

JAERI-M

88-173

熱流動・熱伝導連成解析コード
FLOWNET／TRUMPの検証

1988年9月

丸山 創・藤本 望・木曾 芳広^{*}
村上 知行^{*}・数土 幸夫

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, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

熱流動・熱伝導連成解析コード FLOWNET/TRUMP の検証

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉設計室

丸山 創・藤本 望・木曾 芳広*
村上 知行*・数土 幸夫

(1988年8月15日受理)

本報は、現在日本原子力研究所が、将来の高温ガス炉の技術基盤の確立のため及び高温に関する先端的基礎研究のための照射炉として建設を計画中の、高温工学試験研究炉の設計において、炉心の伝熱流動、特に燃料ブロック内の冷却材流路間の流量配分、燃料ブロック応力解析用熱的境界条件の決定並びに燃料ブロック内の冷却材流路閉塞事故時の温度評価に使用している熱流動・熱伝導連成解析コード FLOWNET/TRUMP の検証を行った結果について報告するものである。検証は、本解析コードを用いて日本原子力研究所の H E N D E L T_{1-M} 実験装置で行なわれた模擬燃料ブロック加熱実験を解析し、実験結果と解析結果を比較検討することによって行った。

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町字新堀 3607

* 富士電機（株）

Verification of Combined Thermal-hydraulic
and Heat Conduction Analysis Code
FLOWNET/TRUMP

Soh MARUYAMA, Nozomu FUJIMOTO, Yoshihiro KISO^{*}
Tomoyuki MURAKAMI^{*} and Yukio SUDO

HTTR Designing Laboratory
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 15, 1988)

This report presents the verification results of the combined thermal-hydraulic and heat conduction analysis code, FLOWNET/TRUMP which has been utilized for the core thermal hydraulic design, especially for the analysis of flow distribution among fuel block coolant channels, the determination of thermal boundary conditions for fuel block stress analysis and the estimation of fuel temperature in the case of fuel block coolant channel blockage accident in the design of the High Temperature Engineering Test Reactor(HTTR), which the Japan Atomic Energy Research Institute has been planning to construct in order to establish basic technologies for future advanced very high temperature gas-cooled reactors and to be served as an irradiation test reactor for promotion of innovative high temperature new frontier technologies.

The verification of the code was done through the comparison between the analytical results and experimental results of the Helium Engineering Demonstration Loop Multi-channel Test Section(HENDEL T_{1-M}) with simulated fuel rods and fuel blocks.

Keywords: HTTR, Core Thermal Hydraulic Design, Channel Blockage, Fuel Block, Code Verification, Combined Code, Thermal Hydraulics, Heat Conduction, FLOWNET/TRUMP, Flow Distribution

* Fuji Electric Co., Ltd.

目 次

1. 緒 言	1
2. 解析コードの概要	6
2.1 熱伝導解析コード TRUMP の構成	6
2.2 热流動解析コード FLOWNET の構成	7
2.3 FLOWNET と TRUMP の結合	8
3. HENDEL TR-M 実験と主要実験結果	12
3.1 実験装置の概要	12
3.2 主要な実験結果	13
4. 解析モデルと解析条件	25
4.1 解析モデル	25
4.2 解析条件	25
4.3 計算データ	28
5. 解析結果と実験値との比較検討	42
5.1 予備的検討	42
5.2 解析結果と実験結果との比較	43
5.3 検討結果	45
6. 結 言	67
謝 辞	67
参考文献	68
付録 1 計算メッシュの妥当性の検討	69
付録 2 模擬燃料ブロックの径及び軸方向伝熱量の検討	76

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Analysis Code	6
2.1 Constitution of Heat Conduction Analysis Code TRUMP	6
2.2 Constitution of Thermal-hydraulic Analysis Code FLOWNET	7
2.3 Combination of FLOWNET with TRUMP	8
3. HENDEL T _{1-M} Experiments and Major Experimental Results.....	12
3.1 Outline of experimental apparatus	12
3.2 Major experimental results	13
4. Analytical Model and Conditions	25
4.1 Analytical model	25
4.2 Analytical conditions	25
4.3 Calculation data	28
5. Comparison of the Analytical and Experimental Results	42
5.1 Preliminary analysis	42
5.2 Comparison of the analytical and experimental results	43
5.3 Discussion of the results	45
6. Concluding Remarks	67
Acknowledgements	67
References	68
Appendix 1 Investigation of calculation mesh size	69
Appendix 2 Comparison of radial and axial heat transfer in the simulated fuel blocks	76

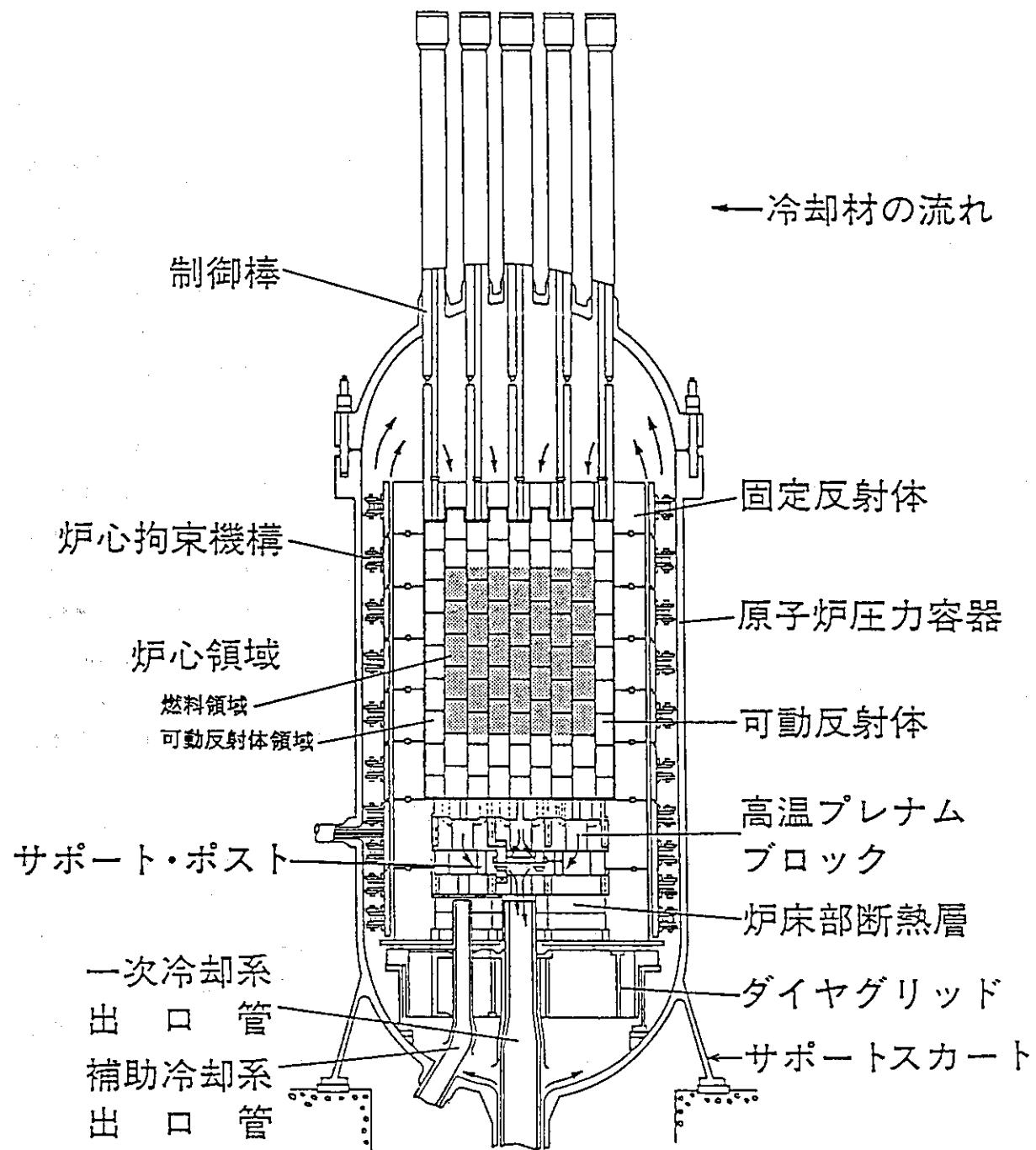
1. 緒 言

現在日本原子力研究所では、将来の高温ガス炉の技術基盤の確立のため並びに高温に関する先端的基礎研究のための照射炉として高温工学試験研究炉の建設を計画している。この試験研究炉の設計に当たって、炉心の伝熱流動解析、特に燃料ブロック内の冷却材流路間の流量配分、燃料ブロックの熱・照射応力解析用熱的境界条件の決定並びに燃料ブロック内の冷却材流路が何らかの原因で閉塞した時の温度解析に熱流動・熱伝導連成解析コード FLOWNET/TRUMP を使用している。本報は、この解析コード FLOWNET/TRUMP の検証結果を報告するものである。

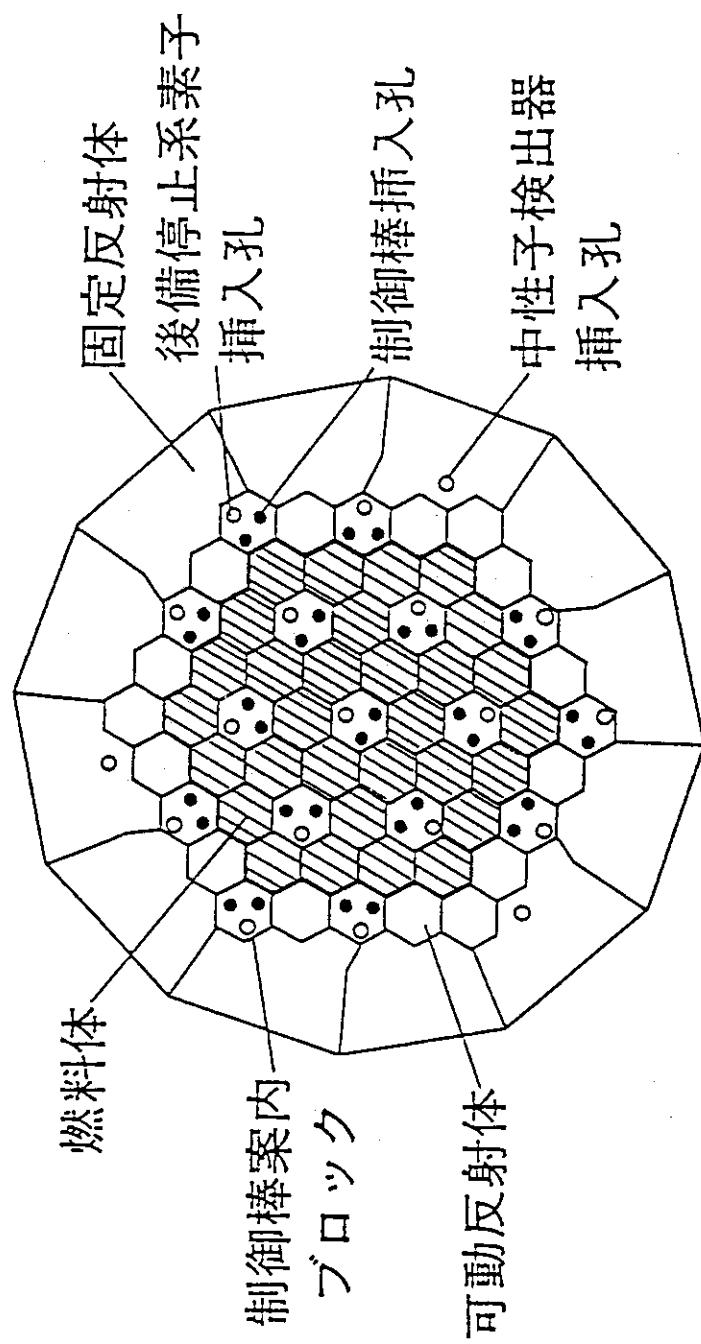
高温工学試験研究炉は、熱出力 30MW、一次冷却材圧力約 $4.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 、一次冷却材入口温度約 395°C 、一次冷却材出口温度は 850°C 及び 950°C の我が国初の高温ガス炉である。第 1.1 図に原子炉圧力容器内の構造の概念図を示す。炉心領域は、黒鉛ブロックである固定反射体によって取囲まれており、高温プレナムブロック、炉床部断熱層を介してダイヤグリッドによって原子炉容器壁に支持されている。第 1.2 図に炉心の横断面を示す。図に示すように、燃料体ブロックの積層カラム計 30 カラムと制御棒案内ブロックの積層カラム計 7 カラムの合計 37 カラムから成る燃料領域を、可動反射体カラム（照射カラム 3 カラムを含む）計 15 カラムと制御棒案内カラム計 9 カラム計 24 カラムで取り囲んでおり、さらにその周囲を固定反射体が取囲む構造となっている。

燃料領域の燃料ブロックには第 1.3 図に示す A 型燃料体、B 型燃料体及び C 型燃料体の 3 種類がある。A 及び B 型燃料体では、6 角柱型の黒鉛ブロックに、多数（33 個及び 31 個）の燃料棒插入孔を設け、その中に燃料棒を挿入する型式であり、燃料棒插入孔と燃料棒が形成する環状流路を冷却材が上から下向きに流れる。A 型燃料体と B 型燃料体の形状は、第 1.3 図に例示したように燃料棒の形状または寸法等が異なるがいずれも棒状燃料である。C 型燃料体は 6 角柱状の中空黒鉛ブロックに球状の燃料を装荷したものである。6 角柱状の黒鉛ブロックの平径は 36.0 mm 、高さは 58.0 mm で、この外形寸法は A、B、C 型燃料体いずれも同一である。第 1.4 図に A 型燃料体の 33 本燃料棒を挿入するものを示す。

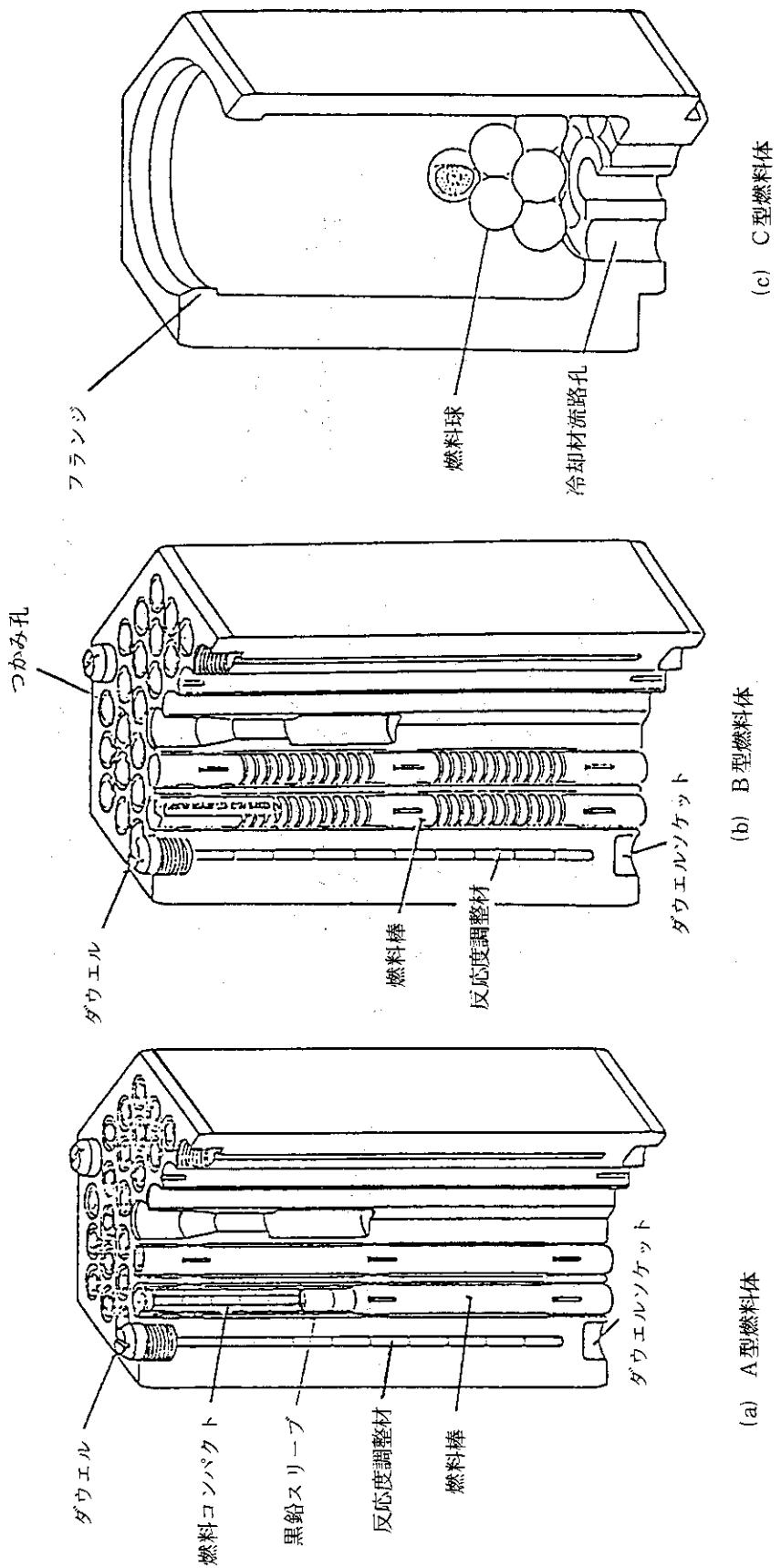
本報は、A 及び B 型燃料体を対象とした、燃料棒及び黒鉛ブロックから成る燃料体ブロックを積重ねた燃料カラムの温度解析の妥当性を調べたものである。検証に当たっては、これまでの日本原子力研究所で高温ガス炉開発のため行ってきた実証試験、HENDEL (Helium Engineering Demonstration Loop) T_{1-M}（燃料体スタック実証試験部多チャンネル試験装置）による燃料体カラムの伝熱流動実験を解析し、実験結果と解析結果の比較検討を行ったものである。HENDEL T_{1-M} では A 型及び B 型燃料体の外型寸法、挿入燃料棒数は異なるものの、6 角柱状黒鉛ブロックに模擬燃料棒を計 12 本挿入した燃料体カラムの伝熱流動実験を行ったものであり、FLOWNET/TRUMP コードの検証に適した実験である。



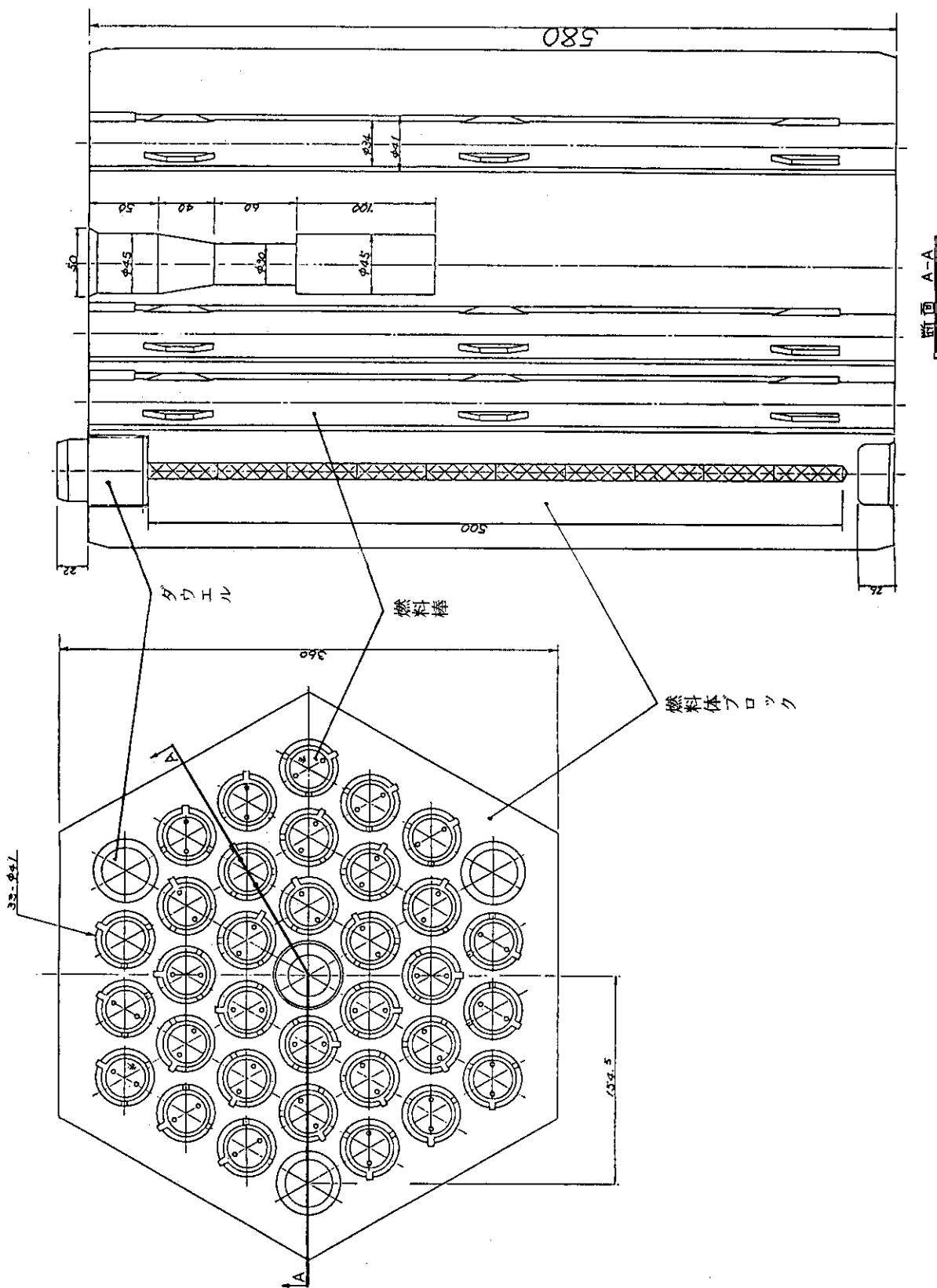
第1.1図 高温工学試験研究炉の原子炉圧力容器内の構成概要



第1.2図 高温工学試験研究炉の炉心断面図



第1.3図 高温工学試験研究炉の燃料体形式



第1.4図 高温工学試験研究炉のA型燃料体の構造の概要

2. 解析コードの概要

高温工学試験研究炉の原子炉内の静特性伝熱流動解析コードとして、これまで1次元流路ネットワーク内の定常的な圧力、温度、流量分布を解く FLOWNET が用いられているが、FLOWNET の伝熱モデルは、固体間及びヘリウムの1流路ブランチ内の伝熱量を近似的な方法により計算しているため複雑モデルになると解析対象に限界があることがある。

そこで、FLOWNET 内の伝熱計算部分に熱伝導解析コード TRUMP を用いて詳細な伝熱計算を可能にしたのが本 FLOWNET/TRUMP コードである。第 2.1 図に本コードの概念を示す。

2.1 热伝導解析コード TRUMP⁽¹⁾ の構成

TRUMP(第2.1図のTEMPX)は、空間の座標と時間の4個の独立変数及び温度と2個の反応物の濃度という一次従属変数を持つ連立偏微分移動方程式を解く。他に従属変数として、相変化のある場合の相の濃度及びいくつかの時間、温度、空間座標の関数となる方程式中のいくつかの係数がある。

本解析では、温度を空間座標と時間の計4個の独立変数について解いており、方程式は、通常のベクトル演算子表示を用いると、次のように表わされる(反応物の濃度に関する方程式は省略する)。

$$\rho_c \frac{DT}{Dt} = \rho_c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T + G \quad \dots \quad (1)$$

ここで、

T ; 絶対温度	t ; 時 間
ρ ; 密 度	c ; 比 熱
k ; 热伝導率	\mathbf{v} ; 流速ベクトル
G ; 単位体積当たりの熱生成の場合	

次に境界条件について記す。物質 1 と 2 の間の座標軸 r に垂直な界面における熱収支は、次のように表わすことができる。

$$k_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right)_i = h_i (T_{2,i} - T_{1,i}) = k_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial r} \right)_i \quad \dots \quad (2)$$

$$h_i = h_{i,\theta} + h_{i,e} [(T_{2,i} - T_{1,i})^2]^{p_i/2} + \sigma F(T_{1,i} + T_{2,i}) \times (T_{1,i}^2 + T_{2,i}^2) \quad \dots \quad (3)$$

界面のコンダクタンス h_i の表現は、接触コンダクタンス、自然及び強制対流及びふく射の効果を含んだ一般形である。(3)式において σ は Stefan-Boltzman 定数、F は総括ふく射伝熱形態係数である。

座標 r に垂直な外表面における熱収支は次式のように表わされる。

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_s = U_{s,b} (T_b - T_s) \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここで、 T_b は外部温度、 T_s は表面の温度であり、界面のコンダクタンス $U_{s,b}$ は(3)式と同様に次式によって計算される。

$$U_{s,b} = h_{s,\theta} + h_{s,e} [(T_b - T_s)^2]^{ps/2} + \sigma F_b (T_s + T_b) (T_s^2 + T_b^2) \quad \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5)$$

(2)～(5)式が境界条件となる。

以上の方程式を一般の多次元 Euler 空間に拡張して、微小の要素(element), すなわち節(Node)に分割すると(以下Nodeと記述する)，次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_n}{\partial t} &= \frac{1}{\rho_n C_n V_n} [\sum_k U_{n,k} (T_k - T_n) + \sum_k F_{n,x} (W_{n,k} - W_n) \\ &\quad + \sum_b U_{n,b} (T_b - T_n)] + \frac{G_n}{\rho_n C_n} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \quad (6)$$

ここで、

$$U_{n,k} = \frac{A_{n,k}}{\frac{\Delta r_n}{k_n} + \frac{1}{h_{n,k}} + \frac{\Delta r_k}{k_k}} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \quad (7)$$

また、

\sum_k ; Node n が関係している内部熱接触と流れの接触のすべてについての総和

\sum_b ; Node n が関係している外表面との接触のすべてについての総和

V_n ; Node n の体積

$U_{n,k}$; 伝熱面積 $A_{n,k}$ 、熱流路の距離 Δr_n 、 Δr_k 及び界面のコンダクタンス $h_{n,k}$ をもつて Node n と k が接觸している時の接觸の熱コンダクタンス

$F_{n,k}$; Node n と k の間を流れる流量の割合

$W_{n,k}$; 流れている物質の界面におけるエンタルピー

物質収支は、Node n の密度 ρ_n が変化しないという仮定のもとに成立っている。

TRUMPで解かれる方程式は、上述の方程式において時間微分項 $\partial u / \partial t$ を $(u' - u) / \Delta t$ で置換することにより得られる微小時間ステップに対する方程式である。

2.2 热流動解析コード FLOWNET⁽²⁾の構成

FLOWNETの基礎式は(i)連続式、(ii)運動方程式の2式であり、ノード及びブランチに適用される。

(i) 連続式(ノード i での流れの連続の式)

$$\sum_i W_{i,j} + S_i = 0 \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (8)$$

(ii) 運動方程式(ブランチ $i-j$ での圧力損失の式)

$$\Delta P_{ij} = P_i - P_j \\ = \frac{\bar{\rho}_{ij}}{2g} \left\{ f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}} + K_{ij} + 2\bar{\rho}_{ij}^2 \left(\frac{1}{\rho_j} - \frac{1}{\rho_i} \right) \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

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。ここで、

W_{ij} ; ブランチ $i j$ の流量

\bar{v}_{ij} ; ブランチ $i j$ での平均流速

S_i ; ノード i での湧出量

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

$\bar{\rho}_{ij}$; ブランチ $i j$ の出入口平均の流体密度

ρ_i ; ブランチ i の入口の流体密度

ρ_j ; 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

ノード圧力、ブランチ流量は(8), (9)からノード圧力 P に関する非線形の連立方程式を解いて求める。 $v_{ij} = W_{ij} / \bar{\rho}_{ij} A_{ij}$ の関係を用いて(9)式の v_{ij} を消去し、次のように流量に関する一次方程式で表わす。

$$R_{ij} = \left\{ \left(f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}} + K_{ij} \right) / 2 \tilde{\rho}_{ij} + \left(\frac{1}{\rho_j} - \frac{1}{\rho_i} \right) \right\} \frac{|W_{ij}|}{g A_{ij}^2} \quad \dots \quad (11)$$

ここで、 A_{ij} はブランチ $i j$ の流路断面積である。

(10)式の W_{1j} を(8)式に代入することにより、次式のノード圧力に関する連立方程式が得られる。

$$\sum_i \frac{P_i}{R_{ii}} - P_i \sum_i \frac{1}{R_{ii}} + S_i = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

