研究論文

952. 冷却材流路内の矩形型スペーサが
周囲の伝熱流動に及ぼす影響

一宮浩市*, 秋野詔夫**, 功刀資彰**

(1990年 6月25日 受理)

*Effects of Rectangular-Type Spacer on Heat Transfer
and Flow in Coolant Passage*

By Koichi ICHIMIYA, Norio AKINO and Tomoaki KUNUGI

In the fuel elements of High Temperature Gas Cooled Reactor, the space, in which the gas-coolant flows, is very narrow. The spacer is set to maintain the space. The present study describes experimental results on the effect of the spacer to the heat and flow in a parallel plate duct. The working fluid was air and the edges of a rectangular-type spacer inclined. Liquid crystal sheet was used to measure the temperature distribution and pearl dye was also dispersed to a water circulating facility to visualize the flow situation. The local heat flux was compensated by solving the heat conduction equation with the boundary condition of the detailed temperature distribution. After the fluid was impinged at the front surface of the spacer, the horseshoe vortex was generated around the spacer and corresponded to the low temperature region. Effective region, whose local heat transfer was enhanced, was larger at the transition region from the laminar flow to turbulent one for constant inclined angle and extended to the wake flow region with decrease of the inclined angle for constant Reynolds number.

KEYWORDS: HTGR, fuel elements, coolant passage, spacer, heat transfer, heat flux, flow visualization, fluid flow, temperature visualization, temperature dependence, temperature distribution, liquid crystal, horseshoe vortex

I. 緒 論

現在わが国で開発されている高温ガス炉の燃料体は、Fig.1に示されているように、ビン・イン・ブロック型で、燃料棒を六角柱の黒鉛ブロックの燃料棒挿入孔中に装填する形式である⁽¹⁾。具体的には、燃料棒の外径約34 mm、長さ約580 mm、挿入孔の内径約41 mmである。したがって、幅約3.5 mmという非常に狭い空間を冷却材が流れることになり、この空間を維持するためにスペーサが配置される⁽²⁾。しかし、そのスペーサが周囲の伝熱流動に及ぼす影響を及ぼしているかを検討した研究はあまり見られず、著者らが、平行平板流路内にスペーサの基本的形状である円柱および円柱列を設置した試験体を用い、感温液晶を使用して伝

熱面上の温度分布を求め、狭い流路内に置かれた円柱および円柱列の周辺での局所熱伝達特性を明らかにした研究⁽³⁾⁽⁴⁾は、燃料体設計への基礎的知見を与えるものといえる。

これらの研究では、燃料棒の直径に比較して空間が非常に狭いため、冷却材流路を平行平板として取り扱えることが明らかにされている。しかし、スペーサ形状に関しては、実際には上述のように、スペースに比較して燃料棒の長さが長いことから、流れ方向に支持傾

* 山梨大学 工学部機械システム工学科 (Dept. of Mech. System Eng. Yamanashi Univ.)

** 日本原子力研究所 高温熱工学研究室(High Temp. and Thermal Eng. Div., Japan At. Energy Res. Inst.)

Fig. 1 HTTR fuel element

域が長いスペーサがより実用に近い形状であると考えられる。そこで、本報では、流れ方向に長い直方体のスペーサおよび抵抗減少のため端部が傾斜したスペーサについて、感温液晶板を用いてスペーサ周囲の温度分布の可視化および微粒子をトレーサとした流れの可視化を行い、レイノルズ数とスペーサ端部の傾斜角との相違による局所熱伝達特性および流れの変化を実験的に検討した。

II. 実験装置および実験方法

1. 実験装置

実験装置の概要をFig. 2に示す。作動流体として使用した空気は、送風機⑧で圧縮され、熱交換器②で規定温度に制御されたのち、流量調節バルブ③、流量計④を経て試験流路へと流入する。さらに、助走区間、試験部を通過したのち、送風機に戻される。熱交換器は隔壁型で冷却材として水を使用するタイプのものであり、冷却水はクーラー⑪、ヒーター⑫で自動的に温度制御され、ポンプ⑩で循環されている。

流路は全長2,100 mm、幅230 mm、高さ10 mmの平行平板流路である。入口からの助走部は1,025 mmで、試験部(加熱部)は750 mmである。試験部流路上板は、外側より透明アクリル板(厚さ10 mm)、感温液晶膜(厚さ28 μm)、ステンレス鋼箔から構成されている。側板と下板は、アクリル板にベークライト板と断熱材を設置して熱の漏れを防ぐ構造となっている。ステンレス鋼箔は厚さ50 μm 、長さ750 mm、幅230 mmであり、

Fig. 2 Schematic diagram of experimental facility

通電加熱された。

スペーサには、Table 1に示すように、長さ(100 mm)、幅(10 mm)、高さ(10 mm)が同一で、端部傾斜角度 θ が15°, 30°, 45°, 60°, 90°の5種類のものを使用している。スペーサは真ちゅうでつくられ、試験部中央にシリコン系接着剤で固定された。

