

JAERI-M
6 9 4 5

多目的高温ガス実験炉Mk-III炉心の燃料の特性

1977年3月

荒井長利・幾島毅・佐藤貞夫
鈴木勝男・谷雄太郎*・黒木修二**

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JAERI-M 6945

多目的高温ガス実験炉Mk-III炉心の燃料の特性

日本原子力研究所動力炉開発安全性研究管理部

荒井長利・幾島 毅・佐藤貞夫

鈴木勝男・谷雄太郎^{*}・黒木修二^{**}

(1976年1月27日受理)

多目的高温ガス実験炉第1次概念設計における参考炉心としてMk-III炉心が設計された。本書は、この炉心における燃料の健全性に係る主要な特性と核分裂生成物の放出特性の解析結果をまとめたものである。

解析した燃料特性は、被覆燃料粒子のアメーバ効果・被覆層応力・燃料棒および黒鉛ブロックの応力、燃料棒からの金属FP核種の放出などである。これらの解析によって、Mk-III炉心における燃料の安全性は基本的に確保され得るものと評価された。

今後はこれらの設計特性を燃料の試験研究によって確証していくことが必要である。

* 外来研究員 石川島播磨重工業株式会社

** 外来研究員 三菱重工業株式会社

JAERI-M 6945

Analysis of Fuel Performance in Core Mark-III of Experimental
Multi-purpose Very High Temperature Reactor

Taketoshi ARAI, Takeshi IKUSHIMA, Sadao SATO
Katsuo SUZUKI, Yutaro TANI*, Shuji KUROKI**

Division of Power Reactor Projects, JAERI
(Received January 27, 1977)

A reference core Mark-III has been designed for the first conceptual design of Experimental Multi-purpose Very High Temperature Reactor plant planned in JAERI. In this report are described comprehensive fuel performance analyses of the fuel integrity and fission product release in the core. Calculations, and comparisons with the design criteria have been made on chemical and mechanical behaviors including amoeba effect in the coated UO_2 particles, stresses in the coatings, fuel rods and graphite blocks, and release of metallic fission products. The results show that operational safety of the fuel could be achieved with the Mark-III core. Further studies by experiments and tests are necessary in the future to confirm the present analyses.

* Visiting Researcher, Ishikawajima Harima Heavy Industries CO., LTD.

** Visiting Researcher, Mitsubishi Atomic Power Industries, INC.

目 次

1. まえがき	1
1. 1 本解析の目標	1
1. 2 多目的高温ガス実験炉の概要	2
1. 3 Mk - III炉心の核熱基本特性データ	15
2. 定格運転時の燃料温度体積割合分布およびアメーバ効果の解析	35
2. 1 計算方法	35
2. 2 評価方法	35
2. 3 結果および検討	37
3. 異常時の燃料温度と燃料核移動の解析	47
3. 1 評価方法	47
3. 2 解析結果	48
3. 3 結論	48
4. 被覆燃料粒子の機械的健全性の評価	54
4. 1 評価方法	54
4. 2 結果と検討	54
5. 燃料棒の応力解析	58
5. 1 燃料コンパクトと燃料スリープの応力解析	58
5. 1. 1 評価方法	58
5. 1. 2 解析方法	58
5. 1. 3 結果と検討	59
5. 2 燃料スリープ底部の応力解析	72
5. 2. 1 解析位置の選定	72
5. 2. 2 応力解析と結果	72
6. 黒鉛ブロックの応力解析	78
6. 1 解析位置の選定	78
6. 2 応力解析と結果	78
7. 定格運転時の燃料棒からの金属FPの放出解析	88
7. 1 計算方法	88
7. 2 結果と検討	89
7. 3 結論	90
8. あとがき	98
謝辞	99

1. まえがき

1.1 本解析の目標

日本原子力研究所は、我が国における核熱エネルギーの多目的利用の道を開くため、その為の第一歩として多目的高温ガス実験炉研究開発を進めている。この多目的高温ガス実験炉プラントの設計は、数段階の改良、詳細化を経て、1975年10月に第1次概念設計を終了している。^{*}

第1次概念設計で採用した実験炉炉心概念がMk-III炉心と呼称されている。このMk-III炉心の基本概念（基本仕様）の選定は、1975年2月より6月までの5ヶ月間をかけ、国内メーカの研究員の協力を得て、当多目的炉設計研究室において実施された。^{**} Mk-III炉心に期待された主要な性能上の改良点は、

1) 核的反応度制御性の改善

2) 炉心伝熱流動の改善

であった。このため、本実験炉の主要基本条件：

1) 热出力 50 MW

2) 冷却材炉心出口温度 1000°C

3) 冷却材圧力 40 kg/cm²g

4) 燃料 UO₂ 被覆粒子 - 黒鉛分散型

5) 燃料体 ブロック型燃料体

6) 炉心部冷却材流れ 下向流

などは従来の炉心設計と同様とし、炉容器内全体構造との関係、核・熱・燃料・動特性上の制限条件および製造上の制約などの整合をはかり、最終的にMk-III炉心の諸元を選定した。

Mk-III炉心の基本的な諸元が定められた後、この炉心の種々の運転状態および燃焼過程に対する核・熱・燃料の総合特性の解析が実施された。この解析検討は、Mk-III炉心をベースとして、ある代表的な運転方法（制御棒操作、流量調節方式）で定格運転する場合、あるいは、部分負荷運転時、過渡過出力運転時の炉心の性能を詳細に把握し、核・熱・燃料設計上の指針や基準を満足しているかどうかをチェックすることを目的としている。

本報告書はこの総合特性解析のうちの燃料に関する部分を一括してまとめたものである。燃料の性能を評価するに当っては、第1.1表に示す燃料体設計の指針、基準を参考とした。

本解析において採り上げた検討項目は以下の通りである。

1) 被覆燃料粒子の健全性

炉心全体としての燃料粒子使用温度

* 青地他 「多目的高温ガス実験炉第1次概念設計」 JAERI-M 6845 1976年12月

** 青地他 「多目的高温ガス実験炉の炉心参考設計 Mark-III」 JAERI-M 6895 1976年12月

炉心全体としてのアーマー効果の発生

過渡的な過出力状態での燃料粒子温度

燃料粒子被覆層の機械的強度

2 燃料棒の健全性

燃料コンパクトの機械的強度

燃料スリープの機械的強度

燃料スリープ底部の機械的強度

3 黒鉛ブロックの健全性

標準型ブロックの機械的強度

制御型ブロックの機械的強度

4 冷却材中への FP 放出

炉心全体としての金属 FP の放出量

なお、Mk - III 炉心に関する全設計内容については別に報告されている。また、本書のような部門別、問題別の報告書が他に幾つか刊行される予定である。

1.2 多目的高温ガス実験炉の概要

本解析の前提条件である多目的高温ガス実験炉 Mk - III 炉心の概要を述べておく、以下に示す炉心の構造は、第 1 次概念設計においてその詳細が決められたものである。

原子炉本体縦断面図および横断面図を第 1.1 図、第 1.2 図に示す。また、6 角型燃料体と共に装填される燃料棒構造図を第 1.3 図、第 1.4 図に示す。さらに、本炉心の主要諸元を第 1.2 表に示す。

本原子炉は、熱出力 50 MW、冷却材出口温 1000°C の達成を目標とする、低濃縮ウラン使用の黒鉛減速ヘリウム冷却型の高温ガス炉である。原子炉本体はブロック状炉心を形成する燃料体、可動反射体、炉心下部構造、固定反射体、環状円筒部、反応度制御装置、流量調節装置、冷却材出口管および原子炉圧力容器から構成される。冷却材ヘリウムは、炉容器下部から導入され、環状円筒部を通って炉心上部に導びかれ、炉心部を下方に流れる。制御棒は炉容器上部のスタンドパイプ内に装備された駆動装置によって操作される。燃料体と可動反射体は、原子炉停止時に、燃料交換機によってスタンドパイプを通して交換される。炉心重量は、炉心下部の支持、断熱構造に伝えられ、さらに、鋼製の支持板、ダイヤグリッド、コアバレルスカートを介して、最終的に炉容器に伝えられる。

炉心は 73 個の燃料体カラムより成り、各カラムは高さ方向 7 段の燃料体より構成される。各燃料体カラムの上下部に各 2 段および炉心周辺部に 66 カラムの可動反射体が配置されている。炉心部は 7 カラムを単位として 19 領域に区分され、各領域毎に冷却材の流量調節と反応度制御棒の挿入引抜きとが行なわれる。

燃料体は平径 299mm、高さ 570mm の 6 角柱黒鉛ブロックの冷却チャンネルに燃料棒を挿入するいわゆるピン・イン・ブロック型である。燃料体には各流量調節領域の周辺 6 カラムに用いられる標準型燃料体と、2 本の制御棒と後備停止素子を挿入するための 3 つの孔を設けた制御棒孔付燃料体とがある。それぞれに 12 本、3 本の燃料棒が装填される。また、燃料体周辺部には余剰反応度の一部を補償するために可燃性毒物棒が埋め込まれている。燃料体の上下部 3 ケ所にダウエルとソケットがあり、これによって燃料体カラム上下方向の位置決めが行なわれる。

燃料棒は単管型であり、中空の燃料コンパクトを黒鉛製の底付き一体型スリーブに収納し、上部に端栓を設けたものである。燃料棒は、黒鉛ブロックの冷却チャンネル孔の下部に突出している支持部に保持されるとともに、上部端栓部の突起が黒鉛ブロックの縦溝にはめられており回転が防止されている。さらに、黒鉛スリーブの表面には、上下方向 3 ケ所、周方向 3 ケ所のリブが設けられ燃料棒の偏心を防止している。冷却材は、スリーブとブロック間の 2mm の間隙を下降し、燃料棒から除熱する。

燃料コンパクトは、被覆燃料粒子を黒鉛素地に分散させたもので、約 30% の粒子を含んでいる。燃料棒内の燃料コンパクトの実効長さは 529mm または 455mm である。被覆燃料粒子は直径 600 μ の UO₂ 核をパイロカーボン (PyC) と炭化硅素 (SiC) とで 4 重に被覆したものである。この詳細を第 1.3 表に示す。核燃料の濃縮度は 6.42 w/o である。燃料体カラム 7 段のうち上部より 6.6, 4.4, 4.2 % となっている。

Mk - III 炉心の全体構成からみて従来の炉心と大きく変更になった点は以下の通りである。

第 1 には、炉心内のレイノルズ数を可能な限り増加させるという目標から、燃料チャンネル数を減らし、かつ、炉心有効高さを高くすることになった。すなわち、燃料体カラム数は従来と同じ 73 カラムであるが、カラムの高さは 400mm (1 燃料体の高さは 57cm) となり、1 カラム当たりの燃料チャンネル数は 12 (標準型ブロック) および 3 (制御型ブロック) となった。従来の設計では燃料チャンネル数がそれぞれ 18, 9 であった。このことによって黒鉛ブロックの平径以外の寸法構造が大きく変更になった。

第 2 に、従来炉心からの懸案事項であった反応度停止余裕の改善のために制御棒を太くすることになり、制御型黒鉛ブロックの制御棒挿入孔径が、従来の 85mm から 104mm となった。

第 3 は、燃料粒子のアメーバ効果に対する設計上の対策を探る必要性から、粒子の緩衝層を 40 μ から 60 μ に増加させた。この変更と反応度停止余裕の改善との関係で幾つかの変更も派生した。すなわち、反応度停止余裕の改善のために炉心のウラン装荷量を増加する必要性から、燃料核直径を 500 μ から 600 μ に、燃料コンパクトの粒子充填率を 27.5 % から 30.5 % に、燃料コンパクトの肉厚を 7mm から 9mm に変更された。

第 4 に、以上のような変更によって炉心全体としてのバランスが構成されたが、燃料の炉内滞在日数が設計目標の下限値、全出力 610 日に迄減少した。これは、反応度制御面からの制約に

よって平均燃料濃縮度を 5 %に減少させる必要があったことに因る。この結果、燃料の最高燃焼度は 34000 MWD / T、最高高速中性子照射量は $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.18 \text{ Mev}$) となった。

以上述べて来た多目的高温ガス実験炉 Mk - III 炉心は、本実験炉炉心の詳細設計における骨格をなすものと考えられる。そもそも、本実験炉の現在迄の炉心設計は、我が国における現状の技術あるいは極く近い将来の技術予測の上に立って、早期の建設着手を可能とさせる技術をシステム的に組み立てることを基本としている。Mk - III 炉心はこのような意味での Pin-in-block 型燃料体を使用する炉心概念の到達点といえよう。

表 1.1 表 燃料体設計の指針、基準

項目	指針または基準	備考
(1) 被覆燃料粒子破損率	<p>(a) 照射によって発生する機械的破損は、無視し得る程度に小さいこと (プラント状態 I、および II)[*]</p> <p>(b) アメーバ破損粒子は全炉心粒子の 1 %以下とする (プラント状態 I および II)[*]</p>	<p>SiC 層の許容応力を 0 kg/cm² とする。</p> <p>燃料核移動距離が 30 μ 以上に達したものを破損とみなす。</p>
(2) 燃料コンパクトの応力	熱応力、照射応力に対する許容応力を以下の値とする (プラント状態 I および II) 引張応力 30 kg/cm ²	
(3) 黒鉛スリーブ、ブロックの応力	<p>1 次応力、2 次応力に対する許容応力を以下の値とする。 (プラント状態 I および II)[*]</p> <p>1 次応力 引張 35 kg/cm² 圧縮 165 kg/cm²</p> <p>2 次応力 引張 50 kg/cm² 圧縮 350 kg/cm²</p>	

* プラント状態 I 通常運転中に計画または考慮されている事象

プラント状態 II 通常運転としては計画されていない事象であるが、原子炉寿命期間中に比較的しばしば起るものと予想される事象

第1.2表 原子炉主要諸元

主 要 諸 元		
1. 一 般	原子炉型式	低濃縮ウラン黒鉛減速ヘリウム冷却型
	原子炉熱出力 MWt	50
	冷却材平均温度 (原子炉入口 / 原子炉出口) °C	395 / 1000
	冷却材圧力 (炉心出口) kg/cm ² G	40
	一次系冷却材流量 kg/hr	57318
2. 炉心構成	燃料体カラム数	73
	標準燃料体カラム数	66
	制御燃料体カラム数	7
	制御棒総数 (炉心 / 反射体)	38 (14 / 24)
	後備停止素子チャンネル数 (炉心 / 反射体)	19 (7 / 12)
	周辺可動反射体カラム数	66
	固定反射体カラム数	18
	燃料体積重段数	7
	上下可動反射体積重段数	各2
	炉心等価直径	2690
	炉心有効高さ	4000
	周辺反射体厚さ	110
	上下反射体厚さ	114
	燃料装荷方法 径方向	一様装荷
	軸方向 (w/o)	6, 6, 4, 4, 2, 2 (炉心上部より) 双子状, 炉内一様配置
	制御棒配置	7カラム単位領域別
	冷却材流量調節	停止時, 全炉心同時交換
	燃料取替方式	下降流
	冷却材流動方向	上部取替
	燃料取替位置	上部駆動
3. 燃料体	型 式	六角型黒鉛ブロック中空燃料棒插入型
	總 数	511
	標準燃料体	462
	制御棒孔付燃料体	49
	重 量 (燃料棒含む)	
	標準燃料体 kg	74.7
	制御棒孔付燃料体 kg	51.2

		主 要 諸 元
1) 黒鉛ブロック	形 式	六角柱
	材 質	SM1-24相当
	密 度	g / cm ³ 1.80
	寸法、平径×高さ	mm 299×570
	冷却孔数	
	標準燃料体	12
	制御棒孔付燃料体	3
	冷却孔径	mm 50
	制御素子挿入孔径	mm 104
	可燃性毒物孔径	mm 6
	ダウエル数 / ブロック	3
2) 黒鉛スリーブ	型 式	上部端栓付一体型円筒
	材 質	SM1-24相当
	密 度	g/cm ³ 1.80
	全長 (ダウエル燃料棒)	mm 55.0 (48.2)
	内 径	mm 36.3
	外 径	mm 46.
	スペーサリブ数	
	円周方向	3
	軸方向	3
3) 燃料コンパクト	型 式	オーバーコートプレス型円筒
	寸法、内径 / 外径 / 高さ	mm 18 / 36.0 / 36
	被覆粒子充填率	% 30.5
	重金属密度	g / cm ³ 0.68
	マトリックス密度	g / cm ³ 1.65
	製造時粒子破損率	<1×10 ⁻⁴
	スタック長さ	mm
	標準型燃料棒	5.29
	ダウエル燃料棒	4.55
4) 被覆燃料粒子	型 式	低濃縮ウラン四重被覆型
	燃料材質 (濃縮度 w/o)	二酸化ウラン
	被覆層材質	バイロカーボン
	燃料核直徑	μ 600

主 要 諸 元		
5) 可燃性毒物	被覆層厚さ μ 粒子直径 μ 真球度 d_{max}/d_{min} 露出ウラン率	160 920 ≤ 1.2 $\leq 5 \times 10^{-5}$
4. 可動反射体	形 式 材 質 寸 法 外径 / 長さ mm B ₄ C 粒子径 μ ボロン濃度 w/o 装荷本数	中実細棒を標準燃料体ブロックに封入 B ₄ C 粒子と黒鉛粉末混合焼結体 8 / 500 600 5.3 濃縮度 6, 4, 2 w/o 標準燃料体に対し それぞれ 3, 2, 1 本づつ
5. 流量調節	型 式 材 質 種 類 総 数 寸法, 平径×高さ mm	六角柱 SMI - 24 相当 標準燃料チャンネル用, 制御棒チャンネル用, 側面反射体領域用, 制御チャンネル用, その他 1018 299×570 (470)
6. 固体反射体	形 式 寸 法 mm 材 質	不規則形ブロック (最大形状) 約 100×1200 原子炉級黒鉛
7. 高温プレナム部	形狀, 寸法 材 質	六角ブロック, ポストーリート構造 平径 793.5×高さ 700 原子炉級黒鉛, 断熱材

主 要 諸 元			
8. 炉心支持板			
	個 数		1
	形 状		正六角形および不整形板配列
	全体寸法		(全体) 外径 4990 × 板厚 100
	材 質		2 1/4 Cr -1Mo 鋼 インコネル 600 (シールプレート)
	重 量 ton		1.6
9 ダイヤグリット			
	個 数		1
	形状, 寸法 mm		菱形格子 外径 4990 × 高さ 1000
	材 質		2 1/4 Cr -1Mo 鋼
	重 量 ton		2.9
10 コアパレル			
	個 数		1
	形状, 寸法 mm		自立式円筒構造 (胴率) 外径 5300 × 高さ 9385 × 肉厚 36
	材 質		2 1/4 Cr -1Mo 鋼
	重 量 ton		5.8
11 炉心拘束機構			
	型式, 寸法 mm		リンク機構, リンク径 45
	材 質		ハステロイ-X 2 1/4 Cr -1Mo 鋼
12 遮蔽体			
	上部遮蔽体 形状		6角柱ブロック (SUS 304)
	寸法 mm		対面距離 299 × しゃべい厚さ 100
	遮蔽体材質		ホウ素入り黒鉛
	側部遮蔽体 形状		台形柱 (2 1/4 Cr -1Mo 鋼)
	寸法 mm		上辺 845 × 下辺 880 × しゃべい厚さ 50
	遮蔽体材質		ホウ素入り黒鉛
13 ガス出口管			
	個 数		2
	形 状		断熱材内挿型
	材 質		2 1/4 Cr -1Mo 鋼 (管) ハイテロイ-X (ライナー)

		主 要 諸 元	
14 反応度制御系			
1) 制御棒			
	型 式	軸方向 14分割2重円筒ペント型	
	基 数	38本(19対)	
	吸收体材質	$B_{4}C$ と黒鉛粉末混合焼結体 (ボロン濃度30w/o)	
	吸收体寸法 mm	内径55×外径85×有効長4500	
	保護管(内厚)	ハステロイ-X(2mm)	
2) 後備停止系			
	型 式	ボロンカーバイト球落下挿入	
	基 数	19基	
	吸收体材質	$B_{4}C$ と黒鉛粉末混合焼結体 (ボロン濃度30w/o)	
	吸收体寸法 mm	外径10	
3) 可燃性毒物	4.5) 参照		
15 炉容器			
	型 式	堅置円筒型	
	基 数	1	
	主要寸法 mm		
	内 径	5510	
	内 高	15510	
	肉 厚	127(胴部)	
	主要材料	$A387Gr22(2\frac{1}{4}Cr-1Mo鋼)$	
	容器重量 ton	約450	
16 炉心主要特性			
	出力密度(平均/最高) w/cm ³	2.2 / 5.9	
	中性子束(平均/最高) n/cm ² s		
	熱中性子束($E \leq 2.38\text{ ev}$)	$4.3 \times 10^{13} / 10.6 \times 10^{13}$	
	速中性子束($E \geq 2.38\text{ Mev}$)	$3.6 \times 10^{13} / 9.4 \times 10^{13}$	
	冷却材領域出口温度(初期) °C (最低/平均/最高)	1039 / 1039 / 1039	
	チャンネル出口レイノズル数(初期) (最低/平均/最高)	3580 / 5328 / 7790	
	燃料最高温度(初期) °C	1329	
	燃料装荷重	流量調節 方式IIに よる	
	U^{235} kg	70	
	U^{238} kg	1670	
	燃料炉内滞在時間 年	2.1	

主 要 諸 元			
平均燃焼度	MWD/T	21000 (6% E·U)	22000 (4% E·U)
最高積分照射量	n/cm ²	5900 (2% E·U)	1.0×10^{21} (E>0.18Mev)

第1.3表 被覆燃料粒子の諸元

(1) 燃料核

材質 二酸化ウラン
 直径 $600 \pm 60 \mu$
 密度 $1.041 \pm 0.22 \text{ g/cc}$ (95±2% T,D)
 濃縮度 2, 4, 6 w/o ^{235}U
 O/U比 $2.00 \begin{matrix} + 0.01 \\ - 0.00 \end{matrix}$
 真球度 $d_{\max} \times d_{\min} \leq 1.2$

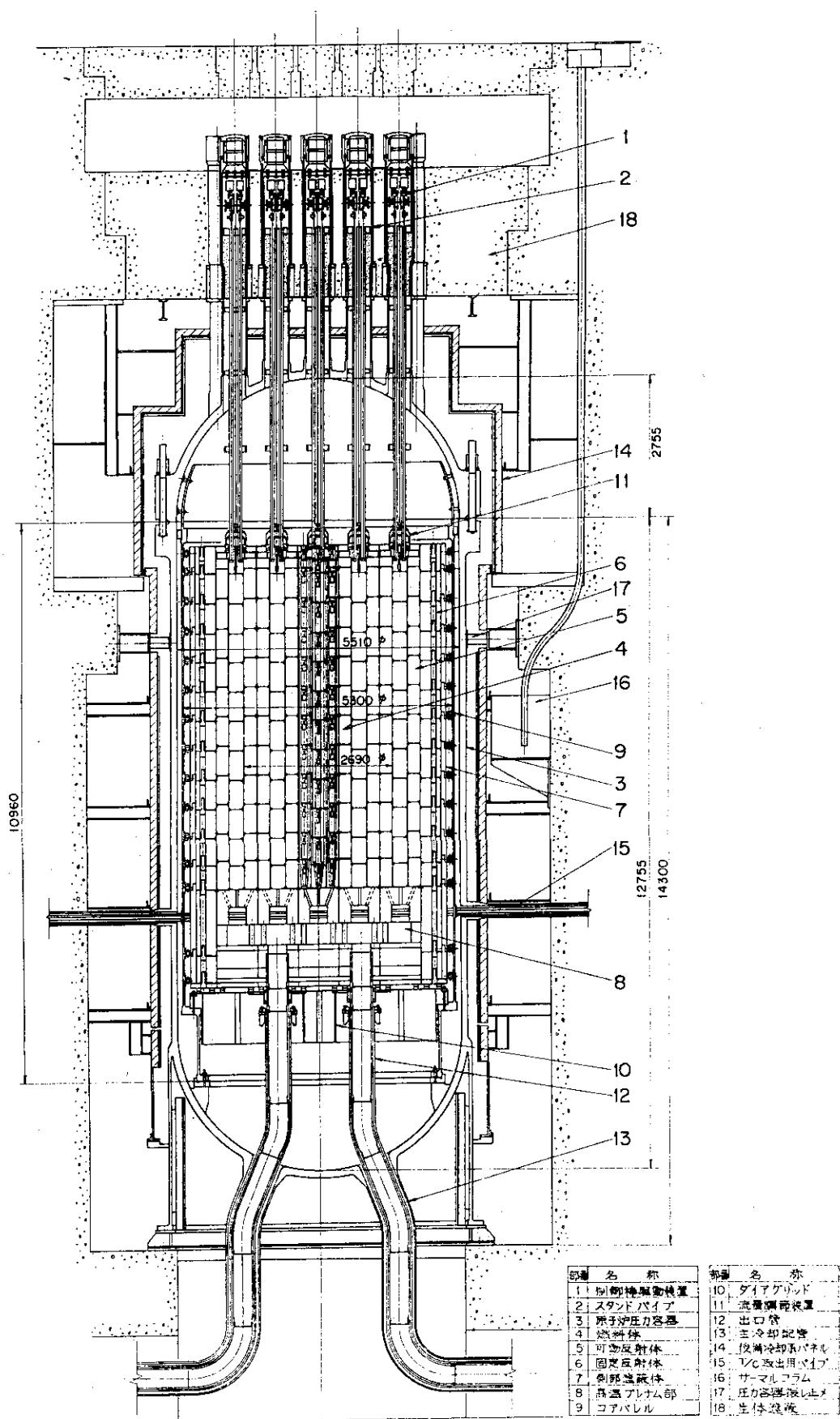
(2) 被覆層

被覆型式 四重被覆粒子

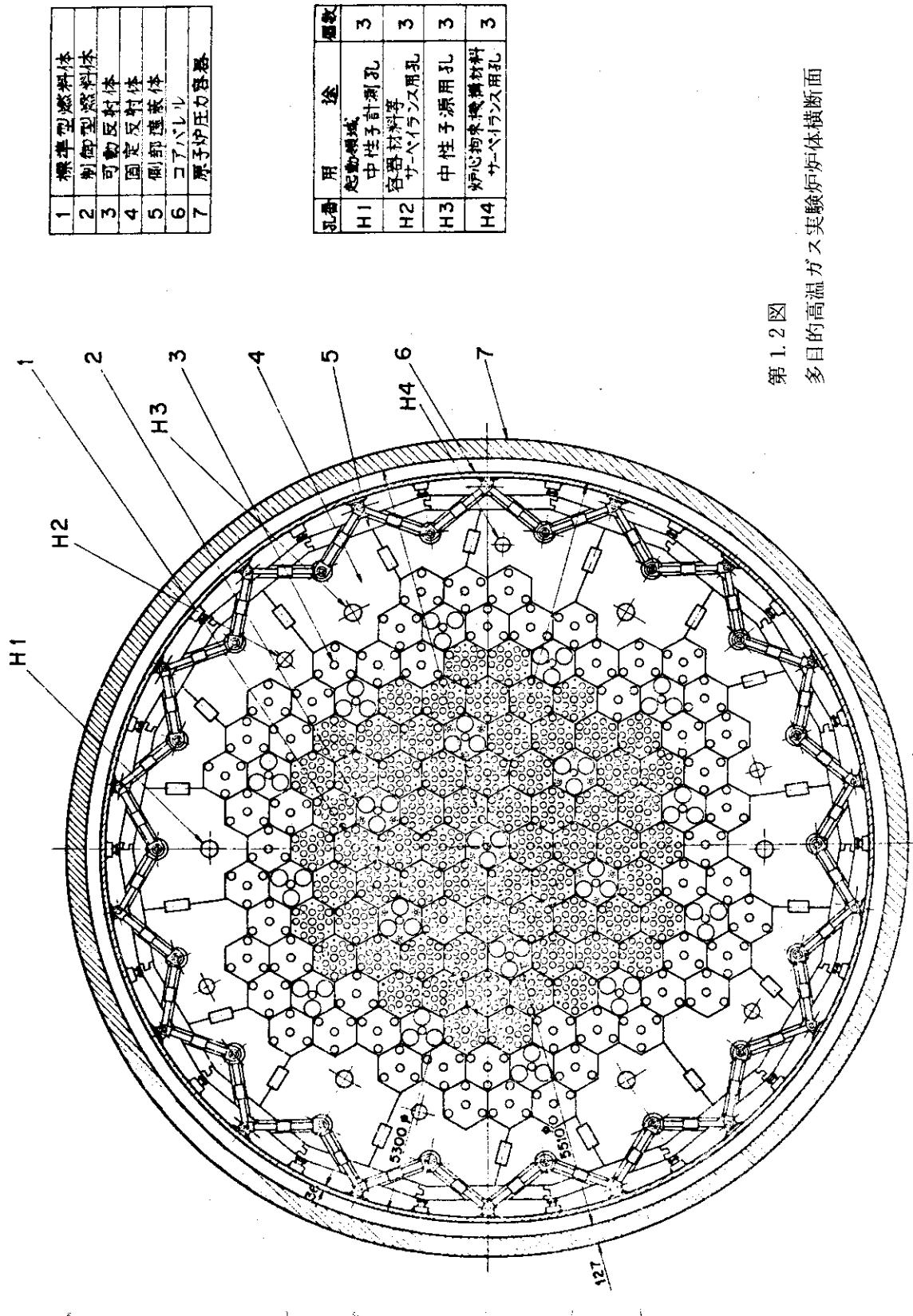
	第1層	第2層	第3層	第4層
材質	低密度熱分解炭素	高密度熱分解炭素	炭化素	高密度分解炭素
厚さ(μ)	60 ± 5	30 ± 5	25 ± 5	45 ± 5
密度(g/cm ³)	1.10 ± 0.1	1.80 ± 0.05	3.20以上	1.80 ± 0.05
異方性因子		< 1.1		< 1.1

(3) 被覆粒子

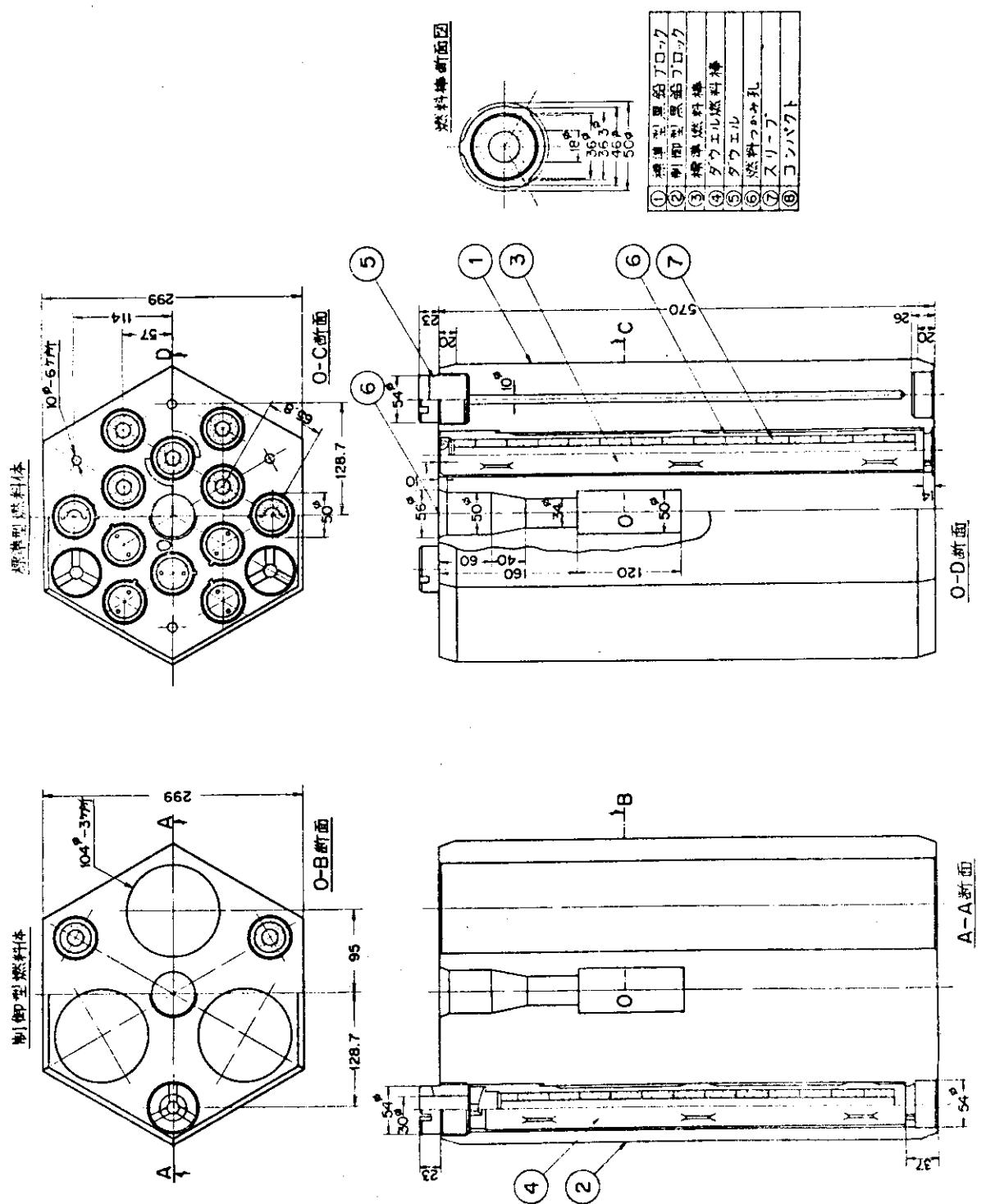
直径 $920 \pm 90 \mu$
 真球度 $d_{\max} / d_{\min} \leq 1.2$
 露出ウラン率 5×10^{-5} 以下



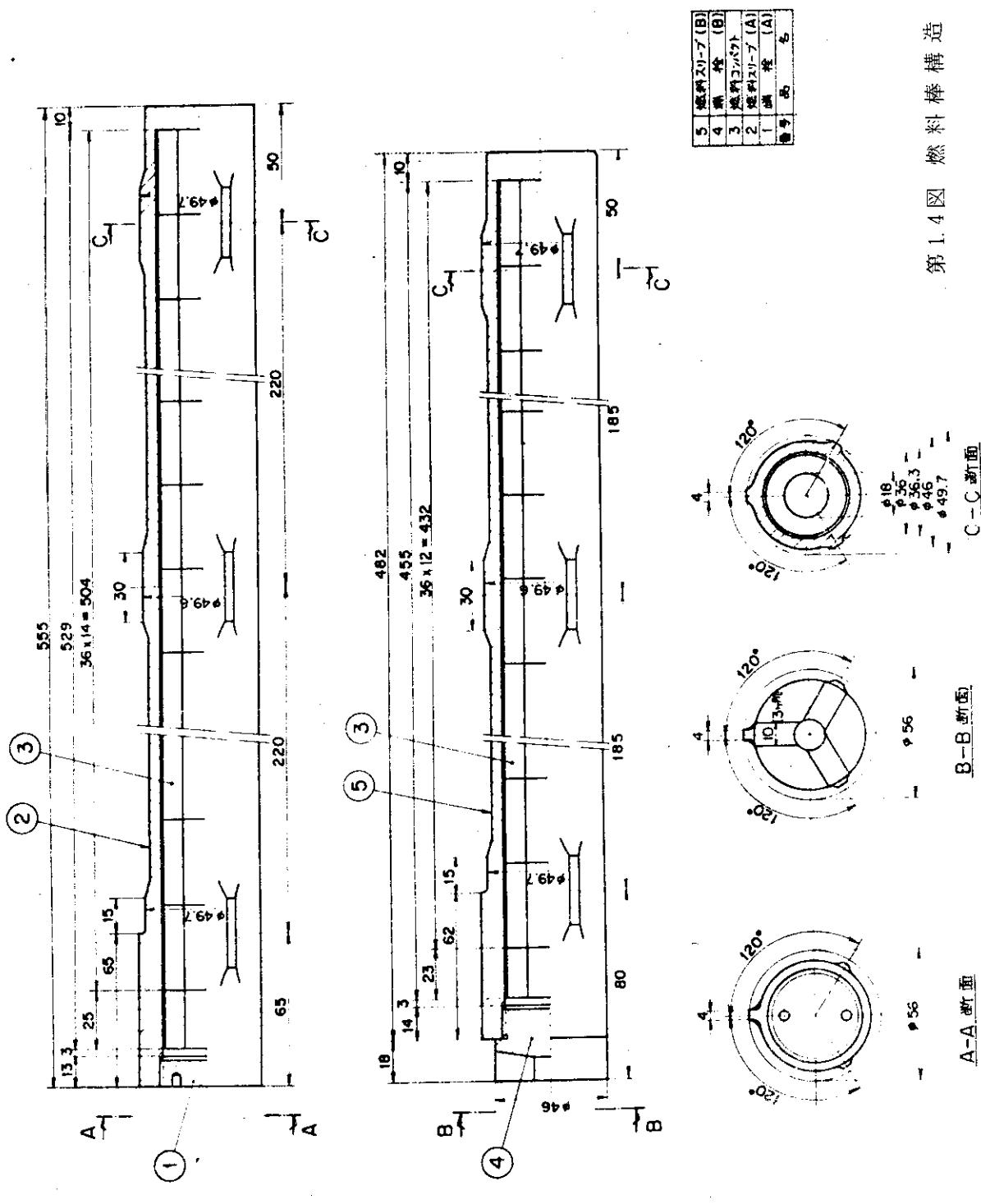
第1.1図 多目的高温ガス実験炉炉体縦断面



第1.2図
多目的高温ガス実験炉炉体横断面



第1.3図 燃料体構造



1.3 Mk-III炉心の核熱基本特性データ

本節において、次章以後の燃料特性の解析において使用される、出力分布、流量配分計画などの核熱基本特性をまとめておく。

Mk-III炉心の燃料装荷領域は、73個の燃料体カラムで構成される。炉心は、その1/6部分が基本配列となり、6つの基本配列によって構成される。炉心内の燃料チャンネルの類別は、核特性解析における命名を準用し、1/6ブロック毎に設定される。これを第1.5図に示す。

更に、炉心半径方向のオリフィス単位（又は制御棒配列リング）毎に領域I、II、III、IVが類別されている。

領域I (中心制御棒領域、1オリフィス、7カラム)

領域II (制御棒第1リング領域、6オリフィス、42カラム)

領域III (制御棒第2リング領域、6オリフィル、18カラム)

領域IV (制御棒第3リング領域、6オリフィス、6カラム)

(1) 出力分布

1) 全熱出力

炉心の全熱出力は50MWである。このうちの95%，47.5MWが燃料棒内のコンパクトで発生するものと設定している。47.5MWは、燃料スリーブ、黒鉛ブロック内で発生する幾分かの熱も含んでいる、残りの5%は、制御棒チャンネルと側部の反射体で発生するものとしている。

したがって、1燃料チャンネルの平均出力は58.43KW、1カラム(12チャンネル)の平均出力は、701KW、1オリフィス単位(7カラム)の平均出力は、4382MWである。

2) チャンネル積分出力分布

チャンネル積分出力は、燃焼と共に制御棒挿入パターンによって変化する。後者を第1.6図に示す。また、チャンネル積分出力は、出力ピーキングとして領域平均値と領域最大値とを第1.7図に示す。チャンネル積分出力の最大値は燃焼日450日、領域Iに発生し、72.5KWである。

3) 軸方向出力分布

炉心3次元出力分布計算による1/6ブロック単位の軸方向出力密度分布の代表特性を第1.4表および第1.8図に示す。ただし、この出力密度は燃料装荷領域の全熱出力が50MWに対応するものであり、燃料チャンネルでの発熱はこれの95%に当たる。代表チャンネルとして以下の5つが含まれている。

1C 領域Iの制御燃料体カラムのチャンネル

1S 領域Iの標準燃料体カラムのチャンネル

2C 領域IIの制御燃料体カラムのチャンネル

2S 領域IIの標準燃料体カラムのチャンネル

3S 領域IIIの標準燃料体カラムのチャンネル

4S 領域IVの標準燃料体カラムのチャンネル

各々の炉心内位置は、第1.5図に示されている。

4) 燃料棒の出力ピーキング

1ブロック断面内の燃料棒の出力ピーキングを第1.9図に示す。燃料濃縮度4%領域の運転初期におけるピーキングである。このピーキングは出力分布のシステムチック変動量として扱われる。

(2) 流量分布

1) 炉心全流量の配分

炉心上部のプレナムに導入される冷却材流量は15.92 kg/secである。このうちの90%，14.33 kg/secがオリフィスで調節され、各オリフィス領域へ導入される。従って、1燃料チャンネル当りの平均冷却材流量は、17.63 g/secである。全冷却材流量のうち10%は、制御棒と側部可動反射体の冷却のために配分される。

2) 燃料領域内流量調節方式

オリフィスによるオリフィス領域毎の流量調節は、3方式が検討されている。

方式1 全チャンネルを同一流量とする（オリフィス内のチャンネル数に比例させる。）

方式2 4オリフィス領域毎の冷却材出口温度を同じくする（領域出口に比例させる）。

方式3 4オリフィス領域内の公称燃料最高温度を同じくする。

燃料の特性解析としては、主として方式2を採用している。以後の記述において、流量調節方式の説明が無い場合は、方式2に準拠していることを意味する。

方式2による流量調節は制御棒挿入パターンの変化に即応して修正される。この再調節は、オリフィス領域毎の出力分担に基づいて設定される。オリフィス領域毎の出力分担の変化は、第1.7図の領域平均出力ピーキングに示めされている。

各オリフィス領域の平均チャンネル流量を第1.5表に示す。

3) オリフィス領域内流量再配分

第1.8図あるいは第1.9図に示されるように、オリフィス内の各1/6ブロックあるいは各ブロック内の各燃料棒は出力が不均一である。この為、燃料体スタック全長での流動抵抗が等しくなるようにチャンネル流量が再配分される。個々の燃料チャンネルの冷却材流量は前述の第1.5表の値からずれる。これをオリフィス領域内流量再配分効果と呼ぶ。平均チャンネル流量からの変動は、オリフィス領域内の出力ピーキングと関係づけられる。Mk-III炉心設計において設定された関係を第1.10図に示す。

4) 燃焼度と高速中性子束照射量

炉心3次元燃焼計算から得られた第2オリフィス領域の燃料体毎の燃焼度と高速中性子照射量との関係を第1.11図に示す。

また、各オリフィス領域の代表チャンネル（1/6ブロック相当）の軸方向高速中性子照射量分布を第1.6表に、高速中性子束分布を第1.12図に示す。

5) 黒鉛ブロックの放射線発熱率

黒鉛ブロックの放射線発熱量は、炉心3次元出力分布計算から得られた、1/6ブロック単位の出力密度の10%と設定する。

6) 規則的変動量（システムチック変動量）

炉心全体の核特性、熱特性と評価する場合、構造物の材質、寸法あるいは原子炉運転データ（出力、冷却材流量など）などは、平均値が使用される。このようにして得られた特性を公称特性という。燃料特性の解析も主として公称核熱特性に準拠している。

ところで、原子炉運転データなどの計測量には測定誤差が伴っており、また、運転制御上避けられない変動もあり、これらを通常的な運転状態において考慮しておかねばならない、さらに、実際の炉心内の局所的な領域（1本の燃料チャンネルとか1本の燃料棒など）を見る場合、ある部分の特性が前述の公称特性より厳しいものになっている。従って、構造物の健全性を確保する立場からは、このようなある関係・規則に従って現出している厳しい使用条件を前提として設計する必要がある。このような設計使用状態をシステムチック変動状態という。

本検討の一部において種々のシステムチック変動量を考慮した解析を実施している。この変動量は、Mk-III炉心の設計の過程で定められたものである。これを第1.7表に示す。

第1.4表 炉心3次元出力分布 (W/CC)
(CITATIONによる1/6 プロック断面の値)

