

JAERI - M  
85-084

燃料体スタック実証試験部 (T<sub>1</sub>):  
1チャンネル試験装置の試験結果  
(第1報, 軸方向に一様発熱分布を有する場合)

1985年6月

高瀬 和之・丸山 創・日野 竜太郎  
菱田 誠・井沢 直樹・田中 利幸  
下村 寛昭

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, 1985

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 山田軽印刷所

燃料体スタック実証試験部 (T<sub>1</sub>): 1チャンネル試験装置の試験結果, (第1報軸方向に一様発熱分布を有する場合)

日本原子力研究所東海研究所高温工学部  
高瀬 和之・丸山 創・日野 竜太郎・菱田 誠  
井沢 直樹・田中 利幸・下村 寛昭

(1985年5月17日受理)

多目的高温ガス実験炉 (VHTR) の炉心燃料体を実寸規模で模擬した燃料体スタック実証試験部 (T<sub>1</sub>) では, 実験炉と同等の高温高圧の He ガスの条件のもとで伝熱流動試験を実施している。

本報は, 燃料体スタック実証試験部のうちの1チャンネル試験装置で得られた試験結果を整理したものである。試験条件は, 入口温度290~620 K, 入口圧力0.4~4.0 MPa, 入口レイノルズ数1,600~21,000, 発熱量は最大約90 kWである。また, 使用した模擬燃料棒は, 軸方向に一様な発熱分布を有している。

本試験の結果, 模擬燃料棒の摩擦係数と熱伝達率は, レイノルズ数が約2,000以上では平滑環状流路の値に比べて, それぞれ約20%, 約15~60%高い値を示した。この原因としては, 模擬燃料棒の表面に設置してあるスペーサ・リブが乱流促進体として有効に作用していると考えられる。

Experimental Results of Single-channel in the Fuel  
Stack Test Section (T<sub>1</sub>), I

(Test results of a fuel rod with uniform heat flux  
distribution in the axial direction)

Kazuyuki TAKASE, Soh MARUYAMA, Ryutaro HINO,  
Makoto HISHIDA, Naoki IZAWA and Hiroaki SHIMOMURA

Department of High Temperature Engineering  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 17, 1985)

Experimental studies on heat transfer and flow characteristics of a simulated fuel rod for the VHTR (Very High-temperature Gas-cooled Reactor) has been performed with the fuel stack test section (T<sub>1</sub>) of the Helium Engineering Demonstration Loop (HENDEL), using a helium gas of almost same conditions of the VHTR operation.

This report describes test result obtained by single-channel test rig of T<sub>1</sub>. Test conditions are as follows;

Inlet temperature	:	290 ~ 620 K
Inlet pressure	:	0.4 ~ 4.0 MPa
Inlet Reynolds number	:	1,600 ~ 21,000
A simulated fuel rod		
Electrical input	:	Maximum 90 kW
Heat flux distribution	:	Uniform

The conclusions derived from the tests are that friction factors and heat transfer coefficients are about 20%, 15 60% higher than those for concentric smooth annuli, respectively. The reason may be due to the effect of spacerribs.

KEYWORDS: Gas-cooled Reactor, High-temperature, Helium Gas, Single-channel, Annular Passage, Fuel Rod, Heat Flux Distribution, Friction Factor, Heat Transfer Coefficient.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 試験装置と試験方法 .....	3
2.1 試験部の構成 .....	3
2.2 1チャンネル試験装置 .....	5
2.2.1 模擬燃料棒 .....	5
2.2.2 流路管 .....	7
2.2.3 補償ヒータブロック .....	7
2.3 試験手順 .....	15
3. 試験結果とその検討 .....	23
3.1 流動特性 .....	23
3.1.1 摩擦係数 .....	23
3.1.2 圧力損失 .....	23
3.2 伝熱特性 .....	27
3.2.1 温度分布 .....	27
3.2.2 熱放射量 .....	29
3.2.3 熱伝達率 .....	30
4. 結 言 .....	40
謝 辞 .....	40
参考文献 .....	41

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Test loop and experimental method .....	3
2.1 Composition of fuel stack test section .....	3
2.2 Single-channel test rig ( $T_{1-S}$ ) .....	5
2.2.1 Simulated fuel rod .....	5
2.2.2 Outer tube .....	7
2.2.3 Compensation heater block .....	7
2.3 Experimental procedure .....	15
3. Experimental results and studies .....	23
3.1 Flow characteristics .....	23
3.1.1 Friction factor .....	23
3.1.2 Pressure drop .....	23
3.2 Heat transfer characteristics .....	27
3.2.1 Temperature profile .....	27
3.2.2 Radiant heat transfer .....	29
3.2.3 Heat transfer coefficient .....	30
4. Concluding remarks .....	40
Acknowledgment .....	40
References .....	41

## List of Tables

Table 2.2.1	Main specifications of the fuel stack test section
Table 2.2.2	List of measuring data
Table 2.3.1	Experimental conditions for HENDEL No.6 cycle test operation (1/3) ~ (3/3)
Table 2.3.2	Experimental conditions for HENDEL No.7 cycle test operation (1/2) ~ (2/2)
Table 3.2.1	Analytical conditions (1)
Table 3.2.2	Analytical conditions (2)

## List of Figures

Fig. 1.1	Fuel element
Fig. 2.1.1	Schematic diagram of the fuel stack test section
Fig. 2.2.1	Conceptual drawing of single-channel test rig
Fig. 2.2.2	Measuring locations
Fig. 2.2.3	Simulated fuel rod
Fig. 2.2.4	A cross-sectional view of simulated fuel rod
Fig. 2.3.1	Experimental range for heated flow
Fig. 3.1.1	Friction factors in the flow direction
Fig. 3.1.2	Relationship between friction factor and Reynolds number
Fig. 3.1.3	Pressure drop in the flow direction
Fig. 3.2.1	Temperature profile for $Re_{in} = 15,000$
Fig. 3.2.2	Temperature profile for $Re_{in} = 4,300$
Fig. 3.2.3	Temperature profile for $Re_{in} = 2,000$
Fig. 3.2.4	Longitudinal section of simulated fuel rod
Fig. 3.2.5	Calculation mesh
Fig. 3.2.6	Relationship between temperature difference ( $T_w - T_b$ ) and dimensionless axial distance $x/De$
Fig. 3.2.7	Analytical model
Fig. 3.2.8	Influence of connecting section of simulated fuel rod
Fig. 3.2.9	Influence of unheating section of simulated fuel rod
Fig. 3.2.10	Temperature profiles between wall and tube, and radiative heat transfer rate in the flow direction
Fig. 3.2.11	Nusselt numbers in the flow direction
Fig. 3.2.12	Relationship between Nusselt number and Reynolds number

## 〔記号〕

- $c_p$  : 流体比熱  
 $D_e$  : 水力等価直径 =  $D_o - D_i$   
 $D_i$  : 環状流路内径  
 $D_o$  : 環状流路外径  
 $f$  : 摩擦係数  
 $G$  : 流量  
 $\ell$  : 模擬燃料部 1 段あたりの長さ  
 $\ell'$  : 模擬燃料部 1 段あたりの有効発熱長さ  
 $Nu$  : ヌッセルト数  
 $P$  : 圧力  
 $\Delta P$  : 圧力損失  
 $Pr$  : プラントル数  
 $q$  : 熱流束  
 $\dot{q}_{in}$  : 無次元熱流束  
 $Q$  : 発熱量  
 $Re$  : レイノルズ数  
 $Rn$  : 抵抗値  
 $S$  : 流路断面積 =  $\pi \cdot (D_o^2 - D_i^2) / 4$   
 $T$  : 温度  
 $v$  : 流束  
 $x$  : 流れ方向距離  
 $\alpha$  : 熱伝達率  
 $\beta$  : 流路内外径比 =  $D_i / D_o$   
 $\lambda$  : 熱伝導率  
 $\rho$  : 密度  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 定数  
 $\epsilon$  : 放射率

## (添字)

- $b$  : 流体  
 $c$  : 環状流路外面  
 $in$  : 入口  
 $m$  : 平均  
 $.out$  : 出口  
 $s$  : 平滑面  
 $r$  : 熱放射  
 $w$  : 環状流路内面



## 1. 緒 言

現在、日本原子力研究所で研究・開発が進められている多目的高温ガス実験炉<sup>(1)</sup>の炉心は、Fig. 1.1に示すような六角柱状の黒鉛製燃料ブロックを高さ方向に7段、水平断面内に約70個、合計約500個積み重ねた構造となっている。1個の燃料ブロックには、直径53mmの燃料冷却孔が12個あけられている。そして、それぞれの流路内には、外径46mm、長さ570mmの燃料棒が挿入されている。冷却材であるHeガスは、冷却孔と燃料棒とのすき間の環状流路を下降しながら加熱される。現在の設計では、レイノルズ数は10,000以下という比較的低い範囲であるが、高熱負荷状態であるために、炉心部の熱伝達率や摩擦係数を算定するに当たっては従来の研究結果だけでは十分ではない。更に、従来の研究はその大部分が平滑環状流路について行われており、実験炉で使用する燃料棒のように、発熱体の表面に突起（スペーサ・リブ）を有する場合の熱伝達率や摩擦係数を求めた報告<sup>(2),(3)</sup>はほとんどされていない。

平滑環状流路についての研究には、次のものがある。Dalle Donne<sup>(4),(5)</sup>らは、発熱体表面温度と冷却材入口ガス温度との比を用いて実験結果を整理している。また、Furber<sup>(6)</sup>らは、発熱体表面温度と冷却材混合平均温度との比を用いて整理している。更に、Kays<sup>(7)</sup>らは環状流路に関して内面加熱、外面加熱及び両面加熱の3つの実験から、内外両壁面における熱伝達率を求めている。しかしながら、それらの研究ではいずれもレイノルズ数は10,000以上である。一方、数値計算に関しては、層流域についてはLundberg<sup>(8)</sup>ら、Hatton<sup>(9)</sup>らにより、乱流域についてはBrighton<sup>(10)</sup>らによって行われているが、物性値の温度依存性が考慮されていなかったり、簡単な乱流モデルに基づく予測であるために、物性値変化が著しい場合の予測は困難である。更に、レイノルズ数が約3,000～8,000の遷移域についての報告は少なく、僅かにHausen<sup>(11)</sup>や藤井<sup>(12)</sup>らによって行われている程度である。しかし、これらの報告はいずれも平滑な環状流路についての場合であり、実験炉の燃料棒のようにスペーサ・リブを取り付けた発熱体を内管として用いた場合の熱伝達や摩擦係数についての研究はほとんど行われていない。

以上の理由から、実験炉の炉心燃料体における伝熱、流動特性および燃料体の健全性などを求めるために、燃料体スタック実証試験部<sup>(13)</sup>（T<sub>1</sub>）が建設された。本試験部は、大型構造機器実証試験ループ<sup>(14)</sup>（HENDEL）の有する試験部の1つであり、実験炉の燃料体を寸尺規模で模擬した装置である。この燃料体スタック実証試験部は、1チャンネル試験装置（T<sub>1-S</sub>）と多チャンネル試験装置（T<sub>1-M</sub>）で構成されている。1チャンネル試験装置は、Fig. 1.1に示す燃料ブロックの燃料冷却孔の1チャンネル分を模擬しており、多チャンネル試験装置は、燃料体1カラムを模擬している。

本試験部の目的は、実験炉の燃料棒とはほぼ同一の形状、寸法及び構造を有する模擬燃料棒を用いて、実験炉と同一の試験条件下での燃料棒の伝熱特性及び流動特性を求めることである。得られた熱伝達率や摩擦係数は、実験炉の設計や炉心運転条件などに反映させる予定である。

本報は、主としてHENDELのNo. 6 サイクル試験（昭和58年12月5日～12月20日）とNo.7 サイクル試験（昭和59年3月20日～3月27日）で得られた試験結果について報告するものである。

試験条件は、入口温度290~620 K、入口圧力0.4~4.0 MPa、入口レイノルズ数1,600~21,000  
 加熱量は最大約90 kWである。また、使用した模擬燃料棒は、軸方向に一様な発熱分布を有して  
 いる。

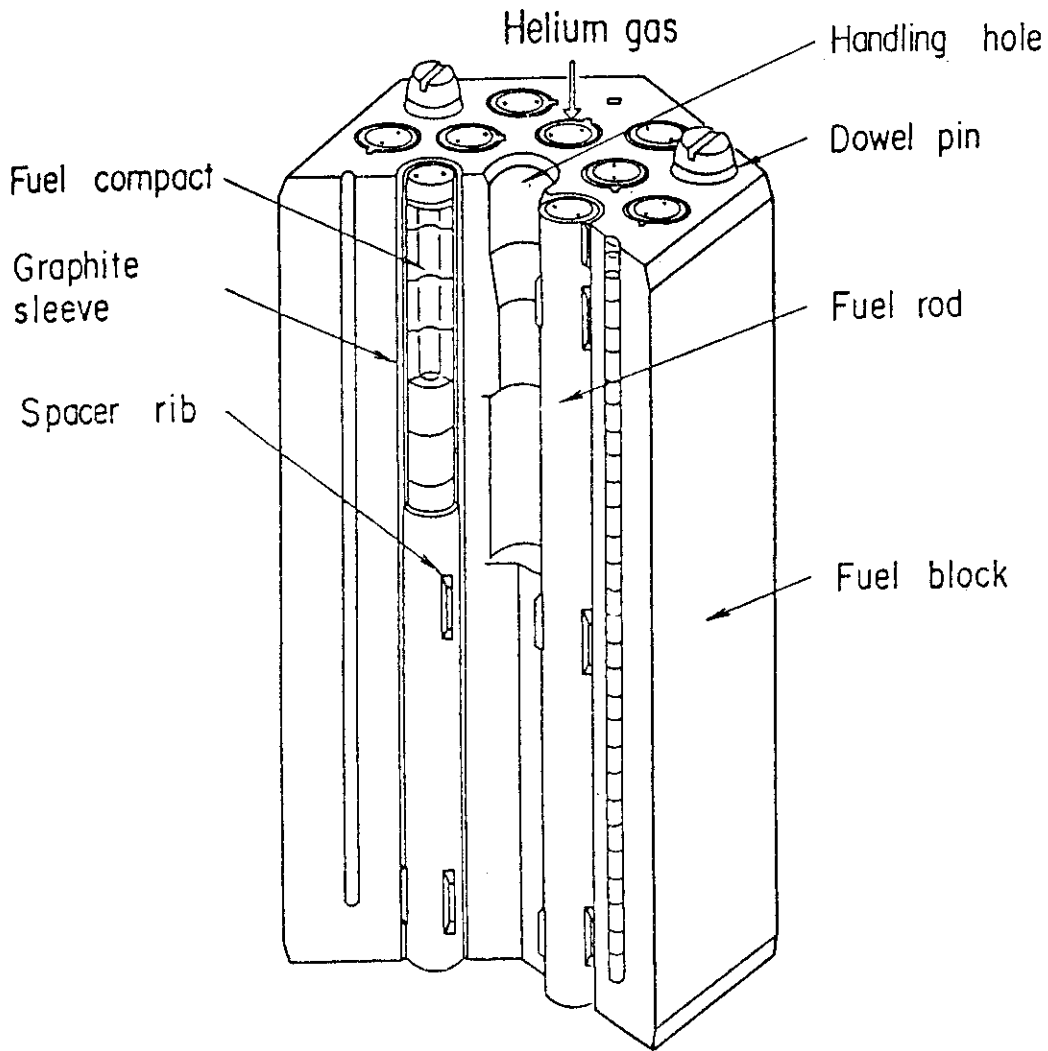


Fig. 1.1 Fuel element

## 2. 試験装置試験方法

### 2.1 試験部の構成

燃料体スタック実証試験部は、既設のHENDELマザー第1 He ガスループ<sup>(15)</sup> (M<sub>1</sub>)と接続されており、任意の試験条件のHeガスは、この第1 He ガスループから供給される。本試験部は、1チャンネル試験装置、多チャンネル試験装置及び第1 He ガスループの混合タンクを介してHENDELのメイクアップ系と精製系に接続されており、Heガスの供給、回収や本系統内の圧力制御(最大約4.5 MPa)を行っている。また、本系統内で発生した不純物ガスは、Heガスとともに精製系に送られて除去される。

