

蒸気発生器伝熱管破損伝播に係るマルチフィジックス評価システムの開発

研究代表者 大島 宏之 独立行政法人日本原子力研究開発機構次世代原子力システム研究開発部門
参画機関 独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人北海道大学、国立大学法人大阪大学、
国立大学法人徳島大学
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

本研究開発は、ナトリウム冷却高速炉(SFR)蒸気発生器(SG)での伝熱管破損に伴うナトリウム-水反応現象について、従来の実証試験に基づく研究開発では困難であった複合現象の解明を可能とするとともに、許認可における安全評価に資することを目的として、昨今の計算機能力、解析・計測技術の進歩を背景に、SGの様々な運転条件や設計オプションにも対応可能な伝熱管破損伝播に係るマルチフィジックス解析評価システムを開発することを目標とする。開発するシステムの全体像を図1に示す。研究開発は以下の3項目を実施することとした。

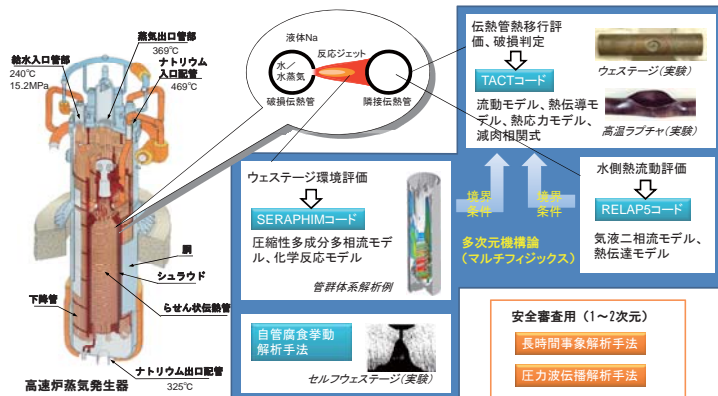


図1 解析評価システム

1) 機構論に基づくナトリウム-水反応現象解析評価手法の開発

反応ジェット領域に適用する化学反応を伴う圧縮性多成分多相流解析手法、隣接伝熱管熱移行解析手法及び隣接伝熱管内水側熱流動解析手法を組み合わせた汎用性の高い解析システム、及び自管損耗（セルフウェステージ）解析手法を開発。

2) 長時間事象進展解析評価手法の開発

1)を用いた現象評価、既往実験及び本研究での現象解明実験知見等に基づき、安全審査に適用できる長時間解析可能な簡易評価手法及び圧力波伝播解析手法を開発。

3) ナトリウム-水反応による伝熱管破損現象解明のための実験とデータベース整備

ウェステージや高温ラプチャ現象、化学反応過程解明の実験、実機SG条件を模擬した総合検証用試験を行い、既往知見と合わせて1)、2)のモデル化・検証に活用できるデータベースを構築。

2. 研究開発成果

(1) 機構論に基づくナトリウム-水反応現象解析評価手法の開発

① 化学反応を伴う圧縮性多成分多相流解析手法の整備 (反応ジェットを含むナトリウム領域解析)

a. ウェステージ環境評価モデルの構築

平成23年度までに、液滴エンタレインメントモデル及び液滴輸送モデル、ナトリウムと水酸化ナトリウム (NaOH) の化学反応により酸化ナトリウム (Na₂O) が生成する総括化学反応式モデル、及び Na₂O の移流拡散モデルを構築し、これらを組み込んだ化学反応・多成分多相流解析コードSERAPHIMによる試解析を実施した。平成24年度には、既往の液滴エンタレインメント実験、及び移流・拡散・化学反応が複合する問題を解析し、前者では圧力変動挙動等 (図2)、後者では化学反応完了時間等を再現でき、上記モデルの妥当性をそれぞれ確認した。

b. 解析精度向上のための解析手法の改良

平成 23 年度までに SERAPHIM コードにおける基礎方程式や圧縮性多相流用 HSMAC 法の非構造格子化モデル構築及びその試解析を実施した。平成 24 年度には、計算安定化方策として陰解法を導入するとともに、既往の SWAT-1R 試験体系での解析を実施して非構造格子化モデルの妥当性を確認した。

