

JAERI-M

85-184

多目的高温ガス実験炉詳細設計(II)
炉心有効流量の評価

1985年11月

鈴木 邦彦・文沢 元雄・村上 知行
平野 光将・宮本 喜晟

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985
編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

多目的高温ガス実験炉詳細設計(Ⅱ)炉心有効流量の評価

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部

鈴木邦彦・文沢元雄・村上知行

平野光将・宮本喜晨

(1985年10月17日受理)

多目的高温ガス実験炉詳細設計(Ⅱ)炉心の有効流量（燃料チャンネルからの除熱に有効に寄与する冷却材流量）を、燃料体ブロック水平面間ギャップの発生に起因するクロス流れ及び固定反射体及び高温プレナムブロック等のブロック間シール構造と漏れ流れとの関連において検討した。燃料チャンネルからの除熱に有効な冷却材流量の原子炉全流量に対する割合として定義される炉心有効流量割合は、燃焼初期状態において約82%であり、燃焼が進むとわずかに減少するが、燃焼末期（425日）でも約81%である。

また、燃料カラム内の各燃料チャンネルへの冷却材流量配分は、燃焼末期の炉心周辺部のカラムで最小となり、その割合はカラム平均チャンネル流量の98%である。

Evaluation of Effective Coolant Flow in the Experimental
VHTR Core at Detailed Design Stage II.

Kunihiko SUZUKI, Motoh FUMIZAWA, Tomoyuki MURAKAMI
Mitsumasa HIRANO and Yoshiaki MIYAMOTO

Department of Power Reactor Projects, JAERI

(Received October 17, 1985)

This report presents the results of an analysis of core flow distribution in Multi-purpose Very High Temperature Gas-Cooled Reactor (the Experimental VHTR) based on the second stage of detailed design, considered crossflow between fuel block horizontal interfaces, the correlation between seal structures of permanent reflector blocks and hot plenum blocks and leak flow.

The ratio of core which cooles fuel element usefully to the total in a reactor is about 82% at the initial condition and is about 81% at the end of life of core (425 days). The minimum coolant flow rate of fuel channel, which occurs in the core peripheral column at the end of life of core, is about 98% of column average channel flow rate in a column.

Keywords: VHTR, Core, Flow Analysis, Crossflow, Detailed Design,
Block, Leak, Helium, Network, Effective Coolant Flow

目 次

1.はじめに.....	1
2.原子炉構造と炉内流動特性.....	4
2.1 原子炉構造.....	4
2.1.1 炉心構造の概要.....	4
2.1.2 シール部構造.....	4
2.2 炉内流動特性.....	10
3.解析法.....	12
3.1 解析モデル.....	12
3.2 解析方法.....	20
3.3 解析条件.....	22
3.4 解析ケース.....	24
3.5 解析データ.....	25
4.解析結果.....	44
4.1 計画炉心の流量配分特性.....	44
4.2 詳(II)炉心の流量配分特性.....	51
5.検討.....	70
5.1 計画炉心.....	70
5.2 詳(II)炉心.....	71
6.結論.....	74
謝辞.....	76
参考文献.....	76
付録1 クロス流れ係数とブロック変形量の関係.....	77
付録2 炉心流量調節方式の検討.....	83
付録3 カラムバウイングによる炉心変形の効果.....	91
付録4 カラム内流量再配分の検討.....	95

Contents

1. Introduction	1
2. Description of core structure and coolant flow performance	4
2.1 Reactor	4
2.1.1 Core structure	4
2.1.2 Seal structure	4
2.2 Coolant flow performance in reactor internals	10
3. Analytical method	12
3.1 Analytical model	12
3.2 Analytical method	20
3.3 Analytical conditions	22
3.4 Analytical case	24
3.5 Flow data	25
4. Results	44
4.1 Coolant flow performance in planned core	44
4.2 Coolant flow performance in detailed design stage II core ...	51
5. Discussion	70
5.1 Planned core	70
5.2 Detailed design stage II core	71
6. Conclusion	74
Acknowledgements	76
References	76
Appendix-1 Correlation between crossflow loss coefficient and wedge-shaped gap between horizontal fuel block interfaces	77
Appendix-2 Study on core coolant flow control	83
Appendix-3 Effects of column bowing on core flow distribution	91
Appendix-4 Study on coolant flow distribution in a fuel column ...	95

1. はじめに

多目的高温ガス実験炉（以下実験炉と呼ぶ）の設計研究は、44年度に開始し、これまでに試設計、予備設計、概念設計、システム総合設計、詳細設計(I)及び詳細設計(II)⁽¹⁾を行っている。現在、詳細設計(II)（以下詳(II)と呼ぶ）をベースに、高温ガス炉の固有の安全特性を積極的に活用して、実験炉の機能及び性能を維持しつつ建設費を低減し得る、実験炉の合理化システムの検討をすすめている。

本報告書では、昭和59年3月に終了した詳(II)で実施した炉内流量配分解析と、その結果に基づく炉心有効流量（燃料チャンネルからの除熱に有効に寄与する冷却材流量）の設定について、考え方及び検討結果について述べる。

昭和57年3月から同年9月まで実施した詳(II)の第1段階（設計基本条件見直しのための検討⁽²⁾）では、実験炉の熱出力、原子炉入口・出口冷却材温度、燃料体型式、原子炉圧力容器型式、冷却システム構成等について広範囲な検討が行われた。これらの検討結果は新たな実験炉設計基本条件の設定に反映され、詳(II)の後半以降の設計は新たな実験炉設計基本条件に基づいて実施されている。「設計基本条件の見直しのための検討」において、燃料最高温度は炉心性能についての重要な指標であり、このため、燃料温度に大きな影響をもつ冷却材炉心有効流量割合の改善は、炉心主要諸元の選定にあたって重大な関心事であった。

詳(II)の炉内流量配分解析の検討を大別すると、①解析手法の改良や解析データの詳細化に伴う詳細解析モデルの検討、②新たな解析手法による流量調節方式の検討、③燃料カラムバウイングや炉心変形による炉内流量配分への影響の検討、及び、④燃料要素や炉心諸元の変更による炉心流量分布への影響の検討とに分けられる。各段階に応じて炉心性能を評価するために、炉心流量分布が必要とされた。しかし、炉心流量分布は炉心構造と密接に関連する。このため、概略の流量分布を暫定的に定めるとともに、概略の炉心性能評価作業と併行して炉心流量分布及びその炉心特性評価での適用法の検討を行った。

詳(II)炉心の流量配分検討の流れをFig. 1.1に示す。

詳(II)炉心の流量配分解析の特徴は、クロス流れに関して密接に関連し合う冷却材流量分布、冷却材および黒鉛ブロック温度分布、黒鉛ブロックの熱変形によって派生するブロック間ギャップ量を互いに連成させて求めていることである。詳(II)以前の解析では、簡便な方法として炉心を代表する1つのクロス流れ係数を設定することで、その代表クロス流れ係数としては十分に安全側の大きな値を用いていた。しかし、近年冷却材の流量分布とブロックの温度分布との関係、あるいはブロックの温度分布と熱変形量との関係が解析的に明らかにされるとともに、ブロック水平面間の開口ギャップとクロス流れの流動抵抗との関係が実験によって明らかにされてきた。このため、炉心内の温度分布や位置依存の熱変形量、即ち開口ギャップの大きさに依存したクロス流れの流動抵抗を設定して流動解析を行う事が可能となった。

本報告書は、このような検討を踏まえて最終的に設定された炉内流量配分について、設定の考え方及び設定のための解析データベースを明らかにすることを目的としている。このため、解析

モデルの詳細化及び炉心流量調節方式の検討については、最終的に選定された解析モデル及び炉心流量調節方式について示し、詳細は付録に示した。また、炉心変形の炉内流量配分への影響の検討についても、同じく付録に示した。しかし、選定した炉心の概略性能評価のために定めた流量配分（計画炉心の流量配分）は、その後、クロス流れの流動抵抗係数やシール性能データの取得が進んだこと、炉内構造の若干の変更が為されたこと、及び、燃料装荷法検討の結果炉心の出力分布が確定したことなどから、これらの変更に伴い最終的な炉心流量配分（詳(II)炉心流量配分）とは異なるものとなつたが、燃料装荷法の検討などに用いた設計上の経緯から重要であるので、この計画炉心の流量配分も詳(II)炉心の流量配分と比較して示した。その結果、計画炉心の流量配分と詳(II)炉心の流量配分とを比較すると、全体として差が小さく炉心有効流量（燃料チャンネルからの除熱に有効に寄与する冷却材流量を意味し、クロス流れがある場合には軸方向に変化する。しかし、ここでは便宜的に軸方向の最低流量を意味することにする）が、前者が後者より高々1%多い程度の差であった。従って、計画炉心の流量配分は、詳(II)炉心の特性を評価するための流量配分として妥当なものである。なお、詳(II)の被覆燃料粒子健全性評価（FP放出量評価のための温度解析）はカラム内の燃料チャンネル毎に行われる。このため、カラム内の燃料チャンネル間での流量再配分を定めなくてはならない。本報告書の炉内流量配分解析は、燃料カラムまでを単位とする解析について示し、カラム内での流量再配分の検討については付録に示した。

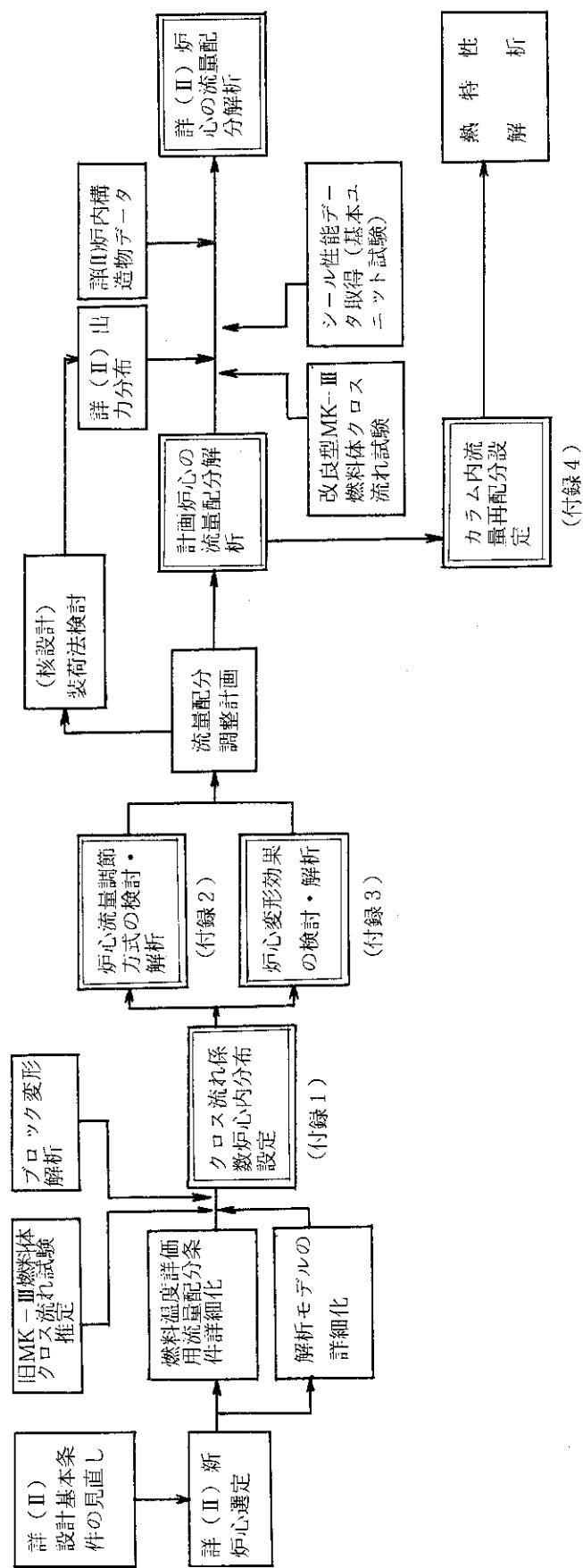


Fig. 1.1 詳細設計(II)の炉心内流量配分検討作業の流れ (2重枠は本報告書にて記載されていることを示す。)

2. 原子炉構造と炉内流動特性

2.1 原子炉構造

2.1.1 炉心構造の概要

原子炉及び炉心は、原子炉圧力容器、燃料体、反射体、炉内構造物、制御棒、制御棒駆動装置等から構成される。多目的高温ガス実験炉の詳細設計(II)における炉心構造の垂直断面と水平断面を、それぞれFig. 2.1.1とFig. 2.1.2に示す。炉心は54個の燃料カラム及び7個の制御棒案内カラムから成り、軸方向には燃料体が8段積みされている。この炉心の半径方向には内側から順に可動反射体、固定反射体が取り囲み、上下方向には可動反射体が配置されている。

燃料体は、Fig. 2.1.3に示すように、対面間距離334 mm、高さ700 mmの六角柱状黒鉛ブロックに直径56 mmの冷却孔をあけ、その中に燃料棒を挿入したものである。黒鉛ブロックの冷却孔の上部には、燃料棒まわり止めの縦溝があり、下部には燃料棒支持用突起があって、黒鉛ブロックに挿入した燃料棒が保持される。各黒鉛ブロックの上面コーナ部には3ヶ所のダウエルがネジ止め固定され、また、各黒鉛ブロックの下面コーナ部に3ヶ所のソケットが設けられ、積み重ねた燃料体の位置決めが行われる。そのほか、燃料体の下面には燃料体中心部と周辺部の熱膨張差を吸収するため、深さ1 mmの座ぐり加工が施されている。燃料体の黒鉛ブロック周辺部には、反応度の一部を補償するために、炭化ホウ素と黒鉛粉末を混合燃結した可燃性毒物を挿入する3ヶ所の穴が用意される。

反射体は、可動反射体と固定反射体がある。可動反射体は、燃料体と同じ外形の黒鉛ブロックで、炉心部の上部、下部、周辺部に配置される。上下の可動反射体には燃料体の冷却孔に対応した流路孔が設けられる。可動反射体は、燃料体と同じ燃料交換機によって取り換える。固定反射体は、Fig. 2.1.4に示すように、多角形な黒鉛ブロックで、可動反射体の外周に配置、固定され、中性子の漏洩防止、熱遮蔽、放射線遮蔽等の機能を有している。

なお、本原子炉の熱出力50 MWは432個の燃料体によって達成される。これを冷却する1次冷却材流量は約17.4 kg/sであり、原子炉圧力容器入口冷却材温度約395°Cに対して原子炉圧力容器出口冷却材温度約950°Cである。

2.1.2 シール部構造

実験炉の炉心は前節で述べたように、上部、側部及び下部をそれぞれ、上部遮蔽体、固定反射体及び高温プレナムブロックで囲まれている。これらのブロックは取り扱い上あるいは製作上の制限から、多数のブロックに分割されている。このため、分割されたブロック間のギャップを流れる計画外の冷却材の流れ、いわゆる、漏れ流れが発生する。漏れ流れは、炉心の燃料チャンネルを流れる冷却材流量（炉心有効流量）を低減し、その結果、燃料温度を上昇させてるので、できる限り抑制する必要がある。そのため、実験炉では以下に述べるシール対策が施されている。

(1) 上部遮蔽体間シール

燃料体が積み上げられた燃料カラムのうち、7カラムを単位として冷却材流量調節を行うために、Fig. 2.1.5 に示すように炉心上部に炉心流量調節装置が設置される。流量調節装置と上部遮蔽体との間のギャップ及び上部遮蔽間のギャップが漏れ流れの流路となる。

(2) 固定反射体間シール

固定反射体は Fig. 2.1.4 に示すように、3種類の形状をした黒鉛ブロック 18 個で 1 層を形成し、12 層で炉心全段を構成する。

炉心支持板（金属）と固定反射体（PGX 黒鉛相当）との温度及び熱膨張率の差によって、固定反射体間のギャップが拡がらないように、固定反射体は炉心拘束バンドによって締め付けられている。

また、高温の炉心側と低温の外周側との熱膨張差によって、固定反射体間にくさび型ギャップが発生する。そこで、高温の炉心側の固定反射体面を削って、残る外側の面で良く密着するようなあたり面を設けている。一方、固定反射体は原子炉の寿命期間を通して交換されることの無い大型構造物であるので、シール要素が設置できる。あたり面の外側で比較的低温の部分には、黒鉛片で保持された金属シールが設置される。あたり面より内側の高温の部分には黒鉛製のキーが設置され、シール性能試験の結果⁽⁵⁾によれば高いシール性能が期待できる。

(3) 高温プレナムブロック間シール

高温プレナムブロックは、Fig. 2.1.6 に示すように、上下 2 段に分割されている。このうち、下段のブロックは領域の冷却材温度混合を良くするためのプレナムを形成し、また、ブロック間にキーが設置されてブロック水平面でのくい違い段差が生じないようになっている。上段のブロック面間には黒鉛のシール要素が 3 段設置され、シール機能に多重性を持たせた設計となっている。

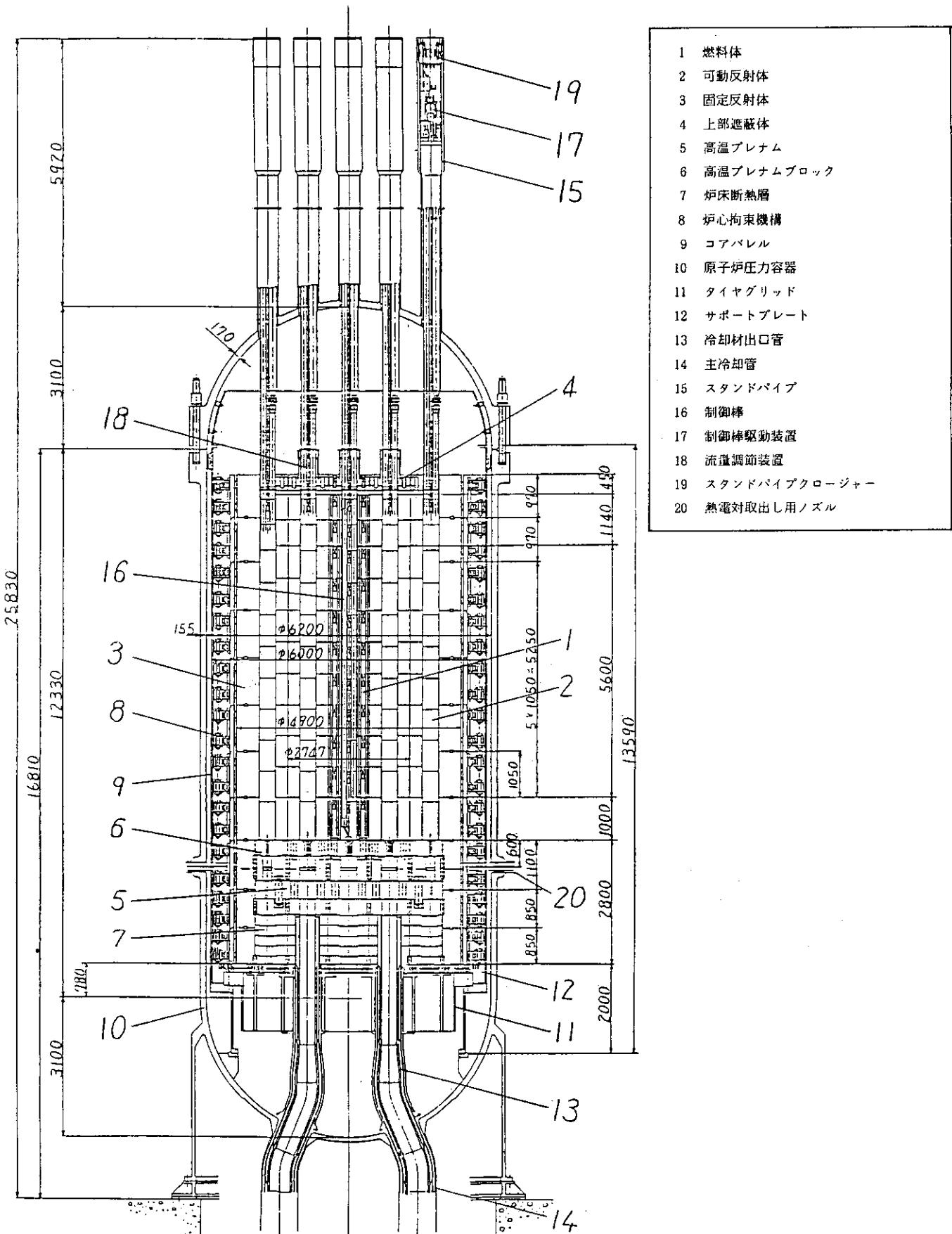


Fig. 2.1.1 原子炉縦断面図

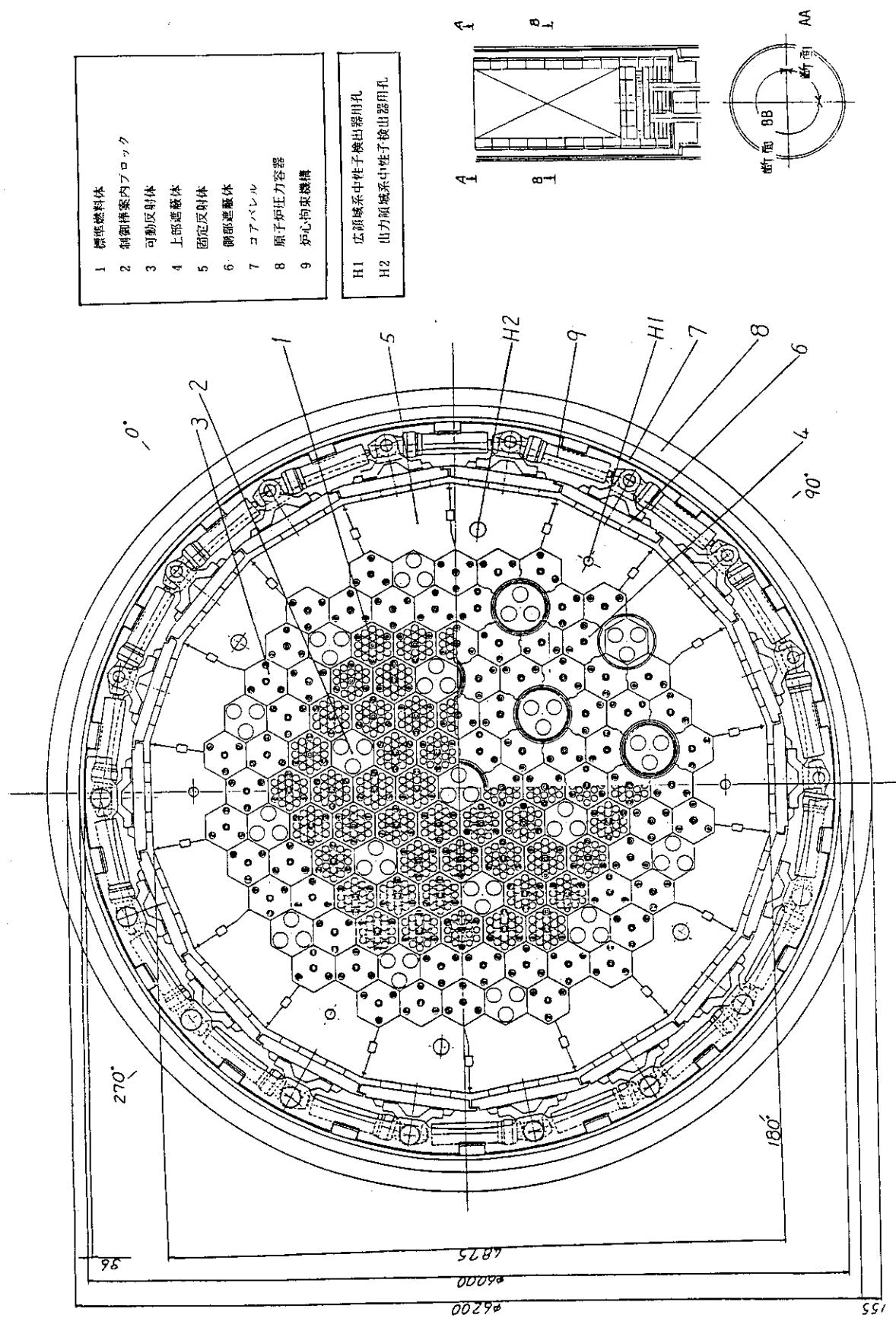


Fig. 2.1.2 原子炉平面図

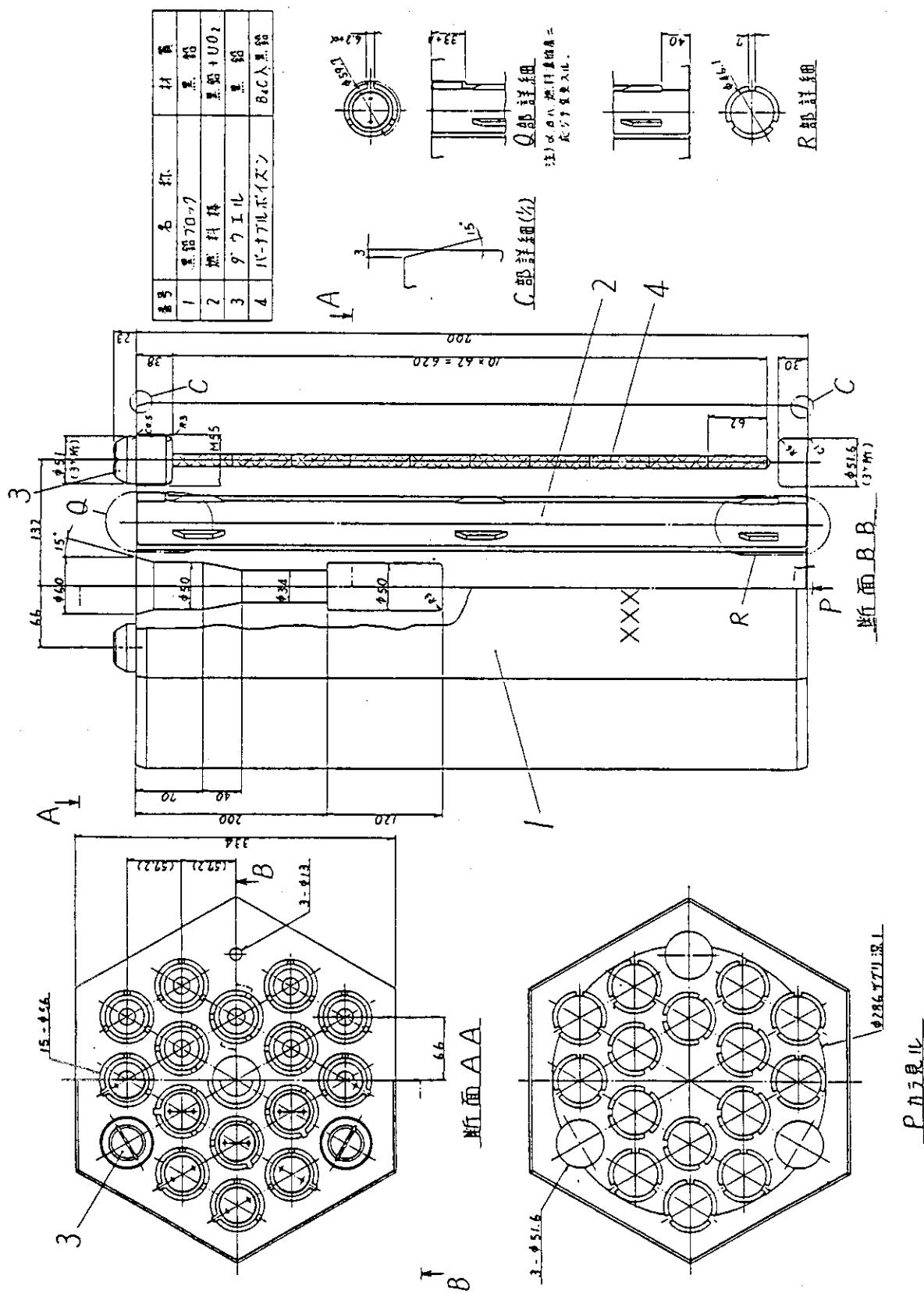
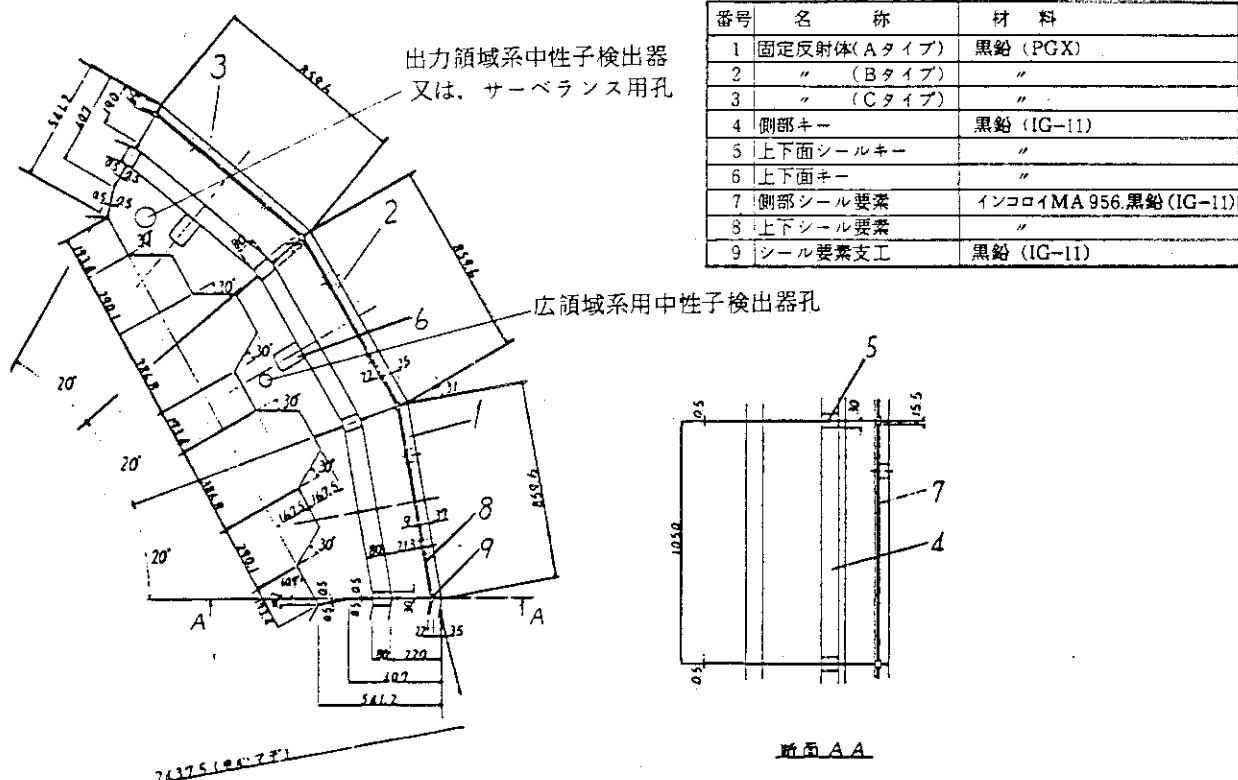
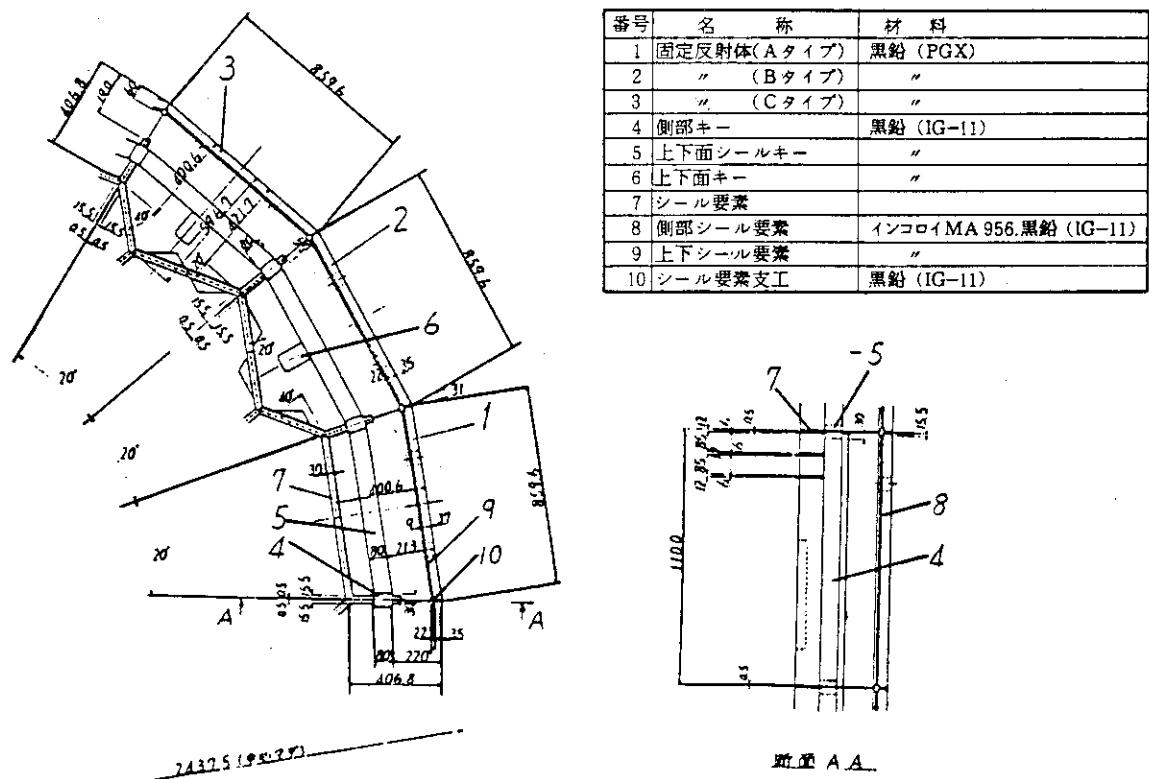


Fig. 2.1.3 燃料体構造説明図



(a) 固定反射体(炉心側部)



(b) 固定反射体(炉床部)

Fig. 2.1.4 固定反射体構造説明図

2.2 炉内流動特性

炉内の冷却材の流れを Fig. 2.2.1 に示す。

漏れ流れない場合は、冷却材ヘリウムは原子炉圧力容器下部に取り付けられた主冷却管（2重管）の外管側から 395°C で炉内に流入し、原子炉下部構造物を冷却しながら圧力容器内側及びコアバレルと固定反射体外周部のすき間を通って上向きに流れ、原子炉上部プレナムに至る。その後、炉心上部に設けられている流量調節装置を通り炉心燃料体の流路に分流されて下降しながら炉心を冷却する。また、1部は制御棒を冷却する。これらの冷却材は、炉心下部のプレナム部に集められ混合して 950°C になり、主冷却管の内管側を通って炉外に取り出される。

漏れ流れがあると、コアバレルと固定反射体外周部のすき間を上向きに流れている冷却材の一部が、固定反射体接合面の水平・垂直ギャップ（Fig. 2.2.2 参照）を通り炉心内部へ流入する。「固定反射体間流れ」となる。燃料ブロック、可動反射体及び高温プレナムブロックでは、ブロックの接合面間を流れる「クロス流れ」、「カラム間ギャップ流れ」及び「高温プレナムブロック間流れ」等が存在する。これらの漏れ流れは炉心内の冷却材流量配分に影響を及ぼすばかりでなく、この低温のヘリウムが燃料ブロックに過大な熱応力を発生させる原因となる。

