

令和 3 年 4 月 21 日現在

機関番号：32639

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06209

研究課題名(和文)狭隘制限空間内沸騰における限界熱流束向上方法の提案

研究課題名(英文)Proposal of method of critical heat flux enhancement in small space boiling

研究代表者

宇高 義郎 (UTAKA, Yoshio)

玉川大学・工学部・教授

研究者番号：50114856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：優れた熱伝達特性を示す沸騰熱伝達においては、近年の発熱密度の増加傾向に対応して、その限界値の向上が重要である。従来の表面付与方式の沸騰伝熱促進法と異なる、異形態相関沸騰と命名した、新たな伝熱板の内部構造による伝熱促進法を提案した。伝熱面に不均一な温度分布を形成させて異なる沸騰形態の干渉を誘発し、より大きな限界熱流束を実現する。異形態相関沸騰の基本特性および支配パラメータの影響を明らかにし、その有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

優れた熱伝達特性を示す沸騰熱伝達は、近年、パワーエレクトロニクスの冷却など、多くの工業分野に利用され、機器の発熱密度の増加に対応して、その性能向上が重要である。本研究は、従来の表面付与方式と異なる、異形態相関沸騰と呼ぶ新たな伝熱板の内部構造による伝熱の向上法を提案し、その工学技術への貢献のための検討を進めた。

研究成果の概要(英文)：In boiling heat transfer, which shows excellent heat transfer characteristics, it is important to improve critical heat flux to meet the recent trend of increasing heat generation density. I proposed a new method of enhancing boiling heat transfer by using the internal structure of heating plate, which we call "different-mode-interacting boiling". Non-uniform temperature distribution is created on the heat transfer surface to induce interference between different boiling modes, resulting in a larger critical heat flux. The basic characteristics of different-mode-interacting boiling and the effects of the dominant parameters are elucidated, and the effectiveness of the method is demonstrated.

研究分野：熱工学

キーワード：熱工学 沸騰伝熱 限界熱流束向上 非均一伝熱板 異材料配置パターン 液体供給系 伝熱促進

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

沸騰熱伝達は、その優れた熱伝達特性により、電子デバイス冷却、鋼冷却、蒸気発生などの産業用途での高密度熱除去に広く適用されている。しかし、沸騰伝熱現象には、熱伝達の良好な核沸騰領域に熱流束の限界が存在する。近年の発熱密度の増加傾向に対応して、その限界値（限界熱流束、CHF）の向上が重要になっている。そのため、CHFの促進のための研究が活発に行われている。沸騰における熱伝達率（HTC）やCHFの向上は、これまで主に伝熱面表面の加工やマイクロ/ナノ構造物の表面への付与によって実現されてきた。本研究では、そのような背景の下、異形態相関沸騰と命名した、新たな沸騰CHFの向上方法を考案した。すなわち、水プール内に配置された狭隙隙間における沸騰伝熱のCHFを改善するための方法として、新たな伝熱板の内部構造を提案した。熱伝導率の低い材料を伝熱板内部に離散的に配置し、CHF点付近の伝熱面において不均一な温度分布を形成させることにより、核沸騰と膜沸騰が隣接して共存する現象を実現する。それらの異なる沸騰モード、あるいは沸騰強度の大きく異なる部分の相互干渉により、より大きなCHFを実現する方法である。さらに、本方式では、従来おこなわれていた、表面構造を付加する沸騰促進方法と異なり、伝熱表面には手を加えていないため、表面付加物の脆弱性あるいは表面の劣化などを考慮する必要がないことが特徴である。また、本方式に適切な表面構造や表面改質をさらに加えることにより、より大きな伝熱促進率を得ることが可能と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、上述のような異形態相関沸騰と呼ぶ、狭隙空間沸騰における限界熱流束の向上方法を提案している。伝熱板に熱伝導性の異なる材料を配置し、ドライアウトの出現するCHF点近傍の高過熱度領域において、系統的な温度分布を付与する伝熱面構造により、自己ぬれ部とドライアウト部、あるいは沸騰強度の大きく異なる部分を交互に隣接共存させ、それらを互いに干渉させる。そのような沸騰モードの干渉が生じる、温度分布境界部を意図的に存在させることにより限界熱流束の促進を図る。以上、本研究では、異形態相関沸騰原理に基づく伝熱促進方式を実験的に検証し、限界熱流束の向上を実現させることを目的としている。

