

JAERI-M
88-138

炉内流動解析コード FLOWNET の検証

1988年7月

丸山 創・村上 知行*・木曾 芳広*
教土 幸夫

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。

入手の間合わせは、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、お申しこしてください。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

炉内流動解析コードFLOWNET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・村上 知行*・木曾 芳広*・数土 幸夫

(1988年6月23日受理)

本報は、高温工学試験研究炉（HTTR：High Temperature engineering Test Reactor）の炉内流動解析コード“FLOWNET”の検証解析結果についてまとめたものである。本検証解析では、炉心有効流量に影響を及ぼすクロス流れ及び漏れ流れについて、実機と同規模の炉外流動試験結果との比較検討を行った。検証解析結果と試験結果は良く一致し、解析コード、モデル及び使用したデータの妥当性が確認された。

Verification of in-vessel thermal and hydraulic analysis
code "FLOWNET"

Soh MARUYAMA, Tomoyuki MURAKAMI*, Yoshihiro KISO*
and Yukio SUDO

HTTR Designing Laboratory
Oarai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received June 23, 1988)

This report presents the verification results of in-vessel thermal and hydraulic analysis code, "FLOWNET", for the High Temperature engineering Test Ractor (HTTR). The experimental results by 1 column test facility and in-core structure test section (HENDEL T₂) were used in course of validation of accuracy of the code and of adequateness of data-base.

Verification results showed quite good agreement with the experimental results.

Keywords: HTTR, FLOWNET, Network Model, Thermal and hydraulic Analysis, Verification, Cross Flow, Leak Flow, 1 Column Test Facility, In-core Structure Test Section

* Fuji Electric Co.

目 次

1. 緒 言	1
2. FLOWNET の概要	5
2.1 流路網モデル	5
2.2 解析手法	5
3. 検証解析	12
3.1 クロス流れ試験	12
3.2 固定反射体漏洩試験	14
4. 解析結果	25
4.1 クロス流れ試験の解析結果	25
4.2 固定反射体漏れ流れの解析結果	26
5. あとがき	39
謝 辞	39
参考文献	39

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of FLOWNET code	5
2.1 Network model	5
2.2 Analytical method	5
3. Verification analysis	12
3.1 Crossflow test	12
3.2 Permanent reflector leak test	14
4. Analytical results	25
4.1 Crossflow test results	25
4.2 Permanent reflector leak test results	26
5. Conclusion	39
Acknowledgement	39
References	39

1. 緒 言

現在日本原子力研究所では、熱出力30MW、原子炉出口冷却材温度950°Cの高温工学試験研究炉（HTTR：High Temperature engineering Test Reactor）の設計を進めている⁽¹⁾。

HTTRの炉心燃料領域は、Fig.1.1及び1.2に示すように六角柱状の黒鉛ブロックを積み重ねたカラムの集合体であり、燃料体カラム30カラム及び制御棒案内ブロックのカラム7カラム合計37カラムから構成されている。燃料体カラムは、Fig.1.3に示す燃料体が高さ方向に5段積み重ねられている。一次冷却材（ヘリウムガス、4MPa）は、炉容器下部から395°Cで流入し、炉床部及び炉側部の金属構造物及び炉容器を冷却しながら上向きに流れ、上部プレナムにおいて燃料冷却チャンネル、制御棒冷却チャンネルに分配される。各チャンネルを加熱されながら下向きに流れた冷却材は、高温プレナムにおいて混合された後、950°Cで出口管を通り炉外に流出する。

炉心及び炉内構造物は、大部分が黒鉛により構成されているため、上述の計画された流路以外に熱・照射変形、製作公差等によるブロック間の隙間を流れる漏れ流れが生じる。漏れ流れには、固定反射体間の隙間を通り高温プレナムまたは炉心に漏れ込む流れ、高温プレナムブロック間の隙間を通り燃料体間のカラム間ギャップから高温プレナムに漏れ込む流れ、カラム間ギャップの流れ、燃料体等の積層面を水平に流れるクロス流れ等がある。過大な漏れ流れが生じると、炉心有効流量（燃料の冷却に直接寄与する流量）が減少し、燃料温度の上昇をまねく。また低温の漏れ流れが炉心に多量に流入すると、燃料体等の炉心構成要素に過大な熱応力が発生することになり、構造健全性上の問題となる。したがって炉内冷却材流量配分を精度良く評価することは、炉心熱流設計において最も重要な項目の一つである。

炉心熱流設計では、流路網解析コードFLOWNETを用いて、定常時の炉内冷却材温度、圧力及び流量分布を評価している⁽²⁾。FLOWNETは、炉内流路の合流点（結合点）をノードと呼び、各ノード間を流路ブランチで、流路ブランチ間を伝熱路で結合した流路網モデルにより炉内の流動状態を求めるコードである。各流路ブランチには、実際の流路寸法の他に、別途要素試験等により得られた流動抵抗係数（シール性能、クロス流れ抵抗係数等）を与えることにより、実機をモデル化している。炉心熱流設計では、FLOWNETにより得られた炉心有効流量に基づいて燃料温度、被覆燃料粒子の破損率を評価する。また炉内構造物の構造健全性評価には、本コードにより得られた冷却材流量及び温度を境界条件として用いる。

以上述べてきたように炉心熱流設計では、FLOWNETにより得られる冷却材流量配分が基本となることから、その解析精度、モデルの妥当性の検証が重要課題となる。そこでFLOWNETの解析精度、モデルの妥当性を検証するために密封試験体1カラム試験装置によるクロス流れ試験結果⁽³⁾及びHENDEL炉内構造物実証試験部（T₂）による炉床部冷却材漏洩試験結果⁽⁴⁾についての解析を実施した。

