

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）

数値シミュレーションの現状と限界熱流束評価に向けた課題
Current Status of Numerical Simulation and Issues for CHF Evaluation

二相流モデルを用いた数値シミュレーションについて

Numerical Simulation with Two-Phase Flow Model

*吉田 啓之¹

¹原子力機構

1. はじめに

原子炉設計における燃料の限界熱流束評価は、炉心の熱的余裕を評価する上で最も重要な項目の一つである。燃料の限界熱流束は燃料集合体構造等に大きく依存するため、実機の燃料形状及び運転条件を模擬した大規模試験により関連データを取得している。しかしながら、そのような試験は多大な費用と期間を必要とし、試験実施可能な国内外の主要施設が限定的であることなどから、大規模試験に依存しない限界熱流束評価のための技術開発が望まれている。

「原子炉における機構論的限界熱流束評価技術」研究専門委員会においては、近年の計算機性能の飛躍的向上、数値解析技術や計測技術の進展を受け、限界熱流束の機構論的評価に向けた調査、課題抽出を行っている。本報告では、二相流モデルを用いたシミュレーションの概要、現状、課題について紹介する。

2. 二相流モデルを用いた数値シミュレーションによる限界熱流束評価

2-1. 二相流モデルを用いた数値シミュレーションの概要

二流体モデルを例として示す。二流体モデルの基礎式のうち、連続の式、運動量保存式を示す。

$$\frac{\partial \rho_m \alpha_m}{\partial t} + \frac{\partial \rho_m \alpha_m u_{mk}}{\partial x_k} = \Gamma_m, \quad \frac{\partial \rho_m \alpha_m u_{mi}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_m \alpha_m u_{mk} u_{mi}}{\partial x_k} = -\alpha_m \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{m,ik}}{\partial x_i} - M_{m,i} - \Gamma_m (u_{g,i} - u_{l,i}) + F_i$$

ここで、 ρ : 密度[kg/m³]、 α : ボイド率[-]、 u : 速度[m/s]、 Γ : 相変化速度[kg/s]、 t : 時間[s]、 x : 座標[m]、 p : 圧力密度[Pa]、 τ : セン断応力[N/m²]、 M : 界面摩擦[N/m²]、 F : 外力[N]であり、添え字 m は液相 l あるいは気相 g を、 i, k は座標の方向を表す。上式に加えエネルギー方程式を連立させることで、二流体モデルにより相変化を伴う二相流の挙動をシミュレーションすることができる。

2-2. 限界熱流束評価の現状

これまで、3次元二流体モデルを用いた限界熱流束評価はほとんど行われていなかったが、1. で述べた状況を反映し、近年、いくつかの試みが行われている。例えば Lifante らは、Fluent に壁面沸騰モデルなどを導入し、COSMOS-L 試験などの限界熱流束試験結果との比較を行っている[1]。また Feng らは、STAR-CCM+を用いて限界熱流束の予測を試みた[2]。両者とも、二流体モデルと気泡数密度に関する輸送方程式、相関式を用いていること、比較、検討した実験結果が熱流束一定の条件であることが共通である。

3. 機構論的限界熱流束評価に向けた課題

2-2 で示した解析においては、シミュレーションで壁面温度が急上昇した熱流束を限界熱流束として実験結果と比較した。Feng らは実験結果と±25%で一致したと報告しているが、過小評価の傾向が現れている。二流体モデルで得られる速度、ボイド率などは統計平均値であるが、近年の基礎的な研究では、局所・瞬時の気液挙動が限界熱流束の引き金になると指摘されている、上述の解析結果と実験結果との差異は、これらの影響を含まないことが一因と思われるため、機構論的な評価に向けては限界熱流束に関係する局所・瞬時の挙動をモデル化することが不可欠と考えられる。

参考文献 [1] C. Lifante, et al., Proc. ICONE27, ICONE27-2070 (2019). [2] J. Feng, Z. Skirpan, E. Baglietto, Proc. ICONE2020, ICONE2020-16080 (2020).

*Hiroyuki Yoshida¹

¹JAEA