

JAERI-M

8400

多目的高温ガス実験炉照射用炉心の検討

1979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・鈴木邦彦

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、複製などのお問い合わせは、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.

多目的高温ガス実験炉 照射用炉心の検討

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 喜晟

三竹 晋 ・ 新藤 隆一

荒井 長利 ・ 平野 光将

鈴木 邦彦

(1979年7月30日受理)

多目的高温ガス実験炉を照射用炉心として使用する場合は、炉心構成、炉心性能ならびに原子炉構造、運転法への要求について検討したものである

実験炉炉心の中央冷却材流量調節領域の7燃料カラムを試験領域とし、そのまわりをドライバー領域として照射用炉心を構成した。この試験領域に置かれた試験燃料体は、大型高温ガス炉に類似した条件で照射できるようになっている。

多目的利用システム実証試験と併用した照射用炉心では、試験燃料の燃焼度は約1200日で照射目標の80GWd/tに達するが、出力密度は目標値の約半分である。しかし、原子炉出口冷却材温度を下げた運転、または、ドライバー領域にセミピン型燃料体を使用することによって照射性能が高められ、実験炉を照射ベッドとして有効に利用できることが明らかになった。

JAERI-M 8400

Design Studies on Irradiation-Bed Core  
of the Experimental Multi-Purpose VHTR

Takehiko YASUNO, Yoshiaki MIYAMOTO, Susumu MITAKE, Ryuichi SHINDO,  
Taketoshi ARAI, Mitsumasa HIRANO and Kunihiro SUZUKI

Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received July 30, 1979)

For the experimental multi-purpose Very High Temperature Gas Cooled Reactor used as an irradiation bed, core composition, core performance and the requirements of reactor structure and plant operation were studied.

The core used for irradiation consists of the test region with seven fuel columns in the core and a driver region surrounding it. Test fuel elements placed in the test region are to be irradiated under conditions similar to those of large VHTR.

Burn-up of the test fuel reaches 80 GWd/t of large VHTR at about 1200 days but its power density is about half the target value, when the core is used jointly with demonstration test of nuclear process heat applications. It was shown that the core performance could be improved by plant operations with lower coolant temperature at the reactor outlet than normal or with semi-pin fuel elements used in the driver region and the core could be used sufficiently for irradiation purposes.

Keywords : VHTR Reactor, Irradiation Bed, Core Design, Irradiation Test, Test Fuel, Driver Fuel, Core Performance

## 目 次

1. はじめに	1
2. Mk-III 炉心の定格時照射性能	6
2.1 概要	6
2.2 核特性解析	13
2.3 熱流動特性解析	33
2.4 遮蔽特性解析	49
2.5 原子炉の構造, 運転への影響	54
3. 照射用炉心の特性検討	57
3.1 概要	57
3.2 炉心の概念構成のための検討	67
3.3 参考炉心の核特性	108
3.4 参考炉心の熱流動特性	140
3.5 燃料特性解析	171
3.6 遮蔽特性解析	200
3.7 炉体構造の検討	212
3.8 運転方式の検討	215
4. おわりに	222

## CONTENTS

1. Foreword .....	1
2. Irradiation ability of Mk-III core in normal operation ...	6
2.1 Summary .....	6
2.2 Nuclear characteristics .....	13
2.3 Thermal-hydraulic characteristics .....	33
2.4 Neutron shielding characteristics .....	49
2.5 Influence of reactor structure and operation .....	54
3. Performance analysis of irradiation core .....	57
3.1 Summary .....	57
3.2 Consideration of irradiation core concept .....	67
3.3 Nuclear characteristics of reference core .....	108
3.4 Thermal-hydraulic characteristics of reference core ...	140
3.5 Fuel performance .....	171
3.6 Shielding characteristics .....	200
3.7 Consideration of core structure .....	212
3.8 Consideration of reactor operation .....	215
4. Afterword .....	222

## 1. はじめに

多目的高温ガス実験炉の設計は、昭和50年に第1次概念設計<sup>(\*)</sup>を終了した後、種々の設計上の検討が行なわれている。本報告は、これらのうち実験炉炉心を照射用炉心として使用することについて検討したものをまとめたものである。

実験炉には、3つの基本機能、すなわち、「多目的利用システムの開発実証試験」、「耐高温燃料・材料の照射・開発試験」、「高温ガス炉システム安全性実証試験」を有することが求められている。これらの機能のうち「耐高温燃料・材料の照射・開発試験」を具体化する1つの方法として、実験炉炉心を新型燃料体照射試験に使用する場合の照射用炉心としての特性検討および原子炉構造・運転法に対する要求事項の検討を行なった。

ブロック型燃料体を採用している実験炉の特徴を生かした耐高温燃料照射試験は、試料による照射試験よりも燃料体として総合的な健全性試験を行なうことであると考えられる。そのために Fig. 1.1 および Fig. 1.2 に示す第1次概念設計の炉心構成に対して、Fig. 1.3 に示すように炉心中心の冷却材流量調節領域の7燃料カラム全部を、または、1部を試験燃料体に置き換え、残りをドライバー燃料として照射用炉心を構成することを前提とした。

試験燃料体には、大型高温ガス炉として想定される照射条件を定め、この目標を達成するために照射用炉心の概念を具体化した。

2章には、ドライバー燃料に第1次概念設計時の炉心<sup>(\*\*)</sup>(以下Mk-III炉心と略記)を用い多目的利用システム実証試験と併用して照射機能を持たず照射用炉心の特性検討を示す。試験燃料体は、低濃縮ウラン系のもので主に内面冷却ピン型(セミピン型)燃料体を、また、高濃縮ウラン富化トリウム系のものでマルチホール型燃料体を想定した。

炉心性能解析は、ドライバー燃料2サイクル、試験燃料体1200日燃焼、反応度増加1%以内の条件で、試験燃料体の濃縮度と可燃性毒物の装荷量を決定し、セミピン型試験燃料体の照射用炉心(設計例-1)およびマルチホール型試験燃料体の照射用炉心(設計例-2)を選定した。設計例-1については燃焼時の核熱特性と制御棒炉停止余裕の検討を、設計例-2については遮蔽の検討を行なった。

3章には、試験燃料体に対する照射性能に重点を置き、原子炉熱出力や原子炉出口冷却材温度をパラメータにした特性検討を示す。試験燃料体は、セミピン型、マルチホール型、中空棒型および円環棒型の4種類を想定した。また、ドライバー燃料体は、Mk-III炉心の燃料体およびセミピン型燃料体<sup>(\*\*\*)</sup>である。試験燃料体の燃料および可燃性毒物の装荷法や制御棒操作方法などを検討し、Mk-III型ドライバー燃料参考炉心(MR-1炉心)およびセミピン型ドライバー燃料参考炉心(SR-1炉心)を設定し、これらの照射用炉心としての性能を検討した。さらに、照射用炉心の性能を向上させる

(\*) 青地, 他, "多目的高温ガス実験炉第1次概念設計", JAERI-M6845 (1977)

(\*\*) 青地, 他, "多目的高温ガス実験炉の炉心参考設計MK-III", JAERI-M6895 (1976)

(\*\*\*) 青地, 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-M8064 (1978)

ために原子炉熱出力（50，60 MW）と原子炉出口冷却材温度（800，900，1000℃）を変えることの効果を把握するとともに，遮蔽・炉体構造ならびに運転方法への影響を検討した。

なお，これらの検討は，原研がメーカーとの契約にもとづいて進めたものであり，2章に関しては富士電機製造（株），川崎重工業（株），3章に関しては日本原子力事業（株），石川島播磨重工業（株）が，それぞれ担当して作業したものである。



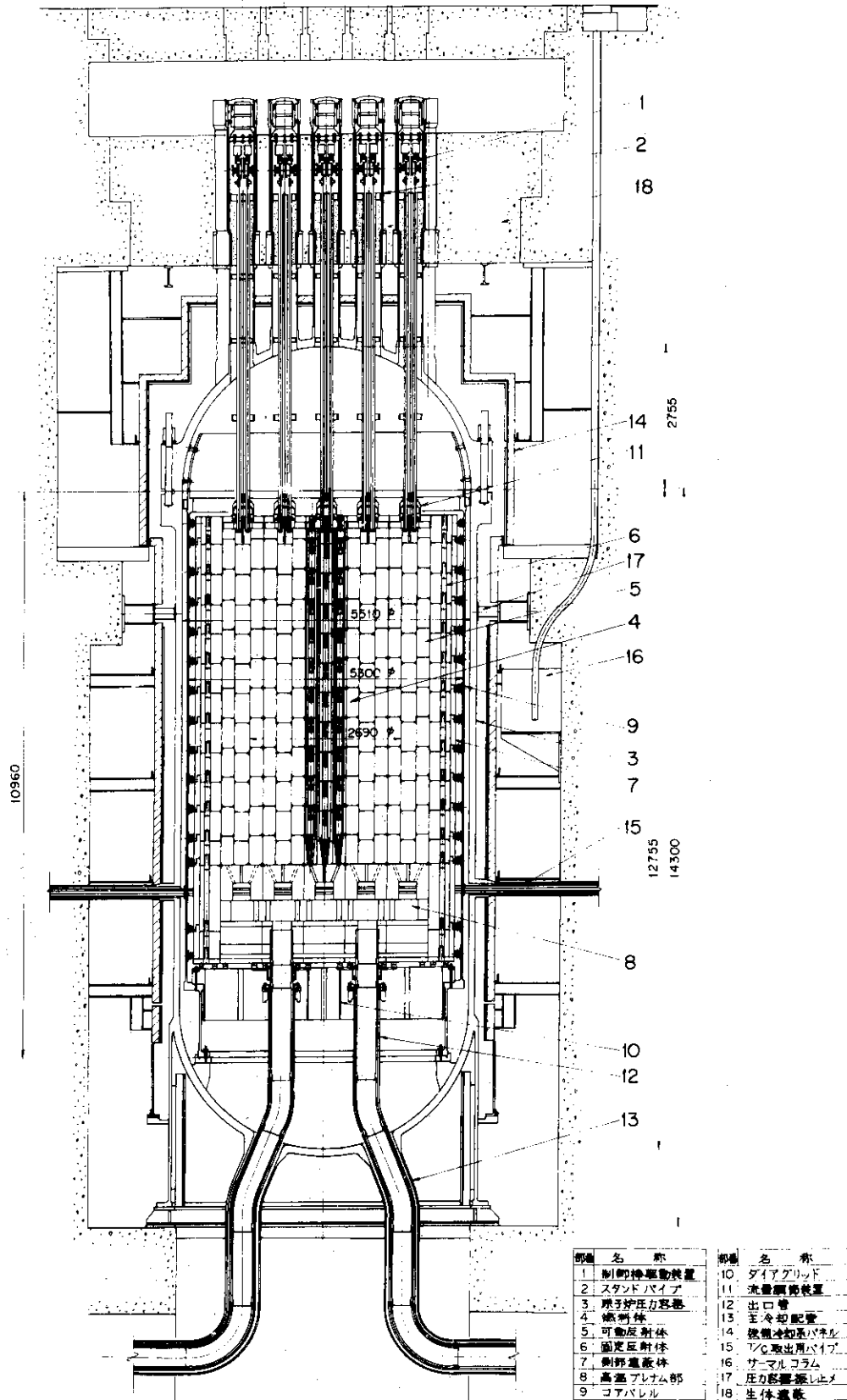
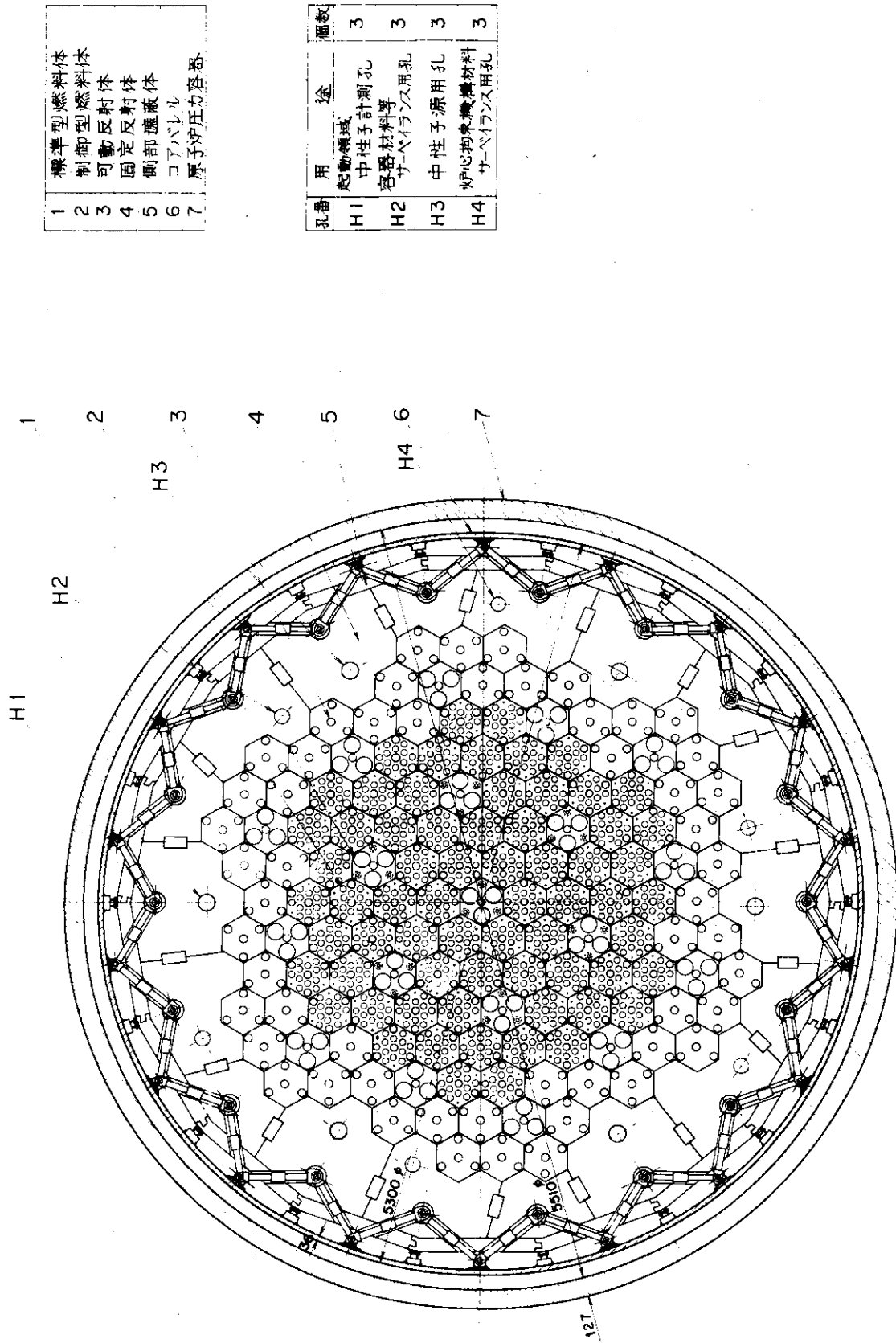


Fig. 1.1 多目的高温ガス実験炉の原子炉縦断面図



1	標準型燃料体
2	制御型燃料体
3	可動反射体
4	固定反射体
5	側部遮蔽体
6	コアバレル
7	原子炉压力容器

孔番	用途	個数
H1	起動領域 中性子計測孔	3
H2	反射材料等 サーベイランス用孔	3
H3	中性子源用孔	3
H4	炉心拘束機構材料 サーベイランス用孔	3

Fig. 1.2 多目的高温ガス実験炉の原子炉横断面図

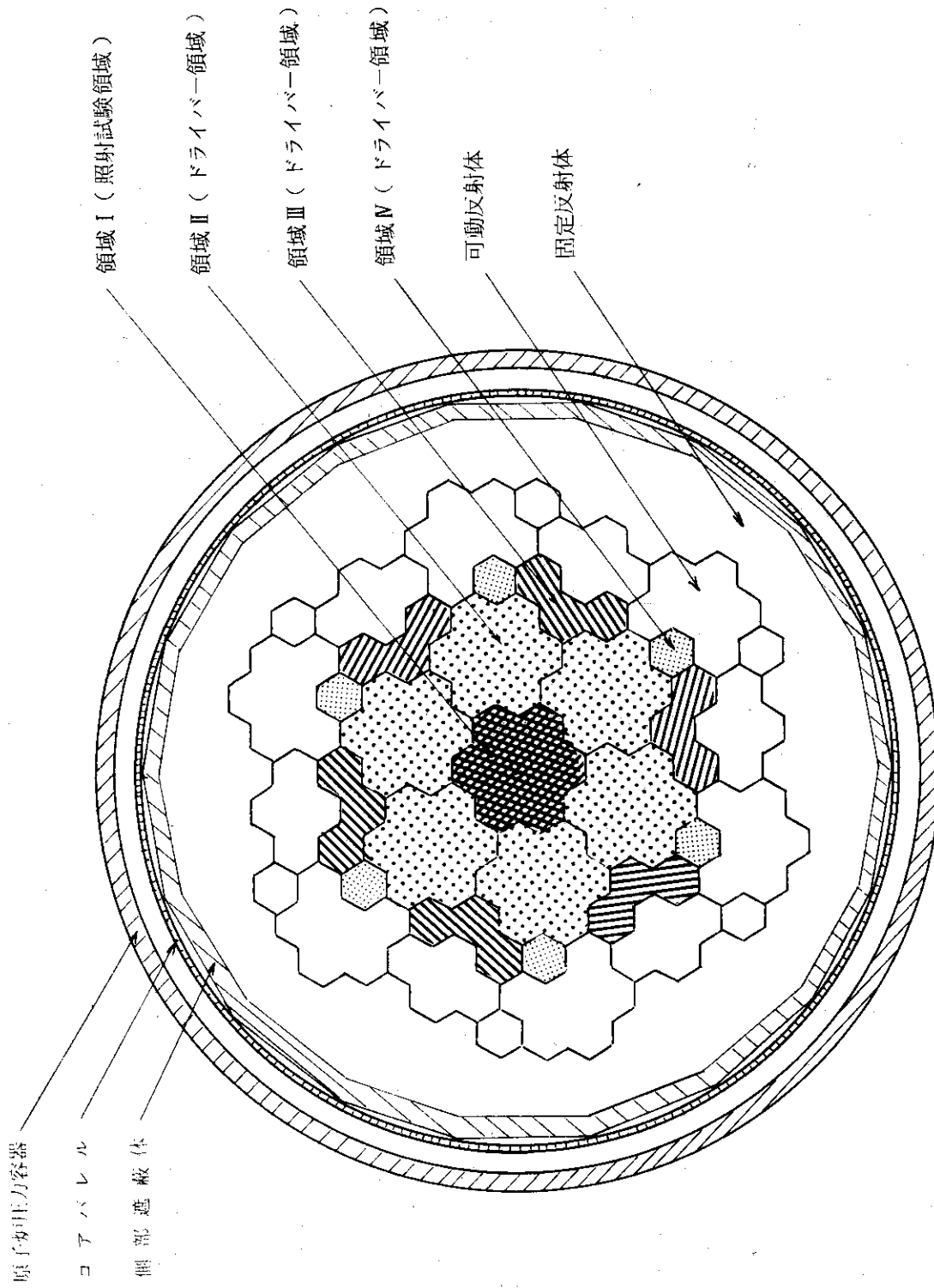


Fig. 1.3 照射炉用炉心断面の概念図

## 2. Mk-III炉心の定格時照射性能

### 2.1 概要

Mk-III炉心を照射炉として利用することの可能性と問題点を明らかにすることを目的とし検討を行なった。

もともと実験炉は出力密度が高くないので、十分な燃料照射試験を行なうには長い期間が必要になるが（試験計画・製作・前検査、予備照射・本照射、冷却・照射後試験、等を含めると10年程度かかることも予想される）、他方熱利用試験については熱利用系の開発状況にも依存するもの、おそらく間かつ的であるにしてもかなりの期間続くものと予想される。従って、実験炉としては多目的利用開発実証試験と照射試験の両機能を同時に満足することが望ましいことから、本検討ではこの両機能の両立を前提として検討を行なった。

検討に際してとった基本方針は次の通りである。

- (i) ドライバー燃料はMk-III型燃料とする（Fig. 2.1.1）。
- (ii) 照射試験の領域は中央7燃料カラムの領域とする。
- (iii) 試験燃料は低濃縮ウラン使用内面冷却ピン型（セミピン型）燃料体及び高濃縮ウラン富化トリウム使用マルチホール型燃料体の2種を基本とする。
- (iv) 照射試験では可能な限り照射目標の達成を計るものとし、炉心設計の指針・基準としてはMk-III炉心設計時のものに準拠する。
- (v) 運転条件として次のケースを考える。但し、条件2,3は参考検討用である。

条件1 出力 = 50 MW , 出口ガス温度 = 1000 °C

“ 2 “ ≤ “ , “ = “

“ 3 “ ≤ “ , “ ≤ “

- (vi) 流量調節方式は出口ガス温度一定方式を基本とし、照射試験領域への出力集中化の限界を検討するために流量再配分の効果も調べる。

本検討において照射試験で想定した目標を、結果としての達成度とともにTable 2.1.1に示した。又、試験燃料体の主要目をTable 2.1.2に、さらにその構造をFig. 2.1.2, 2.1.3に示した。

検討結果によると、試験燃料体が低濃縮ウラン使用セミピン型の場合、燃焼初期で最大達成出力密度  $10 \text{ w/cm}^2$ 、ドライバー燃料に2サイクルを想定した1200日燃焼後での高速中性子最大照射量  $3 \times 10^{21} \text{ nvt}$ 、最大燃焼度  $80 \text{ GWD/T}$ 程度が見込める。そして、冷却条件は燃焼初期で最も厳しく、燃焼とともに緩和する。又、遮蔽特性解析の結果によると、出力が50 MWであればMk-III炉心体系と比較して遮蔽設計上大きい変更の必要はないと考えられる。しかし、オリフィス制御、制御棒設計、計測・制御設計に対する要求は一般にMk-III炉心に対するより厳しくなっているといえる。

結果としては、中央照射試験領域に対する冷却能力に限界があり出力密度が高められないこと、

照射目標の重要項目の1つである高速中性子照射量も必ずしも十分な値を達成できないこと、等  
が明らかになったが、実験炉の利用方式に関連した前記2機能の両立の可能性は示しえたといえ  
よう。

Table 2.1.1 照射実験の設計条件, 目標と達成値

項目	目	標		達成値
		Mk - III	SP	
最大高速中性子照射量 ( $E_n > 0.18 \text{ Mev}$ ) nvt	$1 \times 10^{21}$	$8 \times 10^{21}$	$8 \times 10^{21}$	$2.9 \times 10^{21}$
燃焼度 平均 GWD/T	18	40	80	43.5
燃焼度 最大 "	34	80	160	81.2
出力密度 W/cm <sup>2</sup>	<7.1	20	20	10.4
燃料最高温度 °C	1350	1400	1400	1400
照射用炉停止余裕*	0.01	0.0	0.0	0.0
最少レイノズル数*	3500	3000	3000	3000
最少限界熱流束比* (CHR)	1.8	1.4	1.4	1.66

\* ) 設計条件として設定したものの。

(注) SP ... セミピン型, MH ... マルチホール型

Table 2.1.2 照射用燃料の主要目

項	目	設計例 - 1	設計例 - 2	MK - III
燃料サイクル		低濃縮ウラン	高濃縮ウラン	低濃縮ウラン
燃料体型式		セミピーン-体成型	マール-ホル-体成型	中空燃料
冷却孔径	(mm)	41.5	15.88	50
標準燃料体		18	63	12
		18	126	12
		280	210	390
	(kg/ブロック)	4.81	60	3.76
制御燃料体		6	27	3
		6	54	3
		600	350	1250
	(kg/ブロック)	1.6	2.57	0.81
黒鉛スリーブ (外)		3.35	-	36.3
		3.95	-	46
	(内)	1.8	-	-
		2.2	-	-
燃料コンパクト		5.30	5.30	5.29/4.55(CR)
		30.8	35 (9 <sup>1</sup> )	30.5
	(mm)	2.2	-	1.8
	(mm)	3.35	1.27	3.6
	(μm)	1120	520/810 <sup>2</sup> )	920
	(μm)	800	200/500 <sup>2</sup> )	600
	(μm)	60	60	60
	(μm)	30	30	30
	(μm)	25	25	25
	(μm)	45	45	45
	(w/o)	8	93	4
ウラン平均濃縮度		8/10/10/10/6	0/7.9/14.1/6.7/5.4/	6/6/4/4/4/2/2
核分裂核種/重金属核種		/6/6	4.1/2.8 平均 6.8	
1) UO <sub>2</sub> 粒子充填率		2) UO <sub>2</sub> 粒子/ThO <sub>2</sub> 粒子		

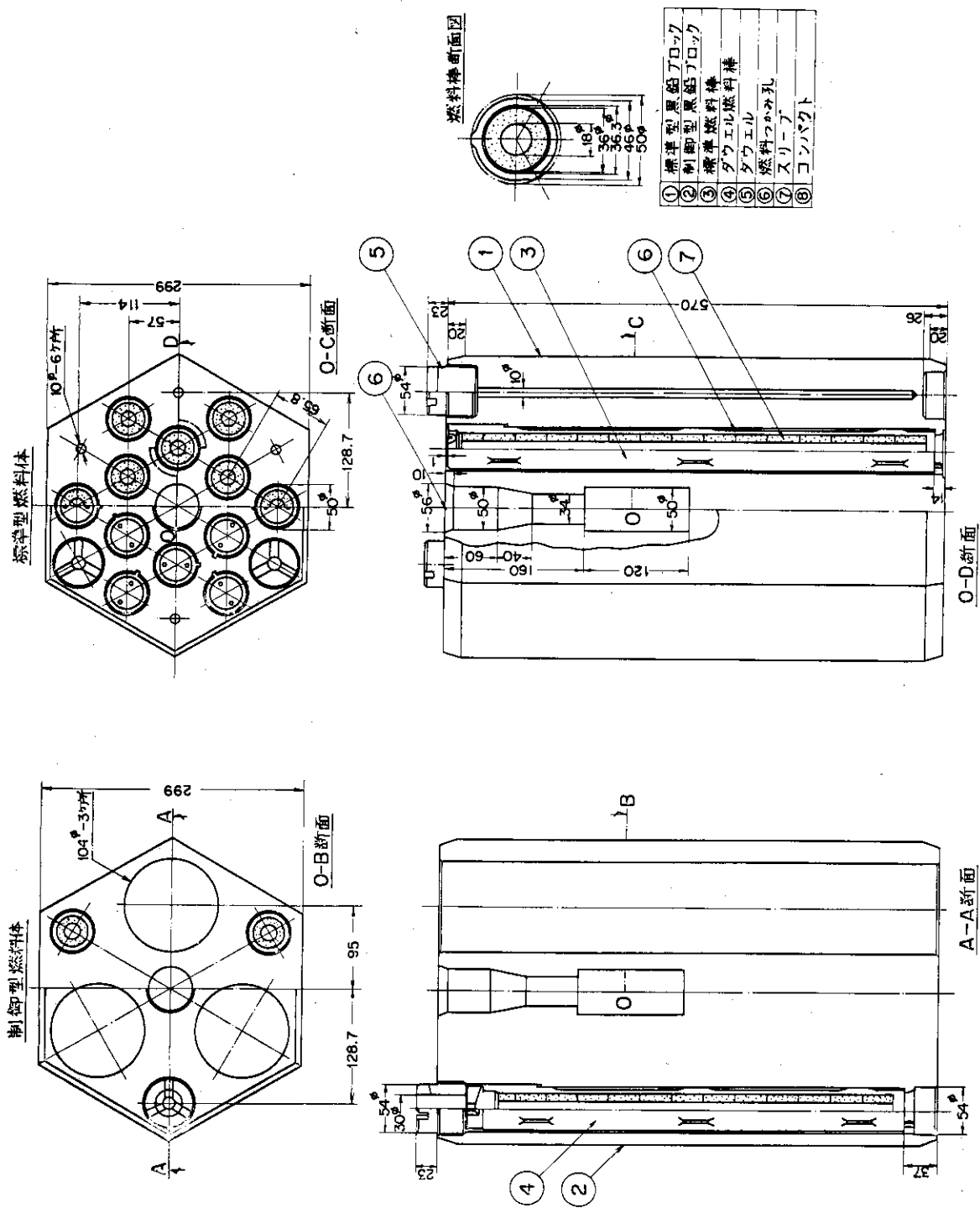


Fig. 2.1.1 Mark - III 燃料体



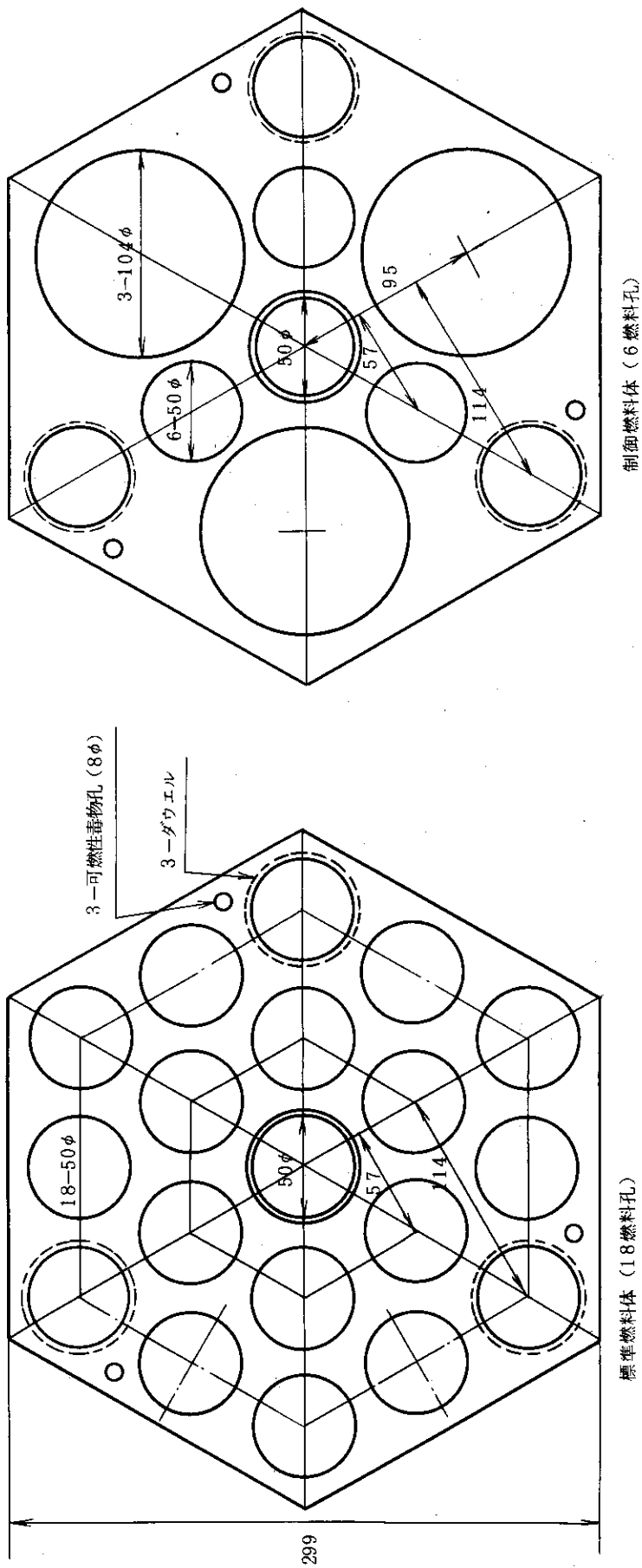


Fig 2.12 セミピン型試験燃料体

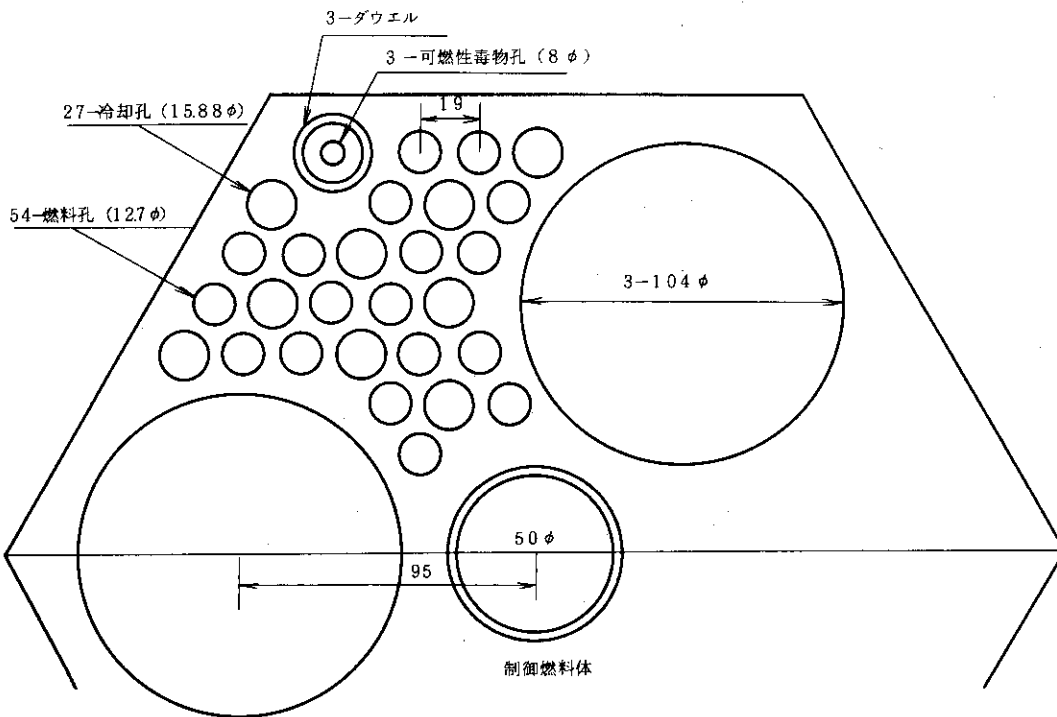
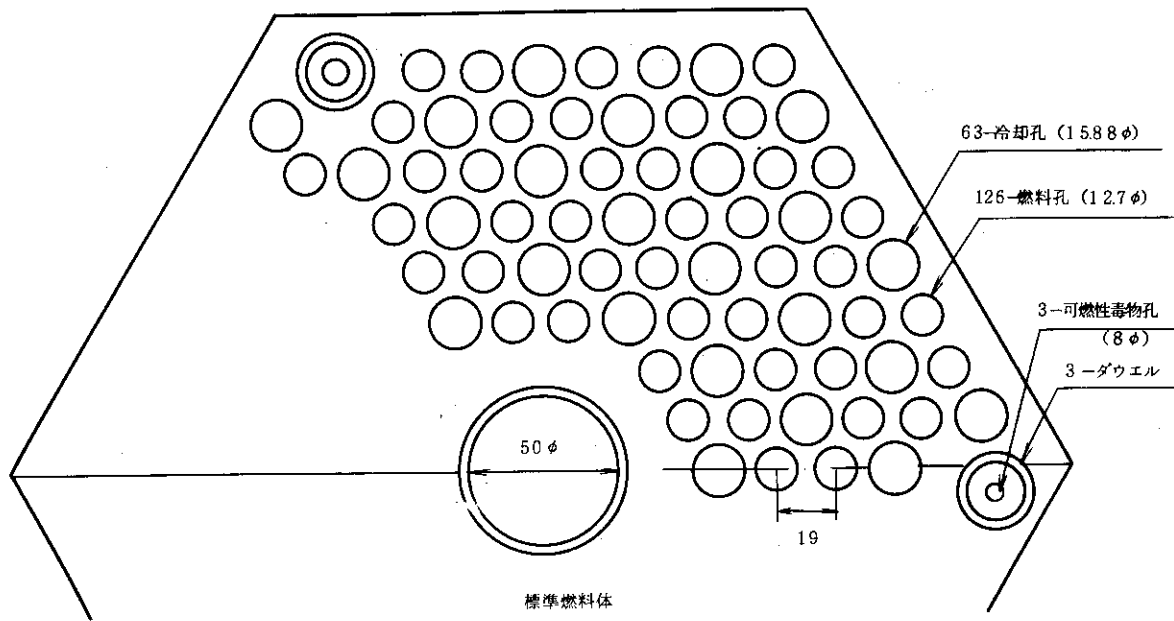


Fig 2.13 マルチホール型試験燃料体

## 2.2 核特性解析

### 2.2.1 計算モデル

核特性解析はCITATIONにより、主として2次元R-Zモデルで行ない、形状のモデル化は制御燃料体の位置と体積を保存する円筒化近似とし、中心制御燃料体の領域は1コラム分、第1、2及び3リング制御燃料体の領域は6コラム分の体積に対応させた。計算形状モデルをFig.2.2.1に示した。照射領域は第1オリフィス領域の7コラムである。なお、1次元計算での径方向メッシュは2次元の場合と同様とした。さらに、確認計算のための3次元Tr-Zモデル体系はFig.2.2.2の通りであり、1/6回転対称で径方向メッシュ数は1ブロック6点、軸方向メッシュ数は1ブロック4点とした。

一方、群定数はGGC-4で作成するものとし、群数は2群とした(切断エネルギー2.38 eV)。なお、炉心の初期温度設定は第1次概念設計のMark-III炉心に対する熱計算結果に基づいて、各領域平均の燃料及び減速材温度を設定したが、燃焼後の変化は無視した。

### 2.2.2 燃料の平均装荷量

まず、DELIGHTコードを使用しポイントモデルによる燃焼計算により、①Mk-III炉心の2倍の出力でも1200日の燃焼が可能なこと、及び②Mk-III炉心より増倍係数が $0.01\Delta K_{eff}$ 以上大きくならない見通しのあること、を条件とし1次元モデルによるサーベイ範囲を追求し、

- i) セミピン型試験燃料の平均濃縮度は7~10 w/o が望ましい、
- ii) マルチホール型試験燃料の燃料粒子平均充てん率は9~12 v/oが望ましい、

との結果を得た。

次に、上記範囲に対して1次元2群拡散近似により、①Mk-III炉心より増倍係数が $0.01\Delta K_{eff}$ 以上にならないこと、及び②ドライバー燃料は600日で2サイクルの燃焼が可能である、との条件のもとに燃料装荷量を検討し、次の結論をえた。

- i) セミピン型試験燃料; 燃料濃縮度 8 w/o  
可燃性毒物 燃料体当り外径8mmの(B<sub>4</sub>C+C)均質棒3本装荷。
- ii) マルチホール型試験燃料; 燃料粒子 9 v/o  
燃料 充てん率  
可燃性毒物 外径600μのB<sub>4</sub>C粒子と黒鉛を混合した直径8mmの棒とし、装荷本数は燃料体毎に炉心上2段に3本、中3段に2本、下2段に1本とする。

しかし、この設定炉心では達成できる高速中性子照射量が低いため、第3サイクルの計算も行なってみた。しかし、マルチホール型試験燃料に対しては所定の燃料交換期間は維持できるものの、セミピン型試験燃料に対しては不可能であり、又いづれにしても高速中性子照射量に対する目標達成はMk-III炉心のような低中性子束レベルの炉心をドライバーにする限り困難であることが明らかになった。

### 2.2.3 炉心初期状態

#### (1) 制御棒操作パターン

まず、Mk-Ⅲ炉心における制御棒パターンに対する検討を行なった。即ち、具体的には照射試験領域である中心オリフィス領域の出力密度を上げねばならないため、中心制御棒は引抜き、他の制御棒（リング1, 2, 3の各制御棒； $R_1, R_2, R_3$ ）のみで臨界調整することの可能性を調べたものである。

その結果、ピーキング係数評価及び熱的検討を通して、第1リングの制御棒（ $R_1$ ）のみの使用法が特性的に最も望ましいとの結論を得た。

#### (2) 燃料濃縮度配分と出力分布

照射試験領域に試験燃料を装荷した炉心の燃焼初期について、出力分布、燃料温度、レイノルズ数などの点から望ましい特性となる燃料濃縮度配分、制御棒パターンを追求した。照射試験領域の燃料濃縮度は2.2.2節(2)に示したようにセミピン型試験燃料では平均濃縮度8 w/o、マルチホール型試験燃料ではウラン燃料粒子の充てん率9 v/oが最適との結果をえており、軸方向にはこれら平均の濃縮度、充てん率を保持するような配分を検討した。

検討結果をTable 2.2.1に示す。なお、これらの検討及び熱特性解析を通して、制御棒パターンとしては中心制御棒を使用した方が炉心ポイントピークを大きく保ちながら、そのポイントを含む燃料チャンネル積分出力を小さくでき、従って燃料最高温度を低減できることが判明し、最終的には中心と第1リングの制御棒により臨界調整するパターンを採用するものとした。

その結果として、セミピン型試験燃料炉心では最高出力密度  $11\text{w}/\text{cm}^2$  を達成し、照射試験領域の燃料最高温度  $1400^\circ\text{C}$  以下で最小レイノルズ数3000以上になる炉心（Table 2.2.1のケース17）を設計例-1として選定した。この炉心は燃焼を通じて制御棒の挿入されない照射領域の第4段目のブロックに最高出力を生ぜしめ、かつ燃焼を通じて安定な出力分布とすることを目標としたものである。この軸方向出力分布をFig. 2.2.3に示した。

一方、マルチホール型試験燃料炉心に対する選定炉心である設計例-2としてはTable 2.2.1のケース15の炉心を選んだ。この炉心の軸方向出力分布をFig. 2.2.4に示す。この炉心は最高出力密度が高いうえ、それが炉心入口側に生じかつ勾配が急であり、上部構造物に対する中性子や $\gamma$ 線照射の影響が大きいと考えられるので遮蔽特性を検討する上で適当なものとして選定したものである。

### 2.2.4 炉心燃焼特性

セミピン型試験燃料炉心に対する選定炉心である設計例-1について燃焼炉心解析を行なった。制御棒挿入状態は炉心の実効増倍率が1.0に近く、しかも若干下回るようにし、かつ第1リングより中心の制御棒がやや深く、その差が1ブロック程度になるように定めるものとした。

検討結果によると、燃焼に伴う制御棒の引抜き量が少なく、制御棒操作はMk-Ⅲ炉心に較べて単純といえる。第1サイクルの燃焼後も反応度に余裕があり、600日の燃焼期間の確保は十分可能といえる。又、ドライバー燃料交換後のさらに600日間の燃焼も、中心制御棒を一段だけ残すとすれば可能で、通算1200日の燃焼が達成できよう（Table 2.2.2, Fig. 2.2.5参照）。

最高出力密度は初期の  $11\text{w}/\text{cm}^2$  から10日後には  $8\sim 9\text{w}/\text{cm}^2$  と著しく減少するが、これはXe

& Sm の蓄積や燃焼に伴なって制御棒を引抜くために出力ピークが上方へ移動し軸方向出力分布が平坦になる結果である。又、ピーク位置が照射試験領域内でも外側に生じているためドライブ領域の制御棒の影響も受け易いといえよう。

高速中性子照射量はFig. 2. 2. 6 に示したように最大でも約  $3 \times 10^{21}$  nvt であり、目標値  $8 \times 10^{21}$  nvt の達成は不可能といえる。

一方、オリフィス領域内ピーキング係数はTable 2. 2. 3 及び 2. 2. 4 に示すように最大でも1.2以下であり、比較的平坦で変動も少ない。又、試験燃料の燃焼度は最大 81.2 GWD/T で、目標値 80 GWD/T は達成可能といえよう (Fig. 2. 2. 7, 8)。

### 2. 2. 5 炉停止余裕の検討

セミピン型試験燃料炉心の初期及び燃焼 300 日後の状態について、常温状態での炉停止余裕を検討した。解析結果をTable 2. 2. 5 に示す。これらの結果から次のことがわかる。

- (i) 照射試験のための反応度余裕としては 0.01  $\Delta K_{eff}$  を見込んでおけば、炉停止余裕の面からは特に問題は生じない。
- (ii) 炉停止余裕は FP の蓄積、可燃性毒物燃焼にともなう温度効果の減少、Xe & Sm 効果の減少、などにより燃焼とともに増大する。

Table 2.2.1 制御棒パターン、濃縮度配分サーベイ

燃料型式	ケース番号	軸方向濃縮度配分							可燃性毒物(本)	制御棒挿入度		実効増倍率(補正値)	最高出力密度(w/cc)全炉心50MW値	オリフィス領域内ピーキング係数(P <sub>g</sub> )			オリフィス領域積分出力(MW)			備考
		1段目	2	3	4	5	6	7		C	R <sub>1</sub>			オリフィス1	2	3	オリフィス1	2	3	
S P 型	1	12	12	8	8	8	4	4	1 様 3 本	0	2(4)/7	1.0011	10.38	1.123	1.133	1.015	9.65	25.94	14.41	ドライバ燃料と同じ割合の濃縮度配分
	2	14	14	8	8	8	2	2	"	"	0.9988	10.30	1.144	1.147	1.018	9.59	25.93	14.48	ケース1より濃縮度配分を急勾配に	
	3	0	16	16	16	4	4	0	"	3/7	0.9990	19.99	1.246	1.301	1.015	13.18	24.18	12.63	最高出力密度 20w/cc を目標	
	4	0	18	16	14	4	4	0	"	"	0.9934	17.02	1.248	1.304	1.017	12.88	24.28	12.84	"	
	5	12	12	8	8	8	4	4	4・4・3・3・3・2・2	"	2(4)/7	1.0021	10.37	1.118	1.126	1.017	9.62	25.98	14.40	ケース1~4に対応, BPの衰荷本数をドライバ燃料と同じ割合に
	6	14	14	8	8	8	2	2	"	"	0.9992	10.44	1.130	1.132	1.016	9.34	26.08	14.57	"	
	7	0	16	16	16	4	4	0	4・4・4・4・2・2・2	3/7	0.9935	19.95	1.213	1.245	1.015	12.16	24.65	13.19	"	
	8	0	18	16	14	4	4	0	"	"	1.0031	16.52	1.201	1.216	1.016	11.61	24.99	13.40	"	
	9	0	22	22	4	4	4	0	1 様 3 本	"	"	0.9989	23.14	1.294	1.360	1.022	13.39	24.02	12.59	最高出力密度 20w/cc を目標
	10	0	13	22	13	6	2	0	"	3/7	1.0027	24.02	1.267	1.335	1.015	13.93	23.81	12.25	"	
	11	0	16	16	16	4	4	0	"	3/7	0.9916	20.48	1.144	1.113	1.016	9.99	25.52	14.49	中心制御棒使用	
	12	0	18	16	14	4	4	0	"	"	0.9989	16.86	1.161	1.092	1.017	9.35	25.87	14.78	"	
	13	14	14	10	6	4	4	4	"	"	0.9947	8.90	1.178	1.082	1.023	6.52	27.09	16.39	最高出力密度 11w/cc を目標	
	14	13	14	11	6	4	4	4	"	"	0.9957	9.80	1.184	1.083	1.023	6.65	27.03	16.32	"	
	15	12	14	12	6	4	4	4	"	"	0.9968	10.69	1.181	1.083	1.023	6.78	26.98	16.24	"	
	16	12	12	10	10	4	4	4	"	"	1.0033	10.65	1.169	1.089	1.020	7.27	26.86	15.87	"	
	17	8	10	10	10	6	6	6	"	"	1.0019	11.42	1.140	1.088	1.015	8.42	26.39	15.19	4 段目に燃焼を通じ安定な出力分布	
M H 型	1	14	14	9	9	9	4	4	1 様 2 本	0	2(4)/7	1.0018	9.35	1.093	1.136	1.016	8.93	26.43	14.64	ドライバ燃料と同じ割合の濃縮度(充満率)配分
	2	16	16	9	9	9	2	2	"	"	0.9991	9.36	1.105	1.143	1.017	8.70	26.50	14.80	ケース1より配分を急勾配	
	3	0	18	18	18	4	4	0	"	2(4)/7	1.0041	16.97	1.144	1.218	1.016	10.90	25.45	13.64	最高出力密度 20w/cc を目標	
	4	0	22	18	14	4	4	0	"	"	0.9961	14.40	1.148	1.215	1.018	10.36	25.64	14.00	"	
	5	14	14	9	9	9	4	4	3・3・2・2・1・1	"	2(4)/7	1.0031	9.38	1.091	1.134	1.017	8.94	26.47	14.59	ケース1~4に対応, BPの衰荷本数をドライバ燃料と同じ割合に
	6	16	16	9	9	9	2	2	"	"	0.9999	9.44	1.101	1.136	1.016	8.60	26.58	14.82	"	
	7	0	18	18	18	4	4	0	3・3・3・3・1・1	"	2(4)/7	1.0017	17.03	1.130	1.195	1.016	10.45	25.67	13.88	"
	8	0	22	18	14	4	4	0	"	"	0.9938	13.43	1.132	1.187	1.017	9.86	25.87	14.27	"	
	9	14	25	25	4	4	4	0	1 様 2 本	"	2(4)/7	1.0001	20.05	1.160	1.218	1.021	10.19	25.67	14.14	最高出力密度 20w/cc を目標
	10	16	15	25	15	6	2	0	"	"	0.9908	19.48	1.168	1.267	1.017	11.58	25.00	13.43	"	
	11	0	18	18	18	4	4	0	"	3/7	0.9984	16.92	1.156	1.085	1.016	8.60	26.33	15.07	中心制御棒使用	
	12	0	22	18	14	4	4	0	"	"	1.0026	12.95	1.171	1.079	1.018	7.83	26.70	15.47	"	
	13	0	12	20	13	8	6	4	"	"	1.0026	12.94	1.136	1.091	1.018	9.08	26.21	14.71	最高出力密度 15w/cc を目標	
	14	0	13	22	10	8	6	4	"	"	0.9974	13.88	1.141	1.083	1.016	8.62	26.37	15.01	"	
	15	0	12	23	10	8	6	4	"	"	0.9979	14.50	1.140	1.082	1.016	8.68	26.35	14.99	"	
	16	0	16	16	16	5	5	5	"	"	0.9983	14.94	1.140	1.083	1.015	8.63	26.36	15.01	"	
	17	0	10	16	16	9	7	5	"	"	1.0008	15.86	1.116	1.116	1.022	10.14	25.74	14.12	"	

Table 2.2.2. 燃焼時の制御棒による臨界調整

燃焼 ステップ	挿入状態		臨 界 調 整 例			最大出力密度 (w/cm <sup>2</sup> ) 全炉心50MW 相当値
	C	R <sub>1</sub> Keff	参考例 1	参考例 2	参考例 3	
0 日	3/7	2(1)/7 0.9999	3(1)/7 2/7 1.0046	2(2)/7 2(1)/7 1.0034	3(2)/7 2/7 1.0007	10.89
10 日	3/7	1(2)/7 0.9969	2(2)/7 1(2)/7 1.0006	2(2)/7 1(2)/7 1.0042		8.76
150 日	3/7	1(2)/7 0.9983	2(2)/7 1(1)/7 1.0147	2(2)/7 1(2)/7 1.0017	2(2)/7 1(2)/7 1.0050	8.91
300 日	2(2)/7	1(1)/7 0.9994	3/7 1(2)/7 0.9867	2(2)/7 1(1)/7 0.9961		8.65
375 日	2(2)/7	1/7 0.9980	2/7 1/7 1.0043			8.13
450 日	1(2)/7	1/7 0.9991	2/7 1/7 0.9961			8.91
600 日	1(1)/7	0(2)/7 0.9994	1(2)/7 0(2)/7 0.9927			9.00
燃料交換						
0 日	2(2)/7	2(1)/7 0.9979	2(2)/7 2/7 1.0063			9.52
10 日	2(2)/7	1(2)/7 0.9981	2(2)/7 1(2)/7 1.0013			7.96
150 日	2(2)/7	1(2)/7 0.9969	2(2)/7 1(2)/7 0.9942			7.44
300 日	2/7	1/7 1.0001	2/7 1(1)/7 0.9930			7.02
450 日	1(1)/7	0(2)/7 0.9971	1(1)/7 0(2)/7 1.0048			7.99
600 日	1/7	0/7 1.0009				8.03

Table 2.2.3 オリフィスピーキング係数とオリフィス積分出力 (第1サイクル)

燃焼 日数	制御棒挿入度	オリフィス領域内ピーキング係数			オリフィス領域積分出力 (MW)			最大出力密度 (W/cm <sup>2</sup> ) 全炉心50MW相当	摘 要
		オリフィス1	オリフィス2	オリフィス3	オリフィス1	オリフィス2	オリフィス3		
0日	3/7, 2(1/4)/7	1.1436	1.0869	1.0160	81392	44181	12793	1089	第1サイクル の初期
10日	3/7, 1(1/2)/7	1.1771	1.1219	1.0225	74176	45009	12981	876	
150日	3/7, 1(1/4)/7	1.1600	1.0777	1.0233	77806	45256	12554	891	
300日	2(1/4)/7, 1(1/4)/7	1.1368	1.0868	1.0221	82605	45198	12184	865	
375日	2(1/4)/7, 1/7	1.1458	1.0932	1.0213	81219	45402	12197	813	
450日	1(1/2)/7, 1/7	1.1107	1.1001	1.0194	88099	45044	11804	891	
600日	1(1/4)/7, 0(1/4)/7	1.1074	1.1090	1.0244	87187	45512	11645	900	
0日	2(1/4)/7, 2(1/4)/7	1.1456	1.0898	1.0157	79247	44307	12910	952	第2サイクル の初期



(第2サイクル)

Table 2.2.4 オリフェイス領域内ピーキング係数とオリフェイス領域積分出力

燃焼 日数	制御棒挿入度 C R <sub>1</sub>	オリフェイス領域内ピーキング係数			オリフェイス領域積分出力(MW)			最大出力密度 (W/cm <sup>2</sup> )	摘 要
		オリフェイス1	オリフェイス2	オリフェイス3	オリフェイス1	オリフェイス2	オリフェイス3		
0日	3/7, 2(1/4)/7	1.1430	1.0869	1.0160	81392	44181	12793	1089	第1サイクル の初期
0日	2(3/4)/7, 2(1/4)/7	1.1456	1.0898	1.0157	79247	44307	12910	952	第2サイクル の初期
10日	2(3/4)/7, 1(1/4)/7	1.1683	1.1239	1.0214	73962	45122	12943	796	
150日	2(3/4)/7, 1(1/4)/7	1.1437	1.0761	1.0238	73562	45649	12712	744	
300日	2/7, 1/7	1.1407	1.0868	1.0253	71313	46153	12648	702	
450日	1(1/4)/7, 0(1/4)/7	1.1123	1.0957	1.0215	74905	46232	12309	799	
600日	1/7, 0/7	1.1240	1.1232	1.0246	71366	47207	12116	803	

Table 2.25 照射炉心設計例 - 1 の炉停止余裕

項 目	初 期 状 態			300 日 燃 焼 状 態		
	冷 温 時	昇 温 時	温 度 効 果	冷 温 時	昇 温 時	温 度 効 果
全 引 抜 時	1.18445	1.09922	0.08523	1.10839	1.05847	0.04992
1 対 スタック, 挿入時	0.98061	0.89971	0.08090	0.93198	0.88086	0.05112
全 挿 入 時	0.90292	0.82358	0.07934			
Xe, Sm 効 果	0.035			0.028 <sup>1)</sup>		
1 対 スタック時補償	0.20384	0.19951		0.17641	0.17761	
( Mk - III 1 対 スタック時 Keff )	0.97598	0.89547				
( Mk - III 1 対 スタック時 $\Delta K$ )	0.2137					
炉 停 止 余 裕 の 変 化 <sup>2)</sup>	0.0036			-0.0197		

1) Xe のみ原子数密度を0とした。

2) 初期Mk - III炉停止余裕からの相対変化

[ 1 対 スタック時Keff + 1 対 スタック時 $\Delta K \times 0.1$  ] 照射炉心

- [ 1 対 スタック時Keff + 1 対 スタック時 $\Delta K \times 0.1$  ] Mk - III

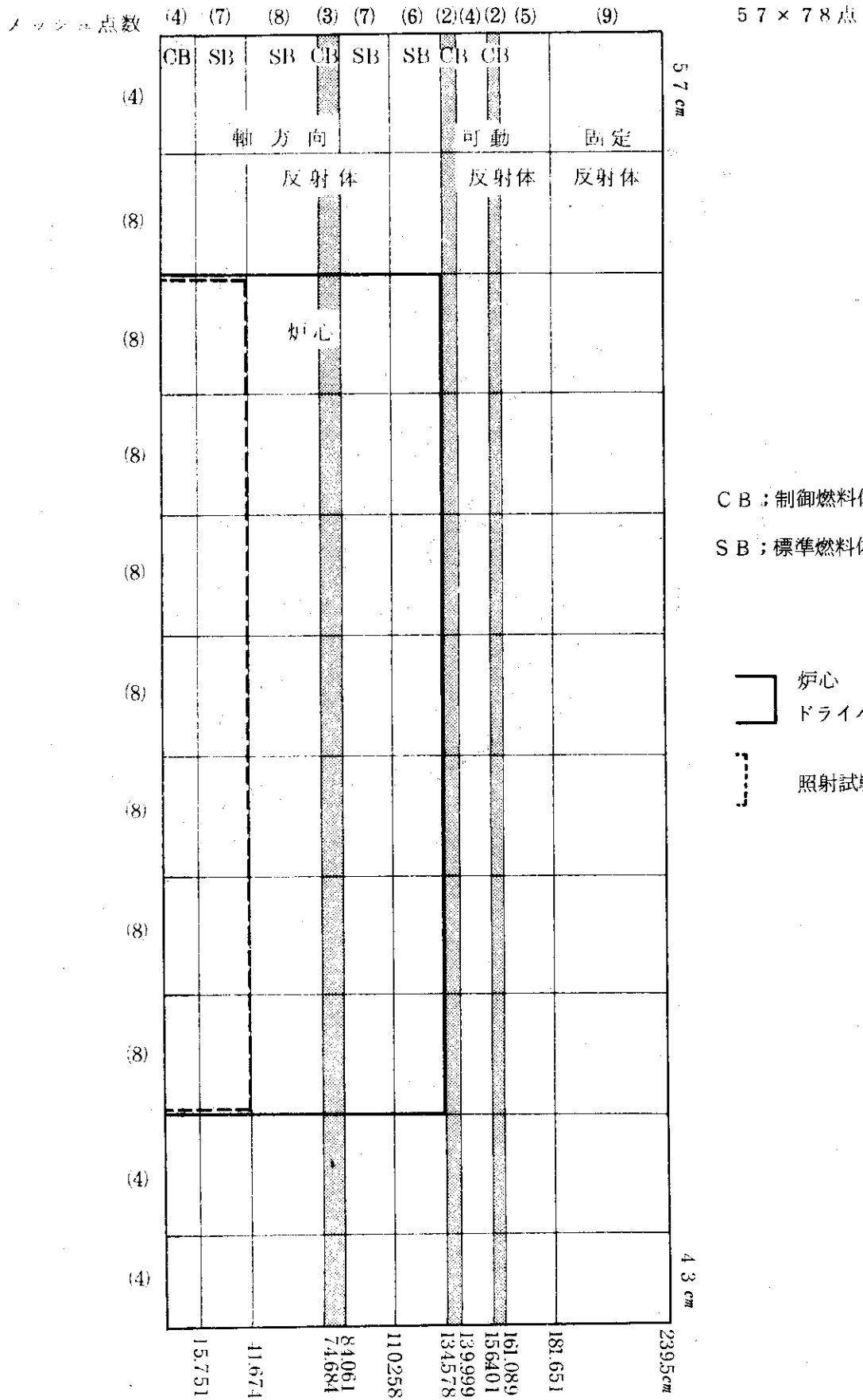


Fig. 2.2.1 2次元R-Zモデルによる炉心核計算体系

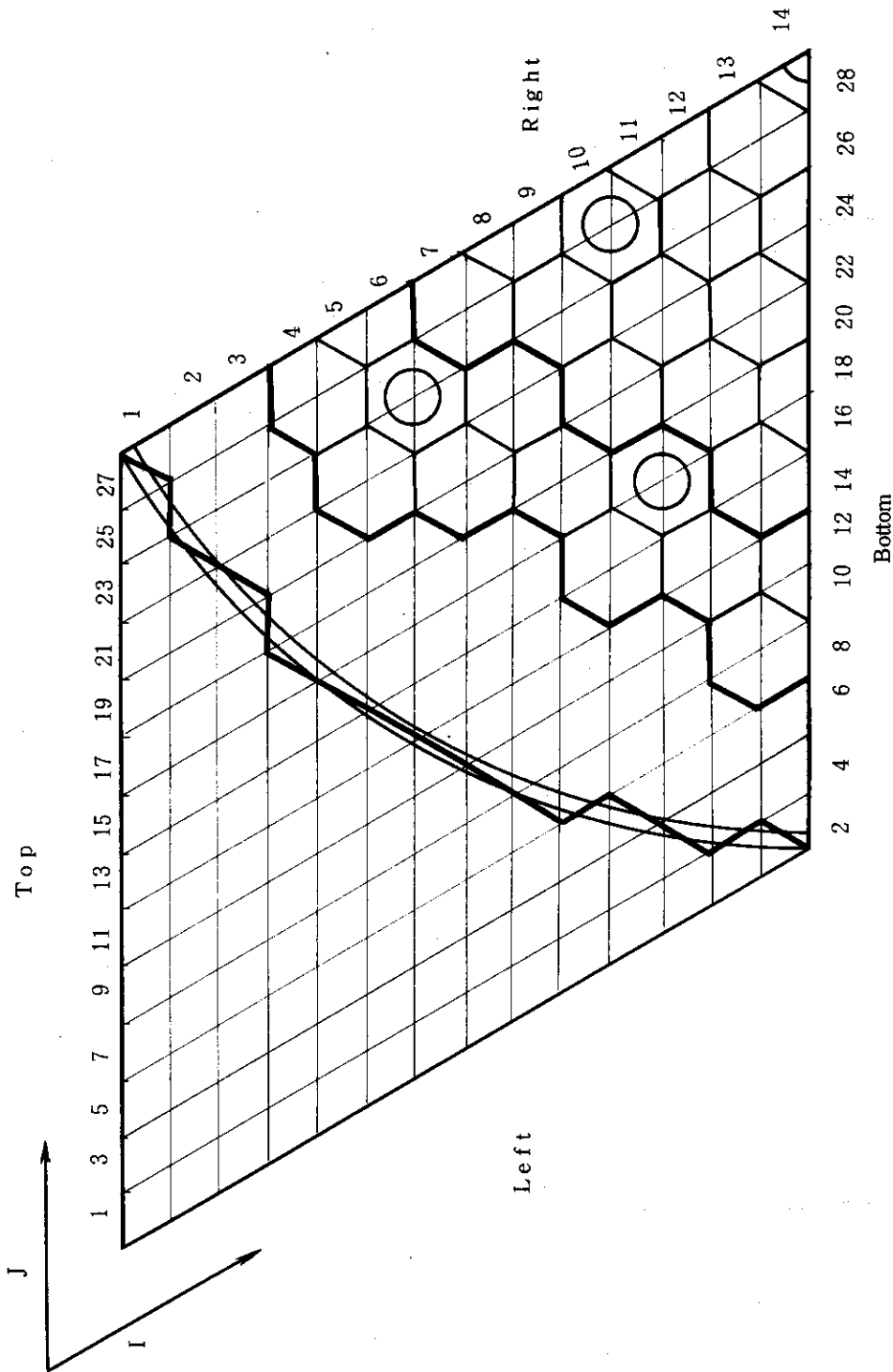
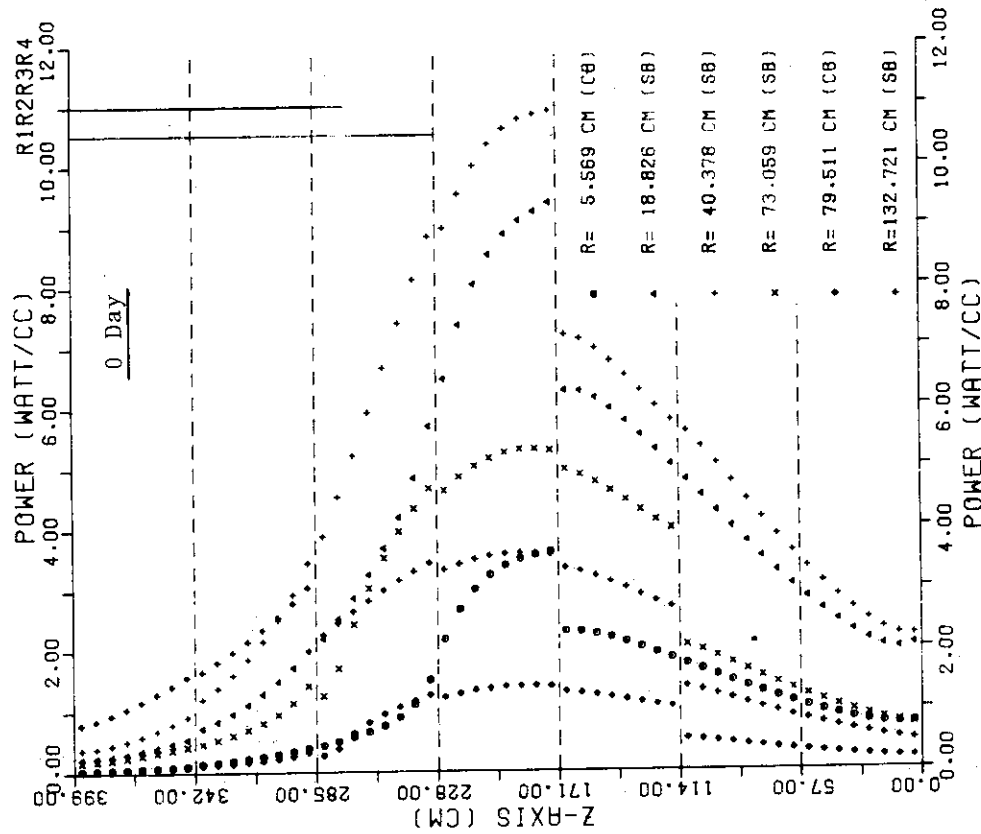
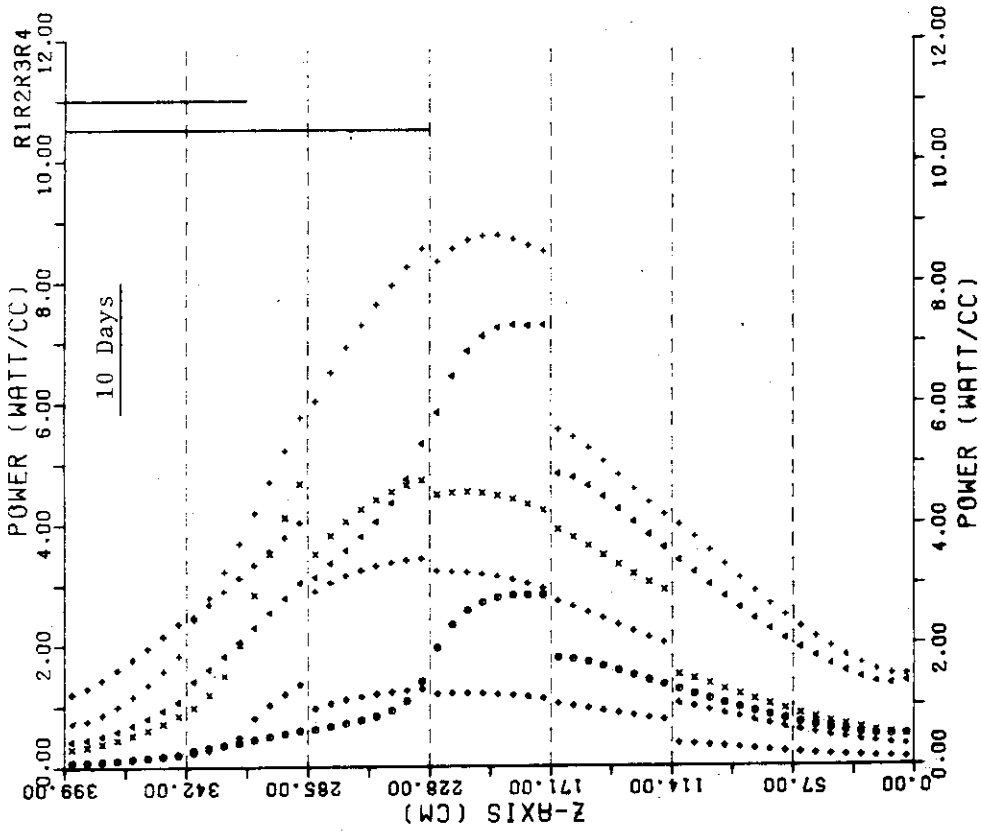


Fig 2.2.2 3次元Tr-Zモデルによる炉心核計算体系



SEMI PIN ENR.=8%/10%/10%/6%/6%/6% BP=3

Fig. 2.2.3 セミピン型試験燃料炉心における軸方向出力分布

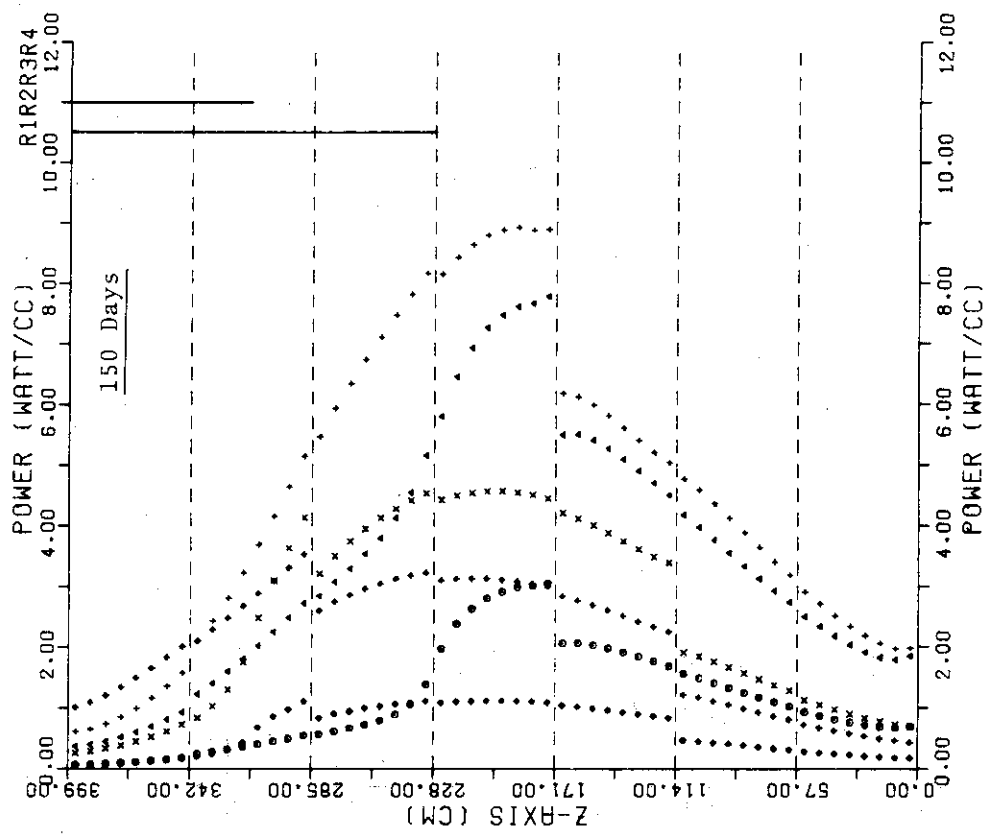
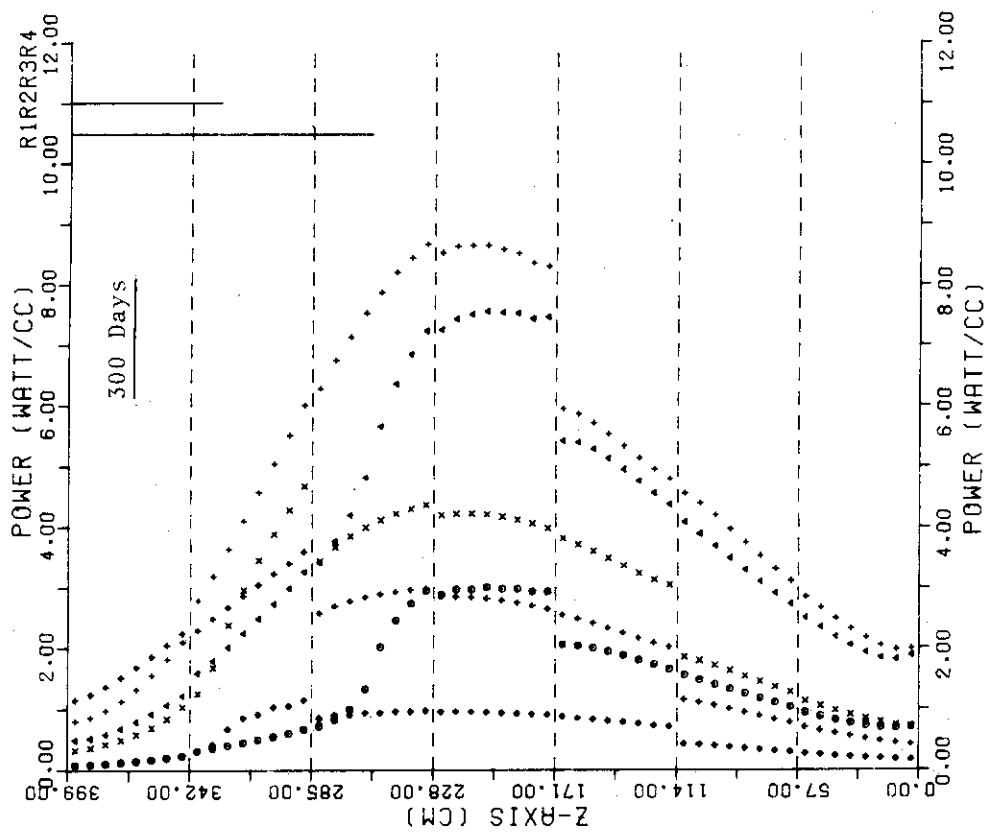


Fig. 2.2.3 (続)

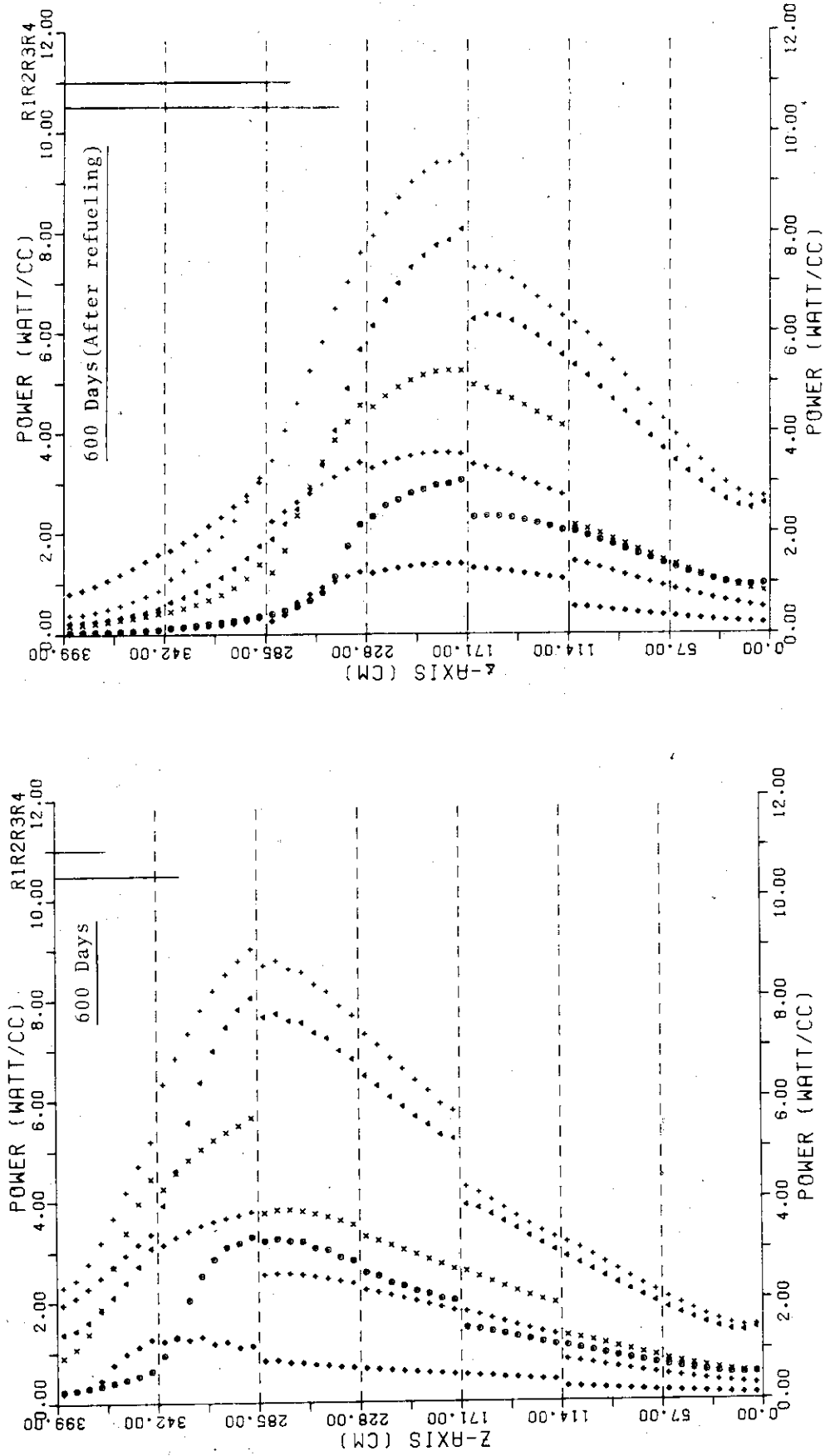
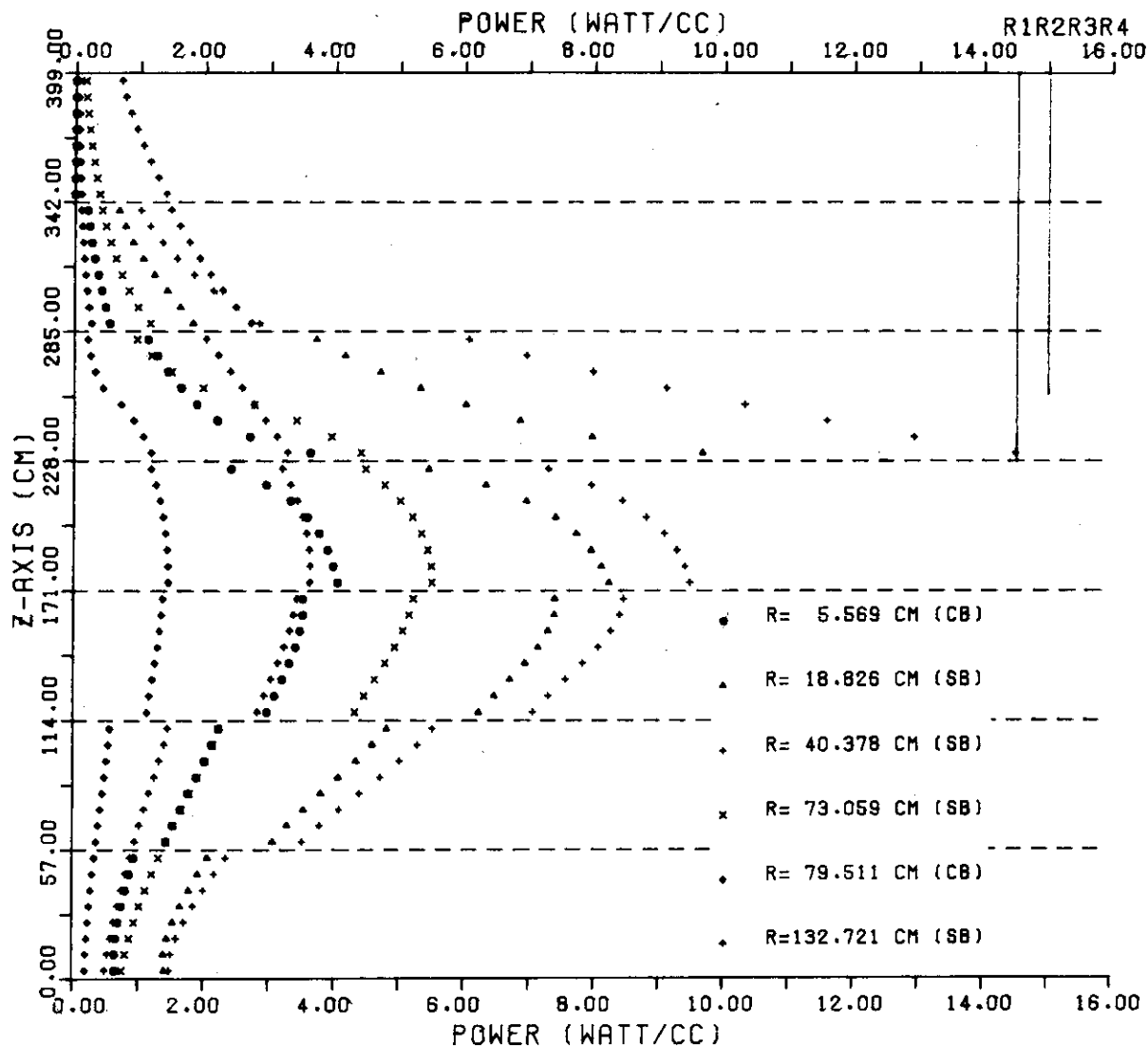


Fig. 2.2.3 (続)



U P.F=0/.12/.23/.10/.08/.06/.04 BP=2

Fig. 2.24 マルチホール型試験燃料炉心における軸方向出力分布



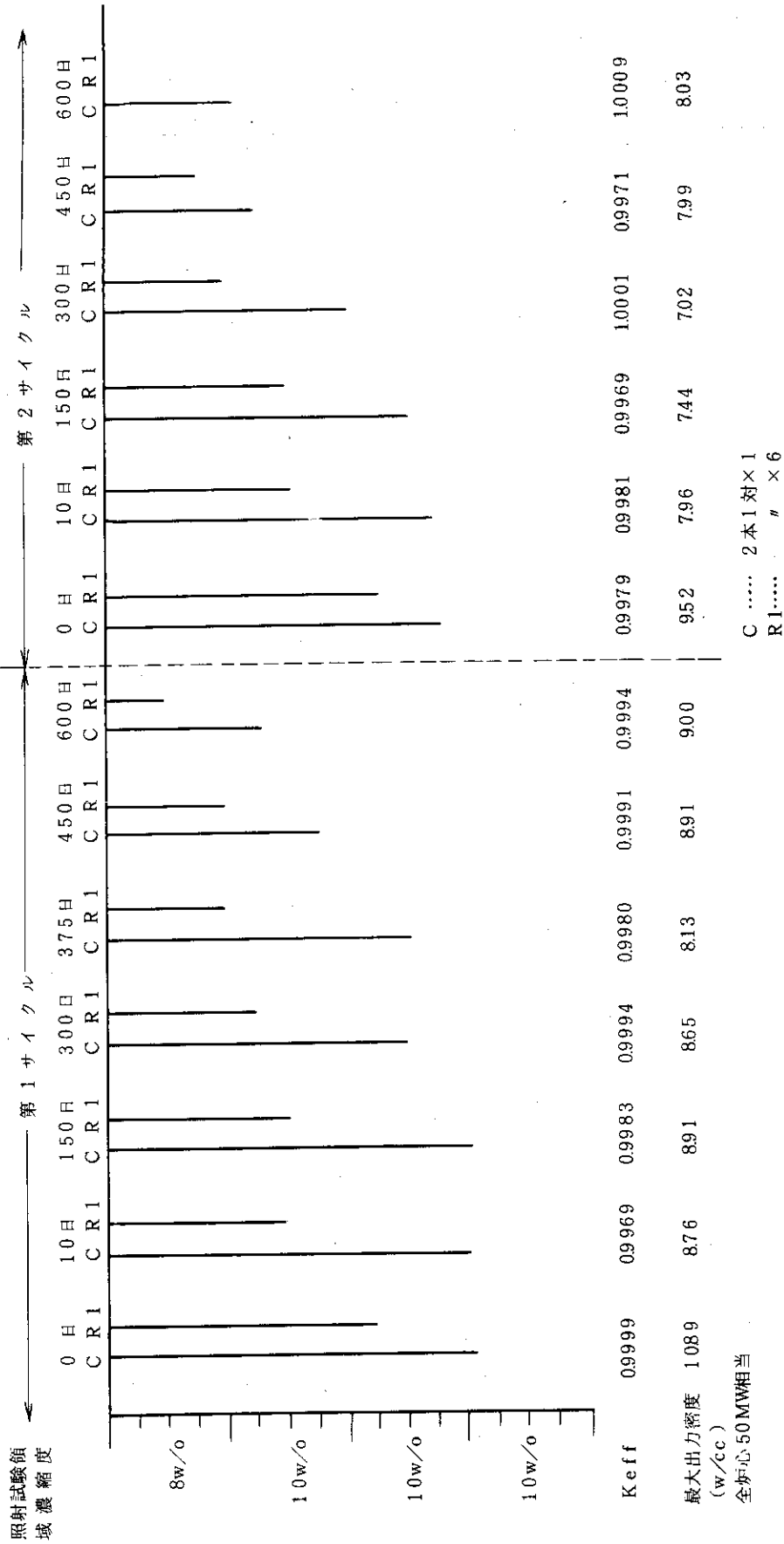


Fig 2.2.5 燃焼時制御棒挿入パターン

照射試験領域 濃縮度	照射試験燃料領域		ドライバ燃料領域			
	CB	SB	SB	CB	SB	SB
8 w/o						
10 w/o			1.53			
				1.63		
10 w/o	1.66	2.22	2.03			
	1.89	2.42				
	2.20	2.63				
	2.50	2.78		1.76		
10 w/o	2.78	2.89	2.06			
	2.89	2.94				
	2.86	2.89				
	2.73	2.76		1.60		
6 w/o						
6 w/o						
6 w/o						

(単位  $\times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ )

領域平均最大高速中性子束照射量……  $2.94 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$

(SB, E= 10 w/o, 4段目)

領域平均高速中性子束の最大値……  $3.48 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$

(180 KeV 以上)

Fig. 2.2.6 高速中性子照射量の炉心内分布 (燃焼期間 1200 日)

照射試験燃料濃縮度	照射試験燃料領域		ドライバ燃料領域			
	CB	SB	SB	CB	SB	SB
8 w/o (6 w/o)	0.200	0.641	0.624	0.303	0.774	1.07
	0.258			0.398		
	0.349			0.555		
	0.465			0.849		
10 w/o (6 w/o)	0.713	2.02	2.10	1.49	2.06	2.02
	0.920			2.21		
	1.22			3.07		
	1.79			3.68		
10 w/o (4 w/o)	2.14	3.00	2.68	2.94	2.42	2.06
	2.53	3.36		3.17		
	3.08	3.69		3.31		
	3.58	3.97		3.41		
10 w/o (4 w/o)	4.19	4.09	2.83	3.32	2.44	2.03
	4.54	4.22		3.32		
	4.64	4.23		3.27		
	4.61	4.17		3.17		
6 w/o (4 w/o)	2.89	2.68	2.33	2.96	1.98	1.64
				2.79		
				2.61		
				2.41		
6 w/o (2 w/o)	1.95	1.84	1.01	1.13	0.840	0.679
6 w/o (2 w/o)	1.18	1.10	0.573	0.653	0.474	0.382

カッコ内はドライバ燃料

(単位  $10^4$  MWD/THM)

最大燃焼度 .....  $4.64 \times 10^4$  MWD/THM  
 炉心平均燃焼度 .....  $1.64 \times 10^4$  MWD/THM  
 照射試験領域平均燃焼度 .....  $2.27 \times 10^4$  MWD/THM  
 ドライバ領域平均燃焼度 .....  $1.56 \times 10^4$  MWD/THM

Fig. 2.27 燃料燃焼度の炉心内分布 (1) (600日燃焼)

照射試験燃料濃縮度	照射試験燃料領域		ドライバ燃料領域		
	CB	SB	SB	CB	SB
8 W/o (6 W/o)	0.452	1.44			
	0.593				
	0.788				
	1.06				
10 W/o (6 W/o)	1.68	4.21			
	2.41				
	3.10				
	3.97				
10 W/o (4 W/o)	4.73	5.91			
	5.44	6.48			
	6.37	6.96			
	7.19	7.35			
10 W/o (4 W/o)	7.79	7.48			
	8.09	7.58			
	8.12	7.53			
	8.00	7.39			
6 W/o (2 W/o)	5.28	4.96			
6 W/o (2 W/o)	3.74	3.53			
6 W/o (2 W/o)	2.36	2.18			

カッコ内はドライバ燃料

↑ 1200日積算値

(単位  $10^4$  MWD/THM)

最大燃焼度  $8.12 \times 10^4$  MWD/THM  
 炉心平均燃焼度  $3.28 \times 10^4$  MWD/THM  
 照射試験領域平均燃焼度  $4.35 \times 10^4$  MWD/THM

Fig. 2.2.8 燃料燃焼度の炉心内分布 (2) (1200日燃焼)

## 2.3 熱流動特性解析

### 2.3.1 熱計算モデル

照射用炉心の熱特性解析として、核計算により得られたCITATION 2次元R-Z出力分布を用いて、炉心内の冷却材流量および温度分布を計算し、検討する。

熱計算のための炉心全体モデルをFig. 2.3.1に示す。炉心は、核計算2次元モデルに対して3つのオリフィス領域に分割される。それぞれの領域内に領域を代表する複数の燃料チャンネルが設定されている。燃料チャンネルは燃料体形式に応じてFig. 2.3.2に示すような形状である。

燃料チャンネルの温度は、R-Z 2次元の差分計算により求めている。冷却材流量は炉心圧力損失一定の条件の下に、各チャンネルのオリフィス損失、摩擦損失、加速損失、浮力を考慮した圧力バランスをとることにより配分する。

使用した解析コードは、原子炉熱解析コードTEM DIMである。また、使用した計算条件、物性値をTable 2.3.1に示す。

### 2.3.2 初期状態特性

初期状態特性解析では、核計算により得られている出力分布のうち、照射炉心の熱的制限(2.1節, (N)を参照)を満足し、かつ照射試験領域(第1オリフィス領域)の出力密度が最も高くなるものを選定する。

以下においては各オリフィス領域への流量配分方式として2種類を考える。第1は、各領域毎の冷却材出口温度を一定(1093℃)とする方式である。第2は、高出力密度になっている照射試験領域の燃料最高温度を制限値1400℃以下に抑えるために、照射試験領域への流量を増加させる方式である。これを領域流量再配分と呼ぶ。領域流量再配分の結果、最も良好な燃料装荷例をセミピン型試験燃料炉心、マルチホール型試験燃料炉心について夫々1つずつ選定する。

セミピン型試験燃料炉心に対する解析結果の概要をTable 2.3.2に示す。同表のケース番号は核計算での出力分布のケース番号を意味する。結論として、オリフィス領域の出口冷却材温度を一定にそろえるという流量配分の場合には、主として照射燃料の最高温度を制限値以下に抑える必要性から、照射試験領域において達成し得る出力密度は8 W/cm<sup>2</sup>程度である。更に、流量再配分を行なう場合には、最高出力密度を11 W/cm<sup>2</sup>程度迄あげられる(ケース17)。このケース17をセミピン型試験燃料炉心の選定出力分布とし、次節で燃焼特性を検討する。

