

崩壊熱除去系に対する自然循環除熱評価手法の開発

研究代表者 渡辺 収 三菱FBRシステムズ株式会社炉心・安全設計部
参画機関 三菱FBRシステムズ株式会社、独立行政法人日本原子力研究開発機構、
一般財団法人電力中央研究所
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

ナトリウム冷却高速増殖炉では原型炉「もんじゅ」を含め、原子炉緊急停止時の炉心崩壊熱除去は非常用電源を用いた強制循環によって行われ、自然循環は非常用電源が喪失した場合のバックアップという位置づけである。この自然循環崩壊熱除去については、これまで実験炉「常陽」による自然循環試験など様々な試験及び解析が行われ、自然循環によって崩壊熱除去が十分に可能であること、また、炉心内では浮力により冷却材が高温部に集まって流れることから温度分布が平坦化することなど、ナトリウム冷却炉の優れた自然循環除熱特性が明らかとなってきた。

本事業では、ナトリウム冷却高速増殖炉の優れた自然循環除熱特性を活用し、強制循環に頼らない自然循環のみによるパッシブで信頼性の高い崩壊熱除去システムを実現するために、ナトリウム冷却高速増殖炉の原子炉トリップ後の広範な崩壊熱除去運転に対する自然循環現象を実験的に確認するとともに、許認可に適用可能な1次元自然循環評価手法並びにその評価結果の詳細を確認する3次元自然循環評価手法を開発し、試験データに基づいて検証する。さらに、安全評価の高度化を図るため、炉心最高温度に係わる各種の不確かさが浮力等を介して相互に影響し合う点を合理的に考慮し、自然循環に適用できる炉心高温点評価手法を開発する。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。

2. 研究開発成果

2. 1 既存の高速炉への評価手法適用性の検討

本研究で開発する1次元自然循環評価手法、3次元自然循環評価手法、炉心高温点評価手法及び使用する試験装置の「もんじゅ」への適用性について検討した結果は以下の通りであり、いずれも適用可能であることを確認した。

1次元自然循環評価手法は、フローネットワークモデルを用いた特定のプラントに特化しない汎用的な手法であり、入力データの変更で「もんじゅ」全動力電源喪失事象等に適用可能である。

3次元自然循環評価手法は、3次元熱流体解析モデルを用いた特定のプラントに特化しない汎用的な手法であり、入力データの変更で「もんじゅ」全動力電源喪失事象等に適用可能である。

炉心高温点評価手法は、「もんじゅ」とこれまでに検討したナトリウム冷却高速増殖炉を比較して、炉心の構造に本質的な差異はなく、炉心温度平坦化効果や不確かさ因子の取扱い方法などは共通である。従って、入力データの変更で本手法を「もんじゅ」全動力電源喪失事象等に適用可能である。

システム水試験装置は、炉心と中間熱交換器（IHX）の伝熱中心差を代表長さとし、リチャードソン数相似を適用することにより、「もんじゅ」の1次系内における自然循環流量形成過程を模擬することが可能である。

ナトリウム試験装置は空気冷却器、スタックなどを有し、「もんじゅ」全動力電源喪失事象等の評価において重要となる崩壊熱除去系の強制循環から自然循環への移行特性等に適用可能である。

2. 2 自然循環解析評価手法の開発

1次元自然循環評価手法、3次元自然循環評価手法及び炉心高温点評価手法の開発について、平成24年度までの主な成果は以下の通りである。

(1) 1次元自然循環評価手法

自然循環時は炉心内が低流速となるため、浮力による流量再配分が燃料集合体間（相互）及び燃料集合体内部で生じる。これに冷却材ナトリウムの高熱伝導性などが加わり、炉心内の温度分布は強制循環時に比べて大幅に平坦化する。これらの効果を取り入れて合理的に炉心最高温度を評価するため、制御棒などを含む全ての炉心集合体を1体ずつチャンネル分けし燃料集合体内の流量再配分効果などを考慮できる炉心高温点評価用のホットスポットモデルを組み込んだ。また、炉心高温点評価のためのパラメータ解析が容易となるよう、炉心部の出力、流量、流路断面積等の不確かさ因子を変量として入力できるようにした。

