193. 高温ガス実験炉燃料体の伝熱流動試験, (V) HENDEL 多チャンネル試験装置による高温試験結果

日野 竜太郎*, 丸山 創*,
高瀬 和之*, 宮本 喜晟*, 下村 寛昭*

(1988年 1月11日 受理)

*Experimental Studies on Thermal and Hydraulic Performance
of Fuel Stack of VHTR, (V)*

*Test Results of HENDEL Multi-Channel Test Rig
when Helium Gas was Heated up to 1,000°C*

By Ryutaro HINO,
Soh MARUYAMA, Kazuyuki TAKASE,
Yosiaki MIYAMOTO and Hiroaki SHIMOMURA

Experimental studies on thermal and hydraulic performance of fuel blocks of the very high-temperature gas-cooled reactor (VHTR) have been performed with a multi-channel test rig of a fuel stack test section (T_1 -M) installed in a helium engineering demonstration loop (HENDEL).

Present paper reports the experimental results obtained by a high temperature test that He gas was heated up to 1,000°C in T_1 -M. Under the conditions of uniform heating of 12 simulated fuel rods installed in the fuel block, it was found that a flow rate distribution of He gas in 12 fuel channels was almost uniform, radiant heat flux from the fuel rod was large considerably, and average heat transfer coefficients agreed with the correlation reported previously. On the other hand, the temperature distribution in the horizontal cross section with power distributions of 12 fuel rods was calculated with a three dimensional thermal analysis code, and the temperature difference was found to be small.

KEYWORDS: performance test, thermodynamic properties, VHTR reactors, fuel stack, fuel block, fuel rods, fuel channels, helium gas loop, multi-channel test, very high temperature, flow rate, hydraulics, temperature distribution, power distribution, numerical analysis

I. 緒 言

日本原子力研究所(原研)では、ヘリウム(He)ガスを冷却材とする高温ガス炉(VHTR)の技術的基盤の確立とその高度化を目的として高温工学試験研究炉(HTTR)**の開発を進めている。現在の炉心設計は圧力4 MPaのHeガスを950°Cまで昇温させることを目標としており、設計および安全性の評価のため、高温高圧条件下での炉心燃料体の健全性、高温性能等の実証データが必要とされている。

そこで、原研の大型Heガスループ「大型構造機器実

証試験ループ(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いる。

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おり、試験は当初、

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

** 従来の「多目的高温ガス実験炉」の計画を見直し、高温ガス炉技術の確立とその高度化等の試験研究を行うため「高温工学試験研究炉」に改称した。

He ガスを約 750℃ まで加熱する中温試験を実施した。そこで得られた結果は、第Ⅰ報⁽¹⁾において燃料冷却チャンネルの伝熱流動特性を、第Ⅱ報⁽²⁾と第Ⅲ報⁽³⁾において燃料体カラムの熱出力が均一な場合と不均一な場合の伝熱流動特性をそれぞれ報告している。この中温試験により、燃料冷却チャンネルと燃料体カラムにおける基本的な伝熱流動特性を把握することができた。

その後、この実績をもとにして He ガスを 1,000℃ まで昇温させる試験を実施し、高温域における燃料冷却チャンネルと燃料体カラムの伝熱流動特性を調べた。このうち、1 チャンネル試験装置による燃料冷却チャンネルの伝熱流動特性については、すでに第Ⅳ報⁽⁴⁾に報告した。本報では、多チャンネル試験装置において模擬燃料体カラム内の発熱分布を均一にした場合と、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高温試験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

燃料体スタック実証試験部(T₁)に設置された多チャンネル試験装置の構造をFig. 1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Heガスが流入し、

Fig. 1 Schematic drawing of multi-channel test rig

内蔵冷却器を経て流出する。Heガスの供給系統は第Ⅱ報で述べた通りである。

模擬燃料体カラムは、黒鉛製の燃料ブロック①を7段、さらに黒鉛製の可動反射体ブロックを上部および下部にそれぞれ2段ずつ合計11段積み重ねた構造である。燃料ブロックには12個の燃料孔が開けられており、それぞれの燃料孔には模擬燃料棒②が挿入されている。Heガスは、内径53mmの燃料孔と外径46mmの模擬燃料棒との隙間の環状流路③を下降しながら最高1,000℃まで加熱される。

