技術

150. 高温ガス実験炉燃料体の伝熱流動試験, (Ⅲ)

HENDEL 多チャンネル試験装置による
不均一発熱試験結果と解析丸山 創*, 高瀬 和之*, 日野竜太郎*,
井澤直樹*, 河村 洋*, 下村 寛昭*

(1986年 4月4日 受理)

*Experimental Studies on Thermal and Hydraulic Performance
of Fuel Stack of VHTR, (Ⅲ)**Experimental and Analytical Results of HENDEL Multi-Channel Test Rig
with 12 Independently Heated Fuel Rods*By Soh MARUYAMA, Kazuyuki TAKASE,
Ryutaroh HINO, Naoki IZAWA,
Hiroshi KAWAMURA and Hiroaki SHIMOMURA

Experimental studies on heat transfer and fluid-dynamic characteristics of a mock-up fuel stack of the Very High Temperature Gas Cooled Reactor (VHTR) were carried out by the use of a multi-channel test rig of Helium Engineering Demonstration Loop (HENDEL). Heat generation rate of each simulated fuel rod was varied independently to simulate a power distribution of the VHTR core in a horizontal plane. In parallel with this experiment, a three-dimensional thermal analysis code was developed in order to check the experimental temperature distribution of the fuel stack.

Experimental results showed that the distribution of coolant flow rate varied with the temperature distortion in the fuel stack. The variation of calculated temperature distribution in the fuel stack was about 20~35°C in each case, indicating that the temperature distortion in the fuel stack was flattened by thermal conduction through the graphite.

KEYWORDS: *experiment, flow rate, fuel rods, fuel stack, helium gas loop, multichannel test, numerical analysis, power distribution, temperature distribution, thermal conduction, VHTR reactor*

I. 緒 言

現在, 日本原子力研究所において, 多目的高温ガス実験炉(VHTR, 熱出力 50 MW, 原子炉出口冷却材温度 950°C; 以後, 実験炉)の研究・開発が進められている⁽¹⁾。実験炉炉心部は, Fig. 1に示すような燃料要素が垂直に積み重ねられたカラムの集合体から構成され, さらにその外周を可動反射体, 固定反射体を取り囲んでいる。炉心に流入した冷却材(Heガス)は, 燃料棒と黒鉛ブロックにより構成された環状流路を下向きに流れ, 最高 1,000°C まで加熱される。大型構造機器実証試験装置⁽²⁾(HENDEL; Helium Engineering Demon-

stration Loop)の燃料体スタック実証試験部⁽³⁾(T₁)は, 実験炉燃料体の伝熱流動特性を把握することを目的とした試験部であり, 冷却材流路 1 本を模擬した 1 チャンネル試験装置(T_{1-s})と燃料体 1 カラムを模擬した多チャンネル試験装置(T_{1-m})から構成されている。

第 I 報⁽⁴⁾では, T_{1-s} による均一熱流束分布の場合の伝熱流動特性試験結果について, また第 II 報⁽⁵⁾では, T_{1-m} による均一発熱分布の場合の試験結果について報告した。これらの試験により実験炉燃料体の基本的な伝熱流動特性を把握することができ, その結果は, 本報で述べる数値解析に反映された。一方炉心では,

* 日本原子力研究所 (Japan At. Energy Res. Inst.)

Fig. 1 Fuel element for VHTR

7カラム(1領域)*ごとに流量調節機構および制御棒駆動機構が設置され、1領域を単位として冷却材流量、反応度を制御している。したがって、炉心水平断面内の出力密度は、領域内では中央が小さく、制御カラムを中心とするすり鉢状の分布となっている。このような出力分布のひずみが原因となって、燃料要素内に大きな温度勾配が生じる可能性がある。そこで、 T_{1-M} を用いて、燃料カラム内に水平方向出力分布のひずみがある場合の伝熱流動特性試験を実施し、出力分布のひずみが、冷却材流量配分あるいは黒鉛ブロック温度分布に及ぼす影響を調べた。本報では、 T_{1-M} による伝熱流動試験結果および新たに作成した3次元温度分布解析コードによる解析結果について報告する。

