

新シミュレーション手法開発 一次世代革新炉の設計支援

内堀 昭寛
Uchibori Akihiro

岡野 靖
Okano Yasushi

1. はじめに

次世代革新炉（以下、革新炉）の有力な候補の1つであるナトリウム冷却高速炉は、長期的なエネルギーの安定供給を実現すると共に、放射性廃棄物の低減に寄与することができる。ナトリウム冷却高速炉では、高速中性子による核分裂から熱エネルギーを取り出す。核分裂から生成される余剰中性子により、新たな燃料としてのプルトニウムを生成できること、及びマイナーアクチニドを燃焼できることが特徴である。

「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（2021年6月策定）では、国際連携を活用した高速炉開発の着実な推進が目標とされている。「GX実現に向けた基本方針」（2023年2月閣議決定）では、革新炉の開発・建設に取り組むことが示されている。以上のように、革新炉の社会実装はカーボンニュートラルの実現に大きく貢献すると期待されている。高速炉開発の「戦略ロードマップ」（2022年12月改定）では、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）の役割として、解析評価技術等のソフトの開発基盤を維持・整備することが示されている。それらの技術を他機関や民間企業へ提供することも重要な課題となっている。

原子力機構は、革新炉の設計を支援する技術としてAI（Artificial Intelligence）支援型革新炉ライフサイクル最適化手法ARKADIA（Advanced Reactor Knowledge- and AI-aided Design Integration Approach through the whole plant lifecycle）を開発している¹⁾。ARKADIAに組み込むDX（デジタルトランスフォー

メーション）技術として、ナトリウム冷却高速炉の安全性を評価し、設計最適化に活用できる新シミュレーション手法を開発した²⁾。

2. ARKADIAの概要

シミュレーションは、原子炉の設計や安全性評価に必要な不可欠となっている。ARKADIAは、最新のシミュレーション手法にAIと知識ベースを組み合わせた統合システムである。既往知見を最大限活用し、安全性や経済性等様々な観点から自動で設計を最適化することが目的である。その実現に向け、以下に示すシステムの実装を進めている（図1）。

- ① これまでの研究開発から得られた知識に加え、ARKADIAの評価により生み出される新しい知識を蓄積し、活用するシステム
- ② 物理法則に基づき、原子炉をサイバー空間上でシミュレーションするシステム
- ③ ①と②を活用して、設計の最適化を支援（最適解探索等）するシステム
- ④ 3つのシステムを制御し、使いやすいインターフェースを有するプラットフォーム

設計を最適化するプロセスでは、システム①が、膨大な量の知識ベースから評価に必要な情報を探索し、提供する。その情報に基づき、評価すべき機器の設計条件や仮想的な事故条件を策定した後、システム②がシミュレーションを実行する。システム③は、シミュレーションの結果から安全性を評価し、経済性も含めて、現在の設計条件が要求を満たすかどうかを判断する。満たさない場合、システム③は、