マルチホール型試験燃料炉心に対する上記と同様な結果をTable 2.3.3に示す。出口冷却材温度を一定とする流量配分方式の場合には、達成可能な出力密度は約12 W/cm<sup>2</sup>程度(ケース13)であるが、流量再配分を行えば約14 W/cm<sup>2</sup>迄あげられる(ケース15, 16)。このケース15の場合の照射試験領域(標準燃料体カラムの最大出力チャンネル)の温度分布をFig. 2.3.3に示す。

### 2.3.3 燃焼状態特性

燃焼状態の特性については、セミピン型試験燃料炉心についてのみ解析する。

2.2.4節に述べた燃焼に伴う出力分布に対応して、流量配分を行ない、炉心の熱流動特性を解

析した結果の概略を Table 2.3.4 に示す。試験燃料の温度を制限値以下に抑えるため第1サイクルの375日迄は流量再配分操作が必要であるが、450日以後第1サイクル終期の間は必要としない。しかし、第2サイクルに入った当初では再び流量再配分操作が必要となる。

燃焼日数0, 10, 600日および第2サイクル初期における照射領域（標準燃料体カラムの最大出力チャンネル）の温度分布を Fig. 2.3.4～2.3.7 に示す。

#### 2.3.4 セミピン型および円環型燃料のチャンネルサーベイ

これ迄に検討してきたセミピン型試験燃料体は1カラム当り18本の燃料チャンネルを配置したものであった。ここでは、1ブロック当りの燃料チャンネル数を増加させることにより、最高出力密度をどの程度迄上げられ得るかを、熱流動上の制限条件との関係から検討してみる。

この検討ではブロック当りのチャンネル本数に拘らず、燃料チャンネルの形状は同一（流路径16mm、燃料コンパクト肉厚6mm、内外スリーブ肉厚2mm）とした。また、用いた照射試験領域の出力分布は、セミピン型試験燃料炉心の初期状態選定出力（ケース17、最高出力密度10.85W/cm<sup>2</sup>）である。チャンネル本数18, 24, 30, 36, とした場合の熱流動解析結果を Table 2.3.5 に示す。予期されるようにチャンネル本数が少ない程、燃料最高温度が高くなる。チャンネルが18, 24, 30本の場合には流量再配分が必要であるが、36本の場合に流量再配分なしに熱的制限条件が満たされている。このチャンネル本数が36本の場合、ドライバー燃料領域の流量を照射試験領域に回すことにより、試験燃料領域の出力を約1.2倍増加してもその燃料最高温度を1400℃以下に抑えることが可能である。したがって、この場合には試験燃料領域の最高出力密度を13W/cm<sup>2</sup>程度迄上げることが可能となる。

次に、両面冷却型円環燃料棒を用いる試験燃料体を考え、熱流動的に最適な形状を検討してみる。ここでは、1ブロック当り18本の円環燃料棒が装填される場合を考える。また、出力分布としてセミピン試験燃料炉心の初期状態選定出力分布を用い、内外流量は圧力損失がバランスする様に定めるものとした。

検討の結果、先ず第1に、両面冷却型燃料は冷却性能が高く、上記の出力分布の場合に燃料最高温度は1300℃以下となるが、外側流路のレイノルズ数が低くなる傾向があることがわかった。そこで最小限界熱流束比を大きくするためにはどのような形状が好ましいかを検討した結果、内側冷却流路径を小さく、コンパクト肉厚を薄く、内外冷却流量比を2～4とする方法が考えられた。これに基づいて定めた形状の1例と、その特性を以下に記す。

内側冷却材流路径	10 mm
燃料スリーブ肉厚	2 mm
燃料コンパクト肉厚	6 mm
外側冷却材流路径	34.6 mm (流路巾2.3 mm)
燃料最高温度	1220 °C
最小レイノルズ数	4500
限界熱流束比	1.79

Table 2.3.1 熱特性解析計算条件

炉心入口冷却材温度	400℃
炉心入口冷却材圧力	40 kg/cm <sup>2</sup> g
炉心出口混合冷却材温度	1000℃
燃料チャンネル出口平均冷却材温度	1040℃
全炉心冷却材流量	15.9 kg/S
全燃料チャンネル流量	(90%)
漏れ流量	(10%)
全炉心熱出力	50 MWt
全燃料チャンネル熱出力	47.5 MWt
熱伝導度	

	燃料コンパクト cal/cm S.C	グラファイト cal/cm S.C
Mk-IIIドライバ燃料	0.03	0.06
FSV型燃料	0.0165	0.06
SP型燃料	0.03	0.06
両面冷却型燃料	0.03	0.06

グラファイト放射率	0.8
ギャップコンダクタンス (Mk-III燃料)	ヘリウムによる伝導に放射伝熱を考慮 (ギャップの熱膨脹による形状変化は無視)
冷却材熱伝達率	第1次概念設計の使用式 (JAERI-M 6895)

Table 2.3.2 セミ・ピン型照射燃料の熱特性 (初期状態)

Tfmax 燃料最高温度  
 Tgout 出口ガス温度  
 Remin 最小レイノルズ数  
 G 流量

A)

オリフィス出口ガス温度一定

ケース番号	オリフィス番号	オリフィス平均チャンネル				最高出力チャンネル				限界熱流束比
		Tf max°C	Tg out°C	Re min	G kg/hr	Tf max°C	Tg out°C	Re min	G kg/hr	
1 (9.86w/cc)	1	1416	1039	36110	87.3	X 1557	1141	33240	84.6	2.279
	2	1226	1039	4120	59.8	1343	1145	3770	57.5	1.629
	3	1180	1039	3550	51.6	1194	1043	3560	51.8	2.011
2 (9.79w/cc)	1	1446	1039	35870	86.8	X 1610	1161	32460	83.4	2.212
	2	1220	1039	4120	59.7	1349	1163	3680	56.8	1.652
	3	1177	1039	3570	51.8	1188	1052	3520	51.4	2.186
3 (18.99w/cc)	1	1894	1039	49280	119.2	X 2302	1247	41960	112.1	2.086
	2	1217	1039	3840	55.7	1473	1292	3150	51.5	1.434
	3	1174	1039	3120	45.2	1191	1046	3110	45.3	1.611
4 (18.17w/cc)	1	1763	1039	48160	116.5	X 2133	1251	40840	109.3	2.122
	2	1214	1039	3860	55.9	1472	1296	3150	51.6	1.508
	3	1173	1039	3170	46.0	1182	1051	3130	45.7	1.856
5 (9.87w/cc)	1	1424	1039	36000	87.0	X 1560	1135	33380	84.6	2.288
	2	1229	1039	4130	59.9	1339	1136	3810	57.9	1.630
	3	1181	1039	3550	51.5	1196	1044	3560	51.7	2.009
6 (9.92w/cc)	1	1454	1039	34940	84.5	X 1604	1148	31990	81.7	2.084
	2	1226	1039	4140	60.1	1342	1144	3780	57.8	1.638
	3	1180	1039	3600	52.2	1191	1051	3540	51.7	2.181
13 (8.46w/cc)	1	1295	1039	24390	59.0	X 1467	1190	21720	56.4	9.793
	2	1200	1039	4300	62.4	1324	1090	4160	62.0	1.774
	3	1170	1039	4040	58.7	1187	1060	3970	58.1	2.586
14 (9.31w/cc)	1	1295	1039	24880	60.2	X 1522	1190	22110	57.5	9.329
	2	1199	1039	4290	62.3	1323	1090	4150	61.8	1.760
	3	1169	1039	4030	58.4	1186	1060	3950	57.8	2.569
15 (10.16w/cc)	1	1328	1039	25370	61.3	X 1592	1190	22500	58.6	8.951
	2	1198	1039	4280	62.2	1322	1090	4140	61.7	1.747
	3	1169	1039	4010	58.1	1185	1050	3940	57.6	2.548
16 (10.12w/cc)	1	1526	1039	27210	65.8	X 1720	1180	24420	63.2	1.083
	2	1201	1039	4260	61.9	1331	1100	4100	61.3	1.713
	3	1169	1039	3910	56.8	1183	1050	3850	56.3	2.462
17 (10.85w/cc)	1	1440	1039	31510	76.1	X 1591	1150	28950	73.9	1.489
	2	1223	1039	4190	60.8	1364	1100	4040	60.3	1.646
	3	1180	1039	3750	54.4	1194	1040	3760	54.6	2.208

B)

流量再配分後

ケース番号	オリフィス番号	オリフィス平均チャンネル				最高出力チャンネル				限界熱流束比
		Tf max°C	Tg out°C	Re min	G kg/hr	Tf max°C	Tg out°C	Re min	G kg/hr	
13 (8.46w/cc)	1	1240	988	27230	64.1	1398	1121	24460	61.6	1.215
	2	1201	1039	4300	62.4	1325	1091	4160	61.9	1.773
	3	1192	1062	3860	56.7	1210	1079	3790	56.1	2.287
14 (9.31w/cc)	1	1190	941	30930	71.0	1337	1064	27920	68.4	1.429
	2	1199	1039	4290	62.3	1324	1094	4140	61.8	1.757
	3	1219	1090	3630	54.1	1239	1110	3560	53.5	2.156
15 (10.16w/cc)	1	1184	894	35540	79.4	1399	1005	32260	76.7	1.737
	2	1198	1039	4290	62.2	1321	1091	4140	61.7	1.749
	3	1255	1127	3370	51.1	1271	1144	3330	50.8	1.826
16 (10.12w/cc)	1	1264	833	44990	97.0	1399	920	41610	94.4	2.916
	2	1217	1056	4120	60.3	1349	1115	3960	59.7	1.611
	3	1300	1172	3030	47.0	1316	1189	2990	46.7	1.569
17* (10.85w/cc)	1	1280	894	44160	98.6	1400	976	41230	96.4	2.864
	2	1223	1039	4190	60.8	1364	1096	4040	60.3	1.646
	3	1303	1164	2950	45.5	1319	1172	2950	45.6	1.501

\* 初期状態選定出力分布



Table 2.3.3 マルチホール型照射燃料の特性 (初期状態)

A) オリフィス出口ガス温度一定

ケース番号	オリフィス番号	オリフィス平均チャンネル				最高出力チャンネル				限界熱流束比
		Tf max°C	Tg out°C	Re min	G kg/hr	Tf max°C	Tg out°C	Re min	G kg/hr	
1 (8.88w/cc)	1	1255	1039	9460	22.7	1353	1117	8860	22.1	3.357
	2	1229	1039	4200	60.9	1348	1150	3810	58.4	1.683
	3	1181	1039	3610	52.4	1196	1043	3620	52.6	2.064
2 (8.89w/cc)	1	1289	1039	9220	22.2	1400	1129	8540	21.5	3.109
	2	1226	1039	4210	61.1	1351	1158	3790	58.2	1.696
	3	1180	1039	3650	53.0	1191	1052	3590	52.5	2.218
3 (16.12w/cc)	1	1540	1039	11550	27.8	X 1741	1161	10450	26.7	2.818
	2	1220	1039	4040	58.7	1413	1228	3440	54.6	1.533
	3	1176	1039	3370	48.8	1191	1044	3370	49.0	1.799
4 (13.68w/cc)	1	1411	1039	10970	26.4	X 1595	1166	9880	25.3	2.857
	2	1218	1039	4070	59.1	1407	1226	3460	54.9	1.611
	3	1177	1039	3460	50.1	1188	1052	3400	49.7	2.028
5 (8.91w/cc)	1	1261	1039	9470	22.8	1358	1115	8900	22.2	3.372
	2	1231	1039	4200	61.0	1352	1071	4150	61.1	1.680
	3	1182	1039	3600	52.3	1198	1044	3610	52.4	2.047
6 (8.97w/cc)	1	1302	1039	9110	21.9	X 1412	1124	8480	21.3	3.019
	2	1229	1039	4220	61.3	1348	1150	3830	58.7	1.690
	3	1182	1039	3660	53.0	1192	1051	3600	52.6	2.209
7 (16.18w/cc)	1	1541	1039	11060	26.6	X 1727	1148	10120	25.7	2.547
	2	1229	1039	4080	59.1	1404	1204	3540	55.7	1.542
	3	1181	1039	3430	49.7	1197	1044	3430	49.9	1.843
8 (12.76w/cc)	1	1410	1039	10440	25.1	X 1576	1151	9520	24.2	2.746
	2	1229	1039	4110	59.6	1395	1198	3580	56.1	1.614
	3	1182	1039	3520	51.1	1193	1052	3470	50.6	2.066
9 (19.05w/cc)	1	1623	1039	10790	25.9	X 1890	1179	9590	24.7	1.891
	2	1190	1039	4080	59.2	1381	1234	3430	54.6	1.742
	3	1160	1039	3490	50.6	1175	1054	3430	50.2	2.160
10 (18.51w/cc)	1	1442	1039	12260	29.5	X 1668	1182	10920	28.1	2.546
	2	1228	1039	3970	57.6	1470	1275	3250	52.7	1.517
	3	1181	1039	3310	48.1	1187	1049	3300	48.2	1.881
11 (16.07w/cc)	1	1585	1039	9110	21.9	X 1783	1169	8210	21.0	1.615
	2	1231	1039	4180	60.7	1357	1081	4080	60.6	1.533
	3	1186	1039	3720	53.9	1197	1052	3660	53.4	2.187
12 (12.30w/cc)	1	1434	1039	8290	19.9	X 1625	1184	7380	19.0	1.730
	2	1216	1039	4240	61.5	1343	1090	4110	61.1	1.645
	3	1177	1039	3820	55.4	1190	1054	3750	54.9	2.348
13 (12.3w/cc)	1	1270	1039	9630	23.1	1404	1150	8820	22.4	2.457
	2	1239	1039	4160	60.4	1379	1088	4040	60.1	1.557
	3	1188	1039	3630	52.7	1205	1045	3630	52.8	2.015
14 (13.2w/cc)	1	1212	1039	9140	22.0	1340	1154	8350	21.2	2.009
	2	1240	1039	4190	60.8	X 1377	1085	4080	60.5	1.597
	3	1189	1039	3710	53.7	1205	1044	3710	53.9	2.092
15 (13.8w/cc)	1	1212	1039	9200	22.1	1341	1155	8390	21.4	1.952
	2	1239	1039	4180	60.7	X 1377	1085	4080	60.5	1.594
	3	1189	1039	3700	53.6	1205	1045	3700	53.8	2.086
16 (14.19w/cc)	1	1437	1039	9150	22.0	X 1598	1154	8360	21.2	1.870
	2	1233	1039	4190	60.7	1366	1084	4080	60.5	1.564
	3	1187	1039	3710	53.7	1202	1044	3710	53.9	2.075
17 (14.32w/cc)	1	1327	1039	10750	25.8	X 1451	1132	10010	25.2	2.676
	2	1256	1039	4090	59.3	1401	1083	3830	59.2	1.446
	3	1195	1039	3490	50.6	1216	1048	3480	50.7	1.812

B) 流量再配分後

ケース番号	オリフィス番号	オリフィス平均チャンネル				最高出力チャンネル				限界熱流束比
		Tf max°C	Tg out°C	Re min	G kg/hr	Tf max°C	Tg out°C	Re min	G kg/hr	
13 (12.3w/cc)	1	1268	1037	9670	23.2	1401	1147	8870	22.5	2.602
	2	1214	1012	4410	63.1	1351	1058	4290	62.8	1.722
	3	1244	1097	3230	48.3	1264	1107	3220	48.4	1.663
14 (13.2w/cc)	1	1211	1038	9160	22.0	1338	1151	8390	21.3	2.963
	2	1216	1013	4420	63.3	1351	1057	4310	63.1	1.753
	3	1238	1089	3350	49.8	1252	1092	3360	50.0	1.782
15* (13.8w/cc)	1	1212	1039	9200	22.1	1340	1154	8410	21.4	2.992
	2	1215	1013	4420	63.3	1350	1056	4310	63.1	1.754
	3	1238	1089	3340	49.7	1252	1092	3350	50.0	1.777
16 (14.19w/cc)	1	1271	902	12560	28.0	1398	987	11670	27.3	3.465
	2	1233	1039	4180	60.7	1366	1084	4080	60.5	1.562
	3	1302	1156	2950	45.4	1319	1164	2950	45.5	1.446
17 (14.32w/cc)	1									
	2	流量再配分不可能								
	3									

\* 初期状態選定出力分布

Table 2.3.4 燃焼状態熱特性

試験燃料	燃焼ステップ	オリフィス番号	オリフィス平均チャネル			出口ガス温度一定 流量再配分			最高出力チャネル			出口ガス温度一定 流量再配分			最高出力 密度(W/cm <sup>2</sup> )	限界熱流束比	備考
			燃料最高温度(°C)	出口ガス温度(°C)	最小レイノルズ数	流量(Kg/h)	燃料最高温度(°C)	出口ガス温度(°C)	最小レイノルズ数	流量(Kg/h)	燃料最高温度(°C)	出口ガス温度(°C)	最小レイノルズ数	流量(Kg/h)			
セミピン型	0日	1	1428	1278	1039	30500	73.6	93.5	SB	1579	1400	1153	27900	71.4	14.32	26.25	
		2	1224	1224	1039	4200	61.1	61.1	CB	1364	1364	1096	4100	60.6	1.661	1.661	10.35
		3	1181	1285	1039	3800	55.0	47.1	SB	1194	1297	1055	3700	54.4	2.365	1.718	
	10日	1	1366	1249	1039	27800	67.1	80.5	SB	1546	1398	1185	24800	64.3	13.74	21.93	
		2	1176	1176	1039	4300	62.2	62.2	CB	1326	1326	1130	4000	60.7	1.663	1.663	8.32
		3	1147	1213	1039	3800	55.8	50.5	SB	1165	1230	1057	3800	55.2	2.076	1.672	
	150日	1	1346	1260	1039	29100	70.4	80.6	SB	1504	1399	1170	26300	67.8	15.38	21.75	
		2	1187	1187	1039	4300	62.6	62.6	CB	1296	1296	1091	4200	61.9	2.102	2.102	8.46
		3	1152	1202	1039	3700	53.9	49.9	SB	1171	1220	1057	3600	53.4	2.165	1.835	
300日	1	1319	1273	1039	30900	74.7	80.2	SB	1454	1399	1151	28300	72.3	18.53	22.24		
	2	1165	1165	1039	4300	62.5	62.5	CB	1224	1224	1057	4300	62.3	2.087	2.087	8.22	
	3	1135	1162	1039	3600	52.3	50.2	SB	1154	1179	1055	3500	51.8	1.997	1.836		
375日	1	1292	1263	1039	30400	73.5	76.8	SB	1434	1399	1160	27600	70.8	18.53	20.76		
	2	1152	1152	1039	4300	62.8	62.8	CB	1199	1199	1052	4300	62.6	2.102	2.102	7.72	
	3	1126	1142	1039	3600	52.4	51.1	SB	1144	1158	1054	3600	51.9	1.952	1.862		
450日	1	1286	1142	1039	33000	79.7	51.1	SB	1397	1158	1130	30700	77.5	21.42		← 再配分不要	
	2	1142	1039	1039	4300	62.3	62.3	CB	1165	1165	1030	4300	62.6	2.104	8.46		
	3	1119	1039	1039	3500	50.7		SB	1131		1046	3500	50.7	1.864			
600日	1	1230	1039	1039	32600	78.9		SB	1336		1128	30300	76.7	20.57		← 再配分不要	
	2	1114	1039	1039	4300	62.9		CB	1140		1045	4300	62.6	2.030	8.55		
	3	1099	1039	1039	3400	50.0		SB	1116		1054	3400	49.9	1.745			
燃料交換	1	1305	1258	1039	29700	71.7	77.5	SB	1456	1399	1155	27200	69.5	15.34	18.72		
	2	1226	1208	1039	4200	61.3	63.2	CB	1371	1351	1097	4100	60.7	1.688	1.814	9.04	
	3	1183	1248	1039	3800	55.5	50.2	SB	1193	1257	1049	3800	55.0	2.426	1.977		

※ SB……標準ブロック  
CB……制御ブロック

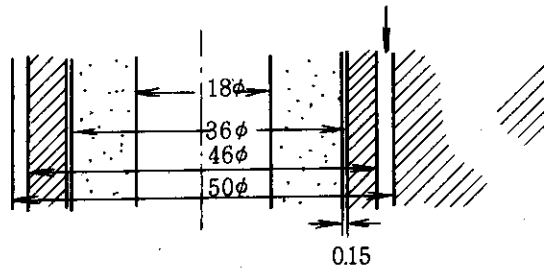
Table 2.3.5 セミピン型試験燃料体のチャンネル本数サーベイ結果

ケース番号	チャンネル数 ブロック	オブリバイス号	平均出力チャンネル			出口ガス温度一定 流量再配分			燃料最高温度°C	出口ガス温度°C	燃料最高温度°C	最高出力チャンネル		出口ガス温度一定 流量再配分		限界熱流比	備考					
			燃料最高温度°C	出口ガス温度°C	最小レイノルズ数	流量 (Kg/h)	燃料最高温度°C	出口ガス温度°C				最小レイノルズ数	流量 (Kg/h)									
1	18	1	1430	1283	1039	904	31500	42900	1581	96.5	SB	1584	1404	1151	989	29000	40000	73.9	94.2	14.89	27.10	
		2	1223		1039		4200		60.8		CB	1365		1097		4000		60.3		1.644	1.646	
		3	1180	1288	1039	1149	3700	3000	54.4	46.4	SB	1194	1304	1043	1156	3800	3000	54.6	46.5	2.207	1.563	
2	24	1	1349	1275	1039	967	23600	27600	57.1	64.2	SB	1492	1402	1151	1066	21700	25500	55.4	62.5	9.755	13.13	
		2	1223		1039		4200		60.8		CB	1365		1097		4000		60.3		1.644	1.646	
		3	1180	1226	1039	1086	3700	3400	54.4	50.7	SB	1194	1208	1043	1088	3800	3400	54.6	50.9	2.207	1.886	
3	30	1	1297	1269	1039	1012	18900	20000	45.7	47.7	SB	1434	1400	1151	1118	17400	18400	44.3	46.3	7.027	7.846	
		2	1223		1039		4200		60.8		CB	1365		1097		4000		60.3		1.644	1.644	
		3	1180	1195	1039	1054	3700	3600	54.4	53.1	SB	1194	1208	1043	1058	3800	3600	54.6	53.3	2.207	2.088	
4	36	1	1260		1039		15800		38.1		SB	1394		1152		14400		36.9		5.371		流量再配分 不
		2	1223		1039		4200		60.8		CB	1365		1097		4000		60.3		1.644		"
		3	1180		1039		3700		54.4		SB	1194		1013		3800		54.6		2.207		"

SB 標準ブロック  
CB 制御 "

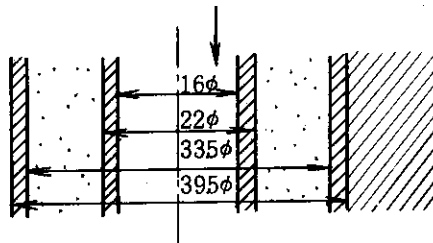


MK-IIIドライバ燃料



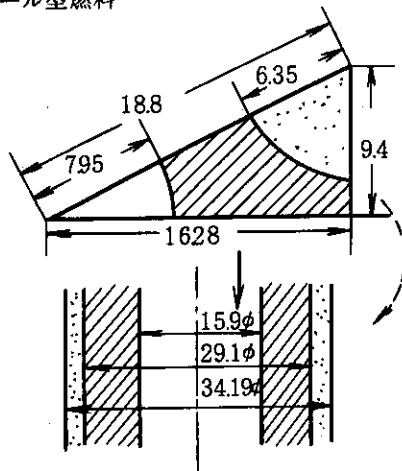
燃料有効発熱長さ	
標準燃料ブロック	529mm
制御燃料ブロック	455mm
軸方向計算点	56点
径方向計算点	12点

セミピン型燃料



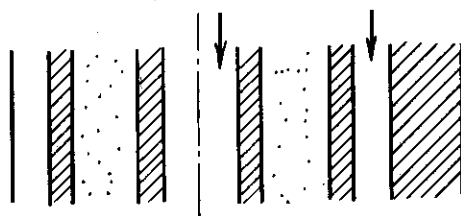
燃料有効発熱長さ	530mm
軸方向計算点	56点
径方向計算点	9点

マルチホール型燃料



燃料有効発熱長さ	530mm
軸方向計算点	56点
径方向計算点	8点

両面冷却型燃料



燃料有効発熱長さ	530mm
軸方向計算点	56点
径方向計算点	11点

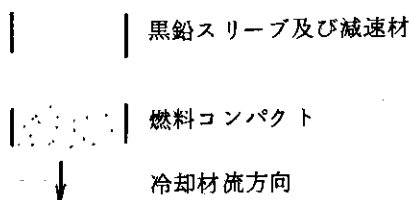


Fig 2.3.2 燃料チャンネル形状モデル

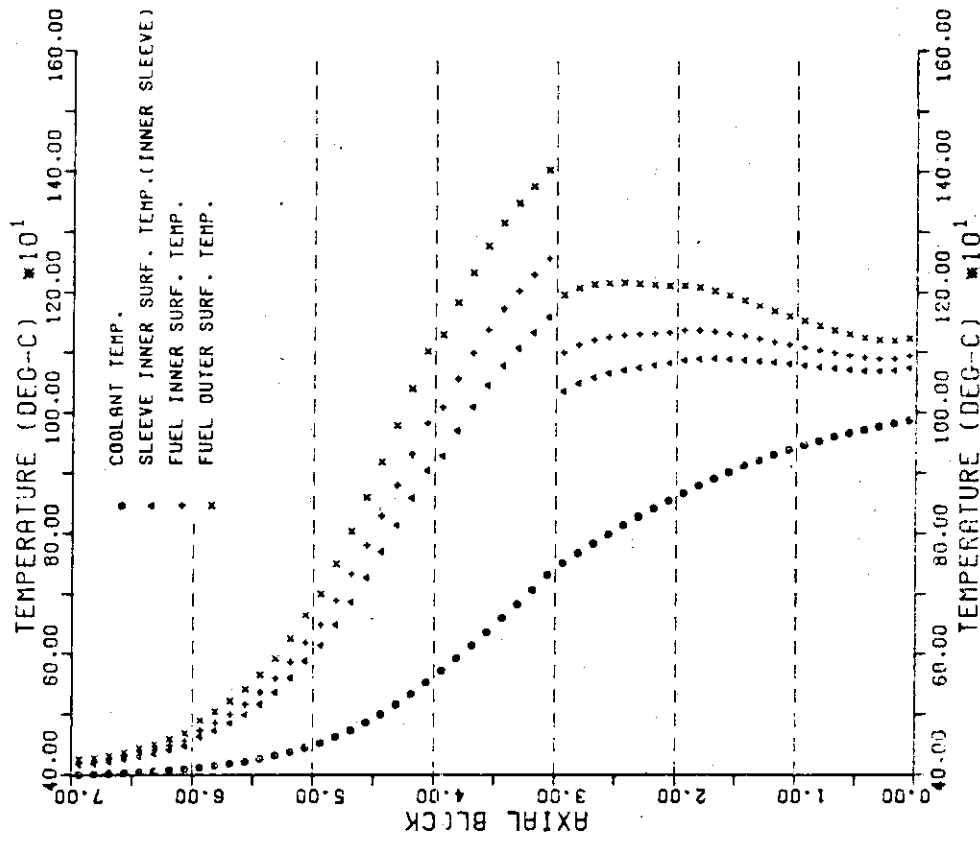


Fig. 2.3.4 セミピン型試験燃料体 (最高出力チャンネル) の温度分布

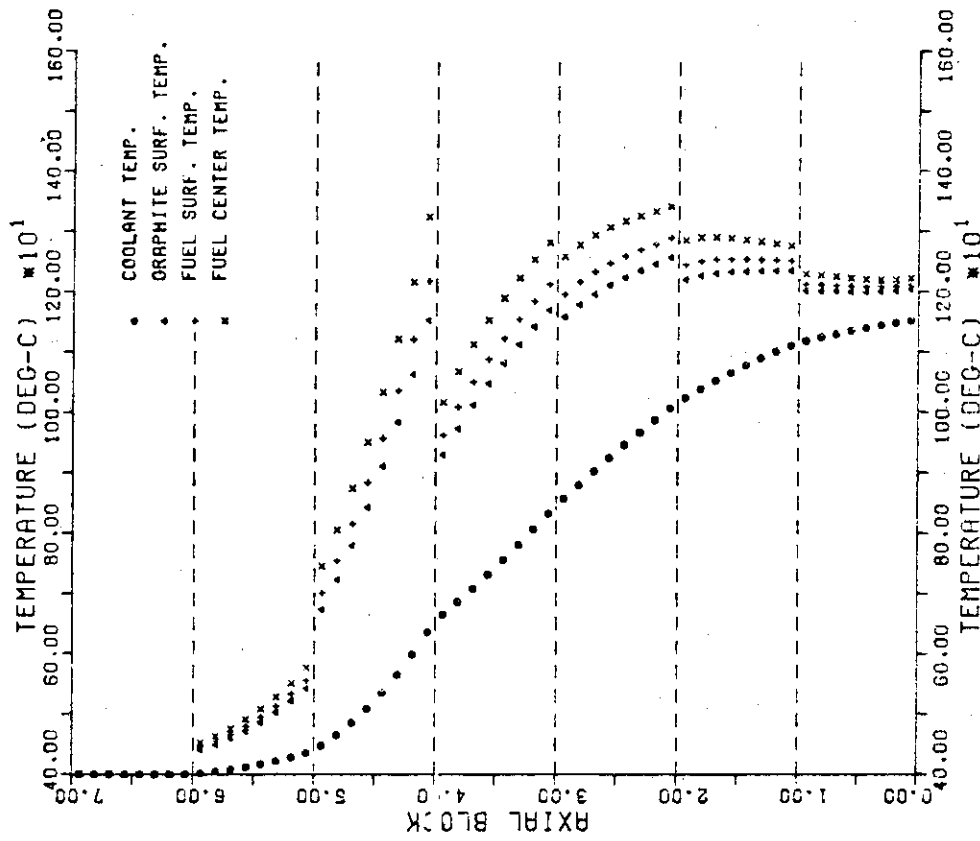


Fig. 2.3.3 マルチホール型試験燃料 (最高出力チャンネル) の温度分布

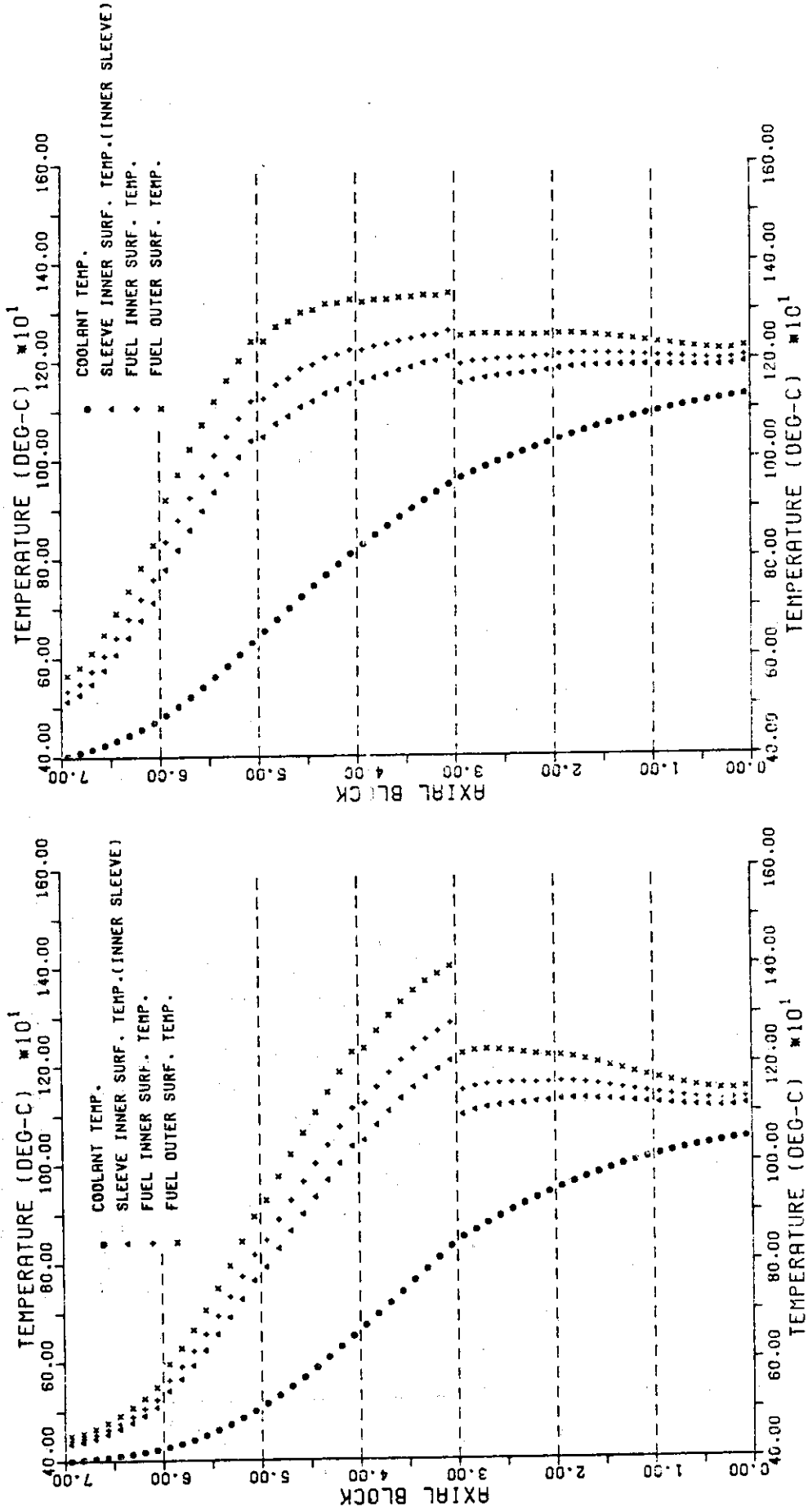


Fig. 2.3.5 セミピン型試験燃料体 (最高出力チャンネル) の温度分布 (燃焼 10 日)  
 Fig. 2.3.6 セミピン型試験燃料体 (最高出力チャンネル) の温度分布 (燃焼 600 日)

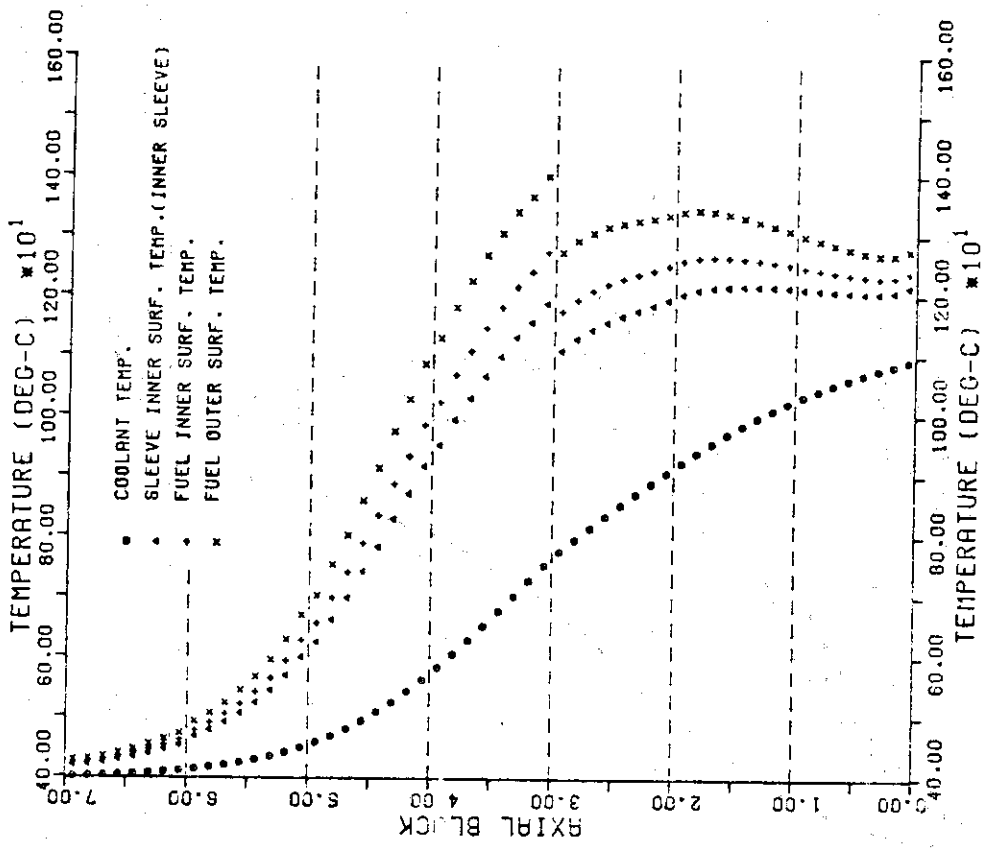


Fig. 2.3.7 セミピン型試験燃料体 (最高出力チャンネル) の温度分布  
(第2サイクル初期)



## 2.4 遮蔽特性解析

実験炉を照射炉として使用する場合、照射機能を前提としない遮蔽設計から設計上の変更が必要になるかどうか検討された。対象炉心としては2.2節に述べた設計例-2を選び解析を行ない、Mk-III炉心設計の結果と比較検討された。

解析には1次元および2次元Snコードを用いるものとし、具体的には1次元計算はANISNによる $P_3 S_0$ 近似、2次元計算はDOT-IIIによる $P_3 S_0$ 近似をとった。また、群定数データはENDF/B-IVから、中性子34群、ガンマ線20群モデルで作成された。なお、2次元計算用群定数は1次元計算のスペクトルから中性子10群、ガンマ線7群に縮約して求めた。

1次元解析は炉心中心径方向（円筒座標系）及び炉心中心軸上（平板座標系）について、2次元解析は径方向には圧力容器外面、軸方向には上部熱遮蔽体外面から下部炉心支持板までの領域（R-Z座標系）を対象とした。なお、2次元解析は実際には炉心中央水平面で上、下2分割して計算され、その際の境界条件は炉心中央水平面で完全反射、炉心外側で真空とした。

中性子束分布に対する計算結果をTable 2.4.1及びFig. 2.4.1, 2.4.2に示す。半径方向では固定反射体における最大高速中性子束（ $E_n \geq 0.2 \text{ MeV}$ ）がMk-III炉心設計時に較べて約3倍程度大きくなっている以外はいずれも今回の計算結果が小さくなっている。固定反射体に対する積分中性子照射量は約 $4 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ （照射年数20年、負荷率80%）であるが、設計条件 $5 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 以下におさまっている。一方、上部方向に関しては今回の結果が1~4桁小さくなっているので特に問題はなからう。又、下部方向については熱遮蔽体までの領域で今回の結果が約10倍程度大きくなっている。下部反射体における高速中性子積分照射量は約 $2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ （照射年数3年、負荷率80%）となるが、これも設計条件 $3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ を満足している。

なお、Mk-III炉心設計時の結果との違いが大きいが、これは照射試験領域の設定にもよるがむしろ主として計算手法、体系のモデル化、データ・ライブラリー、使用コードなどの相違に起因するところが大であると考えられる。

さらに、2次元解析結果にもとづく炉心周辺構造物の放射線発熱量をTable 2.4.2に示した。

以上の結果から、運転中における遮蔽性能は照射炉心に対しても十分であると考えられ、出力50 MWという条件のもとではMk-III炉心設計における遮蔽設計を特に変更する必要はないと判断される。

Table 2.4.1 中性子束のMk-III炉心との比較

項 目		照射用炉心体系	Mk-III炉心体系	備 考	
半	固定反射体内面	$\phi_f$	$6 \times 10^{10} \text{ } \mu\text{cm}^2 \text{ sec}$	$2 \times 10^{10} \text{ } \mu\text{cm}^2 \text{ sec}$	$E_n \geq 0.2 \text{ MeV}$
		$\phi_{\text{int}}$	$5 \times 10^{11}$	$3 \times 10^{11}$	$0.2 \text{ MeV} > E_n \geq 0.215 \text{ eV}$
		$\phi_{\text{th}}$	$1 \times 10^{12}$	$1 \times 10^{13}$	$E_n < 0.215 \text{ eV}$
径	熱遮蔽体内面	$\phi_f$	$2 \times 10^8$	$4 \times 10^9$	全 上
		$\phi_{\text{int}}$	$1 \times 10^9$	$3 \times 10^8$	
		$\phi_{\text{th}}$	$2 \times 10^9$	$7 \times 10^{11}$	
方	压力容器(最大)	$\phi_f$	$8 \times 10^7$	$2 \times 10^8$	$E_n \geq 0.1 \text{ MeV}$
		$\phi_{\text{int}}$	$2 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	$0.1 \text{ MeV} > E_n \geq 0.215 \text{ eV}$
		$\phi_{\text{th}}$	$1 \times 10^7$	$2 \times 10^8$	$E_n < 0.215 \text{ eV}$
上	熱遮蔽体内面	$\phi_f$	$2 \times 10^7$	$4 \times 10^8$	$E_n \geq 0.2 \text{ MeV}$
		$\phi_{\text{int}}$	$8 \times 10^7$	$3 \times 10^9$	$0.2 \text{ MeV} > E_n \geq 0.215 \text{ eV}$
		$\phi_{\text{th}}$	$2 \times 10^8$	$1 \times 10^{12}$	$E_n < 0.215 \text{ eV}$
方	压力容器(最大)	$\phi_f$	$1 \times 10^5$	$5 \times 10^7$	$E_n \geq 0.1 \text{ MeV}$
		$\phi_{\text{int}}$	$2 \times 10^5$	$1 \times 10^8$	$0.1 \text{ MeV} > E_n \geq 0.215 \text{ eV}$
		$\phi_{\text{th}}$	$4 \times 10^3$	$3 \times 10^7$	$E_n < 0.215 \text{ eV}$
下	反射体上面	$\phi_f$	$3 \times 10^{12}$	$3 \times 10^{11}$	$E_n \geq 0.2 \text{ MeV}$
		$\phi_{\text{int}}$	$8 \times 10^{12}$	$8 \times 10^{11}$	$0.2 \text{ MeV} > E_n \geq 0.215 \text{ eV}$
		$\phi_{\text{th}}$	$5 \times 10^{12}$	$2 \times 10^{12}$	$E_n < 0.215 \text{ eV}$
方	熱遮蔽体上面	$\phi_f$	$2 \times 10^8$	$3 \times 10^7$	全 上
		$\phi_{\text{int}}$	$2 \times 10^9$	$3 \times 10^8$	
		$\phi_{\text{th}}$	$2 \times 10^9$	$1 \times 10^{11}$	
向	压力容器(最大)	$\phi_f$	$3 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	$E_n \geq 0.1 \text{ MeV}$
		$\phi_{\text{int}}$	$1 \times 10^5$	$3 \times 10^5$	$0.1 \text{ MeV} > E_n \geq 0.215 \text{ eV}$
		$\phi_{\text{th}}$	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^5$	$E_n < 0.215 \text{ eV}$

Table 2.4.2 放射線発熱量のMk-III炉心との比較

項 目	照射用炉心体系	Mk-III炉心体系	備 考
径方向可動反射体	$2.2 \times 10^5 \text{ w}^{(*)}$	$7.9 \times 10^2 \text{ w/cm}^2^{(**)}$	(*)領域全発熱量 (**)単位発熱量
上方向可動反射体	$7.3 \times 10^3 \text{ "}$	$2.7 \times 10^0 \text{ w/cm}^2$	"
下方向可動反射体	$1.4 \times 10^4 \text{ "}$	$2.5 \times 10^{-1} \text{ w/cm}^2$	"
径方向固定反射体	$9.3 \times 10^3 \text{ "}$	$6.6 \times 10 \text{ w/cm}^2$	"
径方向熱遮蔽体	$4.8 \times 10^2 \text{ "}$	$3.7 \times 10^0 \text{ w/cm}^2$	"
上方向熱遮蔽体	$1.2 \times 10^1 \text{ "}$	$1.0 \times 10^{-1} \text{ w/cm}^2$	"
下方向熱遮蔽体	$3.6 \times 10^1 \text{ "}$	$5.1 \times 10^{-2} \text{ w/cm}^2$	"
コア・パレル	$8.3 \times 10^{-1} \text{ m w/cm}^2$	$1.3 \times 10^{-1} \text{ m w/cm}^2$	最大発熱量
圧力容器(径方向)	$2.9 \times 10^{-1} \text{ "}$	$5.5 \times 10^{-2} \text{ "}$	"
" (上方向)	$1.2 \times 10^{-4} \text{ "}$	$3.3 \times 10^{-3} \text{ "}$	"
" (下方向)	$1.8 \times 10^{-4} \text{ "}$	$2.9 \times 10^{-4} \text{ "}$	"

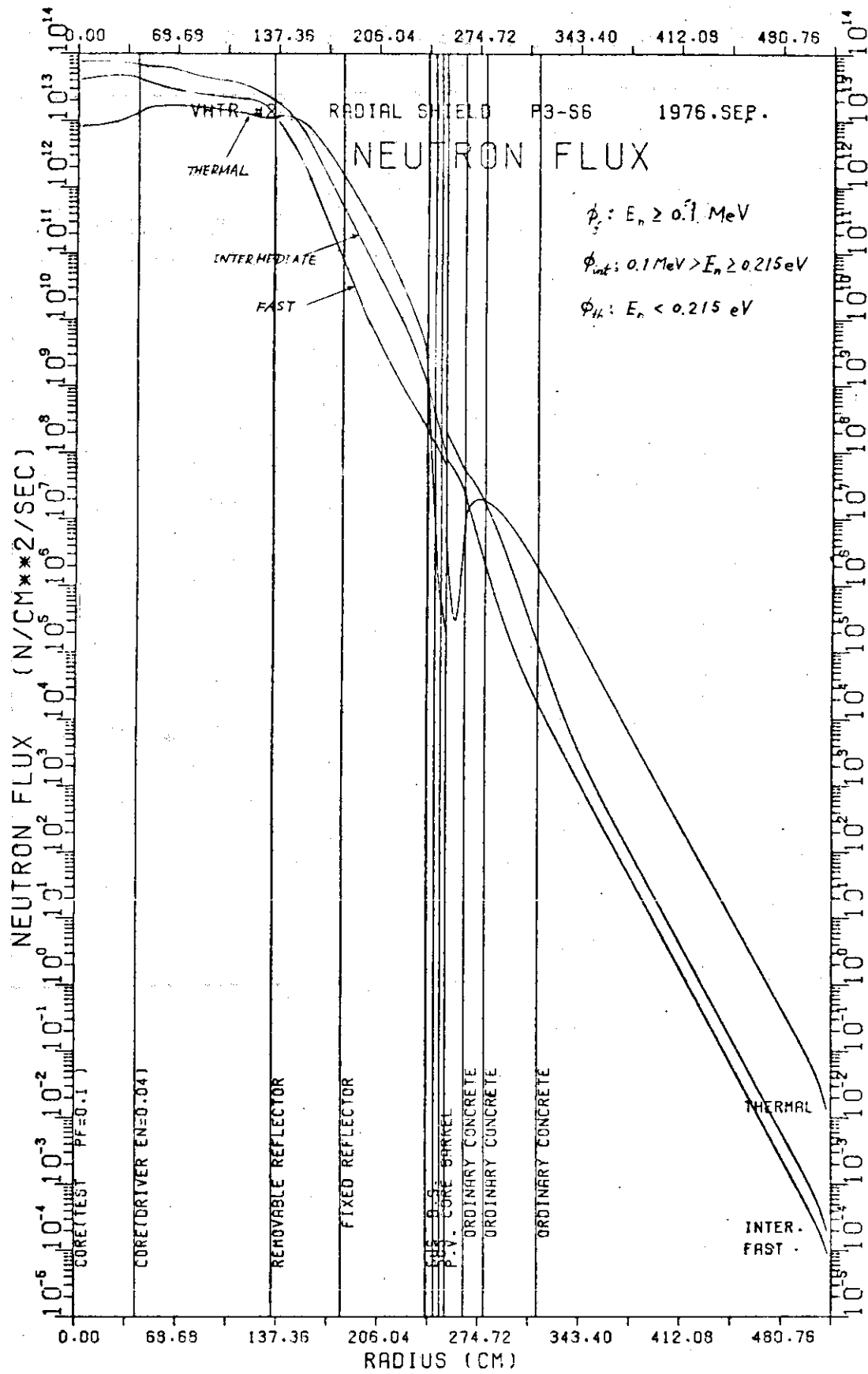


Fig. 2.4.1 径方向中性子束分布

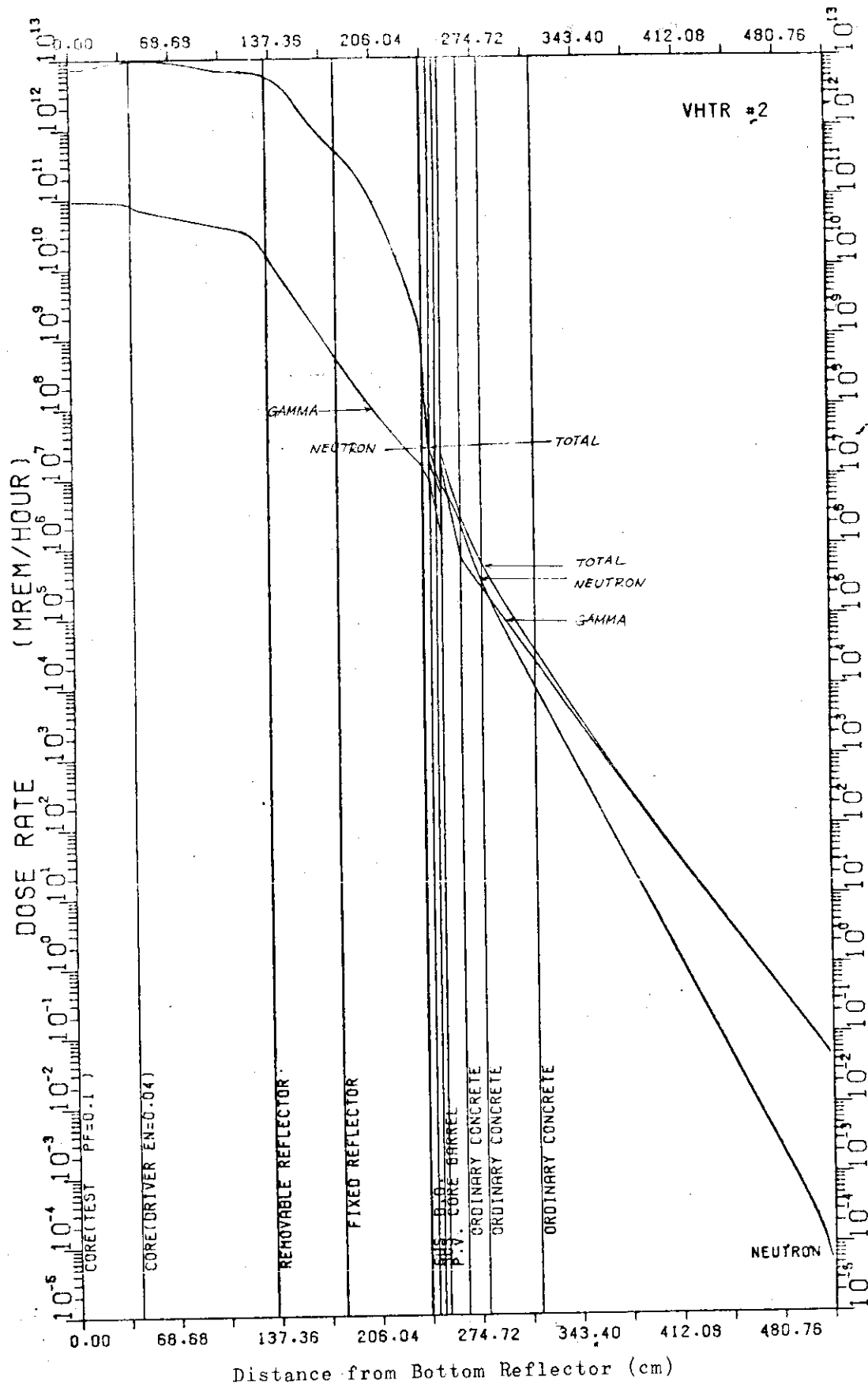


Fig. 2.4.2 径方向線量分布

## 2.5 原子炉の構造、運転への影響

以上の結果から、照射用炉心の主要な特徴としてはTable 2.5.1のようにまとめることができる。これらをふまえ、原子炉の構造、運転への要求として以下のように整理できる。

### (1) 炉心冷却材流量、オリフィス制御への要求

照射試験領域の高出力密度達成という設計上の重要な一つの目標の結果として生じた炉心内領域一部の高出力化は、炉心冷却条件を厳しくしオリフィス領域毎に冷却材出口温度を一定にする流量制御方式がとれず、方式を変えることによりその達成を計らねばならない。しかし、この場合オリフィス装置に要求される流量調節範囲はMk-III炉心に較べて広くなり(最大流量で約40%増、最小流量で同程度減)、オリフィス機構の改良が必要になる。

又、試験燃料温度を限界値近傍で長期間一定に保つために流量調節に要求される信頼度はMk-III炉心の場合より厳しいものとなる。従って、流量制御を行なうための情報として、オリフィス流量、オリフィス領域毎出口ガス温度及び燃料最高温度の測定精度の向上が不可欠といえよう。

なお今回、設計例-1で最高出力密度約 $11\text{w}/\text{cm}^2$ を燃焼初期で達成したが、照射目標の1つである $20\text{w}/\text{cm}^2$ をその時の出力分布形状を保ちながら達成しえたと仮定した場合、照射領域に流すべき冷却材流量はMk-III炉心の約3倍必要になる。この結果、原子炉混合出口ガス温度は約 $830^\circ\text{C}$ に低下し、炉心部圧力損失は約6倍程度になる。

### (2) 制御棒設計への要求

制御棒の構造・寸法はMk-III設計と同じであり、挿入パターンもMk-III炉心設計時と類似であることから、ドライバー領域においては出力密度や温度など制御棒に対する環境はMk-III炉心と同様で、特に問題は生じないと考えられる。しかし、照射試験領域では環境が大巾に異なるうえに、制御棒挿入用ブロック構造や燃料冷却方式の違いもあり、①制御棒温度(特に被覆材)、②制御棒材料劣化、③燃料ブロックボウイング、④制御棒挿入用ブロック強度、⑤バイパス流増加による制御棒振動、などについての検討が必要といえよう。

### (3) 計測制御設計への要求

試験燃料体の総合試験を行なう上で必要な計測、制御上の機能を達成するためには次のような方法が考えられる。

- (i) 試料の最高温度を定められた値にほぼ保つには、定格運転中連続的に炉内出力分布を管理し、代表的な点における試料温度を直接測定する必要がある。これが不可能な場合は、運転初期に試料温度と冷却材流量、出力分布、冷却材温度の関係を把握しておき、長期にわたる定格運転時には、冷却材流量と出口冷却材温度から推定する。
- (ii) 試料からのF.P.放出量の変化の測定は、オリフィス領域単位であればMk-IIIの設計で可能である。将来はブロック単位程度の測定が必要になる。
- (iii) 中性子束照射量の測定は、ワイヤもしくは試料に埋め込んだ被覆粒子状のアルミナに含まれる鉄、コバルトあるいはニッケルにより測定することになる。
- (iv) 燃焼度は照射後試験により測定する。
- (v) 線出力あるいは出力分布の評価は、炉内核計装による情報又は低出力時の基礎試験によ

り行う。運転時の限られた情報に基づいて信頼出来る出力分布が得られる計算コードの開発が必要である。

(VI) 燃料体及びピンの受けた応力評価は、出力分布、温度分布より評価する。キャプセル試験などによる素材の照射特性データの蓄積と共にソフトの開発が必要である。

一方、Mk - III 炉心と照射炉心との相違点より、計測系に対して次のような課題が生じる。

(i) Mk - III 炉心は出力平坦化を行った上で伝熱流動的に限界に近い設計であったが、本設計ではさらに照射試験領域の出力密度を上げ、流量配分により照射試験領域の流量を増加させ燃料温度を一定に制御している。その結果、ドライバ領域の流量減少に伴うレイノルズ数、限界熱流束比等の条件は悪化し、流動条件はより厳しくなる。したがって照射試験領域のみならずドライバ領域についても計測の必要性が増加する。出力分布の管理のためには炉内中性子計測が行えることが好ましく、照射燃料体の連続温度測定、もしくは推定が可能なことが照射炉としての必須条件といえよう。

(ii) 中性子照射量の増加により、照射試験領域の計測素子の材料損傷、性能、感度劣化に対する対策を考慮しなければならない。又燃料温度の上昇、炉内滞在期間の延長により、より厳しい条件に耐える作動素子が必要である。

(iii) 軸方向、径方向の出力勾配の増加によるコラムボウイングに対して、計測素子の破損、取り換え方法などの再検討が必要になる。

以上のような問題点をふまえ、照射炉心の計測設計への要求として次のような事項が挙げられよう。

(i) 炉内温度測定に対しては、現段階での熱電対では長期間にわたる連続測定は困難と思われ、R & Dが必要である。又、一体ものでないブロック状の燃料のためリード線の接続方法、絶縁、取り付け方法、取り換え方法のR & Dが必要である。

又熱電対以外の温度計のR & Dも検討の必要がある。

(ii) 中性子計装に対しては、最高使用温度の高いよりきびしい照射条件に耐える小型中性子検出器の開発が必要である。

(iii) 大型炉の運転条件、燃料照射条件が明らかになれば、より詳細な計測が必要となろう。その場合には、特殊計測燃料体とその交換方法の開発が必要で、場合によっては専用スタンドパイプの設置も考えられる。この様な場合に備えてケーブル貫通部、中央制御パネルに余裕を見込んでおく必要も生じるかもしれない。

Table 2.5.1 照射用炉心（設計例-I）の特徴

項 目	単 位	Mk - III 炉心	照 射 用 炉 心 (照射試験領域)*	備 考
1. 最大出力密度の増大	W/cm <sup>2</sup>	初期炉心 6.3 450日BU時 6.8	10.4 8.9	ブロック内出力分 布の勾配も増加
2. 燃料最高温度（ノミナル）の 増加	°C	1350	1400	ブロック内温度分 布の勾配も増加
3. 中心オリフィス領域流量の 増加	kg/s	1.66	2.96	
4. 周辺オリフィス領域におけ る最小レイノルズ数の減少		3500	3000	設計条件
5. 平均濃縮度の増加	w/o	4	8	
6. 熱外中性子束 (E > 2.23 eV) の増加	n/cm <sup>2</sup> ・s	1 × 10 <sup>14</sup>	1.3 × 10 <sup>14</sup>	
7. 炉内滞在期間の延長	y	2	4	80% LF
8. 高速中性子照射量の増加	nvt	1 × 10 <sup>21</sup>	2.9 × 10 <sup>21</sup>	
9. 最大燃焼度の増加	GWD/T	34	81	

\* 項目 4 を除いて、照射領域の値



### 3. 照射用炉心の特性検討

#### 3.1 概要

第2章に述べた検討に引続いて、実験炉の炉心を照射ベツト専用で使用し照射試験を行なうことの可能性と問題点及び原子炉の構造や運転法に対する要求をさらに詳細につめるための検討を行なった。

これは大きくわけて、燃料装荷方式を検討するための炉心特性解析（核特性、熱・流動特性、燃料特性及び遮蔽特性の解析を含む）、ならびに圧力容器や炉体構造、原子炉運転方式への要求事項を明らかにするための検討、からなっている。

解析を行なうに際して前提とした基本条件ならびに基本仕様は次の通りである。

- i) 照射試験の目的は新型燃料体の総合実証試験である。
- ii) 炉心の基本構成はMk - III炉心と同じとするが、照射試験領域は中央1オリフィス領域(7燃料カラム)とする。
- iii) 原子炉熱出力は50MWを標準とするが、60MWも検討する。又、原子炉出口冷却材温度は800, 900及び1000°Cを対象とする。
- iv) 試験用燃料体は最高20 w/o濃縮の二酸化ウランを使用した中空棒型、円環棒型、内面冷却棒(セミピン)型及びマルチホール型燃料体とする。これら燃料体構造のうち中空棒及び円環棒型の場合、標準燃料体に装荷する燃料棒が12本の例としてはFig. 2.1.1を、又18本の例としてはFig. 2.1.2を参照されたい。さらに、セミピン型及びマルチホール型燃料体の構造はFig. 3.1.1に示してある。
- v) ドライバー燃料体の型式はMk - III型及びセミピン型の2型式とする。

一方、試験燃料体の照射性能評価に関連して設定した目標をTable 3.1.1に、また適用した炉心設計指針・基準をTable 3.1.2に示す。

検討はまず予備的なものとして、炉心核・熱流動総合特性解析を行なった。具体的には核特性解析では試験燃料の装荷方法、可燃性毒物装荷法、制御棒の操作法やドライバー燃料の濃縮度配分などを、又熱・流動特性では熱出力と冷却材出口温度をパラメータにして燃料最高温度、最小レイノルズ数、最小限界熱流束比などを検討し、以下の結論をえた。

- (i) 高出力密度を得るためには、濃縮度の高い燃料の装荷が必要になるが、炉停止余裕の面からの制約があり、照射試験領域の燃料装荷法としては軸方向に燃料体1段のみ濃縮度の高い燃料を装荷するような特殊な方式をとらざるを得ない。
- (ii) Mk - III型ドライバー燃料炉心では、試験燃料として濃縮度18 w/o以上の燃料を装荷することによって、出力密度20 w/cm<sup>2</sup>の達成が見込める。
- (iii) セミピン型燃料ドライバー炉心では、50~60 MWの炉出力ではドライバー燃料の濃縮度を下げない限り試験燃料として濃縮度20 w/oの試験燃料を装荷しても、出力密度20 w/cm<sup>2</sup>の達成は困難である。
- (iv) 濃縮度の高い燃料体の装荷位置は炉心上部から第4段目程度が望ましい。

(V) Mk-III型燃料ドライバー炉心で出力密度  $20 \text{ w/cm}^2$  を達成するためには、冷却材出口温度を  $900^\circ\text{C}$  以下にすることが必要になる。

これらの結果をふまえて Mk-III 及びセミピン型各ドライバー燃料炉心に対して、原子炉出口冷却材温度  $800, 900, 1000^\circ\text{C}$  及び熱出力  $50, 60 \text{ MW}$  各々に対応する初期炉心状態を設定した。次いで、その中からさらに照射炉用炉心の詳細な特性を把握するために熱出力  $50 \text{ MW}$  で出口冷却材温度  $800^\circ\text{C}$  の Mk-III 型燃料ドライバー炉心 (MR-1 炉心) および、熱出力  $50 \text{ MW}$  で出口冷却材温度  $1000^\circ\text{C}$  のセミピン型燃料ドライバー炉心 (SR-1 炉心) の各炉心を参考炉心として選定した。これら参考炉心の概略諸元を Table 3.1.3 に示す。次いで、これら参考炉心に対して詳細な核特性 (反応度補償計画, 燃焼特性, 等), 熱流動特性 (流量調節方式, 温度分布, 等), 燃料特性 (アマーバ効果, 応力評価, 等) や遮蔽特性の解析を行なった。その結果, 次のようなことが明らかになった。

### 1) 核特性に関して

(i) 局所的に濃縮度の高い燃料を装荷することにより、制御棒の反応度補償特性、炉停止余裕及びオリフィス領域間の出力分担の燃焼変化、等が強く影響を受ける。

特に Mk-III 型燃料ドライバー炉心では試験燃料を装荷することにより炉停止余裕が厳しくなる。

(ii) 試験燃料に対する照射目標のうち、最大燃焼度については MR-1 及び SR-1 両炉心とも目標の達成が見込めるが高速中性子照射量については両炉心ともに目標値の  $1/2$  以下である。

### 2) 熱流動特性に関して

(i) MR-1 炉心の場合、初期では  $19.9 \text{ w/cm}^2$  と高い最大出力密度を達成できるが、炉出口冷却材温度は  $800^\circ\text{C}$  程度に下げざるを得ない。又、燃焼とともに照射領域の出力密度が急激に減少し初期状態と燃焼状態とで熱・流動特性が非常に異なるため、照射試験領域とドライバー領域とでは各々独立し、かつ各燃焼状態に対応して流量調節を行なうことが必要である。なお、燃焼が進んだ状態では炉出口冷却材温度  $900^\circ\text{C}$  程度の運転も可能である。

(ii) SR-1 炉心の場合、照射試験領域の中性子束レベルが高められず最大出力密度が  $14 \text{ w/cm}^2$  と低いため炉出口冷却材温度  $1000^\circ\text{C}$  の運転が可能である。しかし、試験燃料の最高温度を低く抑えるためには MR-1 炉心と同様に燃焼状態に対応した流量調節方式をとる必要がある。

(iii) 最大出力密度の高い初期状態では、照射試験領域において燃料最高温度を抑えるため多くの流量を必要とし、結果として照射試験領域の冷却材出口温度はドライバー領域のそれよりかなり低くなる。

(iv) 試験燃料体としてはマルチホール及びセミピン型燃料が流動特性上から中空及び円環型燃料より有利である。

### 3) 燃料特性に関して

(i) 照射試験領域の最大核移動距離はアマーバ破損の基準値  $30 \mu$  よりかなり大きい値となるが、第4段目のブロックのみに限られる。又、ドライバー領域では  $30 \mu$  を超えることはなく、全炉心でも MR-1 炉心で  $0.4 \sim 1.5\%$ 、SR-1 炉心で  $0.3 \sim 0.7\%$  程度である。

(ii) 被覆粒子の応力破損に対しても、照射試験領域の第4段目燃料体で破損が生じるが、ド

ライバー領域では健全性を保たれると推定できる。

(iii) 燃料体の応力の立場からは、総合的結論として、高出力密度、高照射に耐える試験燃料体、被覆粒子を再検討する必要がある。

4) 遮蔽特性に関して

(i) 高速中性子照射量はMR-1及びSR-1炉心ともに基準を満足しており(Mk-III炉心とはファクター4以内)、照射領域の高出力密度の効果は周辺構造物に余り影響を与えないといえよう。

(ii) 放射線発熱量はMk-III炉心の2~25倍であるが、基準は満足する。

(iii) 従って、MR-1及びSR-1炉心ともに遮蔽特性上Mk-III設計から特に変更すべき点はないと考えられる。

以上の結果をふまえて、Mk-III炉心を照射炉用炉心として用いる場合の主要な炉心構造(炉床部断熱構造、炉心側部反射体、炉心側部拘束機構、コアパレル、炉心上部オリフィス構造、炉心下部支持構造、炉容器、等)に対して、熱・流動条件、放射線照射条件や要求機能に変化が生じるか、およびその変化が構造に重大な影響を及ぼすか否かの検討を行なった。又、炉床部断熱構造およびサポートポスト下部構造に対しても解析、検討を行なった。その結果、炉心周辺部における各種条件はMk-III炉心と全んど変わらないこと、但し炉心上部オリフィス構造についてはより精密なオリフィス調整機構を必要とすることからその製作や据付の精度が厳しくなる(高信頼性の要求)、等がいえる。

一方、原子炉運転方式に関連して、運転範囲や設計仕様の変更の必要性を検討した。その結果、MR-1炉心は炉心出口冷却材温度800°Cの炉心であることから、サーキュレータの流量及び昇圧の変更、二重管外管径の変更、蒸気発生器の寸法および伝熱管本数の変更、等が必要になるが、中間熱交換器の設計変更の必要はないことがわかった。又、SR-1炉心は炉出口冷却材温度1000°Cの炉心であるため、Mk-III炉心設計のまま運転可能といえる。なお、熱出力60MWとする炉心ではサーキュレータ、配管寸法、蒸気発生器及び中間熱交換器の寸法、等の大巾な変更が必要になる。

Table 3.1.4にMR-1及びSR-1炉心の特性の主要目を、又Fig.3.1.2にそれらの照射目標に対する達成度を概念的に図示した結果を示す。

Table 3.1.1 試験燃料体の照射目標

	考慮すべき項目	目 標 値	備 考
1	高速中性子照射量 (nvt)	$8 \times 10^{21}$	
2	燃焼度(GWD/T)	平均 : 40 最大 : 80	
3	照 射 時 間	2サイクルを考慮する。	
4	燃 料 温 度(°C)	1400	試験燃料の限界値と考える。
5	線 出 力	出力密度換算で 20 W/cm <sup>2</sup>	ブロック単位、標準燃料体、 但し初期に達成し、可能な限り 長期間

Table 3.1.2 照射炉用炉心の特性解析における指針・基準

	項 目	指 針 又 は 基 準	備 考
核 設 計 の 指 針 ・ 基 準			
1	燃 料 濃 縮 度	10w/o 以下。但し、天然ウラン相当以上	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1 燃料体内は同一</li> <li>・ ドライバー燃料に適用</li> </ul>
2	炭素とウランの原子数密度比 (Nc/Nu)	300 前後	Mk-III ドライバー領域には適用しない。
3	炉内燃料滞在時間	2 年以上	ドライバー燃料がMk-III 燃料及びセミピン燃料の場合について負荷率を各々50%, 60%以上とする。
4	制御棒スタック基準	通常運転状態 1対 燃料交換状態 1本	制御棒は各々独立駆動とする。
5	反応度が停止余裕	未臨界度 $0.01 \Delta k_{eff}$ 以上	制御棒の反応度補償量計算に10%程度の誤差を見込む。
6	制御棒最大反応度価値	発生しうる最大の反応度事故を想定した場合の事故結果が許容できるものであること。	ドライバー燃料がMk-III 燃料及びセミピン燃料の場合に対して各々 $0.016 \Delta k_{eff}$ , $0.022 \Delta k_{eff}$ 程度を目安値と考える。但し数値は定格運転状態での1対の値である。
7	後備停止系スタック基準	1 組	
8	後備停止系反応度補償量	燃焼分を除いた全余剰反応度	
9	可燃性毒物反応度補償	初期補償量及び燃焼にともなう炉心反応度回復量を極力小さくする。	可燃性毒物の反応度補償量計算に15%程度の誤差を見込む。

Table 3.1.2 (続)

熱設計の指針・基準			
1	限界熱流束	定格運転時に層流化現象を起さないこと。	(a) 層流化の判定式は次式による。 $q_{crit}^+ = 0.584 \times 10^{-8} R_{eb}^{1.465}$ (3500 ≤ R <sub>eb</sub> ≤ 6000) (b) 不確かさの効果を考慮すること。 (c) 本解析では限界熱流束と局所の無次元化熱流束との比が1.0以下を層流化限界の目安値とした。
2	レイノルズ数	定格運転時の最小レイノルズ数は3500以上を目標とすること。	
3	燃料温度	公称最高温度を1350℃以下とすること。	ドライバ燃料に適用する。
燃料設計の基準・指針			
1	被覆燃料粒子破損率	〔プラント状態IおよびII〕 炉内滞在期間末期において全炉心平均の破損率が0.1%以下。	(a) 製造時破損率は0.01% (b) SiC層の許容円周応力を0%とする。(機械的破損) (c) 燃料核移動距離が30μ以上に達した粒子を破損とみなす。 (アメーバ破損)
2	燃料コンパクトの応力	〔プラント状態IおよびII〕 (a) 単軸1次応力 引張    45 % (b) 2軸1次等応力 引張    35 % (c) 単軸2次応力 引張    60 % (d) 2軸2次等応力 引張    45 %	(a) 粒子充填率30%以下、厚さ6mm以上。 (b) 左の(d)が熱応力、照射応力に対応する。
3	黒鉛の応力	〔プラント状態IおよびII〕 (a) 単軸一次応力 引張    90 % 圧縮    270 % (b) 2軸一次等応力 引張    70 % (c) 単軸2次応力 引張    100 % (d) 2軸2次等応力 引張    80 %	(a) 黒鉛はSM1-24 (b) 左の(d)が熱応力、照射応力に対応する。

Table 3.1.2 (続)

遮蔽設計の指針・基準														
1	高速中性子照射量	<table border="1"> <thead> <tr> <th>材 料</th> <th>設 計 基 準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>不 銹 鋼</td> <td><math>1 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup>以下 (<math>E_n \geq 0.1</math> MeV)</td> </tr> <tr> <td>クロモリ鋼</td> <td><math>1 \times 10^{18}</math> " ( " )</td> </tr> <tr> <td>可動反射体用黒鉛 (SM 1-24)</td> <td><math>3 \times 10^{21}</math> " (<math>E_n \geq 0.2</math> MeV)</td> </tr> <tr> <td>固定反射体用黒鉛 (PGX)</td> <td><math>5 \times 10^{21}</math> " ( " )</td> </tr> <tr> <td>ボロン入り黒鉛 (天然ボロン1w/o)</td> <td><math>5 \times 10^{20}</math> " ( " )</td> </tr> </tbody> </table>	材 料	設 計 基 準	不 銹 鋼	$1 \times 10^{22}$ n/cm <sup>2</sup> 以下 ( $E_n \geq 0.1$ MeV)	クロモリ鋼	$1 \times 10^{18}$ " ( " )	可動反射体用黒鉛 (SM 1-24)	$3 \times 10^{21}$ " ( $E_n \geq 0.2$ MeV)	固定反射体用黒鉛 (PGX)	$5 \times 10^{21}$ " ( " )	ボロン入り黒鉛 (天然ボロン1w/o)	$5 \times 10^{20}$ " ( " )
		材 料	設 計 基 準											
		不 銹 鋼	$1 \times 10^{22}$ n/cm <sup>2</sup> 以下 ( $E_n \geq 0.1$ MeV)											
		クロモリ鋼	$1 \times 10^{18}$ " ( " )											
		可動反射体用黒鉛 (SM 1-24)	$3 \times 10^{21}$ " ( $E_n \geq 0.2$ MeV)											
		固定反射体用黒鉛 (PGX)	$5 \times 10^{21}$ " ( " )											
ボロン入り黒鉛 (天然ボロン1w/o)	$5 \times 10^{20}$ " ( " )													
2	放射線発熱量	<table border="1"> <thead> <tr> <th>材 料</th> <th>設 計 基 準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>黒 鉛</td> <td>200 °C 以上</td> </tr> <tr> <td>ボロン入り黒鉛</td> <td>200 °C 以上</td> </tr> <tr> <td>圧 力 容 器</td> <td>0.01 w/cm<sup>2</sup> 以下</td> </tr> </tbody> </table>	材 料	設 計 基 準	黒 鉛	200 °C 以上	ボロン入り黒鉛	200 °C 以上	圧 力 容 器	0.01 w/cm <sup>2</sup> 以下				
		材 料	設 計 基 準											
		黒 鉛	200 °C 以上											
		ボロン入り黒鉛	200 °C 以上											
圧 力 容 器	0.01 w/cm <sup>2</sup> 以下													

Table 3.1.3 参考炉心の主要諸元

項 目			MR-1 炉 心	SR-1 炉 心
1	原子炉熱出力 (公称)	MW	50	
2	冷却材温度			
	原子炉入口ノズル	°C	395	
	原子炉出口ノズル	°C	800	1000
3	領域区分			
	照射試験領域		中心7カラムの全燃料体	
	ドライバー領域		照射試験領域以外の全炉心部	
4	燃料装荷方法			
	照射試験領域			
	燃料体型式		セミピン型但し、熱流動特性の検討には、マルチホール型、中空型および円環型も考慮する。	
	燃料濃縮度 (炉心上部から)			
	標準燃料体	w/o	4, 4, 4, 18, 2, 2, 2,	4, 4, 4, 20, 2, 2, 2,
	制御型燃料体	w/o	4, 4, 4, 12, 2, 2, 2,	4, 4, 4, 12, 2, 2, 2,
	ドライバー領域			
	燃料体型式		Mk-III型	セミピン型
	燃料濃縮度 (炉心上部から) w/o		5.5, 4.4, 3.3, 3.3, 2.2, 2.2, 2.2	6.6, 4, 3, 3, 3, 3
5	可燃性毒物			
	型 式		中実細棒を標準燃料体ブロックに封入	
	材 質		B <sub>4</sub> C 粒子と黒鉛粉末の混合焼結体	
	外 径	mm	8	
	スタック長さ	mm	500	
	照射試験領域			
	B <sub>4</sub> C 粒子径		完全粉末	
	B <sub>4</sub> C 密度	g/cm <sup>3</sup>	2.38	
	マトリックス密度	g/cm <sup>3</sup>	1.75	
	装荷本数 (炉心上部から)	本	2, 2, 2, 3, 1, 1, 1	3, 3, 3, 4, 2, 2, 2,
	ホウ素濃度	w/o	2.0	
	ドライバー領域			
	B <sub>4</sub> C 粒子径	μm	400	完全粉末
	B <sub>4</sub> C 密度	g/cm <sup>3</sup>	2.38	
	マトリックス密度	g/cm <sup>3</sup>	1.65	1.75
	装荷本数 (炉心上部から)	本	3, 3, 2, 2, 1, 1, 1	3, 3, 2, 1, 1, 1, 1
	ホウ素濃度	w/o	3.0	1.5

Table 3.1.4 照射炉用参考炉心の特性値

項 目		目 標 値 指 針・基 準 値 目 安 値	MR-1 炉心	SR-1 炉心	備 考		
照射 目 標 準	最大ブロック平均出力密度 (W/cm <sup>2</sup> )	20	19.9	14.1	初期炉心		
	高速中性子照射量 (X10 <sup>21</sup> nvt)	8	3.8	3.0			
	燃 燒 度 最 大 (GWD/T)	80	104	82			
	平 均 (GWD/T)	40	37	28			
前提 条件	全 炉 心 熱 出 力 (MW)	50	50	50	Mk-III 炉心 を目安値とし た。		
	原子炉出口冷却材温度 (°C)	1000	800	1000			
核 特 性	制御棒最大反応度係値 ( $\Delta k_{eff}$ )	MR-1: 0.016 SR-1: 0.022	0.014	0.005	Hot-Clean 状態		
	炉内燃料滞在期間 (日)	2年以上	1035	1150			
	反応度炉停止余裕 ( $\Delta k_{eff}$ )	未臨界度 0.01 (スタック 基準状態)	0.026	0.039	Cold-Clean 状態中心制御 棒一対10%計 算誤差		
熱 流 動 特 性	燃 料 最 高 温 度 (°C)	試験燃料: 1400以下 ドライバ燃料: 1350以下	照射試験 領域	ドライバ 領域	照射試験 領域	ドライバ 領域	初期炉心状態 が最も厳しい  Mk-III 炉心 での値を目安 値とした。
	最小レイノルズ数	3500以上	1400	1265	1400	1347	
	最小限界熱流束比	1.5以上	14851	4384	8607	7661	
	炉心部最大圧力損失 (kg/cm <sup>2</sup> )	0.6	—	1.953	—	—	
			0.6	1.28	0.90	0.40	
燃 料 特 性	最 大 核 移 動 距 離 ( $\mu$ m)	30	123.9	16.3	99.3	9.6	核移動距離30 $\mu$ 以上をアメー バ破損とし、全 炉心における破 損率を示した。 Mk-III 炉心の 値を目安値と した。 すべて最大応力 である軸方向応 力について示した
	ア メ ー バ 破 損 率 (%)	0.1	1.5	—	—	0.7	
	1200°C 以上燃料温度体積割合 (%)	5.0	2.4	—	—	2.1.2	
	燃料体の応力 初 期 (kg/cm <sup>2</sup> )	45 以下	74	—	—	50	
	照 射 中 (kg/cm <sup>2</sup> )	45 以下	33	—	—	25	
炉停止時 (kg/cm <sup>2</sup> )	45 以下	70	—	—	50		
遮 蔽 特 性	圧 力 容 器						径方向の値を 示した。
	最大高速中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> )	1 × 10 <sup>18</sup> 以下	3.59 × 10 <sup>16</sup>		3.49 × 10 <sup>16</sup>		
	最大放射線発熱量 (mW/cm <sup>2</sup> )	10 以下	9.05 × 10 <sup>-1</sup>		7.79 × 10 <sup>-1</sup>		
運 転 特 性	1 次 系 循 環 機 流 量 (ton/hr)	2866	4281		2866		Mk-III 炉心 を基準値とし た。
	昇 圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	1.35	3.27		1.39		
	IHX 2 次ヘリウム出口温度 (°C)	930 以下	732.9		929.5		
	二 重 管 差 圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	4 以下	2.55		1.13		
	二 重 管 外 管 内 流 速 (m/s)	30 以下	23.7		23.7		

(注) 但し、試験燃料体はセミピンで、流量調節ケース (Table 3.4.3, 3.4.8 参照) は MR-1 炉心では A, SR-1 炉心では G とした



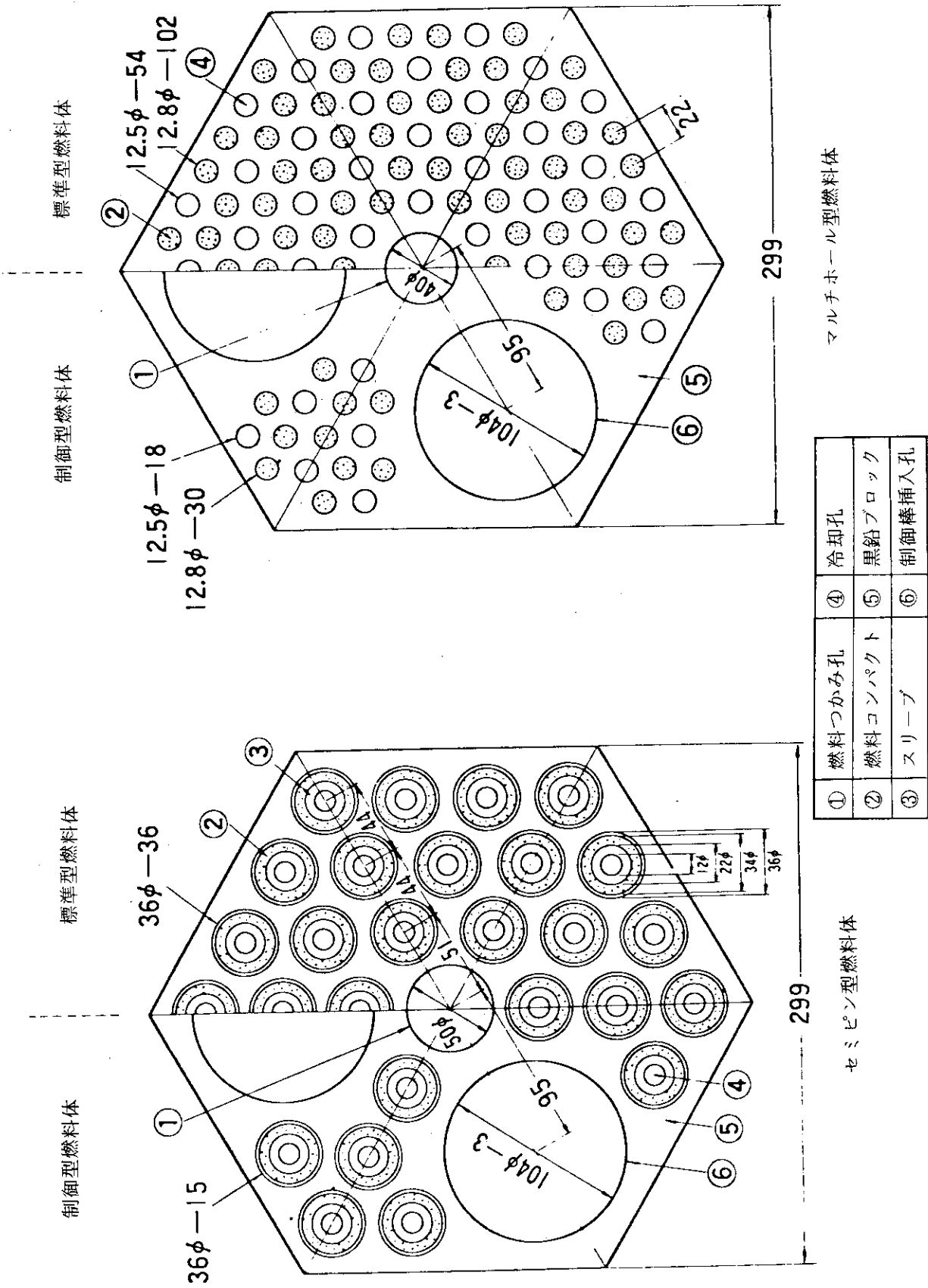


Fig. 3.1.1 セミピン型およびマルチホール型燃料体

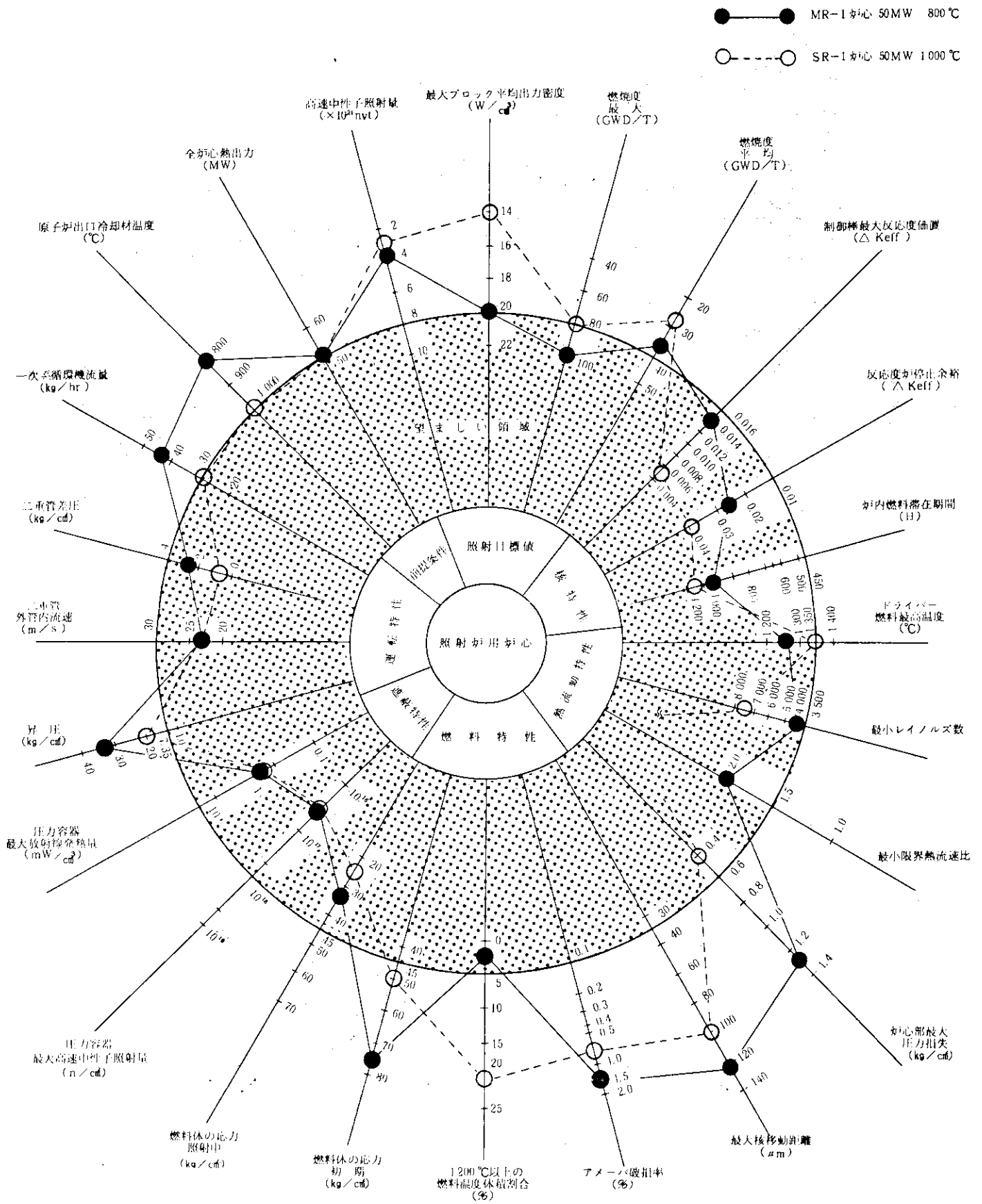


Fig. 3.1.2 照射目標値および主要特性値

### 3.2 炉心の概念構成のための検討

#### 3.2.1 考え方と手順、条件等

##### (1) 考え方と手順

まず試験燃料の装荷法、制御棒操作法、原子炉熱出力及び原子炉出口冷却材温度を種々変化させて炉心の核・熱流動特性を解析し、照射炉用炉心の概念を把握するとともに、照射目標および設計指針・基準の両観点から照射炉用炉心の実現可能性を検討し、詳細特性解析の対象とする参考炉心を選定するものとした。

解析では照射目標に関連しては試験燃料の線出力、燃焼度および高速中性子照射量を、設計上の指針・基準に関連しては炉停止余裕、炉内燃料滞在時間、燃料最高温度、最小レイノルズ数および最小限界熱流束比に着目した。検討の手順をFig.3.2.1に示す。

最初に、予備検討として試験燃料の濃縮度配分および可燃性毒物装荷法と初期余剰反応度及びブロック最大出力密度との相関や制御棒挿入法とブロック最大出力密度および熱流動特性との相関を調べた。

次いで、この予備検討結果に基づいて照射炉用炉心の基本構成を定め、熱出力と出口冷却材温度条件の異なる複数炉心を想定し、初期定格運転状態における熱流動特性及び燃焼特性を解析し、代表炉心としての参考炉心を選定した。

##### (2) 前提条件

検討を行なうに際していくつかの前提条件を設定したが、まず核設計に関するものは次の通り。

- (i) ドライバー燃料体として Mk-III 型及びセミピン型を考える。但し、必要な場合には燃料濃縮度の変更についても検討を行なう。
- (ii) 試験燃料体としてはセミピン型のみを考える。但し、照射試験領域の燃料濃縮度レベルとその配分および可燃性毒物の装荷法については検討を行なう。
- (iii) 燃焼期間としてはドライバー燃料に対して2燃焼サイクルを想定する。
- (iv) 原子炉熱出力は50MWとする。
- (v) 試験燃料に対して次の制約をおく。
  - 燃料濃縮度は20w/o以下とする。
  - 燃料の装荷は1燃料体単位とする。
  - 可燃性毒物は外径8mmの均質棒状とし、標準燃料体にのみ装荷する。装荷量は本数で調整する。
- (vi) 制御棒操作に対しても次の制約をおく。
  - 制御棒は全て60度対称で駆動する。
  - 制御棒は全て対単位で操作する。
  - 定格運転時では中心および第1リング制御棒のみ操作する。

一方、熱・流動設計に対するものは次の通りである。

- (i) 全炉心冷却材流量の90%が燃料チャンネルへ、残りは制御棒や反射体部へ流れるものとする。又、全熱出力のうち95%が燃料チャンネルで発熱するものとする。

- (ii) 熱・流動特性解析は代表的な6チャンネル(最高温度チャンネル, Table 3.2.1)を対象とし、棒内一様発熱、径方向1次元熱伝達モデルによった(Table 3.2.2)。燃料チャンネルモデルはTable 3.2.3, 3.2.4に示した。なお、チャンネル外側境界では断熱を仮定した。又、マルチホール型燃料の場合は冷却孔数と燃料チャンネル本数との割合で燃料チャンネルの発熱量を調整した。
- (iii) 出力分布の検討に関しては領域ピーキング係数( $P_1$ )とチャンネルピーキング係数( $P_2$ )を定義する。前者は各流量調節領域の平均チャンネル間の出力比、後者は各領域内のチャンネル間の出力比である(但し、出力密度で定義した $P_1$ 相当の値は $P_0$ として区別)。なお、チャンネルピーキング係数のうち各領域最高のものをポイントピーキング係数とし、そのチャンネルを最高温度チャンネルとした。
- (iv) 流量調節方式としては次の6種類を対象とした。
- 方式1; 各流量調節領域の冷却材出口平均温度を等しくする。
- 〃 2; 各流量調節領域の燃料最高温度(ノミナル)を等しくする。
  - 〃 3; 照射試験領域の冷却材出口温度を指定、ドライバー領域の流量調節領域毎冷却材出口温度を等しくする。
  - 〃 4; 照射試験領域の冷却材出口温度を指定、ドライバー領域の流量調節領域毎燃料最高温度(ノミナル)を等しくする。
  - 〃 5; 照射試験領域の燃料最高温度(ノミナル)を指定、ドライバー領域の流量調節領域毎冷却材出口温度を等しくする。
  - 〃 6; 照射試験領域の燃料最高温度(ノミナル)を指定、ドライバー領域の流量調節領域毎燃料最高温度(ノミナル)を等しくする。

