

JAERI-M
90-118

燃料体スタック実証試験部(T₁)
多チャンネル試験結果・IV
(平行ギャップによるクロス流れ試験)

1990年8月

高瀬 和之・日野 竜太郎・宮本 喜晟

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、お申し込みください。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）で複写による実費領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, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

燃料体スタック実証試験部 (T₁)
多チャンネル試験結果・IV
(平行ギャップによるクロス流れ試験)

日本原子力研究所東海研究所高温工学部
高瀬 和之・日野竜太郎・宮本 喜晟

(1990年7月2日受理)

HENDELに設置されている燃料体スタック実証試験部の多チャンネル試験装置 (T₁-M) は、HTTRの炉心1カラムを模擬した大規模試験装置である。

このT₁-Mを使って、クロス流れ試験を実施した。本試験の目的は、黒鉛ブロックの外周から冷却材流路内にギャップを通過してクロス流れを生ずる場合の燃料体の熱流動特性を調べることである。クロス流れは、鉛直方向に積み重ねた黒鉛ブロックのうち、加熱領域の上部から3段目と4段目のブロック間に設定した平行ギャップによって、強制的に発生させた。

平行ギャップ幅が0.5~2mmの範囲において、加熱した際のクロス流量は、T₁-Mに流入する総ヘリウムガス流量の半分ほどであった。ギャップ幅の減少により、No.7~12流路から成る外側流路のクロス流量は増え、No.1~6流路から成る内側流路のクロス流量は低下し、クロス流れが冷却材流路間の流量再配分や燃料棒の温度分布に大きな影響を及ぼすことがわかった。

Experimental Test Results of Multi-channel Test Rig
of T₁ Test Section

IV. Crossflow Test in Parallel Gap

Kazuyuki TAKASE, Ryutaro HINO and Yoshiaki MIYAMOTO

Department of High Temperature Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 2, 1990)

The multi-channel test rig (T_{1-M}) of the fuel stack test section in the helium engineering demonstration loop (HENDEL) is a large-scale experimental facility which simulates one fuel column of the HTTR core.

A crossflow test was carried out using the T_{1-M}. The objectives of this test are to investigate the thermal and hydraulic characteristics in the fuel stack under the conditions that produced the crossflow through a gap from the outside of the graphite blocks into twelve coolant channels: the crossflow was forcibly produced by a parallel gap situated between the third and fourth blocks from the top of those in the heated section mounted in the vertical direction.

Crossflow rate were about a half of the total flow rate of helium gas in T_{1-M} for heated flow. A decrease of the gap width raised the crossflow rates in outer channels (No.7~12) and also reduced those in inner channels (No.1~6). It was found that the crossflow affected flow redistributions in the channels and temperature distributions of the fuel rods.

Keywords: Gas Cooled Reactor, High Temperature, Large-scale Model,
Hydraulics, Fuel Stack, Multi-channel, Cross Flow,
Graphite Block, Parallel Gap, Coolant Channels, Flow Rate,
Fuel Rod, Redistribution

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験装置と試験条件	3
2.1 試験装置	3
2.1.1 装置の概要	3
2.1.2 試験計装	4
2.2 試験条件	4
2.2.1 クロス流れ試験	4
2.2.2 試験条件	5
2.2.3 試験データの整理	5
3. 試験結果と考察	19
3.1 流量配分	19
3.2 温度分布と伝熱量分布	22
4. 結 言	33
謝 辞	33
参考文献	34

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental apparatus and experimental condition	3
2.1 Experimental apparatus	3
2.1.1 Outline of apparatus	3
2.1.2 Experimental instrumentation	4
2.2 Experimental condition	4
2.2.1 Crossflow test	4
2.2.2 Experimental condition	5
2.2.3 Data arrangement	5
3. Experimental results and considerations	19
3.1 Flow distribution	19
3.2 Temperature and heat transfer rate distributions	22
4. Conclusions	33
Acknowledgement	33
References	34

1. 緒 言

日本原子力研究所（原研）では、ヘリウム（He）ガスを冷却材とする高温ガス炉（VHTR）の技術的基盤の確立とその高度化を目的として、高温工学試験研究炉（HTTR）⁽¹⁾の建設を進めている。HTTRは炉心入口で395℃、4MPaのHeガスを最高950℃まで昇温させることを計画している。よって、燃料棒の表面温度は1000℃を超える高温になるため、燃料体構造を検討するうえで、燃料体の熱流動挙動を評価できる実証データが必要である。

燃料体スタック実証試験部（T₁試験部）⁽²⁾は、HTTRの運転条件と同じ高温高圧のHeガス条件下で、燃料体の伝熱流動特性を調べることを目的とした装置であり、大型構造機器実証試験ループ（HENDEL）に設置されている。

T₁試験部は、1つの冷却材流路を模擬した1チャンネル試験装置（T₁-S）と燃料体1カラムを模擬した多チャンネル試験装置（T₁-M）から成り、併設のHeガスループ（M₁）から試験条件に応じた温度、圧力、流量のHeガスが供給される。

本報に示すクロス流れ試験は、多チャンネル試験装置を使って行った。多チャンネル試験装置では、これまでに中温⁽³⁾及び高温⁽⁴⁾伝熱流動試験、自然循環試験、流路閉塞試験を行い、燃料体の伝熱流動特性についての基礎データを得るとともに、その成果をHTTRの開発に反映してきた。これら従来試験に対して、クロス流れ試験はHTTRの安全性に関わる試験の一環として行ったものである。

HTTRの燃料体は、Fig. 1.1に示すように六角柱状の黒鉛ブロックと燃料棒から構成される。黒鉛ブロックは長さ580mm、面間距離360mmの大きさであり、長さ方向に直径41mmの燃料チャンネル（チャンネル）が33本あけられている。燃料棒は、内部に複数個の燃料コンパクトを挿入した長さ580mm、外径34mm、肉厚約5mmの円筒棒であり、表面にはスペーサ・リブと呼ばれる突起が合計9個取り付けられている。この燃料棒が、黒鉛ブロックのそれぞれのチャンネル内に装荷される。Heガスは燃料体の上方から流入し、燃料棒とチャンネルとで構成される等価直径7mmの突起付き環状流路を下降しながら加熱される。HTTRでは、この燃料体が鉛直方向に5段積み重ねられ、さらにその上部と下部に各2段ずつ燃料棒が装荷されない可動反射体ブロックが設置されて、1つの燃料体カラムを形成する。このカラムが、制御棒カラム及び可動反射体カラムを含めて半径方向に約60個設置されて、炉心を構成している。

したがって、炉心を通るHeガスの大部分はチャンネル内を流れるが、一部は燃料体カラム間の鉛直方向のギャップに沿って下降するバイパス流となることが考えられる。このバイパス流は、直接燃料棒によって加熱されないため、チャンネル内を流れるHeガスよりも低温になることから、燃料体の内外面に温度差を生じることになる。この結果、燃料体を構成する黒鉛ブロックが熱応力によって変形するため、積み重ねた燃料体接触面間にギャップを生じる可能性がある。よって、バイパス流が燃料体の水平方向の接触面間ギャップから燃料体内に流れ込み、炉心出口冷却材温度が低下することが考えられる。この燃料体水平方向の接触面間ギャップの流れをクロス流れと呼び、Fort Saint Vrain炉で発生した炉心温度変動現象^{(5), (6)}の原因の1つと云われている。本

報で述べるクロス流れ試験は、この現象を実機規模の試験体を使って調べた試験である。

本試験では、鉛直方向に積み重ねた黒鉛ブロックのうち、模擬燃料棒が挿入される燃料体領域の中の3段目と4段目のブロック間に平行ギャップを設けて、クロス流れを強制的に発生させた。平行ギャップの幅は、黒鉛ブロック積層面に取り付けたダウエルピンの高さを調節して、0.5~2 mmの範囲で3種類に変化させた。試験は、3種類のギャップ幅に対して、まず模擬燃料棒を加熱しない条件で冷却材流路内の基本的な流動特性を調べる等温流試験を行った。次に、12本の模擬燃料棒の加熱量をすべて同じにした均一発熱試験を行い、燃料チャンネルの流量配分と黒鉛ブロックの温度分布を調べた。

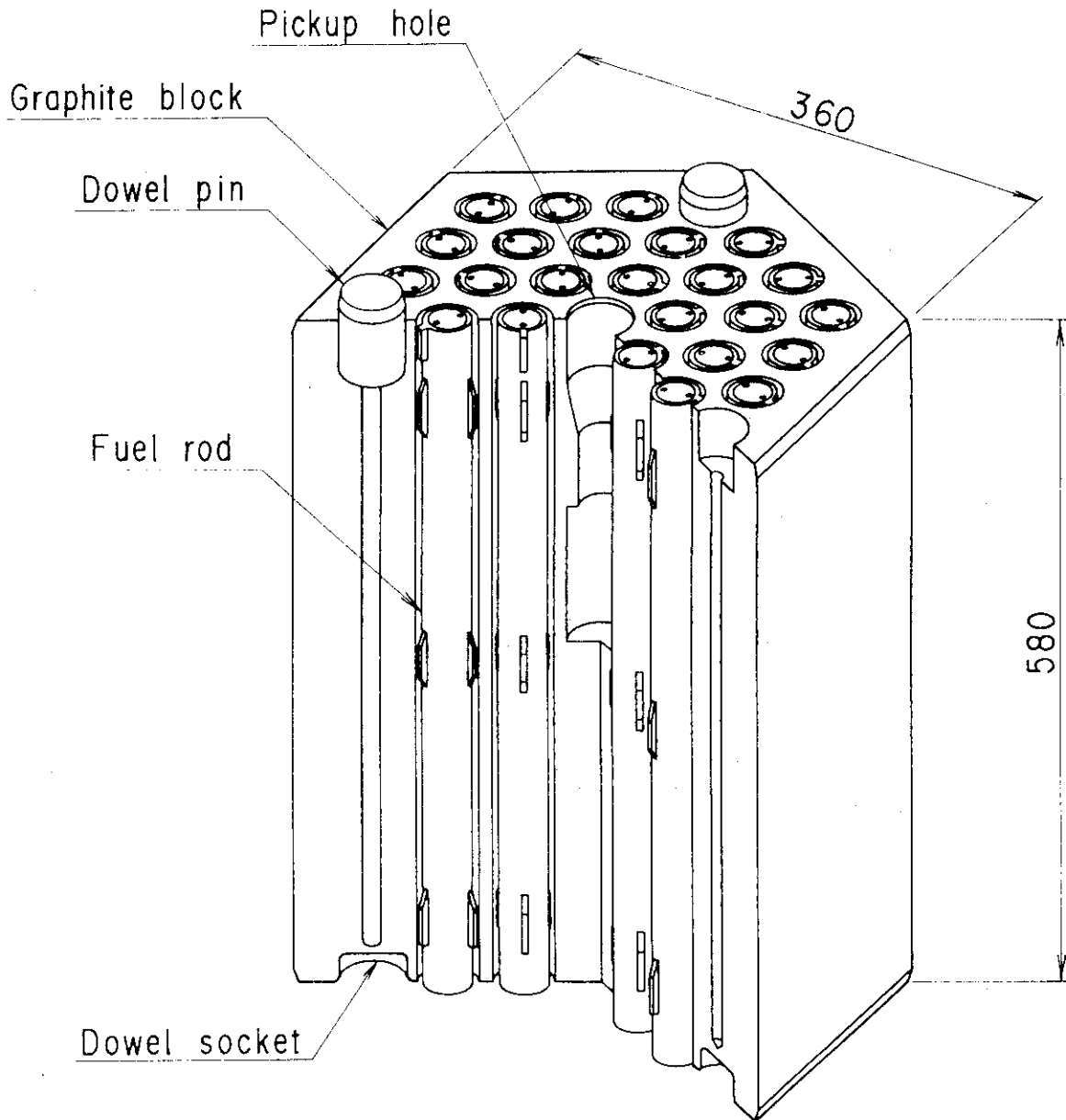


Fig. 1.1.1 Structural drawing of a fuel element in HTTR

2. 試験装置と試験条件

2.1 試験装置

2.1.1 装置の概要

Fig. 2.1.1 に、多チャンネル試験装置の構造を示す。本試験装置はHTTRの炉心燃料体1カラムを実寸規模で模擬したものであり、黒鉛ブロック、模擬燃料棒、補償ヒータブロック、圧力容器等の構成機器と熱電対、圧力計、差圧計、ピトー管等の計測器から成り、Fig. 2.1.2 に示す既設Heガスループ(M₁)⁽⁷⁾から試験条件の温度、圧力、流量のHeガスが供給される。M₁ループから供給されたHeガスは、本試験装置の圧力容器上部から容器内に流入し、試験体部分を下降しながら加熱される。その後、容器最下部に設置した内蔵冷却器で除熱された後、容器外に流出し、再びM₁ループに送られる。

多チャンネル試験装置に設置されている試験体は、黒鉛ブロックと模擬燃料棒から構成される。黒鉛ブロックは、Fig. 2.1.3 に示すように高温ガス実験炉詳細設計(I)の仕様をベースに製作された高さ570mm、面間距離299mmの六角柱ブロックであり、鉛直方向に11段積み上げた状態で試験体を形成している。このうち、上方から3～9段目までが模擬燃料棒によって加熱される燃料体領域、残りの1, 2段目及び10, 11段目は非加熱の上部及び下部反射体領域を模擬している。この黒鉛ブロックには、直径53mmのチャンネルが12個設けられており、それぞれのチャンネル内に外径46mmの模擬燃料棒が挿入される。

黒鉛ブロックの外周には、インコロイ800製のサポートブロックを介して、補償ヒータブロックが設置されている。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タルヒータを巻き付けた構造で、試験体からの半径方向への熱損失を防ぐために設置された2分割独立制御方式のヒータブロックである。

模擬燃料棒は、黒鉛ブロックと同様に高温ガス実験炉詳細設計(I)の形状寸法を模擬した電気ヒータであり、Heガスを最高1000℃まで昇温させることができる。Heガスは、黒鉛ブロックにあけられたチャンネルと模擬燃料棒とで構成される等価直径7mmの環状流路を下降しながら加熱される。

模擬燃料棒の構造をFig. 2.1.4 に示す。模擬燃料棒は、外径46mm、肉厚5mm、長さ約570mmの黒鉛スリーブ内に有効発熱長さ約460mmの黒鉛発熱体を挿入したサブロッドを、長さ方向に7段接続して1体構造とした間接加熱式の電気ヒータである。発熱体と黒鉛スリーブの間には、電気絶縁のために窒化ホウ素(BN)を充填してある。各サブロッドの発熱体は、黒鉛製の中間電極で接続されており、上部及び下部電極からの交流直接通電によって発熱する。上部電極はニッケル製の電気リード棒の周囲を絶縁シースした構造で、リード棒の軸方向の熱膨張を吸収するためにリード棒と最上部サブロッド発熱体とは網線を溶接して接続してある。また、下部電極は黒鉛製のテーパー電極で、各チャンネルの加熱領域出口部に設置された黒鉛電極に挿入固定される。印加電圧は単相最高303Vで、発熱量は最高100kwである。黒鉛スリーブは、実機燃料棒スリーブ

を材質、形状ともに模擬した構造で、その表面には軸方向と周方向にそれぞれ3ヶ所ずつスペーサ・リップが取り付けられている。

2.1.2 試験計装

模擬燃料棒の表面温度は、軸方向2段目から6段目までの各サブロッドの黒鉛シースの外表面に、シース上端から約220mmの位置に $\phi 1.6$ mmのK型シース付き熱電対を各段あたり1点、模擬燃料棒1本につき6点取り付け測定した。

各チャンネルの入口Heガス温度は、模擬燃料棒の上部電極リード棒表面に取り付けた $\phi 1.6$ mmのK型シース付き熱電対で測定した。また、出口Heガス温度は、試験体最下部に設置した下部可動反射体ブロック2段目の各チャンネル内に $\phi 3.2$ mmのK型シース付き熱電対を取り付けて測定した。

各チャンネルの入口Heガス流量は、模擬燃料棒の上部電極リード棒に設置したピトー管の測定値から校正して求めた。同様に、出口Heガス流量は、下部可動反射体ブロック2段目に設置したピトー管から求めた。

さらに、試験体入口部と出口部に設けた圧力計により、試験体入口圧力及び出口圧力を測定した。また、試験体の出入口間に設置した差圧計により、試験体全体差圧を測定した。

黒鉛ブロックの内部温度及び外表面温度は、Fig. 2.1.5に示す軸方向位置に $\phi 3.2$ mmのK型シース付き熱電対を合計75本取り付け測定した。また、各黒鉛ブロックの水平方向の熱電対設置位置をFig. 2.1.6～Fig. 2.1.11に示す。ここで、図中に示すA点、B点はいずれも2分割式独立制御方式補償ヒータブロックのヒータ温度制御用の熱電対である。

