

[15023]

放射線誘起表面活性による限界熱流束評価 Critical Heat Flux with Radiation Induced Surface Activation

岡本孝司^{#A)}, エルカンネジェット ^{A)}, カーンアブデュル ^{A)},
Koji Okamoto ^{#A)}, Nejdett Erkan ^{A)}, Abdul Khan ^{A)}
^{A)} Nuclear Professional School, the University of Tokyo

Abstract

The Critical Heat Flux (CHF) is very important for boiling heat transfer. Under the irradiation condition, the CHF increases because of the surface wettability improvement. For the advanced nuclear power plant, the in-vessel melt retention (IVMR) is one of the most important strategy to reduce the risk of severe accidents. The high-temperature melted core will be cooled at the lower plenum with filling the water outside the plenum. The boiling heat transfer outside the vessel determines the success of the IVMR. When the melt relocation happens, the lower plenum will be very high radiation conditions. Therefore, if the radiation affects the CHF, higher heat removal can be assumed. To confirm the CHF characteristics under irradiation conditions, the CHF experiments had been carried out at Takasaki Laboratory. The Co-60 gamma-ray source and Electron beam were applied to the test section. Then, CHF had been improved for pool boiling experiments. However, very few effects had been found for flow boiling conditions.

Keyword: Critical Heat Flux, In-Vessel Melt Retention, Radiation Induced Surface Activation.

1. はじめに

1.1 目的

限界熱流束向上に与える RISA 効果の影響を評価するため、放射線を照射した試験体を、実験装置に組み込み、沸騰二相流実験を行う。得られる結果より、RISA 効果(放射線誘起表面活性)が限界熱流束に与える影響について検討する。これらの実験で得られる結果を比較し、ハニカム多孔質体及び RISA 効果が限界熱流束向上に与える影響について検討する。

射を実施した場合には、照射設備から取り外したのち、1 時間以内で CHF が得られるように実験を行っている。過去の研究により、RISA 効果は、照射後数時間継続する事が知られているためである。なお、ハニカム多孔質体としては、板厚 1mm のステンレスの焼結金属(100 μ m)を用いた。銅ブロック伝熱面の直前に設置して用いている。図 3 に銅伝熱面、及びハニカム多孔質体を設置した状況での銅伝熱面を示す。

2. 限界熱流束に与える RISA 効果の影響

2.1 実験装置

実機条件を模擬した状態は、伝熱面が下向きもしくは角度の付いた下向き伝熱面となる。また、自然対流によって、飽和状態の対流による冷却となる。このことから、強制流動実験装置(図 1)を用いる。また、比較のために、プール沸騰実験装置(図 2)も用いている。伝熱面の設置方向については、浮力による気泡の抜けが期待できないことから、最も厳しいと考えられる下向き伝熱面を評価する事とする。強制対流実験装置は完全な下向きであるが、プール沸騰においては、完全な下向きは実験の不確かさが大きくなるため、5 度伝熱面を傾けている。なお、実験は大気圧下で実施した。沸点は 100 度である。

2.2 伝熱面

伝熱面は銅ブロックにより構成されている。断熱性能に優れた PEEK で周りを囲い、30x30mm の伝熱面を構成した。実験及び照射前に洗浄を行い、汚れの無い状態で実験及び照射を行っている。なお、照

