

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、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

ナトリウム冷却型高速増殖炉では原型炉「もんじゅ」を含め、原子炉トリップ後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、非常用電源が喪失した場合のバックアップとして自然循環による崩壊熱除去が位置づけられている。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、ナトリウム冷却型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について実験的に確認する。また、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ための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とともに、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 自然循環解析評価手法の開発

(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ることによって、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、図1に示すように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トップピン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部の温度は自然循環移行時で約50℃低下する結果が得られた。

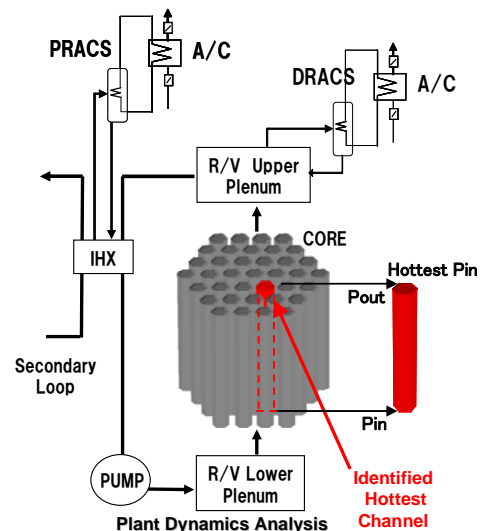


図1 自然循環を考慮した1次元評価手法

(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中間熱交換器 (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が開発されている。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3次元モデルを作成した。作成に当たっては、熱交換器内部で生じる温度や流速分布の過渡特性が評価できるように伝熱管を1本ずつモデル化し、詳細な伝熱特性評価を可能にした。図2にモデルの例を示す。

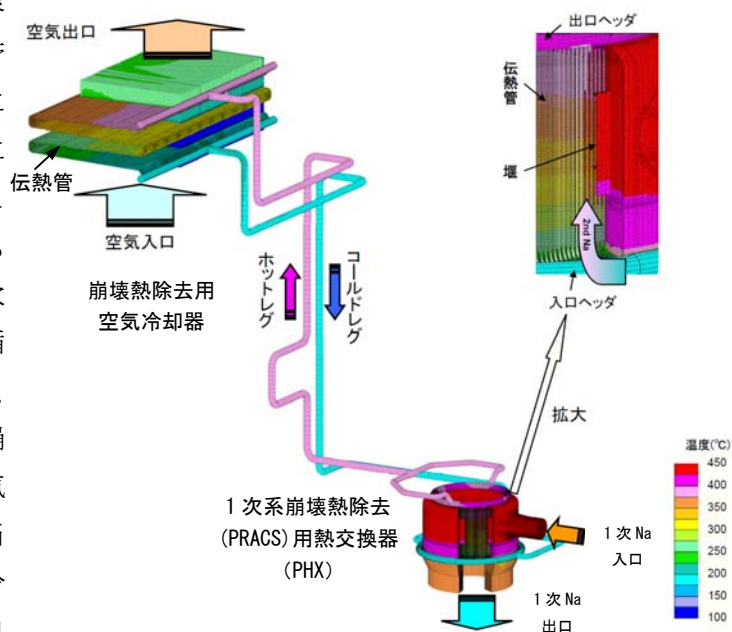


図2 ナトリウム冷却型高速増殖炉の崩壊熱除去系の3次元解析モデルの例

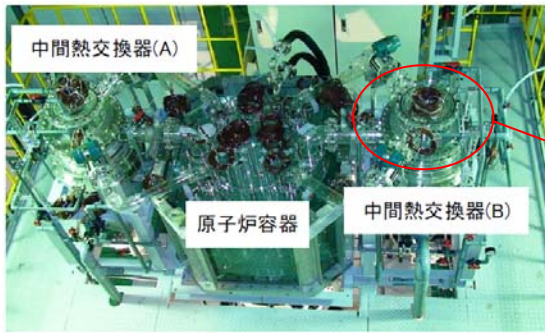
(3) 炉心高温点評価手法

自然循環時の炉心高温点評価に重要な不確かさ因子を同定するに当たって、代表的な原子炉トリップ事象として外部電源喪失事象を選定し、評価指標として炉心燃料の被覆管肉厚中心最高温度及び被覆管累積疲労損傷和 (CDF 値) を選定した。原子炉トリップ後に発生する物理現象を通して個々の不確かさ因子が評価指標に与える影響を分析し、統計的安全評価を行う上で考慮すべき重要な因子 79 個を抽出した。これらの不確かさ因子の統計的処理に当たっては、個々の因子の組合せからなる数万件のパラメータ解析を行う必要がある。このため、不確かさ因子の組合せに従って1次元自然循環評価手法用の入力データを自動的に作成しながら多数の解析を実行し、解析結果を統計処理するシステムを作成した。現在、パラメータ解析を終了し、統計処理結果を Sobol の感度指数などを用いて分析し、不確かさ因子の重要度を評価している。

