

## 高速炉蒸気発生器の伝熱管破損時事象に対する解析評価手法の開発\*

内堀 昭寛<sup>\*1</sup>, 菊地 晋<sup>\*1</sup>, 栗原 成計<sup>\*1</sup>, 浜田 広次<sup>\*2</sup>, 大島 宏之<sup>\*1</sup>

### Development of Numerical Evaluation Methods for Multi-Physics Phenomena under Tube Failure Accident in Steam Generator of Sodium-Cooled Fast Reactor

Akihiro UCHIBORI<sup>\*1</sup>, Shin KIKUCHI, Akikazu KURIHARA, Hirotsugu HAMADA and Hiroyuki OHSIMA

<sup>\*1</sup> Japan Atomic Energy Agency  
4002 Narita, Oarai, Ibaraki, 311-1393 Japan

Multi-physics analysis system for a heat transfer tube failure event in a steam generator of sodium-cooled fast reactors has been developed. The analysis system consists of the multiple computer codes. In this study, applicability of the newly constructed numerical models in the analysis system was investigated. The droplet entrainment / transport model which was incorporated into the SERAPHIM code was verified through the analysis of the related experiment. The experimental data about the pressure variation when the droplet entrainment occurs was reproduced by our model successfully. The TACT code is integrated by the numerical models of fluid-structure thermal coupling, stress evaluation and failure judgment of the structure. The fluid-structure thermal coupling model could predict the temperature distribution formed by the flow around the circular cylinder. About the failure judgment model, the predicted time of failure occurrence showed good agreement with the results of the tube rupture simulation experiment.

**Key Words** : Sodium-Cooled Fast Reactor, Steam Generator, Sodium-Water Reaction, Multi-Phase Flow, Numerical Simulation

## 1. 緒 言

ナトリウム (Na) 冷却高速炉の蒸気発生器 (SG) において伝熱管壁に貫通破損孔が生じると、管内を流れる高圧の水または水蒸気が管外の Na 中へ噴出し、Na と水の化学反応を伴う高速・高温・腐食性ジェットが形成される。隣接する伝熱管にこの反応ジェットが衝突すると、管壁の損耗 (ウェステージ) や高温化に伴う強度低下を引き起こし、それらが進行すると隣接伝熱管が二次的な破損に至る (破損伝播)。著者らは、SG の設計または安全評価に適用することを目的に、破損伝播発生可能性を予測するための機構論に基づくマルチフィジックス解析評価システム (図 1) を開発している。本システムは、Na 側の反応ジェット挙動及びウェステージ環境を評価する SERAPHIM コード、流体から伝熱管への熱移行と伝熱管構造部の温度・応力評価及び破損判定を行う TACT コード、伝熱管内水流动を評価する RELAP5 コードから構成される。本研究では、SERAPHIM コードに新たに導入したウェステージ環境評価モデル、TACT コードに導入した流体-構造熱的連成解析モデル並びに破損判定モデルについて、基本検証を目的とした数値解析を実施した。

## 2. 検証解析

### 2.1 ウェステージ環境評価モデル (SERAPHIM)

SERAPHIM コードは、反応ジェット (化学反応を伴う圧縮性多成分多相流) の挙動を解析し、隣接伝熱管周り

\* 原稿受付 2013 年 8 月 30 日

<sup>\*1</sup> 正員, (独) 日本原子力研究開発機構 (〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002)

