薄い多孔質体の対流熱伝達に関する実験的研究*

西 義久^{*1}, 木下 泉^{*1}, 古谷 正裕^{*1}

Experimental Study on Convective Heat Transfer with Thin Porous Bodies

Yoshihisa NISHI^{*2}, Izumi KINOSHITA and Masahiro FURUYA^{*2} Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI), Nuclear Energy Systems Department,
2-11-1 Iwado-Kita, Komae-shi, Tokyo, 201-8511 Japan

Experimental studies are made on the convective heat transfer of three types of thin porous bodies. Heat transfer performances, flow patterns and temperature profiles near the porous bodies are compared with each other. The heat transfer performance of porous bodies with the largest pore diameter is large. It became clear that the high heat transfer performance depends on an excellent heat transportation ability inside the pore and near the surface of the porous bodies.

Key Words: Heat Transfer, Porous Media, Heat Exchanger, Fast Breeder Reactor, Extended Heat Transfer Surface

1. 緒言

高速増殖炉 (Fast Breeder Reactor; FBR) における崩壊熱除去系 (Decay Heat Removal System; DHRS) は、原子炉停止時および事故時などに、通常の熱輸送系とは別に炉心より熱を除去する役割を担っており、十分な除熱容量とともに FBR の成立性に関わる経済性が要求される。著者らはこれまで、安全容器外表面から自然通風により熱を除去する自然通風冷却型崩壊熱除去系⁽¹⁾ (Reactor Vessel Auxiliary Cooling System; RVACS、図 1) を対象として研究を行ってきた。FBR の DHRS にこの RVACS を採用することができれば、システムが簡素であることから設備コストの低減が期待できる。

しかし、RVACS は他の DHRS に比べ除熱容量が小さいため、これまでは小型炉のみに適用が限定されていた。RVACS の除熱量改善のためには、空気側の伝熱性能を改善することが有効であるが、安全容器外表面にフィンなどの構造物を溶接することは、格納境界の健全性保持の観点から望ましくないため、非接触の伝熱促進機構が必要である。

FBR の運転温度は軽水炉に比べて高く、ふく射伝熱を積極的に利用することにより、伝熱性能を改善できる可能性がある⁽²⁾。ふく射伝熱を有効に利用す

る工夫の 1 つとして、ダクト中に固体を挿入する方法がある。固体がふく射を吸収して温度が上昇し、この面が一種の拡大伝熱面のような作用をして、ガスへの伝熱を促進する。この伝熱促進体として有望

Fig. 1 Concept of the RVACS

* 原稿受付 2000 年 10 月 5 日。

^{*1} 正員、(財)電力中央研究所原子力システム部(〒201-8511 狹江市岩戸北 2-11-1)。

E-mail: y-nishi@criepi.denken.or.jp

なものの1つに、多孔質体（高空隙率発泡金属）がある。

多孔質体を熱伝達の促進に用いたものとしては、上宇都らの、両面加熱の2次元空気流路中央に多孔質体を挿入した場合の、伝熱性能改善効果についての理論的研究^③がある。また、福田らはシェルアンドチューブ型熱交換器中に、多孔質体金属や金網を配し伝熱性能改善に関する実験的研究を行っている^④。これによると、1次側流体の温度が高い場合、非常に顕著な伝熱促進効果があると報告されている。

著者らは多孔質体の薄板を、RVACS 空気流路中央に流れに平行に配し、安全容器外表面からのふく射を有効に用いて伝熱促進を行う方法を提案し、加熱面高さ 3.5m、幅 1.2m、煙突部を含めた全高 11m の加熱空気流路を用いた実験を行った。その結果、特に加熱面温度が高い場合には、多孔質体の挿入により大幅な伝熱性能改善効果が生じることが分かった^⑤。

空気流路に挿入した多孔質体を伝熱促進体として用いる場合、ふく射で入射した熱は、最終的に対流で除去されるため、多孔質体を用いた伝熱性能を解析的に評価する際には、多孔質体の対流熱伝達特性の把握が重要となる。

多孔質体の対流熱伝達特性に関しては福田・近藤ら^⑥、浜口ら^⑦の実験的研究がある。福田・近藤らは、空気流路の入口に 50mm×50mm の多孔質体をはめ込み、両端に銅ブロックを銀ろう付けし、直接通電加熱により多孔質体の熱伝達特性を得ている。浜口らは、あらかじめ高温空氣にさらして十分に一定温度に保持した多孔質体を、瞬時に冷却流路に挿入することにより過渡温度変化を求め、解析的に求めた温度変化と比較することにより熱伝達特性を評価している。