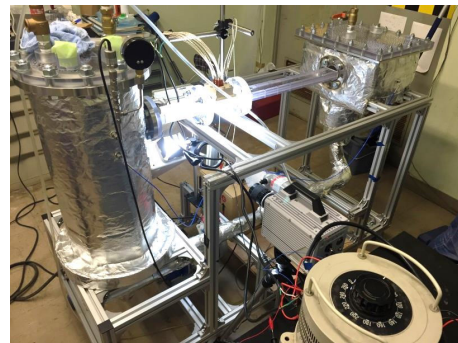


Figure 1. Flow boiling experimental facility

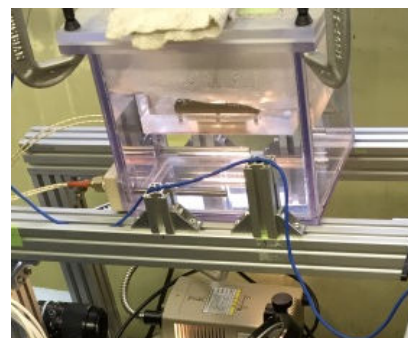
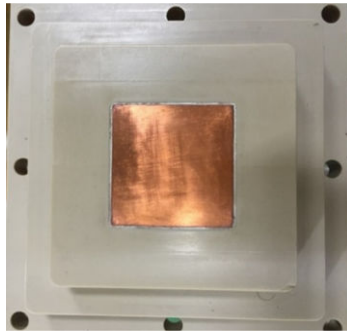
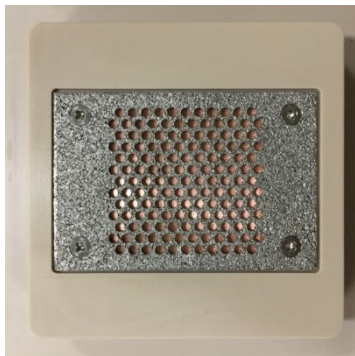


Figure 2. Pool boiling experimental facility

[15023]



(a) Bare surface test section



(b) Honeycomb test section

Figure 3. Test Pieces

2.3 照射装置

日本原子力研究開発機構高崎研究所のコバルト 60 ガンマ線照射設備(以下 Co-60 と呼ぶ)、及び第一号加速器電子線照射設備(以下 1 号加速器と呼ぶ)の 2 種類の照射装置を用いた。照射する放射線は、それぞれ、ガンマ線と電子線と異なる。

ガンマ線は、コバルト 60 の特性放射線である 1.33MeV 及び 1.17MeV の光子を 15kGy/h の線量率で照射している。図 4 に今回照射を実施した様子を示す。PEEK をつけたまま、銅ブロックの照射を行っている。なお、銅ブロック以外の照射効果を見るために、ハニカム多孔質体を含む、様々な材料の照射も同時に実施している。

照射時間を 64~68 時間に制御する事によって、積算照射線量は、約 1000kGy (960~1200kGy)とした。

1 号加速器における照射については、電子線のエネルギーは 2MeV とし、電流を 1mA とした面照射を実施した。この条件における照射線量率は、100kGy/min となり、ガンマ線に比べて 4 桁以上強い放射線を照射する事が可能となる。電子線照射においても、照射時間を 3~30 分に制御する事によって、300kGy, 1000kGy, 3000kGy の積算照射線量となるようにした。非常に強い放射線であるため、PEEK などへの影響を減らすために、2mm 厚のステンレスカバーで PEEK 部分を覆っている。電子線であるため浸透深さは 1mm 程度となり、2mm あれば電子線は透

過しない。

図 5 に照射治具と照射前の試験片設置状況を示す。伝熱面はステンレスの穴の下に存在している。また、ガンマ線と同様に、ハニカム多孔質体を含む複数の試験片を同時に照射している。

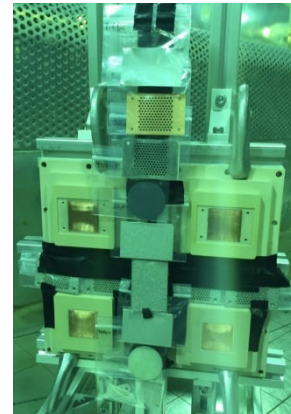


Figure 4. Co-60 irradiation

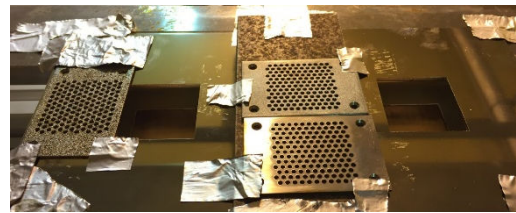


Figure 5. Electron Beam irradiation

3. 実験結果

3.1 強制流動実験

強制流動実験装置を用いて、CHF 実験を実施した。照射が照射装置のスケジュールで限定されるため、パラメータをおおく変更する事が出来ない。図 6 にハニカムなどを設置しない、銅伝熱面に対する CHF をまとめる。パラメータとしては、まず、非照射時について、流量を 320kg/m²s と 640kg/m²s で実施した結果を示す。沸騰曲線としては若干の違いがあるが、流量が増加すると、CHF が増大している事が判る。一方、ガンマ線照射(G)と電子線照射(300~3000 kGy)の CHF はいずれも減少している。流量については、ガンマ線照射(G)については、640 との比較となるが、核沸騰の開始が高温側に依っている。これは、濡れ性が向上したことによって、核沸騰開始点が遅れているためであると考えられる。一方、電子線照射については、沸騰曲線上はほぼ同一の曲線状を推移しているが、低い温度かつ低い熱流束で沸騰遷移を起こしている。この原因については、今後調査を進める必要がある。

