

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04315

研究課題名(和文)非加熱副流路構造による非共溶性混合媒体強制対流沸騰の限界熱流束増大効果

研究課題名(英文) Enhancement of Critical Heat Flux of immiscible mixtures flow boiling in a channel with unheated space

研究代表者

河南 治 (Kawanami, Osamu)

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号：20382260

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：高密度低沸点媒体(FC-72)と低密度高沸点媒体(水)の非共溶性混合媒体を用いた流動沸騰実験を実施した。加熱試験部は、流路高さ1 mm、流路幅73 mm(幅30 mmの加熱部+幅23 mmの非加熱領域)の矩形流路である。水とFC-72の流量比を変化させ、合計流量は0.5 L/minで一定とした。水:FC-72=4:1のときに、加熱部全体に渡って水単成分よりも高い熱伝達率を示した。一方、CHFは水の流量比が大きくなるに従って大きくなり、水単成分の場合がもっとも高くなった。FC-72は試験部下流においても非加熱部分に残っていることが確認できたが、CHF増大には寄与しなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、非共溶性混合媒体を用いた沸騰伝熱の基礎的知見が多く得られた。これらは、既往の熱交換器や電子機器の冷却システムに対して、極めて効率良い、新たな冷却方法として重要な知見となるため、例えばデータセンターの省エネ化に貢献できるなど社会的意義が大きいものである。また、非共溶性混合媒体による流動沸騰実験による限界熱流束データや熱伝達データは、これまでにほとんど例がなく、学術的に大きな価値があるものである。

研究成果の概要(英文)：Flow boiling experiments were conducted using a immiscible mixture by FC-72 and water. The heating test section was a rectangular channel with a channel height of 1-5 mm and a channel width of 73 mm (30 mm wide heated area + 23 mm wide unheated area). The flow ratio of water to FC-72 was varied, and the total flow rate was kept constant at 0.5 L/min. In the case of water:FC-72 = 4:1, the heat transfer coefficient was higher than that of the water-only component over the entire heated area. The CHF, on the other hand, increased as the ratio of water increased, and was highest in the case of the water-only component. FC-72 was found to remain along the unheated area even in the downstream of test section, however did not contribute to the increase in CHF.

研究分野：熱工学

キーワード：沸騰 限界熱流束 非共溶性混合媒体

### 1. 研究開始当初の背景

従来の沸騰冷却システムの研究・開発のほぼすべては、単成分媒体もしくは溶解性混合媒体を用いたものであり、不凍液や代替冷媒の開発に対して機器設計を変更することなく、蒸気圧曲線(液相線)のレベルを調整できる以外に大きな利点はなく、物質拡散抵抗に起因する伝熱劣化が欠点として大きく目立つ。一方、非共沸混合媒体に関しては沸騰研究の黎明期を中心に若干の断片的的研究が見られるが、これらは化学プロセスでの応用を目的としたもので、冷却系に有用な伝熱特性を持つことが明確にされておらず、単成分媒体との定性的差異も認識されていない。

一方、最近、FC72/水の組み合わせのような、高密度低沸点/低密度高沸点の非共溶性混合媒体を沸騰冷却に適用し、1. 限界熱流束の飛躍的増大、2. 負荷変動の大きな冷却系で嫌われる沸騰開始時の伝熱面温度のヒステリシスの回避、3. 非凝縮気体(空気)混入防止のための正圧(大気圧以下)作動下での冷却面温度の低減、などを液体混合のみで実現でき、特に低沸点媒体が少ない条件下では、図1のような沸騰熱伝達特性を取る条件があることが、大田らのグループによって報告されている。