この連立方程式を流量に依存する係数を再評価しながら反復計算を行い、ノード圧力及びブランチ流量Wの収束値を求める。

2.3 FLOWNETとTRUMPの結合

前述のように、FLOWNETは流路ネットワークの流量配分を解析し、TRUMPは伝熱を解

析するコードである。FLOWNET/TRUMPでは、この2つのコードを第2.1図に示すように結合し、伝熱・流動の連成解析を行っている。

① 収束条件

本コードの計算は第2.1図に示したように圧力、流量配分計算と伝熱計算に分割され、流量配分計算から流量及び熱伝達率を計算し、その後で伝熱計算から温度を計算する。流量配分計算と伝熱計算の両者で別々に収束計算を行い、その後、流量配分計算、伝熱計算相互の収束をとるため、もう一度流量配分の収束判定（外側収束判定）を行っている。

外側収束判定条件は以下のとおりである。

$$\text{Max} |W_{\text{old}} - W_{\text{new}}| < \epsilon_1$$

$$\text{Max} |(\sum_j W_{\text{new}} - \sum_j W_{\text{old}}) / \sum_j W_{\text{old}}| < \epsilon_2$$

W_{old} : 外側反復計算における前回の流量

W_{new} : 外側反復計算における今回の流量

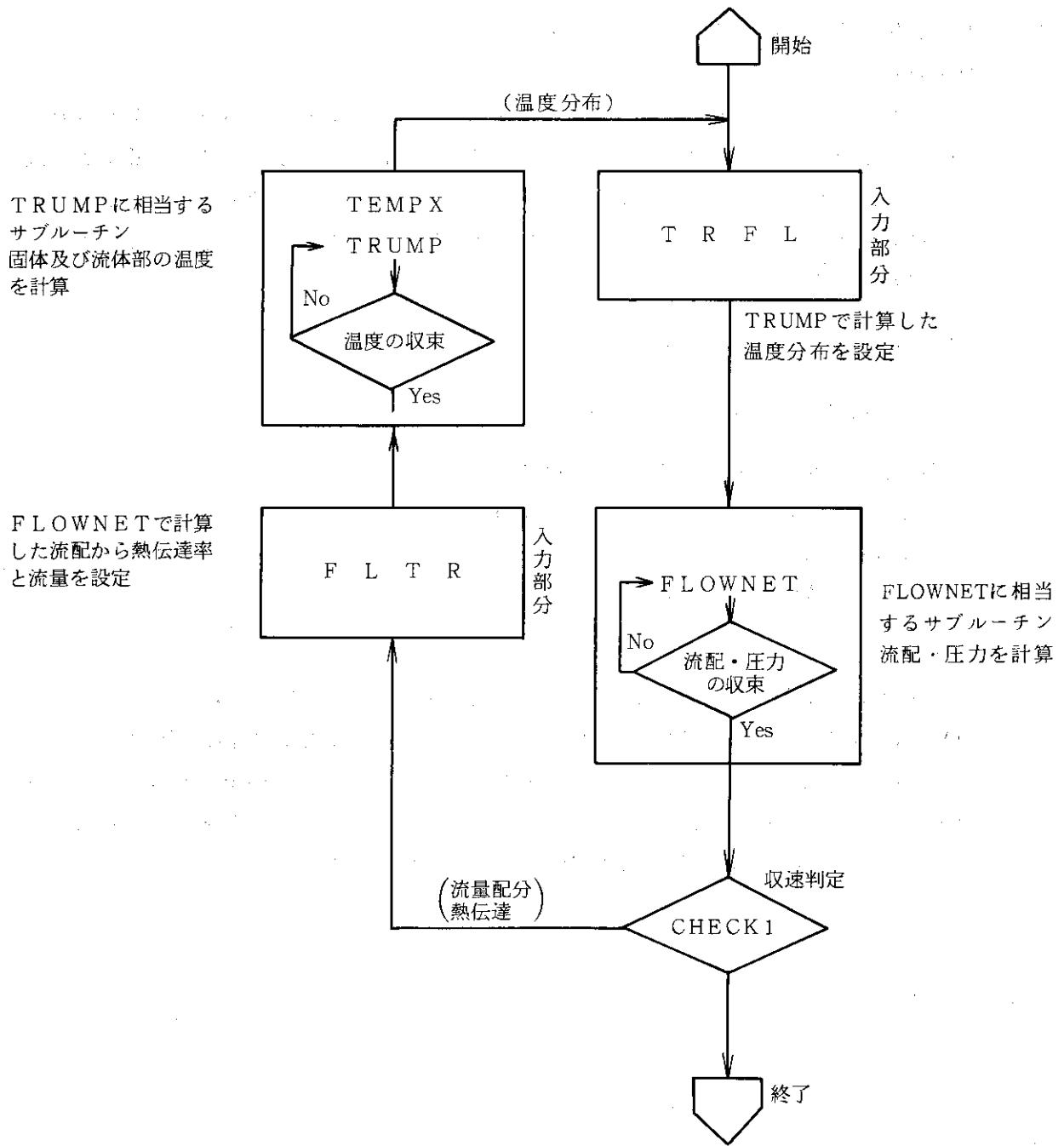
ϵ_1, ϵ_2 : 収束判定値

j : 流路ブランチ数

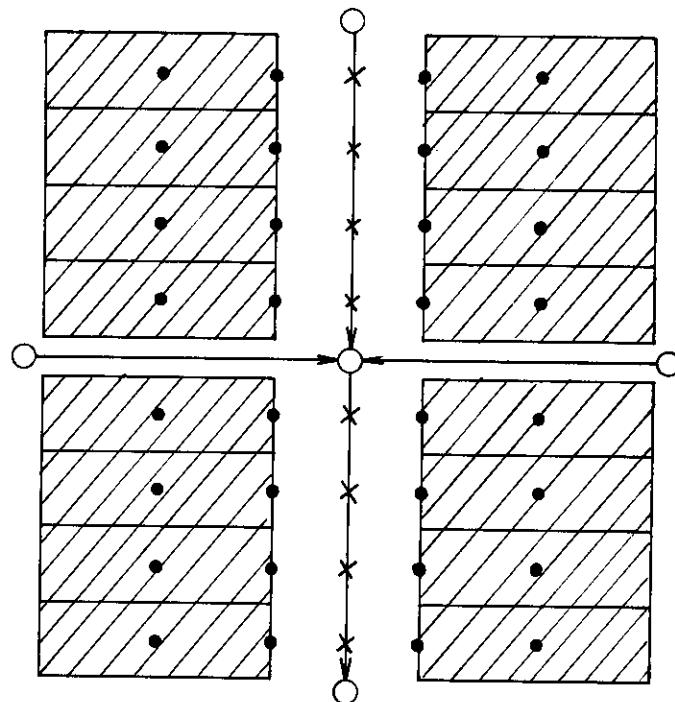
② 計算モデル

FLOWNET/TRUMPでは、FLOWNET及びTRUMP両方のモデルを必要とする。

FLOWNETのモデルは、1次元の流路ブランチとその合流点を示す節点（圧力ノードと呼ぶ）から成る流路ネットワークを形成するものである。TRUMPのモデルは伝熱計算を実施する対象領域（流路部を含む）を有限体積で分割した要素からなるモデルである。第2.2図に典型的なFLOWNET/TRUMPの解析モデルを示す。



第 2.1 図 解析コード FLOWNET/TRUMP のフロー図



○：FLOWNET圧力ノード

→：流 路

○：TRUMP要素

×：TRUMP流体ノード

第2.2図 FLOWNET/TRUMPの基本解析モデル図

3. H E N D E L - T_{1-M} 実験と主要実験結果

3.1 実験装置の概要⁽³⁾

日本原子力研究所では、従来から原子炉出口冷却材温度 950°C の多目的高温ガス炉の開発を進めてきており、高温下で使用する黒鉛ブロック燃料体、炉床部構造物、炉心拘束機構、高温配管、弁類等の原子炉の構成機器の実炉とは同じ熱流動条件下での性能確認及び安全性確認のため大型構造機器実証試験装置 (Helium Engineering Demonstration Loop ; HENDEL) を建設し実証試験を行ってきてている。

第 3.1 図に HENDEL の系統図を示す。本装置は図に示すように試験部へ高温の He ガスを供給する系統である M₁ 部と試験部である T₁ 試験部とから成っている。さらに、T₁ 試験部は、第 3.1 図に示すように、T_{1-S}^③ と T_{1-M}^④ から構成されている。ガス循環機①を出た He ガスは、加熱器②により試験条件に応じた温度にまで昇温された後、オリフィス型流量計を経て試験部に流入する。試験部において最高 1,000°C にまで加熱された He ガスは、圧力容器に内蔵された加圧水型冷却器⑥をへて循環機に戻る。

多チャンネル試験装置の構造を、第 3.2 図に示す。模擬燃料カラムは、第 3.3 図に示す模擬ブロック①を合計 11 段（燃料ブロック 7 段 + 上部／下部可動反射体ブロック各 2 段）積み重ね 12 本の燃料插入孔に模擬燃料棒②を挿入したものである。He ガスは、内径 5.3 mm の燃料插入孔と外径 4.6 mm の模擬燃料棒の間の環状流路③（等価直径 $D_e = 7 \text{ mm}$ ）内を下向きに流れながら加熱される。模擬ブロックの外周には、模擬燃料カラムの支持と模擬燃料カラムと補償ヒータブロック⑥の隙間の充填を兼ねた金属側部ブロック⑤が配置されている。補償ヒータブロックは、コージライト製の断熱ブロックにカントリ線のヒータエレメントを巻き付けたもので、さらにその外側に繊維状断熱材、金属ケーシングが設置されている。ヒータは、半径方向に 2 分割、軸方向に 9 分割され、合計 18 回路から構成されている。同ヒータの出力は模擬ブロック表面温度と断熱ブロック温度が等しくなるように自動制御され、半径方向への熱損失の低減化を図っている。

模擬燃料棒は、既報⁽⁴⁾の試験に使用した模擬燃料棒と同じ中温試験用模擬燃料棒である。同模擬燃料棒は、ニクロム合金を発熱体とした金属シースヒータの外側を黒鉛スリーブで覆ったものである。黒鉛スリーブは合計 7 本使用し、1 本の寸法は長さ 570 mm、外径 4.6 mm で、その表面にはスペーサリブが軸方向及び周方向にそれぞれ 3 個所取り付けられている。発熱体は、長さ 530 mm のニクロム合金製のコイルを Ni 製の接続電極により 7 本連結したものである。発熱体と金属シースの間には、絶縁材の窒化ホウ素が充填されている。本模擬燃料棒の軸方向熱流束分布はほぼ均一である。

計測点の配置を第 3.4 図に示す。模擬燃料棒の黒鉛スリーブ表面には、各段の上端から 410 mm の位置に表面（伝熱面）温度計測用の K 型熱電対 T_w が設置されている。さらに模擬燃料棒の上部リードには、流路入口 He ガス温度計測用熱電対 T_g が固定されている。黒鉛ブロック温

度 T_b は第 3.4 図の右上図に示すように、上端より 285 mm の位置において 6 角ブロックの頂点 A 及び B の 2 点、上端より 410 mm の位置において C 点に設置した K 型熱電対により計測する。さらに加熱部第 2 段目では、上端より 410 mm の位置においてブロック内部温度分布を測定するために、D～H 点に熱電対を追加した。また最下段の黒鉛ブロックには、流路出口における He ガスの温度 T_a 及び流速 u を測定するための熱電対とピトー管が設置されている。

3.2 主要な実験結果⁽⁴⁾

多チャンネル試験装置には、模擬燃料棒 1 本ごとに SCR 方式の入力制御装置が備えられており、独立して 0～100 kW の範囲で任意の電力を設定することが可能である。これを用いてカラム内の特定の流路（ここでは No. 6 チャンネル）に挿入された模擬燃料棒の発熱量を変化させた不均衡出力分布実験と、HTTR 炉心における出力分布を模擬した均一出力分布実験の 2 種類の実験を行った。

不均衡出力分布実験は、黒鉛ブロックを介しての熱移動量、あるいは水平断面内の温度分布のひずみが He ガスの流量配分に及ぼす影響を定性的に把握するとともに、前述した数値解析コードの妥当性を評価することを主な目的とした試験である。したがって、水平断面内の出力分布は意図的に極端にひずませたものであり、HTTR 炉心における出力分布を再現させたものではない。

解析では、12 チャンネル全てが均等の出力分布となっている均一出力分布実験と No. 6 チャンネルの出力を零とした不均衡出力分布実験の 2 つを対象とした。

本解析で対象とした実験の試験条件を第 3.1 表に示す。

① 不均衡出力分布実験結果

第 3.2～3.4 表に、不均衡出力分布実験結果を示す。第 3.2 表には、全流量、チャンネル平均流量、出入口温度、出入口圧力、出入口の平均レイノルズ数と、各チャンネルに対する流量、出力、出入口温度、出入口レイノルズ数を示すとともに、燃料ブロックの表面及び内部温度を示す。

また第 3.3 表にはチャンネル 1, 6 (非加熱)、第 3.4 表にはチャンネル 8, 12 の実験データを各々示してある。

② 均一出力分布実験

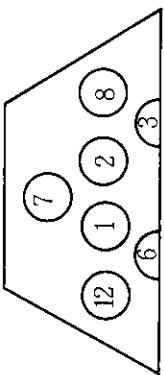
第 3.5～3.7 表に均一出力分布実験結果を示す。第 3.5 表には、全流量、チャンネル平均流量、出入口圧力、出入口温度、出入口の平均レイノルズ数と、各チャンネル毎の流量、出力、出入口温度、出入口レイノルズ数を示す。第 3.6 表にはチャンネル 8 の、第 3.7 表にはチャンネル 1, 2 の実験データが各々示してある。

第3.1表 解析ケースと主要試験条件

ケース	チャンネル出力分布	入口圧力	入ガス温度	出ガス温度	入口レイノルズ数
1	不平衡出力分布*1	3.87 MPa	約 275°C	約 600~670°C	約 4500
2	均一出力分布*2	2.95 MPa	約 260°C	約 780°C	約 6600

*1 №6 チャンネル 0 kW, その他のチャンネル 約 21 kW

*2 各チャンネル 約 40 kW



(チャンネル位置)

第3.2表 不平衡出力分布実験の結果一覧（その1）

Total flow rate = 124.00 (g/s)
 Inlet temperature = 274.5 (°C)
 Inlet pressure = 3.87 (Mpa)
 Inlet Reynolds no. = 4480

Average flow rate = 10.33 (g/s)
 Outlet temperature = 651.5 (°C)
 Outlet pressure = 3.87 (Mpa)
 Outlet Reynolds no. = 3143

	Wm g/s	Q kW	Tin °C	Tout °C	Rein	Reout
Ch# 1	10.30	21.38	278.9	647.4	4443	3142
Ch# 2	10.35	21.41	277.9	660.9	4471	3125
Ch# 3	10.22	21.26	274.5	663.8	4435	3080
Ch# 4	9.99	21.60	275.8	661.3	4324	3016
Ch# 5	10.31	21.41	278.3	647.7	4448	3142
Ch# 6	11.25	.08	271.6	605.9	4892	3537
Ch# 7	10.46	21.34	265.9	658.5	4586	3164
Ch# 8	10.17	21.30	269.6	666.3	4436	3056
Ch# 9	10.05	21.60	278.7	667.2	4334	3018
Ch#10	10.28	21.56	273.8	656.8	4461	3113
Ch#11	10.27	21.56	276.4	641.6	4441	3145
Ch#12	10.35	21.49	273.0	640.0	4495	3172

Graphite block temperature (°C)									
	Upper	1	2	3	4	5	6	7	Bottom
Surface	270.2	301.2	360.9	420.4	476.5	533.9	589.5	645.4	658.7
at 285mm	272.5	297.6	353.8	408.2	467.3	521.6	574.6	626.3	648.2
Inner	---	302.4	353.1	403.0	455.0	508.8	560.6	611.4	---
at 410mm	---	---	361.1	---	---	---	---	---	---
	---	---	353.8	---	---	---	---	---	---
	---	---	355.3	---	---	---	---	---	---
	---	---	355.4	---	---	---	---	---	---
	---	---	351.3	---	---	---	---	---	---

第3.3表 不平衡出力分布実験の結果一覧（その2）

### Run #0719 ### Channel No. 1 ### 1984 3 /11 14:58			
Flow rate	= 10.30 (g/s)	Electric input	= 21.38 (kW)
Inlet temp.	= 278.9 (*C)	Outlet temp.	= 647.4 (*C)
Inlet press.	= 39.49 (kg/cm ² .abs)	Outlet press.	= 39.48 (kg/cm ² .abs)
Inlet Reynolds No.	= 4443	Outlet Reynolds No.	= 3142
Block No.	1	2	3
X / De	54.7	136.1	217.5
Power (kW)	3.06	3.07	3.06
Qrad (kW)	.202	.279	.314
Qcon (kW)	2.86	2.79	2.75
Pin temp. (*C)	389.4	450.2	495.6
Bulk temp. (*C)	318.1	370.9	423.7
Outer temp. (*C)	299.4	357.4	414.3
Velocity (m/s)	5.9	6.5	7.0
Reynolds No.	4242	4084	3797
H(kcal/m ² .h.C)	462.8	403.8	439.3
Nusselt No.	15.35	12.52	12.89
	299.0	380.4	461.8
	3.06	3.06	3.04
	.318	.343	.377
	591.0	641.6	692.5
	529.3	581.9	633.8
	527.8	582.1	635.9
	8.1	8.6	9.1
	3449	3303	3174
	505.1	518.6	506.4
	13.61	13.44	12.35
	13.25	12.36	

### Run #0719 ### Channel No. 6 ### 1984 3 /11 14:58			
Flow rate	= 11.25 (g/s)	Electric input	= .08 (kW)
Inlet temp.	= 271.6 (*C)	Outlet temp.	= 605.9 (*C)
Inlet press.	= 39.49 (kg/cm ² .abs)	Outlet press.	= 39.47 (kg/cm ² .abs)
Inlet Reynolds No.	= 4892	Outlet Reynolds No.	= 3537
Block No.	1	2	3
X / De	54.7	136.1	217.5
Power (kW)	.01	.01	.01
Qrad (kW)	-.047	-.142	-.239
Qcon (kW)	.06	.15	.25
Pin temp. (*C)	281.8	307.4	348.0
Bulk temp. (*C)	306.6	354.1	402.2
Outer temp. (*C)	299.4	357.4	414.3
Velocity (m/s)	6.4	6.9	7.4
Reynolds No.	4690	4450	4233
H(kcal/m ² .h.C)	-26.9	-37.4	-53.1
Nusselt No.	-.90	-1.19	-1.60
	297.3	449.2	501.7
	-.346	-.454	-.570
	.46	.58	.69
	527.8	582.1	635.9
	8.4	9.0	9.5
	3867	3711	3572
	-108.2	-149.4	-224.7
	-2.21	-2.97	-3.93
	-3.93	-5.66	

第3.4表 不平衡出力分布実験の結果一覧（その3）

# ## Run #0719		Channel No. 8		# ## 1984 3 / 11 14:58			
Flow rate	= 10.17 (g/s)			Electric input	= 21.30 (kW)		
Inlet temp.	= 269.6 (°C)			Outlet temp.	= 666.3 (°C)		
Inlet press.	= 39.49 (kg/cm ² .abs)			Outlet press.	= 39.48 (kg/cm ² .abs)		
Inlet Reynolds No.	= 4436			Outlet Reynolds No.	= 3056		
Block No.	1	2	3	4	5	6	7
X / De	55.0	136.4	217.8	299.2	380.7	462.1	543.5
Power (kW)	3.06	3.05	3.06	3.06	3.04	3.04	2.99
Qrad (kW)	.205	.266	.336	.423	.494	.552	.629
Qcon (kW)	2.85	2.79	2.73	2.64	2.54	2.49	2.36
Pin temp. (°C)	389.0	446.5	502.6	559.9	611.3	660.6	711.2
Bulk temp. (°C)	311.7	368.6	425.7	482.6	539.3	595.9	651.7
Outer temp. (°C)	299.4	357.4	414.3	471.9	527.8	582.1	635.9
Velocity (m/s)	5.8	6.4	7.0	7.6	8.1	8.6	9.2
Reynolds No.	4218	3963	3739	3546	3375	3224	3089
H(kcal/m ² .h.C)	422.4	411.6	409.3	390.3	484.1	442.5	450.5
Nusselt No.	14.10	12.81	11.98	10.75	10.60	11.20	10.85

# ## Run #0719		Channel No. 12		# ## 1984 3 / 11 14:58			
Flow rate	= 10.35 (g/s)			Electric input	= 21.49 (kW)		
Inlet temp.	= 273.0 (°C)			Outlet temp.	= 640.0 (°C)		
Inlet press.	= 39.49 (kg/cm ² .abs)			Outlet press.	= 39.48 (kg/cm ² .abs)		
Inlet Reynolds No.	= 4495			Outlet Reynolds No.	= 3172		
Block No.	1	2	3	4	5	6	7
X / De	55.0	136.5	217.9	299.3	380.7	462.2	543.6
Power (kW)	3.08	3.10	3.06	3.09	3.06	3.05	3.04
Qrad (kW)	.207	.261	.289	.277	.300	.315	.317
Qcon (kW)	2.87	2.84	2.77	2.82	2.76	2.74	2.72
Pin temp. (°C)	388.9	444.0	491.3	533.1	585.8	633.0	680.3
Bulk temp. (°C)	311.8	364.6	417.2	469.9	522.4	574.6	626.4
Outer temp. (°C)	299.4	357.4	414.3	471.9	527.8	582.1	635.9
Velocity (m/s)	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.6	9.1
Reynolds No.	4291	4048	3836	3651	3484	3336	3205
H(kcal/m ² .h.C)	424.9	407.1	431.3	511.2	504.6	540.2	575.6
Nusselt No.	14.06	12.73	12.74	14.31	13.56	13.85	14.19

第 3.5 表 均一出力分布実験結果一覧（その 1）

Total flow rate = 177.96 (g/s)
 Inlet temperature = 256.4 (°C)
 Inlet pressure = 2.95 (Mpa)
 Inlet Reynolds no. = 6577
 $Q_{plus} = 1.04E-03$

Average flow rate = 14.83 (g/s)
 Outlet temperature = 781.9 (°C)
 Outlet pressure = 2.94 (Mpa)
 Outlet Reynolds no. = 4119

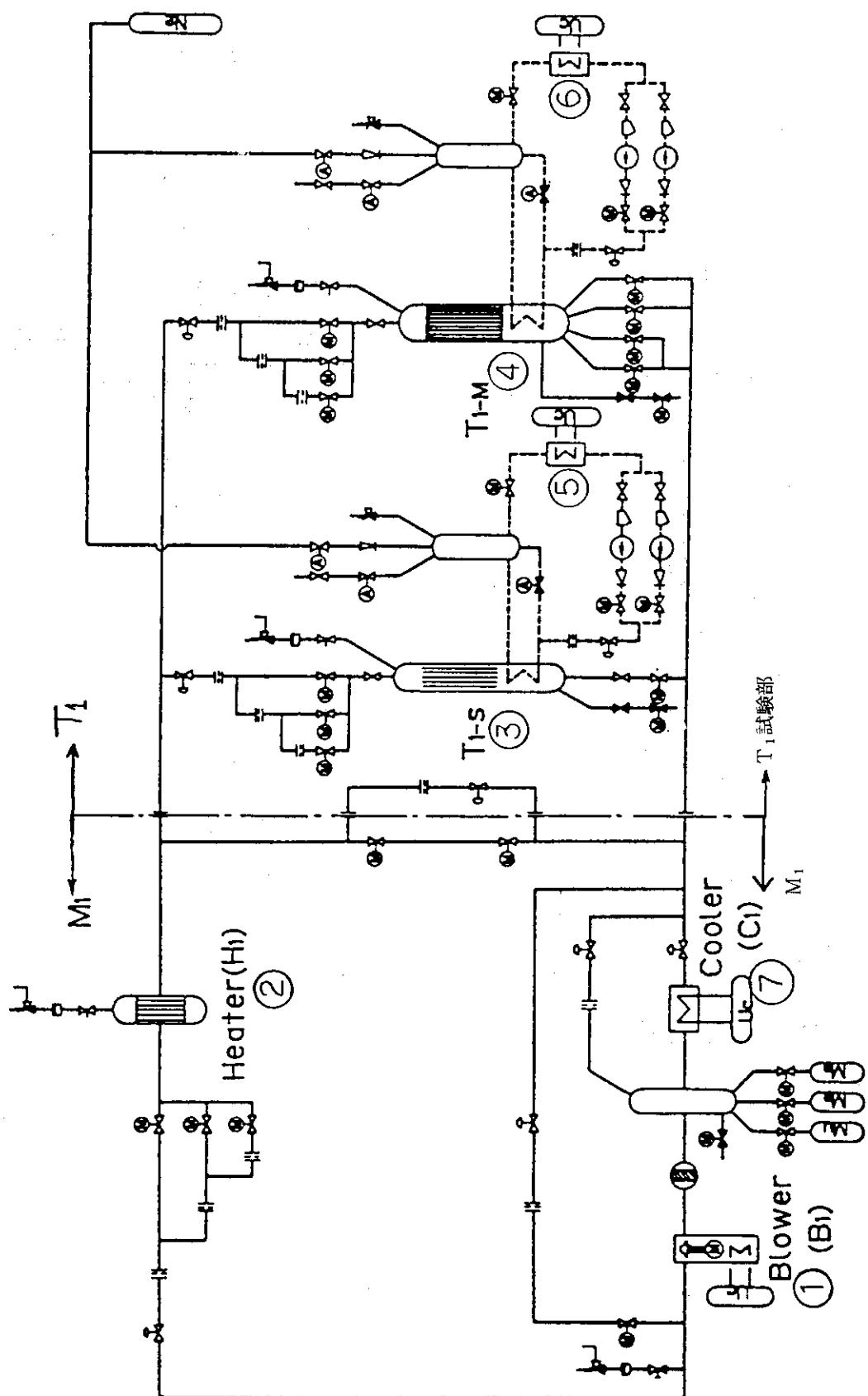
	Wm g/s	Q kW	Tin °C	Tout °C	Rein	Reout
Ch# 1	14.90	39.78	259.7	781.6	6581	4141
Ch# 2	14.94	39.85	258.3	780.8	6612	4153
Ch# 3	14.88	39.77	256.4	781.9	6601	4132
Ch# 4	14.73	39.95	257.8	783.3	6521	4089
Ch# 5	14.71	39.85	258.6	781.7	6502	4086
Ch# 6	14.69	39.78	254.7	782.3	6527	4078
Ch# 7	14.87	39.75	250.9	781.7	6644	4131
Ch# 8	14.95	39.77	253.5	780.6	6655	4154
Ch# 9	14.78	40.00	259.7	783.8	6528	4100
Ch#10	14.88	39.99	255.3	780.8	6606	4136
Ch#11	14.73	39.97	256.9	782.7	6529	4091
Ch#12	14.91	39.90	255.1	781.5	6622	4142

