

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 27 日現在

機関番号：35504

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420170

研究課題名(和文) エネルギーウェイト・ネットゼロを目指した機能性ポーラスヒートシンクの開発

研究課題名(英文) Development of functional porous heat sink toward zero energy-wasting

研究代表者

結城 和久 (Yuki, Kazuhisa)

山口東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：90302182

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、未来のエネルギーウェイト・ネットゼロシステムに貢献する機能性ポーラス体の冷却性能と大面積高熱流束源・高温熱源への適用性について明らかにするものである。真球精度の極めて高い銅粒子充填層型ポーラス体を採用し、液供給と蒸気排出方法の異なる3つの大面積型冷却デバイスを提案した。サブクール度および流量をパラメータとする伝熱試験から、直径3cmの伝熱面に対して2L/minの液供給で10MW/m²の除熱を達成した。得られた全ての知見を総括してポーラス伝熱に関わる全ての熱的課題を克服可能な一方向性ポーラス体を提案し、従来より更に低過熱度条件で熱流束10MW/m²を達成できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, heat transfer performance and applicability of functional porous media are evaluated in order to contribute energy saving of cooling system in industry. The porous media introduced are copper-particle-packed beds with high accuracy of size. Three cooling devices with different liquid supply and vapor discharge are proposed to evaluate the heat transfer performance for the liquid subcooling and the flow rate. It is clarified that low flow rate of liquid supply enables the heat removal of over 10MW/m² at the heat transfer surface of 3.0 cm in diameter. Evaluating from all the experimental and numerical data, novel porous media with uni-directional pore structure, which can solve all the thermal issues utilizing the porous media, are newly proposed. It is verified that it is possible to achieve the heat removal of 10MW/m² under much lower flow rate and lower wall-superheat conditions.

研究分野：熱工学

キーワード：ポーラス 高熱流束 冷却 ヒートシンク

1. 研究開始当初の背景

未来の豊かなエネルギー社会を構築するためには、エネルギー供給側において、大型発電と太陽光発電等の小型分散電源を効率よく併用したエネルギー・ベストミックス体系を確立し、スマートグリッドによる電力送受信網を最適化していくことが不可欠である。一方、エネルギー消費側では、特に全消費電力の約 50%を占める産業分野での電力を如何に削減していくかが重要な課題である。例えば、プラント稼働に対して不可欠となる冷却水の使用量やポンプ動力を劇的に緩和し、かつ冷却系に発電などの付加価値を付けることが出来れば、生産活動を落とすことなくトータルの電気使用量を劇的に削減することができる。特に、製鉄などの基盤産業では大量の冷却水が定常的に必要とされるため、低いポンプ動力で動作可能な新しい冷却技術を導入し、生産性向上と省エネルギー化のトレードオフを打破する必要がある。特に製鉄連続鋳造におけるモールド鋼板では、冷却によって内壁に「シェル」が形成されるが、シェル厚さが位置で異なり、シェルが薄い部位では大量の熱が鋼板側へ流入するため、これを素早く除熱し、溶鋼温度を下げるのが生産性向上のための鍵となる。具体的には、溶鋼からの熱流束として 3~6 MW/m² の非常に高い除熱が必要とされている。従来技術では、このような非常に高い熱流束に対応するため、高圧・高速の冷却水を鋼板に設けたスリットに流すのが一般的であるが、この場合、過大なポンプ動力および高い冷却コストで冷却系が稼働しているのが現状である。

