

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02645

研究課題名（和文）放射線環境における伝熱劣化

研究課題名（英文）Heat Transfer Degradation under irradiation environment

研究代表者

岡本 孝司 (Okamoto, Koji)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：80204030

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：放射線を照射した伝熱面で、伝熱劣化現象が発生しうることが実験的に確認された。実験は、ガンマ線または電子線照射した銀伝熱面、アルミ伝熱面、炭素鋼伝熱面を中心として、表面の沸騰現象がどのように変化するかを伝熱実験及び画像解析によって評価した。本現象は、特に沸騰気泡と伝熱面の関係が重要であることを見出し、核沸騰状態を維持するための液膜の挙動に着目した。照射による表面の微細構造の状態変化が、沸騰核の生成を促し、沸騰気泡が伝熱面を覆いやすくなる。結果として微細な変化がマクロ伝熱に影響していると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

材料表面の酸化被膜の性状により、放射線照射による伝熱性能が影響を受けることを明らかとした。特に、銀やアルミにおいては、酸化被膜に電子線またはガンマ線が照射されると、ミクロな沸騰核に影響を及ぼし、結果として沸騰伝熱に影響を与えることが明らかとなった。特に限界熱流束など、安全性に影響のある伝熱性能においては、放射線によるミクロな酸化被膜の状態変化が、マクロな沸騰現象に影響を与えることを明らかとした。伝熱劣化は炭素鋼では観測されず、実機においては安全性には大きな影響を与えない可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Heat transfer characteristics had been affected by the irradiation. The CHF (Critical Heat Flux) experiment had been carried out using the silver surface, aluminum surface and carbon steel surface, irradiated by gamma-ray and electron-beam. The image processing and boiling curve had been evaluated to understand the CHF. The CHF may occur under the boiling bubble covering the heating surface. Nucleate site had been affected by the irradiated oxidized surface. Then, the bubble generation with many nucleate site causes the coverage of heating surface, resulting in the heat transfer degradation. The microscopic characteristics of irradiated oxidized surface has strong relation to macroscopic heat transfer characteristics.

研究分野：原子力工学

キーワード：限界熱流束 伝熱劣化 照射効果 原子力安全 放射線

1. 研究開始当初の背景

放射線を照射した伝熱面で、伝熱劣化現象が発生しうることを実験的に確認されている。除熱最大量を決める限界熱流束が、放射線照射によって1桁劣化するという現象である。放射線にさらされている、原子炉炉内において、この現象が発生すると、原子炉が事故時に想定よりも早く溶融することや、より早期に放射性物質が環境に放出されることにつながる。原子力発電所の安全性の根幹を揺るがす実験結果であり、その伝熱劣化現象が発生する条件を明確化するとともに、その対策を取ることが極めて重要である。

本研究では、伝熱劣化現象のメカニズムを解明し、伝熱劣化が発生する条件を実験的に明らかとする。また、実機において伝熱劣化が発生するような条件において、伝熱劣化を回避するための方策を検討する。

2. 研究の目的

放射線環境下の伝熱劣化現象は、原子力発電所の安全を脅かす可能性があり、そのメカニズムを明らかにして、十分な対策を行う事が極めて重要となっている。本研究においては、伝熱劣化現象を生ずる条件を明らかにするとともに、そのメカニズムを評価し、原子力発電所の安全性向上に大きく貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

従来の実験においては、銅伝熱面試験体に電子線を照射することによって、限界熱流束が大幅に低下する現象を見出している。この時、電子線の照射線量が大きくなると、伝熱劣化が小さくなる傾向がある。伝熱面における電子線照射の効果を実験的に評価する。また、ガンマ線照射においては、伝熱劣化が観測されていないことから、様々な実験データを蓄積していく。特に、実機で想定される炭素鋼など、材料が変わることによる酸化被膜の状態が変化することを考慮し、様々な材料を用いた実験を進める。伝熱面の材料として、アルミニウム、炭素鋼(鉄)、銀の3種類を用いた。

4. 研究成果

電子線及びガンマ線を用いた照射実験と、照射後の強制対流限界熱流束実験を実施した。

(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。

照射のために電子ビーム照射施設及びガンマ線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(電子線)及びコバルト60ガンマ線照射施設を用いた。電子ビームは1号加速器のチャンバー内で2 MeVに加速され、1 mAの電流で照射した。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。ガンマ線照射は、2号照射室を用いた。線量率は照射位置に依存するが、5.5~6kGy/hであった。電子線及びガンマ線とも、照射時間を調整することで所定の照射線量を得た。なお、電子線は6000kGy/h、ガンマ線は6kGy/hと3桁線量率が異なる。過去の研究で、照射終了後数時間は表面状態が保たれることがわかっている。このため、照射後、2時間以