(2) 3次元自然循環評価手法

自然循環時は炉心内だけでなく原子炉容器やIHXさらには1次系配管内なども低流速となるため、各部での浮力によって生じる自然対流や温度成層化現象についても詳細に評価しておく必要がある。1次元評価手法ではこれらの詳細についてのモデル化が難しいことから、炉心を含む1次系を全て3次元でモデル化した3次元自然循環評価手法を開発している。本研究では、最終除熱源となる崩壊熱除去系に着目し、崩壊熱除去系を構成する各種熱交換器と空

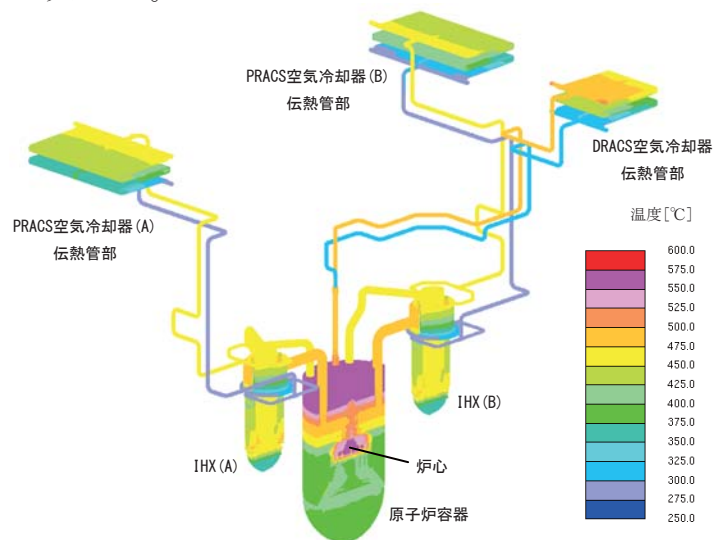


図1 3次元自然循環評価手法による解析結果の例

気冷却器の伝熱管を1本ずつ模擬した詳細な3次元モデルを作成して3次元自然循環評価手法へ組み込むとともに、外部電源喪失事象の解析を行い、自然循環への移行過程を含め崩壊熱除去系の除熱特性の詳細な評価が可能であることを示した。図1に過渡開始後1200秒時点の解析結果の例を示す。

(3) 炉心高温点評価手法

自然循環時の炉心高温点評価に重要な不確かさ因子の統計的性質を考慮して、炉心内の不確かさ因子について各々の確率分布を燃料集合体単位で考慮する手法を考案し、被覆管最高温度の累積確率を評価することによって、炉心部を含めて炉心高温点評価結果の信頼度を定量化することを可能にした。図2に外部電源喪失事象時の被覆管最高温度の累積確率を示す。前公募研究での決定論的手法の信頼度は約98%相当であることが明らかとなった。

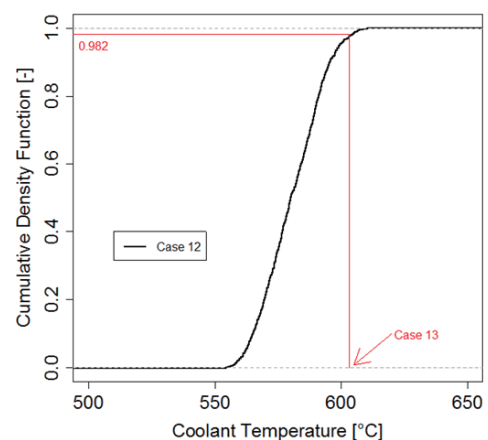


図2 統計的炉心高温点評価手法による解析結果の例

2. 3 1次系に関する評価手法の検証

システム水試験の実施及び評価、試験結果を対象とした1次元及び3次元自然循環評価手法の

検証解析について、平成 24 年度までの主な成果は以下の通りである。

(1) システム水試験装置の改造、システム水試験の実施及び評価

代表的な事象について評価手法の検証用データを取得するとともに、試験の再現性やデータのばらつきについて評価し、検証用データとして適切であることを確認した。広範な崩壊熱除去系の運転条件として、崩壊熱除去系ナトリウム漏えいと 1 次系共用型炉心冷却系 (PRACS) 空気冷却器ダンパ開失敗が同時に起こる複合事象等の試験等を行った。図 3 に示すように PRACS ナトリウム漏えいの単一事象の方が直接炉心冷却系 (DRACS) ナトリウム漏えいと PRACS 空気冷却器ダンパ開失敗の複合事象よりも炉心出口温度が高い等、各複合事象における 1 次系内の崩壊熱除去特性を明らかにした。