2.2 試験条件

2.2.1 クロス流れ試験

クロス流れ試験の概略は次のようである。黒鉛ブロックは、Fig. 2.2.1に示すように高さ方向に11段積み上げられており、上部2段と下部2段を除く7段に模擬燃料棒が挿入されて模擬燃料体を形成している。クロス流れを発生させる平行ギャップは、模擬燃料体の上から3段目と4段目の積層面間に設けた。ギャップ幅の大きさは、4段目のブロック上端面にある3個のダウエルピンによって設定した。ダウエルピンは、黒鉛ブロックを積み上げる際の位置決めを成すものであるが、本試験ではダウエルピンの長さを変えることによって、4段目よりも上方の全ブロックの荷重をダウエルピンで支持した。したがって、3段目と4段目の黒鉛ブロックの積層面は接触せず、積層面間に任意の幅を有する平行ギャップが形成される。黒鉛ブロックの周囲は、幅2.5mmの間隙を通して六角形断面をした側壁で囲まれている。さらに、黒鉛ブロックの外周には補償ヒータが設置されており、径方向の温度補償を行っている。また、黒鉛ブロックの最下端はFig. 2.2.1に示すように側壁から張り出された支持部でシールしている。

よって、Heガスの流れは次のようになる。試験体入口で総流量 W_t は、流路を流れる入口流量 W_{it} と黒鉛ブロックと側壁で囲まれた側部流路を流れるクロス流量 W_{st} に分配される。従来の伝熱流動試験では入口流量がそのまま出口流量となるため、流路入口から出口に渡って流路相互間

で流量再配分は生じないが、クロス流れ試験では鉛直方向に存在するギャップ位置で入口流量とクロス流量との間で流量が再配分される。すなわち、流路内は模擬燃料棒が挿入されているため流動抵抗は大きい、側部流路は全長に渡って障害物がないため流動抵抗は小さい。また、側部流路の下端はシールされているため、ギャップ位置より下方では流れは停滞している。したがって、多並列流路の均圧効果によって、ギャップ位置で側部流路から黒鉛ブロック内に向かってクロス流れが発生する。その結果、12の流路間で流量の再配分が行われ、最終的に流路出口部の流量は入口流量とクロス流量を合計した総流量になる。

2.2.2 試験条件

本試験で使用した模擬燃料棒は、軸方向に一律な発熱分布を有する高温試験用模擬燃料棒*である。

クロス流れ試験は、0.5mm、1mm及び2mmの3種類のギャップ幅に対して行った。試験は、はじめに基本的なクロス流れ特性を調べるために入口圧力2~4MPa、入口流量0.03~0.29kg/s、総流量0.035~0.31kg/s、入口温度220~285℃の条件で等温流試験を行った。

次に、模擬燃料棒を加熱して入口圧力2~4MPa、入口流量0.03~0.14kg/s、総流量0.07~0.28kg/s、入口温度245~300℃、出口温度640~820℃、無次元熱流束 $1.8 \times 10^{-3} \sim 2.6 \times 10^{-3}$ の条件で加熱試験を行った。Table 2.2.1とTable 2.2.2に、それぞれ等温流試験と加熱試験の場合の各試験条件を示す。ここで、Table 2.2.2に示す無次元熱流束 $q_i^{+ (8)}$ は模擬燃料棒の加熱強さを表す無次元熱流束であり、次式で定義される。

$$q_i^+ = \frac{Q_m}{\pi \cdot D_i \cdot L_t} \cdot \frac{A_s}{W_{im} \cdot C_p \cdot (T_{gim} + 273.15)} \quad (2.2.1)$$

- ここで、 Q_m : 12本の模擬燃料棒の平均加熱量
 A_s : 模擬燃料棒1本あたりの発熱部表面積
 D_i : 模擬燃料棒の外径
 L_t : 模擬燃料棒1本あたりの発熱部長さ
 W_{im} : 12の流路に流入する入口流量の平均値
 T_{gim} : 12の流路の入口Heガス温度の平均値
 C_p : Heガスの比熱

2.2.3 試験データの整理

12の流路に流入するクロス流量は次のようにして求めた。まず、試験装置に流入する総流量 W_t は試験装置入口部に設置した流量計で測定した。次に、各流路の入口流量 W_i と出口流量 W_o は、流路入口部及び出口部にそれぞれ設置したピトー管の差圧測定値 ΔP_p を使って算出した。一般に、ピトー管差圧 ΔP_p は次式

* 最高出力100kWの間接電気加熱式ヒータで、Heガスを最高1000℃まで昇温することが可能である。

$$\Delta P_p = C_{pt} \gamma v_p^2 / 2g \quad (2.2.2)$$

ここで、 C_{pt} : ピトー管係数

v_p : ピトー管まわりの平均流速

γ : 流体比重量

g : 重力加速度

から求められるが、この場合にはピトー管係数が既知でなければならない。そこで、Fig.2.2.2 と Fig.2.2.3 に示すように、流路の入口部及び出口部形状を実寸規模で模擬した実験装置を新規に製作し、常温常圧の空気流による実験データをもとにピトー管係数 C_{pt} を決定した。これにより、入口及び出口流路のピトー管係数 $C_{pt,i}$ 及び $C_{pt,o}$ は次式で良く整理できることがわかった。

$$\begin{aligned} \text{入口部} & ; C_{pt,i} = 16.74 Re_{pt}^{-0.253} & (2.2.3) \\ & (800 < Re_{pt} < 32000) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{出口部} & ; C_{pt,o} = 0.525 Re_{pt}^{0.047} & (2.2.4) \\ & (1000 < Re_{pt} < 26000) \end{aligned}$$

ここで、 Re_{pt} はピトー管まわりのレイノルズ数、添字 i 、 o は入口及び出口を表す。

よって、式 (2.2.2) に

$$v_p = \frac{W}{\gamma A_{ep}} \quad (2.2.5)$$

を代入して、 W について整理すると次式になる。

$$W = A_{ep} (2g \Delta P_p \gamma / C_{pt})^{0.5} \quad (2.2.6)$$

ここで、 W : 流量

A_{ep} : ピトー管まわりの流路断面積 [$= \pi (D_{op}^2 - D_{ip}^2) / 4$]

D_{op} : ピトー管まわりの環状流路外径

D_{ip} : ピトー管まわりの環状流路内径

式 (2.2.6) に式 (2.2.3) を代入すると入口流量 W_i が、同様に式 (2.2.4) を代入すると出口流量 W_o が求められる。

さらに、入口総流量 W_{it} 、出口総流量 W_{ot} 及び総クロス流量 W_{st} は、それぞれ次式から求めた。

$$W_{it} = \sum_{n=1}^{12} W_{i,n} \quad (2.2.7)$$

$$W_{ot} = \sum_{n=1}^{12} W_{o,n} \quad (2.2.8)$$

$$W_{st} = W_t - W_{it} \quad (2.2.9)$$

また、総流量 W_t と出口総流量 W_{ot} が一致しない場合には、次式により $W_{ot}=W_t$ となるように各流路の出口流量 $W_{o,n}$ を再計算した。

$$W_{o(new),n} = W_{o(old),n} \cdot W_t / W_{ot} \quad (2.2.10)$$

Table 2.2.1 Experimental conditions for isothermal flow test

Gap width H (mm)	Channel inlet temperature T_i (°C)	Inlet channel flow rate W_{it} (kg/s)	Cross flow rate W_{st} (kg/s)	Total flow rate W_t (kg/s)	Inlet pressure P_i (MPa)	Mean inlet Reynolds number Re_{in}	Mean outlet Reynolds number Re_{on}
0.5	220~250	65~290	5~15	70~305	4.0	2530~10840	2700~11420
1.0	220~260	30~210	5~45	35~255	2.0	1250~8070	1420~9710
2.0	255~285	100~105	55~60	155~165	2.0	1620~3840	5570~5930

Table 2.2.2 Experimental conditions for heated flow test

Gap width H (mm)	Run#	Channel inlet temp. T_i (°C)	Channel outlet temp. T_o (°C)	Inlet channel flow rate W_{it} (kg/s)	Cross flow rate W_{st} (kg/s)	Total flow rate W_t (kg/s)	Inlet pressure P_i (MPa)	Mean inlet Reynolds number Re_{in}	Mean outlet Reynolds number Re_{on}	Electrical input Q (kW)	Dimensionless heat flux parameter q^*_{in} ($\times 10^{-3}$)
0.5	#2613	261.7	819.0	138.0	109.8	247.8	4.0	5070	5600	58.9x12	2.22
0.5	#2616	256.6	814.7	97.9	75.3	173.2	4.0	3620	3930	41.3x12	2.23
0.5	#2619	250.7	809.7	67.6	53.7	121.3	4.0	2520	2760	28.9x12	2.27
0.5	#2622	247.3	802.3	47.9	35.6	83.5	4.0	2790	1910	19.7x12	2.20
1.0	#2505	251.6	746.2	126.0	121.4	247.6	4.0	4690	5860	52.2x12	2.20
1.0	#2538	257.1	819.6	80.2	86.9	167.1	4.0	2960	3780	39.9x12	2.61
1.0	#2439	255.2	833.9	32.9	32.8	65.7	2.0	1220	1470	15.9x12	2.55
1.0	#2444	807.7	206.6	101.9	104.7	206.6	2.0	3790	4700	48.9x12	2.55
1.0	#2454	246.6	811.1	67.4	70.0	137.4	2.0	2530	3120	32.8x12	2.61
2.0	#2308	292.6	674.8	96.8	123.0	219.8	2.0	3420	5470	35.8x12	1.82
2.0	#2311	300.2	683.1	64.9	82.8	147.7	2.0	2280	3660	23.9x12	1.79
2.0	#2314	297.5	684.3	31.5	42.6	74.1	2.0	1110	1830	12.1x12	1.87
2.0	#2317	260.0	644.3	120.6	156.3	276.9	2.0	4440	7050	45.4x12	1.97

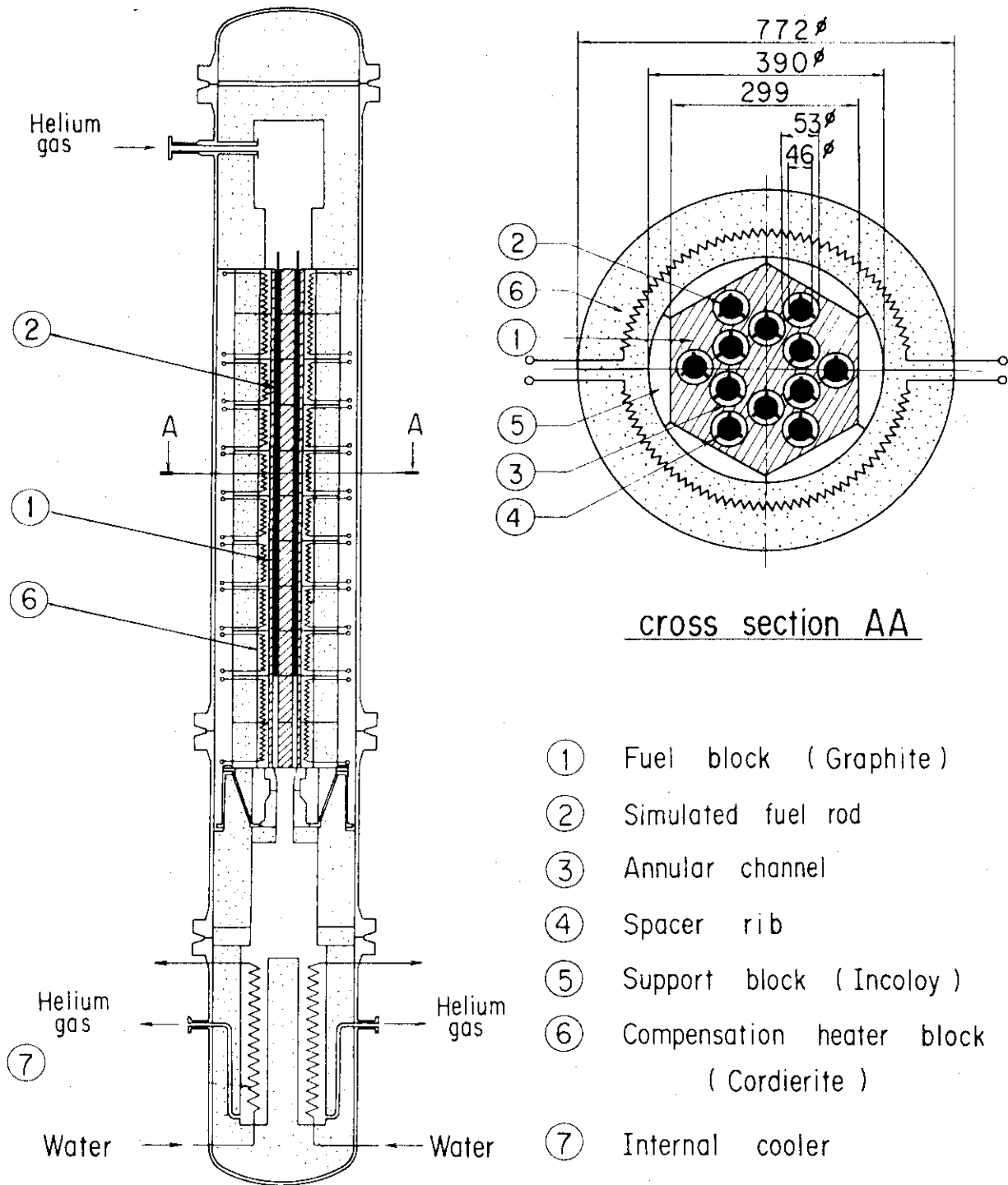


Fig. 2.1.1 Schematic drawing of multi-channel test rig (T_{1-M})