Fig. 2.1.1に、本試験部のループ構成を示す。本試験部は、1チャンネル試験装置、多チャンネル試験装置、加熱器、循環機、冷却器、混合タンク、フィルタ、配管、弁、各種計測器等で構成される。ループの運転仕様は、次のとおりである。メイクアップ系より第1 He ガスループの混合タンクに供給されたHeガスは、フィルタにより微粒子等が取り除かれた後、循環機に入り昇圧(最大0.245 MPa程度)される。循環機からループ内に送り出されたHeガスは、まずオリフィス流量計を通過することにより、流量が計測される。ここでは、高精度の計測ができるように流量計測レンジの異なる3台の流量計が並列に設置されている。Heガス流量の粗制御は循環機の回転数制御により行われ、加熱器で試験条件の温度まで加熱された後試験部側に送られる。Heガス流量は、試験装置入口部に設置してある流調弁と試験部バイパス配管にある流調弁により設定値に微調整され、オリフィス流量計で流量を計測された後、装置の圧力容器内に流入する。容器内に入ったHeガスは、まず流路入口部に設置した上部空間ヒータで設定温度になるように微調整されてから、流路内に送られる。Heガスは、流路内を下降しながら、模擬燃料棒により最高1,270 Kまで加熱される。流路からの熱損失を防止するため、流路管の外周には厚さ約70 mmの断熱層が施工され、その外側を補償ヒータブロックで覆ってある。昇温したHeガスは、装置容器内下部に設置した内蔵冷却器により670 K以下まで除熱された後、再びマザー第1 He ガスループに送られ、冷却器、混合タンク及びフィルタを経て再び循環機に戻る構成となっている。

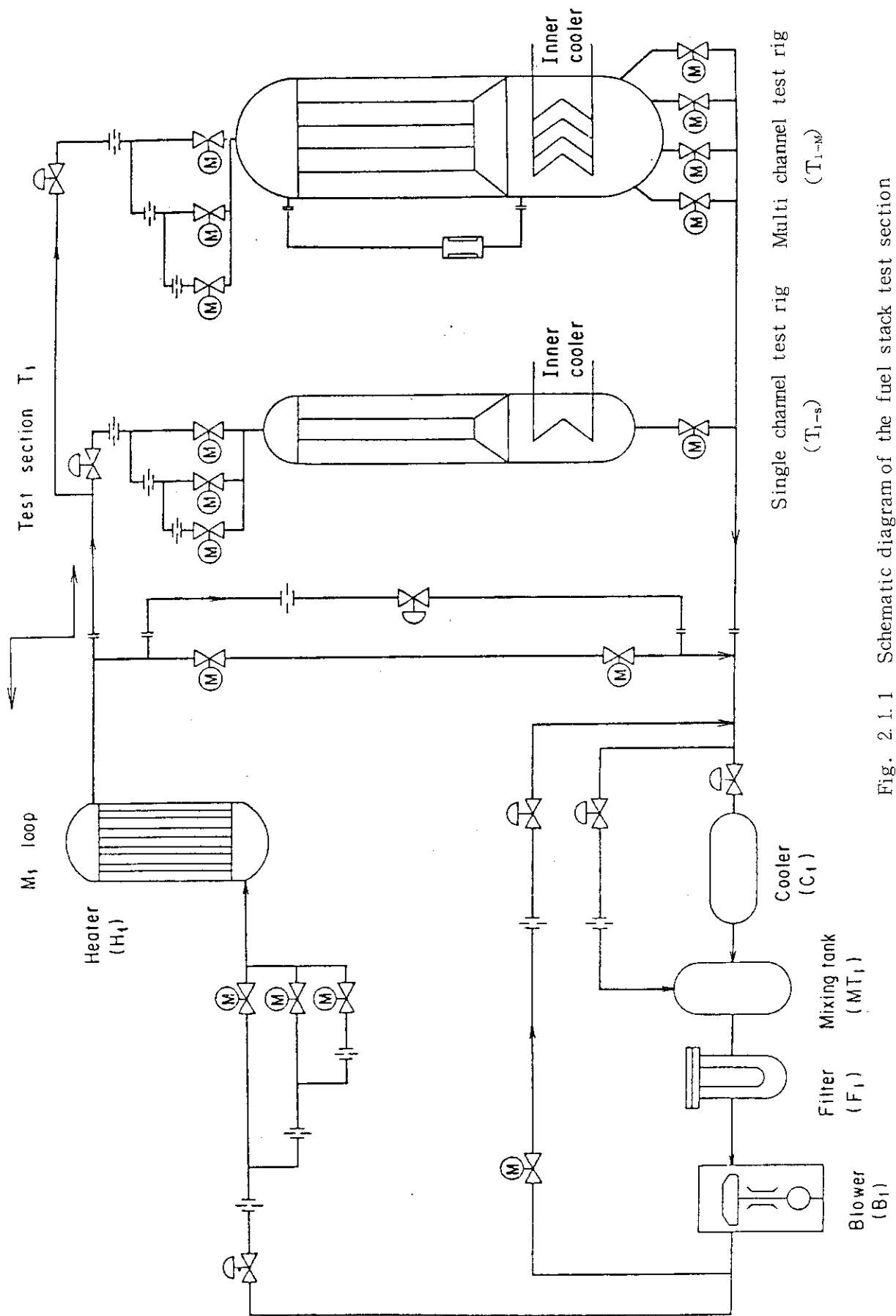


Fig. 2.1.1 Schematic diagram of the fuel stack test section

## 2.2 1チャンネル試験装置

1チャンネル試験装置の構造を、Fig. 2.2.1に示す。本試験装置は、模擬燃料棒、流路管および補償ヒータブロック等から構成される。Table 2.2.1に、模擬燃料棒と流路管の主な仕様を示す。また、Table 2.2.2及びFig. 2.2.2に、それぞれ計測項目と計測点位置を示す。

### 2.2.1 模擬燃料棒

供試模擬燃料棒 (Simulated fuel rod) の構造を、Fig. 2.2.3に示す。本燃料棒は、電気加熱ヒータであり、模擬燃料部 (Sub-rod)、上部電極 (Upper electrode) 及び下部電極 (Lower electrode) から構成される。使用した模擬燃料部の外面形状や寸法は、実験炉仕様燃料棒とほぼ同一である。

#### (1) 主要諸元

供試模擬燃料棒の主要諸元は、次のとおりである。

- |                           |          |
|---------------------------|----------|
| 1) 製造番号                   | 1 SF 101 |
| 2) 模擬燃料部外径                | 45.95 mm |
| 3) 模擬燃料棒全長                | 6155 mm  |
| 4) 模擬燃料部全長                | 4003 mm  |
| 5) 上部リード棒全長               | 2017 mm  |
| 6) 下部電極全長                 | 135 mm   |
| 7) 模擬燃料部段数                | 7 段      |
| 8) 模擬燃料部 1 段当たりの長さ及び有効発熱長 |          |

模擬燃料部段数	1 段当たり黒鉛スリーブの長さ	1 段当たりの有効発熱長
第 1 段	563.3 mm	459.0 mm
第 2 段	563.0 mm	459.0 mm
第 3 段	563.0 mm	459.5 mm
第 4 段	563.0 mm	459.5 mm
第 5 段	563.0 mm	459.0 mm
第 6 段	563.0 mm	460.0 mm
第 7 段	563.0 mm	460.0 mm

#### 9) 構成材質

- |                 |                  |
|-----------------|------------------|
| 模擬燃料部           | 発熱体 — 黒鉛         |
|                 | 絶縁材 — 窒化ホウ素 (BN) |
|                 | スリーブ — 黒鉛        |
| 上部電極リード棒        | ニッケル             |
| 下部電極            | 黒鉛               |
| 10) 最大発熱量 (設計値) | 100 kW           |
| 11) 印加電圧        | 300 V            |

- 12) 模擬燃料棒発熱分布 流れ方向に対して一様
- 13) 模擬燃料部表面温度計測用熱電対の種類及び取り付け本数  
 模擬燃料部 1, 2, 4段 K型 (インコネルシース)  
 各段 1点ずつ計 3点  
 模擬燃料部 5, 6, 7段 R型 (白金シース)  
 各段 1点ずつ計 3点
- 14) 模擬燃料部各段当たりの軸方向及び円周方向の熱電対取り付け位置

模擬燃料部 段数	熱電対 番号	上端面から計測位置 までの軸方向距離	円周方向取り付け角度 0°を基準に時計 回りを正とする
第1段	1	410.0mm	325°
第2段	2	410.0mm	40°
第3段	- ※)	- ※)	- ※)
第4段	3	410.0mm	80°
第5段	4	410.0mm	160°
第6段	5	410.0mm	200°
第7段	6	410.0mm	280°

※) 模擬燃料部第3段目には、熱電対を設置していない。

- 15) 模擬燃料棒抵抗値 (温度20°Cの場合) 1.085 Ω
- 16) 模擬燃料部各段の抵抗値:  $R_r$

段数	$R_r$ (Ω)	
	設計値 <sup>*</sup>	実測値 <sup>**</sup>
第1段	0.1679	0.1727
第2段	0.1655	0.1630
第3段	0.1627	0.1702
第4段	0.1527	0.1637
第5段	0.1517	0.1506
第6段	0.1456	0.1482
第7段	0.1391	0.1412

## (2) 構造

模擬燃料部は、外径約46mm、1段当たりの長さ約570mm (黒鉛スリーブ長さ+接続電極長さ)、同有効発熱長 (Heating length) 約460mm、軸方向及び円周方向に各3か所ずつスペーサ・リ

\* : 温度20°Cの場合

\*\* : 温度25°Cの場合

ブ (Spacer-rib) を有する単一ヒータを、接続電極を介して軸方向に7段継ぎ合わせた構造である。その断面は、Fig. 2.2.4に示すように、内側から発熱体 (Graphite)、絶縁材 (Boron-nitride:BN)、スリーブ (Graphite) で構成され、最外周のスリーブとHeガスとの間で熱交換される。発熱体はらせん状であり、この巻数を変えることにより模擬燃料各段の抵抗値を変化させている。これは、一様な発熱分布となるよう、発熱体温度による抵抗値変化を考慮しているためである。模擬燃料部の各段は、ピンプラグ方式の中間電極 (Graphite) で接続されており、はめあいピンを用いてねじれを防止している。

模擬燃料棒の表面温度計測用の熱電対は、3段目を除く各段の黒鉛スリーブに1点ずつの計6点取り付けられており、1, 2, 4段目に1.6mmφのK型インコネルシースを、5～7段目に1.6mmφのR型白金-白金ロジウム10%シースを使用している。熱電対は、スリーブ表面に加工した溝の中を通り、計測点まで引き回している。特に計測点付近では、冷却材の乱れによる測定誤差を避けるためにセラミックス・セメントにより溝を埋めてスリーブ表面に平滑にしている。

上部電極は、外径28mm、長さ約2.2mのニクロム製の中実円筒であり、上部プレナム部で容器貫通電極と接続している。

下部電極は、頂点10°のテーパ形状をした黒鉛製の接地電極であり、流路管下部に設置された黒鉛製電極接続部に接地される。

### 2.2.2 流路管

流路管は、内部に模擬燃料棒を挿入した際に外壁を構成するものであり、内径約53mm、肉厚約4.6mm、長さ約4.4mの Hastelloy X 製である。管外壁には、温度計測用の3.2mmφ、K型インコネルシース熱電対がFig. 2.2.2に示すように計9点設置してある。更に、静圧測定孔 (1mmφ) が10点設けられており、流路全体差圧1点、発熱部7点、非発熱部2点の合計10点の差圧を計測している。流路管の外周には厚さ約70mmの断熱材 (Kaowool 1260 S) が巻き付けてあり、その外側は厚さ0.8mmの Hastelloy X 製の外装板で取り囲んでいる。

### 2.2.3 補償ヒータブロック

流路管の外側には、流路半径方向への熱損失を防止するための補償ヒータブロックが設置されている。

本ヒータブロックの諸元は、次のとおりである。

- |            |   |
|------------|---|
| (1) 形状     | 円筒形10段積み重ね方式  |
| (2) 材質     | コーギーライト   |
| (3) ヒータ材質  | カンタルA-1   |
| (4) 寸法     | 内径約200mm、外径約700mm、高さ約540mm<br>ただし、ブロック第1段目のみ高さは約1,090mmである。 |
| (5) 発熱量    | ブロック第2, 3段目のみ3.9kW、その他の段はすべて7.8kW                           |
| (6) 熱電対の種類 | 3.2mmφ、K型インコネル600シース  |
| (7) 熱電対の本数 | 各ブロック中央部に1点ずつの合計9本  |

補償ヒータブロックの温度測定用熱電対の軸方向取り付け位置を、Fig. 2. 2. 2 に示す。半径方向取り付け位置は本ヒータブロックの内面より約50mmの深さの位置である。補償ヒータブロックの出力は、本ヒータブロックの温度と流路管外面で計測した温度との差が零になるように制御され、流路管からの熱損失を極力制限している。

#### 2. 2. 4 He ガス温度の計測

He ガスは、装置上部より流入し、上部プレナム部で十分に混合された後、環状流路（加熱部）、下部混合室、下部プレナム部を経て装置外に流出する。

He ガス温度の測定は、上部空間補償ヒータ出口1点、流路管入口3点、環状流路入口1点、環状流路出口3点、下部混合室1点、流路管出口3点、の合計12点行っている。使用した熱電対は、流路管出口温度のうち1点のみ3.2mm $\phi$ 、R型（白金-白金ロジウム10%シース）熱電対であり、残りはすべて3.2mm $\phi$ 、K型（インコネル600シース）熱電対である。

更に、燃料模擬部第1段、第4段、第7段の表面温度計測位置（L/Deでそれぞれ50.6, 294.9, 539.2）に対応する流路管及び補償ヒータには、それぞれ熱線流速計の挿入孔があげられており、熱線流速計によるヘリウムガス流路内の乱れを測定することが可能である。但し、熱線流速計を使用しない場合は、専用治具を用いて流路管の外側から挿入孔をふさいでいる。



Table 2.2.1 Main specifications of the fuel stack test section

(1) Simulated fuel rod	
Maximum electrical input	100 kW
Axial heat flux distribution	Uniform
Outer diameter	0.046 m
Length	6.155 m
Length of heating section	3.99 m
Material	
Heating element	Graphite
Insulation	Boron - Nitride
Sleeve	Graphite
Upper electrode	Nickel
Lower electrode	Graphite
Thermocouple	
Type	K or R type
Number	6
(2) Outer tube	
Inner diameter	0.053 m
Material	Hastelloy X
Thermocouple	
Type	K
Number	9

Table 2.2.2 List of measuring data

	Item	Number
Temperature	Inlet Helium gas temperature	3
	Helium gas temperature at the outlet of heated region	3
	Outlet Helium gas temperature	3
	Helium gas temperature at the outlet of upper plenum heater	1
	Surface temperature of simulated fuel rod model	14
	Surface temperature of outer tube	9
	Temperature of compensation heater	9
Pressure	Inlet Helium gas pressure	1
	Outlet Helium gas pressure	1
Differential pressure	Helium gas in heating region	7
	Helium gas in upper unheating region	1
	Helium gas in lower unheating region	1
Hot-wire anemometer	Helium gas in heating region	3

