

■受領No.1321

二層構造ハニカム多孔質体による沸騰冷却限界の飛躍的な促進

代表研究者

森 昌司 横浜国立大学 准教授



1. 緒 言

沸騰現象は相変化を伴わない場合の冷却技術と比較して、その熱伝達率は大きく、産業上で広く利用されている。近年、電子機器の高集積化に伴う高発熱密度化、大型半導体レーザーのようなパワーデバイスの冷却、原子炉事故時の冷却など要求される除熱流束は増大しており、それらのニーズに対応して、限界熱流束（以下、 q_{CHF} ）の向上が求められている。特に、福島原子力発電所の事故を契機に、大伝熱面・高熱流束除熱が可能な冷却手法による過酷事故回避技術の高度化が切望されている。そのような背景下、原子力の分野では、原子炉事故時に圧力容器外部を冠水させ、炉心溶融物を圧力容器内部に閉じ込める In Vessel Retention（以下、IVR）が過酷事故回避の手法として注目されており、最近では、AP1000のように実機に導入されたケースも存在する。しかし、大型のPWRにおいてIVRを成立させるためには、下向き大伝熱面の q_{CHF} を向上させることが必須である。森他⁽¹⁾はこれまでにハニカム多孔質体（以下、HPP）を用いることで、大気圧下、飽和プール沸騰における q_{CHF} を裸面の約2倍に向上することを実験的に示した。また、丸岡他⁽²⁾は、HPP装着時の q_{CHF} には主な向上要因である、(1) 毛管力による液体供給効果と(2) 蒸気排出孔に直接流入する液体供給効果について、(1)の液体供給機構に着目し、提案する一次元モデルと実験結果がよく一致し、高熱流束下においては、毛管力による液

体供給効果が q_{CHF} 到達の支配的な要因であることを報告している。一方で、丸岡他⁽³⁾は、HPPの構造体の厚さ（以下、板厚 δ_h ）がマクロ液膜厚さ（ $\sim 100\delta_m$ ）と同程度の厚さになると、HPP上部に形成される合体大気泡の滞留時間中（100msオーダー）に多孔質体内部で液枯れ現象が生じ、この液枯れ現象が q_{CHF} 到達の律速要因となることを報告した。また、マクロ液膜と同程度の板厚のHPPでも、その上部に液体保持用のHPPを設置することで、液枯れを防ぐことが可能となり、 q_{CHF} が向上することを示している⁽³⁾。また、Suazlan et al.⁽⁴⁾は、HPP装着時の伝熱面姿勢の影響について実験的に検討した結果、下向き伝熱面において、合体大気泡の影響はより顕著となり、水平上向き伝熱面の場合に比べて q_{CHF} が低下することを報告している。

本報では、合体大気泡の影響に有効であると示唆された、毛管力による液体供給部と液体保持部の2種類のHPPからなる二層構造HPPを用い、飽和プール沸騰下向き伝熱面下においての有効性について、実験的に検討した結果について述べる。

2. 研究概要

2.1 実験装置および方法

2.1.1 実験装置概要

図1 (a) に、実験装置概略図を示す。伝熱面は銅円柱体の端面であり、#2000のサンドペーパーで研磨した面を伝熱面として使用した。加熱は底部に埋め込んだカートリッジヒータにより行った。試験部容器は、内径87mm、長さ200mmのホウケイ酸ガラス管、銅円柱体、SUS製フランジからなり、内部の沸騰様相の観察が可能である。水平上向きを傾斜角度 $\theta=0^\circ$ として、試験部全体を 0° 、 90° 、 135° 、 180° に傾斜させ、実験を行った。図1 (b) に示すように、伝熱面から下方へ 90° 間隔でずらしながら、それぞれ10mm (TC1)、15mm (TC2)、20mm (TC3)、25mm (TC4)の中心軸上に $\phi 1$ 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。伝熱面上で発生した蒸気は、試験部と貯水タンクを繋ぐ蒸気排出流路を通過し、貯水タンク上部に設置したコンデンサーにより還流され、還流された液体は、貯水タンク底部に設置した液体供給路を通して、試験部に戻される。試験液体には蒸留水を用い、試験部および貯水タンク内に

