

Multi-physics モデリングによる Ex-Vessel 溶融物挙動理解の深化

(受託者) 学校法人早稲田大学

(研究代表者) 山路哲史 理工学術院先進理工学研究科共同原子力専攻

(再委託先) 一般財団法人電力中央研究所、国立大学法人大阪大学

(研究期間) 平成28年度～30年度

1. 研究の背景とねらい

原子炉過酷事故では、図1に示すように炉心溶融物が原子炉圧力容器外 (Ex-Vessel) に放出され、原子炉格納容器の床面に広がる可能性があり、これを溶融物の spreading と呼ぶ。溶融物は崩壊熱により自ら発熱するため、床面のサンプ等の狭い空間に溶融物が集中するとその冷却が困難になり、溶融物とコンクリートのコア・コンクリート反応 (MCCI) によりコンクリート床面の浸食が進み、環境への大規模な放射性物質の放出に至る可能性がある⁽¹⁾。

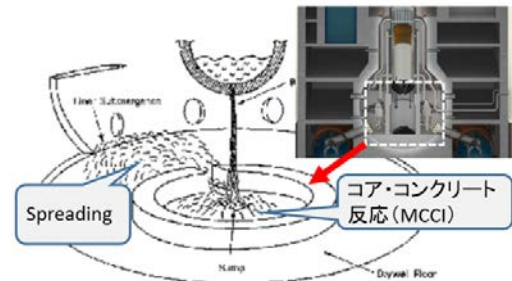


図1: Ex-Vessel溶融物挙動

Ex-Vessel 溶融物挙動を解析により理解し、予測するための課題は以下の2点に集約される：

- A) 固液混相流動の正確な界面追跡と固液相互作用
- B) サブスケール現象や複雑な影響因子の相互作用のモデル化

従来の研究では主に上記(B)に着目した「モデルの高度化」が図られてきた。しかし、流動の近似や、静止したオイラー座標系で界面や流動を離散化する際に生じる界面形状や移流項の数値拡散が流動の予測精度を低下させ、現象やモデル性能の把握を困難にしていた。そこで、本研究では上記(A)に着目し、流動と共に計算点（粒子）が移動するラグランジュ法に基づく MPS 法を用いる。従来の MPS 法の簡便で正確な界面追跡手法および固液相変化モデルに加え、溶融物挙動解析に適した機構論的な固液相互作用モデルや将来の MPS 法の抜本的な改良に向けた課題を検討する。さらに、対象形状をスケラブルに模擬したスケール効果試験（再委託先：電力中央研究所）と、高温溶融物の物性を非接触で正確に測定可能なガス浮遊法による溶融物 (UO₂) 基礎物性取得（再委託先：大阪大学）により、Ex-Vessel 溶融物挙動理解を飛躍的に深めることが本研究のねらいである（図2）。研究項目および計画を図3に示す。

