

炉心損傷時の炉心物質再配置挙動評価手法の開発

研究代表者 飛田 吉春 独立行政法人日本原子力研究開発機構次世代原子力システム研究開発部門
炉心安全評価グループ

参画機関 独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人九州大学

研究開発期間 平成22年度～25年度

1. 研究開発の背景とねらい

ナトリウム冷却型高速増殖炉でたとえ炉心損傷事故が生じたとしてもその影響を原子炉容器内に閉じ込めておくためには、損傷炉心物質を原子炉容器内で保持する必要がある。図1に示されるように、炉心損傷事故によって熔融した燃料等の炉心物質は、制御棒案内管等を通じて原子炉容器底部へ向かって再配置される。損傷炉心物質が原子炉容器内で保持されるには、熔融した炉心物質が制御棒案内管を通じて原子炉容器下部プレナム（以下、「下部プレナム」と称する）へ流出する挙動の評価、さらには、下部プレナムへ流出した際に冷却材ナトリウムと混合して冷却の容易な微粒子状に固化（以下、微粒子状固化物を「デブリ」と称する）し、原子炉容器下部構造上に堆積することの確認が必要である。また、デブリ化した炉心物質が局所的に厚く堆積して冷却性が低い状態となっても、燃料の崩壊熱によって堆積デブリ内外の冷却材が沸騰することでデブリが攪拌され自ずと平坦化（以下、「セルフ・レベリング」と称する）し、冷却性が高まる挙動の評価も重要な課題となる。以上を踏まえ、本事業では、平成22年度～25年度の約4年間で、炉心損傷時の炉心物質再配置挙動で重要な炉心物質の流出挙動及び堆積デブリのセルフ・レベリング挙動について、炉内構造設計及び許認可における安全評価に適用可能な評価手法を開発することを目的とする。また、既存の高速炉の安全性評価に適用できる評価手法を開発することを目的とする。

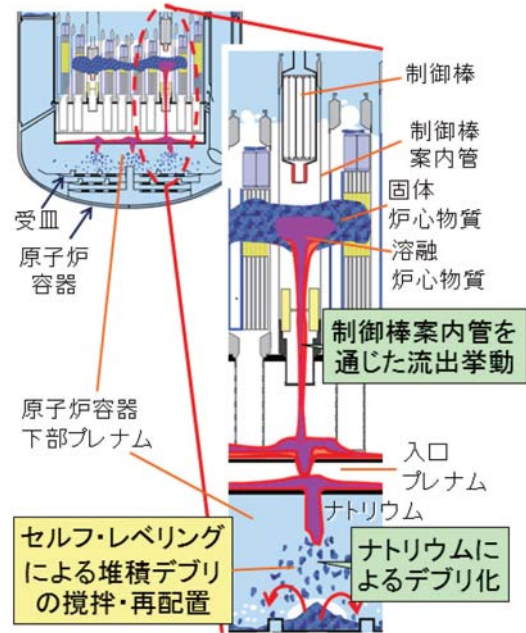


図1 炉心損傷時の炉心物質再配置挙動の概念

2. 研究開発成果

2. 1. 炉心物質流出挙動評価手法の開発

炉心物質の流出挙動を評価するため、本事業では、熔融した炉心物質が制御棒案内管を通じて下部プレナムへ流出する挙動を評価する手法及び下部プレナム冷却材との混合によってデブリ化する挙動を評価する手法を開発する。

2. 1. 1. 流出挙動評価手法の整備

熔融炉心物質の制御棒案内管を通じた流出挙動は、冷却材の蒸発／凝縮、熔融炉心物質の固化を伴う多相・多成分・多速度場の熱流動現象である。そのため、本研究では、高速炉安全解析コード SIMMER-III/IV⁽¹⁾（以下、「SIMMER コード」と称する）を基盤技術として活用する。同コードは、燃料、スティール、ナトリウムの蒸気相・液相・固相が混在した損傷炉心体系での蒸発／凝縮、熔融／固化を伴った多相・多成分・多速度場の熱流動現象を解析できるためである。これま

で、溶融炉心物質の流出に影響を及ぼす主要現象のうち、炉心領域でのナトリウム蒸気の生成、及び制御棒案内管内における溶融炉心物質の固化・閉塞形成に対し、ナトリウム流路を通じた燃料模擬物質の流出試験⁽²⁾解析を通じて、関連するモデルを最適化した。さらに、平成23年度に実施されたデブリ化試験データを用いて、溶融炉心模擬物質が冷却材中に侵入する際の条件に応じて融体と冷却材との伝熱境界面積を定義できるようにモデルの改良を行うことで、図2に示されるように、蒸発・凝縮を伴う溶融炉心模擬物質の冷却材中への流出挙動が適切に評価できる手法を構築した。

