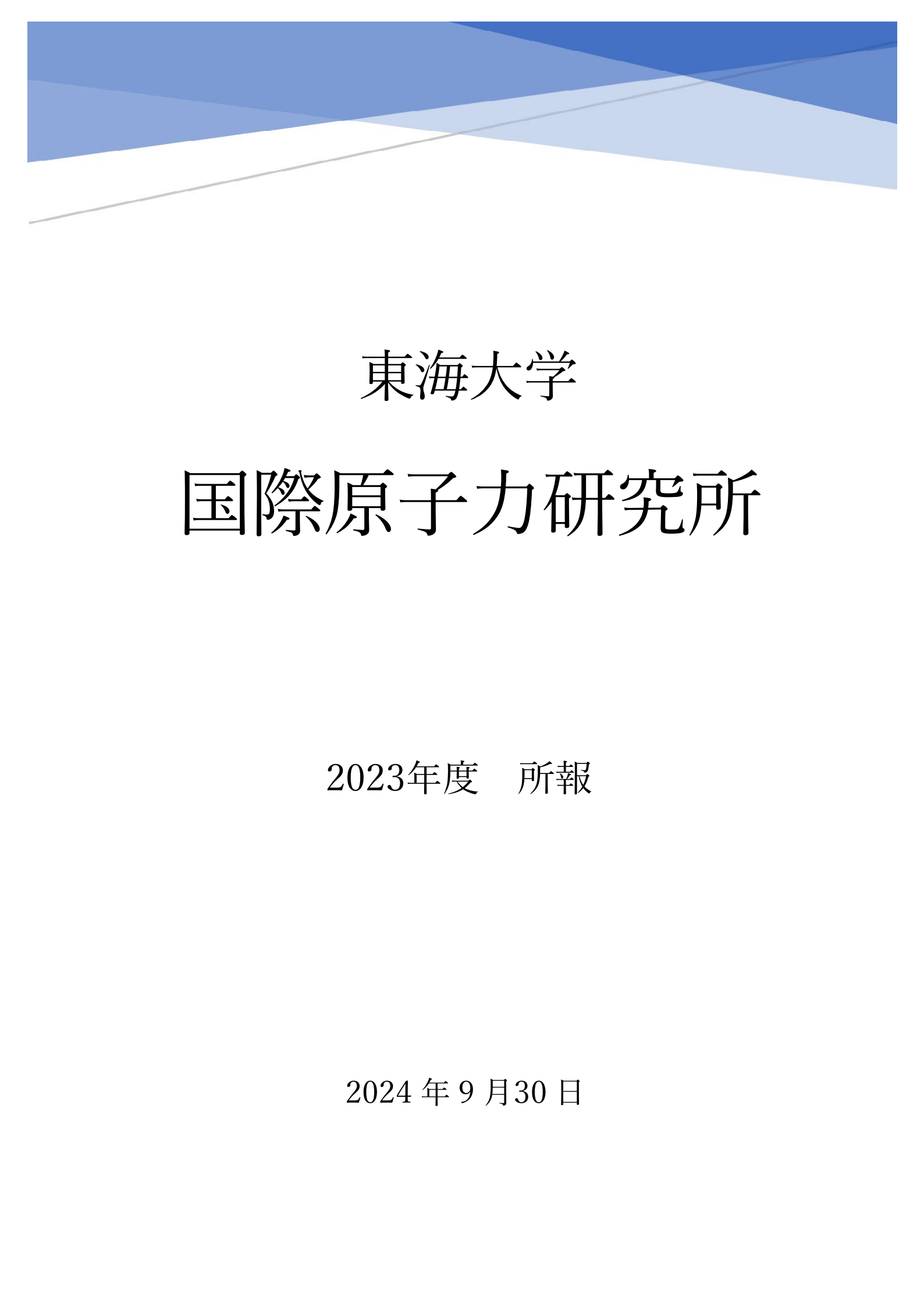




東海大学 国際原子力研究所

2023年度 所報

2024 年 9 月 30 日

目次

巻頭言 積極的な原子力利用の基盤強化の要請に応える	1
近藤 駿介	
原子力分野における人材育成戦略と東海大学国際原子力研究所の役割	2
近藤 駿介	
ナトリウム冷却高速炉におけるガス巻込み評価手法に関する研究	4
堺 公明	
放射線の医学・生物応用研究 ―低酸素を標的とした放射線がん治療の基礎生物研究―	7
吉田 茂生, 伊藤 敦	
地質の長期変動が放射性廃棄物処分に与える影響評価	9
若杉 圭一郎	
電子飛跡検出型コンプトンカメラ2号機開発およびテクネチウム同位体の生体撮像実験	11
櫛田 淳子	
放射性廃棄物処分のための陰イオン吸着材の検討と炭酸塩水溶液によるウラン廃棄物の処理	13
浅沼 徳子	
核融合原型炉での完全非接触プラズマ形成に向けたダイバータ形状の最適化手法の開発	15
利根川 昭	
教育訓練用計算コードSシリーズの開発と利用	17
松村 哲夫, 亀山 高範	
IAEAとの協力による取組み	19
若杉 圭一郎	

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 積極的な原子力利用の基盤強化の要請に応える

国際原子力研究所 所長 近藤 駿介

東海大学国際原子力研究所が発足 4 年目の活動が無事に終え、ここに所報第 4 号を発刊することができました。関係各位のお力添えに感謝いたします。

さて、2023 年度は、国内外において原子力発電を積極的に活用する機運が極めて高まった年でした。12 月に閉幕した国連気候変動枠組条約第 28 回締約国会合（COP28）では、原子力発電が温室効果ガス排出削減の重要な手段であると、初めて成果文書に明記されました。加えて、米、仏、英、日など 25 か国は、このことに関連するパリ協定で示された 1.5°C 目標の達成に向けて、世界の原子力発電設備容量を 2050 年までに 3 倍に増加させるという閣僚宣言を共同で発出しました。わが国でもこの COP に先立って 4 月に、原子力発電は確立された実績のある脱炭素発電技術であり、エネルギー安全保障や経済安全保障にも寄与するとの認識に基づき、技術開発、事業環境整備、教育・人材育成など、その最大限の活用に資する産・官・学による活動を進めるとする「今後の原子力政策の方向性と行動指針」が閣議決定されました。