2. 研究の目的

上記のような高熱流束環境における効率的な冷却手法として、水の蒸発潜熱を利用した沸騰/蒸発伝熱が挙げられる。冷却液が有する蒸発潜熱ポテンシャルを最大限に活用するため、冷却液の蒸発率を促進させる必要がある。本研究では、マイクロチャンネル内での高い蒸発促進効果と膨大な伝熱面積を有するポラス体を用いた低流量型の冷却技術に着目する。ポラス体内の二相領域に少量の冷却液を連続的に圧送供給することで高熱流束域における気液交換を持続させ、より少ない液量で高熱流束除去を達成することが期待できる。しかしながら高熱流束化に伴い、ポラス体内で生成される蒸気量が大量となり熱抵抗層として伝熱阻害するため、迅速に生成蒸気をポラス体外へ排出する必要がある。先行研究では、生成蒸気の排出を促進するため、ポラス体内にサブチャンネルを装荷した銅粒子焼結体が開発されている [1]。ポラス体内の伝熱面近くで発生した蒸気がサブチャンネルを介して積極的に外部へ排出されることにより、結果として 20 MW/m² を超える高い熱流束を達成している [2]。しかしながらサブチャンネル装荷型の冷

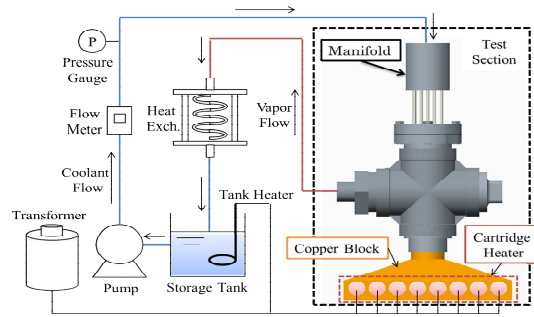


Fig. 1 Details of experimental apparatus

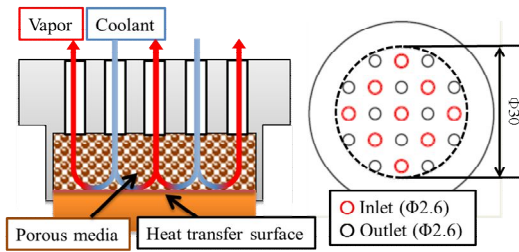
却デバイスでは、連続鋳造モールド鋼板のような大面積面への適用に大きな課題がある。

そこで本研究では、ポラス体を用いた高熱負荷面に対する冷却概念を踏襲しつつ、かつ大面積化が可能な冷却デバイスを新たに提案し、その伝熱特性を評価してデバイスの課題と最適な除熱デバイス構造について検討・評価することを目的とする。

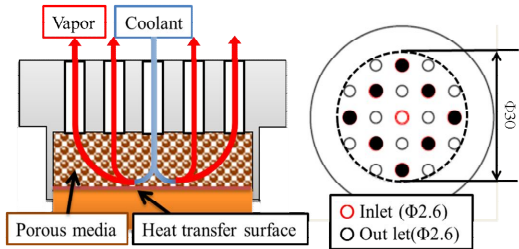
3. 研究の方法

実験装置の概略図を図 1 に示す。実験装置は、主に冷却水供給部、伝熱試験部、蒸気排出部、熱交換部で構成されている。冷却液として蒸留水が用いられる。タンクから循環ポンプで圧送された冷却液は、流量計、圧力計を経て後述する伝熱試験部に流入する。試験部から排出された二相流は熱交換器で凝縮され、再びタンクへ戻る。伝熱試験部の高熱流束源として高出力ヒータを複数本取り付けたピラミッド形状の銅ブロックが用いられる。この銅ブロックの最上面が伝熱面（直径 30mm）であり、この伝熱面上にポラス体が機械的に圧着される。伝熱面から 3, 5, 7, 9 mm の位置に直径 0.5mm の K 型シース熱電対が挿入され、定常時の温度データから伝熱面温度と熱流束が評価される。

