

JAERI-M

82-103

多目的高温ガス実験炉バックアップ炉
心の特性検討(その2)
—セミピン型燃料炉心の総合特性—

1982年9月

安野 武彦・宮本 喜晟・三竹 晋・新藤 隆一
荒井 長利・平野 光将・江崎 正弘・佐藤 貞夫
鈴木 勝男・鈴木 邦彦

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開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、このほかに財團法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

JAERI-M 82-103

多目的高温ガス実験炉バックアップ炉心の特性検討（その2）

— セミピン型燃料炉心の総合特性 —

日本原子力研究所 動力炉開発・安全性研究管理部

安野武彦・宮本嘉晟・三竹 晋・新藤隆一

荒井長利・平野光将・江崎正弘^{*}・佐藤貞夫

鈴木勝男・鈴木邦彦

（1982年7月20日受理）

多目的高温ガス実験炉のバックアップ炉心として、内面冷却型燃料棒（通称セミピン型）を用いた燃料体から構成される炉心について、燃料および可燃性毒物の装荷法ならびに制御棒引抜計画などを検討するとともに、炉心の核特性、熱流動特性や安全特性などの総合的な特性を解析した。

その結果、本炉心は炉心設計基準を満足するとともに、セミピン型燃料体が十分Mark-III型燃料体の代替燃料体となりうることがわかった。

*三菱原子力工業（株）

Design Studies of Backup Cores for the Experimental
Multi-Purpose VHTR (2); Overall characteristics of
Backup Core with Semi-pin Type Fuel Elements

Takehiko YASUNO, Yoshiaki MIYAMOTO, Susumu MITAKE
Ryuichi SHINDO, Taketoshi ARAI, Mitsumasa HIRANO
Masahiro EZAKI*, Sadao SATO, Katsuo SUZUKI
and Kunihiiko SUZUKI

Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received July 20, 1982)

For the Experimental Multi-Purpose Very High Temperature Reactor, design studies have been made for the core of the fuel elements with internally cooled fuel rods (semi-pin type rods).

Studies are as follows;

- i) Study of core constitution.
 - Loading scheme of fuel and burnable poison
 - Scheme of control rod withdrawal sequence
- ii) Analyses of overall core performances
 - Nuclear characteristics
 - Thermal-hydraulic characteristics
 - Safety characteristics

It is concluded that this core meets almost all design requirements of the experimental VHTR and the semi-pin type fuel element can be adopted for the experimental VHTR as the substitution of the standard Mark-III fuel element.

Keyword; VHTR Reactor, Core Design, Nuclear Design, Thermo-hydraulic Design, Safety Analysis, Fuel Loading, Burnable Poison Loading, Control Rod Withdrawal Sequence.

* Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

目 次

1. 概 要.....	1
1. 1 経 緯.....	1
1. 2 検討の範囲と方法.....	1
1. 3 検討結果.....	2
2. 検討の手順と方法.....	18
2. 1 核特性解析.....	18
2. 2 熱流動解析.....	29
3. 廉心構成の検討.....	38
3. 1 予備検討.....	38
3. 1. 1 反応度収支.....	38
3. 1. 2 軸方向燃料装荷法の検討.....	40
3. 1. 3 廉心構成案の立案.....	42
3. 2 詳細検討.....	67
3. 2. 1 廉心構成案の特性比較.....	67
3. 2. 2 代表廉心の選定.....	68
4. 選定廉心の特性解析.....	87
4. 1 核特性解析.....	87
4. 1. 1 反応度補償特性.....	87
4. 1. 2 核特性の燃焼変化.....	88
4. 1. 3 温度係数と動特性パラメータ.....	90
4. 2 熱流動特性解析.....	118
4. 2. 1 流量割合 90 % の場合	118
4. 2. 2 流量割合 85 % の場合	119
4. 3 安全特性.....	128
4. 3. 1 初期の原子炉出力変動と燃料温度変化.....	128
4. 3. 2 事故後の長期間温度変化.....	129
5. 結 論.....	137
謝 辞.....	137
参考文献.....	137

Contents

1. Introduction	1
1.1 History	1
1.2 Scope and procedure of study	1
1.3 Summary of results	2
2. Procedure and method of analyses	18
2.1 Analyses of nuclear characteristics	18
2.2 Analyses of thermo-hydraulic characteristics	29
3. Studies of core constitutions	38
3.1 Preliminary study	38
3.1.1 Reactivity balance	38
3.1.2 Axial fuel loading	40
3.1.3 Core constitution	42
3.2 Detailed study	67
3.2.1 Comparison of core properties for selected core constitutions	67
3.2.2 Determination of representative core constitution	68
4. Performance of the representative core	87
4.1 Nuclear characteristics	87
4.1.1 Characteristics of reactivity compensation	87
4.1.2 Burnup dependency of nuclear characteristics	88
4.1.3 Temperature coefficients and kinetic parameters	90
4.2 Thermal-hydraulic characteristics	118
4.2.1 Case of effective core flow rate 90%	118
4.2.2 Case of effective core flow rate 85%	119
4.3 Safety characteristics	128
4.3.1 Variation of reactor power and fuel temperature in initial state of burnup	128
4.3.2 Long term variation of core temperature after accident	129
5. Conclusion	137
Acknowledgements	137
References	137

1. 概 要

1.1 経 緯

多目的高温ガス実験炉の炉心設計は、第1次概念設計炉心（Mk-III炉心）^{1,2)}を標準炉心として、その改良および調整が図られている³⁾。この炉心に用いる燃料体は、中空型(外面冷却)燃料棒を装填するピン・イン・ブロック型燃料である。他方、標準炉心とは異なる型式の燃料体を用い、主として熱流動特性の設計余裕の向上を図るための炉心設計の検討も進めて来た。この炉心をバックアップ炉心と呼んでいる。バックアップ炉心に使用する燃料体として、セミピン型燃料体（内面冷却棒型燃料体とも呼ばれる）とマルチホール型燃料体とを考え、これらの燃料体とそれで構成される炉心の主要諸元とを選定し、初期炉心の主要特性を把握した⁴⁾。

その後、セミピン型燃料体炉心とマルチホール型燃料体炉心との類似性を考慮して、マルチホール型燃料体炉心に解析の重点を置いたバックアップ炉心の燃焼特性の検討を実施した⁵⁾。この検討によって、バックアップ炉心の基本概念の構築とフィージビリティの検討が終了した。セミピン型燃料およびマルチホール型燃料とともに多目的高温ガス実験炉炉心としての要求を大筋において満足するものと結論づけられた。

今回、システム総合設計⁶⁾の炉心設計の指針および基準の改訂に対応した標準炉心と同一レベル化をはかるため、バックアップ炉心に対して、燃料および可燃性毒物の装荷法ならびに制御棒操作計画の検討を重点とする炉心構成の検討、さらに、それらの結果をふまえて設定された選定炉心の主要特性の解析を行った。本検討では、セミピン型燃料体炉心を対象としており、昭和54年9月から55年5月にわたり、日本原子力事業(株)および石川島播磨重工業(株)の協力のもとに実施された。

1.2 検討の範囲と方法

バックアップ炉心は標準炉心と代替可能な炉心という性格を持つため、第1.1表に示す炉心基本条件、炉心形状の寸法、燃料体外形寸法、制御棒形状・寸法などは標準炉心と同じ設計値を用いている。また、燃料体は従来のセミピン型燃料体⁴⁾と同じ構造であり、それを第1.1図に示す。

本検討に適用した炉心設計基準を第1.2表に、また、この基準の具体的適用法を第1.3表に示す。

本検討の方法は第1.2図に示される。炉心構成の検討では、予備検討および詳細検討の2段階に分けて実施した。予備検討では、反応度収支の検討と軸方向濃縮度配分の検討を行い、12種類の炉心構成案を設定した。詳細検討では、核計算に使用する炉心温度分布の効果および制御棒挿入パターンを考慮して、炉心構成案の特性を検討した。

次に、選定された炉心構成について、全燃焼期間を通じて、核特性および熱流動特性の解析を行うとともに、安全評価の観点から、制御棒逸出事故時の炉出力、炉心および炉体構造物の温度

変化を解析した。

1.3 検討結果

炉心構成の検討では、径方向に一様、軸方向に3領域の濃縮度配分を行い、径方向、軸方向とも一様に可燃性毒物を装荷することにより、設計基準を満足する炉心構成が可能であることが明らかになった。最終的に選定された炉心構成の主要諸元を第1.4表に示す。また、選定された炉心の燃焼初期状態における炉心の主要特性を第1.5表に示す。

第1.1表 核設計および熱設計条件

項 目	設 計 条 件
1. 核 設 計	
(1) 燃 料 濃 縮 度	燃料は低濃縮ウランとし、その濃縮度は 10w/o 以下、天然ウラン相当以上とする。但し、1 燃料体内では同一濃縮度とする。
(2) 燃 料 廉 内 滞 在 時 間	燃料の炉内滞在時間は 2 年以上とする。但し、原子炉稼動率は 50% 以上とし、60% を目標とする。
2. 热 設 計	
(1) 热 出 力	公 称 50 MW
(2) 原子炉出口冷却材温度	1000°C
(3) 原子炉入口冷却材温度	395°C
(4) 1 次冷却系圧力	40 kg/cm²G

第1.2表 設 計 基 準

項 目	設 計 基 準
1. 核 設 計	
(1) 原子炉停止余裕	制御棒による原子炉停止系は、あらゆる通常状態において、制御棒に固着があったとしても、原子炉を未臨界にでき、かつ未臨界を維持できること。
(2) 制御棒 最大反応度価値	制御棒の最大反応度価値は、想定される反応度事故に対して、原子炉冷却材圧力バウンダリの破損や、炉心、炉心支持構造物ならびに圧力容器内部構造物の破壊を生じないものであること。
(3) 後備停止系 反応度補償量	後備停止系は、すべての運転状態（制御棒は、その挿入状態を維持する）において、その一部の系統が作動不能であったとしても、原子炉を未臨界にでき、かつ未臨界を維持できること。
2. 热 設 計	
(1) 層 流 化 防 止	定格運転時に層流化現象を起さないこと。

第1.3表 設計の方法

項目	設計の方法
1. 核設計	
(1) 未臨界度	原子炉停止余裕の評価に際しての未臨界度は $0.01 \Delta K_{eff}$ 以上とすること。
(2) 制御棒の固着	制御棒の固着状態としては、最大反応度効果をもつ同一直径パイプ内にある 1 対の制御棒が固着して炉心に挿入できない状態を想定すること。
(3) 制御棒逸出事故における原子炉停止余裕	制御棒による原子炉停止系は制御棒逸出事故によってもたらされる高温状態において、制御棒に固着があったとしても原子炉を未臨界にでき、かつ未臨界を維持できるものとする。本検討では、この高温状態として“395°C, クリーン炉心”を想定すること。
(4) 制御棒 最大反応度値	制御棒の最大反応度値としては、以下の値とすること。 a) 低温臨界状態 $0.040 \Delta K_{eff}/対$ b) 30%出力状態 $0.025 \Delta K_{eff}/対$ c) 定格出力状態 $0.015 \Delta K_{eff}/対$
(5) 後備停止系の 作動不能	後備停止系の作動不能としては、駆動系統が同一である 1 組が作動せず、その制御素子が炉心に挿入できない状態を想定すること。
(6) 可燃性毒物の 反応度補償量	可燃性毒物は、反応度補償量および燃焼にともなう炉心反応度回復量を極力小さくすること。
(7) 制御棒感度	制御棒は起動、出力上昇、定格運転ならびに通常停止を円滑に行いうる感度を有することとするが、本検討においては、出力上昇に用いる制御棒の感度範囲（目安値）を $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5} \Delta K_{eff}/cm/本$ とすること。
(8) 反応度値 評価誤差	反応度制御素子の反応度補償量計算には、次の計算誤差を見込むこと。 a) 制御棒、後備停止系 10% b) 可燃性毒物 15%

項 目	設 計 の 方 法
2. 热 設 計	
(1) 層 流 化 防 止	<p>加熱による層流化を防止する目安として次の関係を用いる。</p> $q^+ < q^{+crit}$ <p>ここで</p> $q^+ = q'' / G \cdot CpTb$ $q^{+crit} = 0.584 \times 10^{-8} Re_b^{1.465}, (2000 \leq Re_b \leq 6000)$ <p>q'' : 加熱壁の熱流束 G : 重量速度 Cp : 冷却材比熱 Tb : 冷却材混合平均温度 Re_b : 混合平均温度で評価したレイノルズ数</p> <p>上記の評価に際しては不確かさの効果を考慮する必要があるが、本検討においては省略して良い。</p>
(2) 最小レイノルズ数	定格時における燃料冷却流路のレイノルズ数の最小値が3500以上であることを目標とすること。
(3) 燃料の使用温度	<p>炉心内の出力分布や流量配分の最適化のために、1/6 ブロックあたりで評価される燃料最高温度を指標とする場合、次の条件を満たすこと。</p> <p>a) 公称燃料最高温度 1350°C以下 b) システマチック燃料最高温度 1550°C以下</p> <p>ここで、公称温度とは、炉心の径方向ピーキングとして、1/6 ブロック平均の局所チャンネルピーキングを考慮して評価した値を言い、システム温度とは、前記公称温度をもとにシステム因子を用いて評価する値である。</p>

第1.4表 セミピン型燃料炉心の基本諸元

1. 一般諸元			
1	原子炉型式	黒鉛減速, ヘリウム冷却, 低濃縮ウラン型	
2	原子炉熱出力(公称)	MW	50
3	冷却材温度 原子炉入口ノズル	°C	395
	原子炉出口ノズル	°C	1000
	冷却材圧力 原子炉出口ノズル	Kg/cm ² G	40
	1次系冷却材流量	Kg/h r	57318
4	燃料型式	2酸化ウラン被覆粒子黒鉛内分散型 セミピン型燃料体	
5	原子炉容器	鋼製圧力容器	
6	冷却回路数	2ループ	
7	熱交換方式	中間熱交換方式	
2. 原子炉本体			
2.1 炉心主要諸元			
1	炉心等価直径	mm	2690
	炉心有効高さ	mm	4000
	反射体厚さ 周辺反射体	mm	110
	上下反射体	mm	114
2	燃料体型式	6角黒鉛ブロック内 内面冷却中空燃料棒挿入型	
	燃料体カラム数		73
	標準燃料体		66
	制御棒孔付燃料体		7
	可動反射カラム数		66
	標準可動反射体		54
	制御棒孔付可動反射体		12
	カラム当たり燃料体数		7
	カラム当たり反射体数 上部および下部		2
	周辺		11
	燃料体数		511
	標準燃料体		462
	制御棒孔付燃料体		49

2.1 炉心主要諸元

3	可動反射体数	1018
	標準可動反射体	858
	制御棒孔付可動反射体	160
4	制御棒	
	全数(炉心／反射体部)	38(14/24)
5	後備停止素子	
	全チャンネル数(炉心／反射体部)	19(7/12)
6	燃料装荷方法	
	径方向	一様
	軸方向(炉心上部より) W/O	5.3, 5.3, 4.2, 4.2, 3.0, 3.0, 3.0
7	燃料装荷量	ton HM
		2.4
8	冷却材流動方向	下降流
	冷却材流量調節方式	炉心上部, 7カラム単位領域別
9	制御棒炉内装置	双子状, 炉内一様
	後備停止素子チャンネル炉内配置	
10	制御棒駆動位置	炉同一様
	後備停止素子挿入方向	上部
11	燃料取替方法	上部より
	燃料取替位置	炉停止時, 全炉心同時交換
12		上部取替

2.2 燃料体

1	燃料体型式	6角型黒鉛ブロック, セミピン型燃料棒挿入型	
	黒鉛ブロック		
	材質	SM1-24相当	
	密度	g/cm ³	
	平径(ピッチ)	mm	
	高さ	mm	
2	燃料棒挿入孔数	標準 ブロック	制御棒孔付 ブロック
	冷却孔数	36	15
	CR&RSS孔数	36	15
		—	3

2.2 燃料体

		標準 ブロック	制御棒孔付 ブロック	
	可燃性毒物孔数	6	—	
	燃料棒挿入孔径	mm 36.0	mm 36.0	
	燃料棒外径	mm 34.0	mm 34.0	
	CR&RSS孔径	mm —	mm 104	
	燃料体擱孔径(最大)	mm 50	mm 50	
	可燃性毒物孔径	mm 8.5	mm —	
	ダウエル個数/ブロック	3	3	
3	黒鉛スリーブ		SM1-24相当	
	材質			
	密度	g/cm ³ 1.8		
	内径	mm 12.0		
	外径	mm 21.7		
	全長(ダウエル部燃料部)	mm 555(500)		
4	燃料コンパクト		オーバーコートプレス型中空円筒ペレット	
	型式			
	内径	mm 22.0		
	外径	mm 34.0		
	被覆粒子充填率		0.20	
	重金属密度	g/cm ³ 0.51		
	マトリックス密度	g/cm ³ 1.65		
	平均密度	g/cm ³ 2.16		
	製造時粒子破損率		<1×10 ⁻⁴	
	スタック長さ	mm		
	標準燃料棒		520	
	ダウエル部燃料棒		465	
5	被覆燃料粒子		低濃縮ウラン4重被覆型	
	型式			
	直径	μ 920		
	燃料核 材質		2酸化ウラン	
	直径	μ 600		
	密度	g/cm ³ 10.4		

2.2 燃料体		第1層	第2層	第3層	第4層			
6	被覆層	低密度 PyC	高密度 PyC	SiC	高密度 PyC			
	材質							
	厚さ	μ	60	30	25			
	密度	g/cm^3	1.1	1.8	3.2			
	異方性	B A F	—	< 1.1	< 1.1			
燃料体重量								
標準燃料体		Kg	72.5					
制御棒孔付燃料体		Kg	49.9					
全炉心		t on	35.9					
2.3 反応度制御素子								
1	制御棒							
	型式	軸方向多分割2重円筒ペント型						
	本数	38						
	吸收体							
	材質	B_4C と黒鉛粉末混合焼結体						
	内径	—						
	外径	—						
	有効長	—						
	ホウ素濃度	w/o						
	保護管							
2	材質	ハステロイーX						
	内筒 内径	—						
	外径	—						
	外径 内径	—						
	外径	—						
	後備停止系							
	型式	ホウ素入り黒鉛球落下挿入						
	基数	19						
	材質	B_4C と黒鉛粉末混合焼結体						
	ホウ素濃度	w/o						
	外径	—						

2.3 反応度制御素子		
3	可燃性毒物	中実細棒を標準燃料体ブロックに封入 B ₄ Cと黒鉛粉末焼結体
	型 式	
	材 質	
	外 径	8
	スタック長さ	500
	B ₄ C粒子径	—
	ホウ素濃度	1.0
	装荷本数	2
2.4 流量調節装置		
	型 式	7カラム単位領域別、上下駆動方式
	基 数	19
	材 質	ステンレス鋼
2.5 可動反射体		
1	型 式	6角型黒鉛ブロック
2	黒鉛ブロック	
	種 類	上下反射体、周辺反射体
	材 質	SM1-24相当
	密 度	1.8
	平 径	299(ピッチは300)
	高 さ	570
		標準 ブロック
	CR&RSS孔数	—
	CR&RSS孔径	—
	反射体掘孔径(最大)	50
	ダウエル個数/ブロック	3
		制御棒孔付 ブロック
2.6 固定反射体		
	型 式	不規則形ブロック
	材 質	原子炉級黒鉛

2.7 原子炉压力容器

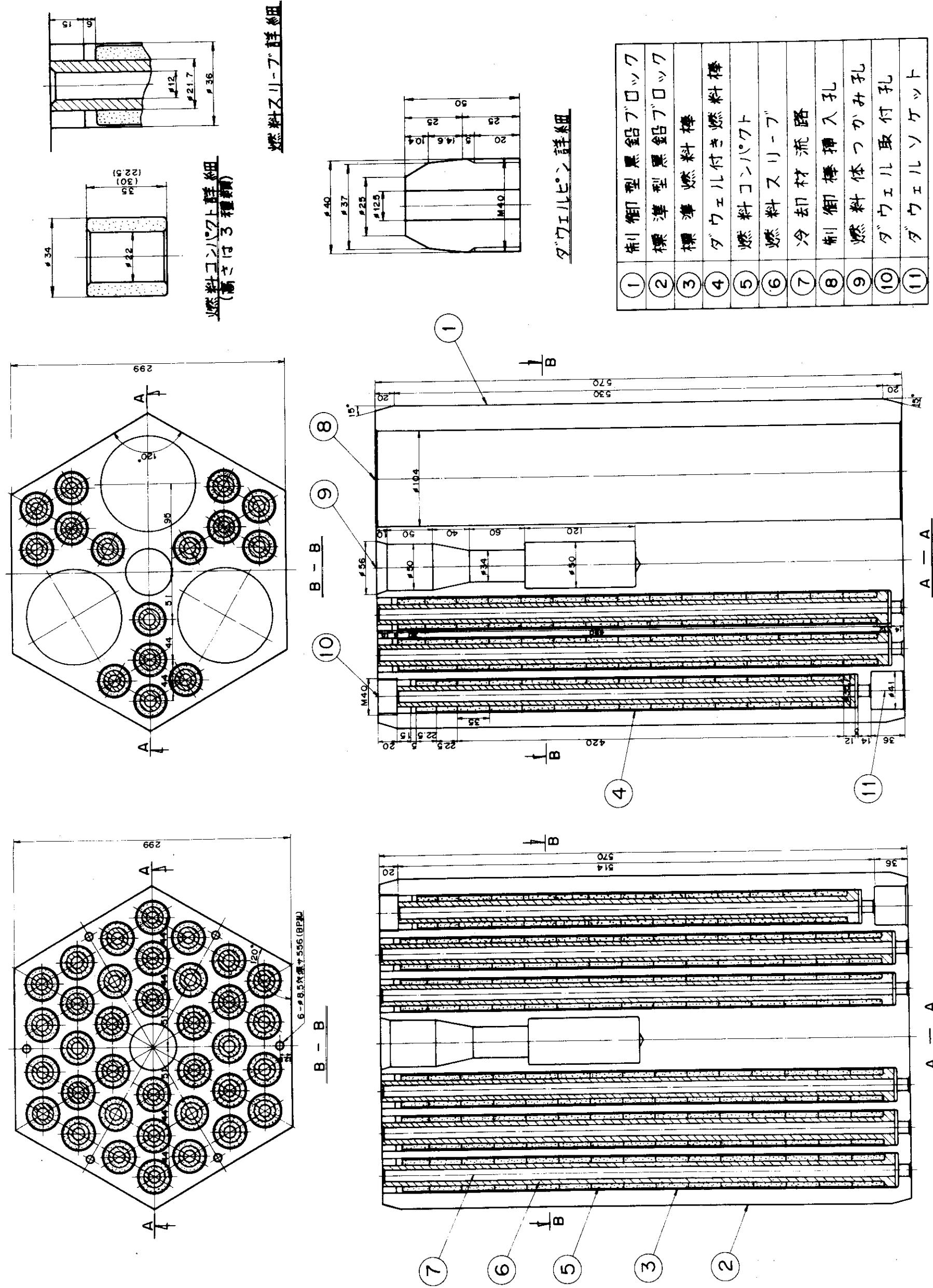
	型 式	整置円筒型
	主要寸法 内径	22
	内高	22
	主要材料	A387 Gr. 22 (2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼)

第1.5表 セミピン型燃料炉心の主要特性

1. 核 特 性 (初期状態)		
1	反応度補償 (ΔK_{eff})	
	全余剰反応度	0.263
	可燃性毒物反応度補償量	0.067
	制御棒反応度補償量 (1対スタック時)	0.251
	炉停止余裕	0.055
2	出力密度 (平均/最大) (W/cm ²)	2.20/4.84
	出力ピーキング (全/軸方向/径方向)	2.20/2.00/1.10
3	中性子束 ($10^{18} n/cm^2 sec$)	
	0.18 MeV 以上 (平均/最大)	1.04/2.13
	0.18 MeV ~ 2.38 eV (平均/最大)	2.66/5.41
	2.38 eV ~ 0.65 eV (平均/最大)	0.65/1.31
	0.65 eV 以下 (平均/最大)	2.66/5.78
4	燃焼度 (GWD/T)	
	5.3 w/o 濃縮燃料 (平均/最大)	1.01/1.36
	4.2 w/o 濃縮燃料 (平均/最大)	1.54/1.84
	3.0 w/o 濃縮燃料 (平均/最大)	7.8/1.25
5	燃料炉内滞在時間 (日)	500
6	制御棒最大反応度価値 (ΔK_{eff} / 対)	
	低温臨界時	0.028
	30%出力時	0.013
	定格出力時	0.013

(つづく)

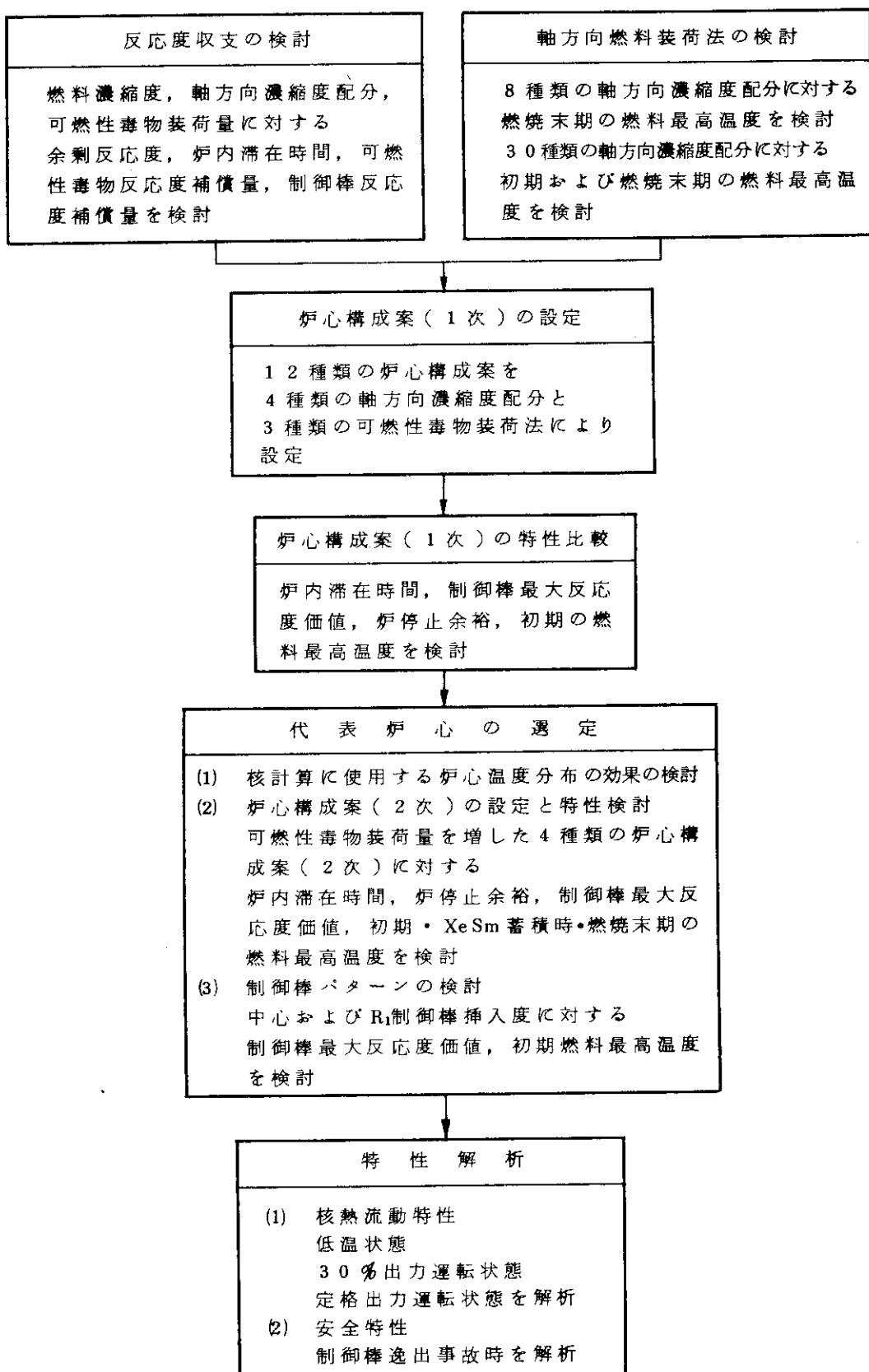
2. 热流动特性 (初期状態)		
1	燃料棒線出力 (平均／最大) (cal/cm sec)	12.6 / 30.2
2	燃料最高温度 (°C)	
	公称温度	1223
	システムティック温度	1501
3	チャンネル出口冷却材温度 (°C) (平均／最大)	1038.6 / 1088.5
4	レイノルズ数出口部 (最小／最大)	10206 / 12416
5	燃料チャンネル部最大圧力損失 (kg/cm ²)	0.09
3. 安全特性 (制御棒逸出事故時)		
1	短期間 (a) 30%出力状態 印加反応度 (ΔK_{eff}) 炉出力ピーク値 (MWt) 燃料温度ピーク値 (°C)	0.0125 740 1000
	(b) 定格出力状態 印加反応度 (ΔK_{eff}) 炉出力ピーク値 (MWt) 燃料温度ピーク値 (°C)	0.0131 2440 1850
2	長期間	約6秒後1980°Cに達した後、炉出力の減衰により最高温度は下がるが、約15時間後約1520°Cまで再度上昇し、その後漸減する。



(a) 標準型燃料体

(b) 制御棒付（制御型）燃料体

第1.1図 セミビン型燃料体



第1.2図 検 討 手 順

2. 検討の手順と方法

2.1 核特性解析

炉心核特性の解析に用いた計算コードと解析スキームの概要を第 2.1.1 図に示す。

炉心計算は CITATION-MACRO を用いていわゆるブロック・スメア・モデルで行ない、ブロック平均巨視断面積の算出には DELIGHT-4 と TWOTRAN-2 を用いた。

制御棒未挿入領域の燃焼依存 4 群巨視断面積は、DELIGHT-4 を用いて、16 群の燃焼・臨界計算の結果を縮約することによって算出した。したがって、可燃性毒物の遮蔽因子の燃焼とともに変化する変化は、16 群モデルで考慮された。

制御棒挿入燃料体の遮蔽因子は、TWOTRAN-2 を用いて 6 群 S₄ モデルで算出した。制御棒挿入領域の燃焼依存 4 群巨視断面積算出では、制御棒挿入燃料体の遮蔽因子が燃焼によって変わらないと仮定された。

この燃焼度および温度に依存した 4 群巨視断面積のセットは、燃焼初期の燃料組成の異なる領域毎に作成し、炉心計算に必要なすべての巨視断面積セットをひとまとめにして、CITATION-MACRO のライブラリーとして、準備された。

炉心計算は、CITATION-MACRO を用いて、2 次元 R-Z あるいは 3 次元 3 角-Z メッシュの 4 群モデルで行なった。

出力分布および中性子束分布の編集、燃焼度分布および高速中性子照射量分布の計算、および熱流動解析のためのデータ作成にはデータ処理用コード DEANA を用いた。燃焼度分布および CHATAC による熱流動解析の結果得られる温度分布は炉心計算に使用された。

解析に使用したエネルギー群モデルを第 2.1.1 表に示す。

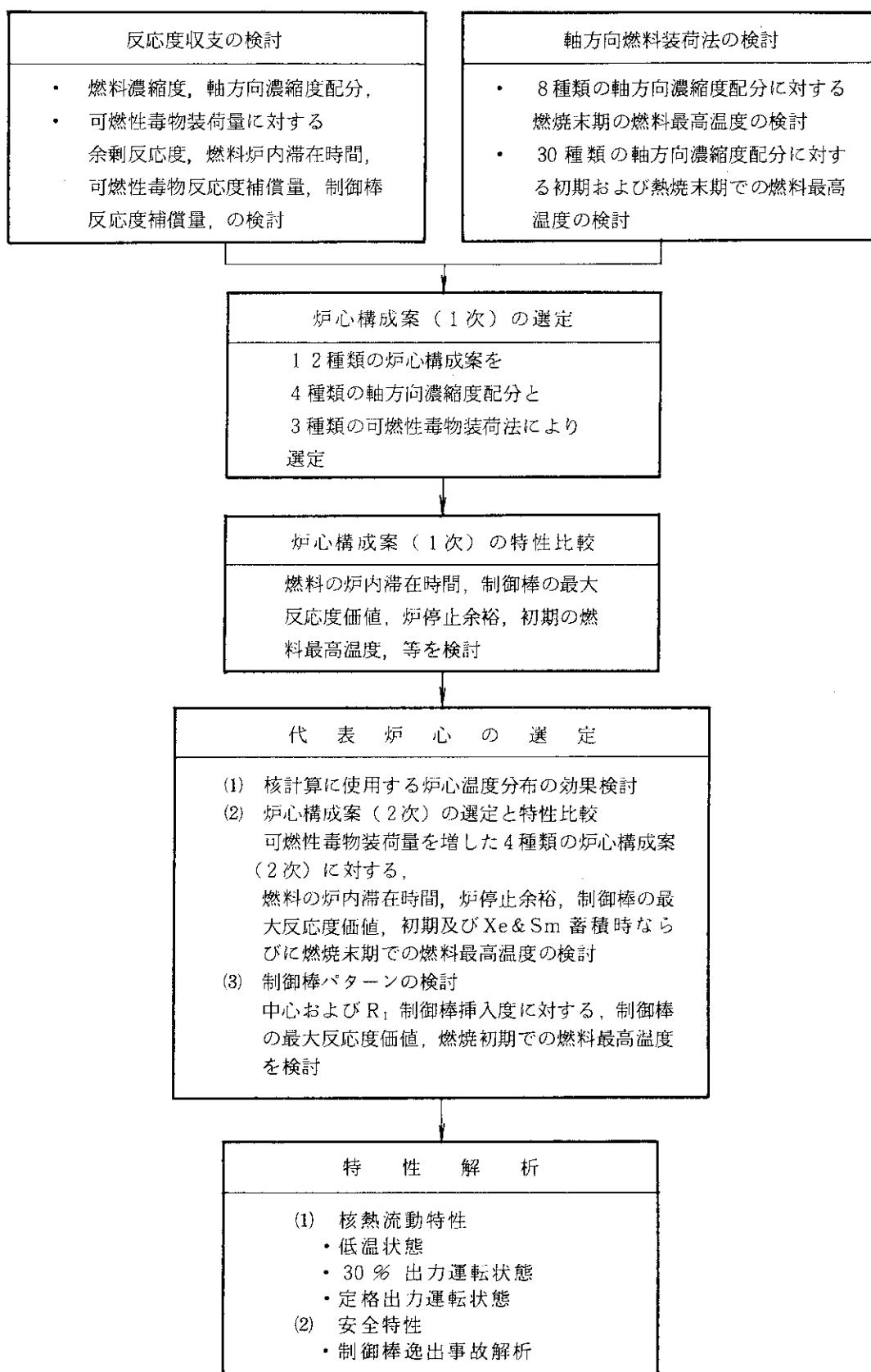
制御棒挿入燃料体の遮蔽因子の計算に使用した空間モデルを第 2.1.2 図に示す。また、炉心計算に使用した 2 次元 R-Z メッシュモデルおよび 3 次元 3 角-Z メッシュモデルをそれぞれ第 2.1.3 図および第 2.1.4 図に示す。2 次元 R-Z 座標の領域区分では、6 角柱の集合を等体積の円柱で置き代えた。また、3 次元 3 角-Z 座標による出力分布の計算結果は方位角方向に平均化した 2 次元 R-Z 座標による表示で示してある。なお、2 次元 R-Z メッシュには、解析に使用した設定温度分布を併記した。

炉停止余裕の計算に使用した、炉心水平断面の 2 次元三角座標による計算形状を第 2.1.5 図に示す。また、径方向の詳細出力分布計算に使用した形状を第 2.1.6 図に示す。制御棒は体積を保存して正方形に近似し、六角形の黒鉛ブロックは長方形の組合せにより表現した。X-Y 座標を使用するため、計算形状には、余剰な燃料領域を含むが、出力ピーピングは、スーパーセル内領域に対して計算している。

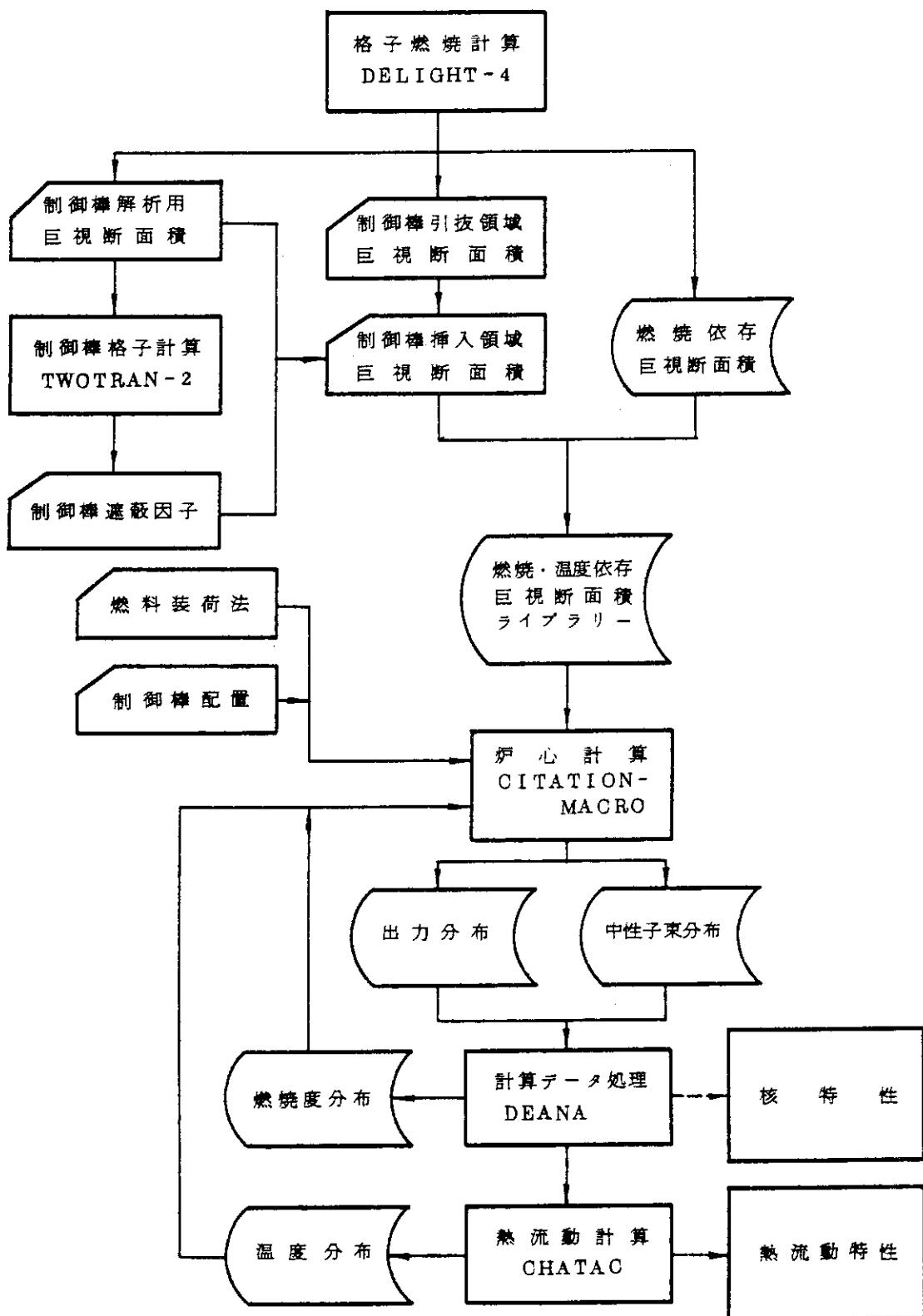
ホットスポット解析に用いる径方向出力ピーピングを算出するため使用される、2 次元三角座標による計算形状を第 2.1.7 図に示す。また、軸方向の詳細出力分布計算に使用した形状を第 2.1.8 図に示す。内側スリーブ及び上下端余剰黒鉛部分は、原子数を保存して均質化している。一方、燃料格子は、標準燃料ブロックのもので代表した。

第2.1.1表 エネルギー群モデル

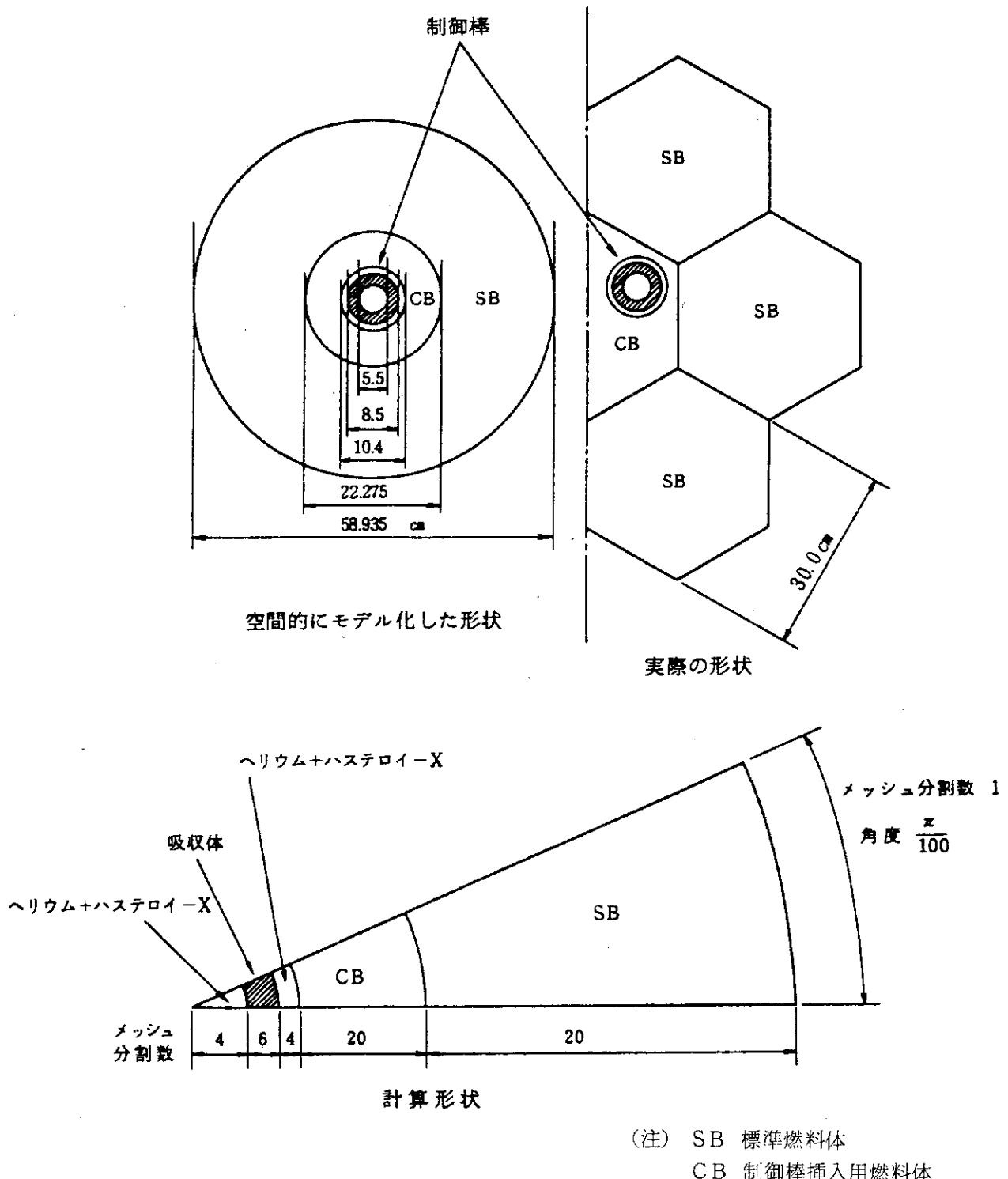
中性子エネルギー範囲 (eV)	エネルギー群モデル		
	16群	6群	4群
$1.0 \times 10^7 - 1.05 \times 10^6$	1	1	1
$1.05 \times 10^6 - 1.83 \times 10^5$	2		
$1.83 \times 10^5 - 1.50 \times 10^4$	3	2	
$1.50 \times 10^4 - 961.0$	4		
961.0 - 78.9	5	3	2
78.9 - 6.48	6		
6.48 - 2.38	7	4	
2.38 - 1.85	8		
1.85 - 1.45	9		
1.45 - 1.03	10		
1.03 - 0.45	11		
0.45 - 0.335	12		
0.335 - 0.195	13		
0.195 - 0.075	14		
0.075 - 0.045	15		
0.045 - 0.0	16		
用 途	格 子 計 算	ス ーパー ⁺ セ ル 計 算	炉 心 計 算