No	距離 cm	初期						140 H					
		1C 13-26	1S 12-24	2C 10-25	2S 11-26	3S 12-17	4S 7-24	1C 13-26	1S 12-24	2C 10-25	2S 11-26	3S 12-17	4S 7-24
1	0	0.06	0.55	0.075	0.55	0.76	0.80	0.075	0.70	0.085	0.77	0.88	0.89
2	9	0.07751	0.6464	0.08594	0.6315	0.8806	0.9135	0.09568	0.8347	0.1013	0.8129	1.015	1.016
3	27	0.1062	0.8759	0.1162	0.8555	1.151	1.185	0.1377	1.201	0.1455	1.171	1.377	1.339
4	45	0.1439	1.185	0.1555	1.158	1.500	1.521	0.1976	1.744	0.2172	1.708	1.886	1.774
5	63	0.1657	1.412	0.1790	1.380	1.709	1.695	0.2420	2.259	0.3177	2.223	2.298	2.083
6	81	0.2200	1.900	0.2494	1.866	2.183	2.108	0.3431	3.146	0.8508	3.163	3.008	2.649
7	99	0.2934	2.610	0.4235	2.597	2.834	2.641	0.5517	4.141	1.148	4.164	3.684	3.176
8	108	0.325	3.04	0.564	3.05	3.20	2.95	0.735	4.49	1.210	4.72	3.97	3.43
9	117	0.2625	2.506	0.6880	2.554	2.575	2.310	0.9619	3.720	0.9525	3.705	3.053	2.569
10	135	0.3483	3.226	0.9314	3.301	3.132	2.739	1.235	4.306	1.053	4.262	3.351	2.796
11	153	0.5298	3.966	1.113	4.033	3.591	3.086	1.312	4.683	1.120	4.622	3.537	2.936
12	175.5	1.26	4.86	1.280	4.89	4.01	3.39	1.364	4.865	1.169	4.835	3.646	3.033
13	202.5	0.554	5.47	1.370	5.44	4.21	3.51	1.356	4.811	1.150	4.779	3.576	2.970
14	229.5	1.57	5.42	1.330	5.36	4.04	3.37	1.269	4.451	1.076	4.421	3.313	2.747
15	256.5	1.41	4.81	1.180	4.78	3.57	2.90	1.095	3.833	0.9273	3.807	2.854	2.367
16	270	1.295	4.44	1.095	4.38	3.29	2.52	0.98	3.44	0.825	3.44	2.55	2.12
17	283.5	0.57	2.11	0.476	2.09	1.57	1.29	0.500	1.867	0.4146	1.845	1.352	1.102
18	310.5	0.436	1.62	0.365	1.59	1.20	1.00	0.3814	1.421	0.3164	1.404	1.031	0.8421
19	337.5	0.32	1.18	0.267	1.16	0.88	0.73	0.2682	0.9896	0.2228	0.9781	0.7255	0.6005
20	364.5	0.23	0.84	0.194	0.84	0.63	0.53	0.1913	0.7022	0.1593	0.6943	0.5171	0.4281
21	378	0.195	0.73	0.165	0.71	0.55	0.45	0.16	0.59	0.135	0.51	0.45	0.36

第1.4表続 出力分布 (W/cc)

No.	距離 cm	300日						450日					
		1C	1S	2C	2S	3S	4S	1C	1S	2C	2S	3S	4S
1	0	0.145	1.34	0.164	1.28	1.54	1.45	0.24	2.10	0.120	1.89	1.96	1.78
2	9	0.1803	1.608	0.2065	1.576	1.775	1.662	0.2816	2.459	0.3844	2.424	2.349	2.078
3	27	0.2495	2.283	0.3626	2.270	2.408	2.184	0.4062	3.482	1.055	3.506	3.142	2.701
4	45	0.3294	3.137	0.9868	3.199	3.190	2.821	0.6496	4.615	1.337	4.648	3.922	3.315
5	63	0.3586	3.487	1.110	3.513	3.419	2.990	1.450	4.935	1.305	4.779	3.932	3.299
6	81	0.4355	4.091	1.187	4.117	3.872	3.366	1.804	5.562	1.273	5.355	4.245	3.557
7	99	0.5947	4.677	1.233	4.676	4.206	3.633	1.891	5.905	1.230	5.669	4.404	3.689
8	108	0.73	4.95	1.243	4.91	4.35	3.72	1.89	6.00	1.208	5.77	4.44	3.71
9	117	0.8995	3.666	0.9215	3.665	3.177	2.698	1.159	4.068	0.8898	4.009	3.166	2.633
10	135	1.031	3.933	0.9211	3.902	3.242	2.740	1.040	3.991	0.8370	3.930	3.095	2.578
11	153	1.002	4.030	0.9101	3.984	3.220	2.712	0.9000	3.800	0.7855	3.743	2.949	2.460
12	175.5	0.9727	3.857	0.8898	3.873	3.104	2.607	0.7990	3.342	0.7296	3.372	2.712	2.269
13	202.5	0.9256	3.646	0.8344	3.657	2.896	2.423	0.7103	2.972	0.6495	2.999	2.416	2.024
14	229.5	0.8700	3.357	0.7816	3.371	2.630	2.194	0.6545	2.674	0.5999	2.697	2.151	1.808
15	256.5	0.7446	2.867	0.6669	2.878	2.240	1.866	0.5459	2.229	0.5003	2.248	1.793	1.508
16	270	0.65	2.56	0.571	2.57	2.01	1.68	0.48	2.02	0.417	2.00	1.55	1.34
17	283.5	0.3912	1.520	0.3358	1.511	1.138	0.9286	0.3062	1.225	0.2679	1.223	0.9390	0.7701
18	310.5	0.3030	1.174	0.2596	1.167	0.8795	0.7184	0.2360	0.9421	0.2063	0.9405	0.7224	0.5926
19	337.5	0.2264	0.8541	0.1908	0.8454	0.6333	0.5219	0.1830	0.7033	0.1562	0.6980	0.5272	0.4344
20	364.5	0.1648	0.6182	0.1388	0.6120	0.4584	0.3770	0.1337	0.5107	0.1140	0.5068	0.3823	0.3138
21	378	0.125	0.52	0.114	0.50	0.40	0.32	0.11	0.44	0.094	0.44	0.31	0.27

第1.4表 縄出力分布 (W/cc)

No.	距 離 cm	600 日					
		1C 13-26	1S 12-24	2C 10-25	2S 11-26	3S 12-17	4S 7-24
1	0	0.395	3.69	1.206	3.82	3.55	2.98
2	9	0.4387	4.038	1.312	4.055	3.787	3.195
3	27	0.5370	4.713	1.454	4.716	4.277	3.608
4	45	0.7388	5.338	1.455	5.448	4.746	4.000
5	63	1.397	5.163	1.306	5.050	4.348	3.673
6	81	1.573	5.490	1.188	5.302	4.402	3.730
7	99	1.540	5.525	1.088	5.316	4.327	3.674
8	108	1.474	5.47	1.046	5.23	4.28	3.57
9	117	0.9547	3.673	0.7777	3.611	2.992	2.523
10	135	0.8344	3.433	0.7069	3.406	2.816	2.380
11	153	0.7149	3.172	0.6487	3.147	2.602	2.203
12	175.5	0.6306	2.752	0.5950	2.795	2.353	1.999
13	202.5	0.5491	2.397	0.5181	2.434	2.048	1.740
14	229.5	0.5165	2.193	0.4865	2.223	1.837	1.558
15	256.5	0.4304	1.825	0.4043	1.850	1.524	1.290
16	270	0.365	1.59	0.330	1.63	1.33	1.14
17	283.5	0.2545	1.040	0.2268	1.041	0.8158	0.6719
18	310.5	0.1975	0.8047	0.1754	0.8057	0.6293	0.5176
19	337.5	0.1579	0.6155	0.1363	0.6120	0.4668	0.3847
20	364.5	0.1161	0.4495	0.09992	0.4470	0.3397	0.2787
21	378	0.10	0.37	0.083	0.39	0.27	0.23

第1.5表 各オリフィス領域の平均チャンネル流量
(流量調節方式2)

燃焼日 オリフィス領域	(g/sec)					
	0日	10日	140日	300日	450日	600日
I	20.054	19.027	21.414	19.895	21.625	20.528
II	18.426	18.664	18.634	18.745	18.788	18.868
III	16.073	15.969	15.409	15.620	15.111	15.255
IV	14.756	14.651	14.040	14.297	13.752	13.960

第1.6表 高速中性子照射量分布 $10^{20} \text{ n/cm}^2 (\text{E} > 0.18 \text{ MeV})$

No.	距 離 cm	150日						300日					
		1C 13-26	1S 12-24	2C 10-25	2S 11-26	3S 12-17	4S 7-24	1C 13-26	1S 12-24	2C 10-25	2S 11-26	3S 12-17	4S 7-24
1	0	0.136	0.227	0.120	0.227	1.325	0.266	0.275	0.535	0.282	0.525	2.216	0.580
2	9	0.140	0.304	0.154	0.298	1.713	0.347	0.328	0.714	0.352	0.698	2.856	0.749
3	27	0.211	0.453	0.230	0.443	2.559	0.498	0.509	1.101	0.543	1.076	4.249	1.090
4	45	0.284	0.609	0.306	0.595	3.396	0.637	0.711	1.544	0.767	1.511	5.495	1.423
5	63	0.360	0.768	0.387	0.752	4.084	0.751	0.938	2.041	1.096	2.011	6.353	1.731
6	81	0.464	1.005	0.513	0.987	4.868	0.914	1.249	2.731	1.918	2.721	7.262	2.141
7	99	0.582	1.293	0.731	1.282	5.463	1.088	1.670	3.442	2.503	3.441	7.834	2.495
8	108	0.622	1.381	0.996	1.382	5.365	1.107	2.071	3.590	2.803	3.591	7.554	2.480
9	117	0.662	1.470	1.261	1.483	5.265	1.127	2.471	3.738	3.104	3.742	7.272	2.466
10	136	0.831	1.811	1.605	1.833	5.536	1.283	3.007	4.326	3.569	4.322	7.393	2.676
11	153	1.151	2.202	1.893	2.218	5.822	1.439	3.544	4.911	3.963	4.893	7.566	2.889
12	175.5	2.216	2.689	2.177	2.679	6.022	1.584	4.744	5.526	4.322	5.477	7.622	3.073
13	202.5	2.650	2.994	2.323	2.965	5.969	1.652	5.154	5.795	4.429	5.726	7.394	3.108
14	229.5	2.631	2.948	2.245	2.910	5.529	1.562	4.930	5.517	4.173	5.442	6.775	2.896
15	256.5	2.216	2.488	1.863	2.466	4.607	1.312	4.112	4.622	3.451	4.569	5.616	2.420
16	270	1.892	1.965	1.490	1.938	3.562	1.024	3.415	3.653	2.762	3.602	4.373	1.891
17	283.5	1.322	1.442	1.118	1.409	2.664	0.735	2.473	2.685	2.074	2.633	3.277	1.360
18	310.5	0.888	0.975	0.745	0.962	1.853	0.505	1.676	1.840	1.399	1.814	2.291	0.940
19	337.5	0.622	0.671	0.518	0.667	1.296	0.356	1.158	1.262	0.964	1.249	1.607	0.658
20	364.5	0.402	0.431	0.334	0.434	0.829	0.233	0.740	0.808	0.616	0.806	1.032	0.428
21	378	0.298	0.327	0.253	0.314	0.616	0.172	0.544	0.602	0.477	0.606	0.775	0.328

 $1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2 (\text{E} > 2.38 \text{ eV}) = 0.25 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2 (\text{E} > 0.18 \text{ MeV})$

第 1.6 表統 高速中性子照射量
 $10^{20} \text{ n/cm}^2 (\text{E} > 0.18 \text{ MeV})$

No.	距 離 cm	450 日						600 日					
		1C 13-26	1S 12-24	2C 10-25	2S 11-26	3S 12-17	4S 7-24	1C 13-26	1S 12-24	2C 10-25	2S 11-26	3S 12-17	4S 7-24
1	0	0.534	1.118	0.583	1.108	1.325	1.098	0.958	2.003	1.121	2.083	2.216	1.772
2	9	0.681	1.505	0.750	1.475	1.713	1.422	1.234	2.731	1.441	2.690	2.856	2.289
3	27	1.048	2.330	1.249	2.297	2.559	2.077	1.916	4.222	2.796	4.198	4.249	3.334
4	45	1.426	3.219	2.206	3.206	3.396	2.701	2.715	5.700	4.250	5.695	5.495	4.241
5	63	1.791	4.032	2.892	4.031	4.084	3.185	4.104	6.896	5.166	6.869	6.353	4.837
6	81	2.253	5.018	3.945	5.039	4.868	3.745	5.000	8.168	6.342	8.143	7.262	5.484
7	99	2.885	5.927	4.615	5.945	5.463	4.149	5.697	9.111	6.972	9.074	7.834	5.869
8	108	3.587	6.005	4.836	6.014	5.365	4.029	6.215	8.944	7.043	8.904	7.554	5.610
9	117	4.287	6.083	5.058	6.085	5.265	3.910	6.731	8.776	7.115	8.737	7.272	5.353
10	135	5.032	6.716	5.472	6.694	5.536	4.070	7.262	9.207	7.358	9.148	7.393	5.406
11	153	5.636	7.326	5.837	7.282	5.822	4.252	7.697	9.657	7.595	9.579	7.566	5.509
12	175.5	6.815	7.887	6.138	7.813	6.022	4.383	8.670	9.991	7.742	9.894	7.622	5.539
13	202.5	7.115	8.021	6.129	7.926	5.969	4.325	8.756	9.888	7.555	9.772	7.394	5.355
14	229.5	6.704	7.531	5.703	7.433	5.529	3.984	8.139	9.169	6.950	9.053	6.775	4.887
15	256.5	5.572	6.289	4.706	6.216	4.607	3.316	6.731	7.618	5.711	7.530	5.616	4.047
16	270	4.611	4.997	3.784	4.929	3.562	2.603	5.565	6.075	4.607	5.994	4.373	3.187
17	283.5	3.405	3.706	2.864	3.640	2.664	1.887	4.155	4.533	3.506	4.457	3.277	2.323
18	310.5	2.335	2.571	1.955	2.535	1.853	1.316	2.869	3.166	2.409	3.122	2.291	1.628
19	337.5	1.622	1.777	1.353	1.757	1.296	0.924	2.003	2.203	1.675	2.177	1.607	1.146
20	364.5	1.038	1.144	0.866	1.137	0.829	0.602	1.285	1.423	1.074	1.412	1.032	0.747
21	378	0.768	0.874	0.665	0.865	0.616	0.464	0.959	1.078	0.827	1.076	0.775	0.577

第 1.7 表 Mk - Ⅲ炉心の規則的変動因子

1. 出力因子

(1) 全チャンネル共通因子

出力校正誤差	1.06	1.144
出力変動	1.03	
軸方向スパイク*	1.054	

(2) チャンネル依存因子

	1C, 1S	2C, 2S	3S, 4S
	1.09	1.07	1.03
(4) 合計	1.234	1.214	1.174

* これは冷却材温度上昇には含めない。

2. 冷却材流量因子

(1) 全チャンネル共通因子

炉内流量配分	1.00	1.03
流量変動	1.03	
クロスフロー	1.00	

(2) チャンネル依存因子 第 1.10 図による。

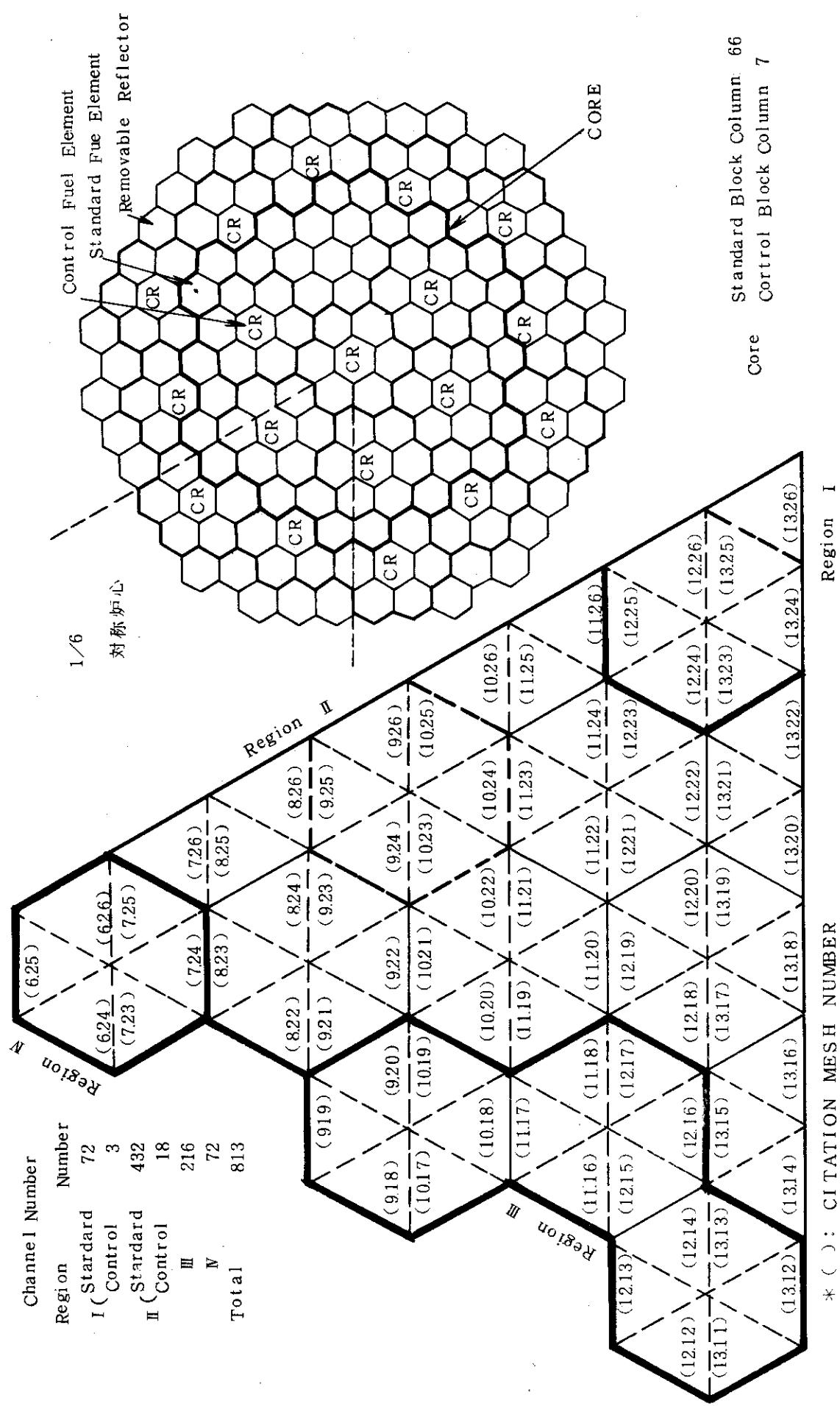
3. 冷却材温度

(1) 全チャンネル共通因子

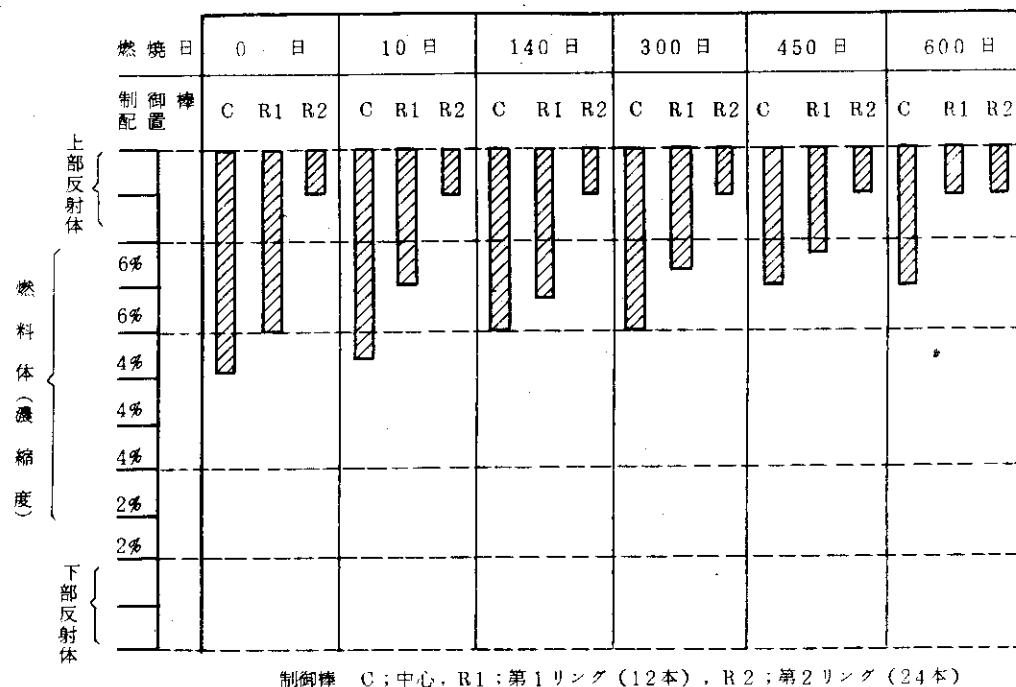
入口温度	1.02
温度差測定誤差	1.03

4. 運転余裕

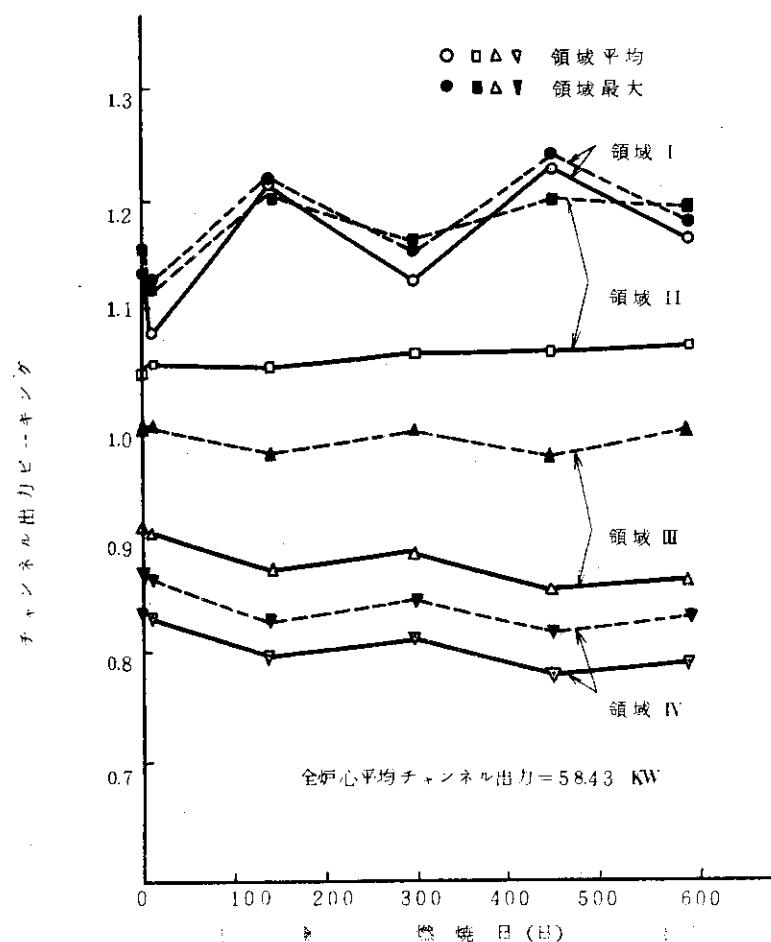
1.00



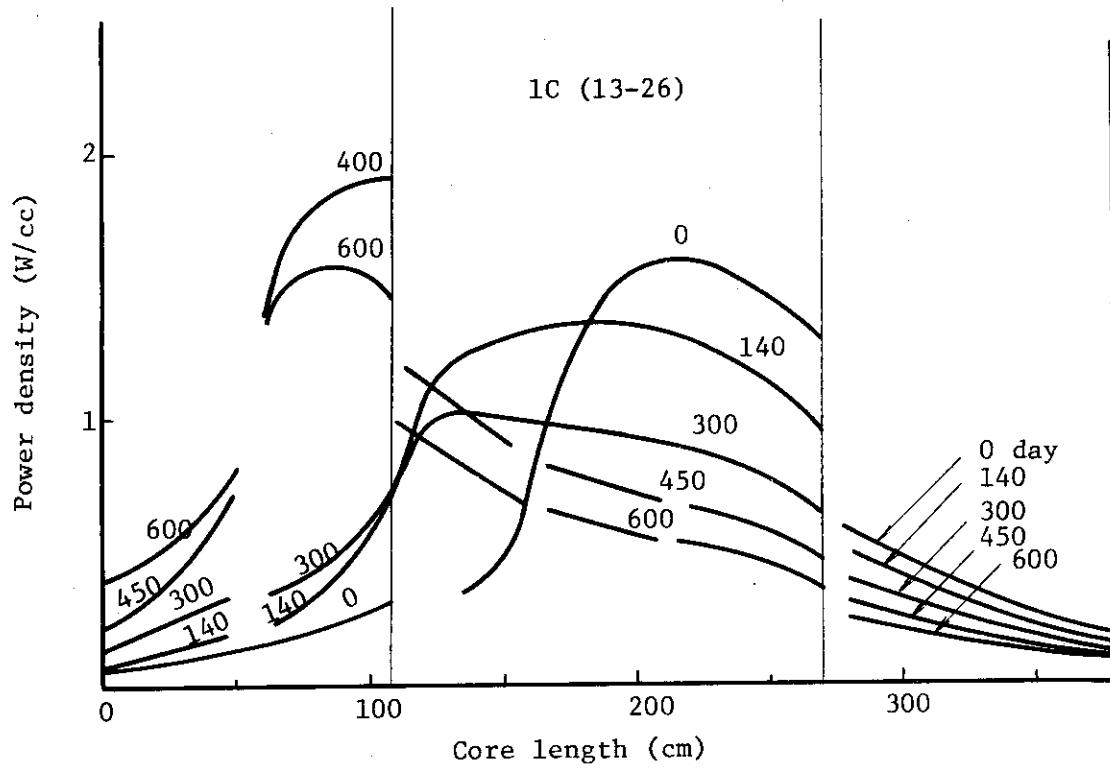
第 1.5 図 炉心内燃料配置



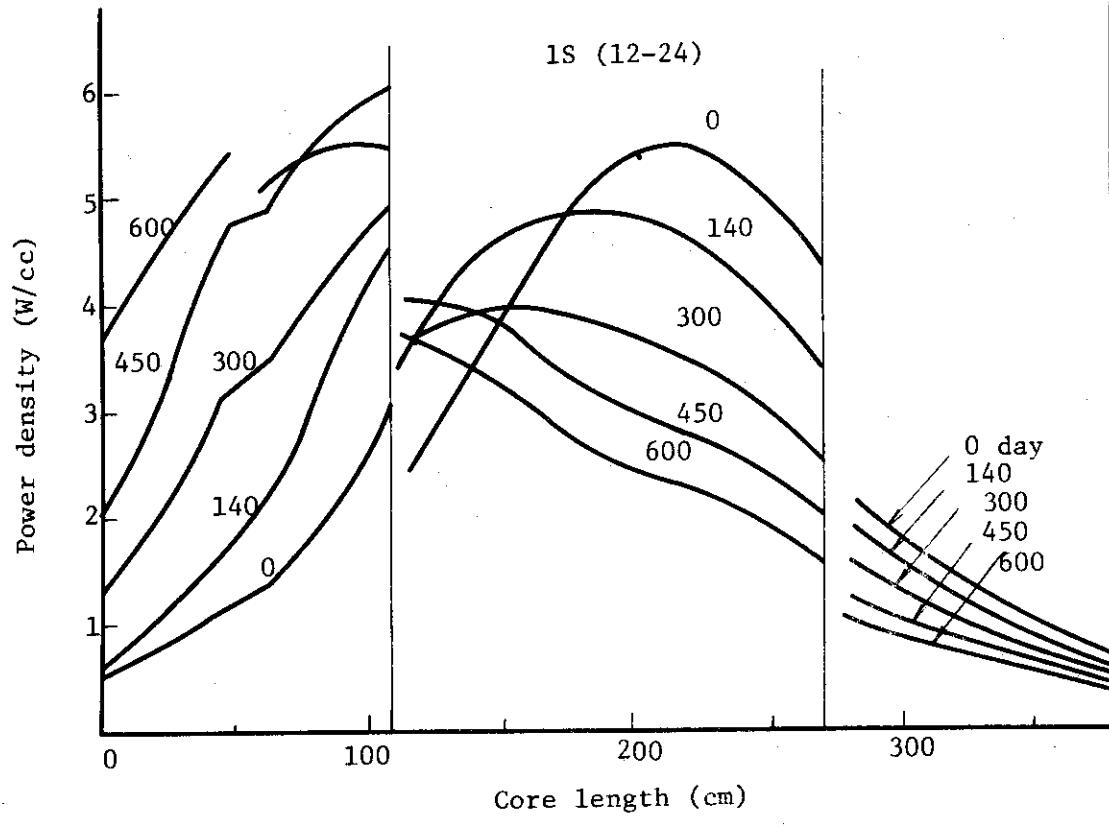
第1.6図 制御棒挿入パターン



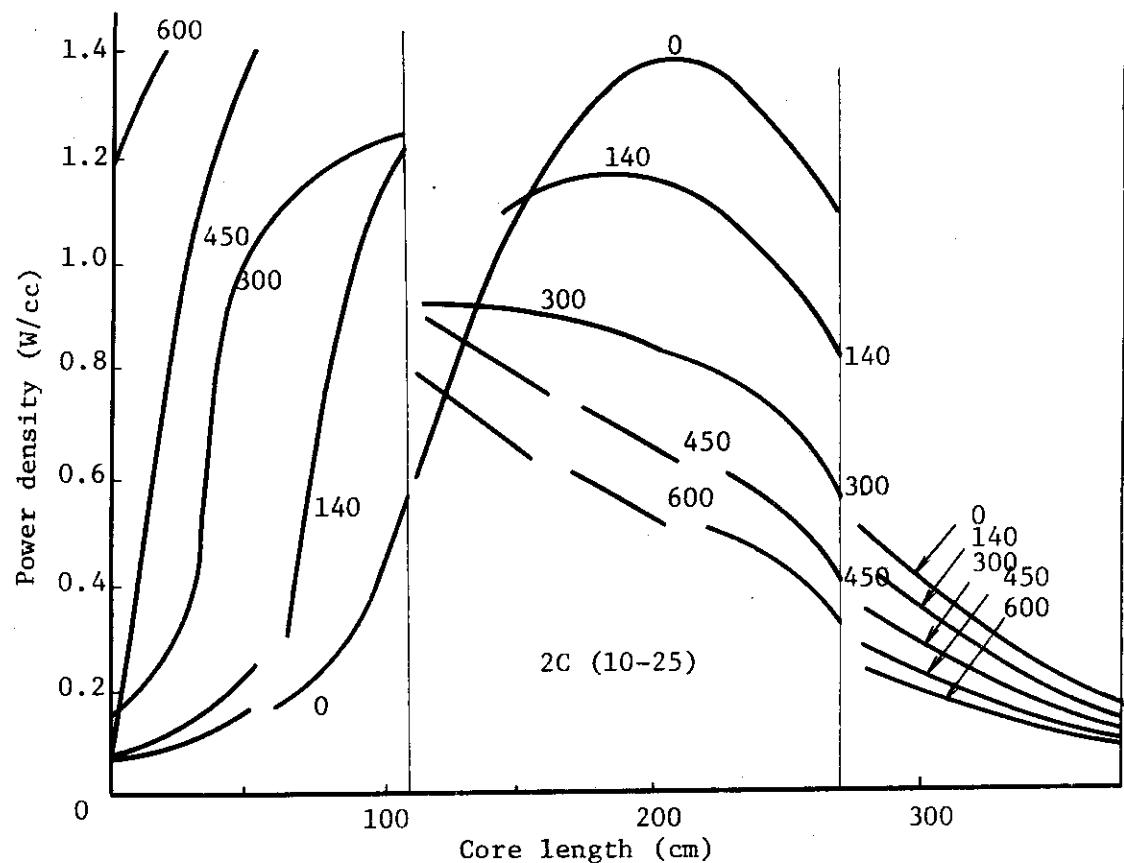
第1.7図 チャンネル出力ピーキングの燃焼変化



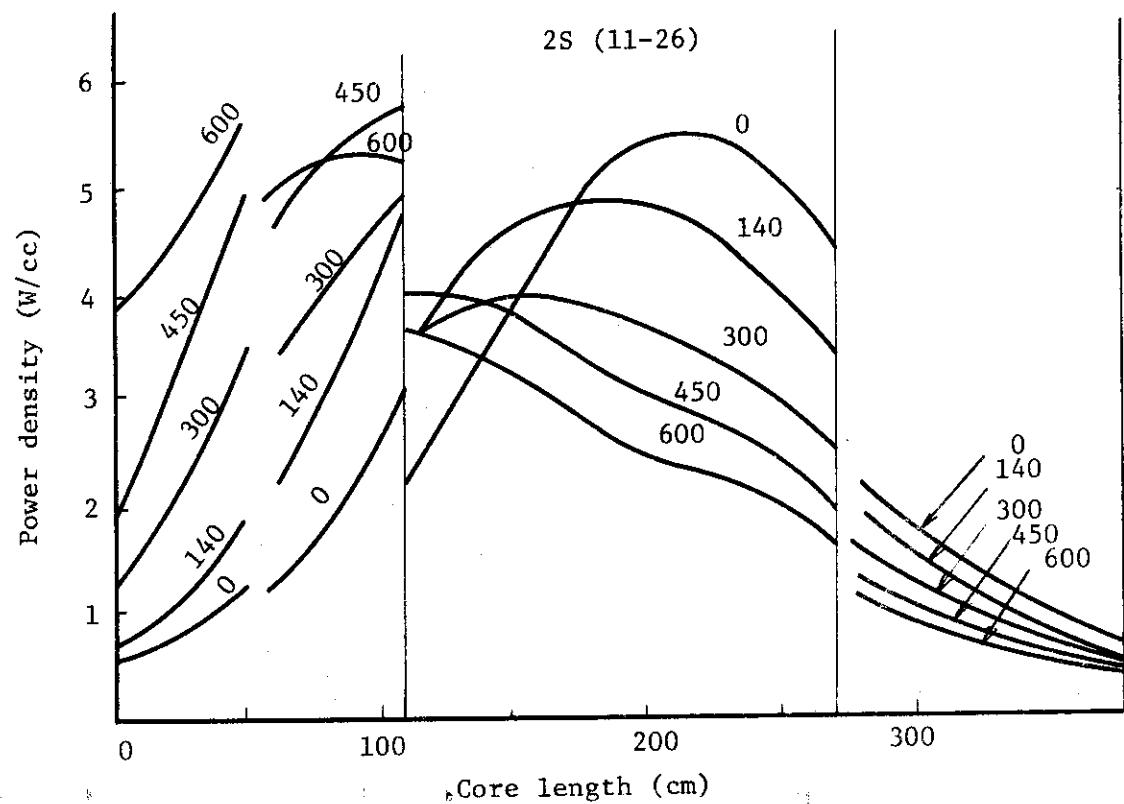
第 1.8(a)図 軸方向出力分布（第 1 領域, 制御カラム）



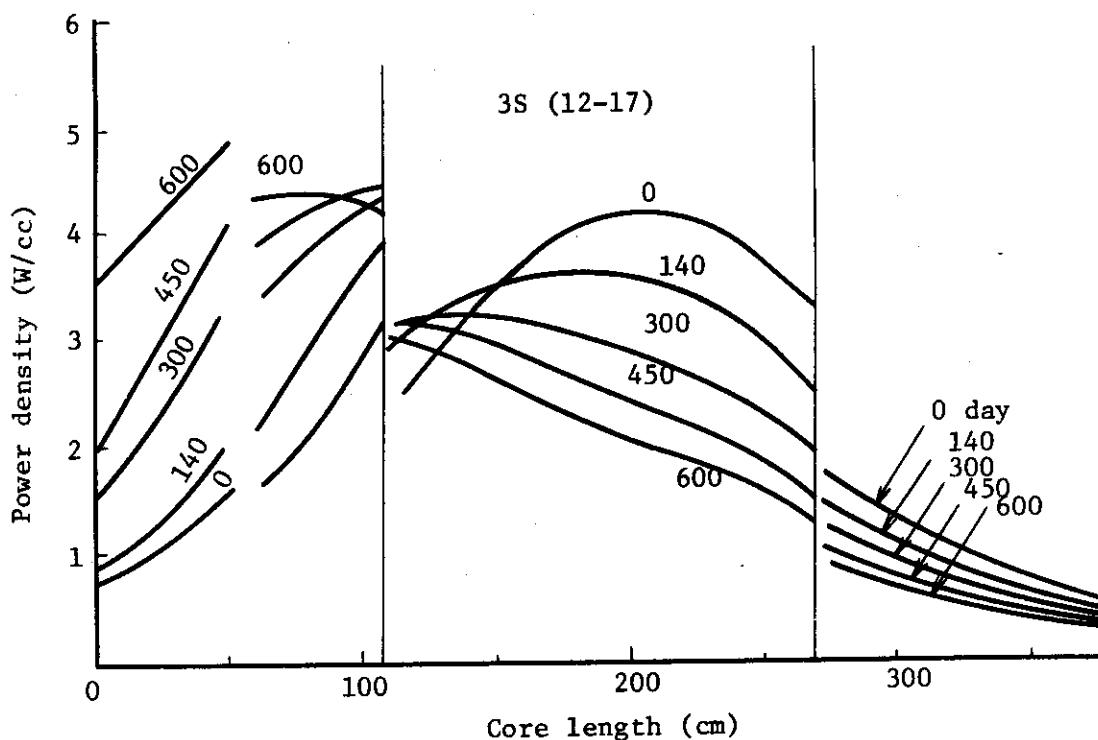
第 1.8(b)図 軸方向出力分布（第 1 領域, 標準カラム）



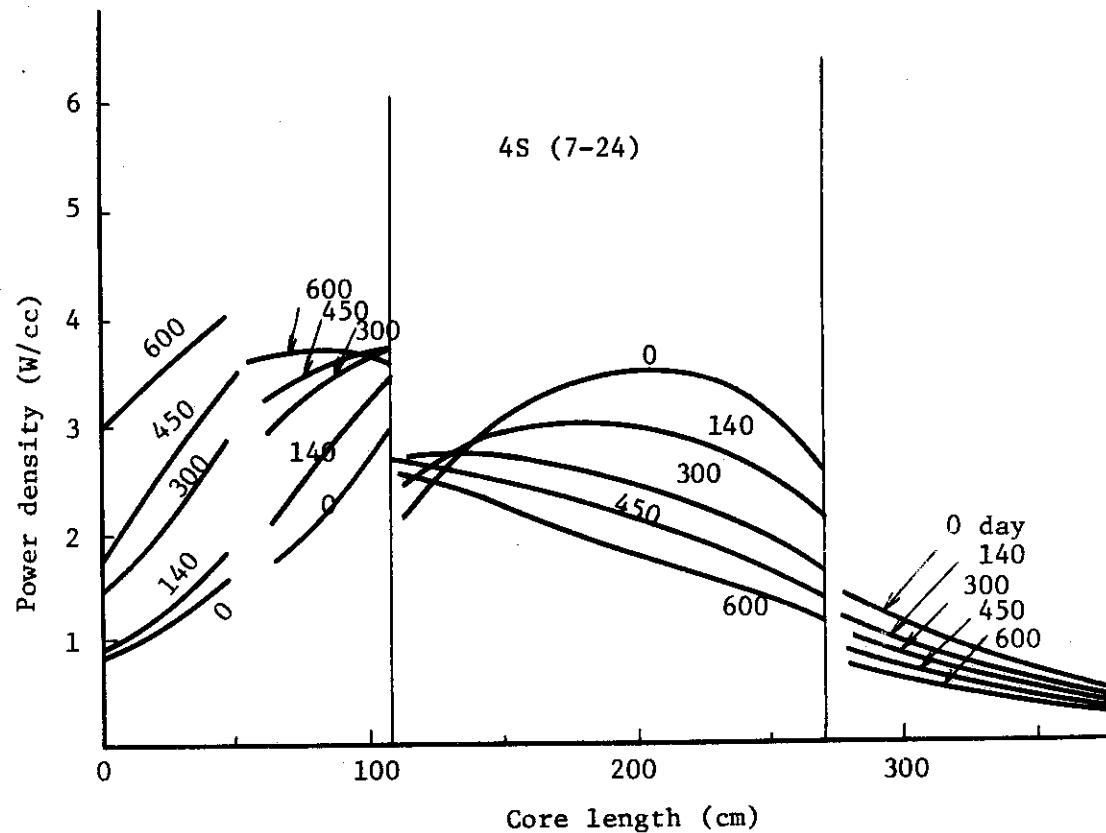
第1.8(c)図 軸方向出力分布（第2領域, 制御カラム）



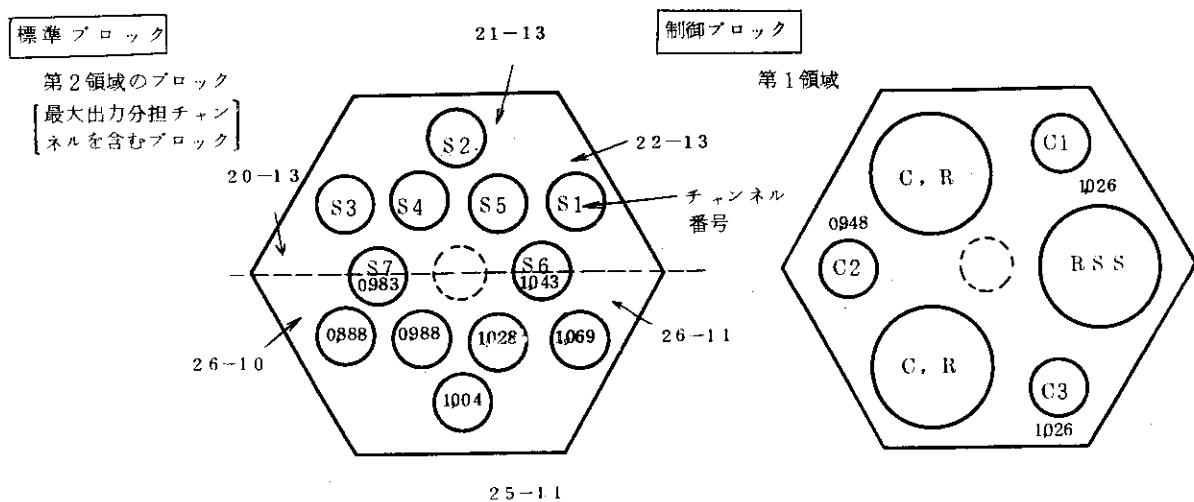
第1.8(d)図 軸方向出力分布（第2領域, 標準カラム）



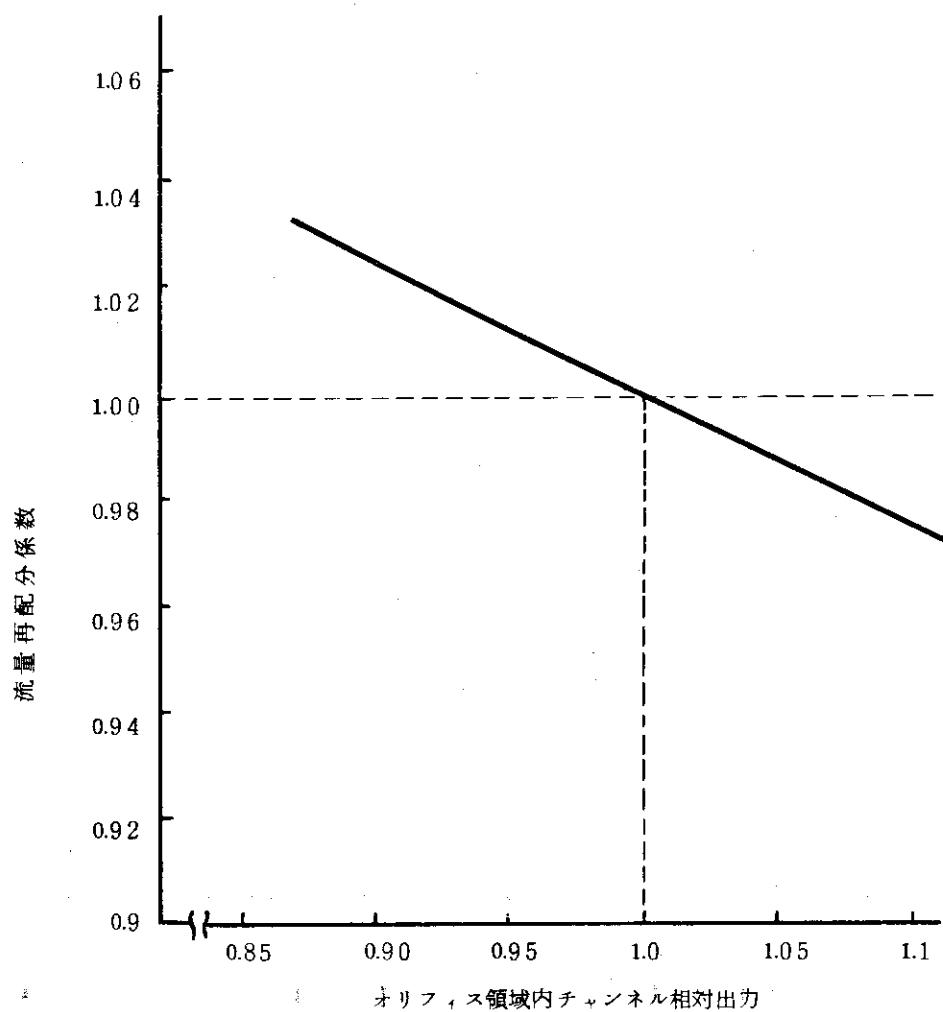
第 1.8(e)図 軸方向出力分布（第 3 領域, 標準カラム）



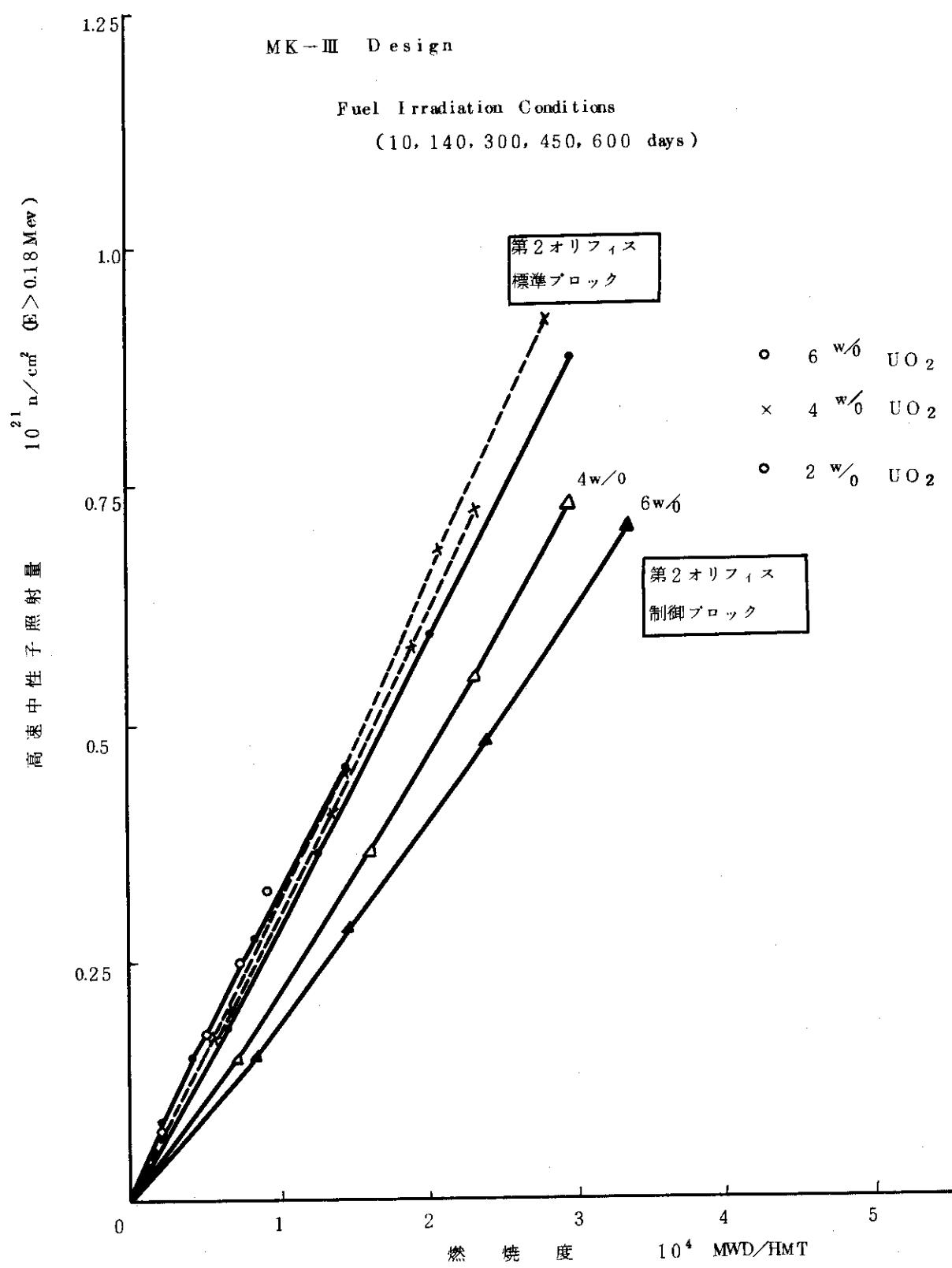
第 1.8(f)図 軸方向出力分布（第 4 領域, 標準カラム）



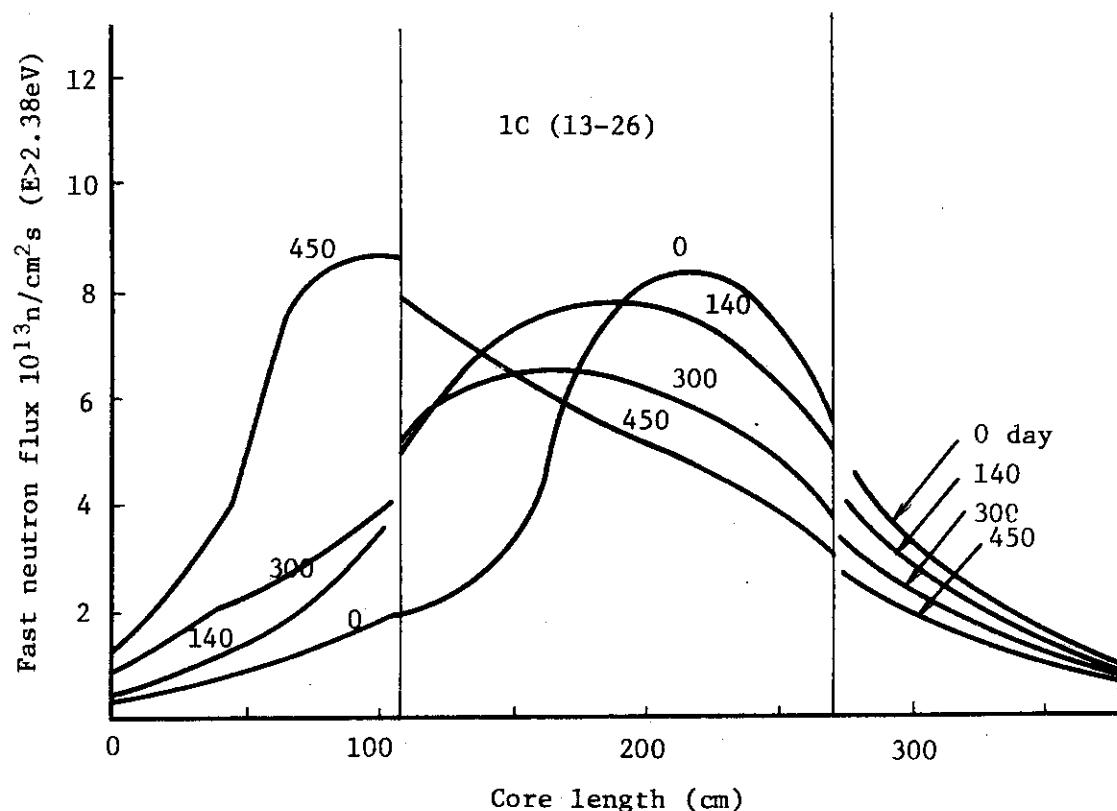
第 1.9 図 燃料棒の出力 ピー キング (運転初期)



