

# 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にてたとえ炉心損傷事故が生じてもその影響を原子炉容器内に閉じ込めておくには、損傷炉心物質を原子炉容器内で長期に渡って安定的に冷却して保持することが必要である。図1に示されるように、炉心損傷事故後に炉心内に残留した損傷炉心物質は崩壊熱により熔融し原子炉容器底部へ向かって再配置されるため、原子炉容器下部に受皿を設置する対策が検討されている。この対策の有効性を示すには、熔融した炉心残留物質が原子炉容器下部プレナム（以下、「下部プレナム」と称する）へ流出した際に冷却材である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、受皿上に堆積することを確認する必要がある。さらには、デブリ化した炉心物質が受皿上で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、長期安定冷却に適した状態へ移行す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。

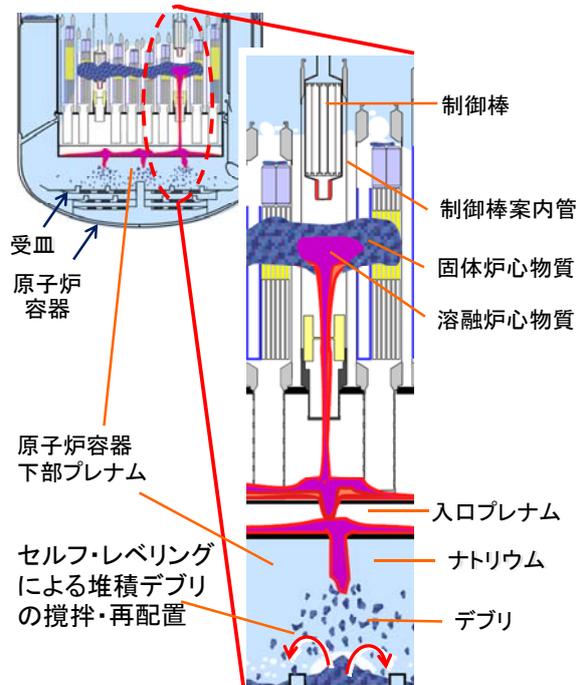


図1 炉心損傷時の炉心物質再配置挙動の概念

## 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の評価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の評価手法の開発を行う。

#### 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、スチール、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<sup>[1], [2]</sup>（以下、

「SIMMER コード」と称する)を基盤技術として活用する。前述の複雑な熱流動現象は主に制御棒案内管内で発生し、制御棒案内管へ流入する熔融炉心物質の条件は制御棒案内管に隣接する燃料集合体によって与えることができる。そこで、流出挙動評価手法を合理的に構築するにあたり、制御棒案内管を中心として周囲に6集合体を配置する2次元の解析体系を設定し、2次元モデルである SIMMER-III コードの円筒座標系モデルを適用する。このことにより、多相・多成分・多速度場の熱流動現象を比較的小さな負荷により計算することができ、汎用的な実機評価手法を構築することができる。現在までに、解析体系を構築し、熔融炉心物質が制御棒案内管から流出する過程の試計算を実施した。図2に示すように、熔融炉心物質により制御棒案内管に流出開口が形成されて熔融燃料と熔融スチールが流出する挙動が確認できた。また、炉心領域からの流出がほぼ終了する時刻まで計算が安定に実施できることを確認した。

