

JAERI-M

6 8 9 4

多目的高温ガス実験炉参考炉心Mark-III
の炉容器内流量配分の検討

1977年1月

佐藤貞夫・荒井長利・宮本喜晟・平野光将

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

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

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

多目的高温ガス実験炉参考炉心 Mark-III
の炉容器内流量配分の検討

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部

佐藤貞夫・荒井長利・宮本喜晟・平野光将

(1976年12月24日受理)

多目的高温ガス実験炉の参考炉心 Mark-III の炉心流量設定に関連して、制御棒および炉心周辺構造物の冷却のための必要な流量（バイパス流量）を見いだすため、これらの構造物に対する温度解析を行った。

この結果、Mark-III 炉心でのバイパス流量は、ともに、原子炉全流量の 4 %程度、合計 8 %、でよいことがわかった。Mark-III 炉心の熱流動設計では、原子炉全流量の 10 %をバイパス流量として設定しているが、本解析によってその設定がほぼ妥当であることが確認された。

Study on Core Flow Distribution of the Reference Core Design
Mark-III of Experimental Multi-purpose VHTR

Sadao SATOH, Taketoshi ARAI

Yoshiaki MIYAMOTO, Mitsumasa HIRANO

Division of Power Reactor Projects, Tokai, JAERI

(Received December 24, 1976)

Concerning the coolant flow distribution between fuel channels and other flow paths in the core, designated as Reference Core Mark-III of the Multi-purpose Experimental Very High Temperature Reactor, thermal analysis has been made of the control rods and other steel structures around the core to find the coolant flow rates(bypass flow) necessary to cool them to their safe operating temperatures.

Calculations showed that adequate cooling could be achieved in the Mark-III Core by the bypass flow of 8% of the total reactor coolant flow, 4% each for the control-rod channels and for other structures. The thermal and coolant flow design bases, including the assumption of a 10% bypass flow, were thus confirmed to first approximation.

目 次

1. まえがき	1
1.1 概 要	1
1.2 Mark-III 炉心の炉体構造	3
2. 制御棒の冷却	9
2.1 Mark-III 炉心を想定した制御棒の冷却検討	9
2.1.1 解析方法	9
2.1.2 解析結果	11
2.2 Mark-III 炉心を対象とした制御棒の冷却検討	29
2.2.1 解析方法	29
2.2.2 結果と検討	29
3. 炉容器内構造物の冷却	36
3.1 Mark-III 炉心を想定した炉容器内構造物の冷却検討	36
3.1.1 計算条件	36
3.1.2 結果と検討	37
3.2 Mark-III 炉心を対象とした炉容器内構造物の冷却検討	45
3.2.1 計算条件	45
3.2.2 結果と検討	47
4. まとめ	54
5. あとがき	56
付録A ホウ素入り黒鉛の製造例と実験範囲	57
付録B 制御棒アセンブリの設計例	58
付録C 制御棒アセンブリの構造例	59

1. まえがき

1.1 概 要

現在原研で研究開発を進めている多目的高温ガス実験炉は、予備設計^{*1)*2)}、基本概念設計^{*3)}を経て、第1次概念設計^{*4)}へと進展してきている。この間、これら実験プラントの設計に先立って、炉心の基本諸元を設定するための参考設計 Mark - I, Mrak - II および Mark - III の設計作業が行われた。これらの炉心設計における主要諸元の比較を表1.1に示す。

Mark - III 炉心の設計作業は、第1次概念設計をメーカーに発注するに当り、その仕様の決定に関連して行った極めて広範囲なものである。すなわち、第1次概念設計のベースとなった Mark - III 炉心は、同じく基本概念設計のベースとなった Mark - I, II 炉心に対し、Ⅰ) 炉心冷却材のレイノルズ数を高める、Ⅱ) 反応度炉停止余裕を増す、Ⅲ) 炉外中性子計測を可能にする、Ⅳ) 炉心と原子炉容器を含む周辺構造物との間の構造上の整合をはかる、の諸点について改良を加えたものである。

これらの改良を計るための検討は以下のような項目に分けて行われた。^{*5)}

- Ⅰ) 炉容器内全体構造の検討
- Ⅱ) Mark - III 炉心を想定した炉心特定サーベイ
- Ⅲ) Mark - III 炉心のための設計指針と基準の設定
- Ⅳ) Mark - III 炉心の諸元選定
- Ⅴ) 核熱燃料特性の解析

本報告書は、参考炉心 Mark - III のこれらの設計作業の一つとして、

- Ⅰ) 制御棒の冷却
- Ⅱ) 炉容器内構造物の冷却

の2項目に関する検討結果について述べるものである。この検討は、上記 Mark - III 設計の作業経過の中で、炉心設計基準の一つである炉心の流量設定に関して、燃料棒の冷却以外に必要な冷却材（本報ではこれをバイパス流量と定義する）としてどの程度の流量を想定すればよいかという、バイパス流量の設定を目的に行ったものである。この検討は次のような2段階に分けて行われた。

第1の段階の検討は、Mark - III 炉心の形状はほぼ選定されたが、出力分布（燃料と制御棒）が解析されない段階で行われたもので、Mark - I または Mark - II 炉心における出力分布を参考として、Mark - III 炉心を想定した制御棒および炉容器内構造物の温度解析（パラメータサーベイ）によって、これらの冷却に必要な流量の予測を行った。

*1) 動力炉開発管理室：多目的高温ガス実験炉予備設計、JAERI-memo 4419(公開) (1971)

*2) 動力炉開発管理室：同上第2次予備設計 (1972)

*3) 下川他：同上基本概念設計、JAERI-M 6141 (1975)

*4) 青地他：同上第1次概念設計、JAERI-M 6845 (1976)

*5) 青地他：多目的高温ガス実験炉の炉心参考設計 Mark - III, JAERI-M 6895 (1976)

表 1.1 多目的高温ガス実験炉の炉心主要諸元

主要諸元	炉心設計例 (設計年度)	予備設計 (45-47)	基 本 概 念 設 計			第1次概念設計 Mark - II (50)
			Mark - I (47-48)	Mark - II (48-49)	Mark - III (49-50)	
炉心等価直径 D (m)	2.34	2.90	2.69	2.69	2.69	2.69
炉心有効高さ H (m)	2.50	3.00	3.50	4.00	4.00	4.00
H / D 比	1.07	1.03	1.30	1.50	1.50	1.50
圧力容器内径 (m)	5.30	5.85	5.85	5.85	5.85	5.51
燃料カラム数	55	85	73	73	73	73
燃料体積重段数	5	6	7	7	7	7
冷却チャンネル数	1833	2787	1251	1251	1251	813
制御棒組数	19	19	19	19	19	19
炉心内 反射体内	7	13	7	7	7	7
領域別燃料装荷 径方向	1.2	6	12	12	12	12
軸方向	— 標	— 標	— 標	— 標	— 標	— 標
冷却材流量調節領域						
燃料棒型式						
ブロック平径 (mm)						
燃料棒本数／ブロック 燃料棒外径 (mm)	34 (標準), 24 (CR孔付)	36 (標準) / 18 (標準) 24 (CR孔付) / 6 (CR孔付)	18 (標準), 9 (CR孔付)	18 (標準), 9 (CR孔付)	18 (標準), 9 (CR孔付)	12 (標準), 3 (CR孔付)
冷却材路幅 (mm)	34	32 / 46	45	45	46	46
平均出力密度	1.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
燃料最高温度 (ミナル) (°C)	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
レイノルズ数 (炉心出口) (最低／平均／最高)	1290	1280	1290	1290	1290	1290
平均燃焼度 (GWD/T-HM)	1540 / 3000 / 5300	1200 / 2100 / 4400	2600 / 3800 / 4800	2600 / 3800 / 4800	2600 / 3800 / 4800	3580 / 5328 / 7790
制御棒反応度値 (平均／最大: ΔK_{eff} , 1相当)	34 (6w/o), 47 (8w/o)	37 (6 w/o)	30 (5 w/o)	30 (5 w/o)	30 (5 w/o)	21 (6w/o), 22 (4w/o), 6 (2w/o)
	0.021 / —	0.016 / —	0.014 / ~ 0.06	0.014 / ~ 0.06	0.017 / ~ 0.11	

第2の段階の検討は、Mark-III炉心の核熱特性が明らかとなった段階で行ったもので、この段階ではバイパス流量として10%を設定しているが、この10%設定量が適当なものであるかの考察を行った。

制御棒および炉容器構造物の冷却に必要な流量を選定する場合、これらの構造物の中で特に温度上問題となる構造物あるいは最も高い温度を示す鋼構造物の暫定的な設計限界温度（評価温度）を設定して、この温度以下ならば、温度的観点からその構造的健全性は確保され得るものと仮定した。

以下に、用語の定義も含めて以後に述べる解析結果の理解を容易にするために、第1次概念設計の炉体構造について説明する。

1.2 Mark-III炉心の炉体構造

Mark-III炉心の炉心構成として原子炉の垂直断面と水平断面を図1.1と図1.2に示す。また、燃料体の構造概念を図1.3に示す。炉心部は73の燃料カラムからなり、軸方向には燃料ブロックが7段積みされている。この炉心部のまわりには、半径方向の配置として、内側から順に可動反射体、固定反射体、熱遮蔽体、コアバレル、そして最外層に原子炉圧力容器が取囲み、また、上下方向には可動反射体を配置している。この可動反射体の上方には、熱遮蔽体を兼ね備えたオリフィス装置が、また、下方には、高温プレナム部をはさんでプレナムブロックと断熱層、さらにその下にサポートプレートとダイヤグリッドとが配置されている。

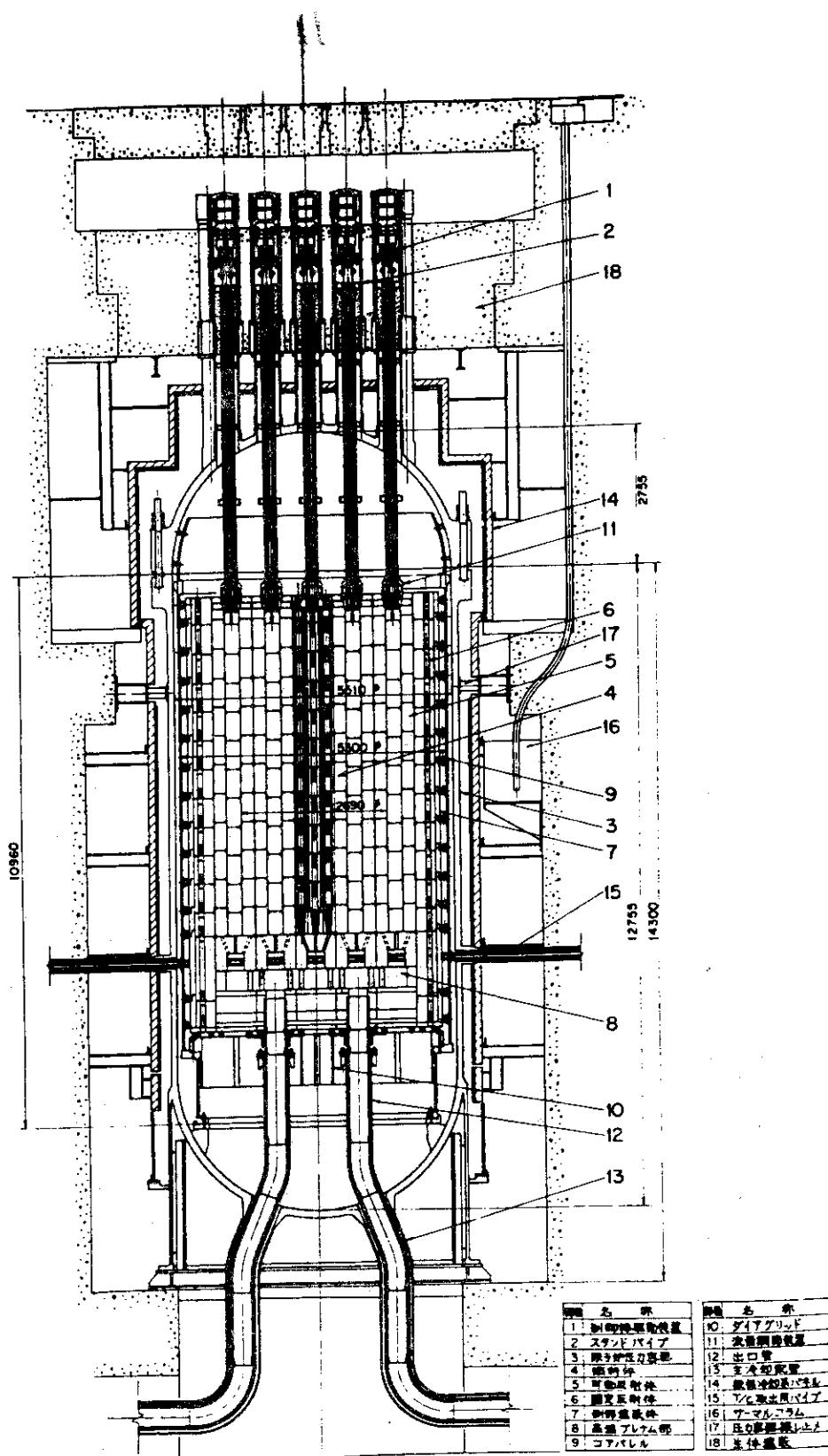
燃料体には、燃料棒と可燃性毒物細棒を挿入したもの（標準燃料体）と制御棒挿入孔および後備停止系ボロン球の落下挿入孔のついたもの（制御棒挿入用燃料体）の2種類があるが、いずれも平径299mm、長さ570mmの六角柱状である。標準燃料体には、孔径50mmの冷却チャンネルが12個設けられ、その中に外径46mmの中空型燃料棒が挿入されている。ほかに、1～3本の外径8mmの可燃性毒物細棒がコーナ領域に封入される。これに対して、制御棒挿入用燃料体には、外径104mmの制御棒挿入孔2個と後備停止用ボロン球落下孔1個が設けられているほか、標準燃料体に挿入される燃料棒と同一の燃料棒が3本挿入されるようになっている。

制御棒は炉心上部から燃料領域に14本（7対）、黒鉛反射体領域に24本（12対）、計38本挿入される。この制御棒は、吸収体としてB₄Cと黒鉛粉末の焼結体を、外管（被覆管）としてハステロイ-Xを採用し、吸収体の内径55mm、外径85mm、有効長4500mmの寸法からなる軸方向14分割の2重円筒ベンド型である。その構造を図1.4に示す。

冷却材ヘリウムは、2重配管の外管から炉内に入り、原子炉下部構造物、圧力容器、コアバレルなどの炉心周辺構造物を冷却しながら原子炉上部プレナムに至る。その後、大部分の冷却材は反射体上部に設けられているオリフィス装置により流量調節をうけ、炉心燃料体内の冷却チャンネルに分流されて下降しながら炉心を冷却する。一部は制御棒チャンネル、可動反射体間のブロック間隙を通り下降する。これらの冷却材は下部プレナムに集められ、ここでミキシングして冷却材出口管を通って1次系2重配管へと導かれる。なお、流量の領域別調節はクカラム単位に行われる。

これらの炉容器内を流れる冷却材の流量配分は、第1次概念設計では次のようにしている。1次系配管から炉容器内下部に入った冷却材を2分し、1つは炉容器とコアバレル外側面にはさま

れた環状流路を上向きに流れ上部プレナムに至る流れとする。もう一方は下部プレナムからダイヤグリッド中心部に流入し、後方向に流れを変えてサポートプレートとダイヤグリッドを冷却しながら周辺部に至り、ついでコアバレル内側面と熱遮蔽体にはさまれた環状流路、固定反射体の中の拘束棒チャンネルおよび固定反射体と熱遮蔽体の隙間を上方に流れ上部プレナムに至るものとする。上部プレナムからの流れは、下向流となり、燃料チャンネル、制御棒チャンネルおよびブロック間隙間を流れて高温プレナムに至る。この炉容器内流量配分において、本報で検討の対象としているバイパス流量とは、制御棒チャンネルを流れる冷却材流量と反射体領域のブロック間ギャップを流れる冷却材流量とを言う。なお、バイパス流量の中には炉心内における燃料カラム間ギャップを流れる冷却材流量もあるが、これは全体のバイパス流量の中で考慮されるものとする。



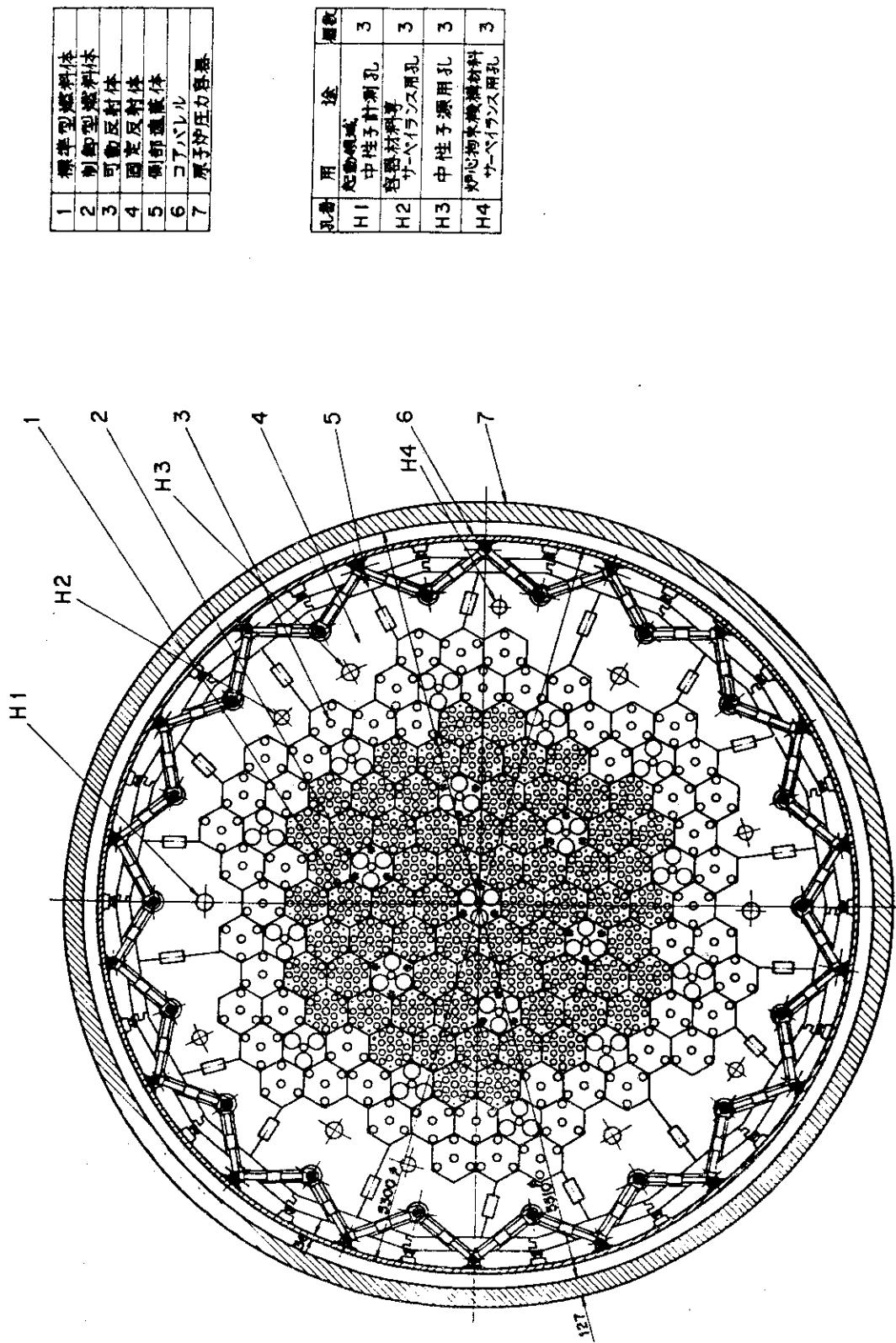


図 1.2 多目的高温ガス実験炉の炉体構造(水平断面、第1次概念設計)