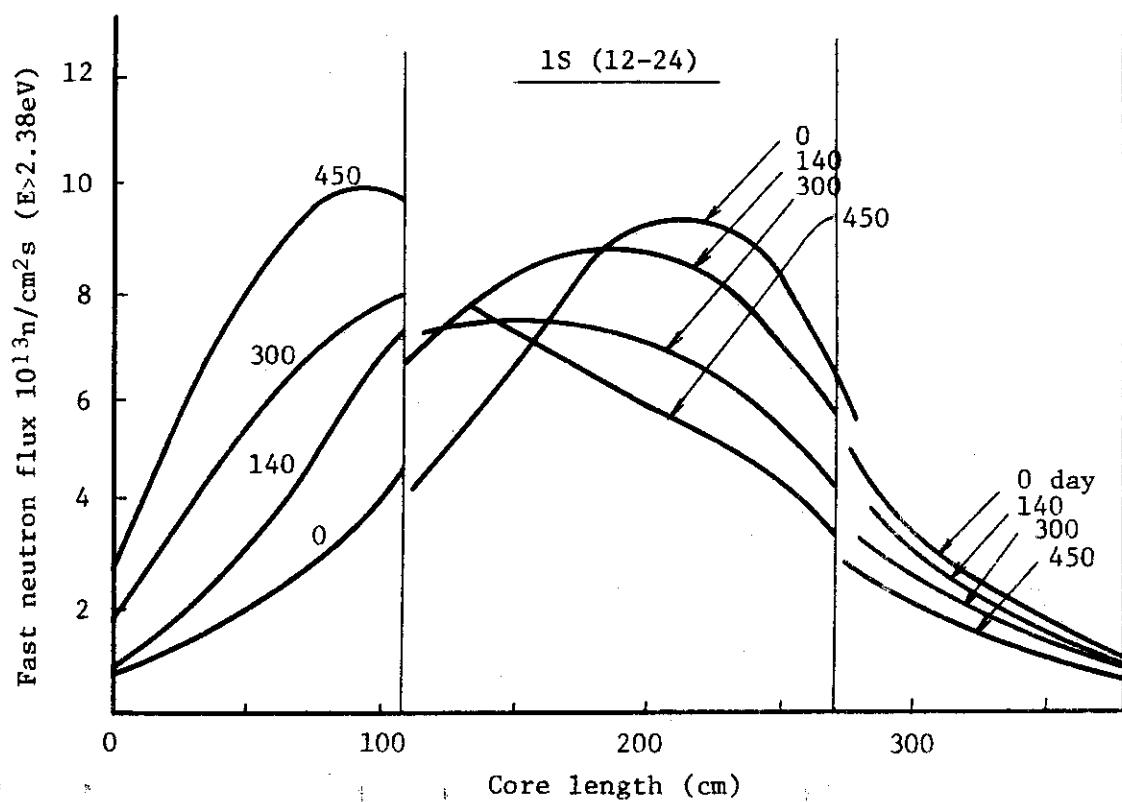
第 1.10 図 オリフィス領域内流量再配分効果



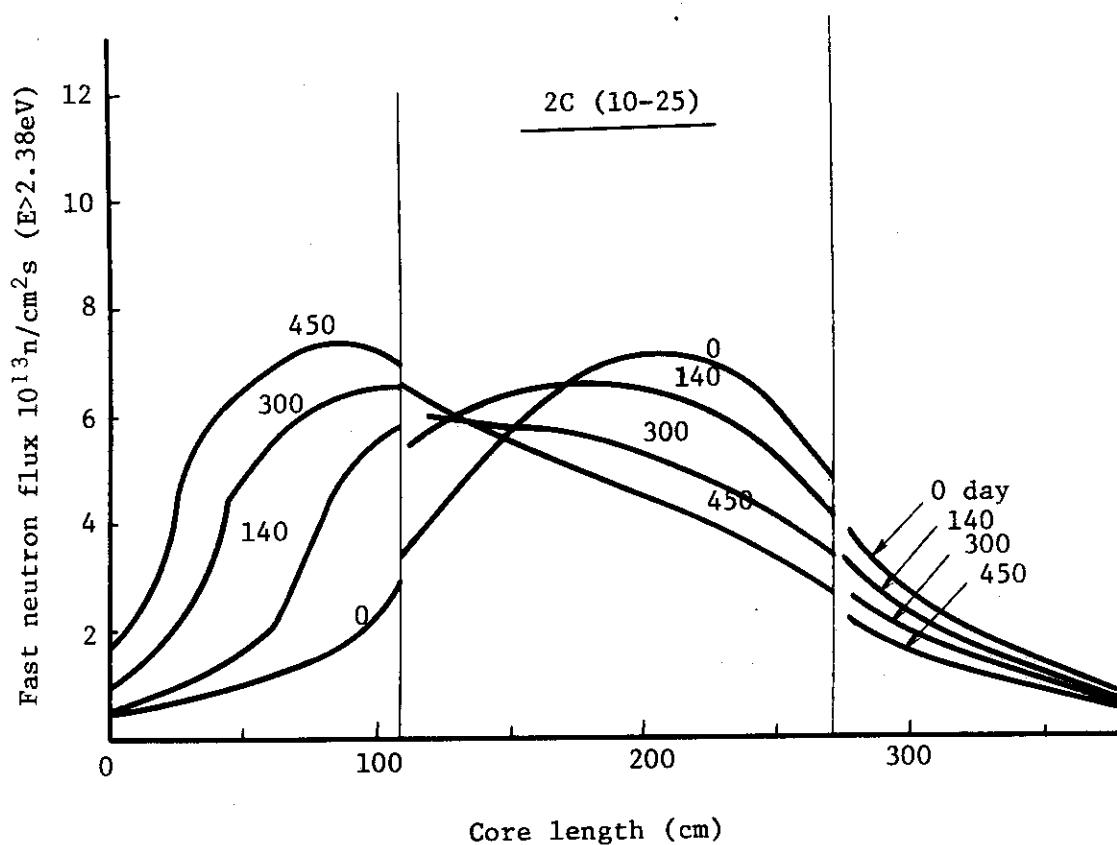
第 1.1.1 図 MK-III 設計燃料の照射条件の代表例



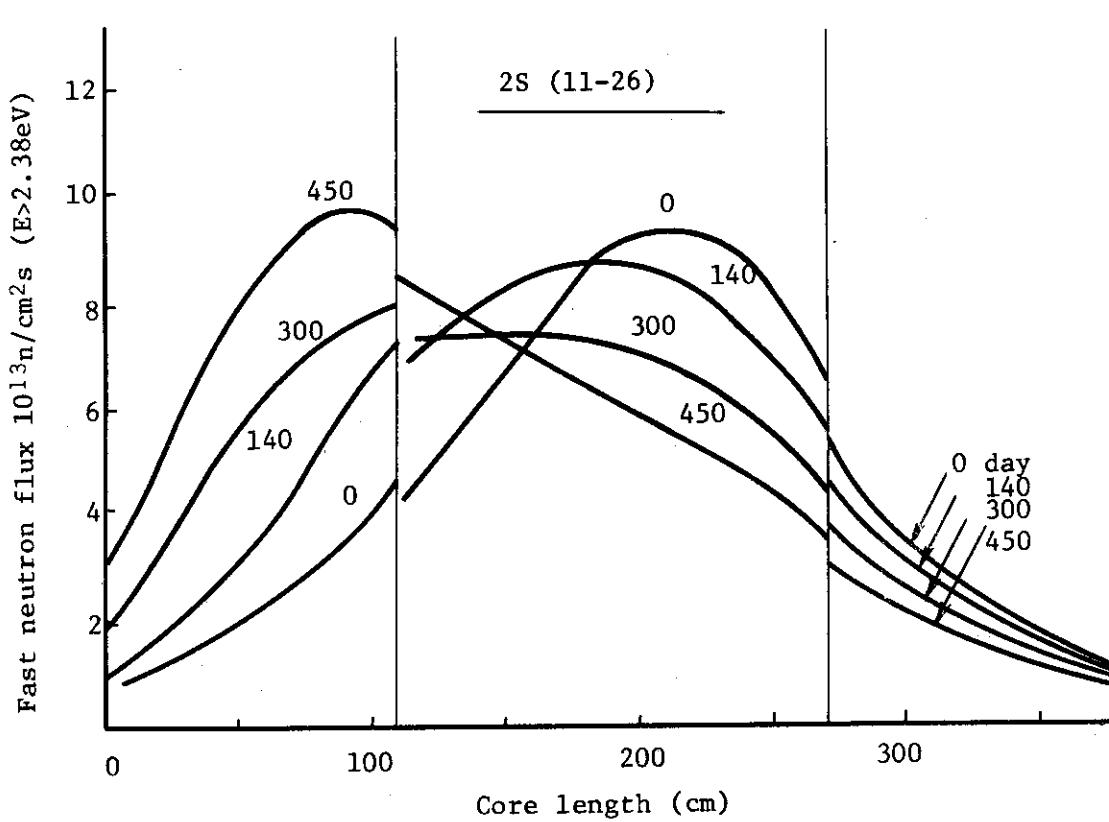
第1.12(a)図 軸方向高速中性子分布（第1領域，制御カラム）



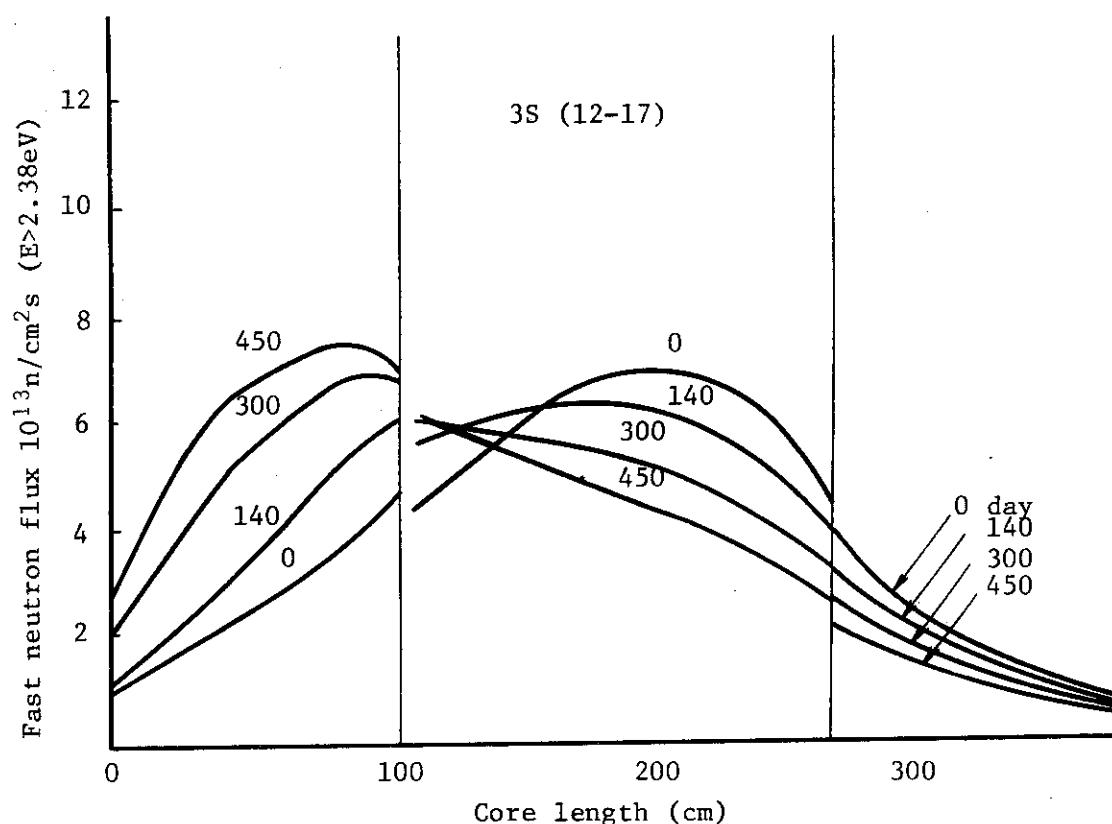
第1.12(b)図 軸方向高速中性子束分布（第1領域，標準カラム）



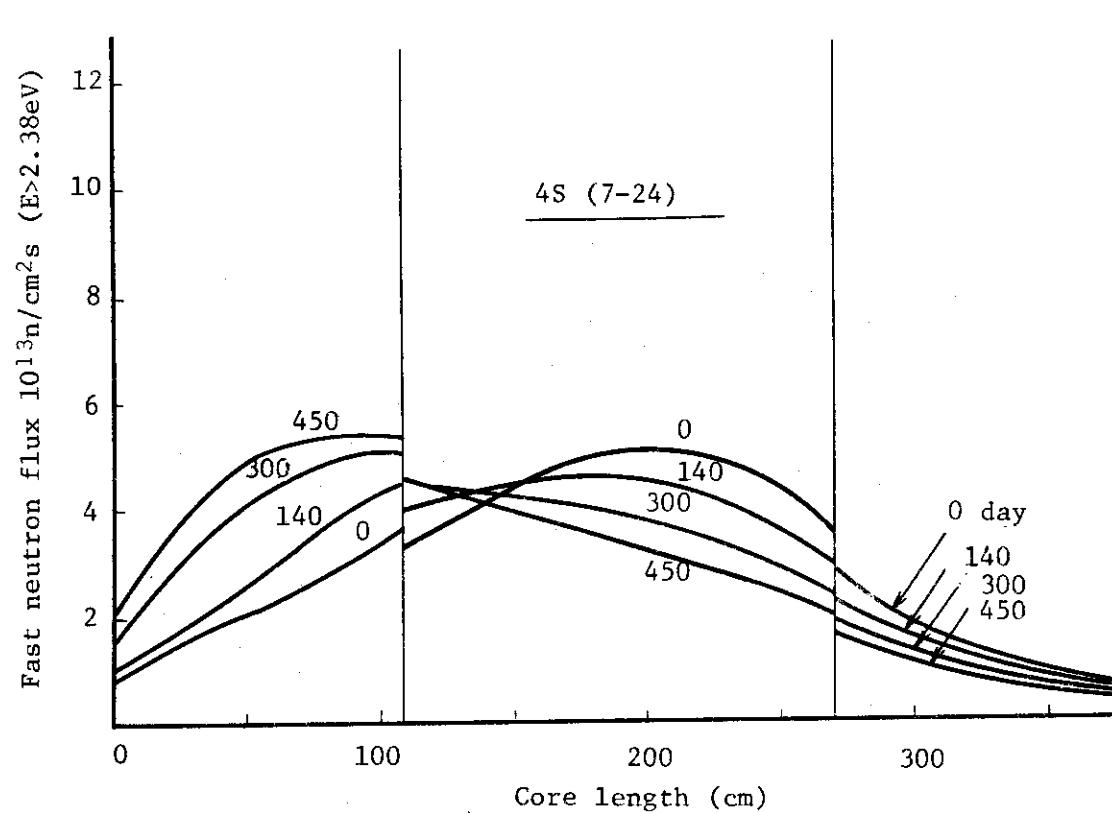
第1.12(c) 軸方向高速中性子束分布（第2領域，制御カラム）



第1.12(d) 軸方向高速中性子束分布（第2領域，標準カラム）



第1.12(e)図 軸方向高速中性子束分布（第3領域、標準カラム）



第1.12(f)図 軸方向高速中性子速分布（第4領域、標準カラム）

2. 定格運転時の燃料温度体積割合分布およびアーマー効果の解析

Mk-III炉心設計における燃料温度、および被覆燃料粒子の健全性、すなわちアーマー効果による破損の評価を行うことを目的として、燃料温度体積割合分布、燃料核移動距離体積割合分布等の解析計算を行った。なお最終的には、解析結果を熱設計基準と照らし合わせ Mk-III炉心設計の妥当性評価を行うことを目的としている。

2.1 計算方法

Mk-III燃料設計における燃料コンパクト幾何形状に従って、单一チャンネルに注目し、单一チャンネル熱計算コードDEGAの計算から得られる、燃料コンパクトの外表面温度および軸方向線出力をインプットデータとし、燃料コンパクトを軸方向96分割又は80分割、径方向12分割を行い、計96×12又は80×12メッシュに分け、各メッシュでの温度および、温度勾配を求めた。（第2.1図参照）

2.2 評価方法

(a) 温度スペクトル

上記計算方法により得られた単一チャンネルの各メッシュ点における温度を、400°Cから、5°Cのきざみ巾ごとに分り分け、その温度きざみ巾ごとに各メッシュ体積を加算し、単一チャンネルでの温度体積割合分布を求めた。

(b) 核移動距離スペクトル

燃料核移動距離については、O.R.N.L.-TM-4493の核移動評価式にもとづいた。

$$\log_{10} KMC = -3.27 - \frac{4220}{Tk} \quad \dots \quad (1)$$

$$KML = 10^{(-3.27 - \frac{4220}{Tk})} \times \frac{TG}{Tk^2} \times \tau \times (24 \times 3600) \times 10^4 \quad \dots \quad (2)$$

ここで

KMC : 核移動係数

KML : 核移動距離 (μ)

Tk : 粒子温度 ($^{\circ}\text{K}$)

TG : 温度勾配 ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)

τ : 照射日数 (日)

各メッシュ点における温度および温度勾配より、式(2)を用いて各メッシュ点での核移動距離を求めた。（すなわち粒子温度、温度勾配とも燃料コンパクトの値ということである。）

求められた各メッシュでの核移動距離を 1μ ごとのきざみ巾で体積加算し、単一チャンネルでの核移動距離体積割合分布を求めた。

炉心運転中、温度、温度勾配は変化するが、核移動距離を評価するのに次の4段階に分け、累積する方法を取った。

- 1) 初期炉心から燃焼日 140 日まで
- 2) 燃焼日 140 日から 300 日まで
- 3) 燃焼日 300 日から 450 日まで
- 4) 燃焼日 450 日から 600 日まで

(c) その他のアメーバ効果の評価

DRAGON プロジェクトの Graham と Hick が 1973 年に、 B.N.E.S. で発表したアメーバ破損線図を、後、彼らは修正を行った。その修正線図によると、下記のアメーバ破損指関係式が導びかれる。

$$\log_{10} (\tau \times TG) \geq a + \frac{b}{Tk} \quad \text{----- (3)}$$

ここで

τ : 照射日数 (日)

TG : 温度勾配 ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)

Tk : 温度 ($^{\circ}\text{K}$)

a, b : 定数 (ここでは $a = 2.25, b = 5000$ とした。)

式(3)を下記の様に書きかえる。

$$TG_L = \frac{10^{(2.25 + \frac{5000}{Tk})}}{\tau} \quad \text{----- (4)}$$

式(4)は、ある温度に対して、アメーバ破損を起す限界の温度勾配になり、この値に対する各メッシュでの温度勾配の比を求め、 0.005 のきざみ巾ごとに各メッシュでの比を体積加算し、単一チャンネルでの温度勾配比の体積割合分布を求めた。

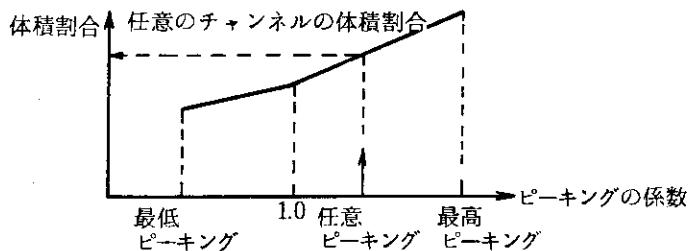
(d) 全炉心評価方法

全炉心を評価するにあたって、下記の方法によった。

- 1) まず各燃焼日毎の炉心における出力ピーキング係数を求める。(各リージョン内において)
- 2) 各チャンネルにおける出力ピーキング係数の燃焼日毎に加算した平均値を求める。
- 3) 仮定として、各燃焼日を通して、最大出力および最低出力をもつチャンネルは、各リージョンにおいて同一チャンネルでおこるとした。又平均チャンネルとしては各リージョンにおける出力ピーキング係数が 1.0 とした。

- 4) 各リージョンにおける最高, 平均, 最低出力チャンネルについて, 各燃焼日毎のチャンネル熱計算をDEGAにより行い, その結果を(1)節における計算方法によりチャンネル毎の各体積割合分布を求めた。
- 5) 各リージョンの最高, 平均, 最低出力チャンネルのスペクトルを先に求めておいた任意の各チャンネル毎の出力ピーキング係数に対して, ピーキングに比例した体積割合を求めた。

(下図参照)



- 6) この様にして求めた任意のチャンネルの体積割合分布を最終的にすべて加算し, 全炉心の体積割合分布を求めた。

2.3 結果および検討

(a) ノミナル温度評価

全炉心における燃料温度体積割合分布について, 初期炉心および燃焼日450日で, 2通りの流量配分方式の比較を第7.2.2図に示した。これより明らかな事は, 450日の方が初期炉心よりも $1000\sim1100^{\circ}\text{C}$ の温度範囲にある体積割合は大きいが, 1200°C 以上の体積割合は小さくなる。また, 2通りの流量配分方式では差程明確な差は出てこない。

第2.3図に全炉心での核移動距離体積割合分布を示した。ここでは初期炉心の状態が600日間継続すると仮定した場合と各燃焼日毎の炉心状態に対応して累積させたものとを比較したが, 初期炉心状態は温度的に厳しい状態である為, かなりの過大評価になっていることがわかる。これが明らかなのは, 第2.4図に示した最大核移動量があるメッシュでの温度, 温度勾配および核移動の経年変化を見るとわかる。

最大核移動が起るメッシュ点を含んだ, 燃料コンパクトの径方向および軸方向における核移動分布の燃焼変化を第2.5図, 第2.6図に示した。径方向分布を見ると, 最大核移動が起るのはコンパクト外側であるが, これは温度勾配が最大の為と考えられる。また軸方向分布では, 炉心上部から第5段目のブロックで最大核移動が起ることがわかる。

(b) システマティック温度評価

第2.7図に, 初期炉心, 領域IIのシステムティック高温チャンネルの燃料温度体積割合分布と核移動体積割合分布を示した。これによると最大核移動は 70μ 以上の所が出てくるが, 60μ 以上で破損を起すと仮定しても5%以内に抑えられることが期待される。また 1550°C を越す燃料体積もほとんどない。

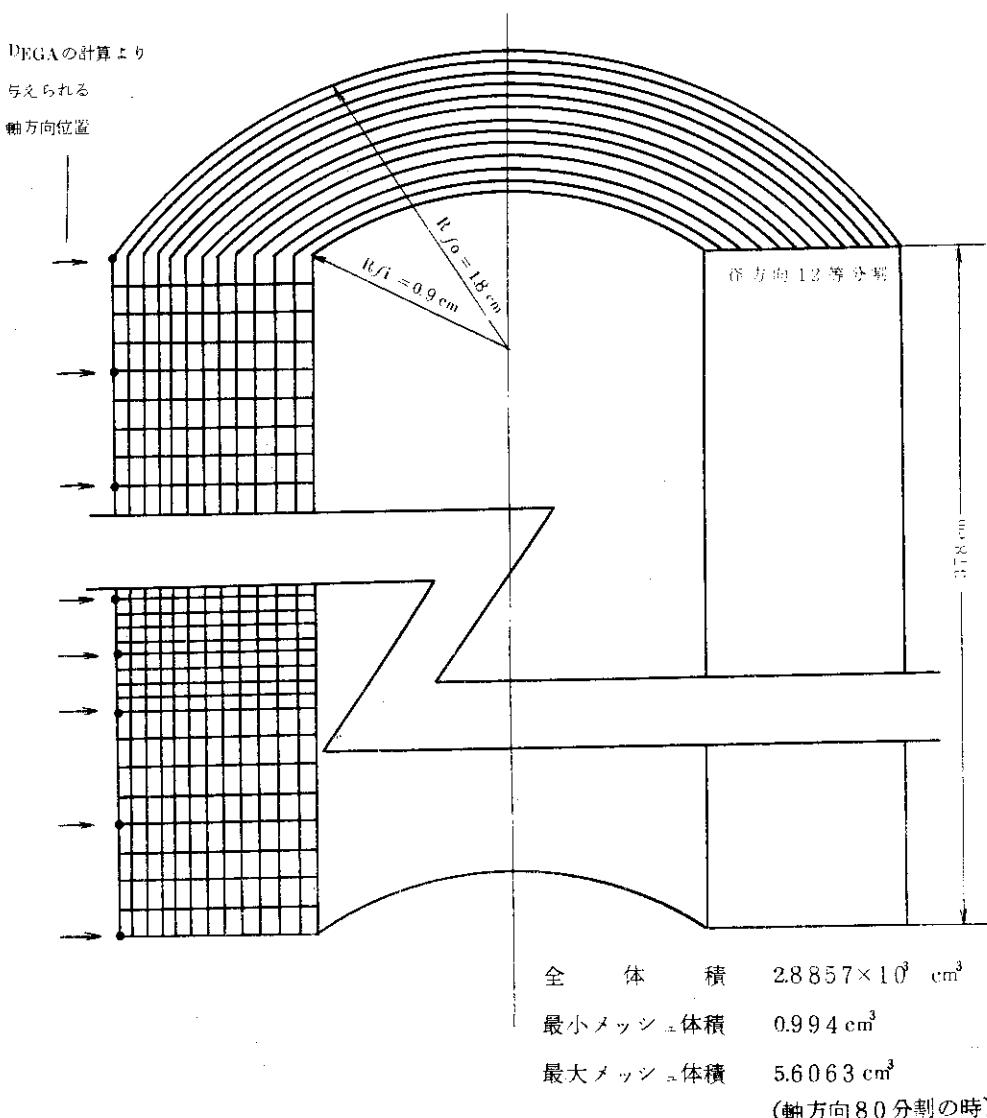
(c) DRAGON 修正線図評価

第 2.8 図に DRAGON の修正線図より求められた、限界温度勾配比の体積割合分布を示した。この分布は、ノミナル高温チャンネルが全炉心を占めた場合と、システムティック温度チャンネルが全炉心を占めたとした場合についてである。この両者とも、限界温度勾配比が 1.0 を越えないでの、アメーバ破損は無いという結果になっている。

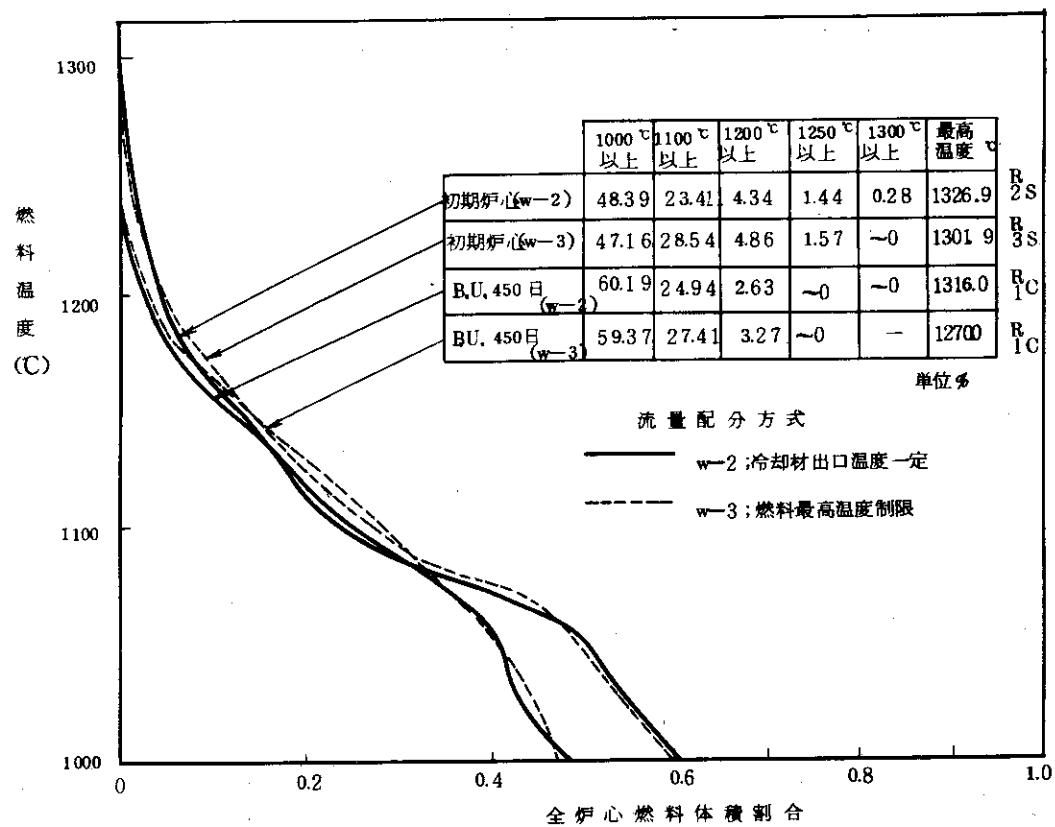
(d) 燃料核移動距離の炉心分布

第 2.9 ~ 11 図に、最大核移動が起こる軸方向位置での各燃焼日における 1 / 6 炉心分布を示した。これによると燃焼日 140 日ではすべて 10μ 以下であり、300, 450 日と進むに従って核移動が炉心に分散していくことがわかる。

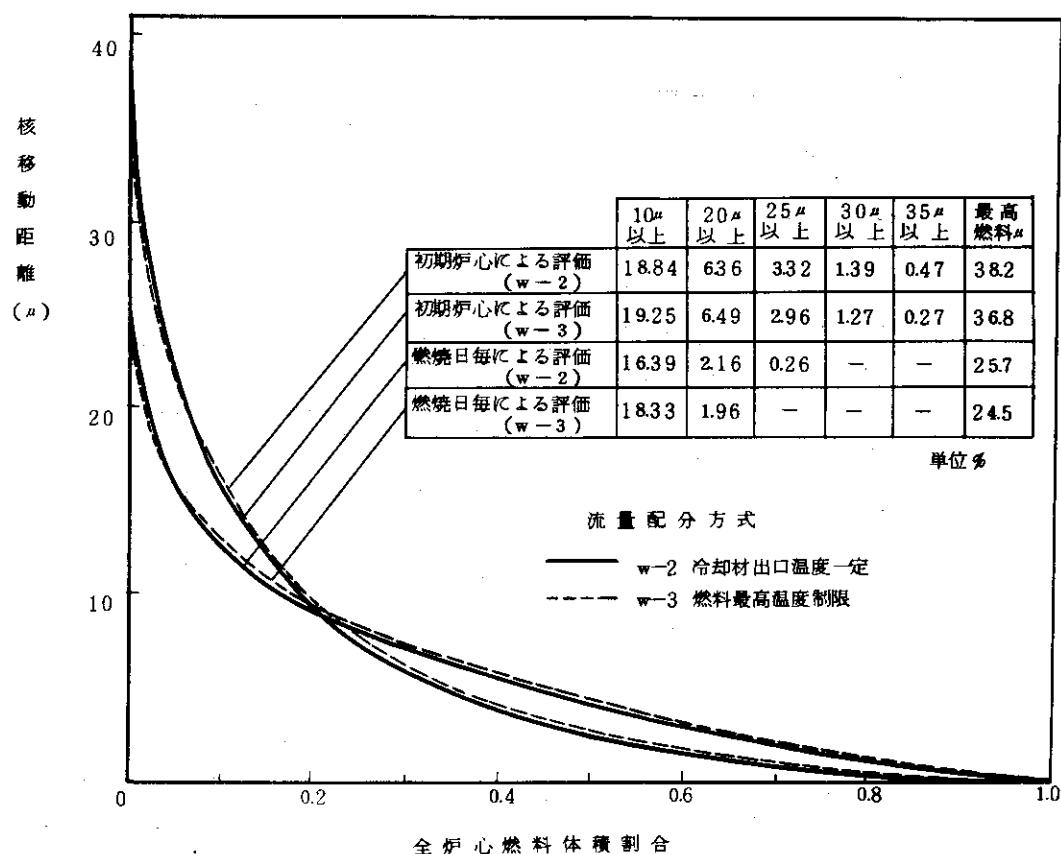
第 7.2, 12 ~ 14 図には、燃焼日 600 日における軸方向各位置での分布を示した。