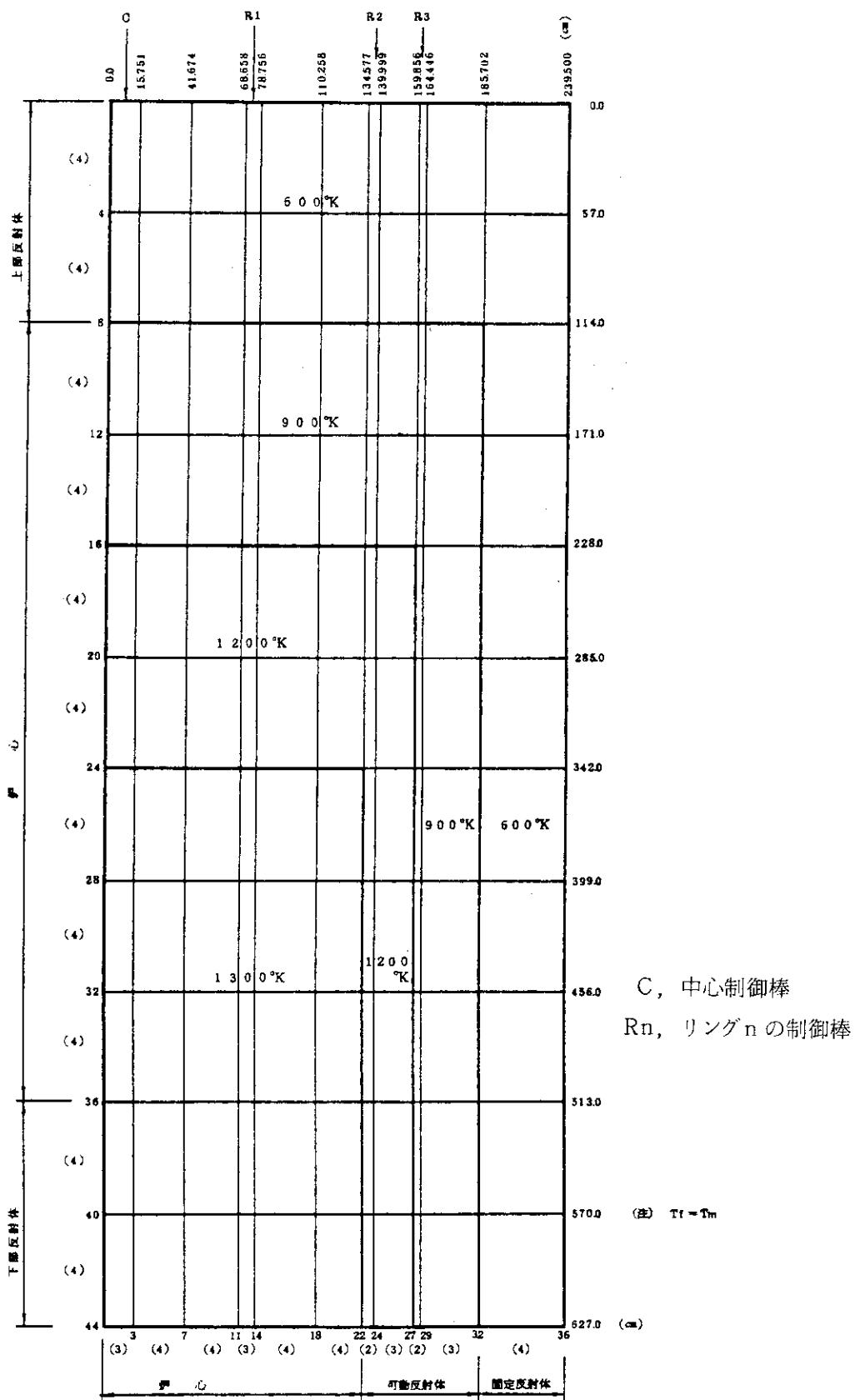
第2.1.1(1)図 作業手順



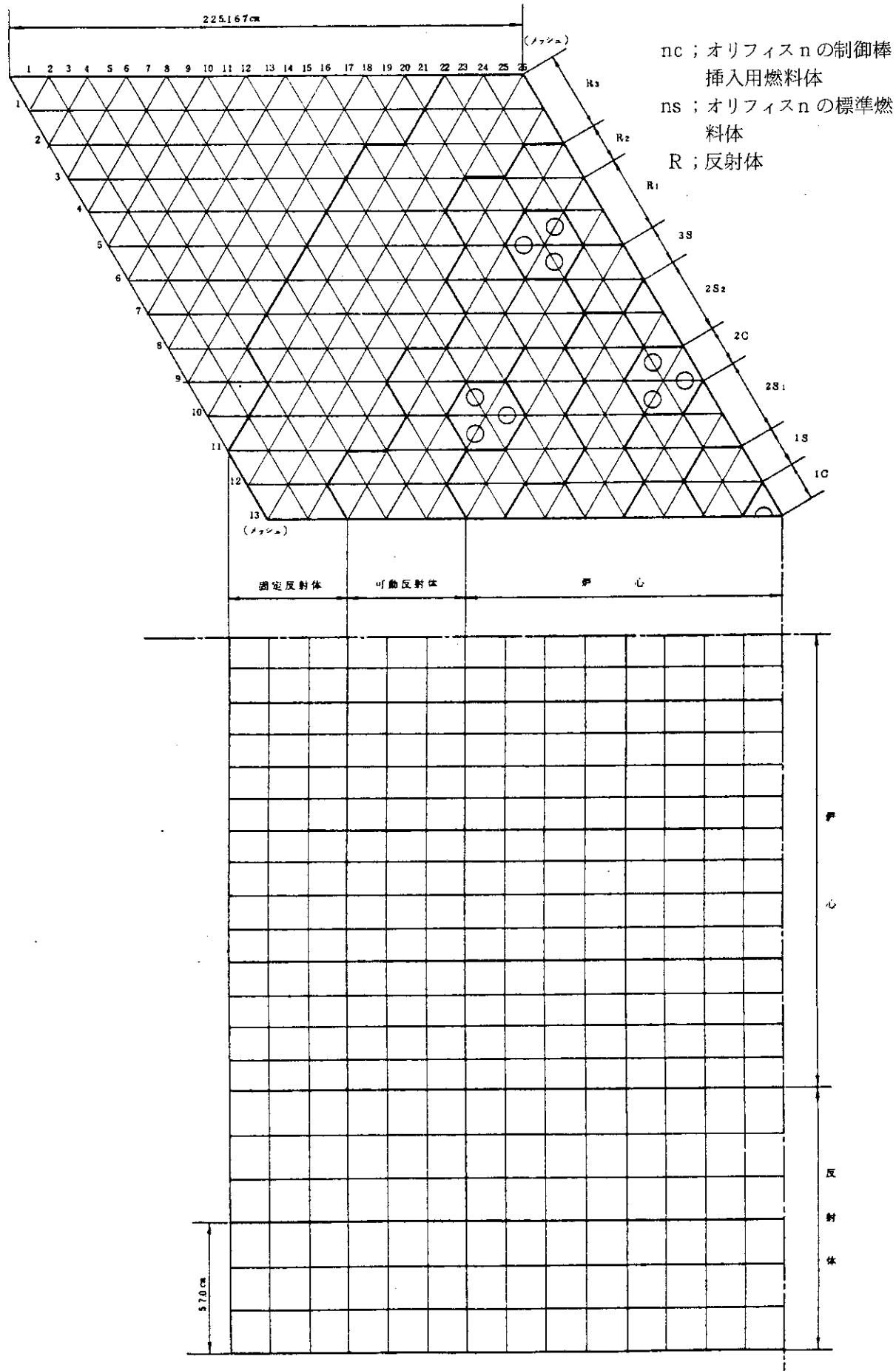
第2.1.1(2)図 核・熱流動特性解析の計算手順



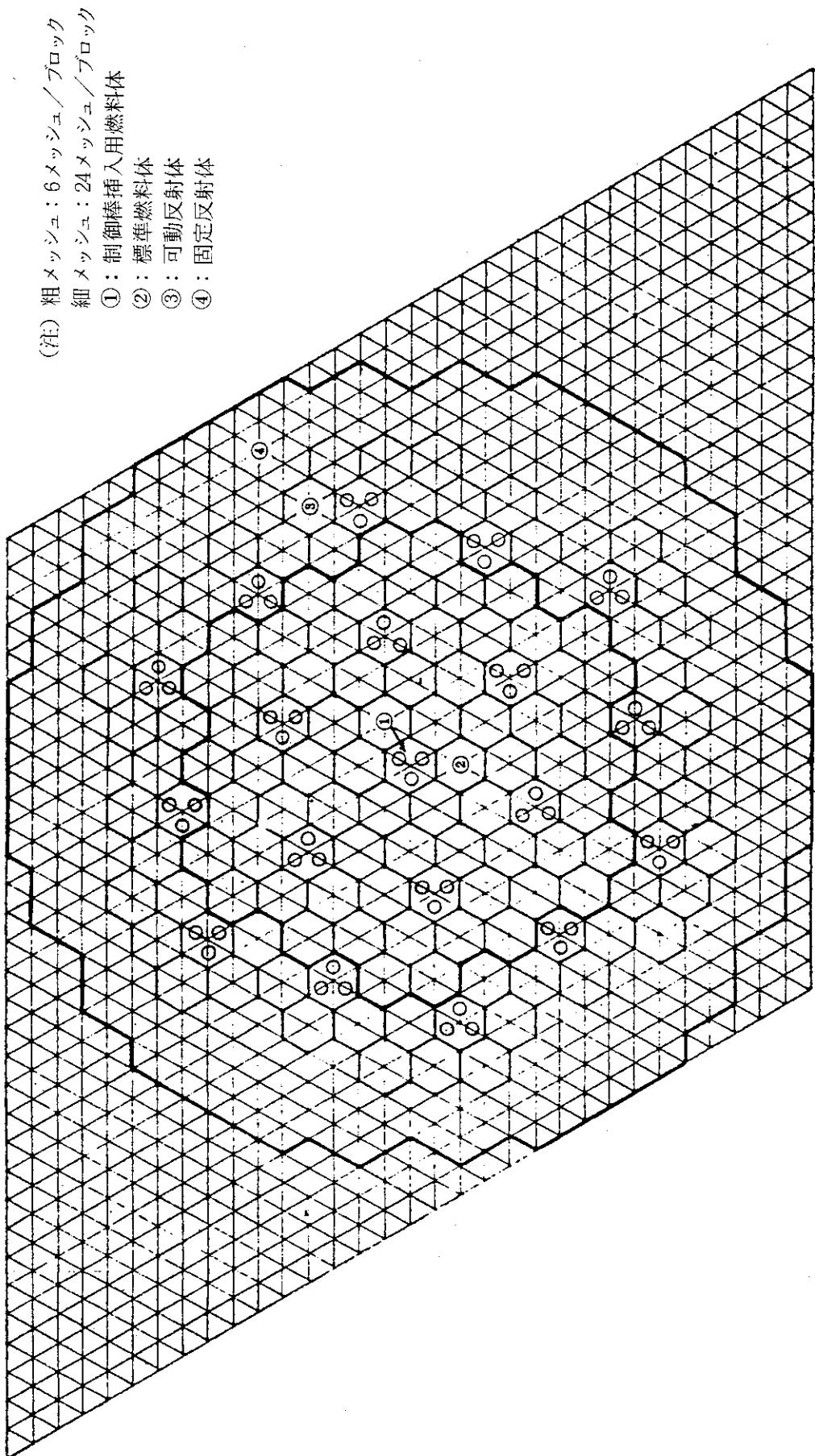
第2.1.2図 制御棒遮蔽因子の計算形状



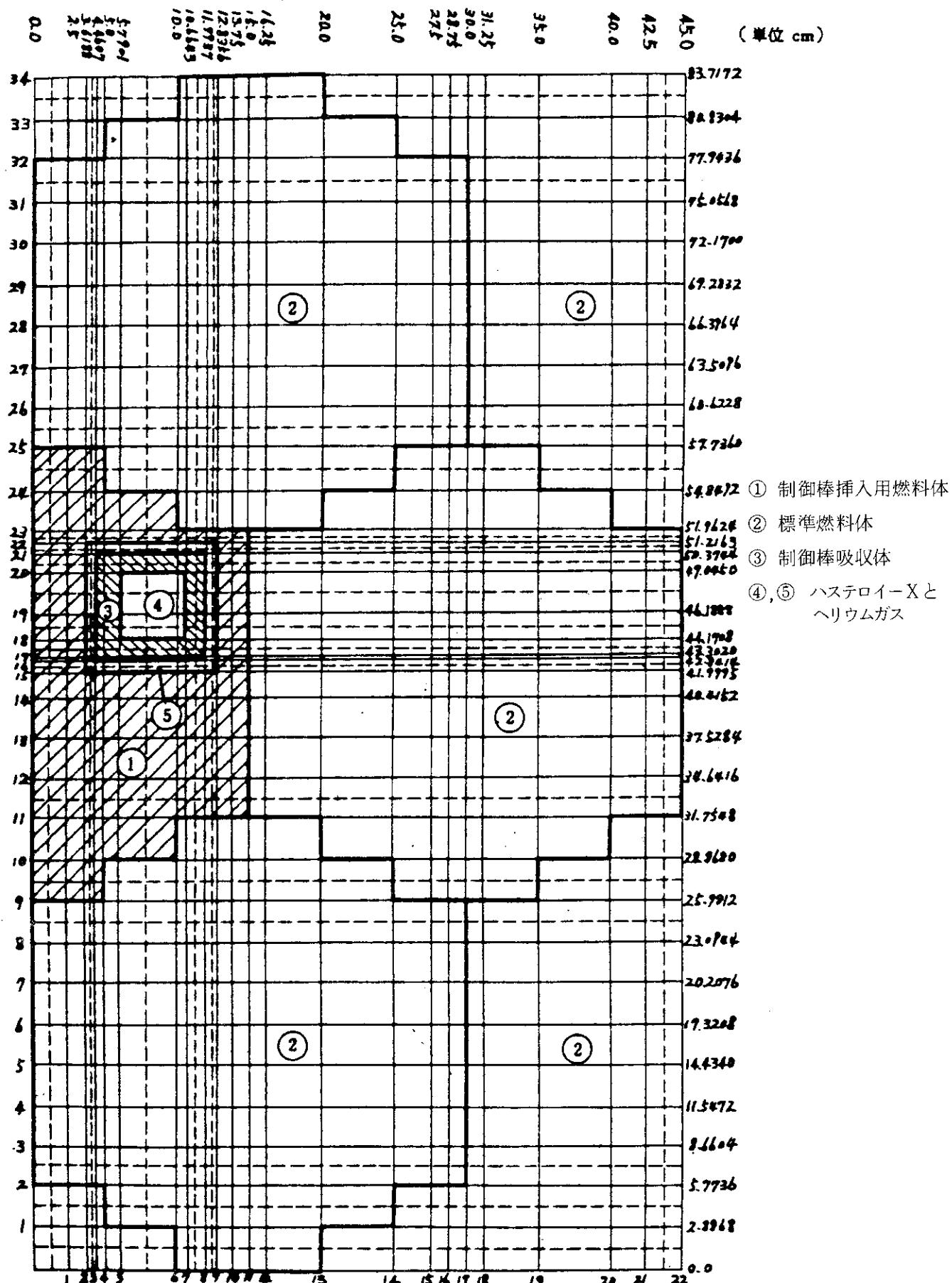
第2.1.3図 2次元R-Z計算形状と定格温度分布



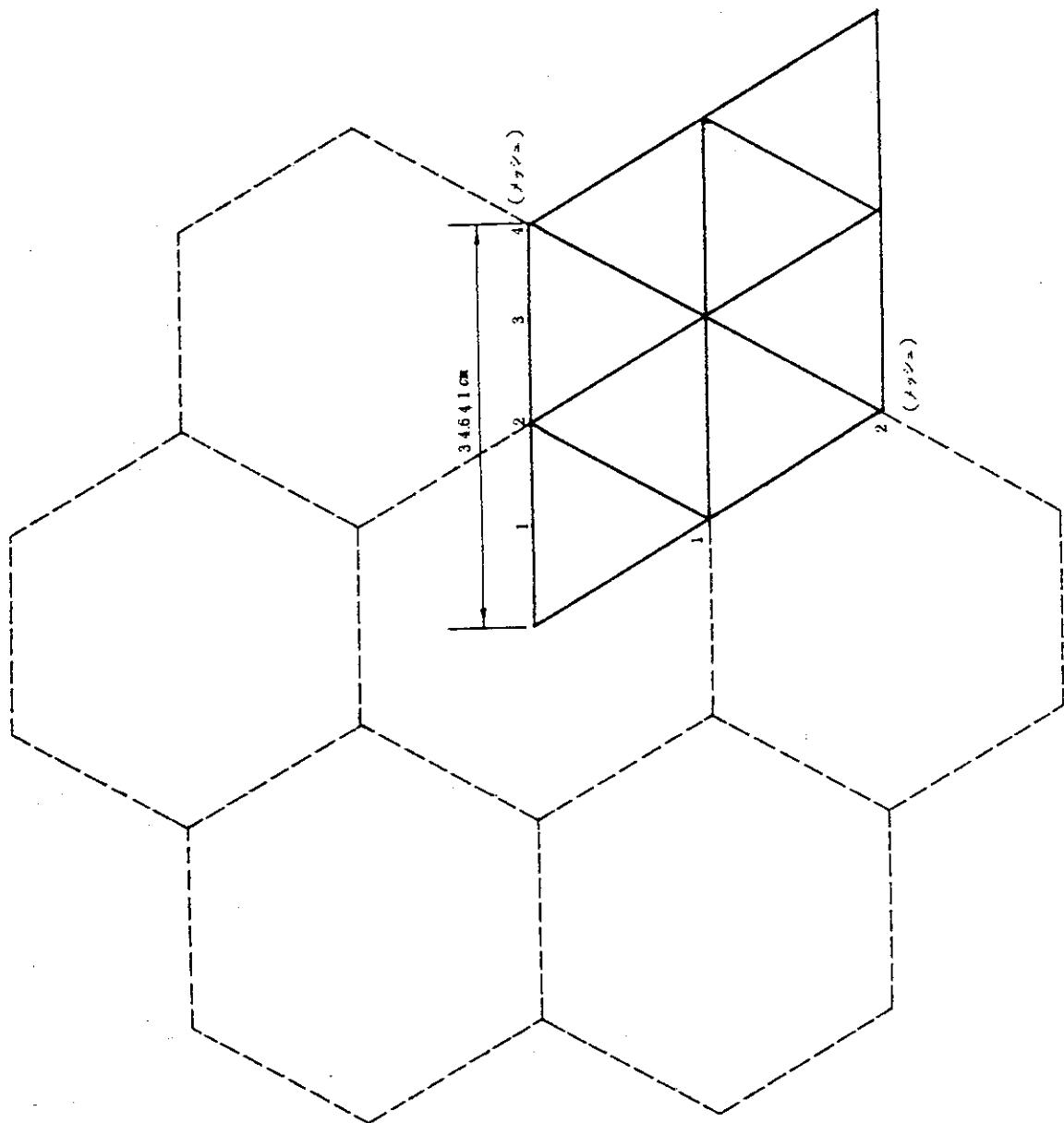
第 2.1.4 図 3 次元 Tr - Z 計算形状



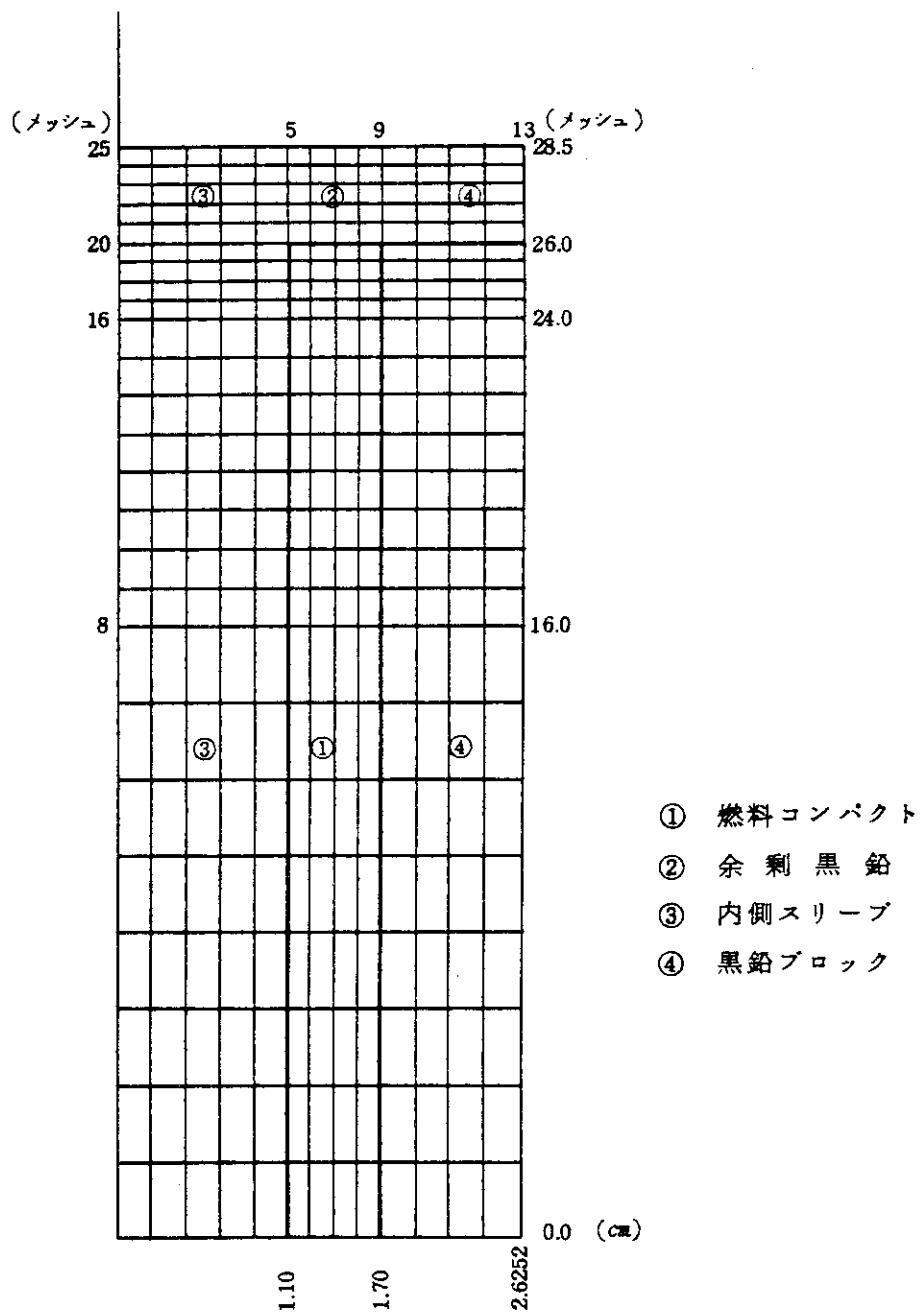
第2.1.5図 2次元 Tr-Z 計算形状



第 2.1.6 図 径方向出力ピークリング計算に対する輸送計算形状



第2.1.7図 2次元 Trモデルス - パーセル計算形状



第2.1.8図 2次元R-Z燃料格子計算形状

2.2 熱流動解析

解析に用いたヘリウムの密度、定圧比熱、熱伝導率、粘性係数の計算式を第 2.2.1 表に示した。また、燃料コンパクトの熱伝導率、比熱、照射変形量の計算式を第 2.2.2 表に、さらに、黒鉛の熱伝導率、照射変形量の計算式を第 2.2.3 表に示した。

セミピン型燃料における冷却材流れは管内流である。この形状に対応して第 2.2.4 表に示す円管流路における冷却材摩擦係数の計算式および、第 2.2.5 表に示すヌッセルト数の計算式を用いた。

高温点解析に用いたシステムティック因子の項目と値を第 2.2.6 表に、また、ランダム因子の項目と値とを第 2.2.7 表にそれぞれ示した。

第 2.2.1 表 ヘリウムの物性値計算式

0.2 bar $\leq P \leq$ 200 bar0 °C $\leq T \leq$ 3000 °C

物性値	記号	計 算 式	単 位	備 考
密 度	ρ	$\rho = \frac{P}{RT} - \rho^2 \cdot B(T) - \rho^2 \cdot C(T)$ $B(T) = 4.5 \times 10^{-4} + \frac{5.42}{1890 + T}$ $C(T) = 1.7 \times 10^{-7} + \frac{4.2 \times 10^{-3}}{1890 + T} + \frac{25.3}{(1890 + T)^2}$	kg/m^3	R : 気体定数 $(= 0.0207723 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})$ P : 圧力 (bar) T : 温度 (K) $C(T) = 0$ としたときの相対誤差 (%) $P = 40, T > 400^\circ\text{C}$ 0.004 %以下 $P = 100, T > 400^\circ\text{C}$ 0.03 %以下
定圧比熱	C_p	$C_p = \frac{5}{2} R = 1.240$	cal/g·°C	
熱伝導率	k	$\frac{P \leq 1 \text{ bar}}{k = k_0}$ $\frac{P > 1 \text{ bar}}{k = k_0 + 2.33 \times 10^{-4} \rho + 2.39 \times 10^{-6} \cdot \rho^2}$ $k_0 = 2.97 \times 10^{-3} T^{0.69} + \frac{9.23 \times 10^2 \times (T - 273.16)}{(T - 273.16) + 4.29 \times 10^{14}}$	$\text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C}$	P : 圧力 (bar) T : 温度 (K) ρ : 密度 (kg/m^3)
粘性係数	η	$\frac{P \leq 1 \text{ bar}}{\eta = \eta_0}$ $\frac{P > 1 \text{ bar}}{\eta = \eta_0 + 2.67 \times 10^{-10} \rho^2}$ $\eta_0 = 3.78 \times 10^{-7} T^{0.69} + \frac{5 \times 10^{-7}}{0.52 + \frac{T}{569.6}}$	$\text{N} \cdot \text{S/m}^2$	P : 圧力 (bar) T : 温度 (K) ρ : 密度 (kg/m^3)

第 2.2.2 表 燃料コンパクト物性値

Particle packing fraction	0.30
Particle weight	1.72 mg
Particle number density	736 n/cm ³
Matrix carbon density	1.65 g/cm ³
Mean density	2.42 g/cm ³
Heavy metal density	0.764 g/cm ³
Boron content	1.0 ppm

Property	Design value																			
Thermal conductivity	0.03 cal/cm sec°C																			
Specific heat	$C_p = 0.2521 + 5.707 \times 10^{-5}t$ $- 1.0378 \times 10^4 / (t + 273)^2$ $C_p[\text{cal/g°C}], t[°C]$																			
Mean coefficient of thermal expansion	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="2">Packing fraction</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td><td>0.20</td><td>0.30</td></tr> <tr> <td>Axial direction</td><td>$3.5 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$</td><td>$3.0 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$</td></tr> <tr> <td>Radial direction</td><td>$2.1 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$</td><td>$2.3 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$</td></tr> <tr> <td>Young's ratio</td><td>$1.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$</td><td>$1.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$</td></tr> <tr> <td>Radial direction</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>			Packing fraction			0.20	0.30	Axial direction	$3.5 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$3.0 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	Radial direction	$2.1 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$2.3 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	Young's ratio	$1.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$1.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$	Radial direction		
	Packing fraction																			
	0.20	0.30																		
Axial direction	$3.5 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$3.0 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$																		
Radial direction	$2.1 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$2.3 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$																		
Young's ratio	$1.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$1.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$																		
Radial direction																				
Poisson's ratio	0.10																			
Irradiation-induced dimensional change	Axial direction	$n_A = \sum_{i=1}^6 a_i \gamma^i$																		
	Radial direction	$n_A = \sum_{i=1}^6 a_i \gamma^i$																		
Irradiation-induced steady-state creep strain rate	$K(t) = 3.679 \times 10^{-6} - 6.987 \times 10^{-9}t$ $+ 9.911 \times 10^{-12}t^2,$ $K[(\text{cm/cm})/(\text{kg/cm}^2) / (10^{20}n/\text{cm}^2, E > 0.18\text{MeV})]$ $t[°C]$																			
Poisson's ratio in creep	0.10																			
Allowable stress limits	Uniaxial tensile stress	45 kg/cm ²																		
	Thermal and irradiation-induced tensile stress	45 kg/cm ²																		

第2.2.2表 (続)

Correlation of irradiation-induced dimensional changes of fuel compact

$$\eta = \sum_{i=1}^6 a_i \gamma^i$$

$$\eta = \Delta L/L_0 \text{ or } \Delta D/D_0$$

(1) Diameter change

Temp. (°C)	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
400.0	-6.99279E-04	1.32730E-03	-9.02179E-07	2.98457E-08	1.44920E-10	-9.66170E-12
500.0	-6.09420E-04	-2.22947E-03	3.76811E-06	-2.36711E-07	6.93691E-09	-7.72930E-11
600.0	-2.19569E-04	-7.60266E-03	1.11489E-05	-6.97912E-07	2.01449E-08	-7.22220E-10
700.0	-7.94444E-04	-4.87802E-03	8.94940E-06	-5.69700E-07	1.71014E-08	-1.93240E-10
800.0	-1.61341E-03	8.21296E-03	-3.73140E-06	2.055315E-08	2.46370E-09	-4.63080E-11
900.0	-2.16087E-03	2.58894E-03	1.09361E-05	-9.39610E-07	3.13042E-08	-3.67130E-10
1000.0	-2.71333E-03	1.05737E-04	-7.39291E-06	5.193279E-08	6.23137E-09	-1.23600E-10
1100.0	-3.28333E-03	2.95423E-04	-1.197712E-05	1.09119E-07	-1.17391E-08	6.76330E-11

(2) Length change

Temp. (°C)	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
400.0	-4.87681E-04	-4.68383E-03	5.40190E-06	-2.98310E-07	7.97109E-09	-6.30920E-11
500.0	-4.74985E-04	-5.44276E-03	7.68896E-06	-4.39568E-07	1.17391E-08	-1.21740E-10
600.0	-5.11884E-04	-7.17173E-03	1.02688E-05	-6.22463E-07	1.71304E-08	-1.79710E-10
700.0	-5.11768E-04	-3.39011E-03	7.90190E-06	-4.66909E-07	1.23139E-08	-1.25600E-10
800.0	-1.64891E-03	1.38017E-04	-1.00161E-05	5.30193E-07	-1.49276E-08	1.64290E-10
900.0	-2.419297E-03	1.92041E-04	-7.39309E-06	2.65702E-07	-4.34786E-09	1.93240E-11
1000.0	-2.72319E-03	1.70302E-04	-8.02537E-06	2.35092E-07	-1.44940E-10	-6.76330E-11
1100.0	-3.83261E-03	3.00024E-04	-5.1391E-05	2.93720E-06	-7.65217E-08	7.34300E-10

第2.2.3表 黒鉛物性値

Apparent density 1.80 g/cm³

Boron content 1.0 ppm

Property	Design value
Thermal conductivity	0.06 cal/cm sec °C
Specific heat	$C_p = 0.54212 - 2.4267 \times 10^{-6} T - 90.273/T$ $- 4.3449 \times 10^4/T^2 + 1.5931 \times 10^7/T^3$ $- 1.4369 \times 10^9/T^4$, $C_p [\text{cal/g}^\circ\text{K}], T [{}^\circ\text{K}]$
Mean coefficient of thermal expansion	Axial direction $\bar{\alpha}_A = 4.07 \times 10^{-6} f_\alpha(t) f(r) {}^\circ\text{C}^{-1}$ Radial direction $\bar{\alpha}_R = 3.69 \times 10^{-6} f_\alpha(t) f(r) {}^\circ\text{C}^{-1}$ $f_\alpha(t) = 0.8335 + 4.56 \times 10^{-4} t - 9.95 \times 10^{-8} t^2$, $t [{}^\circ\text{C}]$ $f(r) = 1.0 + 2.243 \times 10^{-2} r - 1.25 \times 10^{-3} r^2$ $+ 1.72 \times 10^{-5} r^3 - 6.60 \times 10^{-8} r^4$, $r [10^{20} \text{n/cm DNE}]$
Young's modulus	Axial direction $E_A = 0.9 \times 10^5 [1.0 + f(r)] \text{kg/cm}^2$ Radial direction $E_R = 1.0 \times 10^5 [1.0 + f(r)] \text{kg/cm}^2$ $f(r) = 0.1068 r - 0.01196 r^2 + 6.210 \times 10^{-4} r^3$ $- 1.588 \times 10^{-5} r^4 + 2.0181 \times 10^{-7} r^5$ $- 1.0165 \times 10^{-9} r^6$, $r [10^{20} \text{n/cm}^2 \text{DNE}]$
Poisson's ratio	0.17
Irradiation-induced dimensional change	Axial direction $\eta_A = \sum_{i=1}^6 a_i r^i$ Radial direction $\eta_R = \sum_{i=1}^6 a_i r^i$

Correlation of the irradiation-induced dimensional changes of SM1-24

$$\eta = \sum_{i=1}^6 a_i \gamma^i$$

$\eta : \Delta t / t_0$

 $\gamma : 10^{20} \text{ n/cm}^2 \text{DNE}$

(1) Radial (perpendicular) direction

Temp. (°C)	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
-400.0	-2.58869E-04	2.93647E-03	-2.2027E-06	7.97397E-08	-1.46065E-09	1.07330E-11
-300.0	-6.39623E-05	2.74739E-03	-3.34611E-06	1.66106E-07	-3.63952E-09	2.94370E-11
-200.0	-9.88437E-05	-6.38069E-06	1.66021E-07	-2.17307E-09	-1.23250E-11	4.00950E-13
-100.0	-1.69121E-04	-1.40641E-03	4.40210E-07	-7.34920E-09	3.68310E-11	0.0
100.0	-7.11304E-04	6.417524E-06	-8.90394E-07	2.65904E-08	-2.09210E-10	0.0
200.0	-2.25464E-03	9.92237E-03	-6.75351E-06	2.46684E-07	-5.73715E-09	2.00700E-11

(2) Axial (parallel) direction

Temp. (°C)	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
400.0	-9.11969E-09	-3.13233E-07	-7.37502E-07	3.29427E-08	-3.02050E-10	0.0
300.0	-2.70462E-03	-3.31912E-06	-1.71010E-07	2.84033E-09	0.0	0.0
600.0	-1.666619E-03	1.28669E-06	-3.71933E-07	1.95603E-08	-4.23230E-10	3.70370E-12
700.0	-2.67236E-06	-1.19210E-06	-2.20338E-07	1.90844E-09	0.0	0.0
1000.0	-3.72203E-03	-1.113420E-03	6.06620E-07	-3.14302E-09	1.32212E-09	-1.25190E-11
1100.0	-3.43920E-04	-1.17264E-03	1.21264E-06	-5.79190E-08	1.19108E-09	-7.61340E-12
1200.0	-6.06302E-04	2.13193E-03	-6.21573E-07	4.50544E-09	1.30308E-10	-1.72200E-12
1300.0	-1.21994E-03	3.85951E-03	-1.15309E-06	2.26727E-08	-1.51150E-10	0.0
1400.0	-2.24709E-03	1.01929E-04	4.17949E-06	2.13742E-07	-1.90642E-09	1.36270E-12

第2.2.4表 摩擦係数計算式(円管流路)

流れの領域	摩擦係数	記号
層流 ($Re < 1600$)	$\lambda_L(Re) = \frac{64}{Re}$	
遷移域 ($1600 \leq Re \leq 4000$)	$\lambda_R(Re) = \lambda_e(e, 4000)$ <p style="text-align: center;">ここで</p> $1/\sqrt{\lambda_e} = -2 \log \left(\frac{e}{3.71} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda_e}} \right)$	$e = \epsilon/D_e$ ϵ : 壁面粗さ (不規則突起の平均値) (cm) D_e : 等価直径 (cm)
乱流 ($4000 < Re$)	$\lambda_I(Re) = \lambda_e(e, Re)$ $1/\sqrt{\lambda_e} = -2 \log \left(\frac{e}{3.71} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda_e}} \right)$	$e = \epsilon/D_e$ ϵ : 壁面粗さ (不規則突起の平均値) (cm) D_e : 等価直径 (cm)

第2.2.5表 热伝達率計算式(円管流路)

流れの領域	熱伝達率(又はセルト数)	記号
層流域 ($Re < Re'$)	$Nu_L(Re) = 4.36 \cdot (T_b/T_w)^{0.5}$	T_h : 流体温度 (°K) T_w : 壁温度 °K $Re' : Nu_L(Re') = Nu_R(Re')$
遷移域 ($Re' \leq Re \leq 6000$)	$Nu_H(Re) = \xi \cdot Nu_{H\text{,}}(Re) \cdot (T_b/T_w)^{0.5}$ ここで $Nu_H(Re) = 0.116(Re^{2/3} - 125) \cdot Pr^{1/3}$ $\xi = Nu_{H\text{,}}(Re) / Nu_H(Re)$ $Nu_{H\text{,}}(Re) = 0.02 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$	$Re' : Nu_L(Re') = Nu_R(Re')$ とするレイノルズ数
乱流域 ($6000 < Re$)	$Nu_i(Re) = 0.02 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot (T_b/T_w)^{0.8}$	

第2.2.6表 セミピン型燃料体炉心のシステムティック因子

項目	相対誤差	冷却材 温度上昇	膜温度差	スリープ 温度差	ギャップ 温度差	コンパクト 温度差
1. 熱出力分布						
1.1 出力校正誤差	0.06	1.03	1.034	1.06	1.06	1.06
1.2 径方向出力分布	0.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16
1.3 軸方向出力分布	0.08	1.00	1.08	1.08	1.08	1.08
1.4 出力変動	0.03	1.015	1.03	1.03	1.03	1.03
2. 冷却材流量						
2.1 炉内流量配分	0.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
2.2 領域内再配分	0.036	1.036	1.036	1.036	1.036	1.036
2.3 流量変動	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2.4 クロスフロー	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3. 冷却材温度						
3.1 入口温度	0.02	8°C	1.0	1.0	1.0	1.0
3.2 領域間温度差	0.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
4. 運転余裕	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

第2.2.7表 セミピン型燃料体炉心のランダム因子

項目	相対誤差	冷却材 温度上昇	膜温度差	スリープ 温度差	ギャップ 温度差	コンパクト 温度差
1. 製造公差						
1.1 コンパクト内径	000455	00	-000683	-000656	026514	-002466
1.2 コンパクト外径	000294	00	001056	001013	001013	001779
1.3 スリープ内径	000833	002796	002276	00	00	00
1.4 スリープ外径	000461	00	00	00	027842	00
1.5 燃料装荷	005	00	005227	005	005	005
2. 物性データ式						
2.1 冷却材比熱	0002	0002	000083	00	00	00
2.2 熱伝導率	003	00	001920	00	002664	00
2.3 粘性係数	003	00	001277	00	00	00
2.4 スリープ熱伝導率	0005	00	00	000503	00	00
2.5 コンパクト熱伝導率	005	00	00	00	00	005263
2.6 熱伝達率	01	00	011111	00	00	00
2.7 ギャップコンダクタンス	005	00	00	00	005263	00
3. その他						
3.1 熱焼効果	00	00	00	00	00	00
3.2 出力分布	01	01	010471	01	01	01
(核計算精度)						

3. 炉心構成の検討

設計条件に基き、設計基準を満足し、かつ性能的にも優れた炉心構成を得るために、燃料装荷方式および反応度補償特性について検討した。

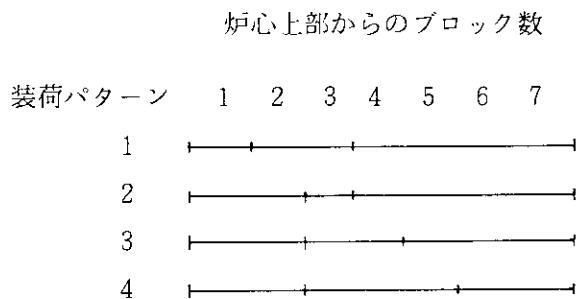
検討は予備的検討と詳細検討の2段階に分けられる。

まず、予備的検討では、反応度炉停止余裕の確保を始めとし、適切な反応度補償計画の実現という立場から反応度収支の検討を行なうとともに、燃料最高温度の低減という観点から軸方向濃縮度配分の検討を行なった。さらに、これらの検討結果に基いて炉心構成案が立案された。

詳細検討では核計算に使用する炉心温度分布の効果および制御棒の挿入パターンを考慮して、炉心構成案の特性を比較検討し、必要な調整を行なって代表炉心構成を設定した。

検討は、以下に示すような基本的考え方に基づいている。

- a) 径方向には一様燃料装荷方式で極力設計基準を満足することを目標とする。
- b) 軸方向の濃縮度配分でも燃料種類的を極力減じるものとし、従来からの検討結果も勘案し軸方向に3領域とし、以下に示す4種類の装荷パターンについて検討する。



- c) 可燃性毒物は標準燃料体にのみ装荷する。また、可燃性毒物棒はすべて同一諸元とし、炉心内装荷は本数で調節する。
- d) 中心制御棒および第1リング制御棒は粗調整棒として使用し、出力上昇および微調整には第3リング制御棒を使用する。

3.1 予備検討

3.1.1 反応度収支

実験炉のこれまでの設計経緯からみて、炉停止余裕の確保ということが重要な課題であると考えられるので、まず反応度収支に関する検討を行なった。ここでは、設計条件として与えられた燃料の炉内滞在時間を確保するのに必要な余剰反応度と制御棒および可燃性毒物によって補償可能な反応度とを見積り、炉停止余裕の確保を始めとし妥当な反応度補償計画を実現させ得る燃料濃縮度および可燃性毒物装荷量の概略を調べた。

(1) 可燃性毒物の諸元

可燃性毒物の諸元を設定するために、炉心の平均的組成（濃縮度 3.5 %, 温度 1200 °K）を対象に格子燃焼計算を行ない、可燃性毒物の諸元と反応度補償量、反応度回復量、燃焼末期の残存量等の特性との関係を検討した。この検討では、特に、ボロン装荷量を一定とし、B₄C粒子径および毒物棒径による自己遮蔽効果に着目した。また、1燃料体当たりの装荷本数は、炉心内の装荷配分法への対応を考慮して、炉心平均で2本とした。検討の結果得られた特性をまとめると以下のようになる。

- a) ボロン装荷量を一定にした場合、可燃性毒物反応度補償量（自己遮蔽効果）は、ほとんど粒子径のみに依存し、棒径に対する依存性は弱い。
- b) 燃焼末期の可燃性毒物残存量は比較的大きい。
- c) 均質棒状の可燃性毒物でも、反応度回復量は問題となる程大きなものではない。

以上のことから、可燃性毒物として直径 8 mm の均質棒状のものを採用するものとし、ボロン濃度 (B₄C粒子重量割合) は、必要な反応度補償量から決めることとした。

(2) 平均濃縮度と余剰反応度

燃焼および温度上昇による反応度低下を補償するのに必要な余剰反応度と燃料濃縮度を見積るために、第 3.1.1 表に示す燃料濃縮度配分を持つ炉心を対象に余剰反応度および燃料の炉内滞在時間について検討した。

但し、表中 \bar{E} は燃料濃縮度の平均値である。また σ は、濃縮度配分の標準偏差であり、濃縮度配分の勾配の大きさを表わす一つのパラメーターとして導入したものである。即ち、

$$\bar{E} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 E_i \quad (E_i \text{ は } i \text{ 段目ブロックの濃縮度})$$

$$\sigma = \frac{1}{7} \sqrt{\sum_{i=1}^7 (E_i - \bar{E})^2}$$

また、可燃性毒物は、ボロン濃度 0.9 w/o と 1.3 w/o の 2 種類のものを 1 燃料体あたり 2 本づつ炉心内に一様に装荷するものとした。

計算は CITATION - MACRO による 2 次元 R-Z 座標モデルで行なった。

可燃性毒物を装荷しない状態の、燃料平均濃縮度と燃料の炉内滞在時間の関係を第 3.1.1 図に、また、定格状態における濃縮度配分と初期余剰反応度および燃料の炉内滞在時間の関係を第 3.1.2 図に示す。可燃性毒物を装荷しない場合の特性をまとめると以下のようになる。

- a) 燃料の炉内滞在時間は、ほとんど平均濃縮度で決まり、濃縮度パターンへの依存性は弱い。
- b) 初期余剰反応度（定格状態）は濃縮度配分（偏差 σ ）に大きく依存し、濃縮度配分の勾配が大きくなるにつれて初期余剰反応度も増加する。
- c) 燃料の炉内滞在時間 438 日（稼動率 60 % で 2 年間）を達成するためには、平均濃縮度は少なくとも 3.6 % 程度は必要である。

次に、可燃性毒物を装荷した場合の、燃料平均濃縮度と燃料の炉内滞在時間との関係を第 3.1.3 図および第 3.1.4 図に示す。また、可燃性毒物装荷による燃料の炉内滞在時間の減少量を第 3.1.5 図に示す。可燃性毒物を装荷した場合の特性をまとめると以下のようになる。

a) 燃料の炉内滞在時間は濃縮度パターンへの依存が強くなる。したがって炉内滞在時間の減少量は濃縮度パターンに依存することになるが、平均的には可燃性毒物反応度補償量 $0.01 \Delta k_{\text{eff}}$ 当り、約 15 日の減少となる。

b) 炉内滞在時間 438 日を達成するためには、平均濃縮度は 3.8 %程度は必要となる。

初期余剰反応度（定格状態）は、第 3.1.2 図によると、濃縮度配分に依存するが、偏差 σ が 1.0 近辺の濃縮度配分に対しては、平均濃縮度が 3.5 %の場合には $0.15 \Delta k_{\text{eff}}$ 程度、4.0 %の場合に約 $0.18 \Delta k_{\text{eff}}$ 程度である。したがって、平均濃縮度が 3.9 %の場合には、初期余剰反応度は約 $0.17 \Delta k_{\text{eff}}$ 程度となる。

炉心の温度変化による反応度増加量を第 3.1.6 図に示す。定格状態から 300°K および 668°K へと炉心温度が下った場合の反応度増加量はそれぞれ $0.09 \Delta k_{\text{eff}}$ および $0.04 \Delta k_{\text{eff}}$ である。したがって、平均濃縮度 3.8 %の炉心の初期余剰反応度は、 300°K で $0.26 \Delta k_{\text{eff}}$ 、 668°K で $0.21 \Delta k_{\text{eff}}$ と見積ることが出来る。

(3) 補償可能反応度と炉停止余裕

補償可能反応度と炉停止余裕を見積るため、可燃性毒物による反応度補償量と制御棒による反応度補償量および炉停止余裕との関係を検討した。ここで、制御棒のスタック状態として、炉心温度 300°K において中心制御棒 1 対がスタックした状態と 668°K において中心制御棒 1 対と第 1 リング制御棒 1 対の計 2 対がスタックした状態を考慮した。計算は、濃縮度 3.5 %の燃料を装荷した炉心水平断面を対象に、CITATION-MACRO による 2 次元 3 角座標（粗メッシュ）で行なった。

可燃性毒物反応度補償量に対する制御棒反応度補償量を第 3.1.7 図に示す。但し、この図では、横軸の可燃性毒物反応度補償量は計算の結果得られた値であるが、縦軸の可燃性毒物および制御棒の反応度補償量には、それぞれ 15 %および 10 %の計算誤差を考慮した。また、 300°K および 668°K における余剰反応度をそれぞれ $0.26 \Delta k_{\text{eff}}$ および $0.21 \Delta k_{\text{eff}}$ とした場合の炉停止余裕も第 3.1.7 図にあわせて示す。これらの特性をまとめると以下のようになる。

a) 制御棒炉停止余裕の観点からは、 668°K における 2 対スタック状態より、 300°K における 1 対スタック状態の方が厳しい。

b) 炉停止余裕および設計上の余裕として $0.02 \Delta k_{\text{eff}}$ 程度を確保するためには、可燃性毒物反応度補償量として $0.09 \Delta k_{\text{eff}}$ 程度が必要となる。

3.1.2 軸方向燃料装荷法の検討

軸方向燃料装荷法を検討する為に、第 1 段階として可燃性毒物、制御棒挿入効果の影響が弱く、燃料装荷の影響が顕著にあらわれる燃焼末期状態において、8 種類の燃料濃縮度配分を考え、2 次元 R-Z モデル計算を行ない、その熱流動特性について検討した。

各解析ケースおよび公称燃料最高温度の解析結果を、第 3.1.2 表に示した。又、燃焼日 365 日および 438 日における各解析ケースの公称燃料最高温度の比較を、第 3.1.8 図、第 3.1.9 図にそれぞれ示した。

これらの解析の結果は、炉心上部と下部の燃料濃縮度の差が大きい場合（6 %と 2 %）、第 3.1.10 図に示した様に上段側ブロックにおける出力が極端に高くなり、その為、燃料最高温度も上

段側ブロックで極端に高くなることがわかる。

それ故、次に、上段側ブロックの出力が極端に高くならない様な燃料濃縮度配分30種類を考え、さらに、燃焼状態とそれに対応した制御棒挿入状態を考慮した、軸方向燃料装荷法について検討した。その解析ケースおよび解析結果を第3.1.3表に示した。各燃焼状態と制御棒挿入状態の解析ケース名称との対応は、以下の通りである。

解析ケース名称

P S A	Xe & Sm 蓄積時において、 中心制御棒1ブロック挿入 第1リング制御棒1ブロック挿入
P S B	炉心初期状態において、 中心制御棒2 1/2ブロック挿入 第1リング制御棒2ブロック挿入
P S C	炉心初期状態において、 中心制御棒3ブロック挿入 第1リング制御棒2ブロック挿入
P S D	燃焼末期において、 中心制御棒1ブロック挿入 第1リング制御棒上部反射体まで挿入

各装荷パターンにおける、各燃焼状態での公称燃料最高温度の比較を、第3.1.11図～第3.1.14図に示した。これらの図より、全ケースとも炉心初期状態において燃料最高温度が最も高くなっているが、装荷パターン1における解析ケースNo.30、装荷パターン3における解析ケースNo.3とNo.17は、各燃焼状態において、それ程大きな差はないことがわかる。

さらに、燃料濃縮度の勾配と公称燃料最高温度の関係を、各燃焼状態に対して、第3.1.15図および第3.1.16図に示した。又、炉心初期状態における各装荷パターン別の勾配と燃料最高温度の関係を、第3.1.17図に示した。燃料濃縮度の勾配による燃料最高温度の影響は明確には現われないが、各装荷パターンとも、値が0.7～1.0の範囲において燃料最高温度が低く押さえられており、勾配が極端に小さい場合、又大きい場合には燃料最高温度が高くなることがわかる。

装荷パターン1における解析ケースNo.5とNo.30、装荷パターン3における解析ケースNo.3とNo.9における、各燃焼状態における軸方向出力分布と燃料温度分布を、第3.1.18図および第3.1.19図にそれぞれ示した。これらの図からも明らかな様に、燃焼初期の制御棒が挿入されている状態において炉心下段側ブロックでの出力は出来るだけ低く、さらに制御棒が引き抜かれても、炉心上段側ブロックの出力が極端に高くならない様な、軸方向出力分布をつくることが可能であれば、最適な燃料の装荷法は、装荷パターンには依らないことがわかる。

以上の検討の結果、全解析ケースの中で、燃料最高温度が最も低く押さえられている解析ケースNo.3とNo.30を、炉心選定の為の軸方向燃料濃縮度配分の参考ケースとして選定した。

3.1.3 炉心構成案の立案

(1) 軸方向濃縮度配分

軸方向燃料装荷法の検討において、2種類の燃料濃縮度配分が参考ケースとして選定された。この2種類の濃縮度配分は平均濃縮度が3.8%のものであり、可燃性毒物装荷による燃料の炉内滞在時間の短縮を考慮すると、若干濃縮度を上げた配分についても検討しておく必要がある。そこで、選出された2種類の濃縮度配分と同一パターンを持ち、平均濃縮度が4.0%となるような濃縮度配分を2種類追加した。第3.1.4表に、4種類の濃縮度配分を示す。

(2) 可燃性毒物装荷法

可燃性毒物棒の装荷本数は、装荷パターンに応じて第3.1.5表に示すような配分を考えた。

可燃性毒物の装荷量（ボロン濃度）を設定するために、可燃性毒物反応度補償量と炉停止余裕の関係およびボロン濃度と可燃性毒物反応度補償量の関係を調べた。計算は2次元三角座標（細メッシュ）を用いて行なった。

可燃性毒物反応度補償量に対する制御棒と可燃性毒物の反応度補償量、余剰反応度および炉停止余裕を第3.1.20図に示す。余剰反応度は、2次元三角座標によるものを用いており、必要な炉停止余裕として $0.01 \Delta k_{eff}$ 、炉停止余裕を炉心の水平断面を対象に評価するために必要となる補正及び余裕に $0.03 \Delta k_{eff}$ 、合計 $0.04 \Delta k_{eff}$ を確保するためには、平均濃縮度3.8%の炉心に対して $0.045 \Delta k_{eff}$ 、4.0%の炉心に対して $0.063 \Delta k_{eff}$ の可燃性毒物反応度補償量が必要となる。

ボロン濃度と可燃性毒物反応度補償量の関係を第3.1.21図に示す。可燃性毒物反応度補償量として $0.045 \Delta k_{eff}$ および $0.063 \Delta k_{eff}$ を確保するためには、平均的にはそれぞれ0.7w/oおよび1.0w/oのボロン濃度が必要となる。

(3) 炉心構成案（1次）の立案

以上の燃料装荷法および可燃性毒物装荷法を組合せ、第3.1.6表に示す炉心構成案（1次）を立案した。

第3.1.1表 検討対象とした炉心燃料装荷法

炉心 番号	装 荷 バターン	燃料濃縮度% (炉心上部より)								勾配 σ
		1	2	3	4	5	6	7	平均 E	
1	0	3	3	3	3	3	3	3	3.0	0.0
2	0	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	0.0
3	0	4	4	4	4	4	4	4	4.0	0.0
4	0	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	0.0
5	0	5	5	5	5	5	5	5	5.0	0.0
6	1	5	4	4	2	2	2	2	3.0	1.195
7	1	5	4	4	3	3	3	3	3.57	0.728
8	1	6	5	5	3	3	3	3	4.0	1.195
9	2	5	5	3	2	2	2	2	3.0	1.309
10	2	6	6	4	2	2	2	2	3.43	1.761
11	2	6	6	4	3	3	3	3	4.0	1.309
12	3	4	4	3	3	2	2	2	2.86	0.833
13	3	5	5	4	4	2	2	2	3.43	1.294
14	3	6	6	4	4	3	3	3	4.14	1.245
15	4	4	4	3	3	3	2	2	3.0	0.756
16	4	5	5	3	3	3	2	2	3.29	1.161
17	4	5	5	4	4	4	3	3	4.0	0.756

第3.1.2表 軸方向燃料装荷法の検討

解析ケース	燃料濃縮度(%)							平均濃縮度 勾配, σ (%)	濃縮度 *1)	燃焼日 (日)	制御棒挿入度*2)	公称燃料最高温度 3)	備考	
	1	2	3	4	5	6	7							
PSE 01									3.65	B	R _i	流量調節2	公称燃料最高温度 3)	
PSE 02	5	4	3	3	3	3	3	3.57	0.728	3.65	1	B	1176	1158
PSE 03										4.38	B	B	1184	1165
PSE 04										4.38	1	B	1178	1160
PSE 05										3.65	B	B	1188	1168
PSE 06	6	6	4	2	2	2	2	3.43	1.761	4.38	1	B	1483	1399
PSE 07										3.65	1	B	1389	1375
PSE 08										4.38	1	B	1496	1385
PSE 09										3.65	1	B	1397	1348
PSE 10	5	5	4	4	2	2	2	3.43	1.294	4.38	1	B	1301	1239
PSE 11										3.65	1	B	1224	1208
PSE 12										4.38	1	B	1306	1246
PSE 13										3.65	1	B	1230	1215
PSE 14	5	5	3	3	3	2	2	3.29	1.161	4.38	1	B	1348	1287
PSE 15										3.65	1	B	1265	1248
PSE 16										4.38	1	B	1353	1293
PSE 17										3.65	1	B	1272	1255
PSE 18	6	5	5	3	3	3	4.0	1.363		3.65	1	B	1255	1207
PSE 19										4.38	1	B	1198	1188
PSE 20										3.65	1	B	1262	1212
PSE 21										4.38	1	B	1197	1188
PSE 22	6	6	4	3	3	3	4.0	1.309		3.65	1	B	1309	1303
PSE 23										4.38	1	B	1280	1268
PSE 24										3.65	1	B	1389	1311
PSE 25										4.38	1	B	1287	1276
PSE 26	6	6	4	4	3	3	3	4.14	1.245	3.65	1	B	1335	1259
PSE 27										4.38	1	B	1231	1221
PSE 28										3.65	1	B	1345	1269
PSE 29										4.38	1	B	1241	1231
PSE 30	5	5	4	4	4	3	3	4.0	0.756	3.65	1	B	1169	1157
PSE 31										4.38	1	B	1174	1160
PSE 32										4.38	1	B	1176	1162

第3.1.3表 軸方向燃料装荷による燃料最高温度 (1/2)

解 析 ケース	燃料軸方向濃縮度配分 (%)							勾配 σ	公称燃料最高温度			システムチェック燃料最高温度				
	1	2	3	4	5	6	7		PSA	PSB	PSC	PSA	PSB	PSC		
1	5	4	4	3.4	3.4	3.4	3.4	1	0.555	1219	1289	1174	1467	1570	1574	
2	5	5	4	3.1	3.1	3.1	2	0.834	1170	1251	1252	1166	1390	1518	1519	
3	5	5	4	4	2.8	2.8	3	0.922	1174	1192	1190	1157	1425	1430	1417	
4	5	5	4	4	2.3	2.3	4	1.035	1212	1267	1259	1168	1461	1553	1541	
5	4.8	3.8	3.8	3.5	3.5	3.5	1	0.440	1239	1303	1304	1180	1498	1594	1597	
6	4.8	4.8	3.8	3.3	3.3	3.3	2	0.655	1200	1276	1278	1169	1437	1555	1557	
7	4.8	4.8	3.8	3.1	3.1	3.1	3	0.704	1172	1237	1237	1168	1394	1495	1493	
8	4.8	4.8	3.8	3.8	2.8	2.8	4	0.756	1188	1228	1220	1157	1436	1507	1495	
9	4.5	4.5	3.6	3.4	3.4	3.4	3	0.468	1219	1288	1289	1175	1467	1572	1574	
10	4.5	4.5	3.6	3.6	3.4	3.4	4	0.450	1220	1285	1285	1175	1467	1556	1568	
11	5	4.4	4.4	3.2	3.2	3.2	1	0.717	1182	1255	1256	1173	1408	1523	1524	
12	5	5	4.4	3	3	3	2	0.910	1153	1230	1231	1168	1362	1485	1484	
13	5	5	4.4	4.4	2.6	2.6	3	1.064	1222	1235	1216	1161	1490	1527	1491	
14	5	5	4.4	4.4	4.4	1.7	1.7	4	1.351	1246	1309	1302	1193	1506	1608	1595
15	4.8	4.3	3.3	3.3	3.3	3.3	1	0.598	1196	1267	1177	1269	1431	1541	1543	

第3.1.3表 軸方向燃料装荷による燃料最高温度 (2/2)

解 析 ケース	燃料軸方向濃縮度配分(%)							σ	公称燃料最高温度			システム燃料最高温度			
	1	2	3	4	5	6	7		PSA	PSB	PSC	PSA	PSB	PSC	
16	4.8	4.8	4.3	3.1	3.1	3.1	3.1	2	0.774	1168	1246	1172	1388	1509	
17	4.8	4.8	4.3	4.3	2.8	2.8	3	0.886	1198	1197	1181	1159	1461	1474	
18	4.8	4.8	4.3	4.3	4.3	2.0	2.0	4	1.148	1268	1339	1333	1210	1532	1639
19	4.5	4.0	4.0	3.5	3.5	3.5	1	0.618	1230	1296	1297	1185	1484	1583	1586
20	4.5	4.5	4.0	3.4	3.4	3.4	2	0.487	1211	1282	1284	1178	1454	1563	1566
21	4.5	4.5	4.0	4.0	3.2	3.2	3	0.553	1182	1242	1241	1178	1409	1502	1499
22	4.5	4.5	4.0	4.0	4.0	2.8	4	0.665	1205	1243	1235	1162	1461	1527	1516
23	5	5	3.6	3.2	3.2	3.2	2	0.789	1191	1272	1274	1162	1422	1650	1552
24	5	5	3.6	3.6	3.1	3.1	3	0.795	1174	1246	1246	1163	1397	1509	1509
25	5	5	3.6	3.6	3.6	2.9	4	0.812	1169	1221	1219	1155	1410	1477	1466
26	4.8	4.8	3.5	3.5	3.3	3.3	3	0.647	1206	1278	1279	1166	1446	1558	1559
27	4.8	4.8	3.5	3.5	3.2	3.2	4	0.653	1196	1263	1264	1164	1432	1536	1536
28	5.5	4	4	3.2	3.2	3.2	1	0.793	1198	1270	1271	1164	1435	1547	1548
29	5.5	4.4	4.4	3.0	3.0	3.0	1	0.938	1161	1236	1237	1164	1375	1495	1494
30	5.5	4.8	4.8	2.8	2.8	2.8	1	1.126	1186	1199	1200	1159	1459	1436	1431

第3.1.4表 追加対象軸方向燃料装荷法

装荷パターン	燃料濃縮度% (炉心上部より)							平均 \bar{E}	勾配 σ
	1	2	3	4	5	6	7		
3	5	5	4	4	2.8	2.8	2.8	3.771	0.922
1	5.5	4.8	4.8	2.8	2.8	2.8	2.8	3.757	1.126
3	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	4.0	0.961
1	5.6	4.8	4.8	3.2	3.2	3.2	3.2	4.0	0.956