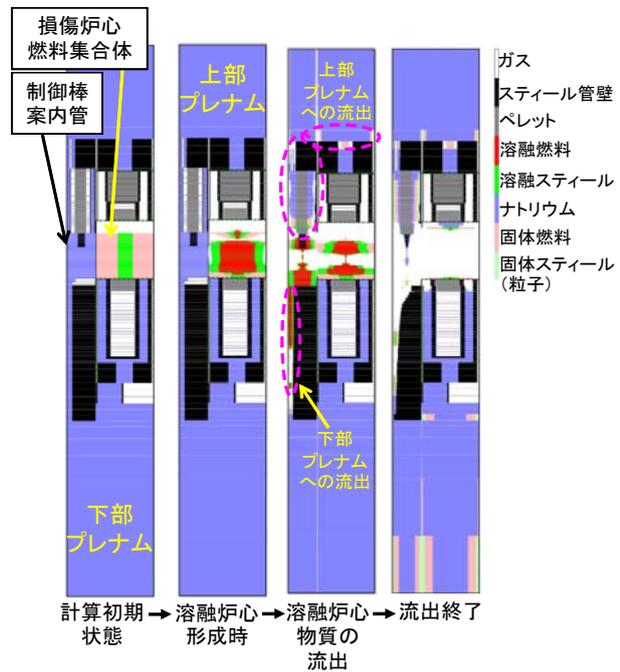


図2 炉心物質流出挙動の試計算結果

## 2. 1. 2. デブリ化試験

下部プレナムへ流出した炉心物質が冷却材と混合してデブリ化する挙動も相変化を伴う熱流動現象である。開発する評価手法を炉内構造設計の検討に用いる観点からは、熔融炉心物質が下部プレナムに流出する条件(速度、口径等)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す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。試験は、2段階(第1段階の試験を「試験1」、第2段階の試験を「試験2」と称する)に分けて実施する。試験1は、熔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る。熔融炉心物質とナトリウムとの接触は、接触面にナトリウム蒸気膜が形成されない液-液接触となるが、この接触状態は熔融物質と冷却材の物性と温度条件によって定まるため、低融点合金と水との組み合わせにおいても両者の温度条件の適切な設定により液-液接触の状態を模擬することができる<sup>[3]</sup>。試験1では、広範な範囲で試験条件を設定し、さらに、冷却材中での熔融物質のデブリ化挙動を直接観察する。これらにより、液-液接触条件におけるデブリ化距離を定量的に予測することが可能になる。試験2では、熔融炉心物質の模擬融体としてステンレス・スチールを用い、冷却材にナトリウムを用いた実験を実施し、連続エクソ線によるナトリウム中でのデブリ化過程を可視像として観察する。これにより、試験1でのデブリ化距離予測の妥当性と評価精度を確認する。現在までに、試験1用の装置を設計製作し、装置の制御系及び計測系を整備した。平成23年中に試験1を開始してデータを取得する。

## 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

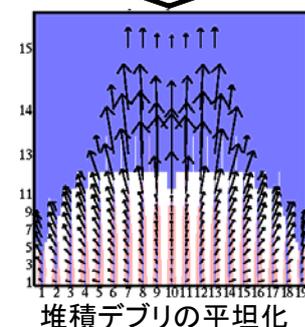
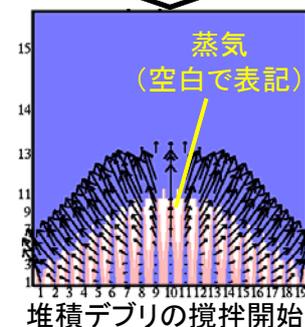
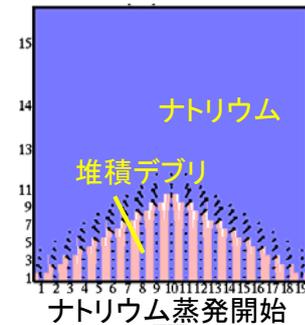
既往研究では、セルフ・レベリング現象を定量的に評価する手法は確立されていない。セルフ・レベリング現象は、燃料とスチールの固化粒子、液体ナトリウムとその蒸気が混在し流動化する相変化を伴った多相多成分の熱流動現象である。SIMMER コードはこのような熱流動現象を解析できるため技術基盤とし、同コードにはモデル化されていない堆積デブリに特有な粒子間の相互作用を扱うモデルを開発・導入することで堆積デブリのセルフ・レベリング現象を評価する手法を構築する。粒子間の相互作用を扱うモデルは2種類開発する。1つは「巨視的モデル」と称し、堆積デブリ全体を流動層のように巨視的に扱うことで、従来の流体対流アルゴリズムと同様に扱う手法である。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することで粒子そのものを独立に扱う手法である。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、微視的モデルは受皿構造の局所のセルフ・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て受皿構造の有効性評価や安全評価を行う。

### 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、及び粒子と粒子の接触抵抗による粒子粘性が必要となる。そのため、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数値的研究を調査し、SIMMER コードへの適合性等を考慮して3つのモデルを選択し SIMMER コードへ組み込んだ。さらに、選択した3つのモデルを用いた試計算を実施した。典型的な結果を図3に示すが、堆積デブリ内のナトリウムの蒸発によってデブリが攪拌され、徐々に山型のデブリが平坦化されていく挙動を確認できた。

