

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：25503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03918

研究課題名（和文）自発的な液供給機能を有するブリージング現象のメカニズム解明と限界熱流束の向上

研究課題名（英文）Clarification of Breathing Phenomenon and CHF enhancement of Saturated Pool Boiling

研究代表者

結城 和久（Yuki, Kazuhisa）

山陽小野田市立山口東京理科大学・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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、一方向性の気孔構造を有するロータス銅を溝付き伝熱面上に張り付け、液を沸騰させることで発現するブリージング現象を利用して液を自発的に伝熱面に供給し、飽和プール沸騰の限界熱流束を飛躍的に増大させることを目的としている。まずポラス体と溝を含むCFDシミュレーションを実施し、溝の出口から蒸気泡が排出される際、ロータス上部および溝の反対側から液が供給されることを明らかにした。以上の知見から、溝の深さを深くして蒸気排出効果を高めたと、約730W/cm²の非常に高い限界熱流束を達成した。更に、絶縁性冷媒を用い、一方向溝に対し直交溝の熱伝達率が最大で1.5倍向上することも明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

AIや5Gを代表とする高度情報社会を支えるデータセンタ、スーパーコンピュータ、更には環境問題や省エネルギー対策として期待されているパワー半導体など、今後、新たな社会インフラを支える電子機器の消費電力は増加の一途を辿り、その発熱密度はかつてないレベルにまで達してきている。本研究で得られた冷却性能に関する成果は、これらの機器の冷却をポンプレスで可能とすることを実証するものであり、高度情報化社会ならびに高度省エネルギー社会を構築するための基盤技術となりうるものである。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to dramatically increase the critical heat flux of saturated pool boiling by stretching a lotus copper with a unidirectional porous structure over a grooved heat transfer surface and using the bleeding phenomenon that develops when the liquid is boiled to spontaneously supply the liquid to the surface. First, CFD simulations involving a porous body and a groove were performed, and it was found that the liquid is supplied from the top of the lotus and from the opposite side of the groove as the vapor bubbles are discharged from the outlet of the groove. Based on these findings, a very high critical heat flux of about 730 W/cm² was achieved by increasing the depth of the groove to increase the vapor discharge effect. Furthermore, using an insulating refrigerant, the heat transfer coefficient of the orthogonal grooves was found to be up to 1.5 times higher than that of the unidirectional grooves.

研究分野：熱工学

キーワード：沸騰伝熱 限界熱流束 ポラス体 ブリージング 冷却 電子機器

1. 研究開始当初の背景

2011年の福島原子力発電所の事故以降、日本は深刻なエネルギー危機と環境問題に直面している。しかしながら一方で、AIや5Gを代表とする高度情報社会を支えるデータセンタ、スーパーコンピュータ、更には環境・省エネ対策として期待されているパワー半導体など、新たな社会インフラを支える電子機器の消費電力は増加の一途を辿っている。これらの機器からの発熱密度はかつてないレベルにまで達してきており、放熱を含む熱制御、特にそのボトルネックとなる「冷却」に関わるエネルギー消費を大幅に削減する必要がある。例えば、次世代SiC型車載用インバータでは5 MW/m²、次世代スパコンでは1 MW/m²を超える熱流束となる。2016年に策定された日本機械学会のロードマップにおいて、熱流束10 MW/m²の新たな冷却技術が必要と明記されている所以である。このような高熱流束機器として、核融合発電炉のダイバータ（実験炉ITERで約10 MW/m²）や製鉄連続鋳造におけるCCモールド鋼鈑の冷却（最大7 MW/m²）が挙げられる。いずれも加圧水を高速で流し冷却する強制流動方式であり、過大なポンプ動力が必要であり省エネ化に相反する。更に、高速流れて冷却する場合、流動加速腐食や流力振動など、隠れた懸念要素が顕在化する可能性もあり、保全コストの増大を招くことを否定することはできない。すなわち将来の新しい省エネ社会を支えるためには、従来の強制冷却方式にとらわれない斬新な冷却技術の導入と普及が必要不可欠である。

