

[20017]

放射線照射による伝熱への影響評価

Evaluation of Heat Removal Performance under Irradiation

岡本孝司 ^{#,A)}, 鈴木俊一 ^{B)}, Wang Kai^{B)}, 井上純也 ^{B)}, 上杉紘太郎 ^{B)}
Koji Okamoto ^{#,A)}, Shunichi Suzuki ^{A)}, Wang Kai ^{B)}, Inoue Junya ^{B)}, Uesugi Koutaro ^{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 characteristic in heat transfer characteristics. This caused instability in irradiation environment, thus increased the uncertainty during accident condition. In this study, irradiation effects of CHF on aluminum, carbon steel, copper, and silver surfaces in downward-facing saturated flow boiling were investigated. For aluminum, it was found that although the contact angle of the surface decreased greatly, no CHF change was observed up to 3000 kGy. This anti-radiation ability was likely to be related to the strong oxidation on aluminum surface. For carbon steel and silver case, CHF increased with total dose, which may be related to the oxidation level of the surface. For copper, CHF decreased, which confirmed our previous results. This founding may be crucial for the future heat transfer design and anti-accident counter-measurements in radiation environment.

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

1. はじめに

1.1 目的

従来の実験により、限界熱流束 (CHF) が、照射によって劣化する可能性があることを示している。この劣化現象について、CHF に与える様々な因子を考慮する必要がある。本年度は、材料が CHF と照射に与える影響を評価するため、4 種類の材料への照射効果を検討した。

2. 放射線照射と CHF

2.1 実験装置

図 1 に流動沸騰試験設備を示す。伝熱面として用いる試験ブロックは、最初に表面洗浄のためにエメリー1200 のサンドペーパーで酸化被膜を除去する。次に、照射のために電子ビーム照射施設で照射を実施した。この施設は、量子科学研究開発機構の高崎研究所の1号加速器を用いた。電子ビームはチャンバー内で2 MeVに加速され、1 mAの電流で照射した。照射に関する情報を表1に示した。試験ブロックの表面の線量率は、約100 kGy/minであった。チャンバー出口と試験ブロックの距離は200 mmに調整した。

1号加速器照射室に試験ブロックを設置したのち、照射を開始した。所定出力に達するまで約10分かかるため、電子ビームはカバーによって遮断され、試験ブロックには到達していない。所定の時間、カバーをあけることで、照射量を制御した。例えば1000 kGyの照射量を得るためには、10分間照射している。

また、照射停止後、加速器の停止作業があるため、試験ブロックを取り出すまでに約10分かかっている。その後、照射室から試験ブロックを取り出し、試験ループに設置したのち、実験を開始した。照射後、実験を開始するまでに、条件によって差があるが、1~2時間かかっている。

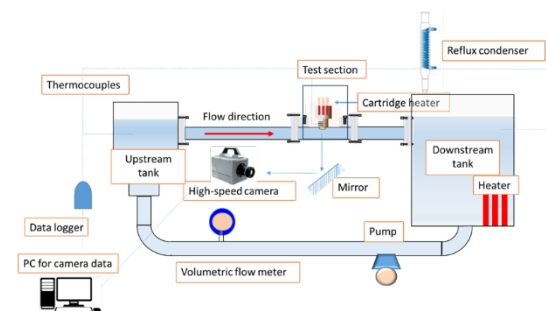


図1 流動沸騰の実験設備

試験ブロックの材料として、アルミニウム、炭素鋼(鉄)、銀、銅の4種類を用いた。照射実験は、高崎研究所において、2020年9月14日~18日、2020年11月16日~20日、2021年2月12日~18日の合計3週間実施した。

2.2 アルミニウムの結果

アルミニウムを試験ブロックとして用いた場合の、沸騰曲線、及び熱伝達係数の結果を図2に示す。

[16023]

図 2 (a) にアルミニウムの沸騰曲線を示す。質量流束は $320 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、大気圧下で実施した。照射線量によって、過熱度が変化しているにも関わらず、限界熱流束(CHF)には大きな変化は観測されなかった。過熱度の変化を評価するため、沸騰熱伝達 (BHT) と熱流束の関係を求め、図 2 (b) に示した。熱伝達係数(h)は次のように定義される。

$$h = q''/T_s \quad (1)$$

ここで、 T_s は過熱度であり、 q'' は熱流束である。過熱度の不確かさを考慮し、BHT のフィッティングカーブを、次式のように作成し、同図に直線でプロットしている。ここで、 A, B はパラメータであり最小二乗法によって求めている。

$$h = A(q''/q_{CHF,min})^B \quad (2)$$

1000 kGy の場合を除いて、アルミニウムの CHF は、照射量に関係なく、一定の値をとっており、照射の影響をほとんど受けていないことがわかる。一方、熱流束 = 0.7 MW/m^2 での照射線量による熱伝達係数の変化を示すが、BHT は少ない照射で増加し、照射量とともに減少する。