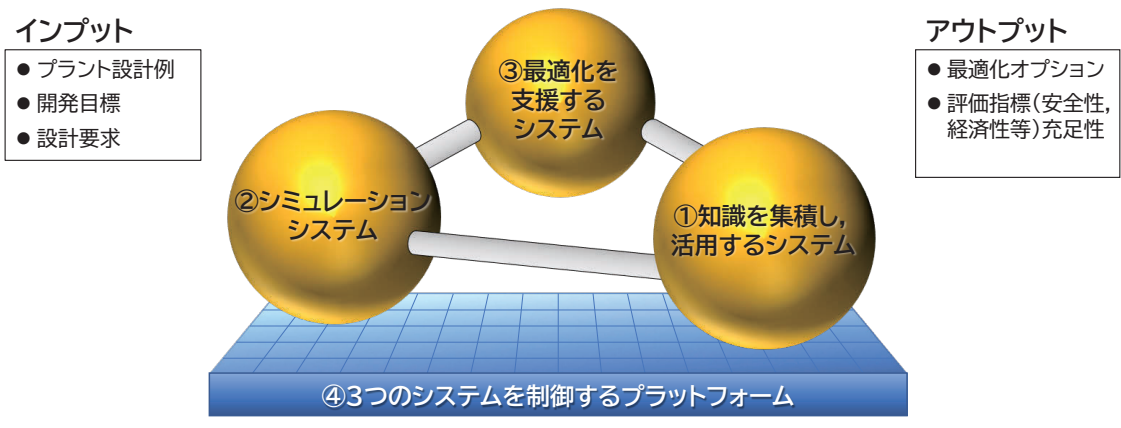


図1 ARKADIAの構成

AI等を活用して次に評価すべき条件を自動で策定し、システム②に実行命令を与える。以上のプロセスを繰り返すことで、最適な設計条件を探し出す。ユーザーは、プラットフォーム④により簡単な操作で前記の評価を実施できる。

3. 新シミュレーション手法

設計最適化では、事故の発生を想定し、その影響として原子炉各所の状態変化をシミュレーションから評価することが必要となる。これまで、ナトリウム冷却高速炉の分野では、事故時に発生する事象ごとに（原子炉容器内では炉心損傷における起因過程³⁾や遷移過程⁴⁾、原子炉容器外ではナトリウム燃焼⁵⁾やナトリウム-コンクリート反応⁶⁾等）、シミュレーション手法が個別に開発されてきた。ある事象のシミュレーション結果を、次の事象のシミュレーションに用いる入力データとして引き渡し、これを繰り返すことで、原子炉各所の状態変化を評価することができる。しかし、この方法には、データの適切な引渡しに高度な知識と経験を要する、引渡しにより保守側の不確かさが混入した結果となる、安全性と経済性が両立する設計条件を探索する場合、熟練者でも多大な時間を要する等、いくつかの課題があった。これらの課題解決に向けて、解析コードSPECTRA（Severe-accident PhEnomenological Computational tool for TRansient Assessment）を新たに開発した。この解析コードは、原子炉容器の内部から格納容器に至る広い領域で、事象間の双方向の

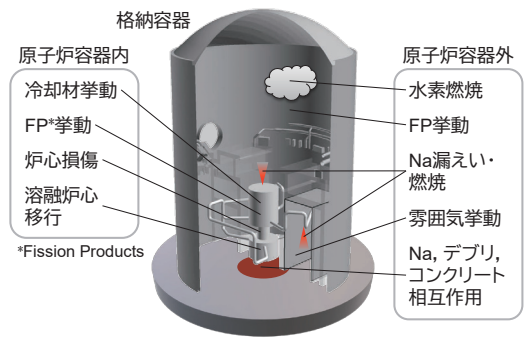


図2 シミュレーションの評価事象

影響を自動で考慮できることが特徴である。熟練者によるデータ引渡しが不要で、過度な保守性が混入することなく、多数の条件に対するシミュレーション、すなわち最適条件の探索が可能である。

本シミュレーションの評価事象を図2に示す。原子炉容器内（原子炉容器から1次主冷却系配管を含む）の冷却材挙動に対し、液位変動や相変化が発生することを考慮し、また計算速度と安定性の観点から、完全陰解型多次元多流体モデルを適用した。原子炉容器外（原子炉容器の下部に位置する区画、配管室、格納容器の上部区画等を含む）については、エアロゾルを含む多成分気相挙動に対して完全陰解型質点系モデルを適用し、ナトリウム燃焼等の解析モデルとカップリングした。原子炉容器壁や1次主冷却系配管壁等の冷却材バウンダリが破損する事象を評価する場合、各時刻ステップでバウンダリ内外の圧力差から冷却材漏えい流量を求め、これを原子炉容器内外の生成項として与える。