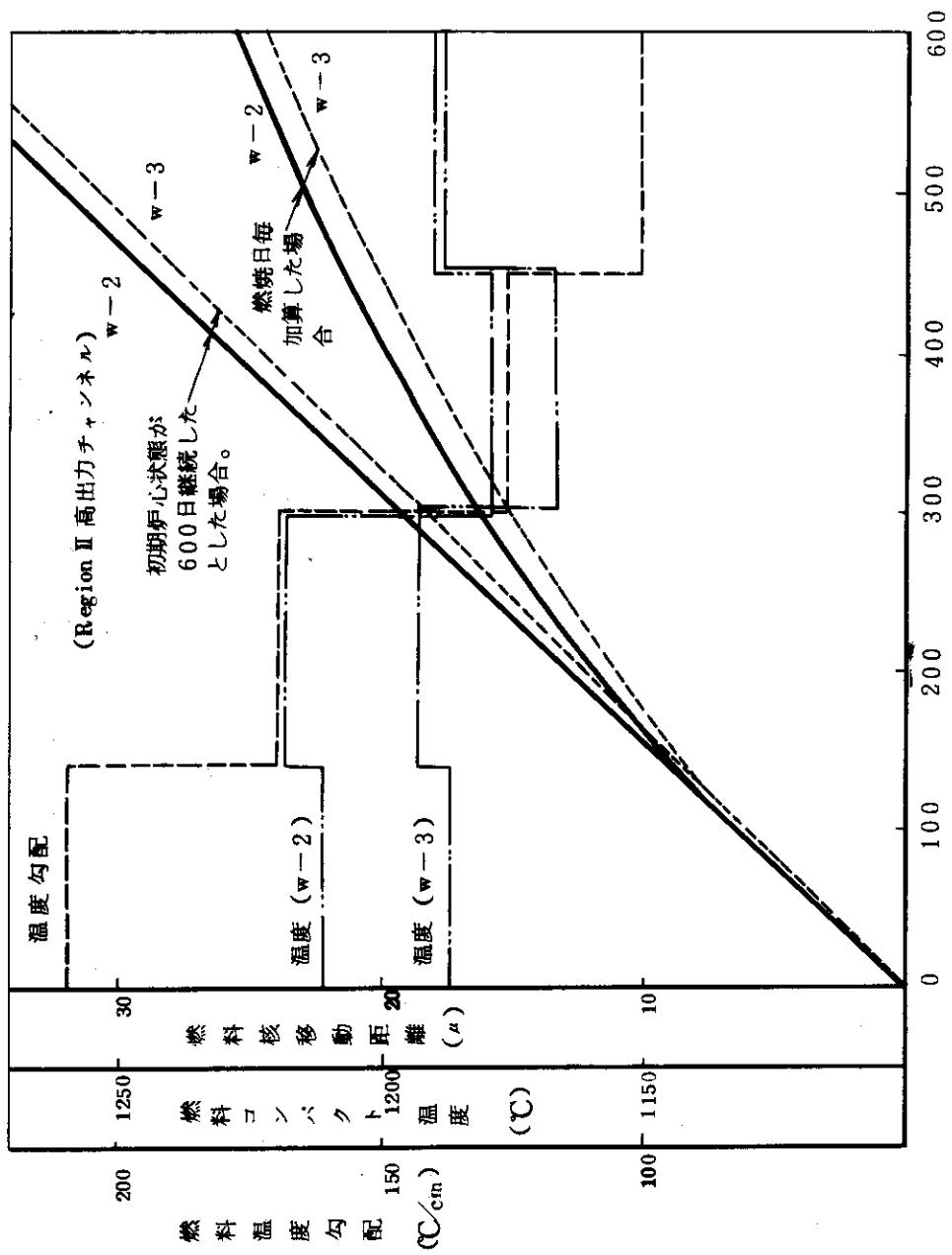
第 2.1 図 チャンネル計算メッシュ図



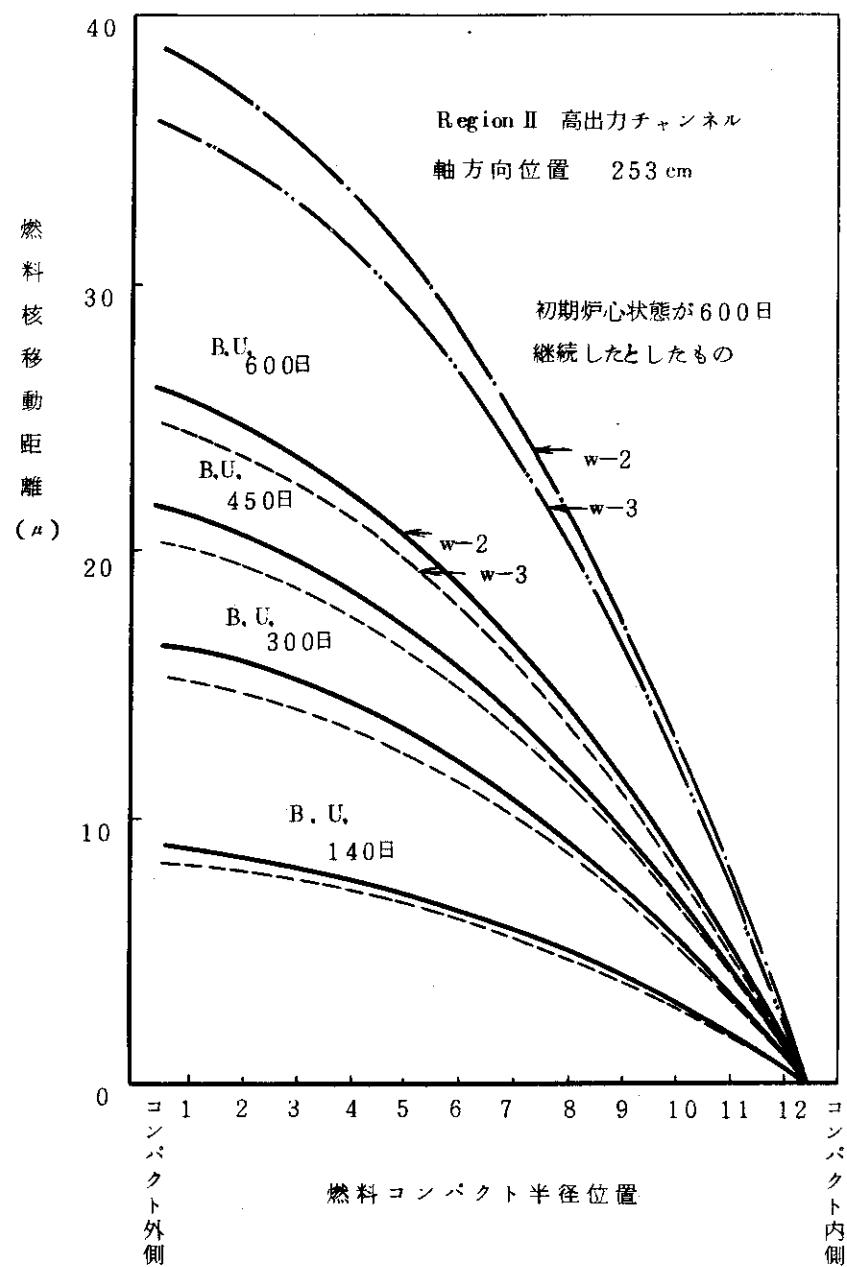
第2.2図 全炉心燃料温度体積割合分布



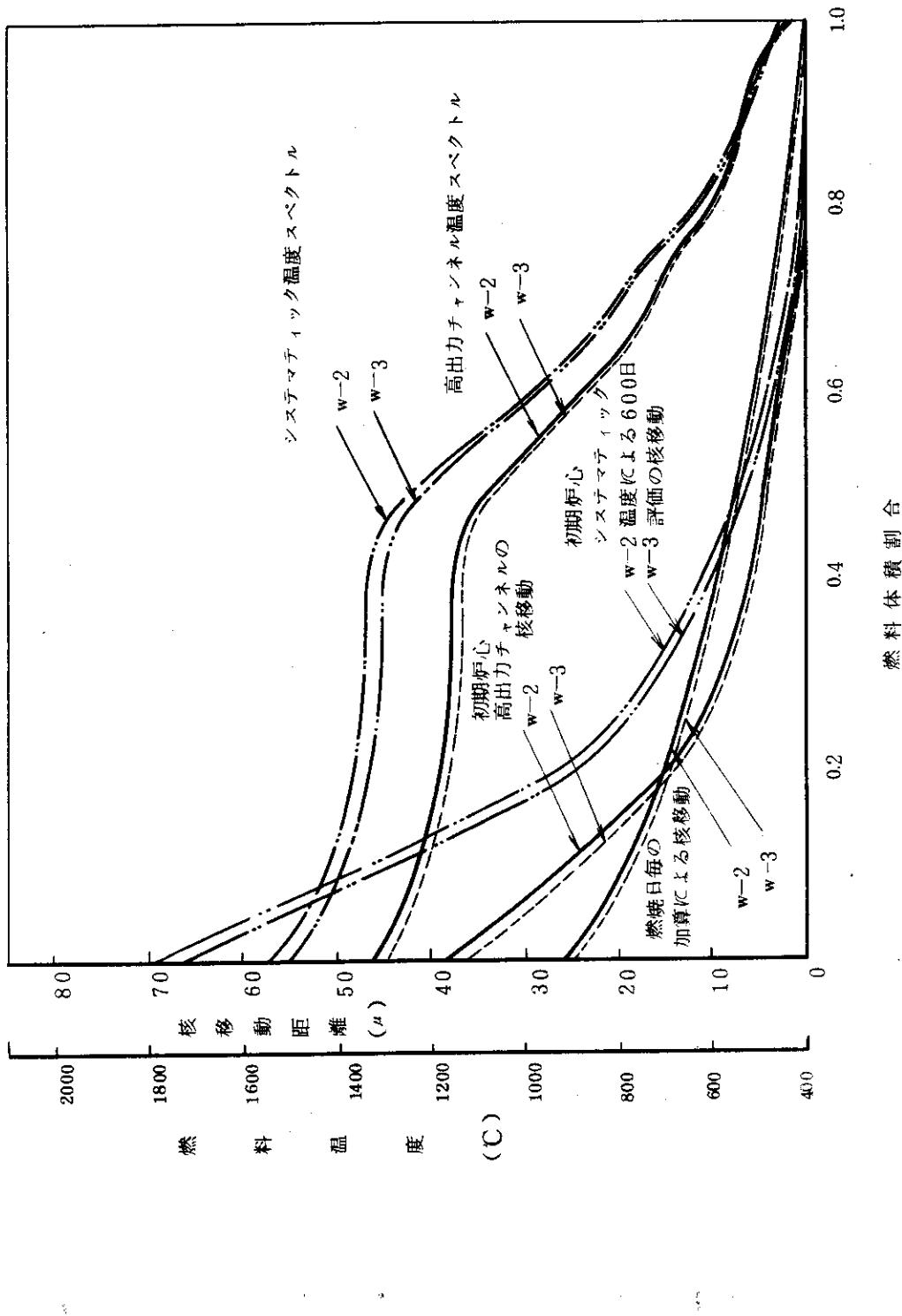
第2.3図 全炉心核移動距離



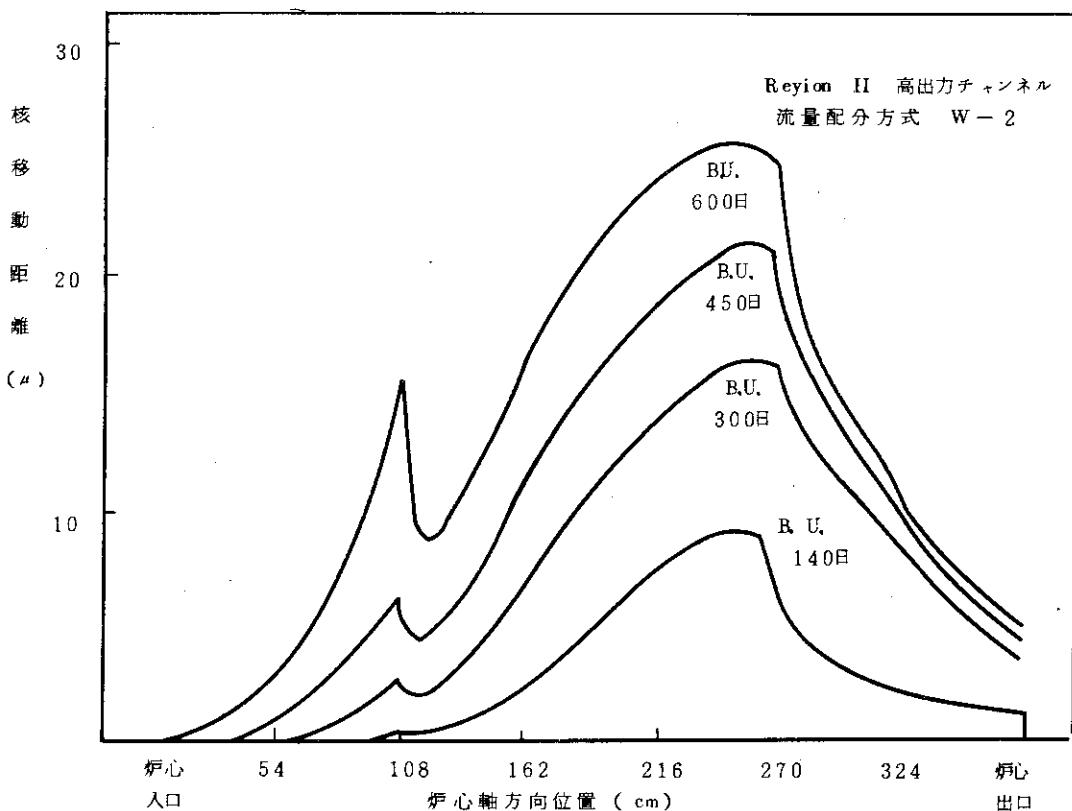
第2.4図 核移動距離の経年変化



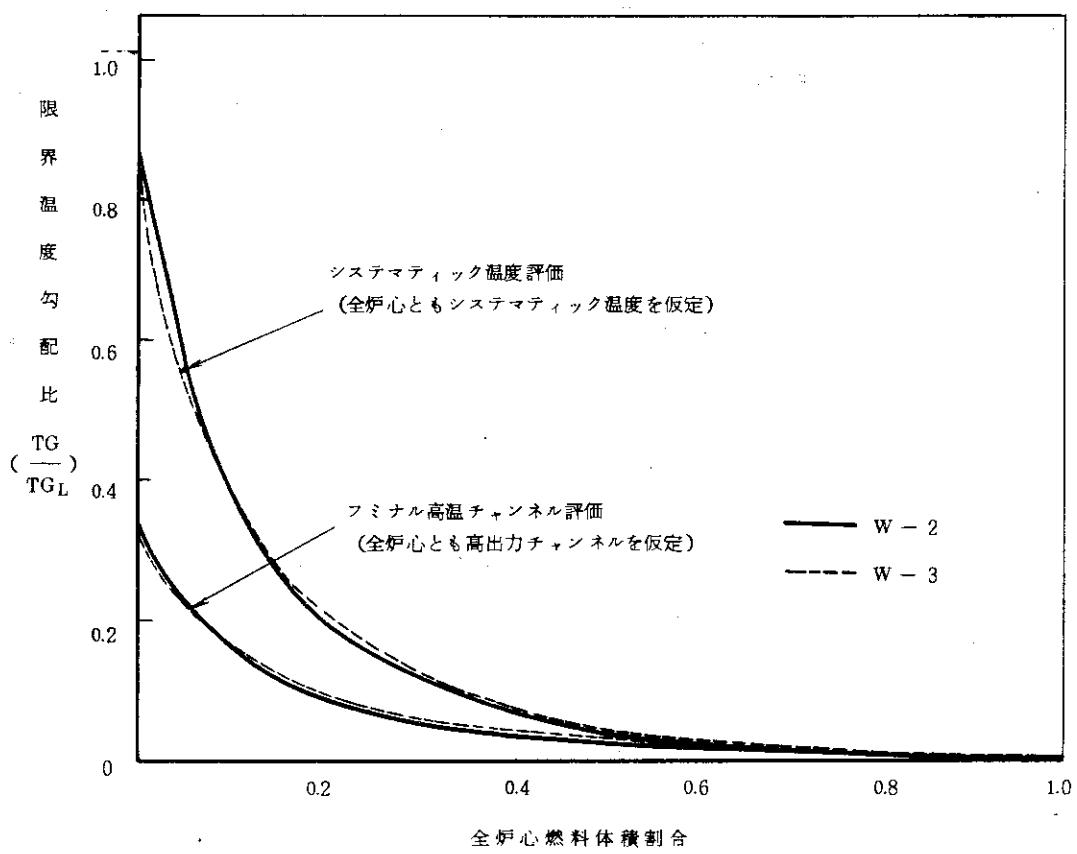
第 2.5 図 核移動径方向分布



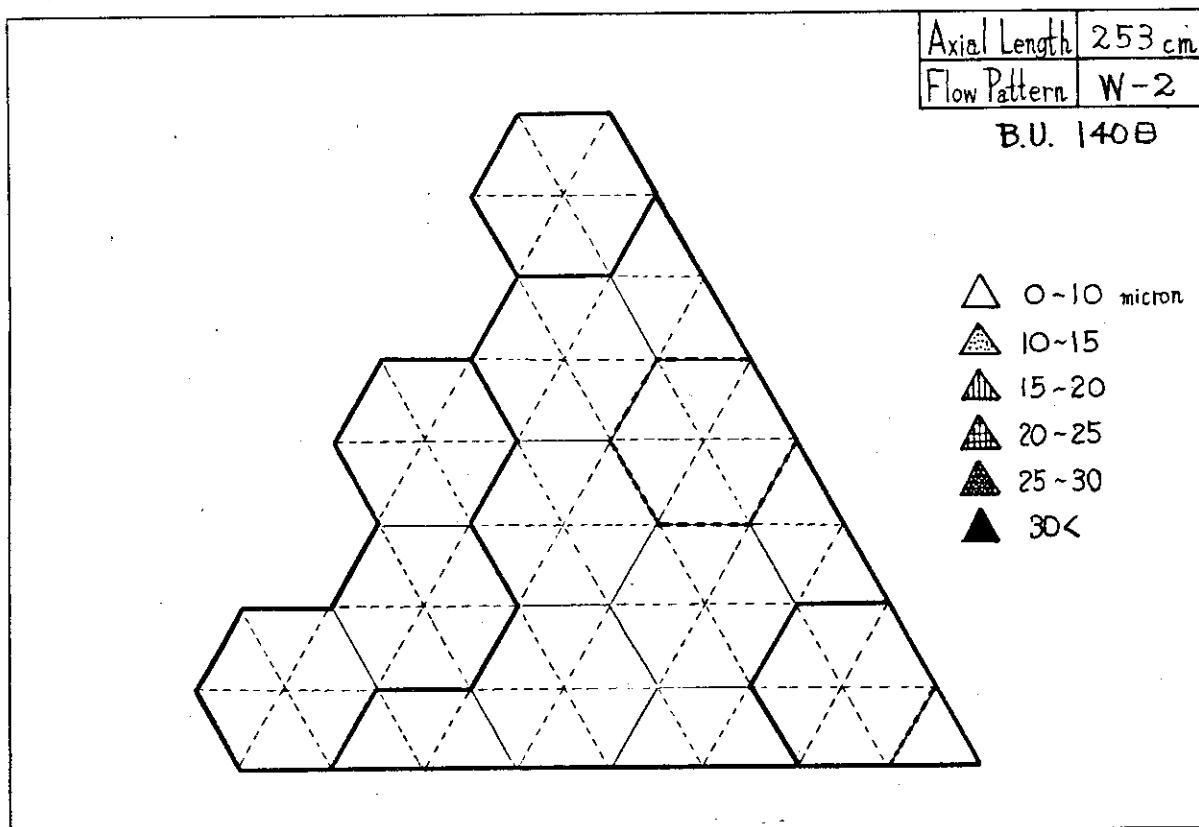
第2.7図 単一チャンネルのシスティック温度評価
(Region II 標準プロック(高出力チャンネル))



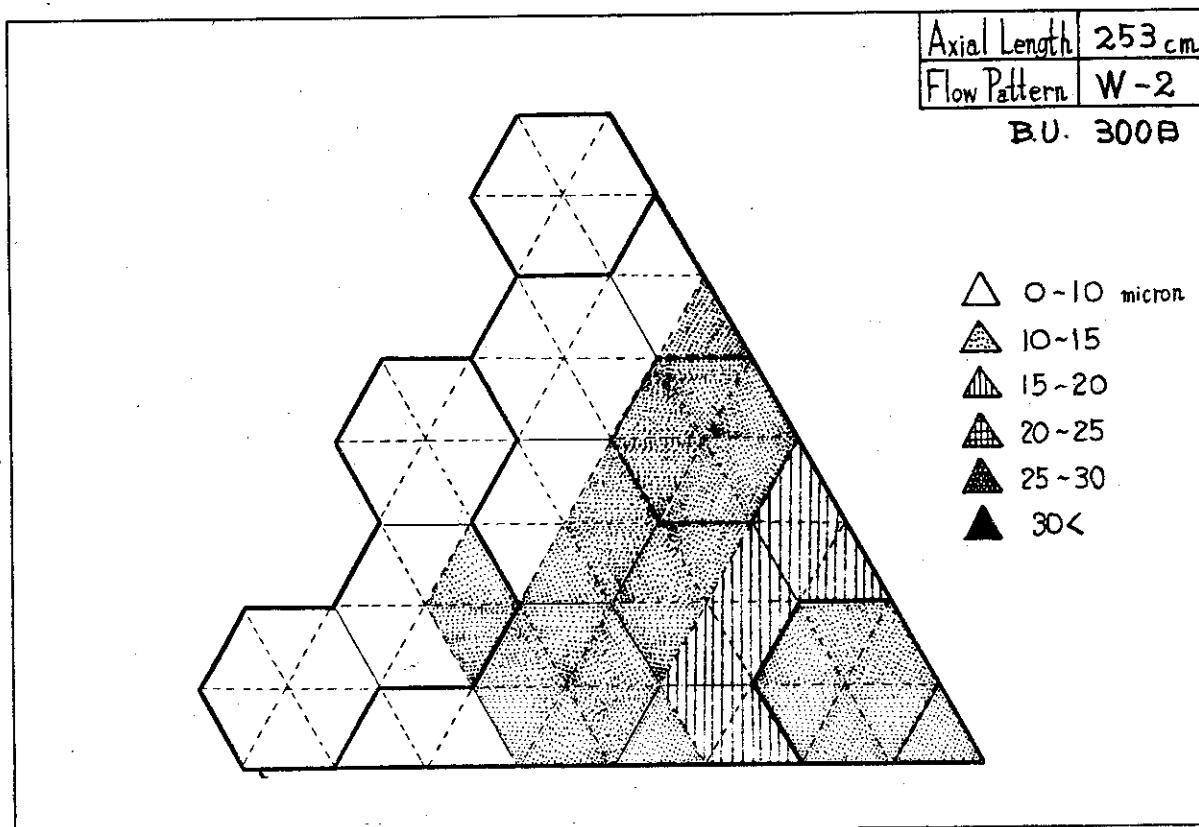
第 2.6 図 核移動軸方向分布



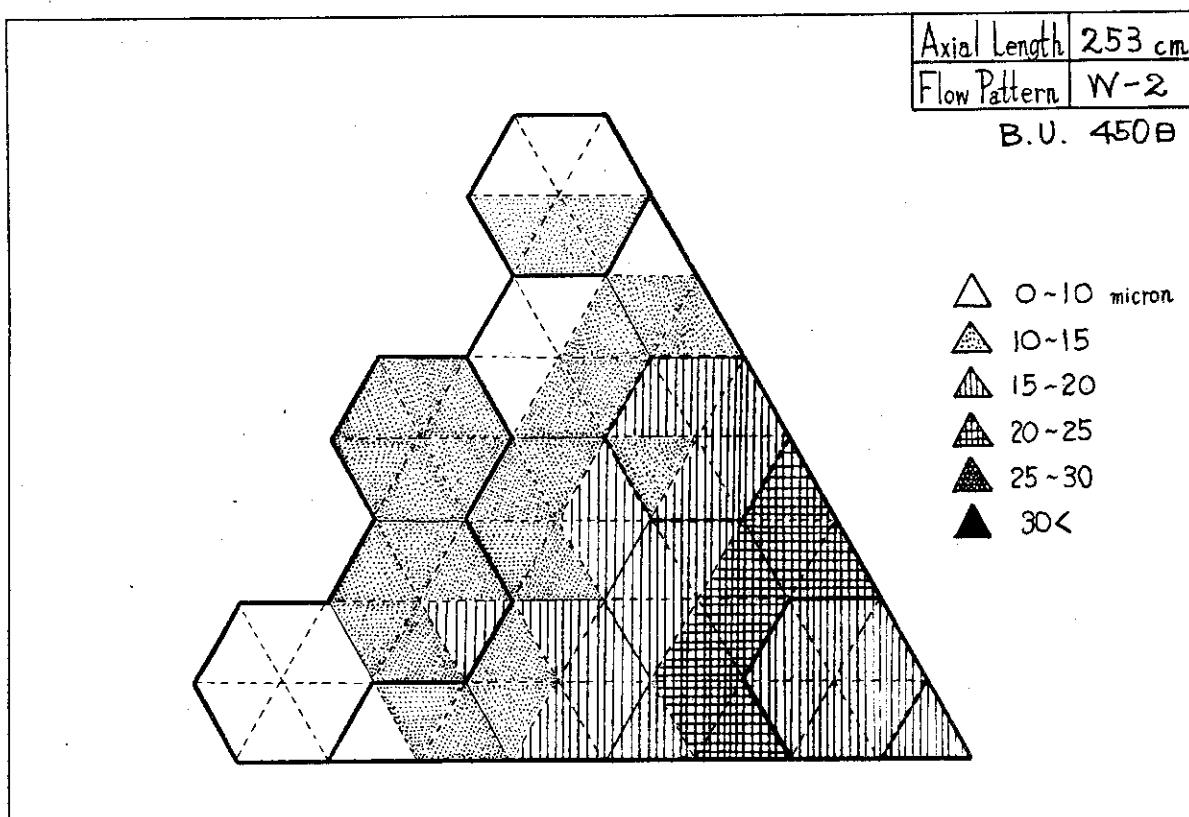
第 2.8 図 DRAGON 修正線図による評価



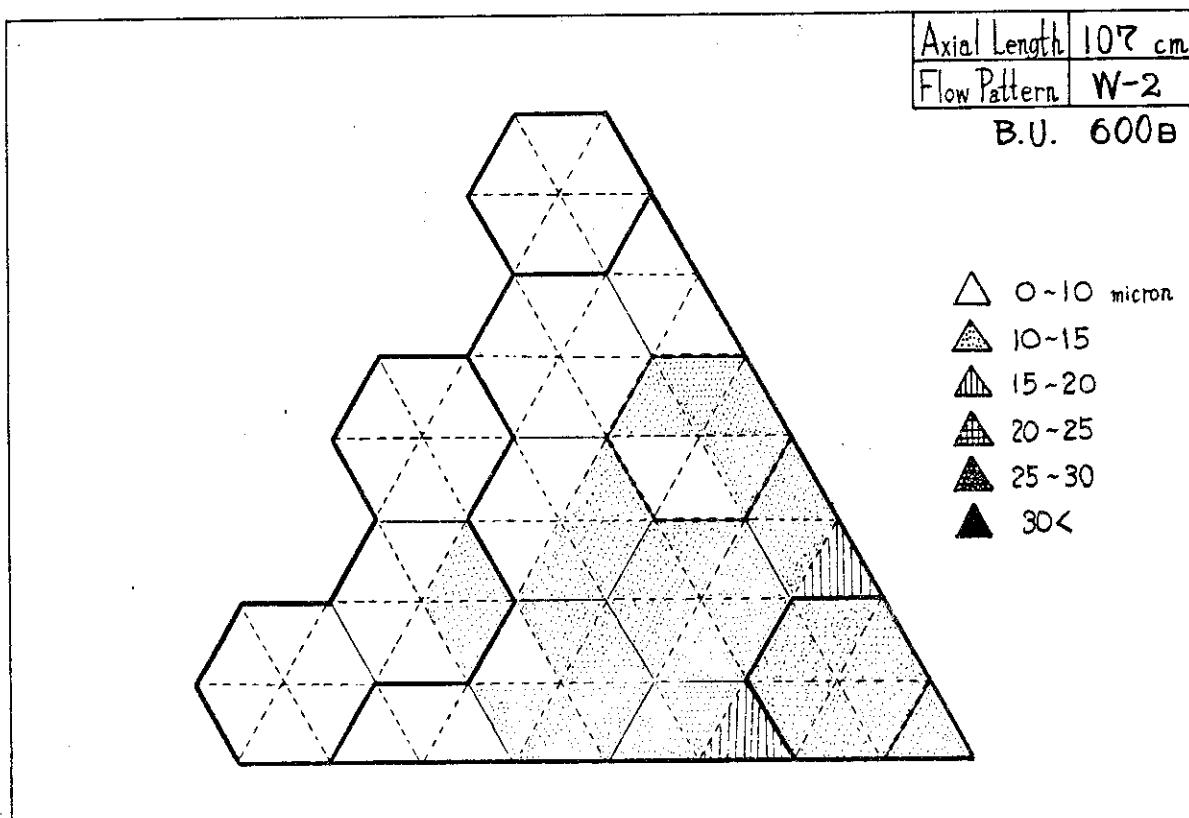
第 2.9 図 最大核移動距離炉心分布（燃焼日 140 日）

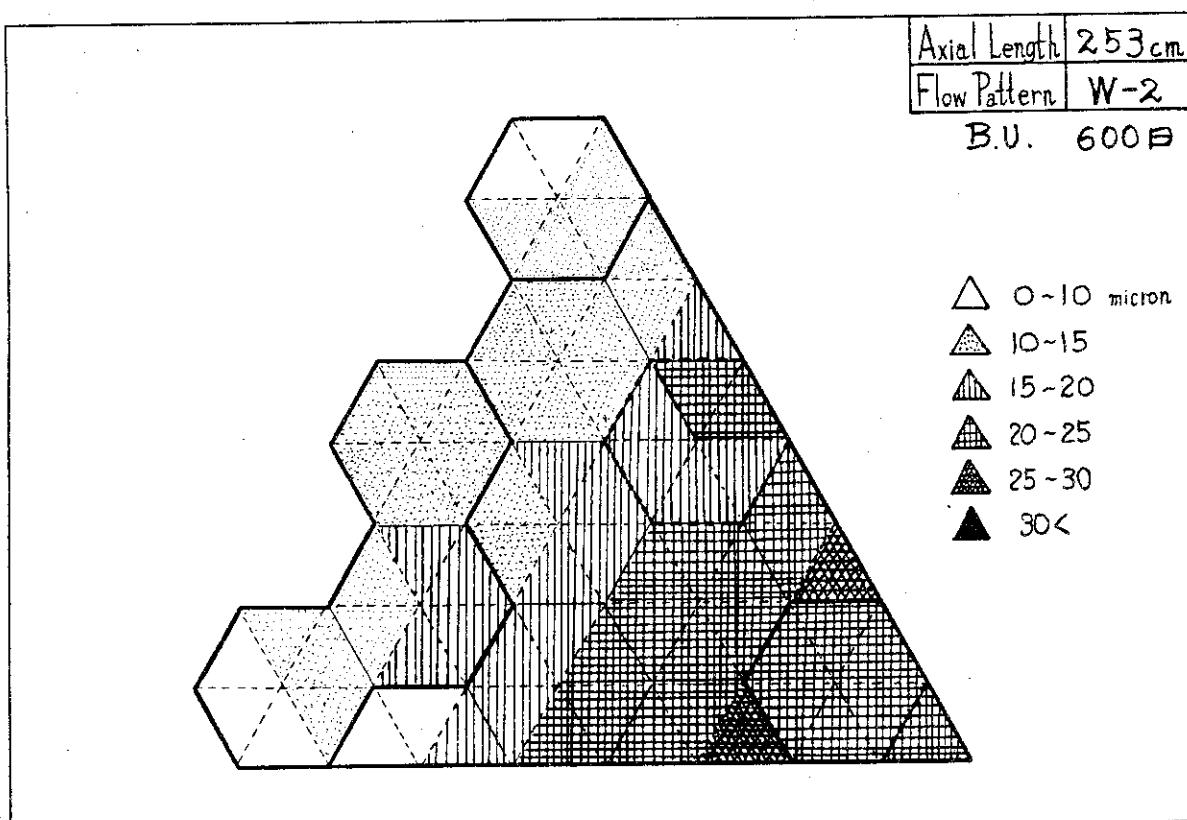


第 2.10 図 最大核移動距離炉心分布（燃焼日 300 日）

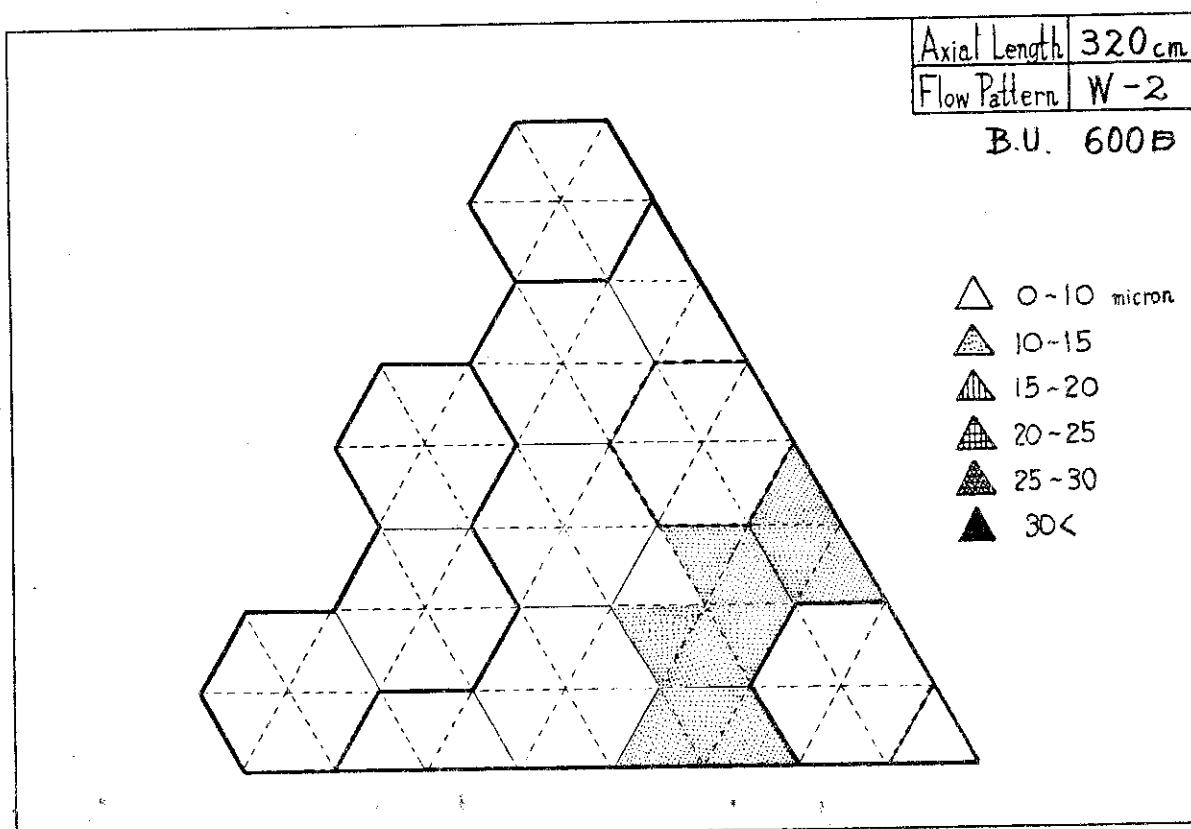


第 2.11 図 最大核移動距離炉心分布（燃焼日 450 日）

第 2.12 図 燃焼日 600 日での最大核移動距離炉心分布
(軸方向 107 cm 断面)



第 2.13 図 燃焼日 600 日での最大核移動距離炉心分布
(軸方向 253 cm 断面)



第 2.14 図 燃焼日 600 日での最大核移動距離炉心分布
(軸方向 320 cm 断面)

3. 異常時の燃料温度と燃料核移動の解析

被覆燃料粒子の健全性を考える立場から、燃料粒子にとって定格運転時よりも厳しい熱的状況における挙動を解析し、このような異常時における燃料温度および燃料核移動を評価する。

なお、Mk - III炉心設計において、プラント状態Ⅱにおける健全性限界（安全限界）として、次の目標値を設定している。

“燃料温度が 1550°C (公称温度) 以上、または、燃料核移動距離が 60μ 以上に達する粒子が、全炉心で 1% 以下とする。”

ここでは、このような設計目標が満足され得るかどうかを検討する。

3.1 評価方法

(a) Mk - III炉心で想定した異常時

被覆燃料粒子にとって厳しい異常時として、第3.1表に示すような4つの反応度印加事故を想定する。（プラント状態との対応およびその内容は、第1次概念設計用プラント状態分類（第3次仕様）に準拠している）

(b) Mk - III炉心の異常状態の解析

- 1) 異常時の炉心の熱的過渡現象の解析にはBLOOST - 6コードを使用した。
- 2) 全炉心を代表する平均チャンネル、高温チャンネルとして、Mk - III炉心（初期状態、出口冷却材等温度流量配分方式）の第IIオリフィス領域の平均チャンネルと高温チャンネルを採用した。
- 3) 燃料および減速材の温度係数は、4%濃縮度燃料の値（格子計算、O燃焼度）の値を使用した。

(c) 燃料温度と核移動距離の解析

BLOOST - 6コードにより得られる過渡状態での燃料コンパクト内温度分布を用いて、平均および高温各チャンネルでの燃料温度体積割合分布および燃料核移動体積割合分布をKEMISコード（改訂バージョン）を用いて解析した。

燃料核移動量は、特定の過渡時間における温度分布状態が、その過渡時間にそのプラント状態の発生頻度を乗じた時間だけ持続するものと仮定して、算定している。各プラント状態の発生頻度は、燃料の炉内寿命を600日（2年）として、以下のように定めている。

プラント状態Ⅱ 10回

プラント状態Ⅲ 1回

3.2 解析結果

(a) 異常時における炉心の過渡状態

各異常時における原子炉出力および燃料最高温度の過渡状態を第3.1図～第3.3図に示す。

各異常時における燃料最高到達温度は以下の通りである。

プラント状態II(1) 約1650°C (10秒後)

プラント状態II(2) 約1760°C (25秒後)

プラント状態III(1) 約1350°C (20秒後)

プラント状態III(2) 約2300°C (400秒後)

これらの過渡状態から判断して、プラント状態III(1)に関する検討は以下省略する。

(b) 燃料コンパクト内過渡温度分布

各異常状態における平均チャネルと高温チャネルにおける、最大の核移動速度となる軸方向位置での、燃料コンパクト内過渡温度分布を、第3.4図、第3.5図に示す。

(c) 過渡時の燃料温度体積割合分布と累積燃料核移動距離

各異常状態における平均チャネルおよび高温チャネルの過渡時の燃料温度体積割合分布を第3.6図、第3.7図に示す。プラント状態IIでの温度体積割合分布が定常時の温度体積割合分布に類似していることをを利用して、平均チャネルと高温チャネルの体積割合分布から、温度1550°C以上での体積割合を求めることができる。その結果を第3.2表に示す。

また、各異常状態におけるホットチャネルでの最大累積燃料核移動距離を同表に記す。いずれの状態においても、核移動距離は、定格時の移動距離に比して全く無視できる量である。

3.3 結論

単一制御棒の引き抜き事故の際、120%出力でスクラムが入るならば、温度1550°Cを越える炉心全体での燃料の体積割合は、高々1%であり、設計上の目標値とほぼ同等である。

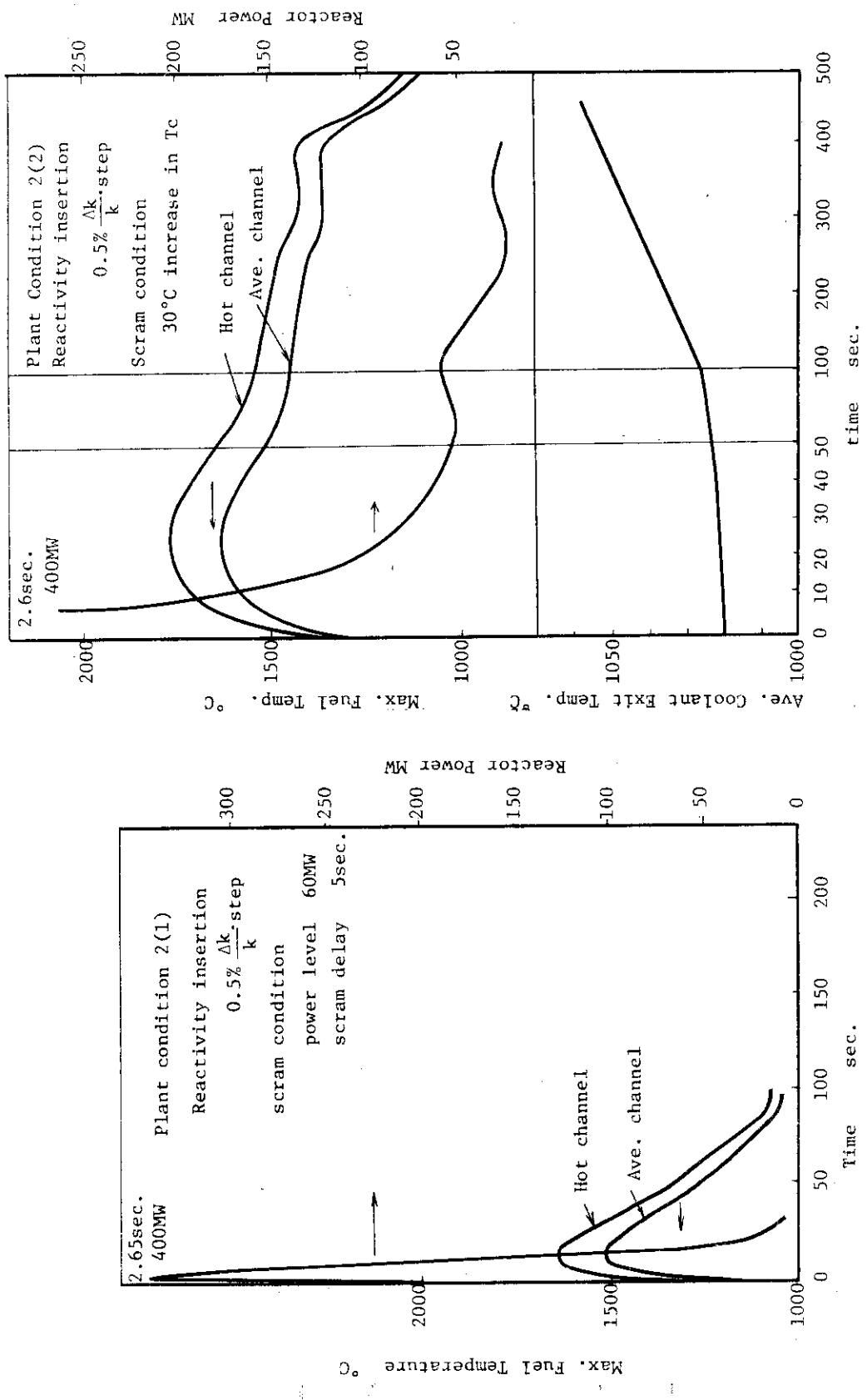
また、制御棒の引き抜き事故によってもたらされる炉心の過渡状態においては、燃料核移動は燃料の健全性上問題とならない。

第3.1表 Mk-Ⅲ炉心で想定した異常時

異常時の分類	起因事象	頻度 (プラント寿命中)	反応度印加	スクラム条件	
				レベル	スクラム遅れ
プラント状態2(1)	誤操作による单一制御棒の部分引き抜き	80回	ステップ状 0.5%△k/k	120%出力	5秒
プラント状態2(2)				冷却材出口平均温度30°C上昇	
プラント状態3(1)	誤操作による单一制御棒の連続引き抜き	5回	ランプ状 3%△k/k/600秒	120%出力	5秒
プラント状態3(2)				冷却材出口平均温度30°C上昇	

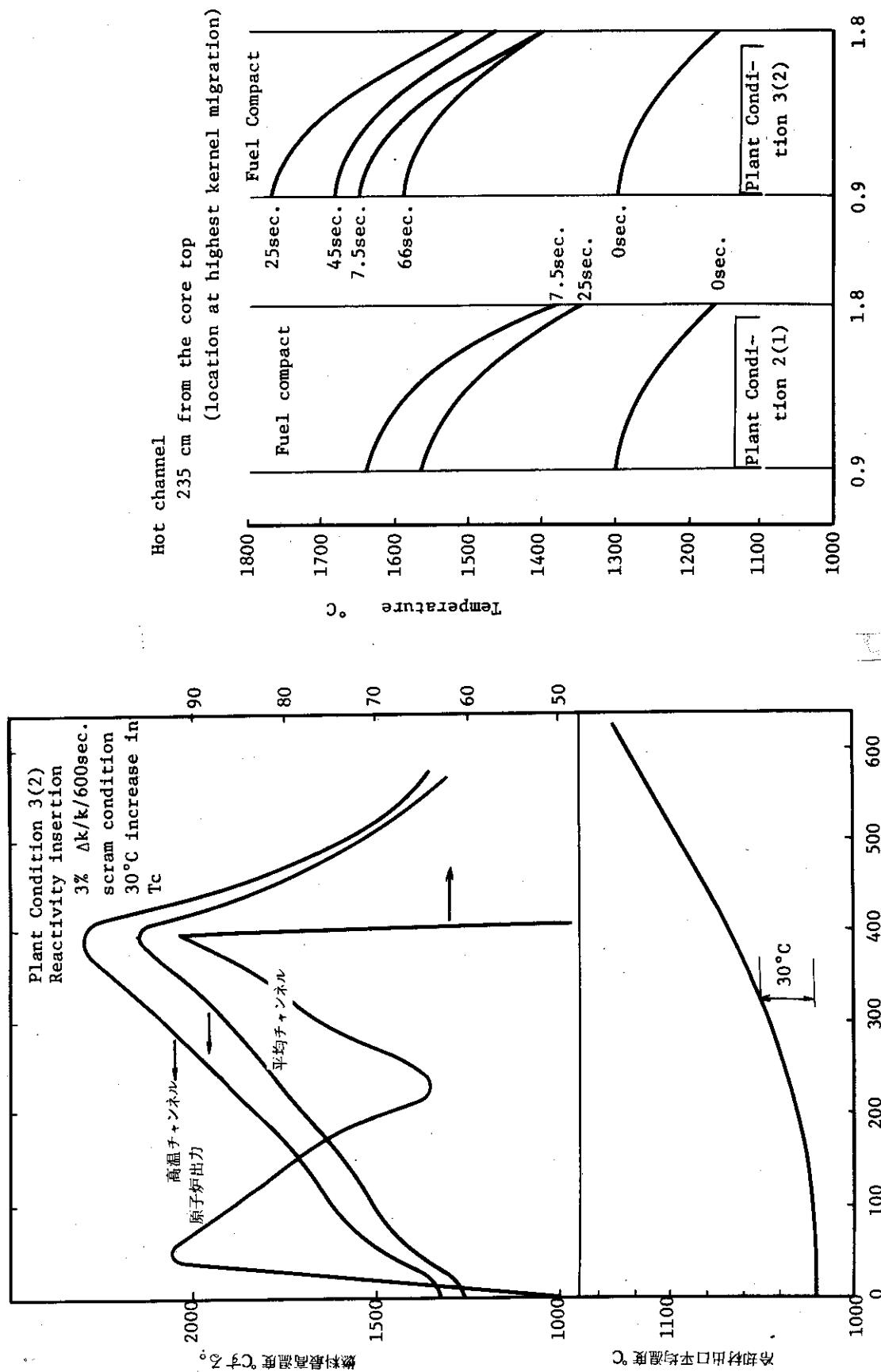
第3.2表 異常時ににおける燃料温度と燃料核移動距離

Plant condition	Transient time (sec)	Channel	Fuel temperature		Accumulated maximum kernel migration distance [calculated] × 2
			Maximum (°C)	Volume fraction (T > 1550°C)	
Plant condition 2(1)	7.5	Ave. Hot	1520 1645	0. 0.068	0.01
		Channe	Core		0.5 milli-μ in 10 times
Plant condition 2(2)	7.5	Ave. Hot	1530 1655	0. 0.079	0.02
	25.4	Ave. Hot	1635 1780	0.060 0.161	0.07
Plant condition 3(2)	44.5	Ave. Hot	1375 1465	0. 0.	0.1 milli-μ in one time
	91.8	Ave. Hot	1490 1610	0. 0.038	0.5 milli-μ in one time
	206	Ave. Hot	1710 1845	0.164 0.227	1 milli-μ in one time
	300	Ave. Hot	1905 2075	0.261 0.320	2.5 milli-μ in one time
	390	Ave. Hot	2135 2305	0.355 0.448	5 milli-μ in one time