2. 研究の目的

このような研究背景のもと、新たな冷却方式として液体の蒸発潜熱を活用する沸騰冷却が導入できればその恩恵は非常に大きい。特に沸騰浸漬冷却は、飽和プール沸騰伝熱を活用する技術であり、いわゆる発熱部を液浸させて冷却する。この冷却方式を採用することで少なくとも冷却面の温度管理に関するコストは不要となり、更に、冷却系の劇的な小型化も可能となるため製作コストの削減にも貢献できる。しかしながら、水を冷却液とする平滑面での飽和プール沸騰の場合、その冷却限界である限界熱流束は1.1 MW/m²程度であり、目的とする5~10 MW/m²の冷却に到底及ぶものではない。既存の限界熱流束向上技術について更に発展させることは非常に重要であるが、沸騰浸漬冷却による未踏の10 MW/m²冷却達成のためには、既存冷却方式にとらわれない斬新かつ新たな発想による限界熱流束向上に挑戦することが非常に重要である。この際、限界熱流束を飛躍的に向上させるための「学術的な問い」として、以下の3項目を挙げる。

- (1) 毛細管現象や化学処理に依存せず、強い自発的液供給現象を発現させることが可能か？
- (2) 自発的液供給機能と蒸気排出を分離し、合体泡形成を遅延させることができるか？
- (3) 新たな液供給メカニズムを十分に把握し、工学的に完全に制御できるか？

これらの3項目を達成して冷却液の蒸発潜熱ポテンシャルを最大限に活用し、水を作動液とする場合に、限界熱流束10 MW/m²を飽和プール沸騰で達成することを目的とする。

3. 研究の方法

このような背景のもと、我々は、図1のような一方向性の気孔構造を有するロータス銅をグループ伝熱面上に張り付け、飽和プール沸騰の限界熱流束を飛躍的に増大させる斬新な沸騰限界促進技術を提案・実証している（特開2018-204882）。この技術では、先述の「学術的な問い」を解決する以下の特徴が挙げられる。

- 蒸気の吹き出し現象に伴う作動液の自発的供給効果（ブリージング現象）を活用
- 貫流型の液供給と蒸気排出により液供給・蒸気排出を分離し、合体泡の形成を遅延
- ブリージング現象ならびにポーラス体内での伝熱促進のため、透過性能かつ熱伝導性に優れる一方向性ポーラス銅を導入
- 比較的大きな気孔径のポーラス体であるため毛細管現象は不要

ブリージング現象として二つのモードが考えられる。すなわちグループから蒸気が排出されポーラス上部から液が供給されるモード（図1左）とその逆モードである（図1右）。このブリージング現象による限界熱流束増大効果を実証するため、大気圧環境での飽和プール沸騰試験を実施した。後述のように10 mm×10 mmのグループ伝熱面上にロータス銅（厚み2 mm、気孔率66%、平均気孔径0.49mm）を張り付けたところ、グループサイズの調整により最大5.3 MW/m²の限界熱流束を達成した。この値は親水性などの化学処理を担持させないポーラス沸騰促進技術としてはワールドレコードである。裸面に対し沸騰熱伝達も大幅に促進されており、本技術が

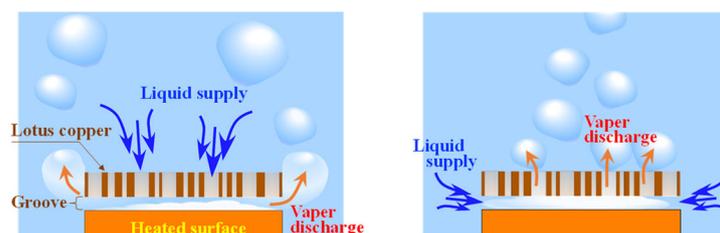


図1 ロータス銅を用いた沸騰限界促進技術

沸騰熱伝達促進と限界熱流束増大を両立させる技術であることが分かる。なお、沸騰現象の可視化から、蒸気がグループから射出されていることを確認しており、限界熱流束の上昇が前述のブリージング現象であることを実証した。またグループサイズやロータス気孔構造が限界熱流束へ与える影響を評価している。一方、限界熱流束増大のメカニズムについては想像の域を脱していない。このメカニズムを解明することでブリージング現象を完全に制御でき、限界熱流束を更に飛躍的に向上できると考える。本研究で取り組み、明らかにする項目について以下に示す。

- ① 可視化実験とCFDシミュレーションによるブリージング現象の原理解明
- ② ブリージング現象制御による限界熱流束の飛躍的向上
- ③ ブリージング現象制御による低温下の促進と絶縁性流体への適用

