

VULCANO VF-U1 実験における金属コリウム局所凝固挙動の MPS 法による解析

Analysis of Locally Distributed Metallic Corium Solidification

in VULCANO VF-U1 Experiment with MPS Method

*福田 貴斉¹, 山路 哲史¹, Li Xin¹

¹早稲田大学

溶融炉心-コンクリート相互作用(MCCI)を模擬した VULCANO VF-U1 実験における溶融物中の金属相の局在化とその凝固挙動を Moving Particle Semi-implicit (MPS)法を用いて解析した結果を報告する。

キーワード : MCCI, MPS 法, VULCANO VF-U1 実験, 福島廃炉, 燃料デブリ取り出し

1. 背景・目的

炉心溶融を伴う原子炉過酷事故時の格納容器健全性評価の観点等から、これまでに実施された溶融炉心-コンクリート相互作用(MCCI)の研究では、主にコンクリートの侵食やコンクリート分解ガスの発生量が着目されてきた。一方で福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出しのためには、MCCI 終息後に格納容器下部に凝固した酸化物(UO₂, ZrO₂ 等)デブリ及び金属(Fe, Zr 等)デブリの分布の推定が重要であるが、これらに着目した研究は限られる。2017 年に実施された VULCANO VF-U1 実験では、溶融物の金属相と酸化物相は成層化するだけでなく、金属相がコンクリート床底面や側壁面に沿って局在化し凝固したことが確認された[1]。Volume Of Fluid 法を用いた解析研究では、金属相と酸化物相との間の界面張力がそのような局在化の原因の一つに指摘されたが、伝熱に伴う溶融物とコンクリートの溶融や凝固は考慮されていない。そこで本研究では、ラグランジュ法に基づき複雑な固液相変化に伴う界面変化の追跡が容易な Moving Particle Semi-implicit (MPS)法の改良と解析により VULCANO VF-U1 実験を解析し、このような凝固物分布の形成機構を検討した。

2. 手法

VULCANO VF-U1 実験における金属相の局在化と凝固挙動を再現するため、Li らによる従来の MPS 法による MCCI 解析手法に以下を組み込んだ。まず、溶融物自由表面のみならず金属相と酸化物相の間の界面張力も考慮するため、Zhu らによるポテンシャルモデルを活用した。また溶融物の冷却に伴う粘性上昇による凝固を高精度に再現するために Duan らによる修正アルゴリズムを採用した。加えて、実験において観測された数 mm～数 cm 規模の局在金属相と酸化物相の間の界面を高い解像度で解析するため、従来の共有メモリ並列計算手法 OpenMP に分散メモリ並列計算規格 MPI を組み合わせた並列計算を実施した。

3. 結果

直径 7.5mm の粒子により VULCANO VF-U1 実験の体系を構成し 2000 秒間の解析を行なった。溶融物全体が高温であった約 800 秒までは、容器底面に移行し界面張力により局在した金属相が溶融コンクリートの上昇流に伴う自然対流に牽引され側壁面に添い分布した。800 秒以降では溶融物の凝固が進行することで溶融物の自然体流が徐々に停止したが、特に熱伝達率の高い局在金属相付近の酸化物相が効率よく冷却されることにより局在金属相が固化した酸化物相(クラスト)の膜の内部に捕獲され、容器底面において局在形状を保ったまま凝固することがわかった。

参考文献

[1] V. Bouyer, et, al., The 9TH European Review Meeting on Severe Accident Research, Prague, 2019.

*Takanari Fukuda¹, Akifumi Yamaji¹ and Xin Li¹

¹Waseda University