<sup>\*2</sup> (独) 日本原子力研究開発機構

E-mail: uchibori.akihoro@jaea.go.jp



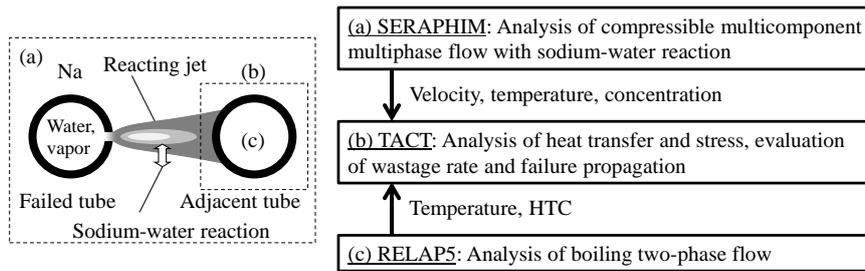


Fig. 1 Multiphysics evaluation system

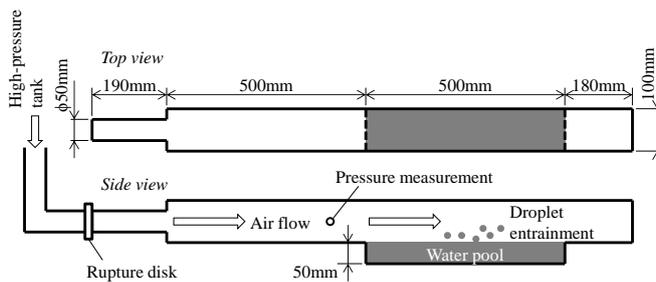


Fig. 2 Liquid droplet entrainment experiment by Epstein et al.<sup>(5)</sup>

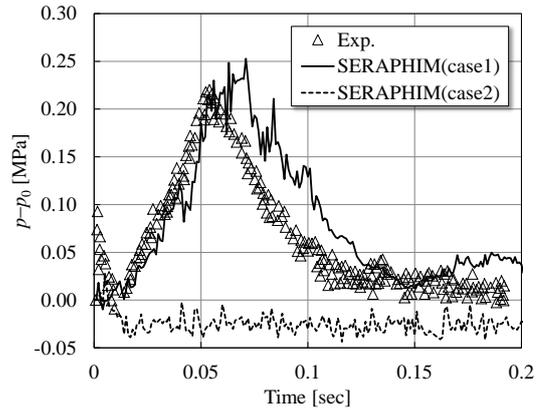


Fig. 3 Comparison of pressure variation

の材料損傷環境（ウェステージ環境）を評価する機能を有する。多相流の解析モデルとして多流体モデルを採用し、成分種の移流・拡散や圧縮性を考慮している。また、水蒸気と液体 Na の接触界面における化学反応 ( $\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + 1/2\text{H}_2$ ) を、化学反応の進行が接触界面への水蒸気輸送速度に律速されるとして（反応速度無限大）物質の生成・消滅速度を求める独自の表面反応モデル<sup>(1)</sup>により考慮している。

隣接伝熱管のウェステージを発生させる主要因の一つとして、反応ジェットの影響からエンタレインされた液滴が引き起こす液滴エロージョンが考えられる。そこで、上述の解析モデルに加え、ウェステージ環境評価モデルの一つとして液滴エンタレインメント・輸送モデルを構築した<sup>(2)</sup>。本モデルでは液滴を分散相として取り扱うこととし、液滴に対する質量・運動量・エネルギー保存式を構築した。質量保存式の生成項として現れる液滴エンタレインメント速度については、噴流現象への適用性が既に確認されている Ricou-Spalding の式<sup>(3,4)</sup>を適用した。

液滴エンタレインメント・輸送モデルの基本検証を目的として、Epstein らによって実施された液滴エンタレインメント実験<sup>(5)</sup>を対象に数値解析を実施した。実験の概略を図 2 に示す。実験装置は、空気の高圧タンク、ラプチャディスク、透明プラスチック製矩形流路から構成され、矩形流路の一部には窪み部が設けられており、水が満たされる。高圧タンクより、空気がラプチャディスクを破ることで矩形流路へ流入する。流入した空気は、水プールの液面より上部で液面に沿って水平方向の流れを形成し、液滴が空気中へエンタレインされる。本解析では、図 2 中のラプチャディスクから矩形流路出口までを対象とした。解析体系の入口境界（ラプチャディスクに相当）は、時刻 0 で開放するものとした。入口境界は、タンク圧力（0.69MPa）に相当する臨界流状態とし、また、ボイド率を 1 で一定とした。一方、出口境界は大気圧で一定とした。壁面境界にはノンスリップ条件を与えた。解析の初期条件として、水プールを除く流路全域でボイド率を 1、水プールでボイド率を 0、流速を 0m/s、圧力を大気圧、温度を 20℃とした。水プールの存在するケース（水プール用の領域で初期ボイド率 0：ケース 1）、水プールの存在しないケース（水プール用の領域で初期ボイド率 1：ケース 2）のそれぞれを解析した。

