

放射線照射下での沸騰伝熱特性に関する研究

Study on Boiling Characteristics under the Irradiation Environment

氏名 今井康之

1. 諸言

原子炉のみならず、ボイラ、内燃機関など多くの熱伝達機関では、沸騰状態における単位時間単位面積あたりの高い熱伝達量が求められており、伝熱促進技術開発は工学分野の主要テーマとして続けられてきている。近年プラズマ形成された酸化皮膜金属に γ 線照射を行った結果、表面濡れ性の改善や伝熱特性の改善が生じることが確認されている。この放射線による表面活性は放射線誘起表面活性、また沸騰熱伝達改善は放射線誘起沸騰改善とそれぞれ名づけられている。基礎伝熱研究では γ 線照射された酸化チタン板の限界熱流束が向上することが確認されている。実験は大気開放された水容器内に試験片を水平に固定し試験片に通電加熱するプール沸騰実験にて行い、積算照射量 800kGy 以上の γ 線照射により照射前のほぼ 2 倍の限界熱流束を得ている。しかし詳細な機構は解明されていない。

そこで本研究ではこれまでの基礎実験で得られた知見をもとに、常温常圧下における基礎的な伝熱試験としてプール沸騰実験を行い再現性の確認を行った後、放射線照射による伝熱促進効果を確認するため、各熱流束域での沸騰様相を捉えると共に γ 線環境下照射中での沸騰挙動メカニズムを調べる。

2. γ 線照射直後の酸化皮膜金属における沸騰熱伝達特性の変化

実験は Fig. 1 に示す様な大気圧下でのプール沸騰実験で行った。試験片は直径 0.5mm、計測部長さ約 40mm のチタン細線を用いた。試験体表面にはプラズマ照射により安定した酸化皮膜を形成した。 γ 線照射は ^{60}Co 線照射室にて線量強度 1kGy/hr で一定時間行い照射直後に実験を行った。従って、プール水は照射されず水の放射分解はされていない。水容器は大気開放されており、蒸留水はヒーターによって飽和温度まで加熱されている。試験片はプール水中に水平に固定し通電加熱され、熱流束は随時得られた抵抗値より計測される。また、限界熱流束は電圧を上げ試験片が破断するまで計測を行い、回路内電流値が最大の値を取る点とした。Fig. 2 に本研究で求めたチタン、酸化チタン、 γ 線照射直後の酸化チタンの沸騰曲線の 1 例を示す。表面温度は温度分布を一様と仮定することで比抵抗値から算出した。また各曲線右上の先端は限界熱流束である。 γ 線非照射のチタンと酸化チタンを比較する。酸化皮膜を有する試験片の沸騰曲線は、酸化皮膜を形成していない結果に比較して沸騰熱伝達率が向上する結果となった。チタン線表面に施した酸化皮膜により表面性状が異なるため違いが生じたためと考えられる。Fig. 2 より限界熱流束近傍のみを拡大して、Fig. 3 に示す。 γ 線照射・非照射の酸化チタンについて比較する。 γ 線照射の有無にかかわらず核沸騰から限界熱流束に至るまで沸騰曲線に顕著な違いは見られなかった。 γ 線照射により限界熱流束のみが向上することが確認された。

また非照射・照射直後の試験線について任意の熱流束での沸騰様相を、高速度ビデオを用いてシャッター速度 1/8000sec、2000fps で撮影し、実際の沸騰挙動を確認することで γ 線照射による沸騰特性に及ぼす影響を調べた。試験片及び実験装置は従来と同じものを使用し γ 線照射は 2kGy/hr にて行った。Figure 4 に本実験で得られたチタン、酸化チタン、 γ 線照射直後の酸化チタンの沸騰曲線を示し、Fig. 5 に沸騰の様相の 1 例を示す。画像左の値はそれぞれ Fig. 4 に示す点に対応している。各熱流束での様相を比較すると、低

熱流束域では γ 線照射・非照射とも大きな違いは見られないものの、高熱流束域では γ 線照射を行った酸化チタンの気泡離脱頻度が非照射より高いことが確認できた。

3. γ 線照射環境下の限界熱流束

放射線誘起表面活性に関する研究では、一定量 γ 線照射された酸化金属の接触角が照射直後に超親水性を示し時間と共に照射前の値に戻ることが報告されている。これまでの伝熱実験は γ 線照射直後から一定時間内に計測された結果であることから照射の直接的な影響が見られない可能性が考えられる。そこで照射中の沸騰曲線を計測し各熱流束域での沸騰様相を捉え、 γ 線照射による伝熱特性の変化を調べた。