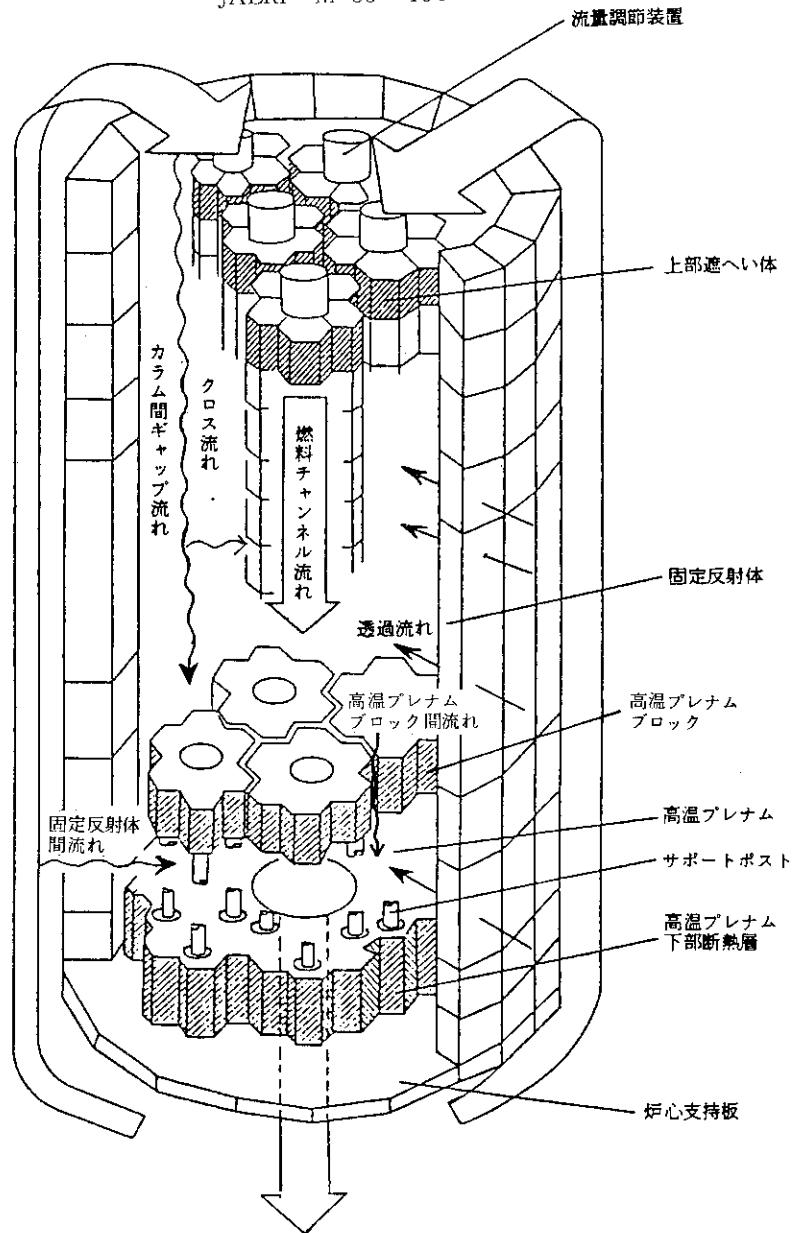


Fig. 2.2.1 炉容器内冷却材流れの概念

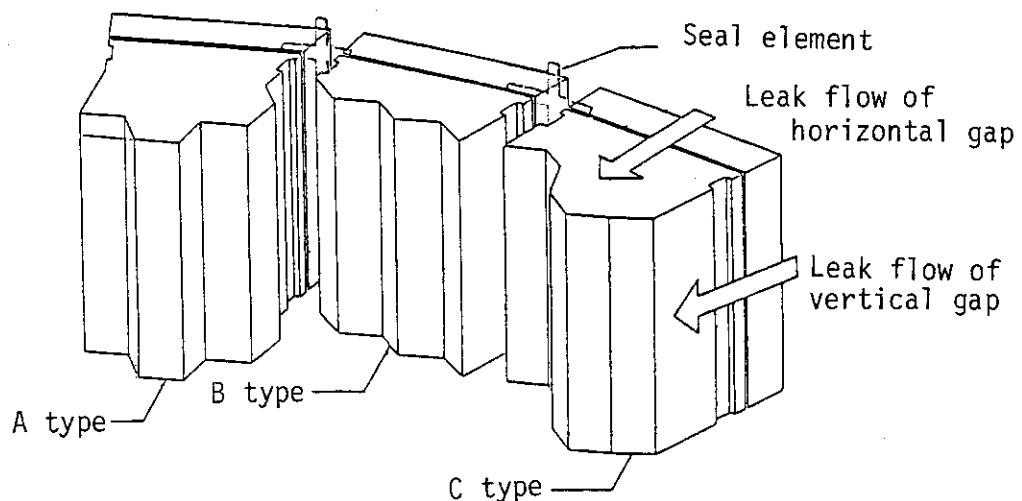


Fig. 2.2.2 Leak flow between permanent reflectors

3. 解析法

3.1 解析モデル

解析モデルは、炉内の各流路にノードと呼ばれる代表点を取り、ノード間を流路ブランチと呼ばれる1次元の流路で結合し、また、流路ブランチ間を伝熱ブランチと呼ばれる伝熱路で結合した流路網モデル⁽⁴⁾である。本解析では、炉心の等価な1/6領域をノード数約800、流路ブランチ数約2400、伝熱ブランチ数約1000で構成した。軸方向の流路モデルをFig. 3.1.1～Fig. 3.1.3に、径方向の流路および伝熱路モデルをFig. 3.1.4, Fig. 3.1.5に示す。また固定反射体および高温プレナムブロックのシール部構造と漏れ流れ解析モデルをFig. 3.1.6に、固定反射体部の伝熱路モデルをFig. 3.1.7に示す。

主な流路は以下の通りである。燃料チャンネル（1ブロック1流路）、制御棒冷却チャンネル（1ブロック1流路）コアバレル内外流路、流量調節領域内カラム間ギャップ（1領域1流路）、流量調節領域間カラム間ギャップ（1領域4～6流路）、固定反射体等のシール部流路、クロス流れ流路、オリフィスバイパス流路等である。特に第2、3領域を代表する2カラム（熱応力が最も厳しいと考えられる炉心最外周カラムを含む）については、ブロック周辺のカラム間ギャップチャンネルを詳細に分割している。

伝熱路は、燃料・反射体発熱部、燃料チャンネル・C/R冷却チャンネルからカラム間ギャップへの放熱径路、側部可動反射体を囲むカラム間ギャップ流路間の伝熱径路、および固定反射体内／外の伝熱径路等に設け、特に炉心最外周カラムから固定反射体部にかけてはブロック間の輻射伝熱を考慮している。

以下に、流量配分解析法について述べる。

i) 流動解析

流路網計算ではまず各ノードに流量の連続の式、各ブランチに運動方程式を適用して圧力および流量を求める。次に各ノードにエネルギー式を適用して温度を求める。計算は物性値の温度依存性を考慮しており、この圧力・流量計算、温度計算を交互に繰り返すことによって圧力・流量、温度の収束値を求めている。

① 連続の式（ノード*i*での流れの連続の式）

$$\sum_j W_{ij} + S_i = 0 \quad (1)$$

② エネルギー式（ノード*i*での熱収支の式）

$$\sum_j^{in} T_{Bij} \cdot W_{ij} + T_{Si} \cdot S_i + T_i \sum_j^{out} W_{ij} = 0 \quad (2)$$

③ 運動方程式（ブランチ*ij*での圧力損失の式）

$$\Delta P_{ij} = P_i - P_j$$

$$=\frac{\bar{r}_{ij} v_{ij}^2}{2g} \left\{ f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}} + K_{ij} + 2 \left(\frac{\bar{r}_{ij}}{r_{ij}^{out}} - \frac{\bar{r}_{ij}}{r_{ij}^{in}} \right) \right\} \quad (3)$$

(3)式において第一項は流路の摩擦損失、第二項は形状圧力損失、第三項は加速圧力損失を表わしている。

W_{ij} ; ブランチ i,j の流量

S_i ; ノード i での湧出量

T_i ; ノード i での流体混合温度

T_{Bij} ; ブランチ i,j からノード i への流入流体温度

T_{Si} ; ノード i での湧出流体の温度

P_i, P_j ; ノード i, j での圧力

g ; 重力加速度

D_{ij} ; ブランチ i,j での流路の等価直径

\bar{r}_{ij} ; ブランチ i,j の出入口平均の流体密度

r_{ij}^{in} ; ブランチ i,j 入口の流体密度

r_{ij}^{out} ; ブランチ i,j 出口の流体密度

f_{ij} ; ブランチ i,j での摩擦損失係数

K_{ij} ; ブランチ i,j での形状圧力損失係数

L_{ij} ; ブランチ i,j での流路長

ii) 伝熱解析

燃料チャンネルからカラム間ギャップへの伝熱量は流路ブランチ間を接続する伝熱ブランチにより、以下の様な平行2平板間の伝熱式にしたがうものとして評価している。式中の $f(\lambda)$ は、形状に依存しない等価的な熱伝導率（等価熱伝導率）を示し、 h_C, h_G, T_C, T_G の関数として解析コード内に組み込まれている。

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{h_C \ell_C} + \frac{1}{f(\lambda)} + \frac{1}{h_G \ell_G}}$$

Q ; 燃料チャンネルからカラム間ギャップへの熱流束 (kcal/mhr)

ΔT ; 燃料冷却材—カラム間ギャップ中ヘリウム間温度差 (°C)

h_C ; 燃料冷却材—グラファイト熱伝達率 (kcal/m² hr °C)

T_C ; 燃料チャンネルの壁温 (°C)

ℓ_C ; 燃料冷却材流路ぬれ縁長

h_G ; グラファイト—ギャップ中ヘリウム熱伝達率 (kcal/m² hr °C)

T_G ; グラファイトの壁温 (°C)

ℓ_G ; 燃料要素ギャップぬれ縁長

$f(\lambda)$; 等価熱伝導率 (kcal/m hr °C)

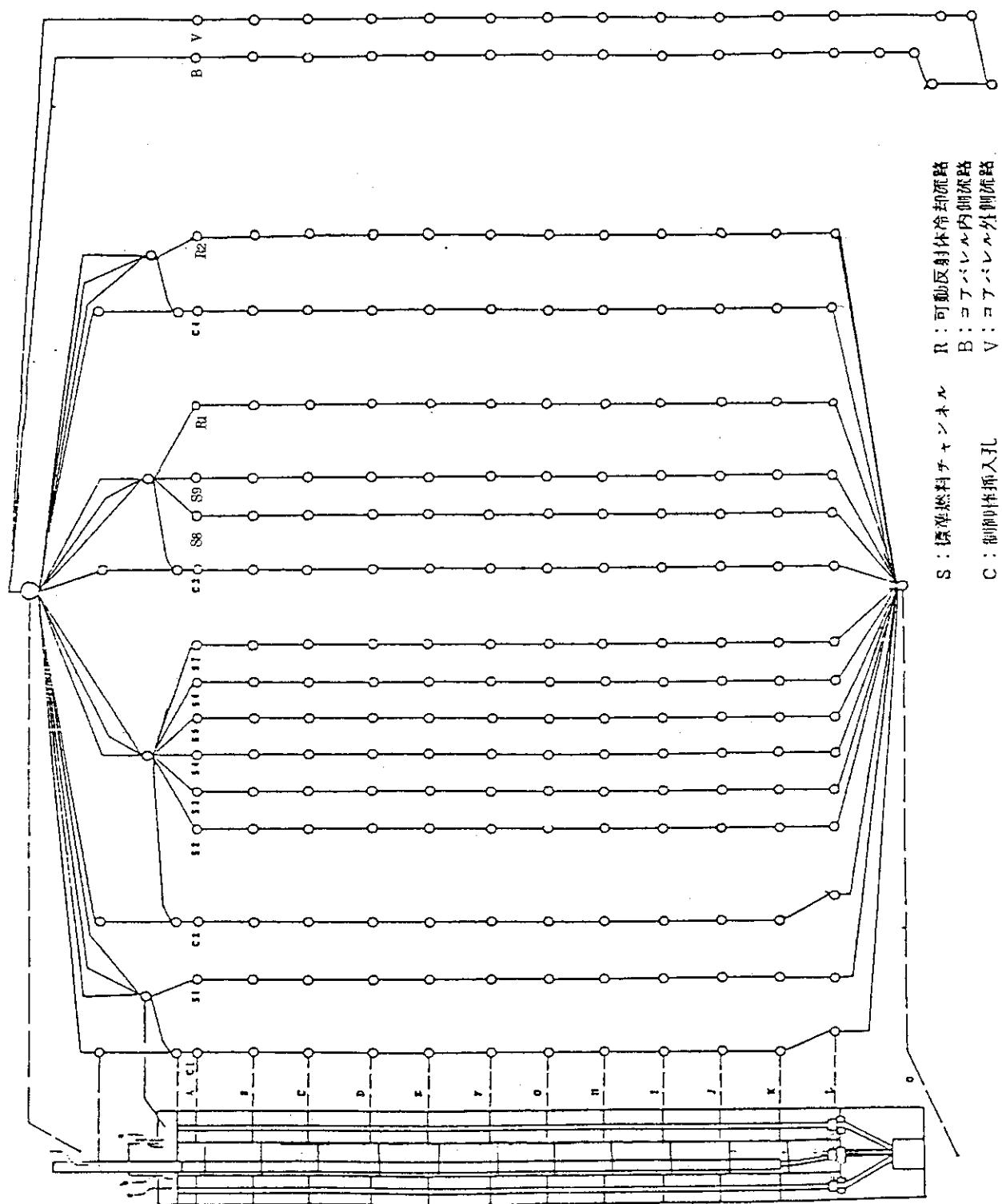


Fig. 3.1.1 ノードおよび軸方向流路 (燃料チャンネル, 制御棒挿入孔, コアバレル内外流路)

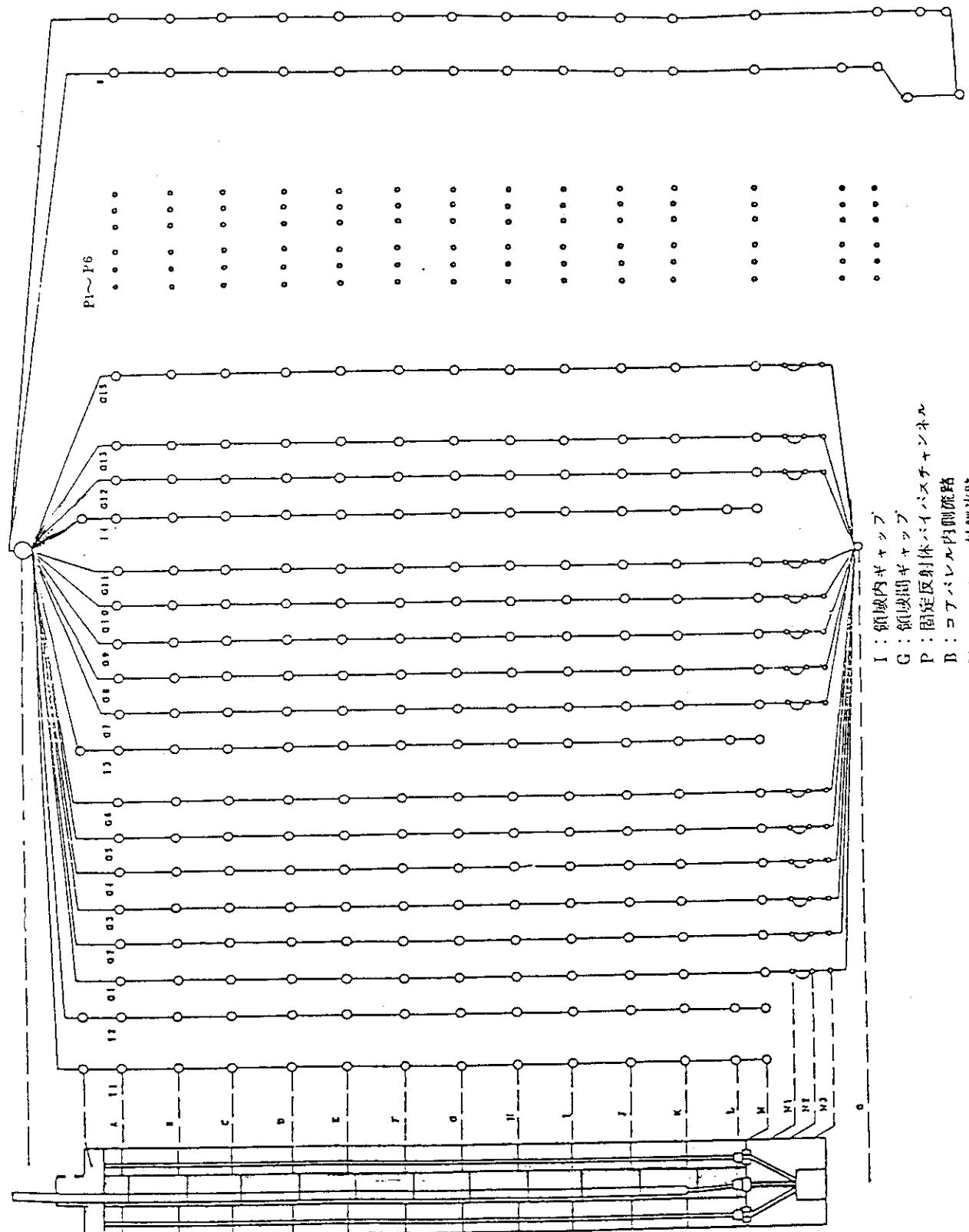


Fig. 3.1.2 ノードおよび軸方向流路（カラン間ギャップ、コアバレル内外流路）

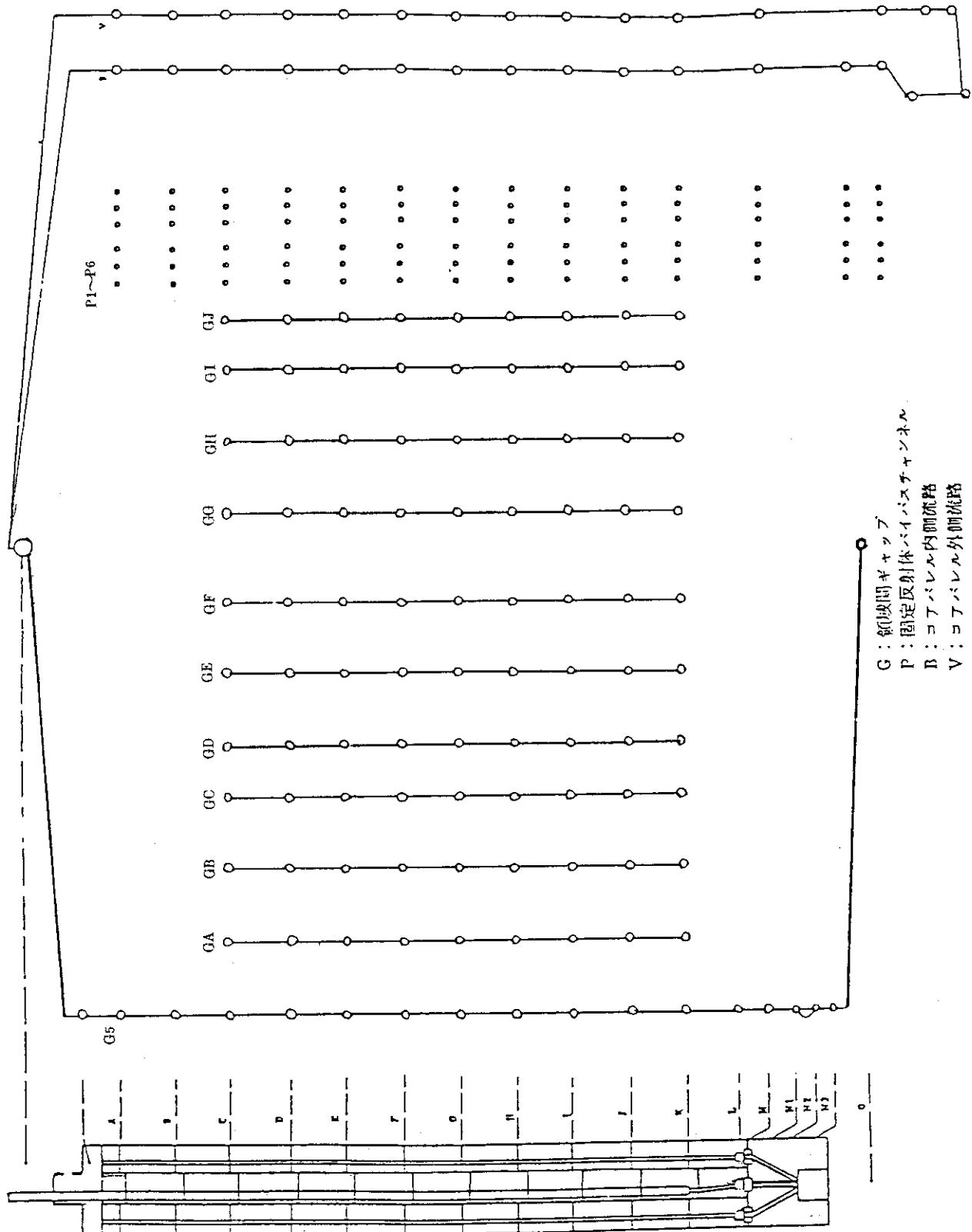


Fig.3.1.3 ノードおよび軸方向流路（詳細カラム間ギャップ、コアバレル内外流路）

G : 領域間ギャップ
 P : 固定反射体バイパスチャンネル
 B : コアバレル内側流路
 V : コアバレル外側流路

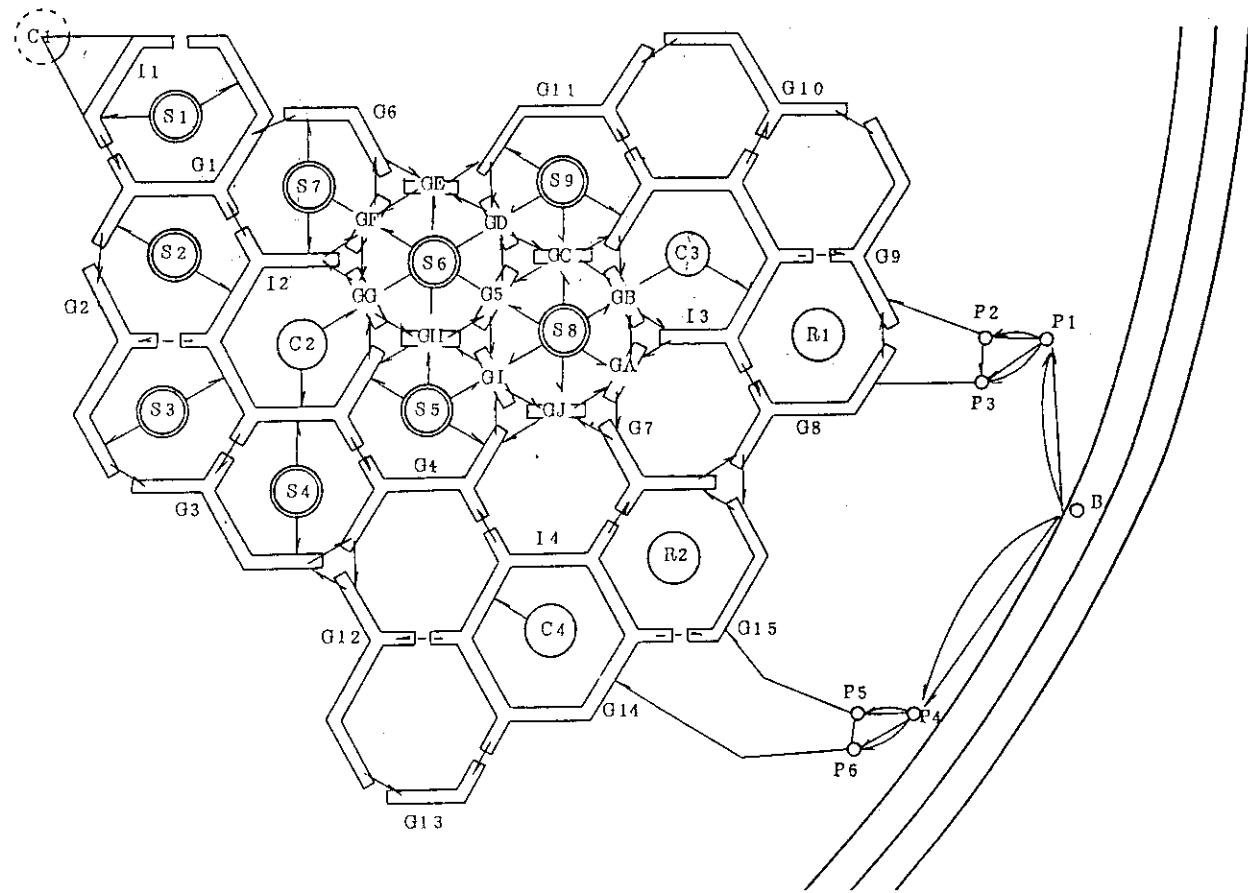


Fig. 3.1.4 炉心径方向流路モデル（燃料体部）

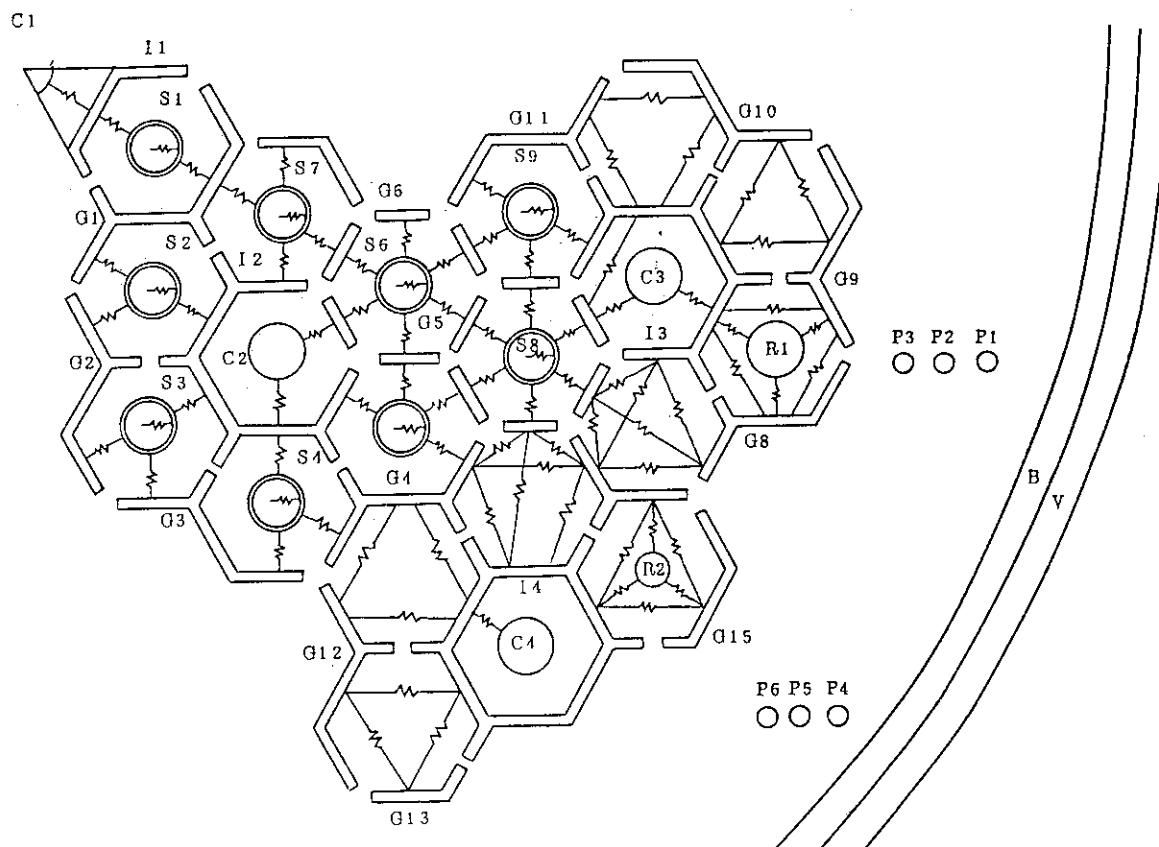
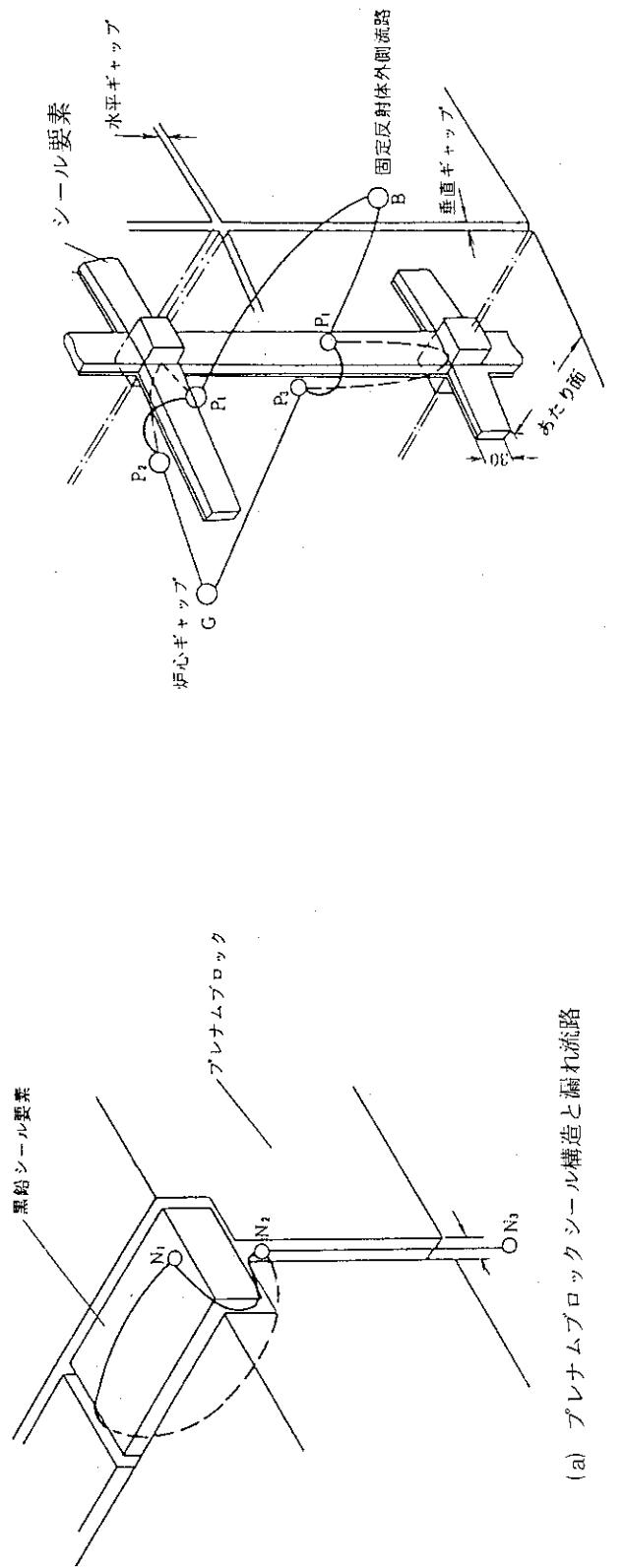


Fig. 3.1.5 炉心径方伝熱路モデル（燃料体部）



(a) シール構造と漏れ流路

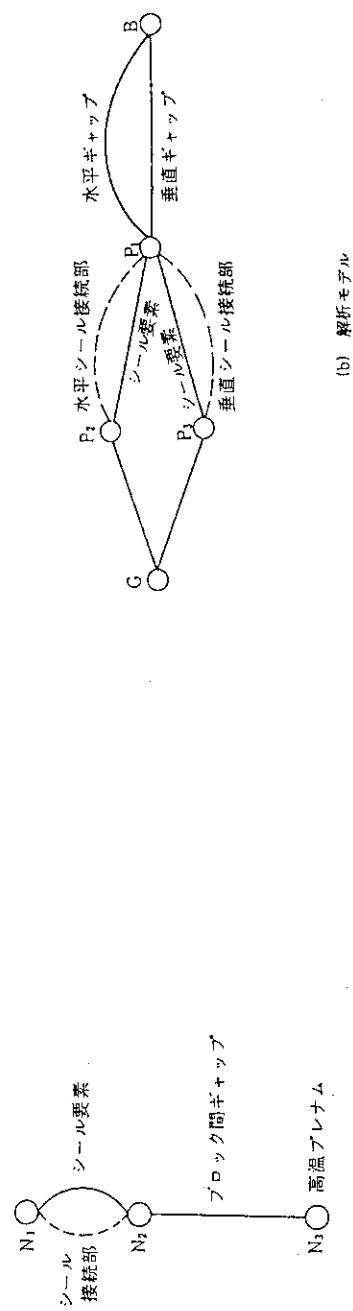


Fig. 3.1.6 漏れ流れ解析モデル

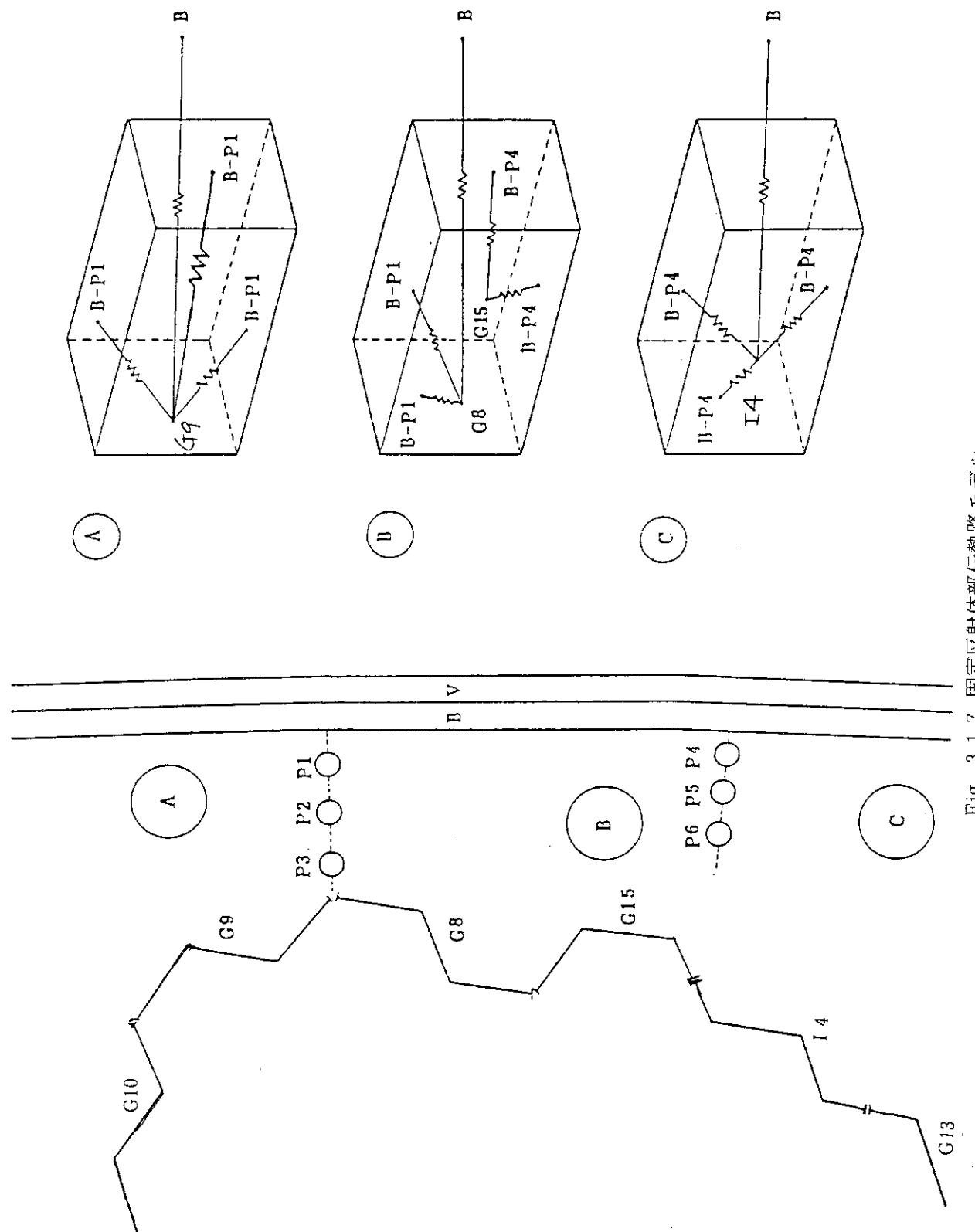


Fig. 3.1.7 固定反射体部伝熱路モデル

3.2 解析方法

詳(II)の炉心温度分布は、クロス流れ係数を一定とした従来の炉心有効流量の算出方法に次の3項目を考慮して算出した流量を用いて評価している。

- ① クロス流れを考慮した軸方向の流量分布
- ② 流量調整方式を考慮した領域間の流量配分
- ③ カラム内の流量分布を考慮した領域内流量再配分

評価手順をFig. 3.2.1 に示す。炉内流量配分解析は、流路網解析コード FLOWNET⁽⁴⁾ を使用した。以下にその詳細について述べる。

(1) 軸方向流量分布の評価

ブロック内の温度勾配（ブロックの表面温度差）と、3次元有限要素法コードにより求めたブロックの熱変形量との関係、及び予備的な流量配分解析によって得られたブロックの温度勾配とにより、炉心を代表する特定のブロックの熱変形量分布を評価する。なお、ブロック温度勾配を精度良く評価するために炉心最外周及びそれに内接する代表カラムに関しては、第3.1節で述べた様に解析モデルとして、カラム間ギャップ流路を詳細に分割している。次に、得られた熱変形量、ブロックの製作・据付公差等も考慮して、クロス流れ流路となるブロック積層面間ギャップを計算する。これらの結果と実験により求めた（くさび型ギャップ）クロス流れ係数により、炉心内のクロス流れ係数分布を評価し、流路網解析コードにより炉心流量配分解析を行う。クロス流れ係数設定の基本データとなるブロックの温度勾配は、炉内の流量配分からも影響を受けるので、これらの計算を繰り返し、最終的に燃焼初期、中期および末期における各燃料カラムの軸方向流量分布を評価する。

(2) 領域間流量配分の評価

次に、領域間流量配分を評価するために、領域出口ガス温度が均一となるように各領域の流量調整を行う方式（領域出口温度一定制御方式）と、あらかじめ領域出力ピーピング等により設定されたオリフィス開度を全燃焼期間にわたって維持する方式（オリフィス固定方式）との比較検討を行う。その結果、オリフィス固定方式に基づいた領域間流量配分の効果を取り入れる。詳細を付録2に示す。

(3) カラム内流量再配分の評価

カラム内流量再配分については次の方法で評価した。炉内流量配分解析結果より得られた炉心を代表するカラム（S8, S6, S2カラム；位置はFig. 3.1.4 参照）の平均燃料チャンネル及びその周辺のカラム間ギャップガス温度、ブロック表面温度、燃料チャンネル出入口圧力、およびクロス流れ部差圧を境界条件として、カラム内の流量再配分評価を流路網解析コードにより行う。この場合、カラム内代表チャンネル間の流動抵抗、熱抵抗は2次元熱流動計算により求め、等価的な流動抵抗、熱伝導率として評価される。これらの詳細は付録4に記す。