### 3.2.2 予備的検討

#### (1) 濃縮度配分

まず、試験燃料への可燃性毒物装荷および炉心への制御棒挿入を考えない条件で、試験燃料の濃縮度配分の初期余剰反応度およびブロック最大出力密度への影響を検討した。解析はCITATION-MACROコードにより、2次元R-Z4群モデルで行なった。

余剰反応度に関する解析結果をFig. 3.2.2, 3.2.3に示す。なお、標準は照射試験領域にもドライバー燃料と同燃料を装荷した炉心においた。これらの結果から次のことがわかる。

- (i) 平均濃縮度と余剰反応度の増加量とはほぼ比例関係にある。
- (ii) 高い濃縮度の燃料が炉心上方に装荷されるほど、余剰反応度の増加量も著しくなる。
- (iii) Mk-Ⅲ型燃料ドライバー炉心の方がセミピン型燃料ドライバー炉心よりも余剰反応度の増加量が多い。

次に試験燃料について、平均濃縮度に対する最高濃縮度の比とブロック最大出力密度との関係をFig. 3.2.4, 3.2.5に示した。

この結果から次のことがわかる。

- (i) 最大ブロック出力密度に最も強い影響を及ぼすのは最高濃縮度の値とその燃料体装荷位置であり、最高濃縮度が高いほど最大ブロック出力密度が高くなる。又、最高濃縮度燃料

が炉心上方に装荷されるほど、最大ブロック出力密度が高くなる。

- (ii) 平均濃縮度に対する最高濃縮度の比が大きいほど、ブロック最大出力密度が高くなる。
- (iii) 最高濃縮度燃料を軸方向に連続2段装荷しても最大ブロック出力密度は余り変わらない。
- (vi) Mk-III型燃料ドライバー炉心の方がセミピン型燃料ドライバー炉心よりも高い最大ブロック出力密度を得やすい。

## (2) 可燃性毒物装荷法

次いで、可燃性毒物の装荷量と反応度補償量及び最大ブロック出力密度との関係を検討した。(1)の検討で最も高い最大ブロック出力密度を達成する濃縮度配分をとり、可燃性毒物を最高濃縮度の標準燃料体にもみ装荷する場合、最高濃縮度の標準燃料体以外の標準燃料体に装荷する場合、および全標準燃料体に装荷する場合を対象とした。又、可燃性毒物の天然ポロン濃度は1.5w/oと2.0w/oの2種を考えた。

まず、可燃性毒物の装荷本数と反応度補償量との関係をFig. 3.2.6, 3.2.7に示す。これより、反応度補償の観点からは最高濃縮度の標準燃料体に装荷するのが有効であること、および極端に多量の可燃性毒物を装荷しない限り補償できる反応度は高々0.02 $\Delta$ Keffであること、等がわかる。

一方、可燃性毒物の装荷本数とブロック最大出力密度の変化との関係をFig. 3.2.8, 3.2.9に示す。この結果より、最高濃縮度以外の標準燃料体に可燃性毒物を装荷することによる最大ブロック出力密度の上昇よりも最高濃縮度の標準燃料体に装荷することによる最大ブロック出力密度の低下の方が大きいことや全標準燃料体に可燃性毒物を装荷すると最大ブロック出力密度は1~1.5 w/cm<sup>2</sup>程度低下すること、等がわかった。

## (3) 制御棒操作法

炉心内に制御棒を挿入するときの出力分布歪を利用することにより高い最大ブロック出力密度を達成することが可能になると考えられる。そこで、最高濃縮度燃料の位置も配慮して、Fig. 3.2.10に示す典型的な制御棒挿入パターンを対象に、初期定格時での最大ブロック出力密度ならびに熱・流動特性を検討した。

各パターン毎の核特性の概要をTable 3.2.5, 3.2.6に示す。最大ブロック出力密度に関しては次のことがわかった。

- (i) パターンAでは目標値20 w/cm<sup>2</sup>の達成は困難である。又、中心制御棒を挿入しないのも運転上問題になる恐れがある。
- (ii) Mk-III型燃料ドライバー炉心ではパターンB及びCで目標値20 w/cm<sup>2</sup>を達成できる。
- (iii) セミピン型燃料ドライバー炉心では目標値20 w/cm<sup>2</sup>の達成は困難である。
- (iv) パターンCでは中心制御棒を3段目途中まで挿入するのが良く、さらに第1リング制御棒も中心制御棒より深くならない範囲で深く挿入した方が良い。

以上より、Mk-III型燃料ドライバー炉心では最大ブロック密度20 w/cm<sup>2</sup>の達成は可能と考えられるが、セミピン型燃料ドライバー炉心ではせいぜい17 w/cm<sup>2</sup>程度までしか見込めないため、20 w/cm<sup>2</sup>を達成する上からは照射領域をさらに極端な燃料装荷法にするか又はドライバー燃料装荷法の変更が必要になる。

一方、熱・流動特性の解析結果をTable 3.2.7, 3.2.8に示す。これらの結果から次のこ

とがわかる。

- (i) 照射試験領域では最高濃縮度のブロックでのみ温度が高くなり、その燃料最高温度を抑えるために必要な流量は非常に大きくなる。
  - (ii) 最大ブロック出力密度は熱・流動特性に非常に大きい影響を及ぼし、原子炉出口冷却材温度の決定因子になる。
  - (iii) 照射試験領域の制御燃料体の濃縮度を高くすると線出力が大きくなり、そこが燃料最高温度の点から厳しいものになるので制御燃料体の濃縮度は下げる方が望ましい。
  - (iv) Mk-III型燃料ドライバー炉心の場合、照射試験領域及び第2オリフィス領域の出力が大きくなりすぎると、第3、4オリフィス領域の最小レイノルズ数及び最小限界熱流束比が問題になる。
  - (v) 試験燃料体としては円環型燃料が原子炉冷却材出口温度を最も高くする炉心構築ができ、ついでマルチホール型、セミピン型そして中空型の順になる。なお、Mk-III型燃料ドライバー炉心では最大ブロック出力密度  $20 \text{ w/cm}^2$  を達成するためには原子炉冷却材出口温度を  $900^\circ\text{C}$  以上にすることは困難である。
- (4) セミピン型ドライバー燃料の濃縮度変更

セミピン型燃料ドライバー炉心ではドライバー領域に対して初期に設定した燃料装荷法では最大ブロック出力密度  $20 \text{ w/cm}^2$  の達成は困難と考えられる。そこで、ドライバー燃料の濃縮度を低めることによる目標達成の可能性について検討した。検討ケースを Table 3.2.9 に示す。なお、可燃性毒物棒の天然ボロン濃度として  $1.5 \text{ w/g}$  と  $1.0 \text{ w/g}$  の2種類を考えた。

まず、制御棒未挿入時におけるドライバー燃料の平均濃縮度と余剰反応度の関係を Fig. 3.2.11 に示す。図は炉心全体に初期設定セミピン型燃料を装荷した場合を基準にしている。ドライバー燃料の濃縮度を下げると初期余剰反応度が減じ、炉内滞在時間が短くなることがわかるが、Fig. 3.2.12 に示すように逆に最大ブロック出力密度は大きく上昇する。さらに、ドライバー燃料体に装荷される可燃性毒物の濃度を高くすることによっても最大ブロック出力密度は上昇することがわかる。

一方、制御棒挿入時に対する検討結果を Table 3.2.10 に示す。ドライバー燃料の濃縮度を下げると、照射試験領域の燃料装荷法によっても、又制御棒の挿入形状によっても最大ブロック出力密度を大巾に上昇させる。Table 3.2.11 には熱流動特性を示すが、原子炉出口冷却材温度が  $800^\circ\text{C}$  程度であれば、十分な設計上の余裕をもって最大出力密度  $20 \text{ w/cm}^2$  以上が達成できることがわかる。

#### (5) 照射炉用炉心の基本構成

以上の検討から照射炉用炉心の基本構成に関して、以下のような方針をとった。

- (i) 最大ブロック出力密度及び熱・流動特性の両観点から、初期定格時の制御棒挿入パターンとしてパターンCをとる。
- (ii) 試験燃料としては軸方向1ブロックに特に高濃縮度燃料を装荷する。
- (iii) 出力密度が最大となる段の制御用試験燃料体には、標準燃料体より低い濃縮度の燃料を装荷する。
- (iv) 可燃性毒物は全標準燃料体に装荷するが、出力分布に対しては微調整程度の役割をもた

せる。

### 3.2.3 初期炉心状態特性

数種の初期炉心状態を対象に最大ブロック出力密度と原子炉冷却材温度および熱出力の関連について検討を行なった。照射試験領域の燃料装荷法としては最高濃縮度燃料の濃縮度を変えて最大ブロック出力密度を変化させるものとした。なお、最高濃縮度燃料の濃縮度を低くすると最大ブロック出力密度は小さくなるが、制御棒挿入や可燃性毒物装荷の影響もあり、その変化は一様ではない。

#### (1) Mk-Ⅲ型燃料ドライバー炉心

初期状態での核特性の概要を Table 3.2.12に、熱流動特性の概要を Table 3.2.13に各々示した。さらに、Fig. 3.2.13に最大ブロック出力密度と限界原子炉出口冷却材温度との関係を示した。これらの結果から、最大ブロック出力密度と可能な原子炉出口冷却材温度は反比例の関係にあることや最大ブロック出力密度  $20\text{w}/\text{cm}^2$  以上にするためには原子炉出口冷却材温度を  $800^\circ\text{C}$  程度まで下げねばならないことなどがわかる。Fig. 3.2.14に最大ブロック出力密度と熱・流動特性との関係を示した。Mk-Ⅲ型燃料をドライバーに使用する炉心では照射機能を持しつつ原子炉出口冷却材温度  $1000^\circ\text{C}$  の達成は難しいといえよう。

#### (2) セミピン型燃料ドライバー炉心

初期状態での核特性の概要を Table 3.2.14に、熱・流動特性の概要を Table 3.2.15に示した。又、Fig. 3.2.15には最大ブロック出力密度と限界原子炉出口冷却材温度との関係を示した。初期設定の燃料をドライバー燃料として用いると（図中SISシリーズ）、最大ブロック出力密度は  $15\text{w}/\text{cm}^2$  程度であるが、原子炉出口冷却材温度  $1000^\circ\text{C}$  達成の可能性はある。又、ドライバー燃料の濃縮度を変えると（図中SDCシリーズ）、 $20\text{w}/\text{cm}^2$  で  $900^\circ\text{C}$  以上の炉心の実現が可能である。これらのことから、Mk-Ⅲ型燃料ドライバー炉心より熱・流動的には有利な設計が可能といえよう。そして、Fig. 3.2.16からもわかるように、最大ブロック出力密度が  $14\text{w}/\text{cm}^2$  程度であれば原子炉出口冷却材温度  $1000^\circ\text{C}$  の炉心の実現が見込めることがわかる。

### 3.2.4 燃焼炉心状態特性

前節の結果に基づき、数種の照射炉用炉心を想定し、その燃焼特性を検討した。検討は炉内燃料滞在時間及び燃料燃焼度ならびに高速中性子照射量に着目して進めた。なお、照射期間としてはドライバー燃料の2燃焼サイクルを仮定した。

Mk-Ⅲ型及びセミピン型燃料ドライバー炉心の燃焼特性の概要をそれぞれ Table 3.2.16, 3.2.17に示す。

まず、Mk-Ⅲ型燃料ドライバー炉心については次のことが結論される。

- (i) まず当然のことながら、照射試験領域の平均濃縮度が高いほど炉内燃料滞在時間は長くなること、平均濃縮度の等しい場合には最高濃縮度燃料を炉心中央に装荷した方が炉内燃料滞在時間が長くなること、試験燃料の平均燃焼度はほぼ平均濃縮度に依存するが、最大燃焼度は最高濃縮度燃料の装荷位置にも強く依存すること、等がわかる。

- (ii) 炉中央に最高濃縮度燃料を装荷する場合の最大燃焼度は目標の80 GWD/Tを十分達成できよう。
- (iii) 又、最大高速中性子照射量の目標  $8 \times 10^{21}$  nvt の達成は困難といえる。
- 一方、セミピン型燃料ドライバー炉心についても次のことがわかる。
- (i) まず、試験燃料を装荷することにより平均濃縮度が高くなり、炉内燃料滞在時間が長くなることや最大ブロック出力密度を高めるためにドライバー燃料の濃縮度を低めると炉内燃料滞在時間が非常に短くなり、基準を満足しなくなる可能性が生ずる。
- (ii) 又、試験燃料の最大燃焼度は45~50GWD/T程度であり、目標の達成は困難と思われる。
- (iii) さらに、高速中性子照射量も Mk-III型燃料ドライバー炉心と同様、その目標達成は困難である。

次に、Xe & Sm 蓄積時の制御棒操作例と核特性の概要を Table 3.2.18に示す。表中 MXS-3T 及び MXS-6Tは初期炉心 MIS-5T の Xe & Sm蓄積時の臨界調整例である。これらの結果から次のことがわかる。

- (i) 初期状態 (Hot-clean) で  $19.9 \text{ w/cm}^2$  であった最大ブロック出力密度は制御棒の引抜きにより  $17 \sim 18 \text{ w/cm}^2$  まで低下する。
- (ii) 中心制御棒を相対的に浅く、第1リング制御棒を相対的に深く挿入することによって最大ブロック出力密度を高めることが期待できる。
- (iii) なお、Xe & Sm 蓄積時で高い最大ブロック出力密度を達成する可能性を見出すことはやはり困難であると思われる。

### 3.2.5 炉心概念検討のまとめ

まず予備検討において、濃縮度配分、可燃性毒物の装荷法、制御棒パターン、ドライバー燃料の濃縮度の効果等を検討し、基本構成を決定した後 Mk-III型燃料ドライバーおよびセミピン型燃料ドライバー炉心における初期炉心状態のサーベイを行い、さらに燃焼炉心状態の核特性についても検討を行ってきた。その結果、炉心熱出力50MW、60MW、および原子炉出口冷却材温度800°C、900°C、1000°C、それぞれに対して、最も妥当と思われる初期出力分布を設定する必要があることがわかった。Table 3.2.19には、炉心熱出力、原子炉出口冷却材温度に対応した、核・熱流動特性のまとめを示した。Table 3.2.20には、Mk-III型燃料ドライバー炉心において、50MW、60MW に対して、それぞれ800°C、900°C炉心とした場合、Table 3.2.21には、セミピン型燃料ドライバー炉心において、50MW、60MW に対して、それぞれ800°C、900°C、1000°Cとした炉心の場合についての、熱流動特性を示した。

さらにFig. 3.2.17には、Mk-III型燃料ドライバー炉心での、照射目標値、前提条件と、核特性、熱流動特性の関係を、またFig. 3.2.18には、セミピン型燃料ドライバー炉心における場合を示した。これらの図からも明らかな様に、照射目標値では、高速中性子照射量がかなり低い値となること、また最大ブロック出力密度は、前提条件である原子炉出口冷却材温度を低くする事により、照射目標値である  $20 \text{ w/cm}^2$  を達成でき、熱流動的にも十分満足出来る炉心を構築することが、可能であることがわかる。

さらに詳細な核・熱流動特性、燃料特性、遮蔽特性等について検討する為に、



- (i) 炉心熱出力は、これまでの経緯および運転法に対する影響を考慮して、50 MWとする、
- (ii) 最大ブロック出力密度は、目標値である 20 w/cm<sup>2</sup>に、出来るだけ近いこと、
- (iii) 試験燃料体の、最高および平均燃焼度、さらに高速中性子照射量は、出来るだけ大きい値が得られること、
- (iv) 炉内燃料滞在時間は、核設計指針・基準を満足すること、
- (v) 炉停止余裕の観点から、初期余剰反応度はあまり大きくならないこと、

等の点に留意し、さらに Mk-III 型燃料ドライバー炉心では最大ブロック出力密度 20 w/cm<sup>2</sup>を得やすいこと、またセミピン型燃料ドライバー炉心では、原子炉出口冷却材温度を高温にしやすいこと、を考慮して炉心選定を行ない、Mk-III 型燃料ドライバー炉心として MIS-5T (50 MW, 800 °C)、セミピン型燃料ドライバー炉心として SIS-6T (50 MW, 1000 °C) を、各々参考炉心 MR-1 炉心、SR-1 炉心とした。

Table 3.2.1 熱・流動解析対象チャンネル

解析対象 チャンネルNo.	領域種類	領域No.	カラムの 種類	チャンネル の記号	全炉心中の燃料チャンネル本数	
1	照射試験領域	I	標準	1-S	セミピン	216
					マルチホール	612
					中空	108
					円環	108
2		制御型	1-C	セミピン	15	
				マルチホール	30	
				中空	3	
				円環	3	
3	ドライバー 領域	II	標準	2-S	Mk-III	432
					セミピン	1296
制御型			2-C	Mk-III	18	
				セミピン	90	
4		III	標準	3-S	Mk-III	216
					セミピン	648
5		IV	標準	4-S	Mk-III	72
					セミピン	216
6						

Table 3.2.2 炉心熱流動解析条件

原子炉入口 冷却材温度 (°C)	炉心入口 冷却材温度 (°C)	炉心入口 冷却材压力 (kg/cm <sup>2</sup> )	全炉出力 (MW)	热出力割合 (MW)		原子炉出口 冷却材温度 (°C)	全炉心 冷却材流量 (kg/S)	炉心流量配分 (kg/S)		炉心出口 冷却材 平均温度 (°C)
			50	燃料チャンネル	47.5	800	23.78	燃料チャンネル	21.41	827
				その他				その他	2.37	
395	400	40	60	燃料チャンネル	57.0	900	22.89	燃料チャンネル	17.17	933
				その他				その他	1.90	
			50	燃料チャンネル	2.5	1000	15.92	燃料チャンネル	14.33	1038
				その他				その他	1.59	
			60	燃料チャンネル	3.0	800	28.54	燃料チャンネル	25.69	827
				その他				その他	2.85	
			60	燃料チャンネル	3.0	900	19.11	燃料チャンネル	20.60	933
				その他				その他	2.29	
			60	燃料チャンネル	3.0	1000	19.11	燃料チャンネル	17.20	1038
				その他				その他	1.91	



Table 3.2.4 ドライバー燃料体の解析モデル

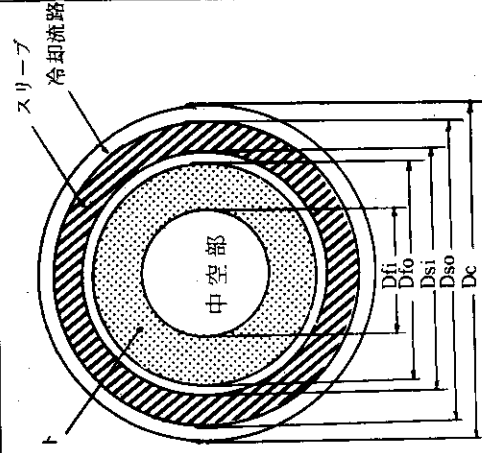
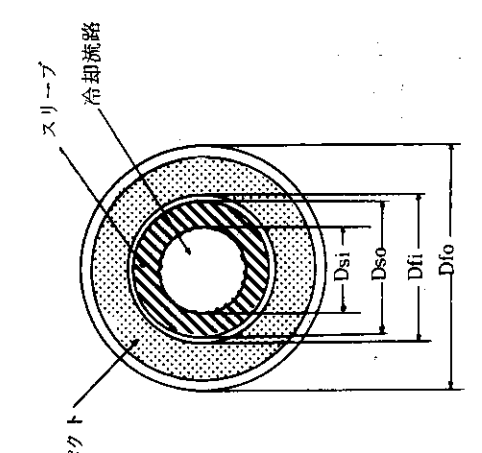
燃料体	Mk-III ドライバ燃料	セミドライバ燃料
寸法	 <p>冷却孔径 <math>D_c = 50.0</math> mm スリーブ外径 <math>D_{so} = 46.0</math> mm スリーブ内径 <math>D_{si} = 36.3</math> mm コンパクト外径 <math>D_{fo} = 36.0</math> mm コンパクト内径 <math>D_{fi} = 18.0</math> mm</p>	 <p>コンパクト外径 <math>D_{fo} = 34.0</math> mm コンパクト内径 <math>D_{fi} = 22.0</math> mm スリーブ外径 <math>D_{so} = 21.7</math> mm スリーブ内径 <math>D_{si} = 12.0</math> mm</p>
被覆燃料粒子率	30 %	20 %
加熱および摩擦長さ	529 mm × 7 段	520 mm × 7 段
カラム当りのチャネル標準/制御型	12 / 3	36 / 15
各領域のチャネル本数標準/制御型	領域 II 432 / 18 領域 III 216 領域 IV 72	領域 II 1296 / 90 領域 III 648 領域 IV 216

Table 3.2.5 制御棒の効果 (MK-IIIドライバ-炉心)

項目	試験燃料濃縮度 (w/o) (注) および可燃性毒物装荷量							可燃性毒物 濃度 (w/o)	制御棒挿入度 (ブロック単位)		制御棒 パターン 分類	実効増倍率	最大ブロック平均出力密度 (w/cm <sup>2</sup> )		照射試験領域 リージョン ピーキング (P <sub>0</sub> )	第2オリフィス 領域ポイント ピーキング (P <sub>2</sub> )
	1	2	3	4	5	6	7		中心	第1 リージョン			炉心出力50MW	炉心出力60MW		
MPC-3T	20	4	3	3	2	2	2	—	0	2	A	1.0066	11.42	13.70	2.02	1.30
MPC-4T	20	4	3	3	2	2	2	—	0	3	A	0.9687	16.92	20.30	2.33	1.42
MPC-9T	4	4	20	2	2	2	2	—	1	2	B	1.0363	22.13	26.56	2.36	1.28
MPC-10T	4	4	20	2	2	2	2	—	1	3	B	0.9809	19.49	23.39	2.34	1.36
MPC-21T	4	4	20	2	2	2	2	—	2	3	B	0.9722	16.97	20.36	2.11	1.27
MPC-33T	4	4	4	20	2	2	2	—	3	2	C	1.0343	23.23	27.88	2.34	1.17
MPC-34T	4**	4**	4**	4**	20****	3*	3*	1.5	3	2	C	1.0280	20.95	25.14	2.39	1.15
MPC-36T	4**	4**	4**	4**	15****	3*	3*	1.5	3	2	C	1.0175	17.44	20.93	2.20	1.14
MPC-37T	4**	4**	4**	4**	20****	3*	3*	1.5	3	2	C	1.0268	20.99	25.19	2.37	1.15
MPC-38T	4**	4**	4**	4**	15****	3*	3*	1.5	3	2	C	1.0163	17.46	20.95	2.17	1.14
ドライバ-	ドライバ-燃料濃縮度 (w/o) (注) および可燃性毒物装荷量							可燃性毒物 濃度 (w/o)								
燃料体型式	1	2	3	4	5	6	7									
Mk-III	5.5****	4.4****	3.3***	3.3***	2.2*	2.2*	2.2*	3.0								

(注) 1. ( )内の数値は制御棒燃料体の濃縮度を示す。( )内示されていない場合は標準燃料体と同一である。  
 2. \*印1個が可燃性毒物1本を示す。  
 3. 1~7は炉心上部からのブロック数を示す。

Table 3.2.6 制御棒の効果 (セミピン ドライバー炉心)

項目 解名称	試験燃料濃縮度 (w/o) (注) および可燃性毒物装荷量							可燃性毒物 濃度 (w/o)	制御棒挿入度 (ブロック単位)		制御棒 パターン 分類	実効増倍率	最大ブロック平均出力密度 (w/cm <sup>2</sup> )		照射試験領域 リージョン ピーキング (Po)	第2オリフィス 領域ピーキング ピーキング (P <sub>2</sub> )	
	1	2	3	4	5	6	7		中心	第1 リング			が心出力 50 MW	が心出力 60 MW			
SPC-10T	4	4	20	2	2	2	2	—	1	2	B	1.0326	14.19	17.03	1.62	1.27	
SPC-11T	4	4	20	2	2	2	2	—	1	3	B	0.9946	10.71	12.85	1.46	1.28	
SPC-13T	4	4	4	20	2	2	2	—	2 $\frac{2}{3}$	2 $\frac{1}{3}$	C	1.0270	16.78	20.14	1.73	1.20	
SPC-12T	4	4	4	20	2	2	2	—	2 $\frac{2}{3}$	2 $\frac{2}{3}$	C	1.0184	16.96	20.35	1.75	1.22	
ドライバー 燃料体型式	ドライバー燃料濃縮度 (w/o) (注) および可燃性毒物装荷量							可燃性毒物 濃度 (w/o)	注1. ( )内の数値は制御型燃料体の濃縮度を示す。( )で示されていない場合は標準燃料体と同一である。 2. *印1個が可燃性毒物棒1本を示す。 3. 1~7はが心上部からのブロック数を示す。								
セミピン	6***	2	3	4	5	6	7	1.5	6***	4**	3*	3*	3*	3*	3*	3*	

Table 3.2.7 予備検討におけるMk-IIIドライバークル心の熱流動特性(その1)

解析名称	照射試験領域 最大線出力 (cal/s·cm)	ドライバークル に必要な流量 (kg/s)	照射試験領域 1400°C制限上 必要なチャンネ ル流量 (g/s)	限界 原子炉出口 冷却材温度 (°C)	各チャンネルの熱流動特性値						熱流動特性からの検討	
					出口温度	チャンネ 名称	ピーキン グ係数	燃料最高 温度(°C)	最 小 Re 数	最小限界 熱流速比		
MPC -3T	/	/	16.88	/	/	50 (MW)	1 S	1.043	1165	36631	/	最大ブロック平均出力密度 (11.42 W/cc)が小 さすぎる。
						1 C	0.810	1400	35264	/		
						2 S	1.301	1180	6663	4.498		
						2 C	0.914	1013	7340	4.692		
/	/	/	/	/	800 (°C)	3 S	1.102	1029	5778	3.740	傾城IIにおけるポイントピー キング(1418)が大きい為 60MW-800°C炉心とすると 傾城III, IVへの流量が少く なり, 熱設計基準・指針を 満足しなくなる。	
					4 S	0.863	971	5352	3.542			
					1 S	1.055	1172	73651	/			
					1 C	0.937	1400	71241	/			
MPC -4T	129.9	/	30.51	/	50 (MW)	2 S	1.418	1252	5026	2.036	照射試験領域の最大線出 力が大きい為, 試験燃料 最高温度1400°C制限で は, ドライバークル領域への 流量が少くなる。	
					2 C	0.814	958	5929	3.336			
					3 S	0.920	1044	4575	2.401			
					4 S	0.832	997	4207	2.100			
/	/	/	/	/	800 (°C)	1 S	1.003	1212	121984	/		
					1 C	0.947	1400	119563	/			
					2 S	1.282	1488	3536	1.143			
					2 C	0.957	1262	3918	1.227			
MPC -9T	157.0	/	46.53	/	50 (MW)	3 S	0.888	1306	2965	0.985	傾城IIのポイントピーキン グが大きく傾城III, IVへの 流量が少くなるので, 熱設 計基準・指針を満足しなく なる。	
					4 S	0.806	1225	2764	1.002			
					1 S	1.030	1202	107081	/			
					1 C	0.942	1400	104763	/			
/	/	/	/	/	800 (°C)	2 S	1.355	1423	3919	1.509		
					2 C	0.861	1108	4554	1.679			
					3 S	0.912	1182	3490	1.390			
					4 S	0.826	1122	3232	1.353			
MPC -10T	149.4	12.895	41.70	780	50 (MW)	1 S	1.003	1196	85686	/	50MW-800°C炉心では, 熱設計基準・指針を満足す るが, 60MW (最大ブロック 平均出力密度20.35w/cc)と すると, 満足しなくなる。	
					1 C	0.846	1400	84330	/			
					2 S	1.272	1314	4774	1.908			
					2 C	0.879	1081	5351	2.151			
/	/	/	/	/	800 (°C)	3 S	0.955	1118	4268	1.878		
					4 S	0.871	1062	3963	1.850			
					1 S	1.003	1196	85686	/			
					1 C	0.846	1400	84330	/			
MPC -21T	127.6	/	33.80	/	50 (MW)	2 S	1.121	1081	5351	2.151	傾城IIのポイントピーキン グが大きく傾城III, IVへの 流量が少くなるので, 熱設 計基準・指針を満足しなく なる。	
					3 S	0.955	1118	4268	1.878			
					4 S	0.871	1062	3963	1.850			
					1 S	1.003	1196	85686	/			
/	/	/	/	/	800 (°C)	1 C	0.846	1400	84330	/		
					2 S	1.272	1314	4774	1.908			
					2 C	0.879	1081	5351	2.151			
					3 S	0.955	1118	4268	1.878			
/	/	/	/	/	800 (°C)	4 S	0.871	1062	3963	1.850		
					1 S	1.003	1196	85686	/			
					1 C	0.846	1400	84330	/			
					2 S	1.272	1314	4774	1.908			

Table 3.2.7 (続)

解析名	照射試験領域 最大線出力 (cal/s.cm)	ドライバー領域 に必要な限界 流量 (kg/s)	照射試験領域 1400℃制限上 必要なチャンネル 流量 (g/s)	限界 原子炉出口 冷却材温度 (℃)	各チャンネルの熱流動特性値										熱流動特性からの検討
					熱出力 出口温度	チャンネル 名称	ピーキング係数		燃料最高 温度(℃)	最 小 Re数	最小限界 熱流束比				
							リージョン	ポイント							
MPC -33T	160.3	10.960	46.96	794	50 (MW)	1 S	1.052	1291	122557				照射試験領域の制御型燃料 要素における最大線出力が 大きすぎると、ドライバー 領域への流量が少くなる。		
					800 (℃)	1 C	0.939	1400	123325						
						2 S	1.174	1461	3581	1.062					
						2 C	0.998	1341	3791	1.119					
MPC -34T	147.0	11.725	39.09	814	50 (MW)	1 S	1.053	1296	98544			最大プロック平均出力密度が 20w/cc以上で領域IVの最小レ イノルズ数以外の熱設計基準 指針は満足するが、テスト領 域の制御型燃料要素の線出力が 高すぎる。			
					800 (℃)	1 C	0.961	1400	98948						
						2 S	1.153	1318	4455	1.599					
						2 C	1.096	1229	4663	1.662					
MPC -36T	123.2	11.515	28.04	875	50 (MW)	1 S	1.049	1293	67399			60 MW-800℃炉心状態でも 熱設計基準・指針を満足する が、照射試験領域の制御型燃 料要素のポイントピーキング が高すぎる。			
					800 (℃)	1 C	0.883	1400	67765						
						2 S	1.138	1222	5649	2.495					
						2 C	1.115	1150	5881	2.593					
MPC -37T	128.4	11.725	31.81	848	50 (MW)	1 S	1.062	1400	30849			50 MW-800℃炉心として、 予備検討における初期炉心サ ーベイ計算の中では、最適で ある。			
					800 (℃)	1 C	0.951	1163	32471						
						2 S	1.151	1257	5266	2.155					
						2 C	1.098	1178	5494	2.241					
MPC -38T	106.3	11.484	23.15	908	50 (MW)	1 S	1.058	1400	53294			60 MW-800℃炉心として予 備検討における初期炉心サ ーベイ計算の中では、最適であ る。			
					800 (℃)	1 C	0.873	1132	55989						
						2 S	1.136	1191	6203	2.965					
						2 C	1.118	1124	6445	3.080					
		3 S	0.937	1083	5240	2.622									
		4 S	0.859	1009	4892	2.579									



Table 3.2.8 予備検討におけるセミドライバー炉心の熱流動特性

解析名	照射試験領域 最大線出力 (cal/s.cm)	ドライバ-領域 に必要な流量 (kg/s)	照射試験領域 1400°C制限上 必要な流量 (g/s)	限界 原子炉出口 冷却材温度 (°C)	各チャンネルの熱流動特性値							熱流動特性からの検討	
					熱出力 出口温度 (°C)	チャンネル 名称	ピーキング係数 リージョン	ピーキング係数 ポイント	燃料最高 温度(°C)	最高 Re 数	最小 Re 数		最小限界 熱流束比
SPC -10 T	105.8	/	22.28	/	50 (MW)	1 S	1.035	1.651	1.035	1205	54653	/	最大ブロック平均密度(14.19 W/cc)が低すぎる。
						1 C	1.177	1.651	1400	53206	/		
					800 (°C)	2 S	1.265	0.979	1257	15300	/		
						2 C	1.031	0.979	1220	16271	/		
						3 S	1.090	0.872	1132	14275	/		
						4 S	1.068	0.825	1107	13581	/		
					50 (MW)	1 S	1.001	1.802	1211	73353	/		
						1 C	1.120	1.802	1400	71897	/		
2 S	1.215	0.962	1160	13699		/							
2 C	1.039	0.962	1068	14387		/							
800 (°C)	3 S	1.080	0.859	1059	12689	/							
	4 S	1.062	0.811	1045	12043	/							
	1 S	1.003	1.781	1219	69180	/							
	1 C	1.107	1.781	1400	67934	/							
50 (MW)	2 S	1.198	0.965	1386	9091	3.374							
	2 C	1.056	0.965	1282	9519	3.436							
	3 S	1.083	0.859	1269	8396	3.740							
	4 S	1.063	0.812	1250	7986	3.525							
SPC -12 T	124.4	11.015	28.81	884	50 (MW)	1 S	1.003	1.781	1219	69180	/	50 MW - 800°C 炉心としては 余裕があるが、900°C 炉心と すると、熱設計基準・指針は 満足出来ない。	
						1 C	1.107	1.781	1400	67934	/		
					800 (°C)	2 S	1.198	0.965	1386	9091	3.374		
						2 C	1.056	0.965	1282	9519	3.436		
						3 S	1.083	0.859	1269	8396	3.740		
						4 S	1.063	0.812	1250	7986	3.525		
					50 (MW)	1 S	1.003	1.781	1219	69180	/		
						1 C	1.107	1.781	1400	67934	/		
2 S	1.198	0.965	1386	9091		3.374							
2 C	1.056	0.965	1282	9519		3.436							
800 (°C)	3 S	1.083	0.859	1269	8396	3.740							
	4 S	1.063	0.812	1250	7986	3.525							
	1 S	1.003	1.781	1219	69180	/							
	1 C	1.107	1.781	1400	67934	/							
900 (°C)	2 S	1.198	0.965	1386	9091	3.374							
	2 C	1.056	0.965	1282	9519	3.436							
	3 S	1.083	0.859	1269	8396	3.740							
	4 S	1.063	0.812	1250	7986	3.525							
SPC -13 T	120.4	10.754	27.37	902	50 (MW)	1 S	1.003	1.781	1219	69180	/	900°C 炉心では、領域Ⅱの最 高温度が若干高すぎるので、 照射試験領域の制御型燃料要 素のポイントピーキングを下 げる必要がある。	
						1 C	1.107	1.781	1400	67934	/		
					800 (°C)	2 S	1.198	0.965	1386	9091	3.374		
						2 C	1.056	0.965	1282	9519	3.436		
						3 S	1.083	0.859	1269	8396	3.740		
						4 S	1.063	0.812	1250	7986	3.525		
					50 (MW)	1 S	1.003	1.781	1219	69180	/		
						1 C	1.107	1.781	1400	67934	/		
2 S	1.198	0.965	1386	9091		3.374							
2 C	1.056	0.965	1282	9519		3.436							
800 (°C)	3 S	1.083	0.859	1269	8396	3.740							
	4 S	1.063	0.812	1250	7986	3.525							
	1 S	1.003	1.781	1219	69180	/							
	1 C	1.107	1.781	1400	67934	/							
900 (°C)	2 S	1.198	0.965	1386	9091	3.374							
	2 C	1.056	0.965	1282	9519	3.436							
	3 S	1.083	0.859	1269	8396	3.740							
	4 S	1.063	0.812	1250	7986	3.525							

Table 3.2.9 セミピンドライバー炉心のドライバ燃料装荷法の検討ケース

燃料	記号	燃料濃縮度 (w/o) および可燃性毒物装荷量 (g)							備考		
		1	2	3	4	5	6	7		平均	
ドライバ燃料	D0	*** 6	*** 6	** 4	* 3	* 3	* 3	* 3	* 3	4.0	オリジナル
	D1	*** 5	*** 5	** 3	* 2	* 2	* 2	* 2	* 2	3.0	
	D2	*** 4.5	*** 4.5	** 2.5	* 1.5	* 1.5	* 1.5	* 1.5	* 1.5	2.5	
試験燃料	T1	6	6	6	20	4	4	4	4	7.1	最高/平均 = 2.8
	T2	4	4	4	20	2	2	2	2	5.4	最高/平均 = 3.7

(注) 1. \*印1個が可燃性毒物棒1本を示す。

2. 1~7の数字は炉心上部からのブロック数を示す。

Table 3.2.10 ドライバー燃料変更炉心の制御棒挿入時の特性(セミピン・ドライバ-炉心)

項目 解析名称	燃料濃縮度 (w/o)							注		可燃性毒物濃度 (w/o)	制御棒挿入度 (ブロック単位)	最大ブロック平均出力密度 (w/cd)		照射試験領域リージョンピーキング (Po)	第2オリファイト領域ピーキング (P <sub>2</sub> )	備考
	1	2	3	4	5	6	7	中心	第1段階			炉心出力50MW	炉心出力60MW			
SDC-6T	6	6	6	20	4	4	4	3	2	—	14.69	17.63	2.00	1.17	D0 ドライバ-燃料 T1 試験燃料	
	6***	6***	4**	3*	3*	3*	3*									
SDC-3T	6	6	6	20	4	4	4	3	2	—	20.34	24.41	2.62	1.21	D1 ドライバ-燃料 T1 試験燃料	
	5***	5***	3**	2*	2*	2*	2*									
SDC-4T	4	4	4	20	2	2	2	3	2	—	15.33	18.40	1.60	1.16	D0 ドライバ-燃料 T2 試験燃料	
	6***	6***	4**	3*	3*	3*	3*									
SDC-5T	4	4	4	20	2	2	2	3	2	—	21.45	25.74	2.17	1.19	D1 ドライバ-燃料 T2 試験燃料	
	5***	5***	3**	2*	2*	2*	2*									
SDC-7T	6	6	6	20	4	4	4	2-2/3	2	—	21.66	25.99	2.77	1.25	D1 ドライバ-燃料 T1 試験燃料	
	5***	5***	3**	2*	2*	2*	2*									
SDC-9T	6**	6**	6**	20***	4*	4*	4*	2-2/3	1-2/3	1.5	18.23	21.88	2.46	1.16	D1 ドライバ-燃料 T1 試験燃料	
	5***	5***	3**	2*	2*	2*	2*									

(注) 1. 上段が試験燃料の濃縮度, 下段がドライバ-燃料の濃縮度を示す。

2. \* 印1個が可燃性毒物棒1本を示す。

3. 1~7は炉心上部からのブロック数を示す。

Table 3.2.11 セミピンドドライバ燃料の濃縮度を変えた出力分布における熱流動特性

解析名	照射試験領域 最大線出力 (cal/s.cm)	ドライバ領域 に必要な限界 流量 (kg/s)	照射試験領域 1400°C制限上 必要なチャンネル 流量 (g/s)	限界 原子炉出口 冷却材温度 (°C)	各チャンネルの熱流動特性値							熱流動特性からの検討
					熱出力 出口温度	チャンネル 名称	ピーキング係数 リージョン	ポイント	燃料最高 温度(°C)	最小 Re数	最小限界 熱流束比	
SDC -3 T	146.7	9.429	38.82	865	50 (MW)	1 S	1.023	1249	96655		50 MW-800°C炉心では、十分熱設計基準・指針を満足する。	
						1 C	2.694	1400	97062			
						2 S	1.215	1166	11526			
						2 C	1.062	1075	12041			
SDC -5 T	151.5	9.558	41.99	843	50 (MW)	3 S	1.069	1063	10181	4.948	照射試験領域の最大線出力が、SDC-3Tより高い為、若干SDC-3Tよりドライバ領域の燃料最高温度が上がる。	
						4 S	1.053	1041	9515	4.247		
						1 S	1.025	1239	109405			
						1 C	2.228	1400	109230			
SDC -6 T	107.4	22.20	22.20	900 (°C)	50 (MW)	2 S	1.193	1217	10301	3.983	最大プロック平均出力密度が小さい為、900°C炉心も十分可能である。	
						2 C	0.918	1105	10874	3.930		
						3 S	0.817	1117	9524	3.819		
						4 S	0.766	1107	8965	3.494		
SDC -7 T	151.6	8.651	43.71	856	50 (MW)	1 S	1.014	1251	52156		照射試験領域の最大線出力が高すぎる。	
						1 C	2.054	1400	51730			
						2 S	1.173	1266	10768	5.111		
						2 C	0.944	1206	11053	4.829		
SDC -9 T	124.7	9.112	30.40	934	50 (MW)	3 S	0.820	1166	9625	4.894	最大プロック平均出力密度が若干低い(18.23 W/cc)為、900°C炉心も可能である。	
						4 S	0.773	1151	9121	4.579		
						1 S	1.009	1226	110459			
						1 C	2.883	1400	108955			
SDC -9 T	124.7	9.112	30.40	934	900 (°C)	2 S	1.247	1234	10179	3.841	最大プロック平均出力密度が若干低い(18.23 W/cc)為、900°C炉心も可能である。	
						2 C	0.873	1109	10795	4.059		
						3 S	0.726	1112	8900	3.778		
						4 S	0.673	1085	8311	3.312		
SDC -9 T	124.7	9.112	30.40	934	900 (°C)	1 S	1.024	1252	73366		最大プロック平均出力密度が若干低い(18.23 W/cc)為、900°C炉心も可能である。	
						1 C	2.465	1400	72862			
						2 S	1.160	1289	8694	3.097		
						2 C	0.897	1207	9021	3.051		
SDC -9 T	124.7	9.112	30.40	934	900 (°C)	3 S	0.787	1199	7862	2.580	最大プロック平均出力密度が若干低い(18.23 W/cc)為、900°C炉心も可能である。	
						4 S	0.736	1188	7387	2.357		

Table 3.2.12 Mk-III ドライバー燃料を用いた初期炉心

項目 解析名称	試験燃料濃縮度 (w/o) (注) および可燃性毒物装荷量							可燃性毒物濃度 (w/o)	制御棒挿入度 (ブロック単位)		実効増倍率	最大ブロック平均出力密度 (w/cm <sup>2</sup> )		照射試験領域 リージョン ピーキング (P <sub>0</sub> )	第2オリフィス 領域ポイント ピーキング (P <sub>2</sub> )	
	1	2	3	4	5	6	7		中心	第1 リング		炉心出力50MW	炉心出力60MW			
MIS-6T	4**	4**	4**	**** 20 (12)	2*	2*	2*	2.0	3	2 <sup>2</sup> / <sub>3</sub>	1.0018	21.36	25.63	2.12	1.14	
MIS-5T	4**	4**	4**	**** 18 (12)	2*	2*	2*	2.0	3	2 <sup>2</sup> / <sub>3</sub>	0.9978	19.90	23.88	2.04	1.14	
MIS-7T	4**	4**	4**	*** 15 (9)	2*	2*	2*	2.0	2 <sup>2</sup> / <sub>3</sub>	2 <sup>2</sup> / <sub>3</sub>	0.9993	19.04	22.85	2.03	1.15	
MIS-8T	4**	4**	4**	*** 12 (8)	2*	2*	2*	2.0	2 <sup>2</sup> / <sub>3</sub>	2 <sup>2</sup> / <sub>3</sub>	0.9991	16.19	19.43	1.86	1.13	
MIS-12T	4**	4**	4**	*** 8 (5)	2*	2*	2*	1.5	2 <sup>2</sup> / <sub>3</sub>	2	1.0048	11.70	14.04	1.59	1.10	
MIS-15T	4**	4**	4**	*** 8 (6)	3*	3*	3*	2.0	2 <sup>2</sup> / <sub>3</sub>	2 <sup>1</sup> / <sub>3</sub>	1.0007	11.41	13.69	1.82	1.12	
MIS-11T	4**	4**	4**	** 6 (4)	2*	2*	2*	1.5	1 <sup>1</sup> / <sub>3</sub>	2	1.0041	9.88	11.86	1.53	1.10	
ドライバー 燃料型式	ドライバー燃料濃縮度 (w/o) (注) および可燃性毒物装荷量							可燃性毒物濃度 (w/o)	(注) 1. ( ) 内の数値は制御型燃料体の濃縮度を示す。( ) で示されていない場合は標準燃料体と同一である。 2. * 印1個が可燃性毒物棒1本を示す。 3. 1~7は炉心上部からのブロック数を示す。							
Mk-III	*** 5.5	*** 4.4	*** 3.3	*** 3.3	*** 2.2	*** 2.2	*** 2.2		3.0							

Table 3.2.13 Mk-III ドライバー初期炉心の熱流動特性

解析名称	全炉心熱出力 (MW)	出口冷却材温度	流量調節方式	炉心体系		ピーキング係数		チャンネル流量 (g/s)	燃料最高温度 (°C)	最小レイノルズ数	最小限界熱流束比	最大核移動距離* (μ)	圧力損失 (MPa)	備考
				セミピン	Mk-III	リージョン	ポイント							
MIS-5T	50 (MW)	800	5	照射試験	1 S	1.063		29.92	1400	73760		117.467	1.152	燃料最高温度を1400°Cに制限した。
				ドライバ I	1 C	0.881		20.85	1224	76333		60.290	1.096	
					2 S	1.135		18.12	1265	5338	2.068	37.746	0.502	
					2 C	0.940		16.65	1166	5644	2.114	35.228	0.464	
MIS-6T	50 (MW)	800	5	照射試験	1 S	1.066		33.93	1400	85029		193.441	1.455	"
				ドライバ I	1 C	0.852		19.57	1171	88357		82.311	1.379	
					2 S	1.142		16.88	1300	4911	1.767	42.643	0.458	
					2 C	0.943		15.49	1193	5207	1.811	28.147	0.421	
MIS-8T	50 (MW)	900	5	照射試験	1 S	1.042		20.15	1400	46700		101.702	0.563	"
				ドライバ I	1 C	0.750		17.94	1196	48395		46.250	0.533	
					2 S	1.131		14.49	1331	4353	1.480	46.401	0.407	
					2 C	0.931		14.49	1214	4634	1.506	30.223	0.371	
MIS-12T	50 (MW)	1000	5	照射試験	1 S	1.053		12.42	1400	26347		77.671	0.241	"
				ドライバ I	1 C	0.640		16.37	1121	28055		25.387	0.219	
					2 S	1.098		14.49	1370	3851	1.328	48.665	0.370	
					2 C	0.956		13.40	1284	4038	1.340	36.421	0.343	
MIS-15T	50 (MW)	1000	5	照射試験	1 S	1.036		12.13	1400	24629		78.704	0.236	"
				ドライバ I	1 C	0.734		16.55	1247	25360		45.539	0.224	
					2 S	1.115		14.45	1324	3918	1.329	43.141	0.363	
					2 C	0.953		13.31	1230	4131	1.349	30.710	0.335	
				3 S	1.002	1.090	14.45	1253	3446	1.220	29.253	0.286		
				4 S	0.928	1.034	13.31	1191	3234	1.234	20.343	0.245		

\*但し、最大核移動距離の燃焼日数は、600日として評価した。

Table 3.2.14 セミピン。ドライバ燃料を用いた初期炉心

項目 解析名	燃料濃縮度 (w/o)							可燃性毒物濃度 (w/o)	制御棒挿入度 (ブロック単位)		実効増倍率	最大ブロック出力 (w/cm <sup>2</sup> )		照射試験領域リレーキーング (P <sub>0</sub> )	第2オリフェイス領域ポインティング (P <sub>2</sub> )	備考
	1	2	3	4	5	6	7		中心	第1リーング		炉心出力 50MW	炉心出力 60MW			
SIS-6T	4***	4***	4***	**** 20 (12)	2**	2**	2**	2.0	2 $\frac{2}{3}$	2 $\frac{2}{3}$	1.0019	14.11	16.93	1.44	1.09	オリジナルドライバ燃料
	6***	6***	4**	3*	3*	3*	3*	1.5	2 $\frac{2}{3}$	2 $\frac{2}{3}$						
SIS-7T	4**	4**	4**	**** 15 (9)	2*	2*	2*	2.0	2 $\frac{2}{3}$	2 $\frac{2}{3}$	1.0005	11.50	13.80	1.32	1.11	オリジナルドライバ燃料
	6***	6***	4**	3*	3*	3*	3*	1.5	2 $\frac{2}{3}$	2 $\frac{2}{3}$						
SDC-10T	6	6	6	20 (12)	4	4	4	—	2 $\frac{2}{3}$	2	0.9989	21.70	26.04	2.72	1.24	変更ドライバ燃料
	5***	5***	3**	2*	2*	2*	2*	1.0	2 $\frac{2}{3}$	2						
SDC-11T	6**	6**	6**	**** 20 (12)	4*	4*	4*	1.5	2 $\frac{2}{3}$	1 $\frac{2}{3}$	0.9926	19.05	22.86	2.44	1.17	変更ドライバ燃料
	5***	5***	3**	2*	2*	2*	2*	1.0	2 $\frac{2}{3}$	1 $\frac{2}{3}$						

(注) 1. 上段が試験燃料の濃縮度, 下段がドライバ燃料の濃縮度を示す。

2. ( ) 内の数値は制御型燃料体の濃縮度を示す。( ) で示されていない場合は標準燃料体と

同一である。

3. \*印1個が可燃性毒物棒1本を示す。

4. 1~7は炉心上部からのブロック数を示す。

Table 3.2.15 セミピンドライバー初期炉心の熱流動特性

解 析 名 称	全炉心 熱出力 (MW)	出 口 冷却温度	流 量 調節方式	炉 心 体 系		ピーキング係数		チャンネル 流量(g/s)	燃料最高 温度(°C)	最小レイ ノルズ数	最小限界 熱流束比	最大核移動 距離*(μ)	圧力損失 (%)	備 考
				セミピン	1 S	リージョン	ポイント							
SIS -6T	50 (MW)	1000	6	照射試験	1 S	1.026			1400	36648		92.606	0.340	燃料最高温度を1400°Cに 制限した。
				ドライバ	1 C	1.483		15.71	1228	37585		48.521	0.327	
					2 S	1.090			1346	9069		17.046	0.044	
					2 C	0.969	1.018	4.93	1302	9293		15.163	0.041	
	60 (MW)	900	6	照射試験	3 S	0.931	1.086	4.56	1346	8302	3.878	14.819	0.039	"
				ドライバ	4 S	0.888	1.062	4.23	1346	7661	3.457	13.802	0.034	
					1 S				1400	50232		104.444	0.590	
					1 C			21.02	1228	51425		54.613	0.569	
SIS -7T	60 (MW)	1000	6	照射試験	2 S			7.26	1188	14355		13.793	0.087	"
				ドライバ	2 C				1155	14676		12.198	0.083	
					3 S			6.70	1188	13075		11.702	0.077	
					4 S			6.20	1188	12081		10.845	0.067	
SDC -10T	50 (MW)	800	6	照射試験	1 S	1.016			1400	35205		91.604	0.337	"
				ドライバ	1 C	1.355	0.917	15.46	1205	36078		43.533	0.323	
					2 S	1.105			1344	11874		21.460	0.071	
					2 C	0.984	1.019	6.35	1286	12217		17.948	0.067	
SDC -11T	50 (MW)	900	6	照射試験	3 S	0.942	1.085	5.67	1345	10412		18.382	0.060	"
				ドライバ	4 S	0.898	1.062	5.29	1344	9700	5.034	17.267	0.052	
					1 S	1.017			1400	71990		115.972	1.279	
					1 C	2.802	0.921	30.60	1238	73572		62.851	1.230	
				照射試験	2 S	1.244			1033	15012		7.746	0.085	"
				ドライバ	2 C	0.876	1.047	7.24	940	15781		4.482	0.078	
					3 S	0.731	1.074	5.11	1033	10527		4.165	0.043	
					4 S	0.678	1.053	4.56	1033	9330	4.054	3.535	0.035	
				照射試験	1 S	1.029			1400	56802		107.468	0.871	"
				ドライバ	1 C	2.509	0.900	24.79	1213	58613		52.841	0.826	
					2 S	1.167			1161	10831		10.511	0.056	
					2 C	0.894	1.053	5.60	1093	11205		8.577	0.053	
				照射試験	3 S	0.779	1.068	4.34	1162	8319	2.855	7.710	0.035	"
				ドライバ	4 S	0.729	1.056	4.01	1162	7667	2.523	6.960	0.030	

\* 但し、最大核移動距離の燃焼日数は600日として評価した。



Table 3.2.16 燃 燒 特 性 ( Mk-III ド ラ イ バ ー 炉 心 )

項 目 解 析 名 称	燃 料 濃 縮 度 (w/o)							可 燃 性 毒 物 濃 度 (w/o)	炉 内 燃 料 滞 在 時 間 (H)		試 験 燃 料 最 大 燃 燒 度 (GWD/T)		試 験 燃 料 平 均 燃 燒 度 (GWD/T)		試 験 燃 料 最 大 高 速 中 性 子 照 射 量 (10 <sup>21</sup> nvt)		初 期 炉 心 と の 対 応
	1	2	3	4	5	6	7		第 1 サイクル	第 2 サイクル	第 1 サイクル	第 2 サイクル	第 1 サイクル	第 2 サイクル	第 1 サイクル	第 2 サイクル	
MMB-1	5.5***	4.4***	3.3**	3.3**	2.2*	2.2*	2.2*	3.0	450	—	36.16	—	16.41	—	1.00	—	
	5.5***	4.4***	3.3**	3.3**	2.2*	2.2*	2.2*	3.0									
MMB-2	20***	4**	3**	3**	2*	2*	2*	1.5	465	375	73.01	111.92	17.90	32.32	2.07	3.56	
	5.5***	4.4***	3.3**	3.3**	2.2*	2.2*	2.2*	3.0									
MMB-3	4**	4**	20***	2*	2*	2*	2*	1.5	485	385	61.32	92.71	18.29	31.41	1.82	3.05	
	5.5***	4.4***	3.3**	3.3**	2.2*	2.2*	2.2*	3.0									
MMB-4	4**	4**	4**	18.02	2*	2*	2*	1.5	490	400	42.38	69.65	18.13	31.02	1.40	2.35	MIS-5T
	5.5***	4.4***	3.3**	3.3**	2.2*	2.2*	2.2*	3.0									
MMB-5	4**	4**	4**	20.02	2*	2*	2*	2.0	495	410	45.57	74.78	18.68	32.09	1.48	2.50	MIS-6T
	5.5***	4.4***	3.3**	3.3**	2.2*	2.2*	2.2*	3.0									
MMB-6	4**	4**	4**	12.08	2*	2*	2*	2.0	460	390	32.12	54.51	15.74	27.75	1.11	1.92	MIS-8T
	5.5***	4.4***	3.3**	3.3**	2.2*	2.2*	2.2*	3.0									
MMB-7	4**	4**	4**	8.05	3*	3*	3*	1.5	460	390	25.45	43.74	15.76	27.76	0.97	1.76	MIS-13T
	5.5***	4.4***	3.3**	3.3**	2.2*	2.2*	2.2*	3.0									

- (注) 1. 上段は試験燃料の濃縮度, 下段はドライバ-燃料の濃縮度を示す。  
 2. ( ) 内の数値は制御型燃料体の濃縮度を示す。( ) 内で示されていない場合は標準燃料体と同一である。  
 3. \* 印1個が可燃性毒物棒1本を示す。  
 4. 1~7は炉心上部からのブロック数を示す。

Table 3.2.17 燃 燒 特 性 (セミピン・ドライバークル) 燃 焼 特 性 (セミピン・ドライバークル)

項 目 解 析 名 称	燃 料 濃 縮 度 (w/o) (注)							可 燃 性 毒 物 濃 度 (w/o)	炉 内 燃 料 帯 在 時 間 (日)		試 験 燃 料 最 大 燃 燒 度 (GWD/T)		試 験 燃 料 平 均 燃 燒 度 (GWD/T)		試 験 燃 料 最 大 高 速 中 性 子 照 射 量 ( $10^{21}$ nvt)		初 期 炉 心 と の 対 応	
	1	2	3	4	5	6	7		第 1 サ イ ク ル	第 2 サ イ ク ル	第 1 サ イ ク ル	第 2 サ イ ク ル	第 1 サ イ ク ル	第 2 サ イ ク ル	第 1 サ イ ク ル	第 2 サ イ ク ル		
SMB-1	6***	6***	4**	3*	3*	3*	3*	1.5	475	27.01	11.86	—	1.02	—	—	—	—	
	6***	6***	4**	3*	3*	3*	3*	1.5										
SMB-3	6**	6**	6**	20***	4*	4*	4*	1.5	330	29.14	13.08	45.73	0.85	21.60	—	1.45	—	SDC-9T
	5***	5***	3**	2*	2*	2*	2*	1.0										
SMB-4	4***	4***	4***	20***	2**	2**	2**	2.0	490	28.61	11.89	49.94	1.04	21.63	—	1.85	—	SIS-6T
	6***	6***	4**	3*	3*	3*	3*	1.5										
SMB-5	4**	4**	4**	15*** (9)	2*	2*	2*	2.0	480	25.88	12.10	45.12	0.90	21.77	—	1.60	—	SIS-7T
	6***	6***	4**	3*	3*	3*	3*	1.5										

- 注 1. 上段は試験燃料の濃縮度，下段はドライバークル燃料濃縮度を示す。
2. ( ) 内の数値は制御型燃料体の濃縮度を示す。( ) 内で示されていない場合は標準燃料体と同一である。
3. \* 印1個が可燃性毒物棒1本を示す。
4. 1～7は炉心上部からのブロック数を示す。

Table 3.2.18. Xe & Sm 蓄積時の特性

項目 解析名	試験燃料濃縮度 (w/o) (注)							可燃性毒物濃度 (w/o)	制御棒挿入度 (ブロック単位)		実効増倍率	最大出力 (w/cm <sup>2</sup> )		照射試験領域 リージョン ピーキング (P <sub>0</sub> )	第2オリファイト 領域ポイント ピーキング (P <sub>2</sub> )	ドライバー 燃料体型式
	1	2	3	4	5	6	7		中心	第1 リング		炉心出力 50MW	炉心出力 60 W			
MXS-3T	4**	4**	4**	4**	2*	2*	2*	2.0	2	1 2/3	0.9946	18.12	21.74	1.99	1.13	Mk-III
MXS-6T	4**	4**	4**	4**	2*	2*	2*	2.0	2 2/3	1 1/3	0.9934	16.81	20.17	1.84	1.11	Mk-III
MXS-5T	4**	4**	4**	4**	2*	2*	2*	2.0	2	1 2/3	0.9811	15.66	18.79	1.72	1.11	Mk-III
MXS-4T	4**	4**	4**	4**	2*	2*	2*	2.0	2	1 2/3	0.9980	19.35	23.22	2.06	1.13	Mk-III
SXS-1T	4***	4***	4***	4***	2**	2**	2**	2.0	2	1	0.9970	11.48	13.78	1.31	1.06	セミピン
SXS-2T	4***	4***	4***	4***	2**	2**	2**	2.0	1 1/3	1 1/3	0.9943	12.12	14.54	1.40	1.09	セミピン

注) 1. ( ) 内の数値は制御型燃料体の濃縮度を示す。( ) 内示されていない場合は標準燃料体と同一である。

2. \*印1個が可燃性毒物棒1本を示す。

3. 1~7は炉心上部からのブロック数を示す。

Table 3.2.19 主要炉心の核熱流動特性のまとめ

ドライバ 燃料体 型式	解 析 名	炉 心 全出力 (MW)	初 期 実 効 増 倍 率	最 大 ブ ロ ッ ク 平 均 出 力 密 度 (W/cm <sup>2</sup> )	炉内燃料 滞在時間 (H)	試験燃料燃 焼度 (GWD/T)		試験燃料 高速中性子 照射量 ( $\times 10^{21}$ nvt)	冷却材中心 出口温度	領 域	燃 料 最 高 温 度 (°C)	最 小 レ イ ノ ズ 数	最 小 限 界 熱 流 束	最 大 圧 力 損 失 (kg/cm <sup>2</sup> )
						最 大	平 均							
Mk-III	MIS-5T	50	1.1004	19.9	490	70	31	2.4	800	照射試験	1400	73760		1.152
										ドライバ-	1265	4384	1.953	0.502
	MIS-8T	50	1.0953	16.2	460	55	28	1.9	900	照射試験	1400	46700		0.563
										ドライバ-	1331	3621	1.409	0.407
	MIS-12T	60	—	14.0	—	—	—	—	900	照射試験	1400	35184		0.398
										ドライバ-	1339	5058	2.624	0.681
	MIS-15T	50	1.0964	11.4	460	44	28	1.8	1000	照射試験	1400	24629		0.236
										ドライバ-	1324	3234	1.220	0.363
	SDC-II T	50	1.0811	19.1	330	46	22	1.5	800	照射試験	1400	56802		0.871
										ドライバ-	968	11460		0.093
		60	—	22.9	—	—	—	—	900	照射試験	1400	56802		0.871
										ドライバ-	1162	7667	2.523	0.056
60		—	—	—	—	—	—	800	照射試験	1400	80547		1.738	
									ドライバ-	1005	12722		0.160	
60	—	—	—	—	—	—	1000	照射試験	1400	36648		0.340		
								ドライバ-	1346	7661	3.457	0.044		
SIS-6 T	50	1.0809	14.1	490	50	22	1.9	900	照射試験	1400	50232		0.590	
									ドライバ-	1188	12081		0.087	
SIS-7 T	60	1.0837	13.8	480	45	22	1.6	1000	照射試験	1400	35205		0.337	
									ドライバ-	1345	9700	5.034	0.071	

(注) 炉内滞在滞在時間は炉心全出力50MWの場合の第1サイクルのものを示す。

Table 3.2.20 Mk-III ドライバー炉心の初期炉心における熱流動特性

流量調節方式：5 (試験燃料 1400℃制限)

熱出力 原子炉 出口冷却材温度		50 MW					60 MW					
800 ℃	出力分布 名称	MIS-5T					MIS-8T					
	最大ブロック 出力密度	19.90 (W/cm <sup>2</sup> )					19.43 (W/cm <sup>2</sup> )					
	熱流動 特性値	燃料 最高温度 (℃)	最 小 レイノルズ 数	最小限界 熱流束比	領 域 出口冷却材 温度 (℃)	圧力損失 (%)	燃料 最高温度 (℃)	最 小 レイノルズ 数	最小限界 熱流束比	領 域 出口冷却材 温度 (℃)	圧力損失 (%)	
	セ ミ ピ ン	照射 試験	1400	73760	/	659	1.152	1400	65264	/	710	1.003
		ドライ イ	1265	4384	1.953	908	0.502	1304	6052	3.336	866	0.820
	ハ ン ナ ー ル	照射 試験	1400	41360	/	692	0.345	1400	36851	/	748	0.306
		ドライ イ	1244	4693	2.210	882	0.542	1291	6323	3.615	850	0.863
	中 空	照射 試験	1400	25039	/	615	0.538	1400	21803	/	661	0.458
		ドライ イ	1311	3825	1.529	964	0.432	1330	5579	2.877	896	0.746
	円 環	照射 試験	1400	13512	/	717	0.209	1400	12184	/	773	0.191
ドライ イ		1231	4881	2.374	867	0.567	1284	6475	3.778	842	0.888	
900 ℃	出力分布 名称	MIS-8T					MIS-12T					
	最大ブロック 出力密度	16.19 (W/cm <sup>2</sup> )					14.04 (W/cm <sup>2</sup> )					
	熱流動 特性値	燃料 最高温度 (℃)	最 小 レイノルズ 数	最小限界 熱流束比	領 域 出口冷却材 温度 (℃)	圧力損失 (%)	燃料 最高温度 (℃)	最 小 レイノルズ 数	最小限界 熱流束比	領 域 出口冷却材 温度 (℃)	圧力損失 (%)	
	セ ミ ピ ン	照射 試験	1400	46700	/	752	0.563	1400	35184	/	848	0.398
		ドライ イ	1331	3621	1.409	1001	0.407	1339	5058	2.624	952	0.681
	ハ ン ナ ー ル	照射 試験	1400	26751	/	788	0.176	1400	20513	/	886	0.129
		ドライ イ	1314	3791	1.527	980	0.427	1331	5175	2.733	942	0.699
	中 空	照射 試験	1400	14982	/	707	0.252	1400	10942	/	802	0.175
		ドライ イ	1358	3363	1.237	1035	0.376	1350	4892	2.472	966	0.657
	円 環	照射 試験	1400	8950	/	810	0.118	1400	6993	/	904	0.092
ドライ イ		1306	3877	1.590	970	0.438	1327	5223	2.779	939	0.706	

\* ) 斜線部は、レイノルズ数 10000 以上の最小限界熱流束比を省略した。

Table 3.2.21 セミピンドライバーの初期炉心における熱流動特性

流量調節方式：6 (試験燃料 1400℃制限)

熱出力 原子炉 出口冷却材温度		50 MW					60 MW					
800 ℃	出力分布	SDC-II T					SDC-II T					
	最大ブロック出力密度	19.05 (W/cm <sup>2</sup> )					22.86 (W/cm <sup>2</sup> )					
	熱流動特性値	燃料最高温度 (℃)	最小レイノルズ数	最小限界熱流束比	領域出口冷却材温度 (℃)	圧力損失 (%)	燃料最高温度 (℃)	最小レイノルズ数	最小限界熱流束比	領域出口冷却材温度 (℃)	圧力損失 (%)	
	セミピン	照射試験	1400	56802	/	773	0.871	1400	80547	/	726	1.738
		γ線	968	11460	/	895	0.093	1005	12722	/	851	0.160
	ホルルチ	照射試験	1400	32449	/	813	0.272	1400	45214	/	767	0.556
		γ線	951	11945	/	879	0.099	980	13478	/	829	0.171
	中空	照射試験	1400	18567	/	721	0.386	1400	27666	/	669	0.725
		γ線	999	10660	/	923	0.084	1060	11297	/	975	0.138
	円環	照射試験	1400	10907	/	837	0.176	1400	15666	/	785	0.309
γ線		943	12177	/	872	0.102	972	13738	/	895	0.176	
900 ℃	出力分布	SDC-II T					SIS-6 T					
	最大ブロック出力密度	19.05 (W/cm <sup>2</sup> )					16.93 (W/cm <sup>2</sup> )					
	熱流動特性値	燃料最高温度 (℃)	最小レイノルズ数	最小限界熱流束比	領域出口冷却材温度 (℃)	圧力損失 (%)	燃料最高温度 (℃)	最小レイノルズ数	最小限界熱流束比	領域出口冷却材温度 (℃)	圧力損失 (%)	
	セミピン	照射試験	1400	56802	/	773	0.871	1400	50232	/	712	0.590
		γ線	1162	7667	2.523	1071	0.056	1188	12081	/	1033	0.087
	ホルルチ	照射試験	1400	32449	/	813	0.272	1400	28670	/	747	0.183
		γ線	1128	8166	2.817	1040	0.060	1167	12570	/	1015	0.091
	中空	照射試験	1400	18567	/	721	0.386	1400	16223	/	670	0.268
		γ線	1227	6841	2.070	1130	0.049	1225	11321	/	1065	0.080
	円環	照射試験	1400	10906	/	837	0.176	1400	9524	1.562	768	0.120
γ線		1112	8409	2.967	1026	0.063	1156	12834	/	1005	0.094	
1000 ℃	出力分布	SIS-6 T					SIS-7 T					
	最大ブロック出力密度	14.11 (W/cm <sup>2</sup> )					13.80 (W/cm <sup>2</sup> )					
	熱流動特性値	燃料最高温度 (℃)	最小レイノルズ数	最小限界熱流束比	領域出口冷却材温度 (℃)	圧力損失 (%)	燃料最高温度 (℃)	最小レイノルズ数	最小限界熱流束比	領域出口冷却材温度 (℃)	圧力損失 (%)	
	セミピン	照射試験	1400	36648	/	748	0.340	1400	35205	/	788	0.337
		γ線	1346	7661	3.457	1175	0.044	1345	9700	5.034	1152	0.071
	ホルルチ	照射試験	1400	21152	/	782	0.107	1400	20322	/	826	0.107
		γ線	1319	7980	3.707	1152	0.046	1324	10006	/	1135	0.073
	中空	照射試験	1400	11482	/	710	0.155	1400	11021	/	746	0.152
		γ線	1385	7223	3.127	1209	0.041	1374	9282	4.670	1176	0.067
	円環	照射試験	1400	7083	0.962	802	0.076	1400	6826	0.948	846	0.075
γ線		1307	8136	3.832	1142	0.047	1315	10151	/	1127	0.075	

\*) 斜線部は、レイノルズ数 10000 以上の最少限界熱流束比を省略した。

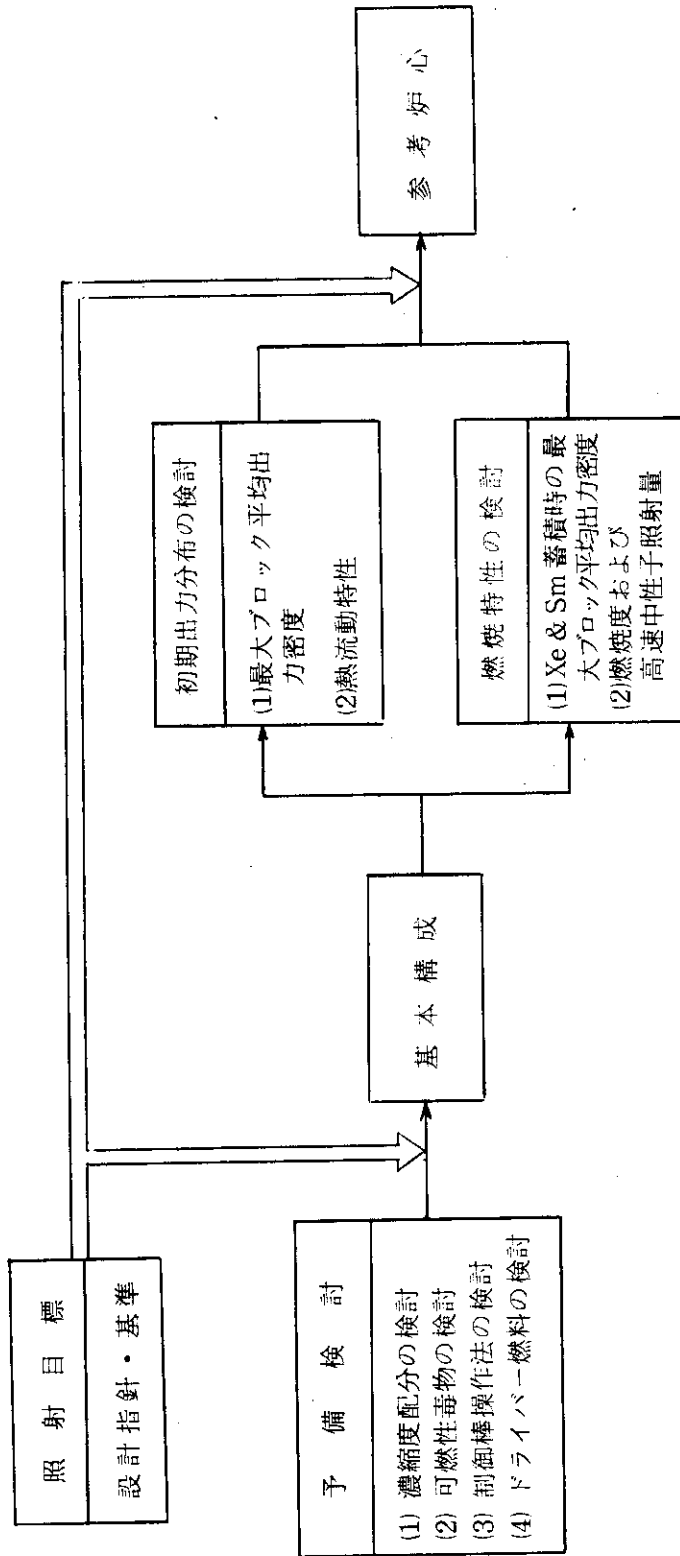
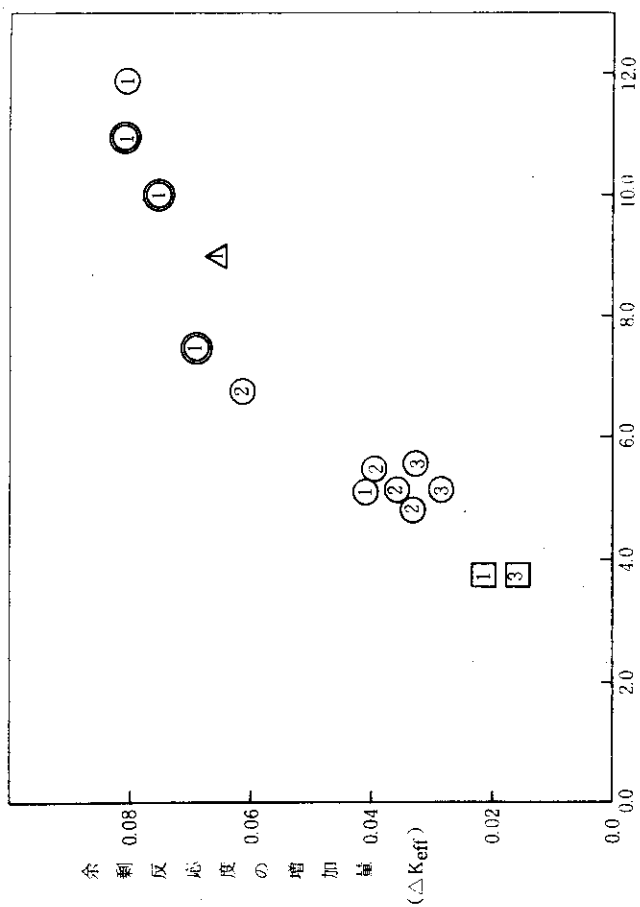


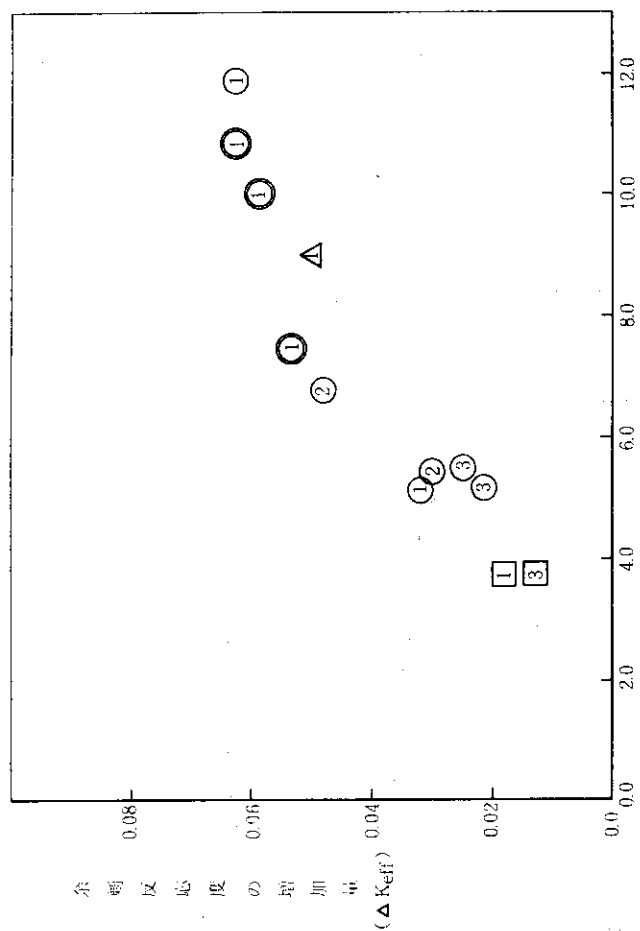
Fig 3.2.1 炉心概念構成のための検討の手順



試験燃料平均濃縮度 (w/o)

- (注) 1. ○：最高濃縮度が20w/oである。  
 △：最高濃縮度が15w/oである。  
 □：最高濃縮度が10w/oである。  
 ◎：最高濃縮度20w/oの燃料が2ブロック続いて装荷される。
2. 図中の数字は最高濃縮度の燃料体装荷位置を炉心上部からのブロック数で示している。

Fig 3.2.2 試験燃料平均濃縮度と実効増倍率の変化量  
 (Mk-IIIドライバーク心)

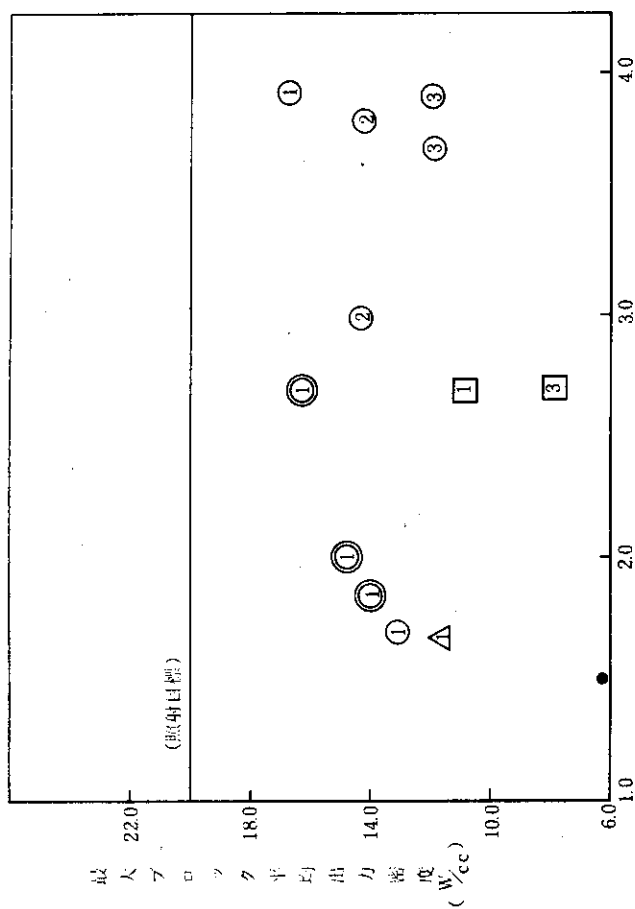


試験燃料平均濃縮度 (w/o)

- (注) 1. ○：最高濃縮度が20w/oである。  
 △：最高濃縮度が15w/oである。  
 □：最高濃縮度が10w/oである。  
 ◎：最高濃縮度20w/oの燃料が2ブロック続いて装荷される。
2. 図中の数字は最高濃縮度の燃料体装荷位置を炉心上部からのブロック数で示している。

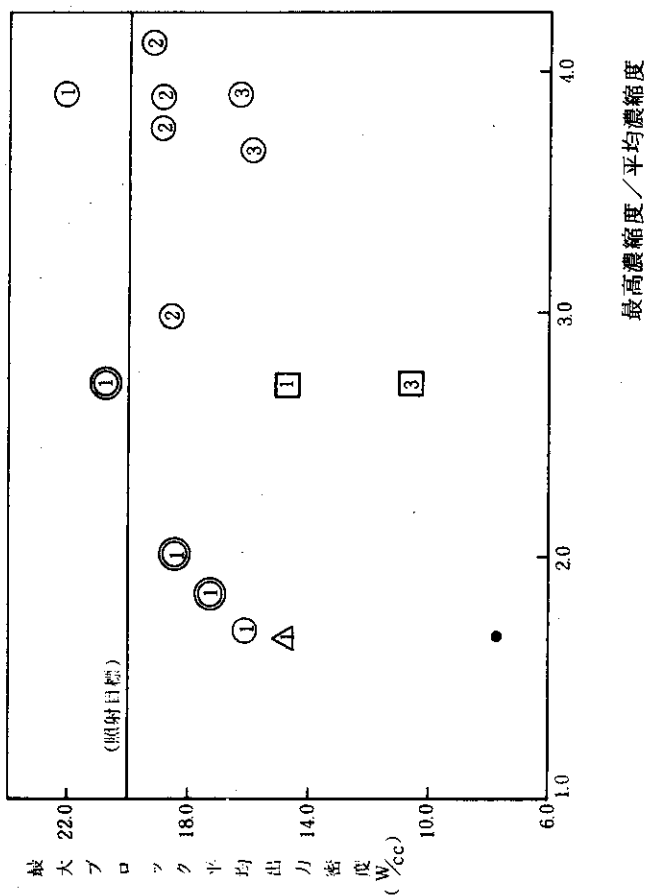
Fig 3.2.3 試験燃料平均濃縮度と実効増倍率の変化量  
 (セミペンドライバーク心)





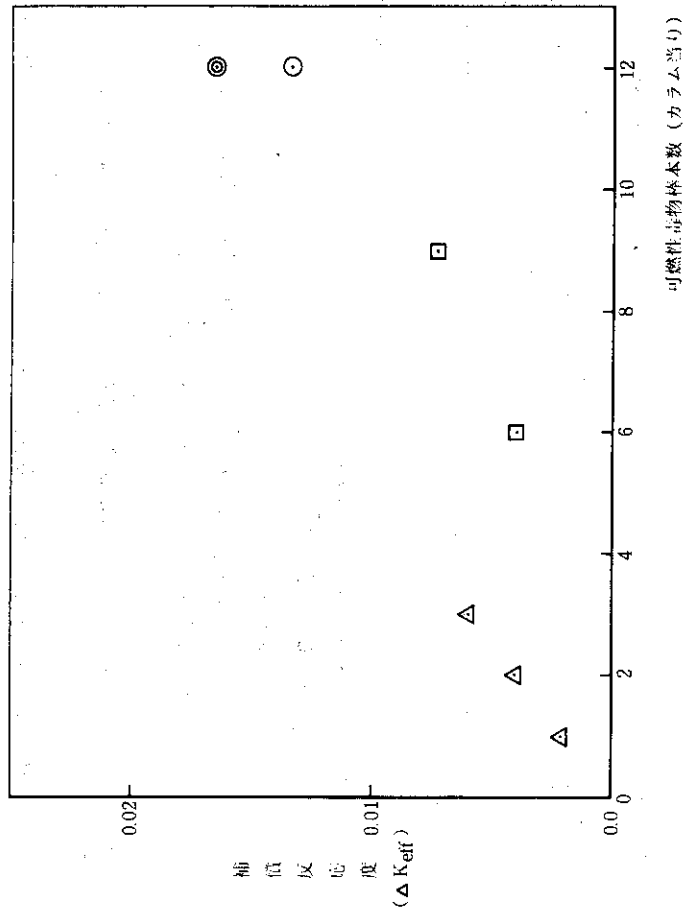
- (注) 1. ○：最高濃縮度が20w/oである。  
 △：最高濃縮度が15w/oである。  
 □：最高濃縮度が10w/oである。  
 ◎：最高濃縮度20w/oの燃料が2ブロック続いて表荷される。  
 ・：ドライバ燃料を照射試験領域にも表荷する。
2. 図中の数字は最高濃縮度の燃料表荷位置を炉心上部からのブロック数で示す。

Fig 3.2.5 試験燃料の濃縮度配分と最大ブロック平均出力密度の関係 (セミピンドライバ炉心)



- (注) 1. ○：最高濃縮度が20w/oである。  
 △：最高濃縮度が15w/oである。  
 □：最高濃縮度が10w/oである。  
 ◎：最高濃縮度20w/oの燃料が2ブロック続いて表荷される。  
 ・：ドライバ燃料を照射試験領域にも表荷する。
2. 図中の数字は最高濃縮度の燃料表荷位置を炉心上部からのブロック数で示す。

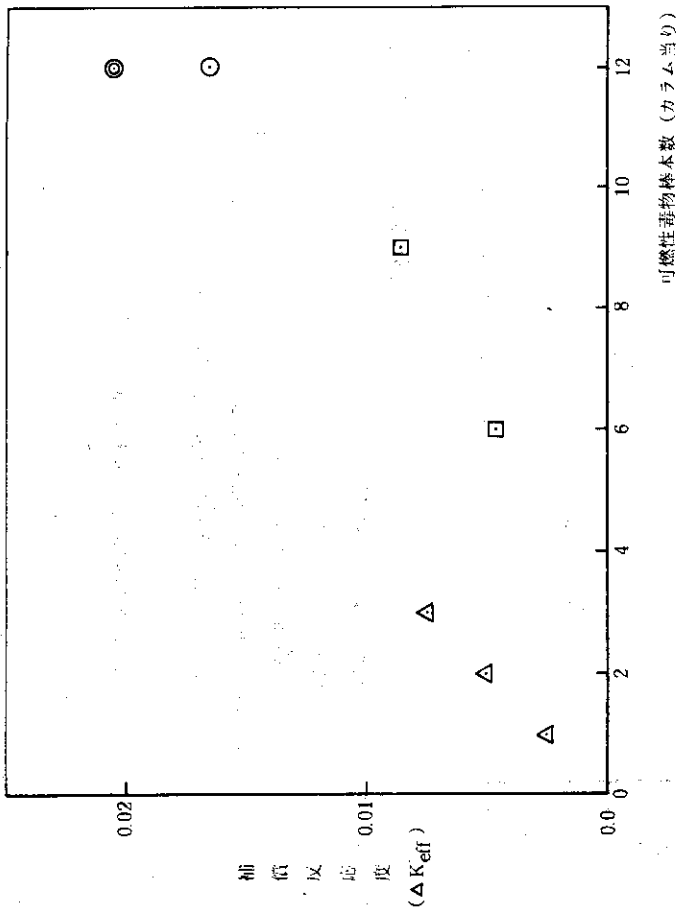
Fig 3.2.4 試験燃料の濃縮度配分と最大ブロック平均出力密度の関係 (MK-IIIドライバ炉心)



(注) △ : 最高濃縮度の標準燃料体のみ装荷, ボロン濃度 1.5 W/o  
 □ : 最高濃縮度以外の標準燃料体に装荷, ボロン濃度 1.5 W/o  
 ○ : 全標準燃料体に装荷, ボロン濃度 1.5 W/o  
 ◎ : 全標準燃料体に装荷, ボロン濃度 2.0 W/o

Fig 3.2.7 試験燃料可燃性毒物の補償反応度

(セミピンドライバーク心)



(注) △ : 最高濃縮度の標準燃料体のみ装荷, ボロン濃度 1.5 W/o  
 □ : 最高濃縮度以外の標準燃料体に装荷, ボロン濃度 1.5 W/o  
 ○ : 全標準燃料体に装荷, ボロン濃度 1.5 W/o  
 ◎ : 全標準燃料体に装荷, ボロン濃度 2.0 W/o

Fig 3.2.6 試験燃料可燃性毒物の補償反応度

(Mk-IIIドライバーク心)

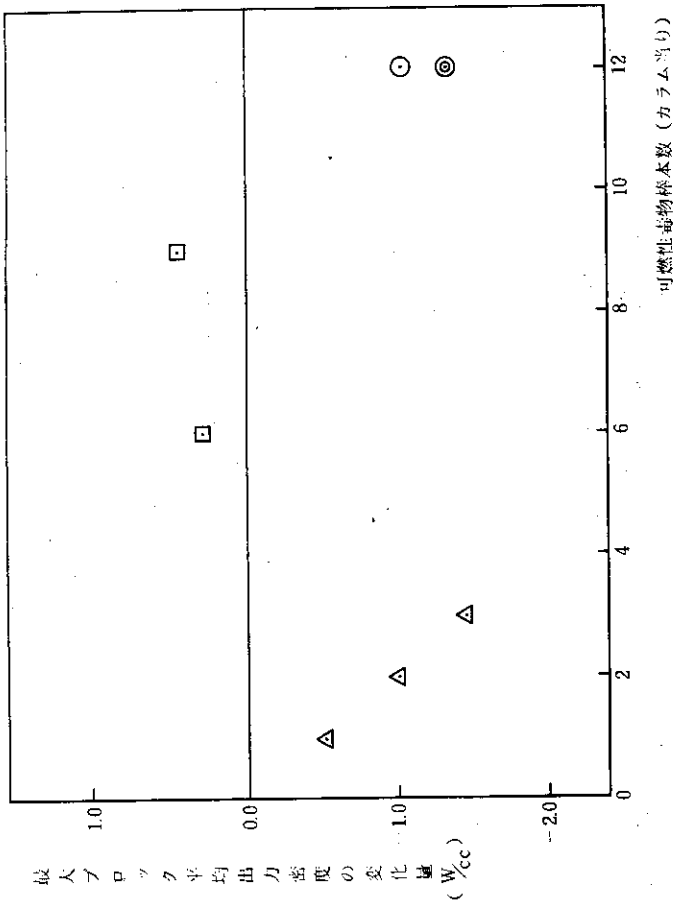


Fig. 3.28 試験燃料可燃性毒物の装荷による  
最大ブロック平均出力密度の変化  
( Mk-III ドライバー炉心 )

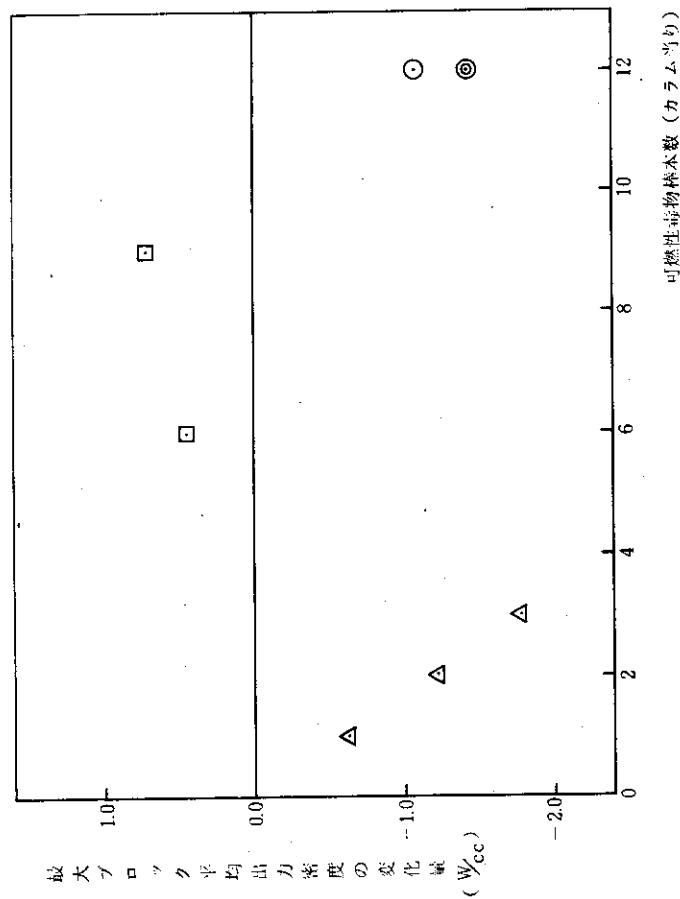


Fig. 3.29 試験燃料可燃性毒物の装荷による  
最大ブロック平均出力密度の変化  
( セミブンドライバー炉心 )