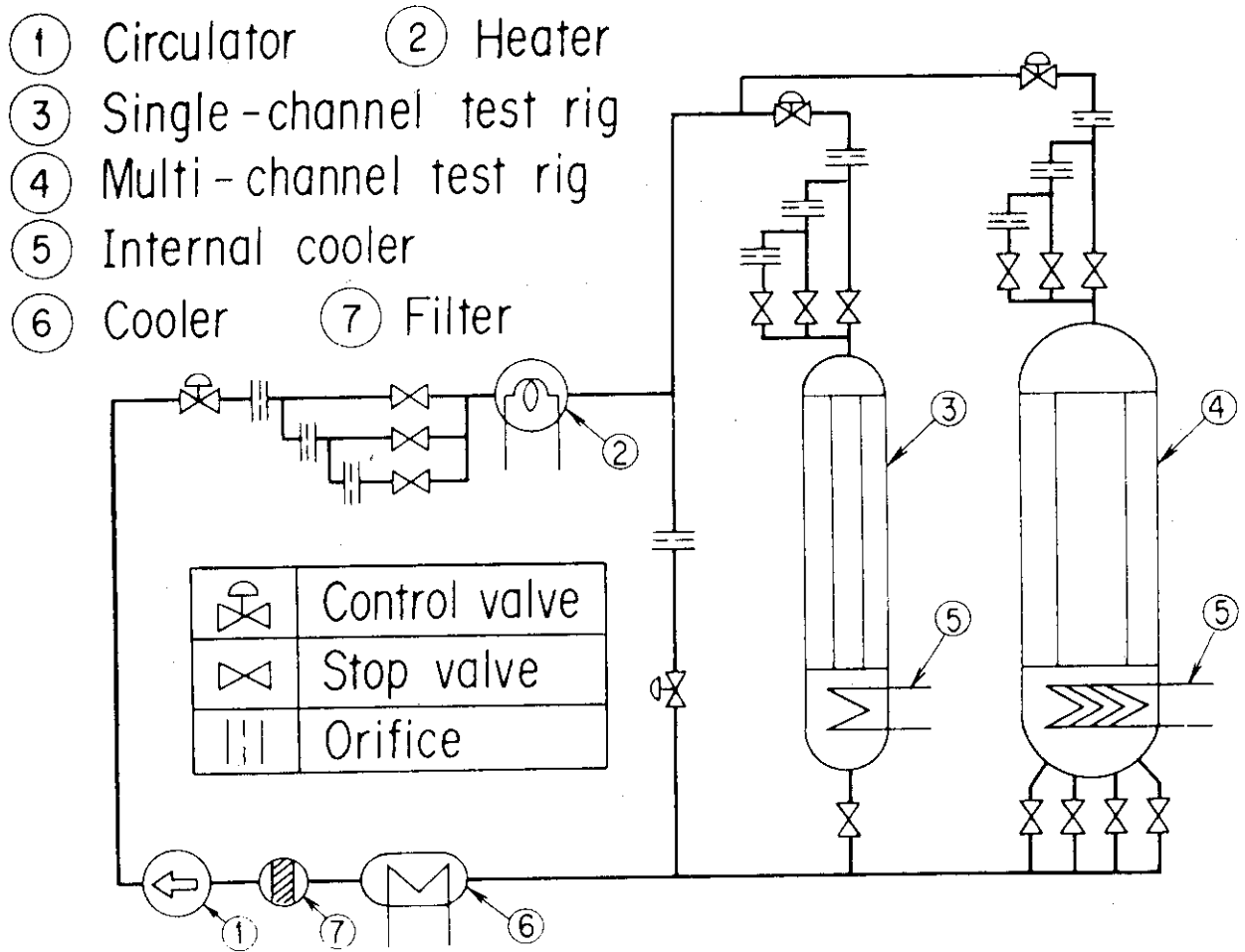


Fig. 2.1.2 Flowsheet of M₁+T₁ loop

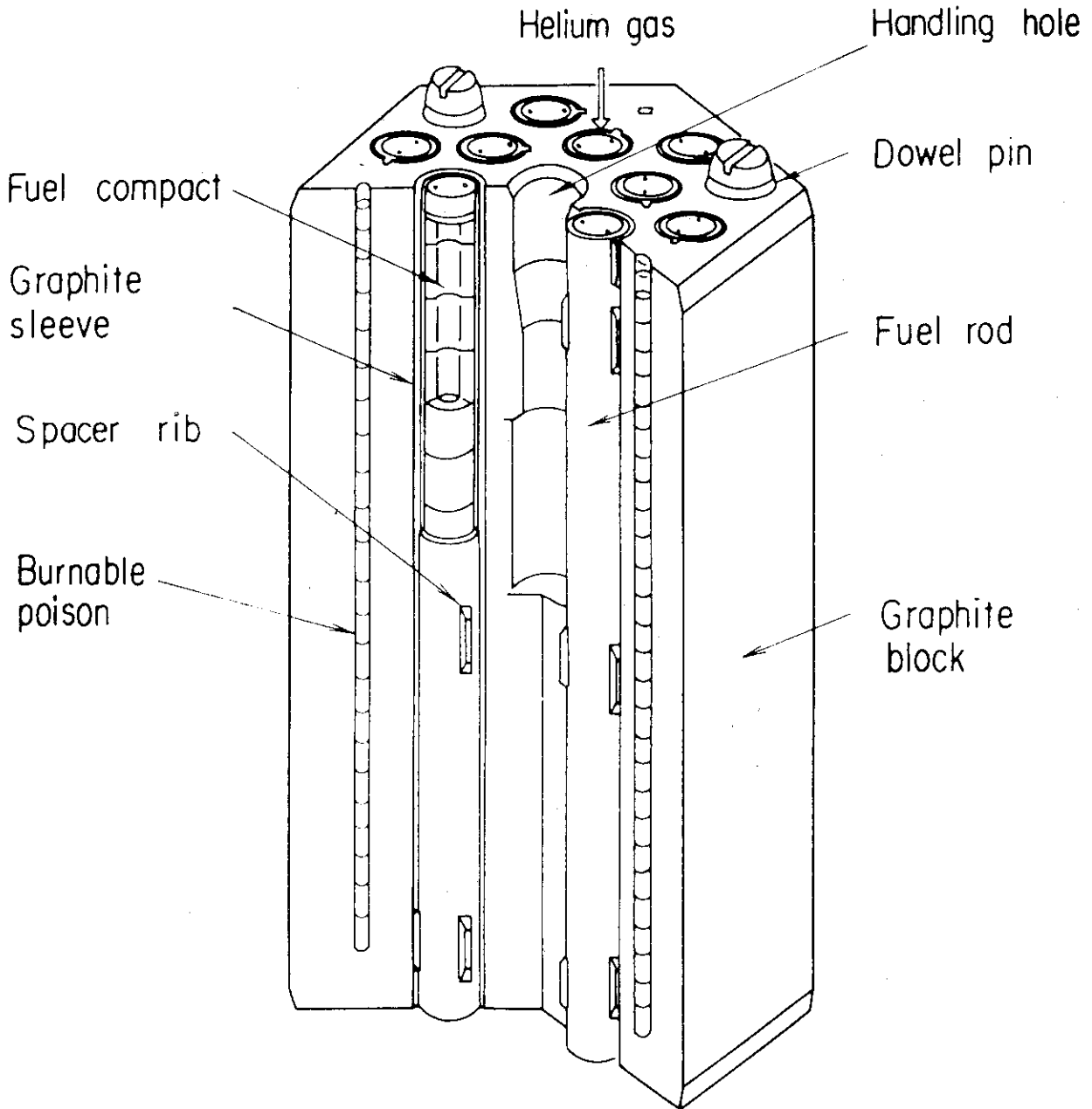


Fig. 2.1.3 Structural drawing of a fuel element of detail design (I) in VHTR

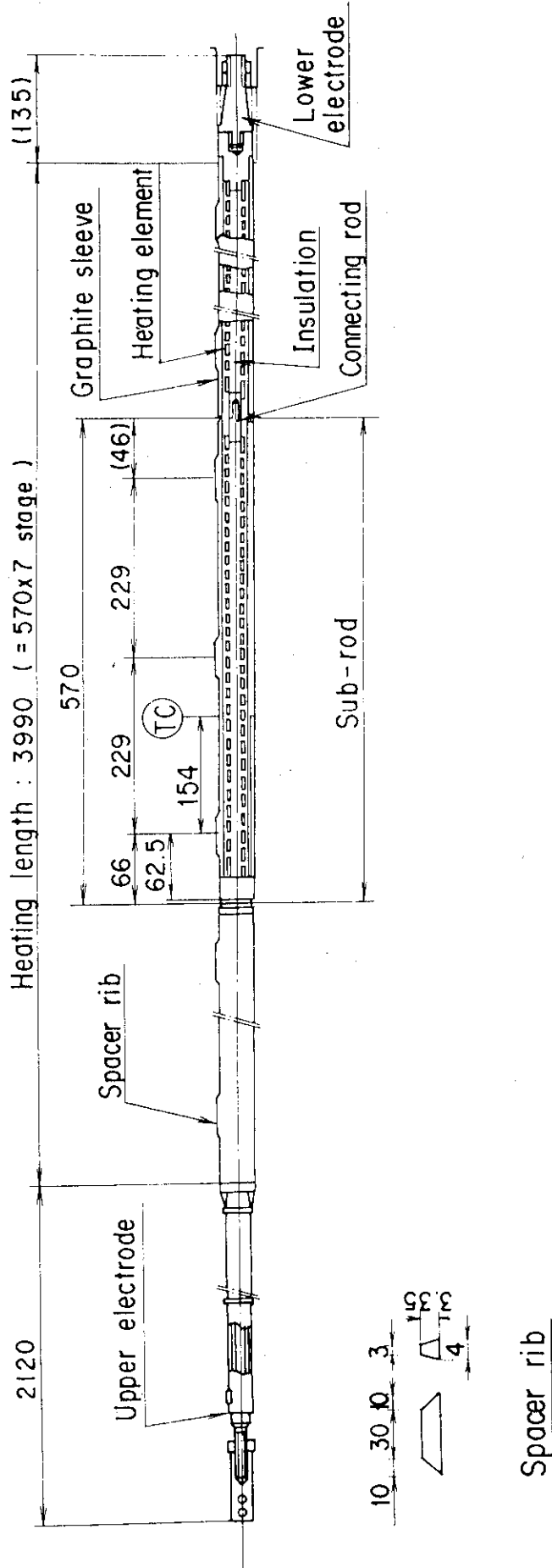


Fig. 2.1.1.4 Structural drawing of a simulated fuel rod

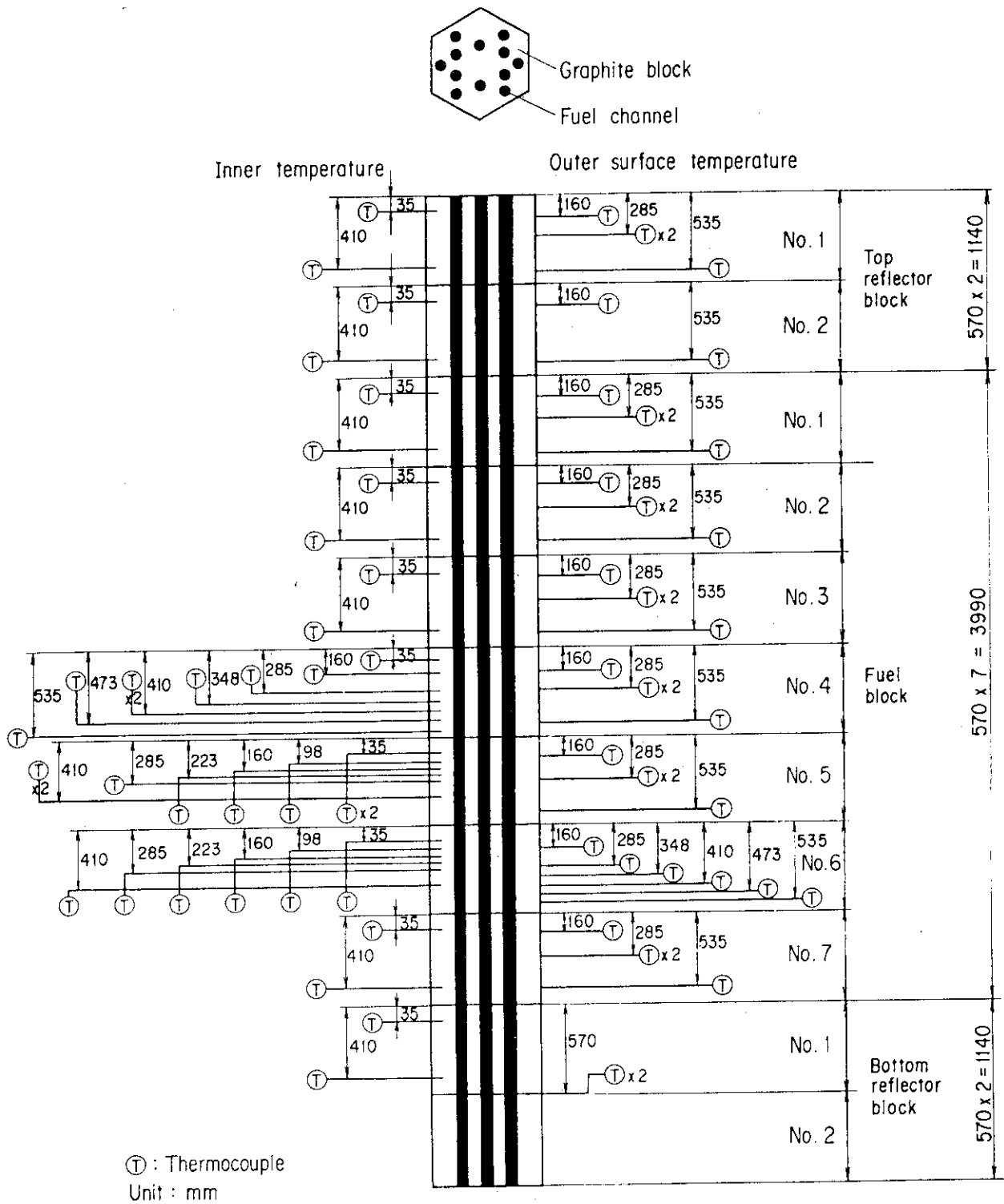


Fig. 2.1.5 Axial measuring positions and numbers of block temperature

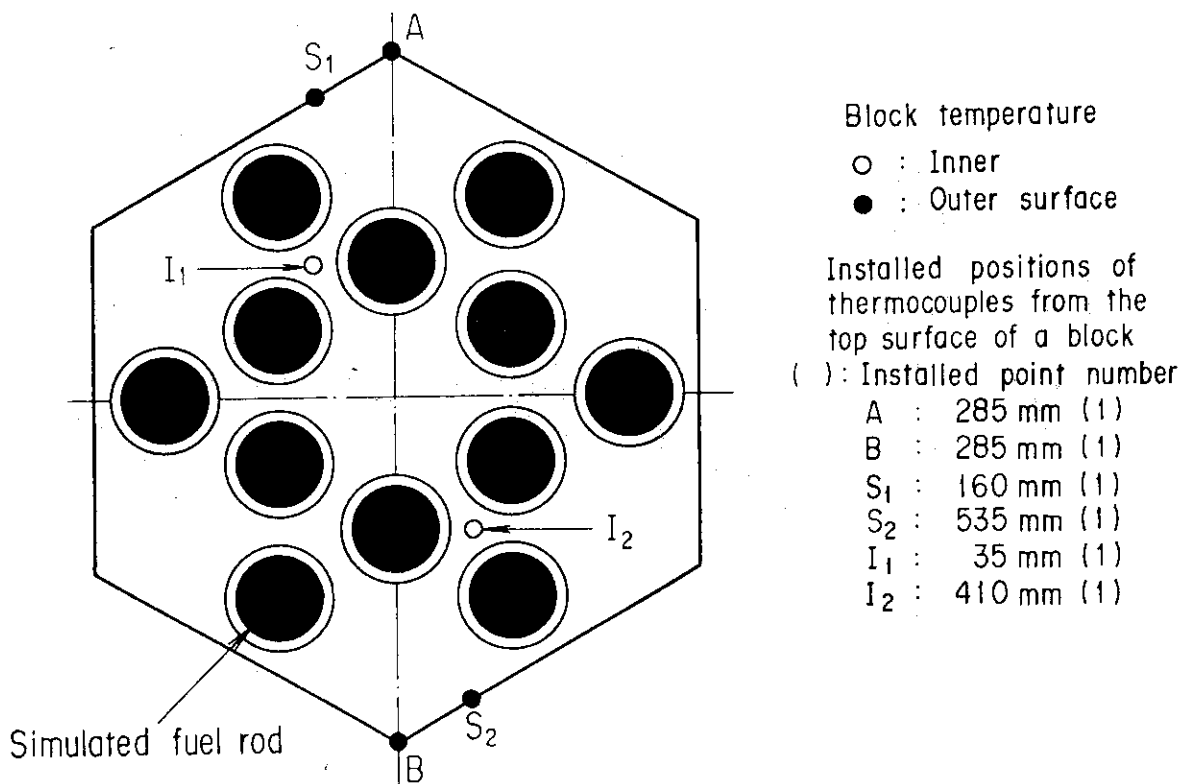


Fig. 2.1.6 Measuring positions of temperature at a top reflector block No.1, fuel blocks No.1 ~ No.3 and No.7

