

JAERI - M
90-017

燃料体スタック実証試験部(T₁)
多チャンネル試験結果・II
(不均一発熱試験結果)

1990年2月

日野竜太郎・高瀬 和之・丸山 創・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。
入手の問い合わせは、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, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

燃料体スタック実証試験部 (T₁) 多チャンネル試験結果・II
(不均一発熱試験結果)

日本原子力研究所東海研究所高温工学部
日野竜太郎・高瀬和之・丸山 創[†]・宮本喜晟

(1990年1月24日受理)

高温工学試験研究炉の炉心熱流設計および安全性の評価に寄与するため、大型ヘリウムガスループ (HENDEL) の燃料体スタック実証試験部 (T₁) では、模擬燃料体カラム模型「多チャンネル試験装置」を用いて、ヘリウムガスを 750 °C まで加熱する中温試験を行った。

本報は、模擬燃料体カラムに装荷した 12 本の模擬燃料棒の発熱量を不均一にした場合と、傾斜状に変化させて実機燃料体カラム内の発熱分布を模擬した場合の中温試験結果についてまとめたものである。本試験により、極端な発熱分布及び実機相当の発熱分布における流量配分特性、黒鉛ブロック内温度分布特性等が明らかとなった。

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

II. Nonuniform Power Distribution Test

Ryutaro HINO, Kazuyuki TAKASE, Soh MARUYAMA⁺
and Yoshiaki MIYAMOTO

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

(Received January 24, 1990)

Nonuniform power distribution test was performed with the multi-channel test rig of the fuel stack test section (T₁) in order to contribute the licensing of the JAERI's High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR). In the test, helium gas was heated up to 750°C under asymmetric and slantwise power distributions realized by changing input electric powers of 12 simulated fuel rods respectively.

Experimental results showed that the distribution of helium gas flow rate was influenced by the temperature distortion in the mock-up fuel stack. Calculated results with the numerical thermal analysis code indicated that the temperature distortion in the fuel stack was flattened by the thermal conduction in the graphite block.

Keywords: HTTR, Helium Gas, Power Distribution, Flow Rate, Fuel Stack, Temperature Distortion, Numerical Analysis, Graphite Block

⁺ Department of HTTR Project, Oarai Research Establishment

目 次

1. まえがき	1
2. 試験装置	3
2.1 試験装置の概要	3
2.2 試験計装	4
3. 試験データの整理方法及び試験条件	11
3.1 試験データの整理方法	11
3.2 試験条件	12
4. 試験結果	18
4.1 不平衡出力試験結果	18
4.1.1 流量配分	18
4.1.2 温度分布	19
4.2 傾斜出力試験結果	19
4.3 数値解析結果	20
5. 結 言	45
謝 辞	45
参考文献	46
付録1 ヘリウムガス物性値	47
付録2 黒鉛等の物性値	48
付録3 T _{I-M} 用中温試験用模擬燃料棒の各部寸法	49
付録4 T _{I-M} 用黒鉛ブロックの燃料孔内径	55
付録5 流路圧力損失の評価方法	56

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental apparatus	3
2.1 Outline of experimental apparatus	3
2.2 Experimental instrumentation	4
3. Data arrangement and test conditions	11
3.1 Data arrangement	11
3.2 Test conditions	12
4. Experimental results	18
4.1 Asymmetric power distribution test	18
4.1.1 Flow rate distribution	18
4.1.2 Temperature distribution	19
4.2 Slant power distribution test	19
4.3 Numerical analysis	20
5. Conclusion	45
Acknowledgement	45
References	46
Appendix 1 Properties of helium gas	47
Appendix 2 Properties of graphite and so on	48
Appendix 3 Dimensions of simulated fuel rods for T _{1-M} test	49
Appendix 4 Dimensions of fuel channels in graphite blocks of T _{1-M}	55
Appendix 5 Pressure loss estimation in test section	56

1. ま え が き

日本原子力研究所（原研）では、ヘリウムガスを冷却材とする高温ガス炉（Very High Temperature Gas-cooled Reactor ; 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（High Temperature Engineering Test Reactor ; HTTR）の開発を進めている¹⁾。現在の炉心設計は圧力4 MPaのヘリウムガスを950℃まで昇温させることを目標としており、設計及び安全性の評価のために高温高圧条件下での炉心燃料体の高温性能、健全性等の実証データが必要とされている。

そこで、原研の大型ヘリウムガスループ「大型構造機器実証試験ループ（Helium Engineering Demonstration Loop ; HENDEL）」に燃料体スタック実証試験部（ T_1 ）を設置し、HTTRの運転条件と同じ高温高圧条件のもとで燃料体の伝熱流動特性を実証する試験を進めてきた。

T_1 試験部は、燃料冷却チャンネル1本を模擬した1チャンネル試験装置と燃料体1カラムを模擬した多チャンネル試験装置から構成されている。1チャンネル試験装置は、燃料冷却チャンネルの伝熱流動特性の詳細な試験、制御棒駆動装置の性能試験等を目的とし、多チャンネル試験装置は燃料体カラムの伝熱流動特性を調べることを目的としている。ここで、燃料体1カラムは、六角柱の黒鉛ブロック内に燃料棒を装荷した燃料ブロックを積み重ね、その上下に黒鉛製の可動反射体ブロックを設置したものをいう。Fig. 1.1に燃料体の概要を示す。燃料棒は黒鉛ブロックに開けられた燃料孔に装荷され、冷却材であるヘリウムガスは燃料孔と燃料棒の隙間を下降しながら加熱される。燃料冷却チャンネルとは、燃料孔と燃料棒から構成される環状流路をいう。

多チャンネル試験装置では、実機と同じ材質の六角柱状の黒鉛ブロックに12個の燃料孔を設け、それぞれに電気発熱方式の模擬燃料棒を挿入している。したがって、12本の燃料冷却チャンネルが並列に設置された連成系であり、その伝熱流動特性についてはほとんど不明である。そこで、基礎的な伝熱流動特性を把握するために、当初、12本の模擬燃料棒出力を均一にしてヘリウムガスを約750℃まで加熱する中温試験を実施し、黒鉛ブロック内温度分布、流量配分、熱伝達率等を調べた^{2),3)}。

その後、連成系としての特性をより詳細に把握するために、12本の模擬燃料棒のうちの1本の発熱量を変化させた場合（不平衡出力試験）と、黒鉛ブロック平径方向に12本の模擬燃料棒の発熱量を傾斜させた場合（傾斜出力試験）について試験を実施し、模擬燃料棒の表面温度分布、黒鉛ブロック内温度分布、流量配分を調べた。このときの試験部出口ヘリウムガス温度は約750℃で、中温試験条件である。なお、本試験で得られたデータ及び結果は、HTTRの安全審査用データ及び資料として使用されている。HTTR用解析コードの検証に用いられた例については、文献〔4〕に詳細が報告されている。

本報では、多チャンネル試験装置の概要と試験計装、試験データの整理方法と試験条件、並びに中温試験結果について記述する。

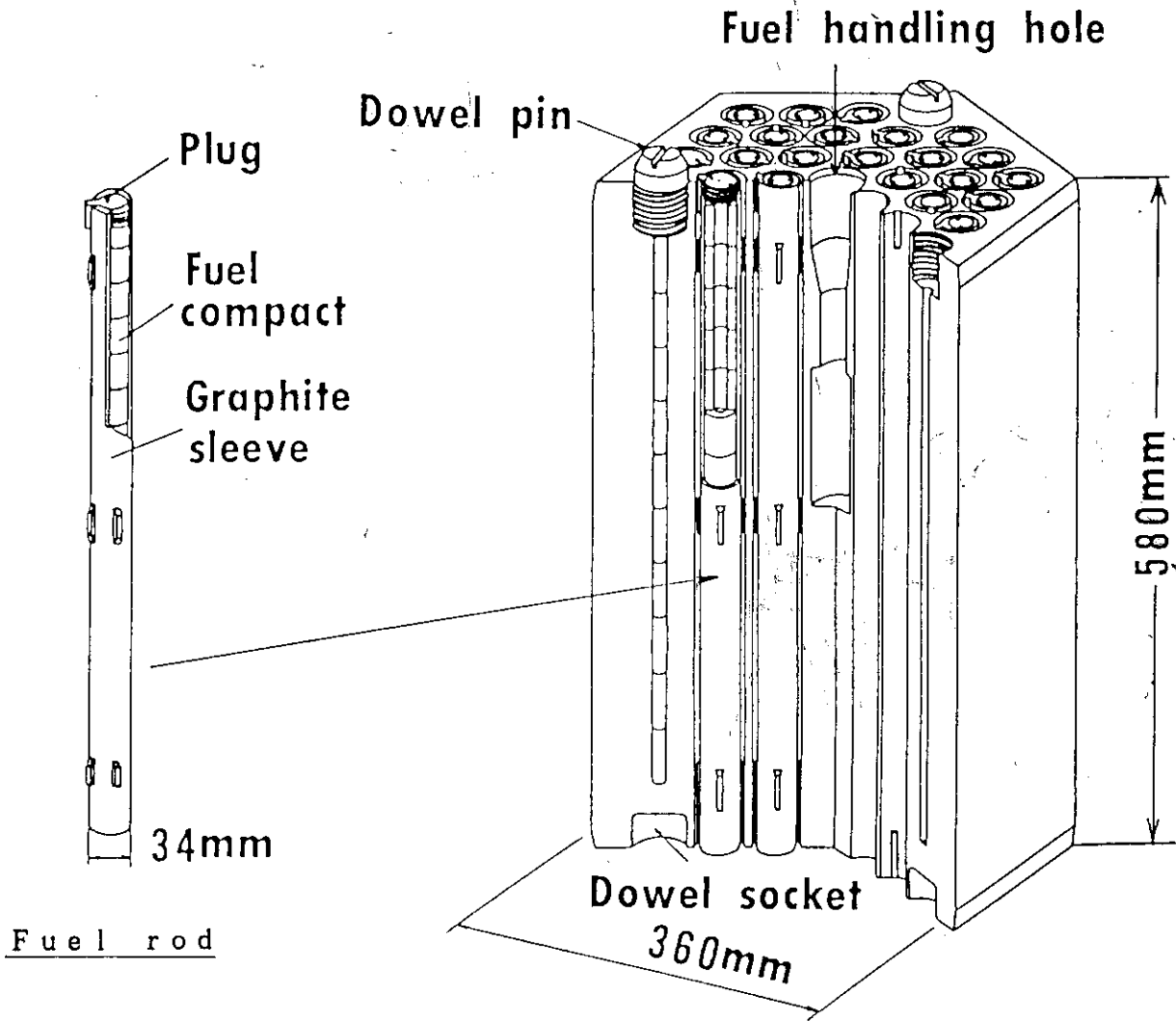


Fig 1.1 Fuel element of HTTR

2. 試験装置

2.1 試験装置の概要

T₁ 試験部は、燃料冷却チャンネル1本を模擬した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) から構成されており、既設の M₁ ループから所定の圧力、温度、流量のヘリウムガスの供給を受ける。Fig. 2.1 に T₁ 試験部の系統を示す。ガス循環機 B₁ より送り出されたヘリウムガスは加熱器 H₁ で所定の温度に調整された後、流量計を経て1チャンネル試験装置と多チャンネル試験装置に流入する。流入したヘリウムガスは、それぞれの装置に装荷された模擬燃料棒により約 750 °C まで加熱された後、内蔵冷却器と冷却器 C₁ で冷却され、混合タンク MT₁、フィルター F₁ を経て再び循環機 B₁ に戻る。T₁ 試験部の詳細は文献〔5〕に報告されている。

多チャンネル試験装置の概要を Fig. 2.2 に示す。多チャンネル試験装置は、模擬燃料体カラムの試験体を中心に内蔵冷却器等を圧力容器内に収納した構造で、圧力容器の上部より所定の温度、圧力、流量でヘリウムガスが流入し、内蔵冷却器を経て流出する。模擬燃料体カラムは、炉心燃料体1カラムを実寸規模で模擬したものであり、模擬燃料棒と黒鉛ブロックで構成される。

黒鉛ブロックは、高さ 570 mm、面間距離 299 mm の六角柱状をしており、鉛直方向に 11 段積み重ねた構造である。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 段目と 10, 11 段目は非加熱の上部・下部可動反射体領域を模擬している。本報では、燃料体領域の黒鉛ブロックを燃料ブロックと呼ぶ。上部・下部可動反射体及び燃料ブロックには、直径 53 mm の冷却材流路が 12 個設けられており、それぞれの流路に外径 46 mm の模擬燃料棒②が挿入されている。なお、燃料ブロックの冷却材流路は燃料孔とも称する。約 260 °C のヘリウムガスは、内径 53 mm の燃料孔と外径 46 mm の模擬燃料棒との隙間の環状流路③ (燃料冷却チャンネル) を下降しながら約 750 °C まで加熱される。

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⑤を介して補償ヒータブロック⑥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組み込んだもので、燃料体のガードヒータとして機能する。模擬燃料体カラムの下方には、1000 °C 程度のヘリウムガスを 200 °C 以下に冷却できる内蔵冷却器⑦が設置されている。なお、模擬燃料棒には流路の保持等のためにスペーサ・リブ④が取り付けられており、燃料冷却チャンネルは突起付きの環状流路である。

使用した模擬燃料棒の構造を Fig. 2.3 に示す。模擬燃料棒は、外径 31.6 mm のシースヒータに、外径 46 mm、全長 570 mm の黒鉛スリーブを合計 7 本差し込み、接続した構造である。シースヒータは、インコネル 600 製シースの内部に、有効発熱長 530 mm のニクロム 5 製発熱体を中間電極を介して 7 段連結した構造である。発熱体の周囲には、窒化ホウ素 (BN) を充てんして、電気絶縁性を保持している。模擬燃料棒各段 (サブロッド) の長さは、黒鉛ブロックの高さと同じ 570 mm である。発熱体は、模擬燃料棒の上部・下部電極からの交流直接通電により発熱する。

模擬燃料棒の軸方向の発熱分布はほぼ一様である。黒鉛スリーブは、実機燃料棒スリーブとほぼ同じ材質の黒鉛を用い、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・リブを取り付けて実機の形状を模擬している。12本の模擬燃料棒の出力は、それぞれ単独に0～100kWの範囲で変化させることができる。

2.2 試験計装

多チャンネル試験装置における試験計測点の概要をFig.2.4に、計測項目とその点数をTable 2.1にそれぞれ示す。模擬燃料棒表面温度は、各段のサブロッドの黒鉛スリーブ上端から410mmの位置に取り付けたK型シース熱電対(φ1.6mm)により測定される。熱電対は、黒鉛スリーブ内面に掘られた溝に沿って導かれ、計測点近傍で黒鉛スリーブを貫通し、表面に掘られた溝に導かれる。熱電対の先端は表面に埋め込まれた金属製のピンに溶接固定されている。上記の計測点の位置は温接点の位置である。模擬燃料棒の上部電極リード棒には各燃料冷却チャンネルの入口ガス温度を計測するためのK型シース熱電対(φ1.6mm)が取り付けられている。

燃料ブロックの温度はFig. 2.5に示すように、ブロックの上端より285mm下方の外面上のA点及びB点、さらに上端より410mm下方の断面内のC점에設置したK型シース熱電対(φ3.2mm)で測定される。とくに、2段目の燃料ブロックについてはD～H点を追加し、中心角30°の断面内温度分布を測定できるようにしている。

また、燃料ブロック下部の下部可動反射体の12個の燃料冷却チャンネルにはピトー管とK型シース熱電対(φ3.2mm)が設置され、それぞれの流路を流れるヘリウムガス流量と出口ガス温度が計測される。そのほか、試験体入口・出口に設けられた導圧管により、入口・出口圧力と試験部全体の圧力損失が計測される。

Table 2.1 List of measuring items

	Item	Number
Temperature	Helium gas temperature	
	(1) Inlet temperature (Upper plenum)	1
	(2) Channel inlet temperature	12
	(3) Channel outlet temperature	12
	(4) Outlet temperature (Bottom plenum)	1
	Surface temperature of simulated fuel rod	84 (7X12)
Pressure	Fuel block temperature (Surface)	18
	" (Internal)	12
	Temperature of compensation heater block	18
	Static pressure at inlet of test region	1
Flow rate	Static pressure at outlet of test region	1
	Differential pressure between inlet and outlet of test region	1
	Total flow rate	1
Input power	Helium gas velocity at channel outlet	12
	Electric power of simulated fuel rod	12

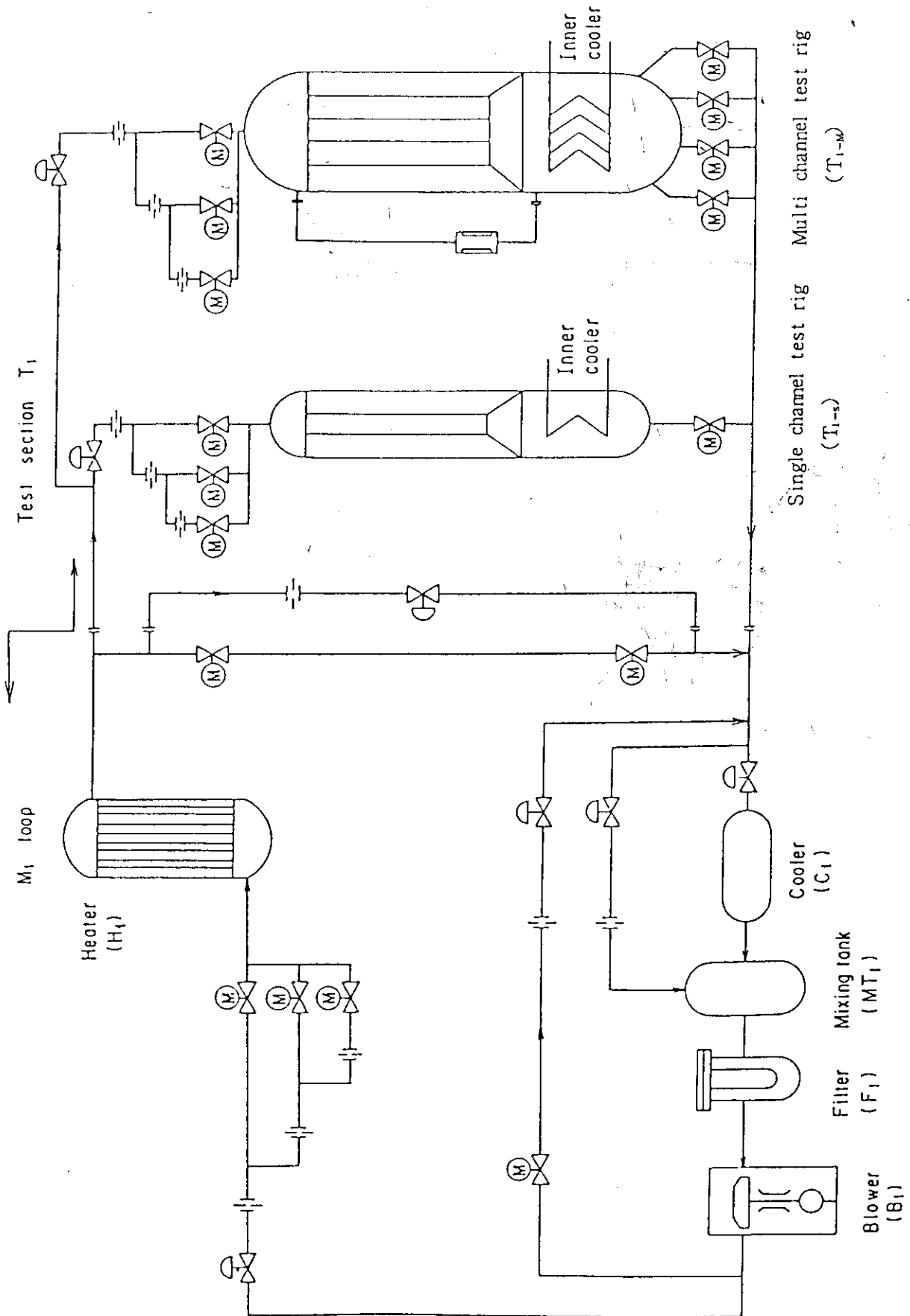


Fig.2.1 Flowsheet of M₁ loop and T₁ test section

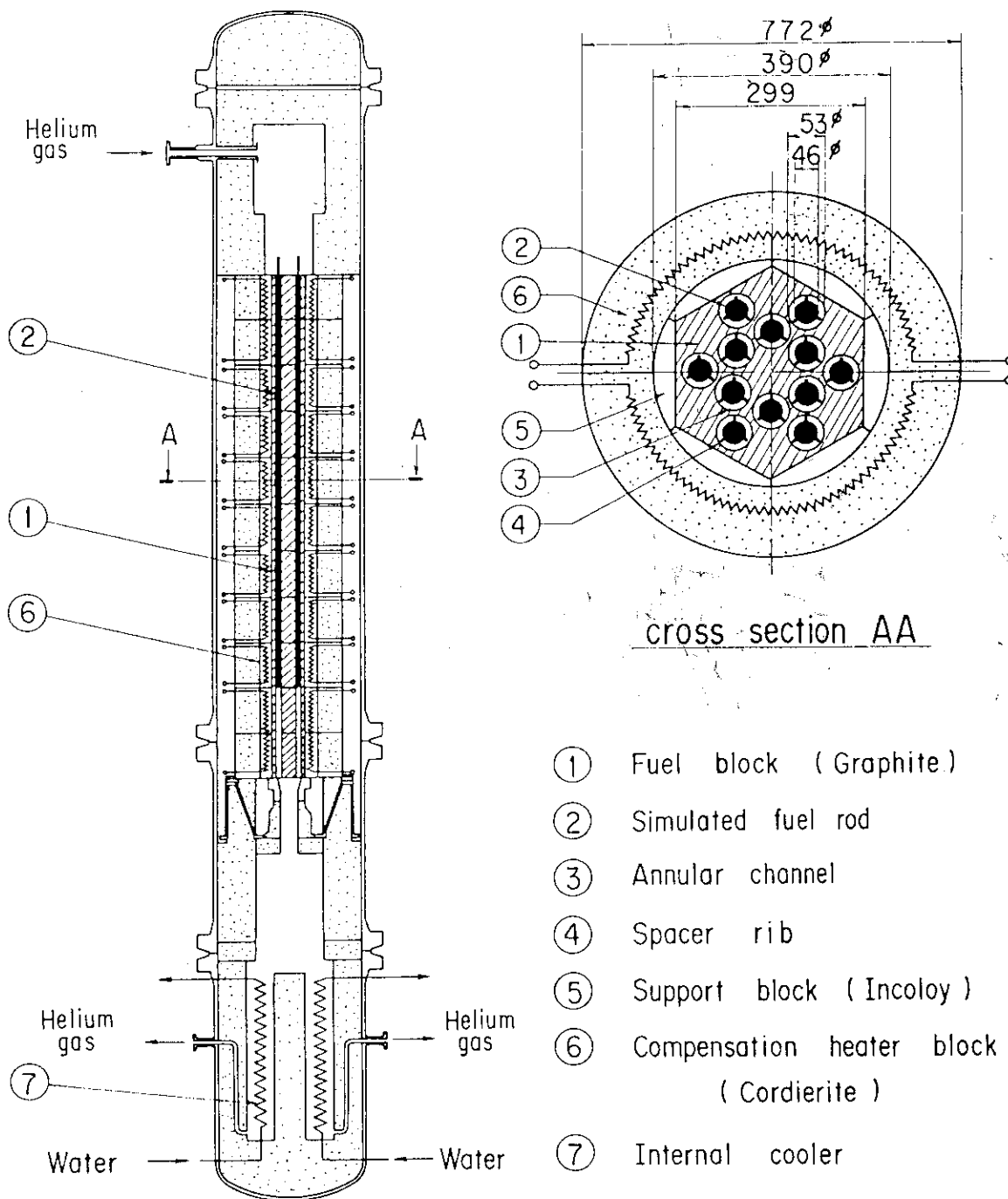


Fig.2.2 Schematic drawing of multi-channel test rig (T₁-M)

