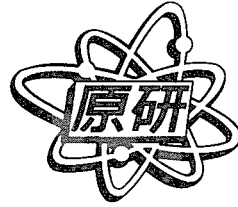




JP0150131

JAERI-Research
2000-056



金属細線を挿入した多孔性流路の伝熱促進

2000年12月

武田 哲明

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

金属細線を挿入した多孔性流路の伝熱促進

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

武田 哲明

(2000年10月10日受理)

一般に伝熱を促進させるため、流路壁面に環状フィンやスパイラルフィンを取り付けたり、流路内にねじれテープなどを挿入したりする方法がある。これらの伝熱促進法は伝熱面を改造して熱伝達率を改善させたり伝熱面積を大きくしたりすることによるものである。本研究では、金属細線を挿入した高多孔性流路の伝熱及び圧力損失特性を調べることを目的とする。ここでは、鉛直正方形流路と水平円管流路を用いて実験を行い、流路内に銅線を挿入した場合の熱伝達特性について調べた。

実験の結果、流路内に銅線を挿入すると除熱量は増大し、除熱量増大の効果は加熱壁の温度上昇に伴い増大した。空隙率が0.993~0.998の範囲で銅線を挿入した正方形流路及び円管流路では、壁温度が170℃以下の一定熱流束条件下において、滑らかな伝熱面流路の場合に比べて約20%程度の伝熱促進効果があった。

Enhancement of Heat Transfer in a Porous Channel with Metallic Wire Inserts

Tetsuaki TAKEDA

Department of Advanced Nuclear Heat Technology
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 10, 2000)

There are several methods for enhancement of heat transfer such as attaching radial and spiral fins on a channel surface or inserting twisted tape in the channel. These methods increase heat transfer coefficient or area by manufacturing of the heat transfer surface. The objective of this study is to clarify characteristics of heat transfer and pressure drop in the channel inserted metallic wire with high porosity. A heat transfer experiment was performed using a vertical rectangular or a horizontal circular channel to obtain the heat transfer characteristics in the channel inserted copper wire.

From the results obtained in this experiment, it was found that an amount of heat removal in the channel with the copper wire was larger than that without one. An effectiveness of heat transfer enhancement increased with the temperature of the heated wall. The amount of heat removal in the rectangular and circular channel inserted copper wire, which has 0.993~0.998 of porosity, increased about 20% comparing with the channel having a smooth wall surface under the condition of the constant heat flux and lower than 170°C of wall temperature.

Keywords: Heat Transfer Enhancement, Porous Channel, Forced Convection, Fin, Rectangular Channel, Circular Channel, Copper Wire, High Porosity Insert, Heat Removal, Experimental Study

目次

| | |
|---------------------------|----|
| 1. 序論 | 1 |
| 2. 実験装置の概要 | 2 |
| 2.1 鉛直正方形流路 | 2 |
| 2.2 水平円管流路 | 2 |
| 3. 実験結果と考察 | 14 |
| 3.1 鉛直正方形流路の実験結果と考察 | 14 |
| 3.2 水平円管流路の実験結果と考察 | 16 |
| 4. 結論 | 26 |
| 謝辞 | 26 |
| 参考文献 | 27 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Outline of Experimental Apparatus | 2 |
| 2.1 Vertical Rectangular Channel | 2 |
| 2.2 Horizontal Circular Channel | 2 |
| 3. Experimental Results and Discussions | 14 |
| 3.1 Results of the Vertical Rectangular Channel and Discussions | 14 |
| 3.2 Results of the Horizontal Circular Channel and Discussions | 16 |
| 4. Conclusion | 26 |
| Acknowledgement | 26 |
| References | 27 |

This is a blank page.

1. 序論

日本原子力研究所では高温工学試験研究炉 (HTTR) の高温核熱を用いて天然ガスによる水蒸気改質水素製造システムの技術開発⁽¹⁾を進めている。HTTR水素製造システムでは高温のヘリウムガスにより水蒸気改質器の触媒管を加熱するが、一般に円管や矩形管を強制対流により加熱して熱交換させる場合、流路管表面に様々なフィンを取り付けたり、ねじれテープを挿入したりして伝熱を促進させることが多い。このような方法ではフィン付き管の製作性や流動抵抗の増大に伴う流量確保に対して経済性を考慮した伝熱流動性能が最適となる設計が存在し、適用する際には十分な検討が必要である。現在のHTTR水素製造システムの水蒸気改質器触媒管では直交フィンによる伝熱促進を検討しているが、触媒管の溶接検査や加工の困難さ、加工による構造強度の低下を考慮しなければならない。そこで、本研究では伝熱面を加工することなく流路内に繊維状の金属細線を重ねて挿入し、放射伝熱と高い熱伝導率及び伝熱面積の拡大を利用した伝熱促進法について熱伝達と圧力損失特性を調べることを目的とする。

これまで、繊維状充てん層は主に非金属材料を用いた断熱材として利用されてきたが、充てん層の有効熱伝導率や放射伝熱に関する特性を調べたものが多く、熱伝達率や物質伝達率などについても比較的空隙率が低い場合の実験や解析が行われ、粒子充てん層における値を近似的に使用するが多い。空隙率が低い充てん層内の放射伝熱に関する研究^(2,3)が過去に行われ(空隙率; $\varepsilon < 0.8$)、対流ふく射変換体^(4,5)として既に利用されている。この多孔性固体放射変換体は空隙率の高い多孔性固体を流路内に挿入して、放射エネルギーの吸収-射出体として機能させるものである。高温の作動ガスを多孔性固体壁に通す場合を考えると、多孔性固体壁の光学的厚さが適当であれば、この部分で急激な温度降下が見られることがわかっている。このエンタルピー差が放射エネルギーに変換されるため、これを被加熱体に吸収させれば高い伝熱促進効果が得られるというものである。この方法の原理、伝熱の機構では主に放射の伝播機構を利用し、(1)放射の吸収射出能力が気体に比べて多孔性固体の方がよいこと、(2)作動する気体と多孔性固体間の熱伝達率が高いこと、(3)多孔性固体の伝熱面積が大きいこととされている。この方法では、作動流体が多孔性固体内を直接流れることが重要であり、これにより高い熱伝達率と拡大伝熱面の効果を有効に利用している。

空隙率が高い場合 ($\varepsilon > 0.98$) の繊維充てん層に関する研究は、充てん材に高熱伝導率材料を用いた場合の熱伝達に関する研究^(6,7)がいくつか見られるものの、空隙率や線径等により整理されているとはいえない。また、伝熱促進法の観点から、従来利用されてきたフィンなどの方法と十分比較検討されていない。

そこで、本研究では充てん材に比較的高熱伝導率の銅線を用いて、熱放射により加熱された銅線による伝熱面拡大効果を利用した伝熱促進法について調べた。金属細線を充てんした流路の伝熱性能が従来のフィン等に代わりうる性能を有するかどうかを調べるため、特に空隙率が 0.98 以上の場合について、伝熱・圧力損失等の基本特性を求めることが目的である。ここでは、片面加熱の鉛直正方形流路内に銅線を挿入した場合及び水平円管流路内に銅線を挿入した場合の除熱特性について報告する。

2. 実験装置の概要

2.1 鉛直正方形流路

実験装置の概略図をFig.2.1(側面図1), Fig.2.2(側面図2), Fig.2.3(断面図)に示し, 主要仕様をTable2.1の(a)に示す。実験装置は3枚のステンレス製の平板と1枚の銅製平板を組み合わせた鉛直の正方形断面流路である。銅板の厚みは4mm, ステンレス板は5mmである。銅板表面にシーヒータを取付け, その外側を断熱材により覆い放熱を防いだ。他の3面は断熱せずに自然放冷とした。流路断面は一辺が100mmの正方形であり, 流路高さは1200mmである。流路内の加熱面側には, 壁温測定用のK型熱電対を鉛直方向に12本取り付けた。3つの冷却面には鉛直方向におのおの10本の熱電対を設けた。さらに, 流路内気体温度を測定するために加熱面と対向する冷却面から加熱面方向にトラバース可能な熱電対を鉛直方向に10本取り付けた。試験部の熱電対位置をFig.2.1~2.3に示し, スキャナー端子番号と側定点をTable2.2(a)に示す。ヒータ制御においては, 温度調節計に取り込まれた熱電対の電圧信号が自動電圧制御電源の制御信号に変換され, ヒータ出力が制御される。温度計測は熱電対出力をデータ収録装置(アドバンテスト社製R7430データロガー)に取り込み, パーソナルコンピュータによりデータ収録装置を制御して実験データを取得した。

実験の加熱条件はヒータ出力を一定とし, 正方形流路の一面を加熱した。加熱量はあらかじめヒータ端子間の抵抗を測定し, 温度調節計の出力信号に対する電圧を求めてから電気出力を計算した。正方形流路の実験では熱伝達率の低い層流の強制対流において伝熱促進効果があるかを調べ, 乱流については層流の場合の結果を検討した後, 実施することとした。まず, 流路内に何も挿入しない場合について実験を行った。層流($Re=1.16 \times 10^3$)の強制対流は流路の上部からブロウにより空気を吸い込むことにより発生させ, その状態で正方形流路の一面を加熱した。加熱開始後の各部温度変化の一例として, 加熱量が829Wの場合の温度変化をFig.2.4に示すが, 約2時間後には定常状態に達している。実験では, 各部の温度変化が $1^\circ\text{C}/\text{h}$ 以内となった状態を定常状態と仮定し, 各部壁温度及び気体温度を測定した。また, 流路内の気体温度測定用熱電対を加熱壁から3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 85, 90, 95mmの合計15点の位置に移動させて温度を測定し温度分布を求めた。直径1mmと0.5mmの2種類の銅線を用い, 空隙率は0.99以上の範囲で変化させて実験を行った。また, 銅線は5mmずつに切って, 金属束子状に丸めたものを充てん層として使用した。

2.2 水平円管流路

円管流路試験部の概略図をFig.2.5(側面図), Fig.2.6(断面図)に示し, 主要仕様をTable2.1の(b)に示す。流路は内径25mmのステンレス製円管であり, 外側にシーヒータを巻付け, さらにその外側を厚さ50mmの断熱材で覆い, 放熱を防いでいる。フランジ面間が500mmの円管を接続して流路長さを1000mmとした。流路の圧力損失を求めするため, 流路の出入口に差圧測定孔を設けた。

測定孔間距離は 920mm である。管内の気体温度測定用に5本, 出入口気体用に2本の熱電対を設けた。管内壁は流れ方向に10本, 断熱材内に5本の熱電対を取り付けた。熱電対位置をTable 2.2(b)に示す。流量測定は層流型流量計を用いて差圧及び温度を測定し, 校正された流量変換係数を用いて流量を求めた。