3. 研究の方法

狭隙隙間内での沸騰に関する本報告者らの以前の研究の知見によると、伝熱面の大部分が常に蒸気で占められているドライアウト領域では、液体の狭隙空間入口近くで液体が前進しながら乾燥領域に入り、また後方に戻るといった周期的な液体移動が繰り返される。そのような非定常的な液体移動により、その領域で活発な蒸発にともなう高熱流束が生じると考えられる。したがって、それらの現象は、ウェット領域とドライアウト領域の隣接がCHFを増大させる可能性があることを示唆した。そのような関連現象の理解に基づき本研究の伝熱促進機構方法は考案された。基本的な考え方と伝熱板構造を図1および図2に示した。上述のように、核沸騰とドライアウトの異なるモードを持つ隣接領域の共存による狭い間隙でのCHFの向上が、異なる沸騰モード間の相互作用を引き起こすことが予想される。熱流束を伝熱板の下方から加えると、伝熱板内の熱伝導性が異なる材料（ここでは、PTFEと銅）により伝熱面の温度分布が付与される。その表面の温度分布により、核沸騰と膜沸騰、あるいはぬれ部とドライアウト部などの沸騰形態、あるいは沸騰強度の大きく異なる部分の隣接混在が生起するはずである。そのような異形態沸騰境界近傍では、気泡の生成、成長、合体、および離脱などの不規則な気泡運動に伴う動的な液体の非定常的な移動が生じ、特に低コンダクタンス材料の上側部分のぬれ領域から、高コンダクタンス材料上の乾き領域にぬれ領域が拡張され、その個所において集中的な蒸発が非定常かつ断続的に発生する可能性が考えられ、CHFあるいはHTCの向上を期待することができる。

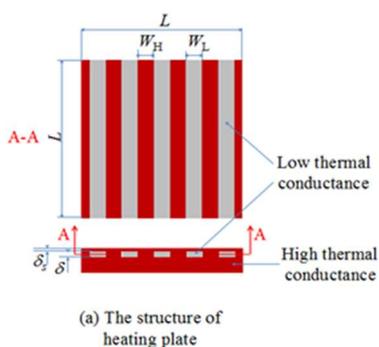


図1 異形態相関沸騰の概念と伝熱板構造

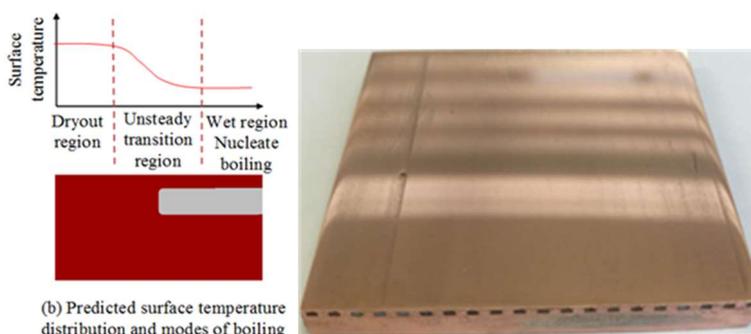


図2 伝熱板の一例

4. 研究成果

異形態相関沸騰に関する本研究の成果は、次の4項目にまとめられる。すなわち、異形態相関沸騰の CHF 促進における、(1) 基本特性として、ストライプ状の材料配置における材料幅 $W=W_L=W_H$ の影響（ここで、添え字 L, H はそれぞれ低熱伝導性および高熱伝導性）、(2) 伝熱面寸法 L の影響、(3) 材料配置パターン、および(4) 狭隘間隙の周囲液体への開放形態の影響、に関する研究成果を以下に記述する。

