

[21038]

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)}, Wang Kai^{A)}, 井上純也^{B)}
Koji Okamoto^{#A)}, Shunichi Suzuki^{A)}, Wang Kai^{A)}, Inoue Junya^{B)}
^{A)} Nuclear Professional School, the University of Tokyo
^{B)} Department of Nuclear Engineering and Management, the University of Tokyo

Abstract

It is well-known that irradiation may have effect on surface condition of metal materials, thus greatly changing the heat transfer characteristics. In this study, irradiation effects of CHF on aluminum, carbon steel, copper, and silver surfaces in downward-facing saturated flow boiling were investigated. This year, because of the long maintenance of electron beam facility, gamma-ray irradiation experiments had been performed. With the gamma-ray, Silver and carbon steel surface show CHF increase. The image analysis reveal that the CHF had inverse proportional characteristics with the square root of nucleation site density. The ITO-glass is the transparent heater with spattering ITO on the sapphire glass surface. The boiling phenomena can be visible through the heater. Thus, the detail nucleation characteristics of boiling had been observed. The gamma-ray irradiated ITO-glass has 0.75MW/m² critical heat flux, while non-irradiated glass has 1.2MW/m². The CHF with gamma-ray irradiated ITO-glass decreased drastically. The results has inverse characteristics with metal surface. The surface condition had drastically changed with irradiation. Future experiments will be needed to reveal the mechanism of CHF degradation.

Keyword: Critical heat flux; Flow boiling; Bubble behavior; Irradiation effect; Material effects

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。特に、ITO 膜などを用いた照射実験について検討を進めた。

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 °C 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リングされる。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 40 mm, 高さ 10 mm の長方形をしている。フローチャンネルの途中で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。

今年度は耐震工事などの関係で 1 号加速器照射室が利用できなかったこともあり、コバルト 60 照射施設を用いたガンマ線照射を行った。照射実験は、2021 年 12 月に実施した。第二照射室を用い、照射線量率は約 6kGy/h であった。2 週間の照射期間で、表 1 に示す照射線量での実験を行った。実験は、銅、銀、アルミニウム、炭素鋼の 4 種類の材料を用いて実施した。金属材料のほかに、透明ヒーターである ITO をスパッタした、ITO ガラスを用いた実験も実施した。

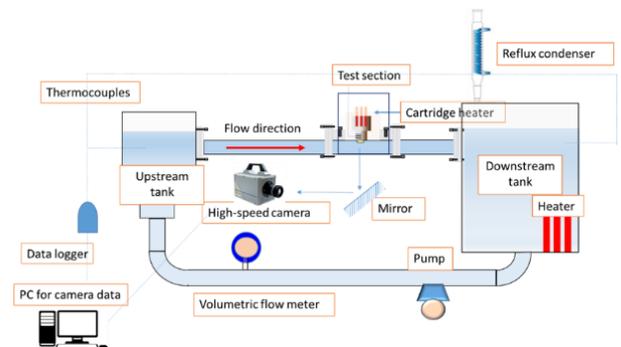


図 1 流動沸騰の実験設備

[21038]

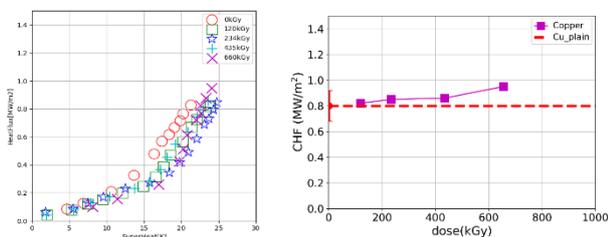
表 1 ガンマ線の吸収線量

材料	銅	銀	アルミ	炭素鋼
γ線吸収線量 (kGy)	120	234	540	120
	234	540	804	522
	435	660	880	895
	655	936	—	918

