

崩壊熱除去系に対する自然循環除熱評価手法の開発

(受託者) 三菱FBRシステムズ株式会社

(研究代表者) 渡辺 収 炉心・安全設計部 兼熱流動グループ

(再委託先) 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と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を統計的に評価する自然循環崩壊熱除去時の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、システム水試験装置は「もんじゅ」全動力電源喪失事象等の自然循環模擬試験に適用可能である。

ナトリウム試験装置は、「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23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、従来は数チャンネル程度に領域分けされていた炉心部を制御棒などを含む全ての炉心集合体について1体ずつチャンネル分けした全炉心集合体モデルに拡張した。また、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。改良後の試算では、集合体間流量再配分効果及び炉心半径方向熱移行効果などにより、外部電源喪失後の炉心燃料集合体内の2次ピーク温度は自然循環移行時で従来手法より約50℃低下する結果が得られた。

(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。これらについて1次元のモデルでは一般性をもった解析が難しいことから、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んだ。図1に自然循環状態の解析結果の例を示す。

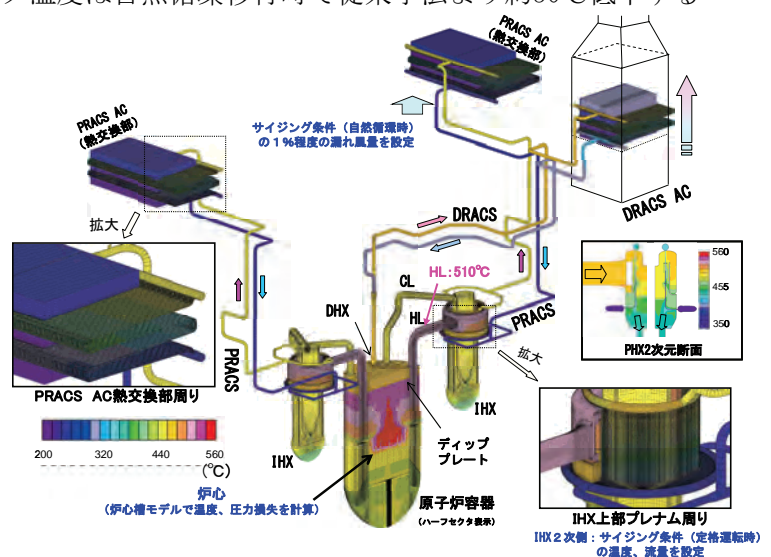


図1 3次元自然循環評価手法による解析結果の例

本図は、原子炉システム全体の3次元モデルを示しています。炉心（炉心槽モデルで温度、圧力損失を計算）と原子炉容器（ハーフセクタ観察）が中心にあり、DRACS、DHX、IHX、ディッププレート、PRACSなどの熱交換器が接続されています。温度分布は色で示され、炉心内では560°Cの高温領域が確認できます。また、PHX2次元断面の温度分布も示されています。サイジング条件（自然循環時）の1%程度の濡れ流量を設定していることが示されています。

(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、炉心高温点評価結果の信頼性を定量化できる炉心高温点評価手法を構築した。重要な不確かさ因子とその組合せをパラメータとした約1万5千ケースの1次元自然循環解析を行い、図2に示すように炉心高温点評価結果の信頼性評価が可能であることを示した。この場合、自然循環移行時における

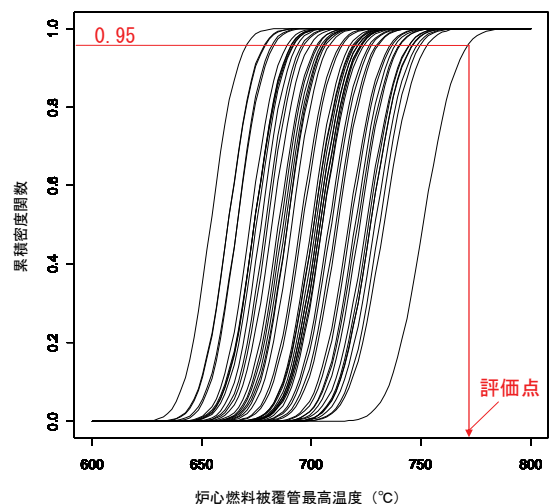


図2 統計的炉心高温点評価手法による解析結果の例

95%信頼度の燃料被覆管最高温度は約770℃となる。

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 23 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