(1) 狭隘間隙内における異形態相関沸騰の CHF 促進—基本特性

はじめに、異形態相関沸騰の基本特性を明らかにするため、二種類の代表的なパラメータにおける伝熱特性について実験的に検討した。すなわち、沸騰実験装置および狭隘間隙構造をそれぞれ図3および図4に示すように、水プール内に水平に配置された無酸素銅製の伝熱面 ($20 \times 20 \text{mm}^2$) とそれに平行なガラス板で構成される狭隘間隙が構成される。伝熱板内にはストライプ状に材料が配置された。3通りの材料幅 ($W=W_L=W_H=0.5, 1.0, 2.0 \text{ mm}$)、および3通りの間隙寸法 ($h=0.54, 1.04, 2.01 \text{ mm}$) をパラメータとした。狭隘間隙における4面の端部はいずれも周囲プール水へ開いた形態を採用している。

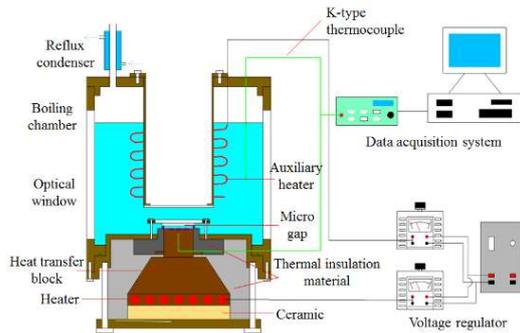


図3 沸騰実験装置

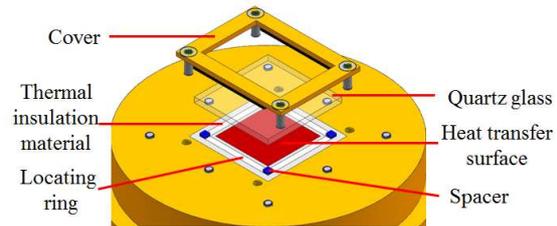


図4 狭隘間隙構造

図5および図6は、熱流束と伝熱面過熱度の関係を表す沸騰特性曲線の測定例で、それぞれ W と h の影響を示している。図5における、□印が通常の一様な伝熱板、他の印が非均一伝熱板を用いた異形態相関沸騰の結果を示している。通常の伝熱面に比べて、異種材料を伝熱板に組み込んだ伝熱板を用いた異形態相関沸騰の CHF が大きく促進されている。またこの場合には、高い CHF を実現するための材料幅に最適値が存在し、 $W=1.0 \text{ mm}$ において最も大きな CHF の増加を示した。

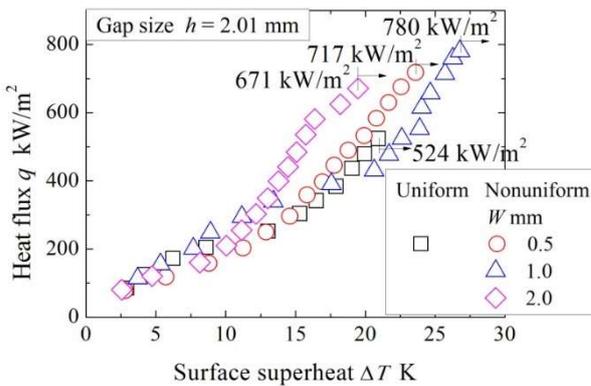


図5 沸騰特性曲線 (材料幅 W の影響)

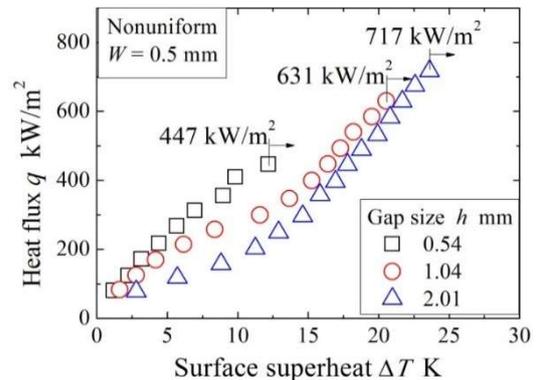


図6 沸騰特性曲線 (間隙寸法 h の影響)