2.2 金属ブロックのガンマ線照射効果

(1) 銅の結果

図 3 に銅ブロックを用いた沸騰曲線と照射料に対する限界熱流束(CHF)の結果を示す。質量流束は $320 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、大気圧下で実施した。限界熱流束は照射無し実験の値と同程度の値を示し、吸収線量に伴って限界熱流束が僅かながら大きくなった。沸騰曲線を見ると、ガンマ線の照射を受けた銅沸騰面の結果はいずれも過熱度が大きい方向へシフトしており、沸騰熱伝達率が低下していることがわかった。これらの傾向は、過去の実験データと同等であるが、より吸収線量の大きな実験データで、どこまで CHF が増加するかを調べることが必要と考えられる。

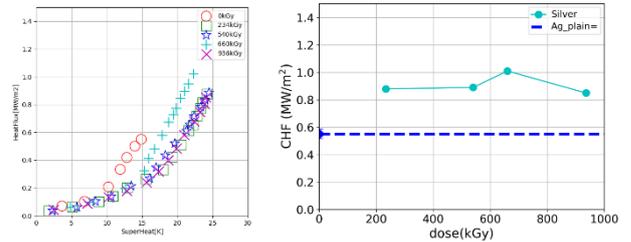


(a) 沸騰曲線 (b) 限界熱流束

図 3 銅の沸騰曲線と限界熱流束

(2) 銀の結果

図 4 に銀の沸騰曲線と CHF を示す。なお、伝熱ブロックは銅で製作し、表面に銀ロウ付けを行うとともに、表面を加工し、伝熱面を作成した。質量流束は $320 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、大気圧下で実施した。照射によって、CHF が大幅に増大していることが確認された。画像解析の結果、照射線量が増えると気泡の発生が少なくなり沸騰核密度も減少している。銀表面の酸化被膜の状態が変化し、沸騰核密度の減少により、CHF が増大していると考えられる。

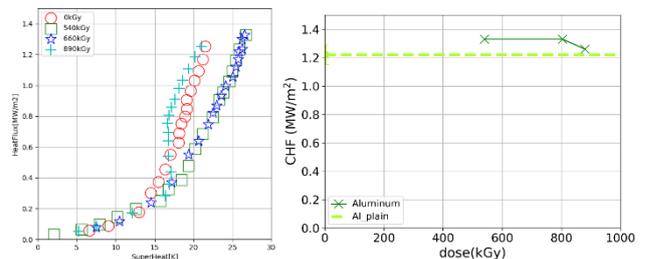


(a) 沸騰曲線 (b) 限界熱流束

図 4 銀の沸騰曲線と限界熱流束

(3) アルミの結果

図 5 にアルミブロックの沸騰曲線と CHF を示す。質量流束は $320 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、大気圧下で実施した。アルミニウムの場合は、照射による CHF はあまり変化がなかった。沸騰曲線を見ると、照射を行うことによって、沸騰伝熱が若干悪くなるが CHF としては大きく変わらないことがわかる。

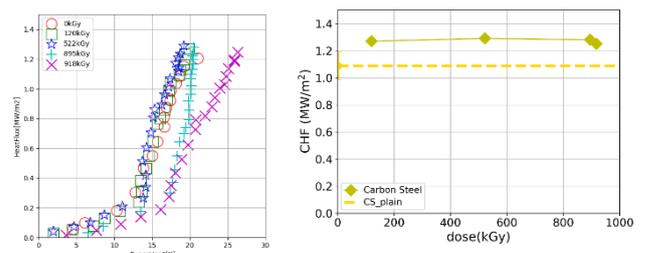


(a) 沸騰曲線 (b) 限界熱流束

図 4 アルミの沸騰曲線と限界熱流束

(4) 炭素鋼の結果

図 6 に炭素鋼の沸騰曲線と CHF を示す。質量流束は $320 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、大気圧下で実施した。炭素鋼についても、照射によって CHF が増加することがわかる。照射線量はあまり関係なく、照射された表面の CHF が増大している。



(a) 沸騰曲線 (b) 限界熱流束

図 6 炭素鋼の沸騰曲線と限界熱流束

[21038]

(5) まとめ

以上をまとめると、銀と炭素鋼については、ガンマ線照射によって、CHF が増大する現象が確認された。一方、銅とアルミニウムについては、ガンマ線照射による CHF 増大は観測されたが、その増大量はあまり大きくないことが確認された。