また、原子力委員会は、東京電力福島第一原子力発電所における ALPS 処理水の海洋放出の決定に際して、放射性物質の安全性等について国内外で議論が巻き起ったことを踏まえて、令和 5 年度版原子力白書では「放射線の安全・安心と利用促進に向けた課題の多面性」を特集として取り上げました。今日、放射線利用は工業、医療、農業などで幅広く展開され、社会を支える重要な技術となっています。例えば、医療分野の診断面ではレントゲン検査、X 線 CT 検査、PET 検査、骨シンチグラフィ等の核医学検査等が、治療面では高エネルギー X 線・電子線治療、陽子線治療、重粒子線治療、ホウ素中性子捕捉療法、小線源治療、RI 内用療法等の腫瘍治療が、それぞれ効果的に利用されています。工業分野では、昨今ニーズが高まっている半導体生産の現場ではイオン注入装置が活躍していることをはじめ、生活用品の生産活動に至るまで、生産現場の随所で放射線が日常的に用いられています。それにもかかわらず、当白書では放射線に対して人々が漠然と不安を感じているとし、その原因について分析した結果、原子力関係者に対する国民の信頼回復が最も喫緊の課題であるとして、関係者に対して放射線リスクについて市民との真摯な対話を求めるとともに、放射線利用に関する正確な知識の普及に取り組むことも求めています。

本研究所は、こうした将来の原子力技術を支える基礎研究や人材育成を担って、社会の求めるその基盤の強化の要請にいささかなりとも応えることに努めている本学教員が連携する組織であり、本所報は 2023 年度の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、ご教示をいただけますと幸甚に存じます。

原子力発電事業を推進するには、原子力発電所等の建設、運転、保守、廃止措置、研究開発などさまざまな分野に専門人材が必要である。さらに、各国の原子力安全規制機関が原子力システムの安全性を確認する観点から、その設計・建設・運転の妥当性を判断する基準を確立するためにも専門人材が重要である。ここでは、このためのアプローチの基本戦略と先進国や我が国の原子力人材育成システムが直面している課題を指摘し、最後にそれを打開するために最近に開始された取り組みを紹介したい。