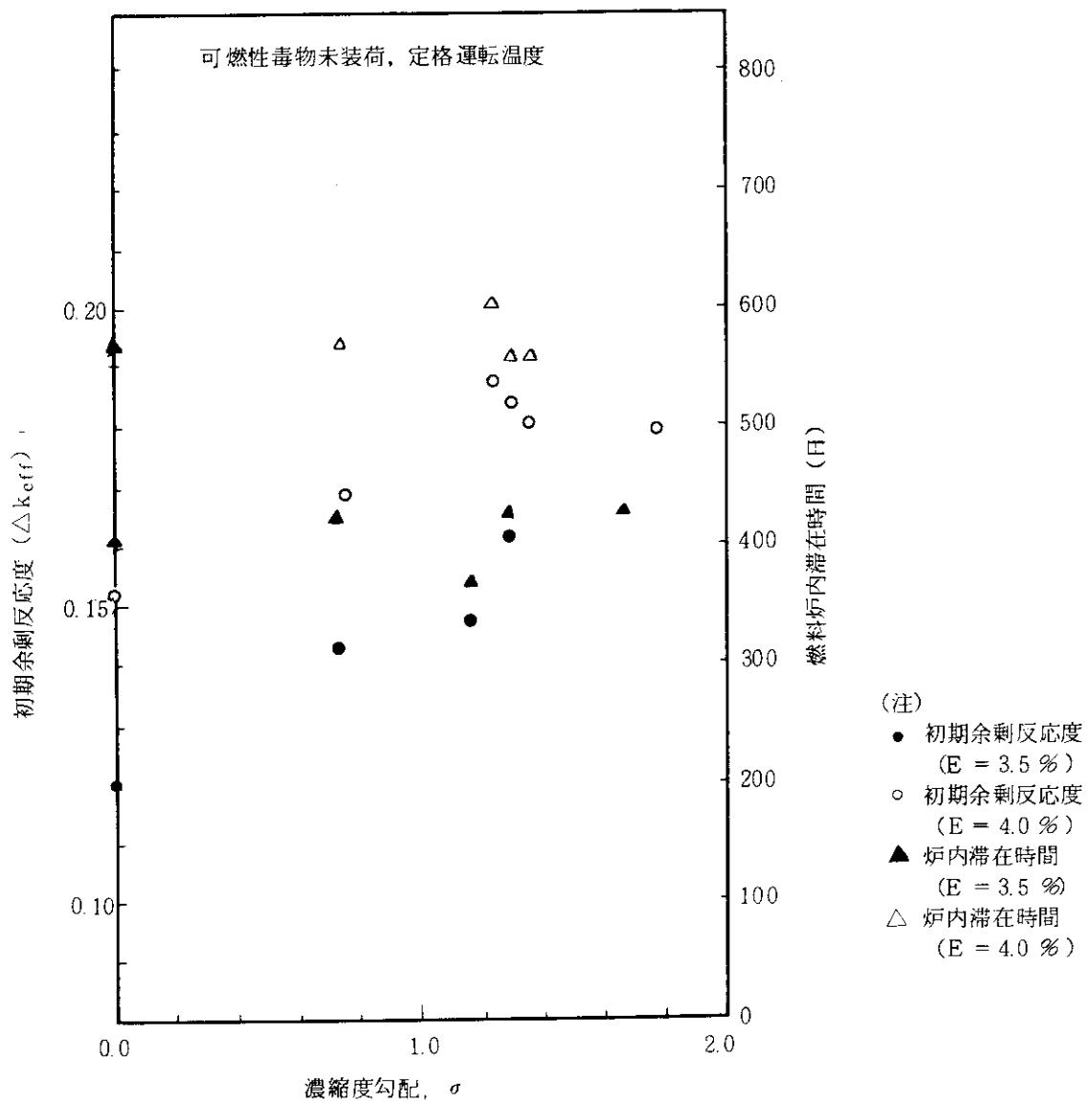
第3.1.5表 検討対象炉心可燃性毒物装荷法

装荷パターン	可燃性毒物装荷本数 (炉心上部より)							
	1	2	3	4	5	6	7	平均
1	2	2	2	2	2	2	2	2.0
1	2	3	3	2	1	1	1	1.857
1	1	3	3	2	2	2	2	2.143
3	2	2	2	2	2	2	2	2.0
3	2	2	3	3	1	1	1	1.857
3	1	1	3	3	2	2	2	2.0

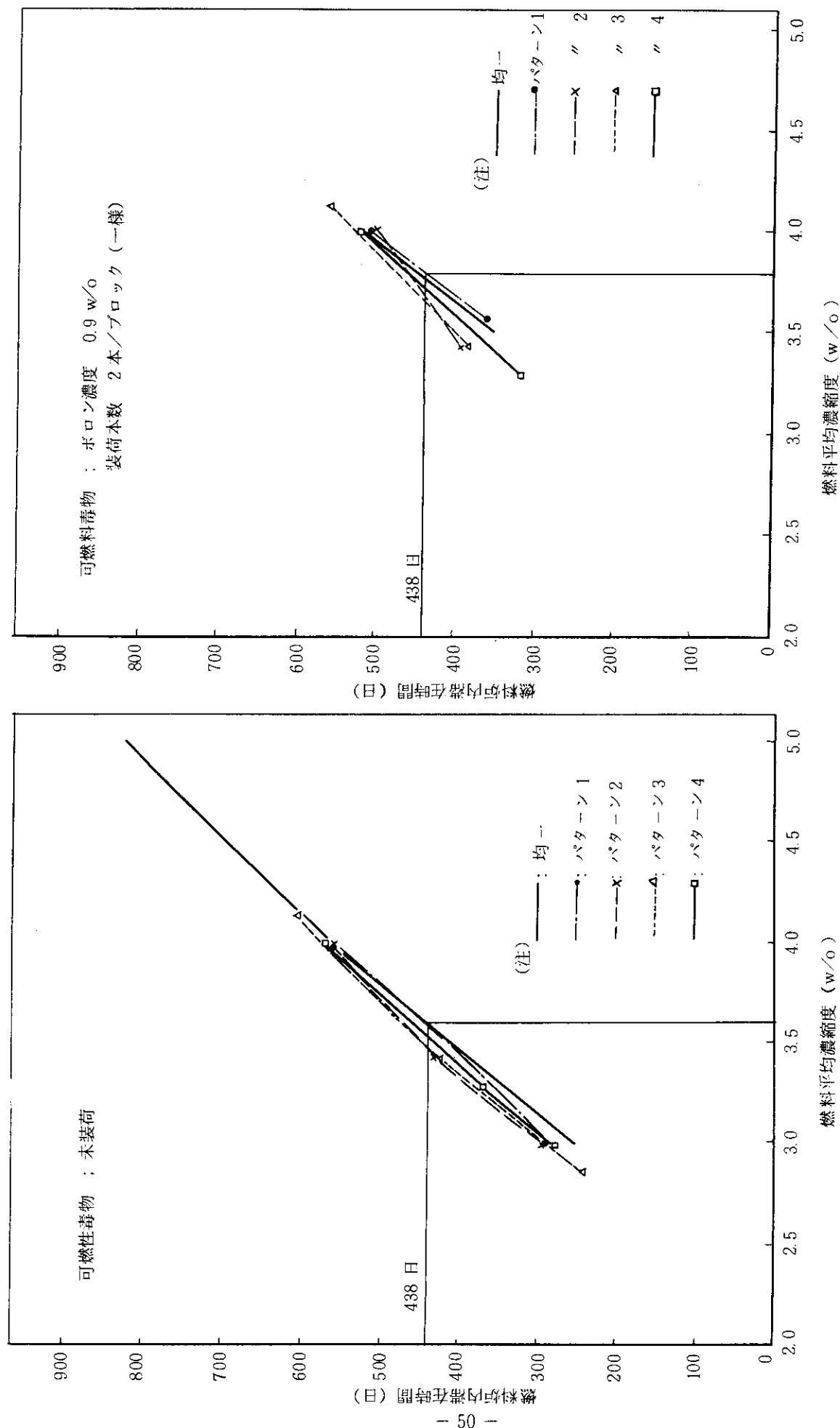
第3.1.6表 炉心構成案（1次）

炉心 番号	燃料濃縮度配分と可燃性毒物装荷量								σ	ボロン 濃度(%)
	1	2	3	4	5	6	7	平均		
0.1	5	5	4	4	2.8	2.8	2.8	3.771	0.922	0.7
	2	2	2	2	2	2	2	2.0		
0.2	5	5	4	4	2.8	2.8	2.8	3.771		
	2	2	3	3	1	1	1	1.857		
0.3	5	5	4	4	2.8	2.8	2.8	3.771		
	1	1	3	3	2	2	2	2.0		
0.4	5.5	4.8	4.8	2.8	2.8	2.8	2.8	3.757	1.126	
	2	2	2	2	2	2	2	2.0		
0.5	5.5	4.8	4.8	2.8	2.8	2.8	2.8	3.757		
	2	3	3	2	1	1	1	1.857		
0.6	5.5	4.8	4.8	2.8	2.8	2.8	2.8	3.757		
	1	3	3	2	2	2	2	2.143		
0.7	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	4.0	0.961	1.0
	2	2	2	2	2	2	2	2.0		
0.8	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	4.0		
	2	2	3	3	1	1	1	1.857		
0.9	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	4.0		
	1	1	3	3	2	2	2	2.0		
1.0	5.6	4.8	4.8	3.2	3.2	3.2	3.2	4.0	0.956	
	2	2	2	2	2	2	2	2.0		
1.1	5.6	4.8	4.8	3.2	3.2	3.2	3.2	4.0		
	2	3	3	2	1	1	1	1.857		
1.2	5.6	4.8	4.8	3.2	3.2	3.2	3.2	4.0		
	1	3	3	2	2	2	2	2.143		

(注) $\sigma = \sqrt{\frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 (E_i - \bar{E})^2}$ $\bar{E} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 E_i$

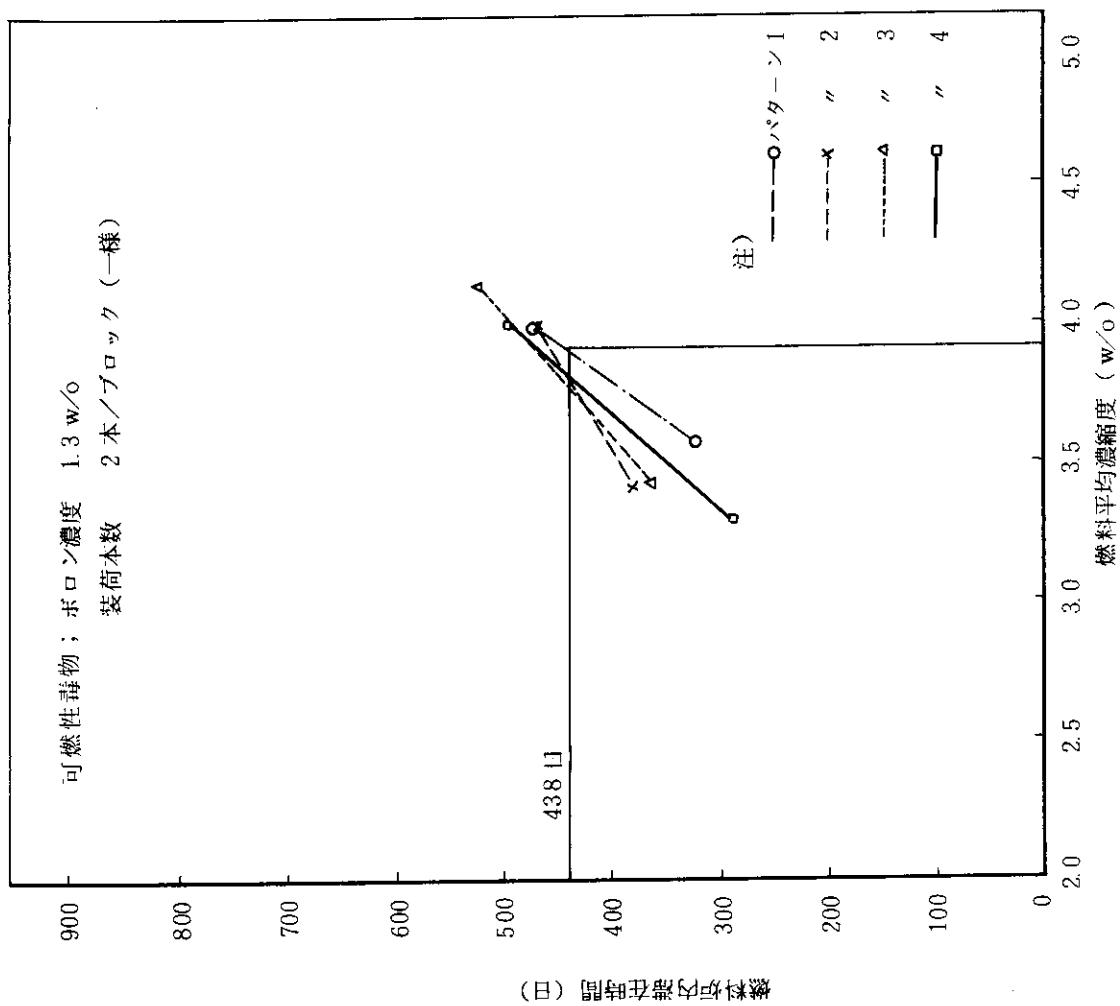


第 3.1.1 図 濃縮度配分と初期余剰反応度および燃料炉内滞在時間

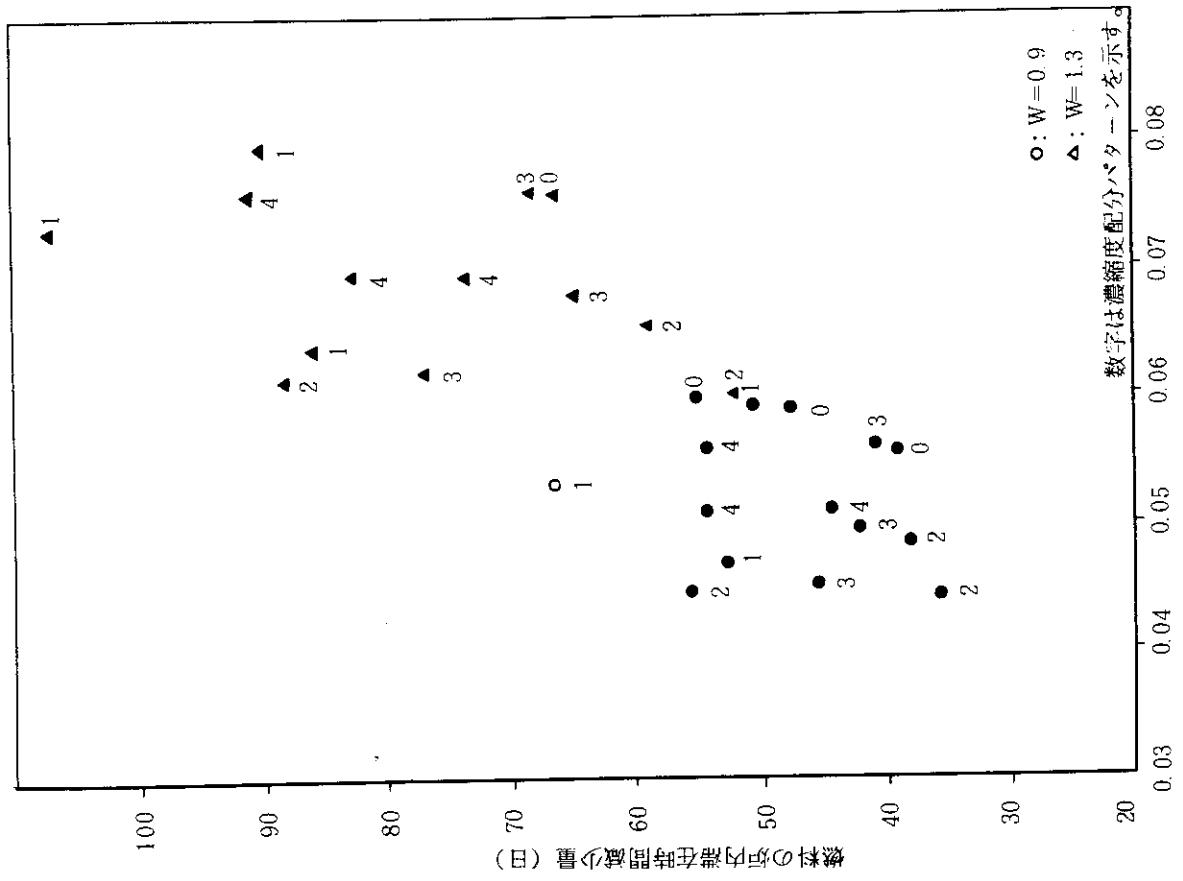


第3.1.2図 燃料濃縮度と燃料の炉内滞在時間 (1)

第3.1.3図 燃料濃縮度と燃料の炉内滞在時間 (2)



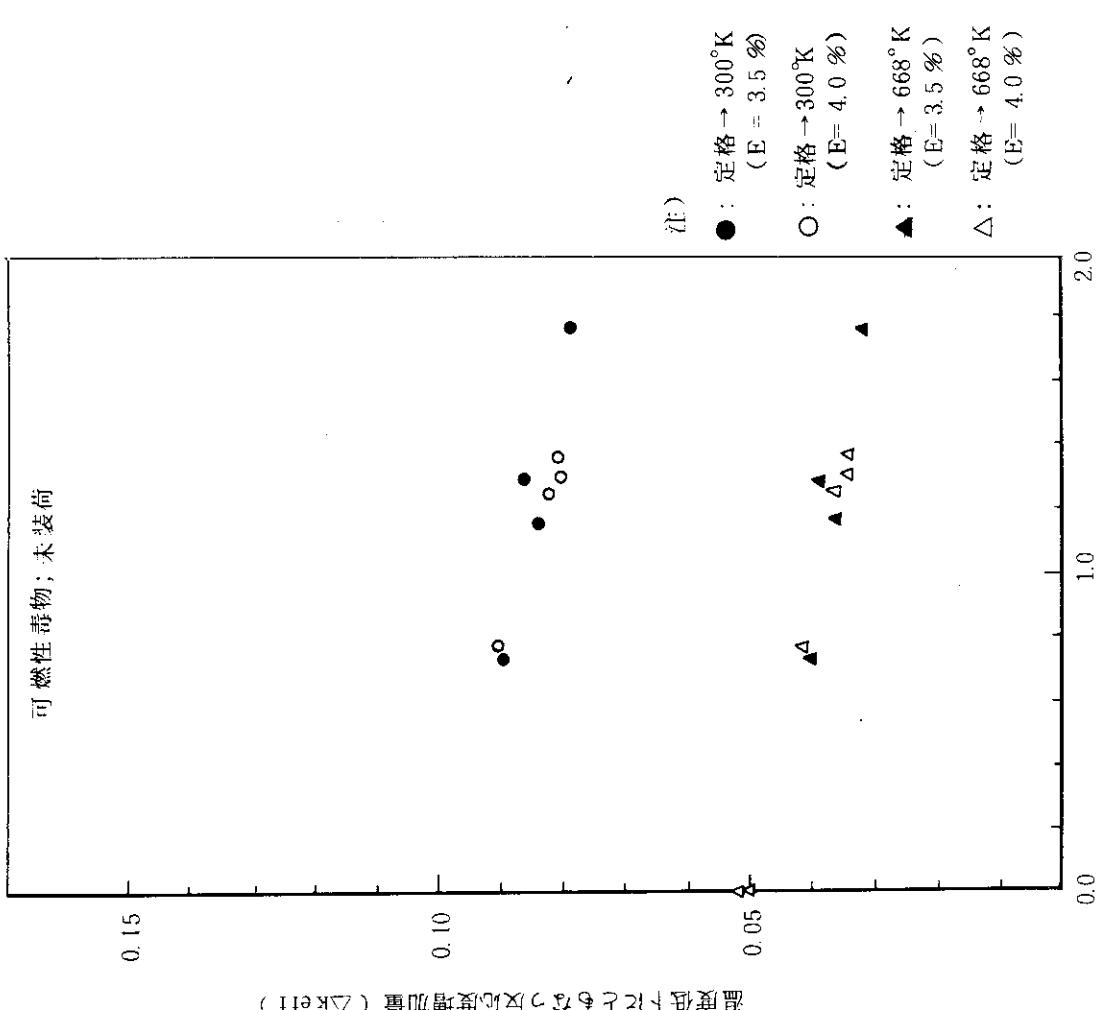
第3.1.4図 燃料濃縮度と燃料の炉内滞在時間(3)

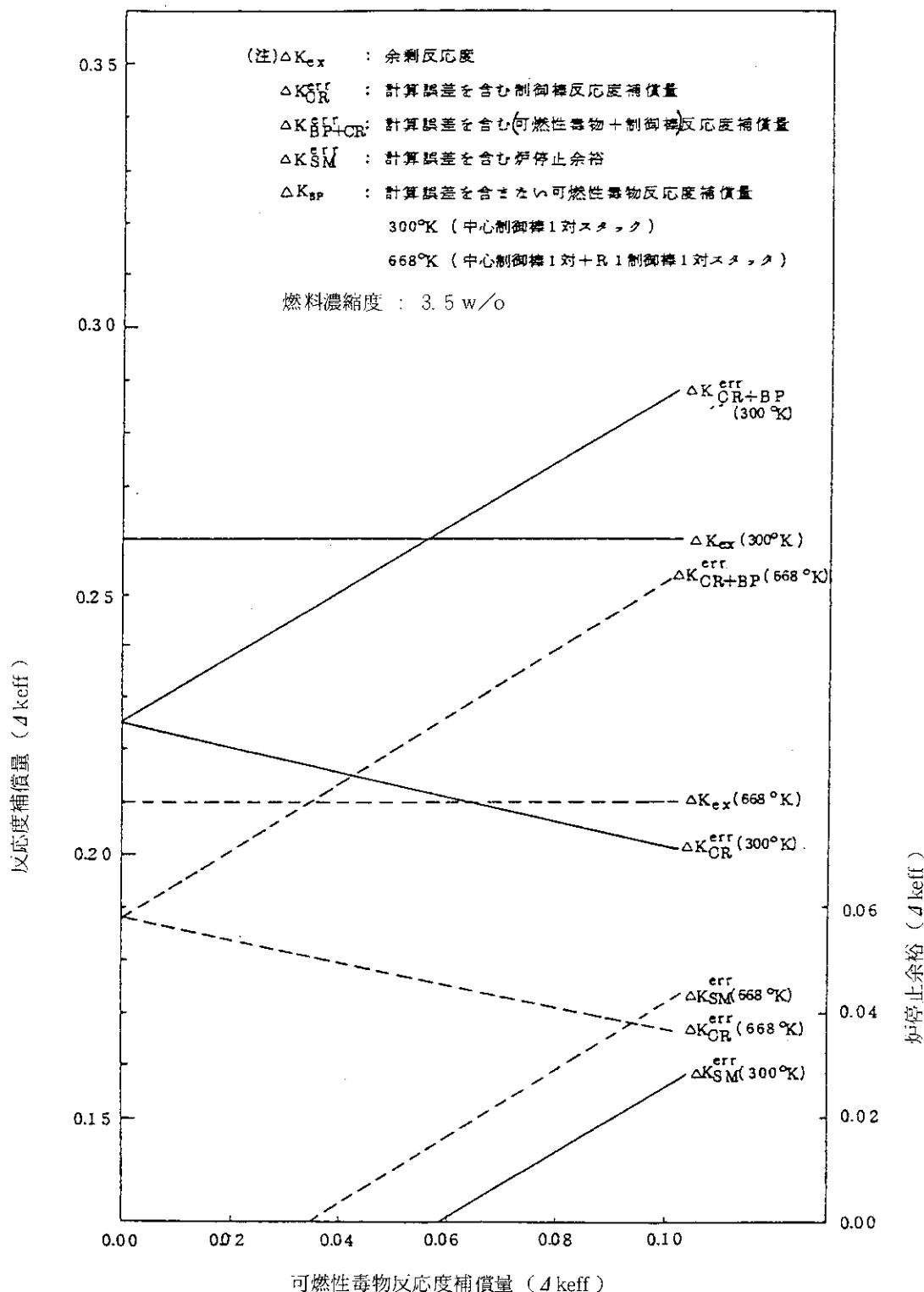


第3.1.5図 可燃性毒物装荷による燃料の炉内滞在時間減少量

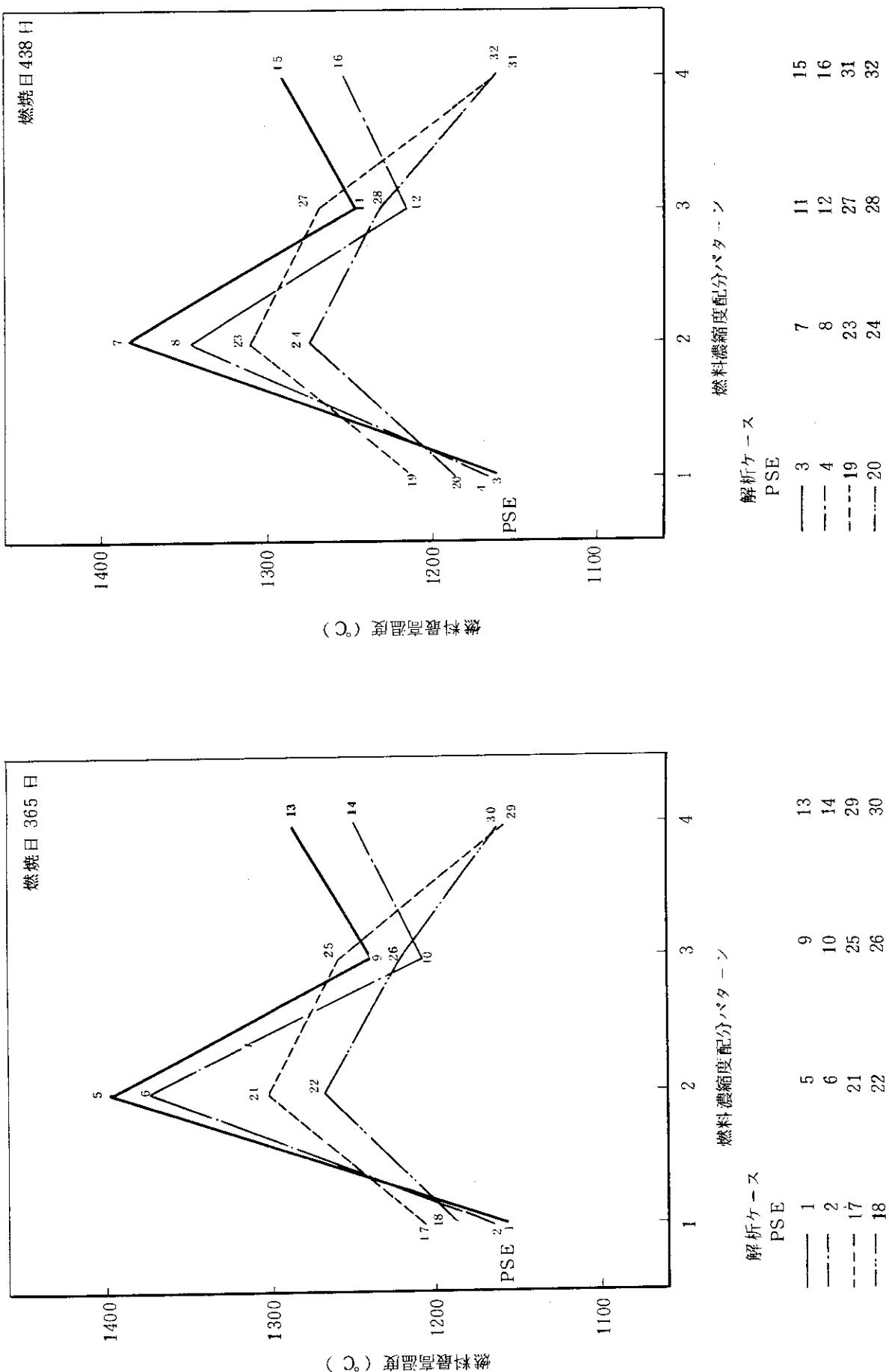
第3.1.6図 燃料濃縮度配分と炉心温度低下にともなう反応度增加量の関係

可燃性毒物；未装荷

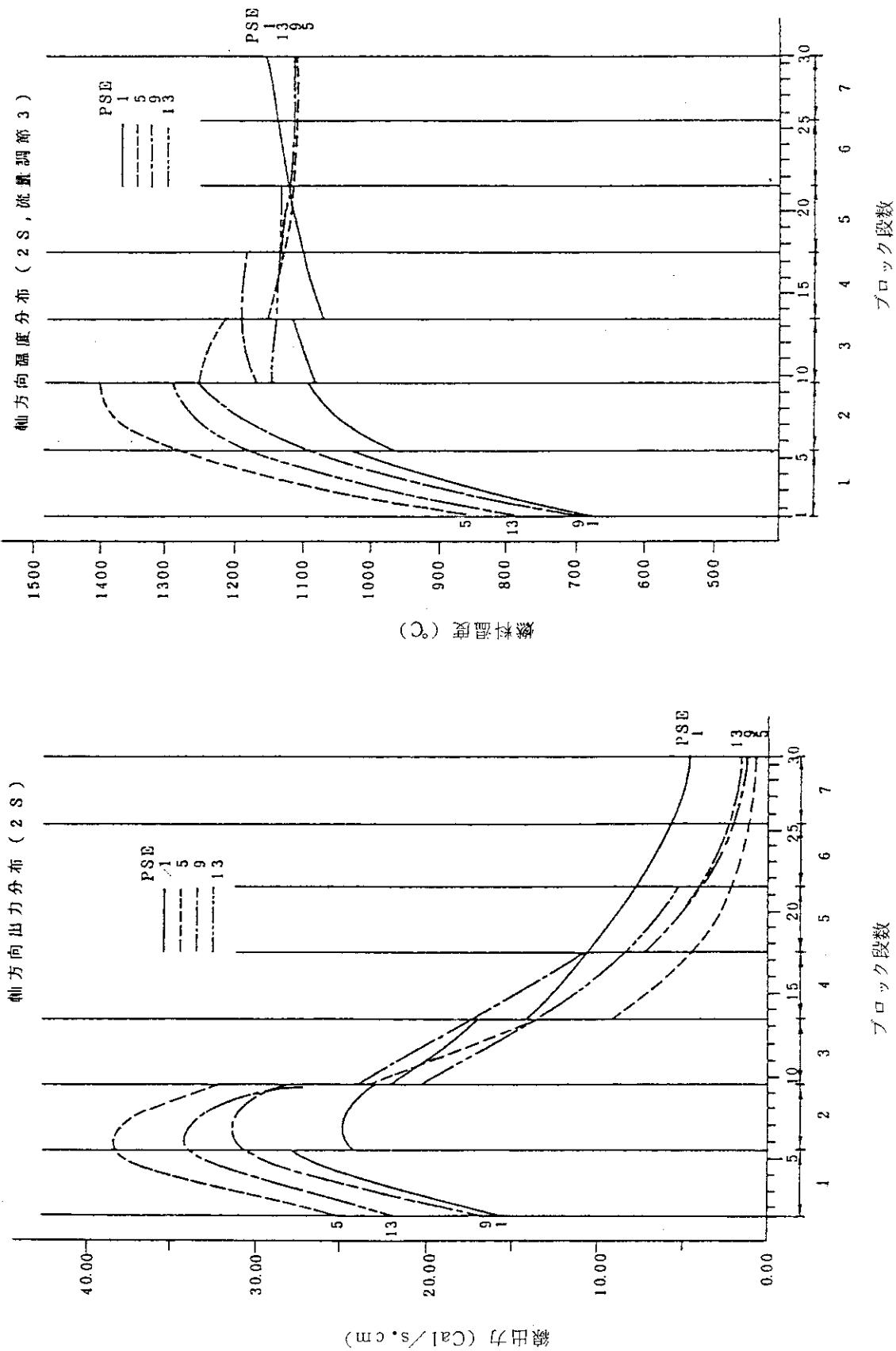




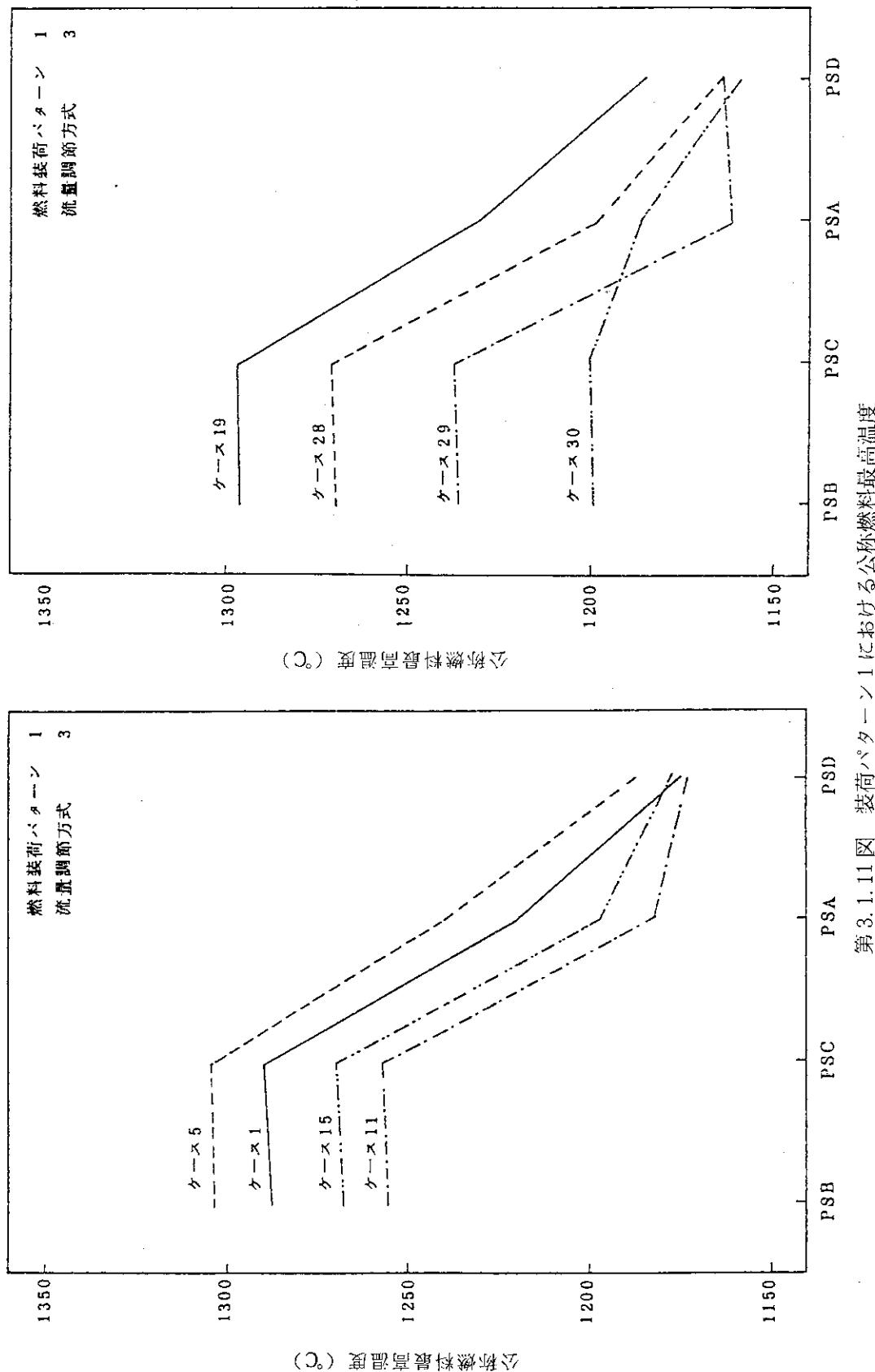
第 3.1.7 図 制御棒および可燃性毒物の反応度補償量と炉停止余裕の関係に対する予備検討



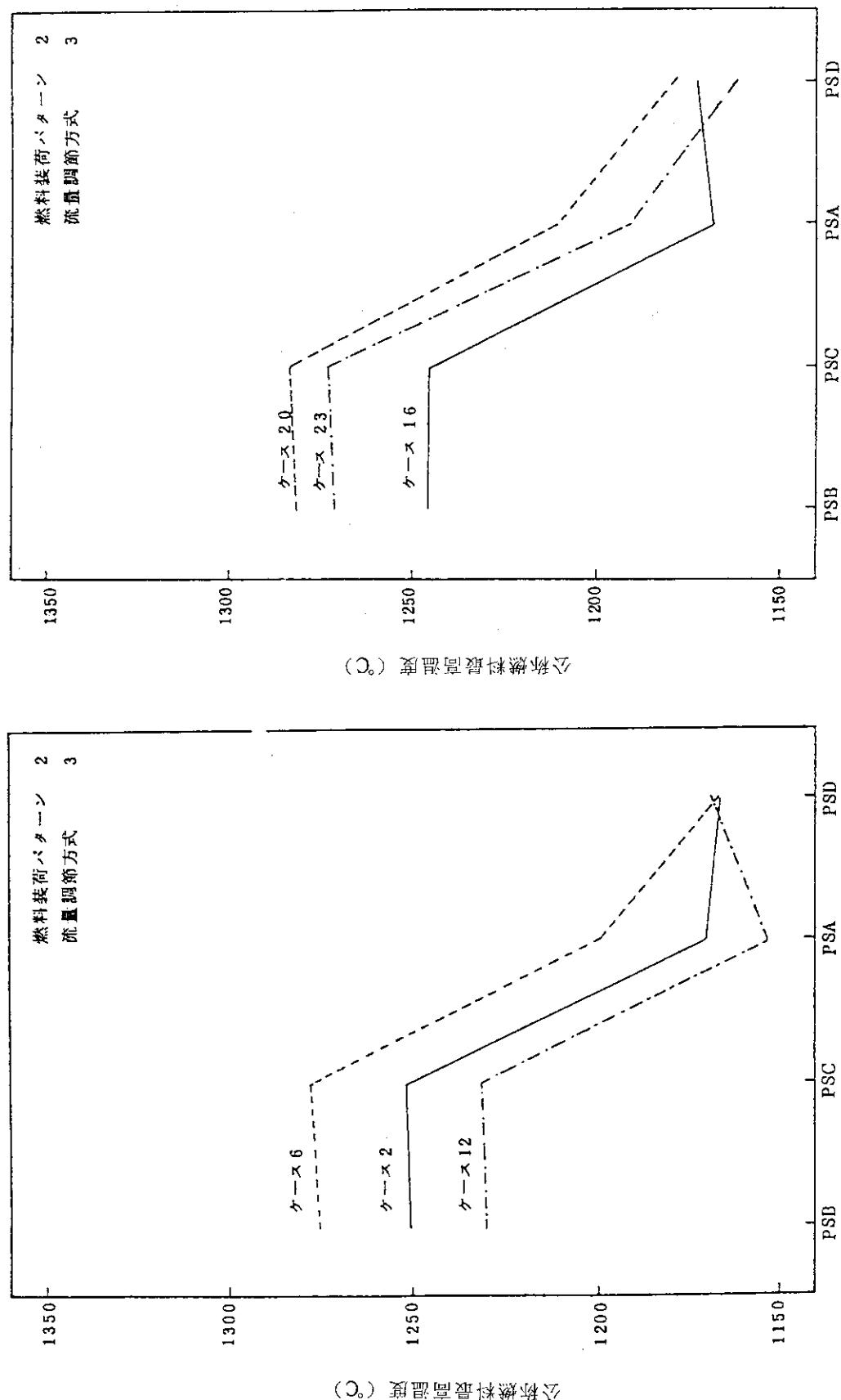
第3.1.8図 燃料濃縮度配分パターーンと燃料最高温度の関係 (燃焼日 365 日)
第3.1.9図 燃料濃縮度配分パターーンと燃料最高温度の関係 (燃焼日 438 日)



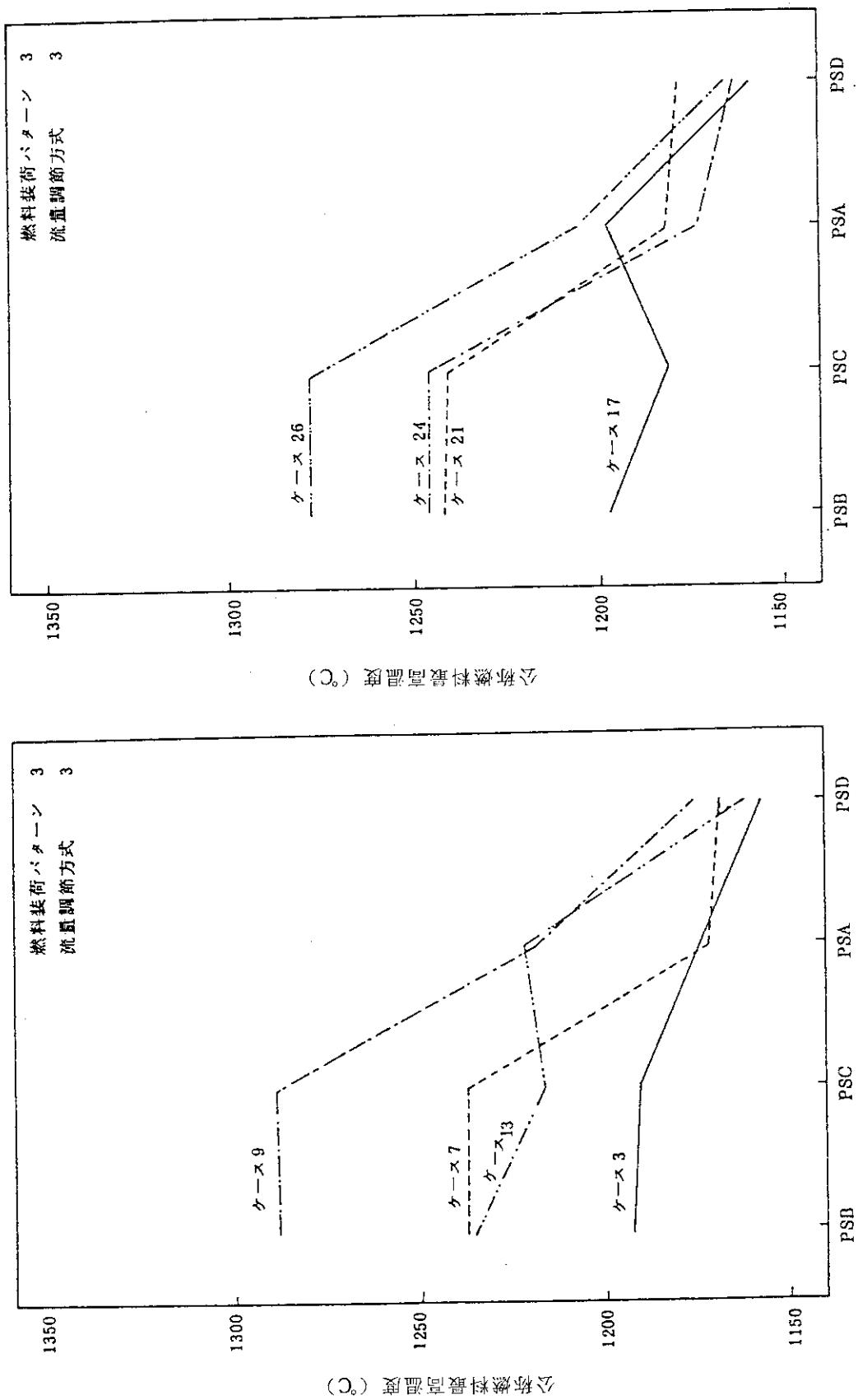
第3.1.10図 軸方向出力分布と温度分布 (PSE 1, 5, 9, 13)



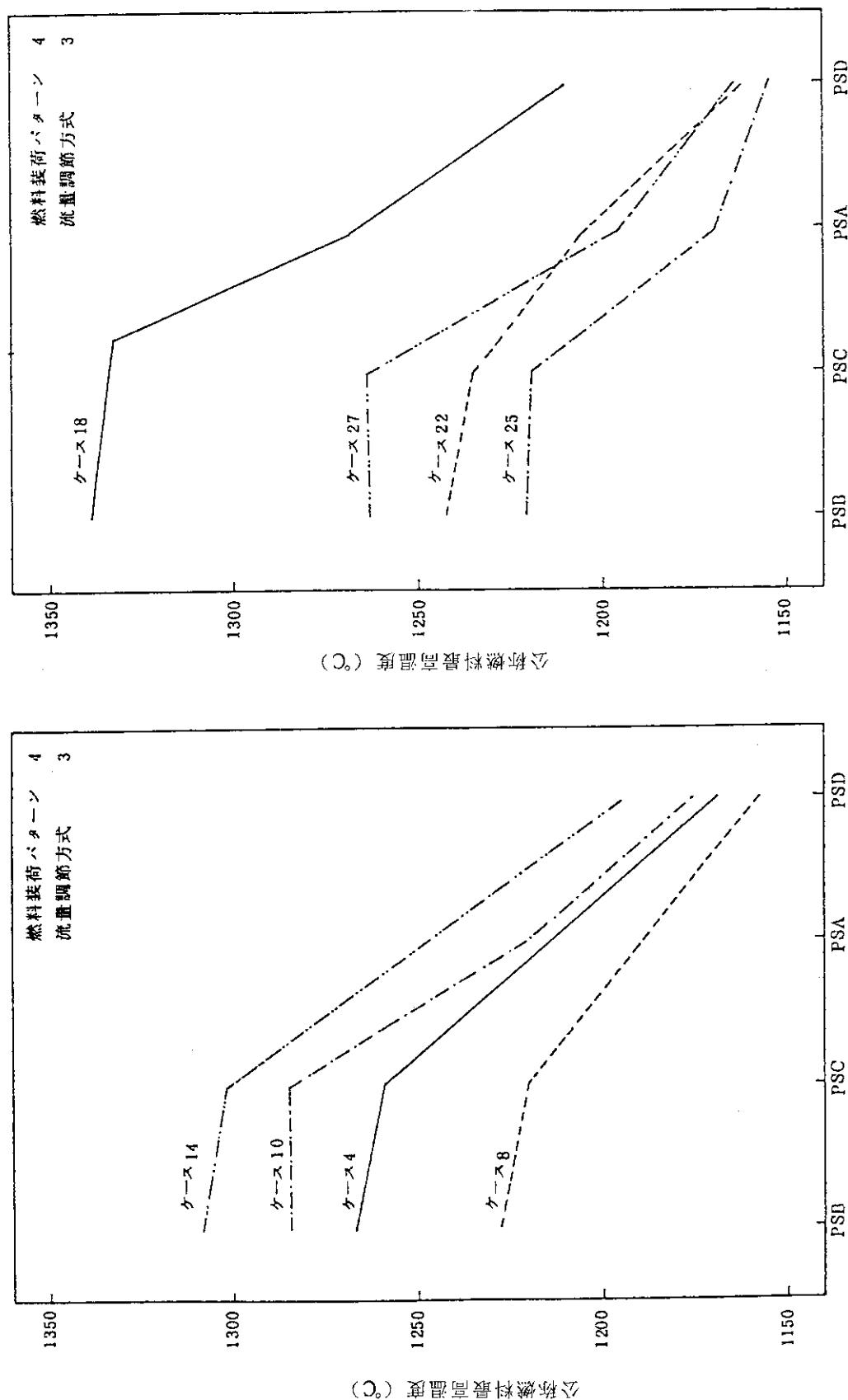
第3.1.11図 装荷パターン1における公称燃料最高温度



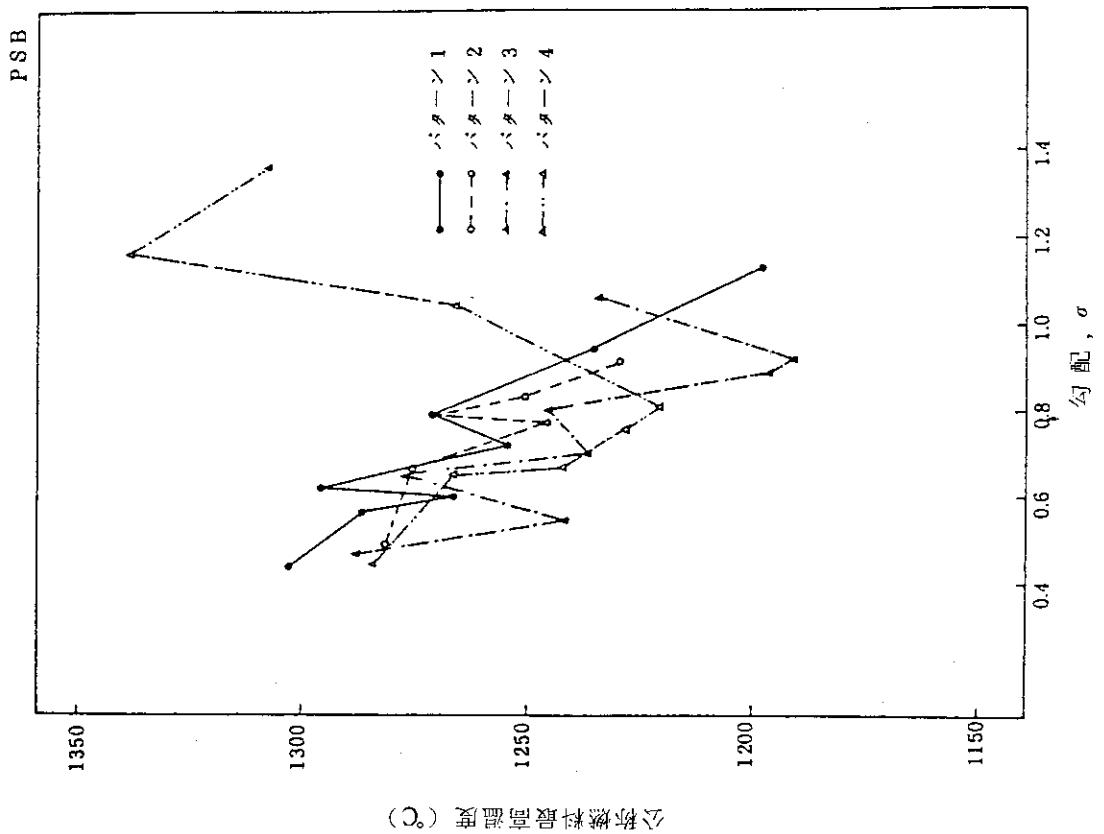
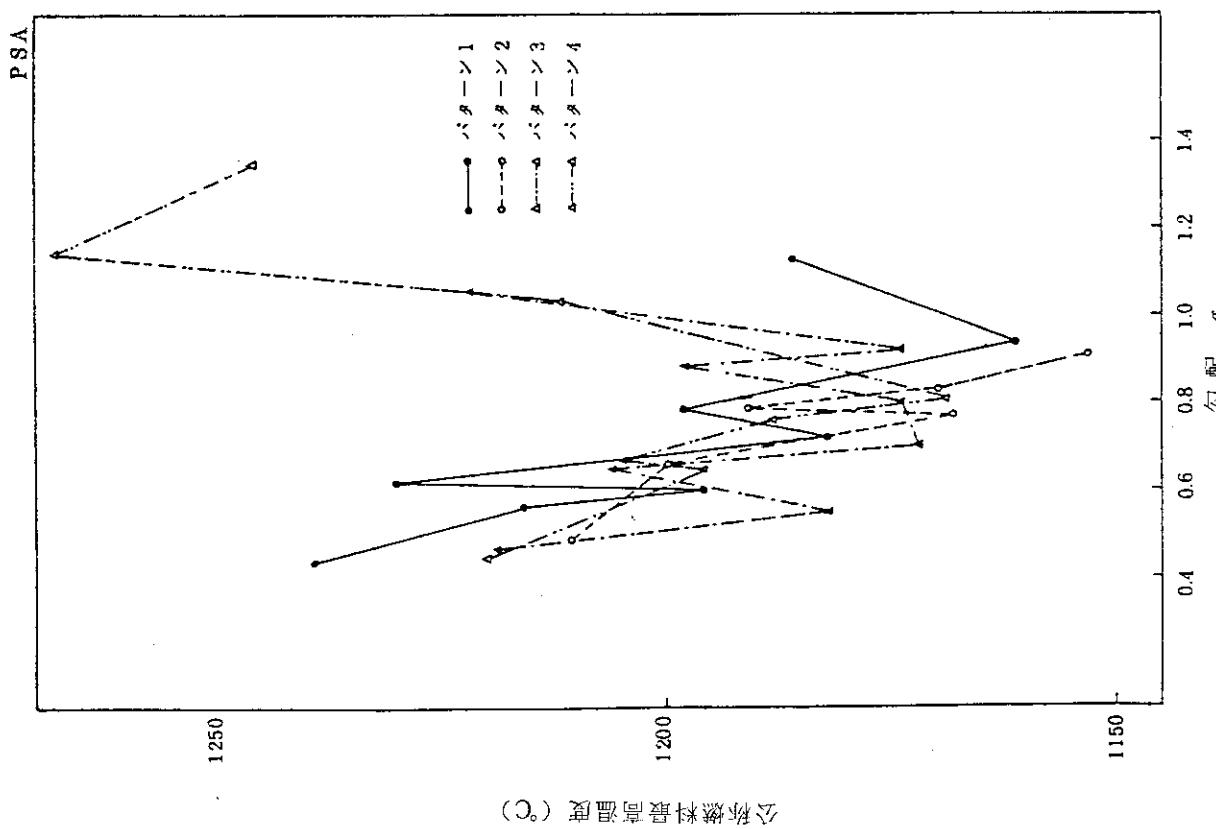
第3.1.12図 装荷パターント2における公称燃料最高温度