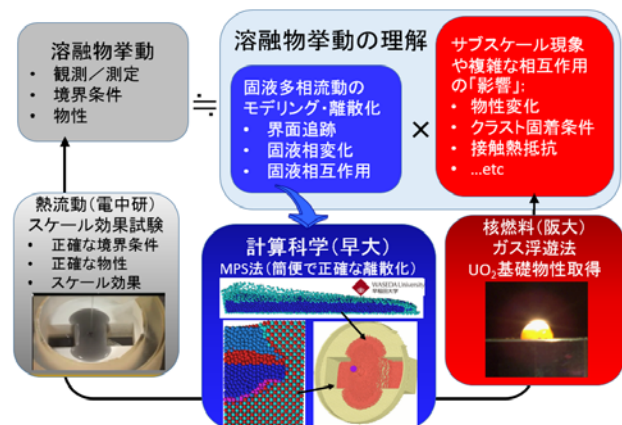


図2: 本研究のねらい（溶融物挙動理解の深化）

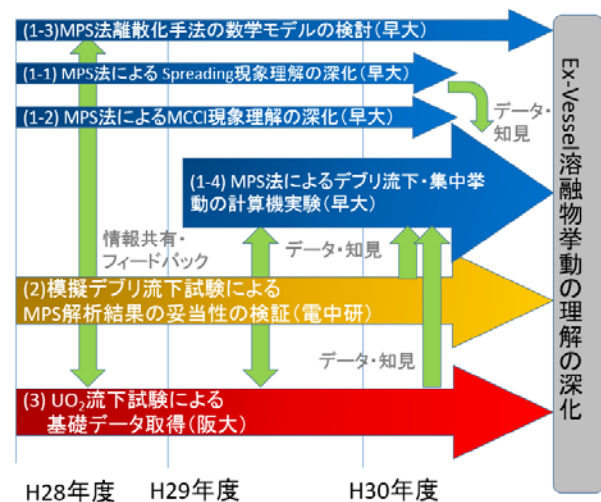


図3: 研究項目と計画

2. これまでの研究成果

2.1 MPS 法による Spreading 現象理解の深化

仏国 CEA で実施された VULCANO VE-U7 実験⁽²⁾を対象に、MPS 法の新たにクラストモデルを複数検討した。このうち、粒子の固相率が閾値（流動停止固相率）を超え、且つその粒子が床粒子等の静止粒子に接触した場合に静止させる「クラスト固着モデル」を用いた解析により VULCANO VE-U7 実験の流動停止機構を検討した。その結果、図 4 に示すように、MPS 法により推定される流動停止固相率（約 70%）は実験⁽²⁾からの推定値（65-75%）と良く一致した。また、解析が示す流動停止時の溶融物の先端位置（図 5）は、実験による報告⁽²⁾とも整合している。これらも踏まえた MPS 法による解析結果から同実験の spreading について以下のように理解が深まった。

- 従来知見：重力／粘性支配の流動において、溶融物の固相率が閾値を超えると流動は停止する。
- 理解の深化：重力／粘性支配の流動において、流動先端に形成されるクラストと流動の固液相互作用の結果、クラストが次第に発達し、やがてバルク流動をせき止めて流動停止に至る。

2.2 MPS 法による MCCI 現象理解の深化

仏国 CEA で実施された VULCANO VB-U7 実験⁽⁴⁾を対象に、粗骨材、側壁クラスト、スラグ膜、クラスト融解等、珪質岩系コンクリートの非等方浸食をもたらすと考えられる因子を MPS 法の三次元 MCCI 解析モデルに組み込み、どのようにこれらが非等方浸食をもたらすのかを検討した。

図 6 に実験体系および解析結果を示す。実験では、コンクリートを構成する粗骨材が実験後も未溶融の状態に残っていたことが報告されており、本研究ではコンクリートの均質／非均質モデルにより、粗骨材の影響を検討した。その結果、粗骨材が底部でヒートシンクの役割を果たし、クラストを安定化させることで、コンクリート浸食の非等方性が増す効果があることが明らかになった。コンクリートの粗骨材を考慮した非均質モデルを用いた解析結果は、図 7 に示すように実験結果とも比較的に良く一致している。

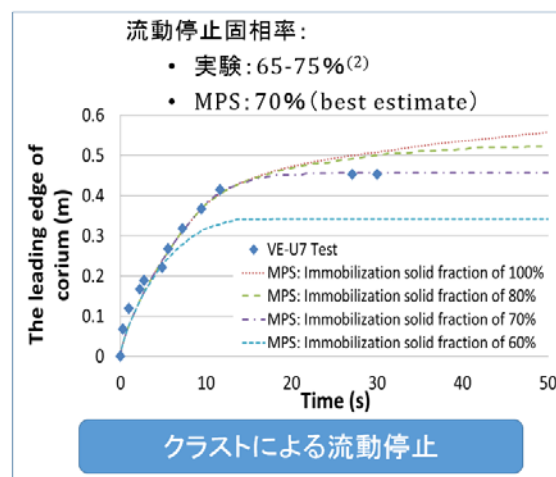


図4: 流動停止固相率が流動先端距離に及ぼす影響

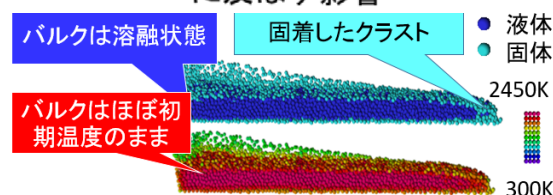


図5: Spreading停止時の様子(MPS法)

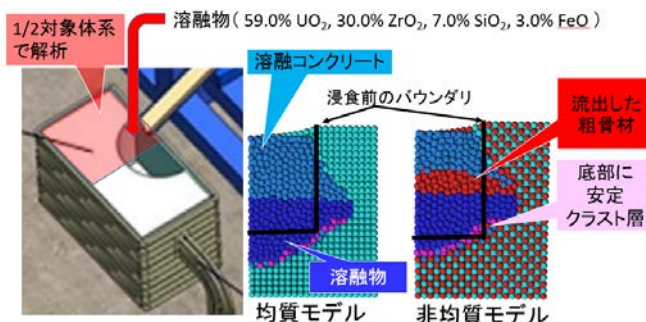


図6: VULCANO VB-U7実験体系と解析結果(MPS法)