設置した予備ヒータでバルク液体を加熱し、伝熱面周囲に設置したK型シース熱電対 (TC5) により、バルク液体が飽和温度に維持されていることを確認した。また、高速度カメラにより沸騰様相を観察した。

2.1.2 ハニカム多孔質体

本報で用いた二層構造HPPを図2に示す。図2 (a)、(b) はそれぞれ、毛管力による液供給部を担うHPP (以下、NHPP)、液保持部を担うHPP (以下、MHPP) を示す。NHPPの組成は、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (30-50wt%)、 SiO_2 (40-60wt%)、 TiO_2 (5-20wt%) であり、MHPPはSUS316Lからなる。表1に二層構造HPPの特性値 (有効細孔半径 r_{eff} 、透過係数 K 、空隙率 ϵ) 及び幾何寸法 (セル幅 d_g 、壁厚 δ_s 、板厚 δ_h 、開口率 ϕ) を示す。二層構造HPPは伝熱面上に直径0.3mmのSUS製のワイヤーにより固定した。

2.1.3 実験手順

実験は、裸面及び二層構造HPPの場合の2種類に関して行った。カートリッジヒータに所定の電圧を印加して加熱を行い、TC1およびTC2の温度変化が、10分間で0.25 K以下となった場合に定常

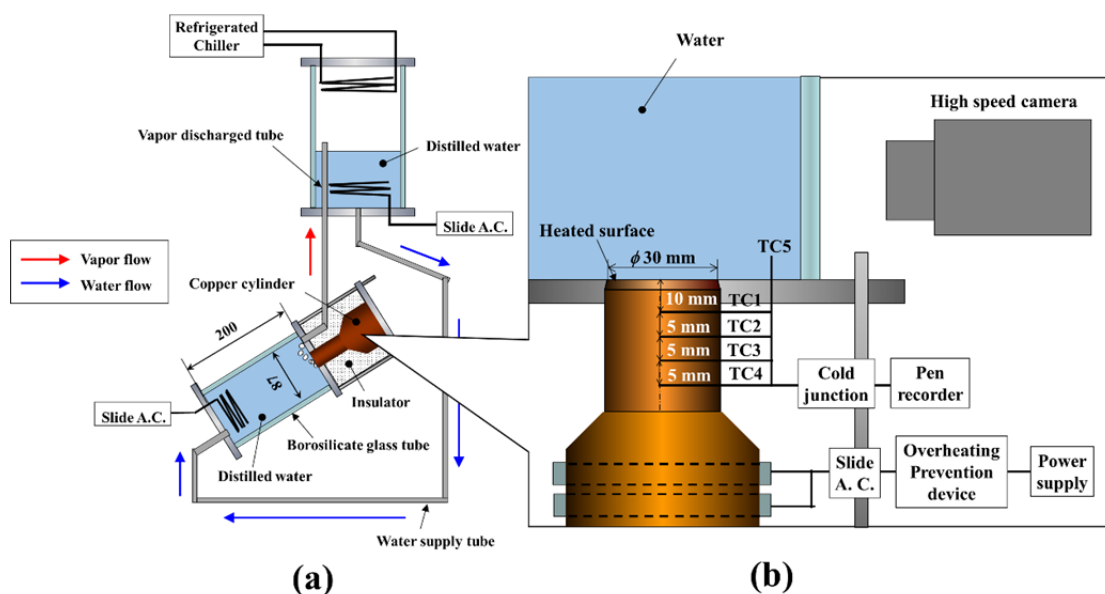


図1. 実験装置概要

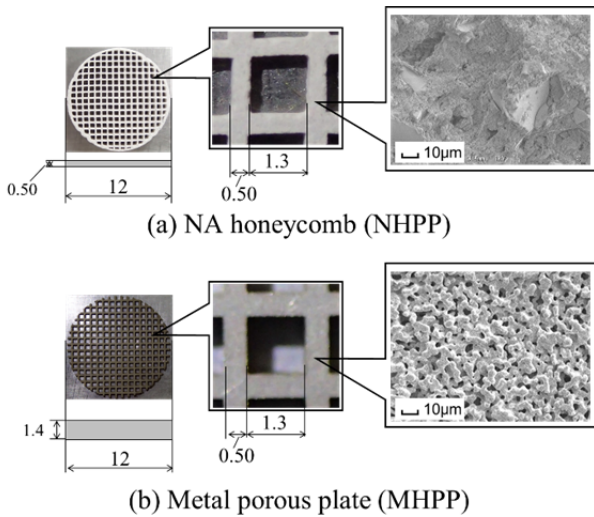


図 2. 実験に用いたハニカム多孔質体

状態に達したとみなし、測定を行った。以上の操作を、定常状態が維持できなくなり、壁温が急上昇を開始して、TC1の温度が200 °Cを超えるまで繰り返した。また、壁温が急上昇を開始して、TC1の温度が200 °Cを超えた場合には、直ちに加熱を中止し、その直前の加熱条件下での伝熱面熱流束を q_{CHF} とした。