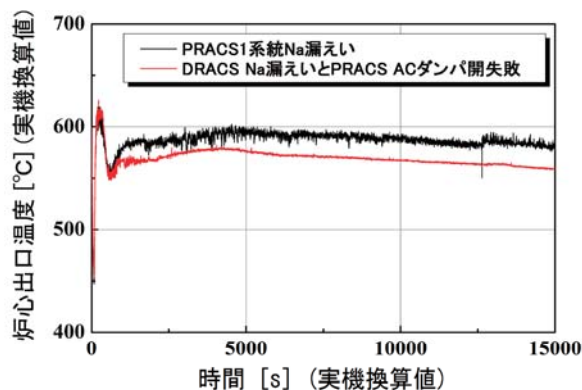


図 3 崩壊熱除去系ナトリウム漏えい模擬試験結果の例

(2) 評価手法の検証

改造されたシステム水試験装置を対象とした評価手法の検証解析を行った。1 次元自然循環評価手法では、炉容器上部プレナムモデルを検証するために、システム水試験結果を用いて複数のモデルパラメータを多目的遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization Problems) により最適化した。代表的な事象について検証解析を行った結果、図 4 に示すように原子炉容器出入口部の温度変化を精度よく解析できることが分かった。3 次元自然循環評価手法では崩壊熱除去系の熱交換器の除熱量を評価するとともに、模擬炉心集合体出口オリフィスの圧力損失係数に流量依存性を取り入れることにより、システム水試験に対する模擬性の向上を図った。代表的な事象について検証解析を行った結果、図 5 に示すように事故ループ側のコールドレグ配管の逆流現象を含め、試験結果を細部まで精度良く解析できることが分かった。

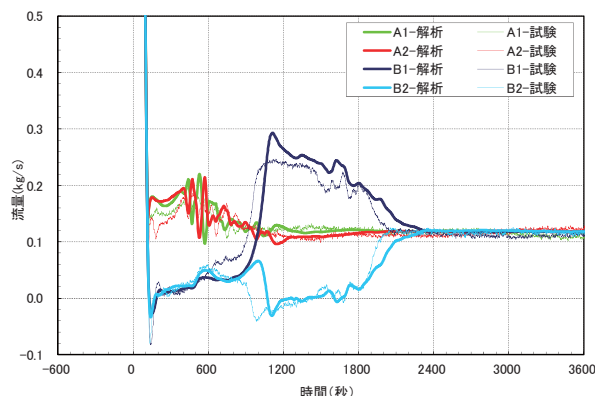
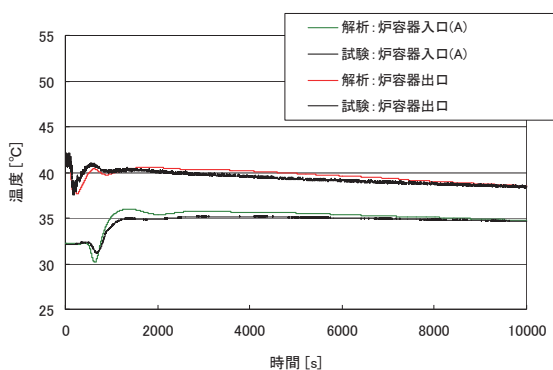


図 4 1 次元自然循環評価手法によるシステム水試験検証解析結果の例 (外部電源喪失模擬試験) 図 5 3 次元自然循環評価手法によるシステム水試験検証解析結果の例 (2 次ナトリウム漏えい模擬試験)

2. 4 崩壊熱除去系に関する評価手法の検証

ナトリウム試験の実施及び評価、試験結果を対象とした 1 次元及び 3 次元自然循環評価手法の検証解析について、平成 24 年度までの主な成果は以下の通りである。

(1) ナトリウム試験の実施及び評価

空気冷却器の除熱量増大が崩壊熱除去系熱交換器周りの温度変動特性や崩壊熱除去系の過渡特

性に与える影響、崩壊熱除去系の初期循環流量や圧力損失が自然循環移行時の温度過渡特性に与える影響、崩壊熱除去系ナトリウム温度が凝固温度に近づく過程での流動特性に与える影響等、「もんじゅ」の自然循環特性評価等に適用可能な試験データ及び知見が多数得られた。一例として、図6に崩壊熱除去系の流動抵抗（バルブ開度%）と初期強制循環流量（L/min）をパラメータにした自然循環移行時の温度過渡特性を示す。初期強制循環流量が多く流動抵抗係数が大きいほど、自然循環移行時の熱過渡（空気冷却器出口温度のアンダーシュート）が大きくなること等が分かった。