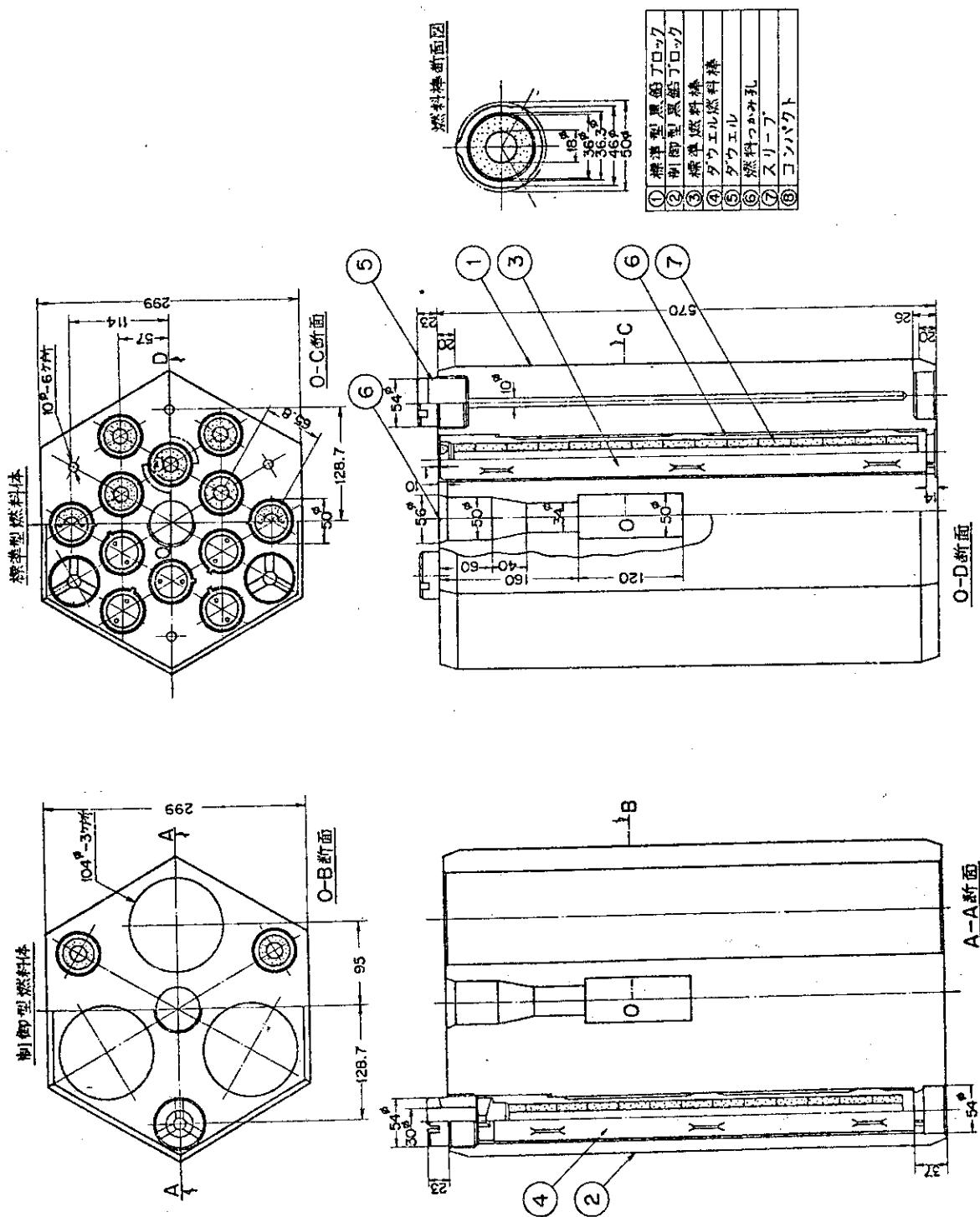


図 1.3 多目的高温ガス実験炉の燃料体（第1次概念設計）

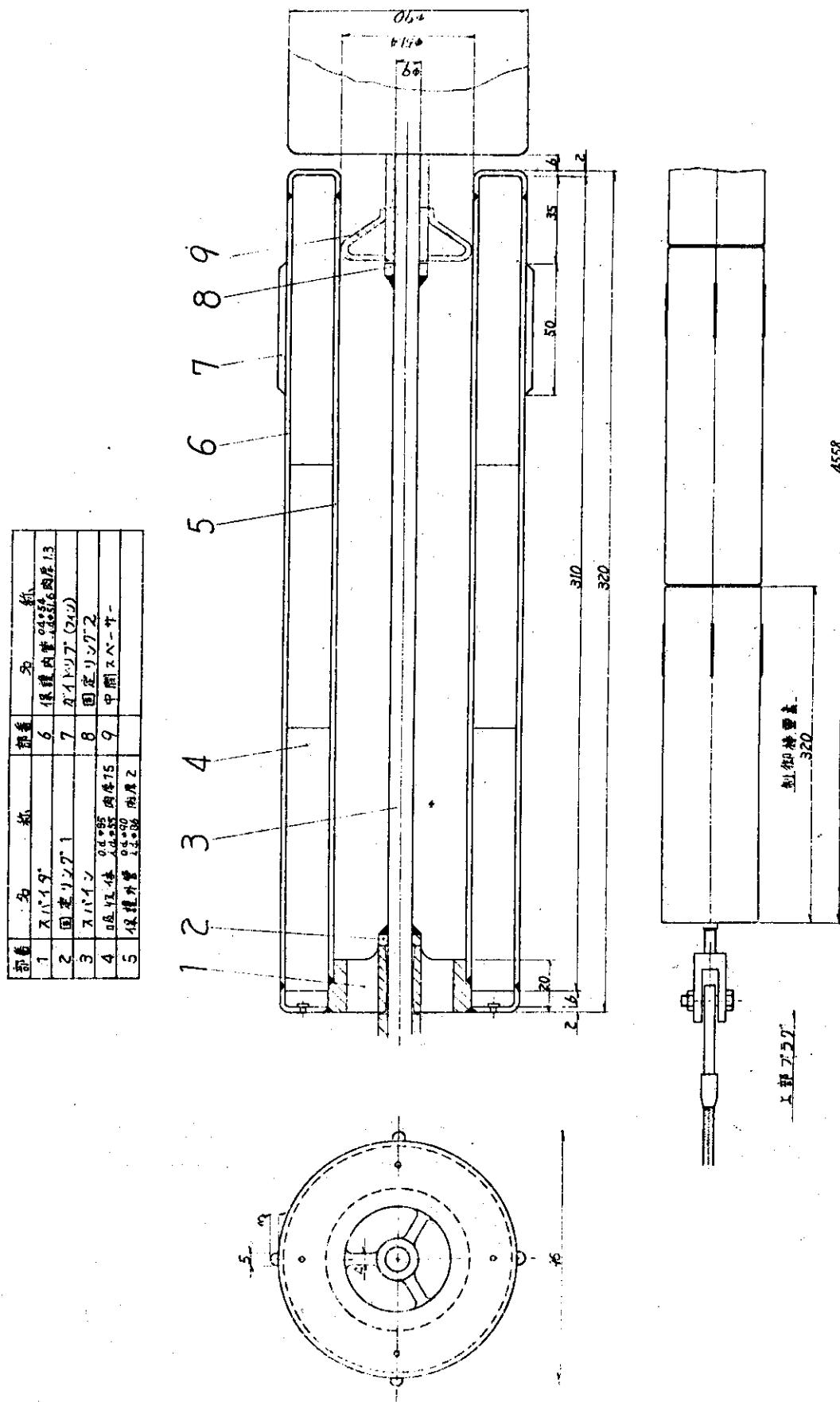


図 1.4 多目的高温ガス実験炉の制御棒の構造（第1次概念設計）

2. 制御棒の冷却

第1章で説明したように、制御棒は全部で38本あり、このうち14本が炉心内のものである。制御棒の被覆管は炉心内で高温にさらされる恐れのある金属材料である。しかし、その構造的健全性の点から余り高温度であることは好ましくない。冷却の必要性もここにある訳で、本章ではこの冷却に必要な流量の設定を目的とした温度解析結果について述べる。はじめに、Mark-III炉心を想定した制御棒の冷却検討について述べ、次いで、Mark-III炉心を対象とした制御棒の冷却検討について述べる。解析したのは、制御棒1本である。したがって、本章における制御棒の冷却に必要な流量（全流量）とは、全制御棒チャンネルに同一の冷却材流量を流すことを想定してのものである。

なお、本Mark-III炉心の制御棒は、材料、構造形式など種々の点からも検討されている。これについての詳細な説明は本書の域を出るため省略するが、参考として、多目的高温ガス実験炉の予備設計から第1次概念設計までの制御棒の設計例、GA社設計のSummit炉の制御棒アセンブリーの設計例と構造例、および制御棒の吸収材として用いられるホウ素入り黒鉛コンパクトの製造例と実験範囲、とを付録A～Cに示す。

2.1 Mark-III炉心を想定した制御棒の冷却検討

Mark-III炉心の構造諸元ならびに炉心設計基準の設定段階で行ったMark-III想定^{*1)}の制御棒チャンネルの熱流動解析結果について述べる。これは、制御棒チャンネルの周囲の、ブロックからの熱の流入を考慮したものである。また、比較のため、ブロックからの熱の流入を考えない場合についても行う。さらに、Mark-III制御棒の比較対象としてMark-I制御棒の構造寸法を用いた解析も同様に行う。このMark-IとMark-III制御棒の構造寸法の相異を図2.1に示す。なお、ブロックからの熱の流入を考慮した解析では、制御棒チャンネルの周囲に存在する燃料チャンネルによって、ブロック自体が、燃料チャンネルの冷却材温度程度に高温度になっているとしている。

また、構造諸元の設定に関連して、制御棒の外側流路ギャップを変化させ、これに伴う制御棒温度への影響についても検討する。そして、これらの解析を通じ、制御棒の冷却に必要な流量の予測を行い、合わせて、熱流動（冷却）および熱応力の観点からみた制御棒の構造寸法に対する検討を行う。

2.1.1 解析方法

(1) 計算コード

本解析にはDEGA^{*2)}とMULSHES^{*3)}の2種類の計算コードを使用した。前者は、多目的高温ガス炉用単チャンネルの熱流動特性を解析するためのもので、制御棒チャンネルの内側と外

*1) 制御棒発熱量など、Mark-III炉心のものでなく、Mark-III炉心を想定した炉心条件下での解析を意味するものとして「想定」なる語句を挿入している。以下の本文中で使われている意味もこれと同様である。

側への冷却材の流量配分および制御棒チャンネルへの熱通過を考えない場合の解析に使用した。後者は、多重殻型燃料体（多重円筒型燃料体、多重球殻燃料）の照射に伴う温度および応力変化を詳細に解析するためのもので、前者によって得られた流量配分を用いて制御棒チャンネルへの熱通過を考慮した場合の解析に使用した。温度計算はいずれも半径方向一次元の熱伝導方程式に基づくものである。

(2) 計算条件

(a) 制御棒の材料データと解析評価データ

本解析に使用した材料データと評価データをまとめて表2.1に示す。計算コード MULSHES では機械的物性値の他にふく射率などの熱設計データを入力することになっている。今解析では、ふく射熱伝達は考えなかったので直接使われてはいないが、一般的に熱設計上必要なデータとしてこれらのデータも参考に示しておいた。

制御棒の許容温度（設計目標値）は構造上の健全性を考慮して 750 °C とした。この値は、以下に述べる制御棒の流量（温度）評価のための基準として、次の2点から暫定的に定められたものである。（付録参照）。第1は、制御棒の吸収材として用いられるホウ素入り黒鉛コンパクトの照射実績温度が現在のところ最高で約 800 °C であること、第2は、被覆管として考えているハステロイ-X の強度が 600～700 °C 以上から徐々に低下がみられること、である。なお、第1次概念設計では制御棒の設計温度を 800 °C としている。

(b) 計算モデルと寸法諸元

計算モデルを図2.2に示す。この計算体系は、制御棒チャンネルと燃料チャンネルとの間の最小距離（最小リガメント幅）における熱通過を考慮できるように、現実の制御棒チャンネルと燃料チャンネルとの配置を1次元的にモデル化したものである。図2.2の模擬燃料チャンネルと模擬燃料は、次のような2条件を満足するように定めた。

i) 模擬チャンネルの軸方向温度分布が本来の燃料チャンネルのそれと等しくする。

ii) リガメントの外周の熱伝達率が本来の燃料チャンネルのそれと等しくする。

なお、この際、模擬燃料チャンネルの出力と流量は Mark-I 炉心設計（60 MW炉心）^{*4}の値を参考に設定した。このようにして定めた模擬燃料チャンネルの形状、発熱量と流量等をまとめ表2.2に示す（図2.1参照）。また、本計算モデルの基本となった燃料棒諸元を表2.3に、黒鉛リガメントの外側境界温度を図2.3に示す。

なお、ブロックからの熱通過を考えない場合のモデルは、図2.2で、制御棒チャンネルの外側を取り除いたものである。

(c) 炉心設計データ

制御棒の発熱分布は Mark-I 炉心設計において得られたものを使用する。この発熱分布は、

*2) 鈴木邦彦：ガス冷却用チャンネル熱計算コード DEGA-3, (1971)

*3) 荒井, 佐藤：高温ガス炉用多重殻型燃料体の照射に伴う温度および応力変化の解析, 計算コード MULSHES, JAERI-M 5513 (1974)

*4) 宮本, 鈴木, 佐藤：多目的高温ガス実験炉心の参考設計（Mk-I & Mk-II）—熱流動、強度特性の検討, JAERI-M 6264 (1975)

60 MWの初期炉心状態で全制御棒を全挿入したときの、最大発熱量をもつ炉心中心ブロックに挿入された制御棒のものである。これを図2.4に示す。実際の運転状態では部分長挿入であるが、制御棒の発熱量は全挿入の場合に最大となるので、ここでは安全側の評価として採用した。Mark-I炉心の結果をMark-III炉心に拡張して使用する場合の関係因子を表2.4に示す。また、本解析で基本とした燃料棒（模擬燃料チャンネルの設定に対して選定したもので、これはMark-I炉心設計の60 MWにおける炉心中心ブロックの燃料棒であり、これは、また、初期炉心における最高出力チャンネルでもある）^{*4)}の炉心軸方向出力分布を前と同じ図2.4に示す。

(d) 制御棒の冷却流量の考え方

全制御棒38本のうち、温度解析をしているのは1本であるが、制御棒の冷却流量は、1本当りの流量の38倍したものを考える。したがって、本章および本報で制御棒の冷却に必要な流量を原子炉全流量に対する割合で言い表わすときには、原子炉全流量を15.9 Kg/sとして、これに対する上記38倍した流量の比をとっている。

2.1.2 解析結果

(1) Mark-I炉心における制御棒チャンネルの熱流動解析結果を、ブロックからの熱通過を考慮した場合とこれを考へない場合の各々について表2.5と表2.6および図2.5に示す。この結果から次のことが読み取れる。

- (i) ブロックからの熱通過を考慮すると、これを考へない場合に比べ制御棒の温度が100～250 °C上昇する。
- (ii) ブロックからの熱通過を考へない場合、被覆管の温度を750 °C以下に保つための必要流量は原子炉全流量の3%程度でよい。
- (iii) 他方、ブロックからの熱通過を考慮すると、上記の温度以下にするためには原子炉全流量の15%程度の流量の確保が必要となる。

(2) Mark-III想定炉心の制御棒の熱流動解析

Mark-III想定炉心の制御棒チャンネルの熱流動解析結果を、Mark-I炉心の場合と同様に、ブロックからの熱通過を考へない場合とこれを考慮した場合の各々について表2.7と表2.8および図2.6、図2.7、図2.8に示す。図2.6はMark-I炉心の制御棒と同程度の発熱量を有する本解析での標準計算の結果であり、図2.7と図2.8は制御棒発熱量が標準値の1/2倍と2倍の結果である。また、図2.9に、被覆管の最高温度と制御棒の発熱量（軸方向の最大値）との関係を、ブロックからの熱通過を考慮した場合とこれを考へない場合の各々について、流量をパラメータとして示した。

前項(1)のMark-I制御棒チャンネルの場合と比較しながら、これらの結果を整理すると以下のようになる。

- (i) ブロックからの熱通過を考慮しない場合、制御棒の温度を750 °C以下にするためには、1制御棒当たり約20 g/sの流量が必要であり、全制御棒にこれだけの量を考えると原子炉全流量の約5%を制御棒の流量として確保することが必要となる。Mark-I制御棒の場合（3%相当）に比較して約1.7倍と大きい。
- (ii) 一方、ブロックからの熱通過を考えた場合には、上記(i)の逆で、制御棒の冷却用として確

表 2.1 制御棒チャンネルの材料データ^{*)}, ^{**) (}

	被覆材 ハステロイ-X	吸収材 ボロン入りコンパクト	黒鉛ブロック (IM 2-24)
熱伝導率 (cal/cm s °C)	0.05	0.03	0.06
線膨張係数 (°C ⁻¹)	15×10^{-6}	5×10^{-6}	5×10^{-6}
ヤング率 (Kg/cm ²)	16×10^5	0.5×10^5	1×10^5
ポアソン比	0.32	0.15	0.15
表面あらさ (cm)	2×10^{-4}	2×10^{-3}	2×10^{-3}
硬さ (H _B) (Kg/cm ²)	2×10^4	1×10^3	1.5×10^3
ふく射率	0.5	0.8	0.8
平均引張強度 (Kg/cm ²)	2500		200
設計目標温度 (°C)	750	750	

^{*)} 宮本他; 多目的高温ガス実験炉心の参考設計 (Mk-I & Mk-II)

—熱流動・強度特性の検討, JAERI-M 6264 (1975)

<sup>**) 小平他; 多目的高温ガス実験炉用 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼およびハステロイ-X の
設計データに関する調査, JAERI-M 6213 (1975)</sup>

表 2.2 制御棒チャンネルの計算モデル諸元

	Mk III 想定炉心	Mk I 炉心
内側被覆管 内径 (mm)	66	40
“ 外径 (mm)	69.6	49.6
吸収材コンパクト内径 (mm)	70	50
“ 外径 (mm)	90	70
外側被覆管 内径 (mm)	90.4	70.4
“ 外径 (mm)	94	80
制御棒チャンネル孔径 (mm)	110	85
黒鉛リガメント幅 (mm)	33	20
模擬燃料棒 内径 (mm)	180	130
“ 外径 (mm)	200	150
制御棒最大発熱量 (cal/cm s)	21.5	20
模擬燃料棒最大出力 (cal/cm ³ s)	6.080	3.7463
模擬冷却チャンネル流量 (g/s)	102.32	35.665

表 2.3 Mark - III 想定炉心と Mark - I 炉心の燃料棒諸元

	Mark - III	Mark - I
燃料コンパクト 内径 (mm)	18	8
外径 (mm)	36	22
黒鉛スリーブ 内径 (mm)	36.2	22.2
外径 (mm)	46	32
燃料棒チャンネル孔径 (mm)	50	37
燃料棒最大線出力 (cal/cm s)	101.06*	47.17
燃料チャンネル流量 (g/s)	27.57*	9.651

* Mark - I 炉心の数値に表 2.4 のスケールファクタを掛けたもの

表 2.4 M_k I → M_k III (想定炉心) の関係因子とスケールファクタ

関 係 因 子	Mk I→Mk II	Mk II→Mk III	制御棒 出 力	燃 料 棒	
				出 力	流 量
熱 出 力 MW	50/60	50/50	○	○	○
炉 心 高 さ m	3.0/3.5	35/40	○	○	
濃 縮 度 wt-%	6.0/5.0		○		
制御棒最大ワース△Keff	1.06	1.35	○		
燃料チャンネル数	2787/1251	1251/813		○	○
スケールファクタ	Mk I —— Mk III		1.073	2.1425	2.8567

表 2.5 Mark-I 炉心の制御棒チャンネルの熱流動特性（ブロックからの熱通過考慮せず）

$W_{c,core}^*$	流量 (g/s)	内側流量 (g/s)	外側流量 (g/s)	最高温度 (°C) / 轴方向位置 (cm)			最小レイノルズ数 / 轴方向位置 (cm)	
				内側被覆管	外側被覆管	吸収材	内側流路	外側流路
0.03	1.5	11.963	3.037	748 / 225	765 / 225	768 / 225	9210 / 500	542 / 325
0.04	2.0	16.891	3.109	667 / 225	687 / 225	690 / 225	13570 / 500	578 / 325
0.08	4.0	36.166	3.834	536 / 225	561 / 225	563 / 225	31190 / 500	767 / 300
0.12	6.0	50.825	9.175	498 / 225	516 / 225	520 / 225	45050 / 500	1884 / 300
0.16	8.0	67.777	12.223	477 / 225	494 / 225	499 / 225	60880 / 500	2561 / 300
0.20	10.0	84.720	15.280	463 / 225	479 / 250	484 / 225	76710 / 500	3234 / 300
0.28	14.0	118.590	21.410	447 / 225	461 / 250	466 / 225	108400 / 500	4595 / 300

* 全制御棒流量対原子炉全流量

表 2.6 Mark-I 炉心の制御棒チャンネルの熱流動特性（ブロックからの熱通過考慮）

$W_{c,core}^*$	流量 (g/s)	最高温度 (°C) / 轴方向位置 (cm)			レイノルズ数			
		内側被覆管	外側被覆管	吸収材	内側流路	外側流路	炉心入口	中央
0.04	2.0	852 / 500	911 / 450	874 / 500	15360	13750	11800	687
0.08	4.0	708 / 500	803 / 425	746 / 500	32890	30780	22700	847
0.12	6.0	652 / 500	769 / 425	700 / 450	46220	44150	40460	2026
0.16	8.0	613 / 500	747 / 425	669 / 425	61640	59490	55340	2700
0.20	10.0	585 / 500	729 / 425	647 / 425	77050	74860	70420	3375
0.28	14.0	546 / 500	701 / 425	616 / 425	107800	105700	100900	4729

* 全制御棒流量対原子炉全流量

保しなければならない流量は Mark - I の場合より Mark - III の場合は遥かに少量で、熱通過を考慮しない場合の流量と同程度、むしろ若干少目でよい。

(iii) Mark - I の場合に比較して流量の相違による温度変化が全般に緩やかである。特に熱通過を考慮した場合にこれが顕著にみられる。この相異は、構造寸法、特に外側流路幅の違いによるものである。なお、リガメント幅 (20 ~ 40 mm) の相異は制御棒温度にはほとんど影響を与えない。

制御棒チャンネルの温度とそれを取巻く黒鉛リガメントの外周の温度との差の大小によって、制御棒チャンネルへのブロックからの伝熱量が相異し、これが制御棒の温度に影響を与えることになるが、このブロックからの伝熱量についての本解析モデルにおける具体的な関係は、炉心出口でみると次のようなものである。制御棒の発熱量に関しては、発熱量の増大とともに直線的に減少する。流量に関しては、ブロックからの伝熱量は、発熱量とは逆に、流量の増加とともに増大する(図 2.10)。制御棒チャンネルへの流入熱量の炉心軸方向分布を図 2.11 に示す。ブロックからの流入熱量は炉心出口で最大となっている。なお、上図のブロックからの伝熱量は、ブロックの外側に設置された模擬燃料棒の全発熱量に対する流量の比を百分率で表わしたものである。

図 2.12 と図 2.13 には、ブロックからの熱通過を考慮した場合の制御棒チャンネルの半径方向と軸方向の各温度分布を、標準発熱量をもつ標準計算の場合について示した。ブロックからの熱の流入によって外側被覆管の温度が炉心入口より 175 cm 入ったところから吸収材の温度以上になり、炉心の出口で約 40 °C の差がみられている。

図 2.14 には、同じく標準計算の場合の炉心出口における制御棒チャンネルのレイノルズ数を示す。外側の流路は 60 g/s 以上流れないと流れは乱流域 ($Re > 2300$) に入らない。熱通過を考えない場合は 50 g/s 以上の流量で乱流域となる。内側の流路は 20 g/s の流量ですでに最小レイノルズ数が 6000 を越えている。

(3) Mark - III 制御棒チャンネル外側流路ギャップと内側・外側流量配分の制御棒温度への影響

制御棒の軸方向最大線出力 21.5 cal/cms, 流量 40 g/s の標準的計算に対する制御棒温度に及ぼす外側流路ギャップと流量配分の影響について整理したものを表 2.9 と表 2.10 および図 2.15 と図 2.16 に示す。これより次のことが知られる。

- (i) ブロックからの熱通過を考えない場合には、制御棒温度の最小となる流路ギャップ (6 mm 付近) が存在する。しかし、4 mm ~ 8 mm の間では高々 20 °C 程度の差しかない。
- (ii) 一方、熱通過を考慮した場合には、外側流路ギャップが小さくなるにつれて温度の上昇がみられる。外側の流路ギャップ 8 mm が 1/2 倍の 4 mm になると、温度は 80 °C 上昇する。
- (iii) 熱通過を考慮した場合の内側・外側流量配分は、外側の流量の少ない場合に温度が低く好ましい。