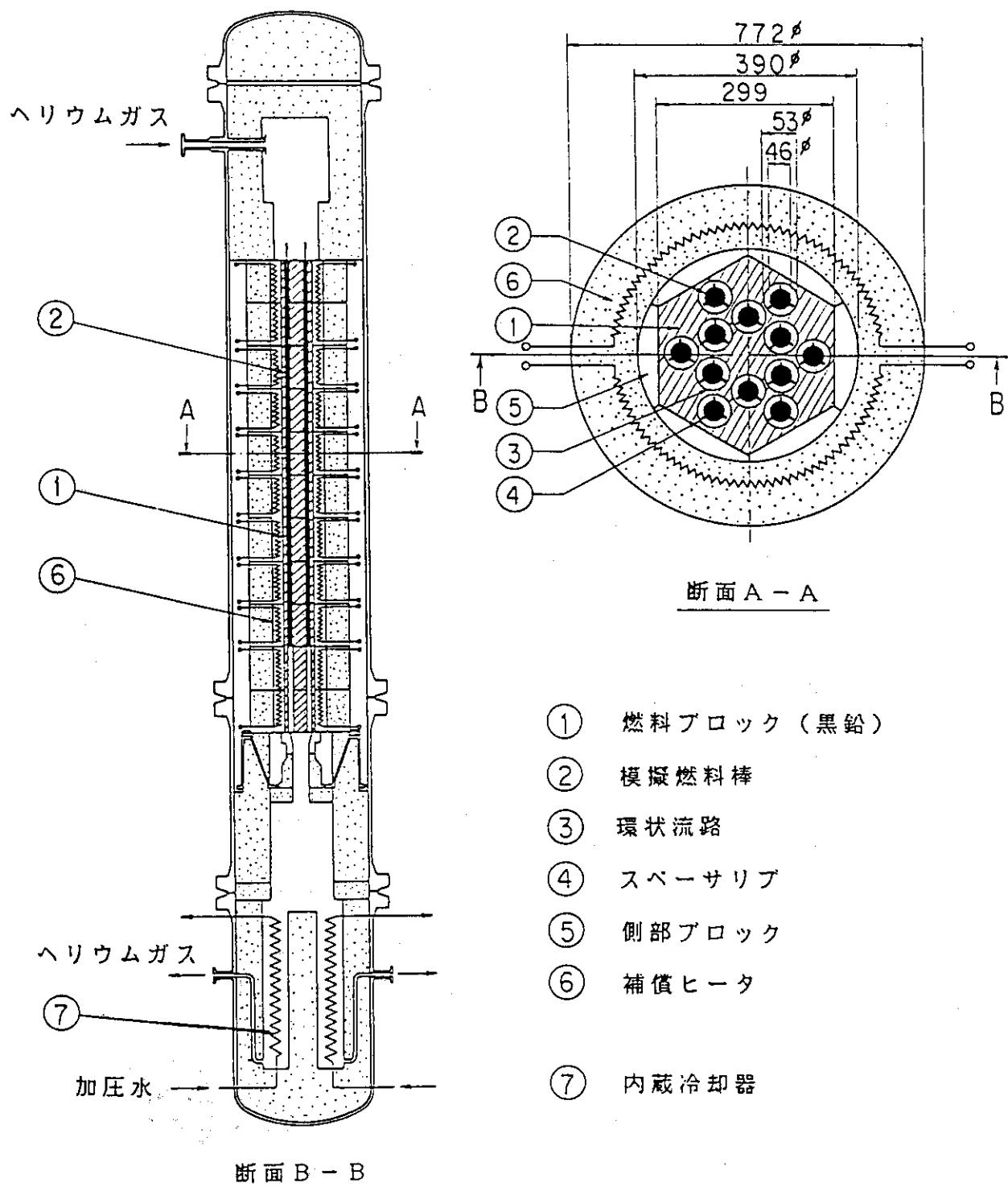
第3.6表 均一出力分布実験結果一覧(その2 - №8チャンネル)

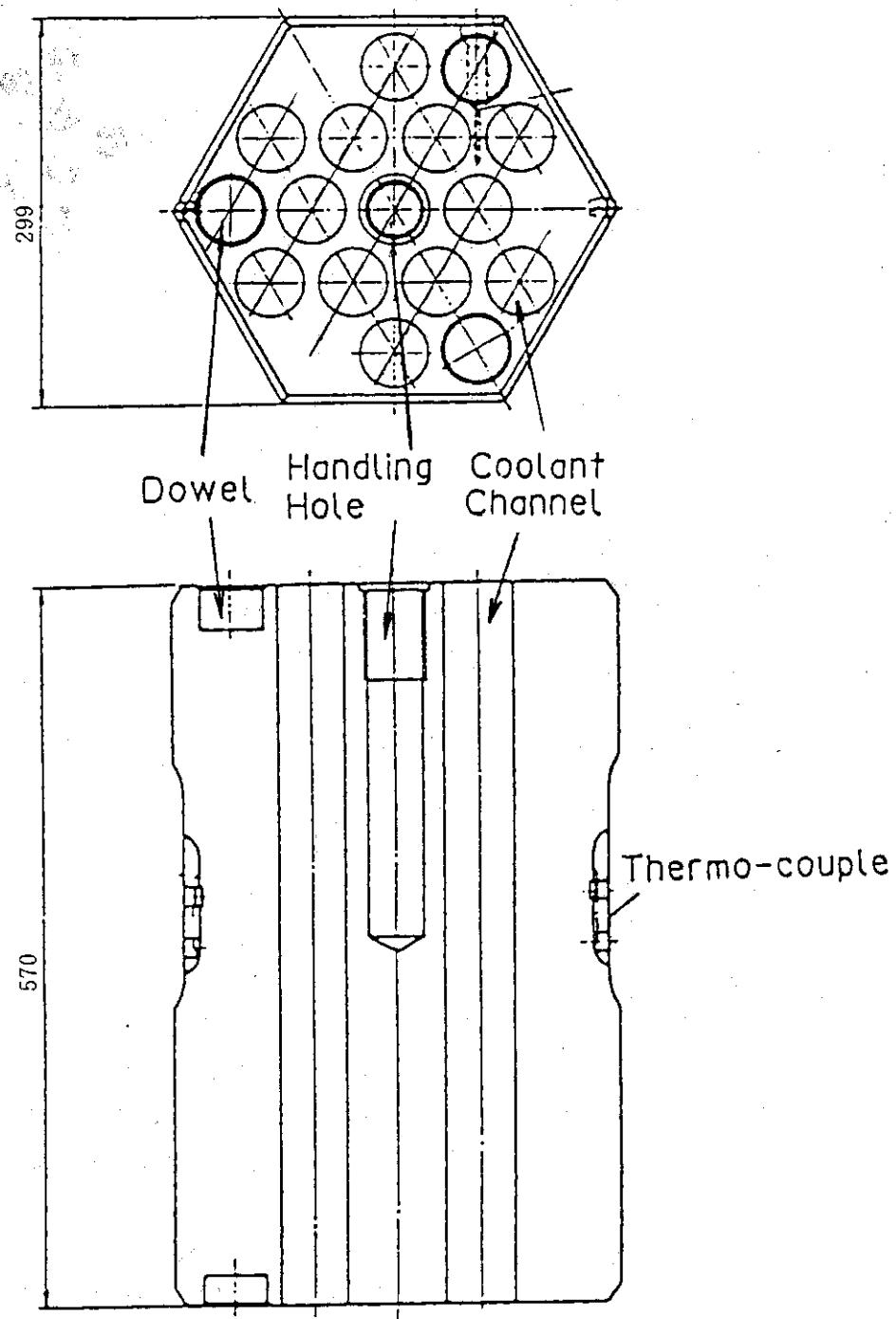
#		Run No. 06P052		## Channel No. 8			
Flow rate	= 14.95 (g/s)			Electric input = 39.77 (kW)			
Inlet temp.	= 253.5 (°C)			Outlet temp. = 780.6 (°C)			
Inlet press. = 30.05 (kg/cm ² .abs)				Outlet press. = 30.01 (kg/cm ² .abs)			
Inlet Reynolds No. = 6655				Outlet Reynolds No. = 4154			
Block No.	1	2	3	4	5	6	7
X / De	55.0	136.4	217.8	299.2	380.7	462.1	543.5
Power (kW)	5.67	5.66	5.68	5.71	5.69	5.73	5.64
Qrad (kW)	.297	.416	.535	.667	.766	.861	.935
Qcon (kW)	5.38	5.24	5.14	5.04	4.92	4.86	4.71
Pin temp. (°C)	412.5	489.0	560.5	633.8	700.3	768.9	834.3
Bulk temp. (°C)	309.1	384.2	459.5	534.8	610.3	686.1	761.0
Block temp. (°C)	286.3	364.1	442.3	522.7	600.4	677.0	753.1
Velocity (m/s)	11.1	12.6	14.1	15.6	17.0	18.3	19.9
H(kcal/m ² ·h·°C)	595.7	575.3	588.1	581.7	625.8	676.0	729.3
Reynolds No.	6219	5731	5323	4981	4685	4436	4207
Musselt No.	19.96	17.61	16.66	15.29	15.51	16.03	16.34

第3.7表 均一出力分布実験結果一覧（その3 - №12チャンネル）

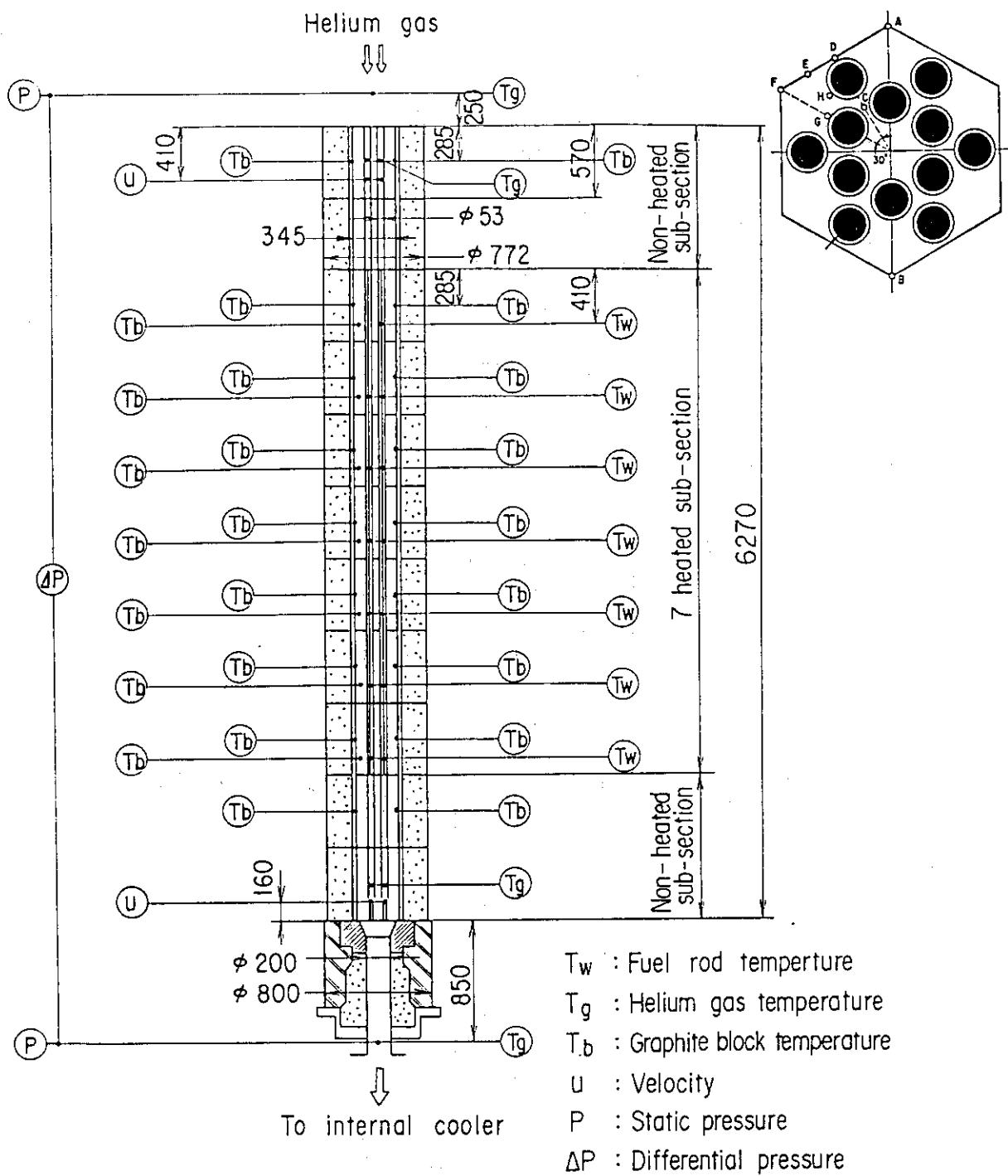
#	Run No.	06PR052	#	Channel No. 12	
Flow rate	=	14.91 (g/s)			Electric input = 39.90 (kW)
Inlet temp.	=	255.1 (°C)			Outlet temp. = 781.5 (°C)
Inlet press.	=	30.05 (kg/cm ² .abs)			Outlet press. = 30.01 (kg/cm ² .abs)
Inlet Reynolds No.	=	6622			Outlet Reynolds No. = 4142
Block No.		1		2	3
					4
X / D _e		55.0		136.5	217.9
Power (kW)		5.68		5.71	5.65
Q _{rad} (kW)		.312		.416	.505
Q _{con} (kW)		5.37		5.38	5.14
Pin temp. (°C)		415.5		487.1	554.4
Bulk temp. (°C)		310.5		385.6	460.6
Block temp. (°C)		286.3		364.1	442.3
Velocity (m/s)		11.2		12.6	14.8
H(kcal/m ² .h.°C)		583.8		594.2	631.3
Reynolds No.		6192		5705	5303
Nusselt No.		19.36		18.16	17.88
					18.89
					16.83
					16.03
					16.42
					19.7
					729.7
					729.1
					4417
					4196

第3.1図 HENDEL T₁試験装置の概要

第3.2図 T_{1-M}多チャンネル試験装置構造図



第3.3図 模擬ブロックの構造

第3.4図 T_{1-M} 試験装置における計測点

4. 解析モデルと解析条件

4.1 解析モデル

HENDEL T_{1-M} 実験の解析のための FLOWNET/TRUMP の解析モデルを第 4.1 図に示す。解析モデルは模擬燃料カラムの対称性を考慮して、燃料カラムの半分を解析の対象としている。

第 4.1 図の左側に FLOWNET 部分に相当する流路ネットワークモデルを示し、右側に TRUMP 部分に相当する伝熱モデルのメッシュ図を示している。流路ネットワークモデルでは模擬燃料ブロックの積層面間でのクロス流れが扱えるようになっている。伝熱モデルのメッシュの取り方の妥当性については付録 1 に示す検討から確認した上で、メッシュの取り方を決めた。

伝熱モデルの取扱いは以下のようにしている。

- ① 模擬燃料棒と模擬燃料体ブロックの冷却材流路内面との間に輻射伝熱を考慮する。
- ② 模擬燃料体ブロックの軸方向の伝熱量は、付録 2 に示すように径方向伝熱量に比べて小さいので、本解析モデルでは軸方向の伝熱を考慮しない。また、非発熱部である模擬燃料体ブロックの 1 段目と 2 段目は考慮しないこととする。
- ③ 模擬燃料体ブロックの軸方向の伝熱モデルを第 4.2 図から第 4.5 図に示す。模擬燃料体の 3 ~ 9 段目が有効発熱部に相当するブロックである。この部分では第 4.2 図に示すように軸方向にメッシュを 4 としている。第 4.5 図に平面メッシュを示す。平面メッシュの取り方は軸方向にどのブロックに対しても同一である。

4.2 解析条件

- ① 流路部の境界条件としての圧力、温度及び流量条件

i) 不平衡出力分布実験

$$\text{流路入口部圧力} = 39.474 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{流路入口部温度} = 274.5^\circ\text{C}$$

$$\text{流路入口での流量} = 62.09/\text{s} \text{ (6 流路相当分)}$$

ii) 均一出力分布実験

$$\text{流路入口部圧力} = 30.05 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{流路入口部温度} = 256.4^\circ\text{C}$$

$$\text{流路入口での流量} = 89.359/\text{s} \text{ (6 流路相当分)}$$

- ② 模擬燃料体ブロックの境界条件

外周部断熱

- ③ 熱伝達相関式

模擬燃料体ブロックの環状流路についての熱伝達率の評価式として次式を用いる。

$$N_u = \frac{h(D_o - D_i)}{k} = 0.018 \left(\frac{D_i}{D_o} \right)^{-0.16} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot \left(\frac{T_w}{T_b} \right)^{-0.5}$$

また、感度解析として係数が 0.018 の代りに 0.020 の場合についても調べることとした。

ここで、
h : 热伝達率

k : 热伝導率

D_o : 环状流路外径

D_i : 环状流路内径

Re : レイノルズ数

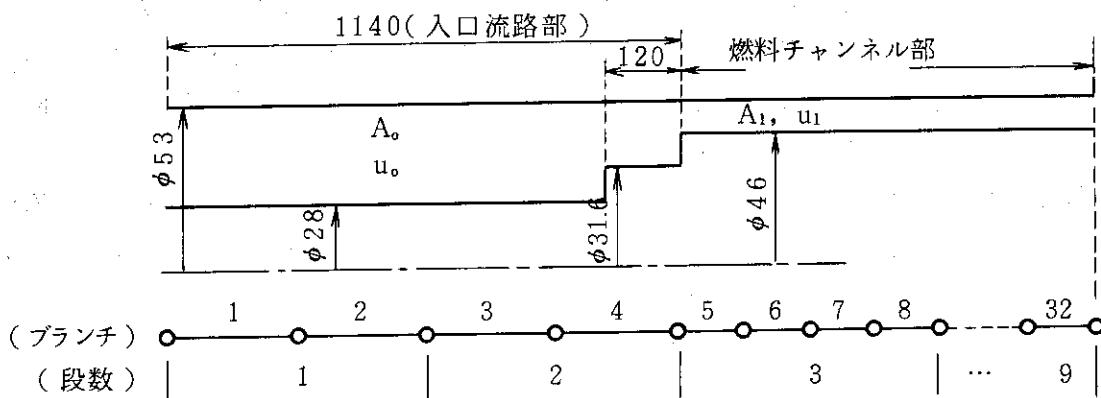
Pr : プラントル数

T_b : 冷却材バルク温度

T_w : 固体壁面温度

④ 圧力損失評価式

i) 入口流路部及び燃料チャンネル部



1) 入口流路部

$$\Delta P_{in} = (1.42) \frac{\rho_{in} u_0^2}{2g} + (0.316 Re_o^{-0.25}) \frac{1.14}{0.025} \cdot \frac{\rho_{in} u_0^2}{2g} + (4.303 Re_1^{-0.112}) \frac{\rho_{in} u_1^2}{2g}$$

2) 燃料チャンネル部

燃料チャンネル (3 ~ 9 段部) の形状圧損

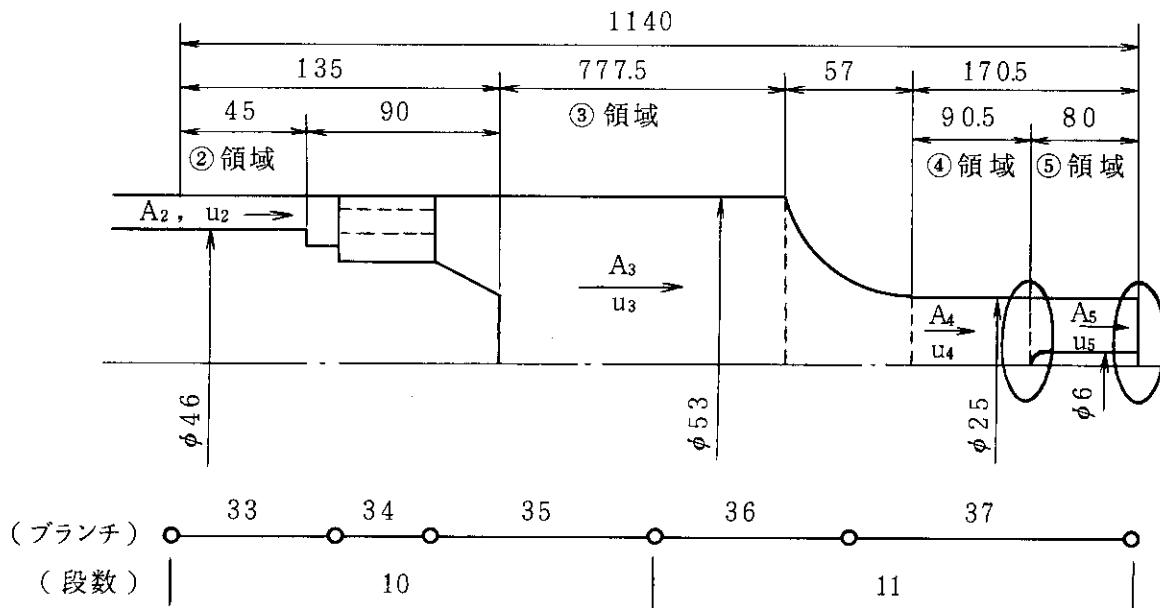
スペーサーリブ ; $k_{sr} = 2.5 Re^{-0.25}$

燃料体 1 段についてはリブは 3 個あるので $k_s = 7.5 Re^{-0.25}$

チャンネルオフセット ; ダウエルのガタ $\theta = 0.1\text{mm}$ では $K \sim 0$

*摩擦損失については、第 4.4 表流路用データ参照

ii) 出口流路部



$$\Delta P = \underbrace{(0.316 Re_2^{-0.25})}_{②} \cdot \frac{0.045}{0.007} \cdot \frac{\rho_0 u_2^2}{2g} + (33256 \cdot Re_2^{-1.483}) \cdot \frac{\rho_0 u_2^2}{2g}$$

$$+ \underbrace{(0.316 Re_3^{-0.25})}_{③} \cdot \frac{0.7775}{0.053} \cdot \frac{\rho_0 u_3^2}{2g} + (1.0) \cdot \frac{\rho_0 u_3^2}{2g}$$

$$+ \underbrace{(0.316 Re_4^{-0.25})}_{④} \cdot \frac{0.0905}{0.025} \cdot \frac{\rho_0 u_4^2}{2g} + (1.02) \cdot \frac{\rho_0 u_4^2}{2g}$$

$$+ \underbrace{(0.316 Re_5^{-0.25})}_{⑤} \cdot \frac{0.080}{0.019} \cdot \frac{\rho_0 u_5^2}{2g} + (2.0) \cdot \frac{\rho_0 u_5^2}{2g}$$

以下に、②～⑤の領域の面積、長さ、等価水力直径及び速度を示す。

	② 領 域	③ 領 域	④ 領 域	⑤ 領 域
A (m ²)	$(0.053^2 - 0.046^2) \pi / 4$	$0.053^2 \pi / 4$	$0.025^2 \pi / 4$	$(0.025^2 - 0.006^2) \pi / 4$
Z (m)	0.045	0.7775	0.0905	0.08
D _h (m)	$0.053 - 0.046 = 0.007$	0.053	0.025	0.019
u (m/s)	$u_2 = W / \rho_{out} A_2$	$u_3 = W / \rho_{out} A_3$	$u_4 = W / \rho_{out} A_4$	$u_5 = W / \rho_{out} A_5$

4.3 計算データ

① 各部の熱伝導率

使用する各部の熱伝導率を表 4.1 表に示す。

② 発熱データ

不平衡出力分布実験の各部の発熱量をチャンネルと段数に分けて第 4.2 表に、均一出力分布実験の場合を第 4.3 表に示す。

③ 流路用データ

流路用データとして、第 4.4 表に(a)冷却材流路外径の実測値、(b)模擬燃料棒外径（スリープ外径）、(c)FLOWNET 入力データ用計算式及び(d)FLOWNET 入力データを示す。

第 4.1 表 各部の熱伝導率

i) 模擬燃料ブロック ; IG-11

第 4.6 図参照

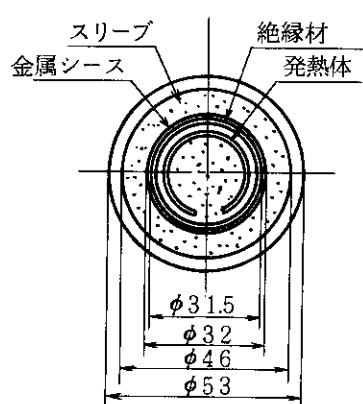
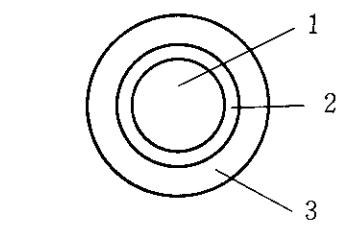
ii) 模擬燃料棒 (3 ~ 9 段目)

1 部 ; [絶縁材 + 発熱体]
 BN NCH-1

500 (kcal/m h °C)

* 1 の部分に均等発熱を与えたときに絶縁材部
が実際に近い等温となるように熱伝導率を適當
に大きく設定した。実際の構造寸法については
左下図参照。

2 部 ; [絶縁材 + ヒータシース + 間隙]
 BN インコネル600相当 He



温度	BN	インコネル600	He	等価熱伝導率
200	26.1	15.0	0.184	2.91
400	25.8	17.6	0.236	3.64
600	22.2	20.6	0.283	4.22
800	20.4	23.6	0.324	4.69

(単位°C) (kcal/mh°C)

3 部 ; [黒鉛スリーブ]
T-4

温 度	热 伝 导 率
200	57.7
300	51.4
400	46.5
500	41.9
600	38.7
700	35.2

(単位°C) (kcal/mh°C)

iii) 模擬燃料棒 (10 段目)

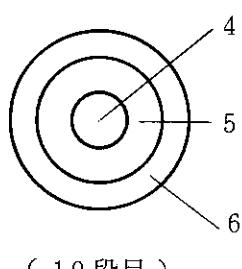
4 部 ; [リード棒]
NC-Ni

温 度	热 伝 导 率
26.85	77.8
326.85	56.3
526.85	58.0
726.85	61.7

(°C) (kcal/mh°C)

5 部 ; [絶縁材]
BN

2 部表中の BN に同じ。



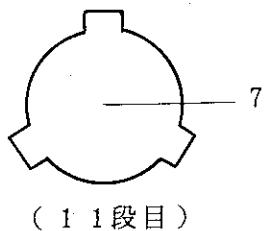
第 4.1 表 (続 き)

6 部 ; [黒鉛スリーブ] 3 部に同じ
T - 4

iv) 模擬燃料棒 (11 段目)

7 部 ; [模擬燃料棒端部 + 支持部]
T - 4 IG - 11

IG - 11 で代表させて第 4.6 図に同じ。



(11 段目)

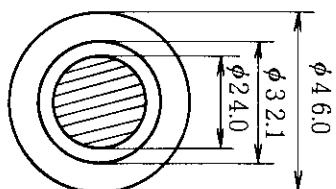
第4.2表 不平衡出力分布実験における模擬燃料棒部各チャンネル各段発熱量

(単位 kW)

段 チャンネル	3	4	5	6	7	8	9
1	3.04	3.07	3.08	3.09	3.07	3.04	3.01
2	3.06	3.10	3.11	3.10	3.05	2.99	2.99
3	3.04	3.07	3.08	3.07	3.07	3.05	3.02
4	3.04	3.07	3.08	3.09	3.09	3.03	3.00
5	3.03	3.07	3.07	3.12	3.06	3.05	3.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	3.04	3.06	3.09	3.08	3.07	3.05	3.01
8	3.04	3.07	3.09	3.10	3.06	3.05	2.98
9	3.06	3.09	3.09	3.12	3.08	3.05	3.00
10	3.07	3.10	3.10	3.12	3.07	3.04	3.00
11	3.05	3.08	3.09	3.11	3.09	3.07	3.01
12	3.05	3.10	3.08	3.11	3.08	3.06	3.03

(注) 上記の表は模擬燃料棒発熱部総発熱量である。

発熱部(3~9段);下図斜線部



第 4.3 表 均一出力分実験における模擬燃料棒部各チャンネル各段発熱量

(単位 kW)

段 チャンネル	3	4	5	6	7	8	9
1	5.67	5.67	5.66	5.68	5.70	5.70	5.69
2	5.71	5.72	5.72	5.73	5.67	5.61	5.67
3	5.67	5.67	5.65	5.65	5.70	5.72	5.71
4	5.69	5.68	5.68	5.71	5.75	5.72	5.71
5	5.69	5.70	5.67	5.66	5.71	5.71	5.71
6	5.66	5.68	5.72	5.66	5.71	5.67	5.69
7	5.68	5.64	5.67	5.66	5.68	5.72	5.70
8	5.67	5.66	5.68	5.71	5.69	5.73	5.64
9	5.71	5.71	5.68	5.75	5.71	5.74	5.70
10	5.72	5.72	5.70	5.75	5.70	5.71	5.69
11	5.70	5.69	5.69	5.72	5.73	5.74	5.70
12	5.68	5.71	5.65	5.72	5.71	5.72	5.72

第4.4表 流路用データ

(a) 冷却材流路孔径 ($D_{H1,ij}$)

(単位mm)

段 チャンネル	3	4	5	6	7	8	9
1	53.045	53.09	53.06	53.05	53.02	53.07	53.08
2	53.035	53.04	53.06	53.06	53.03	53.06	53.07
3	53.040	53.05	53.08	53.05	53.02	53.06	53.06
4	53.040	53.10	53.06	53.05	53.04	53.07	53.07
5	53.040	53.09	53.07	53.07	53.03	53.08	53.07
6	53.045	53.09	53.06	53.05	53.06	53.07	53.08
7	53.045	53.07	53.05	53.05	53.03	53.04	53.10
8	53.045	53.07	53.04	53.05	53.02	53.05	53.08
9	53.045	53.06	53.07	53.05	53.03	53.05	53.07
10	53.050	53.09	53.07	53.06	53.04	53.06	53.08
11	53.045	53.10	53.06	53.10	53.04	53.08	53.06
12	53.045	53.05	53.07	53.06	53.04	53.08	53.07