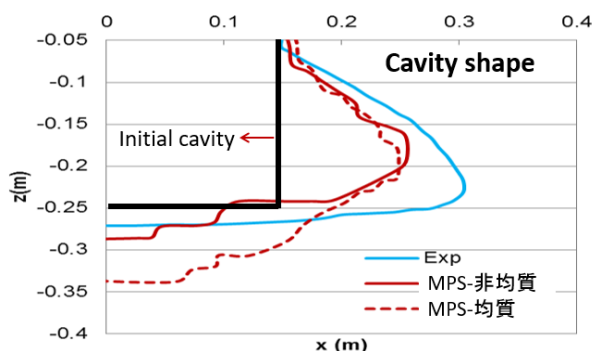


図7: 最終浸食断面の比較

これらも踏まえ、同実験の MCCI について以下のように理解が深まった。

- 従来知見：珪質岩系コンクリートの MCCI による浸食を評価する際には、溶融物からの熱流束の縦／横比を変え、非等方性を考慮する。
- 理解の深化：溶融物・クラスト相互作用の違いが等方浸食／非等方浸食の違いをもたらす。特に、珪質岩系コンクリートでは粗骨材が側壁クラスト形成を阻害する一方で、底部ではヒートシンクの役割を果たし、クラストを安定化させ、非等方浸食をもたらしている。

2.3 MPS 法分散化手法の数学モデルの検討

MPS 法の将来の抜本的な改良に資する基礎的な研究の一環として、非圧縮性オイラー方程式（運動量保存則）を分散化した後に、分散エネルギー保存則を導出できない問題（図 8）に着目した。オイラー方程式には Hamiltonian（運動エネルギー）と Helicity を保存する性質があり、それには Poisson 括弧と散逸括弧の構造が重要な役割をもつ⁽⁵⁾。本研究では、この Poisson 括弧と散逸括弧の定式化を行い、分散化後もそれらを保持する構造保存型数値解法（格子法）を開発した。同解法を周期渦列の崩壊過程の計算に適用し、微小攪乱を導入することによって周期渦列を崩壊させ、そのような乱れた流れ場でも運動エネルギー等の保存量が精密に保存することを確かめた（図 9）。

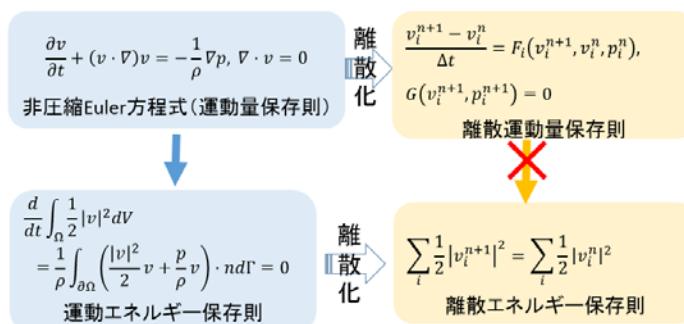


図8: MPS法の分散化手法の課題

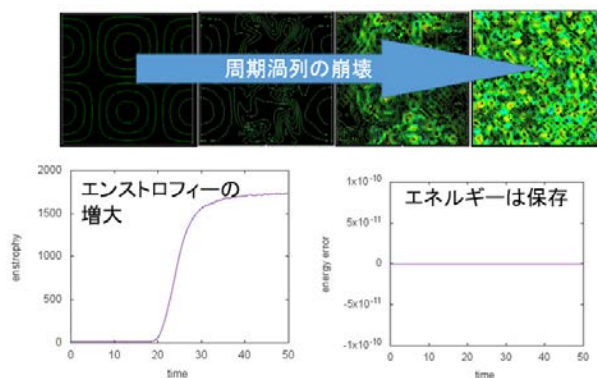


図9: 構造保存型数値解法（格子法）ベンチマーク結果

2.4 デブリ流下・集中挙動試験（再委託先：電力中央研究所）および MPS 法計算機実験

BWR Mark-I 型格納容器ペダスタルのサンプピットなどを模した構造を三次元造形して、模擬デブリ流下試験を行う。本年度は、溶融物による床構造の浸食を伴わない等温条件で試験を実施し、モデルの縮尺率(1/50 および 1/100 スケール)、模擬デブリの滴下位置、粘性等の試験パラメータを定めた。MPS 解析の妥当性確認に必要な三次元流動やサンプピット落下量の時系列などを取得している。今後は異なるスケールで試験し、スケール効果も分析する。また、同実