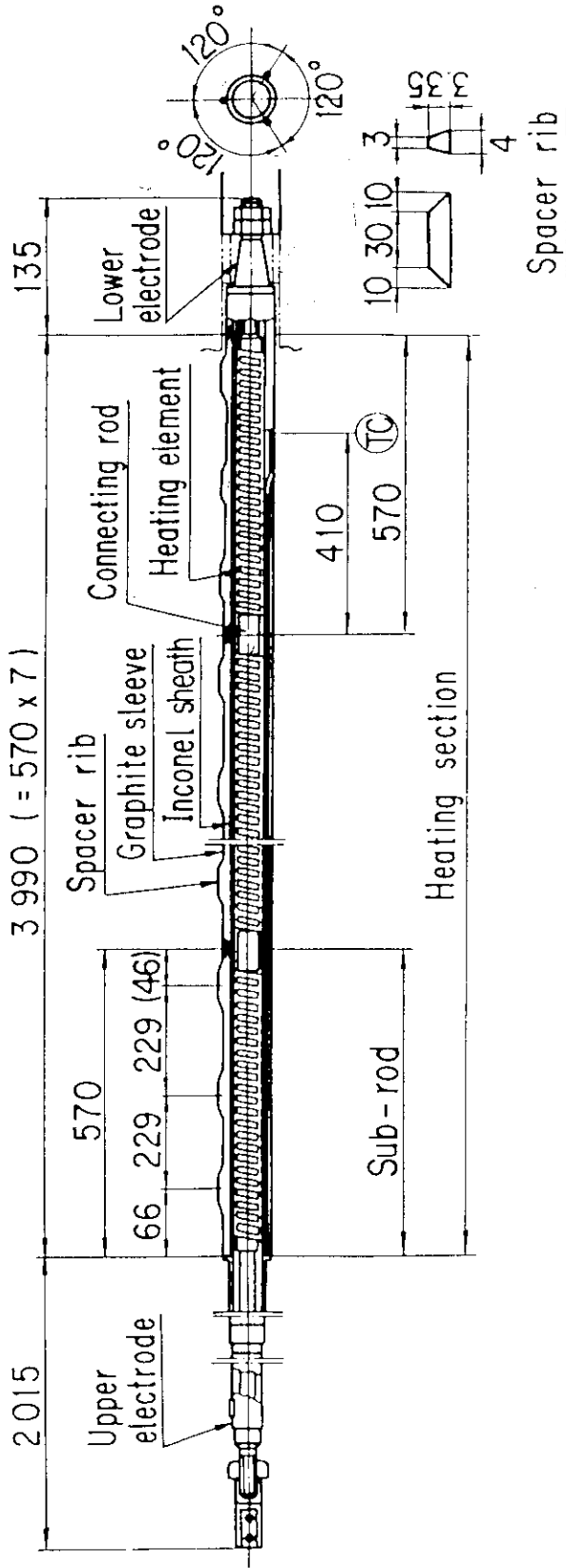
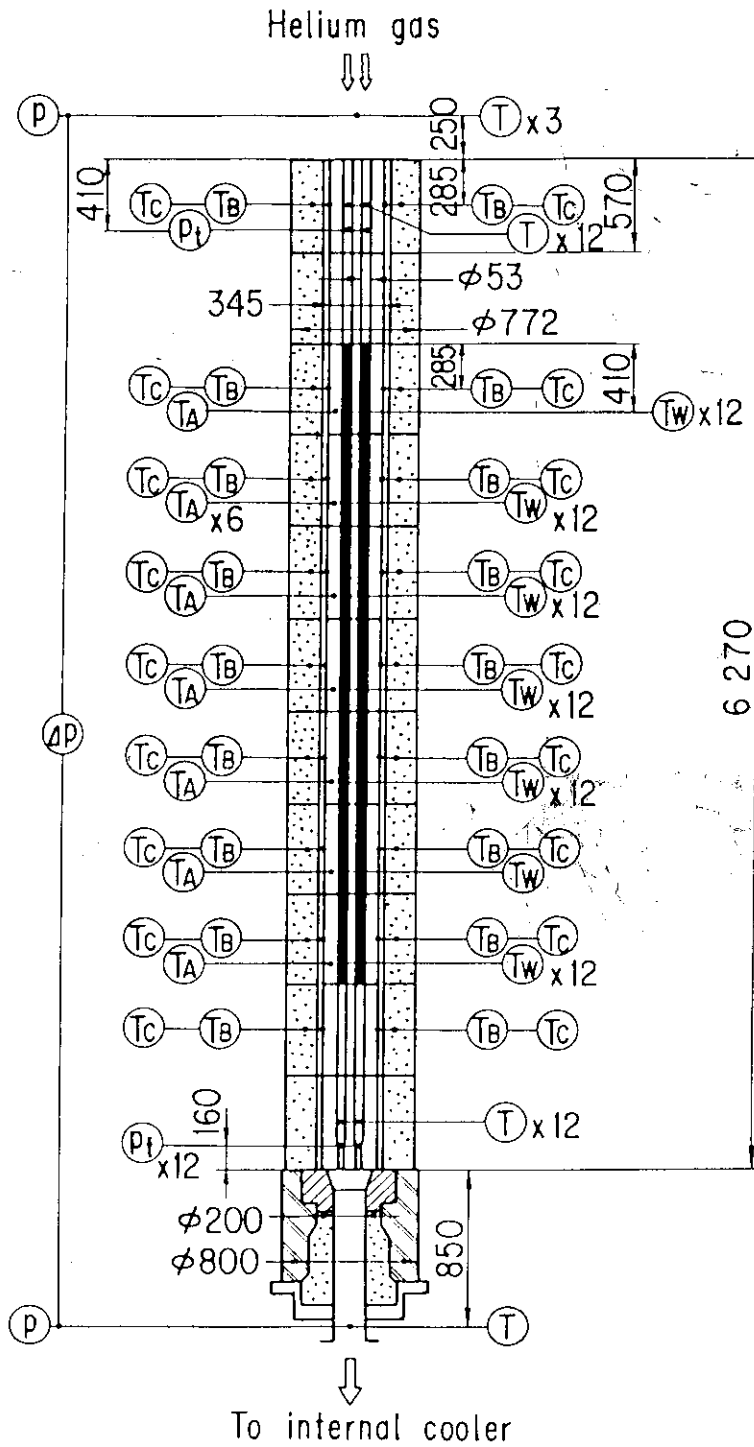


Fig.2.3 Schematic drawing of simulated fuel rod (Unit: mm)



- | | |
|---|--------------------------|
| ⊙T : Helium gas temperature | ⊙P : Helium gas pressure |
| ⊙TA : Fuel block inner temperature | ⊙ΔP : Pressure drop |
| ⊙TB : Fuel block surface temperature | ⊙Pt : Pitot tube |
| ⊙TC : Compensation heater block temperature | |
| ⊙TW : Pin surface temperature | |

Fig.2.4 Axial measuring positions in multi-channel test rig

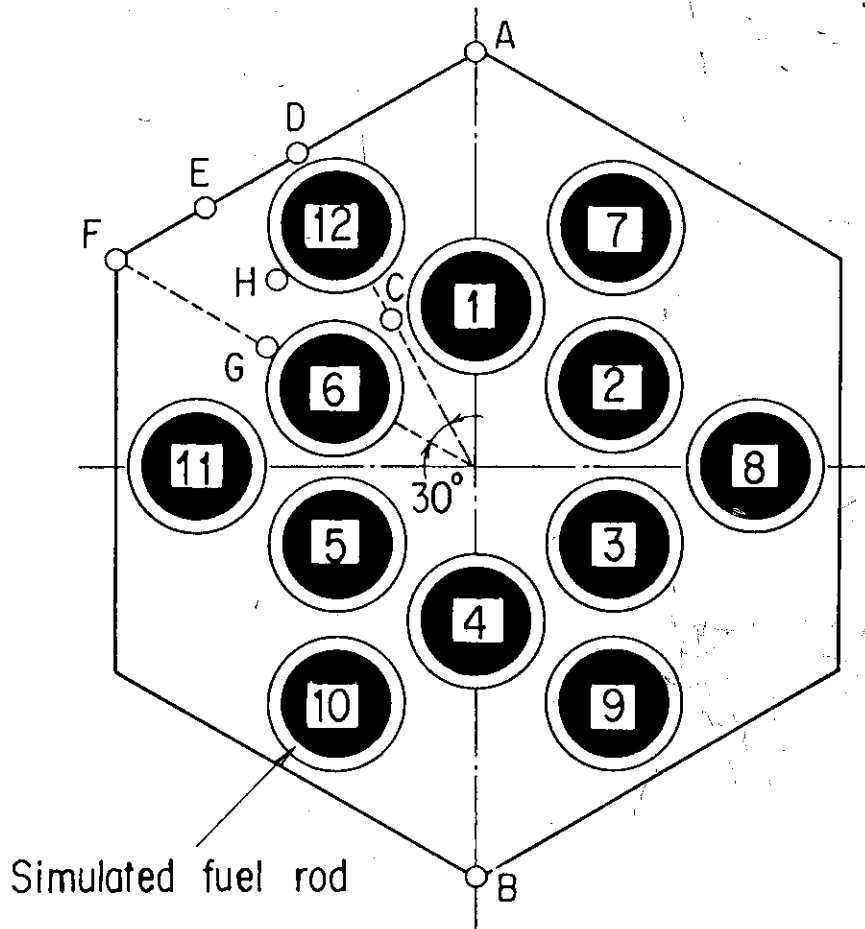


Fig.2.5 Measuring positions in graphite fuel block

3. 試験データの整理方法及び試験条件

3.1 試験データの整理方法

12本の模擬燃料棒のそれぞれの総発熱量 Q_i ($i=1\sim 12$)は、印加される電力量から換算することができるが、模擬燃料棒各段(サブロッド)の発熱量については、総発熱量と各サブロッドの発熱体の抵抗値を基にして算出しなければならない。各サブロッドの発熱量 $Q_{i,n}$ ($n=1\sim 7$)は、発熱体抵抗値の温度変化を考慮して次のようにして算出する。

- (1) 各サブロッド中央の黒鉛スリーブ表面温度を、測定した温度を基に非加熱部を考慮して算出する。これを代表温度とする。
- (2) 各サブロッドの発熱量の初期値を与える。
- (3) 黒鉛スリーブ表面温度と発熱量の初期値を基にして、
 - (a) 黒鉛スリーブ内面温度を熱伝導方程式を用いて計算する。
 - (b) インコネルシースの表面温度を、黒鉛スリーブとインコネルシースの間の薄いヘリウムガス層の熱伝導方程式を用いて計算する。このとき、インコネルシースの熱膨張も考慮する。
 - (c) インコネルシースとニクロム5発熱体表面の間の窒化ボウ素層について熱伝導方程式を計算し、ニクロム5発熱体温度を求める。
 - (d) ニクロム5発熱体温度を基にして電気抵抗値の温度変化率 β を求め、次式で電気抵抗値を算出する。

$$R_{i,n} = R_{oi,n} * \beta$$

ここで、 $R_{oi,n}$ (Ω)は常温における電気抵抗値である。

- (e) 電気抵抗値の合計 $\sum_{n=1}^7 R_{i,n}$ と各段の $R_{i,n}$ との比を基にして、各段の発熱量 $Q_{i,n}$ を次式で算出する。

$$Q_{i,n} = Q_i * R_{i,n} / \sum_{n=1}^7 R_{i,n}$$

- (4) 上記(e)で求めた $Q_{i,n}$ が初期値と一致しない場合は、これを初期値として(3)の計算を一致するまで繰り返す。

計算に使用したヘリウムガスの物性値を付録1に、黒鉛、インコネル600及びニクロム5の物性値を付録2にそれぞれ示す。

各サブロッドにおける熱流束 $q_{i,n}$ は次のようにして与える。

$$q_{i,n} = Q_{i,n} / (\pi * D_{i,n} * L_{t,i,n})$$

$D_{i,n}$: 各サブロッドの外径

$L_{t,i,n}$: 各サブロッドの有効発熱長

燃料冷却チャンネルにおけるヘリウムガスの物性値は、ヘリウムガスの混合平均温度を基にして付録1に示す式から算出し、各燃料冷却チャンネルにおける流速、レイノルズ数を次のようにして計算する。

(1) 流速

$$u_{i,n} = \frac{W_i}{S_i \cdot \rho}$$

S_i : 各段の流路断面積 ($\equiv \pi (D_{o,i,n}^2 - D_{i,i,n}^2) / 4$)

$D_{i,i,n}$: 各サブロッドの外径

$D_{o,i,n}$: サブロッドに対応する燃料孔の内径

W_i : ヘリウムガス流量

ρ : ヘリウムガス密度

(2) レイノズル数

$$Re_{i,n} = u_{i,n} \cdot De_{i,n} / \nu$$

$De_{i,n}$: 等価直径 ($\equiv D_{o,i,n} - D_{i,i,n}$)

ν : ヘリウムガスの動粘性係数

サブロッドの寸法、温度測定位置、有効発熱長等を付録3に、黒鉛ブロックの燃料孔内径を付録4に示す。

また、ピトー管による流量計測は、ピトー管部で計測された動圧と静圧の差を、ヘリウムガス物性値を基にして流量に換算する。このとき、ピトー管の流量係数について空気試験装置で調べたが、それを用いて算出した流量の合計と T_{1-M} 入口で計測した総ヘリウムガス流量 W とは必ずしも一致しない。そこで、算出した流量とその合計との比を基にして、総ヘリウムガス流量から各燃料冷却チャンネルを流れる流量を求めた。算出方法は4.1.1項に記してある。

3.2 試験条件

不平衡出力試験は、燃料棒の発熱量が極端に変化したときを想定した試験である。このような出力分布が発生する可能性はゼロに近いが、実機の安全解析をサポートし、かつ、このような状況でも燃料ブロックの健全性が確保されることなどを実証するために行った。不平衡出力試験条件を Table 3.1～3.3 に示す。表中の Re_{in} は、12本の燃料冷却チャンネル入口におけるレイノルズ数を平均した値を表す。レイノルズ数の定義は前述した通りである。ヘリウムガス流量は T_{1-M} 入口で計測した総ヘリウムガス流量を表す。

ところで、実機炉心の反応度は制御棒を挿入した制御ブロックを中心として、その周囲6カラムの燃料体で取り囲んだ1領域ごとに制御される。このときの領域内の中性子束分布は、制御棒による中性子吸収のためにすり鉢状に傾斜した分布となり、制御ブロックに近い燃料棒ほど発熱量が低下する。そのため、燃料体カラム内の発熱分布は傾斜状に変化し、それに伴って燃料ブロック断面内に大きな温度勾配を生じて熱応力を増大させる可能性がある。

そこで、このような発熱分布を模擬した試験（傾斜出力試験）を行い、燃料ブロック内部の温度分布特性、流量配分特性等を調べた。試験条件を Table 3.4 に、また、12本の模擬燃料棒の発熱分布の概要を Fig. 3.1 に示す。模擬燃料棒の発熱量は、平均発熱量 \bar{Q} に対して $\pm 10\%$ の範囲内で変化させている。この発熱変化は実機よりも多少大きめの設定である。

Table 3.1 Conditions of asymmetric power distribution test
($Re_{in} = 1800$)

Run number	0713	0714	0715	0716	0717	0718
Flow rate (g/s)	49.2	49.5	49.3	49.5	49.4	49.5
Inlet gas temp. (°C)	255	256	256	256	257	257
Pressure (MPa)	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94
Re_{in} (Inlet Reynolds number)	1820	1830	1830	1830	1830	1830
Power (kW)						
Channel #1	8.7	8.6	8.6	8.6	8.6	8.7
#2	8.7	8.7	8.6	8.6	8.6	8.6
#3	8.5	8.6	8.5	8.6	8.5	8.5
#4	8.9	8.9	8.8	8.8	8.8	8.8
#5	8.7	8.6	8.6	8.7	8.6	8.6
#6	0.0	4.4	6.5	8.6	10.8	12.9
#7	8.6	8.6	8.6	8.5	8.6	8.6
#8	8.6	8.6	8.5	8.5	8.6	8.6
#9	8.7	8.7	8.7	8.7	8.6	8.7
#10	8.7	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6
#11	8.7	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6
#12	8.7	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6

Table 3.2 Conditions of asymmetric power distribution test
($Re_{in} \approx 4500$)

Run number	0719	0720	0721	0722	0723	0724
Flow rate (g/s)	124	124	124	123	123	124
Inlet gas temp. (°C)	275	275	275	275	275	275
Pressure (MPa)	3.87	3.88	3.89	3.89	3.89	3.90
Re_{in} (Inlet Reynolds number)	4480	4480	4490	4450	4462	4478
Power Channel						
(kW)						
#1	21.4	21.4	21.5	21.5	21.5	21.5
#2	21.4	21.5	21.5	21.5	21.6	21.5
#3	21.3	21.3	21.4	21.5	21.4	21.4
#4	21.6	21.6	21.6	21.8	21.6	21.8
#5	21.4	21.4	21.5	21.5	21.5	21.6
#6	0.1	10.8	16.3	21.5	26.9	32.4
#7	21.3	21.4	21.3	21.5	21.5	21.5
#8	21.3	21.3	21.4	21.5	21.4	21.5
#9	21.6	21.5	21.6	21.6	21.6	21.6
#10	21.6	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5
#11	21.6	21.5	21.6	21.5	21.5	21.6
#12	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5

Table 3.3 Conditions of asymmetric power distribution test
($Re_{in} \approx 10000$)

Run number	0725	0726	0727	0728	0729	0731
Flow rate (g/s)	275	274	275	275	274	275
Inlet gas temp. (°C)	269	269	269	269	269	269
Pressure (MPa)	3.93	3.93	3.92	3.92	3.92	3.92
Re_{in} (Inlet Reynolds number)	10000	9990	10000	10000	9990	10000
Power (kW)	Channel					
	#1	47.7	47.7	47.7	47.7	47.7
	#2	47.7	47.8	47.7	47.8	47.9
	#3	47.7	47.7	47.5	47.7	47.7
	#4	47.9	47.9	47.8	47.9	47.8
	#5	47.8	47.8	47.7	47.8	47.6
	#6	0.0	24.0	35.7	47.7	71.5
	#7	47.6	47.6	47.5	47.7	47.7
	#8	47.8	47.7	47.6	47.7	47.7
	#9	47.9	47.8	47.9	47.9	47.7
	#10	47.6	47.7	47.7	47.8	47.7
	#11	47.9	47.7	47.7	47.8	47.6
	#12	47.7	47.7	47.7	47.7	47.7

Table 3.4 Conditions of slant power distribution test

Run number	1019	1020	1022	1023
Flow rate (g/s)	82.4	124	192	302
Inlet gas temp. (°C)	269	279	265	271
Pressure (MPa)	2.04	2.02	4.00	3.99
Re _{in} (Inlet Reynolds number)	3000	4470	7010	11000
Power (kW)				
Channel #1	17.2	25.7	40.0	62.9
#2	18.4	27.0	42.0	66.0
#3	18.0	27.0	42.0	66.0
#4	17.2	25.7	40.2	63.2
#5	16.2	24.5	38.0	59.7
#6	16.5	24.4	38.0	59.8
#7	18.1	27.0	42.1	66.1
#8	18.9	28.3	44.0	69.0
#9	18.0	27.1	42.1	66.2
#10	16.2	24.5	38.1	59.8
#11	15.5	23.1	36.0	56.5
#12	16.3	24.5	38.0	59.9