(b) 模擬燃料棒スリーブ外径 ($D_{S0,ij}$)

(単位mm)

段 チャンネル	3	4	5	6	7	8	9
1	45.950	45.965	45.950	45.960	45.960	45.950	45.950
2	45.955	45.955	45.945	45.935	45.950	45.955	45.955
3	45.940	45.965	45.980	45.935	45.945	45.955	45.960
4	45.975	45.955	45.940	45.950	45.950	45.955	45.955
5	45.970	45.935	45.940	45.920	45.940	45.950	45.955
6	45.970	45.930	45.925	45.955	45.925	45.950	45.970
7	45.935	45.950	45.970	45.955	45.955	45.945	45.955
8	45.940	45.935	45.950	45.965	45.980	45.935	45.975
9	45.955	45.970	45.930	45.940	45.950	45.945	45.970
10	45.945	45.965	45.950	45.955	45.995	45.945	45.945
11	45.955	45.960	45.960	45.955	45.960	45.960	45.945
12	45.980	45.955	45.955	45.950	45.940	45.955	45.940

第4.4表 (続き)

(c) FLOWNET入力データ用計算式

a. 寸法形状

面積(i 段 j チャンネル)

$$A_{ij} = \frac{\pi}{4} (D_{HI,ij}^2 - D_{so,ij}^2) \times 10^{-6} \quad (\text{m}^2)$$

燃料チャンネル等価直径(i 段 j チャンネル)

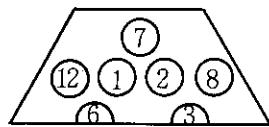
$$D_{H,ij} = (D_{HI,ij} - D_{so,ij}) \times 10^{-3} \quad (\text{m}) \quad (\text{j チャンネル})$$

$$D_{T,ij} = D_{H,ij}$$

$D_{HI,ij}$; 燃料チャンネル孔直径 (a)参照

(i 段 j チャンネル)

$D_{so,ij}$; 燃料スリーブ外径 (b)参照



b. FLOWNET圧力損失計算式

No. 0 6

$$\Delta P = \frac{\gamma v^2}{2g} (0.316 Re^{-0.25} \cdot \frac{\ell}{d} + K)$$

No. 0 7

$$\Delta P = \frac{\gamma v^2}{2g} \left[0.316 Re^{-0.25} + \frac{7 \times 10^{-3}}{0.1425} (4.303 Re^{-0.112}) \cdot \frac{\ell}{d} + \frac{K_s}{4} + K \right]$$

No. 0 8

$$\Delta P = \frac{\gamma v^2}{2g} (5173.16 Re^{-1.483}) \cdot \frac{\ell}{d}$$

No. 0 9

$$\Delta P = \frac{\gamma v^2}{2g} (0.316 Re^{-0.25} \cdot \frac{\ell}{d} + \frac{K_s}{4})$$

 γ ; 比重量 v ; 流速 g ; 重力加速度

Re ; レイノルズ数

 ℓ ; 流路長 d ; 流路等価直径

K ; 形状圧損係数

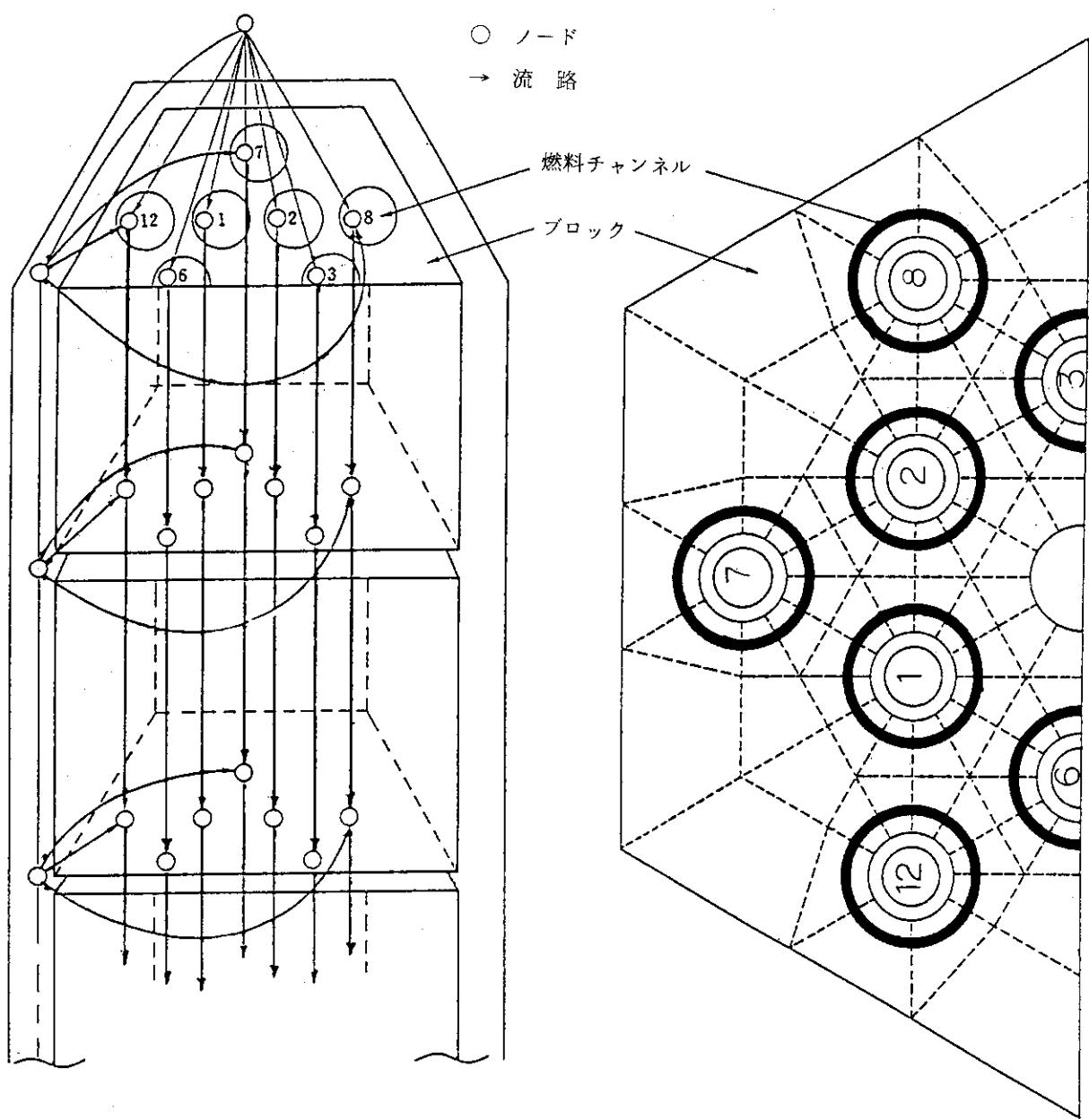
K_s ; スペーサーリブ形状圧損係数

(1 段あたり)

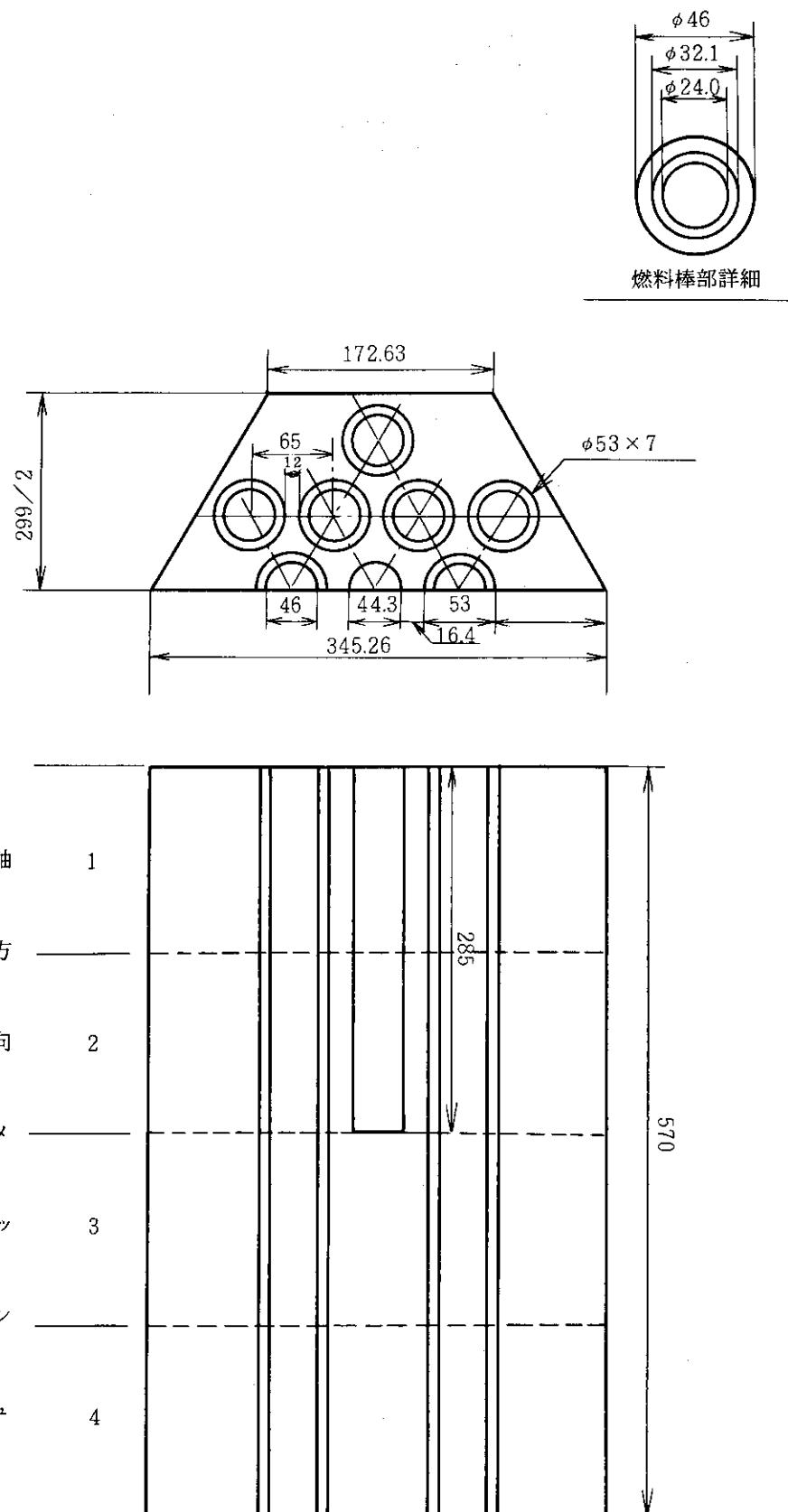
第4.4表 (続き)

(d) FLOWNET入力データ

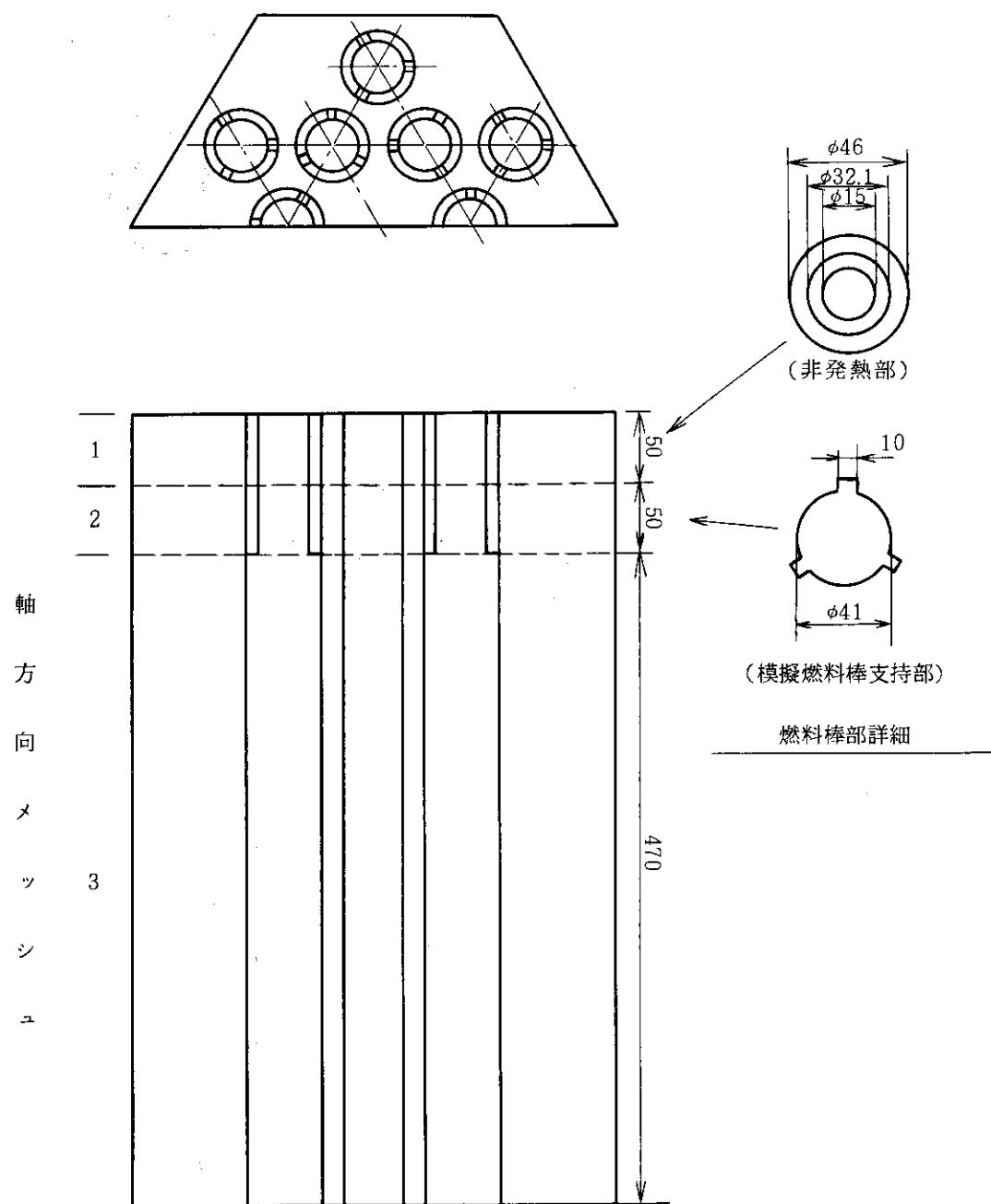
	A	L	D _H	D _T	K	No **	段数	
ブランチ 入 口 部 燃 料 部 出 口 部	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 ⋮ 29 30 31 32 33 34 35 36 37	1.590E-03 " " " $A_{3,j}^*$ " " " " $A_{4,j}^*$ " " A_{ij}^* " $A_{9,j}^*$ " 5.4428E-4 " 2.2062E-3 4.9087E-4 4.6260E-4	0.285 " " " 0.1425 " " " " " " " " 0.045 " 0.7775 0.0905 0.080	0.025 " " " $D_{H3,j}^*$ " " " " $D_{H4,j}^*$ " D_{Hij}^* $D_{H9,j}^*$ " 0.007 " 0.053 0.025 0.019	0.025 " " " $D_{T3,j}^*$ " " " " $D_{T4,j}^*$ " D_{Tij}^* $D_{T9,j}^*$ " 0.007 " 0.053 0.025 0.019	1.42 1.0E-75 " " 1.0E-75 " " " " " " " " 1.0E-75 1.0E-75 1.0 1.02 2.0	0.6 " " " 0.7 0.9 " " " " " " " 0.6 0.8 0.6 0.6	1 2 3 4 ⋮ ⋮ 9 10 10 11



第4.1図 FLOWNET/TRUMP 解析モデル

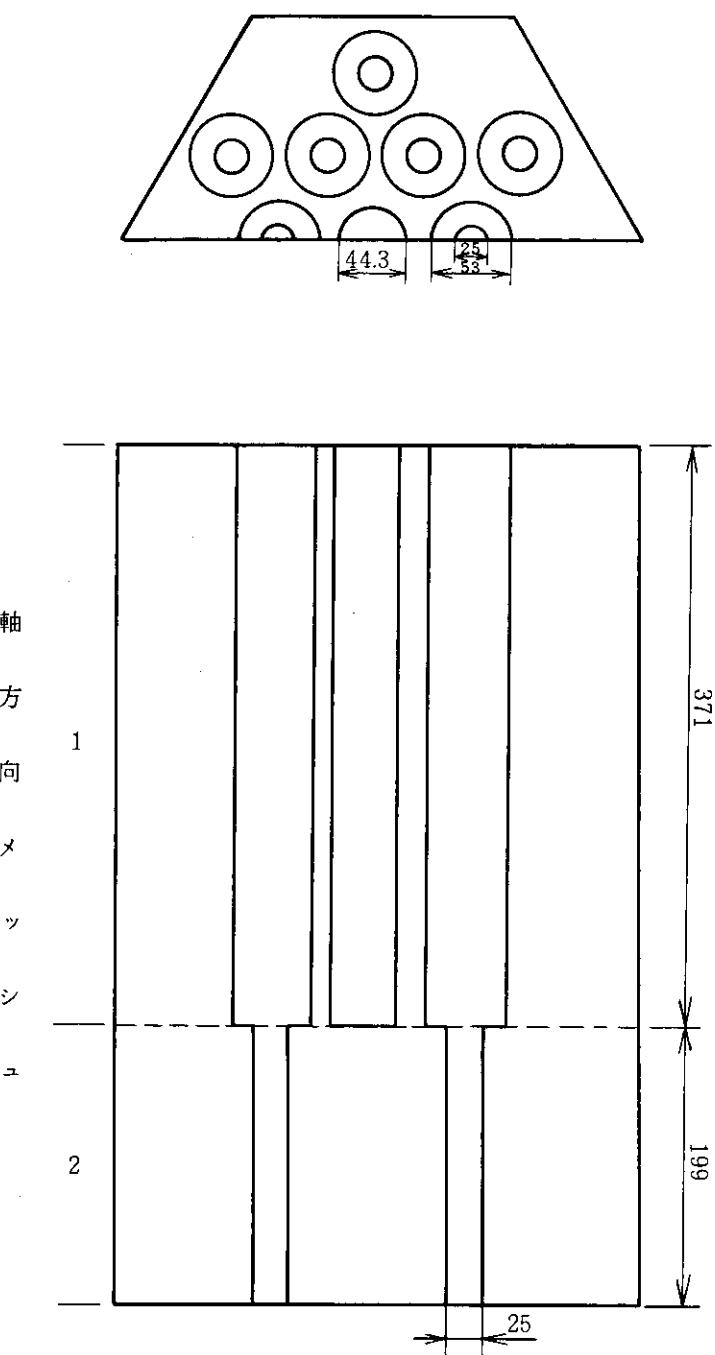


第4.2図 模擬燃料体（3～9段目）のモデル図

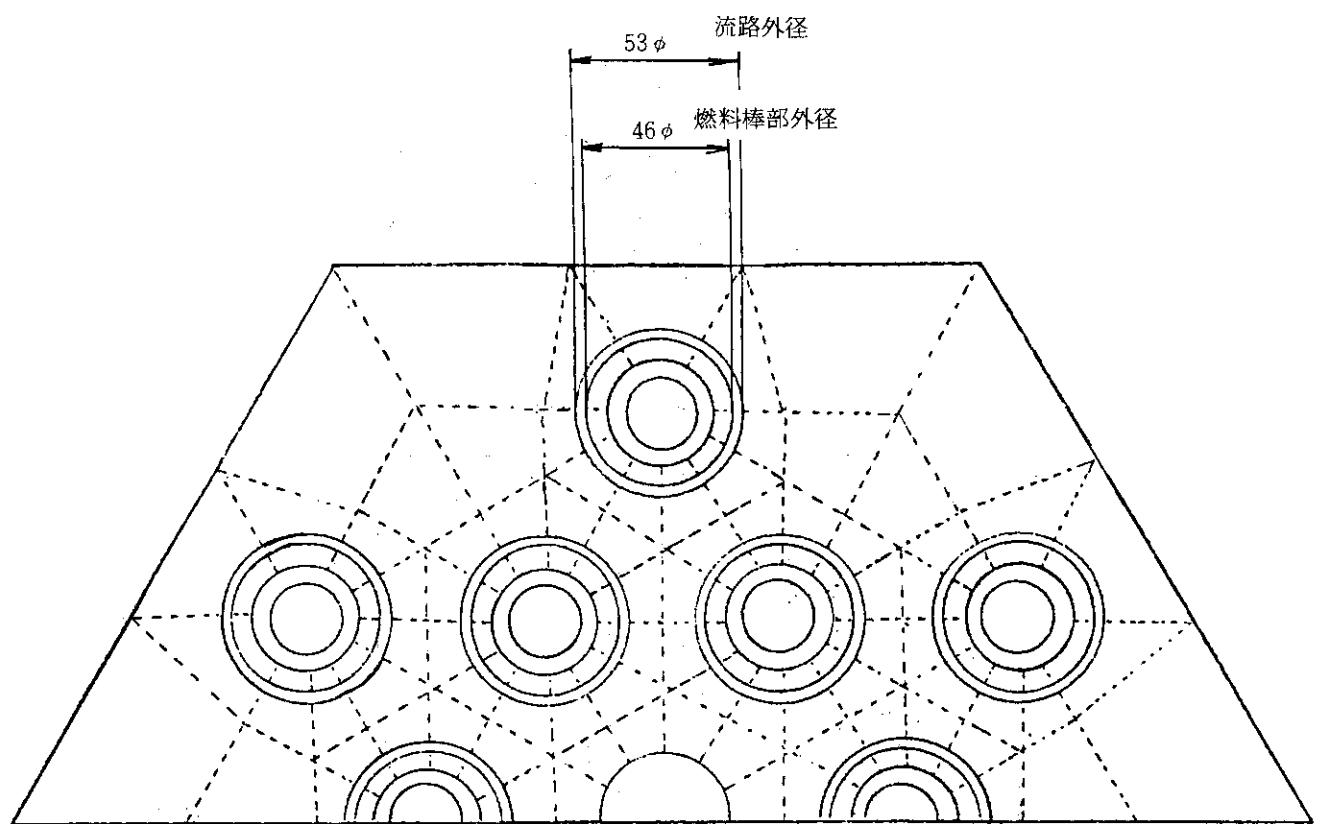


- 注1) 本模擬燃料ブロックの外形は $\phi 390$ の円柱であるがブロック外周部は
熱的に意味がないことから、9段目までと同じ平径 299 の六角柱状ブロ
ックとした。
- 2) 模擬燃料棒支持部は、模擬燃料棒端部（黒鉛 T - 4）及びこれを支持
するカーラー部（黒鉛 I G - 11）の2体から成るが、簡単のためこれらを
一体としてモデル化した。

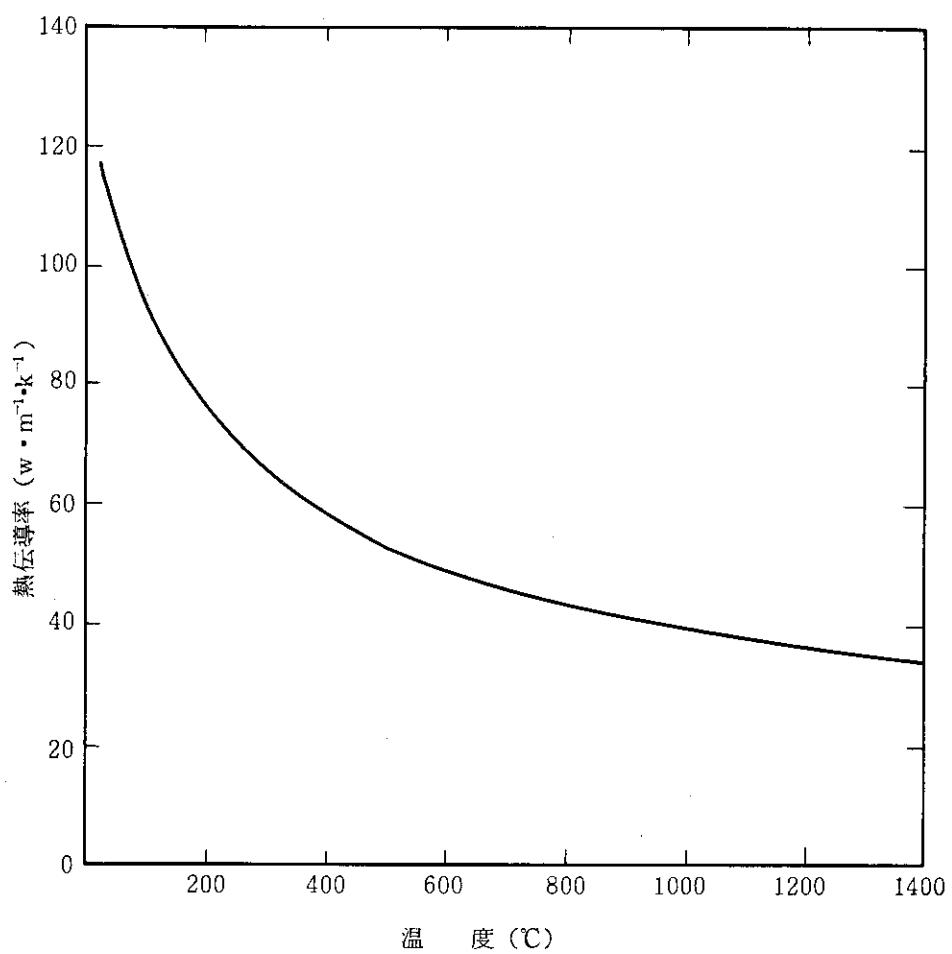
第 4.3 図 模擬燃料体（10段目）のモデル図



第 4.4 図 模擬燃料体（11段目）のモデル図



第4.5図 平面メッシュ図（模擬燃料体3～9段目）



第 4.6 図 I G - 110 黒鉛の熱伝導率

5. 解析結果と実験値との比較検討

5.1 予備的検討

流路として、模擬燃料ブロック外周部の流路及び外周部流路とブロック外周チャンネルとのクロス流路を考慮した場合と、考慮しない場合とを解析し、その結果を比較することによって HENDEL T_{1-M} 実験でのクロス流れの影響の程度を評価し、流量配分への影響を検討した。計算は、ブロック積層面間ギャップ量をパラメータとして 2 ケース行なった。

(1) 解析条件

模擬燃料ブロック外周部流路及び外周部流路とブロック外周チャンネル流路間のクロス流れ流路データは、5.2 節(VII)に述べる不平衡出力分布ケース温度分布解析結果に基づいて、以下のように設定した。ブロック積層面間ギャップは、クロス流れの効果を見るために実際よりも広く設定した。

i) ブロック積層面間ギャップ量の設定

5.2 節(VII)に述べる模擬燃料ブロック温度分布から、第 5.1(a)表に示す温度差が最大の模擬燃料ブロック平面図両下端の温度差及び各段の代表温度を設定し、温度差に基づく黒鉛ブロックの膨張差を求めた。その伸び差から計算されたブロック積層面間ギャップ量及びその $\frac{1}{2}$ の 2 ケースをブロック積層面間ギャップのパラメータ値とした。ギャップ量を第 5.1(a)表に示す。

ii) クロス流れ係数式の設定

クロス流れ係数式はクロス流れ係数簡易評価法を用いて、第 5.8~5.14 図の温度分布から考えられるくさび形ブロック積層面間ギャップを仮定し、次式を設定した。

$$\frac{K}{A^2} = \frac{0.59}{Re \cdot \delta^3} + \frac{3.02}{\delta^2} \quad (m^{-4} \text{ブロックあたり})$$

ここで、

K/A^2 ; クロス流れ係数

Re ; レイノルズ数

δ ; ブロック積層面間ギャップ

iii) ブロック外周部ギャップ量

ブロック外周部流路のギャップ巾は、ブロック交換に必要と考えられる 1 mm の値を設定した。

iv) モデル

第 4.1 図に示すように、ブロック外周部流路とブロック外周チャンネル流路（チャンネル 7, 8, 12）間を結ぶクロス流れ流路を各段に設けた。外周部流路からのクロス流れは、90% 近くが外周チャンネルに流れ込むことが実験で確認されている。

v) 境界条件

ブロック外周部流路の冷却材流量は少ないと考えられることから、すぐに壁温まで昇温されるものと考え、ブロック外周部流路のノード温度は、5.2節(Ⅲ)で述べる模擬燃料ブロック外周各段最下端温度に固定した。最下端温度は、第5.1(a)表中に図示するように、各段4層目の模擬燃料ブロック平面図両下端温度平均値とした。