2.3 透明ガラスにおけるガンマ線照射効果

図 7 に透明電極を用いた場合、ガンマ線照射の有無による沸騰曲線を示す。

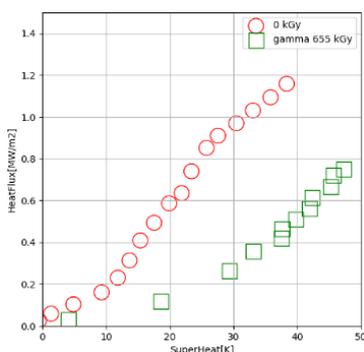
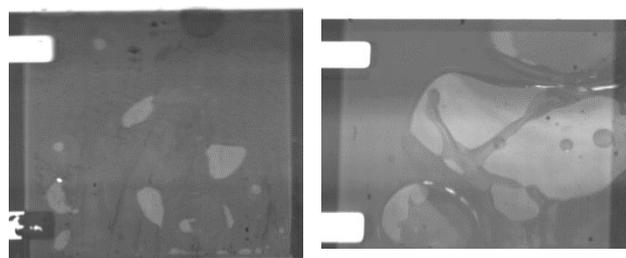


図 7 透明ガラスにおける沸騰曲線

未照射時に比較して、ガンマ線を 655kGy 照射した場合、過熱度が大きくなるとともに、少ない熱流束で CHF に達した。照射によって、伝熱面の性状が大きく変化したことがわかる。透明ガラスを用いているため、CHF 近傍まで、壁面近傍に生成される蒸気気泡の様相が観察できる。図 8 にほぼ同等の熱流束(0.72~0.74MW/cm²)の条件における沸騰伝熱面の可視化結果を示す。同等の入熱に対して、下向き伝熱面表面を覆う気泡の面積が格段に違う。これは、気泡の発生量(蒸発量)が同じであっても、表面の濡れ性などの観点から、表面から気泡が離脱しやすいか、気泡が表面を覆うかの違いが表れていると考えられる。



(a) 未照射 (b) 照射後(655kGy)
図 8 沸騰伝熱面の様相(0.72~0.74MW/m²)

これらの画像を解析し、伝熱面の気泡のカバー率を求めた。ここで、カバー率は、気泡が占める伝熱面積を、全伝熱面積で割ったものと定義した。熱流束を横軸にとり、画像処理により得られたカバー率をプロットすると図 9 になる。ここに示されるように、熱流束が低い条件では、カバー率はほぼ同等であるが、照射された伝熱面では、0.7MW/m²を超えると、一気にカバー率が増大し、CHF に至ることがわかる。本実験は下向き伝熱面であることに留意する必要があるが、気泡発生量がある限界を超えると、表面が気泡に覆われ早く CHF が発生すると考えられる。

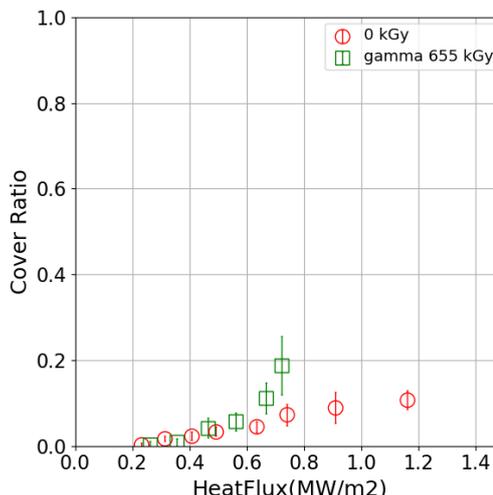


図 9 熱流束とカバー率の関係

3. まとめ

金属ブロックと透明ガラスにガンマ線を数百 kGy 照射し、沸騰曲線及び CHF を実験的に求めた。

金属ブロックについては、ガンマ線照射により、CHF が増大する傾向があることを確認した。金属による違いも明らかとなったが、表面性状(酸化被膜)との関係が深いと考えられる。

一方、透明ガラスにおいては、ガンマ線照射により、CHF が大幅に減少することが確認された。照射によってガラス表面の性状が変化し、気泡発生量が増えてくると、重力の影響も受け、下向き伝熱面を気泡が覆い安くなる。結果として、少ない熱流束で、CHF が発生すると考えられる。