②隣接伝熱管への熱移行解析手法の整備

平成 23 年度までに、隣接伝熱管熱移行解析コード TACT の開発として、伝熱管構造部の温度及び応力分布を評価するモデル、その評価結果から破損判定を行うモデル、熱流動モデル、流体-構造熱的連成モデル、及びウェステージ相関式に基づき隣接伝熱管外壁面を移動させるモデルを構築し、試解析（一部のモデルについては検証）を実施した。平成 24 年度には、円筒周りの伝熱流動実験を解析し、流体-構造熱的連成解析モデルの妥当性を確認した。さらに、既往の高温ラプチャ模擬実験を解析し、延性破損応力や累積損傷に基づく破損時刻が実験と整合し（図 3）、破損判定モデルの妥当性を確認した。

③隣接伝熱管内水側熱流動解析手法の整備

平成 22 年度には、下記(3)で実施した水側熱伝達計測基礎実験を RELAP5 コードで解析し、従来の実験知見も活用して隣接伝熱管が急速加熱された場合に対する伝熱相関式の適用性を確認した。従来知見を超える領域に対しては、水側熱伝達計測基礎実験から新たに導出した相関式を RELAP5 コードに組み込み、水側の沸騰様式や熱伝達率に対する予測精度が向上することを確認した。

④セルフウェステージ解析手法の開発

平成 23 年度までに、SERAPHIM コードを用いた準定常解析と解析メッシュの再構築を繰り返すことで、管壁の腐食減肉量及び亀裂拡大過程を評価する解析モデルを構築し、試解析を実施した。平成 24 年度には、減肉の取り扱いをより詳細化する改良を行うとともに、実験知見に基づくアレニウス型ウェステージ率評価式を導出し、適用した。既往セルフウェステージ実験を試解析し、化学反応に伴う微小亀裂の拡大現象を安定に計算できることを確認した。

(2) 長時間事象進展解析評価手法の開発

①長時間事象解析手法の開発

平成 23 年度までに、上記(1)の機構論に基づく解析手法との整合性を考慮しつつ、解析コードの基本構成等を検討した長時間事象解析コード(LEAP-III)の開発方針をまとめ、詳細なプログラム設計を実施した。また、PIRT(Phenomena Identification and Ranking Table)を作成するとともに、反応ジェット温度分布モデルのパラメータ設定等のため SERAPHIM コードを用いた解析を実施した。平成 24 年度には要素現象解析モデルを構築し、高温ラプチャの再現解析や大型炉 SG 体系での試解析により、LEAP-III の計算機能が正常に作動することを確認した（図 4）。

②圧力波伝播解析手法の開発

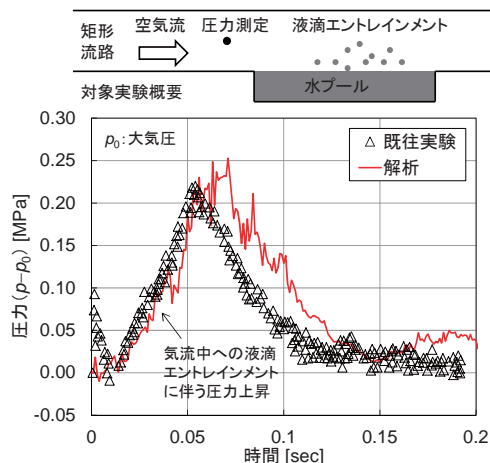


図 2 液滴エントレインメント時の圧力挙動

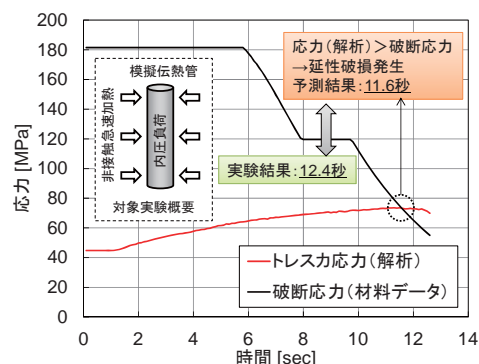


図 3 破損発生時刻の予測結果

平成 24 年度には、既存の大リーク解析コード (SWACS) のモデル改良や直管型 SG への適用性を検討し、既往のナトリウム-水反応実験解析を実施し、初期スパイク圧力波形を再現できる見通しを得た。

