

東海大学
国際原子力研究所

2025年度 所報

2026年 9 月30 日

目次

巻頭言 国内外における原子力平和利用とAI利用の爆発的展開に備えて	1
近藤 駿介	
原子力ガバナンスの歴史を踏まえたAIガバナンスのあり方	2
近藤 駿介	
ナトリウム冷却高速炉における炉心熔融物質の冷却挙動解析 ー融体ジェットによる構造材の熔融浸食試験の解析ー	4
堺 公明	
島嶼域における地層処分を想定した地下水流動評価	6
若杉 圭一郎	
電子飛跡検出型コンプトンカメラによるテクネチウム同位体の生体撮像実験および3号機開発	8
櫛田 淳子，姚 屹	
PWRプラントの2次冷却系除熱機能停止時および全交流動力電源停止時の解析と対策	12
吉村 紘一，亀山 高範	

東海大学国際原子力研究所 所報URL

<https://www.u-tokai.ac.jp/education-research/research-centers/global-research-institute-of-nuclear-energy/kiyou/>

巻頭言 国内外における原子力平和利用と AI 利用の爆発的展開に備えて

国際原子力研究所 所長 近藤 駿介

本研究所は、本学が建学の基盤の1つである原子力の平和利用の理念に基づいて、60年以上にわたって展開してきた原子力・放射線分野の教育・研究の伝統と成果を引き継ぎ、さらなる研究の発展を通じて高度な専門性を持った人材を育成していくことを目指して活動している教職員の組織です。ここに発足6年目の活動を紹介する所報第6号を発刊するにあたり、日頃お力添えをいただいている関係各位にあらためて感謝申し上げます。

さて、ロシアによるウクライナ侵略や中東情勢の緊迫化によりエネルギー安全保障に関する関心が高まったことや、クリーンエネルギーの利用拡大を図るグリーントランスフォーメーション(GX)に加えてデジタルトランスフォーメーション(DX)の進展が急速に顕在化し、これまで減少傾向にあった電力需要が増加に転じることが予想されるに至ったことを踏まえて、2025年2月に閣議決定された第7次エネルギー基本計画に基づき、DXやGXの進展が求める脱炭素電源の確保のため、2025年度に日本政府は再生可能エネルギー電源と原子力発電を最大限活用する取り組みを開始しました。

原子力発電に関しては、その最大限の活用に資する技術開発、事業環境整備、教育・人材育成などの産・官・学の活動を強化する施策が企画・推進されています。私も原子力教育・研究に携わる者は、2011年に発生した福島第一原子力発電所事故の結果、今なお故郷に帰還できない人が多数おられることを片時も忘れることなく、また、各種の世論調査にも明らかなように、原子力や放射線に対して漠然と不安を感じておられる人が少なくないことを謙虚に受け止めた上で、原子力発電に関わる取り組みに対する国民の信頼回復に取り組み、こうした施策の推進を担う人材を育成しなければなりません。このためには、福島事故の教訓を絶えず学び直し、学んだ教訓を確実に実行できるように、倫理観と社会的責任を内在化した判断力を涵養し、自己満足や集団思考に陥らないよう警戒しつつ、終わりのなき安全向上を目指す「継続的改善」の哲学を身につけた原子力人材を育成することが肝要です。本研究所に集う教職員は教育の場において、こうした社会的責任を果たせる倫理・社会的責任・対話力の涵養に力を注いでいます。

他方、目を国際社会に転じれば、そこでは1950年代の平和のための原子力(Atoms for Peace)時代以来、最も活発な原子力エネルギーへの関心の復活が見られます。これはエネルギー安全保障、環境目標及び経済発展に関する緊急のニーズによって促されているのですが、重要なのは、この復活が幅広い国、技術、関係者を巻き込んでいることです。個人的な経験でも先日、アフリカのガーナ共和国の政府関係者が私を訪れ、同国が増大する電力需要に対処するために原子力発電を導入したいこと、そしてこの取り組みに日本の経験と知恵を活用させていただきたいとの要請を受けました。これに対して私は、状況など、原子力発電を安全かつ持続可能にするには資金調達、労働力育成、サプライチェーンの準備が必須であり、日本政府はそれらの準備を支援する仕組みを整備しているので、支援が可能になるようできる限り力添えしたいと伝えました。これには国内の大学も重要な寄与をなすことができると考えています。

もうひとつ、私はこのところ、わずか数年で世界中に爆発的に広まった生成AIが大学に何をもちたらし、何を突きつけるのかについて思い巡らしています。このAIの爆発的展開は、人類が20世紀半ばに遭遇した「原子力エネルギー」の解放に匹敵する、あるいはそれを凌駕するインパクトを人類社会に与えるであろうと考えるからです。

1953年 米国のアイゼンハワー大統領が国連総会で行った「アトムズ・フォー・ピース(Atoms for Peace)」演説は、核の恐怖を平和利用へと反転させることを呼びかけたものです。これを契機に、国際原子力機関

(IAEA)が設立され、IAEAは放射線安全や原子炉安全に係る国際的な安全基準の策定、核物質や原子力施設の防護、すなわち、テロリストなどの非国家主体への技術・物質の流出阻止の仕組みの整備、そして核不拡散条約(NPT)体制という国際規制秩序を立ち上げる起点となりました。このことを想起しますと、我々原子力関係者には、原子力分野における「安全(Safety)」、「セキュリティ(Security)」、「不拡散(Non-Proliferation)」の確保に向けた制度整備の歴史と経験を踏まえて、生成AI技術が孕む国際平和へのリスクとその管理のあり方について考究・提案する責任があると考えます。

国内の大学も世界の有力大学と連携し、学術利用におけるAIの安全性、透明性、データ倫理の基準を策定・相互査察する仕組みや、AIへの過度な依存による人間の思考力低下(知の空洞化)をリスクと捉え、基礎的な批判的思考力を守るための制限と、AIを正しく使いこなすための高度教育を両立させることに取り組むべきです。生物兵器、サイバー攻撃、自律型兵器に転用可能なAIモデルの研究開発に対し、原子力技術と同等の厳格な輸出管理やアクセス制限(セキュリティ・クリアランス)を機能させる一方、民間の巨大IT企業による富と技術の独占(AIナショナリズム・モノポリー)に対し、各大学がパブリックセクターとして安全で偏りのない「公共AI基盤」を国際協調で開発・維持することに知恵を尽くすべきでしょう。

本所報は、本学においてこのような「福島」の記憶と「DXの未来」を架橋する教育・研究を通じて、時代の求める人材の育成に努めている所員の取り組みの成果の一端を紹介しています。お読みいただき、その内容等についてご意見、ご教示をいただければ幸いです。

(2026年6月16日記)

原子力ガバナンスの歴史を踏まえた AI ガバナンスのあり方

国際原子力研究所 近藤 駿介

1. はじめに

人類は今、20 世紀半ばに遭遇した「核分裂の連鎖反応の制御」に匹敵する、あるいはそれを凌駕するインパクトのある汎用技術：人工知能(AI)、とりわけ汎用人工知能(AGI)の威力に驚愕し、人類は危機に直面しているとする発言が各方面からなされている。

例えば、米国工学アカデミーの James O. Ellis Jr 議長は、「人工知能の未来を設計する：人類全体にその可能性を引き出すために」と題する論考で、AI の可能性を語る一方で、それを実現するには、深刻な技術的、倫理的、ガバナンスの課題に技術者と政策立案者が協力して取り組まなければならないとしている¹⁾。

日本学術会議は 2025 年 2 月に提言「生成 AI を受容・活用する社会の実現に向けて」を公表し、技術の急速な進展がもたらす社会的・倫理的リスクへの包括的な洞察を示した²⁾。また、日本工学アカデミー (EAJ) においても、「先進 AI の社会実装とリスクマネジメントに関する調査研究」などのプロジェクトを通じて、技術倫理と社会実装のあり方を多角的に問い直すシンポジウムを継続的に開催している³⁾。

一方、OpenAI の CEO であるサム・アルトマン氏と「AI の安全性に対する考え方の違い」で対立したアモデイ姉弟によって 2021 年に設立された Anthropic (アンソロピック) 社は、「一定以上の計算量 (10^{25} FLOPs 超) を持つ AI モデルには、政府が社会全体に回復困難な被害をもたらす危険な展開を差し止める権限を持つべき」として Anthropic's Advanced AI Framework (AI 規制案) を提言した⁴⁾。こうした動きは、かつて、原子爆弾の開発を成し遂げたマンハッタン計画に参加した科学者たちが、核兵器の破壊力に直面して「憂慮する科学者同盟 (UCS)」を結成し、『原子力科学者会報 (Bulletin of the Atomic Scientists)』誌を創刊し、表紙に「世界終末時計」を掲げ、人類に核兵器が使用される可能性の警告を発し続けていることを想起させる⁵⁾。

勿論、フロンティア AI 企業のトップ自らも、技術がもたらす破壊的リスクを認め、開発の「一時抑制」や規制の必要性を公に提唱する事態も起きている⁶⁾。また、こうした「民間の内部動揺」と並行して、技術を既存の枠組みの中に封じ込めようとする動きもある。欧州議会が制定した包括的な「EU AI 法」は、その先駆的な例である⁷⁾。