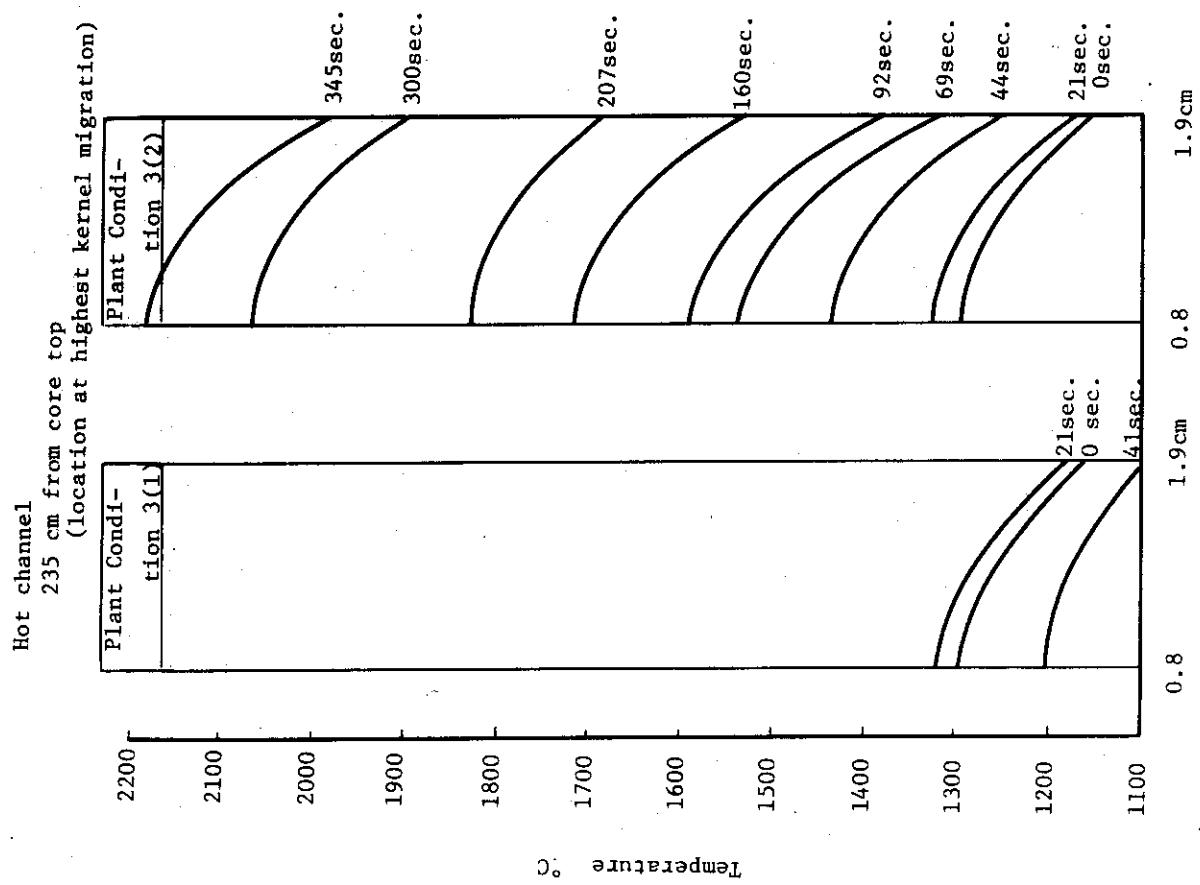
第3.1図 プラント状態2(1)での炉心の過渡状態

第3.2図 プラント状態2(2)での炉心の過渡状態

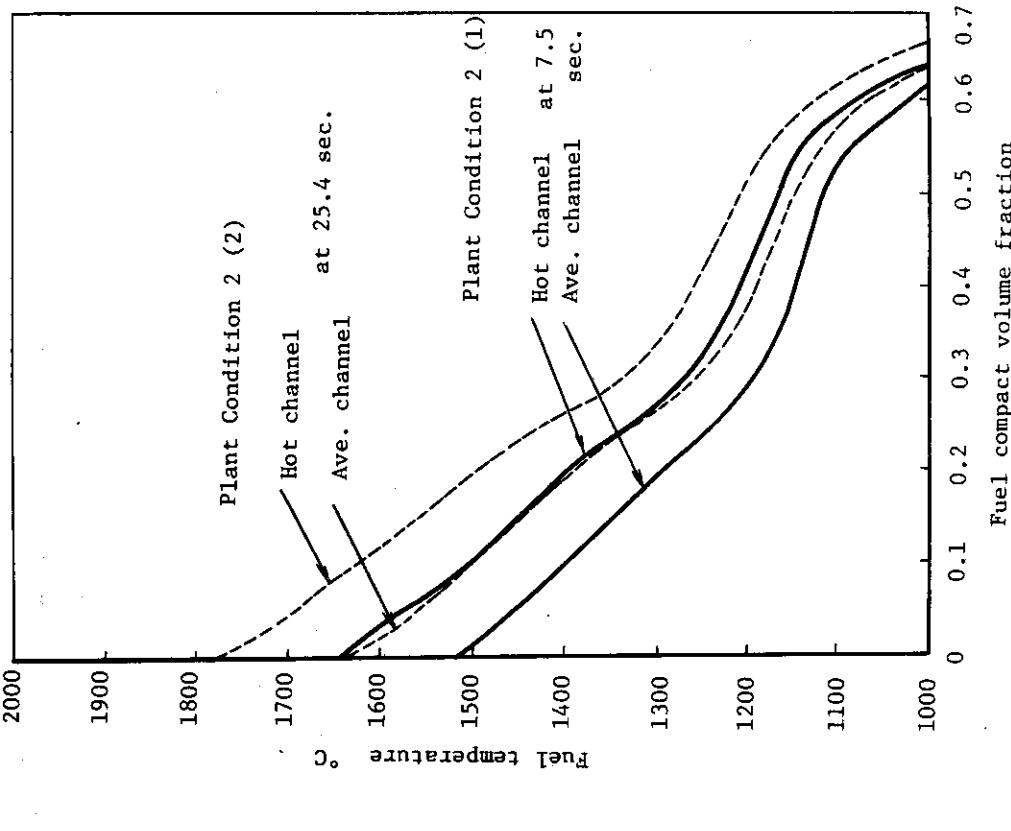


第3.3図 プラント状態3(2)での炉心の過渡状態

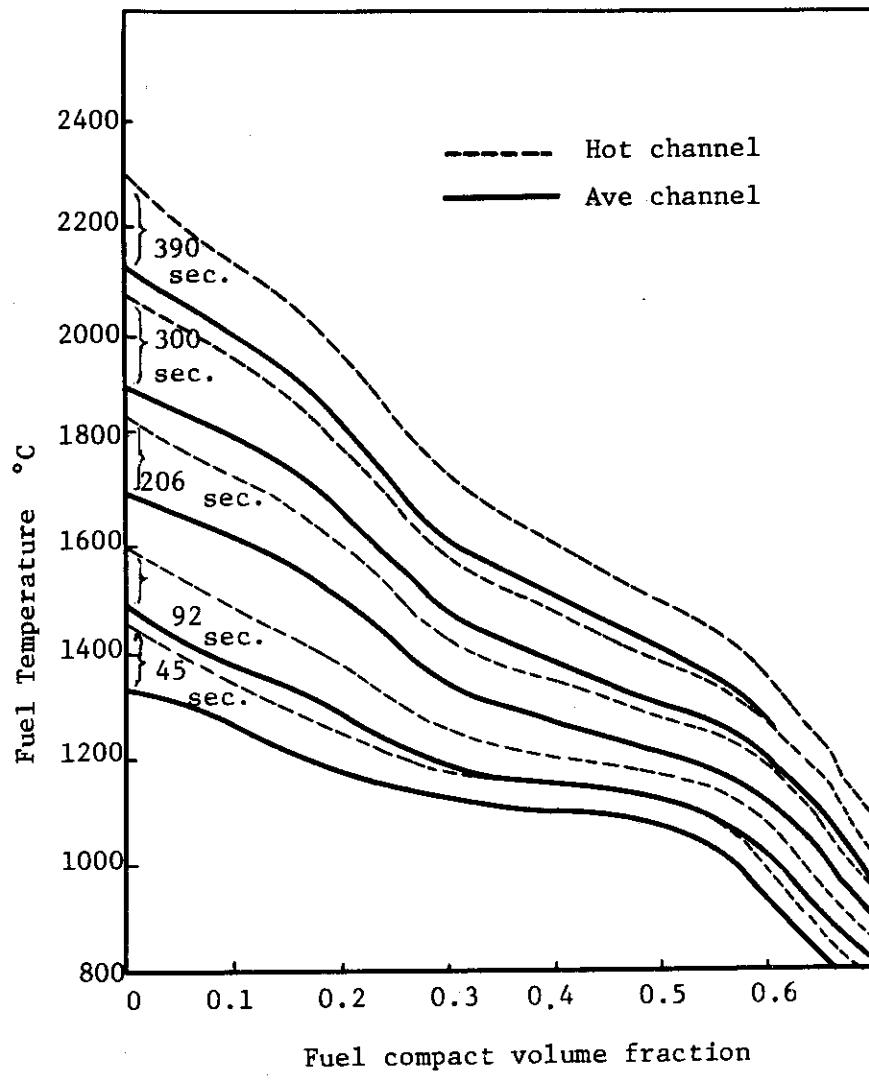
第3.4図 プラント状態2における燃料コンパクト内温度分布



第3.5図 プラント状態3における燃料コンパクト内温度分布



第3.6図 プラント状態2の過渡時の燃料温度体積割合分布



第3.7図 プラント状態3(2)の過渡時の燃料温度体積割合分布

4. 被覆燃料粒子の機械的健全性の評価

Mk - III炉心設計において設計された被覆燃料粒子は、基本概念設計の粒子と比較して、燃料核直径が 500μ から 600μ へ、また緩衝層厚さが 40μ から 60μ へとそれぞれ変更された。この検討は、Mk - III炉心の照射条件下における新しい被覆燃料粒子の機械的健全性として、SiC 層の健全性を評価することを目的とする。

4.1 評価方法

本検討計画の当初においては、被覆層製造公差を考慮した破損率の確率論的評価を実施する予定であったが、後述するように本設計粒子の照射条件が軽微であることが判明し、これを除外し、以下の項目について、SiC 層応力の評価を MICROS - 2 コードにより実施した。

- 1) 公称寸法粒子の応力
- 2) 製作公差内の寸法効果
- 3) アメーバ効果を受けた粒子の応力
- 4) 高温過渡時の内圧破損の可能性

なお、本検討においては、SiC の設計限界応力（許容応力）を、円周応力で 0 kg/cm^2 と設定している。

4.2 結果と検討

(a) 公称寸法粒子の応力

Mk - III炉心の燃料の照射条件の代表例（第 2 領域）が、第 1.1.1 図である。燃料の照射終了時（EOL）における最大照射量は約 $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.18 \text{ Mev}$)、約 3% FIMA である。このような照射条件下における公称寸法粒子の応力変化を第 4.1 図に示す。最大許容燃焼度は約 9% FIMA であり、本炉心の EOL において、SiC 層の機械的破損は起らない。

(b) 製作公差内の寸法効果

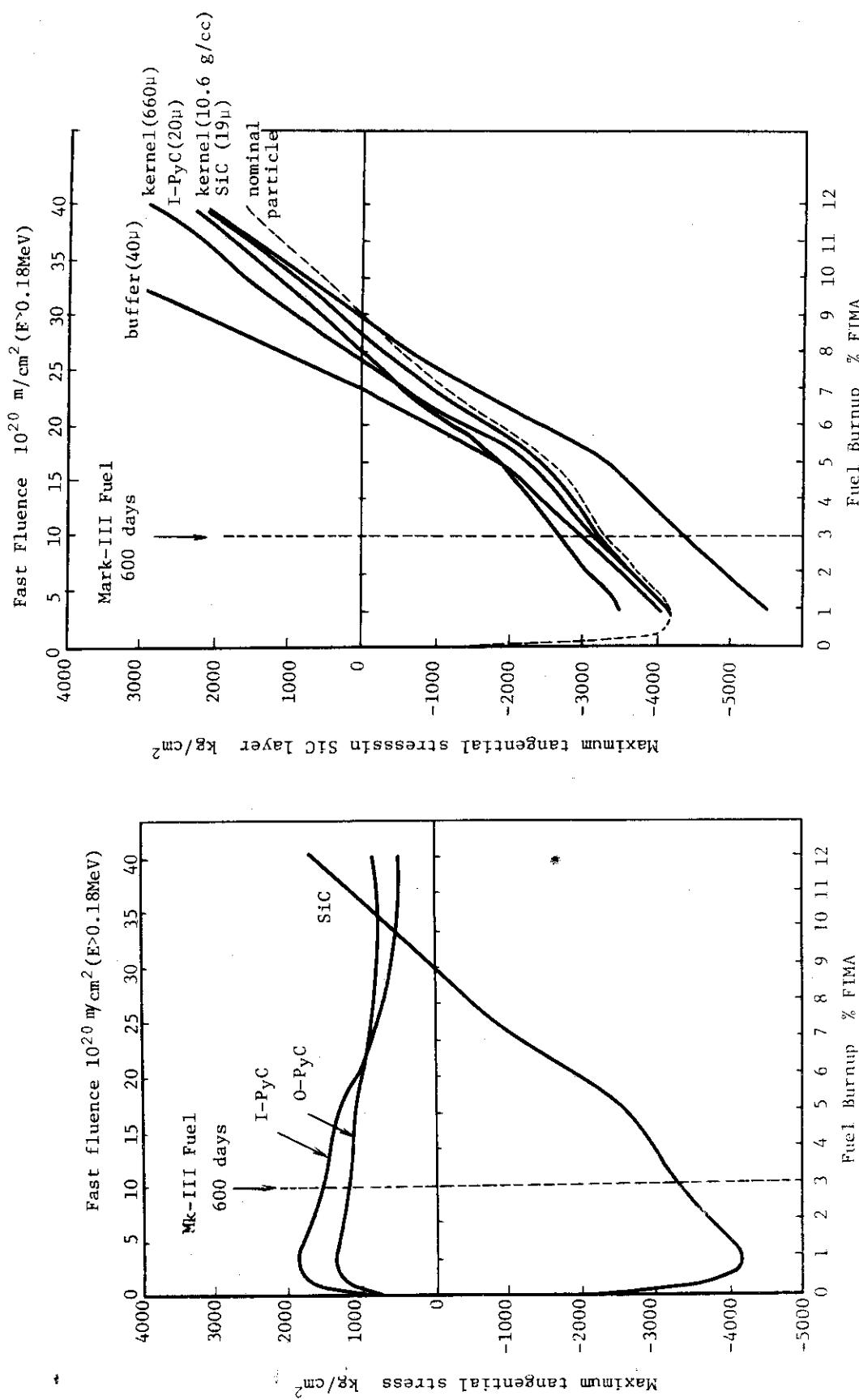
変更された寸法諸元に対する製作公差を考慮し、製作公差限界の諸元を有する粒子の SiC 応力変化を第 4.2 図に示す。製作公差内の寸法諸元のうち、緩衝層厚さの影響が最大である。しかし、極めて存在確率の低い粒子（2 シグマレベルの 2 乗）でも、約 6% FIMA までは、SiC の円周応力が 0 kg/cm^2 以下である。従って、EOL における SiC 層の破損確率は製造時の値と変りないと考えて良い。

(c) 高温過渡時の内圧破損の可能性

通常運転時平均温度（約 1000°C ）からの過渡的な高温状態における SiC 層の応力（公称寸法粒子）を第 4.3 図に示す。図より、EOL、 1600°C においても、SiC 層応力は許容応力より十分に低い。

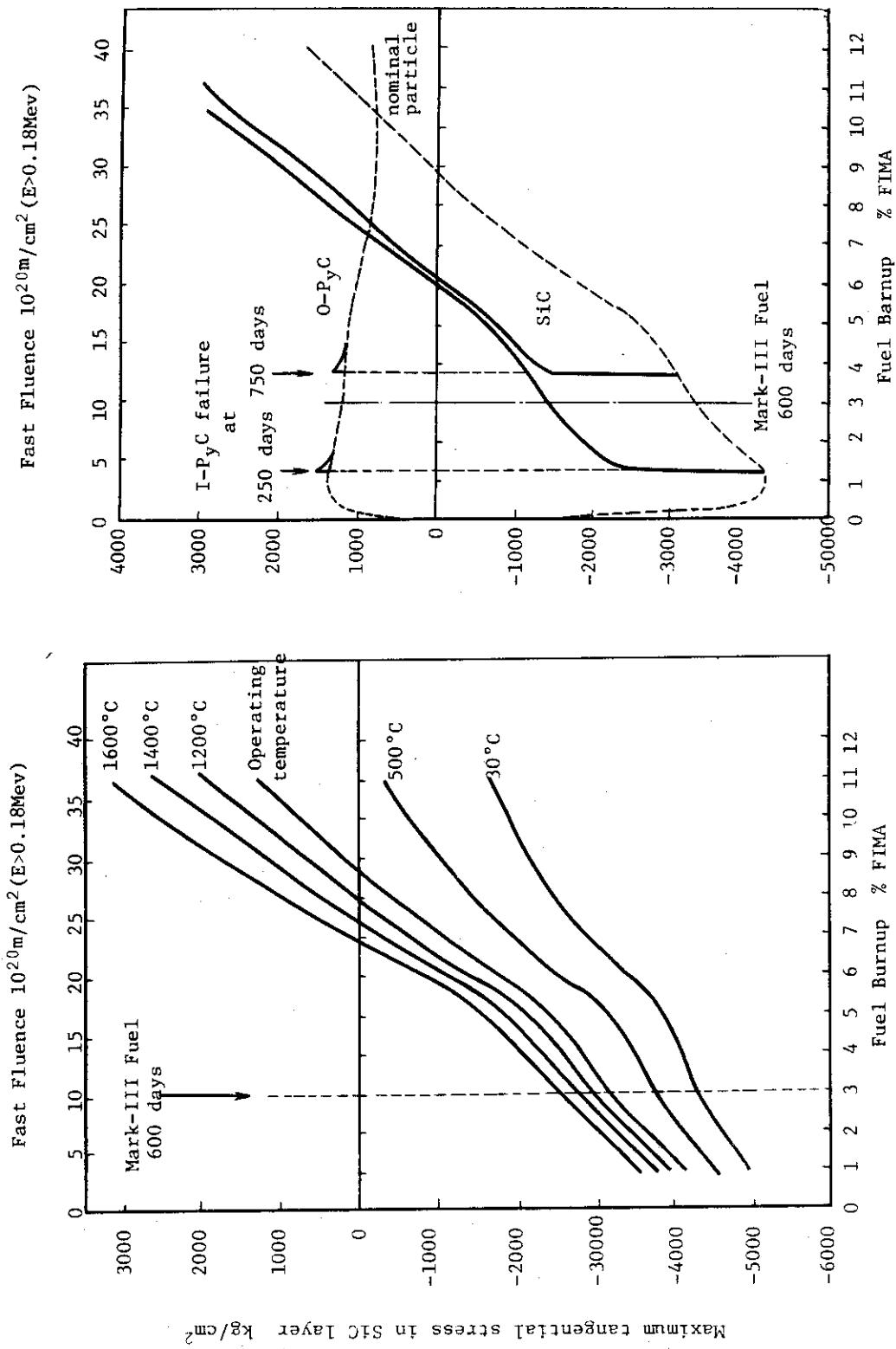
(d) アメーバ効果を受けた粒子の応力

アメーバ効果を受けた粒子を、 I - PyC 層が破損した粒子と考えることにする。250日, 750 日でアメーバ破損が起ったときの、 SiC 層の応力変化が第 4.4 図である。これでも約 6 % FIMA 迄は SiC は破損しない。



第4.1図 公称寸法粒子の応力変化

第4.2図 SiC応力に対する粒子寸法公差の影響



第4.3図 SiC応力に対する温度の影響

第4.4図 SiC応力に対するI-PyC層破損の影響

5. 燃料棒の応力解析

5.1 燃料コンパクトと燃料スリープの応力解析

出力分布、高速中性子束分布および冷却材流量の定格運転期間中の変化を考慮して、Mk III 燃焼炉心における燃料コンパクトと燃料スリープの機械的健全性（応力）を評価する。

5.1.1 評価方法

(a) 対象炉心

制御棒パターン P4、流量調節方法 W2

(b) 対象チャンネル

リージョン番号	ブロック番号	
	標準ブロック	制御棒ブロック
1	12 - 24	13 - 26
2	11 - 26	10 - 25
3	12 - 17	-
4	7 - 24	-

上記ブロック内燃料棒が応力解析の対象としているものであり、それぞれ各リージョンの制御棒ブロックと標準ブロックの代表チャンネル（運転期間を通じホットチャンネルかそれに近いもの）である。代表チャンネルの炉心位置を第 5.1 図に示す。応力評価に際しては、設計限界応力（許容応力 - 引張）を、コンパクトについては 30 kg/cm^2 、スリープについては 50 kg/cm^2 としている。

5.1.2 解析方法

- (a) 使用コード MULSHES（中空無限円筒を仮定した一次元の異方性粘弾性解析モデル）
- (b) 材料物性値 第 1 次概念設計（Mk III）設定値
- (c) 照射条件

運転期間（最大照射時間） 600 日

核熱計算で得られている各燃焼日の間（0 日 / 150 日、150 日 / 300 日、300 日 / 450 日、450 日 / 600 日）で、出力分布、高速中性子照射量、冷却材流量を線形内挿することによって運転期間中の連続的な空間的時間的変化を考慮する。なお、10 日は無視し、かつ、核熱計算の 140 日の燃焼日を 150 日とみなしている。

(d) その他の条件

炉停止時温度 30°C

炉心全長 378 cm (各ブロックの非燃料部を除いた燃料コンパクト有効長)

5.1.3 結果と検討

(a) 運転期間中の温度変化

各代表チャンネルの燃料最高温度の炉心軸方向分布を第5.2図～第5.7図に示す。また、運転中の燃料最高温度と冷却材炉心出口温度の変化を第5.1表に示す。

燃料温度は、運転に伴う出力分担の変化、制御棒操作および流量調節とによって変化していく。Mk-III炉心では、使用期間中の最高温度は殆どのチャンネルにおいて照射初期に発生している。この照射初期の最高温度は、上部より5段目のブロックの燃料棒で発生する。しかし、燃焼に伴ってこの最高温度位置は、上部より2段目のブロックの燃料棒に移っていく。このため、運転に伴って燃料最高温度は、炉心下方の燃料棒では減少していき、上方の燃料棒では上昇していく。このような使用期間中の燃料温度変化は、上部燃料棒で最大 500°C の上昇、下部燃料棒で最大 200°C の減少である。

(b) 運転中の応力変化

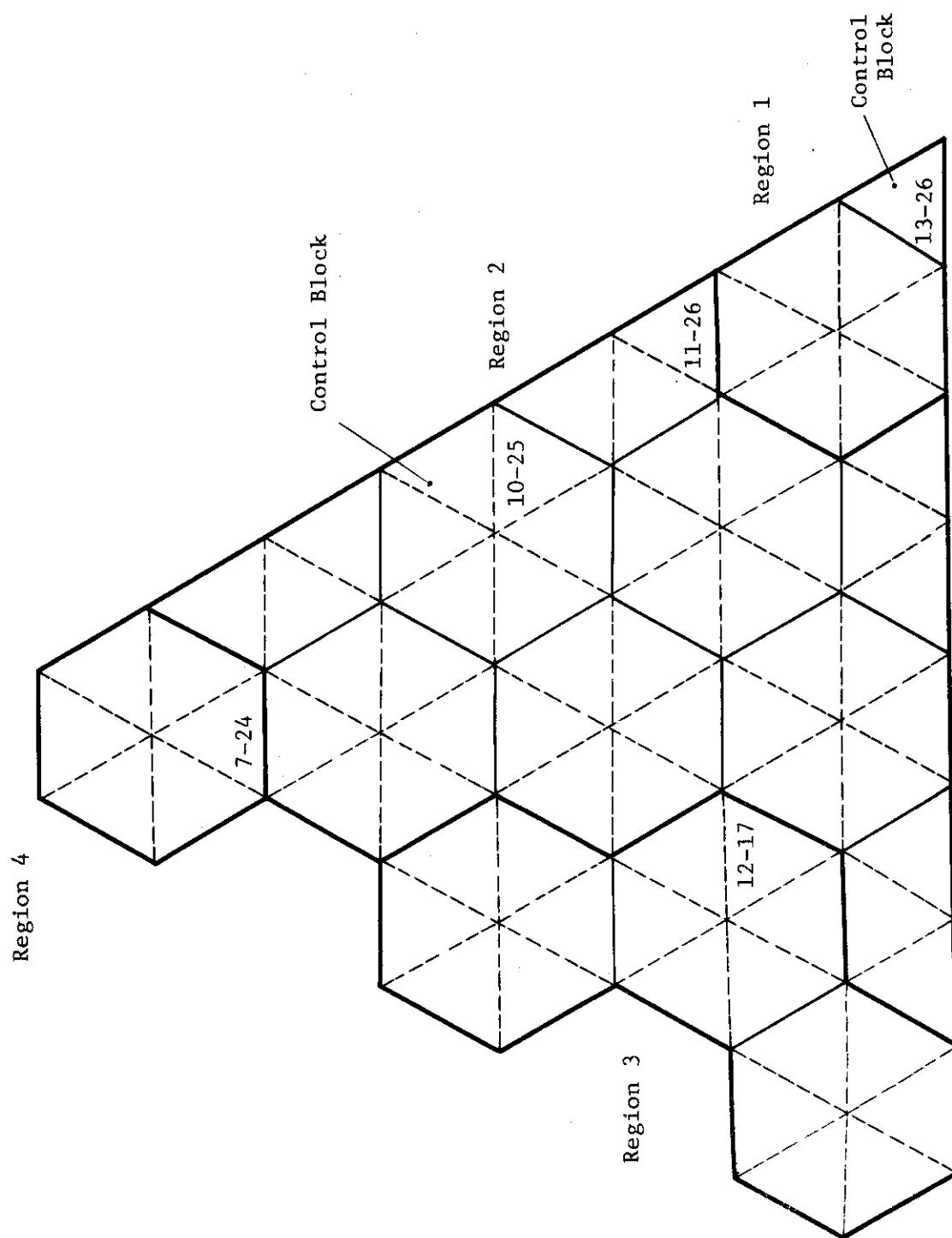
各代表チャンネルの燃料コンパクトと燃料スリープの最大応力の照射による変化を第5.8図～第5.14図に示す。これらには最大応力の軸方向発生位置も示されている。また、運転中の最大応力と最大応力対許容応力比を初期、運転時、炉停止時のそれについてまとめたものを第5.2表に示した。最大応力は運転末期(600日)に、また、炉心中央部から炉心の入口に近い側で多く発生している。コンパクトの最大応力は、全ての場合、許容応力を下まわっているが、極く一部の燃料については、ほとんど許容応力に近い応力が発生しているコンパクトがある。他方、スリープの方は、最大でも許容応力(50 kg/cm^2)の約1/2と小さい。

第5.1表 運転中の燃料最高温度と冷却材出口温度の変化
 制御棒ペータンP 4
 流量調節方式W 2

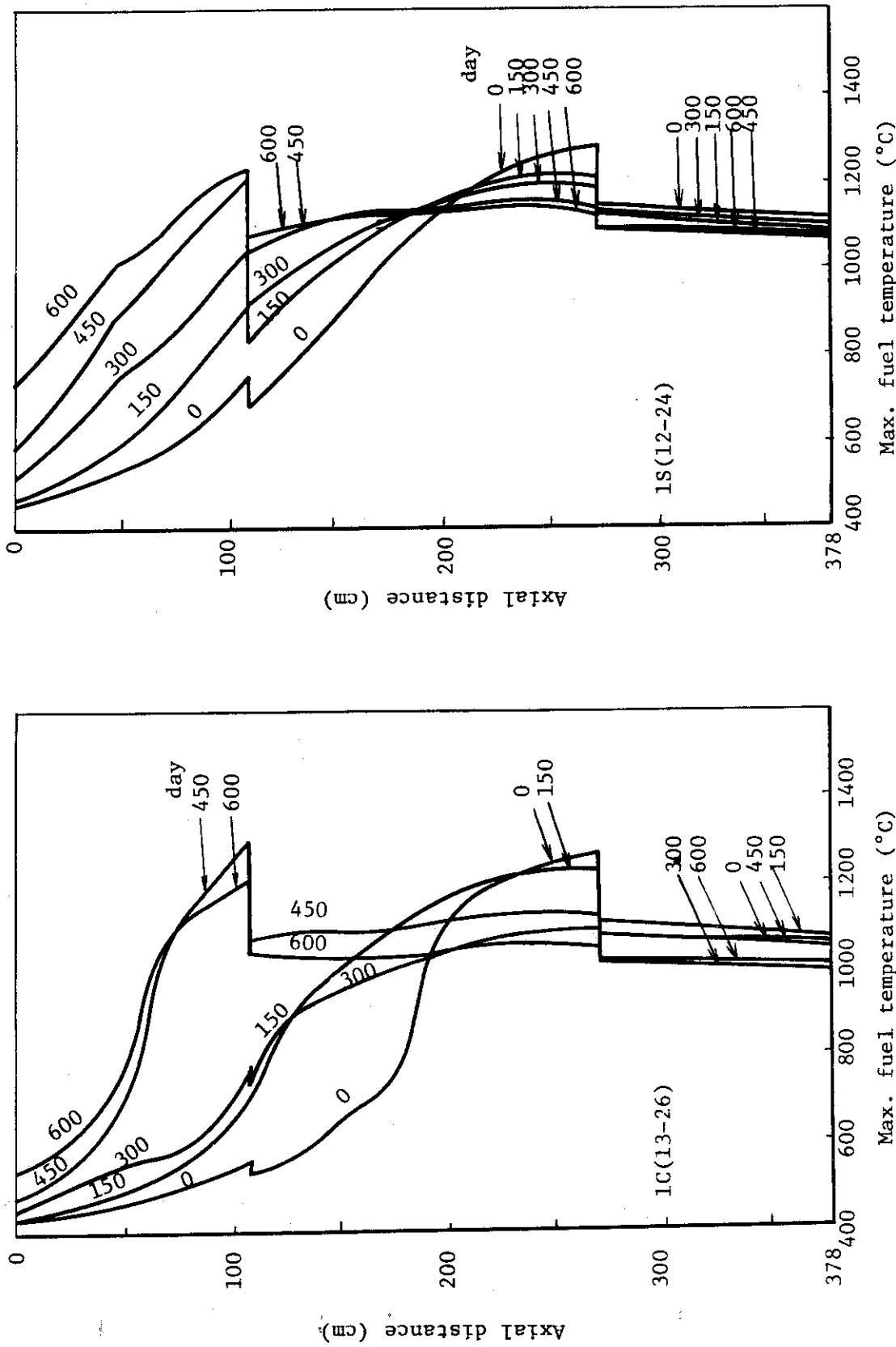
	燃料最高温度 °C					冷却材出口温度 °C				
	初期	150日	300日	450日	600日	初期	150日	300日	450日	600日
1G(12-26)	1265	1235	1091	1299	1215	990	1020	944	1024	972
1S(12-24)	1290	1229	1206	1210	1234	1061	1045	1064	1042	1049
2C(10-25)	1313	1270	1212	1173	1158	1078	1092	1081	1073	1070
2S(11-26)	1343	1316	1240	1244	1250	1117	1137	1104	1130	1106
3S(12-17)	1287	1262	1233	1226	1219	1109	1124	1124	1134	1136
4S (7-24)	1210	1121	1170	1156	1150	1071	1077	1076	1079	1080

第5.2表 燃料コンパクト・燃料スリープの運転中の最大応力と最大引張応力対許容応力比

初期	運転時	炉停止時	初期	運転時	炉停止時	最大圧縮応力 (kg/cm ²)		最大引張応力 σ _a (kg/cm ²)		運転時 炉停止時						
						円周	軸	円周	軸							
コーン	1C	16	20	16	13	29	26	-11	-14	-20	-40	0.67	0.53	0.97		
コンバクト	1S	15	18	18	15	27	26	-10	-12	-23	-41	0.60	0.60	0.90		
コンバクト	2C	15	18	14	12	23	23	-10	-12	-21	-18	-35	0.60	0.47	0.77	
コンバクト	2S	15	19	18	15	26	25	-10	-13	-26	-21	-39	-37	0.63	0.60	0.87
コンバクト	3S	11	14	15	13	23	22	-8	-9	-22	-19	-33	-32	0.47	0.50	0.77
コンバクト	4S	9	11	11	9	18	17	-6	-7	-17	-14	-26	-24	0.37	0.37	0.60
スリーブ	1C	12	12	12	12	18	17	-14	-14	-15	-14	-15	-15	0.24	0.24	0.36
スリーブ	1S	11	11	9	13	25	24	-13	-13	-10	-14	-21	-20	0.22	0.22	0.50
スリーブ	2C	11	11	10	13	18	17	-13	-13	-12	-14	-15	-14	0.22	0.22	0.36
スリーブ	1ZS	11	11	12	12	26	26	-13	-13	-10	-14	-21	-21	0.22	0.24	0.52
スリーブ	3S	8	8	11	21	21	-10	-10	-9	-13	-17	-17	0.16	0.22	0.42	
スリーブ	4S	7	7	9	12	12	-8	-8	-8	-11	-10	-10	0.14	0.18	0.24	

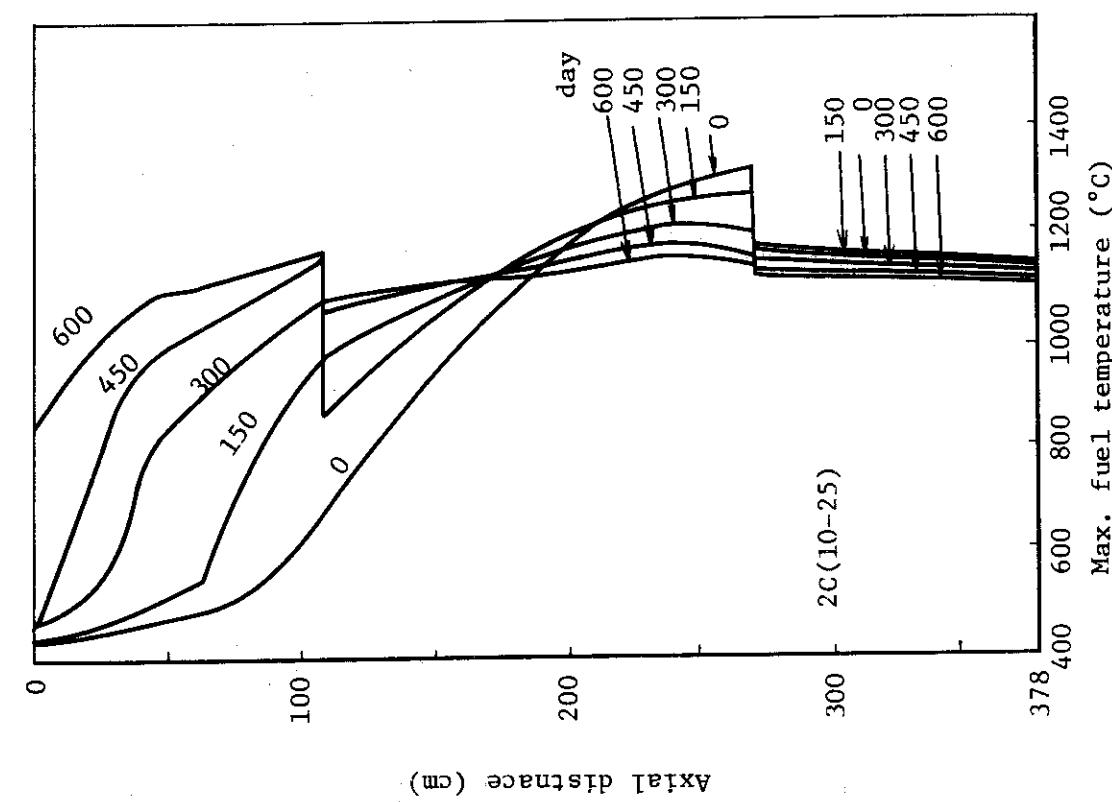


第5.1図 燃料棒の応力解析を実施したプロックチャレンジ

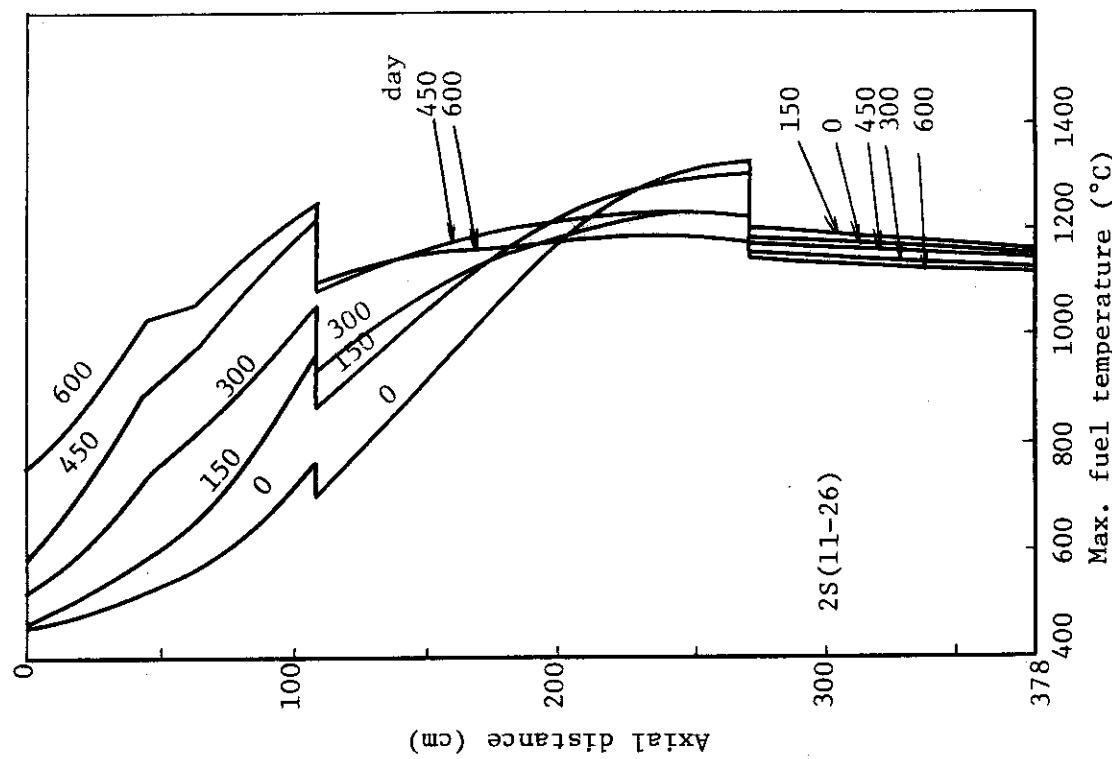


第5.2図 燃料最高温度の軸方向分布
(第1リージョン, 制御棒ブロック13-26)

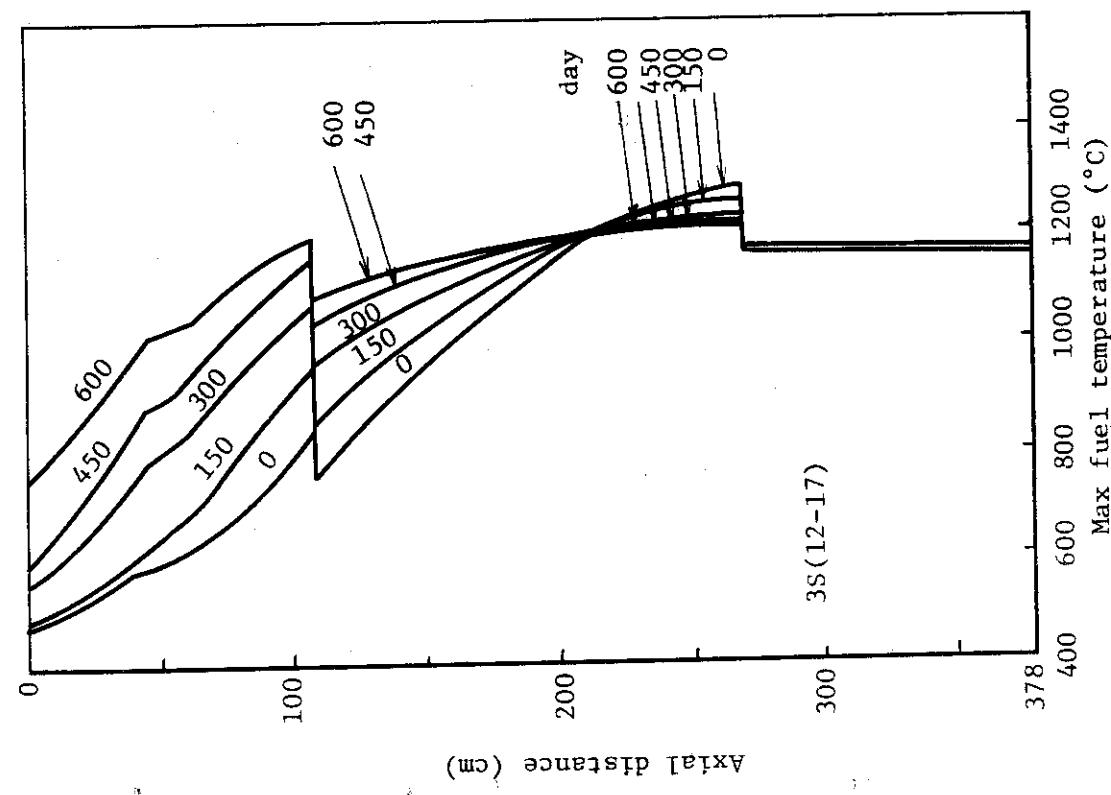
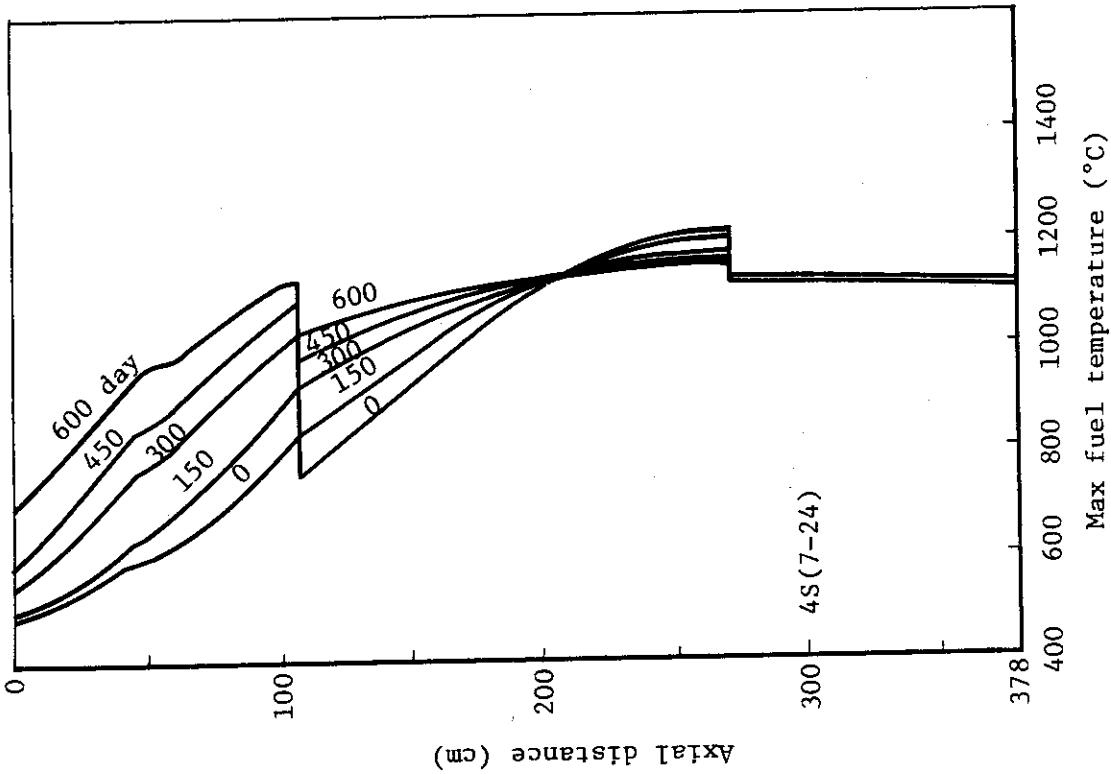
第5.3図 燃料最高温度の軸方向分布
(第1リージョン, 標準ブロック12-24)



第5.4図 燃料最高温度の軸方向分布
(第2リージョン, 制御棒ブロック10-25)

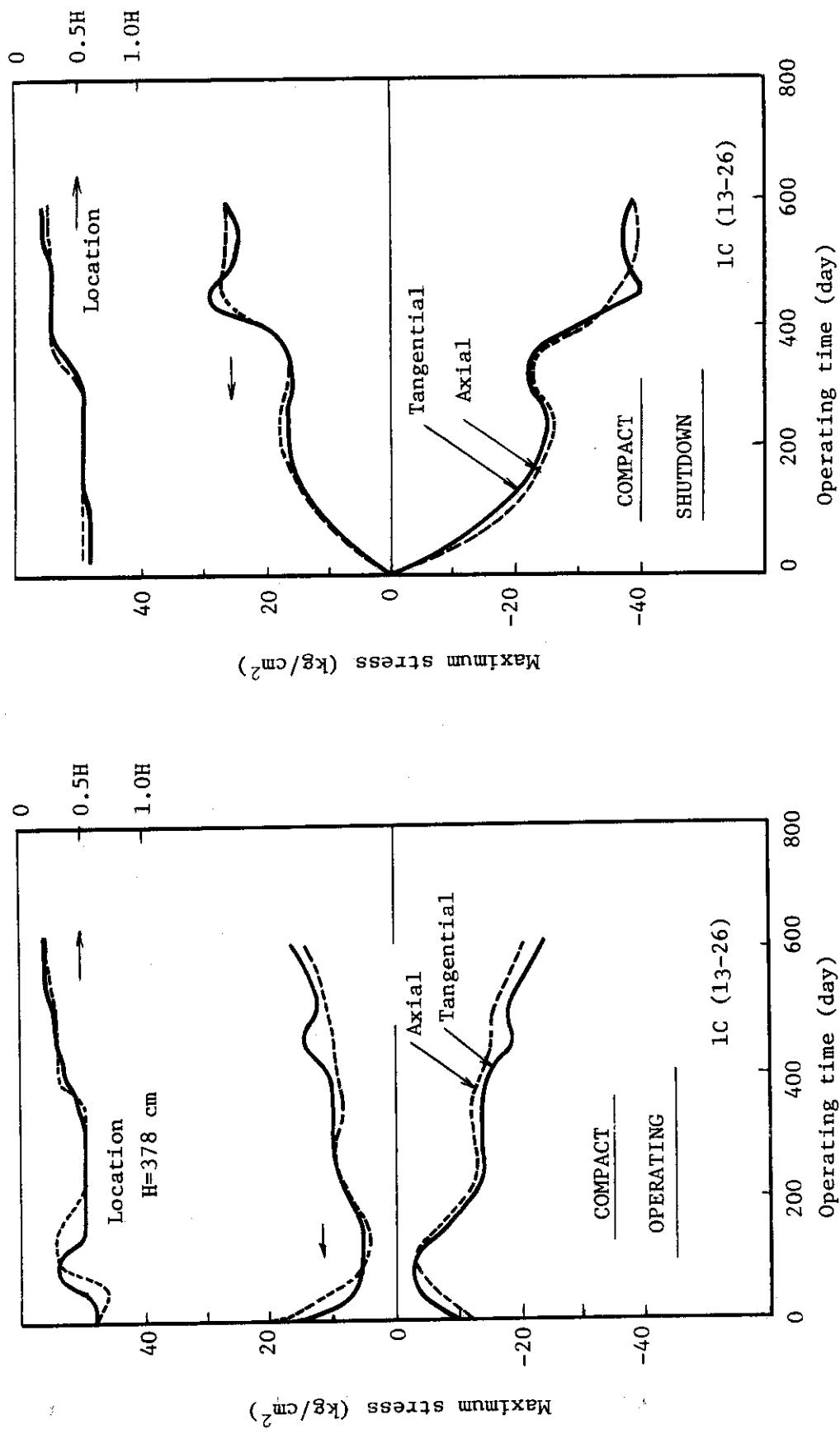


第5.5図 燃料最高温度の軸方向分布
(第2リージョン, 標準ブロック11-26)