CHF の促進率は、 h の減少とともに増加し、 $W=0.5, 1.0, \text{ および } 2.0 \text{ mm}$ でそれぞれ 34~43%, 47~68%, および 26~32%であった。

(2) 狭隘間隙内における異形態相関沸騰の CHF 促進—伝熱面寸法の影響

水プール中の狭隘間隙における異形態相関沸騰を適用した場合の、CHF に対する一辺 $L=10 \sim 40 \text{ mm}$ の矩形伝熱面サイズ ($L=10 \sim 40 \text{ mm}$) の影響を検討した。不均一な加熱面では、均一な加熱面に比べて CHF が大幅に向上することが測定され、 L が CHF に与える影響も明らかになった。さらに、CHF に対する $L, h, \text{ および } W$ の影響は、2つの傾向に分類された。 h を小さくして L を増大させると、CHF は単調に減少する傾向にあるが、 W は、 L と h のそれぞれについて、CHF を最大化させる最適値を有していた。このことから、異形態干渉沸騰は、 L を大きくしても CHF の改善に有効であることが示された。図7および図8に、それぞれ L と CHF の関係を従来の関連

研究と比較するとともに、CHF の促進率におよぼす L の影響について示した。

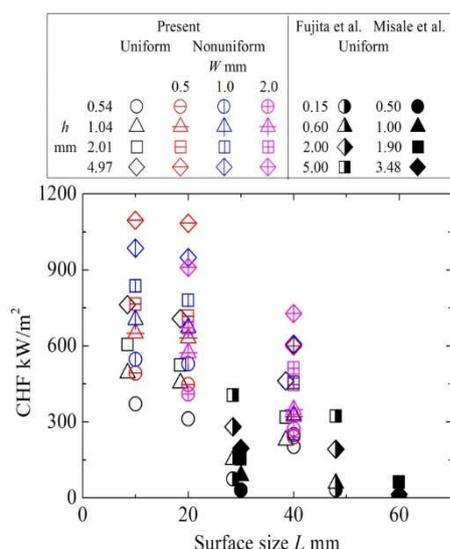


図 7 伝熱面サイズ L と CHF (h の影響)

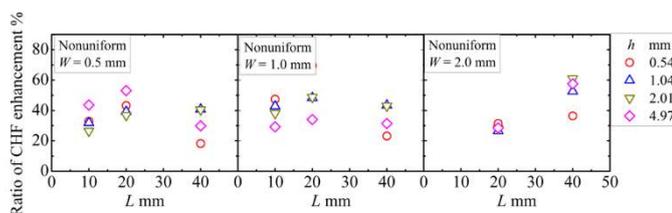
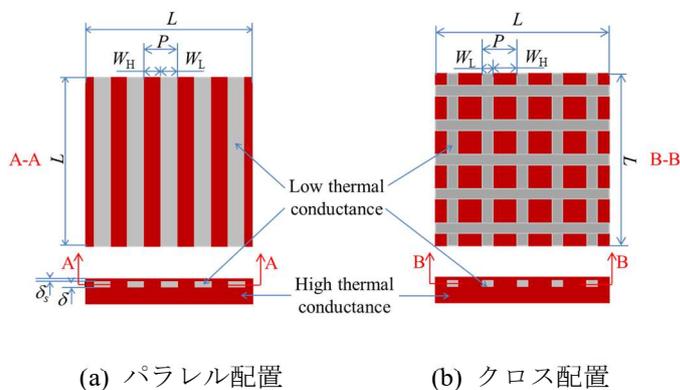


図 8 CHF の増加率 (L の影響)

(3) 狭隙間隙内における異形態相関沸騰の CHF 促進—材料配置パターン

狭隙間隙での異形態相関沸騰における、材料の配置パターンの影響を実験的に検討した。図 9 は、この研究で使用した 2 つの異なる材料配置パターンを持つ水平配置の 20mm の矩形表面の伝熱板の構造を示している。熱伝達に対するパターン構造の影響を共通に調べるために、すべての低熱コンダクタンス材料と高熱コンダクタンス材料の面積比は、ほぼ 1 : 1 に設定している。図 9 (a) は平行配置、図 9 (b) はクロス配置を示している。熱特性の異なる 2 つの材料、PTFE と銅（幅がそれぞれ、 W_L と W_H ）は、伝熱プレート内側に交差配置されている。材料のパラメータ範囲として、ピッチ P : 1.0~4.0 mm, h : 0.54~4.97mm を採用した。