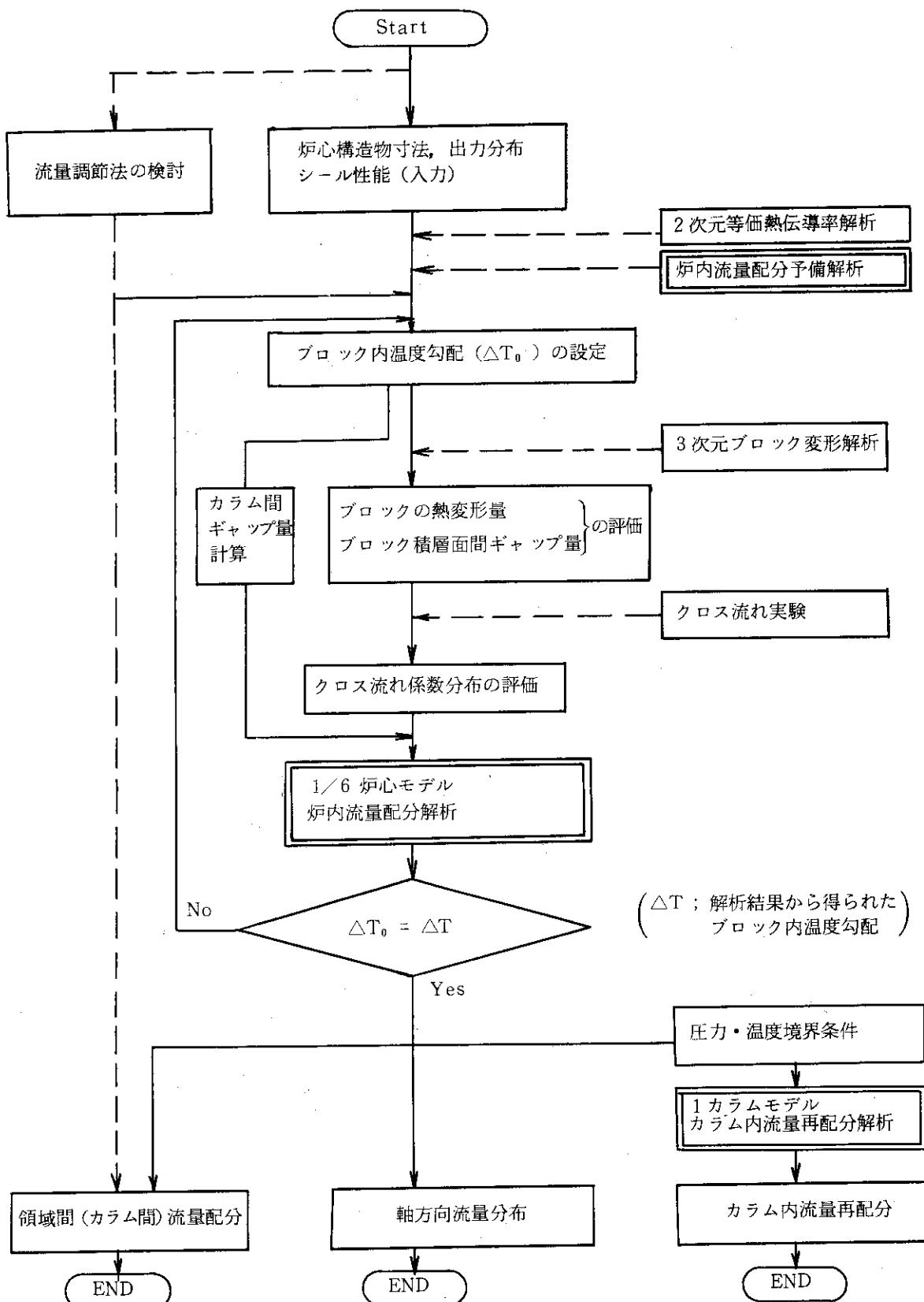


Fig. 3.2.1 炉内流量配分解析手順

3.3 解析条件

詳細設計(Ⅱ)の炉内流量配分解析作業は大別して、予備解析、計画炉心の解析、および最終的な原子炉仕様に基づく解析に分けられる。

ここでは、計画炉心、および詳(Ⅱ)炉心における流量配分解析条件について述べる。

(1) 炉心・燃料体主要諸元

炉心および燃料体の主要諸元はTable 3.3.1に示す通りである。

(2) 流量調節方式

流量調節方式は全ケースをも燃料温度面で有利となるオリフィス固定運転方式とした。オリフィス開度は第1、第2領域は開放 ($K/A^2 = 3200 \text{ m}^{-4}$) とし、第3領域については上部オリフィスに加え、下部可動反射体部あるいは高温プレナムブロック上段に固定オリフィス（下部絞りと略す）を設置した。下部絞りは、第3領域カラム間の出力差を補なう様カラム単位で独立の絞りを設ける様設計している。下部オリフィス設置位置は、計画炉心ではプレナムブロック上段、最終炉心では下部可動反射体である。また、第3領域には熱応力を軽減させる為、分担出力比に対して約5%増の冷却流量が配分される様絞りを設定している。領域流量調節方式の検討結果は付録2に示してある。

(3) 炉心出力分布及び等価熱伝導率

炉心出力分布は燃焼0日、185日、425日の3次元出力分布計算結果を使用した。また、燃料体単位で等価的に燃料チャンネルからカラム間ギャップへの熱移動量を評価するための等価熱伝導率は2次元有限要素法モデルにより評価して設定したが、本設計ではより精度を向上させるため、等価熱伝導率の評価には燃料体の温度依存性を考慮した。

(4) 流量配分計画（炉心以外）

制御棒冷却チャンネルには、軸方向に最低4%流れるように制御棒冷却チャンネル上下の絞りを調節している。

また、側部可動反射体には冷却チャンネルを設けない。

Table 3.3.1 热流力設計に関する主要諸元

1. Coolant Flow and Coolant Temperatures

Reactor inlet temperature	395 °C
Core inlet temperature	400 °C
Core inlet pressure	40 kg/cm ² G
Reactor outlet temperature	950 °C
Total flow rate in reactor	17.4 kg/sec

2. Thermal Powers

Reactor power	50 Mwt
Heat generation in fuel rods	47 Mwt
Fraction of heat generation in core	
Compact & sleeve/graphite block/others	94/5/1 %

3. Fuel Channel Dimensions

Diameter of fuel rod hole	56 mm
Inner/outer diameter of sleeve	36.3/46 mm
Inner/outer diameter of fuel compact	18/36 mm
Length for calculation of pressure drops	700 mm/fuel element
Length for calculation of temperatures	659 mm/fuel element
Number of fuel channels	15/fuel element

4. Thermal Properties

Thermal conductivity of sleeve	Function of temperature and fast neutron dose
Thermal conductivity of compact	0.03 cal/cm s °C
Emissivity factor between sleeve and compact	0.8

3.4 解析ケース

計画炉心では、燃焼初期（ケース NOMBOL）、中期（ケース NOMMOL）、および末期（ケース NOMEOL）の3ケースを行った。詳(II)炉心では、燃焼初期（ケース D II-000）、中期（ケース D II-185）、および末期（ケース D II-425）の3ケースに加え、Table 3.4.1のケース PS-1～PS-6に示す様なNOMBOLを基準ケースとした感度評価を行った。この感度評価はクロス流れ係数、シール性能データ等の実験データの精度評価並びに、第3領域下部絞り及び制御棒冷却チャンネル絞りの位置による流量配分特性比較を目的とした。なお、第3領域下部絞り位置の効果の評価ケースでは、効果が最も顕著にあらわれると考えられる炉心変形状態（カラム上下端に口あけが生じた状態）についても検討を行った。炉心変形モードは以下の通りである。

- ① カラム上下端口あけ量 $\left\{ \begin{array}{l} \text{炉心最外周領域} \quad 3.4 \text{ mm} \\ \text{上記以外の領域} \quad 2.1 \text{ mm} \end{array} \right.$
- ② カラム上下端の K/A^2 値 $\left\{ \begin{array}{l} \text{炉心最外周領域} \quad 7.45 \times 10^6 \text{ m}^{-4} \\ \text{上記以外の領域} \quad 3.83 \times 10^7 \text{ m}^{-4} \end{array} \right.$

Table 3.4.1 感度評価解析ケース

解析ケース名	流配条件	燃 燃 日	記 事
基 準 ケース (計画炉心流配)	K/A^2 分布	0 日	計画炉心流量配分解析ケースNOMBOLとする。
PS-1			クロス流れ係数データのみ変更。
PS-2			高温プレナムブロックシール性能データのみ変更。
PS-3			固定反射体シール性能データのみ変更。
PS-4			上部遮蔽体シール性能データのみ変更。
PS-5			第3領域下部絞り設置場所をプレナムブロックから下部反射体に変更。
PS-5A	カラム上下端	0 日	下部絞り設置場所の効果を、カラムバウイングを想定したケースで検討。
PS-5B	口あけケース	↓	
PS-6	K/A^2 分布	↓	カラム間ギャップデータのみ変更。
D II-000C*	↓	↓	制御棒冷却流路絞りを下部のみに設置。

* D II-000Cの基準ケースはD II-000（詳(II)炉心：燃焼初期）である。

3.5 解析データ

Table 3.4.1 に示した解析ケースのうち、代表的なケースとして計画炉心と詳(II)炉心の炉内流量配分解析データをTable 3.5.1 に示す。計画炉心の解析データと比べて、詳(II)炉心の解析データの主な相違点は以下の通りである。

(1) クロス流れ係数

詳(II)燃料ブロックのクロス流れ係数は、レイノルズ数依存性を考慮した式⁽³⁾に 10 % の実験誤差を見込んだ以下の式から定めた。

$$(K/A^2)_{1/6} = \frac{8.75 \times 10^{10}}{\delta^3 Re} + \frac{2.59 \times 10^8}{\delta^2}$$

ここで、 $(K/A^2)_{1/6}$ 、 δ 、 Re は、それぞれ 1/6 ブロック当たりのクロス流れ係数 (m^{-4})、ブロック積層面間ギャップ (mm)、クロス流れのレイノルズ数である。

(2) 高温プレナムブロックのシール要素のシール性能

実験結果⁽⁵⁾より、シール要素 500 mm 当りの漏れ流れ抵抗係数 (K/A^2) を $2.2 \times 10^8 m^{-4}$ とする。この値は、黒鉛シール 3 段（平行段差 3.5 mm、くいちがい段差 1.5 mm）の測定値に実験誤差 20 % を見込んだ値である。

(3) 固定反射体シール要素のシール性能

固定反射体のキーの流動抵抗をシール要素の抵抗に置きかえる。抵抗値は以下の通りである。縦置シールの抵抗係数は 500 mm 当り $5 \times 10^8 m^{-4}$ (500 mmあたりのくいちがい段差 0.4 mm) とする。横置シールは、等価ギャップ 0.4 mm に相当する流動抵抗とする。なお、金属シール要素は、キーが万一破損した場合において抵抗を保障するものとして取り扱い、金属シール要素の抵抗値は設計値としては取り入れない。

(4) カラム間ギャップ

炉内構造物温度分布解析結果及び詳(II)核計算結果を基にカラム間ギャップデータを設定した。詳(II)炉心のデータは計画炉心のデータより値が小さ目になっている。

Table 3.5.1 炉内流量配分解析データ (1/6)

No.	項目	炉心名	計画炉心	詳(II)炉心	備考
1	クロス流れ係数		以下の式に基づく(実験誤差10%を含む) $K/A^2 = 3.6 \times 10^{(-3.062 \log \delta + 8.608)}$	以下の式に基づく(実験誤差10%を含む) $K/A^2 = \frac{C_1}{\delta^3 Re} + \frac{C_2}{\delta^2}$ $C_1 = 8.75 \times 10^{10}$ $C_2 = 2.59 \times 10^8$	クロス流れ係数とブロック変形量の関係 は付録1参照の事。 なお、ブロック積層面間ギャップ量は両者同じである。
2	高温プレナム プロックシール 性能	(1) シール要素 黒鉛シール(1段)目標値を使用。 (a) 炉心最外周以外の領域 $K/A^2(200 \text{ mm}) = 4.46 \times 10^9 \Delta P_s^{0.0434}$ (平行段差1mm相当) (c) 炉心最外周領域 $K/A^2(200 \text{ mm}) = 2.06 \times 10^8 \Delta P_s^{0.0380}$ (くいちがい段差1mm/200mm相当) ここで ΔP_s はシール要素部差圧 (kg/m^2) である。	(1) シール要素 黒鉛シール(3段)実験データを使用。 (a) 炉心最外周以外の領域 $K/A^2(500 \text{ mm}) = 2.2 \times 10^8 (\text{m}^{-4})$ 平行段差3.5mm, くいちがい段差1.5mm /500mm相当。なお、本データは実験護差 20%を含む。 (c) 炉心最外周領域 $K/A^2(200 \text{ mm}) = 2.06 \times 10^8 \Delta P_s^{0.0380}$ (くいちがい段差1mm/200mm相当) ここで ΔP_s はシール要素部差圧 (kg/m^2) である。	計画炉心のシール要素抵抗値(炉心平均値)は、500mm当たり約 $2 \times 10^8 \text{ m}^{-4}$ に相当する。	

Table 3.5.1 炉内流量配分解析データ (2/6)

No	項目	炉心名	計画炉心	詳(II)炉心	備考
2	高温プレナムブロックシール性能 (つづき)	(2) ブロック面間抵抗 プレナムブロックの片寄りを考慮し、等価的に 6 mm とした。	(2) ブロック面間抵抗 ラジアルキーによる片寄り防止効果を考慮し平均値 2.1 mm とする。		詳(II)炉心用データでは金属シールの抵抗値はバックアップとし、設計値としてはとり入れない。
3	固定反射体シール性能	(1) シール要素 以下の式に基づく $K/A^2 (200 \text{ mm}) = 8.64 \times 10^9 \Delta P_s^{0.083} \text{ m}^{-4}$ (金属シール平行段差 0.6 mm 相当) ここで ΔP_s はシール要素部差圧 (kg/m^2) である。なお、 $\Delta P_s = 300 \text{ kg}/\text{m}^2$ では、 $K/A^2 (500 \text{ mm}) = 2.23 \times 10^9 \text{ m}^{-4}$ に相当する。	(1) シール要素 キーのみの抵抗値とする。 ① 縦置シール $K/A^2 (500 \text{ mm}) = 5.0 \times 10^8 \text{ m}^{-4}$ (くいちがい段差 0.4 / 500 mm 相当) ② 横置シール 等価ギャップ 0.4 mm、有効流路長 80 mm の平行平板間流路の抵抗とする。 (この抵抗値は、層流域では、 $K/A^2 (500 \text{ mm}) = 5 \sim 6 \times 10^8 \text{ m}^{-4}$ に相当する)		

Table 3.5.1 炉内流量配分解析データ (3/6)

No.	項目	炉心名	計画炉心	詳(II)炉心	備考																																					
3	固定反射体シール性能 (つづき)	(2) プロック面間抵抗 等価ギャップ ⁽⁵⁾ は以下の通りである。 単位 (mm)	(2) プロック面間抵抗 等価ギャップ ⁽⁵⁾ は以下の通りである。	<table border="1"> <thead> <tr> <th>固定反射体 段数(上から)</th> <th>隣接間</th> <th>上下間</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>0.52</td><td>0.28</td></tr> <tr> <td>2</td><td>0.52</td><td>0.28</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.52</td><td>0.31</td></tr> <tr> <td>4</td><td>0.55</td><td>0.35</td></tr> <tr> <td>5</td><td>0.56</td><td>0.37</td></tr> <tr> <td>6</td><td>0.57</td><td>0.37</td></tr> <tr> <td>7</td><td>0.57</td><td>0.37</td></tr> <tr> <td>8</td><td>0.57</td><td>0.37</td></tr> <tr> <td>9</td><td>0.57</td><td>0.35</td></tr> <tr> <td>10</td><td>0.55</td><td>0.31</td></tr> <tr> <td>11</td><td>0.52</td><td>0.28</td></tr> </tbody> </table> <p>固定反射体 段数(上から)</p> <p>隣接間</p> <p>上下間</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11</p> <p>0.28 0.29 0.30 0.32 0.33 0.34 0.34 0.33 0.32 0.31 0.29 0.17</p>	固定反射体 段数(上から)	隣接間	上下間	1	0.52	0.28	2	0.52	0.28	3	0.52	0.31	4	0.55	0.35	5	0.56	0.37	6	0.57	0.37	7	0.57	0.37	8	0.57	0.37	9	0.57	0.35	10	0.55	0.31	11	0.52	0.28	<p>(2) プロック面間抵抗 等価ギャップ⁽⁵⁾は以下の通りである。</p> <p>単位 (mm)</p> <p>固定反射体 段数(上から)</p> <p>隣接間</p> <p>上下間</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11</p> <p>0.28 0.29 0.30 0.31 0.31 0.32 0.32 0.33 0.31 0.30 0.17</p>	<p>流路長(あたり面の長さ)は0.3mである。</p> <p>流路長(あたり面の長さ)は0.13mである。</p>
固定反射体 段数(上から)	隣接間	上下間																																								
1	0.52	0.28																																								
2	0.52	0.28																																								
3	0.52	0.31																																								
4	0.55	0.35																																								
5	0.56	0.37																																								
6	0.57	0.37																																								
7	0.57	0.37																																								
8	0.57	0.37																																								
9	0.57	0.35																																								
10	0.55	0.31																																								
11	0.52	0.28																																								

Table 3.5.1 炉内流量配分解析データ (4/6)

No.	項目	炉心名	計画炉心	詳(1)炉心	備考
4	上部遮蔽体間 シール性能	K/A^2 (200 mm) = $3.7 \times 10^8 m^{-4}$ (シール要素) (シール締目)		(1) 上部遮蔽体間 等価ギャップ 0.4 mm (2) 上部遮蔽体／固定反射体間 K/A^2 (200 mm) = $1.0 \times 10^8 m^{-4}$	
5	カラム間ギャップ	燃焼初期及び末期のデータをそれぞれ、Table 3.5.5 及び 3.5.6 に示す。またカラム間ギャップの位置を Fig. 3.5.1 に示す。なお、燃焼中期のデータは燃焼末期と同じである。		燃焼初期、中期及び末期のデータをそれぞれ、 Table 3.5.7 ~ 3.5.9 に示す。	
6	オリフィス係数 および下部絞り 設置場所	(1) 上部オリフィス係数 • 第1、第2領域 : $3.2 \times 10^3 m^{-4}$ (6 燃料カラム相当) • 第3領域 : $3.17 \times 10^4 m^{-4}$ (2 燃料カラム相当) (2) 第3領域下部絞り (1 カラム当り) • S8 カラム : $4.03 \times 10^4 m^{-4}$ • S9 カラム : $6.33 \times 10^3 m^{-4}$	(1) 上部オリフィス係数 同左 (2) 第3領域下部絞り (1 カラム当り) • S8 カラム : $5.64 \times 10^4 m^{-4}$ • S9 カラム : $1.57 \times 10^4 m^{-4}$		

Table 3.5.1 炉内流量配分解析データ (5/6)

No	項目	炉心名	計画炉心	詳(II)炉心	備考
6	オリフィス係数 および下部綴り 設置場所 (つづき)	③ 第3領域下部綴り設置場所 高温プレナムロックにカラムごとに設置 する。	③ 第3領域下部綴り設置場所 下部可動反射体にカラムごとに設置する。		
7	燃料チャンネル 圧力損失係数	① スペーサリップの圧力損失係数 暫定的に 0.75 をとする。 ② 燃料チャンネルのオフセットによる圧力損失係数 0.09とする。なお、オフセット量はダウエル ガタの分 (0.7 mm) である。 ③ 燃料棒継目の圧力損失係数 考慮していない。 ①～③より圧力損失係数は 0.84	① スペーサリップの圧力損失係数 実験結果より 0.6 とする。 ② 燃料チャンネルのオフセットによる圧力損失係数 同 左 ③ 燃料棒継目の圧力損失係数 実験結果より 0.2 とする。 ①～③より圧力損失係数は 0.89	解析には、左記の圧力損失係数、および 摩擦損失係数に 10 %の余裕を見込んで いる。	

Table 3.5.1 炉内流量配分解析データ (6 / 6)

No.	項目	炉心名	計画炉心	詳(II)炉心	備考
8	上部遮蔽体・可動反射体プレナムプロック流路	<p>① 上部遮蔽体 $\phi 48 \text{ mm} \times 6, K = 1.25$</p> <p>② 上部可動反射体 $\phi 32 \text{ mm} \times 15$</p> <p>$K = \begin{cases} 0.38 & (\text{上段}) \\ 0.68 & (\text{下段}) \end{cases}$</p> <p>③ 下部可動反射体 $\phi 50 \text{ mm} \times 6, K = 0.93$</p> <p>④ 高温プレナムブロック $\begin{cases} \phi 120 \text{ mm} \times 6 & (\text{上段}) \\ \phi 350 \text{ mm} \times 1 & (\text{下段}) \end{cases}$</p> <p>$K = 0.95$</p>	<p>① 上部遮蔽体 $\phi 57 \text{ mm} \times 6, K = 2.3$</p> <p>② 上部可動反射体 $\phi 36 \text{ mm} \times 15$</p> <p>$K = \begin{cases} 0.38 & (\text{上段}) \\ 0.84 & (\text{下段}) \end{cases}$</p> <p>③ 下部可動反射体 $\phi 36 \text{ mm} \times 15, K = 1.4$</p> <p>④ 高温プレナムブロック $\begin{cases} \phi 120 \text{ mm} \times 6 & (\text{上段}) \\ \phi 350 \text{ mm} \times 1 & (\text{下段}) \end{cases}$</p> <p>$K = 1.73$</p>	<p>ここでKは圧力損失係数である。</p> <p>ここでKは圧力損失係数である。</p>	<p>詳(II)炉心の出力分布を使用 燃焼初期、中期及び末期のデータをそれぞれ Table 3.5.10 ~ 3.5.12に示す。</p>
9	発熱分布	計画炉心の出力分布を使用			

Table 3.5.2 計画炉心燃焼初期のクロス流れ係数

カラム A_6	S1, C1			S2, S7			S3, S6, C2			S4, S5, S8, S9, C3, C4		
	設定表面温度差 ($^{\circ}\text{C}$)	熱変形量 ($\frac{mm}{mm}$)	設定表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)	熱変形量 ($\frac{mm}{mm}$)	設定表面温度差 ($^{\circ}\text{C}$)	熱変形量 ($\frac{mm}{mm}$)	設定表面温度差 ($^{\circ}\text{C}$)	熱変形量 ($\frac{mm}{mm}$)	設定表面温度差 ($^{\circ}\text{C}$)	熱変形量 ($\frac{mm}{mm}$)	設定表面温度差 ($^{\circ}\text{C}$)	熱変形量 ($\frac{mm}{mm}$)
反射体	1 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
燃	1 2 10	0 0.06	0 10	0 0.06	0 10	0 0.06	10	0 0.06	10	0 0.06	10	0 0.05
	3 30	0.14	30	0.14	30	0.14	30	0.14	30	0.14	30	0.14
料	4 30	0.16	30	0.16	30	0.16	40	0.20	40	0.20	40	0.20
	5 30	0.19	30	0.18	30	0.18	50	0.25	50	0.25	50	0.25
体	6 50	0.27	50	0.28	50	0.28	70	0.33	70	0.33	70	0.33
	7 50	0.28	50	0.28	50	0.28	80	0.37	80	0.37	80	0.37
反射体	8 50	0.28	50	0.28	50	0.28	60	0.31	60	0.31	60	0.31
	反射体	50	0.28	50	0.28	50	0.28	80	0.38	80	0.38	80
反射体	K_6 ($\frac{mm}{mm}$)	K/Λ^2 (m^{-4})	A_6 ($\frac{mm}{mm}$)	開口キャップ ^ア	K/Λ^2 (m^{-4})	A_6 ($\frac{mm}{mm}$)	開口キャップ ^ア	K/Λ^2 (m^{-4})	A_6 ($\frac{mm}{mm}$)	開口キャップ ^ア	K/Λ^2 (m^{-4})	A_6 ($\frac{mm}{mm}$)
	1 0.067	5.808E+12	1 0.067	5.808E+12	1 0.067	5.808E+12	1 0.067	5.808E+12	1 0.067	5.808E+12	1 0.067	5.808E+12
燃	2 0.073	4.326E+12	2 0.073	4.326E+12	2 0.073	4.326E+12	2 0.073	4.326E+12	2 0.073	4.326E+12	2 0.073	4.326E+12
	3 0.074	4.201E+12	3 0.074	4.171E+12	3 0.090	4.171E+12	3 0.090	4.171E+12	3 0.090	4.171E+12	3 0.090	4.171E+12
料	4 0.095	1.990E+12	4 0.095	1.962E+12	4 0.111	1.962E+12	4 0.111	1.962E+12	4 0.111	1.962E+12	4 0.111	1.962E+12
	5 0.157	4.223E+11	5 0.159	4.108E+11	5 0.156	4.108E+11	5 0.156	4.108E+11	5 0.156	4.108E+11	5 0.156	4.108E+11
体	6 0.213	1.672E+11	6 0.216	1.594E+11	6 0.227	1.594E+11	6 0.227	1.594E+11	6 0.227	1.594E+11	6 0.227	1.594E+11
	7 0.237	1.206E+11	7 0.242	1.127E+11	7 0.282	1.127E+11	7 0.282	1.127E+11	7 0.282	1.127E+11	7 0.282	1.127E+11
反射体	8 0.288	6.609E+10	8 0.294	6.175E+10	8 0.349	6.175E+10	8 0.349	6.175E+10	8 0.349	6.175E+10	8 0.349	6.175E+10
	9 0.333	4.226E+10	9 0.338	4.040E+10	9 0.409	4.040E+10	9 0.409	4.040E+10	9 0.409	4.040E+10	9 0.409	4.040E+10
体	10 0.340	3.982E+10	10 0.341	3.926E+10	10 0.401	3.926E+10	10 0.401	3.926E+10	10 0.401	3.926E+10	10 0.401	3.926E+10
	11 0.341	3.926E+10	11 0.341	3.926E+10	11 0.404	3.926E+10	11 0.404	3.926E+10	11 0.404	3.926E+10	11 0.404	3.926E+10
反射体	12 0.201	1.997E+11	12 0.201	1.997E+11	12 0.248	1.997E+11	12 0.248	1.997E+11	12 0.248	1.997E+11	12 0.248	1.997E+11

Table 3.5.3 計画炉心燃焼中期のクロス流れ係数

力マム K _b	S1, C1		S2, S7		S3, S6, C2		S4, S5, S8, S9, C3, C4	
	設定表面温度差(℃)	熱変形量($\frac{mm}{mm}$)	設定表面温度差(℃)	熱変形量($\frac{mm}{mm}$)	設定表面温度差(℃)	熱変形量($\frac{mm}{mm}$)	設定表面温度差(℃)	熱変形量($\frac{mm}{mm}$)
反射体	1 0	0	0	0	0	0	0	0
	2 0	0	0	0	0	0	0	0
	1 10	0.02	10	0.02	10	0.02	10	0.02
	2 30	0.06	30	0.06	30	0.06	10	0.03
	3 50	0.11	50	0.11	40	0.09	50	0.11
	4 50	0.12	50	0.12	40	0.10	100	0.20
	5 50	0.13	50	0.13	40	0.11	140	0.27
	6 50	0.14	50	0.14	50	0.13	160	0.31
	7 50	0.14	50	0.14	70	0.17	180	0.34
	8 50	0.14	50	0.14	80	0.19	180	0.35
	反 射 体 60	0.16	60	0.16	80	0.19	200	0.38
反射体	開口ギヤップ β	K/A ² (m^{-4})	開口ギヤップ β	K/A ² (m^{-4})	開口ギヤップ β	K/A ² (m^{-4})	開口ギヤップ β	K/A ² (m^{-4})
	1 0.067	5.808E+12	1 0.067	5.808E+12	1 0.067	5.808E+12	1 0.067	5.808E+12
	2 0.073	4.326E+12	2 0.073	4.326E+12	2 0.073	4.326E+12	2 0.073	4.326E+12
	3 0.091	2.255E+12	3 0.091	2.255E+12	3 0.091	2.262E+12	3 0.091	2.262E+12
	4 0.147	5.153E+11	4 0.147	5.153E+11	4 0.146	5.288E+11	4 0.114	1.134E+12
	5 0.231	1.294E+11	5 0.231	1.294E+11	5 0.211	1.715E+11	5 0.195	2.181E+11
	6 0.289	6.514E+10	6 0.289	6.514E+10	6 0.249	1.029E+11	6 0.362	3.274E+10
	7 0.313	5.129E+10	7 0.313	5.129E+10	7 0.270	8.079E+10	7 0.527	1.038E+10
	8 0.331	4.317E+10	8 0.331	4.317E+10	8 0.302	5.716E+10	8 0.638	5.772E+09
	9 0.340	3.976E+10	9 0.340	3.976E+10	9 0.362	3.285E+10	9 0.712	4.132E+09
	10 0.341	3.926E+10	10 0.341	3.926E+10	10 0.417	2.122E+10	10 0.749	3.539E+09
	11 0.357	3.407E+10	11 0.357	3.407E+10	11 0.436	1.856E+10	11 0.783	3.092E+09
	反 射 体 12 0.217	1.575E+11	12 0.217	1.575E+11	12 0.248	1.044E+11	12 0.438	1.835E+10

Table 3.5.4 計画炉心燃焼末期のクロス流れ係数

カラム κ_6	S 1 , C 1		S 2 , S 7		S 3 , S 6 , C 2		S 4 , S 5 , S 8 , S 9 , C 3 , C 4	
	設定表面温度差 (℃)	熱変形量 (mm)	設定表面温度差 (℃)	熱変形量 (mm)	設定表面温度差 (℃)	熱変形量 (mm)	設定表面温度差 (℃)	熱変形量 (mm)
反射体	1 0	0	0	0	0	0	0	0
	2 0	0	0	0	0	0	0	0
	1 40	0.15	20	0.09	10	0.05	20	0.09
	2 40	0.18	50	0.21	50	0.20	90	0.33
	3 40	0.20	50	0.24	60	0.26	130	0.48
	4 40	0.22	50	0.26	80	0.34	150	0.56
	5 40	0.24	50	0.27	80	0.35	150	0.57
	6 40	0.25	60	0.31	80	0.36	150	0.58
燃料体	7 40	0.25	60	0.31	90	0.41	160	0.62
	8 40	0.25	60	0.31	90	0.41	170	0.66
	反射体	40	0.25	60	0.31	100	0.44	200
		κ_6 (mm) ²	K/A^2 (m ⁻⁴)	κ_6 (mm) ²	K/A^2 (m ⁻⁴)	κ_6 (mm) ²	K/A^2 (m ⁻⁴)	κ_6 (mm) ²
	1	0.067	5.808E+12	1	0.067	5.808E+12	1	0.067
	2	0.073	4.326E+12	2	0.073	4.326E+12	2	0.073
	3	0.143	5.678E+11	3	0.110	1.249E+12	3	0.094
	4	0.224	1.423E+11	4	0.208	1.790E+11	4	0.189
燃 料	5	0.250	1.021E+11	5	0.282	7.034E+10	5	0.292
	6	0.274	7.725E+10	6	0.306	5.486E+10	6	0.361
	7	0.292	6.319E+10	7	0.324	4.581E+10	7	0.410
	8	0.305	5.566E+10	8	0.353	3.539E+10	8	0.421
	9	0.309	5.326E+10	9	0.374	2.975E+10	9	0.446
	10	0.309	5.326E+10	10	0.374	2.975E+10	10	0.467
	11	0.309	5.326E+10	11	0.374	2.975E+10	11	0.485
	12	0.184	2.583E+11	12	0.217	1.575E+11	12	0.281
反射体								

Table 3.5.5 計画炉心のカラム間ギャップデータ（燃焼初期定格運転状態）

(単位:mm)

位 置	領 域 内 部 ギ ャ ッ プ°											
	第 1 領 域		第 2 領 域		第 3 領 域				第 4 領 域			
	C ₁ - S ₁	S ₁ - S ₁	C ₂ - S ₂	S ₂ - S ₂	Rin - S ₃	S ₃ - S ₃	Rin - Rin	Rin - Rout	Rin - Rin	Rin - Rout	Rout - Rout	
上 部	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	
	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	
燃 料 体	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	
	1.78	1.76	1.78	1.75	1.78	1.73	1.83	1.84	1.83	1.84	1.85	
	1.62	1.58	1.60	1.53	1.64	1.49	1.79	1.81	1.79	1.81	1.82	
	1.42	1.36	1.39	1.31	1.50	1.27	1.73	1.77	1.73	1.77	1.81	
	1.25	1.19	1.22	1.13	1.38	1.11	1.65	1.72	1.65	1.72	1.79	
	1.12	1.04	1.09	0.97	1.29	1.01	1.58	1.68	1.58	1.68	1.78	
	1.02	0.93	1.01	0.85	1.23	0.93	1.53	1.64	1.53	1.64	1.75	
	0.97	0.85	0.93	0.78	1.20	0.89	1.51	1.60	1.51	1.60	1.69	
	下部反射体	0.99	0.82	0.95	0.74	1.20	0.89	1.51	1.60	1.51	1.60	1.69

(単位:mm)

位 置	領 域 間 ギ ャ ッ プ°								領 域 - 固 定 反 射 体 間			
	第 1 - 2 領 域			第 2 - 3 領 域			第 3 - 4 領 域		第 2 - 4 領 域		第 3 - PR 領 域	第 4 - PR 領 域
	S ₁ - S ₂	S ₂ - S ₃	S ₃ - S ₄	S ₃ - Rin	Rin - Rin	Rin - Rout	Rout - Rout	S ₂ - Rin	Rin - PR	Rout - PR	Rout - PR	
上 部	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.18	2.18	2.18	
	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.18	2.18	2.18	
燃 料 体	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.18	2.18	2.18	
	2.85	2.85	2.84	2.88	2.93	2.94	2.95	2.89	2.16	2.17	2.17	
	2.65	2.63	2.61	2.74	2.89	2.91	2.92	2.76	2.13	2.15	2.15	
	2.44	2.41	2.39	2.60	2.83	2.87	2.91	2.62	2.10	2.14	2.14	
	2.26	2.23	2.22	2.48	2.75	2.82	2.89	2.49	2.05	2.13	2.13	
	2.10	2.07	2.09	2.39	2.68	2.78	2.88	2.37	2.00	2.12	2.12	
	1.99	1.95	1.99	2.33	2.63	2.74	2.85	2.29	1.97	2.10	2.10	
	1.92	1.88	1.94	2.30	2.61	2.70	2.79	2.24	1.96	2.07	2.07	
	下部反射体	1.88	1.84	1.94	2.30	2.61	2.70	2.79	2.23	1.96	2.07	2.07

Table 3.5.6 計画炉心のカラム間ギャップデータ（燃焼末期定格運転状態）

(単位:mm)

位 置	領 域 内 部 ギ ャ ッ プ ^o											
	第 1 領 域		第 2 領 域		第 3 領 域				第 4 領 域			
	C ₁ -S ₁	S ₁ -S ₁	C ₂ -S ₂	S ₂ -S ₂	Rin-S ₃	S ₃ -S ₃	Rin-Rin	Rin-Rout	Rin-Rin	Rin-Rout	Rout-Rout	
上 部	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	
反 射 体	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	
燃 料 体	1.91	1.92	1.92	1.92	1.91	1.92	1.89	1.88	1.89	1.88	1.86	
	1.89	1.89	1.92	1.87	1.90	1.88	1.92	1.88	1.92	1.88	1.85	
	1.75	1.75	1.78	1.68	1.75	1.60	1.90	1.86	1.90	1.86	1.82	
	1.56	1.52	1.57	1.46	1.61	1.37	1.85	1.83	1.85	1.83	1.81	
	1.38	1.36	1.40	1.33	1.50	1.25	1.76	1.77	1.76	1.77	1.79	
	1.23	1.19	1.25	1.20	1.38	1.13	1.62	1.70	1.62	1.70	1.78	
	1.12	1.08	1.24	1.19	1.30	1.05	1.55	1.65	1.55	1.65	1.75	
	1.10	1.05	1.22	1.21	1.28	1.03	1.54	1.61	1.54	1.61	1.69	
下部反射体	0.99	0.82	0.95	0.74	1.20	0.89	1.51	1.60	1.51	1.60	1.69	

(単位:mm)

位 置	領 域 間 ギ ャ ッ プ ^o								領 域 - 固 定 反 射 体 間		
	第1-2 領 域	第2-2 領 域	第2-3 領 域	第 3 - 4 領 域				第2-4 領 域	第3-PR 領 域	第4-PR 領 域	
	S ₁ -S ₂	S ₂ -S ₂	S ₂ -S ₃	S ₃ -Rin	Rin-Rin	Rin-Rout	Rout-Rout	S ₂ -Rin	Rin-PR	Rout-PR	Rout-PR
上 部	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.18	2.18	2.18
反 射 体	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.18	2.18	2.18
燃 料 体	3.02	3.02	3.02	3.01	2.99	2.98	2.96	3.01	2.18	2.18	2.18
	2.98	2.97	2.98	3.00	3.02	2.98	2.95	3.00	2.16	2.17	2.17
	2.81	2.78	2.74	2.85	3.00	2.96	2.92	2.89	2.13	2.15	2.15
	2.59	2.56	2.51	2.71	2.95	2.93	2.91	2.76	2.10	2.14	2.14
	2.45	2.43	2.39	2.60	2.86	2.87	2.89	2.65	2.05	2.13	2.13
	2.30	2.30	2.27	2.48	2.72	2.80	2.88	2.51	2.00	2.12	2.12
	2.24	2.29	2.22	2.40	2.65	2.75	2.85	2.47	1.97	2.10	2.10
	2.23	2.31	2.22	2.38	2.64	2.77	2.79	2.47	1.96	2.07	2.07
下部反射体	1.88	1.84	1.92	2.30	2.61	2.70	2.79	2.23	1.96	2.07	2.07

Table 3.5.7 詳(II)炉心のカラム間ギャップデータ (燃焼初期定格運転状態)

(単位:mm)

位 置	領域 内 部 ギ ャ ッ プ											
	第1領域		第2領域		第3領域				第4領域			
	C ₁ -S ₁	S ₁ -S ₁	C ₂ -S ₂	S ₂ -S ₂	Rin-S ₃	S ₃ -S ₃	Rin-Rin	Rin-Rout	Rin-Rin	Rin-Rout	Rout-Rout	
上 部 反 射 体	1.71	1.71	1.76	1.76	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79
	1.71	1.71	1.76	1.76	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79
燃 料 体	1.69	1.69	1.75	1.75	1.77	1.77	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.75
	1.64	1.63	1.68	1.68	1.72	1.71	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.72
	1.47	1.45	1.48	1.48	1.59	1.52	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.67
	1.23	1.21	1.21	1.21	1.40	1.26	1.54	1.56	1.54	1.56	1.56	1.58
	1.01	0.98	0.97	0.97	1.23	1.04	1.42	1.45	1.42	1.45	1.45	1.48
	0.83	0.81	0.79	0.78	1.10	0.89	1.31	1.36	1.31	1.36	1.40	
	0.72	0.70	0.67	0.67	1.02	0.80	1.24	1.30	1.24	1.30	1.30	1.36
	0.62	0.62	0.60	0.60	0.98	0.77	1.20	1.26	1.20	1.26	1.26	1.31
下部反射体	0.62	0.62	0.60	0.60	0.98	0.77	1.20	1.26	1.20	1.26	1.26	1.31

(単位:mm)