Table 1 Experimental conditions

Distance between upper and lower wall	h (mm)	10.0
Edge angle of Spacer rib θ (deg)		90, 60, 45, 30, 15
Reynolds Number	Re	1000 ~ 15000
Heat flux	q (W/m^2)	115.9 ~ 463.8
Material of Spacer rib		Brass

加熱面温度は感温液晶に現れた色分布を温度分布に変換して求めた。色の輝度を測定するためにCCDカメラを流路上方に設置し、照明として赤外線遮断フィルタを取り付けた4個のハロゲンライトを使用した。CCDカメラには画像処理装置が連結されている。

また、流路入口、出口における空気温度は熱電対にて直接測定された。

2. 実験方法

スペーサを設置しない場合の伝熱実験を行い、局所熱伝達係数が片側加熱の平滑平行平板流路の値と同様であることを確認したのち、スペーサを流路に設置し

た伝熱実験を実施した。まず、規定流路の空気を送りステンレス鋼箔に通電した。加熱面温度 T_w が液晶の感温範囲内に入るように付加する電流、電圧を調節した。流れおよび温度分布が定常状態になったのち、光学フィルタを取り付けた CCD カメラによって色分布を輝度として測定し、その値を「回帰式による色彩評価法」によって温度に変換した(次節参照)。任意の位置における流体の混合平均温度 T_b は、流路入口、出口の温度が加熱区間で直線的に変化すると求められた。局所熱伝達係数は次式により求められた。

$$\alpha = q / (T_w - T_b)$$

ここで、 q : 正味の熱流束

感温液晶膜で周密に測定された温度分布を境界条件にしてアクリル基板内の 3 次元温度分布を求め、基板内の熱移動量を評価した。ステンレス鋼箔は非常に薄く液晶膜に密着している。したがって、計測した温度分布から、ステンレス鋼箔内を移動する熱量を 2 次元的に評価した⁽⁶⁾。

以上の方法で、一様熱流束条件からの偏りを計算して正味の熱流束を求めた。測定された温度分布による熱移動量の割合は全発熱量 12 W に対し、アクリル基板内の移動熱量は 0.013 W、ステンレス鋼箔内の移動熱量は 0.007 W 程度である。

実験は流路高さの 2 倍を代表長さとするレイルノズ数 $Re (= u \cdot De / \nu)$, u : 平均流速, De : 水力学的相当直径, ν : 動粘性係数) を 1,000~15,000 まで変化させて行われ、熱伝達の結果はヌセルト数 $Nu (= \alpha \cdot De / \lambda)$, α : 熱伝達係数, λ : 流体の熱伝導率) 分布で示された。

さらに伝熱実験に対応した流れの可視化実験を、水の回流槽を使用して行なった。トレーサとしては雲母の微粒子に酸化チタンを被覆したパール顔料(粒度 30 μm)を用いた。

3. 回帰式による色彩評価法

感温液晶を温度測定に適用する原理は、秋野らの方法⁽⁶⁾によった。本節ではその概要を述べる。実験に使用した液晶はコレステリック系液晶でマイクロカプセル化されており、温度によって変化するものである。色は低温より、黒、茶、赤、橙、黄、緑、青、紺である。校正実験により温度 T の液晶からの散乱反射光を光学フィルタで 3 つの色成分に分解して色成分輝度を測定し、次の回帰式によって温度予測値 T^* を求めることができる。

$$T^* = \alpha + \beta r + \gamma g + \delta b + O(r^2, g^2, b^2)$$

ここで、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: 定数

r, g, b : 色成分輝度比

$O(r^2, g^2, b^2)$: 残差項

温度 T と回帰式による温度 T^* との差が、許容範囲内(本実験の場合 0.2°C)になるように定数と適用範囲を決定した。得られた定数値は、 $\alpha = 25.98$, $\beta = 4.36244$, $\gamma = 5.78944$, $\delta = 11.3555$ である。温度範囲は 27°C から 32°C であり、 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 程度の精度と 0.01°C の分解能で測定が可能になった。

III. 実験結果および検討

1. 伝熱状態

Photo. 1 (a), (b) に感温液晶に現れた色分布例を示す。スペーサの設置された加熱板を裏側からみたことになり、スペーサは黒い領域の中に含まれている。

Photo. 1 (a) は傾斜角 $\theta = 45^\circ$ で Re をパラメータにして表わされている。流れ方向は左から右である。 $Re = 1,000$ の層流状態では、スペーサの上流端で半円状の低温域が存在し、それがスペーサ周囲に延びており、温度勾配の大きい領域となっている。 $Re = 3,000$ の遷移域では、周囲より温度の低い領域(茶色と黒色の領域)が著しく拡大されていることが明らかである。特にスペーサ上流端はコブラ型になり、後流端に層流状態ではなかった低温域が存在している。ところが $Re = 10,000$ の乱流域になると逆に低温領域が減少し、上流端のコブラ型分布が明確になっている。これはスペーサにごく近いところの温度勾配が、より大きくなっていることを示している。 $Re = 15,000$ と $10,000$ との間にそれほど著しい差は見られなかった。