(2) 解析結果

解析結果を5.2節に述べるクロス流れ流路がない場合の解析結果と比較して、第5.1(b)表に示す。

解析結果の比較によると、流量配分、圧力損失とともにクロス流れの影響は十分に小さく無視できる。このことから、ブロック外周部流路とのクロス流れ流路は、HENDEL T_{1-M}の解析に当たっては考慮する必要のないことが結論される。

5.2 解析結果と実験結果との比較

(i) 燃料チャンネル冷却材出口温度

第5.2表に実験結果の熱収支を示す。同表によると模擬燃料ブロック外部から補償ヒータの熱が流入している。本解析では模擬燃料ブロック外周を断熱としているため、燃料チャンネル冷却材出口温度の比較においては、この効果を補正して比較した。

第5.3表、第5.1図に不平衡出力分布ケースを、第5.4表、第5.2図に均一出力分布ケースを実験結果と比較して示す。

冷却材出口温度は数度の範囲でよく一致している。

(ii) 燃料チャンネル流量配分

第5.3、5.4表に解析及び実験での各チャンネル流量配分、解析及び実験各々でのチャンネル平均値からの偏差の百分率割合を示す。

解析値と実験値との偏差の百分率割合の差は均一出力分布実験に対して、最大約1.4%，不平衡出力分布実験に対して最大は非加熱チャンネルで約3.2%程度、その他の加熱チャンネルで最大約1.8%である。

(iii) 圧力損失

第5.3、5.4表に解析及び実験での圧力損失値を比較して示す。

実験値を基準とした解析値との違いは、均一出力分布実験に対して約8%，不平衡出力分布実験に対して約13%程度である。

(iv) 模擬燃料棒表面温度

第5.3図に不平衡出力分布実験に対する解析及び実験の燃料棒表面温度をチャンネル6及び8について比較して示す。

模擬燃料棒表面温度は、チャンネル6及び8共に解析値の方が実験値よりも高い値となり、保守的評価となっている。

また、第5.4、5.5図に均一出力分布実験に対する解析及び実験の燃料棒表面温度をチャンネル8及び12について比較して示す。チャンネル8、12いずれの場合も解析結果

が若干高目になっており保守的評価となっている。

(V) 模擬燃料ブロック温度分布(4段目)

模擬燃料ブロックの温度分布を解析と実験(計測点は4段目のみ)で比較して第5.5表に示す。

解析計算点と実験計測点の位置は異なるため、第5.5表に示した方法で補正を加えて比較した。解析値と実験値の相違は最大で約25°C程度であり、解析値の方が高目となっている。

(VI) 冷却材軸方向圧力分布の解析結果

冷却材軸方向圧力分布を不平衡出力分布実験の代表チャンネルとしてチャンネル6及び8について第5.6図に、均一出力分布実験の代表チャンネルとしてチャンネル6について第5.7図に示す。

不平衡出力分布実験では、上段部では発熱がゼロで流量の多いチャンネル6の圧力損失が大きいが、下段部では温度上昇によってチャンネル8の圧力損失が大きくなっている。

(VII) 冷却材軸方向温度分布の解析結果

冷却材軸方向温度分布を不平衡出力分布実験の代表チャンネルとしてチャンネル6及び8について第5.6図に、均一出力分布実験の代表チャンネルとしてチャンネル6について第5.7図に示す。

不平衡出力分布実験では、発熱がゼロのチャンネル6は、発熱があるチャンネル8よりもやや小さな傾きで温度上昇しており、9段目下端では両チャンネルの温度差は約100°Cになっている。ブロック番号10上部の模擬燃料棒支持部では、燃料棒から支持カラーを通る熱伝導によって、チャンネル6の温度が大きく上昇している。

(VIII) 模擬燃料体ブロック温度分布の解析結果

模擬燃料体ブロックの温度、冷却材温度及び燃料棒温度の平面分布を、不balance出力分布実験については第5.8～5.14図に、均一出力分布実験については第5.15～5.21図にそれぞれ各高さ位置について示す。

また第5.22図に不balance出力分布実験に対する平面温度分布の計算結果を第4段目第4メッシュ位置及び第7段目第4メッシュ位置について示す。第5.23図に均一出力分布実験に対する平面温度分布の計算結果を第一段目第4メッシュ位置及び第4段目第4メッシュ位置について示す。

(IX) その他の軸方向温度分布の解析結果

第5.24、5.25図に、不balance出力分布実験に対するチャンネル2、12及び6、8の模擬燃料棒表面、ブロック内面温度、冷却材温度の軸方向分布を、第5.26図に均一出力分布実験に対するチャンネル12の模擬燃料棒表面、ブロック内面温度、冷却材温度の軸方向分布を各々示す。

5.3 検討結果

(1) 不平衡出力分布実験

① 冷却材出口温度

第5.1図で比較すると冷却材出口温度の絶対値は比較的よく一致している。チャンネル6を基準とした温度差では、出力がゼロのチャンネル6から遠ざかるにつれて温度差が広がるという傾向も実験と解析で一致している。また、温度差は解析値の差の方が実験値の差よりも約10°C程度高く、安全側の結果となっている。

② 冷却材流量配分

第5.3(b)表に各チャンネルの流量配分の偏差を、平均値を基準とした割合として実験値との比較で示す。表によると、実験値と解析値との差は、チャンネル6で最も大きく約3.2%で、ついでチャンネル7の約1.8%，チャンネル12の約1.4%となっている。しかし、発熱がゼロのチャンネル6では流量が最も多く、その他のチャンネルでは流量が少なくなるという傾向はよく一致しており、チャンネル6での実験値と解析値との差は約3%と比較的小さい。

また、不平衡出力分布実験は1チャンネルの出力がゼロという実炉条件とはかけ離れた条件での試験である。実炉ではカラム内の出力差は最大でも平均±10%程度であるので、チャンネル6での実験と解析での流量差は実炉では十分に小さく無視できると判断できる。

③ 圧力損失

第5.3(c)表によると解析と実験の違いは高々13%である。

④ 模擬燃料棒表面温度

第5.3図によるとチャンネル6及び8共に解析値は実験値よりも高い値を示している。本解析では熱伝達率として設計用である実際よりも小さな値を用いているため、解析値の方が大きく出たものと考えられ妥当な結果である。

(2) 均一出力分布実験

① 冷却材出口温度

第5.2図の冷却材出口温度を実験と解析で比較すると、違いの最大値はチャンネル6で3.3°Cでありよく一致している。

② 冷却材流量配分

第5.4(b)表の冷却材流量配分を偏差の百分率で実験と解析で比較すると、その差はチャンネル6で最大で約1.4%と小さく、よく一致している。

③ 圧力損失

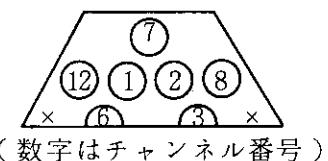
第5.4(c)表によると実験値を基準とした圧力損失の違いは約8%程度であり、解析値は実験値よりも大き目に評価されており安全側である。

第 5.1(a)表 ブロック積層面間ギャップ

燃料段	ブロック ^{*1} 両端温度差 ΔT (°C)	ブロック 代表温度 (°C)	変形量差 δ (mm)	ブロック ^{*2} 積層面間 ギャップ(mm)
3	10	400	0.02	0.01
4	20	"	0.05	0.04
5	30	"	0.07	0.06
6	35	500	0.08	0.08
7	40	"	0.09	0.09
8	45	600	0.11	0.10
9	50	"	0.12	0.10
10	30	"	0.07	0.10
11	25	"	0.06	0.07

*1 第 5.8～5.14 図に示す不平衡出力分布
模擬燃料ブロック温度分布の右図に示
す両端部の温度差(×部)。

*2 各段の変形量差の平均値



(注) 計算ケースは上表のブロック積層面間ギャップ及びその1/2の値の2ケースである。

第5.1(b)表 クロス流れ流路の有無及び実験結果との比較

(不平衡出力分布ケース)

クロス流れ流路ケース1							
チャンネル流量 (g/s)							圧力損失 (kg/cm ²)
1	2	3	6	7	8	12	
1 0.3 1	1 0.2 1	1 0.1 9	1 0.8 8	1 0.2 9	1 0.2 3	1 0.4 2	0.0 2 6 9
クロス流れ流路ケース2*							
チャンネル流量 (g/s)							圧力損失 (kg/cm ²)
1	2	3	6	7	8	12	
1 0.3 4	1 0.2 4	1 0.2 2	1 0.9 1	1 0.2 6	1 0.2 0	1 0.3 9	0.0 2 7 0
クロス流れ流路無しケース**							
チャンネル流量 (g/s)							圧力損失 (kg/cm ²)
1	2	3	6	7	8	12	
1 0.3 4	1 0.2 5	1 0.2 2	1 0.9 2	1 0.2 6	1 0.2 0	1 0.3 9	0.0 2 7 0

* 積層面間ギャップ；ケース1の1/2

** 5.2節の不平衡出力分布ケース解析結果

実験結果							
チャンネル流量 (g/s)							圧力損失 (kg/cm ²)
1	2	3	6	7	8	12	
1 0.3	1 0.3	1 0.2	1 1.3	1 0.5	1 0.2	1 0.3	0.0 3 0 4

第5.2表 実験結果熱収支

(a) 均一出力分布実験

チャンネル	チャンネル冷却材 熱 収 支 *1	模擬燃料棒 発 熱 量	チャンネル冷却材 流 入 热 量
1	0.14	9.50	9.64
2	0.16	9.52	9.68
3	0.20	9.50	9.70
4	0.06	9.54	9.60
5	0.03	9.52	9.54
6	0.11	9.50	9.61
7	0.30	9.49	9.79
8	0.27	9.50	9.77
9	0.05	9.55	9.61
10	0.15	9.55	9.70
11	0.06	9.54	9.60
12	0.20	9.53	9.73
	1.73 *2	114.23	115.97

(単位 kcal/s)

(b) 不平衡出力分布実験

チャンネル	チャンネル冷却材 熱 収 支 *1	模擬燃料棒 発 熱 量	チャンネル冷却材 流 入 热 量
1	-0.40	5.11	4.71
2	-0.22	5.11	4.89
3	-0.16	5.09	4.92
4	-0.38	5.16	4.78
5	-0.39	5.11	4.72
6	4.66	0.02	4.68
7	0.03	5.09	5.12
8	-0.07	5.09	5.02
9	-0.34	5.16	4.82
10	-0.27	5.16	4.89
11	-0.49	5.16	4.66
12	-0.45	5.13	4.69
	1.51 *2	56.38	57.89

(単位 kcal/s)

$$*1 \quad (\text{チャンネル冷却材}) - (\text{模擬燃料棒}) \\ (\text{流 入 热 量}) - (\text{発 熱 量})$$

*2 均一出力分布ケース ; 温度上昇で 7.85 °C

不平衡出力分布ケース ; 温度上昇で 9.84 °C

第 5.3 表 不平衡出力分布実験に対する解析結果と実験結果の比較

(a) 冷却材出口温度

CH	解 析	チャンネル6との温 度 差	実 驗	チャンネル6との温 度 差
1	646.7 (°C)	47.9 (°C)	647.4 (°C)	41.5 (°C)
2	667.4	68.6	660.9	55.0
3	665.8	67.0	663.8	57.9
6	598.8	—	605.9	—
7	659.7	60.9	658.5	52.6
8	668.6	69.8	666.3	60.4
12	638.9	40.1	640.0	34.1

(b) 冷却材流量配分

CH	解 析 A	$\epsilon_1 = \frac{A - \text{平均}}{\text{平 均}}$	実 驗 B	$\epsilon_2 = \frac{B - \text{平均}}{\text{平 均}}$	$\epsilon_1 - \epsilon_2$
1	(g/s) 10.341	(%) + 0.1	(g/s) 10.3	(%) - 0.9	(%) + 1.0
2	10.247	- 0.8	10.3	- 0.9	+ 0.1
3	10.221	- 1.1	10.2	- 1.8	+ 0.7
6	10.916	+ 5.6	11.3	+ 8.8	- 3.2
7	10.258	- 0.7	10.5	+ 1.1	- 1.8
8	10.198	- 1.3	10.2	- 1.8	+ 0.5
12	10.386	+ 0.5	10.3	- 0.9	+ 1.4
平均	10.333		10.39		

(c) 压 力 損 失

解 析	実 驗
0.02704 (kg/cm ²)	0.03038 (kg/cm ²)

第 5.4 表 均一出力分布実験に対する解析結果と実験結果の比較

(a) 冷却材出口温度

CH	解 析	実 驗
	(℃)	(℃)
1	779.2	781.6
2	778.8	780.8
3	779.4	781.9
6	779.0	782.3
7	779.3	781.7
8	779.2	780.6
12	780.2	781.5

(b) 冷却材流量配分

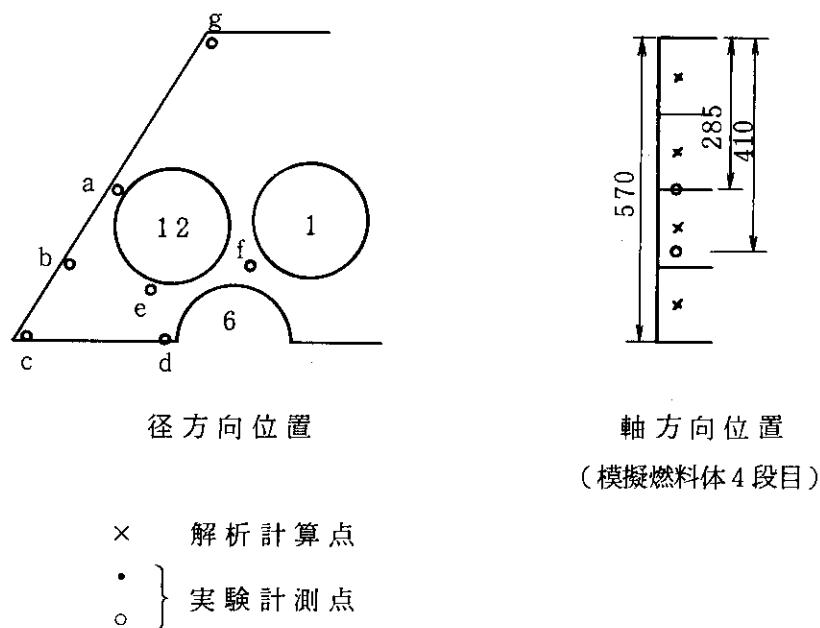
CH	解 析 A	$\epsilon = \frac{A - \text{平均値}}{\text{平 均 値}}$	実 驗 B	$\epsilon = \frac{B - \text{平均値}}{\text{平 均 値}}$
1	(g/s) 14.900	(%) + 0.05	(g/s) 14.90	(%) + 0.05
2	14.887	- 0.04	14.94	+ 0.3
3	14.877	- 0.1	14.88	- 0.09
6	14.937	+ 0.3	14.69	- 1.4
7	14.896	+ 0.02	14.87	- 0.2
8	14.869	- 0.2	14.95	+ 0.4
12	14.896	+ 0.02	14.91	+ 0.1
平均	14.893		14.893	

(c) 圧力損失

解 析	実 驗
0.07545 (kg/cm ²)	0.06992 (kg/cm ²)

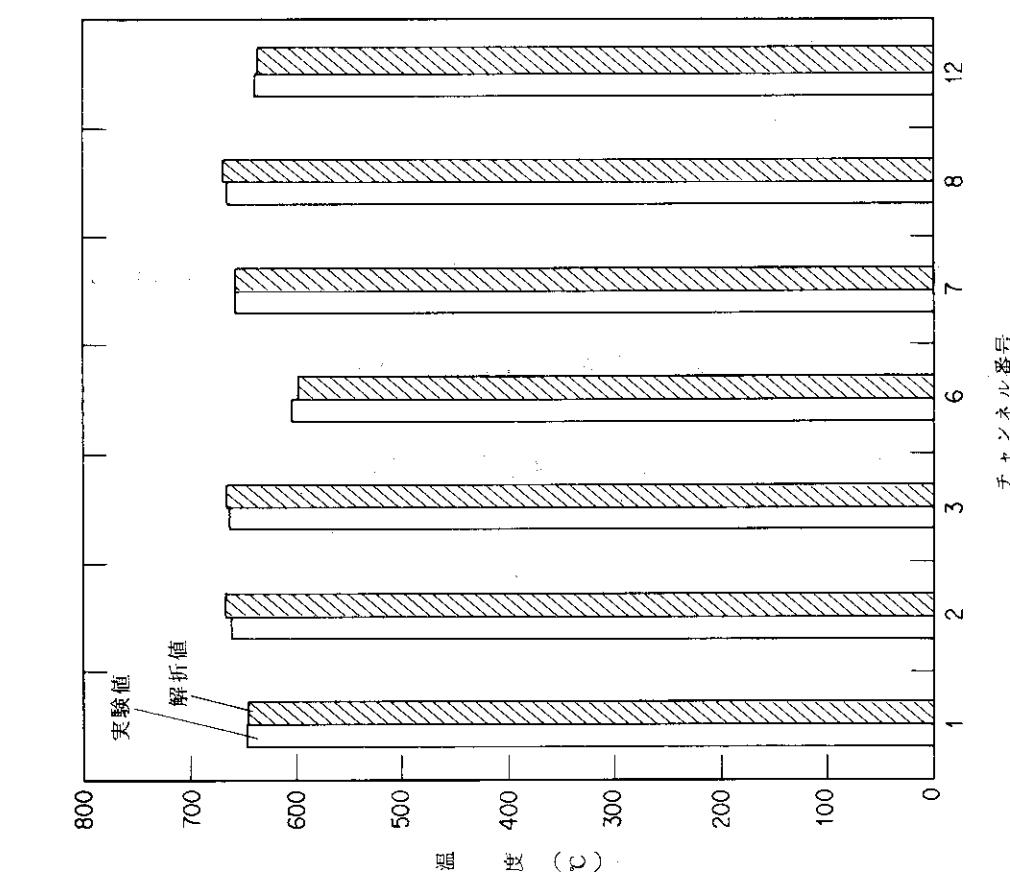
第 5.5 表 模擬燃料ブロック温度の実験値との比較
 (不平衡出力分布実験 4 段目)

位 置	a	b	c	d	e	f	g
解 析 值	377	370	370	375	365	368	368
実 驗 値	361	355	355	351	354	353	354

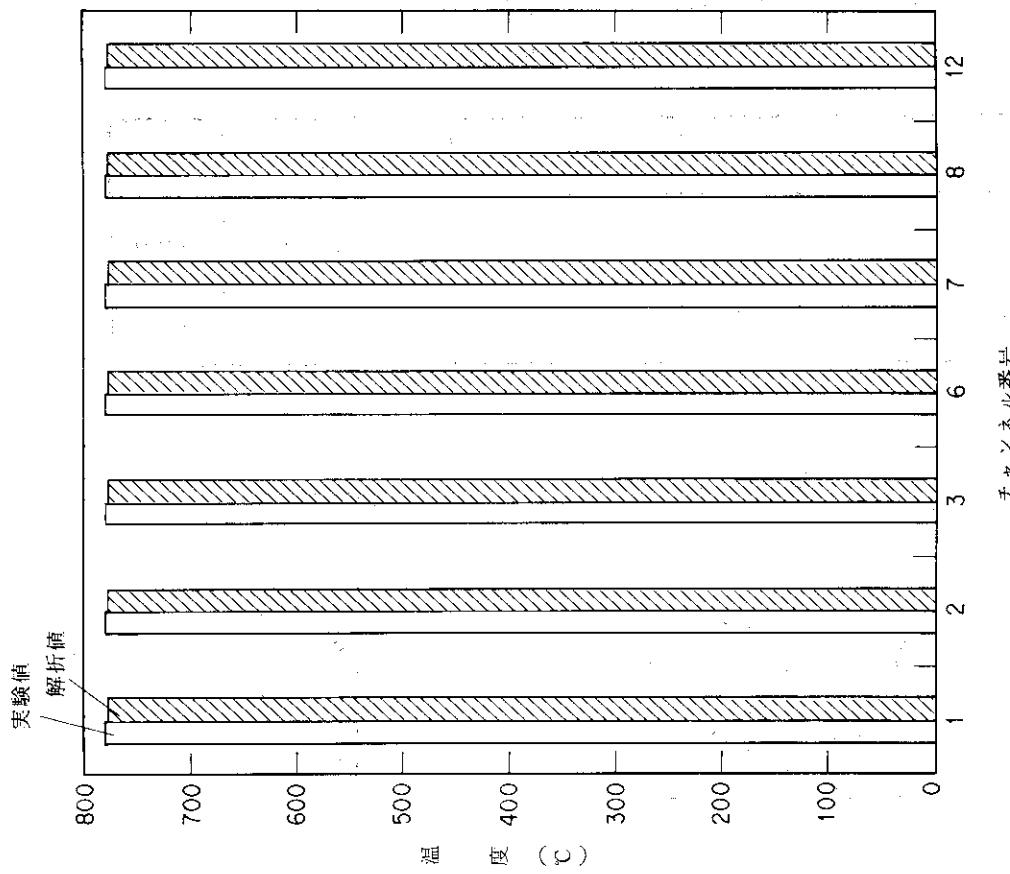


(注) 解析計算点位置は実験計測点位置と異なるため、比較にあたっては次のように補正した。

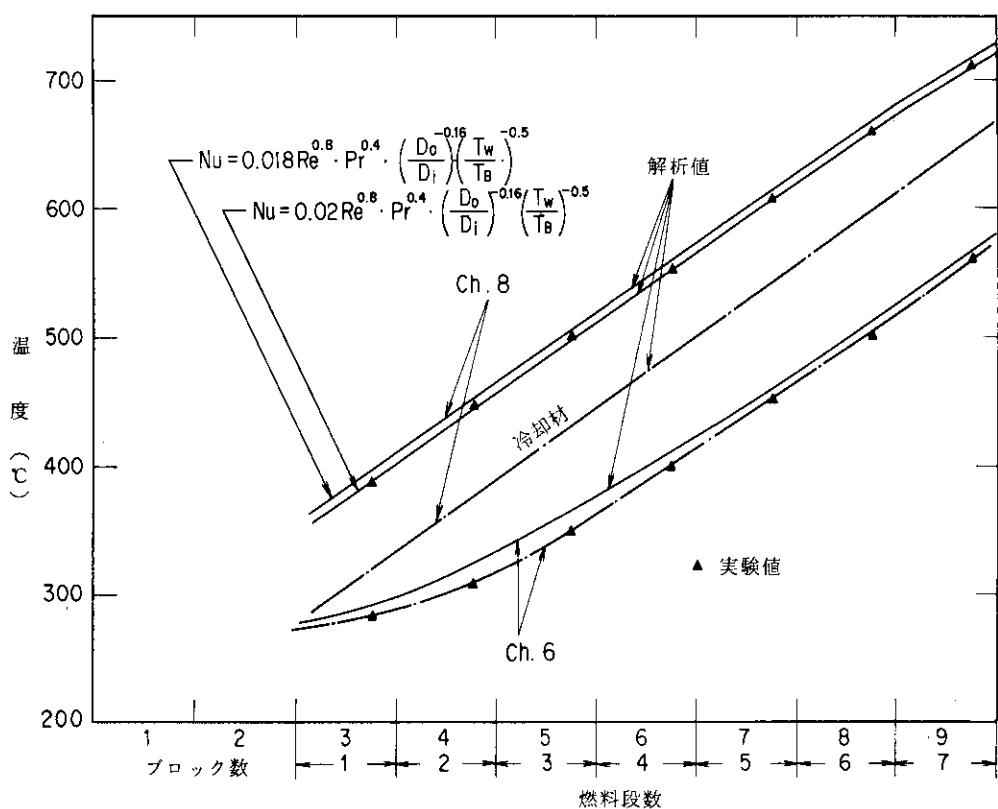
- i) 径方向
実験計測点周囲の解析点の温度平均値を実験計測点の解析値とした。
 - ii) 軸方向
解析計算点を線型補間して実験計測点の解析値とした。



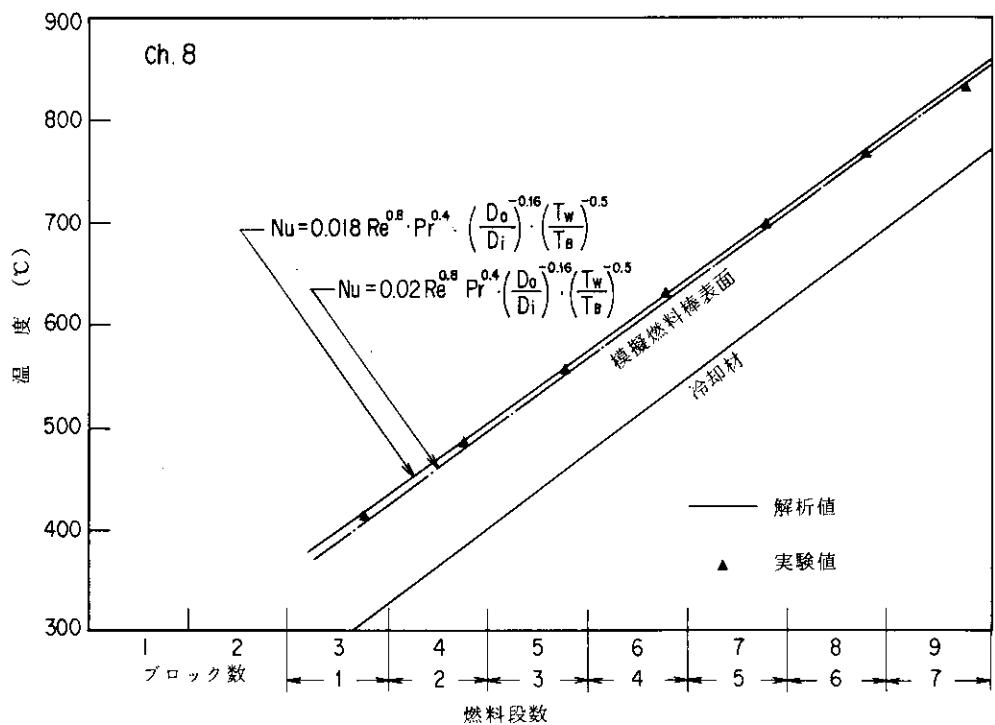
第5.1図 不均一出力分布実験の冷却材出口温度に関する実験値と計算値との比較



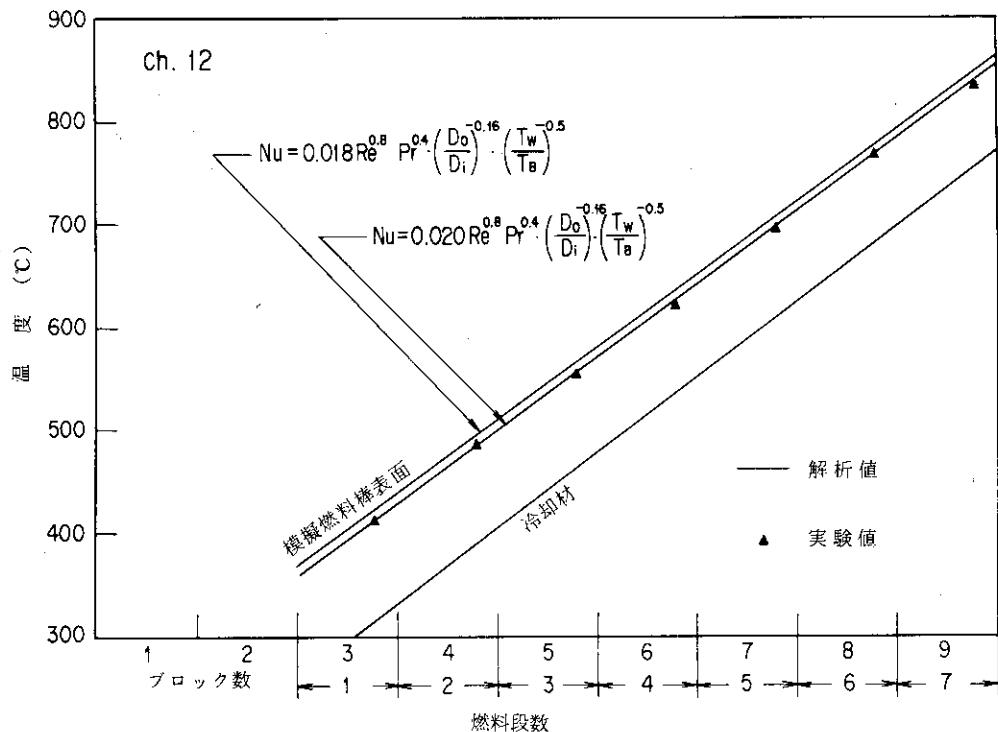
第5.2図 均一出力分布実験に対する冷却材出口温度の実験値と計算値との比較



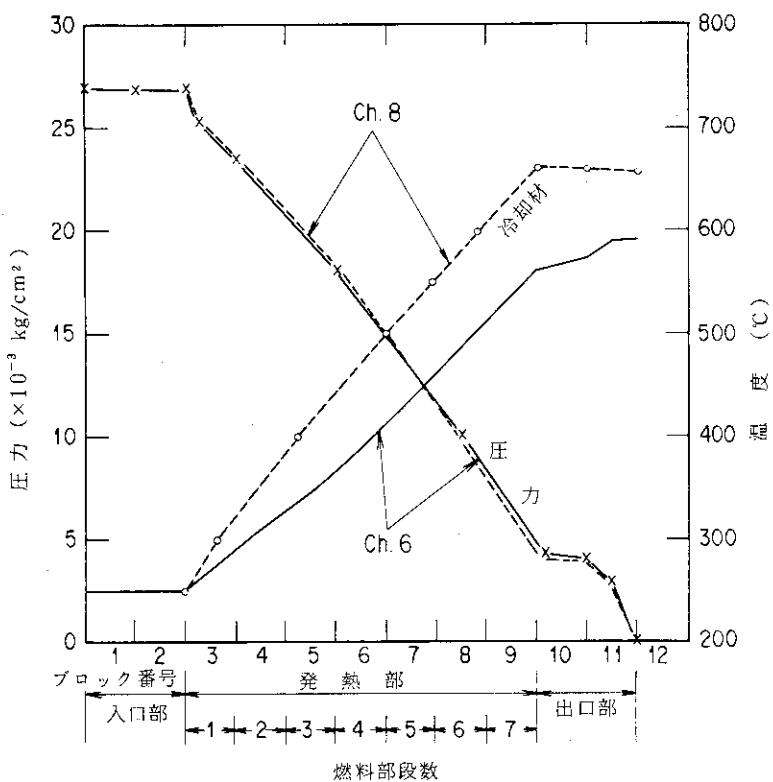
第 5.3 図 不平衡出力実験に対する模擬燃料棒表面温度の解析値と実験値との比較
(チャンネル 6 及び 8)