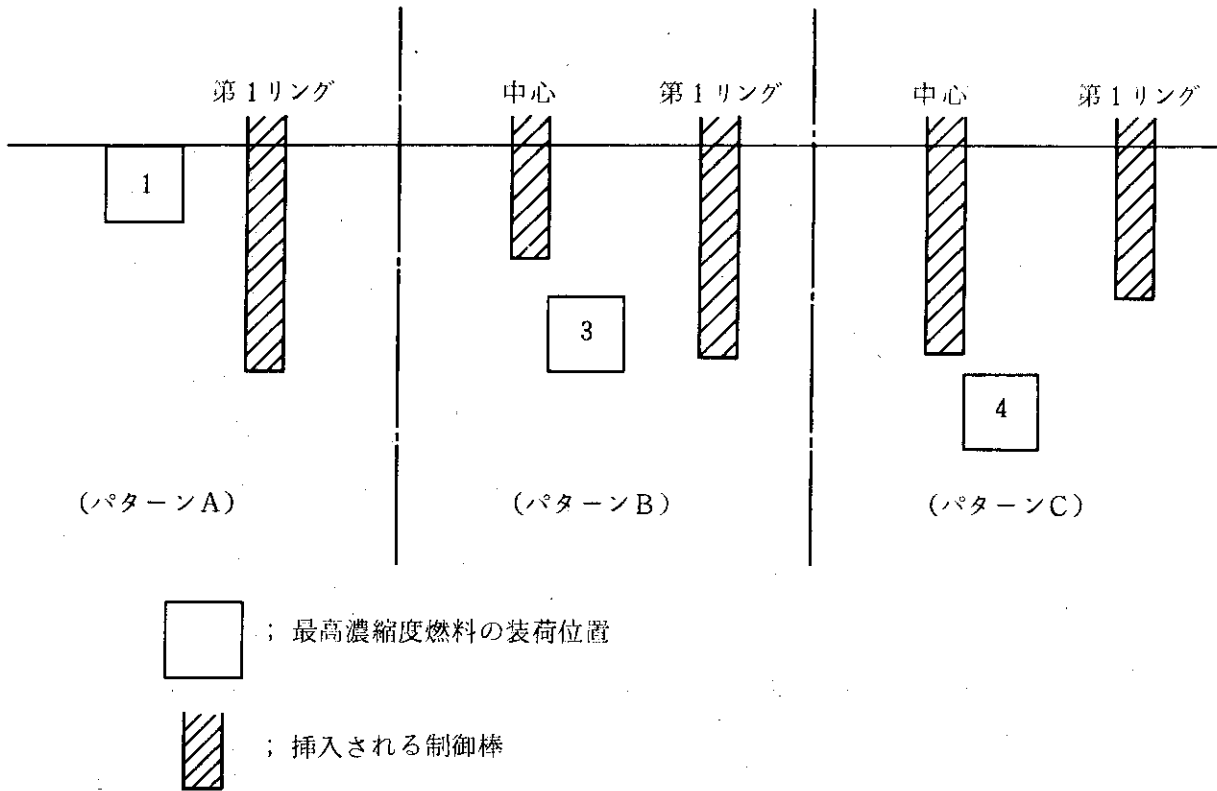


Fig 3.2.10 制御棒パターン分類

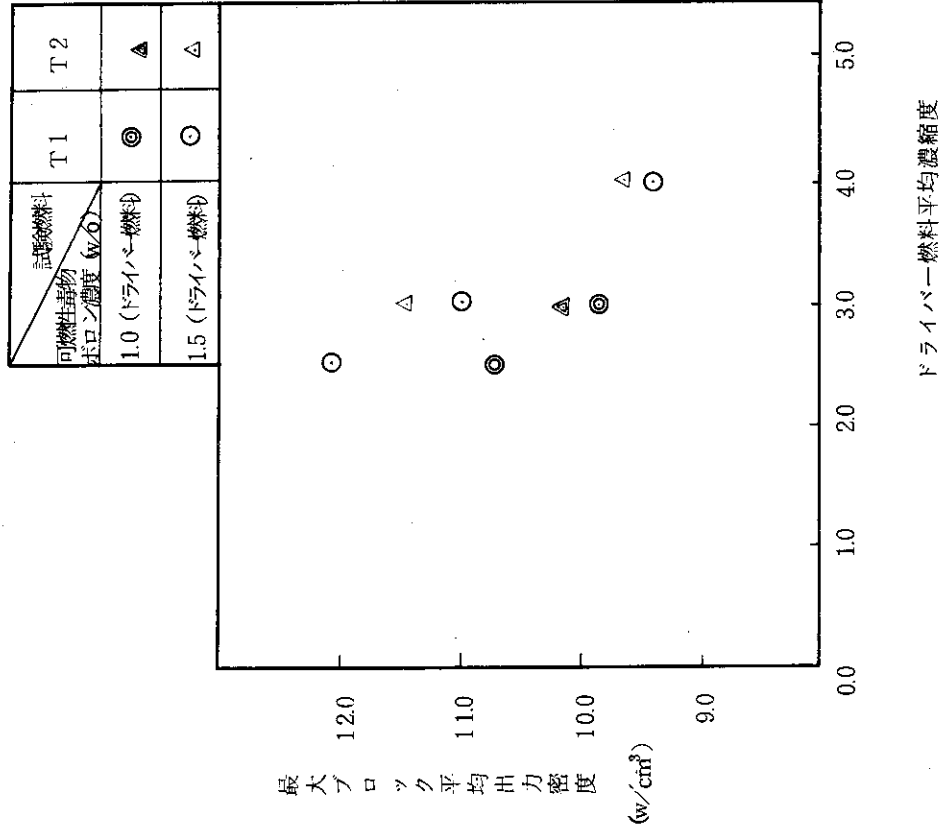


Fig 3.2.12 ドライバ燃料変更による最大ブロック平均出力密度の変化  
(セミピンドライバ炉心)

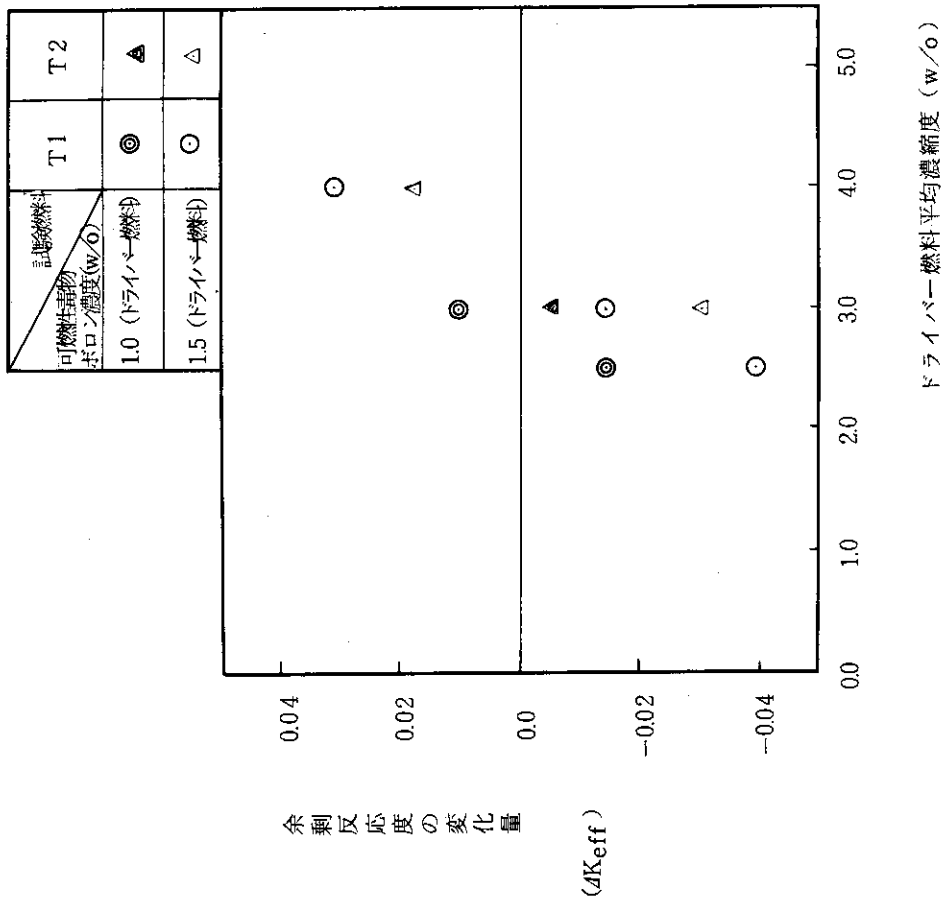


Fig 3.2.11 ドライバ燃料変更による実効増倍率の変化  
(セミピンドライバ炉心)

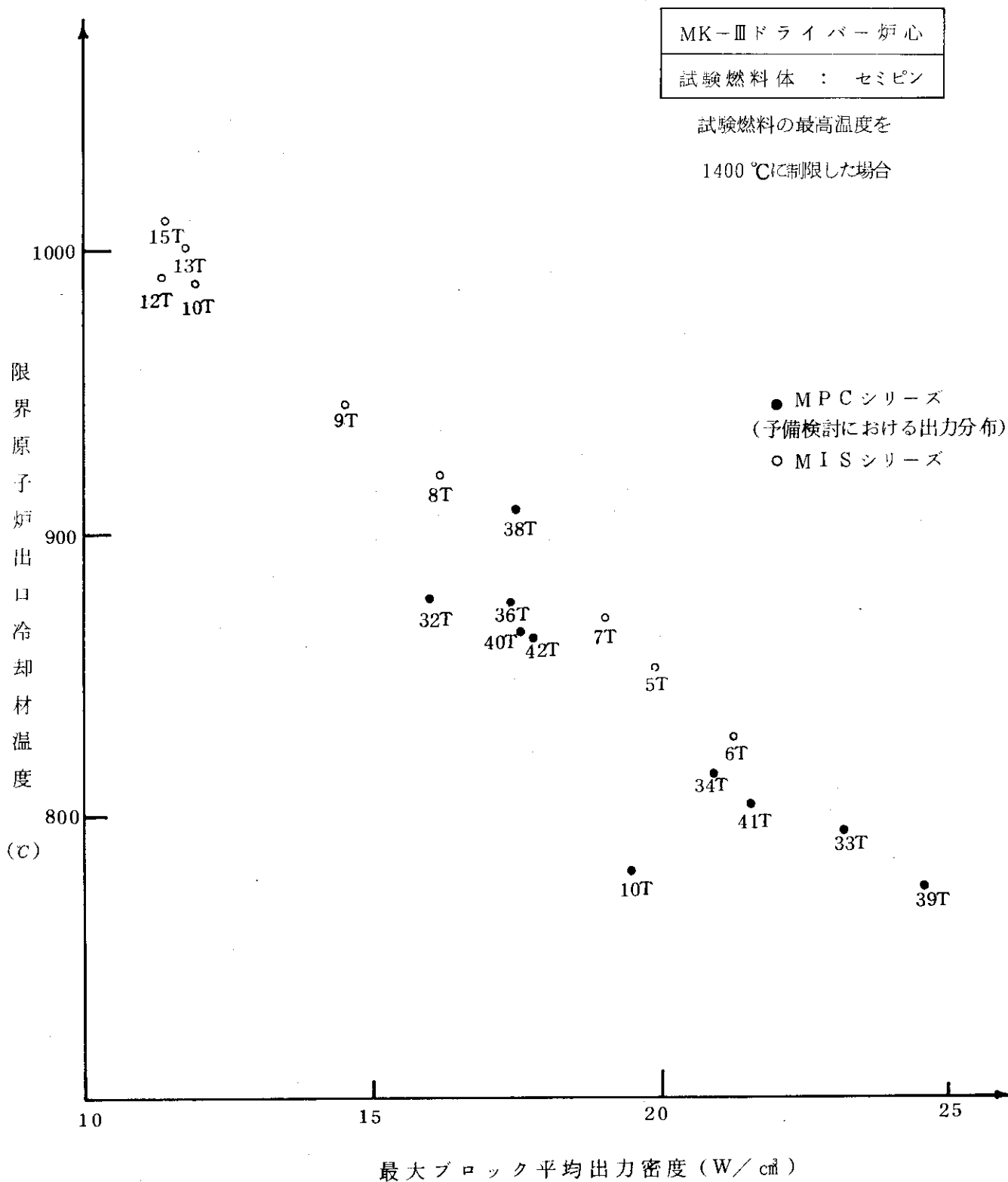


Fig 3.2.13 Mk-IIIドライバー炉心における最大ブロック平均出力密度と限界原子炉出口冷却材温度との関係

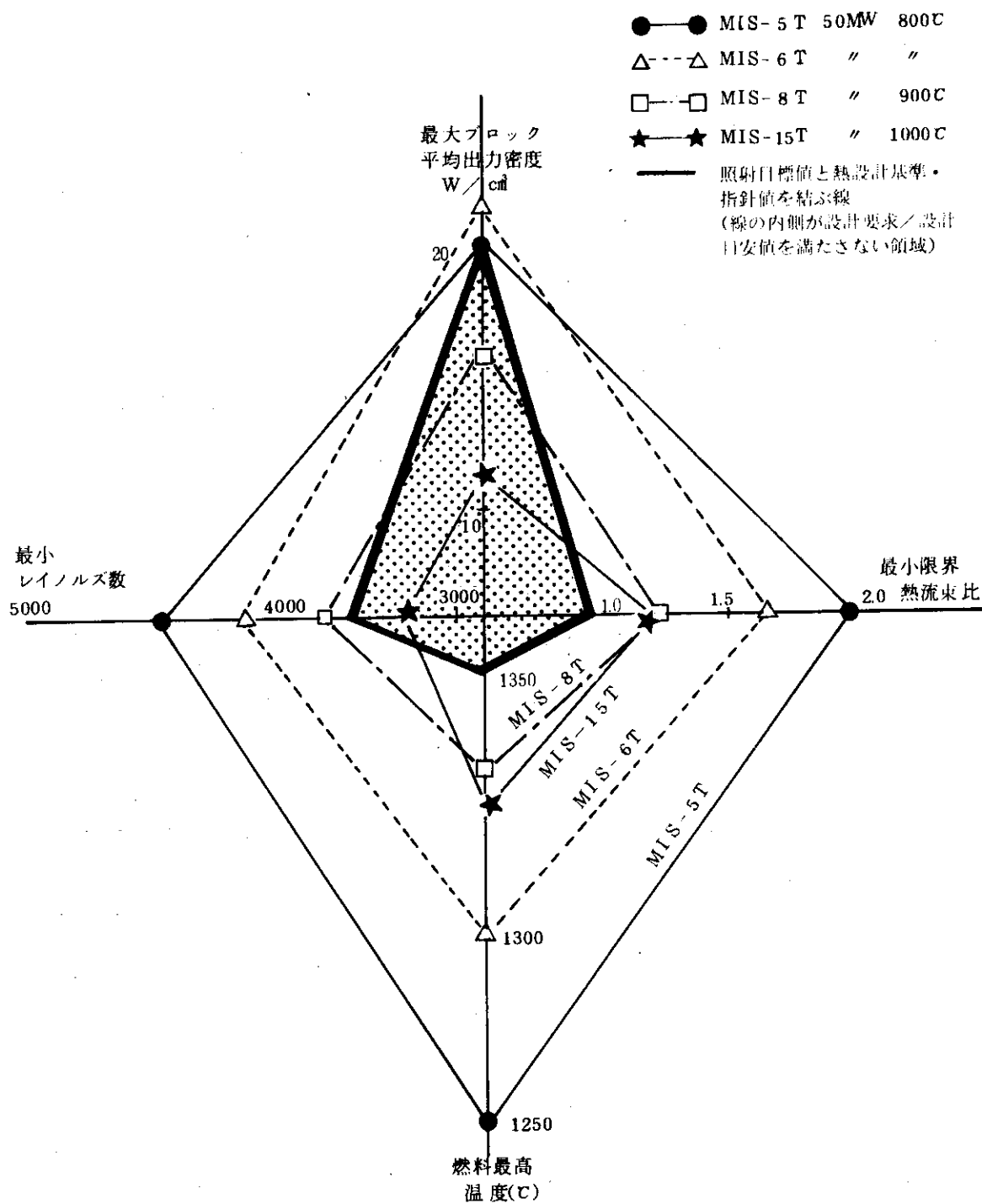


Fig 3.2.14 Mk-IIIドライバー炉心における最大ブロック平均出力密度と熱流動特性値の関係

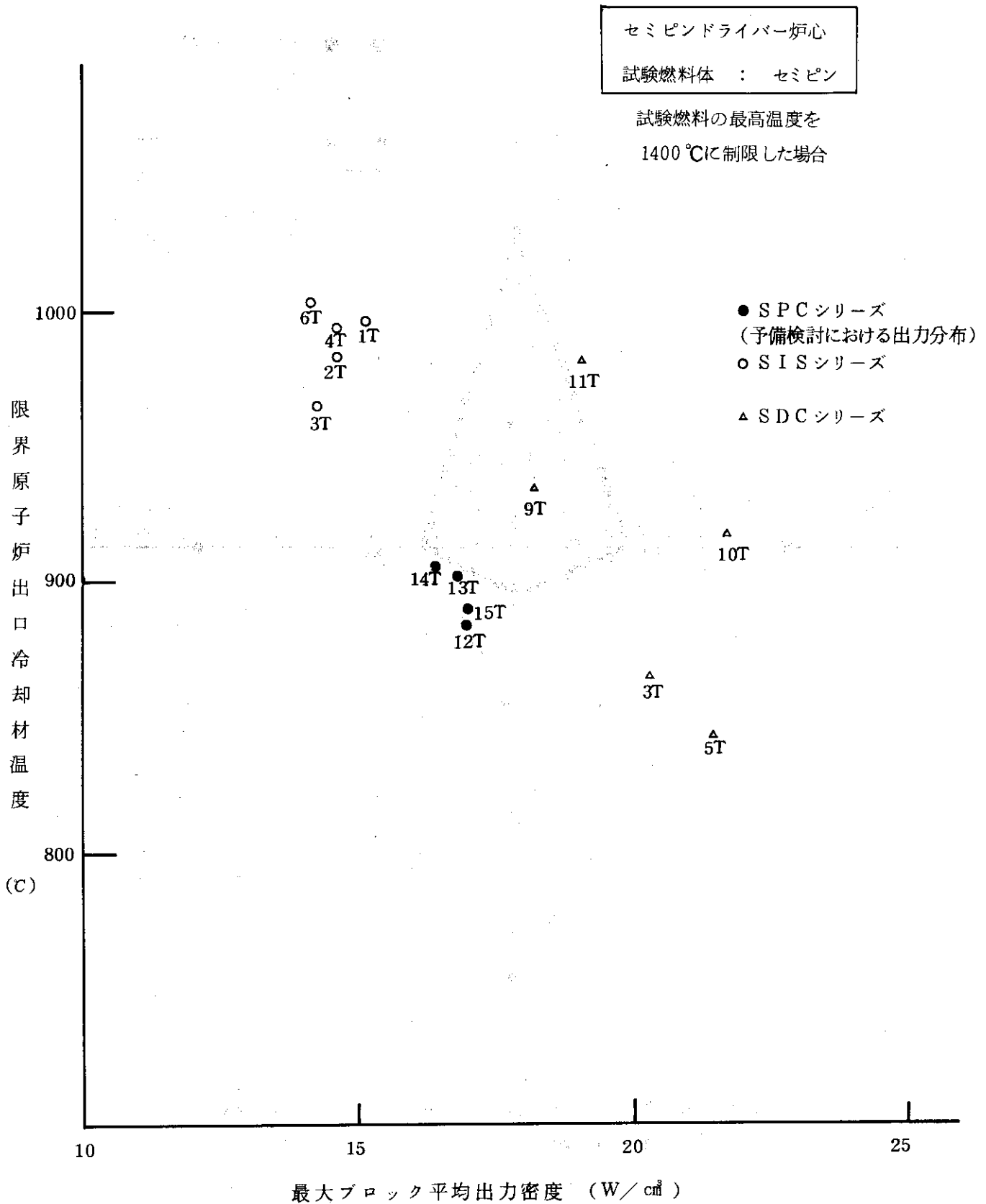


Fig 3.2.15 セミピンドライバー炉心における最大ブロック平均出力密度と  
 限界原子炉出口冷却材温度の関係



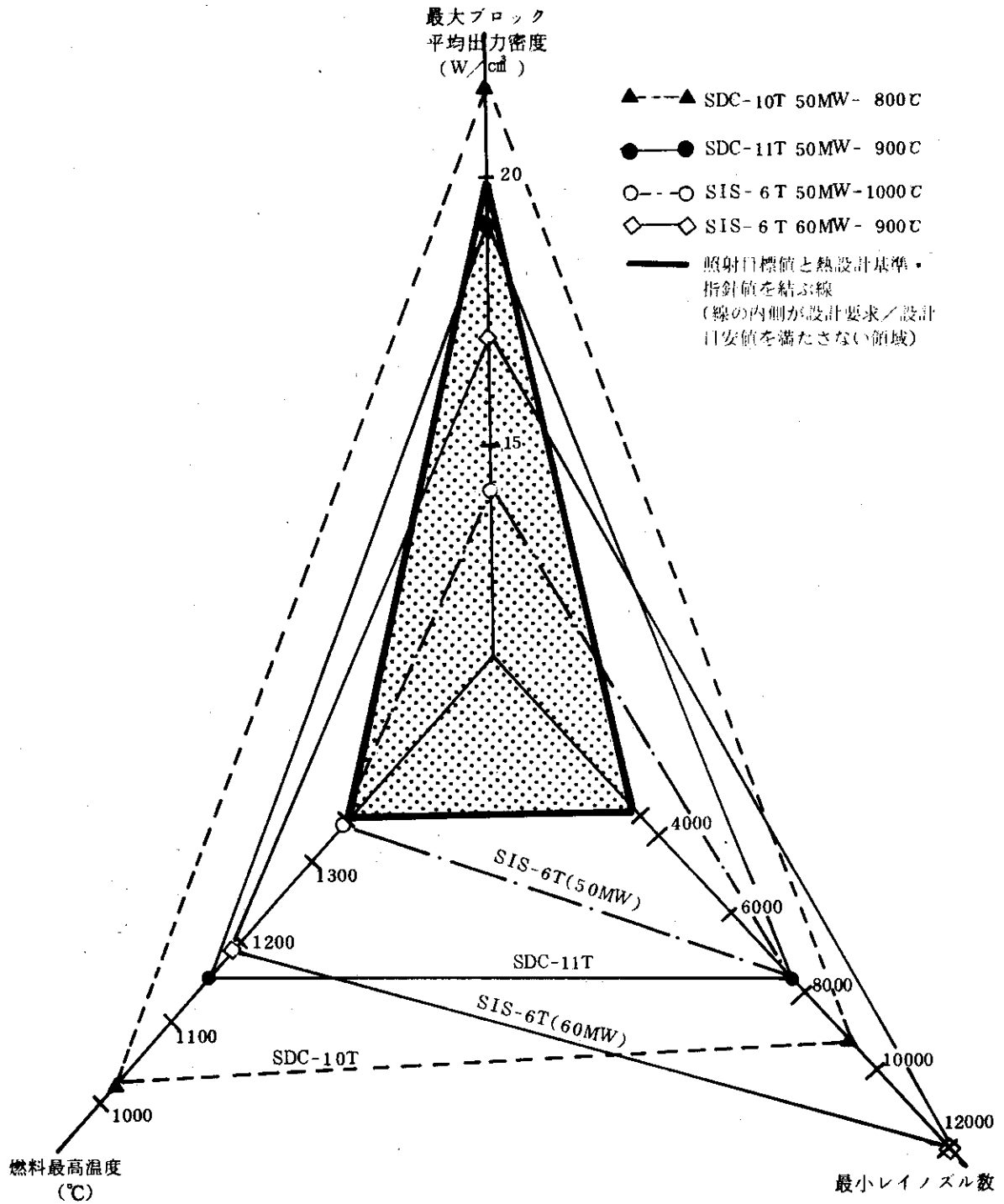


Fig 3.2.16 セミピンドライバー炉心における最大ブロック平均出力密度と熱流動特性値の関係

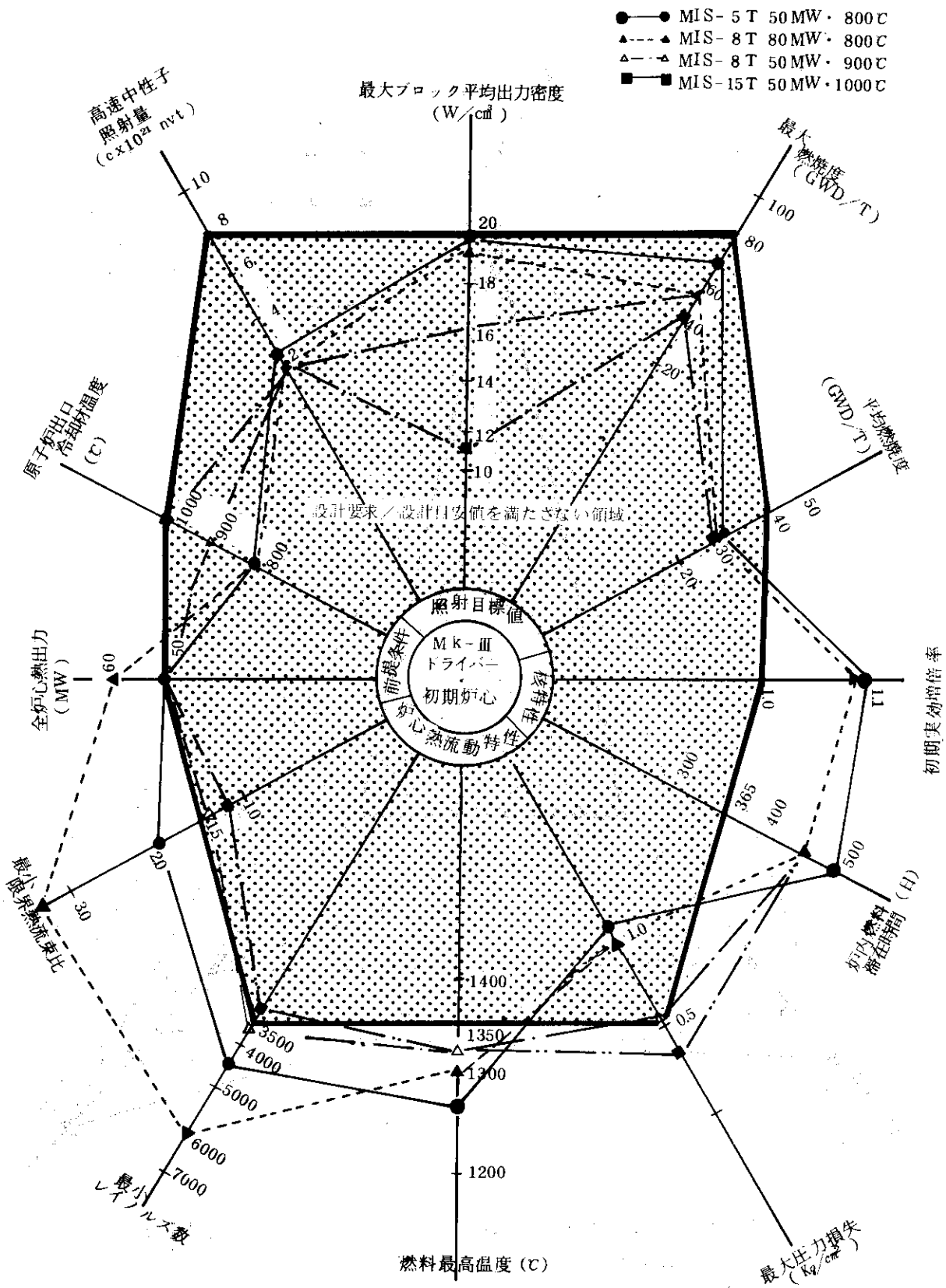


Fig 3.2.17 Mk-IIIドライバー初期炉心の特性比較

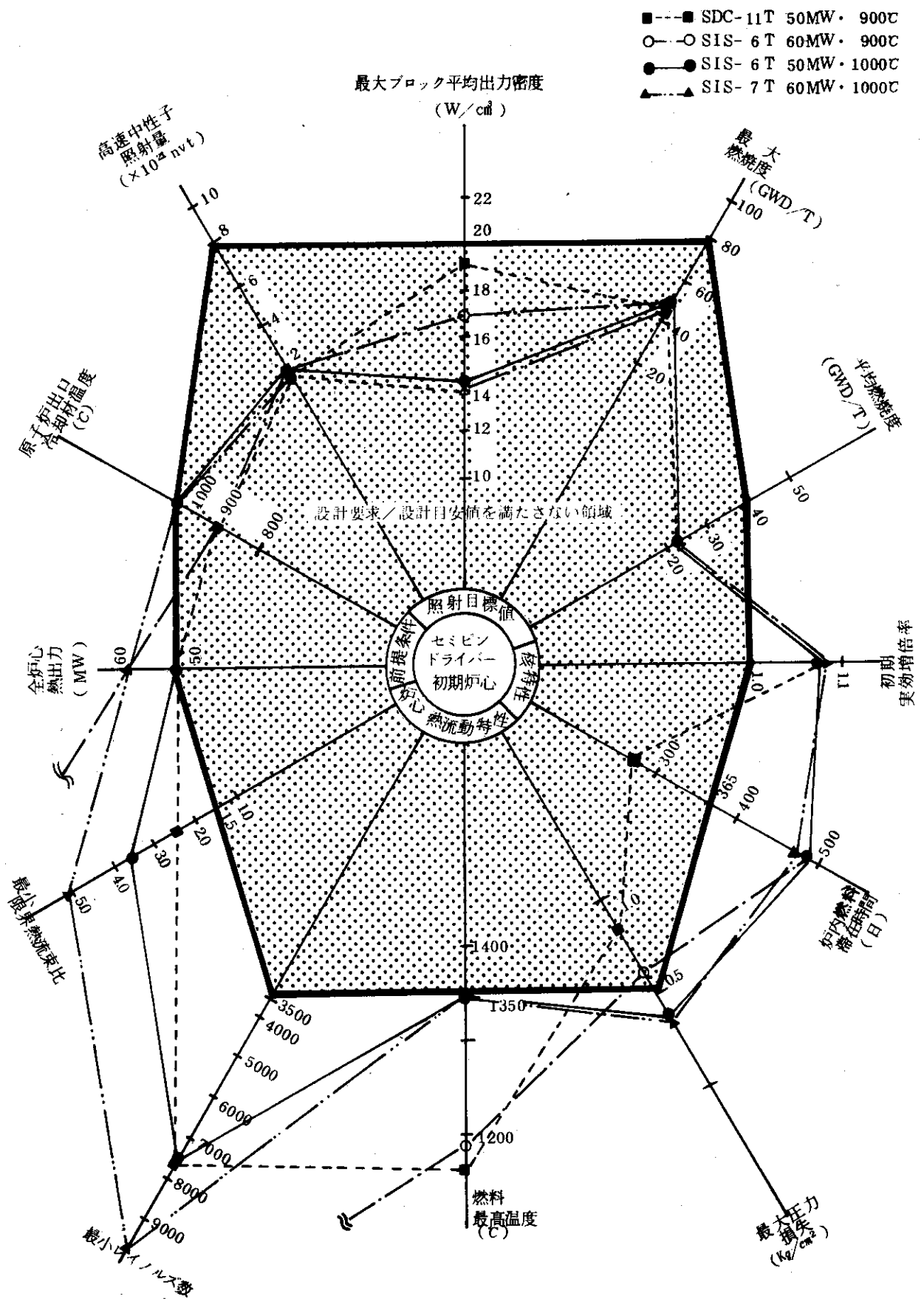


Fig 3.2.18 セミピンドライバー初期炉心の特性比較

### 3.3 参考炉心の核特性

前節に述べた参考炉心MR-1炉心及びSR-1炉心について詳細な核特性を解析し、照射炉用炉心の特徴を明らかにするとともに問題点、等を考察した。参考炉心の主要な核特性をTable 3.3.1に示す。

#### 3.3.1 初期炉心状態特性

##### (1) 反応度収支と炉停止余裕

Mk-III, MR-1, セミピン及びSR-1の各炉心の反応度収支を各々Table 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4及び3.3.5に示す。Mk-III型燃料ドライバー炉心ではセミピン型燃料ドライバー炉心に較べ $N_c/N_u$ が高いこともあり、燃焼を補償する余剰反応度が大きく、可燃性毒物の反応度補償量も大きい。

又、MR-1及びSR-1炉心とも、試験燃料を装荷しても反応度収支的にはほとんど影響を受けていないことがわかる。

次に、全制御棒が完全挿入された状態及び中心制御棒1対がスタックした状態の制御棒による炉停止余裕をTable 3.3.6に示す。これらの値は初期冷温状態(Cold-clean)におけるものである。制御棒の反応度補償能力はMk-III型燃料ドライバー炉心の方がセミピン型燃料ドライバー炉心より高いことがわかる。

制御棒の反応度補償量をみるとMR-1炉心ではMk-III炉心に較べて全制御棒で $0.012 \Delta k_{eff}$ 、中心制御棒対を除いた場合 $0.022 \Delta k_{eff}$ 程度小さくなる。そして、MR-1炉心の炉停止余裕はMk-III炉心より、全制御棒挿入状態で $0.01 \Delta k_{eff}$ 、中心制御棒対スタック状態で $0.019 \Delta k_{eff}$ 程度小さくなることがわかる。このように、試験燃料として濃縮度の高い燃料を装荷する影響は中心制御棒スタック時の炉停止余裕に強く表れる。もし、制御棒の反応度値計算に10%の誤差を見込むと、中心制御棒1対のスタック状態での炉停止余裕はMk-III炉心の $0.04 \Delta k_{eff}$ からMR-1炉心では $0.026 \Delta k_{eff}$ とほぼ4%も減少し、MR-1炉心の炉停止余裕は不足気味になるといえよう。

一方、SR-1炉心における制御棒の反応度補償量はセミピン炉心に較べて、全制御棒で $0.001 \Delta k_{eff}$ 、中心制御棒対スタック状態で $0.007 \Delta k_{eff}$ と若干減少するが、炉停止余裕への影響は比較的小さいといえよう。

以上のように、試験燃料を装荷することによる中心制御棒1対スタック時の炉停止余裕の減少は、SR-1炉心よりもMR-1炉心で強く表れており、これはMR-1炉心の試験燃料の可燃性毒物の装荷量の少ないこともあるが、主たる原因はMk-III型燃料の $N_c/N_u$ がセミピン型燃料より大巾に高いことの影響といえよう。従って、このMk-III型燃料の高い $N_c/N_u$ 値は試験燃料の出力密度を高めるうえで有利ではあるが、逆に炉停止余裕の面では不利になることがわかる。

##### (2) 制御棒の反応度補償特性

まず、制御棒の軸方向ストローク特性をFig. 3.3.1~3.3.4に示す。図には中心制御棒1対のみの挿入、第1リング制御棒6対の挿入及び中心と第1リング制御棒7対の挿入の3種

類について示した。

多くの制御棒をまとめて挿入すると中性子束分布を大きく歪ませ、ストローク特性が悪くなるという傾向は試験燃料を装荷しても変わらない。試験燃料を装荷すると、炉心の中央（炉心上部から4ブロック目）の燃料濃縮度が非常に高いことを反映して、炉心上部（上部から1ブロック目、2ブロック目）での補償割合が減少し、炉心中央部（上部から3ブロック目、4ブロック目）での補償割合が増加する。この傾向は中心制御棒だけでなく第1リング制御棒にも強くあらわれている。

次に中心対制御棒の反応度に対する感度をみよう。

全長引抜状態の中心制御棒1対を炉心上部から順次挿入していった場合の1ブロック当りの反応度補償量の増加量、あるいは、全長挿入状態から順次引抜いていった場合の1ブロック当りの印加反応度の増加量を制御棒感度として、Fig. 3.3.5及び3.3.6に示す。

Mk-III炉心およびセミピン炉心では、炉心の下部から上部に向かって順次燃料濃縮度が高くなっているため、炉心上部の中性子インポートンスが高いことを反映して、炉心上部（1ブロック目、2ブロック目）の感度が高く、炉心の下部にいくに従って、順次低くなっている。また、Mk-III炉心とセミピン炉心と比較すると、Mk-III炉心では制御棒感度は1ブロック目でピークになっているが、セミピン炉心では炉心上部から2ブロック目でピークになっている。さらに、初期定格状態（Hot-clean）における制御棒の反応度補償能力は初期冷温状態（Cold-clean）と同様にMk-III炉心の方が高い。

Mk-III炉心とMR-1炉心、あるいは、セミピン炉心とSR-1炉心とを比較すると、MR-1炉心あるいはSR-1炉心の制御棒感度は、Mk-III炉心あるいはセミピン炉心に比し、炉心上部（1ブロック目、2ブロック目）の制御棒感度が大きく低下し、炉心中央部（3ブロック目、4ブロック目）の感度が高くなり、中央部（炉心上部から4ブロック目）に燃料濃縮度の非常に高い試験燃料を装荷した影響が強く表われているのがわかる。炉心上部の制御棒感度が低下するということは、Xe & Sm蓄積の運転状態において、制御特性の改善および事故時の印加反応度の低下という良好な結果をもたらす。

次に、制御棒の最大反応度価値を最も大きい価値をもつ中心制御棒対に対して検討した。検討結果を3.3.7に示す。これらの値は、第1リング制御棒がある位置までの部分長挿入状態のままに保持されている時に、中心制御棒1対がある部分長挿入状態から全長引抜かれた場合の印加反応度量（ $\Delta k_{eff}$ ）、あるいは、全長引抜状態からある部分長挿入した場合の補償反応度量（ $\Delta k_{eff}$ ）を示している。MR-1炉心及びSR-1炉心の中心制御棒1対の反応度価値は比較的小さい値になっており、又MR-1炉心の反応度価値の方がSR-1炉心より高くなっている。MR-1炉心およびSR-1炉心の初期定格運転状態における制御棒最大反応度価値は、それぞれ、 $0.014 \Delta k_{eff}$  および  $0.005 \Delta k_{eff}$  であり、設計基準に対する目安値である  $0.016 \Delta k_{eff}$  および  $0.022 \Delta k_{eff}$  よりも小さくなっている。

### 3.3.2 燃焼炉心状態特性

#### (1) 反応度変化と制御棒操作手順

MR-1炉心およびSR-1炉心の制御棒操作手順を反応度変化とともに、Fig. 3.3.7,

3.3.8にそれぞれ示す。この反応度変化は、燃焼の各時点において、制御棒が完全に引抜られた場合の実効増部率の変化を示しており、可燃性毒物による反応度補償は含まれている。

MR-1炉心およびSR-1炉心とも、燃焼直後にXe & Smの蓄積により反応度が急激に低下し、この反応度低下を補償するために制御棒が引抜れる。燃焼初期には可燃性毒物の燃焼による反応度回復が起り制御棒が挿入されるが、燃焼開始後100日～150日の反応度が最も回復する時点を過ぎた後は、燃料の減損による反応度低下にともなって、順次制御棒が引抜れる。余剰反応度が運転余裕分 $0.01 \Delta k_{eff}$ を確保できなくなる時点でドライバー燃料のみが交換され、引続いて、第2サイクルの燃焼が始る。第2サイクルも第1サイクルとほぼ同様であるが、試験燃料の燃焼はすでに相当進んでいるので、余剰反応度は少し低めであり、したがって、制御棒の挿入度も浅めになり、また、炉内燃料滞在時間も短くなる。

MR-1炉心とSR-1炉心を比較すると、Xe & Sm蓄積による余剰反応度の減少量はほぼ同じであるが、可燃性毒物の燃焼による反応度回復量はSR-1炉心の方が大きく、また、反応度回復後の燃料の減損による余剰反応度の低下割合もSR-1炉心の方が緩やかである。したがって、炉内燃料滞在時間は、SR-1炉心の方が初期余剰反応度が小さいにもかかわらず長くなっている。

MR-1炉心の方に多量の可燃性毒物が装荷されているにもかかわらず、可燃性毒物の燃焼による反応度回復がSR-1炉心よりも小さいのは、セミピン型ドライバー燃料では均質棒状の可燃性毒物を用いているのに対して、Mk-III型ドライバー燃料では、直径 $400 \mu$ の $B_4C$ 粒子を黒鉛粉末中に分散された可燃性毒物を用いて、空間遮蔽効果を強くしていることによる。空間遮蔽効果を強くすることは、反応度回復を低く押えるためには有刻であることがよくわかるが、燃焼末期の残存量が多くなり、炉内燃料滞在時間を短くする作用もある。

一方、SR-1炉心の方が燃料の減損による余剰反応度の低下割合の小さいのは、セミピン型ドライバー燃料の $N_c/N_u$ 値がMk-III型ドライバー燃料よりも小さいためである。

MR-1炉心の炉内燃料滞在時間は、第1サイクルで585日、第2サイクルで450日であり、設計基準である負荷率50%で2年以上を満足している。また、SR-1炉心の炉内燃料滞在時間も、第1サイクルで625日、第2サイクルで525日と設計基準である負荷率60%で2年以上を満足している。

## (2) 出力分布と中性子束分布

### (a) 最大線出力

試験燃料の最大線出力は照射目標の1つであるが、具体的目標値は標準燃料体1個当りで平均された出力密度の最大値（最大ブロック出力密度）として与えられている。

MR-1炉心およびSR-1炉心の試験燃料、ドライバー燃料両者の最大ブロック出力密度の燃焼による変化をFig. 3.3.9およびFig. 3.3.10に示す。試験領域の最大ブロック出力密度は常に炉心上部から4ブロック目で発生しているが、ドライバー領域の最大ブロック出力密度の発生位置は、燃焼初期には炉心上部から4ブロック目であるが、燃焼が進に従って制御棒が引抜れることに対応して、徐々に炉心の上方に移動していく。

MR-1炉心の試験燃料の最大ブロック出力密度は初期クリーン状態で $19.9 \text{ w/cm}^2$ と照射目標値 $20 \text{ w/cm}^2$ をほぼ満足していたが、Xe & Smの蓄積にともなって制御棒は挿入され

るが、高出力密度による燃料の急激な減損により、最大ブロック出力密度は少し低下する。反応度回復のピーク点を過ぎると、制御棒の引抜と燃料の減損の両方の効果により、最大ブロック出力密度は急激に低下し、第1サイクルの末期には $6.3 \text{ w/cm}^2$ になる。第2サイクルの初期には、ドライバー燃料の交換にともなう制御棒挿入によって、 $11.3 \text{ w/cm}^2$ にまで回復した最大ブロック出力密度も、その後の燃焼にともなう除々に低下してゆき、第2サイクルの末期では、 $5.8 \text{ w/cm}^2$ である。第2サイクル末期の最大ブロック出力密度が第1サイクル末期とほぼ変わらないことを考えると、第2サイクルにおける変化の大部分は制御棒の操作によるものであると言える。

一方、SR-1炉心の試験燃料の最大ブロック出力密度は初期クリーン状態で $14.1 \text{ w/cm}^2$ と最初から照射目標値を大きく下廻っているが、Xe & Smの蓄積にともなうさらに $11.5 \text{ w/cm}^2$ にまで低下する。燃焼初期には可燃性毒物の燃焼による反応度回復にともなう制御棒が挿入されることにより、最大ブロック出力密度は少し回復する。MR-1炉心では反応度回復時にも低下しているのに、SR-1炉心で回復するのは、反応度回復量がSR-1炉心の方が大きいこと、ならびに出力密度がMR-1炉心ほど高くはないので燃料の減損が少いことによる。反応度回復のピーク点を過ぎると最大ブロック出力密度は急激に低下してゆくが、出力密度自身がMR-1炉心より小さいことにより、MR-1炉心よりは緩やかな低下である。第1サイクル末期には、 $4.6 \text{ w/cm}^2$ であった最大ブロック出力密度は、ドライバー燃料の交換により第2サイクルの初期には $8.7 \text{ w/cm}^2$ まで回復するが、その後は、燃焼とともに除々に低下してゆき、第2サイクルの末期では、 $4.1 \text{ w/cm}^2$ である。

MR-1炉心およびSR-1炉心の最大線出力の燃焼による変化をそれぞれ、Fig. 3. 3.11およびFig. 3. 3.12に示す。この最大線出力は、燃料体の平均ではなく計算点のうちでの最大であり、また試験燃料については、セミピン型のみでなく中空・円環型およびマルチホール型についてもあわせて示した。

最大線出力の燃焼による変化は最大ブロック出力密度の変化と同じである。試験燃料の最大線出力は、各燃料体型式のチャンネル数にほぼ逆比例している。MR-1炉心のセミピン試験燃料について見ると、燃焼開始後300日を境にして、ドライバー燃料の最大線出力が試験燃料の最大線出力よりも大きくなる。

なお、MR-1炉心及びSR-1炉心の軸方向出力分布の燃焼変化を参考のため各々Fig. 3. 3.13及び3. 3.14に示しておく。

#### (b) 出力ピーキング係数

出力ピーキングに対する検討結果をFig. 3. 3.15～3. 3.18に示す。図には次の3種類の出力ピーキング係数を示した。

- $P_0 = \bar{P}_{\text{orifice}} / \bar{P}_{\text{core}}$  ; 炉心平均出力密度に対するオリフィス領域平均出力密度の比
- $P_1 = \bar{P}_{\text{ch, orifice}} / \bar{P}_{\text{ch, core}}$  ; 炉心平均チャンネル出力に対するオリフィス領域平均チャンネル出力の比
- $P_2 = P_{\text{ch, max}} / \bar{P}_{\text{ch, orifice}}$  ; 各オリフィス領域の平均チャンネル出力に対するそのオリフィス領域最大チャンネル出力の比

照射試験領域の $P_0$ の燃焼による変化は、最大ブロック出力密度の変化に近い。また、 $P_1$ は $P_0$ に対してチャンネル本数の違いを換算したものであるから、燃焼による変化は $P_0$ と同じである。MR-1炉心の照射試験領域の $P_2$ は第1サイクルの初期では非常に小さいが、燃焼が進むに従って、徐々に大きくなってゆく。一方、第2オリフィス領域の $P_2$ は、燃焼を通じて1.1に近い値であるが、各サイクルの初期と末期でわずかに大きくなっている。SR-1炉心の照射試験領域の $P_2$ は燃焼を通じて1.1以下であるが、第2サイクルの $P_2$ は第1サイクルの $P_2$ よりも全体的に大きい。一方第2オリフィス領域の $P_2$ は、照射試験領域の $P_2$ よりも全体的に高い。

### (c) 中性子束分布

4群中性子束の燃焼変化をFig. 3. 3. 19～3. 3. 26に示した。中性子束は燃焼とともに減少するが、これは制御棒の引抜にともなってドライバー領域の濃縮度の比較的高い領域の出力分担の割合が増していくためといえる。そして、速中性子群の最大中性子束は最大線出力とほぼ同様の变化するのがわかる。

## (3) 燃料燃焼度と高速中性子照射量

### (a) 燃料燃焼度

MR-1炉心およびSR-1炉心の燃料燃焼度の軸方向分布をFig. 3. 3. 27およびFig. 3. 3. 28に示す。これらの図には、第1燃焼サイクルおよび第2燃焼サイクル末期の平均燃焼度を試験燃料およびドライバー燃料に分けて示した。

試験燃料の燃焼度が炉心上部から4ブロック目で極端に大きくなっているのは、試験燃料の装荷法から当然のことである。ドライバー燃料の第1燃焼サイクル末期の燃焼度は、MR-1炉心では炉心上部から4ブロック目、SR-1炉心では3ブロック目で最大になっている。炉心上部から3ブロック目あるいは4ブロック目で燃焼度が最大になるのは、制御棒の挿入および、照射試験領域の4ブロック目に濃縮度の高い燃料が存在することの両方によって、この領域の熱中性子束が高くなるからである。MR-1炉心とSR-1炉心とで最大燃焼度の発生位置が異なるのは、MR-1炉心では3ブロック目、4ブロック目とも3.3 w/o濃縮燃料が装荷されているのに対して、SR-1炉心では、3ブロック目に4 w/o濃縮と4ブロック目の3 w/o濃縮より濃縮度の高い燃料が装荷されているためである。ドライバー燃料の第2燃焼サイクル末期の燃焼度は、炉心上部から2ブロック目で最大となっている。これは、第2サイクルは第1サイクルより制御棒の挿入度が浅いこと、および、試験燃料の燃焼が既に相当進んでいることによる。

MR-1炉心の試験燃料の最大燃焼度は104 GWD/Tonであり、照射目標である80 GWD/Tonを大きく上回っているが、平均燃焼度は37 GWD/Tonと若干不足気味である。一方、SR-1炉心では、最大燃焼度は82 GWD/Tonと照射目標を満足するものの、平均燃焼度は、28 GWD/Tonと照射目標を下回った。

### (b) 高速中性子照射量

MR-1炉心およびSR-1炉心の高速中性子照射量の軸方向分布をFig. 3. 3. 29 およびFig. 3. 3. 30に示す。これらの図には、第1燃焼サイクル末期および第2燃焼サイクル末期の平均照射量を試験燃料およびドライバー燃料に分けて示した。



高速中性子照射量の分布は、燃料燃焼度の分布とほぼ同様である。試験燃料の高速中性子照射量の最大値はMR-1炉心で $3.8 \times 10^{21}$  nvt、SR-1炉心で $3.0 \times 10^{21}$  nvtと、照射目標の $8 \times 10^{21}$  nvtの半分以下しか達成できない。

### 3.3.3 核特性のまとめ

以上の結果は以下のように整理できる。

#### (1) 照射炉用炉心の特性

##### (i) 炉停止余裕

試験燃料として濃縮度の高い燃料を装荷すれば炉停止余裕が厳しくなり、全制御棒挿入時の炉停止余裕に対する影響は比較的小さいものの、中心制御棒1対スタック時の炉停止余裕への影響は大きくなる。特に、 $N_c/N_u$ 値の高いMk-III型燃料ドライバー炉心の炉停止余裕は厳しくなる。

##### (ii) 制御棒の反応度補償特性

試験燃料として、炉心の中央1ブロックのみに濃縮度の高い燃料を装荷すると、制御棒の反応度補償特性は大きな影響を受ける。すなわち、炉心上部における反応度補償割合が大きく低下し、炉心中央部の反応度補償割合が増加する。しかも、この影響は中心制御棒だけでなく、第1リング制御棒も強く受ける。

##### (iii) 出力分担の燃焼による変化

試験燃料として、濃縮度の高い燃料を装荷することにより、燃焼初期には照射試験領域（第1オリフィス領域）の出力分担が非常に大きい、出力密度が大きい分だけ照射試験領域の燃焼が急激に進み、照射試験領域の出力分担は燃焼にともない急激に小さくなる。この出力分担の燃焼による急激な変化は、冷却材の流量調節および炉心熱流動特性に大きな影響を及ぼす。

##### (iv) ドライバー燃料の特性

Mk-III型ドライバー燃料とセミピン型ドライバー燃料との基本的な相違点は $N_c/N_u$ 値であり、燃料濃縮度および可燃性毒物の相異は $N_c/N_u$ 値の相異から派生したものである。

この $N_c/N_u$ 値の相違により、制御棒の反応度補償能力、あるいは燃焼にともなう反応度変化を始めとして種々の核特性が異ってくる。特に、照射炉用炉心のドライバー燃料の $N_c/N_u$ 値の相異によってあらわれる核特性のうち最も重要なものは、熱中性子束レベルと照射試験領域の中性子インポートランスであり、 $N_c/N_u$ 値が高い程、熱中性子束レベルは高くなり、また照射試験領域の中性子インポートランスも高くなる。

MR-1炉心はドライバー燃料の高い $N_c/N_u$ 値を反映して熱中性子束レベルが高く、その結果として試験燃料の出力密度が高くなる。さらに、MR-1炉心の中心制御棒1対スタック時の炉停止余裕は高い中性子インポートランスを反映して大きく減少する。

このように、ドライバー燃料の $N_c/N_u$ 値は、照射炉用炉心の特性を大きく左右する重要な量であるといえよう。

## (2) 照射目標の達成度

## (i) 最大線出力

MR-1 炉心では初期において出力密度換算で  $20 \text{ w/cm}^2$  という照射目標をほぼ達成しているが、SR-1 炉心では、 $14 \text{ w/cm}^2$  と目標を大きく下廻った。

セミピン型ドライバー燃料を用いた炉心でも、ドライバー燃料の濃縮度を低くするか、あるいは、 $N_c/N_u$  値を高くすれば照射目標の達成は可能と考えられる。ただし、燃料濃縮度を低くすれば、炉内燃料滞在時間が極端に短くなる。

## (ii) 燃料燃焼度

最大燃焼度  $80 \text{ GWD/Ton}$  という照射目標はMR-1 炉心およびSR-1 炉心の両方とも達成している。一方、平均燃焼度  $40 \text{ GWD/Ton}$  という照射目標については、MR-1 炉心はほぼ達成しているが、SR-1 炉心は不足気味である。平均燃焼度の不足は、テスト燃料の平均濃縮度を高くすることにより解決できる。

## (iii) 高速中性子照射量

MR-1 炉心およびSR-1 炉心とも照射目標である  $8 \times 10^{21} \text{ nvt}$  の半分以下しか達成できない。高速中性子照射量については、高速中性子による照射のみを目的とした照射炉を用いるか、あるいは、照射時間を長くする以外に有効な解決法はない。

## (iv) 最大線出力の燃焼にともなう低下

MR-1 炉心およびSR-1 炉心とも、最大線出力は燃焼にともなう急激に低下してしまう。炉心の1部のみで高い出力密度を発生させれば、その領域の燃焼が他の領域に比べて急激に進むので、試験燃料の最大線出力は燃焼にともなう当然低下してゆく。

又、制御棒の引抜による線出力の低下を小さくするために、濃縮度の高い燃料の装荷量を増やすことが考えられる。この場合、炉停止余裕が十分取れなくなると考えられる。さらに、炉心上部で最大線出力が発生する場合には制御棒の挿入度が浅く中性子束の歪が相対的に小さいので、初期状態で4ブロック目に発生している最大線出力ほどの高い値は期待できない。その上、燃焼が進んで最大線出力の発生位置が炉心上部に移行した時点では線出力の高い領域が軸方向に長く続き、熱流動特性を悪化させる恐れがある等、問題点も多い。

又、全く別な方法として反応度回復をなだらかに長期間続かせ、反応度回復が終った時点で燃料交換を行うということも考えられる。

## (v) 炉停止余裕

MR-1 炉心の中心制御棒1対スタック時の炉停止余裕が不足気味であることがあきらかとなったが、試験燃料の可燃性毒物の装荷量を増すことによって多少の改善は期待できるものの、炉停止余裕が厳しくなるのはMk-IIIドライバー燃料自体の特性である。すなわち、 $N_c/N_u$  値が高いため、炉内燃料滞在時間を確保するためには大きい初期余剰反応度が必要なこと、ならびに照射試験領域の中性子インポートンスが高く試験燃料の装荷による反応度増加が大きいことを反映して炉停止余裕が厳しくなるのである。

Table 3.3.1 参考炉心の核特性

項 目		MR-1 炉 心			SR-1 炉 心		
1	反応度補償 ( $\Delta K_{eff}$ )	余 剩 反応度	制御棒	可燃性 毒 物	余 剩 反応度	制御棒	可燃性 毒 物
	温度上昇	0.076	0.083	-0.007	0.079	0.078	0.001
	Xe & Sm 蓄積	0.064	0.050	0.014	0.060	0.050	0.010
	燃 焼	0.170	0.040	0.130	0.116	0.031	0.085
	運転余裕	0.010	0.010	-	0.010	0.010	-
	炉停止余裕	-	0.153 (Cold)	-	-	0.147 (Cold)	-
2	出力密度 ( $W/cm^2$ )						
	炉心平均	2.20			2.20		
	照射試験領域						
	最 高	23.21			15.74		
	最高燃料体平均	19.90			14.11		
	照射試験領域平均	4.49			3.17		
	ドライバー領域						
	最 高	5.69			4.23		
	最高燃料体平均	5.15			3.84		
ドライバー領域平均	1.96			2.10			
3	出力ピーキング						
	全 炉 心	10.55			7.16		
	軸 方 向	4.45			4.44		
	径 方 向	2.37			1.61		
4	中性子束 ( $n/cm^2 \cdot sec$ )						
	速中性子束 ( $E > 2.38eV$ )						
	照射試験領域最大	$2.4 \times 10^{14}$			$1.7 \times 10^{14}$		
	照射試験領域平均	$6.9 \times 10^{13}$			$5.3 \times 10^{13}$		

Table 3.3.1 (続)

	項 目	MR-1 炉 心	SR-1 炉 心
4	ドライバー領域最大	$1.6 \times 10^{14}$	$1.2 \times 10^{14}$
	ドライバー領域平均	$3.4 \times 10^{13}$	$3.5 \times 10^{13}$
	炉心平均	$3.8 \times 10^{13}$	$3.7 \times 10^{13}$
	熱中性子束( $E < 2.38\text{eV}$ )		
	照射試験領域最大	$1.2 \times 10^{14}$	$8.3 \times 10^{13}$
	照射試験領域平均	$5.1 \times 10^{13}$	$3.5 \times 10^{13}$
	ドライバー領域最大	$1.2 \times 10^{14}$	$7.1 \times 10^{13}$
	ドライバー平均	$4.9 \times 10^{13}$	$3.2 \times 10^{13}$
	炉心平均	$4.9 \times 10^{13}$	$3.3 \times 10^{13}$
5	炉内燃料滞在時間(日)	1035	1150
	第1サイクル	585	625
	第2サイクル	450	525
6	平均燃焼度(GWD/Ton)		
	試験燃料		
	最大	104	82
	平均	37	28
	ドライバー燃料		
	最大(第1サイクル)	26	20
平均(第1サイクル)	15	13	
7	平均高速中性子照射量 ( $E > 0.18\text{MeV}$ ), ( $\text{n}/\text{cm}^2$ )		
	試験燃料		
	最大	$3.8 \times 10^{21}$	$3.0 \times 10^{21}$
	平均	$1.6 \times 10^{21}$	$1.3 \times 10^{21}$
	ドライバー燃料		
	最大	$1.3 \times 10^{21}$	$1.1 \times 10^{21}$
平均	$5.0 \times 10^{21}$	$5.6 \times 10^{21}$	

Table 3.3.2 Mk-III炉心の反応度バランス

項 目 \ 区 分	余剰反応度 ( $\Delta K_{eff}$ )	反 応 度 補 償 量 ( $\Delta K_{eff}$ )	
		制 御 棒	可 燃 性 毒 物
温 度 上 昇	0.073	0.082	-0.009
Xe & Sm 蓄 積	0.064	0.050	0.014
燃 燒	0.185	0.043	0.142
運 転 余 裕	0.010	0.010	--
合 計	0.332	0.185	0.147

Table 3.3.3 Mk-1炉心の反応度バランス

項 目 \ 区 分	余剰反応度 ( $\Delta K_{eff}$ )	反 応 度 補 償 量 ( $\Delta K_{eff}$ )	
		制 御 棒	可 燃 性 毒 物
温 度 上 昇	0.076	0.083	-0.007
Xe & Sm 蓄 積	0.064	0.050	0.014
燃 燒	0.170	0.040	0.130
運 転 余 裕	0.010	0.010	--
合 計	0.320	0.183	0.137

Table 3.3.4 セミピン炉心の反応度バランス

項 目 \ 区 分	余剰反応度 ( $\Delta K_{eff}$ )	反 応 度 補 償 量 ( $\Delta K_{eff}$ )	
		制 御 棒	可 燃 性 毒 物
温 度 上 昇	0.078	0.077	0.001
Xe & Sm 蓄 積	0.059	0.049	0.010
燃 燒	0.118	0.028	0.090
運 転 余 裕	0.010	0.010	--
合 計	0.265	0.164	0.101

Table 3.3.5 SR-1炉心の反応度バランス

項 目 \ 区 分	余剰反応度 ( $\Delta K_{eff}$ )	反 応 度 補 償 量 ( $\Delta K_{eff}$ )	
		制 御 棒	可 燃 性 毒 物
温 度 上 昇	0.079	0.078	0.001
Xe & Sm 蓄 積	0.060	0.050	0.010
燃 烧	0.116	0.031	0.085
運 転 余 裕	0.010	0.010	-
合 計	0.265	0.169	0.096

Table 3.3.6 各炉心の制御棒による炉停止余裕

制 御 棒 挿入状態	項 目	炉 心				
		M <sub>k</sub> -III	MR-1	MIS-6T	セミピン	SR-1
全 制 御 棒 全 挿 入	反応度補償量( $\Delta K_{eff}$ )	0.348	0.336	-	0.307	0.306
	炉停止余裕( $\Delta K_{eff}$ )	0.163	0.153	-	0.143	0.147
	炉停止余裕( $\Delta K_{eff}$ ) (含10%計算誤差)	0.129	0.120	-	0.112	0.116
中心制御棒 1対スタック	反応度補償量( $\Delta K_{eff}$ )	0.253	0.231	0.227	0.227	0.220
	炉停止余裕( $\Delta K_{eff}$ )	0.068	0.049	0.044	0.063	0.061
	炉停止余裕( $\Delta K_{eff}$ ) (含10%計算誤差)	0.042	0.026	0.021	0.041	0.039

( Cold- Clean 状態 )

Table 3.3.7 中心制御棒1対の反応度価値

制御棒挿入度 (注) (ブロック単位)		反 応 度 価 値 ( $\Delta K_{eff}$ )				計算体系	備 考
中 心	第1リング	Mk-III炉心	MR-1炉心	セミピン炉心	SR-1炉心		
R	0	0.006	0.004	0.005	0.003	2次元R-Z	
R	R	0.003	0.001	0.002	0.001	2次元R-Z	
1	0	0.020	0.012	0.015	0.009	2次元R-Z	
1	1	0.004	0.002	0.003	0.002	2次元R-Z	
2	0	0.034	0.022	0.025	0.017	2次元R-Z	
2	2	0.004	0.003	0.003	0.002	2次元R-Z	
$2\frac{2}{3}$	$2\frac{2}{3}$	—	—	—	0.005	3次元3角-Z	SR-1初期 定格状態
3	0	0.043	0.034	0.032	0.025	2次元R-Z	
3	$2\frac{2}{3}$	—	0.014	—	0.009	3次元3角-Z	MR-1初期 定格状態
3	3	0.005	0.009	0.003	0.006	2次元R-Z	
4	0	0.047	0.043	0.035	0.032	2次元R-Z	
4	4	0.006	0.016	0.003	0.007	2次元R-Z	

- (注) 1. R : 上部反射体を示す。  
 2. 1~4 : 炉心上部からのブロック数を示す。  
 3. 中心制御棒は、ブロック単位で示された位置までの部分長挿入状態から全引抜されることを示している。第1リング制御棒は、ブロック単位で示された位置までの部分長挿入状態に保持されることを示している。

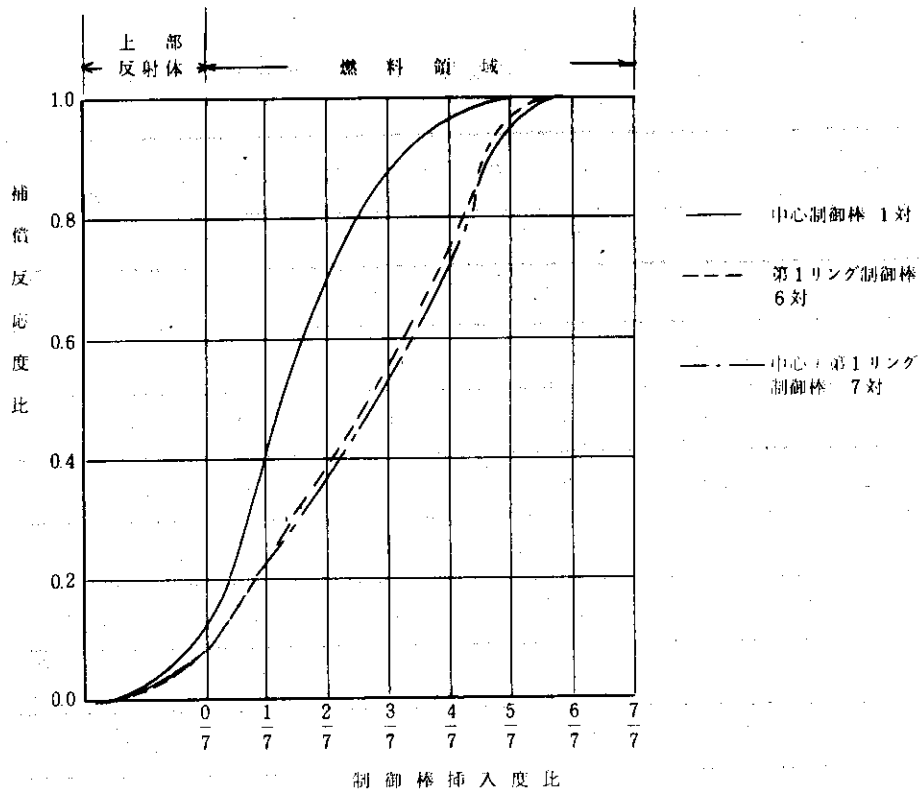


Fig. 3.3.1 制御棒ストローク特性  
(MR-1炉心)

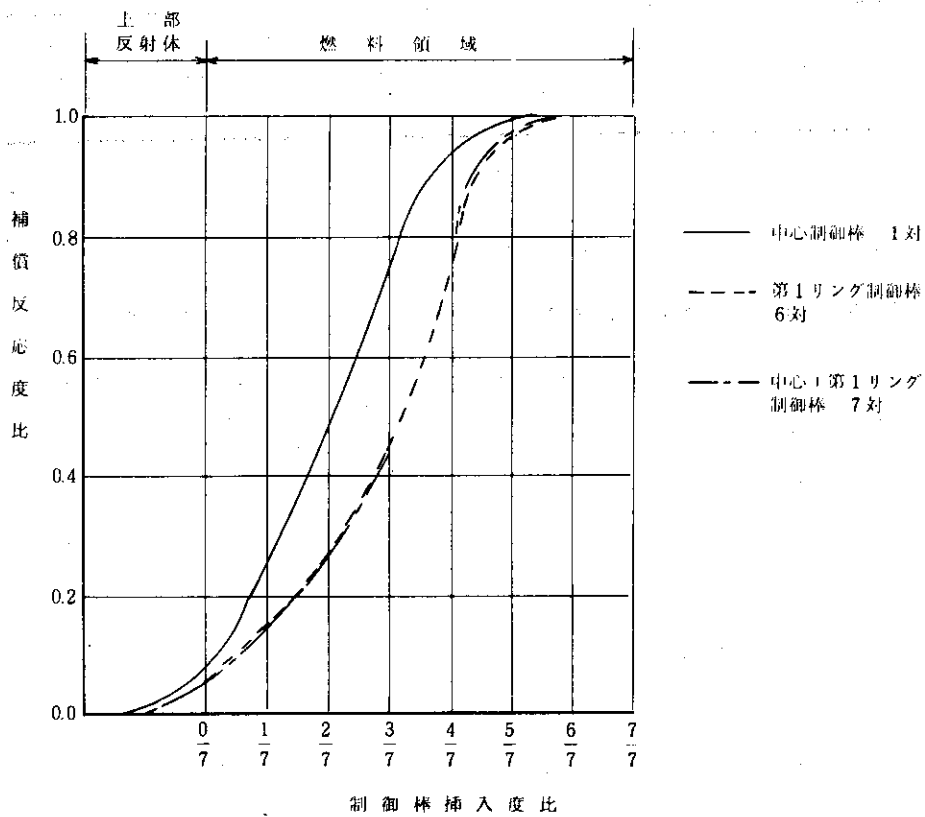


Fig. 3.3.2 制御棒ストローク特性  
(Mk-III炉心)



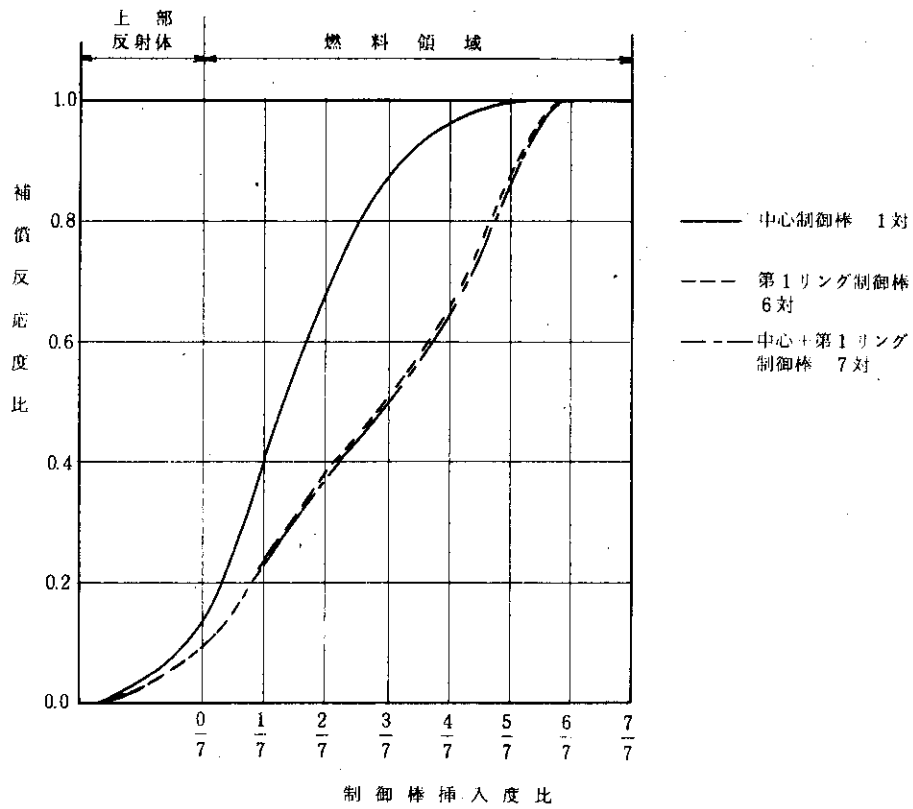


Fig. 3.3.3 制御棒ストローク特性  
(SR-1炉心)

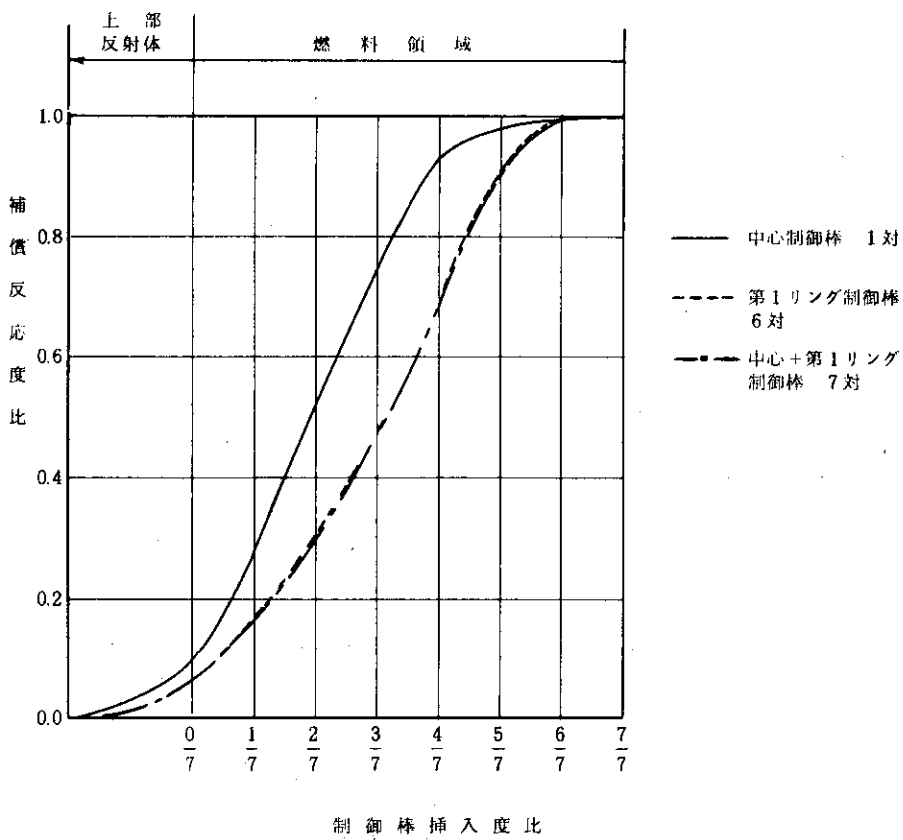


Fig. 3.3.4 制御棒ストローク特性  
(セミピン炉心)

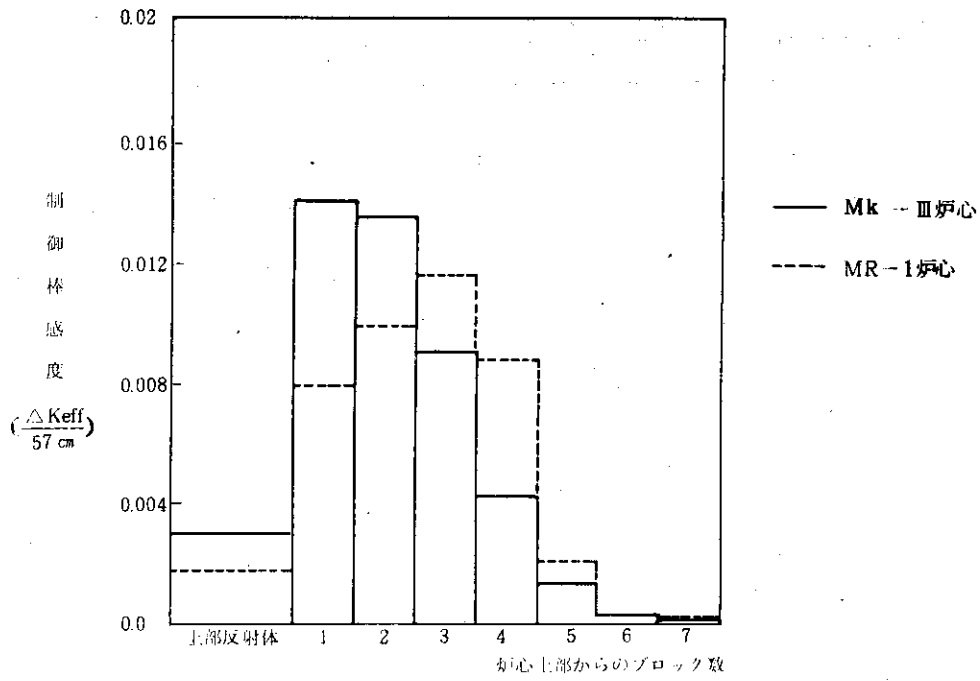


Fig. 3.3.5 中心制御棒1対の感度  
(Mk-IIIドライバー炉心)

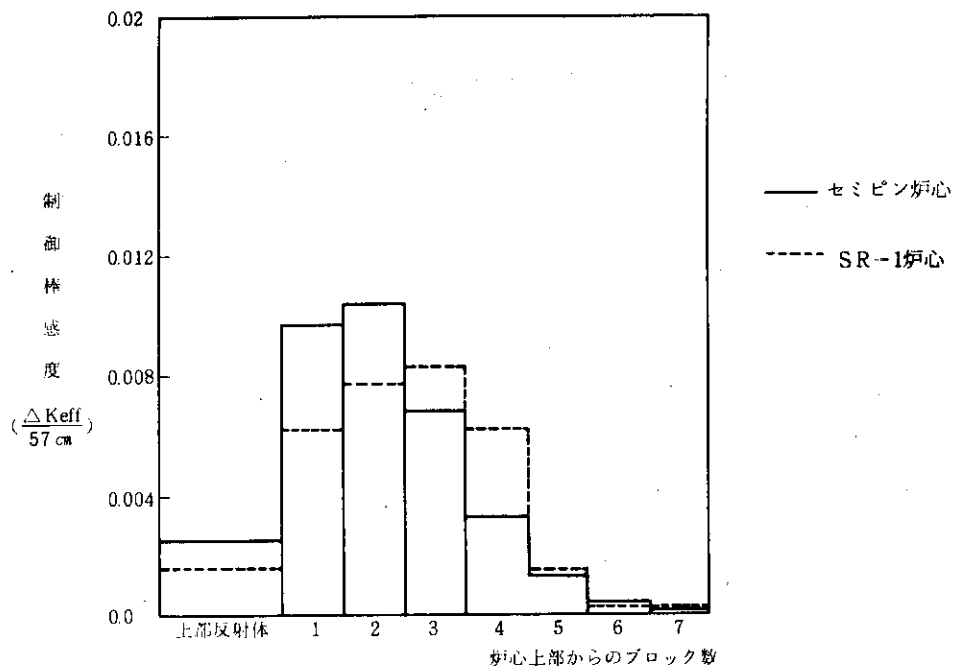


Fig. 3.3.6 中心制御棒1対の感度  
(セミピンドライバー炉心)

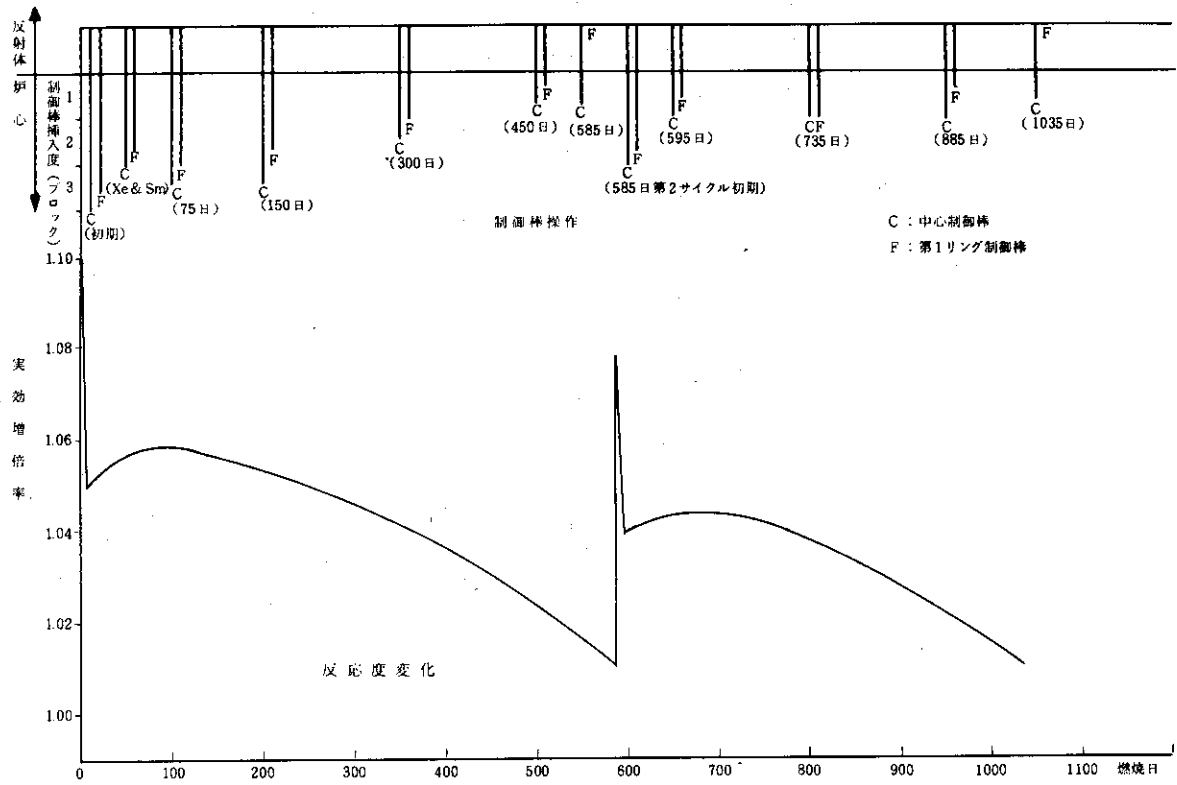


Fig. 3.3.7 燃焼による反応度変化と制御棒操作 (MR-1炉心)

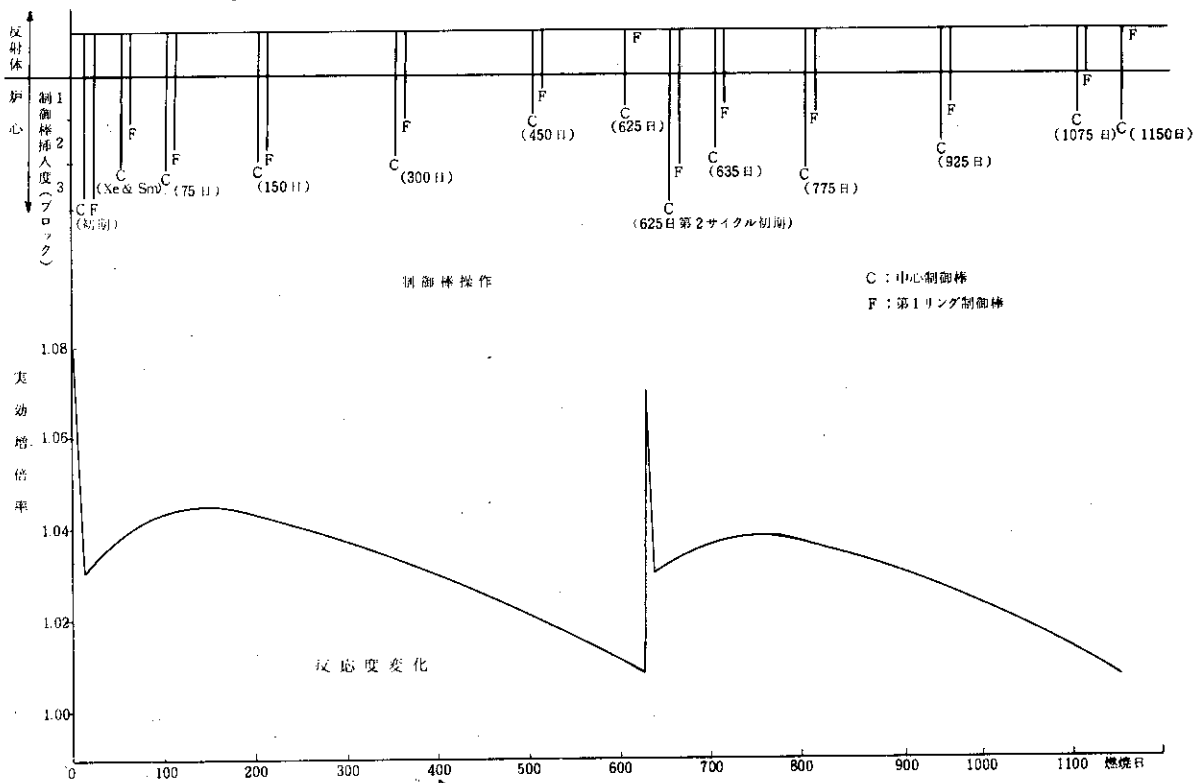


Fig. 3.3.8 燃焼による反応度変化と制御棒操作 (SR-1炉心)

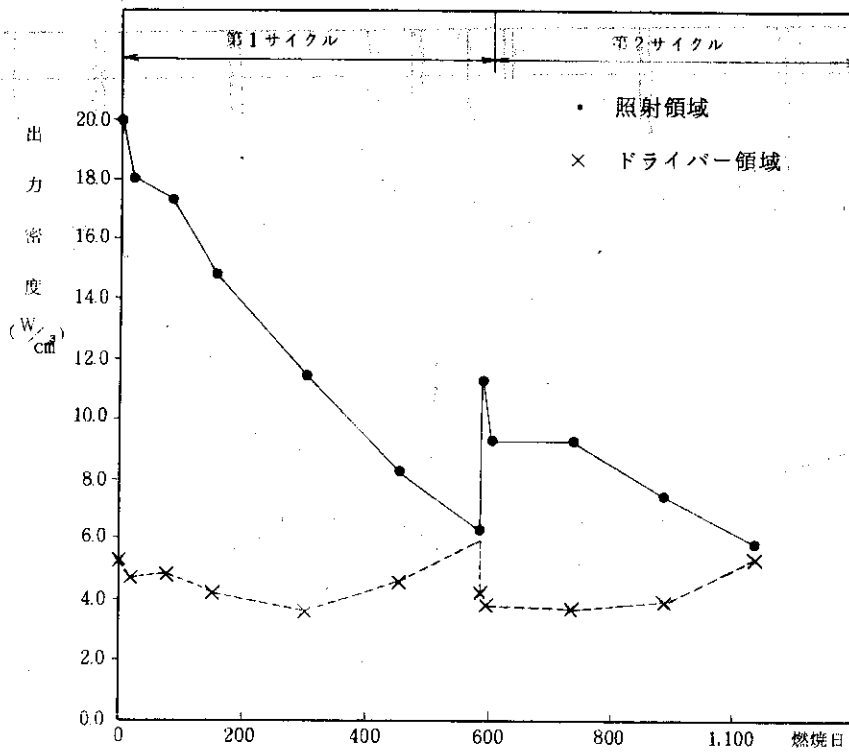


Fig. 3.3.9 最大ブロック平均出力密度の燃焼変化  
(MR-1 炉心)

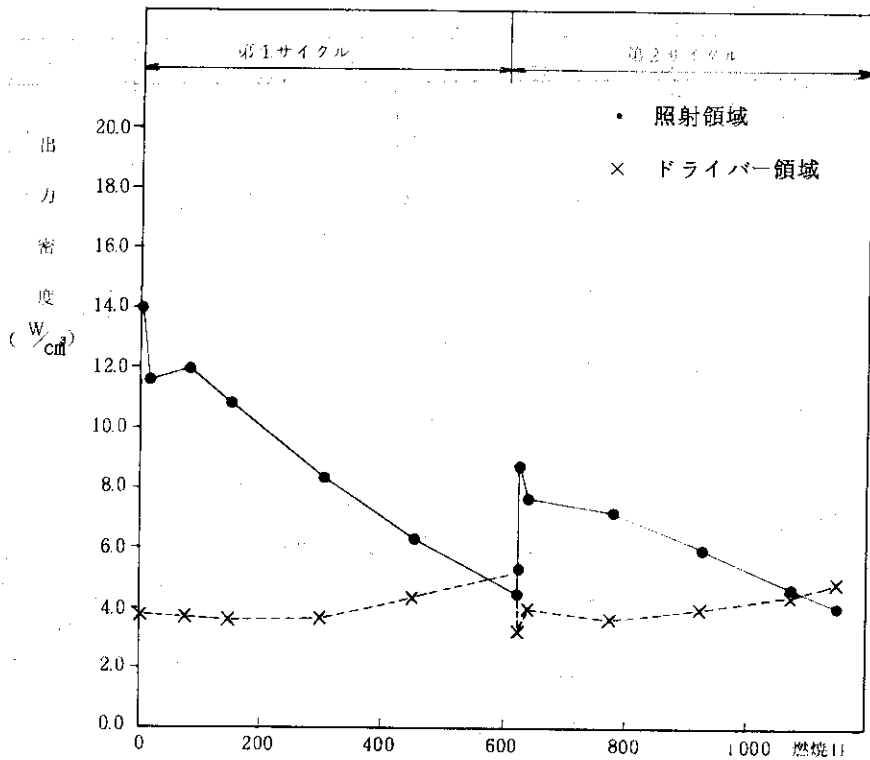


Fig. 3.3.10 最大ブロック平均出力密度の燃焼変化  
(SR-1 炉心)

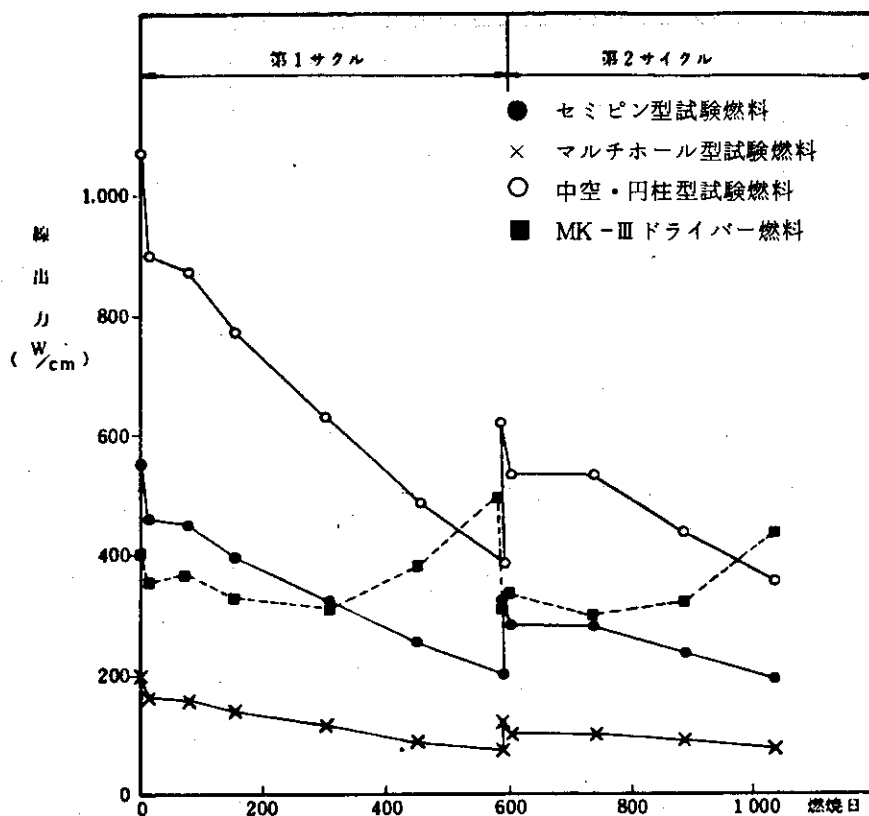


Fig. 3.3.11 最大線出力の燃焼変化 (MR-1炉心)

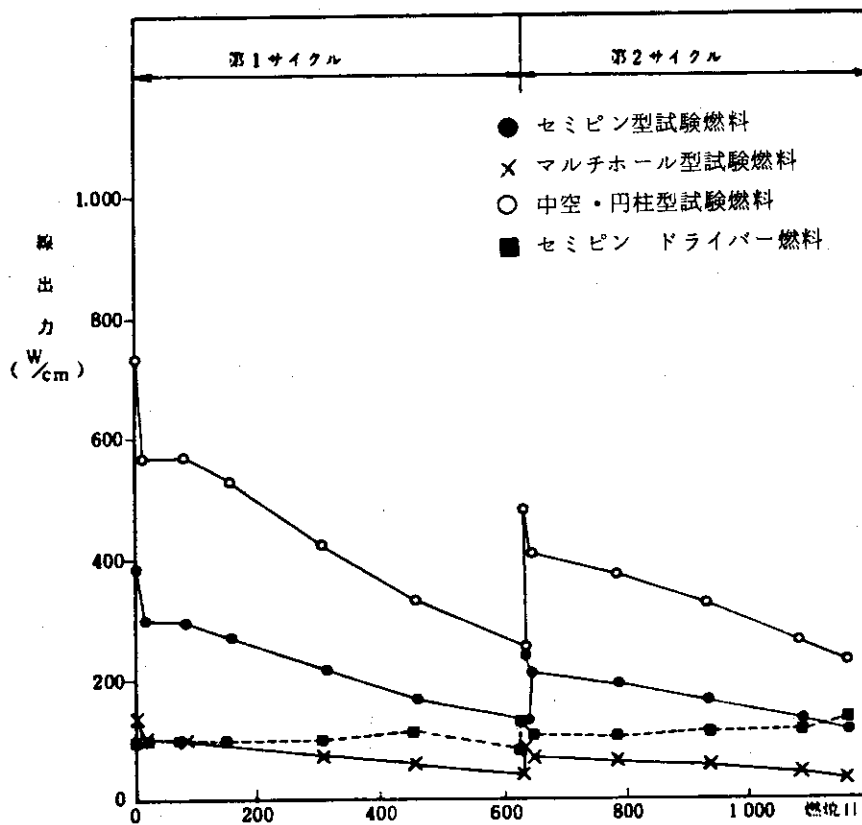


Fig. 3.3.12 最大線出力の燃焼変化 (SR-1炉心)