加熱条件は正方形流路の場合と同様にヒータ出力を一定に保持した。円管が水平に配置されていることから, 流速を遅くして層流とすると浮力による上昇流の影響を無視できない場合があることを考慮し, 円管の実験における対流条件は乱流 ($Re=5.0 \times 10^3$) の強制対流とした。加熱開始後の各部温度変化の一例として, 加熱量が 322W の場合の温度変化をFig.2.7に示すが, 約3時間後には定常状態に達している。実験では, 正方形管の場合と同様に各部の温度変化が $1^\circ\text{C}/\text{h}$ 以内となった状態を定常状態と仮定し, 各部壁温度, 気体温度及び流路差圧を測定した。

Table 2.1 Specification of apparatus

(a) Vertical rectangular channel

Channel width: 0.1m

Channel height: 1.2m

Heated plate: 0.1m×0.6m×4mmt×2(Copper)

Side and counter plates: 0.1m×0.6m×5mmt×2 (SUS304)

Insulation layer: 0.1m×0.6m×50mmt×2

Heater: 1kW×2parts

Blower: Max. 350 l/min

(b) Horizontal circular channel

Channel diameter: 25mm

Channel length: 1.0m

Insulation layer: ϕ 34mm(I.D.)×50mmt

Heater: 0.5kW×2parts

Laminar flow meter: LFM-6

Factor: 0.0906 L/sec·mmAq at 20°C

Table 2.2(a) List of thermocouples (rectangular)

| Scanner No. | Thermocouple No. | Thermocouple Position | Distance from Inlet (mm) |
|-------------|------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1 | T-TC-1 | Gas | 1095 |
| 2 | T-TC-2 | Gas | 985 |
| 3 | T-TC-3 | Gas | 875 |
| 4 | T-TC-4 | Gas | 765 |
| 5 | T-TC-5 | Gas | 655 |
| 6 | T-TC-6 | Gas | 520 |
| 7 | T-TC-7 | Gas | 410 |
| 8 | T-TC-8 | Gas | 300 |
| 9 | T-TC-9 | Gas | 190 |
| 10 | T-TC-10 | Gas | 80 |
| 11 | KI-TC-1 | Heated surface | 1025 |
| 12 | KI-TC-2 | Heated surface | 855 |
| 13 | KI-TC-3 | Heated surface | 685 |
| 14 | KI-TC-4 | Heated surface | 515 |
| 15 | KI-TC-5 | Heated surface | 345 |
| 16 | KI-TC-6 | Heated surface | 175 |
| 17 | KO-TC-1 | Heater | 1025 |
| 18 | KO-TC-2 | Heater | 855 |
| 19 | KO-TC-3 | Heater | 685 |
| 20 | KO-TC-4 | Heater | 515 |
| 21 | KO-TC-5 | Heater | 345 |
| 22 | KO-TC-6 | Heater | 175 |
| 23 | DI-TC-1 | Insulator | 1025 |
| 24 | DI-TC-2 | Insulator | 855 |
| 25 | DI-TC-3 | Insulator | 685 |
| 26 | DI-TC-4 | Insulator | 515 |
| 27 | DI-TC-5 | Insulator | 345 |
| 28 | DI-TC-6 | Insulator | 175 |
| 29 | D1-TC-1 | Right side surface | 965 |
| 30 | D1-TC-2 | Right side surface | 765 |
| 31 | D1-TC-3 | Right side surface | 565 |
| 32 | D1-TC-4 | Right side surface | 365 |
| 33 | D1-TC-5 | Right side surface | 165 |
| 34 | D2-TC-1 | Counter surface | 965 |
| 35 | D2-TC-2 | Counter surface | 765 |
| 36 | D2-TC-3 | Counter surface | 565 |
| 37 | D2-TC-4 | Counter surface | 365 |
| 38 | D2-TC-5 | Counter surface | 165 |
| 39 | D3-TC-1 | Left side surface | 965 |
| 40 | D3-TC-2 | Left side surface | 765 |
| 41 | D3-TC-3 | Left side surface | 565 |
| 42 | D3-TC-4 | Left side surface | 365 |
| 43 | D3-TC-5 | Left side surface | 165 |

Table 2.2(b) List of thermocouples (circular)

| Scanner No. | Thermocouple No. | Thermocouple Position | Distance from Inlet (mm) |
|-------------|------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1 | TC-1 | Gas | 165 |
| 2 | TC-2 | Gas | 260 |
| 3 | TC-3 | Gas | 450 |
| 4 | TC-4 | Gas | 645 |
| 5 | TC-5 | Gas | 835 |
| 6 | TC-6 | Insulator | 165 |
| 7 | TC-7 | Insulator | 260 |
| 8 | TC-8 | Insulator | 450 |
| 9 | TC-9 | Insulator | 645 |
| 10 | TC-10 | Insulator | 835 |
| 11 | TC-11 | Heated surface | 70 |
| 12 | TC-12 | Heated surface | 165 |
| 13 | TC-13 | Heated surface | 260 |
| 14 | TC-14 | Heated surface | 355 |
| 15 | TC-15 | Heated surface | 450 |
| 16 | TC-16 | Heated surface | 550 |
| 17 | TC-17 | Heated surface | 645 |
| 18 | TC-18 | Heated surface | 740 |
| 19 | TC-19 | Heated surface | 835 |
| 20 | TC-20 | Heated surface | 930 |
| 21 | TC-21 | Gas at LFM | - |
| 22 | TC-22 | Gas outlet | 1000 |
| 23 | DP-1 | Differential pressure (LFM) | - |
| 24 | DP-2 | Differential pressure (CH) | - |

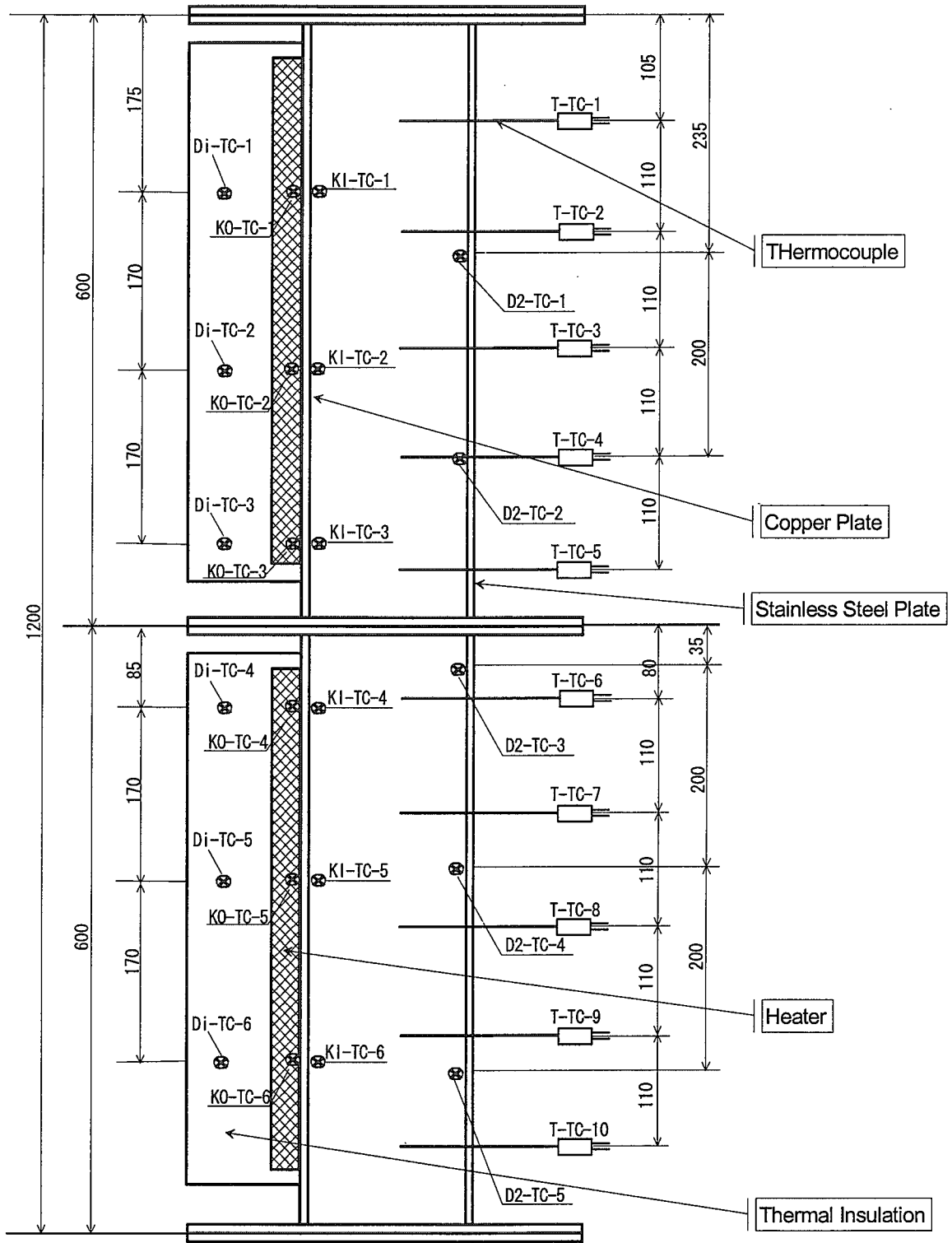


Fig.2.1 Experimental apparatus (side view 1)