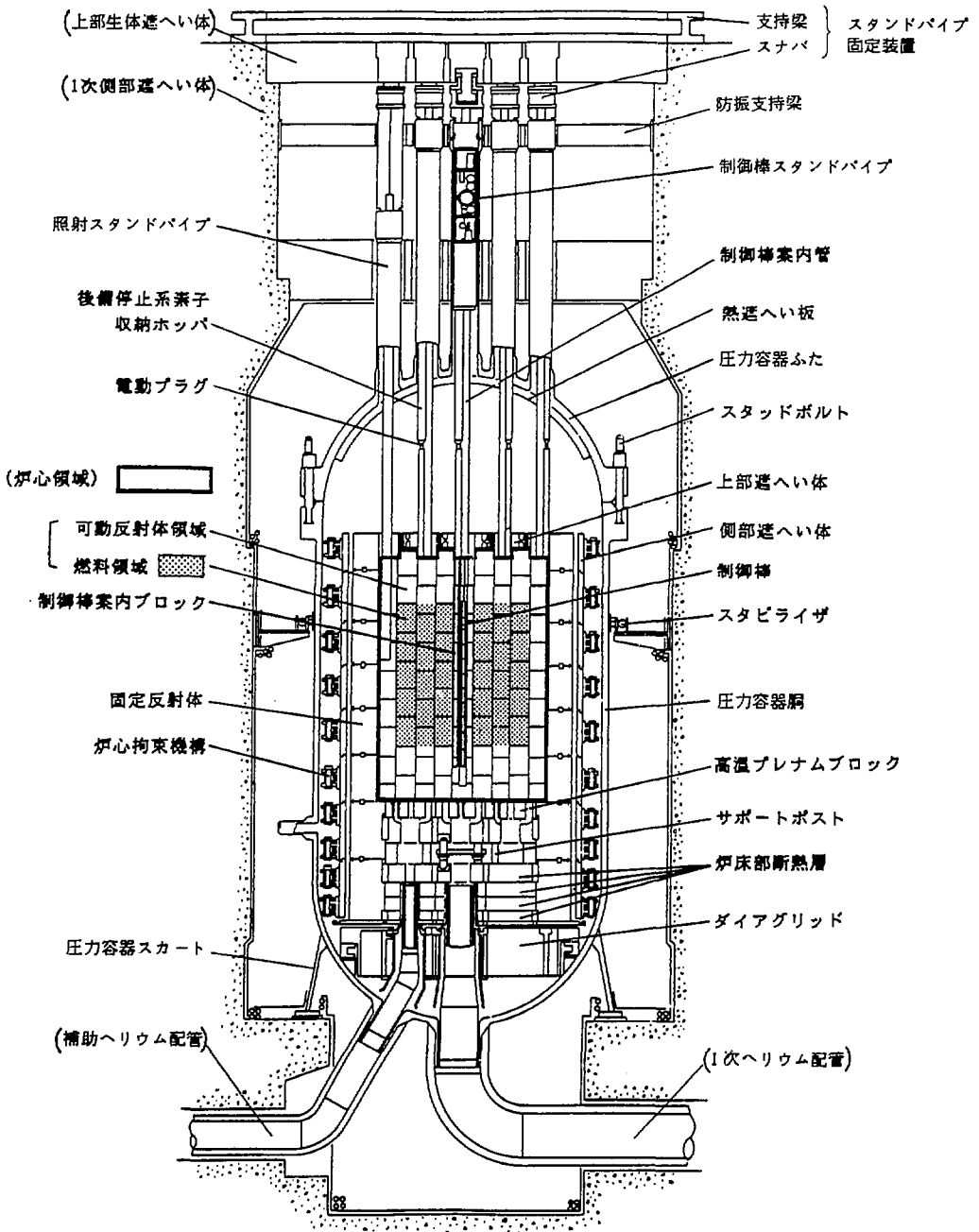


Fig. 1.1 H T T R 原子炉縦断面図

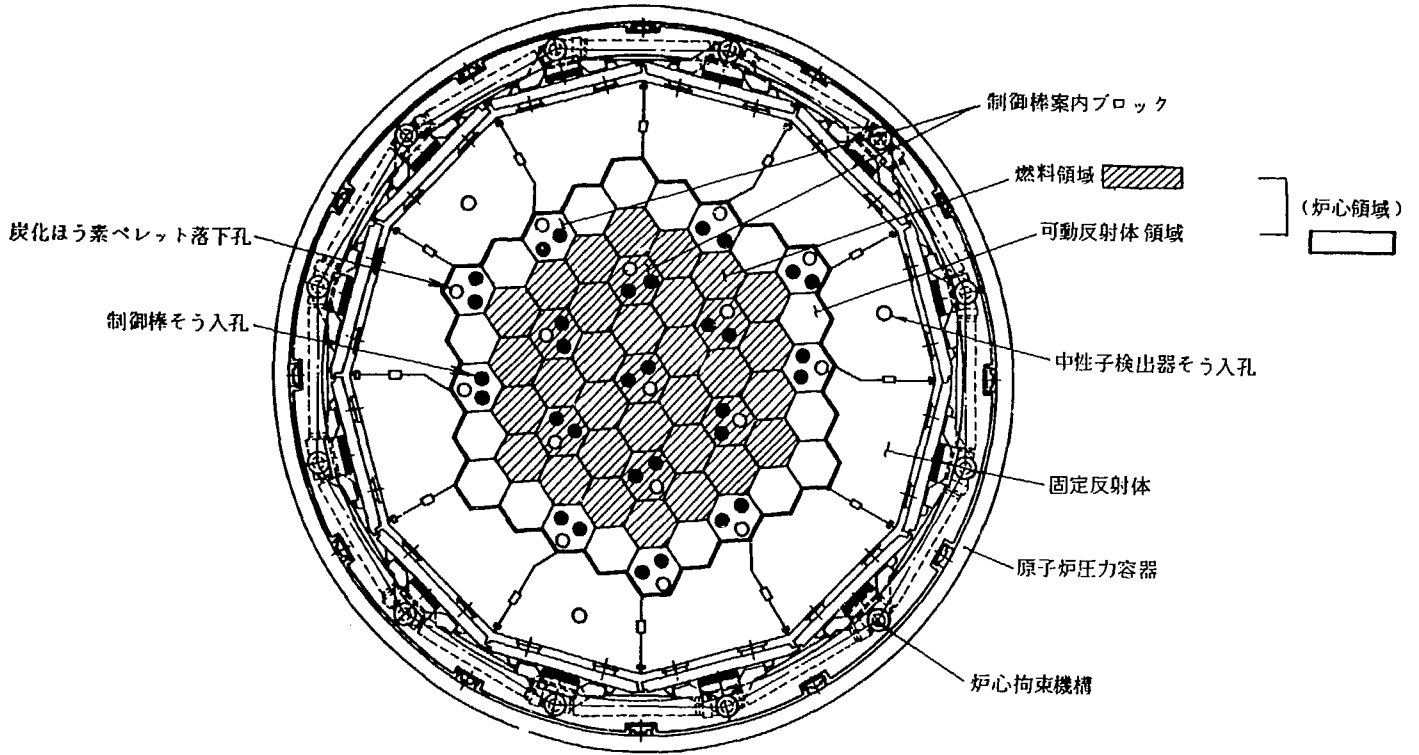


Fig. 1.2 HTTR 炉心水平断面図

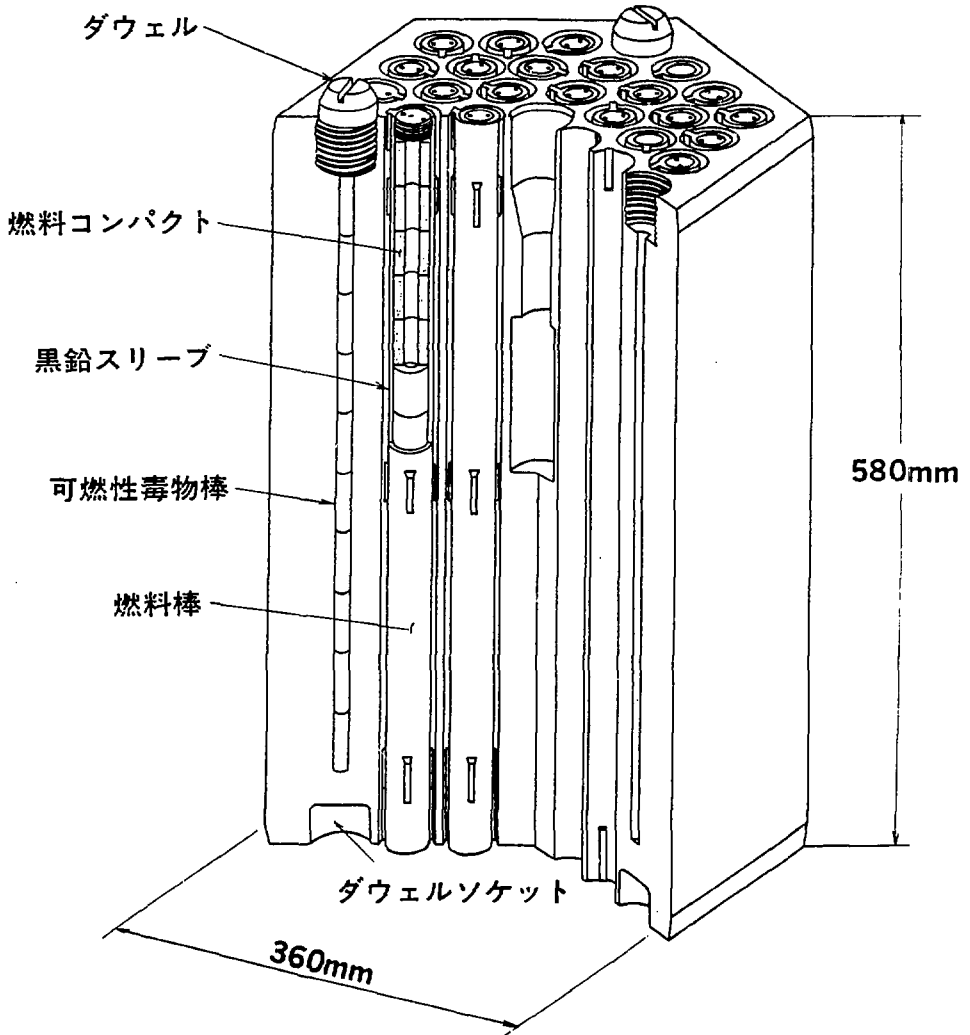


Fig.1.3 燃料体構造図

2. FLOWNETの概要⁽⁵⁾

2.1 流路網モデル

FLOWNETは、HTTR 炉心を模擬した流路網内の定常状態の温度、圧力及び流量分布を解析するコードである。FLOWNETでは、各流路にノードと呼ばれる代表点を取り、ノード間を1次元の流路ブランチで結合し、さらにブランチ間を伝熱路で結合した流路網モデルを用いる。燃料体まわりの冷却材流路と伝熱路及び解析モデルの例をFig. 2.1に示す。同図中の上図及び下図に示す・がノードを表わし、矢印と \sim が流路ブランチと伝熱路を示している。伝熱路のうち、 \triangle は燃料棒から主流冷却材への、 \triangleleft 、 \triangleright は主流冷却材とカラム間ギャップを流れるバイパス流れの間の伝熱路を示している。また流路ブランチのうち④、⑤は、ブロック積層面におけるバイパス流れと主流との間の漏れ流れ、即ちクロス流れ、を模擬したブランチである。

炉心熱流体力設計では、Fig. 2.1に示したようなモデルを基本構成要素とし、炉心の対称性からFig. 2.2中に斜線で示したように水平断面内の $1/6$ 領域を詳細にモデル化して炉内流量配分解析を行っている。このときの $1/6$ 断面内の流路ブランチの配置をFig. 2.3に示す。カラム内の燃料冷却チャンネル(F)は、等価な1流路で模擬し、カラム間ギャップ流路(G)は各カラムの1辺毎に設けている。また制御棒挿入孔(C)及び後備停止系素子挿入孔(X)についても燃料冷却チャンネルと同様に考慮している。図中の記号V及びBは、それぞれ側部遮へい体と圧力容器間、固定反射体と側部遮へい体間の流路を示している。また記号Pは、固定反射体縦置き及び横置キーの内外に設けたノードである。

半径方向の伝熱路は、Fig. 2.4に示すように冷却チャンネルとカラム間ギャップ間、カラム間ギャップ同士の間等に配置し、各流路の冷却材温度を評価している。

2.2 解析手法

FLOWNETでは、各ノード及びブランチに以下に示す基礎式を適用して、流路網内の定常状態における温度、圧力及び流量分布を計算する。なお計算では、物性値の温度依存性を考慮している。

I) 連続の式(ノード*i*における流れの連続の式)

$$\sum_j W_{ij} + S_i = 0 \quad (2.1)$$

II) エネルギー式(ノード*i*における熱収支)

$$\sum_j W_{ij} \cdot T_{bij} + T_{si} \cdot S_i + T_i \sum_j W_{ij} = 0 \quad (2.2)$$

Ⅲ) 運動方程式 (ブランチ ij における圧力損失)

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

$$= \frac{1}{2 \bar{\rho}_{ij}} \left(\frac{W_{ij}}{A_{ij}} \right)^2 \left\{ 4 f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}} + 2 \bar{\rho}_{ij} \left(\frac{1}{\rho_{ij}^{out}} - \frac{1}{\rho_{ij}^{in}} \right) + K_{ij} \right\} \quad (2.3)$$

ここで、

- W_{ij} : ブランチ ij の質量流量
- S_i : ノード i における湧出量
- T_i : ノード i における流体混合温度
- T_{Bij} : ブランチ ij からノード i への流入流体温度
- T_{Si} : ノード i における湧出流体温度
- P_i, P_j : ノード i, j における圧力
- D_{ij} : ブランチ ij の流路等価直径
- $\bar{\rho}_{ij}$: " の平均流体密度
- ρ_{ij}^{in} : " 入口の流体密度
- ρ_{ij}^{out} : " 出口の "
- f_{ij} : " の摩擦損失係数
- K_{ij} : " の形状 "
- L_{ij} : " の流路長
- A_{ij} : " の流路面積

である。

各ノード圧力及びブランチ流量は、(2.1)、(2.3)式から圧力Pに関する非線形連立方程式を解くことにより得られる。いま、(2.3)式を W_{ij} に関する1次式とみなすと、

$$P_i - P_j = -R_{ij} \cdot W_{ij} \quad (2.4)$$

が得られる。ここで、

$$R_{ij} = \left\{ \left(4 f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}} + K_{ij} \right) / 2 \bar{\rho}_{ij} + \left(\frac{1}{\rho_{ij}^{out}} - \frac{1}{\rho_{ij}^{in}} \right) \right\} \frac{|W_{ij}|}{A_{ij}} \quad (2.5)$$

である。(2.4)式を(2.1)式に代入すると、次式に示すような圧力Pに関する式が得られる。

$$\sum_j \frac{P_j}{R_{ij}} + P_i \sum_j \frac{1}{R_{ij}} + S_i = 0 \quad (2.6)$$

(2.6) 式を流量に依存する係数を再評価しながら繰返し計算を行い、ノード圧力 P 及びブランチ流量 W の収束値を求める。ノード温度は、各ノードに(2.2) 式を適用し、(2.6) 式から得られた圧力 P と流量 W に基づいて計算する。