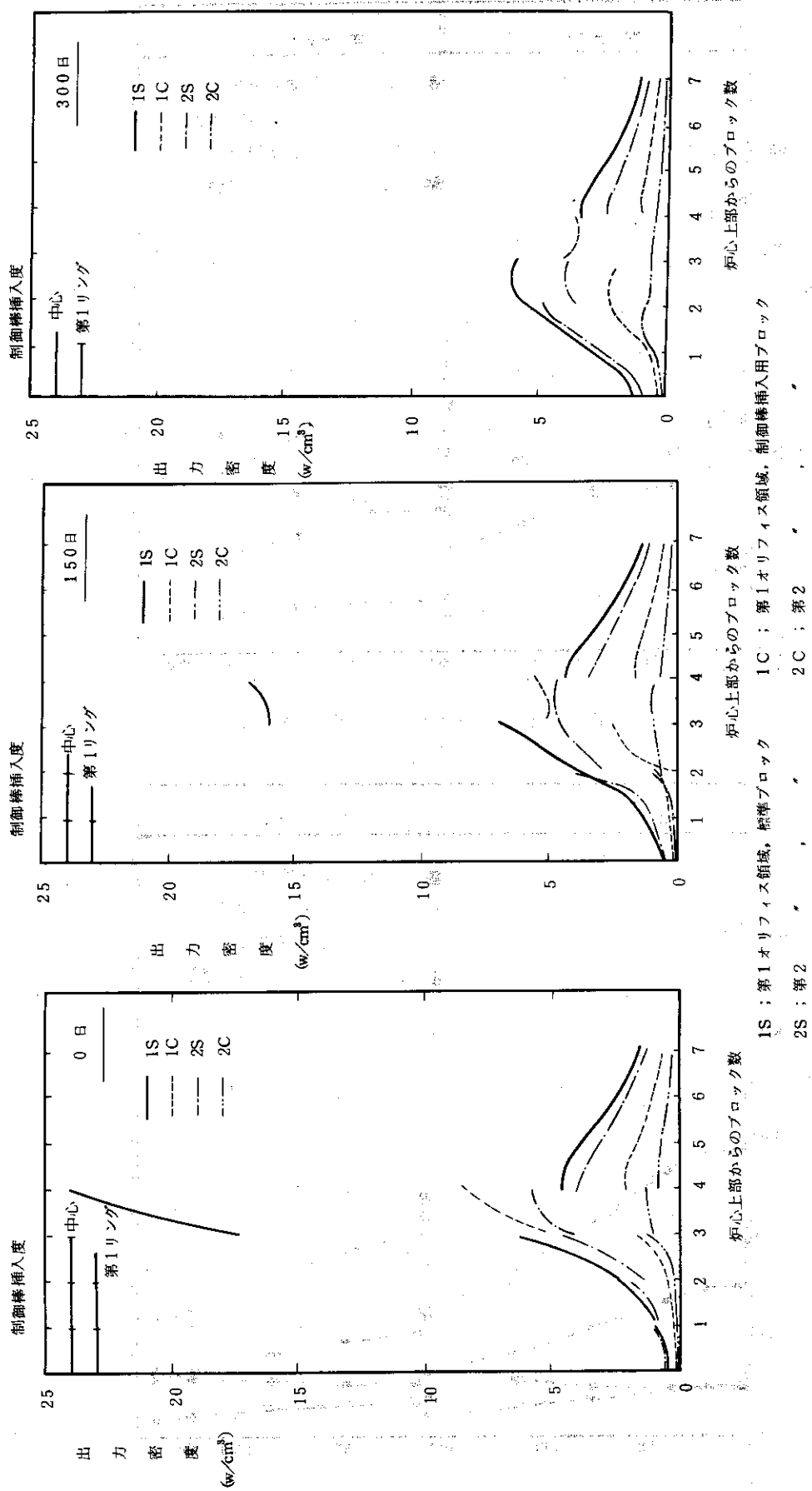


Fig 3.3.13 MR - 1 炉心の軸方向出力分布

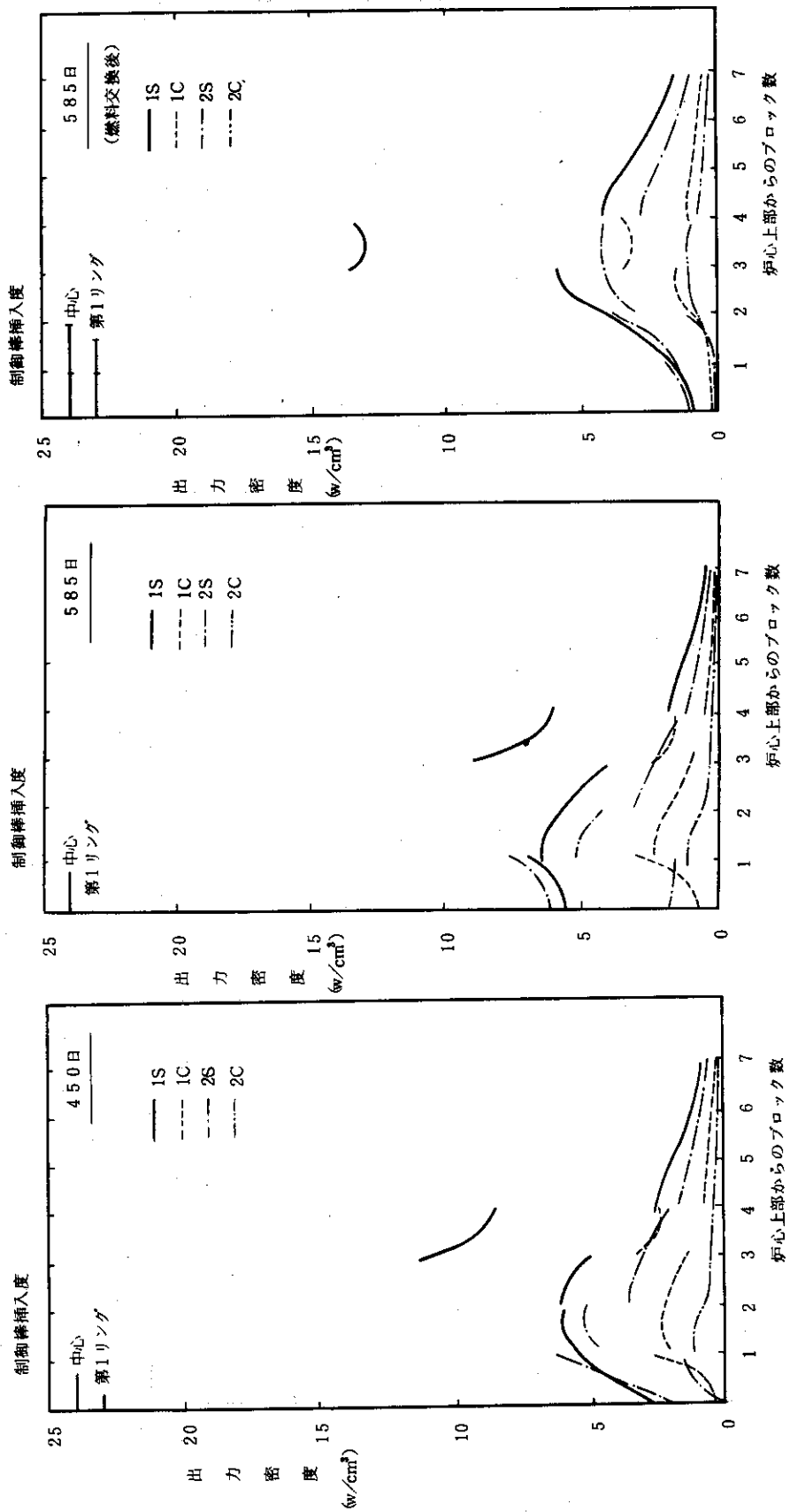


Fig 3.313 (続)

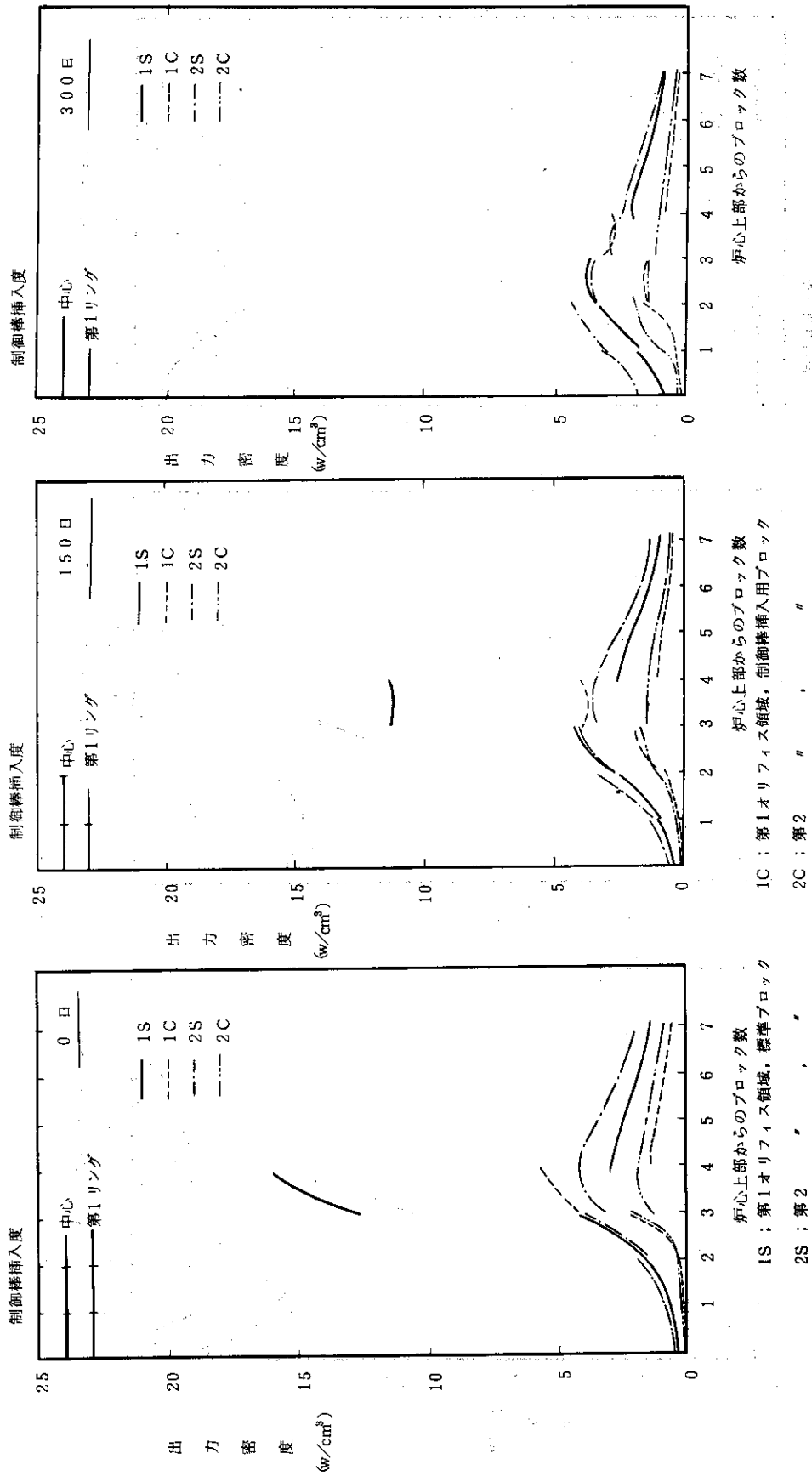


Fig 3.3.14 SR-1 炉心の軸方向出力分布



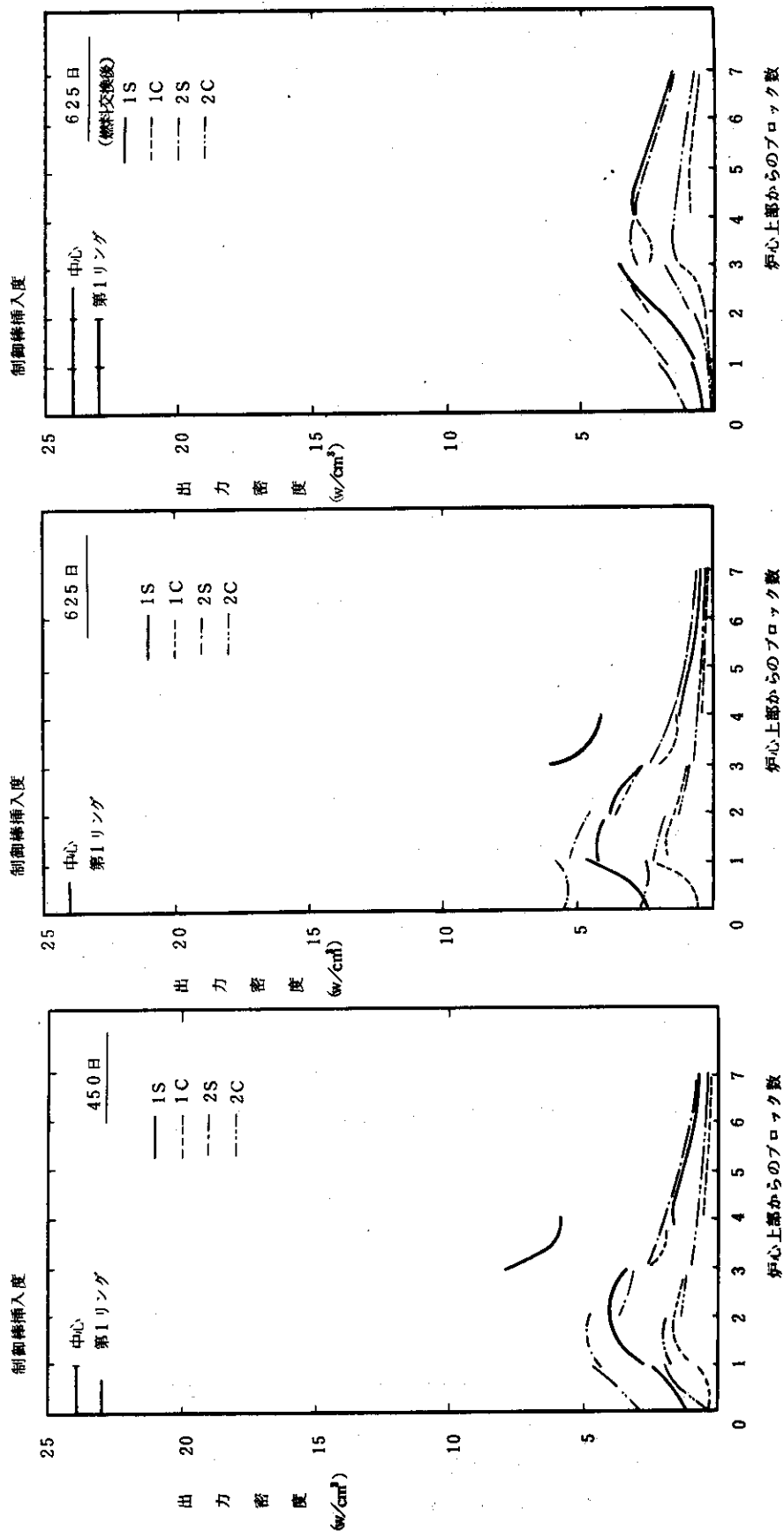


Fig 3.3.14 (続)

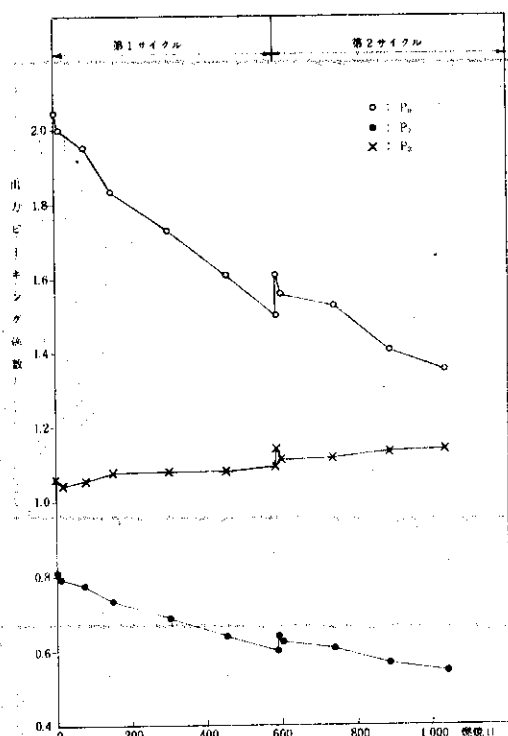


Fig. 3.3.15 照射試験領域出力ピーキングの燃焼変化  
(MR-1炉心)

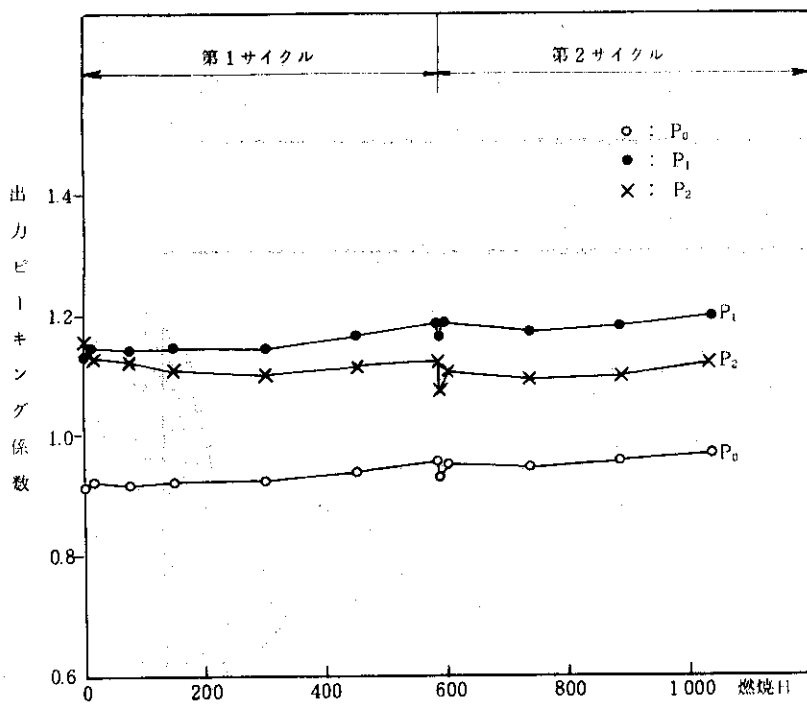


Fig. 3.3.16 第2オリフィス領域出力ピーキングの燃焼変化  
(MR-1炉心) 燃焼度分布

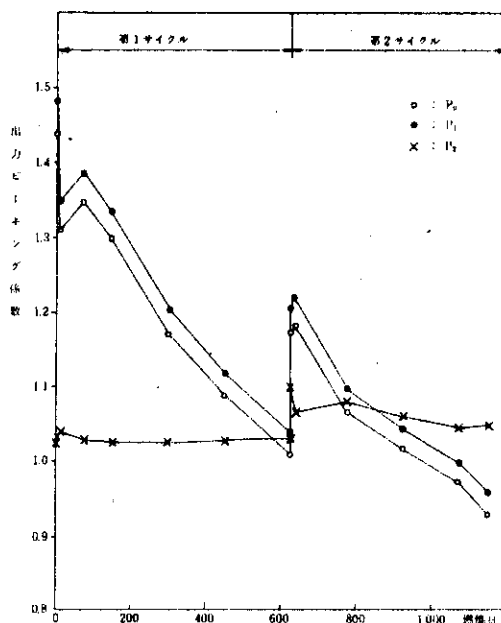


Fig. 3.3.17 照射試験領域出力ピーキングの燃焼変化 (SR-1炉心)

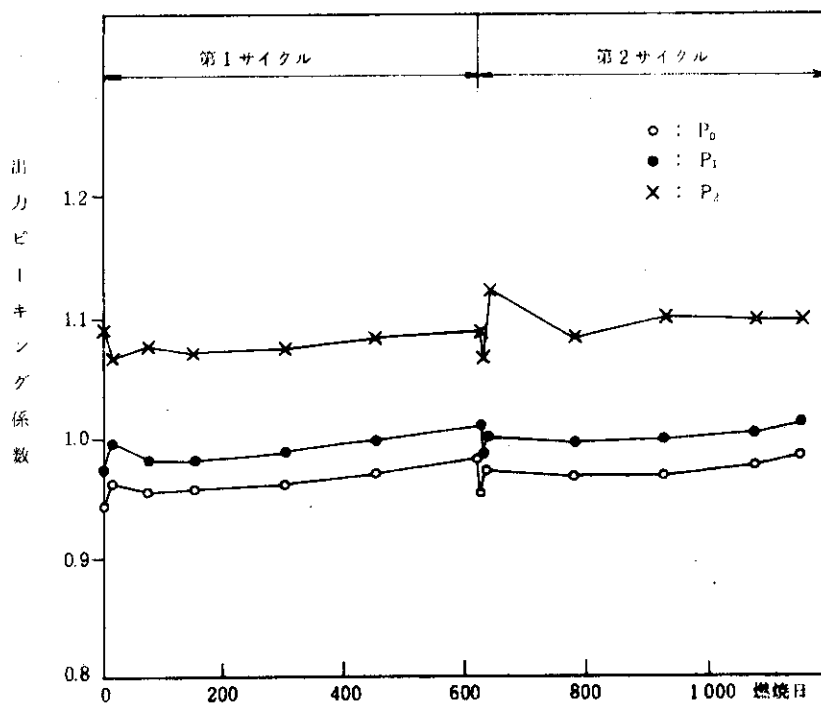


Fig. 3.3.18 第2オリフィス領域出力ピーキングの燃焼変化 (SR-1炉心)

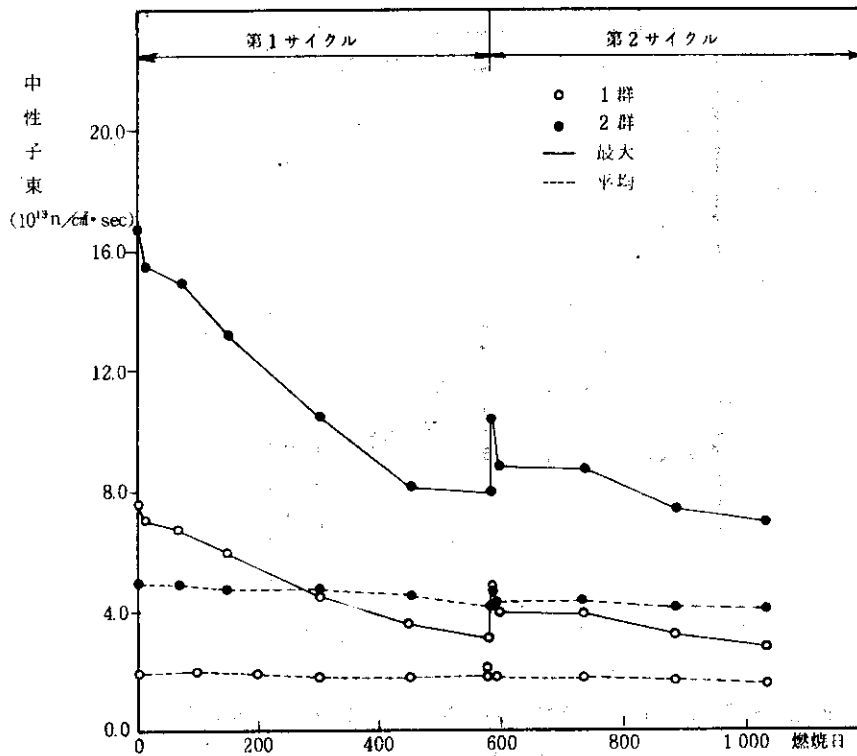


Fig. 3.3.19 照射試験領域速中性子束の燃焼変化  
(MR-1炉心)

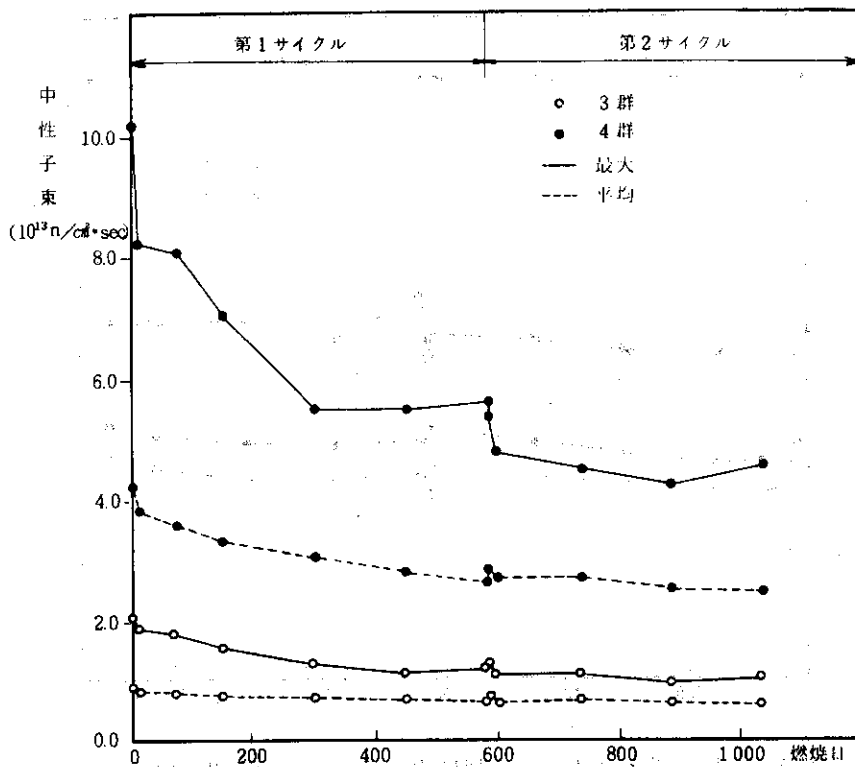


Fig. 3.3.20 照射試験領域熱中性子束の燃焼変化  
(MR-1炉心)

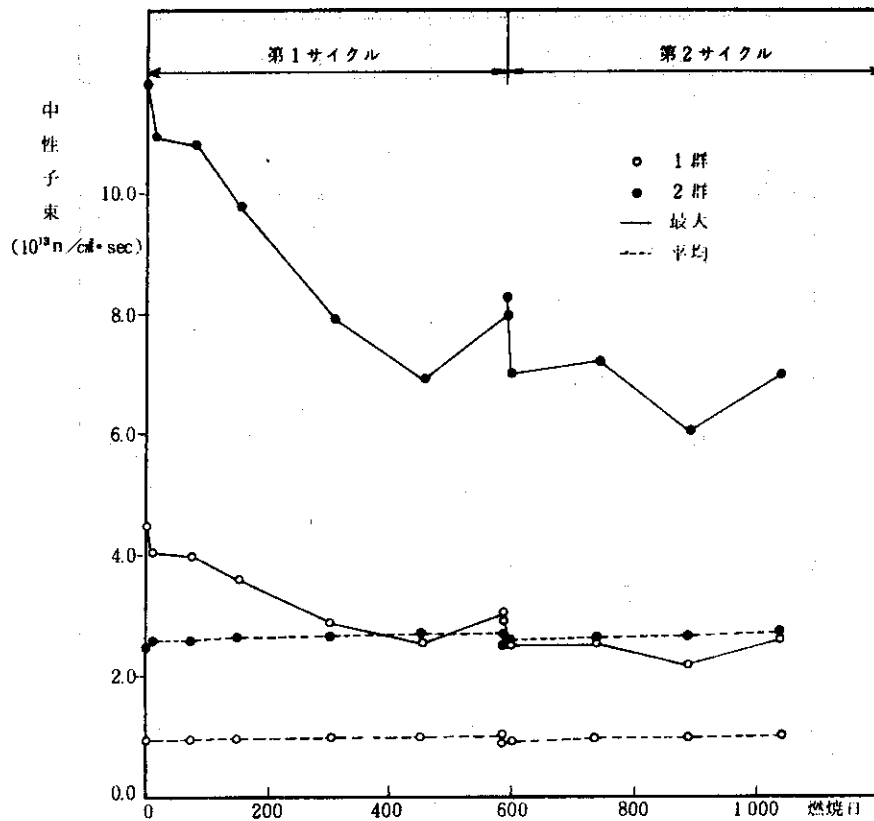


Fig. 3.3.21 ドライバー領域速中性子束の燃焼変化 (MR-1炉心)

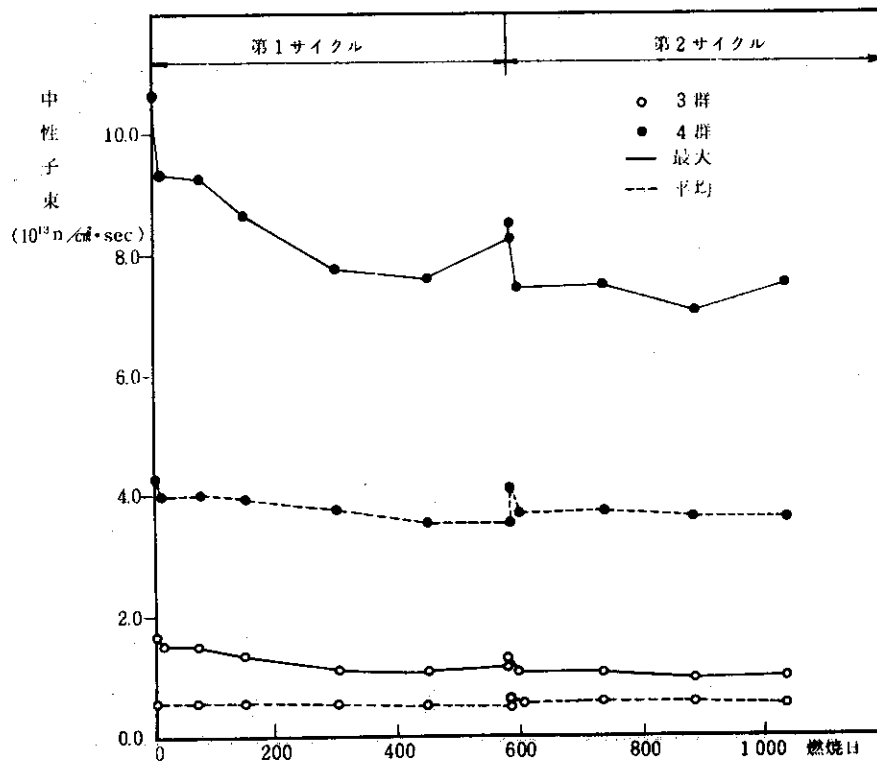


Fig. 3.3.22 ドライバー領域熱中性子束の燃焼変化 (MR-1炉心)

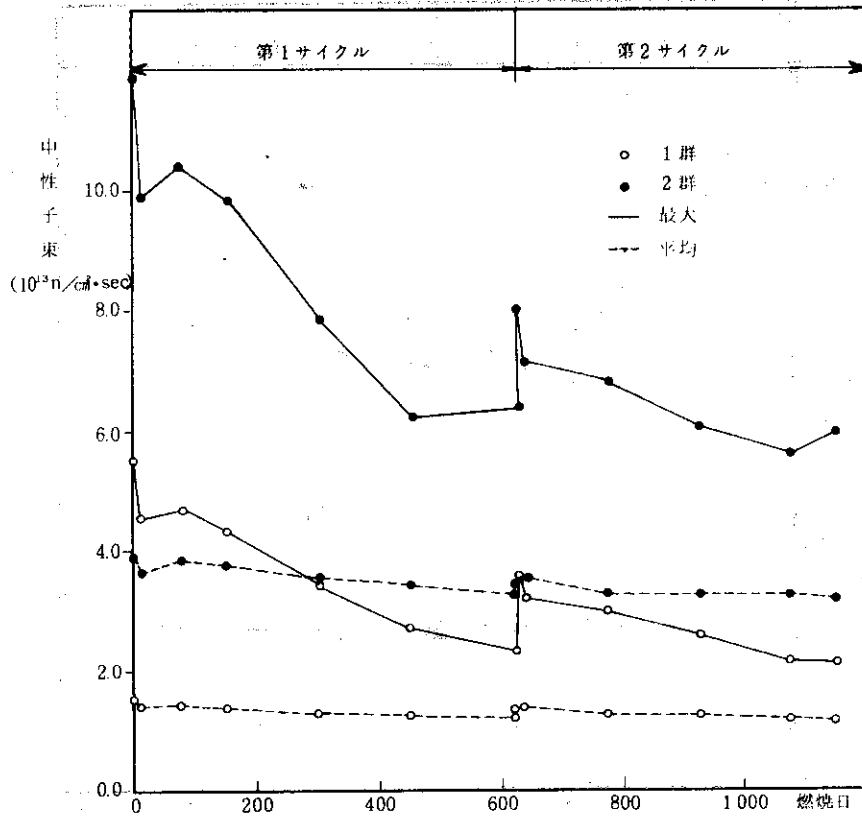


Fig. 3.3.23 照射試験領域速中性子束の燃焼変化  
(SR-1炉心)

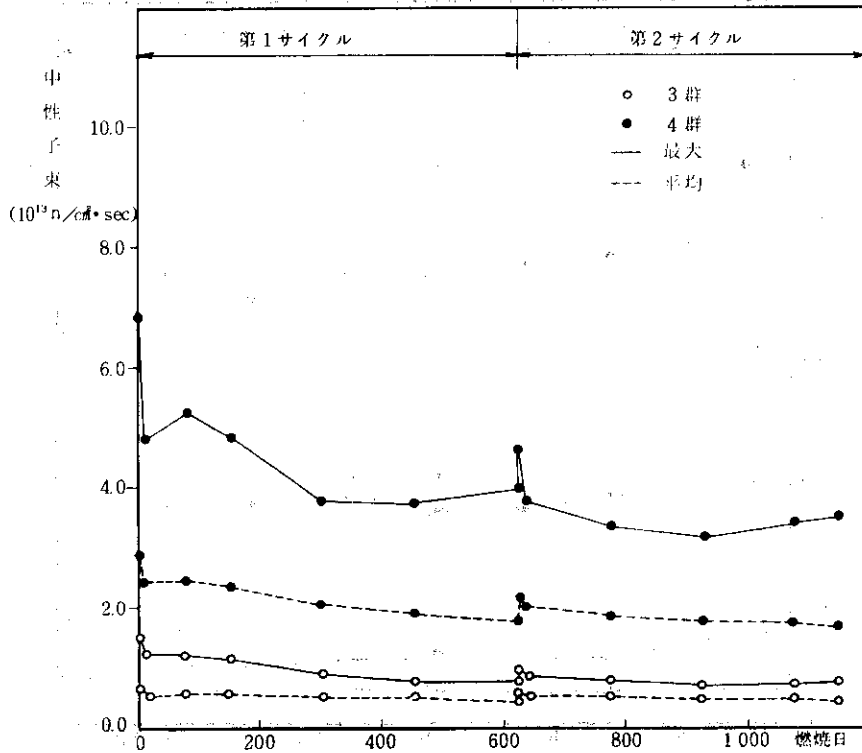


Fig. 3.3.24 照射試験領域熱中性子束の燃焼変化  
(SR-1炉心)

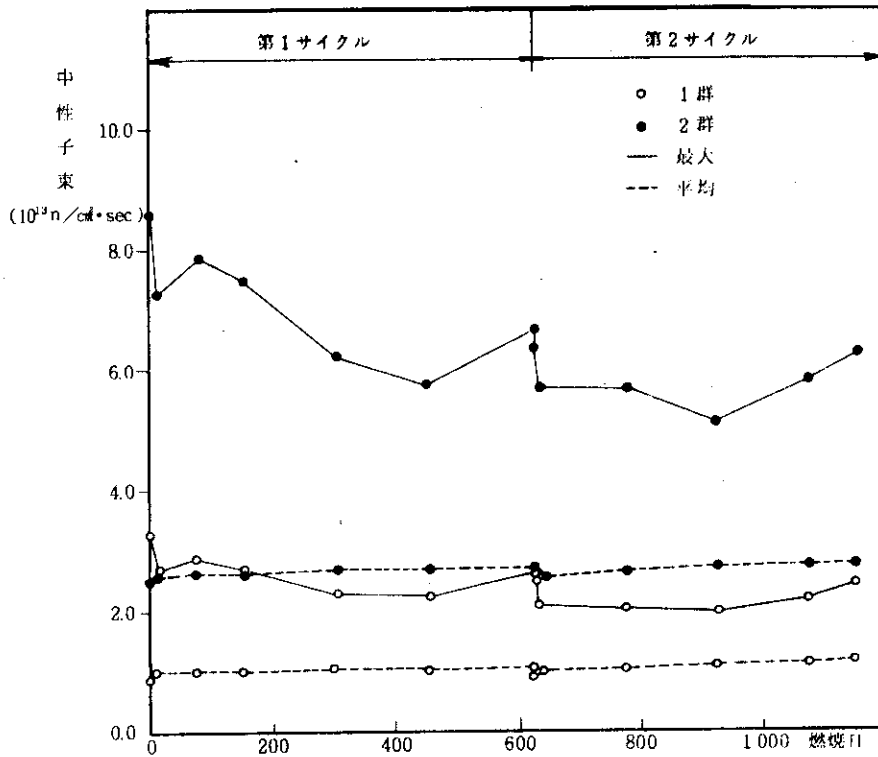


Fig. 3. 3. 25 ドライバー領域速中性子束の燃焼変化 (SR-1炉心)

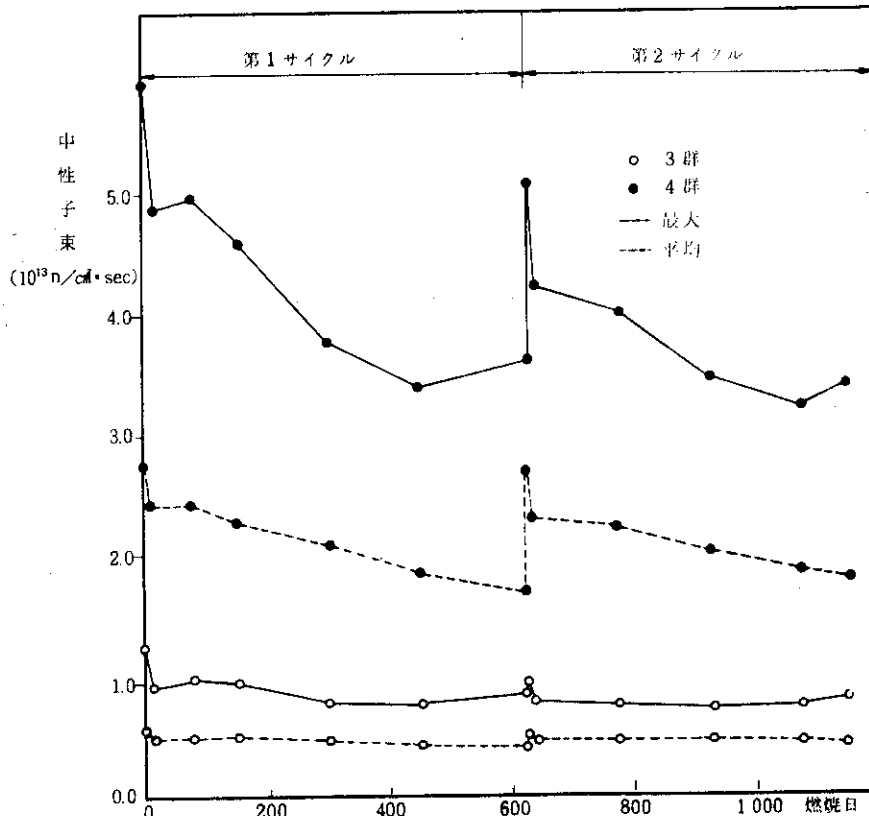


Fig. 3. 3. 26 ドライバー領域熱中性子束の燃焼変化 (SR-1炉心)

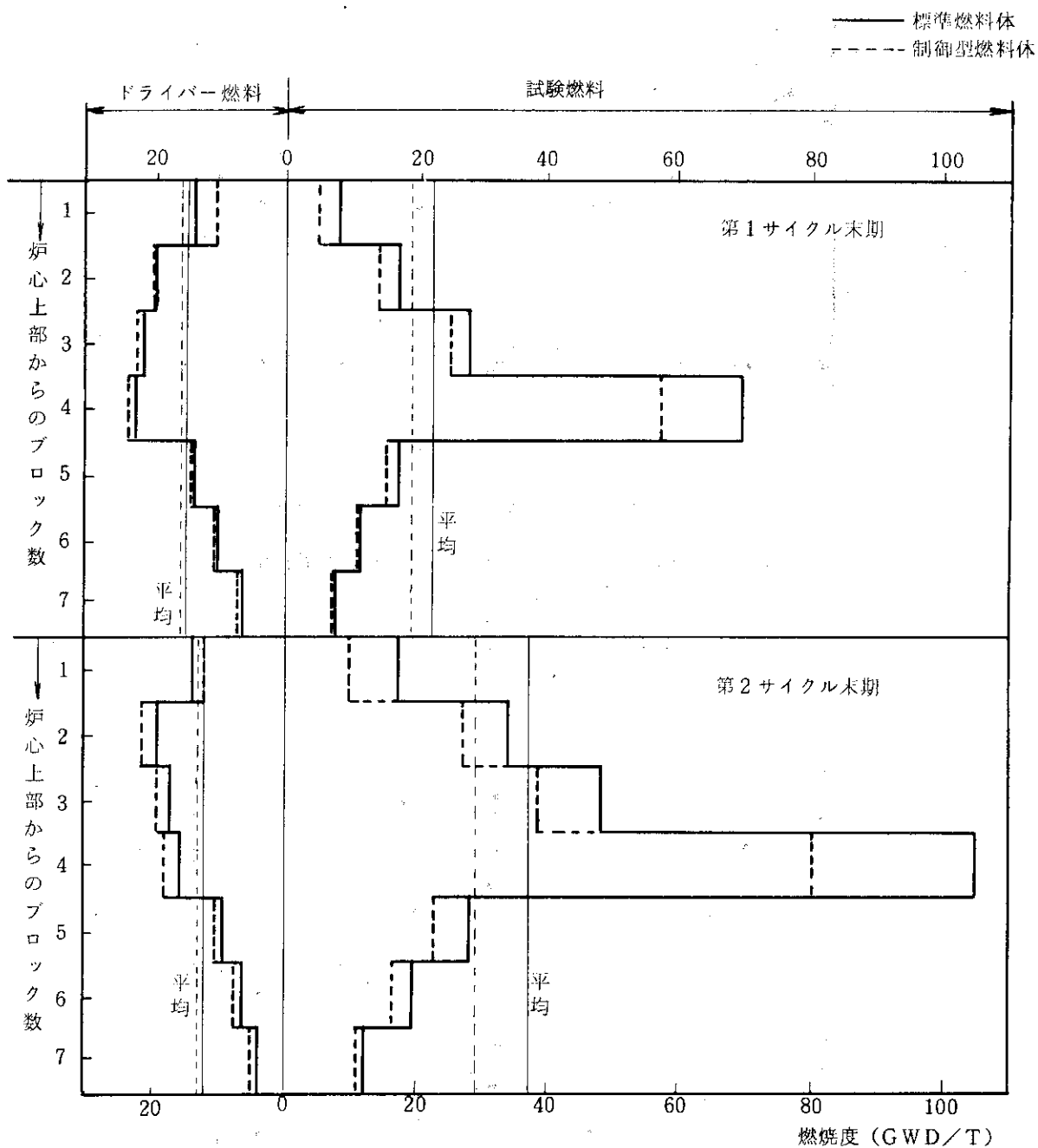


Fig. 3.3.27 燃焼サイクル末期における燃焼度分布  
(MR-1 炉心)



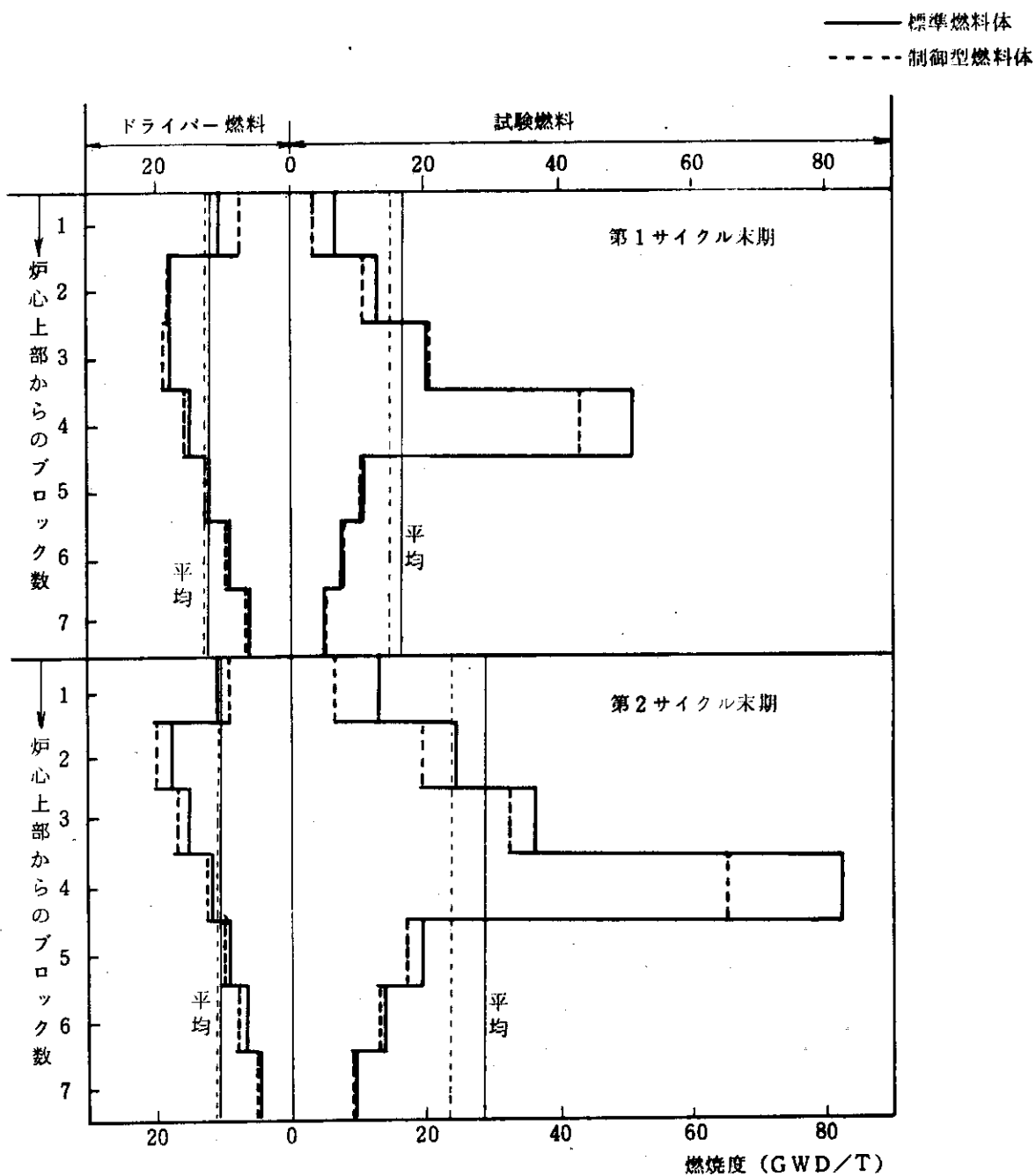


Fig. 3.3.28 燃焼サイクル末期における燃焼度分布  
(SR-1炉心)

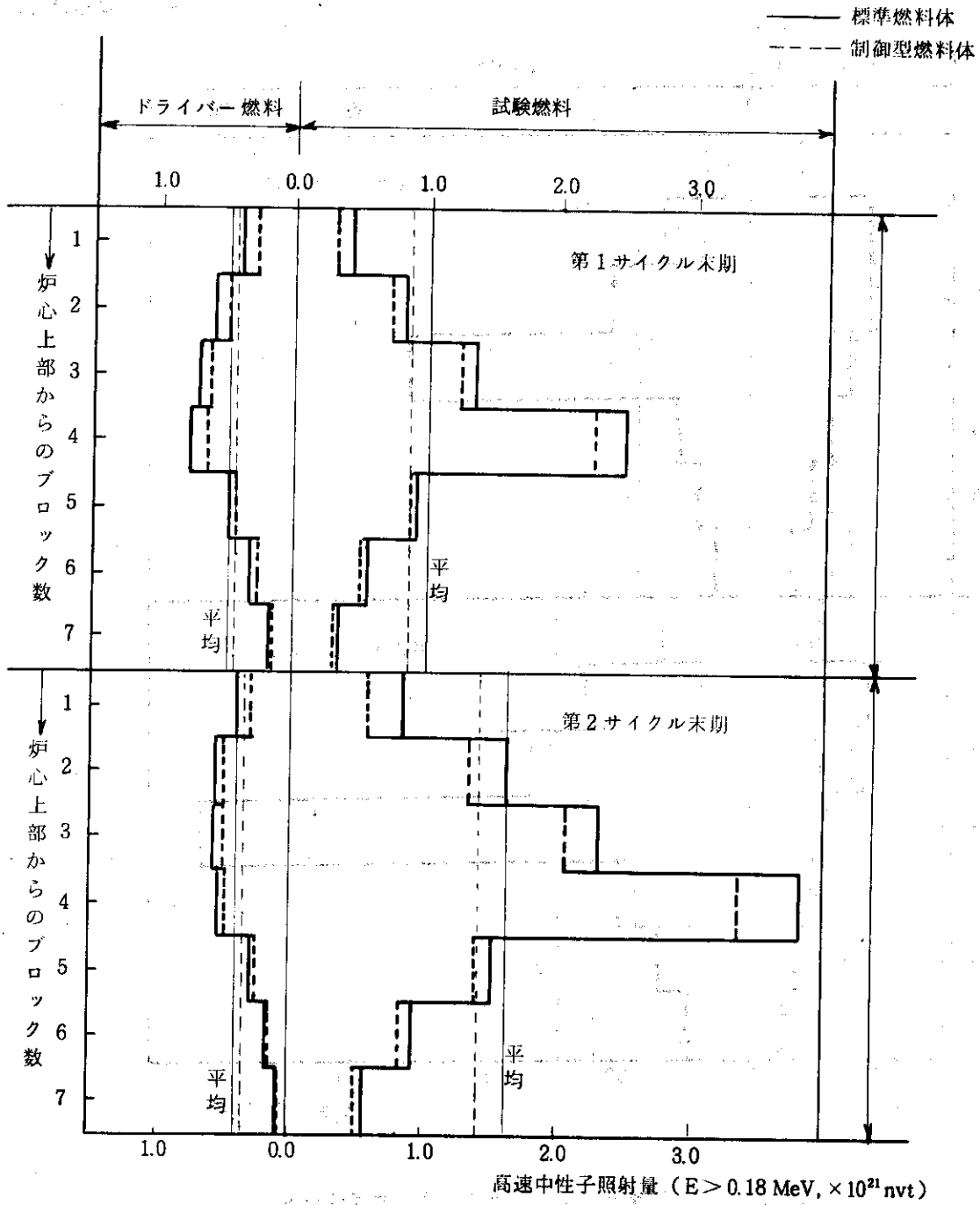


Fig. 3. 3. 29 燃焼サイクル末期における高速中性子照射量分布 (MR-1炉心)

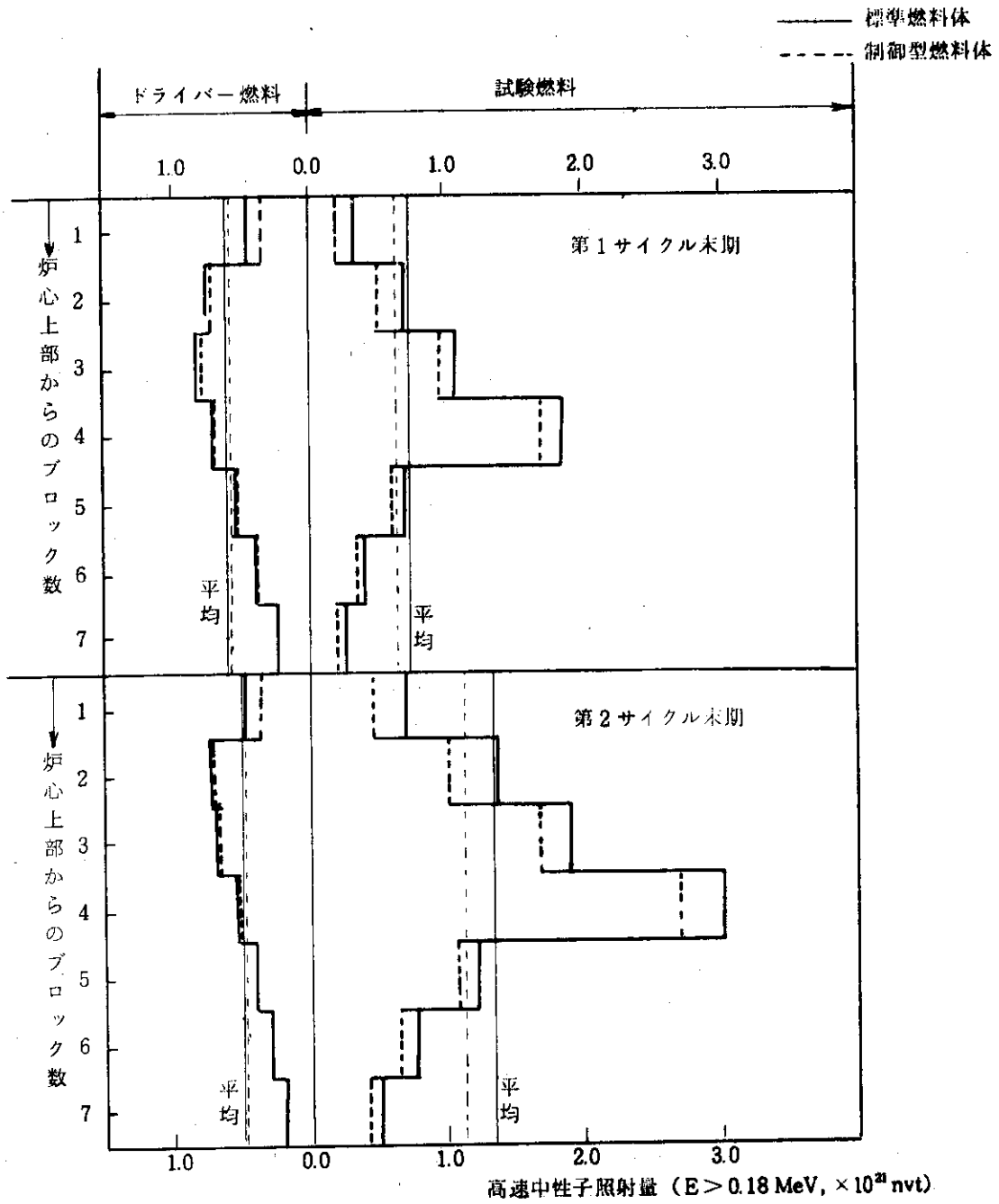


Fig. 3.3.30 燃焼サイクル末期における高速中性子照射量分布  
(SR-1炉心)

### 3.4 参考炉心の熱流動特性

#### 3.4.1 概要

照射炉用炉心として選定された Mk-III ドライバー参考炉心 (MR-1 炉心) およびセミピンドライバー参考炉心 (SR-1 炉心) の熱流動特性を明かにし、これらの特性が所定の熱設計基準および指針を満足していることを確認する。

選定された参考炉心では、燃焼が進むに従い、照射試験領域での最大ブロック平均出力密度が急激に減少するので、初期炉心状態よりも燃焼炉心状態の方が流量調節に余裕がある。このため、初期状態から燃焼炉心状態までを通して一つの流量調節方式を採用することは必ずしも得策ではないことが推察された。

これらのことを考慮して、参考炉心の流量調節としては燃焼状態に応じて異なった流量調節方式が適用され、これらの組合せによるいくつかのバリエーション (流量調節ケースと呼ぶ) が選定された。流量調節方式の内容については、3.2.1 節に示されている。すなわち、MR-1 炉心においては初期炉心状態で原子炉出口冷却材温度  $800^{\circ}\text{C}$ 、流量調節方式 5 (照射試験領域での燃料最高温度を指定された温度とし、かつドライバー領域出口の冷却材温度を一定とする流量調節方式) とし、燃焼がすすんだ状態では試験燃料に応じて異なる流量調節ケースが採用されセミピン型、マルチホール型試験燃料に対してそれぞれ 5 種類、また中空型、円環型試験燃料に対して、それぞれ 1 種類の流量調節ケースを選定して各燃焼日毎の熱流動特性解析を行った。また、SR-1 炉心の場合には初期炉心状態で原子炉出口冷却材温度  $1000^{\circ}\text{C}$ 、流量調節方式 6 (試験燃料領域での燃料最高温度を指定された温度とし、かつドライバー領域毎の燃料最高温度を等しくする流量調節方式) とし、燃焼がすすんだ状態では 3 つの流量調節ケースを選定して熱流動解析を行った。MR-1 炉心と SR-1 炉心の熱流動特性解析の主な結果をそれぞれ、Table 3.4.1 および Table 3.4.2 に示す。

#### 3.4.2 Mk-III 型ドライバー燃料参考炉心の熱流動特性解析

##### (1) 流量調節法の検討

初期炉心状態の試験、燃料体は、最大ブロック平均出力密度が  $19.9 \text{ W/cm}^2$  と高い出力密度であるので、熱設計の基準、指針を満足する炉心とするためには原子炉出口冷却材温度を  $800^{\circ}\text{C}$  とする冷却材流量を用い、かつ試験燃料の最高温度を  $1400^{\circ}\text{C}$  に制限する流量調節方式 5 を採用した。しかし、燃焼がすすむに従って試験燃料体の最大ブロック平均出力密度は急激に小さくなるので、熱設計の基準や指針を満足させる範囲で原子炉出口冷却材温度の高温化や、燃料最高温度の低減化をはかる流量調節方式が検討された。

まず、セミピン型とマルチホール型試験燃料体については、原子炉出口冷却材温度を  $800^{\circ}\text{C}$  および  $900^{\circ}\text{C}$  とするそれぞれの炉心に対して、流量調節方式 1, 2, 5 (試験燃料の最高温度を  $1400^{\circ}\text{C}$  および  $1300^{\circ}\text{C}$  に制限した場合) の検討が行われた。結果の 1 例を、セミピン型試験燃料体について Fig. 3.4.1 および Fig. 3.4.2 に示す。Fig. 3.4.1 は各流量調節方式によるドライバー領域の燃料最高温度の燃焼変化を示し、Fig. 3.4.2 は同じく最小レイノルズ数と最小限界熱流束比の燃焼変化を示す。ただし、流量調節方式 5 は試験燃料最高温度

を 1400 °C に制限した場合のみを示した。これらの結果から次の結論が得られた。

- (i) 流量調節方式 1 は試験燃料体の最大ブロック平均出力密度が、800 °C 炉心のとき 12 ~ 13 W/cm<sup>2</sup> , 900 °C 炉心のとき 10 ~ 11 W/cm<sup>2</sup> 以上であると、試験燃料最高温度が 1400 °C をこえるので、試験燃料体の出力密度がある程度まで下らないと採用出来ない。
- (ii) 流量調節方式 2 は試験燃料、ドライバー燃料の最高温度を低く抑えるためには最も効果的ではあるが、最小レイノルズ数や最小限界熱流束比に対する熱設計の基準や指針を 900 °C 炉心では満足されないで、800 °C 炉心としてしか採用できない。
- (iii) 流量調節方式 5 は試験燃料体の最大ブロック平均出力密度が高い時には、非常に効果的であり、900 °C 炉心を達成するためにはこの方法しかない。
- (iv) 流量調節方式 6 は流量調節方式 5 に比べて、ドライバー領域での最小レイノルズ数、最小限界熱流束比が小さくなるため、Mk-III ドライバー参考炉心では採用しなかった。

次に、中空型、円環型試験燃料体における流量調節方式として、原子炉出口冷却材温度を 800 °C および 900 °C とするそれぞれの炉心に対して、流量調節方式 5 (試験燃料の最高温度を 1400 °C および 1200 °C に制限した場合) について検討した。この場合、燃焼がすすんで試験燃料の最大ブロック出力密度が下っても試験燃料最高温度制限を 1400 °C としておくと、初期炉心状態よりも少ない流量で制限温度に抑えることが可能であるが、もともと熱設計の基準や指針に対する余裕が小さい照射試験領域の最小レイノルズ数や最小限界熱流束比が問題となってくる。結果の例として、中空型および円環型試験燃料体における最小限界熱流束比の燃焼変化を、試験燃料最高温度制限 1400 °C と 1200 °C の場合について Fig. 3.4.3 に示す。

このように試験燃料体の形状および燃焼の度合によって種々の流量調節方式が可能であるが、燃焼期間中をとおして試験燃料体を 1400 °C に保持する必要が必ずしも無いこと、熱流動的には最小レイノルズ数や最小限界熱流束比の余裕ができるだけ大きいことが望ましいこと、被覆燃料粒子の破損、特にドライバー領域での破損を抑えること等を勘案して本解析では Table 3.4.3 に示すように、燃焼状態に応じて異なった流量調節方式が対応する流量調節ケース A, B, C, D, E, F を選定して熱流動特性を検討した。

## (2) 熱流動特性

### (i) セミピン型試験燃料の場合

各流量調節方式による燃料最高温度、最小レイノルズ数、最小限界熱流束比の燃焼変化を Table 3.4.4 に示す。また、ドライバー領域におけるこれらの燃焼変化を、燃料最高温度について Fig. 3.4.4 に、最小レイノルズ数および最小限界熱流束比について Fig. 3.4.5 に示す。これらから、ケース A, B の流量調節方式の場合には熱設計の基準や指針に対して充分余裕があるが、ケース D, E は比較的余裕が無いといえる。セミピン型試験燃料を用いた初期炉心状態における照射試験領域、ドライバー領域それぞれの高温チャンネルの軸方向温度分布を Fig. 3.4.6 に、同じく第二サイクル初期の軸方向温度分布を Fig. 3.4.7 に示す。照射試験領域 4 段目のブロックの出力密度が非常に高いため、軸方向の温度分布に著るしい不連続がある。また、流量調節ケース A を例にチャンネルの燃料最高温度と冷却材流量の燃焼による変化を Fig. 3.4.8 に示す。試験燃料の最高温度を燃焼期間中 1400 °C に制限しているため、試験燃料 (1-S チャンネル) のチャンネル流量は、初期状態の

時に比較して第1サイクル末期では1/3になっている。

(ii) マルチホール型試験燃料体の場合

各流量調節方式による燃料最高温度，最小レイノルズ数，最小限界熱流束比の燃焼変化を Table 3.4.5 に示す。また，ドライバー領域におけるこれらの燃焼変化を燃料最高温度について Fig. 3.4.9 に，最小レイノルズ数および最小限界熱流束比について Fig. 3.4.10 に示す。セミピン型とマルチホール型試験燃料体の熱流動特性の比較を流量調節ケース A について Fig. 3.4.11 に示す。両者の特性はほとんど同一であることがわかる。

(iii) 中空型および円環型試験燃料体の場合

炉心熱流動特性の燃焼変化を Table 3.4.6 に，また，ドライバー領域の燃料最高温度，最小レイノルズ数 および最小限界熱流束比の燃焼変化を，それぞれ， Fig. 3.4.12， Fig. 3.4.13 に示す。ドライバー燃料を交換した第2サイクル初期では原子炉出口冷却材温度を 900 °C としているため熱流動的に余裕が少ない。中空型，円環型試験燃料体を比較すると後者の方が優れている。

(iv) 各試験燃料体の燃料最高温度 (1400 °C) 位置における径方向温度分布の比較を，初期炉心状態について Fig. 3.4.14 に示す。また，全体の温度上昇に占める各部での温度上昇の割合を Table 3.4.7 に示す。セミピン型，マルチホール型はほぼ同じ傾向をもつが，中空型燃料は，燃料コンパクト部での温度上昇が大きく，そのため，冷却材温度と燃料最高温度との差が最も大きい。しかし，冷却材との境膜温度差が最も小さく，良好な熱伝達を示している。

## 3.4.3 セミピン型ドライバー燃料参考炉心の熱流動特性解析

## (1) 流量調節方式の検討

初期炉心状態では試験燃料体の最大ブロック平均出力密度が  $14.11 \text{ W/cm}^3$  であり、原子炉出口冷却材温度を  $1000^\circ\text{C}$  とし、かつ熱設計の指針、基準を満足するためには流量調節方式 6 (試験燃料の最高温度を  $1400^\circ\text{C}$  に制限する) によるしかない。しかし、燃焼がすすむに従って試験燃料体の最大ブロック出力密度が低下するので、種々の流量調節方式が可能と考えられた。

試験燃料体として中空型および円環型燃料を用いる場合、各サイクル後半における最大ブロック平均出力密度が非常に小さいため、照射試験領域のチャンネル流量を決定する因子は試験燃料最高温度ではなく、最小レイノルズ数や最小限界熱流束比に対する制限である。その結果、試験燃料最高温度は  $1000^\circ\text{C}$  以下になることが予想され、照射試験領域とドライバー領域がアンバランスになるので、SR-1 炉心において中空型および円環型燃料体を試験燃料として用いるのは不適當であり、検討外とした。

一方、セミピン型とマルチホール型試験燃料体に対しては、流量調節方式 1, 2 および 6 (試験燃料の最高温度を  $1400^\circ\text{C}$  および  $1300^\circ\text{C}$  に制限する) について検討した。その結果、ドライバー領域においては熱設計の指針、基準を満足し、照射試験領域の最小レイノルズ数は燃焼を通して約 10000 以上が確保されていることが示された。従って、流量調節ケースは最高温度についてのみ注目して選択すれば良く、このようにして選定された流量調節ケース G, H および I を Table 3.4.8 に示す。

## (2) 熱流動特性

## (i) セミピン型試験燃料の場合

各流量調節ケースによる炉心熱流動特性の燃焼変化を Table 3.4.9 に、また、このときのドライバー領域の燃料最高温度の燃焼変化を Fig. 3.4.15 に示す。ドライバー領域の燃料最高温度は初期炉心状態においてのみ  $1300^\circ\text{C}$  以上であるが、その他の燃焼状態においては、大旨  $1200^\circ\text{C}$  前後であり、どの流量調節ケースにおいても最小レイノルズ数は 6000 以上の値が確保される。照射試験領域およびドライバー領域の最高温チャンネルの軸方向温度分布を、初期炉心状態の場合とドライバー燃料を交換した第 2 サイクル初期の場合とについて、それぞれ、Fig. 3.4.16 および Fig. 3.4.17 に示す。また、各領域の代表チャンネルの燃料最高温度とチャンネル流量の燃焼による変化を、流量調節ケース A を例に Fig. 3.4.18 に示す。照射試験領域の最大ブロック平均出力密度が低下した第 2 サイクルでも試験燃料最高温度を  $1400^\circ\text{C}$  に制限しているため、照射試験領域の燃料チャンネル流量は炉心初期状態の約  $1/3$  である。

## (ii) マルチホール型試験燃料の場合

各流量調節方式による炉心熱流動特性の燃焼変化を、Table 3.4.10 に示す。また、ドライバー領域の燃料最高温度の燃焼変化を Fig. 3.4.19 に示す。セミピン型試験燃料と比較すると若干、ドライバー燃料最高温度を低くすることが可能であるが、熱流動的に大差はない。

#### 3.4.4 熱流動特性の考察

照射用炉心として選定された。Mk-Ⅲ型ドライバー燃料参考炉心（MR-1炉心）およびセミピン型ドライバー燃料参考炉心（SR-1炉心）は、両者ともに、それぞれのオリジナルであるMk-Ⅲ炉心やバックアップ炉心（セミピン型燃料）とは、炉心熱流動特性が非常に異なっている。すなわち、照射試験領域の燃料体によってドライバー領域に対する影響が異なるとともに、試験領域の特性もまた燃焼によって変化するためである。

MR-1炉心については5種類の流量調節ケースの検討を行なったが、これら5種類の流量調節ケースは全て熱設計基準・指針を満足するものであり、どのケースが最も優れているかを決定するためには、燃料体の健全性や運転方式等を検討して総合的に判断する必要がある。しかし、これまで考えられていた流量調節方式では対処できず、試験領域とドライバー領域とは別々に、また各燃焼日に対応して流量調節を行なう必要があることは確かである。本解析で設定した流量調節ケース以外にもいくつか考えられるが、いずれにしても、試験燃料として中空型または円環型燃料を用いた場合には、ドライバー領域だけではなく照射試験領域における最小レイノルズ数や最小限界熱流束比が問題となり流量調節の方法が難しくなると予想される。これらのことからMR-1炉心における試験燃料体としては、中空型および円環型燃料よりセミピン型およびマルチホール型燃料の方がはるかに優れている。

SR-1炉心についてはセミピン型およびマルチホール型試験燃料についてのみ検討したが、この場合には、最小レイノルズ数による制限がほとんど無くなり燃料最高温度が主要なパラメータになるので、試験燃料最高温度を低く抑えるためには流量調節ケースCが最も望ましいと言える。試験燃料体としては、燃料温度の点でマルチホール型燃料体がセミピン型燃料体よりもやや優れているが、大差は無い。



Table 3.4.1 MR-1 炉心の熱流動特性

試験 燃料体	熱出力	流量 調節 ケース	原子炉出 口冷却材 温度 (°C)	領 域	燃料ピン 最高線出 力 (cal/ s·cm)	熱料最 高温度 (°C)	最高熱伝 達率 (cal/s· cm <sup>2</sup> ·°C)	最小*) レイ ノルズ数	最小限界 熱流束比	最大圧力 損失 (kg/cm <sup>2</sup> )
セ ミ ピ ン	50 MW	A	800	照射試験	125.268	1400	0.0902	14851		0.279
				ドライバー	112.626	1265	0.0484	4384	1.953	0.898
		B	800	照射試験	125.268	1400	0.0902	19886		1.279
				ドライバー	112.626	1265	0.0479	4384	1.953	0.879
		C	800 / 900	照射試験	125.268	1400	0.0902	17608		1.279
				ドライバー	112.626	1265	0.0479	4117	1.564	0.879
		D	800 / 900	照射試験	125.268	1400	0.0902	16636		1.279
				ドライバー	112.626	1287	0.0402	3794	1.427	0.637
		E	800	照射試験	125.268	1400	0.0902	25264		1.279
				ドライバー	112.626	1265	0.0517	3515	1.025	0.985
マ ル チ ホ ール	50 MW	A	800	照射試験	125.226	1400	0.0559	9155		0.406
				ドライバー	112.626	1244	0.0486	4693	2.210	0.904
		B	800	照射試験	44.226	1400	0.0559	12012		0.406
				ドライバー	112.626	1244	0.0481	4693	2.210	0.362
		C	800 / 900	照射試験	44.226	1400	0.0559	10831		0.406
				ドライバー	112.626	1244	0.0481	4232	1.584	0.362
		D	800 / 900	照射試験	44.226	1400	0.0559	10107		0.406
				ドライバー	112.626	1285	0.0404	3938	1.448	0.647
		E	800	照射試験	44.226	1400	0.0559	15023		0.406
				ドライバー	112.626	1244	0.0525	3619	1.045	1.047
中 空	50 MW	F	800 / 900	照射試験	255.775	1400	0.0591	6164	1.405	0.538
				ドライバー	112.626	1311	0.0468	3825	1.576	0.846
円 環	50 MW	F	800 / 900	照射試験	255.775	1400	0.0389	4591	0.911	0.209
				ドライバー	112.626	1231	0.0475	4051	1.783	0.867

\*) 最小レイノルズ数 10000 以上の最小限界熱流束比の値については省略した。

Table 3.4.2 SR-1炉心の熱流動特性

試験 燃料体	熱出力	流量 調節 ケース	原子炉出 口冷却材 温度 (°C)	領 域	燃料ピン 最高線出 力 (cal/ s·cm)	燃 料 最 高 温 度 (°C)	最高熱伝 達 率 (cal/ s·cm <sup>2</sup> ·°C)	最小レイ ノズル数	*) 最小限界 熱流束比	最大圧力 損 失 (kg/cm <sup>2</sup> )
セ ミ ピ ン	50MW	G	1000	照射試験	84.946	1400	0.0542	8607	2.744	0.403
				ドライバー	34.279	1347	0.0267	7661	3.332	0.105
		H	1000	照射試験	84.946	1400	0.0542	10148	/	0.403
				ドライバー	34.279	1347	0.0264	7661	3.060	0.103
		I	1000	照射試験	84.946	1400	0.0542	12765	/	0.403
				ドライバー	34.279	1347	0.0262	7661	3.060	0.102
マ ル チ ホ ー ル	50MW	G	1000	照射試験	29.988	1400	0.0343	5379	2.509	0.137
				ドライバー	34.297	1333	0.0267	7980	3.173	0.105
		H	1000	照射試験	29.988	1400	0.0343	6301	3.292	0.137
				ドライバー	34.279	1333	0.0265	7980	3.319	0.104
		I	1000	照射試験	29.988	1400	0.0343	7949	4.940	0.137
				ドライバー	34.279	1333	0.0263	7980	3.152	0.102

\*) 最小レイノルズ数 10000 以上の最小限界熱流束比の値については省略した。

Table 3.4.3 MR-1 炉心の流量調節ケース

試験燃料体	流量調節ケース	選択理由	第1サイクル			第2サイクル		
			燃	焼	日	燃	焼	日
セミピン・マルチホール	A	初期炉心状態と同じとする。	0 75	150 300	300 450	585 595	735 885	885 1035
	B	流量調節方式1を採用する。	800℃流量調節方式5 (1400℃制限)					
	C	第1サイクルは800℃炉心、第2サイクルは900℃炉心とする。	800℃ 流量調節方式5 (1300℃制限)					
	D	900℃炉心を出来るだけ早く達成させる。	900℃ 流量調節方式5 (1400℃制限)					
	E	試験燃料温度を低く抑え核移動距離を小さくする。	800℃ 流量調節方式2					
	F	熱設計基準・指針を満足させ、第1サイクルは800℃炉心、第2サイクルは900℃炉心とする。	800℃ 流量調節方式5 (1200℃制限)					

Table 3.4.4 MR-1炉心の熱流動特性燃焼変化

試験燃料体 セミピン

サイクル	燃焼日	熱流動特性値	流 量 調 節 ケ ー ス										
			A		B		C		D		E		
			照射試験	ドライバー	照射試験	ドライバー	照射試験	ドライバー	照射試験	ドライバー	照射試験	ドライバー	
第1サイクル	初期炉心	燃料最小温度	1400	1265	1400	1265	1400	1265	1400	1265	1400	1265	
		最小レイノルズ数	73760	4384	73760	4384	73760	4384	73760	4384	73760	4384	
		最小限界熱流束比	/	1.953	/	1.953	/	1.953	/	1.953	/	1.953	
	Xe,Sm蓄積時	"	1400	1206	1400	1206	1400	1206	1400	1206	1400	1206	
		"	54696	4902	54696	4902	54696	4902	54696	4902	54696	4902	
		"	/	2.688	/	2.688	/	2.688	/	2.688	/	2.688	
	75	"	1400	1191	1411	1181	1411	1181	1400	1181	1400	1181	
		"	51423	5056	51423	5056	51423	5056	51423	5056	51423	5056	
		"	/	2.750	/	2.750	/	2.750	/	2.750	/	2.750	
	150	"	1400	1142	1300	1158	1300	1158	1400	1263	1167	1167	
		"	41535	5481	50640	5183	50640	5183	41535	3794	68990	3515	
		"	/	3.371	/	3.041	/	3.041	/	1.732	/	1.513	
	300	"	1400	1049	1300	1059	1300	1059	1400	1161	1083	1083	
		"	28504	6060	34358	5855	34358	5855	28504	4316	56728	4296	
		"	/	3.641	/	3.414	/	3.414	/	1.950	/	1.934	
	450	"	1400	1101	1300	1106	1300	1106	1400	1184	1096	1096	
		"	20223	6356	24163	6213	24163	6213	20223	4602	38084	4091	
		"	/	2.979	/	2.853	/	2.853	/	1.631	/	1.316	
	585	"	1400	1212	1300	1217	1300	1217	1400	1287	1181	1181	
		"	16636	6463	19886	6342	19886	6342	16636	4712	25264	3923	
		"	/	2.564	/	2.474	/	2.474	/	1.427	/	1.025	
	第2サイクル	585	"	1400	1097	1374	1100	1300	1224	1300	1224	1124	1124
			"	29237	6076	30654	6026	35340	4117	35340	4117	52750	4312
			"	/	4.048	/	3.985	/	1.978	/	1.978	/	2.150
595		"	1400	1066	1252	1080	1300	1195	1300	1195	1086	1086	
		"	22820	6097	30066	5846	27358	4241	27358	4241	4390	4366	
		"	/	3.466	/	3.200	/	1.759	/	1.759	/	1.855	
735		"	1400	1070	1261	1082	1300	1190	1300	1190	1088	1088	
		"	22607	6261	29319	6022	27137	4357	27137	4357	43518	4571	
		"	/	3.912	/	3.637	/	2.008	/	2.008	/	2.189	
885		"	1400	1018	1183	1034	1300	1136	1300	1136	1039	1039	
		"	17903	6493	26981	6163	21360	4599	21360	4599	38037	5042	
		"	/	3.512	/	3.181	/	1.845	/	1.845	/	2.185	
1035		"	1400	1117	1107	1129	1300	1188	1300	1188	1101	1101	
		"	14851	6589	25968	6182	17608	4720	17608	4720	26324	4237	
		"	/	2.907	/	2.578	/	1.564	/	1.564	/	1.287	

\*) 斜線部は最小レイノルズ数 10000 以上であるので最小限界熱流束比は省略した。

Table 3.4.5 MR-1炉心の熱流動特性燃焼変化

試験燃料体 マルチホール

サイクル	燃焼日	熱流動特性値	流量調節ケース										
			A		B		C		D		E		
			試験	ドライバー	試験	ドライバー	試験	ドライバー	試験	ドライバー	試験	ドライバー	
第1サイクル	初期炉心	燃料最高温度	1400	1244	1400	1244	1400	1244	1400	1244	1400	1244	
		最小レイノルズ数	41360	4693	41360	4693	41360	4693	41360	4693	41360	4693	
		最小限界熱流速比	/	2.210	/	2.210	/	2.210	/	2.210	/	2.210	
	Xe, Sm蓄積時	"	1400	1193	1400	1193	1400	1193	1400	1193	1400	1193	
		"	31336	5103	31336	5103	31336	5103	31336	5103	31336	5103	
	75	"	1400	1170	1400	1170	1400	1170	1400	1170	1400	1170	
		"	29478	5249	29478	5249	29478	5249	29478	5249	29478	5249	
	150	"	1400	1134	1300	1148	1300	1148	1400	1249	1154	1154	
		"	24015	5632	29165	5367	29165	5367	24010	3938	40681	3619	
	300	"	1400	1044	1300	1054	1300	1054	1400	1154	1074	1074	
		"	16906	6147	20320	5961	20320	5961	16914	4399	33941	4399	
	450	"	1400	1099	1300	1104	1300	1104	1400	1182	1092	1092	
		"	12302	6403	14637	6269	14637	6269	12309	4648	22665	4147	
	585	"	1400	1211	1300	1215	1300	1215	1400	1285	1187	1187	
		"	10103	6503	12013	6391	12012	6391	10107	4751	15023	3828	
	第2サイクル	585	"	1400	1093	1320	1100	1300	1214	1300	1214	1115	1115
			"	17172	6175	19887	6026	20685	4232	20685	4232	31265	4410
			"	/	4.175	/	3.985	/	2.079	/	2.079	/	2.240
		595	"	1400	1063	1212	1080	1300	1188	1300	1188	1080	1080
			"	13690	6157	19494	5845	16360	4312	16360	4312	26453	4434
		735	"	1400	1067	1219	1082	1300	1184	1300	1184	1082	1082
			"	13496	6326	19003	6023	16160	4432	16160	4432	26097	4648
		885	"	1400	1016	1150	1034	1300	1132	1300	1132	1034	1034
			"	10860	6536	17485	6164	12928	4651	12928	4651	23095	5109
1035		"	1400	1116	1082	1129	1300	1186	1300	1186	1100	1100	
		"	9155	6617	16847	6183	10831	4752	10831	4752	16185	4258	
			/	/	2.579	/	1.584	/	1.584	/	1.298		

\*) 斜線部は最小レイノルズ数 10000 以上であるので、最小限界熱流速比は省略した。

Table 3.4.6 MR-1炉心の熱流動特性燃焼変化

試験燃料体 中空型および  
円環型

サイクル	燃焼日	熱流動特性値	試験燃料体			
			中空		円環	
			試験	ドライバー	試験	ドライバー
第1サイクル	初期 炉心	燃料最高温度	1400	1311	1400	1231
		最小レイノルズ数	25039	3825	13512	4881
		最小限界熱流束比		1.529		2.374
	Xe,Sm 蓄積時	"	1400	1230	1400	1187
		"	17711	4576	10545	5203
	75	"		2.371		3.000
		"	1400	1201	1400	1165
		"	16647	4746	9864	5349
	150	"		2.450	1.820	3.051
		"	1200	1214	1200	1160
		"	20868	4357	12058	5148
	300	"		2.218		3.004
		"	1200	1085	1200	1064
		"	13166	5377	8564	5766
	450	"		2.914	1.783	3.318
		"	1200	1120	1200	1111
		"	9066	5888	6211	6112
	585	"		2.577	1.247	2.765
		"	1200	1227	1200	1222
		"	7204	6103	5060	6263
	585	"		1.818	1.054	2.417
		"	1200	1077	1200	1230
		"	13764	3623	8659	4051
	595	"		1.574	1.797	1.922
"		1200	1040	1200	1203	
"		10155	3917	6904	4157	
735	"		1.522	1.351	1.696	
	"	1200	1037	1200	1197	
	"	10139	4021	6786	4281	
885	"		1.738	1.303	1.945	
	"	1200	1015	1200	1144	
	"	7712	4358	5464	4515	
1035	"		1.672	1.022	1.783	
	"	1200	1007	1200	1192	
	"	6164	4541	4591	4632	
			1.405	1.458	0.911	1.512

\* ) 斜線部は最小レイノルズ数 10000 以上であるので、最小限界熱流束比は省略した。

Table 3.4.7 MR-1炉心における試験燃料体各部温度差の比較

試験燃料体:		冷却材と燃料最高温度との差 (°C)	冷却材部		スリーブ又は黒鉛部		燃料コンパクト部	
			温度 (°C)	割合	温度 (°C)	割合	温度 (°C)	割合
セミピン		824.4	457.5	55.5%	201.4	24.4%	165.5	20.1%
マルチホール		801.8	470.7	58.7%	213.6	26.6%	117.5	14.7%
中空		854.6	400.5	46.9%	184.5	21.6%	269.6	31.5%
円環	内側	661.6	540.4	81.7%	71.9	10.8%	49.3	7.5%
	外側	806.5	489.5	60.7%	111.0	13.8%	206.0	25.5%

Table 3.4.8 SR-1炉心の流量調節方式

試験燃料体	流量調節ケース	選択理由	第1サイクル					第2サイクル					
			燃焼日					燃焼日					
			0 75	75 150	150 300	300 450	450 625	625 635	635 775	775 925	925 1075	1075 1150	
セミピン・マルチホール	G	初期炉心状態と同じとする。	流量調節方式6(1400°C制限)										
	H	熱流動的に十分余裕を持たせる。	流量調節方式6(1400°C制限)	流量調節方式6(1300°C制限)									
	I	テスト燃料温度を低く抑え核移動距離を小さくする。		流量調節方式2									

Table 3.4.9 SR-1炉心の熱流動特性燃焼変化

試験燃料体 : セミピン

サイクル	燃焼日	熱流動特性値	流 量 調 節 ケ ー ス					
			G		H		I	
			試験	ドライバー	試験	ドライバー	試験	ドライバー
第 1 サ イ ク ル	初期 炉心	燃料最高温度	1400	1347	1400	1347	1400	1347
		最小レイノルズ数	36648	7661	36648	7661	36648	7661
		最小限界熱流速比		3.332		3.332		3.332
	Xe,Sm 蓄積時	"	1400	1226	1400	1226	1400	1226
		"	24978	8598	24978	8598	24978	8598
		"		3.060		3.060		3.060
	75	"	1400	1236	1400	1236	1400	1236
		"	26158	8791	26158	8791	26158	8791
		"		3.623		3.623		3.623
	150	"	1400	1230	1300	1256	1267	1267
		"	22986	9163	27545	8775	29402	8616
		"		3.963		3.676		3.561
	300	"	1400	1183	1300	1200	1217	1217
		"	16025	10142	19090	9857	22429	9560
		"				3.909		3.706
	450	"	1400	1152	1300	1162	1180	1180
		"	11761	10567	13934	10357	17532	10023
		"						
	625	"	1400	1177	1300	1184	1191	1195
		"	9418	10848	11099	10681	13552	10441
		"		3.116				
	625	"	1400	1227	1300	1247	1258	1259
		"	18813	9725	22521	9397	24450	9231
		"		4.734		4.457		4.322
635	"	1400	1184	1300	1200	1218	1218	
	"	15657	9382	18651	9123	21853	8855	
	"		3.410		3.249		3.086	
775	"	1400	1179	1300	1193	1209	1210	
	"	14146	10272	16841	10020	20080	9728	
	"						3.800	
925	"	1400	1174	1300	1185	1200	1200	
	"	11592	10526	13762	10318	10826	10048	
	"							
1075	"	1400	1151	1300	1186	1174	1175	
	"	9518	10759	11244	10590	11095	10303	
	"		2.909					
1150	"	1400	1164	1300	1169	1176	1179	
	"	8607	10794	10148	10645	11538	10414	
	"		2.744					

\*) 斜線部は最小レイノルズ数 10000 以上であるもので、最小限界熱流速比は省略した。



Table 3.4.10 SR-1 炉心の熱流動特性燃焼変化

試験燃料体 : マルチホール

サイクル	燃焼日	熱流動特性値	流量調節ケース						
			G		H		I		
			試験	ドライバー	試験	ドライバー	試験	ドライバー	
第1サイクル	初期炉心	燃料最高温度	1400	1333	1400	1333	1400	1333	
		最小レイノルズ数	21152	7980	21152	7980	21152	7980	
		最小限界熱流束比		3.575		3.575		3.575	
	Xe, Sm 蓄積時	"	1400	1213	1400	1213	1400	1213	
		"	14766	8781	14766	8781	14766	8781	
		"		3.173		3.173		3.173	
	75	"	1400	1222	1400	1222	1400	1222	
		"	15370	8999	15370	8999	15370	8999	
		"		3.773		3.773		3.773	
	150	"	1400	1218	1300	1241	1254	1254	
		"	13553	9344	16205	8991	17715	8791	
		"		4.101		3.835		3.688	
	300	"	1400	1178	1300	1191	1210	1210	
		"	9616	10255	11442	9990	13627	9687	
		"	4.179			4.001		3.792	
	450	"	1400	1148	1300	1158	1175	1175	
		"	7195	10633	8517	10434	10792	10104	
		"	3.160		4.240				
	625	"	1400	1175	1300	1182	1189	1192	
		"	5857	10877	6898	10726	8445	10492	
		"	2.824		3.742		5.33		
	第2サイクル	625	"	1400	1218	1300	1236	1248	1248
			"	11096	9880	13260	9579	14680	9390
			"		4.866		4.610		4.452
635		"	1400	1179	1300	1194	1211	1211	
		"	9444	9478	11233	9237	13328	8964	
		"	4.330	3.471		3.319		3.152	
775		"	1400	1173	1300	1186	1203	1203	
		"	8502	10371	10109	10136	12198	9843	
		"	3.618					3.878	
925		"	1400	1170	1300	1181	1195	1195	
		"	7047	10597	8355	10401	10199	10134	
		"	2.949		3.973				
1075		"	1400	1149	1300	1159	1171	1171	
		"	5872	10805	6934	10643	8828	10363	
		"	2.600		3.464		5.299		
1150		"	1400	1163	1300	1169	1173	1176	
		"	5379	10825	6301	10686	7949	10461	
		"	2.509		3.292		4.940		

\*) 斜線部は最小レイノルズ数 10000 以上であるので、最小限界熱流束比は省略した。

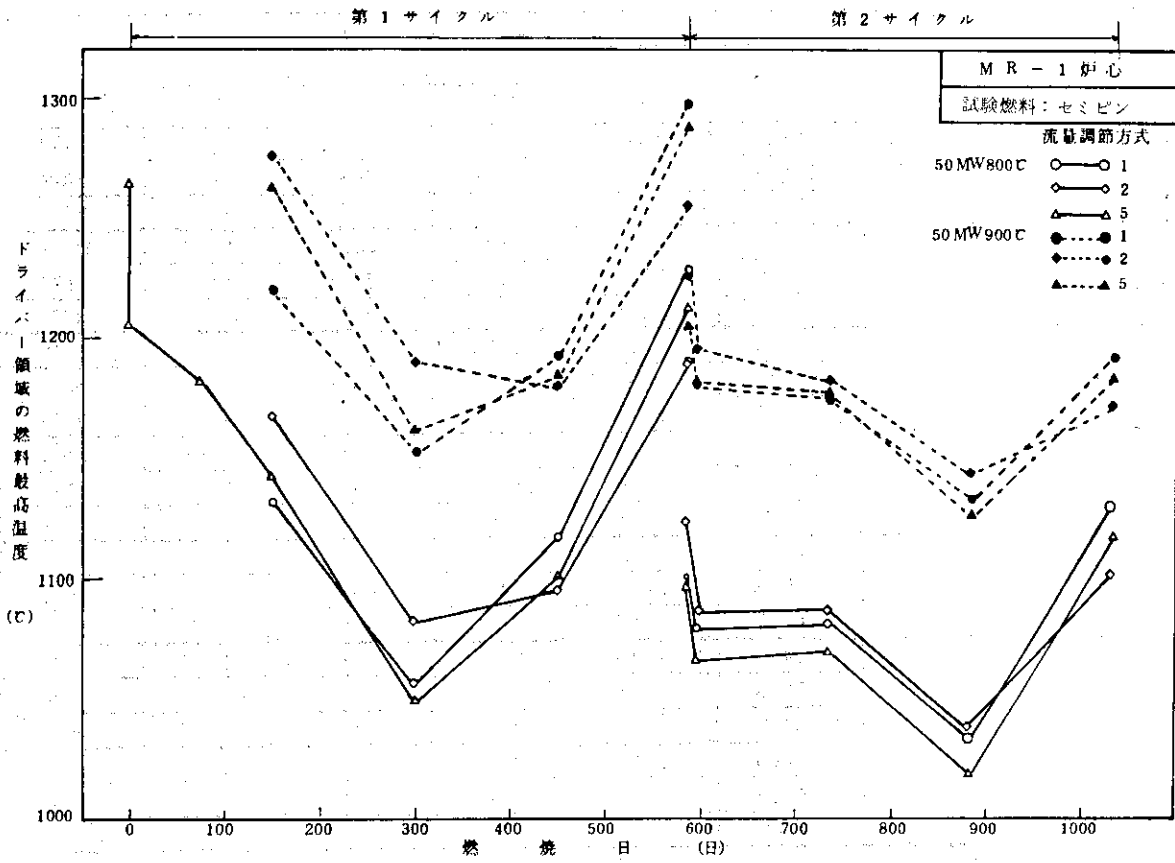


Fig. 3.4.1 各燃焼日における流量調節方式の検討 (ドライバーの燃料最高温度)

