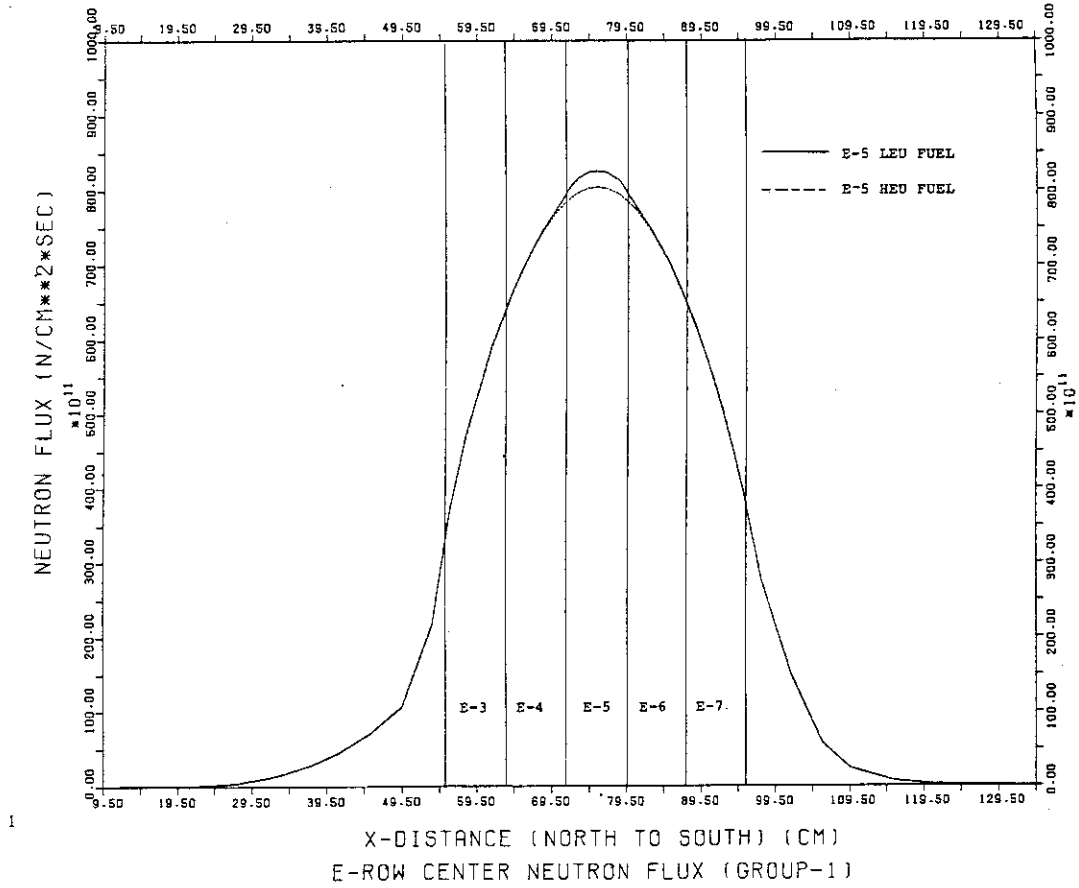


図 8.10 HEU 燃料炉心と E-5 に EFE を入れた時の中性子束および出力分布の比較 (南北方向 E 列中心)

