

革新的ナトリウム冷却高速炉におけるマルチレベル・マルチシナリオ プラントシミュレーションシステム技術の研究開発

(受託者) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(研究代表者) 大島宏之 次世代高速炉サイクル研究開発センター 高速炉計算工学技術開発部

(再委託先) 国立大学法人広島大学、国立大学法人徳島大学

(研究開発期間) 平成28年度～平成31年度

1. 研究の背景とねらい

原子力システム運用時における安全性評価は、システム状態を通常状態、異常な過渡、炉心損傷開始、著しい炉心損傷、炉外事象と事象の進展に応じて行われる。従来の解析評価では、図1(a)に示すように、炉心損傷開始以前（いわゆる設計基準事象に相当）については、プラント全体では動特性解析コードが、個別事象（炉心部、炉上部など）については専用の多次元数値解析コードが用いられてきた。一方、炉心損傷開始以降（一般に著しい炉心損傷以降はシビアアクシデント（Severe Accident, SA）領域と呼ばれる）では、複雑かつ不確かさが大きい領域であり、一部多次元解析が行われているものの、そのほとんどの領域では、幾つかの領域に応じた動特性解析コードをつなげる形で事象進展が評価されてきた。このため、前者では高精度予測に必要なプラント全体挙動を含めた詳細化・連成化が課題であり、後者では個別コード間を境界条件として接続することの妥当性、不連続性などが課題となっている。

本事業では図1(b)に示すように、炉心損傷開始以前については動特性解析コードをベースとした統合プラットフォームを構築すると共に、これにリンクする核熱流動連成を含めた炉心部多次元詳細解析サブシステムを開発する（マルチレベルシミュレーションシステム）。

また、炉心損傷開始以降については、SA事象に至る炉内事象及び炉外事象の物理モデルを整備し、これらを統合するアルゴリズムを構築することで、炉心損傷から炉外事象に至るまでの様々なSAシナリオを統一的に扱える数値計算手法（SAマルチシナリオシミュレーションシステム）の開発を行う。加えて、ナトリウム冷却高速炉特有の重要現象であるナトリウム燃焼及びナト

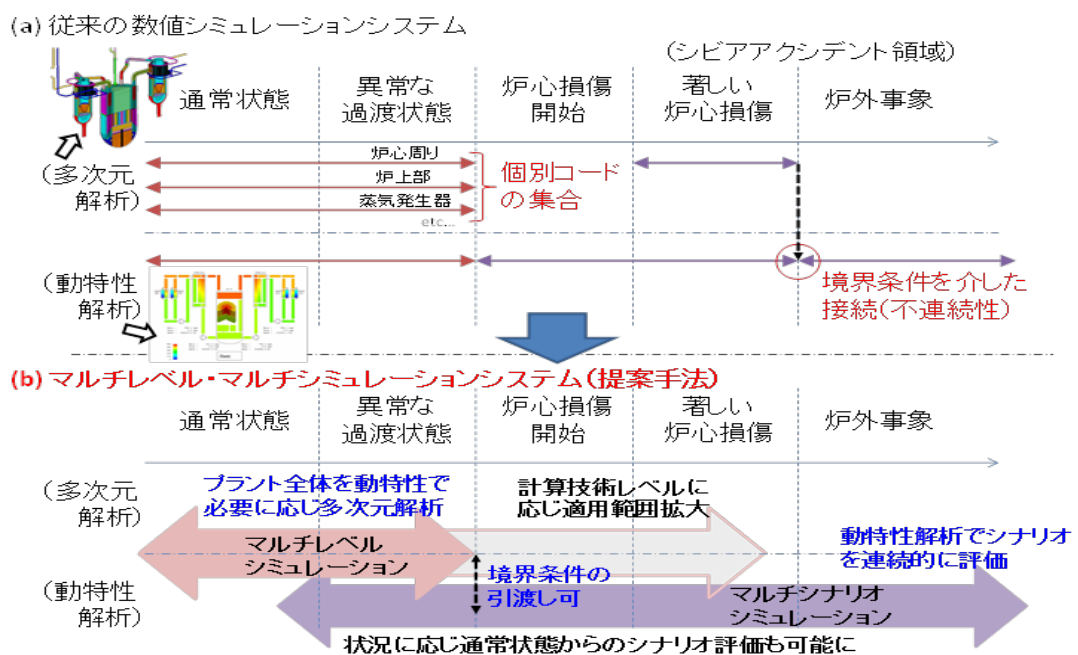


図1 プラント状態と数値シミュレーションとの関係

リウムと構造物コンクリートとの反応に関する数値計算手法について、特に詳細な検討を実施する。これらによりナトリウム冷却高速炉のシステム運用時の安全性評価を網羅的に取り扱える数値シミュレーションシステムを構築する。また、近年の数値計算科学技術の積極的な設計への援用を踏まえ、数値解析コードの検証並びに妥当性評価 (Verification & Validation, V&V) が重要視されている。そこで、ナトリウム冷却高速炉特有の重要現象として、ナトリウム燃焼時の多部屋間対流通気やナトリウムエアロゾルの基礎的物性の把握並びにナトリウムと構造物コンクリートとの反応に係る基礎実験を実施し、数値解析モデルの開発・検証・妥当性評価に資すると共にV&Vに適した形でのデータベース化を行う。