先ず研究初年度で実施する項目①では、ブリージング現象の詳細メカニズムを解明するため、ポーラス体とグループを含むCFDシミュレーションを実施する。計算手法としてはMARS (Multi-interface Advection and Reconstruction Solver) を採用する。項目①の知見を総括してブリージングのポテンシャルを最大限に引き出し、水を作動液とする場合で限界熱流束 10 MW/m^2 の値へ近づけるため、1. グループ流路の中央閉塞によるブリージング現象の対称・規則化、2. グループ構造の最適化、の2点に取り組む。更に本技術をスパコンやサーバへ適用することを意識し、NOVECなどの絶縁性液体の場合を用い沸騰熱伝達を極限まで高める(項目③)。

4. 研究成果

研究項目で掲げた上記の3つの項目①②③に対して得られた知見について詳説する。

① 可視化実験とCFDシミュレーションによるブリージング現象の原理解明

先述のように、水を作動液とする場合、蒸気がグループから放出されることによって冷却液がロータス上部から吸引される呼吸モード Mode-G (図1左) が誘起され、冷却限界(限界熱流束)が飛躍的に向上すると予想される。著者が実施した伝熱面周辺の可視化実験でも同様の現象が確認されているが、グループ内部とロータス内部においてどのように相変化が生じているかは明らかではない。そこでMARS法(非混合多相流解析)を用いたCFDシミュレーションにより、グループ内部とロータス内部の相変化の様子を可視化する。計算領域は $26 \text{ mm} \times 11.28 \text{ mm} \times 14.5 \text{ mm}$ であり、中央底部に設置されるグループ/ロータス体の上面から鉛直上方向に 10 mm 、グループ出口から水平方向に 8 mm 、グループに垂直な水平方向に 3 mm の空間が設置されている。この空間に 100 度の水が封入される。実際の冷却実験で使用したグループ/ロータス構造の一部を再現するため、伝熱面は $10 \text{ mm} \times 5.28 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ であり、断面が $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ のグループを3本配置する。その上に設置されるロータス体は、直径 0.4 mm の気孔が20個グループ上に 0.5 mm 間隔で配置されている。ロータス体の厚みは 2 mm である。計算条件として、液体の表面圧力は大気圧とし、発熱面以外の固体壁ではノースリップ/断熱条件を与える。グループ底部の面で 100 W/cm^2 の発熱を与える。ロータスとグループでの固液の接触角は 70 度である。メッシュは等間隔メッシュであり、メッシュ幅は 0.05 mm である。総メッシュ数は $34,382,400$ である。非定常計算を安定的に実施するため、クーラン数は 0.1 とする。

解析結果の一部を図2に示す。沸騰により気泡がグループ内で生成され、時間の経過に伴い気泡は成長して互いに合体する。成長した蒸気泡はロータス金属孔内部へも一時的に侵入するが、グループ端部から冷却液中へ放出される蒸気泡が大きく成長するに伴い、液はロータスからグループ側へ引き返し、冷却液がロータス孔内へ吸引されている。その後、蒸気がグループ端部から大きく成長して離脱する際、反対側のグループ端面から冷却液が吸引され、グループ底部で薄液膜を形成しながらグループ内へ侵入している。すなわち、グループからの蒸気の排出に伴い、ロータス上部からだけでなく、反対側のグループからも液が供給され、これにより限界熱流束が向上していると考えられる。おそらくロータス側から、またグループ端から吸引される液は薄液膜として供給されているため、薄液膜の急速蒸発も大きな冷却促進メカニズムと考えられる。更なる計算の継続が必要であるが、CFDシミュレーションによりグループ/ロータス内部でどのように液供給されているか、その一端の再現に成功したと言える。