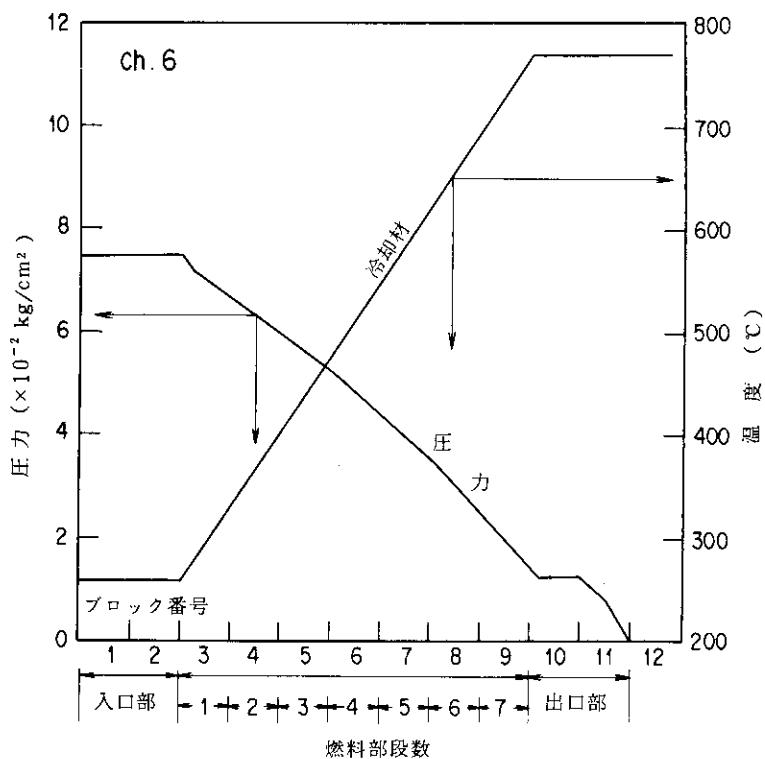
第 5.4 図 均一出力分布実験に対する軸方向温度分布の計算結果（8 チャンネル）



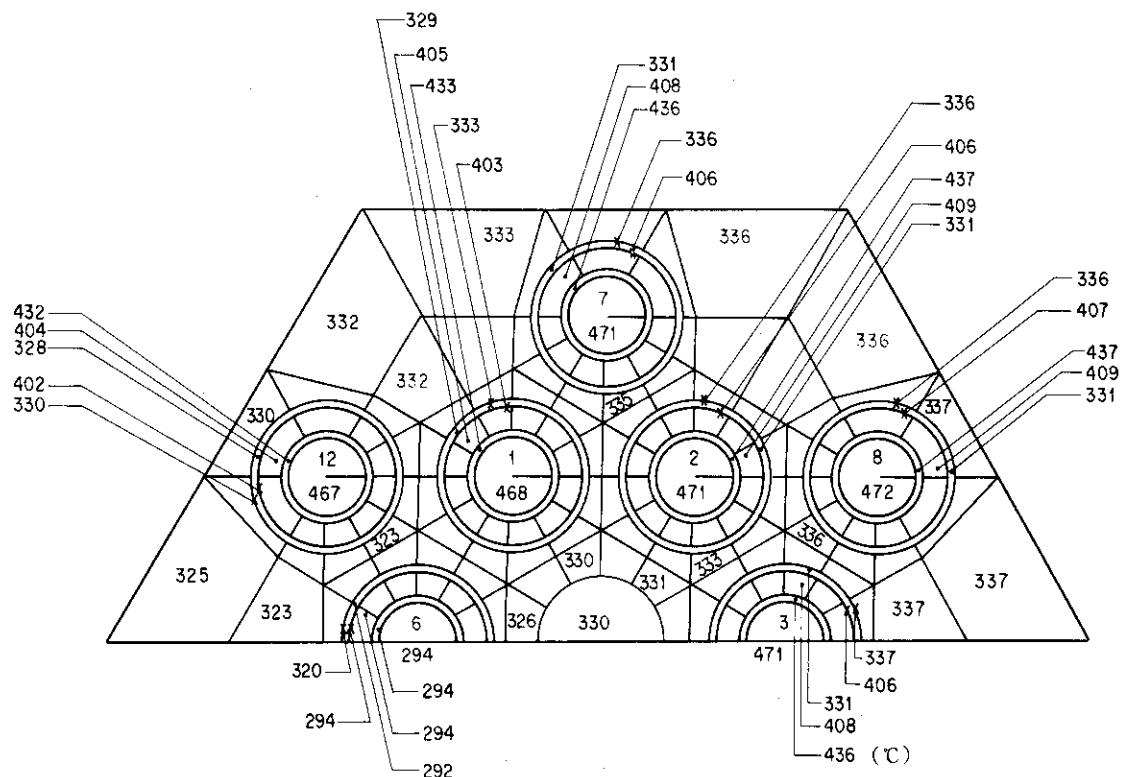
第 5.5 図 均一出力分布実験に対する軸方向温度分布の計算結果（12 チャンネル）



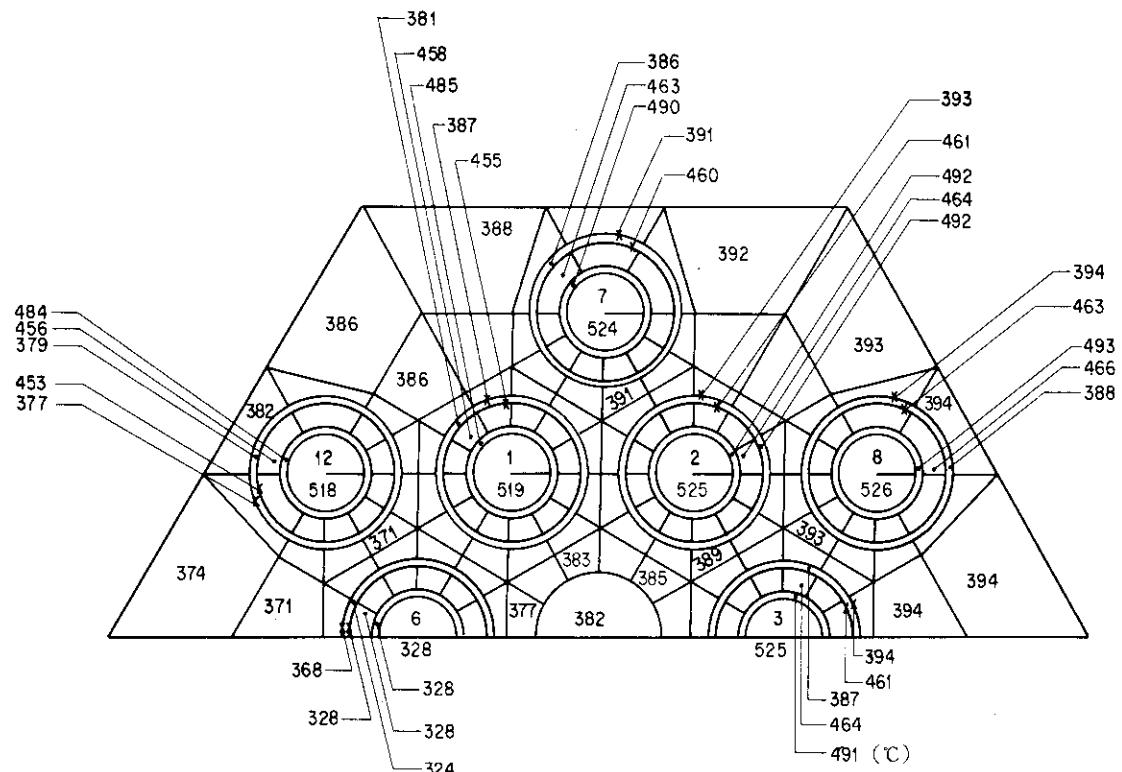
第 5.6 図 不平衡出力分布実験に対する軸方向温度及び圧力分布計算結果



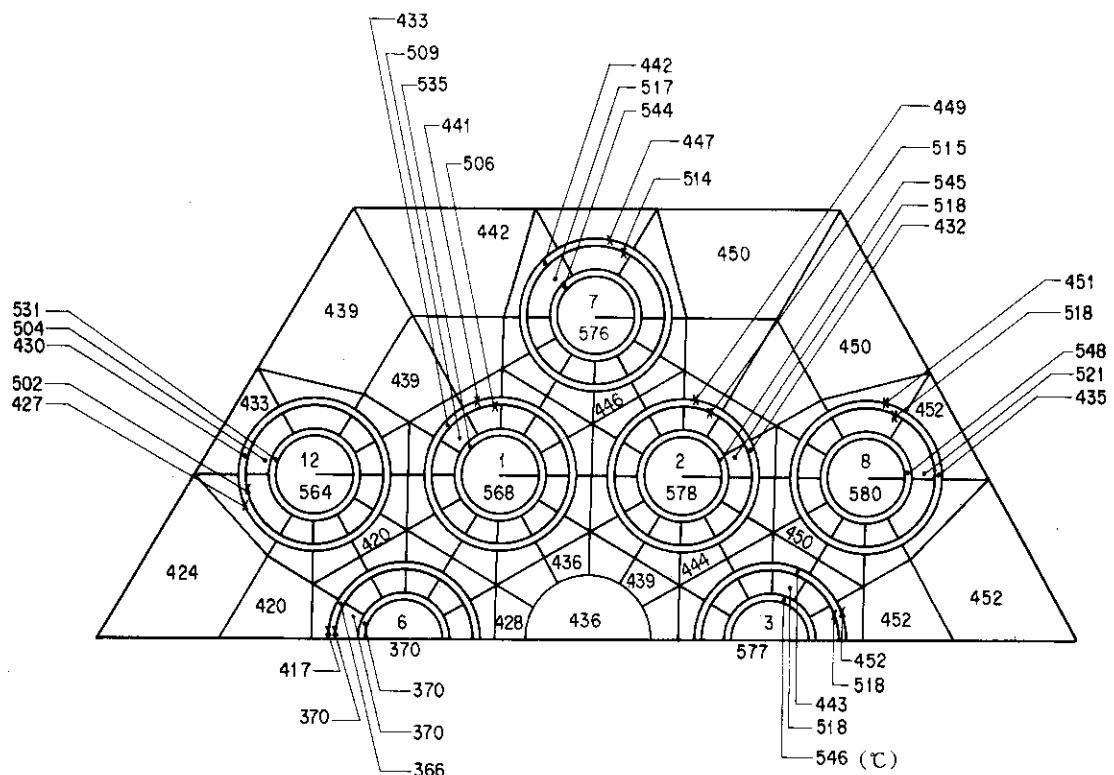
第 5.7 図 均一出力分布実験に対する軸方向の圧力及び冷却材温度分布の計算結果（6 チャンネル）



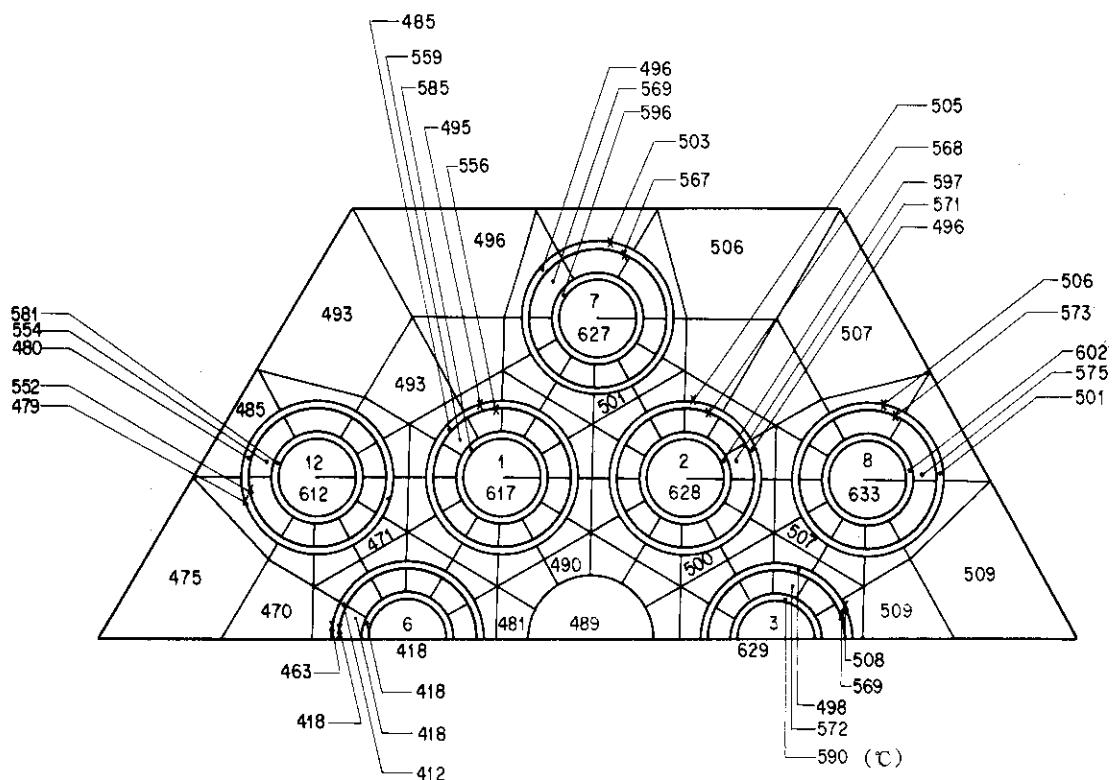
第 5.8 図 不平衡出力分布実験に対する計算結果（第 1 段目第 4 メッシュ位置）



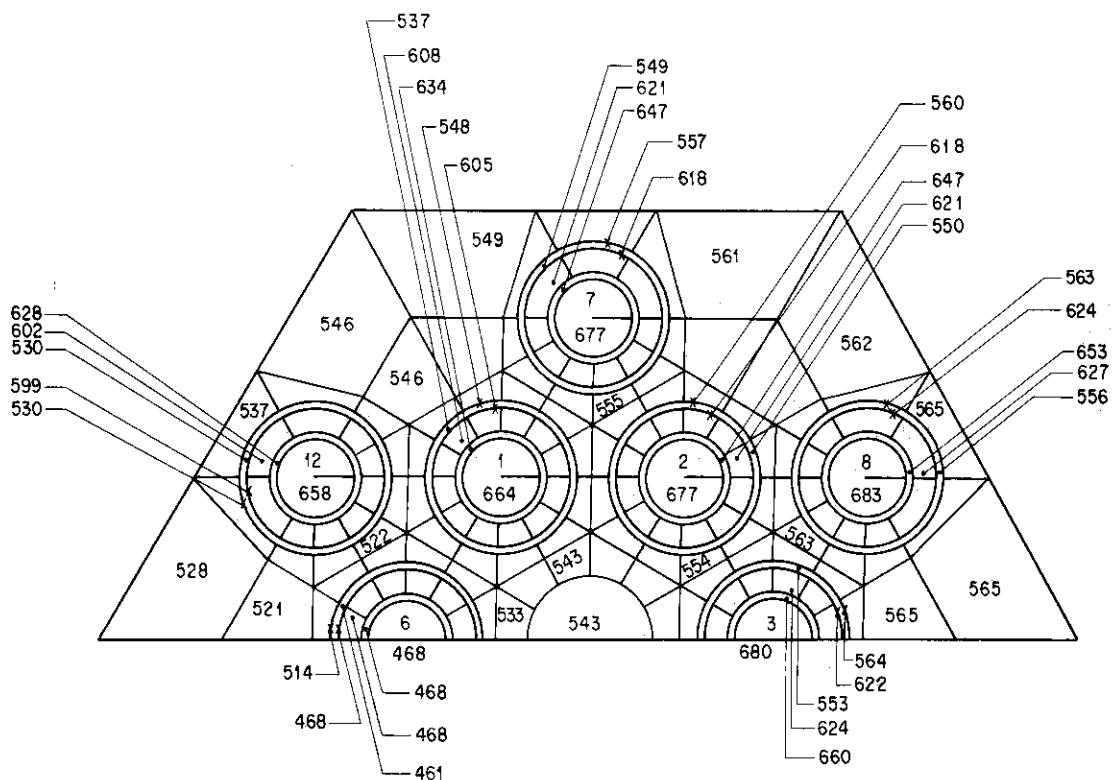
第 5.9 図 不平衡出力分布実験に対する計算結果（第 2 段目第 4 メッシュ位置）



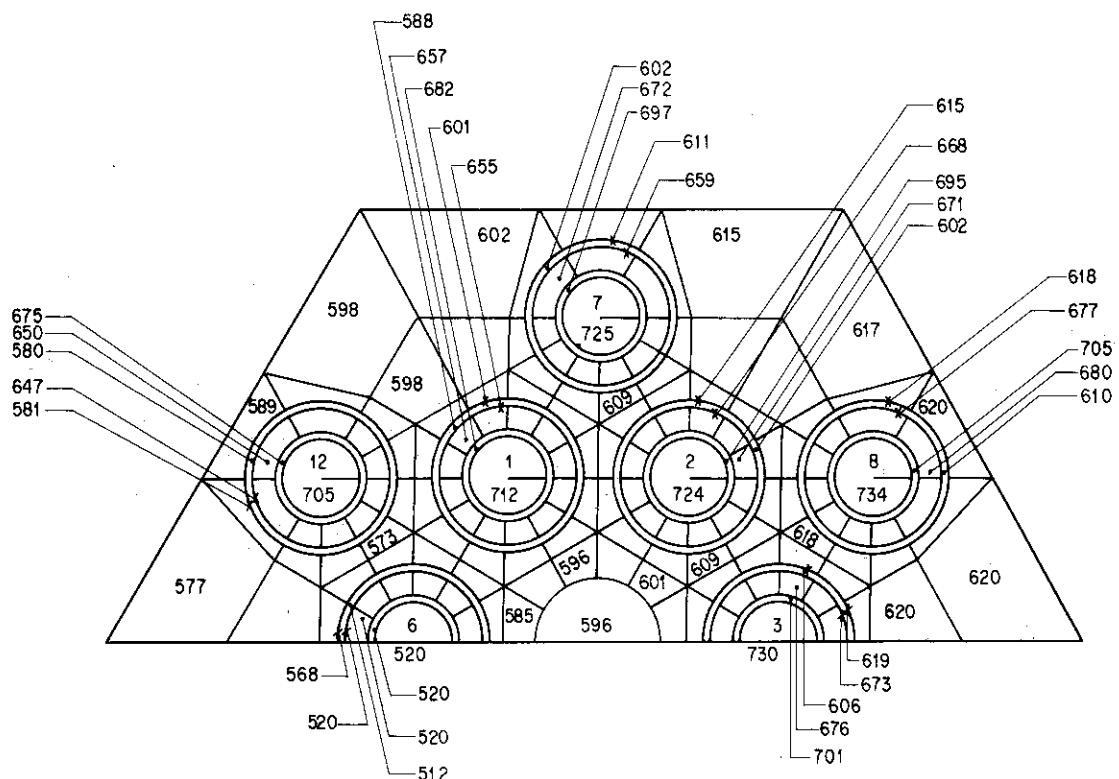
第 5.10図 不平衡出力分布実験に対する計算結果（第 3 段目第 4 メッシュ位置）



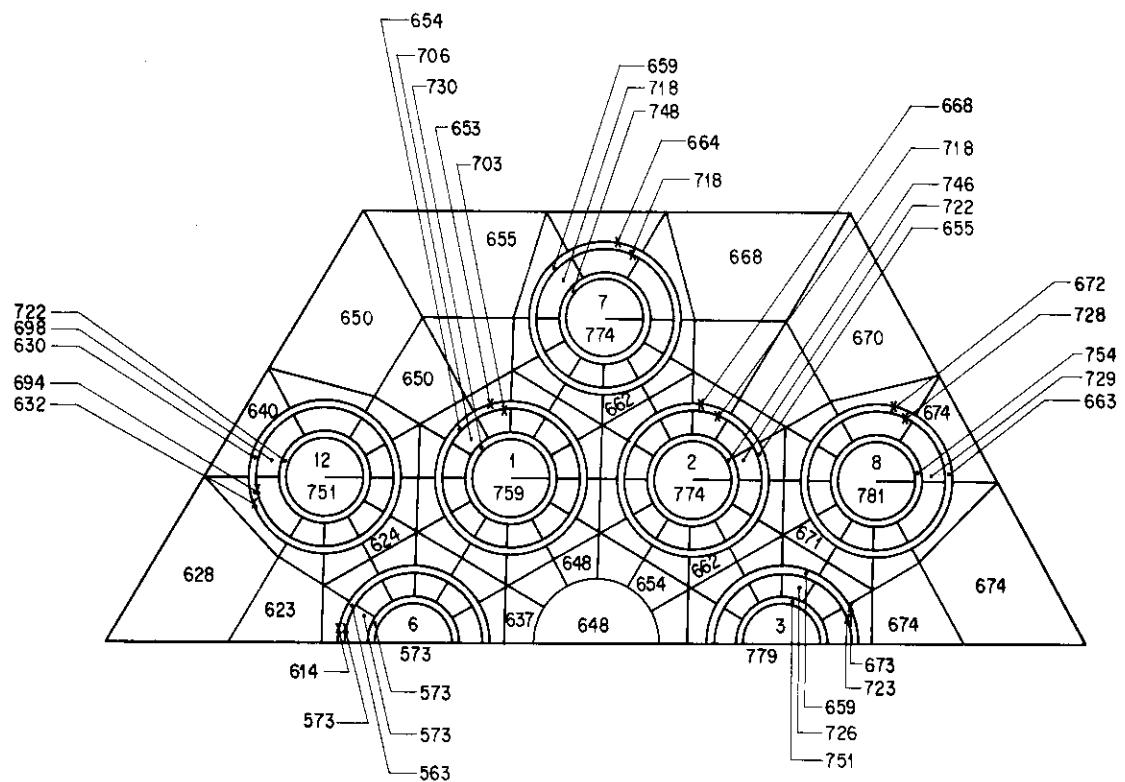
第 5.11図 不平衡出力分布実験に対する計算結果（第 4 段目第 4 メッシュ位置）



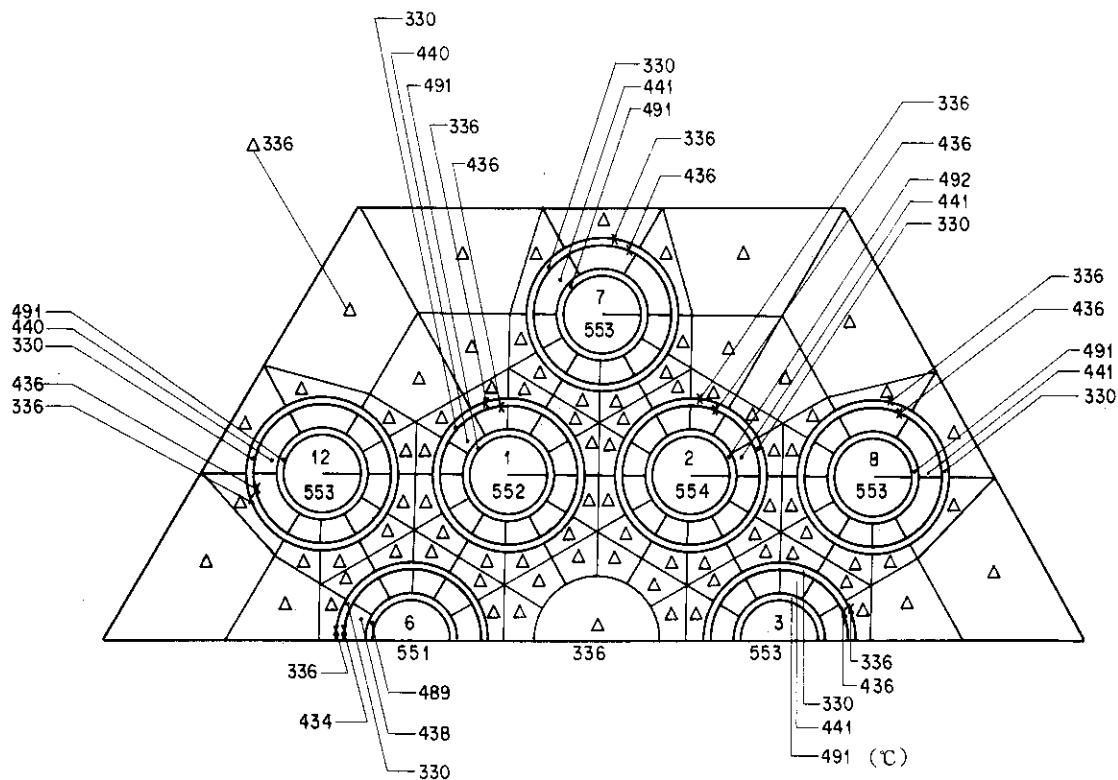
第 5.12 図 不平衡出力分布実験に対する計算結果（第 5 段目第 4 メッシュ位置）



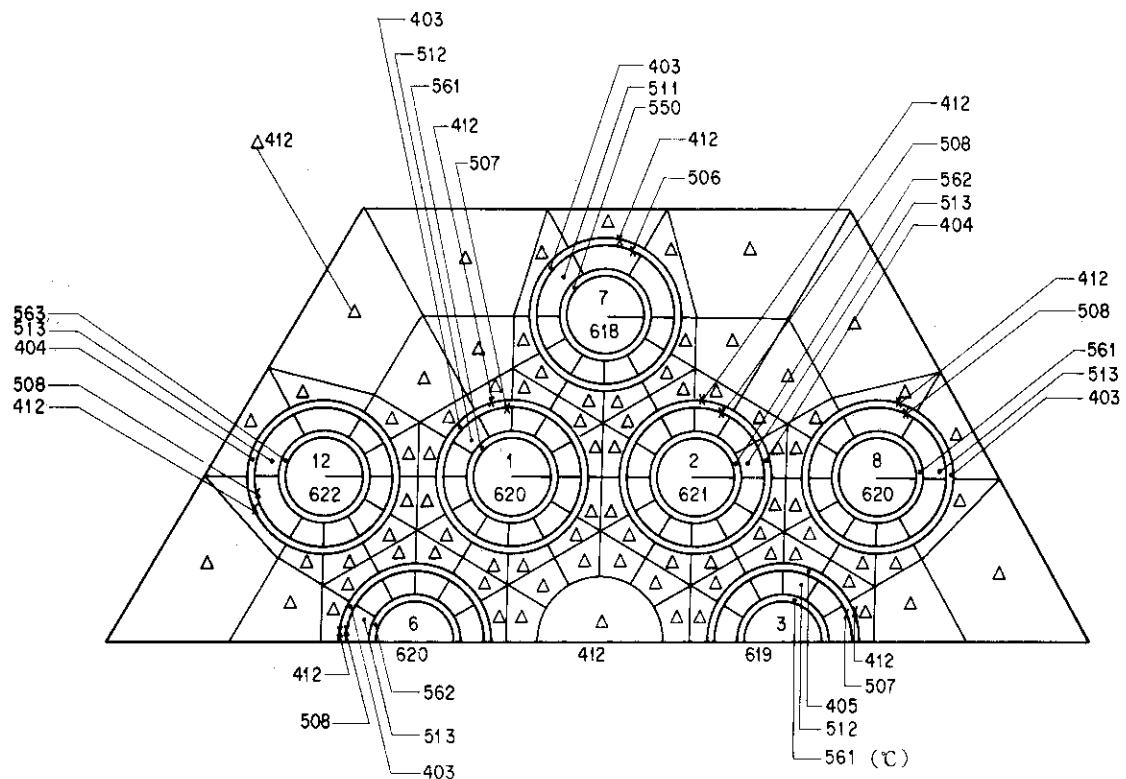
第 5.13 図 不平衡出力分布実験に対する計算結果（第 6 段目第 4 メッシュ位置）