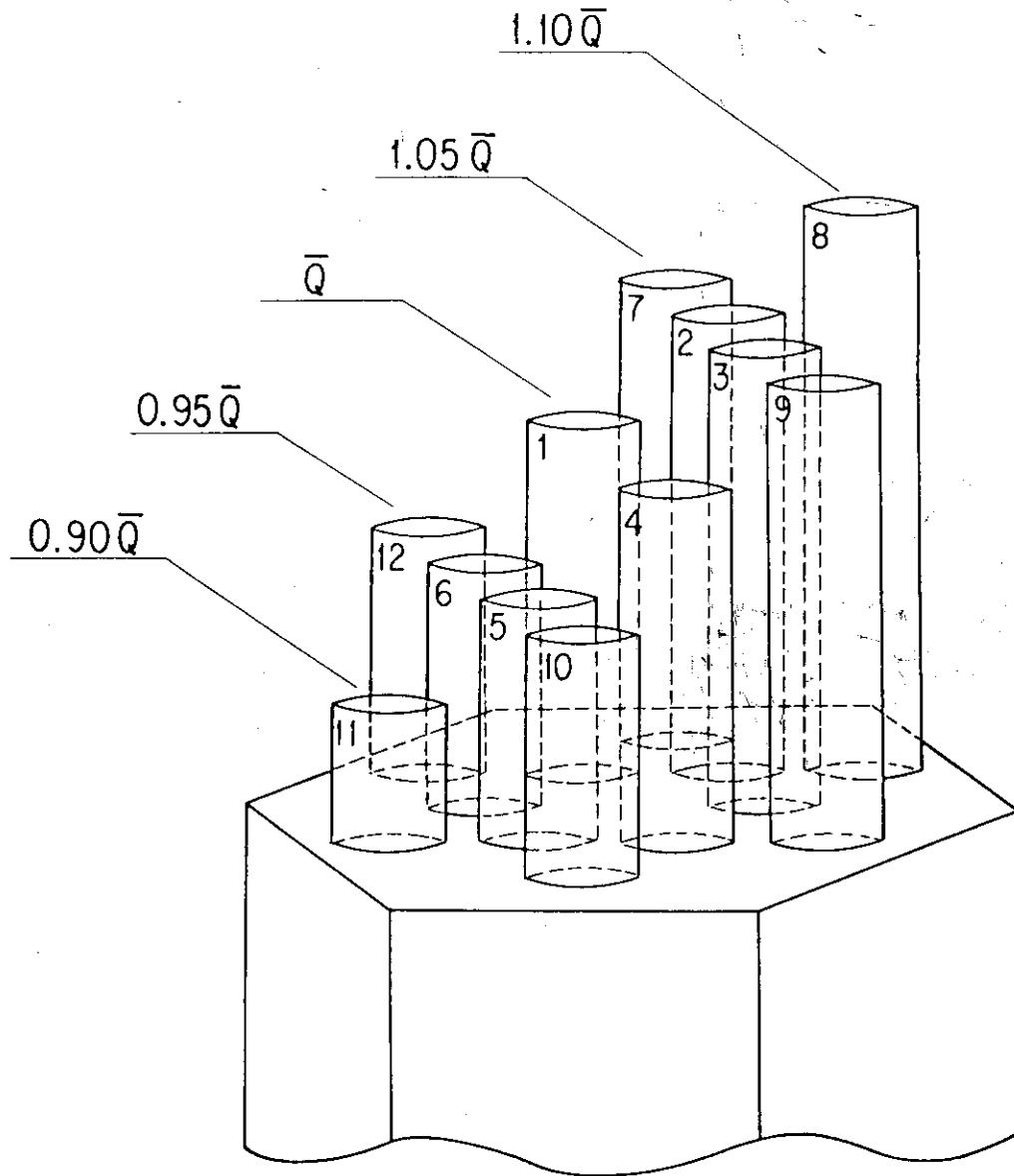


Fig.3.1 Slant power distribution

4. 試験結果

4.1 不平衡出力試験結果

4.1.1 流量配分

各燃料冷却チャンネルを流れるヘリウムガス流量 (w_i) は、先ずチャンネル出口部に設置したピトー管の指示値 (ΔP , 単位は mmAq) を基に、次式で算出する。

$$w_{ic} = V_p * \rho * \pi * D_{out}^2 / 4$$

ここで、
 D_{out} : ピトー管設置部流路内径 (25 mm)
 V_p : 流速 ($\equiv (2g * \Delta P / \rho)^{0.5}$)
 g : 重力加速度
 ρ : ヘリウムガス密度

ヘリウムガス密度 ρ は、ピトー管入口圧力と出口温度の計測値を用いて、付録 1 に示す式から算出する。ピトー管入口圧力は、試験部入口圧力からピトー管入口までの圧力損失の計算値を差し引いて求める。圧力損失の算出方法を、付録 5 に記してある。

次に、計算した w_{ic} と T_{1-M} 入口部で計測した総流量 W を用いて、次式で各チャンネルを流れるヘリウムガス流量 (w_i) を決める。

$$w_i = W * (w_{ic} / \sum_{1}^{12} w_{ic})$$

これは、上式で計算される各チャンネルの流量 (w_i) の総和が W と必ずしも一致しないため、それを補正するために行う。

Fig. 4.1 ~ 4.3 に、燃料冷却チャンネルを流れるヘリウムガス流量の測定例を示す。ここで、縦軸はヘリウムガスの流量 (w_i) と平均流量 \bar{w} (\equiv 総流量 $W/12$) との差 $(w_i/\bar{w} - 1) * 100$ (%) を表す。横軸は燃料冷却チャンネルの番号であり、その位置は図中に示してある。また、図中の Q_a は、No. 6 チャンネルを除く 11本のチャンネルに装荷された模擬燃料棒の発熱量を平均したものである。

各図の(c)は、12本の模擬燃料棒の発熱量が均一な条件での結果であるが、Fig. 4.1の入口レイノルズ数が約 1800 の場合は、全体的に流量の偏差が大きくなっている。この原因として、 T_{1-M} に流入するヘリウムガス総流量が小さいため、 M_1 ループにおける流量の脈動の影響を強く受けること、模擬燃料棒の発熱量の調整に多少のばらつきを生じて各チャンネルのヘリウムガスの昇温状況が若干異なったことなどが挙げられる。いずれの図においても、No. 6 チャンネルの発熱量がゼロの場合には、他のチャンネルよりもかなり多くヘリウムガスが配分され、また、発熱量が増加して Q_a よりも 50% 高くなった場合には、流量は他のチャンネルよりも小さくなっている。これは、No. 6 チャンネルの出力変化の影響を受けて、チャンネル間で熱が黒鉛ブロックを介して熱伝導で移動し、各チャンネルのヘリウムガス温度が変化することにより圧力損失状況が

変わり、ヘリウムガスが再配分されるためである。例えば、あるチャンネルの加熱量が増加すると、ヘリウムガス温度が上昇し、加速損失及び摩擦損失による圧力損失が増加するために、12本のチャンネルにおいて圧力損失の平衡が成り立つように流量が減少する。

4.1.2 温度分布

(1) 表面温度分布

Fig. 4.4～4.6に、流れ方向における模擬燃料棒の表面温度分布例を示す。横軸に加熱開始点を原点とする無次元距離を取り、No.1, 2, 6, 8, 12チャンネルの模擬燃料棒表面温度と入口/出口ヘリウムガス温度を示してある。

各図にみられるように、模擬燃料棒表面温度はNo.6チャンネルの発熱量が低い場合には、隣接するNo.1と12チャンネルの模擬燃料棒表面温度も低く、逆に高い場合には隣接するチャンネルも高くなっている。これらの模擬燃料棒表面温度差は、No.6チャンネルの発熱量がゼロの時、加熱部出口付近において最も大きくなるが、出口ガス温度差はその差よりもかなり小さい。例えば、No.6チャンネルの模擬燃料棒の発熱量がゼロであるRun#0719の場合、No.6チャンネルの模擬燃料棒表面温度は、隣接するNo.12チャンネルと比較して約120℃、最も離れたNo.8チャンネルよりも約160℃低い値を示すが、流路出口におけるヘリウムガス温度は、No.12チャンネルと約35℃、No.8チャンネルとは約60℃程度の差しかない。また、この温度差は入口レイノルズ数が高いほど大きくなっている。実機の入口レイノルズ数は4000以下であり、燃料棒の発熱量がゼロとなることはないので、それほど大きな温度差は生じないといえる。

(2) 黒鉛ブロック内部温度分布

Fig. 4.7～4.9に、中心角30°の1/12セクター内の黒鉛ブロック温度分布例を示す。図に示す黒鉛ブロック温度は2段目のもので、模擬燃料棒表面温度も示してある。図にみられるように、No.6チャンネルの発熱量がゼロで、入口レイノルズ数が高い場合に最も温度差がつく。ちなみに、入口レイノルズ数が約1800のとき約3℃(Fig. 4.7(a))、4500のとき約10℃(Fig. 4.8(a))、10000のとき約16℃(Fig. 4.9(a))である。しかし、温度の計測点数に限りがあるため、黒鉛ブロック全断面内の温度分布を詳細に把握することは困難である。そこで、T_{1-M}用の3次元温度分布解析コードを開発した⁶⁾。このコードを用いた解析結果については4.3節で述べる。

4.2 傾斜出力試験結果

Fig. 4.10と4.11に、入口レイノルズ数が約4500のときと約7000のときの流量配分を示す。図中のQ_aは、12本の模擬燃料棒の平均発熱量で、発熱分布はFig. 3.1に示すとおりである。流量配分の偏差は、最大でも2%程度であり、前述した不平衡出力試験結果と比べるとはるかに小さい。

Fig. 4.12と4.13に、流れ方向における模擬燃料棒の表面温度分布と入口/出口ヘリウムガス温度を示す。模擬燃料棒表面温度の最大値と最小値の差は、例えば、Fig. 4.12の入口レイノルズ数が約4500の場合には約60℃程度で、それほど大きくはない。出口ガス温度差については、

例えば、入口レイノルズ数が約 4500 の場合には約 30 °C、7000 の場合には約 40 °Cであるが、各燃料冷却チャンネル間で熱移動がない、すなわち断熱と仮定して出口温度差を計算するといずれも約 100 °Cとなる。このとき、次式で出口ガス温度を算出した。

$$Q_i * 860 = c_p * w_i * 3600 / 1000 * (T_{out_i} - T_{in_i})$$

ここで、
 Q_i : 模擬燃料棒の発熱量 (kW)
 c_p : ヘリウムガス比熱 (kcal/kg °C)
 T_{in_i} : 入口ヘリウムガス温度 (°C)
 T_{out_i} : 出口ヘリウムガス温度 (°C)
 w_i : ヘリウムガス流量の実測値 (g/s)

このことから、かなりの熱が黒鉛ブロックを介してチャンネル間を熱伝導で移動していることが分かる。この熱移動は、一方で黒鉛ブロック断面内の温度分布を平坦化することにもなる。

4.3 数値解析結果

T_{1-M} 用 3次元温度分布解析コード「TBLOCK」を用いて、黒鉛ブロック内温度分布の数値計算を行った。コードの詳細は文献〔6〕に記されている。本解析では、 T_{1-M} の体系を模擬するために、模擬燃料体の周囲及び上下端面は断熱境界とした。模擬燃料棒の熱伝達率 h は、 T_{1-S} と T_{1-M} で得られた次の実験式^{2, 3, 7, 8, 9)}を用いた。

$$\begin{aligned} Re \leq 1800 & \quad h = 6.8 * \lambda_g / De \\ Re \geq 2000 & \quad h = 0.0215 * Re^{0.8} * Pr^{0.4} \lambda_g / De \end{aligned}$$

このとき、ヘリウムガスの熱伝達率 λ_g 等の物性値は、ヘリウムガス温度の変化を考慮して付録 1 に示す式から求めた。

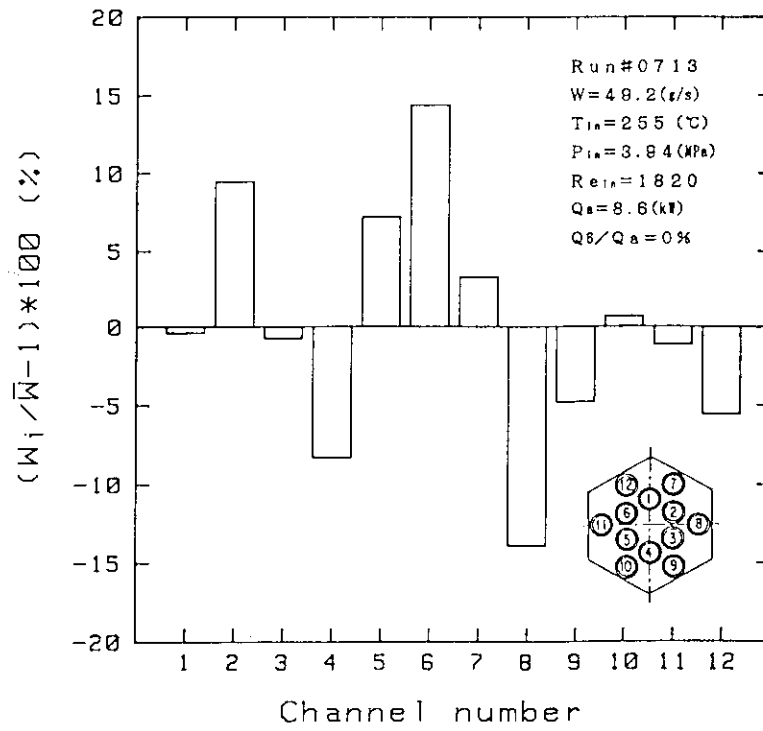
Fig. 4.14 と Fig. 4.15 に、不平衡出力試験における No.6 チャンネルの模擬燃料棒表面温度と出口温度の解析結果を示す。Fig. 4.14 は、No.6 チャンネルの発熱量がゼロの場合で、Fig.4.15 は、平均発熱量よりも 150 %高い場合である。黒鉛ブロックの温度は、No.6 チャンネルに近い Fig.2.5 中の C 点での測定温度と解析値を示している。図にみられるように、解析結果は実験結果と良く一致しており、本コードの有効性が確認できた。

Fig. 4.16 に、黒鉛ブロック断面内温度分布の解析例を示す。Fig. 4.16(a)と(b)は不平衡出力試験条件での解析結果で、(a)は No.6 チャンネルの模擬燃料棒の発熱量がゼロの場合、(b)は 150 %高い場合である。Fig. 4.16(c) は、傾斜出力試験条件での解析例で、いずれも加熱開始点から 3.745 m ($x/De = 535$) の位置における解析例である。この位置は、出口に近く、ブロック温度が最も高くなる位置でもある。

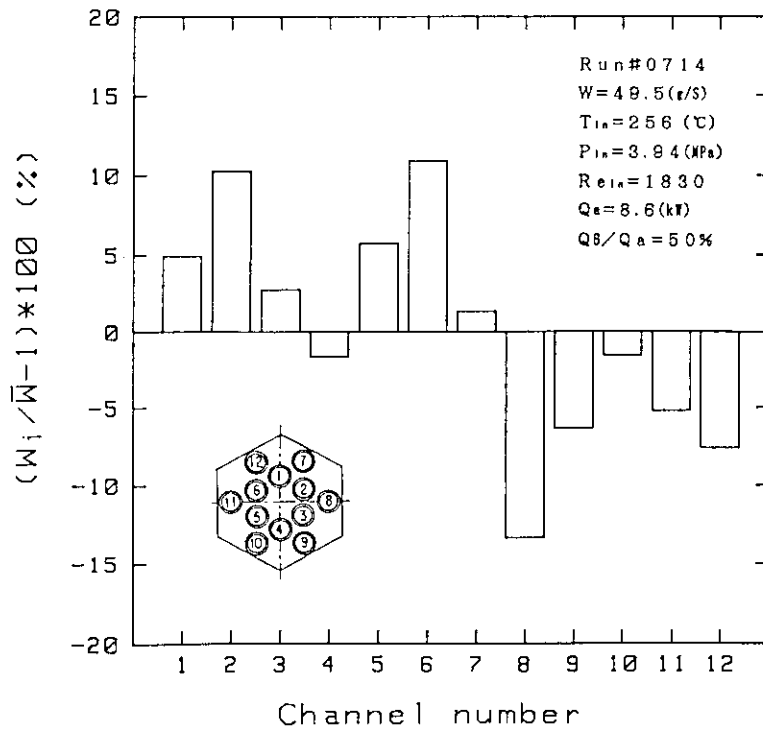
No.6 チャンネルの模擬燃料棒の発熱量がゼロの場合には、Fig. 4.15 にみられるように、同一水平断面内の模擬燃料棒表面温度の最大値と最小値の差は 150 °Cを越えているにもかかわらず、黒鉛ブロック内部での温度差は、Fig. 4.16(a)にみられるように 35 °C程度である。また、No.6 チャンネルの模擬燃料棒の発熱量が、150 %高い場合では約 17 °Cという結果であった。一方、

傾斜発熱試験条件では、Fig. 4.16(c)に示すように、出力分布の傾斜方向に沿って約20℃の温度勾配がついている。いずれもかなり小さい値であり、燃料ブロック断面内の温度は、ブロックの優れた熱伝導性能によって均一化される方向にあるといえる。

このことは、炉心下部にある高温プレナムブロックに流入するヘリウムガスの温度差が小さくなること、また、燃料ブロックの熱歪が軽減されることを意味し、実機炉心設計に余裕を与えるものである。

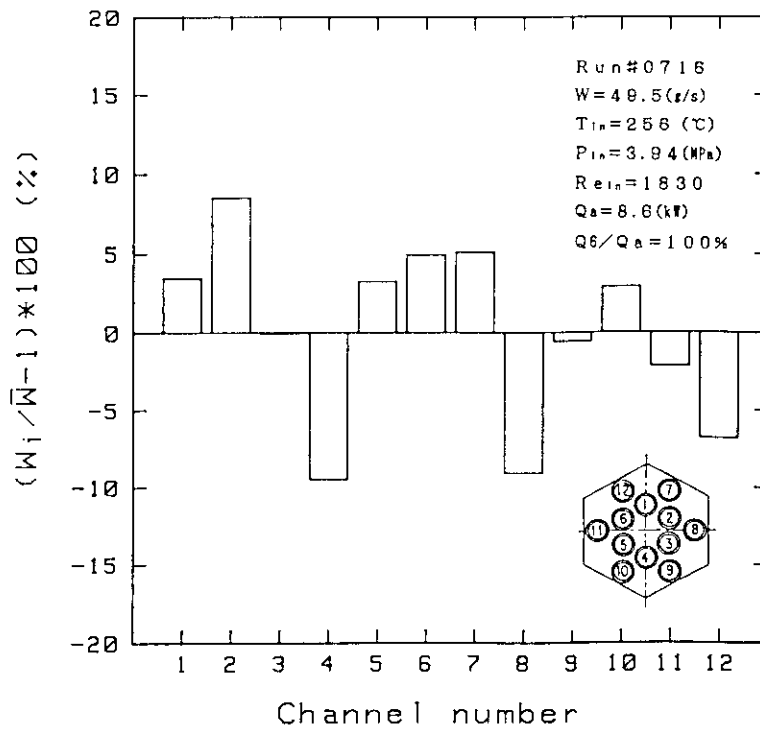


(a) $Q_6/Q_a = 0\%$

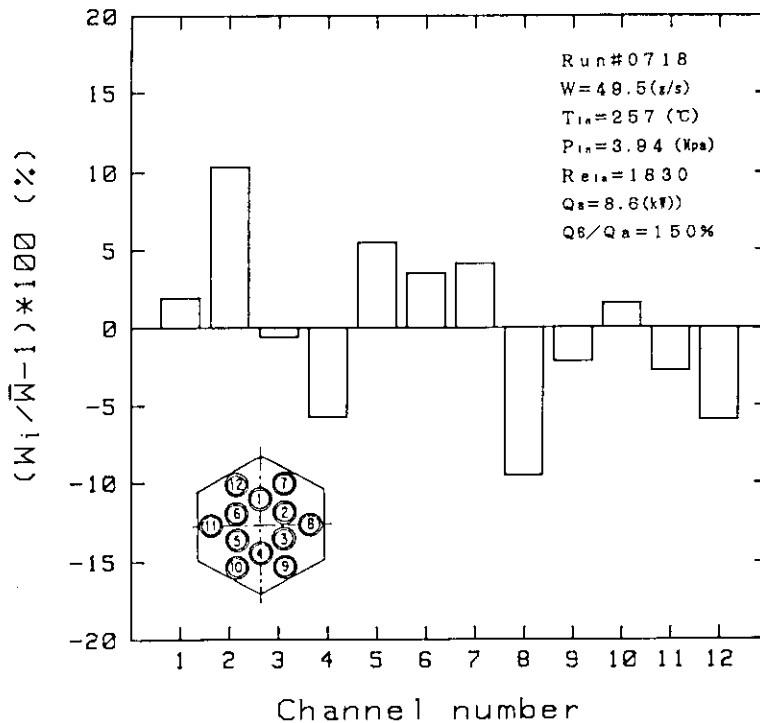


(b) $Q_6/Q_a = 50\%$

Fig.4.1 Flow rate distribution in asymmetric power distribution test ($Re_{in} \approx 1800$)