II. 試験装置および試験条件

1. 試験装置

T_1 試験部は、Fig. 2に示すように、 T_{1-S} ③と T_{1-M} ④から構成されている。ガス循環機①を出たHeガスは、加熱器②により試験条件に応じた温度にまで昇温された後、オリフィス型流量計を経て試験部に流入する。試験部において最高1,000°Cにまで加熱されたHeガスは、圧力容器に内蔵された加圧水型冷却器⑤および冷却器⑥を経て循環機に戻る。

多チャンネル試験装置の構造をFig. 3に示す。模擬燃料カラムは、Fig. 1に示した実験炉燃料要素と同一形状を有する模擬ブロック①を合計11段(燃料ブロック7段+上部/下部可動反射体ブロック各2段)積み重ね12本の燃料挿入孔に模擬燃料棒②を挿入したものである。Heガスは、内径53mmの燃料挿入孔と外径46mm

Fig. 2 Flowsheet of M_1 loop and T_1 test section
の模擬燃料棒の間の環状流路内③(等価直径 $D_e=7$ mm)を downward に流れながら加熱される。模擬ブロックの外周には、模擬燃料カラムの支持と模擬燃料カラムと補償ヒータブロック⑥の隙間の充填を兼ねた金属製側部ブロック⑤が配置されている。補償ヒータブロックは、コージライト($2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$)製の断熱

Fig. 3 Schematic drawing of multi-channel test rig

* 炉心を構成する単位で、燃料要素7体、上部/下部可動反射体それぞれ2体合計11体を垂直に積み重ねたものを“カラム”という。また燃料カラム6カラム、制御カラム1カラム合計7カラムの集合を“領域(リージョン)”と呼び、1領域ごとに冷却材流量、反応度を制御する。

ブロックにカンタル線のヒータエレメントを巻き付けたもので、さらにその外側に繊維状断熱材、金属ケーシングが設置されている。ヒータは、半径方向に2分割、軸方向に9分割され、合計18回路から構成されている。同ヒータの出力は模擬ブロック表面温度と断熱ブロック温度が等しくなるように自動制御され、半径方向への熱損失の低減化が図られている。

本試験に用いた模擬燃料棒は、前報の試験に使用した模擬燃料棒と同じ中温試験用模擬燃料棒である。同模擬燃料棒は、ニクロム合金を発熱体とした金属シースヒータの外側を実験炉燃料棒と同一形状を有する黒鉛スリーブで覆ったものである。黒鉛スリーブは合計7本使用し、1本の寸法は長さ570 mm、外径46 mmで、その表面にはスペーサリブが軸方向および周方向にそれぞれ3箇所取り付けられている。発熱体は、長さ530 mmのニクロム合金製のコイルをNi製の接続電極により7本連結したものである。発熱体と金属シースの間には、絶縁材のチ化ホウ素(BN)が充填されている。本模擬燃料棒の軸方向熱流束分布はほぼ均一である。

計測点の配置をFig. 4に示す。模擬燃料棒の黒鉛スリーブ表面には、各段の上端から410 mmの位置に表

Fig. 4 Axial measuring position in multi-channel test rig

面(伝熱面)温度計測用のK型熱電対 T_w が設置されている。さらに模擬燃料棒の上部リードには、流路入口Heガス温度計測用熱電対 T_g が固定されている。黒鉛ブロック温度 T_b は、Fig. 5に示すように、上端より285 mmの位置において六角ブロックの頂点AおよびB点、上端より410 mmの位置においてC点に設置したK型熱電対により計測する。さらに加熱部第2段目では、上端より410 mmの位置においてブロック内部温度分布を測定するために、D~H点に熱電対を追加した。また最下段の黒鉛ブロックには、流路出口におけるHeガスの温度 T_g および流速 u を測定するための熱電対とピトー管が設置されている。