これらの研究は、多孔質体が流路に充填され、流れている空気は、必ずその多孔質体をよぎる形状で行われている。

対向する加熱面で構成された空気流路中央に、多孔質体を主流と平行に配した場合の伝熱促進効果については、先に示した上宇都ら^③の研究がある。上宇都らは空氣の流れを層流と仮定し、多孔質体挿入時の流速分布を Darcy 数をパラメータにして解析的に求めている。その場合の多孔質体の対流熱伝達特性は、多孔質体の構造を球にあてはめ等価直径を推定し、球の熱伝達式を用いている。また、これとは別に多孔質体を円管中に装填した場合の伝熱促進量を見積もる場合は MMEI-WAKIL ら^⑧が提案する熱伝達係数を用いている^⑨。このようにこれまでの研究では、多孔質体の対流熱伝達を評価する際には、まず、適当なモデル化を行い多孔質体中の流れを決

定し、その流れの大きさをもとに、既知の相関式を用いる手法が一般的である。

しかし、本研究で提案している伝熱促進方策は、厚さ 5mm の多孔質体の薄板を、200mm 程度の幅を持つ流路中に空氣流に平行に挿入するものであり、この体系では、多孔質体中の流速、熱伝達量を決定することは難しい。このような体系での対流熱伝達特性に関する研究はほとんど行われていない。そこで、本論文では、薄い多孔質体を主流と平行に配した場合の対流熱伝達特性を、主流の流速との関係から評価する。

2. 多孔質体

対象とした多孔質体の特徴を表1に示す。多孔質体は、住友電工製の製品名セルメットであり、Ni と Cr の合金で3次元の骨格構造をした高い空隙率をもつ発泡金属である。実験では、全て厚さ 5mm のものを用いた。表から分かるように品番 #1 と #5 では平均孔径が 20 倍以上異なり、比表面積は #5 が #1 の約 7 倍である。

Table 1 Geometrical forms of the porous bodies

	#1	#3	#5
Number of Cells (n / inch)	6 - 11	17 - 26	35 - 44
Specific Surface Area (m ² /m ³)	500	1700	3700
Thickness (mm)	5	5	5
Porosity(%)	92	93	96
Mean Pore Diameter (mm)	5	2	0.2

3. 実験装置および実験条件

3.1 実験装置

図2に実験装置概略を示す。試験部は 200mm×300mm、高さ 1300mm の垂直ダクトからなる。試験部上流に熱線流速計挿入孔が5個水平に並び、上流 I 型の熱線流速プローブをトラバースさせ、各点での時間平均値から平均流速を求めた。多孔質体はダクトの長辺中央に流れに平行に設置されている。1枚の多孔質体は高さ 125mm、厚さ 5mm であり、両端を電極の銅ブロックに銀ろう付けで固定している。この多孔質体6枚で加熱部を構成している。銅ブロックは断熱材で覆われ、断熱材の内外温度差によりこの部分での放熱量を見積もっている。この試験部短辺の中央に縦スリットがあり、多孔質体表面の流速分布等を上流 X 型熱線流速計で測定している。各多孔質体は各々 2V200A トランスで変圧した交流電源により通電加熱している。多孔質体の発熱量は通電量から銅ブロックの放熱量を差し引いて計算した。

通電量は5回の測定の前平均値とした。この測定での誤差は23%である。多孔質体の温度は、伝熱セメントで多孔質体の骨格に接着させた $\phi 0.5\text{mm}$ の6本の熱電対で測定した。多孔質体の温度はこの6箇所の平均値とするが、その6箇所の測定においてもサンプリングタイム1秒で5分間計測した値の時間平均値を用いている。空気は、試験部出入口に設置した $\phi 0.5\text{mm}$ の5本の熱電対を用いて測定している。計測に用いた熱電対は0.4級である。RVACSは空気を強制的に吹き込むブローア等の強制通風装置は存在しないが、空気出口に煙突が設けられており、熱交換は強制対流的に行われていると考えられる。本実験でも、煙突の効果を考慮して、出口ヘッダ上部には可変軸流吸気ファンを設置している。試験部下流には、出口ファンにより生じる可能性のある旋回流の試験部への影響を抑えるため、整流効果のあるハニカム構造を取り入れている。本実験装置の熱収支を計算したところ、空気流量に見込む必要のある測定誤差は10%であった。