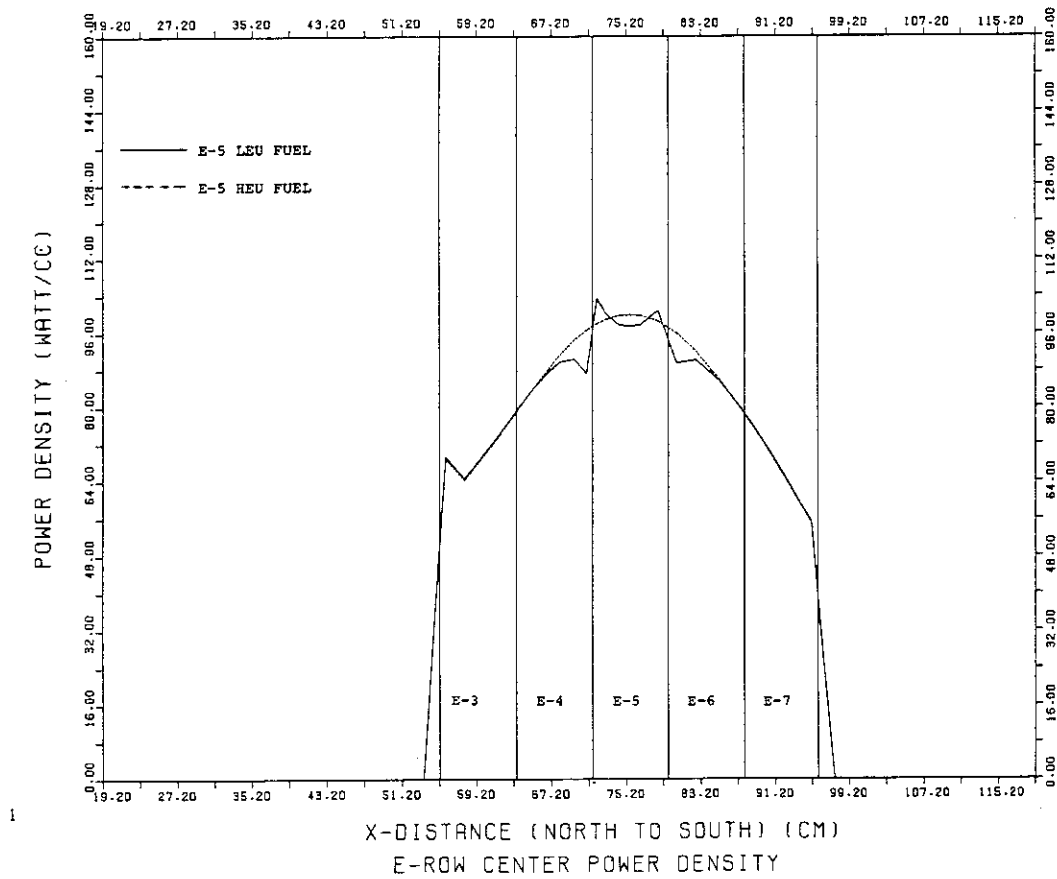
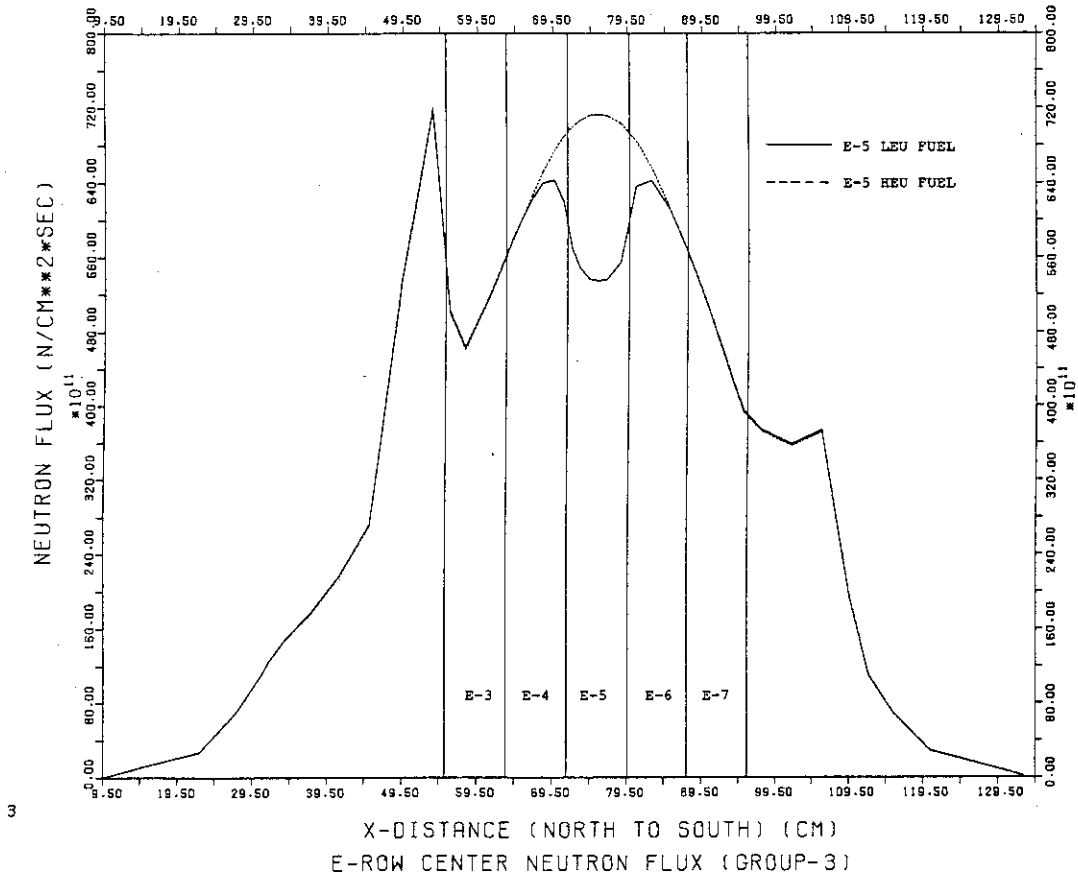