このように、非共溶性混合媒体を用いた沸騰冷却は、最近、その冷却性能の高さや、実用面での適用可能範囲の広さが明らかになってきたが、2成分2相が複雑に作用するため、単成分媒体とは大きく異なる沸騰熱伝達特性を示し、その基本的性質のごく一部しか明らかではない。申請者らは最近、非共溶性混合媒体を用いたプール沸騰の、低沸点媒体から高沸点媒体への沸騰冷媒遷移(Boiling Refrigerant Transition, BRT)を、ケルビン-ヘルムホルツ不安定性から説明し[4]、図2に示すように、過去の文献によるデータを含めた実験結果との良い一致を見せている。また、BRTの発生条件が高密度低沸点媒体の液高さのみに依存することや、BRT発生時の伝熱特性も報告している。さらに、下面を伝熱面とした矩形流路による強制対流沸騰実験も実施中であり、BRTが強制対流沸騰系においても生じることを確認している。

ここまでに、非共溶性混合媒体による沸騰熱伝達特性とその優位性を論じてきたが、非共溶性混合媒体を用いることによる限界熱流束の増大効果については、その概念のみの記述に留まっており、実際の実験結果を報告している例はない。特に、実用化に際して適用範囲が広い強制対流沸騰系での限界熱流束は、非常に重要な検証事項である。本研究では、これまでに報告例のない強制対流沸騰系での非共溶性混合媒体の限界熱流束の増大効果について、非加熱副流路構造を提案し、検証を行う。

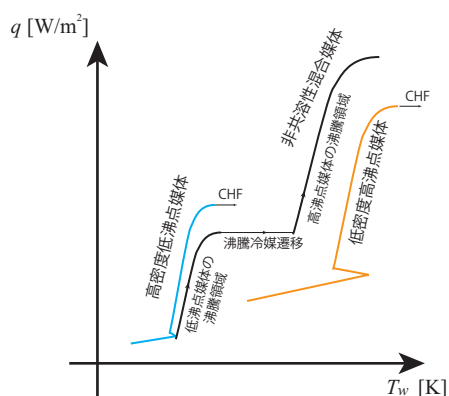


図1 高密度低沸点/低密度高沸点の非共溶性混合媒体沸騰熱伝達特性の例(高密度低沸点媒体が適量かつプール沸騰の場合)

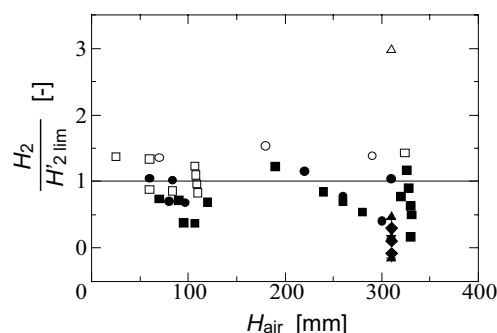


図2 プール沸騰における沸騰冷媒遷移が生じる低沸点高密度冷媒液位の実験値と新しく提案した理論値の比較  
 オープンシンボル: 沸騰冷媒遷移なし, クローズドシンボル: 沸騰冷媒遷移あり (●/○および▲/△: FC-72/Water, ■/□および▼: Novec7100/Water, ◆: Novec7200/Water, +: Novec649/Water).

## 2. 研究の目的

本研究の核心をなす学術的「問い」を以下に示す。

- 革新的な冷却方法として期待される非共溶性混合媒体による強制対流沸騰伝熱において、期待される限界熱流束の増大効果は得られるのか？
- また、理想的な限界熱流束の増大効果を達成するにはどうすればよいか？

この問いに答えるため、これまで全く研究が行われていない以下の内容を研究対象とする。

- 非共溶性混合媒体を用いた強制対流沸騰における限界熱流束実験
- 非共溶性混合媒体を用いた強制対流沸騰における非加熱副流路構造の構築
- 上記流路構造による限界熱流束の増大効果の検証

以上の、目的を達成するため、本研究では流路高さを  $0.5\sim 5\text{ mm}$  に、また流路長さを  $25\sim 175\text{ mm}$  に可変できる矩形加熱流路構造を、非共溶性混合媒体の強制対流沸騰系に対して最適化し、その限界熱流束に対する効果を検証する。