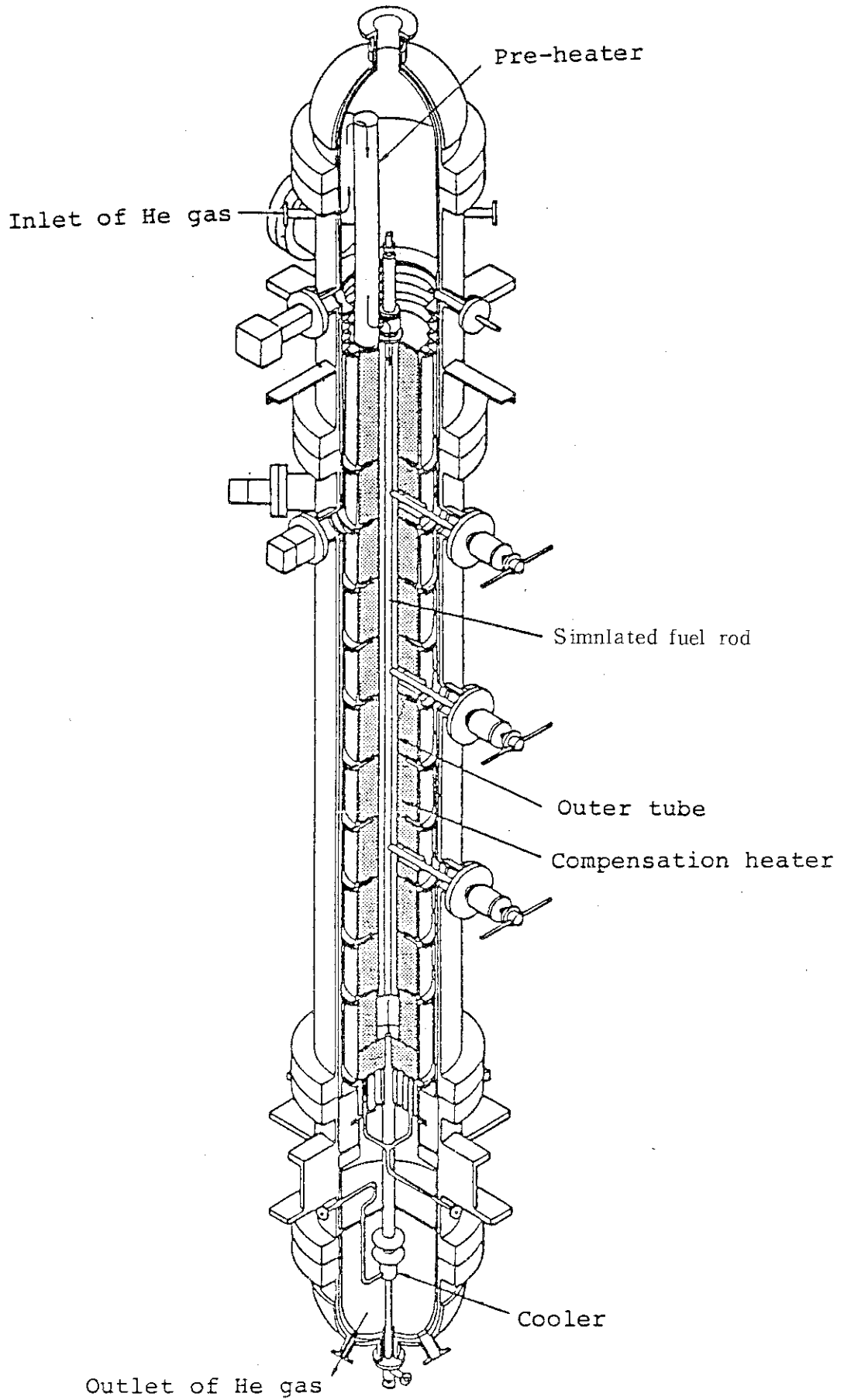


Fig. 2.2.1 Conceptional drawing of single-channel test rig.

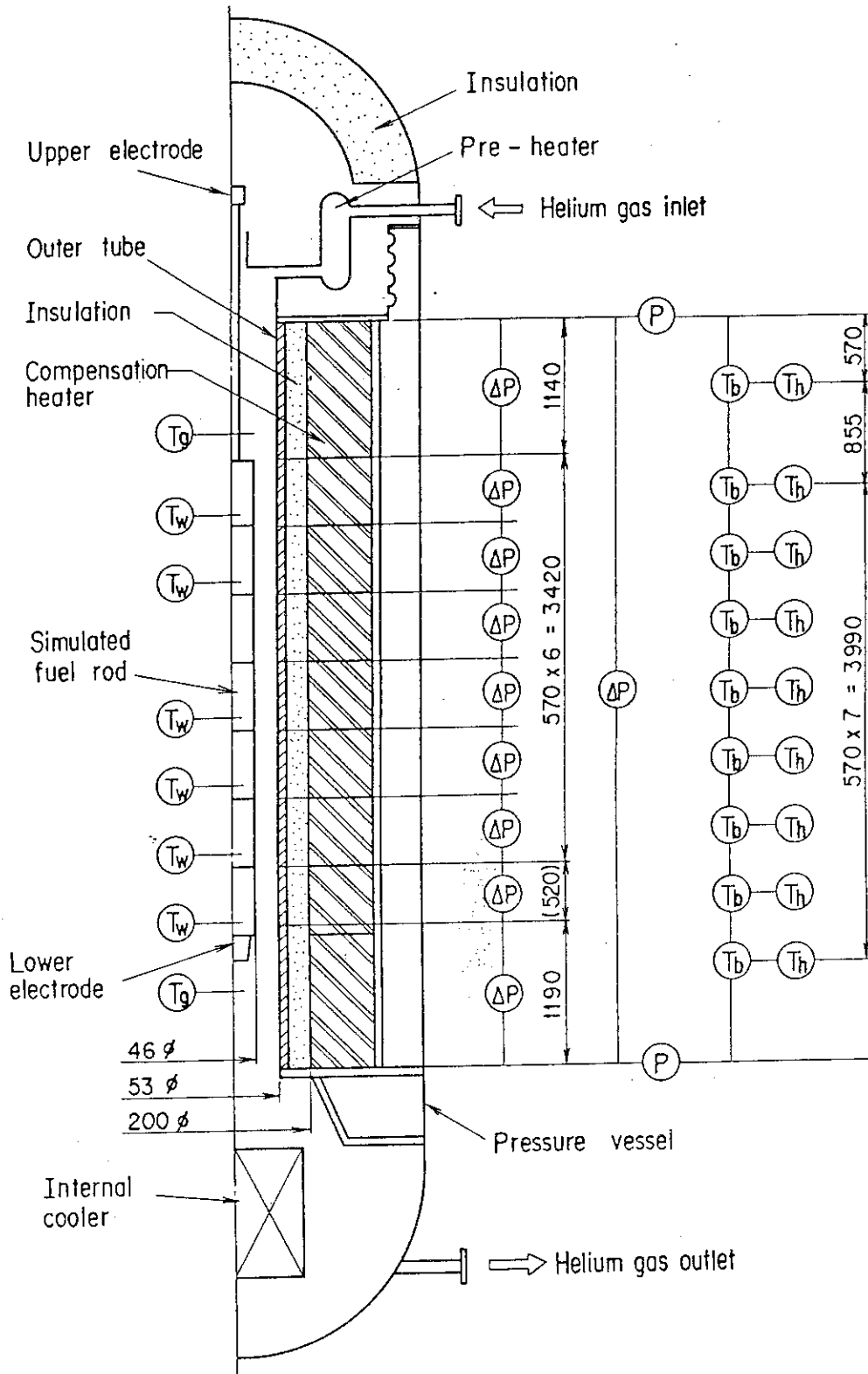


Fig . 2 . 2 . 2 Measuring locations

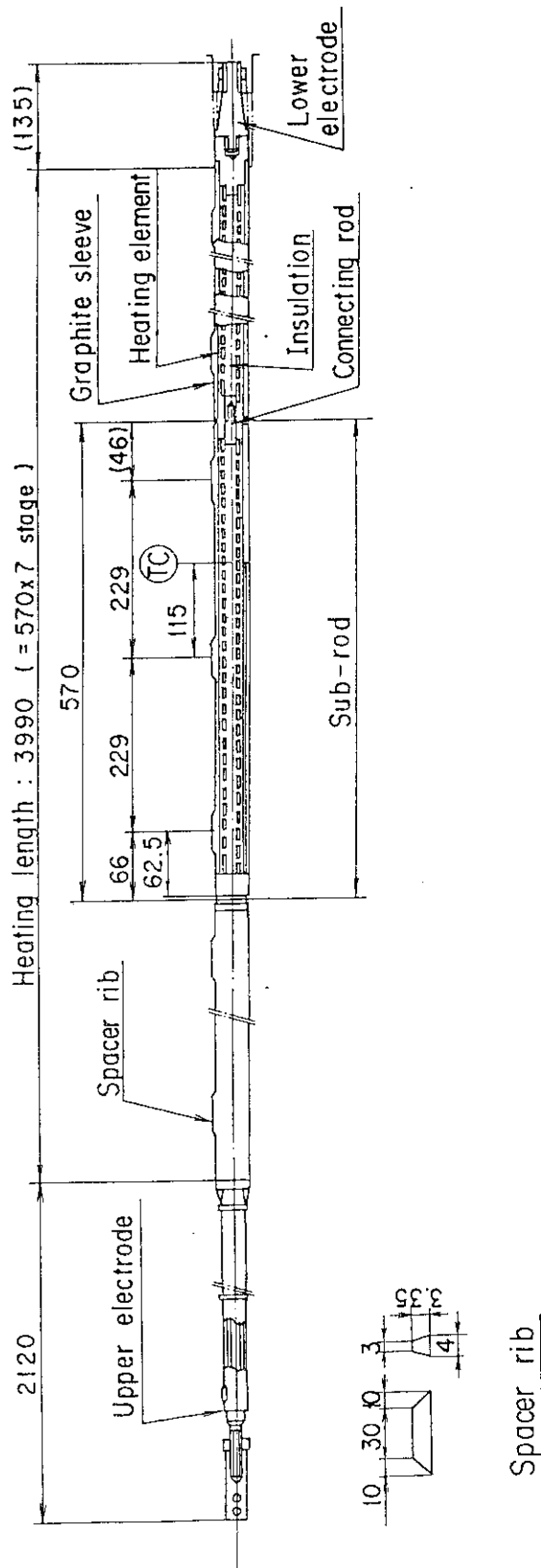


Fig. 2.2.3 Structural drawing of simulated fuel rod

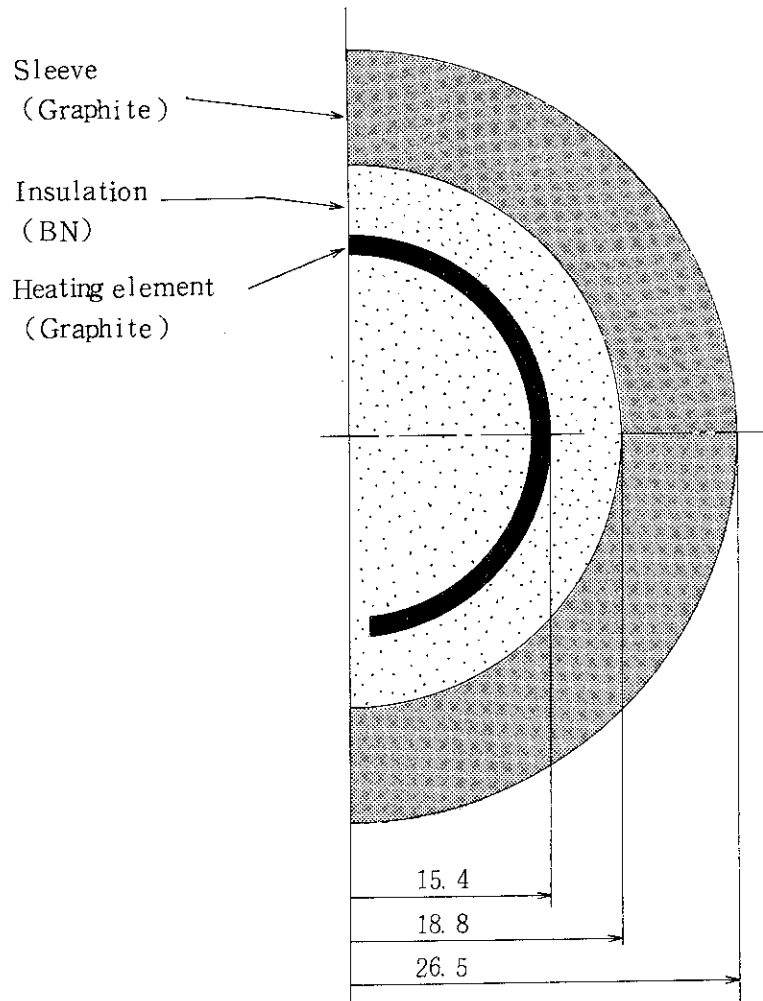


Fig. 2.2.4 A cross-sectional view of simulated fuel rod

## 2.3 試験手順

最初に、検出器の較正や装置からの漏えい量及び測定値の補正等を目的として、Heガスを流さない状態で各種検出器の測定誤差を求めた。

次に、模擬燃料棒を加熱しない状態でHeガスの流量を徐々に変化させて圧力損失を求める等温流試験を行った。試験は、試験部の流路入口において、温度290~610 (K)、圧力0.6~3.0 (MPa)、流量1.0~47.1 (g/s)、レイノルズ数700~21,000の範囲で実施した。

最後に、流量、入口ガス温度及び模擬燃料棒の電気入力を設定し、流量と壁面温度が十分定常になった後、流量、ガス温度、壁面温度、電気入力、圧力損失をそれぞれ測定した。

ここで、模擬燃料棒の正味の加熱量は、電気入力値から上部電極、下部電極及びブスバー間による消費電力を差し引いた値であるが、後者の全抵抗値は前者の抵抗値の0.5%未満であり、全体の発熱量に比べて無視できるほど小さいため、電気入力を模擬燃料棒の加熱量とした。また、流路内のHeガス温度は、環状流路入口と同出口で求めたHeガス温度から算出した。

流路入口における試験条件は、温度520~620 (K)、圧力3.0~4.0 (MPa)、流量3.1~40.5 (g/s)、レイノルズ数1,300~18,000、加熱量8.5~91.1 (kW)の範囲である。

Table 2.3.1とTable 2.3.2に、それぞれHENDEL No. 6 サイクル試験、No. 7 サイクル試験の試験条件を示す。試験はFig. 2.3.1に示すように、無次元熱流束 $\dot{q}_{in}^* = 0.9 \times 10^{-3} \sim 1.4 \times 10^{-3}$ の範囲内で実施した。また、等温流試験及び加熱試験を通して、レイノルズ数が1,600以下のデータは、流量計の精度上の問題あるいは補償ヒータの制御が不十分で温度が定常状態に達していなかったために、本報の整理からは除外した。

$$\text{模擬燃料部各段の発熱量} \quad Q_j = Q_t \cdot R_{nj} / \sum_{j=1}^7 R_{nj} \quad (2.3.1)$$

$$\text{Heガス温度} \quad T_x = T_{in} + \frac{1}{G \cdot c_p} \left\{ \sum_{j=1}^{j-1} Q_j + Q_j \cdot \frac{x - \ell(j-1)}{L} \right\} \quad (2.3.2)$$

$$\text{模擬燃料部表面における熱流束} \quad q_j = 859.6 \cdot Q_j / \pi \cdot D_i \cdot \ell_j' \quad (2.3.3)$$

$$\text{局所熱伝達率} \quad \alpha_j = (q_j - q_{ej}) / (T_{wj} - T_j) \quad (2.3.4)$$

$$\text{局所ヌッセルト数} \quad Nu_j = (D_o - D_i) \cdot \alpha_j / \lambda_j \quad (2.3.5)$$

$$\text{無次元熱流束} \quad \dot{q}_{in}^* = q / \{ c_p \cdot T_{in} \cdot (G/S) \} \quad (2.3.6)$$