原子力分野においては早い段階から AI 技術の応用に対する関心が高く、それに応えて 2024 年だけでもカナダの CNSC、米国の NRC、英国の ONR が共同して AI 利用に関する原則を CANUKUS Paper に⁸⁾、IAEA が「原子力産業における AI 応用の展開」と題する原子力技術報告 NR-T-1.26 を⁹⁾、我が国の原子力規制庁が「原子力分野における人工知能の動向に係る調査報告」と題する NRA 技術ノート NTEN-2024-1002 を¹⁰⁾、それぞれ公表している。

また、IAEA が 2025 年末に開催した AI と原子力に関する国際シンポジウムでは¹¹⁾、これをこのテーマに関する会合の始まりであるとし、早速、「安全・セキュリティ・保障措置と両立する AI 利用の拡大」と題するパネル討論が行われ、AI を単一の技術と捉えるべきではないとして、安全重要度に応じたリスクベースの AI 利用フレームワーク；具体的には、安全性に関わる機能には決定論的 AI

に限って利用すること、運用最適化のためには制約付き確率的 AI を強力なガードレールの下で利用すること、そして生成 AI はドキュメント、トレーニング、分析のサポートといったリスクの低い分野に限定して利用すべきとした。また、規制当局と事業者の間で AI リテラシーを同期させ、IAEA を中立な検証の場として活用することが提言された。こうした動きは、AI を一つの革新技術とみなして、その管理に関するリーダーシップをめぐる競争と協調の様相を示しつつ、今後とも一層加速していくと思われる。

しかし、著者はこうした局所的な議論と取り組みで人類が AI 技術を管理できると考えるのはあまりに楽観的に過ぎるのではないかと、そうではなく、この技術を第二の原子力技術と捉え、原子力の脅威に対処する国際的取り組みを生み出す契機になった 1953 年に米国のアイゼンハワー大統領が国連総会で行った Atoms for Peace 演説¹²⁾に匹敵する AI for Peace 演説が発出されるべきではないかと考え、そこに織り込むべき内容の検討を始めた。本文では、その作業の一端として、原子力分野における安全、セキュリティ、不拡散の確保に向けた国際的取り組みの歴史を補助線として、現代の AI 技術が孕む国際平和へのリスクの管理のあり方について考究した。

2. AI がもたらす三つの国際平和リスク

原子力が内包し、その管理に国際的な努力が払われてきているリスクの三層構造は、そのまま現代の AI 技術がもたらすリスクプロファイルとすることができる。

第一に、安全リスクである。原子力の黎明期、その利用に伴う過酷事故や放射性物質漏洩は人類に対する脅威になることが認識された。AI における安全リスクとは、システムのアライメント (制御・調整) の失敗である。自律性を高めた AI システムが開発者の意図を離れて暴走し、重要インフラを麻痺させる、あるいは不可逆的な社会混乱を引き起こすリスクは、原子炉事故がもたらす国境を超える環境汚染と同質の恐怖を内包している。

第二に、セキュリティリスクである。核物質や原子力施設の防護、すなわち技術・物質の非国家主体への流出阻止は、国際社会の至上命題である。AI 技術においても、サイバー攻撃の自動化、ディープフェイクによる認知戦、生物兵器の設計支援 (バイオ AI) など、悪意あるアクターによる悪用のリスクが爆発的に高まっている。技術の民生化が進む現代において、そこに発生する「セキュリティの空白」は原子力以上に深刻である。

第三に、拡散リスクである。原子力は平和利用と軍事利用が表裏一体をなすデュアルユース性を有するが、AI もまた、自律型致死兵器システムや戦略的意思決定の自動化といった、軍事バランスを根本から覆す破壊力を持つ軍事利用、一部の国家や巨大企業によるそうした技術の独占、あるいはそれを追求する国家間での AI 軍拡競争といった、冷戦期の核軍拡の構図と重なり合うリスクを持つ。

3. IAEA モデルの応用と限界

IAEA 保障措置は、原子力が平和的利用から核兵器製

造等の軍事的目的に転用されないことを確保することを目的として、IAEA が憲章に基づき当該国の原子力活動について実施する査察を含む検認制度である。保障措置の協定を締結することで、IAEA の加盟国は、原子力の平和利用の権利と引き換えに、国家主権の一部を譲り渡して国際査察を受け入れるという極めて大胆な妥協を行っている。AI 国際管理を構想する上で、このスキームは大きな示唆を与える。

1) 「機微リソース」の管理

原子力規制はウランや遠心分離機といった「物理的物質・技術」のトラッキングで機能した。AI においては、数万枚規模の最先端 GPU (半導体) や大規模データセンターという「計算資源」、そして基盤モデルの「重み (ウェイト)」情報がこれに相当する。これらを「機微な国家資源」と位置づけ、サプライチェーンの監視と登記制度を設けることは、核物質管理の現代的変容と言える。

2) 「相互査察」の精神の継承

IAEA による現地査察のアナロジーとして、先端 AI 開発のフロンティアに対し、アルゴリズムの透明性や安全性テストの実施状況を第三者が検証する「国際 AI 監査・査察体制」の構築が要請される。

3) 「推進と規制」のガバナンス分離

技術の「推進」と「規制」を同一の文脈で語ってはならない。AI の優位性を競う国家の枠組みとは完全に独立した、地球規模の安全性を担保するための「国際 AI 平和機関 (仮称)」の創設が不可欠である。

しかし、AI は原子力とは異なる決定的な差異を持つ。それは、技術の主体が「国家」ではなく、莫大な資本を持つ「民間」である点、そしてコード (ソフトウェア) の拡散は一瞬で完了するという点である。それゆえに今、冒頭に紹介したようなアライメントの崩壊を危惧する人々の動きが急なのである。

国内の原子力政策において、かつて日本のアカデミアが「自主・民主・公開」の原子力三原則を打ち立て、国際秩序と国内ガバナンスの調和に苦闘した歴史を思い起こすべきである。日本のアカデミアに今求められているのは、単なるリスクの受動的な分析ではない。欧米主導のトップダウン的な規制 (EUAI 法など) と、果てなきイノベーション競争の狭間で、いかんにして「安全性の担保」と「人類の技術的発展」のダイナミックな均衡点を見出すかという、具体的な国際制度設計のグランドデザインを提示することだ。

日本学術会議や日本工学アカデミーは、その高度な専門性と独立性を活かし、国境や官民の壁を越えた「対話の触媒 (カタリスト)」として、グローバルな AI ガバナンス構築に向けた主導的役割を果たすべきである。科学者・技術者の社会的責任の系譜を継ぐものとして、その真価が今まさに試されている。

最近、日本電気学会会長に就任した岡本は近著の論説で「AI 時代において人間社会の主権をどう守るか」という問題を電力インフラの視点から大胆に論じ、「電力会社こそが AI 文明の最後の制御点を握る」という問題提起を行ったが¹³⁾、この取り組みのヒントになり得ると考え、紹介する。

4. 結論

欧州の動きや国内アカデミアの提言をはじめ、国際社会はすでに AI を「高度に政治的な対象」として扱い、枠組みの中に捉えようと躍起になっている。そこで、本論で

は、原子力という「絶対的な力」を前に人類が主権の壁を越えて知恵を絞った歴史的経緯を参考に、一つのリスク管理システムの構想を示した。だが、どのようなリスク管理が本当に機能するのか、その決定的な「正解」はまだ誰の目の前にも提示されていない。一国・一地域の法規制や、20 世紀型の硬直的な国際条約によって AI を「封じ込める」ことは、果たして可能なのだろうか。物理的実体を持たないソフトウェアを 20 世紀型の枠組みで縛ることは技術的に極めて困難であり、放任と封じ込めの二元論ではこの流動的な技術を捉えきれないという批判を受けることは目に見えている。

技術が急速に進展している今、我々に求められているのは、リスク管理制度の完成ではなく、この技術の暴走を抑止しつつ、その恩恵を人類の共有財産として最大化するために、我々はどのような対話のテーブルを設けるべきかと問い続けることなのかもしれない。いずれにしても、この 21 世紀の難問に対し、国家、民間、そしてアカデミアの枠を超え、最新の動向に絶えず注目しながら、社会と問題意識を共有し、きちんと検討を重ねていくことこそが、今を生きる我々に課された歴史的責任であろう。

(2026 年 8 月 8 日 記)

参考文献

- 1) Julius James O. Ellis Jr., "Engineering the Future of Artificial Intelligence: Delivering on Its Potential for All Mankind", The Bridge, Vol. 56, No. 1, National Academy of Engineering, 2026.
- 2) 日本学術会議、提言「生成 AI を受容・活用する社会の実現に向けて」、2025.
- 3) 日本工学アカデミー、「生成 AI をはじめとした AI による社会変容とリスクマネジメントに関する調査研究」成果報告書、2025.
- 4) Anthropic | Policy on the AI Exponential.
- 5) <https://www.ucs.org/> (Union of Concerned Scientists: UCS) 設立宣言、1969 及び <https://thebulletin.org> Bulletin of the Atomic Scientists.
- 6) <https://openai.com/ja-JP/index/our-principles/>.
- 7) 欧州連合 (EU)、「AI 法 (AI Act)」最終合意条文および欧州議会成果文書.
- 8) CANUKUS_trilateral_AI_principles_paper_2024_08_28-final.pdf.
- 9) IAEA Nuclear Energy Series No. NR-T-1.26, "Considerations for Deploying Artificial Intelligence Applications in the Nuclear Power Industry," 2025.
- 10) 原子力規制庁長官官房技術グループ、「原子力分野における人工知能の動向に係る調査報告」NAR 技術ノート NTEN-2024-1002, 2024.
- 11) IAEA International Symposium on Artificial Intelligence and Nuclear Energy 3-4, December 2025, Vienna Austria (Draft Summary).
- 12) 国際原子力機関 (IAEA) 憲章および核不拡散条約 (NPT) 体制関連史料 アイゼンハワー大統領 国連総会演説 "Atoms for Peace," 1953 年 12 月 8 日.
- 13) Hiroshi Okamoto, "Sovereignty by Design - Part 1: The Feeder Sovereignty," ELECTRA No. 345 -, April 2026.