しかしながら、強制流動実験においては、RISA 効果による CHF の増加は見られない事がわかった。

[15023]

3.2 プール沸騰実験

プール沸騰実験装置を用いて同様の CHF 実験を実施した。伝熱面設置角度は5度に固定し、銅伝熱面に対する沸騰曲線を図 7 に示す。非照射の沸騰曲線は2回取得しているが、ほぼ同様の値で CHF となっている。一方、ガンマ線照射(G)及び電子線照射(1000kGy)ともに、大幅な CHF の増大が計測されている。それぞれ、65%及び 53%という大幅な CHF 増大である。強制流動実験ではガンマ線と電子線の違いが見て取れているが、プール沸騰実験では、CHF には大きな差は無い。しかし、沸騰曲線を見ると、ガンマ線照射(G)では、伝熱面温度が大きく増大しつつ、限界熱流束も増大している。一方、電子線照射では沸騰曲線はほぼ変わっておらず、単純に沸騰曲線を延長した形での限界熱流束向上が見られている。限界熱流束向上に与える RISA 効果が電子線とガンマ線で異なる事を意味していると考えられるが、そのメカニズムに関しては今後の課題である。

3.3 考察

上述のように、銅の伝熱面においては、照射前後の CHF について、強制流動実験とプール沸騰実験で大きな違いが得られている。CHF に与えるパラメータとしては、サブクール度と質量流量が大きい。本実験はサブクール度がゼロでの飽和沸騰条件である。質量流量の影響は大きい事が知られており、本実験においても、CHF については大きな変化があった。一方、従来は RISA 効果を確認する実験としては、主としてプール沸騰実験であった。一部、小口径管内沸騰実験によって、RISA 効果で CHF 向上が観測されているが、ごく限られた条件である。本実験においては、下向き伝熱面を用いているという事も従来の実験と異なる条件である。しかしながら、本実験の範囲においては、流動による CHF への影響が非常に大きく、流動環境下では RISA 効果は観測できなかった。これは、下向き伝熱面であるために、沸騰気泡が伝熱面に与える影響が相対的に大きくなるためであるとも考えられる。

4. まとめ

コバルト 60 ガンマ線照射施設で 1000kGy 以上の照射を行った銅伝熱試験体を強制流動実験装置に組み込んで実験を行った結果、限界熱流束(CHF)向上は見られなかった。一方、同時に実施したプール沸騰実験装置では、CHF 向上が見られた。

RISA 効果だけではなく、流動の影響が重要であることが確認された。

なお、ハニカム多孔質体の影響についても評価を継続中である。

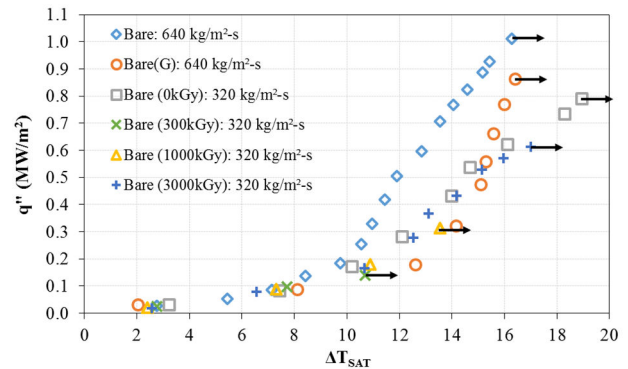


Figure 6 CHF under flow boiling

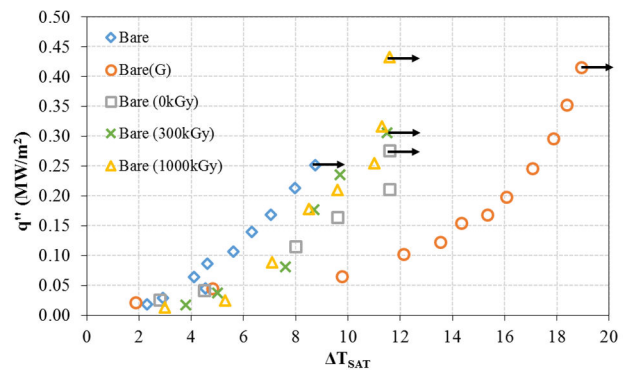


Figure 7 CHF under pool boiling