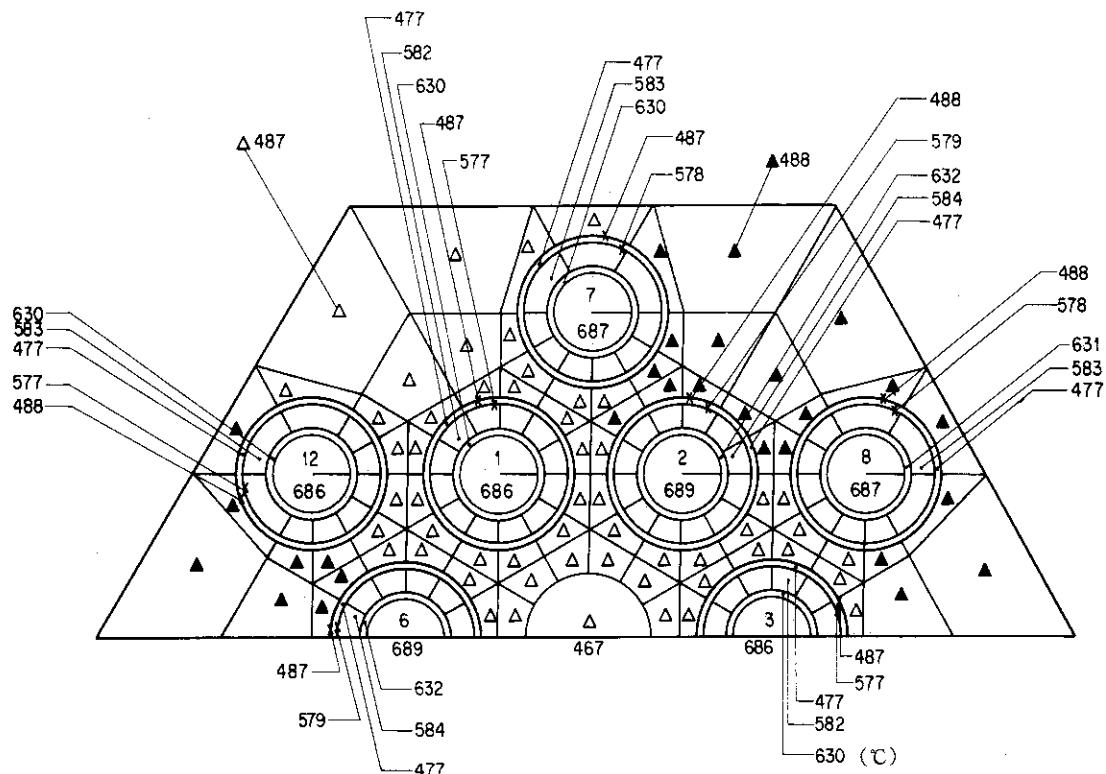
第 5.14図 不平衡出力分布実験に対する計算結果（第 7 段目第 4 メッシュ位置）



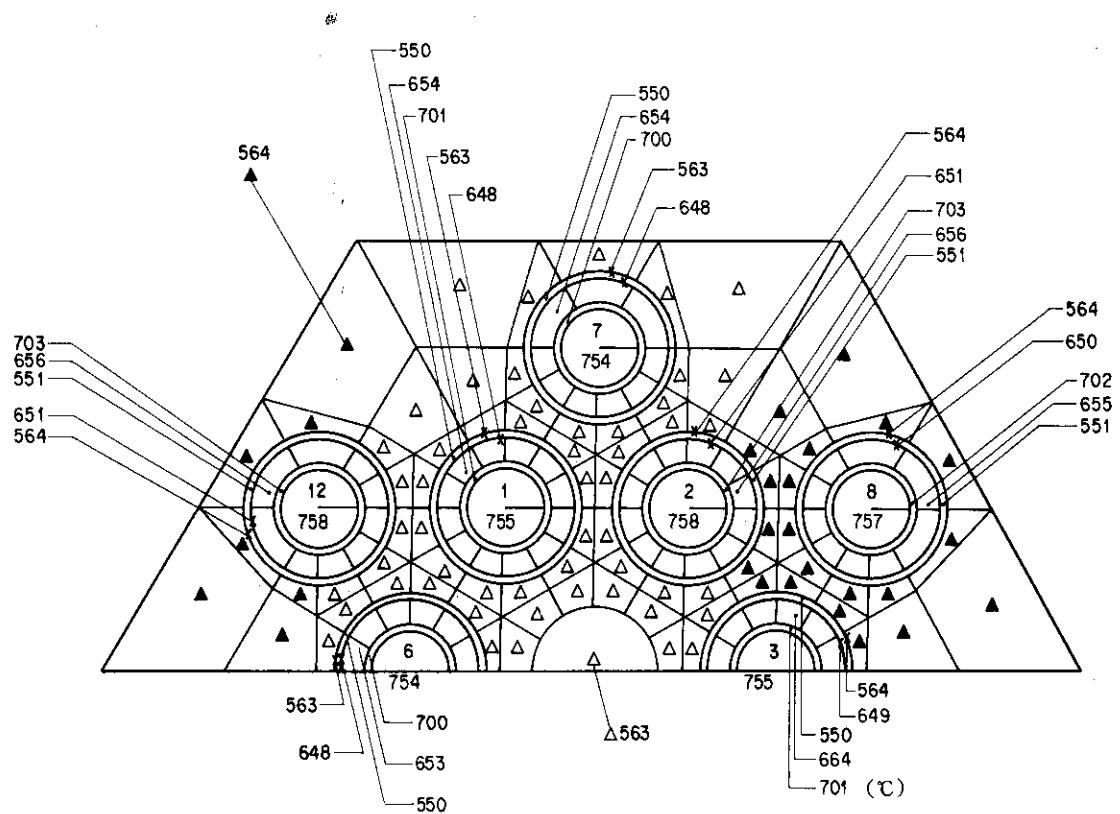
第 5.15図 均一出力分布実験に対する計算結果（第 1 段目第 4 メッシュ位置）



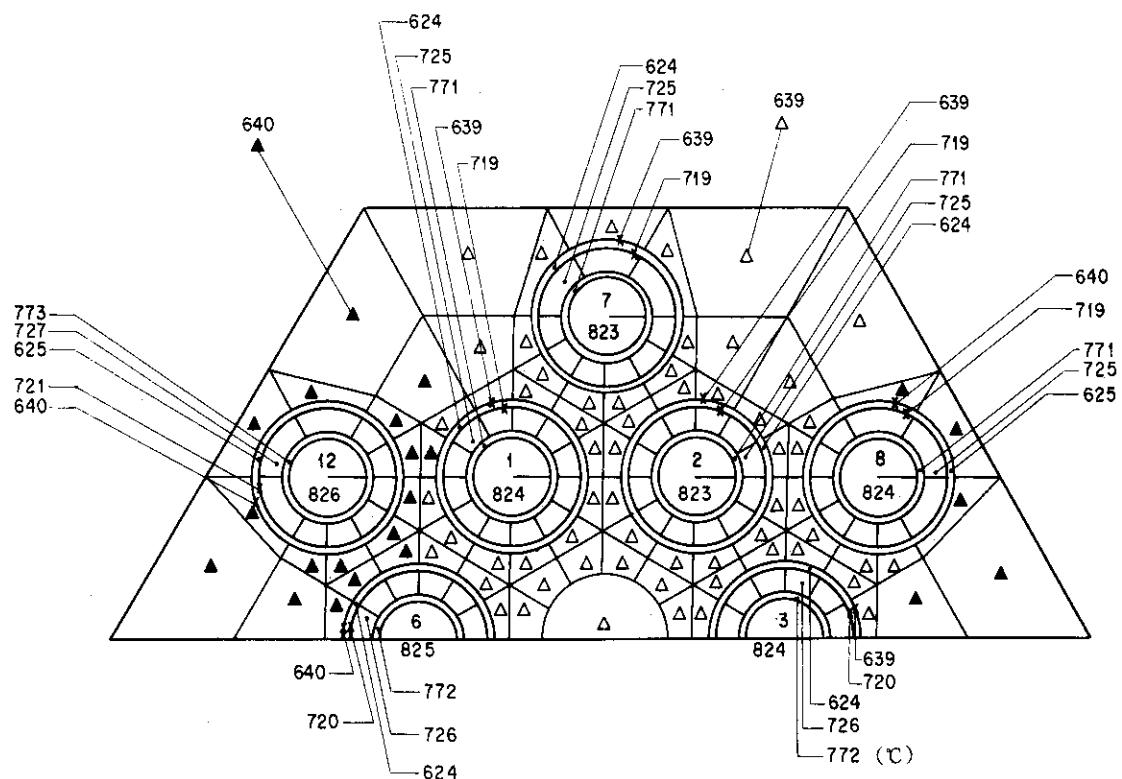
第 5.16図 均一出力分布実験に対する計算結果（第 2 段目第 4 メッシュ位置）



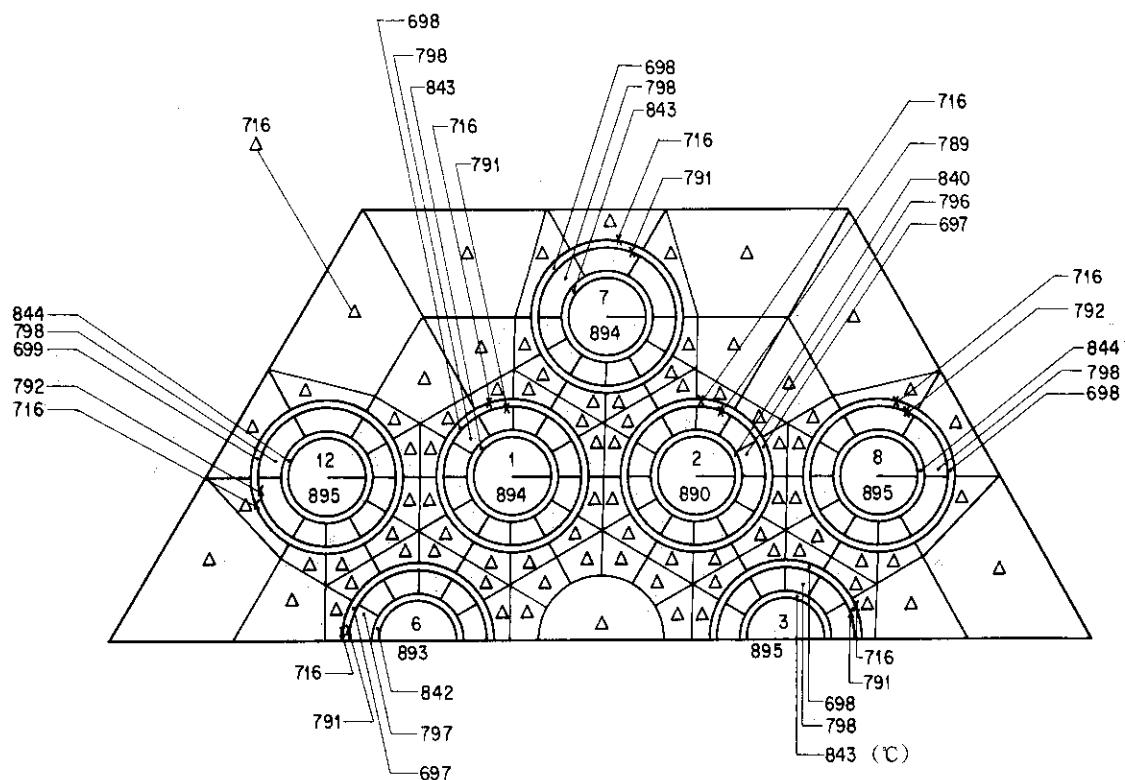
第 5.17図 均一出力分布実験に対する計算結果（第 3 段目第 4 メッシュ位置）



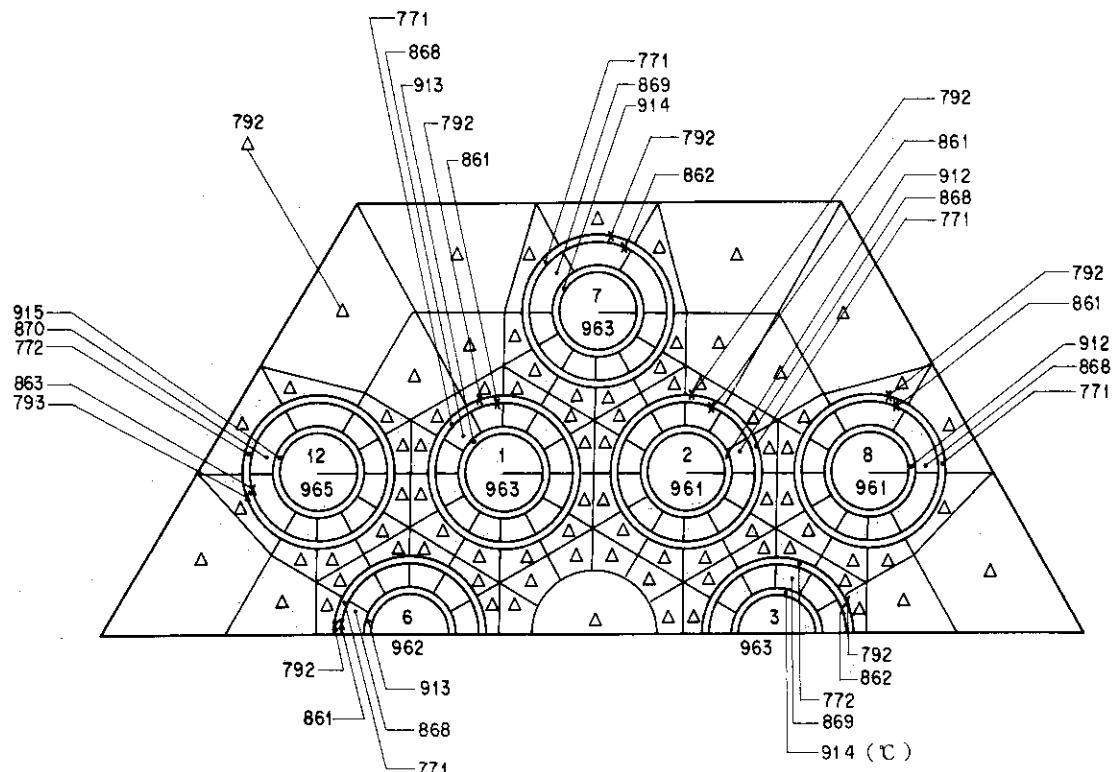
第 5.18図 均一出力分布実験に対する計算結果（第 4 段目第 4 メッシュ位置）



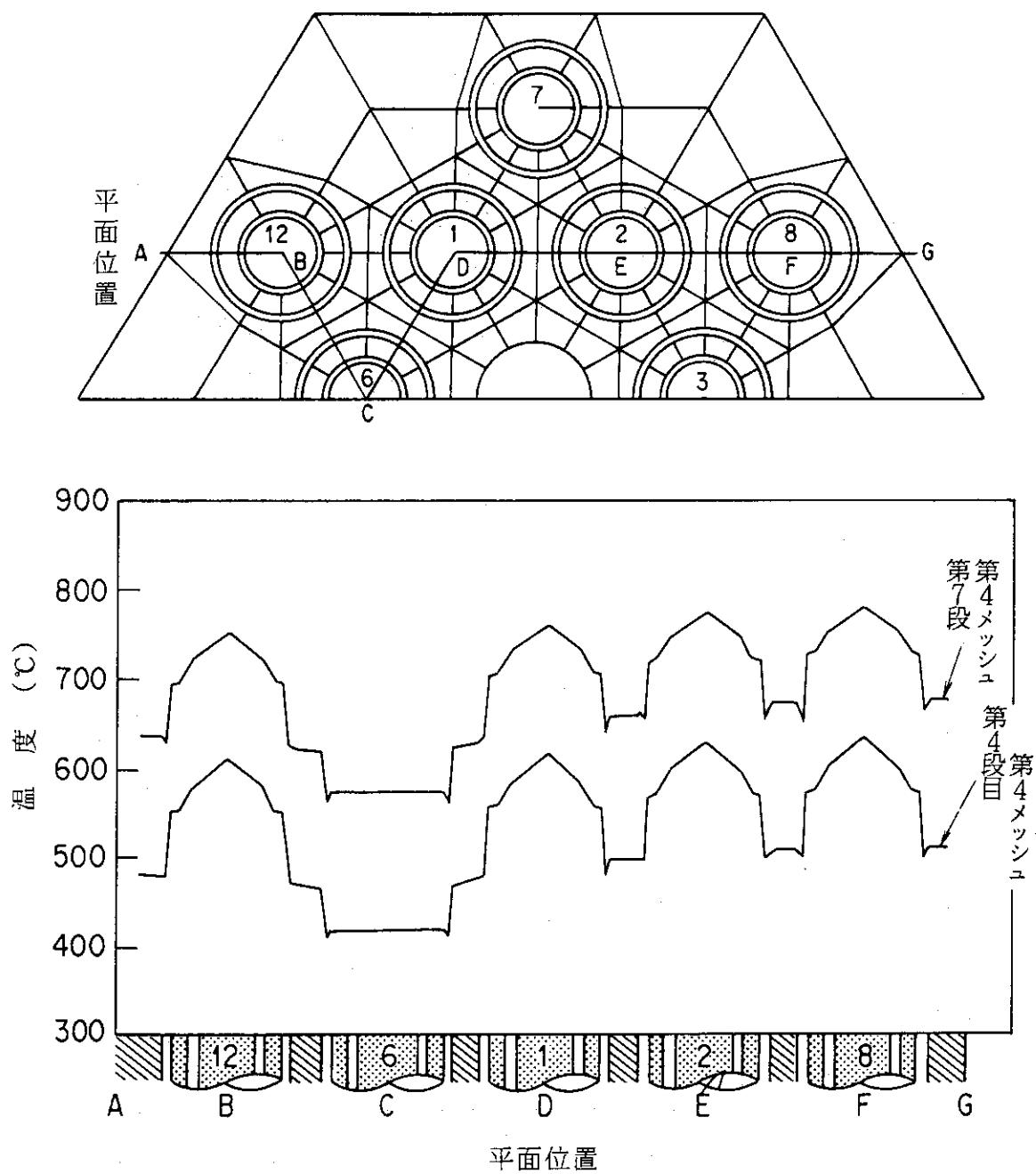
第 5.19図 均一出力分布実験に対する計算結果（第 5 段目第 4 メッシュ位置）



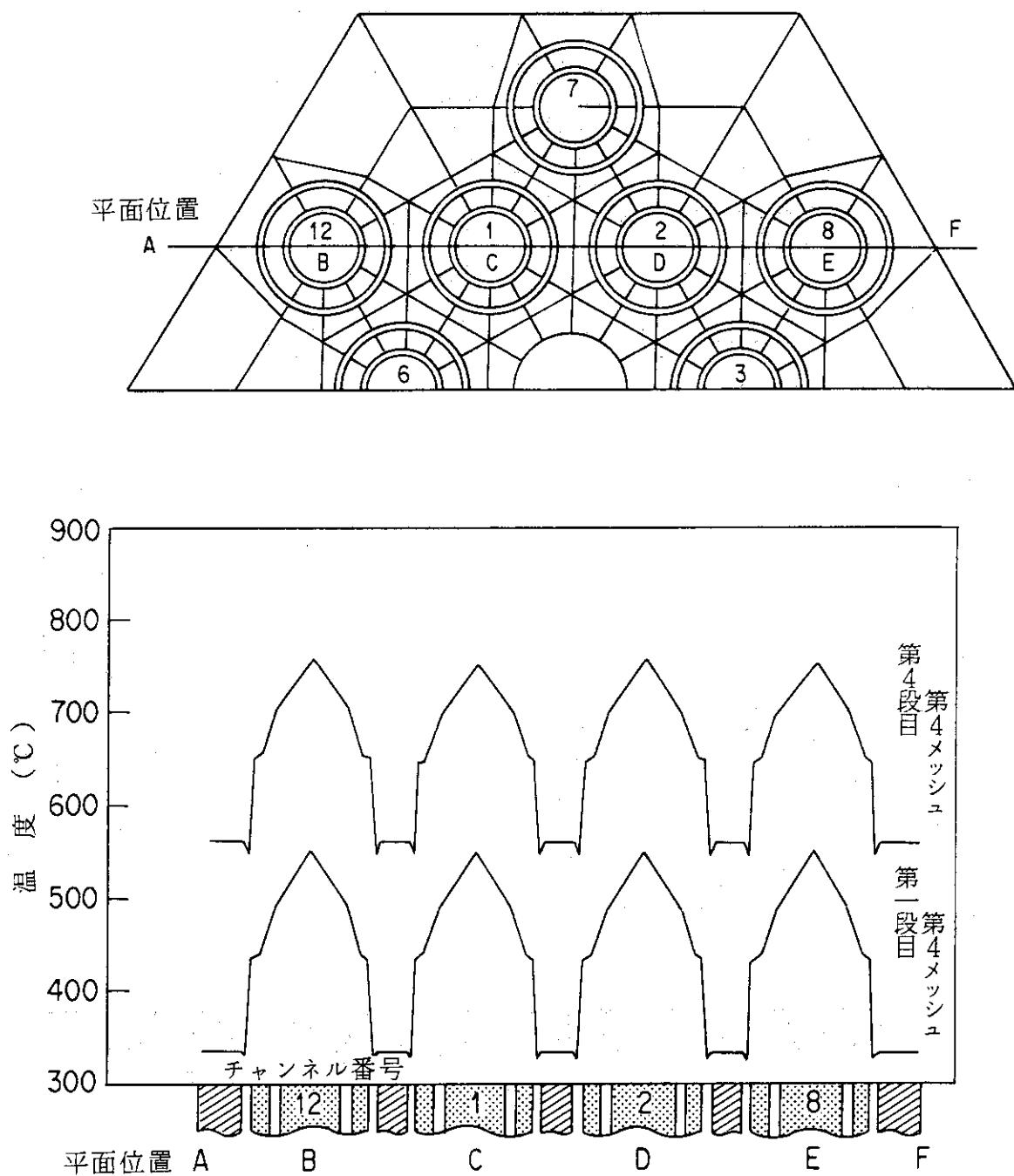
第 5.20 図 均一出力分布実験に対する計算結果（第 6 段目第 4 メッシュ位置）



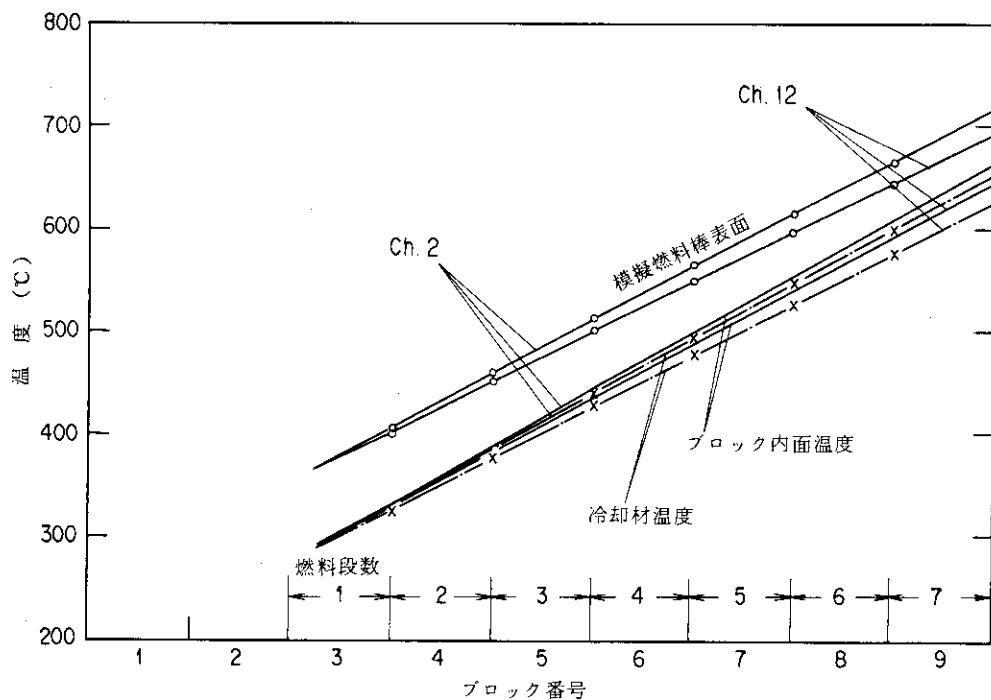
第 5.21 図 均一出力分布実験に対する計算結果（第 7 段目第 4 メッシュ位置）



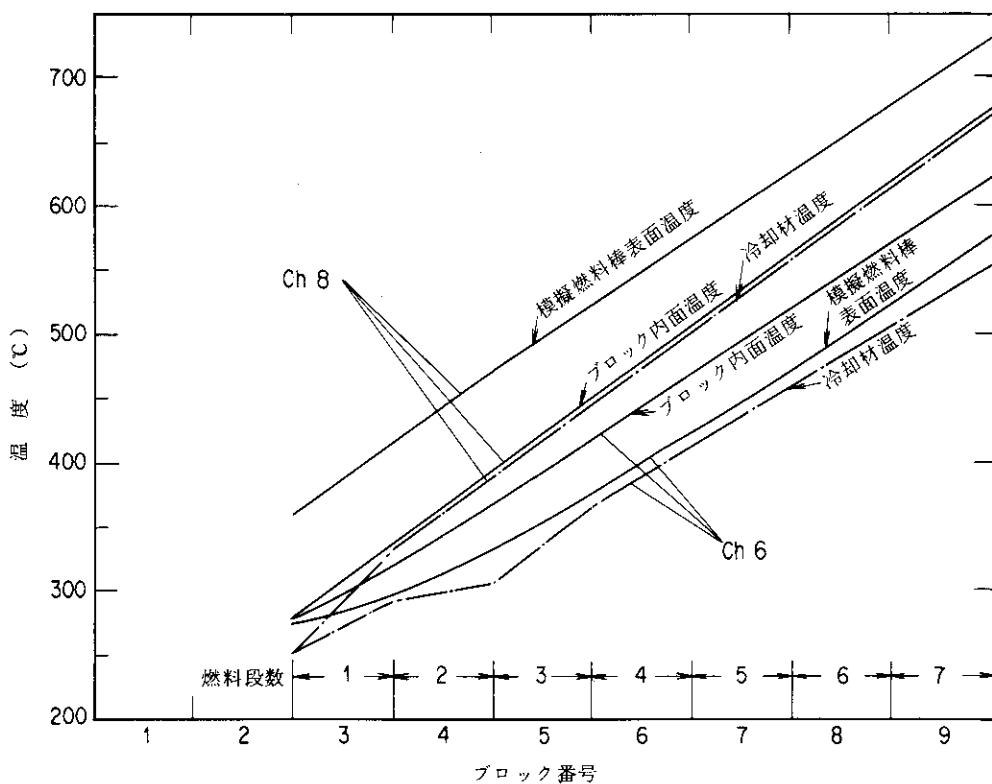
第5.22図 不平衡出力分布実験に対する平面温度分布の計算結果
(第4段目第4メッシュ位置及び第7段目第4メッシュ位置)