γ 線照射室内での実験は沸騰様相可視化実験と同じプール沸騰実験装置を用いて行った。ただし γ 線照射を行いながら実験を遂行するためプール容器は照射室内に設置し、プール水及び試験体の加熱、各計測値の記録等は外部から遠隔操作にて行った（Fig. 6）。試験体は γ 線照射前にプール容器に水平に設置し、あらかじめ照射開始前に照射室内にて限界熱流束に達する前の任意の熱流束に対する沸騰様相を記録する。また撮影は高速度ビデオカメラを用いシャッタースピード 1/8000sec、2000fps で行った。沸騰曲線及び沸騰挙動測定後、更に試験体をプール容器内に固定したまま水中にて γ 線照射し、同一試験体での γ 線照射による沸騰挙動の変化を確認する。

Figure 7 に本実験で得られた酸化チタン、各積算線量を水中にて照射中の酸化チタンの沸騰曲線の 1 例を示す。ここで水中照射による沸騰曲線の一部を比較する。グラフには非照射、水中保管約 1 週間、14 kGy 及び 34.8 kGy 水中にて γ 線照射を行い、それぞれ照射時に得られた値が示されている。これより積算照射の増加に伴い沸騰曲線が高過熱度側に移行していることがわかる。更に 34.8 kGy 照射後 γ 線照射時に測定した沸騰曲線において、右上先端が示す限界熱流束値は 1.4×10^6 とこれまでの γ 線照射による限界熱流束値と比較して近い値を示し、実験の妥当性を示すと共に、水中照射においても積算線量に対して限界熱流束値が増加していることが確認できた。またグラフより非照射環境の水中にて約 1 週間保管された試験片に関して、試験片プール水設置直後と沸騰曲線に大きな違いが見られないことが確認され、水中保管による影響は γ 線照射による伝熱特性の影響よりはるかに小さく無視できるものと考えられる。

Figure 8 に各代表熱流束値での γ 線積算照射量の違いによる沸騰挙動を示す。各熱流束で γ 線非照射、照射中の沸騰様相を比較すると、熱流束値がほぼ一定の場合、 γ 線照射により発泡点密度が減少し離脱気泡径が増加することが確認された。

4. 考察・まとめ

酸化チタンに大気中で γ 線照射を行うことで照射直後の沸騰熱伝達率は変化しないまま、限界熱流束のみが向上することを確認した。また照射直後の試験線において沸騰様相は、低熱流束域では γ 線照射・非照射とも大きな違いは見られず、高熱流束域にて γ 線照射を行った酸化チタンの気泡離脱頻度が非照射より高いことを確認した。高熱流束域での限界熱流束値を含む熱流束の向上は、沸騰による生成蒸気泡の発生頻度が高くなっても、伝熱面の濡れ性がよくなることで表面張力等が変化し非照射と比較して離脱気泡割合が増加し、伝熱面の除熱量が促進されると考えられる。

また照射前の酸化チタンを水中で保管した場合、沸騰曲線は水中に設置した直後に計測した値と顕著な差が見られなかった。しかし試験線を水中に設置し続けかつ一定時間 γ 線照射を行い、照射環境下で同様に沸騰曲線を計測した結果、積算線量の増加に伴い高壁面加熱度側に移行し、限界熱流束が向上することが確認された。更に同一試験体を用いて低熱流束域から中熱流束域まで一定の間隔で照射中における沸騰様相を高速度ビデオカメラを用いて計測した結果、任意の壁面加熱度に対し γ 線照射中の発泡点密度は非照射時と比