ポラス体を内装する冷却デバイスとして、図 2 に示すような Type1 および Type2 と呼称する 2 つのデバイスを提案する。各デバイスに共通する特徴として、大面積化への対応を考慮し、ポラス体の上部に冷却液供給口と蒸気排出口を有する気液セパレータ板を備えている点が挙げられる。ポンプによって圧送されてきた冷却水は、試験部上部のマニホールドで気液セパレータの各冷却液供給口に接続されたステンレスパイプ（内径 2.6mm）へ分配される。ポラス体内で生成された蒸気は、蒸気排出口から十字管内部へ排出され試験部外へ排出される。Type1 は、ポラス体上部に 9 個の冷却液供給口と、12 個の蒸気排出口を持つ試験部である。Type2 は、12 個の蒸気排出口に対し、冷却液供給口を中央の 1 つのみとした構造である。Type1 および Type2 とともに、供給口、排出口の直径は 2.6mm である。気液交換のバランスが異なる二つデバイスの沸騰伝熱特性を比較し、最



(a) Type-1 device



(b) Type-2 device

Fig. 2 Two types of cooling devices

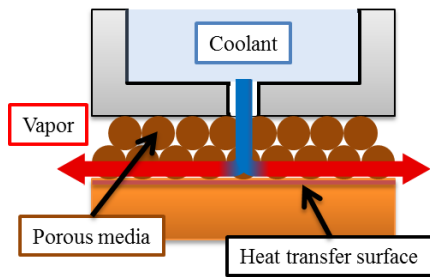


Fig. 3 Type-3 cooling devices

適構造について検討する。更に、Type1 および Type2 のデバイス構造とは蒸気排出構造が全く異なる図3のような衝突噴流型のデバイス (Type3) についてもその伝熱特性について評価し、密閉型デバイスである Type1 と Type2 の課題について検討する。

本研究で採用するポーラス体は、銅粒子充填層であり、気液セパレータ板による機械的押しつけによって伝熱面へ圧着される (Type3 についてはノズル部によって機械的に押し当てる)。伝熱面上で形成される蒸気相へ直接的に液を供給するため、銅粒子は伝熱面上に2層充填される。銅粒子の直径は1.0 mm (真球度 $\pm 20 \mu\text{m}$) であり、伝熱面上に最密充填されている。充填層の厚みは1.82 mm、空隙率は約43.4%である。

4. 研究成果

図4はType1およびType2の沸騰曲線を表している。Type2ではサブクール度70Kで約11 MW/m² (伝熱面過熱度43.2K)と、高サブクール環境において目標値に達する高熱流束を達成した。一方、Type1では同じ高サブクール環境で5.7 MW/m² (伝熱面過熱度38.1K)

と目標としている10 MW/m²の実現には至らなかった。Type2では流量がType1に比べ半分以下であるのに対し、高サブクール条件で最大熱流束がType1の約2倍、熱伝達率は約1.5倍 ($2.5 \times 10^5 \text{ W/m}^2/\text{K}$)と大きな差を確認することができる。一方、サブクール度20Kの低サブクール条件では、最大熱流束に大きな差異は見られず、特にType2の高サブクール時のような高い熱伝達率を得ることはできなかった。これらの原因として、ポーラス体内部での相変化の状態が大きく関係していると考えられる。Type1では、図5(a)左側に示す様に、ポーラス体の上部から冷却水が入り、伝熱面で折り返し上部から蒸気として排出されるのが理想である。しかしながら実際には、高熱流束化に伴い図5(a)右側に示すように、伝熱面に達した冷却水が蒸発して蒸気ポケットが形成され、この蒸気ポケット上部で噴流が流入直後に押し返されているものと考えられる。この時、蒸気ポケットは噴流により伝熱面に押し付けられるため、蒸気の排出が妨げられていると予想できる。この状態は実験後の伝熱面様相からも推察でき、液供給口の直下以外は黒く酸化していた。伝熱面上で完全に乾いた蒸気相が形成され伝熱面温度が上昇し、高い熱流束を得ることができなかったと考えられる。このことはType1において低サブクールの場合に著しく圧力損失が低下することからも推察でき、すなわち供給液がポーラス体内に流入後、すぐに蒸気排出孔から流出していることを意味している。一方、Type2では、図5(b)に示すように、冷却液供給口が中央の1つのみの為、生成された蒸気は上部からの噴流に妨げられずに