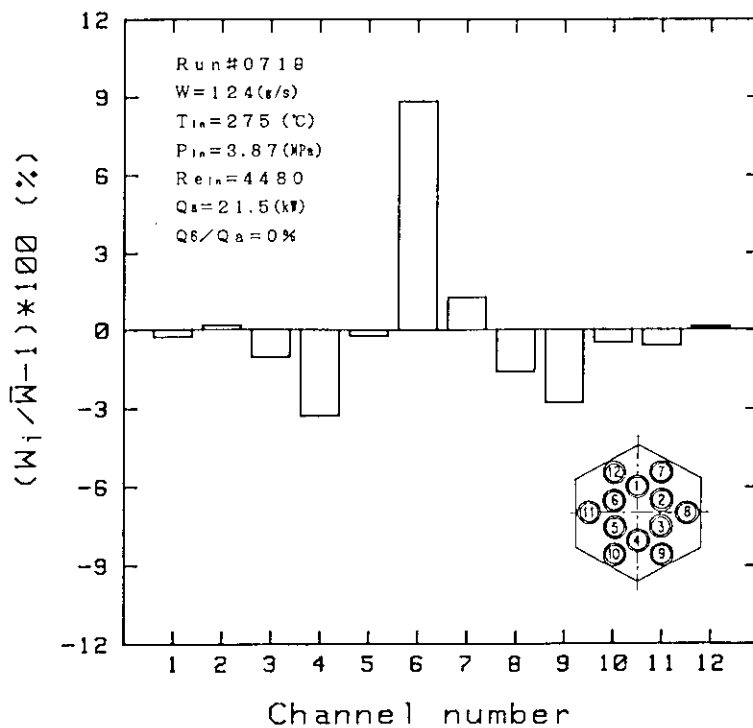


(c) Q₆/Q_a = 100%

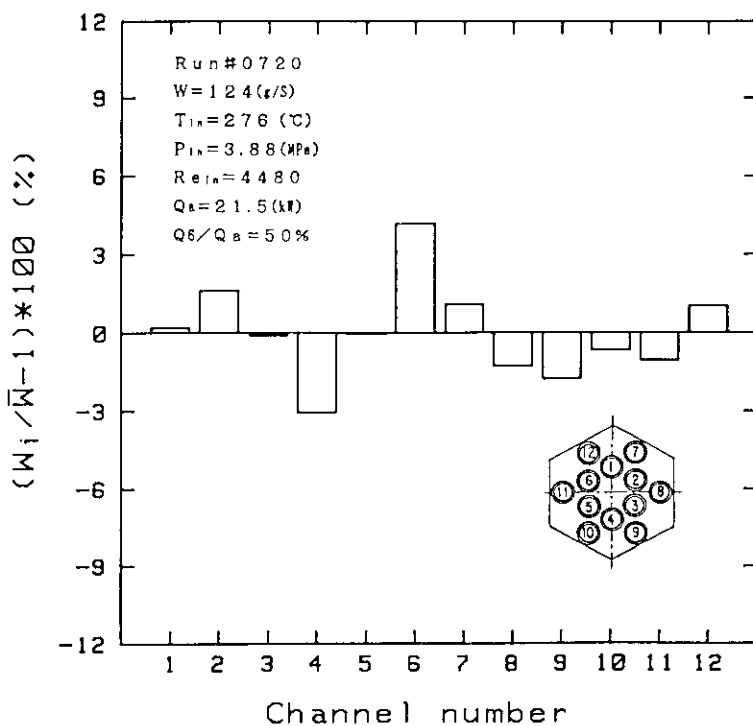


(d) Q₆/Q_a = 150%

Fig.4.1 (Continued)

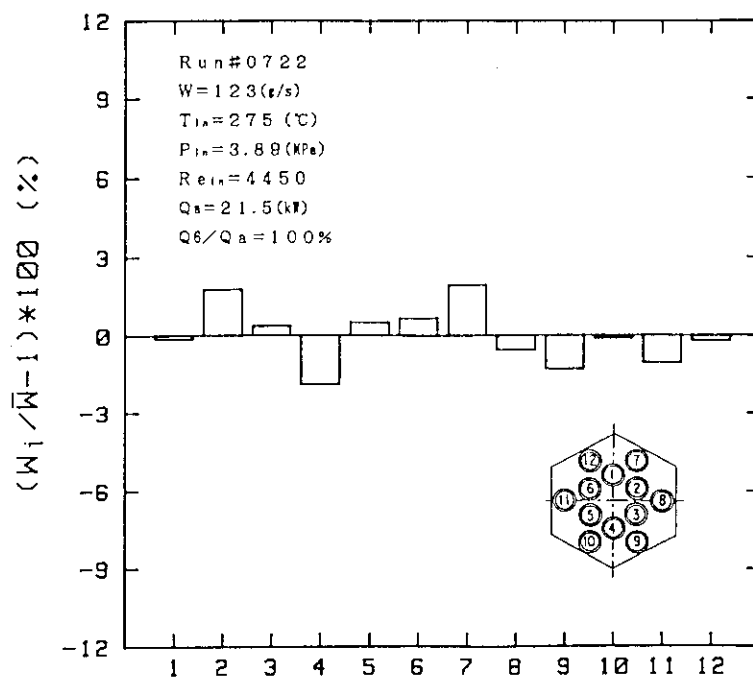


(a) Q_s/Q_a = 0%



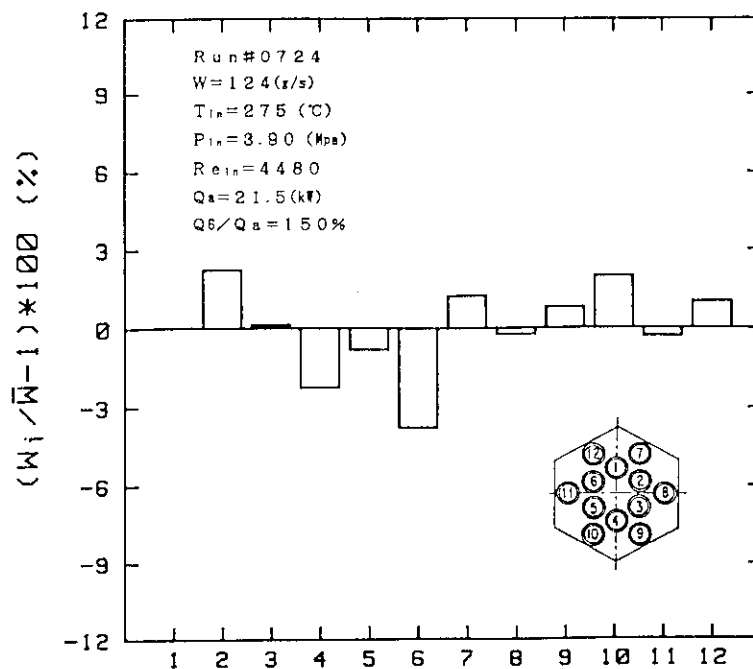
(b) Q_s/Q_a = 50%

Fig.4.2 Flow rate distribution in asymmetric power distribution test (Re_{in} ≅ 4500)



Channel number

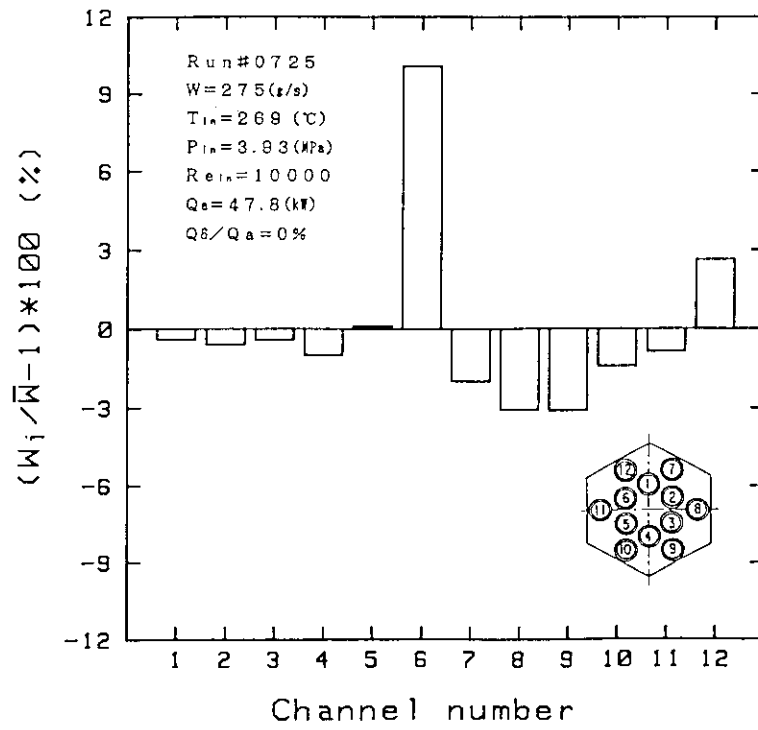
(c) Q₆/Q_a = 100%



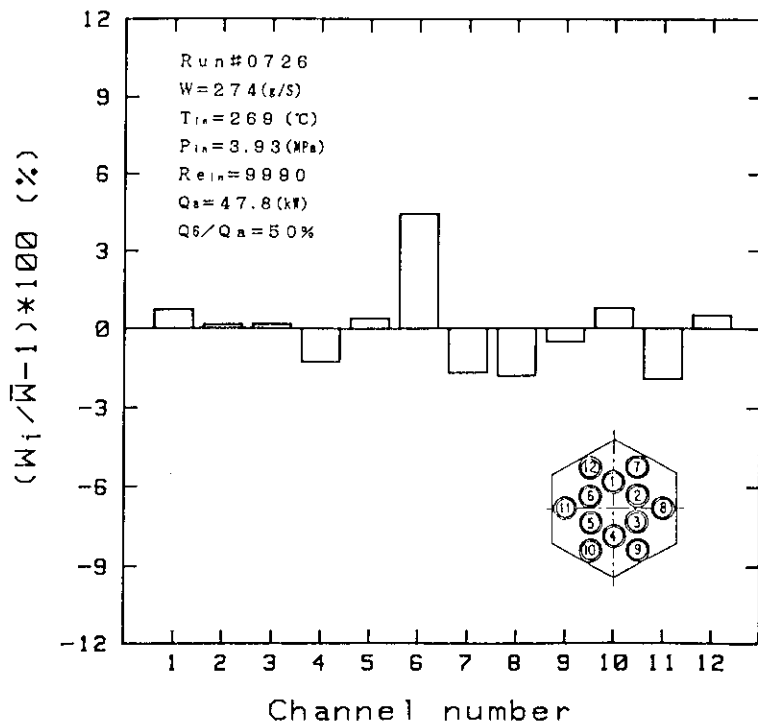
Channel number

(d) Q₆/Q_a = 150%

Fig.4.2 (Continued)

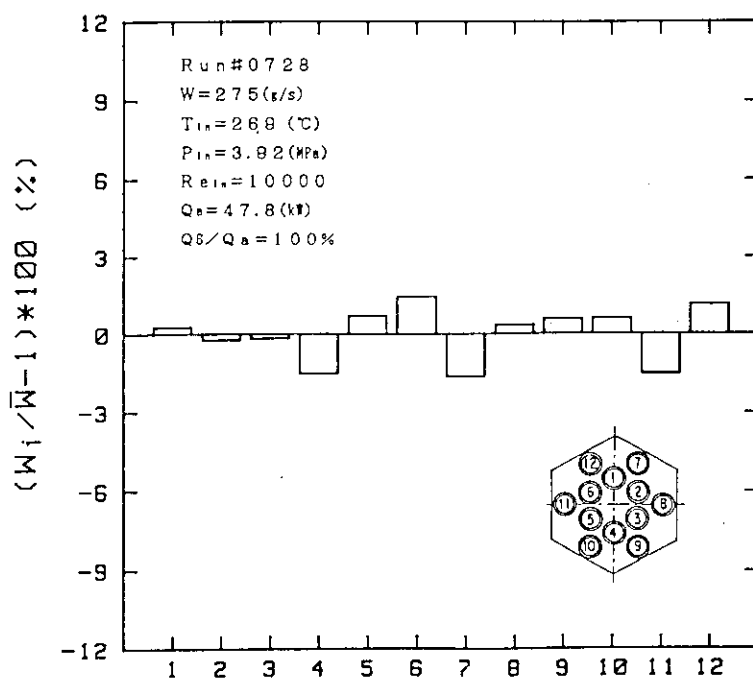


(a) Q₆/Q_a = 0%

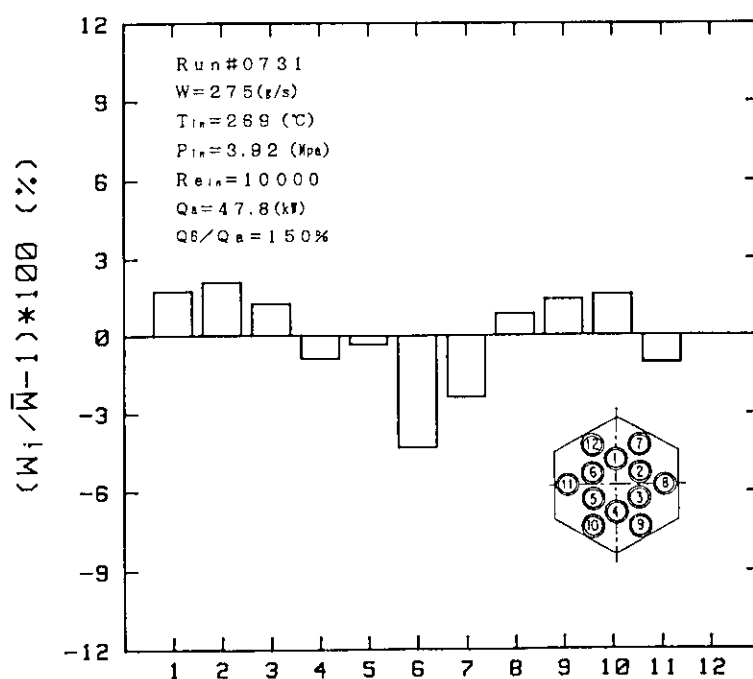


(b) Q₆/Q_a = 50%

Fig.4.3 Flow rate distribution in asymmetric power distribution test (Re_{in} ≈ 10000)

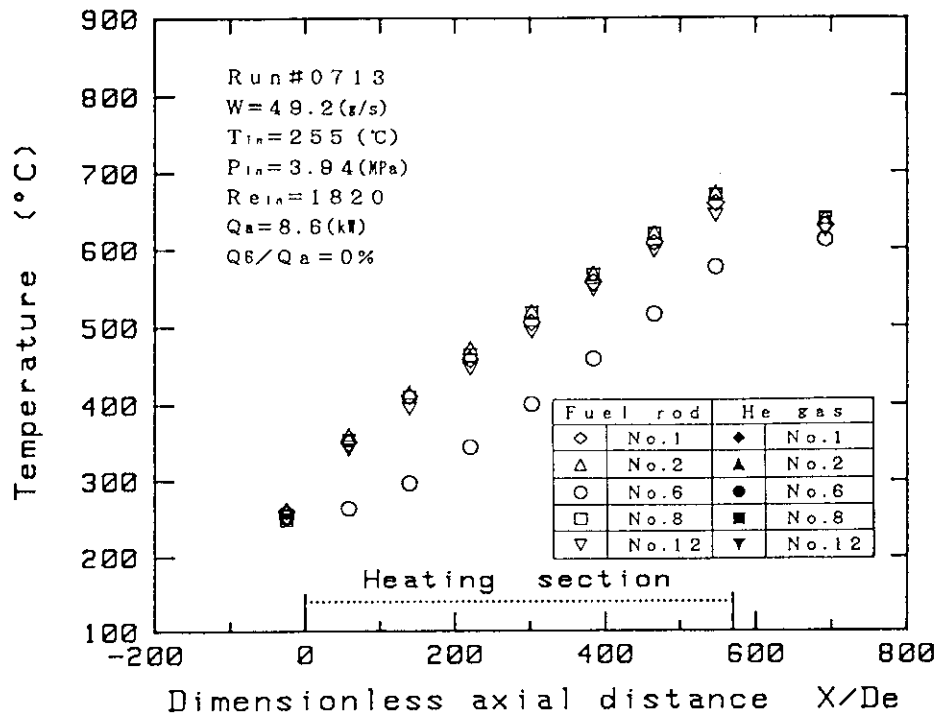


Channel number
 (c) $Q_6 / Q_a = 100\%$

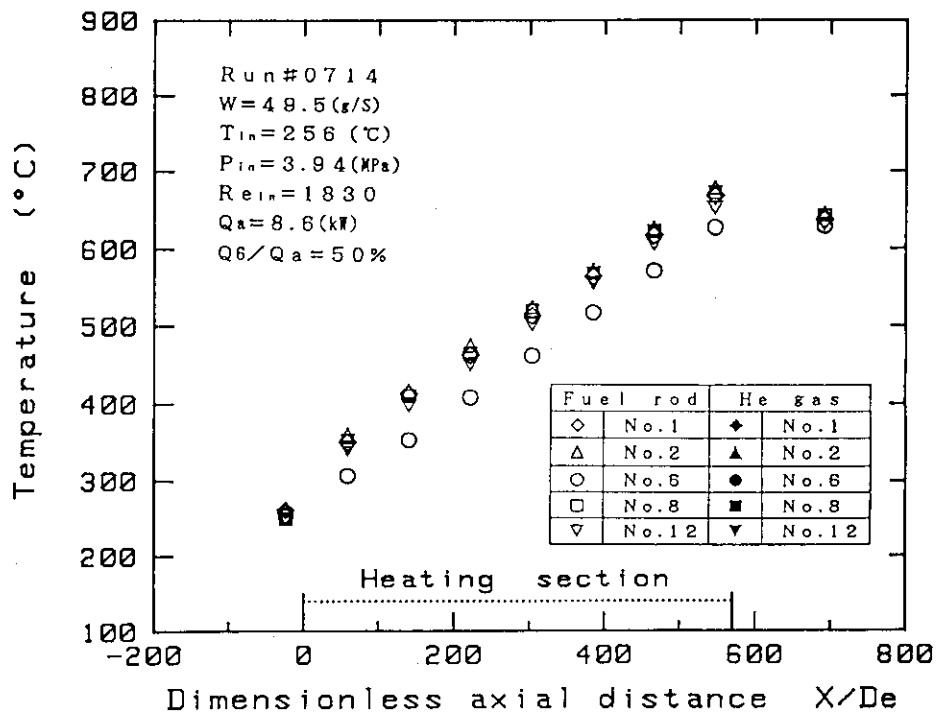


Channel number
 (d) $Q_6 / Q_a = 150\%$

Fig.4.3 (Continued)

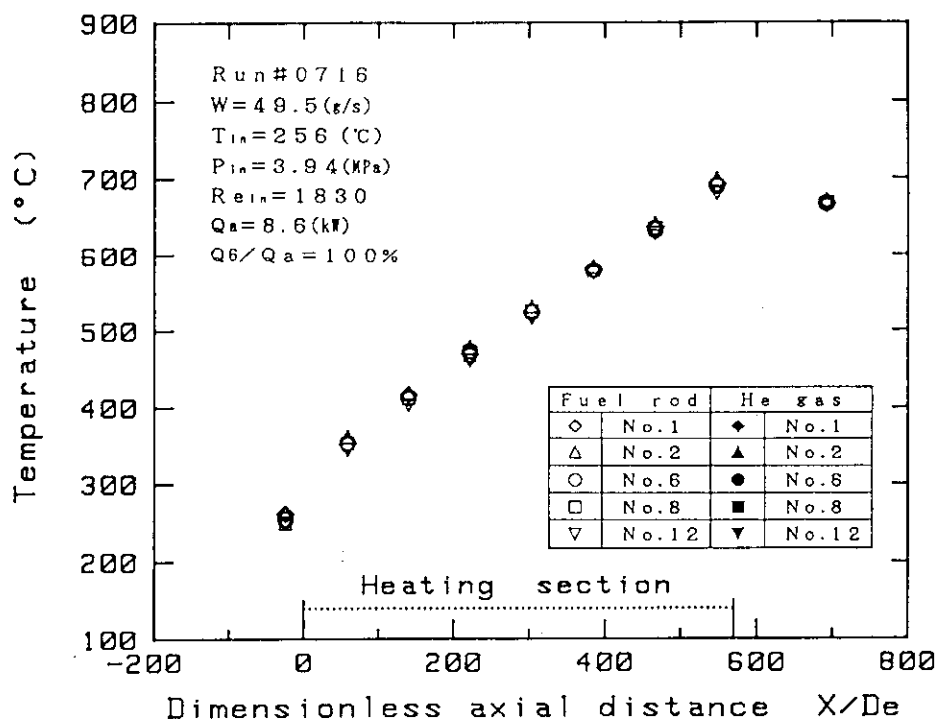


(a) $Q_6/Q_a = 0\%$

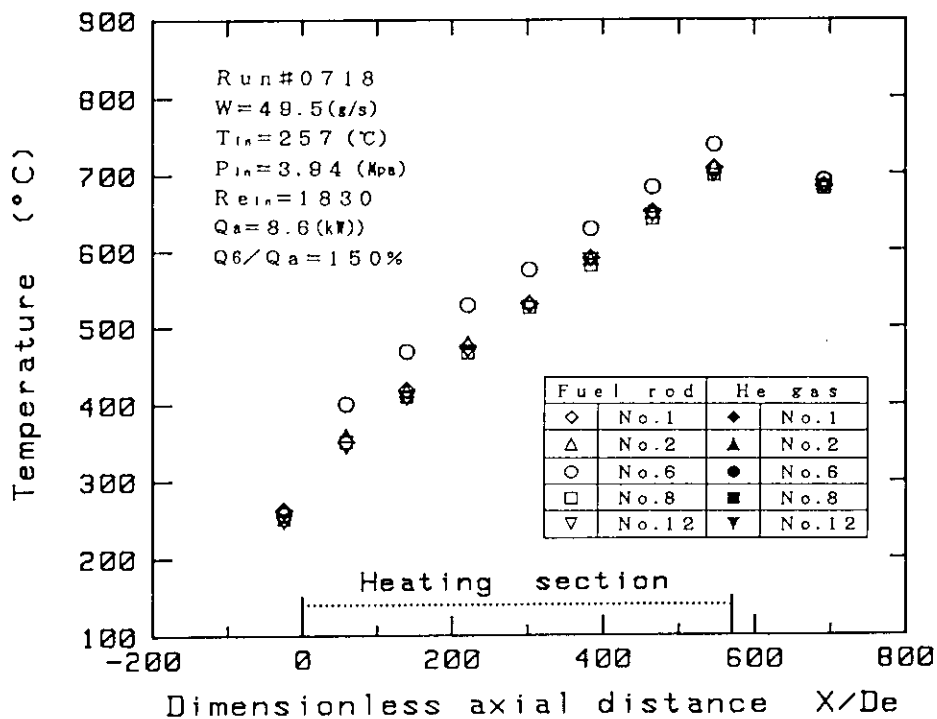


(b) $Q_6/Q_a = 50\%$

Fig.4.4 Axial temperature distribution in asymmetric power distribution test ($Re_{in} \approx 1800$)

