

[2023206002]

放射線照射と伝熱性能の相関に関する研究(2023 年度)

Relationship between irradiation and heat transfer (FY2023)

岡本孝司^{#A)}, 陳泰山^{B)}, Wang Shixian^{B)}, Wang Kai^{A)}, 三輪修一郎^{A)}
Koji Okamoto^{#A)}, Taishan Chen^{B)}, Shixian Wang^{B)}, Kai Wang^{A)}, Shuichiro Miwa^{A)}

^{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 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

優れた経済性と安定性を持つ原子力発電は長年ベース電源として利用されている。しかしながら、福島第一原子力発電所事故のような長期間、広域的に影響を与えるリスクも伴っている。したがって、原子力発電の安全性を向上させることが長年研究の目標として掲げられている。安全性向上へのアプローチとして In-Vessel Retention (IVR) が考えられ採用されている。IVR は燃料溶融時に、圧力容器外部を水で除熱し、圧力容器の損害を避ける手法である。一方、IVR による冷却は、沸騰による熱伝達であり、限界熱流束によって制限される。限界熱流束の向上が原子力発電に寄与する。

本研究では、下向き伝熱面に注目し、伝熱面構造変化が流動沸騰の条件下でどのように限界熱流束に影響を与えるかを評価する実験を行った。特に、実際の環境における放射線の影響に着目し、吸収線量が限界熱流束や伝熱面の沸騰特性に与える影響についても評価を行った。

2. 実験概要

大気圧環境の下で多孔質体伝熱面の使用や放射線照射などの手法で伝熱面の特性を変え、下向き伝熱面飽和強制流動沸騰実験を行い、それぞれの条件下の温度データを測定し、熱流束を計算した。

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。装置内の水温はプレヒーターによって 100℃ の飽和温度に制御され、水の流量はポンプによって制御される。気泡の挙動を観測するために、流路は透明なアクリル製品を採用している。下流タンクの上部に凝

縮器が組み込まれており、蒸発による水の減少を防ぐ。試験ブロックは下向きであり、この試験ブロックを変更することで伝熱面の条件を変えた。金属の試験ブロックの上にカートリッジヒーターを設置し伝熱面を加熱した。銅ブロックにおいては、伝熱面から 3, 6, 9mm の温度を熱電対で計測する。

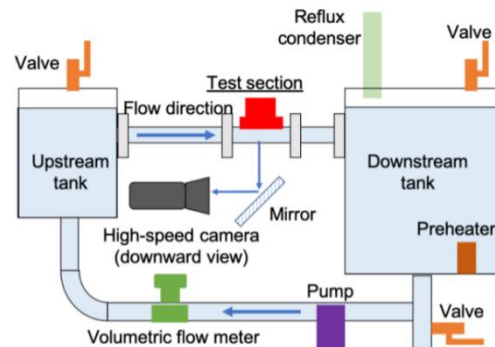


図 1 強制流動沸騰実験装置の概略図

2.2. 照射施設

伝熱面への放射線照射は群馬県高崎市にある量子科学技術研究開発機構高崎研究所の一号加速器とコバルト 60 の照射施設を利用した。電子線による照射は加速電圧 2MeV、電流 1mA であり、その条件下での吸収線量率凡そ 100kGy/min である。ガンマ線による照射はコバルト 60 を線源として利用し、吸収線量率は凡そ 8~10kG/h である。

2.3. マイクロハニカム伝熱面

図 2(a) に多孔質体(マイクロハニカム)を使用した試験ブロックの写真を示している。多孔質体は九州大学森教授の研究グループによって作成されたものであり、伝熱面の沸騰特性が大きく変化する^[1]。今回

[2023206002]

の実験は 15mm×15mm, 20mm×10mm と 30mm×10mm 三種の伝熱面で滑らかな伝熱面及びマイクロハニカム伝熱面を使用して実験を展開した。

2.4. 表面処理

伝熱面に放射線照射や多孔質体の処理を行う前に、行う前に#1200 紙やすりで銅の表面を研磨し、その後アセトンと蒸留水で表面を清浄する。多孔質体を用いる場合は、多孔質体を伝熱面にはんだ付けする。まず、照射なしの状況で騰実験を行い、試験ブロックを放射線照射した後、同じ条件で実験を行った。



