

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03928

研究課題名(和文) ナノマクロHybrid多孔体による超高熱流束除熱の物理機構

研究課題名(英文) Physical Mechanism of Ultrahigh Heat Flux removal by Nano-macro Hybrid Porous Material

研究代表者

森 昌司 (Mori, Shoji)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：10377088

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：八ニカム多孔質体による限界熱流束向上に寄与する毛管力による液体供給効果とセル内部に直接流入する液体供給効果の2つの液供給メカニズムを検討した。具体的には、毛管力による液体供給効果抽出実験、セル内部に直接流入する液体供給効果抽出実験の実測値を比較検討した。その結果、毛管抽出実験の結果を毛管限界モデルにより、非常によく説明できること、さらにはセル内への直接液供給効果のモデル化により、高熱流束域における、プール沸騰qCHF向上には毛管効果による影響が支配的であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We proposed a technique to enhance the critical heat flux (CHF) action and (2) vapor escape channels from the top surface due to gravity. In this study, we especially focused on (2) the liquid supply through vapor escape channels from the top surface due to gravity. Based on the results, the following conclusions were obtained: In the high heat flux region, the liquid supplied by capillary action was shown to be the dominant factor leading to the CHF enhancement in saturated pool boiling, and the calculated CHF by the capillary limit model were found to be in good agreement with the CHF obtained from the experiments extracting only the effect of capillarity. Moreover, the new CHF model considering the two liquid supply mechanism as stated above was proposed to predict the CHF by honeycomb porous plate in a saturated pool boiling.

研究分野：熱流体工学

キーワード：限界熱流束向上 多孔質体 相変化 沸騰

### 1. 研究開始当初の背景

福島原子力発電所の事故を契機に、過酷事故回避技術の高度化が切望されている。そのような背景のもと、新規の緊急冷却システムとして、In Vessel Retention (以下、IVR) が提案されている。IVR は事故時に原子炉容器を冠水させ、容器底部に堆積した炉心溶融物を容器外部より沸騰冷却することで、メルトスルーを防ぐ冷却技術である。このシステムの確立には  $4\text{MW}/\text{m}^2$  程度の高熱流束除熱技術が要望されているが、水の沸騰冷却限界は大気圧、飽和状態において、約  $1\text{MW}/\text{m}^2$  と目標値に遠く及ばない。沸騰冷却の限界値は限界熱流束 (Critical Heat Flux, 以下、 $q_{CHF}$ ) と呼ばれ、 $q_{CHF}$  を飛躍的に向上させる冷却手法を開発することが IVR の確立には重要となる。著者らは、飽和プール沸騰条件下において、伝熱面上にハニカム多孔体を装着するという簡易な方法を提案し、 $q_{CHF}$  を裸面の 2 倍以上に向上できることを実験的に示した<sup>(1)</sup>。ハニカム多孔体装着時に  $q_{CHF}$  が向上するのは、(1) 毛管力による液供給効果、(2) 蒸気排出孔 (以下、セル) に直接流入する液供給効果、(3) セルから蒸気を迅速に排出する効果の 3 つの効果が関わっていることがこれまでの結果からわかってきている<sup>(2)</sup>。また、合体気泡の滞留中に多孔体内部の液枯れが起きる際には、それが  $q_{CHF}$  到達の律速となる場合も存在する<sup>(3)</sup>。特に、(1)と(2)の液供給メカニズムは、冷却性能に大きく関わると予測されるが、各効果の  $q_{CHF}$  向上寄与割合は明らかとなっていない。

### 2. 研究の目的

そこで、本研究では、(1)の液供給効果に着目し、それが  $q_{CHF}$  向上に与える影響について、提案する  $q_{CHF}$  発生モデルと実測値を比較検討した結果について述べる。加えて、別途行った(2)の液供給効果を抽出した分離実験の結果についても述べる。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 実験装置概要およびハニカム多孔体

図 1 に毛管力による液供給効果の抽出実験装置概略を示す。伝熱面を下向きにすることで、セル内部へ直接流入する液供給効果を排除した。毛管力による液供給は図 1 に詳細を示すように、プール容器の高さをハニカム多孔体端面と同じにし、試験液体をポンプにより循環させることで行った。伝熱面上で発生した蒸気はプール容器底部より貫通させたシリコンチューブ内を通過させることで外部へ放出させた。以上のようにして、毛管力による液供給効果のみの抽出を行った。

