

炉心損傷時の炉心物質再配置挙動評価手法の開発

(受託者) 独立行政法人日本原子力研究開発機構

(研究代表者) 飛田吉春 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

(再委託先) 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部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。

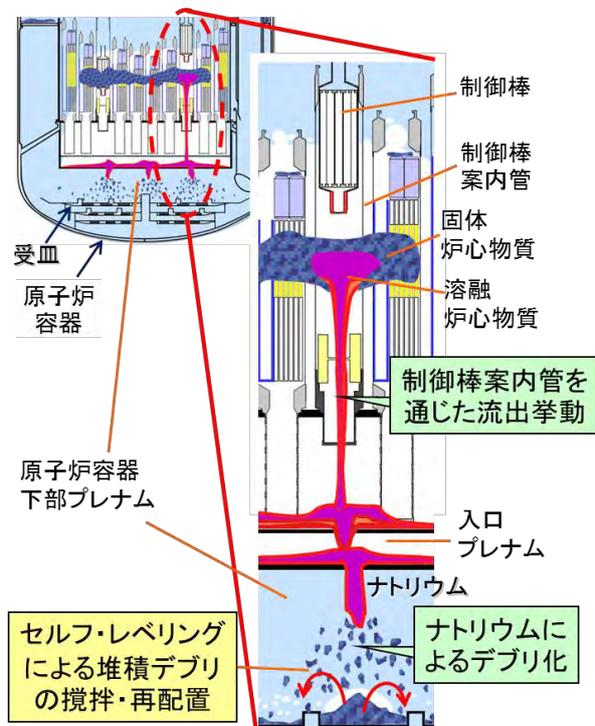


図1 炉心損傷時の炉心物質再配置挙動の概念

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、損傷炉心における燃料、ステール、ナトリウムの蒸気相・液相・固相が混在した体系における蒸発／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。これまでに、SIMMER コードによる制御棒案内管を通じた溶融炉心物質の流出挙動解析を行い、流出に影響を及ぼす主要現象として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・閉塞形成を摘出した。さらに、溶融炉心模擬物質 (アルミナ) をナトリウム流路中に流出させた試験を対象とした解析を実施し、試験結果との比較を通じてナトリウム蒸気の生成に関わる伝熱量及び流路中での閉塞形成モデルをそれぞれ最適化し、図2に示されるように、試験で生じた一連の流出挙動を適切に再現できることを確認した。

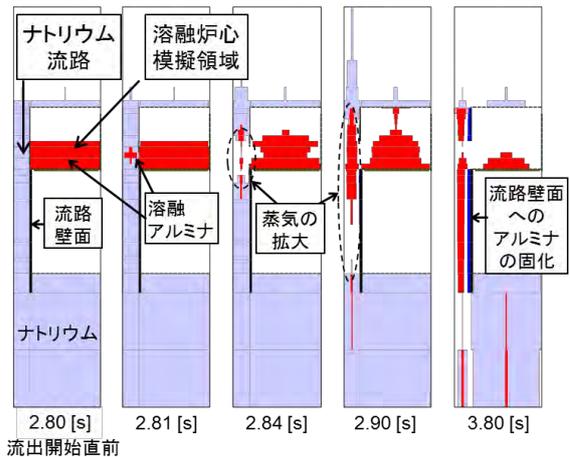


図2 溶融炉心模擬物質の流出試験に対する計算結果

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-液接触となることを踏まえ^[2]、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。これまでに、高解像度高速度カメラ (撮影速度毎秒 10,000 コマ) を用いたデブリ化挙動の詳細観察により、図3に示されるように、融体近傍の冷却材の蒸発による蒸気圧の生成が融体のデブリ化に寄与している可能性が高いことを捉えた。

また、水中に侵入した液柱状融体の流出直径が大きくなるほどデブリ化距離が長くなる傾向にあるものの、既往研究の代表的な実験相関式^[3]によるデブリ化距離評価値に対して 1/10 程度の大幅に短い距離でデブリ化されることを確認した。これは、液-液接触条件下では、液柱状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デブリ化するためであると考えられる。