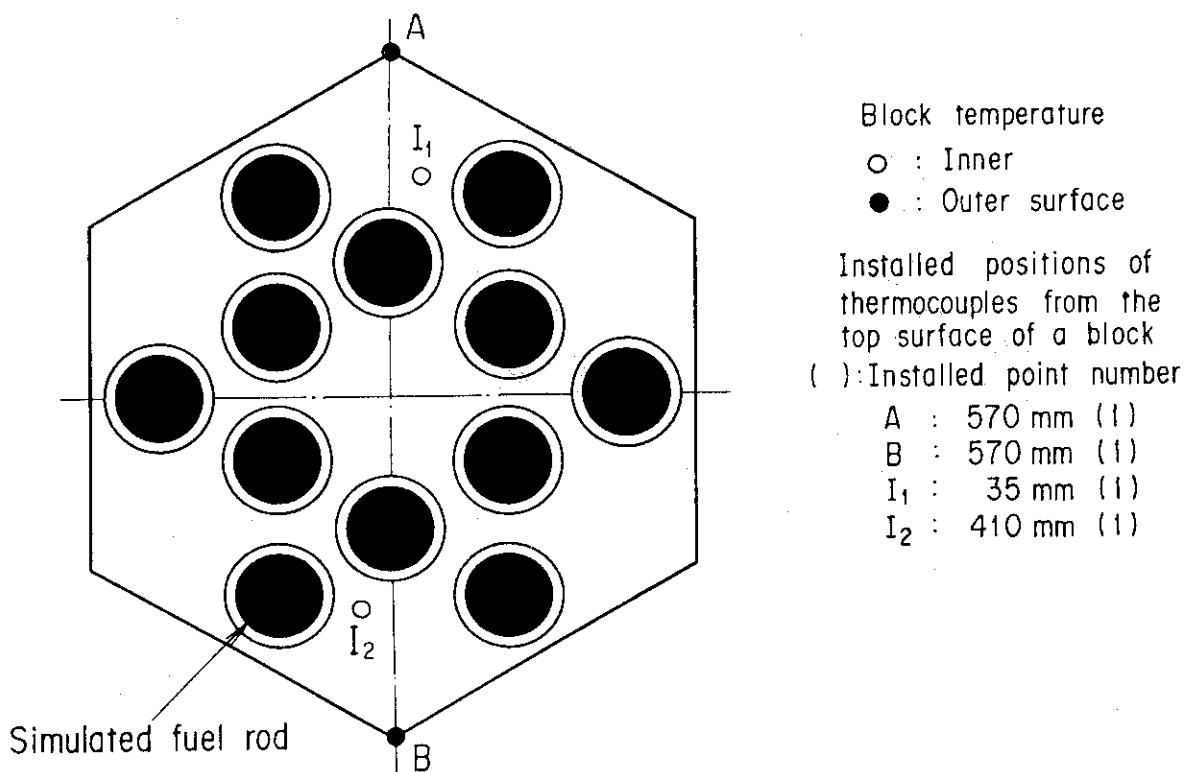


Fig. 2.1.7 Measuring positions of temperature at a top reflector block No.2

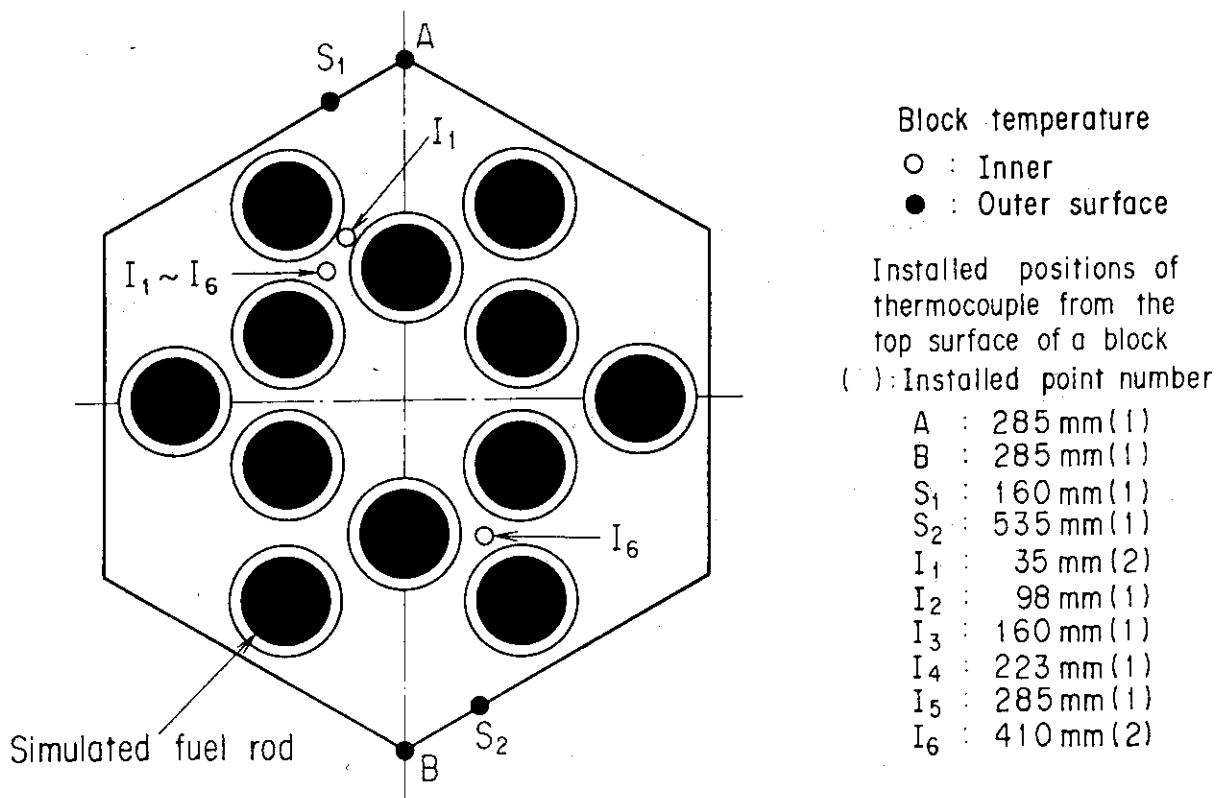


Fig. 2.1.8 Measuring positions of temperature at a fuel block No.4

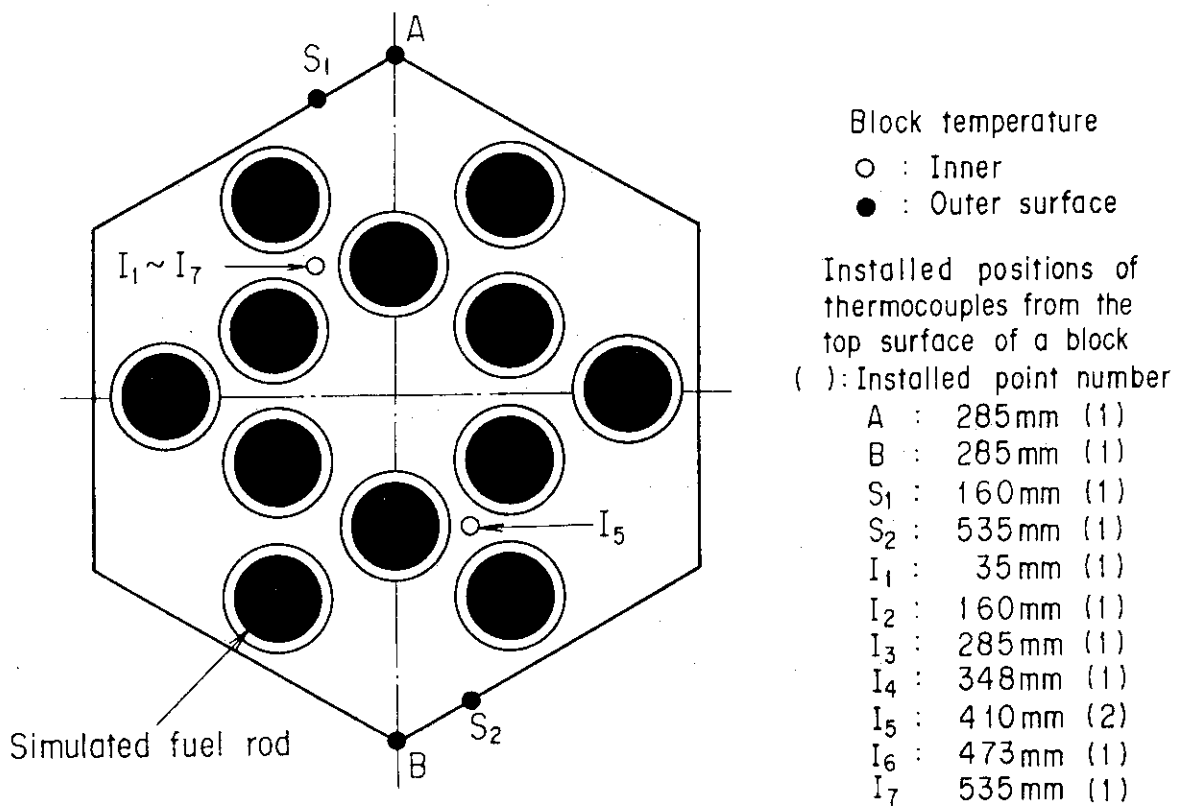
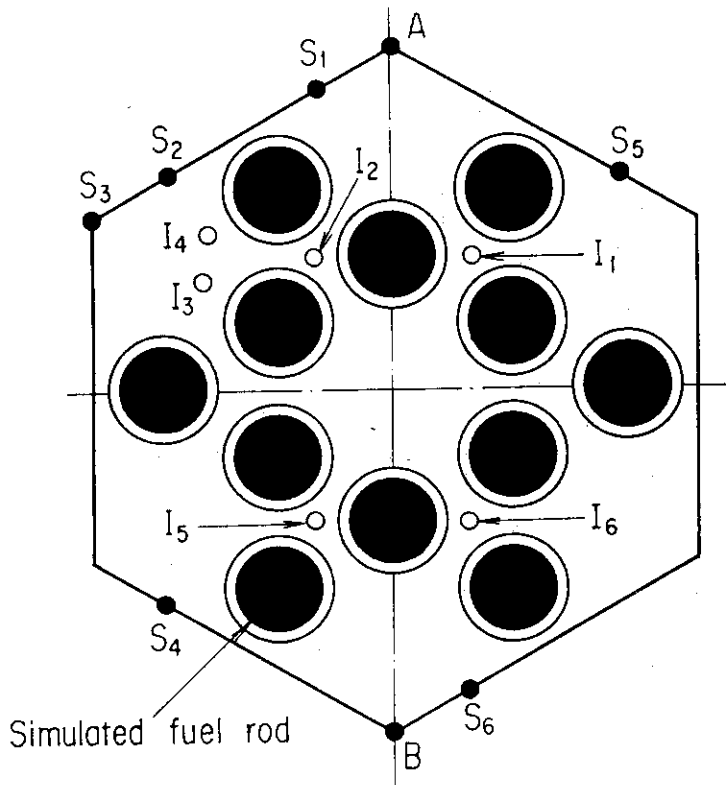


Fig. 2.1.9 Measuring positions of temperature at a fuel block No.5



Block temperature

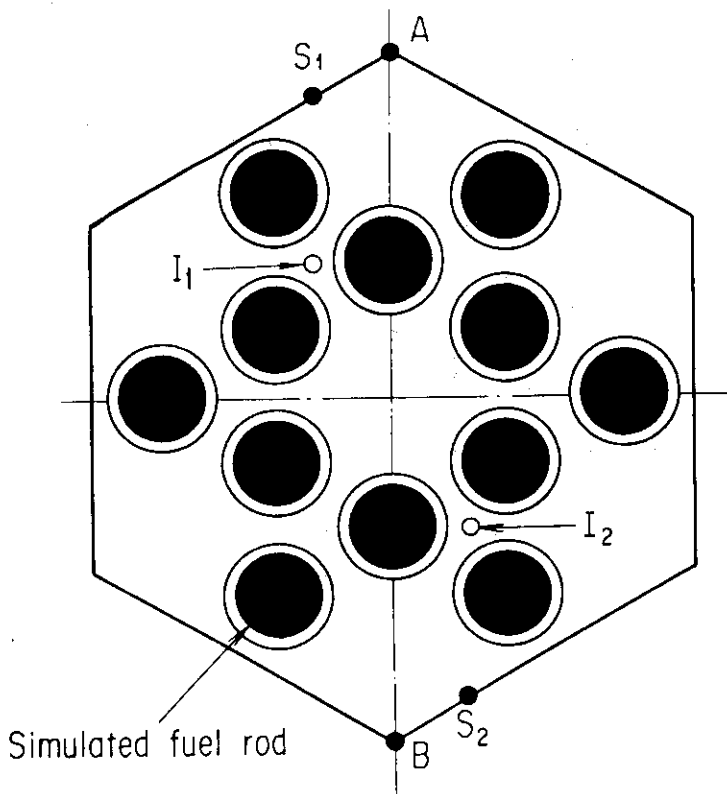
- : Inner
- : Outer surface

Installed positions of thermocouples from the top surface of a block

() : Installed point number

- A : 285 mm (1)
- B : 285 mm (1)
- S₁ : 160 mm (1)
- S₂ : 285 mm (1)
- S₃ : 348 mm (1)
- S₄ : 410 mm (1)
- S₅ : 473 mm (1)
- S₆ : 535 mm (1)
- I₁ : 35 mm (1)
- I₂ : 98 mm (1)
- I₃ : 160 mm (1)
- I₄ : 223 mm (1)
- I₅ : 285 mm (1)
- I₆ : 410 mm (1)

Fig. 2.1.10 Measuring positions of temperature at a fuel block No.6



Block temperature

- : Inner
- : Outer surface

Installed positions of thermocouples from the top surface of a block

() : Installed point number

- S₁ : 160 mm (1)
- S₂ : 535 mm (1)
- I₁ : 35 mm (1)
- I₂ : 410 mm (1)

