

博士論文審査報告書

論文題目

**Multi-dimensional Numerical Study of Molten
Corium-Concrete Interaction
(MCCI) Mechanism by MPS Method**

MPS 法による溶融コリウム-コンクリート相互作用
(MCCI) メカニズムの多次元数値解析研究

申請者

Xin LI	
李	昕

Cooperative Major in Nuclear Energy
Research on Reactor Theory

2016 年 7 月

本論文は独自のモデルを追加した改良 Moving Particle Semi-implicit (MPS)法による溶融コリウム-コンクリート相互作用 (Molten Corium-Concrete Interaction: MCCI) メカニズムの多次元数値解析について論じている。改良 MPS 法の検証計算から、MCCIにおけるコンクリート侵食を支配する因子およびそれらの相互作用のメカニズムを物理現象に基づいて論じている。本論文は以下の6章から構成される。

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は原子炉過酷事故時に原子炉格納容器のコンクリート侵食・貫通による損傷から放射性物質の環境への放出につながりうる事象であるため、その影響因子とそれらの相互作用メカニズムの理解は原子力発電技術の安全性と信頼性の向上に必要不可欠であるとしている。特に、コンクリート侵食パターンの不確かさは原子炉格納容器破損に要する時間等の事故進展予測の不確かさをもたらすため、その低減が必要であるとしている。

模擬溶融コリウムに酸化物を用いたこれまでのMCCI実験では、珪質系コンクリートの横方向侵食量が深さ方向侵食量に比べて大きい非等方侵食が起こっているのに対し、石灰岩系コンクリートを用いた実験では等方侵食が起こっている。しかし、これらの侵食パターンの違いがどのようなメカニズムによりもたらされているかはこれまで不明であったとしている。

一方、従来の解析法ではMCCIの基本的な現象を支配する伝熱流動および相変化のモデルに経験式が用いられているため、MCCIに影響する因子の複雑な相互作用を正確にモデル化できず、特に以下が課題としている：

- 計算結果同士および計算結果と実験結果の相違を基本的な物理現象に立ち戻って議論できない。
- 実験結果の再現に多様な経験式中のパラメータ調整を伴うため、計算結果が実験結果と一致しても、必ずしもモデルの妥当性や汎用性を保証しない。

さらに、従来の解析コードはオイラー法に基づくため、溶融物とコンクリートの相変化に伴う固/液界面を正確に捉えることが困難で、解析コード間の予測誤差が大きいので、より機構論的な手法を導入し、経験式への依存度を低減したMCCIの多次元数値解析が可能な手法が必要であるとしている。

本研究では、ラグランジュ法に基づき、固液相変化を伴う伝熱流動現象の機構論的な解析が可能なMPS法を用いて以下を目指している：

- コンクリート侵食が一次元から三次元までのMCCI実験を、独自のモデルを追加した改良MPS法により解析し、そのMCCI解析能力を検証する。
- MCCIによるコンクリート侵食の影響因子とそれらの相互作用を物理現象に基づく機構論的な観点から明らかにする。

第二章ではMPS法の基礎モデルおよび本研究でMCCIメカニズムを理解するために新たに導入された以下の独自モデルが解説されている：化学反応熱モデル、コリウム粘性モデル、スラグ膜モデル、クラスト溶解モデル。こ

れらにより、溶融物やコンクリート中に含まれる金属の酸化発熱の影響や、溶融物のエンタルピー変化に伴う粘性変化、コンクリート分解に伴って溶融物／コンクリート界面に生じるスラグ膜の影響、更にはクラスト形成と溶解の影響が考慮できるようになったとしている。

第三章では一次元 MCCI 実験である SURC-2 および SURC-4 実験の解析により、本研究に用いる熱伝導モデル、化学反応熱モデル、相変化モデルの妥当性を議論している。その結果、溶融物／コンクリート界面に形成されるクラストの断熱効果やクラストの再溶融、溶融物の酸化発熱がコンクリート浸食率におよぼす影響が明らかになったとしている。

第四章では二次元 MCCI 実験の解析および本研究で導入したスラグ膜モデル、クラスト溶解モデルの効果の検証から、コンクリートの等方／非等方侵食メカニズムについて次のように議論している。すなわち、珪質系コンクリートが用いられた CCI-3 ではコンクリートに含まれる骨材が溶融しないため、コンクリートの溶融に伴う骨材の流出移動挙動および骨材と溶融物の伝熱がクラスト形成に非等方性をもたらし、非等方侵食の主因となるとしている。一方、石灰岩系コンクリートが用いられた CCI-2 では骨材は溶融し、クラスト形成は概ね等方的となり、等方侵食をもたらす主因としている。また、成分中に炭酸カルシウムを多く含む石灰岩系コンクリートは熱分解・溶融過程で多量のガスを発生させることや、クラストの拡散係数が高いことから、溶融物／コンクリート界面に生じるスラグ膜が界面の熱伝達率におよぼす影響を考慮するためのスラグ膜モデルやクラストが融点未満で溶解する効果を考慮するためのクラスト溶解モデルが必要であるとしている。