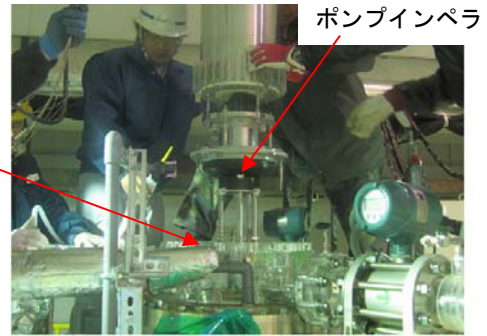
2. 2 自然循環時の1次系に関する評価手法の検証

(1) システム水試験

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った。図3にシステム水試験装置の外観と1次系ポンプ組込時の様子を示す。装置改良後は、炉心や1次系の圧力損失特性、ポンプによる1次系流量制御特性、2次冷却系ヒータによる加熱特性などの確認試験を行うとともに、外部電源喪失事象を模擬した自然循環移行試験を実施し、目標とする装置性能が得られることを確認した。本試験装置の既存の高速炉 (「もんじゅ」) への適用性を調べるため、自然循環力を生み出す炉心と1次系から崩壊熱を除去する IHX の高低差を代表長さを選んだ相似則について検討し、「もんじゅ」の全動力電源喪失時を模擬した試験を実施した。その結果、図4に示すように試験結果は「もんじゅ」を対象とした自然循環解析結果の傾向を良く捉えていることが分かった。

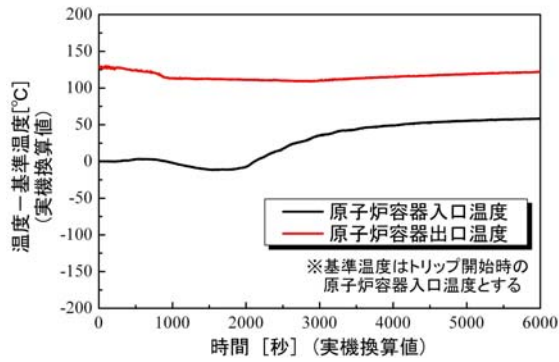


(a) システム水試験装置外観

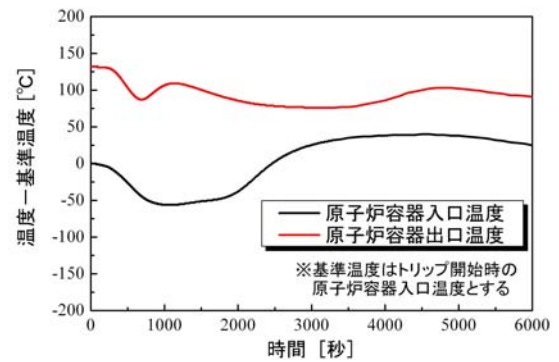


(b) 1次系ポンプ組込

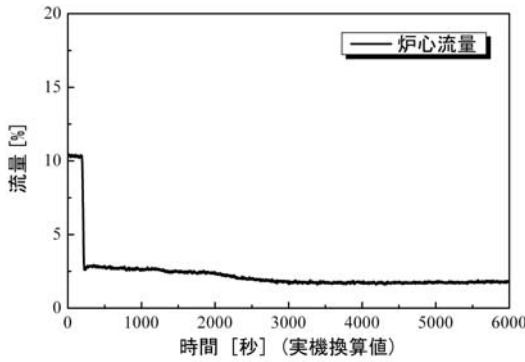
図3 システム水試験装置の外観と1次系ポンプ組込時の様子



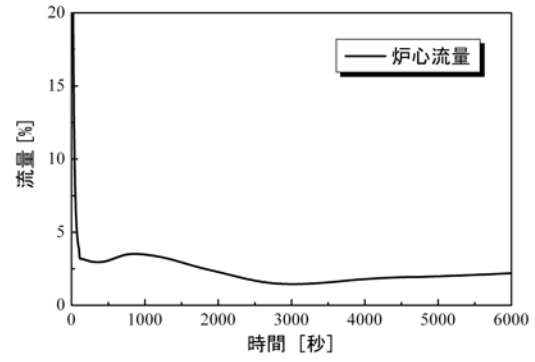
時間 [秒] (実機換算値)



時間 [秒]



(a) 試験結果



(b) 1次元自然循環解析結果

図4 「もんじゅ」全動力電源喪失事象模擬試験結果と解析結果の比較

(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次元及び3次元自然循環評価手法に用いる形状及び特性データを作成している。両手法とも炉心部は全チャンネルをモデル化することとし、3次元自然循環評価手法については、その開発方針に沿って崩壊熱除去用の熱交換器は伝熱管1本ずつモデル化する構想で進めている。図5にシステム水試験装置の3次元解析モデルを示す。