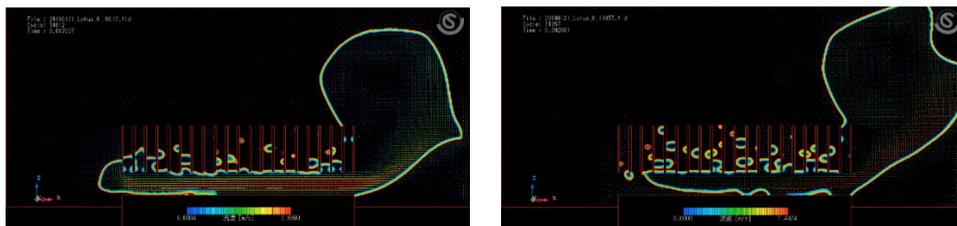


図2 グループからの蒸気泡の放出の様子

② ブリージング現象制御による限界熱流束の飛躍的向上

試験装置の概要を図3に示す。装置は主に加熱銅ブロック、試験容器、凝縮器で構成されている。試験容器は内径 63 mm 、高さ 72 mm のガラス容器であり、沸騰様相を観察することができる。容器底部中央に接続される加熱用の銅ブロックは角柱部とベース部で構成され、角柱部の上端

面がグループ面となっている。その大きさは10 mm×10 mmである。グループは1.0mmの幅を有し、1.0 mmのピッチで伝熱面に施工されている。その上にロータス銅ははんだにより張り付けられる。CFD シミュレーションの知見から、更なる限界熱流束の向上のためにはグループ内での蒸気の移動と吸引液の移動を促進させることが重要である。そのため、通常の1mm深さのグループを有する試験体A、グループ端面からの液供給を検証するためグループ中央部を閉塞した試験体B、そして蒸気移動と液移動を促進させるためのグループ深さ3 mmの試験体C、の3つの試験体を準備した。ロータス銅の初期厚みは2.0mm、平均気孔径は0.49 mm、気孔率は65.9%である。冷却液は蒸留水であり、大気圧環境下における飽和プール沸騰試験が実施される。実験中に発生した蒸気は試験容器上部に設置される凝縮器により液化される。銅ブロック角柱部の中心軸上にΦ0.5 mmのK型熱電対が4本挿入される。定常状態における伝熱面側3点の平均温度から温度分布と伝熱面温度を算出し、フーリエの熱伝導則から伝熱面熱流束を評価する。なお、これまでの熱流束の単位は(MW/m²)であったが、今後、実際の電子機器への応用を考慮して(W/cm²)で表記する。

図4は、試験体A, B, Cの沸騰曲線を表している。横軸は壁面過熱度であり、冷却面温度と液体の液体の飽和温度との差を表している。まず1 mm深さのグループである試験体Aの場合、限界熱流束は552 W/cm²である。この時の壁面過熱度は100Kを超えているため、壁面温度も200℃を若干超えている。本装置での平滑面の限界熱流束は144 W/cm²であったため、ブリージング現象により冷却限界が大幅に向上していることが分かる。グループ端面からの液供給を検証するための試験体Bでは、限界熱流束が試験体Aと比べて若干低下している(532 W/cm²)。特徴的なのは呼吸現象が活性化される高熱流束域で伝熱面が高温化されており、すなわち、グループ中央部を閉塞したことによりグループ端面からの液供給が阻害された結果であると考えられる。一方、グループ深さを3 mmとした試験体Cについては、限界熱流束が724 W/cm²まで飛躍的に向上している。この時の壁面過熱度は約200 Kであるため、試験体Aと比較して熱流束が200W/cm²ほど高いにも関わらず同じ壁面温度を維持している。中程度の熱流束域で若干高温化しているのはグループが深くなったことによるグループ内での熱抵抗の増大によるものと考えられる。蒸気の排出性能が促進され、かつ吸引液の流動抵抗が低減した結果、呼吸現象によるグループ端面とロータス上部からの液供給が飛躍的に活性化されたものと考えられる。