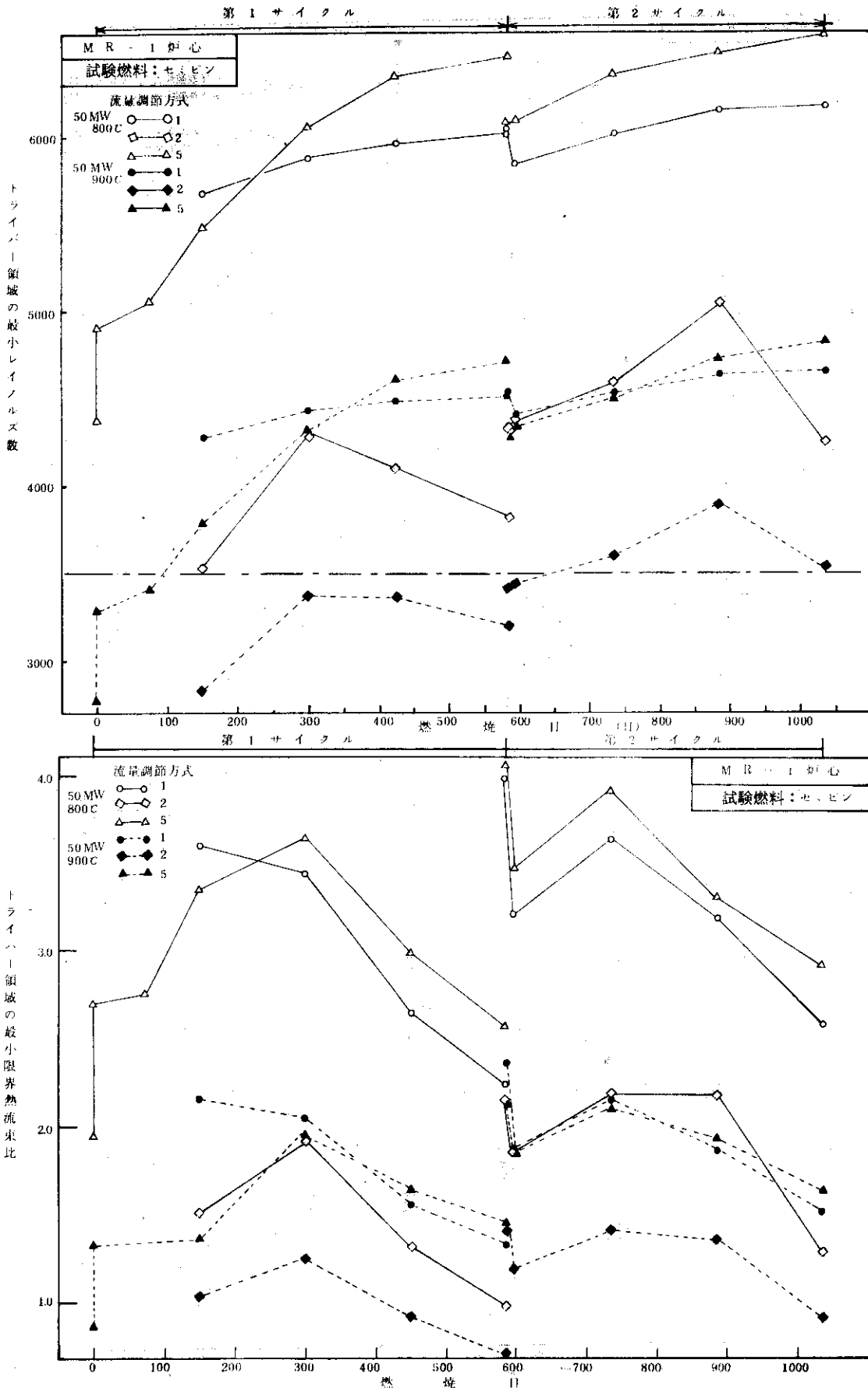


Fig. 3. 4 2 各燃焼日における流量調節方式の検討 (ドライバー領域の最小レイノルズ数と最小限界熱流束比)

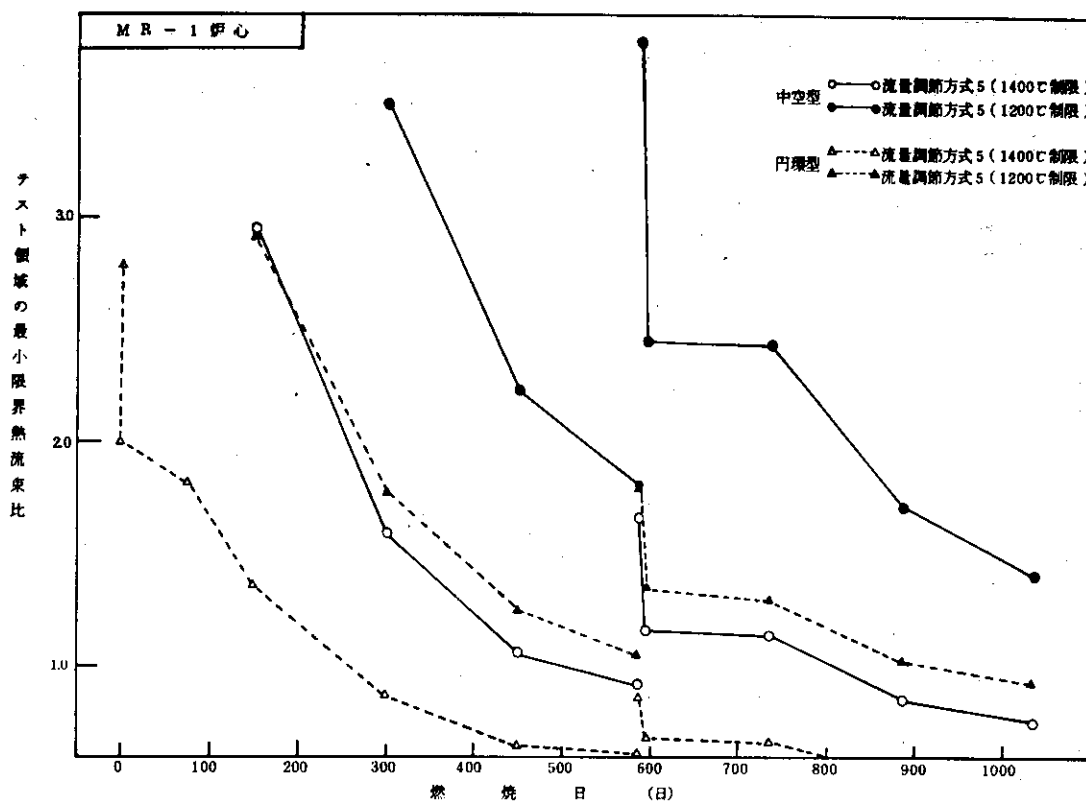


Fig. 3.4.3 中空および円環型試験燃料体における流量調節方式の検討  
(照射試験領域の最小限界熱流束比の燃焼変化)

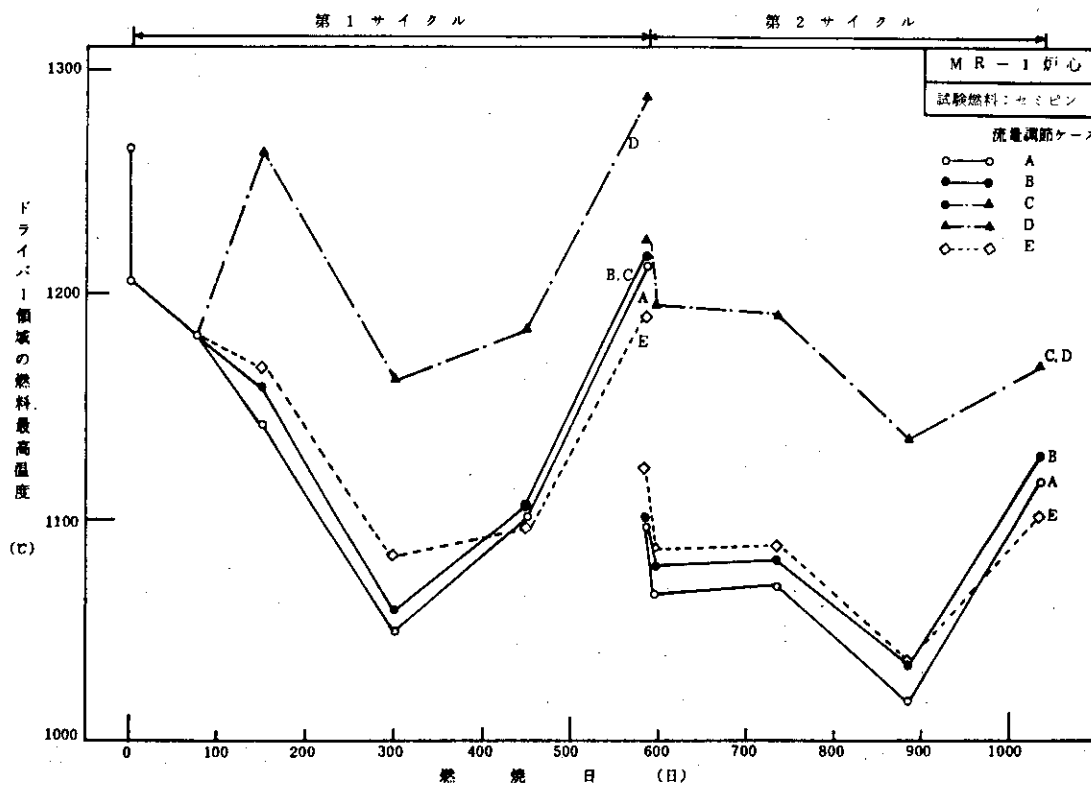


Fig. 3.4.4 各流量調節ケースにおけるドライバー領域の燃料最高温度の燃焼変化

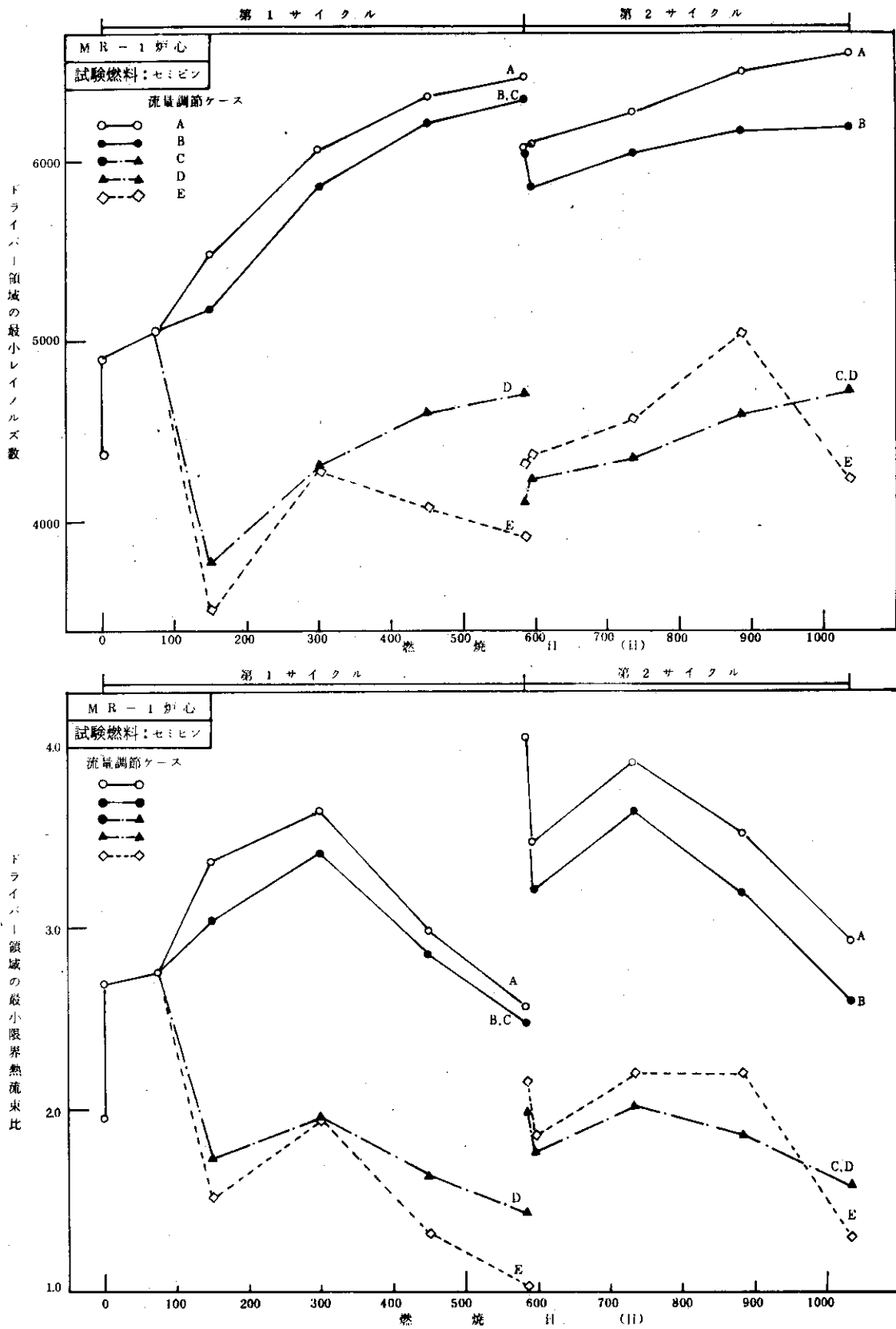


Fig. 3.4.5 各流量調節ケースにおけるドライバ領域の最小レイノルズ数と最小限界熱流束比の燃焼変化

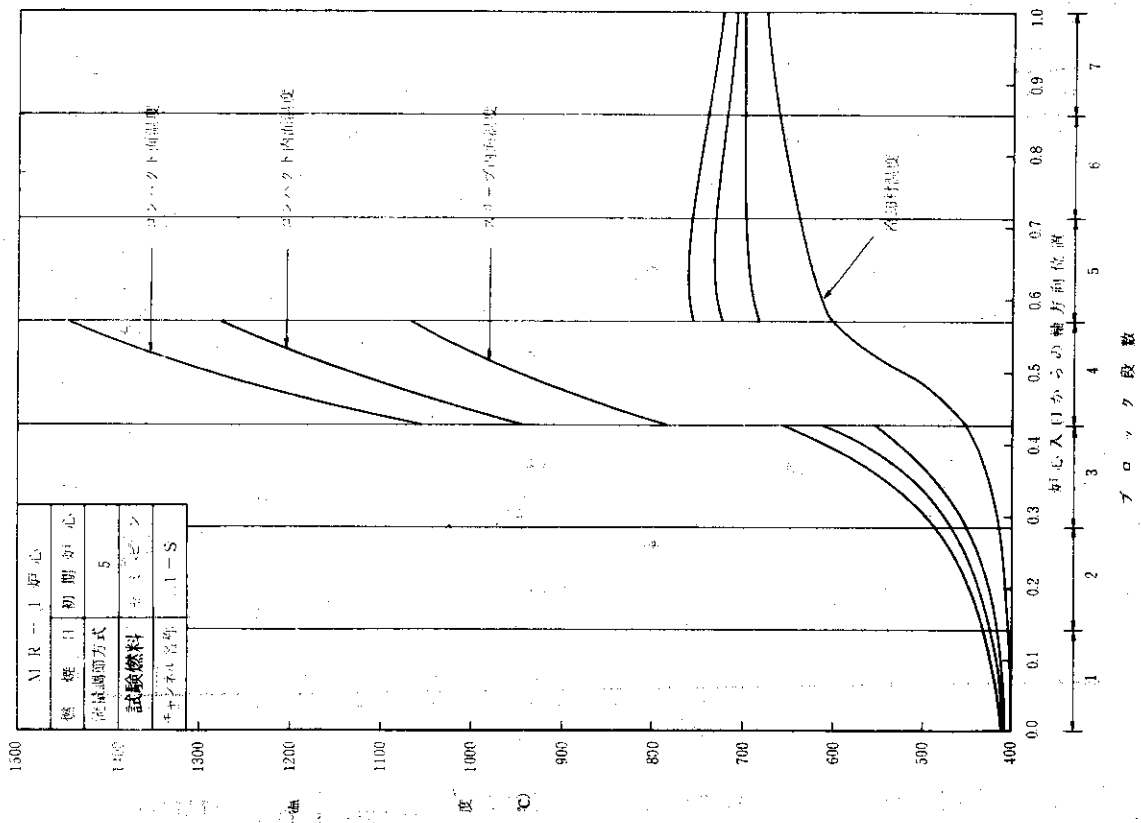
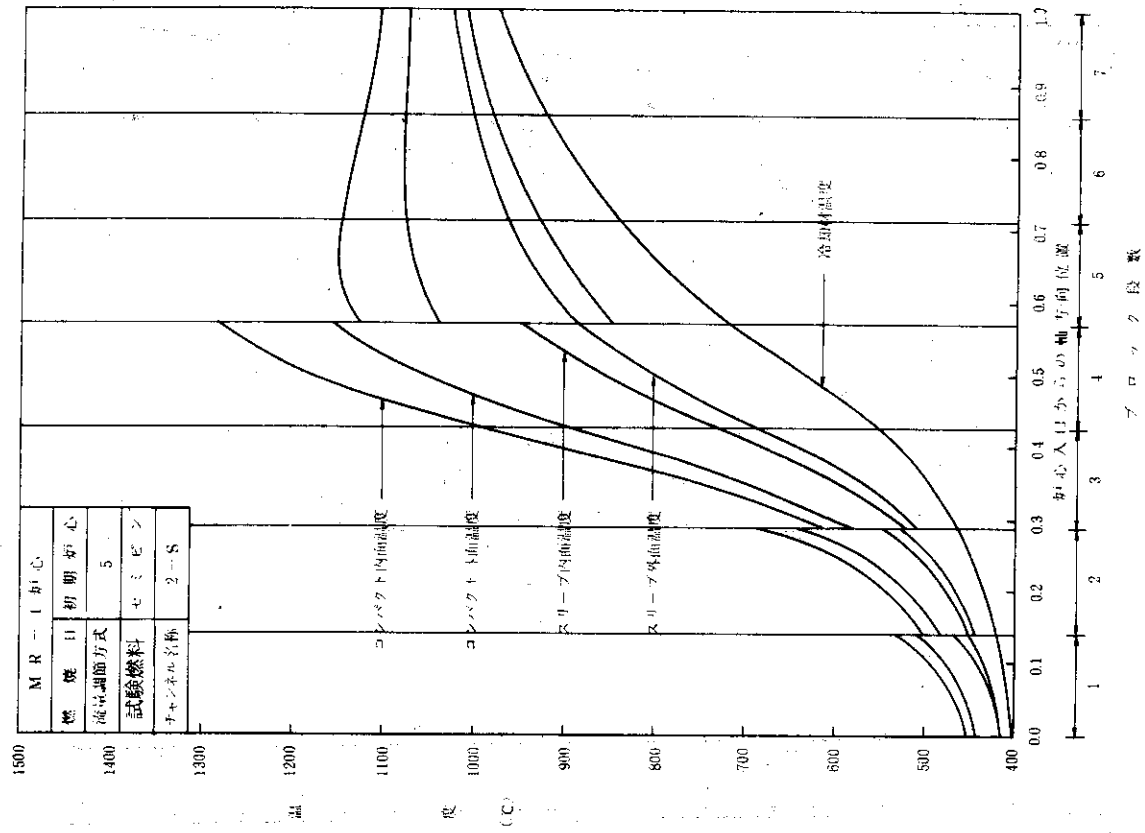


Fig. 3.4.6 MR-1炉心の高温チャンネル軸方向温度分布 (第1サイクル燃焼初期)

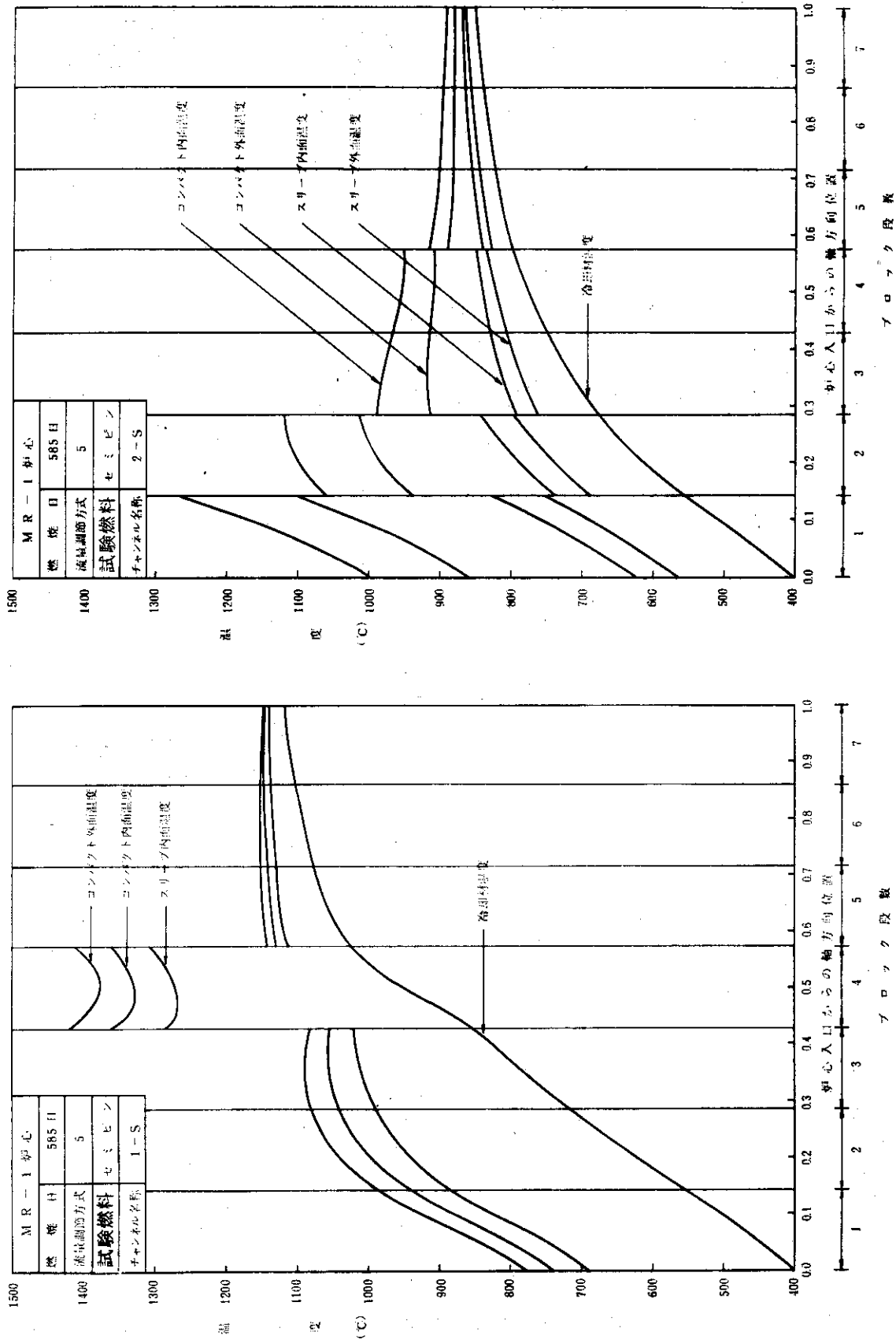


Fig. 3.4.7 MR-1炉心の高温チャンネル軸方向温度分布 (ドライバ燃料取換後)

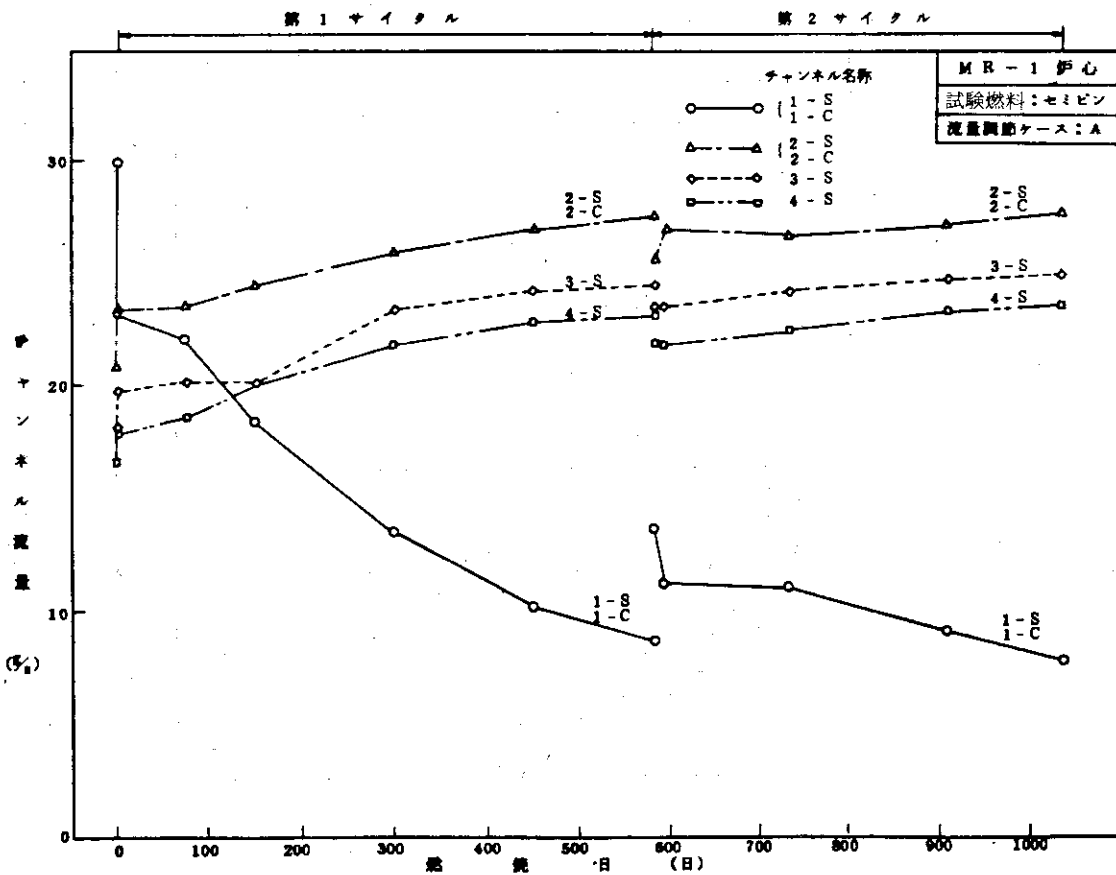
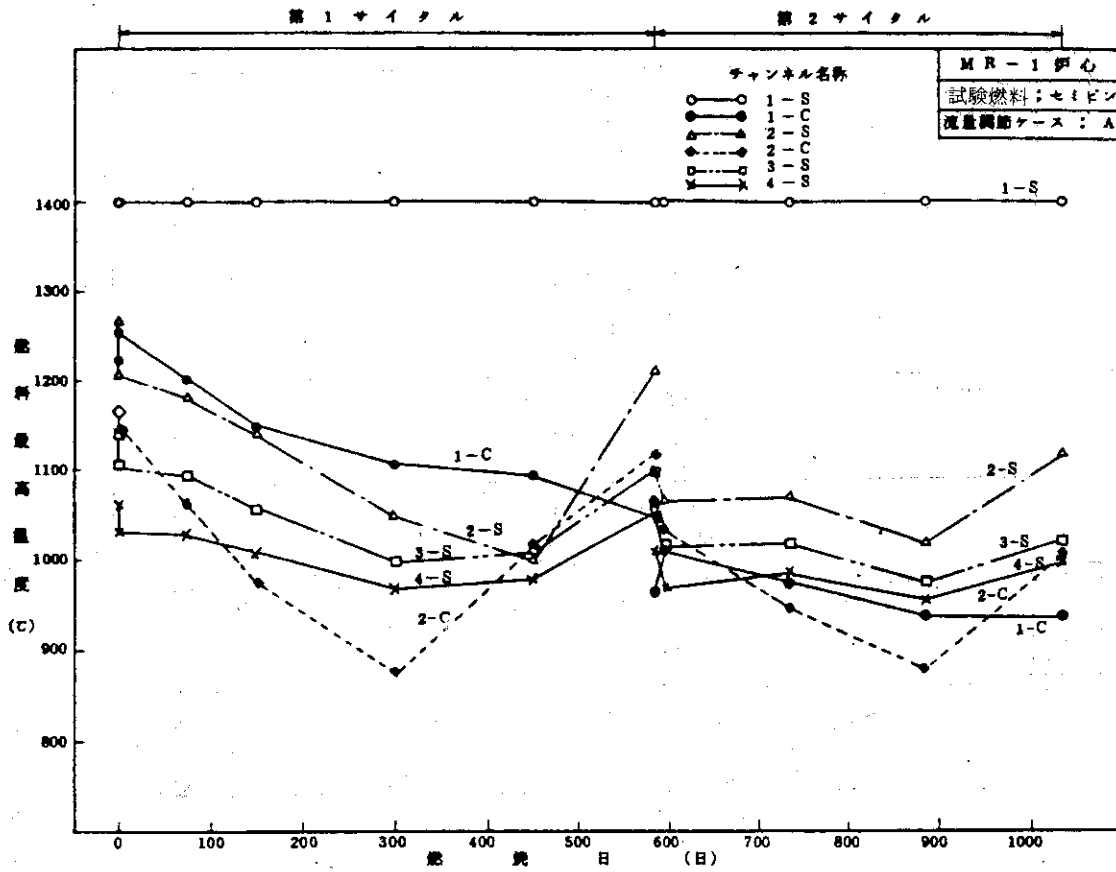


Fig. 3.48 流量調節ケースAにおける各燃料チャンネルの燃料最高温度と流量の燃焼変化



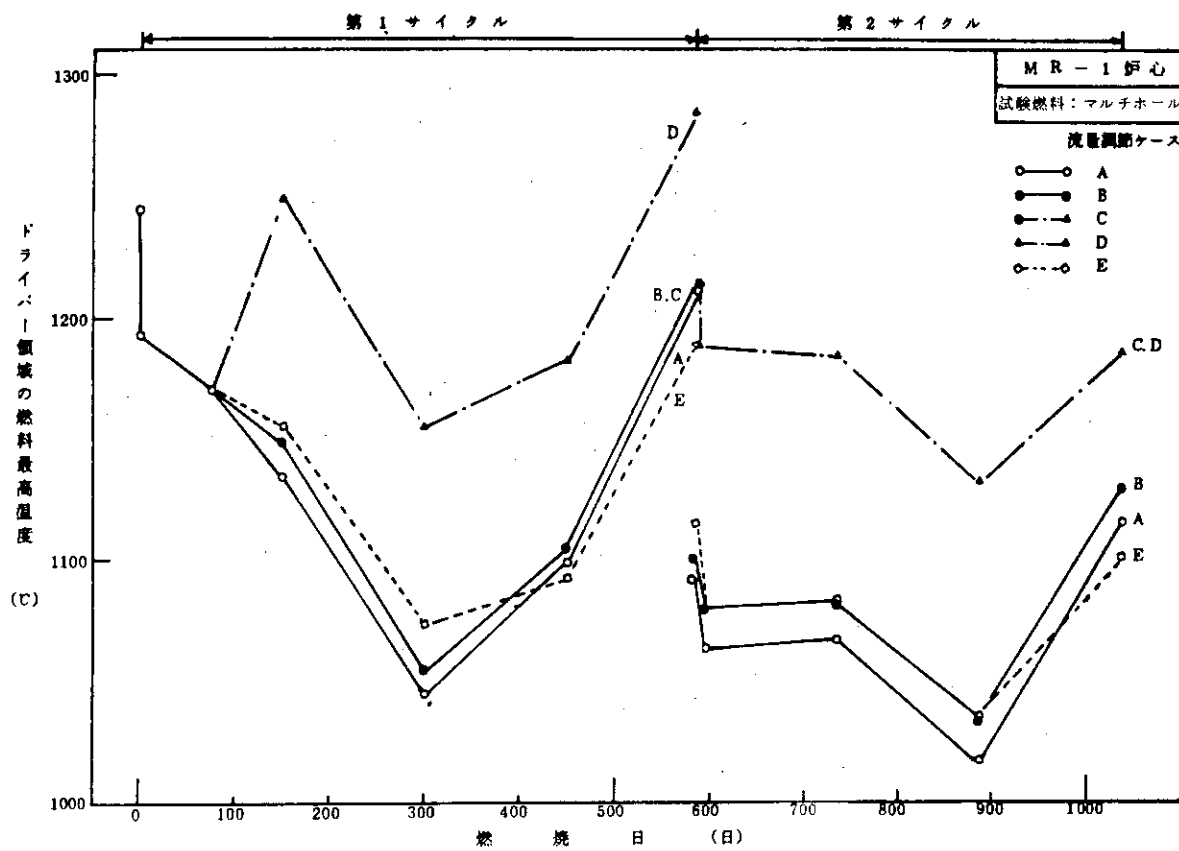


Fig. 3.4.9 各流量調節ケースにおけるドライバー領域の燃料最高温度の燃焼変化

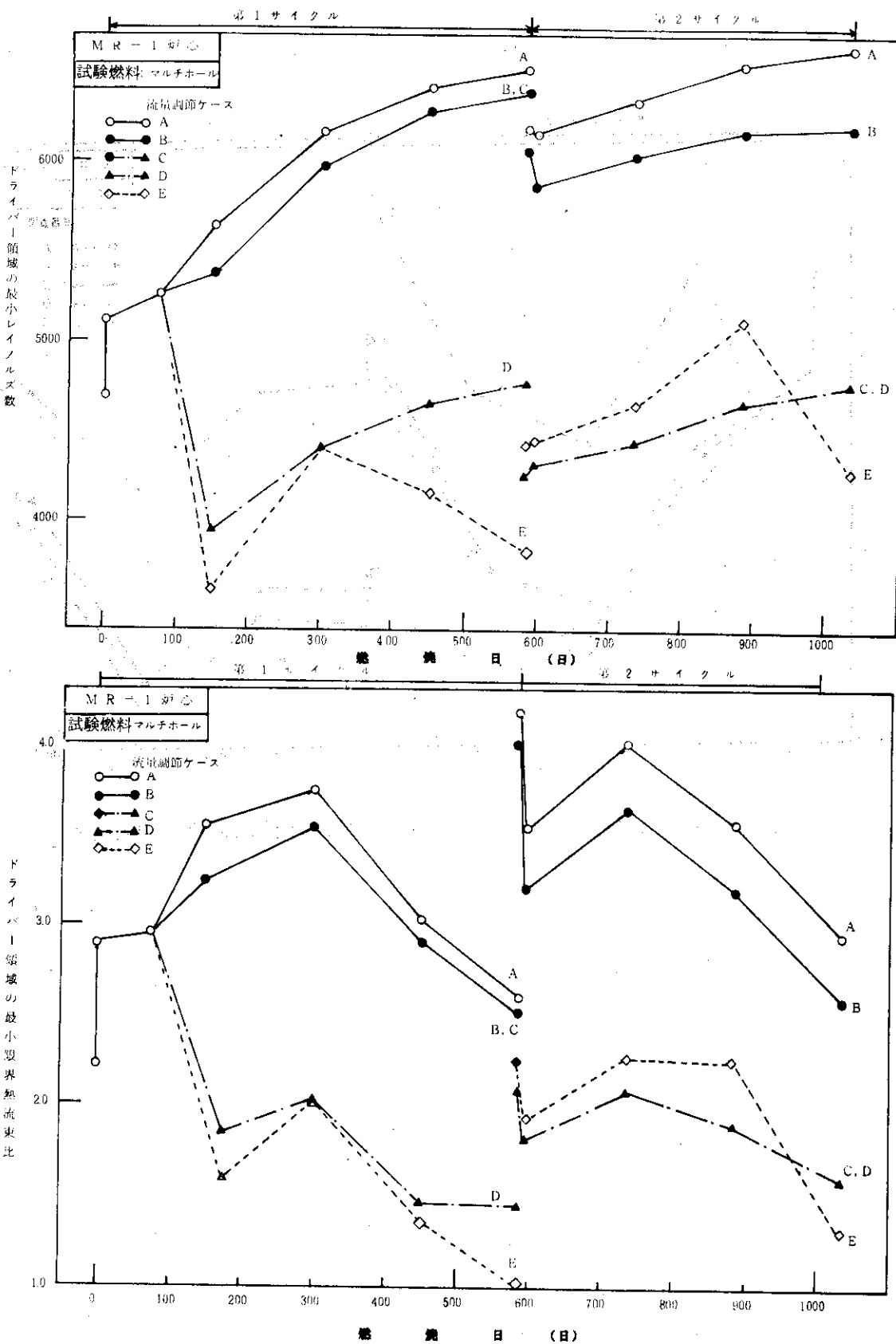


Fig. 3.4.10 各流量調節ケースにおけるドライバ領域の最小レイノルズ数の燃焼変化  
最小限界熱流束比

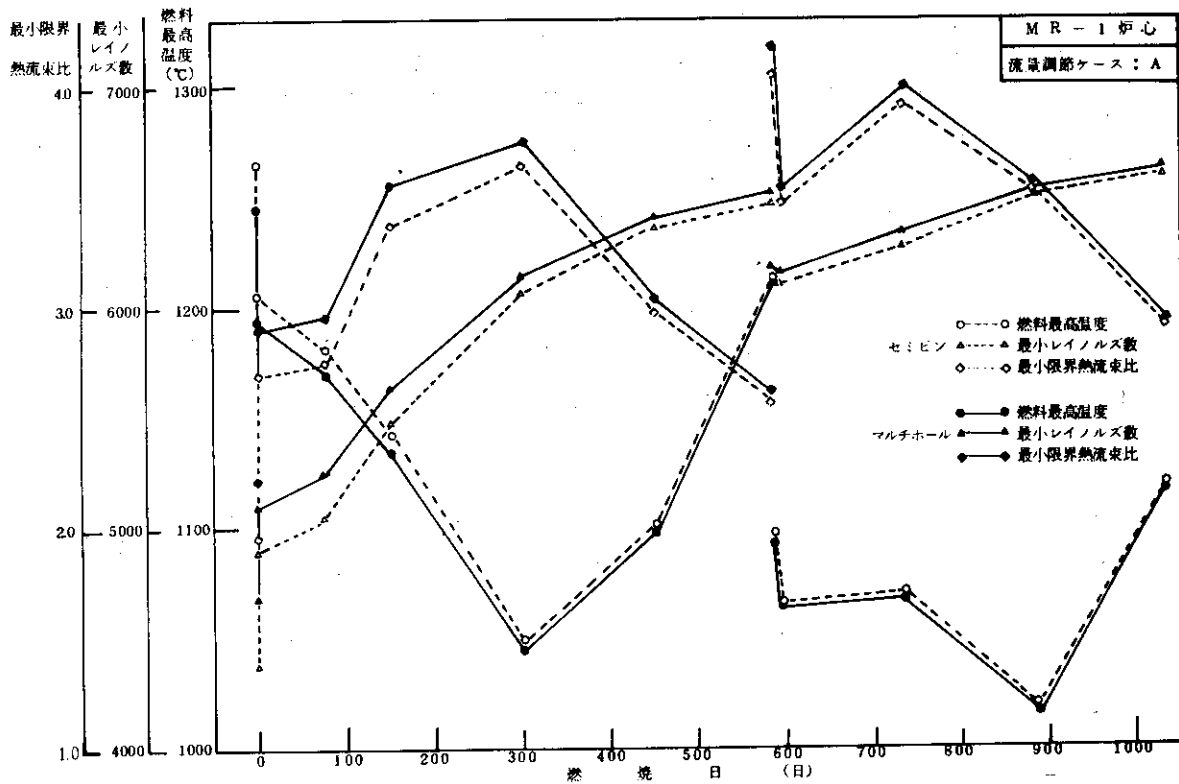


Fig. 3.4.11 セミピン型とマルチホール型試験燃料体の熱流動特性の比較

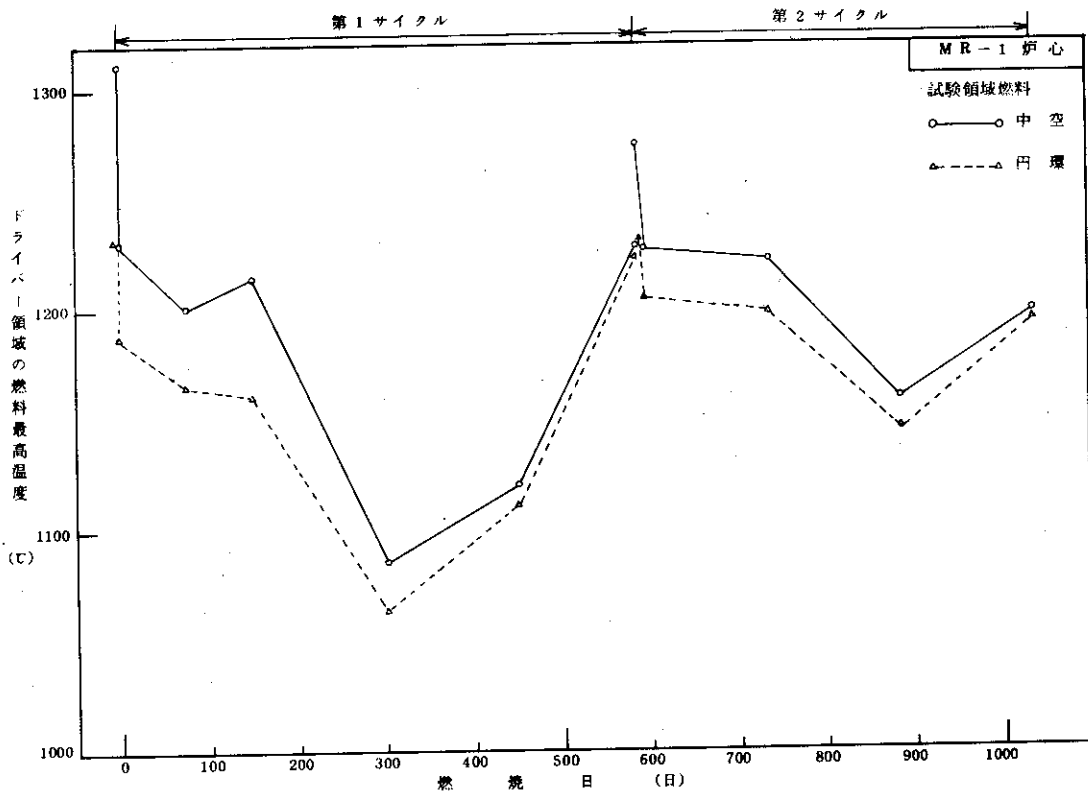


Fig. 3.4.12 中空および円環型試験燃料体のドライバ領域の燃料最高温度の燃焼変化

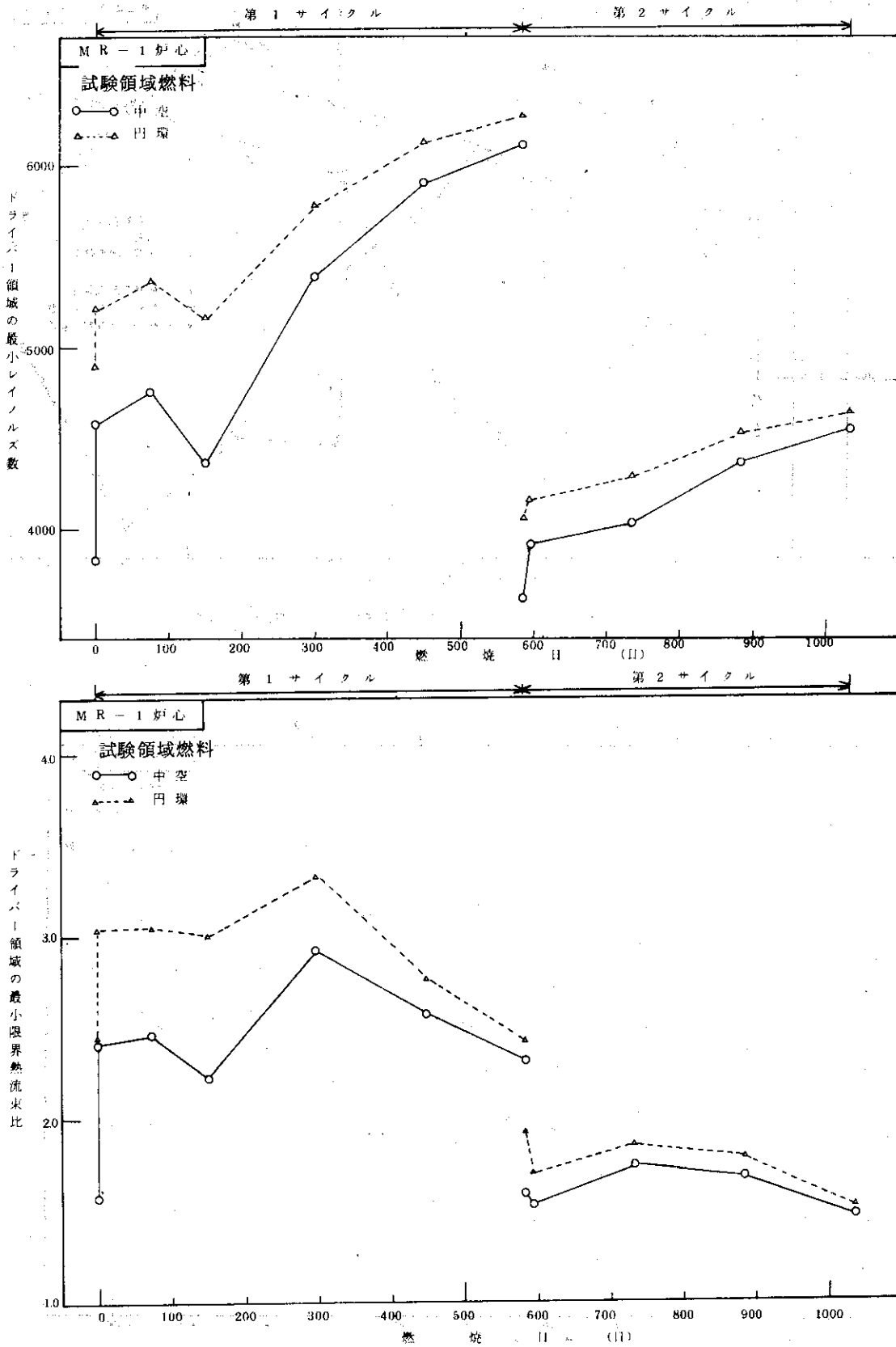


Fig. 3.4.13 中空および円環型試験燃料体のドライバ領域の最小レイノルズ数の燃焼変化  
最小限界熱流束比

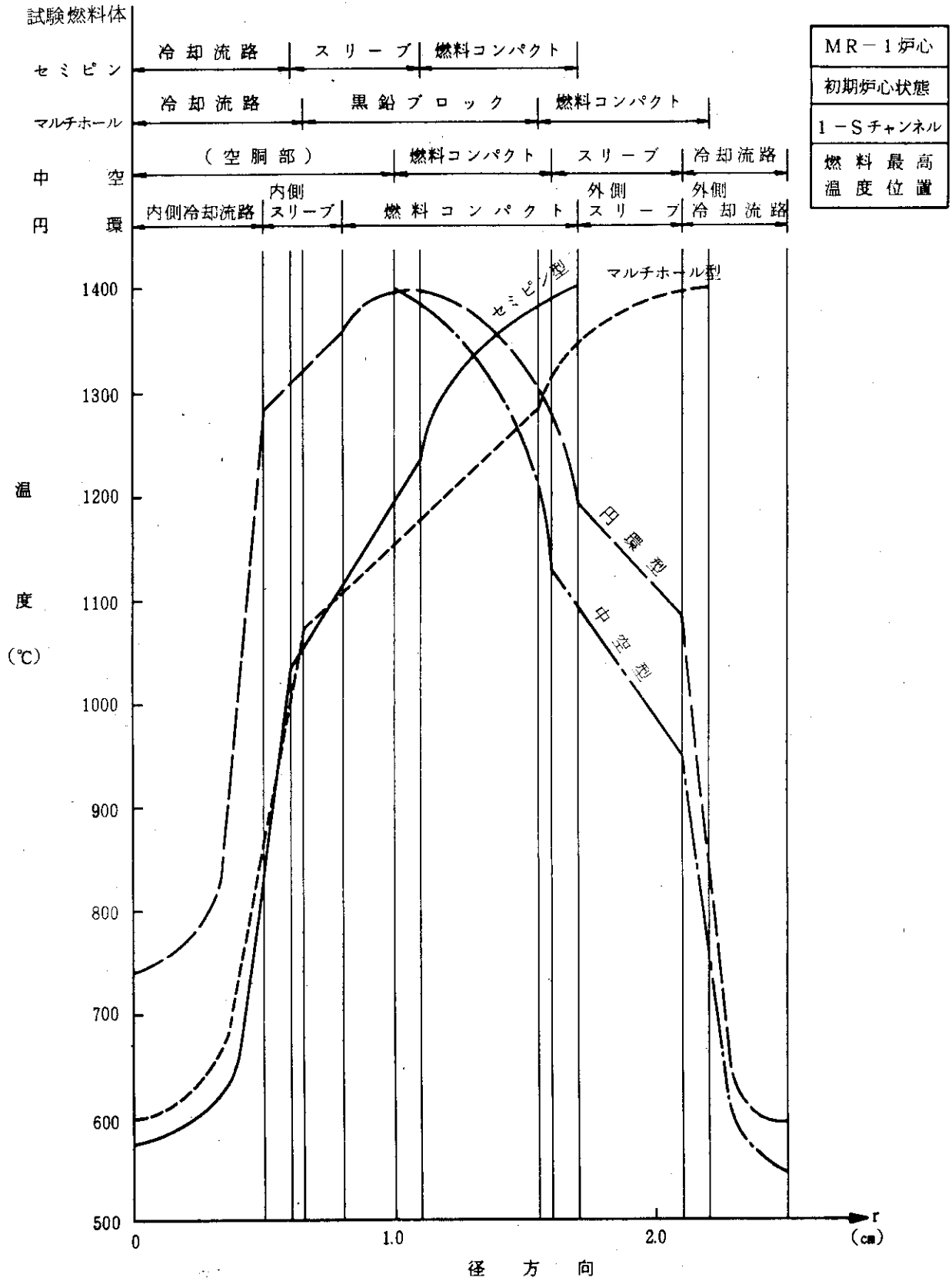


Fig. 3. 4. 14 MR-1炉心の初期炉心状態における、各試験燃料体の径方向温度分布の比較

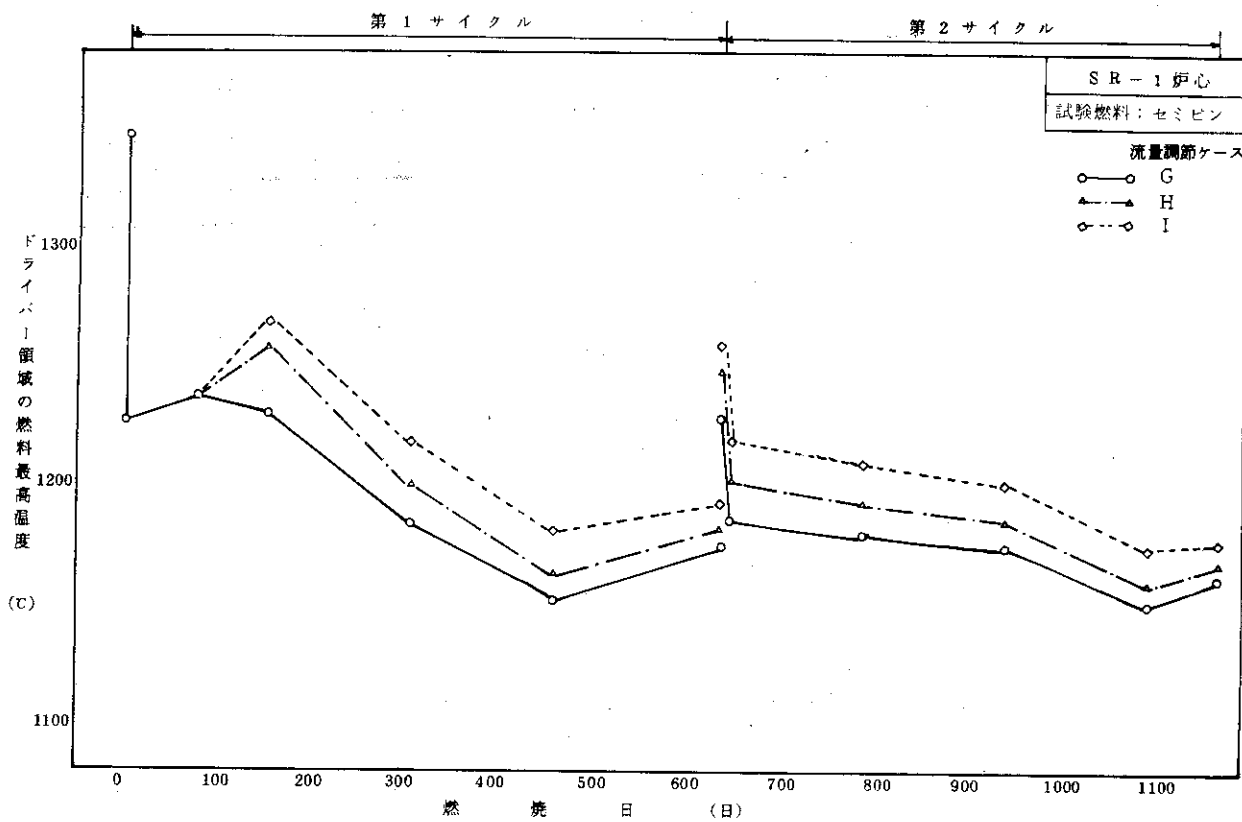


Fig. 3.4.15 各流量調節ケースにおけるドライバー領域の燃料最高温度の燃焼変化

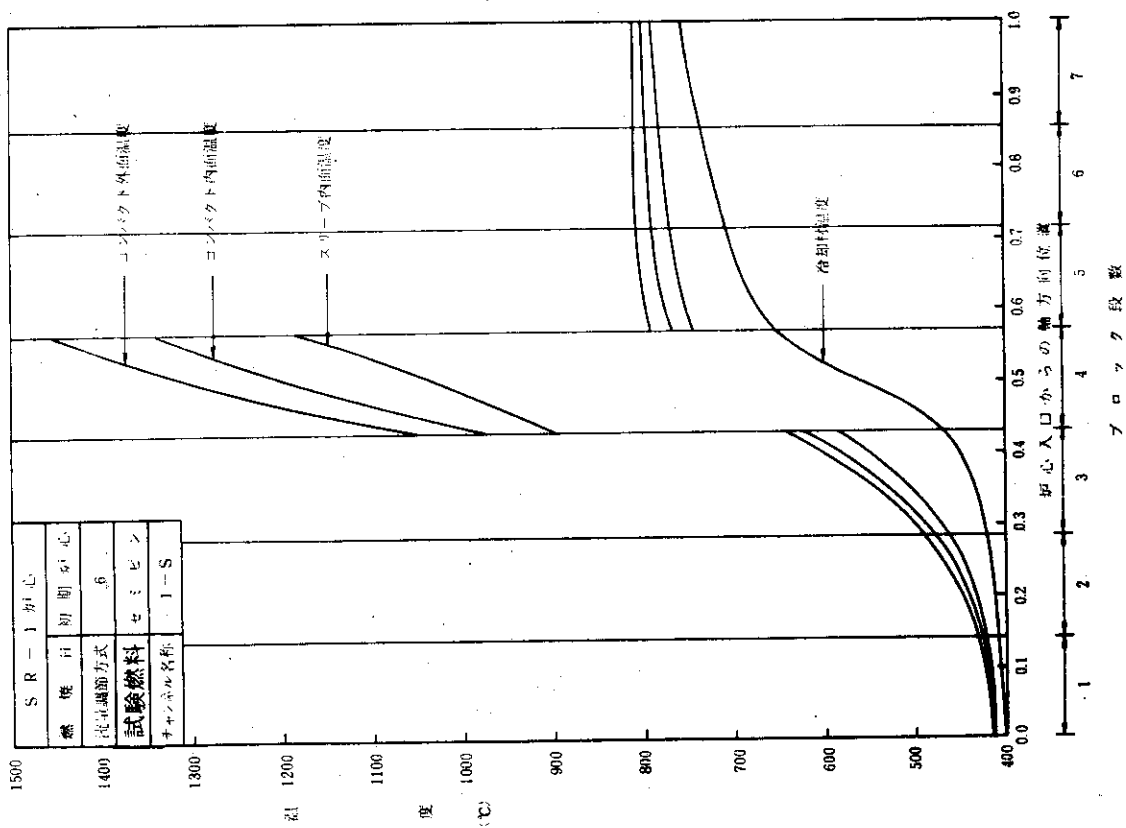
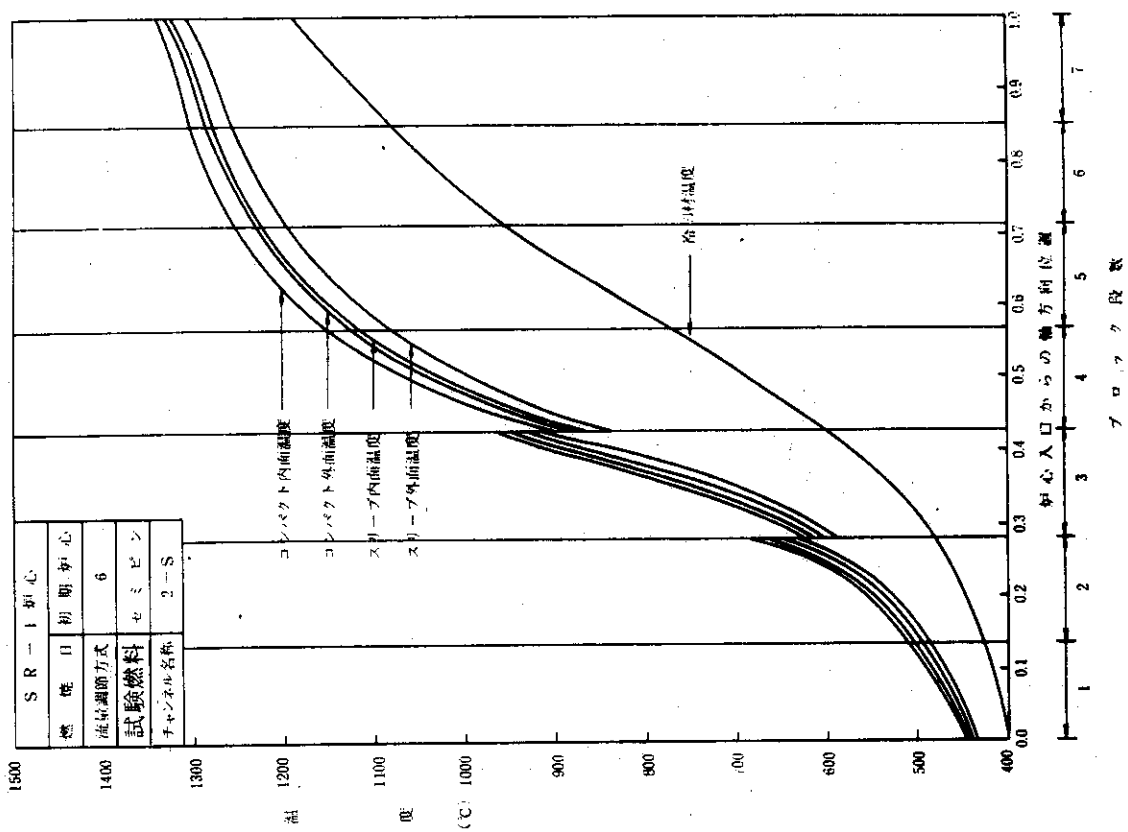


Fig. 3.4.16 SR-1炉心の高温チャンネル軸方向温度分布 (初期炉心)

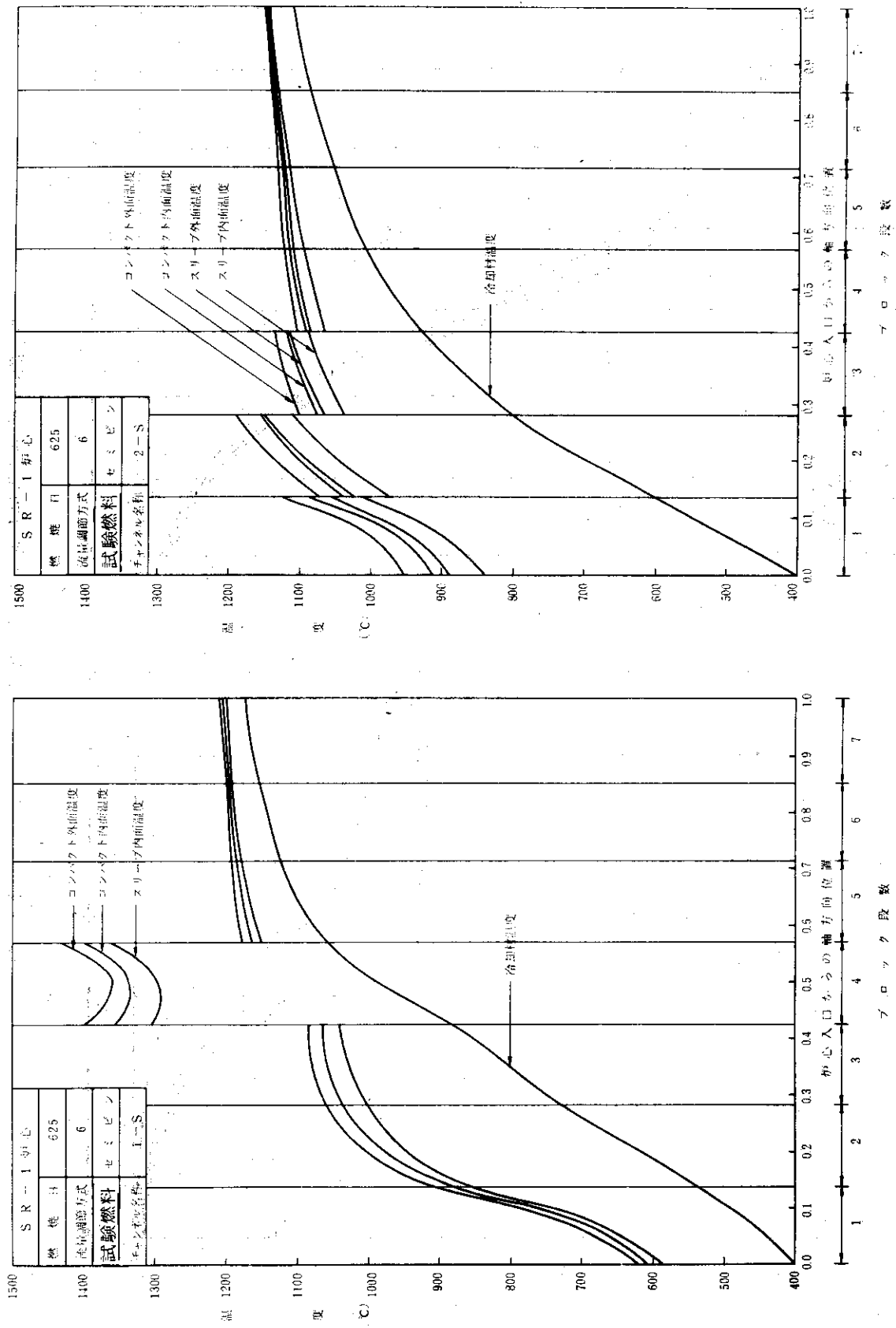


Fig. 3.4.17 SR-1炉心の高温チャンネル軸方向温度分布 (第2サイクル初期)



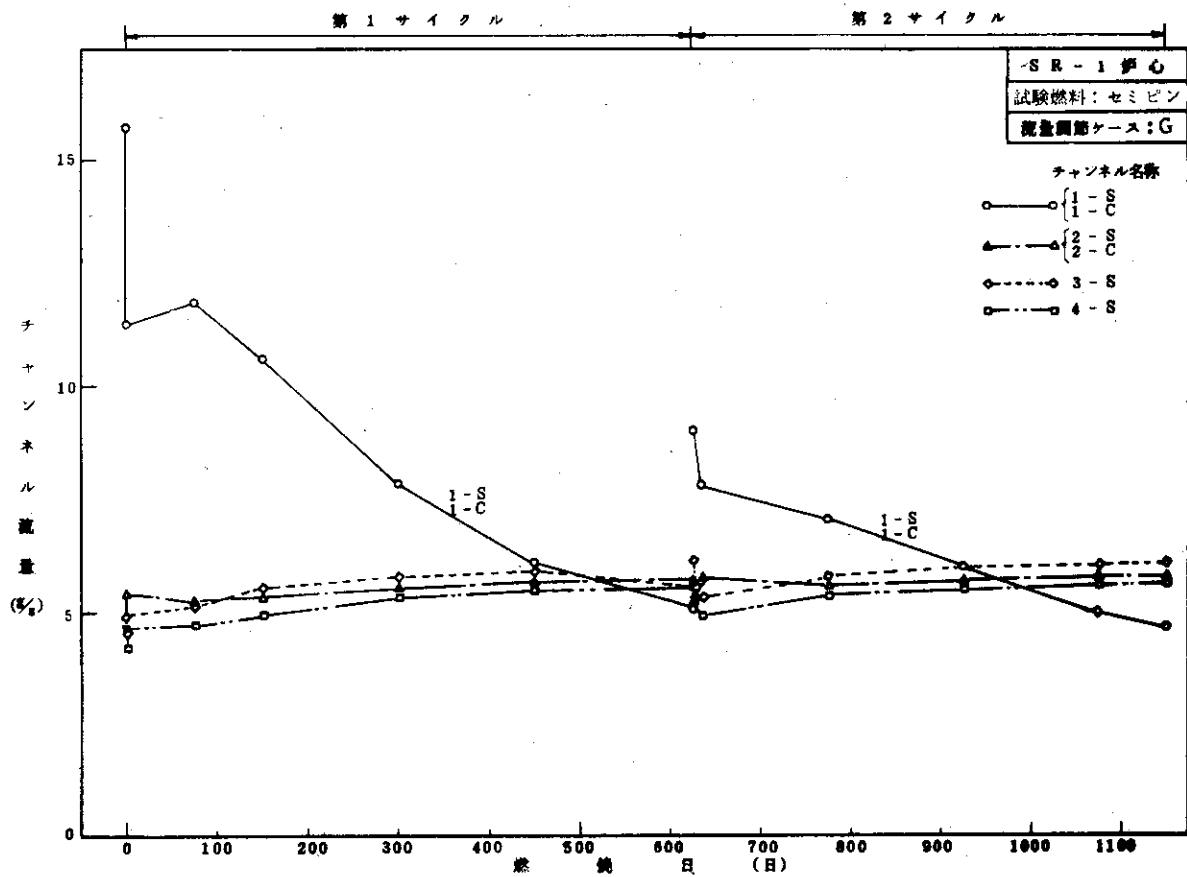
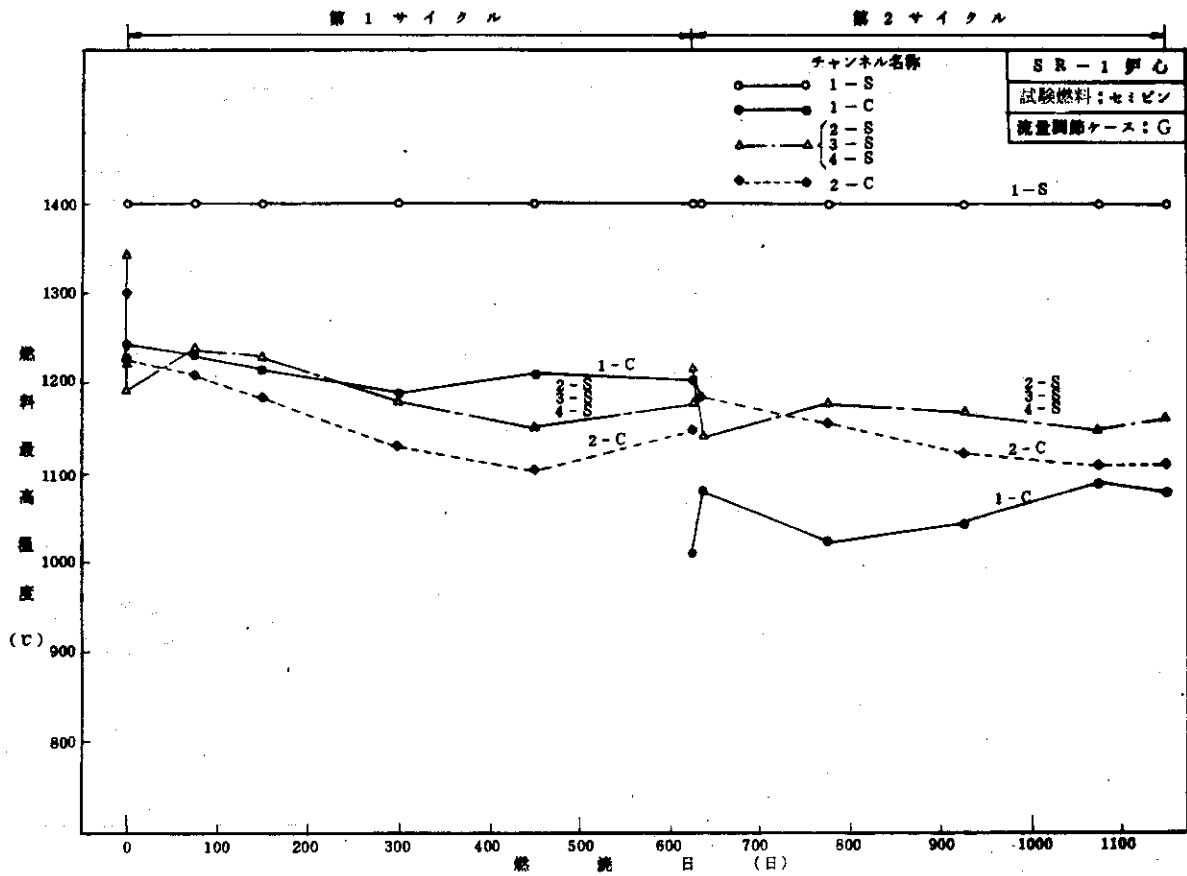


Fig. 3.4.18 流量調節ケースAにおける各燃料チャンネルの燃料最高温度と流量の燃焼変化

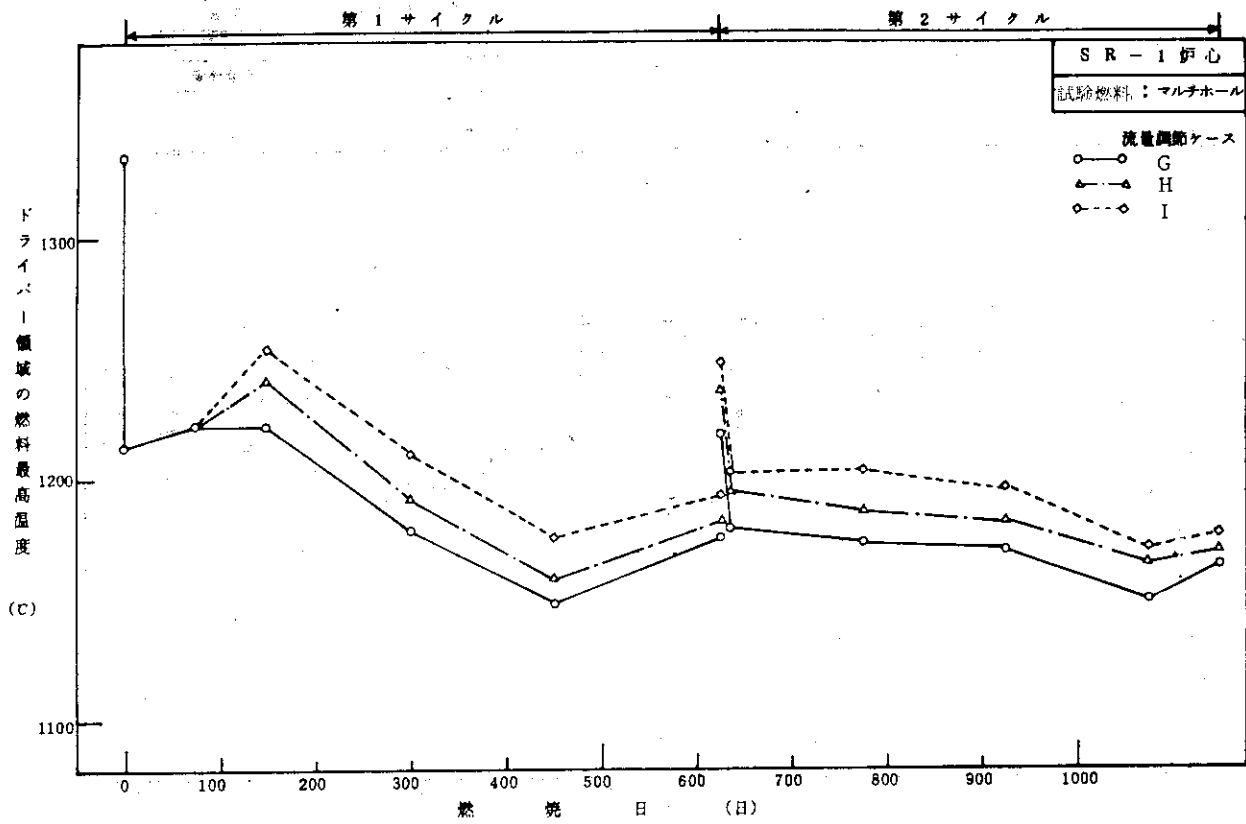


Fig. 3.4.19 各流量調節ケースにおけるドライバー領域の燃料最高温度の燃焼変化

### 3.5 燃料特性解析

#### 3.5.1 概要

前節迄の検討と解析によって、2種類のドライバー燃料を想定した照射炉用炉心（MR-1，SR-1炉心）の概念が設定された。これらの照射炉用炉心における燃料特性を把握するために、燃料温度の体積割合分布、燃料核移動距離、粒子被覆層応力、燃料棒および黒鉛ブロックの応力を解析した。

個々の解析結果については次節以降に詳しく述べることにし、ここでは全体的な結論を述べてみたい。まず、Table 3.5.1に代表的な解析結果の概要を示す。ここに示されている結果および粒子被覆層の応力などその他の解析結果を含めて考えると、全体的な結論として、両照射炉用炉心での試験燃料（体）は、通常の燃料設計で考えられる健全性基準を殆んど満足していない、と言える。すなわち、被覆粒子に関しては、核移動距離が100  $\mu$ 以上にも達し、また、SiC被覆層応力が2000 kg/cm<sup>2</sup>以上にも達する。燃料棒（一体型成形）では最大引張応力50 kg/cm<sup>2</sup>以上が発生する。さらに、燃料体黒鉛ブロックでも最大引張応力が100 kg/cm<sup>2</sup>以上に達する。

今回の照射炉用炉心に関する炉心設計上の検討では、高出力密度、高燃焼度領域の達成を目標とし、この主旨に沿って、核熱特性的にみて妥当と思われる照射炉用炉心が選定されている。この選定に際し、試験燃料の健全性を確保するという考慮は、本検討の範囲外とした。そして、試験燃料体の構造概念として既に述べられているセミピン型あるいはマルチホール型燃料体のように、我々にとって比較的卑近な例をとり合えず考えることとした。従って、今回の燃料特性解析の結果、前述のように、試験燃料（体）自体に問題が生じているのは止むを得ないであろう。

今後、照射炉用炉心を検討するにあたっては、まず試験燃料体自身の設計を固めておく必要がある。今回の解析結果を参考にすれば、高出力密度、高燃焼度に耐え得る燃料（体）概念を設計するに当たって、以下の点を考慮することが必要と考えられる。

- (i) 被覆粒子に関しては、アメーバ効果対策と内圧上昇対策とが必要である。前者については酸素ゲッター入りUO<sub>2</sub>核かあるいはUC<sub>2</sub>核の採用が考えられ、後者については、より小さな燃料核か低ウラン密度の燃料核、あるいはより厚肉の緩衝層の採用などが考えられる。
- (ii) 燃料棒に関しては線出力を低くするか、あるいは熱負荷を分散させるかの対策が必要である。例えば、ブロック内の燃料棒本数を増加させること、円環型燃料棒を採用することなどが考えられる。
- (iii) 黒鉛ブロックに関しては、例えばマルチホール型燃料体でではガメント厚さをより薄くすることなどが考えられる。

#### 3.5.2 燃料温度体積割合分布

燃料温度の全炉心的な統計分布は、燃料粒子の健全性あるいはFP放出量を考える際の1つの指標となるものと考えられる。この照射炉用炉心では、試験燃料、ドライバー燃料の最高温度を、それぞれ1400、1350℃以下に抑えている。燃料の健全性との関係から見れば、約1300℃以上となる燃料の体積割合がどの程度になるかを注目すれば良いであろう。

全炉心での燃料温度体積割合の解析は以下のような方法によっている。まず、4つのオリフィ

ス領域毎に、最高出力、平均出力、最低出力の3チャンネルの体積割合を求める。この際、各チャンネル内の燃料コンパクトは軸方向21、径方向10分割した。次に、各領域内の他のチャンネルについては、考えている体積割合がチャンネルの出力ピーキング係数に関して線形であると仮定して評価する。そして、全炉心での体積割合は、各領域内での燃料チャンネルの本数を考慮して求めた。

まず、初期状態出力分布を用いて、燃料温度体積割合分布を原子炉出力、冷却材出口平均温度（以下 $T_{out}$ ）、試験燃料体形式との関係において比較してみる。Fig. 3.5.1はMk-Ⅲ型ドライバー燃料セミピン型試験燃料炉心での原子炉出力（50, 60 MW）と $T_{out}$ （800, 900℃）の影響を示しているが、照射試験領域の第4段目燃料体のみが著しく高温になっているため、1300℃以上の体積割合としては大差ない。また、Fig. 3.5.2はMk-Ⅲ型ドライバー燃料炉心での試験燃料体による燃料温度体積割合の相違を示しているが、これに関しても1300℃以上の体積割合には大差ない。上記2つの特性は、セミピン型ドライバー燃料炉心にも共通することである。

次に、MR-1、SR-1炉心についての第1サイクル、第2サイクルの各初期における燃料温度体積割合をFig. 3.5.3に示す。第2サイクル初期では、試験燃料体の出力が減少するため、全炉心での燃料温度が平坦化し、その体積割合分布はドライバー燃料領域に対するものに近づいている。

以上のことから、試験燃料およびドライバー燃料の最高温度を一定の制限以下に抑えるよう照射炉用炉心を考えるものとすれば、燃料温度体積割合に関して特に問題とすることはないのである。

### 3.5.3 燃料核移動

今回の解析では、燃料核移動係数（KMC,  $\% \mu / \text{sec}$ ）として従来の設計で用いて来た関係式

$$\log_{10} \text{KMC} = -3.27 - 4220/T$$

を用いる。また、アメーバ破損発生条件も同じく、核移動距離が $30 \mu$ に達すると粒子が破損するものとする。本解析では、2つの照射炉用炉心（MR-1、SR-1炉心）について、燃焼に伴う核移動距離およびその全炉心での統計分布を検討した。核移動距離統計分布の評価法は前節の方法と同様である。

まず、MK-Ⅲ型ドライバー燃料MR-1炉心に対する結果を述べる。Fig. 3.5.4にはセミピン型試験燃料を用いた場合の最大核移動距離の燃焼変化と流量調節ケースとの関係を示す。また、Fig. 3.5.5には他の試験燃料の最大移動距離の燃焼変化を示す。これらの図から、試験燃料体として、どのような型式のものを用いても、又、各種流量調節ケースを用いても、照射試験領域の最大核移動距離は、アメーバ破損の基準値である核移動距離 $30 \mu$ よりはるかに大きく、一方、ドライバー領域では、 $30 \mu$ を超えることは無い、ということがわかる。特にドライバー領域では、第2サイクルにおいて、 $20 \mu$ 以下に抑えることが可能である。又、試験燃料体の型式による相違は、セミピン型とマルチホール型を比較すると、はるかにマルチホール型燃料の方が小さく、中空型と円環型を比較すると、円環型の方が $15 \mu$ 程度小さい。これらの違いは、同じ流量調節ケースである場合、主に温度勾配の相違から生じるもので、マルチホール型燃料の方が、はるかに線出力が小さく、温度勾配が小さい為である。さらに各流量調節ケースによる照射試験領域の核移

動距離の違いは、照射試験領域の温度による違いであり、特に流量調節ケースEが、最も試験燃料温度を低く抑えていることがわかる。

また、セミピン型およびマルチホール型試験燃料を用いる場合の、 $30\mu$ 以上の核移動距離体積割合の燃焼変化をFig. 3.5.6に示す。第2サイクル末期において、各試験燃料および各流量調節ケースともに、全炉心割合で0.4～1.5%程度のアメーバ破損が生じる。試験燃料型式による破損率の違いは余り大きくないが、試験燃料の温度を低く抑えている流量調節ケースEは、アメーバ破損を抑えるという観点からは優れている。

次に、セミピン型ドライバー燃料炉心（SR-1炉心）について上記と同様な結果について述べる。Fig. 3.5.7およびFig. 3.5.8には、それぞれセミピン型試験燃料、マルチホール型試験燃料の場合の最大核移動距離の燃焼変化を示す。また、Fig. 3.5.9には $30\mu$ 以上の核移動距離体積割合の燃焼変化を示す。SR-1炉心はMR-1炉心よりも試験燃料の出力は小さい（約70%）が、原子炉出口冷却材温度を $1000^{\circ}\text{C}$ とする運転を考えている。照射試験領域では燃料最高温度を $1400^{\circ}\text{C}$ に設定しているので、ほぼ出力の相違分だけ最大核移動距離が異なっている（Fig. 3.5.4, Fig. 3.5.7の流量調節ケースAを参照）。しかし、ドライバー燃料ではチャンネル本数（線出力）の相違が大きく、SR-1炉心の最大核移動距離はMR-1炉心の約半分になる。

以上の解析結果に基づいて以下のような結論が得られる。

Mk-IIIドライバー参考炉心（MR-1炉心）およびセミピンドライバー参考炉心（SR-1炉心）とも、燃料設計基準・指針である、全炉心における被覆燃料粒子破損率0.1%以下を達成するのは、アメーバ破損だけでもはるかに0.1%を越すので困難である。しかし、破損はすべて照射試験領域における高濃縮度燃料を装荷した4段目ブロックでのみ生じ、ドライバー領域では最大核移動距離 $30\mu$ 以上になる燃料はない。

MR-1炉心では、セミピン型およびマルチホール型試験燃料における5種類の流量調節ケースのうち、核移動の観点からは最大核移動距離、アメーバ破損の最も小さい流量調節ケースEがすぐれており、又、試験燃料体の型式としては、マルチホール型の燃料がすぐれている。しかし、マルチホール型試験燃料の場合の流量調節ケースEにおいてもアメーバ破損率は全炉心の0.4%になる。ただし、 $20\mu$ 以上の核移動距離体積割合は各流量調節ケース、各試験燃料体とも1.0～1.5%程度であり、ドライバー領域においては核移動の点から問題は無い。

SR-1炉心では、セミピン型、マルチホール型試験燃料における3種類の流量調節ケースのうち、核移動の観点からは最大核移動距離、アメーバ破損の最も小さい流量調節ケースIがすぐれており、全炉心での破損率はセミピン型で0.5%、マルチホール型で0.25%である。又セミピンドライバー燃料では、ほとんどの燃料が最大核移動距離 $10\mu$ 程度に抑えられており、全炉心での $10\mu$ 以上の核移動距離体積割合は1%程度である。

これらの結果から、核移動については試験燃料体の4段目ブロックのみが問題であるが、それ以外は問題が無い。

### 3.5.4 被覆燃料粒子の応力

被覆燃料粒子の被覆層の発生応力に対する照射効果として、粒子内部で生成される気体による内圧上昇と、高速中性子照射によるPyCの異方性寸法変化とがある。本節ではMR-1 炉心およびSR-1 炉心における試験燃料体中の被覆燃料粒子の応力変化について述べる。

両炉心の試験燃料の照射条件（燃焼度と高速中性子照射量との関係）をFig. 3.5.10, Fig. 3.5.11に示す。照射試験領域内の高濃縮度(18~20 w/o)燃料は、燃焼末期に燃焼度10% FIMA前後、高速中性子照射量 $3 \sim 4 \times 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup>に達する。この高濃縮度燃料粒子の被覆層の応力変化をFig. 3.5.12とFig. 3.5.13に示す。今回の解析では、被覆層の破損はSiC層の円周応力が正になった時に発生すると考えているので、高濃縮度燃料粒子は殆んど全てが燃焼途中で破損することになる。この照射炉用炉心の検討では、試験燃料の粒子寸法はドライバー燃料のそれと同じとしているので、本来的に重照射での健全性を期待することは難しいと考えられる。Fig. 3.5.14は公称寸法粒子SiC層の円周応力と照射条件との関係を示す。この図から、燃焼度10% FIMA以上でもSiC層の健全性を確保するためには、SiC層の強さを1000 kg/cm<sup>2</sup>以上にすることが必要である（設計上考える許容応力値を上げることに対応する）。また、SiC層の円周応力を引張側に変化させる要因は内圧の増加にあるから、このことを粒子の設計で考慮すれば良い。第1には緩衝層を厚くすることが効果的である。即ち、現在の60 $\mu$ から30 $\mu$ 増やすことによって、燃焼度で約2% FIMAの寿命増加が期待できる。第2には燃料核の寸法または組成（気孔率）の変更が考えられる。ただし、寸法だけを変更する場合には、外径を小さくする必要がある。現在の600 $\mu$ を500 $\mu$ にすれば約2% FIMAの寿命増加が期待できる。しかし、試験燃料としての被覆粒子の最適化設計は本検討の範囲外であるので、これ以上は詳しく述べないことにする。

### 3.5.5 燃料体の応力解析

試験燃料体の機械的健全性を考察する意味で、セミピン型、中空型、円環型の3種の燃料棒、マルチホール型燃料体の黒鉛ウェブ部、および、セミピン型燃料体黒鉛ブロックの応力解析を実施した。

#### (1) セミピン型、中空型、円環型燃料棒の応力

これらの燃料棒は燃料コンパクトと黒鉛スリーブとが一体化している成型体と考えている。一体型成形燃料棒の熱的機械的性質は十分には知られていない。そこで、今回の解析では、それらの性質として従来用いていた燃料コンパクトの値を代用することとした。

解析の対象とした燃料棒は、照射試験領域の第4段目の最大濃縮度燃料体中に含まれるものとした。ただし、燃焼過程では燃料棒内の温度分布は初期状態のまま持続するものと仮定した。また、高速中性子照射量は燃料棒内で一様とし、最大値 $2 \times 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup>とした。

解析の結果得られた各燃料棒の最大応力値をTable 3.5.2に示す。各燃料棒とも線出力（温度勾配）の大小に対応する初期最大引張応力が発生しているが、それらはMR-1 炉心（初期出力密度19.9 W/CC）では許容値45 kg/cm<sup>2</sup>よりも相当大きく、SR-1 炉心（同上、14.1 W/CC）ではほぼ同等以下である。しかし、照射後の炉停止時ではいずれも許容値よりもはるかに大きい。

以上の結果に関する限り、試験燃料体として健全性の確保は困難であると判断される。

そこで、今後の検討課題として以下の点があげられよう。

- (i) 一体型成型燃料体の機械的特性および健全性について、実験的究明が必要である。今回の解析で想定した熱および照射ひずみの評価法は保守的なものと考えられるので、より現実的な評価が可能となろう。
  - (ii) 今回の解析では、燃焼過程で初期の線出力が持続するものと仮定している。これは極めて保守的な仮定であり、照射ひずみの発生に関しては再評価が必要であろう。
  - (iii) 総合的には、SR-1炉心（初期出力密度約  $14 \text{ W/cm}^3$ ）程度の照射には耐えられるものと思われるが、燃料棒の健全性確保の観点からは、円環型燃料棒、または、黒鉛スリーブ／燃料コンパクト分離型の燃料棒が指向されよう。
- (2) マルチホール型燃料体黒鉛ウェブの応力

マルチホール型試験燃料体黒鉛ウェブの応力解析は、燃料孔と冷却孔とによって囲まれている黒鉛ウェブを対象とした。応力解析では、この部分の材料はSM1-24相当材とし、平面ひずみモデルを仮定した。また、照射条件の考え方は前述の燃料棒に対するものと同じである。

MR-1, SR-1炉心に対する解析対象箇所の温度分布をFig. 3.5.15に示す。そして、応力解析の結果得られた最大応力値を前掲のTable 3.5.2に示した。照射初期の最大引張熱応力は想定した許容値  $80 \text{ kg/cm}^2$  を下廻っているが、照射ひずみが負荷すると最大応力値は許容値を越える。前述したように照射時の応力は過大評価である。従って、黒鉛ウェブの応力に関する限りSR-1炉心（初期で約  $14 \text{ W/cm}^3$ ）程度の照射には耐えられると考えられる。ただし、高出力密度により適した燃料体とするためには、燃料孔、冷却孔の配列・寸法を今回のものから変更することが妥当であろう。

- (3) セミピン型燃料体黒鉛ブロックの応力

試験燃料体の黒鉛ブロックの応力を評価するため、代表例として、MR-1炉心（Mk-III型ドライバー炉心）のセミピン型試験燃料体の標準型および制御型黒鉛ブロックの3次元粘弾性応力解析を行なった。ただし、解析対象は、熱および中性子照射条件から見て応力的に最も厳しくなると予想される上部より4段目の最大濃縮度燃料体とした。また、黒鉛ブロックの形状および熱的な対称性を考慮して、標準型、制御型黒鉛ブロックについて、それぞれ横断面の  $1/12$ ,  $1/6$  セクターを対象とした。

黒鉛ブロックの3次元温度分布計算は、高さ方向3層に分割した形状モデルに基づいている。伝熱境界条件は次のように考えた。まず、燃料孔壁の温度は初期炉心状態の熱流動解析結果を使用した。制御棒挿入孔およびブロック間ギャップの冷却材温度は燃料棒内又はその近傍の冷却チャンネルの温度（熱流動特性解析結果）に等しいと仮定した。また、制御棒挿入孔壁および黒鉛ブロック側壁の熱伝達率は、その部分を通る冷却材流量がそれぞれ原子炉内全流量の4%、3%と仮定して、それぞれ約  $55, 560 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$  とした。解析結果を標準型、制御型黒鉛ブロックについて、それぞれFig. 3.5.16, 3.5.17に示す。

応力解析ではFig. 3.5.18に示す断面内要素分割モデルを、また、高さ方向を6層に分割した形状モデルを採用した。この際各要素の温度は前述の温度分布から内外挿により定めた。力学的境界条件として、セクター切出し面は水平方向に自由、垂直方向に固定、また、底面を固定と考えた。黒鉛の物性値はSM1-24相当品のものを用いた。照射条件として、温度分