ナトリウム冷却高速炉における炉心溶融物質の冷却挙動解析 —融体ジェットによる構造材の溶融浸食試験の解析—

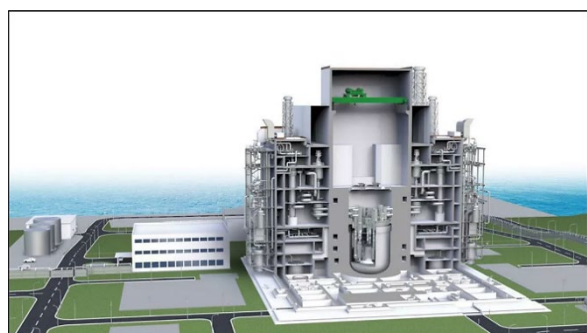
工学部機械工学科 堺 公明

1. はじめに

ナトリウム冷却高速炉¹⁾ (図1) の日本における実証炉の概念設計が開始されている。高速炉において炉心崩壊事故を想定した場合、炉心溶融物質(以下、融体)は、溶融燃料流出管(CMR-D)を通じて炉心下部へ流下し、水平構造物に接触するなどのプロセス後、液体ナトリウム中でフラグメンテーションを発生して微粒化・固化し、その後、炉内に設置されたコアキャッチャーに堆積することが想定される²⁾。

一方、融体のジェットがフラグメンテーションを生じる前に水平構造物に直接衝突する場合(図2)、融体は水平構造物を溶融浸食する可能性があり、融体の流下プロセスを複雑化する結果となる。この現象は炉心損傷の現象が原子炉容器内に留まること、すなわち、「炉容器内終息」を確認するために解明すべき重要な現象であり、日本原子力研究開発機構(JAEA)では高温融体ジェットによる構造材の溶融浸食挙動に関する試験³⁾が実施されている。

本研究では解析コード SIMMER-III で融体ジェットが水平平板へ直接衝突する現象に関する解析を実施し、溶融浸食挙動に対する解析手法の適用性を確認する。



(本図は、経済産業省からの受託事業である「高速炉の国際協力等に関する技術開発」の成果を含みます)

図1 ナトリウム冷却高速炉実証炉¹⁾。

<https://x.gd/XluKc>

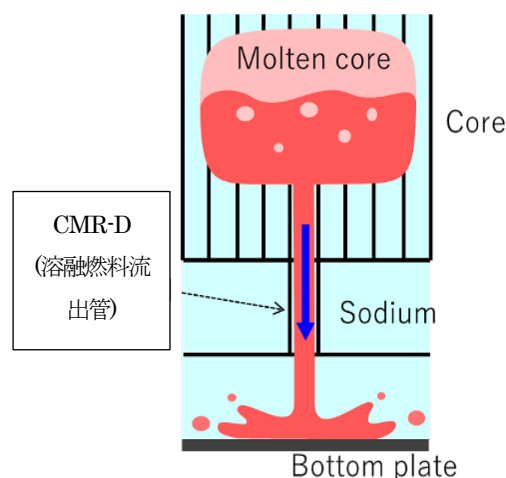


図2 炉心損傷時における溶融炉心物質の移動。
(CMR-D: Controlled Material Relocation Duct).

2. 研究の概要

本研究で解析に使用する SIMMER-III は、固・気・液の各相の速度を考慮した多相流、冷却材である液体金属ナトリウム及び溶融炉心物質の各成分を考慮した多成分、核反応物質の空間依存の核計算モデル等によって特徴づけられるマルチフィジクスコードであり、JAEA が国際協力を進めながら主体的に当コードの開発を実施している⁴⁾。

解析対象とする試験⁵⁾では融体として金属(SUS316)と酸化物(Al_2O_3)及び塩化ナトリウム、水平構造材に SUS316 及びスズを使用し、アルゴンガス雰囲気中に融体をジェット状に落下させ水平構造物に衝突させる。ノズル径、融体ジェット流速、温度、及び、水平構造物の厚みをパラメータとし、溶融貫通するまでの時間が測定されている。解析では図3のような2次元 X-Z 解析体系を構築し、試験と同じ温度条件ならびに融体を一定流速で注入し続ける速度境界条件にて解析を行い、平板が溶融により減肉して貫通するまでの時間を評価する。

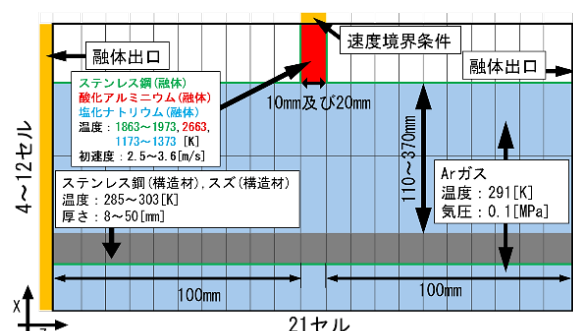


図3 解析体系 (SIMMER).

3. 解析結果

解析結果の例として、図4に SUS316 融体について、ノズル径、融体ジェット流速、温度、水平構造物の厚み等の各パラメータの異なる試験条件での SUS316 平板に対する溶融浸食速度の評価結果を示す。溶融浸食速度 0mm/s まで外挿した温度は、SUS316 の融点(1700K)近傍であり、融点近傍で溶融浸食が減速する物理的な現象理解と一致する。また、融体温度の上昇に比例して水平平板を溶融浸食する速度が大きくなる傾向を解析でも明確に再現している。

また、現在、実証炉の設計において、酸化物燃料と金属燃料の多角的な比較評価が行われている⁶⁾。炉心損傷評価は燃料タイプの影響について確認しておくべき重要な事項であることから、本学では溶融貫通に関する現象的な分析を実施することとした。図5に金属融体(SUS316)と酸化物融体(Al_2O_3)の解析から得られた時間変化に伴う平板厚の比較を示す。金属融体 SUS316 を使用した試験解析では、平板が直線的に減肉しているのに対して、酸化物融体 Al_2O_3 を使用した試験解析では、衝突初期に平板表面に酸化物の固化した被膜のクラスト層が形成され

た。クラスト層は融点が高く、熱伝導率も低いいため、クラスト層が存在する間はその下の平板は減肉し難く、クラスト層が十分昇温・溶融して消滅した後に、平板が減肉する浸食挙動メカニズムが判明した。

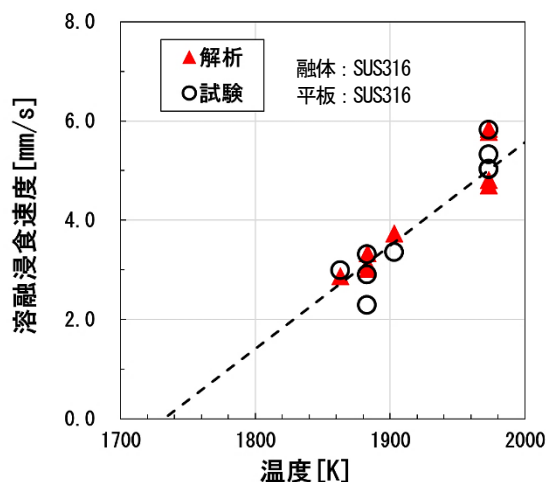
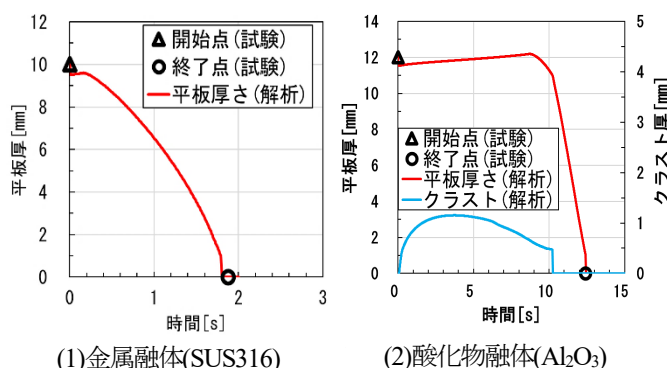


図4 溶融浸食速度の試験と解析の比較。



(1)金属融体(SUS316) (2)酸化物融体(Al_2O_3)

図5 時間変化に伴う平板の溶融浸食挙動。

4. まとめ (謝辞, 所感)

本研究は、JAEA と東海大学の共同研究契約に基づき、解析コードの貸与と試験情報の開示を受けて実施した。関係者のご助力に感謝する。また、従来より、水プールへの融体流出試験に関する解析を東海大学にて実施し⁶⁾、2024 年 10 月には日韓の原子力熱流動と安全専門家会議の若手セミナーにて本成果について発表講演^{7,8)}を実施した。今後、これらの知見に基づき、高速炉の炉心損傷評価手法開発が進展することを期待したい。