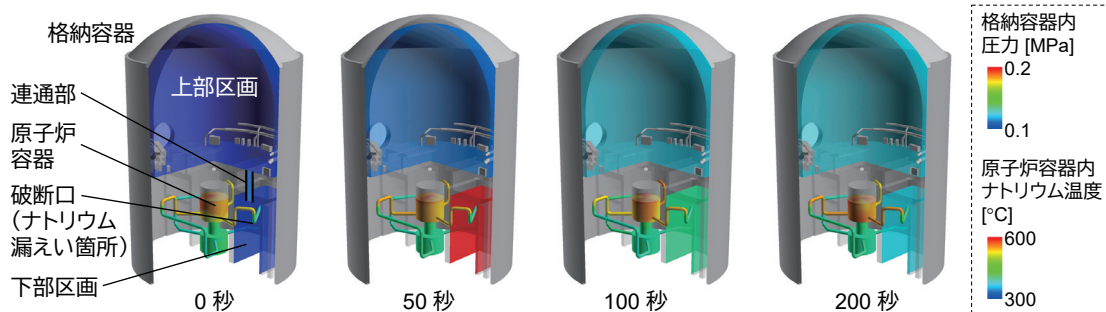


図3 仮想的なナトリウム漏えい事象に対するシミュレーション結果

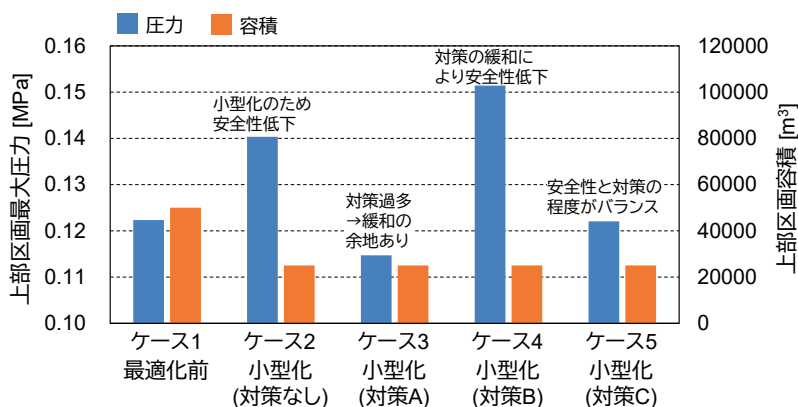


図4 最適な設計条件の探索プロセス

4. シミュレーションによる設計最適化例

新シミュレーション手法の有効性を確認するため、1次主冷却系配管からナトリウムが漏えいし、燃焼することで、広い範囲で圧力が上昇する仮想的な事故を想定し、格納容器の設計を最適化する問題を例題とした。ナトリウム燃焼とは、漏えいしたナトリウムが雰囲気中の酸素や湿分と反応し、熱・物質を生成する事象である。

図3は、シミュレーション結果の一例を示している。実在のプラント構成を単純化した仮想的な解析体系として、原子炉容器と1次主冷却系配管を含む原子炉容器内領域、下部／上部区画を含む原子炉容器外領域を設定した。1次主冷却系配管に破断口を設け、配管内外の圧力差に応じてナトリウムが漏えいし、下部区画ではナトリウム燃焼が発生する。仮定した連通部により、下部区画で発生したナトリウム燃焼の影響が上部区画へ及ぶ。0秒は原子炉の定格運転条件における定常状態を示している。ナトリウムは発熱を有する炉心部を通過するため、原子炉

容器の上方では比較的高温の状態にある。その後、ナトリウム漏えいと共に液位が低下するが、原子炉容器と1次主冷却系配管の間でナトリウムの循環は保持されているため、炉心部で有意な温度上昇には至っていない。下部区画の雰囲気圧力は、ナトリウム燃焼により上昇した後(50秒)、漏えい流量の変動と上部区画との通気により低下し(100秒)、上部区画の雰囲気圧力とほぼ平衡した状態に至っている(200秒)。新シミュレーション手法により、原子炉容器内の熱流動と、原子炉容器外のナトリウム燃焼や雰囲気挙動が相互に作用した結果として、格納容器の内部圧力が変動することを自動的に評価することを可能とした。

