# 放射線誘起表面活性における表面性状影響評価 Effects of Surface structure on Radiation Induced Surface Activation

岡本孝司<sup>#,A)</sup>, Bold Nairamdakh<sup>B)</sup>, Wang Shixian<sup>B)</sup>, Wang Kai<sup>A)</sup>, 三輪修一郎 <sup>A)</sup> Koji Okamoto<sup>#,A)</sup>, Nairamdakh Bold<sup>B)</sup>, Shixian Wang<sup>B)</sup>, Kai Wang<sup>A)</sup>, Shuichiro Miwa<sup>A)</sup> <sup>A)</sup> Nuclear Professional School, the University of Tokyo <sup>B)</sup> Department of Nuclear Engineering and Management, the University of Tokyo

## Abstract

This study examines boiling behavior near the Critical Heat Flux (CHF) threshold using a downward-facing flow on a polished copper surface. It introduces the concept of a "CHF front" to describe the transition from nucleate to film boiling, often beginning downstream. The CHF front, which expands at several millimeters per second, reflects the spread of irreversible dry spots. Findings reveal an inverse relationship between CHF front velocity and both flow rate and surface roughness, and a linear inverse link between CHF and front velocity. A microlayer balance model suggests that increasing microlayer thickness slows CHF front movement, delaying boiling crisis onset. These insights advance CHF modeling and highlight the importance of CHF front dynamics in heat transfer analysis.

Keyword: Critical heat flux; Flow boiling; CHF front; 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、伝熱面の表 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、放 射線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

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。伝熱 面の面積は30x30mmとした。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。なお、設置位置は、上流 から7.5mm 及び22.5mmの位置に熱電対を設置する ことで、上流側と下流側の熱流束と表面過熱度を独 立に計測できるようにした。



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試験片の表面性状

試験片の表面粗さは粗さ計を用いて正確に測定さ

れ、サンドペーパー処理後の粗さを図2に示す。各 表面の上流・下流・中央で測定を行い平均化し、 Ra/RSm 比によって表面の粗さを評価しました。この 比率はサンドペーパーの粗さに比例して増加し、テ クスチャの違いを数値化している。具体的な数値は 図にも示している。さらに、接触角の測定では、P120、 P600、P1200 で処理された表面は約49.8°とほぼ同 じであったが、P120処理の表面では傷の方向に沿っ て液体が広がるため、横方向で43.4°と低下し、液 滴が楕円形になる現象が確認された。

flow direction in experiment

P600s

Ra/RSm = 1.30e-3

roughness meter

Ø

sampling profile

(length: L)

Ra = 0.188µm; RSm = 146.2µm;

x sampling sites

X X X A B T

P1200s (smooth) Ra = 0.052μm; RSm = 117.2μm Ra/RSm = 4.44e-4



**P120s** Ra = 0.901μm; RSm = 221.7μm; Ra/RSm = 4.13e-3

図2 サンドペーパー処理表面の粗さ<sup>[1]</sup>

# 2.4 沸騰曲線と温度履歴

図3に、CHF が発生した状態の過渡的な表面過熱 度と熱流束の履歴を示す。CHF となった時点を0と して、その前後の時間変化を示している。まず、下 流側(DS)の過熱度が変動しながら上昇を始める。約 10秒程度遅れて、下流側(DS)の熱流束も減少をはじ める。下流側が幕沸騰に遷移していることを意味し ている。加熱量は一定であることから、下流側の徐 熱量が減少したことに伴い、上流側からの徐熱量が 増大する。下流側の熱流束が半分程度となると、上 流側の熱流束の上昇速度が増し、上流側も CHF に達 する。

図4に時間的に変化する熱流束と過熱度を沸騰曲 線としてプロットした。このデータからも、幕沸騰 は下流側から生成し、幕沸騰と核沸騰の界面は、上 流側に移行していくことがわかる。下流側の方が早 く CHF に達している。