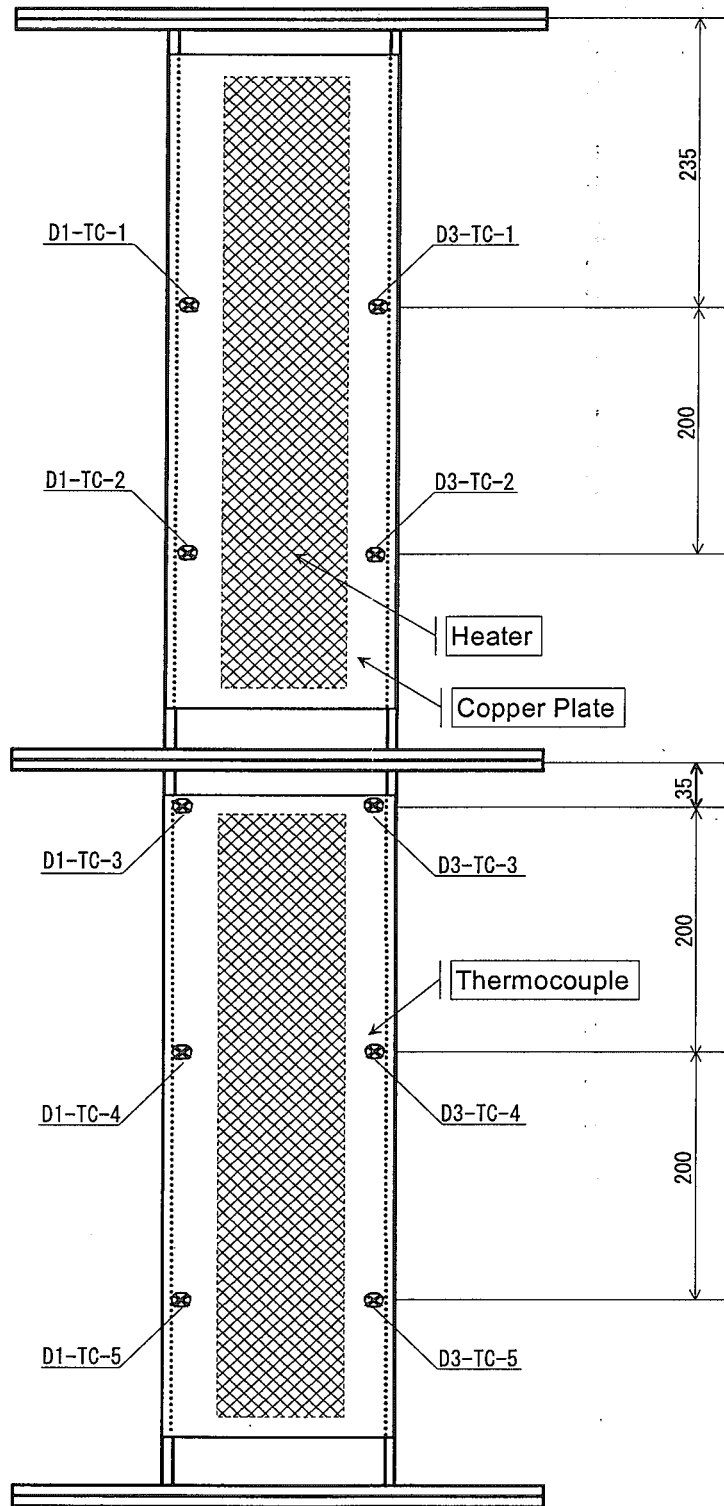


Fig.2.2 Experimental apparatus (side view 2)

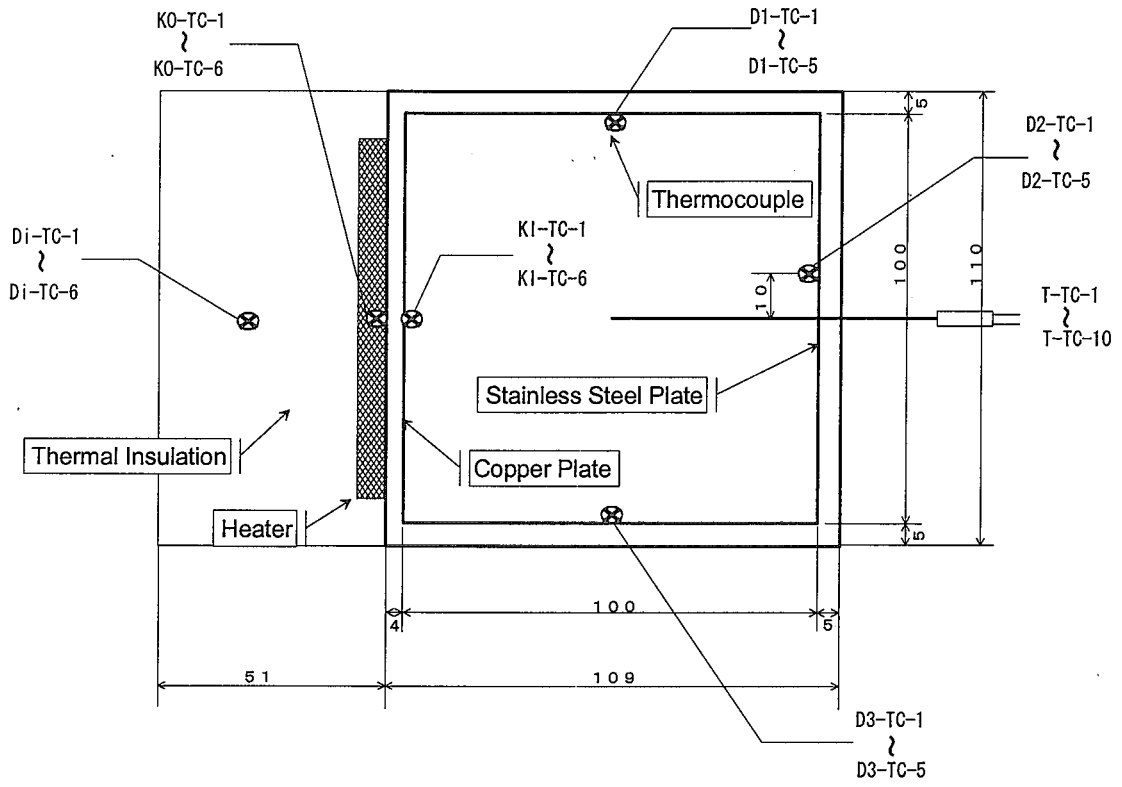


Fig.2.3 Experimental apparatus (cross section)

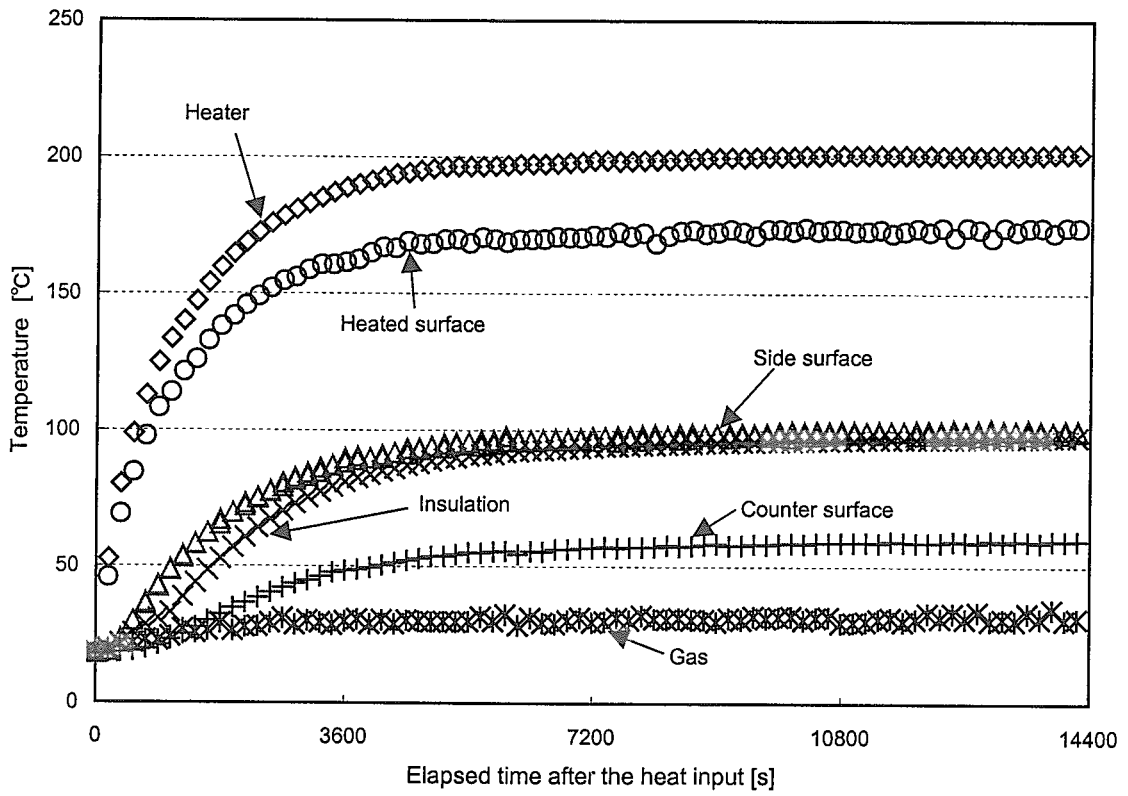


Fig.2.4 Temperature transient

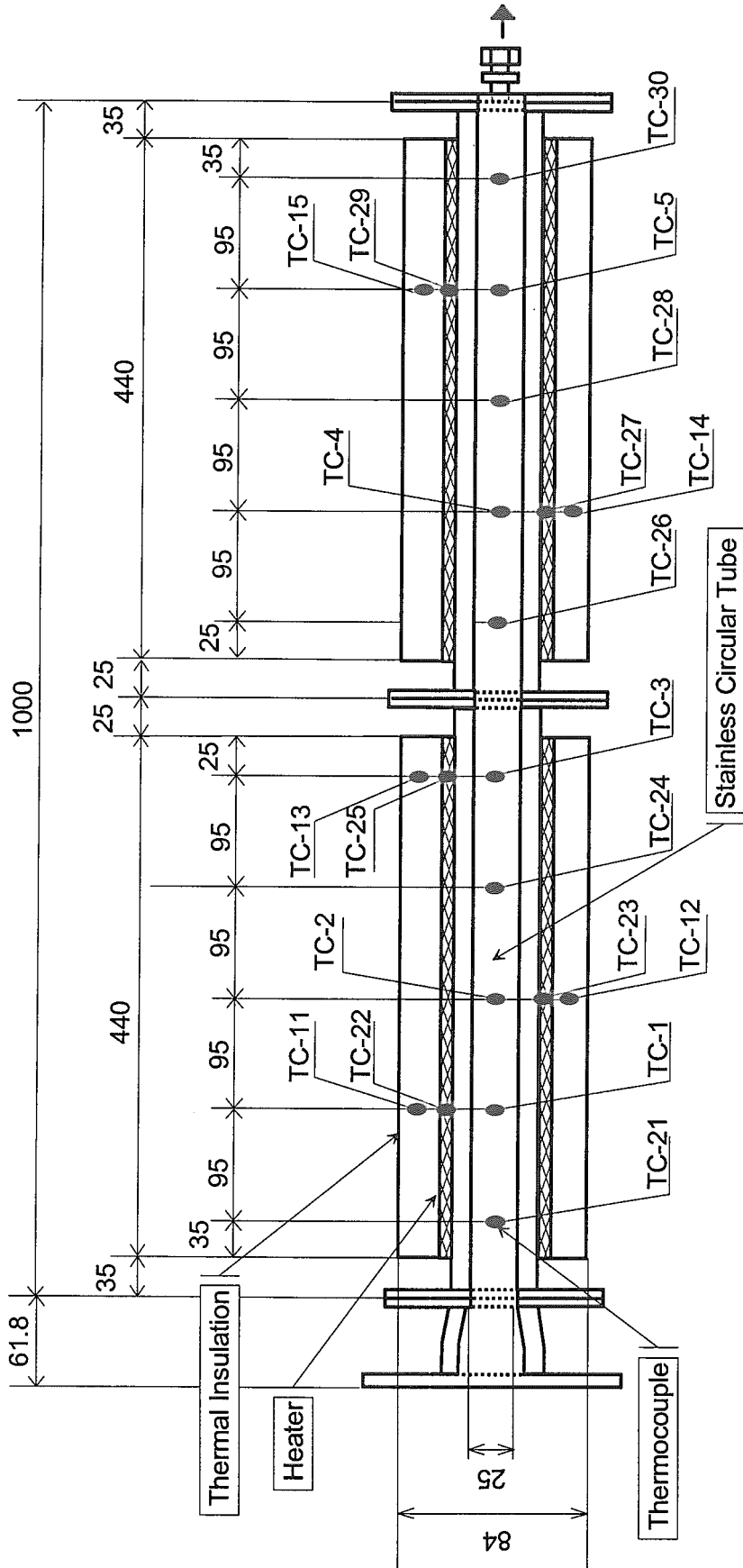


Fig.2.5 Experimental apparatus (Circular channel - side view)