べ減少することが観察された。これは表面の濡れ性が向上したことで気泡発生に必要なキャビティ内に水が浸透し見かけの表面粗さが小さくなるためと考えられる。また、 γ 線照射中の離脱気泡径は照射を行っていない試験体と比べると増大することも確認された。照射直後の実験において高熱流束域の気泡離脱頻度が増加することから離脱気泡径は非照射時よりも小さくなることが予想されるが、照射による加熱表面濡れ性の向上により気泡の離脱が促進しても発泡点密度が小さくなることで気泡成長速度が増加し離脱気泡径は多くなると考えられる。また活性キャビティ径と発泡点密度の積は熱流束の値にかかわらず積算照射量によって決まる一定の値を示したことから、離脱気泡径が気泡発生に関する活性キャビティ径に依存すると仮定すると、 γ 線照射量と発泡点密度から離脱気泡径が概算できる。

ところで限界熱流束の発生メカニズムとして Zuber は加熱面に発生した上昇する蒸気が連続かつ定常な蒸気柱となり、加熱面上に Taylor 不安定によって決まる間隔で、円柱状の蒸気柱が並ぶ上体を想定している。上昇する蒸気と下降する液との相対速度が Helmholtz 不安定を起こす速度以上になると、加熱面への液体の流れが妨げられ、限界熱流束が発生するとして、飽和沸騰の場合の限界熱流束の式を示している。ここで限界熱流束をとる臨界波長は蒸気柱の間隔が蒸気径の2倍となる値としているが、活性キャビティ径と発泡点密度の積が一定であることから、発泡点密度の増加に対する離脱気泡径の増加が小さくなり限界熱流束値は発泡点密度の大きさに依存すると考えられる。また γ 線照射中の発泡点密度は非照射時と比較し大きくなることから、高壁面加熱側においても γ 線照射により発泡点密度が増加し不安定波長に至り難くなる結果、限界熱流束が向上するといえる。

