

博士論文審査報告書

論文題目

MPS 法の改良と VULCANO VF-U1 実験の
解析による MCCI の理解の深化

Deepening Understanding of MCCI
through Development of MPS Method and
Analysis of VULCANO VF-U1 Experiment

申請者

福田 貴斉

Takanari FUKUDA

共同原子力専攻 原子炉物理学特殊研究

2023 年 2 月

2011年の東京電力福島第一原子力発電所（1F）事故は炉心溶融を伴う原子炉過酷事故の評価、対策、設計改良が、原子力エネルギー利用がカーボンニュートラル達成に貢献するための重要課題であることを明らかにした。本申請論文は、軽水炉の過酷事故時に原子炉格納容器床に放出される溶融炉心物質（コリウム）とコンクリート床の相互作用（MCCI）の理解を深める独自の視点で、数値解析手法の一種である Moving Particle Semi-implicit（MPS）法の改良と解析により MCCI の現象理解を深めることを目的としている。具体的には、1F1号機を模擬した VULCANO VF-U1 実験を例に、実験後に凝固・残留したデブリ成分分布は、模擬コリウムに含まれる酸化物成分が冷えて半溶融／凝固状態になった後もコンクリートの溶融浸食と溶融金属の流動が継続した痕跡である可能性を示している。本論文は以下の五章から構成されている。

第一章では研究の背景、必要性、目的について論じている。MCCI に伴うコンクリート浸食やガス発生は格納容器の健全性や環境への放射性物質の放出に影響するため、軽水炉過酷事故の評価、対策、設計改良のためには MCCI の理解の深化が必要としている。MCCI は炉心酸化物・金属、床コンクリート等の多成分が、それぞれ異なる温度域で熱分解・溶融・凝固するため、気・液・固の相変化とそれらの間の複雑な多成分多相界面が形成される伝熱流動現象である。しかし従来は、実験や数値解析能力の制約からそのような多成分多相界面の挙動は考慮できず、限られた経験則を利用したコンクリート侵食量やガス発生量の評価に留まっており、現象理解の深化をもたらす機構論的な数値解析を必要としている。離散点（粒子）が流れと共に移動するラグランジュ式記述の MPS 法は、界面を明示的に解かずに伝熱や固液相変化を伴う多成分間界面を容易に追跡できるため、そのような解析に適しているが、上記のような MCCI 解析のためには実用的な計算コストで溶融物の凝固直前までの固・液及び液・液界面の計算能力を向上することが課題であるとしている。以上を背景に、MPS 法の改良と解析により、VULCANO VF-U1 実験の実験後に何故、凝固した金属デブリ成分がコンクリート側壁に沿って分布したのかを溶融物が凝固するまでの伝熱流動履歴により論じ、MCCI の理解を深めることが本研究の目的であるとしている。

第二章では MPS 法の従来モデルを組み合わせた VULCANO VF-U1 実験の解析により、溶融金属成分がコンクリート底部から側壁に沿って分布・凝固するまでの伝熱流動現象の履歴を示すために必要な物理現象モデルとその精緻化のレベルが検討されている。溶融酸化物・金属の界面に適当な張力を暫定的に与えた場合に、溶融酸化物成分の凝固とコンクリート壁の溶融が同時に進行するようになると実験と同様な酸化物・金属成分の分布が得られたこと等から以下を数時間以上の現象の解析に反映することが課題とされた：

- 凝固酸化物成分とコンクリート壁間に形成されるミリメートルスケールの液・液、固・液界面の計算能力の向上。

- 溶融物間の混合に伴う密度や固液相線温度の変化の考慮。

第三章では第二章で示された課題を解決するために申請者が新たに開発した界面張力モデルと追加考慮した溶融物間の混合モデルが示されている。特に MCCI の履歴とその後に残留するデブリ成分分布を議論するには以下の4つの要件を全て満たす界面張力モデルの開発が必要であるとしている：

- (1) 複雑な多成分界面を容易に追跡できる（例：界面形状の計算が不要）。
- (2) 壁面の濡れ性を考慮できる。
- (3) モデル中のパラメータを恣意的に調節する必要がない。
- (4) 低密度液相中の高密度液滴の自重沈降等の基本的な解析能力がある。