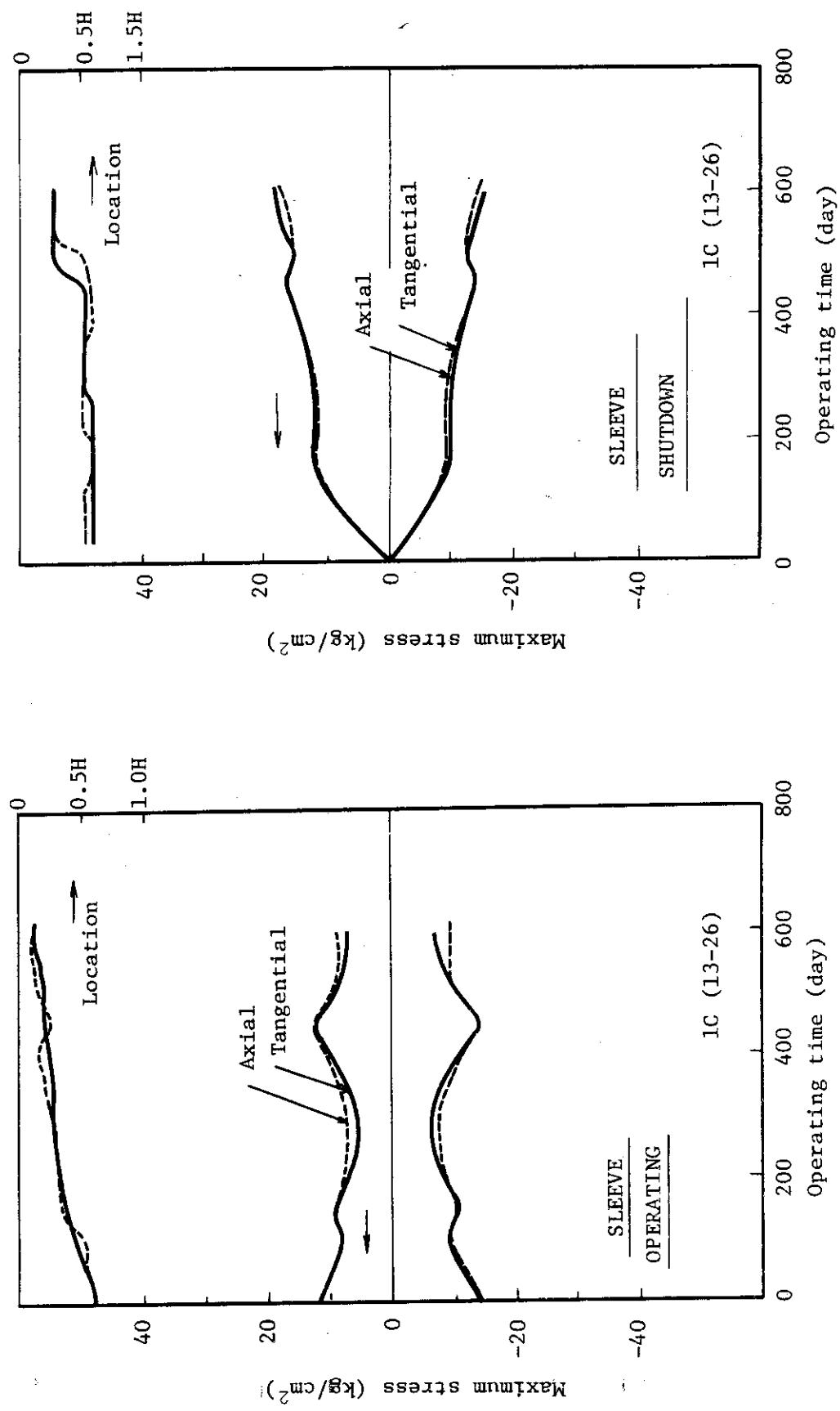


第 5.6 図 燃料最高温度の軸方向分布
(第 3 リージョン, 標準ブロック 12-17)

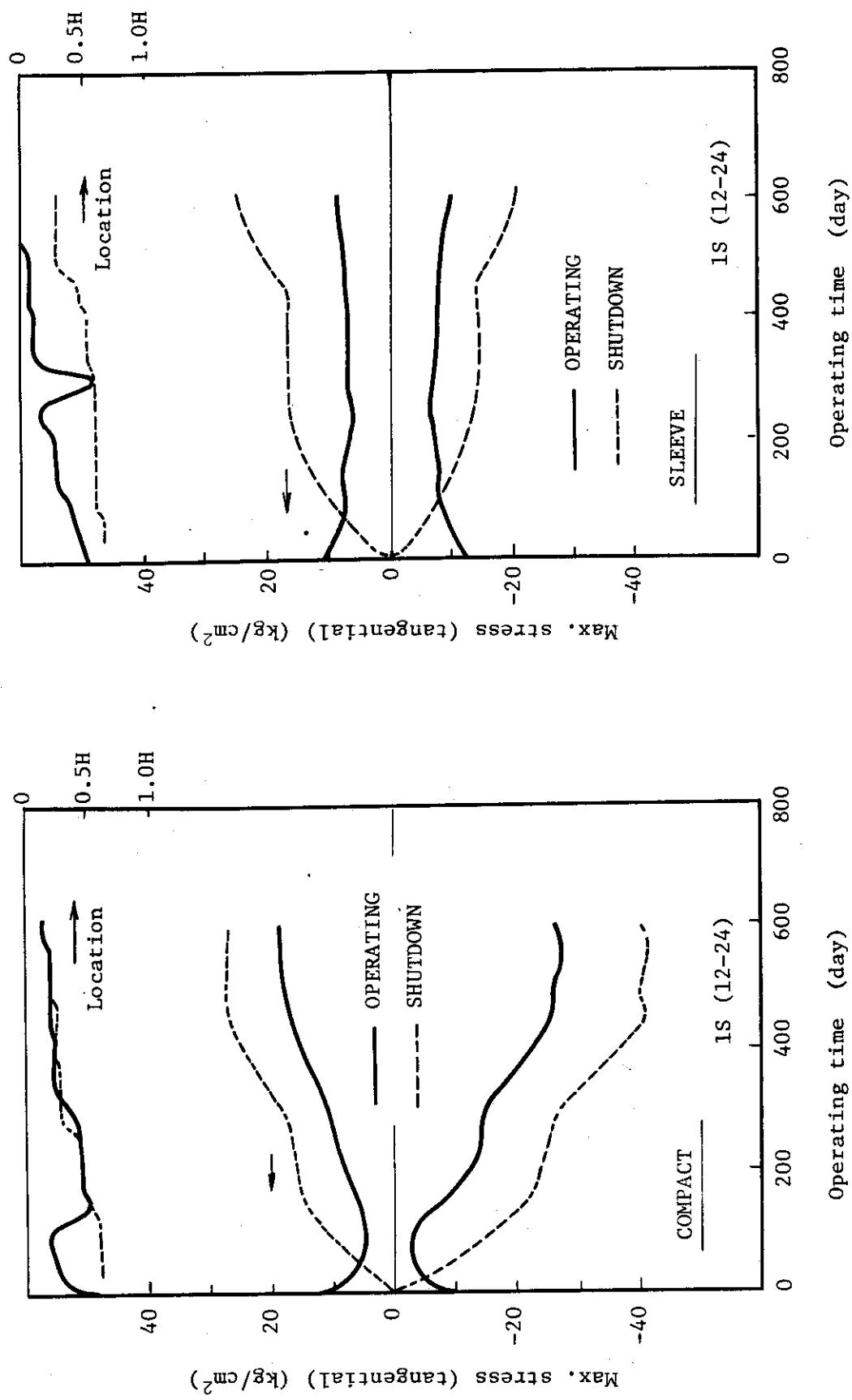
第 5.7 図 燃料最高温度の軸方向分布
(第 4 リージョン, 標準ブロック 7-24)



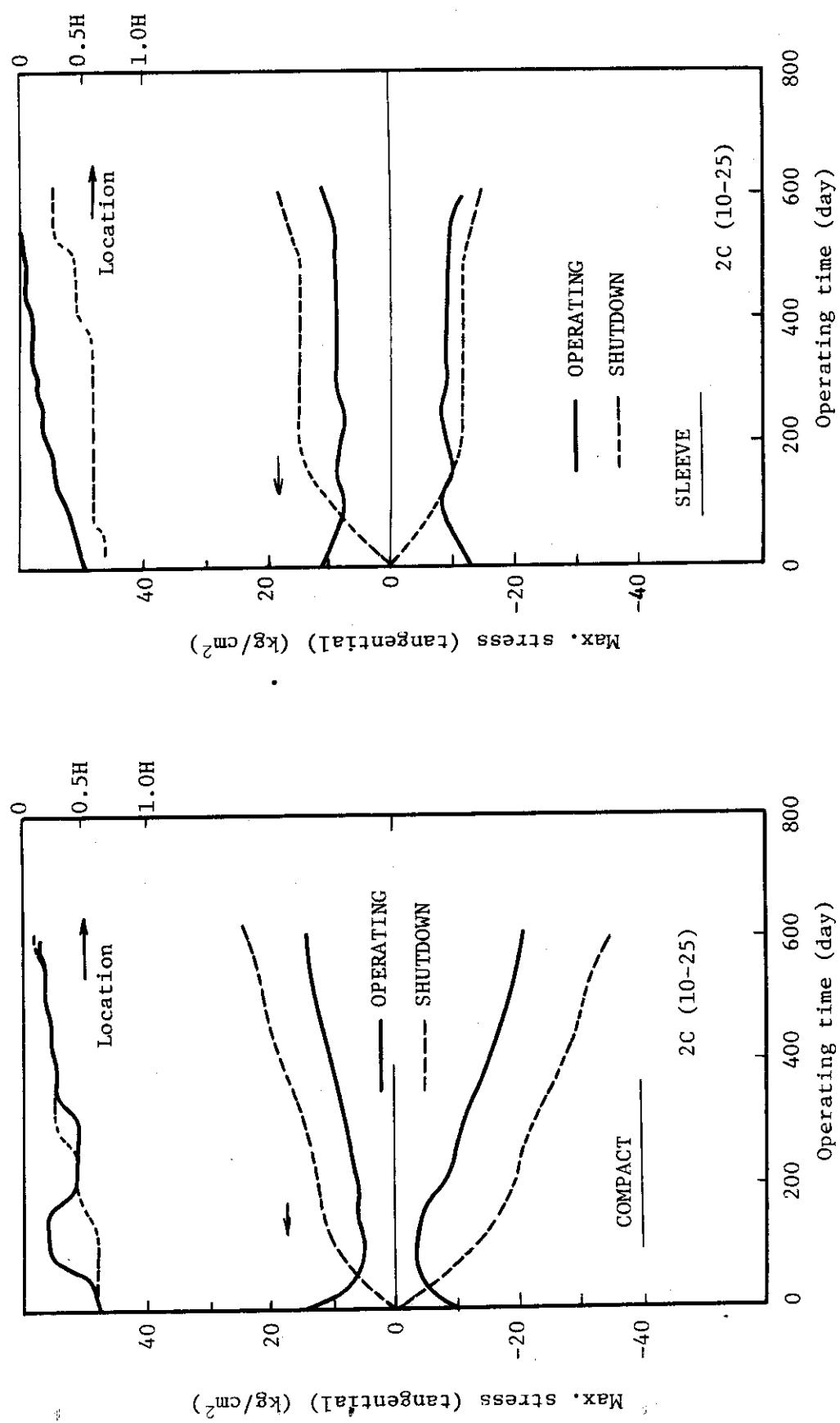
第5.8図 燃料コンパクトの運転中における最大応力の変化（第1リージョン、制御棒ロック13-26）



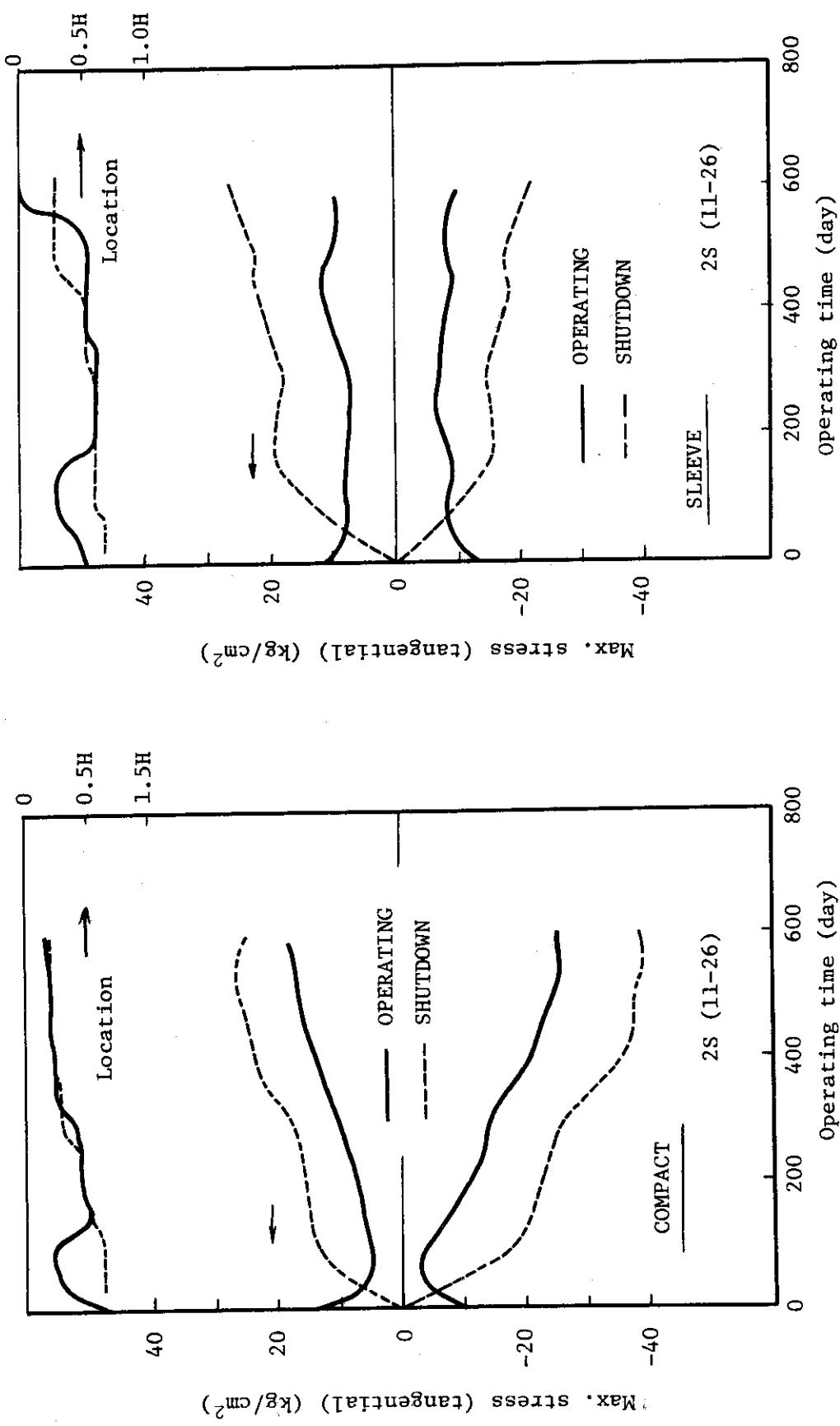
第5.9図 燃料スリーブの運転中ににおける最大応力の変化(第1リージョン, 制御棒ロック13-26)



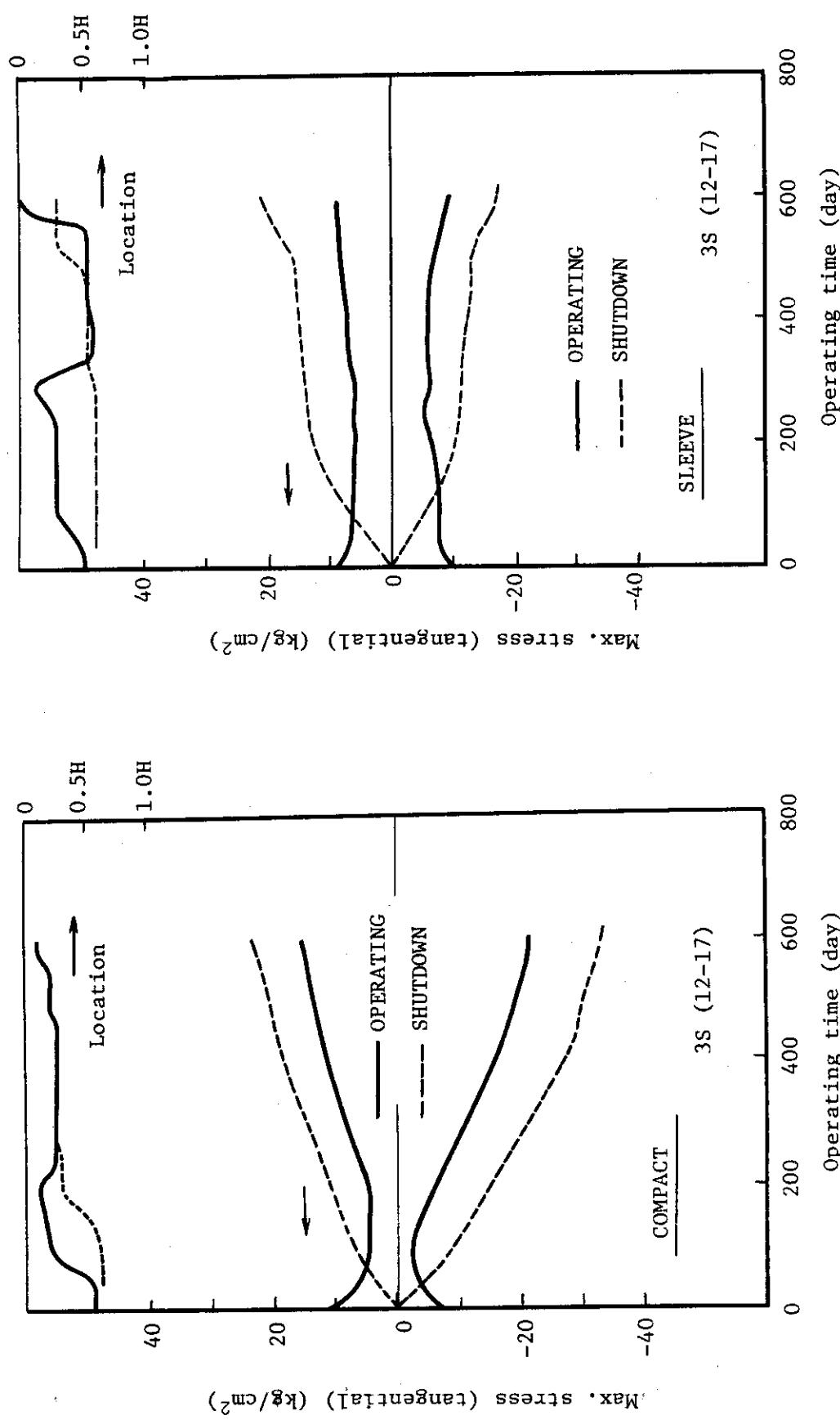
第5.10図 運転中の最大応力の変化(第1リージョン、標準プロック12-24)



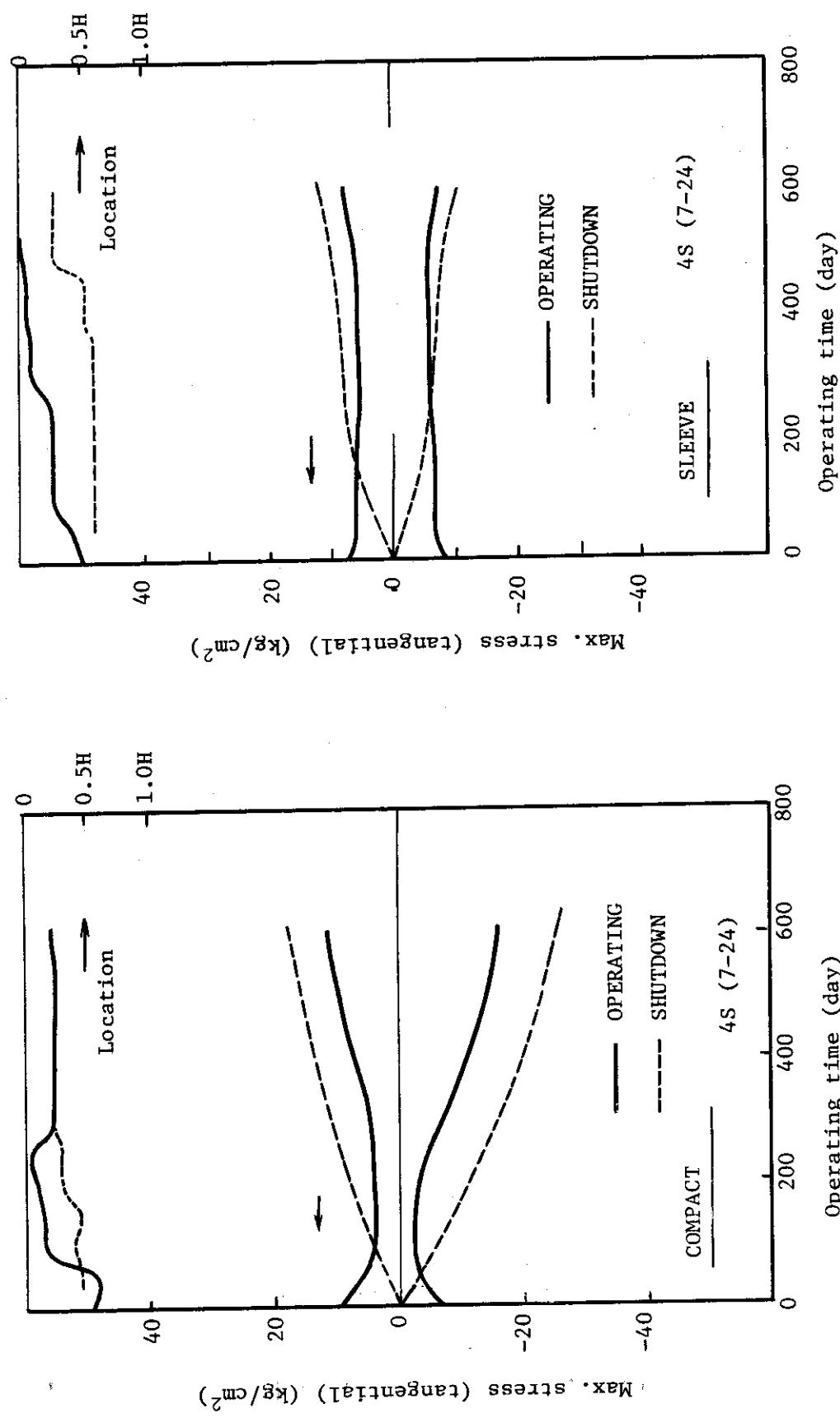
第5.11図 運転中の最大応力の変化(第2リージョン, 制御棒ブロック10-25)



第5.12図 運転中の最大応力の変化（第2リージョン、標準ブロック11-26）



第5.13図 運転中の最大応力の変化(第3リージョン, 標準プロック12-17)



第5.14 図 運転中の最大応力の変化(第4リージョン、標準プロック7-24)

5.2 燃料スリーブ底部の応力解析

5.2.1 解析位置の選定

スリーブ底部の解析を行う代表点を一次元の熱・応力解析の結果を参考にして定める。全炉心的にみて局所的に高出力状態が出現している中心制御カラムのチャンネル(1C)と第2オリフィス領域の最高出力チャンネル(2S)を代表チャンネルとして採り上げる。両チャンネルの燃料棒の下端付近に対する定格運転時の熱流動条件を第5.3表に示す。これを参考にして、最大線出力の位置(ブロック番号4)の応力解析をする。

5.2.2 応力解析と結果

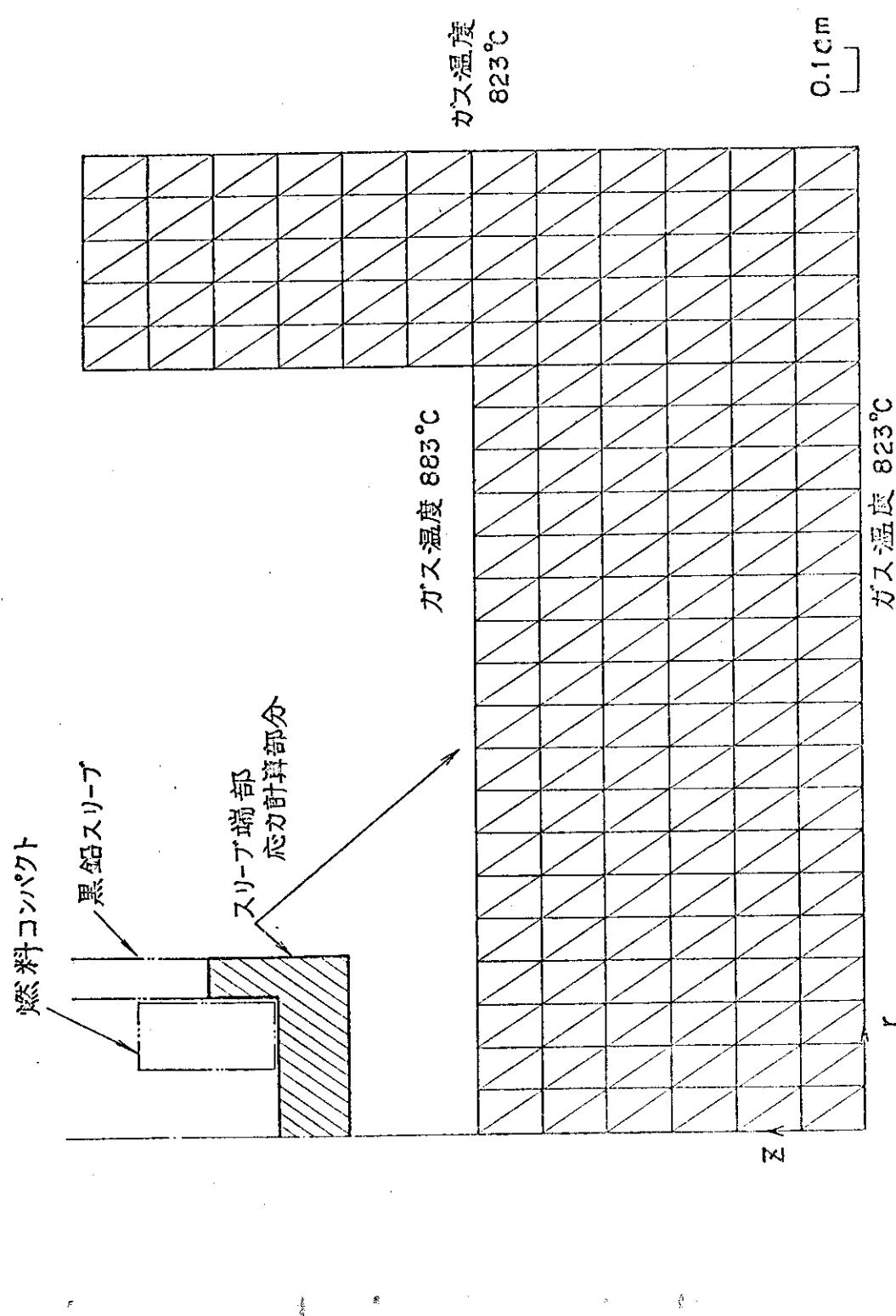
計算の対称となった部分図と要素分割および温度境界条件は第5.1.5図に示す。計算は計算プログラムLIVIELAによって、温度分布および応力履歴解析をする。

出力チャンネル1Cのブロック番号4の温度分布は第5.1.6図に、これによる周方向応力分布を第5.1.7図に示す。これから、スリーブ底部の応力はスリーブと比較して、特に大きなものではなかった。また、出力チャンネル2Sのブロック番号4についても同じように計算をした。この部分の応力は1Cよりもわずかに下回っていた。

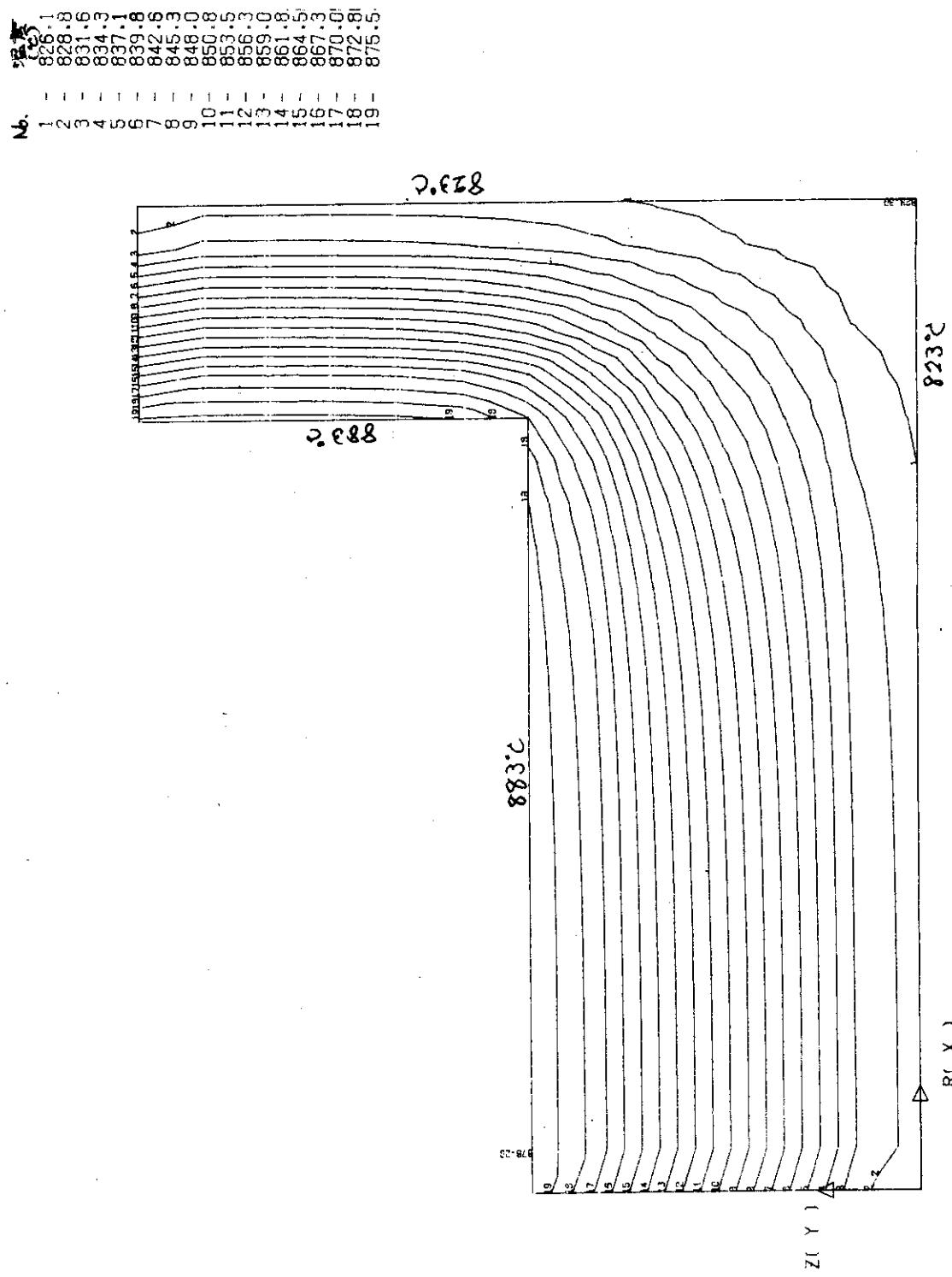
しかし、実施した応力解析は温度条件を少し低く見積った。スリーブ底部の応力はスリーブとほとんど変りなかったものと思われる。

第5.3表 スリーブ底部周辺の熱流動条件（初期炉心）

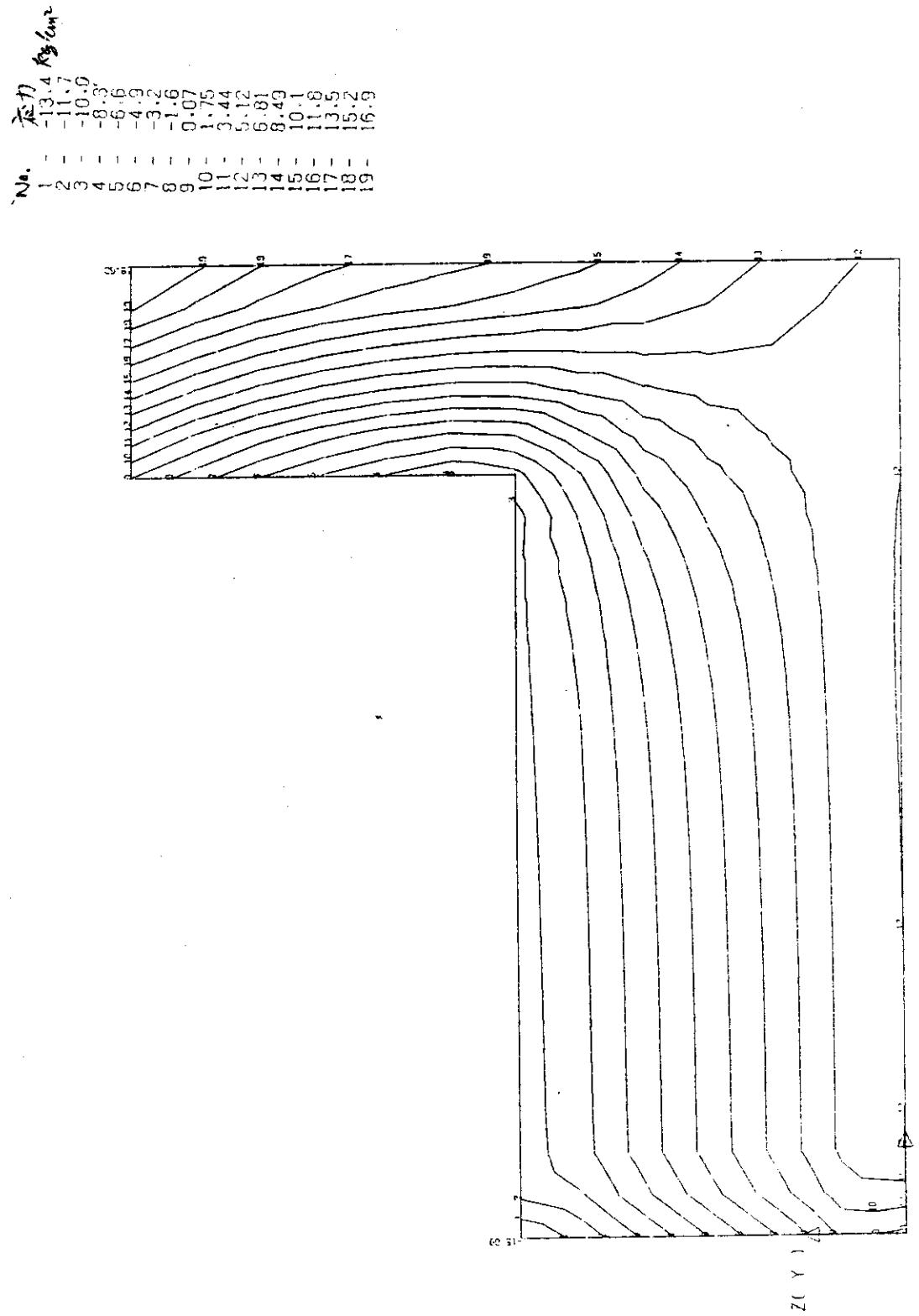
対象 ブロック	プロック No.	入口からの 距離 cm	線出力 Cal/cm s	冷却材 温度 °C	スリーブ温度		スリーブ最大熱応力 kg/cm ²	熱伝達 係数 Cal/cm ² s °C	高速中性子 照射量 600 日 $10^{20} n/cm^2 E > 0.18 MeV$
					内面	外面			
1C	1	54	9.506	414.3	438	432	1.2	0.0370	1.21
	2	108	20.273	445.0	495	483	2.6	0.0372	2.33
	3	162	52.188	500.0	630	597	6.6	0.0373	6.05
	4	207	96.411	647.7	883	823	12.2	0.0381	10.00
	5	270	80.053	879.5	1068	1017	10.1	0.0402	7.09
	6	324	23.020	954.0	1008	994	2.9	0.0402	2.83
	7	378	11.658	990.8	1018	1011	1.5	0.0401	1.12
2S	1	54	20.040	432.6	485	473	2.5	0.0347	2.77
	2	108	46.220	506.4	626	598	5.8	0.0349	5.80
	3	162	67.234	628.2	795	753	8.5	0.0373	9.68
	4	207	83.869	780.5	991	938	10.6	0.0368	12.00
	5	270	67.699	996.1	1169	1126	8.6	0.0360	8.51
	6	324	21.072	1069.5	1123	1110	2.7	0.0359	3.24
	7	378	10.559	1106.0	1133	1127	1.3	0.0357	1.40



第5.15図 中空型燃料黒鉛スリーブ端部の要素分割

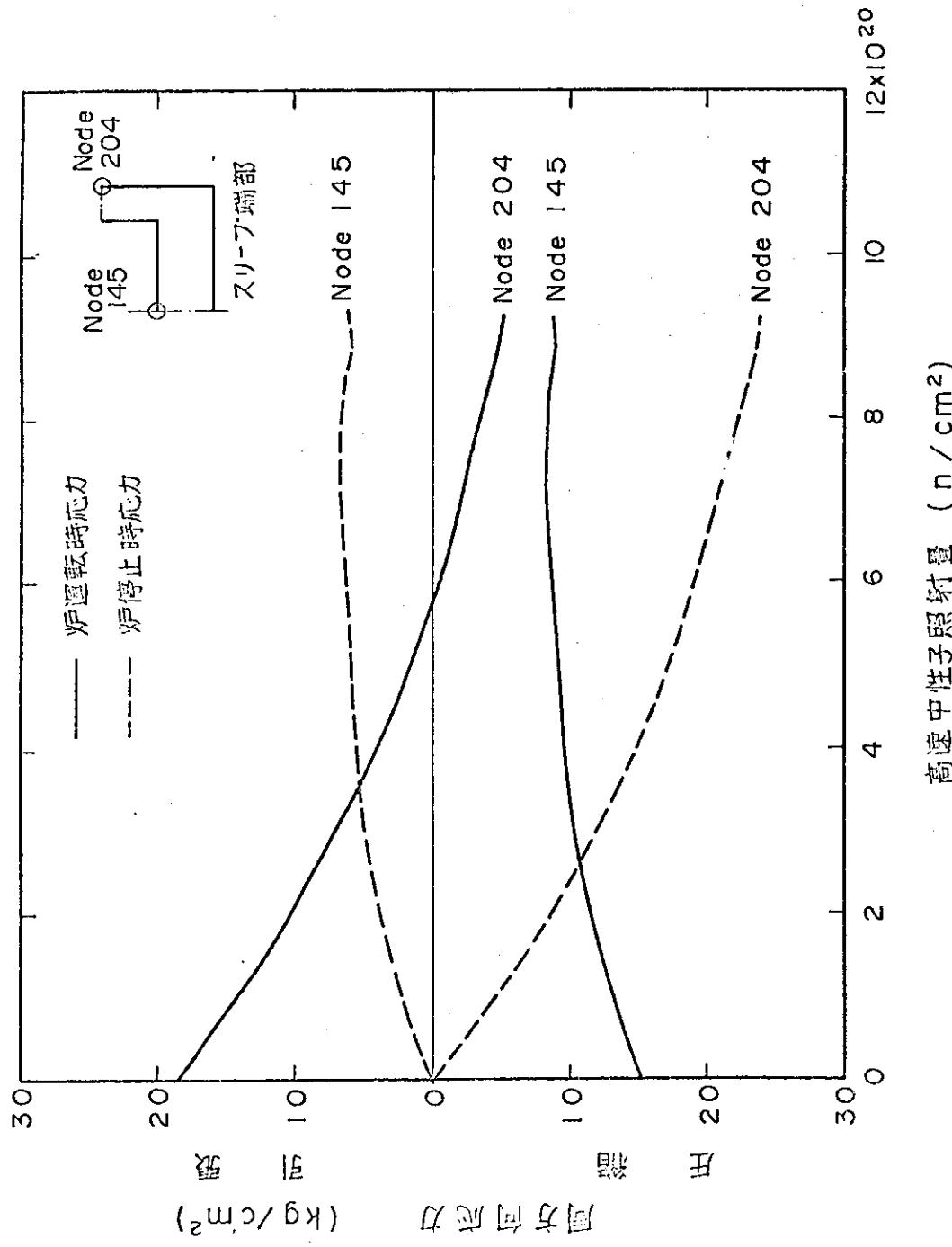


第 5.16 図 中空型燃料黒鉛スリーブ端部の温度分布



第 5.17 図 中空型燃料棒黒鉛スリーブ端部の応力分布 (周方向応力)

R(X)



第5.18図 中空型燃料黒鉛スリーブ端部の応力履歴

6. 黒鉛ブロックの応力解析

6.1 解析位置の選定

ブロック横断面の解析を行う代表面を一次元の熱流動解析を参考として定める。全炉心的にみて高出力状態が出現している中心制御カラムと第2オリフィス領域の標準カラムとを探り上げる。ブロック断面内の温度勾配を詳細に予測するため、第1.9図に与えた燃料棒毎の半径方向ピーキングを考慮して、チャンネル毎の熱流動状態を把握する。この際、第1.7表に与えた出力、流量、冷却材温度に対するシステムチック変動量を考慮するとともに、黒鉛中の放射線発熱量および高速中性子束に対してもシステムチック変動効果1.09を考慮する。2つのブロックカラムに含まれる各チャンネルの熱流動条件を第6.1表、第6.2表に示す。これを参考として、黒鉛材中の発熱量が最大のブロックの位置（ブロック番号4または5）の応力解析を実施した。

6.2 応力解析と結果

(1) 標準型燃料ブロック

標準型燃料ブロックの六角形状の対称性を考慮して、第6.1図のようにブロック半分を対象として応力解析を実施する。このための要素分割は第6.1図に、温度境界条件および温度分布図は第6.2図に示す。この温度分布による主応力分布は第6.3、6.4図に、応力履歴は第6.5図に示す。軸方向応力分布図は第6.6図に、応力履歴は第6.7図に示す。

これから、軸方向応力が大きいこと、運転時では初期の応力、炉停止時には照射量とともに応力が大きくなることが明らかになった。

(2) 制御型燃料ブロック

制御型燃料ブロックについても標準型のものと同じように応力解析をする。要素分割は第6.8図に、温度境界条件および温度分布図は第6.9図に示す。主応力分布は第6.10、6.11図に、応力履歴は第6.12図に示す。軸方向応力分布図は第6.13図に、応力履歴は第6.14図に示す。

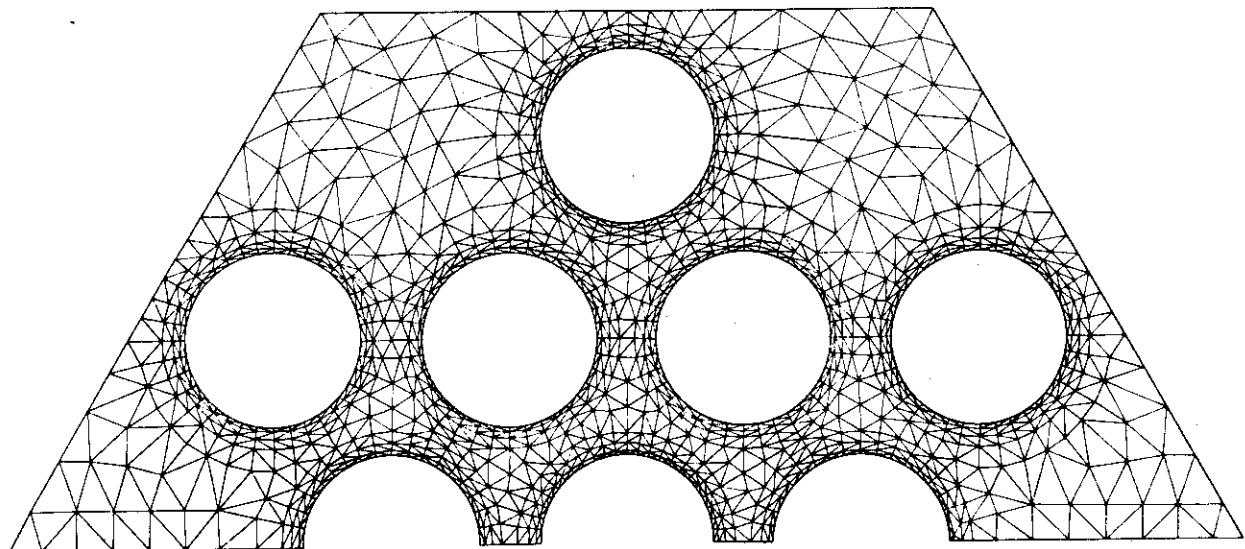
これらから、標準型燃料ブロックと同じような傾向が見られる。

第 6.1 表 標準プロック(2S)のチャンネル熱流動条件
対象炉心 P4/2S/W2(初期状態)