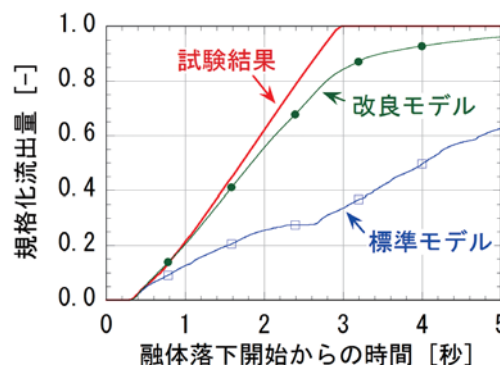


図2 冷却材中への規格化流出量に対する試験結果との比較

2. 1. 2. デブリ化試験

溶融炉心物質が下部プレナムに流出した際のデブリ化挙動に関しては、溶融炉心物質の下部プレナムへの流出条件（流出速度、流出直径等）がデブリ化するまでの距離（以下、「デブリ化距離」と称する）に与える影響を評価できることが重要である。本事業では、従来の試験研究では十分でなかったナトリウム冷却条件下でのデブリ化距離を定量的に評価するためのデータベースの構築から開始する。溶融炉心物質がナトリウムに流出した際の特徴は、両者の接触面にナトリウム蒸気膜が形成されない液-液接触となることにある⁽³⁾。これを踏まえ、溶融炉心物質の模擬融体として低融点合金を、ナトリウム冷却材の模擬物質として水を用い、両者の温度条件の設定により液-液接触の状態を模擬した水試験を実施した。また、水試験で得られた知見がナトリウム冷却条件下でも適用できることを確認するため、溶融炉心物質の模擬融体としてアルミニウムを、冷却材としてナトリウムを用いたナトリウム試験を実施した。これまでに、高速度エックス線透過装置を用いたナトリウム中でのデブリ化挙動の観察により、図3に示されるように、ナトリウム中へ侵入した融体がナトリウム蒸気の膨張に伴って急速にデブリ化される可能性が高く、水試験で確認したデブリ化挙動と共通であることを捉えた。また、水試験でのデブリ化距離は既往研究の代表的な実験相関式⁽⁴⁾による評価値を大きく下回ったが、ナトリウム中でのデブリ化距離の傾向も同様になることを確認した。すなわち、液-液接触条件下では、融体が流体力学的な不安定性によりデブリ化する前に、融体近傍の冷却材の蒸発といった熱的な影響により急速なデブリ化が生じると考えられる。