内に実験が終了するように留意して実験を行った。なお、流動ループは縦 10mm 横 40mm の矩形流路であり、伝熱面は 30x30mm の正方形である。図 1 に示すように、流路上方から、伝熱面を設置し、下向き伝熱面とした。ブロックはヒーターによって過熱し、熱流束と伝熱面表面温度は熱電対から得た。流量は 320kg/m²s として実験を行っている。

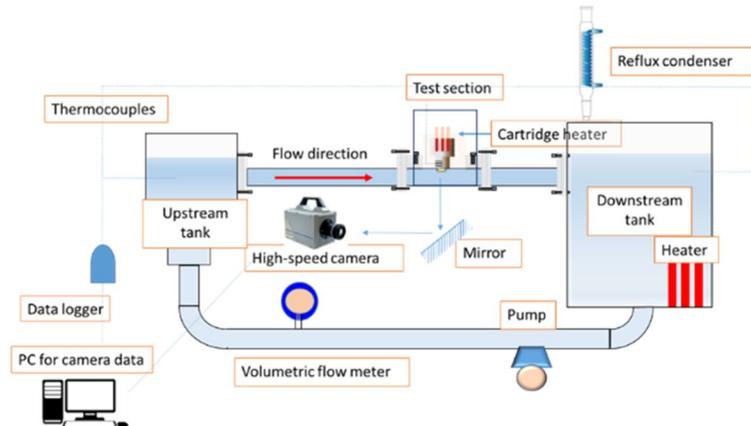
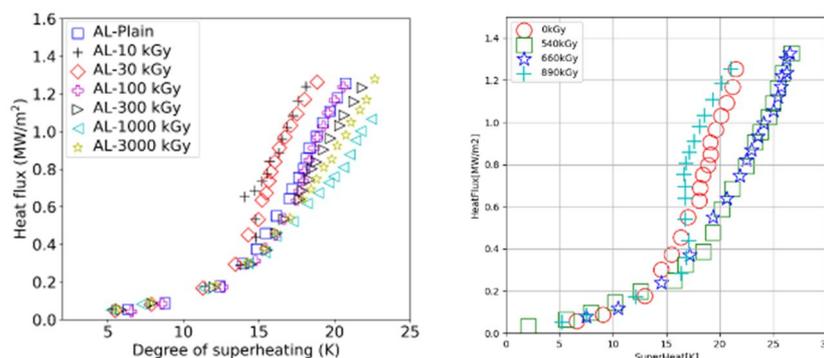


図 1 流動沸騰の実験設備

(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、沸騰曲線の結果を図 2 に示す。

質量流束は 320 kg/m²s、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。電子線照射の場合もガンマ線照射の場合も、未照射のデータは同一となる。未照射データと比較して、電子線照射の場合は、10kGy、30kGy で過熱度が小さくなり、線量率が増加するにつれて、過熱度が大きくなる方向となる。1000kGy の場合を除いて、限界熱流束は同一であった。一方ガンマ線照射の場合は、500kGy の照射では過熱度が大きくなり、890kGy では未照射とほぼ同等の過熱度となった。沸騰曲線は、双方の場合とも、熱流束が増大するにつれて、過熱度は単調増加しているが、電子線の 10kGy、ガンマ線の 890kGy の 2 ケースにおいては、0.4~0.8MW/m² の領域において、過熱度がほとんど変わらない(場合によっては減少する)という状況が観測された。熱伝達特性が照射によって変化することがわかる。これは、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。アルミニウムは 80 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。また、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。酸化被膜の状態が影響していると考えられる。



(a) 電子線照射

(b) ガンマ線照射

図 2 アルミニウムの沸騰曲線と熱伝達係数

(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、沸騰曲線の結果を図3に示す。未照射の場合のデータが異なっている。沸騰曲線自体は類似であるが、ガンマ線照射前に実施した結果は、 $1.2\text{MW}/\text{m}^2$ 、電子線では $1.0\text{MW}/\text{m}^2$ と 20%程度の誤差がある。これは、炭素鋼は熱伝導が悪いため、銅ブロックの上に 1mm 厚の炭素鋼板を銀口ウ付けしたために、試験片による差異が出たためと考えられる。一方で、照射については同じ試験片で実験をしていることから相対的な差異で比較することができる。照射によって、いずれも $1.2\text{MW}/\text{m}^2$ 程度となっており、照射による影響は少ないことがわかる。一方、沸騰曲線自体は少しずつ変化しており、特にガンマ線 895kGy、電子線 100kGy では $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ 以上で過熱度が変わらない特性を示している。