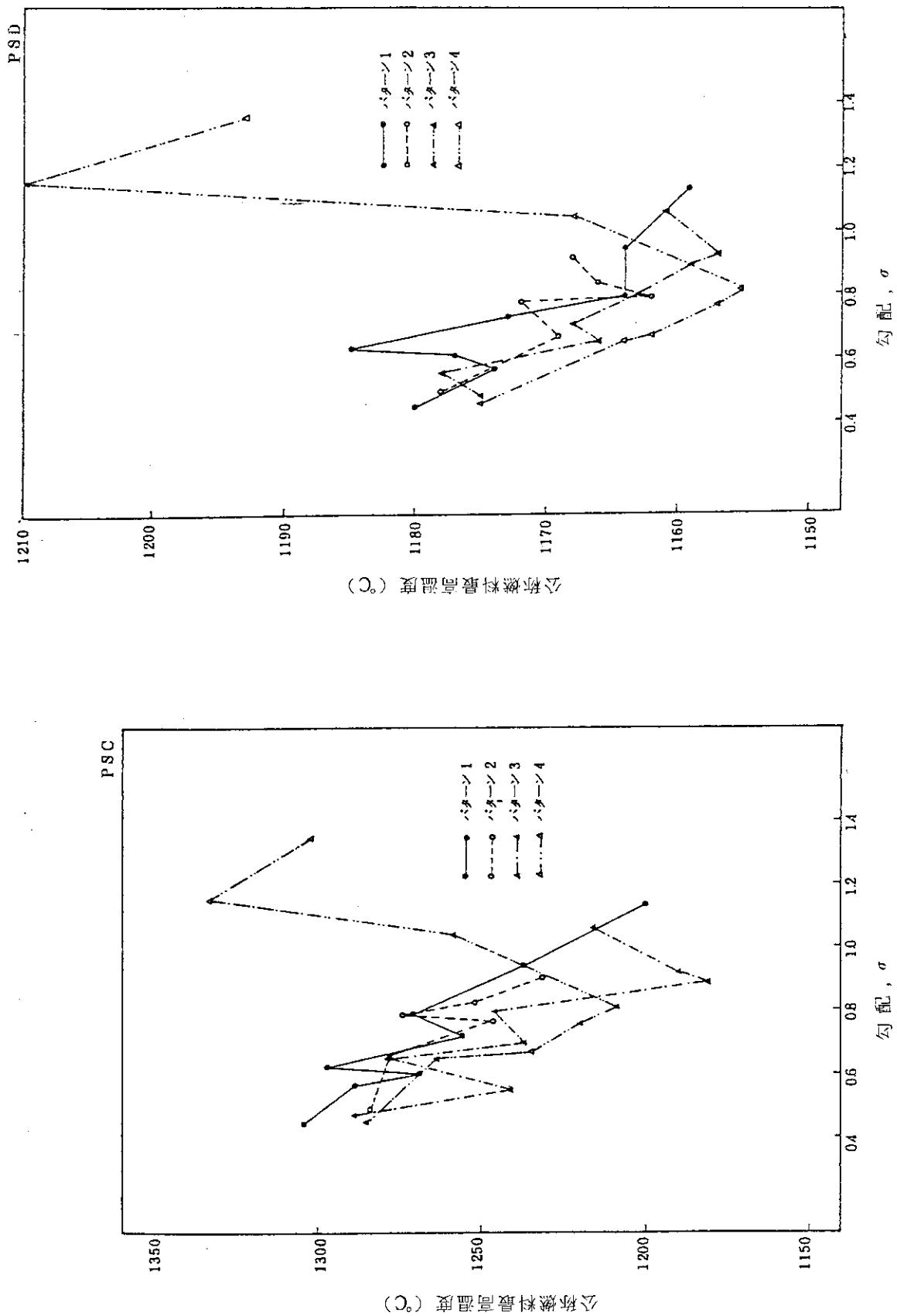
第3.1.13図 装荷パターン3における公称燃料最高温度



第3.1.14図 装荷パターン4における公称燃料最高温度

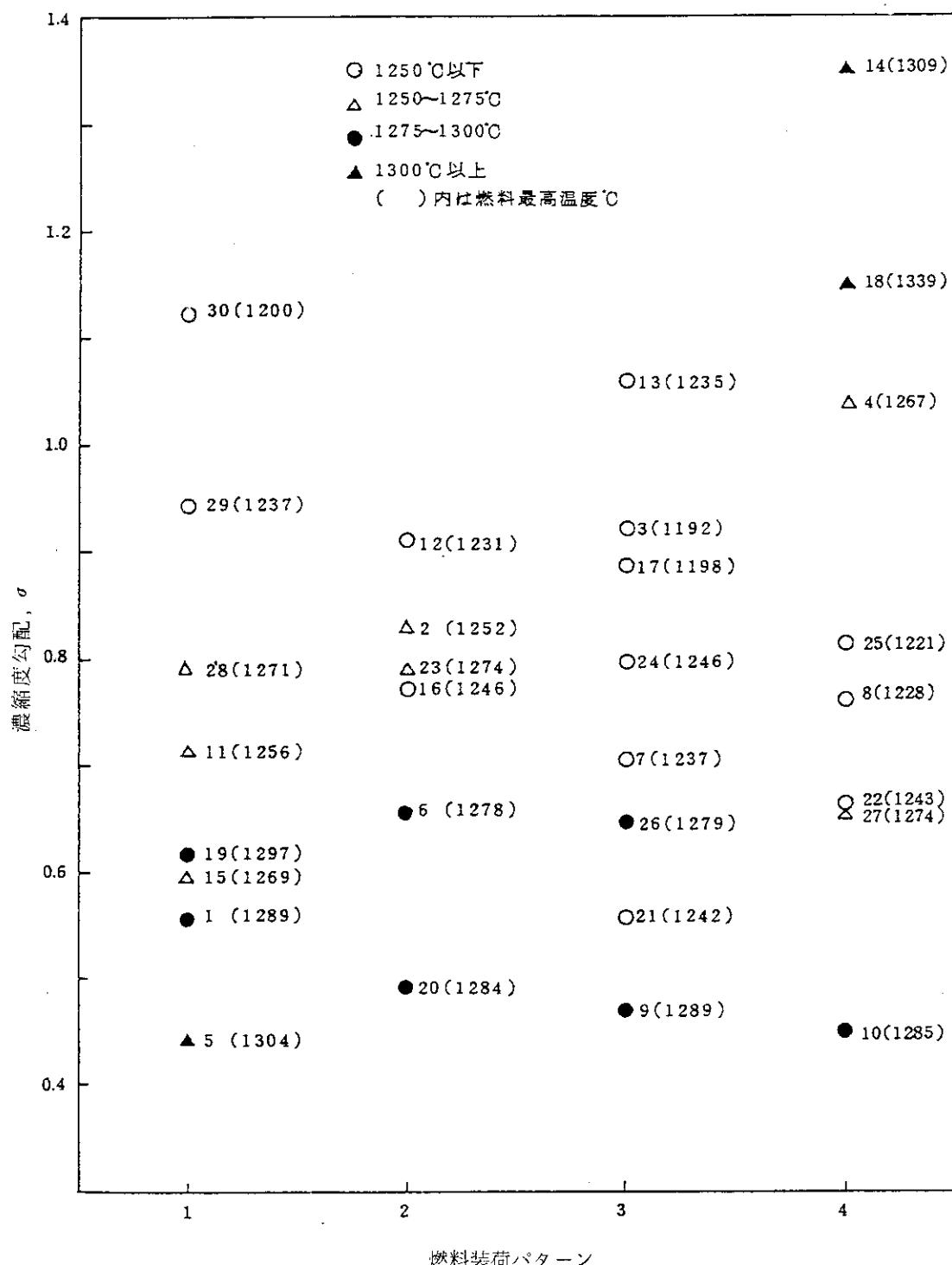


第3, 1, 15図 濃縮度勾配と燃料最高温度の関係

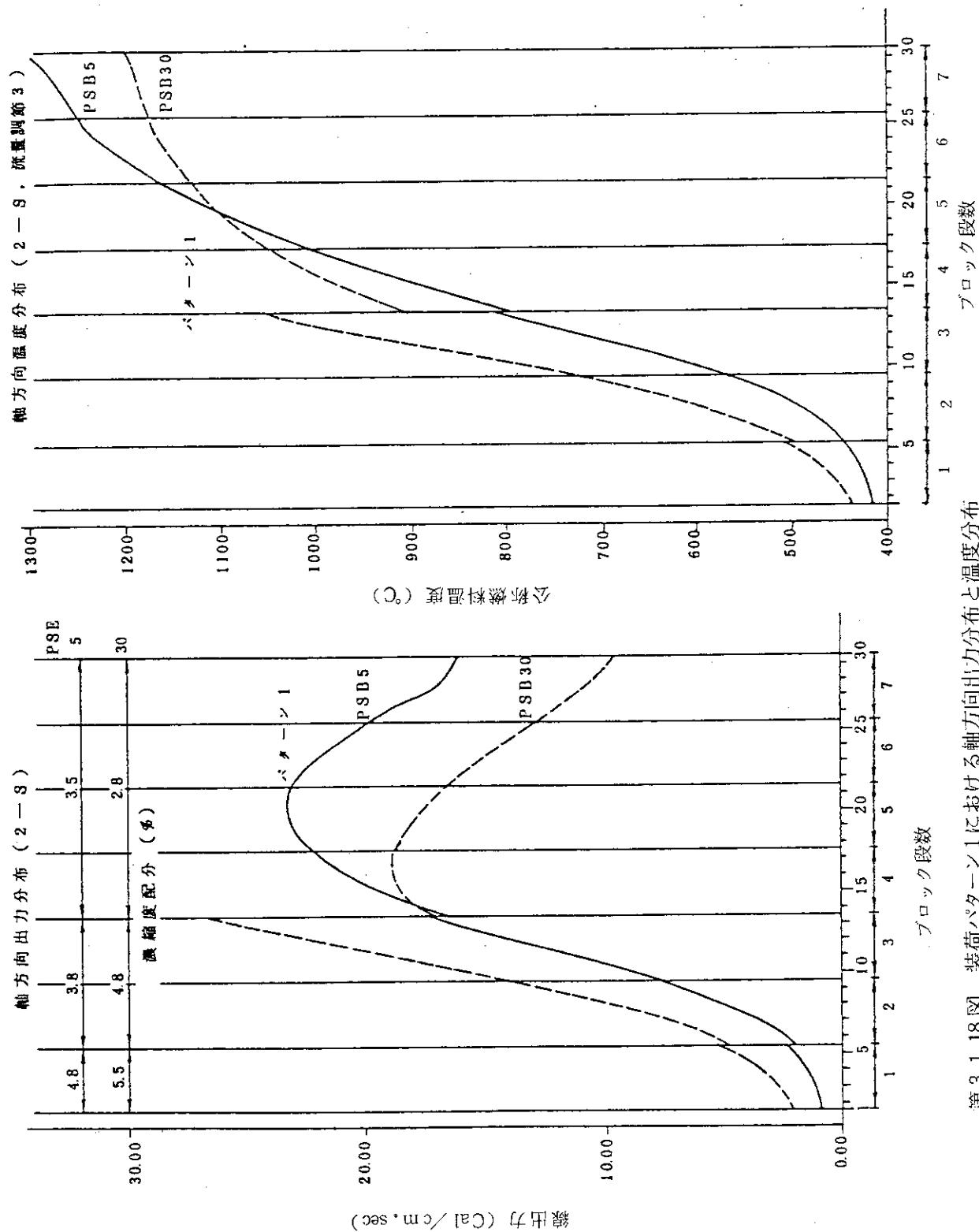


第3.1.16図 濃縮度勾配と燃料最高温度の関係

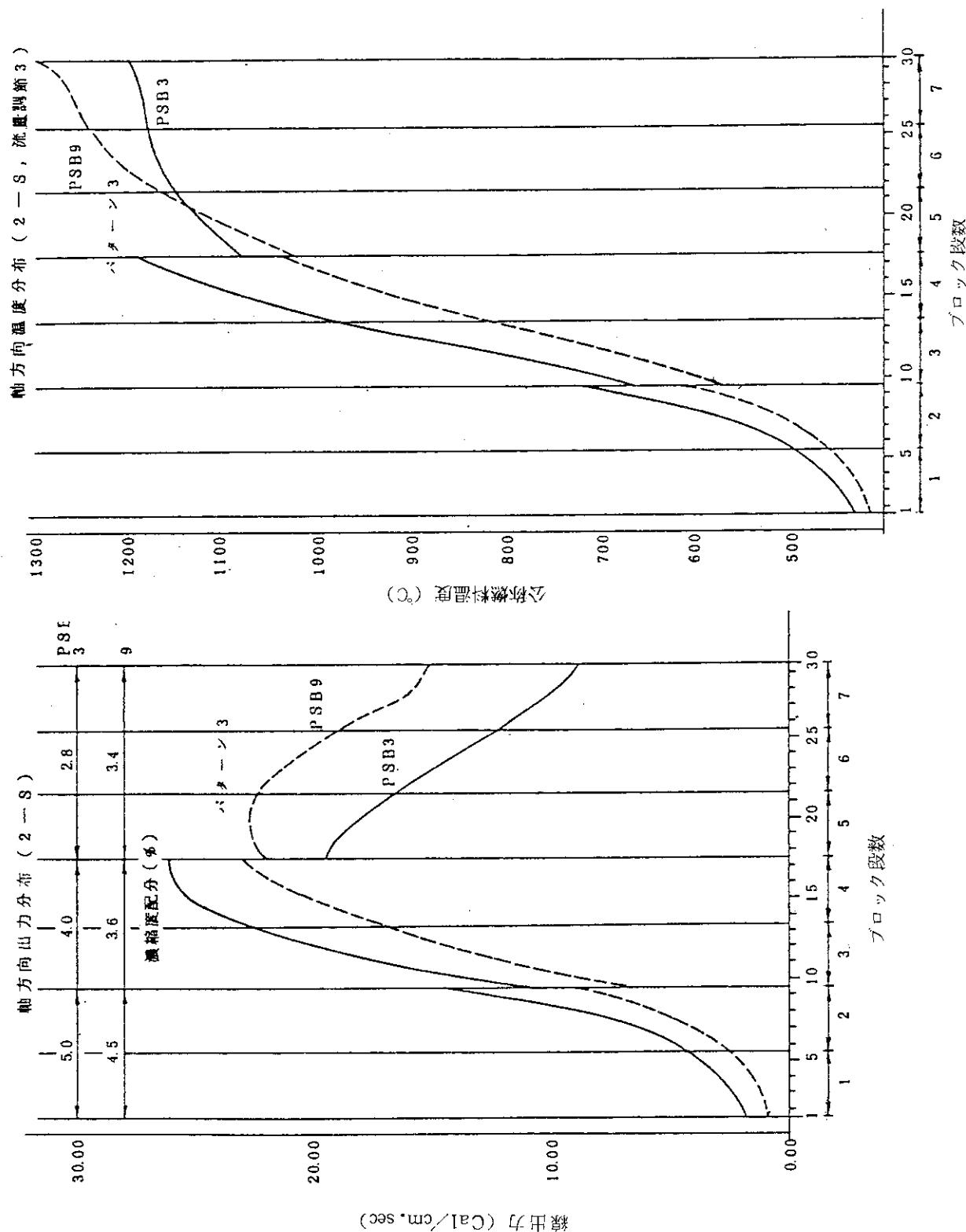
勾配, σ



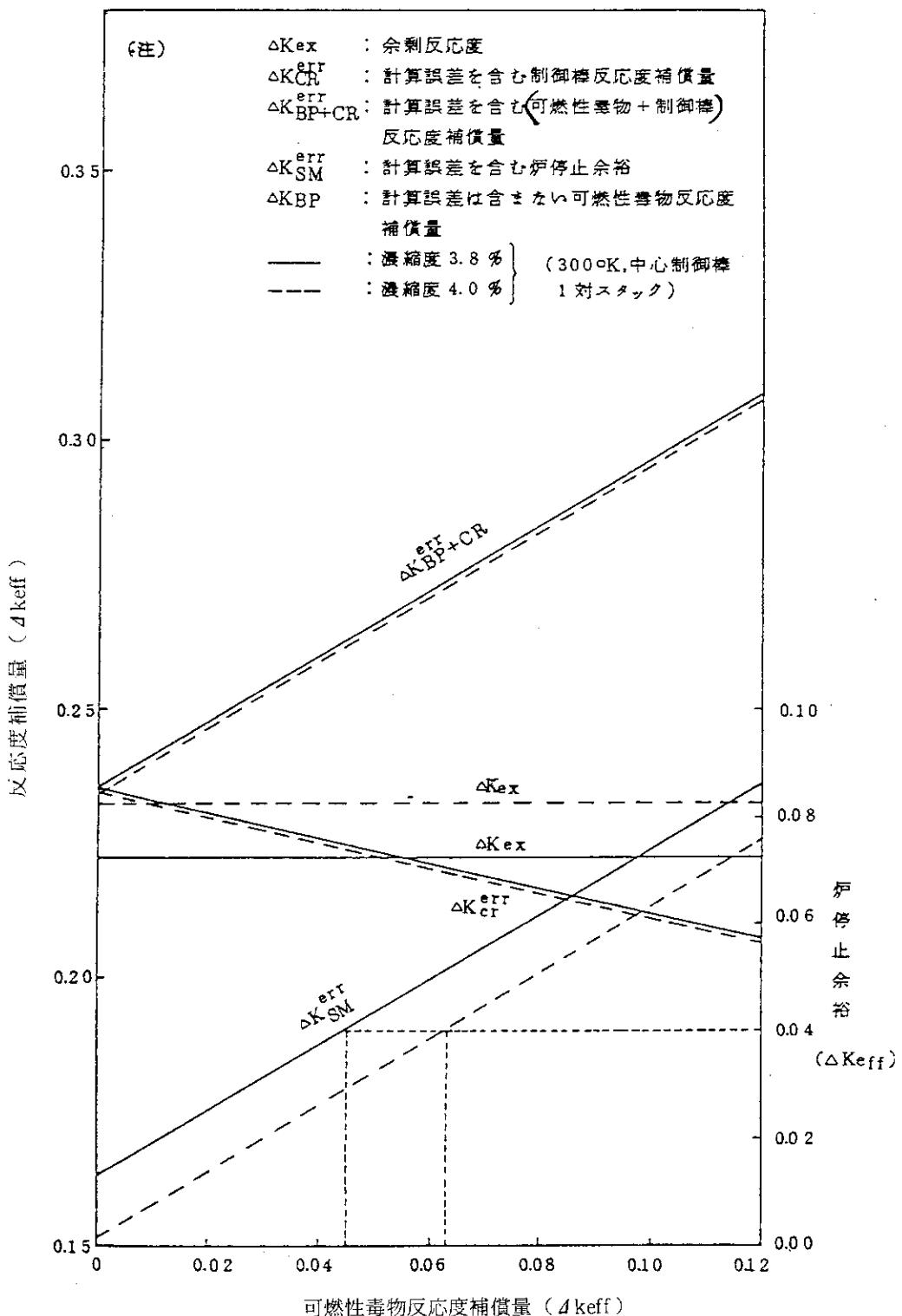
第3.1.17図 燃料装荷パターン別による濃縮度勾配と
燃料最高温度の関係



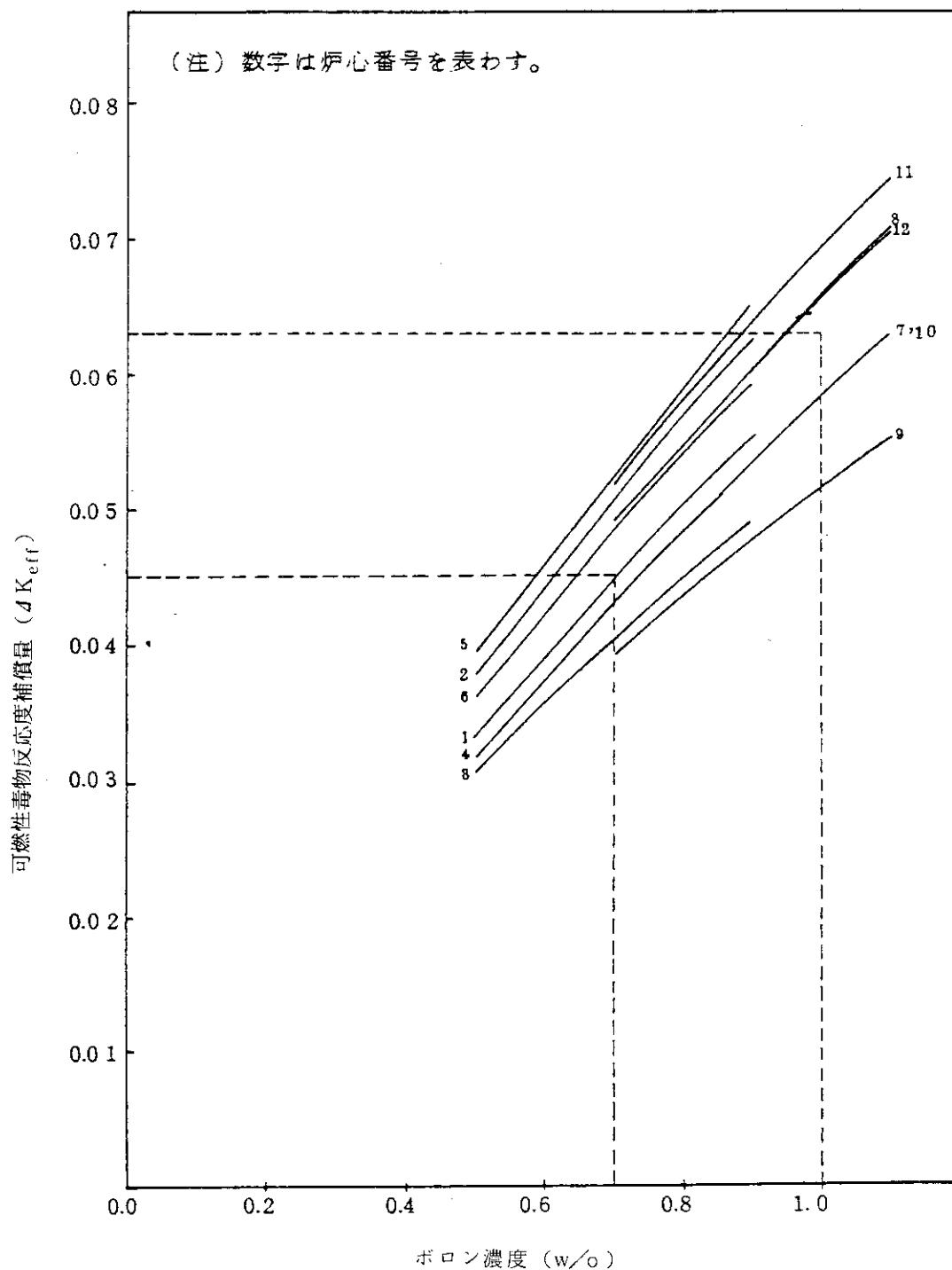
第3.1.18図 装荷パターン1における軸方向出力分布と温度分布



第3.1.19図 装荷パターン3における軸方向出力分布と温度分布



第 3.1.20 図 選定候補炉心における制御棒および可燃性毒物の
反応度補償量と炉停止余裕



第 3.1.21 図 ボロン濃度と可燃性毒物反応度補償量

3.2 詳細検討

3.2.1 炉心構成案の特性比較

予備検討の結果選定された炉心構成案（1次）について核特性および熱流動特性の比較検討を行ない、代表炉心を設定するための改善策を明らかにした。

(1) 核特性

12種類の炉心構成案（1次）に対する核特性として、燃料の炉内滞在時間、初期余剰反応度、Xe & Sm蓄積時の反応度低下量、反応度回復量、低温臨界状態および定格運転状態における制御棒最大反応度価値および炉停止余裕を解析した。燃焼特性および制御棒最大反応度価値は2次元R-Z座標を用い、炉停止余裕は3次元三角-Z座標を用いて求めた。

解析結果を第3.2.1表にまとめて示す。

燃料の炉内滞在時間は、平均濃縮度3.8%の炉心に対して、450～470日、平均濃縮度4.0%に対して490～520日程度で、炉心構成による極端な相違は見られない。

炉停止余裕は0.006～0.023△k_{eff}と炉心構成による相違が比較的大きいが、これは余剰反応度および可燃性毒物装荷法に依存しているためである。炉停止余裕は各炉心ともにやや不足気味である。

制御棒最大反応度価値として、臨界近傍の中心制御棒価値を求めた。低温臨界においては、各炉心とも制御棒挿入度が深いので制御棒最大反応度価値の炉心構成による相違は少ない。一方、定格状態では、制御棒挿入度が浅く、炉心により制御棒配置が異なるため、制御棒最大反応度価値は炉心構成による相違が比較的大きくなっている。しかし設計基準と比較すると、中心制御棒価値は余裕のある値となっている。

Xe & Sm蓄積時の反応度低下量は0.04～0.045△k_{eff}程度であり、炉心構成による相違はあまり大きくない。また、反応度回復量も、高々0.005△k_{eff}程度であり、問題となる大きさではない。

(2) 热流動特性

12種類の炉心構成の燃焼初期状態に対して、3種類の制御棒配置を考慮して2次元R-Z計算により出力分布を求め熱流動特性の比較を行なった。

各炉心の公称燃料最高温度の比較を第3.2.2表および第3.2.1図に示す。解析名称と制御棒挿入度との対応は以下のとおりである。

C S A	中心制御棒3ブロック挿入
	第1リング制御棒2ブロック挿入
C S B	中心制御棒3ブロック挿入
	第1リング制御棒2 1/2ブロック挿入
C S C	中心制御棒3 1/4ブロック挿入
	第1リング制御棒2 3/4ブロック挿入

各炉心とも制御棒挿入度が深くなるに従って燃料最高温度が高くなっている。

可燃性毒物装荷法としては、一様に装荷した場合が最も燃料最高温度が低くなっている。可燃性毒物装荷法の相違による軸方向出力分布と温度分布の比較を炉心7～9について第3.2.2図に示した。可燃性毒物を一様に装荷した場合、炉心下部での出力が低くなり、下部での温度上昇が

少なく、燃料最高温度が最も低く押さえられていることがわかる。

濃縮度配分法による相違は、制御棒挿入度が深い状態において現われ、炉心1～3および炉心7～9の方が、炉心4～6および炉心10～12よりも燃料最高温度が低くなっている。濃縮度配分法の相違による軸方向出力分布と温度分布の比較を炉心1と炉心4について第3.2.3図に示した。炉心1と炉心4は、制御棒挿入度が浅い場合(CSA)炉心下部での出力がほぼ同じであるため、燃料最高温度はほぼ等しくなるが、制御棒挿入度が深くなった場合、炉心4の下部での出力が炉心1より大きくなり、燃料最高温度が高くなる。

以上の検討の結果、12種類の炉心構成のなかでは、炉心7が燃料最高温度を低く押さえるのに最も適していることが明らかとなつたが、炉心選定にあたってはさらに、核計算に使用する温度分布および燃焼状態の影響を考慮する必要がある。

3.2.2 代表炉心の選定

以上の検討より、12種類の炉心構成案の中では炉心7が最も適当であることが分ったが、同時に以下のことも明らかになった。

- a) 炉停止余裕が不足気味である。
- b) 初期定格状態の制御棒挿入度が比較的深い。
- c) 制御棒最大反応度値を3次元計算を用いて解析する必要がある。
- d) 核計算に使用する炉心温度分布を正確に評価する必要がある。
- e) 燃焼の進んだ状態における熱流動特性を検討する必要がある。

そこで、炉心7と同一濃縮度配分で可燃性毒物装荷量を増した炉心構成案3種類を追加し、合計4種類の炉心を対象として、上記で指摘された改善点を考慮して核特性および熱流動特性を検討した。第3.2.3表に4種類の炉心構成を示す。

(1) 炉心温度効果

核計算に使用する炉心の温度分布により、得られる特性が大きく影響されるため、その影響(以降、炉心温度効果と記す)を、初期、Xe & Sm蓄積時および燃焼末期について検討した。

燃焼度分布は、Xe & Sm蓄積時に対しては、初期の出力分布が10日間持続するものとし、燃焼末期に対しては、Xe & Sm蓄積時の出力分布が更に490日間持続するものとして求めた。

初期状態の推定温度分布として、炉心上部からブロック単位に、900, 900, 1200, 1200, 1300, 1300 °Kとした。Xe & Sm蓄積時の推定温度分布には、初期の熱流動計算の結果を用いた。燃焼末期の推定温度分布としては、Xe & Sm蓄積時の熱流動計算の結果を用いた。

推定温度分布を用いて核計算を行なった場合と、その出力分布を用いた熱流動計算の結果得られた温度分布(以降、フィードバック温度分布と記す)を用いて再び核計算を行なった場合との特性を比較するため、実効増倍率、中心制御棒価値および燃料最高温度を第3.2.4表に示す。また、出力分布と温度分布を、初期、Xe & Sm蓄積時および燃焼末期についてそれぞれ第3.2.4図、第3.2.5図および第3.2.6図に示す。

初期では、推定温度分布はフィードバック温度分布に比べて、温度を炉心上部で高く、炉心下部で低く評価していたため、フィードバック温度分布を用いることにより、出力分布が炉心上部で高く、炉心下部で低くなる。この温度分布、出力分布の相違により実効増倍率は $0.0033 \Delta k_{eff}$

減少し、中心制御棒価値は $0.0023 \Delta k_{eff}$ だけ増加し、燃料最高温度は 23°C 低くなる。

Xe & Sm 蓄積時には、制御棒が 1 ブロック分引抜かれ、初期よりも炉心中央部の温度が上昇するが、推定温度分布として初期の熱流動計算の結果を用いているため、フィードバック温度分布を用いた実効増倍率は、推定温度分布を用いた場合より $0.0075 \Delta k_{eff}$ だけ減少した。

燃焼末期では、制御棒がほとんど引抜かれ、炉心上部の温度が非常に高くなる。推定温度分布は炉心上部の温度が低いため、余剰反応度を高く評価しているが、フィードバック温度分布を用いた場合には、燃料濃縮度の高い炉心上部の温度を高く評価するので余剰反応度は大幅に減少する。そのため、臨界調整状態の実効増倍率は $0.0162 \Delta k_{eff}$ も減少した。推定温度分布とフィードバック温度分布を用いた場合とでは、出力分布には大きな相違が見られる。

以上の検討から分かるように、核計算に使用する炉心の温度分布は、反応度特性だけでなく、出力分布を通して熱流動特性にも大きな影響を及ぼすため、正確に評価する必要がある。特に、燃焼を通じて平均的な温度分布で炉内滞在時間を評価した場合、燃焼末期における炉心上部の温度上昇による反応度低下を考えると、炉内滞在時間を過大評価することになる。

(2) 炉心構成案（2次）の核特性比較

次に 2 次の炉心構成案として選定した 4 種類の炉心構成案の核特性として燃料の炉内滞在時間、常温 (300°K) における中心制御棒 1 対スタック時の炉停止余裕、初期定格運転状態における制御棒最大反応度価値を求めた。

燃料の炉内滞在時間は、2 次元 R-Z 座標モデルを用いた制御棒挿入による臨界調整を行なわない燃焼解析から求めた。炉停止余裕、制御棒最大反応度価値および出力分布は 3 次元三角-Z 座標モデルにより求めた。但し、制御棒最大反応度価値と燃料最高温度を求めた臨界調整状態では炉心温度効果を考慮している。

炉心構成案（2次）の核特性として、燃料の炉内滞在時間、初期余剰反応度、Xe & Sm 蓄積時反応度低下量、反応度回復量、制御棒最大反応度価値、炉停止余裕を第 3.2.5 表に示す。

燃料の炉内滞在時間は、470 ～ 500 日程度であり、可燃性毒物装荷量を増すに従って短かくなるが、設計目標を充分満足している。

Xe & Sm 蓄積時反応度低下量は、炉心構成による相違は少なく、余剰反応度も運転余裕を大きく上回っている。

反応度回復量は、可燃性毒物装荷量を増した炉心では大きくなっているが、問題となる大きさではない。

炉停止余裕は、可燃性毒物装荷量を増した炉心 13、炉心 14 および炉心 15 では、それだけ余裕が大きくなっていて、設計基準を満足している。

制御棒最大反応度価値は、臨界調整のための制御棒配置にも依存するが、どの炉心でも制御棒最大反応度価値は大きく、設計基準を余裕を持って満足することは難かしい。

(3) 炉心構成案（2次）の熱流動特性比較

4 種類の炉心構成案（2次）について、燃焼初期、Xe & Sm 蓄積時、および燃焼末期の熱流動特性を解析した。出力分布は、3 次元 3 角-Z モデル計算により、炉心温度効果を考慮して求めた。

各炉心の公称燃料最高温度の比較を第 3.2.6 表および第 3.2.7 図に示した。また、炉心 14 の軸

方向出力分布と燃料温度分布を第 3.2.8 図に示した。

各炉心の燃料最高温度を比較すると、炉心 7 は初期状態で最も高いが、燃焼末期では最も低くなる。炉心 13 は、Xe & Sm 蓄積時において、燃料温度を最も低く押さえることが出来るが、燃焼末期では Xe & Sm 蓄積時より高くなる。炉心 14 は、Xe & Sm 蓄積時において他炉心より高くなるが、初期、Xe & Sm 蓄積時、燃焼末期の順で、燃料最高温度は低くなっている。逆に炉心 15 は、初期において他炉心より最も低いが、末期にいくに従って、燃料温度は高くなり、末期では、他炉心より、最も高いものとなっている。

以上の検討からみると各炉心とも、燃料最高温度は 20 ~ 30 °C 以内の差であり、熱設計基準・指針を満足するものであり、熱流動特性上、大差はないと言える。

(4) 制御棒パターンの検討

適切な制御棒挿入パターンを決定するために、炉心 14 の初期定格状態を対象に、制御棒パターンと制御棒最大反応度価値、出力ピーピングおよび燃料最高温度との関係を検討した。計算は炉心温度効果を考慮して、3 次元三角-Z 座標モデルを用いて行なった。

制御棒パターンと最大反応度価値を第 3.2.7 表に示す。制御棒最大反応度価値は、中心制御棒と第 1 リング制御棒の挿入度差に依存し、挿入度差が大きくなるにつれて、制御棒最大反応度価値も増加する。制御棒最大反応度価値が設計基準を満たすためには、挿入度差は 0.5 ブロック以内にする必要がある。

中心制御棒と第 1 リング制御棒との挿入度差と出力ピーピング係数および燃料最高温度との関係を第 3.2.9 図および第 3.2.10 図に示した。リージョン I の P_1 は中心制御棒の挿入度が深くなるに従って小さくなり、 P_2 は挿入度が大きくなるに従って大きくなる。したがって、リージョン I の燃料温度は挿入度差が大きくなるに従って、高くなる。一方、リージョン II では、 P_1 は挿入度差にあまり依存しないのに対して、挿入度差が大きくなるに従って P_2 が小さくなり、燃料温度が低くなる。挿入度差が 1 ブロックより小さい場合、全炉心の燃料最高温度はリージョン II で発生し挿入度差が大きくなるに従って、燃料最高温度が低くなる。挿入度差が 1 ブロックを超えると燃料最高温度がリージョン I で発生し、1 ブロック差の場合よりも燃料最高温度が高くなる。以上のことから、燃料最高温度を低く押さえるという観点からは、挿入度差を 1 ブロック程度とすることが望ましいといえる。

(5) 代表炉心の選定

以上の検討により、径方向に一様、軸方向に 3 領域の濃縮度配分を行なうことにより設計基準を満足する炉心を構成することが可能であることが明らかとなつたが、バックアップ炉心の特性をさらに詳細に解析するために、可燃性毒物を一様に装荷した炉心 14 を代表炉心として選定した。また、制御棒の駆動に関しては、制御棒最大反応度価値の低減を計るため、中心制御棒と第 1 リング制御棒との挿入度差が 0.5 ブロックを越えないよう駆動するものとした。

第3.2.1表 炉心構成案（1次）の核特性（1／2）

炉心 番号	濃縮度（上段）と RP 装荷本数（下段）						炉内滞在 時間（日）	初期余剰 反応度	Xe & Sm蓄積量 反応度低下量	反応度 回復量	制御棒最大反応度偏値 300 °K	炉停止余裕 (300 °K)			
	1	2	3	4	5	6									
1	5	4	4	2.8	2.8	2.8	3.771	0.7	4.67.3	0.1244	0.0442	0.0010	0.0213	0.0082	0.0135
	2	2	2	2	2	2.0									
2	5	4	4	2.8	2.8	2.8	3.771	0.7	4.66.3	0.1192	0.0436	0.0020	0.0218	0.0064	0.0178
	2	2	3	1	1	1.857									
3	5	4	4	2.8	2.8	2.8	3.771	0.7	4.62.5	0.1310	0.0454	—	0.0212	0.0075	0.0103
	1	1	3	3	2	2	2.0								
4	5.5	4.8	4.8	2.8	2.8	2.8	3.757	0.7	4.52.8	0.1302	0.0444	—	0.0211	0.0084	0.0091
	2	2	2	2	2	2	2.0								
5	5.5	4.8	4.8	2.8	2.8	2.8	3.757	0.7	4.57.1	0.1206	0.0431	0.0021	0.0218	0.0063	0.0165
	2	3	3	2	1	1	1.857								
6	5.5	4.8	4.8	2.8	2.8	2.8	3.757	0.7	4.51.5	0.1261	0.0439	0.0002	0.0211	0.0076	0.0134
	1	3	3	2	2	2	2.143								

(注) i) 炉停止余裕には反応度補償量の計算誤差を含む(可燃性毒物 15 %, 制御棒 10 %)

ii) 炉停止余裕は 3 次元 Tr-Z 計算, 他是 2 次元 R-Z 計算により求めた。

第3.2.1表 炉心構成案（1次）の核特性（2／2）

炉心 番号	濃縮度（上段）とBP装荷本数（下段）							炉内滞在 時間（日）	初期余剰 反応度	Xe & Sm蓄積時 反応度低下量	反応度 回復量	制御棒最大反応度価値	炉停止余裕 (300°K)	
	1	2	3	4	5	6	7							
7	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	4.0	1.0	5.0 5.7	0.1 2 2 3	0.0 4 3 1	0.0 0 2 3	0.0 2 0 7	0.0 0 8 5
	2	2	2	2	2	2	2.0							0.0 1 0 8
8	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	4.0	1.0	5.1 9.9	0.1 1 6 0	0.0 4 2 4	0.0 0 3 4	0.0 2 1 4	0.0 0 5 5
	2	2	3	1	1	1	1.8 5 7							0.0 1 6 2
9	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	4.0	1.0	4.9 8.1	0.1 3 1 9	0.0 4 4 6	—	0.0 2 0 6	0.0 0 7 6
	1	1	3	3	2	2	2.0							0.0 0 6 0
10	5.6	4.8	4.8	3.2	3.2	3.2	4.0	1.0	4.9 2.6	0.1 2 0 1	0.0 4 2 9	0.0 0 2 2	0.0 2 0 5	0.0 0 6 7
	2	2	2	2	2	2	2.0							0.0 1 4 0
11	5.6	4.8	4.8	3.2	3.2	3.2	4.0	1.0	5.1 4.0	0.1 0 8 2	0.0 4 1 5	0.0 0 5 1	0.0 2 1 2	0.0 0 4 1
	2	3	3	2	1	1	1.8 5 7							0.0 2 3 1
12	5.6	4.8	4.8	3.2	3.2	3.2	4.0	1.0	4.9 0.0	0.1 1 5 0	0.0 4 2 4	0.0 0 2 6	0.0 2 0 6	0.0 0 5 9
	1	3	3	2	2	2	2.1 4 3							0.0 1 9 5

(注) i) 炉停止余裕には反応度補償量の計算誤差を含む（可燃性毒物 15 %, 制御棒 10 %）

ii) 炉停止余裕は 3 次元 Tr-Z 計算, 他是 2 次元 R-Z 計算により求めた。

第3.2.2表 炉心構成案（1次）における燃料最高温度の比較

炉心 番号	燃料濃縮度（%）						可燃性毒物装荷本数(本)						流量調節2による公称燃料最高温度						流量調節3による公称燃料最高温度						備 考			
	軸方向ブロック段数						軸方向ブロック段数						制御棒挿入度						制御棒挿入度									
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	CSA(3/2)	CSB(3/2)	CSC(3/2.5)	CSA(3/2.75)	CSB(3/2.5)	CSC(3/2.75)								
1								2	2	2	2	2	2	2	1197	1244	1268	1179	1216	1237	B.P. 装荷無し 制御棒挿入(3/2)							
2	5	5	4	4	2.8	2.8	2.8	2	3	3	1	1	1	1	1237	1284	1309	1211	1251	1272	1.21'2°C							
3								1	1	3	3	2	2	2	1206	1255	1280	1187	1226	1248	1.19'0°C							
4								2	2	2	2	2	2	2	1202	1270	1304	1187	1240	1268	B.P. 装荷無し 制御棒挿入(3/2)							
5	5.5	4.8	4.8	2.8	2.8	2.8	2	3	3	2	1	1	1	1	1249	1311	1342	1223	1274	1301	1.22'1°C							
6								1	3	3	2	2	2	2	1218	1284	1316	1199	1250	1278	1.20'0°C							
7								2	2	2	2	2	2	2	1188	1234	1258	1174	1212	1233								
8	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	2	2	3	3	1	1	1	1260	1307	1331	1233	1272	1293								
9								1	1	3	3	2	2	2	1198	1248	1274	1184	1225	1247								
10								2	2	2	2	2	2	2	1236	1299	1332	1214	1267	1296								
11	5.6	4.8	4.8	3.2	3.2	3.2	2	3	3	2	1	1	1	1	1312	1362	1389	1277	1320	1343								
12								1	3	3	2	2	2	2	1257	1315	1346	1232	1281	1308								

(注) i) 制御棒挿入度 (n_1/n_2)において、 n_1 は中心制御棒挿入度、 n_2 は第1リング制御棒挿入度を各々示す。

第3.2.3表 炉心設定のための検討対象代表炉心

炉心番号	燃料浸縮度(上段)と可燃性毒物装荷本数(下段)								ボロン 濃度
	1	2	3	4	5	6	7	平均	
7	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	4.0	1.0
	2	2	2	2	2	2	2	2.0	
13	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	4.0	1.0
	2	2	3	3	2	2	2	2.286	
14	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	4.0	1.2
	2	2	2	2	2	2	2	2.0	
15	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	4.0	1.2
	2	2	3	3	2	2	2	2.286	

第3.2.4表 炉心温度分布(核計算用)が核特性に及ぼす影響

温度分布	状態	燃焼項目	初期	XeSm蓄積時	末期
			(0日)	(10日)	(500日)
推定	臨界調整	解析名称	CSZ-07	CXY-07	CEZ-07
		制御棒配置	(3.25/2.75)	(2.5/1.5)	(1.0/B)
		実効増倍率	0.9998	1.0085	1.0038
	中心制御棒引抜	実効増倍率	1.0116	-	-
		中心制御棒価値	0.0118	-	-
	フィードバック	解析名称	CSU-07	CXV-07	CEU-07
		制御棒配置	(3.25/2.75)	(2.5/1.5)	(1.0/B)
		実効増倍率	0.9965	1.0010	0.9876
		実効増倍率	1.0104	-	-
		中心制御棒価値	0.0139	-	-

- (注) i) 推定温度分布(炉心上部よりブロック単位で 900, 900, 1200, 1200, 1300, 1300, 1300 °K)
ii) XeSm蓄積時の推定温度分布には、初期のフィードバック温度分布による熱流動計算結果を使用。
iii) 末期の推定温度分布には、XeSm蓄積時のフィードバック温度分布による熱流動計算結果を使用。

第3.2.5表 炉心構成案（2次）の核特性

炉心 番号	濃縮度（上段）とBP装荷本数（下段）							ボロン 濃度	炉内滞在 時間（日）	初期余剰 反応度	Xe&Sm蓄積時 反応度低下量	反応度 回復量	制御棒最大 反応度価値 (制御棒配置)	炉停止余裕 (300 °K)
	1	2	3	4	5	6	7							
7	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	4.0	1.0	5.0	0.1223	0.0431	0.0023	0.0139 (3.25/2.75)	0.0108
	2	2	2	2	2	2	2.0							
13	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	4.0	1.0	4.9	0.1147	0.0423	0.0032	0.0169 (3.25/2.75)	0.0170
	2	2	3	3	2	2	2.286							
14	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	4.0	1.2	4.9	0.1135	0.0422	0.0036	0.0135 (3/2.5)	0.0164
	2	2	2	2	2	2	2.0							
15	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	4.0	1.2	4.7	0.1049	0.0412	0.0046	0.0168 (3/2)	0.0232
	2	2	3	3	2	2	2.286							

(注) i) 炉停止余裕には反応度補償量の計算誤差を含む（可燃性毒物 15 %, 制御棒 10 %）

ii) 炉停止余裕, 制御棒最大反応度価値は3次元計算, 他是2次元R-Z計算により求めた。

第3.2.6表 炉心構成案(2次)の熱流動特性

炉心番号	濃縮度(上段)とBP装荷本数(下段)							初期			XeSm蓄積時			末期		
	ボロン濃度							制御棒 挿入度 (C/R1)	Keff	公称燃料最高温度		制御棒 挿入度 (C/R1)	Keff	(C/R1)	Keff	公称燃料最高温度
	1	2	3	4	5	6	7			流量調節 流路遮断	流量調節 流路遮断					
7	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	1.0	3.25/2.75	0.9965	1.233	1.210	2.5/1.5	1.0010	1.186	1.175
13	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	1.0	3.25/2.25	1.0009	1.204	1.189	2/1.25	0.9982	1.179	1.166
14	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	1.2	3/2.5	0.9975	1.212	1.191	2.25/1.25	1.0000	1.195	1.182
15	5.3	5.3	4.2	4.2	3	3	3	1.2	3/2	0.9994	1.188	1.175	1.75/0.75	1.0016	1.192	1.172
	2	2	3	3	2	2	2									

(注) i) 制御棒挿入度

C …… 中心制御棒 R1 …… リング1制御棒

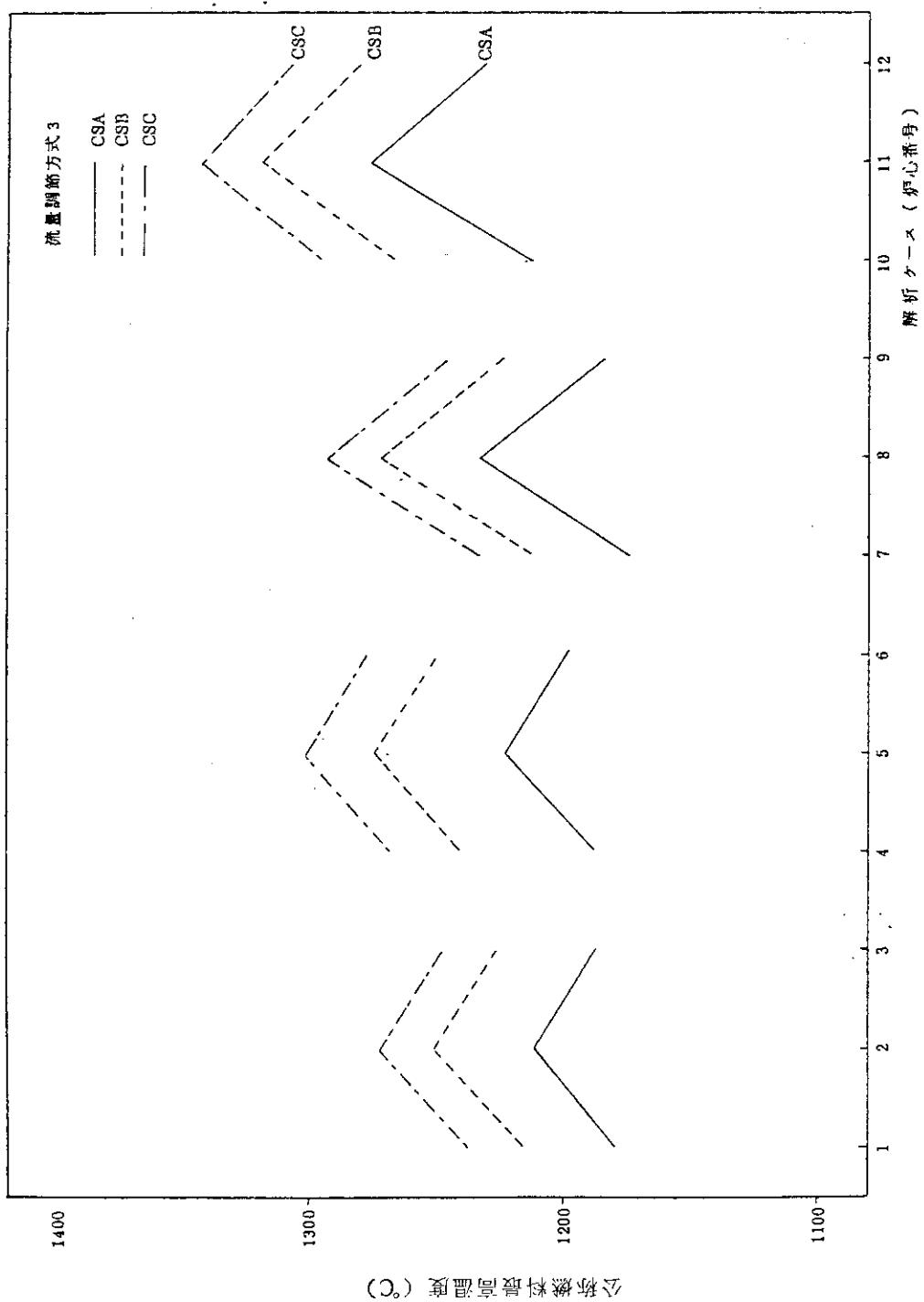
第3.2.7表 制御棒パターンと最大反応度値

解析 名称	制御棒挿入度				C の R1 の挿入度差	実効増倍率	制御棒最大 反応度値
	C	R1	R2	R3			
CRE	2.75	2.5	0	0	0.25	0.9999	0.0111
CRA	3	2.5	0	0	0.5	0.9975	0.0135
CRF	3.25	2.5	0	0	0.75	0.9949	0.0161
CRG	0	2.5	0	0	-	1.0110	
CBC	3	2.25	0	0	0.75	1.0063	0.0157
CRB	3.25	2.25	0	0	1.0	1.0035	0.0185
CRD	3.5	2.25	0	0	1.25	1.0007	0.0213
CRH	0	2.25	0	0	-	1.0220	

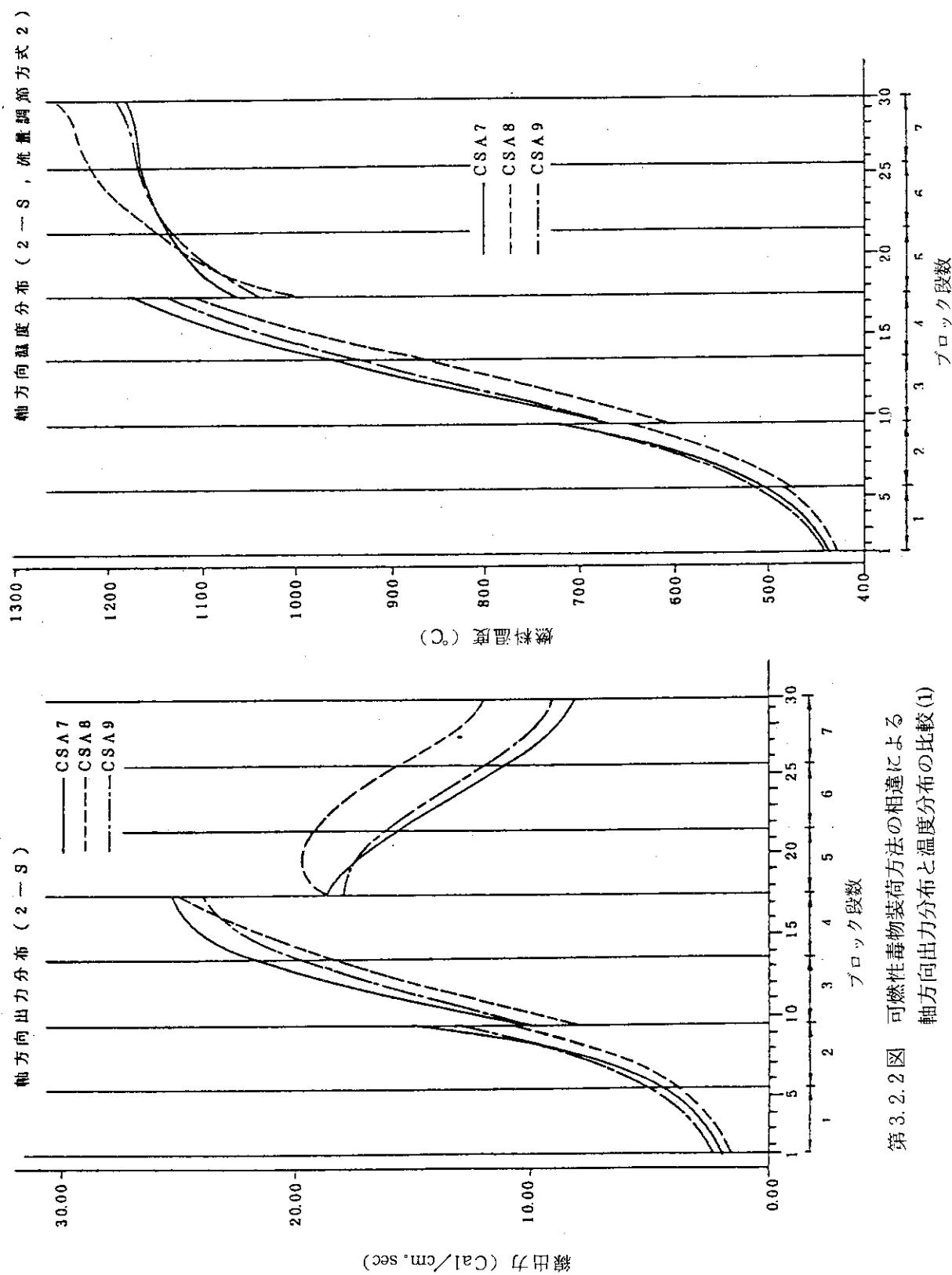
(注) i) 制御棒挿入度

C …… 中心制御棒

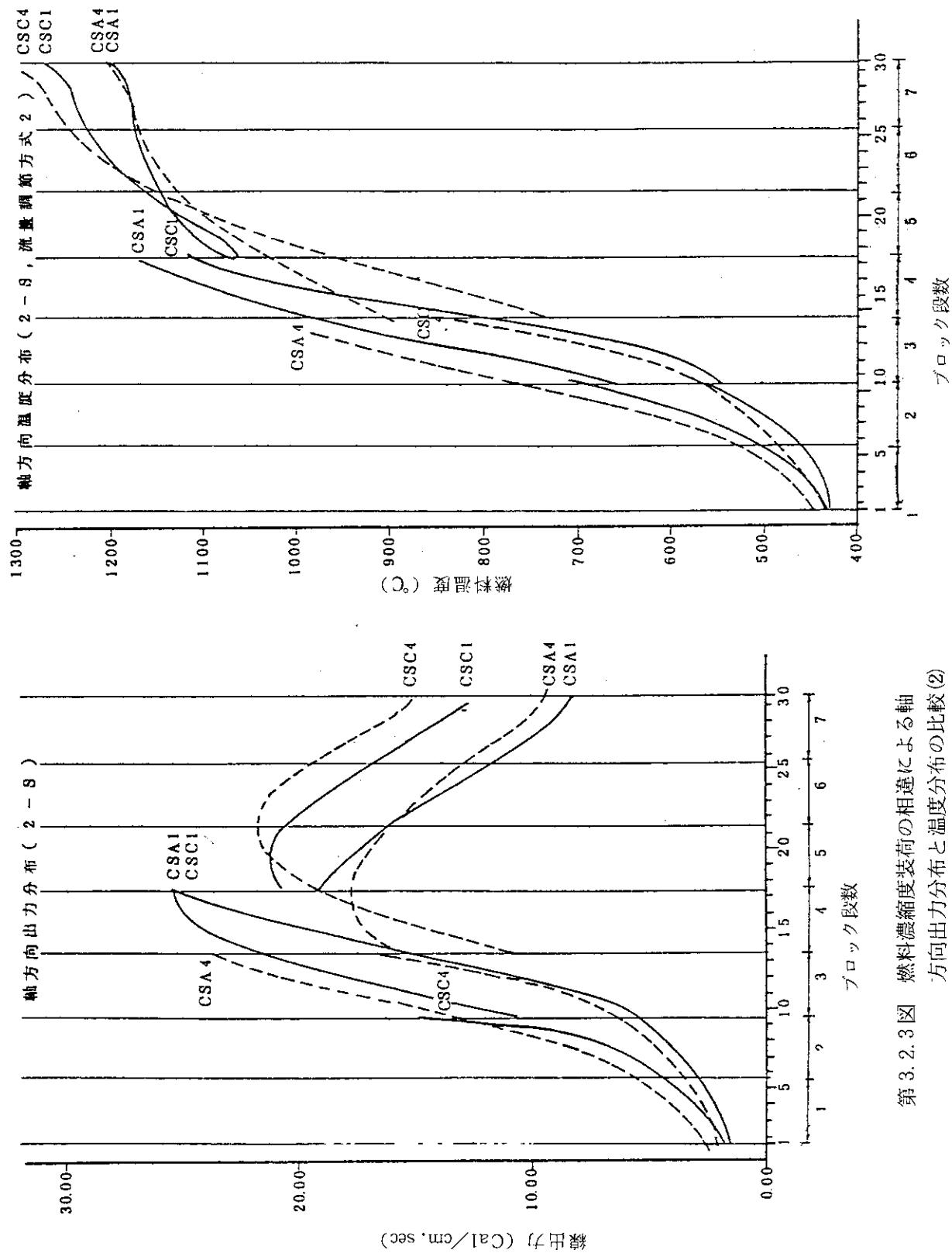
R_i …… 第i リング制御棒 (i = 1 ~ 3)