また、次に示す平滑環状流路の熱伝達の式(2.3.7)~(2.3.9)と本試験結果を比較した。

$$\text{乱流域} \quad Nu_s = 0.018 (D_i/D_o)^{-0.16} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (2.3.7)$$

$$\text{遷移域} \quad Nu_s = 0.084 (Re^{2/3} - 110) \cdot Pr^{0.4} \quad (2.3.8)$$

$$\text{層流域} \quad Nu_s = 5.6 \quad (2.3.9)$$

同様に，摩擦係数については次式と比較した。

$$\text{乱流域}^{(16)} \quad f_s = 0.079 \text{Re}^{-0.25} \text{ (Blasius の式)} \quad (2.3.10)$$

$$\begin{aligned} \text{層流域}^{(17)} \quad f_s &= \frac{16}{\text{Re}} \cdot \frac{(1-\beta)^2}{1+\beta \frac{1-\beta^2}{\ln(1/\beta)}} \\ &\doteq 24 / \text{Re} \quad (2.3.11) \end{aligned}$$



Table 2.3.1 Experimental conditions for HENDEL No. 6 cycle test operation (1/3)

Run No.	Date (1983)	Inlet He gas temperature (K)	He gas flow rate (g/s)	Inlet He gas pressure (Mpa)	Electric input (kW)	Inlet Reynolds number	Outlet Reynolds number	$q_{in} \times 10^{-4}$	
1	601	12/8 12:40	286.2	0	0.67	0	0	0	
2	602	19:19	286.2	1.0	0.67	0	676	675	0
3	603	19:19	286.3	1.9	0.67	0	1,272	1,270	0
4	604	23:48	288.3	1.9	0.66	0	1,283	1,284	0
5	605	12/9 9:53	288.8	3.2	0.67	0	2,150	2,151	0
6	606	9:53	289.0	3.5	0.67	0	2,342	2,345	0
7	607	10:44	289.2	3.8	0.67	0	2,527	2,531	0
8	608	10:58	289.2	4.2	0.67	0	2,806	2,810	0
9	609	11:05	289.9	4.6	0.66	0	3,054	3,060	0
10	610	11:05	290.9	4.9	0.64	0	3,241	3,248	0
11	611	12:18	290.5	5.4	0.64	0	3,583	3,586	0
12	612	13:04	292.1	5.9	0.65	0	3,888	3,901	0
13	613	13:04	294.6	6.5	0.65	0	4,267	4,284	0
14	614	14:30	295.9	7.2	0.65	0	4,686	4,706	0
15	615	14:30	298.2	7.9	0.65	0	5,116	5,140	0
16	616	14:30	300.9	8.5	0.65	0	5,518	5,544	0
17	617	16:12	301.5	9.4	0.65	0	6,094	6,124	0
18	618	17:05	306.1	10.3	0.65	0	6,579	6,611	0
19	619	17:46	307.6	11.3	0.65	0	7,203	7,237	0
20	620	18:15	306.4	12.6	0.66	0	8,040	8,067	0
21	621	19:19	311.4	13.9	0.66	0	8,802	8,840	0
22	622	20:56	314.7	15.1	0.64	0	9,490	9,528	0
23	623	21:41	316.3	16.7	0.65	0	10,448	10,492	0
24	624	21:48	317.9	17.7	0.65	0	11,050	11,097	0
25	625	12/10 10:54	317.1	9.4	0.64	0	5,855	5,881	0
26	626	12:18	312.1	4.6	0.65	0	2,902	2,912	0
27	627	12:25	310.0	4.2	0.65	0	2,674	2,684	0
28	628	13:45	307.1	3.0	0.65	0	1,911	1,918	0
29	629	14:58	305.5	2.6	0.65	0	1,674	1,679	0

Table 2.3.1 Experimental conditions for HENDEL No. 6  
cycle test operation (2/3)

Run No.	Date (1983)	Inlet He gas temperature (K)	He gas flow rate (g/s)	Inlet He gas pressure (MPa)	Electric input (kW)	Inlet Reynolds number	Outlet Reynolds number	$q_{in}^+$ $\times 10^{-4}$	
30	630	12/10 15:05	304.0	2.4	0.65	0	1,551	1,555	0
31	631	16:03	302.7	2.1	0.64	0	1,368	1,370	0
32	632	16:10	302.1	1.9	0.65	0	1,234	1,236	0
33	633	16:10	301.6	1.7	0.65	0	1,100	1,101	0
34	634	17:14	300.7	1.5	0.65	0	979	980	0
35	635	17:14	300.0	1.3	0.65	0	838	838	0
36	636	18:13	299.3	1.2	0.66	0	793	793	0
37	637	18:32	299.0	1.2	0.66	0	787	787	0
38	638	20:22	306.3	13.9	0.66	0	8,906	8,938	0
39	639	12/11 8:37	323.8	14.4	0.64	0	8,886	8,921	0
40	640	13:14	525.0	25.3	3.01	0	11,321	11,378	0
41	641	14:51	529.9	27.7	3.01	0	12,298	12,316	0
42	642	16:09	532.2	30.3	3.01	0	13,386	13,413	0
43	643	17:14	530.7	33.4	3.01	0	14,826	14,850	0
44	644	17:14	531.0	33.6	3.0	0	14,891	14,919	0
45	645	18:19	531.7	36.6	3.0	0	16,188	16,219	0
46	646	19:17	531.7	40.1	2.99	0	17,747	17,781	0
47	647	20:55	532.2	43.9	2.98	0	19,426	19,463	0
48	648	22:07	531.6	47.1	2.97	0	20,849	20,894	0
49	649	12/12 4:45	532.2	47.1	2.97	0	20,825	20,883	0
50	650	12/14 4:17	531.3	4.6	3.0	11.3	2,031	1,323	10.8
51	651	19:23	507.9	8.7	2.99	23.2	3,962	2,465	12.2
52	652	12/15 21:24	509.5	14.8	2.98	39.6	6,742	4,196	12.2
53	653	12/17 4:04	512.5	22.9	2.94	58.1	10,389	6,575	11.5
54	654	9:49	512.3	22.8	2.95	58.1	10,370	6,561	11.5
55	655	15:43	517.3	34.4	2.96	87.2	15,516	9,871	11.4
56	656	20:24	518.0	34.5	2.96	87.2	15,556	9,892	11.3

Table 2.3.1 Experimental conditions for HENDEL No. 6  
cycle test operation (3/3)

Run No.	Date (1983)	Inlet He gas temperature (K)	He gas flow rate (g/s)	Inlet He gas pressure (MPa)	Electric input (kW)	Inlet Reynolds number	Outlet Reynolds number	$q_{in} \times 10^{-4}$	
57	657	12/18 6:18	537.2	40.5	2.97	90.8	17,818	11,928	9.70
58	658	7:16	537.5	40.5	2.97	91.1	17,815	11,924	9.72
59	659	9:58	501.1	43.5	2.97	0	20,060	19,907	0
60	660	14:50	500.0	43.4	2.96	0	20,015	19,994	0
61	661	19:13	499.7	43.6	2.96	0	20,148	20,201	0
62	662	20:08	499.7	43.6	2.96	0	20,144	20,201	0

Table 2.3.2 Experimental conditions for HENDEL No.7 cycle  
test operation (1/2)

Run No.	Date (1983)	Inlet He gas temperature (K)	He gas flow rate (g/s)	Inlet He gas pressure (MPa)	Electric input (kW)	Inlet Reynolds number	Outlet Reynolds number	$q_{in}^+$ $\times 10^{-4}$	
1	701	3/7 11:39	279.5	0.0	0.06	0.0	0	0	
2	702	3/8 18:59	281.5	12.8	4.03	0.0	8.626	8.626	0
3	703	22:27	283.7	9.9	4.03	0.0	6.643	6.646	0
4	704	22:27	283.7	9.9	4.03	0.0	6.650	6.653	0
5	705	3/9 0:14	283.5	4.8	4.03	0.0	3.259	3.260	0
6	706	0:20	283.5	4.9	4.03	0.0	3.266	3.267	0
7	707	2:56	287.7	18.1	4.02	0.0	12.078	12.089	0
8	708	6:09	290.7	21.3	4.02	0.0	14.095	14.111	0
9	709	6:09	290.9	21.3	4.02	0.0	14.076	14.092	0
10	710	8:17	293.4	26.0	4.02	0.0	17.143	17.163	0
11	711	8:23	293.8	26.0	4.02	0.0	17.121	17.144	0
12	712	9:17	295.4	32.3	4.02	0.0	21.137	21.160	0
13	713	3/10 8:37	568.5	14.2	3.98	0.0	6.014	6.014	0
14	714	9:10	565.3	15.4	3.98	0.0	6.551	6.584	0
15	715	14:28	582.0	7.6	3.98	0.0	3.174	3.208	0
16	716	19:05	592.4	6.3	3.98	0.0	2.610	2.643	0
17	717	21:50	602.9	5.3	3.98	0.0	2.168	2.194	0
18	718	3/11 2:32	610.4	4.7	3.98	0.0	1.896	1.923	0
19	719	14:58	553.3	4.3	3.89	0.0	1.866	1.891	0
20	720	16:46	554.6	4.1	3.89	0.0	1.764	1.786	0
21	721	19:26	561.1	3.9	3.91	0.0	1.644	1.674	0
22	722	22:34	558.2	3.8	3.91	0.0	1.637	1.665	0
23	723	3/12 0:56	552.4	3.8	3.91	0.0	1.653	1.674	0
24	724	9:09	560.5	3.5	3.92	0.0	1.474	1.499	0
25	725	16:14	562.7	3.3	3.92	0.0	1.415	1.441	0
26	726	19:15	563.8	3.3	3.92	0.0	1.413	1.442	0
27	727	21:14	562.8	3.3	3.92	0.0	1.419	1.444	0

Table 2.3.2 Experimental conditions for HENDEL No. 7 cycle test operation (2/2)

Run No.	Date (1983)	Inlet He gas temperature (K)	He gas flow rate (g/s)	Inlet He gas pressure (MPa)	Electric input (kW)	Inlet Reynolds number	Outlet Reynolds number	$q_{in}^+$ $\times 10^{-4}$	
28	728	3/12 23:46	562.6	3.3	3.92	0.0	1,419	1,446	0
29	729	3/13 1:36	562.9	3.3	3.92	0.0	1,419	1,444	0
30	730	2:13	563.2	3.3	3.92	0.0	1,421	1,447	0
31	731	22:17	562.6	3.3	3.92	0.0	1,424	1,447	0
32	732	3/14 8:42	562.4	3.2	3.93	0.0	1,351	1,376	0
33	733	3/15 1:49	571.0	3.0	4.00	0.0	1,274	1,305	0
34	734	17:17	571.5	3.2	2.03	0.0	1,355	1,385	0
35	735	3/16 10:42	534.6	7.0	3.86	0.0	3,067	3,092	0
36	736	3/17 3:37	531.4	6.5	3.88	0.0	2,895	2,920	0
37	737	15:32	538.4	5.9	3.91	0.0	2,586	2,611	0
38	738	3/18 15:06	553.3	3.1	4.02	8.5	1,328	861	11.6
39	739	3/20 17:26	528.5	5.3	4.03	14.1	2,374	1,505	11.6
40	740	21:48	522.4	6.7	4.03	17.5	2,989	1,897	11.7
41	741	23:50	522.4	6.7	4.02	17.6	2,984	1,895	11.7
42	742	3/21 19:46	515.7	9.7	4.03	26.3	4,393	2,737	12.2
43	743	3/22 3:46	514.5	9.8	4.02	26.3	4,432	2,764	12.1
44	744	6:31	514.6	9.7	4.02	26.2	4,409	2,749	12.2
45	745	16:10	519.1	15.6	4.02	40.7	6,996	4,408	11.7
46	746	18:22	519.3	15.6	4.02	41.02	7,009	4,417	11.7
47	747	3/24 0:30	617.0	18.1	4.02	58.9	7,233	4,519	12.3
48	748	10:40	617.0	17.1	4.01	59.0	6,855	4,228	13.0
49	749	10:41	617.0	17.1	4.01	59.0	6,855	4,228	13.0
50	750	13:05	617.5	16.7	4.01	58.8	6,684	4,080	13.3

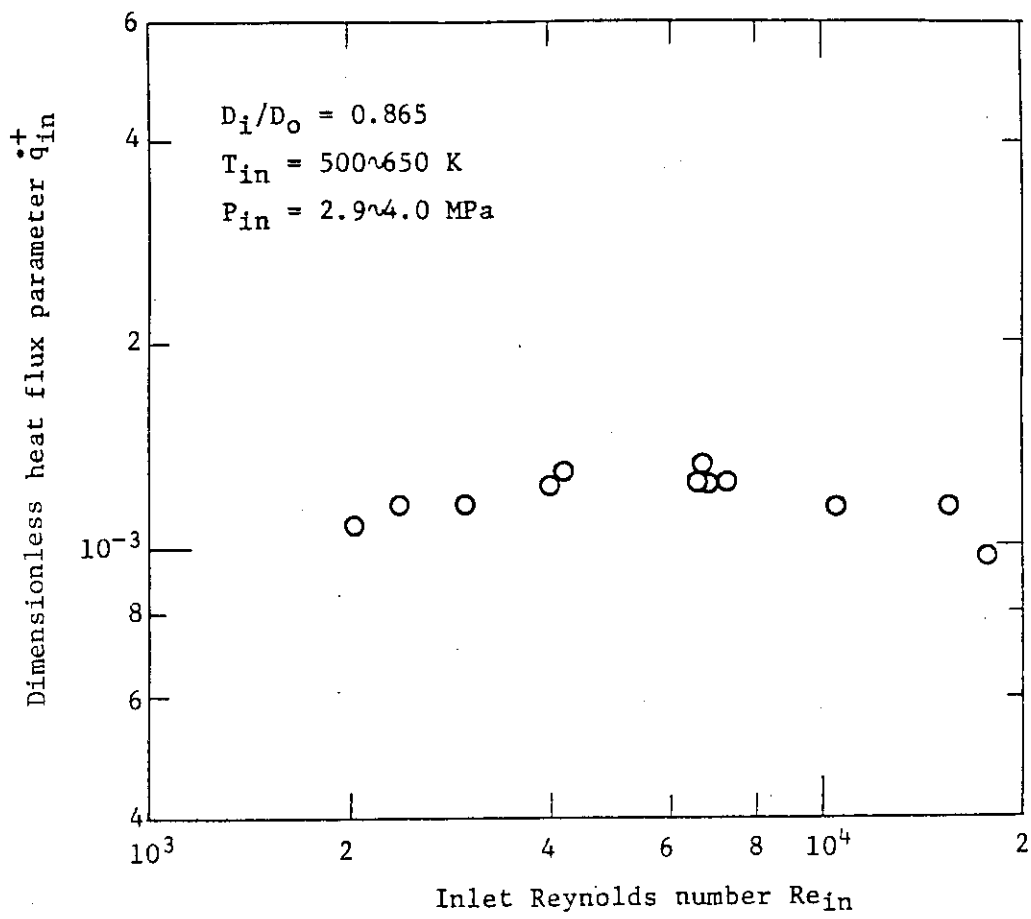


Fig. 2.3.1 Experimental range for heated flow

### 3. 試験結果とその検討

#### 3.1 流動特性

##### 3.1.1 摩擦係数

冷却材流路における基本的な流動特性を求めるために、非加熱等温流での模擬燃料棒の摩擦係数  $f$  を次式 (3.1.1) から求めた。

$$f = \frac{1}{2} \cdot \frac{De \cdot \Delta p}{x \cdot \rho \cdot v^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{De}{x} \cdot \gamma \cdot \Delta p \cdot \left(\frac{S}{G}\right)^2 \quad (3.1.1)$$