(a) 平行配置 (b) クロス配置
図 9 非均一伝熱板構造

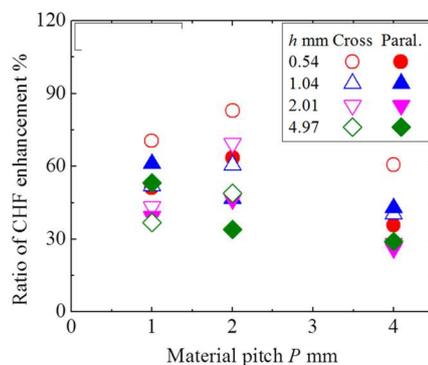
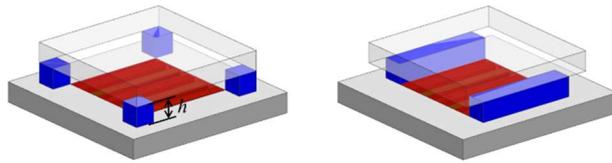


図 10 CHF 促進割合

この実験的検討により、均一な伝熱板の結果と比較して、不均一な加熱板を使用すると、CHF が大幅に向上した。特に、クロス配置の場合には、平行配置と比較して、CHF と HTC の大幅な増加を示した。これは、クロス形状が、より高密度の異なる熱コンダクタンスの材料境界を有しているため、異形態相関沸騰に関わる部分が増大し、その結果 CHF および HTC が促進されたと考えられる。図 10 に CHF の促進割合を示す。クロス配置と平行配置の CHF 増加率は、それぞれ 83~36% と 70~27% であった。 $h=0.54\text{mm}$, $P=2.0\text{mm}$ で、最大の CHF = 1140 kW/m², CHF 向上率 = 83% が得られた。

(4) 狭隙間隙内における異形態相関沸騰の CHF 促進—狭隙間隙の周囲液体への開放形態の影響

狭隙間隙のような制限空間における沸騰系では、対象となる空間が狭いため、間隙の側方周囲からの液体供給の制限を受ける場合が考えられる。ここでは、間隙サイズ h と材料幅 W をパラメータとして、狭隙間隙の異形態相関沸騰における、間隙周囲のバルク液への開放状態が CHF 特性に与える影響を検討した。図 11 に、二種類の間隙側端部開放形態を示す。これまでは周囲の液体に対して、狭隙間隙端部の 4 面とも周囲液体に開いた形態としてきた。ここでは、新たに対向する 2 面を閉鎖し、残りの 2 面が周囲液体に開放される形状を採用した。その結果、2 種類の



(a) 4 側面開放

(b) 2 側面開放

図 11 狭隘間隙のプール水への開放形態

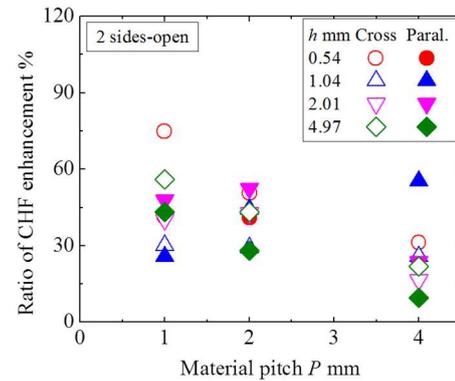


図 12 2 側面開放における CHF 促進割合

狭隘間隙の周囲液体への開放形態が、CHF と HTC に与える影響は、材料の配置パターンと強い関係があることがわかった。4 面開放系の場合、周辺から間隙への液体供給が容易なため、クロス配置に対する伝熱促進効果が大きかった。2 面開放方式の場合には、材料配置形態の影響は少ない。図 12 に、2 面開放系における CHF の促進割合を示す。h と P の変化にともなうクロス配置と平行配置の CHF の促進率は、それぞれ 75~25% と 57~10% であった。h=0.54mm, P=1.0mm の下で、946kW/m² の最大 CHF と 74% の促進率が得られた。