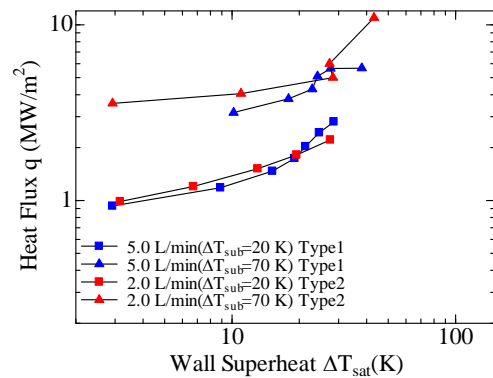


Fig. 4 Heat transfer performance of each device

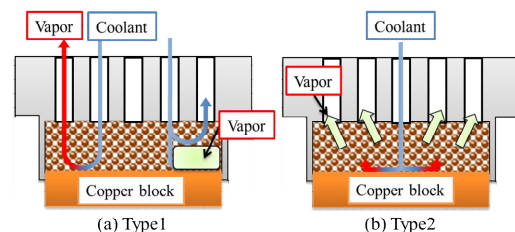


Fig. 5 Two-phase flow inside porous medium

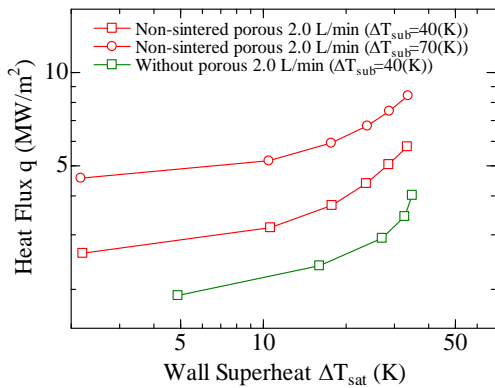


Fig. 6 Boiling curve of Type3

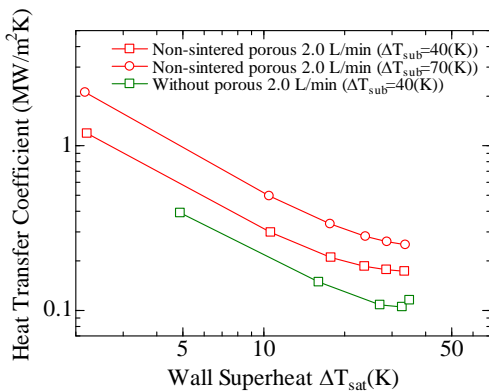


Fig. 7 Boiling heat transfer performance of Type3

排出されやすい状況にあると考えられる。特に液温が低い高サブクール条件では、ポラス体全体を液相もしくは二相流のまま冷却液が浸透し、より広い伝熱面で蒸発できたため、高い熱流束が得られたと考えられる。一方、低サブクール条件では、液温が飽和温度に近いため冷却液供給後すぐに乾いた蒸気が発生し、熱流束の向上が見られなかったと考えられる。しかしながら、Type2 では圧力損失が Type1 に比べ増大した。これは、液供給口を一つにしたために、マニホールドからの分岐流路での圧力損失が増加したためと考えられる。今後の実用化に向け、デバイス全体の圧力損失を減らすことも重要な課題である。以上の考察から、ポラス体内部における二相流の変化を考慮し、デバイス形状ならびに液流量・サブクール度の最適条件について検討する必要がある。一方、図 6 は、Type3 の沸騰伝熱特性を表している。図中に示す各沸騰曲線の最大値(サブクール度 40K)は、ポラス体装荷・非装荷共に限界熱流束(図中×印)を示している。サブクール度 70K では、ヒータがその耐熱温度に達し実験を終了するまでの値である。グラフから、サブクール度の上昇に伴い熱流束の増加が見られる。ポラス体装荷時における最大熱流束は、サブクール度 40K において約 5.8 MW/m^2 (伝熱面過熱度 33.4K , 熱伝達率 $0.17 \text{ MW/m}^2/\text{K}$)、