黒鉛ブロックの外周にはインコイ 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ーとして機能する。模擬燃料体カラムの下方には、1,000℃のHeガスを200℃程度まで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。

使用した高温試験用燃料棒の構造をFig. 2に示す。模擬燃料棒は、外径46mmの黒鉛スリーブ内に有効発熱長460mmの黒鉛製の電気発熱体を挿入したサブロッドを7段接続した構造で、発熱体の周囲にはチッハホウ素(BN)を充填して電気絶縁性を保持している。サブロッドの長さは570mm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黒鉛材を用い、その表面には軸方向と周方向にそれぞれ3箇所ずつスペーサ・リブを取り付けて実機の形状を模擬している。第2, 4, 5, 7段目のサブロッドの黒鉛スリーブには、スリーブの上端より216.5mmの位置に表面温度計測用の熱電対が設置されている。

なお、燃料チャンネル入口/出口温度は、模擬燃料棒の上部電極と最下段の下部反射体ブロックに設置された熱電対で計測され、さらに燃料チャンネルを流れるHeガス流量は、最下段の下部反射体ブロックに設置されたピトー管を通して計測される。

2. 試験条件

12本の模擬燃料棒の発熱量 Q を同一にした均一発熱試験の試験条件をTable 1に示す。表中の Re_{in} と Re_{out} は、12本の燃料冷却チャンネル入口と出口におけるレイノルズ数(Re)をそれぞれ平均した値を表わす。 Re

Fig. 2 Schematic drawing of simulated fuel rod (dimension mm)

Table 1 Experimental conditions for uniform power distribution test

Run No.	Inlet pressure P_{in} (MPa)	Total flow rate W (g/s)	Input power Q (kW)	Inlet gas temperature T_{gin} (°C)	Outlet gas temperature T_{gout} (°C)	Inlet Reynolds number Re_{in}	Outlet Reynolds number Re_{out}	Heat flux parameter $q^+_{in} \times 10^3$
#1309	4.0	128	35.2	354	1,006	4,200	2,600	1.23
#1310	4.0	175	49.9	328	993	5,900	3,600	1.32
#1403	4.0	254	69.8	364	1,003	8,300	5,200	1.20
#1405	4.0	315	87.4	367	1,007	10,000	6,400	1.21
#1410	4.0	95	26.7	342	1,002	3,200	1,900	1.27
#1413	4.0	100	29.3	336	1,022	3,400	2,000	1.34

の定義は次の通りである。

$$Re = uDe/\nu,$$

ここで, De : 等価直径 ($D_o - D_i = 7\text{mm}$)

D_i : 模擬燃料棒外径

D_o : 燃料孔内径

u : 流速

ν : 動粘性係数

また, q^+_{in} は次式で定義される加熱強さを表す無次元数である。

$$q^+_{in} = \frac{q}{\bar{w}C_p(T_{gin} + 273)} \cdot \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4},$$

ここで, C_p : Heガス比熱

q : 熱流束

T_{gin} : 入口ガス温度

$\bar{w}$: 平均流量 (= 総流量 $W/12$)

実機の無次元熱流束 q^+_{in} は約 0.9×10^{-3} であり, 本試験はそれよりも 20~65% ほど強い加熱を行なっている。

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(傾斜出力分布試験)を行い, そのデータをもとにブロック断面内の温度分布を詳細に解析した。試験条件を Table 2 に, また, 12本の模擬燃料棒の発熱分布を Fig. 3 に

Table 2 Experimental conditions for slant power distribution test

Run No.	#1311	#1407
He gas flow rate W (g/s)	169	65
Inlet pressure P_{in} (MPa)	4.0	4.0
Inlet gas temperature T_{gin} (°C)	330	339
Inlet Reynolds number Re_{in}	5,700	2,200
Average power Q (kW)	47.9	18.3

