

アドバンス・シミュレーション・ニュース

Vol.3, No.10 (2026年3月17日発行)

第10回アドバンス・シミュレーション・セミナー2025 開催報告

原子力発電環境整備機構 技術部 性能評価技術グループ

グループマネージャー 石田 圭輔 様

「地層処分の安全評価におけるシミュレーションの活用と展望」

アドバンス・シミュレーション・ニュースは、アドバンスソフト株式会社が2021年度から、我が国における計算科学技術の振興を目的として、幅広い分野の最先端研究を対象として開催している「アドバンス・シミュレーション・セミナー」の開催報告と今後の開催予定をご案内するサービスです。

本セミナーで紹介される多種多様な最先端研究をきっかけに、企業の研究開発を担う技術者の方が新たな視点を持つこと、最先端研究を産業に応用する起点となること、長期的には計算科学シミュレーション分野の裾野が広がること等を期待しています。

開催概要

- 日時：2026年1月23日（金）14:00～15:30
- 開催方法：オンラインセミナー（Zoomにて開催）
- 主催：アドバンスソフト株式会社 出版事業部
- 講演概要

地層処分システムは、不均質性を有する複数の構成要素から成り、これらの構成要素の空間スケールは数十cm～数十km以上である。また、システム全体の性能に求められる時間スケールは数万年以上となる。このため、規模や期間に限られる室内試験や原位試験によってシステムの性能を直接的に実証することは困難であることから、シミュレーションによる評価が必須である。

本セミナーにおいては、地層処分の実施主体である弊機構が安全評価において使用しているシミュレーションについて紹介する。また、これらのシミュレーションにおける課題と今後の技術開発の展望について報告する。



本稿は、2026年1月23日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2025」において、石田 圭輔 様にご講演いただいた内容をアドバンスソフトがまとめたものです。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1. 地層処分の基本概念と多重バリアの構造

原子力発電環境整備機構（NUMO）は、わが国における高レベル放射性廃棄物および TRU 廃棄物の地層処分事業の実施主体である。処分する廃棄物の量は、ガラス固化体 4 万本以上、TRU 廃棄物 19,000 m³以上（2008 年に公表された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」に示された値）とされる。また、2025 年 3 月時点で原子力発電所に保管されている使用済燃料はガラス固化体換算で約 27,000 本相当と整理されている。ガラス固化体の放射能は時間とともに減衰するが、極めて長期間にわたり残存するため、人の管理がなくとも長期に安全が確保できる仕組みが求められる。

地層処分は、放射能の減衰を待つ間、放射性廃棄物を地表から隔離し、処分施設周辺に閉じ込める考え方により、人間の管理に頼らずとも処分場の閉鎖後長期にわたって安全を確保する。これを具体化するの

が、人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムである。人工バリアは、放射性物質をガラスの構造内に取り込むガラス固化体、その周囲を覆う金属製の容器オーバーパック、そして地下水の侵入を抑えつつ核種の移動を遅延させる緩衝材（ベントナイト）で構成される。一方、岩盤である天然バリアは、廃棄物を地下 300 メートルより深い安定した地層に埋設することによって、廃棄物を地表から遠ざけるとともに、万が一核種が漏出した際にも、岩石表面への吸着機能によってその移動を大幅に遅らせる役割を果たす。このように、複数の物理的・化学的障壁を幾重にも重ねることで、一部の機能が損なわれたとしても全体としての安全性が確保されるよう設計されている。