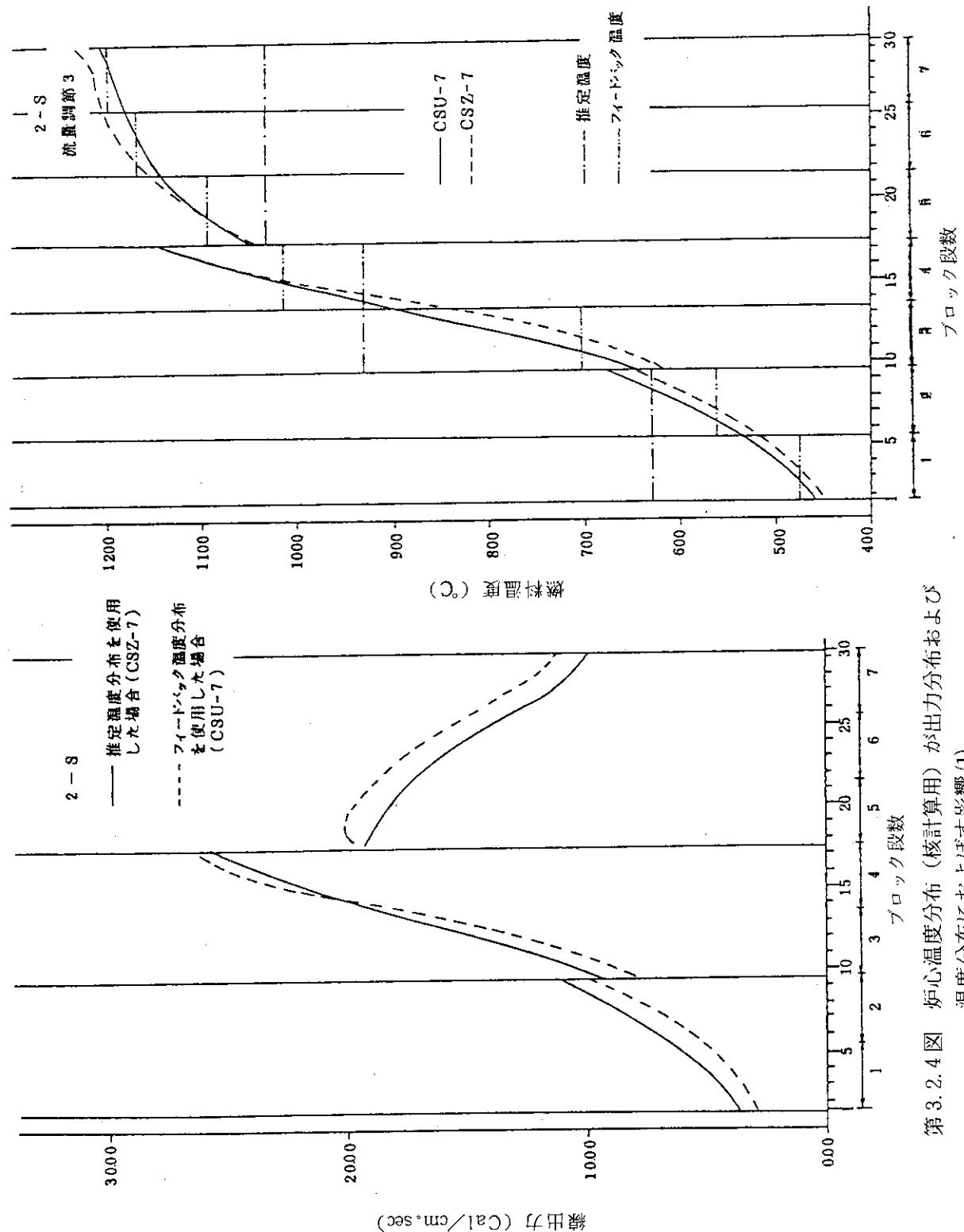
第3.2.1図 炉心構成案の燃料最高温度



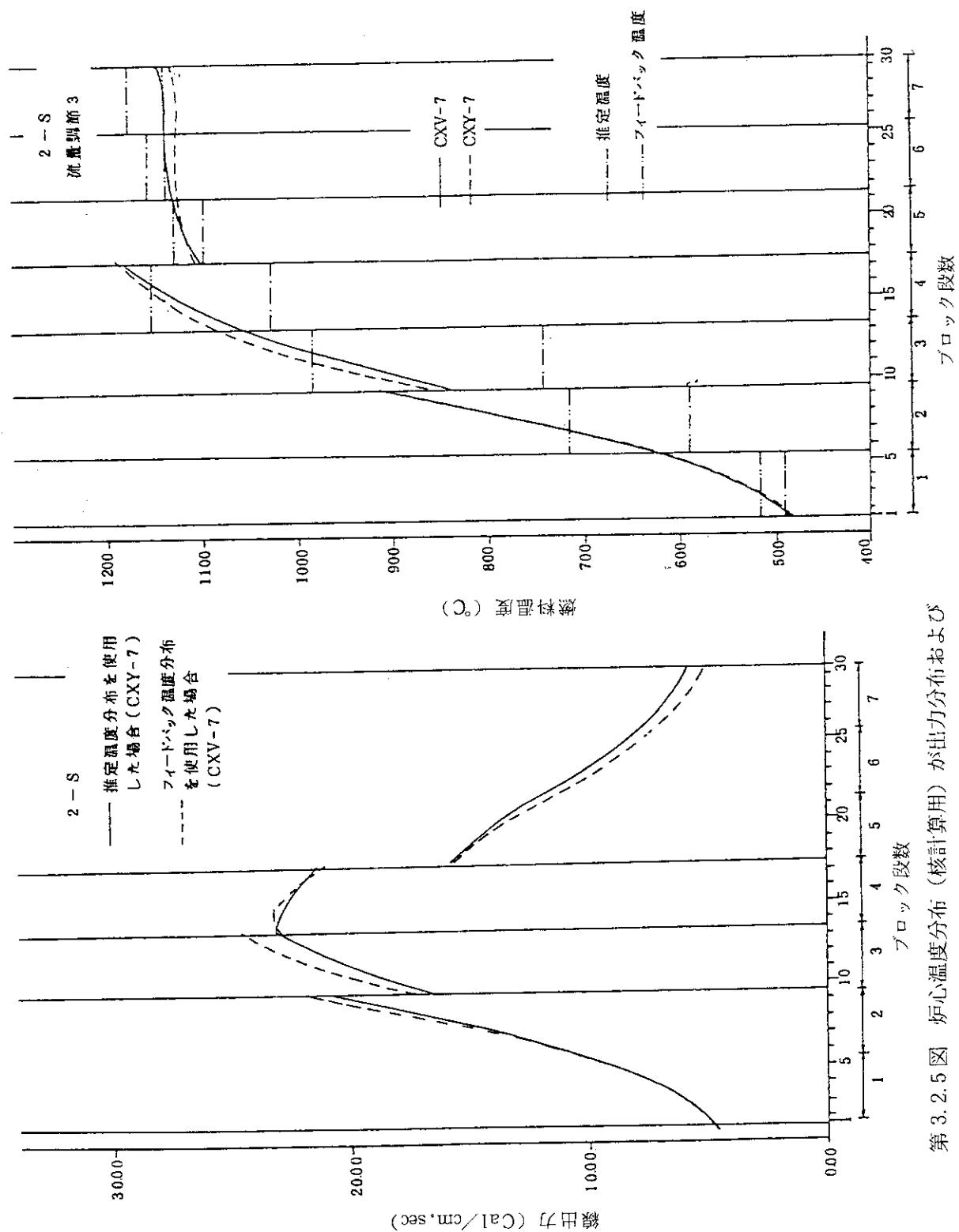
第3.2.2図 可燃性毒物荷方法の相違による
軸方向出力分布と温度分布の比較(1)



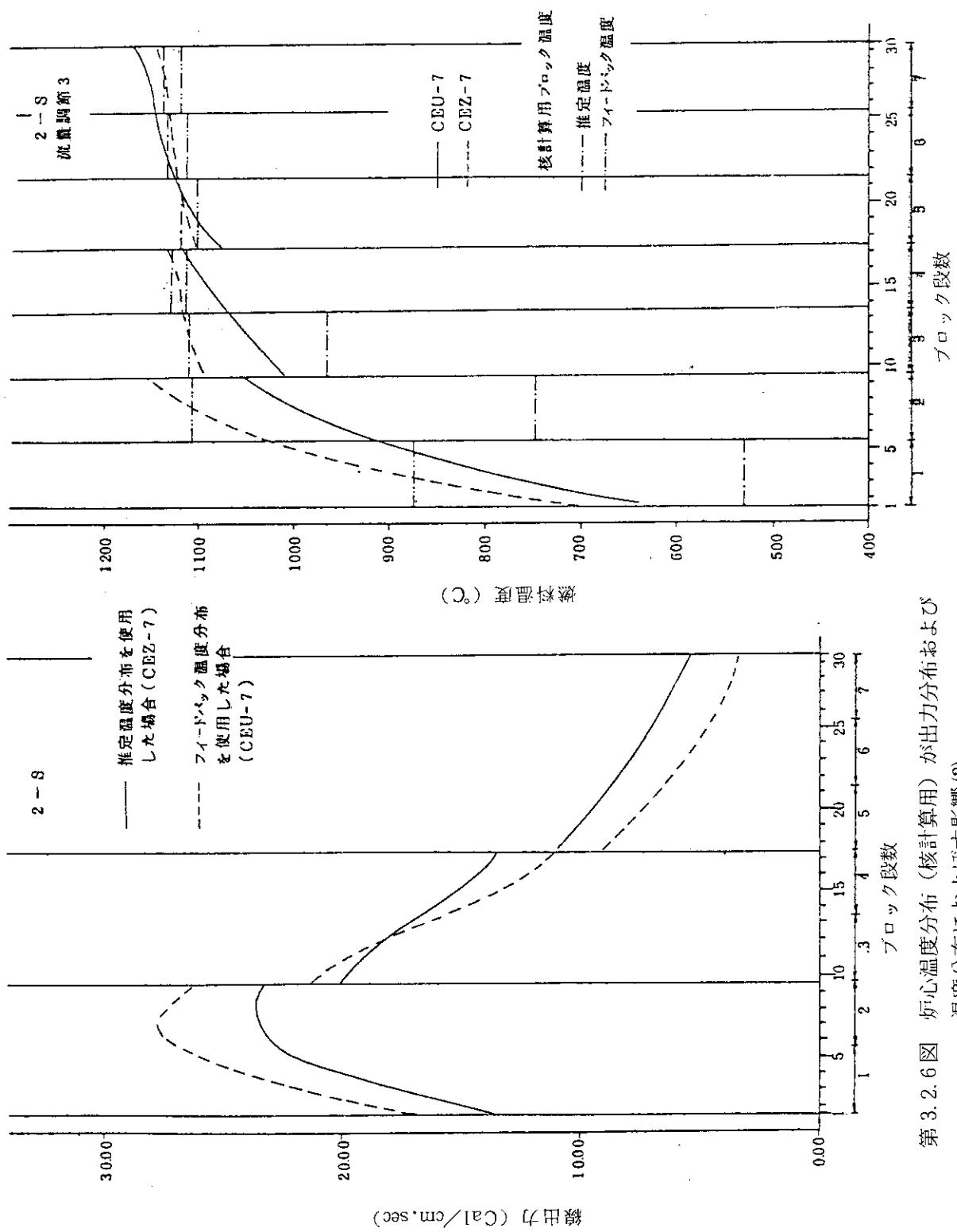
第3.2.3図 燃料濃縮度装荷の相違による軸方向出力分布と温度分布の比較(2)



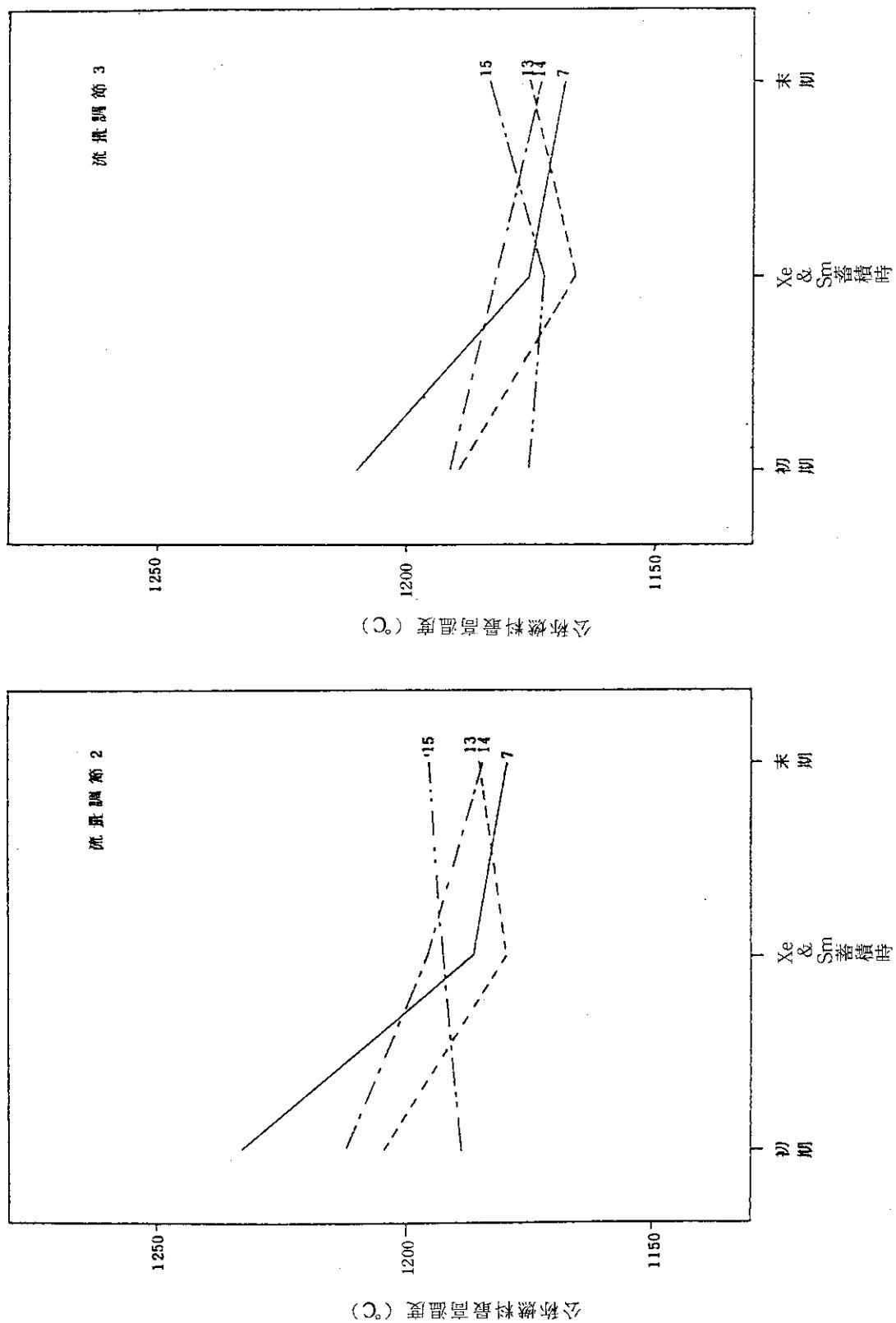
第3.2.4図 炉心温度分布（核計算用）が出力分布および
温度分布におよぼす影響（1）



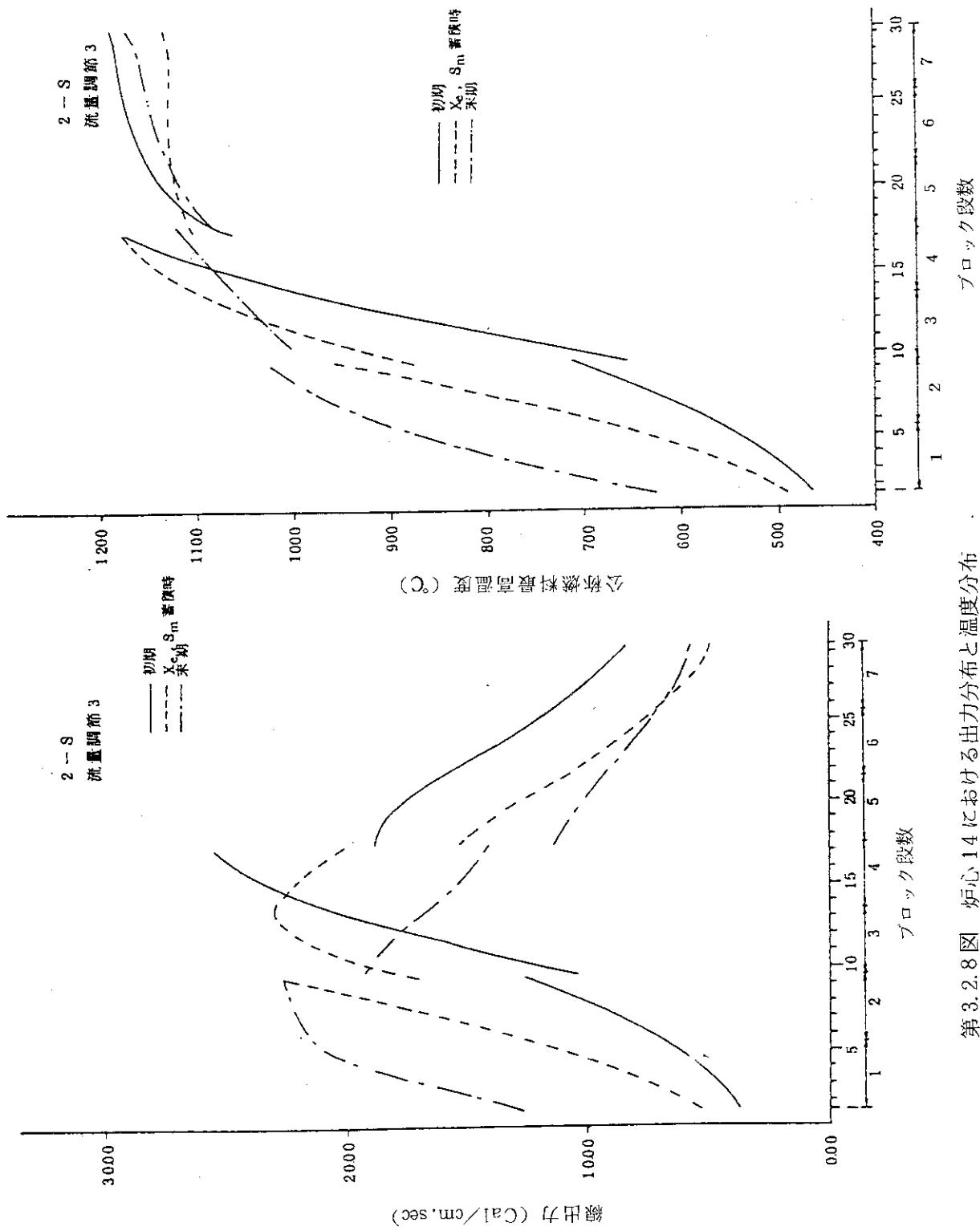
第3.2.5図 炉心温度分布(核計算用)が出力分布および
温度分布におよぼす影響(2)



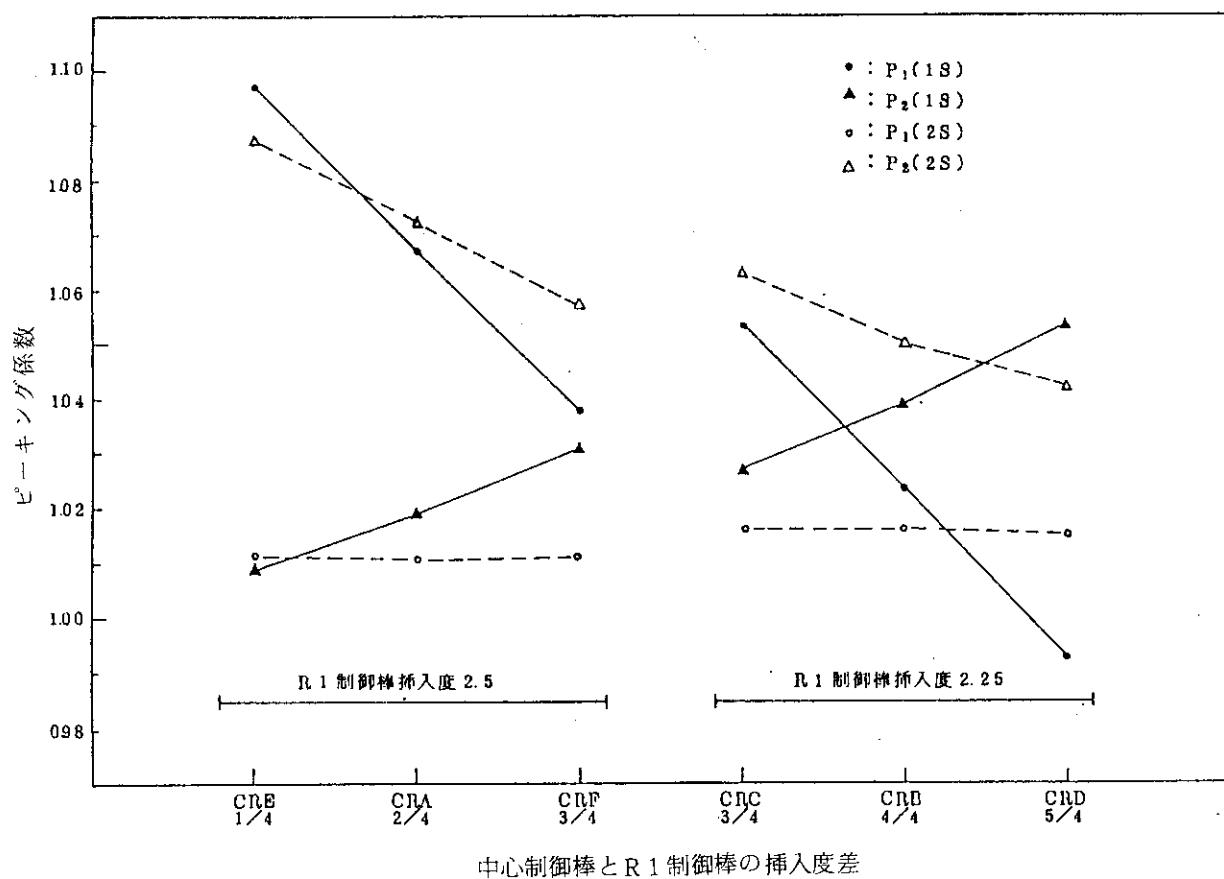
第3.2.6図 炉心温度分布(核計算用)が出力分布および
温度分布におよぼす影響(3)



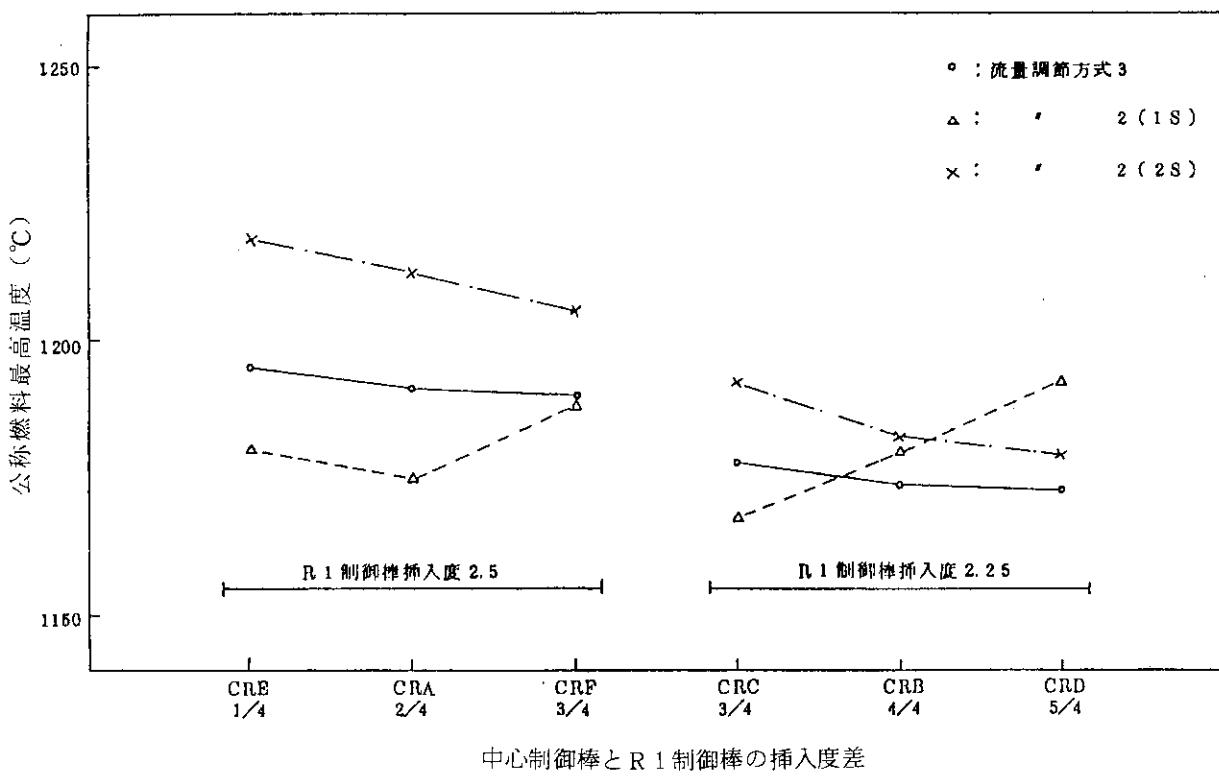
第3.2.7図 炉心構成素(2次)の燃料最高温度の比較



第3.2.8 図 炉心 14 における出力分布と温度分布



第3.2.9図 制御棒パターンと出力ピーキング係数



第3.2.10図 制御棒パターンと燃料最高温度

4. 選定炉心の特性解析

4.1 核特性解析

4.1.1 反応度補償特性

選定炉心の反応度補償特性を明らかにするために、起動時から初期定格状態および全燃焼期間を通しての制御棒駆動計画を立案するとともに、炉停止余裕、制御棒最大反応度価値および制御棒感度を解析した。

(1) 炉停止余裕

選定炉心の炉停止余裕は、初期状態について解析した。

制御棒および後備停止系による炉停止余裕を第4.1.1表に示す。制御棒による炉停止余裕は、300 °Kにおける中心制御棒1対スタック状態と668 °Kにおける中心制御棒1対+第1リング制御棒1対スタック状態について解析し、後備停止系による炉停止余裕は、300 °Kにおける中心後備停止系1基スタック状態について解析した。

制御棒による炉停止余裕は、300 °Kにおいて $0.0560 \Delta k_{eff}$ 、668 °Kにおいて $0.0613 \Delta k_{eff}$ である。また、可燃性毒物反応度補償量に15%、制御棒反応度補償量に10%の計算誤差を考慮すると炉停止余裕はそれぞれ $0.0208 \Delta k_{eff}$ および $0.0305 \Delta k_{eff}$ に減少するが、いずれの場合も設計基準は満足している。^{*}

後備停止系による炉停止余裕は、制御棒が定格運転状態の挿入度を維持し、中心の1基を除いて制御棒の下に後備停止系のボロン球が挿入された状態で $0.0792 \Delta k_{eff}$ であり、計算誤差を考慮した場合で $0.0416 \Delta k_{eff}$ となる。

なお、参考までに、第2章で述べた種々の解析モデルによる炉停止余裕の計算値を第4.1.2～3表に示す。

(2) 後備停止系の系統組分け

後備停止系の系統を組分けするために、燃料濃縮度4.0%，温度300 °Kの炉心水平断面を対象に、2次元三角座標（粗メッシュ）を用いて後備停止系の反応度補償量を求めた。

後備停止系のスタック状態と反応度補償量の関係を第4.1.4表に示す。中心1基スタック状態を基準とし、スタックした時の反応度補償量が中心1基スタック時のものより大きい後備停止系は1系統にまとめるとすると、以下のような後備停止系の系統組分けとなる。

* 本解析では、当初設定した作業範囲と設計条件に従って、①燃焼初期状態を対象に、②計算誤差としては制御棒と可燃性毒物の反応度価値のみを考慮して、炉停止余裕の評価を行っているが、必ずしも十分でない。すなわち、①可燃性毒物の燃焼により炉心反応度が回復する時点（第4.1.2図参照）の炉心を対象とし、②制御棒や可燃性毒物の挿入されていない炉心の反応度自体に対する計算誤差を考慮すると、本選定炉心の炉停止余裕は不足気味となる。その場合は、本選定炉心の燃料炉内滞在時間が基準値に対して余裕があること（365日に対して約500日）から、燃料濃縮度を全体的に低下させることにより、燃料炉内滞在時間と炉停止余裕を共に満足し、しかも他の炉心特性を大巾には変えない炉心を容易に構成できると推測される。

- a) 中心後備停止系は1基で1系統。
- b) 第1リング後備停止系は1基を1系統とし全部で6系統。
- c) 第2リング後備停止系は6基で1系統。
- d) 第3リング後備停止系は6基で1系統。

(3) 制御棒駆動計画と最大反応度価値

起動時から初期定格出力状態を通し、燃焼末期までの全燃焼期間の制御棒駆動方法と、最大反応度価値の検討を行なった。各状態の制御棒配置と最大反応度価値を第4.1.5表に示す。

起動時には、まず中性子束計測を考慮して第2、3リング制御棒が上部反射体部分まで引抜かれ、次に中心および第1リング制御棒が引抜かれ、制御棒挿入度が(6/5)となったときに低温臨界状態となる。この状態における制御棒最大反応度価値は $0.0276 \Delta k_{eff}$ である。

出力上昇および微調整には第3リング制御棒を使用するが、ここでは、第2リングおよび第3リング制御棒を上部反射体部分まで挿入した状態を保持した場合の、中心および第1リング制御棒の挿入度を示す。

制御棒挿入度が(3.75/3.25)となったときに30%出力状態に達し、この状態の制御棒最大反応度価値は $0.0125 \Delta k_{eff}$ である。

制御棒挿入度が(3/2.5)のとき定格出力状態となり、制御棒最大反応度価値は $0.0131 \Delta k_{eff}$ である。

中心制御棒と第1リング制御棒は、低温臨界状態および燃焼末期を除いて、径方向出力分布の平坦化のため挿入度差が0.5ブロックを維持して操作される。

制御棒最大反応度価値は、燃焼が進むに従って減少し、いずれの場合にも、設計基準を満足している。

(4) 制御棒感度

微調整および出力上昇には第3リング制御棒を使用するものとし、初期30%出力状態から出力上昇を行なう場合の制御棒感度を解析した。

第4.1.1図に、30%出力の制御棒挿入状態(第4.1.5表参照)から第3リング制御棒のみを運かした場合の、第3リング制御棒の挿入深さと反応度価値感度の関係を示す。制御棒感度は、制御棒吸収体先端が第1段目燃料体内にあるとき $6 \times 10^{-7} \Delta k_{eff}/cm$ ／本程度となり最も小さく、5段目燃料体内にあるとき $1.2 \times 10^{-5} \Delta k_{eff}/cm$ ／本となり最も大きい。従って、第3リング制御棒をバンク操作することにより、適切な感度が得られる。

4.1.2 核特性の燃焼変化

選定炉心を対象に、制御棒挿入による臨界調整を行ないながら燃焼状態の追跡を行ない、出力分布ならびに中性子束分布を解析するとともに、全燃焼期間を通じて、余剰反応度、燃料の燃焼度および高速中性子照射量を求めた。また、燃焼初期における径方向および軸方向の局所出力分布の解析も行なった。

(1) 燃焼に伴う反応度変化

燃焼に伴う反応度の変化と制御棒挿入状態を第4.1.2図に示す。燃焼ステップは60日間隔としたが、Xe & Sm蓄積時および燃焼末期としてはそれぞれ10日および510日を採用した。

初期余剰反応度は $0.1204 \Delta k_{eff}$, Xe & Sm蓄積時余剰反応度は $0.0641 \Delta k_{eff}$ であり, Xe & Sm蓄積時の反応度低下量は $0.0563 \Delta k_{eff}$ となる。この値は、炉心構成案（2次）の炉心14の結果と比べて大きくなっているが、これは制御棒引抜により炉心上部の温度が上昇し、余剰反応度が低下するためである。また、反応度回復量は、Xe & Sm蓄積時の余剰反応度の低下に伴って増加し、 $0.0189 \Delta k_{eff}$ と、炉心14の結果に比べて大きくなっている。

燃焼ステップは510日まで採用したが、510日の余剰反応度が運転余裕を若干下回ったため、反応度変化曲線の内挿により炉内滞在時間を500日とした。この解析では、制御棒を挿入した臨界調整により炉内滞在時間が増加される反面、燃焼を通して炉心の温度分布を第2章で述べた炉心選定のための解析より正確に評価しているため、燃焼末期に近づくにつれて、炉心上部の温度上昇による反応度低下が大きく、炉内滞在時間は500日程度となった。

(2) 出力分布

燃焼依存の出力分布特性として、最高出力密度の燃焼変化を第4.1.3図に、また、出力ピーピング係数の燃焼変化を第4.1.4図に示す。

初期には 4.8 w/cc 程度あった最高出力密度は、燃焼240日には 4.2 w/cc に減少するが、更に燃焼が進むにつれて増加し、燃焼末期には 5.3 w/cc 程度に達する。

出力ピーピング係数として、第1オリフィス領域および第2オリフィス領域の、領域ごとピーピング係数 P_1 と領域内チャンネルごとピーピング係数 P_2 を示す。第1オリフィス領域の P_1 は、Xe & Sm蓄積時に制御棒引抜により一担増加し、その後は燃焼とともに減少するが、燃焼中期を過ぎてからは反転して増加していく。第2オリフィス領域の P_1 も定性的には同様の傾向をとるが、全体的に燃焼期間を通しての変化が小さい。これは、全炉心の燃料棒の過半数が含まれる第2領域内の出力平坦化を重視した設計を行ったためである。しかし、オリフィス領域内チャンネル出力ピーピング係数 P_2 は、第4.1.4図にみると、第2オリフィス領域での値がかなり大きくなっている。これは、本設計では径方向に一様（濃縮度）装荷を行っているため、長い中性子移動距離をもつ黒鉛炉としては炉心の小さい本実験炉では、中性子漏洩に起因する炉心を横断するマクロの出力分布の歪が大きくなるためである。第2オリフィス領域の P_2 が高いことは、炉心全体として高い温度にさらされる燃料の割合が多くなることを意味し好ましくない。その対策としては、制御棒パターンを更に改良する方法もあるが、径方向に2～3領域の領域別燃料装荷を行うことが最も効果的である。

代表的な燃焼ステップにおける出力ピーピング係数 P_1 と P_2 を、第4.1.5図に示す。同図には、各オリフィス領域内の平均チャンネル分担出力に対する、 $1/6$ カラム単位の平均チャンネル分担出力の比も示してある。また、第4.1.6図には炉心の出力分布を燃焼を追って示した。これは、3次元的な分布を周方向に平均化して、2次元R-Z座標による表現に直したもので、軸方向にはブロック単位、径方向には第1オリフィス領域制御燃料、同標準燃料、第2オリフィス領域内側標準燃料、同制御燃料、同外側標準燃料、第3および第4オリフィス領域の6つの領域単位に、出力密度を平均化して示したものである。更に、第4.1.7図に、出力分布（第4.1.6図）と同様な炉心モデル化を行った場合の中性子束分布を示した。

(3) 局所出力ピーピング

熱流動解析に使用されるシステムティック因子を導出するために、径方向および軸方向の局所

出力ピーピングを解析した。

径方向局所出力分布は、第1オリフィス領域（スーパーセル）を対象とし、制御棒を挿入した場合および引抜いた場合について、2次元X-Y座標を用いた輸送計算により求め、軸方向局所出力分布は、標準燃料体を対象として、燃料コンパクトと上下の余剰黒鉛を別々の領域とする2次元R-Z座標を用いた輸送計算により求めた。

局所出力分布は、燃料濃縮度5.3, 4.2, 3.0%, 温度900, 1200, 1500 °Kの各々の場合について解析した。

燃料濃縮度および温度に依存した径方向および軸方向の局所出力ピーピングを第4.1.6表に示す。また、この表には、3次元三角-Z座標と同一メッシュ構造の2次元三角座標を用いた拡散計算により求めた径方向出力ピーピングも示した。

径方向出力分布に対するシステムティック因子は、輸送計算（細メッシュ）と拡散計算（粗メッシュ）のチャネルピーピング比の最大値である1.16を採用した。この値は第4.1.6表の制御棒挿入状態の計算結果からのみ算出しており、制御棒が全長挿入された炉心状態の局所出力ピーピングの補正值に相当する。従って、実際の運転状態では制御棒は部分長挿入されているだけであることを考慮して、制御棒挿入部と未挿入部での軸方向出力分担を重みとしてチャンネルピーピングの補正值を算出した場合と較べると、第4.1.6表から解るように輸送計算と拡散計算のチャンネルピーピング比は、制御棒引抜状態における値が制御棒挿入状態における値より大巾に小さいことから、今回の熱流動計算用採用値はかなり安全側の評価値であるといえる。また、軸方向出力分布に対するシステムティック因子は局所出力ピーピングの最大値である1.08を採用した。

(4) 燃焼度と高速中性子照射量

燃焼末期の燃焼度分布を第4.1.9図に、また、高速中性子照射量分布を第4.1.10図に示す。この燃焼度分布および高速中性子照射量分布は、第4.1.5図と同様に、3次元的な分布を周方向に平均し、2次元R-Z座標による表現に直したものである。

最大および平均燃焼度は、5.3%濃縮度燃料に対して 1.36×10^4 および 1.01×10^4 MWD/T, 4.2%濃縮度燃料に対して 1.84×10^4 および 1.54×10^4 MWD/T, 3.0%濃縮度燃料に対して 1.25×10^4 および 7.8×10^3 MWD/Tとなる。

最大高速中性子照射量は 0.865×10^{21} nvt、平均高速中性子照射量は 0.477×10^{21} nvtである。

4.1.3 溫度係数と動特性パラメーター

選定炉心の平均的な燃料格子を対象に、燃焼初期および末期の温度係数と動特性パラメーターを求めた。平均的組成として濃縮度4.2%の標準燃料を採用し、燃焼末期の燃焼度としては平均値である 1.5×10^4 MWD/Tを用いた。また、温度については、1200 °Kを基準とした。

燃焼初期および末期の格子実効増倍率の温度変化を第4.1.11図に示す。この図では減速材温度を1200 °Kとし燃料温度を変化させた場合、燃料温度を1200 °Kとし減速材温度を変化させた場合について示した。これらの曲線の傾きが温度係数に相当する。

燃焼初期では、燃料温度係数も減速材温度係数も負であるが、絶対値は燃料温度係数の方が大きい。

一方、燃焼末期では、燃料温度係数は燃焼初期とあまり相違は見られないが、減速材温度係数

は初期のものとは大きく異なり、900 °K 近辺で正になることがある。それ以上温度が上ると、今度は急激に負となりその絶対値は増大して行く。

燃焼初期および末期の遅発中性子生成割合、中性子平均寿命および動特性パラメーターを第4.1.7表に示す。遅発中性子生成割合、中性子平均寿命とも燃焼に伴って減少している。

第4.1.1表 制御棒および後備停止系による炉停止余裕

制御系	温 度	項 目	反応度	備 考
制御棒	300 °K	余 剩 反 応 度	0.2628	中心制御棒1対スタック
		可燃性毒物 反応度補償量	0.0674	
		制御棒 反応度補償量	0.2514	
		炉 停 止 余 裕	0.0560	
		炉停止余裕 (計算誤差含)	0.0208	
	668 °K	余 剩 反 応 度	0.2136	中心制御棒1対 + R1 制御棒1対スタック
		可燃性毒物 反応度補償量	0.0657	
		制御棒 反応度補償量	0.2092	
		炉 停 止 余 裕	0.0613	
		炉停止余裕 (計算誤差含)	0.0305	
後 備 停 止 系	300 °K	制御棒 + RSS 反応度補償量	0.2746	制御棒定格状態を維持 RSS 中心スタック
		炉 停 止 余 裕	0.0792	
		炉停止余裕 (計算誤差含)	0.0416	

(注)。反応度補償量の計算誤差：可燃性毒物 15%，制御棒 10%

第4.1.2表 炉停止余裕計算値（制御棒）

座標	制御棒	項目	中心制御棒 1対スタック (300 °K)	中心+R1制御棒 2対スタック (668 °K)
R-Z	引	実効増倍率	B P無	1.2628
			B P有	1.1954
	抜	BP反応度補償量		0.0674
		実効増倍率		1.1585
Tr (細)	中心 1対 スタック	実効増倍率	0.9126	0.8560
		制御棒価値	0.2459	0.2573
	中心+R1 2対スタック	実効増倍率	—	0.9069
		制御棒価値	—	0.2064
Tr (粗)	中心 1対 スタック	実効増倍率	0.9238	0.8676
		制御棒価値	0.2347	0.2457
	中心+R1 2対スタック	実効増倍率	—	0.9155
		制御棒価値	—	0.1978
補正 係数	制御棒価値比 メッシュ効果(細/粗)		1.0477	1.0435
	制御棒価値比 (2対スタック/1対スタック)		—	0.8050
Tr-Z	中心 1対 スタック	実効増倍率	0.9554	0.8989
		制御棒価値	0.2400	0.2490
補正 考慮	補正制御棒価値		0.2514	0.2092
	補正実効増倍率		0.9440	0.9387
	炉停止余裕		0.0560	0.0613
	BP反応度補償量		0.0573	0.0558
計 誤 差 考	制御棒価値		0.2263	0.1883
	実効増倍率		0.9792	0.9695
	炉停止余裕		0.0208	0.0305

第4.1.3表 炉停止余裕計算値（後備停止系）

座 標	制御棒 + RSS	項 目	中心 RSS スタック (300 °K)	備 考	
R-Z	引	実効増倍率	BP 無 1.2628		
			BP 有 1.1954		
	抜	BP 反応度補償量	0.0674		
		実効増倍率	1.1585		
Tr (細)	挿	中心 RSS	実効増倍率 0.9660		
			RSS 値 値 0.1925		
Tr (粗)		スタック	実効増倍率 0.9719		
			RSS 値 値 0.1866		
補正 係数	入	RSS 値 値 比 メッシュ効果(細/粗)	1.0316		
Tr-Z		中心 RSS	実効増倍率 0.9292	制御棒配置(3/2.5/B/B) RSSは制御棒の下に想定 (0/7/7/7)	
		スタック	制御棒 + RSS 値 値 0.2662		
メッシュ補正 効果		補正制御棒 + RSS 値 値	0.2746		
計 算 誤 差 考 慮	入	補正実効増倍率	0.9208		
		炉停止余裕	0.0792		
		BP 反応度補償量	0.0573		
		制御棒 + RSS 値 値	0.2471		
		実効増倍率	0.9584		
		炉停止余裕	0.0416		

第4.1.4表 後備停止系の反応度補償特性

後 備 停 止 系				実効増倍率	後備停止系 反応度補償量
中 心	R 1	R 2	R 3		
スタック	挿 入	挿 入	挿 入	0.9719	0.1866
挿 入	1 基 スタック	挿 入	挿 入	0.9601	0.1984
挿 入	対角 2基 スタック	挿 入	挿 入	0.9782	0.1803
挿 入	1つおき3基 スタック	挿 入	挿 入	0.9976	0.1609
挿 入	6 基 スタック	挿 入	挿 入	1.0650	0.0935
挿 入	挿 入	6 基 スタック	挿 入	0.9637	0.1948
挿 入	挿 入	挿 入	6 基 スタック	0.9347	0.2238

第4.1.5表 制御棒駆動計画と最大反応度価値

炉心状態		制御棒挿入度				実効増倍率	制御棒最大 反応度価値
温度状態	燃焼日	中 心	R 1	R 2	R 3		
低温臨界	0	6	5	B	B	0.9985	0.0276
30%出力	0	3.75	3.25	B	B	1.0029	0.0125
定格出力	0	3	2.5	B	B	0.9958	0.0131
	10	2	1.5	B	B	0.9930	0.0088
	60	2.25	1.75	B	B	0.9969	—
	120	2.25	1.75	B	B	0.9999	0.0081
	180	2.25	1.75	B	B	0.9962	—
	240	2	1.5	B	B	0.9978	—
	300	1.75	1.25	B	B	0.9949	—
	360	1.25	0.75	B	B	0.9981	—
	420	0.75	0.25	B	B	0.9993	0.0059
	480	0.25	B	0	0	0.9988	—
	510	0.25	0	0	0	1.0010	—

(注) 。制御棒挿入度：ブロック単位

。B：炉心と反射体の境界までの挿入を意味する。

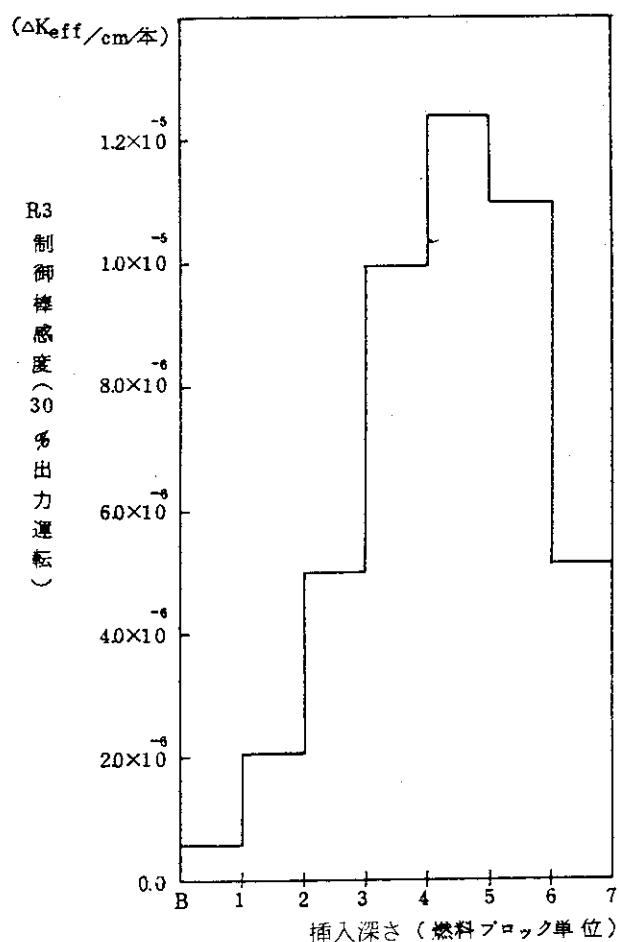
第4.1.6表 局所出力ピーキング

濃縮度 温 度 (K) % 項目	種類 制御棒	径方向チャンネル出力ピーキング				軸方向 出力ピーキング	
		引抜		挿入			
		細メッシュ	粗メッシュ	細メッシュ	粗メッシュ		
5.3 %	900	1.060	1.027	1.348	1.171	1.081	
	1200	1.055	1.026	1.349	1.172	1.074	
	1500	1.052	1.024	1.352	1.174	1.068	
4.2 %	900	1.053	1.025	1.359	1.176	1.070	
	1200	1.050	1.023	1.359	1.177	1.063	
	1500	1.046	1.021	1.362	1.179	1.058	
3.0 %	900	1.046	1.021	1.373	1.181	1.056	
	1200	1.042	1.020	1.373	1.183	1.050	
	1500	1.039	1.018	1.376	1.184	1.046	

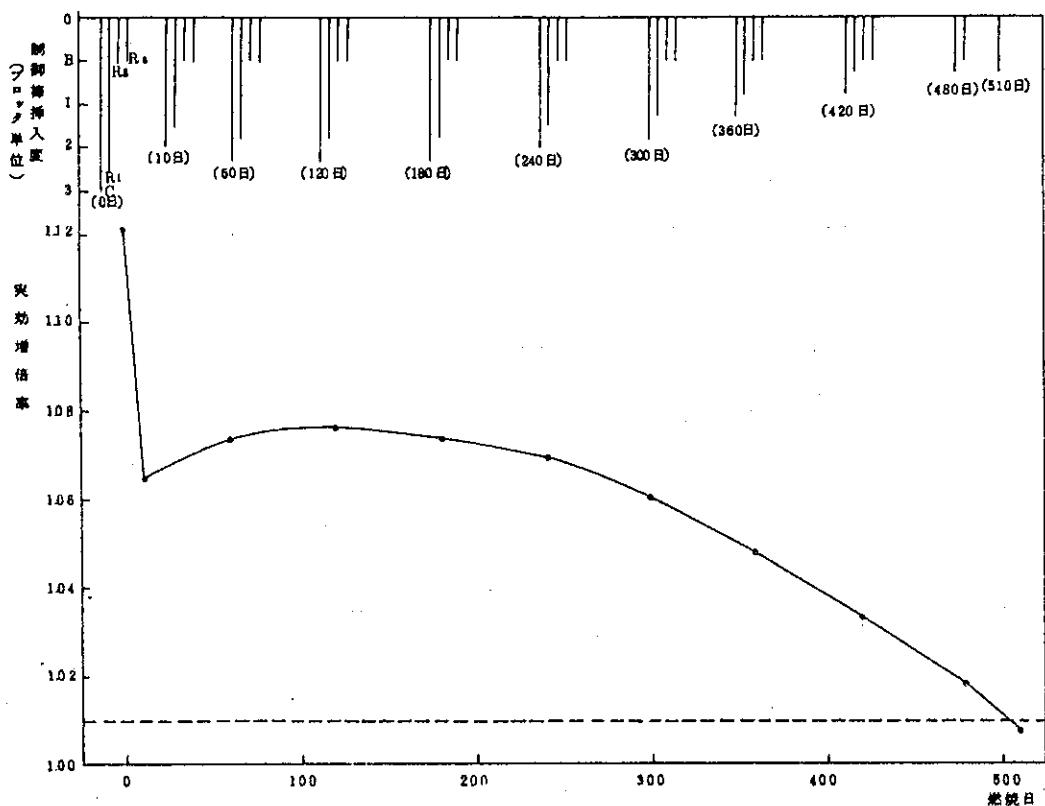
第4.1.7表 動特性パラメータ

燃焼 項目	初期	末期
遅発中性子 生成割合 β	6.904×10^{-3}	6.151×10^{-3}
中性子平均 寿命 ℓ (sec)	6.436×10^{-4}	5.221×10^{-4}
β/ℓ (1/sec)	10.73	11.78