自然循環移行特性の模擬性を向上させるため、システム水試験装置へ 1 次系ポンプを組み込み、IHX 2 次側入口温度を調節する機能を追加する等の装置改造を行い、改造部の機能を確認した。図 3 に「もんじゅ」を対象とした全動力電源喪失模擬試験結果を一例として示す。炉心流量及び原子炉容器出入口温度の試験結果は「もんじゅ」全動力電源喪失時の解析結果の傾向を良く捉えている。1 次系ポンプ 1 台軸固着等の数事象について自然循環模擬試験を行った結果、1 次系ポンプの IHX 容器への内蔵化と 2 次系ヒータを活用した試験手順を用いることによって、自然循環移行時の模擬性が向上することを確認した。

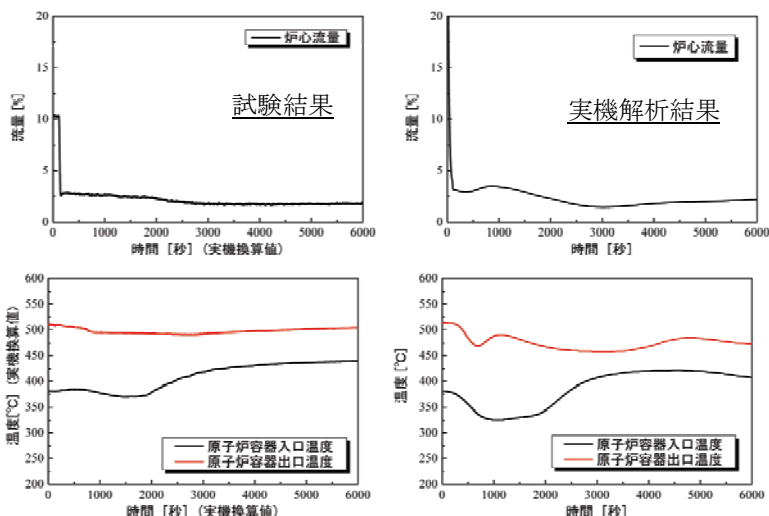


図 3 「もんじゅ」自然循環模擬試験結果の例 (全動力電源喪失事象)

(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うため、1 次元自然循環評価手法では試験装置用 1 次元解析モデルを作成して外部電源喪失事象模擬試験を対象とした計算を行い、1 次系の自然循環移行後の流量、温度の過渡変化等が概ね試験と一致することを確認した。3 次元自然循環評価手法では図 4 に示すように新たに作成した崩壊熱除去系の熱交換器及び IHX の 3 次元解析モデルを組み込んだ体系で、外部電源喪失事象模擬試験を対象とした計算を行い、流量及び温度応答ともに試験結果とほぼ一致することを確認した。一例として、図 5 に 1 次系流量の比較を示す。

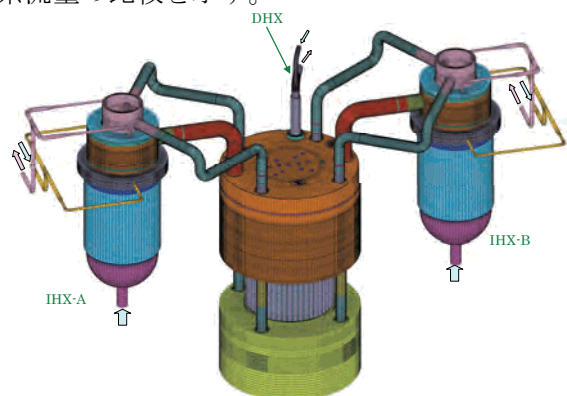


図 4 システム水試験検証解析用解析モデル

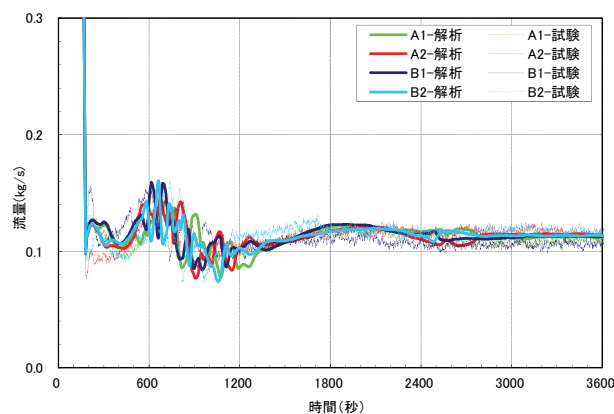


図 5 3次元自然循環評価手法によるシステム水試験検証解析結果の例 (外部電源喪失模擬試験)