## 3. 研究の方法

本研究では強制対流実験を閉ループにて実施する。装置概要を図3に示す。装置の主な構成要素は、混合媒体タンク、分岐セクション、ポンプ、予熱器、加熱試験部、凝縮部である。混合媒体のタンク内は、重力によって、高密度低沸点媒体と低密度高沸点媒体に分離される。本研究では、高密度低沸点媒体にFC-72（大気圧下での沸点  $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、低密度高沸点媒体に水（大気圧下での沸点  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）を用いる。この2成分混合物の平衡温度は大気圧下で  $51.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  である。

タンク内で自重により分離された各液体は、ポンプによって所定の流量比で予熱器を経由し、設定された液体温度にて加熱試験部へと向かう。本実験でのポンプはギアポンプであり、ポンプでの液体輸送時に2流体は混合された状態で加熱試験部まで流れる。

加熱試験部の詳細を図4に示す。加熱試験部は下側伝熱面の矩形流路とし、流路幅  $30\text{ mm}$  で一定、流路高さはスペーサーを取り替えることで  $1\sim 5\text{ mm}$  に設定できる。加熱面である底面はアルミの伝熱ブロックとなっているおり、伝熱ブロックは流れ方向に7セクションに分かれ、それぞれ流れ方向に  $25\text{ mm}$  で、総加熱長さは  $175\text{ mm}$  である。さらに、加熱底面の両側には流れ方向に沿って幅  $23\text{ mm}$  の非加熱領域を設けた。それぞれの伝熱ブロックには鉛直方向に3つの熱電対が挿入されており、各ブロックの伝熱面表面温度、熱流束および熱伝達率が導出できる。これによって、流れ方向における伝熱特性分布を計測することができる。また上部は透明なポリカ板