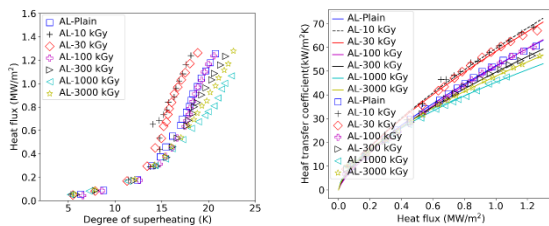


図 2 アルミニウムの沸騰曲線と熱伝達係数

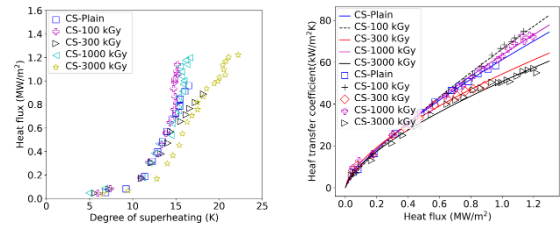
(a) 沸騰曲線、(b) 熱伝達係数

アルミニウムの CHF が大きく変化しないことは次のように説明できる。アルミニウム表面の酸化のしやすさに関係していると考えられる。Kim et al. [2] によれば、銅やステンレス鋼とは異なり、アルミニウムは 80°C 以上の熱湯と反応する可能性があり、濡れ性が容易に向上することを指摘している。Min and Webb [3] は、熱湯に浸すと、アルミニウム表面に酸化アルミニウム水酸化物が形成される可能性があることを報告している。つまり、照射実験の前に、アルミニウム表面がすでに酸化されていることで、その後の照射による CHF のさらなる変化は観察されなかったと考えられる。

2.3 炭素鋼の結果

炭素鋼を試験ブロックとして用いた場合の、沸騰曲線、及び熱伝達係数の結果を図 3 に示す。

図 3 (a) に炭素鋼ブロックを用いた沸騰曲線を示す。質量流束は $320 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、大気圧下で実施した。炭素鋼においては、CHF は照射を行うと増加する傾向を示した。図 3 (b) は熱流束と沸騰熱伝達係数の変化を示す。



(a) 沸騰曲線、(b) 熱伝達係数

図 3 炭素鋼の沸騰曲線と熱伝達係数

(a) 沸騰曲線、(b) 熱伝達係数

炭素鋼の CHF の増加は、RISA 効果の接触角の変化に関連していると考えられる。炭素鋼表面は照射線量が増加するとともに接触角が減少し、すなわち、濡れ性が良くなっている。

銅ブロックに対するプール沸騰時の限界熱流束に関する相関式として Kandlikar [4] の式がある。

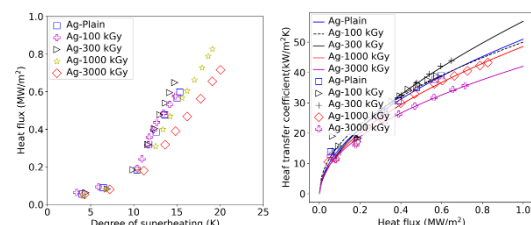
$$q_m = h_{fg} \rho_g^2 \left(\frac{1 + \cos \beta}{16} \right) \left[\frac{2}{\pi} + \frac{\pi}{4} (1 + \cos \beta) \cos \theta \right]^2 [\sigma g (\rho_l - \rho_g)]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

ここで、 q_m は CHF、 h_{fg} は潜熱、 ρ_l と ρ_g は、液相及び気相の密度、 σ は表面張力、 β は接触角、 θ は伝熱面の傾き角である。Kandlikar によれば、CHF は接触角の関数となっており、接触角が小さくなると CHF は増大する。つまり、照射量が増大することで、接触角の減少し CHF が増大していると想定される。

2.4 銀の結果

図 4 (a) に銀の沸騰曲線を示す。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。また、図 4 (b) に熱流束に対する熱伝達係数のデータを示す。

1000 kGy の場合を除いて、銀の CHF が照射量の増加とともに増加する。BHT は照射により増加し、照射量とともに減少している。



(a) 沸騰曲線、(b) 熱伝達係数

図 4 銀の沸騰曲線と熱伝達係数

(a) 沸騰曲線、(b) 熱伝達係数

照射線量が増えると気泡の発生が少なくなっている。銀の CHF 増加は、炭素鋼と同じメカニズムで説

[16023]

明できる。

2.5 銅の結果

銅の実験は、Wang et al. [1]により、既にデータが取得されている。本研究では、照射による CHF 劣化現象に対する、質量流束の効果を確認するために、 $160\text{kg/m}^2\text{s}$ における実験を実施した。また、Wang et al.[1]の CHF 劣化現象について再現性を確認するため、 $320\text{kg/m}^2\text{s}$ の実験も 1 ケースだけ実施した。

図 5 (a) に $160\text{kg/m}^2\text{s}$ の条件における銅の沸騰曲線を示す。照射線量が 1000kGy の場合のみ CHF が低下している。しかし、質量流束が低いため、もともとの CHF 自体が小さく、実験結果としては、さらなる検討が必要である。