アジアのフィリピン、インドネシア、インド、バングラディシュ、トルコやヨルダンでは従来より、アフリカのエジプトやガーナは最近に至って、増大するエネルギー需要に対応してエネルギーの対外依存度を下げ、エネルギーミックスを多様化する観点から、炭素排出量を削減できる原子力発電に関心を示し、一部の国はすでに海外から技術を導入し、利用し始めている。これらの国々も自国内にこのための専門知識と能力を構築する必要性を強く認識して、当初は外国の技術に付随して提供される人材育成プログラムに依存してシステムを整えるにしても、中長期的観点からこれを使いこなす専門人材、さらには技術の国産化を追求していく専門人材を育成していく必要がある。そのため、国内にそうした人材育成基盤を整備し、あるいは既存の人材育成システムをこの観点から強化することに力を入れてきている。そこでは、これに国際原子力機関(IAEA)をはじめとする国際機関や技術提供国を含む原子力先進国が提供する原子力人材育成プログラムをも効果的に活用するなどして、戦略的かつ多角的な人材育成のアプローチが追求されている。

こうした取り組みの基本戦略は以下のように整理できる。

- 1) 政府が原子力発電に関する長期計画を作成し、その実用化に対する持続的な関与を明らかにする。

政府が、国家エネルギー計画の枠組みとして、明確な原子力利用に関する政策ロードマップを策定し、その推進にコミットすることにより、関係者は、これに寄与するインフラストラクチャと事業計画を整備することや、原子力分野における人材育成のための明確で包括的な長期戦略を策定し、長年にわたって人材育成に投資するという持続的なコミットメントを明確にすることが可能になる。

- 2) こうしたコミットメントの一環として、大学や研究教育機関が政府の支援を得て原子力分野の学位や資格を授与する専門教育プログラムを創設する。

原子力工学人材、安全規制システム、核セキュリティシステムの運用人材など、原子力セクターのさまざまな人材ニーズに応える教育・訓練プログラムを開発し、

原子力発電所が建設される前に、原子力関連分野の学位や資格も持った人々を生み出し、彼らが現場において活動しているようにすることが大切である。

- 3) 政府機関、学術機関、研究機関、業界関係者間が政府のコミットメントに共同して対応するべく、役割を分担し、相互に協力する。

それぞれの機関には固有の使命・役割があるから、その達成を追求するなかで原子力人材育成に係る業務を分担することになるが、それらが総体として人材のサプライチェーンとして原子力事業を推進するように、お互いの分担する役割を定義し、全体最適の観点からその協力関係を継続的に改善しながら、取り組みを推進していくべきである。これには、情報交換及び共同訓練プログラムが確立されている国々とのパートナーシップを確立・活用することも含むべきである。

- 4) 学生や専門家を海外に派遣して、確立されたプログラムのある国で、インターンシップや高度なトレーニングを受けさせ、稼働中の原子力施設に触れさせ、あるいは国際会議に参加させる。

彼らを実物に触れ、国際会議や国際的なコラボレーションの取り組みに参加させることで、リアルを知り、視野を広げ、継続的に学べる場としてのグローバルネットワークに接点をもつことは、学習に要する時間と空間を圧縮し、原子力事業推進にとって必須ともいえるべき、安全情報の迅速な相互学習にも寄与する。

- 5) 政府が長期的コミットメントの一環として研究開発に投資する。

これにより、官民が技術の進歩に対応し、進化する業界のニーズに適応する自立性を獲得することが可能になり、それにより現場に生まれたさまざまな提案の実現を目指す取り組みを支援することにより、原子力エネルギーの継続的イノベーションを促進することが可能になる。

こうした人材育成プログラムの核をなすディシプリンである原子力工学は、物理学、化学をはじめ、機械、電気、材料、応用化学、土木建築、情報処理など工学系の全分野にひろがる広範な学術分野から構成される“総合科学技術の工学”である。そこでは高度なシミュレーションとモデリングに基づく設計・制御、「極端な」材料の開発、高度な放射線源や検出器の開発などへの挑戦が、システム工学、材料科学、機械工学、物理学、化学、生物学などの専門家がパートナーを組んで進められている。

ただし、今日の若者は世界にプラスの影響を与える機会が得られる仕事を優先する傾向があるから、原子力部門はそのような志を有する若い才能を引き付けることが業界の持続可能性と安全性を確保する上で極めて重要で

あることを強く認識しなければならない。さらに、原子力部門は社会のために整備されるのであるから、社会から孤立してはいけな。社会のための取り組みである以上、原子力発電の推進には多様な部門や役割の担い手との協力・共同作業が必要であり、エンジニア、科学者、プロジェクトマネージャーはもとより、金融、規制専門家など、多様な専門家の協力を得ることも必要である。そして、このような認識を若い人と共有する取り組みを推進することにより、より幅広い人財を得ていくことも可能になる。