伝熱面は直径 10.0mm の銅円柱の端面であり、銅ブロック内に挿入したカートリッジヒータにより加熱を行った。ハニカム多孔体は

ワイヤーにより伝熱面上に固定した。伝熱面から上方へ 9.85mm, 14.91mm, 19.87mm,

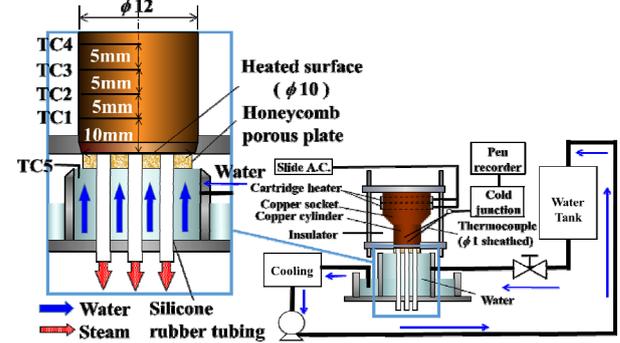


図 1 実験装置概要

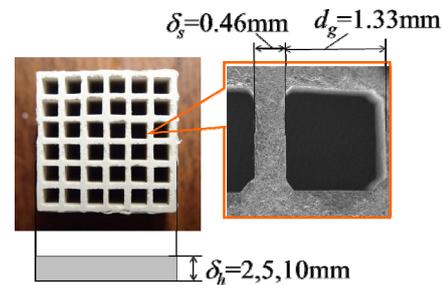


図 2 ハニカム多孔質体

24.77mm の中心軸上に  $\phi 1\text{mm}$  の K 型シース熱電対を設置し、指示温度から一次元性を確認した上で伝熱面表面温度を、また、フーリエの法則を用いて、伝熱面熱流束を算出した。

試験液体は蒸留水で、予備ヒータにより加熱を行い、プール液面近傍の水温を測定し、常に飽和状態であることを確認した。システム圧は 0.1MPa である。

図 2 は実験に用いた  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を主成分とするハニカム多孔体である。ここで、有効細孔半径:  $1.8\mu\text{m}$ 、空隙率: 24.8%、透過係数:  $2.4 \times 10^{-14} [\text{m}^2]$  で、ハニカム多孔体の幾何寸法は図中に示す通りである。

#### 3.2 毛管限界モデル

図 3 は、ハニカム多孔体の一部の断面拡大図である。ハニカム多孔体装着時に、毛管力により伝熱面へ液体が供給され、発生した蒸気がセルから排出される場合の気液の流れを矢印で示している。 $q_{CHF}$  に達するときの力学的なつりあいは、(1)式で示すように、液流が多孔体内を通過する際の圧力損失  $\Delta p_l$ 、蒸気流がセル内を通過する際の圧力損失  $\Delta p_g$ 、及び蒸気の加速損失  $\Delta p_a$  の和が最大毛管圧力  $\Delta p_{c,\text{max}}$  に等しくなる場合と考えられる。

$$\Delta p_{c,\text{max}} = \Delta p_l + \Delta p_g + \Delta p_a \quad (1)$$

また、(1)式において、左辺はラプラスの式、右辺第 1 項はダルシーの法則、右辺第 2 項はハーゲン・ポアズイユ則、右辺第 3 項は蒸気の加速損失より求められる。ここで、既報<sup>(1)</sup>より、セルの大きさがミリメートルオーダー

の場合、 $\Delta p_g$  および  $\Delta p_a$  は  $\Delta p_l$  に比して、無視出来るほど小さいため、今回用いたハニカム

