

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06216

研究課題名(和文) 塩析出を伴う海水流動沸騰熱伝達と限界熱流束に関する研究

研究課題名(英文) Study on Flow Boiling Heat Transfer and Critical Heat flux of Seawater with Deposited Sea Salt

研究代表者

小泉 安郎 (Koizumi, Yasuo)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・囑託

研究者番号：20215156

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：海水の流動沸騰熱伝達と限界熱流束を調べた。プール沸騰熱伝達の場合と同様に加熱量の上昇に伴い伝熱面上に海水中硫酸カルシウム塩の析出が発生し、加熱量一定下伝熱面温度は経時的に上昇を開始した。この伝熱面温度上昇開始熱流束は通常水の限界熱流束よりかなり低い値であった。経時的伝熱面温度上昇過程で伝熱面温度変動があった。この伝熱面温度変動は析出塩層の局所的剥離と再形成の繰り返しによるものであることを明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火力ボイラの安全性に関し、ボイラ水中の鉱物質のボイラ蒸発管内面に鉱物質析出に関する流動沸騰熱伝達、限界熱流束に関する研究は為されていたが、海水のように塩析出を伴う場合の研究は為されてきていない。2011年東日本大震災津波発生後の福島第一原子力発電所事故時、炉心冷却水供給源を失い、海水が代替冷却水として注水されたが、これまで経験、研究例が無く全く有効性に関し不明な状況であった。本研究結果は、海水による冷却に関する有効性、注意点の基礎情報を提供するものである。

研究成果の概要(英文)： The flow boiling heat transfer and the critical heat flux were examined for seawater. The deposition of the sea salt of calcium sulfate on the heat transfer surface was initiated as in the pool boiling. When the deposition occurred, the heat transfer surface temperature started to rise up continuously with time under the same heating rate. The heat flux at the initiation of the heat transfer surface temperature rising-up was lower than the critical heat flux for usual water. Heat transfer surface temperature fluctuation was observed in the course of the continuous surface temperature rising-up. It was confirmed that the fluctuation was caused by locally continued abrasion and re-formation of the deposited layer of calcium sulfate on the heat transfer surface.

研究分野：機械工学、熱工学、伝熱工学、流動、沸騰、気液二相流、ボイラ、タービン、原子力安全性

キーワード：流動沸騰 核沸騰熱伝達 限界熱流束 海水 海水塩 析出 原子力安全性 炉心伝熱流動

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震によって引き起こされた津波の襲来により、福島第一原子力発電所の原子炉で炉心溶融に至る事故が発生した。このとき、炉心冷却水源が失われ、海水が代替冷却水として原子炉に注水された。それまで原子炉への海水注水は経験が無く、また、海水の沸騰熱伝達も研究例は為されてきていなかった。海水中には多くの塩類が含まれており、それらが沸騰熱伝達へ影響を持つことは十分に想定される。火力ボイラでのボイラ水中の鉱物質の伝熱管内面への析出に関する研究が見られるのみであった。海水の沸騰熱伝達についての研究が求められていた。

このような背景から、本課題研究者達は第一段階として、海水のプール沸騰熱伝達の研究を行った。本研究課題はそれに続く第二段階、海水のプール沸騰熱伝達から流動沸騰熱伝達への拡張であった。

2. 研究の目的

これまでに本課題研究者達は、ナノ粒子を水に懸濁させたナノ流体、また、海水を対象とし、伝熱面に析出物を伴う場合のプール沸騰熱伝達を調べてきた。¹ ナノ流体及び低濃度海水では、核沸騰熱伝達、並びに限界熱流束は純水の場合と同様の傾向を示し、流体物性値の差を考慮すれば従来相関式を適用することが出来た。しかしながら、海水の場合、濃度が上がると伝熱面上に硫酸カルシウムの析出が低熱流束で生じ、析出が開始すると定加熱量であっても析出層の厚さが経時的に増大し、それに伴い伝熱面温度は緩やかな上昇を開始し、上昇を継続して、遂には伝熱面は溶断する伝熱面温度逸走が起きることを明らかとしてきた。本研究課題では、プール沸騰から流動沸騰状態に変え、海水の沸騰熱伝達と限界熱流束を調べる。

3. 研究の方法

実験装置の概要を図1に示す。試験流体には人工海水を用いる。海水濃度は試験毎に変えることが出来る。温度60°Cに維持されたタンクから試験流体はポンプにより送り出され、流量計を経て、予熱部で飽和温度近く迄昇温され、テスト部に至る。テスト部を出た試験流体はタンクへ戻る。

テスト部は水平に設置される。テスト流路は巾10 mm×高さ1 mmの矩形流路で、全長は316 mmである。流路上面には透明ポリカーボネイト板、流路底面にはベークライトを用いた。流路底面ベークライト板にはテスト伝熱部取り付け穴がくり抜かれている。

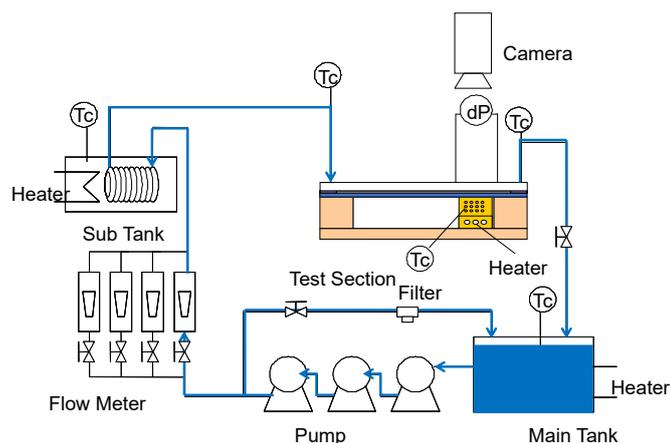


図1 実験装置概要

厚さ 1 mm のステンレス板に流路になる巾 10 mm、長さ 316 mm のスリットを設け、このステンレス板を上面のポリカーボネイト板と底面のベークライト板で挟み込み、ボルトナットで締結してテスト流路を形成した。銅製テスト伝熱部は流路底面ベークライト板に開けられた穴に差し込まれ、伝熱面が流路底面と同一面となるように固定される。伝熱面加熱開始点は流路入り口から 221 mm の位置にある。テスト伝熱面は巾 10 mm×長さ 60 mm である。テスト伝熱部は下部に取り付けられた 3 本の電気ヒーターで加熱される。テスト伝熱部には流れ方向 4 カ所、縦方向それぞれ 3 カ所に熱電対が取り付けられている。熱電対の温度読値から外挿して伝熱面温度を、またフーリエ則から伝熱面加熱熱流束を求めた。透明流路上壁面を通して高速度カメラで伝熱面上流動状態を撮影した。また、同様にレーザー間隙計を用いて伝熱面上塩析出層厚さ測定を行った。

実験は、定流量下、加熱熱量を段階的に上昇させて行った。各段で充分定常状態を確認後測定を行い、伝熱面温度の大幅な上昇をもって実験は終了させた。

4. 研究成果

図 2 に海水プール沸騰の沸騰曲線を示す。海水濃度が 3.5 % 以下の場合、純水の場合に比べて高過熱度側にデータ一点は動いているが、全体的傾向、また最終点である限界熱流束に純水の場合に比べて大きな違いは見られない。海水濃度増に伴い高過熱度側に移るのは流体物性の変化による。一方、海水濃度が 7.0 % 以上では、加熱量がある値になると、加熱量一定であるにも拘わらず伝熱面の連続的上昇が生じた。図で染められていない点はその状況を表している。測定は 20 分間隔で為された。なお、この実験では伝熱面は直接通電で加熱されており、加熱は定電流で為されているため、伝熱面温度上昇に伴い伝熱面電気抵抗が伝熱面温度上昇に伴い大きくな

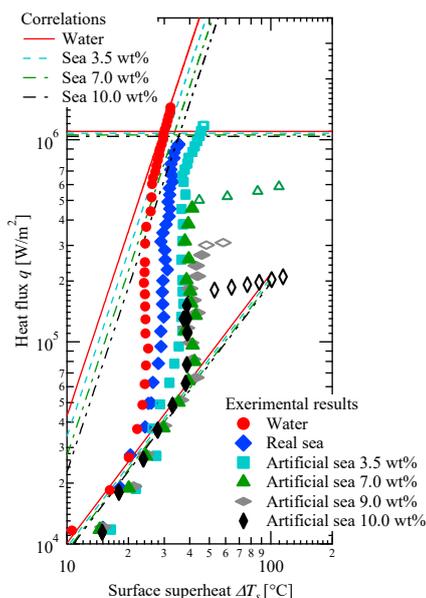


図 2 海水プール沸騰の沸騰曲線

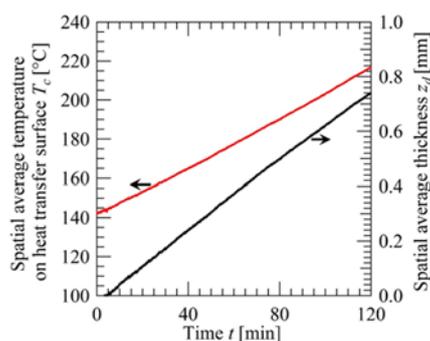


図 3 析出層厚さの時間変化

り熱流束は若干上昇していつている。伝熱面温度が 200°C を超えたところで実験は打ち切られている。実験後、伝熱面上には白い析出物層が形成されていた。成分分析から、硫酸カルシウムであった。

