

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 炉システム開発計画室

(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蒸気発生器(SG)内の伝熱管が破損すると、高圧の水・蒸気が破損部からナトリウム中に噴出し、ナトリウム-水反応現象を引き起こす。このナトリウム-水反応現象で生成する高温高速反応ジェットは、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の進展を防止するとともに、安全上及び財産保護上の観点から仮に漏えいの規模が拡大しても事故影響が局限化できることが求められている。原型炉「もんじゅ」のSG安全設計は、当時の計測技術や数値解析技術・環境では伝熱管破損時の現象の解明に限界があったことから、想定条件に応じた実証的なモックアップ試験を積み上げ、その成立性を確保してきた。しかしながら、実証試験の蓄積に基づく安全設計手法は、高速炉SGの型式や運転条件など設計上の選択肢に対して柔軟に対応できず、汎用的ではない。設計の最適化を可能とし、安全審査における説明性向上に資するためには、ナトリウム-水反応現象のメカニズムに基づく汎用性の高い評価手法の整備が必要である。本事業では、昨今の計算機能力、解析技術、計測技術の進歩を背景に、現象解明や設計最適化、許認可における安全評価に資するため、高温・高圧化など様々な運転条件や設計オプションにも対応可能なマルチフィジックス評価システム及び既存の高速炉SGの安全性評価に適用できる評価システム(図1)を開発することを目的として、平成22年度において以下の研究開発を実施した。

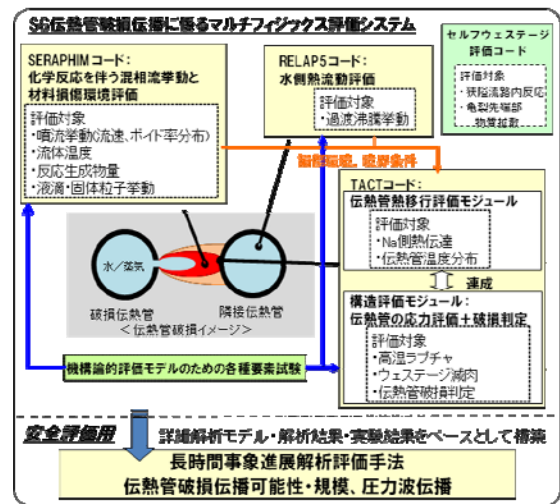


図1 評価システム

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

a. ウェステージ環境評価モデルの構築

反応ジェットの界面からエントレインされた液滴が隣接伝熱管に衝突し、液滴エロージョンを引き起こす可能性があるため、液滴挙動の評価が必要である。そこで、液滴エントレインメントモデル及び液滴輸送モデルを構築し、ナトリウム-水反応・圧縮性多成分多相流解析コード(SERAPHIM)へ組み込んだ。液滴エントレインメントモデルについては、エントレインメント速度、液滴径、液滴の抵抗係数等を表すモデルを構築した。液滴輸送モデル

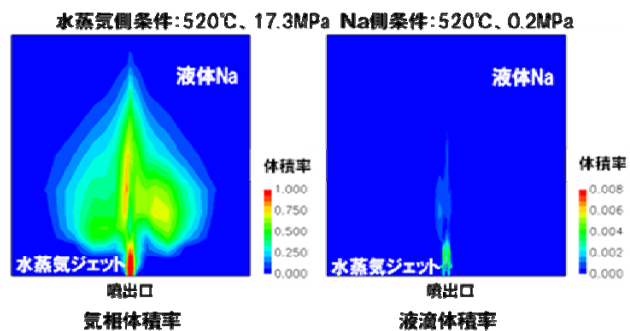


図2 液滴エントレインメント・

液滴輸送モデルの動作確認解析

については、液滴を分散相として取り扱うこととして質量/運動量/エネルギー保存式を構築した。モデル組み込み後、液滴の発生を考慮した液体中気体噴流の試解析を実施し、安定に解析できることを確認した。図2に解析結果の一例として気相および液滴の体積率分布を示す。

b. 解析精度向上のための解析手法の改良

SG 内の複雑形状に対して解析体系の模擬性を改善して解析精度を向上することを目的に、SERAPHIM コードで採用している圧縮性を考慮した多流体HSMAC法を非構造格子へ適用するための手法を検討した。2