参考文献

- 1) 三菱重工 HP, 高速炉, <https://x.gd/XluKc> (2026.6 参照).
- 2) Y. Onoda, et al., “Demonstration SFR Conceptual Design Project in Japan (5) Safety Design Policy,” FR26 (International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles), 18–21 May 2026, Beijing, People's Republic of China, FR-26-330, 2026.
- 3) 佐藤浩司, 他, 動燃技報 No.78, 1991.
- 4) TOBITA, Y., et al., “The Development of SIMMER-III, An Advanced Computer Program for LMFR Safety Analysis and its Application to Sodium Experiments,” Nuclear Technology, Vol. 153, No. 3, pp. 245-255, 2006.
- 5) S. OHKI, et al., ““Demonstration SFR Conceptual Design Project in Japan(2) Status of core design,” 18–21 May 2026, Beijing, People's Republic of China, FR-26-241, 2026.
- 6) Hatsuki Matsushita, Ren Kobayashi, Takaaki Sakai, “Analysis on cooling behavior for simulated molten core material impinging to a horizontal plate in a sodium pool,” Proc. of 13th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-13), Hsinchu, Taiwan, Sept. 5-10, 2022.
- 7) Ren Kobayashi, Wahei Kaneko, Takaaki Sakai, “Study on Relocation Behavior of Molten Core Materials during Core Disruptive Accidents in a Sodium-cooled Fast Reactor (1) Evaluation of thermal effects of molten core materials impinging on horizontal flat plates in sodium,” The 13th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS-13) for Students and Young Researchers seminar, Seoul, Korea, Nov. 8–10, 2024.
- 8) Wahei Kaneko, Ren Kobayashi, Takaaki Sakai, “Study on Relocation Behavior of Molten Core Materials during Core Disruptive Accidents in a Sodium-cooled Fast Reactor (2) Analysis on plate penetration experiments by simulated molten core material jets,” NTHAS-13 for Students and Young Researchers seminar, Seoul, Korea, Nov. 8–10, 2024.

1. はじめに

原子力エネルギーは、気候変動や異常気象の原因とされる温室効果ガスの排出量の削減に貢献し、脱炭素社会の実現に不可欠なエネルギー源である。この原子力エネルギーを持続的に利用していくためには放射性廃棄物の問題を解決する必要がある。国際原子力研究所では、環境負荷低減や持続可能なエネルギー開発を目的とした放射性廃棄物の処分技術の研究開発を進めている。なかでも、放射能レベルが高く長期間にわたり影響を及ぼす「高レベル放射性廃棄物」については、安全な地層処分を実現するための技術基盤を整備しておくことが、原子力利用において重要な鍵となっている¹⁾。また、地層処分の安全評価では、数十万年に及ぶ長期的な評価期間を対象とするため、地質環境の将来的な変動を適切に考慮することが求められる²⁾。

島嶼域は沿岸部の特性を有し、塩水域において動水勾配が小さいことから地下水の流れが緩慢であり、核種移行の遅延が期待できる。また、放射性廃棄物の輸送面においても好ましい条件を備えている。さらに、島嶼域は地理的・環境的に隔離された場所が多く、人間活動の影響を比較的受けにくいことから、社会的観点からも地層処分に適した条件を備えている可能性がある。一方、島嶼域には、海水系（塩水）と降水系（淡水）の密度差によって形成されるレンズ状の塩淡水境界が存在し、その周辺では密度差に起因する地下水流動（密度流）が生じる（図1）。さらに、長期的な海面水位の変動（海水準変動）により地下水環境が時間的に変化することも、核種移行評価において無視できない要因となる。加えて、2026年3月3日に国（政府）が南鳥島を対象とした地層処分の文献調査実施の申し入れを東京都小笠原村に行ったことから、島嶼域における地層処分は今後の最終処分地の選定における重要な選択肢の一つになると考えられる。そこで本研究では、島嶼域を地層処分の立地候補として想定し、海水準変動を考慮した密度流解析および粒子追跡解析を実施することにより、島嶼域特有の地下水流動特性が核種移行経路に及ぼす影響を明らかにし、島嶼域における地層処分の成立性を評価することを目的とした。

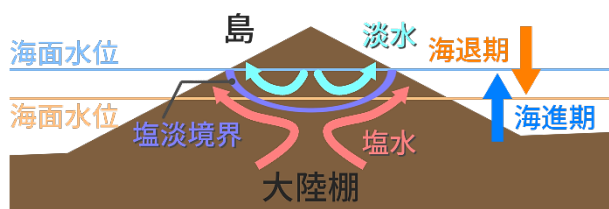


図1 島嶼域における地下水流動の概念図。

2. 島嶼域を対象とした水理地質モデル

本解析では、大陸棚上に島嶼が存在するケースを想定し、陸域10 km・大陸棚40 km から構成される鉛直次元の水理地質モデル³⁾（図2）を作成した。本モデルは、全体が均質な透水性を有する単一の岩種で構成されている。解析には、二次元飽和・不飽和移流分散解析プログラ

ムである Dtransu-2D・EL⁴⁾ を用い、密度流解析を実施した。まず、初期条件の設定を目的として、海面水位の時間変化を考慮しない定常解析を行った。この際、境界条件として、陸域には我が国の平均的な涵養量である400 mm/yrの降水境界を設定し、海域側の大陸棚には塩分密度を考慮した圧力水頭固定境界を適用した。これにより、塩分濃度分布および全水頭分布を求めた。次に、海水準変動を考慮した解析では、モデル上部全域に水頭変化境界と降水境界を設定した。また、モデルの側面および底面には不透水境界を設定した。以上の解析条件に基づき、海水準変動による海退を7万年、海進を2万年の周期とする海水準変動を仮定し、27万年間の解析を実施した。なお、島嶼の形状は円錐形に単純化し、その大きさは科学的特性マップで適性が確認された汀線より300 km以内の島嶼の平均値に基づき設定した。また、大陸棚における島嶼の位置は、陸域地下水の影響の有無を比較するため、評価開始時における汀線の位置から25 kmのケースと15 kmのケースを設定し、陸域から海に浸透する淡水が島嶼周辺の地下水流動にどのような影響を及ぼすのかを、それぞれのケースについて検討した。得られた地下水流動解析の結果に基づき、島嶼の右側8.5 km・中央・左側8.5 kmの3地点に、海拔-1 kmの深度に長さ3 kmの仮想の処分場を配置し（3種類の配置を想定）、放射性核種の移行経路を把握するための粒子追跡解析を行った。

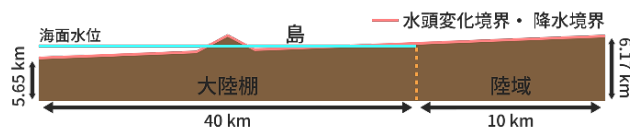


図2 本研究に用いた地下水流動モデル。

3. 海水準変動を考慮した地下水流動解析

2章に示した水理地質モデルを用いて、島嶼域への地層処分を想定した密度流解析および粒子追跡解析を実施した。図3に解析結果を示す。図中の流跡線は、処分場1、処分場2および処分場3から解析初期に粒子が放出されたと仮定し、地下水流動に伴う粒子の移行経路を示したものである。

まず、密度流解析の結果、島嶼位置が汀線から25 km離れたケースでは、陸域から供給される淡水の影響は島嶼部まで及ばず、島嶼内部に独立した淡水レンズが形成されることが確認された。一方、島嶼位置が汀線から15 km離れたケースでは、海水準変動に伴う海退期に陸域と島嶼が陸続きとなり、陸域から供給される淡水の影響を受けることで、島嶼周辺に広い汽水領域が形成されることが示された。

次に、粒子追跡解析の結果、島嶼位置の違いにかかわらず、淡水レンズ内に処分場が位置する場合（処分場2）には、塩水域と比較して地下水流速が1~2桁大きくなり、解析上のタイムステップである1000年以内に粒子が生活圏へ到達することが示された（水色矢印）。このため、淡水レンズ内では核種の移行経路が短時間で生活圏に接続する可能性があり、天然バリアによる移行遅延機能を期待することは困難であると考えられる。

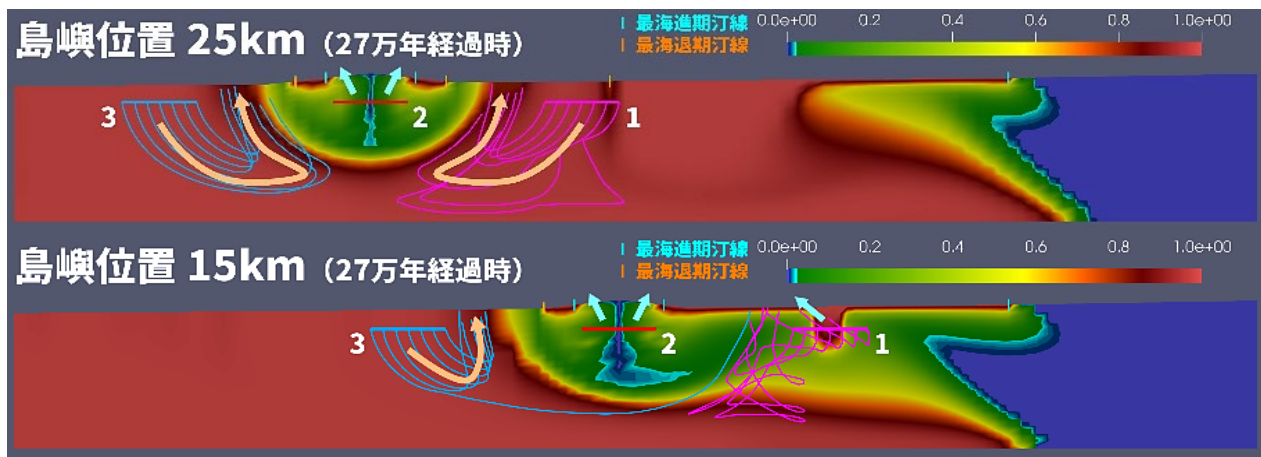


図3 島嶼を想定した密度流解析の結果と処分場からの流跡線（処分場1, 2, 3）.

