

補助事業番号 2023M-372

補助事業名 2023年度 新型自己吸引沸騰型冷却手法の開発 補助事業

補助事業者名 福井大学学術研究院工学系部門 党 超鋌

## 1 研究の概要

次世代冷却方法としてプール沸騰に代表される沸騰冷却技術は、沸騰核の形成、気泡離脱と液体供給を同時に行う複雑な過程である。また、加熱面から液体への単相熱伝達による過熱液層の形成は、プール沸騰の伝熱性能を左右する要因である。さらに、浮力駆動により蒸気の排出と液体の供給が逆に流動することにより、限界熱流束が到達すると伝熱性能が急激に低下する。加熱面から確実に熱を除去するために、伝熱性能と限界熱流束の両方を向上させる必要がある。最近の研究動向は主に次の二つに分類される: 1. 伝熱面に微細構造を付与することで、表面張力による液体の供給を促進する。2. 伝熱面に蒸気と液体の流れを分離させるような流路を加工して、伝熱促進と限界熱流束の向上を図る。

本研究は、外力を用いず、気泡の膨張による蒸気排出と液体吸引を自発的に行う自己吸引沸騰方式を開発する。流路形状と表面濡れ性を設計することで、気泡が流路の拡張方向に沿って膨張し、多孔質層を通して液体を流路内に自発的に吸い込む効果を図る(特許申請中)。加熱面から気泡への熱移動は、主に加熱面と気泡の間に形成する薄い液膜の薄液膜蒸発によるもので、プール沸騰より高い伝熱性能が得られる。また、蒸気の排出方向と液体の供給方向を分離することで、伝熱性能と限界熱流束を同時に向上させる。

## 2 研究の目的と背景

電子機器の微細化と高集積化により、電力密度は継続的に増加し、熱流束は100~200W/cm<sup>2</sup>に達しており、電気自動車のパワーアンプの熱流束が1kW/cm<sup>2</sup>に達する可能性があると予想されている。このような高い熱流束はプール沸騰の限界熱流束(約120W/cm<sup>2</sup>程度)を超えるため、伝熱性能を維持した上で限界熱流束を高めることが必要である。

また、原子炉が過酷事故時の安全性の確保及び宇宙ステーションでの相変化冷却の実現には、加熱面が下向き或いは浮力が働かない条件での相変化性能の確保が求められている。

本研究は、プール沸騰の冷却能力限界である限界熱流束及び加熱面の設置方向の制約から解放され、同時に高い伝熱性能を達成できる自己吸引沸騰方式を提案する。沸騰流路形状と表面濡れ性を設計することにより、気泡が流路の拡張方向に沿って膨張し、多孔質層を通して液体を流路内に自発的に吸い込む効果を図る。蒸気の排出方向と液体の供給方向を分離することで、伝熱性能促進と限界熱流束の向上が同時得られる。さらに、気泡と液体の移動に浮力を利用しないため、下向きの伝熱面やプール沸騰の性能が著しく低下する微小重力環境への適用も期待される。

### 3 研究内容

(1) 自己吸引沸騰性能に影響を与えるマクロ的要因の解明と最適設計。

可視化観察,  $\mu$ PIV計測および伝熱性能計測を行い, 流路の形状/拡張角度, 多孔質層のパラメータ, 壁面の濡れ性(接触角)と運転条件の影響を明らかにする上に, 流路形状のパラメータの最適化設計を行う。

(2) 自己吸引沸騰性能に影響を与えるマイクロ的要因の解明。

理論解析と数値解析を用いて, 加熱面での初期気泡の形成と成長, 加熱面上の固液気三相界線の移動, 側壁面上の三相界線の形成・移動及び消滅, 気泡と多孔質層の間の液体吸引と液膜の流れ, などを解明することで, 自己吸引沸騰の性能予測モデルを構築する。

(3) 加熱面上向き条件、下向き条件および低圧条件における自己吸引沸騰の性能評価

### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

自己吸引沸騰が実現することで, 今までより遥かに高い伝熱性能と限界熱流束の向上が可能になり, 次世代高熱流束電子機器の冷却, 電気自動車のパワーアンプ及び急速充電に冷却能力不足問題の解決に繋がる。また, 原子炉が過酷事故時に発生する崩壊熱を外部から冷却することによって除去するためには伝熱面下向き条件での冷却性能の向上, 宇宙ステーションにおける高熱流束電子機器の確実な冷却には浮力が働かない環境での相変化性能の確保は必要である。本研究の成果は原子炉の安全性向上及び宇宙開発の進歩にも貢献するものである。

### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

申請者はこれまで, エネルギーを大量に消費することなく人間の快適な生活環境をつくる技術や, 中長期的な都市のエネルギーシステムの研究を行っている。研究の学術的重要性と社会貢献の両方を重視し, 先進熱交換器の研究から, 冷媒の低GWP化, 太陽エネルギーの有効利用, 冷凍空調システムのイノベーションに至るまで幅広く研究開発を行ってきた。

本研究は, より長期的な社会変化や環境の持続性を考慮し, 国際的な協力の下で, エネルギー利用の高効率化, 低炭素化及びスマート化の実現を目指した研究である。自己吸引沸騰が実現できれば, 今までより遥かに高い伝熱性能と限界熱流束の向上が可能になり, 次世代高熱流束電子機器の冷却, 電気自動車のパワーアンプ及び急速充電に冷却能力不足問題の解決に繋がる。また, 原子炉が過酷事故時に発生する崩壊熱を外部から冷却することによって除去するためには伝熱面下向き条件での冷却性能の向上, 宇宙ステーションにおける高熱流束電子機器の確実な冷却には浮力が働かない環境での相変化性能の確保は必要である。本研究の成果は原子炉の安全性向上及び宇宙開発の進歩にも貢献するものである。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- ・ 学術論文発表1件

山田瑛大, 楊少博, 井上架, 党超鋌、マイクロチャンネル内における低キャピラリースラッグ流の流動特性に関する研究, 日本冷凍空調学会論文集、掲載決定。

- ・ 学術論文投稿2件

Ryuunosuke Nishikawa, Chaobin Dang, Shaobo Yang, Chengzhi Li, Study on heat transfer coefficient and pressure drop characteristics of two phase flow radial expanding channel heat sink, International Communication of Heat and Mass Transfer, 投稿中

Shaobo Yang, Sihui Hong, Chaobin Dang, Experimental study on self suction boiling heat transfer applied for high heat flux cooling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 投稿中

- ・ 国際学会発表1件 (The Third Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS 2024), June 23-27, 2014, Shanghai)
- ・ 国内学術会議発表5件 (2024年度日本伝熱学会北陸支部シンポジウムに2件、2024年度第61回日本伝熱シンポジウムに3件発表)

## 7 補助事業に係る成果物

### (1)補助事業により作成したもの

<http://mech.u-fukui.ac.jp/~dang/Research/self-suction%20boiling.html>

### (2)(1)以外で当事業において作成したもの

なし

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 福井大学(フクイダイガク)

住 所: 〒910-8507

福井県福井市文京3丁目9-1

担 当 者: 教授・党 超鋌(ダン チョウビン)

担 当 部 署: 学術研究院工学系部門(ガクジュツケンキュウインコウガクケイブモン)

E - m a i l: dangcb@u-fukui.ac.jp

U R L: <http://mech.u-fukui.ac.jp/~dang/index.html>