

令和 6 年 5 月 2 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03895

研究課題名（和文）伝熱面の濡れ進展速度とプール沸騰CHFの関係解明

研究課題名（英文）Clarificaion of the relation between wetting front propagation velocity and pool boiling CHF

研究代表者

小泉 安郎 (Koizumi, Yasuo)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・研究支援推進員

研究者番号：20215156

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：伝熱面の濡れ進展速度とプール沸騰CHFの関係解明を目的として、水を試験流体とするプール沸騰実験を実施した。銅薄膜を伝熱面とし、表面性状の影響を調べるため、表面研磨した面と酸化被膜形成面の二種類を準備した。実験の結果、濡れ進展速度は、研磨面で0.10m/s、酸化面で0.12m/sであり、酸化被膜の形成により濡れ進展速度は有意に変化することがわかった。これより、酸化面ではCHFが向上すると予想されたが、CHFの計測値は研磨面に対して806kW/m<sup>2</sup>、酸化面に対して791kW/m<sup>2</sup>であった。このため、濡れ進展速度とCHFをより大きく変化させた上で、両者の関係を検討することが今後重要と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プール沸騰の限界熱流束(CHF)は、高発熱電子機器の冷却やエネルギー関連プラントの安全確保で工業的にきわめて重要な技術である。近年、加熱壁の表面に微細加工を施したり被膜を形成したりすると、CHFが有意に変化することが報告されているが、CHFに変化を生じるメカニズムは十分に明らかにされていない。本研究では、CHF変化の直接的な原因となりうる濡れ進展速度の実験計測に成功するとともに、これが酸化被膜の形成により有意に変化することを示した。したがって、本研究の成果は、プール沸騰CHF向上効果のメカニズム解明、及び高CHF伝熱面開発の効率化に寄与するものと言える。

研究成果の概要（英文）：Pool boiling experiments were conducted using water as the test fluid to elucidate the relationship between the wetting propagation speed of the heat transfer surface and pool boiling CHF. Two types of surfaces were prepared to investigate the effect of surface properties: polished surface and oxide surface. The experimental results showed that the wetting propagation speed was 0.10 m/s for the polished surface and 0.12 m/s for the oxidized surface, indicating that the formation of the oxide film significantly changed the wetting propagation speed noticeably. From this, it was expected that CHF would improve on the oxidized surface, but the measured CHF was 806 kW/m<sup>2</sup> for the polished surface and 791 kW/m<sup>2</sup> for the oxidized surface. Therefore, it will be important in the future to study the relationship between wetting growth rate and CHF with more significant changes in both the parameters.

研究分野：熱工学

キーワード：プール沸騰 限界熱流束 CHF 濡れ進展速度

### 1. 研究開始当初の背景

核沸騰は、 $100\text{kW/m}^2\cdot\text{K}$  にも及ぶ高い熱伝達率を示す超高効率の冷却機構である。このため、高性能 CPU を始めとする高発熱電子機器の冷却や原子炉の事故時緊急冷却に利用される。ただし、熱流束が限界値 (CHF) を超過すると、沸騰様式が膜沸騰に移行して熱伝達率が急低下し、発熱体温度の急上昇を引き起こす。このため、CHF の向上を主目的として、様々な表面加工を施した高性能伝熱面の開発が行われている。これらの伝熱面で CHF が向上するメカニズムについても検討がなされており、特に興味深い結果として、伝熱面の濡れ性と吸水性の向上に伴って CHF が上昇する傾向のあることが報告されている。また、水のプール沸騰で CHF に至る瞬間における伝熱面温度分布の時間変化を、赤外線 (IR) カメラを用いて観察することで、CHF に至るメカニズムをより直接的に検討する試みも行われている。本観察の結果によれば、発泡核での気泡生成に伴って小さな高温部が現れ、これが拡大・縮小を数回繰り返した後、拡大の一途となり、CHF に至ることが示されている。本観察結果より、CHF に至るときに想定される気液界面構造を図 1 に示す。伝熱面からの入熱によって蒸気泡が生成され、その底部に乾き域が形成される。この後、乾き域外縁の固気液三相界線が内向きに移動して、乾き域が消滅すれば、伝熱面温度は飽和温度近くに維持される。一方、乾き域が際限なく拡大すると、冷却が長期間途絶えるために伝熱面温度は上昇し、CHF に至ると考えられる。