サブクール度 70K では、約 8.4 MW/m^2 (伝熱面過熱度 33.6K , 熱伝達率 $0.25 \text{ MW/m}^2/\text{K}$) の高い熱流束が得られている。一方、ポラス体非装荷時では、サブクール度 40K において最大約 4.0 MW/m^2 (伝熱面過熱度 34.8K , 熱伝達率 $0.12 \text{ MW/m}^2/\text{K}$) の熱流束が得られている。すなわちポラス体を装荷することにより、限界熱流束は約 1.5 倍、熱伝達率も約 1.5 倍向上している。また、沸騰曲線はポラス体装荷・非装荷共に、伝熱面過熱度の上昇に伴い勾配の増加が見られる。熱伝達率の変化を図 7 に示す。壁面過熱度の上昇に伴い熱伝達率は減少しているが、高過熱度側に行くほど熱伝達率の減少が緩やかになっており、高過熱度側において投入した冷却水がより蒸発していることを表している。ポラス体を装荷することで熱伝達率と限界熱流束が向上しているが、熱伝達率はいずれも減少傾向にあり、ポラス体の蒸発促進効果に伴う熱流束と熱伝達率の劇的な向上は見られなかった。高サブクール環境では、冷却水が衝突噴流として断続的に供給されるため、伝熱面中心付近では冷却水が蒸発せず、液相のみの衝突噴流冷却になる。一方、衝突点から離れた伝熱面の外縁部では、伝熱面上を径方向に流れる冷却水の流速が減少するため沸騰・蒸発しやすくなる。この外縁部で生じた蒸気が衝突噴流による速い流れで押し流されることが、理想的な冷却水の流れになる。しかしながら実際には、高熱流束条件において過剰に生成された蒸気による乾いた領域が伝熱面外縁部に形成され、径方向の流れが伝熱面外縁部で生じた蒸気を押し流さずにその上部の高空隙率の領域へ迂回するように流れたため高い熱流束を得ることができなかったと考えられる。

以上、Type1,2,3 の全ての伝熱特性を総括し、以下の様々なポラス体の熱・流動的特性について検討しながら、高熱流束域に適した新しいポラス体について検討する。先ず、ポラス体の熱伝導性に注目する。一般に、ポラス体の有効熱伝導率は、固相と流体相の有効熱伝導率にそれぞれの空間割合を重みづけした形で表される。すなわちポラス体そのものの有効熱伝導率は気孔率に大きく依存する。例えば、高气孔率を有するフォーム体については熱伝導率が低いため、フィン効果による有効伝熱面積の拡大はあまり期待できず、ガス熱伝達における乱流促進体として利用される場合が多い。一方、細密充填構造を有する粒子焼結体は気孔率が低い場合で 0.3 を下回るものも製作可能であるが、焼結度によって粒子間の接触構造を制御する必要がある。しかしながら著者らが実施した数値シミュレーション結果から、焼結度の高いネック構造を有するブロンズ粒子の焼結体でさえ、その有効熱伝導率は $10 \sim 20$