現在、原子力先進国では、原子力分野における人財確保にあたって、他の伝統的セクターと同様に、国内および国際的な人財流動性の向上、人口動態の変化、若い人々のキャリア願望の変化、機会の平等の拡大要請など、多くの課題に直面している。また、重厚長大産業分野は、情報技術、メディア、ビジネスなどの他の分野ほど魅力的とは見なされていない現実がある。さらに、原子力産業が成熟産業化したゆえに若年層の補充が進んでいないことから、現在働いている人の多くは、退職または退職間近であり、新規参入者が限られる中で有能な人財が離職するとなれば、業界全体が重大なリスクに見舞われることになる。したがって、原子力先進国においても、原子力産業界が必要な人員規模を維持するべく、適切な教育を受けた人々を適切な規模で採用し、彼らがその役割に有能で適格であることを保証するために必要なトレーニングと経験を提供していくことに関心が高まっている。この職場で働く能力にはその分野における知識、スキル、態度の組み合わせが含まれ、そのコンピテンシーは教育、経験、訓練の組み合わせを通じて開発されるものであり、それには一定の時間を要するからである。

我が国でも、21世紀に入るところから、原子力発電の新規建設の取り組みの停滞に対応して、原子力人財育成システムにおいて応募者数や教員数が減少し始め、高経年化した試験研究炉等の関連教育研究施設の維持が困難になるなど、厳しい現実が目立つようになってきた。加えて、2011年に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故で、原子力発電所の安全性やこれに携わる人々に対する信頼性は大きく損なわれた。日本の原子力産業界は、この事故を防げなかったこと、この事故が多くの人々の生活に筆舌に尽くしがたい苦難をもたらしたことに対する真摯な反省とそこから得た教訓の上に立ち、社会との対話を続けながら、脱炭素社会を目指した原子力エネルギー利用のあり方を、冷静かつ事実に基づいた議論の下、再構築している過程にある。

ロシアのウクライナ侵攻に伴い、我が国の置かれたエネルギーをめぐる国際環境は劇的に変化しつつあり、政府としてコミットした2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする「カーボンニュートラル」の達成には、原子力発電の貢献が必須であると考え、これを実現するためには、そのリスクを十分に低く維持することに絶えず気配りすることができ、そうしていることを

社会に説明し、社会からそのことを信頼される人財・組織がこの役割を担うことが前提条件である。

文部科学省は近年、原子力利用に関係する大学、研究機関を始め、企業なども含めた多くの組織・機関と議論を重ね、相互に協力して基盤的な教育機能を相互補完するコンソーシアムの形成を促した。その結果整えられたのが、「国際原子力人材育成イニシアティブ事業」の中で「未来社会に向けた先進的原子力教育コンソーシアム：Advanced Nuclear Education Consortium for the Future Society: ANEC」を展開する体制である。このANECは、スケールメリットを生かした体系的な専門教育カリキュラムと実践的な講義・実習、国際ネットワークによる研鑽などを通じて、未来技術に挑む豊かな知性と探究する力、創造力、リーダーシップ、多様な価値観を受容する柔軟な感性を育てていくことを目指している。

この体制において、競争力ある原子力システムの追求を目指す取り組みと並行して、このシステムが社会や環境とどう相互作用するかを理解を深め、原子力システムの利用にはリスクが伴うこと、そこで、原子力安全や核セキュリティの分野におけるリスク管理、つまり、このシステムの利用に伴うリスクを正しく評価し、それを小さくするために取り組み、それが環境の変化を踏まえてこれで良いかと自分と社会に絶えず問いかけることの大切さ、そして、この姿勢を育む、このシステムを運営する組織のバックボーンとしての安全文化や核セキュリティ文化について学ぶ機会も提供されることを期待している。そうした取り組みを骨肉化していくことが、我が国の提供する原子力人材育成システムのあるべき姿と考えるからである。

国際原子力研究所は、総合大学である東海大学に集う人々と原子力科学技術に関わる内外の人々の交流を大切に、ここに述べた取り組みを活発に進めることで、内外の原子力界の発展に貢献していきたいと考えている教員の組織体である。所員は、所内外の人々と連携して、次世代の要請に応える原子力利用の推進を担う人材育成を目指す、多様な興味と知的好奇心に応える教育コンテンツを提供できるので、原子力関連分野、またそれ以外の分野領域で学ぶことに関心を有する学生の皆さんからのアプローチを期待している。

1. ナトリウム冷却高速炉のガス巻込み評価

資源エネルギー庁は、カーボンニュートラルに向けたGX(Green Transformation)実現のため、2023年度より高速炉の商用化を目指した実証炉の建設に関する新規事業に着手した。その炉型として「ナトリウム(Na)冷却タンク型高速炉」(Fig.1)が選定され、事業者による設計検討がスタートした。



Fig.1 Tank type Sodium-cooled Fast Reactor as the Demonstration Reactor in Japan.
(<https://www.mhi.com/jp/news/23071202.html>).