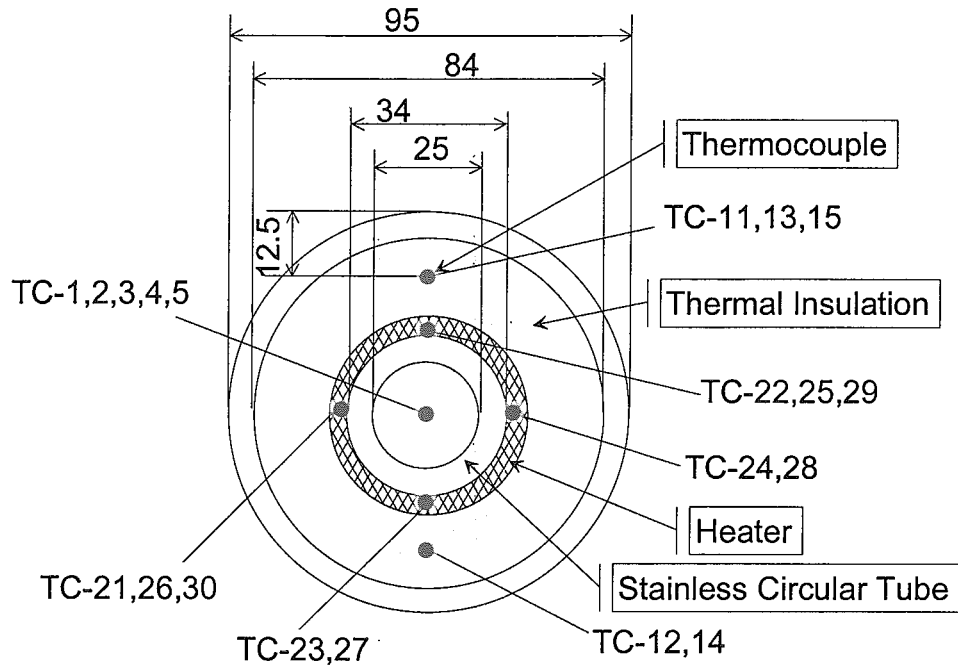


Fig.2.6 Experimental apparatus (Circular channel - cross section view)

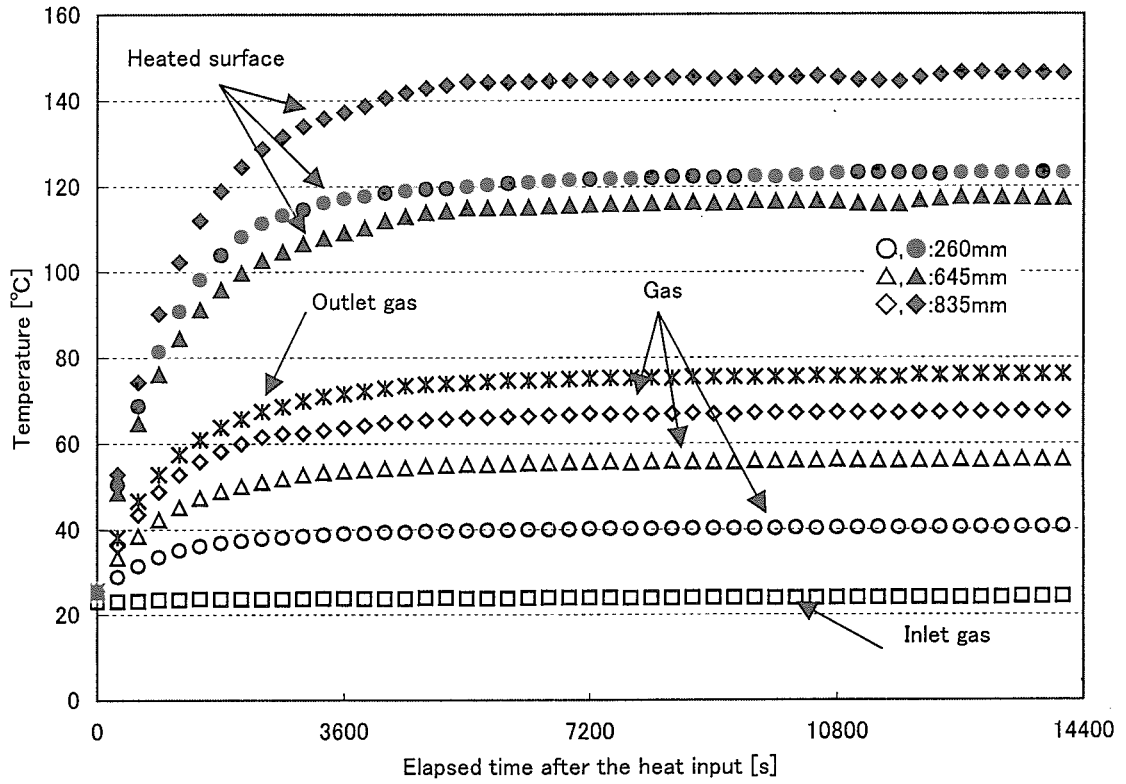


Fig.2.7 Temperature transient

3. 実験結果と考察

3.1 鉛直正方形流路の実験結果と考察

空隙率, 伝熱面積, 銅線径, 線長及び加熱量の実験条件をTable3.1に示す。記号N/Aは銅線を挿入しない場合の実験である。本実験では線径を一定として空隙率を変化させた場合の除熱量変化を調べた。したがって, 線径を変えた実験は1mmの場合(W1)について加熱量を変えた2条件のみ実施した。W2からW4までは線径を0.5mmで一定とした場合の実験である。加熱量が736Wの場合の加熱-冷却面間の気体温度分布をFig.3.1(a), (b)に示す。(a)は実験W3とN/A, (b)はW4とN/Aの場合である。横軸は加熱面からの距離を流路幅で除した無次元距離, 縦軸は流路内測定点の気体と流入気体との温度差を示している。(●, ▲, ◆)は銅線を挿入しない平滑面の場合, (○, △, ◇)は銅線を挿入した場合である。(●○)は流路出口(無次元距離 $y/L=0.91$), (▲△)は流路中央($y/L=0.64$), (◆◇)は流路入口($y/L=0.16$)の温度分布を示している。特に出口部($y/L=0.91$)では加熱壁から $x/D=0.4$ 付近までは銅線を挿入した場合の気体温度が高くなっている。これは主として熱放射により加熱された銅線によっても空気が加熱されるため, 平滑管の場合に比べて気体温度が上昇しているものと考えられる。一方, $x/D=0.9$ 以上の冷却面側では銅線を挿入しない場合の気体温度が銅線を挿入した場合より高くなっている。これは, 平滑管の場合には加熱面から直接, 冷却面へ熱放射されるために気体温度が高くなるものと考えられる。

次に, 加熱量が736Wの場合の銅線を挿入しない平滑管(N/A)と挿入した(W3, W4)場合の加熱壁面と側面及び対向面の流れ方向の壁温度分布をFig.3.2に示す。Fig.3.1に示す気体温度とは逆に, 加熱壁面温度は銅線を挿入しない平滑管(●)の場合が高くなっている。これは, 熱入力一定の実験であることから, 除熱能力の低い平滑面の場合の加熱壁面温度が高くなったためである。

ここで流入する空気が持ち去った熱量を以下のように算出した。まず, 流路出口($y/L=0.91$)において流路の加熱-冷却面間をトラバースして測定した15点の気体温度から積分平均温度を算出する。流路入口($y/L=0.07$)の最低気体温度との温度差を求め, 物性値は流路出入口の算術平均温度で評価して除熱量を算出した。空気の流速は層流型流量計から求めた流量から平均流速を算出した。層流型流量計から求めた流量は $0.183\text{m}^3/\text{min}$ であった。これより, 正方形管の流路断面積で除して平均流速を求めると 0.183m/s となり, レイノルズ数は $Re=1.16 \times 10^3$ であった。

Table3.2にすべての実験結果を示す。表には熱入力と加熱面平均温度, 流入気体温度, 及びこれらの温度差, 空隙率, 表面積及び銅線を挿入した場合の除熱量(Q_w)を挿入しない平滑管の場合の除熱量(Q_s)で除した除熱量の比を示す。この除熱量の比を熱入力に対して示した図をFig.3.3に示す。横軸は熱入力, 縦軸は除熱量の比(Q_w/Q_s)を示す。図からわかるように熱入力の増大とともに除熱量の比が大きくなる傾向が現れている。例えば, W3(△)で熱入力が486Wの場合, 平滑面の矩形流路に比べて7%程度の伝熱促進効果であるが, 熱入力が829Wの場合は20%以上の促進効果があった。W3の場合, 加熱壁面温度は486Wで94℃, 829Wでは141℃であり, 加熱面温度の上昇に伴い銅線が熱放射により加熱されると考えると, 加熱壁面温度が高くなればより伝熱促進の効果が大きくなる可能性を示している。また, 銅線の表面積が大きいW2(□)についても拡大

伝熱面の効果があると考えられたが、本実験では除熱の効果はそれほど大きくなかった。これは、空隙率が低くなって十分熱放射で加熱されない細線の割合が増えるためではないかと考えている。本実験の範囲では 0.998 程度の高空隙率でも伝熱促進効果があった。

ここで、熱伝達率と伝熱面積の観点から本実験を考察する。まず、銅線を円柱と仮定した場合の熱伝達率を計算すると、流体が加熱円柱に直交するように流れる場合のヌセルト数は下式で与えられる⁽⁸⁾。

$$Nu_m = C_1 \cdot Re^n \cdot Pr^{0.37} (Pr/Pr_w)^{0.25} \quad (1)$$

円柱の直径を代表長とした Re_d 数に対して、 $1 < Re_d < 40$ のとき、係数 $C_1 = 0.75$ 、及び指数 $n = 0.4$ である。したがって、銅線の直径を 0.5mm、 Re 数を 1.16×10^3 とするとき、 $Re_d = 5.78$ となる。ここで、主流及び壁面でのプラントル数は等しいと仮定し、物性値は 300K の空気の値を用いた。これより、平均ヌセルト数は、

$$Nu_m = 0.75 \times 5.78^{0.4} \times 0.717^{0.37} \times 1^{0.25} = 1.338$$

$$\alpha_{md} = Nu_m \cdot \lambda / d = 69.7 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

となる。また、Collis の式⁽⁹⁾で平均ヌセルト数及び熱伝達率を求めると

$$Nu_m = 1.436, \alpha_{md} = 74.7 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