図 2 ハニカム試験ブロックの写真

3. 実験結果

得られた実験結果を表 1 にまとめて示す。いずれも 8L/min の流速で行った強制流動沸騰実験である。

表 1 下向き伝熱面強制流動沸騰実験の結果

伝熱面 (mm × mm)	素材	吸収線量	限界熱流束 (MW/m ²)
銅 15×15	滑らか(Bare)	0	1.60
	ハニカム (多孔質体)	0	1.93
		γ 920 kGy	1.61
		EB 900 kGy	1.62
銅 20×10 (流動方向× 垂直方向)	滑らか(Bare)	0	1.09
	ハニカム (多孔質体)	0	1.27
		γ 905 kGy	1.30
		EB 900 kGy	1.34
銅 30×10 (流動方向× 垂直方向)	滑らか(Bare)	0	0.89
	ハニカム (多孔質体)	0	1.18
		γ 930 kGy	0.91
		EB 900 kGy	0.84

4. 考察

4.1. ハニカムの影響

図 3 は滑らかな伝熱面とハニカムを使用した伝熱面を使用した際に、それぞれの沸騰曲線を現している。横軸は表面温度の過熱度であり、縦軸は熱流束を示している。すべての形状の伝熱面において、ハニカムを使用することにより限界熱流束の上昇及び熱伝達率の上昇を確認することができた。

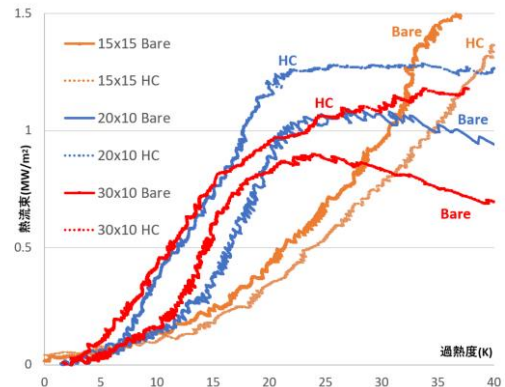


図 2 ハニカム構造が沸騰曲線に対する影響

ここで代表的な例について考察する、図 4 は 30mm×10mm 伝熱面の実験における限界熱流束近傍の時間に伝熱面の表面温度 T_{suf} 及び熱流束 q の変化を示している。滑らかな伝熱面 (Bare) を使用した場合、限界熱流束に達した際、伝熱面に膜沸騰が起き、完全に伝熱できなくなり、熱流束が急激に下がり、温度表面温度が急激に上昇する。一方ハニカム (HC) 伝熱面を使用した際に、2500 秒のタイミングで既に限界熱流束に達したが、その後熱流束が急減せず、ある程度の熱流束を保ちながら表面温度のみ上昇する現象を確認した。

この現象の原因として、熱流束を表面温度に大きく影響を与える要素は水の供給にある。Bare 条件の伝熱面の除熱は流れる流体(主に液相の水)の供給によって寄与されるが、ハニカム伝熱面の場合はチャンネルに流れる水のほかに、その特殊的な構造によっておこる毛細管現象がハニカムの内部に水が供給される。限界熱流速に達したときに、Bare 条件

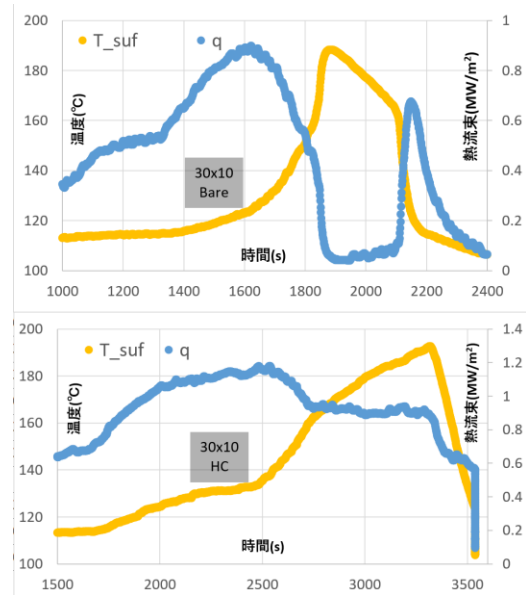


図 3 30×10 伝熱面におけるハニカム構造の影響

[2023206002]

