

[22048]

## 放射線照射と伝熱性能の相関に関する研究 Relationship between irradiation and heat transfer

岡本孝司 #A), 鈴木俊一 B), 陳泰山 B), Hong Zhenhan<sup>A)</sup>, 三輪修一郎<sup>A)</sup>  
Koji Okamoto<sup>#A)</sup>, Shunichi Suzuki<sup>A)</sup>, Taishan Chen<sup>B)</sup>, Zhenhan Hong<sup>A)</sup>, Shuichiro Miwa<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> Nuclear Professional School, the University of Tokyo  
<sup>B)</sup> Department of Nuclear Engineering and Management, the University of Tokyo

### Abstract

It is well-known that irradiation may affect the surface condition of metal materials, thus significantly changing the heat transfer characteristics. This study investigated the irradiation effects of Critical Heat Flux (CHF) on flat surfaces and honeycomb-structured surfaces in downward-facing saturated flow boiling. With gamma-ray or electron beam irradiation, flat surfaces made by copper show CHF decrease. However, CHF increases to triple value when the honeycomb structure covers the flat surface. In this experiment, the honeycomb-covered surface structure was irradiated by a gamma-ray or electron beam. Although the CHF decreases by irradiation, it still has double the value from the original flat surface. In conclusion, the honeycomb structured surface improves the CHF under irradiation conditions.

**Keyword:** Critical heat flux; Flow boiling; honeycomb structure; Irradiation effect

## 1. はじめに

### 1.1 目的

放射線照射による伝熱劣化現象に関する実験を進めるとともに、メカニズムを評価した。具体的には、放射線照射を行うとともに、可視化を含む実験を進めた。ハニカム構造を設置した場合の影響について評価を行った。

## 2. 放射線照射と CHF

### 2.1 実験装置

図 1 に強制流動沸騰実験装置の概略図を示した。強制流動沸騰実験装置は水の温度を飽和温度である 100℃に保ちながら水を循環させる機能を持つ。装置内に溜められた水は下流側タンク内にあるプレヒーターで温める。水の流速は質量流速計によってモニターされる。上流側タンクと下流側タンクの間には透明なアクリル製のフローチャンネルがあり、その断面は幅 40mm、高さ 10mm の長方形をしている。フローチャンネルの途中に沸騰面を含む試験ブロックを下向き伝熱面として設置できる構造である。

本年度は、2022 年 9 月及び 2023 年 1 月に、1 号加速器照射室を用いた電子線照射、及び、コバルト 60 照射施設を用いたガンマ線照射を行った。本年度は特にハニカム構造を表面に設置して、その影響を評価した。

ハニカム構造は、九州大学で製作した[1]。銅の電解析出法によって、表面に銅の多孔質構造を生成する。この時、電流を調整する事によって発生する気泡を制御し、ハニカム構造を構築するものである。製作方法の課題から、0.3mm の銅板にハニカム構造を構築し、これを伝熱面にはんだ付けをすることで、ハニカム構造表面を構築した。

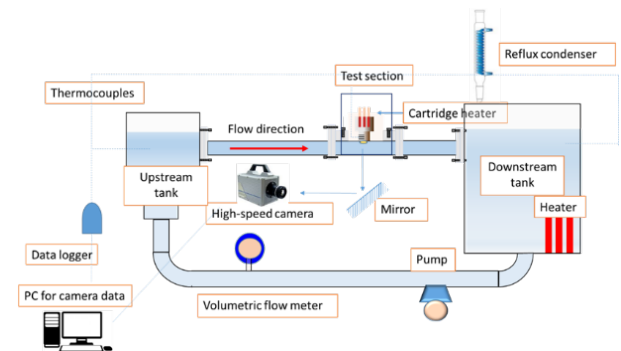


図 1 流動沸騰の実験設備

### 2.2 ハニカム構造による伝熱劣化防止

ハニカム構造を伝熱面に加えることで、放射線照射後の限界熱流束がどのように変化するかを実験的に考察した。伝熱劣化が顕著に見られる銅ブロックを用い、前述のようにハニカム構造も銅製である。実験は、照射をしない場合と、電子線照射及びガンマ線照射を実施したあとに限界熱流束を評価した。