小型格納容器の実現可能性を確認することに主眼を置き、上部区画の容積とナトリウム燃焼を抑制する設備対策の組み合わせによる様々な条件に対してシミュレーションを行った。シミュレーションの時間進行の中で、上部区画において到達した最大圧力を安全性基準とした。上部区画の容積として、初期値及び1/2(小型化)の2条件を考慮した。設備対策

として、初期酸素濃度（低濃度であるほど燃焼を抑制）、空間の垂直方向区画化（区画化数が多いほどナトリウムの落下距離が減少し、燃焼を抑制）、水平方向区画化（区画化数が多いほど床面でのナトリウムの拡がり減少し、燃焼を抑制）を考慮した。

複数の条件に対する上部区画の最大圧力を、解析条件である容積と共に図4に示す。最適化前の条件（ケース1）に対し、設備対策は追加せず小型化した条件（ケース2）では最大圧力が増大し、安全性が低下している。ケース3では、設備対策により最大圧力が減少している一方、ケース4では設備対策を過剰に緩和したため最大圧力が増大している。ケース5では、適切な設備対策の選択により、最大圧力が最適化前と同等に保たれている。安全性の観点のみではケース3が最も優れているが、ケース5は、高い安全性を保ったまま格納容器を小型化できる最適な設計である。格納容器の小型化は、経済性の飛躍的な向上、耐震性の向上、建設工程の短縮やメンテナンスの簡素化等、多くの利点を有する。

5. まとめと今後の展望

革新炉の設計支援を目的としたAI支援型革新炉ライフサイクル最適化手法ARKADIAに組み込むDX技術の1つとして、ナトリウム冷却高速炉の安全性を評価し、設計最適化に活用できる新シミュレーション手法を開発した。格納容器の容積や設備対策の組み合わせによる多様な設計条件から、高い安全性を保ったまま格納容器を小型化できる条件を探索する例題を通じて、本手法の有効性を確認した。

今後、開発したシミュレーション手法にAI等を活用した自動探索手法や知識ベースを組み合わせることで、次のことが可能となる。

・原子炉の設計プロセスを変革し、プラントライフサイクル（設計、建設、運転、廃止）の全般に対して最適な革新炉概念の創出を支援する。

・世界最高水準の安全性を保ったまま経済性を飛躍的に向上させる設計を見出す。

・コストや時間のかかる実証実験の数を抑え、革新炉を実用化するまでの期間を短縮する。

・利便性の高い統合システムとして、シミュレーションや原子炉の設計を担う人材の育成に貢献する。

ARKADIAは、原子力機構におけるナトリウム冷却高速炉の設計研究に活用するだけでなく、近年中に民間企業各社や教育機関へ提供を開始する予定であり、地球温暖化のストップとゼロカーボン社会の実現に貢献するための中核的な技術として開発を進めていく。

謝辞

本件の一部は文部科学省原子力システム研究開発事業JPMXD0216816129の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) H. Ohshima, *et al.*, *J. Nucl. Eng. Radiat. Sci.*, **9**, NERS-21-1157 (2023)
- 2) A. Uchibori, *et al.*, *Nucl. Eng. Des.*, **413**, 112492 (2023)
- 3) S. Ishida, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2243949 (2023)
- 4) T. Suzuki, *et al.*, *Nucl. Eng. Technol.*, **47**, 240-252 (2015)
- 5) M. Sonehara, *et al.*, *Proc. ICONE 2020.*, 16851 (2020)
- 6) M. Aoyagi, *et al.*, *Mech. Eng. J.*, 23-00459 (2024)

(日本原子力研究開発機構 高速炉サイクル研究開発センター 高速炉解析評価技術開発部 安全解析評価グループ)