1.2. サイト選定の要件と段階的な調査プロセス

適切な地質環境を選定し、これに対して地下施設を設計したうえで、処分場の閉鎖後長期における安全性の評価を行い、安全な地層処分を実現する。NUMO では、科学的な客観性に基つき、主に二つの観点から選定を進めている。第一は長期安定性である。日本は地震や火山活動が活発な変動帯に位置するため、将来にわたって大規模な地殻変動や火山噴火、隆起・侵食の影響を受けにくい場所を特定しなければならない。活断層の近傍を避けることはもとより、地下深部の環境が数万年単位で安定し続けることが条件となる。第二は適切な地質環境特性を有する地質環境である。これには力学的、熱的、水理学的、化学的という四つの側面からの評価が含まれる。地下深部に巨大な空間を建設・維持できる岩盤強度、廃棄物の熱による劣化を招かない温度環境、核種移動の主因となる地下水の流速の遅さ、そして腐食の抑制などに関係する還元的な化学環境が求められる。こうした特性を判断する指標として、国は 2017 年に科学的特性マップを公表した。これは日本全土の地質情報を集約し、火山や断層からの距離などに基つき適性を視覚化したものであるが、実際の適否は段階的な調査によって判断される。サイト選定プロセスは文献調査、概要調査、精密調査の三段階で構成される。文献調査は 2020 年 11 月 17 日に北海道の寿都町・神恵内村で開始され、2024 年 6 月 10 日に佐賀県玄海町でも開始された。文献調査では既存の学術データに基づく机上検討が行われ、概要調査では地表からの物理探査やボーリング調査が実施される。最終的な精密調査では地下調査施設を建設し、地下深部の実地環境を直接観察・評価する。こうしたプロセスを通じて、点の情報を三次元、あるいは時間軸を加えた四次元の地質環境モデルへと統合し、科学的エビデンスに基づいた処分地の決定が行われる。

1.3. 長期安全評価の論理と包括的技術報告書

地層処分における安全評価の特異性は、処分場の閉鎖後長期という、人間の知覚を超えた時間スケールを扱わなければならない点にある。この長期的な安全性を定量的に証明するために用いられるのが安全評価である。評価はまず、将来起こり得る事象を科学的に想定し、論理的なストーリーとして組み立てるシナリオ構築から始まる。代表的な基本シナリオで

は、地下水によりオーバーパックが腐食し、千年後に地下水がガラス固化体に接触して核種が溶け出す過程を想定する。溶け出した核種が緩衝材や岩盤中を移行し、最終的に生活圏へ到達して人間に及ぼす放射線量を算出し、それが基準値を下回るかを確認する。後述する包括的技術報告書（包括的技術報告）においては、国内で閉鎖後長期の規制基準値が未設定であるため、諸外国で設定されている厳しい基準値等を参考に、年あたり $10 \mu\text{Sv}$ を「めやす（目標値）」として設定し、基本シナリオ結果と比較している。包括的技術報告は、これまでに蓄積された科学的知見や技術を統合し、実施主体として安全な地層処分を実現するための方法と最新状況を取りまとめたセーフティケースである。1999 年の「第 2 次取りまとめ」以降の知見・技術開発成果を踏まえ、代表的な地質環境モデル等に対する安全評価を整理し、基本シナリオの最大線量が、めやすとして設定した目標値（年あたり $10 \mu\text{Sv}$ ）を下回る結果が示されている。また、包括的技術報告に関する OECD/NEA による国際レビューを 2023 年 1 月に完了しており、現段階において適切なものであると結論付けられている。

1.4. 高度なシミュレーション技術と二階層モデル

地層処分システムの性能評価には、数十センチメートルのバリア構成要素から数十キロメートルの広域地質環境まで、極めて広範な空間スケールを扱う技術が求められる。これを効率的かつ精密に実行するため、NUMO は二階層モデルという戦略的アプローチを採用している。第一の階層である現象解析モデルは、特定のサブシステム内での複雑な物理・化学現象を精緻に解析するものである。例えば、緩衝材の中での熱、地下水、化学物質の相互作用を詳細に解き、安全性を左右する重要な因子を特定する。第二の階層であるシステム評価モデルは、現象解析モデルで抽出された重要なプロセスを、合理的な保守性を確保しつつ簡略化したうえで、地層処分システム全体を対象に放射線学的影響（線量/リスク）を推定する。この二階層を並行して運用することで、科学的な詳細さと実用的な計算スピードを両立させている。現象解析モデルとシステム評価モデルの境界（時間的・空間的対象範囲）は、科学技術の進歩、解析目的と必要精度、利用可能な計算資源に応じて柔軟に変更される。

近年の計算機科学の進歩により、シミュレーションは領域の大規模化と精緻化を両立させる段階に入った。米国サンディア国立研究所により開発された並列計算対応の公開解析コード PFLOTRAN を地下水流動解析へ導入し、広域スケールを対象とした解析へ拡張する取り組みが進められている。さらに、詳細度の異なるモデルを組み合わせる入れ子モデル技術の整備が進み、個々の廃棄体から発生した核種がどの断層を経由し、どのような時間軸で地表へ至るかを個別に追跡できるようになった。これにより、地質環境の不均質性や時間的な変遷を考慮した四次元的な評価が実現している。また、従来は特定の断面に限定されていた評価が、処分場全体の数万本の廃棄体を対象とした網羅的な解析へと拡張されており、サイト固有の特性に合わせた最適設計を行うための基