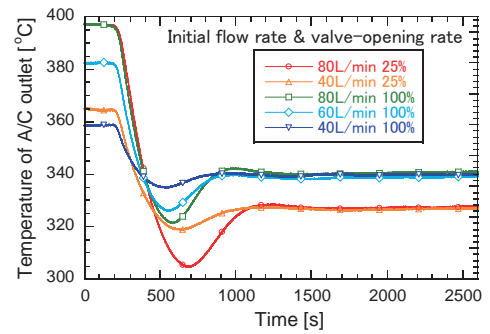


図6 ナトリウム試験結果の例

(2) 評価手法の検証

ナトリウム試験を対象とした評価手法の検証を行うため、1次元自然循環評価手法では崩壊熱除去系を強制循環モードから自然循環モードへ移行させる試験を対象とした検証解析を行った。図7に示すように空気冷却器のナトリウム側出口温度の温度変化等を良く模擬できることが分かった。3次元自然循環評価手法でも同様な試験を対象とした検証解析を行った。図8に示すように空気冷却器出口ダクトに入った直後の水平断面内には空気の明瞭な温度分布が形成されるがその後、出口部へ向かい混合されていく様子が把握できた。崩壊熱除去系の自然循環流量変化、各部の温度変化等を良く模擬できることが分かった。

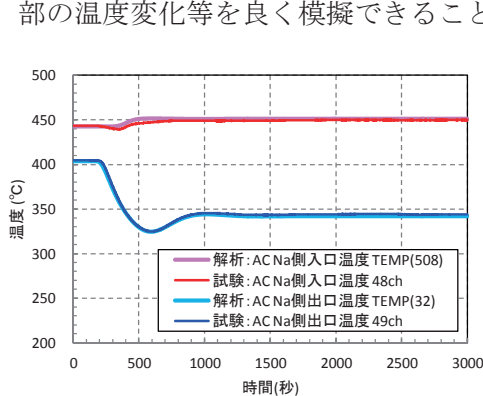


図7 1次元自然循環評価手法によるナトリウム試験検証解析結果の例

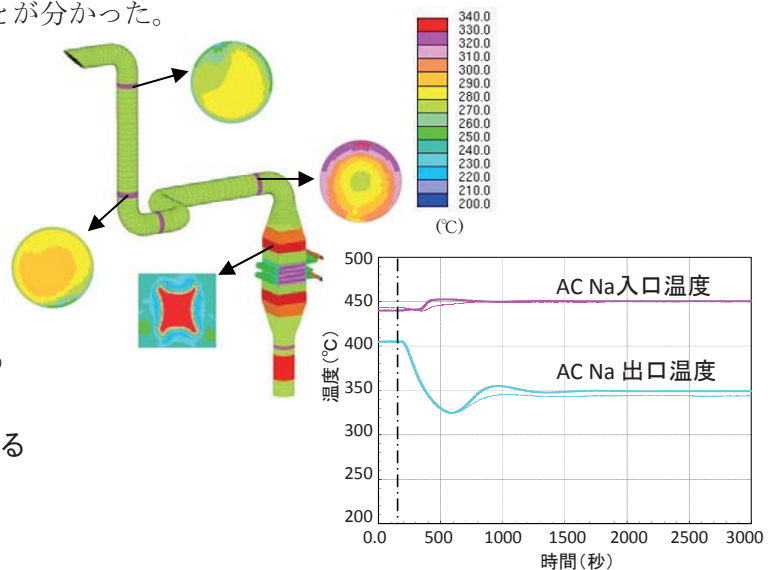


図8 3次元自然循環評価手法によるナトリウム試験検証解析結果の例

3. 今後の展望

本研究開始後ほぼ3年が経過し、計画通りの成果が得られている。自然循環評価手法については主要な開発を終え、最終年度は開発・検証した評価手法による実機解析を行い、許認可に適用可能な評価手法としてまとめ上げる。炉心高温点評価手法は各種不確かさ因子の影響度評価ならびに統計的評価手法の骨格がほぼ出来上がった。最終年度は統計的評価の考え方を導入した説明性の高い評価手法にまとめ上げる。1次系に関するシステム水試験では試験の再現性やデータのばらつきを含めた検証用データを取得した。1次元評価手法と3次元評価手法の検証では各々、試験結果を良く再現できることが分かった。最終確認として、システム水試験装置を対象としたブラインド解析を行う計画である。