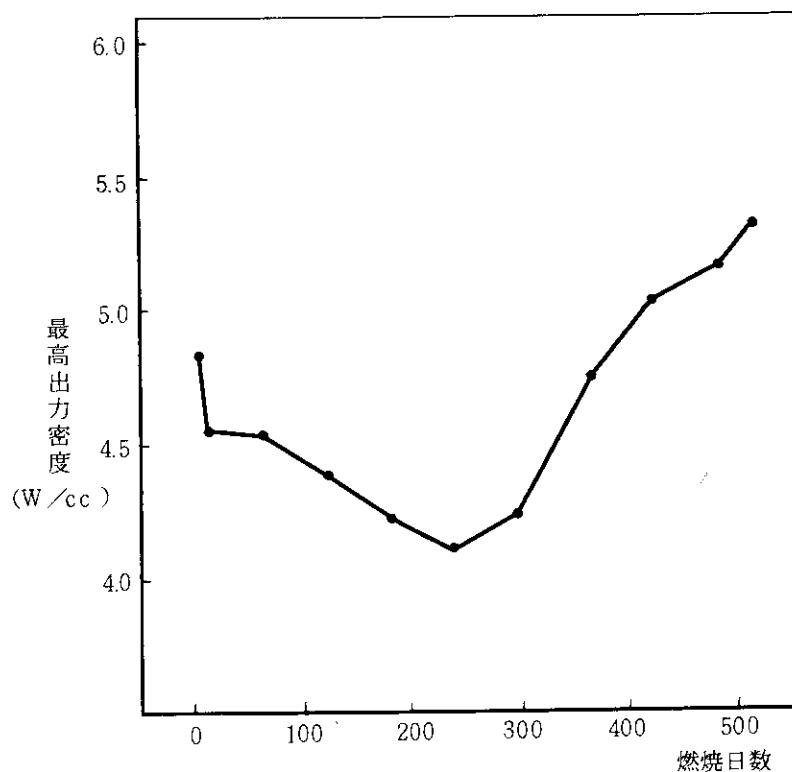
(注) 。 $T_f = 1200$, $T_m = 1200^{\circ}\text{K}$, 濃縮度 4.2 %。燃焼度 1.5×10^{-4} MWD/T



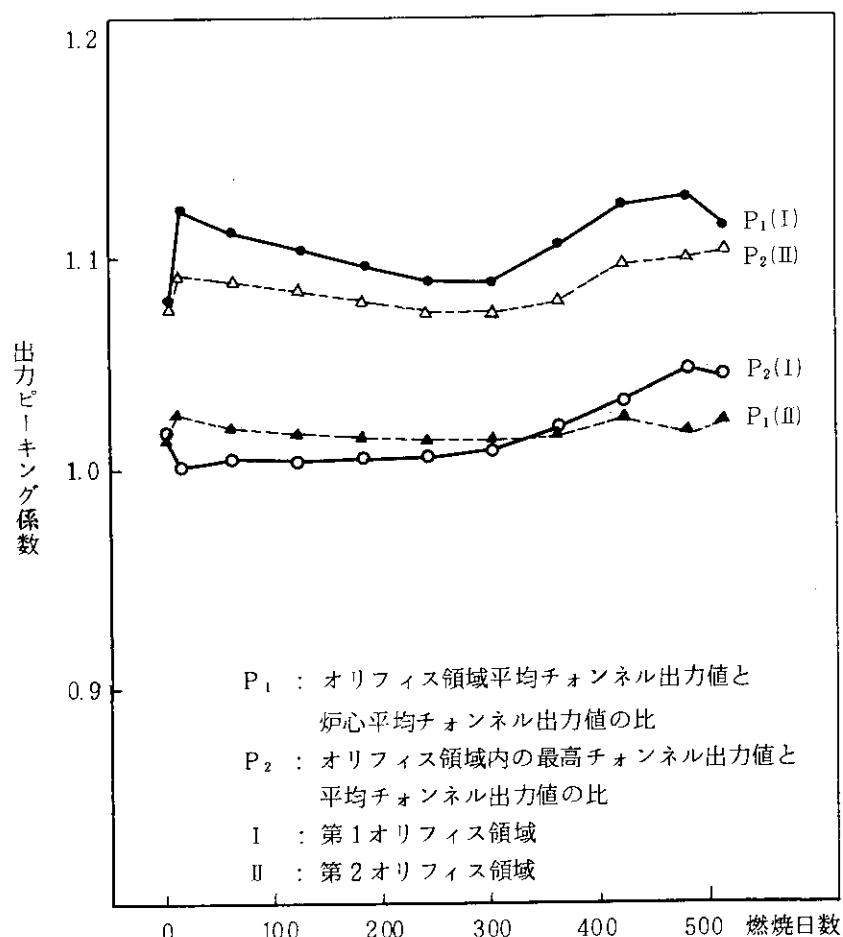
第4.1.1図 30%出力運転時のR3制御棒感度



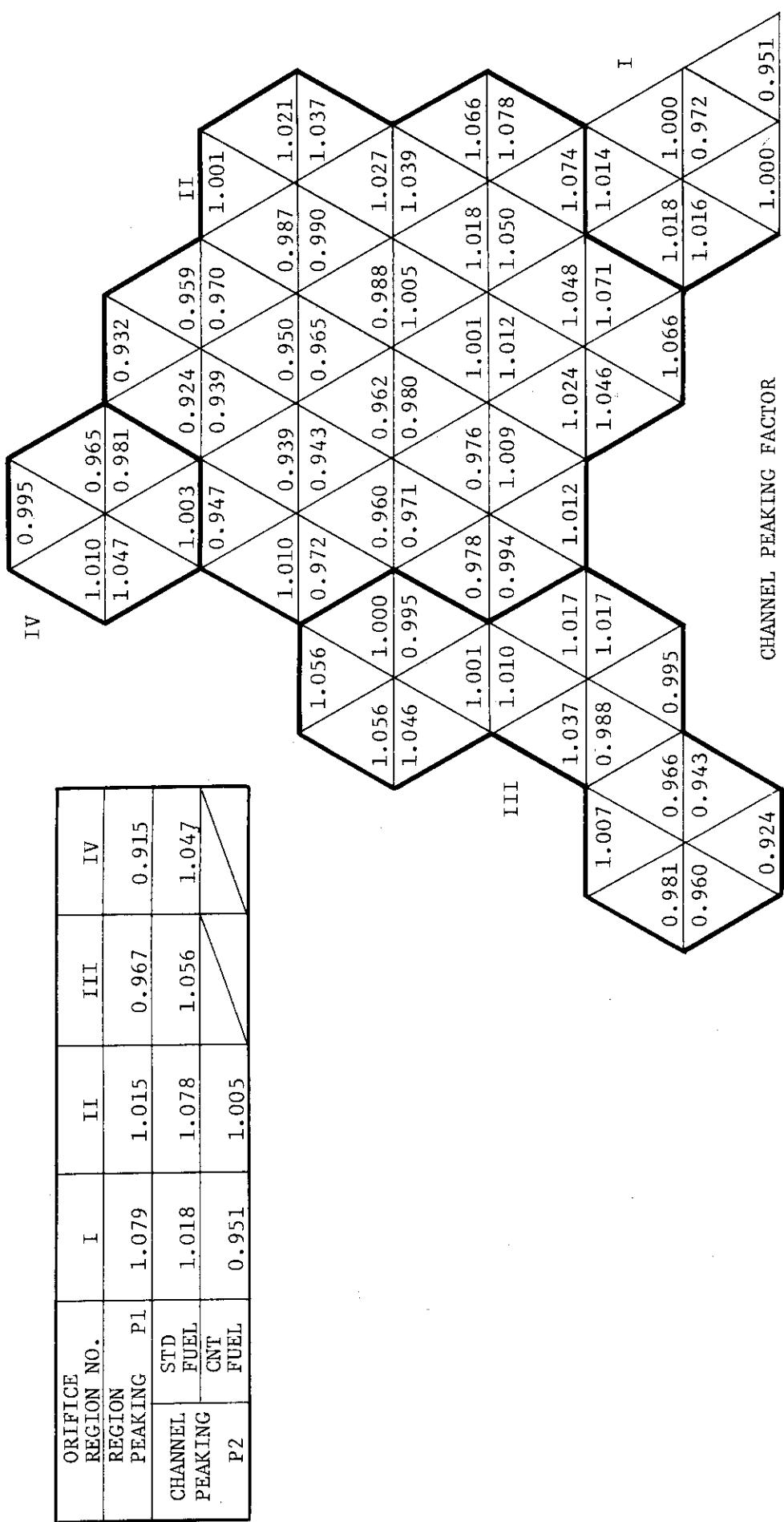
第4.1.2図 燃焼に伴う反応度変化



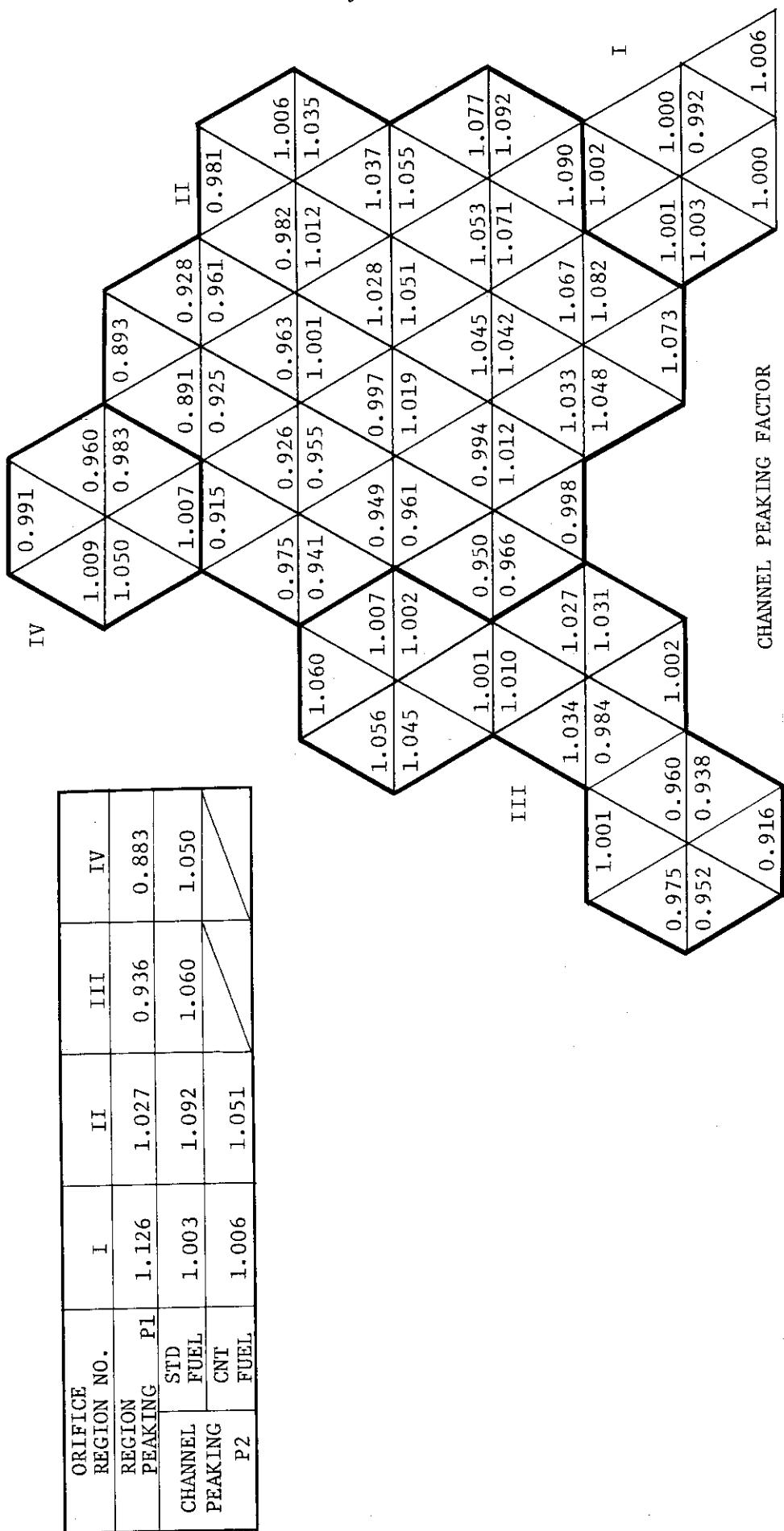
第 4.1.3 図 最高出力密度の燃焼変化



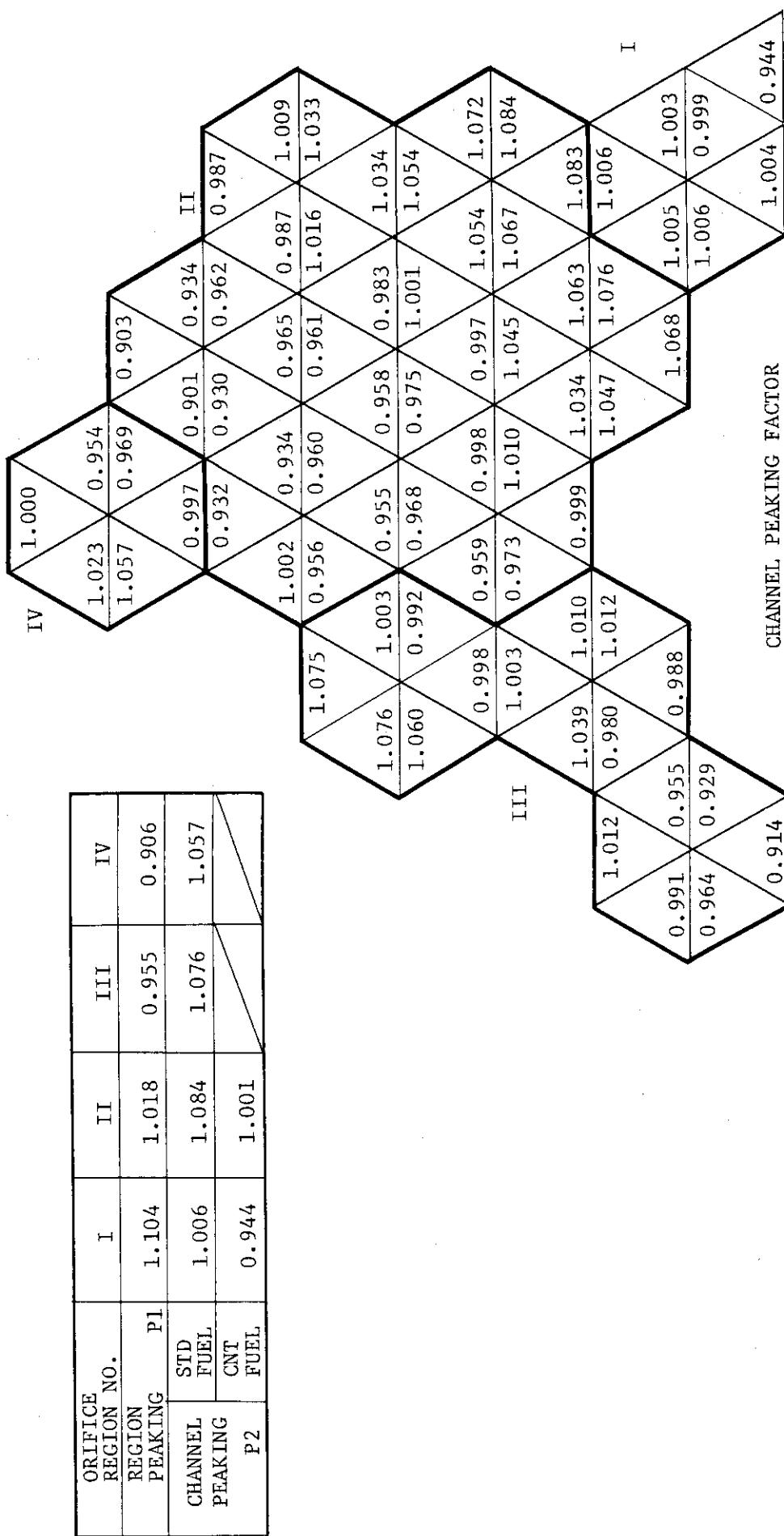
第 4.1.4 図 出力ピーキング係数の燃焼変化



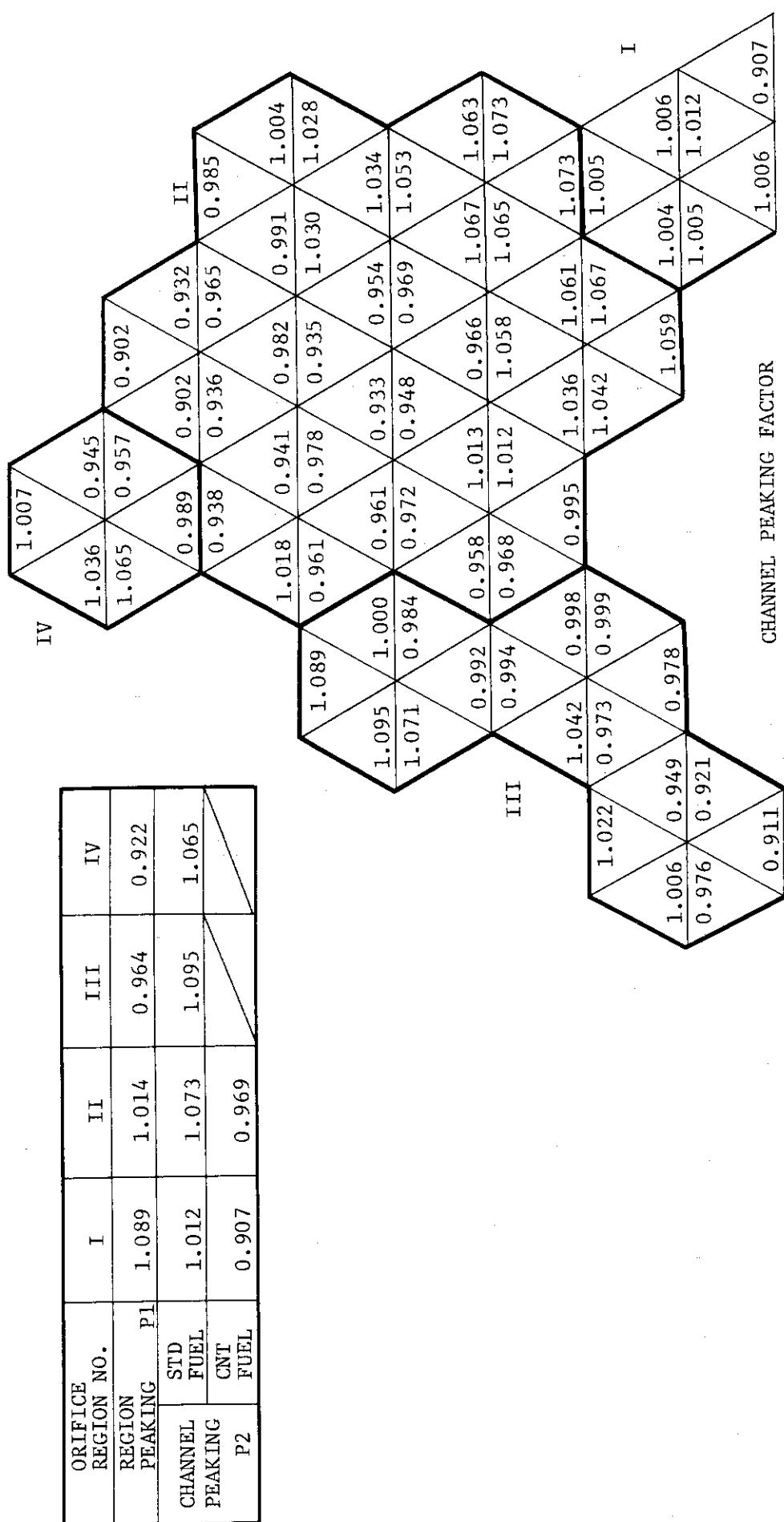
第4.1.5図(1) 出力ピーキング係数 (燃焼日数 = 0 [H])



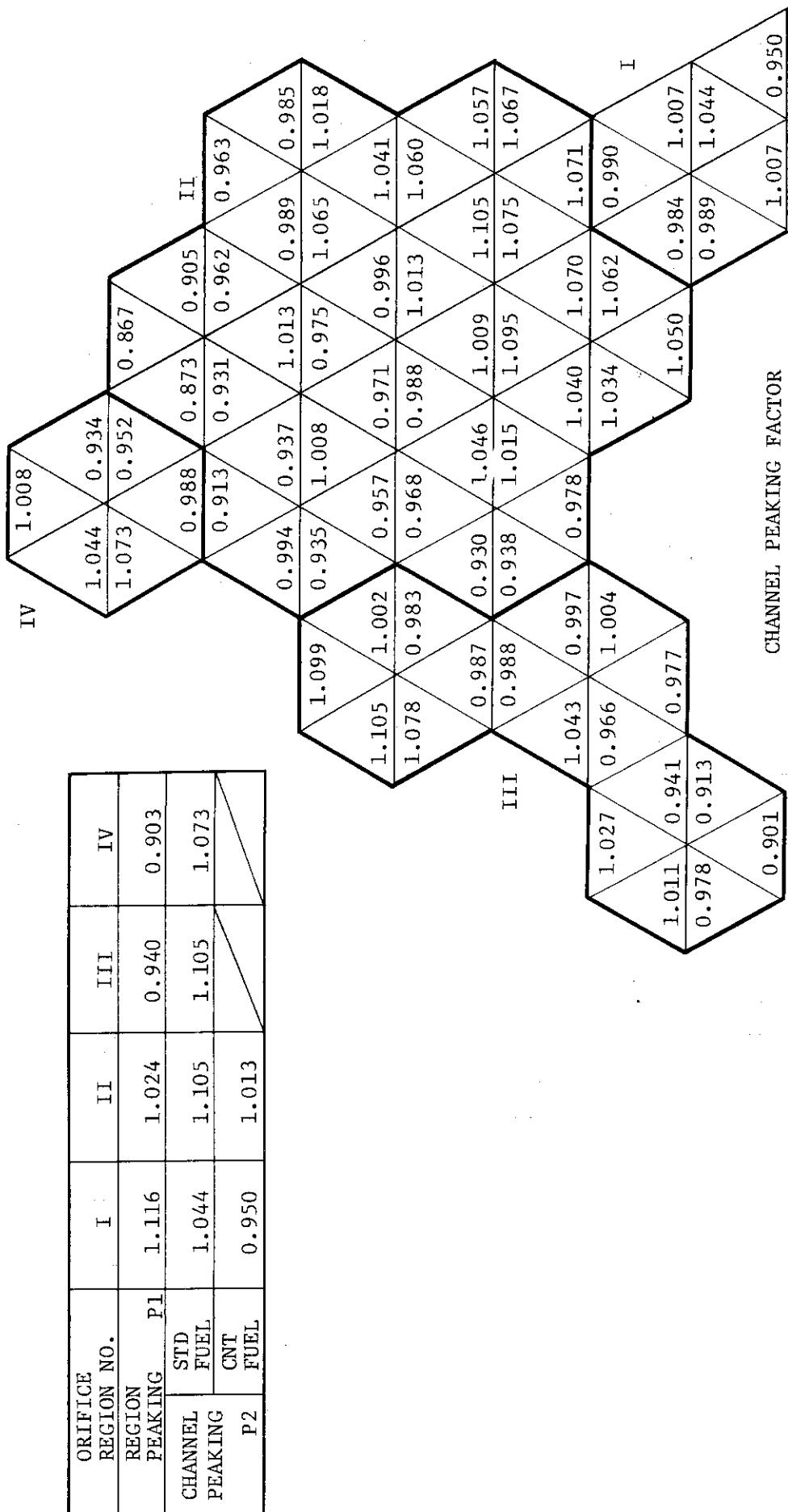
第4.1.5図(2) 出力ピーキング係数(燃焼日数 = 10日)



第4.1.5図(3) 出力ビーキング係数(燃焼日数=120日)



第4.1.5 図(4) 出力ピーキング係数 (燃焼日数 = 300 H)



第4.1.5図(5) 出力ビーキング係数 (燃焼日数 = 510 h)

	LOWER							UPPER	
	7	6	5	4	3	2	1		
INNER	0.93	1.30	1.65	2.04	0.61	0.31	0.15	1C	
	1.98	2.79	3.55	4.52	2.62	1.48	0.74	1S	
	1.86	2.62	3.35	4.42	2.85	1.53	0.77	2S1	
	0.78	1.11	1.42	1.93	1.04	0.34	0.18	2C	
	1.59	2.27	2.91	3.97	2.80	1.73	0.92	2S2	
	1.34	1.94	2.50	3.51	2.89	2.21	1.20	3S	
OUTER									

(NOTE) 1C ; 1ST ORIFFICE REGION CONTROL FUEL (1 COLUMNS)
 1S ; 1ST ORIFFICE REGION STANDARD FUEL (6 COLUMNS)
 2S1 ; 2ND ORIFFICE REGION STANDARD FUEL (INNER 12 COLUMNS)
 2C ; 2ND ORIFFICE REGION CONTROL FUEL (6 COLUMNS)
 2S2 ; 2ND ORIFFICE REGION STANDARD FUEL (OUTER 24 COLUMNS)
 3S ; 3RD AND 4TH ORIFFICE REGION STANDARD FUEL (24 COLUMNS)

第 4.1.6 図(1) 平均出力密度 (W/cm³) (燃焼日数 = 0 日)

	LOWER							UPPER	
	7	6	5	4	3	2	1		
INNER	0.62	0.93	1.32	2.10	1.89	0.62	0.23	1C	
	1.31	1.98	2.83	4.47	4.14	2.57	1.07	1S	
	1.23	1.86	2.66	4.22	4.03	2.77	1.10	2S1	
	0.51	0.77	1.10	1.78	1.73	1.01	0.24	2C	
	1.06	1.61	2.31	3.68	3.61	2.72	1.20	2S2	
	0.90	1.40	2.00	3.22	3.24	2.83	1.49	3S	
OUTER									

第 4.1.6 図(2) 平均出力密度 (W/cm³) (燃焼日数 = 10 日)

		LOWER							UPPER	
		7	6	5	4	3	2	1		
INNER		0.73	1.04	1.37	1.95	1.42	0.42	0.17		1C
		1.61	2.35	3.17	4.45	3.65	2.01	0.85		1S
		1.51	2.21	2.98	4.23	3.70	2.16	0.87		2S1
		0.61	0.88	1.18	1.72	1.54	0.66	0.19		2C
		1.29	1.91	2.60	3.74	3.40	2.22	0.99		2S2
		1.11	1.67	2.29	3.36	3.16	2.52	1.29		3S
OUTER										

第 4.1.6 図(3) 平均出力密度 (W/cm³) (燃焼日数 = 120 日)

		LOWER							UPPER	
		7	6	5	4	3	2	1		
INNER		0.62	0.83	1.04	1.53	1.60	0.84	0.26		1C
		1.46	2.01	2.63	3.78	3.88	2.88	1.26		1S
		1.37	1.91	2.50	3.61	3.77	3.10	1.29		2S1
		0.53	0.73	0.93	1.39	1.48	1.23	0.28		2C
		1.19	1.69	2.23	3.26	3.44	2.99	1.36		2S2
		1.04	1.52	2.04	3.03	3.22	3.04	1.68		3S
OUTER										

第 4.1.6 図(4) 平均出力密度 (W/cm³) (燃焼日数 = 300 日)

		LOWER							UPPER	
		7	6	5	4	3	2	1		
INNER		0.29	0.40	0.53	0.90	1.29	2.08	1.71		1C
		0.72	1.02	1.44	2.40	3.36	4.83	4.52		1S
		0.68	0.97	1.38	2.30	3.20	4.61	4.67		2S1
		0.26	0.36	0.49	0.84	1.16	1.82	1.98		2C
		0.60	0.88	1.27	2.13	2.92	4.14	4.24		2S2
		0.54	0.82	1.21	2.07	2.80	3.89	3.87		3S
OUTER										

第 4.1.6 図(5) 平均出力密度 (W/cm³) (燃焼日数 = 510 日)

LOWER REFLECTOR							7	6	5	4	3	2	1	1	UPPER REFLECTOR
7.87+ 9	7.52+11	8.21+12	1.24+13	1.61+13	1.86+13	9.30+12	4.87+12	2.36+12	1.90+11	1.85+ 9	1C				
4.54+ 9	6.20+11	9.15+12	1.36+13	1.76+13	2.13+13	1.31+13	7.15+12	3.51+12	2.05+11	1.39+ 9	1S				
4.18+ 9	5.80+11	8.60+12	1.28+13	1.67+13	2.09+13	1.39+13	7.41+12	3.68+12	2.15+11	1.46+ 9	2S1				
6.48+ 9	6.28+11	6.91+12	1.05+13	1.38+13	1.73+13	1.12+13	5.41+12	2.72+12	2.17+11	2.06+ 9	2C				
3.36+ 9	4.74+11	7.15+12	1.07+13	1.40+13	1.81+13	1.33+13	8.11+12	4.22+12	2.36+11	1.48+ 9	2S2				
2.00+ 9	3.22+11	5.28+12	7.95+12	1.05+13	1.39+13	1.15+13	8.33+12	4.45+12	2.20+11	1.18+ 9	3S				
2.17+ 9	1.86+11	1.87+12	2.90+12	3.86+12	5.05+12	4.33+12	3.22+12	1.71+12	1.31+11	1.19+ 9	R1				
7.80+ 8	8.00+10	8.99+11	1.39+12	1.84+12	2.43+12	2.08+12	1.55+12	8.29+11	6.02+10	5.00+ 8	R2				
8.96+ 8	6.85+10	6.57+11	1.03+12	1.37+12	1.80+12	1.57+12	1.20+12	6.40+11	5.17+10	5.31+ 8	R3				
2.38+ 8	1.21+10	8.46+10	1.35+11	1.81+11	2.32+11	2.05+11	1.53+11	8.12+10	9.24+ 9	1.49+ 8	R4				
2.32+ 7	8.42+ 8	5.00+ 9	8.07+ 9	1.09+10	1.38+10	1.22+10	9.14+ 9	4.84+ 9	6.72+ 8	1.59+ 7	R5				

(NOTE) 1C ; 1ST OFFICE REGION CONTROL FUEL (1 COLUMN)
 1S ; 1ST OFFICE REGION STANDARD FUEL (6 COLUMNS)
 2S1 ; 2ND OFFICE REGION STANDARD FUEL (INNER 12 COLUMNS)
 2C ; 2ND OFFICE REGION CONTROL FUEL (6 COLUMNS)
 2S2 ; 2ND OFFICE REGION STANDARD FUEL (OUTER 24 COLUMNS)
 3S ; 3RD AND 4TH OFFICE REGION STANDARD FUEL (24 COLUMNS)
 R1 ; RING 2 CONTROL REFLECTOR (6 COLUMNS)
 R2 ; REPLACEABLE REFLECTOR (INNER 24 COLUMNS)
 R3 ; RING 3 CONTROL REFLECTOR (6 COLUMNS)
 R4 ; REPLACEABLE REFLECTOR (OUTER 30 COLUMNS)
 R5 ; PERMANENT REFLECTOR

		LOWER REFLECTOR						UPPER REFLECTOR											
		7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2.42+11	4.96+12	2.35+13	3.65+13	4.77+13	5.22+13	2.19+13	1.11+13	5.35+12	8.44+11	2.88+10	1C								
1.87+11	4.48+12	2.39+13	3.67+13	4.81+13	5.53+13	3.43+13	1.82+13	8.85+12	1.33+12	4.25+10	1S								
1.71+11	4.17+12	2.24+13	3.45+13	4.54+13	5.41+13	3.63+13	1.89+13	9.26+12	1.39+12	4.38+10	2S1								
1.94+11	4.07+12	1.95+13	3.05+13	4.05+13	4.85+13	2.93+13	1.22+13	6.08+12	9.41+11	3.04+10	2C								
1.33+11	3.32+12	1.82+13	2.82+13	3.73+13	4.60+13	3.38+13	2.00+13	1.03+13	1.46+12	4.24+10	2S2								
8.59+10	2.24+12	1.29+13	2.01+13	2.68+13	3.39+13	2.80+13	1.93+13	1.02+13	1.32+12	3.52+10	3S								
7.79+10	1.58+12	8.03+12	1.28+13	1.71+13	2.14+13	1.84+13	1.31+13	6.86+12	6.93+11	1.82+10	R1								
4.23+10	9.14+11	4.95+12	7.87+12	1.05+13	1.33+13	1.14+13	8.17+12	4.31+12	5.81+11	1.78+10	R2								
4.03+10	7.45+11	3.67+12	5.90+12	7.94+12	9.90+12	8.66+12	6.29+12	3.31+12	3.46+11	1.02+10	R3								
1.72+10	2.71+11	1.21+12	1.96+12	2.64+12	3.26+12	2.88+12	2.09+12	1.10+12	1.66+11	6.68+ 9	R4								
3.16+ 9	3.99+10	1.58+11	2.60+11	3.51+11	4.26+11	3.81+11	2.77+11	1.46+11	2.78+10	1.56+ 9	R5								

第4.1.7図(2) 平均中性子束レベル—第2群— (n/cm²・sec) (燃焼日数 = 0日)

LOWER REFLECTOR	7	6	5	4	3	2	1	UPPER REFLECTOR
1.63+12	5.33+12	8.16+12	1.11+13	1.27+13	1.10+13	2.09+12	9.61+11	4.63+11
1.56+12	5.21+12	8.19+12	1.12+13	1.31+13	1.21+13	5.33+12	2.46+12	1.16+12
1.45+12	4.85+12	7.51+12	1.04+13	1.22+13	1.19+13	5.87+12	2.55+12	1.22+12
1.33+12	4.36+12	6.38+12	8.79+12	1.03+13	1.04+13	3.98+12	1.06+12	5.28+11
1.19+12	3.97+12	5.93+12	8.26+12	9.85+12	1.02+13	5.77+12	2.83+12	1.40+12
9.39+11	3.16+12	5.22+12	7.36+12	8.84+12	9.35+12	6.11+12	3.50+12	1.62+12
7.03+11	2.36+12	4.19+12	6.10+12	7.72+12	8.30+12	6.69+12	3.21+12	1.58+12
5.75+11	1.96+12	3.64+12	5.34+12	6.80+12	7.38+12	6.09+12	2.74+12	1.40+12
3.31+11	1.13+12	2.20+12	3.25+12	4.13+12	4.51+12	3.75+12	2.43+12	1.23+12
2.17+11	7.41+11	1.45+12	2.15+12	2.73+12	2.98+12	2.56+12	1.72+12	8.93+11
3.52+10	1.20+11	2.35+11	3.49+11	4.43+11	4.82+11	4.19+11	2.89+11	1.54+11

第 4.1.7 図 (3) 平均中性子束レベル—第 3 群—(n/cm²•sec) (燃焼日数 = 0 日)

	LOWER REFLECTOR	7	6	5	4	3	2	1	UPPER REFLECTOR
8.35+12	2.62+13	3.32+13	4.62+13	5.78+13	4.94+13	1.02+13	3.86+12	1.87+12	1.14+12 2.12+11
8.04+12	2.57+13	2.91+13	4.06+13	5.10+13	4.51+13	2.43+13	1.03+13	4.99+12	3.64+12 6.80+11
7.46+12	2.39+13	2.72+13	3.80+13	4.80+13	4.42+13	2.67+13	1.07+13	5.22+12	3.75+12 6.88+11
6.83+12	2.15+13	2.78+13	3.89+13	4.93+13	4.70+13	2.19+13	4.35+12	2.16+12	1.25+12 2.16+11
6.12+12	1.97+13	2.32+13	3.28+13	4.17+13	3.97+13	2.65+13	1.24+13	6.33+12	4.05+12 6.82+11
4.89+12	1.59+13	2.00+13	2.86+13	3.65+13	3.60+13	2.86+13	1.67+13	8.70+12	4.14+12 6.40+11
4.37+12	1.42+13	2.31+13	3.34+13	4.24+13	4.45+13	3.66+13	2.50+13	1.27+13	1.46+12 1.76+11
3.67+12	1.22+13	2.15+13	3.14+13	3.99+13	4.27+13	3.56+13	2.50+13	1.30+13	3.65+12 5.18+11
3.50+12	1.15+13	2.05+13	3.00+13	3.80+13	4.06+13	3.42+13	2.32+13	1.18+13	1.22+12 1.40+11
2.58+12	8.60+12	1.62+13	2.39+13	3.02+13	3.26+13	2.80+13	1.94+13	1.02+13	2.65+12 3.87+11
1.08+12	3.56+12	6.72+12	9.90+12	1.25+13	1.34+13	1.17+13	8.21+12	4.41+12	1.38+12 2.37+11

第4.1.7図(4) 平均中性子束レベル 第4群 (n/cm²・sec) (燃焼日数=0日)

LOWER REFLECTOR	7	6	5	4	3	2	1	UPPER REFLECTOR									
								1C	1S	2S1	2C	2S2	R1	R2	R3	R4	R5
3.06+	9	2.89+11	3.05+12	4.66+12	6.76+12	1.09+13	1.56+13	2.16+13	1.77+13	1.41+12	1.36+10						
1.78+	9	2.44+11	3.52+12	5.35+12	7.79+12	1.26+13	1.79+13	2.45+13	2.16+13	1.47+12	1.02+10						
1.65+	9	2.30+11	3.33+12	5.11+12	7.48+12	1.21+13	1.71+13	2.34+13	2.19+13	1.59+12	1.14+10						
2.57+	9	2.46+11	2.64+12	4.13+12	6.08+12	9.81+12	1.39+13	1.91+13	1.79+13	1.80+12	1.87+10						
1.35+	9	1.91+11	2.85+12	4.47+12	6.63+12	1.08+13	1.51+13	2.04+13	1.93+13	1.41+12	9.90+ 9						
8.28+	8	1.35+11	2.21+12	3.56+12	5.35+12	8.82+12	1.22+13	1.63+13	1.52+13	1.02+12	6.19+ 9						
9.14+	8	7.92+10	8.01+11	1.33+12	2.03+12	3.31+12	4.61+12	6.07+12	5.44+12	5.95+11	6.86+ 9						
3.29+	8	3.42+10	3.87+11	6.43+11	9.81+11	1.62+12	2.24+12	2.96+12	2.65+12	2.58+11	2.48+ 9						
3.82+	8	2.96+10	2.88+11	4.86+11	7.49+11	1.23+12	1.71+12	2.23+12	1.96+12	2.23+11	2.89+ 9						
1.01+	8	5.22+ 9	3.68+10	6.32+10	9.78+10	1.58+11	2.21+11	2.86+11	2.46+11	3.90+10	7.64+ 8						
9.93+	6	3.62+ 8	2.18+ 9	3.79+ 9	5.89+ 9	9.44+ 9	1.33+10	1.70+10	1.44+10	2.68+ 9	7.45+ 7						

第4.1.7図(5) 平均中性子束レベル—第1群—(n/cm²•sec) (燃焼日数=510日)

LOWER REFLECTOR	7	6	5	4	3	2	1	UPPER REFLECTOR	
								1C	1S
9.47+10	1.93+12	8.96+12	1.43+13	2.12+13	3.33+13	4.78+13	6.30+13	4.86+13	6.31+12
7.35+10	1.76+12	9.20+12	1.46+13	2.16+13	3.40+13	4.87+13	6.46+13	5.49+13	9.68+12
6.79+10	1.65+12	8.72+12	1.39+13	2.07+13	3.27+13	4.65+13	6.17+13	5.50+13	1.08+13
7.72+10	1.61+12	7.68+12	1.25+13	1.88+13	2.95+13	4.19+13	5.52+13	4.93+13	1.11+13
5.36+10	1.34+12	7.29+12	1.19+13	1.79+13	2.83+13	4.00+13	5.25+13	4.74+13	9.33+12
3.53+10	9.28+11	5.40+12	8.95+12	1.36+13	2.18+13	3.05+13	3.97+13	3.54+13	6.59+12
3.24+10	6.63+11	3.41+12	5.81+12	8.94+12	1.42+13	1.99+13	2.54+13	2.20+13	4.69+12
1.76+10	3.85+11	2.12+12	3.61+12	5.57+12	8.89+12	1.25+13	1.59+13	1.37+13	2.73+12
1.69+10	3.16+11	1.59+12	2.75+12	4.27+12	6.78+12	9.50+12	1.20+13	1.02+13	2.24+12
7.21+9	1.15+11	5.23+11	9.14+11	1.42+12	2.24+12	3.15+12	3.94+12	3.30+12	8.05+11
1.33+9	1.70+10	6.90+10	1.22+11	1.91+11	2.98+11	4.18+11	5.15+11	4.26+11	1.18+11
									9.21+9

第4.1.7図(6) 平均中性子束レベル—第2群—(n/cm²・sec) (燃焼日数 = 510 日)

LOWER REFLECTOR		7	6	5	4	3	2	1	UPPER REFLECTOR	
5. 56+11	1. 76+12	2. 21+12	3. 10+12	4. 31+12	6. 34+12	8. 86+12	1. 18+13	7. 60+12	7. 88+11	9. 52+10
5. 37+11	1. 74+12	2. 30+12	3. 23+12	4. 51+12	6. 52+12	9. 08+12	1. 18+13	9. 42+12	2. 12+12	3. 11+11
5. 02+11	1. 63+12	2. 20+12	3. 12+12	4. 37+12	6. 31+12	8. 69+12	1. 12+13	9. 75+12	2. 52+12	4. 06+11
4. 63+11	1. 48+12	1. 88+12	2. 70+12	3. 81+12	5. 61+12	7. 64+12	9. 99+12	8. 76+12	2. 56+12	4. 30+11
4. 17+11	1. 37+12	1. 83+12	2. 66+12	3. 78+12	5. 50+12	7. 45+12	9. 42+12	8. 37+12	2. 26+12	3. 86+11
3. 34+11	1. 11+12	1. 65+12	2. 47+12	3. 54+12	5. 17+12	6. 86+12	8. 26+12	7. 03+12	1. 75+12	3. 15+11
2. 52+11	8. 46+11	1. 48+12	2. 29+12	3. 36+12	4. 79+12	6. 42+12	5. 82+12	5. 13+12	1. 43+12	2. 80+11
2. 07+11	7. 12+11	1. 33+12	2. 09+12	3. 08+12	4. 42+12	5. 93+12	4. 86+12	4. 29+12	1. 08+12	2. 28+11
1. 20+11	4. 16+11	8. 19+11	1. 30+12	1. 93+12	2. 80+12	3. 75+12	4. 25+12	3. 72+12	9. 58+11	2. 07+11
7. 92+10	2. 74+11	5. 54+11	8. 89+11	1. 33+12	1. 91+12	2. 55+12	2. 88+12	2. 52+12	5. 98+11	1. 47+11
1. 29+10	4. 47+10	9. 17+10	1. 48+11	2. 22+11	3. 20+11	4. 24+11	4. 78+11	4. 15+11	2. 03+11	5. 77+10

第4.1.7図(7) 平均中性子束レベル—第3群---(n / cm²・sec) (燃焼日数 = 510 日)

	LOWER REFLECTOR	7	6	5	4	3	2	1	UPPER REFLECTOR
2. 86+12	8. 62+12	9. 53+12	1. 30+13	1. 80+13	2. 32+13	3. 25+13	3. 87+13	3. 02+13	1. 06+13 2. 82+12
2. 76+12	8. 52+12	7. 95+12	1. 07+13	1. 46+13	1. 80+13	2. 53+13	3. 06+13	3. 06+13	3. 51+13 9. 85+12
2. 58+12	8. 01+12	7. 56+12	1. 03+13	1. 41+13	1. 73+13	2. 41+13	2. 91+13	3. 16+13	4. 40+13 1. 30+13
2. 38+12	7. 27+12	8. 39+12	1. 17+13	1. 64+13	2. 11+13	2. 90+13	3. 44+13	3. 65+13	4. 31+13 1. 35+13
2. 15+12	6. 75+12	6. 86+12	9. 58+12	1. 33+13	1. 64+13	2. 25+13	2. 65+13	2. 87+13	4. 11+13 1. 25+13
1. 74+12	5. 57+12	6. 34+12	9. 19+12	1. 30+13	1. 63+13	2. 21+13	2. 55+13	2. 66+13	3. 43+13 1. 05+13
1. 57+12	5. 07+12	8. 07+12	1. 23+13	1. 79+13	2. 48+13	3. 33+13	4. 10+13	3. 88+13	3. 02+13 9. 25+12
1. 32+12	4. 43+12	7. 78+12	1. 21+13	1. 78+13	2. 52+13	3. 38+13	4. 19+13	3. 85+13	2. 64+13 7. 78+12
1. 27+12	4. 19+12	7. 54+12	1. 18+13	1. 74+13	2. 47+13	3. 29+13	3. 85+13	3. 49+13	2. 34+13 7. 05+12
9. 40+11	3. 17+12	6. 15+12	9. 80+12	1. 46+13	2. 08+13	2. 77+13	3. 22+13	2. 86+13	1. 74+13 5. 17+12
3. 95+11	1. 33+12	2. 60+12	4. 18+12	6. 24+12	8. 89+12	1. 17+13	1. 34+13	1. 17+13	6. 84+12 2. 07+12

第4.1.7図(8) 平均中性子束レベル—第4群— (n/cm²・sec) (燃焼日数 = 510日)

燃 縮 度		5.3 (%)		機 縮 度		5.3 (%)	
可燃性毒物 N _p		2 (本)		可燃性毒物 N _p		2 (本)	
温 度		900 (°K)		温 度		900 (°K)	
制 銀 棒	挿 入	制 銀 棒	挿 入	制 銀 棒	挿 入	制 銀 棒	挿 入
1.048	1.072	1.105	1.140	1.063	1.063	1.060	1.058
1.016	1.030	1.056	1.092	1.130	1.167	1.067	1.065
0.985	1.001	1.031	1.071	1.114	1.156	1.071	1.064
0.942	0.961	0.996	1.043	1.094	1.142	1.077	1.072
0.887	0.910	0.952	1.008	1.068	1.125	1.084	1.072
0.818	0.844	0.895	1.965	1.039	1.106	1.095	1.077
0.734	0.763	0.826	1.914	1.005	1.086	1.110	1.097
0.635	0.664	0.742	0.856	0.970	1.066	1.129	1.110
0.285	0.539	0.639	0.790	0.932	1.047	1.127	1.103
0.211	0.204	0.496	0.719	0.900	1.035	1.123	1.177
0.118	0.033	0.127	0.661	0.877	1.028	1.123	1.181
0.084	0.0	0.087	0.631	0.872	1.032	1.129	1.188
0.095	0.0	0.093	0.654	0.889	1.045	1.142	1.201
0.170	0.098	0.191	0.722	0.925	1.070	1.162	1.218
0.287	0.288	0.345	0.814	0.977	1.103	1.187	1.239
0.382	0.389	0.432	0.912	1.036	1.141	1.216	1.264
0.460	0.471	0.499	1.000	1.098	1.184	1.249	1.314
0.524	0.530	1.011	1.078	1.156	1.227	1.283	1.320
0.574	1.063	1.095	1.149	1.211	1.270	1.317	
1.126	1.138	1.167	1.212	1.262	1.310	1.130	1.111
1.191	1.203	1.229	1.266	1.307	1.347	1.110	1.097
1.249	1.260	1.282	1.313	1.347	1.381	1.096	1.087
1.298	1.308	1.327	1.353	1.382	1.410	1.085	1.079
1.339	1.348	1.364	1.386	1.411	1.436	1.077	1.073
1.371	1.378	1.393	1.412	1.434	1.455	1.074	1.072
1.395	1.402	1.415	1.432	1.452	1.471	1.069	1.068
1.417	1.429	1.445	1.463			1.065	1.063
1.436	1.452					1.062	1.060

第4.1.8 図(1) 径方向局所出力ビームシング

第4.1.8 図(2) 径方向局所出力ビームシング

叢縮度		4.2 (%)	
可燃性毒物 N _p		2 (本)	
温度		1200 (°K)	
制御棒	挿入	制御棒	引抜
1.047	1.072	1.106	1.144
1.013	1.028	1.056	1.093
0.981	0.998	1.030	1.072
0.938	0.958	0.994	1.043
0.882	0.905	0.949	1.007
0.812	0.839	0.891	0.963
0.726	0.757	0.821	0.911
0.626	0.657	0.736	0.852
0.277	0.532	0.633	0.787
0.204	0.199	0.491	0.715
0.114	0.032	0.124	0.657
0.080	0.0	0.085	0.627
0.091	0.0	0.091	0.649
0.164	0.095	0.186	0.716
0.277	0.279	0.336	0.808
0.369	0.378	0.422	0.906
0.446	0.458	0.487	0.995
0.510	0.517	0.577	1.002
0.561	1.052	1.089	1.147
1.117	1.131	1.164	1.212
1.185	1.200	1.228	1.268
1.246	1.259	1.283	1.317
1.299	1.309	1.330	1.358
1.341	1.351	1.369	1.393
1.375	1.383	1.399	1.420
1.400	1.403	1.422	1.441
1.424	1.437	1.455	1.474
1.444	1.461		

1.081	1.114	1.068	1.066
1.047	1.072	1.106	1.144
1.013	1.028	1.056	1.093
0.981	0.998	1.030	1.072
0.938	0.958	0.994	1.043
0.882	0.905	0.949	1.007
0.812	0.839	0.891	0.963
0.726	0.757	0.821	0.911
0.626	0.657	0.736	0.852
0.277	0.532	0.633	0.787
0.204	0.199	0.491	0.715
0.114	0.032	0.124	0.657
0.080	0.0	0.085	0.627
0.091	0.0	0.091	0.649
0.164	0.095	0.186	0.716
0.277	0.279	0.336	0.808
0.369	0.378	0.422	0.906
0.446	0.458	0.487	0.995
0.510	0.517	0.577	1.002
0.561	1.052	1.089	1.147
1.117	1.131	1.164	1.212
1.185	1.200	1.228	1.268
1.246	1.259	1.283	1.317
1.299	1.309	1.330	1.358
1.341	1.351	1.369	1.393
1.375	1.383	1.399	1.420
1.400	1.403	1.422	1.441
1.424	1.437	1.455	1.474
1.444	1.461		

1.068	1.069	1.067	1.065
1.047	1.072	1.106	1.144
1.013	1.028	1.056	1.093
0.981	0.998	1.030	1.072
0.938	0.958	0.994	1.043
0.882	0.905	0.949	1.007
0.812	0.839	0.891	0.963
0.726	0.757	0.821	0.911
0.626	0.657	0.736	0.852
0.277	0.532	0.633	0.787
0.204	0.199	0.491	0.715
0.114	0.032	0.124	0.657
0.080	0.0	0.085	0.627
0.091	0.0	0.091	0.649
0.164	0.095	0.186	0.716
0.277	0.279	0.336	0.808
0.369	0.378	0.422	0.906
0.446	0.458	0.487	0.995
0.510	0.517	0.577	1.002
0.561	1.052	1.089	1.147
1.117	1.131	1.164	1.212
1.185	1.200	1.228	1.268
1.246	1.259	1.283	1.317
1.299	1.309	1.330	1.358
1.341	1.351	1.369	1.393
1.375	1.383	1.399	1.420
1.400	1.403	1.422	1.441
1.424	1.437	1.455	1.474
1.444	1.461		

1.070	1.072	1.073	1.071	1.065
1.047	1.072	1.106	1.144	
1.013	1.028	1.056	1.093	
0.981	0.998	1.030	1.072	
0.938	0.958	0.994	1.043	
0.882	0.905	0.949	1.007	
0.812	0.839	0.891	0.963	
0.726	0.757	0.821	0.911	
0.626	0.657	0.736	0.852	
0.277	0.532	0.633	0.787	
0.204	0.199	0.491	0.715	
0.114	0.032	0.124	0.657	
0.080	0.0	0.085	0.627	
0.091	0.0	0.091	0.649	
0.164	0.095	0.186	0.716	
0.277	0.279	0.336	0.808	
0.369	0.378	0.422	0.906	
0.446	0.458	0.487	0.995	
0.510	0.517	0.577	1.002	
0.561	1.052	1.089	1.147	
1.117	1.131	1.164	1.212	
1.185	1.200	1.228	1.268	
1.246	1.259	1.283	1.317	
1.299	1.309	1.330	1.358	
1.341	1.351	1.369	1.393	
1.375	1.383	1.399	1.420	
1.400	1.403	1.422	1.441	
1.424	1.437	1.455	1.474	
1.444	1.461			

1.089	1.095	1.098	1.090	1.077	1.071	1.065
1.047	1.072	1.106	1.144	1.111	1.104	1.100
1.013	1.028	1.056	1.093	1.091	1.084	1.080
0.981	0.998	1.030	1.072	1.070	1.063	1.059
0.938	0.958	0.994	1.043	1.041	1.034	1.030
0.882	0.905	0.949	1.007	1.005	1.000	0.996
0.812	0.839	0.891	0.963	0.961	0.955	0.951
0.726	0.757	0.821	0.911	0.909	0.903	0.900
0.626	0.657	0.736	0.852	0.850	0.844	0.841
0.277	0.532	0.633	0.787	0.785	0.779	0.776
0.204	0.199	0.491	0.715	0.713	0.707	0.704
0.114	0.032	0.124	0.657	0.655	0.649	0.646
0.080	0.0	0.085	0.627	0.625	0.619	0.616
0.091	0.0	0.091	0.649	0.647	0.641	0.638
0.164	0.095	0.186	0.716	0.714	0.708	0.705
0.277	0.279	0.336	0.808	0.806	0.800	0.797
0.369	0.378	0.422	0.906	0.904	0.900	0.897
0.446	0.458	0.487	0.995	0.993	0.989	0.986
0.510	0.517	0.577	1.002	1.000	0.996	0.993
0.561	1.052	1.089	1.147	1.145	1.141	1.137
1.117	1.131	1.164	1.212	1.210	1.207	1.203
1.185	1.200	1.228	1.268	1.266	1.263	1.259
1.246	1.259	1.283	1.317	1.315	1.312	1.308
1.299	1.309	1.330	1.358	1.356	1.353	1.349
1.341	1.351	1.369	1.393	1.391	1.388	1.384
1.375	1.383	1.399	1.420	1.418	1.415	1.411
1.400	1.403	1.422	1.441	1.439	1.436	1.432
1.424	1.437	1.455	1.474	1.472	1.469	1.466
1.444	1.461					