Fig. 3 Slant power distribution

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。

Ⅲ. 試験結果

1. 均一発熱試験結果

(1) 流量配分

Fig. 4 に、燃料冷却チャンネルを流れるHeガス流量の測定例を示す。図の横軸は燃料冷却チャンネル番号を表わしており、その配置は同図上方に示す通りである。縦軸は各チャンネルを流れるHeガス流量 w_i と平均流量 $\bar{w}$ との比 $(w_i/\bar{w}-1)$ を表わしている。

図に見られるように、流量のバラツキは $\pm 4\%$ 以内にある。この結果は第Ⅱ報で報告した $\pm 3\%$ よりも大きくなっている。この原因としては、模擬燃料棒を第Ⅱ報の中温試験用のものから高温試験用のものに変更した際に、模擬燃料棒の寸法精度のバラツキが若干大きくなったこと、また模擬燃料棒の発熱量を増大させたため、発熱量の調整に多少のバラツキを生じて各チャンネルのHeガスの昇温状況が若干異なったことなどが挙げられる。

Fig. 4 Flow rate distribution in uniform power distribution test

(2) 熱伝達率

模擬燃料棒の熱伝達率を求めるため、模擬燃料棒か

ら燃料ブロックへの放射熱量 Q_r を各段ごとに次式を用いて算出した。代表温度としてサブロード中央における表面温度 T_{wc} と燃料ブロック温度 T_b を用いた。

$$Q_r = \sigma \{ (T_{wc} + 273)^4 - (T_b + 273)^4 \} \cdot \frac{A_w}{\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{D_i}{D_o} \left(\frac{1}{\epsilon_w} - 1 \right)} \quad (2)$$

ここで、 A_w : サブロード発熱部の表面積
 ϵ_w : 黒鉛の熱放射率
 σ : ステファーン・ボルツマン定数

計算に当っては、黒鉛の熱放射率を0.8とし、サブロード中央における表面温度 T_{wc} は、表面温度 T_w の軸方向温度分布を最小2乗近似して内挿した。また、燃料ブロック温度 T_b については、燃料ブロック外壁の実測温度を用いた。

Fig. 5 は No. 6 チャンネルを例にとり、放射熱量 Q_r とサブロードの発熱量 Q_i との比 Q_r/Q_i をレイノルズ数 Re で整理したものである。図中の破線は第Ⅱ報で報告した600℃のときの結果であり、●は本試験における900℃のときの結果を表わす。第Ⅱ報の結果と同じように、放射熱量の割合は Re の減少とともに増加している。また、熱放射による伝熱では、温度が高くなるほど放射熱量が増大するという特性を持つが、図に見られるように600℃のときよりも900℃の方が放射熱量の割合は増加しており、 Re 数が約4,000以下では発熱量の約20%以上が熱放射によって伝達されている。この結果から、高温の領域では熱放射による伝熱が重要な役割を果たしていることがわかる。

Fig. 5 Relation between radiation heat flux and Re

Fig. 6 に、12本の模擬燃料棒の熱伝達率を整理した結果を示す。このとき、熱伝達率は発熱量 Q_i から放射熱量 Q_r を差し引いて求め、次のヌセルト数(Nu)に無次元化してある。

Fig. 6 Relation between Nu and Re

$$Nu = \frac{De}{\lambda} \cdot \frac{Q_t - Q_r}{A_w(T_w - T_g)} \quad (3)$$

ここで、 λ : Heガスの熱伝導率

上式において、Heガス温度 T_g は模擬燃料棒の有効発熱部においてのみ上昇するものとして、模擬燃料棒の発熱量とHeガス流量から算出した混合平均温度である。また、図中に Nu_s で示した実線は平滑な環状流路の熱伝導率を表わし、次式で与えられる。

$$\text{層流域: } Re \leq 2,700 \quad Nu_s = 5.6^{(5)} \quad (4)$$

遷移域: $2,700 < Re < 7,000$

$$Nu_s = 0.084(Re^{2/3} - 110)Pr^{0.4(5)} \quad (5)$$

乱流域: $Re \geq 7,000$

$$Nu_s = 0.018(D_i/D_o)^{-0.16} Re^{0.8} Pr^{0.4(7)} \quad (6)$$

ここで、 Pr : プラントル数($\equiv \nu/(\lambda/c_p\rho)$)

