

MPS 法に基づいた MCCI における多相多成分伝熱流動解析手法の開発

Development of the Multi-Phase Multi-Component Thermal-Hydraulic Simulation Method for MCCI
based on MPS Method

*福田 貴斉¹、山路 哲史¹、武井 遥来¹、山下 晋²、吉田 啓之²

¹早稲田大, ²JAEA

多成分への拡張が容易で複雑な液-液界面を正確に追跡できる MPS 法の新たな界面張力モデルと、気泡の通過が液-液界面に与える影響を小さな計算コストで考慮できる簡易気泡モデルを開発した。そして、これらを統合した熔融炉心・コンクリート相互作用 (MCCI) における多相多成分伝熱流動の解析手法を開発した。

キーワード : MPS 法, JUPITER コード, 多相多成分流, 界面張力, MCCI, VULCANO VF-U1 実験

1. 背景・目的

軽水炉過酷事故時の熔融炉心・コンクリート相互作用 (MCCI) を模擬した VULCANO VF-U1 実験の後に確認されたデブリ中の多成分の分布機構を数値解析で示すことができれば、MCCI の現象理解を深めることができる。従来は固・液・気三相の複雑な相互作用と多成分界面追跡を統合した伝熱流動解析が困難であったため、デブリ成分の分布を MCCI の現象履歴から説明できなかつた。Moving Particle Semi-implicit (MPS)法は固液相変化を伴う界面の追跡が容易であり、多成分界面追跡を伴う解析に適している。しかし、従来の MPS 法では多成分流動における正確な界面張力の模擬が困難であり、また気泡の通過が界面に及ぼす影響を考慮するためには大きな計算コストが伴った。本研究ではこれらの新たなモデル開発と、それらを統合した MPS 法による多相多成分伝熱流動解析手法を開発した。

2. 手法開発

2-1. Cohesion-Free Potential(CFP)モデルの開発

複雑な界面形成を伴う多成分流動の界面張力の考慮には界面曲率の評価が不要なポテンシャルモデルが適しているが、従来のモデルでは全ての流体粒子に粒子間引力を作用させるため粒子が凝集し、圧力が過大評価されたり流動が阻害されたりすることが知られていた[1][2]。そこで、界面付近の異成分粒子間のみ斥力を作用させることで流体粒子の非物理的な凝集を伴わずに界面張力を考慮できる CFP モデルを開発した[2]。

2-2. 簡易気泡モデルの開発

一般に気液混相流解析では大きな計算コストをかけて気液界面が計算される。しかし、MCCI 進行時の伝熱流動現象とその後の多成分デブリ分布の関係を検討するためには気液界面の挙動を詳細に計算する必要はなく、気泡の上昇運動が液-液界面に及ぼす影響さえモデル化できれば十分と考えられる。そこで、そのような近似の目的で気泡を本来の 1000 倍の密度の仮想的な粒子で模擬する簡易気泡モデルを考案し、気-液界面を直接解く Volume Of Fluid (VOF)法に基づく JUPITER コード[3]により検証した。

3. 開発した多相多成分伝熱流動解析手法による MCCI 解析

上述の開発モデルを MPS 法による MCCI 解析手法に統合し、非均質なデブリ成分の分布形成過程を包括的に考慮する多相多成分伝熱流動解析手法を開発した。そして VULCANO VF-U1 実験[4]を解析し、実験後の凝固金属成分の分布の特徴を再現した。

参考文献

[1] Zhu, Y., et al., Ann. Nucl. Energy 148, 107753, 2020. [2] Fukuda, T., et al., Prog. Nucl. Energy, 150, 104311, 2022.[3] Yamashita, et al., Nucl. Eng. Design 322, 301–312, 2017, [4] Bouyer, V., et, al., ERMSAR2019, Prague, 2019.

*Takanari Fukuda¹, Akifumi Yamaji¹, Haruki Takei¹, Susumu Yamashita², Hiroyuki Yoshida²

¹Waseda Univ., ²JAEA