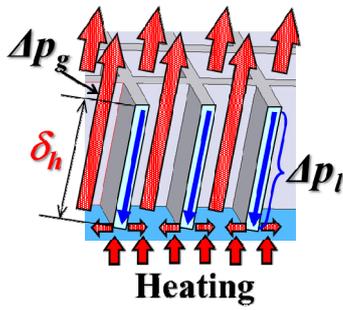


図3 ハニカム多孔質体内部を流れる気液流動の模式図

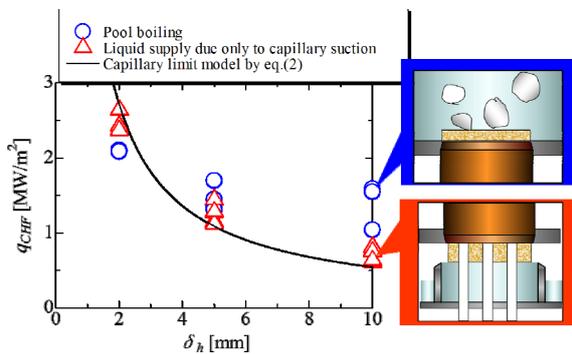


図4  $q_{CHF}$  とハニカム多孔質体高さの関係

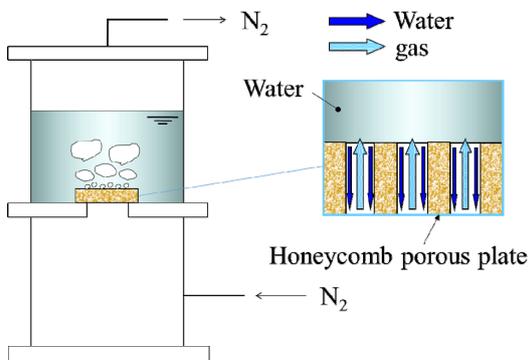


図5 セル内に重力により直接流入する効果を抽出する実験装置概要

多孔体の幾何形状の場合には次式のように単純化され、 $q_{CHF}$ を算定することができる。

$$q_{CHF} = \frac{2\sigma K \rho_l h_{fg} A_w}{r_{eff} \mu_l \delta_h A} \quad (2)$$

ここで、 $q_{CHF}$ : 限界熱流束、 $A$ : 伝熱面積、 $K$ : 透過率、 $\rho_l$ : 水の密度、 $h_{fg}$ : 蒸発潜熱、 $A_w$ : 多孔体と伝熱面の幾何学的接触面積、 $r_{eff}$ : 有効細孔半径、 $\mu_l$ : 水の粘性率、 $\delta_h$ : 多孔体の板厚である。

#### 4. 研究成果

図4は、板厚 $\delta_h$ と $q_{CHF}$ の関係を示す。セル幅 $d_g=1.33\text{mm}$ 、壁厚 $\delta_s=0.46\text{mm}$ のハニカム多孔体の板厚 $\delta_h$ を2, 5, 10mmに変化させてそれぞれ実験を行った。図中の○はプール沸騰の実験結果、△は毛管力の液供給効果抽出の実験結果、実線は毛管限界モデルの計算結果である。図4より、毛管力による液供給効果抽出の実験は、毛管限界モデルによく一致していることがわかる。プール沸騰の $q_{CHF}$ は、毛管力による液供給のみによる実験値や毛管限界モデルによる予測値と同様、 $\delta_h$ が小さくなるほど大きくなる傾向を示している。 $\delta_h=10\text{mm}$ では、2つの実験結果の差が他の場合と比して大きいことがわかる。これは、セル内部に直接流入する液供給効果が毛管力による液供給効果に対して無視できないことに起因していることが考えられる。そこで、図5に示す実験装置を用いて、セル内部に直接流入する液供給効果の抽出を行った。セル内部を通過する蒸気はハニカム多孔体下方より窒素ガスを流入させることで模擬し、セル内部に液体がちょうど流入しなくなる伝熱面からの蒸気発生流量を推定した。実験は非加熱系で行った。 $d_g=1.33\text{mm}$ 、 $\delta_s=0.46\text{mm}$ 、 $\delta_h=5\text{mm}$ のハニカム多孔体を設置し、セル内部に液体がちょうど流入しなくなる際の窒素ガス流量を測定したところ、伝熱面熱流束に換算して $1.5\text{MW/m}^2$ 程度のガス流量であることがわかった。ここで、図4より、毛管力による液供給効果抽出の実験において、 $\delta_h=10\text{mm}$ の場合、 $q_{CHF}$ は約 $0.75\text{MW/m}^2$ であるが、この加熱条件下では、プール沸騰実験において、セル内部へ直接流入する液供給が存在すると考えられる。以上のことから、 $\delta_h=10\text{mm}$ の場合、プール沸騰実験では、毛管力による液供給効果とセル内へ直接流入する液供給効果の2つが組み合わさることで、毛管力による液供給効果抽出の実験よりも $q_{CHF}$ が向上したと考えられる。また、 $\delta_h=5\text{mm}$ の場合のプール沸騰実験の $q_{CHF}$ が $1.5\text{MW/m}^2$ 程度であることから、セル内への直接流入する液供給効果はほぼないと考えられる。そのため、 $\delta_h=5\text{mm}$ の場合には、毛管力による液供給効果抽出の実験とプール沸騰実験の $q_{CHF}$ が同程度になったと考えられる。

以上の結果から、意外にも一次元の毛管限界モデルにより、セル内部に直接流入する液供給がないような高熱流束条件下では、プール沸騰における $q_{CHF}$ をよく説明できることがわかった。