以上のステップを繰返し、炉内の定常状態の圧力、温度及び流量分布を求める。

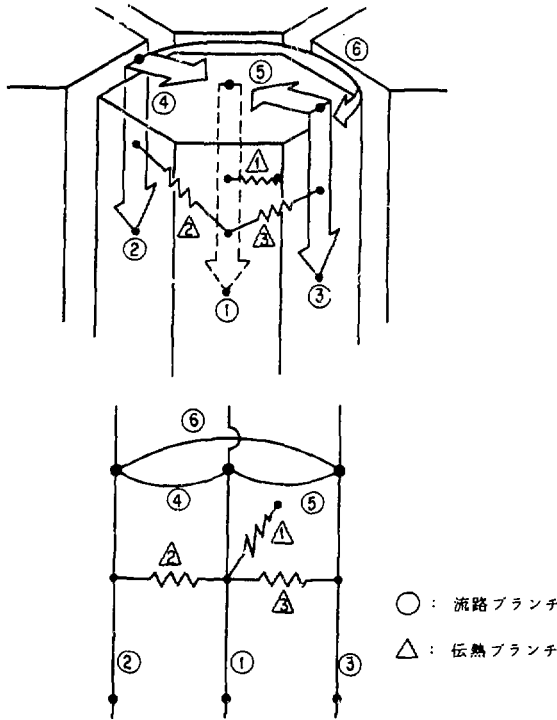


Fig. 2.1 燃料体まわりの流れと解析モデル

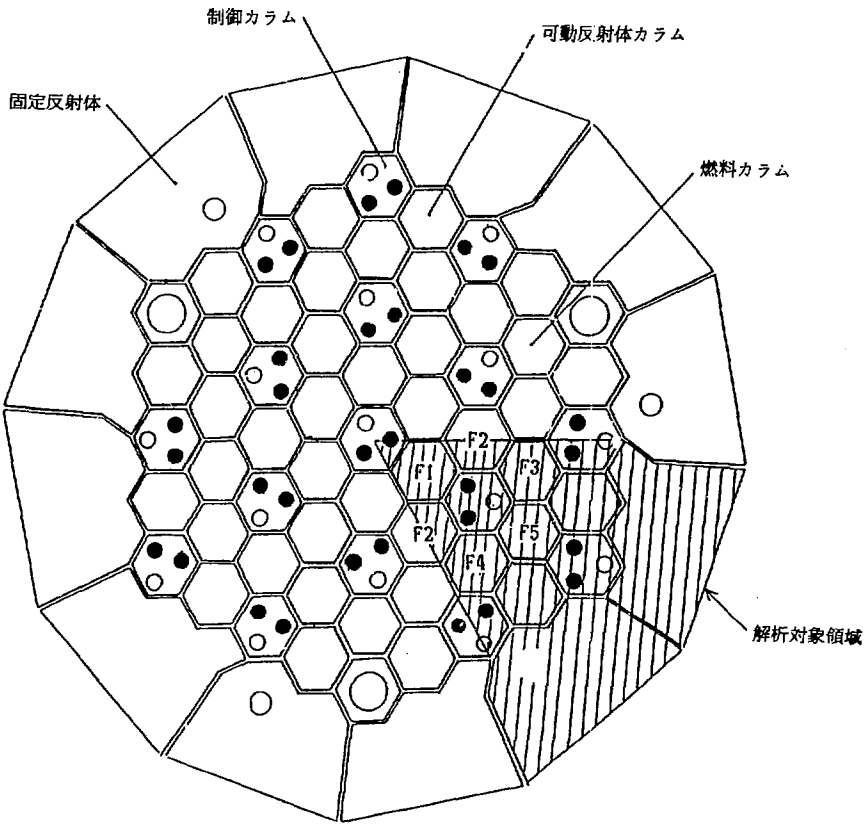


Fig. 2.2 炉心水平断面と解析対象領域

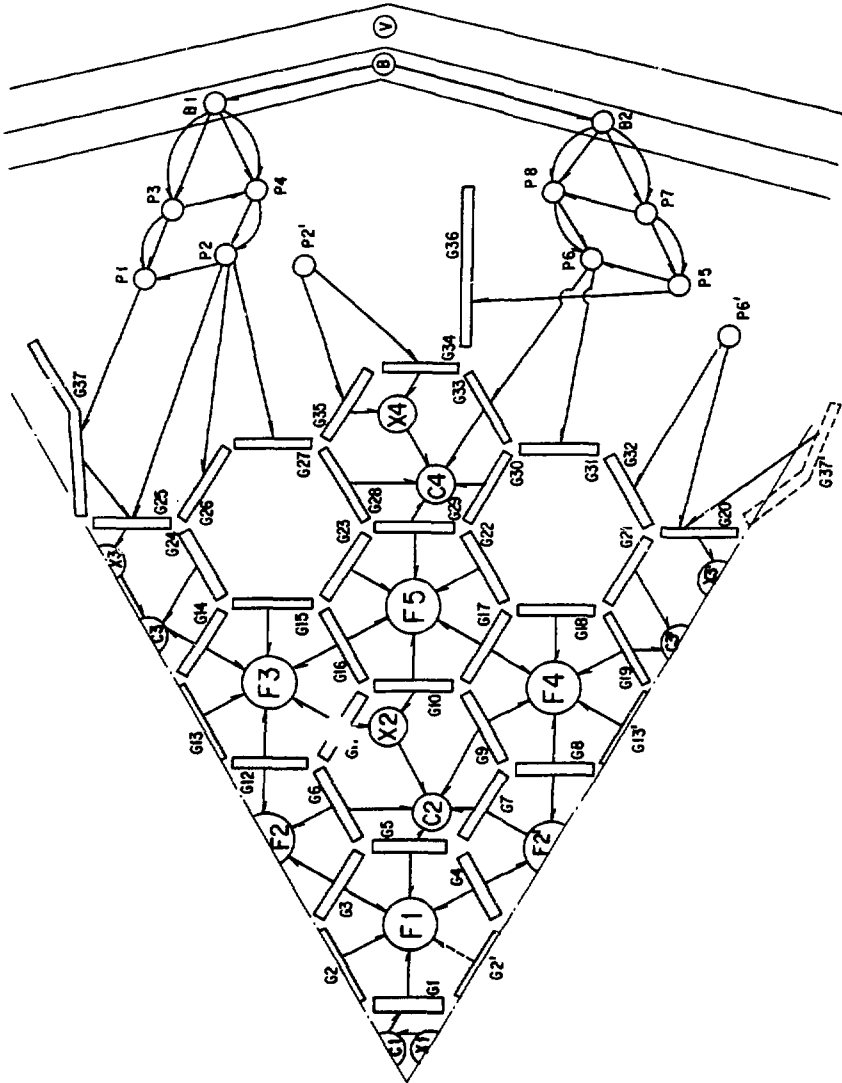


Fig. 2.3 炉心水平方向流路モデル

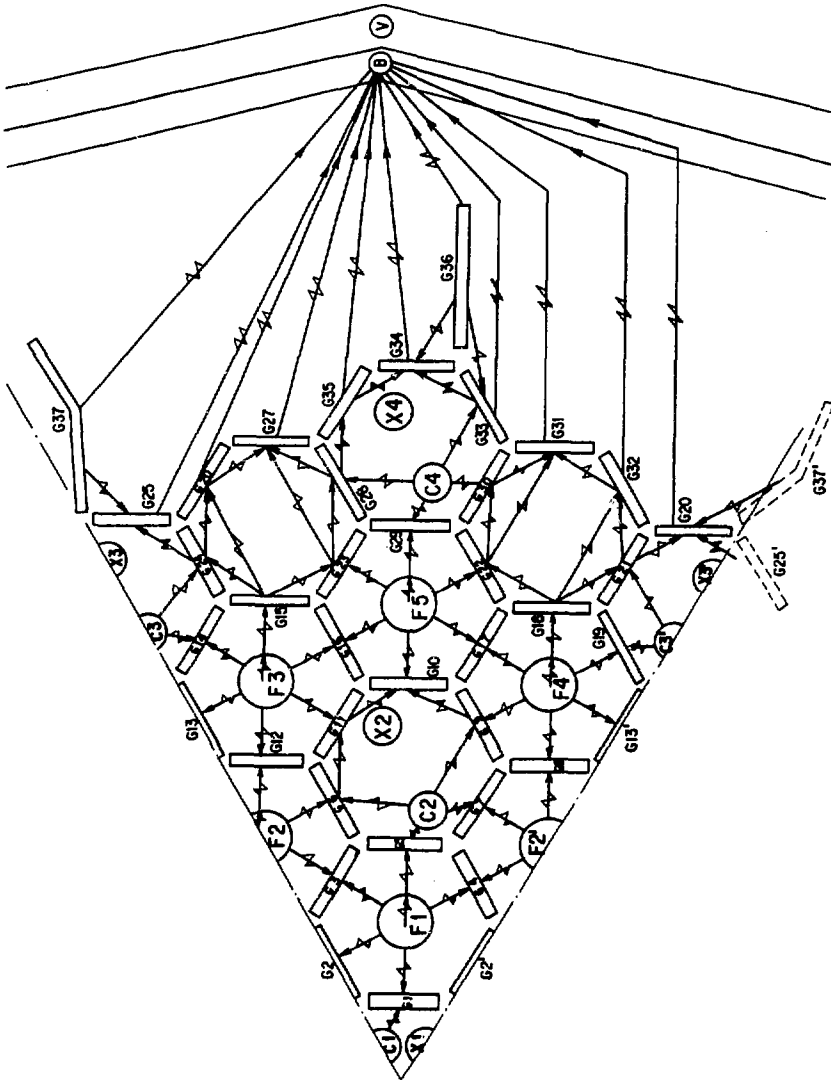


Fig. 2.4 炉心水平方向伝熱路モデル

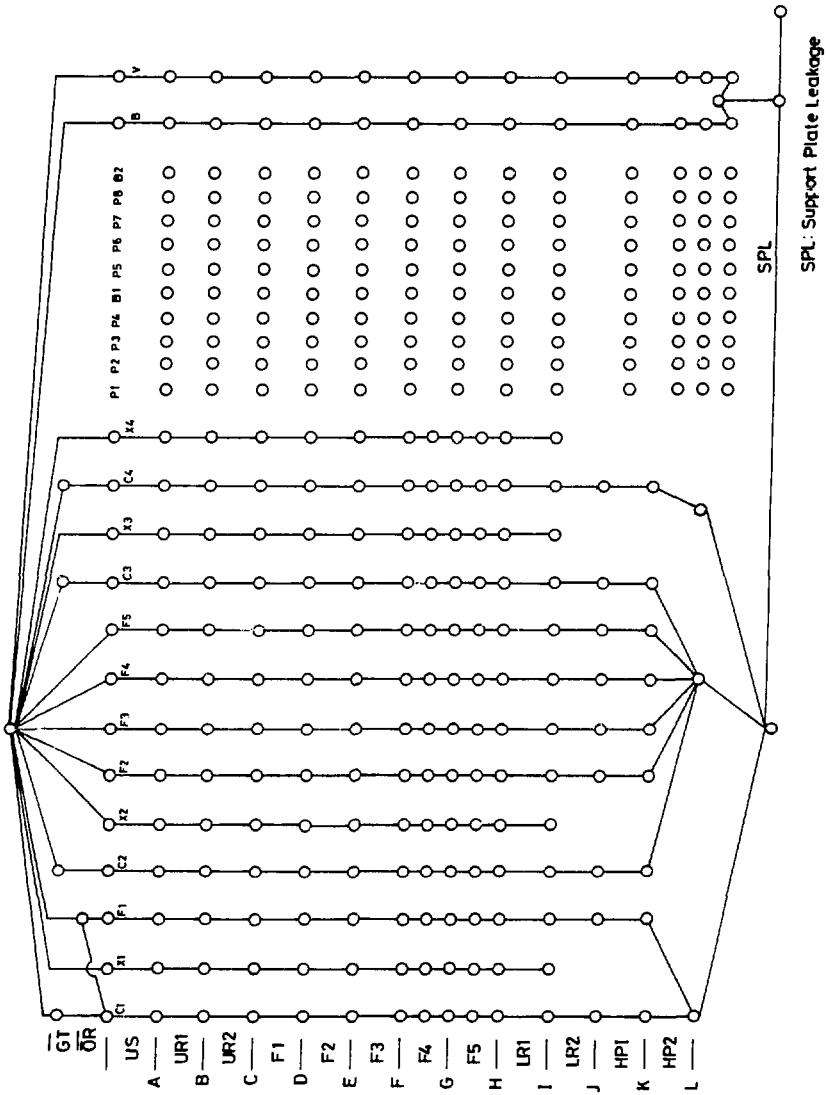


Fig.2.5 炉心軸方向流路モデル

3. 検証解析

FLOWNETの検証解析は、HTTRの炉内流量配分に大きく影響を及ぼすクロス流れと固定反射体漏れ流れに関する流動試験結果を用いて実施した。クロス流れ試験は、模擬燃料カラムを用いて、カラムの任意の位置にクロス流れギャップを設けた場合の流路の圧力分布を測定し、予め2ブロックを用いて得られたクロス流れ抵抗係数の妥当性を評価する試験である。固定反射体漏洩試験は、HTTRとほぼ同規模の模擬炉床部により、高温プレナム内外差圧をパラメータとして、固定反射体間の隙間等を通り炉心側に流れ込む冷却材流量を測定する試験である。

3.1 クロス流れ試験

(1) 1カラム試験装置の概要

1カラム試験装置は、Fig. 3.1に示すように面間距離299 mm、高さ570 mmの試験体である黒鉛製六角ブロックを高さ方向に4段積み重ねた模擬燃料カラムから構成されている。カラムの外周にはシュラウドが設置され、カラムとシュラウドの間に1.0 mmの隙間を設けることによりカラム間ギャップ流れ流路を模擬している。流体（常温・大気圧の空気）は、試験体上部から主流（燃料チャンネル）とカラム間ギャップに流入するが、後者は、試験体最下端において完全にシールされているため、ブロック積層面に設けたクロス流れギャップを介して主流側に全量が流入する。クロス流れギャップは、ブロックの任意の積層面に厚さ1.0 mmのシム（板）をはさんだ平行ギャップである。

本試験装置では、クロス流れギャップの開口部数、開口面積をパラメータとした試験を行った。また模擬燃料チャンネル入口にオリフィスを設置し、模擬燃料チャンネルとカラム間ギャップの流れとの間に大きな差圧をつけた試験も併せて行った。試験条件をTable 3.1に示す。

(2) 解析モデルと流路データ

本検証解析に使用した1カラム試験装置の流路網モデルをFig. 3.2に示す。

模擬燃料チャンネルは、黒鉛ブロックに開けられた12本の直径20 mmの円管流路を、等価な流路断面積と代表直径を有する1流路で模擬する。またブロック積層面に設けた模擬燃料チャンネルの拡大・縮小部（Fig. 3.2中のA-C間）については、別途測定した結果に基づいて得られた圧力損失係数 $K_e = 0.32$ を用いた。燃料チャンネル入口部の圧力損失係数については、入口にオリフィスを設けないケースでは、入口における加速損失と形状損失とを含めて $K_{in} = 1.25$ とした。オリフィスを設置したケースでは、実験結果から、流体の静圧が回復した位置と大気間との圧力差に基づいて設定した圧力損失係数を使用した。一方燃料チャンネル内の流れは、本解析の範囲では乱流（ $Re = 33000 \sim 54000$ ）であることから、流路の摩擦損失係数 f には、壁面粗さを考慮した以下に示す相関式を用いた。

$$4f = 5.5 \times 10^{-3} \left\{ 1 + (2 \times 10^4 \cdot \epsilon_s + 10^6 \cdot Re^{-1})^{1/3} \right\} \quad (3.1)$$

ここで ϵ_e は、流体力学的相対粗さであり、本解析では黒鉛流路の表面粗さの測定値に基づいて 8×10^{-4} を用いた。本解析範囲 ($10^4 < Re_e < 10^5$) では、上式は Colebrook の式と良く一致する。

カラム間ギャップは、ブロックとシュラウド間の隙間の実測値 1 mm を用いた平行平板間流路としてモデル化した。カラム間ギャップ内の流れは層流であることから、以下に示す摩擦損失係数の相関式を用いた。

$$f = 24 / Re_e \quad (3.2)$$

模擬燃料チャンネルとカラム間ギャップの間のクロス流れに関する流動抵抗係数は、無次元の圧力損失係数 K に流路断面積 A を含めた以下の式で定義されるクロス流れ係数 Λ を適用する。

$$\Lambda \equiv \frac{K}{A^2} = \frac{2 \rho \cdot \Delta P}{\dot{m}^2} \quad (3.3)$$

ここで ρ は流体の密度、 ΔP はクロス流れの差圧、 \dot{m} はクロス流れの質量流量である。滝塚、蕪木らは、本試験に使用したブロックと同一の接触面形状を有するブロックを用いてクロス流れ実験及び数値解析を行ない、以下に示す実験式を提示した⁽⁶⁾

$$\delta^2 \Lambda = \frac{C_1}{\delta Re} + C_2 \quad (3.4)$$

ここで δ はブロック積層面の開口ギャップ幅、 Re はクロス流れのレイノルズ数である。 Re は次式で定義される。

$$Re = \frac{4 \dot{m}}{\mu L} ; L = 12 a \quad (3.5)$$

ここで μ は流体の粘性係数、 a はブロック接触面の 1 辺の長さである。(3.4) 式中の係数 C_1, C_2 は、平行ギャップの場合それぞれ 0.67, 3.13、くさび形ギャップの場合 2.14, 12.5 となる。流路網解析では、クロス流れ部の差圧は、Fig. 3.2 中のノード 3 と 11 との間および 5 と 12 との間の圧力差で与えられる。

クロス流れの混合による燃料チャンネル内の流れの圧力変化は、合流点 (Fig. 3.2 中のノード 3 又は 5) の上流と下流の流速変化による圧力変化として評価した。合流点の上・下流における鉛直方向平均流速 u_1, u_2 と静圧 P_1, P_2 の間には次の式が成り立つ。

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (u_2^2 - u_1^2) + K_m \frac{\rho}{2} u_2^2 \quad (3.6)$$

クロス流れの鉛直方向の速度成分を u_x とすると運動量保存側から

$$\rho A u_2^2 - \rho A u_1^2 - (\dot{m}_2 - \dot{m}_1) u_x = P_1 A - P_2 A \quad (3.7)$$

が得られる。ここで \dot{m}_1, \dot{m}_2 は合流点前後の燃料チャンネル内質量流量、 A は流路断面積である。したがってクロス流れ流量は $\dot{m}_2 - \dot{m}_1$ で与えられる。いま u_x と合流点前後の平均流速の比 α_m

($= u_2 / (\frac{u_1 + u_2}{2})$) と (3.6), (3.7) 式から, 混合による圧力損失係数 K_m は,

$$K_m = (1 - \alpha_m) \left\{ 1 - \left(\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \right)^2 \right\} \quad (3.8)$$

となる。 $u_2 \ll u_1, u_2$ であることから $\alpha_m \approx 0$ とするとクロス流れの混合による静圧差は,

$$\begin{aligned} P_1 - P_2 &= 2 \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \right)^2 \right\} \frac{1}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_2}{A} \right)^2 \\ &= 2 \cdot K_m \frac{1}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_2}{A} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

となる。したがって合流点における圧力変化は, 燃料チャンネルの形状変化による損失と合わせて

$$P_1 - P_2 = (K_c + 2K_m) \frac{1}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_2}{A} \right)^2 \quad (3.10)$$

で評価できる。カラム間ギャップの流れについては, 摩擦損失が支配的であることから, 流量変化による圧力変化は無視している。

本検証解析では, 境界条件としてノード1において圧力(大気圧)と温度(常温)を, ノード9に実験で得られたチャンネル出口全流量を与えた。

3.2 固定反射体漏洩試験

(1) T_2 試験部の概要

HENDEL T_2 試験部は, Fig. 1.1 に示した高温プレナムから下のHTTR炉床部を実規模で模擬した試験装置であり, その概要を Fig. 3.3 に示す。 T_2 試験部は, 炉床部のシール性能, 断熱性能, 高温プレナム内での冷却材の混合特性等の実証試験を行うとともに, 実機HTTRの製作・据付技術を確立することを目的としている。

T_2 試験部は, 直径約 4.5 m, 高さ約 16m の $2\frac{1}{4}$ Cr-Mo 鋼製压力容器内に下から順にダイヤグリッド, サポートプレート, シールプレート(ここまでは金属構造物), 下端ブロック, 炭素ブロック, プレナム下部ブロック, サポートポスト・シート, 高温プレナムブロックを積み上げ, さらにその外周を12分割された固定反射体を取り囲み, 実機の炉床部を模擬している。固定反射体の外側には模擬側面遮へい体を介して炉心拘束機構が取り付けられ, 固定反射体を締め付けている。模擬炉床部の上には, 各領域のHeガス流量を制御するための流量調節機構と流量測定ブロック及びHeガス温度を調節するための領域別ヒータが据え付けられている。さらにその上部には金属製の内部隔壁が据え付けられ, 高温側と低温側のHeガスの流れを仕切り, 二重容器構造を取っている。