布は初期状態のものが継続するとし、また、高速中性子照射量はブロック内一様とし、最大  $2.0 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.18 \text{ Mev}$ ) までを考えた。3次元応力解析の結果、両黒鉛ブロックの各層とも、最大応力値に関する限りZ軸（高さ）方向応力が水平面内応力よりも大きいことが解った。以下ではZ軸方向応力についてのみ記述する。Fig. 3.5.19, Fig. 3.5.20には両黒鉛ブロック代表点の照射中の応力変化を示す。また、Fig. 3.5.21~3.5.23 には両黒鉛ブロック内の応力分布を示す。これらに基づいて代表的な運転状態における最大引張、圧縮応力をまとめると以下ようになる。

		最大引張応力			最大圧縮応力		
		初期	運転時	炉停止時	初期	運転時	炉停止時
標準型 ブロック	応力値 ( $\text{kg/cm}^2$ )	100	110	174	-57	-320	-448
	発生要素 (層, 要素)	(6, 22)	(5, 44)	(5, 44)	(6, 44)	(6, 2)	(6, 2)
制御型 ブロック	応力値 ( $\text{mg/cm}^2$ )	230	95	231	-95	-185	-522
	発生要素 (層, 要素)	(6, 17)	(6, 52)	(6, 52)	(6, 52)	(1, 17)	(1, 17)

SM1-24 相当黒鉛に対する許容応力は、今回の解析では、2軸2次等引張の熱応力に対して  $80 \text{ kg/cm}^2$ 、単純曲げ応力状態に対して  $100 \text{ kg/cm}^2$  と考えている。このことから今回の応力解析に関する限り黒鉛ブロックの健全性は期待できない。照射ひずみによる発生応力は極めて保守的な仮定に基づいているため、現状では参考値と考えて良い。本来的には初期炉心状態の熱応力が  $100 \text{ kg/cm}^2$  以上の高応力状態になることを避けなければならない。この点に関して、今後以下のことを検討しなければならない。

- (i) 黒鉛ブロック材内の温度分布を詳細に検討すること。今回の解析では制御棒挿入孔やブロック間隙の伝熱流動条件を、通常の炉心設計で用いられている考え方によって設定した。照射炉用炉心についての固有の伝熱流動境界条件を用いる必要がある。
- (ii) 制御型黒鉛ブロック材の高応力の発生の原因の1つは、燃料棒孔近傍では燃料最高温度に近い高温である一方、制御棒挿入孔壁は低温の冷却材に接していることにある。従ってこの照射炉用炉心の高さ方向出力分布（上部より第4段目燃料体のみを高濃縮度にしていくような場合には、上記のような高温度差が避けられないため、試験燃料体にとっては苛酷過ぎる条件であると考えられる。しかしながら、この問題は基本的にはセミピン型燃料体形式そのものに由来するものであるから、より広い観点からの見直しが必要である。



Table 3.5.1 MR-1 炉心および SR-1 炉心における燃料特性

トライバーク燃	試験燃料	*1 流量調節	*2 1300℃以上の燃料体積割合(全炉心)(%)	*3 最大核移動距離(μ)	核移動距離30μ以上の燃料体積割合*3(%)	燃料体の応力*4 (kg/cm <sup>2</sup> )		
						初期	運転時	炉停止時
MK-III (MR-1) (炉心)	セミピン	A	1.14	23.9	1.46			
		B	0.83	94.3	1.25			
		C	0.83	00.1	1.29	74	33	70
		D	1.14	13.2	1.45			
		E	0.83	62.3	0.79			
	マルチホール	A	0.73	85.6	1.32			
		B	0.43	63.4	0.94			
		C	0.43	69.6	1.09	68	119	204
		D	0.73	78.4	1.23			
		E	0.43	43.2	0.37			
	中空	F	0.28	94.3	0.96	62	67	147
	円環	F	0.05	79.6	0.99	54	41	86
セミピン (SR-1) (炉心)	セミピン	G	3.74	99.3	0.74			
		H	3.74	80.4	0.62	50	25	50
		I	3.74	66.5	0.52			
	マルチホール	G	1.79	67.5	0.62			
		H	1.79	54.8	0.50	45	94	150
		I	1.79	44.7	0.29			

- \* 1) 流量調節ケースの定義は 3.4 節を参照のこと
- \* 2) 燃焼 1075 日迄の最大値
- \* 3) 燃焼 1075 日での値
- \* 4) マルチホール型燃料では黒鉛リガメントの応力

Table 3.5.2 燃料棒およびマルチホール型黒鉛ウエブの運転中の最大引張応力と最大圧縮応力

	最大引張応力 (kg/cm <sup>2</sup> )						最大圧縮応力 (kg/cm <sup>2</sup> )						
	初期		運転時		炉停止時		初期		運転時		炉停止時		
	円周	軸	円周	軸	円周	軸	円周	軸	円周	軸	円周	軸	
MR   1 炉心	セミピン型	55	74	30	33	61	70	-31	-37	-63	-70	-118	-144
	中空型	51	62	67	67	128	147	-61	-80	-75	-66	-126	-128
	円環型	44	54	49	41	56	86	-27	-45	-56	-51	-100	-105
MR   1 炉心	マルチホール型*	57	68	119	90	204	143	-58	-36	-124	-114	-208	-214
	セミピン型	38	50	21	25	42	50	-21	-25	-38	-44	-76	-94
	中空型	35	42	44	48	86	102	-42	-54	-42	-49	-77	-81
MR   1 炉心	円環型	28	34	20	31	37	59	-17	-28	-34	-33	-62	-67
	マルチホール型*	39	45	94	72	50	106	-39	-24	-96	-02	-152	-166

\* マルチホール型の場合、円周方向応力は平面内主応力

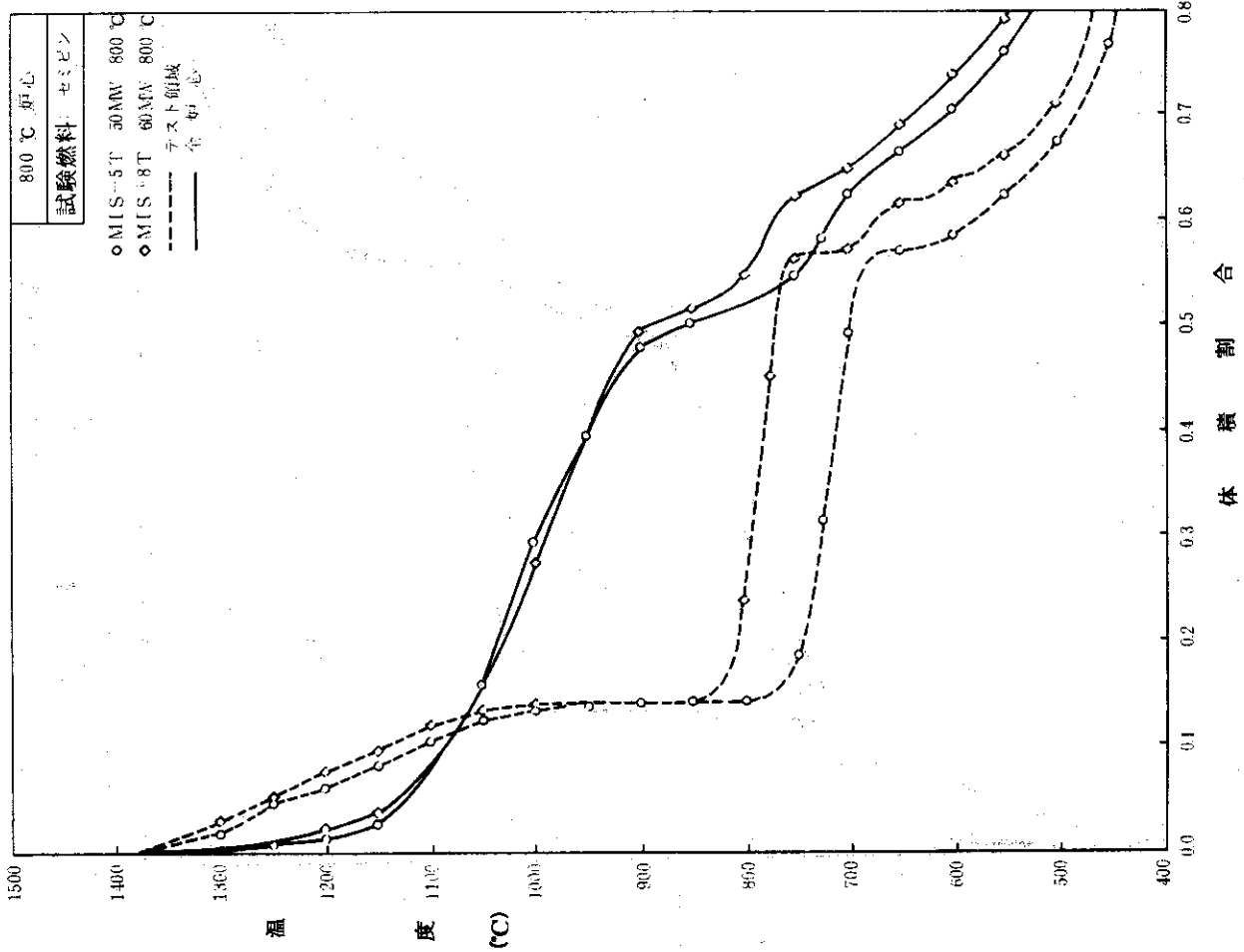
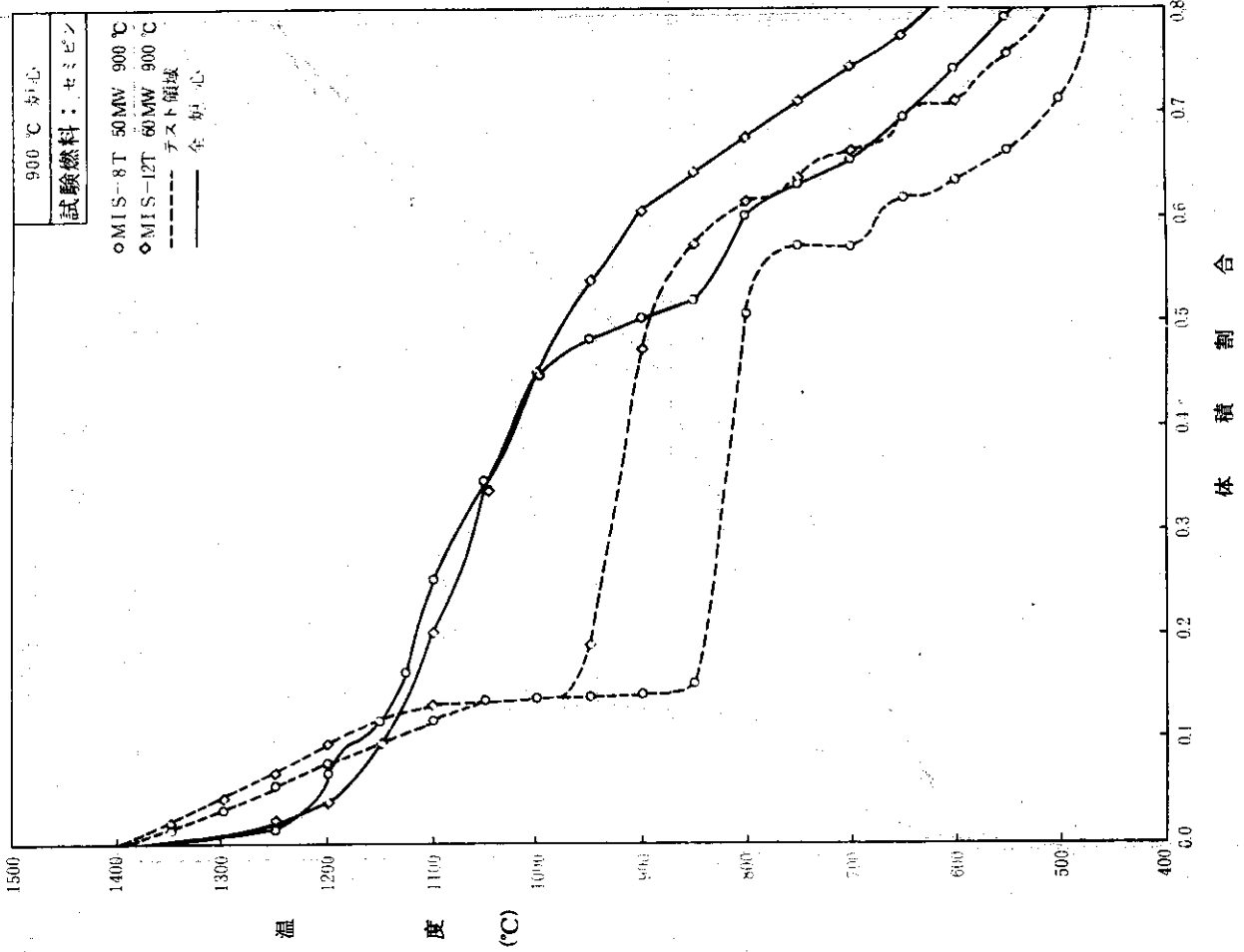


Fig. 3.5.1 Mk-IIIドライバ燃料炉心の初期出力分布における燃料温度体積割合

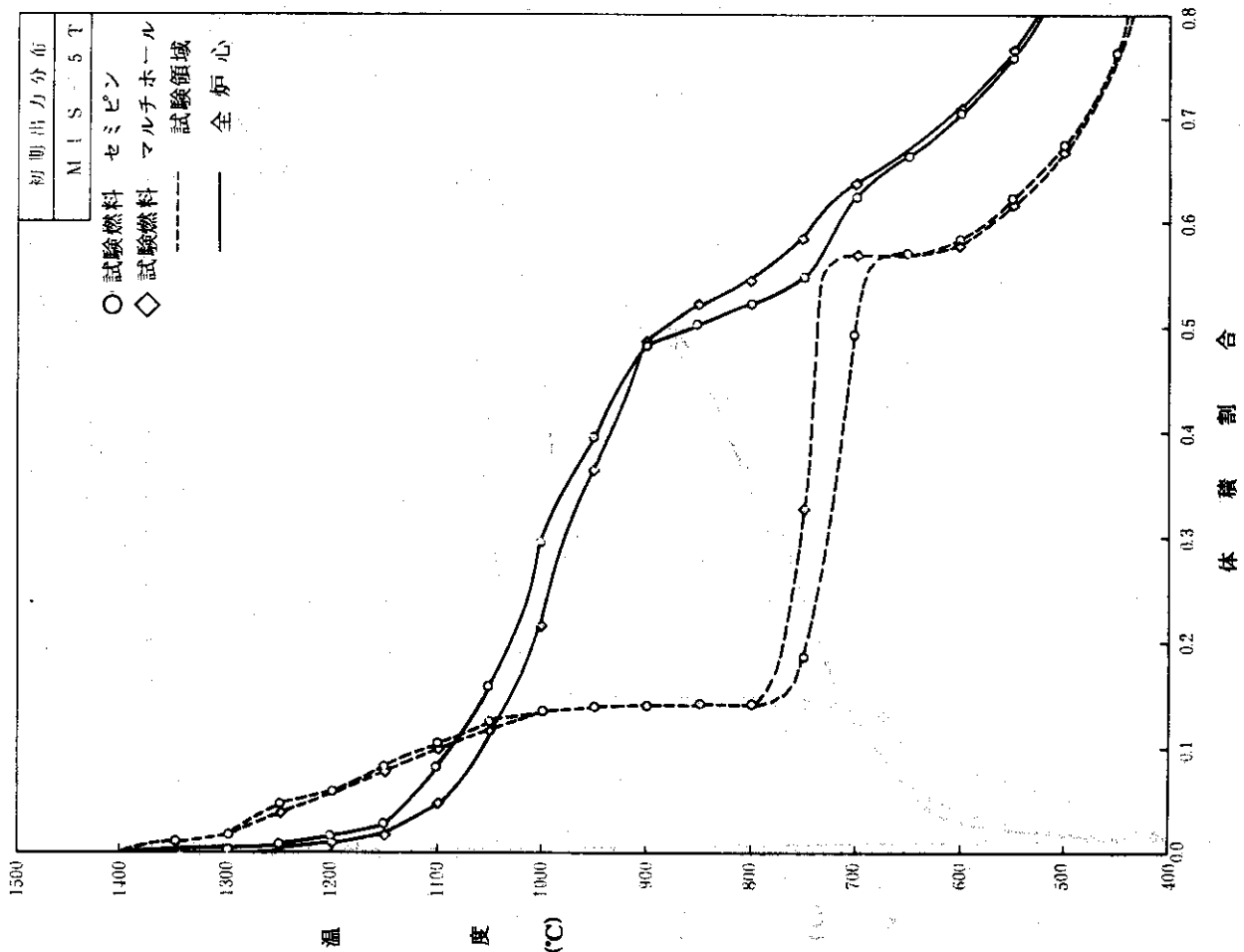
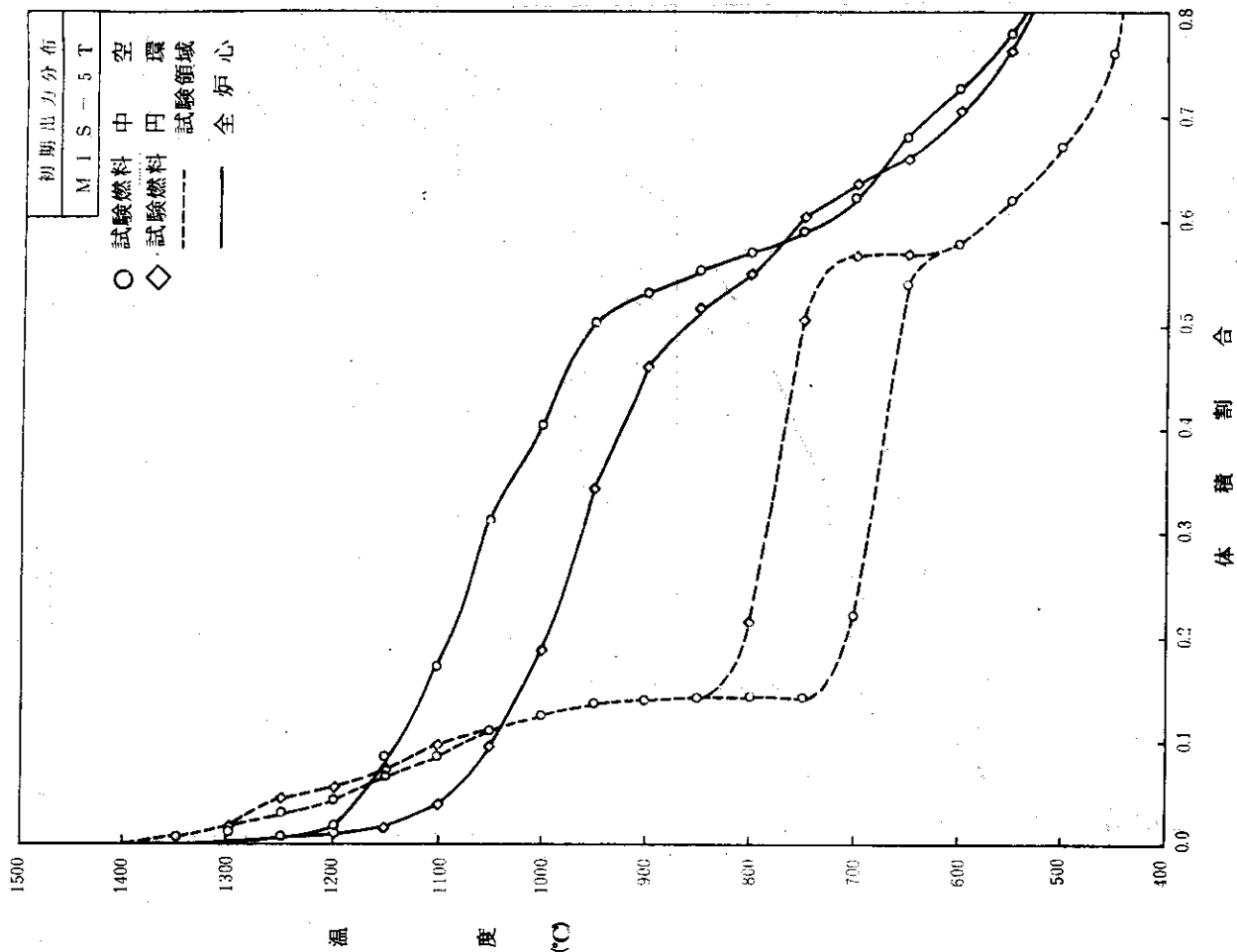


Fig. 3.5.2 Mk-IIIドライバ燃料炉心の試験燃料における燃料体積割合の比較

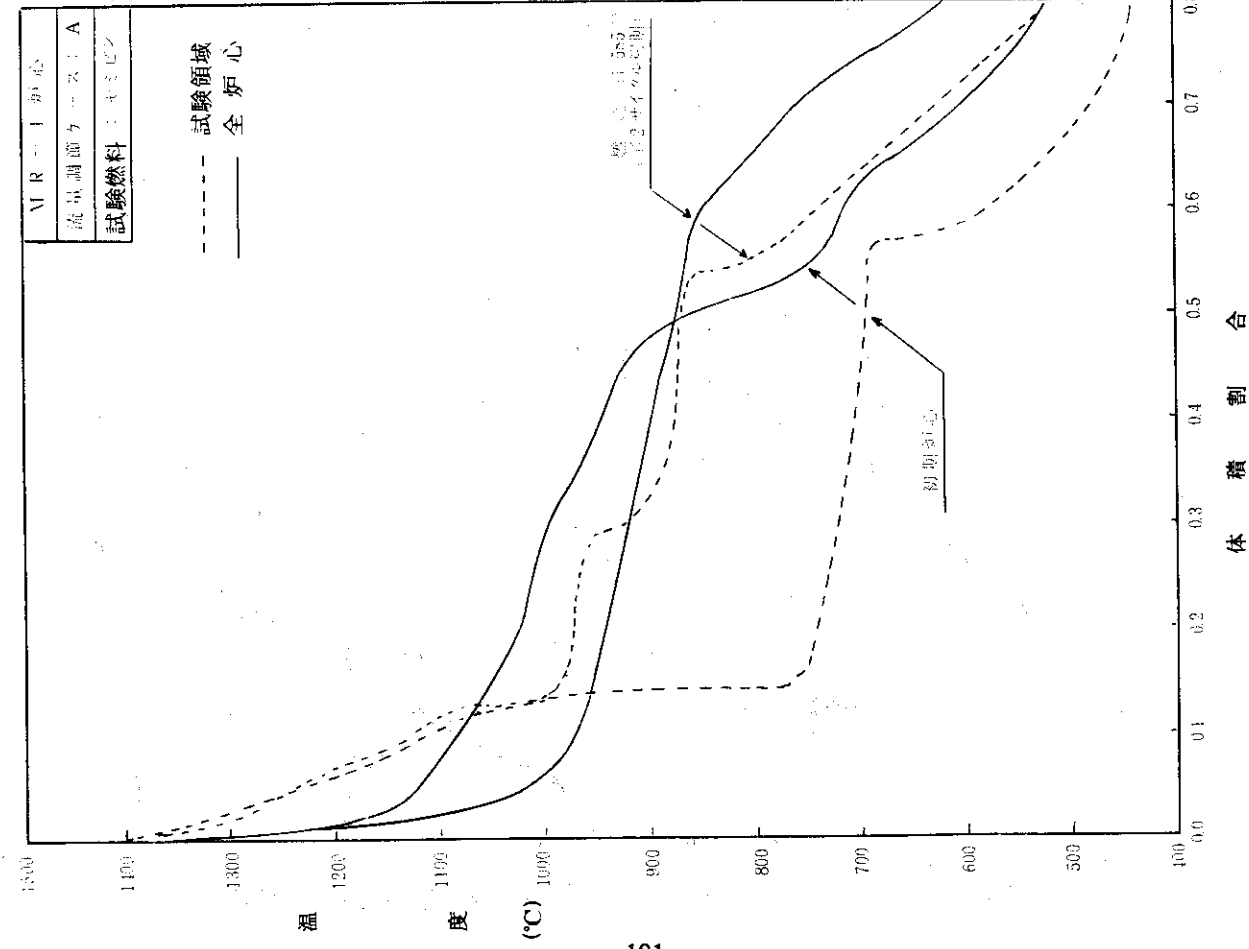
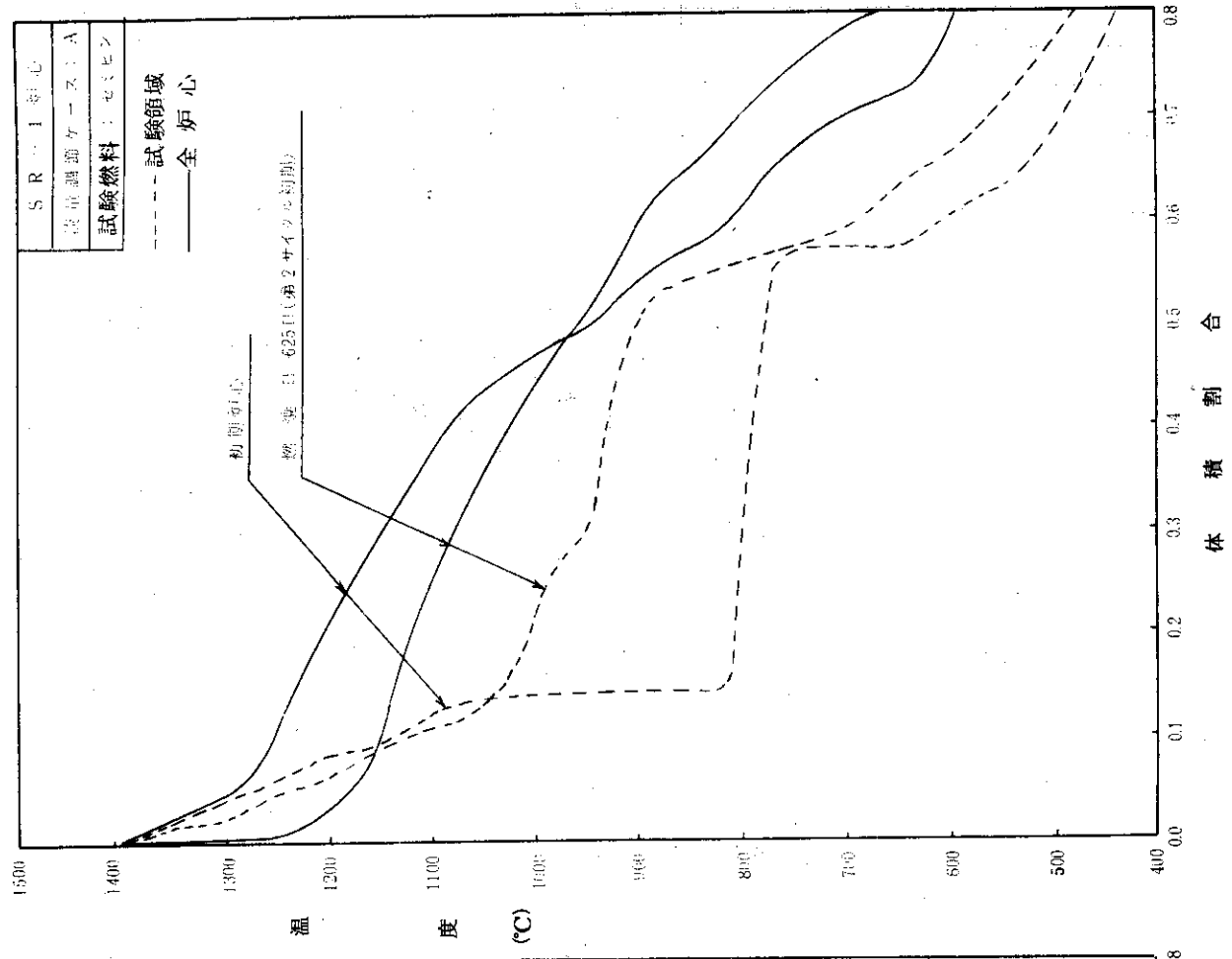


Fig. 3.5.3 参考炉心における燃料温度体積割合の燃焼変化

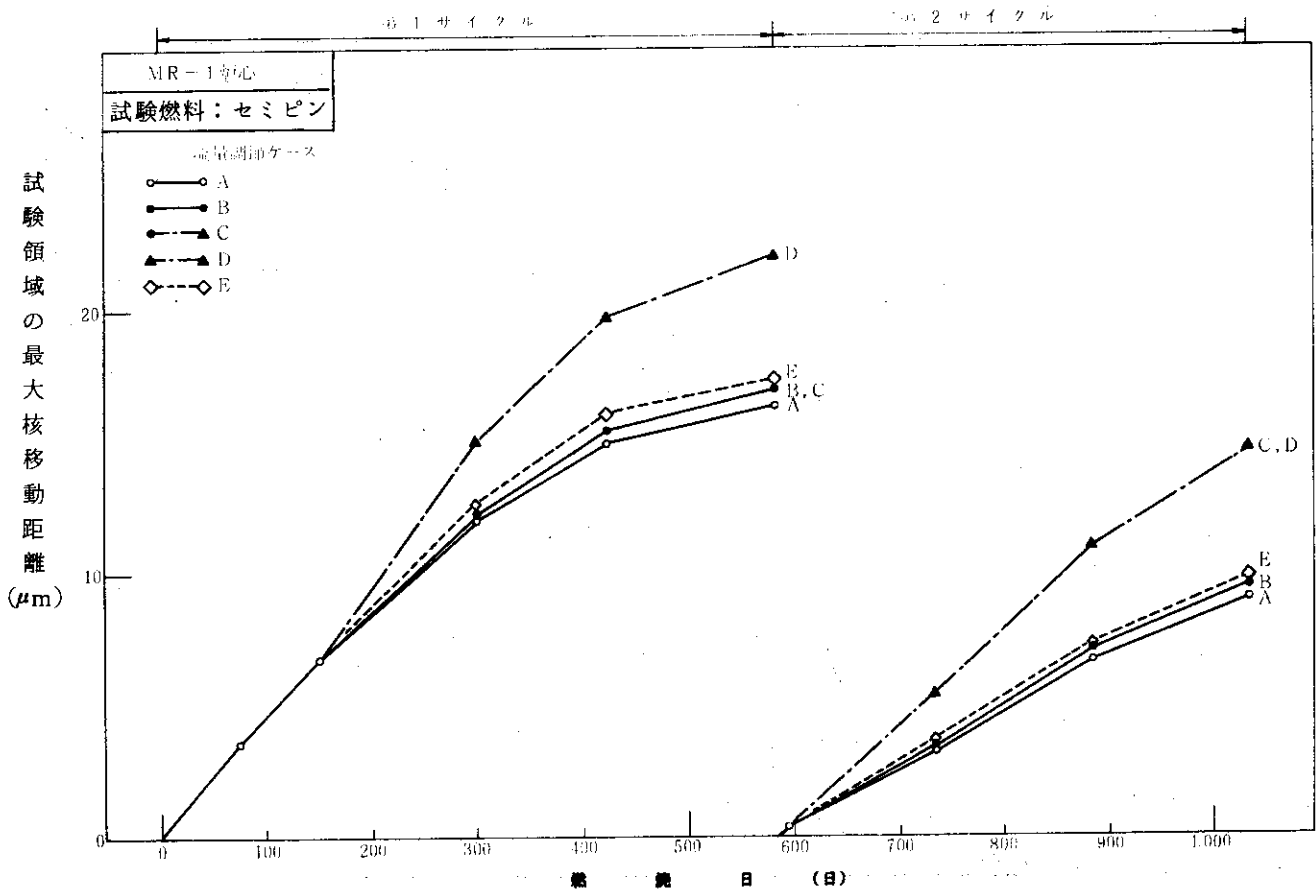
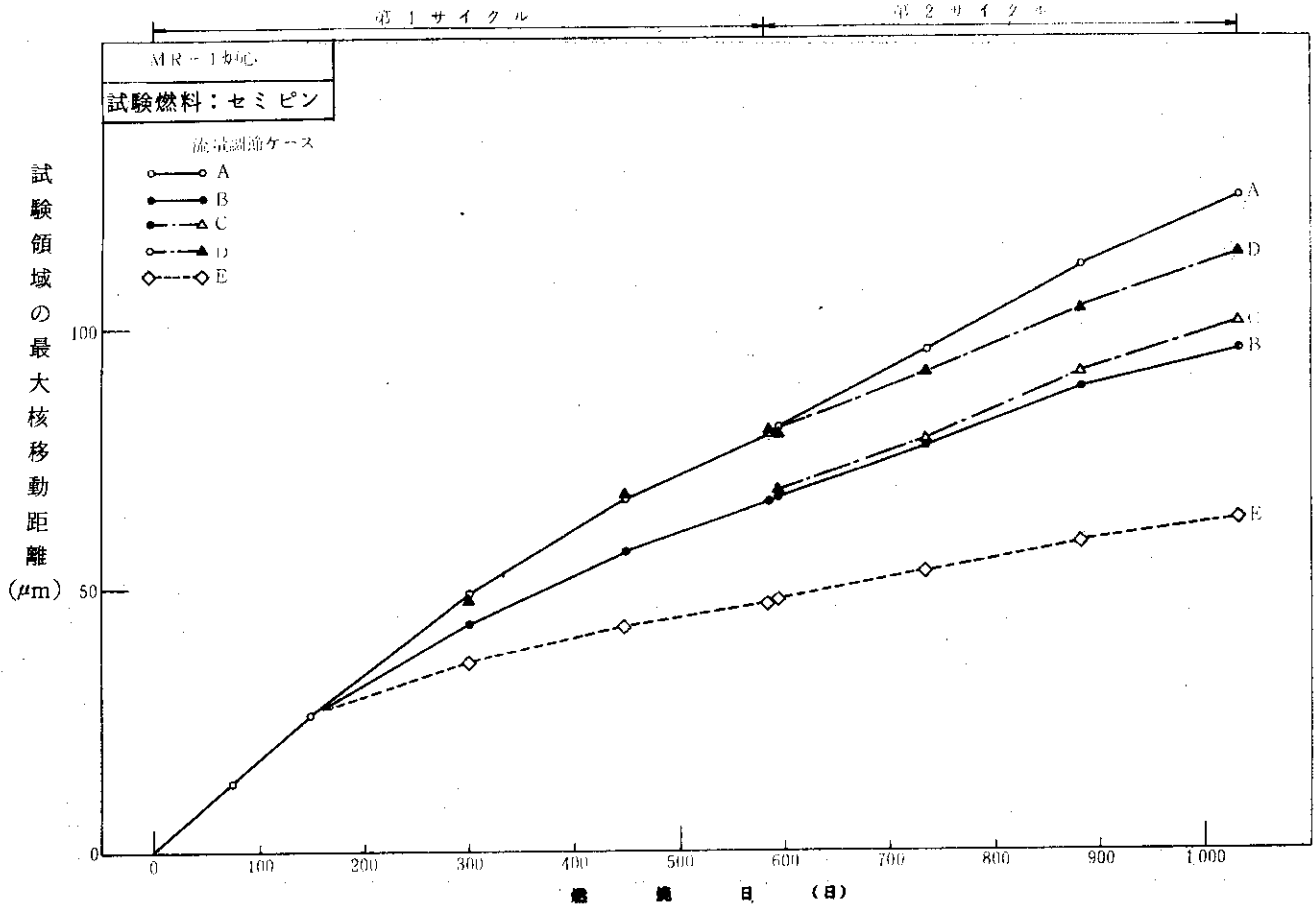


Fig. 3.5.4 MR-1炉心 (セミピン型試験燃料) における最大核移動距離の燃焼変化

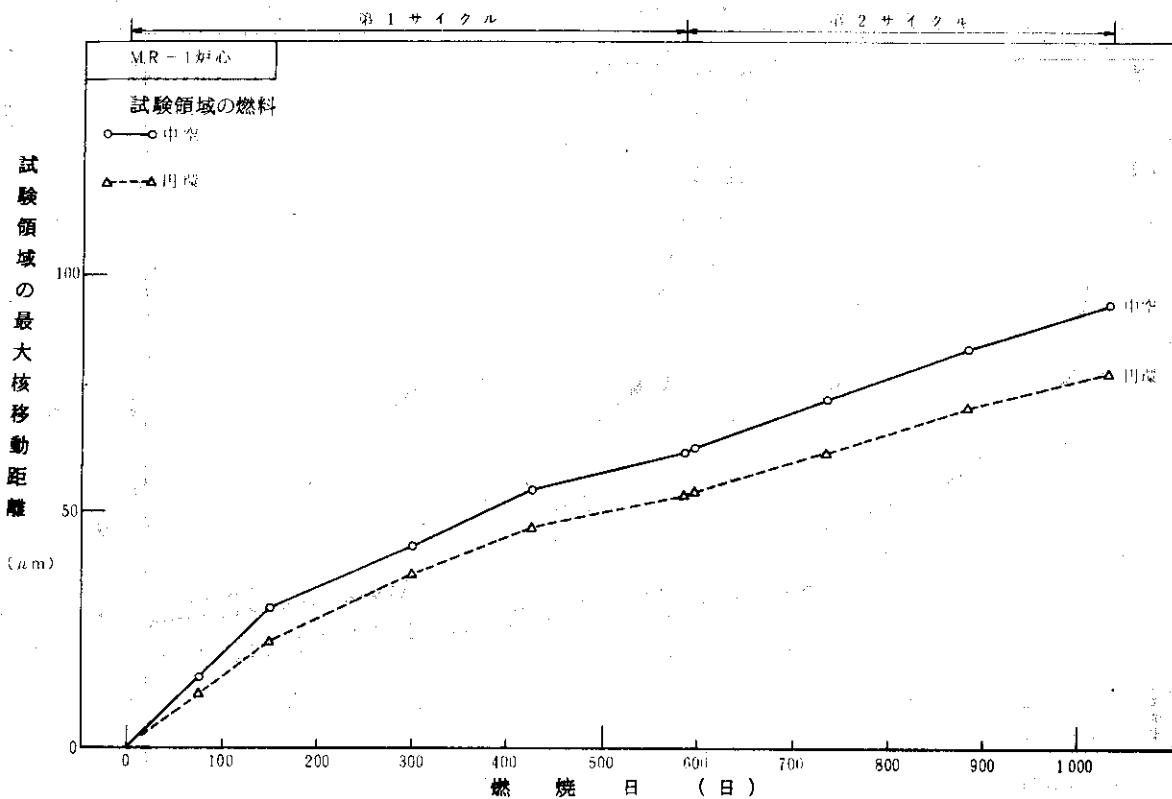
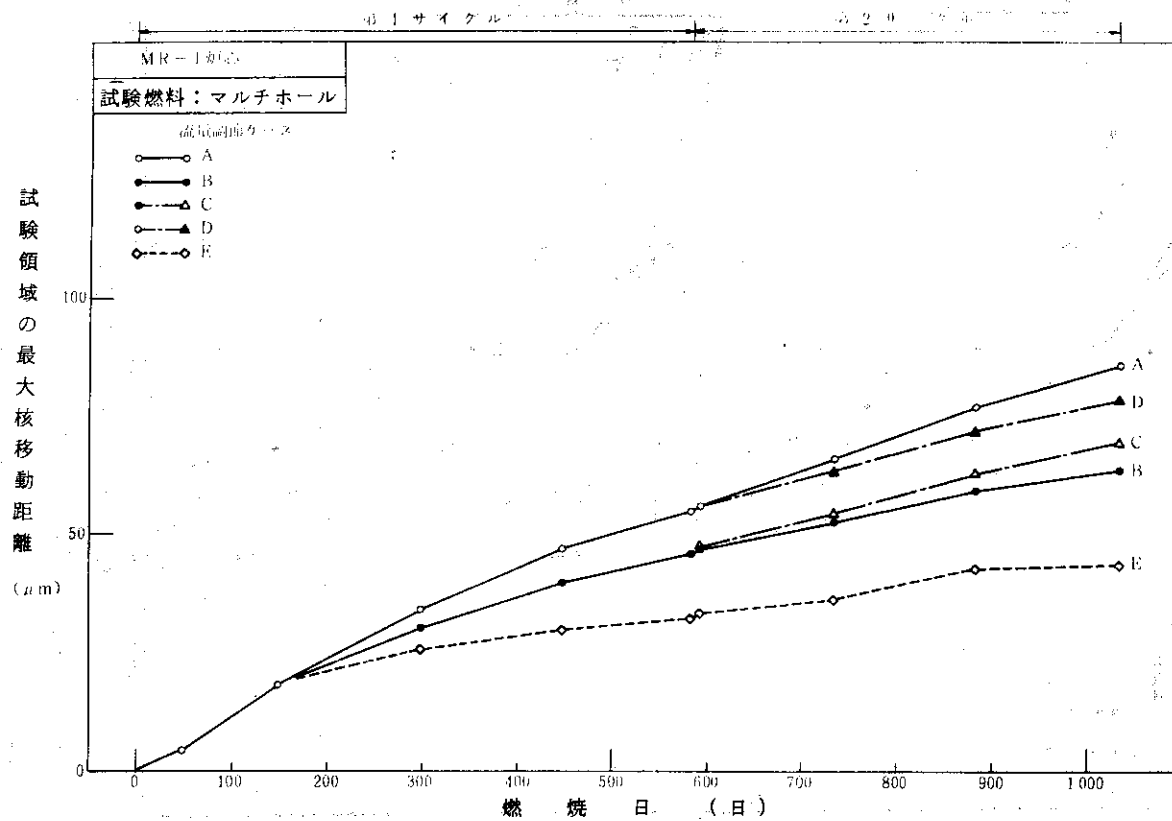


Fig. 3.5.5 MR-1炉心 (マルチホール型, 中空型, 円環型試験燃料) における最大核移動距離の燃焼変化

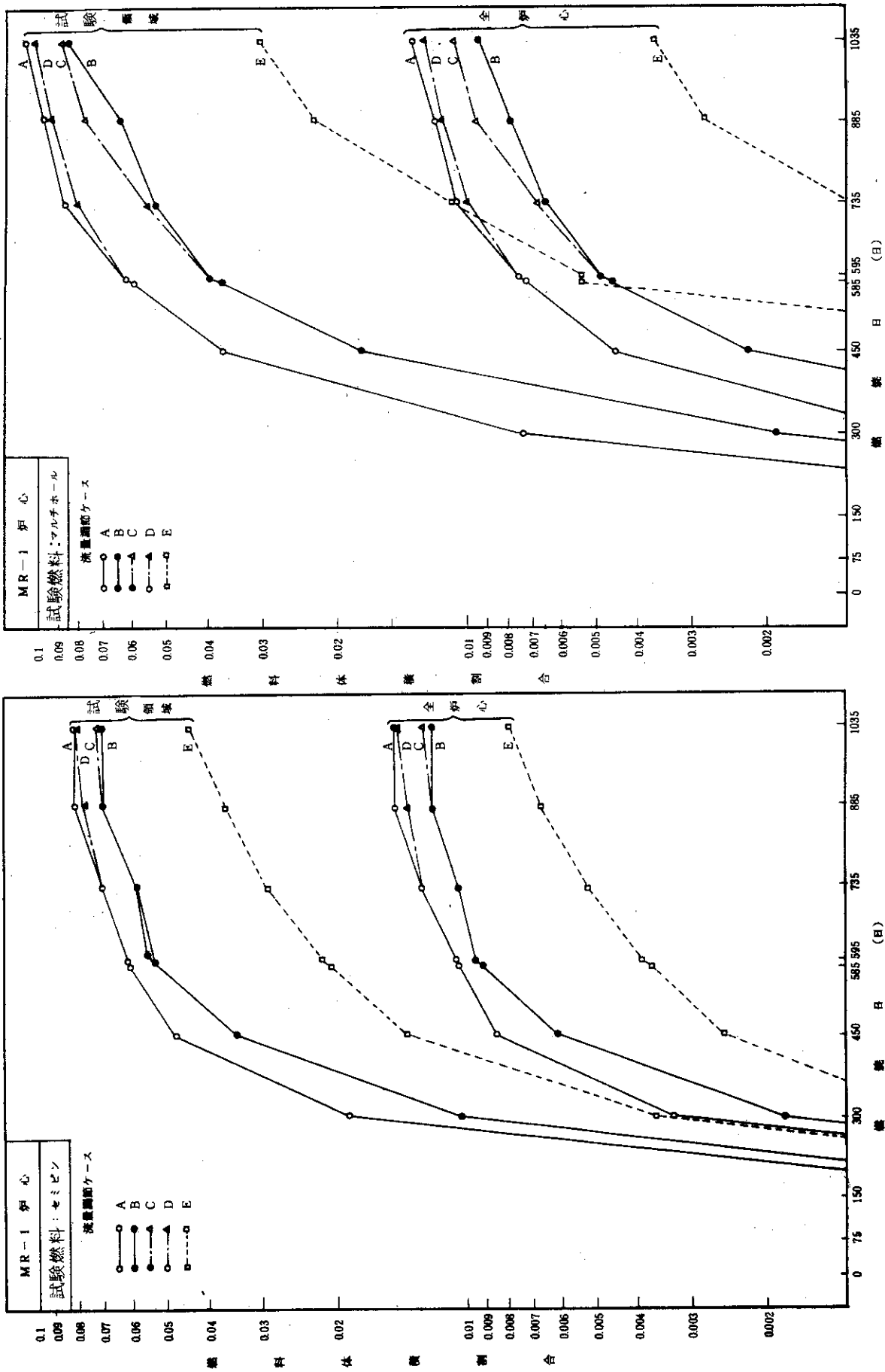


Fig. 3.5.6 MR-1炉心 (セミピンおよびマルチホール型試験燃料) における

30 μ以上の核移動距離体積割合の燃焼変化



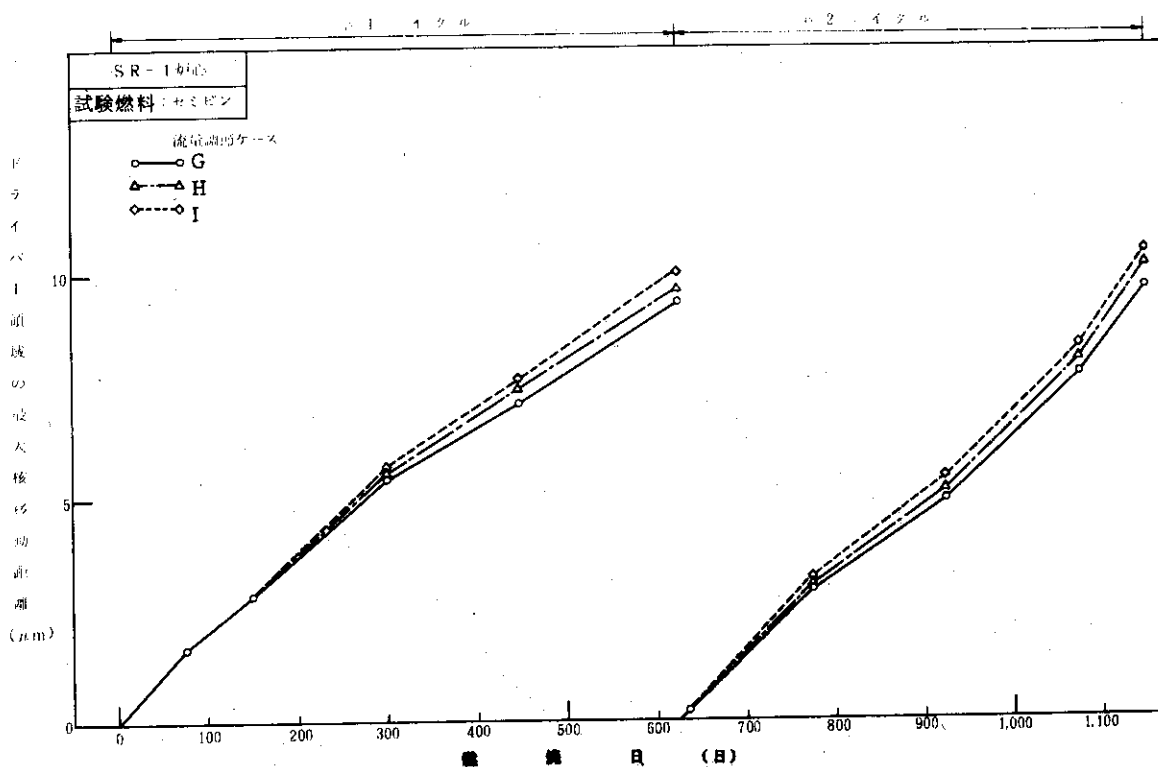
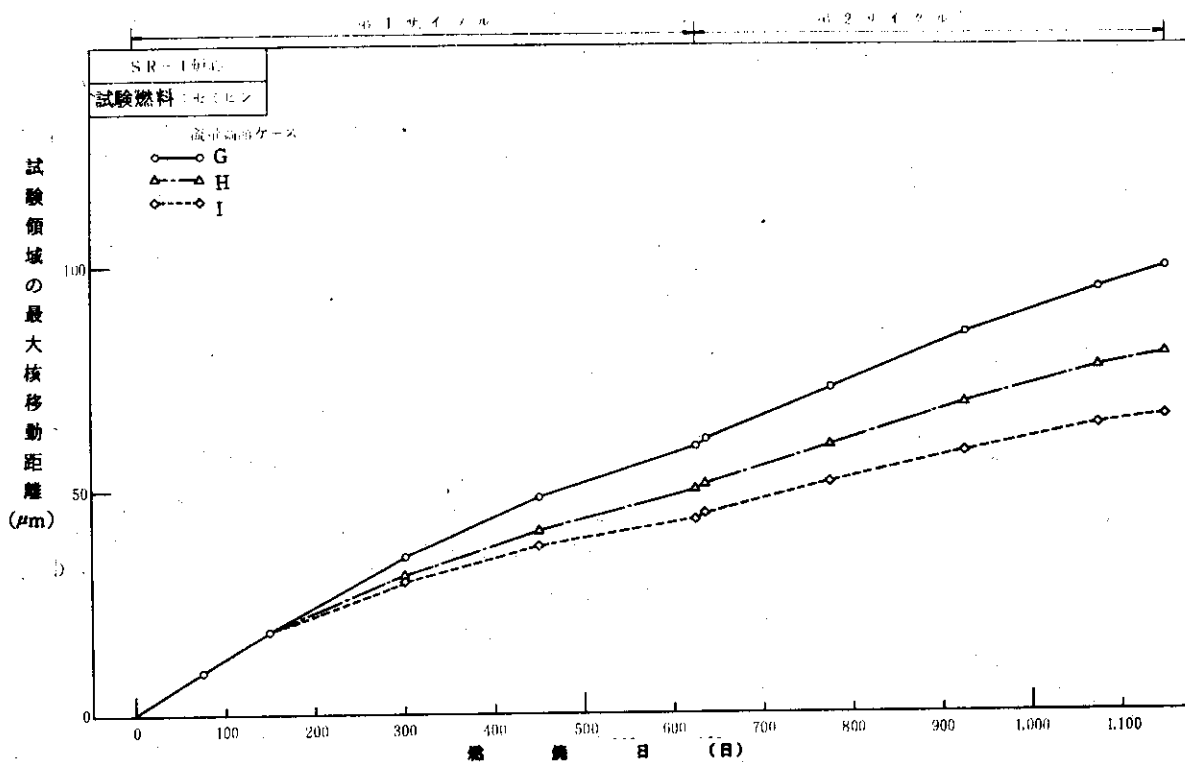


Fig. 3.5.7 SR-1炉心(セミピン型試験燃料)における最大核移動距離の燃焼変化

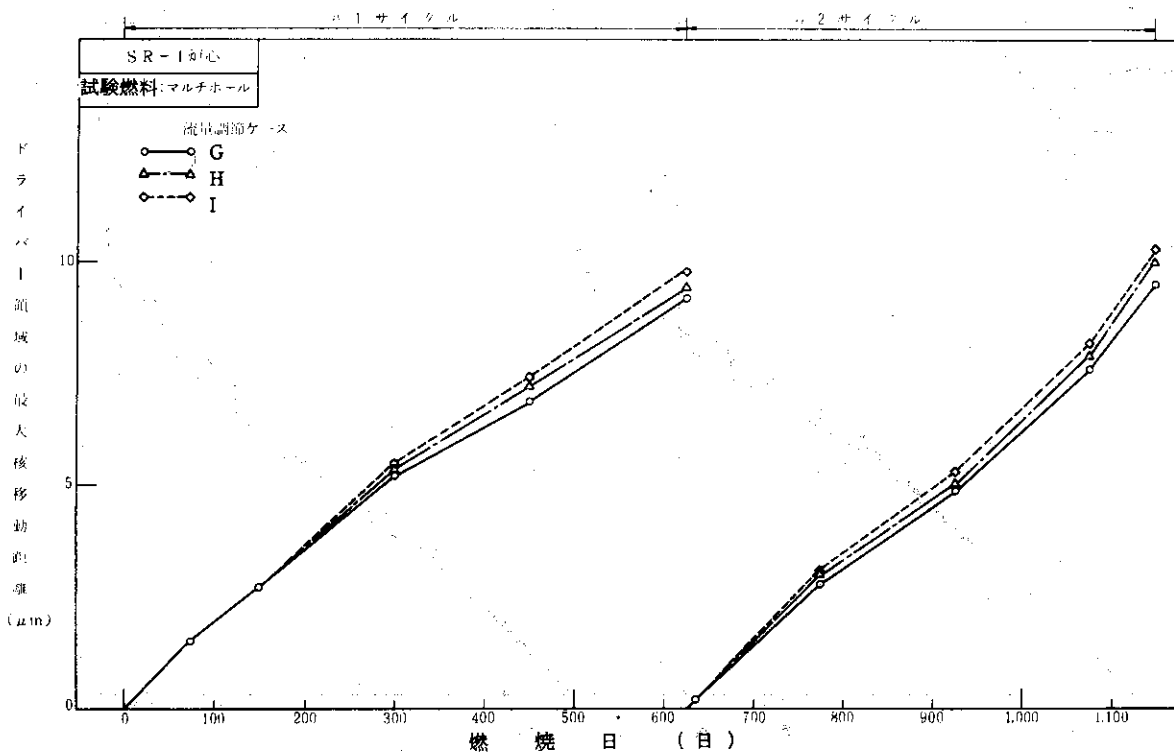
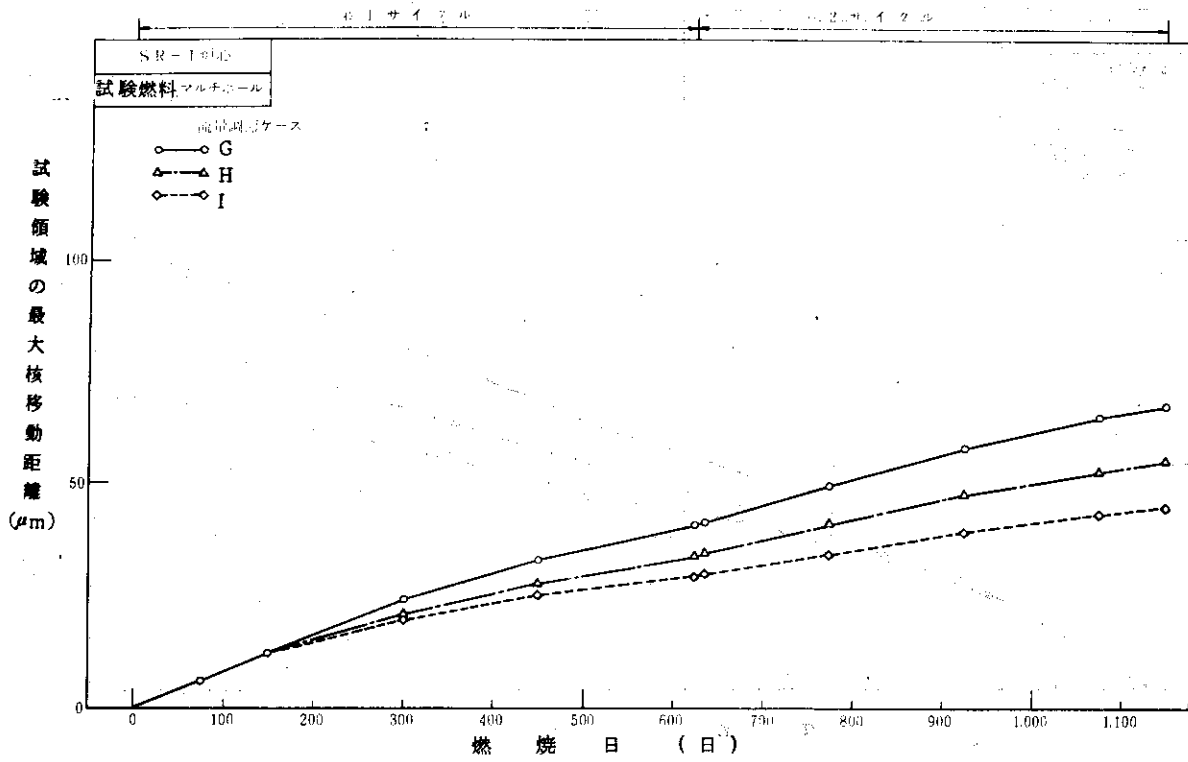


Fig. 3.58 SR-1炉心 (マルチホール型試験燃料) における最大核移動距離の燃焼変化

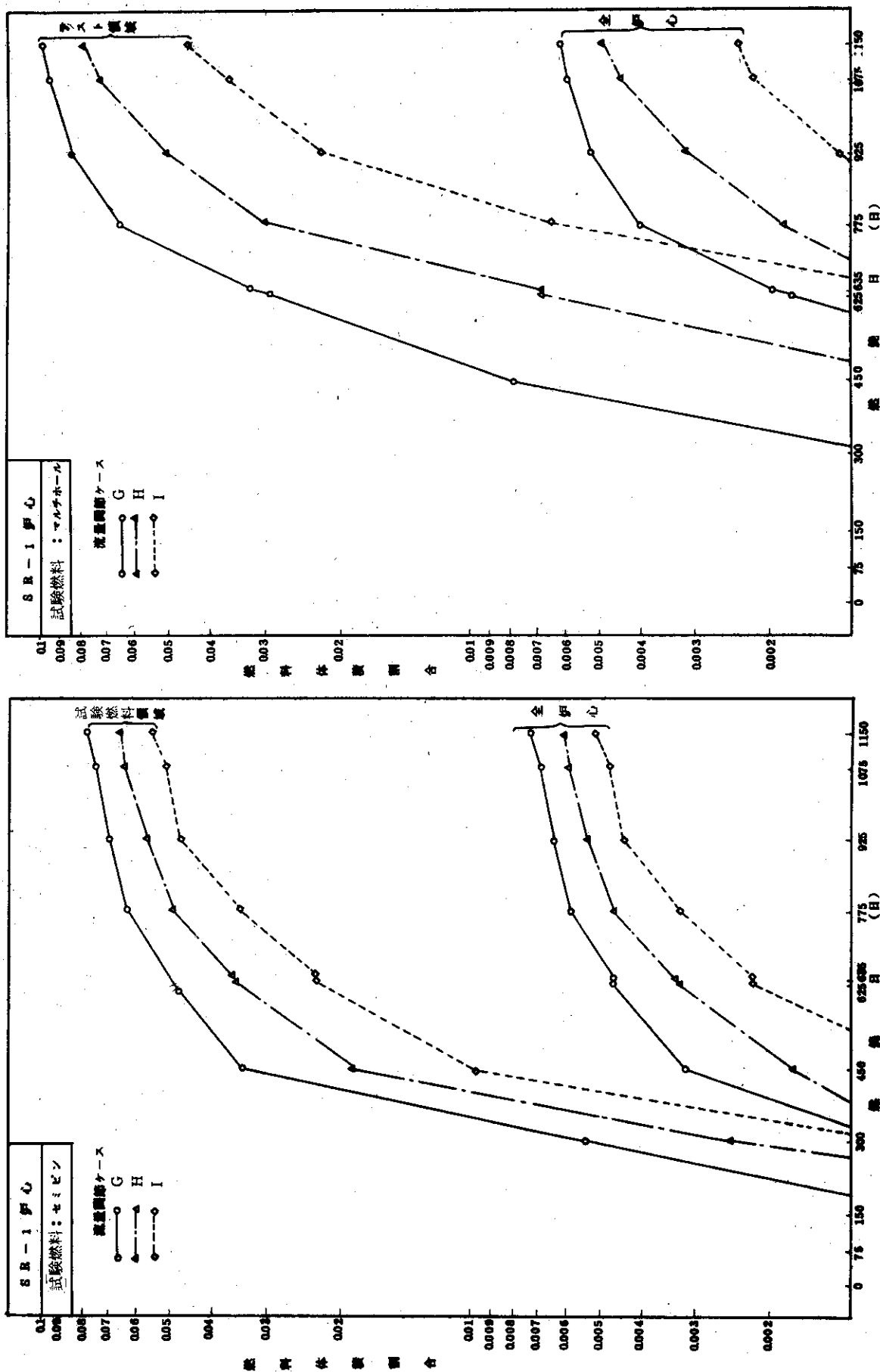


Fig. 3.5.9 SR-1炉心(セミピン型およびマルチホール型試験燃料)における $30\mu$ 以上の核移動距離体積割合の燃焼変化

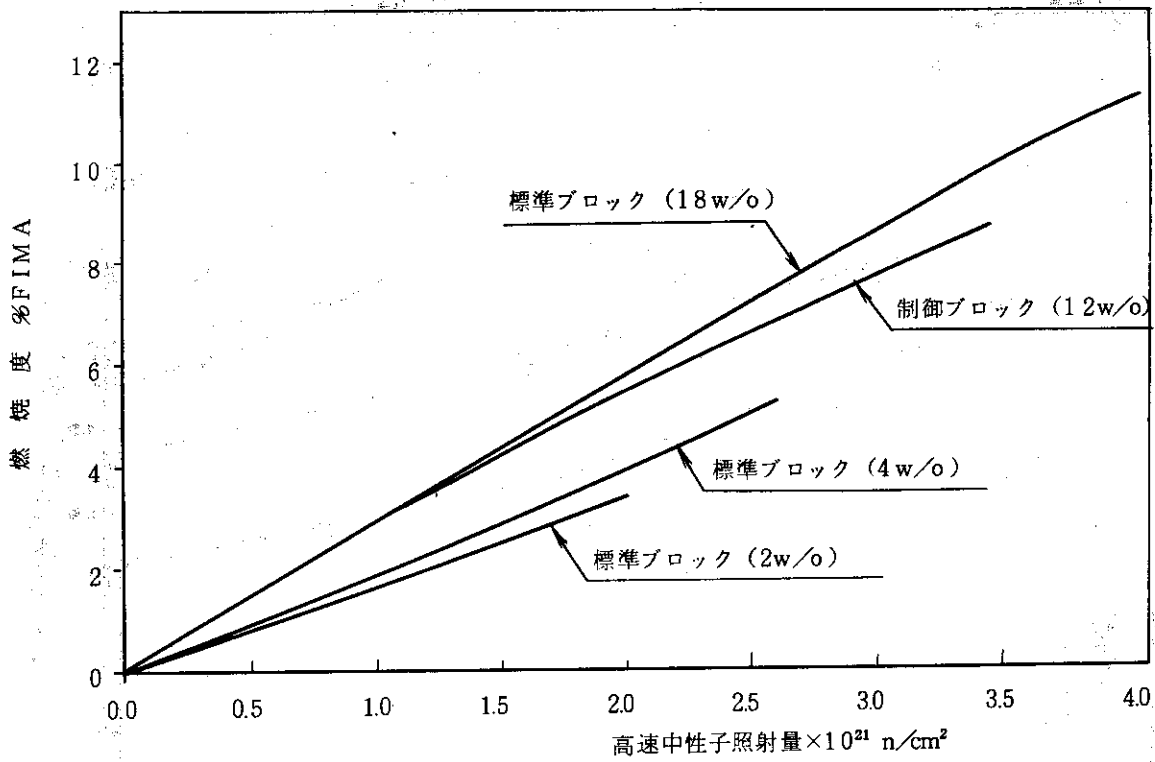


Fig 3.5.10 MR-1 炉心の試験燃料の照射条件代表例

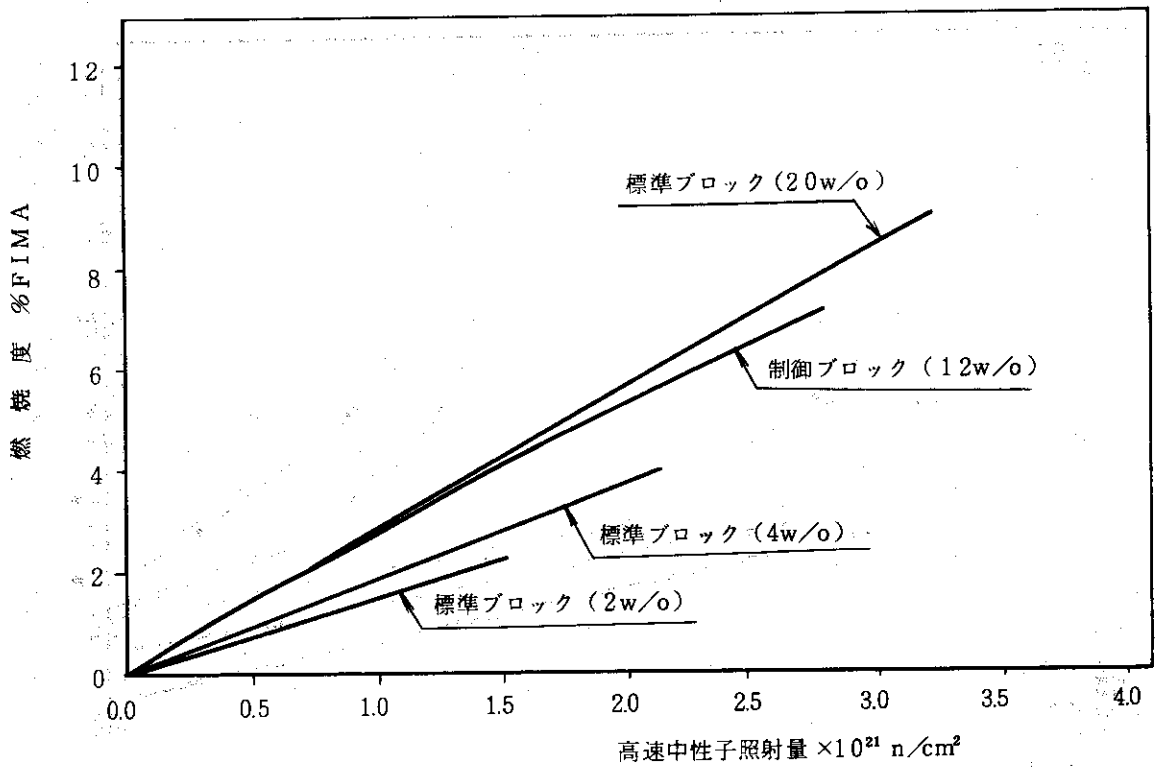


Fig 3.5.11 S.R-1 炉心の試験燃料の照射条件代表例

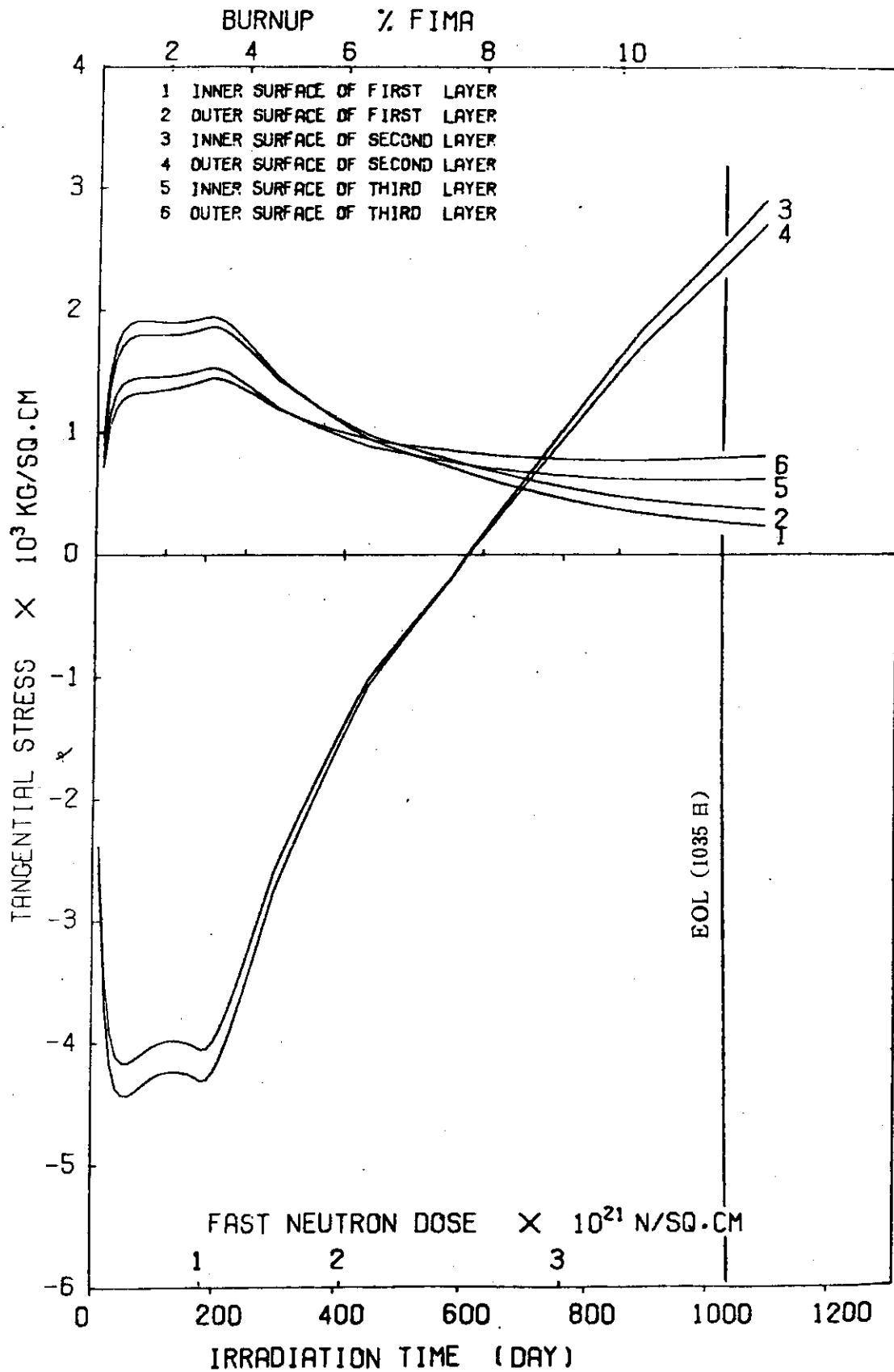


Fig. 3.5.12 MR-1炉心の18%濃縮度燃料粒子の応力変化

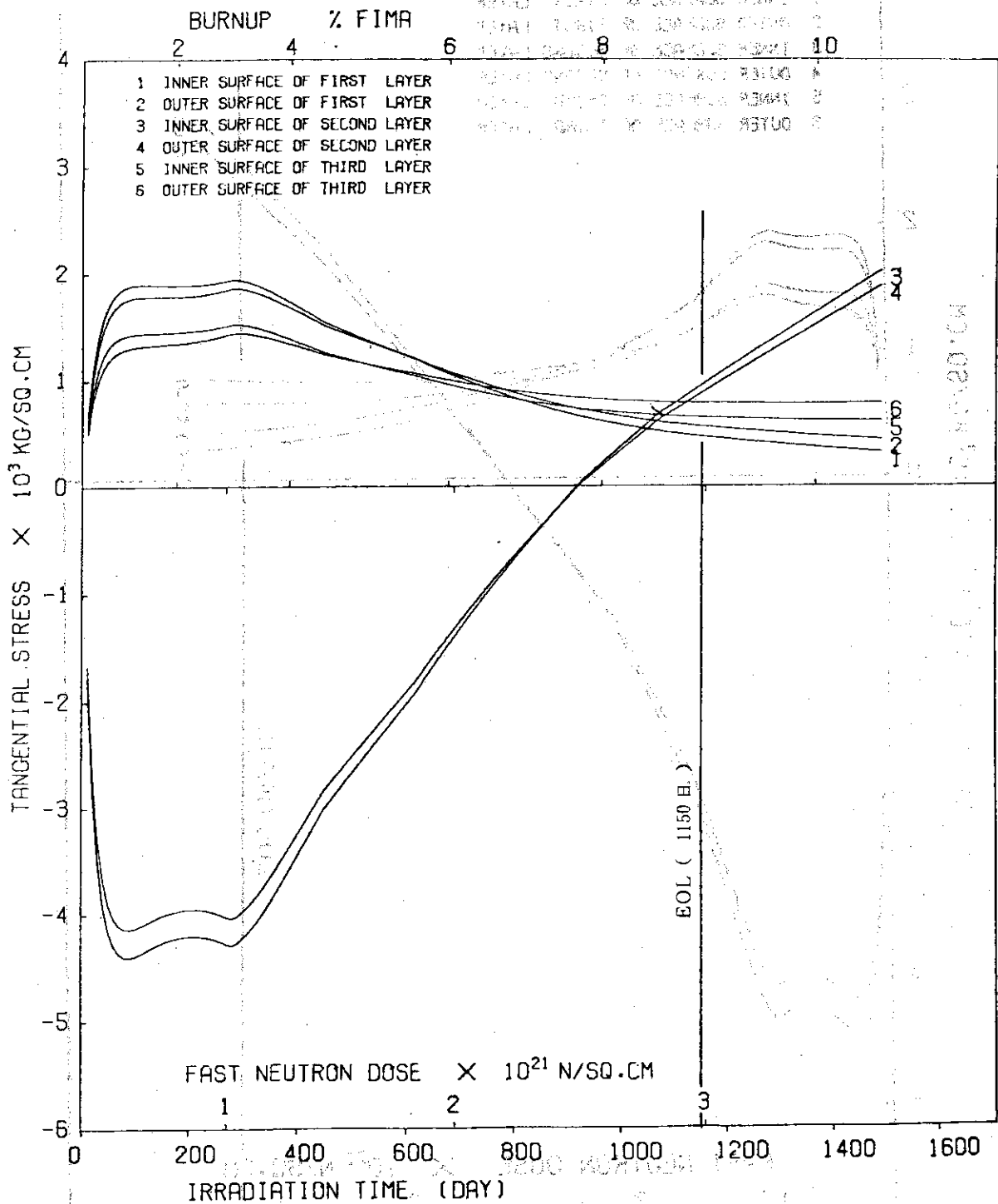


Fig. 3.5.13 SR-1炉心の20%濃縮度燃料粒子の応力変化

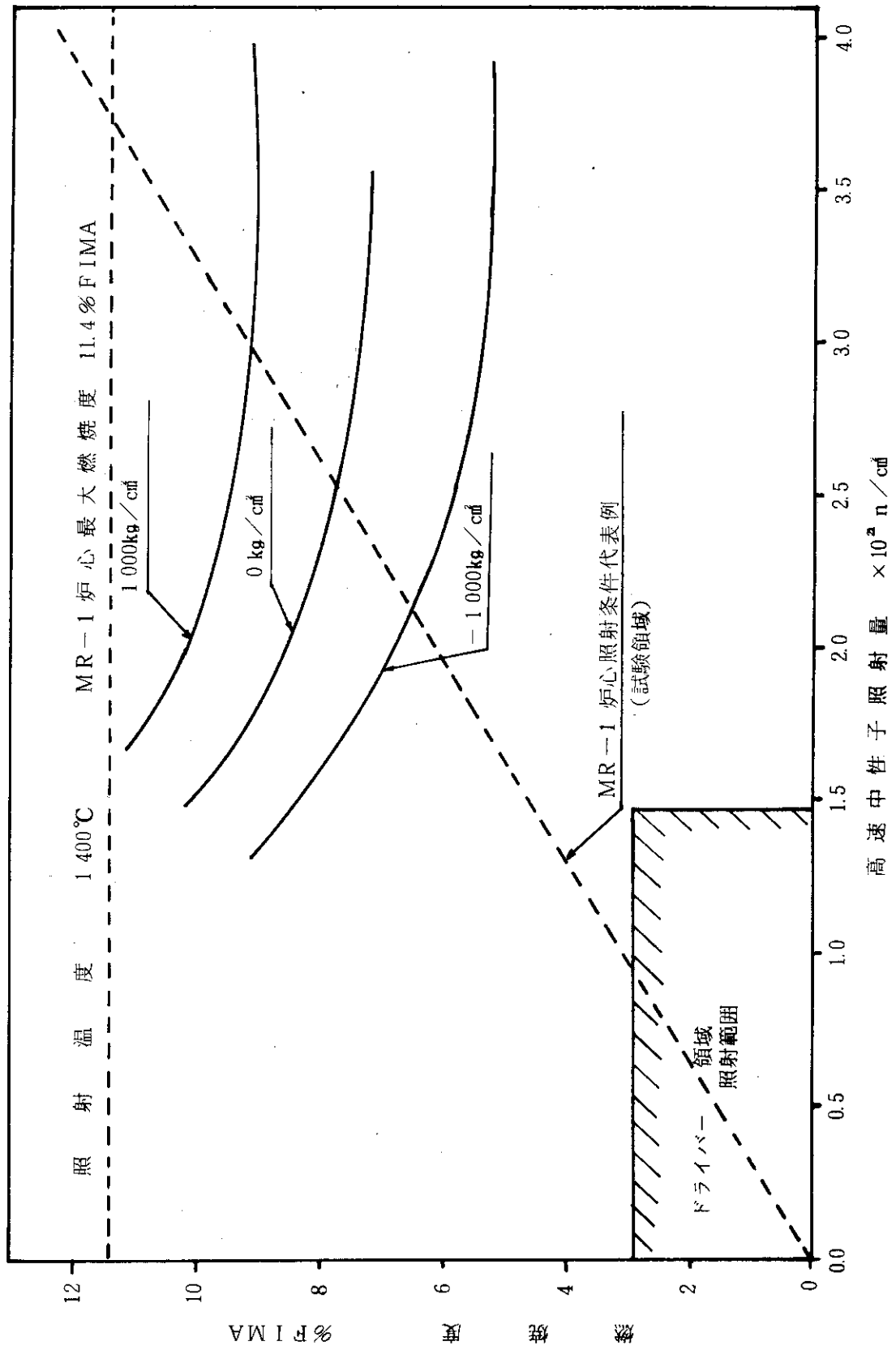


Fig. 3.5.14 公称寸法粒子のSiC層円周方向応力と照射条件の関係

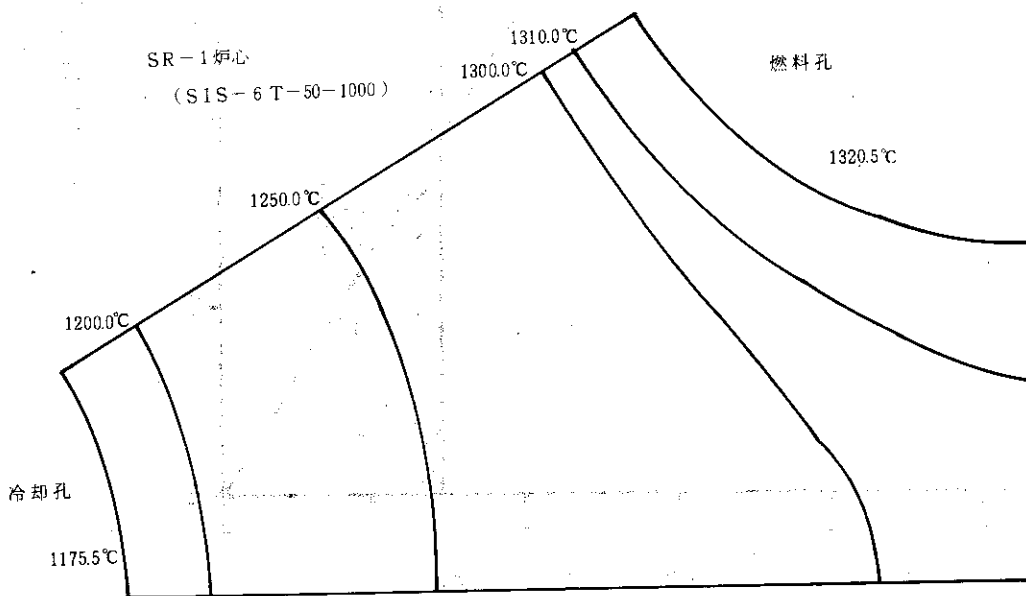
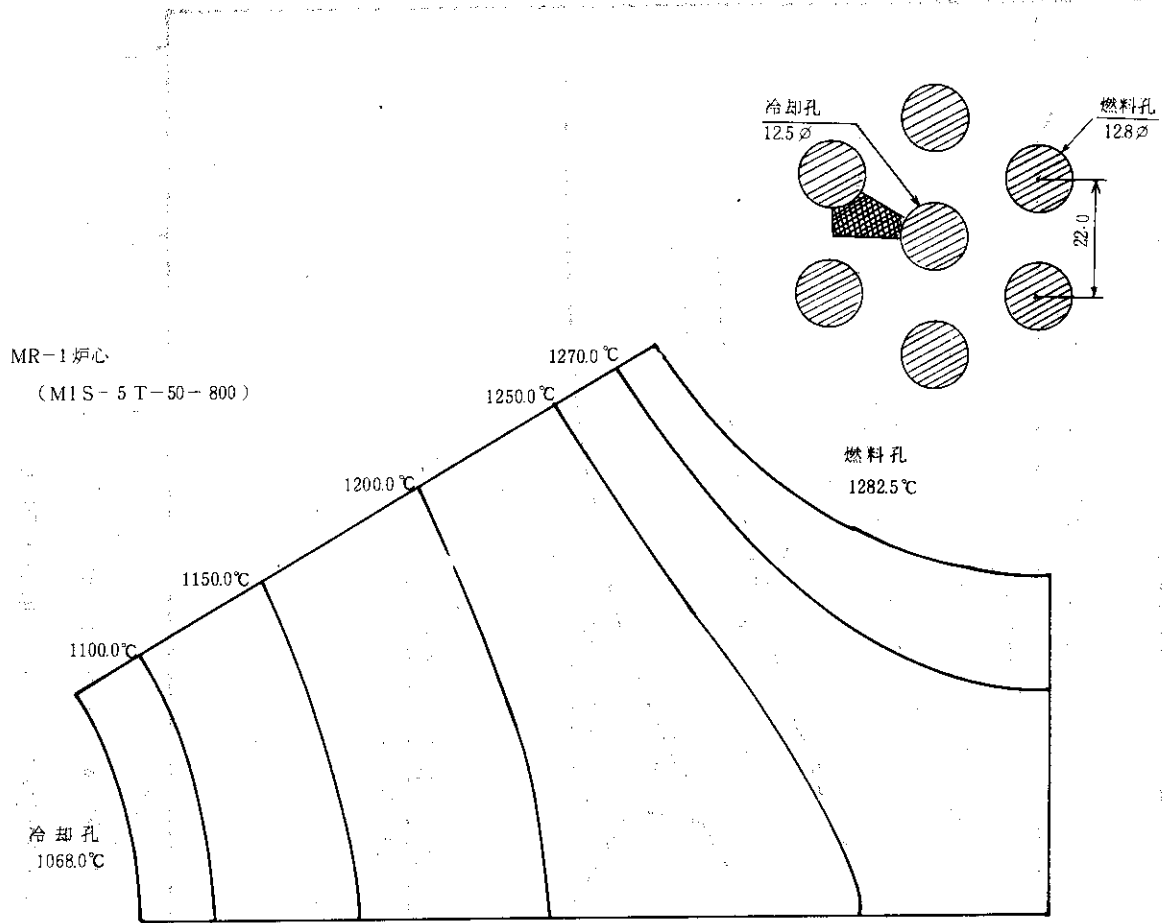