但し、この係数  $f$  は、流路平滑部の摩擦損失と模擬燃料表面に取り付けてあるスペーサ・リブの形状抵抗を含んだ値である。

Fig. 3.1.1 は、流路入口から出口に至る摩擦係数の分布をレイノルズ数をパラメータとして示したものである。ここで、縦軸は摩擦係数を、横軸は模擬燃料部上端からの軸方向距離  $x/De$  を、測定値は模擬燃料部各段の平均の摩擦係数を表す。図に見られるように、レイノルズ数が約4,000より小さい場合は、摩擦係数は  $x/De$  の値で約200までは漸次減少し、その後平坦化していることが分かる。このことから、レイノルズ数が約4,000以下では、 $x/De$  が200までは流れは発達していないと判断される。一方、レイノルズ数が4,000以上では、 $x/De$  が50程度で流れは十分発達していると考えられる。

Fig. 3.1.2 に、発達領域における模擬燃料棒各段の平均の摩擦係数とレイノルズ数の関係を示す。同図に示す測定値は Fig. 3.1.1 の結果を基に、レイノルズ数が約4,000以下では  $x/De > 200$ 、約4,000以上では  $x/De > 50$  の範囲の摩擦係数を用いている。この結果、摩擦係数は次式で表される。

$$f = 0.127 \cdot Re^{-0.28} \quad ; \quad Re > 2,500 \quad (3.1.2)$$

これらの値は、平滑環状流路の式 (2.3.10) よりも17~22%大きい。これは、模擬燃料棒の表面に取り付けたスペーサ・リブにより流動抵抗が増加したためと考えられる。

##### 3.1.2 圧力損失

Fig. 3.1.3 に、模擬燃料棒を加熱した場合の圧力損失の測定値  $\Delta p$  と次式

$$\Delta p_{cal} = 4 \cdot f \cdot \frac{\ell}{de} \cdot \frac{\rho_m \cdot v_m^2}{2g} + (\rho_{out} \cdot v_{out}^2 - \rho_{in} \cdot v_{in}^2) \quad (3.1.3)$$

ここに、 $f$  : 式 (3.1.2) から求めた計算値  $\Delta p_{cal}$  を比較して示す。

測定値と計算値とは、 $x/De \leq 320$ ではほぼ一致している。 $x/De > 320$ の範囲では、計算値の方が測定値より多少大きい、その誤差は3%未満である。以上のことから、加熱した場合の圧力損失は等温流の摩擦係数を用いて整理できることが分かった。



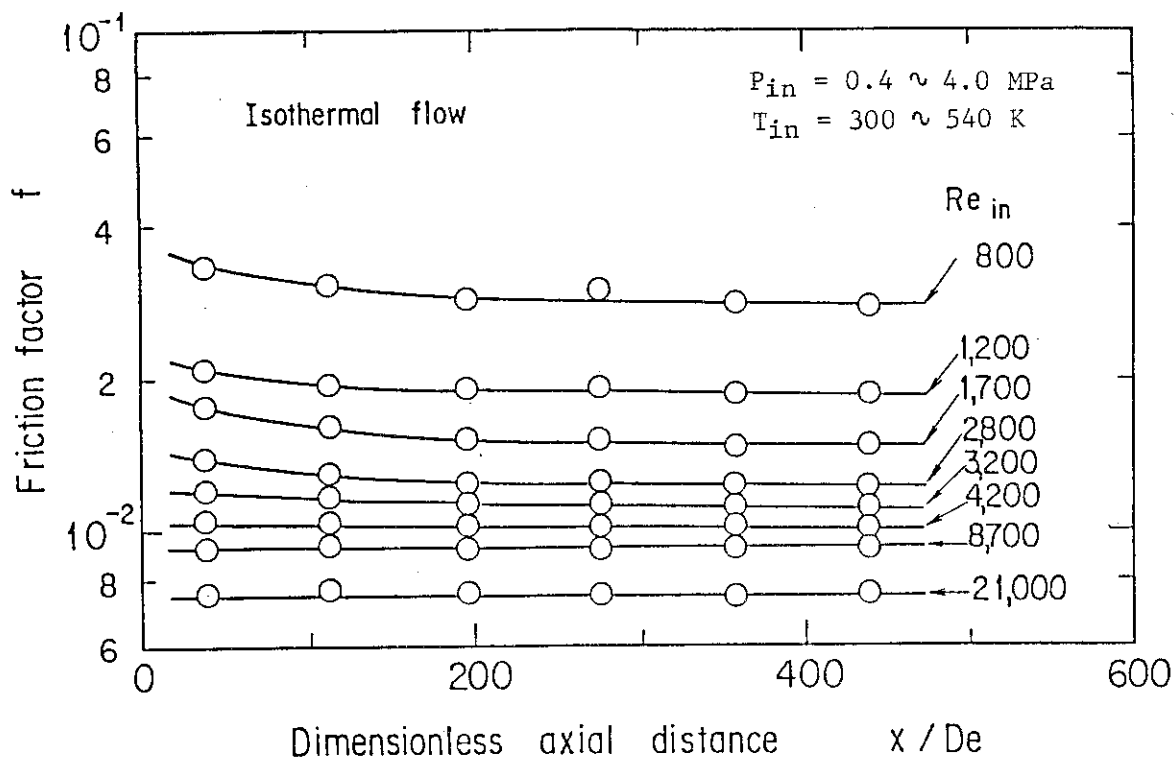


Fig. 3.1.1 Friction factors in the flow direction

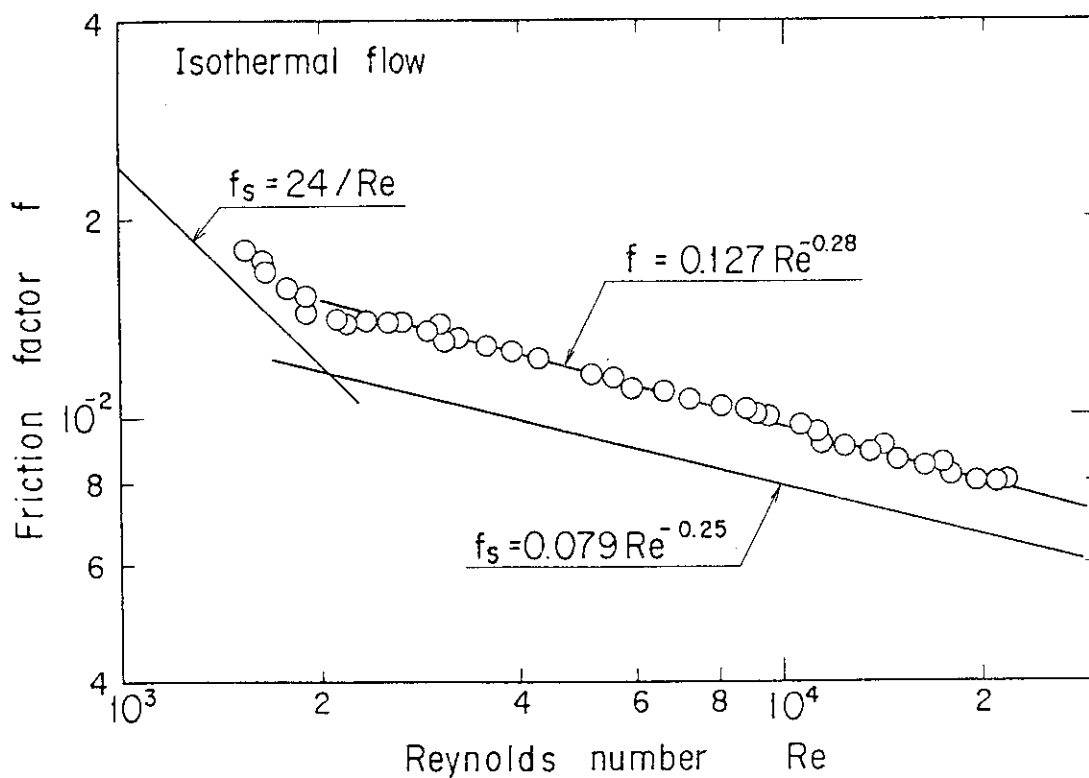


Fig. 3.1.2 Relationship between friction factor and Reynolds number.

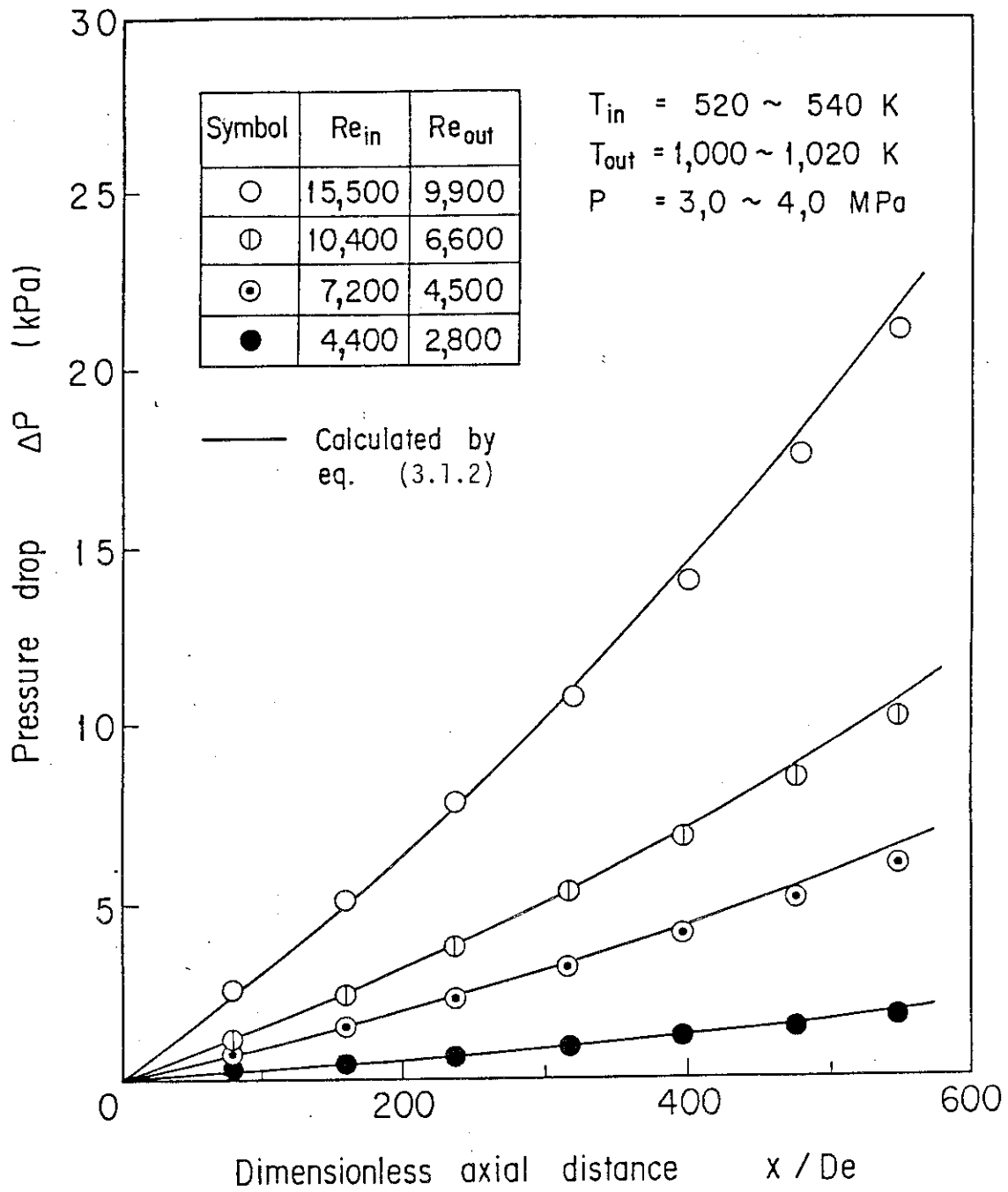


Fig. 3.1.3 Pressure drop in the flow direction

## 3.2 伝熱特性

### 3.2.1 温度分布

#### (1) 試験結果

Fig. 3.2.1 ~ Fig. 3.2.3 に、それぞれ乱流域、遷移域、層流域における温度分布を示す。He ガスの条件は、環状流路の入口で約 535 K、出口で約 1025 K である。図中には、模擬燃料棒の表面温度（記号○）、He ガス温度（●）、流路管温度（△）及び加熱開始点から終了点までの He ガスの温度分布を実線で示している。また、破線、一点破線、点線は、それぞれ平滑環状流路の式（2.3.7）～（2.3.9）から求めた計算値である。

Fig. 3.2.1 は、流路入口レイノルズ数  $Re_{in}$  が 10,000 以上の場合の温度分布である。表面温度の測定値は、式（2.3.7）による乱流域の計算値に比べて 10～30 K 低くなっており、模擬燃料棒の熱伝達率は平滑管の値よりも増加していることが分かる。また、実線で示す He ガスの温度分布は、流路の入口と出口でそれぞれ計測している He ガス温度測定値から推定した。

Fig. 3.2.2 に、入口レイノルズ数  $Re_{in}$  が約 4,300、出口レイノルズ数  $Re_{out}$  が約 2,700 の時の温度分布を示す。この場合のレイノルズ数は平滑管では、遷移域であり、図中の一点鎖線は遷移域の式（2.3.8）から求めた表面温度を表す。実測された表面温度は、式（2.3.8）による計算値よりもかなり低い値を示している。

Fig. 3.2.3 に、入口レイノルズ数  $Re_{in}$  が 2,000 以下のときの温度分布を示す。表面温度の測定値は、層流域の式（2.3.9）で求めた計算値（点線）よりも若干低く、Fig. 3.2.1 や Fig. 3.2.2 と同様にやはり熱伝達が平滑管に比べて上昇している。これは、熱放射による影響と考えられる。

#### (2) 解析結果

本試験で使用した模擬燃料棒（Fig. 2.2.3 参照）は、発熱体に黒鉛をスパイラル状に加工したコイルリングを用いている。従って、リングとリングの巻線ピッチの間には若干の非発熱部を有する。また、模擬燃料 1 段当たりの両端部及びそれら各段の継ぎ部にも非発熱部が存在する。よって、模擬燃料棒表面の黒鉛スリーブは、流れ方向に対して一様でない温度分布を持つことが予想される。

以上の理由から、本項では、前項に示すように試験から得られた温度分布を基に、模擬燃料棒に存在する非発熱部の影響を、汎用熱伝導解析コード TRUMP<sup>(18)</sup> を用いて検討・評価した。

#### (a) 巻線ピッチ間に存在する非発熱部の影響

##### ① 解析モデル

Fig. 3.2.4 に、模擬燃料棒の発熱部構造を示す。発熱体である黒鉛リングはスパイラル状を様し、その回りは絶縁材によって取り囲まれている。従って、発熱体は完全な軸対称ではないため、数値計算を行うには 3 次元計算が必要となる。しかしながら、そのためには非常に多くの要素数が必要であり、計算コードの許容要素数を超過してしまう。そこで、本解析では、発熱体を Fig. 3.2.5 に示すよう円環状のコイルが断続的に埋め込まれているものとしてモデル化した。

##### ② 仮定

本解析上の仮定は、次のとおりである。

1) 解析対象は、模擬燃料部 1 段当たりの有効発熱長 460mm に対して、その約 40% に当たる 176.8mm とする。また、スパーサ・リブの存在は無視する。