### 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。現在まで、一般的な CDF-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実際の粒子よりも大きな粒径のモデル粒子を用いることで DEM 計算の計算機資源を低減し得るラージスケール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た。さらに、SIMMER コードの流体計算と DEM の結合方法及び DEM を組み込むための計算アルゴリズムを検討した。SIMMER コードは、流体



図中矢印はデブリの速度ベクトル  
→ :1 [m/s]、下段図のみ4 [m/s]

図3 巨視的モデルの試計算結果

力学計算の時間積分アルゴリズムに4ステップ法と呼ばれる時間分割法（半陰解法）を採用している。DEM 計算を実行するモジュールは、SIMMER コードとの結合の簡便さ及び数値計算上の問題回避の観点から、図4に示すようにステップ1（セル内熱・物質移行計算）とステップ2（対流計算）の間に陽的に導入することとした。また、DEM 計算では陽的な解法で相互作用力を計算するため、一般に、半陰解法を基本とする SIMMER コードの流体力学計算より小さい時間ステップ幅が必要となる。このため、計算効率の観点から多段時間ステップの計算アルゴリズムを用いて SIMMER コードに組み込むこととした。

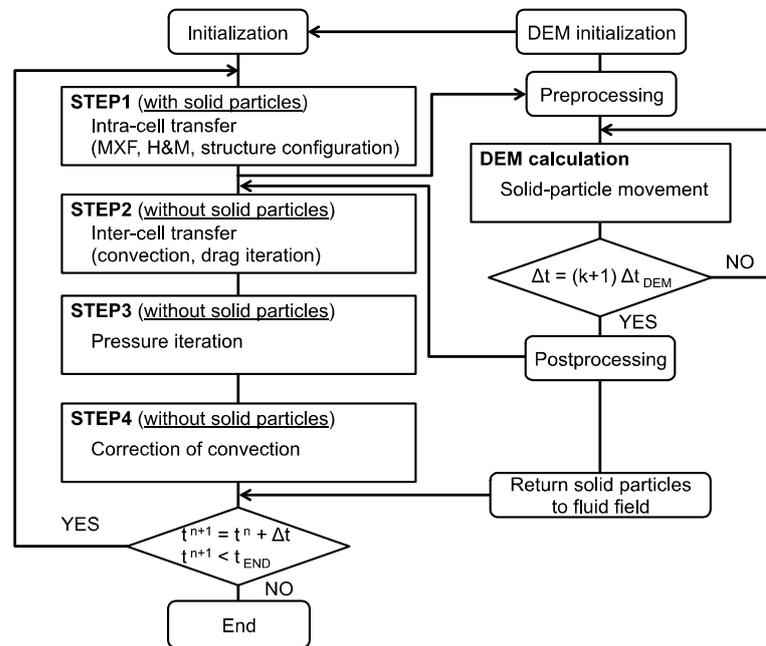


図4 微視的モデルの結合アルゴリズム

### 3. 今後の展望

今後は、炉心物質流出挙動評価手法については、流出を支配する

主要現象に対して試験データに基づく検証を進めるとともに、デブリ化試験を実施して溶融物質の流出条件がデブリ化距離に与える主要な影響を把握し評価手法の整備を進める。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、巨視的モデルでは数値計算の高速化と安定化を図るとともに、既往試験データに基づいた検証解析を通じてモデルの妥当性を確認する。微視的モデルについては、SIMMER コードへの組み込みと試計算を実施し、モデルの機能を確認する。

本事業において開発される技術は、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 LMFR safety analysis, and its application to sodium experiments, *Nucl. Technol.*, **153** [3], 245-255 (2006).
- [2] H. Yamano, et. al., Development of a three-dimensional CDA analysis code: SIMMER-IV and its first application to reactor case, *Nucl. Eng. Des.*, **238**, 66-73 (2008).
- [3] Sa. Kondo et al., Experimental study on simulated molten jet-coolant interactions, *Nucl. Eng. Des.*, **155**, 73-84 (1995).