タンク型高速炉は、我が国において初めて導入が図られる新たな高速炉システムの概念であり、径の大きな原子炉容器内に熱交換器等の機器をコンパクトに配置する概念に特徴がある。格納容器を含む原子炉全体の建屋下に免震構造を導入することにより、地震動条件に対する設計上の自由度が得やすい構造となっている。一方、原子炉容器内に従来以上に広い液体金属Naの自由液面が形成されることから、カバーガスのアルゴンガスがNaの液面から巻込まれるガス巻込み(GE: Gas Entrainment)現象(Fig.2)への対策は、重要な設計上の評価項目となる。GEにより巻き込まれた気泡は、炉心出力の擾乱を招く可能性があり、GEの防止・抑制に関する評価手法の構築が重要である。従来のループ型炉では原子炉容器内の自由液面下に、落し蓋状のディップドプレートが設置可能であり、それによって液面近傍の流れの乱れを抑制しGEを防止する設計対策が採られてきた。タンク型の原子炉容器では、構造上そのようなプレートの設置は困難であり、Na冷却材の3次元流動を適切に制御することによって、GEの発生を抑制する必要がある。著者らは、日本原子力研究開発機構(JAEA)との共同研究により、本



Fig.2 Gas Entrainment.

学の国際原子力研究所に設置の回流水槽(Fig.3)を用いて自由液面を移動しながら成長する渦からのガス巻込み現象の実験データを取得するとともに、その数値解析による評価手法の構築と検証に取り組んでいる[1]~[9]。

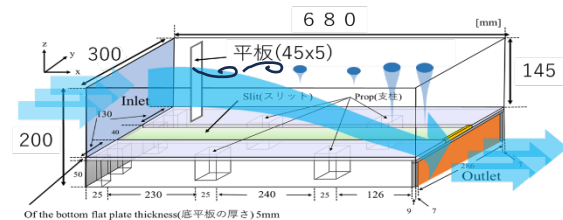


Fig.3 Test section of GE experiment.

ここでは、このGE現象を評価するための効率的な解析手法の構築に関する研究を紹介する。原子炉の大規模な流動体積においてくぼみ渦のような局所的現象を高解像度でCFD解析するためには莫大な計算負荷が必要となるが、数値解析による計算負荷を効率化する手段として、Adaptive Mesh Refinement (AMR)法が有効である。数値解析の解像度を向上させるためには詳細な解析メッシュを必要とするが、大局的に大規模な流動が支配している領域には詳細なメッシュによる高解像度は必要ない。一方、例えば、自由液面においてくぼみ渦が移動しながら発達する局所的な現象を精度よく予測するためには、その領域での解析メッシュの詳細化が必要となる。大気気象計算における局所的な竜巻の予測のように、大規模な原子炉内でのくぼみ渦の発生する局所位置において、解析メッシュを自動的に詳細化することが可能であれば、計算負荷を過度に大きくすることなく、適切な最小限の計算負荷により解析の解像度を向上させることが可能となる。

2. 研究の概要

1) 解析方法

本研究ではAMR法について、解析メッシュの詳細化の条件を設定するとともに、その適用性を検討した。特に、従来から適用されてきたAMR index #1である速度勾配テンソルの第2不変量Qが負($Q < 0$)となる詳細化されたメッシュについて、さらに十分な解像度が得られるように最適化するために、よどみ領域が詳細化されるように圧力勾配の条件を詳細化条件に加え(index #2)比較を行った。

GE実験を行う回流水槽のテスト部(Fig.3)を模擬した等間隔の粗い初期メッシュ(Fig.4)を作成し、次にAMR法により、以下に示す二つの詳細化条件にて解析メッシュの詳細化を実施した。