となる。

一方、熱流束一定の正方形管における発達した層流のヌセルト数⁽¹⁰⁾と熱伝達率は

$$Nu_m = 3.608, \alpha_m = 0.938 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

である。加熱平板の伝熱面積は 0.12 m^2 であり、4面全面が伝熱面であるとしても $A = 0.48 \text{ m}^2$ である。これに対し、銅線の表面積 A_d は Table 3.1 からわかるように加熱平板の面積と同程度かそれ以上である。特に伝熱促進の効果が現れた W3, W4 の場合は加熱平板面積の約 1.5 倍から 2 倍となっている。したがって、加熱壁から熱伝導により銅線に熱が移動しなくても、熱放射によって十分な熱が供給されれば、熱伝達率の増大と伝熱面拡大による伝熱促進効果が期待できることがわかる。仮に 4 面すべてが伝熱面とするとき平板と銅線の温度が等しいと仮定する場合には、熱伝達率と伝熱面積との比を取ると

$$(\alpha_m \cdot A + \alpha_{md} \cdot A_d) / (\alpha_m \cdot A) = 27.8$$

となる。ただし、銅線への熱供給が少ないと銅線と流体との温度差が小さくなり、熱伝達率が平板のそれに比べて十分大きくても、除熱量が熱伝達率の増大効果ほど大きく現れない。このことから、加熱壁を高温にして、銅線に対して熱放射による熱移動量を大きくし、さらに銅線のような高熱伝導率材料を用いることで、銅線からの除熱量を大きくできると考えられる。

次に、圧力損失について検討すると、平滑面を持つ正方形管の管摩擦係数 λ は層流円管の場合を λ_c として、管摩擦係数比 k は

$$k = \lambda / \lambda_c = \lambda / (64 / Re) = 0.889$$

となる。したがって、正方形管の摩擦係数は $\lambda = 4.92 \times 10^{-2}$ となる。これより、本実験装置での圧力損失は

$$\Delta p = \lambda (L/d) (\rho \cdot u^2 / 2) = 1.16 \times 10^{-2} \text{ [Pa]}$$

となる。実験ではフルスケール 100mmAq (= 1.013×10^3 [Pa]) の差圧計を用いて、差圧測定を行っ

たが得られる値は測定誤算の範囲内であり、流路差圧を精度良く求めることはできなかった。

次に、銅線を挿入した場合の圧力損失を円形断面針金で作った正方形網目の織金網を重ねた場合の圧力損失⁽¹¹⁾と仮定して求めた。金網の抵抗係数 K を以下の開口面積比 β 、レイノルズ数 Re_β を用いて式(2)のように定義する。

$$\beta = (1 - d/l)^2, \quad Re_\beta = u \cdot d / (\beta \cdot v)$$

$$K = 6 \cdot (1 - \beta) \cdot \beta^{-2} \cdot Re_\beta^{-1/3}, \quad 60 < Re_\beta < 600 \quad (2)$$

ここで、 d は針金直径、 l は針金間隔である。

実験W4の場合、流路内に挿入した銅線の全長は110mであり、束子状に丸められた銅線の間隔は約5~15mm程度であった。そこで、この銅線を100mmずつに切った1100本を、100mm×100mm×1200mmの直方体空間内に等間隔で配置すると仮定すると、7本の銅線を約12mm間隔でそれぞれ縦横に並べて正方形網目を作り、これを流れ方向に約79枚、等間隔に並べることができる。このとき、正方形断面内の銅線間隔は約12mmとなるので、開口面積比とレイノルズ数はそれぞれ、 $\beta = 0.9188$ 、 $Re_\beta = 6.29$ となる。レイノルズ数 Re_β は式(2)の適用範囲外であるが、参考値として抵抗係数 K を求めると、 $K = 0.3126$ となる。平滑管の場合の抵抗係数を $K' = \lambda \cdot L/d$ で表すとすれば $K' = 0.59$ であり、一方、銅線を挿入したW4の場合は $K = 0.3126 \times 79 = 24.7$ となる。したがって、抵抗係数の比は

$$(K + K')/K' = 42.8$$

となる。また、この場合の圧力損失は

$$\Delta p = K \cdot (\rho \cdot u^2 / 2) \times 79 = 0.486 \text{ [Pa]}$$

となった。実験では銅線を挿入した場合についても測定誤差範囲内の差圧しか測定できなかった。したがって、正方形流路の場合について層流とした本実験の範囲内では圧力損失増大の影響を評価できなかった。ここではポンプ動力を一定として実験を行っており、加熱壁温度が約150°Cの場合は、平滑面を持つ正方形管に対して、加熱面と同程度の表面積を持つ銅線を挿入することで約1.2倍の伝熱促進効果を得ることができた。加熱面がより高温となり、熱放射の効果が大きくなれば、より大きな伝熱促進効果が得られると考えている。

3.2 水平円管流路の実験結果と考察

空隙率、伝熱面積、銅線径、線長及び加熱量の実験条件をTable3.3に示す。記号N/Aは銅線を挿入しない場合の実験である。本実験でも2種類の線径を持つ銅線を用いて空隙率を変化させた場合の除熱量変化を調べた。線径は0.5mmの場合(PW1)と70 μ m(PW2)の2条件である。加熱量が322Wの場合の加熱壁面温度分布と気体温度分布をFig.3.4に示す。横軸は円管入口からの距離である。(●, ▲)は銅線を挿入しない平滑面の場合(N/A)、(○, △)は銅線を挿入した場合(PW1)である。ヒータが巻かれていないフランジ接続部からの放熱により、入口から約500mm付近の壁温度が低下しているが、この温度降下が伝熱性能に影響を及ぼすことはないと考えられる。加熱壁面温度は銅線を挿入しない平滑面(●)の場合が高くなっており、管内の気体温度は銅線を挿入した場合(△)のほうが平滑面(○)に比べて高い。これは、壁面からの除熱能力が銅線を挿入した場

合の方が平滑面に比べて高くなっていることを示している。したがって、円管流路の場合も正方形管の場合と同様に熱放射により加熱された銅線によって空気が加熱されるため、平滑面の場合に比べて気体温度が上昇しているものと考えられる。

次に正方形管の場合と同様に熱伝達率と圧力損失について検討する。円管直径を代表長としたレイノルズ数を 5000 とすれば、5mm の円柱直径を代表長とした Re_d 数は 100 となる。式(1)において $40 < Re_d < 1000$ のとき、係数 $C_1=0.51$ 、及び指数 $n=0.5$ である。これより、平均ヌセルト数は、

$$Nu_m = 0.51 \times 100^{0.5} \times 0.717^{0.37} \times 1^{0.25} = 4.509$$

$$\alpha_{md} = Nu_m \cdot \lambda / d = 234.5 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

となる。

一方、円管内の発達した乱流のヌセルト数を Kays⁽¹²⁾の式で求めると熱伝達率は

$$Nu_m = 16.96, \alpha_m = 17.6 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

である。したがって、熱伝達率だけを比較すれば銅線の熱伝達率は円管のそれに比べて10倍以上も大きい。円管内の伝熱面積は $A = 0.0785\text{m}^2$ であり、銅線の表面積はTable3.3からわかるように、例えば伝熱促進の効果が大きかったPW1の場合は円管の約1/5である。正方形管の場合と同様に加熱面と気体との温度差が等しいと仮定する場合には、熱伝達率と伝熱面積の積の比をとると

$$(\alpha_m \cdot A + \alpha_{md} \cdot A_d) / (\alpha_m \cdot A) = 3.45$$

となる。したがって、正方形管の場合と同様に加熱壁から熱放射によって十分な熱が供給されれば、熱伝達率の増大と伝熱面拡大による伝熱促進効果が期待できる。

次に、圧力損失について検討すると、平滑面を持つ円管の発達した乱流に対する管摩擦係数 λ 、はブラジウスの式を用いると

$$\lambda = 0.3164 \cdot Re^{-0.25} = 3.76 \times 10^{-2}$$

となる。これより、差圧孔の距離を 920mm として、物性値は 30°Cの空気で評価すると円管内の圧力損失は

$$\Delta p = \lambda (L/d) (\rho \cdot u^2 / 2) = 8.16 \text{ [Pa]}$$

となる。Table3.4の77WにおけるN/Aの差圧は8.3Paであり、その差は約1.7%である。また、銅線を挿入した場合の圧力損失は、正方形管の場合と同様に銅線を円形断面針金で正方形網目の織金網と仮定すると以下のように求められる。

実験PW1の場合、流路内に挿入した銅線の全長は 9.2m であり、この銅線を直径 25mm の円管断面内に2本ずつ交差するように配置すると銅線の間隔は約 8mm とすることができる。4本の銅線の長さは約 95mm となって、この4本の銅線で作る平面を約97枚重ねるとその全長が約 9.2m となる。管内に銅線を挿入している部分は約 800mm であるから、平面の間隔も約 8mm とすることができる。このとき、銅線間隔は8mm、直径を0.5mmとして、開口面積比とレイノルズ数を求めると、 $\beta = 0.8789$ 、 $Re_\beta = 114$ となり、抵抗係数は $K = 0.194$ となる。平滑管の場合の抵抗係数を $K' = \lambda \cdot L/d$ で表すとすれば $K' = 1.5$ となり、銅線を挿入したPW1の場合は $K = 0.194 \times 97 = 18.8$ となる。したがって、抵抗係数の比は

$$(K + K') / K' = 13.5$$

となる。このときの圧力損失を計算すると

$$\Delta p = K \cdot (\rho \cdot u^2 / 2) \times 97 = 111 \text{ [Pa]}$$

であるが、加熱量が 77W の実験ではこれよりも小さい 45.9Pa であった。これは、銅線が等間隔で配置されていないからであると考えている。円管の場合もポンプ動力を一定として実験を行っており、最も差圧の大きかったPW3の実験では明らかに流量の減少が確認できた。

Table3.4にすべての実験結果を示す。表には熱入力と加熱面最高温度、流路出入口気体温度、レイノルズ数、流路差圧、空隙率、表面積及び銅線を挿入した場合の除熱量(Qw)を挿入しない平滑管の場合の除熱量(Qs)で除した除熱量の比を示す。流入する空気が持ち去った熱量は流路出入口の気体温度差を求め、物性値は算術平均温度で評価して、層流型流量計から求めた流量を用いて除熱量を算出した。除熱量の比を熱入力に対して示した図をFig3.5に示す。横軸は熱入力、縦軸は除熱量の比(Qw/Qs)を示す。正方形管の場合と同様に平滑面に比べて除熱量が大きくなっていることがわかる。実験データがまだ少ないものの、PW1(O)で熱入力が 261W 以上の場合では20%以上も除熱量が増大している。流路内の差圧を見るとPW1については平滑面の約5倍、PW2で約8倍、PW3では約40倍に増加しているが、これは、主として銅線の表面積が増大することによるものである。流量一定として金属繊維を挿入した場合は圧力損失が増加することによりポンプ動力が大きくなる。そのため、流量一定とした場合の結果から伝熱促進を評価することは、圧力損失増加に伴うポンプ動力の増大を考慮していないことになり、適切な評価であるとはいえない。本実験では流量一定ではなく、ポンプ動力を一定として実験を行っており、圧力損失の増大により必要動力が変化することはない。したがって、除熱量の増大はそのまま伝熱促進の効果であると考えてよい。特に円管の実験では圧力損失の増加が必ずしも伝熱促進にならないことから線径や空隙率と熱伝達の間に最適値が存在することが予想される。したがって、実際の適用に当たっては金属繊維材の形状や物性と熱伝達、圧力損失との関係を求めておく必要がある。また、本方法では熱放射による影響が大きいことから、さらに伝熱促進の効果が期待できる高温での熱放射特性を調べる必要があり、現在、実験的検討を進めている。