伝熱面からの熱流束により気泡は成長するから、熱流束は固気液三相界線を外側に押し広げようとする効果を有する。一方、気泡の伝熱面離脱や伝熱面の濡れ性・吸水性は、三相界線を内側に引き戻そうとする効果を有すると考えられる。濡れ性や吸水性に優れた伝熱面では CHF が向上する傾向があるが、これは、より直接的に見れば、濡れ性・吸水性に優れた伝熱面は図 1 に示す三相界線を内側に引き戻す力が強いいため、より高い熱流束まで、際限のない乾き域の拡大を防ぐことができるからだと解釈できる。

上記の考察より、伝熱面が三相界線を内側に引き戻す力を定量化できれば、これを CHF と比較することで、伝熱面の表面性状により CHF が大きく異なる原因を解明でき、さらに、より高い CHF を実現する高性能伝熱面の開発指針を示すことができると考えられる。

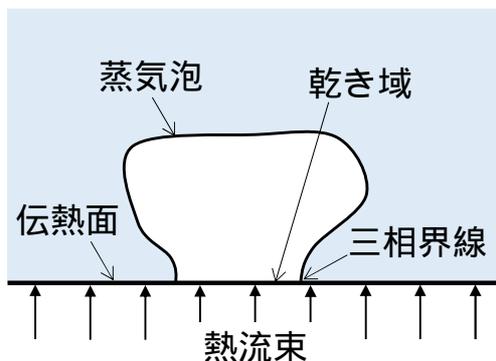


図 1 プール沸騰中で CHF を生じるときに想定される気液界面構造

### 2. 研究の目的

伝熱面の濡れ進展速度とプール沸騰 CHF の関係解明を目的として、水を試験流体とする大気圧下プール沸騰実験を実施する。

### 3. 研究の方法

図 2 に示すように、濡れ進展速度を計測するため、試験流体で満たしたポリカーボネート製の円筒容器の底部に厚さ 50 ミクロンの銅薄膜を配置し、これを直径 18mm のレーザーで加熱することで伝熱面とした。容器内に配置したシースヒーターにより液温を飽和温度に保つとともに、円筒容器の頂部に凝縮器を設置して、容器内における液量の減少を防いだ。また、CHF の検知、及び大気泡の底部に形成される高温の乾き域の拡大・収縮速度に関する実験データを収集するため、伝熱面温度分布の時間変化を高速度の赤外線カメラを用いて計測した。伝熱面の表面性状の影響を調べるため、表面研磨を行った銅薄膜と電気炉を用いて空気中で 200 の高温状態を 2 時間保持して酸化被膜を形成した銅薄膜の二種類を用いて実験を実施した。酸化被膜の形成により、伝熱面の接触角は  $90^\circ$  から  $34^\circ$  に低下した。

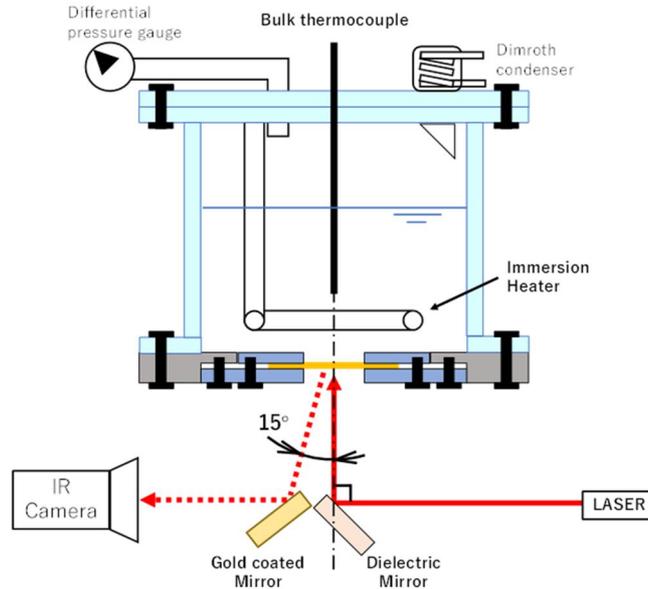


図2 プール沸騰実験装置の概要

#### 4. 研究成果

図3に示すように、熱流束がCHFの90%程度になると、大気泡の直下に明確な高温領域が形成され、高温域の面積は気泡の成長とともに拡大し、気泡の離脱とともに収縮した。そして、図4に示すように、レーザーによる投入熱流束がCHFに至ると、高温域は際限なく拡大して伝熱面の温度もきわめて高温に達した。気泡離脱により高温域が収縮するときの三相界線の移動速度を濡れ進展速度、高温域が際限のない拡大を開始するときの熱流束をCHFと定義した。実験の結果、図5に示すように、濡れ進展速度は熱流束に大きくは依存せず、研磨面では0.10m/s程度、酸化面では0.12m/s程度であり、酸化膜の形成により濡れ進展速度は有意に変化することがわかった。これより、酸化面ではCHFが向上すると予想されたが、CHFの計測値は研磨面に対して806kW/m<sup>2</sup>、酸化面に対して791kW/m<sup>2</sup>であり、ほぼ同等であった。このため、例えば伝熱面上にナノ粒子層を形成するなどして、濡れ進展速度とCHFをより大きく変化させた上で、両者の関係を検討することが今後重要と考えられることを示した。