なお、流量の配分についての検討は、次節 2.2 で詳しく述べている。

(4) 制御棒の熱応力

初期状態において発生する制御棒の熱応力について簡単に述べる。これはコード MULSHES で計算されたものである（軸対称一次元、平面ひずみ条件を仮定）。

表 2.7 Mark-III 想定炉心の制御棒チャンネルの熱流動特性（ブロックからの熱通過考慮せず）

$W_{c\wedge W_{core}}^*$	流量 (g/s)	内側流量 (g/s)	外側流量 (g/s)	最高温度 (°C) / 轴方向位置 (cm)			最小ノルズ数 / 軸方向位置 (cm)
				内側被覆管	外側被覆管	吸収材	
軸方向最大発熱量 10 cal/cm s (0.40 w/cm ³)							
0.047	20	14.023	5.977	557 / 250	562 / 225	565 / 225	7258 / 450
0.095	40	28.046	11.954	492 / 225	498 / 225	502 / 200	15140 / 450
0.142	60	42.070	17.930	462 / 225	467 / 225	472 / 200	23090 / 450
0.189	80	56.093	23.907	447 / 225	451 / 225	456 / 225	3137 / 375
0.237	100	70.116	29.884	438 / 225	442 / 225	447 / 200	31040 / 450
0.331	140	102.305	37.695	428 / 225	433 / 225	438 / 200	38990 / 450
軸方向最大発熱量 21.5 cal/cm s (3.58 w/cm ³ : 標準値)							
0.047	20	14.023	5.977	734 / 250	744 / 250	750 / 250	6635 / 450
0.095	40	28.046	11.954	597 / 225	608 / 225	617 / 200	14400 / 450
0.142	60	42.070	17.930	535 / 225	545 / 225	554 / 200	22320 / 450
0.189	80	56.093	23.907	500 / 225	510 / 225	519 / 225	30280 / 450
0.237	100	70.116	29.884	481 / 225	489 / 225	500 / 200	38230 / 450
0.331	140	102.354	37.646	461 / 225	470 / 225	481 / 200	56410 / 450
軸方向最大発熱量 40 cal/cm s (6.66 w/cm ³)							
0.047	20	14.023	5.977	1013 / 250	1030 / 250	1041 / 250	5863 / 450
0.095	40	28.046	11.954	762 / 225	781 / 225	796 / 200	13380 / 450
0.142	60	42.070	17.930	653 / 225	672 / 225	688 / 200	21200 / 450
0.189	80	56.093	23.907	588 / 225	604 / 225	621 / 200	29140 / 450
0.237	100	70.116	29.884	551 / 225	566 / 225	584 / 200	37080 / 450
0.331	140	102.429	37.571	513 / 225	530 / 225	549 / 200	55230 / 450
外側流路							
* 全制御棒流量対原子炉全流量							

表2.8 Mark-III 想定炉心の制御棒チャンネルの熱流動特性(ロックからの熱通過考慮)

$\frac{W_c}{W_{core}}$ * Wc (g/s)	流 量 (g/s)	最高温度 (°C) / 轴方向位置 (cm)			内 側 流 路			外 側 流 路			ス 数
		内側被覆管	外側被覆管	吸収材	炉心入口	中央	出口	炉心入口	中央	出口	
軸方向最大発熱量 10 cal/cm²s (0.40 w/cm³)											
0.047	20	620/450	671/450	639/450	7729	7383	6916	1068	877	752	
0.095	40	602/450	670/450	627/450	15460	15040	14170	2136	1807	1533	
0.142	60	588/450	669/450	618/450	23190	22710	21550	3203	2756	2334	
0.189	80	576/450	665/450	610/450	30920	30390	29010	4271	3718	3153	
0.237	100	565/450	659/450	601/450	38640	38090	36540	5339	4691	3990	
0.331	140	539/450	644/450	581/450	56390	55760	53940	6734	5978	5116	
軸方向最大発熱量 21.5 cal/cm²s (3.58 w/cm³: 標準値)											
0.047	20	701/450	747/450	719/450	7729	7126	6565	1068	848	731	
0.095	40	644/450	708/450	668/450	15460	14670	13730	2136	1761	1508	
0.142	60	614/450	693/450	644/450	23190	22300	21050	3203	2701	2305	
0.189	80	596/450	684/450	629/450	30920	29960	28460	4271	3658	3120	
0.237	100	581/450	675/450	617/450	38640	37640	35940	5339	4627	3952	
0.331	140	554/450	658/450	595/450	56410	55300	53290	6726	5906	5067	
軸方向最大発熱量 40 cal/cm²s (6.66 w/cm³)											
0.095	40	717/425	773/450	739/425	15460	14200	13090	2136	1701	1468	
0.142	60	686/450	754/450	711/450	23190	21730	20210	3203	2626	2248	
0.189	80	649/450	728/450	679/450	30920	29330	27570	4271	3572	3059	
0.237	100	615/450	704/450	649/450	38640	36960	35030	5339	4532	3890	
0.331	140	580/450	681/450	619/450	56450	54570	52240	6712	5795	4989	

* 全制御棒流量対原子炉全流量

表 2.9 Mark-III 想定炉心の制御棒チャンネルの熱流動特性と外側流路ギャップ
制御棒最大線出力 = 21.5 cal/cm²s, 流量 = 40 g/s

ブロック からの 熱通過	外側 流路 ギャップ (mm)	流量 (g/s)	最高温度 (°C)				レイノルズ数					
			内側	外側	内側	外側	吸収材	炉心入口	内側流路	炉心入口	中央	外側流路
考慮	4	35.594	4.406	707	789	738	19620	18470	17040	819	624	555
	6	30.383	9.617	676	747	702	16750	15860	14750	1752	1405	1214
	8	28.046	11.954	644	708	668	15460	14670	13730	2136	1761	1508
考慮せず	4	35.594	4.406	609	635	637	20140	19040	18210	840	696	723
	6	30.383	9.617	589	602	609	17190	16260	15640	1796	1593	1559
	8	28.046	11.954	597	608	617	15870	14930	14400	2188	1988	1926

表 2.10 Mark-III 想定炉心の制御棒チャンネルの熱流動特性と流量配分（ブロックからの熱通過考慮）
制御棒最大線出力 = 21.5 cal/cm²s, 流量 = 40 g/s

内側	外側	最高温度 (°C)				レイノルズ数					
		内側	外側	内側	外側	吸収材	炉心入口	内側流路	炉心入口	中央	外側流路
40.0	0.0	633	688	654	22050	20870	19640	—	—	—	—
36.4	3.6	639	695	660	20060	18930	17790	643	501	445	
33.3	6.7	623	675	643	18350	17400	16400	1197	970	842	
26.7	13.3	645	711	669	14720	13970	13070	2376	1967	1682	
13.3	26.7	681	743	705	7330	6922	6404	4770	4051	3435	
6.7	33.3	697	751	717	3693	3460	3171	5949	5094	4312	
3.6	36.4	701	753	720	1894	1846	1683	6503	5587	4729	
0.0	40.0	711	756	728	—	—	7146	6157	5214		

ブロックからの熱通過によって温度が全体的に高くなり、このため、本解析で予め設定しておいた吸収材と内側被覆管との間のギャップ 0.2 mm^* ^{*)} が炉心出口に近い炉心入口より 300 cm 附近から出口にかけて見られなくなり、この間で機械的干渉を生ずることとなった。このときの接触圧力は、制御棒の最大線出力 21.5 cal/cm s 、流量 40 g/s の標準的計算の場合で最大（炉心出口） 4 Kg/cm^2 (Mark - III 制御棒) である。また、本標準計算の場合の被覆管の円周方向の最大引張応力は、内側の被覆管では、制御棒の最大出力位置より若干炉心の出口側にずれた位置で発生し、その値は 3.6 Kg/cm^2 である。外側の被覆管では、ブロックからの熱通過によって炉心出口に最大応力が発生し、その値は内側の被覆管それとほぼ等しいものである。機械的干渉のない場合には、今の場合、物性値が等方であるので、軸方向の発生応力も円周方向のそれに等しく、また、圧縮応力もほぼ引張応力値に等しいものである。ところで、本標準計算の場合、内側の被覆管と吸収材との間で機械的干渉がみられるので、このときの接触圧力の最も大きな炉心出口の内側被覆管には、内面、外面とも圧縮応力が発生し、円周方向で最大 108 Kg/cm^2 、軸方向で最大 112 Kg/cm^2 になっている。吸収材の最大引張応力は、機械的干渉のない場合には、内側被覆管における最大引張応力の発生位置に等しい場所で約 $3 \sim 5 \text{ Kg/cm}^2$ 程度の応力発生であるが、今標準計算の例にみられる機械的干渉によって引張応力は、最大の炉心出口で、円周方向については 20 Kg/cm^2 、軸方向については 16 Kg/cm^2 と、機械的干渉のない場合に比し大巾に増加している。なお、この位置での吸収材の応力は、内面、外面とも、機械的干渉によって引張状態となっており、最大の引張応力は内面に発生している。

一方、Mark - I の制御棒における被覆管の最大引張応力は、Mark - III のものより肉厚が厚いこともある、 40 g/s の流量のときで、内側被覆管には 330 Kg/cm^2 (圧縮応力は 290 Kg/cm^2)、外側の被覆管には 150 Kg/cm^2 (同 140 Kg/cm^2) となっている。また、吸収材の最大引張応力は 7 Kg/cm^2 である。

なお、発熱量および流量が増大すると温度勾配が大きくなるため応力値は増加する傾向にある。

以上の一連の解析によって明らかになったことは次のようなものである。その第 1 は、制御棒の冷却用としては、ブロックからの熱の流入の有無にかかわらず、制御棒の温度を 750°C 以下とするためには、原子炉全流量の 5% 程度の流量が必要である、ことである。

その第 2 は、Mark - I 制御棒の場合、ブロックからの熱の流入を考慮した場合とこれを考えない場合とで制御棒の温度にかなりの相違がみられた（前者の場合は後者の場合より相当温度が高い）が、Mark - III 制御棒の場合、これらの相違が少なく、特に熱の流入を考慮した場合などは温度的にもまた熱応力の点からも Mark - I に比べて Mark - III 制御棒の構造寸法の方が好ましかった、ことである。Mark - III 制御棒は、Mark - I のそれよりも挿入性などを考慮して外側の流路ギャップをかなり広くとっている。そして、被覆管の厚さも Mark - I の制御棒のそれに比べて相当薄い。この 2 点が熱流動上および熱応力上好結果の原因となっている。

*) 解析の当初、このような細部の寸法は吟味されていなかったので、計算モデル上このように設定した。

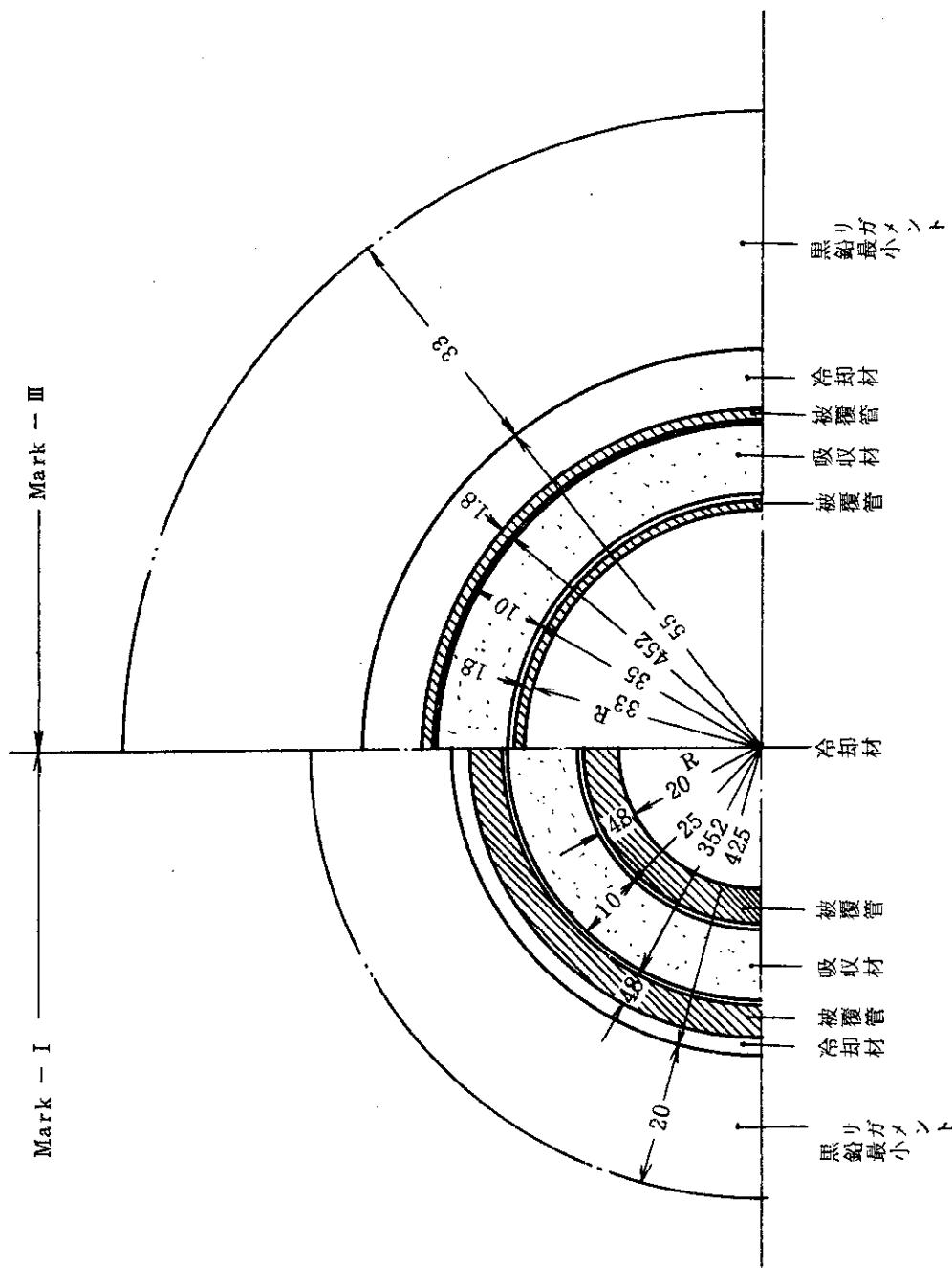


図 2.1 Mark - I と Mark - III 制御棒の構造寸法の相違

断面 A-A

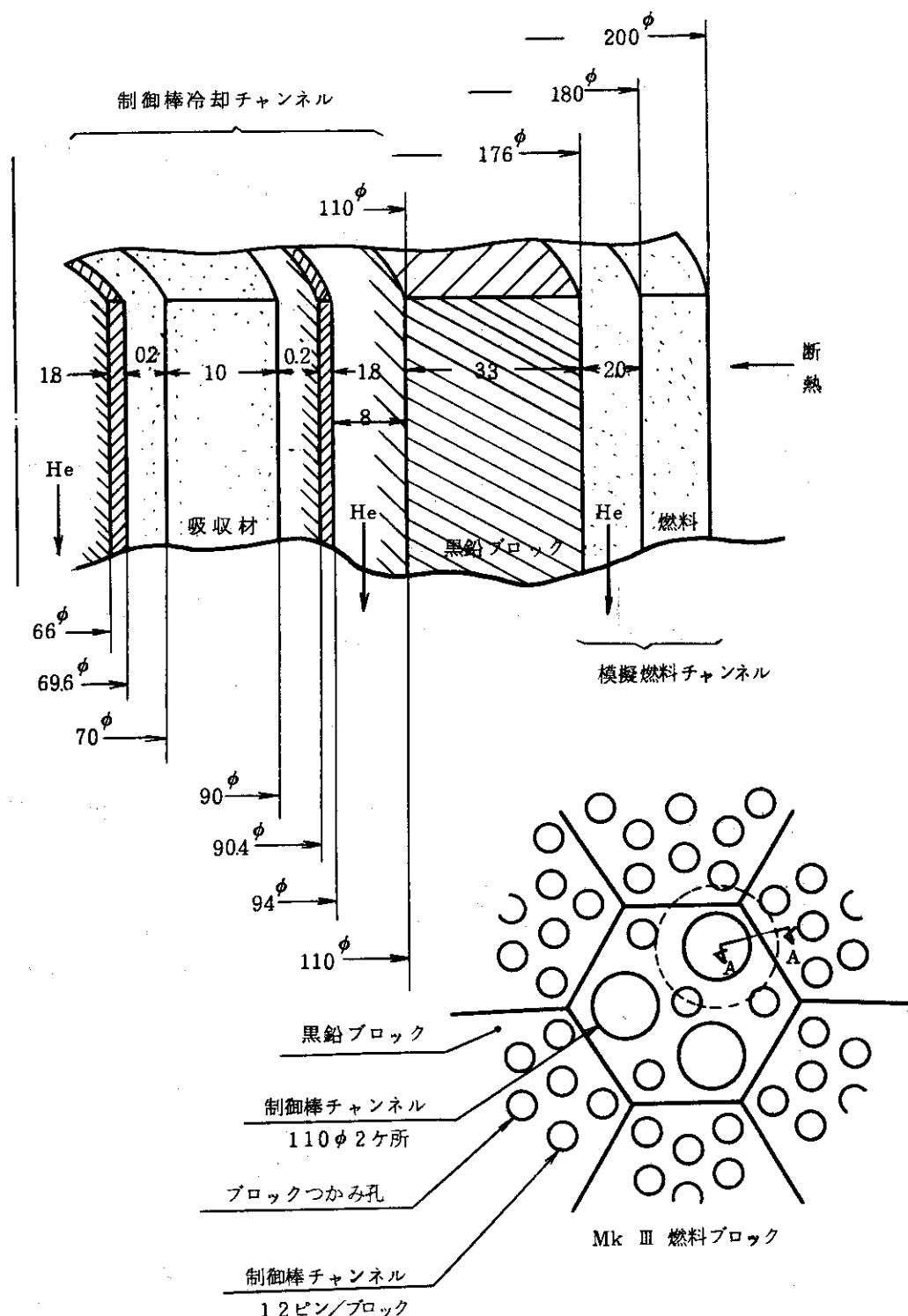


図 2.2 Mark-III想定炉心における制御棒冷却チャンネルの計算モデル

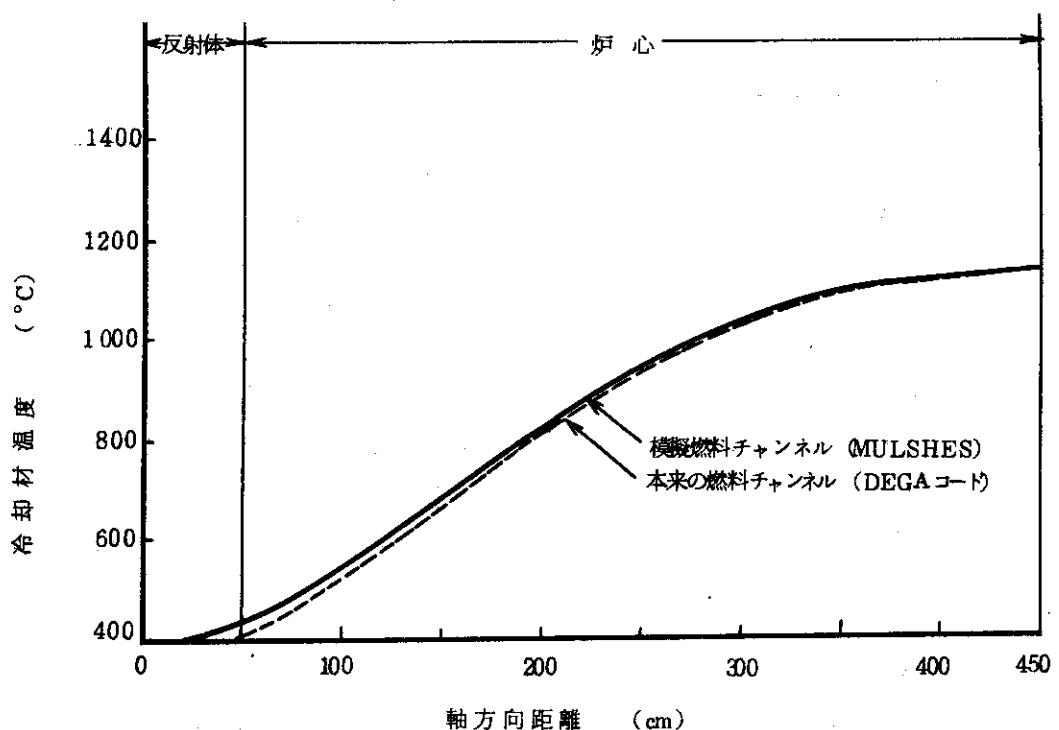


図 2.3 Mark-III想定炉心における模擬冷却チャンネルの冷却材温度
(黒鉛ブロッククリガメントの外周(境界)温度)

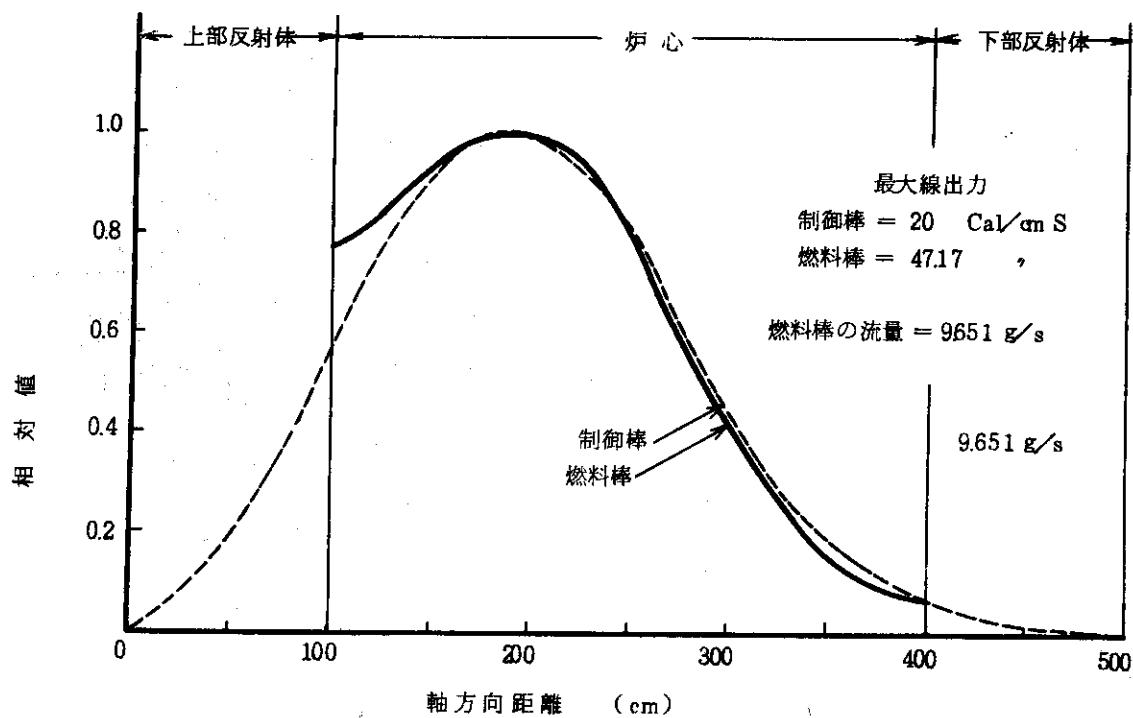


図 2.4 Mark-I炉心における制御棒の軸方向発熱分布(基準発熱分布)