2.2 実験結果

図3に伝熱面姿勢と q_{CHF} の関係を示す。横軸は傾斜角度 θ 、縦軸は限界熱流束 q_{CHF} である。なお、傾斜角度は図中にも示すように水平上向き面を $\theta=0^\circ$ と定義し、 θ を 0° 、 90° 、 135° 、 180° に

表 1. 使用したハニカム多孔質体の特性

	NA honeycomb (NHPP)	Metal porous plate (MHPP)
r_{eff} [μm]	1.8	3.4
$K \times 10^{14}$ [m^2]	2.4	10
ε [-]	0.25	0.50
d_g [mm]	1.3	1.3
δ_s [mm]	0.5	0.5
δ_h [mm]	0.50	1.4
ϕ [-]	0.52	0.52

変化させて実験を行った。図3中の○は裸面の実験結果、△は二層構造HPPの実験結果を示す。裸面の場合、傾斜角度が 0° 、 90° 、 135° 、 180° の時、 q_{CHF} はそれぞれ 1.2 MW/m^2 、 1.1 MW/m^2 、 1.1 MW/m^2 、 0.41 MW/m^2 で、 $0 \sim 135^\circ$ の範囲では、 q_{CHF} の減少は 0° の時の値と比して10%程度に収まるのに対し、 180° では60%以上減少した。ここで、合体気泡の滞留時間を、合体気泡が伝熱面上から切り離されて、次の合体気泡が伝熱面上から切り離される時間と定義し、高速度カメラでの観察結果から測定すると、傾斜角度の増加に伴い、合体気泡の滞留時間も増加することが確認された。さらに、 180° の場合は高速度カメラで合体気泡の離脱を判別することが難しく、限界熱流束付近での熱負荷時には、常に蒸気膜に覆われている様子が確認され、 180° において、 q_{CHF} が急激に低下し