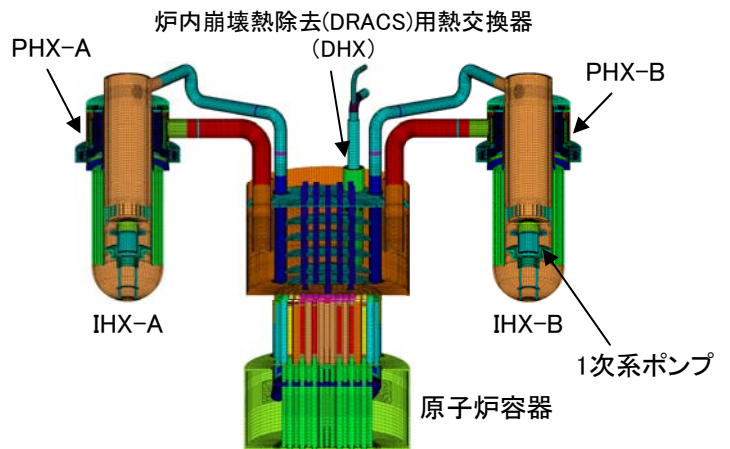


図5 システム水試験装置の3次元解析モデル

2. 3 崩壊熱除去系に関する評価手法の検証

(1) ナトリウム試験

崩壊熱除去用1次系熱交換器の除熱特性を評価するため、図6に示す伝熱部を部分的に模擬したナトリウム試験装置を用い、強制通風などによる空気冷却器の除熱量増大が伝熱部周りの温度分布や崩壊熱除去系内の温度変化に与える影響を調べる試験を行った。その結果、試験を実施した範囲内では、空気冷却器の除熱量増大によって伝熱部周りのナトリウム温度変動 (fluctuation) が増加する傾向が認められたが、構造健全性に影響を及ぼすような特異な現象は発生しないことを確認した。

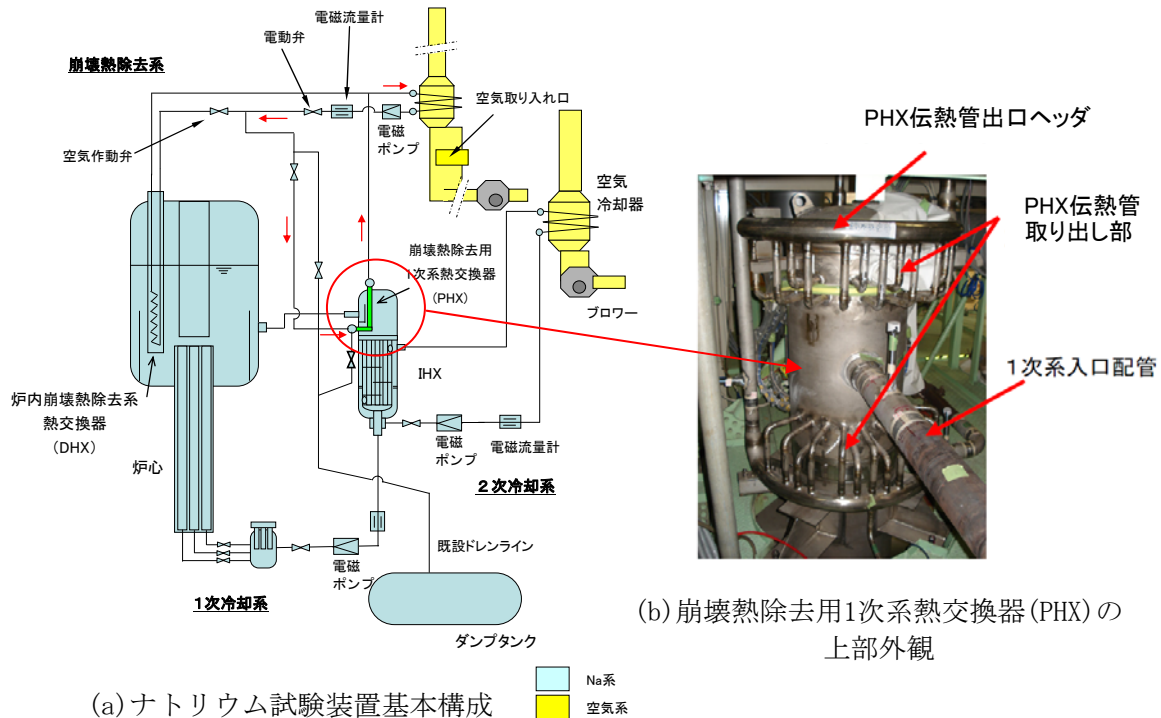


図6 ナトリウム試験装置の概要

(2) 評価手法の検証

ナトリウム試験を対象とした1次元自然循環評価手法の検証解析は平成24年度から実施し、3次元自然循環評価手法の検証解析は平成23年度後半から実施する計画である。

3. 今後の展望

本研究開始後ほぼ1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今年度で主要な開発を終え、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平成23年度で各種不確かさ因子の影響度評価に目途を付け、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平成23年度で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対応した試験を行う。また、ナトリウム試験は平成23年度内に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う。これらの試験と並行し、上記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平成24年度から本格的に開始する。最終年度の平成25年度末には当初計画に沿った研究成果をまとめ上げる予定である。