

合同セッション1（「原子炉における機構論的限界熱流束評価手法」研究専門委員会、
熱流動部会、計算科学技術部会）

原子炉における限界熱流束評価の現状とこれから
Evaluation of Critical Heat Flux of Nuclear Reactor, Present and Future

限界熱流束の機構論的評価に向けた研究

(1) DNB

Review of Studies on the Mechanism of Critical Heat Flux

(1) DNB

*小野 綾子¹

¹原子力機構

1. はじめに

沸騰冷却は、非常に高い除熱特性を有するため、軽水炉をはじめとする各種高熱流束機器の冷却に用いられており、汎用性の高い冷却技術であるが、最大の問題は除熱限界が存在するという点である。1934年、拔山は大気圧の飽和プール沸騰において金属細線を伝熱体とした実験^[1]により、熱流束に対する細線の表面過熱度の関係を調べ、沸騰過程の全貌を明らかにするとともに、沸騰伝熱に除熱の限界（限界熱流束、Critical Heat Flux: CHF）が存在することを示した。CHFを超えると核沸騰から遷移沸騰へと瞬時に移行し（Departure from Nucleate Boiling: DNB）、発熱体の温度はその融点を超え、溶融・破損（バーンアウト）に至る。本発表では、DNB型のCHFについて、そのメカニズムに関する過去の研究を俯瞰し、今後取り組むべき課題について触れる。

2. 困難な現象解明

図1は、直径8mmの上向き伝熱面における飽和沸騰の様相である。DNBに至る直前まで、表面を覆う伝熱面と同程度の蒸気塊が形成と離脱を繰り返す。そして、何の前触れもなく、突然DNBに至る。そこで、多くの研究者が蒸気塊下の気液の挙動がDNBの発生に関与していると考え、伝熱面ごく近傍の気液挙動について調べるようになった。蒸気塊が離脱した後は、数 μm のキャビティ（伝熱面表面の微細な孔であり気泡生成の核となる）から最初の気泡（一次気泡）が発生し、これらが互いに接合することで、再び数cmの蒸気塊が伝熱面上に形成される。この蒸気塊の下には数十 μm の液に富んだ層があることが確認されている^[2]。蒸気塊下の気液挙動は一次気泡の発泡挙動に大きく影響されるため、この挙動を把握しDNBの発生原因を解明するためには、数ms以下および μm オーダーの高速かつ微細な気液挙動を捉える計測手法が必要とされる。また、これらの気液挙動には、流体の物性、伝熱面の物性、流体と伝熱面の組合せ（濡れ性）、伝熱面の幾何形状、方向および性状等、非常に数多くの物理量が関与する。これらの高速かつ微細な気液挙動をとらえることの困難さや関与する物理量の多さが、長年にわたりDNBを引き起こす現象の解明を阻んできた。



図1 直径8mmの上向き面における高熱流束飽和プール沸騰

3. 今までに提案された多種多様なモデル

(1) 飽和プール沸騰における DNB 熱流束予測に関する研究

DNB 熱流束を予測する初期の物理モデルとして Zuber^[3]によって提案されたモデルがある。このモデルでは、伝熱面上に数 cm オーダーの蒸気の柱が存在することを仮定し、伝熱面から流体側へ向かう蒸気と流体側から伝熱面に向かう液の相対速度がある臨界値を超えると DNB に至るというモデルであり、蒸気の限界量が DNB 熱流束を決めるという形になっている。このモデルは、DNB が伝熱面から離れた位置での気液挙動によって生じることから、“Far field model”と分類される。このモデルは、飽和のプール沸騰の DNB 熱流束をよく予測できるものの、図 1 で示されるような映像から、蒸気柱の存在が確認されていないことや、DNB 近傍において伝熱面に液供給するような機構を付加することで DNB 熱流束が向上させる実験事実^[4]から伝熱面で発生する蒸気量に限界がないことが示唆され、モデルの仮定自体に疑問が持たれる。

Zuber によるモデルの提案の後、伝熱面ごく近傍の数 μm の気液挙動に着目した研究が行われるようになり、甲藤ら^[5]は、伝熱面上に形成される蒸気塊の挙動を詳細に検討し、蒸気塊下に残された液体が蒸気塊の離脱前に乾くことで DNB に至るとするモデルを提案した。このモデルは「マクロ液膜蒸発モデル」と呼ばれ、伝熱面近傍の気液挙動が DNB のトリガになることから、“Near field model”と分類される。また、数 100~1000nm の厚さでコーティングした伝熱面上の沸騰様相を裏面から高速度放射温度計で観察し、一次気泡底部に形成される局所的に乾いた領域（ドライスポット）が DNB を引き起こす様相をとらえた研究^[6]や、伝熱面上に発生するドライスポットの温度が固液接触限界温度を超えることで DNB が引き起こされるというモデルが提案されている^[7]。しかし、伝熱面の裏面からの沸騰挙動観察では、金属箔やサファイヤガラスが発熱体として用いられることが多く、熱容量の大きな金属ブロック等を用いた沸騰現象との熱容量差による現象の違いが指摘されている。これらのモデルは、伝熱面表面上での気液挙動が DNB の引き金になることから“On surface model”と分類される。以上のモデルでは、DNB を引き起こす機構に違いはあるものの、何らかの現象が引き金となり、核沸騰域と DNB 以降の遷移沸騰域では伝熱面近傍の気液挙動に違いが現れることになる。一方で、核沸騰から DNB 熱流束点を経て遷移沸騰までを連続した事象ととらえ、過熱度の増大に伴う伝熱促進と伝熱面上の乾燥部拡大による伝熱劣化から生じる熱流束の極大値が DNB 熱流束であるとし、DNB のメカニズムを説明するモデルも提案されている^[8]。このように、DNB の発生に対して多数のモデルが提案されているものの、どのモデルが“正しい”のかについて、飽和のプール沸騰という考慮すべきパラメタの少ないシンプルな体系においてさえ、未だに結論が見いだされていない。