以上をまとめると以下の通りである。

1. 毛管力による液体供給効果抽出の実験結果を毛管限界モデルにより、よく説明できる。
2. プール沸騰の $q_{CHF}$ は、毛管力による液供

給のみによる実験値や毛管限界モデルによる予測値と同様、 $\delta_h$ が小さくなるほど大きくなる傾向を示している。

- セル内部に直接流入する液供給がないような高熱流束条件下では、プール沸騰における $q_{CHF}$ の実測値を本モデルにより、よく説明できる。

#### <引用文献>

- (1) 森昌司, 奥山邦人, 機論(B), 75-758(2009), pp.1896-1902.
- (2) 森昌司, 沈ロージェ, 奥山邦人, 機論(B), 76-771(2010), pp.1908-1916.
- (3) 丸岡成, 森昌司, 奥山邦人, 混相流, 27-5(2014), pp.631-638.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

- ① S. Mori, Suazlan Mt Aznam, Ryuta Yanagisawa, Fumihisa Yokomatsu, and Kunito Okuyama, Measurement of a Heated Surface Temperature using a High-Speed IR Camera during CHF Enhancement by a Honeycomb Porous Plate in a Saturated Pool Boiling of a Nanofluid, Journal of Heat Transfer, 査読有, accepted, 2018.
- ② Wilton Fogaça, S. Mori, Kousuke Imanishi, Kunito Okuyama, J.R.C. Piqueira, Effect of Honeycomb Porous Plate on Critical Heat Flux in Saturated Pool Boiling of Artificial Seawater, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol. 125, Pages 994-1002, October 2018.
- ③ 牟田 明広, 森昌司, 榊原 史起, 奥山 邦人, 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, 日本冷凍空調学会論文集, 査読有, Vol.35, No.2
- ④ S. Mori, F. Yokomatsu, M. Tanaka, K. Okuyama, Rapid cooling of a high-temperature block by the attachment of a honeycomb porous plate on a nanoparticle-deposited surface, Applied Thermal Engineering, 査読有, Vol.133, pp576-579, 2018.
- ⑤ S. Mori, N. Maruoka and K. Okuyama, Critical Heat Flux Enhancement by a Two-layer Structured Honeycomb Porous Plate in a Saturated Pool Boiling of Water, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol.118, pp 429-438, 2018.
- ⑥ Suazlan Mt Aznam, S. Mori, A. Ogoshi and K. Okuyama, CHF Enhancement of a Large Heated Surface by a Honeycomb Porous Plate and a Gridded Metal Structure in a Saturated Pool Boiling of Nanofluid, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol.115, pp969-980, 2017.
- ⑦ S. Mori, Y. Utaka, Critical heat flux enhancement by surface modification in a

saturated pool boiling: a review, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol.108, pp2534-2557, 2017.

⑧ 丸岡成, 森昌司, 奥山 邦人, ハニカム多孔質体を用いたプール沸騰限界熱流束向上に与える毛管効果の影響, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.82, No.840, pp16-00106, 2016.

⑨ Suazlan Bin Mt Aznam, S. Mori, F. Sakakibara, and K. Okuyama, Effects of Heater Orientation on Critical Heat Flux for Nanoparticle-deposited Surface with Honeycomb Porous Plate Attachment in Saturated Pool Boiling of Water, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol.102, pp1345-1355, 2016.

⑩ S. Mori, Suazlan Bin Mt Aznam, Ryuta Yanagisawa, and Kunito Okuyama, CHF enhancement by honeycomb porous plate in saturated pool boiling of nanofluid, Journal of Nuclear Science and Technology, 査読有, Volume 53, Issue 7, pp1028-1035, 2016.

⑪ S. Mori, Suazlan Mt Aznam, and K. Okuyama, Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling of water by nanoparticle-coating and a honeycomb porous plate, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, No.80, pp.1-6, 2015.

〔学会発表〕(計 29 件)

- ① S. Mori, A. Muta, K. Okuyama, The effect of honeycomb porous plate on the CHF of downward facing heated surface in the flow boiling of water, The 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer 12th - 15th March 2018, Nagasaki, Japan.
- ② K. Okuyama, S. Mori, On the onset of drying of a liquid-containing porous medium subjected to a high surface heat flux, The 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer, March 12 - 15, 2018, Nagasaki, Japan.
- ③ S. Mori, F. Yokomatsu, M. Tanaka and K. Okuyama, Effects of a honeycomb porous plate and a nanoparticle deposited surface on the rapid cooling of a high-temperature stainless steel block, the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, October 28-30, 2017, Okinawa, Japan.
- ④ S. Mori, F. Yokomatsu and K. Okuyama, CHF enhancement using spherical porous materials in saturated pool boiling of nanofluid, 17th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Xi'an, Sept 3-8, 2017, Shaanxi, China.
- ⑤ N. Maruoka, S. Mori, K. Okuyama, Improvement of structure in a honeycomb porous

plate for pool boiling CHF enhancement, the 25th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE25, July 2-6, 2017, Shanghai, China.