ρ : Heガス密度

図に見られるように、試験結果は平滑な環状流路の熱伝達率よりも全般に高い値になっており、その平均的特性は第I, II報で報告した次の整理式で良く表わすことができる。

$$Re \leq 1,800 \quad Nu = 6.8 \quad (7)$$

$$Re \geq 2,000 \quad Nu = 0.0215 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (8)$$

2. 傾斜出力分布試験結果

(1) 流量配分と温度分布

Fig. 7に、Heガスの流量配分を示す。図の縦軸は実測流量と平均流量の差を表わし、横軸は燃料冷却チャンネル番号を表わす。各チャンネルに配分される流量の最大偏差は、流量の小さい5.4 g/sの場合には約8%、大きい14.1 g/sでは約6%である。第II-1(1)項

で述べた均一発熱分布の流量配分の結果と比べると流量の偏差は大きくなっている。これは、12本の模擬燃料棒の発熱量を傾斜させたため、Heガスの昇温状況が各チャンネルにおいて異なり、それによる加速損失の変化を補い合うように12本のチャンネル間で流量を配分し合うためと考えられる。

Fig. 7 Flow rate distribution in slant power distribution test

Fig. 8に、軸方向温度分布の測定例を示す。図中には、No. 1, 8, 11チャンネルの模擬燃料棒表面温度と流路入口・出口のHeガス温度をそれぞれ示してある。それぞれのチャンネルの模擬燃料棒の発熱量は、Fig. 3に示すようにNo. 1チャンネルが平均発熱量、No. 8チャンネルはそれよりも10%高い発熱量、No. 11チャンネルでは10%低い発熱量である。図中の横軸は、加熱開始点からの距離 x を等価直径 De で無次元化した距離を表わし、また1点鎖線はHeガス温度分布を表わす。Heガスの軸方向温度分布は平均発熱量と平均流量をもとにして算出した温度分布で、前節で述べたように模擬燃料棒の有効発熱部においてのみ上昇するものとしている。

図に見られるように、発熱量が最大のNo. 8チャンネルと最小のNo. 11チャンネルの模擬燃料棒表面温度の差 ΔT_w は7段目で最も大きくなり、流量の小さいFig. 8(a)では約46℃、流量の大きい(b)では約81℃である。また、No. 8と11チャンネル流路出口のHeガス温度の差 ΔT_g は、Fig. 8(a)では約16℃、(b)では約41℃である。

Fig. 8 (a), (b) Temperature distribution in axial direction

ちなみに、燃料ブロックを介しての熱の移動がない断熱条件の仮定のもとで ΔT_w と ΔT_g を計算すると、Fig. 8(a)では $\Delta T_w \approx 158^\circ\text{C}$, $\Delta T_g \approx 143^\circ\text{C}$, (b)では $\Delta T_w \approx 140^\circ\text{C}$, $\Delta T_g \approx 122^\circ\text{C}$ である。いずれも実測値よりかなり大きく、特に小流量において計算値は実測値よりも相当に大きな値になっている。これは、燃料ブロックの材料である黒鉛は熱伝導率が高いため、ブロック内を熱伝導で多量の熱が移動するためと考えられる。

一方、燃料ブロック断面内の温度分布については、温度計測点数に限りがあるため、燃料ブロック断面内の温度分布を詳細に測定することはできない。そこで、燃料ブロック内の3次元温度分布解析コード⁽³⁾を用いて温度分布の解析を行なった。Fig. 9(a)に、Run #1311の条件で解析した燃料ブロック7段目の水平断