実験では、水プールより上流側の矩形流路内で圧力が測定されている（図 2）。図 3 に、解析結果における同位置での圧力の時間変動を実験結果と比較して示す。ここで、図中の  $p_0$  は大気圧を表す。実験結果から、ラプチャディスクの開放後直ちに圧力が上昇を開始し、その後三角形の圧力変動が現れていることを確認できる。ケース 1 の解析結果は、若干の定量的差異が存在するものの、この傾向を概ね良好に再現している。この圧力変動については、液滴が空気流にエンタレインされ、その量が増大すると、液滴の存在が空気流の抵抗となるため水プ

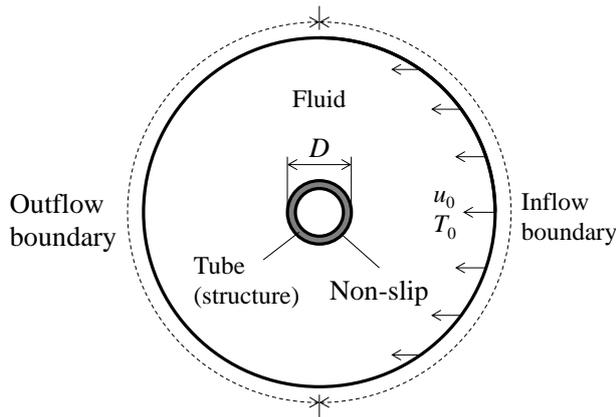


Fig. 4 Computational domain used by TACT code

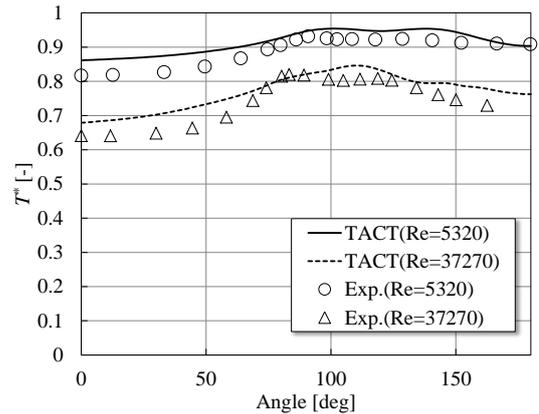


Fig. 5 Temperature distribution along tube surface

ールより上流側の圧力が上昇したものであると考えられる。さらに時間が経過すると、液滴が体系外へ流出し、次第にその量が減少したため、圧力も減少したものと考えられる。およそ 0.1～0.15 秒の間で三角形の圧力変動が終了しているとして取れるが、これは窪み部の水がほぼ消滅し、液滴エントレインメントが終了したことを意味しており、実験では撮影画像からこのことが確認されている。解析結果において窪み部の水量変化を調査した結果、同時間帯で 0 に近い値まで減少しており、実験での観察結果と一致していると言える。一方、ケース 2 の解析では、空気流の抵抗となる水が存在しないため、前述のような圧力変動は発生していないことが同図から分かる。実験でも、水が存在しない場合は三角形の圧力変動が全く現れなかったことが報告されている<sup>6)</sup>。以上の検討から、上述した解析モデルが液滴エントレインメント・輸送現象を概ね再現可能であることを確認した。

## 2・2 流体－構造熱的連成解析モデル (TACT)

TACT コードは、反応ジェットに影響を受ける隣接伝熱管及びその周辺領域を解析対象とし、流体から伝熱管への熱移行と伝熱管構造部の温度・応力評価並びに破損判定を行う機能を有する。TACT コードの解析では、図 4 に示す通り、2 次元円筒座標系において、円形の流体領域の中心部に外径  $D$ 、厚さ  $H$  の伝熱管が存在する体系を用いる。円筒外面の近傍では境界層を十分解像できるような詳細なメッシュを配置するとともに、流体から構造部までを含む全ての解析メッシュ上において基礎方程式（エネルギー保存式）から導出される一つの行列式を解くことにより、流体から伝熱管への熱移行を評価する（流体－構造熱的連成）。なお、構造部表面が計算セルの界面に一致するよう解析メッシュを分割し、構造部表面の熱流束を正しく評価するため、計算セルの界面における熱伝導率を、隣り合う計算セルの中心値の調和平均で求める方法としている。また、流体側の解析では壁近傍の乱流挙動も正しく表現することが重要であるため、乱流モデルとして低レイノルズ数型  $k-\varepsilon$  モデルを用いる。