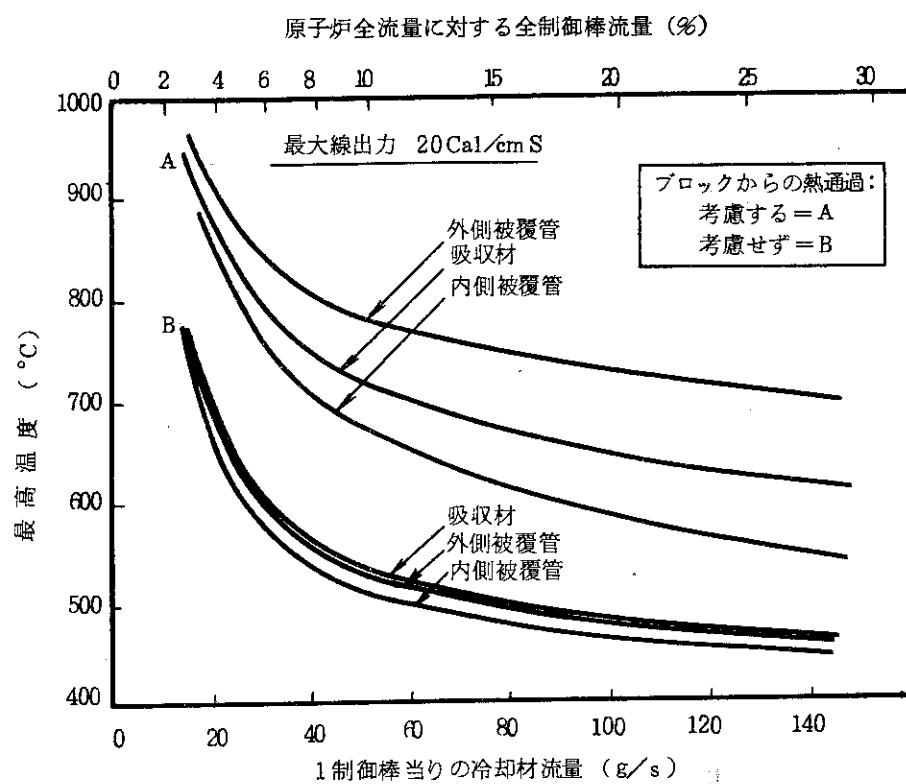


図 2.5 Mark-I 炉心における制御棒の最高温度と流量の関係

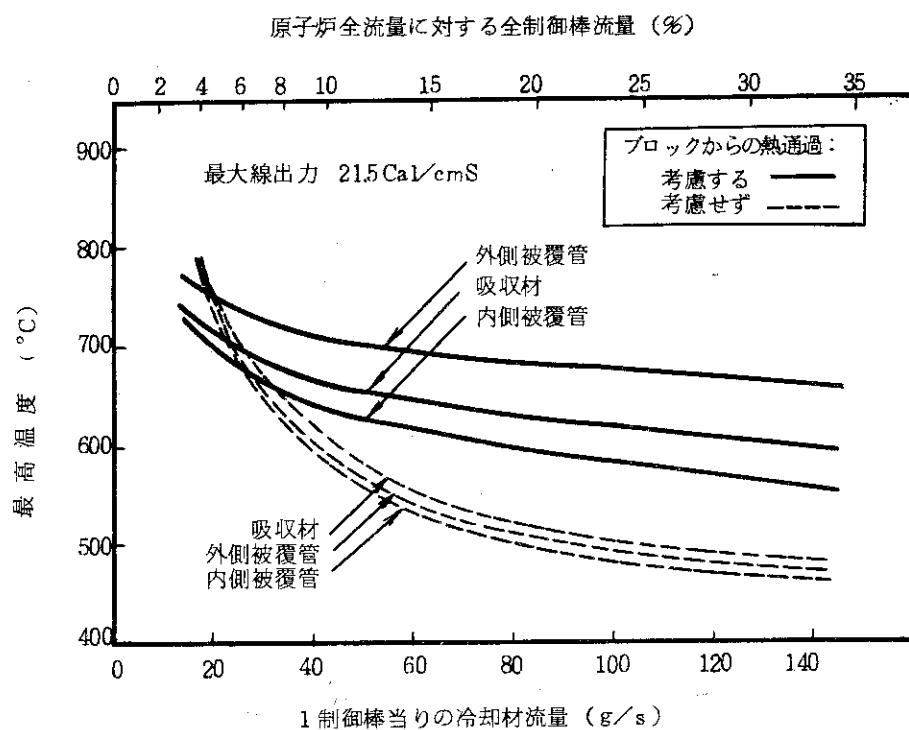


図 2.6 Mark-III想定炉心における制御棒の最高温度と流量の関係 (標準計算)

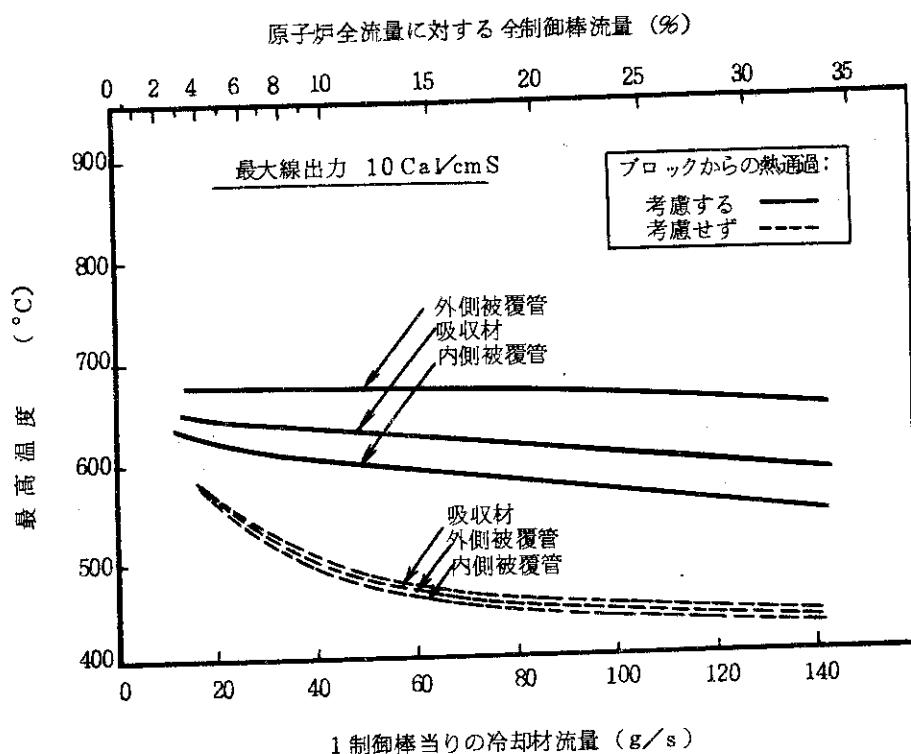


図 2.7 Mark-III想定炉心における制御棒の最高温度と流量の関係 (発熱量:標準計算の1/2)

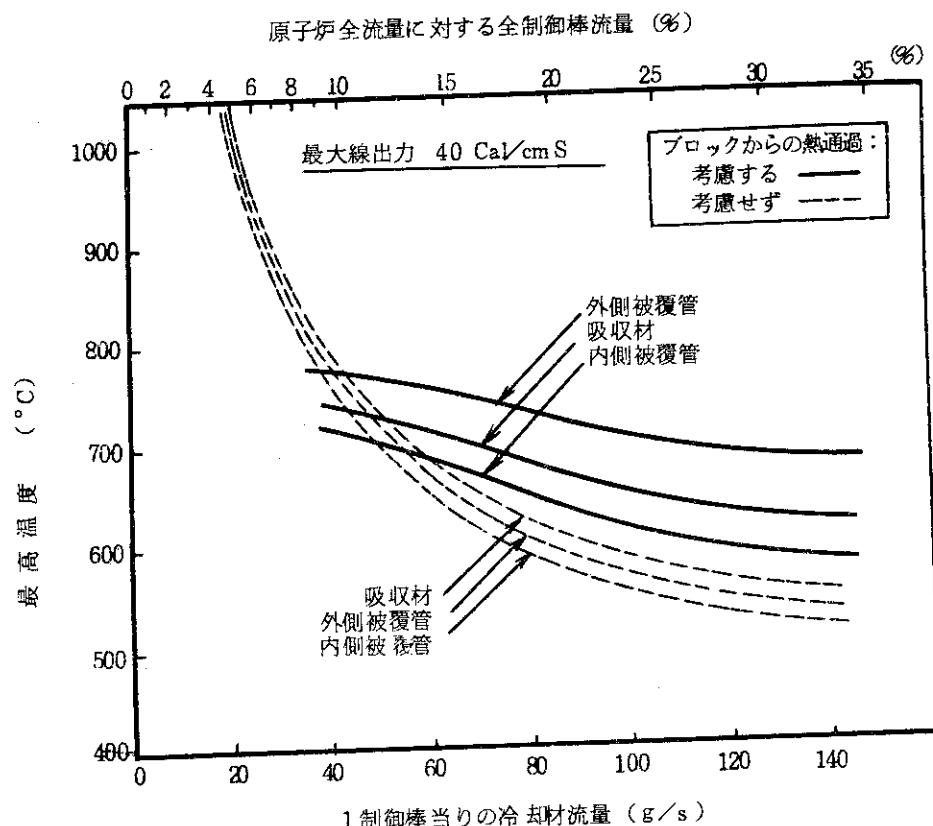


図 2.8 Mark-III想定炉心における制御棒の最高温度と流量の関係 (発熱量:標準計算の2倍)

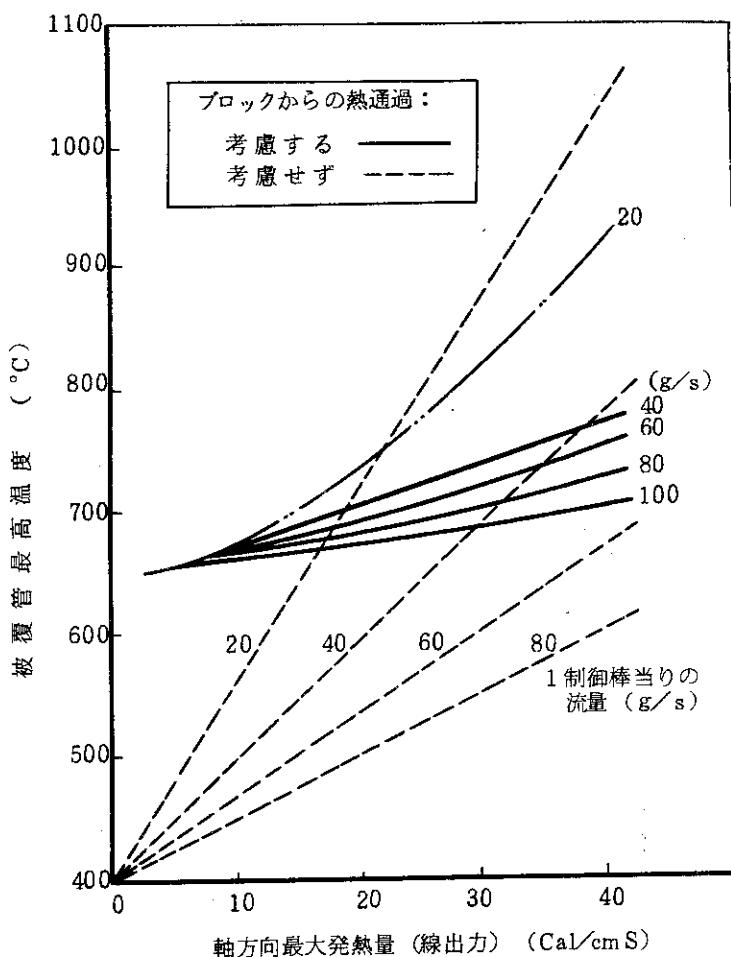


図 2.9 黒鉛ブロックからの熱通過を考慮した場合としない場合の被覆管最高温度の比較 (Mark-III想定炉心)

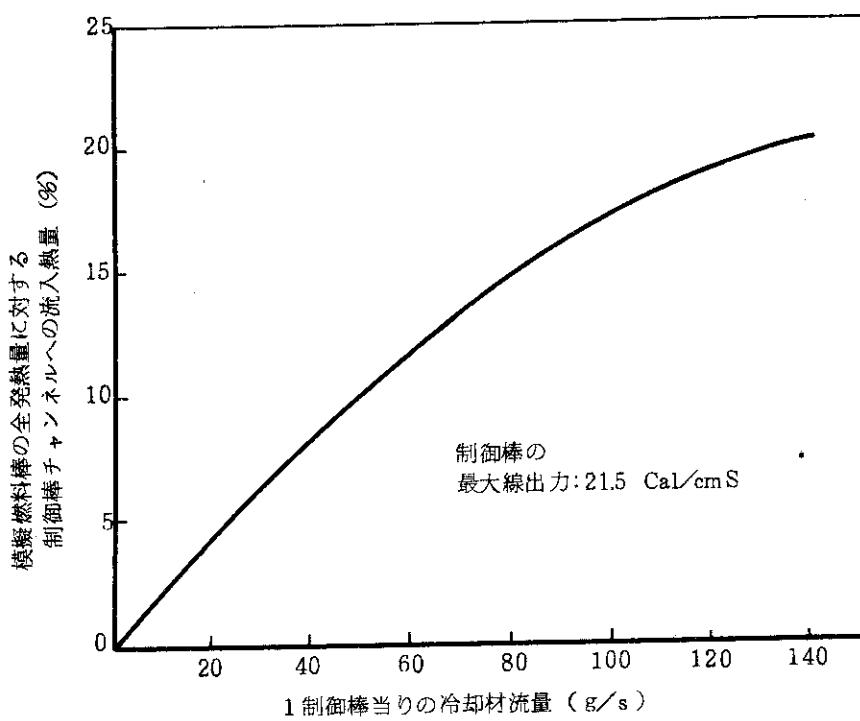


図 2.10 制御棒チャンネルへの流入熱量と流量の関係 (Mark-III想定炉心)

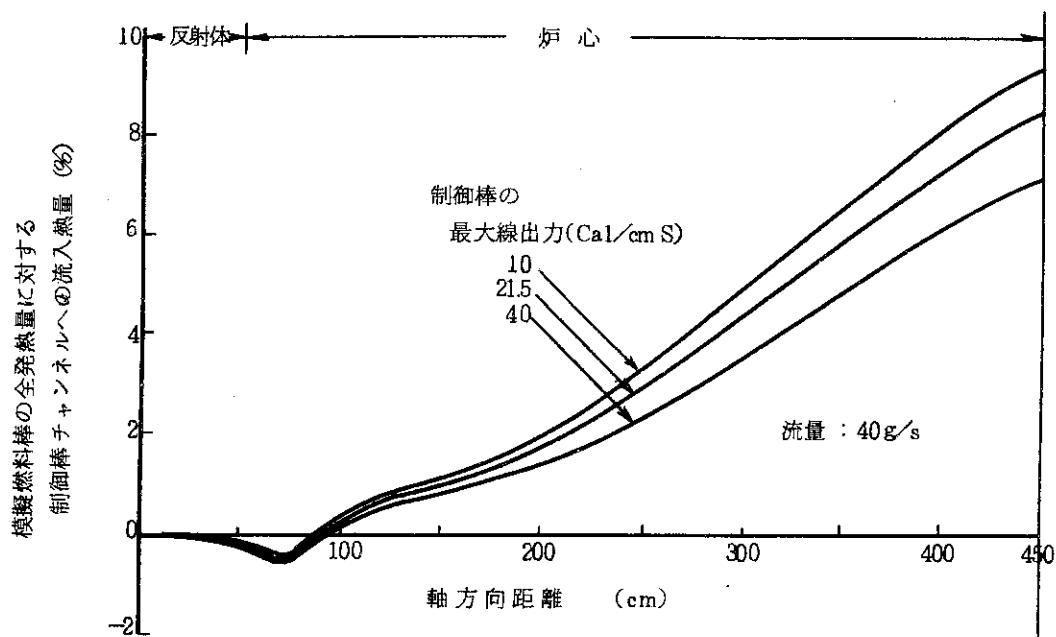


図 2.11 制御棒チャンネルへの流入熱量の軸方向分布 (Mark-III想定炉心)

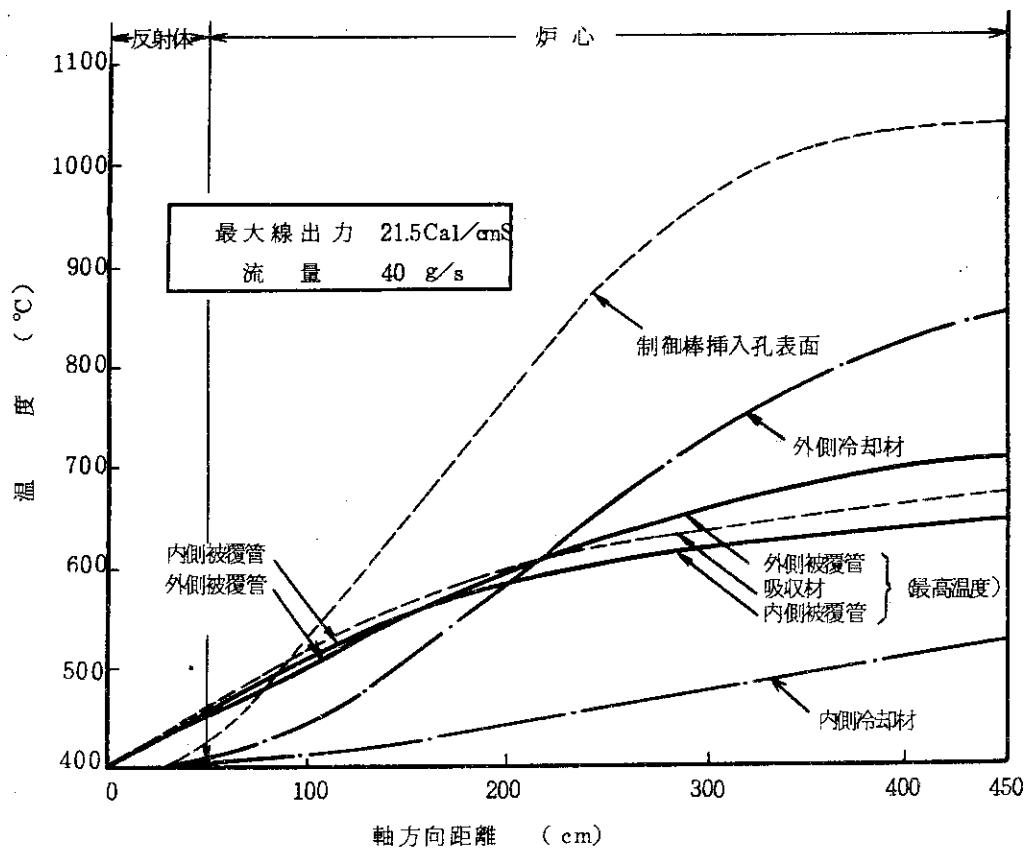


図 2.13 制御棒チャンネルの炉心軸方向温度分布 (ブロックからの熱通過考慮, Mark-III想定炉心)

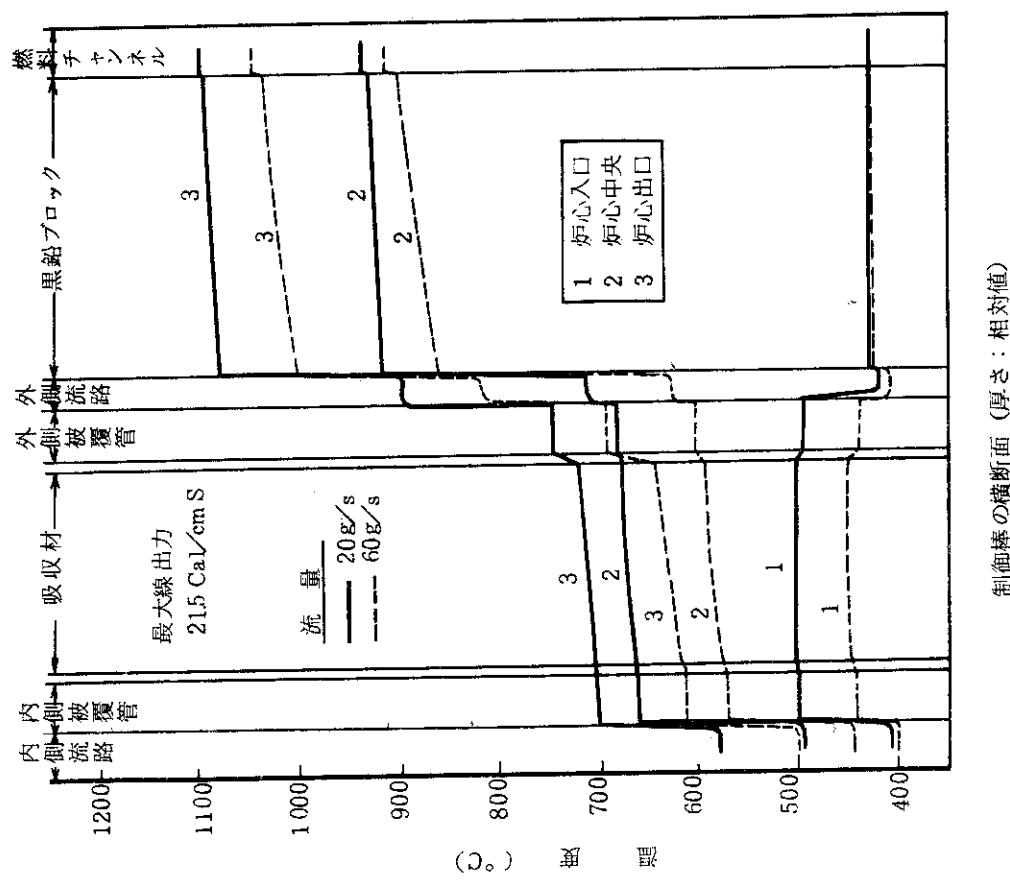


図 2.12 制御棒チャンネルの半径方向温度分布（ブロックからの熱通過考慮、Mark-III想定炉心）

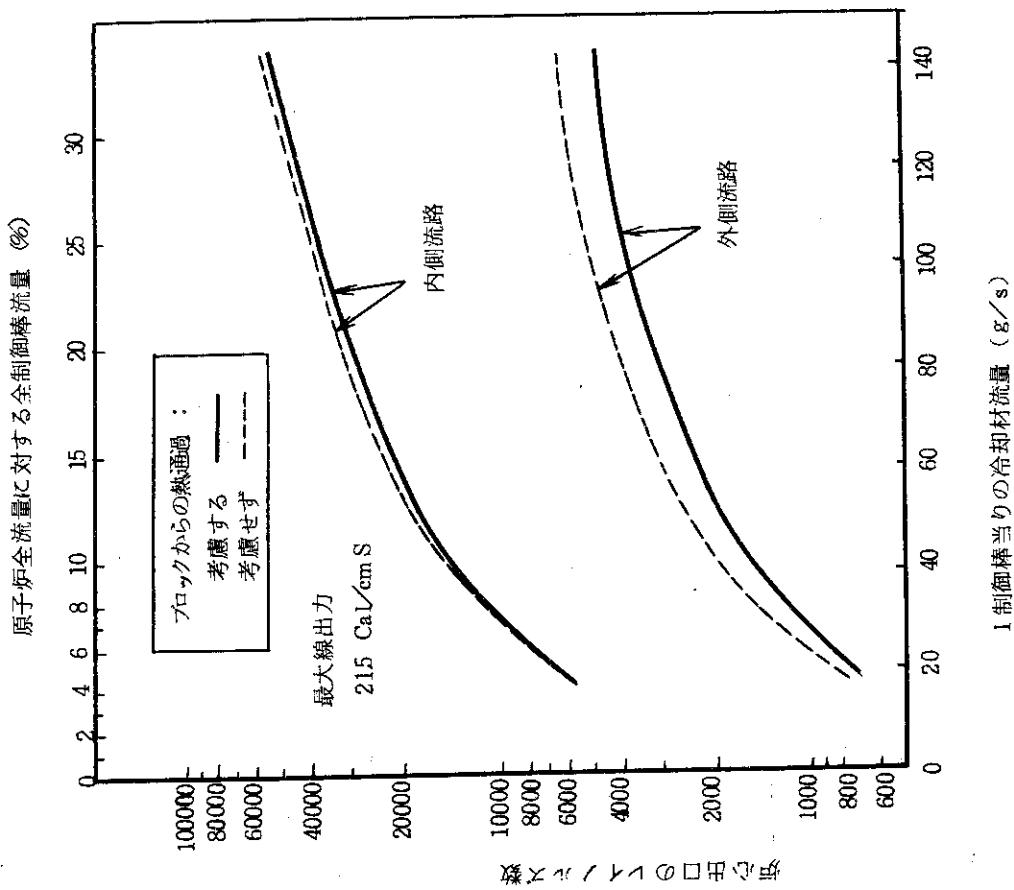


図 2.14 制御棒チャンネルの炉心出口レイノルズ数 (Mark-III想定炉心)