⑥ **S. Mori** and K. Okuyama, Critical heat flux enhancement using honeycomb porous plate in a saturated pool boiling of water-based nanofluid, 13th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, July 17-19, 2017, Portoroz, Slovenia.

⑦ **S. Mori**, F. Yokomatsu, M. Tanaka and K. Okuyama, On the quenching of copper blocks with honeycomb porous plate on the nanoparticle-deposited surface, 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, June 12-15, 2017, Iguazu Falls, Brazil.

⑧ **S. Mori**, M. Tanaka and K. Okuyama, Rapid generation mechanism of superheated steam using a water containing porous material, 2nd Thermal and Fluid Engineering Conference, TFEC2017, 4th International Workshop on Heat Transfer, IWHT2017, April 2-5, 2017, Las Vegas, NV, USA.

⑨ **S. Mori**, R. Yanagisawa, A. M. Suazlan, and K. Okuyama, Measurement of temperature distribution on heated surface with honeycomb porous plate in a saturated pool boiling of nanofluid, The Tenth Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, November 27-30, 2016, Extended Abstract Number N10E1159, Kyoto, Japan.

⑩ N. Maruoka, **S. Mori**, R. Imai, K. Okuyama, Liquid supply processes to heated surface for CHF enhancement using a honeycomb porous plate in a saturated pool boiling, Proceedings of the 4th International Forum on Heat Transfer, IFHT2016, November 2-4, 2016, IFHT2016-1874, Sendai, Japan.

⑪ **S. Mori**, R. Yanagisawa, and K. Okuyama, CHF enhancement combining honeycomb porous plate and nanofluid in saturated pool boiling, IVth International Symposium on Innovative Materials for Processes in Energy Systems 2016, October 23-26, Taormina, Sicily, Italy.

⑫ **S. Mori**, Y. Tanaka and K. Okuyama, Measurement of liquid film thickness in two-phase HFC134a gas-liquid ethanol flow in vertical tube, 9th International Conference on Multiphase Flow, May 22nd -27th, 2016, Firenze, Italy.

⑬ Suazlan Mt Aznam, **S. Mori**, and K. Okuyama, Critical Heat Flux Enhancement in Water-Based Nanofluid with Honeycomb Porous Plate on Large Heated Surface, Proceedings of ICONE-24 24th International Conference on Nuclear Engineering, June 26-30, 2016, Charlotte, USA.

⑭ **S. Mori** and Kunito Okuyama, Liquid film thickness characteristics in HFC134a gas / ethanol liquid two phase flow, 17th International Conference on Thermal and Fluids Engineering, November 27-28, 2015, London, United Kingdom

⑮ **S. Mori**, N. Maruoka, and K. Okuyama, CHF enhancement of pool boiling using a honeycomb porous plate with two-layer structure, 9th Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources", 07-10 September, 2015, Minsk, Belarus.

⑯ Suazlan Mt Aznam, **S. Mori**, R. Yanagisawa and K. Okuyama, Critical heat flux enhancement in saturated pool boiling using water-based nano-fluid with honeycomb porous plate, ICONE-23 23th International Conference on Nuclear Engineering, May 17-21, 2015, Chiba, Japan.

その他 国内発表 13 件

〔図書〕 (計 1 件)

Y. Koizumi, M. Shoji, M. Monde, Y. Takata, N. Nagai, Boiling: Research and Advances, Elsevier, 2017 年 7 月, 3.4 Critical heat flux enhancement in saturated pool boiling を執筆

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 4 件)

①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**, 丸岡 成

権利者: 横浜国立大学

種類: 特許

番号: 特願 2015-106716

出願年月日: 平成 27 年 5 月 26 日

国内外の別: 国内

②名称: 多孔体及び多孔体の製造方法

発明者: 多々見 純一, 高橋絵美, **森昌司**

権利者: 横浜国立大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-38087

出願年月日: 平成 28 年 2 月 29 日

国内外の別: 国内

③名称: 発熱体の冷却方法

発明者: **森昌司**, 横松史久

権利者: 横浜国立大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-114763

出願年月日: 平成 28 年 6 月 8 日

国内外の別: 国内

④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: 横浜国立大学

種類：特許  
番号：特願 2017-057433  
出願年月日：平成 30 年 6 月 5 日  
国内外の別： 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

森 昌司 (Mori, Shoji)  
横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：10377088