位 置	領域 間 ギ ャ ッ プ								領域 - 固定反射体間		
	第1-2 領 域	第2-2 領 域	第2-3 領 域	第3 - 4 領 域				第2-4 領 域	第3 - PR 領 域	第4 - PR 領 域	
	S ₁ -S ₂	S ₂ -S ₂	S ₂ -S ₃	S ₃ -Rin	Rin-Rin	Rin-Rout	Rout-Rout	S ₂ -Rin	Rin-PR	Rout-PR	Rout-PR
上 部 反 射 体	2.83	2.86	2.87	2.89	2.89	2.89	2.89	2.87	2.22	2.22	2.22
	2.83	2.86	2.87	2.89	2.89	2.89	2.89	2.87	2.22	2.22	2.22
燃 料 体	2.82	2.85	2.86	2.87	2.86	2.86	2.85	2.85	2.21	2.21	2.21
	2.76	2.78	2.79	2.82	2.83	2.83	2.82	2.80	2.19	2.19	2.19
	2.57	2.58	2.60	2.69	2.76	2.76	2.77	2.67	2.15	2.16	2.16
	2.31	2.31	2.34	2.50	2.64	2.66	2.68	2.48	2.09	2.11	2.11
	2.08	2.07	2.10	2.33	2.52	2.55	2.58	2.29	2.02	2.06	2.06
	1.90	1.88	1.93	2.20	2.41	2.46	2.50	2.15	1.96	2.01	2.01
	1.78	1.77	1.83	2.12	2.34	2.40	2.46	2.06	1.93	1.99	1.99
	1.71	1.70	1.78	2.08	2.30	2.36	2.41	2.00	1.90	1.96	1.96
下部反射体	1.71	1.70	1.78	2.08	2.30	2.36	2.41	2.00	1.90	1.96	1.96

Table 3.5.8 詳(II)炉心のカラム間ギャップデータ（燃焼中期定格運転状態）

(単位:mm)

位 置	領域 内 部 ギ ャ ッ プ°											
	第1領域		第2領域		第3領域				第4領域			
	C ₁ -S ₁	S ₁ -S ₁	C ₂ -S ₂	S ₂ -S ₂	Rin-S ₃	S ₃ -S ₃	Rin-Rin	Rin-Rout	Rin-Rin	Rin-Rout	Rout-Rout	
上 部	1.76	1.76	1.74	1.74	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
反 射 体	1.77	1.77	1.74	1.74	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
燃 料 体	1.74	1.74	1.72	1.72	1.67	1.68	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.66
	1.66	1.64	1.63	1.62	1.61	1.59	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
	1.45	1.42	1.40	1.39	1.47	1.39	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
	1.18	1.16	1.14	1.13	1.30	1.16	1.45	1.46	1.45	1.46	1.46	1.48
	0.97	0.95	0.93	0.92	1.15	0.97	1.33	1.37	1.33	1.37	1.40	
	0.81	0.79	0.78	0.77	1.04	0.85	1.24	1.28	1.24	1.28	1.33	
	0.69	0.68	0.67	0.67	0.98	0.78	1.18	1.23	1.18	1.23	1.28	
	0.62	0.62	0.65	0.65	0.94	0.74	1.14	1.20	1.14	1.20	1.25	
下部反射体	0.57	0.57	0.57	0.57	0.93	0.72	1.14	1.20	1.14	1.20	1.25	

(単位:mm)

位 置	領域 間 ギ ャ ッ プ°							領域 - 固定反射体間			
	第1-2領域	第2-2領域	第2-3領域	第3-4領域			第2-4領域	第3-PR領域	第4-PR領域		
	S ₁ -S ₂	S ₂ -S ₂	S ₂ -S ₃	S ₃ -Rin	Rin-Rin	Rout-Rout	S ₂ -Rin	Rin-PR	Rout-PR	Rout-PR	
上 部	2.85	2.84	2.82	2.80	2.80	2.80	2.80	2.82	2.18	2.18	2.18
反 射 体	2.85	2.84	2.82	2.80	2.80	2.80	2.80	2.82	2.18	2.18	2.18
燃 料 体	2.83	2.82	2.80	2.77	2.77	2.77	2.76	2.79	2.16	2.16	2.16
	2.73	2.72	2.70	2.71	2.73	2.73	2.73	2.72	2.14	2.14	2.14
	2.51	2.49	2.49	2.57	2.66	2.66	2.66	2.57	2.10	2.10	2.10
	2.25	2.23	2.24	2.40	2.55	2.56	2.58	2.39	2.04	2.06	2.06
	2.03	2.02	2.05	2.25	2.43	2.47	2.50	2.23	1.97	2.01	2.01
	1.88	1.87	1.91	2.14	2.34	2.38	2.43	2.10	1.92	1.97	1.97
	1.77	1.77	1.82	2.08	2.28	2.33	2.38	2.02	1.89	1.95	1.95
	1.73	1.75	1.80	2.04	2.24	2.30	2.35	2.00	1.87	1.93	1.93
下部反射体	1.67	1.67	1.75	2.03	2.24	2.30	2.35	1.96	1.87	1.93	1.93

Table 3.5.9 詳(II)炉心のカラム間ギャップデータ (燃焼末期定格運転状態)

(単位:mm)

位 置	領域 内 部 ギ ャ ッ プ											
	第1領域		第2領域		第3領域				第4領域			
	$C_1 - S_1$	$S_1 - S_1$	$C_2 - S_2$	$S_2 - S_2$	$R_{in} - S_3$	$S_3 - S_3$	$R_{in} - R_{in}$	$R_{in} - R_{out}$	$R_{in} - R_{in}$	$R_{in} - R_{out}$	$R_{out} - R_{out}$	
上 部	1.78	1.78	1.74	1.74	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	
	1.79	1.79	1.74	1.74	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	
燃 料 体	1.78	1.79	1.74	1.74	1.68	1.69	1.67	1.66	1.67	1.67	1.66	
	1.77	1.79	1.74	1.73	1.66	1.69	1.64	1.63	1.64	1.64	1.63	
	1.67	1.67	1.61	1.60	1.56	1.54	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	
	1.40	1.40	1.30	1.30	1.36	1.26	1.47	1.47	1.47	1.47	1.48	
	1.15	1.15	1.07	1.05	1.18	1.03	1.34	1.36	1.34	1.34	1.39	
	0.99	1.00	0.92	0.91	1.05	0.89	1.22	1.27	1.22	1.22	1.31	
	0.89	0.89	0.81	0.81	0.97	0.80	1.15	1.21	1.15	1.15	1.26	
	0.84	0.85	0.93	0.93	0.95	0.77	1.12	1.17	1.12	1.12	1.22	
下部反射体	0.70	0.70	0.58	0.58	0.89	0.67	1.11	1.16	1.11	1.11	1.22	

(単位:mm)

位 置	領域 間 ギ ャ ッ プ								領域 - 固定反射体間		
	第1-2 領域	第2-2 領域	第2-3 領域	第3 - 4 領域				第2-4 領域	第3 - PR 領域	第4 - PR 領域	
	$S_1 - S_2$	$S_2 - S_2$	$S_2 - S_3$	$S_3 - R_{in}$	$R_{in} - R_{in}$	$R_{in} - R_{out}$	$R_{out} - R_{out}$	$S_2 - R_{in}$	$R_{in} - PR$	$R_{out} - PR$	$R_{out} - PR$
上 部	2.86	2.84	2.81	2.79	2.79	2.79	2.79	2.81	2.17	2.17	2.17
	2.87	2.84	2.82	2.79	2.79	2.79	2.79	2.82	2.17	2.17	2.17
燃 料 体	2.86	2.84	2.82	2.78	2.77	2.76	2.76	2.80	2.16	2.15	2.15
	2.86	2.83	2.81	2.76	2.74	2.73	2.73	2.79	2.14	2.14	2.14
	2.74	2.70	2.67	2.66	2.68	2.68	2.68	2.69	2.10	2.11	2.11
	2.45	2.40	2.38	2.46	2.57	2.57	2.58	2.48	2.04	2.06	2.06
	2.20	2.15	2.14	2.28	2.44	2.46	2.49	2.29	1.97	2.01	2.01
	2.06	2.01	2.00	2.15	2.32	2.37	2.41	2.17	1.91	1.96	1.96
	1.95	1.91	1.90	2.07	2.25	2.31	2.36	2.08	1.87	1.94	1.94
	1.99	2.03	1.95	2.05	2.22	2.27	2.32	2.12	1.85	1.91	1.91
下部反射体	1.74	1.68	1.73	1.99	2.21	2.26	2.32	1.95	1.85	1.91	1.91

Table 3.5.10 詳 II 炉心のプロック・オリフィス分担出力 (燃焼初期)

往 復 方 向		1	2	3	4	5	6	7	8	9	各段毎の出力)
1 段	8.1	9.3	8.3	8.0	7.7	7.8	9.1	7.4	8.2		73.9
2	30.9	35.3	31.7	31.4	30.2	29.9	31.4	28.8	31.8		284.4
3	105.1	119.9	109.4	111.0	107.1	103.9	117.3	99.9	108.6		982.4
4	184.6	209.9	192.7	198.1	191.6	183.7	205.6	177.2	191.6		1735.0
5	195.1	222.9	204.9	210.3	203.4	195.3	218.5	188.2	203.6		1842.2
6	156.0	178.8	164.9	169.8	164.3	157.5	175.4	153.1	165.3		1485.1
7	118.3	135.7	125.4	129.4	125.2	119.9	133.2	117.0	126.1		1130.2
8	75.6	86.6	79.7	81.7	79.0	76.1	84.9	73.8	79.7		717.1
カーブ出力	873.9	998.5	917.1	939.8	908.4	874.0	978.3	845.4	914.9		—
オリフィス出力	873.9			5616.1			176.3				8250.3

— 炉心部出力 49.5 MW , 1/6 炉心 — (単位 KW)

Table 3.5.11 詳 II 炉心のプロック・オリフィス分担出力 (燃焼中期)

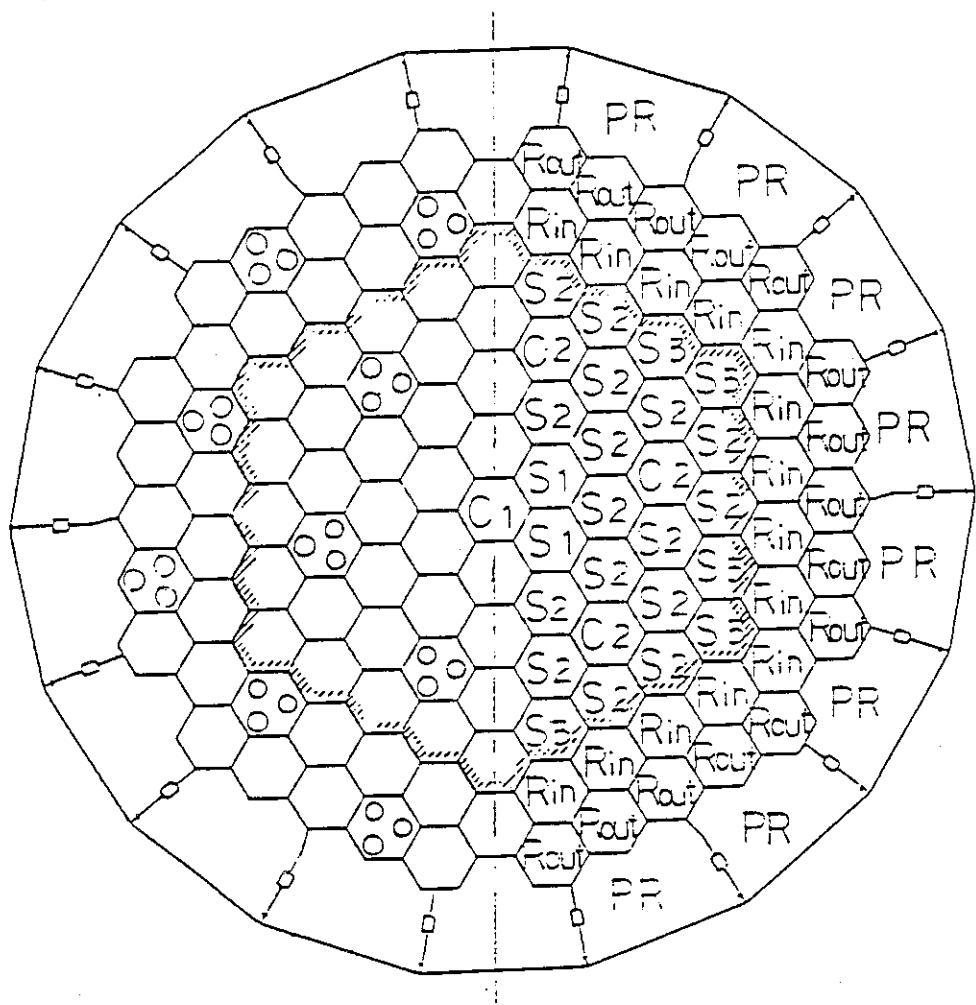
炉方角	1	2	3	4	5	6	7	8	9	各段毎の出力
炉方角	1段	12.4	13.9	12.2	11.9	11.4	11.4	13.5	10.7	11.9
2	5.0.6	5.6.1	4.9.9	4.9.4	4.7.5	4.6.8	5.4.6	4.3.8	4.7.9	4.4.6.6
3	4.4.5.8	4.5.9.1	4.4.3.9	4.4.5.8	4.4.0.9	4.3.6.3	4.5.5.2	4.2.5.5	4.3.5.0	4.2.8.7.5
4	1.8.8.5	2.0.5.0	1.8.6.8	1.9.0.9	1.8.4.6	1.7.7.5	2.0.0.3	1.6.5.2	1.7.7.2	1.6.7.6.0
5	1.8.8.9	2.0.6.5	1.8.7.7	1.9.0.5	1.8.4.1	1.7.8.1	2.0.1.7	1.6.4.8	1.7.7.2	1.6.7.9.5
6	1.5.5.8	1.7.1.0	1.5.4.7	1.5.6.2	1.5.0.7	1.4.6.5	1.6.6.8	1.3.5.0	1.4.5.8	1.3.8.2.5
7	1.1.5.6	1.2.7.6	1.1.5.7	1.1.7.2	1.1.3.1	1.0.9.8	1.2.4.6	1.0.2.4	1.1.0.6	1.0.3.6.6
8	6.9.9	7.7.8	7.0.5	7.1.3	6.8.9	6.6.9	7.6.0	6.2.9	6.8.1	6.3.2.3
カーブ出力	9.2.7.5	1.0.1.7.0	9.2.1.5	9.3.3.2	9.0.1.2	8.7.3.2	9.9.2.6	8.1.0.3	8.7.3.7	—
オリフィス出力	9.2.7.5				5.6.3.8.7			1.6.8.4.0		8.2.5.0.2

— 炉心部出力 4.9.5 MW , 1/6 炉心 — (単位 KW)

Table 3.5.12 詳II炉心のプロック・オリフィス分担出力(燃焼末期)

軸方向 [段]	径方向 [段]	各段毎の出力							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1段	43.3	48.0	42.3	41.4	39.8	39.5	46.6	36.6	40.3
2	129.7	140.7	127.0	128.4	124.2	120.1	137.2	109.5	147.6
3	171.8	186.4	169.2	172.6	167.3	160.5	182.0	146.4	156.1
4	160.6	172.7	157.4	161.3	156.5	149.7	168.7	137.7	146.3
5	147.4	158.6	144.0	146.4	141.8	136.7	154.8	124.7	141.0.9
6	126.0	135.8	122.5	123.2	119.1	115.9	132.4	104.4	112.3
7	100.3	108.7	97.8	98.2	94.9	92.4	105.8	83.8	90.4
8	64.3	70.2	63.1	63.1	60.9	59.6	68.4	54.5	59.1
カーブ出力	94.3.4	1021.1	923.3	934.6	904.5	874.4	995.9	797.6	855.3
オリフィス出力	94.3.4			5653.8				1652.9	8250.1

— 炉心部出力 4.9.5 MW , 1/6 炉心 —



- S 1 : 第1領域燃料ブロック
- S 2 : 第2領域燃料ブロック
- S 3 : 第3領域燃料ブロック
- C 1 : 第1領域制御棒案内ブロック
- C 2 : 第2領域制御棒案内ブロック
- R_{in} : 燃料ブロックに隣接する可動反射体
- R_{out} : 燃料ブロックに隣接しない可動反射体
- PR : 固定反射体

Fig. 3.5.1 カラム間ギャップの位置

4. 解析結果

4.1 計画炉心の流量配分特性

計画炉心の流量配分特性（総合流量配分、軸方向圧力分布、軸方向流量分布）を、燃料初期（0日）中期（185日）、末期（425日）について、それぞれFig. 4.1.1, Fig. 4.1.2, Fig. 4.1.3に示す。

カラム別軸方向流量分布を、燃焼初期、中期、末期について、それぞれTable 4.1.1, Table 4.1.2, Table 4.1.3に示す。なお、これらのカラム別軸方向流量分布は、被覆燃料粒子の健全性評価及びFP放出量評価のための温度分布を求めるのに用いられた。

Table 4.1.1 計画炉心のカラム別軸方向流量分布(燃焼初期状態, 解析ケース NOMBOL) (単位: kg/s)

領域	域名	第1領域			第2領域			第3領域		
		S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8	S 9
1段目	0.2706	0.2650	0.2678	0.2608	0.2619	0.2715	0.2654	0.2445	0.2672	
2段目	0.2707	0.2649	0.2677	0.2607	0.2618	0.2715	0.2654	0.2443	0.2671	
3段目	0.2710	0.2652	0.2680	0.2611	0.2622	0.2718	0.2657	0.2444	0.2676	
4段目	0.2718	0.2659	0.2688	0.2629	0.2640	0.2726	0.2663	0.2457	0.2694	
5段目	0.2727	0.2669	0.2700	0.2663	0.2676	0.2737	0.2673	0.2485	0.2732	
6段目	0.2741	0.2683	0.2718	0.2717	0.2733	0.2755	0.2687	0.2529	0.2790	
7段目	0.2761	0.2702	0.2744	0.2790	0.2807	0.2781	0.2706	0.2590	0.2867	
8段目	0.2783	0.2724	0.2772	0.2873	0.2893	0.2809	0.2729	0.2661	0.2957	

Table 4.1.2 計画炉心のカラム別軸方向流量分布(燃焼中期状態, 解析ケース N0M0L) (単位: kg/s)

力 ラ ム 名	第 1 領 域			第 2 領 域			第 3 領 域		
	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8	S 9
1 段目	0.2662	0.2619	0.2669	0.2634	0.2647	0.2710	0.2626	0.2473	0.2700
2 段目	0.2661	0.2618	0.2668	0.2633	0.2646	0.2709	0.2625	0.2471	0.2700
3 段目	0.2667	0.2623	0.2673	0.2637	0.2651	0.2714	0.2630	0.2474	0.2704
4 段目	0.2678	0.2634	0.2682	0.2652	0.2666	0.2724	0.2641	0.2486	0.2720
5 段目	0.2693	0.2648	0.2693	0.2683	0.2698	0.2736	0.2655	0.2512	0.2754
6 段目	0.2710	0.2665	0.2708	0.2730	0.2747	0.2752	0.2672	0.2553	0.2806
7 段目	0.2730	0.2685	0.2730	0.2793	0.2813	0.2774	0.2692	0.2608	0.2874
8 段目	0.2752	0.2707	0.2761	0.2870	0.2892	0.2805	0.2715	0.2675	0.2957

Table 4.1.3 計画炉心のカラム別軸方向流量分布(燃焼末期状態, 解析ケース NOMEOL) (単位: kg/s)

領域	領域名	第1領域			第2領域			第3領域		
		S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8	S 9
1段目	0.2642	0.2598	0.2635	0.2621	0.2635	0.2681	0.2606	0.2483	0.2687	
2段目	0.2638	0.2594	0.2631	0.2614	0.2628	0.2677	0.2601	0.2476	0.2681	
3段目	0.2642	0.2599	0.2637	0.2624	0.2639	0.2683	0.2606	0.2473	0.2695	
4段目	0.2651	0.2609	0.2650	0.2651	0.2666	0.2696	0.2616	0.2495	0.2725	
5段目	0.2664	0.2623	0.2670	0.2689	0.2707	0.2716	0.2630	0.2527	0.2768	
6段目	0.2679	0.2642	0.2694	0.2736	0.2756	0.2740	0.2649	0.2569	0.2820	
7段目	0.2696	0.2665	0.2725	0.2794	0.2816	0.2771	0.2673	0.2619	0.2883	
8段目	0.2715	0.2691	0.2762	0.2865	0.2889	0.2808	0.2700	0.2682	0.2960	

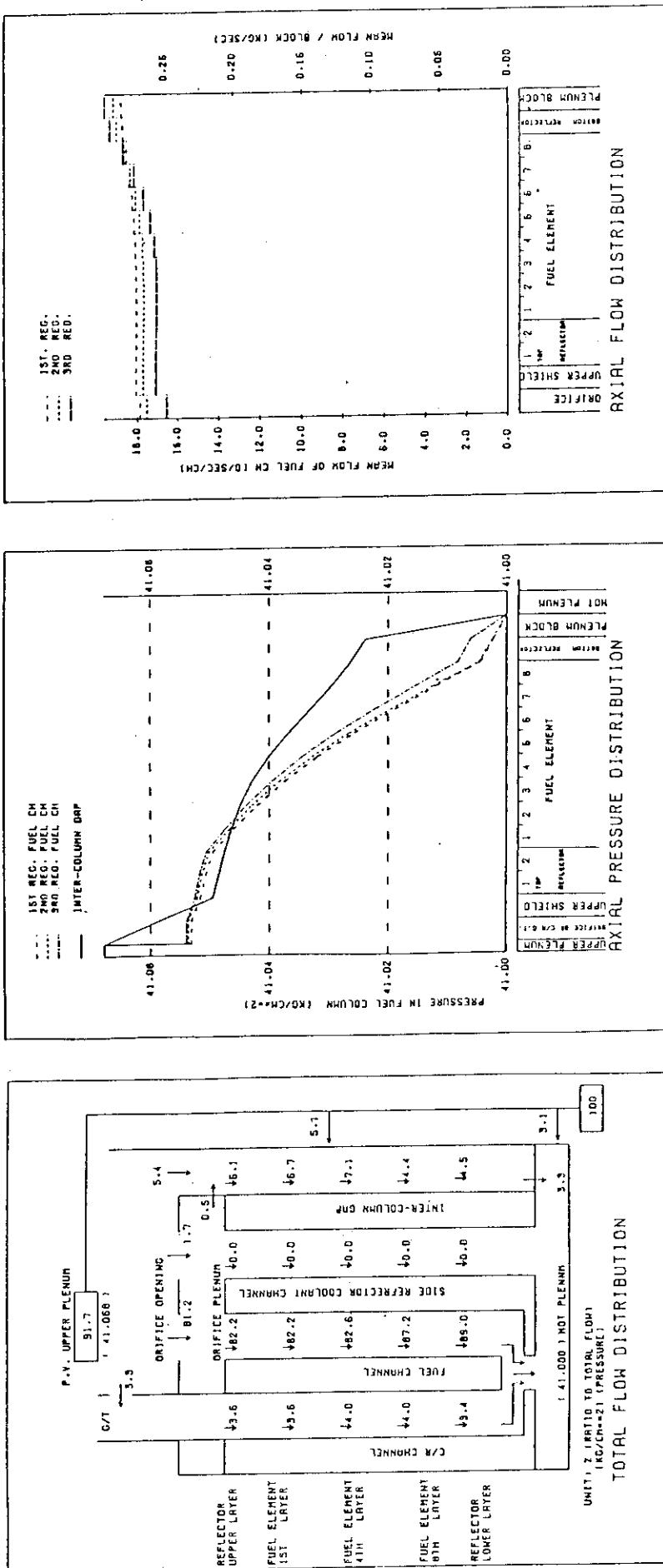
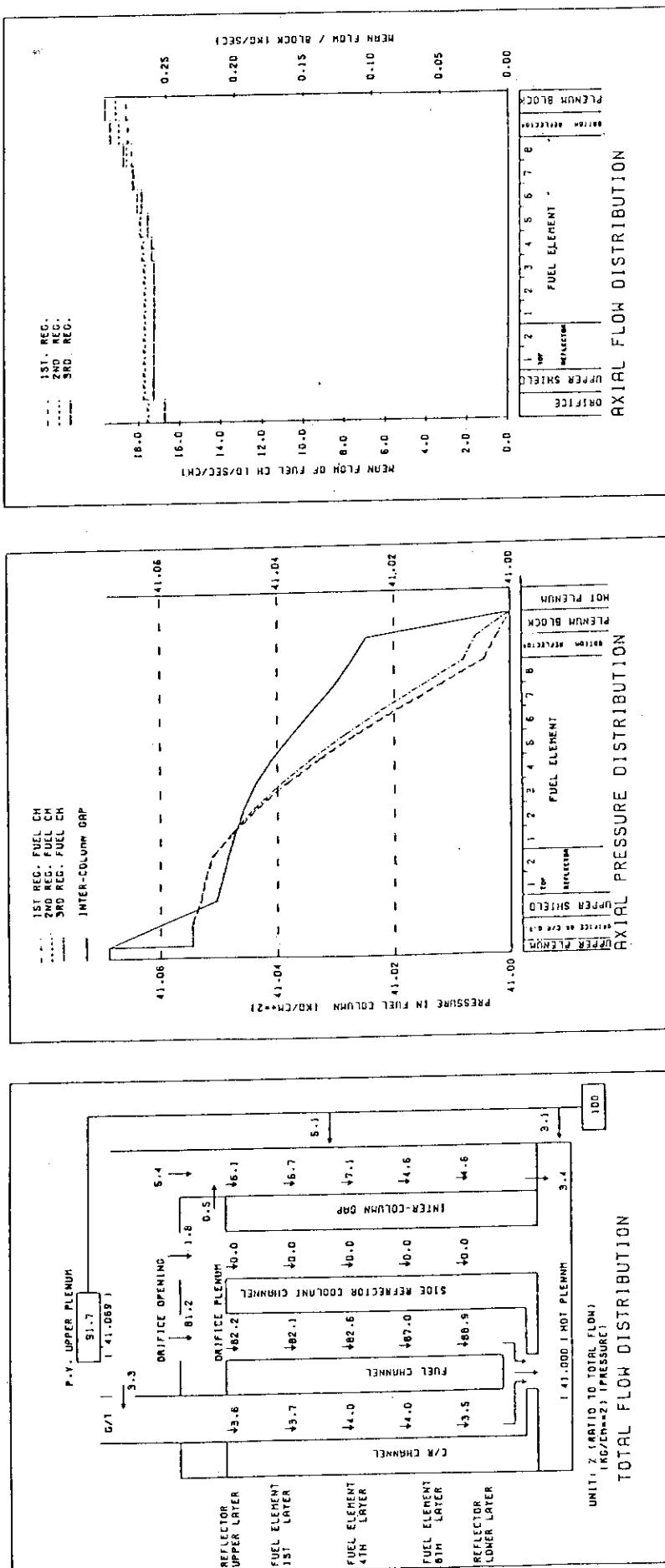


Fig. 4.1.1 計画炉心の流量配分特性(燃焼初期状態, 解析No.1 NOMBOL)



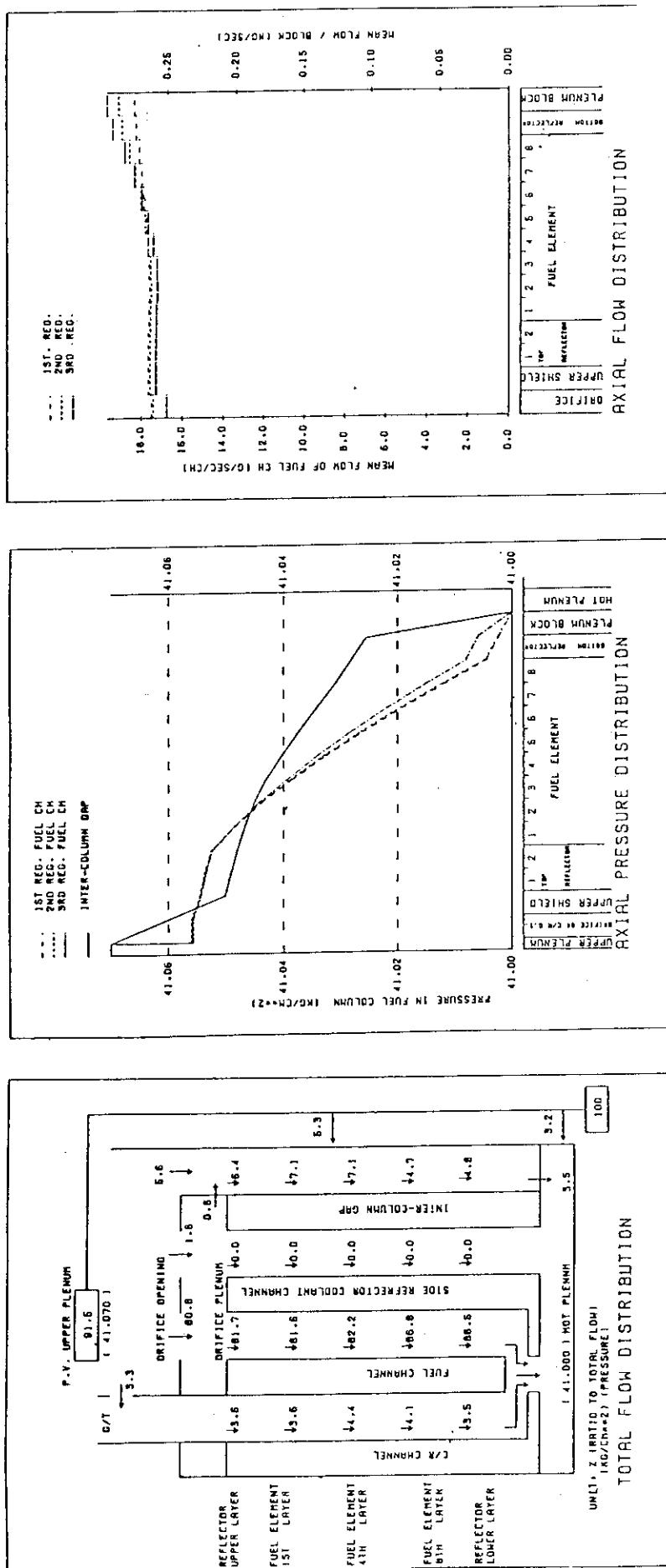


Fig. 4.1.3 計画炉心の流量配分特性（燃焼末期状態、解析ケーブル）

4.2 詳(II)炉心の流量配分特性

計画炉心から若干の構造変更及びTable 3.5.1に示した設計データの変更を行った詳(II)炉心の流量配分解析結果、および計画炉心の流量配分解析ケース(NOMBOL)を基準ケースとした感度評価解析結果について以下に説明する。

(1) 詳(II)炉心の流量配分解析結果

詳(II)炉心の流量配分特性(総合流量配分、軸方向圧力分布、軸方向流量分布)を、燃焼初期、中期、末期について、それぞれFig. 4.2.1, Fig. 4.2.2, Fig. 4.2.3に示す。

(2) 感度評価解析結果

燃焼初期の計画炉心流配(NOMBOL)を基準として、第3.5節に示す様な設計データの変更を行った場合(ケースPS-1～PS-6)での流量配分特性をFig. 4.2.4～Fig. 4.2.9に示す。また、設計データ変更による炉心有効流量割合の変化をTable 4.2.1に示す。

Table 4.2.2に第3領域のS8カラム、第2領域のS7カラムにおける、クロス流れのレイノルズ数とクロス流れ係数の軸方向分布(ケースPS-1および基準ケース)を示す。なお、この場合のレイノルズ数Reは以下の式で定義する。

$$Re = \frac{w}{3ga\mu}$$

ここで、wはクロス流れ重量流量(kg/s), aはブロック1辺の長さ(m), μ は粘性係数(kgs/m²)である。

Table 4.2.3に、基準ケース及びケースPS-2における高温プレナムブロックのシール部(シール要素及びブロック面間)の差圧と漏れ流量割合を示す。

Fig. 4.2.10に、基準ケース及びケースPS-3における固定反射体のシール部差圧(シール要素またはキー及びブロック面間)の軸方向分布を示す。

第3領域の下部絞りを計画炉心と同じ高温プレナムブロックに設置した場合と、交換が容易な下部可動反射体に設置した場合における燃料チャンネル流量の変化を、K/A²分布のケース(基準ケースおよびケースPS-5)、カラム上下端に口あけが生じたケース(ケースPS-5A, PS-5B)についてTable 4.2.4に示す。

制御棒冷却チャンネルの絞りを上、下(ガイドチューブ、下部可動反射体部分)に設置した場合(DII-000)と、下部のみに設置した場合(DII-000C)における制御棒および燃料チャンネルの流量配分をTable 4.2.5に、総合流量配分、軸方向圧力分布をそれぞれFig. 4.2.11, Fig. 4.2.12に示す。なお、両者の効果の比較を容易にするため、制御棒冷却チャンネル流量は軸方向(燃料体領域)で最小4%配分されるように以下に示す補正を軸方向全チャンネルに行ってい。る。(絞りを下部のみに設けたケースでは、Fig. 4.2.11の総合流量配分図に示す様に、制御棒冷却チャンネルに2%過剰に流れている。)

$$Wc'(i) = Wc(i) - (Wc_{min} - w_0)$$

$$Wf'(i) = Wf(i) + \frac{(Wc_{min} - w_0)}{(Wf(i) + Wg(i))} \cdot Wf(i)$$

ここで、Wc', Wf'はそれぞれ補正後の制御棒冷却チャンネル流量、燃料チャンネル流量を示

し、 W_c , W_f , W_g はそれぞれ補正前の制御棒冷却チャンネル流量、燃料チャンネル流量、カラム間ギャップ流量を示す。 W_{cmin} , W_0 は制御棒冷却チャンネルの軸方向最低流量、計画流量(4%)を示し、 i は燃料体段数を示す。

Table 4.2.1 パラメータによる炉心有効流量割合の変化

ケース名	変更データ	基準ケースに対する炉心 有効流量割合* の変化
PS-1	クロス流れ係数	1%減
PS-2	プレナムブロックシール性能	ほとんど変化なし (0.2%増)
PS-3	固定反射体シール性能	ほとんど変化なし (0.3%減)
PS-4	上部遮蔽体間シール性能	1.1%増
PS-5	第3領域下部絞り設置場所	変化なし
PS-6	カラム間ギャップ	ほとんど変化なし (0.3%増)
DII-000	詳(II)炉心用データ (全パラメータ変更)	変化なし

* 基準ケースの炉心有効流量割合は
82.2%である。

Table 4.2.2 詳(II)炉心及び計画炉心のクロス流れ係数(K/A^2)分布の比較

燃料ブロック段	炉心最外周カラム (S8カラム - GAギャップ間)			炉心第2周カラム (S7カラム - GFギャップ間)		
	レイノルズ数	詳(II)炉心の K/A^2 (m^{-4})	計画炉心の K/A^2 (m^{-4})	レイノルズ数	詳(II)炉心の K/A^2 (m^{-4})	計画炉心の K/A^2 (m^{-4})
1段目	3	4.8×10^{13}	2.3×10^{12}	~1	1.7×10^{14}	4.2×10^{12}
2段目	3	2.0×10^{13}	1.2×10^{12}	~1	7.3×10^{13}	2.0×10^{12}
3段目	12	6.8×10^{11}	1.5×10^{11}	~1	2.0×10^{13}	4.1×10^{11}
4段目	19	6.2×10^{10}	2.0×10^{10}	5	1.7×10^{12}	1.6×10^{11}
5段目	32	1.4×10^{10}	7.3×10^9	12	5.2×10^{11}	1.1×10^{11}
6段目	148	1.8×10^9	3.9×10^9	26	1.4×10^{11}	6.2×10^{10}
7段目	283	8.1×10^8	2.9×10^9	49	4.7×10^{10}	4.0×10^{10}
8段目	391	6.3×10^8	2.8×10^9	68	3.4×10^{10}	3.9×10^{10}
	526	5.2×10^8	2.8×10^9	123	1.9×10^{10}	3.9×10^{10}

Table 4.2.3 高温プレナムプロックシール部差圧および漏れ流量割合

シール部差圧 高温プレナムプロック 漏れ流路全差圧 (kg/m ²)	高温プレナムプロック間		高温プレナムプロック/ 固定反射体間	
	基準ケース PS-2	ケース PS-2	基準ケース PS-2	ケース PS-2
シール部差 圧 ΔP_s (kg/m ²)	238	253	238	254
プロック面間 差 圧 ΔP_b (kg/m ²)	3	41	15	81
漏れ流量割合 (%)	0.94	1.7	2.4	1.1

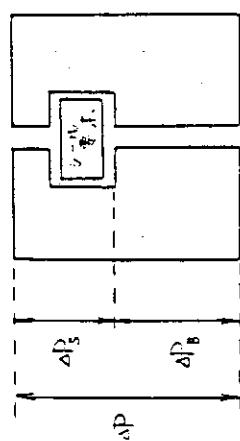


Table 4.2.4 第3領域下部絞り設置場所の違いによる燃料チャンネル流量の比較

ケース名	流量配分解析条件	下部設置場所	炉心有効割合(%)	第1領域量(kg/s・カラム)	第2領域量(kg/s・カラム)	第3領域量(kg/s・カラム)	S8カラム流量(kg/s・カラム)
基準ケース クロス流れ係数を分布させた場合	下部反射体	82.1	0.2705	0.2652	0.2557	0.2445	
	高温プレナムブロック	82.1	0.2706	0.2653	0.2557	0.2443	
PS-5 カラム上下端に口あけが生じた場合	下部反射体	80.1	0.2622	0.2580	0.2523	0.2418	
	高温プレナムブロック	80.3	0.2620	0.2576	0.2567	0.2512	

Table 4.2.5 制御棒冷却流路絞り位置の違いによる炉内流量配分の比較

(単位: %)

C/R チャンネル 絞り位置		ガイドチューブ及び 下部反射体		下部反射体のみ	
チャンネル名	制御棒冷却流路	燃 料 チ ャ ン ネ ル	制御棒冷却流路	燃 料 チ ャ ン ネ ル	
燃料体 段 数	1	4.0	82.6	11.0	78.4
	2	4.0	82.6	11.0	78.4
	3	4.1	82.5	10.9	78.5
	4	4.5	82.3	10.5	78.8
	5	5.1	82.3	9.5	79.8
	6	5.6	82.9	8.1	81.6
	7	5.7	84.0	6.2	84.0
	8	5.1	85.7	4.0	86.7