Table 3.1 Experimental conditions (rectangular channel)

| Type | Porosity | Surface Area of Wire (Plane) [m ²] | Wire Diameter [mm] | Wire Length [m] | Heat Input [w] |
|------|----------|--|--------------------|-----------------|----------------|
| N/A | 1.0 | (0.12×4=0.48) | - | - | 486 ~ 829 |
| W1 | 0.9964 | 0.173 | 1.0 | 55 | 486 & 614 |
| W2 | 0.9964 | 0.346 | 0.5 | 220 | 486 ~ 829 |
| W3 | 0.9973 | 0.259 | 0.5 | 165 | 486 ~ 829 |
| W4 | 0.9982 | 0.173 | 0.5 | 110 | 486 ~ 829 |

Table 3.2 Experimental results (rectangular channel)

| Heat Input [W] | Heated Surface [°C] | Inlet Gas [°C] | Temperature Difference [K] | Porosity | Surface Area [m ²] | Ratio of Heat Removal | Wire Type |
|----------------|---------------------|----------------|----------------------------|----------|--------------------------------|-----------------------|-----------|
| 486 | 105.8 | 19.4 | 86.4 | 1.0 | 0 | 1.0 | N/A |
| ↑ | 111.5 | 25.6 | 85.9 | 0.9964 | 0.173 | 1.064 | W1 |
| ↑ | 111.7 | 30.9 | 80.8 | ↑ | 0.346 | 1.029 | W2 |
| ↑ | 99.9 | 17.8 | 82.1 | ↑ | ↑ | 1.003 | ↑ |
| ↑ | 93.7 | 14.2 | 79.5 | 0.9973 | 0.259 | 1.065 | W3 |
| ↑ | 117.3 | 31.5 | 85.8 | 0.9982 | 0.173 | 1.045 | W4 |
| 508 | 117.6 | 24.2 | 93.4 | 1.0 | 0 | 1.0 | N/A |
| 547 | 120.8 | 22.3 | 98.5 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| ↑ | 107.7 | 17.7 | 90.0 | 0.9964 | 0.346 | 0.973 | W2 |
| ↑ | 100.1 | 11.4 | 88.7 | 0.9973 | 0.259 | 1.075 | W3 |
| ↑ | 120.0 | 23.2 | 96.8 | 0.9982 | 0.173 | 1.067 | W4 |
| 614 | 127.6 | 20.3 | 107.3 | 1.0 | 0 | 1.0 | N/A |
| ↑ | 129.5 | 25.2 | 104.4 | 0.9964 | 0.173 | 1.081 | W1 |
| ↑ | 130.7 | 30.9 | 99.8 | ↑ | 0.346 | 1.039 | W2 |
| ↑ | 120.9 | 19.8 | 101.1 | ↑ | ↑ | 1.019 | ↑ |
| ↑ | 111.0 | 10.9 | 100.1 | 0.9973 | 0.259 | 1.117 | W3 |
| ↑ | 134.4 | 28.6 | 105.8 | 0.9982 | 0.173 | 1.118 | W4 |
| 736 | 148.9 | 22.0 | 126.9 | 1.0 | 0 | 1.0 | N/A |
| ↑ | 135.8 | 18.2 | 117.6 | 0.9964 | 0.346 | 1.069 | W2 |
| ↑ | 128.7 | 11.0 | 117.7 | 0.9973 | 0.259 | 1.191 | W3 |
| ↑ | 141.6 | 19.5 | 122.1 | 0.9982 | 0.173 | 1.184 | W4 |
| 829 | 160.9 | 20.0 | 140.9 | 1.0 | 0 | 1.0 | N/A |
| ↑ | 149.1 | 18.4 | 130.8 | 0.9964 | 0.346 | 1.07 | W2 |
| ↑ | 141.1 | 10.8 | 130.3 | 0.9973 | 0.259 | 1.215 | W3 |
| ↑ | 158.1 | 21.8 | 136.4 | 0.9982 | 0.173 | 1.165 | W4 |

Table 3.3 Experimental conditions (circular channel)

| Type | Porosity | Surface Area of Wire [m ²] | Wire Diameter [mm] | Wire Length [m] | Heat Input [w] |
|------|----------|--|--------------------|-----------------|----------------|
| N/A | 1.0 | 0.07854 | - | - | 77 ~ 322 |
| PW1 | 0.9954 | 0.01445 | 0.5 | 9.2 | 77 ~ 322 |
| PW2 | 0.9931 | 0.02168 | 0.5 | 6.9 | 77 ~ 322 |
| PW3 | 0.9956 | 0.05877 | 0.5+0.07 | - | 77 ~ 322 |

Table 3.4 Experimental results (circular channel)

| Heat Input [W] | Heated Surface [°C] | Inlet Gas [°C] | Outlet Gas [°C] | Re Number [-] | Diff. Pressure [Pa] | Porosity | Surface Area [m ²] | Ratio of Heat Removal | Wire Type |
|----------------|---------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------------|----------|--------------------------------|-----------------------|-----------|
| 77 | 82.7 | 25.1 | 53.9 | 5642 | 8.3 | 1.0 | 0 | 1.0 | N/A |
| ↑ | 79.8 | 24.8 | 54.8 | 5424 | 45.9 | 0.9954 | 0.0145 | 1.017 | PW1 |
| ↑ | 79.8 | 24.5 | 54.2 | 5675 | 76.2 | 0.9931 | 0.0217 | 1.043 | W2 |
| 170 | 102.8 | 27.1 | 63.6 | 5024 | 8.6 | 1.0 | 0 | 1.0 | N/A |
| ↑ | 98.1 | 24.9 | 63.0 | 5241 | 46.3 | 0.9954 | 0.0145 | 1.173 | PW1 |
| ↑ | 96.4 | 25.2 | 61.5 | 5260 | 76.2 | 0.9931 | 0.0217 | 1.101 | PW2 |
| ↑ | 95.7 | 25.1 | 64.7 | 4645 | 384.2 | 0.9956 | 0.0588 | 1.095 | PW3 |
| 261 | 146.1 | 24.3 | 76.1 | 5033 | 10.4 | 1.0 | 0 | 1.0 | N/A |
| ↑ | 143.6 | 24.6 | 82.7 | 5581 | 48.4 | 0.9954 | 0.0145 | 1.294 | PW1 |
| ↑ | 141.6 | 25.0 | 80.9 | 4889 | 78.7 | 0.9931 | 0.0217 | 1.080 | PW2 |
| ↑ | 137.7 | 25.2 | 85.4 | 4699 | 393.4 | 0.9956 | 0.0588 | 1.142 | PW3 |
| 322 | 173.8 | 25.3 | 88.1 | 4977 | 10.2 | 1.0 | 0 | 1.0 | N/A |
| ↑ | 168.4 | 24.9 | 94.4 | 5194 | 49.4 | 0.9954 | 0.0145 | 1.229 | PW1 |
| ↑ | 166.2 | 25.4 | 92.2 | 4905 | 79.0 | 0.9931 | 0.0217 | 1.110 | PW2 |
| ↑ | 163.6 | 25.2 | 98.1 | 4411 | 394.6 | 0.9956 | 0.0588 | 1.121 | PW3 |

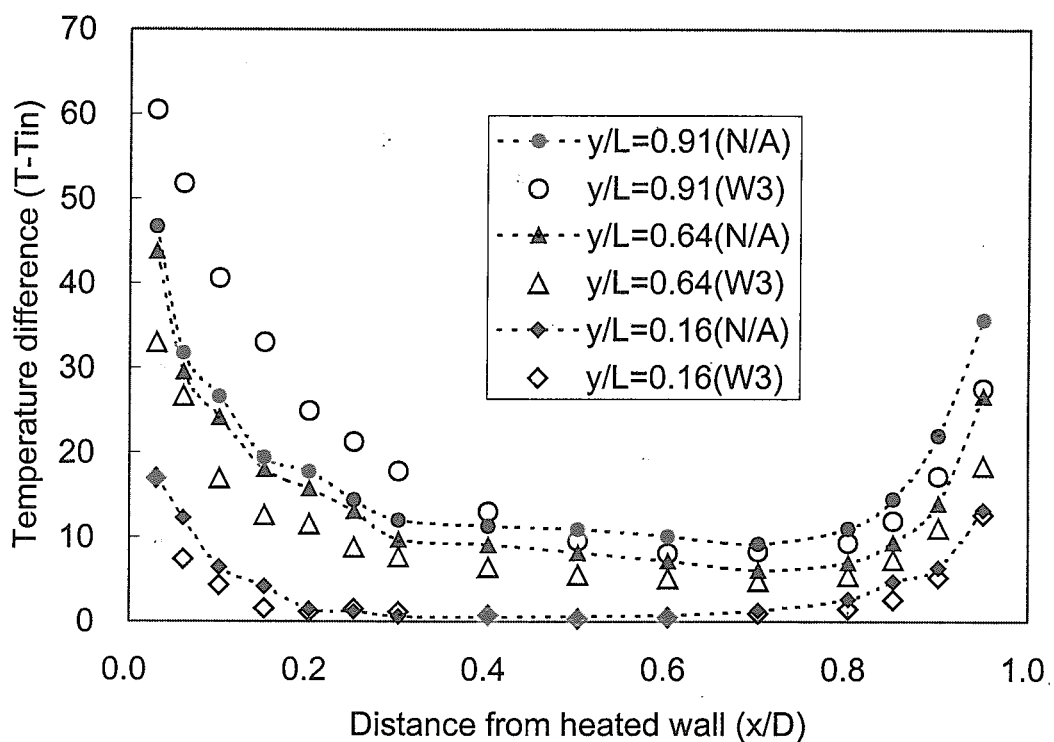


Fig.3.1 (a) Distribution of gas temperature in the channel (736W, W3 & N/A)