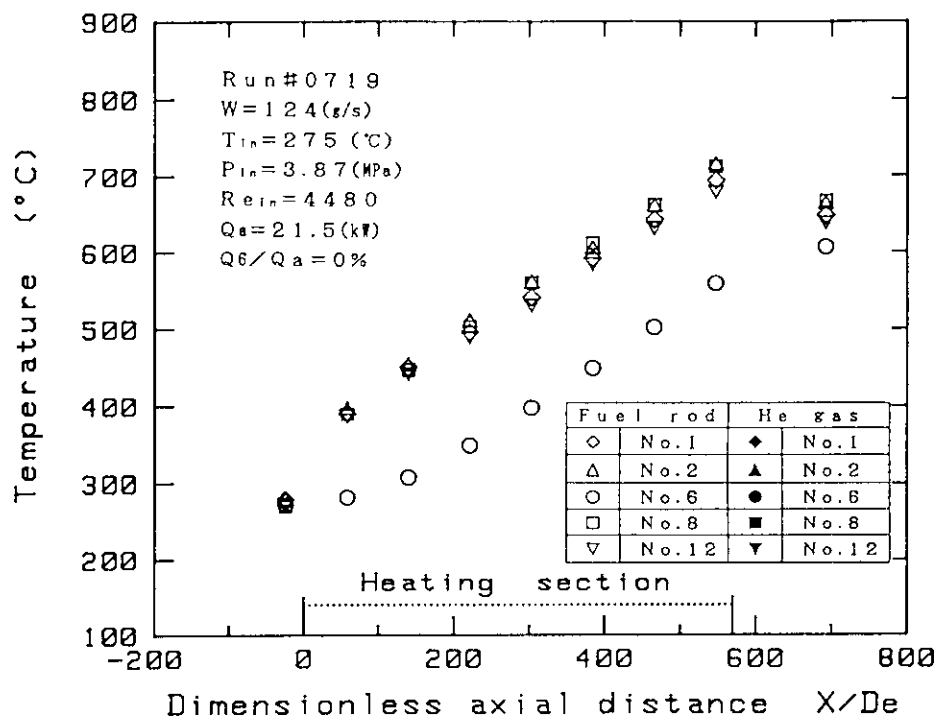


(c) $Q_6/Q_a = 100\%$

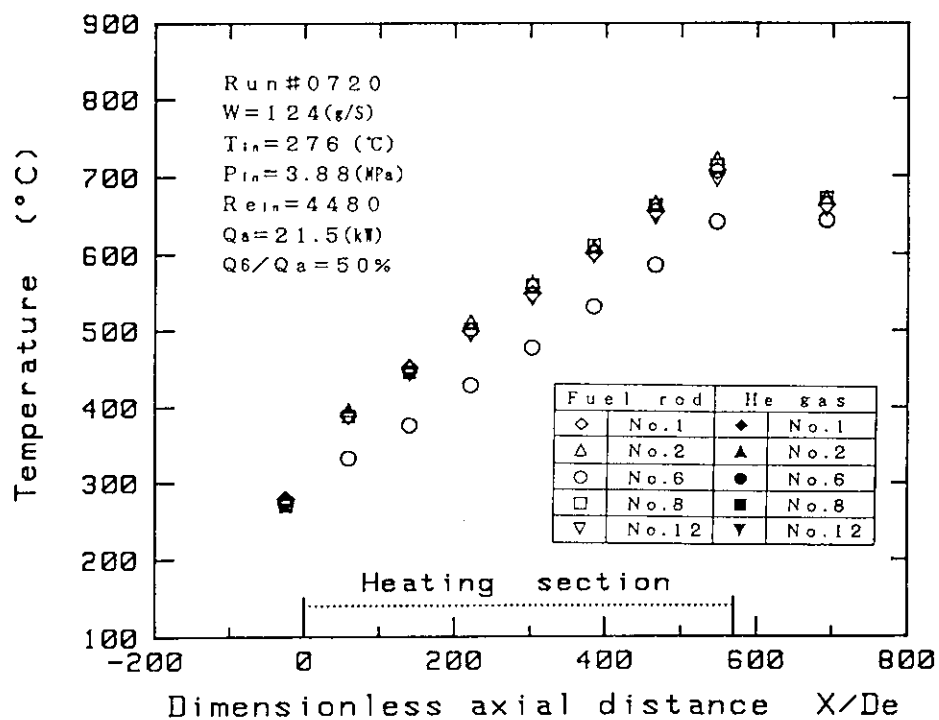


(d) $Q_6/Q_a = 150\%$

Fig.4.4 (Continued)

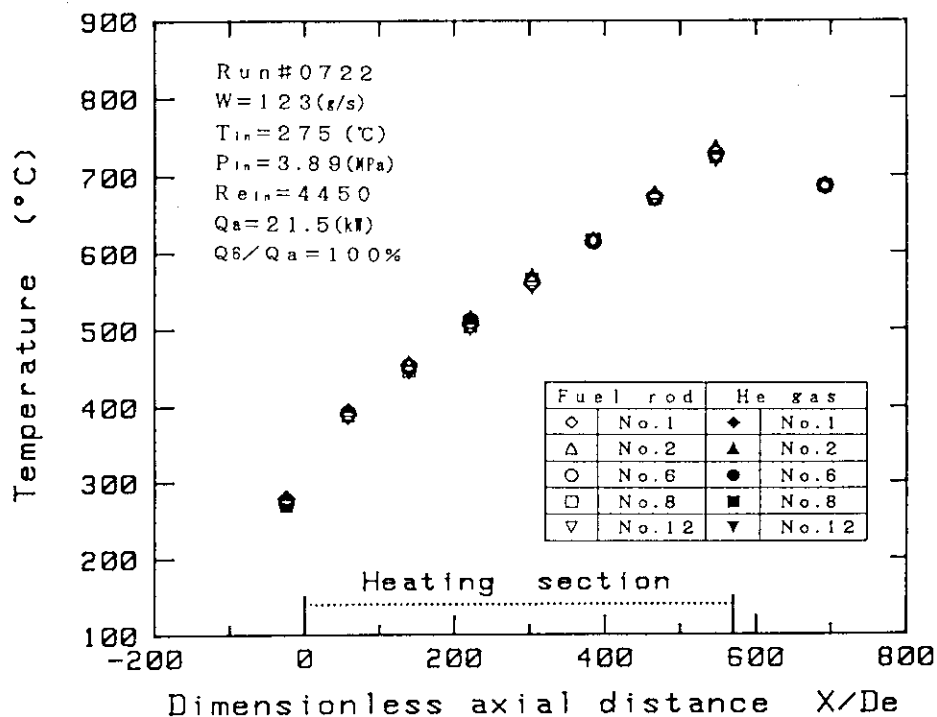


(a) $Q_6/Q_a = 0\%$

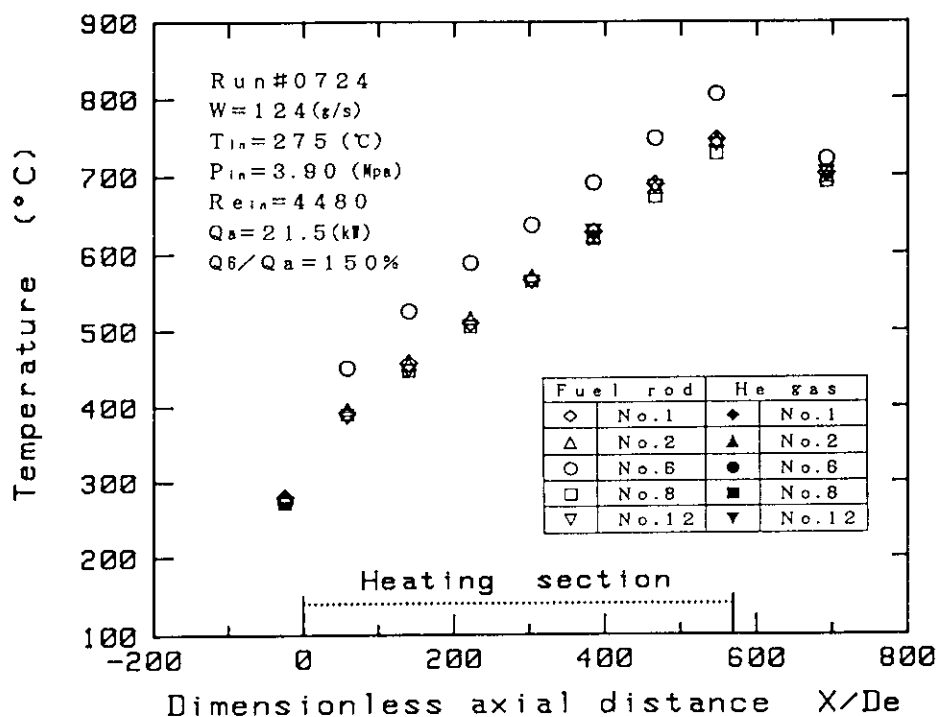


(b) $Q_6/Q_a = 50\%$

Fig.4.5 Axial temperature distribution in asymmetric power distribution test ($Re_{in} \approx 4500$)

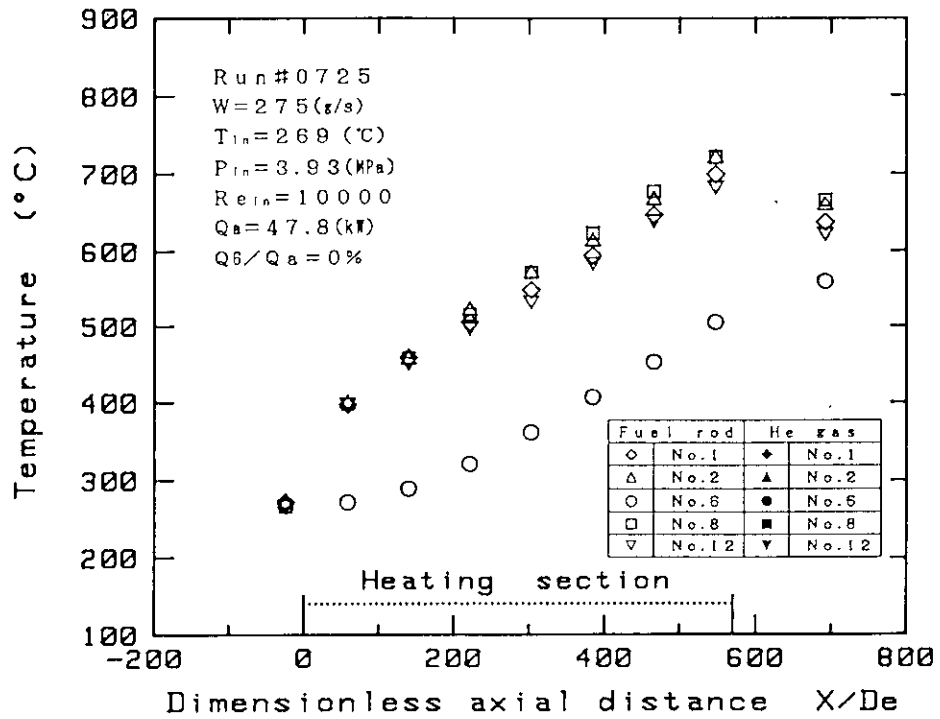


(c) $Q_6/Q_a = 100\%$

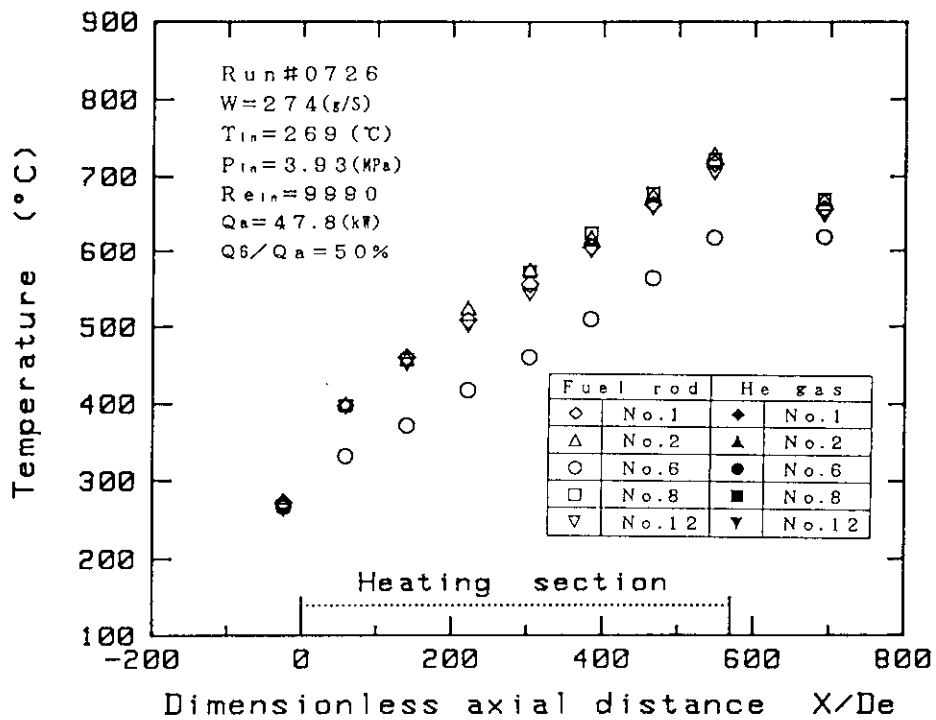


(d) $Q_6/Q_a = 150\%$

Fig.4.5 (Continued)

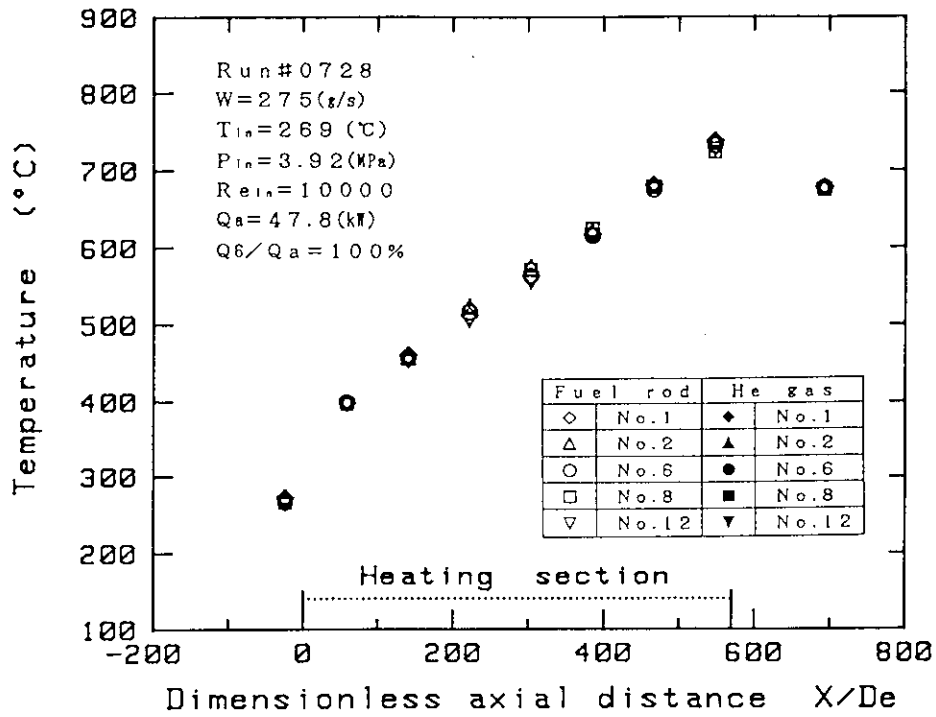


(a) $Q_6/Q_a = 0\%$

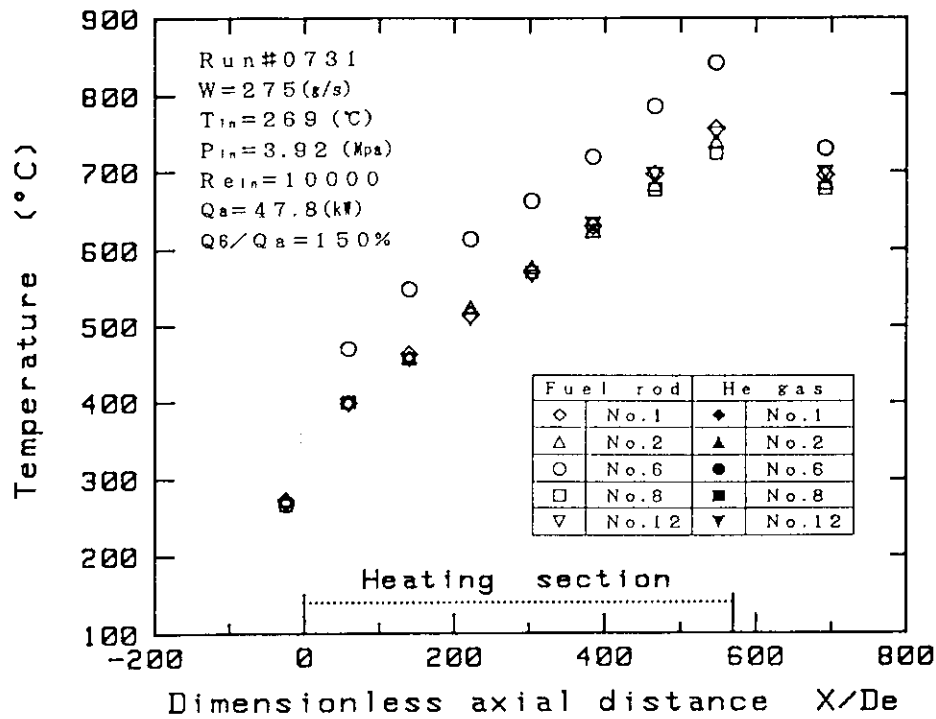


(b) $Q_6/Q_a = 50\%$

Fig.4.6 Axial temperature distribution in asymmetric power distribution test ($Re_{in} \approx 10000$)

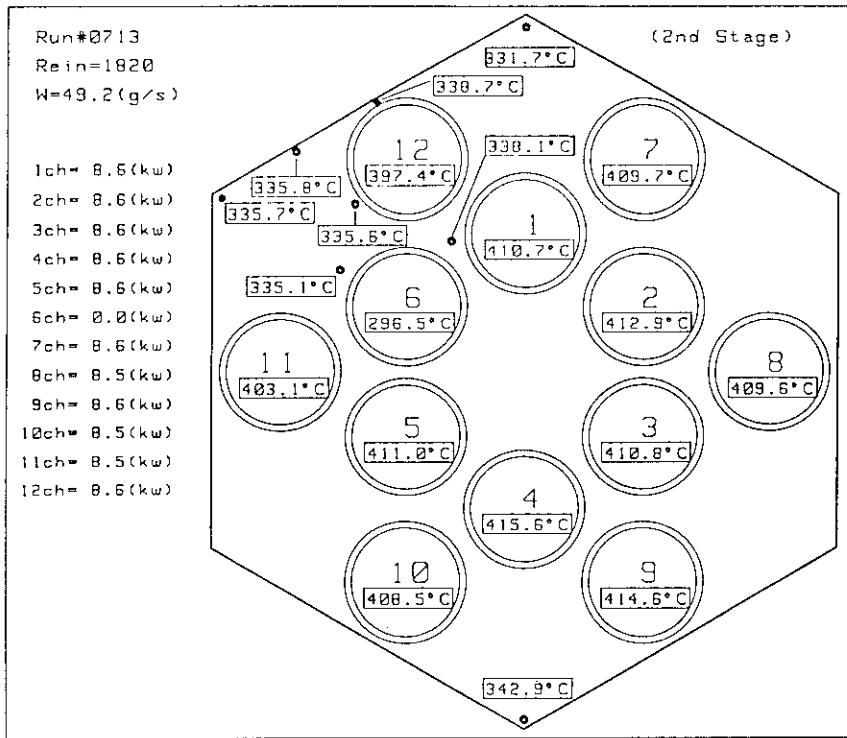


(c) $Q_6/Q_a = 100\%$

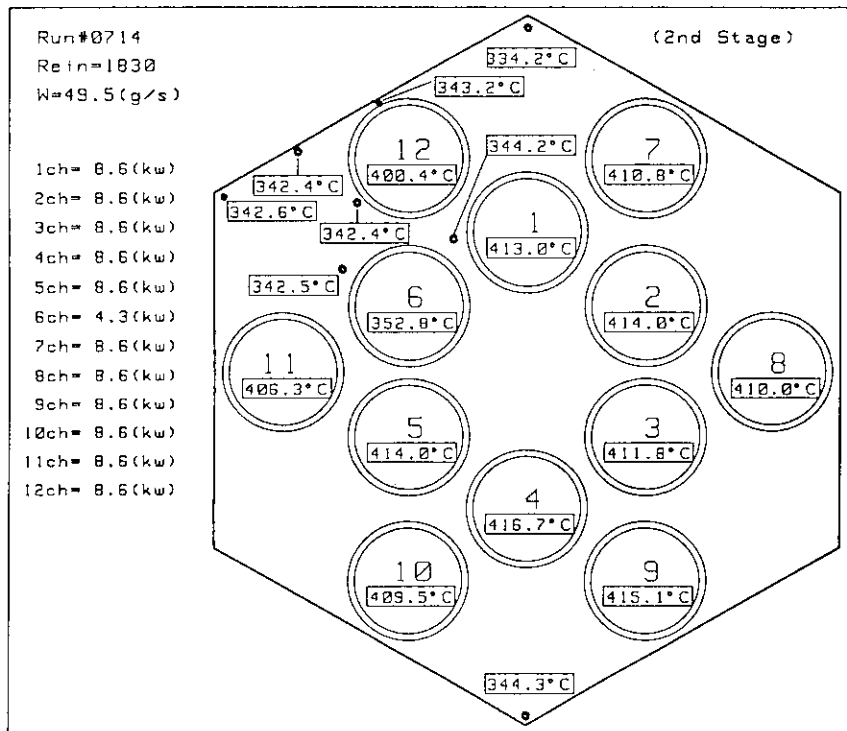


(d) $Q_6/Q_a = 150\%$

Fig.4.6 (Continued)

