

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

(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)大島宏之 次世代原子力システム研究開発部門

(再委託先)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～平成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(SFR)蒸気発生器(SG)での伝熱管破損時には、ナトリウム-水反応現象により健全な隣接伝熱管に破損伝播を生じさせる可能性があることから、小規模漏えいの段階で早期に検知して事象進展を防止するとともに、万一漏えい規模が拡大しても、安全防護・財産保護・社会的受容性の観点からその影響範囲を局限化することが求められる。本研究開発は、従来のモックアップ試験的アプローチでは困難であった複雑な現象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、解析技術、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。図1に開発する解析評価システムの全体像を示す。具体的には以下の3項目の研究開発を実施する。

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

ナトリウム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、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22年度に、液滴のエントレインメント速度、径、気相-液滴間の抵抗係数等を表す液滴エントレインメントモデル、及び液滴に対応する質量/運動量/エネルギー保存式からなる液滴輸送モデルを構築し、平成23年度には、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(Na_2O)が生成する総括化学反応式モデル、及び Na_2O の移流拡散モデルを構築した。これらを化学反応を伴う圧縮性多成分多相流解析コード(SERAPHIM)に組み込み、試解析に

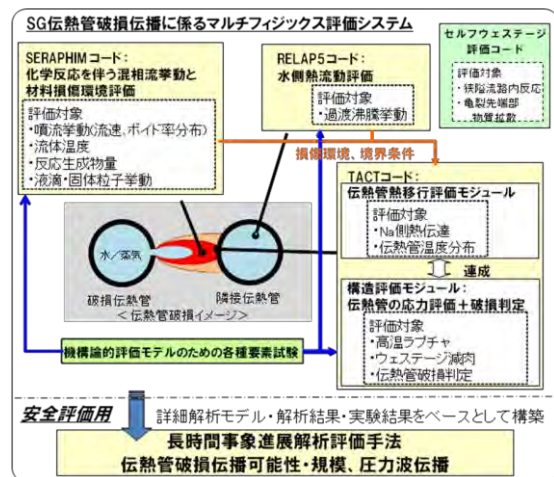


図1 解析評価システム

より安定に解析できることを確認した（図2）。

b. 解析精度向上のための解析手法の改良

SERAPHIM コードの形状模擬性を改善するため、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を考慮した多流体HSMAC法の非構造格子化モデルを構築するとともに、3次元体系でのナトリウム-水反応現象試解析を実施して、妥当な解が得られることを確認した。

②隣接伝熱管への熱移行解析手法の整備

平成22年度には、隣接伝熱管の温度分布及び応力分布を評価するモデルを構築、モデル検証として、円管の応力解析、非定常熱伝導解析、熱応力解析等を実施し、理論解等との一致を確認した。さらに、隣接伝熱管の温度・応力分布から破損発生の有無を判定する破損判定モデルを構築した。本モデルでは、局所的に減肉した隣接伝熱管の破損発生の有無を、同じ深さで全周に一樣減肉した伝熱管の延性破損モード

とクリープ破損モードで判定する。この一樣減肉仮定については、多次元構造解析コードによる評価を実施し、その保守性を確認した。

平成23年度には、隣接伝熱管周りの反応ジェットを均質二相流と仮定して、2次元円筒座標系熱流動モデルを構築するとともに、上記の温度分布及び応力分布評価モデルと連成させた流体-構造熱的連成モデルを構築した。さらに、(3)で得られたウェステージ相関式を基に、隣接伝熱管外壁面をウェステージとともに移動させるモデルを構築し、破損判定モデルを組み込んだ。既往実験データを用いた試解析を実施し、これらのモデルが不具合なく動作することを確認した。

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、(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を繰り返すことで亀裂拡大過程を評価する解析モデル案をまとめるとともに、これに基づき解析モデルの部分構築を行い、平成24年度で完成させる予定である。ここでは、微小亀裂周辺の化学反応を伴う混相流動解析結果から管壁の腐食による減肉量を評価するモデルを構築するとともに、既往のセルフウェステージ試験条件を対象とした試解析を実施し、微小亀裂が拡大する現象を解析可能であることを確認した。