W/m/K で母材の熱伝導率 128 W/m/K を大きく下回ることが確認されている。一方、繊維焼結体については当然ながら繊維方向に高い熱伝導性を有し、更に気孔率を制御してポラス体の有効熱伝導率を上げることも可能であるが、繊維焼結体の使用には熱の流入に対して繊維の配列を制御することが重要である。次にポラス体の流動抵抗について議論する。高熱流束環境では必然的に供給液の流量も増加するが、それだけでなくポラス体内で発生した蒸気を如何にポラス外部に素早く排出するかが重要である。その意味で、高い絶対透過率を有するフォーム体は蒸気の排出特性に優れるものの、先述の様にこのポラス体ではポラス体内部での相変化をあまり期待できないため、伝熱面もしくはその近傍のみの沸騰・蒸発となる。一方、Type1,2,3 のような粒子充填層もしくは粒子焼結体は気孔率が低く高速蒸気の流動抵抗も数 MW/m² の熱負荷環境では無視できない。現に、著者らの実験から、数 MW/m² を超える高熱流束環境では、高い透過率を有するポラス体の方が高い熱伝達特性を有するようになることを明らかにしている。更に著者らは、発生した蒸気を強制的にポラス体外に排出させるため蒸気排出用サブチャンネルを装荷し、20MW/m² を超える除熱に成功している。一方、繊維焼結体に関しては、繊維方向の流動抵抗が大きく軽減されることもありヒートパイプ内のウィックとして使用される場合も多いが、様な気孔構造を形成することが難しい。次に高熱流束環境におけるポラス体と伝熱面との熱抵抗問題について議論する。特に熱流束の増大に伴い、伝熱界面で発生する温度差が非常に大きくなるため直接的に熱伝達率に影響する。例えば、Type1,2,3 のように粒子状ポラス体を機械的に伝熱面に押し当てた場合、伝熱面と粒子が基本的に点接触に近い状態であるため最も大きい熱抵抗が発生する。一方、点接触状態であれば壁効果によって壁に面した高气孔率の領域を生成蒸気がすり抜ける効果も期待できるが、点接触状態では伝熱面もしくは粒子一層目の沸騰・蒸発が主となり、高い熱伝達性能は期待できない。逆に球の接触点をフライス加工等によって少しの面状態にすることも可能であるが、この場合、伝熱面と粒子の間の気孔率が劇的に低くなるため、液が伝熱面まで供給できなくなる可能性がある。接触熱抵抗の緩和と壁近傍の透過性能のトレードオフを解決する最適値が存在することは明確であるが、この制御は非常に難しい。これについては繊維焼結体についても同様である。

以上のような熱的・流動的な課題をクリアするポラス体として、一方向性の気孔構造を有するポラス体に注目する。このポラス体の特徴として、気孔方向の有効熱伝導率が高くなることが挙げられる。更に伝熱面と面接触が可能となるため、接触熱抵抗も最小

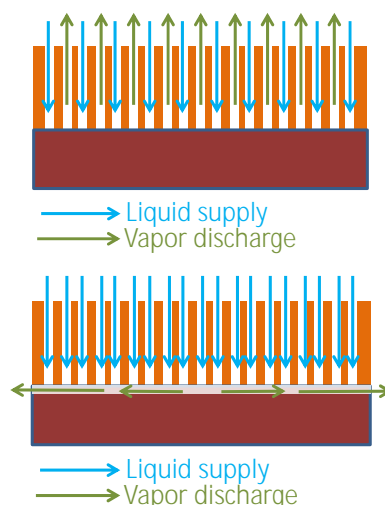


Fig. 8 Uni-directional porous heat sink

限に抑えることが期待できる。特に、一方向性の構造であるため供給液を確実に伝熱面まで強制的に導くことも可能である。更にその気孔構造から流動抵抗を劇的に低減することができる。最大の課題は、生成蒸気を如何にポラス体外へ排出するかであり、本研究では図8のような2パターンのデバイスを提案する。1つ目は、液の供給と蒸気の排出が対向流となっているもの、もう一つは伝熱面に沿うように蒸気が排出されるものである。これらの概念は、伝熱面に格子状、もしくは一方向性のマイクログループを施工してこの上にポラス体を焼結することで達成できる。