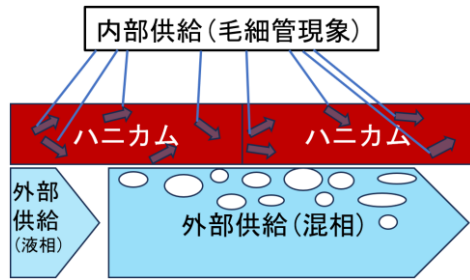


図 4 ハニカム構造伝熱面における水の供給

と違い、水の内部供給により膜沸騰が起こらず、熱流束は下がるもののゼロにはならない。結果として、熱流束が低下し、表面温度が上昇する現象となった。

4.2. 形状の影響

図 3 には、伝熱面形状が異なる場合の沸騰曲線を示している。20mm×10mm 及び 30mm×10mm の実験は流動方向×垂直方向となっている。15mm×15mm と 20mm×10mm を比較した際に、15mm×15mm のほうが伝熱面の面積が大きい一方、過熱度 30K までの熱伝達率は 20mm×10mm のほうが高く、限界熱流束は 15mm×15mm のほうが高い現象を観測した。さらに 20mm×10mm と 30mm×10mm を比較した際に、過熱度 18K まで 30mm×10mm のほうの熱伝達率が高く、伝熱面の面積が増えたにもかかわらず限界熱流束が低下する現象を確認した。その理由について考察する。

図 6 は流動方向が長い伝熱面を使用した際に、除熱に寄与する流体の違いのイメージを示している。下向き強制流動沸騰実験において、伝熱に寄与する流体のボイド率が伝熱の効果に大きく影響を与える。その原因として、混相流体は重力の影響により、気泡が伝熱面の近傍に溜まりやすくなっており、伝熱面における水の供給を阻む作用が考えられる。流動方向の長さが長ければ長いほど、ボイド率が安定せず、限界熱流束にネガティブな影響を与える可能性があると考えられる。

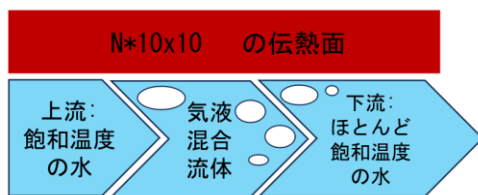


図 5 長方形伝熱面で伝熱に寄与する流体の変化

4.3. 放射線の影響

滑らかな伝熱面における放射線処理の影響はすでに先行研究で議論されたため^[3]、本節は主にマイクロハニカム構造伝熱面における放射線処理の影響について考察する。図 7 は 15mm×15mm 伝熱面を 920kGy の γ 線及び 900kGy の EB で処理した沸騰曲線を示している。

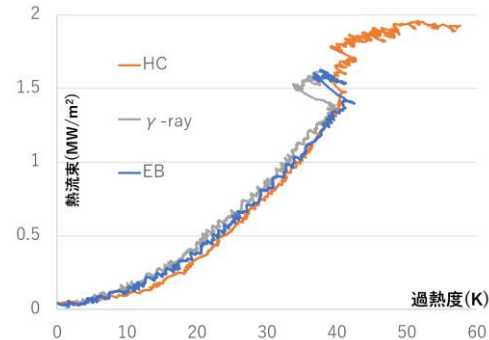


図 6 15×15 放射線処理後の沸騰曲線の比較

γ 線と EB で処理することにより、限界熱流束が低下し、ほぼ Bare 条件と同じような数値になる現象が確認された。さらに、過熱度 40K (EB)、32K (γ) のどこかに、表面の温度が下がり、熱流束が増大する現象を確認することができた。この現象が起きる原因として、放射線処理することによりハニカム全体のキャピラリーフォースが弱くなり、ハニカム構造の内部に気泡の離脱がしにくくなる。結果として大量な気泡がハニカム内部にたまり、その溜まった気泡が何等かのメカニズムで一気に離脱し、水が供給されるようになるものだと考えられる。

5. 結論

a) マイクロハニカム構造伝熱面を使用することにより、同じ伝熱面積でも滑らかな伝熱面よりも限界熱流束が上昇する。滑らかな伝熱面は限界熱流束に達した後、膜沸騰に遷移するが、ハニカム構造伝熱面は毛細管現象による水の内部供給で膜沸騰に遷移せず、限界熱流束に達し、熱流束は下がるものの、除熱し続けることが可能となる。

b) 強制流動下向き伝熱面沸騰実験において、伝熱面の流動方向の長さと垂直方向の幅の比を変えた実験において、形状による影響を確認した。下向き伝熱面は重力の影響を受け、気泡が伝熱面の近傍にたまりやすく、伝熱に寄与する流体のボイド率が大きく伝熱に影響を与えることが考えられる。

c) 放射線の照射処理により、マイクロハニカム限界熱流束が低下した。これは、多孔質体における表面張力が弱くなり、水が供給しにくくなるためと考えられる。

参考文献

- [1] Mori Shoji, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, volume 108, part B, 2354-2557
- [3] L. Wang, N. Erkan, H. Gong, K. Okamoto, Electron beam irradiation effect on critical heat flux in downward-facing flow boiling, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 120, pp. 300-304, (2018)