Photo. 1 (b) には $Re = 6,000$ における傾斜角の影響が示されている。 $\theta = 90^\circ$ ではスペーサの端面が流れに対して直角になっているため、スペーサの影響領域(低温領域)は最も大きくなっている。一般的に角度の減少とともに低温領域は減少している。後流での低温領域は $\theta = 60^\circ$ で一たん減少しているが、傾斜角の減少とともに増大し、前縁部から後縁部に影響領域が移行している。

感温液晶に現れた色分布を等温線で表わしたのが Fig. 3 (a), (b) であり、0.5°C 間隔で示されている。温度分布の全体的傾向は前述しているが、スペーサ周囲は等温線が密に存在し温度勾配が大きいことがわかる。Fig. 3 に見られるスペーサ後流の低温領域の広がり方は $Re = 3,000$ 程度までは拡大し、 $Re = 10,000$ になると減少している。この理由には層流から乱流への遷移状態が関係していると思われる。

Photo. 1 (a), (b) Color distribution around a spacer ($\theta=45^\circ$ and $Re=6,000$)

Fig. 3(a), (b) Isothermal distribution around a spacer ($\theta = 45^\circ$ and $Re = 6,000$) (Temperature skip $\Delta T = 0.5^\circ\text{C}$)

さらに、等ヌセルト数分布を示したのがFig. 4(a), (b)である。Fig. 4(a)は $\theta = 45^\circ$ で Re をパラメータにして表わされている。 $Re = 1,000$ の層流状態では、スパーサ周囲に片面加熱平滑平行平板流路による発達した値(=約5.4)より高い領域が見られる。それが $Re = 3,000$ の遷移状態では上流端にコブラ型の高ヌセルト数域が見られ、後流には $Nu = 10$ の領域が広がっている。 $Re = 10,000$ の乱流域では、スパーサの後流端に $Nu = 30$ 以上の閉じた領域が存在する。このように、スパーサは空間の維持のみならず、局所熱伝達の促進

にかなり寄与することになる。

Fig. 4(b)には $Re = 6,000$ に対し傾斜角をパラメータにして示されている。傾斜角が大きいとスパーサの周囲に影響領域が大きく存在するのに対し、傾斜角が減少するにつれて流路壁に接触する面積が減少するので、後流側に影響領域が延びている。条件によっては、この領域はスパーサ下流端より10数倍以上あり温度分布解析範囲外まで伸展している。 $Nu = 20$ に注目すると、傾斜角が 90° から 45° まで変化するのにつれて後流域で影響領域が減少しているのに対し、 45° から 15° へ変化

Fig. 4(a), (b) Local Nusselt number ($\theta = 45^\circ$ and $Re = 6,000$) (Nusselt number skip $\Delta Nu = 5$)

するにつれて拡大している。これは $\theta = 90^\circ \sim 45^\circ$ ではスパーサ下流側の傾斜面に上向きに沿う流れの影響が強いのにに対し、 $\theta = 30^\circ \sim 45^\circ$ 以下では上流側の傾斜面に沿う下向き流れの影響が強くなったためと考えられる。

2. 流動状態

前節の伝熱状態と対応して流れの可視化写真例をPhoto. 2, 3に示す。Photo. 2 (a)は流路高さの中間の主流れを、(b)は伝熱面に相当する面に堆積したパール顔料の分布を示す。傾斜角が 45° であるので、流路高さに

対し流れが対称でなく、 $Re = 3,000$ ではPhoto. 2 (a)に乱れた領域が拡大していることがわかる。(b)のパール顔料が堆積していない部分が熱伝達の高い領域に対応する。スパーサの上流端付近の半円部には馬蹄形渦が形成されており、 $Re = 3,000, 10,000$ では、それが後流に延びている。

Photo. 3は $Re = 6,000$ に対し傾斜角を $\theta = 90^\circ, 45^\circ, 15^\circ$ と変化した場合のパール顔料の堆積状態を示している。 $\theta = 90^\circ$ では、スパーサ前面に流れが衝突するため、馬蹄形渦が流路幅方向に影響を及ぼしているほか、後流端直後に小さい旋み域が生じている。 $\theta =$