#### ① 20×20 mm 伝熱面

図 2 にハニカム構造を付けた場合と平面の場合の沸騰曲線を示す。ハニカム構造を用いることで、CHF が大きくなることが想定されているため、昨年度までの 30x30mm 伝熱面ではなく、伝熱面積を小さくした 20x20mm 伝熱面を用いた。

流量 4 L/min (160 kg/m<sup>2</sup>s) の場合を比べると、ハニカムを付けない平面伝熱面 (Bare) の場合は、約 0.9 MW/m<sup>2</sup> で CHF が発生しているのに対して、2.5~3.0 MW/m<sup>2</sup> まで加熱ができている。一方、この実験においては、最大のヒーター出力になっても CHF は発生していない。安定的な除熱ができている

[22048]

ことを示している。つまり、CHF は  $3 \text{ MW/m}^2$  以上であるが、 $20 \times 20 \text{ mm}$  に伝熱面積を小さくしても、本実験装置の限界により計測することができないことを意味する。いずれにせよ、ハニカム構造によって、大幅な CHF 増加が確認できた。

次に、ハニカム構造を付けた場合に、ガンマ線 ( $1256 \text{ kGy}$ ) もしくは電子線 ( $1350 \text{ kGy}$ ) の照射を行った結果を図 3 に示す。ハニカム構造のみを付けた場合と沸騰曲線はほぼ同一となる。なお、最大熱流束は  $2 \text{ MW/m}^2$  近傍となっているが、この状態で最大のヒーター出力となっている。 $20 \times 20 \text{ mm}$  の実験結果では、照射による伝熱劣化は、ハニカム構造を付けることによって回避できることが明らかとなった。

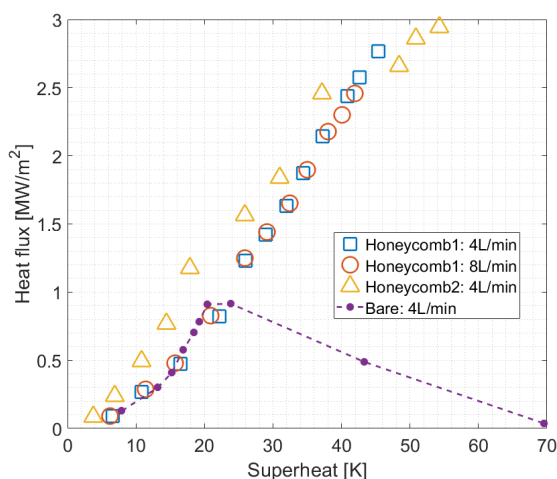


図 2 ハニカム構造における沸騰曲線

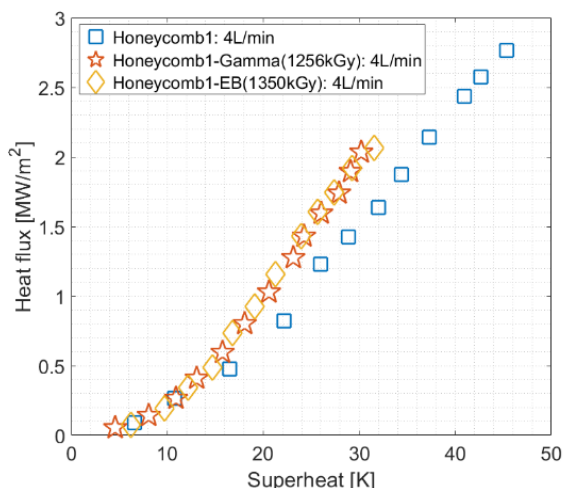


図 3 ハニカム構造の放射線照射後の沸騰曲線

具体的には、ハニカム構造を設置しない裸の伝熱面ケース (Bare) では、CHF が約  $1 \text{ MW/m}^2$  程度であり、これは、従来の結果と大きく変わらない。一方、ハニカム構造を設置した場合 (HC) では、 $4 \text{ L/min}$  の流量で比較しても、 $2.8 \text{ MW/m}^2$  以上に CHF が増

大している。さらに、ハニカム構造を、ガンマ線及び電子線で照射した場合にも、 $2 \text{ MW/m}^2$  以上の CHF が得られており、裸伝熱面に比較しても大幅な CHF の向上が観測されている。