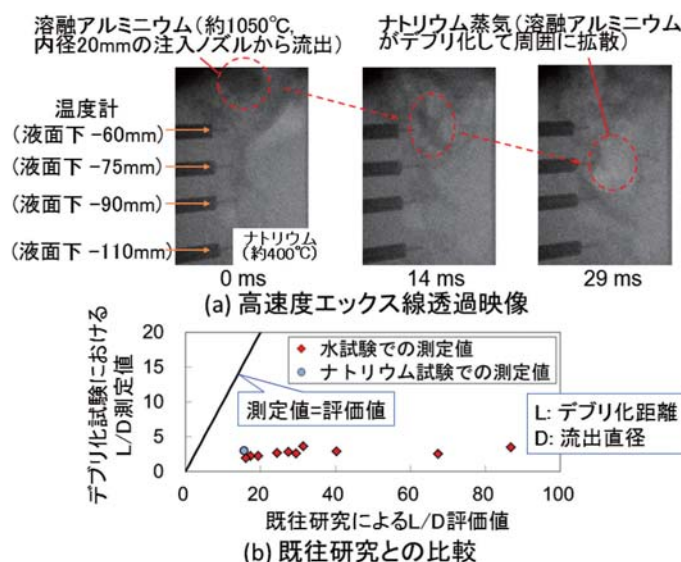


図3 試験での映像及びデブリ化距離の比較結果

2. 2. 堆積デブリのセルフ・レベリング挙動評価手法の開発

既往研究では、セルフ・レベリング現象を定量的に評価する手法が確立されていない。セルフ・

レベリング現象は、燃料とスチールの固化粒子、液体ナトリウムとその蒸気が混在し流動化する相変化を伴った多相多成分の熱流動現象である。このような熱流動現象を解析する技術基盤として SIMMER コードを用い、同コードにモデル化されていない堆積デブリに特有な粒子間の相互作用を扱うモデルを開発・導入することで堆積デブリのセルフ・レベリング現象を評価する手法を構築する。本事業では、粒子間の相互作用を扱うモデルを2種類開発する。1つは「巨視的モデル」と称し、堆積デブリをオイラー系の流体成分として従来の流体対流アルゴリズムと同様に巨視的に扱う手法である。もう1つは「微視的モデル」と称し、粒子の形状、粒子間の衝突、摩擦抵抗、粒子の回転等をモデル化し、個々の粒子の運動を扱う手法である。巨視的モデルは、計算能力への負荷が比較的小さいため、原子炉容器全体スケールでの堆積デブリの挙動を総合的に解析できるが、局所的な現象の解析には適さない。一方で、微視的モデルは局所のセルフ・レベリングによる堆積デブリの挙動を物理現象に基づいて高精度で解析し詳細なメカニズムを把握できるが、計算負荷が大きい。そのため、これらの2つのモデルを相補的に用いたセルフ・レベリング現象の定量的な評価手法を構築する。

2. 2. 1. 巨視的モデルの開発

堆積デブリにおける粒子間相互作用を巨視的に扱うモデルでは、粒子と粒子の衝突作用による粒子圧力、粒子と粒子の接触抵抗による粒子粘性及び異なる径のデブリの運動を個別に扱えることが必要となる。これまでに、セルフ・レベリングと挙動が類似な固気液3相系の流動層を対象とした研究を調査し、SIMMER コードへの適合性を考慮して粒子圧力及び粒子粘性を評価するモデルを選択するとともに、堆積デブリ内の粒子間に働く静止摩擦・動摩擦を粘性として模擬する疑似粘性モデルを SIMMER コードに組み込んだ。加えて、デブリの運動を粒子径毎に個別に扱うためのモデル拡張を行い、上述の3つの要素を有する物理モデルを開発し同コードに組み込んだ。また、モデルの並列化を行い、数値計算の高速化を実現するとともに、開発したモデルを組み込んだ SIMMER コードの物理的な妥当性を確認するため、セルフ・レベリング挙動を模擬した実験⁽⁵⁾による検証解析を行った。その結果、図4に示されるように、山状に堆積したデブリが気液2相流に駆動されて平坦化していく挙動が適切に評価されることを確認した。さらに、実機体系での評価に向けて、燃料崩壊熱により堆積デブリ中の冷却材が沸騰しデブリが平坦化していく挙動を対象とした試計算を行い、計算の速度と安定性を確認した。

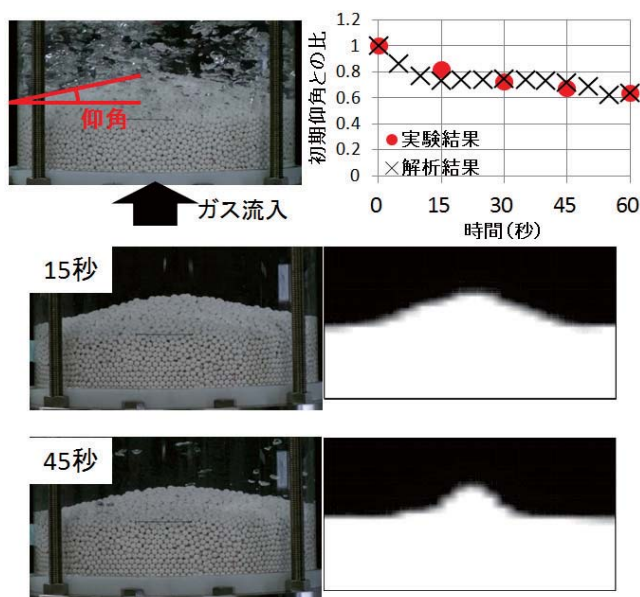


図4 実験結果と解析結果との比較

その結果、図4に示されるように、山状に堆積したデブリが気液2相流に駆動されて平坦化していく挙動が適切に評価されることを確認した。さらに、実機体系での評価に向けて、燃料崩壊熱により堆積デブリ中の冷却材が沸騰しデブリが平坦化していく挙動を対象とした試計算を行い、計算の速度と安定性を確認した。