Fig. 3.4 に示すように, 低温側Heガス(最高400℃)は, HENDEL マザー(M_2)ループ

より供給され、圧力容器の手前で2流路に分岐し、一部は圧力容器とコアパレルの間の環状流路を上向きに流れる。残りの低温Heガスは、出口管と案内管の間の環状流路を通り、サポートプレートの下面を冷却しながら放射状に流れた後、炉心拘束機構を冷却する流路と側部遮へい体と固定反射体の間の流路に分岐し、上向きに流れる。高温側Heガス(最高1000℃)は、アダプター(A)・ループより供給され、内部隔壁の内側に直接流入する。流入したHeガスは、流量調節機構及び領域別ヒータにより、試験条件に応じた温度(最高1050℃)及び流量に調節される。流量測定ブロックを通ったHeガスは、高温プレナムブロックを経て高温プレナム内に流出し、各領域からのHeガスと混合した後出口管の内部を通してAループに戻る。

T₂試験部は、M₂+Aループにより高温プレナム内外(高温Heガスと低温Heガスの間)の差圧が3~30kPaの範囲で一定になるように自動制御することにより実機の運転状態を模擬している。このため固定反射体間の水平、垂直ギャップ、シール面の面取り部等を通して、低温Heガスが高温プレナム内に漏れ込んでくる。この漏洩Heガスにより生じた高温Heガスと低温Heガスの流量の差は、M₂+Aループ側に設置したHeガス回収配管を介して高温Heガスを低温側に流すことにより回収し、ループ全体の流量バランスを保っている。このとき回収配管に設置した流量計によりHeガスの回収流量(=漏洩流量)を測定する。

(2) 解析モデルと流路データ

本検証解析に使用したT₂試験部の流路網モデル及び試験部の縦断面図をFig. 3.5に示す。モデルはT₂試験部の対称性を考慮して、水平断面内1/6領域を対象とした1/6モデルを用いた。ノードの配置は、流路の合流点となる固定反射体、高温プレナムブロック等の積層面に一致するノードの他に、キーあるいはシール要素の上下流に設けた。

試験体内の軸方向流路には、中心領域及び周辺領域を流れる主流(Fig. 3.5中のH₁及びH₂)の他に領域間ギャップ(G₁, G₂及びG₃)、固定反射体と周辺領域間のギャップ(G₄, G₅及びG₆)及び固定反射体の熱膨張を逃がすために設けたギャップ(G₇及びG₈)がある。固定反射体の外側には、固定反射体と側部遮蔽体間の平行平板流路、側部遮蔽体とコアパレルの間の流路及びコアパレルと圧力容器間の環状流路があり、それぞれをHeガスが上向きに流れる。本モデルでは、側部遮蔽体の外側の流路を1流路(B)で模擬した。各軸方向の流路は、黒鉛ブロック等の積層面ギャップを介して接続されている。試験体内の各流路の寸法は、試験体据付時に測定したギャップ幅及び流路径を用いた。主流(H₁及びH₂)の流れは、全試験を通して乱流であることから流路の摩擦損失係数の相関式にはBlasinsの式

$$f = 0.079 R_e^{-0.25} \quad (3.11)$$

を適用した。ギャップ内の流れは層流であることから、(3.2)式を適用した。

固定反射体の積層面及び隣接反射体の接触面には、Fig. 3.6に示すように位置決めのためのキーとシール要素が設置されている。固定反射体部の漏れ流路には、固定反射体間の水平、垂直ギャップ(Fig. 3.6中のH及びV)、シール面の面取りにより構成される矩形流路(C)及び固定反射体を使用している黒鉛材の内部空隙を通る透過流れ(P)の4流路がある。水平・垂直ギャップについては、固定反射体の現地据付作業時に実測したギャップ厚さを用いてモデル化した。ギャップ厚さは、測定時に最も薄い0.04mmの隙間ゲージが挿入できなかったことから、

測定値を保守的に評価して0.04mmとした。水平、垂直ギャップの奥行きは、それぞれ162mm、130mmである。面取り部流路には、Fig. 3.6に示すように流路入口にシール要素押えがあることから、実機と同一形状のモデルを用いて、流路の形状損失係数 K_G を求めた。面取り量 C が2.5mmのとき K_G の実測値は、今回の検証解析に用いた試験条件の範囲内では、約4である。固定反射体内の透過流れについては、Darcy則に従うものとし、次式を適用してモデル化した。

$$\Delta P = \frac{\mu \cdot \ell}{K_D \cdot A \cdot g} Q_m \quad (3.12)$$

ここで ΔP ：差圧 (kg/m^2)、 Q_m ：透過流量 (m^3/s)、 μ ：粘性係数 ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)、 K_D ：透過率 (m^2)、 ℓ ：透過距離 (m)、 A ：透過面積 (m^2)である。各透過流路モデルでは、 ℓ 及び A にそれぞれ水平ギャップの奥行き、固定反射体最外表面積の実測値を用いている。また K_D は固定反射体を使用している黒鉛材 (Union Carbide社製PGX黒鉛) の実測値

$$K_D = 1.18 \times 10^{-13} (\text{m}^2) \quad (7) \quad (3.13)$$

を使用した。

キー+シール要素の流動抵抗係数は、実機と同一形状を有するモデルを用いて、ギャップ幅と段差量をパラメータとした流動実験を行って得られた値を使用した。⁽⁸⁾ 縦置キー+シール要素のシール性能は、Fig. 3.7に示すように、キーのみの流動抵抗に基づいてキーとキー溝のクリアランスから予想される最大くい違い段差量500mmあたり約0.4mmの時の値 $K/A^2=6 \times 10^9 \text{m}^{-4}$ (500mmあたり)を用いた。また横置キー+シール要素のシール性能は、Fig. 3.8に示すように、流動抵抗が最も小さくなるくい違い段差が0.4mmの時の値に基づき、次式で表わされる相関式を使用した。

$$K/A^2 = 2.23 \times 10^9 \times \Delta P_s^{0.51} \quad (3.14)$$

ここで ΔP_s はシール部にかかる差圧 (kg/m^2)である。

高温プレナムブロックには、ブロック間の隙間を通して低温のカラム間ギャップ内の流れが高温プレナムに直接流入することを抑制するために、Fig. 3.9に示すようなシール要素が設置されている。本シール部についても実機と同一形状のモデルによる流動試験から得られたシール性能を用いた。本解析では、Fig. 3.10に示すように高温プレナムブロックの据付作業時に測定した隣接ブロック間のくい違い段差の最大値 $\delta = 0.8 \text{mm}$ 、平行段差 $d = 1 \text{mm}$ のときのシール性能

$$K/A^2 = 7.0 \times 10^9 \quad (500 \text{mmあたり}) \quad (3.15)$$

を用いた。

本検証解析に用いた試験データは、高温プレナム内外のHeガス温度を等しくした等温試験と高温プレナム外 (固定反射体外側流路) のHeガス温度を400℃一定に保ち、高温プレナム内のHeガス温度を700℃から1050℃までに加熱した試験の2種類がある。試験条件をTable 3.2に示す。

Table 3.1 クロス流れ試験条件

試験番号	冷却材流量 (g/s)	レイノルズ数* Re	クロス流れギャップ幅 (mm)	カラム間ギャップ幅 (mm)	クロス流れギャップ 開口部数	クロス流れギャップ 開口辺数	入口オリフィス
ケース#1	182.0	54,000	1.00	1.04	1箇所	6辺	無
ケース#2	117.0	36,000	1.00	1.04	1箇所	6辺	有
ケース#3	112.0	33,000	1.00	1.04	1箇所	3辺	有
ケース#4	125.0	38,000	1.00	0.97	2箇所	6辺	有

* : 冷却材主流のレイノルズ数

Table 3.2 固定反射体漏洩試験条件

試験番号	高温プレナム 内冷却材温度 (°C)	固定反射体外 側冷却材温度 (°C)	冷却材圧力 (MPa)	高温プレナム 内外差圧 (kPa)
1	30	30	2.0	3-30
2	400	400	4.0	3-30
3	700	400	4.0	3-30
4	950	400	4.0	3-30
5	1050	400	4.0	10-30

冷却材主流

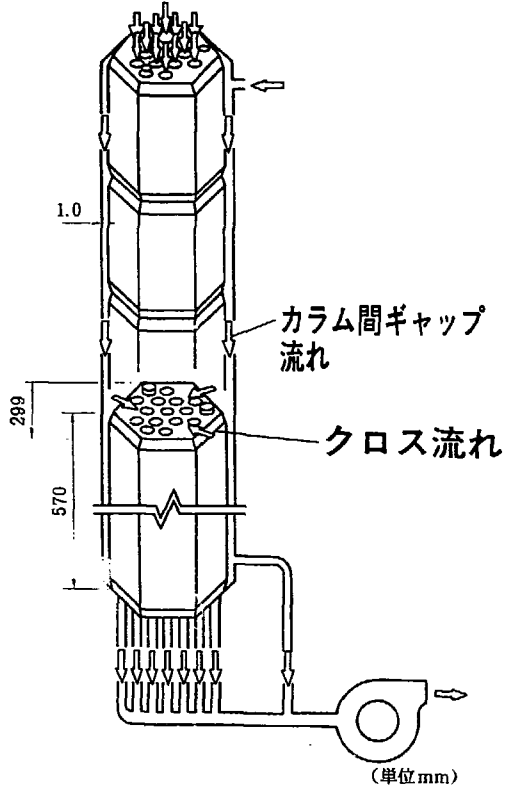
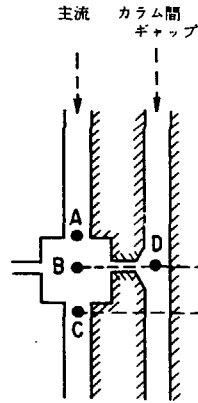