2) 熱源として、発熱体要素に定常熱発生率を与える。熱は、伝導によってのみ移動するものとする。発熱体と絶縁材及び絶縁材と黒鉛スリーブ等の異種材料の接触部には、熱抵抗はないものとする。

3) 黒鉛スリーブから He ガスへの熱の移動は、熱輸送による。解析モデルの左右両端 (Fig. 3.2.5 の A-A', B-B') は、断熱境界とする。

4) 各種構成材料に関して、比熱及び密度の温度依存性は考慮しない。但し、黒鉛スリーブについてのみ熱伝導率の温度依存性を考慮する。本解析に用いた各種材料の物性値を表 3.2.1 に示す。

5) He ガスの熱伝達率と温度は、実験値より算出し、計算コードに入力する。この際、熱伝達率は流れ方向に一定とする。温度は流れ方向に線形近似し、計算モデルの各要素それぞれにステップ状に入力する。

### ③ 解析結果

黒鉛スリーブ表面の温度分布に影響を及ぼす因子としては、次のものが考えられる。

- 1) 発熱体の定常熱発生率
- 2) He ガス温度、レイノルズ数、熱伝達率
- 3) 発熱体のピッチ及び幅

解析に用いた各種諸元を、Table 3.2.1 に示す。

### ④ 解析結果

Fig. 3.2.6 に、計算の結果得られた温度分布を示す。ここで、縦軸は温度、横軸は流れ方向距離、記号は黒鉛スリーブの表面温度から He ガス温度を引いた値を示す。同図に見られるように、すべての解析条件において、解析モデルの左端で表面温度が低くなっている。この原因は、解析モデルの左右両端を断熱境界と仮定したため、入力した He ガスの温度差によって、左端（下流）側から右端（上流）側に若干の熱移動が生じたものと考えられる。しかしながら、この影響は極めて小さく、得られた表面温度はかなりの信頼性があると考えられる。

本解析の結果、次のことが分かった。

- 1) He ガス温度の条件がほぼ同じであれば、レイノルズ数が大きいほど、黒鉛スリーブの表面温度は高くなる。
- 2) 表面温度は流れ方向に対してほぼ一様であり、発熱体のピッチ間隔ごとに存在する非発熱部の影響はほとんど見られない。

以上の結果、模擬燃料棒の発熱部は、連続した発熱体が存在するものと考えて良いと判断した。

### (b) 模擬燃料継ぎ部に存在する非発熱部の影響

#### ① 解析モデル

模擬燃料の各段は、継ぎ電極を介してそれぞれの発熱体が接続されている。この継ぎ部で

は発熱しないため、本模擬燃料棒では各段の継ぎ部ごとに約110mmの非発熱部が存在することになる。ここでは、Fig. 3.2.7に示す解析モデルを用いて、これらの非発熱部がスリーブ表面温度に及ぼす影響について検討した。

#### ② 解析上の仮定

- 1) 解析の対象は、模擬燃料部の継ぎ部分を中心にして上段部285mm(模擬燃料部の1段分の長さ570mmの半分)と下段部285mmとする。
- 2) スペーサ・リブは考慮しない。
- 3) 前項3.2.1(2), (a)の検討結果から、発熱体のピッチ間隔ごとに存在する非発熱部は無視し、円筒状の発熱体が連続しているものとする。
- 4) 継ぎ部の上段部と下段部には、実験から求めた熱伝達率をそれぞれ入力する。
- 5) 上記以外の仮定は、前項3.2.1(2), (a)と同じである。

#### ③ 解析条件

解析条件は、前項3.2.1(2), 1)とほぼ同様である。ただひとつ異なる点は、発熱体のピッチ幅の代わりに、本モデルでは非発熱部の長さとした。解析に用いた諸数値を、Table 3.2.2に示す。

#### ④ 解析結果

解析結果を、Fig. 3.2.8とFig. 3.2.9に示す。ここで、Fig. 3.2.8は非発熱部長さが110mmで、レイノルズ数をパラメータとしている。また、Fig. 3.2.9は非発熱部長さが110mmと41mmの場合について比較している。

本解析の結果、次のことが分かった。

- 1) 非発熱部の表面温度は、発熱部における温度よりもかなり低く、この傾向は、レイノルズ数が大きいほど顕著である。また、非発熱部が長いほど温度降下の影響は著しい。
- 2) 継ぎ部における温度降下の開始位置は、レイノルズ数に依存する。すなわち、レイノルズ数が小さいほど温度降下の開始位置は継ぎ部より遠くなり、継ぎ部の上流側ではより上方に、下流側ではより下方へと移動する。

以上のことから、模擬燃料継ぎ部からのHeガスへの伝熱量は、発熱部に比べて十分小さいことが分かった。流れ方向のガス温度を推定する際には、これら継ぎ部に存在する非発熱部の影響を考慮する必要があるので、試験データを整理するに当たって、Heガス温度は発熱部では線形に上昇し、継ぎ部では一定値であるとした。

### 3.2.2 熱放射量

本試験では、発熱部に黒鉛を用いているため、黒体面による熱放射の影響がかなり大きいことが予想される。

従って、熱伝達率を算出するに当たって、この熱放射の影響を考慮した。熱放射量 $Q_r$ は、次式<sup>(19)</sup>から求めた。

$$Q_r = \sigma \cdot (T_w^4 - T_c^4) \cdot A_w \cdot \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{A_w}{A_c} \left( \frac{1}{\epsilon_c} - 1 \right)} \quad (3.2.1)$$

ここで、 $\epsilon_w$ は発熱体（黒鉛）の放射率であり、温度200～1400 Kの範囲で約 $0.8^{(20)}$ である。 $\epsilon_c$ は流路（ハステロイX）の放射率であり、上に同じ温度範囲で約 $0.2^{(21)}$ である。

Fig. 3. 2.10に、熱放射量、温度と加温開始点から軸方向距離 $x/De$ との関係を、レイノルズ数をパラメータとして示す。ここで、縦軸上段は加熱部表面温度 $T_w$ と流路管温度 $T_c$ の温度分布を、下段は熱放射量 $Q_r$ が発熱量 $Q$ に占める割合 $(Q_r/Q)$ を示す。ここで、無次元熱流束 $\dot{q}_{in}^+$ を一定にしているため、流路入口から出口に至る温度分布は各データともほぼ同じである。すなわち、式(3.2.1)から得られる熱放射量は各データで一定値を示す。しかし、発熱量に対する熱放射量の割合は、レイノルズ数が大きくなると低下している。この理由は、レイノルズ数の増加により対流熱伝達率が増加したためである。また、 $x/De$ の増加に伴って $Q_r/Q$ の割合が増加しているのは、温度レベルの上昇によるものである。

### 3. 2. 3 熱伝達率

Fig. 3. 2.11は、流路入口レイノルズ数 $Re_{in}$ が約3,000以上の場合のヌッセル数 $Nu$ と流れ方向距離 $x/De$ の関係を、レイノルズ数に対して示したものである。ヌッセル数は、 $x/De$ の増加に伴ってなだらかに減少しているが、これはレイノルズ数が低下しているためである。 $x/De$ が100以下では、レイノルズ数が小さい場合に入口助走区間の影響が見られるが、 $x/De$ が100以上では流れは十分発達していると考えられる。

Fig. 3. 2.12に、発達領域におけるヌッセル数とレイノルズ数との関係を示す。同図中、記号は実験値を、実線はそれぞれ式(2.3.7)～(2.3.9)から求めた平滑環状流路のヌッセル数を表す。本試験で得られたヌッセル数は、乱流域から層流域にかけて乱流熱伝達の傾向を示しており、平滑流路とは異なる傾向を示している。ここで、ヌッセル数は平滑管の値に比較して、乱流域( $Re \geq 7,000$ )で約20%、遷移域( $2,700 < Re < 7,000$ )で約30～60%及び層流域( $Re \leq 2,700$ )で約20%高くなっている。この原因としては、模擬燃料棒と流路との間隔を一定に保つ目的で設置されたスペーサ・リブが伝熱促進体として有効に寄与したこと、及び両面加熱の影響等が考えられる。

本試験から求めたヌッセル数は、次式で整理できる。

$$Nu = 0.215 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad ; \quad Re > 2,000 \quad (3.2.2)$$

Table 3.2.1 Analytical conditions (1)

Analysis number	Dimension of heating element		Heat-generation rate (MW/m <sup>3</sup> )	Reynolds number	Heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> ·K)	He gas temperature (K)
	pitch (mm)	width (mm)				
1	21.4	16.8	474.1	11,600	1318.6	774.9
2	21.4	16.8	285.8	5,000	732.6	785.9
3	21.4	16.8	61.5	1,600	284.7	784.2
4	21.4	16.8	31.7	5,700	678.1	626.6
5	21.4	16.8	46.8	4,900	854.0	974.0

Table 3.2.2 Analytical conditions (2)

Analysis number	Heat-generation rate (MW/m <sup>3</sup> )	Reynolds number	Heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> ·K)		He gas temperature (K)	Length of unheating section (mm)
			Upper stage	Lower stage		
1	474.1	10,000	1318.6	1339.5	795.4	110
2	285.8	4,900	732.6	749.3	807.5	110
3	61.5	1,600	284.7	309.7	803.7	110
4	198.2	12,400	1067.4	1180.5	524.1	41
5	59.6	3,500	418.6	468.8	521.9	41

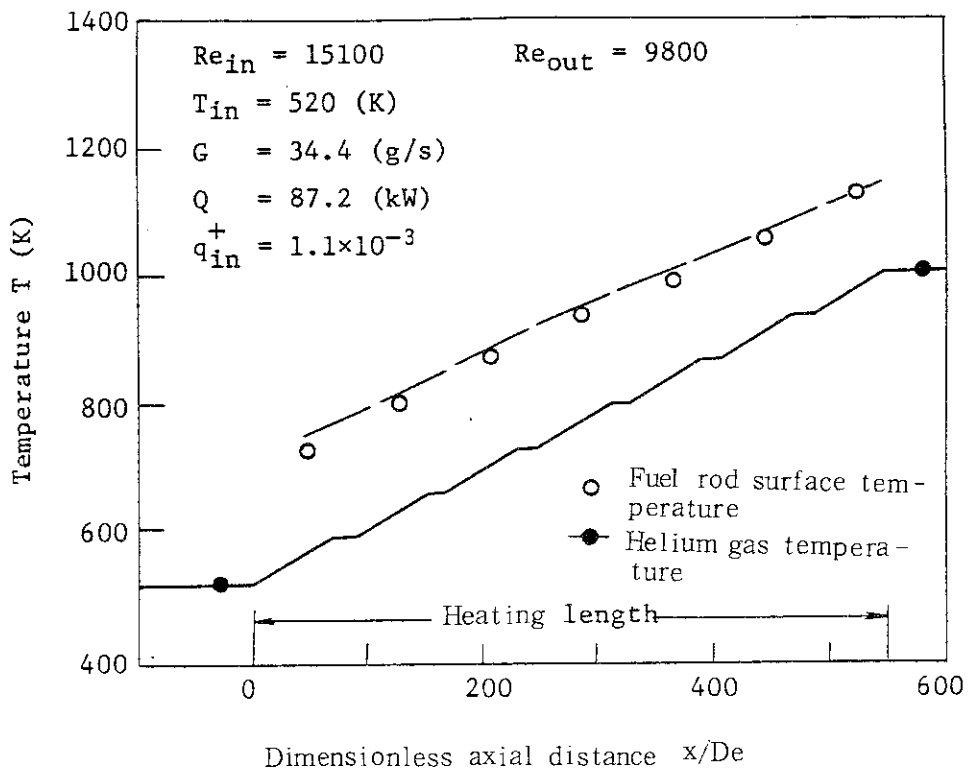


Fig. 3.2.1 Temperature profile for  $Re_{in} = 15,000$   
 (---- : Calculated value obtained from eq. (2.3.7))

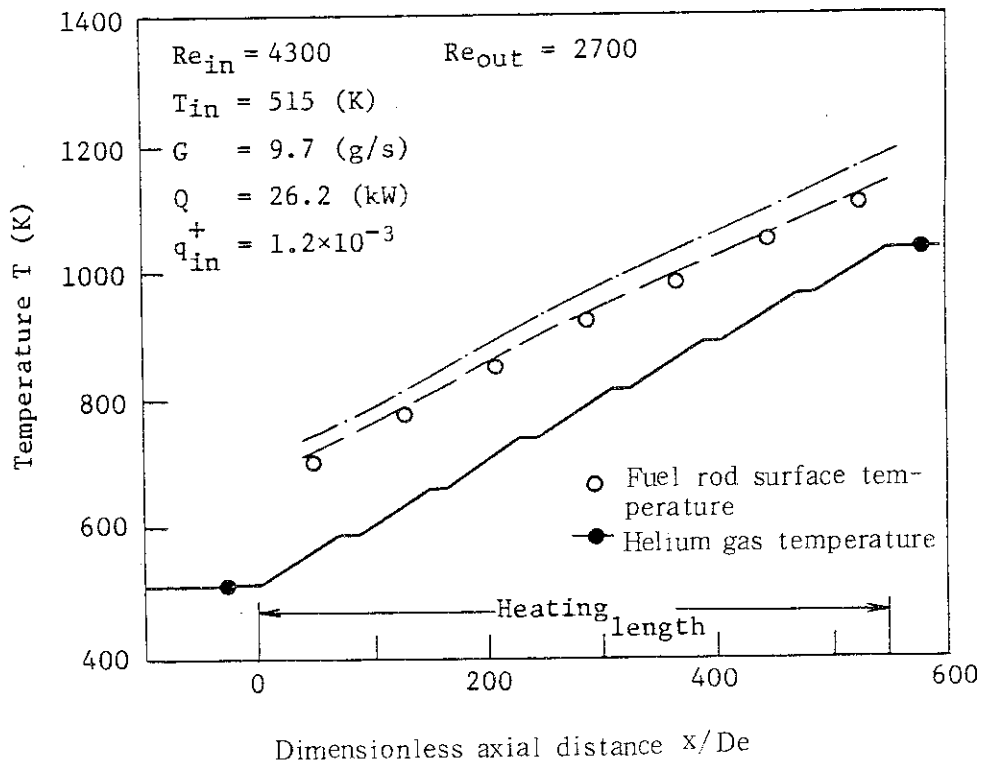


Fig. 3.2.2 Temperature profile for  $Re_{in} = 4,300$   
 (---- : Calculated value obtained from eq. (2.3.7))  
 (----- : Calculated value obtained from eq. (2.3.8))