限界熱流束の向上は濡れ性の向上による気泡離脱頻度と発泡点密度に起因すると考えられ、 γ 線照射により限界熱流束が向上することが確認された。

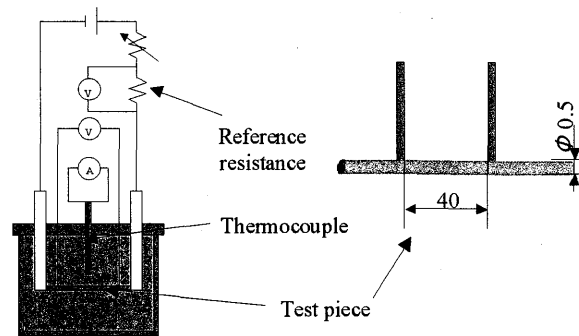


Fig. 1 Experimental apparatus

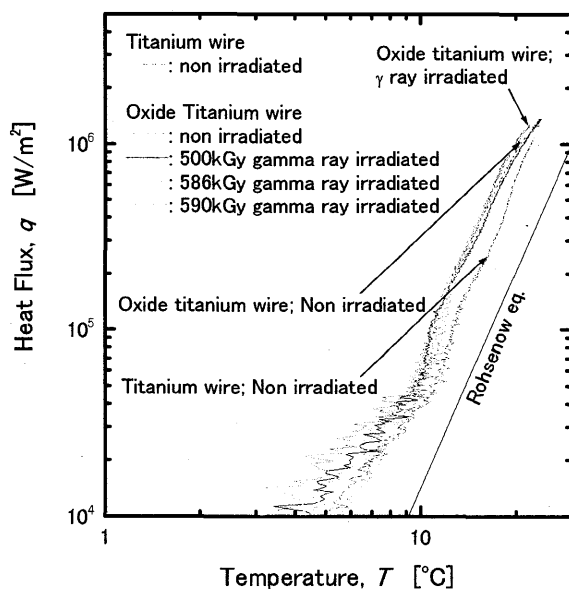


Fig. 2 Boiling curve of oxide titanium wire against temperature

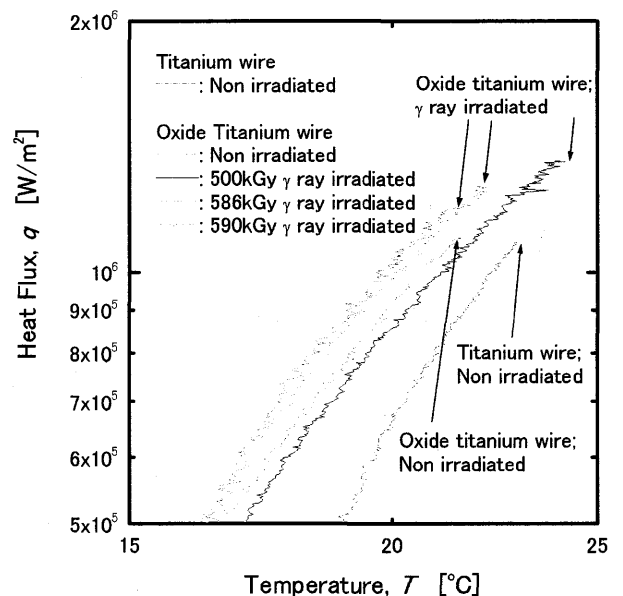


Fig. 3 Boiling curve close to the CHF condition

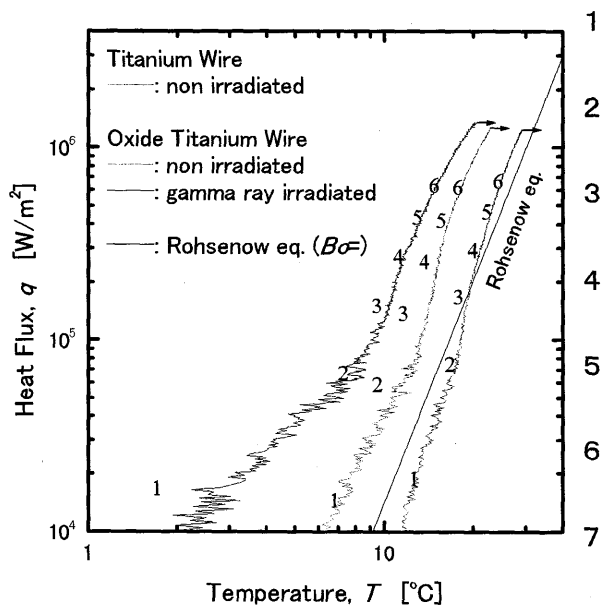