Fig. 3.1 1カラム試験装置



△ 流路ブランチ番号
○ ノード

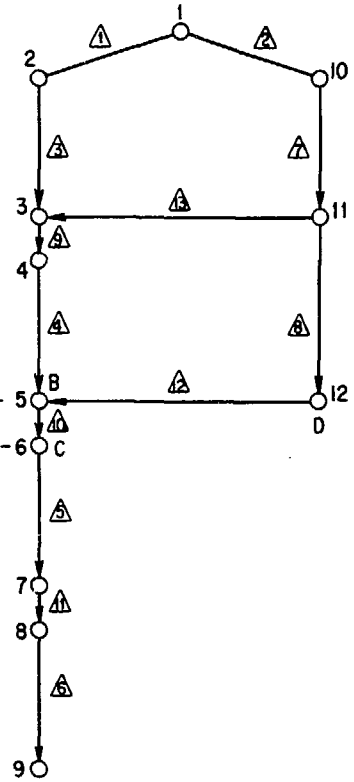


Fig. 3.2 1カラム試験装置の解析モデル

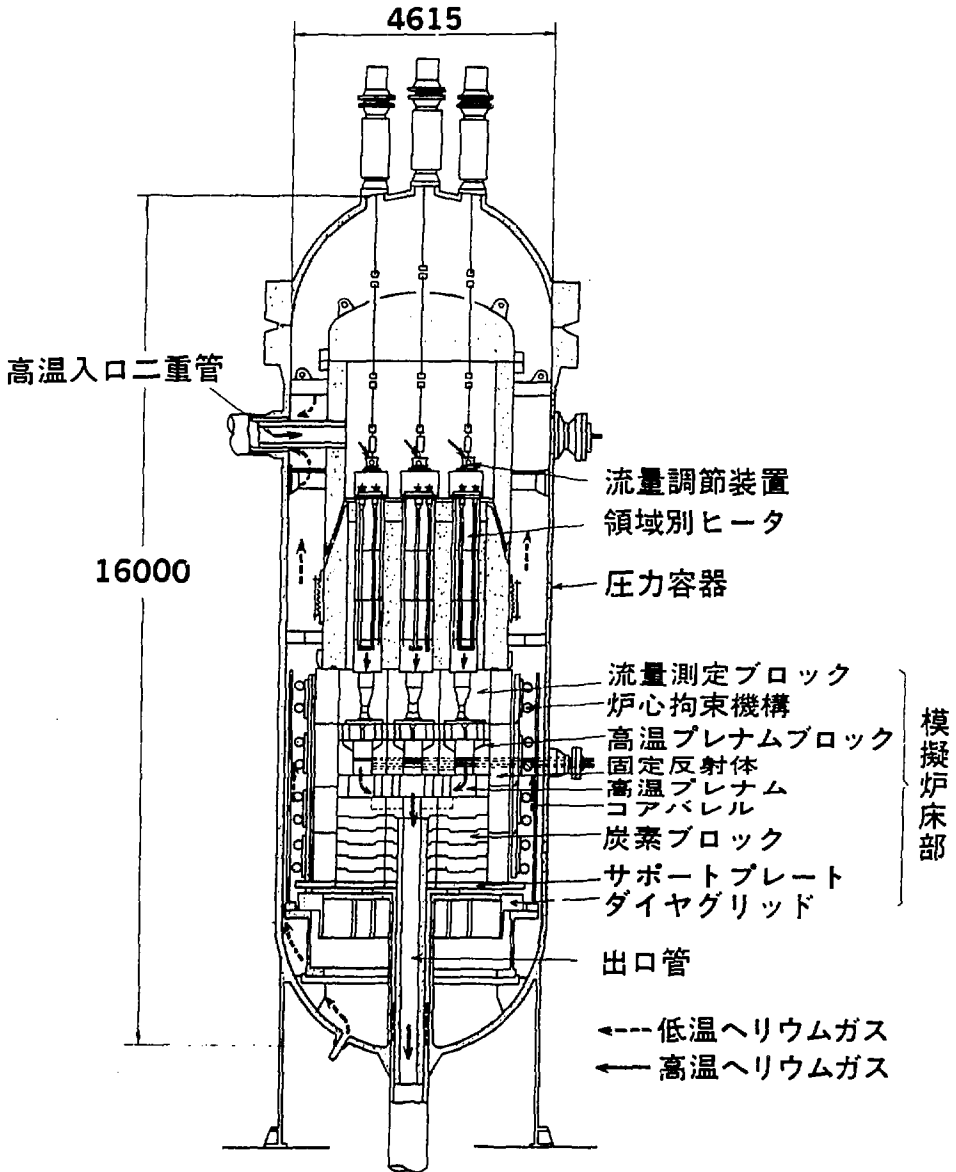


Fig. 3.3 炉内構造物実証試験部 (T₂) 構造図

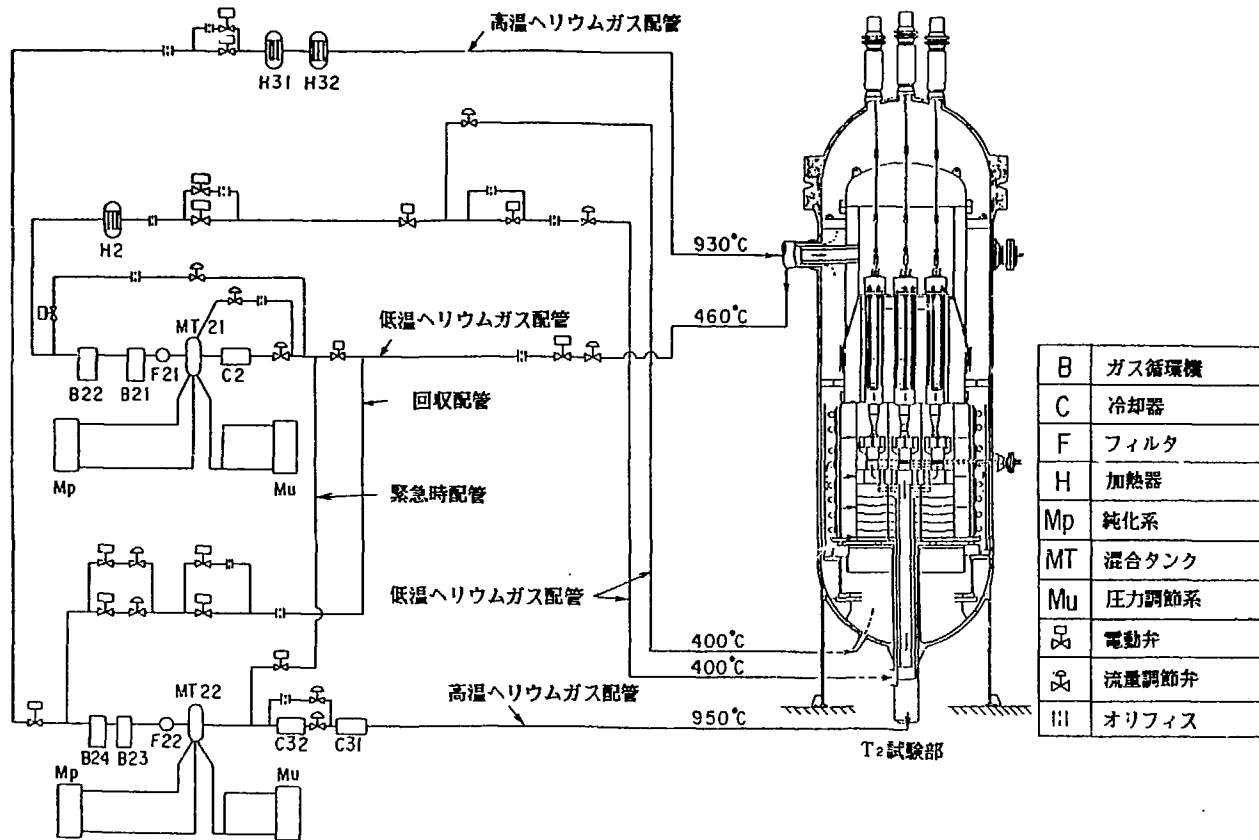


Fig. 3.4 T₂ 試験部 + M₂ + A フローシート

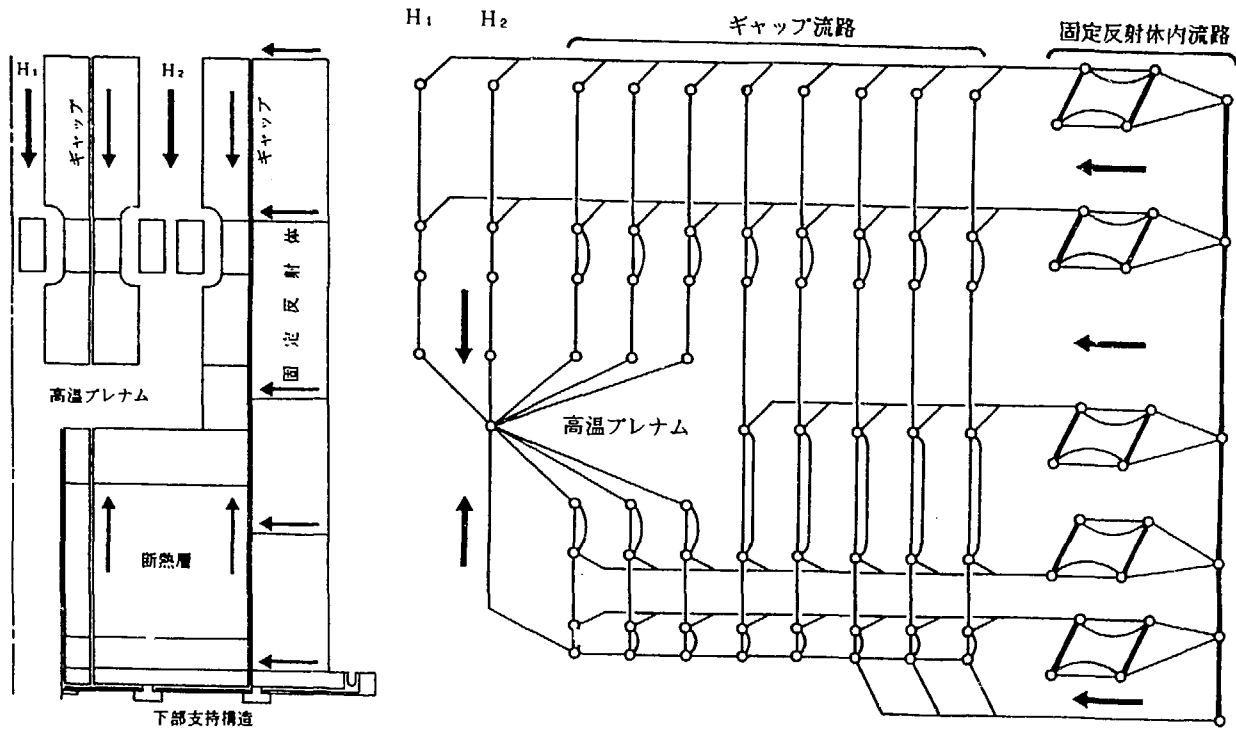


Fig. 3.5 T_2 試験部と解析モデル

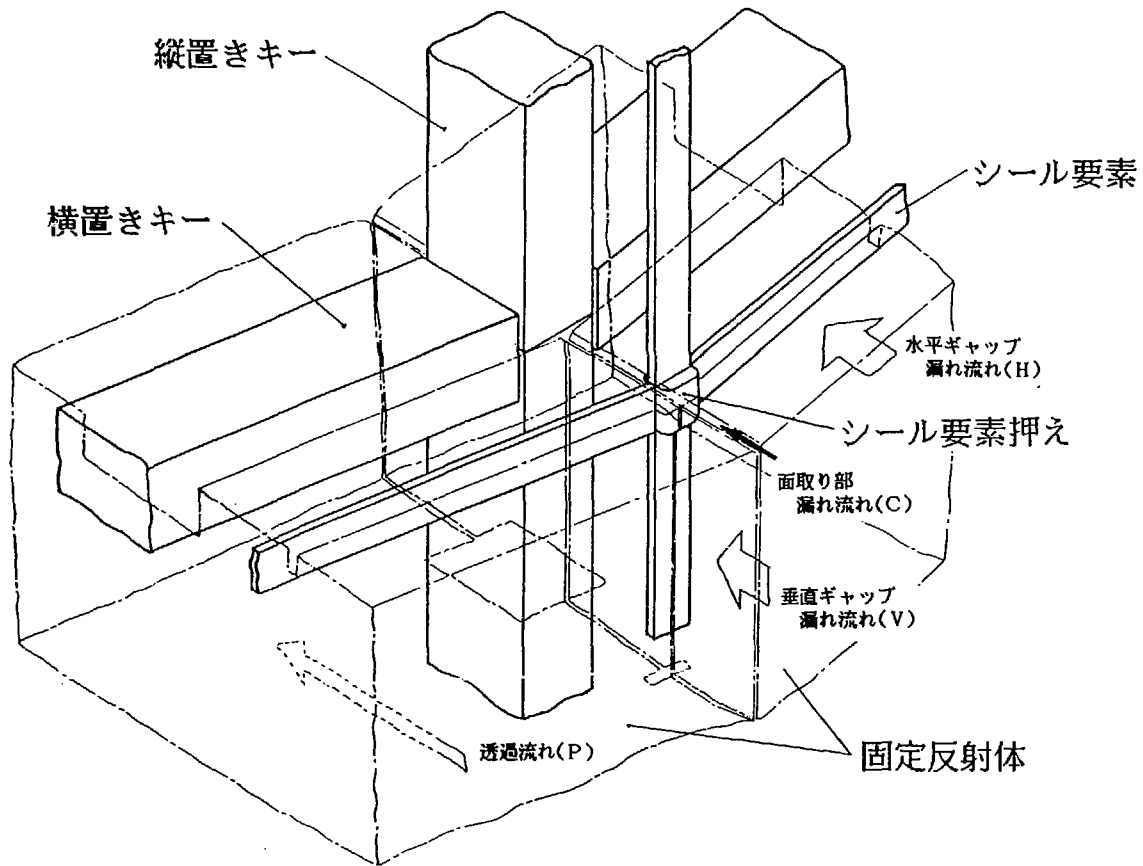


Fig.3.6 固定反射体シール部構造図

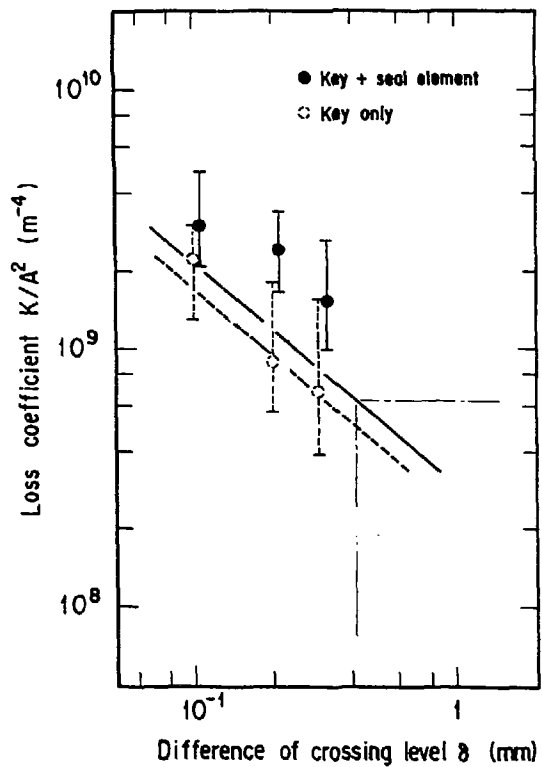


Fig. 3.7 縦置キー+シール要素のシール性能

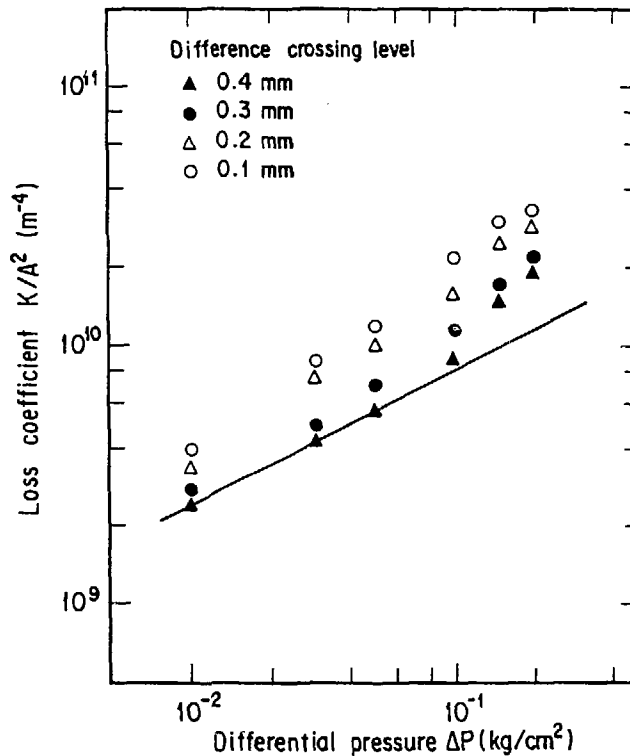


Fig. 3.8 横置キー+シール要素のシール性能

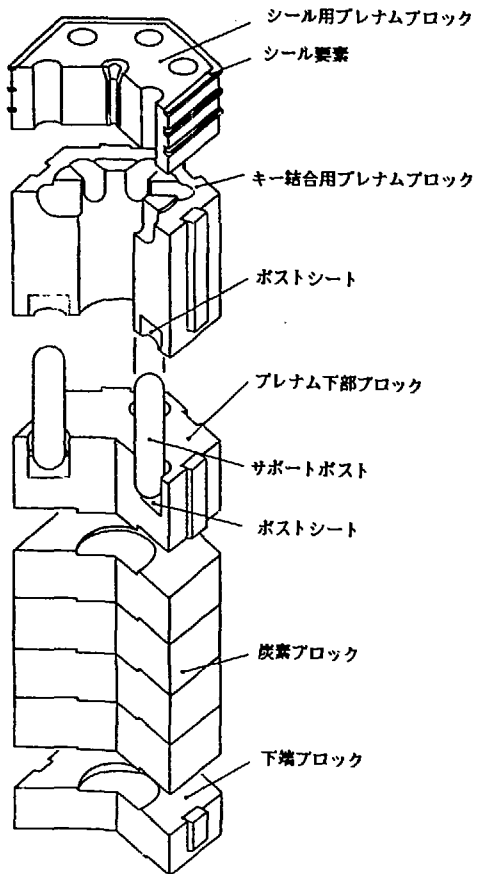


Fig. 3.9 炉床部黒鉛構造物

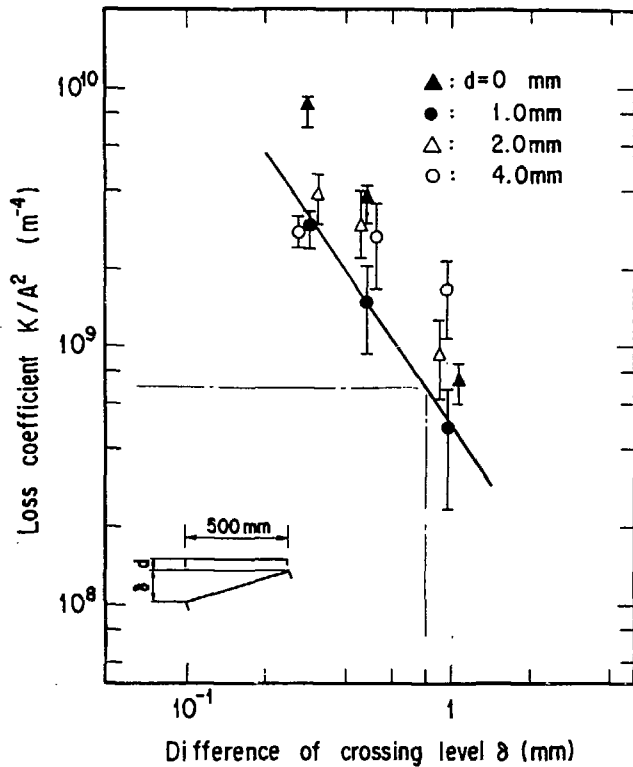


Fig. 3.10 高温プレナムブロック間シール要素のシール性能

4. 解析結果

4.1 クロス流れ試験の解析結果

Fig. 4.1 にケース # 1 における燃料チャンネル及びカラム間ギャップの軸方向静圧分布を示す。図中の実線は、FLOWNET による解析結果を、○、△は実測値をプロットしたものである。カラム間ギャップの圧力は、入口からほぼ直線的に低下し、クロス流れギャップを設けた位置で模擬燃料チャンネルとの圧力差が最小となる。本試験ではカラム間ギャップは最下端でシールされているため、そこを流れるバイパス流れは、全量がクロス流れギャップを通して主流に流入する。したがってクロス流れギャップよりも下流側ではバイパス流れはスタグナントになるため、若干の静圧回復後ほぼ一定の圧力分布となる。流路網解析の結果から、クロス流れの流量は 11.8 g/s 、(3.5) 式で定義されるレイノルズ数は約 1280 である。またバイパス流れのレイノルズ数は約 1210 ~ 1230 であり層流である。一方燃料チャンネル内の圧力は、入口部の急縮小による急加速により大きく低下し、その後摩擦損失及び流路の形状変化による渦損失等により低下する。またクロス流れの流入による加速損失の評価は、実験結果を良く再現しており、(3.11) 式で示したモデルの妥当性を示している。クロス流れの混合による主流の圧力変化は、実際の炉心設計では炉心の全圧力損失に対して十分に小さく、無視し得るものである。

模擬燃料チャンネル入口部にオリフィスを設けたケース # 2 の軸方向静圧分布を Fig. 4.2 に示す。本ケースは、入口オリフィスにより燃料チャンネルの圧力がカラム間ギャップに比較して大きく減少した状態を模擬したものであり、炉心における制御棒案内カラムの流動状態に類似している。本ケースも解析値と実測値とは良く一致し流路網による解析手法の妥当性を示している。クロス流れギャップにかかる差圧は、ケース 1 と比較すると大きくなり、クロス流れ流量及びレイノルズ数もそれぞれ約 28.1 g/s 、約 3210 に増加する。

クロス流れギャップ開口部 6 辺のうち片側 3 辺を完全にシールしたケース # 3 の軸方向圧力分布の解析値と実測値を Fig. 4.3 に示す。本試験は、クロス流れギャップの開口面積を除きケース # 2 と同一条件の下で実施した。解析に使用したクロス流れ抵抗係数は、実効摩擦長は通常の平行ギャップと等しいものとし、実効流路断面積が $1/2$ になった場合、すなわちケース # 1 及び # 2 に用いた平行ギャップのクロス流れ抵抗係数の $1/4$ になるものとした。図中の実測値は、燃料チャンネル 12 チャンネル及びカラム間ギャップ 6 辺分の測定値のばらつきを範囲を示しており、○、△はそれぞれの平均値を示している。本ケースの解析結果より、クロス流れギャップ巾が周方向に均一でない場合（例えばくさび形ギャップ）にも、1 カラム 1 流路モデル（ブロック内の複数の流路を 1 流路で模擬したモデル）を用いて平均的流動特性を評価できることが明らかである。なお実験データでは、燃料チャンネル出口部においても圧力のばらつきが大きくなっているが、これは Fig. 3.1 に示したように各チャンネルの出口から流量計まで独立に配管を引きまわしているためである。実際の炉心では、燃料チャンネルは下部可動

反射体下段で同一キャビティ内に開口しているため、チャンネル間の圧力及び流量の偏差は小さくなる。本ケースのクロス流れの流量及びレイノルズ数は、それぞれ約20.9 g/s、約1160である。

クロス流れギャップを1～2段及び2～3段ブロックの積層面の2ヶ所に設けた、ケース#4にかける軸方向圧力分布の解析値と実測値をFig. 4.4に示す。本ケースは、クロス流れギャップの開口部数を除いた、ギャップ幅、ギャップ形状、入口オリフィス等の試験条件は、ケース#2と同一である。クロス流れ流量及びレイノルズ数の解析結果は、第1積層面でそれぞれ12.1 g/s、1380、第2積層面で22.7 g/s、2560である。

以上述べたように、炉心における燃料カラムまわりの代表的な流れ、即ち燃料チャンネル内の流れ、カラム間ギャップを流れるバイパス流れ及びクロス流れは、FLOWNETを用いた流路網解析により模擬できることが確認された。また各ケースにおいて、バイパス流れの圧力損失の実測値と解析値とを比較すると、解析値の方が大きく、クロス流れ流量を大き目に見積っていることから、燃料温度を計算する上では、保守的な評価を行っていると言える。

次に本解析に用いた流路モデルと同一のモデルによる感度解析の結果を示す。