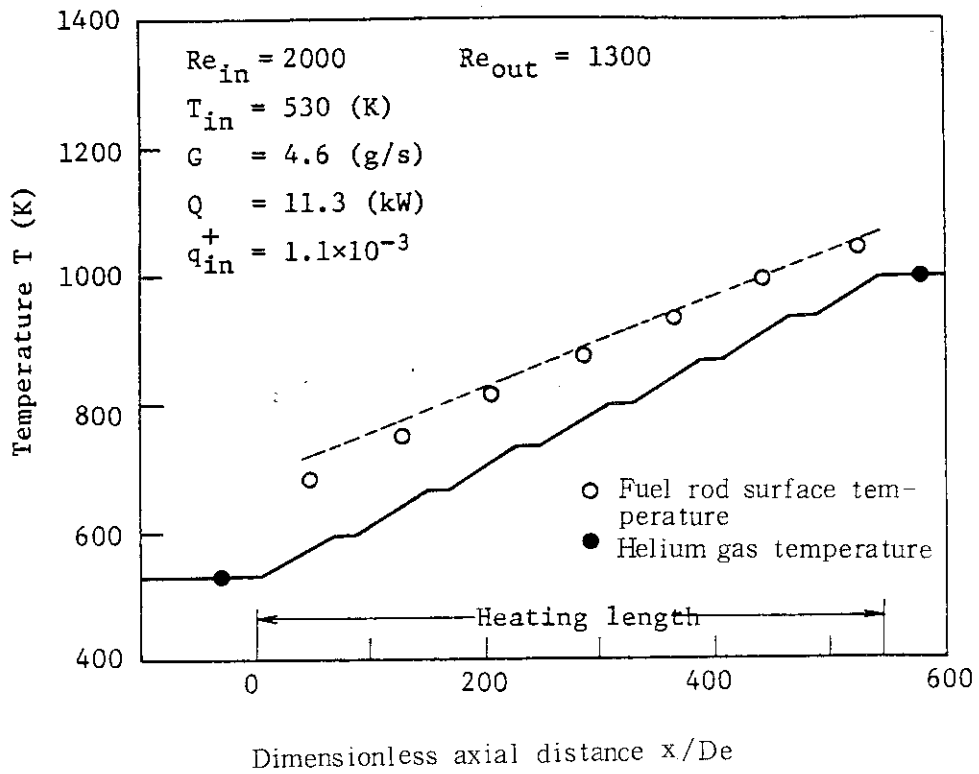


Fig. 3.2.3 Temperature profile for  $Re_{in} = 2,000$   
 (----- : Calculated value obtained from eq. (2.3.9))

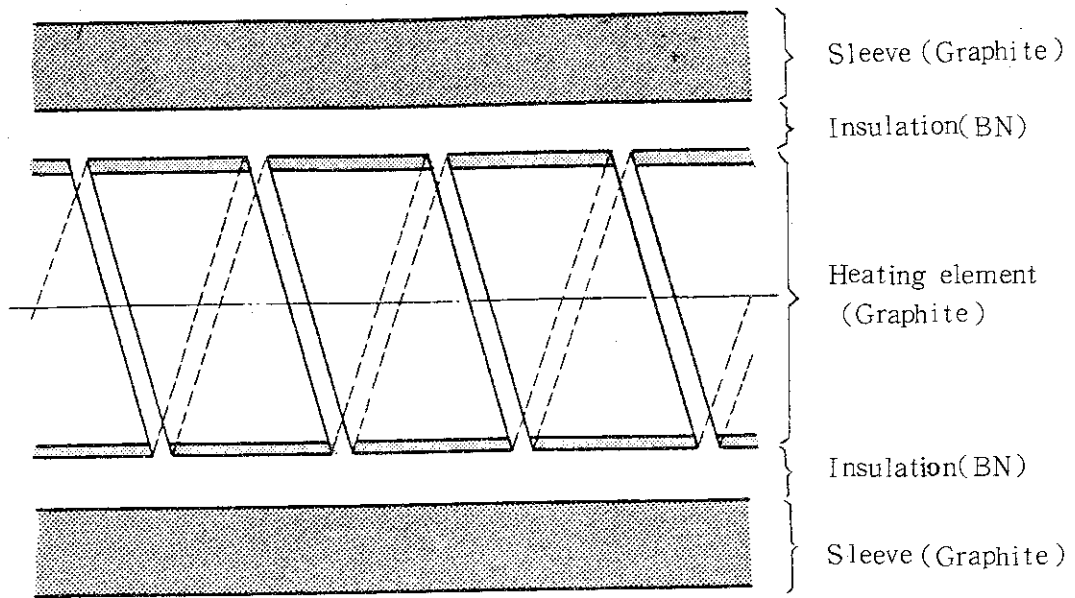


Fig. 3.2.4 Longitudinal section of simulated fuel rod

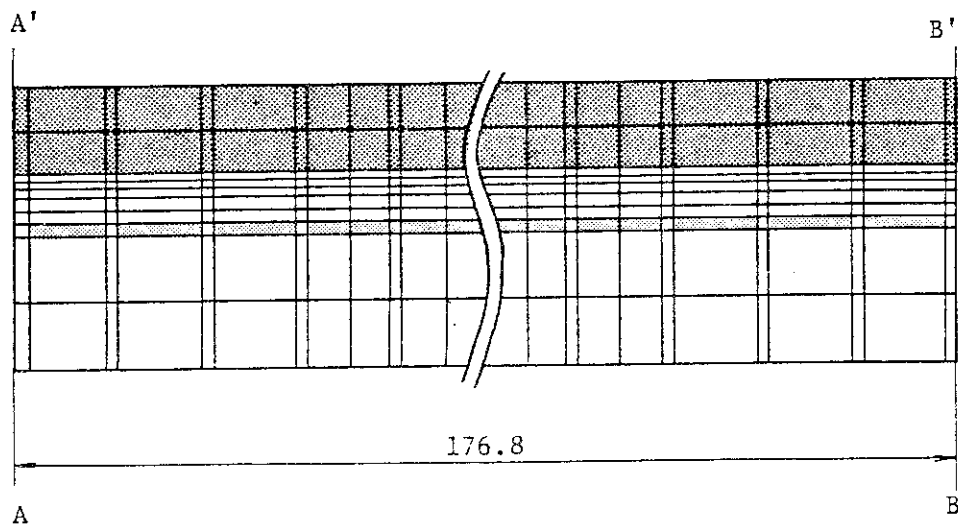


Fig. 3.2.5 Calculation mesh

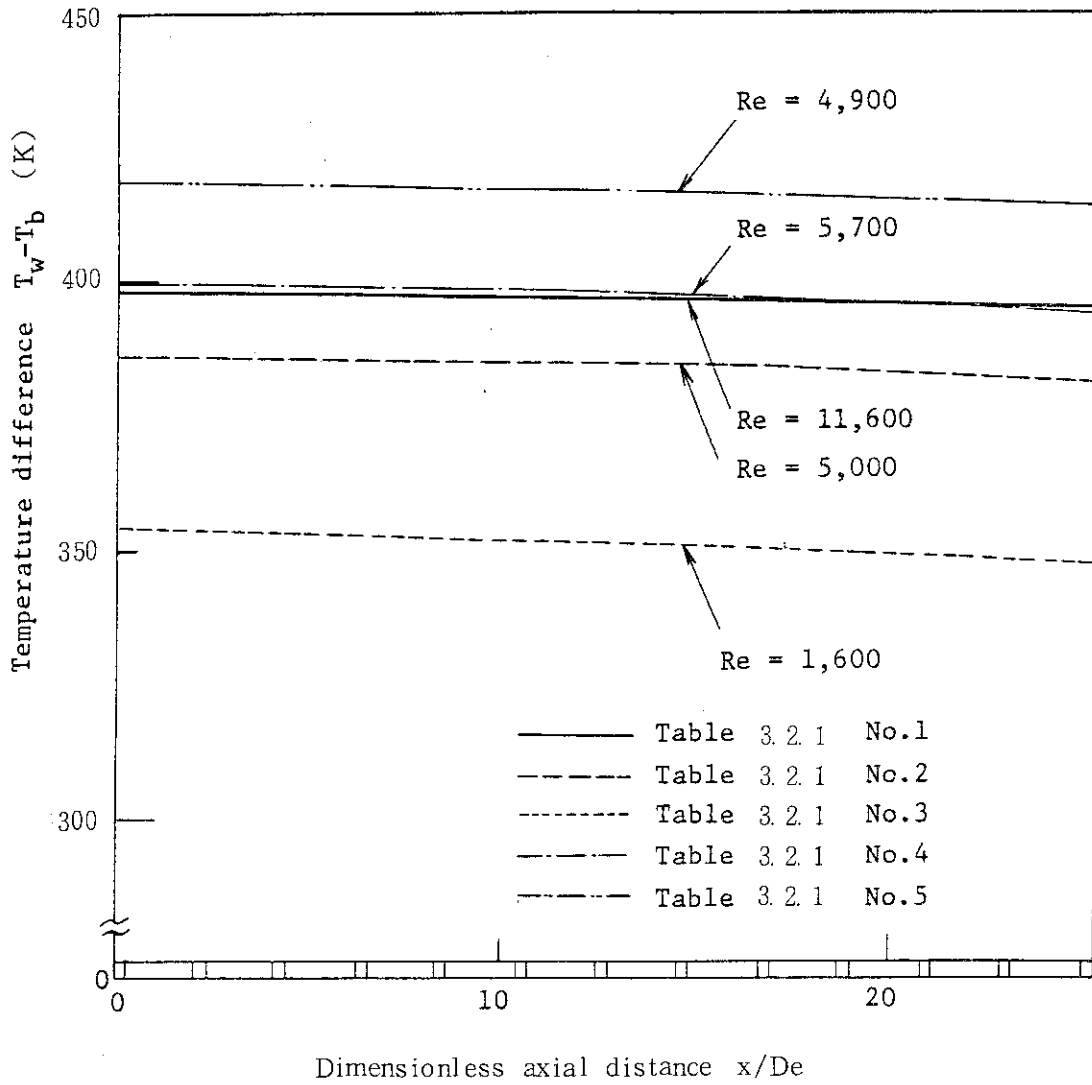


Fig. 3.2.6 Relationship between temperature difference ( $T_w - T_b$ ) and dimensionless axial distance  $x/De$