盤技術が整いつつある。

1.5. AI 導入による計算効率化と今後の技術展望

シミュレーション技術の高度化に伴い、新たな課題として浮上したのが膨大な計算リソースの消費とデータ処理の複雑化である。広域スケールを対象に処分場に埋設する 40,000 体の HLW や異なる TRU 廃棄物それぞれについて核種移行解析を実施するには、概算で 100 万 CPU 時間程度を要する例が示された。また、出力される膨大な解析結果から人間が安全性の本質を直感的に把握することは困難になりつつある。この課題を解決するため、NUMO は AI や機械学習の導入に注力している。具体的には予測評価ツールとクラスター分析ツールの開発が進められている。予測評価ツールでは、一部の廃棄体から得られた詳細な解析結果を機械学習の教師データとして用い、残りの数万体の挙動を AI に予測させる。試行結果では、AI による予測値が詳細解析の結果を比較的精度よく再現できることが確認されており、計算負荷低減に資する可能性が示された。

一方、クラスター分析ツールでは、粒子の移行率等の指標に基づき廃棄体をグループ化する (k-means 法の利用)。また、膨大な移行経路データを自動処理して粒子の集まる箇所を特定し、主要経路を抽出する手法として DBSCAN の利用が示された。これにより、どの経路が核種の移行経路として支配的であるかといった安全性を左右する主要な要因について、人間が注目すべき情報を効率的に抽出することが可能となった。今後の展望として、シミュレーションは安全性の確認に加えて、設計と調査へのフィードバックをする技術としての役割を広げていく。AI と高度なシミュレーションを融合させることで、サイトの地質特性に最適化された合理的な処分場設計や、最も効果的な調査ポイントの特定が可能になる。これは事業の効率性を高めるだけでなく、科学的根拠に基づいた透明性の高い説明を社会に対して行うための重要な手段となる。NUMO は今後も、最新のデジタル技術を積極的に取り入れ、数万年後の将来世代に対する責任を果たすべく、地層処分の確実な実現を目指していく。

1.6. 聴講における感想 (アドバンスソフト)

地層処分の閉鎖後長期安全評価は、数万年以上・数十 cm から数十 km に及ぶマルチスケール問題であり、実験のみでは実証できないためシミュレーションが不可欠であることを体系的に理解できた。特に、現象解析モデルとシステム評価モデルを二階層で運用し、科学的知見の成熟度や計算資源に応じて両者の境界を柔軟に見直すという考え方は、実務に即した合理的なアプローチであると感じた。詳細解析から簡易モデルへ落とす際に、主要な移行経路や支配要素を残しつつ、埋戻し効果を敢えて見込まないことで保守性を担保する点や、線量が目安を超えた場合にはまず評価側の保守性合理化を検討し、その後に設計へ反映するという優先順位付けは印象的であった。また、PFLOTTRAN による並列計算や機械学習を活用した予測評価・データ整理は、計算負荷低減と説明性向上の両立に有効であり、当社と

しても解析環境やデータ活用の面で大いに参考にできると感じた。

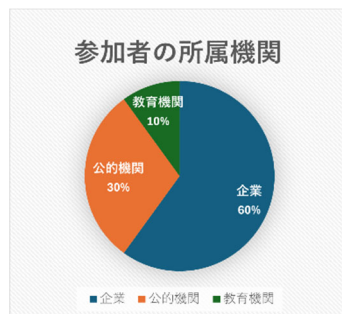
【ご経歴・ご研究内容】

2005 年 東京大学工学部卒業。2010 年 東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 博士課程修了。2010 年 原子力発電環境整備機構 入構。主に、地層処分施設の閉鎖後長期における安全性の評価に関する業務のうち、熱-水-力学-化学に関する連成現象を対象としたシミュレーションや放射性核種の移行シミュレーションなどに従事。

参加者のご意見

申込者は 59 名、当日の参加者 (視聴者) (社外) は 40 名でした。

参加者 (視聴者) の内訳は、企業が 24 名、公的機関が 12 名、教育機関が 4 名でした。主な業種は、「エネルギー (電力・ガス・石油・原子力)」、「官公庁/公的機関」、「建築/土木」でした。主な職種は、「研究/開発」、主な職