Fig. 2.1.11 Measuring positions of temperature at a bottom reflector block No.1

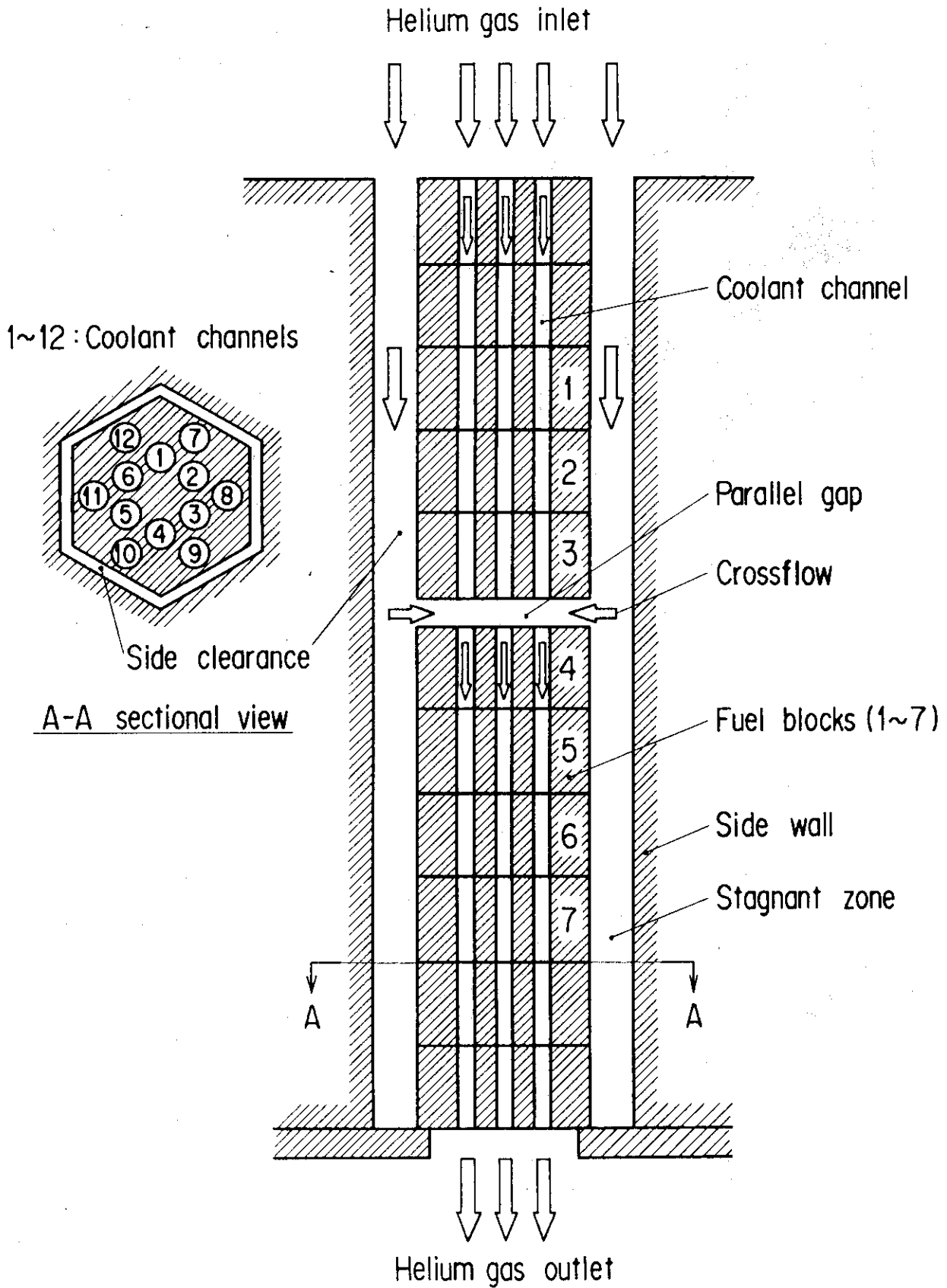


Fig. 2.2.1 Schematic drawing of crossflow test

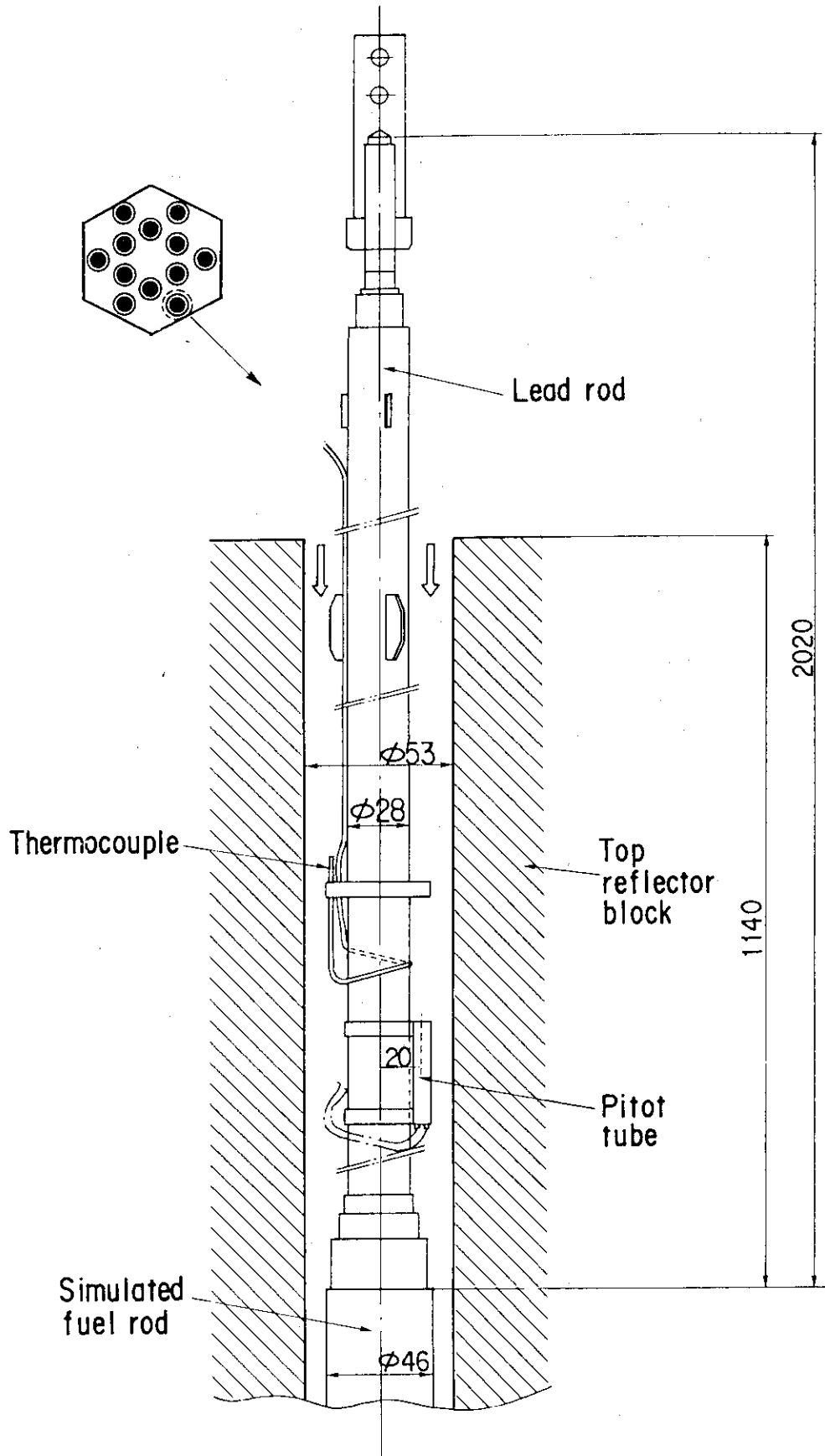


Fig. 2.2.2 Structural drawing of channel inlet section

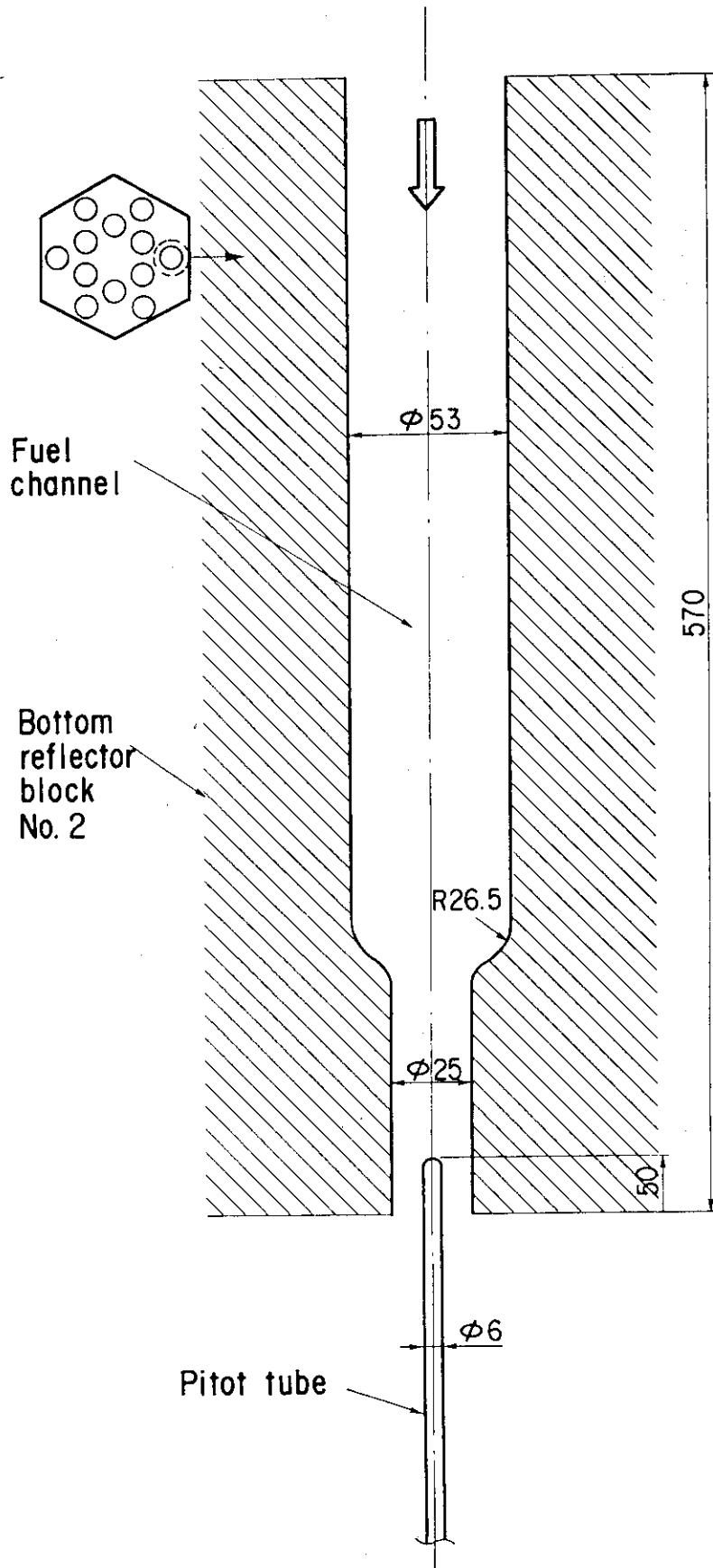


Fig. 2.2.3 Structural drawing of channel outlet section

3. 試験結果と考察

3.1 流量配分

本試験で得られた流路入口と出口のHeガスの流量配分の一例として、ギャップ幅2mmの場合の加熱試験の結果をFig. 3.1.1に示す。縦軸はHeガスの流量、横軸はNo 1～12流路の番号、黒と白のヒストグラムはそれぞれ入口流量と出口流量を表わす。図に見られるように、各流路の入口流量は出口流量の45%程度であり、残りの55%がクロス流れとして流路内に流入したことがわかる。

Fig. 3.1.2は、加熱試験及び等温流試験における総流量 W_t に占めるクロス流量 W_{st} の割合を0.5mm, 1mm, 2mmのギャップ幅 H に対して示したものである。クロス流量は総流量の増加に伴ってほぼ直線的に増大しており、実線で示す値

加熱試験の場合	;	ギャップ幅 0.5mmで,	$W_{st} = 0.434 W_t$
		ギャップ幅 1mmで,	$W_{st} = 0.484 W_t$
		ギャップ幅 2mmで,	$W_{st} = 0.560 W_t$
等温流試験の場合	;	ギャップ幅 0.5mmで,	$W_{st} = 0.048 W_t$
		ギャップ幅 1mmで,	$W_{st} = 0.176 W_t$
		ギャップ幅 2mmで,	$W_{st} = 0.369 W_t$

に対して $\pm 5\%$ の範囲でよく近似できる。図中、クロス流量は等温流試験よりも加熱試験の方が大きな値を示しているが、これは加熱時の流路内圧力損失が等温流時よりも大きいため、より多くのクロス流れが発生するからである。

ところで、多並列流路の概念から、流路入口及び側部流路入口からギャップ位置までの各圧力損失は同じになる。よって、流路入口からギャップ位置までの鉛直方向の圧力損失 ΔP_g は次式で表される。

$$\Delta P_g = 4 f_c \frac{L_g}{De_c} \frac{\rho_c v_c^2}{2g} + \rho_{c,o} v_{c,o}^2 - \rho_{c,i} v_{c,i}^2 \quad (3.1.1)$$

$$= 4 f_{st} \frac{L_g}{De_{st}} \frac{\rho_{st} v_{st}^2}{2g} + \rho_{st,o} v_{st,o}^2 - \rho_{st,i} v_{st,i}^2 \quad (3.1.2)$$

ここで、 f : 摩擦係数

L : 流路長さ

De : 等価直径

v : 平均流速を示し、 $v_c = W_{im} / (\rho_c A_c)$ 及び $v_{st} = W_{st} / (\rho_{st} A_{st})$

W : 流量

A : 流路断面積

ρ : Heガスの密度

添字 c, st : 冷却材流路, 側部流路

im : 入口流路における平均値

i, o : 入口, 出口

式 (3.1.1) は冷却材流路の圧力損失を示し、右辺第1項はスパーサ・リブによる流路の形状抵抗の影響を含んだ摩擦損失、第2項はHeガスの密度変化に伴う加速損失を表す。同様に、式 (3.1.2) は側部流路の場合を表す。ここで、等温流の場合には、式 (3.1.1) と式 (3.1.2) の右辺第2項は無視できるため、等温流時の側部流路の摩擦係数 f_{st} は次式で表される。

$$f_{st} = f_c \frac{De_{st}}{De_c} \frac{\rho_{st}}{\rho_c} \left[\frac{W_{im}}{W_{st}} \right]^2 \left[\frac{A_{st}}{A_c} \right]^2 \quad (3.1.3)$$

上式に

$$Re = \frac{v De}{\nu}, \quad v = \frac{W}{\rho A}$$

を代入すると、式 (3.1.3) は最終的に次式に書き換えられる。

$$f_{st} = f_c \left[\frac{De_{st}}{De_c} \right]^3 \frac{\rho_c}{\rho_{st}} \left[\frac{\nu_c}{\nu_{st}} \right]^2 \left[\frac{Re_c}{Re_{st}} \right]^2 \quad (3.1.4)$$

上式 (3.1.4) に示す冷却材流路の摩擦係数 f_c は、既報⁽⁶⁾で述べた1チャンネル試験装置の結果から、模擬燃料棒まわりのレイノルズ数 Re_c の関数として次式で表せる。

$$Re_c < 2000 \text{ で, } f_c = 28/Re_c \quad (3.1.5)$$

$$Re_c \geq 2000 \text{ で, } f_c = 0.094 Re_c^{-0.025} \quad (3.1.6)$$

一方、側部流路の摩擦係数 f_{st} は平行ギャップ幅 H の関数であるため、本試験の場合には3種類の H に対してそれぞれ f_{st} と Re の関係が得られる。そこで、異なる H に対しても同一の f_{st} 整理式が適用できるように、次の検討を行った。

Fig. 3.1.3 に、式 (3.1.4) ~ (3.1.6) から求めた等温流時の側部流路の摩擦係数 f_{st} と平行ギャップ幅 H を側部流路幅 $S_c (= 2.5 \text{ mm})$ で割った値 H/S_c との関係を示す。摩擦係数 f_{st} はギャップ比 H/S_c の増加とともに減少しており、ギャップ幅が広がると流動抵抗が低下していることがわかる。図中に示す実線は、試験結果を最小2乗法を使って近似した値であり、 $0.2 \leq H/S_c \leq 0.8$ の範囲では次式で整理される。

$$f_{st} = 2.58 \times 10^{-4} (H/S_c)^{0.0515 + 1.341 \ln(H/S_c)} \quad (0.2 \leq H/S_c \leq 0.8) \quad (3.1.7)$$

Fig. 3.1.4 は、加熱試験におけるクロス流量比 W_{st}/W_t とギャップ比 H/S_c の関係を示した図である。図中に示す実線は、等温流時の冷却材流路の摩擦係数 f_c と等温流時の側部流路の摩擦係数 f_{st} を使って、式 (3.1.1) と式 (3.1.2) から加熱時のクロス流量比 W_{st}/W_t を推定した

値である。図に示すように、試験結果と実線で示す計算値との差は最大でも8%未満であり、加熱時のクロス流量は等温流時の側部流路の摩擦係数 f_{st} から十分予測することができる。

Fig. 3.1.5に示すように、12の流路は六角形断面を有する黒鉛ブロックに幾何学的に配置されている。各流路は断面中央から放射状に位置しており、それぞれの配置によってNo.1～6までを内側流路、No.7～12までを外側流路と見なすことができる。よって、これら2つに区分した流路に流入するクロス流量について検討した。

Fig. 3.1.6は、加熱試験の場合の総流量 W_t に占めるクロス流量 W_{st} の割合 W_{st}/W_t と内側流路及び外側流路に流入するクロス流量の割合 $\sum_{n=1}^6 W_{s,n}/W_{st}$ 、 $\sum_{n=7}^{12} W_{s,n}/W_{st}$ の関係を示したものである。ここで、 W_s は任意の流路に流入するクロス流量、添字 n は流路番号を表わす。

図に示すように、 $W_{st}/W_t = 57.5\%$ でクロス流量 W_{st} は内側流路と外側流路に各々50%ずつ配分されるが、 $W_{st}/W_t < 57.5\%$ では内側流路へのクロス流量は次第に減少し、その分だけ外側流路へのクロス流量が増大する。言い換えれば、 $W_{st}/W_t \geq 57.5\%$ ではクロス流量は内外流路に均等に配分される。また、クロス流れに関するギャップ幅の影響については、ギャップ幅が大きくなるにつれて内外流路に配分されるクロス流量はそれぞれ50%に近づく傾向にある。

次に、クロス流量と流入距離の関係について検討した。黒鉛ブロック外周から内側流路及び外側流路までのクロス流量の流入距離は次のように考えた。Fig. 3.1.5に示すように、内側流路の中心を結ぶ円から黒鉛ブロック外周の辺AとA'までの距離をそれぞれ a_1 及び a_2 とし、その平均値 $l_a = (a_1 + a_2)/2$ を黒鉛ブロック外周から内側流路に流入するクロス流れの流入距離とした。外側流路についても同様に考えて、 $l_b = (b_1 + b_2)/2$ を流入距離とした。

Fig. 3.1.7は、各流路に流入するクロス流量比 $W_{s,n}/W_{st}$ と流入距離の関係ギャップ幅 H に対して示したものである。横軸は、黒鉛ブロックの側壁から中心方向への距離 l を黒鉛ブロック1辺の長さ l_s で割った無次元距離 l/l_s を表わす。本試験では、内側流路の場合は $l/l_s = 54.7\%$ 、外側流路は 27.9% になる。ギャップ幅が2mmの場合、内側流路と外側流路にはそれぞれクロス流量の47～50%、50～53%が配分されるが、ギャップ幅が減少するにつれて外側流路へのクロス流入量は増大し、逆に内側流路への流入量は減少しており、クロス流量と流入距離とは反比例の関係にあることがわかる。

Fig. 3.1.8に、ギャップ幅 H が0.5mmと2mmの場合の各流路に配分されるクロス流量 $W_{s,n}$ と出口流量 $W_{o,n}$ との比 $W_{s,n}/W_{o,n}$ と流路出口レイノルズ数 $Re_{o,n}$ との関係を示す。ここで、破線で囲んだ領域は内側流路、実線の領域は外側流路の流量分布を示している。ギャップ幅2mmの場合の流量比 $W_{s,n}/W_{o,n}$ の値は、内側流路と外側流路で $Re_{o,n} < 8000$ 付近から重複する領域が見られ、クロス流量は内外流路にほぼ均等に配分されていることがわかる。一方、ギャップ幅が0.5mmの場合には内外流路で重複する領域は $Re_{o,n} < 2000$ の範囲であり、それ以上では外側流路への配分量が内側流路に比べて平均10%ほど増加しており、内外流路に配分されるクロス流量の値は明らかに異なっていることがわかる。

Fig. 3.1.9に、Table 2.2.2に示す加熱試験の全データから求めた12の流路の入口流量の関係を示す。縦軸は各流路の入口流量を入口総流量で割った値 $W_{i,n}/W_{it}$ 、同様に横軸は出口流量を出口総流量で割った値 $W_{o,n}/W_{ot}$ を示す。本図より、入口流量は内外流路に対して6～12%の範囲内ではばらついているが、出口流量は8～9%ほどのばらつきであり、流路入口での流路間の流