3.2 実験条件

実験は、加熱面温度一定の条件で行った。

強制排気条件での流速範囲は0.5m/sから3.0m/sである。また、加熱面の温度範囲は50℃から100℃であり、空気入口は雰囲気温度である。流速分布の測

Fig. 2 Experimental Apparatus

Fig. 3 Thermo Sensor

定では、加熱部に通電を行わず常温の条件で実施した。尚、多孔質体からの放射伝熱量は加熱面温度が50℃～100℃と低いため、最大でも全伝熱量の10%程度と見積もられる。

完全自然循環状態での対流熱伝達特性を把握するために、出口ヘッダを取り除いた場合についても実験を行った。その場合には、上流X型熱線流速計の代わりに図3に示す熱電対セットを用いて、多孔質体近傍の空気温度も測定した。

4. 実験結果

4.1 強制対流熱伝達実験

図4に流速が約1.2m/s、2.6m/sでのそれぞれの多孔質体での局所熱伝達係数 α を示す。熱流束 q は多孔

Fig. 4 Local heat transfer coefficients

Fig. 5 Local Nusselt number

質体の発熱量 Q を片面分の発熱量として $1/2$ にした上で、多孔質体を平滑板とみなした場合の伝熱面積 A で除して求めた。また空気温度には上流での加熱量を考慮した局所の値を用いた。図より、多孔質体の熱伝達係数は通常の平滑板の場合と同様に上流が高く、下流に行くに従って低下する傾向があることが分かる。図5に局所ヌセルト数 Nu_x を平滑板乱流での整理式⁽¹⁾⁽¹²⁾と共に示す。ここで、 Nu_x および Re_x の代表長さには多孔質体の前縁からの距離 X を用いた。図より、多孔質体の熱伝達特性は平滑板に比べて優れていることが分かる。さらにそれぞれの多孔質体の Nu_x は、その品番ごとによくまとまっており、その熱伝達性能は#1が最も大きく次いで#3、最後が#5の順となっている。それぞれの局所 Nu_x は局所 Re_x を用いて以下の式にまとめることができる。

$$Nu_x = 0.07 Re_x^{0.83} \quad (\#1)$$

$$Nu_x = 0.041 Re_x^{0.83} \quad (\#3)$$

$$Nu_x = 0.03 Re_x^{0.83} \quad (\#5)$$

4.2 速度分布と乱流強度

図6、7に、前縁からの距離 X が0.2m、0.4mおよび0.5mでの板近傍の速度分布およびレイノルズ応力を示す。横軸は多孔質体表面からの水平方向の距離を示している。図より、平滑板に比較して多孔質体では速度境界層の発達早いこと、そして同じ

多孔質体でも#1の境界層が最も早く発達していることが分かる。さらに図7からは、多孔質体では板近傍のレイノルズ応力が非常に大きいことが分かる。さらにレイノルズ応力の大きさは平均空孔径の大きさの順となる。この傾向は板に垂直な方向の乱流強度 $\sqrt{v^2/U}$ 、および水平な方向の乱流強度 $\sqrt{u^2/U}$ にも観察された。

これらのことにより、多孔質体は、対流熱伝達に強い影響をもつ乱流境界層を発達させる能力をもち、その大きさは平均空孔径の大きさの順となる。先に述べたように、比表面積としては#5のより密な多孔質体の方が、#1の多孔質体に比べて大きいものの、この乱れの効果により、平均空孔径の大きな多孔質体の方が表面および内部での熱輸送が促進され、より大きな熱伝達促進効果を示したものと考えられる。

4.3 多孔質体の強制対流熱伝達性能

これまでの検討で多孔質体は、対流による熱伝達性能が平滑板に比較して優れていることが分かった。そしてその性能は多孔質体#1が最も大きく、次いで#3、#5と平均空孔径と表面あらさの大きさの順に熱伝達性能が優れていることが分かった。しかしながら、その表面あらさは流動抵抗も同時に増加させる。本研究で対象としているRVACSは、空気自然対流により原子炉安全容器外表面から除熱を行う概念であるため、顕著な流動抵抗の増加は、空