図 8.10 (続き)

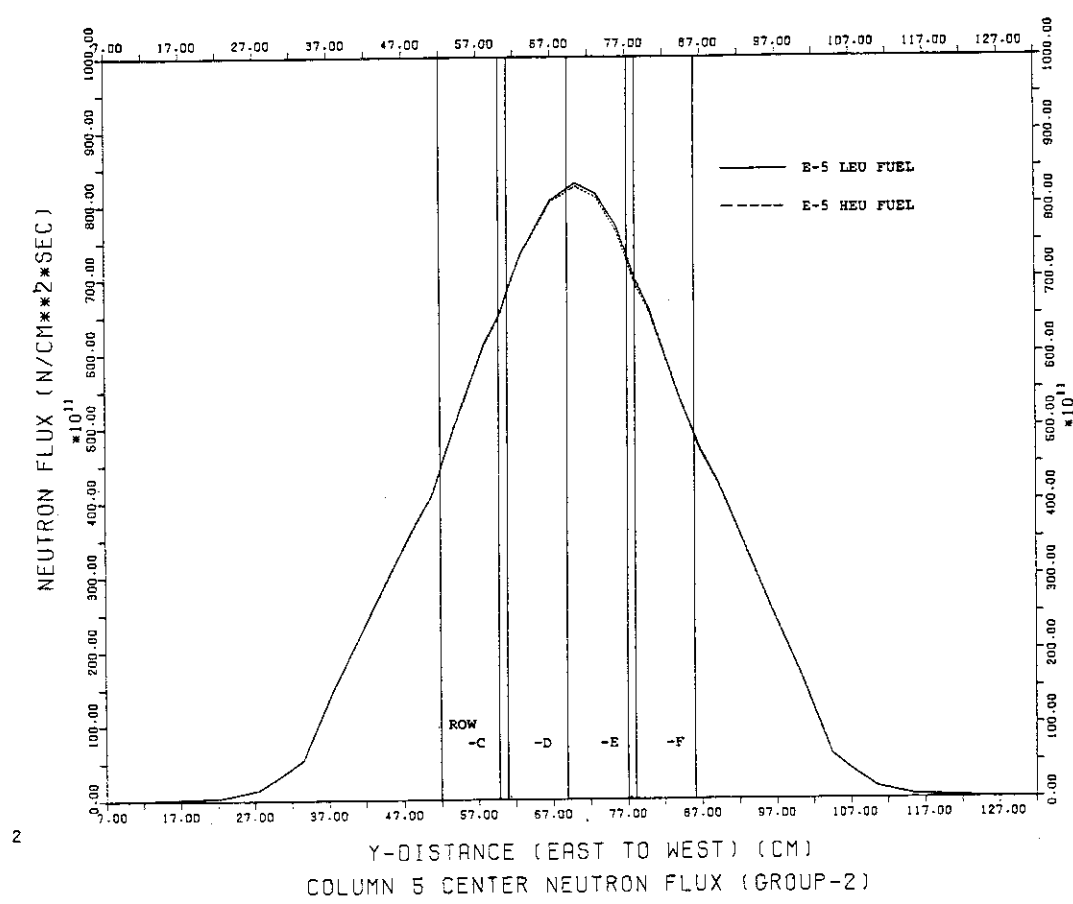
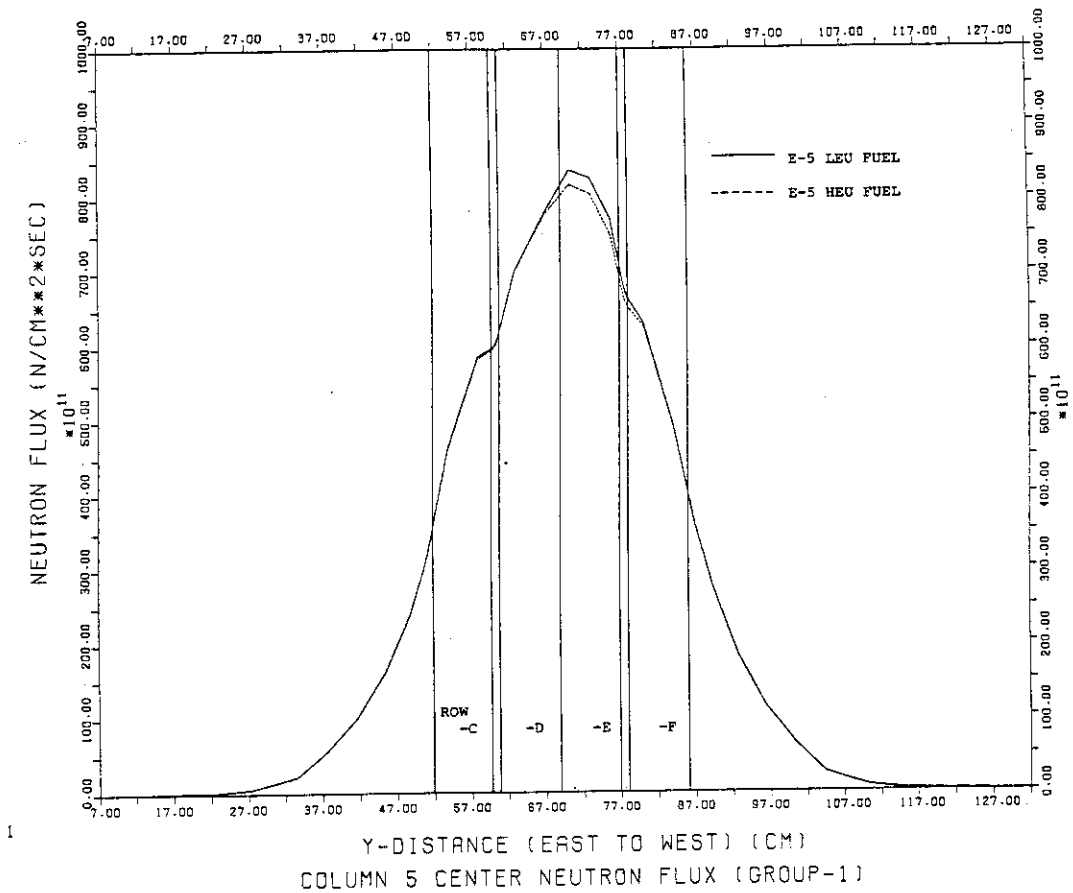


図 8.11 HEU 燃料炉心と E-5 に EFE を入れた時の中性子束および出力分布の比較 (東西方向 5 行中心)