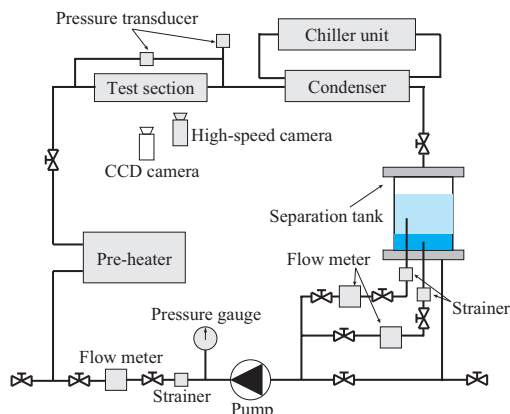


図3 非共溶性混合媒体を用いた強制対流沸騰実験装置の概要図

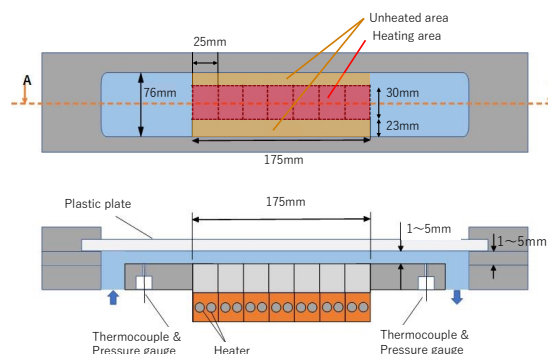


図4 加熱試験部の詳細図

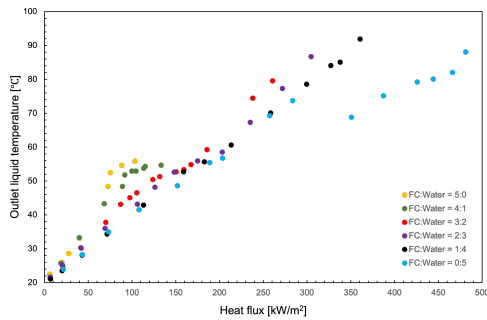


図7 流路高さ 1 mm、総流量 0.5 L/min における  
出口流体温度と印加熱流束

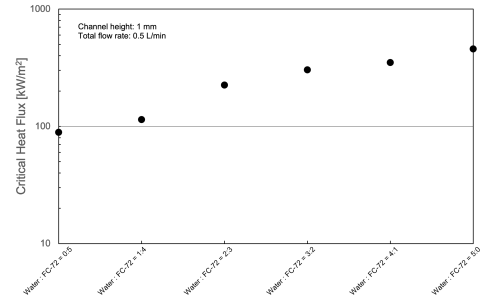


図6 流路高さ 1 mm、総流量 0.5 L/min における  
限界熱流束と流量比率

で、加熱部の気液挙動を観測することができる。本研究では、気液挙動観測を、高速度カメラにて撮影し、伝熱データとの関連性および非共溶性混合媒体の分散状況などを詳細に観測した。

試験媒体（水とFC-72）はポンプ前の手動バルブによって任意の流量比を設定し、総流量0.5 L/min一定とした。ポンプにて混合された試験媒体は予熱器によって所定の温度まで加熱し、加熱試験部に送られる。本実験では平衡温度から10 K低温に加熱試験部入口液体温度を設定した。さらに、それぞれの流体の単一成分での実験も行い、それらの熱伝達の比較を行った。

#### 4. 研究成果

まず、非共溶性混合媒体の限界熱流束を実際に把握するため、まずは流速0の条件を模したプール沸騰状態にて実験を実施した。実験は、高密度低沸点媒体(水)の液高さをパラメータとして行った。また、実験はガラス製の沸騰容器にて、底面の直径 100 mm の銅円板の中心 25 mm を加熱面とした。容器内圧力は大気圧を維持し、低密度高沸点媒体には水、高密度低沸点媒体にはFC-72を用いた。

図5に水/FC-72の二成分系におけるプール沸騰時の限界熱流束と高密度低沸点媒体（FC-72）の液高さとの関係を示す。非共溶性混合媒体が伝熱面温度で切り替わる沸騰冷媒遷移が生じる高密度低沸点媒体の液高さよりも低いにおいて、水単成分時の限界熱流束(約 1.3 MW/m<sup>2</sup>)を超える限界熱流束を記録した。FC-72の液高さが1mm以下の場合、伝熱面より下の液位であっても、CHFは変化せず、同条件の場合の水のCHFに対して、およそ2倍のCHF値 2.6 MW/m<sup>2</sup>が得られた。一方、FC-72の液高さが3mm以上の場合は、液高さが高くなるとCHFが低下し、5mmおよび8mmの場合は同条件における水のCHFと同程度になった。8mm以上の場合は、FC-72から水の沸騰形態に遷移する沸騰冷媒遷移が生じることなく、FC-72の沸騰のみで終了することが多く、この時はFC-72のCHFと同程度となった。これらの結果より、(1)非共溶性混合媒体を用いたプール沸騰において、CHFは高密度低沸点媒体の液高さの影響を受けること、(2)液高さが伝熱面よりも低い、つまり伝熱面上に高密度低沸点媒体が存在しない場合にも、系のなかに高密度低沸点媒体が存在していれば、高いCHFが得られること、(3)CHFは本条件内では最大で水の2倍程度であること、が明らかとなった。これらの結果を、伝熱面直上の温度に依存する伝熱面上のFC-72と水の存在割合を考慮した新しいCHFモデルとして検討し、実験結果を説明できることを示すことができた。

以上のプール沸騰の結果から、非共溶性混合媒体を用いた強制対流沸騰の限界熱流束を増大させるためには、CHF付近の高熱流束域において高密度低沸点媒体が伝熱面に侵入することを防ぐこと、また系として高密度低沸点媒体の液相を常に確保すること、の2点が重要なポイントであると考えられる。よって、図4に示した非加熱流路によって、高熱流束域においても高密度低