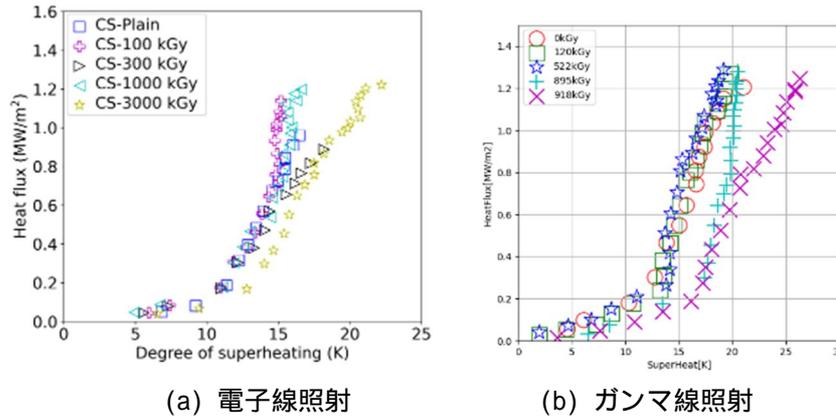


図3 炭素鋼の沸騰曲線と熱伝達係数

(4) 銀の結果

図4に銀の沸騰曲線を示す。なお、伝熱ブロックは銅で製作し、表面に銀口ウ付けを行うとともに、表面を加工し、伝熱面を作成した。質量流速は $320\text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$ 、大気圧下で実施した。銀の場合、未照射のデータは、 $0.6\text{MW}/\text{m}^2$ で CHF となる。電子線照射の場合、1000kGy を超えると CHF が増大し、 $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ まで増加する。一方、ガンマ線照射の場合、230kGy を超えると、 $0.9\sim 1.0\text{MW}/\text{m}^2$ まで増大する。未照射に比較して、酸化被膜に放射線が影響を与え、沸騰核密度が変化することで、CHF が増大している可能性がある。

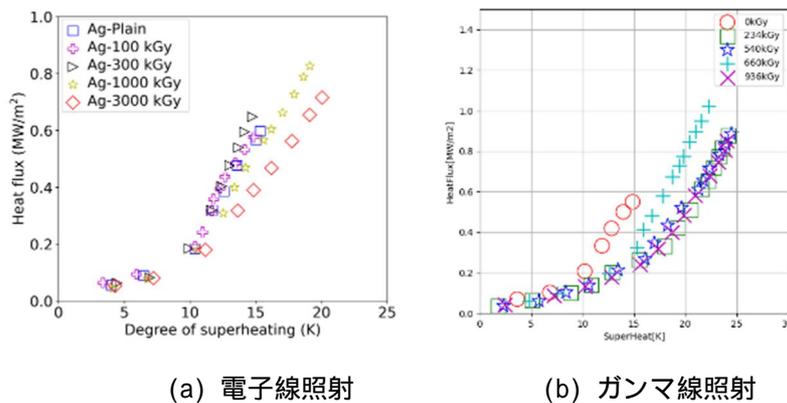


図4 銀の沸騰曲線と熱伝達係数

(5) まとめ

様々な材料を用いた CHF 実験を行った。電子線照射とガンマ線照射における特性の違いを評価した。銅以外の材料では、伝熱劣化は観測されないことが確認された。材料表面の酸化被膜の状況が影響していると考えられる。酸化被膜を形成することなどで、伝熱劣化を回避可能と考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Wang Kai, Gong Haiguang, Wang Laishun, Erkan Nejdte, Okamoto Koji	4. 巻 127
2. 論文標題 Irradiation effects of CHF on bare and porous honeycomb surface in downward-face saturated pool boiling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress in Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 103444 ~ 103444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnucene.2020.103444	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Kai, Li Chun-Yen, Pellegrini Marco, Erkan Nejdte, Okamoto Koji	4. 巻 165
2. 論文標題 Extended development of a bubble percolation method to predict boiling crisis of flow boiling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 120660 ~ 120660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120660	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Kai, Erkan Nejdte, Okamoto Koji	4. 巻 156
2. 論文標題 Oxidation effect of copper on the downward-facing flow boiling CHF under atmospheric condition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 119866 ~ 119866
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119866	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------