量差は出口ではほぼ均一化されることがわかる。この場合、2点鎖線で示すように、試験データにばらつきはあるものの、外側流路への配分量は $W_{o,n}/W_{ot}$ が約8.3%以上であり、内側流路への配分量はそれ以下である。

3.2 温度分布と伝熱量分布

Fig. 3.2.1(a), (b)に、それぞれギャップ幅0.5mm及び2mmの場合の軸方向温度分布の測定例を示す。ここで、横軸は加熱開始点からの軸方向距離 x を等価直径 De で割った無次元距離であり、 $x/De = 244.3$ の位置に平行ギャップが存在する。図に示すように、各温度は流路入口から単調に増加するが、軸方向のギャップ位置でクロス流れの影響を受けて減少した後、再び上昇している。

Fig. 3.2.1(a)の場合、ギャップ位置より上流では内側流路と外側流路の温度差は 5°C 以内であるが、下流では内側流路よりも外側流路の方が $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 低下しており、クロス流量は内側流路よりも外側流路に多く流れ込んでいることがわかる。ギャップ位置前後の温度降下量は内側流路で約 10°C 、外側流路で約 40°C であった。

一方、Fig. 3.2.1(b)はギャップ幅の小さい(a)の場合よりも温度降下は顕著であり、ギャップ位置前後の温度降下量は内側流路で約 80°C 、外側流路で約 120°C であった。また、(b)ではギャップ位置の直前で内側流路よりも外側流路の方がわずかに低下しており、ギャップによる温度降下の影響がギャップ上流にまで及ぼしていることがわかる。

Fig. 3.2.2に、各流路の入口流量 W_i 、出口流量 W_o 及び出入口Heガス温度差 $T_{go} - T_{gi}$ をそれぞれ全流路の平均値 W_{im} 、 W_{om} 、 $T_{gom} - T_{gim}$ で割った無次元量 W_{id} 、 W_{od} 、 T_{gd} とギャップ幅 H との関係を示す。

無次元入口流量 W_{id} は内側流路では平均値よりも増加し、外側流路では逆に減少する傾向にある。また、平均値に対する各流路のデータのばらつきの度合は、ギャップ幅が2mmの場合よりも1mmや0.5mmの方が小さいことから、ギャップ幅の低下とともに各流路のデータは平均化される方向にあるといえる。

一方、無次元出口流量 W_{od} は無次元入口流量 W_{id} とは反対に、内側流路では平均値よりも減少し、外側流路では逆に増加する傾向にあるが、その値は無次元入口流量の場合に比べて十分小さい。これは流路間で無次元出口流量が均等になるようにクロス流量が配分されるためである。また、ギャップ幅が変化しても各流路に配分される無次元出口流量はほぼ一定であり、無次元出口流量はギャップ幅の変化には影響されないことがわかる。ギャップ幅が0.5mm~2mmの範囲における内側及び外側流路に配分される無次元出口流量 W_{od} の平均値はそれぞれ -1.8% 、 1.8% であった。

無次元出入口温度差 T_{gd} は、無次元出口流量 W_{od} の分布に見られるように流量の少ない内側流路では平均値よりも上昇し、外側流路では逆に低下しているが、この傾向はギャップ幅の減少とともに平均化される方向にある。ちなみに、No.10流路ではギャップ幅が2mmで -7.7% であるが、ギャップ幅が0.5mmでは -4.2% まで上昇している。また、平均値に対する内外流路の無次元出入口温度差の値は、ギャップ幅が2mmで $\pm 2\%$ 、1mmで $\pm 1.7\%$ 、0.5mmで $\pm 1.5\%$ ほどであ

った。

模擬燃料棒はHeガスを加熱するとともに黒鉛ブロックも加熱する。黒鉛は高い熱伝導率を有しているため、ブロック内部で高温側から低温側に熱が移動して、ブロック温度を均一化させる。本試験の場合、黒鉛ブロックの温度勾配はブロック内部から外周部に向かって低下するため、熱は内側流路から外側流路に対して移動する。そこで、外側流路に流入する伝熱量を評価した。

Fig. 3.2.3に、外側流路に流入する無次元熱量 Q_d と出口レイノルズ数 Re_{om} の関係を示す。ここで、 Q_d は外側流路から流出する出口流量 W_o の平均値を全流路の平均値で割った無次元流量と外側流路の出入口Heガス温度差の平均値を全流路の平均値で割った無次元温度差との積で、次式で定義される。

$$Q_d = \frac{\sum_{n=7}^{12} W_{o,n} / 6}{W_t / 12} \times \frac{\sum_{n=7}^{12} (T_{g_{o,n}} - T_{g_{i,n}}) / 6}{\sum_{n=1}^{12} (T_{g_{om}} - T_{g_{im}}) / 12} - 1 \quad (3.2.1)$$

また、 Re_{om} は各流路の出口レイノルズ数 $Re_{o,n}$ の平均値を表わす。

図に見られるように、試験範囲である $1470 \leq Re_{om} \leq 7050$ の領域に対して、無次元伝熱量 Q_d はギャップ幅が0.5mmでは Re_{om} の増加とともに単調に増加しており、熱が黒鉛ブロックを伝わって内側流路から外側流路に入り込んでいることがわかる。逆に、ギャップ幅が2mmの場合には Re_{om} の増加に対して無次元伝熱量 Q_d は減少している。特に $Re_{om} > 3500$ では無次元伝熱量は負になり、この範囲ではギャップ幅0.5mmの場合とは逆に熱は外側流路から内側流路に向かって移動していることを示している。

ちなみに、平行ギャップ位置から流路出口までのHeガスのエンタルピー上昇値と模擬燃料棒の加熱量から黒鉛ブロック内の熱移動量を推定すると、ギャップ幅が0.5mmであるRun2613の場合には約8kwの熱が内側流路から外側流路に移動し、ギャップ幅が2mmであるRun2317の場合には約15kwの熱が外側流路から内側流路に移動する計算になる。

また、ギャップ幅1mmの場合には無次元熱量 Q_d と出口レイノルズ数 Re_{om} の間には関連性は見られず、ギャップ幅が0.5mmと2mmの場合の中間の傾向を示しているものと考えられる。

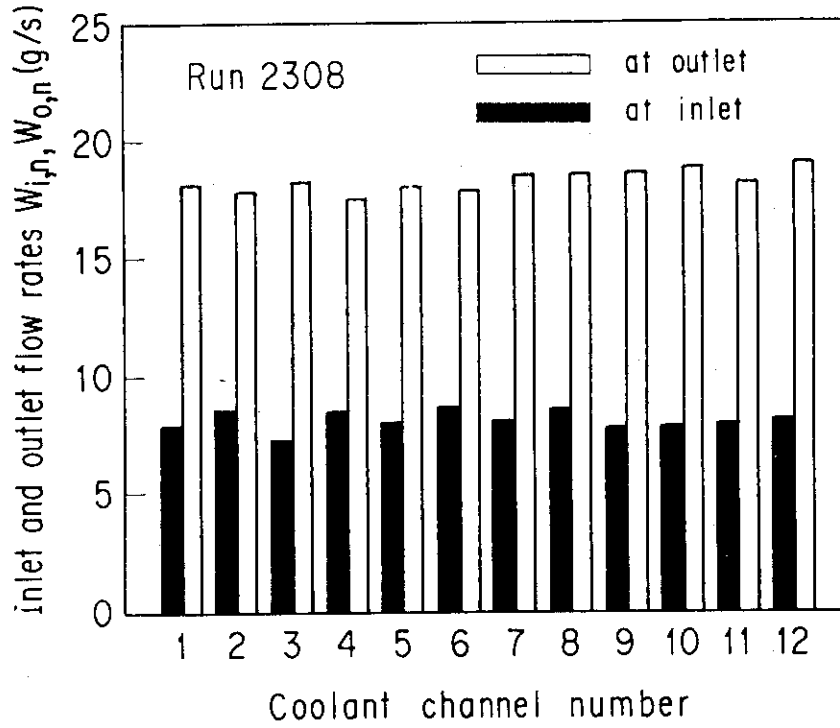


Fig. 3.1.1 Flow rate distribution of He gas at inlet and outlet sections

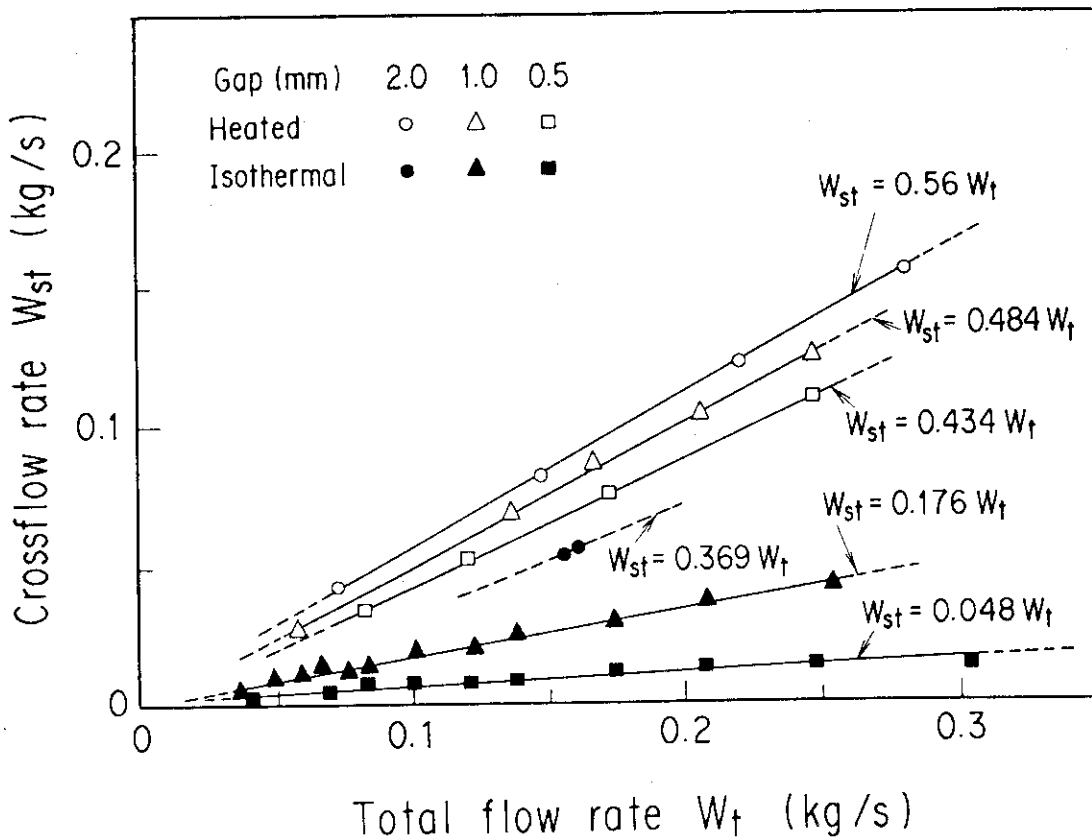


Fig. 3.1.2 Relationship between crossflow rate W_{st} and total He gas flow rate W_t

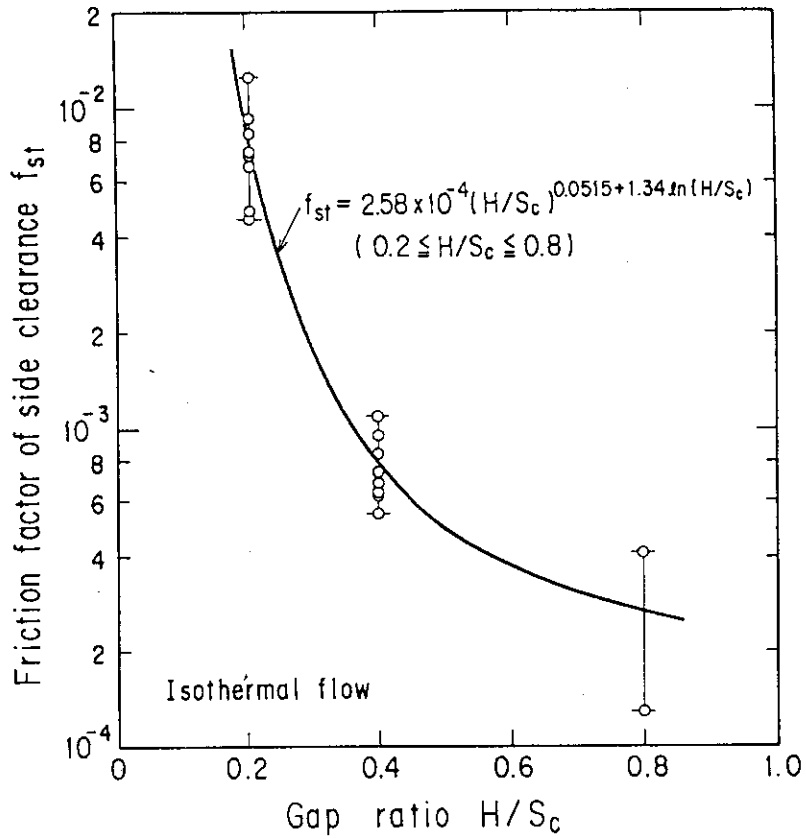


Fig. 3.1.3 Relationship between friction factor of side clearance f_{st} and gap ratio H/S_c