Fig. 6 Velocity profiles

Fig. 7 Reynolds stresses

気の流速の低下による除熱量の低下の原因となる。
そこで次に、多孔質体の表面摩擦損失を見積もる。

2次元定常流で主流方向の圧力勾配が無視できる場合の、境界層運動量式は以下で表される。

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{\tau_0}{\rho U^2} = \left(\frac{u_0}{U}\right)^2 \quad (1)$$

ここで、 θ は運動量厚さ、 τ_0 は界面せん断応力、 ρ は密度、 U は主流の速度、 u_0 は摩擦速度である。壁面速度分布により運動量厚さ θ を求め、以下の式で前縁から位置 x までの全抵抗係数 C_f を求めた⁽¹³⁾。

Fig. 8 Total skin friction coefficients

Fig. 9 Convective heat transfer performance

$$C_f = \frac{1}{\frac{1}{2} \rho U^2 x} \int_0^x \tau_0 dx = \frac{2\theta}{x} \quad (2)$$

その結果、多孔質体の全抵抗係数 C_f は平均流速、多孔質体の種類により異なり、その大きさは#1が最も大きく次いで#3、#5の順であることが分かった。また平均流速の違いにより同じ多孔質体でも C_f の値が異なり、流速が早くなると Re_x に対する勾配が減り、平滑板における乱流での C_f の勾配に近づくことが分かった。#1の多孔質体についての結果を図8に示す。平均流速の影響に関しては、古屋⁽¹³⁾の実験でも同様の傾向が現れており、あらい壁の特徴と考えられるが、多孔質体のあらしのパラメータを定義することが難しいため、ここでは、流速をパラメータとして整理した。

熱伝達性能および圧力損失特性をまとめて評価するため、 $Re_x^{-1/3} C_f$ を導入する。これによりドラフト力を同一とした場合の伝熱性能の比較が可能となる⁽¹⁴⁾。例として平均流速が3m/sでの結果を図9に示す。図より本実験範囲では、どの多孔質体においても、圧力損失を考慮した伝熱性能は平滑板の場合と比較して優れていることが分かる。また、本実験対象の多孔質中では、#1がその C_f の大きさにもかかわらず、最も伝熱性能が優れていることが分かる。

4.4 多孔質体の自然対流熱伝達性能

図10に自然対流条件下での局所ヌセルト数 Nu_x を局所レイレイ数 Ra_x を用いて示す。ここで、 Nu_x および Ra_x の代表長さには多孔質体の前縁からの距離 x を用いた。図中には比較のために、空気の場合の層流および乱流での平滑板での値を示している⁽¹⁵⁾。図より多孔質体の伝熱性能は平滑板に比較して優れていることが分かる。また、各多孔質体間での Nu_x の値の差は、強制対流での結果と比較すると小さい。ただし、特に比較的高 Ra_x の領域で各多孔質体の熱伝達性能に若干の差が現れ、#1の多孔質体が最も良好な熱伝達性能を示している。

強制対流の場合には板表面のあらし(空孔径の大きさ)に起因する乱れが生じ、その乱れの大きさの順に熱伝達の促進量が決まっているが、自然対流下では、板表面のあらしの影響が大きくなり、多孔質体間での伝熱促進の差が強制対流の場合のように顕著に現れないものと考えられる。

図11に、温度センサーにより測定した境界層内の空気温度分布を示す。図中の実線は平滑板での境界層方程式を相似変換し、本実験条件下の評価温度でのプラントル数($Pr=0.718$)に基づき解いた⁽¹⁶⁾温度分布である。

$$\eta = \left(\frac{g\beta(T_w - T_\infty)}{4\nu^2 x} \right)^{1/4} y \quad (3)$$

$$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty} \quad (4)$$

ここで、 η は無次元距離、 g は重力加速度、 β は体膨張係数、 T_w は加熱面温度、 T_∞ は雰囲気温度、 T は温度、 ν は動粘性係数、 y は壁からの距離、 θ は無次元温度である。図より、それぞれの多孔質体近傍の温度分布は、ほぼ平滑板でのそれに近い分布を示すものの、板のごく近傍で、数値解に比較して低い温度を示すことが分かる。

また、同じ多孔質体でも空孔径が大きい場合に、

Fig. 10 Local heat transfer coefficient (natural convection)