#### ② $15 \times 15 \text{ mm}$ 伝熱面

上記のように、ハニカム構造を用いると限界熱流束が大幅に増大し、ヒーター出力限界と伝熱ブロック温度が上昇したため、限界熱流束を得ることができなかった。限界熱流束を検討するために、伝熱面積をさらに小さくする  $15 \times 15 \text{ mm}$  の伝熱面を製作し、ハニカム構造の有無、照射によって限界熱流束がどのように変化するかを実験的に取得した。

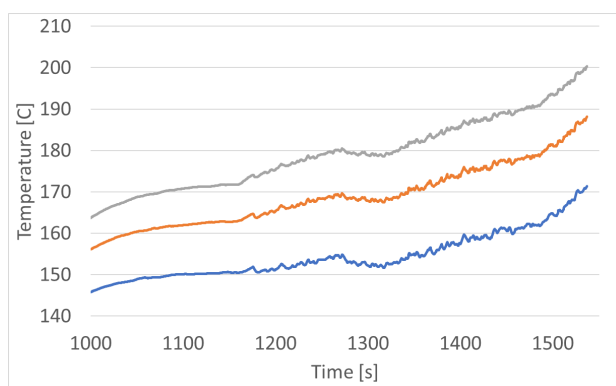


図 4 温度履歴の例( $15 \times 15 \text{ mm}$  伝熱面(HC))

図 4 に  $15 \times 15 \text{ mm}$  伝熱面における実験で得られた 3 本の熱電対の温度履歴を示す。この温度勾配から熱流束と過熱度を求めている。金属面での CHF では、CHF になると急激な温度上昇が観測されるので、カートリッジヒーターの入熱を直ちに切る必要がある。これは、核沸騰から膜沸騰に遷移して伝熱面からの除熱が極めて小さくなり、壁面温度が急激に上昇するためである。一方、ハニカム構造における限界熱流束では、図 4 の 1350 秒以降に示すように、それぞれの熱電対の温度差 (熱流束に相当) は変わらず、温度 (過熱度に相当) が単調に上昇していく様相が捉えられている。熱電対の温度変化は、ゆっくりと単調増加で増大し続けていくため、この温度変動を見てカートリッジヒーターの入熱を停止している。通常の CHF が膜沸騰になることによって、急激な温度上昇をもたらすのに対して、ハニカム構造を設置した伝熱面における CHF は、急激な温度上昇はない。つまり、核沸騰から膜沸騰に遷移するいわゆる沸騰遷移 (BT : Boiling Transition) や核沸騰離脱 (DNB : Departure from Nucleate Boiling) ではなく、核沸騰が継続している状態である。核沸騰のままであるが、除熱量に限界値があり、それ以上の除熱ができなくなるため、入熱 (ヒータ加熱) が除熱をわずかに上回るため、ゆっくりと温度が上昇していくことになる。ハニカム構造によって、表面

[22048]

積が増大しているだけではなく、気泡の離脱が促進されることから、気泡に伝熱面が覆われる膜沸騰になることがなく、核沸騰が継続できると考えられる。ここでは、熱電対の指示値が緩やかに、継続的上昇を始めた時点をもって限界熱流束 (CHF) と定義することとする。図 5 によればこのケースでは、約 2 MW/m<sup>2</sup>となる。温度データにおいても 1 つ顕著な温度履歴は、過熱度が 40℃程度で、過熱度が不安定に変動する状況が観測されている。1100 秒あたりまでは、温度が安定しており、加熱量を増やすと数分で安定な温度分布となる。一方、1200 秒で加熱量を増加させたのちは、温度履歴が不安定になり、1250 秒あたりで、温度が急激に下がる現象も確認されている。ハニカム構造内部の沸騰の様相が変化し、熱伝達が改善したことを意味していると考えられる。その後、温度は単調増加となり、1500 秒あたりで、温度上昇率が増えている。実験では、200℃を超えた時点で加熱を停止しており、その後は温度は一気に下がる。膜沸騰状態ではなく核沸騰が継続しているため、温度の下がる速度は速い。