沸点媒体の液相を常に確保される。さらに、今回の実験では流路高さを低密度高沸点媒体の水に対して表面張力支配の等価直径以下の 1 mm に設定した。これによって、水の沸騰による気泡が加熱領域を充満し、非加熱領域に FC-72 を押し出すことで高密度低沸点媒体が伝熱面に侵入することを防ぐ目的を達成せんとした。

総流量 0.5 L/min で一定の下で、水と FC-72 の流量比率を変化させた場合の限界熱流束を示す。FC-72 の流量比率が小さくなるにしたがって、限界熱流束が大きくなり、水単体での限界熱流束が一番大きくなった。これは、非共溶性混合媒体の場合、水と FC-72 の流量比率に関わらず、水単成分よりも CHF が小さくなるという結果になった。図 7 に各流量比率における出口流体温度と印加熱流束の関係を示す。FC-72 の流量比率が大きくなるほど、出口流体温度は高くなっていることがわかる。プール沸騰の実験結果からは、非共溶性混合媒体の沸騰時における特徴として、FC-72 の液相成分が沸騰系に存在している時は、バルク液体温度は平衡温度付近で保たれるが、強制対流沸騰においては、印加熱流束に依存して上昇しており、FC-72 の流量比率が高い場合のみ、平衡温度付近で若干の影響が見られる程度である。よって、バルク流体温度が平衡温度に維持されるという非共溶性混合媒体における沸騰伝熱の特徴が見られず、その結果、水の潜熱による熱輸送量に依存して CHF が決定されていると考えられる。一方で、気液挙動の観察結果からは、加熱部流路下流部でも FC-72 が残存している様子が確認されており、なぜバルク流体温度が平衡温度付近に維持されないのか、不明のままである。

次に、流れ方向における表面温度分布および熱伝達率分布を図 8 と図 9 に示す。伝熱面表面温度は、水の流量比率が 0.3 以上の場合に低くなっている。これは FC-72 の比熱が小さいため、低い印加熱流束でも液体温度が上昇するためである。なお、熱流束が 110 kW/m<sup>2</sup> 以上では Water:FC-72 = 0:5 の、160 kW/m<sup>2</sup> 以上では Water:FC-72 = 1:4 のデータがないが、それぞれ限界熱流束を超えたためである。これらの結果では、流路高さ 1 mm、総流量 0.5 L/min の場合、水の流量比率が半分以上の場合、加熱部表面温度は流量比率にほとんど影響されない。

図 9 の熱伝達率分布では、全ての条件で水単成分よりも Water:FC-72 = 1:4 もしくは Water:FC-72 = 2:3 の条件で熱伝達率が向上している。特に、Water:FC-72 = 1:4 の条件では、300 kW/m<sup>2</sup> の高熱流束領域でも水単成分よりも高い熱伝達率を保持しており、低熱流束から高熱流束に至るまで、水単成分よりも優れた伝熱性能を示すことを明らかにした。