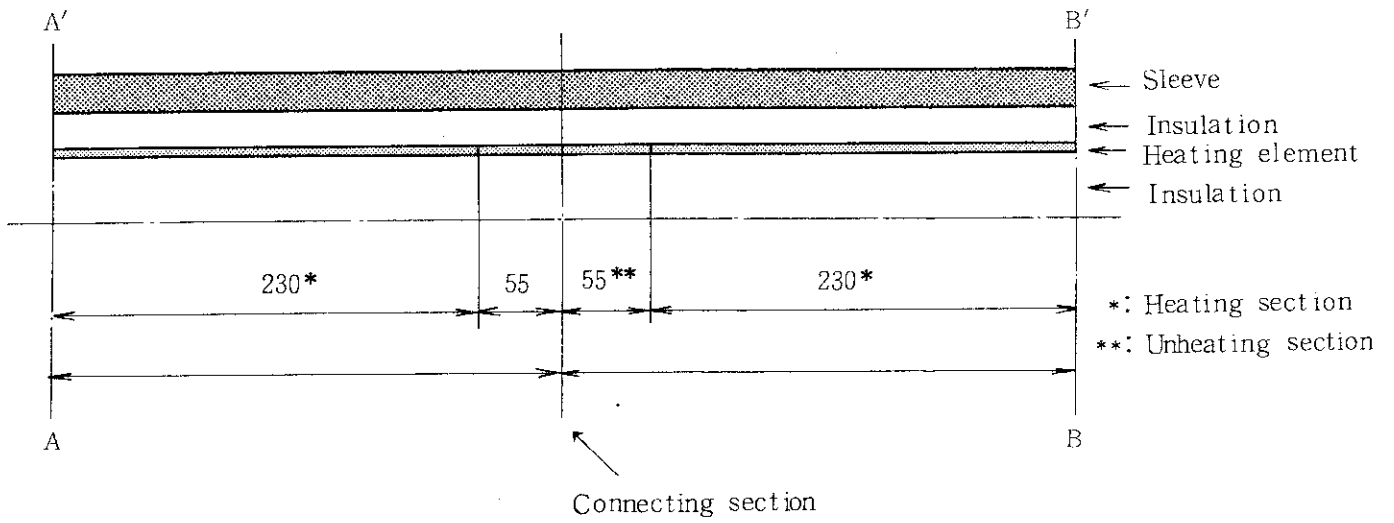


Fig. 3.2.7 Analytical model

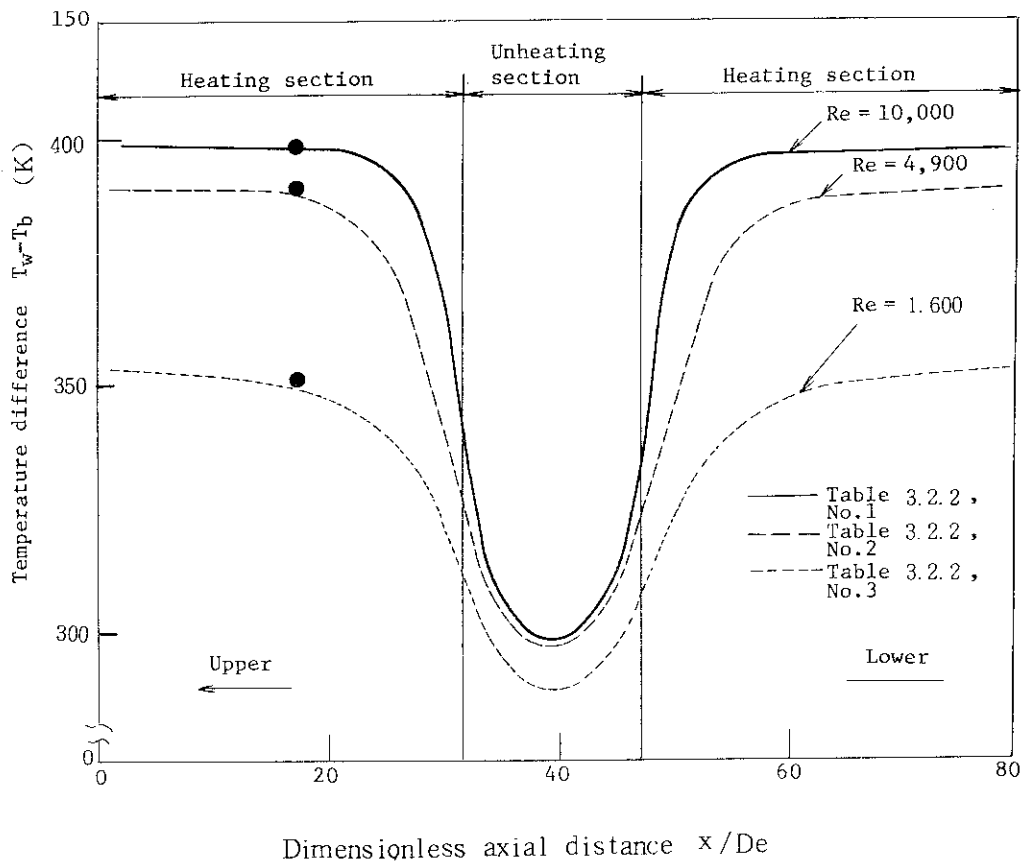


Fig. 3.2.8 Influence of connecting section of fuel rod model

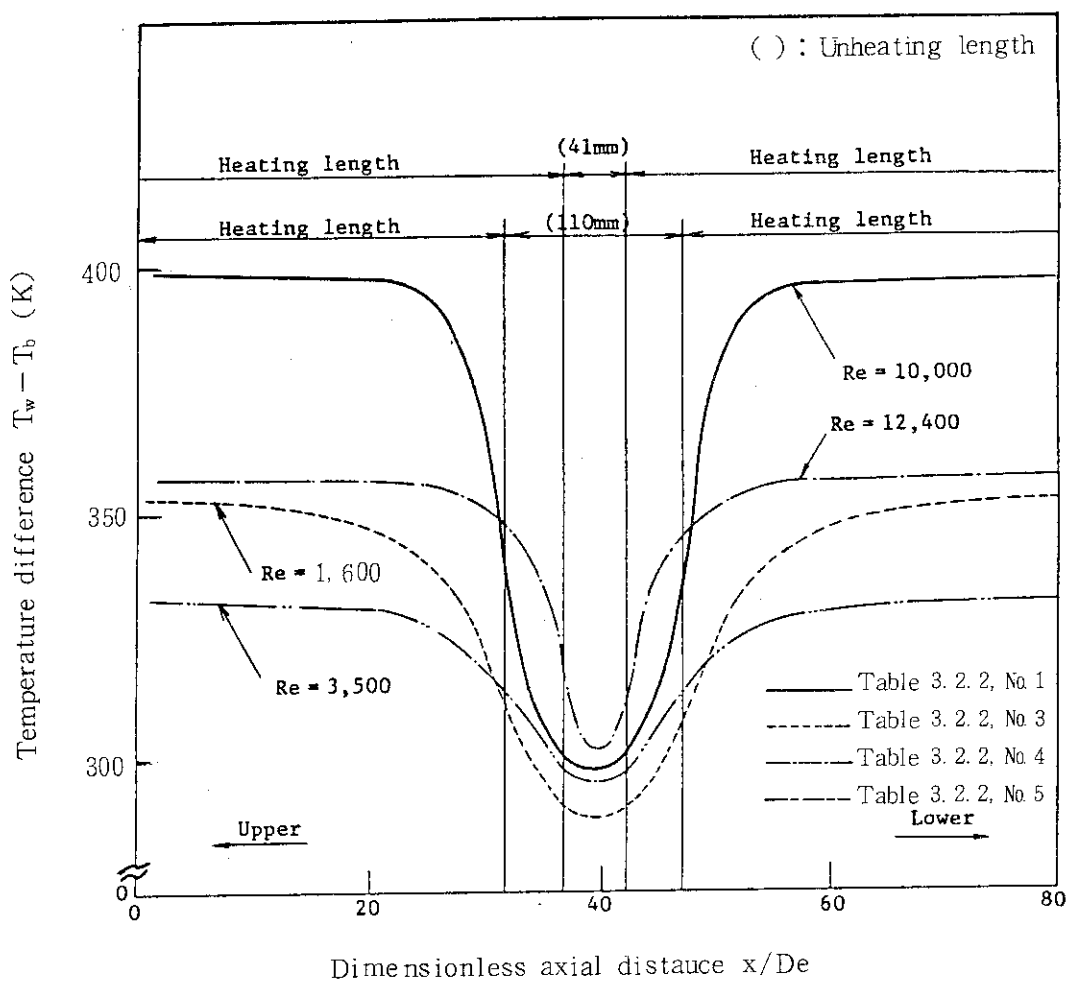


Fig. 3.2.9 Influence of unheating section of simulated fuel rod

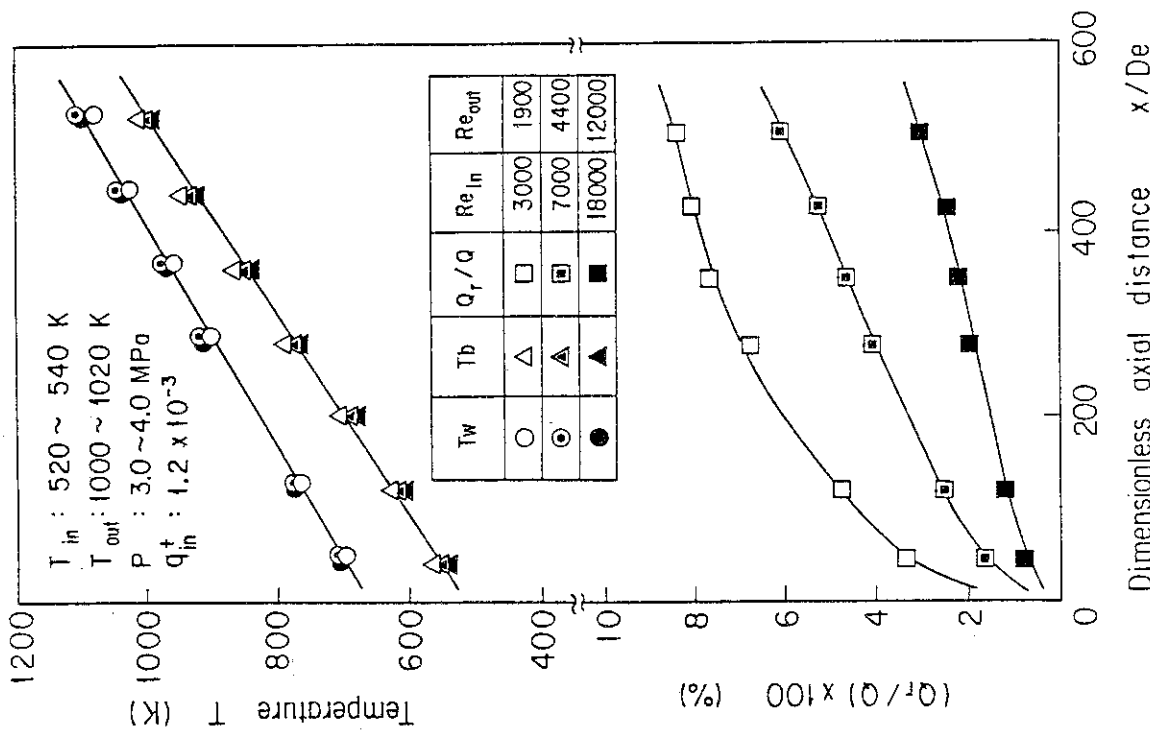


Fig. 3.2.10 Temperature profiles between well and tube, and radiant heat transfer rate in the flow direction

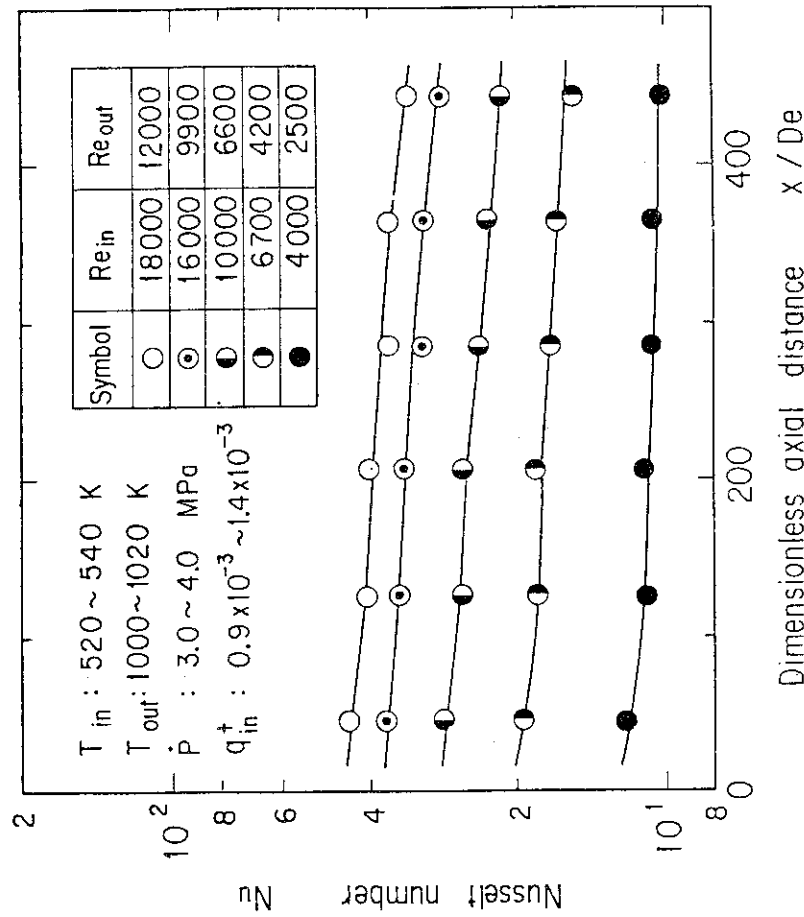


Fig. 3.2.11 Nusselt numbers in the flow direction

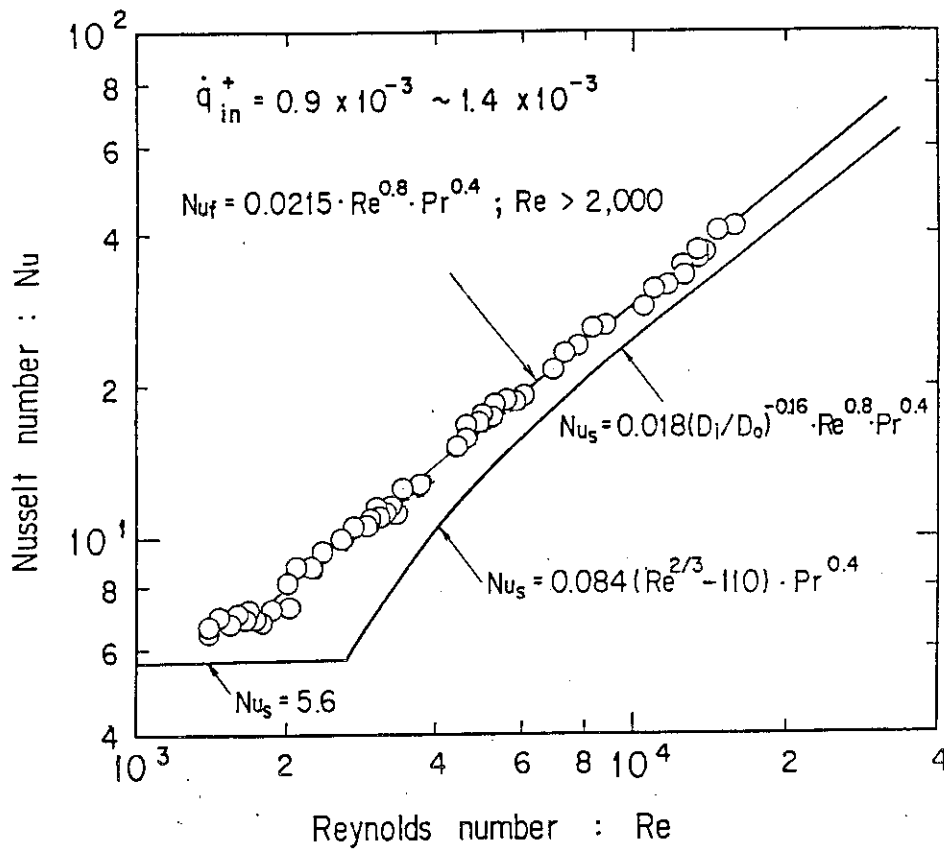


Fig. 3.2.12 Relationship between Nusselt number and Reynolds number

## 4. 結 言

多目的高温ガス炉の燃料棒は、加熱面上にスペーサ・リップを有するが、それとはほぼ同様の模擬燃料棒を用いて等温流試験と加熱試験を行った。試験条件は、冷却材にHeガス（環状流路入口最大620K、4.0MPa）、流路は内径46mm、外径53mm、内外径比0.865の環状流路である。また、使用した模擬燃料棒は、流れ方向に対して一様な発熱分布を有している。

本試験の結果、次のことが分かった。

### (1) 摩擦係数

等温流時の摩擦係数  $f$  は、平滑環状流路の摩擦係数の式 (2.3.10) よりも大きく、

$$f_0 = 0.127 \cdot Re^{-0.28} \quad ; \quad Re > 2,500 \quad (3.1.2)$$

で整理される。

### (2) 熱伝達率

1) 熱伝達率は、 $2,000 < Re < 20,000$  の範囲で、平滑環状流路の値に比べて約20~60%大きい。また、乱流域から層流域にかけて熱伝達率は乱流熱伝達の傾向を示しながら減少し、平滑流路に見られるような傾向は見られない。これは、主として伝熱面上に設置したスペーサ・リップによる伝熱促進効果によるものと考えられる。

2) 模擬燃料棒のヌッセルト数は、次式で整理できる。

$$Nu = 0.0215 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad ; \quad Re > 2,000 \quad (3.2.2)$$

今後は、実験炉の伝熱条件をより一層模擬するために、模擬燃料棒の発熱分布が軸方向に不均一な場合について検討を行う予定である。

## 謝 辞

終りに、本報を執筆するに当たり適切な助言を頂いた原研高温工学部佐野川好母部長、データ解析に協力頂いたHENDEL開発試験室近藤康雄氏及び本試験を遂行するに当たって多大な協力を頂いたHENDEL管理室の方々に、深く感謝致します。



## 4. 結 言

多目的高温ガス炉の燃料棒は、加熱面上にスペーサ・リブを有するが、それとほぼ同様の模擬燃料棒を用いて等温流試験と加熱試験を行った。試験条件は、冷却材にHeガス（環状流路入口最大620K, 4.0MPa）、流路は内径46mm, 外径53mm, 内外径比0.865の環状流路である。また、使用した模擬燃料棒は、流れ方向に対して一様な発熱分布を有している。

本試験の結果、次のことが分かった。

### (1) 摩擦係数

等温流時の摩擦係数  $f$  は、平滑環状流路の摩擦係数の式 (2.3.10) よりも大きく、

$$f_0 = 0.127 \cdot Re^{-0.28} \quad ; \quad Re > 2,500 \quad (3.1.2)$$

で整理される。

### (2) 熱伝達率

1) 熱伝達率は、 $2,000 < Re < 20,000$  の範囲で、平滑環状流路の値に比べて約20~60%大きい。また、乱流域から層流域にかけて熱伝達率は乱流熱伝達の傾向を示しながら減少し、平滑流路に見られるような傾向は見られない。これは、主として伝熱面上に設置したスペーサ・リブによる伝熱促進効果によるものと考えられる。

2) 模擬燃料棒のヌッセルト数は、次式で整理できる。

$$Nu = 0.0215 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad ; \quad Re > 2,000 \quad (3.2.2)$$

今後は、実験炉の伝熱条件をより一層模擬するために、模擬燃料棒の発熱分布が軸方向に不均一な場合について検討を行う予定である。

## 謝 辞

終りに、本報を執筆するに当たり適切な助言を頂いた原研高温工学部佐野川好母部長、データ解析に協力頂いたHENDEL開発試験室近藤康雄氏及び本試験を遂行するに当たって多大な協力を頂いたHENDEL管理室の方々に、深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) 例えば, 安野武彦, 他: JAERI-M 8399 (1979)。
- (2) 菱田 誠, 他: 第 21 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, K 104 (昭 59)。
- (3) 高瀬和之, 他: 原子力誌, 投稿中。
- (4) M. Dalle Donne, E. Meerwald : Int. J. Heat Mass Transfer, 9 (1966), 1361.
- (5) M. Dalle Donne, E. Meerwald : Int. J. Heat Mass Transfer, 16 (1973), 787.
- (6) B.N. Furbar, W.J. Green and et al. : Paper FC3.3 4th International Heat Transfer Conference (1970).
- (7) W.M. Kays, P.A. Leung : Int. J. Heat Mass Transfer, 6 (1962), 537.
- (8) R.E. Lunderg, P.A. McCuen and et al. : Int. J. Heat Mass Transfer, 6 (1963), 495.
- (9) A.P. Hatton, A. Quarrby : Int. J. Heat Mass Transfer, 5 (1962), 973.
- (10) J.A. Brighton, J.B. Jones : J. Basic Eng., Trans. ASME, D, 86 (1964), 835.
- (11) H. Hausen : Wärme-und Stoffübergung, 7 (1974), 222.
- (12) 藤井貞夫, 他: 第 17 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, A 213 (昭 55)。
- (13) 井沢直樹, 他: 原子力誌, 投稿中。
- (14) 下村寛昭, 他: 原子力誌, 26 - 4 (1984), 239。
- (15) 田中利幸, 他: 原子力誌, 26 - 4 (1984), 318。
- (16) H. Blasius : Forsh, Geb. Ing.-Wes., (1913), 131.
- (17) 富田久三郎: 機械誌 1 - 5 (昭 10)。
- (18) 幾島 毅: JAERI-M 84 - 017 (1984)。
- (19) 甲藤好郎, 伝熱概論, 養覽堂 (1980), 380。
- (20) A. Goldsmith and et al. : "Handbook of Thermophysical Properties of Solid Materials", (1961).
- (21) 牧野俊郎, 他: 機論, 49 - 441 (昭 58), 1040。