Fig. 4.5及び4.6は、それぞれケース#1と同じケースにおいて、カラム間ギャップ幅を1.0 mmに固定し、クロス流れギャップ幅のみを変えたケース及びクロス流れギャップ幅を1.0 mmに固定し、カラム間ギャップ幅を変えたケースの解析結果(軸方向圧力分布)である。Fig. 4.5から、クロス流れギャップ幅が増加するとクロス流れ抵抗が減少し、燃料チャンネルとバイパス流れとの間の圧力差が減少することがわかる。本ケースでは、クロス流れギャップ幅が1.0 mmを超えると、バイパス流れの流動抵抗がクロス流れの流動抵抗と比較して支配的となる。このことは、クロス流れギャップ幅が1.0 mmから1.5 mmに広がっても、圧力分布に大きな差がないことからわかる。またFig. 4.6に示したように、カラム間ギャップ幅が増加するとバイパス流れの圧力損失が小さくなり、燃料チャンネルとバイパス流の間の圧力差が増加する傾向を示す。

Fig. 4.7及び4.8は、ケース#2と同じ条件でクロス流れギャップ幅だけを変えたケース及びカラム間ギャップ幅だけを変えたケースの軸方向圧力分布である。本ケースは、Fig. 4.5及び4.6に示したケースと同様にギャップ幅の増加に伴いクロス流れ流量が増加する傾向が見られる。但し本ケースでは燃料チャンネル入口にオリフィスを設置しているため、前述のケースに比較するとクロス流れ流量が大きく、ギャップ幅の変化による圧力分布の変化は顕著に現れる。

4.2 固定反射体漏れ流れの解析結果

(1) 等温流動試験結果の解析

T₂試験部による固定反射体漏洩試験のうち、高温プレナム内外のHeガス温度を等しくした等温試験の実験結果と解析結果をFig. 4.9に示す。図中の○及び△印は、それぞれ30℃、2MPa及び400℃、4MPaのときの実験値を、また実線と破線はそれぞれの解析結果を示している。HTTRの通常運転時の高温プレナム内外差圧は、6～9kPaの範囲であり、

本実験範囲はH T T Rの運転状態を十分に包絡している。

解析値は実験結果と良く一致しており、解析に使用した流路網モデル及び流路データの妥当性が確認された。さらに解析値と実験値を比較すると、解析値の方が30℃試験のときに8～10%、400℃試験のときに0～3%大きな値を示しており、固定反射体漏洩流量を多めに評価している。したがって燃料の冷却に直接寄与する冷却材流量を少なく評価することになり、燃料温度の評価上は保守的に評価していると言える。

また等温試験の解析結果から得られた炉床部における冷却材漏洩流量の内訳をTable 4.1に示す。Tableからわかるように、炉床部の全漏洩流量に対して固定反射体内透過流れ及び固定反射体面取り部の流れが大部分を占めている。透過流れは(3.12)式に示すように差圧の1乗に比例し、面取り部の流れは乱流域にあるため差圧の1/2乗に比例する。従って全漏洩流量は両者の中間的な特性を示し、差圧の約0.75乗に比例している。

(2) 加熱流動試験結果の解析

① 固定反射体変形解析

加熱流動試験では、固定反射体の内外を流れるHeガス温度が異なるため、固定反射体の熱変形により水平及び垂直ギャップ幅が拡がり、漏洩流量が増加することが予想される。従って加熱流動試験時の漏洩流量解析では、あらかじめ試験体温度分布解析を行い、固定反射体の熱変形を評価し、固定反射体間の水平及び垂直ギャップ幅の変化を考慮した等価ギャップ幅を求めた。

固定反射体温度分布解析は、2次元熱伝導解析コードAYERにより、Fig. 4.10に示す軸対称モデルを用いて行った。高温側Heガス温度950℃、低温側Heガス温度400℃のときの温度分布解析結果をFig. 4.11に、この時の固定反射体内外表面温度の軸方向分布をFig. 4.12に示す。得られた温度分布に基づいて、変形後の等価ギャップ幅⁽⁹⁾を求めた。高温側Heガス温度が700℃、950℃及び1050℃の時の等価ギャップ幅をTable 4.2に示す。

② 加熱試験時の固定反射体漏れ流量

Table 4.4に示した各ケースの漏れ流れ解析結果と実験結果の比較をFig. 4.13(1)～(3)に示す。図中の○印が実験結果を、実線と破線がそれぞれ初期ギャップ幅(0.04mm)及びTable 4.4に示した変形後の等価ギャップ幅を用いた時の解析結果を示している。

グラフから固定反射体の熱変形を考慮した等価ギャップ幅を用いた解析結果は、実験結果と比較すると漏れ流量を過大に評価し、初期ギャップ幅を用いた解析結果の方が実験結果を良く再現していることがわかる。これは、固定反射体間の水平及び垂直ギャップ幅は、炉心拘束機構による締付力により、加熱試験条件下においても有意な開口が生じず、かつギャップ入口の縮流部の流路面積が初期の値から大きく変らないことによると考えられる。

したがってH T T Rの通常運転時の固定反射体間の水平及び垂直ギャップ幅は、HENDEL T₂と同程度の加工精度及び据付精度が達成できるとすれば、0.04mmに対して十分に余裕を見込んだ一定値を使えば、燃料温度評価上保守的な流量配分が得られる。

Table 4.1 漏洩流量の内訳(等温試験)

冷却材温度(℃)	3.0	3.0	400	400
冷却材圧力(MPa)	2.0	2.0	4.0	4.0
高温プレナム内外差圧(kPa)	3.0	30.0	3.0	30.0
透過漏洩流量(%)	24.9	41.6	16.9	33.1
面取り部漏洩流量(%)	59.5	32.4	72.6	46.1
ギャップ漏洩流量(%)	2.9	4.8	2.0	3.8
下部支持構造部漏洩流量(%)	12.3	20.2	8.2	16.4
その他(%)	0.4	1.0	0.3	0.6

Table 4.2 加熱試験時の等価ギャップ幅(mm)

i	700℃試験			950℃試験			1050℃試験		
	ΔT_i (℃)	$\delta_{H,i}$	$\delta_{V,i}$	ΔT_i (℃)	$\delta_{H,i}$	$\delta_{V,i}$	ΔT_i (℃)	$\delta_{H,i}$	$\delta_{V,i}$
0	—	0.059	—	—	0.083	—	—	0.090	—
1	80	0.079	0.066	180	0.129	0.100	210	0.144	0.111
2	80	0.074	0.066	180	0.120	0.100	210	0.130	0.111
3	70	0.059	0.062	160	0.084	0.092	180	0.088	0.100
4	30	0.046	0.049	60	0.052	0.059	65	0.053	0.061