面内温度分布例を示す。図に示した結果は、7段目の燃料ブロック上端から325 mm下方の水平断面内温度分布である。

図に見られるように、ブロック断面内の温度分布はFig. 3に示す模擬燃料棒の発熱分布と相似な分布をしている。このときの燃料ブロックの最高温度と最低温度の差は約40°Cで、それほど大きい温度差ではない。このコードでチャンネル出口のHeガス温度を計算したところ、その温度差 ΔT_g は約40°Cで、Fig. 8(b)に示すHeガス温度の差41°Cとよく一致した。燃料ブロックについても、このコードで計算された温度差が実際にあるものと考えられる。同様にFig. 9(b)は、Run #1311よりも入口レイノルズ数の低いRun #1407の条件で解析した結果である。この場合の燃料ブロックの

Fig. 9 (a), (b) Bird's eye view of calculated temperature distribution in horizontal plane at $x/De=535$; Run # 1311 and Run # 1407

最高温度と最低温度の差は約25℃であり、やはり試験結果と良く一致している。

以上のことから、カラム内に発熱分布があっても、各冷却チャンネルを流れるHeガスの温度と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ブレナムブロックに流入するHeガスの温度差が小さくなること、また燃料ブロックの熱ひずみ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。

Ⅳ. 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が均一な場合と傾斜状の場合について、Heガスを約1,000℃まで加熱する高温試験を行い、次の結果が得られた。

- 12本の模擬燃料棒の発熱量を均一にした試験では、
 - (1) 12本の燃料冷却チャンネルを流れるHeガス流量は、中温試験の結果と同じくほぼ一様である。
 - (2) 模擬燃料棒表面温度が高くなる場合には、模擬燃料棒の発熱量のうち相当量の熱が熱放射で伝達されている。
 - (3) 模擬燃料棒の熱伝達率は多少のバラツキはあるものの、その平均的特性は第Ⅰ、Ⅱ報で示した整理

式とよく一致した。

また、模擬燃料体カラム内の出力を傾斜させた試験から、発熱量の差が最も大きいチャンネル間の模擬燃料棒表面温度差とHeガス温度差は、燃料冷却チャンネルが互いに断熱された条件のもとでの計算値に比べて相当に小さくなることがわかった。

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

最後に、本試験を遂行するに当って、種々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、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) 高瀬和之, 他: 原子力誌, 28〔5〕, 428 (1986).
- (2) 日野竜太郎, 他: 同 上, 28〔6〕, 527 (1986).
- (3) 丸山 創, 他: 同 上, 29〔2〕, 133 (1987).
- (4) 日野竜太郎, 他: 同 上, 30〔4〕, 343 (1988).
- (5) HATTON, A.P., QUARMBY, A.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, 5, 973 (1962).
- (6) 藤井貞夫, 他: 第17回伝熱シンポジウム講演論文集, A 213 (1980).
- (7) DONNE, M.D., MEERWALD, E.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, 16, 787 (1973).

○第27回粉体に関する討論会○

共 催 日本化学会、本会ほか21学協会

会 期 1989年10月18日(水)～20日(金)

会 場 千葉市民会館(千葉市要町1-1)

討論主題 (1)粉体分散系・凝集系の性質と応用、(2)粉体の生成、物性と新素材、(3)粉体プロセスと単位操作、(4)粉粒体一般

なお、今回は講演時間20分、討論10分の予定。

申込締切 6月30日(金)

申込方法 B 5判大の用紙に「第27回粉体討論会申込書」と明記し、①申込者名、②所属学会、③勤務先(住所、電話)、④連絡先(住所、電話)、⑤演題(討論主題(1)～(4)のいずれかを明記)、⑥ポスター/口頭発表の希望、⑦発表者氏名(講演者に○印)、⑧200字程度の要旨、を記入して下記へ。採択されると、厚稿用紙と執筆要領を送付する。

予稿締切 9月1日(金)

申込先 (〒229)相模原市相模1960 職業訓練大校内
「第27回粉体に関する討論会」早川宗八郎
(0427-61-2111)

本会マーク入り タイピン・カフスセット
 (金メッキ・七宝・エポキシ樹脂加工)
 創立30周年記念に装い新たに製作しました。海外へのプレゼント用に好評。
 頒価 3点セット 3,000円(〒250円)
 タイピンのみ 1,500円(〃)
 マーク入り朱肉ケース 2,000円(〒360円)
 ○ご希望の方は学会事務局へ○