1.070	1.072	1.073	1.072	1.071	1.070	1.069
1.047	1.072	1.106	1.144	1.143	1.142	1.141
1.013	1.028	1.056	1.093	1.092	1.091	1.090
0.981	0.998	1.030	1.072	1.071	1.070	1.069
0.938	0.958	0.994	1.043	1.042	1.041	1.040
0.882	0.905	0.949	1.007	1.006	1.005	1.004
0.812	0.839	0.891	0.963	0.962	0.961	0.960
0.726	0.757	0.821	0.911	0.910	0.909	0.908
0.626	0.657	0.736	0.852	0.851	0.850	0.849
0.277	0.532	0.633	0.787	0.786	0.785	0.784
0.204	0.199	0.491	0.715	0.714	0.713	0.712
0.114	0.032	0.124	0.657	0.656	0.655	0.654
0.080	0.0	0.085	0.627	0.626	0.625	0.624
0.091	0.0	0.091	0.649	0.648	0.647	0.646
0.164	0.095	0.186	0.716	0.715	0.714	0.713
0.277	0.279	0.336	0.808	0.807	0.806	0.805
0.369	0.378	0.422	0.906	0.905	0.904	0.903
0.446	0.458	0.487	0.995	0.994	0.993	0.992
0.510	0.517	0.577	1.002	1.001	1.000	0.999
0.561	1.052	1.089	1.147	1.146	1.145	1.144
1.117	1.131	1.164	1.212	1.211	1.210	1.209
1.185	1.200	1.228	1.268	1.267	1.266	1.265
1.246	1.259	1.283	1.317	1.316	1.315	1.314
1.299	1.309	1.330	1.358	1.357	1.356	1.355
1.341	1.351	1.369	1.393	1.392	1.391	1.390
1.375	1.383	1.399	1.420	1.419	1.418	1.417
1.400	1.403	1.422	1.441	1.440	1.439	1.438
1.424	1.437	1.455</				

	LOWER						UPPER					
	7	6	5	4	3	2	1					
INNER	6.84+3	9.52+3	1.25+4	1.84+4	1.67+4	1.02+4	4.22+3	1C				
	6.40+3	9.13+3	1.22+4	1.78+4	1.71+4	1.31+4	6.75+3	1S				
	6.00+3	8.60+3	1.16+4	1.70+4	1.68+4	1.36+4	6.99+3	2S1				
	5.83+3	8.23+3	1.09+4	1.64+4	1.64+4	1.22+4	5.11+3	2C				
	5.19+3	7.54+3	1.02+4	1.51+4	1.53+4	1.30+4	7.05+3	2S2				
OUTER	4.50+2	6.71+3	9.17+3	1.38+4	1.43+4	1.34+4	7.98+3	3S				

(NOTE) 1C ; 1ST ORIFICE REGION CONTROL FUEL (1 COLUMN)
 1S ; 1ST ORIFICE REGION STANDARD FUEL (6 COLUMNS)
 2S1 ; 2ND ORIFICE REGION STANDARD FUEL (INNER 12 COLUMNS)
 2C ; 2ND ORIFICE REGION CONTROL FUEL (6 COLUMNS)
 2S2 ; 2ND ORIFICE REGION STANDARD FUEL (OUTER 24 COLUMNS)
 3S ; 3RD AND 4TH ORIFICE REGION STANDARD FUEL (24 COLUMNS)

第4.1.9図 平均燃焼度 (MWD/TON)

	LOWER REFLECTOR	7	6	5	4	3	2	1	UPPER REFLECTOR
0.0003	0.0244	0.2621	0.4013	0.5509	0.7615	0.7255	0.4920	0.2286	0.0168
0.0001	0.0203	0.2969	0.4503	0.6189	0.8646	0.8449	0.6340	0.3164	0.0178
0.0001	0.0190	0.2790	0.4249	0.5861	0.8246	0.8289	0.6479	0.3251	0.0182
0.0002	0.0204	0.2214	0.3430	0.4750	0.6680	0.6831	0.5210	0.2466	0.0179
0.0001	0.0156	0.2333	0.3598	0.4995	0.7112	0.7326	0.6046	0.3192	0.0178
0.0001	0.0108	0.1761	0.2753	0.3849	0.5566	0.5835	0.5212	0.2973	0.0152
0.0001	0.0063	0.0632	0.1018	0.1437	0.2048	0.2174	0.1955	0.1119	0.0090
0.0000	0.0027	0.0304	0.0489	0.0691	0.0992	0.1052	0.0948	0.0543	0.0041
0.0000	0.0023	0.0224	0.0365	0.0519	0.0743	0.0793	0.0718	0.0413	0.0035
0.0000	0.0004	0.0029	0.0048	0.0068	0.0096	0.0103	0.0092	0.0053	0.0006
0.0000	0.0000	0.0002	0.0003	0.0004	0.0006	0.0006	0.0005	0.0003	0.0000
									R5

(NOTE) 1C ; 1ST OFFICE REGION CONTROL FUEL (1 COLUMNS)

1S ; 1ST OFFICE REGION STANDARD FUEL (6 COLUMNS)

2S1 ; 2ND OFFICE REGION STANDARD FUEL (INNER 12 COLUMNS)

2C ; 2ND OFFICE REGION CONTROL FUEL (6 COLUMNS)

2S2 ; 2ND OFFICE REGION STANDARD FUEL (OUTER 24 COLUMNS)

3S ; 3RD AND 4TH OFFICE REGION STANDARD FUEL (24 COLUMNS)

R1 ; RING 2 CONTROL REFLECTOR (6 COLUMNS)

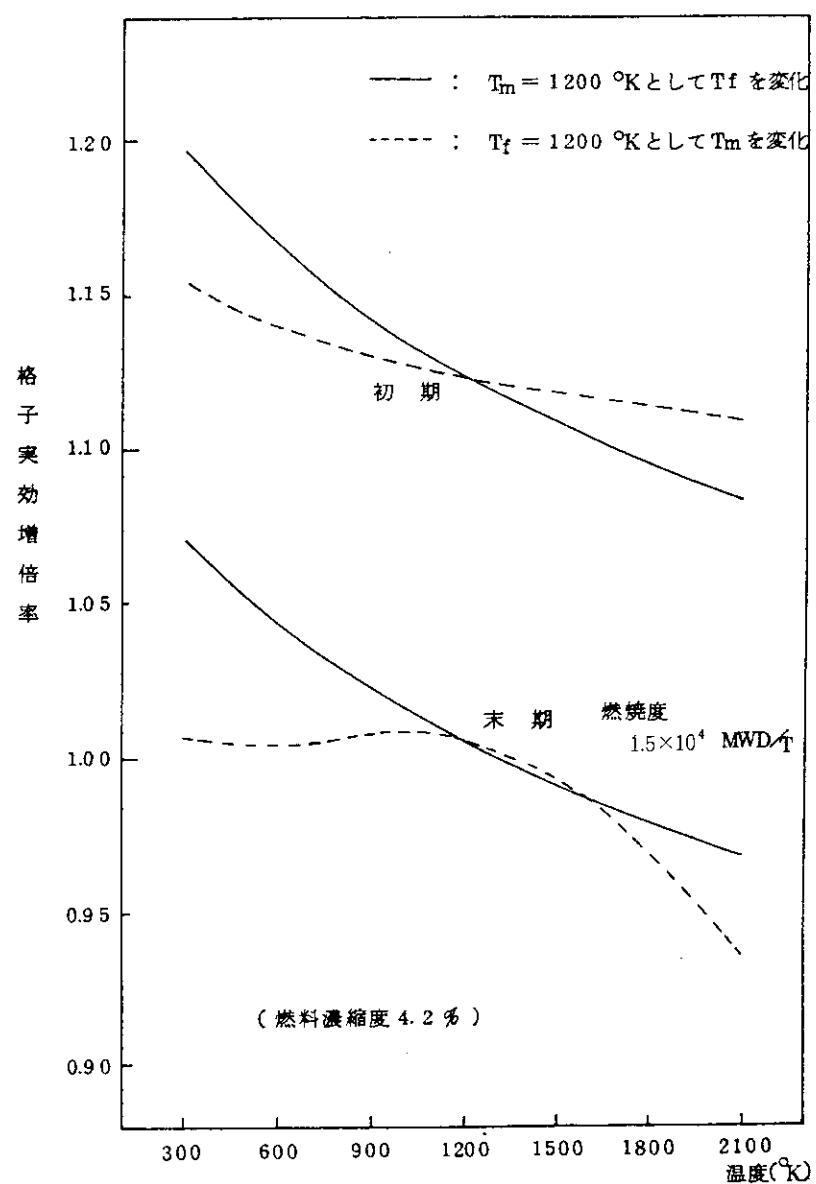
R2 ; REPLACEABLE REFLECTOR (INNER 24 COLUMNS)

R3 ; RING 3 CONTROL REFLECTOR (6 COLUMNS)

R4 ; REPLACEABLE REFLECTOR (OUTER 30 COLUMNS)

R5 ; PERMANENT REFLECTOR

第4.1.10図 平均積分中性子束レベル ($\times 10^{21} \text{ nvt}$)



第4.1.11図 格子実効増倍率の温度依存性

4.2 热流動特性解析

前章で選定された炉心について、全燃料チャンネルの流量割合が全炉心流量の 90 %とした場合と、85 %とした場合における燃焼ステップ毎の炉心熱流動特性解析を行ない、燃焼期間中、熱設計基準を満足していることを確認した。流量調節については、各オリフィス領域の冷却材出口温度を等しくする流量調節方式 2 と、公称燃料最高温度を等しくする流量調節方式 3 について解析した。

4.2.1 流量割合 90 %の場合

各燃焼日毎の燃料最高温度（公称、システムティック、ランダム）、最小レイノルズ数および圧力損失を、第 4.2.1 表に示した。この表より、燃焼期間中、流量調節方式 2 では、最小レイノルズ数 9800 以上、圧力損失 0.12 kg/cm^2 以下であり、又、流量調節方式 3 でも最小レイノルズ数約 9000 以上、圧力損失 0.11 kg/cm^2 以下であることがわかる。これらは最小レイノルズ数の設計条件である、最小値 3500 以上という条件を十分満足し、最小レイノルズ数、圧力損失の点からは燃焼期間中全く問題はない。

流量調節方式 2 による、オリフィス領域の各チャンネルにおける公称燃料最高温度の燃焼変化を、第 4.2.1 図に示した。又、同図には、流量調節方式 3 による場合についても示した。流量調節方式 2 では、全燃焼期間中、燃料最高温度チャンネルは、領域 II の標準カラムチャンネルに生じている。これは、全炉心の燃料最高温度の低減化を図る為、炉心中燃料チャンネル本数の最も多い。

領域 II の領域あたり出力ピーキング係数を燃焼期間中低く抑え（最大値 1.027）、領域 II で必要とする流量を少くしている。その為、各オリフィス領域の冷却材出口温度を等しくする流量調節方式 2 では、領域 II の各チャンネルの流量は比較的少いが、一方、領域 II の領域内出力ピーキング係数は他の領域に比べて高く、又、制御棒挿入による軸方向出力分布形状の影響から他の領域のチャンネルより燃料最高温度が高くなるためである。

各燃焼日における公称燃料最高温度とシステムティック燃料最高温度変化を、第 4.2.2 図に示した。全燃焼期間を通して、燃焼日 0 日（炉心初期状態）の燃料最高温度が最も高く、Xe Sm 蓄積時（燃焼日 10 日），燃焼日 60 日と燃料最高温度は低くなるが、燃焼日 60 日から 180 日までは若干、上昇する。これは、燃焼日 60 日から 180 日までは同じ制御棒配置であるため燃焼に伴い軸方向出力分布が平坦化し、相対的にチャンネル下部での出力が高くなり、燃料最高温度が上昇する為である。燃焼日 0 日～160 日までの軸方向出力分布と燃料温度分布変化（領域 II の標準カラムチャンネル）を、それぞれ第 4.2.3 図および第 4.2.4 図に示した。一方燃焼日 240 日から 510 日まで徐々に燃料最高温度が低くなる。これは、第 4.2.5 図および第 4.2.6 図に示した燃焼日 240 日から 510 日までの軸方向出力分布、燃料温度分布からも明らかな様に、この期間中では制御棒が徐々に引き抜かれチャンネル上部の出力が上昇し相対的にチャンネル下部の出力が減少する為、出力分布は減衰関数的な傾向を示し燃料温度を非常に低く押さえることが可能になってくる。これらの傾向は、システムティック燃料最高温度についても同様である。

炉心径方向の 1/6 ブロックあたりの燃料最高温度分布の一例として、燃焼日 0 日, 10 日, 180 日, 480 日における場合を第 4.2.7 図に示した。各燃焼日において領域ⅢとⅣ では燃料最高温度チャンネル位置が変わらないが、領域ⅠとⅡでは制御棒挿入効果により、その位置が変わる。

これらの結果から、燃焼期間中燃料最高温度が最も高くなる炉心初期状態でも、公称燃料最高温度は 1223 °C, システマティック燃料最高温度は 1501 °C (流量調節方式 2) であり、燃料温度の設計基準である、公称値 1350 °C 以下、システムティック値 1550 °C 以下を十分満足している。

4.2.2 流量割合 85 % の場合

各燃焼日毎の燃料最高温度（公称、システムティック、ランダム）、最小レイノルズ数、および圧力損失を、第 4.2.2 表に示した。この表より、燃焼期間中、流量調節方式 2 では最小レイノルズ数 9100 以上、圧力損失 0.11 kg/cm² 以下、又流量調節方式 3 では最小レイノルズ数 8300 以上、圧力損失 0.1 kg/cm² 以下が確保され、流量割合を 85 % としても十分、最小レイノルズ数の設計条件を満足し流動的には全く問題はない。

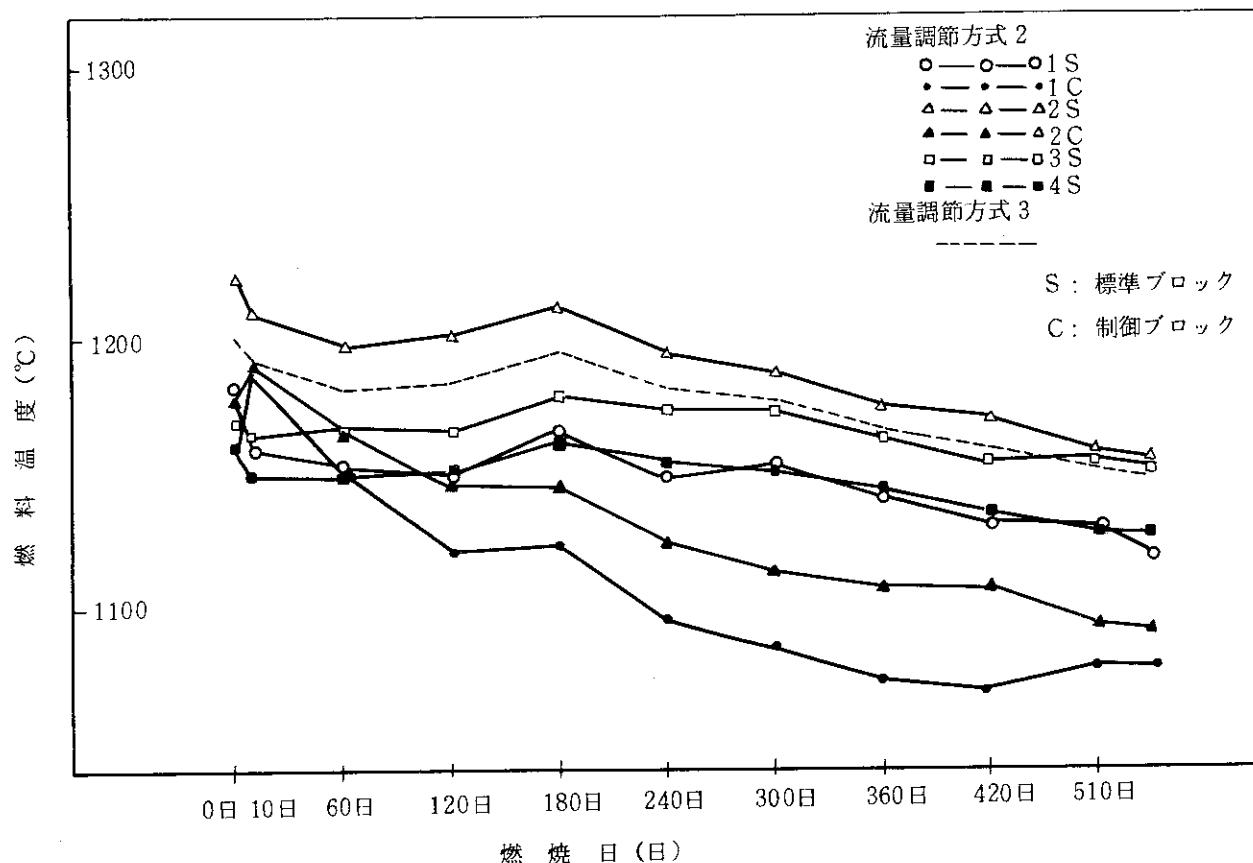
流量調節方式 2 および方式 3 の場合のオリフィス領域の各チャンネルにおける公称燃料最高温度変化を、第 4.2.8 図に示した。又、各燃焼日における公称燃料最高温度とシステムティック燃料最高温度変化を、第 4.2.9 図に示した。傾向は、流量割合 90 % の場合と全く同様であるが、燃料温度が約 40 °C ~ 50 °C 上昇している。これは、第 4.2.10 図に示した流量割合によるチャンネル径方向温度分布の比較からもわかる様に、流量割合を 85 % とした場合チャンネル当りの流量が少くなり冷却材温度が上昇し、さらに境膜温度差が大きくなる為である。この為、流量割合 85 % の場合、燃焼期間中燃料最高温度が最も高くなる炉心初期状態で、流量調節方式 2 における公称燃料最高温度は 1267 °C で、十分、設計基準を満足するが、システムティック燃料最高温度は 1559 °C となり、若干、制限値 1550 °C を上回る。しかし、流量調節方式 3 ではシステムティック燃料最高温度も 1532 °C (燃焼日 10 日) が最高であり、十分設計基準を満足している。

第4.2.1表 热流动特性の燃焼変化(流量割合 90%)

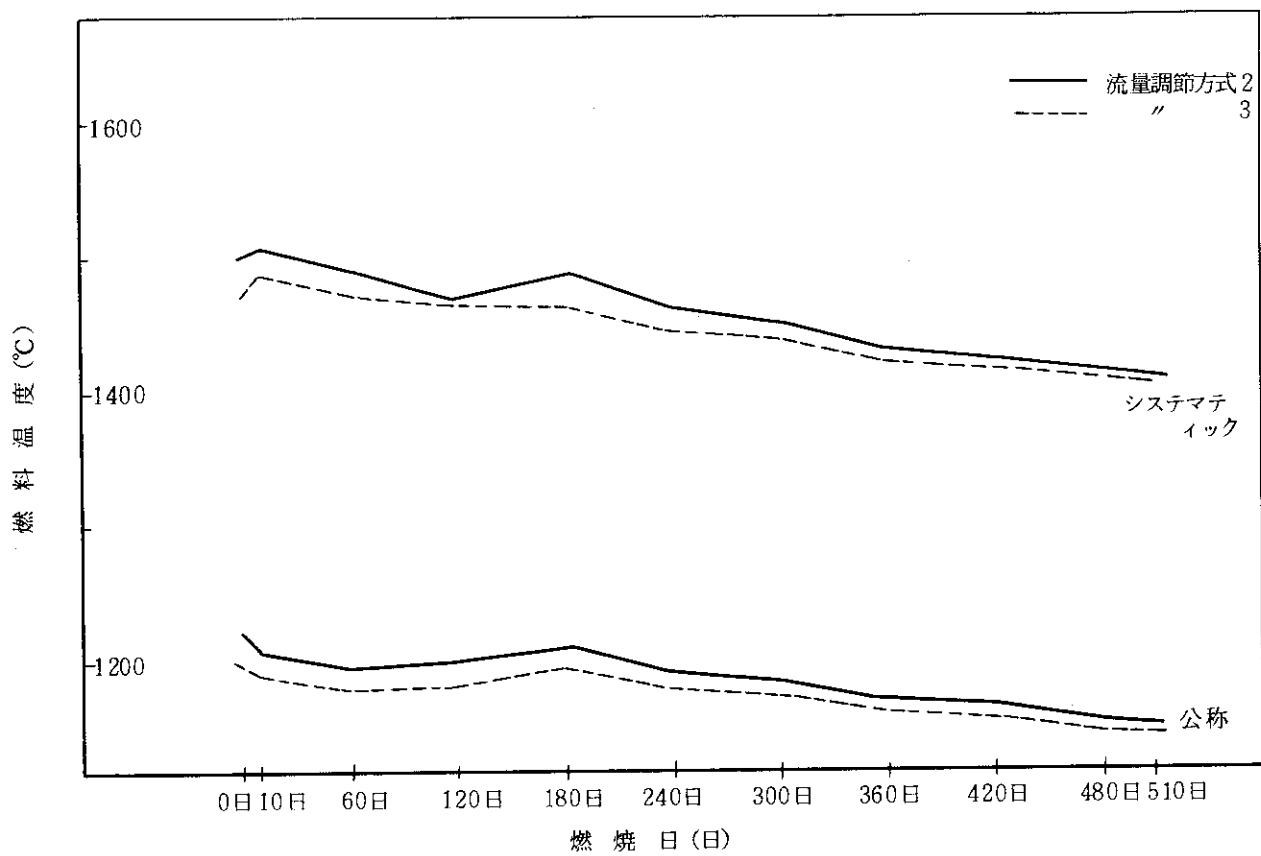
燃焼 日数	オ リ ジ ナ ル フ ィ ス 領 域	流量調節方式 2					流量調節方式 3				
		燃料最高温度 (°C)			最小レイノ ルズ数	圧力損失 (kg/cm ²)	燃料最高温度 (°C)			最小レイノ ルズ数	圧力損失 (kg/cm ²)
		公称	システム ティック	ランダム			公称	システム ティック	ランダム		
0	I	1181	1446	1529	12147	0.089	1200	1471	1555	11727	0.086
	II	1223	1501	1587	11212	0.082	1200	1471	1555	11677	0.085
	III	1169	1430	1516	10757	0.077	1200	1467	1554	10162	0.073
	IV	1159	1412	1493	10206	0.069	1200	1467	1550	9465	0.064
10	I	1159	1439	1525	12734	0.100	1192	1488	1581	12607	0.096
	II	1209	1506	1598	11293	0.088	1192	1482	1572	11722	0.091
	III	1164	1439	1524	10397	0.075	1192	1477	1565	9803	0.071
	IV	1149	1419	1502	9835	0.067	1192	1476	1564	8996	0.062
60	I	1152	1432	1519	12561	0.096	1181	1472	1562	11769	0.090
	II	1187	1492	1584	11248	0.085	1181	1471	1561	11641	0.088
	III	1166	1445	1531	10551	0.076	1181	1466	1553	10171	0.074
	IV	1149	1421	1505	9982	0.068	1181	1463	1551	9324	0.064
120	I	1150	1407	1492	12476	0.094	1184	1447	1532	11722	0.089
	II	1202	1471	1555	11223	0.084	1184	1446	1531	11605	0.087
	III	1165	1442	1528	10553	0.077	1184	1463	1551	10201	0.075
	IV	1151	1414	1498	10073	0.070	1184	1452	1539	9483	0.065
180	I	1165	1423	1503	12392	0.093	1196	1464	1548	11695	0.087
	II	1213	1487	1573	11210	0.083	1196	1464	1548	11570	0.086
	III	1179	1438	1519	10592	0.078	1196	1460	1544	10274	0.075
	IV	1162	1415	1495	10156	0.070	1196	1460	1543	9547	0.066
240	I	1149	1401	1479	12306	0.093	1181	1443	1525	11586	0.088
	II	1194	1460	1543	11208	0.085	1181	1443	1525	11477	0.087
	III	1173	1436	1521	10610	0.080	1181	1445	1530	10459	0.079
	IV	1154	1403	1485	10219	0.072	1181	1440	1521	9713	0.069
300	I	1153	1406	1485	12282	0.093	1177	1438	1520	11737	0.089
	II	1187	1451	1533	11216	0.086	1177	1438	1519	11420	0.087
	III	1173	1429	1512	10592	0.081	1177	1435	1518	10506	0.080
	IV	1152	1401	1480	10225	0.073	1177	1435	1516	9758	0.070
360	I	1141	1388	1465	12436	0.099	1165	1420	1500	11867	0.095
	II	1174	1431	1512	11237	0.089	1165	1420	1500	11415	0.090
	III	1163	1420	1503	10455	0.080	1165	1423	1505	10412	0.080
	IV	1143	1388	1468	10092	0.073	1165	1417	1497	9683	0.070
420	I	1132	1375	1451	12612	0.106	1159	1411	1490	11978	0.101
	II	1170	1424	1504	11245	0.093	1159	1410	1489	11466	0.095
	III	1154	1412	1493	10290	0.079	1159	1418	1500	10187	0.079
	IV	1135	1382	1460	9929	0.072	1159	1410	1491	9492	0.069
480	I	1129	1369	1445	12589	0.111	1152	1399	1477	12059	0.106
	II	1158	1407	1486	11185	0.094	1152	1399	1477	11321	0.095
	III	1154	1415	1496	10329	0.082	1152	1412	1493	10370	0.083
	IV	1129	1381	1459	10028	0.075	1151	1410	1490	9598	0.072
510	I	1119	1374	1458	12460	0.109	1148	1405	1491	11791	0.103
	II	1155	1402	1482	11210	0.097	1148	1393	1474	11358	0.098
	III	1151	1410	1490	10297	0.083	1148	1406	1485	10356	0.083
	IV	1127	1377	1455	9986	0.076	1147	1405	1485	9571	0.073

第4.2.2表 热流动特性の燃焼変化（流量割合 85 %）

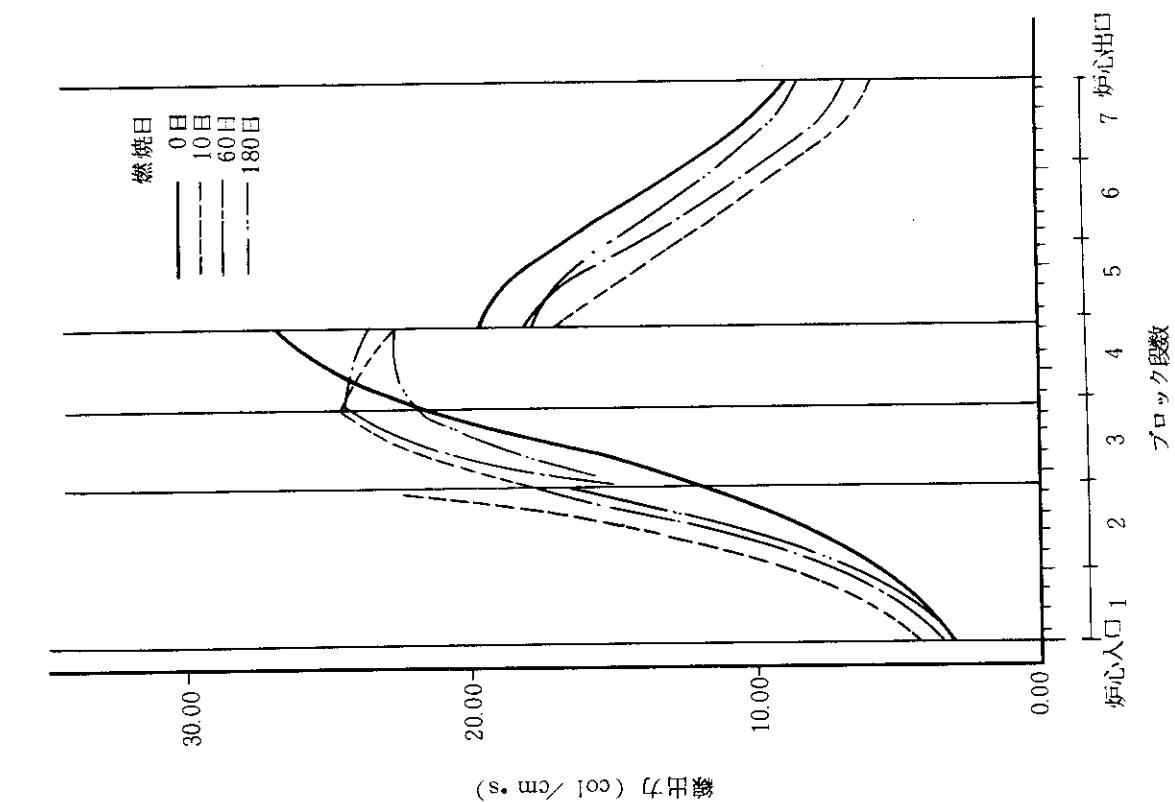
燃焼 日数	オリ エンジ ン 領 域 ス	流量調節方式 2					流量調節方式 3				
		燃料最高温度 (°C)		最小レイン ルズ数	圧力損失 (kg/cm²)	燃料最高温度 (°C)		最小レイン ルズ数	圧力損失 (kg/cm²)		
		公称	システム ティック			ランダム	公称		ランダム		
0	I	1223	1501	1588	11254	0.082	1243	1528	1617	10855	0.079
	II	1267	1559	1651	10382	0.075	1243	1528	1617	10809	0.079
	III	1211	1482	1567	9963	0.071	1243	1525	1613	9420	0.067
	IV	1201	1468	1551	9453	0.064	1243	1524	1612	8776	0.060
10	I	1222	1530	1626	11789	0.090	1229	1538	1635	11637	0.089
	II	1247	1557	1653	10456	0.082	1229	1532	1626	10847	0.085
	III	1200	1489	1578	9629	0.070	1229	1527	1619	9098	0.066
	IV	1186	1468	1555	9109	0.062	1229	1526	1618	8355	0.057
60	I	1186	1478	1569	11639	0.089	1220	1520	1615	10890	0.083
	II	1240	1542	1638	10414	0.079	1220	1519	1613	10786	0.082
	III	1202	1494	1584	9734	0.071	1220	1518	1610	9387	0.068
	IV	1186	1469	1557	9245	0.063	1221	1509	1600	8694	0.060
120	I	1191	1457	1541	11560	0.087	1227	1504	1590	10849	0.082
	II	1246	1529	1617	10392	0.078	1227	1503	1590	10742	0.081
	III	1208	1491	1581	9772	0.072	1227	1513	1604	9455	0.069
	IV	1193	1462	1550	9329	0.064	1227	1501	1592	8789	0.061
180	I	1206	1477	1562	11483	0.086	1239	1522	1610	10823	0.081
	II	1257	1546	1636	10380	0.077	1239	1522	1610	10710	0.080
	III	1222	1495	1581	9807	0.072	1239	1518	1606	9522	0.070
	IV	1204	1471	1555	9405	0.065	1239	1518	1605	8851	0.061
240	I	1190	1455	1537	11403	0.086	1224	1500	1586	10725	0.081
	II	1237	1518	1605	10379	0.078	1224	1500	1586	10624	0.080
	III	1216	1487	1574	9823	0.074	1224	1497	1584	9694	0.073
	IV	1196	1459	1542	9263	0.067	1224	1497	1583	9002	0.064
300	I	1194	1461	1544	11380	0.086	1220	1495	1581	10861	0.082
	II	1230	1508	1595	10386	0.079	1220	1494	1580	10572	0.081
	III	1216	1486	1571	9806	0.075	1220	1492	1577	9736	0.074
	IV	1194	1457	1540	9469	0.068	1220	1491	1577	9044	0.065
360	I	1181	1442	1523	11521	0.092	1208	1477	1561	10983	0.088
	II	1217	1488	1573	10405	0.082	1208	1476	1561	10567	0.084
	III	1206	1472	1557	9679	0.075	1208	1474	1559	9646	0.074
	IV	1185	1443	1525	9345	0.068	1208	1474	1558	8973	0.065
420	I	1173	1429	1509	11684	0.099	1202	1467	1551	11086	0.094
	II	1213	1481	1566	10410	0.086	1202	1467	1550	10614	0.088
	III	1197	1463	1548	9526	0.074	1202	1469	1555	9436	0.073
	IV	1177	1432	1514	9194	0.067	1202	1465	1549	8793	0.064
480	I	1170	1423	1503	11660	0.103	1193	1454	1537	11178	0.098
	II	1201	1464	1547	10355	0.088	1193	1454	1537	10495	0.089
	III	1192	1467	1552	9561	0.076	1192	1467	1552	9564	0.077
	IV	1169	1432	1514	9286	0.070	1193	1461	1545	8895	0.067
510	I	1159	1417	1505	11541	0.101	1189	1448	1539	10934	0.096
	II	1198	1459	1542	10378	0.090	1189	1448	1530	10534	0.091
	III	1190	1462	1546	9532	0.077	1189	1461	1545	9545	0.077
	IV	1165	1428	1509	9247	0.070	1189	1458	1542	8849	0.068



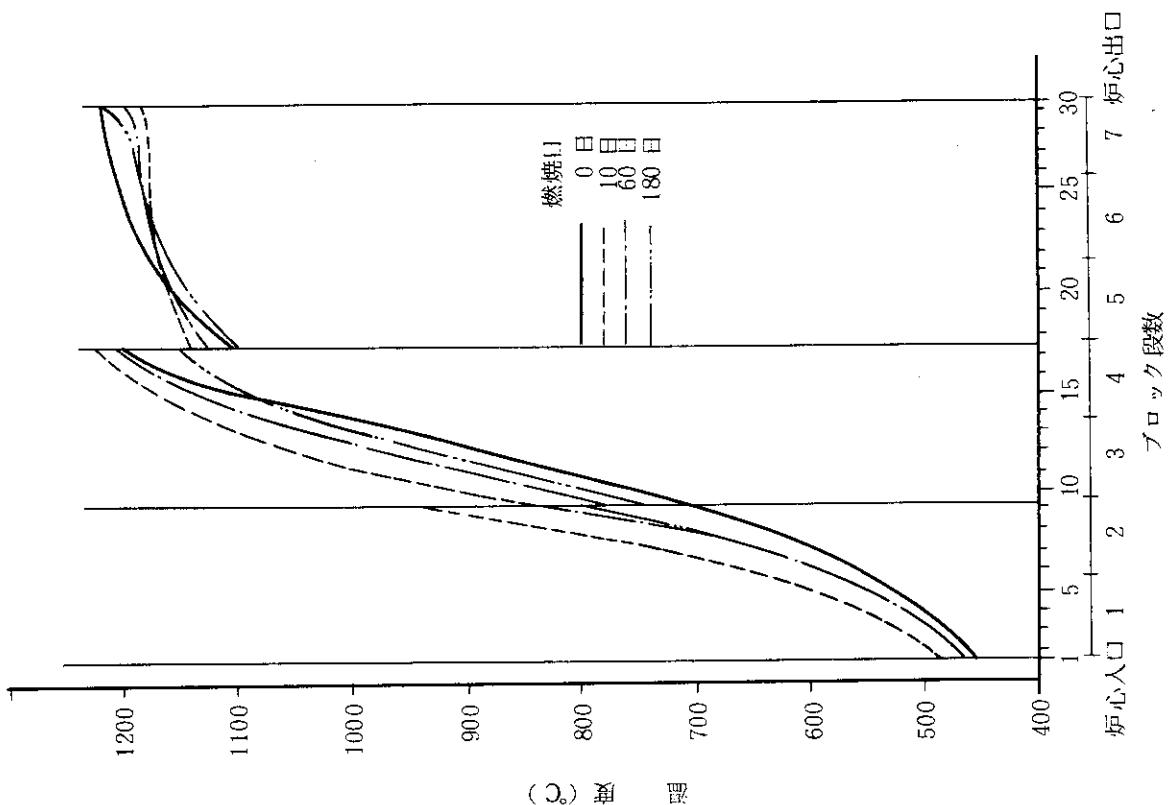
第 4.2.1 図 燃焼による各チャンネルの公称燃料最高温度の変化
(流量割合 90 %)



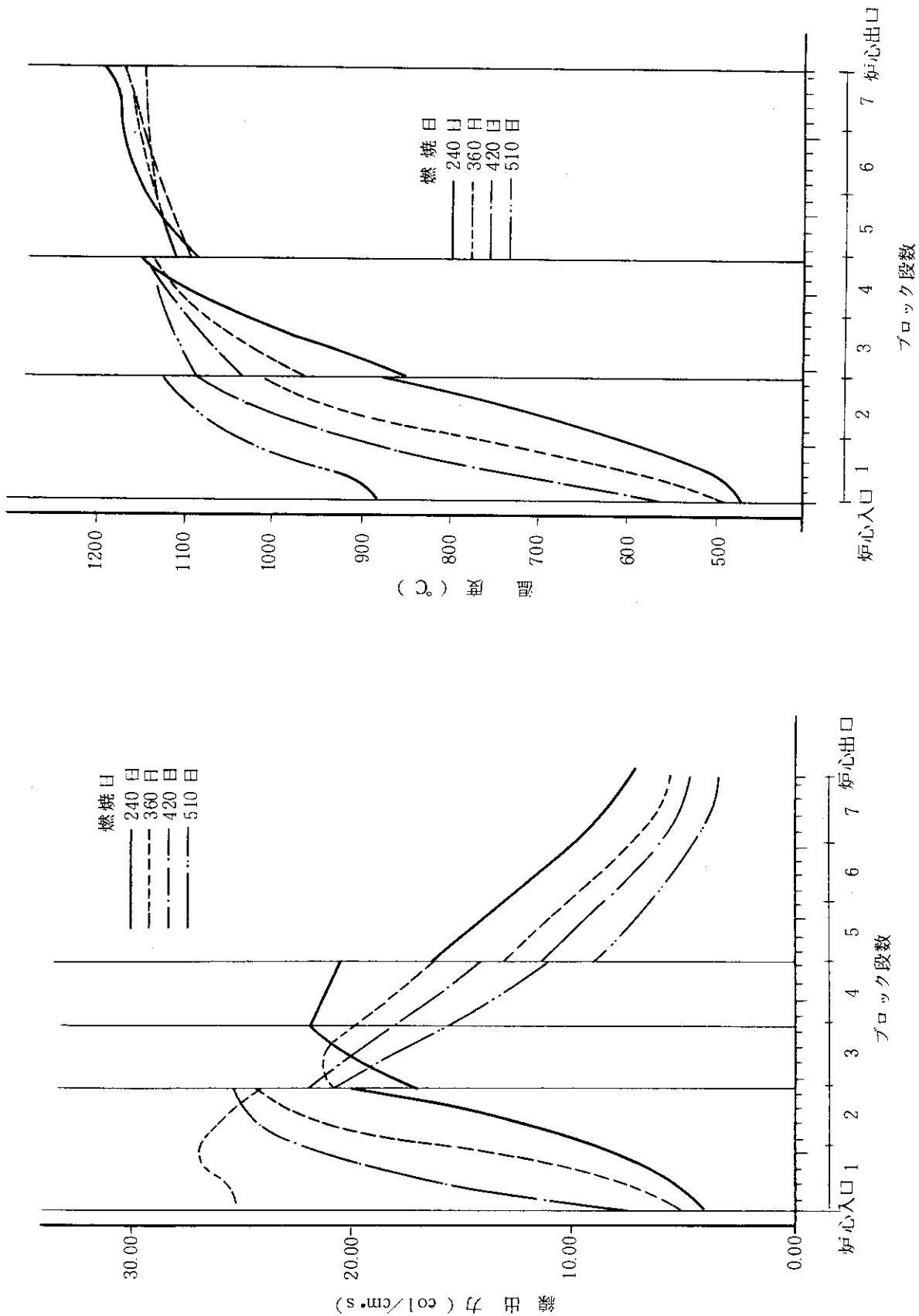
第 4.2.2 図 燃焼による燃料最高温度の変化 (流量割合 90 %)



第4.2.3図 燃焼日0日～180日までの軸方向出力分布の変化（領域II，最高温チャンネル）

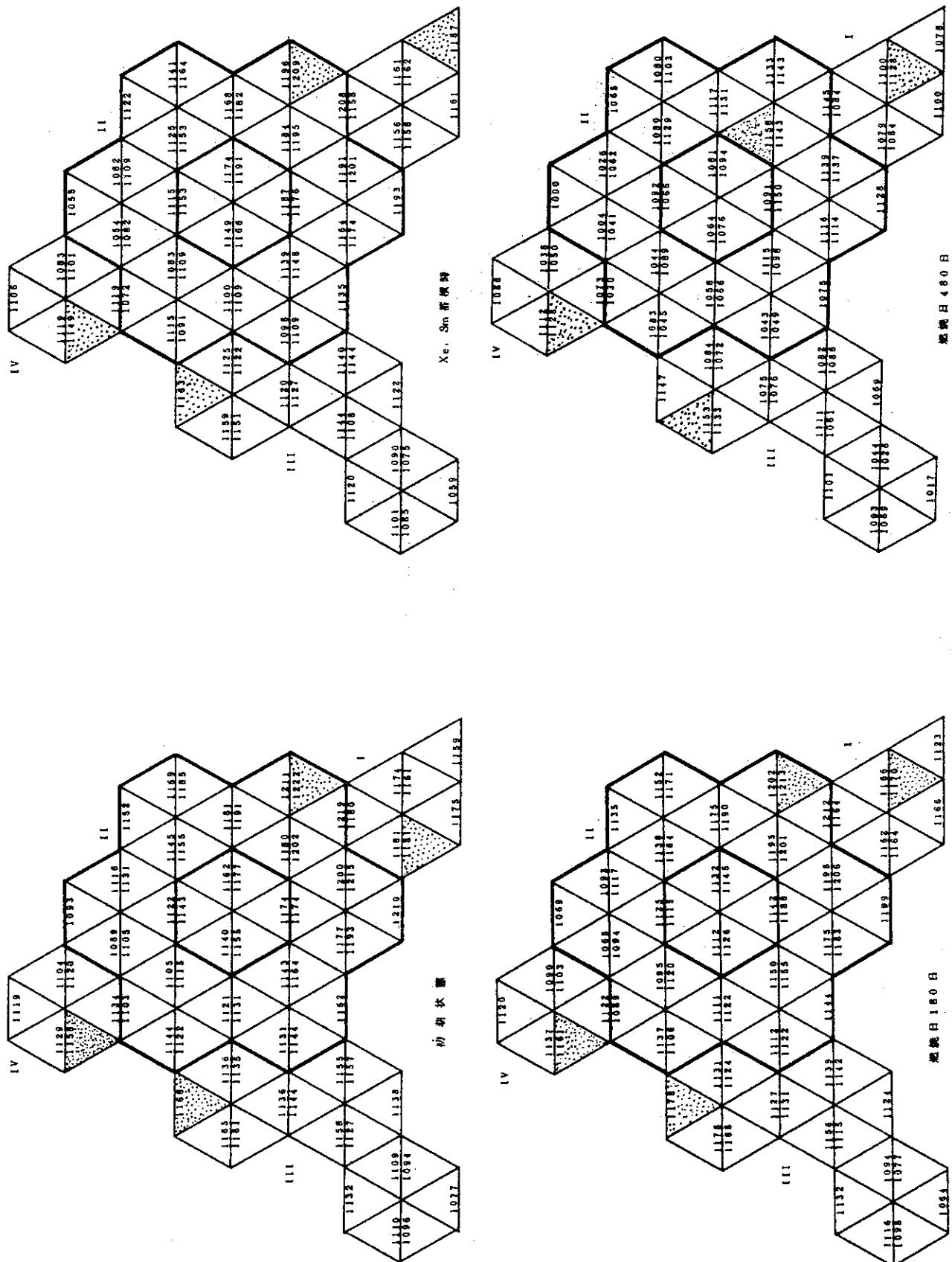


第4.2.4図 燃焼0日～180日までの燃料コソバクト外面温度軸方向分布の変化（流量割合90%，流量調節方式2，領域II，最高温チャネル）

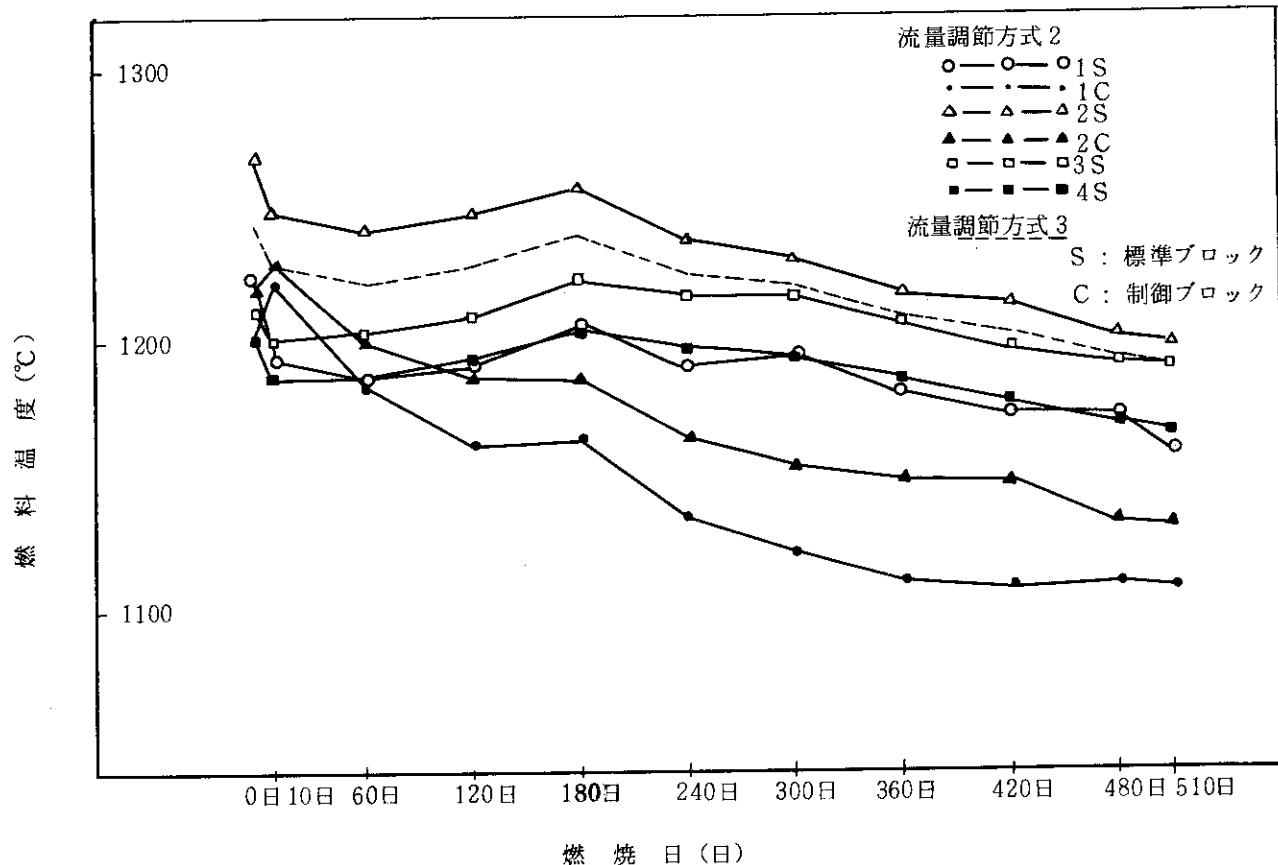


第4.2.5図 燃焼240日～510日までの軸方向出力分布の変化（領域Ⅱ、最高温チャンネル）

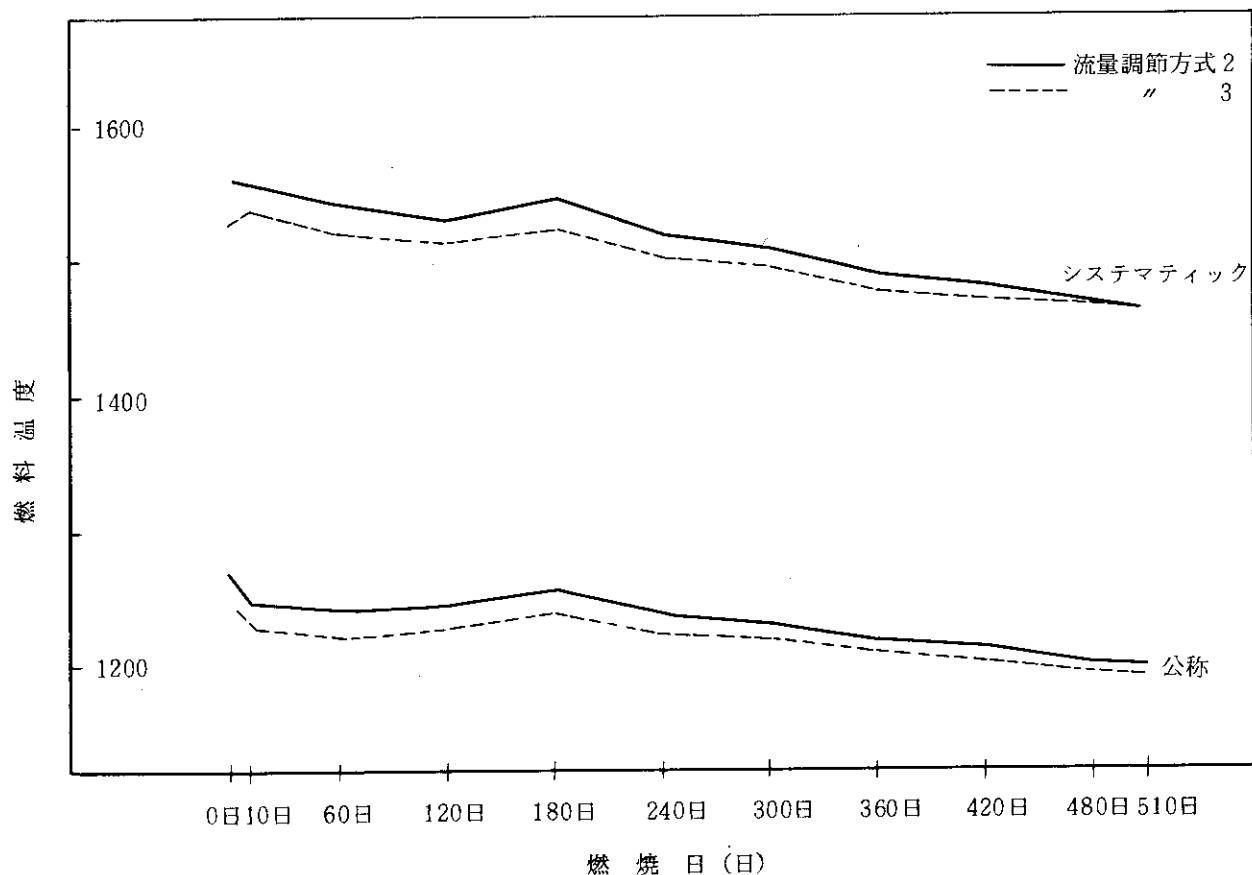
第4.2.6図 燃焼240日～510日までの燃料コントラクト外面温度軸方向分布の変化（流量割合90%，流量調節方式2，領域Ⅱ、最高温チャンネル）



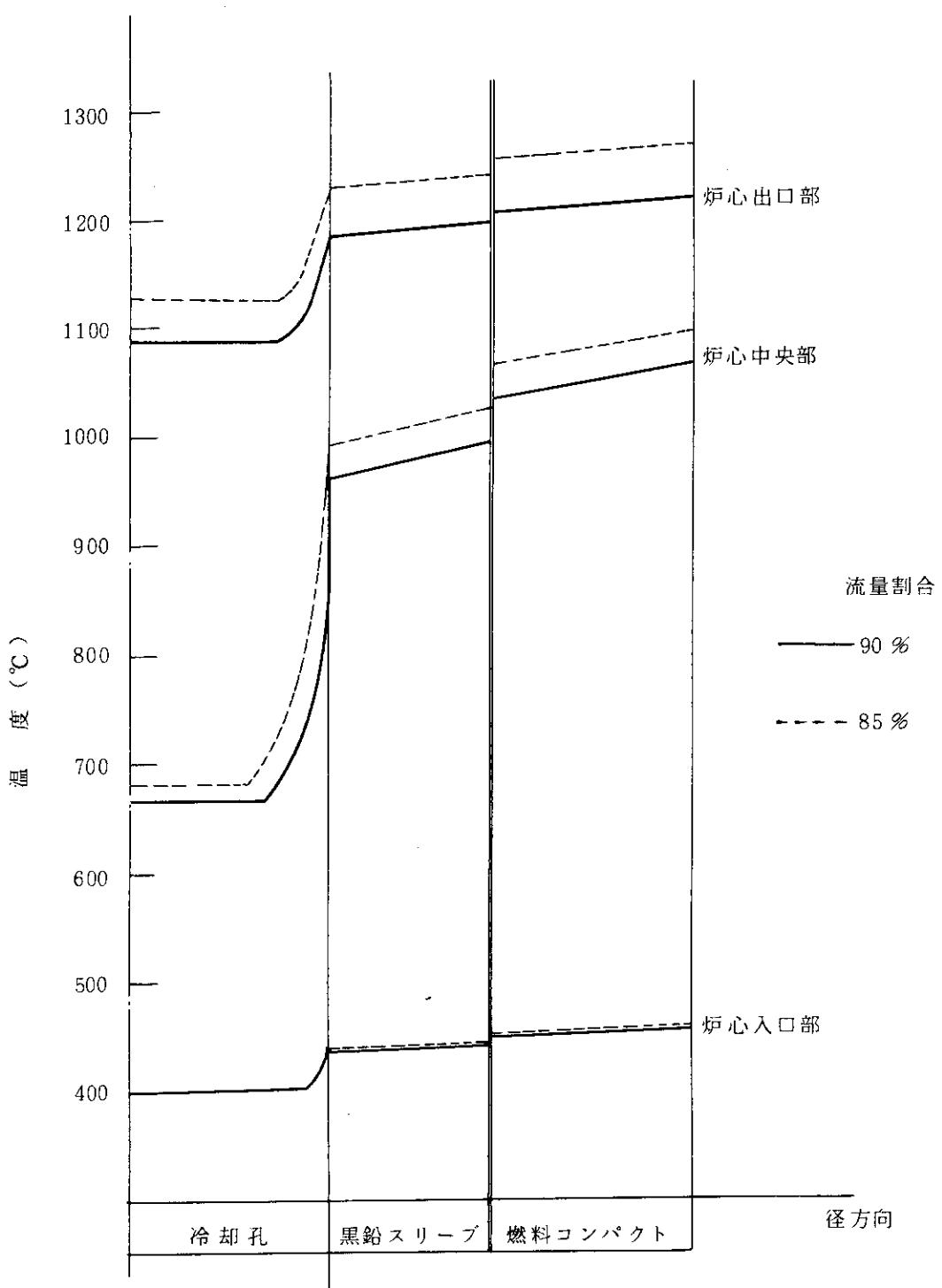
第4.2.7図 炉心径方向公称燃料最高温度分布 (90%流量割合, 流量調節方式2)