第五章では第四章までに示された理論の三次元 MCCI 実験への適用性を検証し、MCCI による一次元から三次元までのコンクリート浸食現象と等方／非等方侵食の普遍的なメカニズムを議論している。すなわち、第四章までに示された同一の解析モデルにより三次元 MCCI 実験の VULCANO-VB U7 を含めて酸化物溶融物による珪質系コンクリートは非等方的に侵食することが示されている。但し、COMET-L3 実験のように溶融物が金属の場合、クラストの引張強度が酸化物クラストの 100 倍程度と高いため、コンクリート成分の影響を受けずに等方的なクラストが形成され、等方的なコンクリート侵食をもたらすとしている。

第六章は本研究の結論を示している。コンクリート侵食が一次元から三次元までの MCCI 実験を独自のモデルを追加した改良 MPS 法により解析し、その MCCI 解析能力が検証できたとしている。さらに、MCCI によるコンクリート侵食の影響因子とそれらの相互作用を物理現象に基づく機構論的な解析を用いて分析したことにより、以下の項目達成に成功したとしている：

- 解析結果と実験結果の相違を従来のパラメータ調整ではなく、物理現象に基づくモデリングの考察から MCCI に伴うコンクリート侵食現象を支配する因子（伝熱、流動、相変化、化学反応熱、クラスト形成・溶解・

溶解，骨材挙動と伝熱，スラグ膜）とそれらの相互作用を明らかにした。

- その結果，酸化物溶解物による石灰岩系コンクリートの等方侵食と珪質系コンクリートの非等方侵食のメカニズムを明らかにし，過酷事故進展予測の不確かさの低減につながりうる重要な知見を得た。

本申請論文の審査過程では，以上について確認・議論した上で以下について申請者と議論し，申請論文に必要な修正を反映させた：①論文の新規性，②影響因子の解析モデルに経験式を用いることや解析モデルを使い分けることの妥当性，③解析結果の妥当性。

第一点目である論文の新規性について議論した結果，申請者が結論に示したように，MCCIの実験結果と解析結果の相違を物理現象に基づき議論することに成功した点や，その結果としてコンクリートの等方／非等方侵食メカニズムを明らかにした点が新規かつ最も重要な知見であることが認められた。

第二点目であるMPS法の解析に経験式を用いることや実験ケースに応じて異なる解析モデルを使い分けることの妥当性は第一点目（新規性）を明確化する過程で議論された。数値解析によるMCCIの理解と予測の困難さは，申請者が第一章で議論しているように，基本的な現象を支配する伝熱流動および相変化の正確なモデル化の困難さに加えて，様々な影響因子の複雑な相互作用の正確なモデル化の困難さに起因する。本研究では，伝熱流動および相変化の正確なモデル化が可能なMPS法を用いて様々な影響因子の複雑な相互作用を機構論的にモデル化していることが重要であり，個別の影響因子を全て機構論的にモデル化する必要はないことが認められた。また，申請者が第四章，第五章で示しているように，種類の異なるコンクリートや溶解物の物性等に応じて異なる影響因子モデルを用いることは，すなわち物理現象の考察・理解・モデリングの過程に位置づけられ，従来の物理的な意味を持たない経験式中のパラメータの調整とは本質的に異なることが認められた。

第三点目である解析結果の妥当性は第二章に示されている各影響因子モデルの適用範囲の妥当性や第三章および第四章の粒子径（解析の解像度）による感度解析の結果等から議論された。その結果，いずれの解析結果についてもその妥当性が認められた。

以上より，MPS法によるMCCIメカニズム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）の学位論文としふさわしいものと認める。

2016年6月

審査員

主査	早稲田大学	専任講師	博士(工学)(東大)	山路	哲史
	早稲田大学	特任教授	工学博士(早大)	師岡	慎一
	早稲田大学	教授	工学博士(東大)	鷺尾	方一
	東京都市大学	教授	工学博士(東大)	横堀	誠一
	東京大学	名誉教授	工学博士(東大)	岡	芳明