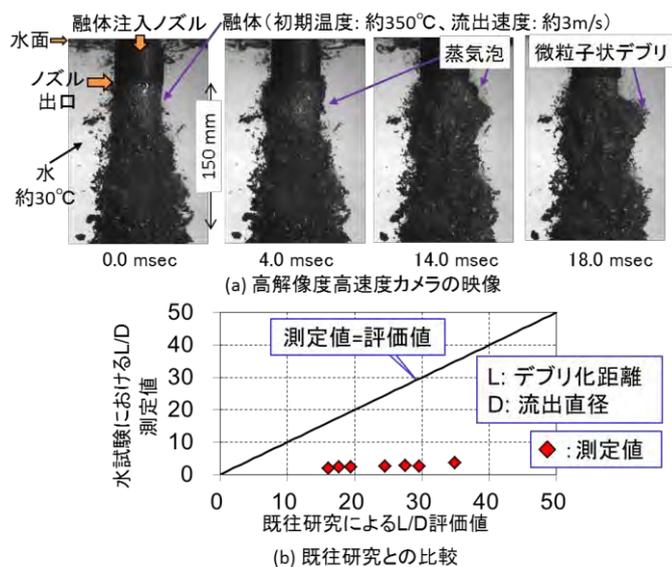


図3 試験での映像及びデブリ化距離の比較結果

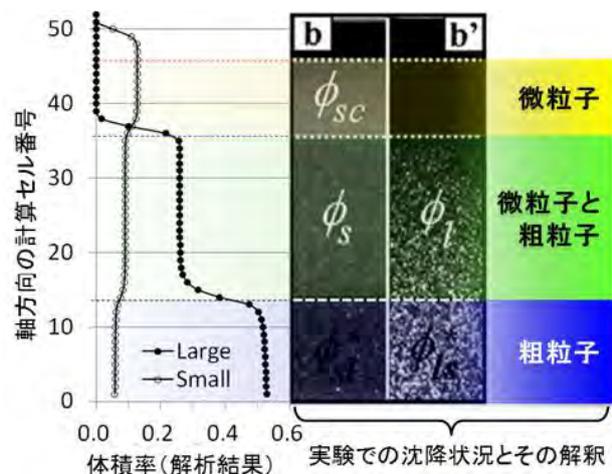
2. 2. 堆積デブリのセルフ・レベリング挙動評価手法の開発

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

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 コードへの適合性等を考慮してモデルを選択して同コードへの組み込みを行った。さらに、粒子圧力に対する収束計算と疑似粘性を利用する解析手法を組み込むアルゴリズム改修を行い、数値計算の高速化と安定化を達成した。また、既往試験（大小2粒子からなる懸濁液中の粒子沈降現象を対象^[4]）を対象とした検証解析を行い、図4に示されるように、粒子沈降挙動に対する粒径の影響を再現し、粒子群の運動を径の大きさに応じて評価できることを確認した。



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及び DEM 計算において代表粒子を用いることで計算負荷を低減し得る粗視化モデルについて調査し、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。SIMMER コードに組み込んだ DEM の機能を確認するため、既往試験 (固体粒子を伴うダム堰崩壊試験^[5]) を対象とした計算を行い、図5に示されるように、ダム堰崩壊によって生じる固液混相流動状況が再現できることを確認した^[6]。また、プログラミングで採用した並列化計算手法及び粗視化モデルによる数値計算の高速化を確認するため、比較的計算負荷の大きい体系での試計算を行い、計算精度を犠牲にすることなく大幅に計算時間を短縮できることを確認した。さらに、微視的モデルを組み込んだ SIMMER コードが固気流動層における特徴的な流動特性

図4 解析結果と実験での沈降状況図との比較

を再現し、粒子群の運動を径の大きさに応じて評価できることを確認した。

を再現できることを実験解析によって確認し、セルフ・レベリング挙動に含まれる要素現象に対する同コードの基本的な妥当性を検証した。

3. 今後の展望

炉心物質の流出挙動評価手法については、流出を支配する主要現象のうち、下部プレナムにおける現象を試験データに基づいて検証を進めるとともに、デブリ化試験については冷却材にナトリウムを用いる模擬性の高いナトリウム試験を実施し、水試験を通じて得られた知見の妥当性を確認する。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、巨視的モデルでは試験解析を通じて粒子圧力等の枢要モデルの検証を進めるとともに、並列化による数値計算の高速化を図り、実機全体評価手法として整備する。また、微視的モデルでは、モデルを3次元に拡張してSIMMERコードへ組み込み、試計算を通じて機能を確認するとともに、固体粒子を含む混相流での微視的な粒子間相互作用の効果を試験データに基づいて検証し、微視的評価手法として整備する。

本事業において開発される手法は、機構論に基づいた汎用性の高い手法を目指しており、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提供するのみならず、既存の高速炉の安全性評価に適用できる評価手法を提供でき、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., The development of SIMMER-III, An advanced computer program for LMFBR safety analysis, and its application to sodium experiments, *Nucl. Technol.*, **153** [3], 245-255 (2006).
- [2] Sa. Kondo et al., Experimental study on simulated molten jet-coolant interactions, *Nucl. Eng. Des.*, **155**, 73-84 (1995).
- [3] M. Saito et al., Experimental study on penetration behaviors of water jet into freon-11 and liquid nitrogen, ANS-Proc. 25th National Heat Transfer Conf., Houston, TX, HTC3, p.173-183, (1988).
- [4] P. Snabre et al., Size segregation and particle velocity fluctuations in settling concentrated suspensions, *Rheol. Acta*, **48**, 855-870 (2009).
- [5] P. Liu, Dynamic Behavior of Multiphase Flow with Solid Particles, Doctoral thesis, Kyushu Univ., (2006).
- [6] L. Guo, Numerical Simulation of Three-Phase Flows with Rich Solid Particles by Coupling Multi-Fluid Model with Discrete Element Method, Proc. of ICONE20-POWER2012 (2012).

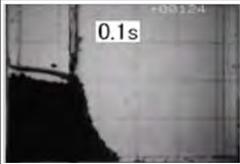
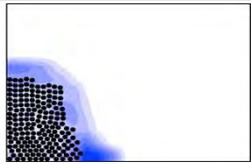
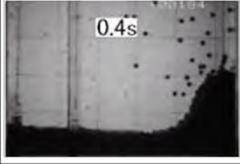
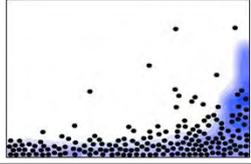
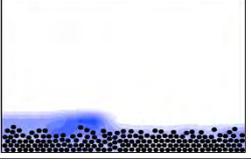
経過時間	実験結果	解析結果
0.10秒		
0.40秒		
1.00秒		

図5 ダム堰崩壊実験結果と計算結果との比較