申請者は、独自に異成分粒子間にのみ斥力を作用させる **Cohesion-Free Potential (CFP)** 界面張力モデルとその濡れモデルを開発し、解析結果と理論解の比較等から、上記4つの要件の全てを満たすことを示している。

第四章では新たな CFP 界面張力モデルと、非圧縮性よりも凝固直前の流動計算精度を優先した粘性による速度拡散計算法、固相率と速度の閾値により粒子座標を固定する凝固モデル、混合に伴う溶融物の密度及び固液相線温度変化モデルを組み合わせた改良 MPS 法による MCCI 解析手法が示されている。さらに、MCCI の履歴とその後の残留デブリ中の成分分布の関係を論じるには以下の包括的な考慮が必要であることが解析により示されている：

- 出力履歴：高加熱期間から低加熱期間に移行した後の溶融物中の各成分の流動と凝固に係る考慮。
- 固液相線温度の関係：酸化物成分が半溶融／凝固状態となった以降も金属成分の流動とコンクリート浸食が継続することの考慮。
- 密度の関係：コンクリートとの混合に伴う酸化物成分の密度低下が限定的な場合、凝固しながら下方に沈降することの考慮。

第五章では本研究の結論・課題・展望が示されている。新たに開発した CFP 界面張力モデルを他のモデルと適切に組み合わせることにより、数時間に及ぶ MCCI 実験中の溶融物が凝固する直前までの複雑な多成分界面の挙動を現実的な解析コストで追跡できるようになったとしている。これにより、VULCANO VF-U1 実験後のデブリ成分分布は、模擬コリウムに含まれる酸化物成分が冷えて半溶融／凝固状態になった後もコンクリートの溶融浸食と溶融金属の流動が継続した痕跡である可能性が示されている。以上から、従来の MCCI 研究とは異なる視点で、実験後に残留したデブリ成分分布から MCCI の理解を深めることに成功している。最後に、本研究の展望が示されている。本研究で得られた新たな視点から深めた MCCI の理解は例えば、原子炉停止後相当程度の時間が経過して崩壊熱が低下した後に生じる MCCI や、1F 事故で考えられているように燃料デブリの不十分な冷却が長期間継続する場合を想定した安全研究の発展を支える基盤研究として貢献することが期待されるとしている。

本申請論文の審査過程では、以上について確認・議論した。MCCI 実験後に残留したデブリ成分分布から MCCI に伴う伝熱流動現象の履歴を議論することに成功した本研究は、申請者独自の新たな視点で MCCI の理解を深めており、新規性が認められた。また、そのために申請者が開発した CFP 界面張力モデルはラグランジュ式記述の MPS 法が界面を明示的に解く必要がない特性を効果的に利用しながら、従来は解析者が恣意的に定める必要があったモデル中のパラメータ調整を不要としており、固液相変化を伴う複雑な多成分間界面の新たな追跡法として革新性が認められた。

上記の新規性及び革新性の議論の過程では、再現対象とした実験の MCCI 模擬性（例：加熱手法）や解析手法の適用性（例：CFP モデルの適用範囲）が議論され、いずれも適切に考慮されており、本研究の結論を左右するものではないことが確認された。また、MCCI 終息期の安全研究の発展を支える基盤研究としての展望が明確にされた。

以上より、MPS 法の改良・発展と MCCI の理解を深めたこれらの成果は、原子力発電技術の安全性と信頼性の向上に重要な知見と認められる。よって、本申請論文は博士（工学）の学位論文としてふさわしいものと認める。

2023 年 2 月

審査員

主査 早稲田大学教授 博士（工学）（東京大学） 山路 哲史

署名

副査 早稲田大学教授 Ph.D.（デルフト工科大学） 古谷 正裕

署名

早稲田大学教授 工学博士（東京大学） 鷺尾 方一

署名

早稲田大学教授 工学博士（早稲田大学） 石山 敦士

署名

東京都市大学教授 博士（工学）（京都大学） 鈴木 徹

署名