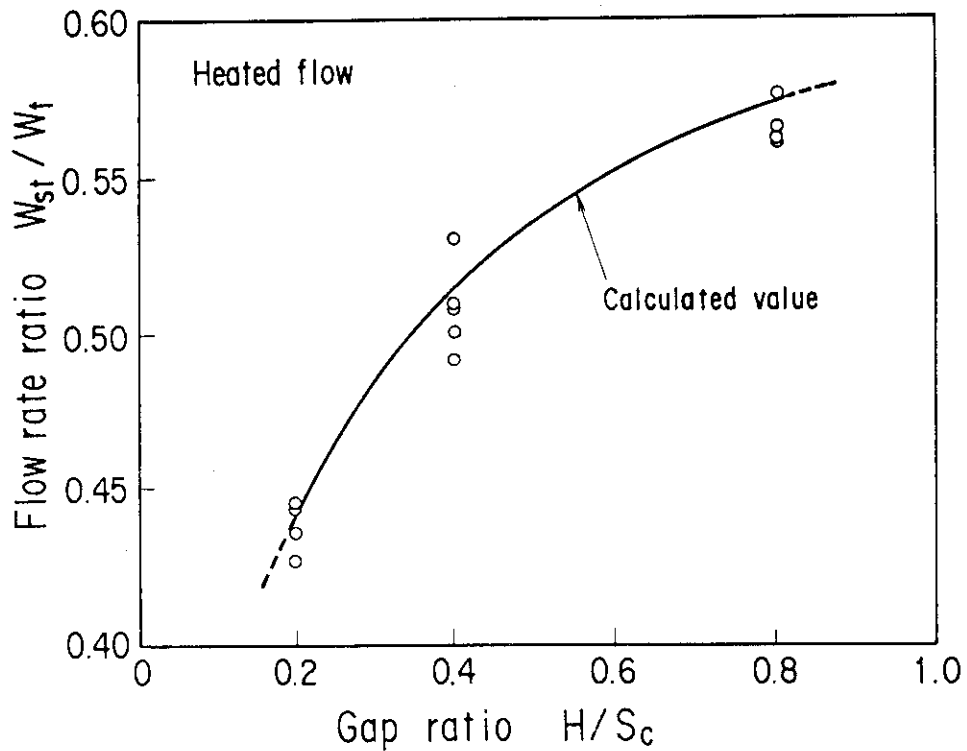


Fig. 3.1.4 Relationship between flow rate ratio W_{st}/W_t and gap ratio H/S_c

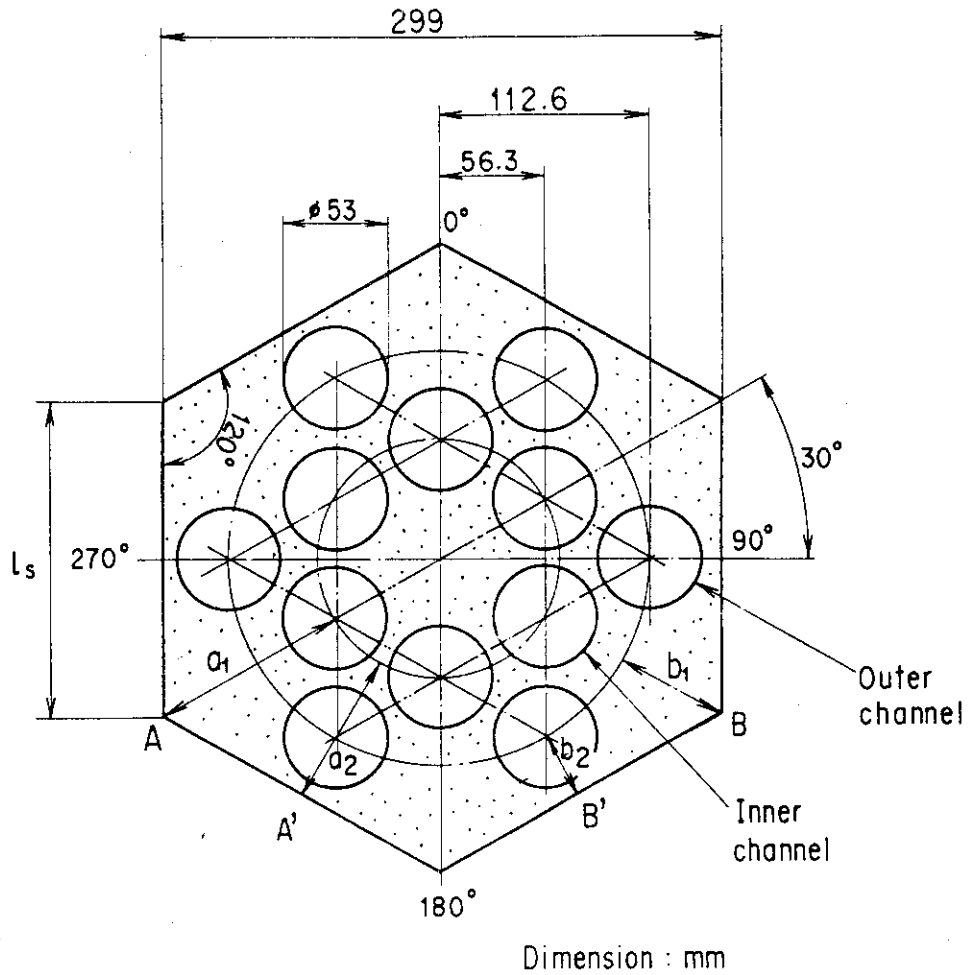


Fig. 3.1.5 Arrangement twelve coolant channels in a graphite block

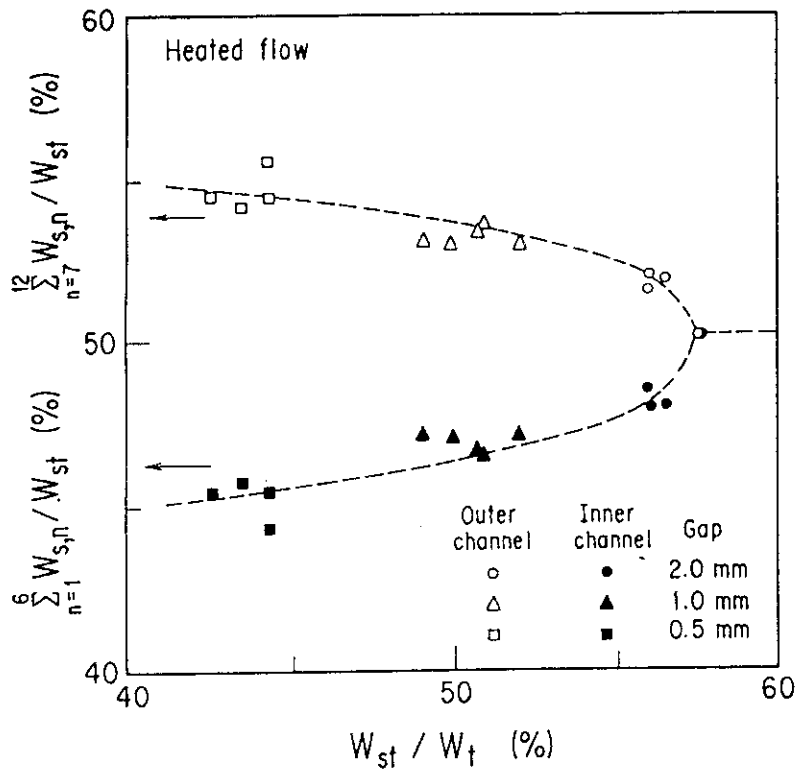


Fig. 3.1.6 Distribution of crossflow rate flowing into inner and outer channels

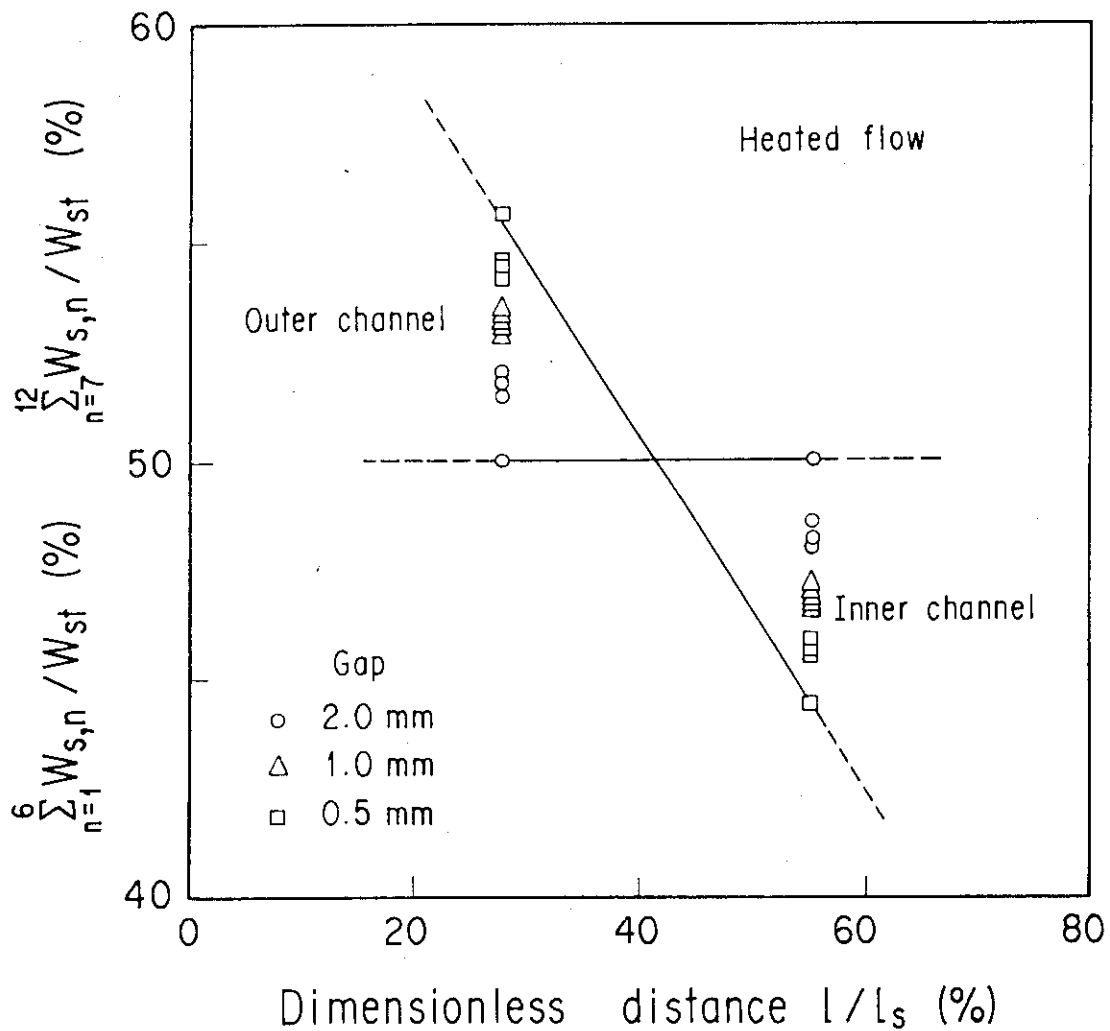


Fig. 3.1.7 Relationship between crossflow ratio $W_{s,n}/W_{st}$ and dimensionless distance l/l_s

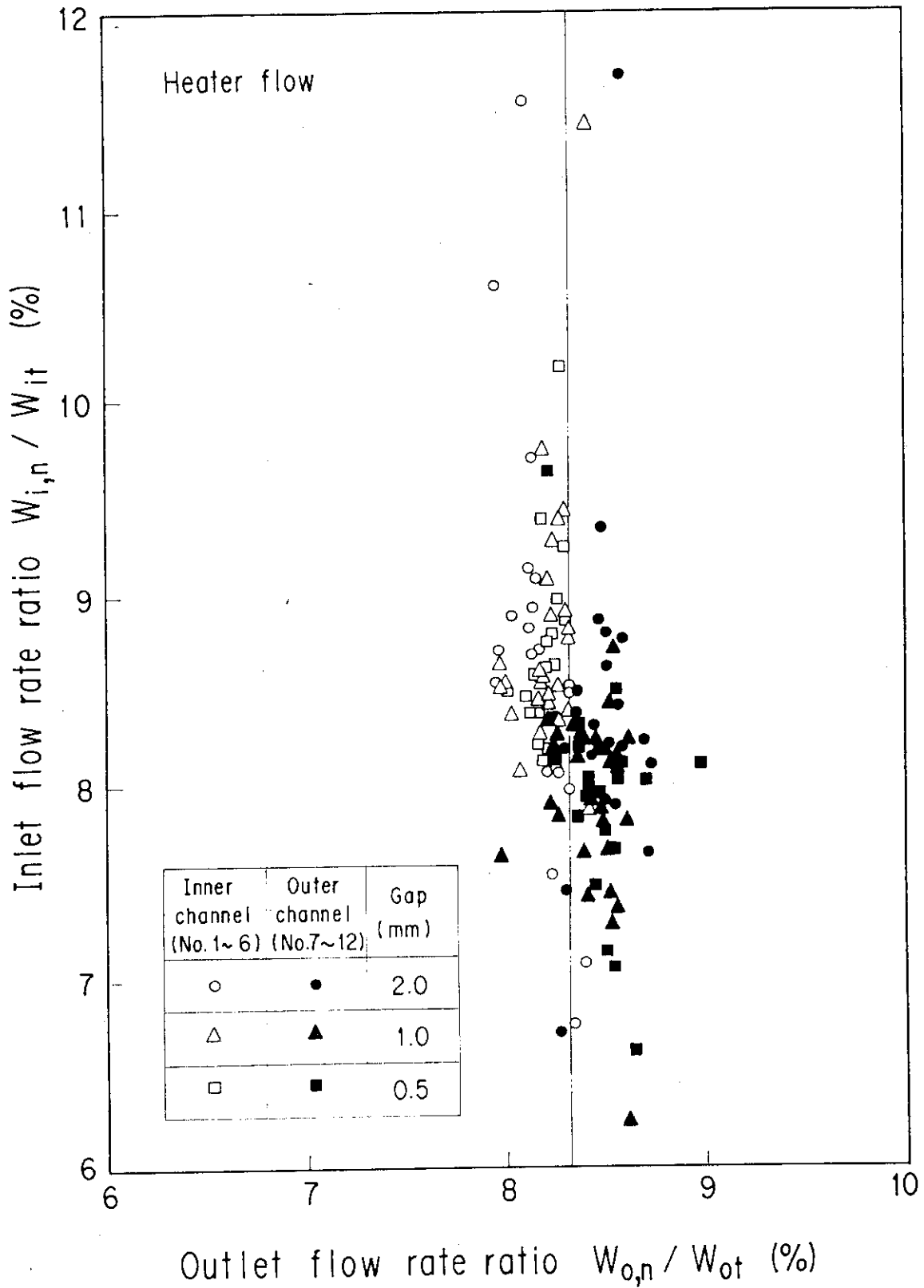


Fig. 3.1.8 Relationship between inlet and outlet He gas flow rates

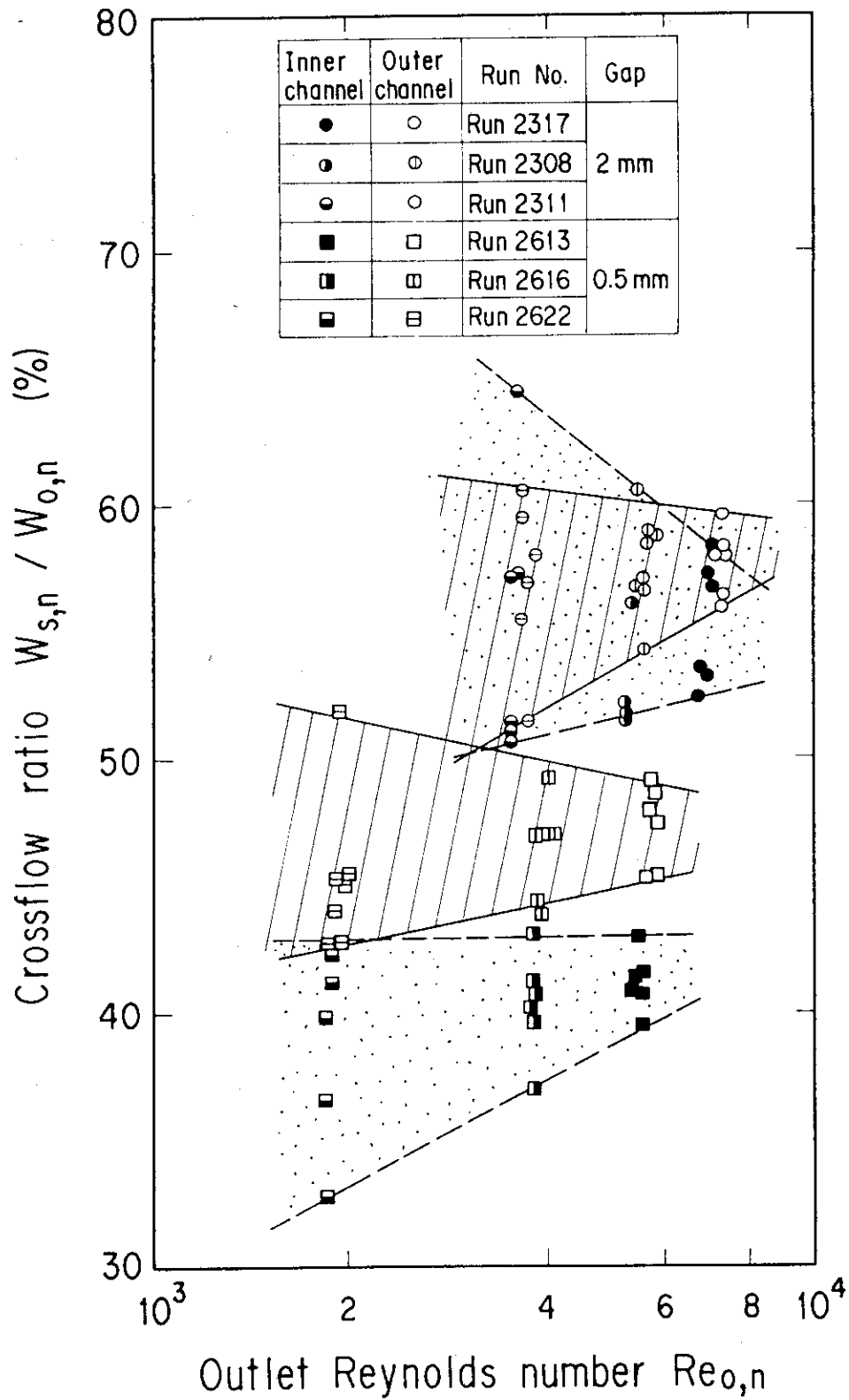


Fig. 3.1.9 Relationship between crossflow ratio $W_{s,n}/W_{o,n}$ and outlet Reynolds number $Re_{o,n}$ for each channel