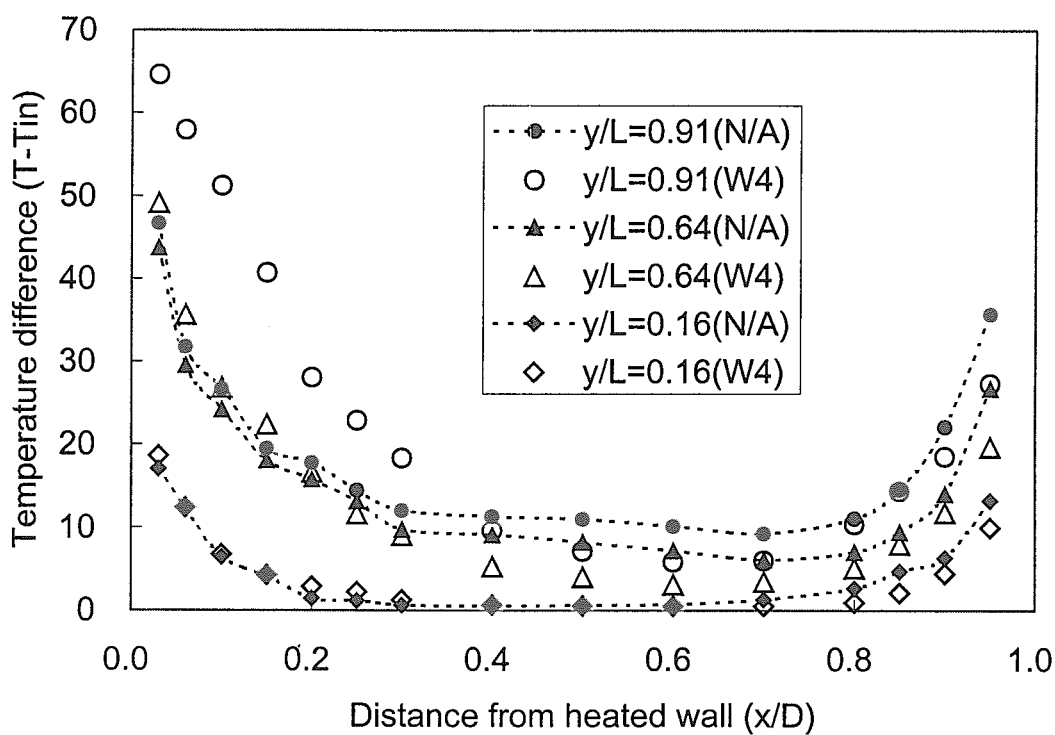


Fig.3.1 (b) Distribution of gas temperature in the channel (736W, W4 & N/A)

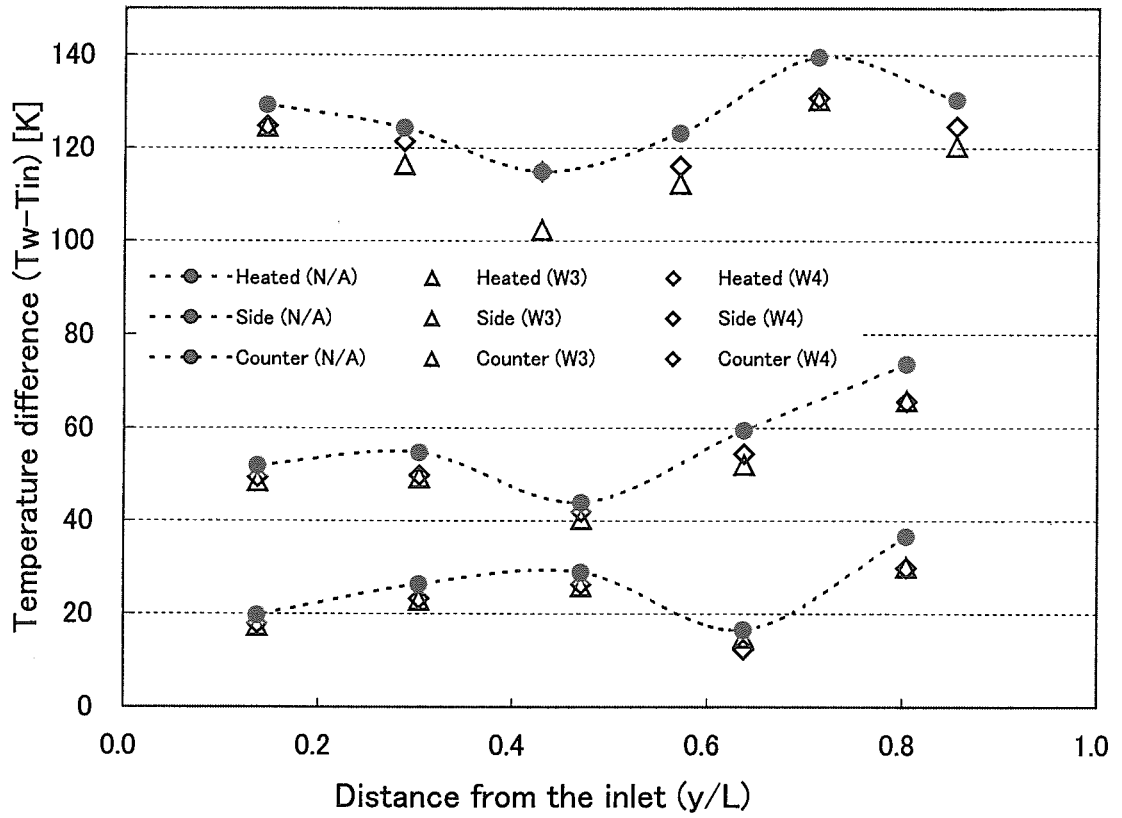


Fig. 3.2 Distribution of wall temperature along the flow direction (736W, W3, W4 & N/A)

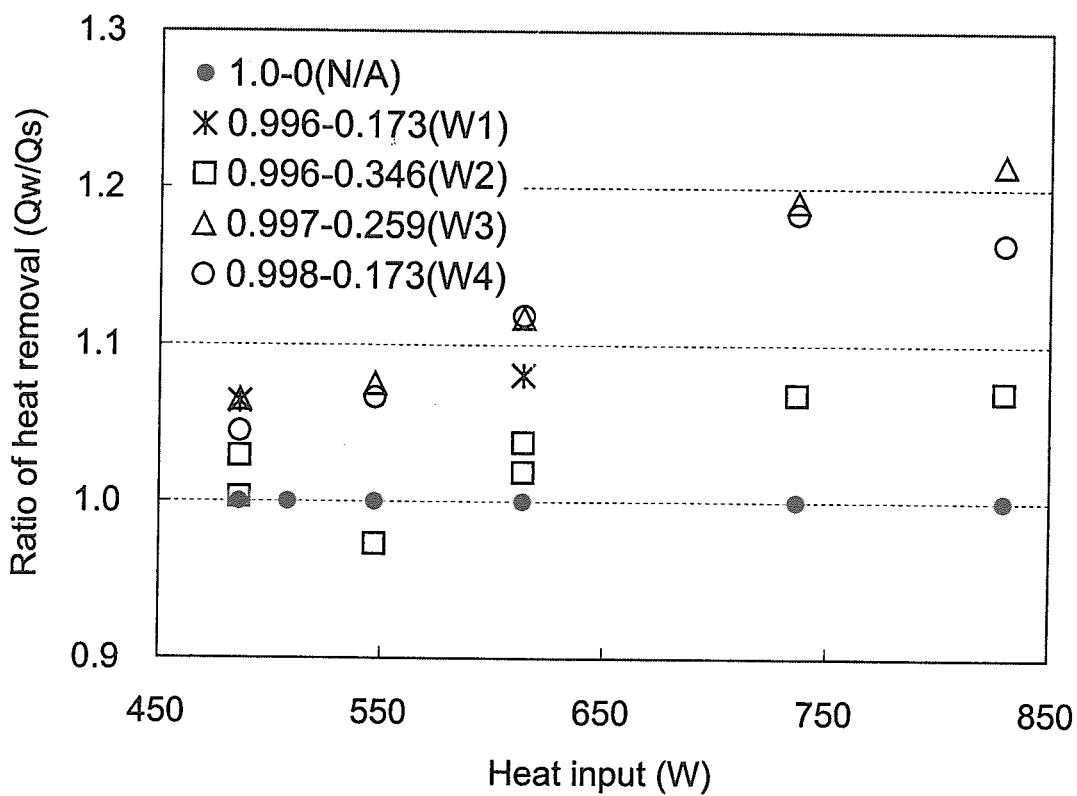


Fig. 3.3 Ratio of heat removal with high porosity inserts (Vertical rectangular channel)

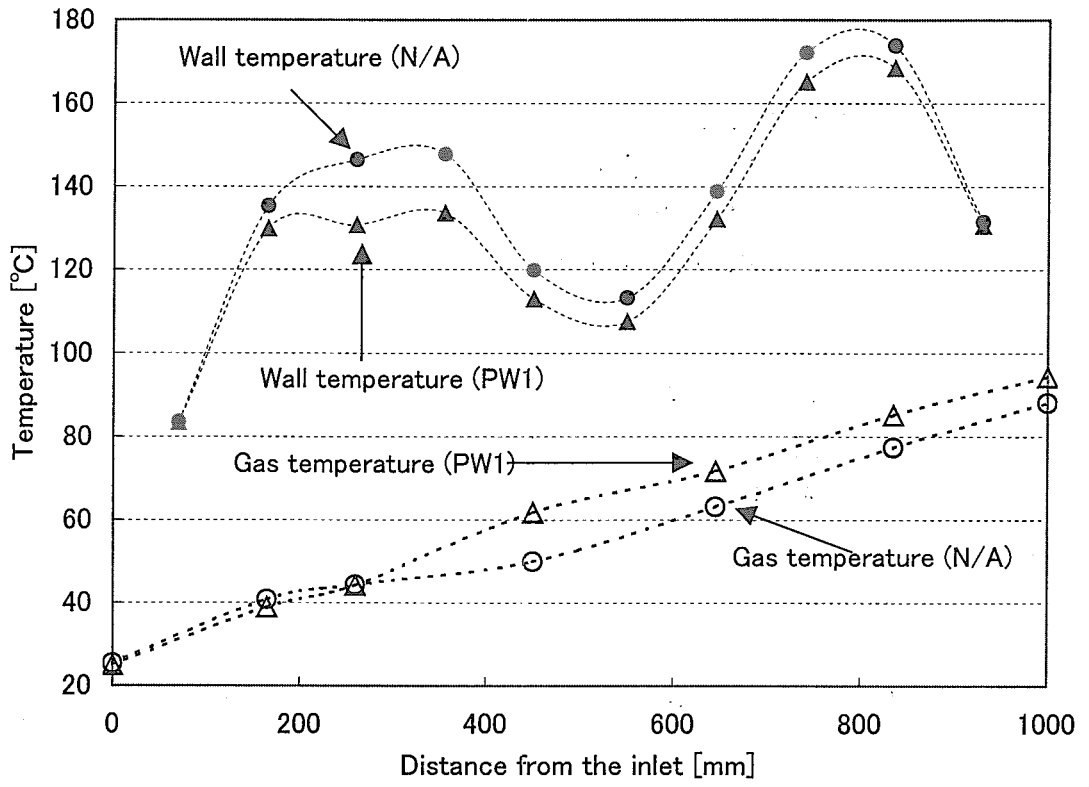


Fig.3.4 Distribution of wall and gas temperature along the flow direction (322W, PW1 & N/A)