以下に平成28年度に実施した研究概要を述べる。

2. これまでの研究成果

(1) マルチレベルシミュレーションシステム開発

基本フレームとなる高速炉プラント動特性解析コードをベースとした統合プラットフォームの設計及び基本的なプログラミングを実施した。また、統合プラットフォームの内部メモリ上でのデータ間通信方式等を検討した。高速炉プラント炉心部のマルチレベルシミュレーションの要素となる熱流動・核特性・構造力学分野の既存解析コードについてそのモデリングレベルを整理するとともに、マルチレベルシミュレーションの基本となる1次元プラント動特性解析コードと3次元詳細伝熱流動解析コードのカップリングにおいて課題となる解析領域の割り当て方法・データ交換の同期方法・データ転送方法・カップリング解析の実行方法について検討を行った。また、マルチレベルシミュレーションシステムと類似のシステムのプラットフォームが有する機能や特徴を調査し、統合プラットフォームに対する要求項目の整理を行った。以上に基づき、マルチレベルシミュレーションの基本フレームとなる統合プラットフォームの設計を行い、その基本的なプログラミングを実施した。解析コード間のデータ転送方法の具体化として、解析コード毎の入出力方法の制限を考慮し、データ交換用入出力ファイル利用、メモリ共有、メッセージ通信利用の3つの方法について検討を実施した。

(2) シビアアクシデントマルチシナリオシミュレーションシステム開発

基本モジュールとなる炉内及び炉外熱流動モジュールにおいて用いられる支配方程式の選定を行い、モジュールの基本設計及び基本的なプログラミングを実施した。軽水炉及びナトリウム冷却高速炉における既存の類似解析コードの比較並びにシビアアクシデント解析と深く関わっているレベル2 確率論的リスク評価に対する包絡性の検討を実施し、本事業で開発するシミュレーションシステムに必要な物理モデル(機能)を抽出すると共にシステム概念の構築を行った。炉内側熱流動モジュールについては、流体の基礎方程式に基づいたシミュレーション手法とし、質点系の解析手法と比較して高精度な数値計算を目指すと共に、Volume of Fluid 法を用いた多相流計算を採用することで、数値計算の合理化を図ることとした。これらに必要な基礎方程式の選定、離散化を実施すると共に基本的なプログラミングを実施した。炉外側熱流動モジュールについては、既存の類似解析コードと同様に質点系を用いた動特性解析を採用することとし、必要となる支配方程式の選定、離散化、数値解法の検討を行った。また、炉内側熱流動モジュールと同様に一部機能についてプログラミングを実施した。

(3) コード V&V のための実験データベース構築

①ナトリウム燃焼に係る熱移行、燃焼生成エアロゾル物質移行模擬実験

ナトリウム燃焼時の多区画（多セル）への熱移行、燃焼生成エアロゾル物質移行を模擬した実験装置の設計検討を実施した。また、燃焼生成エアロゾル模擬物質の選定に関する検討を実施した。計測項目の検討として、ナトリウム漏えい事象における重要度ランク評価、コード V&V の観点での既存実験の整理（評価マトリクス作成）を実施すると共に実験装置のスケールに対する検討を行った。また、ナトリウム漏えい時のコンクリート区画内での伝熱流動や物質移行挙動を明らかにするため、取り扱いが容易な非ナトリウム系の模擬エアロゾル（粒子）を用いて、複数の貫通部で連結された多区画部内での温度や粒子移行挙動等を計測可能な多セル区画実験装置を設計した。

②ナトリウム燃焼に係る燃焼生成エアロゾル性状計測

既存試験装置に酸素などのガスを導入できるように、既存装置の改良を行うと共に、レーザアクセスシステムを追加し、ナトリウム燃焼過程と生成するエアロゾルの光学計測系を構築し、試運転を実施した。上記装置を用いて、ナトリウムと酸素の反応が持続的（10分以上）に行われ、反応生成物がナトリウム液面上部に形成されることを確認できた（図2）。また、ミー散乱法及びびレーザ誘起灼熱法を用いて反応生成物の散乱光を計測し、反応生成物（微粒子）の粒径、複素屈折率などの特性を評価できる見通しを得た。

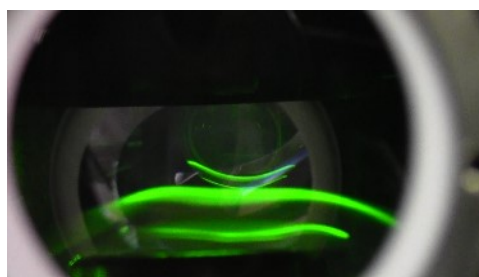


図2 Na-酸素反応時のミー散乱画像例

③ナトリウムとコンクリートとの反応性に係る熱分析実験

既存試験設備を利用し、専用ステンレス容器の製作並びにグローブボックスの再生を行い、構造コンクリートの主要な構成成分とナトリウムもしくはナトリウム化合物との反応性を把握するための予備的な熱分析実験を実施した（図3）。原子力機構で所有している既存試験設備を利用し、パーライトコンクリートの主成分の一つと考えられる炭酸カルシウム（CaCO₃）とナトリウムの反応性に加え、初期段階でコンクリート中の水と反応して生成することが想定される水酸化ナトリウム