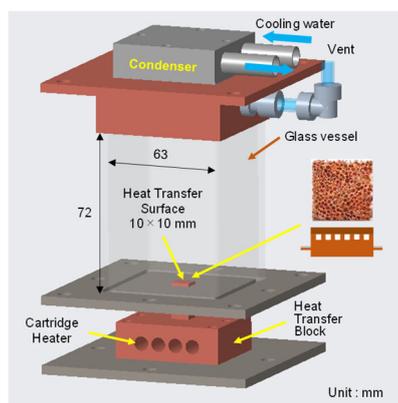


図3 沸騰試験装置の概要

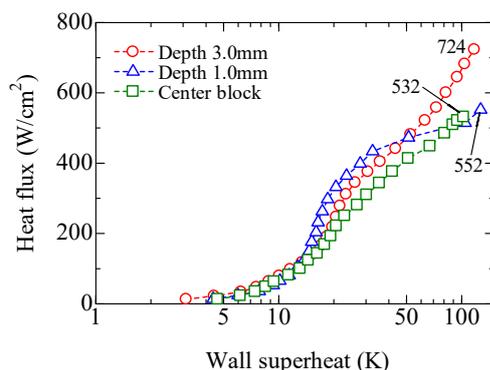


図4 限界熱流束の向上

③ ブリージング現象制御による低温下の促進と絶縁性流体への適用

沸騰熱伝達の向上のためには気泡の発泡点を増やし、気泡生成を早める必要があり、いわゆる溝付き伝熱面の最適化が必要である。そのため、従来の一方向溝に加えて格子状溝を導入する。詳細を表1(左)に示す。すべて溝の深さは1 mmである。それぞれの名称は(溝幅-フィン厚さ(単位 mm))を意味している。この伝熱面にロータス銅を接合する。ロータス銅に関しては、厚み1 mmのものを3種類用いた。ロータス銅の詳細を表1(右)に示す。それぞれの名称は(P気孔径, t厚み(単位 mm))である。また、気孔径と厚みが同じものがあつた為、先頭に番号(1, 2)を付けて判別する。ロータス銅と伝熱面の接合は、これまではロータス銅への熱伝導を高める為に半田による接合を行ってきた。今回、溶存ガスによる気泡の発生には温度差が重要であると考え、ばねによる機械的圧着を用いる。機械的圧着では接触熱抵抗が大きくなる為、熱が伝わりにくく伝熱面とロータス銅上部で温度差が生じると考えられる。そこで、ロータス銅を層状に重ねることでその効果を大きくし、伝熱面と最上層のロータスとの間に更なる温度差を生むことを期待して1層から3層までの3パターンにて実験を行う。

図5に直状溝、溝幅0.5 mm、フィンの厚みが0.57 mmであるS05057の沸騰曲線を代表例として示す。横軸に伝熱面過熱度(伝熱面温度と冷媒の飽和温度の差)、縦軸に熱流束を示している。低過熱度領域に着目するため過熱度10 Kまでのグラフとなっている。ここでは、層を増やすことで温度差による溶存ガスの気泡化を図った実験の結果を比較する。熱流束が最も低いところでは3層、2層、1層の順で過熱度が低温化していることが分かる。しかし、熱流束が向上するとその現象が変化し、熱流束が約8 W/cm²のとき、1層、2層、3層の順で過熱度が低減されてお

り、先ほどの結果と完全に逆転していることが分かる。可視化において、伝熱面の温度が FC-72 の沸点である 56 °C に達する前に 2 層と 3 層のものは発泡を確認することができた。ここで発生した気泡は層を増やことでグループ伝熱面と最上層のロータス銅上面との間に温度差が生まれたことによりできた気泡と考えることができる。また、伝熱面温度が 56 °C を超えてからも継続して気泡が発生していた。ここでは、沸騰による発泡が起きていたと考えられる。実験結果から極低熱流束域では層が多いものにおいて過熱度が低温化する傾向にあることから、この領域では発生した気泡により伝熱面の近傍の過熱液が攪拌され低温化に繋がると考えられる。一方で、層が多いものが 4 W/cm² 以上の熱流束域で低温化できなかった原因として、熱流束が上昇す

表 1 グループ構造とポーラス構造

格子 (Cross)	直溝 (Straight)		写真	名前	気孔率	気孔径	厚み
	C051	S05057					
				IP040t1	88.9 %	0.40 mm	1 mm
				P041t1	88.4 %	0.41 mm	1 mm
				2P040t1	88.8 %	0.40 mm	1 mm