Fig. 5 Measuring positions in graphite fuel block

2. 試験条件

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

不均一出力分布試験は、黒鉛ブロックを介しての熱移動量、あるいは水平断面内の温度分布のひずみがHeガスの流量配分に及ぼす影響を定性的に把握するとともに、後述する数値解析コードの妥当性を評価することを主な目的とした試験である。したがって、水平断面内の出力分布は意図的に極端にひずませたものであり、実験炉炉心における出力分布を再現させたものではない。不均一出力分布試験条件をTable 1に示す。本試験は、層流域、遷移域、乱流域を代表する3ケース

Table 1 Experimental conditions for asymmetric power distribution test

Inlet Reynolds number Re_{in}	1,800	4,500	10,000
He gas flow rate W (g/s)	49	124	275
Inlet gas temperature $T_{g,in}$ (°C)	255	275	270
Inlet gas pressure P_{in} (MPa)	3.9	3.9	3.9
Average power $\bar{Q}$ (kW)	8.7	21.5	47.7
Power of No. 6 channel Q_6 (kW)			
$Q_6=0$	#713	#719	#725
$=0.5 \times \bar{Q}$	#714	#720	#726
$=0.75 \times \bar{Q}$	#715	#721	#727
$=\bar{Q}$	#716	#722	#728
$=1.25 \times \bar{Q}$	#717	#723	#729
$=1.5 \times \bar{Q}$	#718	#724	#731

の流動条件(チャンネル入口平均レイノルズ数 $Re_{in}=1,800, 4,500, 10,000$)で実施した。また, 本試験では, No. 6 チャンネルの模擬燃料棒の発熱量を0kW(−100%)から残る11本の平均発熱量の1.5倍(+50%)まで変化させた。

一方, 炉心燃料体1カラム内の発熱量分布は, 燃料体の炉心滞在時間を通して, 最大でもカラム内平均発熱量に対して±8%程度である。したがって, 傾斜出力

分布試験では, カラム内平均発熱量に対して±10%の直線状の出力勾配をつけ(Fig. 6 参照), 炉心におけるカラム内の出力分布を模擬した。傾斜出力分布試験条件をTable 2に示す。

Fig. 6 Slant power distribution**Table 2** Experimental conditions for slant power distribution test

Run No.		#1019	#1020	#1022	#1023
He gas flow rate W (g/s)		82	124	192	302
Inlet gas temperature $T_{g,in}$ (°C)		270	280	265	270
Inlet gas pressure P_{in} (MPa)		2.0	2.0	4.0	4.0
Inlet Reynolds number Re_{in}		3,000	4,500	7,000	11,000
Average power $\bar{Q}$ (kW)		17.2	25.7	40.0	62.9

Ⅲ. 試験結果

1. 不均一出力分布試験

(1) 温度分布

流路入口レイノルズ数を4,500とした不均一出力分布試験(Run #719)の軸方向温度分布および水平断面内温度分布をFig. 7, 8に示す。Fig. 7は, 横軸に加熱開始点を原点とする無次元距離をとり, 模擬燃料棒表面温度および流路入口/出口におけるHeガス温度を示している。Fig. 8は, 加熱部第2段目における水平断面内の, $1/12$ セクタ内の黒鉛ブロック温度および模擬燃料棒表面温度分布図である。

Fig. 7からわかるように, 加熱部出口付近において, No. 6チャンネルの模擬燃料棒表面温度は, 隣接するNo. 11, 12チャンネルと比較して約120°C, 最も離れたNo. 8, 9チャンネルよりも約160°C低い値を示している。一方, 流路出口におけるHeガス温度は, No. 11, 12チャンネルと約35°C, No. 8, 9チャンネルとは

Fig. 7 Axial temperature distribution obtained by asymmetric power distribution test: Run #719