流体－構造熱的連成解析モデルの基本検証として、円筒を過ぎる流れにおいて円筒表面の熱伝達を計測した van Meel による実験<sup>6)</sup>を対象に、図 4 に示す体系において数値解析を実施した。実験では、円筒内部に一定温度の液体を流すことで円筒を加熱するとともに、円筒周りに空気を流すことで、空気と円筒構造部の間で熱移行を生じさせている。解析体系の外周のうち半周を空気の流入境界とし、流速を一定とした。流入境界の各計算セルにおいて平行な近寄り速度  $u_0$  を与えるために、 $u_0$  を周方向角度  $\theta$  に応じて半径方向成分 ( $u_r$ ) 及び周方向成分 ( $u_\theta$ ) に分解し、これを境界条件とした。一方、残りの半周は流出境界とし、質量保存則を満足する境界条件を与えた。円筒外面にはノンスリップ条件を与えた。文献に示されている円筒内部の流体温度及び熱伝達係数から円筒内壁温度を決定し、これを円筒内壁の境界条件とした。なお、レイノルズ数 5320、37270 の 2 条件を対象とした。

図 5 に、円筒外面に沿った無次元温度分布を実験結果と比較して示す。実験と解析の両者とも、無次元温度は  $0^\circ$ （円筒表面上の入口境界に最も近い位置）から増大し、およそ  $90^\circ$  からそれ以降の領域でピークとなる傾向を示している。円筒周りの流れは約  $90^\circ$  付近ではく離し、その前後の領域では流速が比較的小さい値をとるため熱伝達は低下するが、このことを考慮すると、同領域で温度がピークとなったことは定性的に妥当である。また、レイノルズ数がより大きいケースでは、熱伝達の向上により構造部温度が比較的低くなる結果となっている。実験結果との定量的な差異については、解析では円筒座標系を用いているため、実験装置（風洞等）の形状を完全