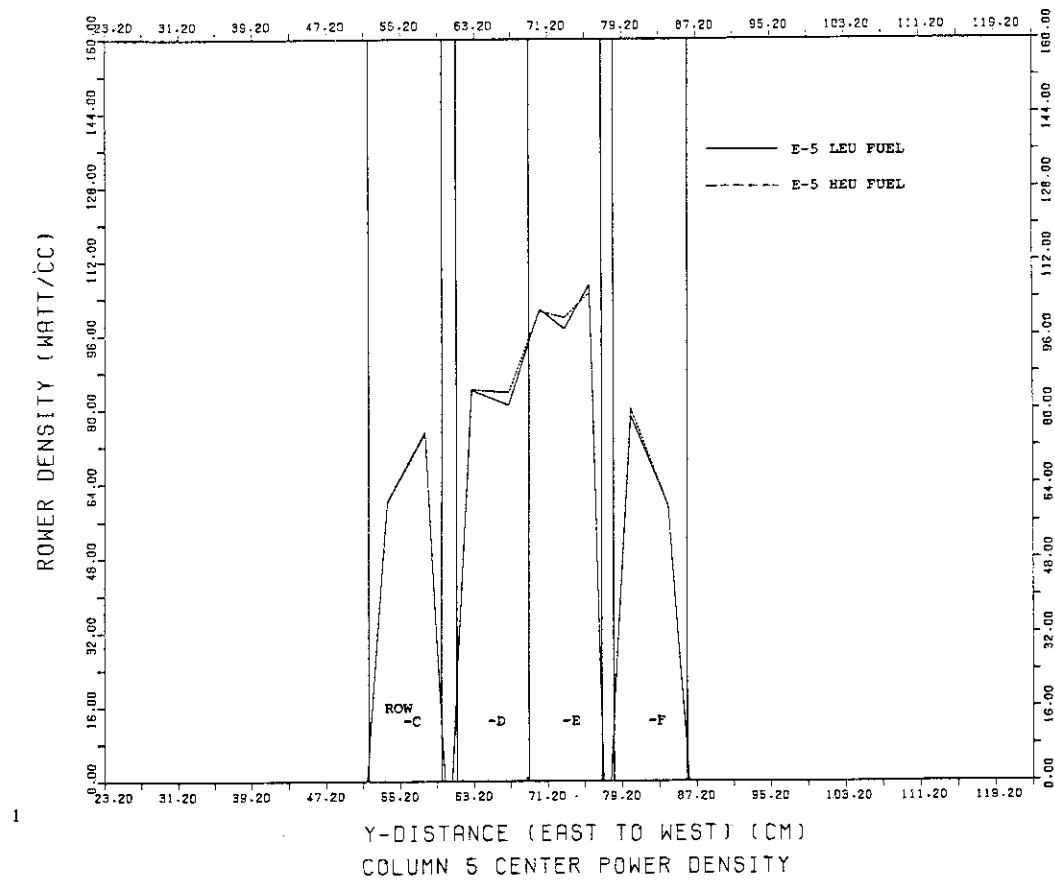
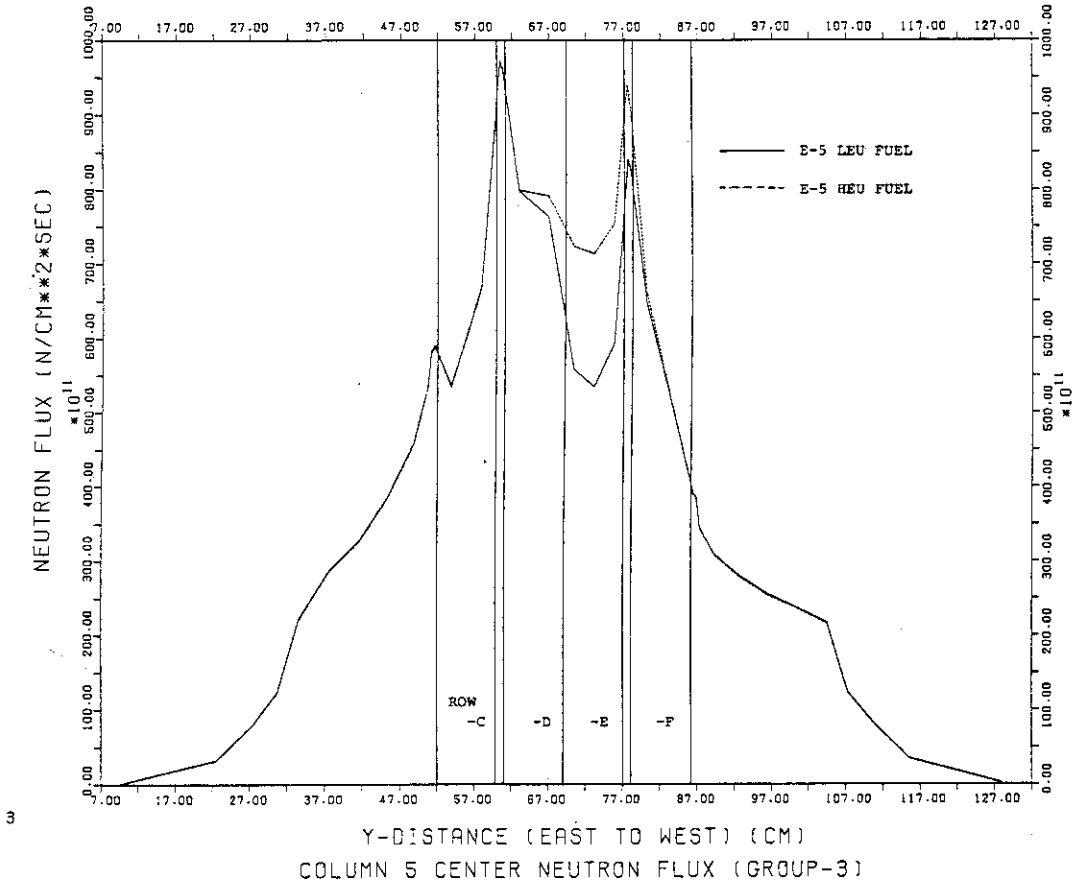