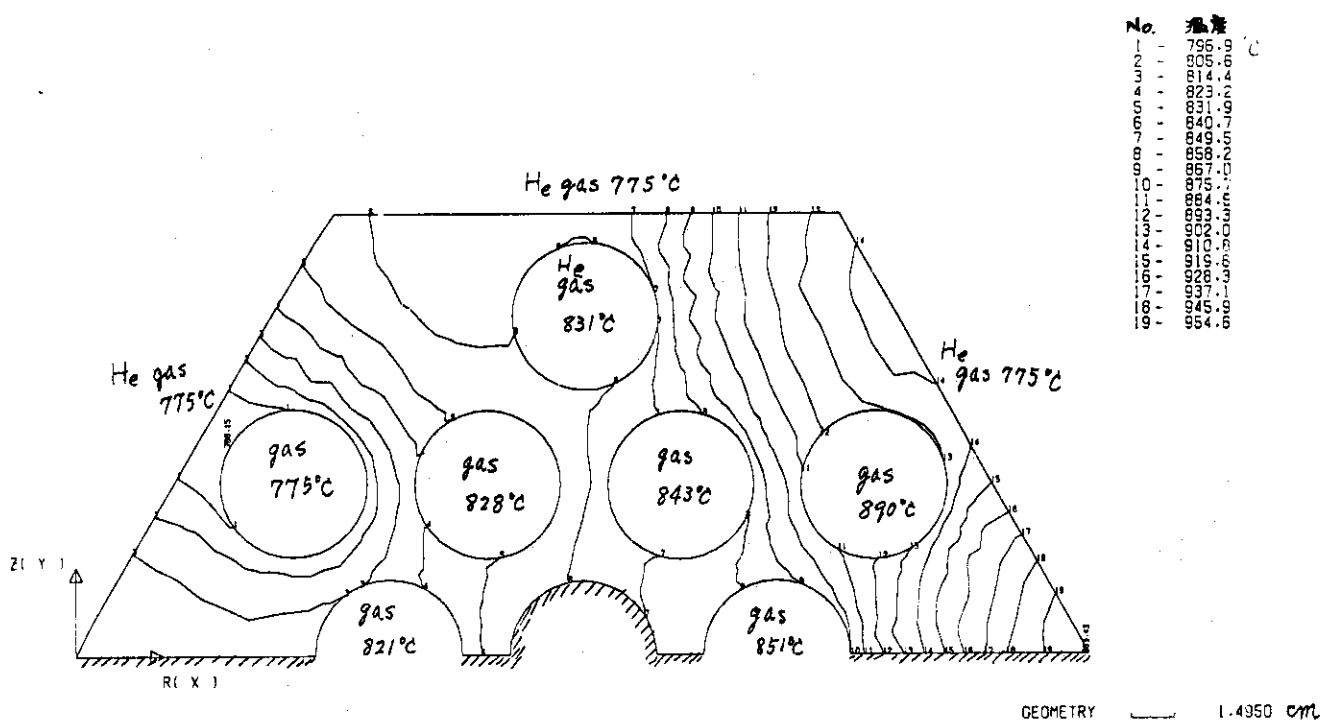
プロック番号	入口から距離cm	S 1		S 2		S 3		S 4		S 5		S 6		S 7		チャンネル間黒鉛材中発熱性子照射材中発熱性子	
		冷却材温度	熱伝達係数	冷却材温度													
1	0	408	0.0335	408	0.0332	408	0.0340	408	0.0332	408	0.0330	408	0.0329	408	0.0333	0	0.058
	27	424	0.0341	422	0.0338	420	0.0347	422	0.0339	423	0.0337	423	0.0336	422	0.0340	0	0.096
	54	449	0.0342	444	0.0339	440	0.0347	444	0.0340	445	0.0338	446	0.0337	443	0.0341	5	1.13
	81	486	0.0344	477	0.0341	468	0.0349	476	0.0341	479	0.0339	480	0.0338	475	0.0342	9	2.08
	108	543	0.0346	526	0.0343	511	0.0350	525	0.0343	530	0.0341	532	0.0360	523	0.0344	142	3.02
	117	564	0.0368	545	0.0365	527	0.0352	544	0.0365	549	0.0362	551	0.0360	542	0.0346	1	2.41
	135	609	0.0366	584	0.0363	561	0.0353	583	0.0364	589	0.0361	593	0.0359	580	0.0366	32	6.32
	153	665	0.0364	633	0.0361	604	0.0374	632	0.0362	640	0.0358	644	0.0357	628	0.0364	17	1.13
	162	697	0.0363	662	0.0360	628	0.0373	660	0.0361	669	0.0357	673	0.0355	656	0.0362	30	2.08
	171	732	0.0362	692	0.0359	655	0.0373	690	0.0360	700	0.0357	705	0.0355	685	0.0362	35	4.39
	189	808	0.0359	759	0.0357	713	0.0371	757	0.0358	769	0.0354	776	0.0352	751	0.0359	115	9.73
	207	890	0.0355	831	0.0354	775	0.0369	828	0.0354	843	0.0351	851	0.0349	821	0.0356	115	8.04
	225	973	0.0352	904	0.0351	839	0.0367	901	0.0352	918	0.0348	927	0.0346	892	0.0354	142	12.56
	243	1053	0.0349	974	0.0348	900	0.0364	971	0.0349	991	0.0345	1001	0.0342	961	0.0351	180	13.08
	261	1128	0.0346	1040	0.0346	957	0.0362	1036	0.0346	1058	0.0342	1070	0.0340	1025	0.0348	201	10.27
	270	1163	0.0344	1070	0.0344	983	0.0361	1066	0.0345	1089	0.0340	1101	0.0338	1055	0.0347	150	9.28
	279	1188	0.0345	1092	0.0345	1002	0.0362	1088	0.0346	1112	0.0341	1125	0.0339	1076	0.0348	237	6.69
	297	1219	0.0343	1120	0.0343	1026	0.0361	1115	0.0344	1140	0.0339	1153	0.0337	1103	0.0346	202	5.01
	324	1255	0.0341	1152	0.0342	1054	0.0360	1147	0.0342	1173	0.0338	1187	0.0335	1134	0.0345	150	3.49
	351	1282	0.0339	1176	0.0340	1075	0.0359	1171	0.0341	1198	0.0337	1212	0.0334	1158	0.0344	201	2.42
	378	1302	0.0339	1192	0.0340	1089	0.0358	1188	0.0340	1215	0.0336	1229	0.0333	1174	0.0343	213	1.53

第6.2表 制御棒プロック(IC)のチャンネル熱流動条件(初期状態)

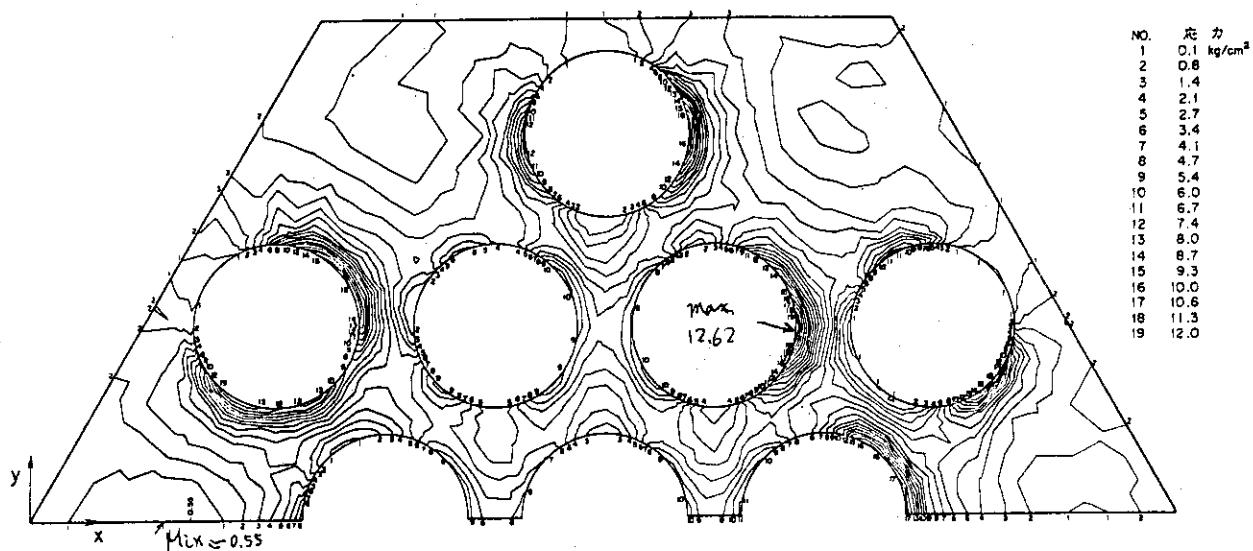
ブロック番号	入口から の距離 cm	C 1 & C 3		C 2		CR		チャネル間 材温差 (°C)	黒鉛材中 発热量 W/cc	高速中性子 照射量 10 ²⁰ n/cm ² (E>18MeV) 600日
		冷却材 温度 °C	熱伝達 係数 Cal/cm ² s°C	冷却材 温度 °C	熱伝達 係数 Cal/cm ² s°C	冷却材 温度 °C	熱伝達 係数 Cal/cm ² s°C			
1	0	408	0.0360	408	0.0358	408	0.0023	0	0.0065	0.59
	27	414	0.0368	414	0.0366	412	0.0023	1	0.0116	0.92
	54	424	0.0368	423	0.0366	419	0.0023	5	0.0169	1.40
2	81	438	0.0369	436	0.0367	430	0.0024		0.0240	2.02
	108	459	0.0370	456	0.0367	445	0.0024		0.0360	2.71
	117	466	0.0370	463	0.0368	452	0.0024	3	0.0286	2.88
3	135	482	0.0371	477	0.0369	468	0.0024		0.0380	3.62
	153	503	0.0372	497	0.0369	490	0.0025		0.0577	5.02
	162	521	0.0371	514	0.0369	505	0.0025	7	0.0926	7.04
4	171	546	0.0372	537	0.0370				0.1275	9.05
	189	612	0.0376	599	0.0373				0.1583	10.86
	207	687	0.0402	670	0.0399			17	0.1711	11.63
5	225	766	0.0400	743	0.0398				0.1720	11.60
	243	843	0.0398	816	0.0396				0.1635	10.82
	261	915	0.0396	883	0.0394				0.1492	9.19
6	270	949	0.0395	914	0.0393			35	0.1421	7.75
	279	972	0.0397	937	0.0395				0.0645	6.32
	297	1000	0.0395	962	0.0394				0.0548	4.69
7	324	1033	0.0394	993	0.0393			40	0.0409	3.26
	351	1057	0.0393	1016	0.0392				0.0293	2.21
	378	1074	0.0393	1032	0.0391			42	0.0213	1.30



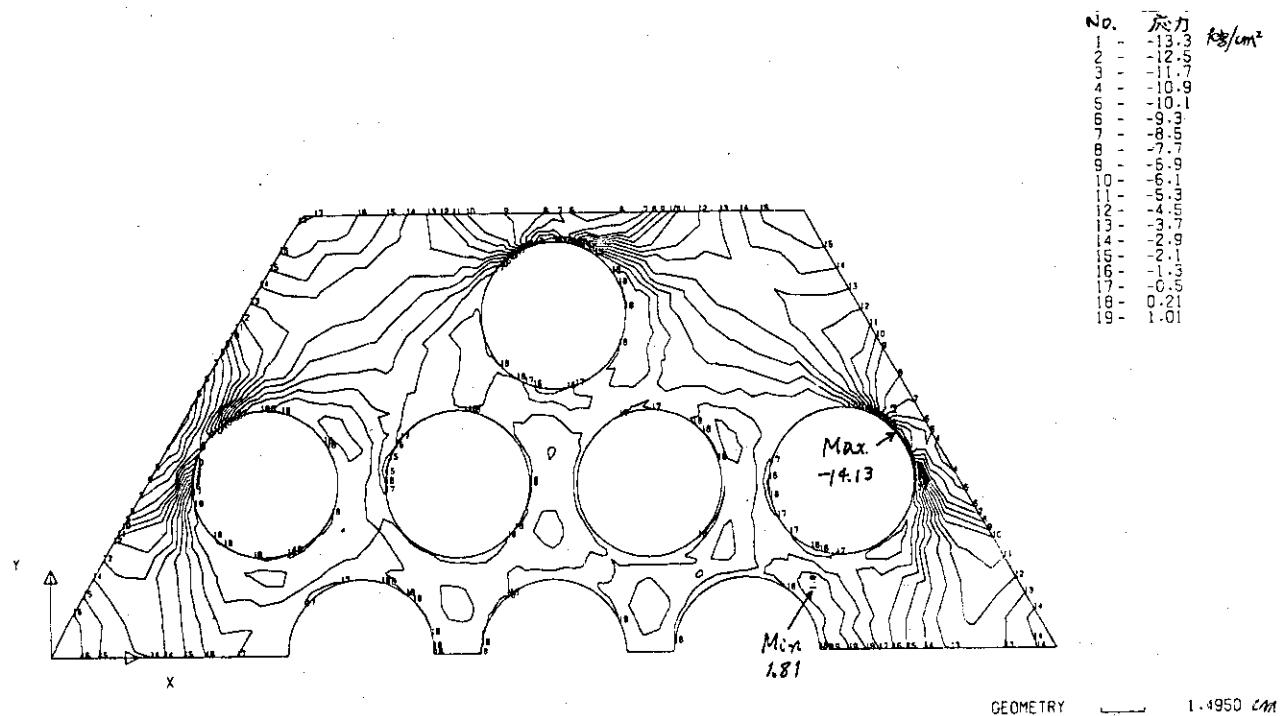
第 6.1 図 燃料ブロック要素分割（標準型燃料）



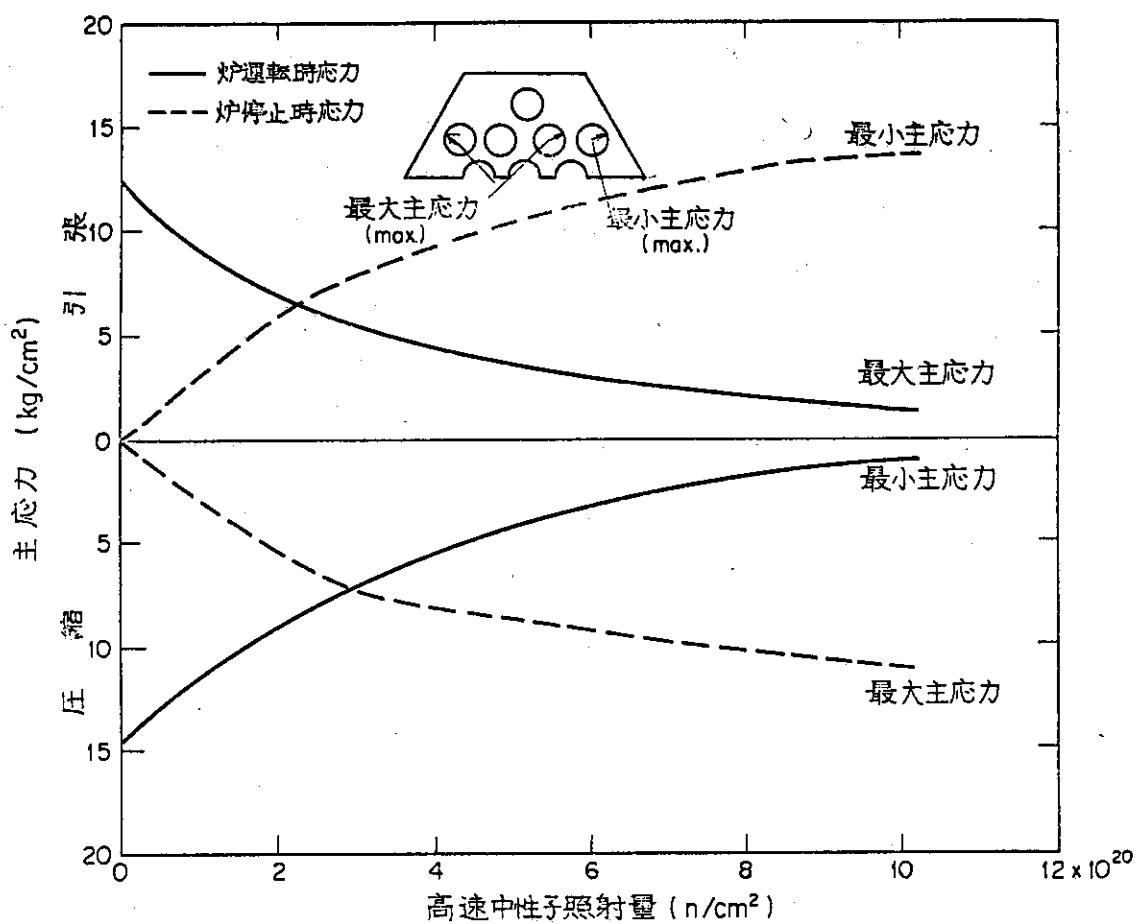
第 6.2 図 燃料ブロックの温度分布図（標準燃料体）



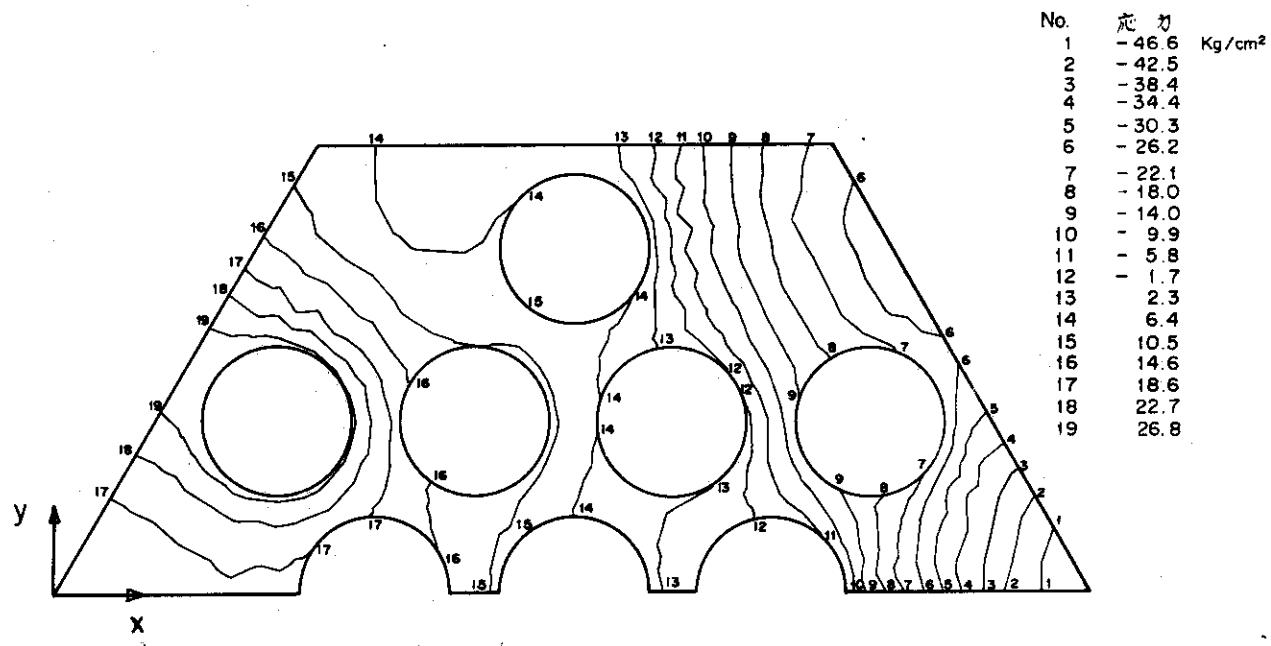
第 6.3 図 燃料ブロックの最大主応力分布図（標準型燃料体）
(高速中性子照射量 $0.01 (\text{n}/\text{cm}^2)$)

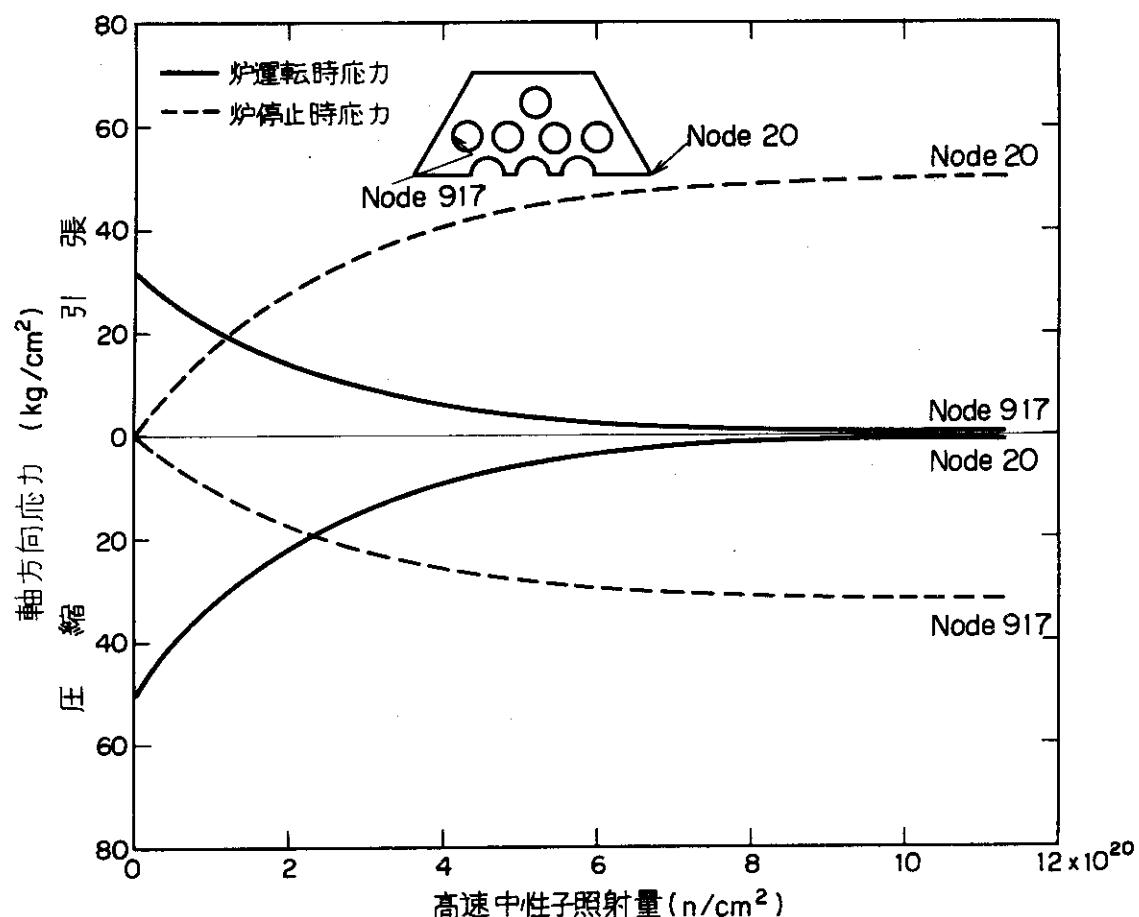


第 6.4 図 燃料ブロックの最小主応力分布図（標準型燃料体）
(高速中性子照射量 $0.0 (\text{n}/\text{cm}^2)$)

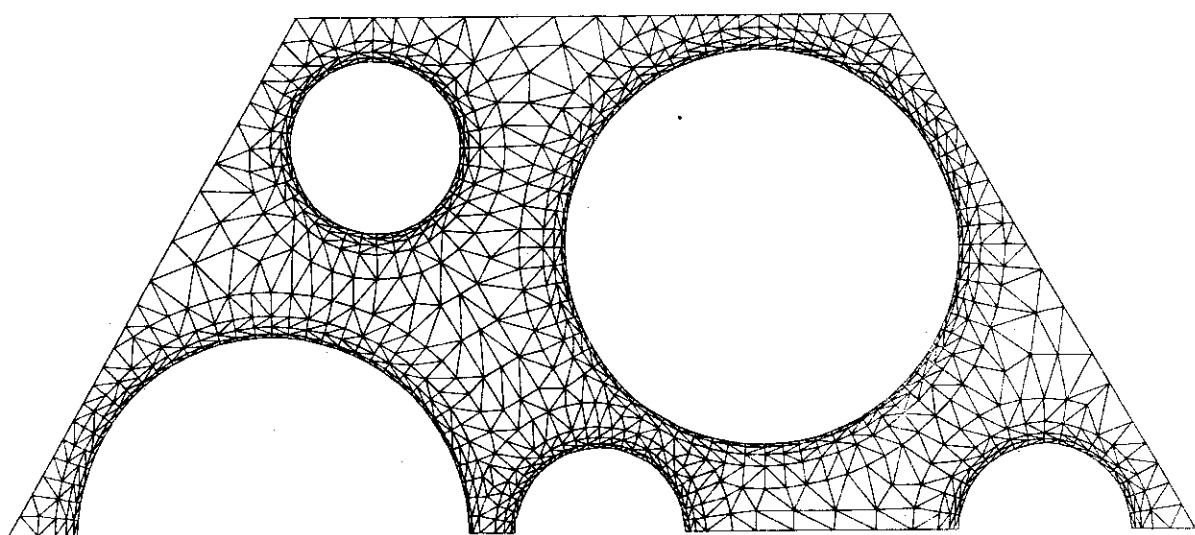


第 6.5 図 燃料ブロック主応力の履歴（標準型燃料体）

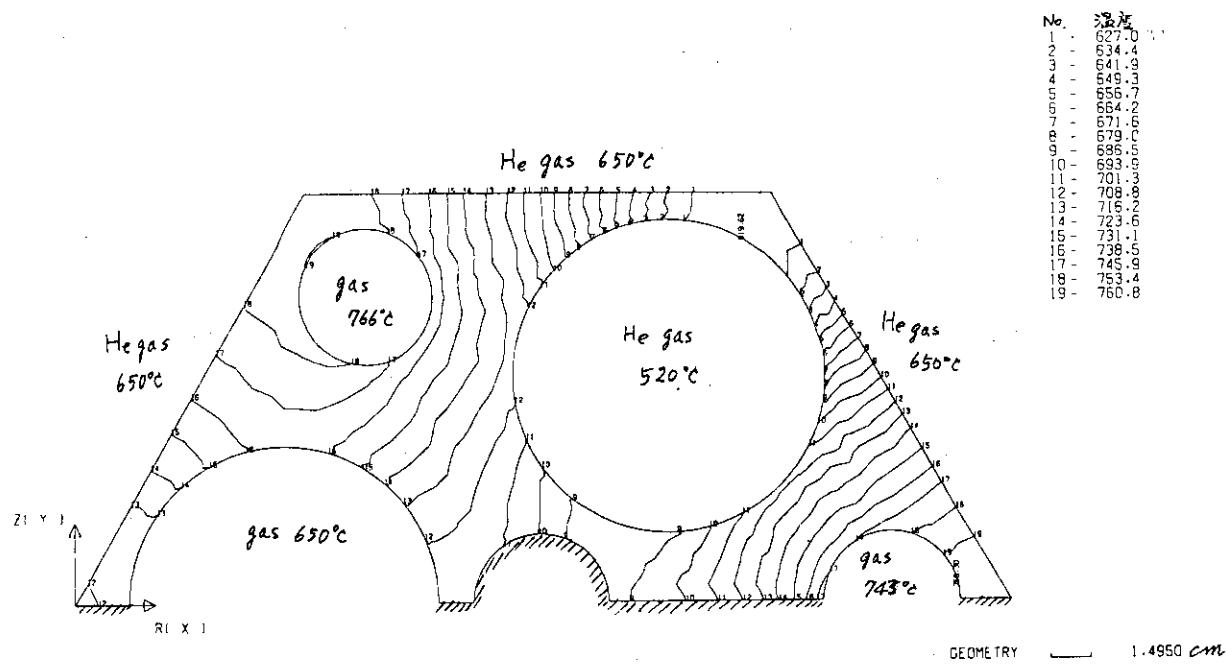
第 6.6 図 燃料ブロックの軸方向応力分布図（標準型燃料体）
(高速中性子照射量 0.0 (n/cm²))



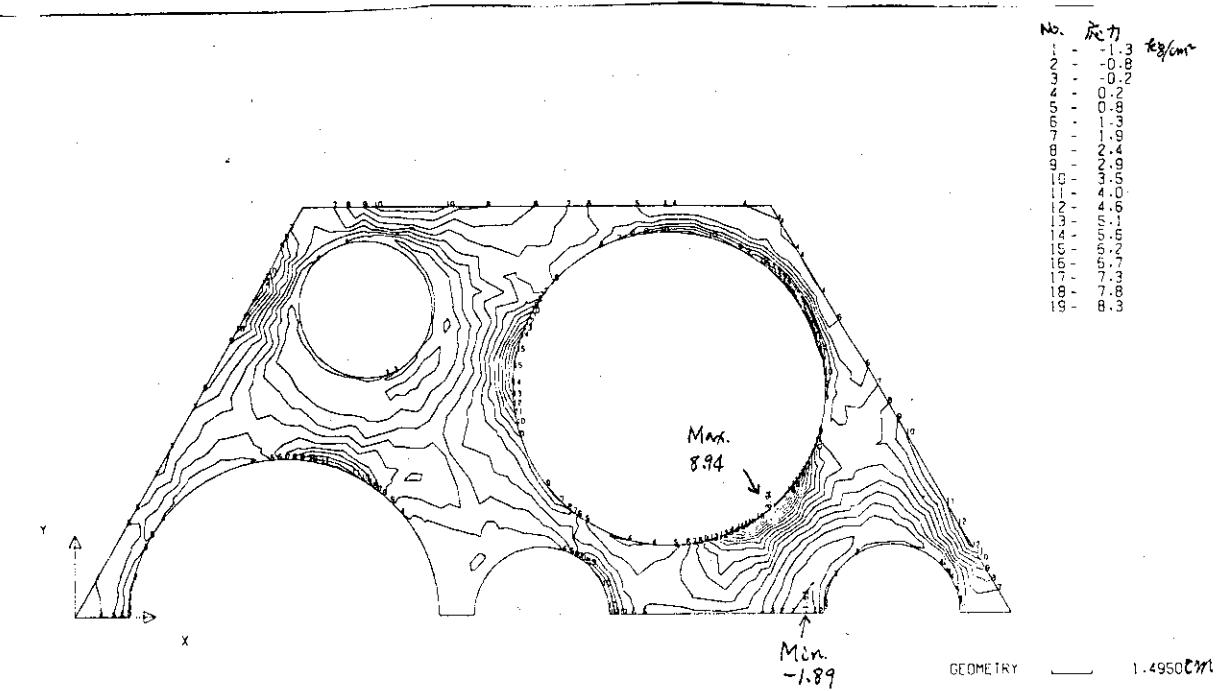
第6.7図 燃料ブロック軸方向応力の履歴（標準型燃料体）

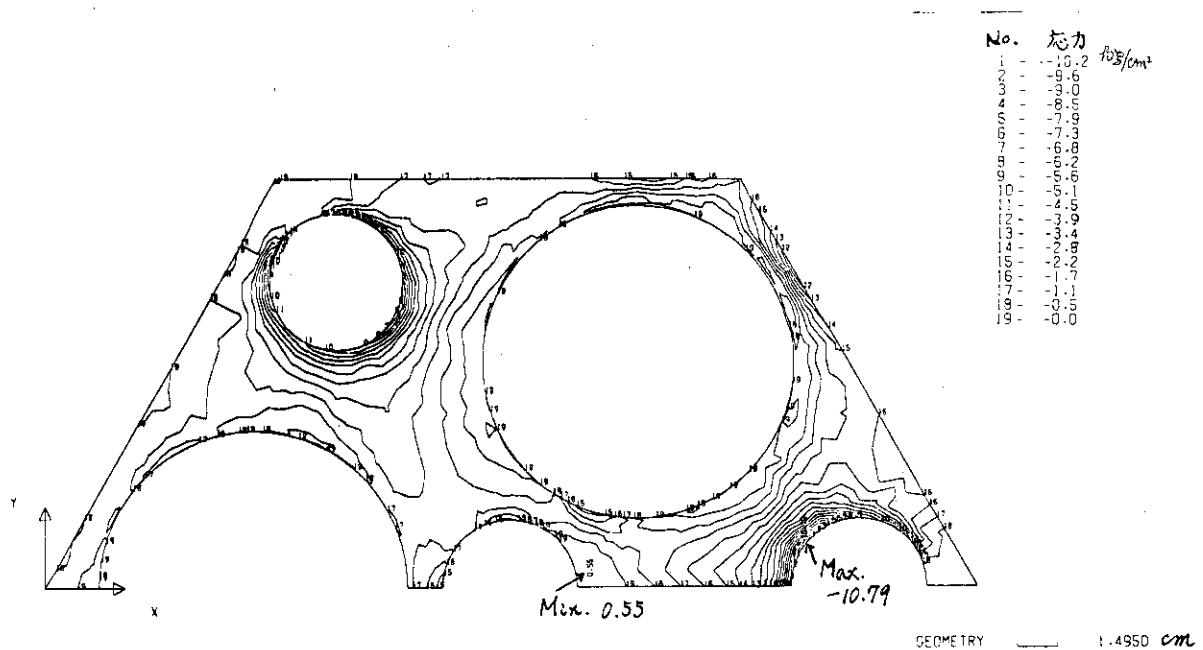


第6.8図 黒鉛ブロック要素分割(制御型燃料)

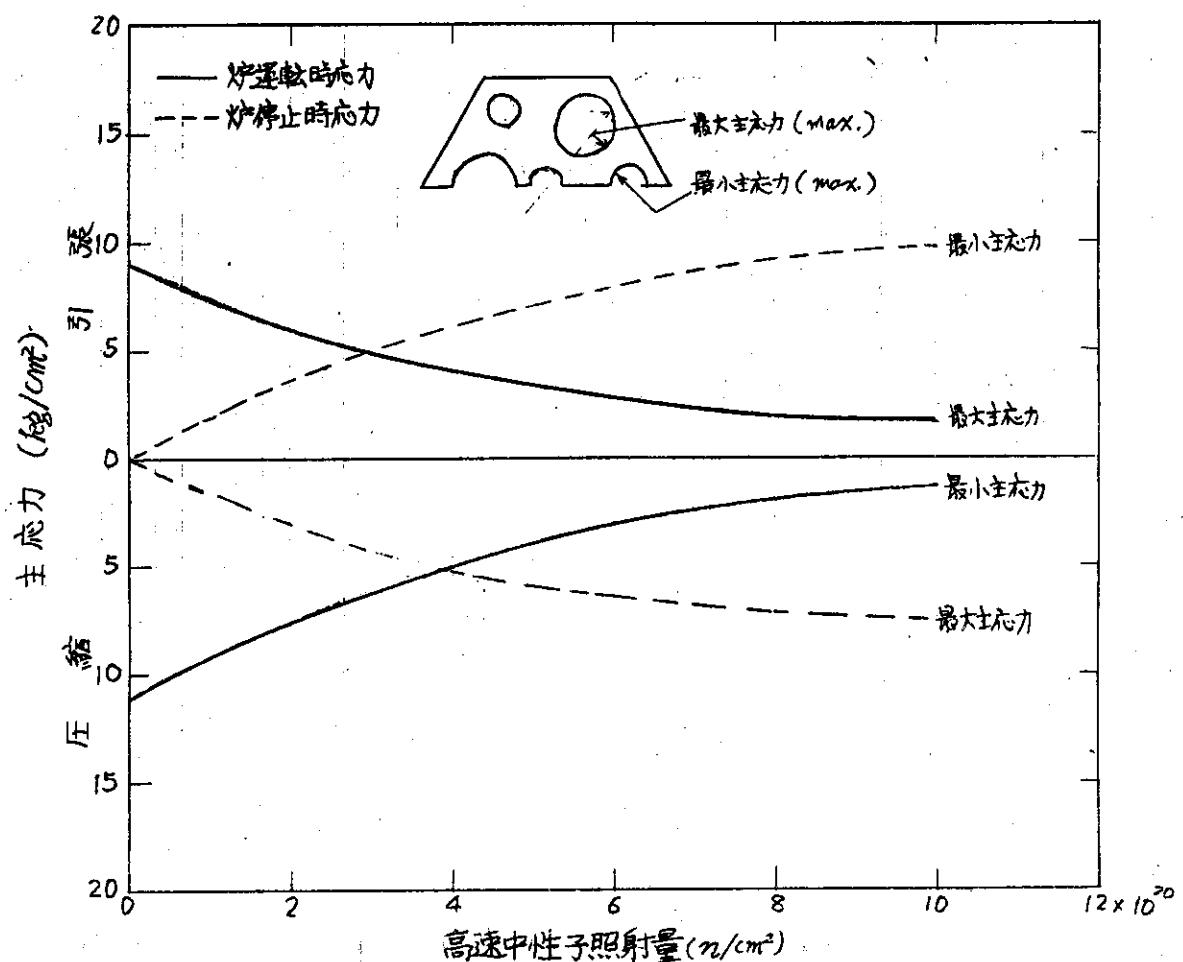


第 6.9 図 燃料ブロック温度分布図（制御型燃料体）

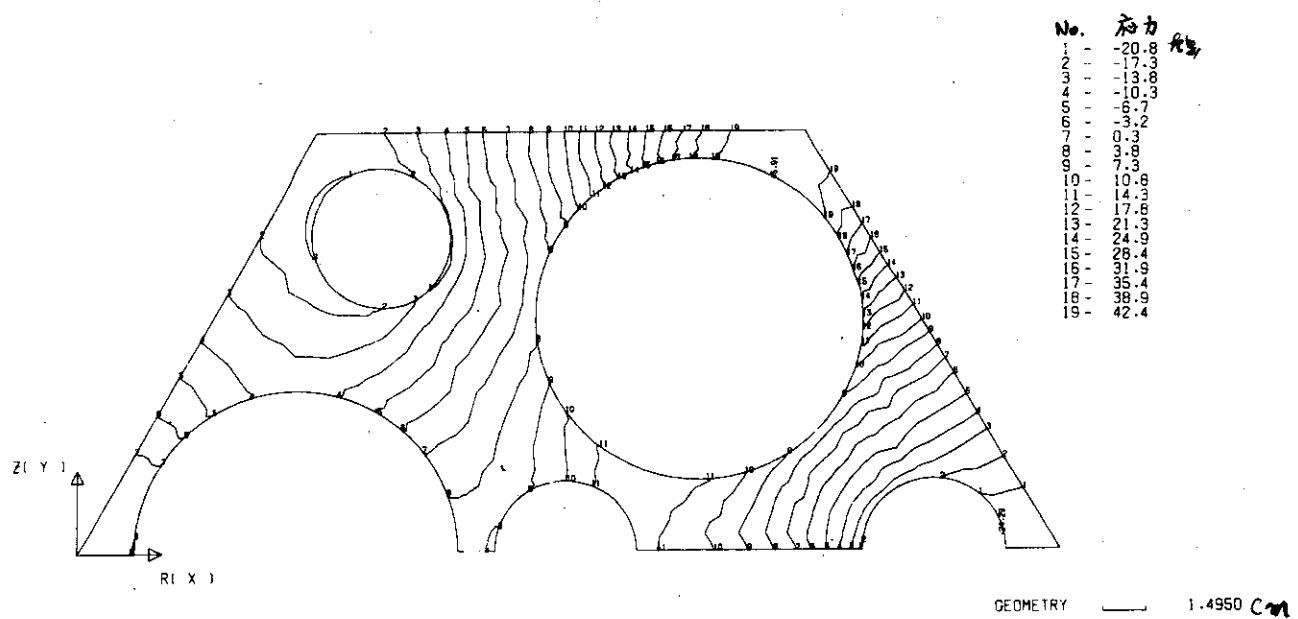
第 6.10 図 燃料ブロックの最大主応力分布図（制御型燃料体）
(高速中性子照射量 0.0 (n/cm^2))



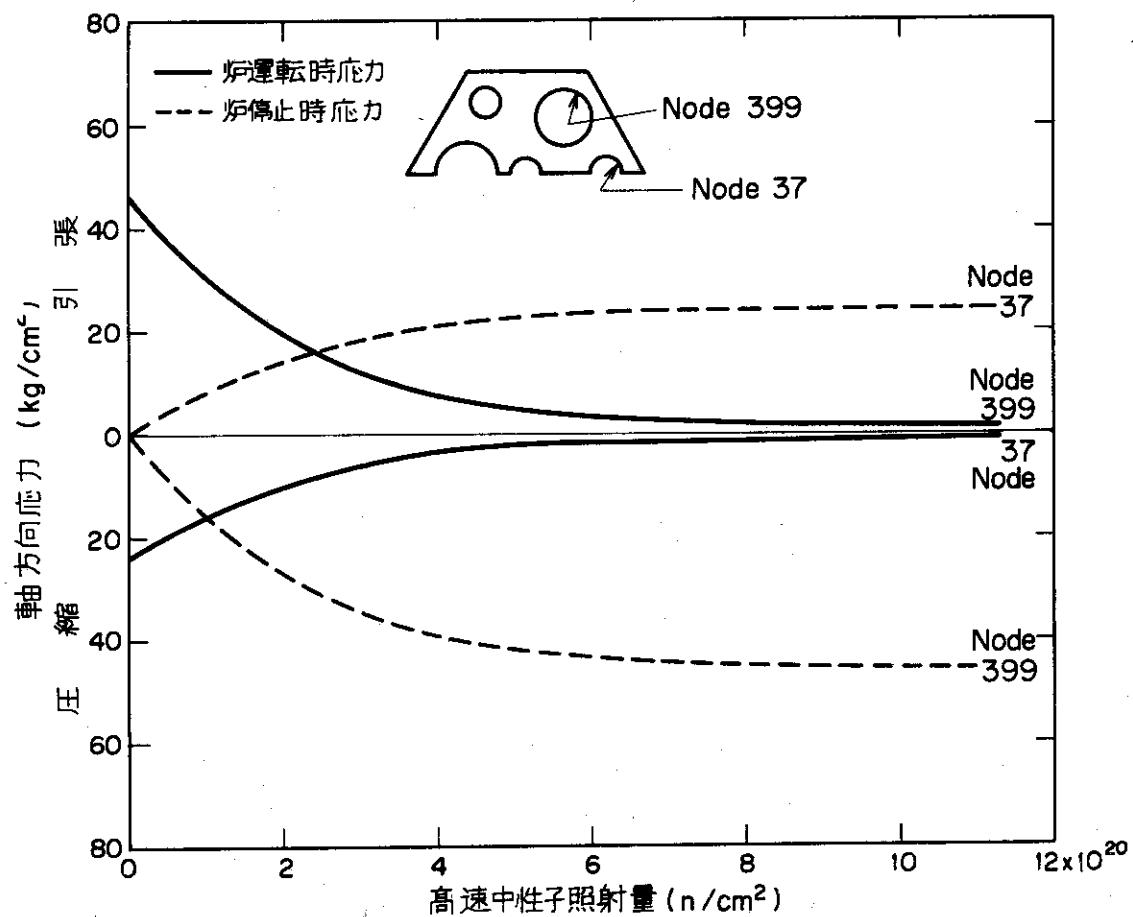
第 6.11 図 燃料ブロックの最小主応力分布図（制御型燃料体）
(高速中性子照射量 $0.0 \text{ (n/cm}^2\text{)}$)



第 6.12 図 燃料ブロック主応力の履歴（制御型燃料体）



第 6.13 図 燃料ブロックの軸方向応力分布図（制御型燃料体）
(高速中性子照射量 0.0 (n/cm^2))



第 6.14 図 燃料ブロック軸方向応力の履歴（制御型燃料体）

7. 定格運転時の燃料棒からの金属FPの放出解析

Mk - 3 炉心設計において設計された燃料棒を対象として、できる限り核熱設計ならびに被覆燃料粒子の健全性評価の結果に基づいて、燃料棒からの金属FP 放出特性の解析評価を行なうと共に、全炉心からのFP 放出総量の解析をする。但し、解析対象とする金属核種はSr - 90, Cs-137, Ba - 140 およびSr - 89 の4個に限っている。