本研究では、この界面の移動に着目する。幕沸騰 から核沸騰に遷移する CHF の界面であることから、 CHF Front と定義する。この CHF Front の意同側を を、沸騰伝熱面の高速度カメラによる可視化画像か ら求める。なお、2 次元熱伝導解析によって、図3に 示される温度履歴を逆解析する事によっても、CHF Front 速度は求まる。画像解析による結果とほぼ一 致している事を確認している。



図3 上流側(US)と下流側(US)の過熱度と熱流束 の時間変化<sup>[1]</sup>



図4上流側(US)及び下流側(DS)の沸騰曲線例<sup>[1]</sup>

#### 2.5 CHF Front 速度

様々なパラメータを変化させて、CHF Front 速度 を求める。放射線照射量、表面粗さ、流量などが大 きなパラメータとなる。放射線照射により、濡れ性 のみを変化させることができる。一方、本研究にお いては、濡れ性の影響はあまりなく、表面粗さによ る影響が支配的であった。図5に表面粗さの無次元 パラメータ(Ra/Rsm)と表面速度の関係を示す。ここ に示すように、表面粗さが荒くなるに従い、CHF Front 速度は減少する傾向になる。これは、核沸騰 から幕沸騰への遷移が、表面の粗さに依存して変化 する事を意味している。表面粗さが荒くなると、沸 騰核はできやすくなるとともに、徐熱の機会が増大 する。このため、遷移が遅れると考えられる。一方、 図6には、流量とCHF Front 速度の関係を示す。流 量が増大すると、壁面への水供給の可能性が増大し、 CHF Front での幕沸騰への遷移が阻害され、遷移速 度が遅くなると考えられる。



図5 CHF Front 速度と表面粗さの関係<sup>[1]</sup>



図6 CHF Front 速度とCHFの関係<sup>[1]</sup>

CHF Front 速度と CHF の関係を図7に示す。ここに 示すように明らかな相関関係がみられる。CHF Front 速度が速いほうが、小さな限界熱流束となる。これ は、表面への水供給や、徐熱性能の向上によって、 CHF Front 速度が遅くなると考えられるため、それ だけ限界熱流束への到達が遅くなることを意味して いる。本実験の範囲では直線的な関係となっている。 この関係を元に、モデル化を行う事が可能となる。 図8に、表面近傍における CHF Front における、沸 騰のモデルを示す。液幕がなくなる事で、核沸騰か ら幕沸騰に遷移する。この液幕に水を供給するため には流量が関係する。また、蒸発による液幕の減少 は、表面粗さが関係する。これらのモデルを用いて、 定性的な CHF Front の関係を表すことが可能となる。



図8 CHF Front のモデル<sup>[2]</sup>

# 3. まとめ

本研究は、限界熱流束(CHF)付近の沸騰挙動を詳細に解析し、下向き流れの条件下での銅表面における現象を調査した。その結果、CHF は下流側から始まり上流へ進行する。この核沸騰から幕沸騰への遷移域を「CHF Front」と定義した。滑らかな表面かつ 質量流束320 kg/(m<sup>2</sup>・s)における CHF Front 速度は 2.80~3.00 mm/s と測定された。さらに、表面粗さ や流量がこの速度に与える影響には逆相関があり、 これは表面の液幕蒸発の遅延や液幕への水供給による再濡れ性能の向上が要因と考えられる。また、CHF と CHF フロント速度との間には線形かつ逆の関係が 見られ、液幕領域のバランスモデルと密接に関係し ている事を明らかにした。

# 参考文献

- [1] S. Wang, K. Wang, S. Miwa, T. Chen and K. Okamoto, A dynamic characteristics on the boiling crisis in downward facing flow boiling, part I: Motion of the CHF front and factores investigation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 159, (2024), 108035
- [2] S. Wang, K. Wang, C. Zeng, S. Miwa and K. Okamoto, A dynamic characteristics on the boiling crisis in downward facing flow boiling, part II: Model development and validation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 160, (2025), 108360