次元簡易コードにより妥当性評価を実施した結果、図3に示すとおり、非構造格子化が可能であると

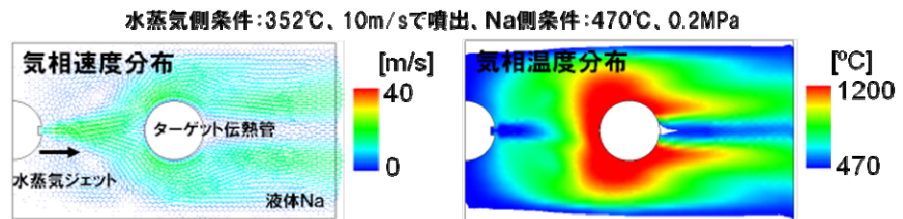


図3 非構造格子系におけるナトリウム-水反応試解析例

いう見通しが得られ、解析手法の改良案としてまとめた。

②隣接伝熱管への熱移行解析手法の整備

a. 伝熱管部評価モデルの構築

反応ジェットにより熱的な影響を受ける隣接伝熱管において、破損発生の有無の判定に必要な管壁の温度分布及び応力分布を評価するため、2次元円筒体系で応力解析モデル、熱伝導解析モデル及び熱応力解析モデルを構築した。2次元円筒体系の応力、熱伝導、熱応力解析を実施し、各種モデルの妥当性を確認した。

b. 破損判定モデルの構築

a. で構築した伝熱管部評価モデルによる隣接伝熱管の温度分布等から、ウェステージ現象で局部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モデルを構築した。構造解析コードによる評価を実施し、採用した一樣減肉の仮定が妥当である見通しを得た。

③隣接伝熱管内水側熱流動解析手法の整備

隣接伝熱管の水側境界条件を整備するため、(3)②a. で実施した水側熱伝達計測基礎実験をRELAP5 コードで解析するとともに、従来の実験知見に基づい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。従来の伝熱相関式をベースに、従来知見を超える領域に対しては(3)②a. のデータで補正し新たに提示された相関式をRELAP5 コードに組み込んだ結果、水側の沸騰様式や熱伝達率に対する高温ラプチャ評価上の過度な保守性を排除でき、実用炉を対象とした解析の妥当性を確認することができた。

④セルフウェステージ解析手法の開発

伝熱管の微小亀裂から高圧水が漏えいするときの反応生成物輸送及び反応生成物による自管腐食(セルフウェステージ)挙動を評価するため、亀裂拡大過程のそれぞれの段階において機構論に基づく準定常解析を実施してセルフウェステージによる亀裂の拡大を評価し、これを順次繰り返して自管腐食挙動を求めるモデルをまとめた。このモデルに基づき、セルフウェステージ現象に関する2次元試解析も併せて実施し、亀裂部周辺の伝熱流動場を評価できる見通しを得た。

(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

水漏えい発生から伝熱管内の水・蒸気が全てブローダウンしてプラントが安全に停止するまでの長時間に渡る事象進展を評価するため、原型炉の評価に使用された伝熱管破損伝播解析手法等を調査し、実用炉に適用するためのモデル改良や確認が必要な項目を抽出・整理した。整理した項目に対して、機構論に基づく解析手法との整合性を考慮しつつ、改良の方向性やプログラム基本構成、必要な開発作業・優先度を検討し、長時間事象解析コードの開発方針をまとめた。

(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

隣接伝熱管のウェステージ量に及ぼす液滴の衝突速度・伝熱管材質の影響を化学反応を伴わない条件で評価することを目的に、実験計測条件拡張のために液滴エロージョン試験装置を調整するとともに、伝熱管候補材料を試験片とした高速度マイクロスコープを用いた予備試験により液滴エロージョン試験が安定に実施できることを確認した(図4)。また、デジタル顕微鏡により液滴エロージョンによって生じる試験片の3次元表面性状の観察及び減損体積等の測定を可能とした。さらに、予備試験により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。



図4 試験片への液滴衝突状況

b. 高温 NaOH 噴射基礎実験

隣接伝熱管のウェステージ量に及ぼすナトリウム-水反応時の主要生成物である NaOH の流れ加速型コロージョンの影響を評価するため、NaOH 噴射基礎実験装置の試験カプセルを高速噴射が出来るように改造し、100m/s 以上での高速噴射及びスプレー状噴射機能を有することを予備試験により確認した。さらに、形状測定システムを用いた予備試験を実施し、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。

c. ナトリウム中蒸気噴出基礎実験

ウェステージ環境(温度・ボイド率・ウェステージ率等)を評価するため、ナトリウム中蒸気噴出基礎実験に供する試験体として、ナトリウム中への高温・高圧蒸気の噴出や伝熱管周りのウェステージ環境の測定を可能にする構造を検討し、試験体を設計した。また、設計に基づいて試験体を製作した。

d. セルフウェステージ現象評価のための実験

伝熱管のナトリウム中での亀裂進展挙動を確認することを目的に、セルフウェステージ現象で見られる亀裂進展挙動を測定するための試験体構造や注水方法等を検討し、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。