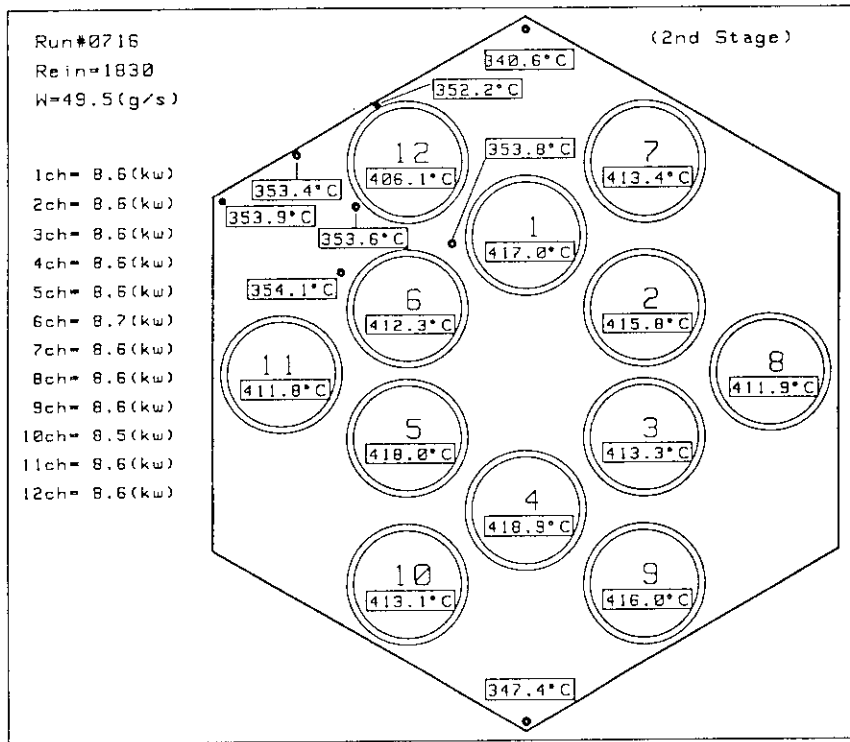


(a) $Q_6/Q_a = 0\%$

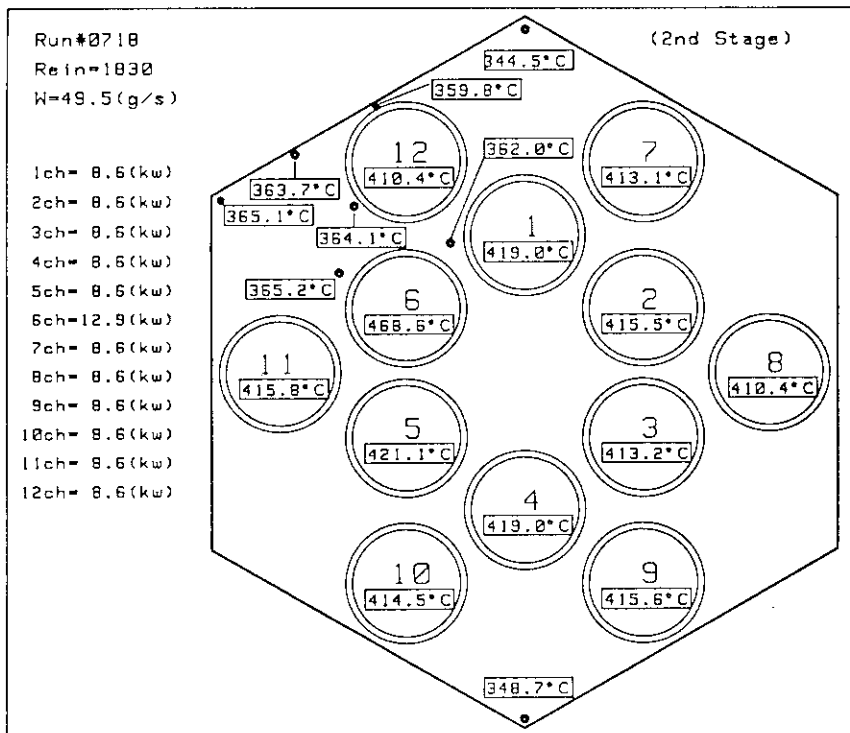


(b) $Q_6/Q_a = 50\%$

Fig.4.7 Horizontal temperature distribution in graphite fuel block (Re_{in} ≐ 1800)

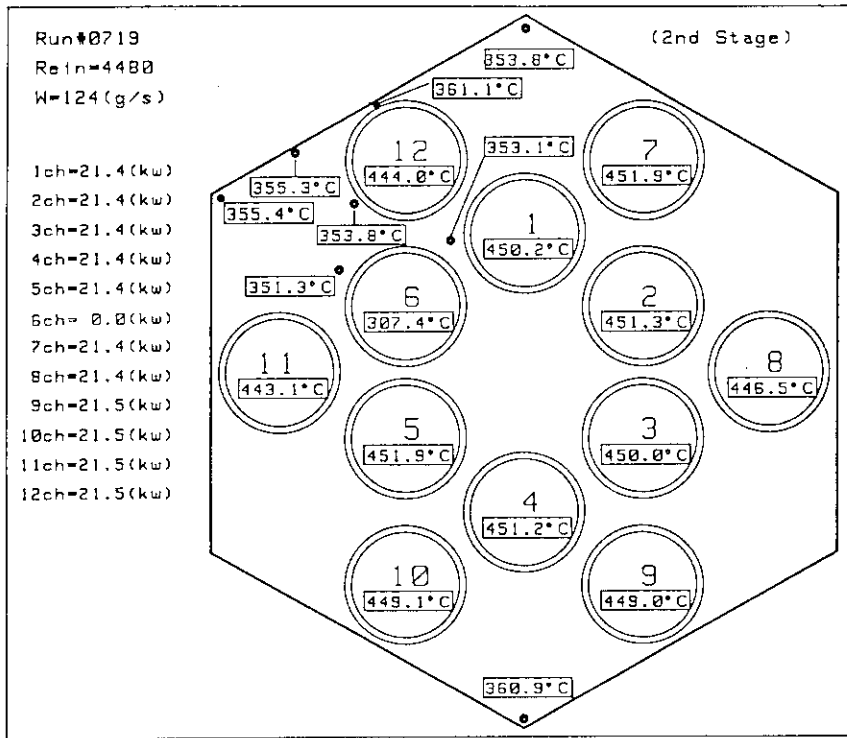


(c) $Q_6/Q_a = 100\%$

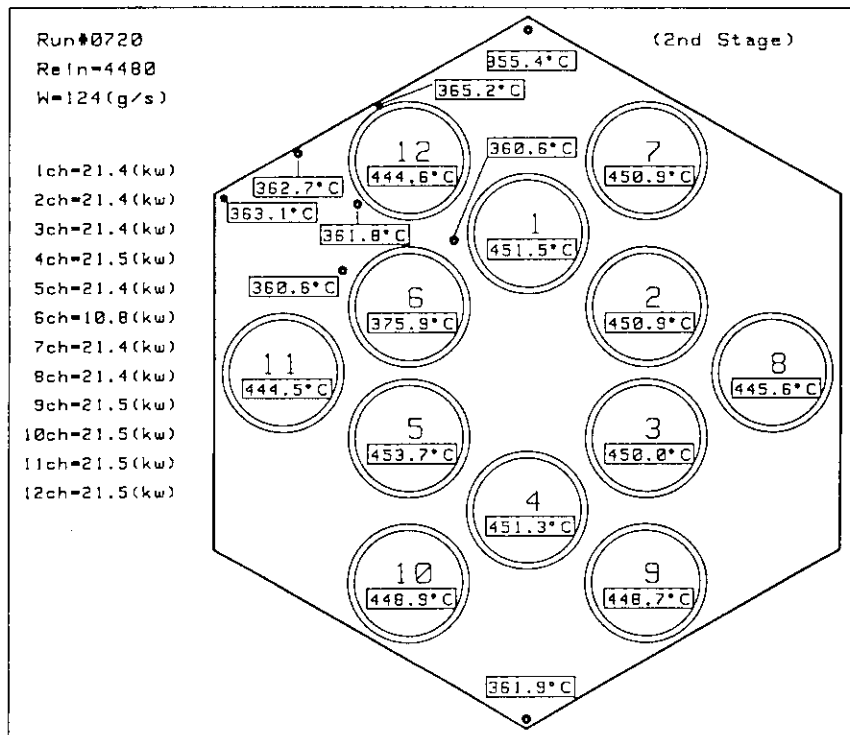


(d) $Q_6/Q_a = 150\%$

Fig.4.7 (Continued)

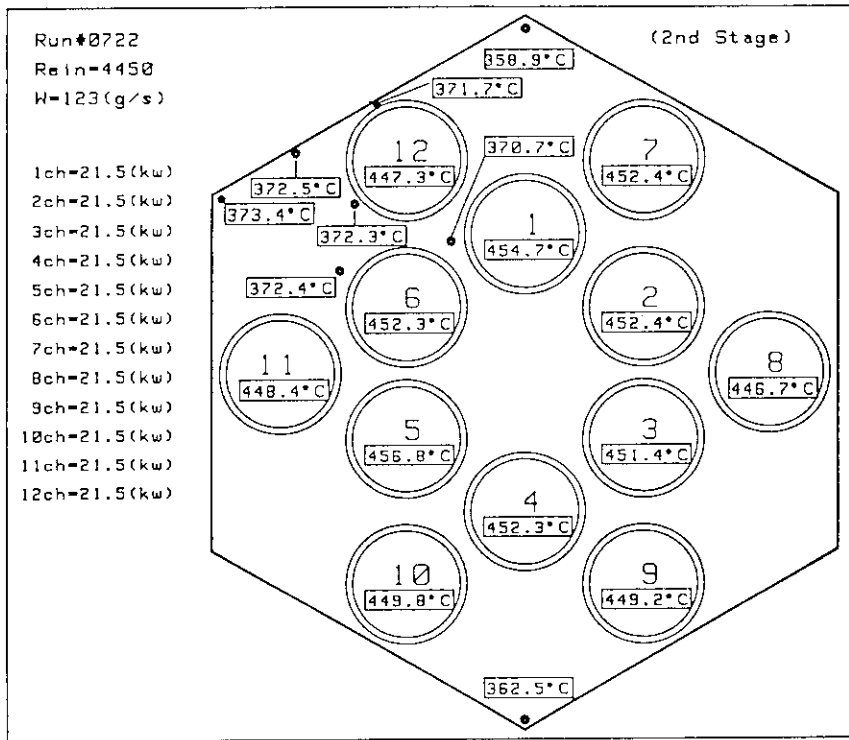


(a) $Q_6/Q_a = 0\%$

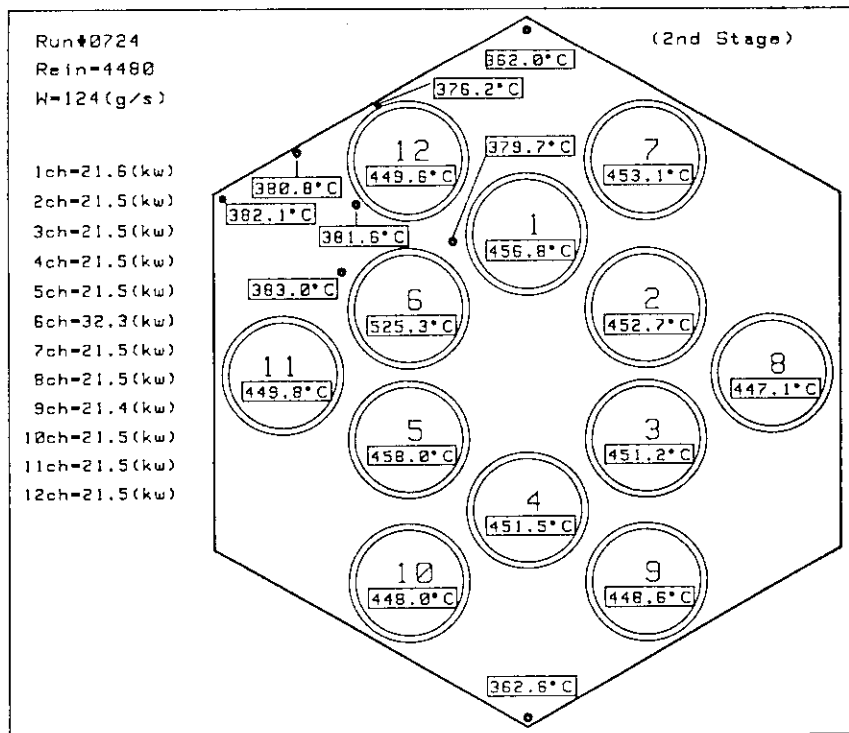


(b) $Q_6/Q_a = 50\%$

Fig.4.8 Horizontal temperature distribution in graphite fuel block (Re_{in} ≃ 4500)

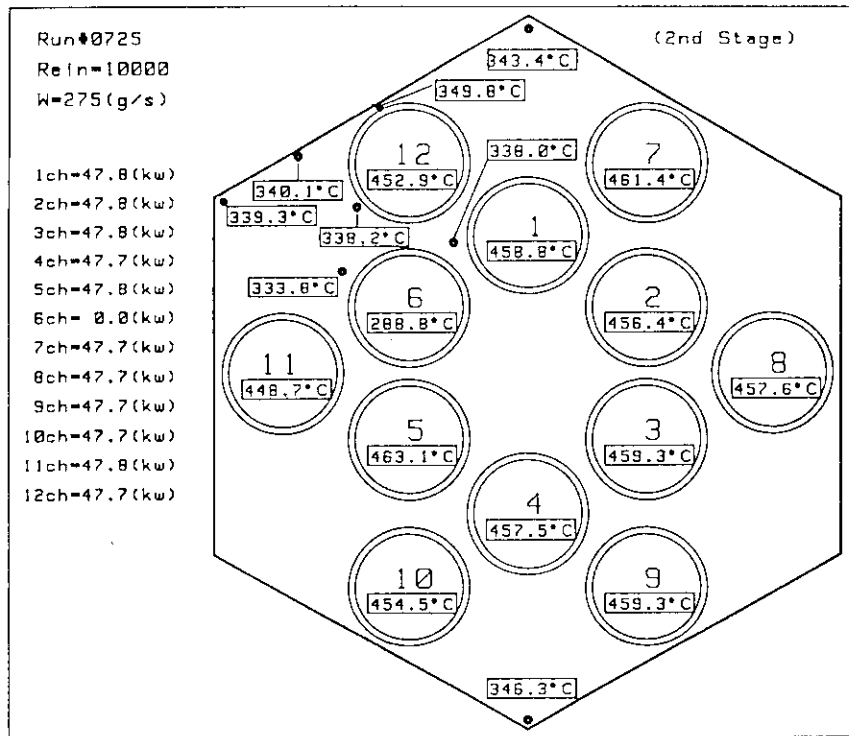


(c) $Q_6/Q_a = 100\%$

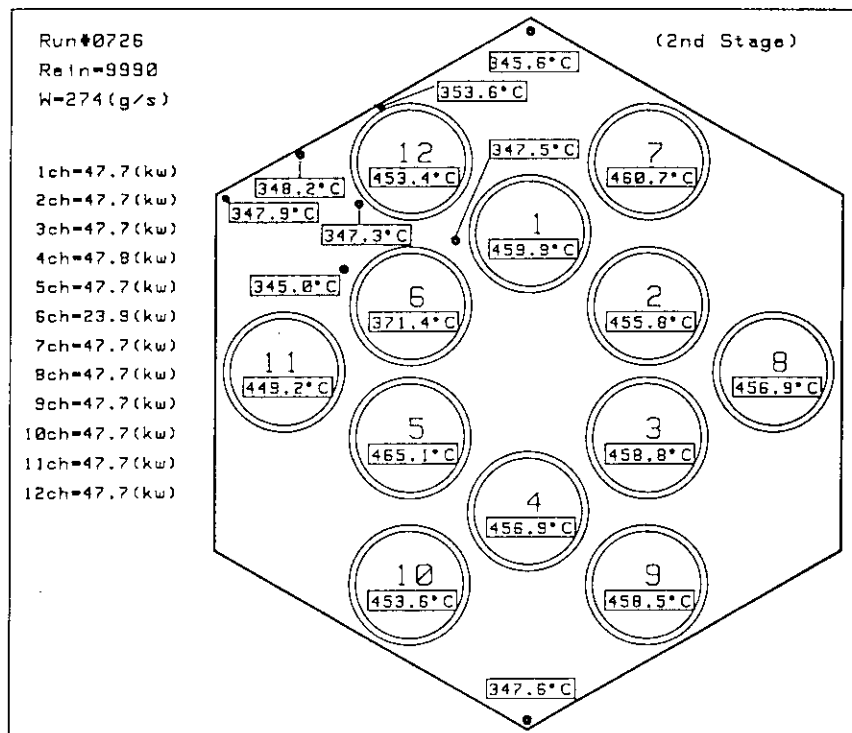


(d) $Q_6/Q_a = 150\%$

Fig.4.8 (Continued)

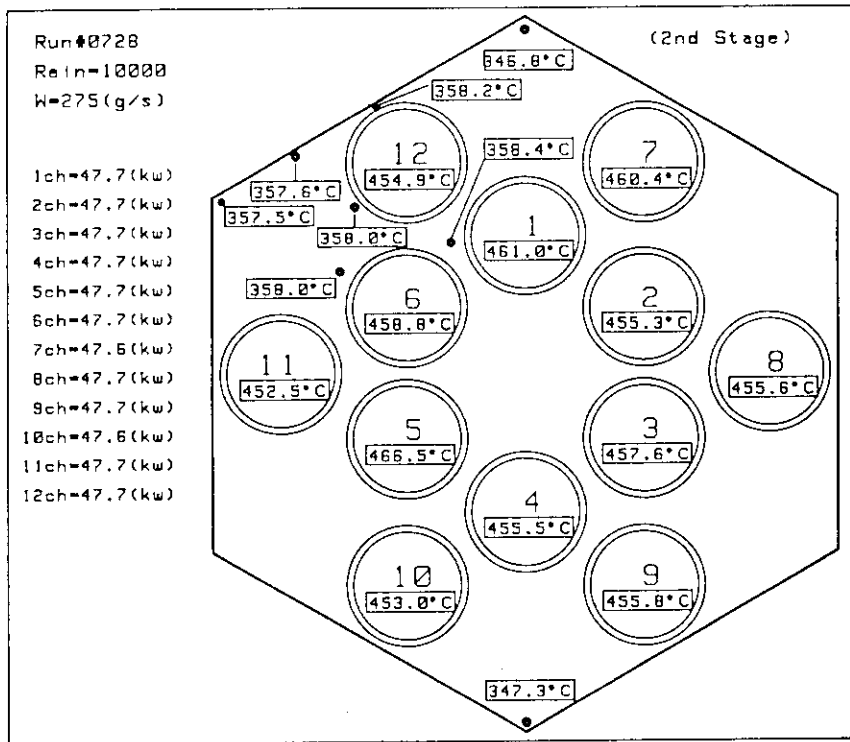


(a) $Q_6/Q_a = 0\%$

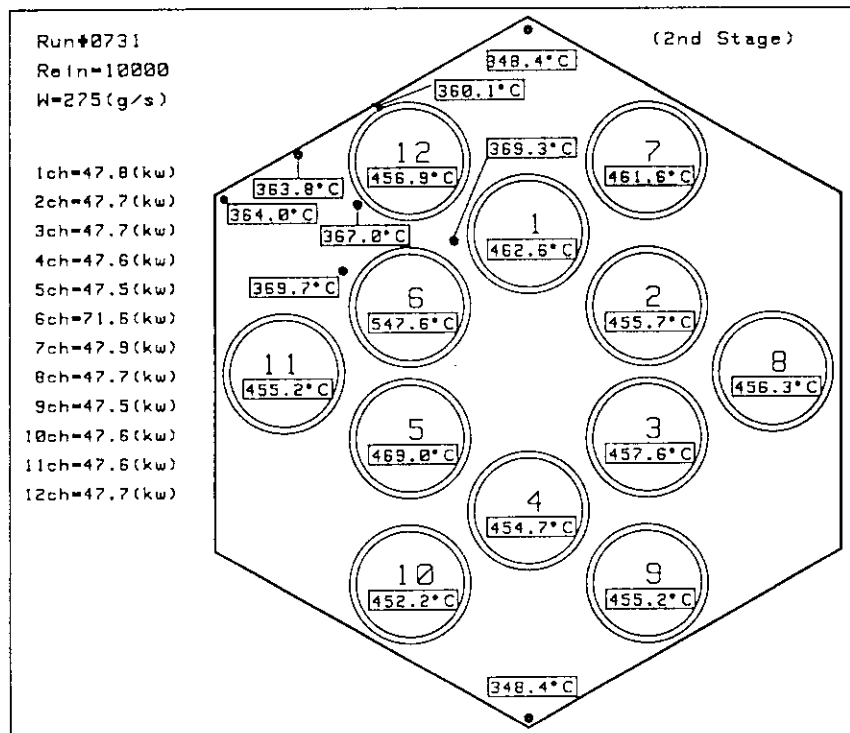


(b) $Q_6/Q_a = 50\%$

Fig.4.9 Horizontal temperature distribution in graphite fuel block (Re_{in} ≅ 10000)



(c) $Q_6/Q_a = 100\%$



(d) $Q_6/Q_a = 150\%$

Fig.4.9 (Continued)