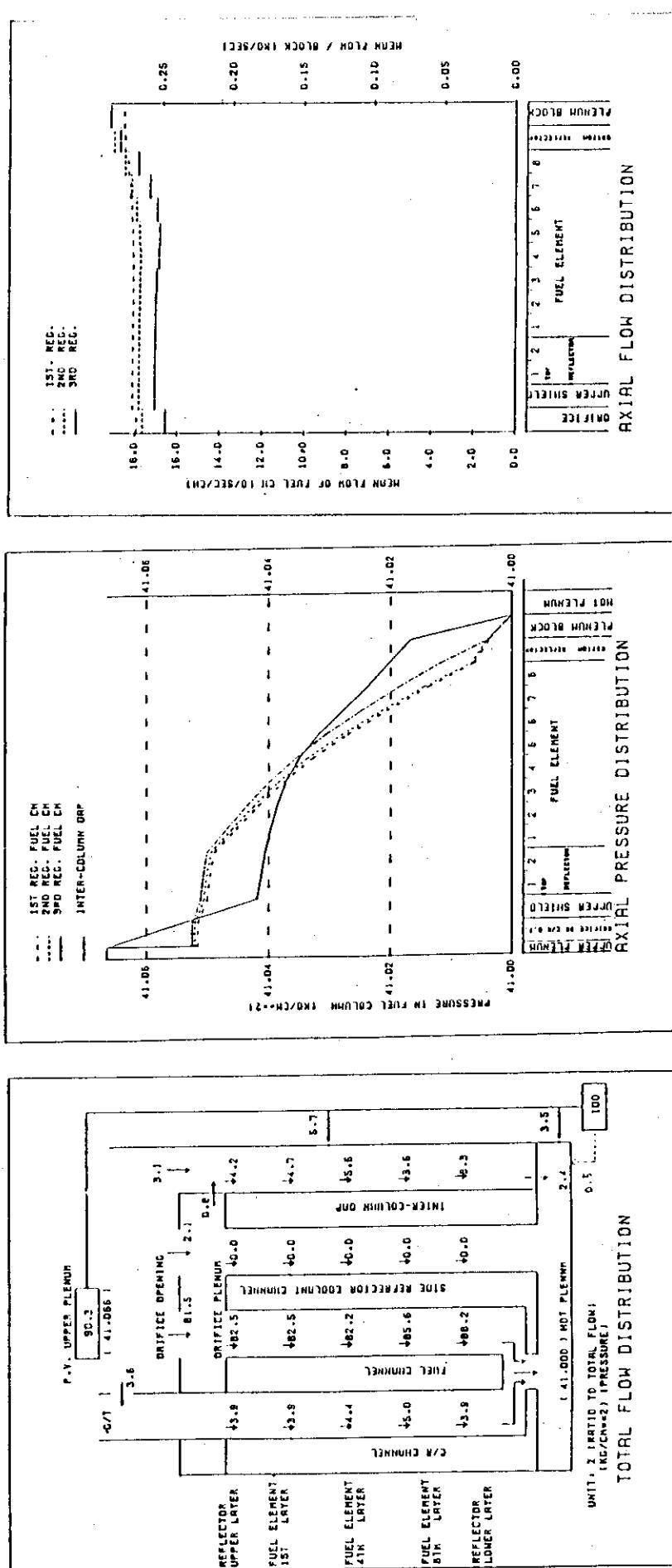


Fig. 4.2.1 詳(II)炉心の流量配分特性(燃焼初期状態, 解析ケースDII-000)

(a) 総合流量配分図
(b) 軸方向圧力分布図
(c) 軸方向流量分布図

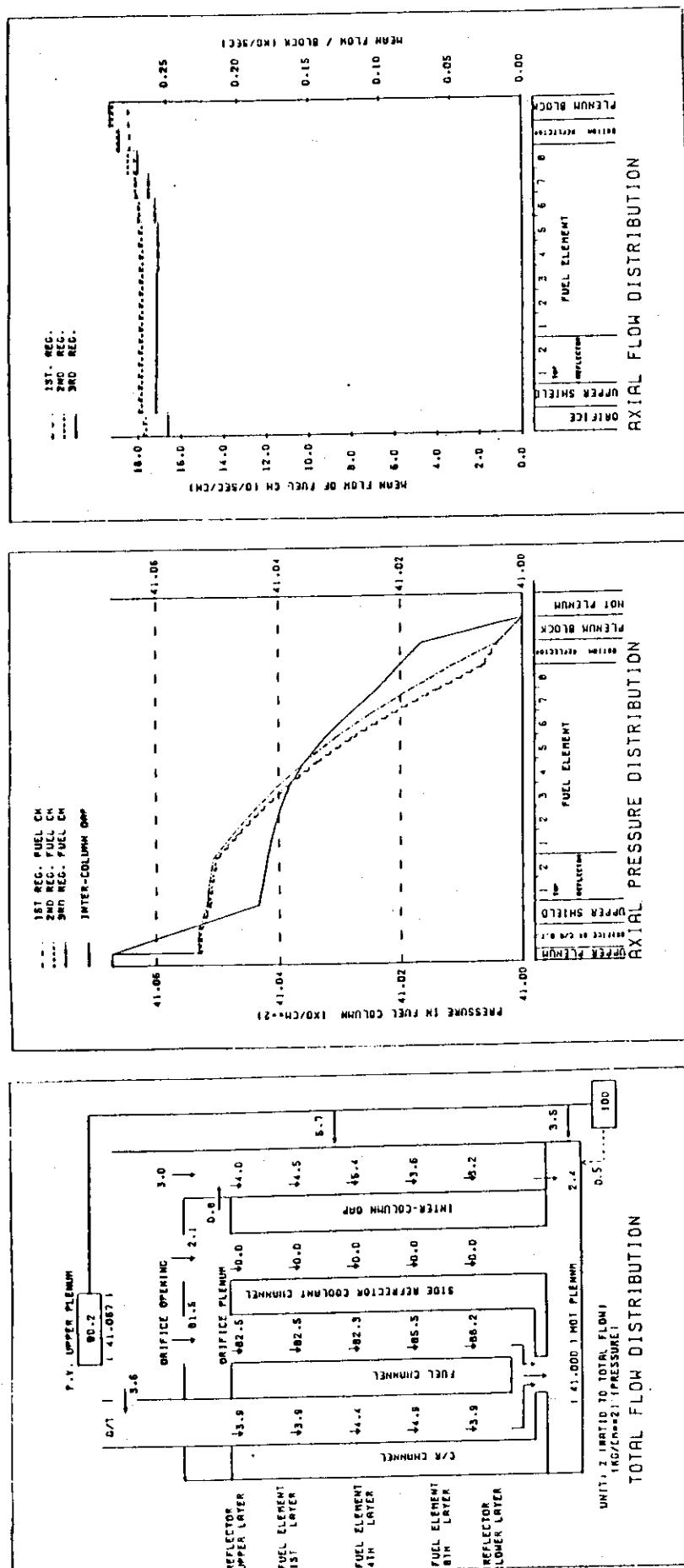


Fig. 4.2.2 準II)炉心の流量配分特性(燃焼中期状態, 解析ケースDII-185)

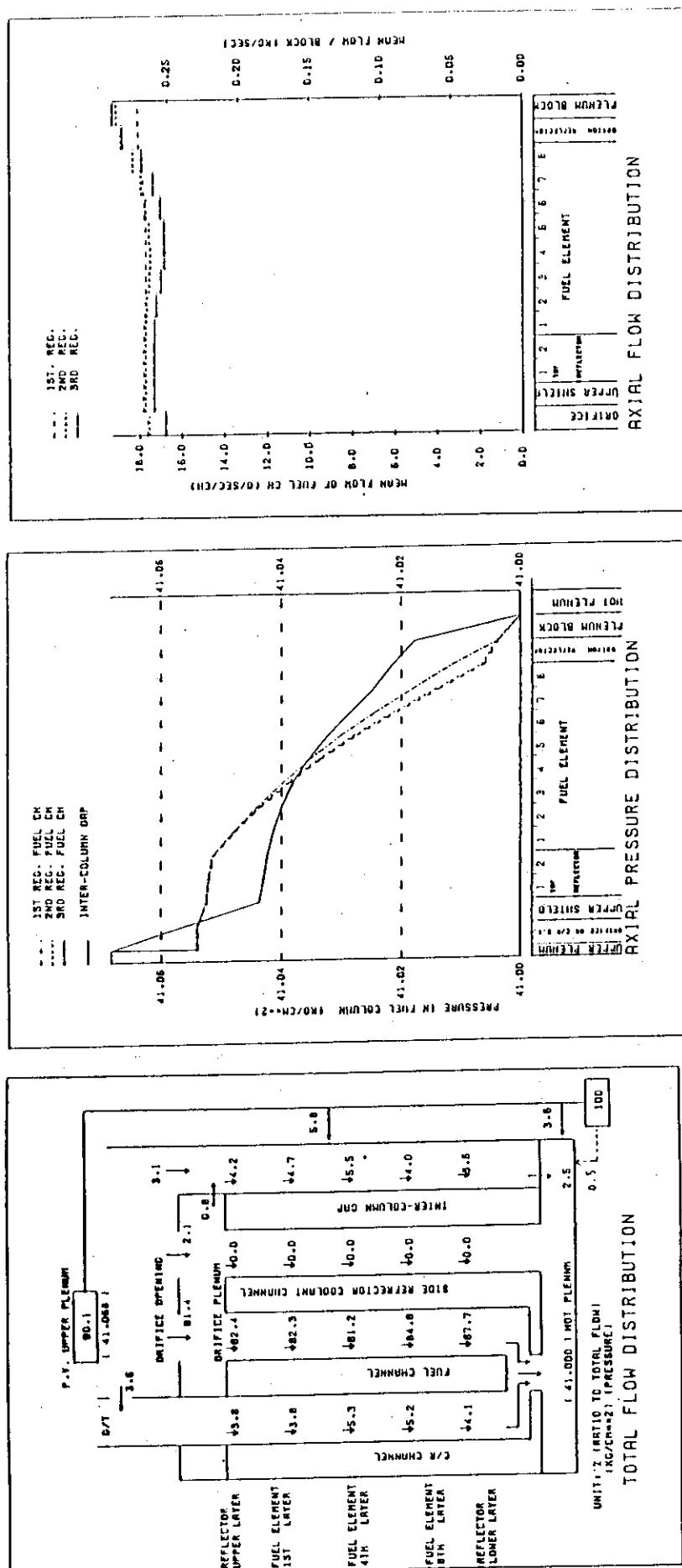
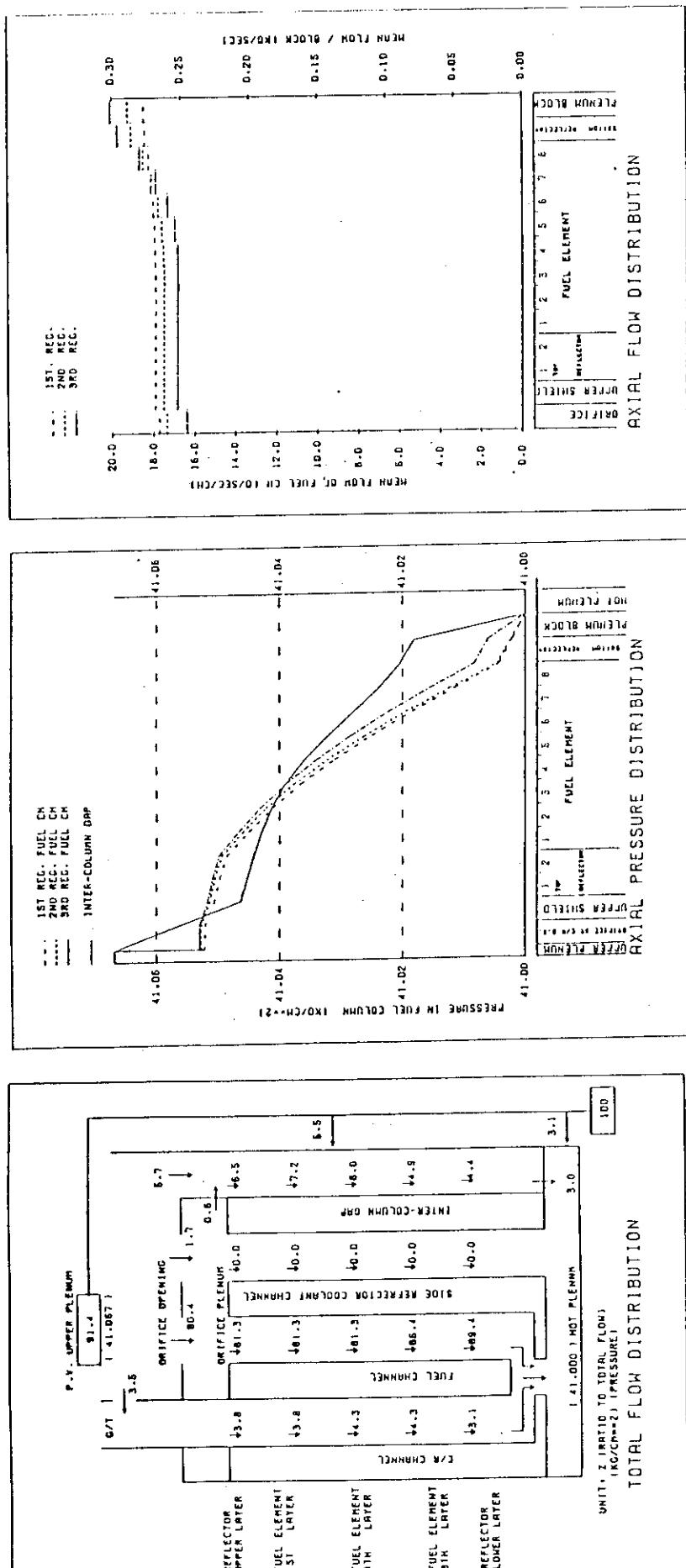


Fig. 4.2.3 詳(II)炉心の流量配分特性（燃焼末期状態、解析ケース D II - 425）

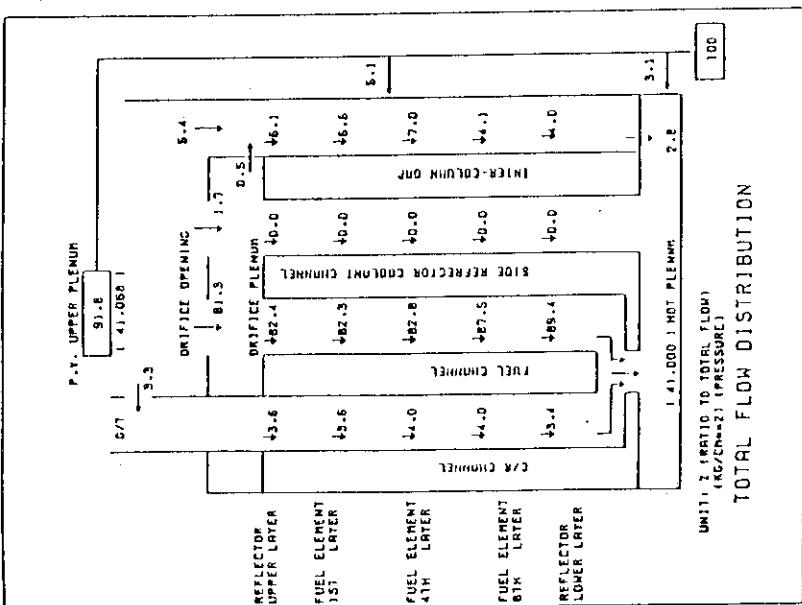


(a) 総合流量配分図

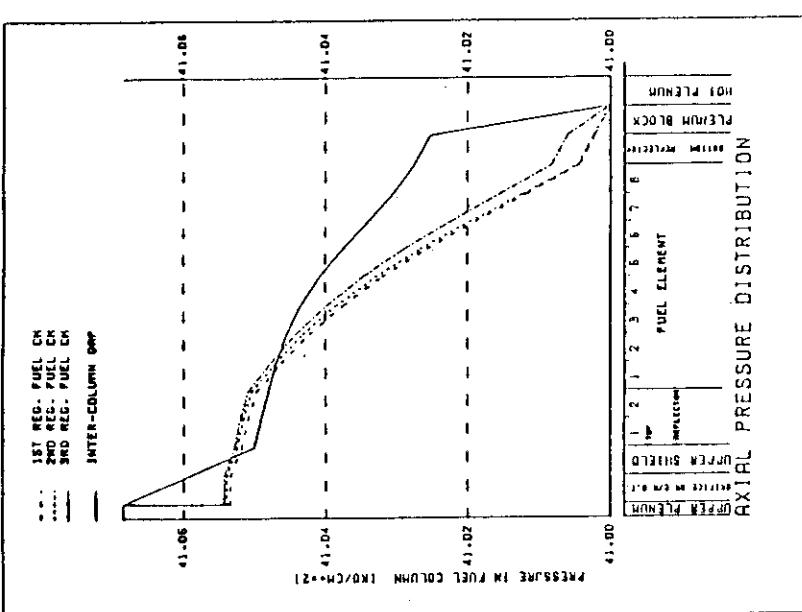
(b) 軸方向圧力分布図

(c) 軸方向流量分布図

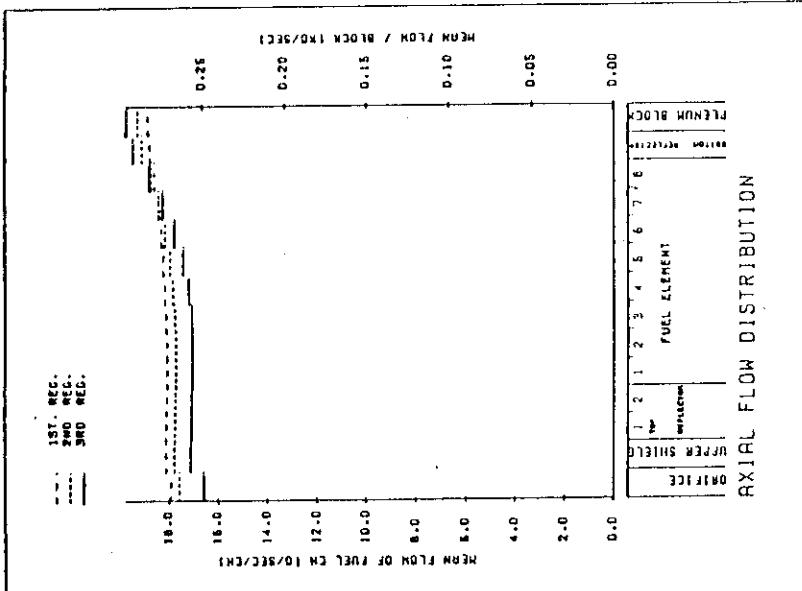
Fig. 4.2.4 炉内流量配分特性 (ケーブル PS-1)



(a) 總合流量分配図

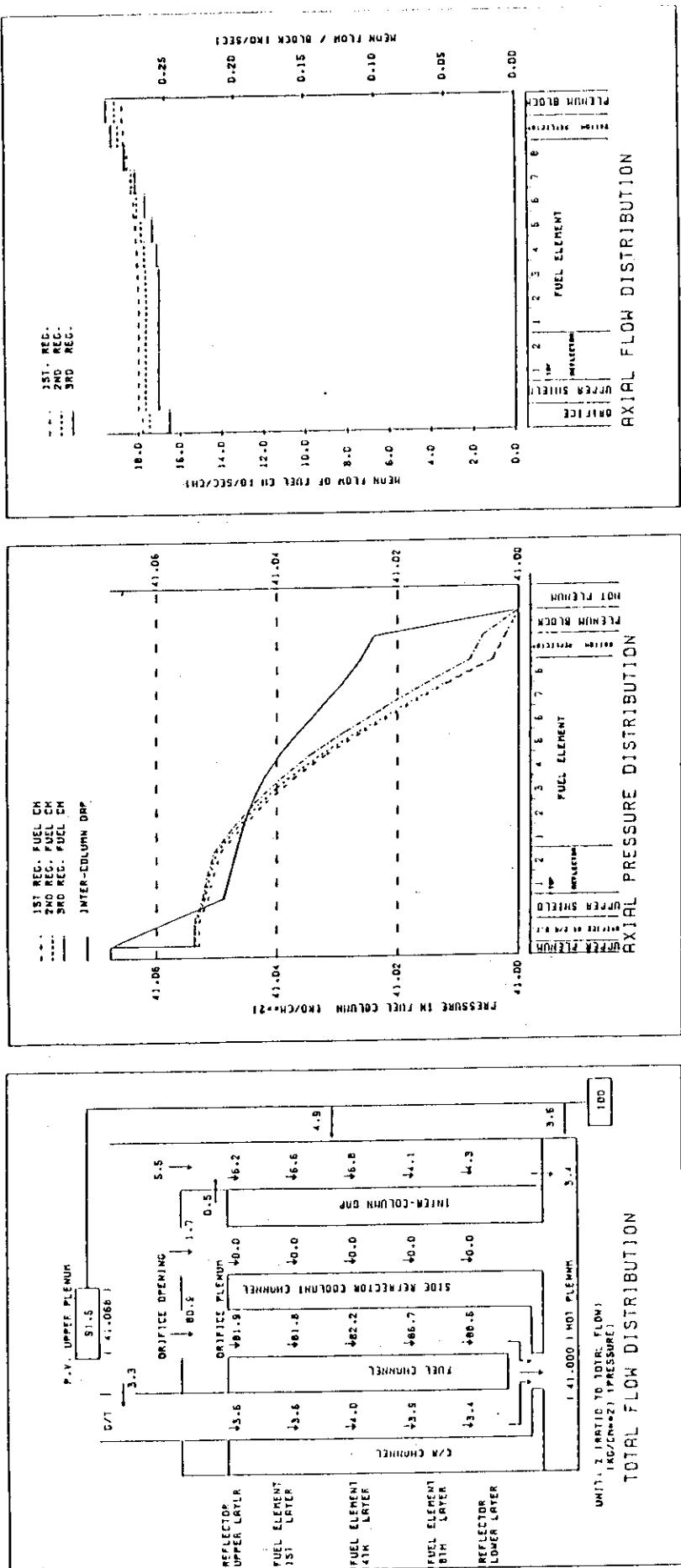


(b) 軸方向圧力分布図



(c) 軸方向流量分布図

Fig. 4.2.5 炉内流量分配特性(ヶ- λ PS-2)



a) 總合流量配分

(b) 軸方向圧力分布図

(c) 軸方向流量分布図

Fig. 4.2.6 炉内流量分配特性(ケースPS-3)

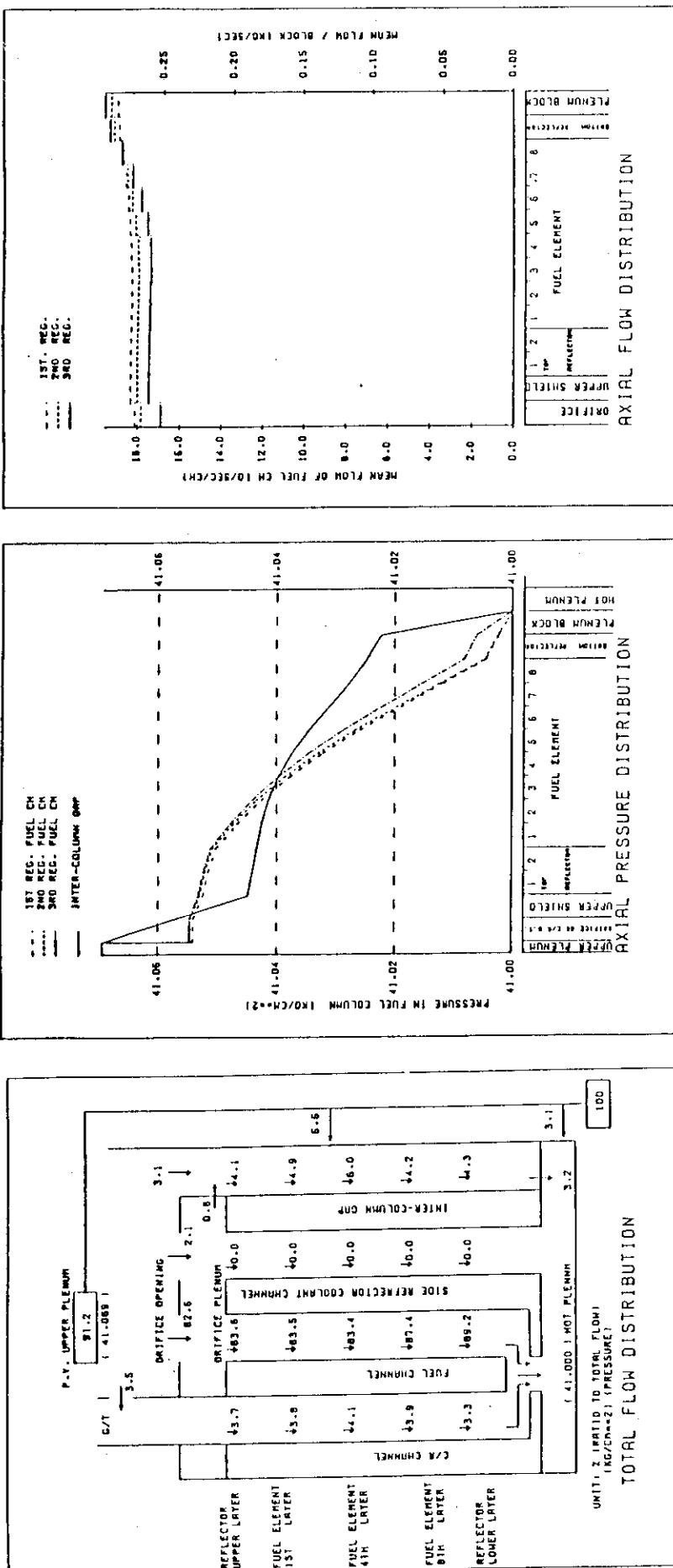
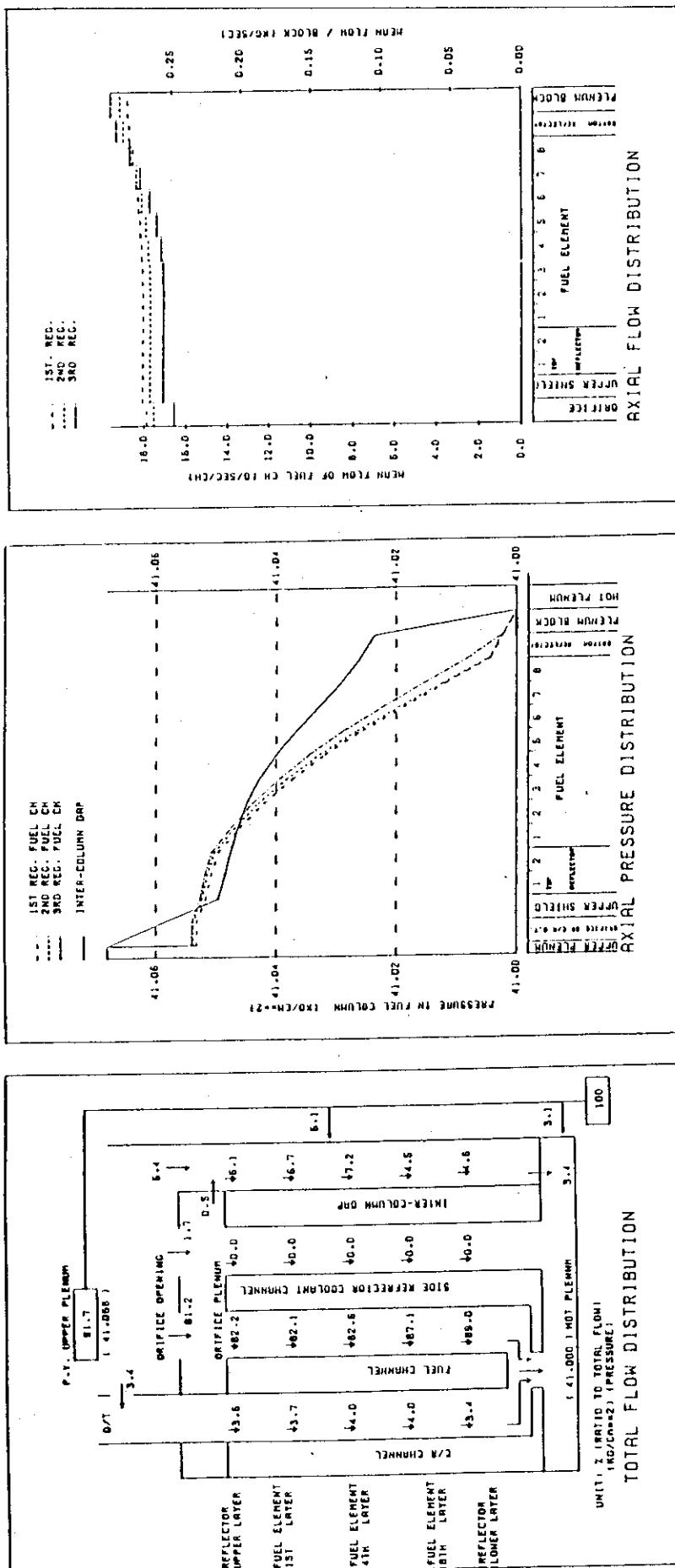


Fig. 4.2.7 炉内流量配分特性 (ケーブル PS-4)



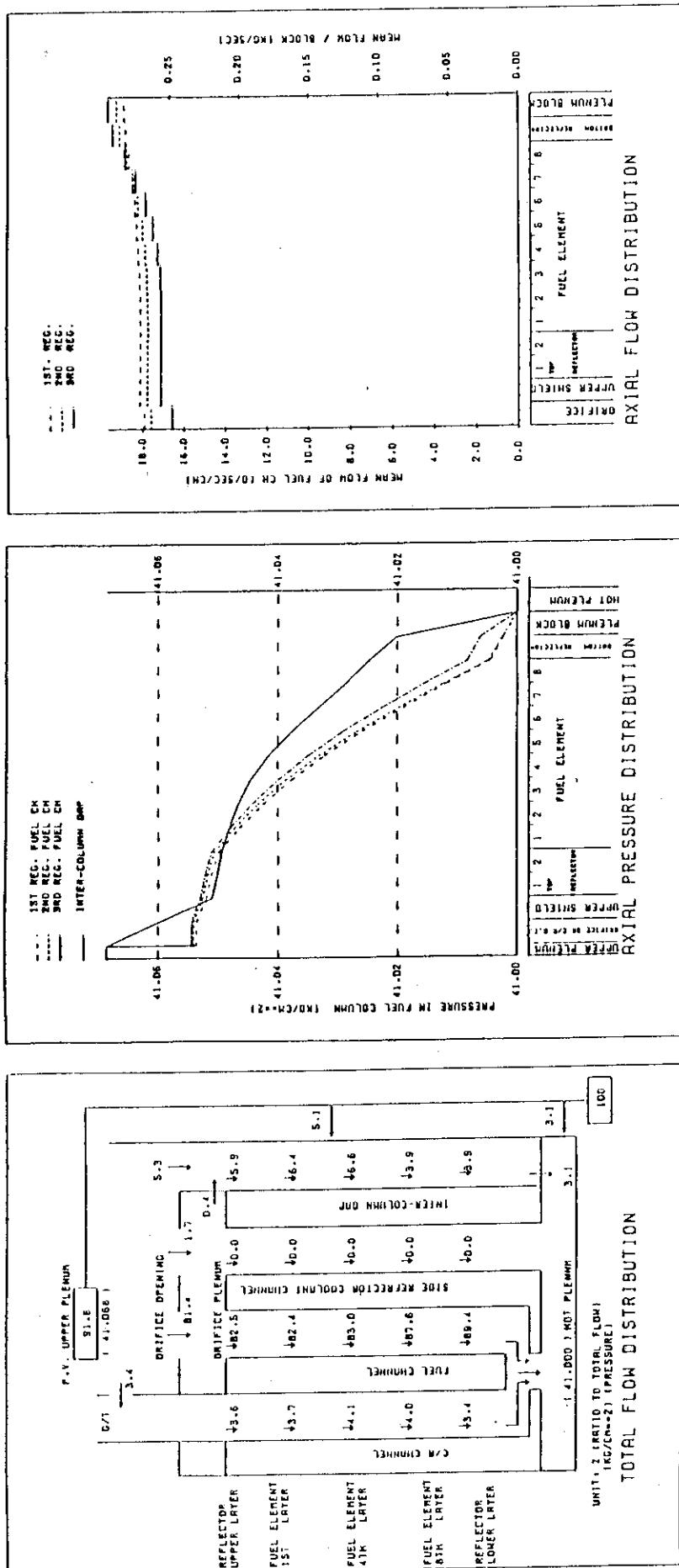


Fig. 4.2.9 炉内流量配分特性 (ケ - ズ PS - 6)