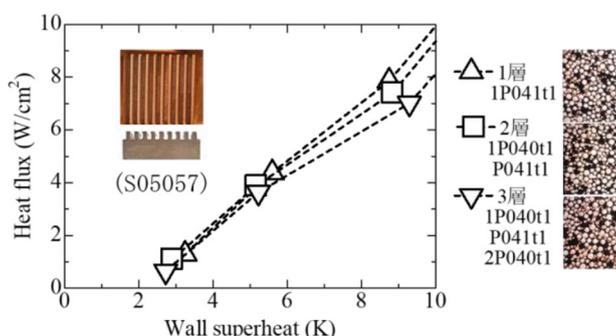


図 5 低熱流束域における沸騰熱伝達性能

ると気泡量が増加することが挙げられる。層が多い気孔が重なったことでロータス銅気孔からの気泡排出が阻害され、伝熱面に液供給がされにくくなり過熱度が高くなると考えられる。また、平均気孔径が同じ場合の実験結果より、ストレートグループに対しクロスグループの熱伝達率は最大で 1.5 倍に向上した。また 2 種の気孔径の比較より、グループ形状にかかわらず熱流束が低い場合は小気孔径における熱伝達率が高いものの、熱流束が高くなるに伴い大気孔径での熱伝達率が上回る傾向が見られた。これらの結果より、(1) 低熱流束域では発泡点と考えられるグループ上面とロータス銅の気孔の濡れ縁を増加すること、(2) 高熱流束域ではロータス銅からの蒸気排出を促進することが沸騰熱伝達向上に有効であることが示唆された。

4. おわりに

本研究では、一方向性の気孔構造を有するロータス銅をグループ伝熱面上に張り付け、液を沸騰させることで発現するブリージング現象（ポーラス体からの蒸気排出に伴う液の自発的供給現象）を利用、特に、蒸気と液体の流れをそれぞれ制御することで飽和プール沸騰の限界熱流束を飛躍的に増大させることを目的とした。ブリージング現象を制御するためには、まず、そのメカニズムを解明することが必要不可欠である。本研究では、まずブリージング現象の詳細メカニズムを解明するため、ポーラス体とグループを含む CFD シミュレーションを実施し、ポーラス内部の液供給と蒸気排出特性について可視化した。その結果、グループから蒸気泡が排出・離脱する際に、ロータス上部および反対側のグループから液が供給されていることを明らかにした。この知見から、ブリージング現象のポテンシャルを最大限に引き出すため、グループの深さを深くすることで蒸気排出効果を高めたところ、約 730 W/cm² の限界熱流束を達成した。並行して FC-72 を用いた飽和プール沸騰試験を実施し、一方向溝と直交溝が冷却性能に与える影響を評価した。平均気孔径が同じ場合の実験結果より、低熱流束域において、一方向溝に対し直交溝の熱伝達率は最大で 1.5 倍に向上した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 D. Tanaka , K. Yuki , N. Unno , K. Yuki , T. Ide , T. Ogushi , M. Murakami	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Heat Transfer Enhancement in Two-phase Immersion Cooling with FC-72	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of International Conference of Electronics Packaging (ICEP2023)	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohei Yuki, Kazuhisa Yuki, Noriyuki Unno, Risako Kibushi, Tetsuro Ogushi, Masaaki Murakami, Tomiyuki Numata, Takuya Ide	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Effect of Thickness and Pore Diameter of Lotus Copper on Breathing Phenomenon for Improving Heat Transfer Performance of Saturated Pool Boiling	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th International Heat Transfer Conference, IHTC-17	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Terada , K. Yuki , N. Unno , K. Yuki , T. Ide , T. Ogushi , M. Murakami	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Heat transfer Performance of Two-Phase Immersion Cooling by Breathing Phenomena with Different Pore Structures of Lotus Copper	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 2022 International Conference on Electronics Packaging (ICEP2022)	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 結城光平, 結城和久, 海野徳幸, 木伏理沙子, 大串哲朗, 村上政明, 沼田富行, 井手拓哉
2. 発表標題 ロータス型ポラス銅を用いた沸騰浸漬冷却における限界熱流束発生メカニズムに関する検討
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中大貴, 結城和久, 海野徳幸, 結城光平, 井出拓哉, 大串哲朗, 村上政明
2. 発表標題 格子状グループ伝熱面に接合したロータス型ポーラス銅による沸騰浸漬冷却性能の向上
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺田光希, 結城和久, 海野徳幸, 木伏理沙子, 尾串哲朗, 井出拓哉, 沼田富行, 村上政明
2. 発表標題 フリーズ現象を利用した二相浸漬冷却技術に対する溝構造の影響
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中大貴
2. 発表標題 フリーズ現象を用いた低沸点冷媒による浸漬冷却
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------