Fig. 4 Improvement of CHF by gamma ray irradiation

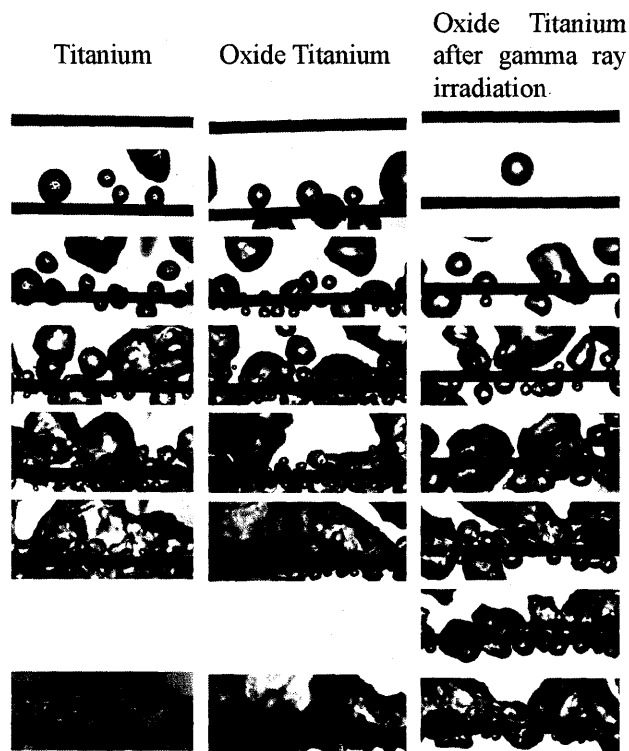


Fig. 5 Boiling condition

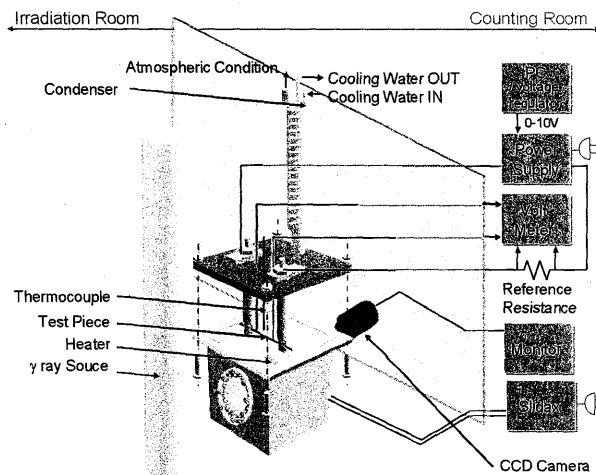


Fig. 6 Apparatus of CHF experiment

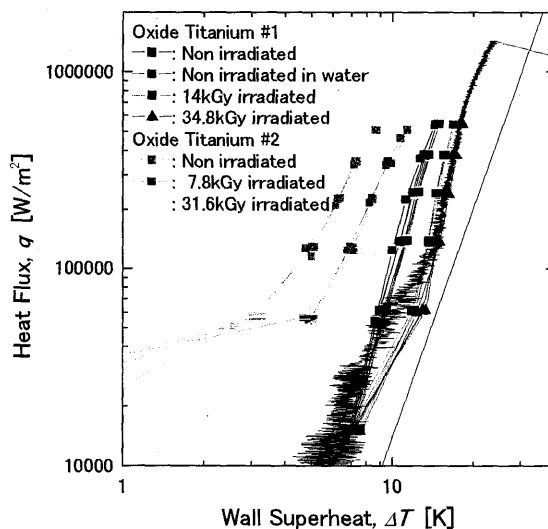


Fig. 7 Boiling curve of oxide titanium wire in irradiation condition

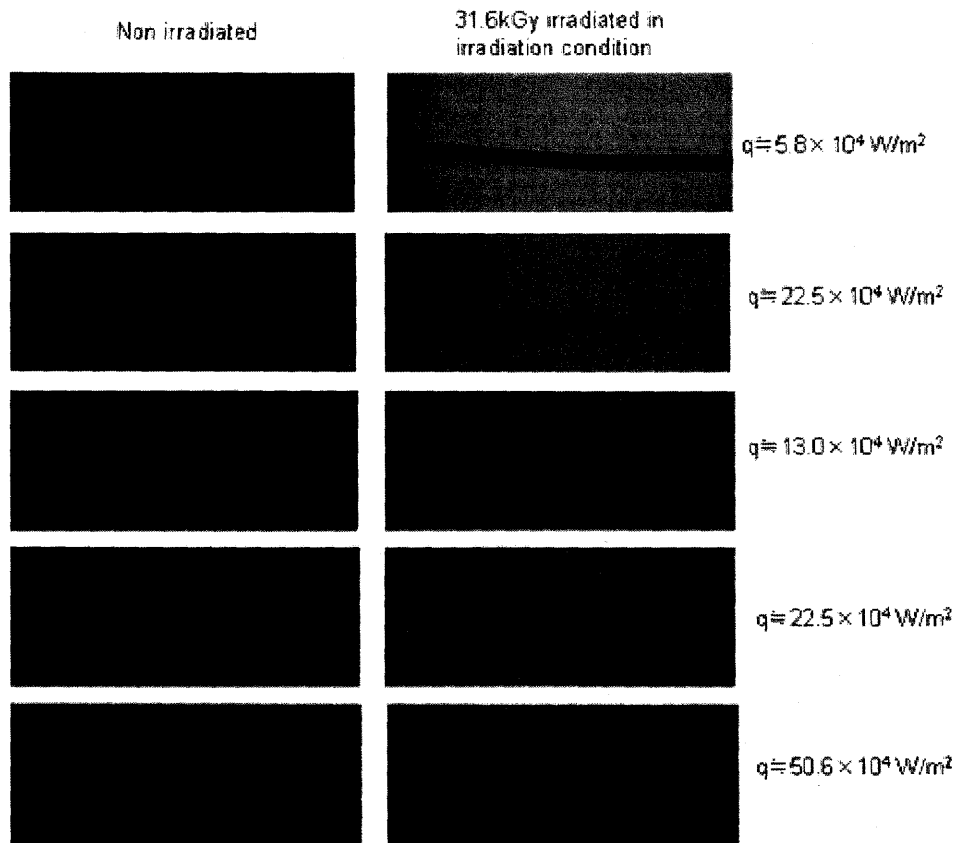


Fig. 8 Boiling condition with gamma ray irradiation