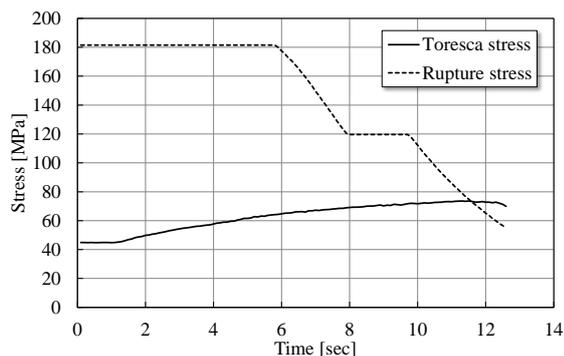


Fig. 6 Tresca stress and rupture stress in analysis of TRUST-1

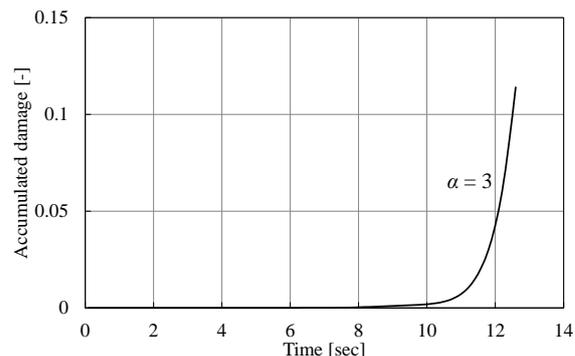


Fig. 7 Accumulated damage in analysis of TRUST-1

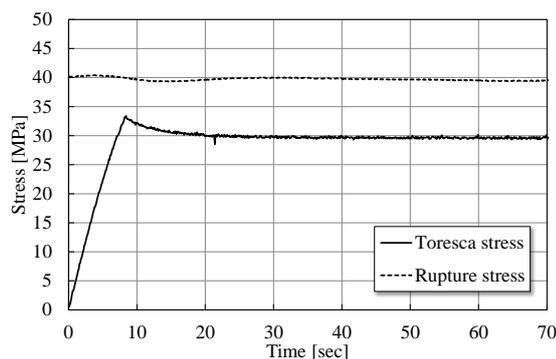


Fig. 8 Tresca stress and rupture stress in analysis of TRUST-2

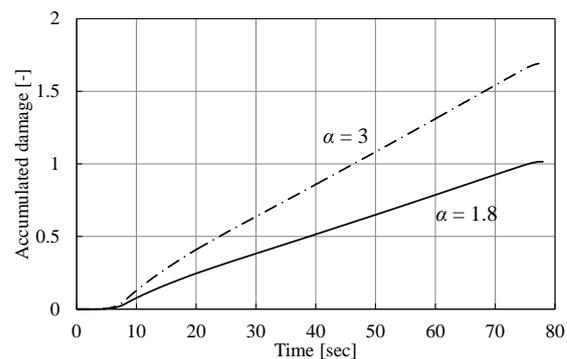


Fig. 9 Accumulated damage in analysis of TRUST-2

には再現することができない等の要因が考えられるものの、解析結果は構造部温度の分布傾向を概ね良好に再現できていると言え、円筒周りの流体-構造熱的連成解析は正しく行われていると判断できる。

### 2・3 破損判定モデル (TACT)

TACT コードでは、上述の流体-構造熱的連成解析により得られた構造部温度から構造部応力を評価し、次の方法により破損判定を行う<sup>7)</sup>。構造部内で直径が  $D_i + 2(1-k)t$  ( $D_i$ は伝熱管内径、 $t$ は伝熱管肉厚、 $k=0.4$ ) となる位置でのトレスカ応力、累積損傷、及び、同位置の温度に対する高温材料強度 (高温材料の引張強度データに基づく) を求め、以下のいずれかの条件に達した場合に破損発生と判定する。

①延性破損：トレスカ応力 > 高温材料強度 (破断応力)

②クリーブ破損：累積損傷 > 1

累積損傷については、実験式から求まる破断時間と、各時刻において構造部の応力・温度が作用する時間 (解析でのタイムステップ) との比の累積和として求める。

破損判定モデルの基本検証として、高温ラプチャ模擬試験 TRUST-1<sup>8)</sup>及び TRUST-2<sup>9)</sup> (Tube Rupture Simulation Test) の数値解析を実施した。TRUST-1 試験は、主に延性破損の発生を想定して実施された試験である。本試験では、窒素ガスにより内部加圧された Mod.9Cr-1Mo 鋼の垂直配置伝熱管を、室温の状態から高周波誘導加熱により非接触で急速加熱することで、伝熱管の高温ラプチャを模擬したものである。一方、TRUST-2試験は、2.25Cr-1Mo 鋼の伝熱管を用い、延性破損とクリーブ破損の両者の発生を想定して実施された試験である。クリーブ破損を生じさせる場合は、試験体を所定の温度に保持するとともに、窒素ガスにより試験体の内圧を破損圧力の数十%程度に保持することで試験体を破損させる。TRUST-1 及び TRUST-2 試験に対するいずれの解析でも、TACT コードの応力解析モジュール及び破損判定モデルを使用し、図 4 に示す構造部領域のみを解析体系とした。構造部の温度には試験で測定された伝熱管温度を与え、各時刻ステップで一様とした。伝熱管内面には試験で測定された圧力の時刻歴を境界条件として与え、外面は自由端とした。以上の構造部温度及び境界条件のもと、解析で得られた構造部応力分布から上記手法により破損判定 (破損発生時刻の予測) を行った。