一方、島嶼位置が汀線から 25 km 離れたケースでは、塩水域に位置する処分場 1 および処分場 3 において、移行遅延を考慮しない場合であっても、粒子が地下岩盤中を移行するのに数万年を要することが明らかとなった。これは、放出された粒子が島嶼内部に形成される塩淡境界の影響を受け、主として下降流に沿って深部へ移行した後、淡水レンズに沿って生活圏へ向かうためである（オレンジ色矢印）。したがって、塩水域に処分場を配置した場合には、密度流に伴う下降流および長い移行経路により、核種移行が遅延される可能性が示された。ただし、島嶼位置が汀線から 15 km 離れたケースでは、陸域から供給される淡水の影響により地下水流動場が変化し、処分場 1 のケースにおいては処分場周辺の粒子の移行経路が複雑化することが確認された。この場合、初期に処分場が海底下の塩水域に位置していたとしても、その後の海水準変動に伴う塩淡境界の移動により、粒子が上昇流に沿って移行し、比較的早期に生活圏へ到達する可能性が示唆された。

以上の結果から、島嶼域における核種移行挙動は、淡水レンズおよび塩淡境界の形成状況に大きく支配されることが明らかとなった。特に、淡水レンズ内や陸域からの淡水流動の影響を受ける領域では地下水流速が速く、天然バリアによる十分な核種移行遅延効果を期待することは困難である。一方、塩水域に処分場を配置した場合には、密度流に起因する下降流の影響により粒子が地下深部を移行するため、移行遅延を考慮しない場合であっても数万年規模の移行時間を確保できる可能性が示された。

ただし、陸域からの淡水流動の影響を受ける場合には、海水準変動に伴う塩淡境界の移動によって地下水流動場が大きく変化し、初期には塩水域に位置していた処分場であっても、粒子が上昇流に沿って早期に生活圏へ到達する可能性が示唆された。したがって、島嶼域における地層処分安全評価では、現在の地下水環境だけでなく、海水準変動に伴う塩淡境界の長期的な変遷を考慮するとともに、処分場を淡水レンズや汽水域から避けた塩水域に配置することが重要であると考えられる。

4. 業績

【学会等発表】

- [1] 野村真彬, 若杉圭一郎: 島嶼処分を想定した地下水流動特性の評価, 日本原子力学会バックエンド部会 第 41 回「バックエンド」夏期セミナー, TKP 名古屋栄カンファレンスセンター, 2025 年 8 月 28 日.
- [2] 野村真彬, 若杉圭一郎: 島嶼域における地層処分を想定した地下水流動特性の評価, 日本原子力学会 2025 年秋の大会, 北九州国際会議場, ポスターセッション, 2025 年 9 月 11 日.

参考文献

- 1) 原子力委員会: 原子力白書, 令和 4 年 7 月, 2023.
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁: 地層処分研究開発に関する全体計画, (令和 5 年度～令和 9 年度), 2023.
- 3) 産業総合技術研究所他: 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 平成 29 年 3 月, 2017.
- 4) 西垣誠他: 飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析的手法に関する研究, 土木学会論文集, No.511, III-30, p135-144, 1995.

電子飛跡検出型コンプトンカメラによるテクネチウム同位体の生体撮像実験および3号機開発

理学部物理学科 櫛田 淳子, 総合理工学研究科総合理工学専攻 姚 屹

1. はじめに

厚生労働省の「令和7(2025)年人口動態統計月報年計(概数)」によると、死因のトップは「悪性新生物(がん)」であり、23.9%を占めている¹⁾。がんの早期発見において重要な役割を果たす放射線診断装置として、現在、医療現場ではPET(Positron Emission Tomography)やSPECT(Single Photon Emission Computed Tomography)が使用されている。これらの装置では、体内に注入した放射線を放出する薬剤ががんに集積されることを利用し、それを目印として画像診断を行う。放射性薬剤の核種として ^{99m}Tc が最も多く、全体の約60%の割合で使用されている。しかし、 ^{99m}Tc の親核種である ^{99}Mo は、主に高濃縮ウランから原子炉で生成され、日本国内では核不拡散条約から製造することができず、全て海外からの輸入に頼っている²⁾。そのため、国際情勢や原子炉の老朽化に伴う停止により輸入ができなくなり、日本国内での薬剤の供給不足が課題になっている³⁾。

この問題を解消するため、東海大学医学部放射線治療科、日本原子力研究開発機構、金沢大学、京都薬科大学との共同研究で新たな薬剤および核医学診断装置の開発を行っている。日本原子力研究開発機構のタンデム加速器を利用してTc同位体(^{99m}Tc 等)を生成し、金沢大学と京都薬科大学にて小動物に薬剤の投与を行い、東海大学が中心となって開発している電子飛跡検出型コンプトンカメラ(Electron Tracking Compton Camera: ETCC)にて撮像し、医療現場での実用化を目指す。 ^{99m}Tc は国内の加速器にて生成可能であり、既存の薬剤である ^{99m}Tc の同位体であるため化学的性質がわかっており、医療現場での早期利用の可能性が高いが、放出するエネルギーが835 keVと高く、SPECTやPETでの撮像は不可能である。我々が開発しているETCCは検出可能エネルギー範囲が300~1800 keVであるため、幅広い放射性薬剤に対応可能である。今年度は、3台目のETCCの開発および2台のETCCを用いた ^{99m}Tc の生体撮像実験を行った。

2. テクネチウム同位体の生体撮像実験

ETCCの実用化に向けて、我々は ^{99m}Tc の同位体 ^{99m}Tc を用いた小動物の生体撮像実験を定期的に行っている。ここでは、2025年2月10日から2月22日にかけて金沢大学にて行った撮像実験の結果について報告する。

<概要>

使用する線源および薬剤の調製は、日本原子力研究開発機構(JAEA)のタンデム加速器施設にて製造され⁴⁾、化学分離精製を経て供給された。この溶液を用い、2つの標的を作成した。1つ目は位置分解能評価用のファントムとして、金リボンの表面に ^{99m}Tc 溶液を付着させた点線源(有効サイズ約5 mm)である。2つ目は生体投与用薬剤として、腎機能診断薬であるDTPA(ジエチレントリアミン五酢酸)と混合し、 ^{99m}Tc -DTPA標識化合物を合成した。撮影開始時の強度は評価用ファントムが1.32 MBq、ラットに投与した溶液は1 MBqである。ラットに薬剤投与後にCT撮影を行い、その後、約16時間にわたりETCCによる生体撮像を実施した。ETCC撮像後、ラットを解剖し、腎臓、肝臓、心臓、肺、脾臓、胃、小腸、大腸、

脳などの主要組織を摘出した。各臓器の放射能を、ガンマカウンターを用いて測定し、臓器ごとの薬剤集積量を定量的に評価した。 ^{99m}Tc のガンマ線エネルギーは主に204 keV, 582 keV, 835 keVである⁵⁾。

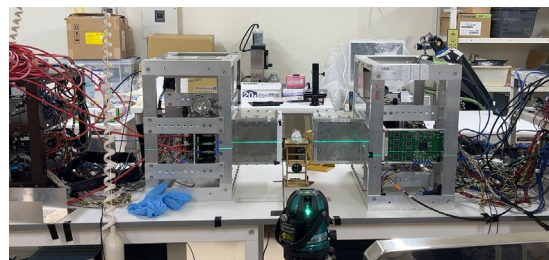


図1 撮像試験の様子(左:1号機, 右:2号機)。

<結果>

本項では、ファントム試験およびラットを用いた生体撮像実験によって得られたエネルギースペクトル、再構成画像、ならびに放射性薬剤の生体内集積分布の結果について詳述する。本研究における撮像実験では、ETCCの1号機および2号機を対向配置した構成を採用しているが(図1)、両者ではほぼ同様の結果が得られたため、ここでは代表して2号機の結果を報告する。

評価用ファントムとして用いる点線源のETCC撮像によって得られたエネルギースペクトルを図2に、再構成画像を図3に示す。

図2より582 keVのピークは理論値通りの位置に鋭く確認されたが、一方で、835 keVのピークに関しては、理論よりもわずかに低エネルギー側へシフトしている様子が確認された。これは、検出器を構成するシンチレータ発光量のわずかな非線形性、あるいは読み出し回路系における高エネルギー領域でのゲインの飽和傾向が影響していると推察される。