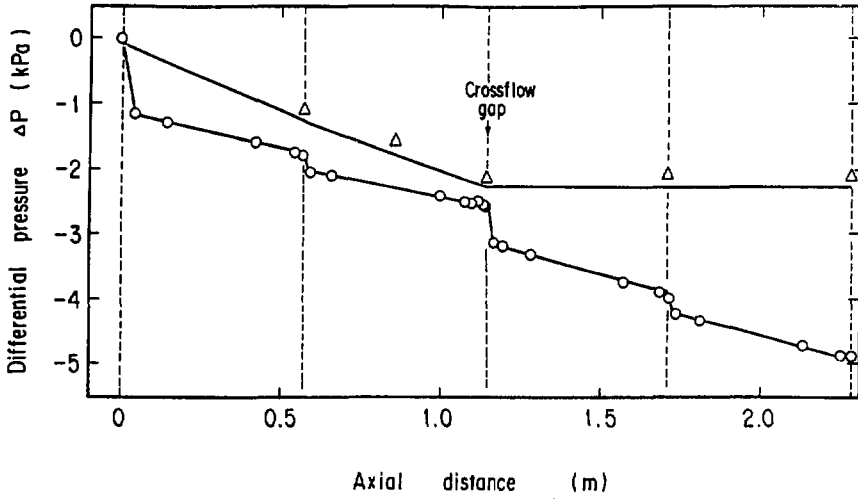


Fig. 4.1 クロス流れの実験結果と解析結果の比較 (ケース # 1)

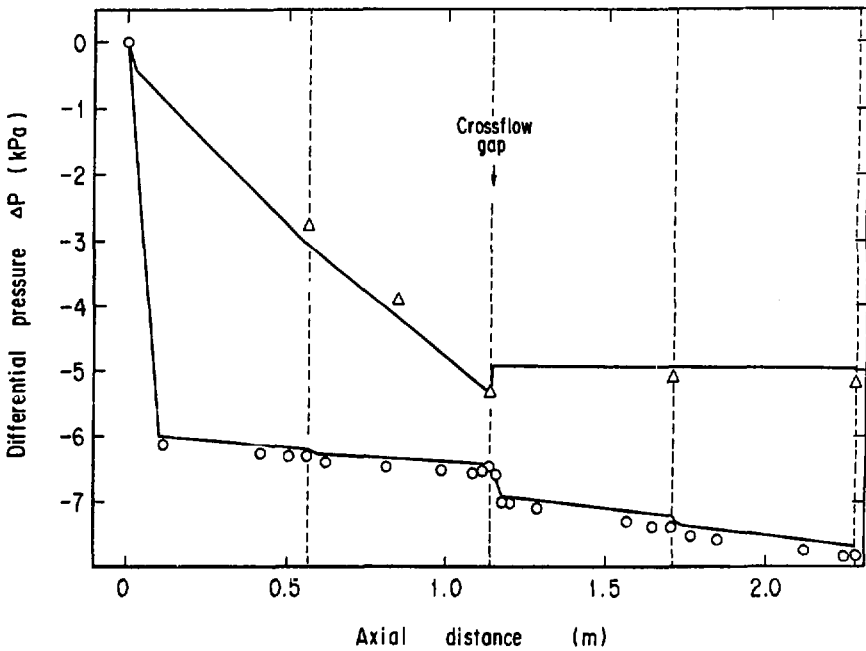


Fig. 4.2 クロス流れの実験結果と解析結果の比較 (ケース # 2)

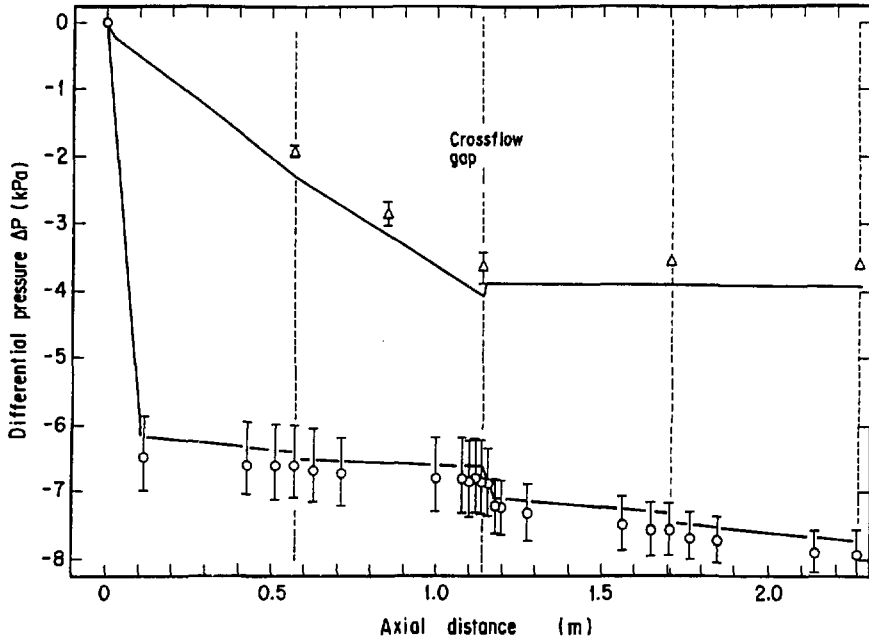


Fig. 4.3 クロス流れの実験結果と解析結果の比較 (ケース # 3)

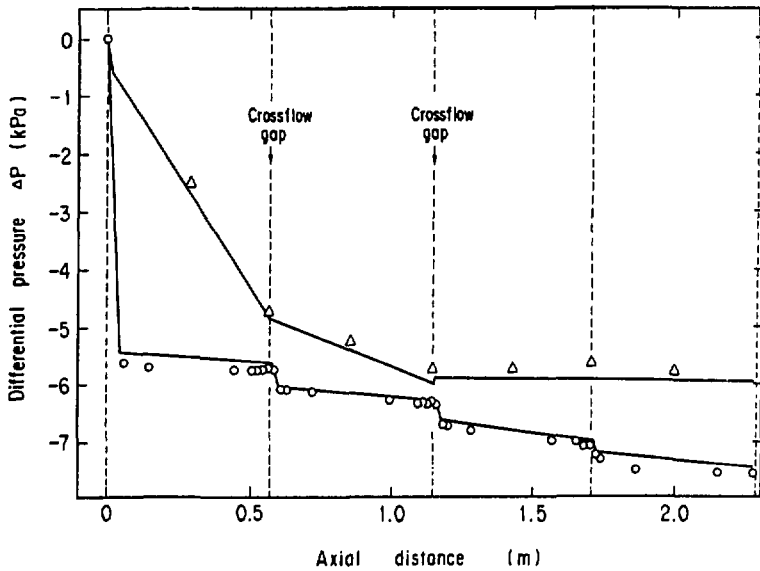


Fig. 4.4 クロス流れの実験結果と解析結果の比較 (ケース # 4)

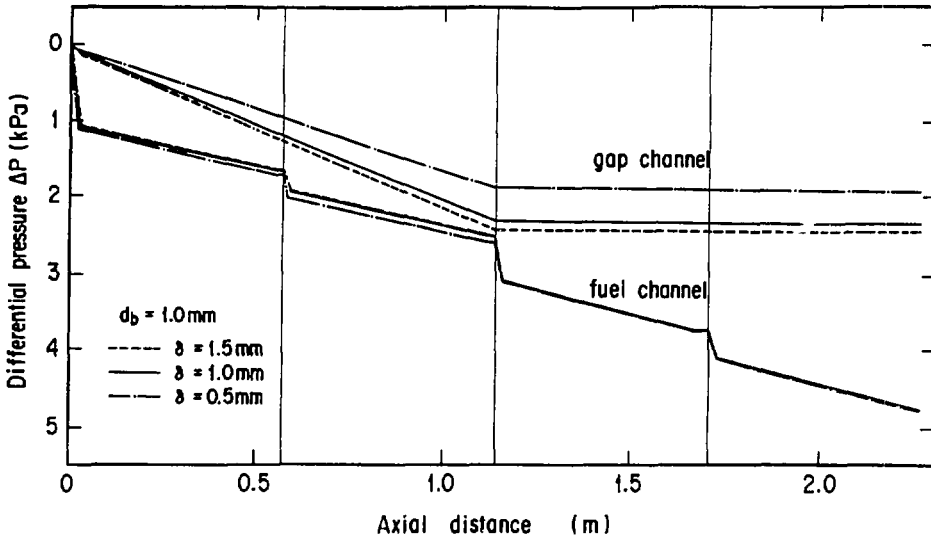


Fig. 4.5 感度解析結果 (ケース # 1 ; クロス流れギャップ幅を変えた場合)

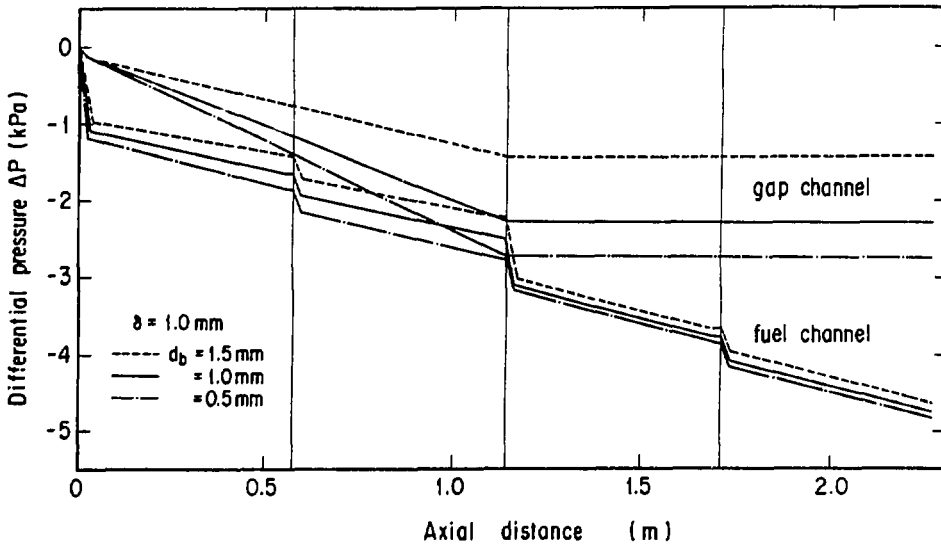


Fig. 4.6 感度解析結果 (ケース # 1 ; カラム間ギャップ幅を変えた場合)

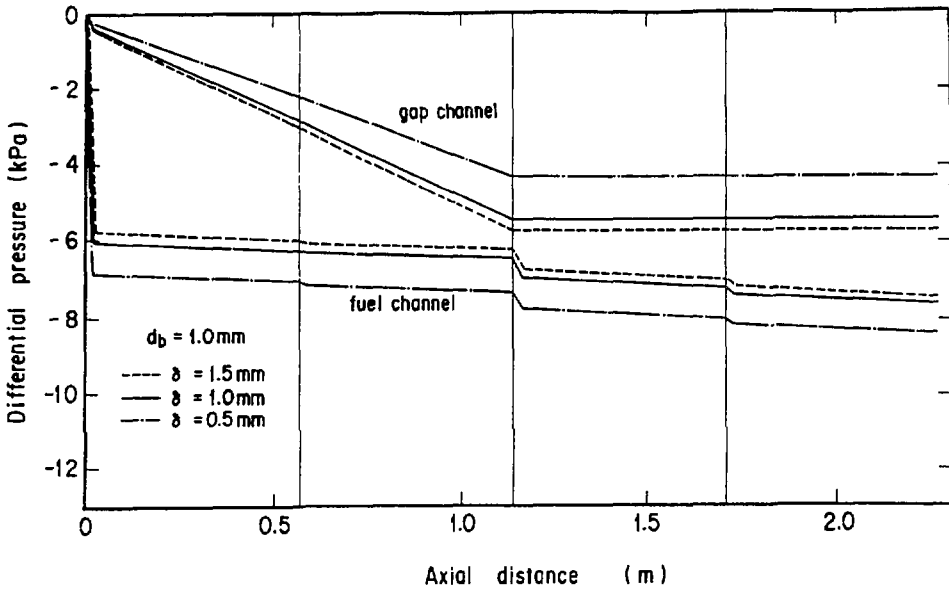


Fig. 4.7 感度解析結果 (ケース#2 ; クロス流れギャップ幅を変えた場合)

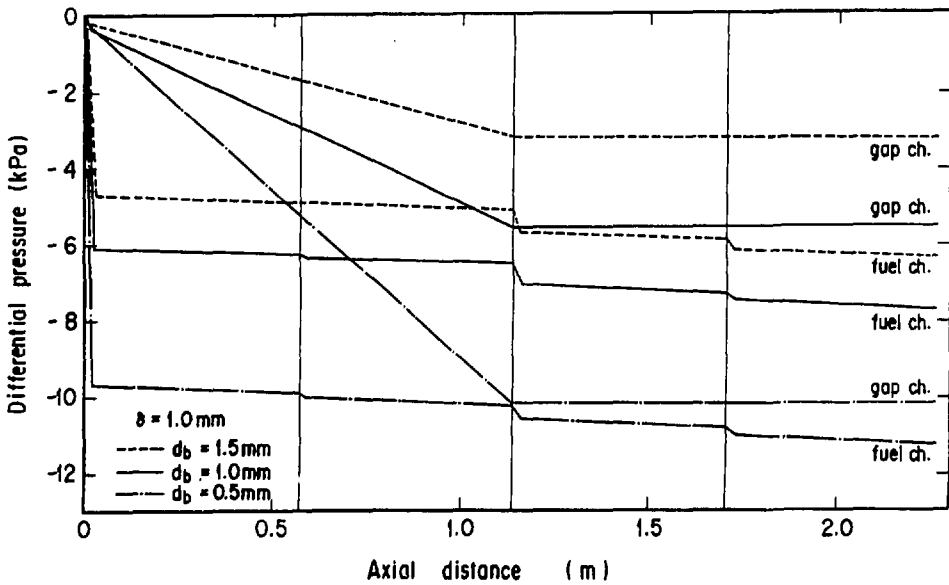


Fig. 4.8 感度解析結果 (ケース#2 ; カラム間ギャップ幅を変えた場合)