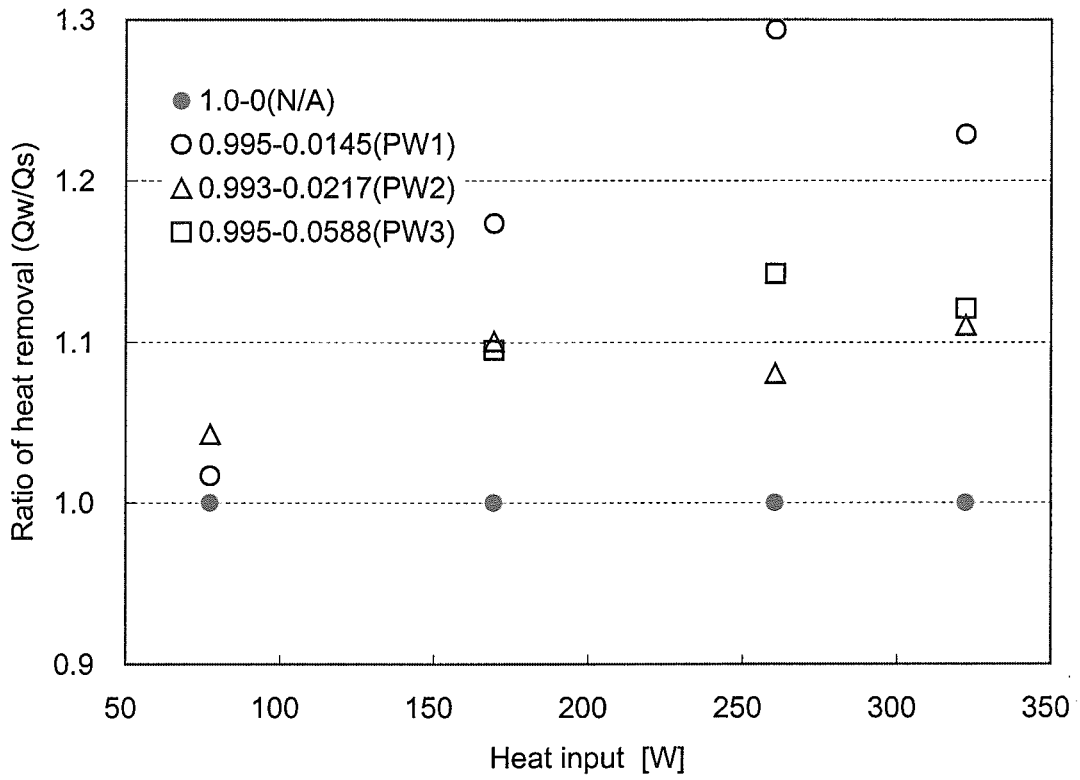


Fig.3.5 Ratio of heat removal with high porosity inserts (Horizontal circular channel)

4. 結論

片面から加熱される鉛直正方形流路と周囲から加熱される水平円管内に高い空隙率($\epsilon > 0.993$)で銅線を挿入して強制対流により冷却する場合の伝熱促進の可能性を実験的に調べた。実験の結果、以下の知見を得た。

1. 一定熱流束条件で片面から加熱される鉛直正方形流路の場合、流路内に銅線を挿入すると除熱量は増大し、除熱量増大の効果は加熱壁の温度上昇に伴い増大した。層流($Re=1160$)の強制対流冷却では、加熱壁温度が $160^{\circ}C$ 以下の場合でも空隙率 $0.996\sim 0.998$ の範囲において、約20%の伝熱促進効果があった。
2. 周囲から一定熱流束条件で加熱される水平円管の場合、乱流($Re=5000$)の強制対流冷却では、加熱壁温度が $170^{\circ}C$ 以下のとき空隙率が $0.993\sim 0.996$ の範囲において、20%以上の伝熱促進効果が得られることがわかった。
3. 金属細線による伝熱促進効果は主として銅線が熱放射により加熱されることによって、平板に比べて高い細線に対する熱伝達率と伝熱面が拡大することを利用するものであり、加熱面が高温となって熱放射による熱移動量が多くなるほど大きな効果が得られる。

金属細線による伝熱促進法は、空隙率や線径による最適値があると予想されるため、実際の適用に当たっては金属材の形状や物性と熱伝達、圧力損失との関係を求めておく必要がある。また、本方法では熱放射による影響が大きいことから、さらに伝熱促進の効果が期待できる高温での熱放射特性を調べる必要がある。本実験結果により、HTTR水素製造システムの水蒸気改質器改質管に金属細線による非加工型の伝熱促進法を適用するため、現在、高温条件における熱伝達・圧力損失特性の実験的検討を進めている。

謝辞

実験結果の検討に当たり、有益なご助言をいただいた核熱利用研究部の小川益郎次長、同部熱利用システム研究室の椎名保顕室長に感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 稲垣嘉之, 他, 原子力誌, 41-3, 250 (1999).
- (2) 越後亮三, 他, 機論B, 40-330, 479 (1974).
- (3) 上宇都幸一, 他, 機論B, 44-388, 4234 (1978).
- (4) 越後亮三, 機論B, 48-435, 2315 (1982).
- (5) 山田純, 一宮浩市, 機論B, 63-616, 4036 (1997).
- (6) A.R. Martin, et. al., ASME J. of Heat Transfer, 120, 458 (1998).
- (7) V.V. Calmidi and R.L. Mahajan, ASME J. of Heat Transfer, 121, 466 (1999).
- (8) A. Zukavskas, Adv. Heat Transfer, 8, 93 (1972).
- (9) D.C. Collis and M. J. Williams, J. Fluid Mech., 6, 357 (1959).
- (10) R. K. Shah and A. L. London, Laminar Flow Forced Convection in Ducts, Adv. Heat Transfer, Suppl.1, Academic Press. p.206, 220 (1972).
- (11) 日本機械学会編, 機械工学便覧基礎編, A5-86 (1986).
- (12) W. M. Kays and M. E. Crawford, Convective Heat and Mass Transfer 2nd ed., McGraw-Hill, P.243, (1980).

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

| 量 | 名称 | 記号 |
|-------|--------|-----|
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質質量 | モールの | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |
| 平面角 | ラジアン | rad |
| 立体角 | ステラジアン | sr |

表3 固有の名称をもつSI組立単位

| 量 | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表現 |
|---------------|--------|----|---------------------|
| 周波数 | ヘルツ | Hz | s ⁻¹ |
| 力 | ニュートン | N | m·kg/s ² |
| 圧力, 応力 | パスカル | Pa | N/m ² |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | ジュール | J | N·m |
| 工率, 放射束 | ワット | W | J/s |
| 電気量, 電荷 | クーロン | C | A·s |
| 電位, 電圧, 起電力 | ボルト | V | W/A |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A |
| コンダクタンス | ジーメン | S | A/V |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | V·s |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A |
| セルシウス温度 | セルシウス度 | °C | |
| 光度 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 照度 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 放射能 | ベクレル | Bq | s ⁻¹ |
| 吸収線量 | グレイ | Gy | J/kg |
| 線量等量 | シーベルト | Sv | J/kg |

表2 SIと併用される単位

| 名称 | 記号 |
|---------|-----------|
| 分, 時, 日 | min, h, d |
| 度, 分, 秒 | °, ', " |
| リットル | l, L |
| トン | t |
| 電子ボルト | eV |
| 原子質量単位 | u |

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J
1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表5 SI接頭語

| 倍数 | 接頭語 | 記号 |
|-------------------|------|----|
| 10 ¹⁸ | エクサ | E |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P |
| 10 ¹² | テラ | T |
| 10 ⁹ | ギガ | G |
| 10 ⁶ | メガ | M |
| 10 ³ | キロ | k |
| 10 ² | ヘクト | h |
| 10 ¹ | デカ | da |
| 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ⁻¹⁸ | アト | a |

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

| 名称 | 記号 |
|----------|-----|
| オングストローム | Å |
| バーン | b |
| バル | bar |
| ガール | Gal |
| キュリー | Ci |
| レントゲン | R |
| ラド | rad |
| レム | rem |

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m
1 b=100fm²=10⁻²⁸m²
1 bar=0.1MPa=10⁵Pa
1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²
1 Ci=3.7×10¹⁰Bq
1 R=2.58×10⁻⁴C/kg
1 rad=1cGy=10⁻²Gy
1 rem=1cSv=10⁻²Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクターも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E/C閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

| 力 | N(=10 ⁵ dyn) | kgf | lbf |
|---|-------------------------|----------|----------|
| | 1 | 0.101972 | 0.224809 |
| | 9.80665 | 1 | 2.20462 |
| | 4.44822 | 0.453592 | 1 |

粘度 1Pa·s(N·s/m²)=10P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

| 圧 | MPa(=10bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg(Torr) | lbf/in ² (psi) |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062×10 ³ | 145.038 |
| 力 | 0.0980665 | 1 | 0.967841 | 735.559 | 14.2233 |
| | 0.101325 | 1.03323 | 1 | 760 | 14.6959 |
| | 1.33322×10 ⁻⁴ | 1.35951×10 ⁻³ | 1.31579×10 ⁻³ | 1 | 1.93368×10 ⁻² |
| | 6.89476×10 ⁻³ | 7.03070×10 ⁻² | 6.80460×10 ⁻² | 51.7149 | 1 |

| エネルギー・仕事・熱量 | J(=10 ⁷ erg) | kgf·m | kW·h | cal(計量法) | Btu | ft·lbf | eV |
|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | 1 | 0.101972 | 2.77778×10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813×10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150×10 ¹⁸ |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407×10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487×10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082×10 ¹⁹ |
| | 3.6×10 ⁶ | 3.67098×10 ⁵ | 1 | 8.59999×10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522×10 ⁶ | 2.24694×10 ²⁵ |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279×10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759×10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272×10 ¹⁹ |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072×10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515×10 ²¹ |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616×10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506×10 ⁻³ | 1 | 8.46233×10 ¹⁸ |
| | 1.60218×10 ⁻¹⁹ | 1.63377×10 ⁻²⁰ | 4.45050×10 ⁻²⁶ | 3.82743×10 ⁻²⁰ | 1.51857×10 ⁻²² | 1.18171×10 ⁻¹⁹ | 1 |

1 cal= 4.18605J (計量法)
= 4.184J (熱化学)
= 4.1855J (15°C)
= 4.1868J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS(仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499W

| 放射能 | Bq | Ci |
|-----|----------------------|---------------------------|
| | 1 | 2.70270×10 ⁻¹¹ |
| | 3.7×10 ¹⁰ | 1 |

| 吸収線量 | Gy | rad |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

| 照射線量 | C/kg | R |
|------|-----------------------|------|
| | 1 | 3876 |
| | 2.58×10 ⁻⁴ | 1 |

| 線量当量 | Sv | rem |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