図 8.11 (続き)

9. 結 論

昭和 62 年度に予定されている低濃縮ウラン実証試験用燃料として設計された燃料の核的特性を確認するため、実証試験用燃料と同仕様の E F E を製作し、核的特性測定を行った。また、SRAC コードシステムを用い計算値と測定値を比較した。その結果は次のとおりである。

- 1) 炉心格子位置 E-5 で E F E と H E U 燃料の等価反応度を比較した結果、E F E は H E U 燃料要素の 98.7 % の等価反応度を持ち、H E U 燃料とはほぼ同等の核的性能を持つことが確認された。これにより、実証試験炉心用燃料の見通しが得られ、設計計算の妥当性が示された。
- 2) 2次元全炉心体系で解析した炉心の k_{eff} は、測定値と 1 % 以下の差で一致した。これは、2次元計算時の軸方向バックリングの設定方法が妥当であった事を示すものである。しかし、E F E および H E U 燃料反応度測定炉心と質量係数測定基準炉心の k_{eff} から求めた E F E および H E U 燃料要素の反応度の測定値との差は約 10 % であった。
- 3) 2次元および3次元全炉心体系による制御棒等価反応度の計算では、粗調整安全棒および微調整棒については測定値と 10 % 以下の差でその等価反応度を予測することができる。しかし、後備安全棒については、今回の解析では 20 % を超える差が生じた。この原因は、対数微分定数設定時の炉心の燃料の燃焼度と解析炉心の燃料の燃焼度が異っていたためだと推定された。この点について今後の検討が必要である。
- 4) 燃焼燃料の Z 方向の燃焼度分布を考慮した 3次元全炉心体系による中性子束分布は、測定結果と良い一致を示した。熱中性子束の絶対値の計算値と測定値の差は約 10 % であった。検討の結果、この差は、計算時の熱中性子の Upper Energy と Cadmium Cut-off Energy のエネルギーの差によるものと思われた。H E U 燃料炉心の中に E F E を装荷した場合の熱中性子束は、その中心で約 24 % 低下し、歪の影響は、隣接する H E U 燃料の中心付近まで達することが測定と計算の両方から確認された。
- 5) 反応度、制御棒価値、熱中性分布について計算した結果は、全体的に測定値と良い一致を示したことから、解析手法は妥当であり、低濃縮ウラン実証試験炉心の核特性は、SRAC コードシステムにより充分予測できると考えられる。

謝 辞

EFE の核的特性測定と解析は、試験・研究炉濃縮度低減化計画の一環として行なわれたものである。本報告書は、同計画に携わる多くの方々の御協力の賜であり、ここに感謝の意を表す。特に、原子炉工学部炉物理実験室の土橋敬一郎氏にはSRAC コードシステムの使用と解析手法について多くの基力と助言を頂いた。研究炉開発室の鶴田晴通氏、市川博喜氏、岩崎淳一氏、株アイ・エス・エルの井戸勝氏にはSRAC コードシステムの使用に関し多くの助言を頂いた。熱中性子束測定に際しては研究炉利用課に多くの協力を頂いた。ここに深く感謝する。