Fig. 8 Horizontal temperature distribution in graphite fuel block: Run #719

約 60°C 程度の差しかない。また $1/12$ セクタ内の黒鉛ブロック温度分布は約 10°C 程度に過ぎない。以上のことから、ブロック内部の温度分布は、黒鉛ブロックを介しての熱伝導により平坦化されていることがわかる。黒鉛ブロック全断面内の温度分布は計測点数の制限等から実測することが不可能であったため、3次元温度分布解析コードにより求めることとした。

(2) He ガス流量配分

流路入口レイノルズ数を10,000としたときのHeガス流量配分をFig. 9に示す。同図は、平均流量に対する各流路を流れるHeガス流量の偏差を%表示したものであり、白ヌキのグラフがピット管による実測値を、黒塗りのグラフが解析値を示している。Heガス流量配分の解析は黒鉛ブロックの積層面におけるクロス流れがないものと仮定し、各流路出入口におけるHeガス温度と流路寸法から、各流路の圧力損失が等しくなるように繰り返し計算を行なった。

No. 6チャンネルに挿入した模擬燃料棒の発熱量を0kWから平均発熱量の1.5倍(71.5kW)まで変化させたとき、No. 6チャンネルのHeガス流量は、平均流量に対して+10%から-4%まで変動した。また、残る11チャンネルはほぼ逆の挙動を示し、その絶対値はNo. 6チャンネルに隣接する流路ほど大きいことがわかる。これは、各流路のHeガス温度が出力分布のひずみの影響を受けて変化することにより、圧力損失が変化してHeガス流量が再配分されるためである。例えば、ある流路の加熱量が增加すると、Heガス温度が上昇し、加速損失および摩擦損失による圧損が増加するため、圧力損失の平衡が成り立つように流量が減少する。

一方、流量配分の解析値は実測値と比較すると若干小さい値を示しているが、全体としての傾向は良く一

Fig. 9 Flow rate distribution obtained by asymmetric power distribution test in turbulent region

致している。また $\pm 0\%$ (均一出力分布) のとき、流量配分に若干のバラツキが見られるが、これは、第Ⅱ報でも述べたように、黒鉛ブロックおよび模擬燃料棒の製作誤差(ただし、公差の範囲内)による流路寸法の差に起因するものと考えられる。

2. 傾斜出力分布試験

流路入口レイノルズ数を4,500とした傾斜出力分布試験(Run #1020)の軸方向温度分布をFig. 10に示す。同一水平断面における模擬燃料棒表面温度および流路出口におけるHeガス温度の最大値と最小値の差は、それぞれ約 60°C 、約 30°C である。前者に比較して後者の値が小さくなっているのは、黒鉛ブロックを介しての熱伝導により、温度分布のひずみが平坦化されているためである。また、それぞれの温度分布の幅は、流路入口レイノルズ数の増加に伴って若干増加する傾向にある。これは、加熱強さを表す無次元熱流束 q^{+}_{in} を一定にして流路入口レイノルズ数をパラメータとした試験を行なっているため、熱流束が変化していることが原因と考えられている。

Fig. 10 Axial temperature distribution obtained by slant power distribution test: Run #1020

傾斜出力分布試験時の He ガス流量配分は不均一出力分布試験と同様な傾向が見られ、He ガス流量の偏差は最大でも 4% 程度に過ぎなかった。

IV. 数値解析

1. 基礎式

黒鉛の物性値は等方性かつ一様であるとすれば、黒鉛ブロック内部の定常状態における 3 次元温度場 $T_b(x, y, z)$ は、次の熱伝導方程式に支配される。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

また、各流路の He ガス温度および模擬燃料棒表面温度は、同一水平断面内では均一であると仮定すれば、第 i 番目の流路における熱輸送方程式は次式で表わすことができる。

$$c_p W_i \frac{\partial T_{g,i}}{\partial x} = Q'_{w,i} + Q_{b,i} \quad (2)$$

一方、燃料棒の発熱量 $Q_{w,i}$ は、

$$Q_{w,i} = Q'_{w,i} + \sigma(T_{w,i}^4 - T_b^4) \cdot \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{D_w}{D_b}(\frac{1}{\epsilon_b} - 1)} \quad (3)$$