(2) PWR における DNB 予測への発展

PWR 条件における DNB を予測するためには、(1)で触れた飽和プール沸騰の条件に加えて、流体の流れ（強制対流条件）の影響、サブクールによる影響、系圧力、集合体形状（管群体系・グリッド等）の影響を盛り込まなくてはならない。

強制流動沸騰における DNB については、マクロ液膜蒸発モデルに基づいた予測法がいくつか提案されている^{[9][10][11]}。これは、(1)で紹介した甲藤らのマクロ液膜蒸発モデルにおいて、蒸気塊が強制対流によって移動する効果などを盛り込んだものである。これらのモデルによる DNB 熱流束の評価では、蒸気塊の下に存在する液膜の厚さ、蒸気塊の長さや速度が DNB 熱流束を決める重要な物理量となるが、各モデルの中で予測されたそれらの値には互いに大きなばらつきがある。これは、強制対流での沸騰体系において、伝熱面ごく近傍の気液挙動に関する計測データが皆無であり、よく理解されていないことに起因する。さらに、実機における管群体系やグリッド等を考慮すると、偏流や旋回流の効果も加わり、現状のモデルで解を得ることができないのは自明である。また、サブクール沸騰では、同体系における飽和沸騰よりも DNB 熱流束が向上するという実験的に示された事実について、(1)で紹介したような、現在提案されているほとんどのモデルでは説明することができていない。さらに、PWR 運転条件のような高圧沸騰においては、DNB のメカニズムに着目した基礎的な研究は非常に限られており^[12]、体系圧力が沸騰挙動に及ぼす影響はモデル化されていないなど、PWR 条件での DNB メカニズムの解明と予測モデルの構築へは多くの課題が残されている。

4. 最先端の計測技術、解析手法への期待

1934年にCHFが発見され85年が経過した。この間に多種多様な計測技術が提案されてきた^{[13][14]}。また、近年のコンピューターシミュレーション技術の向上は目覚ましく、発泡挙動や気泡生長などの複雑な現象を直接数値シミュレーションできるようになってきた^{[15][16]}。原子炉燃料における沸騰現象は、 μm オーダーから m オーダーのマルチスケール現象であり、現状では一次気泡の発泡から燃料集合体内の流れまでを直接シミュレーションすることは不可能に近いものの、検証された信頼性の高い解析手法は、実験では観察が難しい蒸気塊下の発泡挙動や気泡接合の過程を明らかとする可能性を秘めており、モデル構築の大きな助けになると考えられる。

このような最新の実験技術や解析技術を組み合わせることで、高圧、サブクール、強制流動が組合された複雑な沸騰体系において、DNB 機構解明とその予測手法構築へのブレークスルーが期待される。そのためには、詳細な機構を解明するための極めて基礎的な研究といくつかの要素を組み合わせることで相互作用を調べる総合試験が必要である。また、実際に”工学的に使える評価手法”を得るためには工学的な見地と判断が重要であり、大学、研究機関、メーカーの産官学の連携を欠くことはできない。

参考文献 [1] 抜山, 機論, **37**-206, p.367 (昭 9). [2] A.Ono et al., *Int. J. Heat Mass Transf.* Vol.**50**, Issues17-18, p.3481 (2007). [3] N. Zuber, *Trans. ASME*, **80**-3 (1968), p345. [4] S. Mori et al., *J. Nuc. Sci. and Tech.*, **53**-7, (2016). [5] 甲藤, 横谷, 機論, **34**-258 (昭 43), p345. [6] T. G. Theofanous, et al., *Exp. Thermal and Fluid Science*, **26**, (2002), p793. [7] C. Unal, et al., *Trans. ASME*, **114**, p972. [8] V. K. Dhir, et al., *Trans. ASME*, **111**, p.739. [9] C. Lee, et al., *Int. J. Multiphase Flow*, **14**, p.711 (1988). [10] G.P. Celata, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **37**-237 [11] Y. Katto, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **33**, p.611(1990). [12] H.Sakashita, *J. Thermo. Sci. Tech.*, **11**-2, (2016). [13] H. A. Hashimi et al., *J. Heat Transf.*, **140**-3, (2017). [14] E. Wagner et al., *J. Heat Transf.*, **131**-12, (2009). [15] Y. Ose et al., *J. Comp. Multiphase Flows*, **6**-4, p.419, (2014). [16] Y. Sato et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **125**, p.876, (2018).

*Ayako Ono¹

¹JAEA