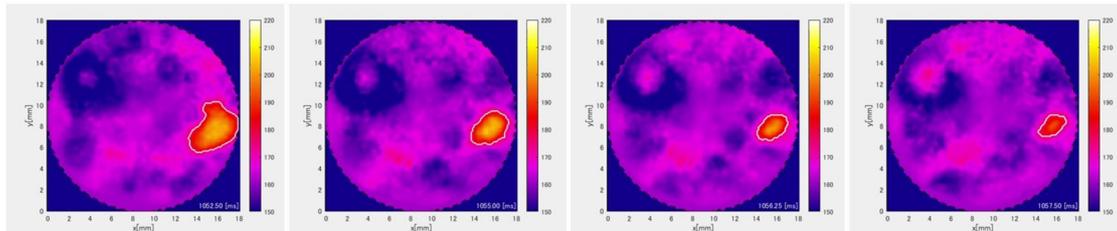


図3 気泡離脱に伴う高温域の収縮の様子（酸化面、熱流束 731kW/m<sup>2</sup>）

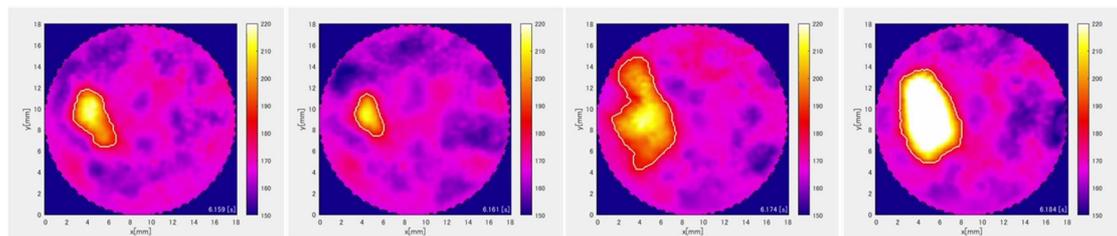
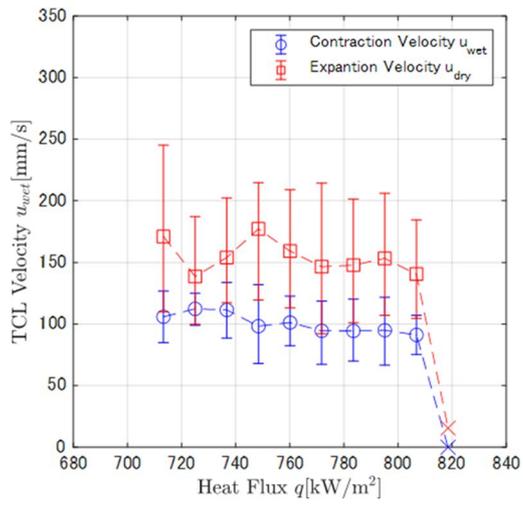
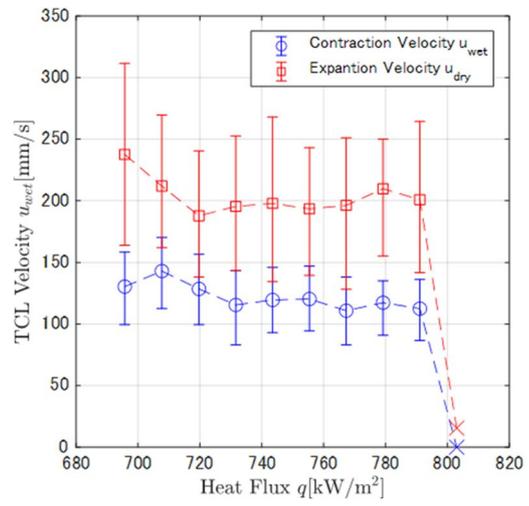


図4 CHF超過時に高温域が際限なく拡大する様子（酸化面、熱流束 803kW/m<sup>2</sup>）



(a) 研磨面



(b) 酸化被膜形成面

図5 高温域の拡大時と収縮時における三相界線(TCL)の移動速度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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	大川 富雄  (Okawa Tomio)  (20314362)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授    (12612)	

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