一方向性ポラス体の伝熱性能を実証するため、機械加工によって疑似的に製作された一方向気孔構造ポラス体を用いて実証試験を実施した。直径 20 mm、厚さ 5mm の銅円板内に液供給用の内径 0.5 mm の一方向性貫通孔が 1.0 mm ピッチの正方配列で 248 本切削されている。また蒸気排出用の内径 2.6 mm の貫通孔が 5 本設けられている。この一方向性ポラス体を伝熱面へ機械的に圧着し伝熱試験を実施する。なお、一方向性ポラス銅内で生成された蒸気を蒸気排出孔へ導くため、伝熱面には幅 1.0 mm、深さ 0.5 mm のグループが施工されている。使用する伝熱試験装置は Type1,2,3 と同様である。実験条件を流量 2.0 L/min、サブクール度 40 K とする。図9は一方向性ポラス銅の沸騰曲線を表している。伝熱面温度の上昇に伴い、熱流束が増大し最大で 10 MW/m² の冷却性能を達成していることを確認できるが、最大の特徴は、Type1,2 と比較し、実験データが低過熱度側へ大きくシフトし沸騰・蒸発伝熱が劇的に向上していることである。伝熱試験はヒータ温度が 900 度を超えたため終了したが、最終的な伝熱面温度は 150 度程である。ポラス冷却が壁面温度 200 度以上の状態でも可能であ

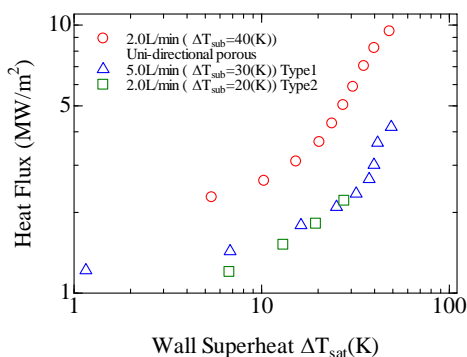


Fig. 9 Heat transfer performance of uni-directional porous heat sink

ることや伝熱面での接触熱抵抗を勘案すると、更に低流量条件で 10 MW/m^2 の冷却は問題なく達成可能できると予想される。なお今回使用した一方向性ポラス銅では、発生する圧力損失が粒子焼結体と比べて劇的に低減されたことも特筆に値する。

本研究では、著者が取り組んできた金属ポラス体内での水相変化現象を応用した高熱流束熱輸送デバイスを大面積体系へ発展させるため、新しく提案した3つ冷却デバイスの伝熱特性について評価した。更に得られたデータ、ならびにポラス伝熱の主要パラメータについて再検討することで最終的に一方向性の気孔構造を有する特殊ポラス体の有効性について提案し、伝熱性能に関する高いポテンシャルを実証した。今後は、一方向ポラス体の気孔構造ならびに伝熱面グループ構造の最適化を図り、より低流量・低ポンプ動力条件での除熱性能の向上を目指す。

[1] K. Yuki et al., Fusion Science and Technology, 60, pp.238-242, 2011.

[2] K. Yuki et al., Fusion Science and Technology, 64, 2, pp. 325-330, 2013.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

- Kazuhisa Yuki, Kio Takai, Akio Sagara, Proposal of water-cooled modules with high thermal conductivity porous media, Journal of enhanced heat transfer, 2016(under review).

[学会発表](計 4件)

- Kazuhisa Yuki, et al., Proposal of utilizing uni-directional porous copper for extremely high heat flux removal, Sixth International Conference on

Porous Media and its Application in Science, Engineering and Industry, (2016).

- 高井貴生, 結城和久, ほか 3 名, 高熱伝導ポラス体を用いた高熱流束除去デバイスの検討, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, (2015).
- 高井貴生, 結城和久, ほか 3 名, 銅粒子充填層内における衝突噴流による熱伝達特性, 第 53 回日本伝熱シンポジウム, (2016).
- Kio Takai, Kazuhisa Yuki, et al., Heat Transfer Performance of Water Impinging Jet Flow in a Metal Particle Bed 22nd Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (TOFE), (2016) August.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

結城和久 (YUKI, Kazuhisa)
山口東京理科大学・工学部機械工学科・
教授 研究者番号: 90302182

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号:

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号: