

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01380

研究課題名（和文）自己組織化Hybridナノ堆積層と八二カム多孔体の連成による新規高効率沸騰の物理

研究課題名（英文）CHF enhancement by coupling self-assembled Hybrid nanodeposited layer and honeycomb porous body

研究代表者

森 昌司（Mori, Shoji）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：10377088

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：電子機器の高発熱密度化、原子炉事故時の緊急冷却などに対応して、超高熱流束除熱を受動的に実現する冷却技術が切望されている。沸騰冷却の限界は、限界熱流束と呼ばれ、これを超えて熱負荷を増やすと熱機器は破損する。以上の背景下、これまでの研究でナノ流体と八二カム多孔質体の連成により大幅に限界熱流束が向上する結果を得たので、そのメカニズムについて実験的に検討を行った。その結果、八二カム多孔質体による向上効果に加え、ナノ粒子層によって多孔質体からセルへ液を供給したことによるもの、dry spotの大きさ減少、wickability向上などによることなどが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

冷却の限界が、伝熱面の静的なぬれ性でなく、動的なぬれ性にも強く依存することが、八二カム多孔質体においても明らかにされたことは、今後さらなる冷却性能を向上させる重要な指針になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In the previous studies, we obtained the result that the critical heat flux was significantly improved by the coupling of the nanofluid and the honeycomb porous body, so the mechanism was experimentally investigated. As a result, in addition to the improvement effect of the honeycomb porous body, it was clarified that the liquid was supplied from the porous body to the cell by the nanoparticle layer, the size of the dry spot was reduced by the nanoparticle layer, and the wickability was improved.

研究分野：熱流体工学

キーワード：沸騰 限界熱流束 相変化

## 1. 研究開始当初の背景

現在、福島第一原子力発電所事故を契機に原子力発電所の安全向上のための炉心溶融デブリ炉内保持 (Inner Vessel Retention, 以下 IVR と略記) 技術の実現が求められている。IVR とは苛酷事故時に溶融燃料を原子炉容器下部プレナムに貯留し、原子炉容器を水没させ崩壊熱除去が長期的に可能とするシステムである。電気出力 170 万 kW の PWR でシビアアクシデント時における原子炉容器の外表面熱流束の解析結果[2]によると、その表面熱流束は最大で  $1.6 \text{ MW/m}^2$  にも達している。よって通常の水の飽和プール沸騰の CHF が  $1.0 \text{ MW/m}^2$  程度であることを考慮すれば、IVR の実現には CHF を大きく向上させる技術の開発が必須である。著者ら<sup>(1)</sup>はこれまでにハニカム多孔質体(HPP)を用いることで CHF を裸面の場合の約 2 倍( $2 \text{ MW/m}^2$ )に向上することを示した。この要因として、毛管力による伝熱面への液供給、蒸気排出孔に直接流入する液供給、蒸気排出孔からの蒸気排出効果が考えられるが、CHF に至る際の dry out の挙動はまだわかっていない。

## 2. 研究の目的

そこで、本研究では赤外線カメラを用いた伝熱面の温度分布の把握や全反射方を利用した dry out 挙動の把握を行い、局所で発生しているメカニズムを明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

### 3.1 高速度 IR カメラによる温度分布の測定

Figure1 に実験装置概略図を示す。加熱体をテフロン製のフランジにのせ、シリコンシートとステンレスの部品によって抑え、シールした。また導線をはんだ付けした厚さ  $30 \mu\text{m}$  の銅薄膜と加熱体の電極を機械的に接触させ電圧を印加した。加熱には高周波交流電源を(計測技術研究所製 EAB-120)用いている。内径 87 mm のホウケイ酸ガラス製管を両端よりフランジによって固定しプール容器とした。作動流体は予備ヒーターによって飽和温度に保たれている。プール容器上部には凝縮器を取り付け、沸騰によってプール内の液量が変わらないようにしている。金ミラー(駿河精機製 S03-25-1/10)を介して赤外線カメラ (FLIR 製 A6700sc) で ITO 膜底部の温度を測定している。参照板には黒体スプレー( $\epsilon = 0.94$ )を塗った銅を用い、温度校正をした熱電対を用いて温度を測定できるようにしてある。同図中に HPP の装着方法を示す。HPP はステンレスの板とシリコンシートを組み合わせた部品で押さえつけ固定した。

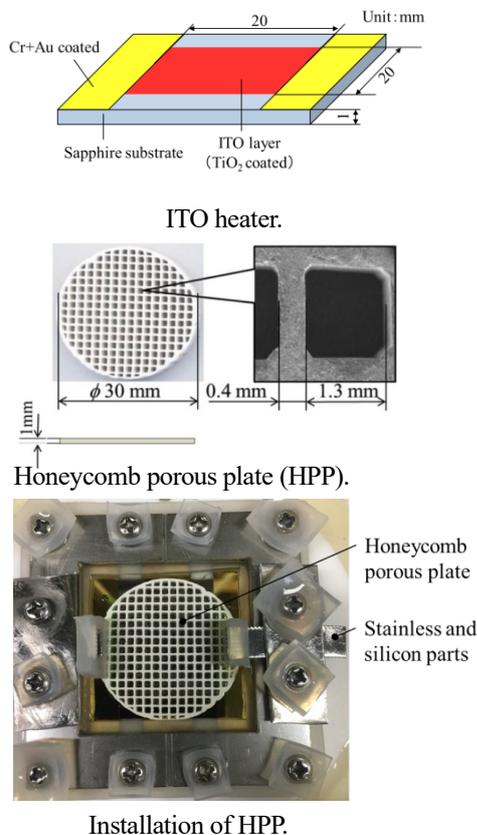
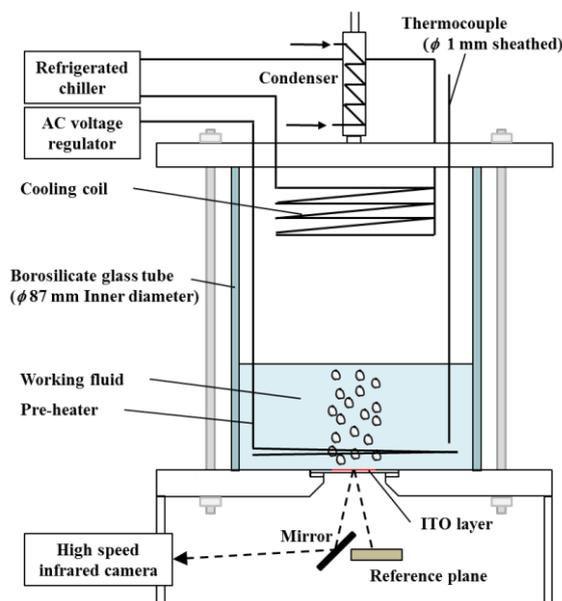


Figure 1 Schematic diagrams of experimental apparatus using infrared camera.

サファイア基板(40 mm×40 mm, 厚さ 1mm)に電極として両端に Cr(30 nm)と Au(200 nm)が, 伝熱面として中央 20 mm×20mm に Indium-Tin Oxide Films : ITO (250 nm), TiO<sub>2</sub>(100 nm)が蒸着されている. ITO 膜は可視光に対して透明で 3~5 μm の赤外線に対しては不透明な導電膜である. またサファイアは可視光, 3~5 μm の赤外線に対してともに透明である. よって ITO 膜底部の温度を測定することができる. HPP の成分は CaO・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:30~50wt%, FusedSiO<sub>2</sub>: 40~60wt%, TiO<sub>2</sub>: 5~20wt%で, 有効熱伝導率は 4 W/(m・K)である. 平均細孔半径 0.0372μm, 空隙率 24.8%, 壁厚 0.4mm, セル穴 1.3mm, 厚さ 1mm である.

作動流体には蒸留水を用いた. 予備ヒーターで作動流体を 30 分間沸騰させ, 脱気を行った後に実験を開始した. システム圧は大気圧, 作動流体の温度は飽和温度である. 実験は ITO 膜を交流(1 kHz)で通電加熱して沸騰させ, 電圧を上げてから 5 分経過後, 平均温度が変化しなくなった時点で定常状態とみなし, 赤外線カメラ(検出波長 3~5 μm)で温度分布を測定し, 再び電圧を上げることをバーンアウトが起こるまで繰り返した. バーンアウトが生じた際の熱流束を  $q_{\text{burnout}}$ , バーンアウト直前の定常状態を保った熱流束を  $q_{\text{CHF}}$ とした. ここで沸騰面はコーティング面で, 測定温度は ITO 膜底部の温度である. 熱流束は高周波交流電源装置から得られる電圧値と電流値及び伝熱面積 20 mm×20 mm より求めた. 赤外線カメラの frame rate は 480 fps, 解像度は 160×128 pixels, 空間分解能は約 130 μm であり, 本実験では温度測定の上限值は 250°C または 330°C である. この方法による熱流束の測定誤差は約 6%以内であることが予備実験により明らかとなっている.

## 4. 研究成果

### 4.1 沸騰曲線

Figure3 に沸騰曲線を示す. 過熱度  $\Delta T_{\text{sat}}$  に伝熱面平均温度の瞬時値を用いた場合, 合体気泡による一時的な温度の急上昇が過熱度  $\Delta T_{\text{sat}}$  に大きな影響を与えてしまう. よってその影響を少なくするために過熱度  $\Delta T_{\text{sat}}$  は伝熱面平均温度の約 10 秒の時間平均から算出した. 図中の数字は CHF の値であり, HPP を装着することで CHF が向上する.

### 4.2 核沸騰領域における伝熱面温度分布

核沸騰域における結果を示す. Figure4 に裸面で作動流体に蒸留水を用いた場合の 0.13~1.12 MW/m<sup>2</sup> の IR 画像, Figure5 に伝熱面に HPP を装着した場合の 0.13~1.88 MW/m<sup>2</sup> の IR 画像を示す. Figure5 からわかる主な特徴として, HPP 設置場所によって温度が異なり, 熱伝達率が異なっている.

### 4.3 CHF 近傍における伝熱面温度分布

Figure6 に裸面(PS)における  $q_{\text{burnout}}$  時の IR 画像および伝熱面における局所温度の経時変化のグラフを示す. Figure 11 に示すように PS の場合, 合体気泡が離脱しても温度が高いままの領域である irreversible dry spot が生じたことでバーンアウトに至ったと考えられる.

Figure 7 に伝熱面に HPP を設置した場合の  $q_{\text{burnout}}$  時の IR 画像を示す. Figure 8 にセル(cell), 多孔質交差部 (intersection of a porous media), 多孔質交差部の間 (part between two intersections) の場所 (正方形の 9 pixels (約 400 μm×400 μm) の範囲) を任意に選び, 各場所の温度を平均値にして経時変化にしたものを示す. Figure 7 から  $q_{\text{burnout}}$  で温度が急上昇する前において, 温度が高い方から順にセル, 多孔質交差部の間, 多孔質交差部であり, つまり熱伝達率は高い方から順に多孔質交差部, 多孔質交差部の間, セルである. また約 6000 ms 以前では伝熱面条件 PS で  $q_{\text{burnout}}$  前ほどの急激

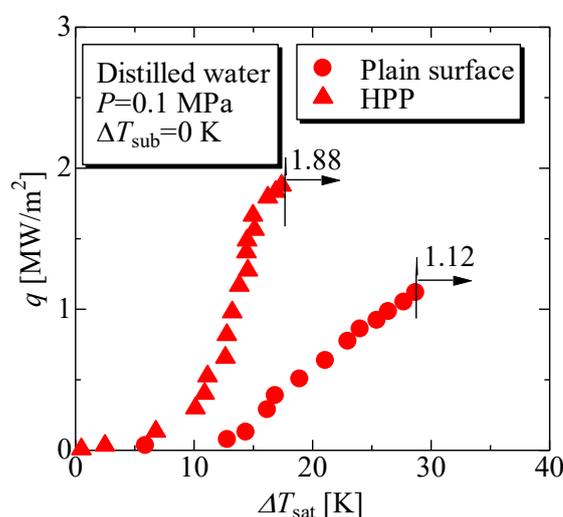


Figure 3 Boiling curve obtained by IR thermometry experiments.

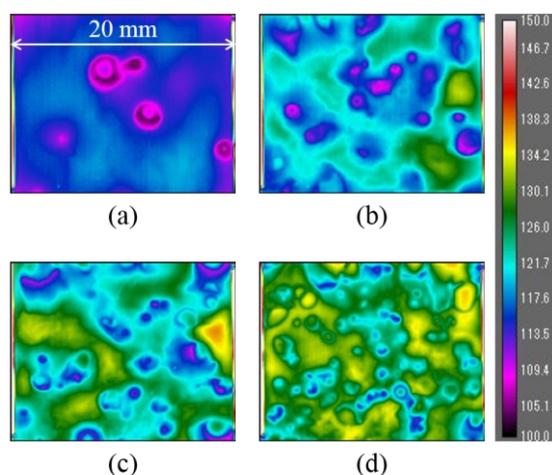


Figure 4 IR images for the case of PS with distilled water at heat flux of (a) 0.13, (b) 0.51, (c) 0.77, and (d) 1.12 MW/m<sup>2</sup>.

な温度上昇 (30 K 程度) は観察されなかった。しかしセルにおいて約 7 K 程度の温度変動が観察されており、その間隔は 75~123 ms であった。通常の合体気泡の離脱周期が 100 ms 前後である[52]ことを考えると、合体気泡の影響によって温度変動をしていると考えられる。約 6400 ms で多孔質交差部の間、多孔質交差部、セルはほぼ同時に温度が急上昇した。

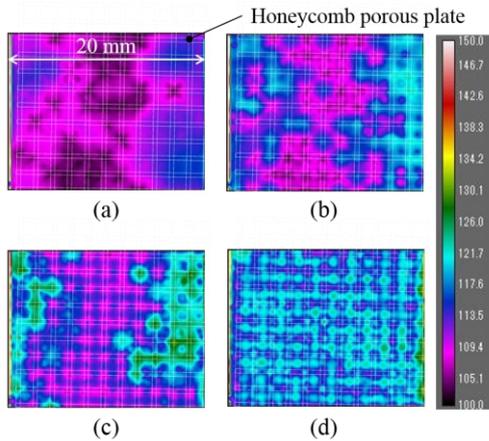


Figure 5 IR images for the case of HPP with distilled water at heat flux of (a) 0.13, (b) 0.53, (c) 1.17, and (d) 1.88 MW/m<sup>2</sup>.

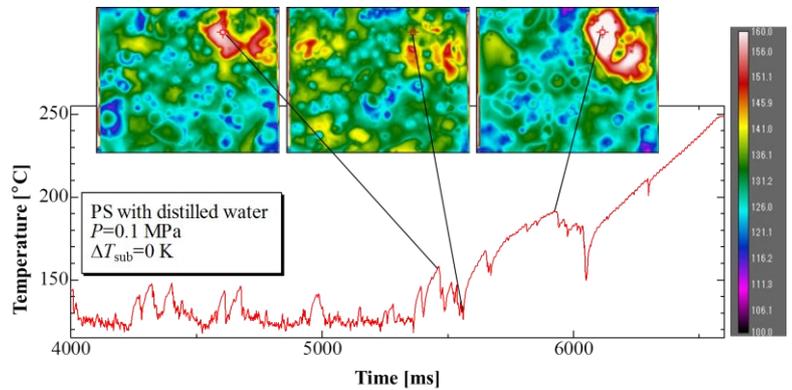


Figure 6 Time series of local temperature for the case of PS with distilled water at 1.19 MW/m<sup>2</sup> (under burnout condition).

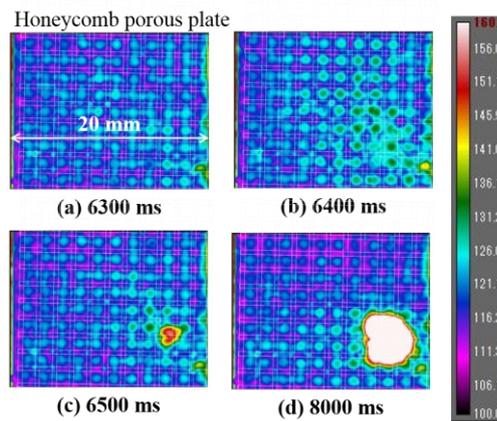


Figure 7 IR images for the case of HPP with distilled water at 1.92 MW/m<sup>2</sup> (under burnout condition).

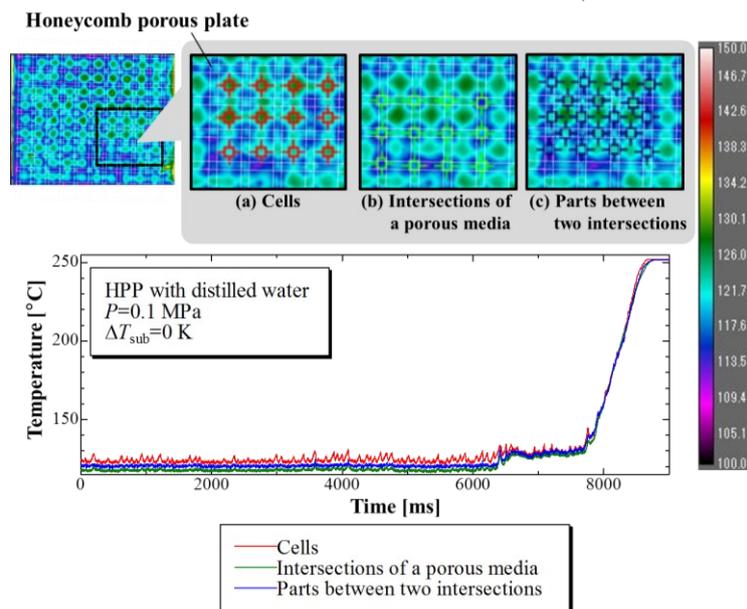


Figure 8 Time change of local average temperature at each location (a) cells, (b) intersections of a porous media, and (c) parts between two intersections for the case of HPP with distilled water at 1.92 MW/m<sup>2</sup> (under burnout condition).

#### 4.4 結論

高速度 IR カメラを用いて伝熱面の温度分布の経時変化の測定によって以下の知見を得た。

- (1) PS の場合, 合体気泡が離脱しても温度が高いままの領域である **irreversible dry spot** が生じたことでバーンアウトに至ったと考えられる。
- (2) HPP を設置した場合, バーンアウト発生する前条件において, 平均熱伝達率が高い順に多孔質交差部, 多孔質交差部の間, セルであった。
- (3) HPP により CHF が向上した要因として, HPP によって連続的な沸騰が生じ, **dry area** が広範囲で生成されることを抑制したことが考えられる。
- (4) PS の場合, **dry area** の拡大と縮小を繰り返しながら何度か合体気泡が離脱しても濡れない **dry area** が生じると最終的にバーンアウトに至った。

#### 参考文献

- (1) S. Mori ・ 他 3 名, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 53-7(2016), 1028.
  - (2) I. C. Chu ・ 他 3 名, *Nucl. Eng. Des.*, 279(2014), 189
  - (3) I. C. Chu ・ 他 2 名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 62-1(2013), 142.
-

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mori Shoji, Yokomatsu Fumihisa, Utaka Yoshio	4. 巻 144
2. 論文標題 Enhancement of critical heat flux using spherical porous bodies in saturated pool boiling of nanofluid	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 219 ~ 230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.047	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 Fogaa Wilton, Mori Shoji, Imanishi Kousuke, Okuyama Kunito, Piqueira J.R.C.	4. 巻 125
2. 論文標題 Effect of honeycomb porous plate on critical heat flux in saturated pool boiling of artificial seawater	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 994 ~ 1002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.101	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 Wilton Foga and Shoji Mori ,	4. 巻 32
2. 論文標題 Effect of honeycomb porous plate on critical heat flux in saturated pool boiling of highly concentrated artificial seawater	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 053302 ~ 053302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5144438	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 Xie Tianxi, Utaka Yoshio, Chen Zhihao, Hirotsu Toshiki, Mori Shoji	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 ~ 116893
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

1. 著者名 Mori Shoji, Maruoka Naru, Okuyama Kunito	4. 巻 118
2. 論文標題 Critical heat flux enhancement by a two-layer structured honeycomb porous plate in a saturated pool boiling of water	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 429 ~ 438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.100	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 牟田 明広、森 昌司、榊原 史起、奥山 邦人	4. 巻 35
2. 論文標題 二層構造ハニカム多孔質体による流動沸騰限界熱流束の向上	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本冷凍空調学会論文集	6. 最初と最後の頁 93 ~ 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11322/tjsrae.18-03_OA	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 Yokomatsu Fumihisa, Fogaa Wilton, Mori Shoji, Tanaka Mikako	4. 巻 127
2. 論文標題 On the quenching of stainless steel rods with a honeycomb porous plate on a nanoparticle deposited surface in saturated water	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 507 ~ 514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.009	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 Xie Tianxi, Utaka Yoshio, Chen Zhihao, Mori Shoji	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 ~ 118543
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 Mori Shoji, Mt Aznam Suazlan, Yanagisawa Ryuta, Yokomatsu Fumihisa, Okuyama Kunito	4. 巻 41
2. 論文標題 Measurement of a Heated Surface Temperature Using a High-Speed Infrared Camera During Critical Heat Flux Enhancement by a Honeycomb Porous Plate in a Saturated Pool Boiling of a Nanofluid	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Heat Transfer Engineering	6. 最初と最後の頁 1397 ~ 1413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01457632.2019.1628487	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 Chen Zhihao, Hu Xiaocheng, Hu Kang, Utaka Yoshio, Mori Shoji	4. 巻 146
2. 論文標題 Measurement of the microlayer characteristics in the whole range of nucleate boiling for water by laser interferometry	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 118856 ~ 118856
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118856	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13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Wilton Foga, Kokuse Imanishi, Shoji Mori
2. 発表標題 Saturated pool boiling of highly concentrated artificial seawater with a honeycomb porous plate and its effect on the critical heat flux
3. 学会等名 The 30th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP30) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wilton Foga, Shoji Mori,
2. 発表標題 Quenching of a stainless-steel rod with a honeycomb porous plate in artificial seawater
3. 学会等名 27th International Conference on Nuclear Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shoji Mori
2. 発表標題 Pool boiling CHF enhancement using a honeycomb porous plate and nanofluid
3. 学会等名 1st International Conference on Nanofluids (ICNf) and the 2nd European Symposium on Nanofluids (ESNf) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shoji Mori
2. 発表標題 Critical heat flux enhancement of large heated surface by the use of a honeycomb porous plate in a saturated pool boiling of water
3. 学会等名 the 7th International Symposium on Micro and Nano Technology, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shoji Mori, Suazlan Mt Aznam, Ryuta Yanagisawa
2. 発表標題 CHF enhancement by the combination of a honeycomb porous plate and nanofluid in a saturated pool boiling, Micro and Nanoscale Phase Change Heat Transfer
3. 学会等名 Gordon Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shoji Mori And Ryuta Yanagisawa
2. 発表標題 Temperature measurement of a heated surface with a honeycomb porous plate in burnout occurrence in a saturated pool boiling of a nanofluid
3. 学会等名 14th International Conference on Heat and Mass Transfer (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wilton Foga, Shoji Mori, Kousuke Imanishi, Kunito Okuyama, J.R.C. Piqueira
2. 発表標題 Enhancement of critical heat flux in saturated pool boiling of artificial seawater by a Honeycomb Porous Plate
3. 学会等名 the 11th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal-Hydraulics And Safety (NTHAS-11) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Mori, A. Muta, K. Okuyama
2. 発表標題 The effect of honeycomb porous plate on the CHF of downward facing heated surface in the flow boiling of water
3. 学会等名 The 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 牟田 明広, 森 昌司
2. 発表標題 下向き伝熱面に設置した二層構造ハニカムによる流動沸騰限界熱流束の向上
3. 学会等名 第24回 動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wilton Santos, Shoji Mori
2. 発表標題 Effect of a honeycomb porous plate on quenching of a stainless-steel cylinder in artificial seawater
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 昌司, 柳沢 隆太, 横松 史久, Matteo Bucchi, 奥山 邦人
2. 発表標題 高速度IRカメラを用いた飽和プール沸騰中に設置したハニカム多孔質体直下の温度分布の測定
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今西 孝介, 森 昌司, Wilton Fogaca da Silva Santos, 奥山 邦人
2. 発表標題 ハニカム多孔質体が海水の飽和プール沸騰限界熱流束に与える影響
3. 学会等名 日本原子力学会2018年春の年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中田 大貴, 森 昌司
2. 発表標題 下駄状多孔質体が狭隘矩形流路の流動沸騰限界熱流束に与える影響
3. 学会等名 第23回 動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yasuo Koizumi, Tomio Okawa, Shoji Mori	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 320
3. 書名 Fundamentals of Thermal and Nuclear Power Generation	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 冷却器及びそれを用いた冷却装置,並びに,発熱体の冷却方法	発明者 森昌司, 中田 大貴	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-107456	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	高橋 厚史  (Takahashi Koji)  (10243924)	九州大学・工学研究院・教授    (17102)	

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
---------	---------