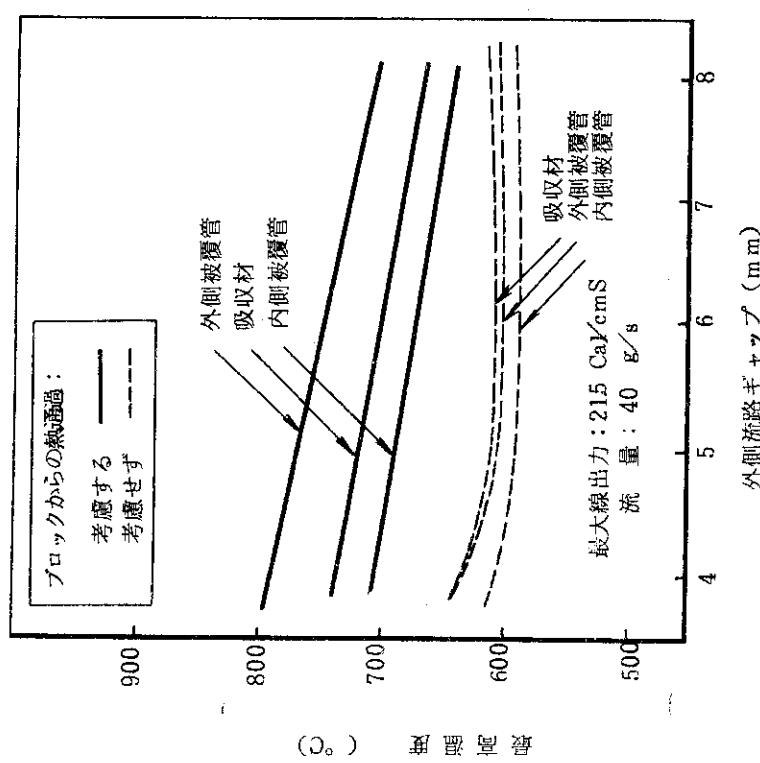


図 2.15 制御棒の最高温度と外側流路長との関係
(Mark-III想定炉心)

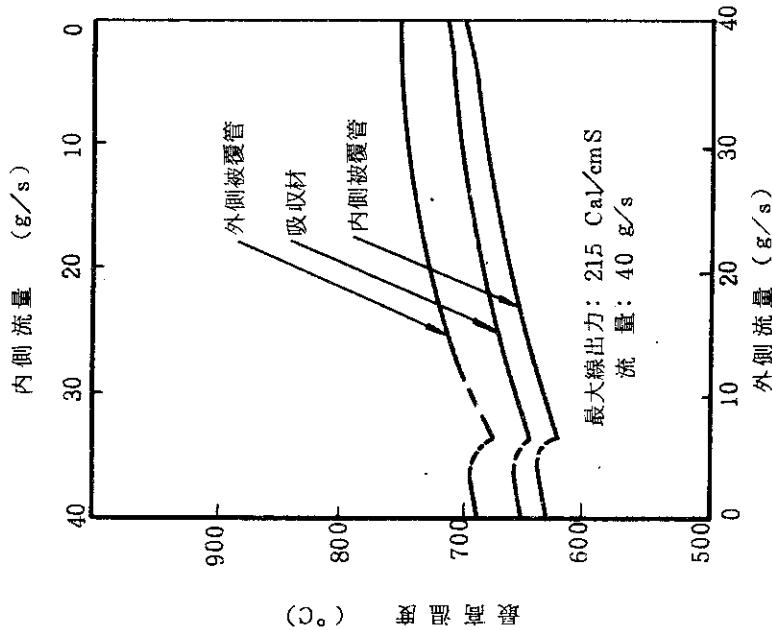


図 2.16 冷却材流量配分と制御棒温度との関係
(Mark-III想定炉心)

2.2 Mark-III 炉心を対象とした制御棒の冷却検討

Mark-I 炉心設計において得られている制御棒の発熱分布を用いた前節での Mark-III 炉心を想定した制御棒チャンネルの熱流動解析によって、制御棒の冷却に必要な流量は原子炉全流量の 5%程度である、とのおおよその目安を得た。

本節では、Mark-III の炉心条件が明らかとなった段階で、初期の目安値を確認の意味も含め、Mark-III 炉心そのものを対象に、制御棒の冷却材流量計画についての検討を行った。その内容は次のようなものである。先ずはじめに、制御棒の内側流路と外側流路とに適当な流量を設定した場合に、そのように設定された流量配分と配分比では両流路でどのような流動様式（層流か乱流か）が実現されているかを明らかにする。次いで、内側対外側流量比と制御棒被覆管の最高温度との関係を、制御棒の冷却材流量をパラメータとして示し、制御棒の冷却という観点からみて、どのような流量設定が好ましいものであるかを明らかにする。以下に、これらの検討結果について述べる。

2.2.1 解析方法

使用計算コードは前節と同様 MULSHES である。物性値も前節と同じ値、すなわち、吸収材（ホウ素入り黒鉛）および被覆材（ハステロイ-X）の熱伝導率として $0.03 \text{ cal/cm s } ^\circ\text{C}$ と $0.05 \text{ cal/cm s } ^\circ\text{C}$ を用いている。

制御棒の発熱分布としては温度的にみて最も厳しいことの予想される初期炉心状態で、発熱量が最大の炉心中心ブロックのものを考える。この制御棒の初期状態における炉心挿入深さは、軸方向 7 段積ブロック中 3 個 ($7/3$ 挿入) であり、運転期間中の挿入深さとしては、この炉心中心ブロックのものが最も大きい。この発熱分布を図 2.17 に示す。

本節の解析は半径方向一次元の円筒モデルを用いている。これをチャンネルの寸法とともに図 2.18 に示す。これは前節におけるようなブロックからの熱通過を考慮しないものである。前節で考えたような熱通過に関する代表例の計算結果によると、出力分布が図 2.17 で、制御棒の冷却材流量が前節での設定流量近傍(原子炉全流量の 4, 5%程度)であれば、図 2.19 に示されるように、制御棒下端の被覆管の温度（最高温度）は熱通過があっても熱通過がないとした場合より約 20°C 程度の上昇である。したがって、流量設定に対しては温度についてこれだけの余裕をもってみてゆくこととする。

なお、流量設定の評価基準として制御棒の被覆管の許容温度（設計目標値）を 750°C とする。

2.2.2 結果と検討

制御棒の構造は、第 1 章図 1.4 に明らかなように、軸方向を数個に分割した二重円筒の「竹節」構造であり、節と節との間の距離が 50 cm 以下と短かいものである。したがって、内側と外側の各流路に分配された冷却材は、それぞれの軸方向分割点（節）で合流し、温度の均等化が期待される。このような構造的特徴を考慮して、図 2.20 は、両流路の加速損失の不均衡を無視し、内側と外側流路の流量分配が摩擦損失の均衡によってのみ生ずるものとした場合考えられる下記の 4 種類の流量分配曲線を示したものである。ここで、層流、乱流の判定には、臨界レイノルズ数 2320 を基準とした。

分配モデル	流動様式	分配式
	内側流路 - 外側流路	内側流量 W_1 , 外側流量 W_2
A	乱流 - 層流	$W_1 = f(T) W_2^n$
B	乱流 - 乱流	$W_1 = 2.154 W_2$
C	層流 - 層流	$W_1 = 10.386 W_2$
D	層流 - 乱流	$W_1 = g(T) W_2^m$

チャンネル寸法が変れば図2.20の分配曲線も当然変るが、今の場合、この図から次のことがわかる。

- (i) 内側乱流、外側層流の流動様式Aは、全制御棒流量 W_c が原子炉全流量 W_{core} の8%以下で実現され、最も一般的である。
- (ii) 内側と外側がともに乱流である流動様式Bは W_c/W_{core} が9%以上でないと現れない。他方、内側と外側がともに層流である流動様式Cは W_c/W_{core} が1%以下という極めて少流量でしかみられない。
- (iii) 内側層流、外側乱流の様式Dは本体系寸法下では存在しない。
- (iv) 内側の流路は冷却材流量が3 g/s 以上で乱流（レイノルズ数 2320以上）となるが、外側の流路は12 g/s 以上流れないと乱流領域に入らない。なお、内外流路とも冷却材の温度によって層流/乱流の境界流量が若干変化するが、それは、たとえば、400 °Cから500 °Cの温度変化に対して10%である。

図2.21は、温度的に好ましい最適な分配をみるために、制御棒の冷却材流量（原子炉全流量の2~7%の範囲）をパラメータに、内側対外側の流量比 W_1/W_2 と被覆管（および吸収材）の最高温度との関係を示したものである。流動様式の相違からやや特異な温度変化を示しているものもみられるが、大雑把に言えることは、流量の分配の相違による温度変化が比較的小さいことである。また、最適な分配、すなわち、制御棒の温度が最も低くなるような流量分配は、制御棒の冷却材流量が増加するにつれて内側対外側流量比 W_1/W_2 がやや大きくなる傾向を示していることである。つまり、このような分配は先に指摘した最も一般的な内側乱流・外側層流の流動様式となるものであり、外側の流量は冷却材の流量が増えて大きな変化はなく、むしろ内側の流路により多くの冷却材が流れる配分となることを示している。

なお、流動様式の相違による特異な温度変化は、熱伝達率に関連したもので、外側流路の流れにおける乱流から層流への境目の配分においてみられるものである。

代表的な例として、図2.22に内側対外側流量 $W_1/W_2 = 2.15$ 、全制御棒流量対原子炉全流量 $W_c/W_{core} = 0.038$ の場合の軸方向と半径方向の制御棒チャンネルの温度分布を示す。

以上の検討結果から制御棒の冷却という観点からみた制御棒の最適な流量設定を以下のようにする。それは、全制御棒の冷却材流量として原子炉全流量の4%を設定し、かつ、制御棒の内側対外側流量比を2とする、ものである。この設定値は、被覆管の通常使用温度（設計目標温度）を750°Cとし、かつ、Mark-III炉心設計の範囲内での流量配分を考慮したものである。上記

4 %の冷却材流量は前節において得られたものとほぼ等しいものである。なお、Mark-III炉心を対象とした制御棒に関する本設定値は、Mark-III炉心に対する制御棒挿入用燃料体（黒鉛ブロック）の応力評価のための境界条件の設定に用いられている。

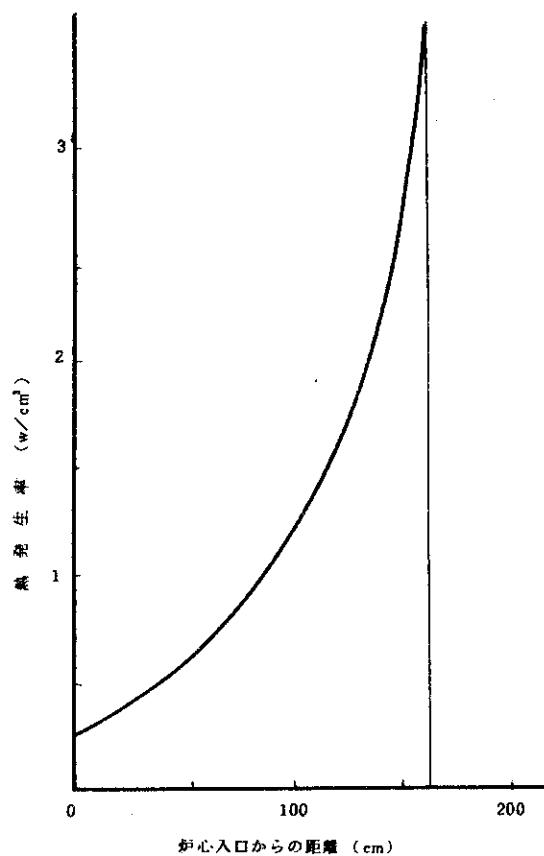


図 2.17 Mark-III 炉心の制御棒の軸方向発熱分布
(初期炉心, 発熱量最大の炉心中心ブロック
の制御棒, 炉心内挿入深さ 3/7)

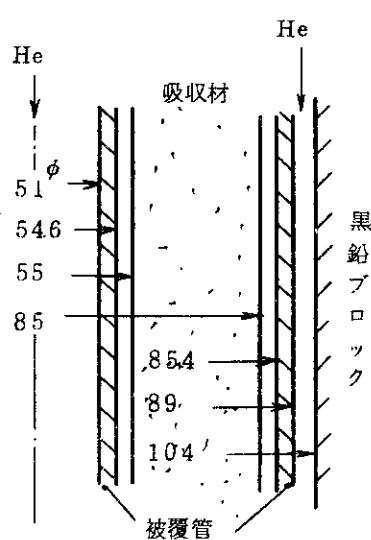


図 2.18 制御棒チャンネルの寸法(Mark-III炉心)

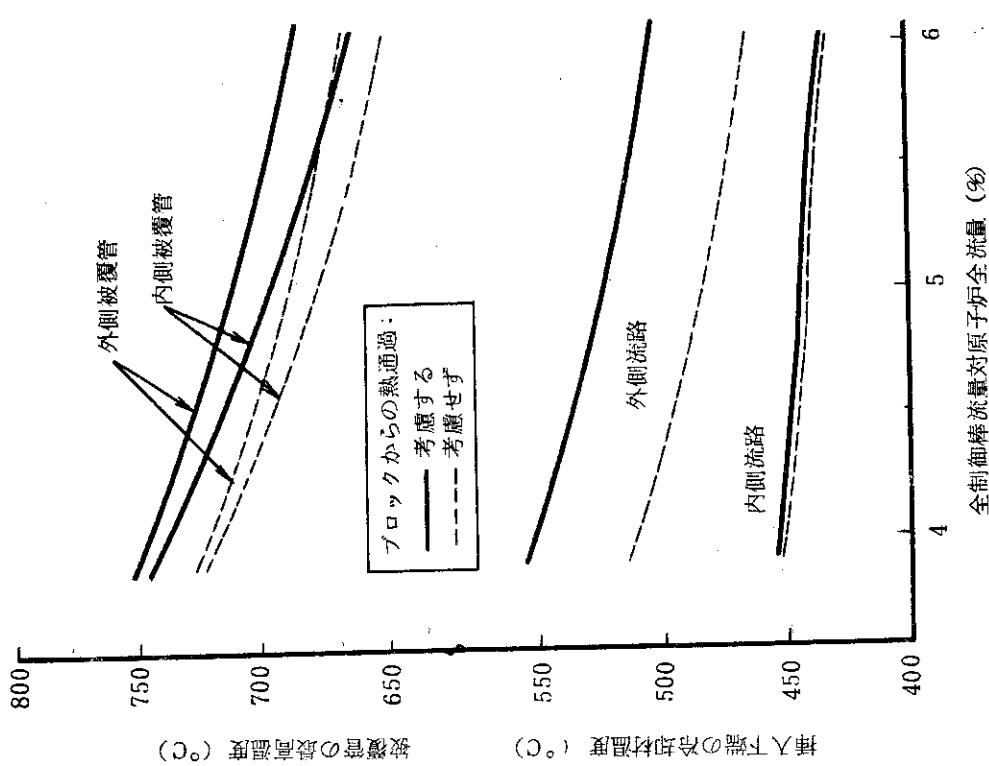


図 2.19 热通過を考慮した場合と考慮しない場合における制御棒の最高温度の比較 (Mark-III 炉心,
最高温度：制御棒挿入最下端)