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 23 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が大きくなること等がわかる。

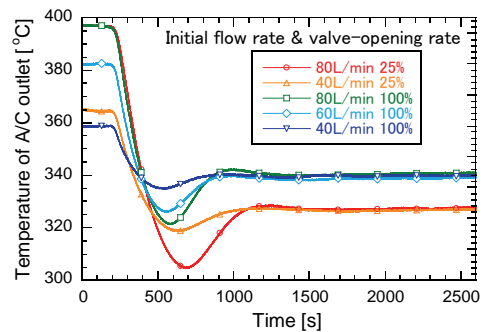


図6 ナトリウム試験結果の例

(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解析を行うため、1次元自然循環評価手法では試験装置用1次元解析モデルを作成して定常試験結果を対象とした計算を行い、機器毎の熱バランス、1次系及び崩壊熱除去系の運動量バランスが適切に計算されていることを確認した。3次元自然循環評価手法では崩壊熱除去系熱交換器の1次側流量をパラメータとした試験を選定し、3次元自然循環評価手法による計算を行った。図7に示すように熱交換器伝熱管回りの温度分布は試験結果と良く一致し、3次元解析モデルは1次系流量の影響を含め、適切な評価が行えることを確認した。平成24年度には、図8に示すように空気冷却器周りの3次元解析モデルを作成した。

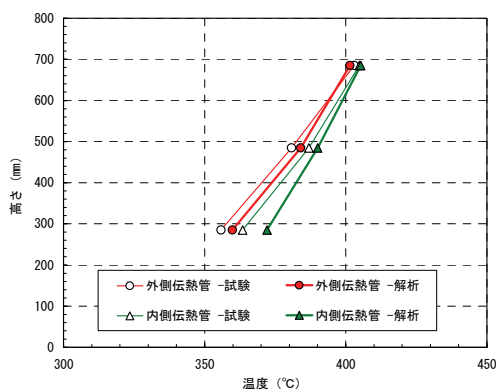


図7 3次元自然循環評価手法によるナトリウム試験検証解析結果の例

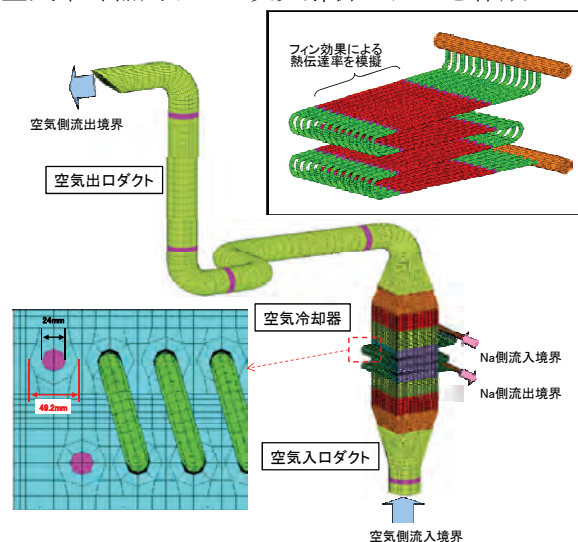


図8 ナトリウム試験装置空気冷却器周り解析モデル

3. 今後の展望

本研究開始後ほぼ2年が経過し計画通りの成果が得られている。自然循環評価手法は主要な開発を終え、平成24年度以降は検証解析結果を反映して改良する段階となる。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。平成24年度以降は、自然循環評価手法の解析誤差の取扱い方や評価結果の信頼度の定量化方法について検討を進める。1次系に関するシステム水試験は装置改造効果の確認を終え、平成24年度以降は評価手法の検証用データ取得のための試験ならびに広範な崩壊熱除去系の運転条件に関する試験を行う。また、ナトリウム試験は崩壊熱除去系に関する試験ならびに評価手法検証用の自然循環移行試験などを行った。平成24年度以降は、これらの試験データを用いた1次元評価手法と3次元評価手法の検証を本格的に開始する。最終年度の平成25年度には開発、検証した評価手法による実機解析を行い、許認可に向けた安全評価手順を整理し、当初計画に沿った研究成果をまとめる予定である。