析出層表面温度を析出が開始したときの伝熱面温度に等しいと仮定し、硫酸カルシウ

μの熱伝導率と加熱熱流束から析出物層厚さを推測した。その結果を図3に示す。析出層厚さが時間と共に厚くなる状況が明確に表れている。このことは、加熱を続ければいずれ伝熱面は熔融焼損に至ることを示しており、塩析出開始による伝熱面温度上昇開始は装置安全上大切な現象であり、限界熱流束的な意味合いを含んでいる。この現象を伝熱面温度逸走と呼ぶことにした。

伝熱面温度逸走開始熱流束は図4に示すように海水の高濃度化に伴い減少する。熱流束ゼロ時の伝熱面温度逸走開始海水塩濃度を外挿して求めると、11 wt%であり、このときの海水中硫酸カルシウム濃度は飽和硫酸カルシウム濃度に等しいことは注目に値する。

流動沸騰の場合の沸騰曲線を図5に示す。プール沸騰の場合と同傾向にある。海水濃度増に伴い沸騰曲線は高過熱度側に移り、海水濃度7.0%以上で、伝熱面温度逸走開始現象が起きている。

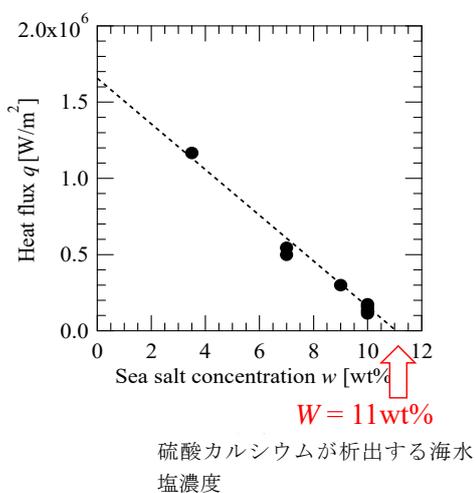


図4 伝熱面温度逸走開始熱流束

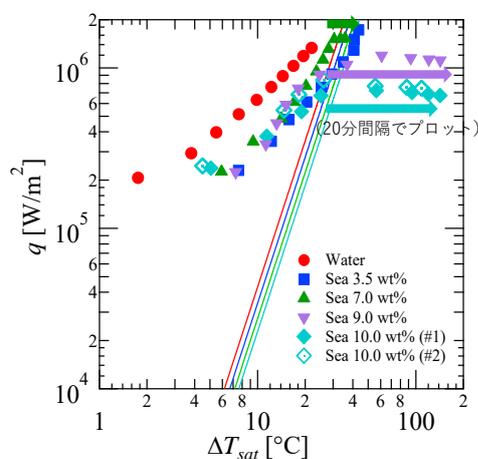


図5 流動沸騰の沸騰曲線

図6の海水流動沸騰情況撮影画像に示すように、海水流動沸騰では海水濃度上昇に伴い、伝熱面からの離脱気泡は微細化している。気泡微細化により伝熱面近傍の流体攪拌が弱まり対流熱伝達が低下することも、海水濃度上昇に伴う伝熱面過熱度の高温化の一因となっているものと考えられるが今後の検討を要する。

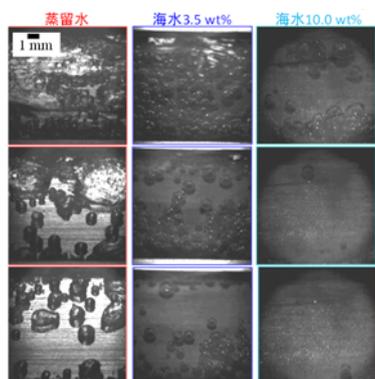


図6 海水流動沸騰情況

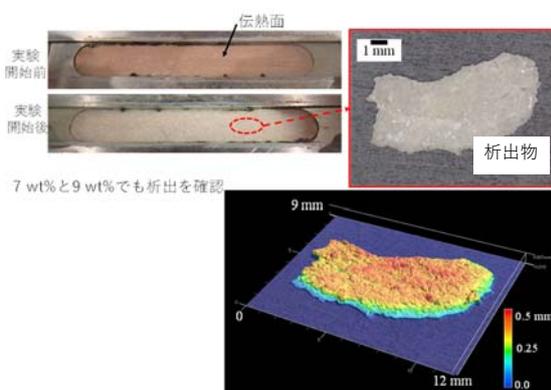


図7 伝熱面上析出物

図7は実験終了後撮影した伝熱面上析出物画像である。析出物が明瞭に確認されている。

プール沸騰の場合同様、伝熱面温度の時間変化から求めた伝熱面温度逸走開始後の生成析出物層厚さの推測値を図8に示す。図中丸点は実験終了後光学顕微鏡で測定した析出物層厚さで、推測値と良く一致している。