第4.2.8図 燃焼による各チャンネルの公称燃料最高温度の変化
(流量割合 85 %)



第4.2.9図 燃焼による燃料最高温度の変化 (流量割合 85 %)



第4.2.10図 流量割合によるチャンネル径方向温度分布の比較

初期炉心状態
 流量調節方式 2
 領域 II, 最高温チャンネル

4.3 安全特性

原子炉が臨界状態にあるとき、破損の起ったスタンダードパイプ内の制御棒が炉心外に飛び出し、急激な反応度の印加を生じる、いわゆる制御棒飛び出し事故について、初期の原子炉出力の変動、燃料温度の変化、および炉停止後の減圧状態の長時間に至る炉心温度の変化について解析した。

4.3.1 初期の原子炉出力変動と燃料温度変化

(1) 解析方法

制御棒飛び出し事故の初期の原子炉出力変動および燃料温度変化は1点近似炉心動特性解析コードBLOOSTにより解析する。すなわち、冷却材流路、黒鉛スリーブ、燃料コンパクトおよび黒鉛ブロックで構成される燃料チャンネル1本分についての2次元熱伝達計算と、これにもとづく反応度フィードバック量計算より成る炉心動特性解析を行う。この時、燃料チャンネル内の出力分布は事故前の形状が保たれるものとする。冷却材の圧力、流量の変化は時間の関数として与える。

(2) 解析条件

原子炉出力は定格出力(50 MWt)および30%出力(15 MWt)について行う。燃料チャンネル内出力分布はそれぞれの出力での定常運転状態のものを用いる。

制御棒は0.3秒間で炉心外部に飛出すものとし、この間に印加される反応度はパラメトリックに与える。原子炉スクラム信号は定格出力の108.5%で発信するとし、これより制御棒挿入開始までの遅れ時間はパラメトリックに考える。制御棒挿入完了に要する時間は5秒とし、その時挿入される負の反応度はパラメトリックにあつかう。

冷却材の圧力、流量は10秒間で1/40となる指数関数で表し、10秒以降はこの値が維持されるものとする。

なお、前述の3つのパラメータは、印加反応度: $0.0131 \Delta k_{eff}$ (定格出力)/ $0.0125 \Delta k_{eff}$ (30%出力)、遅れ時間: 10秒、挿入反応度: $0.11 \Delta k_{eff}$ がそれぞれ設計値として得られており、これを参考ケースとした。

(3) 解析結果

(a) 印加反応度の大きさによる違い

定格出力時において、印加反応度をパラメータとした場合の出力および被覆燃料粒子平均温度の時間変化を、第4.3.1図、第4.3.2図にそれぞれ示した。反応度印加によって原子炉出力は急激に上昇するが、印加反応度が大きい程、その立ち上がりは急激で、又、最高出力も大きくなる。最高出力に達した後、燃料温度上昇による負の反応度効果で出力は下降し、約10秒後、スクラムにより急減する。被覆燃料粒子平均温度も同様に印加反応度が大きい程、温度上昇は急激で、最大値も高くなる。なお、軸方向温度分布を見ると、最高温度は第4段目ブロックに生じている。これは、炉心初期状態の出力分布では、第4段目ブロックでの出力密度が最も高くなっている。そのため、出力分布形状は変わらないと仮定した計算の為である。それ故、燃料コンパクト最高温度変化として、第4段目ブロックの燃料コンパクト温度変化を、印加反応度の相違について、第4.3.3図に示した。

(b) スクラム遅れ時間による違い

定格出力時において、スクラム遅れ時間をパラメータとした場合の出力の時間変化を第4.3.4図に示した。スクラムの時間遅れが無いとした場合でも、出力は約0.4秒後に145MWtまで達する。スクラム時間遅れを、5秒、10秒、20秒、30秒とした場合、最高出力には影響はないが、燃料温度の変化の様子は若干異なる。第4段目ブロックの燃料コンパクト最高温度変化を第4.3.5図に示した。最高温度はほぼ同じであるが、スクラム遅れ時間の相違により、300秒以降の平衡値における温度が異ってくる。スクラムを行わない場合約1740°Cで、スクラム遅れ10秒では約1390°Cである。

(c) スクラムによる挿入反応度の大きさによる違い

参照ケースとしてのスクラム遅れ時間10秒を条件とした解析では、最高出力、燃料温度等にスクラム挿入反応度の大きさの違いは影響を持たなかった。

(d) 30%出力時における結果

30%出力時において、印加反応度をパラメータとした場合の出力、被覆燃料粒子平均温度の時間変化を、第4.3.6図、第4.3.7図にそれぞれ示した。反応度印加によって原子炉出力は急激に立上り、定格出力時と同様に、印加反応度が大きい程、最高出力、被覆燃料粒子温度も高くなる。しかし、定格出力時と比較すると、その立上りは若干緩やかであり、同じ印加反応度であれば、最高出力値、被覆燃料粒子平均温度の最大値とも低くなる。

印加反応度の相違による最高出力および被覆燃料粒子平均温度の最大値について、定格出力時と30%出力時における比較を、第4.3.8図、第4.3.9図にそれぞれ示した。30%出力時の方が、印加反応度の最高出力値に対する感度の大きいことがわかる。すなわち、30%出力時の炉心温度レベルは、100%出力時に較べて平均で約150°C程度低くなっているため、その分燃料温度上昇による負の反応度効果が大きくなり、到達する最高出力は低く抑えられる。しかし、印加反応度が大きくなると反応度印加による「出力上昇」が急激になるため、それによる「燃料温度上昇」の時間遅れが大きくなる。従って温度反応度効果についても時間遅れが生じ、到達する最高出力の値は接近することになる。

4.3.2 事故後の長期間温度変化

(1) 解析方法

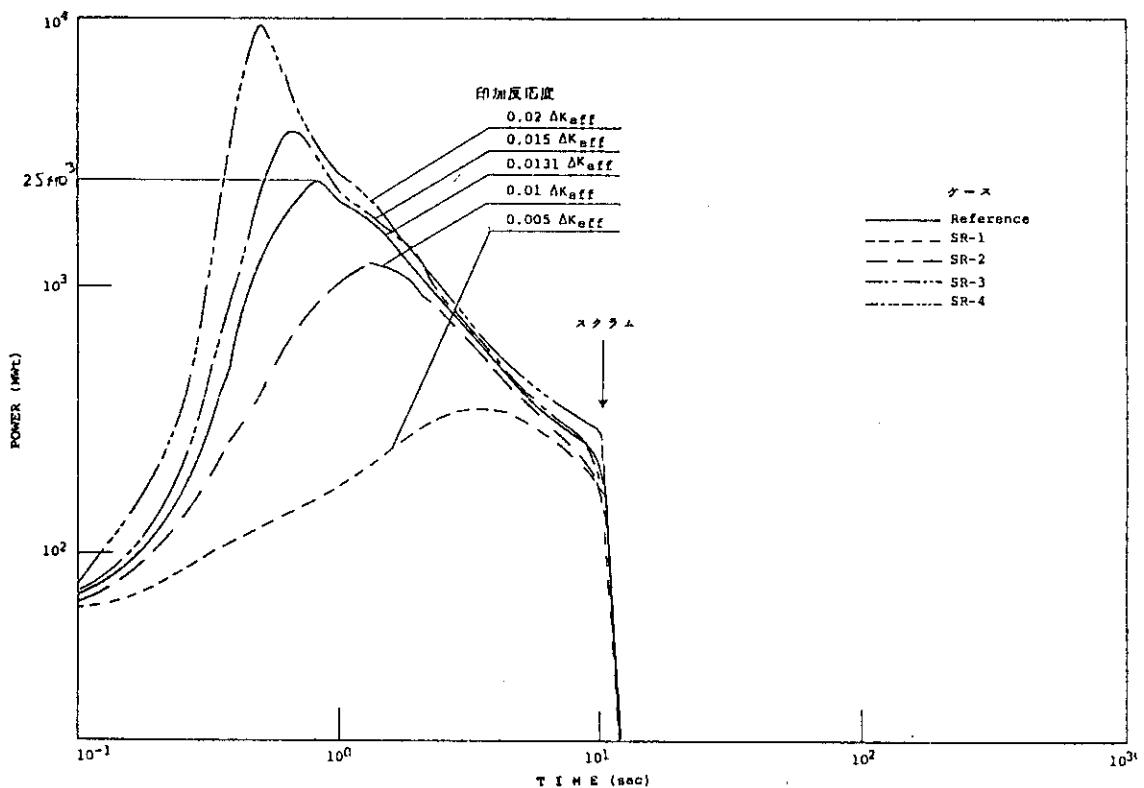
炉停止後の燃料温度の変化および原子炉全体の冷却の状態を長期間に亘って明らかにするため、中心部に燃料チャンネル1本をおき、非常用原子炉冷却系のシュラウドを含めた原子炉全体を対象とした第4.3.10図に示すモデルにより2次元熱伝達計算コードTAC-2Dを用いた解析を行う。なお、炉停止までの燃料チャンネルおよび炉心ブロックでの発熱量を前項の参照ケースの解析結果により与え、事故初期の温度変化も合わせて解析する。

(2) 解析条件

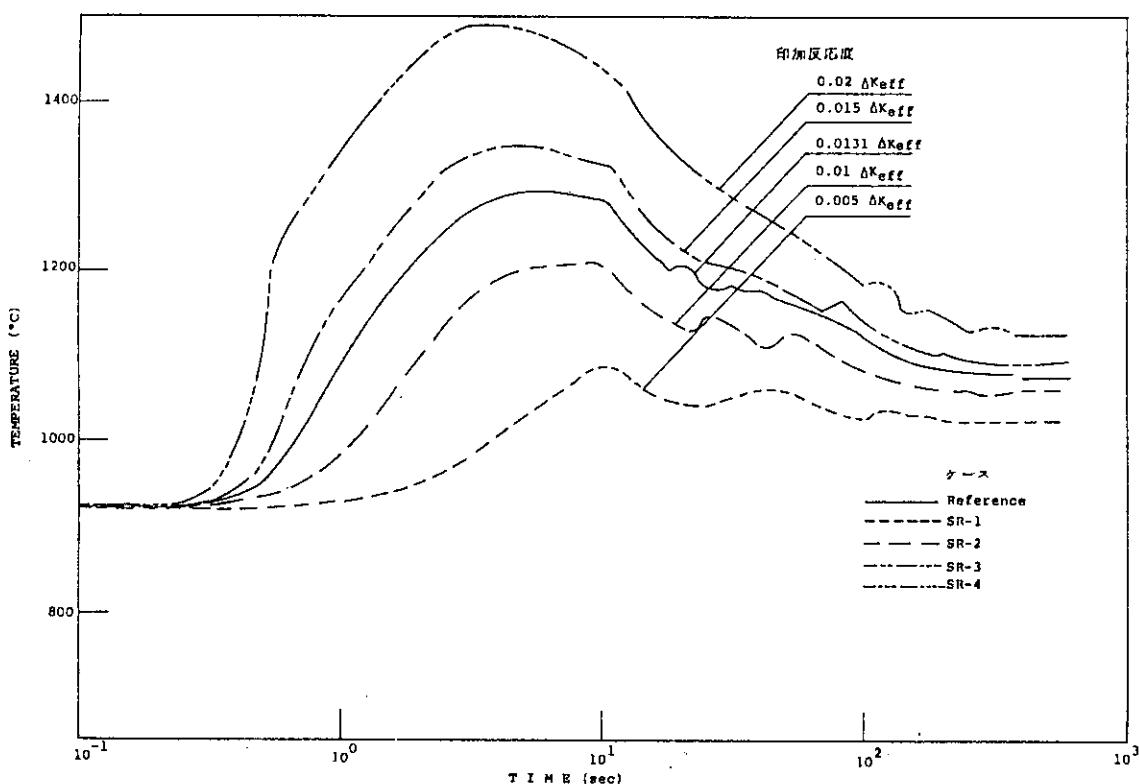
炉心部を直接に冷却する機能は事故発生と同時に喪失すると仮定し、非常用原子炉冷却系による除熱のみが有効であるとする。炉停止後の崩壊発熱はShureの式の120%値にアクチニド元素によるものを加えた値とする。

(3) 解析結果

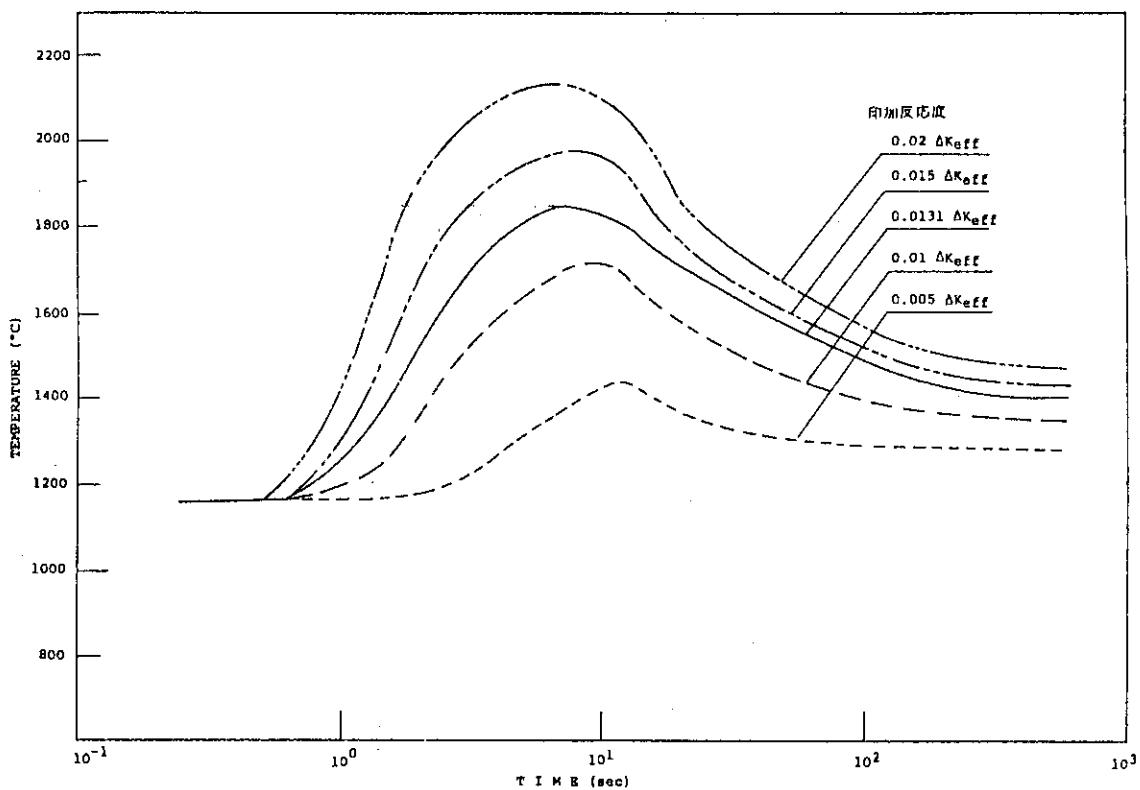
各時刻における原子炉内温度分布の結果から、1時間、10時間、400時間（本解析の終了時刻）のものをそれぞれ第4.3.11図、12図および13図に示す。



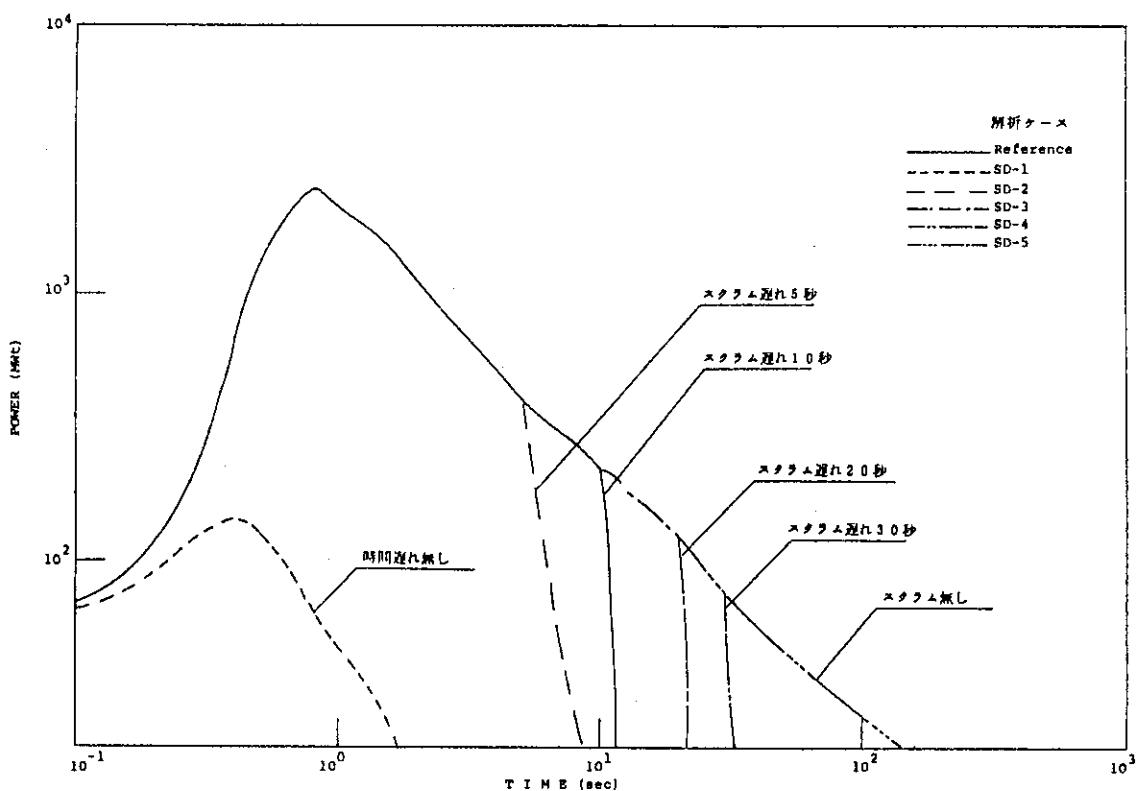
第 4.3.1 図 印加反応度の相違による原子炉出力変化（定格出力時）



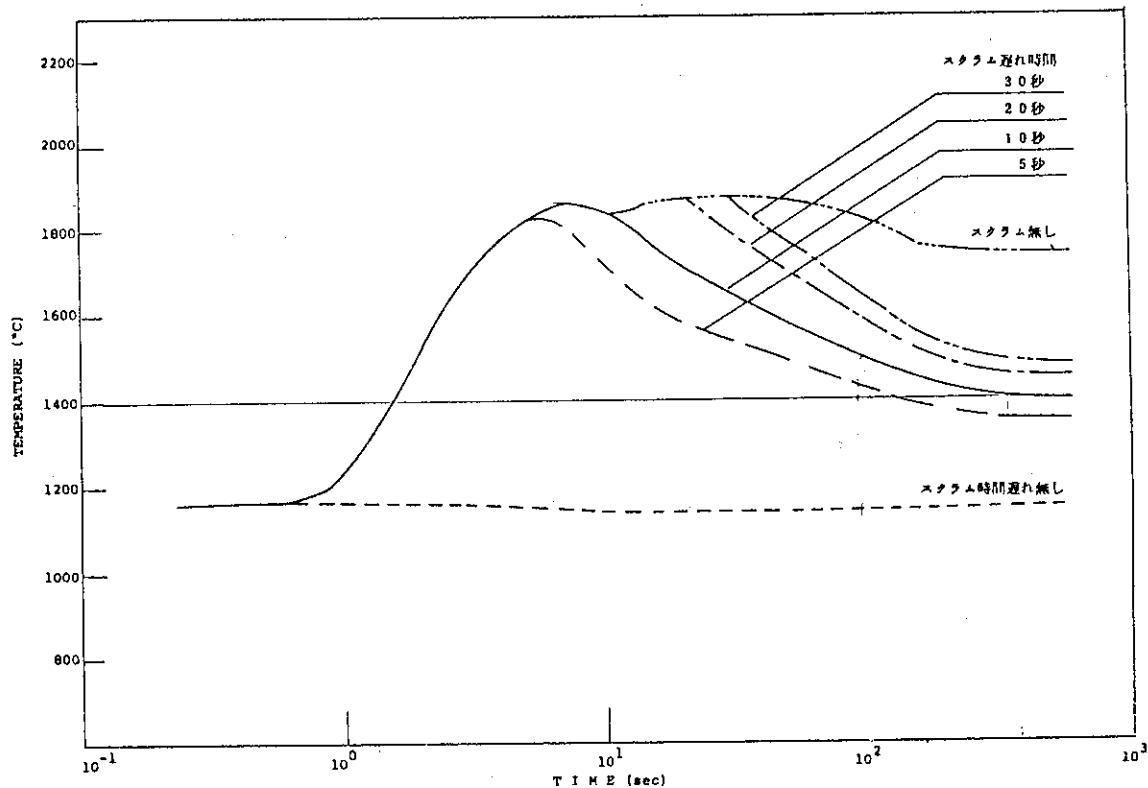
第 4.3.2 図 印加反応度の相違による被覆燃料粒子平均温度変化（定格出力時）



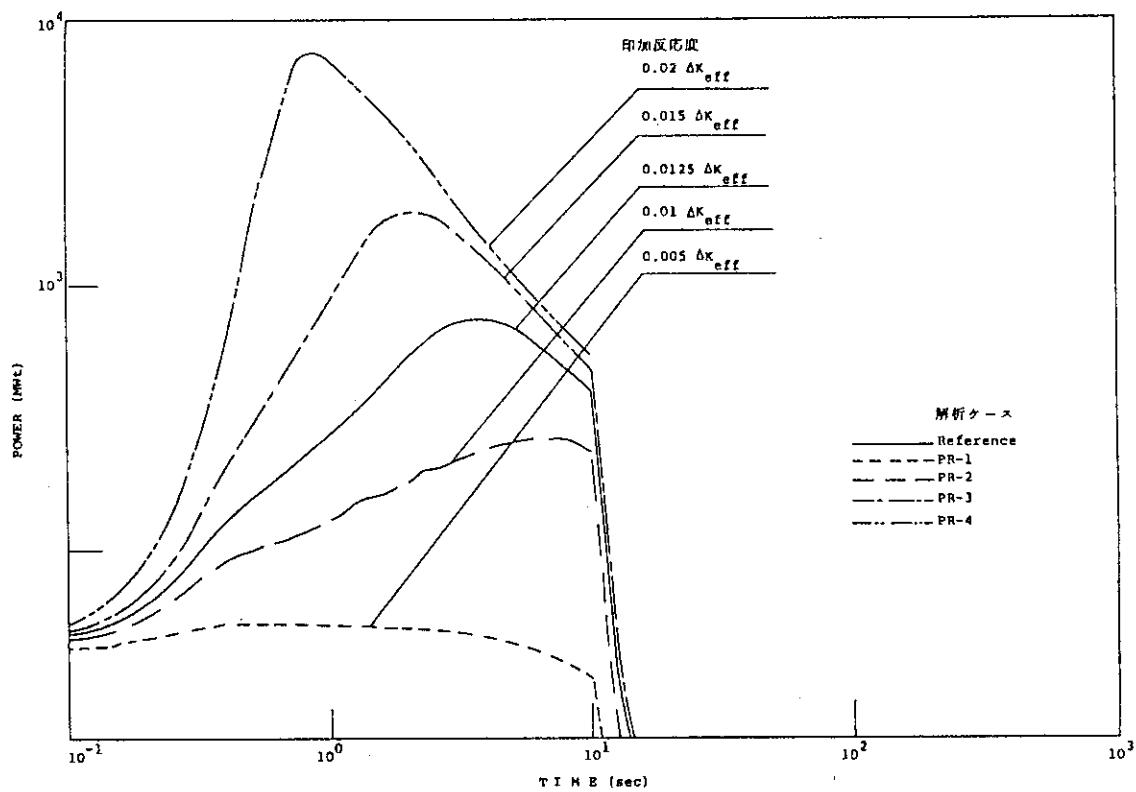
第 4.3.3 図 印加反応度の相違による燃料コンパクト最高温度変化（定格出力時）



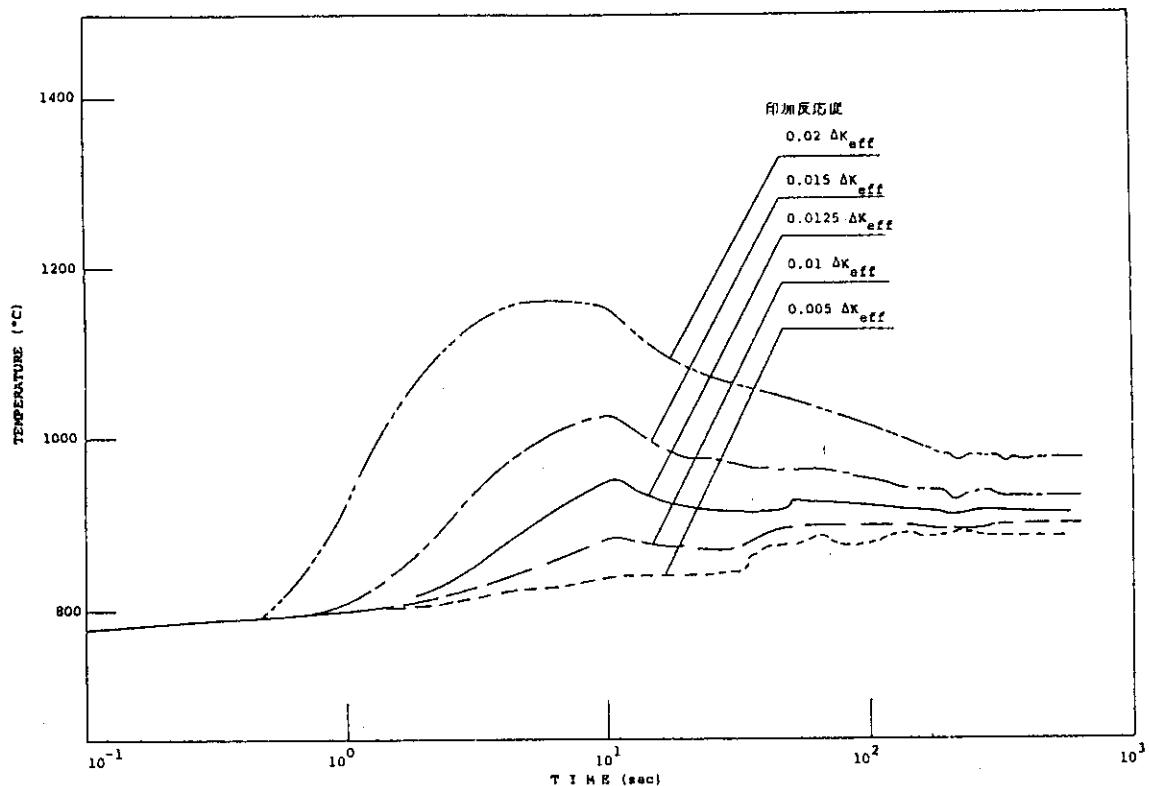
第 4.3.4 図 スクラム遅れの相違による原子炉出力変化（定格出力時）



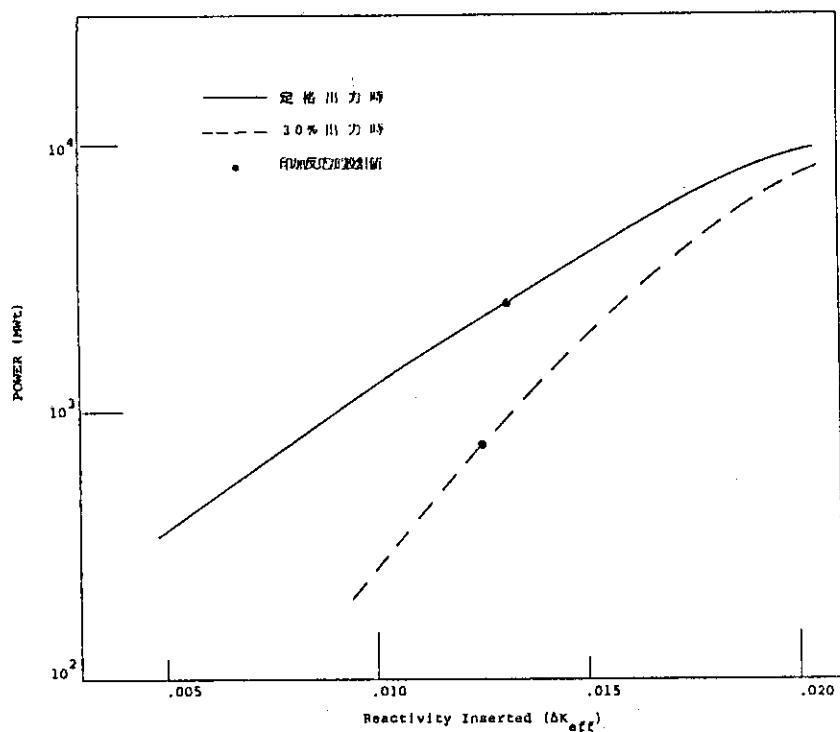
第4.3.5図 スクラム遅れの相違による燃料コンパクト最高温度変化（定格出力時）



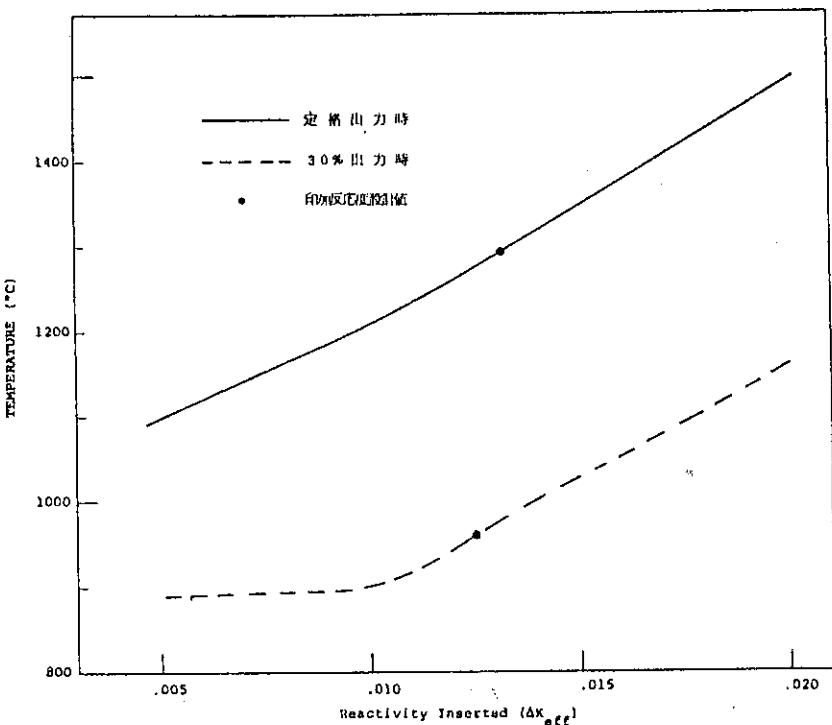
第4.3.6図 印加反応度の相違による原子炉出力変化（30%出力時）



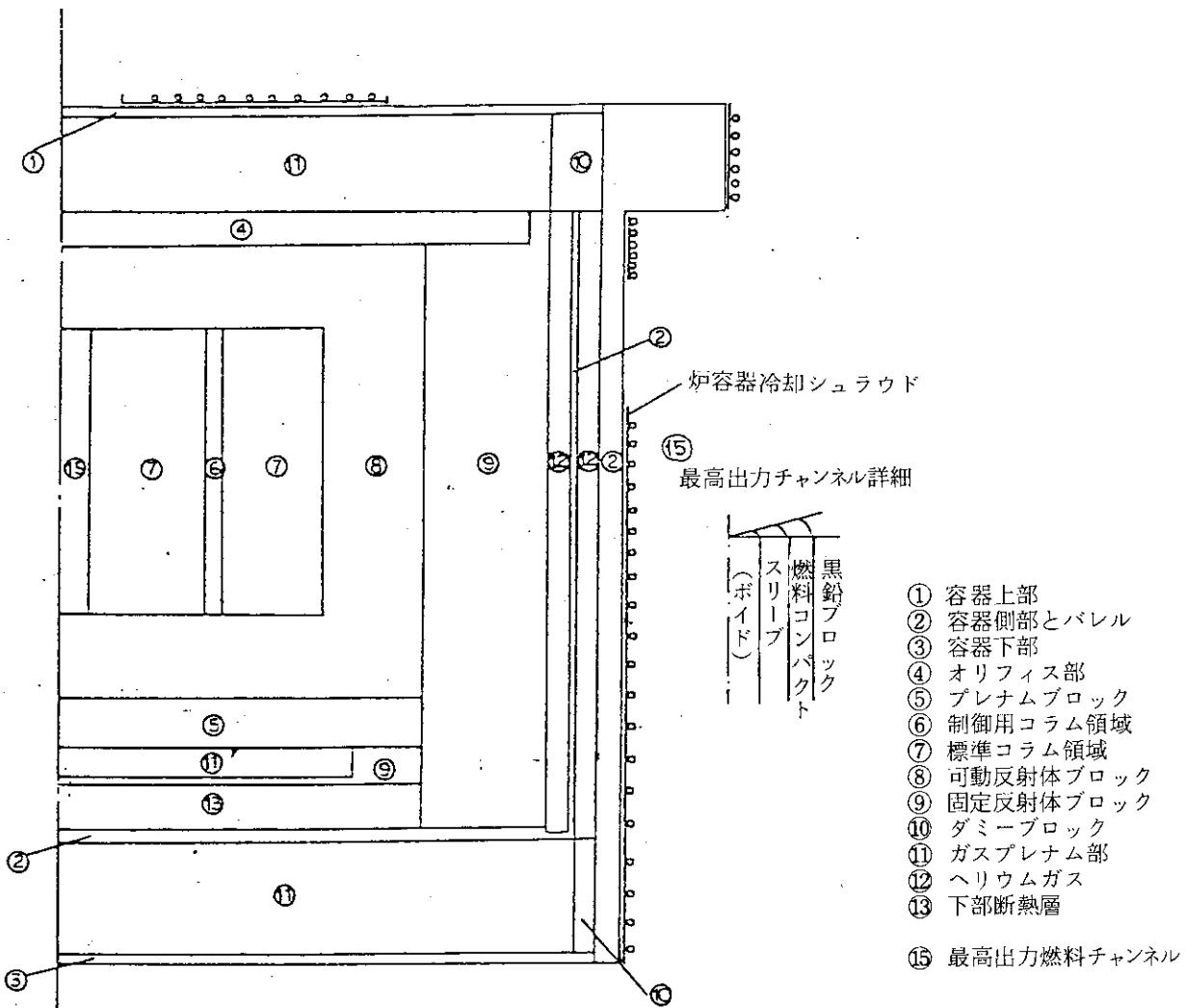
第 4.3.7 図 印加反応度の相違による被覆燃料粒子平均温度変化（30 %出力時）



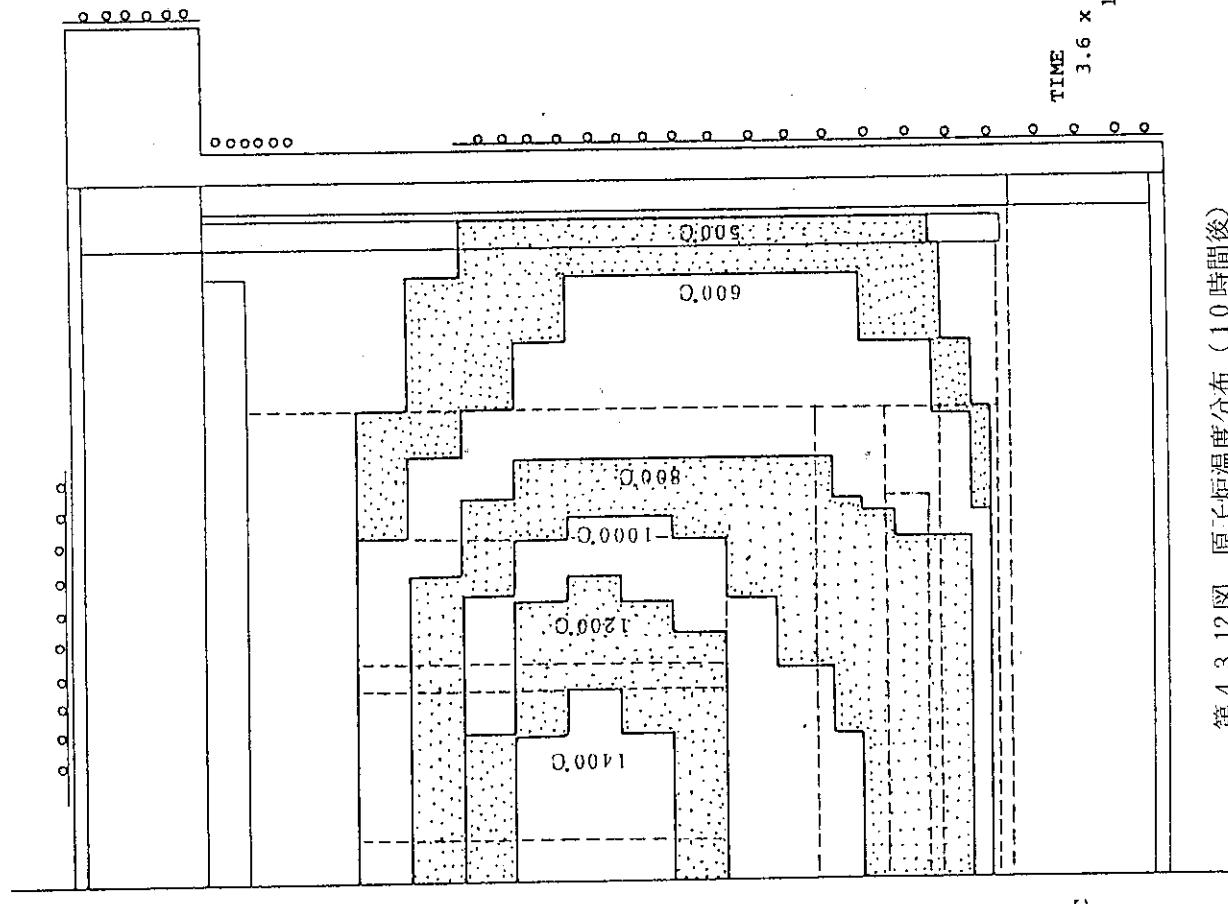
第 4.3.8 図 印加反応度の相違による最大出力値



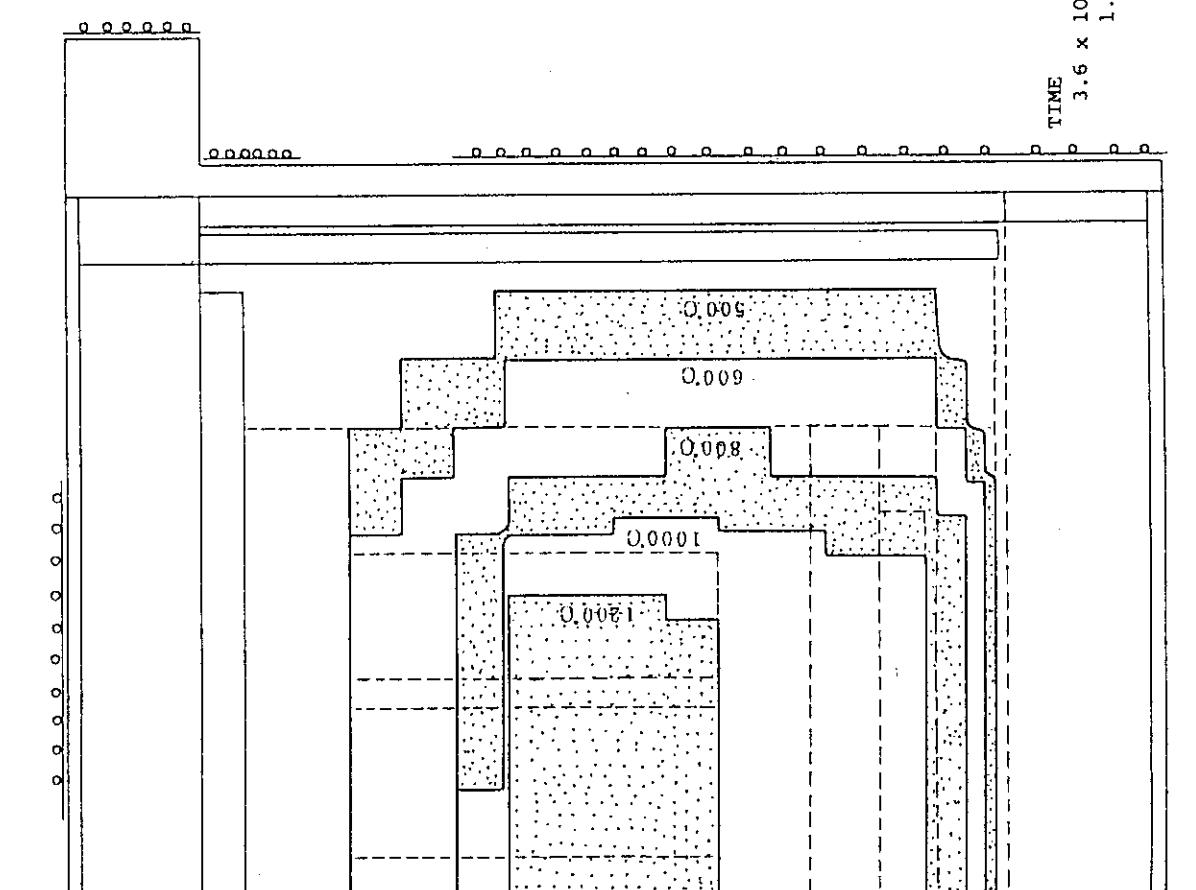
第4.3.9図 印加反応度の相違による被覆燃料粒子平均温度の最大値



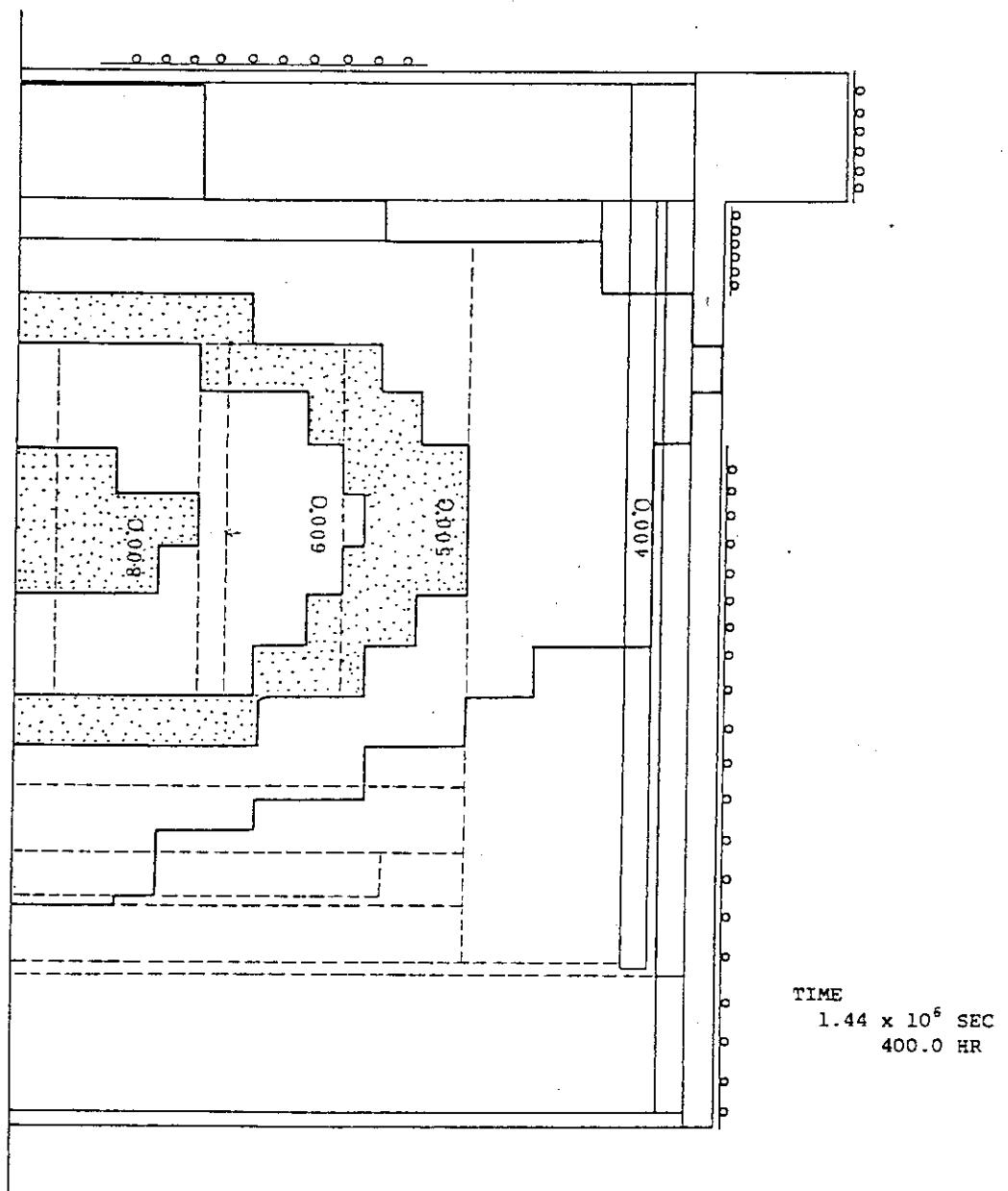
第4.3.10図 原子炉温度分布解析形状モデル



第4.3.12図 原子炉温度分布（10時間後）



第4.3.11図 原子炉温度分布（1時間後）



第 4.3.13 図 原子炉温度分布（400 時間後）

5. 結 論

バックアップ炉心としてセミピン型燃料体を用いる場合の炉心構成について検討し、濃縮度配分については径方向一様、軸方向3領域装荷とし、可燃性毒物については径方向・軸方向とも一様に装荷した炉心を代表炉心として選定した。

この炉心は、設計条件および設計基準のすべてを満足しているが、設計余裕という観点からみると以下のような特徴をもつ。

- a) 燃料の炉内滞在時間は余裕をもって設計条件を満足する。
- b) 冷温状態における反応度炉停止余裕および初期定格状態における制御棒最大反応度価値に関する設計余裕は必ずしも十分とはいえない。
- c) レイノルズ数および限界熱流束比に関する余裕は十分である。
- d) 燃料最高温度に関しては、有効流量割合が90%であればノミナル燃料温度およびシステムマチック燃料温度とも十分余裕がある。有効流量割合が85%になると、ノミナル燃料温度は十分余裕があるものの、システムマチック燃料温度は初期状態において、わずかではあるが基準値を越える。

炉停止余裕および制御棒最大反応度価値に関しては、可燃性毒物装荷法を改善することにより余裕を増すことが可能と考えられるが、これら反応度補償特性の設計余裕は、余剰反応度、補償反応度の解析精度とも密接に関連しているので、解析誤差の改善も含めて検討する必要がある。燃料最高温度に関しても、可燃性毒物装荷法および制御棒操作パターンの改善により、有効流量割合85%の場合でも設計基準を満足するようにすることは可能であると考えられる。

謝 辞

本設計研究を実施するにあたり、御支援、御協力いただいた青地哲男動力炉開発・安全性研究管理部長および多目的高温ガス実験炉設計室の関係者、ならびに日本原子力事業(株)および石川島播磨重工業(株)の関係者に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 青地哲男、他：多目的高温ガス実験炉第1次概念設計、JAERI-M 6845 (1977).
- (2) 青地哲男、他：多目的高温ガス実験炉の炉心参考設計Mark-III、JAERI-M 6895 (1976).
- (3) 安野武彦、他：多目的高温ガス実験炉・Mark-III炉心の検討、JAERI-M 8399 (1979).
- (4) 青地哲男、他：多目的高温ガス実験炉バックアップ炉心設計—炉心諸元の検討と選定、JAERI-M 8064 (1979).
- (5) 安野武彦、他：多目的高温ガス炉バックアップ炉心の特性検討（その1）—バックアップ燃料炉心の総合特性、JAERI-M 82-102 (1982).
- (6) 日本原子力研究所：多目的高温ガス炉研究開発の現状 (1979).

5. 結 論

バックアップ炉心としてセミピン型燃料体を用いる場合の炉心構成について検討し、濃縮度配分については径方向一様、軸方向3領域装荷とし、可燃性毒物については径方向・軸方向とも一様に装荷した炉心を代表炉心として選定した。

この炉心は、設計条件および設計基準のすべてを満足しているが、設計余裕という観点からみると以下のような特徴をもつ。

- a) 燃料の炉内滞在時間は余裕をもって設計条件を満足する。
- b) 冷温状態における反応度炉停止余裕および初期定格状態における制御棒最大反応度価値に関する設計余裕は必ずしも十分とはいえない。
- c) レイノルズ数および限界熱流束比に関する余裕は十分である。
- d) 燃料最高温度に関しては、有効流量割合が90%であればノミナル燃料温度およびシステムチック燃料温度とも十分余裕がある。有効流量割合が85%になると、ノミナル燃料温度は十分余裕があるものの、システムチック燃料温度は初期状態において、わずかではあるが基準値を越える。

炉停止余裕および制御棒最大反応度価値に関しては、可燃性毒物装荷法を改善することにより余裕を増すことが可能と考えられるが、これら反応度補償特性の設計余裕は、余剰反応度、補償反応度の解析精度とも密接に関連しているので、解析誤差の改善も含めて検討する必要がある。燃料最高温度に関しても、可燃性毒物装荷法および制御棒操作パターンの改善により、有効流量割合85%の場合でも設計基準を満足するようにすることは可能であると考えられる。

謝 辞

本設計研究を実施するにあたり、御支援、御協力いただいた青地哲男動力炉開発・安全性研究管理部長および多目的高温ガス実験炉設計室の関係者、ならびに日本原子力事業(株)および石川島播磨重工業(株)の関係者に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 青地哲男、他：多目的高温ガス実験炉第1次概念設計、JAERI-M 6845 (1977).
- (2) 青地哲男、他：多目的高温ガス実験炉の炉心参考設計Mark-III、JAERI-M 6895 (1976).
- (3) 安野武彦、他：多目的高温ガス実験炉・Mark-III炉心の検討、JAERI-M 8399 (1979).
- (4) 青地哲男、他：多目的高温ガス実験炉バックアップ炉心設計—炉心諸元の検討と選定、JAERI-M 8064 (1979).
- (5) 安野武彦、他：多目的高温ガス炉バックアップ炉心の特性検討（その1）—バックアップ燃料炉心の総合特性、JAERI-M 82-102 (1982).
- (6) 日本原子力研究所：多目的高温ガス炉研究開発の現状 (1979).

5. 結 論

バックアップ炉心としてセミピン型燃料体を用いる場合の炉心構成について検討し、濃縮度配分については径方向一様、軸方向3領域装荷とし、可燃性毒物については径方向・軸方向とも一様に装荷した炉心を代表炉心として選定した。

この炉心は、設計条件および設計基準のすべてを満足しているが、設計余裕という観点からみると以下のような特徴をもつ。

- a) 燃料の炉内滞在時間は余裕をもって設計条件を満足する。
- b) 冷温状態における反応度炉停止余裕および初期定格状態における制御棒最大反応度価値に関する設計余裕は必ずしも十分とはいえない。
- c) レイノルズ数および限界熱流束比に関する余裕は十分である。
- d) 燃料最高温度に関しては、有効流量割合が90%であればノミナル燃料温度およびシステムマチック燃料温度とも十分余裕がある。有効流量割合が85%になると、ノミナル燃料温度は十分余裕があるものの、システムマチック燃料温度は初期状態において、わずかではあるが基準値を越える。

炉停止余裕および制御棒最大反応度価値に関しては、可燃性毒物装荷法を改善することにより余裕を増すことが可能と考えられるが、これら反応度補償特性の設計余裕は、余剰反応度、補償反応度の解析精度とも密接に関連しているので、解析誤差の改善も含めて検討する必要がある。燃料最高温度に関しても、可燃性毒物装荷法および制御棒操作パターンの改善により、有効流量割合85%の場合でも設計基準を満足するようにすることは可能であると考えられる。

謝 辞

本設計研究を実施するにあたり、御支援、御協力いただいた青地哲男動力炉開発・安全性研究管理部長および多目的高温ガス実験炉設計室の関係者、ならびに日本原子力事業(株)および石川島播磨重工業(株)の関係者に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 青地哲男、他：多目的高温ガス実験炉第1次概念設計、JAERI-M 6845 (1977).
- (2) 青地哲男、他：多目的高温ガス実験炉の炉心参考設計Mark-III、JAERI-M 6895 (1976).
- (3) 安野武彦、他：多目的高温ガス実験炉・Mark-III炉心の検討、JAERI-M 8399 (1979).
- (4) 青地哲男、他：多目的高温ガス実験炉バックアップ炉心設計—炉心諸元の検討と選定、JAERI-M 8064 (1979).
- (5) 安野武彦、他：多目的高温ガス炉バックアップ炉心の特性検討（その1）—バックアップ燃料炉心の総合特性、JAERI-M 82-102 (1982).
- (6) 日本原子力研究所：多目的高温ガス炉研究開発の現状 (1979).