このような沸騰除熱量が限界となる限界熱流束はハニカム構造を設置した条件のみで観測される。ガンマ線及び電子線を照射した場合でも同様の傾向を示す。熱電対の温度をもとに熱流束と過熱度を評価し沸騰曲線として示したものを図 5 に示す。15×15 mm 伝熱面で 4 L/min (160 kg/m<sup>2</sup>s) の流動条件における沸騰曲線である。青のハニカム構造を付けない条件(Bare)においては、1.5 MW/m<sup>2</sup>の CHF が観測されている。伝熱面が小さくなることによって、CHF が増大することは従来から知られているが、30×30 mm の約 0.8 MW/m<sup>2</sup>と比較しても大きくなっている。一方、ハニカム構造を設置(HC)することで、限界熱流束は約 2 MW/m<sup>2</sup>と増大することが分かる。伝熱面積が小さいために、CHF の増大割合は顕著ではない。上述のようにハニカム構造を付けた伝熱面における限界熱流束はそのメカニズムが異なっていることに留意する必要がある。ハニカム構造を付けた伝熱面に対して、それぞれ約 900 kGy のガンマ線照射(γ-ray)及び電子線照射(EB)を行った。その後得られる最大熱流束は、未照射(橙色:HC)の場合と比較すると、限界熱流束が下がることが確認されている(灰色:γ-ray 及び黄色:EB)。照射によってハニカム構造内部の濡れ性などが変化していると考えられる。ハニカム構造による CHF 増加は、表面張力による伝熱面への液体供給と、沸騰気泡が容易に離脱しやすいことに起因している。詳細はまだ分からないが、表面張力が変化することで、液体供給性能に影響が及んでいる可能性がある。結果として、照射後のハニカム構造は、非照射に比べて CHF が減少する傾向が見られるが、それでも、ハニカム構造のない場合に比較して同等の限界熱流束となっている。これは 15×15 mm の伝熱面積の場合であるが、上述のようにより大きな伝熱面においては、照射後のハニカム構造において、ハニカム構造がない場合よりも大きな CHF となっている。

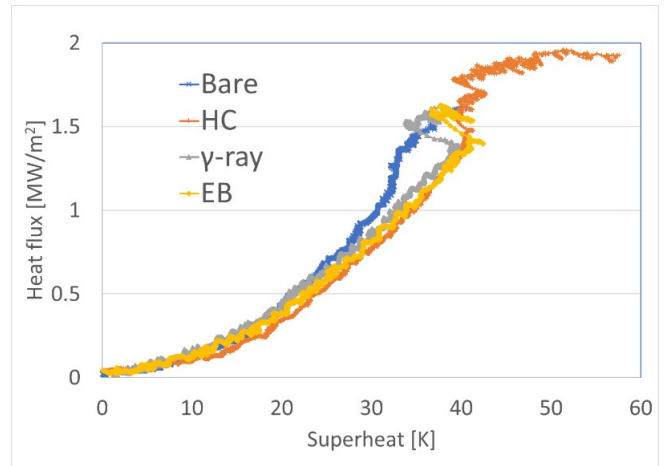


図 5 15×15 mm 伝熱面における沸騰曲線

### 3. 結論

20×20 mm 伝熱面、及び 15×15 mm 伝熱面条件において、ハニカム構造のない裸 (Bare) の伝熱面、ハニカム構造を付けた伝熱面 (HC)、ハニカム構造を付けた伝熱面をガンマ線(γ-ray)及び電子線(EB)で照射した場合についての知見をまとめる。

ハニカム構造を付けることによって、ハニカム構造を付けない伝熱面よりも CHF は大幅に増大する。一方、ハニカム構造に、900 kGy 程度のガンマ線もしくは電子線照射を行う事によって、CHF が減少する可能性があることが観測された。しかしながら、その場合であっても、ハニカム構造を付けない伝熱面 (Bare)における CHF と同等もしくは大きいことが確認された。

電子線照射などによる、伝熱劣化の回避策として、ハニカム構造を伝熱面表面に付けることが有効であることを確認することができた。

なお、照射によりハニカム構造を付けた伝熱面の最大除熱熱流束が減少するメカニズムについては今後の課題である。

### 参考文献

- [1] S. Mori et al., “Critical heat flux enhancement by a two-layer structured honeycomb porous plate in a saturated pool boiling of water,” Int. J. Heat Mass Transf., Vol.118, pp. 429-438 (2018)