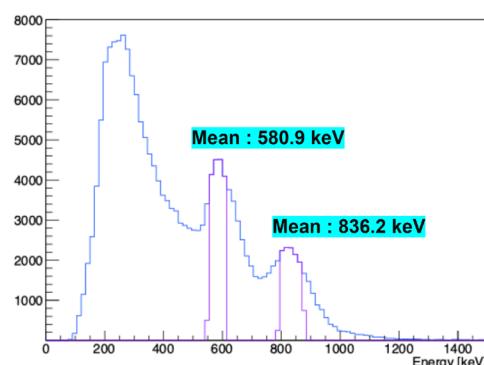


図2 ^{99m}Tc エネルギースペクトル (2号機)。

図3は、582 keVと835 keVの2つのエネルギー中心から $\pm 5\%$ 以内のイベントを選んで、記録されたエネルギーと飛跡からコンプトン散乱より元の位置を再構成した画像である。画像上、線源が設置された座標に単一の集積点が明瞭に描出された。この画像の中心を通るスライスプロファイルを作成し、ガウス関数フィッティングにより半値全幅(FWHM)を求めた結果、空間分解能はX射影およびY射影の平均で11.78 mmと求められた。これは

点源の分解能を示しており、伊勢原実験室で事前に測定していた ^{22}Na （エネルギー：511 keV）および ^{137}Cs （エネルギー：662 keV）と同等の結果となっている。他核種に対する空間分解能の詳細を[業績 1, 4, 9]にてまとめた。

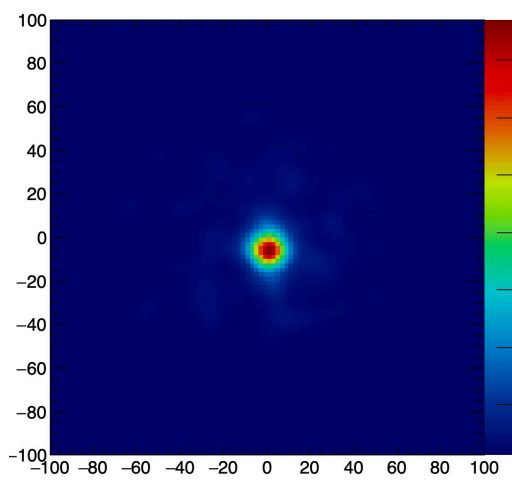


図3 評価用ファントム再構成画像（2号機）。

続いて、 $^{95\text{m}}\text{Tc-DTPA}$ を投与したラット生体撮像の結果について述べる。生体撮像時に取得されたエネルギースペクトルは、582 keV、835 keV にピークをもった。このエネルギー中心から $\pm 5\%$ 以内のイベントを選んだ再構成画像を図4に示す。

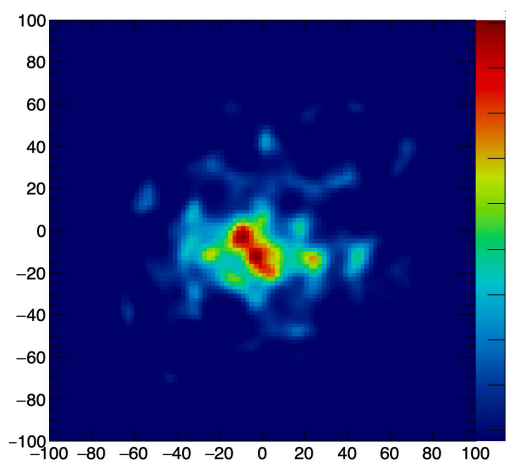


図4 ラットの再構成画像（2号機）。

本来、生体撮像は、ラットの体内（軟部組織や骨）およびアクリル固定台によって、放出されたガンマ線の散乱影響を受け、画像のコントラストを低下させる要因となる。しかし、ETCC の画像再構成においては、エネルギースペクトルから光電ピークのみを厳密にウィンドウで切り出すこと、およびイベント選別によって、散乱線の影響を効果的に低減した。体内散乱線の影響があるにも関わらず、再構成画像にはバックグラウンドノイズが少なく、上下につながった明瞭な集積領域が描出された。この集積の妥当性を検証するため、ラット X 線 CT 画像との重ね合わせを行った。CT 画像と ETCC 再構成画像との合成図を図5に示す。ここでの再構成画像は、FWHM に相当する領域を描写するために、最大カウント値の 50 % を閾値として設定し、それ以下のノイズ成分を除去した。また、臨床核医学検査における腫瘍体積描出で標

準的に用いられる閾値の基準（一般に 40 - 50 %）にも準拠し、検出器の空間分解能とターゲットの集積領域を可視化するために、閾値 50 % を採用した。その結果、ETCC 画像上の高集積部分は、CT 画像上で解剖学的に同定された左右の腎臓の位置と、二次元的によく一致した。これは、ETCC が生体内からのガンマ線を正しく捉え、その発生源の位置を正確に特定できていることを示している。

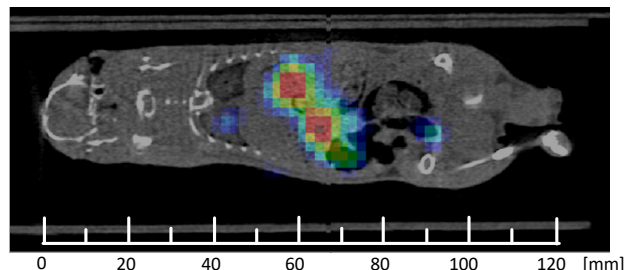


図5 CT 画像と ETCC 再構成画像との合成図。

ETCC 撮像試験の終了後に摘出臓器の放射能測定を行った。ガンマカウンターによる計測結果より、最も高い放射能強度を示したのは腎臓（Kidney）であり、 $^{95\text{m}}\text{Tc-DTPA}$ が意図通りに腎臓へ集積していることが確認された。一方で、肝臓や心臓、肺といった他の臓器においても、バックグラウンドレベルを超える一定のカウント数が観測された。この要因は、投与 30 分後の時点では薬剤が尿中へ完全に排泄されきっておらず、血流が豊富な心臓、肺、肝臓において、血中残留分が検出されたと考えられる。このことは、ETCC 画像において腎臓以外の領域にもうっすらと広がるバックグラウンド成分が見られることとも整合している。結果として、本研究で開発した ETCC システムは、従来の SPECT では困難な高エネルギーガンマ線放出核種に対しても高いイメージング性能を発揮し、生体内の薬剤分布を忠実に可視化できることが実証された。結果の詳細を[業績 2, 10, 11]にてまとめた。

3. 3号機の開発

これまでに運用してきた ETCC のカメラサイズの 10×10 cm より広い 20×20 cm サイズの 3 号機の開発を進めている。カメラサイズを 20×20 cm に広げることで視野は 40×40 cm 程度になると期待でき、人体であれば上半身の撮像が可能になる。将来的にこのカメラを円環上に数台配置することにより、ある程度大きなサイズの患者に対しても十分な精度で撮像可能になる。

図6に1, 2号機デザインと3号機デザインの装置の外観を示す。3号機は容器内に基板を入れることで、広い視野を確保しつつカメラの外周サイズは1, 2号機よりもコンパクトにし、検出器全体のサイズは大きく変えない設計とした。今回の設計は2気圧まで加圧できる仕様であるため、圧力を分散させるために容器の上部を丸くしている。2025年度は、ETCCの前段検出器（ガス検出器）の組み立てを中心に行った。ガスを封入することで電子の飛跡を検出できるドリフトケージと GEM・ $\mu\text{-PIC}$ を装置内部に取り付けた。ドリフトケージは各段に抵抗を取り付けながら接着した。そして、GEMと $\mu\text{-PIC}$ は接着剤やハンダ付けによって慎重に固定し、ドリフトケージとともに装置に取り付けた。

また、実用化に向け回転機構を用いることにより、視

野角や再構成画像の向上、高精度な 3 次元イメージングを行う準備を進めている。それらを実現するため、装置の制御・データ収集用パソコンならびに配線関係のコンパクト化が 1 つの課題となっている。したがって、その一歩目として装置の制御用パソコンを Raspberry Pi という小型パソコンに置き換え、装置のコンパクト化と軽量化を進めた。装置の詳細を[業績 3]にてまとめた。

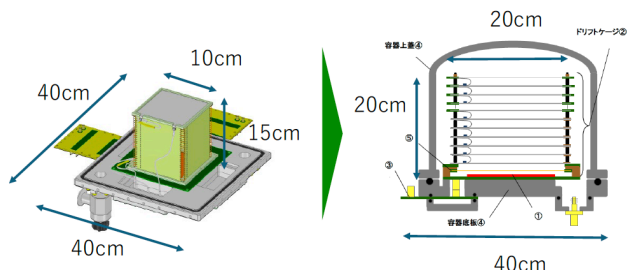


図6 検出器デザインの比較 (左: 1, 2 号機, 右: 3 号機)。

4. シミュレーションおよび比較実験

SMILE 実験グループによって開発されたシミュレーション⁹⁾を基に、ETCC 検出器システム用のシミュレーションプログラムを開発している。このシミュレーションソフトウェアは Geant4 をベースとしており、読み出し回路における応答、ガス領域内での電荷のドリフトおよび拡散の影響、さらにはデジタルデータ処理の機能がパッケージに実装されている。本シミュレータのデータ出力形式は実験データと同一になるよう構成されているため、同一の解析フレームワークを用いて両者を直接比較可能に設計した。