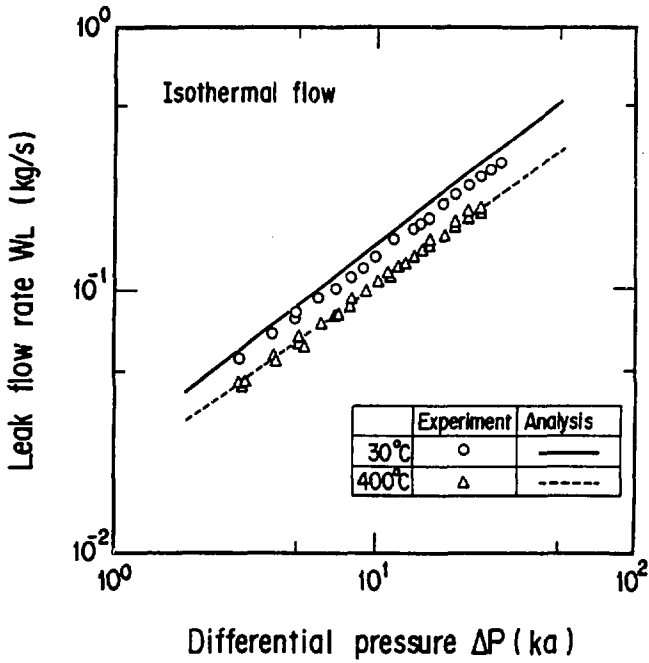


Fig. 4.9 固定反射体漏洩解析結果（等温試験）

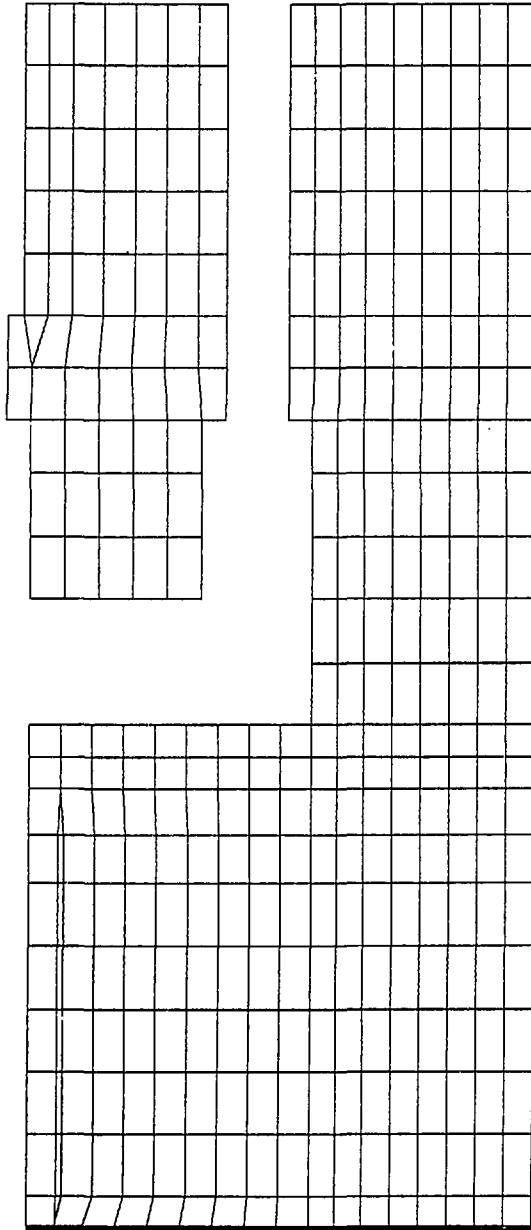


Fig. 4.10 温度分布解析用メッシュ図

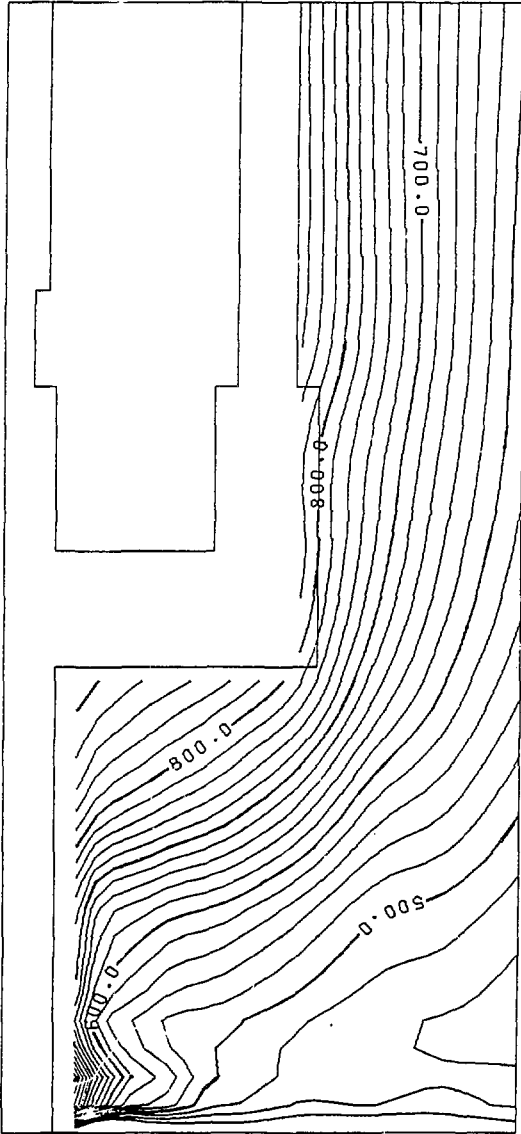


Fig. 4.11 温度分布解析結果 (950°C/400°C)

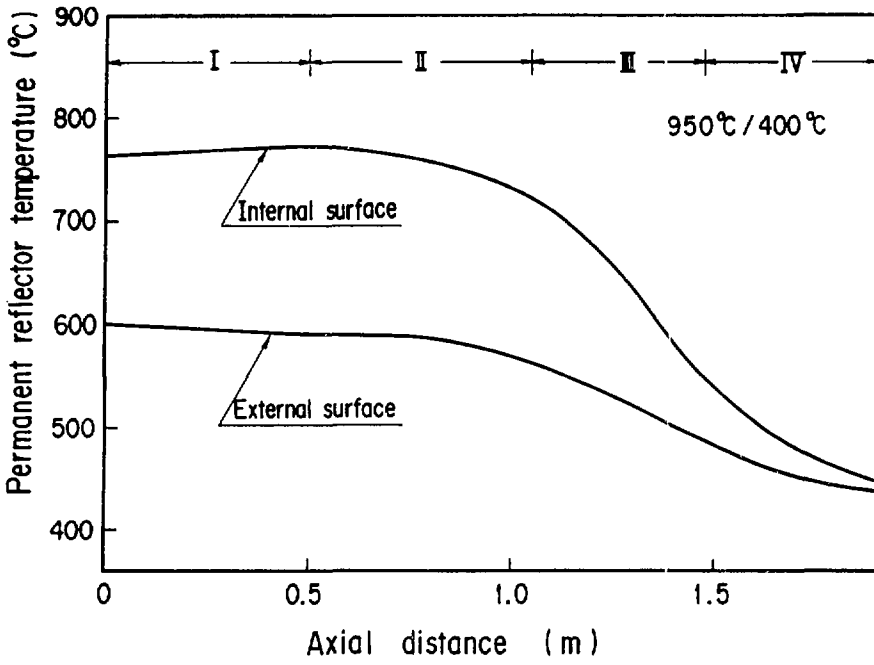


Fig. 4.12 固定反射体表面温度分布 (950°C / 400°C)

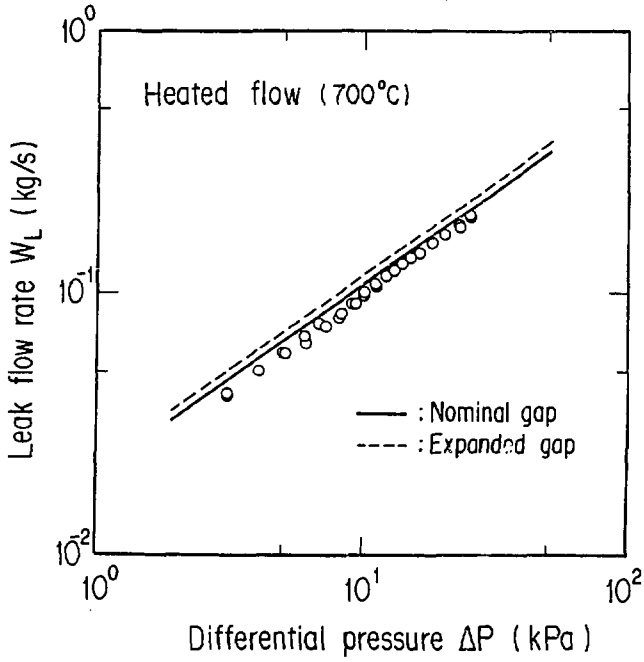


Fig. 4.13(1) 加熱試験時の固定反射体漏洩解析結果 (700°C)

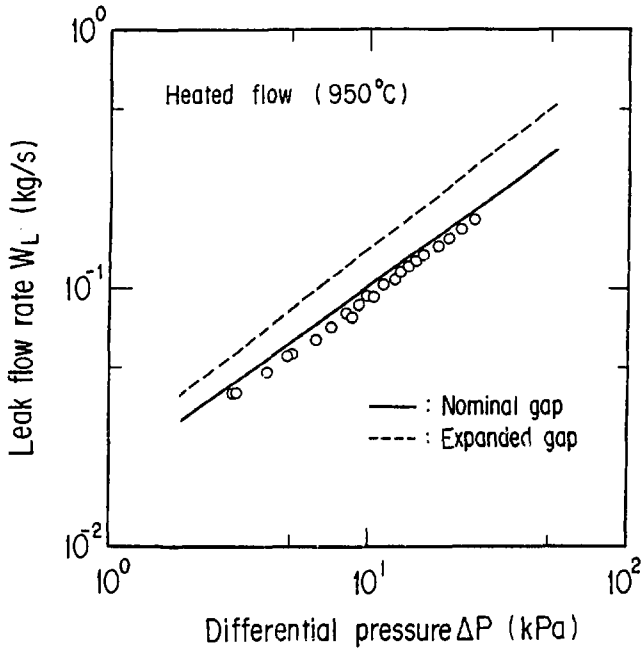


Fig. 4.13(2) 加熱試験時の固定反射体漏洩解析結果 (950°C)

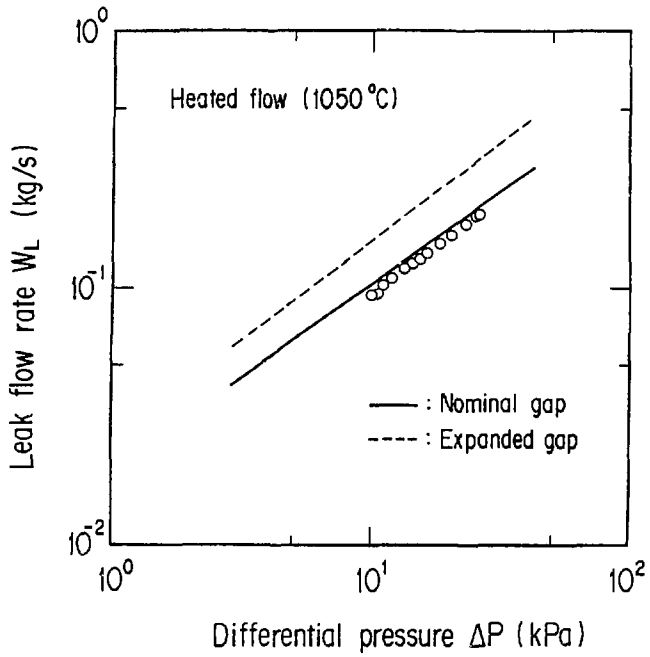


Fig. 4.13(3) 加熱試験時の固定反射体漏洩解析結果 (1050°C)

5. あ と が き

HTTRの炉内流動解析コード“FLOWNET”の検証解析を密封試験体1カラム試験装置によるクロス流れ試験結果及びHENDEL T₂による炉床部冷却材漏洩試験結果を用いて実施した。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) FLOWNETによるクロス流れの解析結果は、実験結果を良く再現し、炉心流配解析に使用する1カラム1流路モデル及び設計データの妥当性が確認された。
- (2) FLOWNETによる炉床部冷却材流れの解析は、実験結果と良く一致するとともに、加熱試験時には保守的な結果を与えることがわかった。またT₂の場合、冷却材の温度が変わっても固定反射体間の隙間が拡がることはないことが確認された。

謝 辞

本検証解析に使用した実験データを提示致いた高温構造工学研究室、HENDEL管理室及びHENDEL開発試験室の各位、並びに本報をまとめるにあたり、適切なコメント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。またFLOWNETの使用にあたり便宜をはかって下さいました富士電機㈱の関係各位に深謝致します。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所，“高温工学試験研究の現状”，1987.
- (2) 鈴木他，“多目的高温ガス実験炉詳細設計(II)炉心有効流量の評価”，JAERI-M 85-184, 1985.
- (3) H. Kaburaki, et al., “Effect of Crossflow on Flow distribution in HTGR Core Column”, J. Nucl. Sci. Tech., 24(7), pp.516-525, 1987.
- (4) 国富他，“炉内構造物実証試験部(HENDEL T₂)における漏えい量の計測試験と解析”，日本原子力学会誌，投稿中。
- (5) 鈴木他，“多目的高温ガス実験炉における炉内流動特性解析”FAPIG 第102号，pp.2-8, 1982.
- (6) 蕪木他，“多目的高温ガス実験炉炉心のクロス流れ(II)2ブロッククロス流れの解析”，日本原子力学会誌，27(5), pp.450-456, 1985.
- (7) 文沢他，“高温ガス炉用黒鉛材中のガス透過”，日本原子力学会，昭和59年年会，B4, 1984.
- (8) 鈴木他，“多目的高温ガス実験炉の炉心シール性能データ”，JAERI-M 85-183, 1985.
- (9) 文沢他，“多目的高温ガス実験炉の炉内流量配分感度解析”，JAERI-M 85-186, 1985.