(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22年度には、原型炉評価に使用された長時間事象解析手法を調査し、既往実験知見や機構

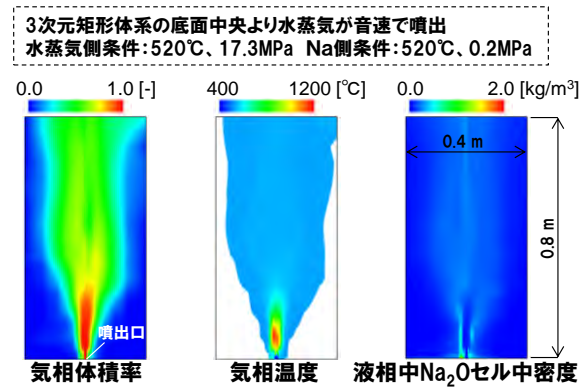


図2 Na₂O生成・輸送モデル試解析結果

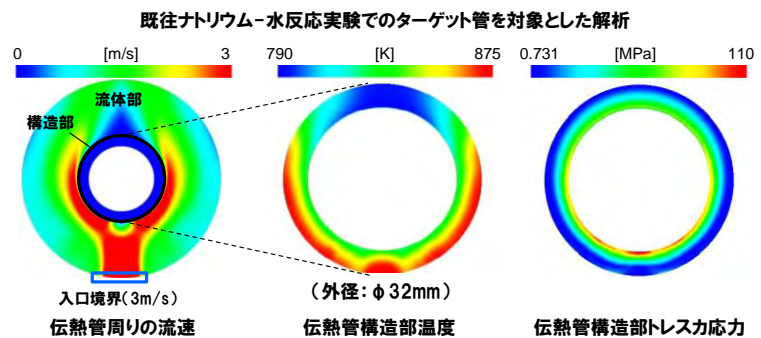


図3 流体-構造熱的連成モデル試解析結果例

論的視点からモデル改良が必要な項目を抽出・整理した。整理した項目に対して、(1)の機構論に基づく解析手法との整合性を考慮しつつ、改良の方向性や解析コード基本構成(図4)、必要な開発作業・優先度を検討し、長時間事象解析コード(LEAP-III)の開発方針をまとめた。平成23年度には、詳細なプログラム設計を実施した。また、PIRT(Phenomena Identification and Ranking Table)を作成して要素現象モデル及び検証データの充足性について検討した。要素現象モデルの一つとして反応ジェット温度分布モデル(図5)を新規に導出し、モデル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。

(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

ウェステージの要因と考えられる液滴エロージョン(LDI)と流れ加速型腐食(FAC)に関する基礎実験を実施し相関式を導出するとともに、その妥当性を確認するナトリウム中蒸気噴出実験を実施する。セルフウェステージについても現象解明実験を実施する。

a. 液滴エロージョン基礎実験

平成22年度は、回転円盤式液滴エロージョン(LDI)試験装置の調整を行うとともに、実験後試験片の3次元表面性状及び減損体積等の測定法、並びにピトー管プローブによる蒸気噴流中の圧力・温度分布測定法を確立した。平成23年度には、水を用いた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、空気中への高温高压蒸気噴出実験及び水中への蒸気噴流可視化予備実験を実施し、より実現に近い条件でLDI環境データの計測方法を確立した(図6)。

b. 高温NaOH噴射基礎実験

平成22年度には、反応ジェットの主成分となるNaOHの噴射基礎実験装置を改造し、100m/s以上での高速噴射機能、試験片の腐食形状及び最大減肉深さ等の定量分析が可能な測定精度を有することを確認した。平成23年度には、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、腐食速度データを取得した。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基礎実験での知見と合わせて衝突速度等で整理した新しいウェステージ