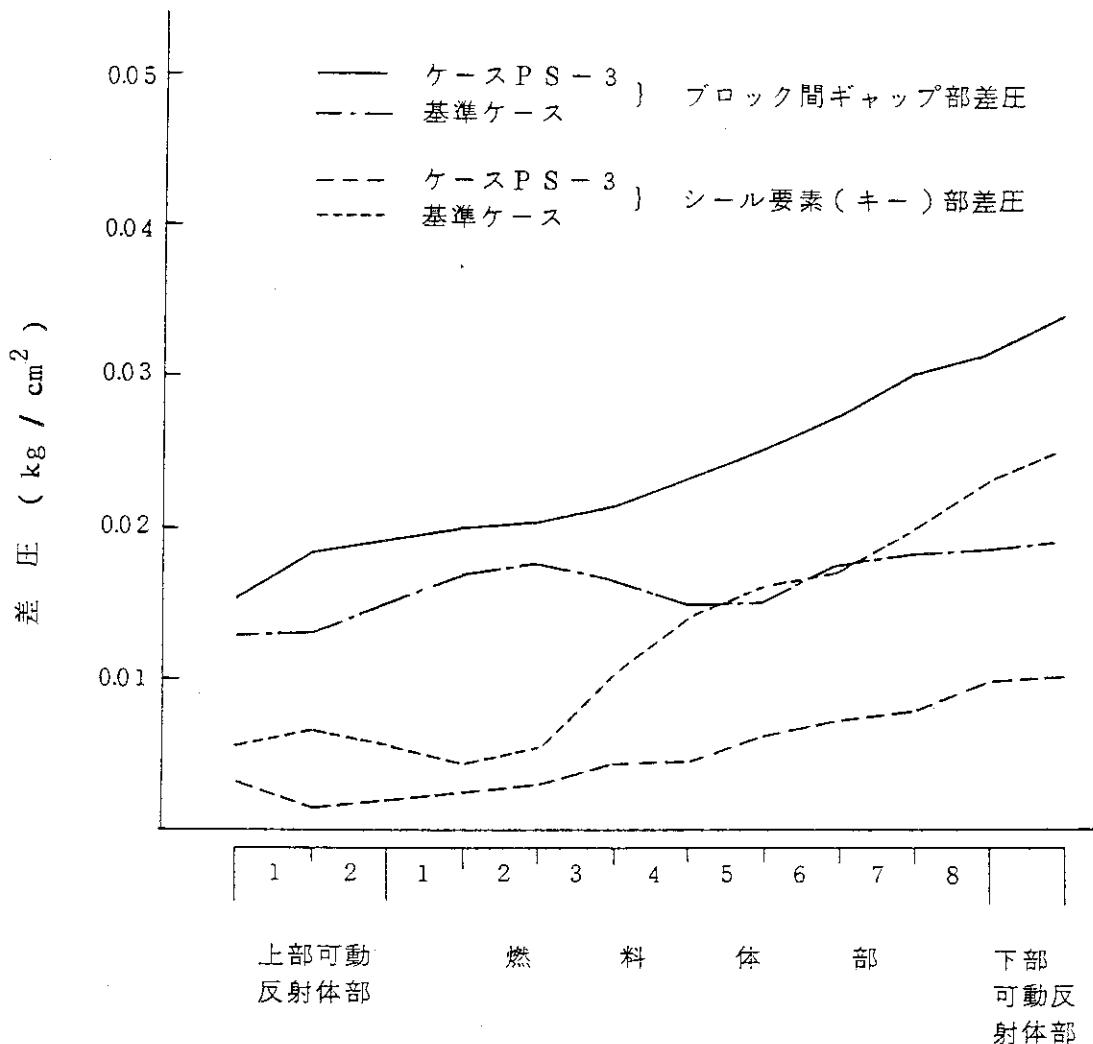


Fig. 4.2.10 固定反射体シール部差圧の軸方向分布

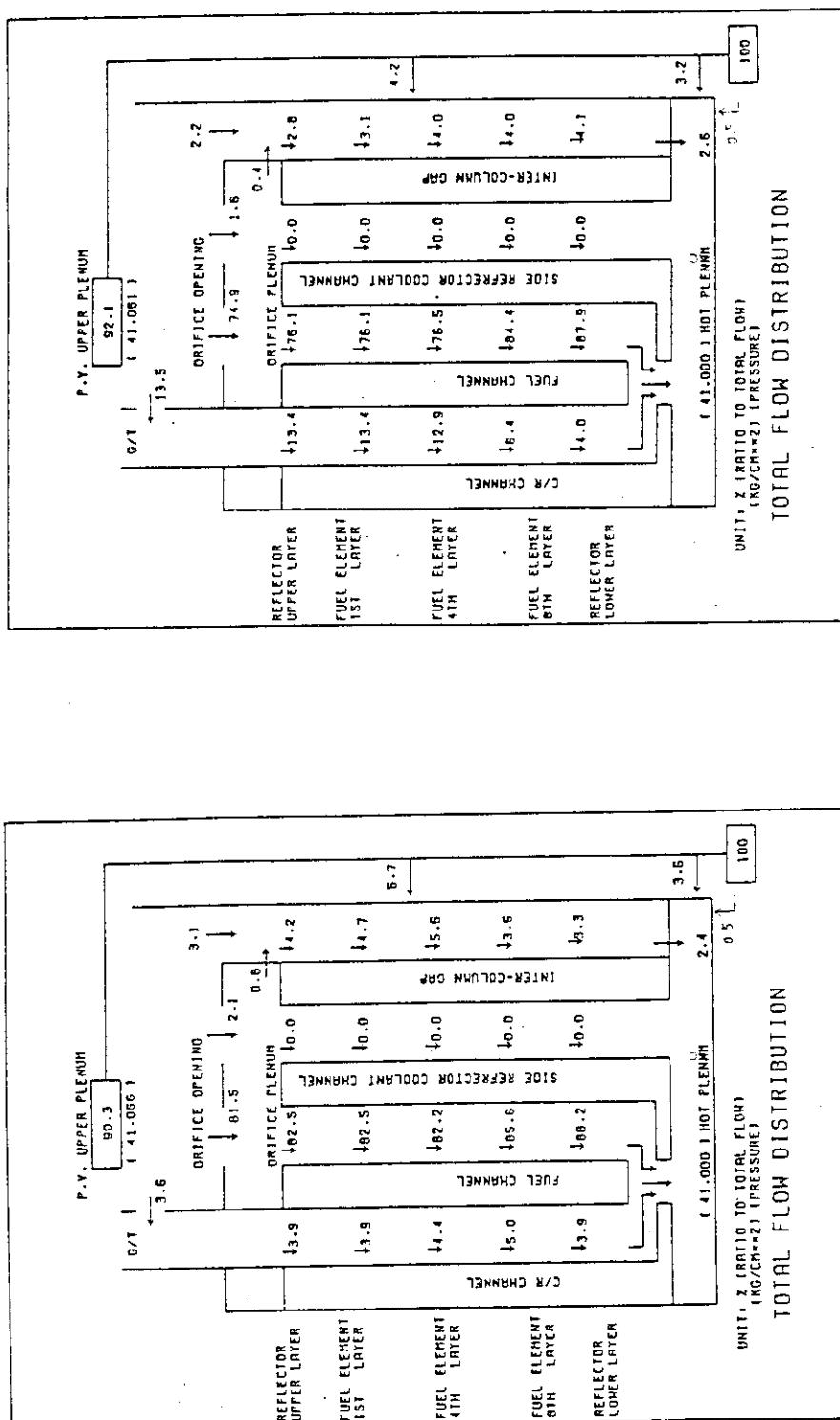
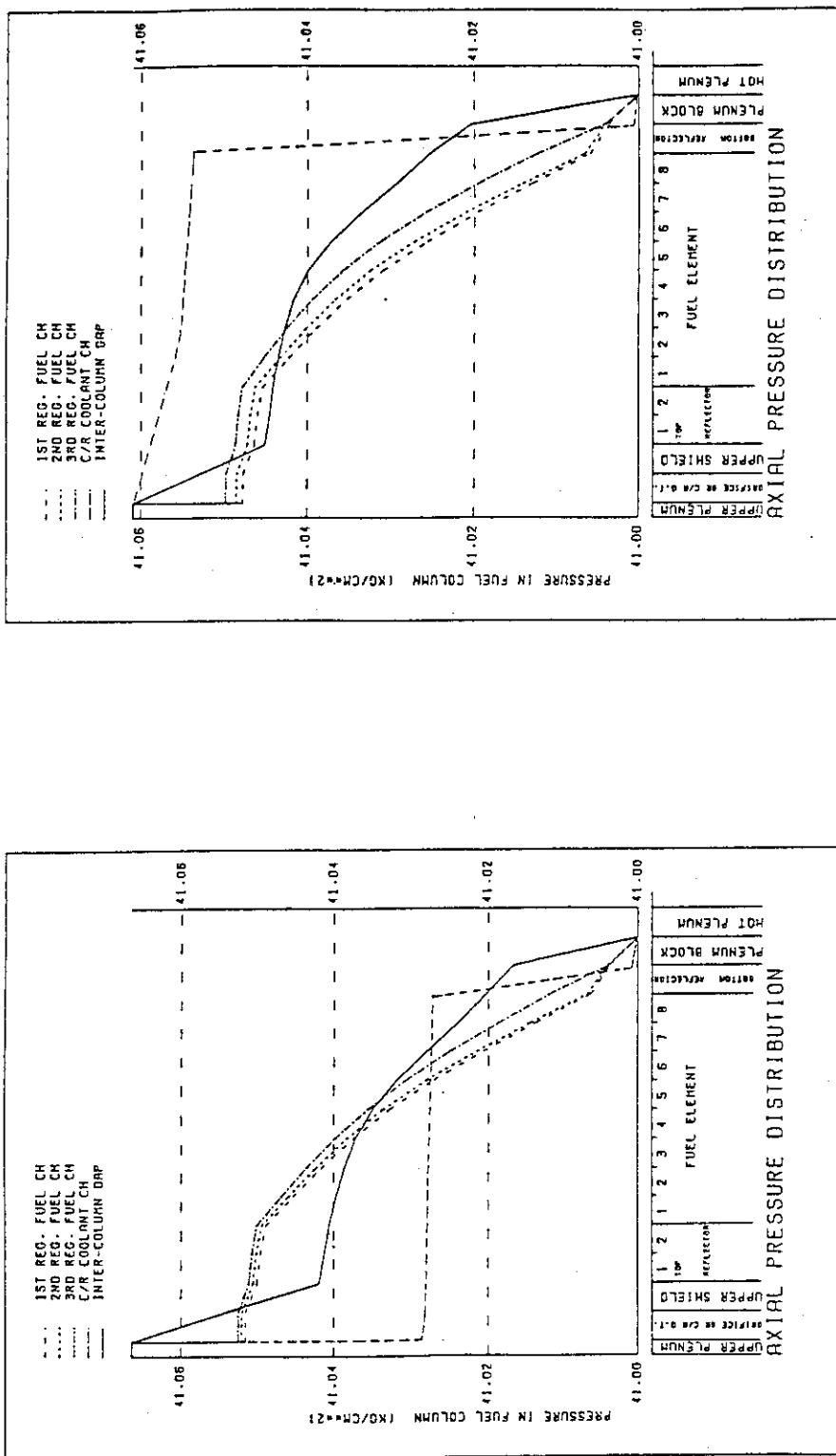


Fig. 4.2.11 制御棒冷却流路絞りによる炉内流量配分の比較
(a) 流量配分図 (D II - 000)
(制御棒冷却流路絞り : 上下に設置)
(b) 流量配分図 (D II - 000C)
(制御棒冷却流路絞り : 下部のみに設置)



5. 檢討

計画炉心、及び詳(II)炉心の炉内流量配分特性について検討する。

5.1 計画炉心

Fig. 4.1.1 ~ Fig. 4.1.3 に示したように、燃焼初期 (NOMBOL), 中期 (NOMMOL), 末期 (NOMEOL) とも炉心有効流量は 80% 以上を確保している。このうち、燃焼末期における有効流量が最も少ない。この原因は、制御棒の挿入深さが最も浅い燃焼末期では、軸方向出力分布のピークが炉心上部にシフトすることにより、炉心内に高温部分の体積割合が増加し、炉心流動特性に以下の効果を与えるためである。

① 炉心変形量（カラム間ギャップ量、ブロック積層面間ギャップ量）が増加し、カラム間ギャップ流れ、及びクロス流れが増加する。

② 冷却材の密度や平均レイノルズ数が減少し、炉心圧力損失が増加する。

しかし、これらの効果は小さく、燃焼初期、末期の炉心有効流量の差は 1 % に満たない。

軸方向の流量分布は以下に示す様な傾向がある。

比較的炉心変形量が小さい燃料体上部までは、クロス流れによる軸方向流量変化が小さいが、カラム間ギャップと燃料チャンネルの圧力がほぼ同じになる燃料体 3 段目付近から、燃料チャンネル流量が増加する。増加の度合は、そのうちでも特に反射体に接するカラムが多く炉心変形量が比較的大きな第 3 領域が最も大きい (Fig. 4.1.1 ~ Fig. 4.1.3 参照)。燃料チャンネルに流入するクロス流れの総流量は、全流量の約 7 % である。

また、固定反射体間、及び高温プレナムブロック間の隙間を通って直接高温プレナムへ流入する漏れ流量は、全流量の 6 ~ 7 % を占める。

炉心の圧力損失は、燃焼末期が最も大きく 0.070 kg/cm^2 である。

5.2 詳(II)炉心

詳(II)炉心の流量配分特性、及び計画炉心と詳(II)炉心との特性比較を感度評価解析結果を用いて考察する。

(1) 詳(II)炉心の流量配分特性

Fig. 4.2.1 ~ Fig. 4.2.3 に示したように、燃焼初期(D II-000)、中期(D II-185)、末期(D II-425)とも炉心有効流量は80%を越えており、最も低い末期でも81%である。また炉心圧力損失は、燃焼末期が最大で 0.068 kg/cm^2 である。

なお、燃焼による流量配分の変化、及び軸方向の流量分布特性は計画炉心の場合と同様である。

(2) 計画炉心との特性比較

クロス流れ係数、シール性能等の設計データ個々の効果について検討した。

i) クロス流れ係数の効果

Table 4.2.2 に示した様に、クロス流れのレイノルズ数が約70を越えるところでは、同表に示す計画炉心のクロス流れ係数データに比べて値は小さくなっている。特に、クロス流れが厳しい炉心最外周領域のカラム下部でのクロス流れ抵抗の低下が著しい。第3領域のクロス流れは、基準ケースの場合領域当り 38 g/s であるのに対してケース PS-1 の場合では 49 g/s である (Fig. 4.2.4 参照)。このため炉心有効流量は基準ケースに比べ1%減である。

ii) 高温プレナムブロックシール性能の効果

Table 3.5.1 に示した詳(II)炉心の高温プレナムブロックシール性能データを使用したケース PS-2 では基準ケースに比べ、高温プレナムブロックの漏れ流量割合は 3.3%から 2.8% に減少した (Fig. 4.1.1 及び Fig. 4.2.5 参照)。この原因は同表に示した様に、シール要素の流動抵抗が平均して約10%増加した他に、ブロック面間シール性能が向上したことによる。面間シール性能は基準ケースでは高温プレナムブロック間隙間にブロックの片寄りを考慮して等価的に 6 mm と評価したが、詳(II)炉心ケースではブロック間およびブロック/固定反射体間のラジアルキー結合による片寄りの防止効果を反映し 2.1 mm としている。プレナムブロックシール部全差圧に対するブロック面間差圧の割合を Table 4.2.3 に示す。ブロック面間差圧の割合は基準ケースに比べ 5 ~ 10 倍程度増加するので、シール要素部の差圧が減少し漏れ流量は低下する。

iii) 固定反射体シール性能の効果

Table 3.5.1 に示した様に、キーの流動抵抗係数 (K/A^2) は、縦置、横置とも計画炉心のデータに比べ約 $\frac{1}{4}$ に減少しているため、漏れ流量が増加する。しかし、固定反射体基準公差の見直しにより隣接ブロックのギャップ量が減少したので、(Table 3.5.1 及び Fig. 4.2.10 参照) その流動抵抗が増加する。その結果、固定反射体から炉心および高温プレナムへの漏れ流量は、約 0.3% 程度の増加にとどまる (Fig. 4.1.1 及び Fig. 4.2.6 参照)。ただし、固定反射体から高温プレナムへの漏れ流動抵抗は、上下面間隙間が支配的であるため隣接ブロック面間抵抗増加の効果は期待できず、漏れ流量は基準ケースに比べて 0.5% 増加となる。これらの効果により固定反射体シールデータ変更による炉心有効流量割合の変化は 0.3% 減で

ある。

IV) 上部遮蔽体シール性能の効果

上部遮蔽体シール性能データの見直しにより、上部遮蔽体間の漏れ流量（カラム間ギャップ入口流量）は2.3%減少する（Fig. 4. 1. 1 及び Fig. 4. 2. 7 参照）。また、上部遮蔽体間でのカラム間ギャップ流れの圧力損失は、基準ケースでは約 0.019 kg/cm^2 であるのに対し、ケースPS-4では 0.025 kg/cm^2 となる（Fig. 4. 1. 1 及び Fig. 4. 2. 7 参照）。この効果によりクロス流れ流量は基準ケースの場合に比べて約14%減少する。

上部遮蔽体シール性能データ見直しによる炉心有効流量割合の変化は1.1%増である。

V) 下部絞り設置場所の検討

第3領域下部絞りの設置場所を高温プレナムブロックに設置した場合と、下部可動反射体に設置した場合とで比較検討を行った。

従来の設計で、下部絞りを下部可動反射体に設置するよりもプレナムブロックに設置する方が有利であると考えていた根拠は以下の通りである。

① 下部可動反射体下端から流入するクロス流れ流量を減少させることにより、第3領域の冷却材流量を増加できる。

② ①の効果により、第3領域の高温プレナムブロック内の冷却材混合温度（領域出口計測温度^{注)}と燃料チャンネル出口温度との差が減少する。従って、第3領域上部オリフィスが過剰に絞られることが防止でき、第3領域に対してより適切な流量配分が可能となる。

詳(II)では、領域間の流量配分方式は付録2に示すようにオリフィス固定方式を採用しているので、②の根拠はなくなった。①の根拠については、Table 4. 2. 4に示す様に基準ケースとケースPS-5とを比較すると、炉心有効流量割合、各領域の最低流量（カラム平均値）及び第3領域のうち絞り量が最大のカラム（S8カラム）の最低流量ともに、下部絞り位置を下部可動反射に変更したことによる変化は1%以内と小さい。

カラムの上下端に口あけが生じたケース（PS-5A, PS-5B）では、Table 4. 2. 4に示す様に炉心有効流量割合の変化は0.2%と少ないが、ケースPS-5BのS8カラム最低流量は、ケースPS-5Aに比べ4%減少している。この効果によりS8カラムのガス温度が上昇し、ブロックの熱応力に問題が生じてくる可能性があるが、詳(II)炉心では熱応力低減のために、第3領域は余分に（出力比に対して約5%増）冷却する様にしているため特に問題はないと考えられる。

また、第3領域ではカラム間の出力差が大きい（S8<S9）ので燃料温度は上昇するが、この対策として下部絞りはカラム単位で設置している。すなわち、第3領域の高出力カラム（S9カラム）については、絞り量は出力に応じて小さく設定（ K/A^2 でS8カラムの約1/4）できる。

以上より、下部絞りの設置場所として、構造上簡単な下部可動反射体に設置しても流量配分特性上問題はない。

注) 領域出口温度一定流量調節方式の場合、この温度に基づいて炉心上部のオリフィス開度が調節される。

vi) 制御棒冷却チャンネルの絞り位置の効果

計画炉心では、制御棒案内管に設けた冷却材入口孔および下部可動反射体内流路の2ヶ所に絞りを設け、制御棒冷却チャンネルの流量を調節することとしている。スタンドパイプ破断を想定した場合の減圧事故解析によれば、絞りを下部可動反射体1ヶ所に集中すれば制御棒の浮上りは生じないという結果が得られている。

そこで、制御棒冷却チャンネル絞りを下部のみに設置した場合の炉内流量配分の効果を調べ、その是非を検討した。その結果、絞りを下部のみに設けた場合、従来方式の上・下に絞りを設けた場合に比べ、炉心有効流量は4%以上減少することが明らかになった。この減少量は、制御棒冷却チャンネルとカラム間ギャップとの差圧の上昇に伴なう、制御棒冷却チャンネルのクロス流れの増加によるものである。

以上より、制御棒冷却チャンネルは、炉心有効流量確保のため、上下に均等に絞るのが良い。

なお、上下均等に絞った場合でも、絞り量は制御棒が浮き上がらない範囲内にある。

vii) カラム間ギャップの効果

カラム間ギャップデータを見直してギャップ量を炉心平均で小さくしたことによる炉心有効流量の増加は、0.3%以内である(Fig. 4.1.1 及び Fig. 4.2.9 参照)。

以上の効果を総合すると、D II-000 等で示される詳(II)炉心の流量配分特性は、NOMBOL 等で示される計画炉心の特性に比べ、軸方向流量分布、領域間流量配分は異なるが、炉心有効流量の変化は0.1%以内である。

6. 結 論

詳細設計(II)炉心の流量配分解析を行い、炉心の除熱に有効に寄与する炉心有効流量を評価した。流量配分解析では燃料ブロック水平面間のクロス流れ、固定反射体及び高温プレナムブロック間ギャップの漏れ流れに対する流動抵抗として最新の実験データを用いた。その結果、以下のことことが明らかになった。

- (1) 詳細設計(II)炉心の炉心有効流量割合（原子炉全流量に対する炉心軸方向での最小流量の割合）は、約82%である。因みに、固定反射体間ギャップから約4%が高温プレナムに直接流入し、約6%がカラム間ギャップに流入する。カラム間ギャップの漏れ流れは、炉心上部で約4%であり、高温プレナムブロック間ギャップの漏れ流れは約3%である。炉心の燃焼がすすんだ場合の炉心有効流量割合は、燃焼末期（425日）でも約1%の減少である。
- (2) 詳細設計(II)炉心の特性評価のために、設計の便宜上暫定的に定めた計画炉心の炉心有効流量割合は、詳細設計(II)炉心よりも約1%多いが、その他の傾向はほとんど変わらない。従って、計画炉心の流量配分は、詳細設計(II)炉心の特性評価のための流量配分として妥当である。
- (3) 燃料カラム内の各燃料チャンネルへの冷却材流量配分を、チャンネルによるクロス流れの流動抵抗、出力ピーキング及びブロックからの放熱量の違いに基づいて評価した。その結果、燃料カラム内の平均チャンネル流量に対する各チャンネルの流量比で表わされるカラム内流量再配分係数を定めた。流量再配分係数は燃焼末期の炉心周辺部カラムの高出力チャンネルで最小値0.984である。

次に、今後の課題について述べる。詳細設計(II)では、燃料ブロックの熱変形などから発生する恐れのある燃料カラムバウイングについては、最悪の場合にはその影響が大きいが、①発生頻度が極端に小さく局所的なものと考えられる、②炉心出口の熱電対による冷却材温度測定により検知可能であり、その場合炉停止などにより対処できる、③発生しても燃料最高温度は1600°C以下なので、短時間は燃料の健全性は保たれることから、炉心流量配分に及ぼす影響の検討にとどめ、炉心全体としての平均特性を評価する公称燃料温度の評価には考慮していない。しかし、インロー型燃料体構造とすることによって、カラムバウイングの発生に伴う大きなくさび形ギャップに対するクロス流れ抵抗係数が急激に悪化しないようにする対策などが考えられる。そのためには、インロー型燃料体について、流動抵抗確保と、相反する製作性及び燃料交換性を考慮した成立性の検討が必要である。また、インロー型燃料体を用いた炉心の成立性を検討する必要がある。

カラムバウイングの有無によらぬ共通の課題として、以下の事柄があげられる。

(1) 炉心温度分布の評価

炉心流量配分の検討では、漏れ流れ冷却材の加熱は加速による圧力損失が増加し漏れ流れを抑制することになるので、できるだけ控え目な加熱量になるようにしている。しかし、燃料カラム間相互の関係を考えると、炉心周辺部のように側部への放熱が多いカラムでは、正確な温度分布を基にブロックの変形量を評価する必要がある。さもないとブロックの温度勾配、す

なわち、ブロックの熱変形差によって生ずるブロック水平面間のクロス流れギャップを過小評価する恐れがある。

(2) 固定反射体面間ギャップの見直し

固定反射体間のシール性能については、固定反射体面間ギャップ自身とシール要素によるシール性能があるが、Fig. 4.2.10に示したように面間ギャップによる流動抵抗が支配的であり、シール要素はバックアップの機能である。一方、面間ギャップのシール性能は、主として固定反射体の製作公差を基に定めた等価ギャップで表わされる。等価ギャップは、固定反射体が1点で接触し、残る3点では公差の2倍のギャップが開くという最も保守的な考え方で算出している。しかし、HENDEL-T2の固定反射体の製作経験を踏まえた公差の見直し、あるいはHENDEL-T2の試験結果を基に等価ギャップの見直しを行うことによって、固定反射体間の漏れ流れを飛躍的に低減できると考えられる。

一方、固定反射体間のシール要素としては、黒鉛のキー及び金属シール片の2種があるが、流動抵抗は主としてキーによる。このキーのうちルーズキーである横置きキーについて詳細設計(Ⅱ)で用いた流動抵抗は余りに保守的と考えられる。面間の等価ギャップが小さくなった場合には、横置きキーのシール性能を見直しても炉心有効流量への影響は小さいと考えられるが、面間の等価ギャップが変わらない場合には有効と考えられる。

(3) 流量調節方式

クロス流れや燃料ブロック表面の放熱効果を考慮した流量調節方式の検討によれば、領域出口の冷却材温度をそろえる方式では炉心周辺部の流量調節領域の流量調節絞りが過剰に絞られることになるので、流量調節絞りを燃焼初期状態の出力に合わせて絞りを燃焼期間を通して固定する方式よりも燃料温度的に不利となることが示された。しかし、オリフィス固定方式の場合の燃料温度は、燃焼に伴う出力分布が燃焼初期のものよりもどれほど異なるかに強く依存する。今回検討した炉心の場合は、燃焼による出力分布の変化が小さかったことが、オリフィス固定方式の燃料温度が低くなった大きな理由の一つである。従って、燃焼に伴う出力分布の不確かさを核設計計算誤差だけではなく、運転対応の不確かさをも考慮して比較検討する必要がある。

謝 辞

本報告における炉内流量配分解析は、 詳細設計(II)の中で富士電機㈱の協力を得て実施したものである。御指導戴いた青地哲男前動力炉開発・安全性研究管理部部長（現理事：東海研究所所長）原 昌雄現部長及び安野武彦次長に感謝致します。

また、 解析評価をすすめるにあたって協力戴いた多目的高温ガス実験炉設計室の新藤隆一、荒井長利、佐藤貞夫、元木保男、伊与久達夫の諸氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 多目的高温ガス実験炉設計室：“多目的高温ガス実験炉設備設計の概要 一詳細設計(II)に基づく一” JAERI-M84-210 (1984)
- (2) 多目的高温ガス実験炉設計室：“多目的高温ガス実験炉詳細設計(II) 一設計基本条件見直しのための検討一、内部資料 (1985)
- (3) 滝塚貴和：私信
- (4) 鈴木邦彦、他：“多目的高温ガス炉における炉内流動特性解析”，FAPIG No 102, P 7 (1982)
- (5) 鈴木邦彦、他：“多目的高温ガス実験炉のシール性能データ”，JAERI-M85-183 (1985)
- (6) Department of High Temperature Engineering, Japan Atomic Energy Research Institute : "Biennial Report of Department of High Temperature Engineering", JAERI-M84-190 (1984)

謝 辞

本報告における炉内流量配分解析は、 詳細設計(Ⅱ)の中で富士電機㈱の協力を得て実施したものである。御指導戴いた青地哲男前動力炉開発・安全性研究管理部部長（現理事；東海研究所所長）原 昌雄現部長及び安野武彦次長に感謝致します。

また、 解析評価をすすめるにあたって協力戴いた多目的高温ガス実験炉設計室の新藤隆一、荒井長利、佐藤貞夫、元木保男、伊与久達夫の諸氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 多目的高温ガス実験炉設計室：“多目的高温ガス実験炉設備設計の概要 一詳細設計(Ⅱ)に基づく一” JAERI-M84-210 (1984)
- (2) 多目的高温ガス実験炉設計室：“多目的高温ガス実験炉詳細設計(Ⅱ) 一設計基本条件見直しのための検討一、内部資料 (1985)
- (3) 滝塚貴和：私信
- (4) 鈴木邦彦、他：“多目的高温ガス炉における炉内流動特性解析”，FAPIG No.102, P 7 (1982)
- (5) 鈴木邦彦、他：“多目的高温ガス実験炉のシール性能データ”，JAERI-M85-183 (1985)
- (6) Department of High Temperature Engineering, Japan Atomic Energy Research Institute : "Biennial Report of Department of High Temperature Engineering", JAERI-M84-190 (1984)

付録1 クロス流れ係数とブロック変形量の関係

1. クロス流れ係数評価式

詳(II)燃料ブロックの実験結果⁽¹⁾ (Fig.A.1.1 参照) から

$$\frac{K}{A_b^2} = \frac{3C_1}{\delta^3 Re} + \frac{4C_2}{\delta} \quad (\text{m}^{-4})$$

ここで, $C_1 = 0.90 \text{ m}^{-1}$, $C_2 = 2 \text{ m}^{-2}$

δ はくさび形の開口ギャップ量 (m)

$Re = 4 \rho Q / (\mu L)$, ρ は密度 (kg/m^3), Q はブロック当りのクロス流れ流量 (m^3/s), L はぬれぶち長さ (m) (= 12 a : a は 1 辺長), μ は粘度 (kg_m/s_m), 添字 b はブロック当りの意味である。

1辺当り (1/6 ブロック当り) のクロス流れ係数は, 10%の実験誤差を見込むと,

$$\begin{aligned} \frac{K}{A_{1/6}^2} &= 0.9 \times 36 \left\{ \frac{3 \times 0.9}{(10^{-3})^3 \delta^3 Re} + \frac{4 \times 2}{(10^{-3})^2 \delta^2} \right\} \quad (\text{m}^{-4}) \\ &= \frac{8.75 \times 10^{10}}{\delta^3 Re} + \frac{2.59 \times 10^8}{\delta^2} \quad (\text{m}^{-4}) \end{aligned}$$

ここで, δ の単位は mm

2. クロス流れ係数分布

燃料ブロック熱変形解析及び, 予備的な流量配分解析を実施してクロス流れ係数分布を以下のように定めた。

ブロックの熱変形解析により得られたブロック表面温度差と熱変形量の関係を Fig.A.1.2 に示す。この関係式は,

$$\delta_t = \delta_0 (T_{fuel}) + 1.618 \times 10^{-3} \Delta T_s$$

ここで, δ_t はブロック 350 mm 当りの熱変形量 (mm), ΔT_s はブロック表面温度差 ($^\circ\text{C}$) ,

δ_0 は冷却流路間温度勾配による変形量である。

ブロック積層面間ギャップの位置を, Fig.A.1.3 に示す。ギャップは上下ブロックの熱変形量と製作公差の和で与えられる。

Table A.1.1 に燃焼 0 日における各カラムの表面温度差の設定値とそれに対するブロック 積層面間ギャップ (開口ギャップ) およびクロス流れ係数 (K/A^2) を示す。詳(II)炉心データ (ケース DII 000 に使用) を Table A.1.2 に示す。

(1) 滝塚貴和：私信

Table A. 1.1 計画炉心の燃焼 0 日クロス流れ係数データ (ケース NOMBOL に使用)

カラム No.		S 1, C 1		S 2, S 7		S 3, S 6, C 2		S 4, S 5, S 8, S 9, C 3, C 4	
プロック No.	設定表面温度差 ΔT_s (°C)	熱変形量差 $2\delta_t$ (mm)	設定表面温度面 (mm)	熱変形量差 (°C)	設定表面温度差 (mm)	熱変形量差 (°C)	設定表面温度差 (mm)	熱変形量差 (°C)	熱変形量差 (°C)
反射体	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	10	0.06	10	0.06	10	0.06	10	0.05
	5	30	0.14	30	0.14	30	0.14	70	0.27
	6	30	0.16	30	0.16	40	0.20	120	0.46
	7	30	0.19	30	0.18	50	0.25	160	0.61
	8	50	0.27	50	0.28	70	0.33	190	0.72
	9	50	0.28	50	0.28	80	0.37	200	0.76
	10	50	0.28	50	0.28	60	0.31	190	0.73
反射体11	50	0.28	50	0.28	80	0.38	200	0.76	
ギヤップ	No.	開口ギヤップ δ (mm)	K/A ² (m ⁻⁴)	No.	開口ギヤップ δ (mm)	K/A ² (m ⁻⁴)	No.	開口ギヤップ δ (mm)	K/A ² (m ⁻⁴)
	1	0.067	5.808E+12	1	0.067	5.808E+12	1	0.067	5.808E+12
	2	0.073	4.326E+12	2	0.073	4.326E+12	2	0.073	4.326E+12
	3	0.074	4.201E+12	3	0.074	4.171E+12	3	0.090	2.296E+12
	4	0.095	1.990E+12	4	0.095	1.962E+12	4	0.111	1.225E+12
	5	0.157	4.223E+11	5	0.159	4.108E+11	5	0.222	1.458E+11
	6	0.213	1.672E+11	6	0.216	1.594E+11	6	0.423	2.037E+10
	7	0.237	1.206E+11	7	0.242	1.127E+11	7	0.591	7.290E+09
	8	0.288	6.609E+10	8	0.294	6.175E+10	8	0.723	3.944E+09
	9	0.333	4.226E+10	9	0.338	4.040E+10	9	0.799	2.902E+09
	10	0.340	3.982E+10	10	0.341	3.926E+10	10	0.805	2.839E+09
	11	0.341	3.926E+10	11	0.341	3.926E+10	11	0.806	2.825E+09
反射体	12	0.201	1.997E+10	12	0.201	1.997E+10	12	0.441	1.789E+10

Table A. 1.2 詳(II)炉心のクロス流れ係数分布の比較 (ケースDII000に使用)

燃料ブロック段	炉心最外周カラム (S 8カラム - GAギャップ間)		炉心第2周カラム (S 7カラム - GFギャップ間)	
	レイノルズ数	$K/A^2 \text{ (m}^{-4}\text{)}$	レイノルズ数	$K/A^2 \text{ (m}^{-4}\text{)}$
1段目	3	4.8×10^{13}	~1	1.7×10^{14}
2段目	3	2.0×10^{13}	~1	7.3×10^{13}
3段目	12	6.8×10^{11}	~1	2.0×10^{13}
4段目	19	6.2×10^{10}	5	1.7×10^{12}
5段目	32	1.4×10^{10}	12	5.2×10^{11}
6段目	148	1.8×10^9	26	1.4×10^{11}
7段目	283	8.1×10^8	49	4.7×10^{10}
8段目	391	6.3×10^8	68	3.4×10^{10}
	526	5.2×10^8	123	1.9×10^{10}

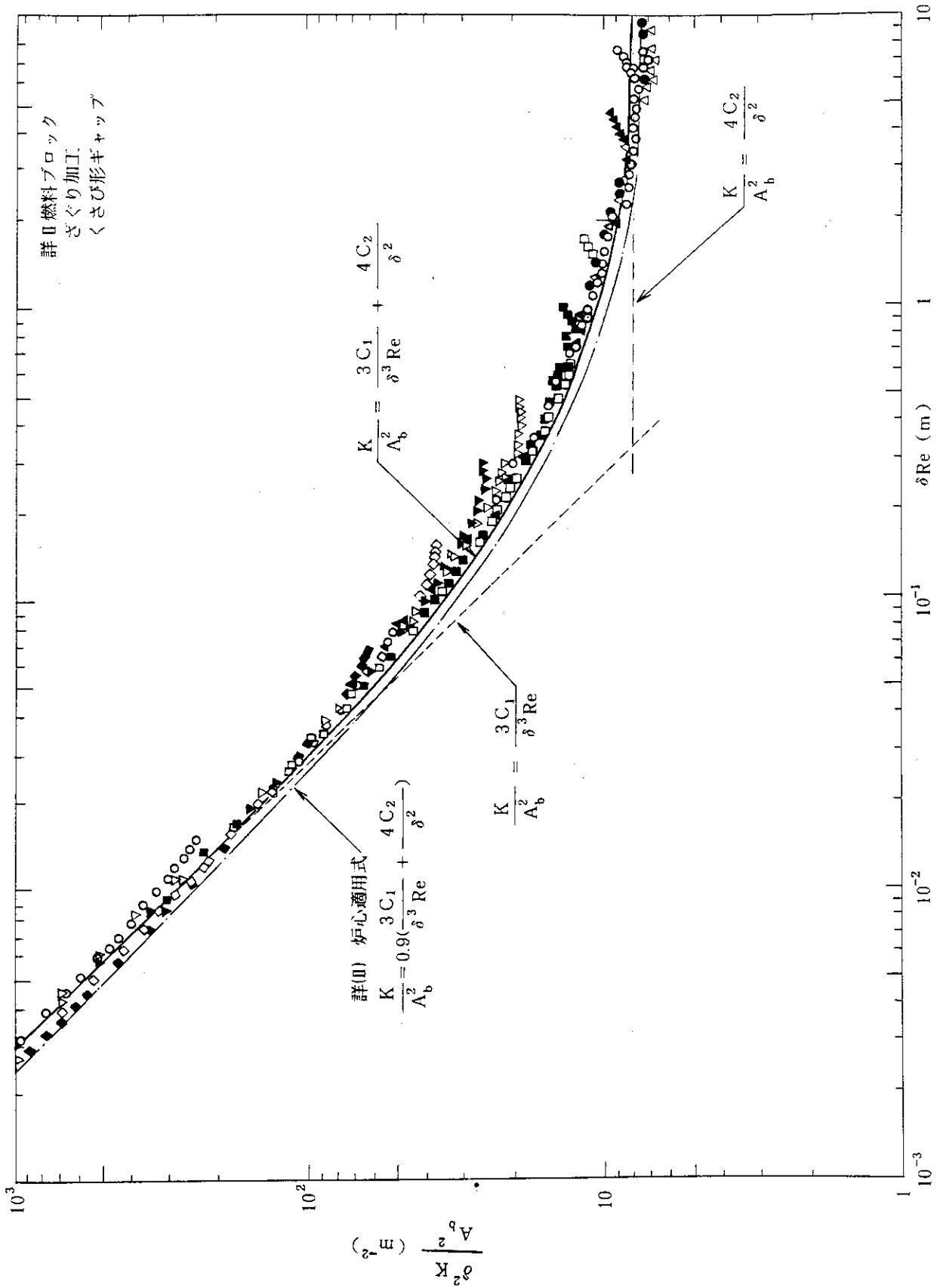


Fig. A 1.1 さび形ギャップのクロス流れ係数
($C_1 = 0.9 \text{ m}^{-1}$, $C_2 = 2 \text{ m}^{-2}$)

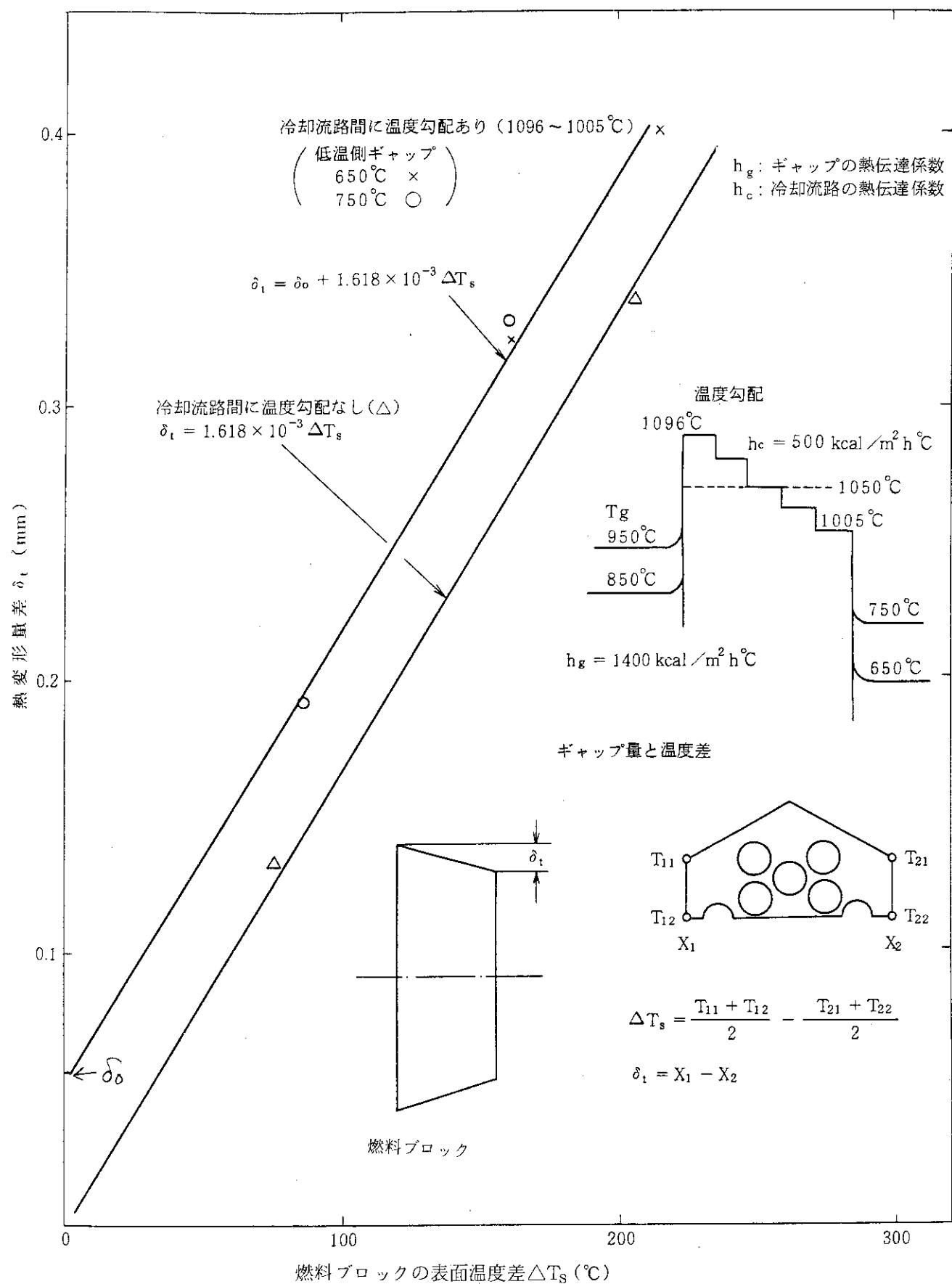


Fig. A. 1.2 表面温度差と熱変形量差

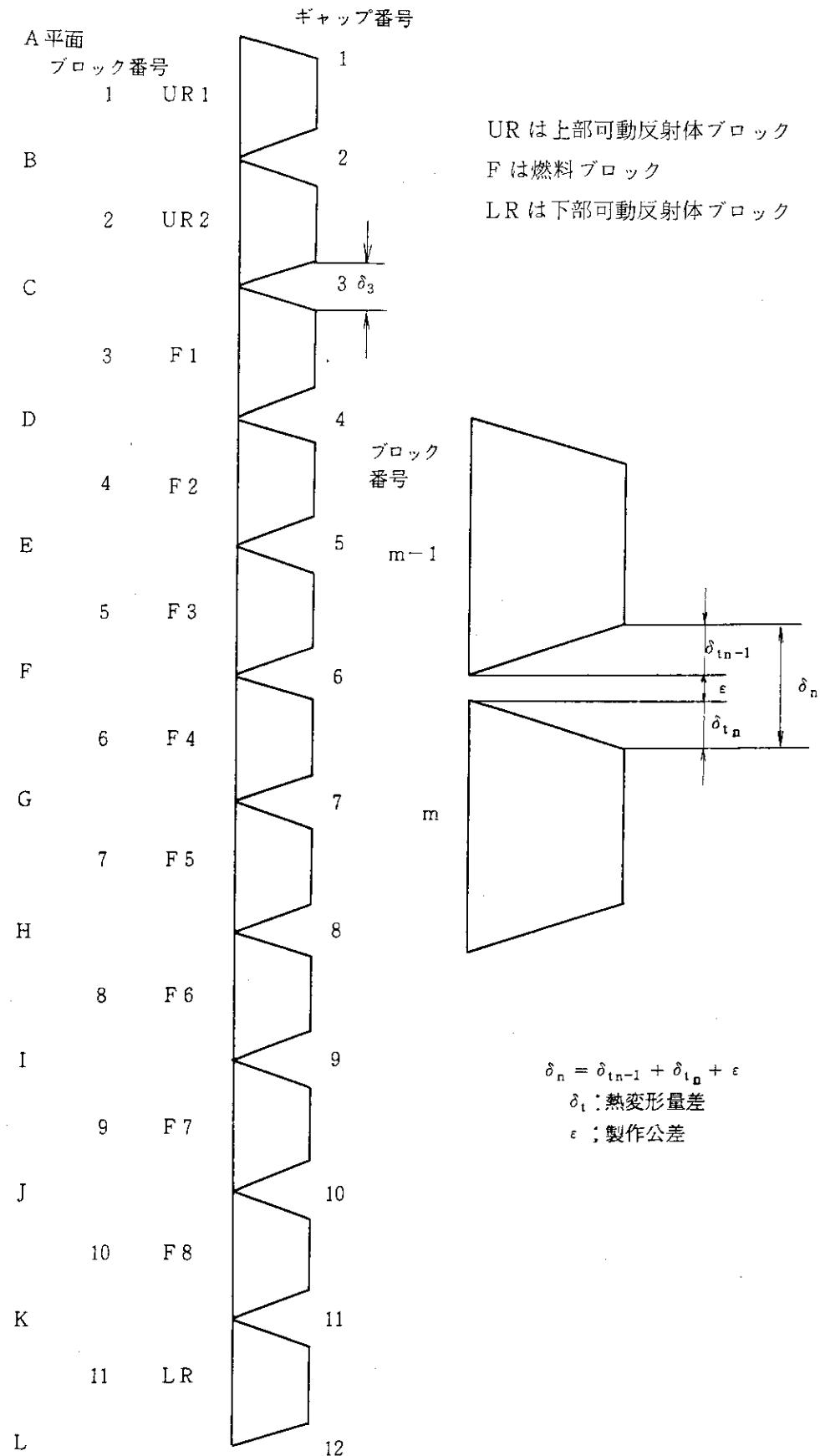


Fig. A. 1.3 燃料ブロック積層面間ギャップの位置

付録 2 炉心流量調節方式の検討

従来の流量調節方式、つまり各領域出口温度を均一に保つような領域間流量配分を実施する方式（領域出口温度一定制御方式）では以下のような問題点が生じる。すなわち、クロス流れ及び熱損失が大きい第3領域では、過剰絞りにより有効流量が不足し燃料温度及び熱応力が厳しくなる可能性が大きいこと、及び領域出口計測温度と実際の燃料チャンネル出口温度との差が十分把握できないという問題がある。