反跳電子の飛跡決定精度は、良好な画像再構成を実現するために重要な要素の一つであり、シミュレーションにおいては真のコンプトン散乱点や電子の初期運動量ベクトルが既知であるため、データ解析から得られるこれらの変数の不確かさを評価することが可能となる。図 7 はシミュレーションによって求められた典型的な電子の飛跡を表している。このシミュレーションでは、511 keV のガンマ線が検出器内に入射したときの様子である。赤い点は反跳電子の飛跡を示し、緑の点はコンプトン散乱点を示している。これらの結果から、コンプトン散乱点および初期運動量ベクトルを精度よく決定するには飛跡が長い事象の方が有利であることが示唆された。

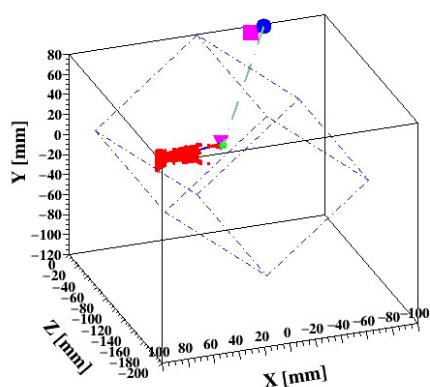


図7 シミュレーションによる典型的な電子の飛跡。

この結果を受けて、金沢大学にて、反跳電子の飛跡が長いイベントを収集するための試験実験を行った。図 8 はこの測定における検出器の配置を示す。TPC 検出器の両側に、TPC 中心から 25 度の角度で 2 台の PSA 検出器を設置した。また、反跳電子の進行方向に沿ってより広いドリフト領域を確保するため、TPC 検出器を水平方向に 45 度回転させた。データ解析の結果、長い飛跡を持つイベントが取得できていることが確認された。より詳細な結果およびシミュレーションとの比較を[業績 12]にて公表している。

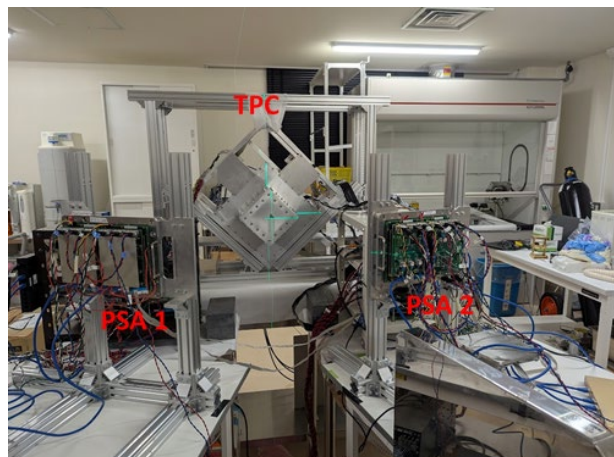


図8 長飛跡測定のための実験配置。

5. 展望

2024 年から 2 台の ETCC による撮像が可能となり、引き続き 3 号機 ETCC の開発も進めている。前段検出器の組み上げは完了し、検出器内部のモジュールやデータ収集系の開発を行っている。

また、データ収集条件の改善やデザイン改良のためにシミュレーション系の構築を行い、ガス内の正確な飛跡シミュレーションが可能になった。金沢大学で行った反跳電子の飛跡が長いイベントを収集するための試験の結果とシミュレーション結果を踏まえて、放射線強度やエネルギーごとのトリガー条件の調査を行っている。

複数台の ETCC が搭載可能な回転架台の製作を行った。現在はこの回転架台に載せた自動回転システムを構築中であり、この架台を用いた生体撮像試験を準備中である。この架台により、実用化に向けて開発を進めていく。

6. 業績

【論文】

- [1] 岩崎凌大, 多核種点線源及び 18F-FDG 多源撮像による電子飛跡検出型コンプトンカメラの基本性能評価, 東海大学修士論文, 2025.
- [2] 田中海司, 電子飛跡検出に基づく次世代ガンマ線イメージングによる医療用核種 ^{99m}Tc の生体撮像, 東海大学修士論文, 2025.
- [3] 水津 響輝, 電子飛跡検出型コンプトンカメラ 3 号機の開発, 東海大学卒業論文, 2025.
- [4] 高山 晃輔, 電子飛跡検出型コンプトンカメラの水中のエネルギー分解能評価, 東海大学卒業論文, 2025.
- [5] 中村 天, GEANT4 によるラットの腎臓を模したシミュレーション, 東海大学卒業論文, 2025.

- [6] 沼子 悠希, 電子飛跡検出型コンプトンカメラの検出可能範囲の拡張に向けた GEANT4 シミュレーション, 東海大学卒業論文, 2025.
- [7] 細貝 康友, 電子飛跡検出型コンプトンカメラの分解能の位置依存性について, 東海大学卒業論文, 2025.
- [8] 森 海翔, 電子飛跡検出型コンプトンカメラのラット腎臓ファントムの位置分解能評価, 東海大学卒業論文, 2025.
- 【口頭発表】
- [9] Basic Performance Evaluation of an Electron-tracking Compton Camera Using Multiple Radionuclide Point Sources and Multi-Source Imaging with ^{18}F -FDG, R. Iwasaki, K. Tanaka, S. Kabuki, J. Kushida et al., 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry 2025, 2025. 9.
- [10] In Vivo Imaging of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DTPA as a Radiotracer Alternative to Clinical $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DTPA Using Electron-Tracking Compton Camera (ETCC), K. Tanaka, R. Iwasaki, S. Kabuki, J. Kushida et al., 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry 2025, 2025. 9.
- [11] Basic study of technetium-95m imaging using Electron-tracking Compton camera as substitute for technetium-99m radiopharmaceuticals, S. Kabuki, J. Kushida et al., 2025 IEEE Nuclear Science Symposium, 2025.11.
- [12] Investigation of tracking performance of the recoil electron in the Electron Tracking Compton Camera, R. Kiuchi, S. Kabuki, J. Kushida et al., 2025 IEEE Nuclear Science Symposium, 2025.11.

参考文献

- 1) 厚生労働省, 令和 7 (2025) 年人口動態統計月報年計(概数)の概況, 厚生労働省, 2026.
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/geppo/nengai25/index.html>
- 2) C. Steven, van der Marck et al, The options for the future production of the medical isotope ^{99}Mo , Eur J. Nucl. Med. Mol Imaging, 37(10), 1817–1820, 2010.
- 3) 遠藤啓吾, 井戸達雄, 国産化 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ の医療運用に向けての課題, RADIOISOTOPES, 61(7), 385-397, 2012.
- 4) Hatsukawa. et al, Electron-tracking compton camera imaging of technetium-95m, PLoS ONE, 13(12): e0208909, 2018.
- 5) 日本原子力研究開発機構核データ研究グループ, 核データの表, https://www.ndc.jaea.go.jp/NuC/index_J.html.
- 6) A. Takada, et al., Observation of Diffuse Cosmic and Atmospheric Gamma Rays at Balloon Altitudes with an Electron-Tracking Compton Camera, ApJ, 733, 13, 2011.

1. 緒言

国内の原子力発電所では複数機器の故障を想定したシビアアクシデント(SA)に対応する設備と手順が追加されている。SA対策として、2次冷却系からの除熱機能停止時に炉心を除熱するため、1次冷却系を減圧し、高圧注入系から注水によって、1次冷却系の冷却材を入れ替えるフィードアンドブリード運転の手順が定められた^{1),2),3)}。全交流動力電源喪失(SBO)時に炉心を除熱するため、既存の設備を用いて2次系を強制冷却し、新設の代替低圧注水設備を用いる対策も取り入れられた。

本研究ではSAとなる「主給水流量喪失+補助給水系不動作」および「SBO+1次冷却材ポンプ(RCP)シールからの冷却材喪失」を対象に、事象進展を解明し、SA対策の機能向上を目指した。

本学では、発電炉シミュレータ Severe Accident Reactor Simulator(SARS)を整備し、SA事象の解明・SA対策の向上の研究開発に取り組んでいる^{4),5),6)}。SARSはRELAP5/SCDAP/MOD3.5を解析エンジンとし、WH型PWR4ループプラント(定格熱出力3411MW)を対象モデルとする(図1)。

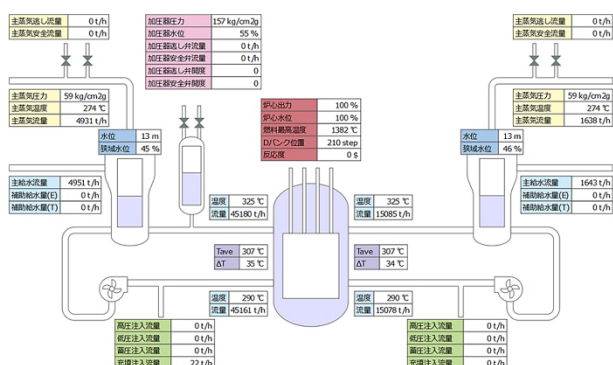


図1 SARSの概要。

2. 主給水流量喪失+補助給水系不動作

2次冷却系の設計ベースの除熱機能停止時の重要事故シーケンスに抽出された主給水流量喪失+補助給水系不動作シナリオを対象に解析した⁷⁾。想定するケース毎の解析条件を表1に示す。ケース1では、重要事故シーケンスの解析、ケース2では、フィードアンドブリード運転の開始時間(SGドライアウトからの時間)を変更した解析を、それぞれ行った。