で与えられる。上式の右辺第 1 項は、対流により燃料棒から He ガスに伝えられる熱量を示し、次式のように表わすことができる。

$$Q'_{w,i} = \pi D_w h_{w,i} (T_{w,i} - T_{g,i}) \quad (4)$$

また、(3)式の右辺第 2 項は、熱放射による燃料棒と黒鉛ブロック間の伝熱量を表わしている。(2)式の右辺第 2 項は対流による黒鉛ブロックから冷却材への伝

熱量を示し、次式で表わすことができる。

$$Q_{b,i} = h_{b,i} (\oint T_{b,i} ds - \pi D_b T_{g,i}) \quad (5)$$

(3)~(5)式より、熱輸送方程式は次式のようにになる。

$$c_p W_i \frac{\partial T_{g,i}}{\partial x} = -\pi (D_w h_{w,i} + D_b h_{b,i}) T_{g,i} + \pi D_w h_{w,i} T_{w,i} + h_{b,i} \oint T_{b,i} ds \quad (6)$$

本解析では、(1)および(6)式について、 x 軸方向には差分法を、 y - z 平面には有限要素法を適用し、Fig. 11に示すような要素分割を用いて 3 次元温度分布を求めた。本コードのフローチャートを Fig. 12に示す。また本コードの詳細については、文献(6)に記載されている。

Fig. 11 FEM and FDM mesh for numerical analysis

2. 境界条件

本解析では、多チャンネル試験装置の体系を模擬するために、模擬燃料体の上下端面および側面は断熱境界とした。流路の内外壁熱伝達率は、1 チャンネル試験⁽⁴⁾および多チャンネル試験装置による均一出力分布試験⁽⁶⁾により得られた実験式

$$h = 0.0215 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{\lambda_g}{D_e} \quad (7)$$

により、He ガスの温度上昇による物性値変化の影響を考慮して求めた。また模擬燃料棒の発熱量、He ガス流量、入口温度および圧力は、試験により得られた実測値を用いて解析を行なった。

3. 試験結果との比較検討

本コードの妥当性を評価するために、不均一出力分布試験(Run #719,724)において得られた He ガス流量、入口温度および模擬燃料棒発熱量を用いて、燃料体内の温度分布解析を行なった。Fig. 13 (a), (b) は、

Fig. 12 Flow-chart of three-dimensional analysis code

それぞれ Run #719および724の結果得られたNo. 6チャンネルの模擬燃料棒表面温度, He ガス出口温度およ

び黒鉛ブロック温度(Fig. 5中のC点)の実測値と解析結果の比較を示したものである。燃料体内の発熱分布が異なる場合でも, 実験結果と解析結果は良く一致することが確認された。

本コードにより, 流路入口レイノルズ数が4,500の場合の不均一出力分布試験(Run #719, 724)および傾斜出力分布試験(Run #1020)の3ケースについて, 3次元温度分布解析を行なった。Fig. 14(a)~(c)は, それぞれのケースについて, 加熱開始点から3.745m($x/D_e = 535$)の位置における水平断面内黒鉛ブロック温度分布の鳥瞰図を示したものである。No. 6チャンネルに挿入した模擬燃料棒の発熱量を0 kWとした試験(Run #719)では, 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を超えているにもかかわらず, 黒鉛ブロック温度分布の幅は35°C程度に過ぎない。また, No. 6チャンネルの発熱量を残る11チャンネルの1.5倍とした試験(Run #724)では, 黒鉛ブロック温度分布の幅は約17°Cに過ぎないことがわかった。一方, 傾斜出力分布試験(Run #1020)では, 出力分布の傾斜方向に沿って, 約20°Cの温度勾配が発生するという結果が得られた。