参考文献

- 1) K. Tsuchihashi, et al. ; "SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis", JAERI-1285 (1983)
- 2) Edited by K. Tsuchihashi ; "Proceeding of The International Meeting On Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, 24-27 October, 1983, Tokai Japan", JAERI-M 84-073

謝 辞

EFE の核的特性測定と解析は、試験・研究炉濃縮度低減化計画の一環として行なわれたものである。本報告書は、同計画に携わる多くの方々の御協力の賜であり、ここに感謝の意を表す。特に、原子炉工学部炉物理実験室の土橋敬一郎氏にはSRAC コードシステムの使用と解析手法について多くの甚力と助言を頂いた。研究炉開発室の鶴田晴通氏、市川博喜氏、岩崎淳一氏、株式会社アイ・エス・エルの井戸勝氏にはSRAC コードシステムの使用に関し多くの助言を頂いた。熱中性子束測定に際しては研究炉利用課に多くの協力を頂いた。ここに深く感謝する。

参考文献

- 1) K. Tsuchihashi, et al. ; "SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis", JAERI-1285 (1983)
- 2) Edited by K. Tsuchihashi ; "Proceeding of The International Meeting On Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, 24-27 October, 1983, Tokai Japan", JAERI-M 84-073

附録A 燃料板基本セルの原子個数密度

本解析に使用したE F E および H E U 燃料要素の燃料板基本セルの計算に使用した原子個数密度を表A-1に示す。

表A-1 燃料板基本セルの原子個数密度

$[n \times 10^{24} / \text{cm}^3]$

物質	核種	H E U B 型燃料板		L E U 燃料板	
		外板	内板	外板	内板
燃料芯材	U-233	—	—	2.8454-7	5.6073-7
	U-234	4.9773-6	1.0017-5	3.3939-6	6.7954-6
	U-235	7.7895-4	1.5683-3	5.5670-4	1.1134-3
	U-236	3.4650-6	6.9724-6	3.9285-6	7.8569-6
	U-238	4.8335-5	9.7313-5	2.2259-3	4.4519-3
	Al	5.8893-2	5.7317-2	5.4139-2	4.5870-2
	Fe	—	—	7.8799-5	6.6766-5
	Si	—	—	4.6999-5	3.9834-5
被覆材	Al	5.9922-2		5.7733-2	
	Mg	—		1.8202-3	
	Fe	1.3387-4		7.2016-5	
	Si	5.7890-5		6.8735-5	
	Cr	—		3.0940-6	
	Mn	—		8.7849-6	
軽水	H	6.6634-2		6.6634-2	
	O	3.3317-2		3.3317-2	

附録 B HEUA・B型混合16本燃料炉心の制御棒等価反応度

図5.7図に示したHEUA・B16本燃料炉心の制御棒等価反応度の計算を第6章で述べた方法と同じ解析手法で解析し、測定値と比較した。使用した対数微分定数は0.38333である。表A-2に計算値と測定値の比較を示す。この炉心についての計算値は、2次元計算では粗調整安全棒が約-5~-7%、微調整棒が約+0.7%、後備安全棒が約+10%~-6%、3次元計算では、各々、約+3~-2%、-5%、+4~-10%で測定値と良い一致を示している。

表A-2 HEUA・B型混合16本燃料炉心の制御棒等価反応度の測定値と計算値の比較

制御棒	測定値 (ρ_E)	2次元計算		3次元計算	
		計算値 (ρ_{C_2})	ρ_{C_2}/ρ_E	計算値 (ρ_{C_3})	ρ_{C_3}/ρ_E
C ₁	4.202	3.920	0.933	4.338	1.032
C ₂	4.260	4.026	0.945	4.351	1.021
C ₃	4.051	3.860	0.953	4.176	1.031
C ₄	4.343	4.043	0.931	4.262	0.981
C ₅	0.522	0.557	1.067	0.497	0.952
B ₁	0.750	0.787	1.049	0.727	0.969
B ₂	1.180	1.113	0.943	1.067	0.904
B ₁ + B ₂	1.510	1.675	1.109	1.577	1.044