表1 解析条件

項目	ケース1	ケース2
起因事象	主給水流量喪失	
補助給水系	不動作	
出力分布	BOC/EOC	BOC
トリップ信号	SG水位低(狭域)11%	
フィードアンドブリード運転開始時間(min)※	無	10, 20, 30, 63, 66
崩壊熱モデル	ANS79-1	

※SGドライアウトからの時間

ケース1では、主給水流量喪失の発生後、補助給水系の不動作にともないSGの除熱機能が喪失した。加圧器逃がし弁から1次冷却材を放出によって炉心水位が低下し、燃料被覆管の最高温度は、燃料棒の損傷基準1473.15K(1200°C)に、BOCとEOCでともに事象発生後105分に達し、混合酸化物(UZr)O₂の融点2830KにBOCで118.2分に、EOCで121.5分にそれぞれ達した(図2)。炉心溶融の進展を図3に示し、事象発生後150分に炉心溶融の体積割合はEOCで35.2%、BOCで26.8%となった。BOCとEOCで崩壊熱の量・分布が異なるためである。

ケース2では、フィードアンドブリード操作によって炉心水位が低下し、燃料被覆管の最高温度が一時的に上昇したが、高圧注入系からの注水とともに最高温度は急速に低下し、事象は収束した(図2)。燃料被覆管の最高温度は事象発生後45分(SGドライアウト後10分)の操作で862.9K、事象発生後98分の操作で1442.5Kまで上昇したが、燃料棒の損傷基準1473.15Kには達しなかった。事象発生後101分の操作で1794.7Kまで上昇し、燃料棒は損傷した。

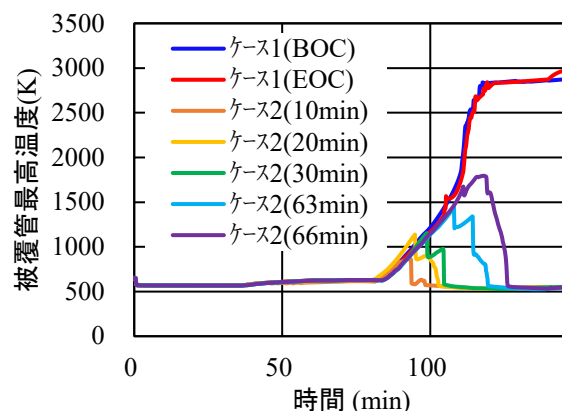


図2 燃料被覆管の最高温度の時間変化。

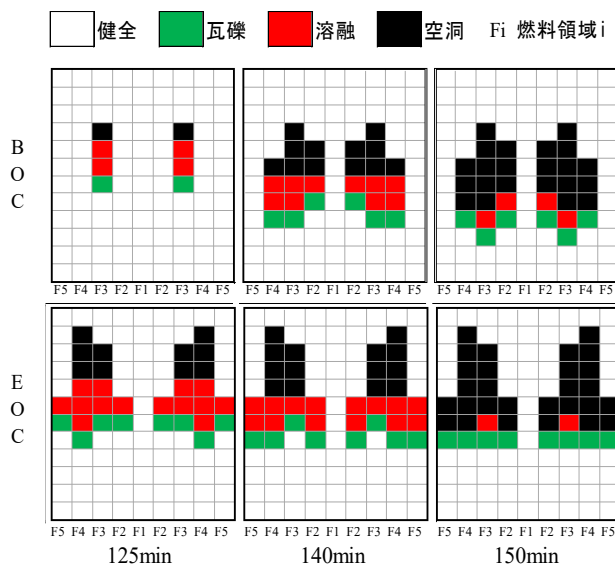


図3 炉心損傷レベルの時間変化。

3. SBO+RCP シール LOCA

SBO 時の重要事故シーケンスに抽出された RCP シールからの冷却材喪失事故(LOCA)のシナリオを対象に解析した⁸⁾。想定するケース毎の解析条件を表2に示す。ケース1ではSBO+RCP シール LOCA の重要事故シーケンスの解析, ケース2では2次系強制冷却の開始時間(事象発生後)を変更した解析, ケース3では代替低圧注水の開始時間を変更した解析を, それぞれ行った。

表2 解析条件

項目	ケース1	ケース2	ケース3
起因事象	全交流動力電源喪失		
RCPシールLOCA	0.6インチ/1台		
タービン動補助給水	起動		
2次系強制冷却開始時間 (min)※	無	30, 45, 55	30
代替低圧注水開始時間 (min)※	無	作動	不作動, 140, 150, 155
崩壊熱モデル	ANS79-1		

※事象発生からの時間

ケース1では, RCP シール LOCA によって1次冷却材の漏洩とともに炉心水位が低下し, 事象発生後 68.2 分に被覆管の最高温度が燃料棒の損傷基準 1473.15K に達し, 88 分に混合酸化物(U-Zr)O₂の融点 2830K に達した(図4)。崩壊熱のピークがある燃料領域3 から溶融が開始し, 炉心溶融の進展を図5に示す。1次系圧力が 4.14MPa まで低下した後, 蓄圧注水が始まり, 炉心水位の回復とともに炉心は再冠水し, 再冠水にともなう脆性破壊により炉心損傷が拡大した。

ケース2では, 2次系強制冷却を事象発生後 30 分に開始する場合に被覆管の最高温度は上昇せず, 事象発生後 55 分に開始する場合に被覆管の最高温度は短時間に 1163K まで上昇したが, 直後に事象は収束した(図4)。

ケース3では, 事象発生後 30 分に2次系強制冷却の開始と代替低圧注水の不作動の場合に事象発生後 178 分に被覆管の最高温度は燃料棒の損傷基準 1473.15K に達したが, 代替低圧注水が事象発生後 140~155 分までに開始する場合に燃料棒は損傷せず, 事象は収束した(図4)。

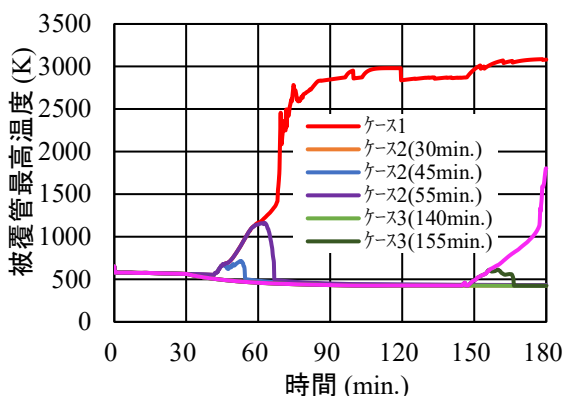


図4 炉心水位と燃料被覆管の最高温度の時間変化。

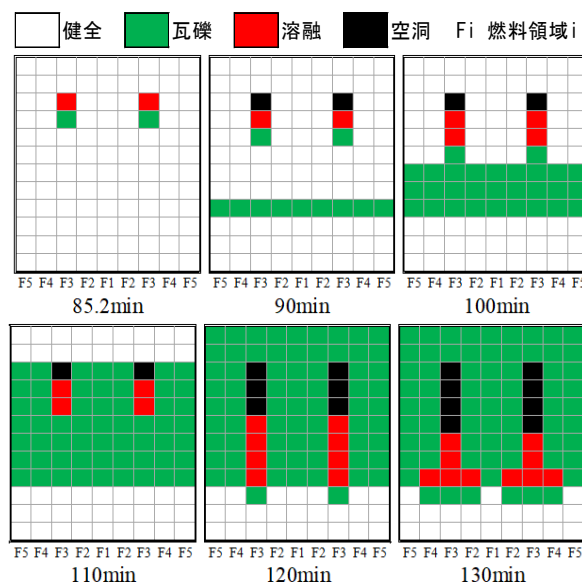


図5 炉心損傷レベルの時間変化。

5. 結言

2次冷却系の設計ベースの除熱機能停止時に, 主給水流量喪失+補助給水系不作動のシナリオを対象に解析し, 事故シーケンスの事象進展および SA 対策であるフィードアンドブリード運転の時間余裕を解明した。フィードアンドブリード運転の開始までの時間余裕は SG ドライアウト後 63 分であることを確認した。

SBO+RCP シール LOCA のシナリオを対象に解析し, 事故シーケンスの事象進展および SA 対策である2次系強制冷却または代替低圧注水の時間余裕を解明した。SA 対策の時間余裕は2次系強制冷却で 55 分まで, 代替低圧注水で 155 分までであることを確認した。

参考文献

- 1) 関西電力, 大飯発電所発電用原子炉設置許可申請書 (3,4号炉完本), 2021
- 2) 原子力規制委員会, 実用発電用原子炉に係る新規規制基準の考え方について, 2022.
- 3) NRA 技術報告, 炉心損傷防止対策の有効性評価事象の分析(PWR), 2014.
- 4) 日本原子力学会 2015 年秋の大会, D19, D20.
- 5) 日本原子力学会 2017 年春の年会, 2M02.
- 6) 日本原子力学会 2019 年春の年会, 3L08.
- 7) 日本原子力学会 2025 年秋の大会 1H06, 1H07.
- 8) 日本原子力学会 関東・甲越支部 第 24 回若手研究者・技術者発表討論会, No. 13, 2025.

東海大学国際原子力研究所URL

<https://www.u-tokai.ac.jp/education-research/research-centers/global-research-institute-of-nuclear-energy/>

東海大学国際原子力研究所 2025年度 所報

発行日：2026年9月30日

発行者：東海大学国際原子力研究所 近藤 駿介

259-1292 神奈川県平塚市北金目4丁目1-1