(3) ナトリウム-水反応による伝熱管破損現象解明のための実験とデータベースの整備

① ウェステージ現象評価のための実験

a. 液滴エロージョン基礎実験

平成 23 年度までに、液滴エロージョン (LDI) 基礎実験により、LDI 速度に及ぼす液滴衝突速度及び伝熱管材料硬さの影響を評価し、既往相関式が適用可能であることを確認した。また、空气中・水中蒸気噴流可視化実験での LDI 環境データ計測方法を確立した。平成 24 年度には、水中高温高压蒸気噴出基礎実験を実施し、コード検証用の蒸気噴流可視化データや伝熱管群中のウェステージ環境データなどを取得した (図 5)。

b. 高温 NaOH 噴射基礎実験

平成 23 年度までに、伝熱管材料を対象とした NaOH/Na₂O 環境における静的腐食実験及び噴射衝突実験を行い、流れ加速型腐食 (FAC) に及ぼす伝熱管材料温度、NaOH/Na₂O 温度、NaOH/Na₂O 組成割合及び NaOH/Na₂O 衝突速度などの影響を評価して相関式を求めた。LDI 基礎実験知見と合わせて新しいウェステージ相関式を導出した。平成 24 年度には、NaOH/Na₂O 環境での追加実験を実施し、平成 23 年度に導出した FAC 相関式の適用範囲を拡大した。

c. ナトリウム中蒸気噴出基礎実験

平成 23 年度までに、ナトリウム中蒸気噴出基礎実験用試験体の設計・製作、据付けを完了し、試験体の注水装置や温度計測等確認のための予備試験を行った。平成 24 年度には、ナトリウム中蒸気噴出基礎実験を実施し、反応ジェットが衝突するターゲット伝熱管周りの温度・ボイド分布及び伝熱管の損傷形状等のウェステージ環境データを計測し、昨年度導出したウェステージ相関式が安全側の評価値を与えることを確認した。

d. セルフウェステージ現象評価のための実験

平成 23 年度までに、セルフウェステージ試験装置を設計・製作し、昇温確認や実験計測用データ収録確認等を実施し、安全に装置が動作することを確認した。平成 24 年度には、セルフウェステージ試験体を製作するとともに、セルフウェステージ実験を実施し、微細孔近傍の自管腐食形状や腐食生成物の堆積状態を確認した。