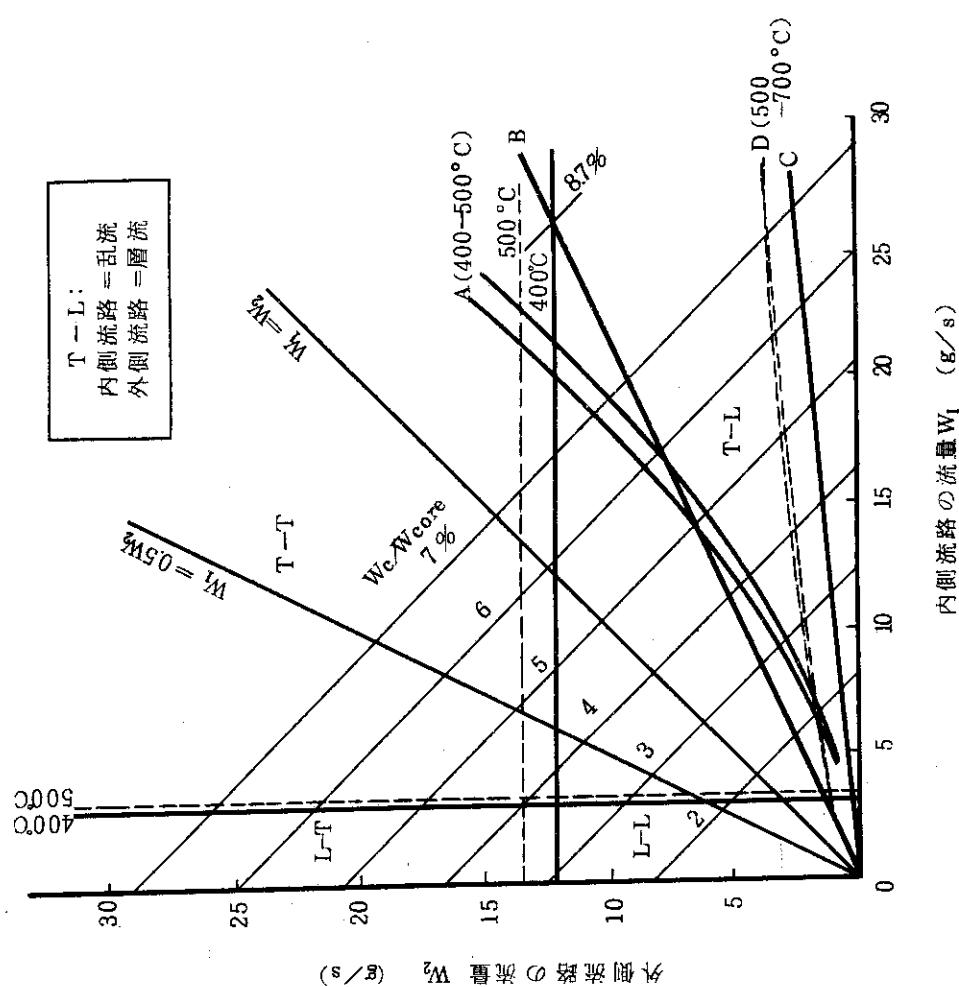


図 2.20 Mark-III 制御棒チャンネルの流量分布と流動様式

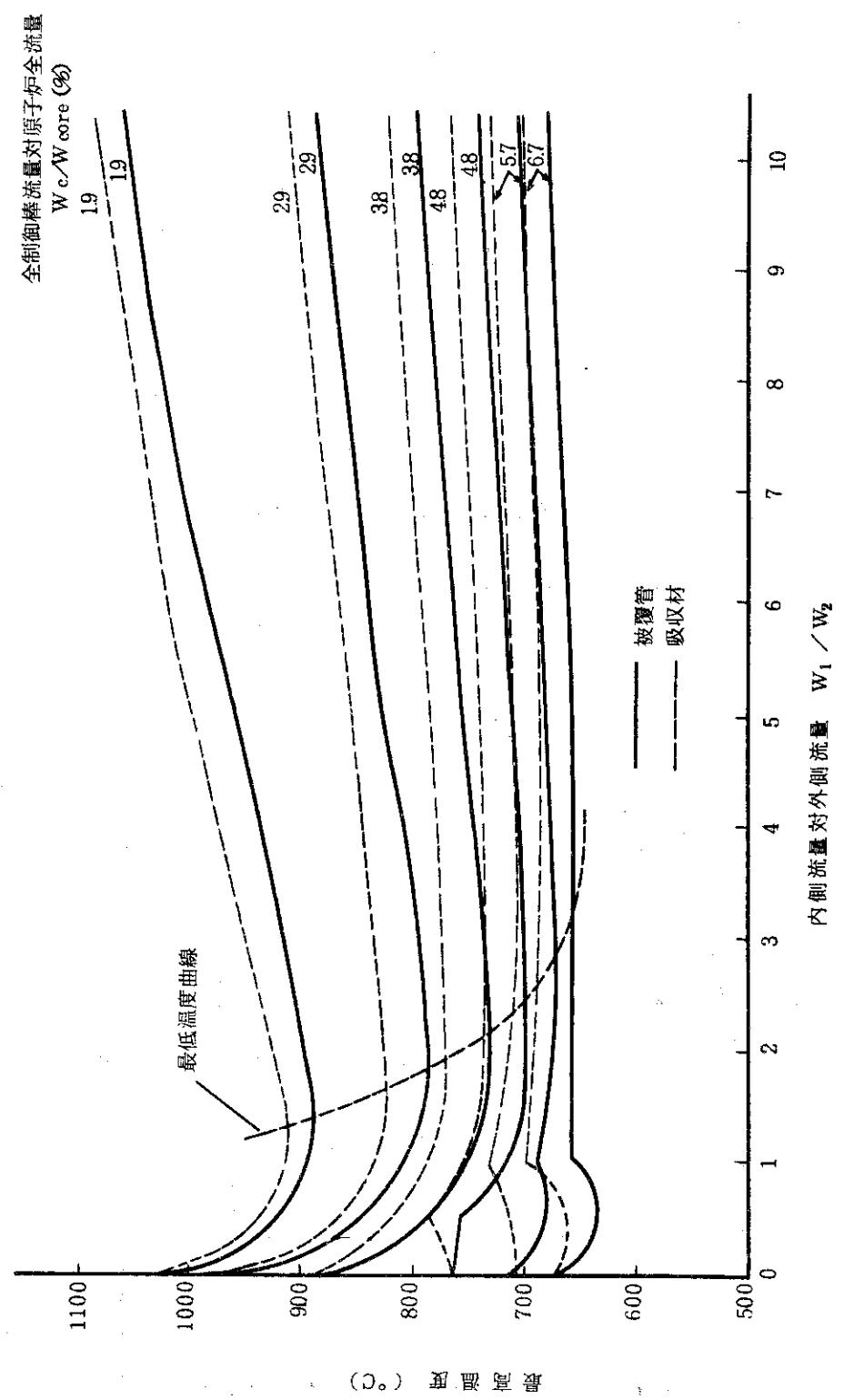


図 2.21 Mark-III 制御棒の最高温度と冷却材流量

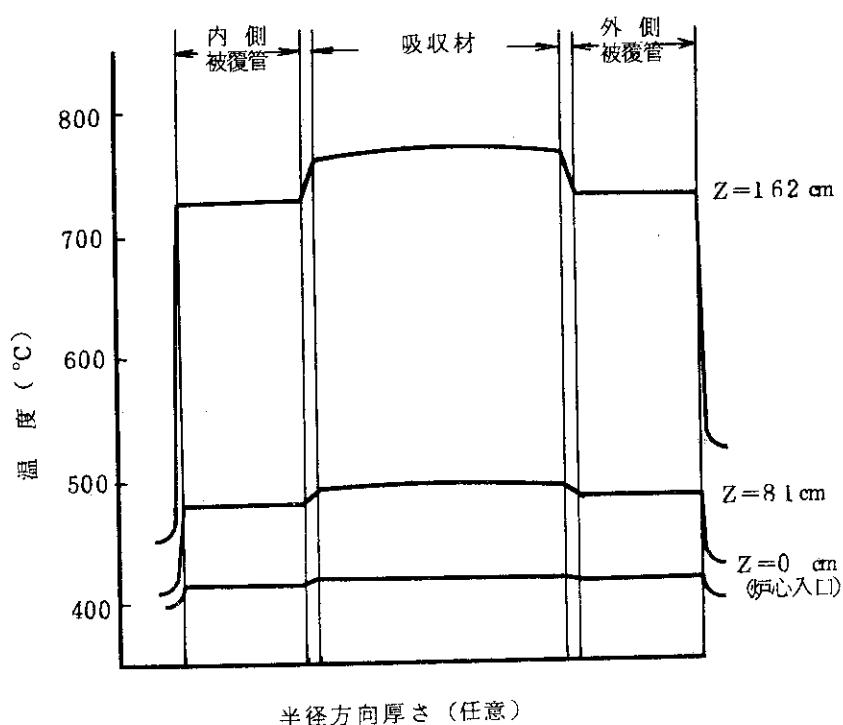
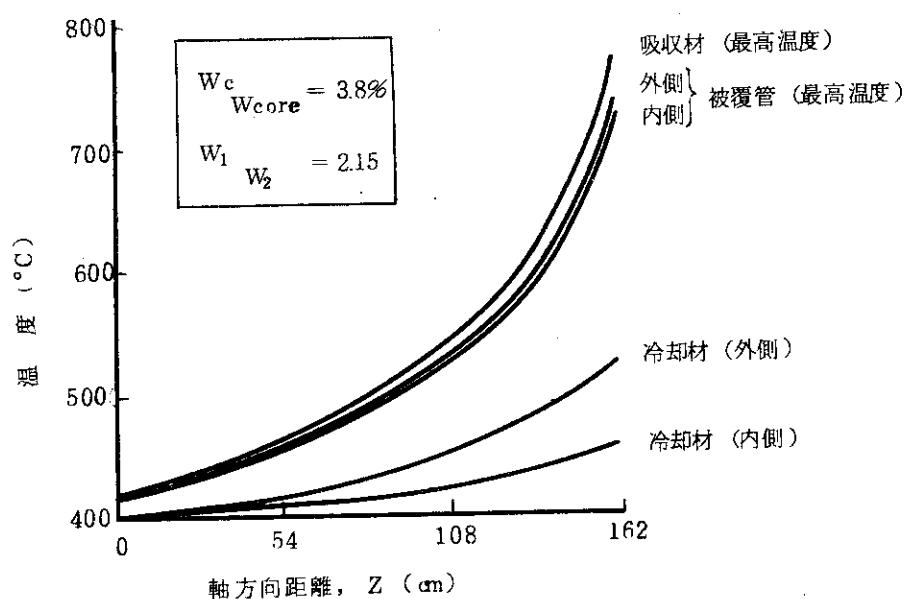


図 2.22 代表的流量配分における軸方向および半径方向温度分布

3. 炉容器内構造物の冷却

高温ガス炉における炉容器内構造物は、炉心はもとより炉心周辺構造物であっても黒鉛を主材料としたものが多い。しかし、中には鋼の構造物、たとえば、炉心拘束機構その他が含まれております。これは、黒鉛と違って、構造的健全性の観点から、特にその使目温度に注意を払わなければならない。

本章は、炉心の流量設定（バイパス流量の設定）に関連して行った炉容器内構造物特に鋼構造物の冷却に注目した温度解析とその検討結果について述べる。

本検討では、バイパス流量を半径方向可動反射体の中の流れと定義し、このバイパス流量の所要量を炉心周辺鋼構造物（固定反射体部の拘束棒、側部および上部熱遮蔽体、コアバレル、サポートプレート、ダイヤグリッド、原子炉圧力容器）の温度条件によって評価、設定することにしている。具体的には、それぞれに対して以下のような制限温度（設計目標値）を基準とする。

固定反射体部拘束棒	650 °C以下
側部・上部熱遮蔽体	550 °C以下
コアバレル	450 °C以下
サポートプレート	500 °C以下
ダイヤグリッド	440 °C以下
原子炉圧力容器	440 °C以下

前章における制御棒の冷却の検討と同様に、先ず Mark-III 炉心を想定した予備的な温度解析結果について述べ、次いで Mark-III 炉心を対象としたそれについて述べる。

3.1 Mark-III 炉心を想定した炉容器内構造物の冷却検討

Mark-III 炉心の炉心寸法がほぼ決った段階で、基本概念設計における炉内各構造物の発熱量を参考として、炉内各部温度の予備的解析を行った。これは、2.1節の制御棒チャンネルの予備的検討と同様、炉心周辺構造物の冷却にどの程度の流量（バイパス流量）を考えればよいかの予測を、Mark-III 炉心の流量設定に関連して行ったものである。なお、本章および本節でのバイパス流量とは、具体的には、半径方向可動反射体の中の流れをいう。

3.1.1 計算条件

(1) 計算モデルと計算コード

計算は $r - z$ の2次元である。図3.1にモデルの詳細を示す。計算コードには TAC-2D (FACOM 230-60 Version^{*)}) を使用した。各構造部の寸法は設計初期段階の Mark-III 炉心のものである。なお、可動反射体部のブロック間ギャップおよび拘束棒部の冷却チャンネルはいずれも単一の環状流路として取扱い、流路幅をそれぞれ、可動反射体部については 1 mm、拘束棒部については 10 mm としている。前者はブロック間ギャップそのものをとったものであり、

*) J. F. Peterson: TAC-2D, User's Manual, GA-8868 (1969)

後者は基本概念設計における原子炉横断面上の冷却孔 80 mm ϕ と 60 mm ϕ の金属的拘束棒によって形成される流路幅をとったものである。

(2) 発熱分布と材料物性値

炉容器内各構造物の発熱量および熱伝導率は表 3.1 に示す値とした。各発熱量は基本概念設計を参考としたそれぞれの構造物の最大値である。なお、熱伝導率はいずれも一定値を用いている。

(3) 境界条件

モデルの外側境界はすべて断熱とする。また、可動反射体より内部の部分、すなわち、炉心部、上下反射体部および上部熱遮蔽体のオリフィス装置とプレナムブロックの一部はダミーとし、一定温度とする。したがって、この部分の熱の出入は考えないことにしている。

(4) 流量配分と各流路の熱伝達率

炉容器／コアバレル間、コアバレル／側部遮蔽体間、拘束棒部の各上向き流れ（冷却材番号 4, 5, 6）と可動反射体部の下向き流れ（冷却材番号 7, 8, 9）の間の流量配分は、各流路の摩擦損失の均衡によって定めた。

こうして求めた流量配分比から流量を決め、レイノルズ数と熱伝達率とを算出した。熱伝達率は臨界レイノルズ数を 2320 と設定し、管内流路における次の式によった。

$$\begin{aligned} h &= (\lambda / De) \cdot Nu \\ Nu &= 4.36 && \text{(層流)} \\ Nu &= 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} && \text{(乱流)} \end{aligned}$$

ここで、 h は熱伝導率、 λ は冷却材の燃伝導率、 De は流路の等価直径、 Nu はヌッセルト数、 Re はレイノルズ数、 Pr はプラントル数、である。ただし、ヘリウム（冷却材）の物性値は、圧力 40 Kg/cm^2 として、上向き流れである流路（4）、（5）、（6）には 400°C における値を、また、下向き流れの（7）には $400\sim800^\circ\text{C}$ 、（9）には $400\sim1000^\circ\text{C}$ の各温度範囲における平均的な値を用いた。

以上のようにして定めた流量配分率と熱伝達率とを表 3.2 に示す。これらの値はいずれも一定値であり、固定して用いている。なお、冷却材番号のうち（1）のダイヤグリッド下部、（2）のサポートプレート下部の中心、（3）のサポートプレート下部、および（10）の高温プレナム部の各熱伝達率は基本概念設計の値を採用した。

3.1.2 結果と検討

本解析では、発熱量、熱伝達率および流量配分率はすべて定数とし、可動反射体の中の冷却材流量のみを変えて炉容器内各構造物の温度分布を求めている。結果を図 3.2～図 3.5 に示す。これらは、原子炉全流量の 2%, 4%, 6% および 8% のバイパス流量を設定し、各々を可動反射体の中の冷却材流量をパラメータに表 3.3 に示す。この結果から次のことがわかる。

- (i) 拘束棒チャンネルの温度（ガス温度）は他の鋼構造物の温度に比べ特に高い。
- (ii) 可動反射体の中の冷却材流量（バイパス流量）の割合によって拘束棒チャンネル、側部遮

表 3.1 炉容器内構造物の最大発熱量と熱伝導率 (Mark-III 想定炉心)

材料番号	構造物	材質	発熱量* w/cc	熱伝導率 cal/cms °C	$C_p \rho$ cal/cm³ s
2	上部遮蔽体	ボロン入り黒鉛 + SUS 316	0.00386	0.1	0.81
3	プレナムブロック	黒鉛	0.00386	0.1	0.64
4	可動反射体	黒鉛	0.135	0.1	0.64
5	可動反射体	黒鉛	0.0296	0.1	0.64
6	サポートフロア	黒鉛	0.0010	0.1	0.64
7	断熱ブロック	炭素	0.00037	0.014	0.22
8	サポートプレート	2 1/4 Cr - 1 Mo	0.0075	0.1	0.86
9	ダイヤグリッド	2 1/4 Cr - 1 Mo	0.0075	0.1	0.86
10	炉容器 (下面)	2 1/4 Cr - 1 Mo	0.00037	0.1	0.86
11	固定反射体	黒鉛	0.0016	0.1	0.64
12	固定反射体	黒鉛	0.0016	0.1	0.64
13	側部遮蔽体	ボロン入り黒鉛 + 2 1/4 Cr - 1 Mo	0.0037	0.1	0.75
14	コアバレル	2 1/4 Cr - 1 Mo	0.0050	0.1	0.86
15	炉容器 (側面)	2 1/4 Cr - 1 Mo	0.0040	0.1	0.86

* 基本概念設計の値を参考とした。

表 3.2 冷却材流量配分と熱伝達率 (Mark-III 想定炉心)

冷却材番号	冷却材流路	流量分配 (%)	熱伝達率* (cal/cm² s °C)	レイノルズ数 (参考値)
1	ダイヤグリッド下部	100	0.00080	
2	サポートプレート中心部	100	0.0074	7.5×10^4
3	サポートプレート下部	100	**	
4	炉容器 / コアバレル	46.8	0.0019	26100
5	コアバレル / 側部遮蔽体	52.1	0.0019	331000
6	拘束棒部	1.1	0.0013	730
7	可動反射体部 ($\alpha = 2 \sim 8\%$)	0.393 α	0.015	
8		0.334 α	0.016	$\} 500 \sim 2000^{***}$
9		0.273 α	0.017	
10	高温プレナム部	100	0.0103	

* 基本概念設計 (Mark-II 炉心設計) を参考とした。

** 0.00448 (r_0/τ) , $r_0 = 40$ cm

*** 原子炉全流量の 2~8% を想定したもの

蔽体、オリフィス装置等の上部遮蔽体およびコアバレルの各温度が影響を受ける。これらのうち最も影響されるのは拘束棒チャンネルの温度であり、次いで上部遮蔽体、側部遮蔽体、コアバレルの順である。

表 3.3 炉容器内鋼構造物の最高温度 (°C) とバイパス流量 (Mark-III 想定炉心)

バイパス 流量 (%)*	上向き 冷却材の 出口(平均)	拘束棒 チャンネル	側 部 遮蔽体	上部遮蔽体 (オリフィス)	コア バレル	原 子 炉 容 器	サポー トプレート	ダイヤ グリッド
2	406	684	507	489	405	406	435	398
4	404	637	488	449	404	406	435	398
6	402	592	472	433	403	405	434	398
8	401	557	460	425	402	405	434	398

*）原子炉全流量に対する可動反射体の中の冷却材流量の割合

- (iii) ダイヤグリッド、コアバレルおよび原子炉容器の温度は 410 °C 以下と低い。
- (iv) コアバレル／炉容器間などの上向き冷却材の出口混合平均温度は 405 °C 前後であり、可動反射体の中の冷却材流量の変化による相違は僅かである。

この予備的サーベイによって、炉容器内鋼構造物のうちで最も高い温度を示す拘束棒部の温度を、その構造的健全性に配慮して、たとえば、650 °C 以下にしようとする場合には、原子炉全流量の 4 %程度の冷却材が必要であること、また、600 °C 以下とする場合には 6 %程度の流量が必要であること、のおおよその目安を得た。また、本解析と同時期に行なった第 2 章 2.1 節の制御棒の予備的サーベイと本結果とによって、Mark-III 炉心では、燃料チャンネル以外の冷却材流量（バイパス流量）として、原子炉全流量の 10 %程度を想定すればよいであろうとの予測を得た。なお、この 10 %のバイパス流量の想定は従来の設計 (Mark-I, II) でも取られてきたものである。

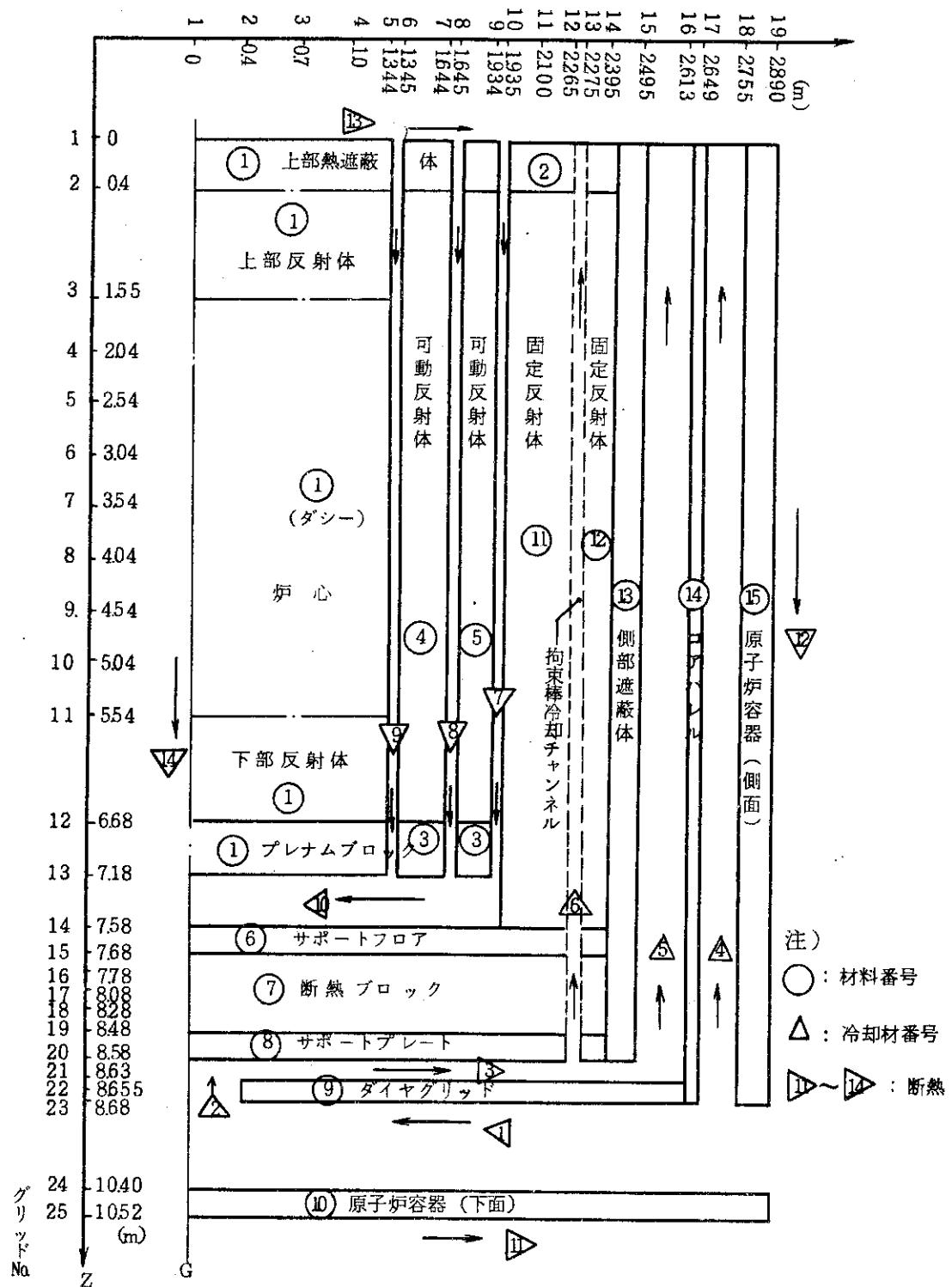


図 3.1 炉容器内構造物の温度計算モデル (Mark-III想定炉心)

TEMPERATURES (C)																			
THE RADIAL (I) DIRECTION IS HORIZONTAL						THE AXIAL (J) DIRECTION IS VERTICAL													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
402	405	406	407	416	450	441	463	453	476	489	511	463	455	411	405	398	406		
405	405	406	407	457	625	592	597	566	562	559	540	471	462	410	405	397	405		
418	418	418	421	479	673	651	658	621	618	613	578	487	475	408	404	397	405		
487	487	488	490	539	728	703	707	669	661	652	602	496	482	408	403	397	405		
571	571	572	573	617	793	760	758	715	703	691	624	505	490	407	403	397	405		
657	657	657	659	697	863	820	811	762	747	730	645	513	496	406	402	396	404		
742	743	743	745	781	935	882	866	810	790	769	663	520	502	405	401	396	404		
828	828	829	830	862	1007	945	920	857	832	806	677	525	506	403	401	396	404		
913	913	914	915	944	1077	1006	972	902	871	839	684	527	507	402	400	396	403		
991	991	992	993	1019	1141	1062	1019	942	904	865	682	525	505	401	399	396	403		
1062	1062	1062	1063	1095	1208	1131	1074	986	937	886	647	509	491	395	398	395	403		
1064	1064	1064	1064	1069	1069	1063	1010	951	891	832	564	472	460	397	397	395	403		
1001	1001	1000	1000	999	999	999	999	999	999	999	873	827	772	496	445	438	396	397	
987	987	986	985	981	979	965	952	865	818	743	448	432	425	396	396	395	403		
15	949	948	947	944	938	933	913	895	817	775	680	431	426	419	396	396	395	403	
16	815	814	811	803	790	780	751	726	666	633	548	417	412	410	396	396	395	402	
17	642	643	642	636	625	617	597	580	543	524	474	404	405	404	396	396	395	402	
18	501	505	506	505	500	496	487	479	463	455	432	399	402	402	396	396	395	402	
19	423	430	433	432	433	430	426	423	421	416	396	401	401	396	397	395	395	402	
20	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	
21	396	397	397	397	397	397	397	398	398	398	398	398	398	398	398	398	397	395	
22	397	397	397	397	397	397	397	398	398	398	398	398	398	398	398	398	397	395	
23	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	397	395	
24	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	
25																			

図 3.2 Mark - III 想定炉心の炉心周辺構造物の温度分布（可動反応体領域の流量が原子炉全流量の 2 % の場合）

		TEMPERATURES (C)																			
		THE RADIAL (CJ) DIRECTION IS HORIZONTAL					THE AXIAL (CJ) DIRECTION IS VERTICAL														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46

図 3.3 Mark-III 想定炉心の炉心周辺構造物の温度分布（可動反射体領域の流量が原子炉全流量の4%の場合）

TEMPERATURES (C)

THE RADIAL (I) DIRECTION IS HORIZONTAL
THE AXIAL (J) DIRECTION IS VERTICAL

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	405	403	406	407	410	432	417	431	421	438	449	470	443	438	408	404	398	406	398	406
2	405	405	405	407	446	525	528	492	493	493	491	448	442	407	403	397	397	403	403	403
3	418	418	418	420	465	629	580	578	534	536	535	523	461	453	406	403	397	397	405	405
4	487	487	487	489	518	676	622	618	573	570	566	543	470	460	406	402	397	397	405	405
5	571	571	571	572	592	735	672	672	610	611	606	600	563	478	467	405	402	397	397	405
6	657	657	657	658	672	800	722	706	650	642	633	583	486	473	404	401	396	396	404	404
7	742	743	743	743	753	860	778	755	692	680	658	602	493	479	403	401	396	396	404	404
8	828	828	828	829	835	937	836	805	735	719	702	618	500	485	402	400	396	396	404	404
9	915	913	913	913	913	916	1006	895	855	778	758	737	631	504	488	401	400	396	396	403
10	991	991	991	991	991	991	992	1071	953	905	821	795	768	637	505	488	400	399	396	403
11	1062	1062	1062	1063	1063	1077	1154	1043	982	890	850	809	617	496	481	398	398	395	395	403
12	1064	1064	1064	1064	1064	1067	1051	1033	972	900	847	795	555	467	455	397	397	395	395	403
13	1000	1000	1000	999	999	999	999	999	999	999	866	815	160	493	443	436	396	396	397	397
14	987	987	986	984	981	978	963	950	858	809	734	447	431	425	396	396	395	395	403	
15	949	948	947	944	937	933	912	903	811	767	672	431	425	418	396	396	395	395	402	
16	815	813	811	803	790	779	750	725	663	631	546	417	412	409	396	396	395	395	402	
17	642	643	642	635	625	616	596	578	542	523	473	404	405	404	396	396	395	395	402	
18	501	505	506	505	500	496	487	478	462	454	432	399	401	402	396	396	395	395	402	
19	423	430	433	435	433	433	430	428	423	421	415	396	401	400	396	397	397	397	402	
20	392	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	396	396	396	396	396	
21	395↑	397	397	397	397	397	397	397	398	398	398	398	398	398	397	397	397	397	397	
22	395↓	397	397	397	397	397	397	397	398	398	398	398	398	398	397	397	397	397	397	
23	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	
24	395←	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	
25	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	
26																				