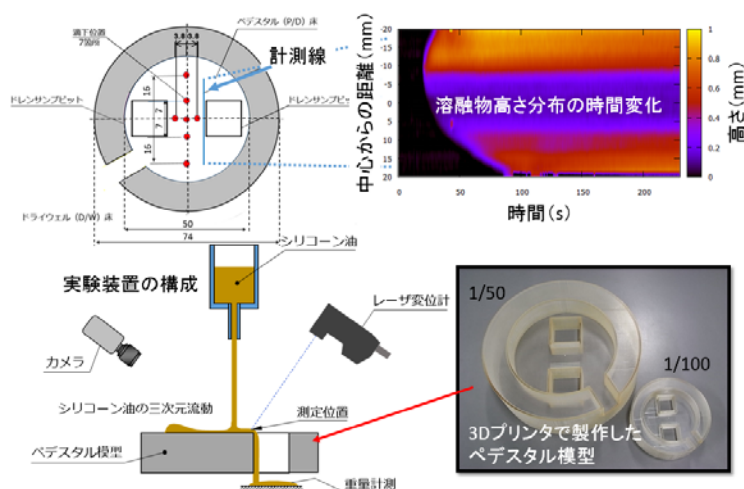


図10: 模擬デブリ流下試験の構成と溶融物高さ分布の測定結果例

験に対応する MPS 法による解析を実施し、解析の妥当性を確認し、解析モデルの課題を検討する。

2.5 UO₂ 流下試験による基礎データ取得（再委託先：大阪大学）

熔融 UO₂ の物性（e. g., 粘性）の非接触測定や、熔融 UO₂ が固体表面に衝突した際の拡がり挙動を観察することを最終的な目標としている。本年度は粘性を非接触で測定するための装置として、ガス浮遊法を利用した液滴振動の励起及び観察システムを構築した。装置の構成とサンプル試験（試料：アルミナ (Al₂O₃、融点 2070 °C) の様子を

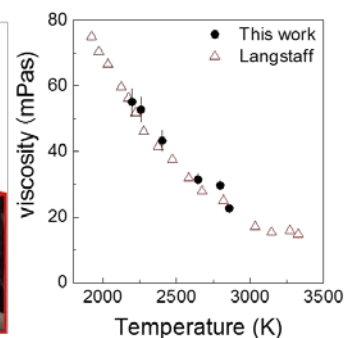
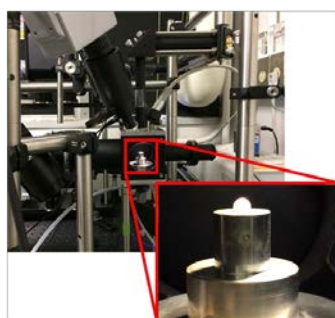


図11 ガス浮遊法を用いたAl₂O₃(模擬物質)の粘性測定結果

上に浮遊させ、CO₂ レーザーにより試料を熔融させる。音波で振動を励起し、振動の減衰から粘性を求める。測定した Al₂O₃ の粘性は Langstaff による文献値と極めて良く一致しており、本装置で酸化物熔融物の粘性を精度良く測定できることが確認できた。

3. 今後の研究（継続課題の場合）

MPS 法による spreading 解析の過程で新たに MPS 法のアルゴリズムに起因する、超高粘性流体の挙動解析の課題（数値的なクリープ変位の抑制／防止）が明らかになった。そこで、MPS 法のアルゴリズム改良と、クラスト固着以外の機構論的凝固モデルおよび固液相互作用モデルを検討する。さらに、BWR Mark-I 型格納容器を模した実験体系における模擬実験、ガス浮遊法による UO₂ 物性データの取得と MPS 法による計算機実験により、原子炉過酷事故時の熔融デブリ流下・集中挙動の理解を深め、その予測のための課題を明らかにする。

4. 参考文献

- (1) Robb, K. R. and Francis, M. W., “Enhanced Ex-Vessel Analysis for Fukushima Daiichi Unit 1,” ORNL/TM-2012/455, February (2013).
- (2) Journeau, C., et al., “Ex-vessel corium spreading: results from the VULCANO spreading tests,” Nuclear Engineering and Design, 223, pp. 75-102 (2003).
- (3) Journeau, C., et al., “The VULCANO VE-U7 Corium spreading benchmark,” Progress in Nuclear Energy, 48, pp. 215-234 (2006).
- (4) Sevón, T., et al., “VULCANO VB-U7 experiment on interaction between oxidic corium and hematite-containing concrete,” Ann. Nucl. Energy 59, 224-229 (2013).
- (5) Suzuki, Y., “Bracket formulations and energy - and helicity - preserving numerical methods for the three-dimensional vorticity equation,” Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 317 (2017) 174-225.
- (6) Langstaff, M., et al., “Aerodynamic levitator furnace for measuring thermophysical properties of refractory liquids,” Rev. Sci. Instrum. 84 (2013) 124901-10.