研究成果まとめ

以上、はじめに、異形態相関沸騰用の伝熱板および伝熱ブロックを用いる狭隘空間沸騰実験装置を製作し、異形態相関沸騰用における基本パラメータの影響を検討した。その結果、低コンダクタンスおよび高コンダクタンス材料の幅および狭隘間隙間隔の影響を実験的に明らかにするとともに、提案した異形態相関沸騰現象の有効性を示した。さらに、狭隘間隙への液体供給に大きく影響する伝熱板寸法の影響を検討した。矩形辺長が 10 mm-40 mm の伝熱板寸法を用いて、核沸騰の全過熱度領域にわたる沸騰曲線を、材料幅と狭隘間隙寸法をパラメータとして測定した。伝熱面寸法の増大にともなう熱伝達の低下する傾向は通常の狭隘間隙における沸騰現象と類似であったが、異形態相関沸騰における材料幅と狭隘間隙寸法の影響は伝熱面寸法により顕著に変化することを示した。さらに、異形態相関沸騰メカニズムを維持しながら、伝熱特性のさらなる改善を検討した。さまざまな材料境界の密度を高めるために、クロスタイプの形状を持つ低コンダクタンス材料の新しい配置を採用した。また、間隙サイズと材料ピッチをパラメータとし、それらの最適値などが検討された。また、間隙周囲のバルク液への開放状況を決める、2 面と 4 面の周囲の液体に対する狭いギャップの開いた形状での性能を調査した。CHF の大幅な促進は、異なる材質境界密度の増大する、クロスタイプの配置での場合に実現され、また 4 面開放と 2 面開放システムで、それぞれ大幅な CHF および HTC の増加が達成された。今後、狭隘空間系から、より一般性の高いプール沸騰系に異形態相関沸騰を適用し、異形態相関沸騰が限界熱流束および熱伝達率の促進への有効性を検討する。

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 3件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Xie, T., Utaka, Y., Chen, Z. and Mori, S.	4. 巻 143
2. 論文標題 Effect of heating surface size on critical heat flux in different-mode-interacting boiling inside narrow gaps for water	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 118543 pp.1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118543	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 該当する

1. 著者名 Utaka, Y., Xie, T., Chen, Z., Morokuma, T., Ohkubo, H.	4. 巻 133
2. 論文標題 Critical heat flux enhancement in narrow gaps via different-mode-interacting boiling with nonuniform thermal conductance inside heat transfer plate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 702-711
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.123	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 該当する

1. 著者名 Tianxi Xie, Yoshio Utaka, Zhihao Chen, Toshiki Hirotsu, Shoji Mori	4. 巻 191
2. 論文標題 Effect of material arrangement pattern on different-mode-interacting boiling in narrow gaps with two liquid supply systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 116893, 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.applthermaleng.2021.116893	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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 謝添璽, 陳志豪, 宇高義郎
2. 発表標題 狭隘空間の異形態相関沸騰における 水の限界熱流束への伝熱面寸法の影響
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宇高義郎、謝添璽、陳志豪、諸隈 崇幸、大久保 英敏
2. 発表標題 伝熱面温度分布付与による狭隘間隙における沸騰限界熱流束の促進
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 XIE Tianxi, 陳 志豪, 宇高 義郎, 廣谷俊樹, 大久保英敏
2. 発表標題 水のプール沸騰における異形態相関沸騰を利用する限界熱流束の向上
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020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
研究 分担者	大久保 英敏 (OHKUBO Hidetoshi) (80152081)	玉川大学・工学部・教授 (32639)	
研究 分担者	諸隈 崇幸 (MOROKUMA Takayuki) (00756059)	横浜国立大学・大学院工学研究院・助教 (12701)	

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			
中国	Tianjin University			