② 高温ラプチャ現象評価のための実験

a. 水側熱伝達計測基礎実験

平成 22 年度に、垂直上昇流体系において急速加熱条件での水側熱伝達基礎実験を行い、伝熱管

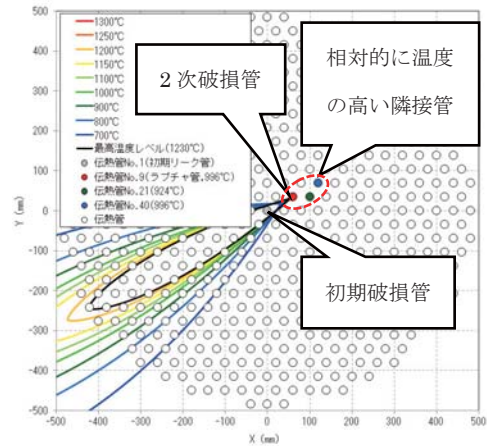


図 4 二次破損による反応ジェット形成

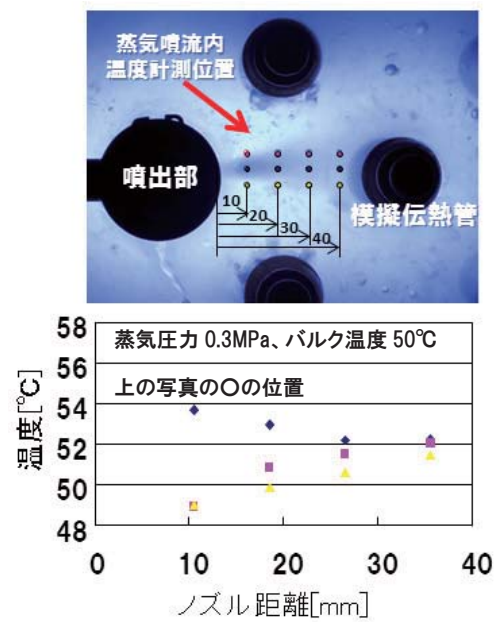


図 5 スリット型蒸気噴流内温度

内表面での沸騰特性データを取得した。得られた実験データに基づき隣接伝熱管内の沸騰様式や熱伝達率の予測精度向上に資する安全評価に最適な伝熱相関式を提示した。

b. ナトリウム側熱伝達計測基礎実験

平成 23 年度に、ナトリウム中への高温・高圧蒸気の噴出や伝熱管周りの熱伝達特性を測定可能なナトリウム側熱伝達計測基礎実験用試験体を設計・製作した。注水装置の作動状態や温度計測等の予備実験を行い、ナトリウム側熱伝達特性に関する予備的データを取得した。平成 24 年度には、平成 23 年度に設計・製作した試験体を用いて、大型炉 SG 条件でのナトリウム側熱伝達計測基礎実験を実施し、既存のナトリウム側熱伝達相関式が高温・高圧条件でも適用できることを確認した (図 6)。

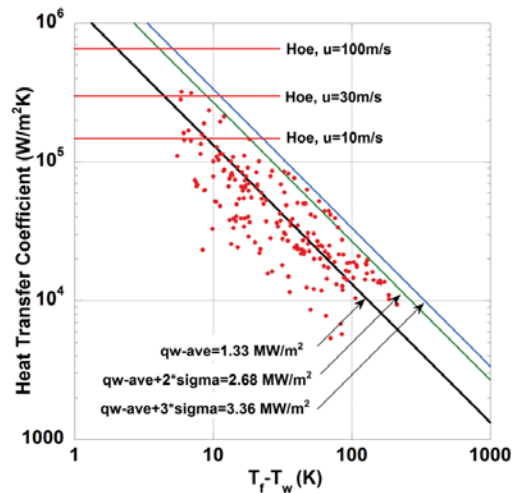


図 6 ナトリウム側熱伝達率

c. 伝熱管ラプチャ実験

平成 24 年度は、伝熱管ラプチャ用試験体を設計・製作し、試験体の管壁温度や内圧負荷時の管壁応力等の伝熱管ラプチャ基礎実験に関する予備的データを取得した。

③化学反応過程の解明とモデル構築

平成 22 年度には、既往のナトリウムと水蒸気の対向流拡散実験や実験解析により、気相反応では NaOH 生成反応素過程が支配的であること、気相反応での NaOH 生成反応速度定数は極めて小さく、表面反応に比べて無視し得ることを明らかにした。昇温速度を変えた熱分析試験により、Na₂O がナトリウム-水反応の事象進展時間内で生成し得ることを確認し、表面反応では NaOH 及び Na₂O が、それぞれ水蒸気拡散律速及び生成 NaOH とナトリウムの反応律速で生成するモデルを構築した。

④総合検証用試験データ取得

平成 23 年度には、解析評価手法の妥当性確認において必要な実験条件、試験体構造及び測定項目を検討し、総合検証用のデータ取得が可能な試験体を詳細設計した。平成 24 年度には、平成 23 年度に実施した詳細設計に基づき総合検証用試験体を製作し、試験体に装着した計測機器による温度計測等を行い、総合検証用試験に関する予備的データを取得した。

⑤知見データベースの構築

平成 24 年度は、JAEA の品質保証マネジメントシステムに則して、本研究で得られる実験知見やデータを整理するとともに、過去の知見を文献調査等より整理し、データベースの基本構造を検討した (図 7)。

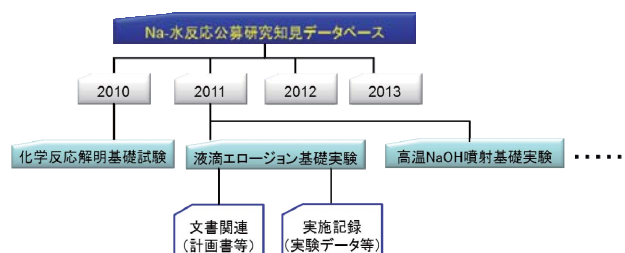


図 7 知見データベース基本構造

3. 今後の展望

震災により実験工程の一部が遅延したが、現時点までに採択時の実施スケジュール通りの研究成果が着実に得られている。今後 1 カ年の研究計画についても、スケジュール、予算ともに変更することなく遂行できると考える。複数の解析手法開発は、既存知見や本研究における実験データを用いてその妥当性を確認するとともに精度向上等を図る。最終的に、開発した解析システムを総合検証用試験データにより評価することによって、所期目的を達成する予定である。