図3 グローブボックス内の熱分析装置

（NaOH）の反応について着目し、予備的な熱分析実験を実施し、反応開始点温度の同定及び反応性を評価した。また、試験で得られたデータを基に簡易的な速度論的評価を実施し、既往知見との比較検討をすると共に、反応過程を推定するために反応後残渣物の化学分析と平衡状態図による評価を実施した。上記成果をまとめて国際会議で口頭発表を行った⁽¹⁾

④ナトリウムとコンクリートとの反応の熱的挙動解析

ナトリウムもしくはナトリウム化合物-構造コンクリート反応の挙動を熱力学的及び動力学的に解析するためのデータの測定方法について、試料形状、試料量、加熱条件及び反応雰囲気等の観点から系統的な検証を行い、測定実験のための基盤を構築した。

ナトリウム高速炉の構造コンクリートとして用いられるパーライトコンクリートについて、結晶学的組成と形態学的性状、熱分解反応挙動及びその速度論的特徴の観点から実験的に分析・解析し、それぞれの逐次的反応段階における形態変化と気体生成の速度論的挙動を明らかにした。図4はパーライトコンクリートの熱重量測定 (Thermogravimetry, TG) 及び示差熱-質量分析 (Differential Thermal Analysis - Mass Spectrometry, DTA-MS) 結果の例であり、コンクリートの熱分解挙動として、低温域で脱水過程が進行し、高温域で脱炭酸過程が進行することを明らかにした。更に、次年度におけるナトリウムとコンクリートの熱的挙動解

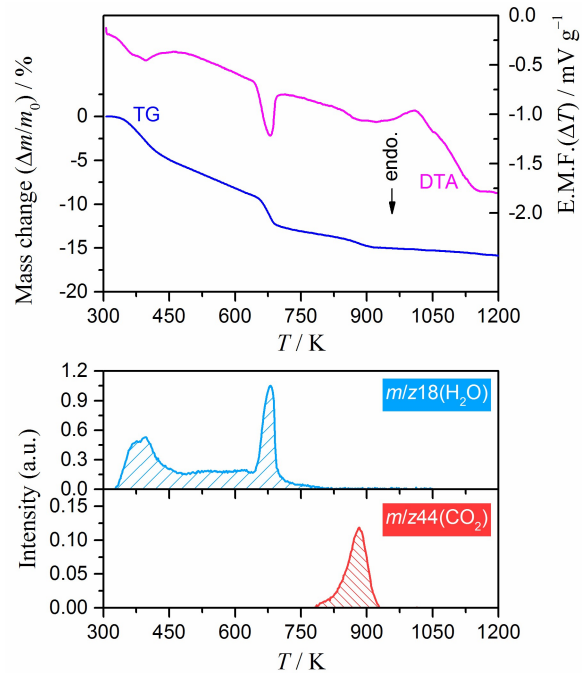


図4 パーライトコンクリートのTG/DTA-MS結果

析におけるモデル反応において、コンクリートの代替試薬として用いる予定の水酸化カルシウムと炭酸カルシウム試薬について、熱分解反応の速度論的挙動の観点から実験的に解析し、それぞれの熱分解反応が、パーライトコンクリートの熱分解反応における特定の反応段階と反応挙動及びその速度論の両方において対応することを確認した。これらの実験解析の結果を基にして、次年度におけるナトリウム及びナトリウム化合物とコンクリートの熱的挙動解析のための熱分析データ測定の具体的方法を策定した。また、加熱条件下においてナトリウム-コンクリート反応と競合関係にあるコンクリートの熱分解反応の総括反応への関与を想定した反応挙動解析のための基礎的知見を得た。上記成果をまとめて国際会議で口頭発表を行った⁽²⁾ ⁽³⁾。

3. 今後の研究

今後は、マルチレベルシミュレーションシステム開発、シビアアクシデントマルチシナリオシミュレーションシステム開発及びコードV&Vのための実験データベース構築を継続し、高い安全性と経済性を両立させる設計最適化・革新技術開発を支える安全基盤技術と成り得るシミュレーションシステムを構築する予定である。

4. 参考文献

- (1) S. Kikuchi, N. Koga, “Thermal behavior of liquid sodium-calcium carbonate reaction”, Abstract of JTACC-V4, ID:81, Budapest, June 6-9, 2017.
- (2) N. Koga, S. Kikuchi, “Kinetic analysis of the multistep thermal decomposition of structural concrete of sodium-cooled fast reactor: Perlite concrete”, Abstract of JTACC-V4, ID:87, Budapest, June 6-9, 2017.
- (3) N. Koga, S. Kikuchi, “Comparative kinetic study for the thermal decomposition of structural concretes used in the sodium-cooled fast reactor”, Abstract of CATS-2017, Fukuoka, November 2-6, 2017.