解析結果の一例として、TRUST-1 実験において初期伝熱管内圧を  $100\text{kg/cm}^2\text{G}$ 、昇温速度を  $90^\circ\text{C}/\text{秒}$  としたケースでのトレスカ応力及び破断応力を図 6、累積損傷を図 7 にそれぞれ示す。時間が経過すると、構造部のトレスカ応力が増大する一方、破断応力は低下し（材料強度の低下）、加熱開始後 11.6 秒でトレスカ応力が破断応力を超え、延性破損発生との判定結果となった。同ケースの実験では加熱開始後 12.38 秒で試験体が破損しており、TACT コードで予測した破損発生時刻はこれとほぼ同等である。一方、延性破損発生と判定された時刻において累積損傷は 1 に到達しておらず、クリープによる破損ではないとの判定結果となった。初期伝熱管内圧や昇温速度の異なる全 9 ケースの検証解析において、解析で予測した破損発生時刻は最大でも約 1.5 秒の誤差範囲で実験結果に一致している。実際の破損伝播はおよそ十数～百数十秒の時間スパンで事象が推移するが、それとの対比で考えると良好な予測精度を与えていると言える。

次に、TRUST-2 実験において、伝熱管温度を  $1100^\circ\text{C}$ 、伝熱管内圧を  $9.4\text{MPa}$  に保持したケースについて、トレスカ応力及び破断応力を図 8、累積損傷を図 9 にそれぞれ示す。構造部温度と内圧はほぼ一定に保たれていることから、TRUST-1 試験の解析結果とは異なり、トレスカ応力は破断応力よりも低く保たれたままとなり（図 8）、延性破損は発生しないとの判定結果となった。累積損傷については、時間係数  $\alpha$  を 3 とした場合に 46.4 秒、1.8 とした場合に 75.6 秒で 1 に到達（クリープ破損発生）する結果となった（図 9）。ここで、時間係数  $\alpha$  とは累積損傷の算出に用いるパラメータであり、3 の場合に保守側結果、1.8 の場合に包絡的结果を与えるものである。同ケースの実験では 77.3 秒で試験体が破損しており、これに対して矛盾のない解析結果となっている。

### 3. 結 論

SERAPHIM コードに導入したウェステージ環境評価モデル、TACT コードに導入した流体-構造熱的連成解析モデル、破損判定モデルそれぞれの基本検証を目的として、関連する実験を解析した。実験データを概ね良好に再現することを確認し、本研究で開発を進めているマルチフィジックス解析評価システムにより伝熱管破損時事象を評価できる見通しを得た。

本報告は、エネルギー対策特別会計に基づく文部科学省からの受託事業として、原子力機構が実施した平成 24 年度「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」の成果である。

### 文 献

- (1) Uchibori, A., and Ohshima, H., "Numerical Methods for Compressible Multiphase Flow with Sodium-water Chemical Reaction", *Proceedings of the 20th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE20POWER2012-54437* (2012).
- (2) 内堀昭寛, 大島宏之, "高速炉蒸気発生器における伝熱管破損時ウェステージ環境評価モデルの構築", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 79, No. 799 (2013), pp. 263-266.
- (3) Ricou, F. P., and Spalding, D. B., "Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 11 (1961), pp. 21-32.
- (4) Epstein, M., Fauske, H. K., Yoshioka, N., Tashimo, M., Sakaba, H., and Kotake, S., "Analytical Model for Peak Temperature within a Sodium-water Reaction Jet", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 43 (2006), pp. 43-54.
- (5) Epstein, M., Fauske, H. K., Kubo, S., Nakamura, T. and Koyama, K., "Liquid Entrainment by an Expanding Core Disruptive Accident Bubble - a Kelvin/Helmholtz Phenomenon", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 210 (2001), pp. 53-77.
- (6) van Meel, D. A., "A Method for the Determination of Local Convective Heat Transfer from a Cylinder Placed Normal to an Air Steam", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 5(1962), pp.715-722.
- (7) 内堀昭寛, 菊地晋, 栗原成計, 浜田広次, 大島宏之, "高速炉熱流動現象の数値シミュレーション (5)蒸気発生器伝熱管破損時事象のマルチフィジックス評価システム", 第 25 回計算力学講演会, 2012, OS1-2 109.
- (8) 林田禎彦, 浜田広次, "大型炉蒸気発生器伝熱管破損模擬試験-データ集-", PNC PN9450 97-001, 1996.
- (9) 栗原成計, 浜田広次, "蒸気発生器伝熱管の急速破損模擬試験-2・1/4Cr-1Mo 鋼伝熱管での試験結果-", JNC TN9430 2002-002, 2002.