図9に、流動沸騰熱伝達での伝熱面温度逸走開始熱流束と海水濃度の関係を、プール沸騰の場合を含めて示す。プール沸騰の場合同様伝熱面温度逸走開始熱流束は海水濃度増加に伴い減少している。プール沸騰の場合同様に予測される流動沸騰の場合の伝熱面温度逸走開始熱流束ゼロの海水濃度はプール沸騰の場合同様 11 wt%であり、そのときの海水中硫酸カルシウム濃度は硫酸カルシウム飽和濃度に相当する濃度になっていることは注目に値する。

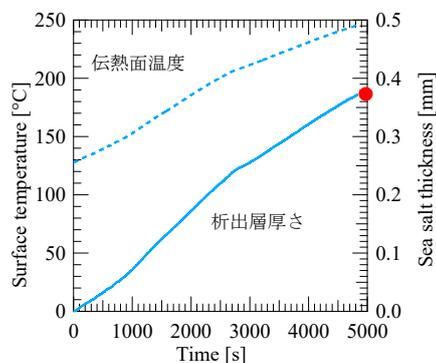


図8 伝熱面上析出物厚さ

実験中、伝熱面温度変動が観察される場合があった。そのときの伝熱面温度から推測される塩析出層厚さ、並びにレーザー変位計による析出層厚さ計測値を図10に示す。明確な結論を得るまでには至っていないが、析出層が局部的に剥離し再形成を繰り返している様相が推測される。このことは現実状況を考える際重要で有り、更なる検討が求められる。

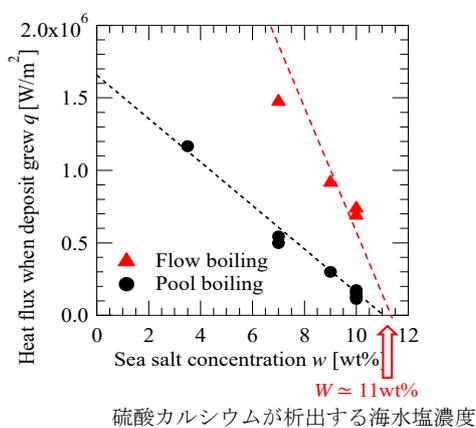


図9 流動沸騰時伝熱面温度逸走開始熱流束

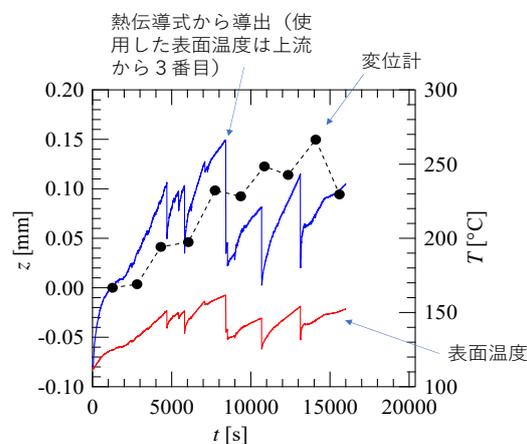


図10 伝熱面温度変動

<引用文献>

① S. Uesawa, Y. Koizumi, M. Shibata, H. Yoshida, Saturated Pool Nucleate Boiling on Heat Transfer Surface with Deposited Sea Salts, ASME J. of Nuclear Rad. Sci. Vol.3(4), 041002-1-041002-13 (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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 上澤 伸一郎、小野 綾子、小泉 安郎、柴田 光彦、吉田 啓之
2. 発表標題 沸騰伝熱面での海水塩析出に対する流動の影響
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム（国内学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小泉 安郎、上澤 伸一郎、小野 綾子、柴田 光彦、吉田 啓之
2. 発表標題 塩析出を伴う海水流動沸騰熱伝達：析出物の役割
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンフェレンス2019（国内学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上澤 伸一郎、劉 維、小野 綾子、小泉 安郎、柴田 光彦、吉田 啓之
2. 発表標題 沸騰伝熱面での海水塩析出に対する流動の影響：第2報
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム（国内学会）
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	劉 維 (Liu Wei) (70446417)	九州大学・工学研究院・准教授 (17102)	

6. 研究組織（つづき）

	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	上澤 伸一郎 (Uesawa Shinichiro) (80737073)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研 究職 (82110)	