図 3.4 Mark - III 想定炉心の炉心周辺構造物の温度分布（可動反射体領域の流量が原子炉全流量の 6 %の場合）

	TEMPERATURES (C)																		
	THE RADIAL (J) DIRECTION IS HORIZONTAL									THE AXIAL (J) DIRECTION IS VERTICAL									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	405	406	407	406	422	406	415	406	417	425	436	423	404	402	404	397	397	405	
2	405	405	406	434	551	470	474	439	442	444	448	428	425	403	401	397	397	405	
3	418	418	418	420	452	568	516	511	465	467	469	468	436	431	403	401	397	397	405
4	487	487	487	488	493	623	546	537	487	488	488	481	441	436	402	401	397	397	405
5	571	571	571	571	560	671	578	565	511	510	508	495	447	440	402	401	397	397	405
6	657	657	657	656	656	635	727	716	596	536	534	531	509	452	445	402	400	396	404
7	742	742	742	742	742	713	786	658	630	563	559	553	523	458	420	401	400	396	404
8	828	828	828	828	827	827	792	846	703	666	592	586	578	536	463	454	400	400	404
9	913	913	913	913	912	912	872	908	751	705	622	613	603	548	468	457	400	399	403
10	991	991	991	991	990	990	948	970	800	746	655	642	628	557	471	460	399	398	403
11	1062	1062	1062	1062	1061	1061	1041	1055	886	817	716	693	669	552	468	457	397	398	403
12	1064	1064	1064	1064	1063	1052	991	919	857	752	718	683	518	451	443	396	397	395	403
13	1000	999	999	998	998	998	998	998	998	998	998	998	721	678	476	435	429	396	397
14	986	985	983	979	976	956	939	816	750	674	440	425	420	396	396	396	397	395	403
15	948	947	946	942	935	929	903	880	777	721	628	427	421	415	396	396	396	395	403
16	813	813	810	800	785	773	741	712	647	612	530	415	411	407	396	396	396	395	402
17	641	642	641	633	622	613	591	572	535	515	467	403	404	403	396	396	396	395	402
18	501	505	506	503	498	494	484	476	460	451	430	399	401	401	396	396	396	395	402
19	423	430	433	434	433	432	430	427	422	420	415	396	401	401	396	396	396	395	402
20	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	402
21	395	396	397	397	397	397	397	397	397	398	398	398	398	398	397	397	397	395	401
22	395	397	397	397	397	397	397	397	397	398	398	398	398	398	397	397	397	395	401
23	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	401
24	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396
25	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396
26																			

図 3.5 Mark-III 想定炉心の炉心周辺構造物の温度分布(可動反射体領域の流量が原子炉全流量の 8% の場合)

3.2 Mark-III炉心を対象とした炉容器内構造物の冷却検討

前節では、Mark-II炉心からMark-III炉心への発展段階で、主としてバイパス流量に対する流量設定に関連して、Mark-III炉心を想定した炉容器内構造物の温度解析を行った。本節では、前節での結果を踏まえ、特に温度的に厳しいことの予想される拘束棒の温度に注目し、かつ、第1次概念設計において得られた各炉内構造物の発熱量が基本概念設計でのそれよりも全般的に小さくなっている^{*}ことにも留意し、冷却の観点から、Mark-III炉心を対象とした温度解析を行った結果について述べる。

なお、本節では、発熱量や熱流動物性値の不確定要素を考慮して、これらをパラメータとしたサーベイを実施している。

3.2.1 計算条件

(1) 計算モデルと計算コード

計算モデル、計算コードおよび境界条件は前節3.1と全く同様である。ただし、各部寸法および構成は拘束機構を除き第1次概念設計に準拠している。拘束機構の構造寸法は基本概念設計段階のものを使用した。^{**)} また、この拘束棒部分の流路ギャップは2.8 mmとした。これは、原子炉横断面上の拘束棒部分の流路断面積から等価的な環状流路ギャップを算出したものである。可動反射体部についてもこれと同様、原子炉横断面上の各ブロック間ギャップから流路断面積を求め、これから等価的な環状流路ギャップを算出すると1.3 mm前後の値となるが、これは前節のブロック間ギャップそのものと余り差がない。したがって、可動反射体部については前節と同じ値1 mmを採用するものとした。図3.6に本解析（Mark-III炉心）の場合のモデル寸法を示す。

(2) 発熱分布と材料物性値

各構造物の発熱量を表3.4に示す。この値は各構造物についての最大値であり、第1次概念設計に基づいている。なお、表3.4には参考として前節3.1の解析に用いた発熱量（基本概念設計値）に対する比を掲げておいた。

各構造物の熱伝導率は断熱ブロックを除き前節の値（表3.1）をそのまま用いている。断熱ブロックについては軸方向に0.0119 Cal/cm s °C、径方向に0.0056 Cal/cm s °Cの第1次概念設計の値を採用した。断熱ブロックは基本概念設計では炭素レンガが考えられていたが、第1次概念設計では断熱性能および耐荷重性能の見直しがなされ、その結果、複合断熱構造がとられたものである。上記の値はこれらの構成比から概算値である。

(3) 流量配分と各流路の熱伝達率

各流路の冷却材流量配分は第1次概念設計に基づき次のようにした。冷却材番号(1), (2), (3)および(4)はそれぞれが原子炉全流量(15.9 Kg/s)の1/2、冷却番号(5)と(6)はその合計が原子炉全流量の1/2となるものとする（図3.6参照）。すなわち第1次概念設計では、炉内に入ってくる入口ガスを半分に分け、一つは炉容器とコアバレルとの間の環状流路を上向きに流して上部プレナムに至るものとし、他方は下部プレナムからダイヤグリッド中心部に

^{*}) 照射発熱量を小さくするため、第1次概念設計では、下部反射体の下方にもボロン入り熱遮蔽体を設置している。

^{**) 第1次概念設計では、照射発熱の低減、冷却ガス流路確保のため、基本概念設計の構造寸法に若干の改善を施している。}

表 3.4 炉容器内構造物の最大発熱量 (Mark-III 炉心)

材料番号	構 造 物	発熱量* w/cc	表3.1の発熱量との比	備 考
2	上部遮蔽体(オリフィス装置)	0.025	6.48	上方向熱遮蔽体ボロン層他を含む
3	プレナムブロック	0.003	0.78	下方向熱遮蔽体ボロン層を含む
4	可動反射体(径方向)	0.09	0.67	
5	可動反射体(径方向)	0.007	0.24	r 線量率(中央)/(外側)の比だけ No.4を減ず
6	サポートフロア	0.0010	1.0	表3.1のものと同値
7	断熱ブロック	0.00037	1.0	表3.1のものと同値
8	サポートプレート	4.6×10^{-6}	0.00061	
9	ダイヤグリッド	0.0075	1.0	表3.1のものと同値
10	炉容器(下)	2.9×10^{-7}	0.00078	
11	固定反射体	0.0019	1.19	
12	固定反射体(拘束棒)	0.000285	0.18	拘束棒の発熱量 0.006w/cc 分を考慮
13	側部遮蔽体	0.0037	1.0	ボロン層他を考慮
14	コアパレル	1.3×10^{-4}	0.26	
15	炉容器(側)	5.5×10^{-5}	0.14	

* 第1次概念設計値

表 3.5 計算に用いた各流路の熱伝達率 (Mark-III 炉心)

冷却材番号	冷却材流路	配分比 (%)	熱伝達率 (cal/cm ² s °C)	備 考
1	ダイヤグリッド下部	50	0.000417	第1次概念設計書による
2	サポートプレート中心	50	0.0061 (= α_0)	同上
3	サポートプレート下部	50	$\alpha_0 (0.3/r)^{1/3}$	同上, r = 半径方向位置 (m)
4	炉容器/コアパレル	50	0.00202	{ 3.1節と同様な方法
5	コアパレル/側部遮蔽体	49.85	0.00186	} によって定めたもの
6	拘束棒	0.15	0.00467	
7	反射体	1.572*	0.015	
8		1.336*	0.016	表3.2(3.1節)と同値
9		1.092*	0.017	
10	高温プレナム	100	0.00764	第1次概念設計書による

* 可動反射体部の流量として原子炉全流量の 4 %を考えたもの。これを本節では標準計算としている。

流入し、径方向に流れを変えて炉心支持板とダイヤグリッドを冷却しながら周辺部に至り、コアパレルと側部遮蔽体の間の環状流路、拘束棒などを冷却して上部プレナムに流入するものとしている（第1章1.2節）。

可動反射体部の流量は原子炉全流量の4%^{*}を標準とする。そして、これら(7), (8), (9)流路間の流量配分は3.1節と同様に定める。また、冷却材番号(5), (6)についても同様である。具体的な流量配分比は、可動反射体部については炉心内側より1:1.22:1.44, (6)と(5)については1:332, である（表3.5）。

各流路の熱伝達率は、3.1節と同様一定値とした。具体的な数値を表3.5に示す。なお、これらの値は第1次概念設計の値を参考としている。

3.2.2 結果と検討

可動反射体の中の流量として原子炉全流量の4%を考えた本標準計算の炉心周辺構造物の温度分布を図3.7および図3.8に示す。また、可動反射体の中の流量をパラメータとした鋼構造物の最高温度変化を図3.9に示す。いずれも前節の結果と大きな相違はなく、可動反射体の中の流量の割合によって拘束棒チャンネル、側部（および上部）遮蔽体の温度変化が他の鋼構造物に比較して大きくなっている。

第1次概念設計の構造寸法に対して、各構造物の発熱量として、基本概念設計値を参考とした表3.1の値を用いた場合と、第1次概念設計値を用いた本解析結果との温度比較を表3.6に示す。表3.4から知られるように第1次概念設計における炉内構造物の各発熱量は、基本概念設計値の

表3.6 構造物の発熱量として第1次概念設計値と基本概念設計値とを用いた場合の鋼構造物の最高温度の比較（℃）
反射体部流量=原子炉全流量の4%

発熱量	上向き 冷却材 出口(平均)	拘束棒 チャンネル	側部 遮蔽体	上部 遮蔽体	コア パレル	原子炉 容器	サポート プレート	ダイヤ グリッド
1概算(A)	405	634	535	477	404	396	427	407
基概算(B)	409	686	568	441	410	406	433	407
(A)-(B)	-4	-52	-33	+36	-6	-10	-6	0

ものより、上部および側部遮蔽体を除いて、すべてかなり小さな値を示している。この結果、可動反射体部の流量を原子炉全流量の4%（前節での予測値）とした場合でも、拘束棒チャンネルの温度は650°C（第1次概念設計温度）以下になっている。これに対して、基本概念設計値を用いた場合の解析では、この部分の温度は650°Cを40°C程度上回っている。

Mark-III炉心を対象とした本節において、さらに、発熱量の相違による鋼構造物の温度変化について解析した結果を表3.7に示す。これは、原子炉全流量の4%を可動反炉体部の流量とした標準計算に対して、特定の構造物についてのみ発熱量を第1次概念設計値（表3.4）の2倍に

*) これは、前節3.1の結果に基づくものである。

増大させたときの鋼構造物の各最高温度を示したものである。この結果から次のことがわかる。

- (i) 炉容器内構造物のうちでは、特に可動反射体の発熱量が鋼構造物の温度に与える影響が大きい。しかも、これは、径方向に位置するほとんどすべての構造物の温度に影響を与える、中でも、拘束棒チャンネルの温度への影響が特に大きい。
- (ii) 拘束棒チャンネルの温度に影響を与える構造物は、上記の可動反射体以外では、固定反射体と側部遮蔽体であり、他の構造物の影響はほとんどない。
- (iii) 可動反射体、固定反射体および側部遮蔽体以外の構造物の発熱量は炉内すべての鋼構造物の温度にはほとんど影響を与えない。

上記の発熱量の場合と同様に、可動反射体部の流量が原子炉全流量の4%の場合の、熱伝達率の影響について解析した結果を表3.8に示す。これは、特定の流路の熱伝達率について表3.5における値の1/10倍にしたときの各鋼構造物の最高温度を示したものである。この結果から次のことが知られる。

- (i) 拘束棒チャンネルの熱伝達率の変化に対しては、拘束棒チャンネルの温度変化そのものは小さく、側部遮蔽体の比較的大きな温度変化を除いて、他の鋼構造物の温度はほとんど変わらない。
- (ii) これに対して、コアバレル／側部遮蔽体間の流路の熱伝達率の変化は、拘束棒チャンネルと側部遮蔽体の温度に特に大きな影響を及ぼす。
- (iii) 炉心周辺構造物の中でも特に発熱量の大きな可動反射体部（径方向）の流路の熱伝達率も拘束棒チャンネルと側部遮蔽体の温度にかなり大きな影響を与える。
- (iv) コアバレル／炉容器間、および高温プレナム部の熱伝達率の変化の鋼構造物の温度への影響は小さい。
- (v) サポートプレート／ダイヤグリッド間の流路の熱伝達率の変化は、特にサポートプレートの温度に大きな影響を与える。
- (vi) 下部低温プレナム部の熱伝達率の変化は、鋼構造物の温度にはほとんど影響しない。

一例として、第1次概念設計の炉容器内流量配分方式と異なる流量配分設定をした場合の鋼構造物の温度が前と同じ表3.8に示してある。これは、コアバレル／炉容器間の流れを80%とし、残りの20%の流量を下部低温プレナム部からの流れとしたものである。なお、可動反射体の中の流れは原子炉全流量の4%とし、流量変更箇所の流路の熱伝達率は下記の値を用いた。ただし、冷却材ヘリウムは400°C, 40 Kg/cm²としている。

冷却材 番号	流量分配 (%)	熱伝達率 (cal/cm ² s °C)	算出式
2	20	0.00363	$Nu = 0.94 Pr^{0.4} Re^{0.5}$
3	20	$\alpha_0 (0.3/r)^{1/3}$	表3.5と同じ, $\alpha_0 = 0.00363$
4	80	0.00294	
5		0.00089	$\} Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$ (乱流)
6	20	0.00467	$Nu = 4.36$ (層流)

拘束棒チャンネルおよび側部遮蔽体の温度が、第1次概念設計の流量配分方式による計算結果に比べてかなり高くなっている。これは、流量の減少と、これによってコアバレル／側部遮蔽体

間の熱伝達率が前の値（表3.5）の50%程度に小さくなっていること、とに因るものであろう。これは、既に述べた熱伝達率を変えて計算した結果から知られるところでもある。サポートプレートおよびダイヤグリッドの温度が若干高くなっているのも同様な理由によるものである。

表 3.7 ある特定の構造物についてのみ発熱量を表 3.4 の値の 2 倍に増大させたときの鋼構造物の最高温度 (°C)

反射体部流量 = 原子炉全流量の 4 %

構造物*	上向き冷却材出口(平均)	拘束棒チャンネル	側部遮蔽体	上部遮蔽体	コアバレル	原子炉容器	サポートプレート	ダイヤグリッド
可動反射体	408	688	568	489	407	397	427	408
固定反射体	405	641	538	478	405	396	427	408
側部遮蔽体	405	638	538	479	405	396	427	408
コアバレル	405	634	535	477	404	396	427	408
プレナムブロック	405	635	535	477	404	396	427	408
サポートプレート	405	634	535	477	404	396	427	408
上部遮蔽体	406	635	535	536	405	396	427	408
標準計算	405	634	535	477	404	396	427	407

* 発熱量を変えた構造物名

表 3.8 ある特定の流路の熱伝達率のみ表 3.5 の値の 1/10 倍に減少させたときの鋼構造物の最高温度 (°C)

反射体部流量 = 原子炉全流量の 4 %

冷却材番号*	上向き冷却材出口(平均)	拘束棒チャンネル	側部遮蔽体	上部遮蔽体	コアバレル	原子炉容器	サポートプレート	ダイヤグリッド
(7) (8) (9)	402	540	475	500	402	396	427	407
(5) (6)	398	762	646	488	402	395	428	407
(5)	399	831	791	502	396	395	430	407
(6)	400	656	450	479	400	396	428	407
(4)	405	635	535	477	412	396	427	409
(10)	404	627	530	477	404	396	421	408
(3)	405	635	535	477	422	396	566	463
(1)	405	634	535	477	404	396	427	408
(2) ~ (6)**	403	701	620	490	404	396	445	412
標準計算	405	634	535	477	404	396	427	407

* 热伝達率を変えた流路の冷却材番号 (図 3.1 参照)

** 第 1 次概念設計の炉内流量配分を変更したもので、熱伝達率と流量が変わっている (本文参照)。

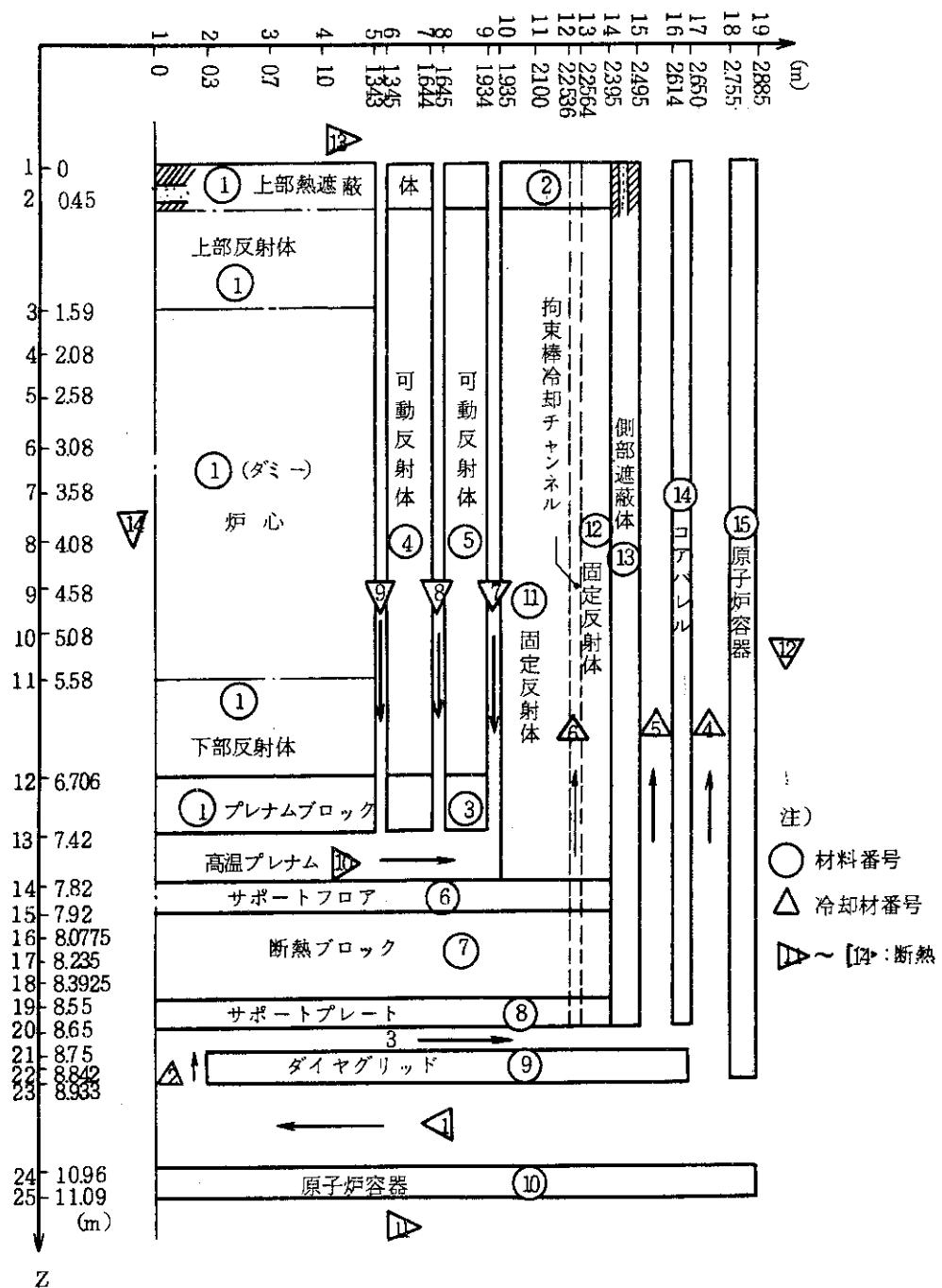


図 3.6 炉容器内構造物の温度計算モデル (Mark-III炉心)

Δ COOLANT NUMBER	INLET	OUTLET	FLOW (LB/HR)	COOLANT TEMPERATURES (C)	INLET	OUTLET	FLOW (LB/HR)												
1	395	395	56688	4.38 4.32 4.30 4.25 4.20 4.14 4.07 4.00 3.95	393	395	56886												
3	395	397	58688	4.38 4.32 4.30 4.25 4.20 4.14 4.07 4.00 3.95	395	396	58886												
5	397	413	58711	4.38 4.32 4.30 4.25 4.20 4.14 4.07 4.00 3.95	395	473	176												
7	405	762	1851	4.38 4.32 4.30 4.25 4.20 4.14 4.07 4.00 3.95	395	405	1573												
9	405	1084	1286	4.38 4.32 4.30 4.25 4.20 4.14 4.07 4.00 390	1000	1000	11776												
11	-17	-17	1000000	4.38 4.32 4.30 4.25 4.20 4.14 4.07 4.00 -17	1000000	1000000	1000000												
13	-17	-17	1000000	4.38 4.32 4.30 4.25 4.20 4.14 4.07 4.00 -17	1000000	1000000	1000000												
				TEMPERATURES (C)															
				THE RADIAL (1) DIRECTION IS HORIZONTAL THE AXIAL (2) DIRECTION IS VERTICAL															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
405	405	406	407	414	449	430	425	420	414	409	404	404	404	404	404	404	404	396	396
405	405	405	406	432	496	489	474	471	466	456	446	441	441	441	441	441	441	396	396
416	416	417	418	448	556	522	510	502	483	477	464	450	445	445	445	445	445	396	396
456	456	457	457	457	582	582	582	582	579	575	571	562	552	552	552	552	552	396	396
5	533	533	533	534	541	541	541	541	541	530	520	512	502	502	502	502	502	396	396
6	647	647	647	647	647	635	635	635	635	621	612	602	592	592	592	592	592	396	396
7	796	795	795	794	794	760	760	760	760	668	662	652	643	643	643	643	643	3965	3965
8	946	946	947	947	946	898	879	879	879	737	675	675	675	675	675	675	675	3967	3967
9	1053	1052	1052	1052	1051	1007	967	967	967	866	816	816	816	816	816	816	816	3951	3951
10	1098	1096	1098	1097	1097	1069	1030	872	785	697	608	639	567	567	567	567	567	3955	3955
11	1108	1106	1105	1105	1105	1098	1084	951	660	769	730	691	623	557	557	557	557	3955	3955
12	1103	1105	1105	1103	1103	1086	1021	956	686	801	755	710	634	562	535	535	535	3955	3955
13	1004	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	781	742	696	617	543	517	396	396	395	395
14	982	982	982	982	982	975	975	975	975	935	822	822	822	822	822	822	822	395	395
15	910	911	910	904	904	903	876	854	761	710	613	501	487	487	487	487	487	395	395
16	773	772	773	774	774	763	741	721	721	655	618	533	458	451	432	432	432	395	395
17	634	634	634	638	638	633	633	630	613	599	551	535	476	430	427	427	427	395	395
18	493	493	497	501	500	498	491	484	484	466	457	432	412	412	410	410	410	395	395
19	412	412	422	422	422	427	427	427	427	423	416	410	404	404	404	404	404	395	395
20	392	392	395	395	395	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	395	395
21	395	404	405	406	406	406	406	406	406	407	407	407	407	407	407	407	407	395	395
22	404	404	407	407	407	407	407	407	407	408	408	408	408	408	408	408	408	395	395
23	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395
24	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	395	395
25	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396
26																			