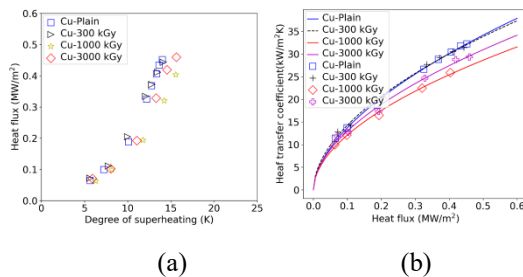


図 5 銅の沸騰曲線と熱伝達 ($G=160\text{ kg/m}^2\text{s}$)

(a) 沸騰曲線、(b) 熱伝達係数

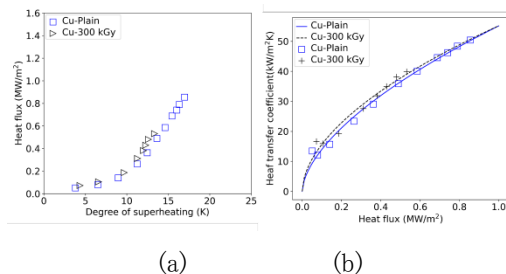


図 6 銅の沸騰曲線と熱伝達係数 ($G=320\text{ kg/m}^2\text{s}$)

(a) 沸騰曲線、(b) 熱伝達係数

図 6 (a) に、再現性確認のために実施した、照射線量 300 kGy 、質量流束 $320\text{ kg/m}^2\text{s}$ 、大気圧での銅の沸騰曲線を示す。CHF は、従来の実験結果を再現し、照射後に大幅に減少した。

高速度カメラを用いて質量流束 $320\text{kg/m}^2\text{s}$ における沸騰面の画像を撮影し図 7 に示す。気泡の画像を見ると、照射により、沸騰気泡の数が増大していることがわかる。

Wang et al. [1]によれば、CHF 劣化は、表面から発生する沸騰気泡の数が、照射により変化すると考えられていた。本研究においても、Wang et al. [1]の実験と同様の傾向を改めて確認し、実験の再現性が良いことを確認した。沸騰表面の低線量照射によって、沸騰核密度が増大し、それによって CHF の減少につながる。低線量照射によって、沸騰核密度が増加す

る理由は、電子ビーム照射が銅表面または表面に存在する微小な酸化被膜を破壊し、沸騰核になる可能性のあるより多くの空洞を作成していると考えられる。高線量照射は長い照射のために、沸騰核の元になる可能性のある空洞が大量に生成され、表面を再び滑らかにすると考えられる。照射面に生成される空洞は、ナノスケールの極めて微小で、密度も少ないため、形状や大きさを観察することは非常に難しい。

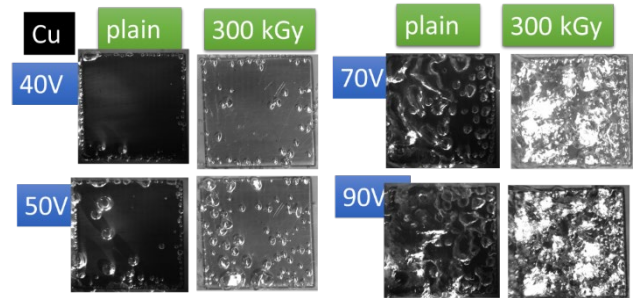


図 7 銅における沸騰気泡可視化 ($G=320\text{kg/m}^2\text{s}$)

3. まとめ

本研究において、4 種類の材料を用いて、電子線照射後の CHF データを取得した。大気圧、質量流束 $320\text{kg/m}^2\text{s}$ 、伝熱面サイズ $30\text{x}30\text{mm}$ 、下向き伝熱面の強制滞留沸騰実験のデータを取得している。電子線照射と CHF の関係については、おおまかに 3 種類のグループに分類できる。グループ A は、炭素鋼、銀に特徴的な、照射とともに増加するグループである。グループ B は、照射とあまり相関がないアルミニウム。そして、グループ C は照射により CHF が減少し、照射量増加とともに元に戻る銅である。

参考文献

- [1] L. Wang, N. Erkan, H. Gong, K. Okamoto. Electron beam irradiation effect on critical heat flux in downward-facing flow boiling. Int. J. Heat Mass Transf. 120 (2018) 300–304.
- [2] J. Kim, S. Jun, J. Lee, S.M. You, Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer of water on a superhydrophilic aluminum surface. J. Heat Transfer, 139 (1) (2017) 101501
- [3] Min, J., and Webb, R. L., Long-Term Wetting and Corrosion Characteristics of Hot Water Treated Aluminum and Copper Fin Stocks, Int. J. Refrig., 25 (8) (2002) 1054–1061.
- [4] Kandlikar, S. G., A theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation. Journal of Heat Transfer, Vol.123 (6), (2001), pp. 1071-1079.