2019年秋の大会

合同セッション1(「原子炉における機構論的限界熱流東評価手法」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(2)液膜ドライアウト

Review of Studies on the Mechanism of Critical Heat Flux (2) Liquid Film Dryout

*上遠野健一1

1日立製作所

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。液相の流量及び加熱熱流束がともに比較的低い場合においては,流 路内において,中心部に液滴を含む蒸気が流れる一方,壁面上に薄い液膜が形成される環状噴霧流となり, 液膜流量が流れ方向に沿って次第に減少し,液膜流量がほぼ零に近い状態,すなわち液膜ドライアウトに至 って壁温の急上昇を生じることが,実験的によく知られている^{II}。本発表では,液膜ドライアウト型の CHF について,そのメカニズムに関する過去・現在の研究を俯瞰し,今後取り組むべき課題について触れる。

2. 液膜流動モデルの概要

液膜ドライアウトの発生メカニズムは、気相から液膜への液滴の付着、液膜からの液滴の飛散、及び、加熱による液膜の蒸発が支配的であることが、1960年代の Hewitt らの試験^[2]によって明らかにされた。また、1970年代には、液滴付着・液滴飛散・液膜蒸発による質量輸送現象を考慮する液膜流動モデルが提案^[3]され、液膜ドライアウトが発生する CHF の機構論的な予測が行われてきた。液膜流動モデルでは、液膜の質量流束は以下のように与えられる。

$$\frac{dG_f}{dz} = \frac{p_q}{A}(m_d - m_e - m_v) \tag{1}$$

ここで、 G_f は液膜の質量流束(kg/m²/s)、 m_d , m_e , m_v はそれぞれ液滴付着、液滴飛散、液膜蒸発による質量流 束(kg/m²/s)、zは軸方向位置(m)、 p_q は加熱周長(m)、A は流路断面積(m²)である。液膜流動モデルでは、まず、 環状噴霧流に遷移する気相・液相の割合を決める環状流遷移クオリティと、液相部の液滴・液膜割合から初 期における液膜の質量流束を評価する必要がある。これらが決まれば、(1)式により管長に沿っての液膜流量 の変化を求め、 $G_f=0$ 、もしくは、最小液膜厚さモデルに基づき液膜ドライアウト点を機構論的に求めること が可能であるが、そのためには液滴の付着や飛散に関する知見が必要である。(a)環状噴霧流の初期状態を算 出するモデルも、(b)液滴の付着や飛散を算出するモデルも、単管体系などの要素試験データを整理した相関 式であり、評価対象としている体系や現象に応じて、適切なモデルセットを選定することが重要である。



図1 サブチャンネル解析と液膜流動モデルによる液膜ドライアウト評価

2019年秋の大会

3. BWR 燃料集合体を対象とした液膜流動モデルによる液膜ドライアウト予測

(a) 環状噴霧流の初期状態を算出するモデルの高度化に関する研究

数十本の燃料棒から構成される BWR 燃料集合体内における気液二相流挙動把握のためには、サブクール 沸騰(沸騰開始位置近傍における気泡の発達)及びサブチャンネル間での流体移動(クロスフロー)挙動を 適切に評価する必要があり^[4],環状噴霧流の初期状態を算出するために重要である。クロスフローモデルとし ては、「乱流混合」と「差圧混合」に加え、「ボイドドリフト」を考慮する Lahey ら^[5]が構築したモデルが主流 であるが、この内、「ボイドドリフト」は、流量に対する発熱割合の最も高いコーナーサブチャンネルのクオ リティが他のサブチャンネルのクオリティより低くなるという現象^[6]を予測するために導入された現象論的 なモデルである。これに対し、サブチャンネル間差圧の変動成分に着目した機構論的なクロスフローモデル の開発も試みられている^{[7][8][9]}。

(b) 液滴の飛散・付着を評価するモデル高度化に関する研究

BWR 燃料の除熱性能は燃料棒を束ねるスペーサ形状により影響を受けることが知られている^[10]。スペー サ部では流路閉塞により蒸気速度が増すため液滴飛散が促進され、スペーサ下流側では乱れが増大するため 液滴付着が促進される。このような特性については、一般的にはスペーサがない場合とある場合の液滴挙動 の実験的な比較からモデル化がされている。また、最近の BWR 燃料では、液滴付着促進効果を狙ったミキシ ングベーン付スペーサが採用されており、その効果をモデル化するための要素試験も行われている^[11]。

4. 今後の研究開発への期待

液膜流動モデルによる液膜ドライアウト現象は、液滴挙動やスペーサ効果などのモデル群を適切に選ぶこ とで比較的精度良く、解析的に予測可能であることが示されている^[12]。現状の液膜流動モデルは、実験結果 に基づき複雑な現象をマクロに取り扱うモデル化が一般的であるが、最近の計測技術の発達^{[13][14][15]}に伴い、 CFD の検証にも活用できる空間分解能で、また、モデル化に際しスケーリングを考慮しなくてよい高温・高 圧環境下における実験データベースが構築されつつある。このようなデータベースや検証された CFD を活用 した、物理的なメカニズムに基づく機構論的なモデル開発も行われており、物理現象の説明性を向上するこ とが可能となってきている。

また,異常過渡時や事故時においては,液膜ドライアウト後の伝熱面の温度上昇がどの程度になるかが問題であり,原子力学会では,燃料集合体内の一時的な沸騰遷移の発生を,被覆管の温度上昇とその持続時間を指標として許容する新しい基準を策定している^[16]。このような沸騰遷移後の伝熱過程としては,壁面温度が比較的低温であるために生じる液滴の壁への近接や衝突による冷却や,燃料棒が再び液膜に覆われるリウェット現象がドライアウト持続時間を決定する因子として評価上重要となる。壁面の温度が上がりきらない遷移沸騰近傍での挙動は十分な理解が得られておらず,現状のモデルはやや大きな不確かさが存在することから,引き続き,実験的研究の進展と物理モデルの更なる検証・高度化が重要である。

参考文献 [1] 植田, 養賢堂 (1981). [2] G. F. Hewitt et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **8**(5), p.793 (1965). [3] P. B. Whalley, *Int. J. Multiph. Flow*, **3**(6), p.501 (1977). [4] 木藤他, 日本原子力学会 2017 年秋の大会, 1E01. [5] R. T. Lahey and F. J. Moody, ANS Monograph (1975). [6] H. Herkenrath et al., EUR 7575EN (1981). [7] M. Sadatomi et al., *Multiph. Sci. Tech.*, **16**(4), p.309 (2004). [8] 隅田他, 機論, **61**-587 (1995). [9] 藤本他, 日本原子力学会 2018 年春の年会, 2B20. [10] T. Sakai and S. Sugawara, *Proc. of ICMF Conf.*, **1**, p.57 (1991). [11] A. Kawahara et al., *Nucl. Eng. Des.*, 310 (2016). [12] M. Naitoh et al., *J. Nucl. Sci. Tech.*, **39**(1), p.40 (2002). [13] K. Katono et al., *J. Nucl. Sci. Tech.*, **52**(3), p.388 (2015). [14] 新井他, 日本原子力学会 2016 年秋の大会, 1E14. [15] G. Aoyama et al., *J. Nucl. Sci. Tech.*, **53**(4), p.537 (2016). [16] 日本原子力学会, AESJ-SC-P002:203 (2003).

*Kenichi Katono¹

¹Hitachi, Ltd.