図 3.7 Mark-III 炉心の炉心周辺構造物の温度分布(可動反射体領域の流量は原子炉全流量の4%)

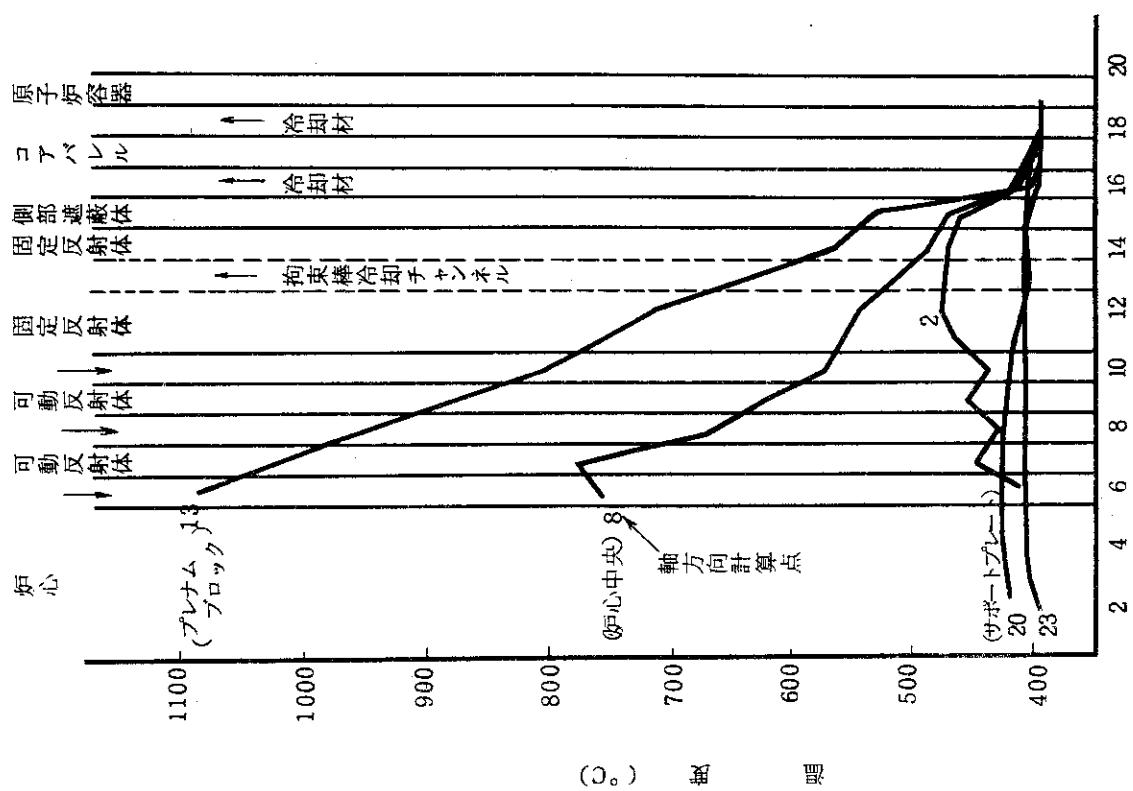


図 3.8 Mark-III炉心の炉心周辺構造物の半径方向温度分布
(可動反射体の中の流量は原子炉全流量の 4 %)

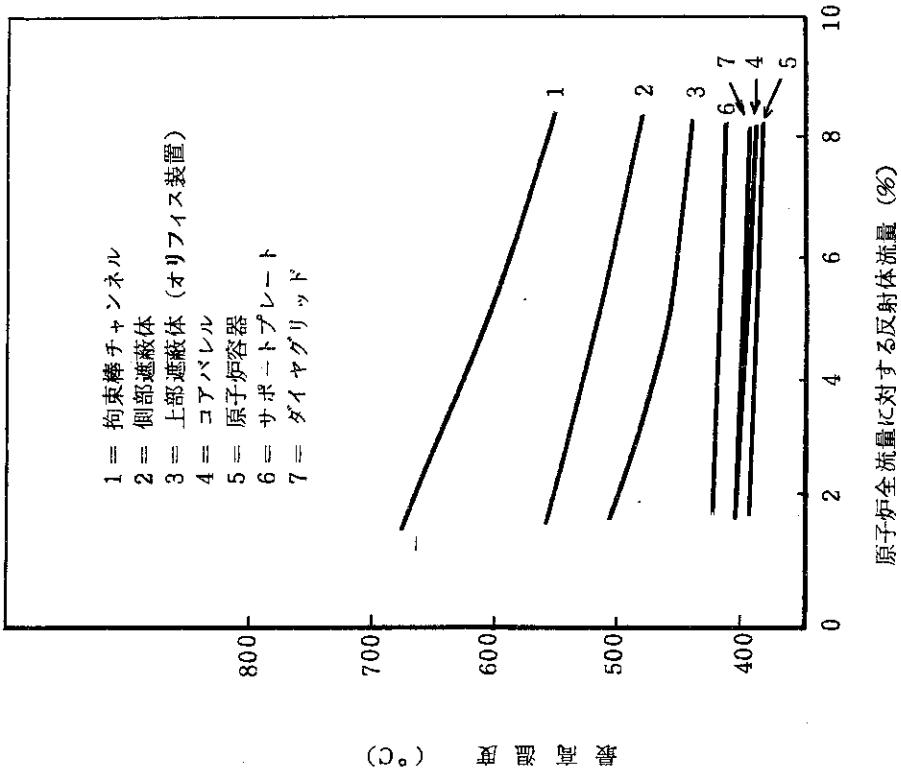


図 3.9 可動反射体領域の流量と炉内鋼構造物の最高温度
の関係 (Mark-III炉心)

4. まとめ

第2章で述べた制御棒の冷却および第3章で述べた炉容器内構造物の冷却に関する検討について以下のことことが明らかとなった。

(1) 制御棒の冷却について

Mark-I炉心設計において得られた制御棒の発熱分布を用いてMark-III炉心を想定した制御棒の予備的な温度解析を行った結果、被覆管の温度を750°C以下にするためには原子炉全流量の4~5%程度の冷却材流量が必要であること、また、制御棒チャンネルの周囲からの熱の流入を考慮した場合にも、最高温度の軸方向発生位置は異なるが、この温度を750°C以下にするための必要流量もほぼ上記と同量の冷却材流量でよいこと、がわかった。構造諸元の設定に関連して行ったパラメータサーベイおよびMark-III炉心の制御棒の比較対象として行ったMark-I炉心の制御棒の温度解析によって、本Mark-III炉心の制御棒の構造寸法は、温度的にもまた熱応力の点からもほぼ満足のゆくものであるとの結論を得た。これらの予備的解析の中で得られた幾つかの特性について以下に整理しておく。

(i) ブロックからの流入熱を考えない場合、制御棒の温度は発熱量および流量によって大巾に変化する。これに対し流入熱を考えたモデルでは温度の流量および発熱量への依存度が比較的緩かである。しかし、1制御棒当たりの流量が20g/sという少流量ではこの両者に余り差がみられない。

(ii) 制御棒の最高温度点は、軸方向ではブロックからの熱の流入によって炉心出口となり、また半径方向では外側被覆管の温度が最も高くなる。ブロックからの熱の流入を考えない場合のそれは、最大線出力位置より少し出口側にずれた位置の吸収材の温度が最も高い。

(iii) 制御棒チャンネルの周囲から熱が流入するという想定のもとでは、外側被覆管の温度は、外側流路ギャップが大きいほど、また、外側流量の少ないほど低くなり、好ましい。

(iv) ブロックからの熱の流入を考えた場合の外側流路ギャップと制御棒の最高温度との関係は直線的であるが、熱の流入を考えない場合のそれは、ある流路ギャップのところ（およそ6mm）で温度が最も低くなる。

(v) 被覆管の熱応力は極めて小さい。軸方向の最大線出力21.5 Cal/cm s (3.6 W/cm³) の標準発熱量で流量40g/sのときの最大引張応力は40 Kg/cm²であり、これは平均降伏強さ(750°C)の約1.6%に相当している。また、吸収材の熱応力も機械的干渉さえ生じなければ10 Kg/cm²以下と小さい。

上記の予備的な解析に引継いで、Mark-IIIの炉心条件が明らかとなった段階で、再び冷却の観点からMark-III炉心を対象とした制御棒の熱流動解析を行い、予備解析によって得た制御棒の冷却に必要な流量の予測値を確めたところ、ほぼこれと同じ結果を得た。また、冷却の観点からみた制御棒チャンネルの最適な配分は、チャンネルの内側对外側流量比が2近くであることがわかった。これは、両流路の圧力損失が等しくなるような配分でもあり、かつ、内側流路乱流、

外側流路層流の流れ様式であることも知られた。

本Mark-IIIの解析を通じ、制御棒の冷却という観点から今後に残された問題点ないしは検討課題のいくつかについて下記に列挙する。

- (i) Mark-III炉心で制御棒の插入深さが長くなった場合の余裕の検討
- (ii) 半径方向2次元モデルによるブロックからの流入熱を考慮した被覆管の温度評価の検討
- (iii) 制御棒の冷却を主眼とする基本構造の検討
- (iv) 制御棒チャンネル流量と燃料チャンネル流量およびリークフローを整合させるための炉内流動ネットワークモデルによる検討

(2) 炉容器内構造物の冷却について

容器器内構造物の冷却に関する検討は、制御棒の冷却検討と同様に、基本概念設計における各構造物の発熱量を用いて行った予備的なものと、第1次概念設計における発熱量を用いて行ったものとに分かれている。先ず、はじめの予備的なサーベイによって、炉容器内鋼構造物の中では拘束棒部分の温度が最も高い温度を示すこと、この部分の温度は可動反射体部の冷却材流量（バイパス流量）によってかなり影響を受けること、他の鋼構造物は温度的に問題ないこと、などがわかった。そして、この拘束棒部分の温度を650°C以下とする場合（拘束棒の設計温度としての暫定的なもの）、原子炉全流量の4%程度の冷却材が必要であるとの目安を得た。引続いて行ったMark-III炉心を対象とした解析によってこれを認め、さらに、構造物の発熱量と炉容器内各流路の熱伝達率とをパラメータとした解析によって、鋼構造物に対するこれら熱流動パラメータの温度効果について検討を行い、いくつかの知見を得た。これらは次のものである。

- (i) Mark-III炉心の場合、可動反射体の中の冷却材として、原子炉全流量の4%を想定すれば、鋼構造物の中で最も高い温度を示す拘束棒部分の温度が650°C以下になる。
- (ii) 鋼構造物（特に拘束棒チャンネル）への温度効果については、発熱量では、可動反射体の影響が特に大きく、他の構造物の発熱量の影響はこれに比べて僅少かあるいはほとんど影響しない。
- (iii) 热伝達率では側部遮蔽体とコアバレルの間の流路の影響が最も大きく、可動反射体の中の流路がこれに次いでいる。
- (iv) サポートプレートとダイヤグリッドの間の流路の熱伝達率の変化はサポートプレートの温度にかなり大きな影響を与える。しかし、径方向の構造物への影響は極めて僅かである。

本解析は可動反射体や拘束棒部分の流路にみられるようにモデル上かなり実際的でない面をもっている。また、熱流動パラメータ、たとえば各流路の熱伝達率などは一定値であり、構造物の発熱量の軸方向分布が考慮されていないなど、現実性にやや欠けている面がある。これらの点については、今後の試験研究の成果や設計の詳細化をまって再検討する必要があろう。

(3) 結論

以上の解析結果と検討とによって、Mark-III炉心における制御棒および炉容器構造物の冷却に必要な流量（バイパス流量）は、ともに、原子炉全流量の4%程度であろうとの結論を得た。この両者の合計8%はMark-III炉心の熱設計で設定した10%より少ない値となっている。

5. あとがき

Mark-III炉心の流量設定（熱設計条件の設定）に関連して、制御棒と炉心周辺構造物の温度解析を行った。Mark-III炉心の寸法諸元が決った段階で、Mark-I, II炉心を参考として、Mark-III炉心を想定した予備的な解析によって、先ず、これらの冷却に必要な流量を予測し、バイパス流量（燃料の冷却に有効でない流量）の設定を行った。次いで、Mark-III炉心の核熱設計が終了した段階で、Mark-III炉心を対象としたこれらの解析を行い、これを確めた。また、これらの解析を通じて得られた知見を整理し、今後の設計への参考とした。

最後に、本検討を行うにあたって種々の御援助を頂いた多目的設計研究室の諸氏、炉容器内構造物の温度解析を行うに当って当初の有益な助言と貴重な討論を頂いた富工電機製造株式会社の松田昌廸氏、およびTAC-2Dコードの便宜を計って下さった当研究室の梶山武義氏らに対し深甚なる感謝の意を表します。

付録 A ホウ素入り黒鉛の製造例と実験範囲

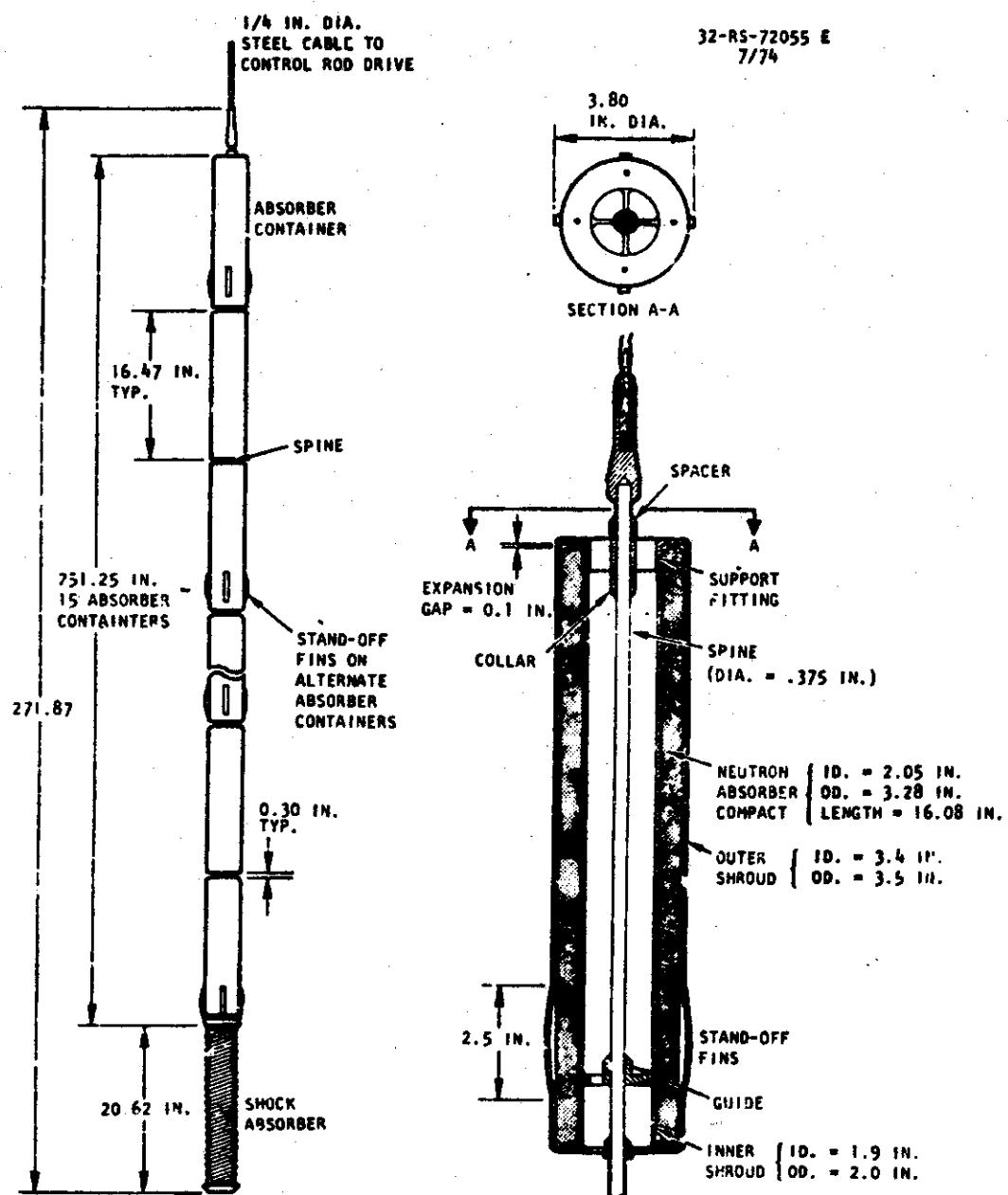
Experiment	Extruded Materials			Warm Pressed Materials			GA	GA	GA
	BNL (Gates et al)	CA (Stansfield) Peach Bottom absorber	GA (Goeddel)	GA (Stansfield) Petroleum Coke	GA (Stansfield) Sponge type	GA Port St. Vrain absorber			
Material Graphite Filler	Petroleum Coke						(Stansfield)	(Stansfield)	(Stansfield)
B ₄ C Powder		(20~200μm)					Petroleum Coke	Petroleum Coke	Petroleum Coke
Binder	Pitch		Pitch (10w/o)	Coal tar Pitch (15w/o)	Coal tar Pitch (15w/o)				
10 ₃ Enrichment	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural			91% ¹⁰ B enrich	
Heat Treatment °C	2450	2200(0.5Hr)	1400	1000(2Hr)	2000(2Hr)	2000(2Hr)		2000(2Hr)	850, >2700
Bulk Density g/cm ³	1.6~1.7	1.75~1.95	1.68~1.77	1.68~1.77	1.60			1.70~1.91	1.45~1.75
Boron Content wt-% B	6.17~8.25	28	20~40	21~35	43			7.1~7.5	0.2~30
Vol-% B ₄ C		26		20~33	40				
g/cm ³ B	0.45		0.36~0.52	0.36~0.52	0.69			0.11~0.14	
Specimen Size mm Sample	Prismatic	Annular	Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical			
152x152x152	57OD/32IDx420	256x12	10~15φx15	10~15φx15	50ID/83ODx76				
Test Piece	Cylindrical	Cylind. & Pris. (ETR)	Prismatic	Prismatic	Cylindrical	Cylindrical			
11φx18	104x15 & 5x10x15 25φx12	5x5~10x15	5x5~10x15	5x5~10x15	10φx15	10φx15			
Irradiation Reactor	Harford, ETR	ETR PBR	GETR	ETR	ETR	ETR			
Temperature °C	260~540	650 ~790	550±150	350, 700	650±100	650±100	700±730	700±730	650±100
Fast Dose 10 ²¹ n/cm ²	0.3~2.1	2.0~6.1	1.2	2.4	2.5~7.3	2.5~7.3	4.8~5.9	4.8~5.9	3.8~2.0
(E>1.8MeV)									
Thermal Dose 10 ²¹ n/cm ²	2.5~0.3	1.5~3.5		2.4	1.5~3.7	1.5~3.5	2.0~2.7	2.0~2.7	1.8~2.0
(E<0.4eV)									
Thermal/Fast Ratio	8.3 & 0.07	0.75~0.57	1.0	0.6~0.51	0.6~0.48	0.42~0.46	0.47~0.43	0.47~0.43	

付録 B : 制御棒アセンブリーの設計例

	第2次 予備設計	基本概念 設 計	第1次概念 設 計	Summit	F. S. V	Peach-Botton
吸収材コンパクト						
(B ₄ C + 黒鉛焼結体)				型込材	型込材	型押材
ボロン濃度 wt %		10	30	40	30 & 40	10 & 30
厚さ (mm)	10	10	15	16	16	12.5
外径 (mm)	50	70	85	84	84	58
内径 (mm)	30	50	55	52	52	33
長さ (mm)	—	—	—	408	76	432
密度 (g/cm ³)	1.95 (85% TD)	1.9	1.9	1.6	1.6	1.7
外側被覆管						
材 料	ハステロイ-X	ハステロイ-X	ハステロイ-X	インコロイ-800	インコロイ-800	黒 鉛
厚さ (mm)	2	5	2	1.3	1.3	12.7
外径 (mm)	54	80	90	88.9		88.9
内径 (mm)	50	70	86	86.4		63.5
内側被覆管						
材 料	ハステロイ-X	ハステロイ-X	ハステロイ-X	インコロイ-800	インコロイ-800	
厚さ (mm)	2	5	1.3	1.3	1.3	
外径 (mm)	30	50	54	50.8		
内径 (mm)	26	40	51.4	48.3		
スパイン						
材 料	ハステロイ-X	ハステロイ-X	ハステロイ-X		ハステロイ-X	
外径 (mm)	10	10	9	9.5	9.5	
吸収材／被覆管間隙 (mm)	—	—	0.5	1.143*	1.143*	1.3
制御棒孔／制御棒間隙 (外側流路幅, mm)	5	2.5	7	6.35	6.35	

*) F. S. V 炉用吸収材コンパクトの実験データと炉内照射許容値 3.6×10^{21} nvt に基づいて設定された。

付録C：制御棒アセンブリーの構造例

AMENDMENT 28
OCTOBER 22, 1974DELMARVA POWER & LIGHT COMPANY
SUMMIT POWER STATION

CONTROL ROD ASSEMBLY AND ABSORBER DETAILS

PSAR

FIG. 4.2.3-3

付録 A ~ C の引用文献

- 1) O.M. Stansfield ; USAEC Report GA-10648 (1971)
- 2) O.M. Stansfield ; Gulf-GA-A12035 (1972)
- 3) J.M. Davidosor, L.O. Gates ; USAEC Report BNWL-96 (1965)
- 4) L.O. Gates, R. Neidner ; USAEC Report BNWL-161 (1965)
- 5) W.V. Goeddel ; USAEC Report GA-2827 (1962)
- 6) Fort St. Vrain Hazard Report ; DOCKET-50267 Section 3 (1969)
- 7) Summit Power Station, Preliminary Safety Analysis Report ; DOCKET-50450, Section 4 (1973)
- 8) Final Hazards Summary Report, Peach Bottom Atomic Power Station ; Vol.II Part C (1965)
- 9) 動力炉開発管理室；多目的高温ガス実験炉第2次予備設計 (1972)
- 10) 下川他；同上基本概念設計, JAERI - M 6141 (1975)
- 11) 青地他；同上第1次概念設計, JAERI - M 6845 (1976)