Fig. 3.5.15 マルチホール型試験燃料体黒鉛ウェブの温度分布





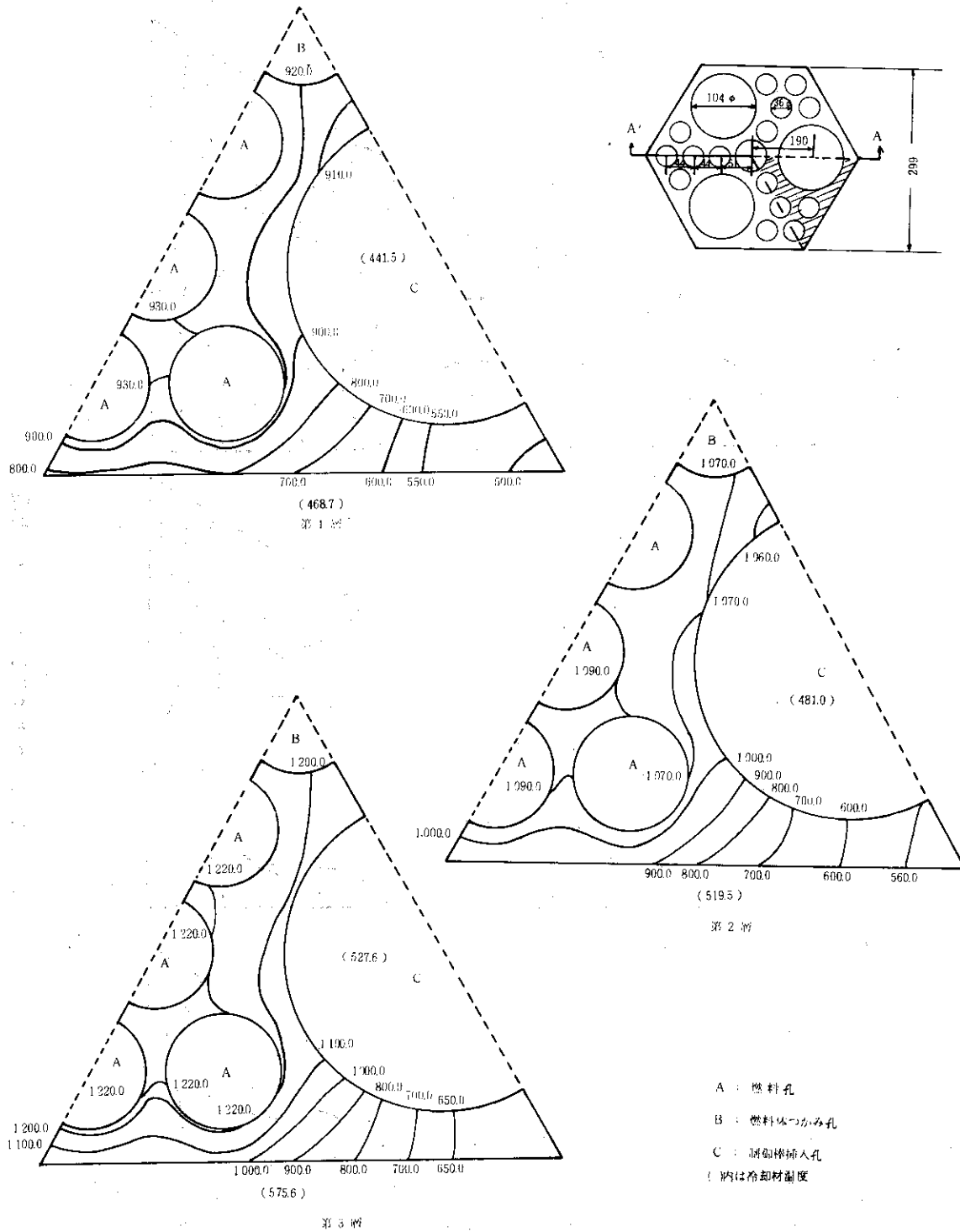


Fig. 3.5.17 制御型黒鉛ブロックの温度分布

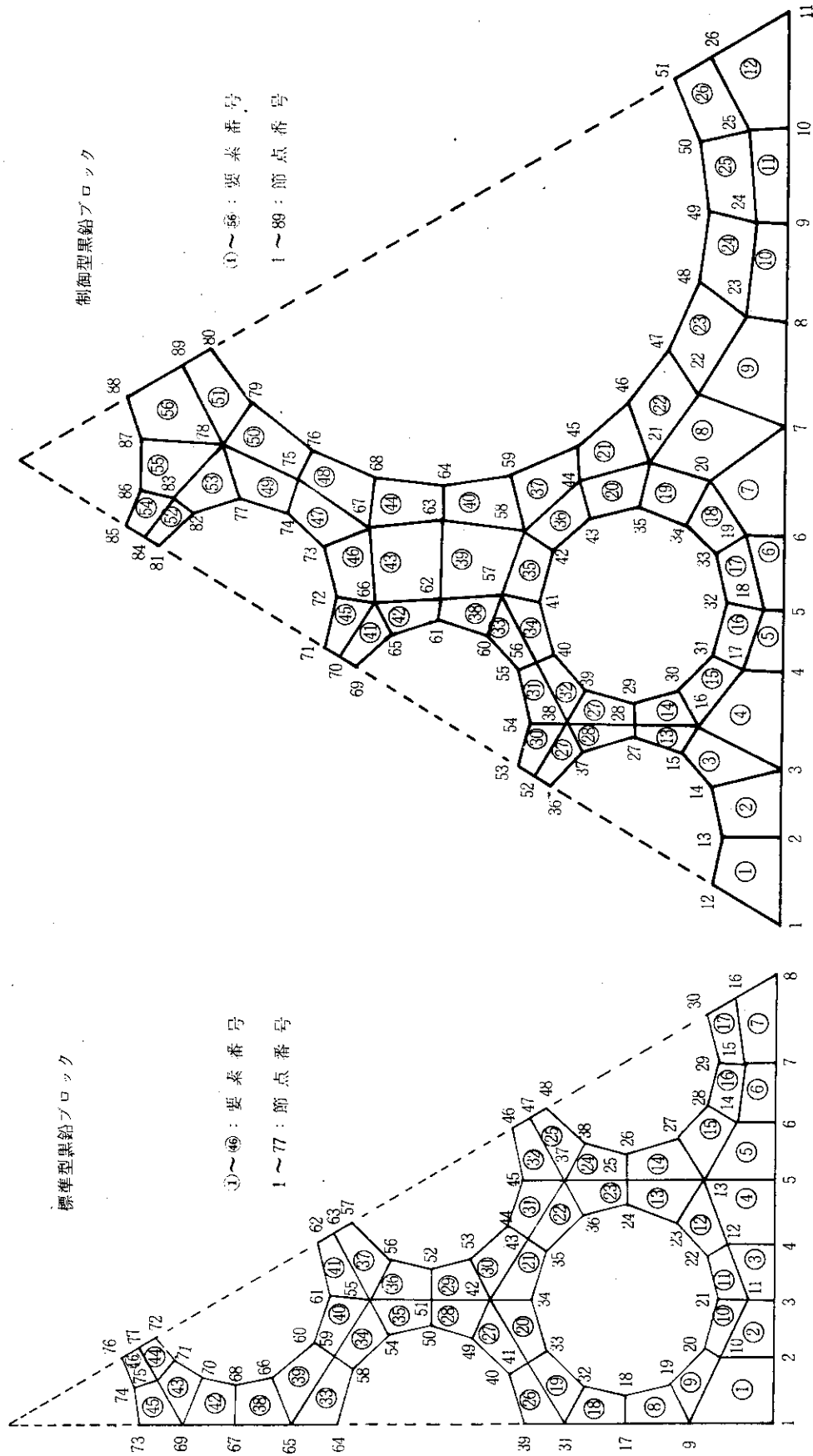


Fig. 3.5.18 黒鉛ブロックの応力解析用水平面内要素分割図

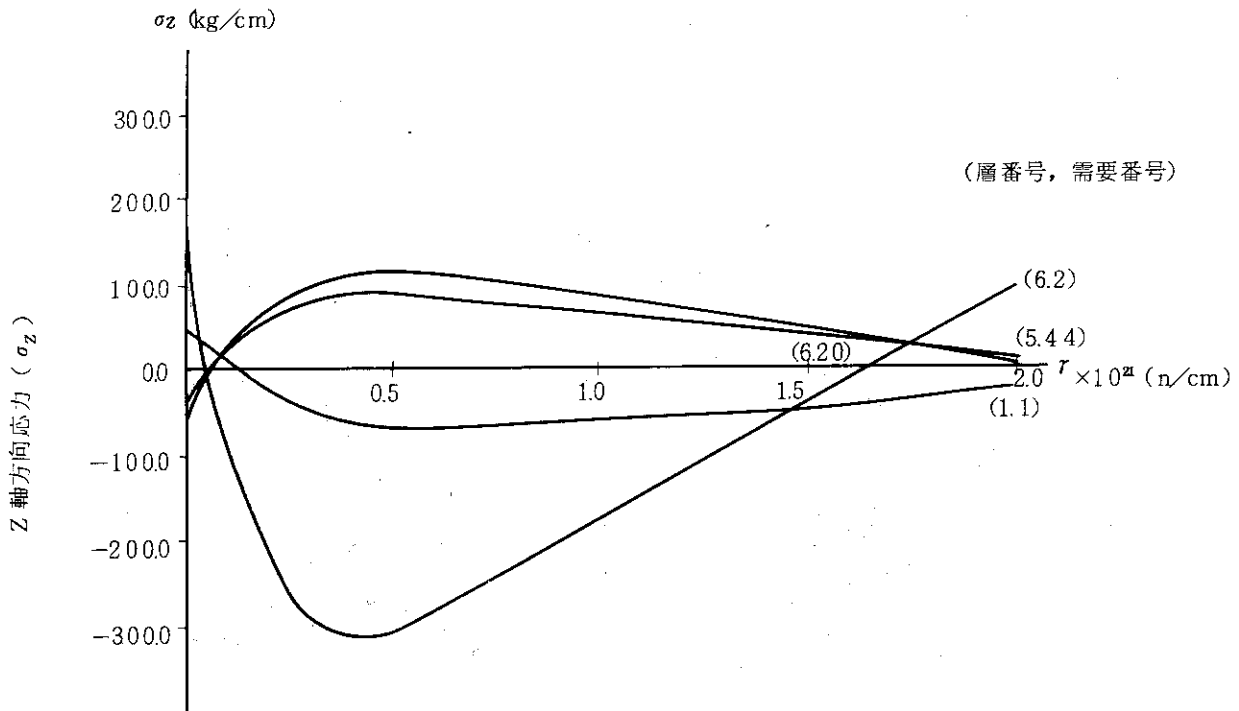


Fig 3.5.19 標準型黒鉛ブロック代表点のZ軸方向応力の変化

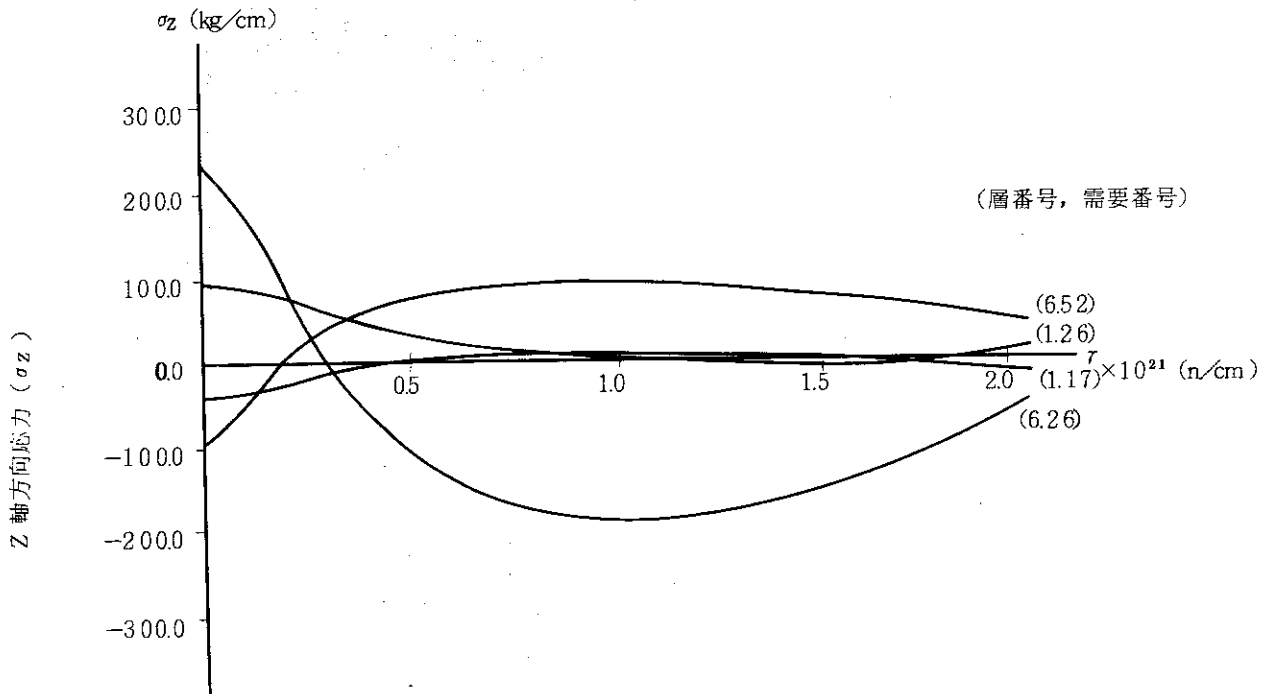


Fig 3.5.20 制御型黒鉛ブロック代表点のZ軸方向応力の変化

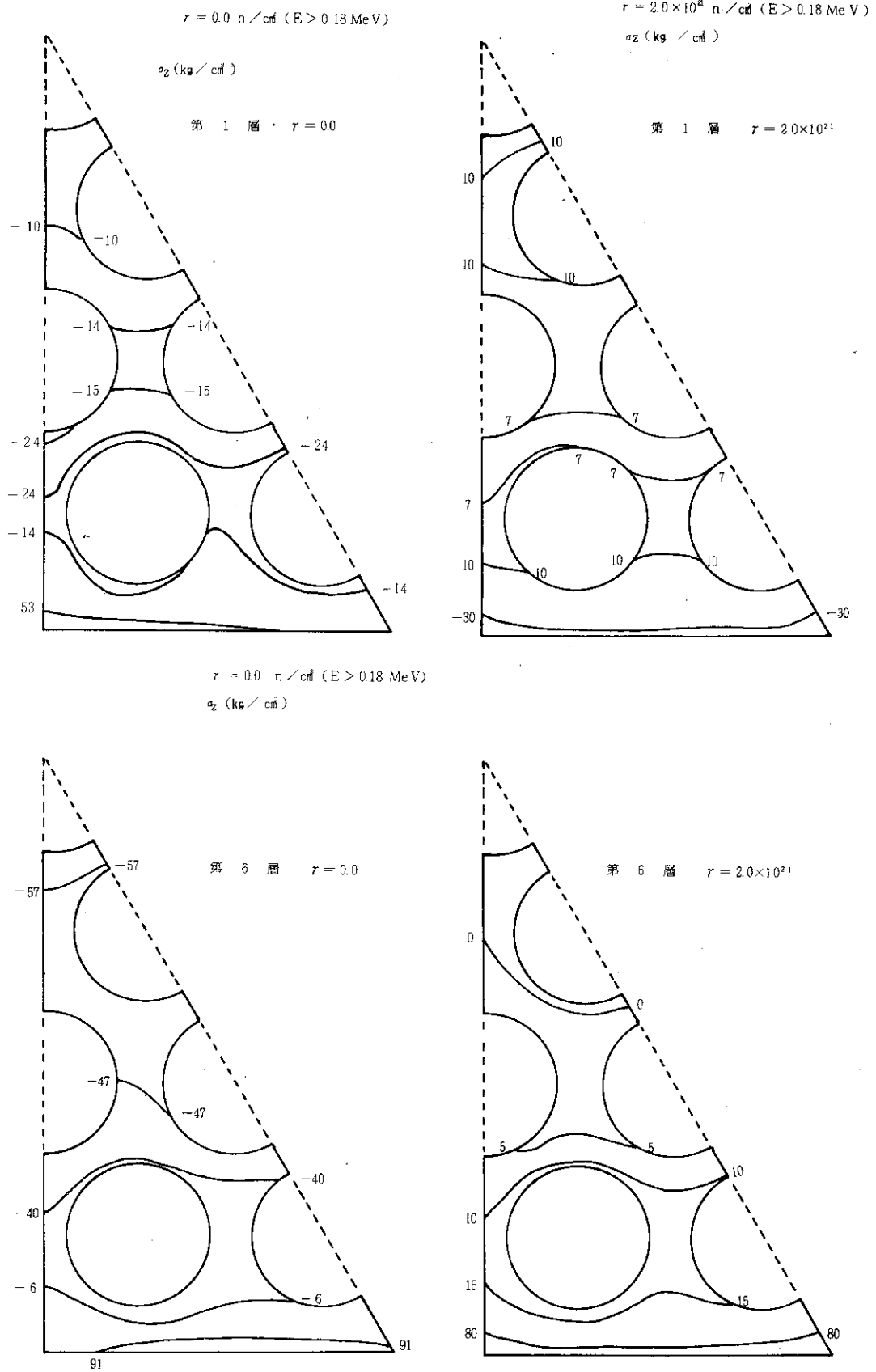


Fig. 3.5.21 標準型黒鉛ブロック内のZ軸方向応力の分布 (第1層および第6層)

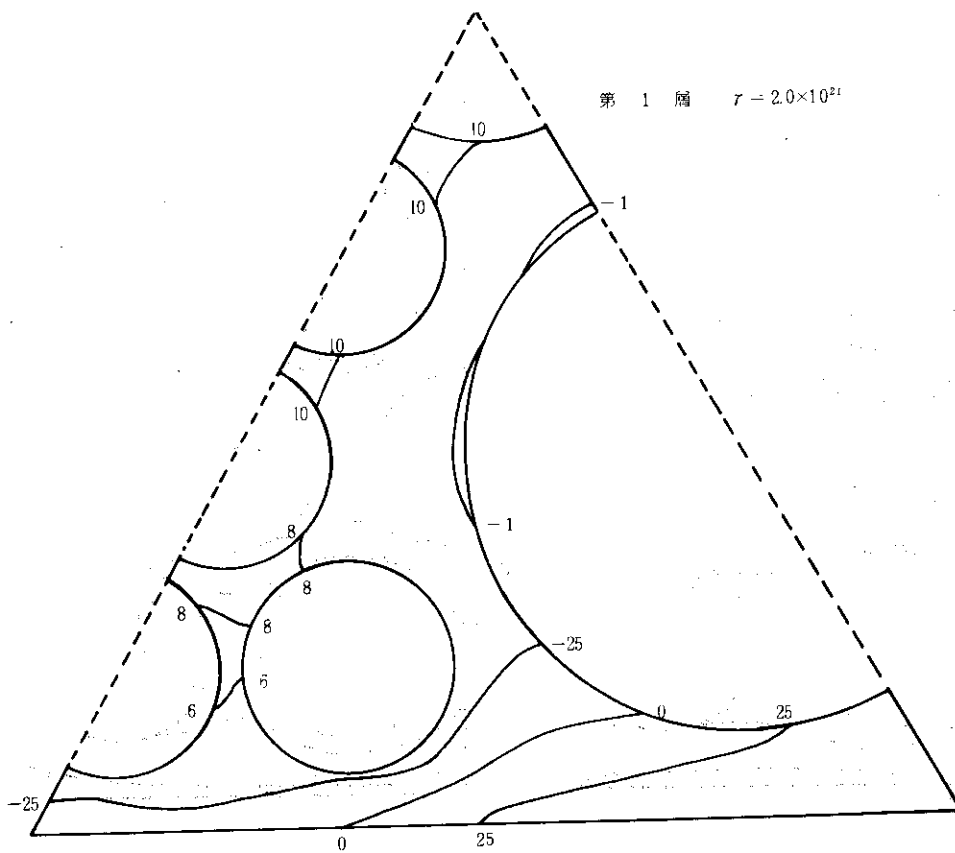
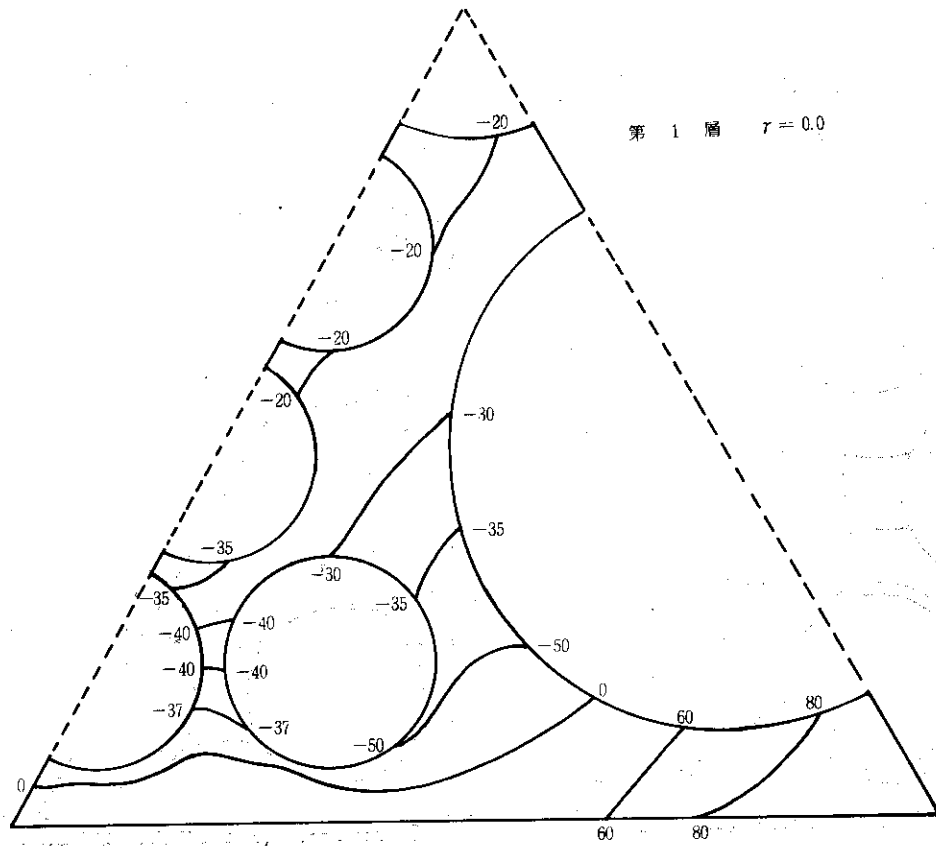


Fig. 3.5.22 制御型黒鉛ブロック内のZ軸方向応力の分布 (第1層)

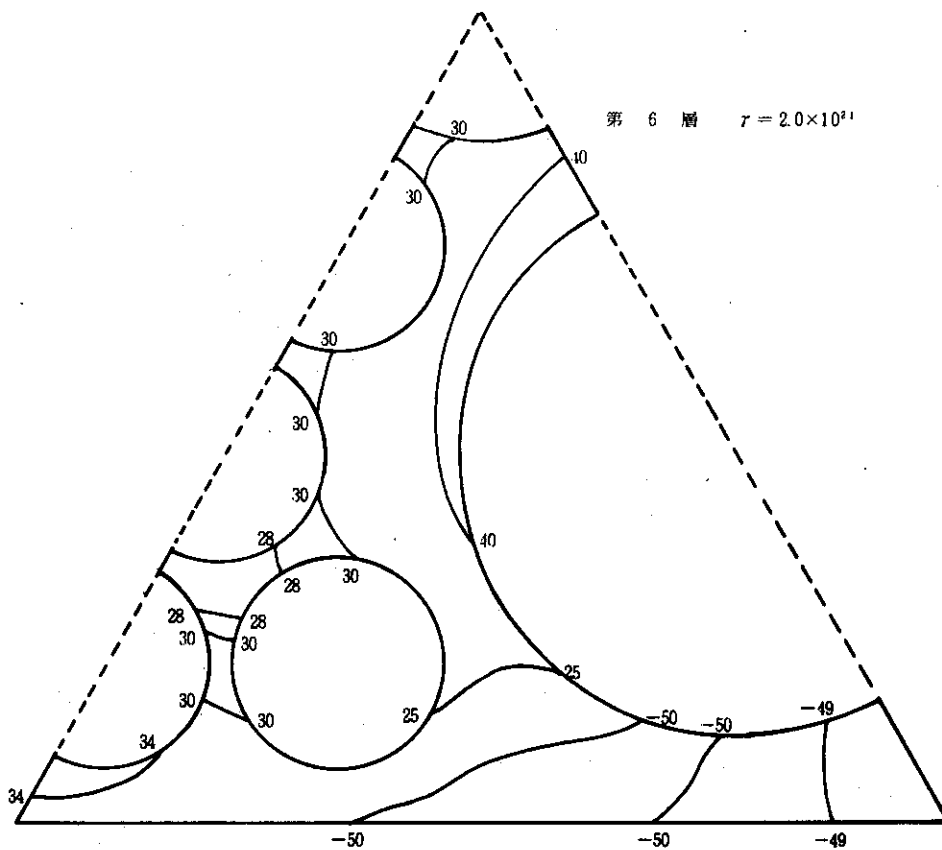
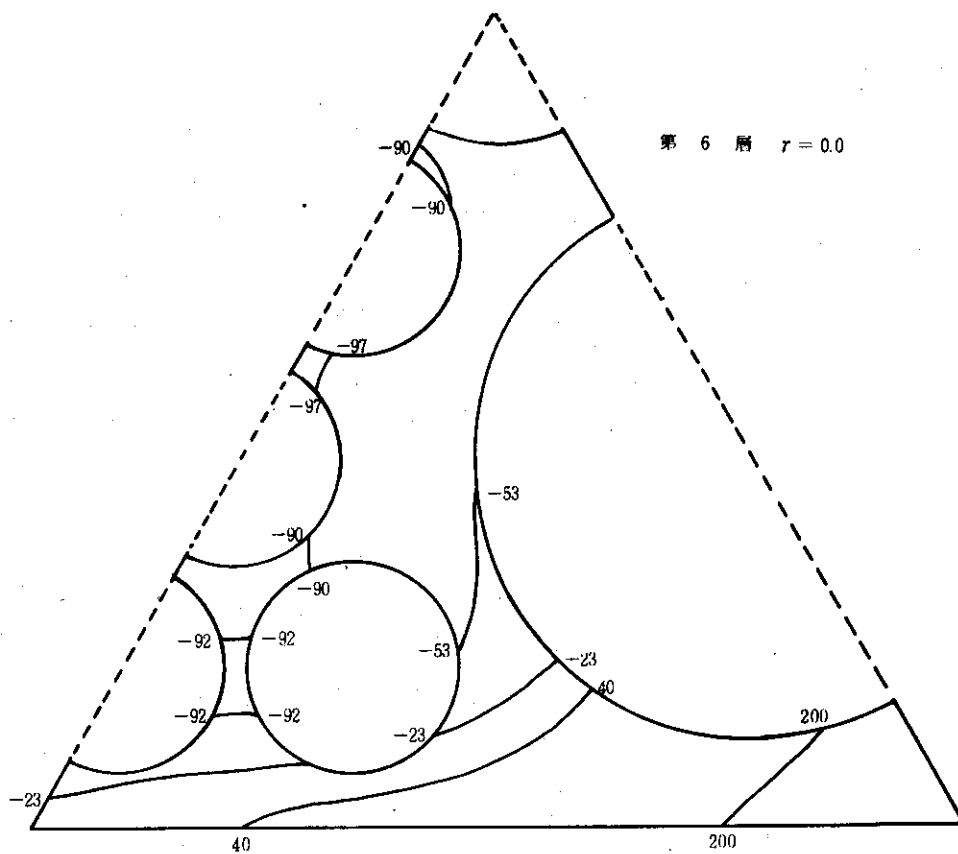


Fig. 3.5.23 制御型黒鉛ブロック内のZ軸方向応力の分布(第6層)

### 3.6 遮蔽特性解析

第1次概念設計においてMk-III炉心についておこなわれた原子炉遮蔽設計を見直すことをねらって、照射用炉心についての原子炉圧容器、反射体などの高速中性子照射量、放射線発熱量などを解析した。照射用の炉心は、Mk-III炉心用の中空棒型の燃料をドライバとした参考炉心MR-1と、内面冷却型（セミピン型）燃料をドライバとした参考炉心SR-1とが設計されており、遮蔽特性解析もこの両炉心についておこなった。

以下に、解析の方法と結果をMR-1炉心の例を中心にのべ、Mk-III炉心とのちがいを考察する。

#### 3.6.1 解析の方法

##### (1) 解析の手順

高速中性子照射量、放射線発熱量の解析は1次元除去-拡散計算でおこなった。そしてこの結果の妥当性を確認するために1次元輸送計算を、また、高速中性子束の空間分布をより正確にとらえるために2次元除去-拡散計算をおこなった。これらの計算の手順をFig. 3.6.1に示す。

1次元除去-拡散計算は、中性子束を除去-拡散法で、ガンマ線束をビルドアップ点減衰核法で計算するMACHEATコード（除去スキーム31群、ガンマ線7群）を用い、径方向、上方向および下方向についてそれぞれおこなう。なお、源となる炉心-反射体境界での中性子束は、CITATIONコードによる3次元炉心燃焼計算で得られたこの境界での4群中性子束を、高速エネルギー領域には核分裂スペクトル、これ以外のエネルギー領域には $1/E$ スペクトルを仮定して31群に配分して求め、炉心の出力密度分布は平坦と仮定する。

1次元輸送計算はANISNコード（中性子100群、 $P_3S_8$ 計算）を用いる。源となる炉心の核分裂数分布は炉心計算で得られた出力密度分布より変換して求め、断面積ライブラリは中性子-ガンマ線結合群定数作成コードシステムRADHEAT-V3により作成する。

2次元除去-拡散計算はRASC2Dコード（除去スキーム5群、拡散スキーム3群）を用いる。源となる炉心の出力密度分布は炉心計算で得られたものを、各領域の縮約断面積は1次元除去-拡散計算で得られたものをそれぞれ用いる。

(2) 2次元の計算モデルをFig. 3.6.2に示す。図から明らかなように、次のような省略、モデル化がおこなわれた。

- (i) 原子炉圧力容器は、容器内の体積を同じとする円筒形のもので表わす。
- (ii) 冷却機出口管、側部炉心拘束機構、炉心下部のプレナムポスト、ダイヤグリット、炉心上部の流量調節機構などの炉内構造物は無視する。
- (iii) 下部および側部の反射体の最下層のブロックに挿入されたボロン入りのピンは、黒鉛のブロックと均質化することによりボロン入りピン層としてモデル化する。

1次元の輸送計算モデルは、2次元モデルの径方向、上方向、下方向のそれぞれについて同じ構成、寸法として作成した。また、除去-拡散計算モデルはヘリウムのボイド層を無視して圧縮した配置のモデルとした。



## (3) 解析の条件

高速中性子照射量，放射線発熱量を検討するという本解析の目的にそって，解析の対象とする炉心は，燃焼サイクル中で炉心-反射体境界における高速中性子束が最も大きくなる時点の炉心とした。すなわち；MR-1炉心，SR-1炉心ともに，炉心の側部，上部においては第1燃焼サイクルの末期の，下部においては燃焼の初期の炉心が選ばれた。なお，すべて50MWの熱出力とした。

## 3.6.2 解析の結果

## (1) 高速中性子照射量

1次元除去-拡散計算(MACHEATコード)によって得られた参考炉心MR-1における径方向，上方向および下方向の中性子束分布を Fig. 3.6.3~5に示し，また，参考炉心SR-1における径方向の中性子束分布を Fig. 3.6.6に示す。

第1次概念設計で得られた結果との比較を径方向の分布についておこなったところ，4倍以上の違いは見られなかった。これは，試験照射領域を炉心の中心部におき，ここにのみ高濃縮の燃料を配置することとしているので，周辺構造物にはほとんど影響を与えていないためである。すなわち，ドライバ領域，あるいは最上部，最下部のような反射体に近い燃料の出力密度によって周辺の遮蔽特性が支配されていることになる。したがって，もし試験照射領域を上下に延ばし，最上部あるいは最下部にも高濃縮の燃料を装荷するならば，これに近い構造物の中性子束が大きくなることに注意せねばならない。

各構造物についての高速中性子の積分照射量を各参考炉心について求め，Table 3.6.1に示す。これは各構造物内での高速中性子束の最大値と表中の積分条件を用いて算出したもので，いずれも同じく表中の設計基準値を下まわっていることが明らかである。

1次元輸送計算(ANISNコード)によって得られたMR-1炉心の径方向中性子束分布を Fig. 3.6.7に示す。この計算結果をMACHEATコードの結果(Fig. 3.6.3)と比べると，可動反射体領域で約15%小さく，固定反射体領域ではほぼ同じ，さらに外側の構造物では最大約3倍大きくなっていることが判った。

2次元除去-拡散計算(RASC2Dコード)によって得られたMR-1炉心の2次元高速中性子束分布を Fig. 3.6.8に示す。この結果をMACHEATコードの各方向の結果(Fig. 3.6.3~5)と比べると，反射体領域ではほぼ同じで，圧力容器では約1/4となっていることが判った。これはヘリウムボイド層でのストリーミング効果によるものと考えられる。

以上のMACHEATコードの計算結果とこれを補うANISNコード，RASC2Dコードの結果から，Table 3.6.1に示した高速中性子照射量は，反射体領域までは大きめの値を，これより外側の構造物では，最も悪い場合，約1/3程度に低い値を示していることとなるが，外側の構造物における照射量は設計基準に対して十分な余裕があり問題とはならない。したがって，高速中性子照射量の点からは参考炉心MR-1，SR-1ともに現設計で問題はないと考えられる。なお，ボイド部分周辺のより正確な高速中性子照射量を求めるには，2次元の除去-拡散，さらには2次元の輸送計算も必要となろう。

## (2) 放射線発熱量

1次元除去-拡散計算 (MACHEATコード) による径方向の放射線発熱量分布を Fig. 3.6.9 に示し、各構造物内での最大値を Table 3.6.2 に示す。最大の発熱はボロン入りの黒鉛において  $(n, \gamma)$  反応,  $(n, \alpha)$  反応などによって生ずる。なお、圧力容器での発熱量は、設計基準値  $10 \text{ mW/cm}^3$  の  $1/10$  以下である。

このように、放射線発熱量の点からも、両参考炉心は現設計で問題はないと考えられる。しかしながら、この結果は、第1次概念設計の結果に比して、各領域において2~25倍の値となっており、高速中性子照射量が約4倍以内であったのを考えると、解析のモデル、使用する断面積ライブラリ、発熱計算式などに検討を要する点があるものと思われ、また、正確な発熱量計算には輸送計算に見合ったような計算が必要といえよう。

Table 3.6.1 高速中性子照射量 (n/cm<sup>2</sup>)

構 造 物	材 料	積 分 条 件	MR-1 炉心	SR-1 炉心	設 計 基 準
径方向可動反射体	SM1-24相当	照射年数3年 負荷率80%	$9.43 \times 10^{20}$	$9.49 \times 10^{20}$	$< 3 \times 10^{21}$
上方向 "	"	"	$1.05 \times 10^{21}$	$9.27 \times 10^{20}$	"
下方向 "	"	"	$3.15 \times 10^{20}$	$3.40 \times 10^{20}$	"
固 定 反 射 体	PGX相当	照射年数20年 負荷率80%	$2.35 \times 10^{19}$	$2.37 \times 10^{19}$	$< 5 \times 10^{20}$
径方向熱遮蔽体	ボロン入り黒鉛	"	$8.31 \times 10^{16}$	$8.09 \times 10^{16}$	"
上方向 "	"	"	$9.26 \times 10^{16}$	$7.94 \times 10^{16}$	"
下方向 "	"	"	$1.72 \times 10^{17}$	$8.58 \times 10^{16}$	"
炉 心 支 持 ブ ロ ッ ク	黒 鉛	"	$6.69 \times 10^{16}$	$3.16 \times 10^{16}$	"
高 温 プ レ ナ ム 断 熱 材	マスロック	"	$4.19 \times 10^{14}$	$1.87 \times 10^{14}$	—
径方向熱遮蔽体	2¼Cr-1Mo鋼	"	$8.58 \times 10^{16}$	$8.36 \times 10^{16}$	$< 1 \times 10^{18}$
上方向 "	SUS 304	"	$9.82 \times 10^{16}$	$8.41 \times 10^{16}$	$< 1 \times 10^{22}$
コ ア バ レ ル	2¼Cr-1Mo鋼	"	$4.72 \times 10^{16}$	$4.58 \times 10^{16}$	$< 1 \times 10^{18}$
炉 心 支 持 板	"	"	$4.23 \times 10^{18}$	$1.89 \times 10^{18}$	"
圧 力 容 器 (径方向)	"	"	$3.59 \times 10^{16}$	$3.49 \times 10^{16}$	"
圧 力 容 器 (上方向)	"	"	$1.08 \times 10^{16}$	$9.21 \times 10^{15}$	"
圧 力 容 器 (下方向)	"	"	$2.13 \times 10^{13}$	$9.51 \times 10^{12}$	"

注  $E_n \geq 0.183 \text{ MeV}$

Table 3.6.2 放射線発熱量の最大値 (mW/cm<sup>3</sup>)

構 造 物	材 料	MR-1 炉心	SR-1 炉心
径方向可動反射体	SM1-24相当	$2.28 \times 10^2$	$2.49 \times 10^2$
上方向 "	"	$2.48 \times 10^2$	$2.40 \times 10^2$
下方向 "	"	$9.65 \times 10^1$	$9.91 \times 10^1$
固定反射体	P G X 相当	$1.73 \times 10^1$	$1.40 \times 10^1$
径方向熱遮蔽体	2¼Cr-1Moクラッド	$3.26 \times 10^2$	$2.82 \times 10^2$
	ボロン入り黒鉛	$6.92 \times 10^2$	$6.01 \times 10^2$
	2¼Cr-1Mo鋼遮蔽体	$1.43 \times 10^1$	$1.23 \times 10^1$
上方向熱遮蔽体	SUS-304クラッド	$5.01 \times 10^2$	$3.98 \times 10^2$
	ボロン入り黒鉛	$6.70 \times 10^2$	$5.32 \times 10^2$
	SUS-304遮蔽体	$1.45 \times 10^1$	$1.14 \times 10^1$
下方向熱遮蔽体	ボロン入り黒鉛	$1.75 \times 10^2$	$1.55 \times 10^2$
炉心支持ブロック	黒 鉛	$1.83 \times 10^{-1}$	$1.59 \times 10^{-1}$
コアバレル	2¼Cr-1Mo鋼	2.83	2.43
炉心支持板	"	$1.14 \times 10^{-1}$	$1.76 \times 10^{-1}$
圧力容器(径方向)	"	$9.05 \times 10^{-1}$	$7.79 \times 10^{-1}$
" (上方向)	"	$3.92 \times 10^{-2}$	$3.13 \times 10^{-2}$
" (下方向)	"	$1.69 \times 10^{-3}$	$2.46 \times 10^{-3}$

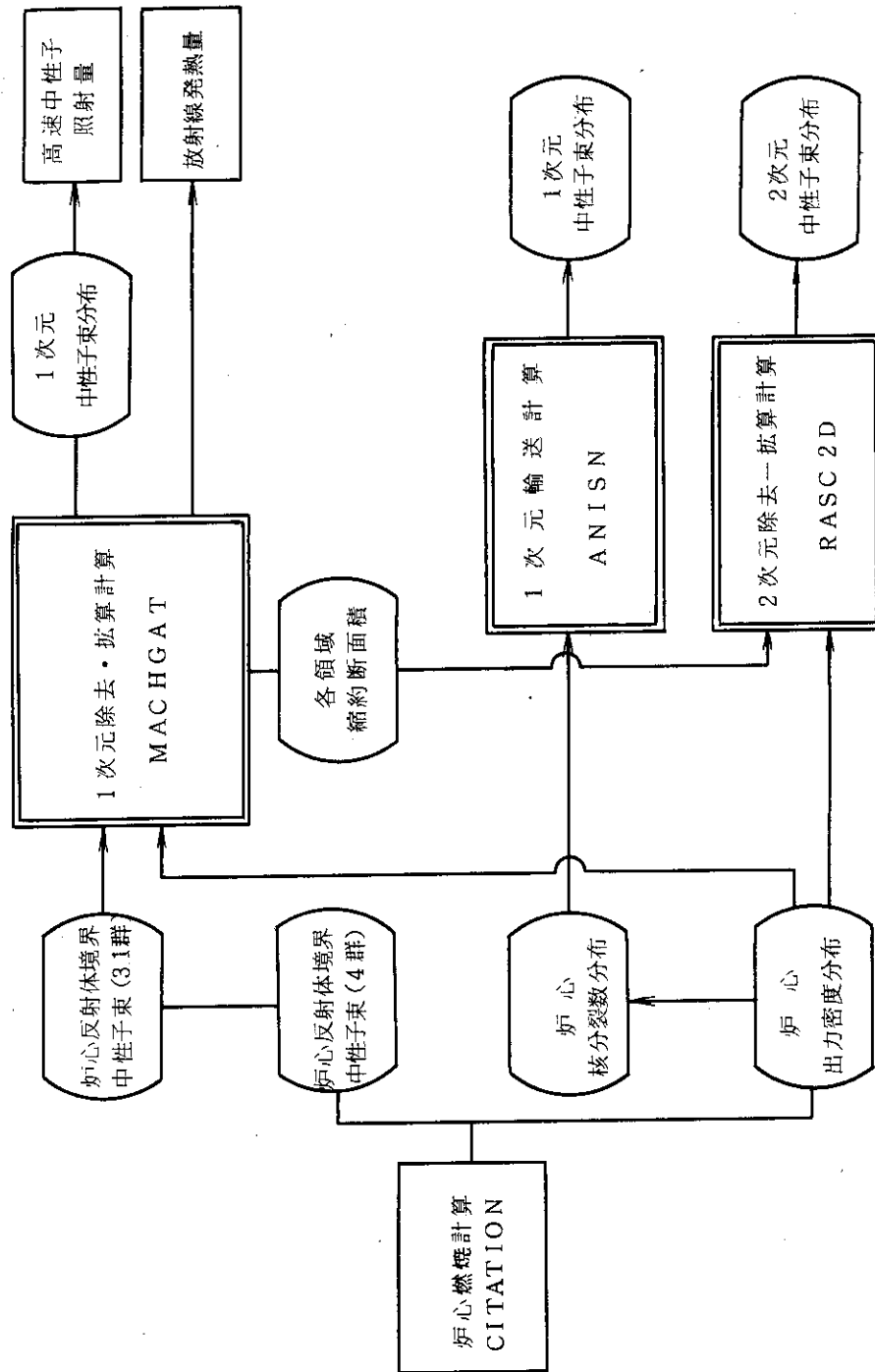
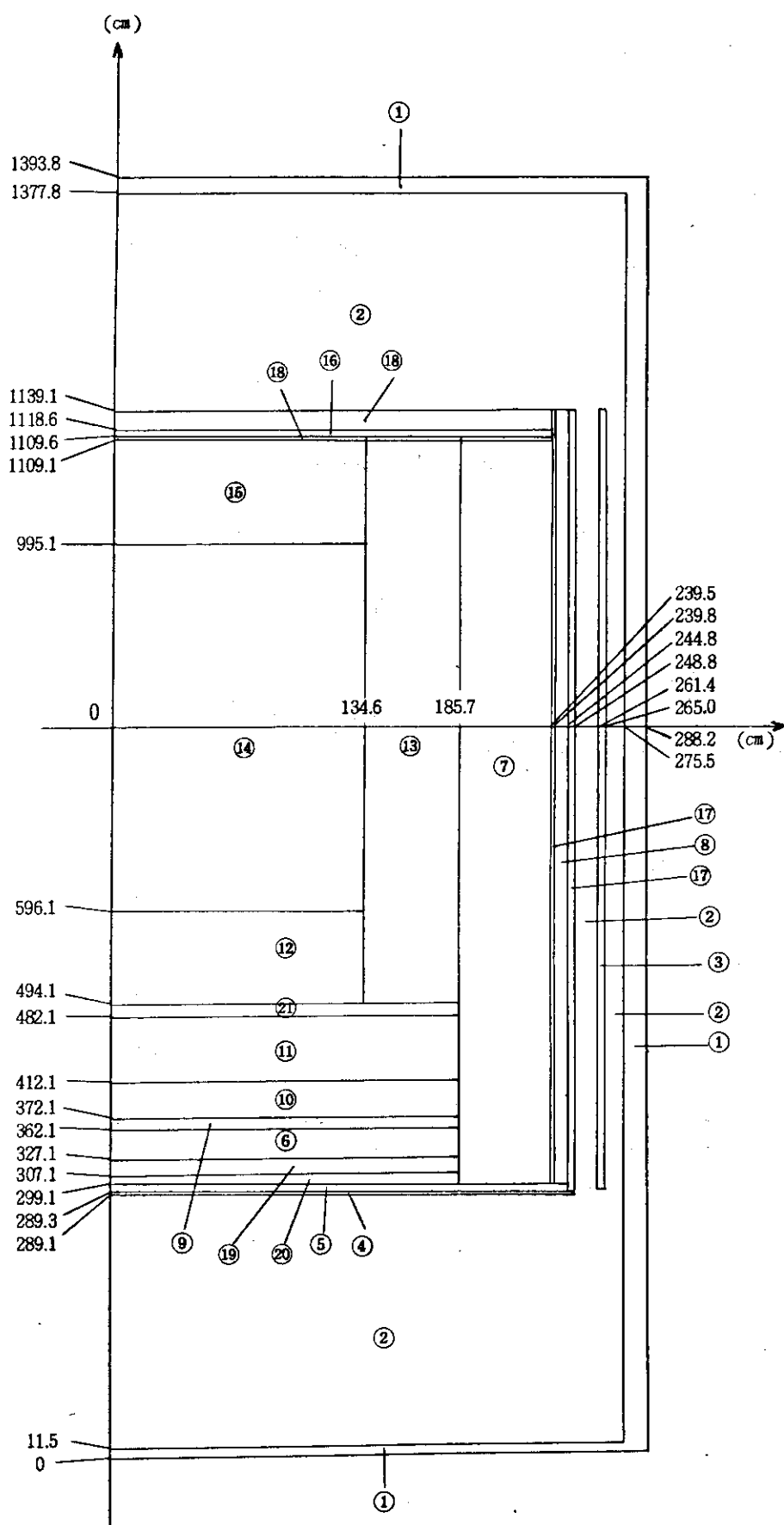


Fig 3.6.1 遮蔽特性解析の手順



番号	名称
1	圧力容器 ( $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼)
2	ボイド (ヘリウム)
3	コアバレル ( $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼)
4	シールプレート (インコネル 600)
5	炉心支持板 ( $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼)
6	マスロック 断熱材
7	固定反射体
8	側部熱遮蔽体
9	黒鉛断熱層
10	プレナム
11	プレナムブロック
12	下部可動反射体
13	側部可動反射体
14	炉心
15	上部可動反射体
16	上部熱遮蔽体
17	$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼クラッド
18	SUS 304 クラッド
19	グラスロックフォーム
20	カオウール
21	ボロン入りピン層

Fig. 3.6.2 2次元遮蔽計算モデル

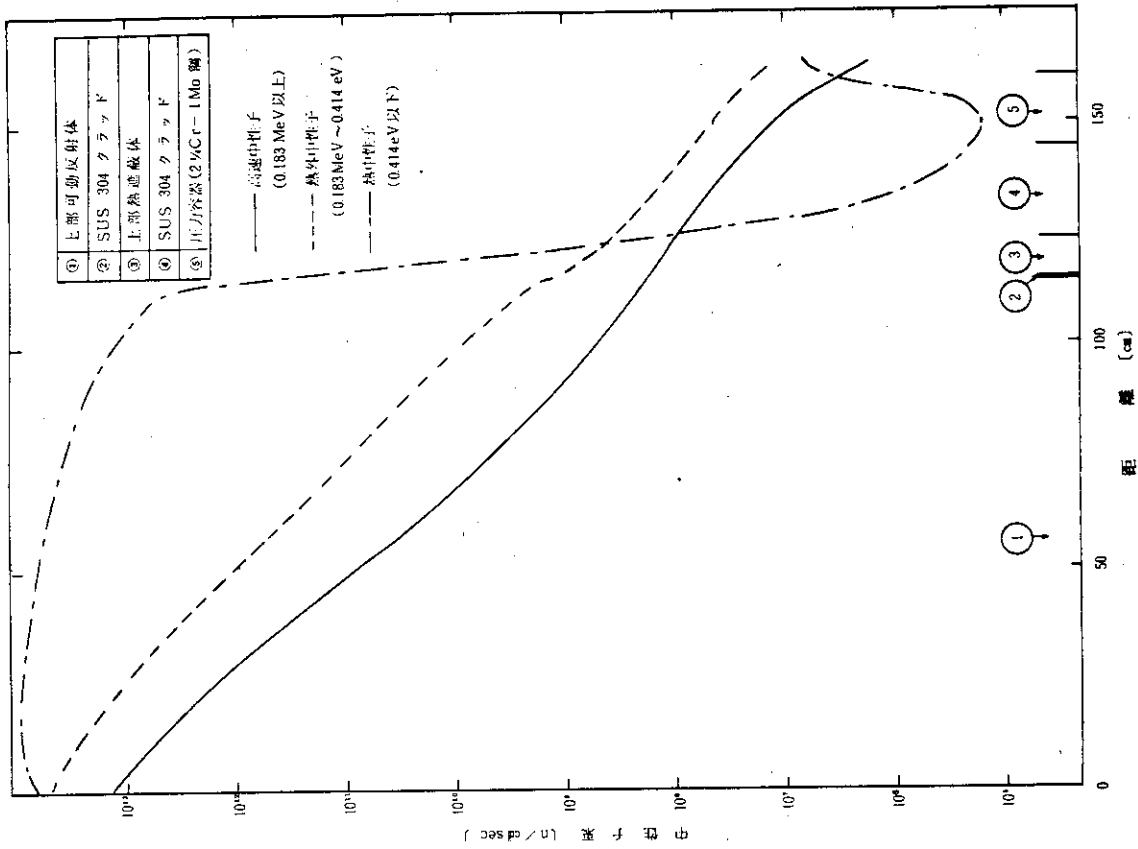


Fig. 3.6.4 MR-1炉心(第1燃焼サイクル末期)の上方方向中性子束分布 (MACHEATによる)

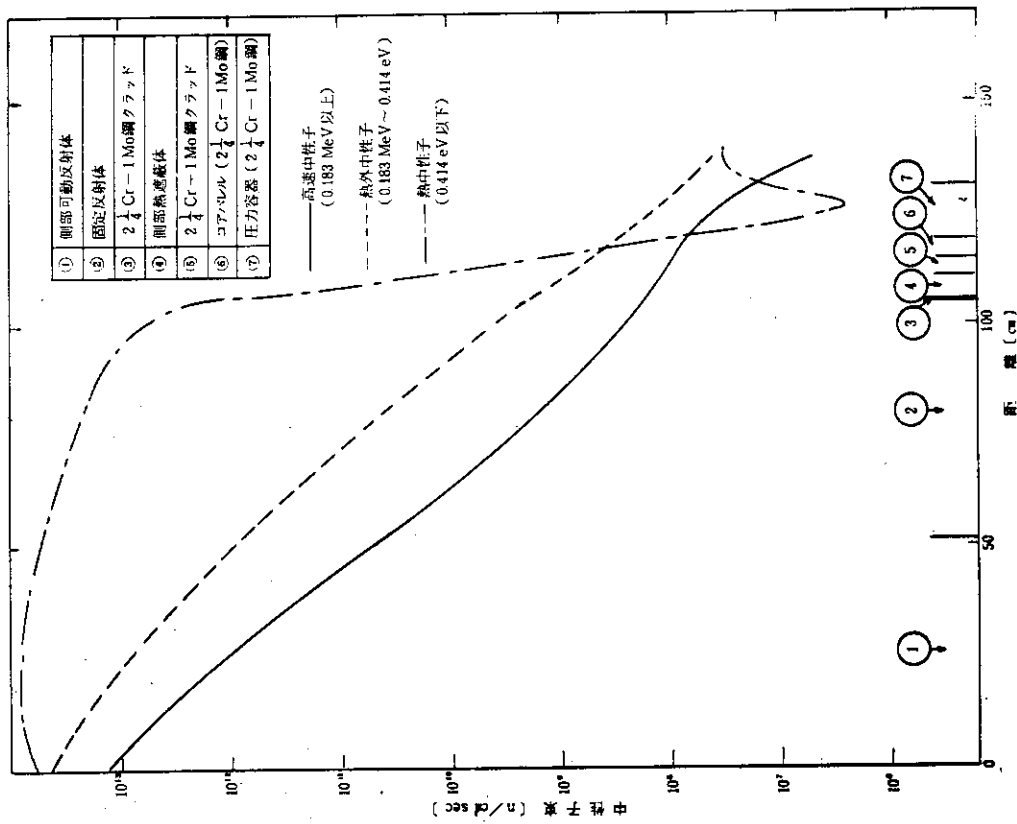


Fig. 3.6.3 MR-1炉心(第1燃焼サイクル末期)の径方向中性子束分布 (MACHEATによる)

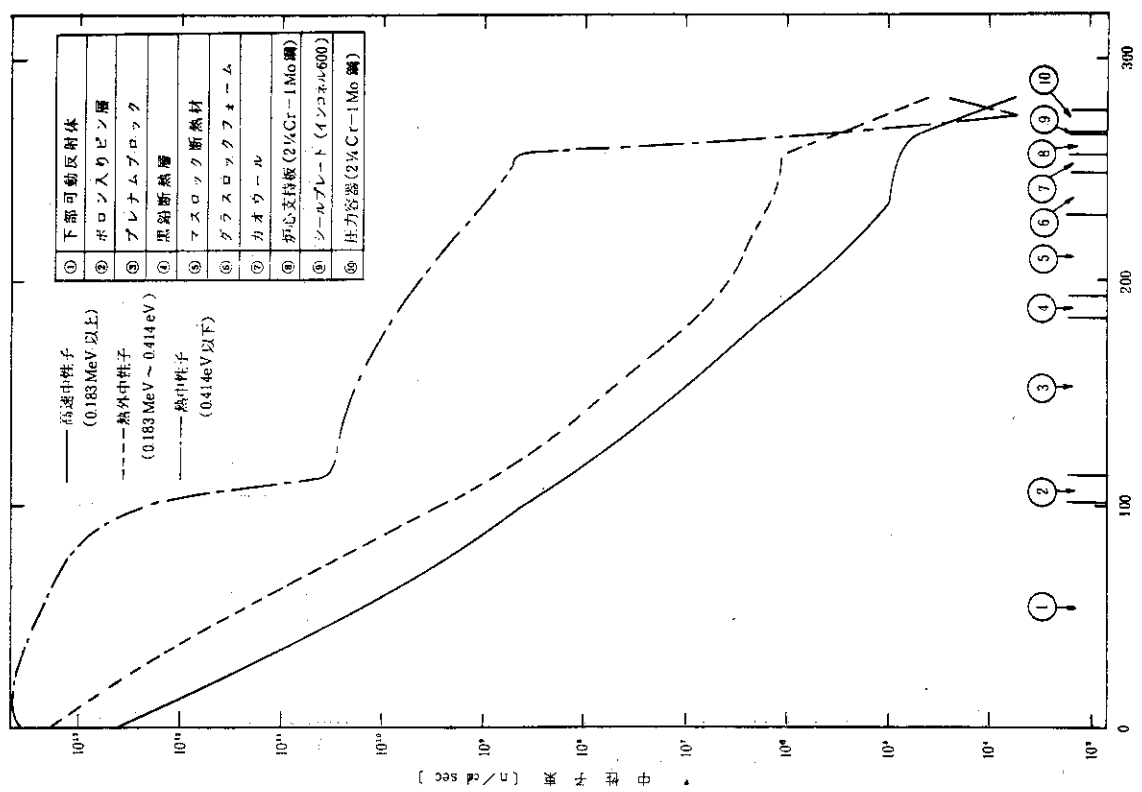


Fig. 3.6.5 MR-1 炉心 (初期炉心) の下方向中性子束分布 (MACHEATによる)

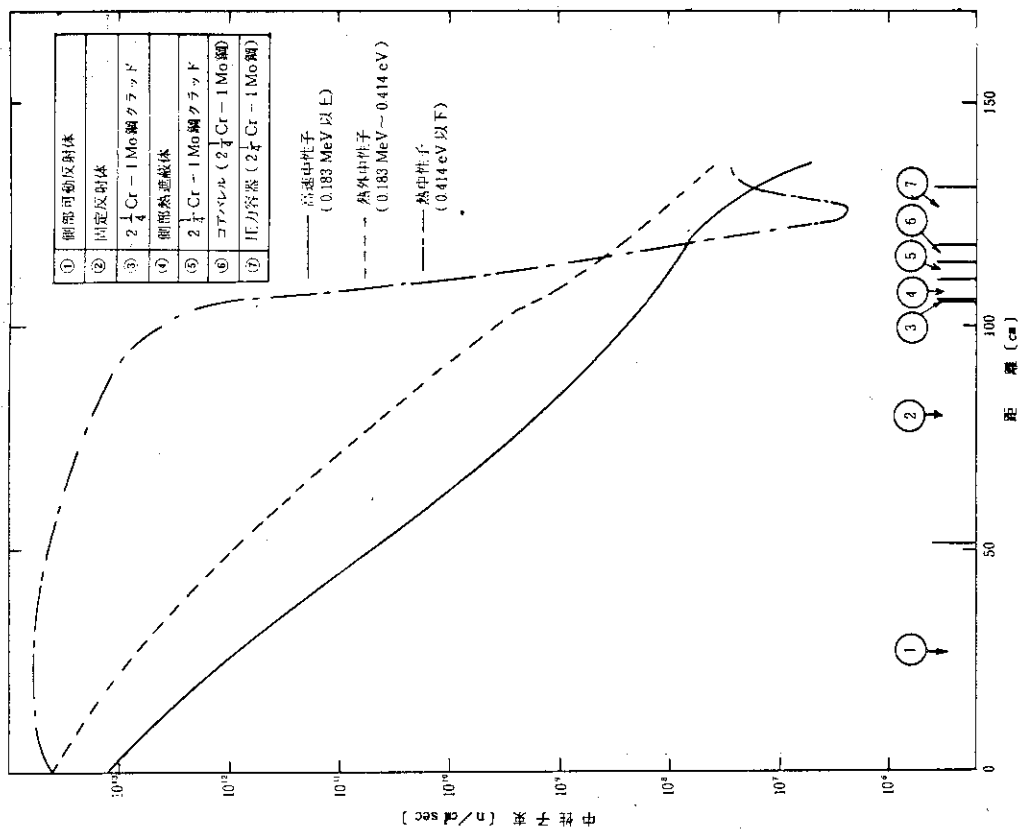


Fig. 3.6.6 SR-1 炉心 (第1 燃焼サイクル末期) の径方向中性子束分布 (MACHEATによる)



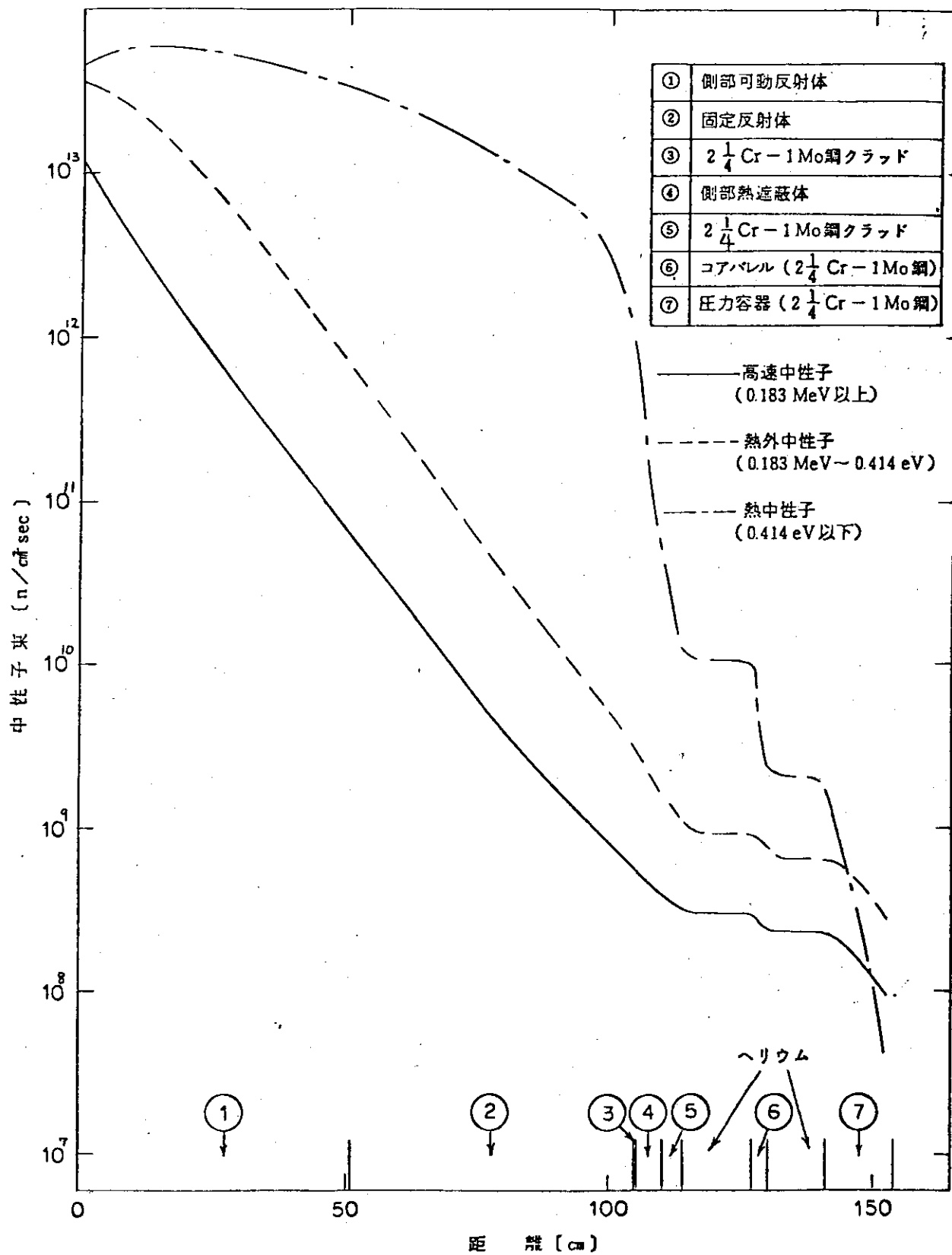


Fig. 3.6.7 MR-1炉心 (第1燃焼サイクル末期) の径方向中性子束分布 (ANISNによる)

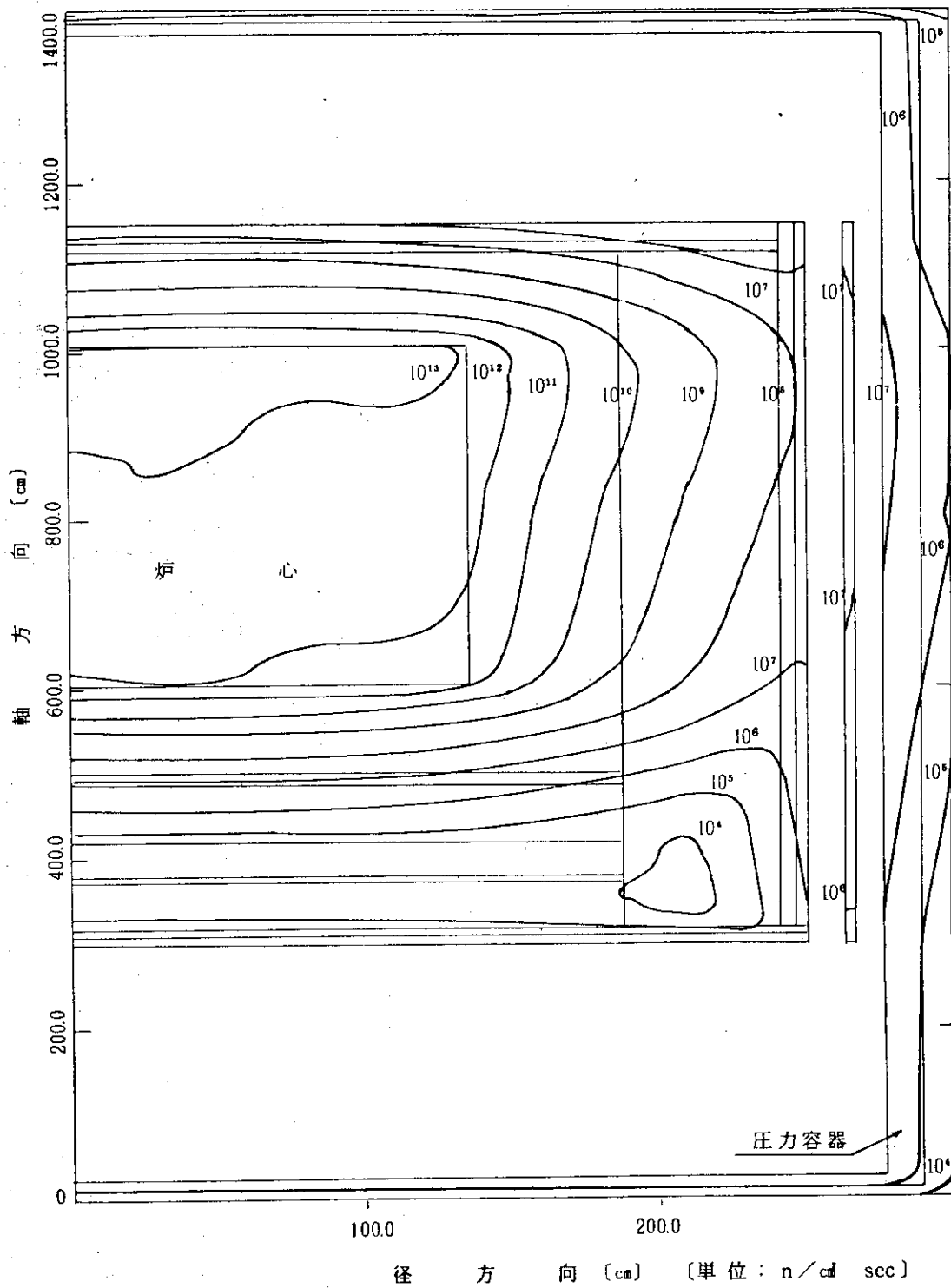


Fig. 3.6.8 MR-1 炉心 (第1 燃烧サイクル末期) の2次元高速中性子束分布  
(0.183MeV以上, RASC2Dによる)

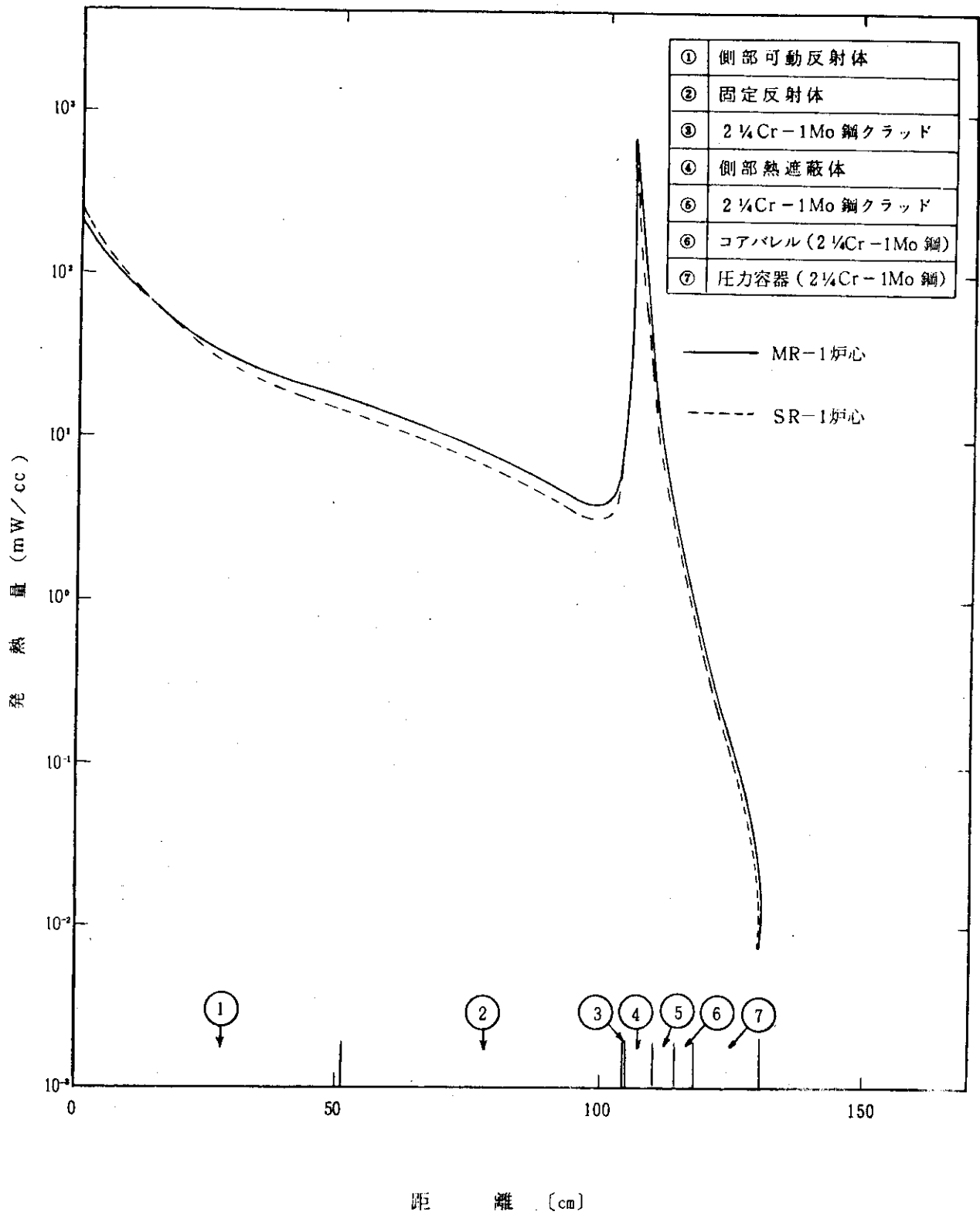


Fig. 3.6.9 径方向放射線発熱量分布 (第1 燃焼サイクル末期)

### 3.7 炉体構造の検討

#### 3.7.1 検討の目的

炉心を照射ベッドとして用いる場合、照射試験領域の出力密度および中性子束が著しく高く、また冷却材流量配分や領域出口冷却材温度も異なるために、第1次概念設計の炉体構造に対してどのような影響を与えるかを検討しておく必要がある。本節では炉体構造の中で重要な構造物を選定し熱・強度上の検討を行なった。

#### 3.7.2 炉床部断熱構造

炉床部断熱構造を出口管のある領域とない領域に分け、それをFig. 3.7.1 に示すような軸対称積層モデルとする。境界の熱伝達として、炉床部断熱ブロック上面では噴流衝突モデルの値を炉心支持板下面ではダイヤグリッドと炉心支持板の仮想流路を設けた場合の値を、出口管内は通常の管内流の値を用いる。

核熱計算から求めた冷却材の流量と温度の組合せを考慮して計算すると、この構造物の温度に対しては流量の影響がほとんど無視できることが明らかとなった。領域出口の冷却材温度の影響についてはFig. 3.7.2に示すように、マスロックやグラスロックフォームの温度に影響を与えるが、炉心支持板にはほとんど影響を与えない。また、この温度分布によるマスロックとグラスロックフォームの熱応力は  $10 \text{ kg/cm}^2$  以下と低い値になっている。

#### 3.7.3 サポートポスト下部構造

サポートポスト下部構造は、サポートポスト、黒鉛シート、CBN黒鉛、炭素レンガで構成され、炉心支持板の上に設けられている。炉床部断熱構造と同じ軸対称積層モデルによる温度解析を行なった。その結果は、3.7.2と同様に冷却材流量が温度分布に与える影響が極めて小さい。高温プレナム部の温度が  $1000^\circ\text{C}$  から  $1200^\circ\text{C}$  になっても、炉心支持板の温度が約  $6^\circ\text{C}$  上昇するにすぎないことが明らかとなった。

#### 3.7.4 炉体構造への要求事項

本解析ならびに遮蔽計算の結果から、炉心周辺部の熱的条件、中性子照射条件が、Mk-III炉心とほとんど変わらないので大きな問題がない。炉心上部のオリフィス構造については、照射試験領域の冷却材流量がドライバー領域に比べて大きく、また、燃焼に伴って正確なオリフィス調節を必要とするので注意しなければならない。

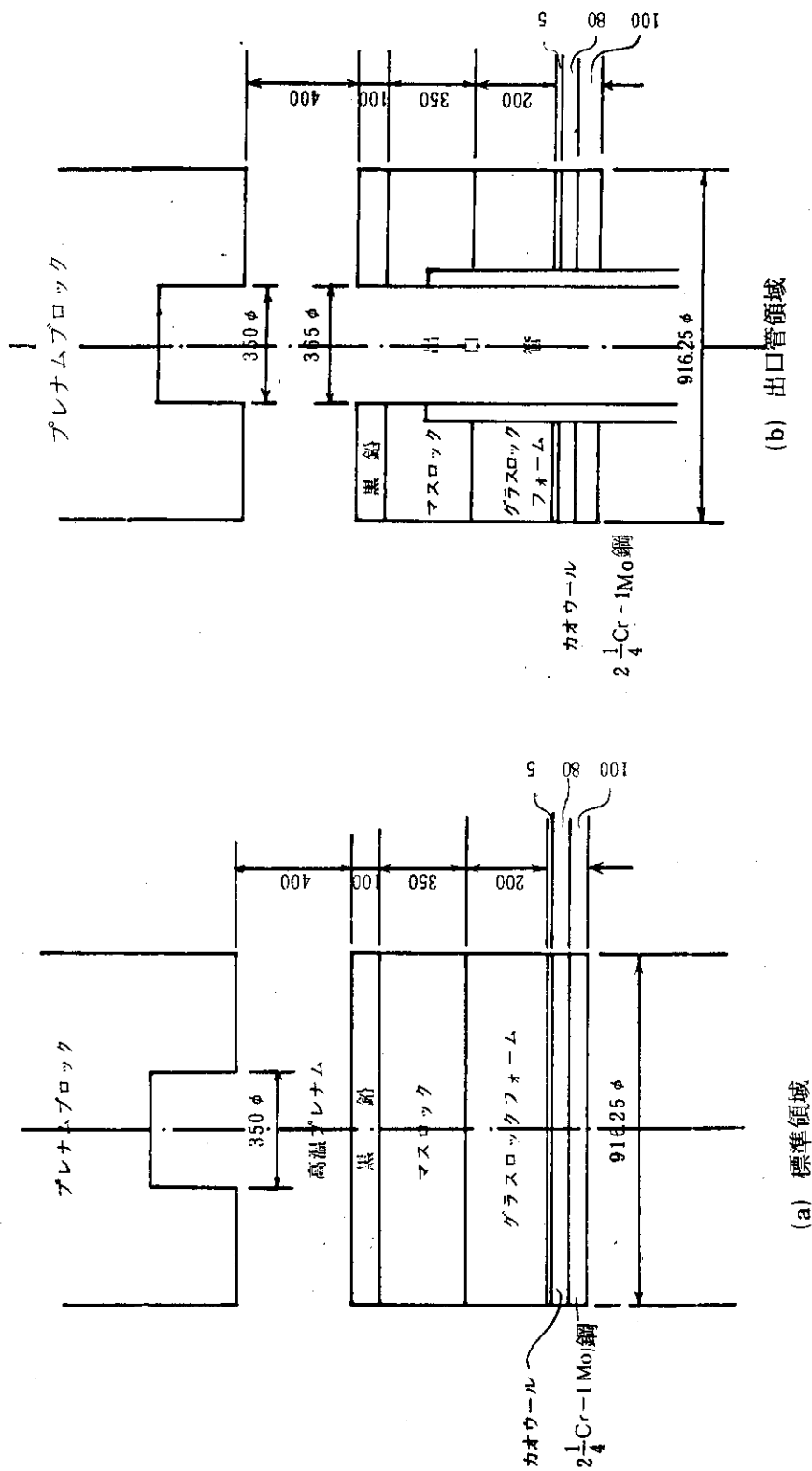


Fig. 3.7.1 炉床部温度解析用軸対称モデル

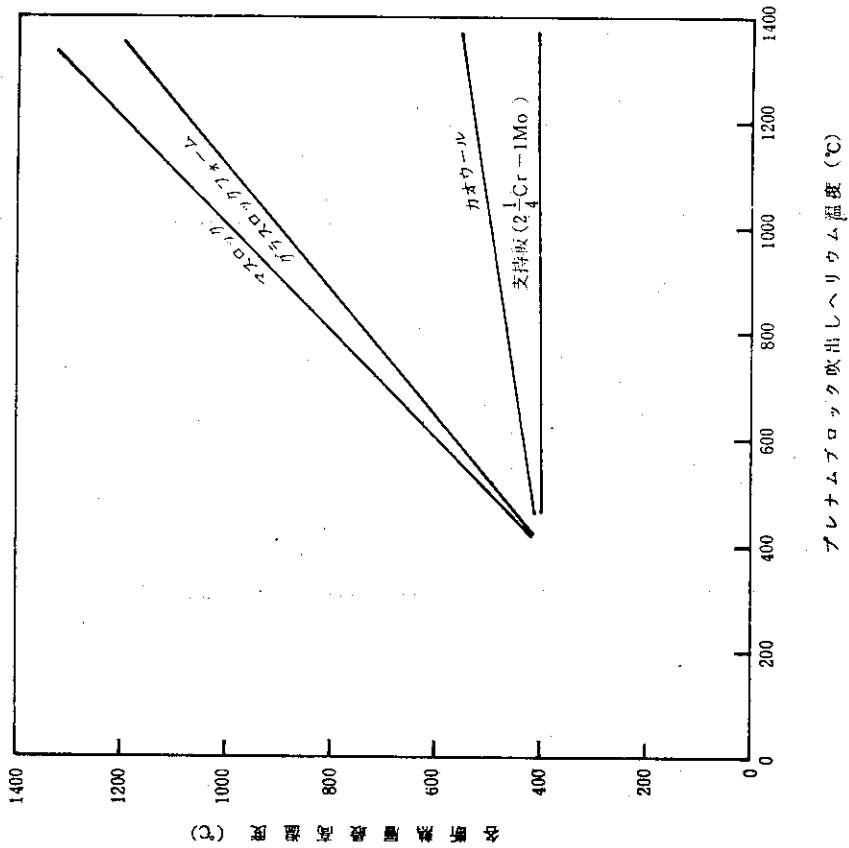
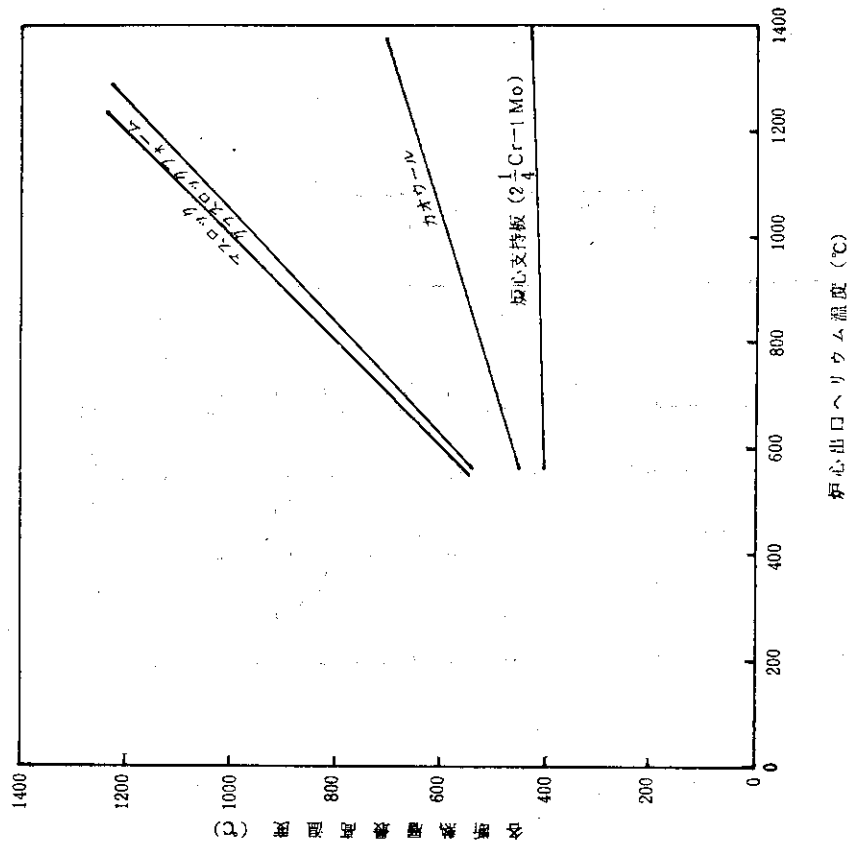


Fig. 3.7.2 炉床部の最高温度

### 3.8. 運転方式の検討

#### 3.8.1 検討の方法

炉心を核熱設計で検討したような範囲で使う場合には、現行の設計（第1次概念設計）の運転範囲および冷却システムの機器仕様に変更を与えることが考えられる。本節ではこれを定量的に検討し、また、その問題点を摘出する。

運転方式の検討手順は、Fig. 3.8.1に示すように大きく3つに分けられる。第1の詳細検討では、参考炉心を対象として初期および燃焼状態についてヒートバランスを計算し、現行設計の運転範囲内に納まるかまたは仕様の変更を伴うかを具体的に検討する。第2の定性検討では、核熱設計で検討されている初期状態全体について、詳細検討で必ずしも網羅されていない問題点の摘出を行なう。第3は上記の検討結果を、運転の可能性および設計仕様変更の影響の大きさの面から評価する。

#### 3.8.2 炉心型式

核熱特性の検討から、ドライバー領域の燃料型式、照射試験領域の燃料型式、熱出力及び出口温度の組合わせとして40ケースの初期炉心が考えられる。運転法の詳細検討では、Mk-III型ドライバー燃料参考炉心、セミピン型ドライバー燃料参考炉心を取り上げ、定量的な考察を行なう。

Mk-III型ドライバー燃料参考炉心では、照射試験領域の燃料型式が4通りありこの中で熱流動的にすぐれていると思われ、さらに初期状態および燃焼を通じて原子炉圧力損失が最大のものを含んだ試験領域の燃料型式であるセミピンタイプとマルチホールタイプの2ケースを選定した。流量調節方式については、試験領域の燃料がセミピンタイプの炉心では、燃焼中に原子炉出口温度を800℃から900℃に切り替えを行なう流量調節ケースCを選定した。また、試験領域の燃料がマルチホールタイプの炉心では、燃焼中に原子炉部圧力損失が最大になる流量調節ケースEを選定した。これらの炉心の仕様をTable 3.8.1に示す。

セミピン型ドライバー燃料参考炉心も試験領域の燃料型式が4通りある。この中で初期と燃焼中を通じて原子炉圧力損失が最大のものを含んだ型式セミピンタイプの流量調節ケースIを選定した。その仕様をTable 3.8.1に示す。

#### 3.8.3 Mk-III型ドライバー燃料参考炉心の検討

##### (1) ヒートバランスの計算結果

前節で選定したMk-III型ドライバー燃料参考炉心についてヒートバランスを計算すると、下記のようにTable 3.8.2に示す「現行設計での運転範囲」の値を越えた項目のあることが明らかとなった。

##### (a) Mk-III型ドライバー燃料参考炉心（試験領域の燃料=セミピンタイプ）初期状態

- |                 |            |                |
|-----------------|------------|----------------|
| (i) 循環機回転数      | : 約 150 %  | > 110 %        |
| (ii) 2重管外管内流速   | : 35.4 m/s | > 30 m/s (目安値) |
| (iii) 中間熱交換器内流速 | : 44.9 m/s | > 40 m/s (目安値) |
| (iv) 蒸気発生器内流速   | : 63.0 m/s | > 40 m/s (目安値) |

(b) Mk-III型ドライバー燃料参考炉心（試験領域の燃料＝マルチホールタイプ）流量調節ケースEの585日目の燃焼状態

上記(a)とはほぼ同じ結果である。

(2) 設計仕様の変更

もし、3.8.2節に示すものを照射ベツト炉心として運転する場合、変更すべき冷却系機器の寸法、諸元を下記に示す。

(a) 循環機

(i) 1次系主循環機

昇圧：1.46 kg/cm<sup>2</sup>を3.27 kg/cm<sup>2</sup>とする。

流量：7.96 kg/s/ループを11.89 kg/s/ループとする。

(ii) 2次系主循環機

昇圧：1.63 kg/cm<sup>2</sup>を約3.05 kg/cm<sup>2</sup>とする。

流量：7.65 kg/s/ループを約12.05 kg/s/ループとする。

ただし、この数値の変更は、循環機の配置に影響を与える程の寸法的変更はなく、歯車の組合せを変えることで解決できる。

(b) 2重管

呼び口径：32<sup>B</sup>を34<sup>B</sup>とする。

(c) 蒸気発生器

(i) 伝熱管寸法：25.4<sup>OD</sup> mm × 2.3<sup>t</sup> mm × 9,800<sup>L</sup> mmを31.8<sup>OD</sup> mm × 2.9<sup>t</sup> mm × 8,000<sup>L</sup> mmとする。

(ii) 本数：252本を292本とする。

(iii) シュラウド内径：1,130 mmを1,070 mmとする。

(iv) 伝熱面積：197.1 m<sup>2</sup>を233.0 m<sup>2</sup>とする。

(v) 配列/ピッチ：千鳥目配管/約62.5 mmを基盤目配管/50 mmとする。

なお、中間熱交換器については、蒸気発生器を上記のように変更することにより、中間熱交換器管内流速が約40 m/sとなり変更する必要がない。

以上の設計仕様変更後、全冷却系のヒートバランスを計算すると、Table 3.8.2の「現行設計での運転範囲」内に納まっていることがわかる。しかし、1次系主循環機出口温度が約390℃と高くなる。また、2次系主循環機出口温度が308℃と高くなる。そのために、これらの出口温度を「現行設計での運転範囲」内に納める方法を検討する。

1次系主循環機の出口温度に関しては、この循環機を出た低温ヘリウムが原子炉に流入するまでの間の2重管部で高温ヘリウムより熱を与えられ温度上昇する。設計仕様変更後の低温ヘリウム流量は約50%も増加したのに内管寸法を変更しないため、変更前と同じ温度上昇をもたらすほどの熱が伝わらない。原子炉入口温度を一定とすると、本循環機出口から原子炉入口までの温度差が小さいために、本循環機出口温度が高めにバランスすることになる。したがって、原子炉から3次系（水系）までのシステムおよび機器に与える影響を極力少なくしながらこの出口温度を385℃以下に保つには、本循環機出口側単管からの熱損失を現行設計より更に小さくすることが最も良い方法と考えられるが、このような設計は難しいので、



この制限値やその他の見直しが必要となろう。

2次系循環機の出口温度に関しては、冷却系全体のヒートバランス上から280℃を越したが、3次系（水系）の流量、圧力を制御することによって、この値以下にすることは可能である。ただし、蒸気発生器の伝熱管の差圧などの再検討が必要である。

さらに、この仕様変更によるMk-III炉心としての運転特性を計算すると、2次系の主循環機の出口温度が280℃より1℃上昇しただけで問題がない。

(3) 燃焼に伴うヒートバランスの変化

前記(2)の設計仕様変更によるMk-III型ドライバー燃料参考炉心の代表的な燃焼日についてヒートバランスを計算すると、「現行設計での運転範囲」を越える部分は、1次および2次主循環機の出口温度であり、まとめて下記に示す。

(a) Mk-III型ドライバー燃料参考炉心（試験領域の燃料=セミピンタイプ）

流量調節ケースCの場合

運転ケース	炉心状態	主循環機出口温度(℃)	
		1次系	2次系
1	初期状態	390	308
2	燃焼日：Xe-Sm 蓄積時	390	305
3	“：585日目（原子炉出口温度800℃）	390	306
4	“：585日目（ “ 900℃）	387	289
5	“：1035日目	387	289

(b) Mk-III型ドライバー燃料参考炉心（試験領域の燃料=マルチホールタイプ）

流量調節ケースEの場合

運転ケース	炉心状態	主循環機出口温度(℃)	
		1次系	2次系
1	初期状態	390	304
2	燃焼日：Xe-Sm 蓄積時	390	305
3	“：585日目	390	307
4	“：1035日目	390	306

これらの結果から、燃焼状態より(a)の初期状態が最も高い値となっており、「現行設計での運転範囲」内に納める検討は(2)項の初期状態に含まれてしまうことが明らかである。

3.8.4 セミピン型ドライバー燃料参考炉心の検討

前節3.8.2で選定したセミピン型ドライバー燃料参考炉心（試験領域の燃料=セミピンタイプ）の流量調節ケースI.について、1150日目の各運転ケースのヒートバランスの計算を行なった。

このヒートバランスから、初期炉心の状態については、1次系および2次系循環機の回転数が

定格の1～2%増しとなるが、これはTable 3.8.2に示す「現行設計での運転範囲」内に納まっている。また、各燃焼日ともに中間熱交換器2次側出口温度が930℃を少し上まわっているが、3次系（水系）の流量を増すことによって「現行設計での運転範囲」内に納めることは可能であろう。その他については、全て現行設計仕様のままで問題はない。

### 3.8.5 その他の初期状態の検討

その他の初期状態の定性的な検討として、50 MW<sub>t</sub> 炉心の中で最も圧力損失の大きいセミピン型ドライバー燃料50 MW<sub>t</sub> - 800℃初期状態（試験領域の燃料=セミピンタイプ）と、60 MW<sub>t</sub> 炉心の中で最も圧力損失の大きいものを含むセミピン型ドライバー燃料60 MW<sub>t</sub> - 800℃初期状態を取り上げた。

#### (1) セミピン型ドライバー燃料50 MW<sub>t</sub> - 800℃初期状態（試験領域の燃料=セミピンタイプ）

この初期状態のみが、50 MW<sub>t</sub> 炉心の中で参考炉心で取り上げたものより圧力損失が大きい。原子炉部の圧力損失が2.38 kg/cm<sup>2</sup>であるので、1次系全体の圧力損失を3.4 kg/cm<sup>2</sup>と考えると1次系の主循環機の仕様変更は、Mk-Ⅲ型ドライバー燃料参考炉心の場合と同じ程度ですみ、その他の条件もMk-Ⅲ型ドライバー燃料参考炉心と同程度の設計仕様変更により運転可能であると考えられる。

#### (2) セミピン型ドライバー燃料60 MW<sub>t</sub> - 800℃初期状態（試験領域の燃料=セミピン、中空、

円環タイプ）原子炉出力が60 MW<sub>t</sub> となることにより中間熱交換器および蒸気発生器といった熱交換器類の伝熱面積が不足し、循環機の流量も110%を越えるので、これらの変更が必要となる。また、原子炉出口冷却機温度を800℃とするために流量を増加させる必要があり、循環機の流量はさらに不足し、単管および2重管の内側および外側の流速も「現行設計での運転範囲」を越えてしまうので、これらの寸法変更が必要となる。

また、試験領域の燃料=中空タイプのように原子炉部の圧力損失が2.79 kg/cm<sup>2</sup>、試験領域の燃料=セミピンタイプのように、4.03 kg/cm<sup>2</sup>と大きくなると、循環機の段数増加が必要となり、また、2重管での差圧も4 kg/cm<sup>2</sup>を越えてしまうのでこの変更も必要になる。

これらの設計仕様の変更を機器毎に整理すると以下の通りとなる

#### (i) 中間熱交換器および蒸気発生器の寸法

#### (ii) 循環機の仕様

循環機の設計条件とその主要諸元をTable 3.8.3に示す。

#### (iii) 単管および2重管の寸法

以上の変更は、配管など全体システムへの大きな影響を与えることになると考えられる。

Table 3.8.1 詳細検討のための炉心型式

ドライバー燃料型式	Mk-III型ドライバー燃料参考炉心		セミピン型ドライバー燃料参考炉心
照射試験燃料の型式	セミピンタイプ	マルチホールタイプ	セミピンタイプ
流量調節ケース	C	E	I
原子炉熱出力 (MW <sub>t</sub> )	50	50	50
原子炉出口温度 (°C)	800 / 900	800	1000
原子炉部圧力損失 (kg/cm <sup>2</sup> )	2.25 ~ 1.23	2.15 ~ 1.64	0.84 ~ 0.58
1次系流量 (kg/s/ループ)	11.89 / 9.54	11.89	7.96

Table 3.8.2 現行設計での運転範囲

原子炉

冷却材流量 30 ~ 110 %  
 出口ヘリウム温度 ≤ 1000 °C

1次循環機

回転数 10 ~ 110 %  
 (流量) (特性カーブによる)  
 (昇圧) ( " )  
 出口ヘリウム温度 ≤ 385 °C

2次循環機

回転数 10 ~ 110 %  
 (流量) (特性カーブによる)  
 (昇圧) ( " )  
 出口ヘリウム温度 ≤ 280 °C

IHX 2次ヘリウム出口温度 ≤ 930 °C

2重管差圧 ≤ 4 kg/cm<sup>2</sup>

配管内流速

2重管内管 ≤ 50 m/sec \*  
 " 外管 ≤ 30 m/sec \*  
 単管 ≤ 40 m/sec \*  
 IHX管内流速 ≤ 40 m/sec \*  
 SG管内流速 ≤ 40 m/sec \*

\* 目安値である。

Table 3.8.3 セミピン型ドライバー燃料, 60 MWt-800°C初期  
に必要な循環機の条件

項 目	単 位	照射試験の燃料 =円環タイプ	照射試験の燃料 =中空タイプ	照射試験の燃料 =セミピンタイプ
温 度 (入口)	°C	約 360	約 353	約 345
圧 力 (入口/出口)	ata/ata	38.99 / 42.56	38.19 / 42.56	36.96 / 42.56
差 圧	at	3.57	4.37	5.60
重 量 流 量	kg/s	14.271	14.271	14.271
流 体	—	ヘリウムガス	ヘリウムガス	ヘリウムガス
(上記仕様に基づく循環機の主要諸元)				
型 式	—	遠心式	遠心式	遠心式
段 数	—	3	4	5
羽 根 口 径	mm	1,000	1,000	1,000
回 転 数	rpm	5,320	5,110	5,200
断 熱 効 率	%	75	75	75

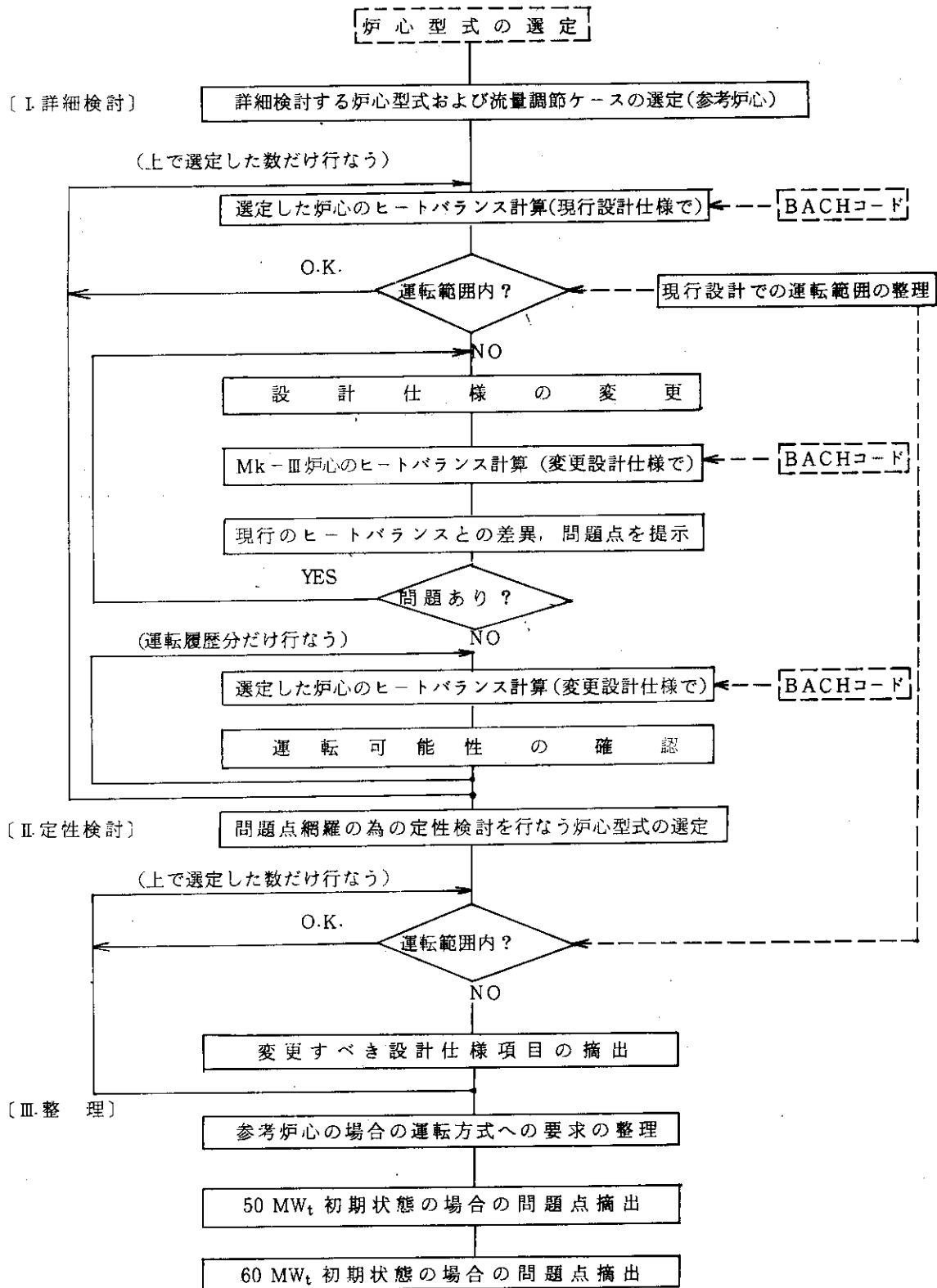


Fig. 3.8.1. 運転法の検討手順

#### 4. おわりに

多目的高温ガス実験炉を照射ベッドとして使用することの可能性と原子炉構造・運転法に対する要求が明らかにされ、照射用炉心としての性能が把握された。今後、実験炉の炉心概念を決定する場合に、これらの検討結果を反映させるとともに、大型炉の照射条件や燃料体概念をかため、照射用炉心としての使用計画を踏まえて、詳細な照射用炉心の特性検討を含む照射試験計画を作っていくべきである。

さらに、実験炉で照射ベッドとしての機能を十分発揮させるためには試験燃料体の照射状態を計測できることが望ましく、そのための計装燃料使用の可能性を検討することも重要である。

最後に、本作業の初期の段階でご支援をいただいた青地哲男前多目的炉設計研究室長に感謝いたします。