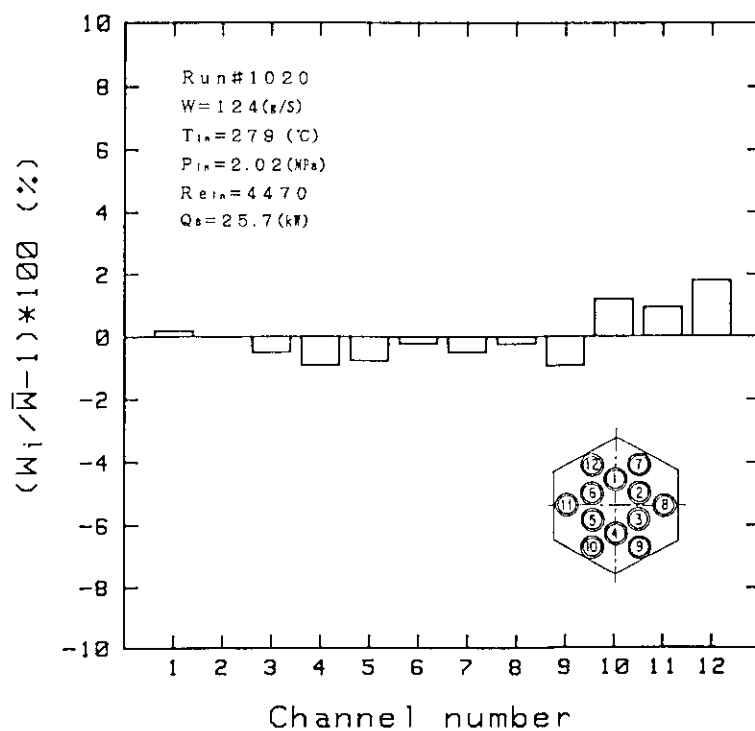


Fig.4.10 Flow rate distribution in slant power distribution test (Re_{in} ≈ 4500)

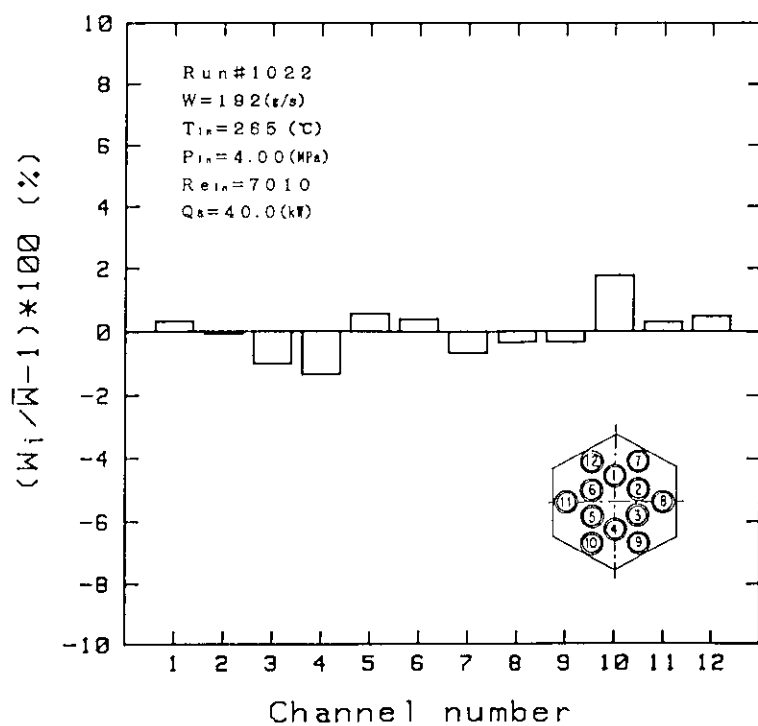


Fig.4.11 Flow rate distribution in slant power distribution test (Re_{in} ≈ 7000)

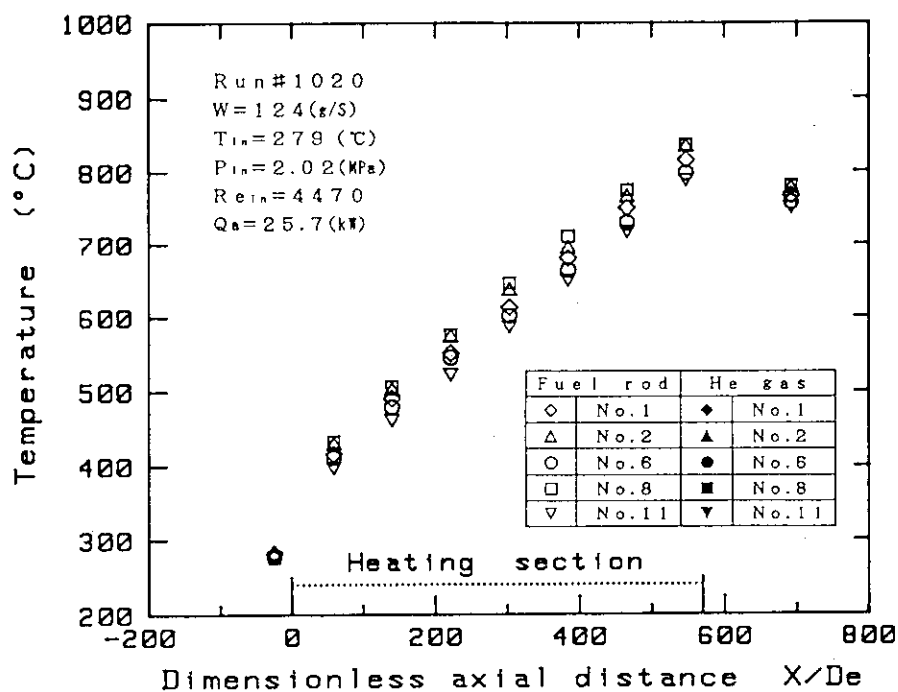


Fig.4.12 Axial temperature distribution in slant power distribution test ($Re_{in} \approx 4500$)

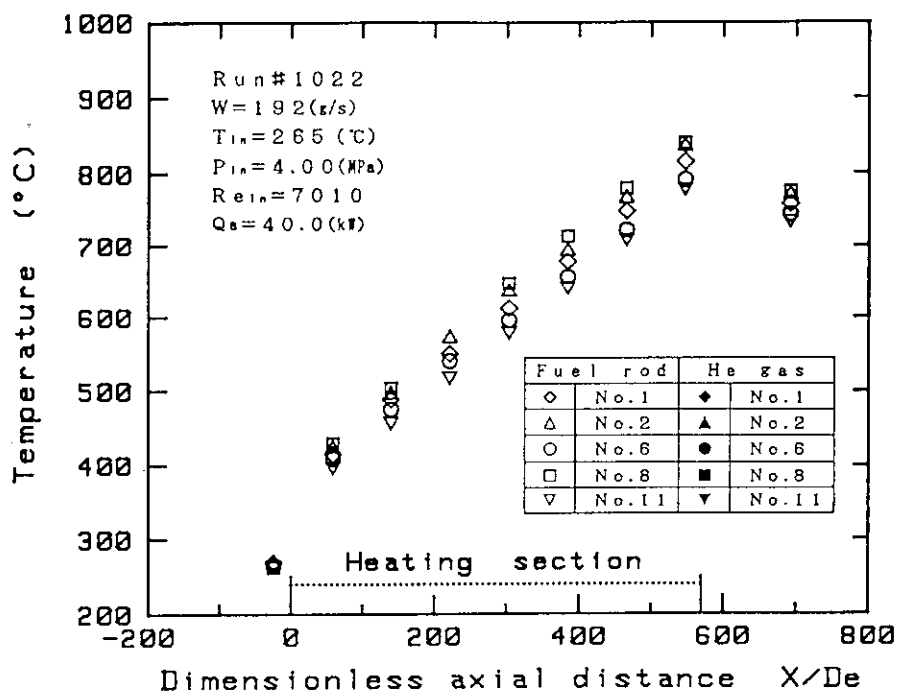


Fig.4.13 Axial temperature distribution in slant power distribution test ($Re_{in} \approx 7000$)

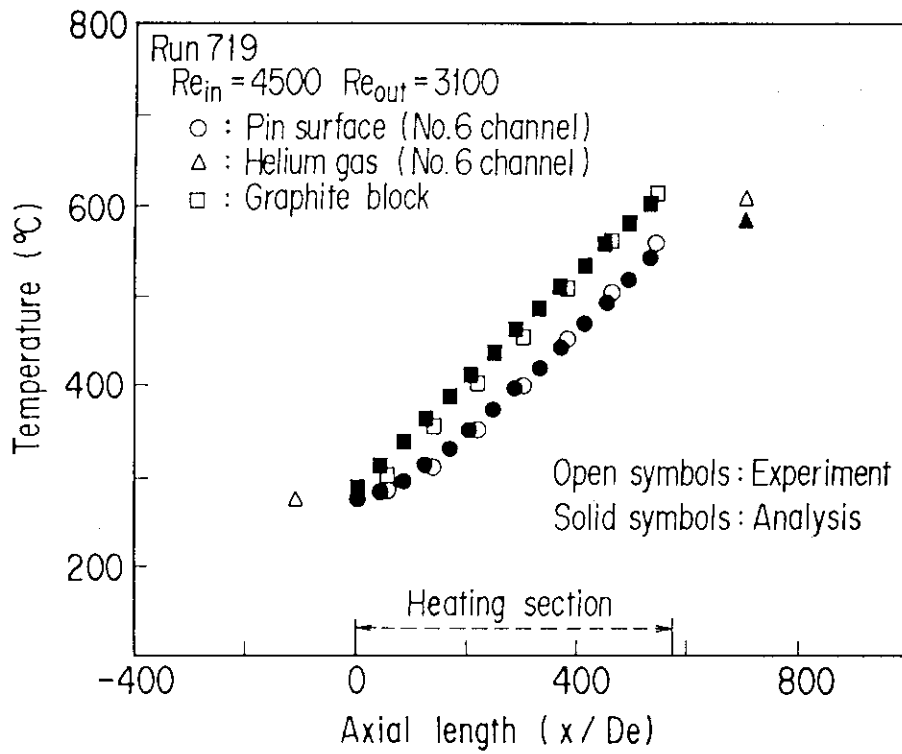


Fig.4.14 Comparison of analytical and experimental results in asymmetric power distribution ($Q_6/Q_a = 0\%$)

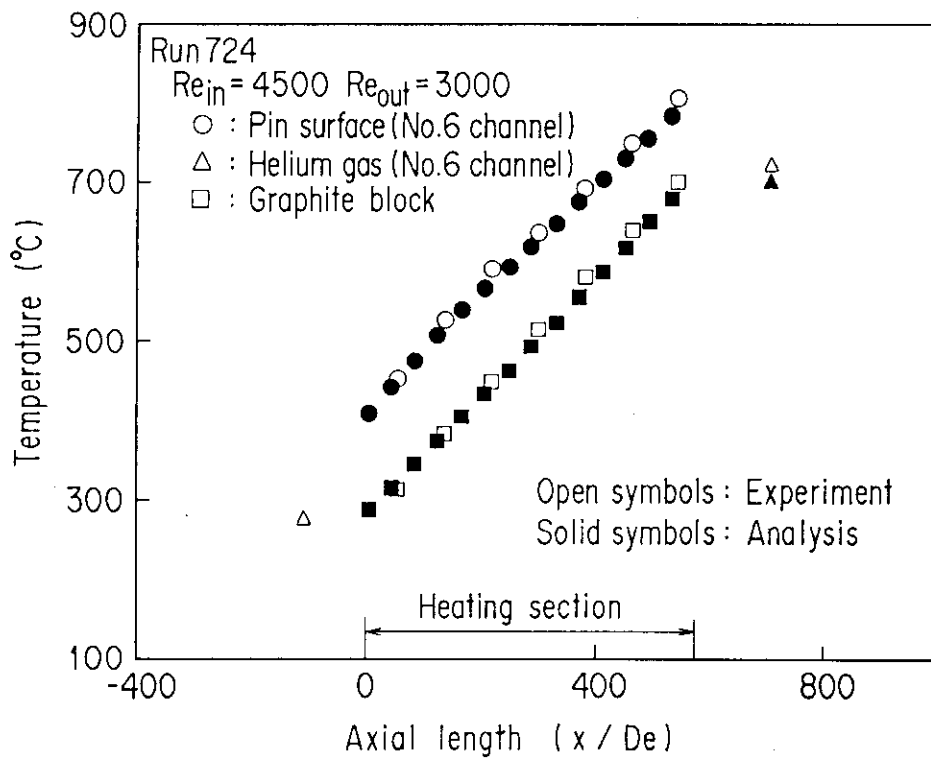


Fig.4.15 Comparison of analytical and experimental results in asymmetric power distribution ($Q_6/Q_a = 150\%$)

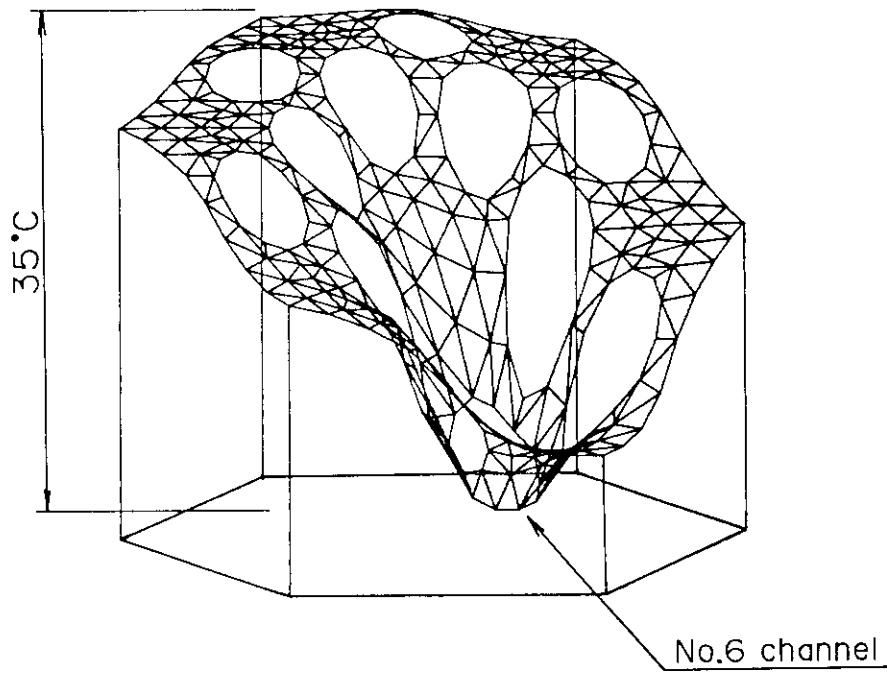


Fig.4.16(a) Bird's eye view of calculated temperature distribution in horizontal plane at $x/De=535$ (asymmetric power distribution test, $Q_6/Q_a = 0\%$)

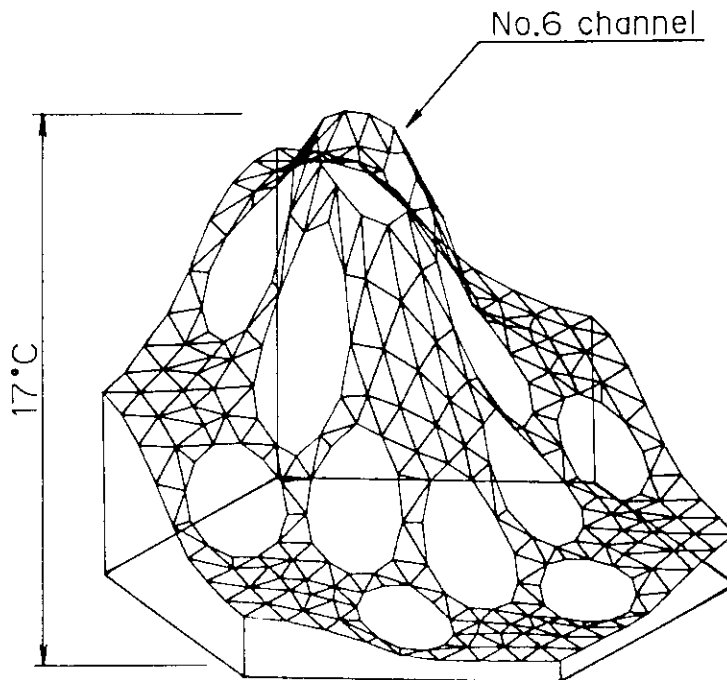


Fig.4.16(b) Bird's eye view of calculated temperature distribution in horizontal plane at $x/De=535$ (asymmetric power distribution test, $Q_6/Q_a = 0\%$)

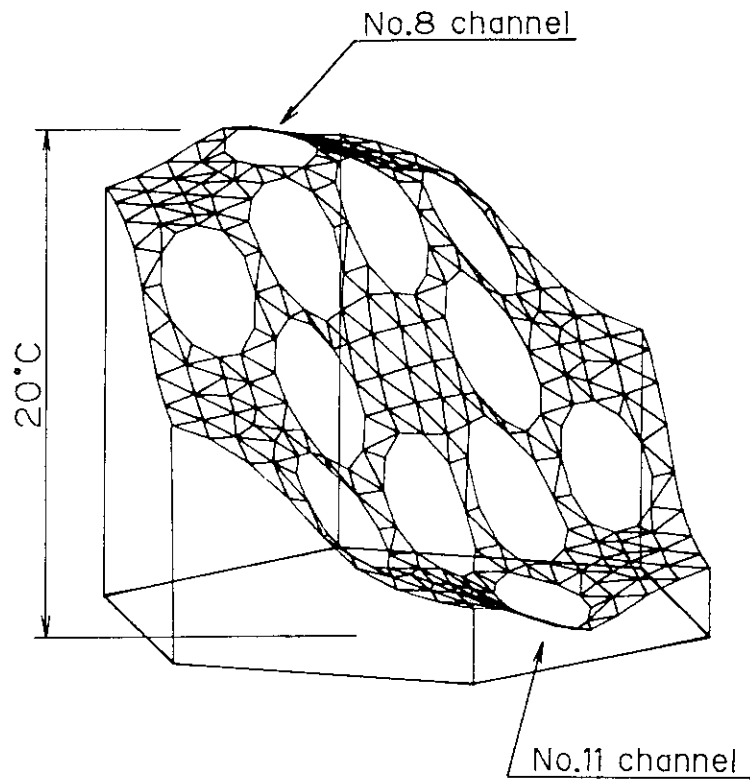


Fig.4.16(c) Bird's eye view of calculated temperature distribution in horizontal plane at $x/De=535$ (slant power distribution test)

5. 結 言

実機燃料体と同一形状、材質を有する模擬燃料体を用いて、カラム内の発熱分布を不均一に変化させた試験（不平衡出力試験）と、傾斜状に変化させた試験（傾斜出力試験）を行い、ヘリウムガスを約 750 °Cまで加熱して、次の結果が得られた。

- (1) ヘリウムガス流量は、模擬燃料棒の発熱量変化に従って配分される。とくに、不平衡出力試験では、発熱量を変えたチャンネルを中心にして配分状況が大きく変化する。
- (2) 各チャンネル出口のヘリウムガス温度差は、チャンネル間での熱移動がない断熱条件で計算した温度差に比べてかなり小さく、かなりの熱が黒鉛ブロックを介してチャンネル間を熱伝導で移動していることが明らかとなった。

これに関連して、3次元温度分布解析コードを用いて燃料ブロック断面内の温度分布を計算した結果、断面内温度分布は、ブロックの優れた熱伝導性能によって平坦化される方向にあることが明らかとなった。

なお、本試験終了後に試験体を取り出して目視検査を行ったが、模擬燃料棒、黒鉛ブロック等にはなんら異常がみられなかったことを付記しておく。

謝 辞

本試験を遂行するに当たって、種々のご指導を頂いた河村 洋前 HENDEL 開発試験室室長、井澤直樹 前 HENDEL 管理室主査、下村寛昭 HENDEL 管理室室長、多大なご協力を頂いた HENDEL 管理室の方々に深く感謝します。

5. 結 言

実機燃料体と同一形状、材質を有する模擬燃料体を用いて、カラム内の発熱分布を不均一に変化させた試験（不平衡出力試験）と、傾斜状に変化させた試験（傾斜出力試験）を行い、ヘリウムガスを約 750 °Cまで加熱して、次の結果が得られた。

- (1) ヘリウムガス流量は、模擬燃料棒の発熱量変化に従って配分される。とくに、不平衡出力試験では、発熱量を変えたチャンネルを中心にして配分状況が大きく変化する。
- (2) 各チャンネル出口のヘリウムガス温度差は、チャンネル間での熱移動がない断熱条件で計算した温度差に比べてかなり小さく、かなりの熱が黒鉛ブロックを介してチャンネル間を熱伝導で移動していることが明らかとなった。

これに関連して、3次元温度分布解析コードを用いて燃料ブロック断面内の温度分布を計算した結果、断面内温度分布は、ブロックの優れた熱伝導性能によって平坦化される方向にあることが明らかとなった。

なお、本試験終了後に試験体を取り出して目視検査を行ったが、模擬燃料棒、黒鉛ブロック等にはなんら異常がみられなかったことを付記しておく。

謝 辞

本試験を遂行するに当たって、種々のご指導を頂いた河村 洋前 HENDEL 開発試験室室長、井澤直樹 前HENDEL管理室主査、下村寛昭 HENDEL 管理室室長、多大なご協力を頂いた HENDEL 管理室の方々に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 「高温工学試験研究の現状」, 日本原子力研究所, 1988.
- 2) 日野, 丸山, 高瀬他: 「高温ガス実験炉燃料体の伝熱流動試験(Ⅱ), HENDEL 多チャンネル試験装置による均一発熱試験結果」, 日本原子力学会誌, Vol. 28, No. 6, pp. 527-533 (1986).
- 3) 丸山, 高瀬, 日野他: 「燃料体スタック実証試験部(T₁)多チャンネル試験結果・I(中温模擬燃料棒を用いた均一出力分布試験)」, JAERI-M 85-067 (1985).
- 4) 丸山, 藤本, 木曾他: 「熱流動・熱伝導連成解析コードFLOWNET/TRUMPの検証」, JAERI-M 88-173 (1988).
- 5) 井澤, 高瀬, 丸山他: 「燃料体スタック実証試験部(HENDEL T₁)の概要と建設」, 日本原子力学会誌, Vol. 27, No. 12, pp. 1136-1146 (1985).
- 6) 丸山, 菱田: 「VHTR燃料体3次元熱伝導解析コード(TBLOCK)」, JAERI-M 85-145 (1985).
- 7) 高瀬, 丸山, 日野他: 「高温ガス実験炉燃料体の伝熱流動試験(I), HENDEL 1チャンネル試験装置による一様発熱試験の結果」, 日本原子力学会誌, Vol. 28, No. 5, pp. 428-435 (1986).
- 8) 日野, 高瀬, 丸山他: 「高温ガス実験炉燃料体の伝熱流動試験(Ⅳ), HENDEL 1チャンネル試験装置による高温試験結果」, 日本原子力学会誌, Vol. 30, No. 4, pp. 343-349 (1988).
- 9) Maruyama, S., Takase, K., Hino, R. et al.: "Experimental studies on the thermal and hydraulic performance of the fuel stack of the VHTR, Part I: HENDEL single-channel tests with uniform heat flux", Nuclear Engineering and Design, Vol. 102, pp. 1-9 (1987).