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

ナトリウム-水反応を模擬した急速加熱条件における隣接伝熱管の水側熱伝達特性を評価するため、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った。まず、予備試験においてローパスフィルタにより高周波ノイズが除去されることを確認し、その後、急速加熱される模擬伝熱管内表面での沸騰特性を評価するための実験データを取得した。図5には、熱伝達

率を補正した一例として、膜沸騰熱伝達率において Bromley 式で規格化した値($h_{\text{exp}}/h_{\text{Bromley}}$)をバルクのサブクール度でプロットした結果を示す。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(青線)を提示した。

③化学反応過程の解明とモデル構築

a. 実験及び解析結果の分析

機構論的手法に組み込む化学反応モデルの構築に必要な知見・データを得るため、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から得られた各化学種の濃度及び温度を分析した結果、気相反応では NaOH の生成に係る反応素過程が支配的であることを明らかにした。

実験データの分析及び素反応解析に用いた、各化学種の濃度及び温度データを図 6 に示す。また、表面反応で NaOH が生成する反応速度定数と気相反応でのそれとを比較した結果、気相反応の反応速度定数は極めて小さく、表面反応に比べ相対的に無視し得ることを明らかにした。

b. 化学反応モデルの構築

機構論的手法に組み込む化学反応モデルを構築するため、熱分析試験を実施し、ナトリウム-水反応時の Na_2O の生成可能性を確認した。また、既往知見及び a. で得られる知見等を踏まえて化学反応モデルを構築した。熱分析試験では昇温速度を変えて反応温度を測定し、これを基に Na_2O の生成速度定数を評価した。表 1 に Na_2O 生成に係る反応速度定数を示す。その結果、 Na_2O がナトリウム-水反応の事象進展で勘案すべき時間スケール内で生成する可能性が高いことを確認した。また、既往知見及び上記 a. で得られた知見から、表面反応において水蒸気の拡散律速で NaOH が、生成した NaOH とナトリウムとの反応律速により Na_2O がそれぞれ生成する化学反応モデルを構築した。

以上のように高速炉 SG での伝熱管破損伝播現象について、様々な運転条件や設計オプションにも対応可能なマルチフィジックス評価システムを開発することを目的として、4 ヵ年計画の 1 年目である平成 22 年度において上に示す研究開発を実施し、所期の目標を達成した。

3. 今後の展望

今後は、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、長時間事象進展解析評価手法の開発及びナトリウム-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を継続し、高速炉 SG における伝熱管破損伝播現象に係る設計の最適化を可能とし、安全審査における説明性向上に資することができる評価システムを開発する予定である。

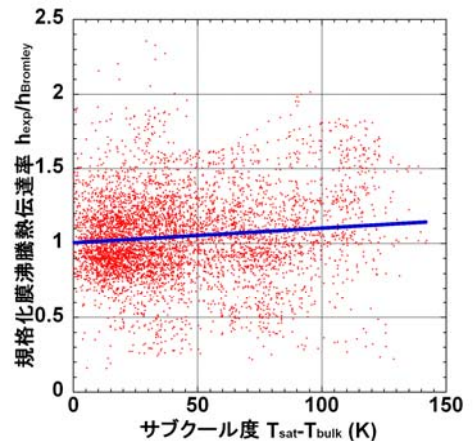


図 5 膜沸騰熱伝達率の補正

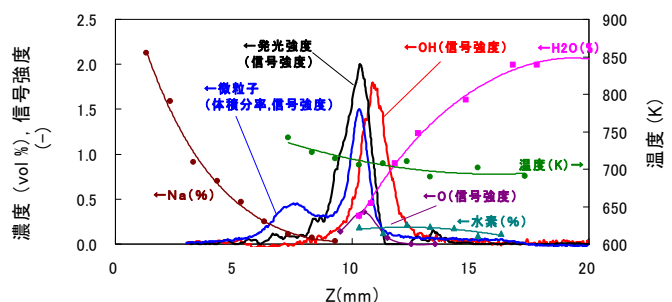


図 6 ナトリウム-水反応場計測結果

表 1 ナトリウム-水酸化ナトリウム反応の反応速度

温度 [°C]	熱分析試験に基づく反応速度定数 [s ⁻¹]		Kong らの 式 [s ⁻¹]
	Na:NaOH=8:2	Na:NaOH=2:1	
500	7.8×10^{-1}	1.5×10^{-1}	7.1
800	5.0×10^3	1.6×10^2	6.7×10^1