種は、「研究/開発」でした。セミナー後のアンケートは、22 名からご回答いただき、満足度の平均値は 10 点満点中 8.1 と高評価でした。また、専門外ではあるが興味をもって申し込まれた方が多かった印象で「民間企業のエンジニアが陥りがちな目先の話ではなく、とても長い時間軸、未来に対しての CAE の取り組みに興味を持った」等、満足度の高い講演であったことがうかがえるご感想をいただきました。

公開資料

ご講演の YouTube 動画は、右の QR コードからご覧いただくことができます。



ご講演の資料は、右の QR コードの「資料をダウンロードする」からログイン後、ダウンロードすることができます。ログインアカウントをお持ちでない方は、「資料をダウンロードする」から新規メンバー登録後、ログインしてダウンロードすることができます。



右の QR コードから過去のアドバンス・シミュレーション・セミナーの YouTube 動画をご覧いただくことができます。



2024 年度に開催したセミナーの各記事の一つにまとめて、24 ページの冊子として発行いたしました。全 10 回分の記事を一度にご覧いただけますので、ぜひお手元にてご一読いただけますと幸いです。



2025 年度の開催日程

アドバンス・シミュレーション・セミナー

2025 の開催要領

<https://www.advancesoft.jp/seminar/33224/>



No.	日程 受付状況	内容	テーマ
第 1 回	5 月 30 日 (金) 終了	「太陽内部の磁気乱流シミュレーション」 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 教授 堀田 英之 様	磁気流体力学 ・ HPC
第 2 回	6 月 13 日 (金) 終了	「流体乱流における同期現象とデータ駆動型手法」 東京理科大学 理学部 第一部 応用数学科 准教授 犬伏 正信 様	データ同化、 機械学習
第 3 回	7 月 18 日 (金) 終了	「火災・爆発災害のリスク低減への燃焼研究の応用」 東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 土橋 律 様	火災・爆発 災害現象
第 4 回	8 月 1 日 (金) 終了	「AI 新時代を切り拓く政府の次世代 HPC 戦略の展望」 文部科学省 研究振興局 参事官 (情報担当) 付 計算科学技術推進室 室長 栗原 潔 様	政府の 科学技術政策
第 5 回	9 月 12 日 (金) 終了	「量子技術を応用した次世代流体解析基盤の確立に向けて」 九州大学 工学研究院 航空宇宙工学部門 准教授 久谷 雄一 様	流体工学、 量子演算
第 6 回	10 月 17 日 (金) 終了	「火災・爆発現象のモデリングおよび早期異常検知」 東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 桑名 一徳 様	火災科学、 燃焼理論
第 7 回	11 月 7 日 (金) 終了	「AI とシミュレーションが駆動する創薬分子設計」 東京科学大学 情報理工学院 情報工学系 准教授 大上 雅史 様	AI 創薬
第 8 回	11 月 28 日 (金) 終了	「原子力から考える汎用解析コードの役割と可能性」 早稲田大学 理工学術院 先進理工学研究科 共同原子力専攻 教授 山路 哲史 様	総合理工学
第 9 回	12 月 19 日 (金) 終了	「『計算・データ・学習』融合と富岳 NEXT、その先にあるもの」 東京大学 情報基盤センター スーパーコンピューティング部門 教授 中島 研吾 様	計算科学・ 計算機科学
第 10 回	2026 年 1 月 23 日 (金) 終了	「地層処分の安全評価におけるシミュレーションの活用と展望」 原子力発電環境整備機構 技術部 性能評価技術グループ グループマネージャー 石田 圭輔 様	地層処分

アドバンス・シミュレーション・セミナー2026 第 1 回 4 月 17 日 (金) 開催いたします。
ホームページより、お申込みください。引き続きよろしくお願いたします。

【お問い合わせ先】

アドバンスソフト株式会社 出版事業部
〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目 3 番地 新お茶の水ビルディング 17 階西
E-mail : office@advancesoft.jp <https://www.advancesoft.jp/>



当社では随時人材の募集も行っております。
<https://www.advancesoft.jp/recruit/>



Copyright © 2026 AdvanceSoft Corporation. All right reserved.