7.1 計算方法

(a) 使用計算コードとその概要

本解析に用いた計算コードは、GGA 社が HTGR における金属 FP の燃料体中拡散を解析するため開発したFIPER-X である (GA - 9904)

本計算コードは1次元非線型拡散方程式

$$\frac{\partial c}{\partial t} = S - \lambda c - \nabla(D \nabla c)$$

を種々の幾何形状に対して、種々の境界条件を与えることによって時間依存で解き、燃料体中FP 濃度分布、物質流れ分布および冷却材中FP 放出量等の計算を行うものである。

(b) 解析モデル

(1) 燃料棒の解析モデル化

① 平板状モデル

② 境界条件ならびに初期条件の設定

- ・燃料体（コンパクト）内側境界 : FP 流れゼロ ($J = 0$)

- ・燃料コンパクトと黒鉛スリーブ境界 : $C(r_c, t) = \phi(r_c) C_0(r_c, t)$

- ・黒鉛スリーブと冷却材境界 : Freundlich 等温吸着式

③ 拡散係数の定式化

- ・温度依存性のみ考慮し、Arrhenius の式で定式化する。すなわち、濃度依存性は無視する : $D = D_0 \exp(-\Delta E/RT)$

④ 発生項の設定

- ・燃料コンパクトの単位体積のFP 発生率に平均の cpf の (R/B) を乗じたものを発生項に設定する。

$$S_i = 5.22 \times 10^{-8} \times P \times Y_i \times \overline{R/B}_i (\mu\text{mole}/\text{cm}^3 - \text{compact})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P : \text{コンパクト単位体積あたりの出力 (w/cc)} \\ Y_i : i \text{ 核種の収率} \\ \overline{R/B}_i = F(\overline{R/B})_{ii} + (1-F)(\overline{R/B})_{in,i} \end{array} \right.$$

(2) 炉心のモデル化

- ① 炉心を4領域に分割する。(Region - I, II, III, IV)
- ② 領域毎に平均出力チャンネル(Average)と最高出力チャンネル(Hot)の2チャンネルを計算する。

7.2 結果と検討

(a) 冷却材中 FP インベントリ(第 7.1 図)

冷却材中 FP インベントリは、(i)炉心全体が各領域の平均出力チャンネルから構成されている。
(ii)炉心全体が同様に最高出力チャンネルから構成されているものと仮定して、次式で計算する。結果は第 7.1 図に示されている。

$$R^i(t) = \sum_{I=1}^4 \left(\sum_{j=1}^7 CUR_{j,I}^i(t) \right) \times N_I \quad (1)$$

但し $CUR_{j,I}^i(t)$: 領域 I, ブロック番号 j からの核種 i の時核 t までの放出量(時間積分量)

N_I : 領域 I のチャンネル(燃料棒)本数

第 7.1 図から、600 日後の各 FP の冷却材中インベントリをまとめると次の表の如くである。

(燃焼時間 600 日)

核種	平均	最高
Sr - 90	20 (Ci)	53 (Ci)
Cs - 137	9.1 (Ci)	19 (Ci)
Ba - 140	3.4×10^{-3} (Ci)	0.39 (Ci)
Sr - 89	7.1 (Ci)	37 (Ci)

(b) 燃料棒内 FP 濃度分布(第 7.2 図)

第 7.2 図に、領域 II の最高出力チャンネルのブロック番号 5 (R - II, H, Block - 5) における Sr - 90, Ba - 140 の半径方向濃度分布を示す。

この 2 核種の分布の相異はそれぞれの半減期と拡散係数の相異によるものである。すなわち、Sr - 90 は長半減期かつ拡散係数が大きいため、拡散過程での崩壊による減衰も少く分布は平坦化するが、一方 Ba - 140 は比較的短半減期でありかつ拡散係数も小さいため、拡散過程での崩壊減衰により、この核種ではスリーブ内での濃度減少がみられる。(核種による拡散係数の相異については第 7.3 図を参照のこと。) 他核種も同様の傾向を示す。

本図からも、短半減期かつ拡散係数小の核種に対しては黒鉛スリーブの減衰効果はある程度期

待できるものと考えられる。

(c) 固体金属FPの放出比 (J/S) (第7.4図～第7.7図)

これは領域間のFP放出特性の相互比較を行なうために、固体金属FPの放出比 (J/S) を次のよえに定義し、図にまとめたものである。

$$(J/S)^{i,k}_j = \int_{S_{k,j}}^{i,k} d\sigma / \int_{V_{k,j}} S_j^{i,k} dv \dots \dots \dots \dots \dots (2)$$

すなわち、領域 k、ブロック番号 j における核種 i の冷却材中放出率の被覆燃料粒子からの全漏洩率に対する比として定義するものである。ここでは、各領域間の比較を行うため、更に平均出力チャネルならびに最高出力チャネルのそれぞれについて、そのチャネルの各ブロック内 FP 発生率 ($S_j^{i,k}$) を重みとして、チャネル全体の“平均”の放出比 (J/S)^{i,k} を次式で定義し、それを各領域毎に図示した。

$$(J/S)^{i,k} = \left(\sum_j (J/S)_j^{i,k} \cdot \int_{V_{k,j}} S_j^{i,k} dv \right) / \sum_j \int_{V_{k,j}} S_j^{i,k} dv \dots \dots \dots \dots \dots (3)$$

領域 I、II、III、IV の放出比 (J/S)^{i,k} をそれぞれ第7.4図～第7.7図に図示した。これらの図の放出比の最大値 (600日間の) を下表にまとめて示す。

最大放出比

核種	領域 I		領域 II		領域 III		領域 IV	
	平均	最高	平均	最高	平均	最高	平均	最高
Sr -90	0.18	0.23	0.19	0.5	0.18	0.4	0.17	0.23
Cs -137	0.23	$\times 10^{-5}$	0.28	$\times 10^{-4}$	0.24	$\times 10^{-5}$	0.46	$\times 10^{-3}$
Ba -140	7.4	$\times 10^{-5}$	1.5	$\times 10^{-4}$	6.1	$\times 10^{-5}$	2.7	$\times 10^{-3}$
Sr -89	0.028	0.047	0.036	0.18	0.028	0.13	0.026	0.055

尚、放出比の図中における放出曲線の挙動は燃焼ステップに沿っての燃料棒の温度分布の変化に主に依存するものである。この間の事情を説明する意図で第7.8図には領域 I の最高出力チャネルの温度変化を、第7.9図、第7.10図には、それぞれその領域の平均出力チャネルおよび最高出力チャネルの放出比 (J/S) が図示されている。他領域の放出比曲線も同様に説明することができます。

7.3 結論

(1) CPF から放出される金属FPは、

Sr - 90	に対して	20~50%
Cs - 137	に対して	21~46%
Ba - 140	に対して	$3.5 \times 10^3 \sim 0.4\%$
Sr - 89	に対して	2.0~20%

が冷却材中に放出されることが明らかとなり、このことから、長半減期のFPに対しては特に、FP放出の障壁として、cpf の被覆層の重要性が指摘される。このことは第7.9図、第7.10図から明らかなように、高温の燃料棒部分では特に重要である。

(2) 冷却材中への金属FPの放出総量は燃料寿命末期で

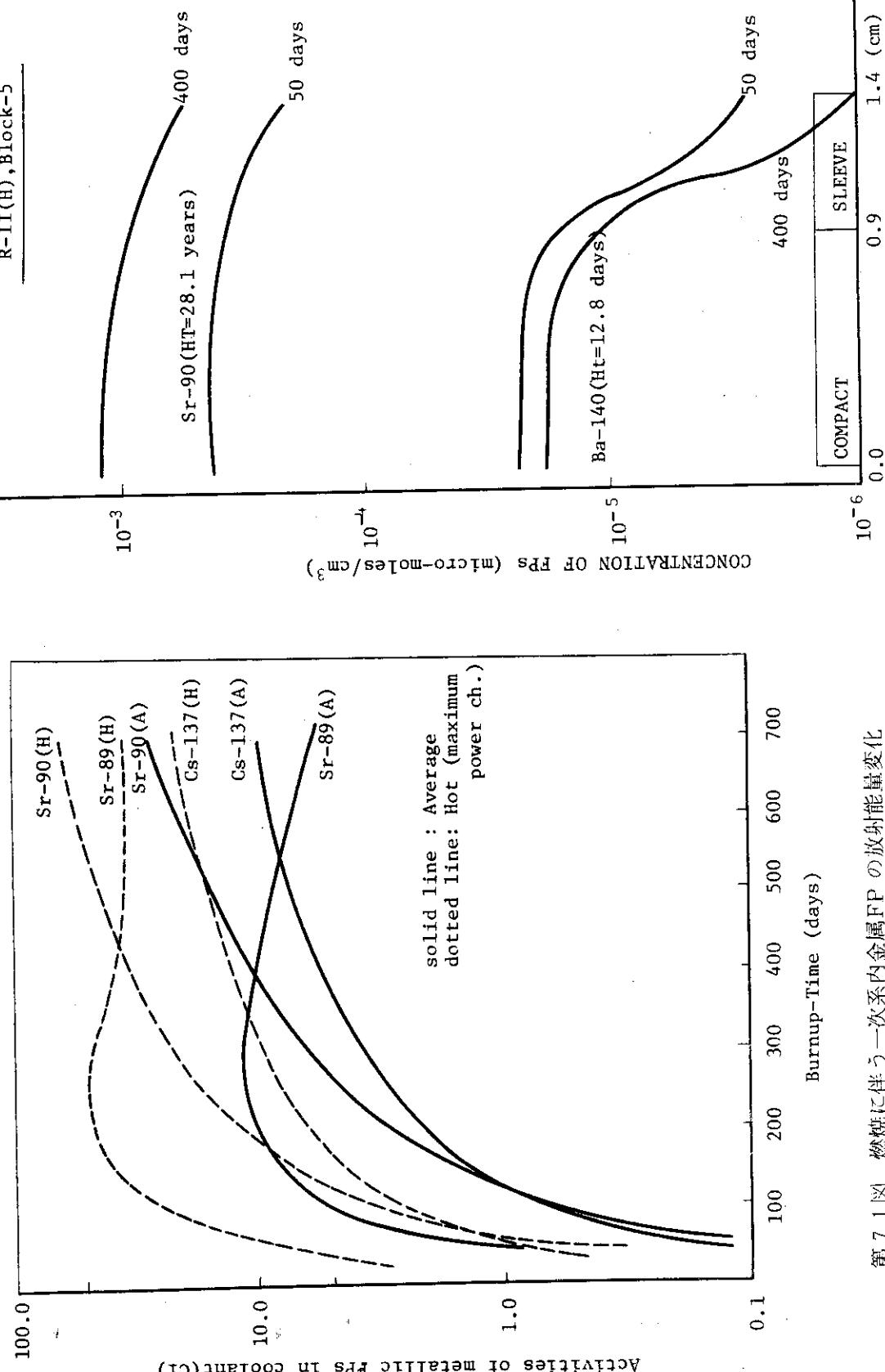
Sr - 90	:	53 Ci	(560 Ci)
Cs - 137	:	19 Ci	(640 Ci)
Ba - 140	:	0.39 Ci	(60 Ci)
Sr - 89	:	37 Ci	(3800 Ci)

ある。カッコ内は基本概念設計炉心(Mk-II)に対する冷却材中FPインベントリである。両者の相異はMk-II炉心では、cpf破損率として10%を想定しているのに対し、Mk-IIIの解析では燃焼期間中のcpf破損は生じないと仮定していることによる(製造時の破損率0.02%を想定)。

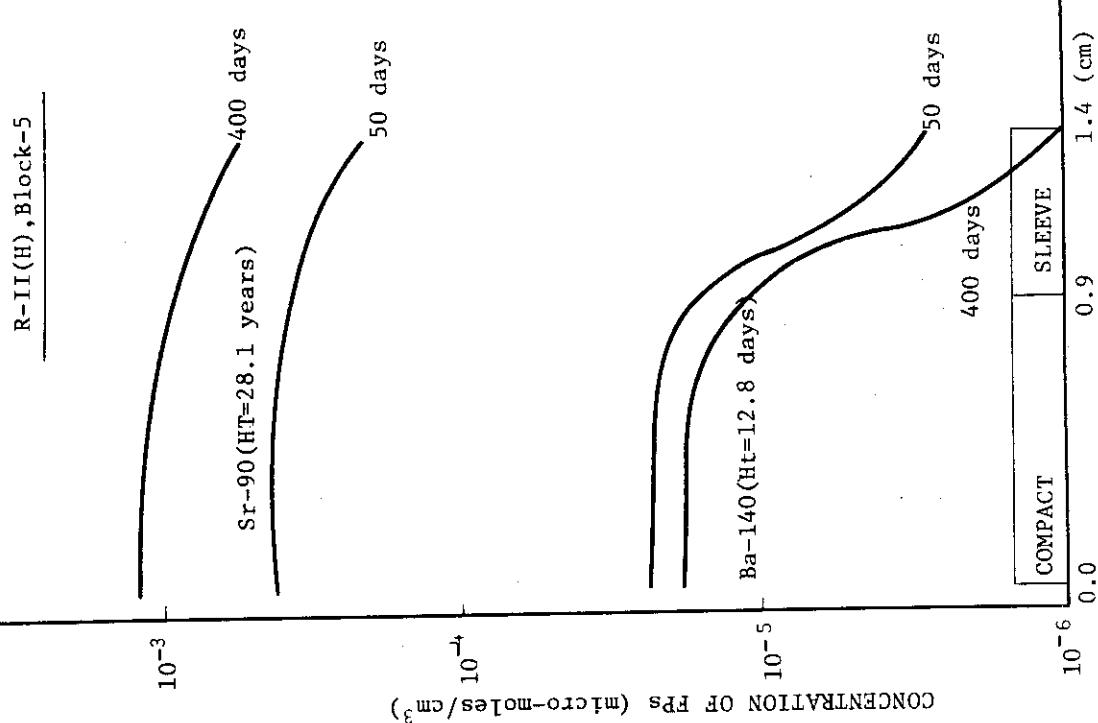
Mk-III炉心の金属FPの冷却材中インベントリはMk-II炉心と比較して、かなり小さく、安全設計上もそれほど問題にならないと考えられる。

R-II(H), Block-5Sr-90(H)Sr-89(H)Sr-90(A)Cs-137(H)Cs-137(A)Sr-89(A)

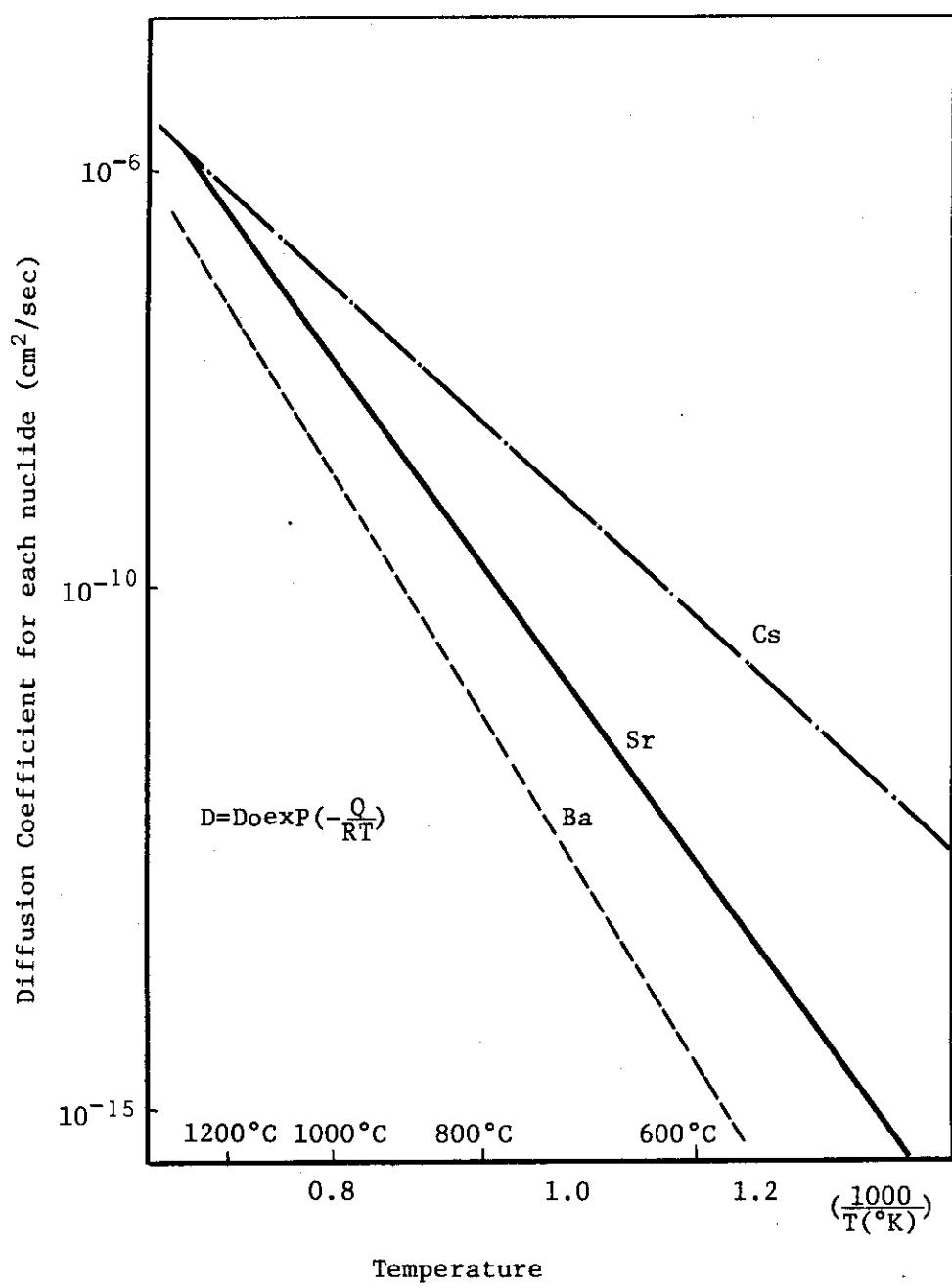
solid line : Average
dotted line: Hot (maximum
power ch.)



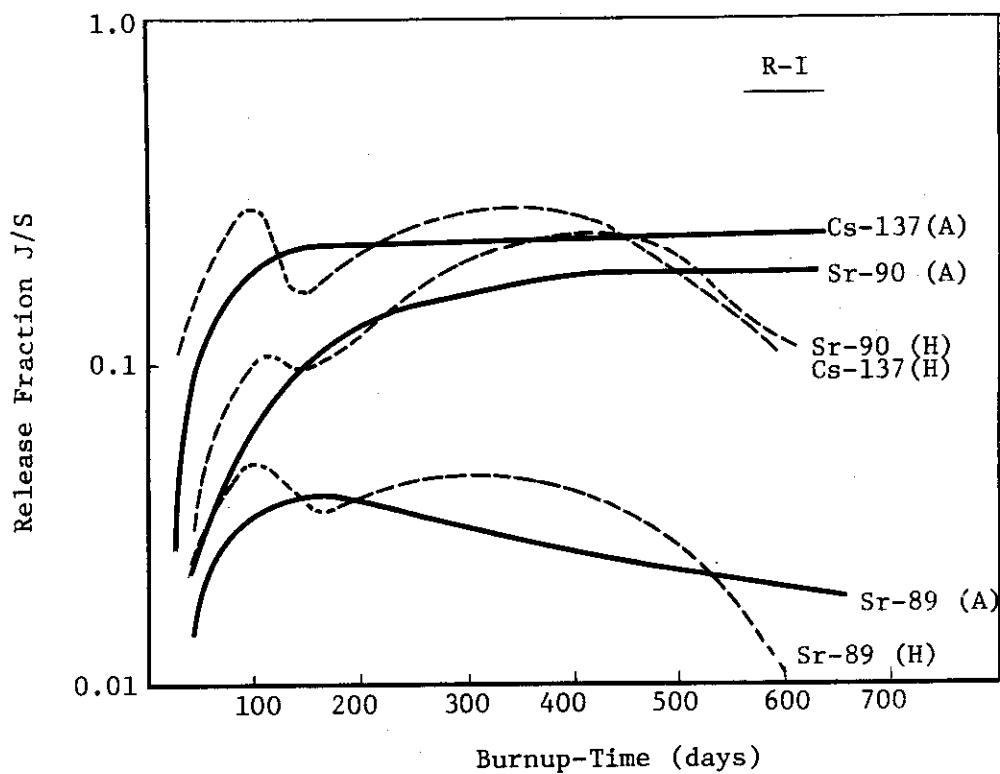
第7.1図 燃焼に伴う一次系内金属FPの放射能量変化



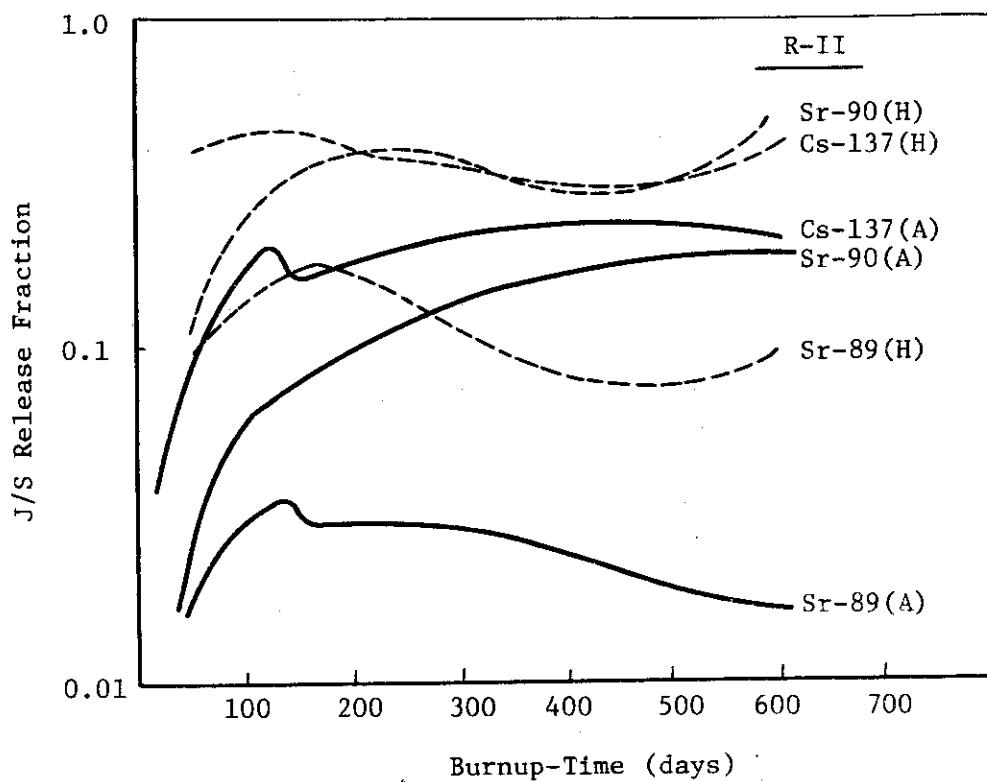
第7.2図 燃料棒内FP濃度分布(Sr-90, Ba-140)



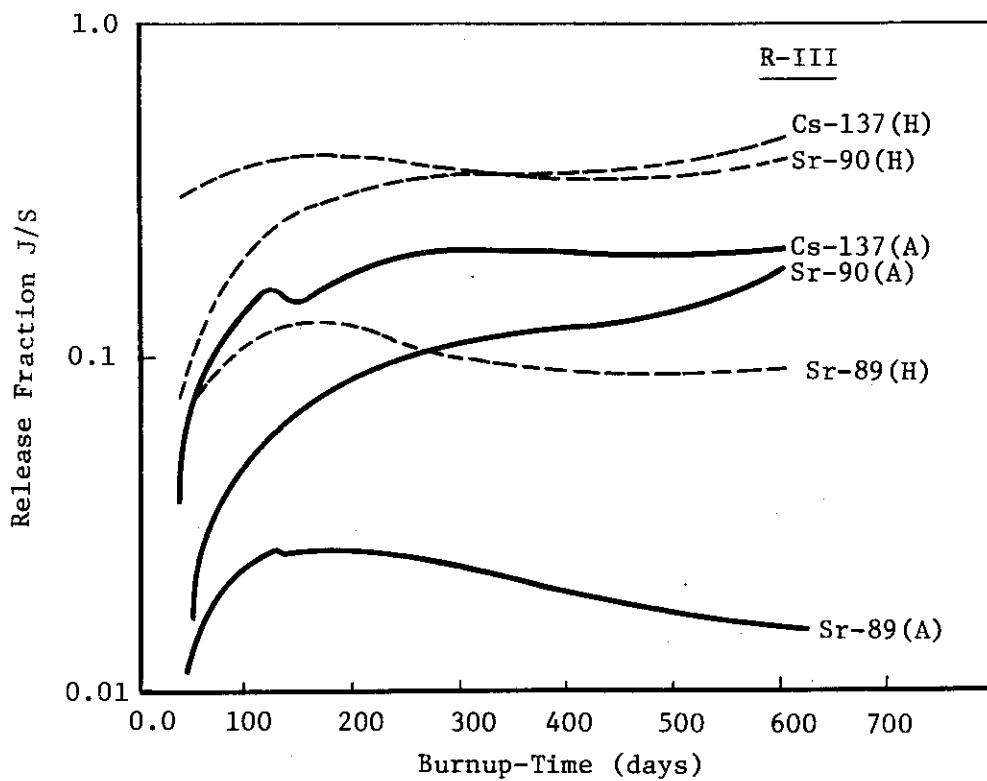
第 7.3 図 黒鉛中のFP核種の拡散係数



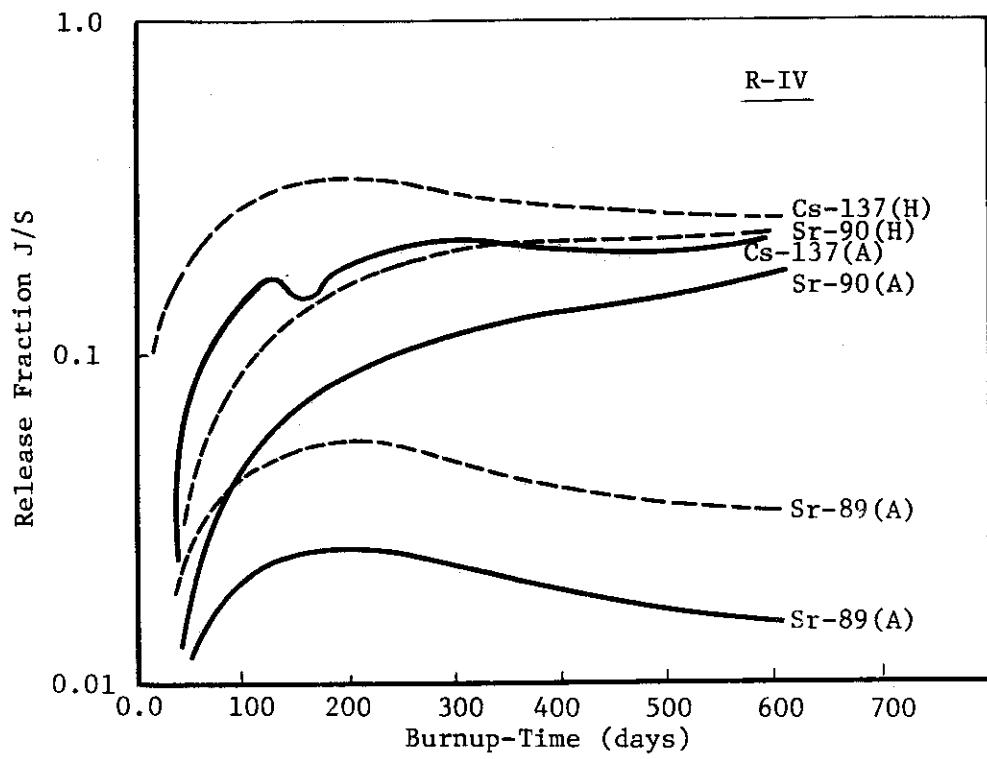
第 7.4 図 被覆粒子からの漏洩対黒鉛スリーブからの放出比（領域 I の
平均チャンネルと最高出力チャンネル）



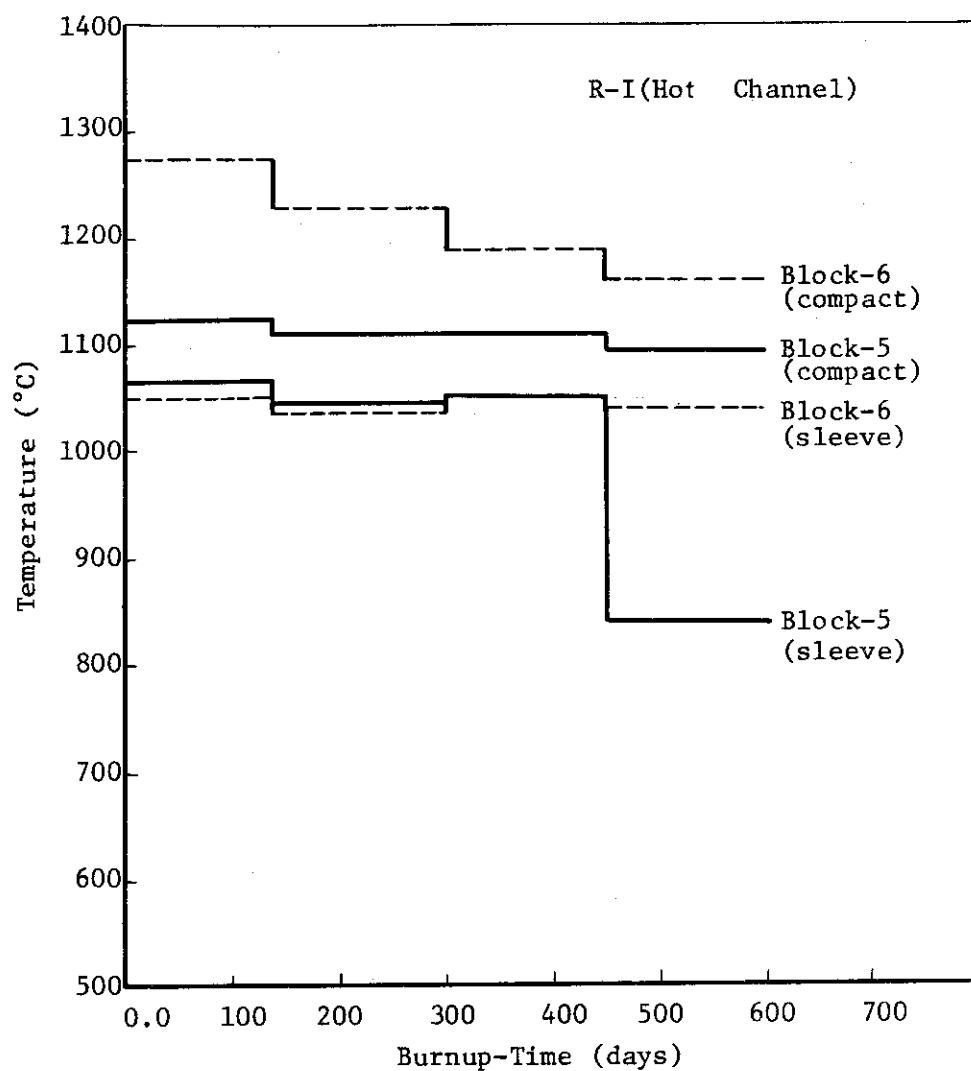
第 7.5 図 被覆粒子からの漏洩対黒鉛スリーブからの放出比
(領域 II)



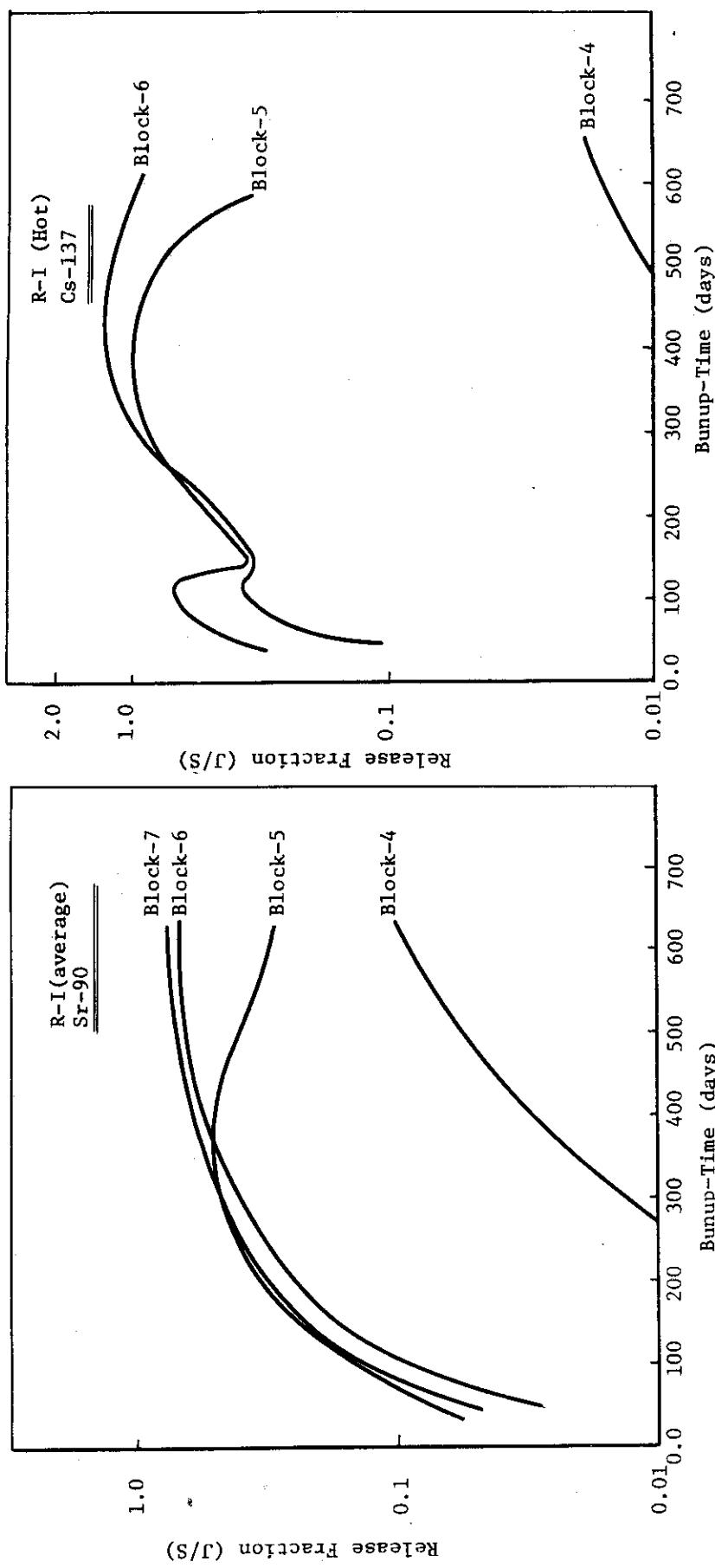
第 7.6 図 被覆粒子からの漏洩対黒鉛スリーブからの放出比（領域Ⅲ）



第 7.7 図 被覆粒子からの漏洩対黒鉛スリーブからの放出比（領域Ⅳ）



第 7.8 図 燃料コンパクト内側温度および黒鉛スリーブ外側温度の
燃焼変化（領域 I の最高出力チャンネル）



第 7.9 図 各ブロック毎の放出比 (Sr-90, 領域 I の
平均チャネル)

第 7.10 図 各ブロック毎の放出比 (Cs-137, 領域 I の
最高出力チャネル)

8. あとがき

多目的高温ガス実験炉の炉心設計の一つの到達点である Mk - III 炉心について、その代表的な運転状態における燃料の健全性に係る主要な特性と核分裂生成物の放出特性とを解析した。個々の特性については前章迄に述べたとおりである。これらの結果から、本解析の前提となっている多くの燃料設計の基盤技術が保証されるならば、Mk - III 炉心の燃料の安全性に関しては基本的な困難はないと考えられる。

燃料の安全性評価においては本報告書の範囲外の検討項目として、事象発生頻度の少ない厳しい異常状態における燃料挙動があげられよう。特に、厳しい反応度事故時や冷却能力不足時（PCM）における燃料棒の健全性、核分裂生成物の放出、また、厳しい地震時における燃料体構造の健全性などが重要であろう。これらの安全問題は、単に燃料設計の範囲内で検討されるべき性質のものではなく、原子炉またはプラント全体としての安全設計の中で検討され評価されるべきものである。本報告書で扱って来た燃料の特性評価は、概念設計としての Mk - III 炉心設計の feasibility check を目的とするもので、したがって、前述のような課題は含まれていない。これらの検討は次段階の設計において為される。

Mk - III 炉心の核・熱流動・燃料などの特性解析の結果を総合すると、この炉心が近い将来の建設開始に対応できる炉心の骨格を与えるものと考えられる。

まえがきにも述べたごとく、本実験炉の炉心設計は我が国において極く近い将来に実用化が可能と考えられる技術を総合的に組み立て、その概念構成を明確にすることを目標として来た。その一つの到達点が Mk - III 炉心である。この炉心の燃料設計に関しては、原研における VHTR 燃料開発研究や、ドラゴンプロジェクトを中心とする諸外国の HTGR 燃料開発やその実績をにらみ、これらの中から現状における技術の到達点を見定め、これに基づいて依拠すべき燃料設計の基盤技術を設定している。

今後の炉心設計を進める上で、そのような設定された基盤技術が妥当なものであることを確証して行く研究開発が是非とも必要である。

燃料設計にとって当然のことながら、炉心の核熱流動設計上の基盤技術の確証が重要である。とりわけ重要なものは出力分布と流量分布の信頼性である。

燃料設計の基盤技術の確証は次のような 4 項目に大別することができよう。

1) 燃料の設計概念（材質、構造）の確証

この為に材料・構造物の製造試作試験が必要である。

2) 材料の挙動、構造物としての挙動の確認

小試片による材料試験、実機の各コンポーネント試験、アセンブリーとしての実機構造物試験を効果的に進める必要がある。

3) 設計限界の確証

設計の裕度を見極めるため、材料や構造物の種々の破損や劣化形態に対する発生条件を明確にすることが必要である。

4) 設計評価手法の確証

現状の設計解析や評価に使用している手法を前述の材料挙動、構造物挙動試験と照合させ、手法の信頼性を検証する必要がある。

上述のような燃料設計の基盤技術の確証は、極めて広範囲の材料物性試験から大規模な工学試験迄を含むものである。従って、多目的高温ガス実験炉の早期の建設着工を期するためには、試験内容を重要度、緊急度などの観点から分類し、優先度の高い試験を先行させる必要がある。

Mk - III炉心設計を一通りまとめ上げた結果からみて、燃料設計の主要な検討課題とその課題解決のための確認事項をやや詳しく第 8.1 表に示した。これらの課題の多くはこれ迄に何回となく関係者によって確認されて来ているものであり、また、既に試験に着手しているものも含まれている。設計面からみた重要課題の確認のためには、実機材料、実機構造物の試験の重要性が認識されるであろう。

燃料設計の基盤技術の確保のために上述のような試験研究が強力に展開されることを願ってやまない。

謝 辞

本研究は、多目的高温ガス実験炉第 1 次概念設計のために、昭和 50 年 2 月より、日本原子力研究所において実施された Mk - III 炉心設計の中でとり行われたものである。本研究は、前多目的炉設計研究室長下川純一博士ならびに、現研究室長青地哲男博士をはじめとして多数名の同研究室員と外来研究員、協力研究員の援助、助言、協力によって達成されたものである。ここに、これらの方々に深甚なる感謝の意を表したい。

燃料設計の基盤技術の確証のために上述のような試験研究が強力に展開されることを願ってやまない。

3) 設計限界の確証

設計の裕度を見極めるため、材料や構造物の種々の破損や劣化形態に対する発生条件を明確にすることが必要である。

4) 設計評価手法の確証

現状の設計解析や評価に使用している手法を前述の材料挙動、構造物挙動試験と照合させ、手法の信頼性を検証する必要がある。

上述のような燃料設計の基盤技術の確証は、極めて広範囲の材料物性試験から大規模な工学試験迄を含むものである。従って、多目的高温ガス実験炉の早期の建設着工を期するためには、試験内容を重要度、緊急度などの観点から分類し、優先度の高い試験を先行させる必要がある。

Mk - III炉心設計を一通りまとめ上げた結果からみて、燃料設計の主要な検討課題とその課題解決のための確認事項をやや詳しく第 8.1 表に示した。これらの課題の多くはこれ迄に何回となく関係者によって確認されて来ているものであり、また、既に試験に着手しているものも含まれている。設計面からみた重要課題の確認のためには、実機材料、実機構造物の試験の重要性が認識されるであろう。

燃料設計の基盤技術の確保のために上述のような試験研究が強力に展開されることを願ってやまない。

謝 辞

本研究は、多目的高温ガス実験炉第 1 次概念設計のために、昭和 50 年 2 月より、日本原子力研究所において実施された Mk - III 炉心設計の中でとり行われたものである。本研究は、前多目的炉設計研究室長下川純一博士ならびに、現研究室長青地哲男博士をはじめとして多数名の同研究室員と外来研究員、協力研究員の援助、助言、協力によって達成されたものである。ここに、これらの方々に深甚なる感謝の意を表したい。

燃料設計の基盤技術の確証のために上述のような試験研究が強力に展開されることを願ってやまない。

第8.1表 燃料設計の主要な検討課題とその解決策(1/2)

設計基準	検討項目	検討課題	課題解決の方策	
			実証	確認
(1) 材料選定と材料仕様	被覆燃料粒子は $600 \mu\text{m}$ UO ₂ 核のTRISO-2型被覆	・ 仕様品の製作性、品質の実証		
	・ 燃料コンパクトはオーバーコートプレスコンパクトを採用し、その仕様は, NEIの経験から推測している。	・ 仕様品の製作可能性の実証、マトリックス材の選定。		
	・ 黒鉛はSMI-24を評価用として採用	・ 黒鉛鉻柄の最終選定、大量生産品の品質の確認		
(2) 設計用材料データ	被覆粒子の耐高温性、アメーバ挙動などは海外データを参考にしている。 燃料コンパクトは、類似品(DPの製品)の測定値を参考にし、これから類推または準拠して設定 黒鉛は、AGLカタログ等に準拠、ただし一部について別銘柄のものを使用。	・ 仕様品でのデータ測定と設計値の妥当性の評価 ・ 上記仕様品の物性(照射前、照射後) 測定と、設定値の妥当性の評価 ・ AGLデータの確認が必要、また未知データの測定と設定値の妥当性の評価		
(3) 被覆粒子燃料の設計限界基準 被覆燃料粒子の使用限界 破損発生条件(機械的破損とアメーバ破損)	異常高温時のFP保持能の劣化 粒子破損率(金炉心) 燃料コンパクトの静的強度	・ 仕様品でのデータ手得と設計の妥当性の評価見直し ・ 仕様品でのデータ手得 ・ 仕様品でのデータ測定		

第8.1表 燃料設計の主要な検討課題とその解決策 (2/2)

検討項目	検討課題	解決の方策
(4) 黒鉛材料、構造物の設計限界基準	<ul style="list-style-type: none"> 許容応力または許容ひずみを設定 未設定 未設定 (・ H_2O, CO_2 により 0.2 mm 深さ) 	<ul style="list-style-type: none"> 設定に関する実験的根拠の集積 材料、構造試験データの集積 同上 実験炉根拠の明示、妥当性の確認
被覆粒子燃料の設計特性	<p>(1) 被覆燃料粒子の破損率</p> <ul style="list-style-type: none"> 通常時の物理的破損は 1 % 以下 異常時に 15 ~ 50 °C 以上の割合は 1 % 程度 熱応力、照射応力は許容値以下 <p>(2) 燃料コンバクトの静的強度</p> <p>(3) 燃料コンバクトからの FP 放出</p>	<ul style="list-style-type: none"> 仕様品での物理的挙動の把握と設計基準の見直し 仕様品での挙動データ、破壊強度の測定と設計基準の見直し 仕様品でのFP放出測定
黒鉛構造物の設計特性	<p>(1) 黒鉛スリーブの静的強度</p> <ul style="list-style-type: none"> スリーブ底部の応力は許容応力に達する。 構造の調整が必要 <p>(2) 黒鉛プロックの静的強度</p> <p>(3) 黒鉛プロックの動的強度</p>	<ul style="list-style-type: none"> 黒鉛の粘弾性挙動解析の実証（照射クリープ定数と構造物照射試験）と強度基準の確認 同上 動的強度データ（衝撃強度、前断強度）または、限界荷重の実測、材料試験と構造物試験が必要 動的強度基準の検討
	<p>(4) 黒鉛スリーブの酸化腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> 起動時でも、SM-24 ならば問題ない。 <p>(5) 黒鉛スリーブ中の FP の拡散移行</p> <ul style="list-style-type: none"> 解析評価用データが外国のもの（拡散や蒸発の定数） 	<ul style="list-style-type: none"> 3 次元挙動解析の確立のための構造物試験推進 活性化エネルギーの検証、放射線効果の検証