付録1 ヘリウムガス物性値

ヘリウムガス物性値の算出に当たっては、圧力P (kg/cm²)と温度T (°C)を用いる。圧力と温度は下記の式でPbar と Tk に換算する。

$$P_{\text{bar}} = 0.9807 * P \quad (\text{bar})$$

$$T_{\text{k}} = 273.16 + T \quad (\text{K})$$

(1) 比熱 $c_p = 1.2406 \quad (\text{kcal/kg } ^\circ\text{C})$

(2) 密度 $\rho \quad (\text{kg/m}^3)$

$$\rho = ((1 + 4 * P_{\text{bar}} * X_x / 0.0207723 / T_{\text{k}})^{0.5} - 1) / 2 / X_x$$

$$\text{ここで, } X_x = 4.5 * 10^{-4} + 5.42 / (1890 + T_{\text{k}})$$

(3) 熱伝導率 $\lambda_g \quad (\text{kcal/mhr } ^\circ\text{C})$

$$\begin{aligned} \lambda_g = & 2.5542 * 10^{-3} * T_{\text{k}}^{0.69} \\ & + 7.9378 * 10^9 * T / (T^5 + 4.29 * 10^{14}) \\ & + 2.0038 * 10^{-4} * \rho + 2.0554 * 10^{-6} * \rho^2 \end{aligned}$$

(4) 粘性係数 $\mu \quad (\text{kg s/m}^2)$

$$\begin{aligned} \mu = & 3.8545 * 10^{-8} * T_{\text{k}}^{0.69} \\ & + 5.0985 * 10^{-8} / (0.52 + T_{\text{k}} / 569.6) \\ & + 2.7226 * 10^{-11} * \rho^2 \end{aligned}$$

(5) 動粘性係数 $\nu = \mu * 9.80665 / \rho \quad (\text{m}^2/\text{s})$

(6) プラントル数 $Pr = \nu / (\lambda / c_p / \rho) * 3600$

付録2 黒鉛等の物性値

- (1) 黒鉛熱伝導率 (黒鉛スリーブ, 燃料ブロック等)
- λ_g
- (kcal/mhr
- $^{\circ}$
- C)

$$\begin{aligned} \lambda_g = & 26.37655 + 0.8169476 * T \\ & - 6.181526 * 10^{-3} * T^2 \\ & + 2.150494 * 10^{-5} * T^3 \\ & - 4.207394 * 10^{-8} * T^4 \\ & + 4.874144 * 10^{-11} * T^5 \\ & - 3.308559 * 10^{-14} * T^6 \\ & + 1.212845 * 10^{-17} * T^7 \\ & - 1.847671 * 10^{-21} * T^8 \end{aligned}$$

- (2) 窒化ホウ素熱伝導率
- λ_{bn}
- (kcal/mhr
- $^{\circ}$
- C)

$$\begin{aligned} \lambda_{bn} = & 3.88362 + 6.070614 * 10^{-3} * T \\ & - 1.046514 * 10^{-5} * T^2 + 5.06314 * 10^{-9} * T^3 \end{aligned}$$

- (3) ニクロム5の電気抵抗変化率
- β

$$\begin{aligned} \beta = & 1.017657 - 4.49413 * 10^{-4} * T \\ & + 7.935643 * 10^{-6} * T^2 - 5.164237 * 10^{-8} * T^3 \\ & + 1.840618 * 10^{-10} * T^4 - 3.783696 * 10^{-13} * T^5 \\ & + 4.417738 * 10^{-16} * T^6 - 2.709139 * 10^{-19} * T^7 \\ & + 6.764642 * 10^{-23} * T^8 \end{aligned}$$

- (4) インコネル600の特性値

- (a) 熱伝導率
- λ_{inc}
- (kcal/mhr
- $^{\circ}$
- C)

$$\begin{aligned} \lambda_{inc} = & 64.66561 - 0.3946704 * T \\ & + 1.21578 * 10^{-3} * T^2 - 1.751215 * 10^{-6} * T^3 \\ & + 1.231814 * 10^{-9} * T^4 - 3.397479 * 10^{-13} * T^5 \end{aligned}$$

- (b) 熱膨張率
- β_{exp}
- (1/
- $^{\circ}$
- C)

$$\begin{aligned} \beta_{exp} = & (13.24145 + 3.39624 * 10^{-3} * T \\ & + 1.115586 * 10^{-7} * T^2) * 10^{-6} \end{aligned}$$

T : 温度 ($^{\circ}$ C)

付録3 T_{1-M}用中温試験用模擬燃料棒の各部寸法

Pin	加熱長さ (m)						
	1段	2段	3段	4段	5段	6段	7段
No.1	0.516	0.519	0.519	0.517	0.518	0.512	0.520
No.2	0.519	0.517	0.515	0.519	0.519	0.513	0.522
No.3	0.521	0.520	0.520	0.522	0.521	0.520	0.524
No.4	0.516	0.518	0.517	0.517	0.520	0.513	0.525
No.5	0.522	0.519	0.519	0.521	0.520	0.518	0.524
No.6	0.516	0.520	0.516	0.522	0.521	0.522	0.525
No.7	0.517	0.520	0.517	0.522	0.521	0.519	0.524
No.8	0.520	0.518	0.516	0.521	0.520	0.518	0.524
No.9	0.518	0.524	0.520	0.521	0.519	0.516	0.523
No.10	0.521	0.521	0.518	0.523	0.517	0.517	0.525
No.11	0.519	0.519	0.518	0.521	0.515	0.519	0.526
No.12	0.521	0.523	0.517	0.519	0.515	0.517	0.523

P i n	表 面 温 度 测 定 位 置 (m)						
	1 段	2 段	3 段	4 段	5 段	6 段	7 段
No. 1	0.4097	0.4097	0.4097	0.4097	0.4092	0.4102	0.4097
No. 2	0.4102	0.4092	0.4097	0.4102	0.4092	0.4097	0.4097
No. 3	0.4107	0.4092	0.4087	0.4087	0.4097	0.4087	0.4097
No. 4	0.4097	0.4097	0.4097	0.4102	0.4097	0.4092	0.4092
No. 5	0.4097	0.4097	0.4097	0.4097	0.4097	0.4097	0.4087
No. 6	0.4097	0.4097	0.4097	0.4097	0.4097	0.4097	0.4097
No. 7	0.4097	0.4092	0.4097	0.4097	0.4092	0.4102	0.4097
No. 8	0.4097	0.4092	0.4097	0.4092	0.4092	0.4092	0.4097
No. 9	0.4107	0.4097	0.4097	0.4102	0.4097	0.4092	0.4097
No. 10	0.4097	0.4097	0.4097	0.4092	0.4097	0.4097	0.4097
No. 11	0.4092	0.4097	0.4092	0.4097	0.4097	0.4097	0.4097
No. 12	0.4092	0.4092	0.4092	0.4097	0.4097	0.4097	0.4097

Pin	サブロッド全長 (m)						
	1段	2段	3段	4段	5段	6段	7段
No.1	0.57015	0.57015	0.57020	0.57020	0.57015	0.57020	0.57010
No.2	0.57010	0.57020	0.57020	0.57020	0.57020	0.57000	0.57020
No.3	0.57020	0.57020	0.57020	0.57020	0.57020	0.57015	0.57015
No.4	0.57020	0.57015	0.57020	0.57020	0.57015	0.57020	0.57015
No.5	0.57010	0.57020	0.57015	0.57020	0.57012	0.57020	0.57015
No.6	0.57010	0.57020	0.57020	0.57020	0.57020	0.57020	0.57015
No.7	0.57015	0.57020	0.57020	0.57020	0.57020	0.57020	0.57015
No.8	0.57015	0.57020	0.57020	0.57020	0.57020	0.57010	0.57020
No.9	0.57010	0.57020	0.57020	0.57020	0.57015	0.57015	0.57020
No.10	0.57015	0.57020	0.57020	0.57020	0.57020	0.57015	0.57020
No.11	0.57015	0.57020	0.57020	0.57020	0.57010	0.57020	0.57020
No.12	0.57015	0.57020	0.57020	0.57020	0.57015	0.57010	0.57020

Pin	黒鉛スリーブ外径 (mm)						
	1段	2段	3段	4段	5段	6段	7段
No.1	45.950	45.965	45.950	45.960	45.980	45.950	45.950
No.2	45.955	45.955	45.945	45.935	45.950	45.955	45.955
No.3	45.940	45.965	45.980	45.935	45.945	45.955	45.960
No.4	45.975	45.955	45.940	45.950	45.950	45.955	45.955
No.5	45.970	45.935	45.940	45.920	45.940	45.950	45.955
No.6	45.970	45.930	45.925	45.955	45.925	45.950	45.970
No.7	45.935	45.950	45.970	45.955	45.955	45.945	45.955
No.8	45.940	45.935	45.950	45.965	45.980	45.935	45.975
No.9	45.955	45.970	45.930	45.940	45.950	45.945	45.970
No.10	45.945	45.965	45.950	45.955	45.995	45.945	45.945
No.11	45.955	45.960	45.960	45.955	45.960	45.960	45.945
No.12	45.980	45.955	45.955	45.950	45.940	45.955	45.940

Pin	黒鉛スリ - プ内径 (mm)						
	1段	2段	3段	4段	5段	6段	7段
No.1	32.135	32.135	32.145	32.140	32.145	32.175	32.155
No.2	32.125	32.160	32.135	32.135	32.155	32.135	32.160
No.3	32.130	32.140	32.130	32.150	32.145	32.175	32.170
No.4	32.130	32.155	32.150	32.130	32.120	32.155	32.160
No.5	32.135	32.135	32.160	32.135	32.150	32.160	32.170
No.6	32.130	32.135	32.155	32.140	32.155	32.170	32.165
No.7	32.120	32.145	32.140	32.145	32.150	32.175	32.165
No.8	32.140	32.155	32.140	32.140	32.155	32.150	32.165
No.9	32.130	32.125	32.150	32.145	32.145	32.155	32.175
No.10	32.120	32.140	32.145	32.140	32.135	32.170	32.175
No.11	32.130	32.130	32.150	32.150	32.120	32.150	32.180
No.12	32.130	32.145	32.155	32.145	32.160	32.155	32.165

各チャンネルのシースヒータ外径 (mm)					
No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
31.62	31.61	31.60	31.61	31.61	31.61
No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
31.61	31.61	31.61	31.60	31.62	31.61

Pin	発熱体電気抵抗 (Ω)						
No.	1段	2段	3段	4段	5段	6段	7段
No.1	0.1792	0.1799	0.1800	0.1804	0.1803	0.1793	0.1782
No.2	0.1795	0.1806	0.1809	0.1808	0.1783	0.1755	0.1765
No.3	0.1768	0.1773	0.1770	0.1767	0.1777	0.1770	0.1761
No.4	0.1789	0.1794	0.1797	0.1803	0.1810	0.1788	0.1778
No.5	0.1768	0.1778	0.1771	0.1766	0.1774	0.1763	0.1755
No.6	0.1780	0.1791	0.1807	0.1789	0.1795	0.1773	0.1771
No.7	0.1781	0.1776	0.1789	0.1783	0.1783	0.1785	0.1771
No.8	0.1790	0.1792	0.1802	0.1808	0.1795	0.1797	0.1763
No.9	0.1779	0.1784	0.1778	0.1798	0.1780	0.1777	0.1756
No.10	0.1786	0.1791	0.1788	0.1803	0.1781	0.1773	0.1758
No.11	0.1805	0.1809	0.1812	0.1819	0.1816	0.1809	0.1788
No.12	0.1776	0.1793	0.1776	0.1797	0.1784	0.1780	0.1770

付録4 T_{1-M}用黒鉛ブロックの燃料孔内径

Block	燃 料 孔 内 径 (mm)							
	1、2段	3段	4段	5段	6段	7段	8段	9段
No.1	53.045	53.090	53.060	53.050	53.020	53.070	53.080	53.040
No.2	53.035	53.040	53.060	53.060	53.030	53.060	53.070	53.050
No.3	53.040	53.050	53.080	53.050	53.020	53.060	53.060	53.050
No.4	53.040	53.100	53.060	53.050	53.040	53.070	53.070	53.040
No.5	53.040	53.090	53.070	53.070	53.030	53.080	53.070	53.050
No.6	53.045	53.090	53.060	53.050	53.060	53.070	53.080	53.060
No.7	53.045	53.070	53.050	53.050	53.030	53.040	53.100	53.060
No.8	53.045	53.070	53.040	53.050	53.020	53.050	53.080	53.060
No.9	53.045	53.060	53.070	53.050	53.030	53.050	53.070	53.050
No.10	53.050	53.090	53.070	53.060	53.040	53.060	53.080	53.040
No.11	53.045	53.100	53.060	53.100	53.040	53.080	53.060	53.060
No.12	53.045	53.050	53.060	53.060	53.040	53.080	53.070	53.060

付録5 流路圧力損失の評価方法

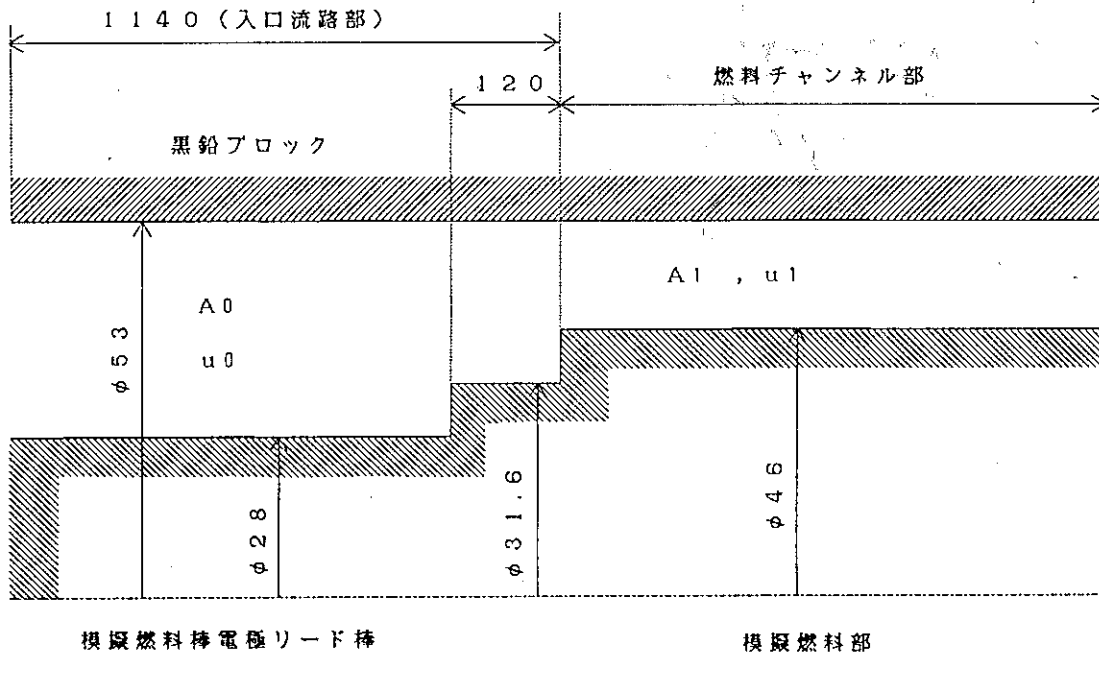
(1) 入口流路部の圧力損失

入口流路部における圧力損失は次式で与えられる。このとき、計算に必要な各部の圧力損失係数は、1チャンネル試験装置における測定データを基にして決定している。

$$\begin{aligned} \Delta P_{in} = & 1.42 * (\rho_{in} * u_0^2 / 2g) \\ & + (0.316 Re_0^{-0.25}) * (1.14 / 0.025) * (\rho_{in} * u_0^2 / 2g) \\ & + (4.303 Re_1^{-0.112}) * (\rho_{in} * u_1^2 / 2g) \end{aligned}$$

ここで、ヘリウムガスの密度 ρ_{in} は、入口ガス温度測定値と入口圧力から付録1に示す式を用いて計算する。以下、ヘリウムガスの物性値はすべて付録1の式を用いる。

下図に入口流路部圧力損失に用いた寸法の概要を示す。レイノルズ数 Re_0, Re_1 、流速 u_0, u_1 は下図に示す寸法から算出する。



(2) 燃料冷却チャンネル部の圧力損失

燃料冷却チャンネル部の圧力損失は、各段毎に次の圧力損失式から計算する。

$$\Delta P = 4f * \frac{L}{De} * \frac{\rho_m u^2}{2} + (\rho_{out} * u_{out}^2 - \rho_{in} * u_{in}^2)$$

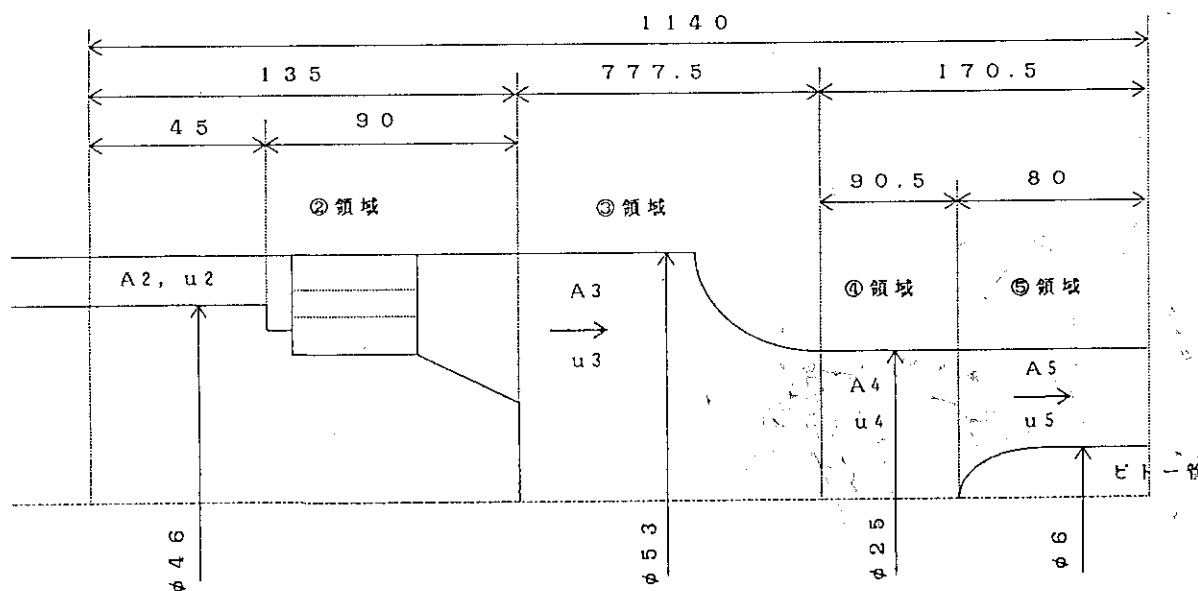
ここで、Lは各段の全長(570 mm)で、等価直径 De、流速 u は付録3、4に示す寸法を基にそれぞれ計算する。入口・出口のヘリウムガスの密度 ρ_{in}, ρ_{out} 及び各段の平均密度 ρ_m は、入口・出口ガス温度と各段中央における温度と、それぞれの位置における圧力を基に計算する。それぞれの位置の圧力は、入口圧力測定値からそこまでの圧力損失を差し引いて得られる。

また、 f は摩擦損失係数で、1チャンネル試験結果より次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{Re} \leq 1900 & \quad f = 28/\text{Re} \\ \text{Re} \geq 2000 & \quad f = 0.094 \text{Re}^{-0.25} \end{aligned}$$

(3) 出口流路部の圧力損失

出口流路部における圧力損失は、下図に示すように5領域に分割して計算する。出口部全体の圧力損失は次式で与えられる。各部の計算に必要な圧力損失係数は、1チャンネル試験装置における測定データを基にして決定している。



(a) ②領域

$$\begin{aligned} \Delta P_2 = & (0.316 \text{Re}_2^{-0.25}) * (0.045/0.007) * (\rho_0 * u_2^2/2g) \\ & + (33256 * \text{Re}_2^{-1.483}) * (\rho_0 * u_2^2/2g) \end{aligned}$$

(b) ③領域

$$\begin{aligned} \Delta P_3 = & (0.316 \text{Re}_2^{-0.25}) * (0.7775/0.053) * (\rho_0 * u_3^2/2g) \\ & + (1.0) * (\rho_0 * u_3^2/2g) \end{aligned}$$

(c) ④領域

$$\begin{aligned} \Delta P_4 = & (0.316 \text{Re}_2^{-0.25}) * (0.0905/0.025) * (\rho_0 * u_4^2/2g) \\ & + (1.02) * (\rho_0 * u_4^2/2g) \end{aligned}$$

(d) ⑤領域

$$\begin{aligned} \Delta P_5 = & (0.316 \text{Re}_2^{-0.25}) * (0.080/0.019) * (\rho_0 * u_5^2/2g) \\ & + (2.0) * (\rho_0 * u_5^2/2g) \end{aligned}$$

以下に、②～⑤の領域の面積、長さ、等価直径及び速度を示す。

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