ここでは、燃焼初期から末期までオリフィス絞りを制御する方式として、燃焼に応じて連続的に測定している領域出口冷却材の平均温度が一定となるように制御した出口温度一定制御方式と燃焼0日の領域出力ピーキング係数（計算値）に比例した流量が各領域に配分されるようにオリフィス絞りを固定した、いわゆるオリフィス固定方式について比較検討を行った。

1. 解析条件及び解析ケース

各方式の流量調節条件は次のとおりである。

オリフィス固定方式では、クロス流れ、漏れ流れ及び熱損失を無視した状態で、燃焼0日の領域出力ピーキング係数に比例した流量が各領域に配分されるようにオリフィス絞りを固定した。領域出口温度一定制御方式では各領域の高温プレナムブロック内混合温度（制御棒冷却チャンネルを除く）が均一になるようにオリフィス絞りを設定した。

Table A. 2. 1に領域出力ピーキング係数を示すが、オリフィス初期絞りを燃焼0日の領域出力ピーキング係数に対応して設定した理由は、次のとおりである。

- (i) 燃焼初期では、軸方向の出力分布のピークが炉心中央部に生じるため、同じ流量配分でも燃料温度が厳しい。
- (ii) 第3領域では炉心変形及び熱応力が特に厳しいがこれを軽減するために第3領域の出力が最大となる燃焼0日の出力に応じた流量配分を行う必要がある。

検討は、流量調整計画の策定等のために設計の初期に設定した燃焼初期状態の炉心を対象に行った。本報告書本文中の計画炉心（ケース NOMBOL等）との違いは、オリフィス係数（Table A. 2. 2 参照）及びくさび型ギャップとクロス流れ係数との関係式が違うこと（Table A. 2. 3 参照）側部可動反射体冷却流量が有ることである。

オリフィス固定方式及び領域出口温度一定制御方式の解析ケースをそれぞれ、ケース JN-10 及びケース JN-10 Y とする。

2. 流量調節方式による燃料最高温度の比較

オリフィス固定方式及び領域出口温度一定方式の場合の炉心軸方向流量分布を、それぞれ、Fig. A. 2. 1 及び Fig. A. 2. 2 に、また炉心軸方向圧力分布を、それぞれ、Fig. A. 2. 3 及び Fig. A. 2. 4 に示す。

Table A. 2. 4 に各流量調節方式における高温プレナムブロック混合ガス温度、燃料チャンネル出口ガス温度及びシステムティック燃料最高温度⁽¹⁾を示す。K/A²が分布している場合では、オリフィス固定ケースの方が領域出口温度一定ケースに比べ、システムティック燃料最高温度は73

°C低い。また、第3領域だけに注目すると、100°C程度低いことが分かる。

オリフィス固定方式及び領域出口温度一定方式（ケース JN-10, JN-10Y）の場合の第3領域の軸方向最低流量（チャンネル平均値）は、それぞれ 16.5 g/s, 14.7 g/s であり、領域出口温度一定ケースの方がオリフィス固定ケースに比べて 10% 程度低い。この主な要因は次のとおりである。

- (i) 領域出口温度一定制御方式では第3領域オリフィスは熱損失、クロス流れが大きいために過剰に絞られ、発熱量に対して過小冷却される。オリフィス係数（第3領域上部）は、オリフィス固定ケースでは $3200 (\text{m}^{-4}/\text{領域})$ 、領域出口温度一定ケースでは $7900 (\text{m}^{-4}/\text{領域})$ である。そのため Fig. A. 2.2 に示すように（第3領域では領域出力ピーキング係数）がより小さい第1領域に比べて流量が少なくなっている。
- (ii) Fig. A. 2.3 及び A. 2.4 の圧力分布（それぞれケース JN-10 及び JN-10Y）に示すように、領域出口温度一定ケースの第3領域燃料チャンネル圧力は、上部オリフィスによって過剰に絞られているのでオリフィス固定ケースよりも低くなっている。

またこの様な過剰絞りにより、Fig. A. 2.1 及び Fig. A. 2.2 に示すように、第3領域入口流量がオリフィス固定方式に比べて減少し、第3領域下部では、Fig. A. 2.4 に示すように燃料チャンネルとカラム間ギャップとの圧力差が増加するのでクロス流れがオリフィス固定方式に比べて約 25% 増加する。この傾向は、第3領域の領域出力ピーキング係数が最小となる燃焼末期では更に顕著になると考えられる。

以上の要因により第3領域の燃料チャンネル流量が減少するので領域出口温度一定方式（ケース JN-10Y）における第3領域システム燃料最高温度はオリフィス固定方式（ケース JN-10）に比べて約 100°C 高くなる。

3. 流量調節方式による領域流量調節誤差の比較

Table A. 2.4 に示したシステム燃料最高温度は、両方式とも領域流量調節誤差（システムティック因子）として 1.05 を使用している。しかし、流量調節方式による燃料温度の比較を行うためには、各方式の流量調節誤差を個別に評価する必要がある。

以下に、オリフィス固定方式、領域出口温度一定制御方式における領域流量調節誤差について検討した結果を示す。

(1) オリフィス固定方式

オリフィス固定方式における領域流量調節誤差はオリフィス開度誤差等により約 2% である。また、オリフィス係数は領域出力ピーキング係数計算値に基づいて設定するため、領域出力ピーキング係数計算誤差（約 1 ~ 2%）を考慮する必要がある。

(2) 領域出口温度一定制御方式

領域出口温度一定制御方式における領域流量調節誤差として以下の因子が考えられる。

- (i) 領域出口温度計測誤差：検討資料⁽²⁾によれば出口温度 1100°C で約 50°C である。これは 700°C の冷却材温度上昇に対して 7% の誤差に相当する。

- (ii) 燃料チャンネル出口温度と計測温度との差

Table A. 2.4 に示したように K/A^2 分布のケース（JN-10Y）で最大 28°C である。これ

は 700°C の冷却材温度上昇に対して 4 % の誤差に相当する。

(iii) オリフィス制御上必要な許容温度偏差

GASSAR⁽³⁾ によると 50°F (27.8°C) まで許している。この値を実験炉に適用すると、700°C の冷却材温度上昇に対して 4 % の誤差に相当する。

(iv) チャンネルガス混合不十分による領域出口温度計測誤差

領域の流量配分誤差を考える場合、これらの(i)～(iv)の誤差は絶対的な値ではなく、これらの誤差の領域間の相対的差が流量配分には重要である。実際(i)の計測誤差などはどの領域でも同じ方向に生じるので相対的差は小さいものとなる。しかし、ここでの評価としては、領域出口温度一定制御方式には最も厳しい取り扱いではあるが、最も保守的な考え方として上記(i)～(iv)の誤差の絶対的な値を領域流量調整の誤差として解析を実施した。

以上より、オリフィス固定方式及び領域出口温度一定制御方式における領域流量調節に関する誤差は、それぞれ 2 % (出力分布誤差を含め 3 ~ 4 %) 及び最大 15 % となり、オリフィス固定方式の方が誤差は少なくてすむ。

4. 結 論

燃焼 0 日の領域出力ピーピング係数に対応した絞りを全燃焼期間維持するようなオリフィス固定方式をとると、以下の効果が期待できる。

- (1) 炉心変形・熱応力が厳しい第 3 領域の燃料チャンネル流量が増加し、燃料温度が低下する (燃焼 0 日 K/A^2 分布ケースで約 100°C)。
- (2) 流量調節誤差が小さくてすむ。従って、詳細設計(II)では領域間の流量配分方式としてオリフィス固定方式をとる。

領域出力ピーピング係数 P_1 の燃焼変化は Table A.2.3 に示すように 8 % 程度であるが燃焼末期では軸方向の出力分布が燃料温度を平坦化する方向に変化し、 P_1 の燃焼による変化を考慮しても、オリフィス固定方式の方が有利である。

参考文献

- (1) 多目的高温ガス実験炉設計室：“多目的高温ガス実験炉設備設計の概要 — 詳細設計(II)に基づく —” JAERI-M 84-210 (1984)
- (2) 多目的高温ガス実験炉設計室、原子炉計測研究室：“多目的高温ガス実験炉原子炉計装に関する検討—核計装と炉心出口温度計装について—”，内部資料
- (3) General Atomic Company ; "GASSAR (General Atomic Standard Safety Analysis Report)", GA-A-13200 (1975).

Table A. 2.1 オリフィス係数 (m^{-4})

流量配分解析ケース	上 部 オ リ フ ィ ス				第 3 領 域 下 部 綾 り	
	第 1 領 域	第 2 領 域	第 3 領 域	S 8 カ ラ ム	S 9 カ ラ ム	
オリフィス固定 (JN-10)	5.74×10^3	3.20×10^3	2.88×10^4 (3.20×10^3)	4.58×10^4	1.06×10^4	
出口温度一定制御 (JN-10Y)	1.56×10^5	3.31×10^3	7.10×10^4 (7.89×10^3)	4.58×10^4	1.06×10^4	
計画炉心 (NOMBOL)	3.20×10^3	3.20×10^3	3.17×10^4 (3.52×10^3)	4.03×10^4	6.33×10^4	
詳(II)炉心 (DII-000)	3.20×10^3	3.20×10^3	3.17×10^4 (3.52×10^3)	5.64×10^4	1.57×10^4	
備考	第 1, 2 領域上部オリフィス : 燃料 6 カラム相当 第 3 領域上部オリフィス : 燃料 2 カラム相当 (燃料 6 カラム相当) 第 3 領域下部綾り : 燃料 1 カラム相当					

Table A. 2.2 クロス流れ係数

位置	炉心内部領域				炉心最外周領域			
	ギャップガス 温度差(°C)	熱変形量 (mm)	ブロック面間 ギャップ(mm)	1辺当たり K/A ² (m ⁻⁴)	ギャップガス 温度差(°C)	熱変形量差 (mm)	ブロック面間 ギャップ(mm)	1辺当たり K/A ² (m ⁻⁴)
上部可動反射体	A 0	0	4.18 × 10 ¹²	0	0	0	0.06	4.18 × 10 ¹²
	B 0	0	4.18 × 10 ¹²	0	0	0	0.06	3.91 × 10 ¹²
	C 10	0.018	1.88 × 10 ¹²	10	10	0.018	0.08	1.88 × 10 ¹²
	D 10	0.021	9.57 × 10 ¹¹	10	15	0.030	0.108	7.33 × 10 ¹¹
	E 45	0.099	0.17	1.86 × 10 ¹¹	45	50	0.188	1.36 × 10 ¹¹
	F 95	0.183	0.33	2.39 × 10 ¹⁰	100	120	0.379	1.58 × 10 ¹⁰
燃料体	G 150	0.274	0.52	6.14 × 10 ⁹	150	190	0.603	3.81 × 10 ⁹
	H 160	0.294	0.63	3.37 × 10 ⁹	155	255	0.763	1.86 × 10 ⁹
	I 145	0.280	0.63	3.26 × 10 ⁹	140	290	0.842	1.38 × 10 ⁹
	J 110	0.233	0.57	4.45 × 10 ⁹	105	295	0.863	1.27 × 10 ⁹
	K 110	0.233	0.53	5.79 × 10 ⁹	105	315	0.874	1.22 × 10 ⁹
	M —	—	0.29	3.48 × 10 ¹⁰	—	—	0.472	8.10 × 10 ⁹
下部可動反射体	—							
	—							

Table A.2.3 領域出力ピーキング係数 P_1

解析ケース	第1領域 P_1	第2領域 P_1	第3領域 P_1
詳(II)炉心燃焼初期 (DII-000)	0.953	1.021	0.960
詳(II)炉心燃焼末期 (DII-425)	1.029	1.027	0.901
オリフィス固定 (JN-10)*	0.943	1.018	0.976
出口温度一定制御 (JN-10Y)*	0.943	1.018	0.976
備考	* 予備検討として実施した解析ケースであり、温度効果を入れた再計算は行っていない。		

Table A.2.4 流量調節方式による燃料温度、領域出口温度の比較

解析ケース	流量調節 方 式	デ タ	第1領域	第2領域	第3領域	備 考
JN-10Y	領域出口 温度一定 制御	T _s max	1311	1377	1473	K/A ² データは、 Table A.2.2に 示すとおりである。
		T (Fuel)	1001	1011	1018	
		T (HP)	997	995	990	
JN-10	オリフィス 固定	T _s max	1346	1400	1372	
		T (Fuel)	1028	1023	973	
		T (HP)	1022	1008	950	
備考	T _s max : システマティック燃料最高温度 (°C) T (Fuel) : 燃料チャンネル8段目出口混合ガス温度 (°C) T (HP) : 制御棒チャンネルを除く高温プレナムブロック混合ガス温度 (°C)					

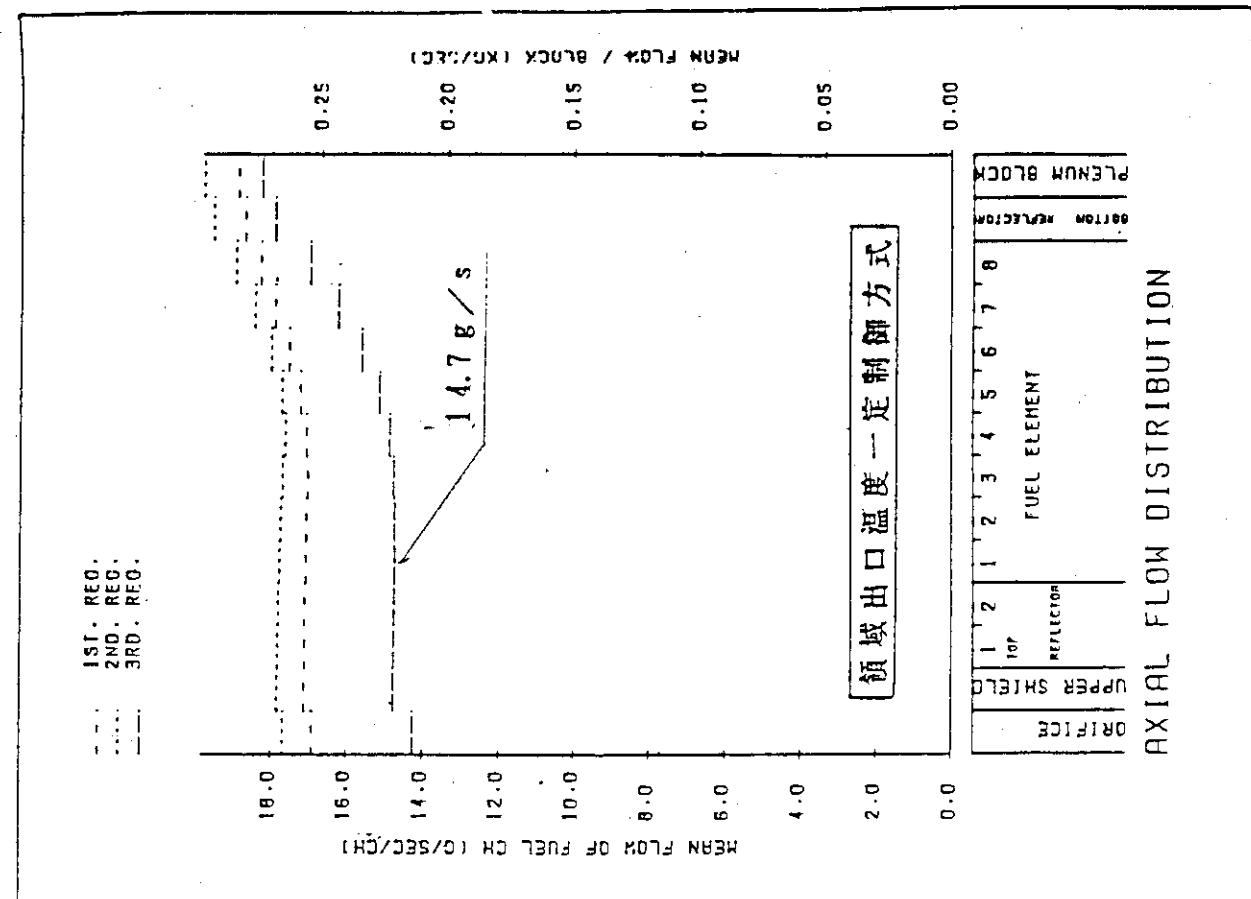
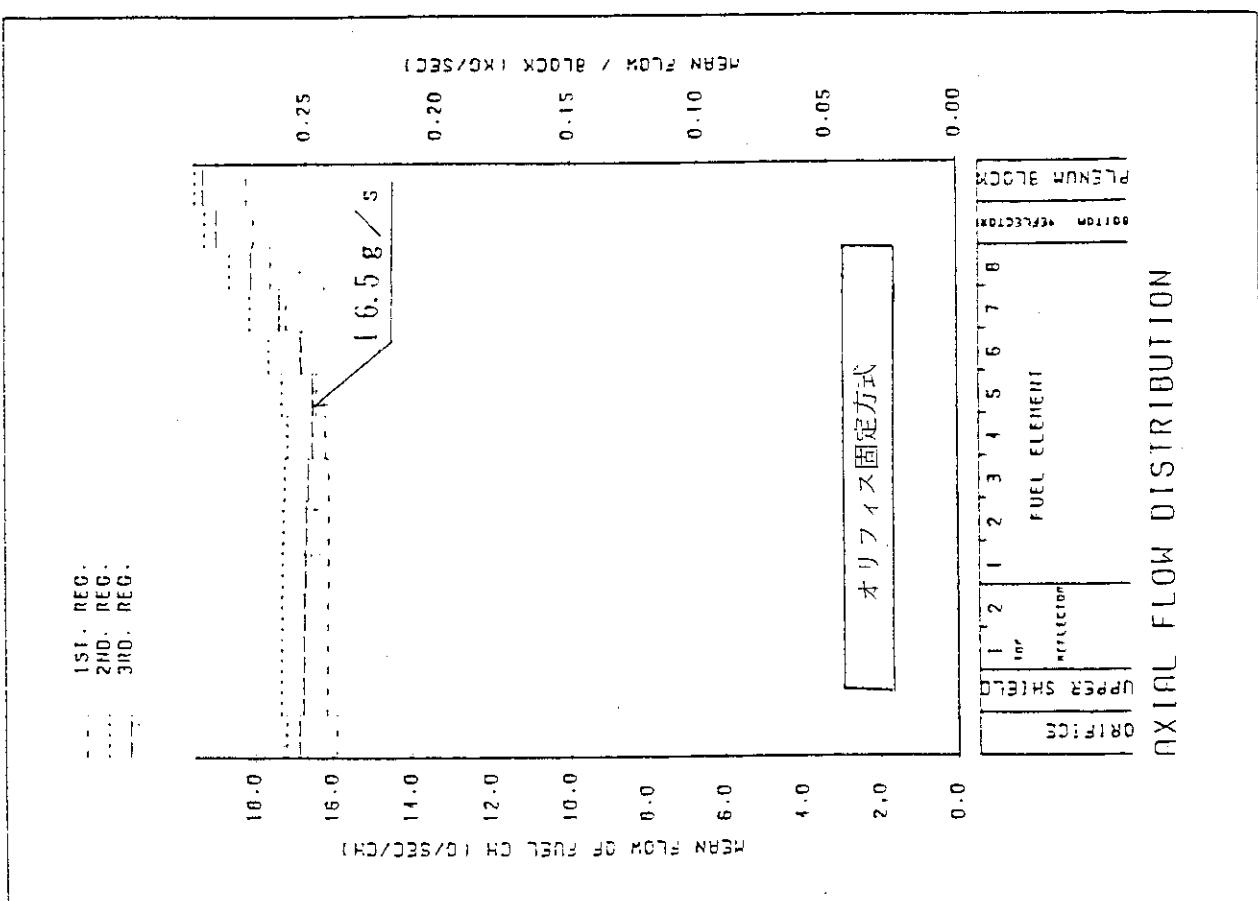


Fig. A. 2.1 流量分布図(ケースJN-10Y)

Fig. A. 2.2 流量分布図(ケースJN-10Y)

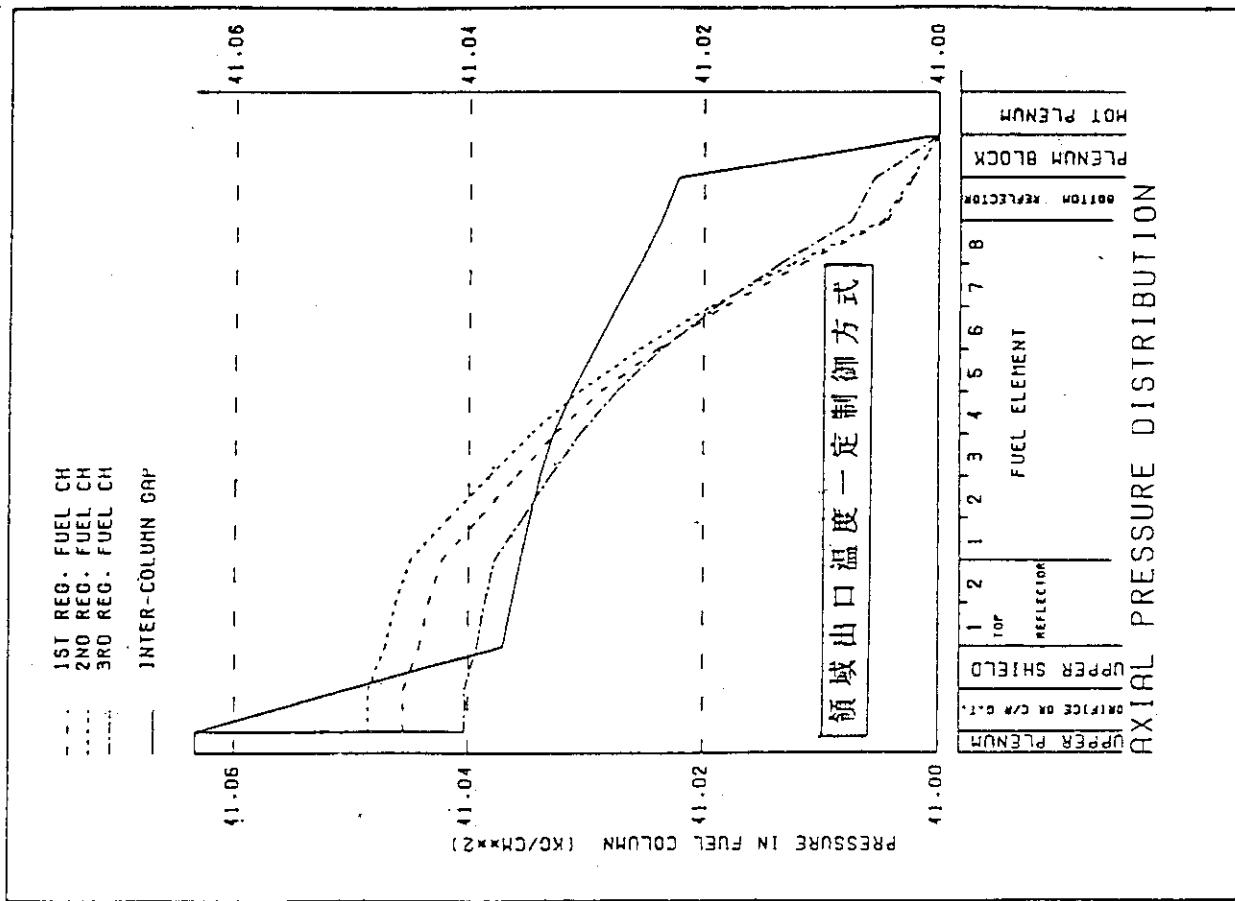


Fig. A. 2.4 圧力分布図(ケースJN-10 Y)

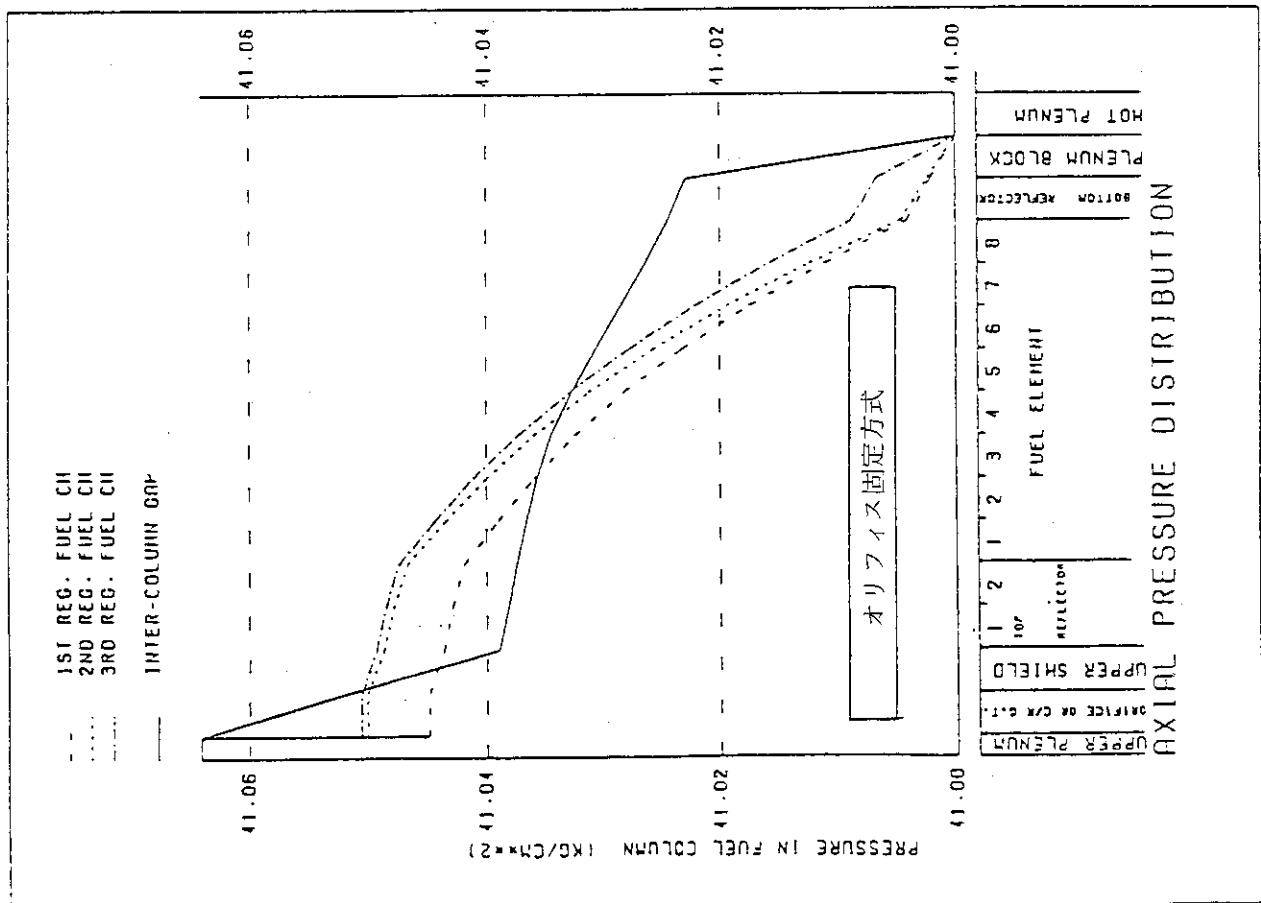


Fig. A. 2.3 圧力分布図(ケースJN-10)

付録3. カラムバウイングによる炉心変形の効果

炉心の六角柱状黒鉛ブロックは炉心内の温度分布と高速中性子束分布が一様でないため曲がり変形をおこし、その結果黒鉛ブロックが11段積まれているカラムが全体として彎曲する可能性がある。このカラムの変形が原因となりさらに隣接カラムとの干渉が起る可能性もある。これをカラムバウイングという。

このようなカラムバウイングが発生すれば、カラムに局部的なギャップ集中が生じ、クロス流れが増大する恐れがある。

以下にカラムバウイングが生じた場合の流量配分特性について検討した結果を示す。

カラムバウイングモードとして、カラム変形解析コードにより得られたカラムのポテンシャルエネルギーと水平方向の変位量から、起こりうる最も厳しいモードを選んだ。このモードを Fig. A. 3. 1 に、口あけ量分布を Table A. 3. 1 に示す。

本モードを、詳(II)炉心(燃焼末期)に適用した場合の流量配分特性(総合流量配分、軸方向圧力分布、軸方向流量分布)を Fig. A. 3. 2 に示す。この結果より以下のことがわかる。

- ① “口あけ”が生じる面で、流量がステップ状に変化し、燃料チャンネル流量が大巾に減少する。
- ②カラム間ギャップの軸方向圧力勾配が口あけ面で急激に変化する。
- ③炉心の有効流量割合は、カラムバウイングが生じないケース(DII-425)に比べ約5%減少する。

Table A 3.1 カラム口あけ量分布 (mm)

カラム No. ^注		S1, C1	S2, S7	S3, S6, C2	S4, S5, S8 S9, C3, C4
オリフィス	< 1	0.1	0.7	0.7	1.1
上部反射体 1	< 2	0.1	0.1	0.1	0.1
上部反射体 2	< 3	0.1			
燃 料 1	< 4	0.1			
" 2	< 5	0.2			
" 3	< 6	0.2			
" 4	< 7	0.3			
" 5	< 8	0.3			
" 6	< 9	0.4			
" 7	< 10	0.4	2.2	2.6	5.2
" 8	< 11	0.5	0.1	0.1	0.1
下部反射体	< 12	0.3	0.1	0.1	0.1
プレナム					

^注 本文 Fig. 3.1.4 参照

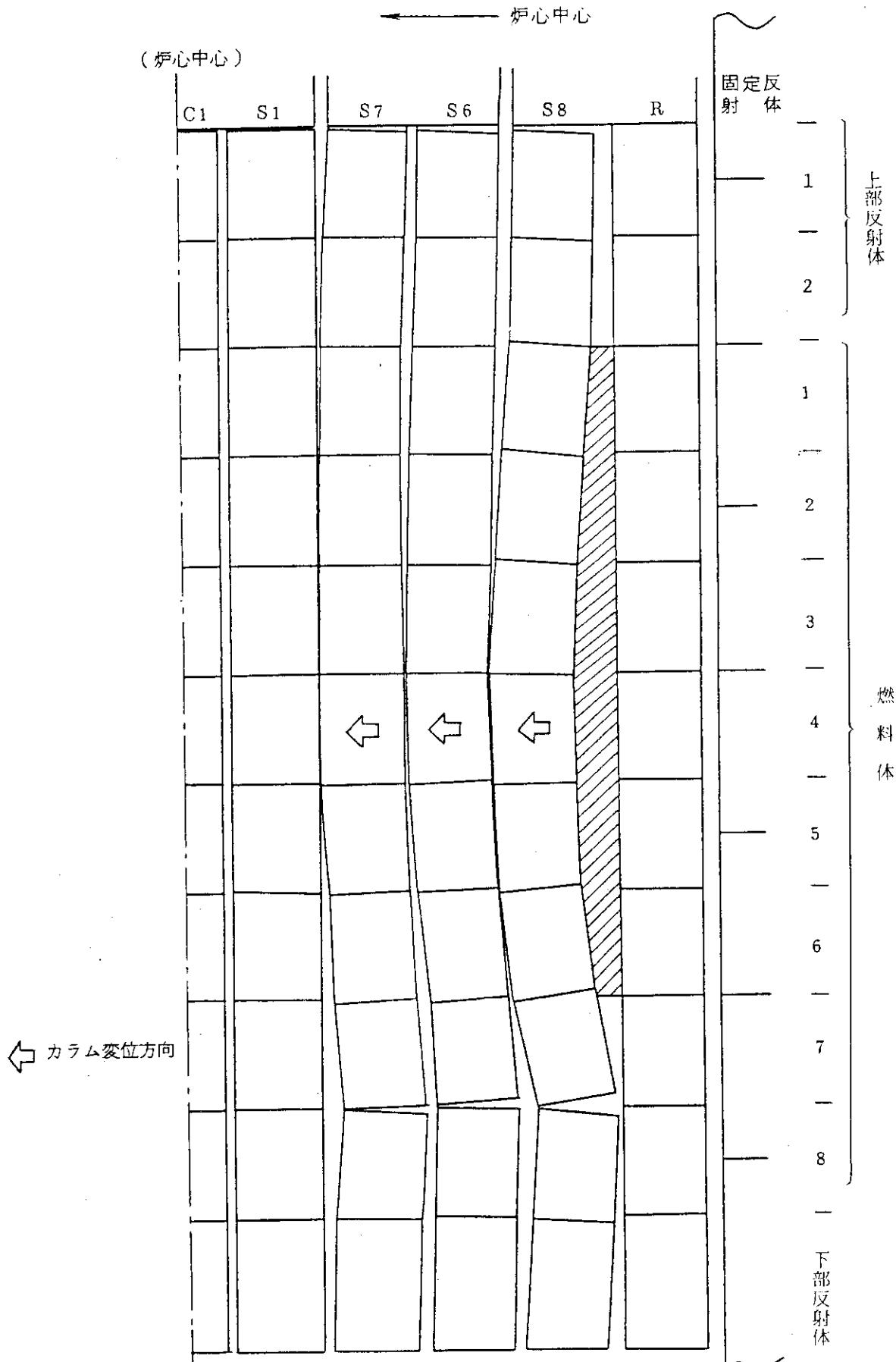
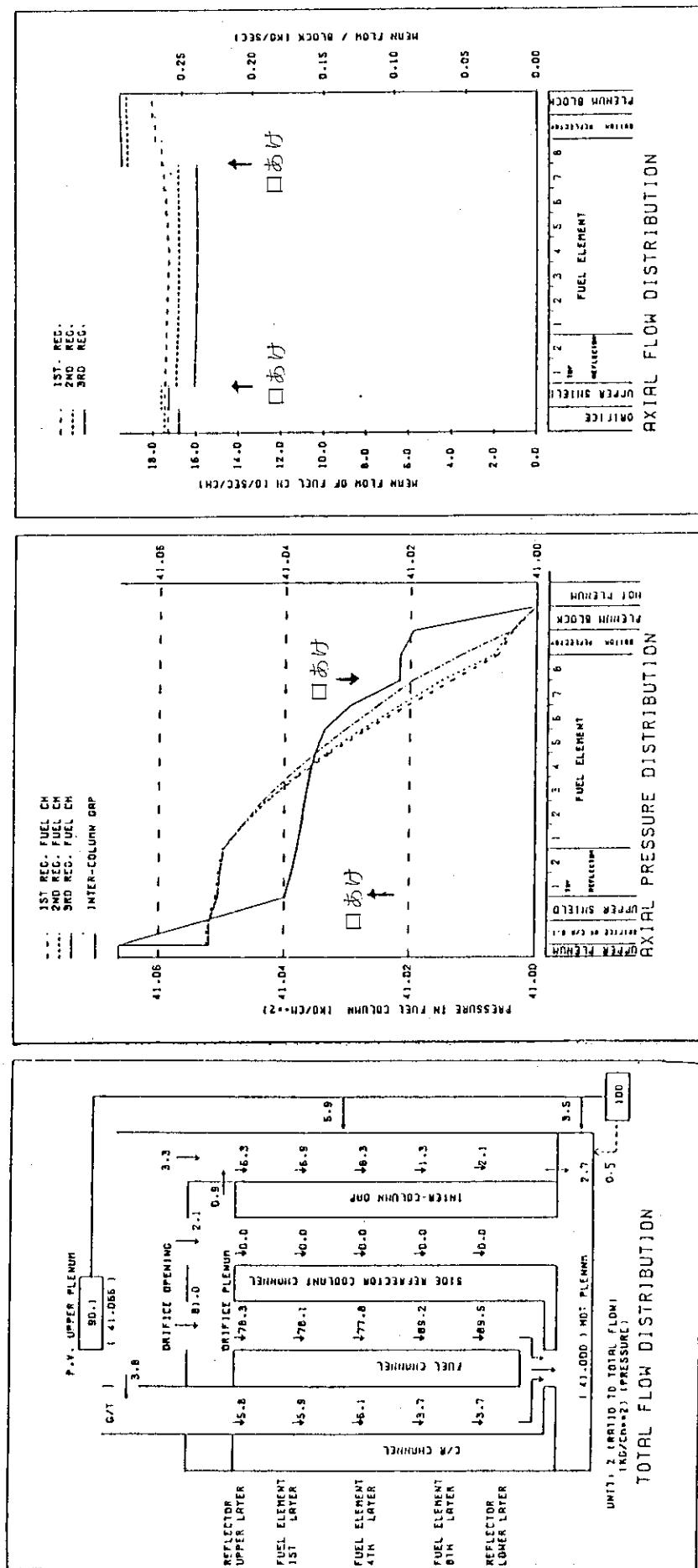