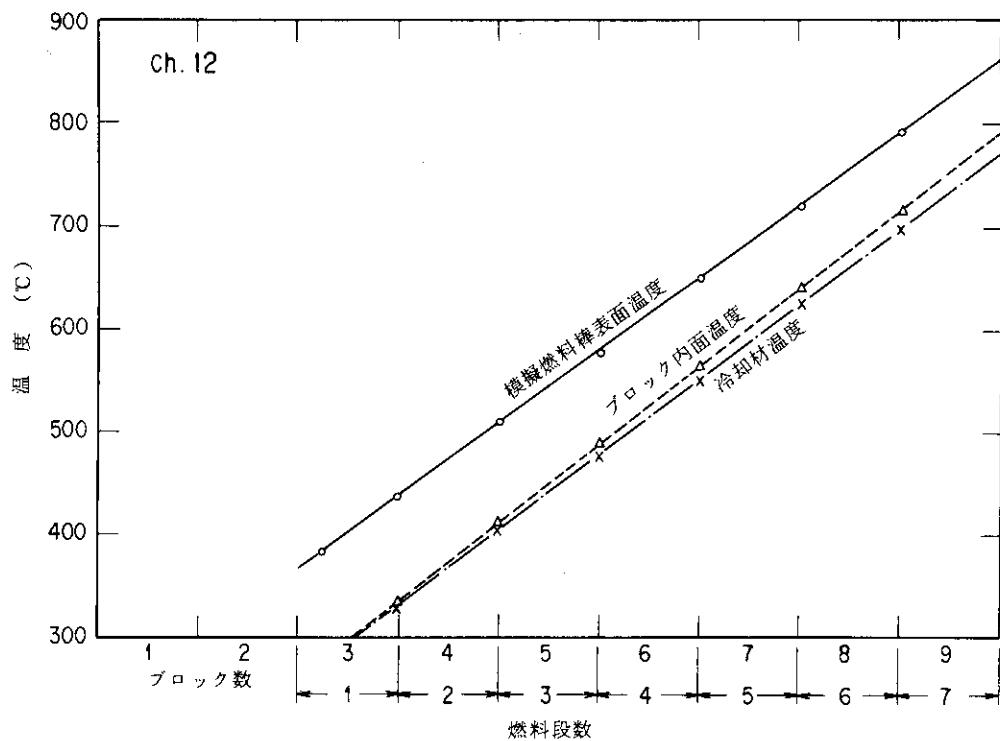
第 5.23 図 均一出力分布実験に対する平面温度分布の計算結果
(第1段目第4メッシュ位置及び第4段目第4メッシュ位置)



第 5.24 図 不平衡出力分布実験に対する軸方向温度分布
(チャンネル 2 及びチャンネル 12)



第 5.25 図 不平衡出力分布実験に対する軸方向温度分布
(チャンネル 6 及びチャンネル 18)



第 5.26 図 均一出力分布実験に対する軸方向温度分布の計算結果（12 チャンネル）

6. 結 言

高温工学試験研究炉の熱流動・熱伝導連成解析コード FLOWNET／TRUMP の検証のため、HENDEL T_{1-M} 実験の解析を当該コードで行い実験値と解析結果とを比較検討した。

検討に当たっては、まず、解析モデルの検討を行い TRUMP 部分の平面メッシュ分割を含む適切な伝熱及び流路モデルを決定した。次いで、模擬燃料体ブロック外周部のギャップとチャンネル間のクロス流路の影響は HENDEL T_{1-M} の実験では充分小さく無視できることを確認した上で、不平衡出力分布及び均一出力分布実験の 2 ケースを解析し、実験結果との比較検討を行った。

主要な結果は以下の通りである。

(1) チャンネル出口温度

チャンネル出口温度は均一出力分布実験、不平衡出力分布実験共、解析結果は実験結果とよい一致を示し、若干安全側の値を示した。

(2) チャンネル間流量配分

不平衡出力分布実験について解析結果を実験結果と比較すると、チャンネル 6 と他チャンネルとの間の流量差について多少違いがあるものの、発熱がゼロのチャンネル 6 の流量が最大であり、チャンネル 6 から遠ざかるに従って流量が減少するという一致した傾向を得られた。

さらに、不平衡出力分布実験がチャンネル 6 で出力ゼロという実炉条件とはかけ離れた条件での実験であることを考えると、チャンネル 6 での流量の解析結果と実験結果の相違は、実炉条件では十分に小さくなり無視できるものであることが分かった。

(3) 模擬燃料棒表面温度

模擬燃料棒表面温度は不平衡出力分布実験、均一出力分布実験共、解析結果は実験結果と良い一致を示し、若干安全側の値を示すことがわかった。

以上の結果から FLOWNET／TRUMP は実験結果を充分精度良く評価できることがわかった。

謝 辞

本報をまとめるにあたり、HENDEL T_{1-M}による実験データを御提示頂いた HENDEL 開発試験室の各位並びに終始御協力を頂いた高温工学試験研究炉設計室の各位に深謝致します。

6. 結 言

高温工学試験研究炉の熱流動・熱伝導連成解析コード FLOWNET／TRUMP の検証のため、HENDEL T_{1-M} 実験の解析を当該コードで行い実験値と解析結果とを比較検討した。

検討に当たっては、まず、解析モデルの検討を行い TRUMP 部分の平面メッシュ分割を含む適切な伝熱及び流路モデルを決定した。次いで、模擬燃料体ブロック外周部のギャップとチャンネル間のクロス流路の影響は HENDEL T_{1-M} の実験では充分小さく無視できることを確認した上で、不平衡出力分布及び均一出力分布実験の 2 ケースを解析し、実験結果との比較検討を行った。

主要な結果は以下の通りである。

(1) チャンネル出口温度

チャンネル出口温度は均一出力分布実験、不平衡出力分布実験共、解析結果は実験結果とよい一致を示し、若干安全側の値を示した。

(2) チャンネル間流量配分

不平衡出力分布実験について解析結果を実験結果と比較すると、チャンネル 6 と他チャンネルとの間の流量差について多少違いがあるものの、発熱がゼロのチャンネル 6 の流量が最大であり、チャンネル 6 から遠ざかるに従って流量が減少するという一致した傾向が得られた。

さらに、不平衡出力分布実験がチャンネル 6 で出力ゼロという実炉条件とはかけ離れた条件での実験であることを考えると、チャンネル 6 での流量の解析結果と実験結果の相違は、実炉条件では十分に小さくなり無視できるものであることが分かった。

(3) 模擬燃料棒表面温度

模擬燃料棒表面温度は不平衡出力分布実験、均一出力分布実験共、解析結果は実験結果と良い一致を示し、若干安全側の値を示すことがわかった。

以上の結果から FLOWNET／TRUMP は実験結果を充分精度良く評価できることがわかった。

謝 辞

本報をまとめるにあたり、HENDEL T_{1-M}による実験データを御提示頂いた HENDEL 開発試験室の各位並びに終始御協力を頂いた高温工学試験研究炉設計室の各位に深謝致します。

参 考 文 献

- (1) 幾島 賀：「TRUMP 3-JR：有限差分法による非線型熱伝導計算プログラム」，JAERI-M 84-017(1985).
- (2) 丸山 創他：「炉内流動解析コード FLOWNET の検証」，JAERI-M 88-138 (1988).
- (3) 井沢 直樹他：「燃料体スタック実証試験部 (HENDEL T₁) の概要と建設」，日本原子力学会誌，Vol.27，No.12，pp.1136-1146(1985).
- (4) 丸山 創他：「高温ガス実験炉燃料体の伝熱流動試験(Ⅲ) HENDEL 多チャンネル試験装置による不均一発熱試験結果と解析」，日本原子力学会誌，Vol.29，No.2，pp.133-140(1987).

付録 1 計算メッシュの妥当性の検討

燃料チャンネル間の伝熱を考慮して、TRUMPコードの計算メッシュを適切に定めるため、燃料体ブロックの2次元モデルを汎用の熱伝導計算コードNASTRANと本解析で使用するTRUMPコードとで解析した。チャンネル間の伝热量を比較しその違いが充分小さい値以下におさまることを確認した上で、本解析コードで用いるTRUMP部分のメッシュを定めた。以下にNASTRANとTRUMPとの比較について示す。

(1) 解析条件

① 解析モデル

解析モデルとして、燃料チャンネル間の特徴的なユニットセルに、ブロックコーナー部での燃料チャンネル間伝熱路を加えた2種類の燃料チャンネル間伝熱路を持つブロック部分の2次元モデルを選んだ。

(i) TRUMPコード用メッシュ

付図1(b)に示すメッシュとしている。

(ii) NASTRANコード用メッシュ

付図1(a)に示すメッシュとしており、このメッシュの細さは充分な精度の温度計算結果を与えると考えられるメッシュである。

② 境界条件

高温工学試験研究炉の運転条件を考慮して、付表1(a)に示すように冷却材温度、熱伝達率、線出力密度を与えていた。

(i) チャンネル間の冷却材温度差

高温工学試験研究炉の設計上の評価値を参考にして冷却材温度差の最大値を100°Cと定めている。

(ii) 熱伝達率

燃料棒からブロックへの輻射伝熱が大きくなるよう燃料棒の熱伝達率を低目にすることにより、燃料体ブロックの温度計算が高目に保守的に評価するよう定めた。

(iii) 線出力密度

高温工学試験研究炉の燃料棒の平均線出力密度ならびに、最大の燃料棒間の出力ピーキング1.1を考慮して定めた。

③ 物性値(熱伝導率及び輻射率)

ブロックの熱伝導率は、ブロック内での伝热量を大き目に計算するため高目の値を用いている。使用する値を付表1(b)に示す。

(2) 解析結果の比較

① 解析結果比較の基本的な考え方

FLOWNET/TRUMPは、高温工学試験研究炉の設計では、燃料ブロック熱応力解析を行なうための燃料ブロック詳細温度解析用の熱的境界条件評価及び燃料体ブロック

内での流路閉塞事故時の燃料温度及び黒鉛ブロック温度評価用に用いられる。したがって、 FLOWNET／TRUMPコードは燃料ブロック熱応力解析及び燃料温度解析に十分な精度をもった冷却材温度を算出することが必要となる。そこで、冷却材温度変化を生じる燃料チャンネル間の熱移動量に注目して、 NASTRAN及びTRUMPコード解析結果を比較した。

② 解析結果の比較

(i) 温度分布

TRUMPによる温度分布及びNASTRANによる温度分布を付図1に、 TRUMPとNASTRANの温度分布の比較を付図2及び3に示す。

TRUMPとNASTRANの温度分布はよく一致している。

(ii) 燃料チャンネル間熱移動量

TRUMPとNASTRANの各チャンネル間の移動熱量及びその比と偏差の最大値を付表2に示す。偏差の最大値は Q_2 で 3.74% であった。

③ 計算誤差が冷却材温度に与える影響

NASTRANによる計算値が真値に近いと考え、両コード解析結果の各チャンネル間伝熱量の違いから、不平衡出力実験での条件においてチャンネル出口での冷却材温度計算誤差を求めた。付表3に不平衡出力分布実験 ch. 6 の結果を示す。

(i) 実験結果による燃料チャンネル間移動熱量

不平衡出力実験、ch 6 0%出力及びch 6 50%出力のch 6での移動熱量は、発熱量と冷却材の受熱量との差から次のようにになった。

ch 6 0%出力試験 ; 4.66 kcal/s

ch 6 50%出力試験 ; 2.38 kcal/s

(ii) 出口冷却材温度計算誤差

出口冷却材温度計算誤差は、②(ii)項の燃料チャンネル間移動熱量の偏差の最大値及び上項の燃料チャンネル間移動熱量により次のようになつた。

ch 6 0%出力実験 ; 12.4 °C

ch 6 50%出力実験 ; 6.6 °C

④ 評 價

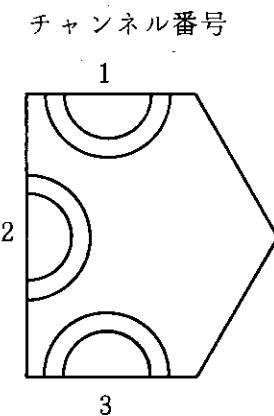
以上の解析結果比較により、TRUMPとNASTRANの燃料チャンネル間伝熱量計算誤差は 3.7 % であり比較的よく一致している。

ch 6 0%出力実験条件では、この誤差は冷却材出口温度で 12.4 °C の誤差となり無視し難くなるが、実機条件に近い傾斜出力分布実験の場合には、熱移動量最大の ch 11 で、わずか 1.6 °C であり十分に小さな誤差である。

この結果から、計算誤差 3.7 % は目的とする FLOWNET／TRUMP 解析条件では十分であるといえる。そこで、本検討で作成したメッシュを用いて検討を行うこととした。

付表 1(a) 境界条件

境界条件	チャンネル 1	チャンネル 2	チャンネル 3
冷却材温度 (℃)	850	900	950
熱伝達率 (kcal/m ² h°C)	350	350	350
線出力密度 (kW/m)	9	9.5	10

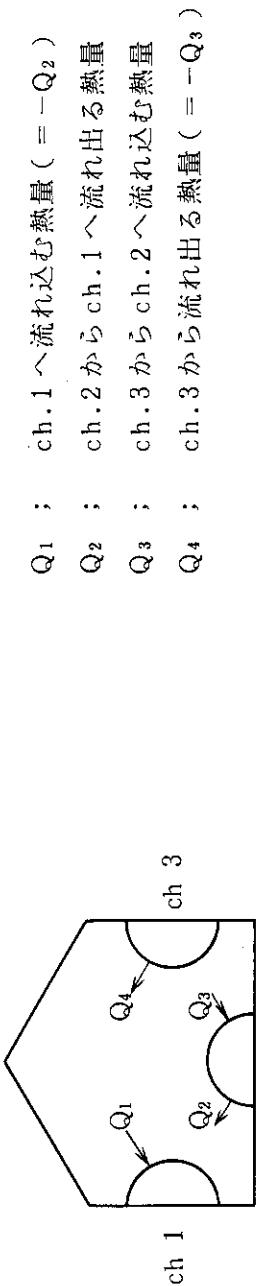


付表 1(b) 使用材料物性値

構造物	材質	物性値
ブロック	IG-11	i) 熱伝導率 52.1 (kcal/mh°C) (未照射, 400°C) ii) 輻射率 0.8
燃料棒	IG-11	i) 熱伝導率 32.7 (kcal/mh°C) (未照射 1200°C) ii) 輻射率 0.8

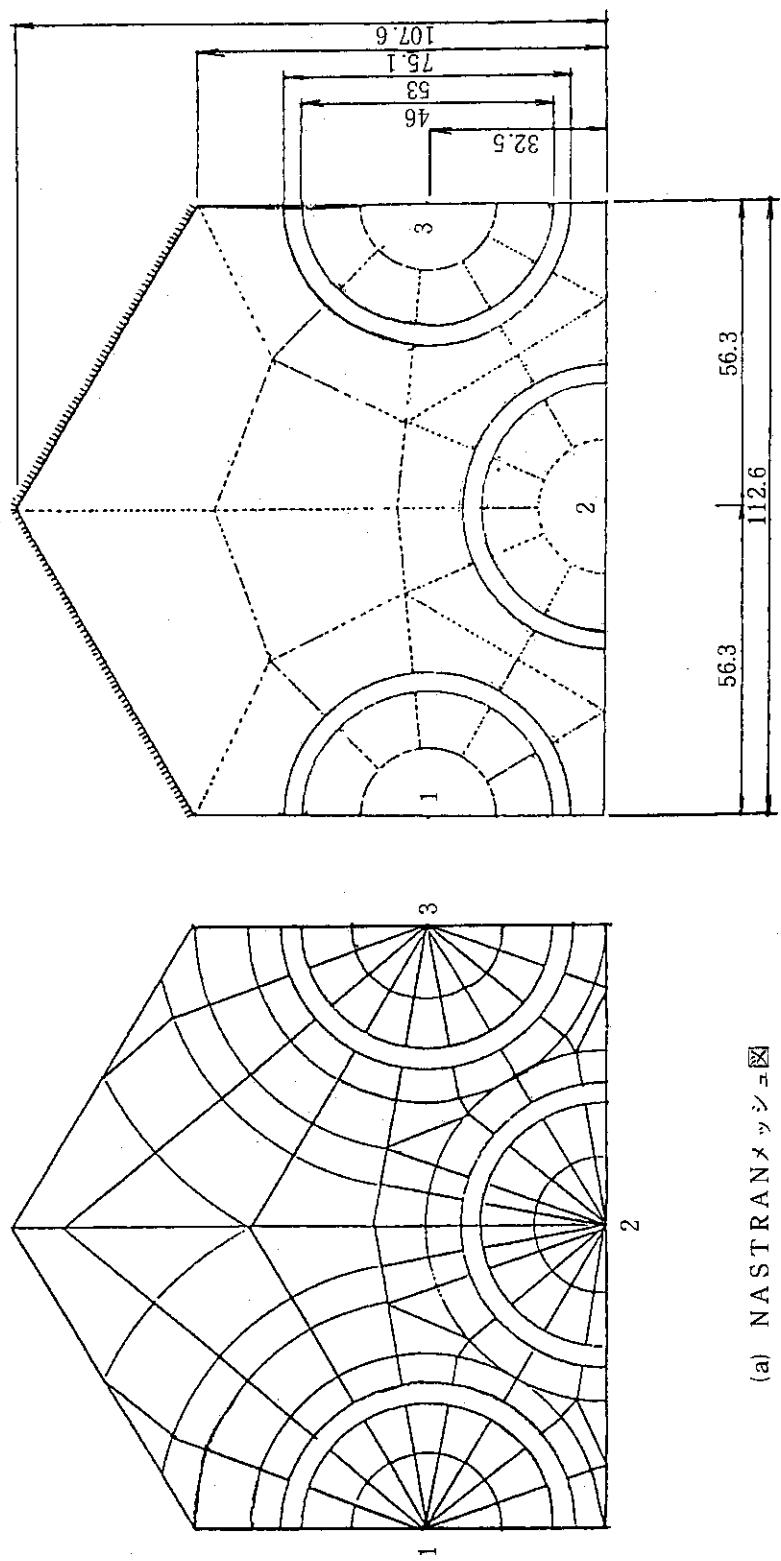
付表 2 TRUMP, NASTRAN 計算結果の比較

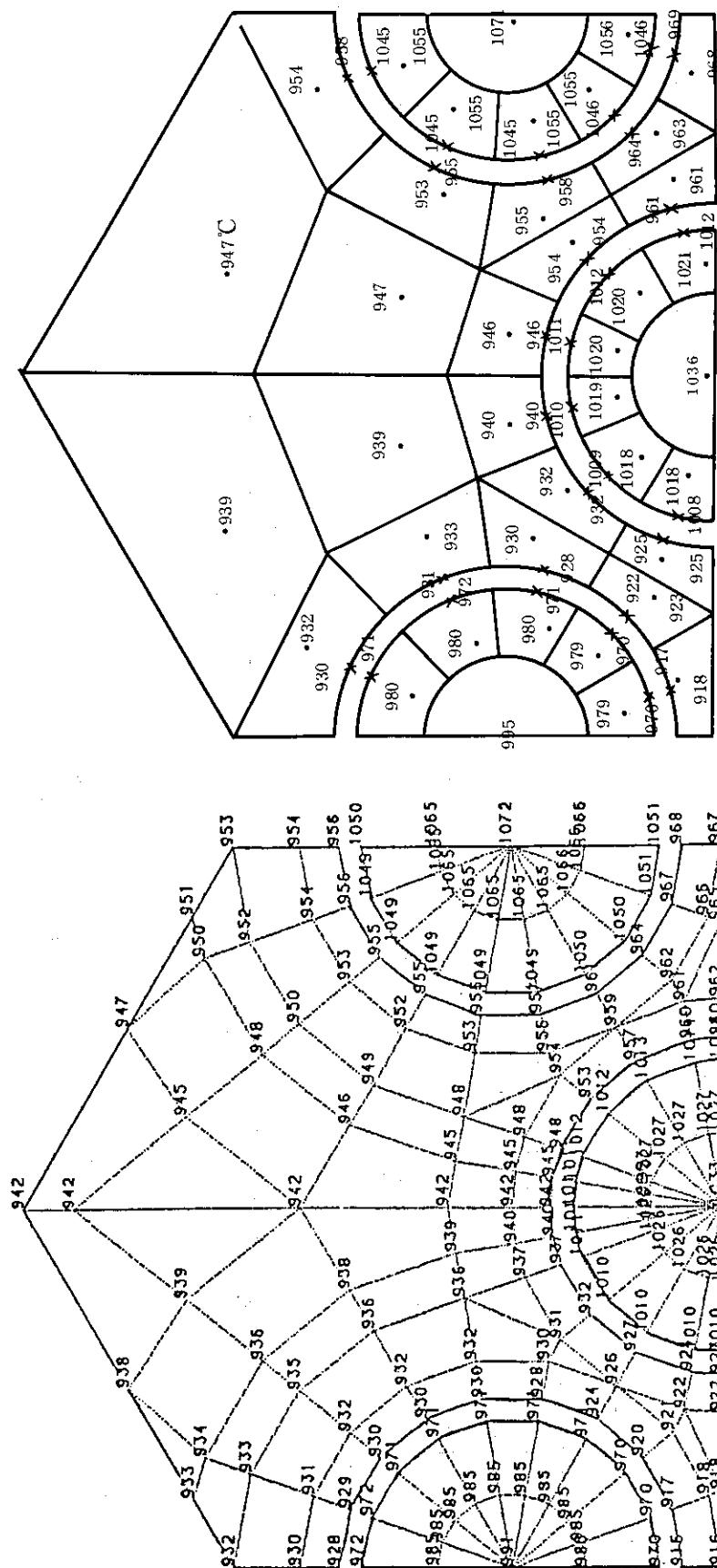
	TRUMP 計算結果 Q_{TR} (kcal/s)	NASTRAN 計算結果		計算結果の比 Q_{TR}/Q_{NA}	偏差の絶対値 $R = 1 - Q_{TR}/Q_{NA}$
		Q_{NA} (kcal/s)	Q_{TR}/Q_{NA}		
チャンネル間移動熱量 Q_1	3.3141×10^{-1}	3.3504×10^{-1}	0.98917	0.0108	
Q_2	6.7676×10^{-2}	6.5234×10^{-2}	1.0374	-0.0374	
Q_3	6.5829×10^{-2}	6.7916×10^{-2}	0.96927	0.0307	
Q_4	3.3145×10^{-1}	3.3504×10^{-1}	0.98928	0.0107	



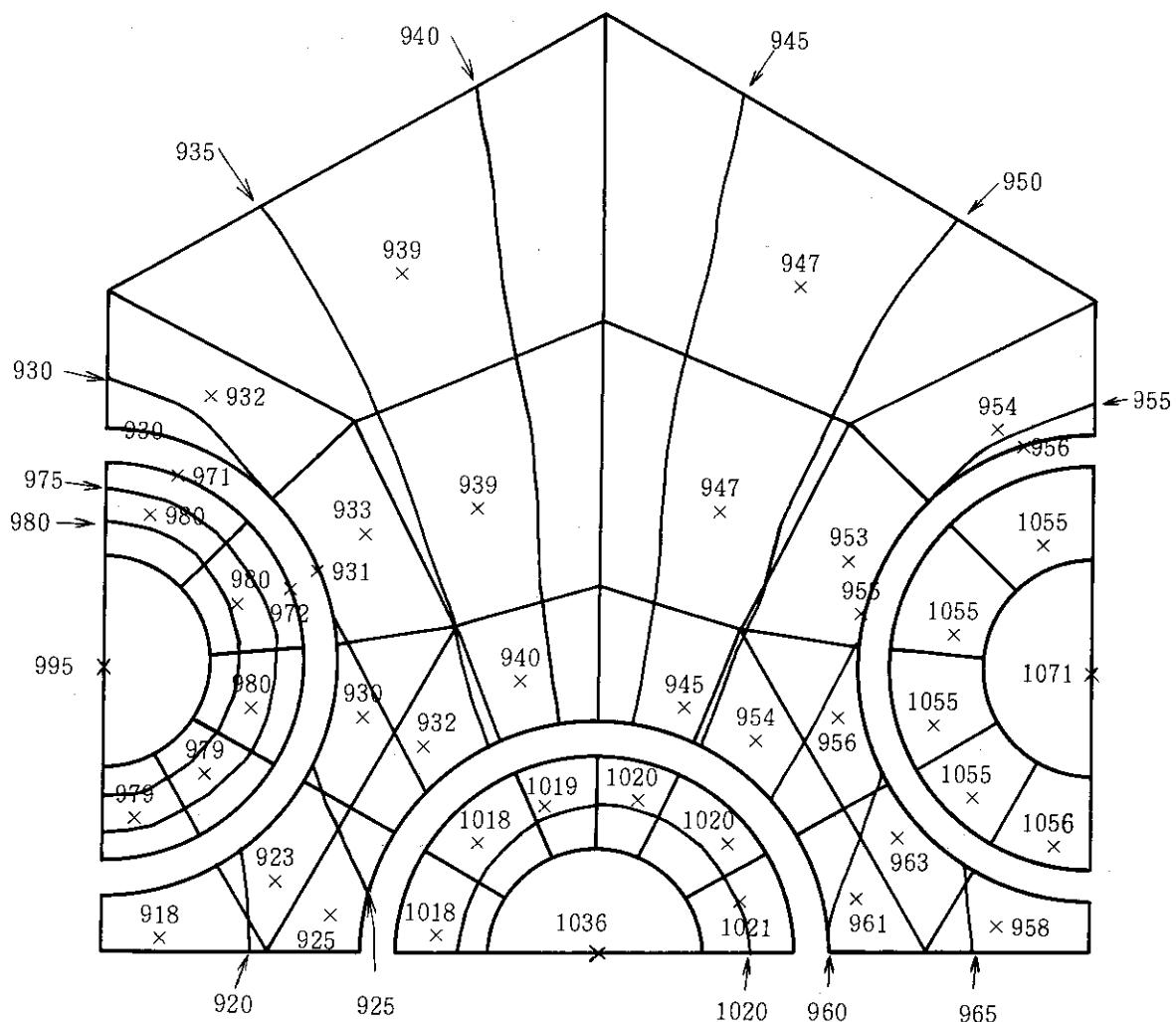
付表 3 不平衡出力実験結果
チャンネル 6 0%出力実験

チャンネル 6	流量 (g/s)	出力 (kW)	チャンネル 入口温度 (°C)	チャンネル 出口温度 (°C)
	11.3	0.1	271.6	605.9





付図 2 NASTRAN と TRUMP 温度分布計算結果の比較



~~ 部はNASTRANの計算結果等温線

× 印はTRUMP計算結果ノード温度

付図3 TRUMPとNASTRAN温度分布の比較

付録2 模擬燃料ブロックの径及び軸方向伝熱量の検討

HENDEL-T1 の実験結果から径方向及び軸方向の伝熱量を推定し比較した。

(1) 径方向伝熱量の推定

HENDEL-T1 では模擬燃料棒の表面温度を測定している。不平衡出力実験では、チャンネル6の出力がゼロであるため、チャンネル6の模擬燃料棒表面温度はチャンネル6の冷却材温度に近いと考えられる。

この冷却材温度の上昇からチャンネル6外周壁部分での径方向伝熱量(1/4周囲, 1/4ブロック)は次のようになる。

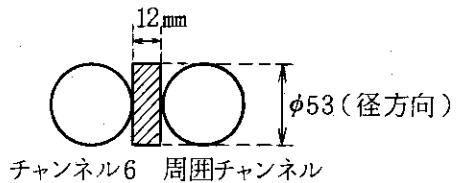
$$1\text{段での温度上昇} = \sim 50^\circ\text{C}$$

$$\text{チャンネル6の流量} = 11.3 \text{ g/s}$$

$$\text{径方向の伝熱量: } Q_R = 11.3 \times 10^{-3} \times 1.24 \times 50 \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{4} = 4.38 \times 10^{-2} (\text{kcal/s})$$

(2) 軸方向伝熱量の推定

軸方向伝熱は右図に示すようにチャンネル6の外周部1/4について、軸方向1/4段で考える。チャンネル6の1段での温度上昇50°Cから、1/4段でのチャンネル6周囲1/4段の温度上昇を $\frac{50}{4}$ °Cとする。



$$\begin{aligned} \text{軸方向伝熱量} \quad Q_A &= k^* A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \\ &= (0.0115)(0.012)(0.053) \left(\frac{50/4}{0.57/4} \right) \\ &= 6.42 \times 10^{-4} (\text{kcal/s}) \end{aligned}$$

(3) 径方向及び軸方向伝熱量の比較

上記(1), (2)より軸方向伝熱量は径方向伝熱量の約 1.5 %であり、軸方向伝熱を無視しても影響は小さいことがわかる。

* ブロックの熱伝導率として 610°C の値, $k = 0.0115 \text{ kcal/ms°C}$ を使用。