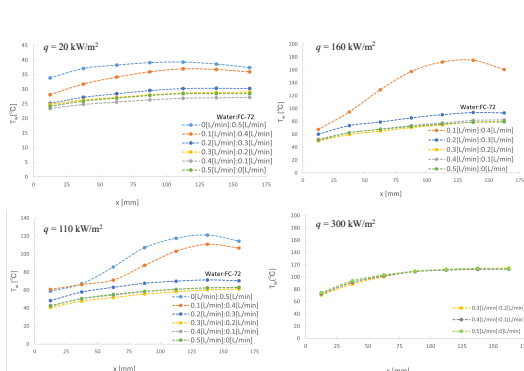


図 8 流路高さ 1 mm、総流量 0.5 L/min における流れ方向の加熱面表面温度

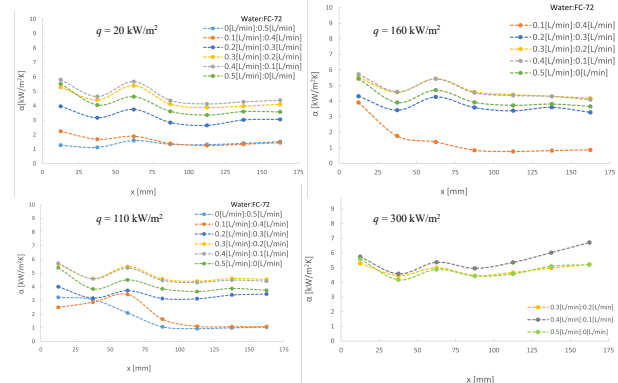


図 9 流路高さ 1 mm、総流量 0.5 L/min における流れ方向の熱伝達率

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Matsuda Yu, Kawanami Osamu, Orimo Riki, Uete Keigo, Watanabe Atsufumi, Egami Yasuhiro, Yamaguchi Hiroki, Niimi Tomohide	4. 巻 153
2. 論文標題 Simultaneous measurement of gas-liquid interface motion and temperature distribution on heated surface using temperature-sensitive paint	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 119567 ~ 119567
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119567	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Imai Ryoji, Nishida Kazuaki, Kawanami Osamu, Umemura Yutaka, Himeno Takehiro	4. 巻 109
2. 論文標題 Ground based experiment and numerical calculation on thermodynamic vent system in propellant tank for future cryogenic propulsion system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cryogenics	6. 最初と最後の頁 103095 ~ 103095
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cryogenics.2020.103095	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 Kazuaki NISHIDA, Ryoji IMAI, Osamu KAWANAMI, Yutaka UMEMURA, Takehiro HIMENO	4. 巻 38
2. 論文標題 Ground-Based Experiment on Reducing Boil-Off Gas by Jet Mixing for Future Cryogenic Propulsion System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Microgravity Science and Application	6. 最初と最後の頁 380102
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 Inoue Koichi, Ohta Haruhiko, Toyoshima Yuuki, Asano Hitoshi, Kawanami Osamu, Imai Ryoji, Suzuki Koichi, Shinmoto Yasuhisa, Matsumoto Satoshi	4. 巻 33
2. 論文標題 Heat Loss Analysis of Flow Boiling Experiments Onboard International Space Station with Unclear Thermal Environmental Conditions (1st Report: Subcooled Liquid Flow Conditions at Test Section Inlet)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Microgravity Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12217-021-09869-5	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 Inoue Koichi, Ohta Haruhiko, Asano Hitoshi, Kawanami Osamu, Imai Ryoji, Suzuki Koichi, Shinmoto Yasuhisa, Kurimoto Takashi, Matsumoto Satoshi	4. 巻 33
2. 論文標題 Heat Loss Analysis of Flow Boiling Experiments Onboard International Space Station with Unclear Thermal Environmental Conditions (2nd Report: Liquid-vapor Two-phase Flow Conditions at Test Section Inlet)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Microgravity Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12217-021-09902-7	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 Osamu KAWANAMI, Kentaro TAKEDA, Ryoki MATSUSHIMA, Ryoji IMAI, Yutaka UMEMURA, Takehiro HIMENO	4. 巻 39
2. 論文標題 Observation of Flow Pattern and Jet-tip Height Issuing from a Nozzle at Tank Bottom in Microgravity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Microgravity Science and Application	6. 最初と最後の頁 -
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3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 河南治、高垣直尚、本田逸郎、大田治彦
2. 発表標題 水/FC-72混合媒体による流動沸騰の流体挙動及び熱伝達特性
3. 学会等名 混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋朋花、池田直哉、河南治、浅野等、今井良二、井上浩一、松本聡、鈴木康一、大田治彦
2. 発表標題 国際宇宙ステーション沸騰二相流実験における透明伝熱管内壁面温度の導出及び気泡挙動と壁面温度との関連
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Takahashi, N. Ikeda, O. Kawanami, K. Inoue, H. Asano, R. Imai, S. Matsumoto, K. Suzuki, and H. Ohta
2. 発表標題 Characteristics of inner-wall temperature transition during flow boiling in transparent heated tube onboard international space station
3. 学会等名 The 32rd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
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