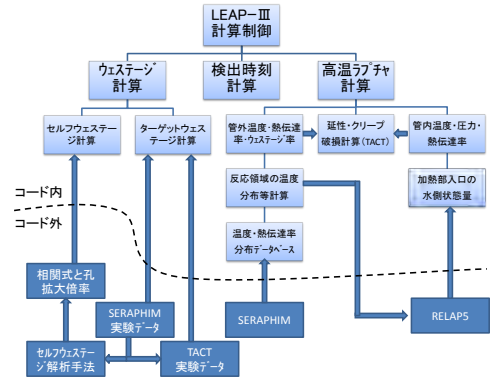


図4 長時間事象解析コード基本構成

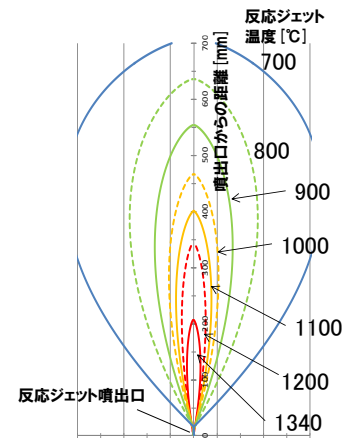


図5 反応ジェット温度分布モデルによる評価結果の一例

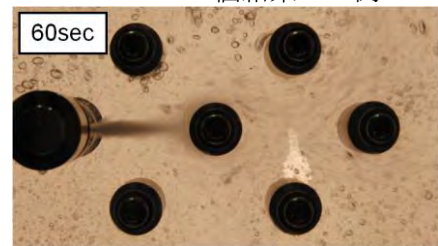


図6 水中への蒸気噴出挙動

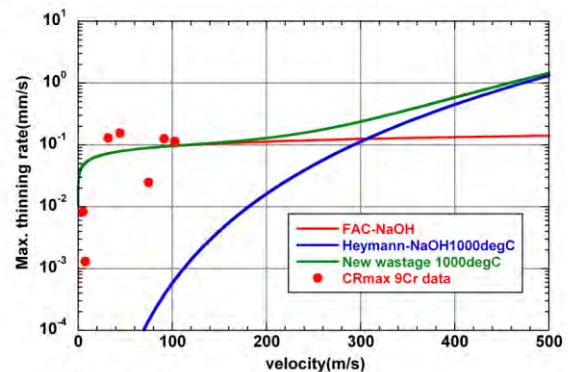


図7 新ウェステージ曲線、1000°C(緑線)

を有することを確認した。平成23年度には、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、腐食速度データを取得した。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基礎実験での知見と合わせて衝突速度等で整理した新しいウェステージ

相関式を導出した（図7）。

c. ナトリウム中蒸気噴出基礎実験

平成23年度までに、隣接伝熱管周りのウェステージ環境を測定可能な試験体の設計・製作、据付けを完了し、試験体の注水装置の作動状態や温度計測等確認のための予備試験を行った。

d. セルフウェステージ現象評価のための実験

平成22年度には、亀裂進展挙動を測定する試験体構造等を検討し、試験容器、注水設備、カバーガス供給設備、圧力開放設備及びナトリウム充填・ドレン設備等で構成される試験装置を詳細設計した（図8）。平成23年度は試験装置を製作し、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。



図8 セルフウェステージ試験装置

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。

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で得られた各化学種の濃度及び温度を分析し、気相反応ではNaOH生成反応素過程が支配的であることを明らかにした。また、気相反応と表面反応でのNaOH生成反応速度定数を比較し、気相反応の反応速度定数は極めて小さく、表面反応に比べ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生成の反応速度定数を評価し、Na₂Oがナトリウム-水反応の事象進展時間内で生成する可能性が高いことを確認した。また、表面反応ではNaOH及びNa₂Oが、それぞれ水蒸気の拡散律速及び生成NaOHとナトリウムとの反応律速により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。

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2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逐次、検証フェーズに移行し、既存知見や本研究で取得した、あるいは取得す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。