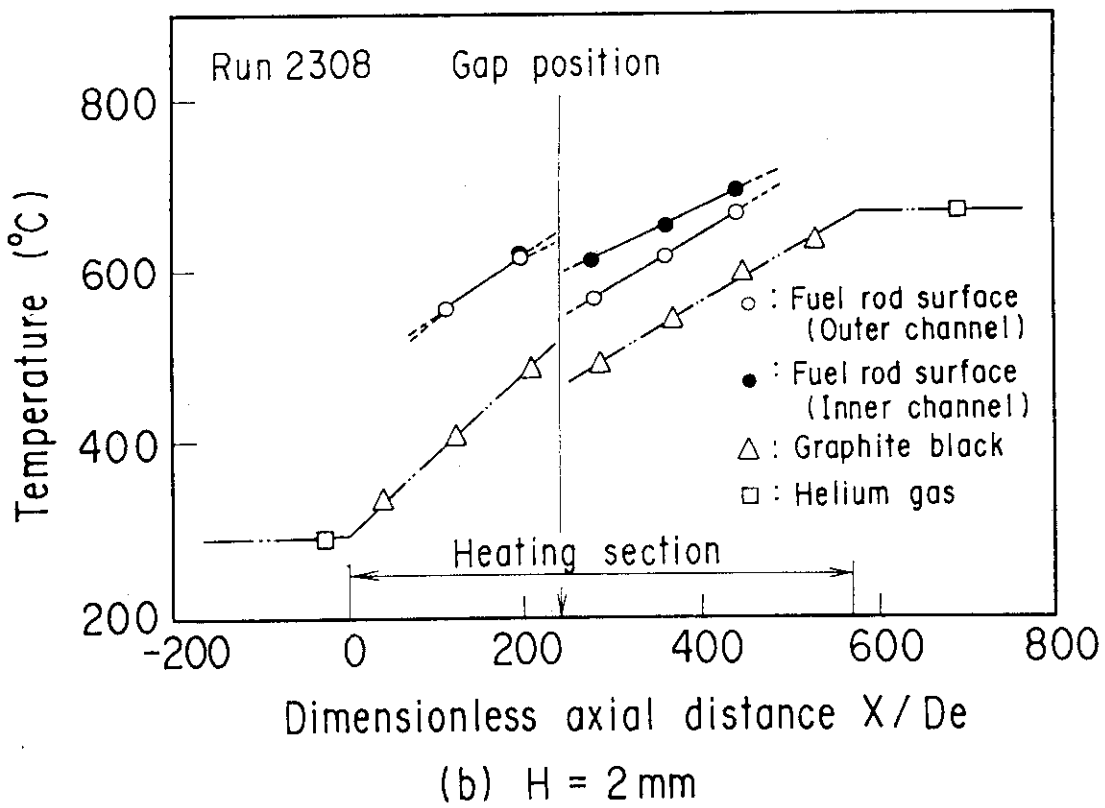
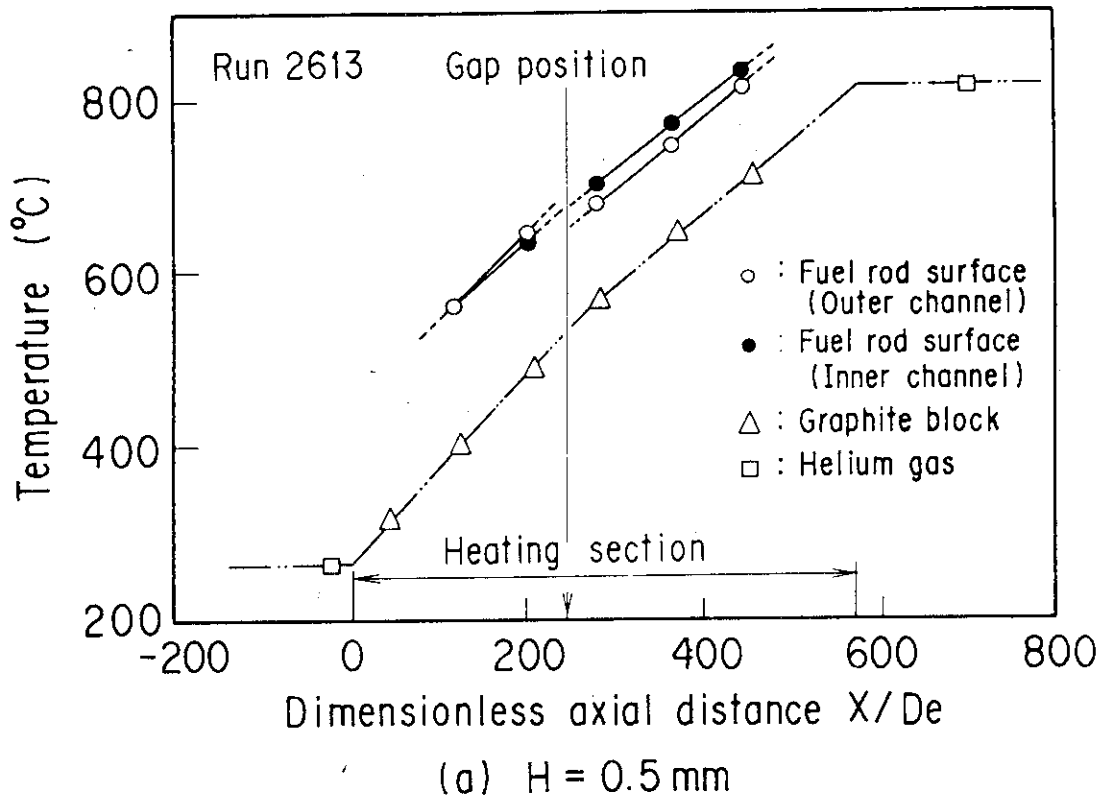


Fig. 3.2.1 Temperature distribution in the axial direction

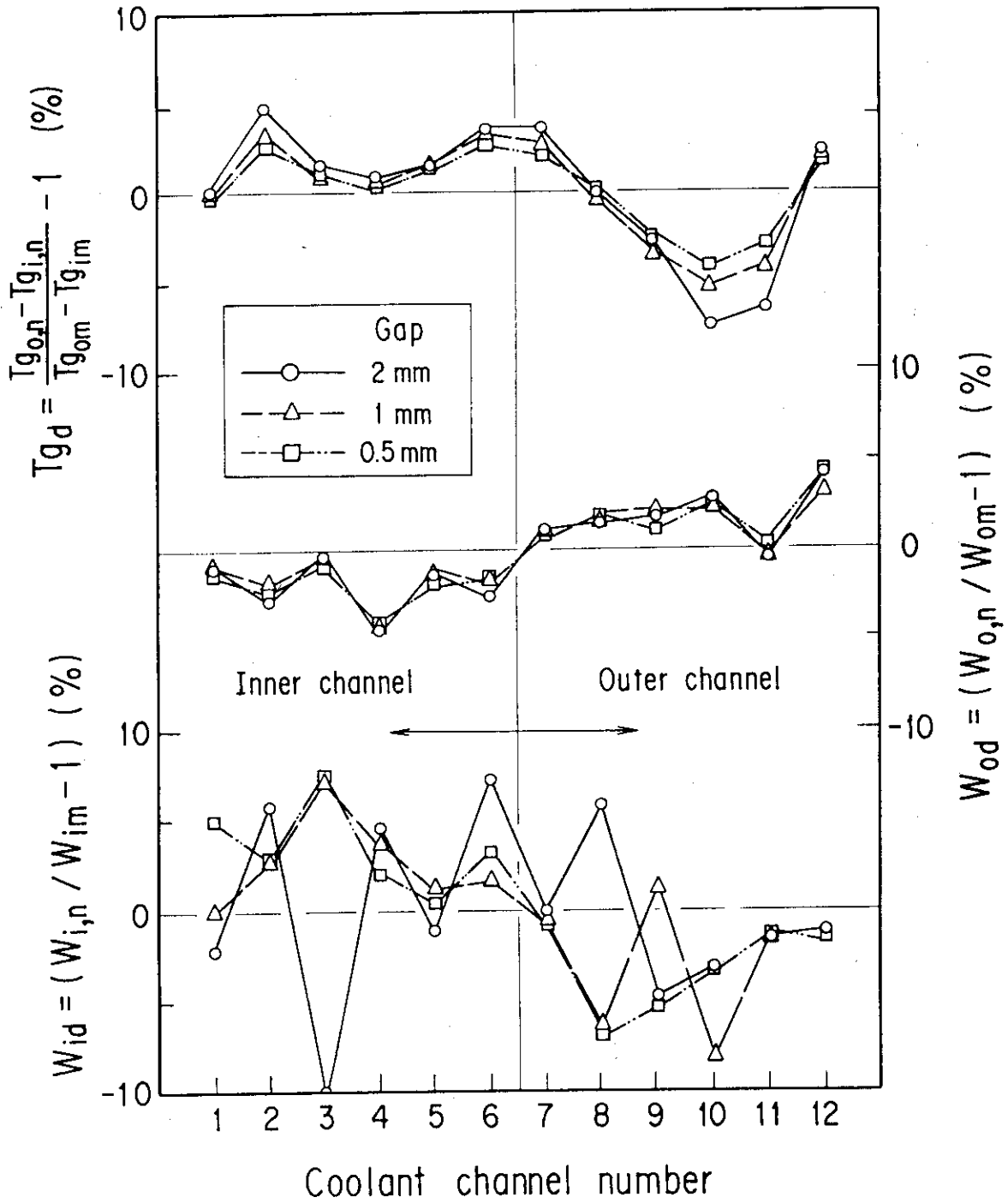


Fig. 3.2.2 Distribution of dimensionless inlet and outlet He gas flow rates and dimensionless temperature of each channel

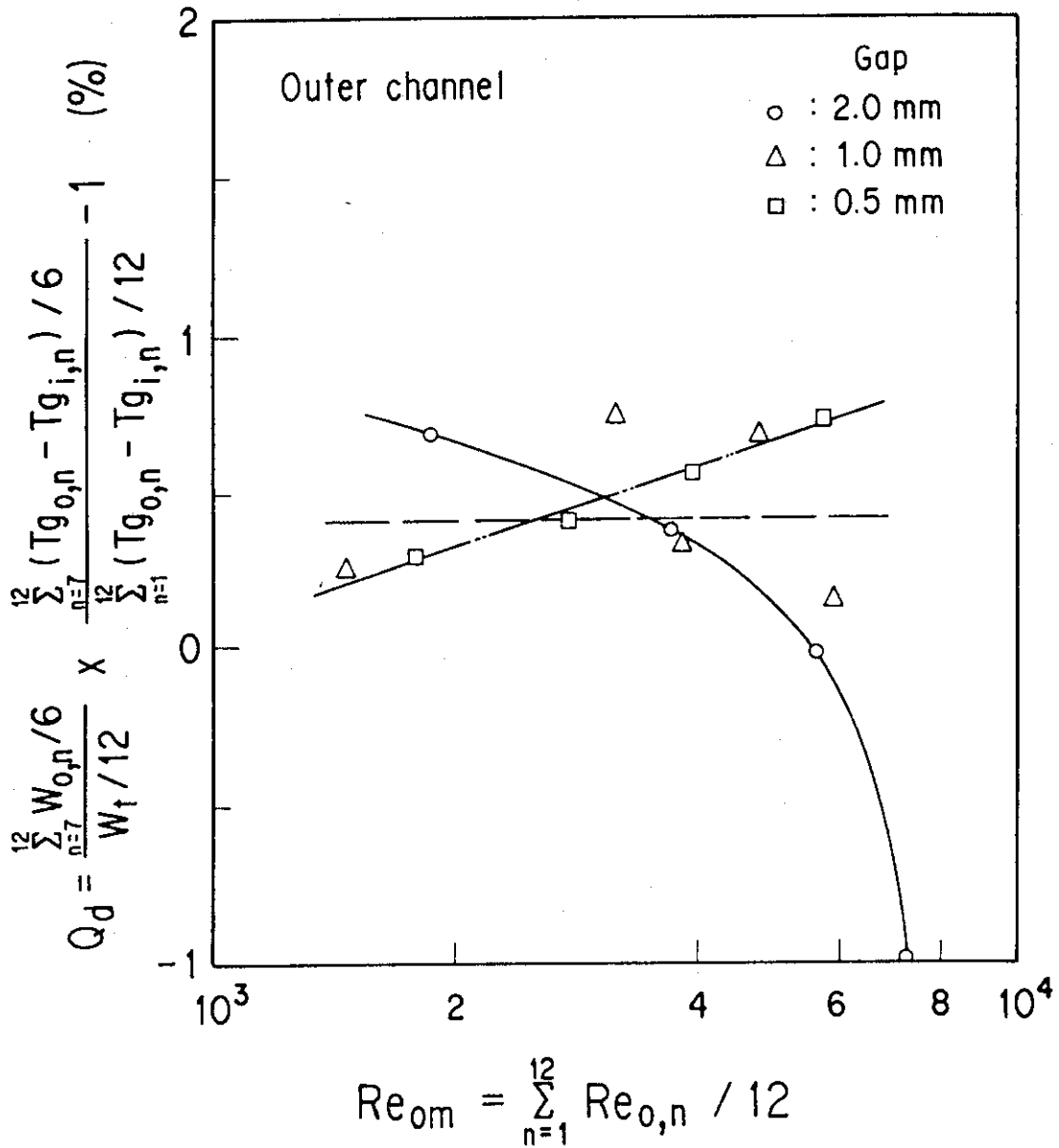


Fig. 3.2.3 Relationship between dimensionless heat transfer rate Q_d and mean outlet Reynolds number Re_{om}

4. 結 言

HTTR 燃料体を実寸規模で模擬した試験体を使って、Heガスの一部が流路入口を流れずに、試験体の外周から鉛直方向に積み上げられた黒鉛ブロック積層面間の平行ギャップを通して流路内に流入するクロス流れ試験を行い、次の成果を得た。

- (1) 等温流時の側部流路の摩擦係数 f_{st} は、式 (3.1.7) で表すことができる。また、加熱時のクロス流量は等温流時の摩擦係数を使って、十分予測することが可能である。
- (2) 内側及び外側流路へのクロス流量の配分は、ギャップ幅が 2mm の場合は各々約 50% であるが、ギャップ幅が減少するにしたがって内側流路へのクロス流れは減少し、外側流路へのクロス流れが増大する。
- (3) 模擬燃料棒の表面温度は流路入口から単調に増加するが、軸方向のギャップ位置でクロス流れの影響を受けて減少した後、再び上昇する。ギャップ位置前後の温度降下量は内側流路よりも外側流路で顕著である。
- (4) 熱はギャップ幅が 0.5mm の場合は出口レイノルズ数の増加とともに、黒鉛ブロックを伝わって内側流路から外側流路に流入する。一方、2mm の場合には 0.5mm の場合とは逆に熱は外側流路から内側流路に向かって移動する。また、1mm の場合は 0.5mm と 2mm の場合の中間の傾向を示す。

謝 辞

最後に、本試験を遂行するにあたり、原子力研究交流制度に基づいて清華大学（中国）から派遣されてピトー管の校正試験及び試験データの一部を評価された姚梅生氏、種々の御指導を載いた下村HENDEL管理室長、T₁-Mの運転及び試験データの収録に御協力載いたHENDEL管理室の方々、さらに試験データの整理に御尽力載いた原子力エンジニアリング(株)飛田正浩氏に深く感謝いたします。

4. 結 言

HTTR 燃料体を実寸規模で模擬した試験体を使って、He ガスの一部が流路入口を流れずに、試験体の外周から鉛直方向に積み上げられた黒鉛ブロック積層面間の平行ギャップを通して流路内に流入するクロス流れ試験を行い、次の成果を得た。

- (1) 等温流時の側部流路の摩擦係数 f_{st} は、式 (3.1.7) で表すことができる。また、加熱時のクロス流量は等温流時の摩擦係数を使って、十分予測することが可能である。
- (2) 内側及び外側流路へのクロス流量の配分は、ギャップ幅が 2mm の場合は各々約 50% であるが、ギャップ幅が減少するにしたがって内側流路へのクロス流れは減少し、外側流路へのクロス流れが増大する。
- (3) 模擬燃料棒の表面温度は流路入口から単調に増加するが、軸方向のギャップ位置でクロス流れの影響を受けて減少した後、再び上昇する。ギャップ位置前後の温度降下量は内側流路よりも外側流路で顕著である。
- (4) 熱はギャップ幅が 0.5mm の場合は出口レイノルズ数の増加とともに、黒鉛ブロックを伝わって内側流路から外側流路に流入する。一方、2mm の場合には 0.5mm の場合とは逆に熱は外側流路から内側流路に向かって移動する。また、1mm の場合は 0.5mm と 2mm の場合の中間の傾向を示す。

謝 辞

最後に、本試験を遂行するにあたり、原子力研究交流制度に基づいて清華大学（中国）から派遣されてピトー管の校正試験及び試験データの一部を評価された姚梅生氏、種々の御指導を載いた下村HENDEL管理室長、T₁-Mの運転及び試験データの収録に御協力載いたHENDEL管理室の方々、さらに試験データの整理に御尽力載いた原子力エンジニアリング(株)飛田正浩氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) “高温工学試験研究の現状”，日本原子力研究所，(1989).
- (2) 井沢，他：原子力誌，27〔12〕，1136，(1985).
- (3) 日野，他：同上，31〔4〕，471，(1989).
- (4) 日野，他：原子力誌，30〔4〕，343，(1988).
- (5) BREY, H.L., OLSON, H.G. : Nucl. Energy 22, 117 (1983).
- (6) 滝塚：JAERI-M 85-055，(1985).
- (7) 高瀬，他：JAERI-M 85-072，(1985).
- (8) McELIGOT, D.M., et al. : Int. J. Heat Mass Transfer, 13, 431 (1970).