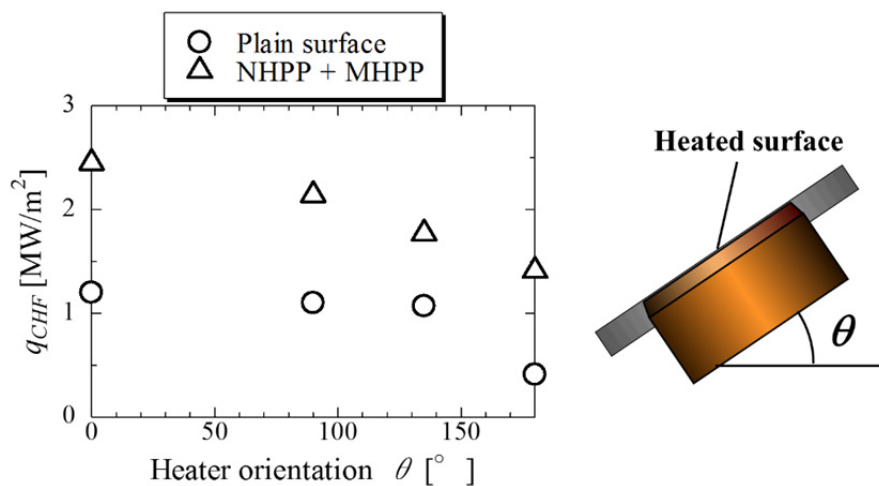


図 3. 二層構造ハニカム多孔質体が設置角度に与える影響

たのは、合体気泡の滞留時間の増加が主な原因と考えられる。一方、二層構造HPP装着時には、傾斜角度が 0° 、 90° 、 135° 、 180° の時の q_{CHF} はそれぞれ 2.5 MW/m^2 、 2.1 MW/m^2 、 1.8 MW/m^2 、 1.4 MW/m^2 で、傾斜角度の増加に伴い、裸面の場合と同様に q_{CHF} は減少傾向にあるが、 $\theta=180^\circ$ においても、裸面の場合のような急激な減少は生じず、いずれの傾斜角度においても、裸面の場合と比して、 q_{CHF} が1.6倍以上に向上した。さらに、同じ傾斜角度での裸面の実測値と二層構造HPPの実測値を比較すると、合体気泡の影響がより顕著に現れる $\theta=180^\circ$ の時の q_{CHF} 促進率が最も大きく、3倍以上に向上する結果が得られ、下向き伝熱面下においては、伝熱面近傍でいかに液体を保持することが重要であることが示唆された点は非常に興味深い。以上の結果から、 $\theta>90^\circ$ の下向き伝熱面において、合体気泡が q_{CHF} に与える影響は水平上向き面と比較して大きく、二層構造HPPを装着することが q_{CHF} 向上には有効な手段であることが示唆された。

2.3. 結 言

- (1) 下向き伝熱面下においては、裸面と二層構造HPPともに、傾斜角の増大とともに、 q_{CHF} が減少する。特に、裸面の場合には、合体気泡の滞留による影響は顕著であり、 q_{CHF} 向上には、高熱流束下において、いかに伝熱面近傍に液体を保持するかが重要であることがわかった。
- (2) 傾斜角度の増大とともに、合体気泡の滞留時間も増大するが、二層構造HPPを用いることで、伝熱面近傍に液体が保持されるため、 q_{CHF} の向上に繋がった。さらに、本報で使用した二層構造HPPによる q_{CHF} 促進率は、水平下向き伝熱面の場合が最も大きいことが明らかとなった。

2.4 文 献

- (1) S. Mori and K. Okuyama, Enhancement of the Critical Heat Flux in Saturated Pool

Boiling Using Honeycomb Porous Media, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 35, (2009), pp. 946-951.

- (2) 丸岡成、森昌司、奥山邦人、ハニカム多孔質体上部に形成される合体大気泡が飽和プール沸騰限界熱流束向上に与える影響、混相流、Vol. 27, No.5, (2014), pp. 631-638.
- (3) 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、Vol. 82, No. 840, (2016), p. 16-00106.
- (4) S. 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, Vol. 102, (2016), pp. 1345-1355.

3. 発表論文

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, accepted, 2018.
2. 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.
3. 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, July17-19, 2017, Portoroz, Slovenia. (キーノート講演)

4. Shoji Mori, Kunito Okuyama, CHF enhancement of a large heated surface using a honeycomb porous plate in saturated pool boiling, the ASME 2017 15th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, ICNMM2017, August 27-31, 2017, Hyatt Regency Cambridge, Cambridge, USA (キーノート講演)
5. 小林 哲、森 昌司、高橋 絵美、多々見 純一、丸岡 成、奥山 邦人、ハニカム多孔質体のマクロ・マイクロ孔構造がプール沸騰限界熱流束に与える影響、日本混相流学会混相流シンポジウム 2017年8月、東京
6. 丸岡 成、森 昌司、奥山 邦人、二層構造ハニカム多孔質体による下向き伝熱面の飽和プール沸騰限界熱流束の向上、The CHF enhancement on downward facing heated surface in a saturated pool boiling using a honeycomb porous plate with two layers structure, 第22回 動力・エネルギー技術シンポジウム, 2017年6月, 豊橋