45°, 15°と減少するにつれ幅方向の非堆積領域が減少して後流端の淀み域がなくなり、スーサ後方ではパール顔料が2つの筋となって延びている。

スーサ上流端に生ずる低温域と馬蹄形渦の影響領域の対応をFig. 5に示す。横軸はレイノルズ数 Re 、縦軸はスーサ幅方向の低温域あるいは馬蹄形渦の影響領域幅を流路の水力学的相当直径 De で無次元化したものである。低温域と馬蹄形渦領域がほぼ対応している。その幅は、傾斜角が90°では乱流域で約 $1.5De$ 、45°では約 $1.2De$ 、15°では約 $0.6De$ となっている。傾斜角の減少とともに幅方向の影響領域幅が減少しているのがわかる。

IV. 結 論

平行平板流路に、直方形型の端部を傾斜させたスーサを設置し、それが周囲の伝熱流動に与える影響を実験的に検討した。温度分布は感温液晶で可視化し、得られた詳細な温度分布を使用して局所熱流束を補正した。また、流れはパール顔料で可視化した。その結

←Photo. 3 Flow visualization ($Re=6,000$)
(Precipitation pattern)

Fig. 5 Correspondence between low temperature region and horseshoe

果、スぺーサ前面に衝突した流体はスぺーサ上流端より馬蹄形渦を形成し、それが温度の低温域と対応していることがわかった。傾斜角が同じであれば、流れが層流から乱流へ遷移する状態($Re=3,000$)でスぺーサ周囲低温域が最も増大し、局所熱伝達が促進される。さらに同じレイノルズ数では、傾斜角が減少すればスぺーサ周囲より後流に広がる影響範囲が流路間隔の10数倍以上も拡大されることが明らかになった。流路間隔より流れ方向の距離が非常に長い場合の空間保持のスぺーサには、直方体型が円柱型より有効と考えられ、本研究の結果は、スぺーサが高温ガス炉燃料要素内の層流化現象に伴う熱伝達劣化の解消およびホットスポットの解消につながることを示している。さらにスぺーサの配列を決定する際の基礎資料になりうる。

— 参考文献 —

- (1) 原研高温工学試験研究炉開発部: “高温ガス炉研究開発の現状”, 31 (1989).
- (2) AKINO, N., SUZUKI, K., SANOKAWA, K., OKAMOTO, Y. (MORI, Y., SHEINDLIN, A.E., AFGAN, N.H. ed.): “High Temperature Heat Exchangers”, 131 (1986), Hemisphere Publ. Corp., Washington.
- (3) 一宮浩市, 秋野詔夫, 功刀資彰, 光城浩二: 機論, 52[474], B919 (1986).
- (4) 同上: 同上, 54[500], B925 (1988).
- (5) 功刀資彰, 秋野詔夫, 一宮浩市, 高木一郎: 同上, 56[527], B209 (1990).
- (6) 秋野詔夫, 功刀資彰, 上田正治, 黒沢 昭: 同上, 54[505], B2661 (1988).

◇第2回粒子線の先端的応用技術◇

ワークショップ(BEAMS 1991)

主催 第2回粒子線技術ワークショップ実行委員会
協賛 本会ほか30学協会

会期 1991年11月25日(月)~27日(水)

会場 野口英世記念会館(東京都新宿区大京町)

○募集要領○

研究発表分野

- 粒子線の発生法と粒子線源
 - 粒子線装置, 機器およびシステム
 - 粒子線による原子間結合制御と新特性材料の形成
 - 粒子線による微細加工, 生体照射および分析
- 発表時間 一般講演は20分, 招待講演は30~40分(どちらも質問時間を含む)の予定。
- 発表申込 発表希望の方は, ①発表題目, ②発表希望分野(上記参照), ③発表者名(連名者を含む), ④研究機関または会社名・所属, ⑤連絡先住所, ⑥電話番号・ファックス番号を日本語と英語で併記して, 下記の粒子

線技術ワークショップ事務局まで郵送して下さい。

申込締切 9月9日(月)

講演予稿 予稿原稿として, 一般論文は4頁, 招待論文は約8頁の予定(日本語でワープロ打ち, ただし英文のabstract約1/3~1/4頁分を1頁目の本文の前に付ける。また, 図の説明は英語でお願いします。)

原稿締切 10月21日(月)必着

参加申込 参加希望の方やプログラム希望の方は, あらかじめ, ①参加者氏名, ②研究機関または会社名・所属, ③連絡先, ④電話番号, をハガキまたは封書で下記のワークショップ事務局までお知らせ下さい。

参加費 ワークショップ参加費 10,000円(論文集代を含む)

懇親会 3,000円(11月25日夕)

(当日会場でお支払い下さい。ワークショップ当日の参加も受け付けます。)

申込・問合せ先 (〒606-01)京都市左京区吉田本町

京都大学工学部電子工学教室

粒子線技術ワークショップ事務局

実行委員会委員長 石川順三

(075-753-5325, FAX 075-751-0297)