これらの解析結果は, 多チャンネル試験装置による試験, すなわち補償ヒータブロックにより黒鉛ブロックの回りに断熱境界を形成している状態を模擬した境界条件で得られたものである。一方, 実験炉炉心はカラムの集合体であるために, カラム間のギャップ(隙間)が存在し, このギャップを流れるバイパス流れが発生することが予想される。したがって, 炉心燃料体の回りには, 強制対流境界あるいは混合対流境界が形成される。今後は, 黒鉛ブロック外側を流れるバイパ

(a) Run #719

(b) Run #724

Fig. 13(a), (b) Comparison of analytical and experimental results: Run #719 and 724

Fig. 14(a)~(c) Bird's eye view of calculated temperature distribution in horizontal plane at $x/D_s=535$: Run #719, 724 and 1020

ス流れを模擬できるようにコードの改良を行うとともに、燃料体の健全性を評価するために応力解析コードとの結合を計画している。

V. 結 論

実験炉燃料体と同一形状、材質を有する模擬燃料体を用いて、カラム内に出力分布がある場合の伝熱流動試験を行うとともに、燃料体内の3次元温度分布解析コードを作成し、実験結果との比較検討を行なった。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 特定の流路に挿入した模擬燃料棒の発熱量を0 kWからカラム内平均値の1.5倍にまで変化させる不均一出力分布試験を行なった。流路入口レイノルズ数が4,500の場合、1流路の発熱量を0 kWとしたとき、模擬燃料棒表面および流路出口Heガスの最高/最低温度の差は、それぞれ約160°C、約60°Cであり、黒鉛ブロックを介しての熱伝導によりカラム内温度分布が平坦化されている。
- (2) 同様に実験炉炉心部における出力分布を模擬した傾斜出力分布試験においても、カラム内の熱伝導により温度分布が平坦化され、模擬燃料棒およびHeガス温度分布の幅は、それぞれ約60°C、約30°Cであった。
- (3) 3次元温度分布解析の結果は試験結果と良く一致し、不均一出力分布試験時の黒鉛ブロック水平断面内の温度分布の幅は約17~35°C、また傾斜出力分布試験では約20°C程度である。出力分布に起因する温度分布のひずみは、カラム内の熱伝導により均一化される。

〔記 号〕

- c_p : Heガスの比熱 (J/g·K), D : 直径 (m)
 D_s : 水力等価直径 (m), h : 熱伝達率 (W/m²·K)
 P : Heガスの圧力 (Pa)
 ΔP : 試験体出入口間の差圧 (Pa)
 Pr : プラントル数, Q : 伝熱量または発熱量 (W)
 q_{1a}^+ : 無次元熱流束 ($q_{1a}^+=Q/c_p w T_{q1a}$)
 Re : レイノルズ数, T : 温度 (K)
 u : Heガスの流速 (m/s)
 w : 質量流量 (g/s), x : 軸方向距離 (m)
 ϵ : 放射率, λ : 熱伝導率 (W/m·K)
 σ : Stefan-Boltzmann定数 (W/m²·K⁴)
 (添字)
 b : 黒鉛ブロック, g : Heガス
 i : 流路番号 (1~12)
 in : 流路入口の値, w : 燃料棒

本報をまとめるに当たり、有益なご助言を頂いた日本原子力研究所高温工学部佐野川好母部長、田中利幸前HENDEL開発試験室長、菱田誠高温熱工学研究室長ならびに本試験の遂行に多大な協力を頂いたHENDEL管理室、開発試験室の各位に感謝の意を表す。

—参考文献—

- (1) 石川 寛, 他: 原子力誌, 25[12], 971 (1983).
- (2) 下村寛昭, 他: 同上, 26[3], 239 (1984).
- (3) 井澤直樹, 他: 同上, 27[12], 1136 (1985).
- (4) 高瀬和之, 他: 同上, 28[5], 428 (1986).
- (5) 日野竜太郎, 他: 同上, 28[6], 527 (1986).
- (6) 丸山 創, 他: JAERI-M 85-145, (1985).