2. 2. 2. 微視的モデルの開発

堆積デブリにおける粒子間相互作用を微視的に扱うモデルとして個別要素法(DEM)を採用した。DEMはラグランジェ系で記述した支配方程式を陽的に解くことから、種々のCFD(計算流体力学)手法と比較的に容易に結合できる利点がある。これまでに、一般的なCFD-DEM法の結合アルゴリズム

ムにおける支配方程式、粒子-流体間相互作用力のモデル化手法等について調査し、SIMMER コードとの適合性を有するモデルを選択して同コードに組み込んだ。開発コードの妥当性については、セルフ・レベリング挙動と流動機構に類似性がある固気流動層^{(6), (7)}を対象とした検証解析を実施し、流動層における特徴的な流動特性を再現できることを確認した。さらに、図5に示すように、セルフ・レベリング挙動を模擬した既往試験⁽⁸⁾解析により、気液2相流に駆動された比較的長時間のセルフ・レベリング挙動に対するコードの物理的な妥当性を確認した。一方、堆積デブリのセルフ・レベリング挙動を3次元的に解析できるようにするため、DEM を3次元体系で計算できるように拡張するとともに、2次元コードと同様の固体-流体計算の結合アルゴリズムに基づいて3次元SIMMER コードに組み込んだ。

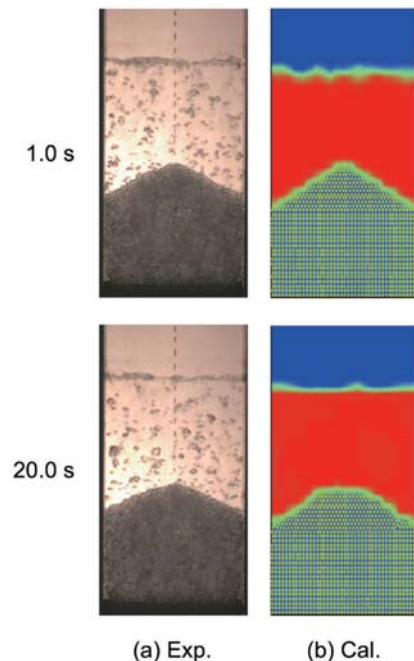


図5 セルフ・レベリング挙動試験における固体粒子層形状の変化

3. 今後の展望

炉心物質の流出挙動評価手法については、試験データに基づいて流出を支配する主要現象を検証するとともに、炉心全体での流出挙動を3次元的に解析できるようコードの整備を進める。また、デブリ化試験については、高速度エックス線透過装置を用いたナトリウム中でのデブリ化挙動に関するデータを拡充し、冷却材中への流出条件に対するデブリ化距離を評価する手法を構築する。堆積デブリのセルフ・レベリング挙動評価手法については、巨視的モデルでは、炉内構造物の全体スケール解析を通じて、実機体系での数値的安定性及び計算速度を向上させ、セルフ・レベリング挙動評価に用いる巨視的手法として整備する。また、微視的モデルでは、DEM を組み込み3次元的に解析できるように拡張したSIMMER コードを用いて既往試験を解析し、固体粒子を含む混相流に対する同コードの基本的な妥当性を検証するとともに、同コードを用いて堆積デブリのセルフ・レベリング挙動を解析してその適用性を検証し、微視的評価手法として整備する。

本事業では機構論に基づいた汎用性の高い評価手法群の構築を目指しており、成果は炉内構造設計及び許認可における安全評価に適用が可能であることに加え、既存の高速炉の安全性評価にも適用でき、ナトリウム冷却型高速増殖炉のより高い安全性確保への貢献が期待できる。

4. 参考文献

- (1) Y. Tobita *et al.*, Nucl. Technol., 153(3), 245-255 (2006).
- (2) K. Kamiyama *et al.*, J. Nucl. Sci. Tech., 50(6), 629-644 (2013).
- (3) Sa. Kondo *et al.*, Nucl. Eng. Des., 155, 73-84 (1995).
- (4) M. Saito *et al.*, ANS-Proc. 25th National Heat Transfer Conf., p.173-183, (1988).
- (5) S. Cheng *et al.*, Ann. Nucl. Energy., 63, 188-198, (2014).
- (6) A. Di Renzo, F.P. Di Maio, Chem. Eng. Sci., 62(1-2), 116-130 (2007).
- (7) J. Jung *et al.*, Ind. Eng. Chem. Res., 44(5), 1329-1341 (2005).
- (8) S. Cheng *et al.*, J. Nucl. Sci. Tech., 48(10), 1327-1336 (2011).