Fig. A.3.1 カラムバウイングによる炉心変形模式図
(流量配分特性上想定される最も厳しいモード)



付録 4. カラム内流量再配分の検討

1. はじめに

カラム内の流量再配分の検討を目的とし、燃料3チャンネル、ギャップ2チャンネルからなる流路網（以後、1カラムモデルと呼ぶ）を用いて流量配分解析を行い、カラム内の流量分布を求めた。

カラム内の再配分が生じる要因は、

- ① チャンネルによってクロスの抵抗が異なること。
- ② チャンネルによって出力が異なるため流動抵抗が異なること。
- ③ 燃料チャンネルブロック表面温度との温度差（あるいはカラム間ギャップガス温度との温度差）により、燃料チャンネルからカラム間ギャップへの放熱量が異なること。
- ④ チャンネルによって流路の形状が異なる（製作公差のばらつき等による）ことにより圧力損失係数が異なること。

が揚げられるが、本解析では①～③の要因について考慮した。これらの効果は、燃焼日、領域等により異なる。本解析では、対象とする燃料ブロックの境界条件（カラム間ギャップの温度、圧力分布）を本文4章で述べてきた1／6炉心モデルの流量配分解析結果のものと等価とし、燃焼0日および425日における、カラム内流量再配分因子を算出した。

2. 解析モデル

Fig. A. 4.1及びFig. A. 4.2に軸方向、径方向の流路モデル図を示す。これらの図が示す様に、1カラムモデルはブロックの高温側カラム間ギャップと低温側カラム間ギャップを表わす2本のカラム間ギャップチャンネル（G1, G2）と、それぞれのカラム間ギャップに接する燃料チャンネル及びブロック内側の燃料チャンネルを表わす3本の燃料チャンネル（F1, F2, F3）の5チャンネルで以下に示す様に構成されている。

(1) ギャップ

カラム間ギャップは、以下の2流路で代表している。

G1：低温ギャップ（外部ギャップは炉心外周側ギャップに相当）

G2：高温ギャップ（内部ギャップは炉心中央側ギャップに相当）

(2) 燃料チャンネル

燃料チャンネルは、以下の3流路で代表している。

F1：クロス流れ、ギャップへの放熱量が最も多い低出力チャンネルで、低温ギャップに面するブロック外周5チャンネル。

F2：ブロックの内側に位置する6チャンネルと、高温ギャップに面するチャンネルのうち、出力が比較的小さい2チャンネルの計8チャンネル。

F3：ブロック開口部に対して反対側に位置し、出力が最も大きい2チャンネル。

ギャップチャンネルのノード点は、カラム間ギャップの圧力及びクロス流れ流入温度を1／6炉心モデルによる解析結果と等しくするように、圧力及び温度が固定されている。

また、ギャップチャンネルの流路は、燃料チャンネルからカラム間ギャップへの放熱量を等し

くするように、ガス温度（輻射計算時は壁温）が固定されている。

伝熱ブランチは、

- 燃料チャンネル
- 燃料チャンネル間
- 燃料チャンネル—ギャップ間

にそれぞれ設けている。

3. 解析条件及び解析ケース

炉心径方向の出力勾配、それに起因した温度分布及びブロック熱変形量の分布を考慮して、全炉心のカラムを次の3領域に分類する。（燃料カラムの区分についてはFig. 3.1.4 参照の事）

- ① 炉心最外周カラム（S4, S5, S8 およびS9 カラム）—S8 カラムで代表する。
- ② 炉心最外周カラムに隣接するカラム（S3, S6 カラム）—S6 カラムで代表する。
- ③ ①②以外のカラム（S1, S2, S7 カラム）—S7 カラムで代表する。

それぞれの領域の境界条件、すなわち、カラム間ギャップガス温度、圧力及びカラム入口の冷却材圧力については、1/6炉心モデルの解析結果より得られるS8, S6, S7 カラムの境界条件で代表する。

境界条件設定に使用した流量配分は本文第4章で検討した炉心特性評価用流量配分の燃焼0日（ケースNOMBOL）、燃焼425日（ケースNOMEOL）の解析結果である。

Table A 4.1に、カラム内流量再配分解析に使用した解析条件を示す。Table A 4.2に、チャンネル間の出力比を示す。

解析ケースをTable A 4.3に示す。

4. 解析結果及び検討

全解析ケースの、軸方向圧力分布及び流量分布をFig. A. 4.3からFig. A. 4.14に示す。

Table A 4.4に、本解析結果（ケース1, 2, 3）と対応する1/6炉心モデル解析結果（ケースNOMBOL）とについて燃料チャンネル流量、出口温度の比較を示す。燃料チャンネル流量は、最大で約2%の差が生じている。この差は、以下の要因によるものと考えられる。

- ① カラム間ギャップのガス温度差が実際生じるであろう温度差よりも大きい。これは、1/6炉心モデルの解析結果のうち最高及び最低のガス温度を境界条件として用いていることに起因する。
- ② クロス流れ流入温度が低い。これは、クロス流れが低温ギャップ側（G1）からしか流入しないモデルであることに起因する。

S7 カラムではチャンネル出口温度が1/6炉心モデルに比べて数10°C低下している。この原因は1/6炉心モデルではS7 カラムにおける燃料チャンネルでの輻射を考慮していないが、本解析モデルでは考慮しているためである。従って、S7 カラムでの放熱量が1/6炉心モデルによる解析結果より大きく評価され、出口ガス温度が低目に評価される。（なお、S8, S6 カラムでは、両者とも輻射を考慮している。）

チャンネル間の最大圧力差は、6 kg/m²以下であり、燃料チャンネル1ブロック当りの圧力損

失の約10%である。また、平均チャンネル流量に対する各チャンネルの流量変化割合は、軸方向に平均すると最大2%程度である。この様な圧力差、流量差が最も大きくあらわれるのは、燃焼末期の炉心最外周カラムの場合である。

5. カラム内流量配分因子暫定値の設定

カラム内流量再配分因子を以下の式に示す様に、平均チャンネル流量に対する各チャンネルの流量比(R_i)で表わした。

$$R_i = 3 \times \frac{\sum_{j=1}^8 W_{ij}}{\sum_{j=1}^8 \sum_{i=1}^3 W_{ij}}$$

R_i : i チャンネルの再配分因子

W_{ij} : i チャンネル j 段目の平均チャンネル流量

燃焼0日、425日におけるカラム内再配分因子をそれぞれ、Table A.4.5 及び Table A.4.6 に示す。これらの因子は、炉心熱特性解析に使用するチャンネル流量を決定するのに用いられた。

Table A 4.1 カラム内流量再配分解析条件

項番	項目	条件
1	出力分布	代表領域の最大出力勾配をとる。各代表カラムのチャンネル間出力比は、Table A 4.2 の通りである。但し、軸方向の出力分布は各チャンネル同じである。
2	等価熱伝導率	以下の3種類で評価している。 (i) 外側チャンネル→ギャップ (ii) 内側チャンネル→ギャップ (iii) 燃料チャンネル間 (i)(ii)(iii)いずれの場合も、温度依存性、照射量依存性(燃焼425日で $7 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$)を考慮している。
3	輻射及び表面温度	以下に示す2種類の輻射伝熱を考慮している。 (i) カラム間ギャップ ブロックの表面温度は1/6炉心モデル解析結果から平均表面温度を求め、その値を境界表面温度として固定した。(S8のみ) (ii) 燃料チャンネル(F1, F3) F1, F3チャンネルの輻射伝熱を考慮した。 (表面温度は固定しない) なお、F2(主に内側チャンネル群)のチャンネル間の熱抵抗を大き目に評価する意味でも輻射は考慮していない。
4	カラム間ギャップ ガス温度	対象カラム周辺ギャップの最低温ギャップ(G1)、最高温ギャップ(G2)を1/6炉心モデル解析結果より求め境界温度条件として固定した。
5	クロス流れ抵抗 ① チャンネル -ギャップ ② チャンネル間	燃料チャンネルからカラム間ギャップへのクロス流れはくさび型ギャップが開いているF1-G1間にのみに生じるものと仮定した。 (クロス流れ係数は計画炉心と同じ) 2次元流動解析結果を使用した。 クロス流れ流路を以下に示す様な平板モデルを用いると、流路長(ℓ)は等価的に $\ell = 28 \text{ mm}$ である。

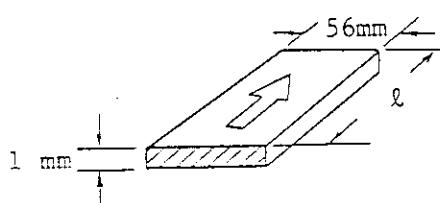


Table A 4.2 各チャンネルの出力比

燃 燃 日	チャンネル名	S 8 カラム	S 6 カラム	S 7 カラム
0 日	F 1	1.001	0.969	0.983
	F 2	0.987	1.002	0.992
	F 3	1.049	1.069	1.073
425 日	F 1	0.991	0.984	1.084
	F 2	0.969	0.999	1.080
	F 3	0.973	0.995	1.088

Table A.4.3 カラム内流量再配分解析ケースと条件

ケース No	代表カラム	燃 燃 日	基準流量配分
1	S 8	0 日	NOMBOL
2	S 6		
3	S 7		
4	S 8	425 日	NOMEOL
5	S 6		
6	S 7		

Table A.4.4 1カラムモデルと1/6炉心モデルによる流量分布及びカラム出口混合ガス温度解析結果の比較

(単位 ; kg/s)

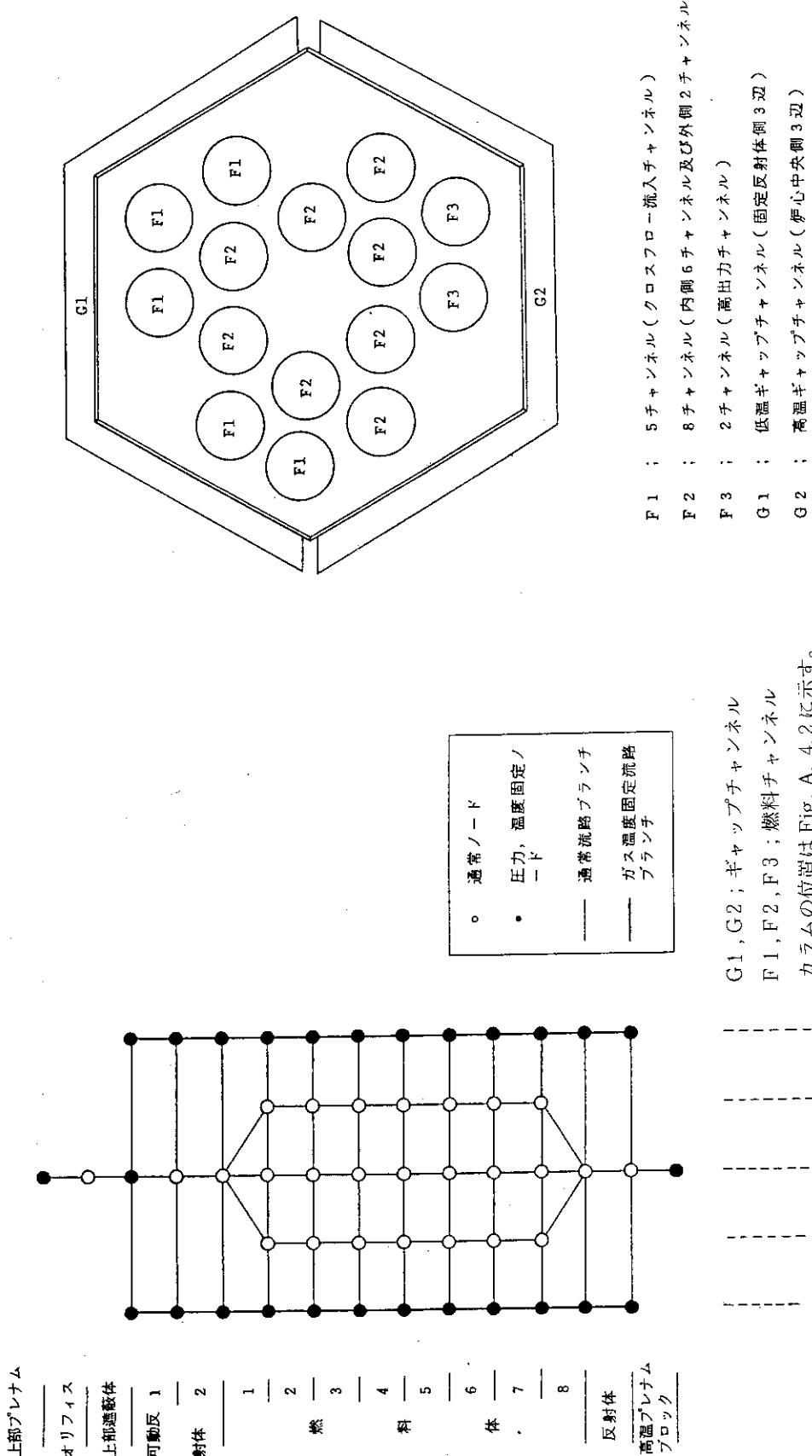
モル (燃焼日)	S8 カラム (0日)		S8 カラム (425日)		S6 カラム (0日)		S6 カラム (425日)		S7 カラム (0日)		S7 カラム (425日)	
	1カラム モデル	1/6炉心 モデル	1カラム モデル	1/6炉心 モデル	1カラム モデル	1/6炉心 モデル	1カラム モデル	1/6炉心 モデル	1カラム モデル	1カラム モデル	1カラム モデル	1/6炉心 モデル
炉心 (S44) 出口 (S44) 混合 ガス 温度 (°C)	1	0.2412	0.2445	0.2453	0.2483	0.2681	0.2715	0.2643	0.2681	0.2648	0.2654	0.2600
	2	0.2410	0.2443	0.2445	0.2476	0.2681	0.2715	0.2639	0.2677	0.2648	0.2654	0.2594
	3	0.2409	0.2444	0.2440	0.2473	0.2684	0.2718	0.2644	0.2683	0.2651	0.2657	0.2599
	4	0.2421	0.2457	0.2460	0.2495	0.2691	0.2726	0.2658	0.2696	0.2658	0.2663	0.2610
	5	0.2448	0.2485	0.2493	0.2527	0.2704	0.2737	0.2680	0.2716	0.2668	0.2673	0.2625
	6	0.2492	0.2529	0.2533	0.2569	0.2723	0.2755	0.2707	0.2740	0.2683	0.2687	0.2630
	7	0.2552	0.2590	0.2583	0.2619	0.2752	0.2781	0.2741	0.2771	0.2703	0.2706	0.2646
	8	0.2622	0.2661	0.2646	0.2682	0.2782	0.2809	0.2782	0.2808	0.2727	0.2729	0.2700
カラム 混合ガス 温度 (°C)		980	965	938	924	996	993	1005	999	1035	1060	1088

Table A. 4.5 カラム内流量再配分因子（平均チャンネル流量に対する各チャンネルの流量比）
R の値（燃焼 0 日）

カラム名 チャンネル名	S8	S6	S7
F1	1.020	1.010	1.009
F2	0.991	0.997	0.993
F3	0.987	0.988	1.007

Table A. 4.6 カラム内流量再配分因子（平均チャンネル流量に対する各チャンネルの流量比）
R の値（燃焼 425 日）

カラム名 チャンネル名	S8	S6	S7
F1	1.021	1.014	1.013
F2	0.991	0.995	0.989
F3	0.984	0.985	1.005



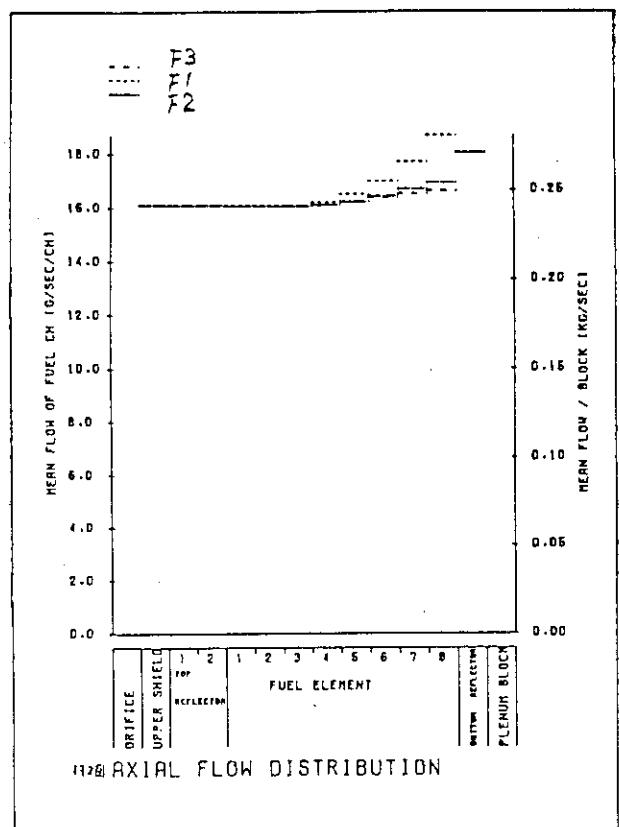
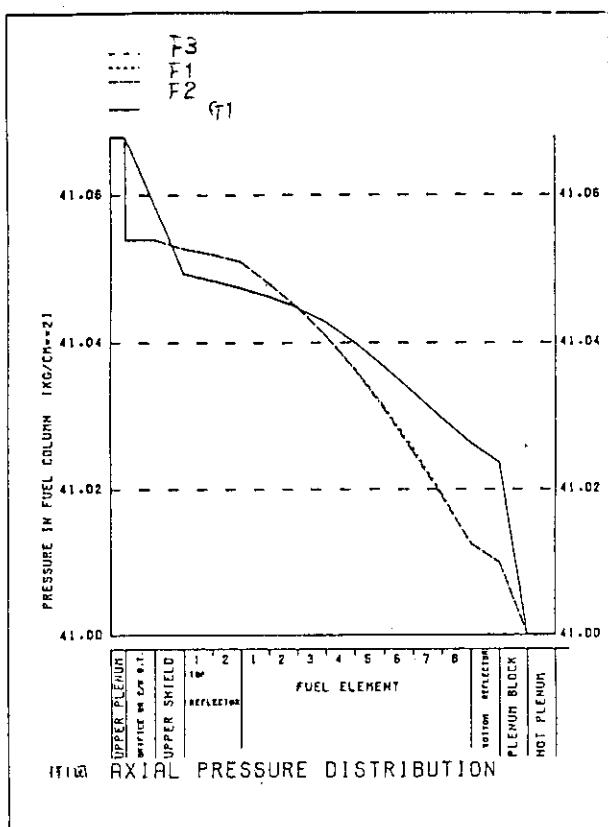


Fig. A 4.3 チャンネル圧力分布図（ケース 1）

Fig. A 4.4 チャンネル流量分布図（ケース 1）

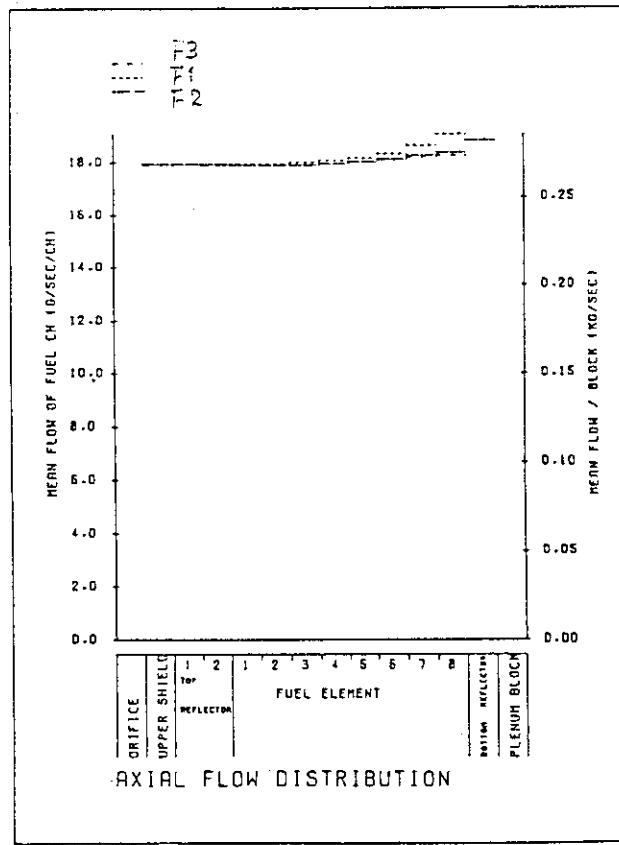
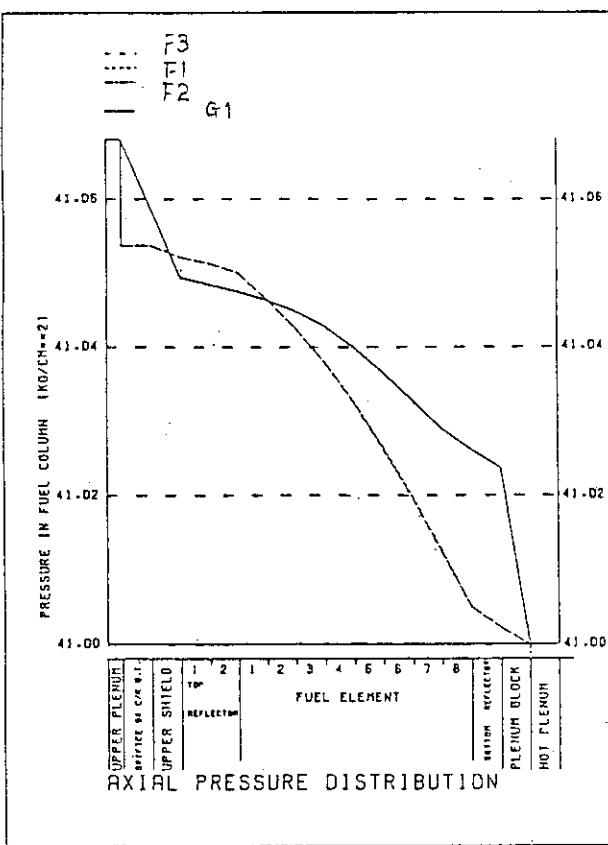


Fig. A 4.5 チャンネル圧力分布図（ケース 2）

Fig. A 4.6 チャンネル流量分布図（ケース 2）

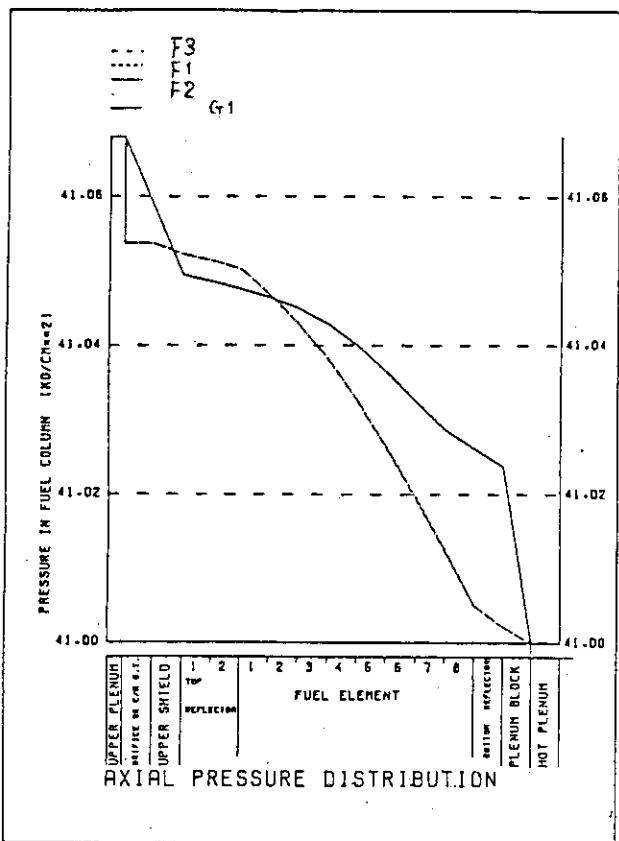


Fig. A 4.7 チャンネル圧力分布図（ケース 3）

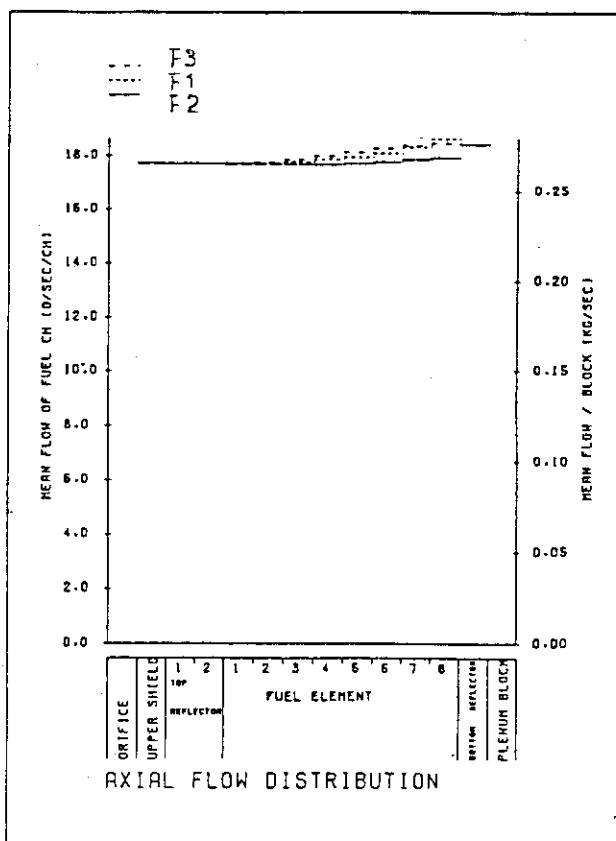


Fig. A 4.8 チャンネル流量分布図（ケース 3）

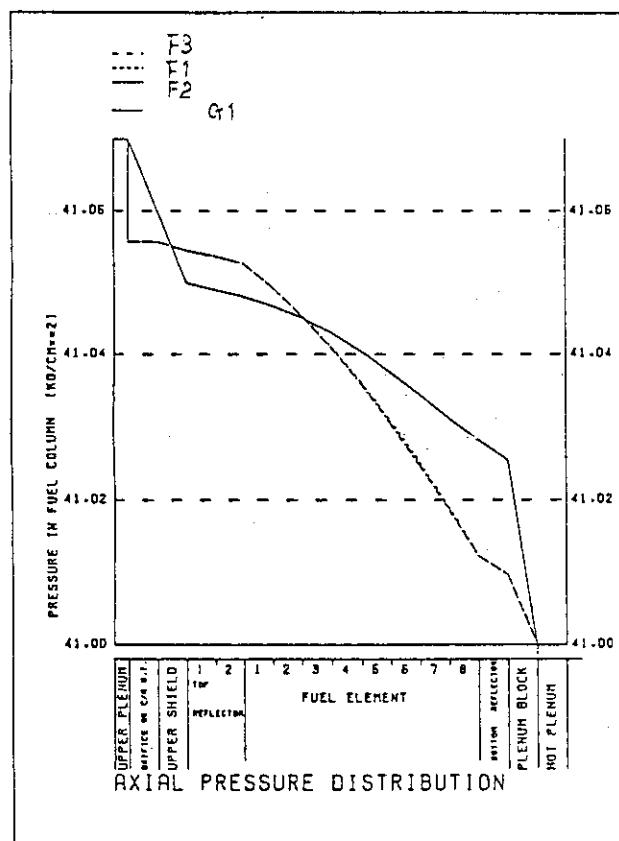


Fig. A 4.9 チャンネル圧力分布図（ケース 4）

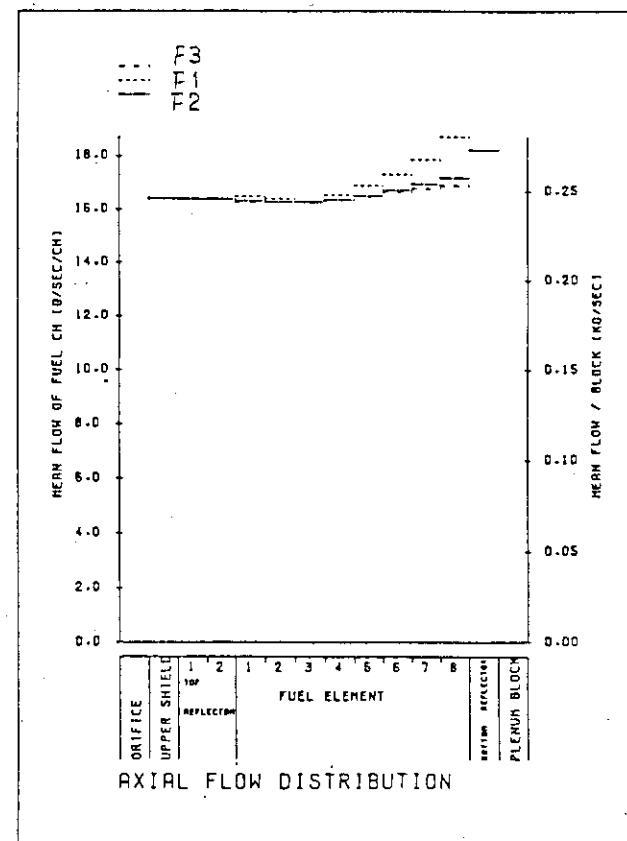


Fig. A 4.10 チャンネル流量分布図（ケース 4）

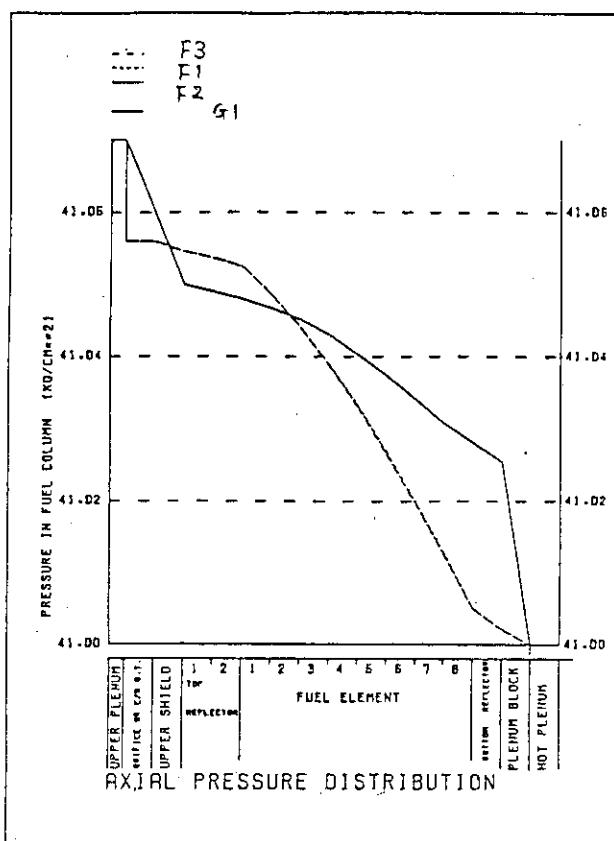


Fig. A 4.11 チャンネル圧力分布図（ケース 5）

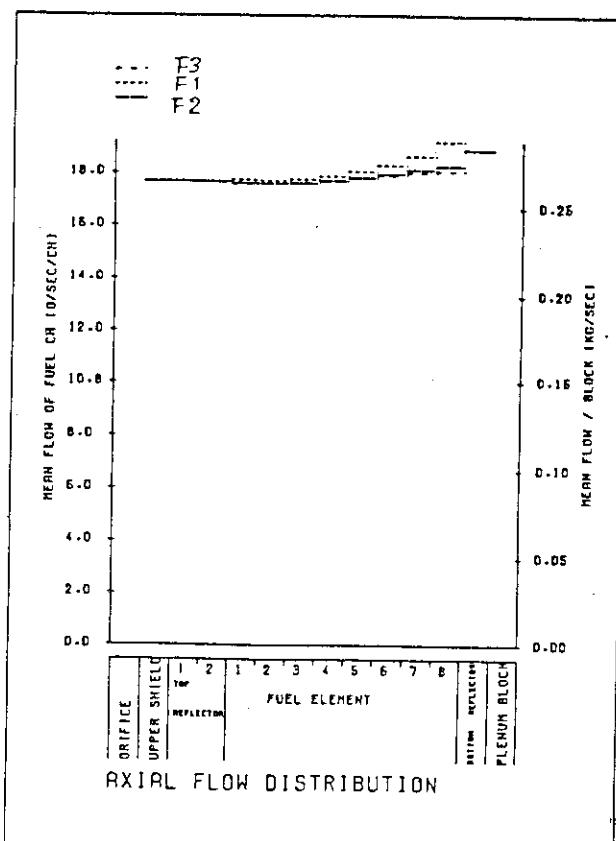


Fig. A 4.12 チャンネル流量分布図（ケース 5）

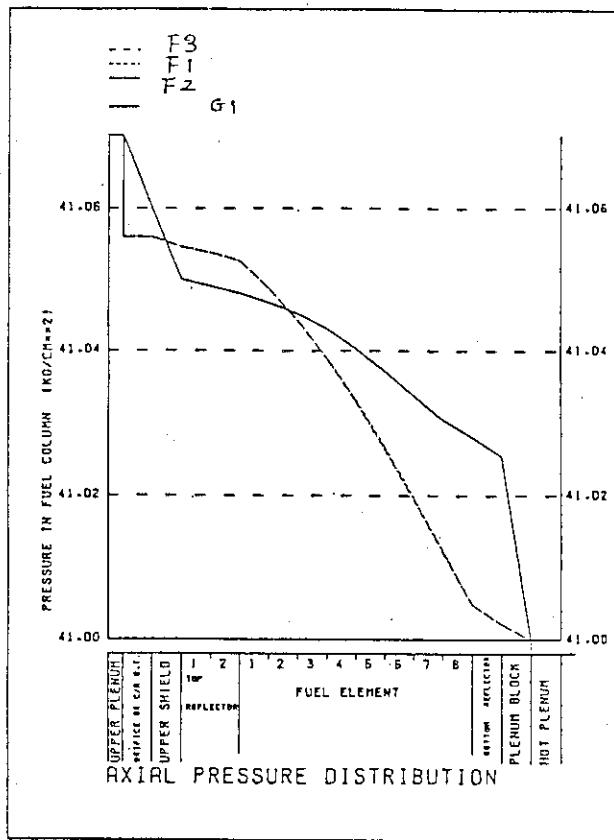


Fig. A 4.13 チャンネル圧力分布図（ケース 6）

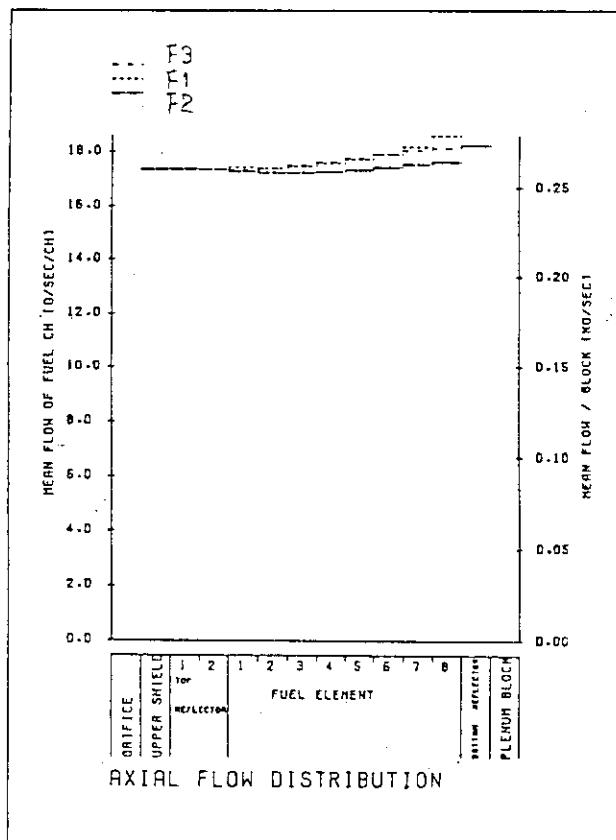


Fig. A 4.14 チャンネル流量分布図（ケース 6）