Fig. 11 Temperature profiles

多孔質体近傍の温度低下量が若干大きくなっていることが分かる。

多孔質体近傍の空気温度が低下している理由は、多孔質体中の空孔での流体による熱輸送が良好に行われているためと考えられる。そして、この良好な熱輸送により、図10に示される多孔質体の自然対流熱伝達促進効果が生じているものと思われる。これは、増岡ら⁽¹⁷⁾の透過性の垂直壁の傾向と同様である。また、図から分かるように空孔径の大きな多孔質体では、板近傍での温度の低下量が若干大きく現れている。このことから、空孔径が大きいほど板面近傍、内部での熱輸送がスムーズに行われ、それにより、図10に見られる多孔質体間の対流熱伝達性能の差が生じているものと考えられる。

5. 結言

3種類の多孔質体を用い、広い流路内に薄い多孔質体の流れに平行に設置した場合の対流熱伝達実験を行い以下の結論を得た。

- (1) 多孔質体の強制対流熱伝達特性は平滑板に比較して優れており、その大きさは平均空孔径の大きさの順となる。局所ヌセルト数 Nu_x は主流速度から計算される局所レイノルズ数 Re_x を用いて精度よくまとめることができる。多孔質体の自然対流熱伝達性能に与える空孔の大きさの影響は、強制対流でのそれに比較して小さい。ただし、空孔径の大きな多孔質体の熱伝達促進効果が若干優れている。
- (2) 多孔質体は強制対流熱伝達に強い影響をもつ乱流境界層をよく発達させる。また、その強度は本実験の範囲では、平均空孔径の大きさとともに強くなる。この乱れの効果により、平均空孔径の大きな多孔質体は、表面および内部での熱輸送が促進され、より大きな熱伝達促進効果を示す。
- (3) 強制対流時の全抵抗係数 C_f は平均流速により異なるものの、各流速をパラメータとして Re_x により整理できる。本実験の範囲では、どの多孔質体においても圧力損失を考慮した伝熱性能は平滑板の場合と比較して優れている。空孔径の大きい多孔質体の方が圧力損失を考慮した伝熱性能も優れていることが分かった。
- (4) 多孔質体で自然対流熱伝達が促進した理由は、空孔、多孔質体表面における良好な熱輸送によると考えられる。平均空孔径の影響は、強制対流におけるそれほど大きくはないものの、強制対流の場合と同様に、平均空孔径が大きいほど熱輸送

がスムーズに行われ、対流熱伝達性能も優れている。

文 献

- (1) Charles E. Boardman, Marvin Hui, Int. conf. on Future Nuclear Systems (GLOBAL '99), Theme 5 (Nonproliferation), Wyoming, 1999-9
- (2) 長谷川修、機論、Vol.49, No.437, pp3-10, 1983
- (3) 上宇都幸一、越後亮三、長谷川修、末藤嘉博、高温学会誌、Vol.4, No.6, pp258-268, 1978
- (4) 福田研二、山本哲三、長谷川修、越後亮三、佐野川好母、日本原子力学会誌、Vol.28, No.4, pp352-359, 1986
- (5) 西義久、木下泉、小倉健志、機論 Vol.56, No.529, 1990, p.2779
- (6) 近藤哲也、福田研二、長谷川修、中川清、九州大学総合理工学研究科報告、Vol.9, No.1, 1987, p.57
- (7) 福田研二、長谷川修、近藤哲也、機論、Vol.56, No.529, 1990, p.2729
- (8) 浜口和洋、高橋真太郎、宮部英也、機論、Vol.49, No.445, 1983, p.1991
- (9) MMEL-WAKIL, Nuclear Heat Transport, 1971, p.161, Int. Text Co.
- (10) K.KAMIUTO, K.NAKAGAWA, RECHIGO, and S.HASEGAWA, J. of Nuclear Science and Technology, Vol.16, No.6, 1980, pp.425-435
- (11) JOHNSON, H. A. and RUBESIN, M. W., Trans. ASME, 1949, Vol. 71, No.5, p.447
- (12) Kader, B. A. and Yaglom, A. M., Int. J. Heat Mass Transfer, 15, 1972, p.2329
- (13) 古屋善正、藤田秀臣、「金網粗面上の乱流境界層」、機論、Vol.32, No.237, 1966, p.725
- (14) 棚沢一郎、西尾茂文、高野清、田辺正史、機論、Vol.49, No.439, 1983, p.676
- (15) 藤井哲、伝熱工学の進展 3
- (16) 中村 博、伝熱解析プログラム
- (17) 増岡、高津、他、第 32 回伝熱シナポ講演論文集 p.135, 1995