AMR index #1 条件：

速度勾配テンソルの第2不変量Qが負 $Q < 0$

AMR index #2 条件：

index #1, 及び、圧力勾配条件 $|\Delta P| > 9.44$

ここで、Q値は一般的に以下で示され、

$$Q = 1/2(S_{ij} * S_{ij} - \Omega_{ij} * \Omega_{ij})$$

S_{ij} は流れ場のひずみ成分、 Ω_{ij} は流れの回転成分を示

すことから、 $Q < 0$ は回転成分が支配的な渦流れが形成されていることを示している。

詳細化する前の粗いメッシュのサイズは一辺 20mm の立方格子(Fig.4)とし、AMR 法の 2 つの index 条件でそれぞれ詳細化されたメッシュにて過渡解析を行い、その結果を、正方格子メッシュを単純に一樣に詳細化したリファレンスメッシュ条件の結果と比較した。

2) 解析結果

Fig.5, 6 に AMR 法により 2 つの index で詳細化されたメッシュを比較して示す。両方のメッシュともに、平板後流の渦が発生する個所近傍のメッシュが詳細化されている。しかし、index #1 の $Q < 0$ のみの詳細化メッシュ(Fig.5)の場合よりも、圧力勾配の条件を加えた index #2 の詳細化メッシュ(Fig.6)の方が平板上流のよどみ領域を詳細化することに成功している。また、Fig.7 の平板後流の速度分布に示されるように、index #2 条件により詳細化したメッシュが index #1 の $Q < 0$ のみのメッシュより、一樣に詳細化したリファレンスメッシュでの値に近く、平板から

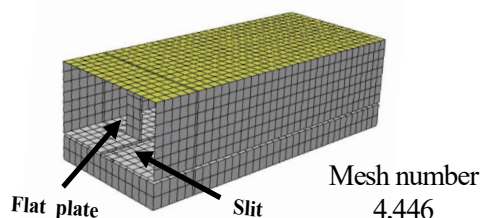


Fig.4 Initial Coarse Mesh.

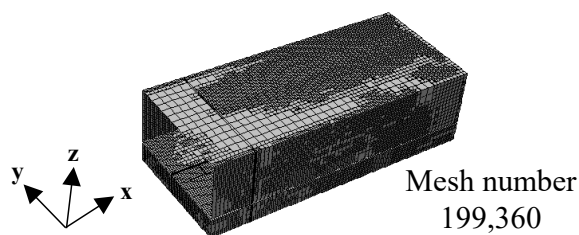


Fig.5 AMR index #1 condition Mesh (result).

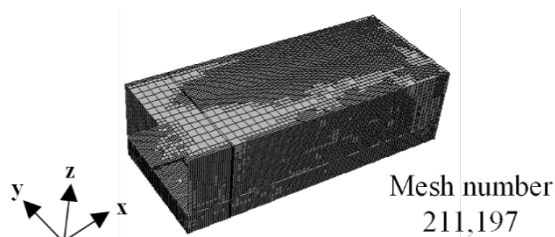


Fig.6 AMR index #2 condition Mesh (result).

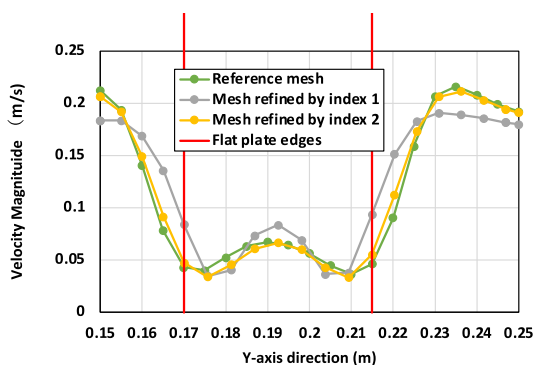


Fig.7 Velocity profiles at the flat plate wake.

の後流渦発生 の 起 点 となる 流れ の 剥 離 現象 が 正 確 に 模 擬 でき る こと が 判 明 し た . そ れ ぞ れ の メ ッ シ ュ で 計 算 し た 流 れ 場 の コ ン タ 図 を Fig.8, 9 に 示 す . Index #2 の ほ う が よ り 後 流 の 交 互 渦 を 明 確 に 再 現 し て い る . 正 方 格 子 メ ッ シ ュ を 単 純 に 一 様 に 詳 細 化 し た リ フ ァ レ ン ス メ ッ シ ュ の 場 合 , メ ッ シ ュ 数 は 約 32 万 7000 メ ッ シ ュ で あ る こと か ら , index #2 の AMR 法 に よ り , 着 目 す る 解 析 精 度 を 低 下 す る こと な く , 約 35% の メ ッ シ ュ 数 の 削 減 が 可 能 で あ る . 以 上 よ り , index #2 の AMR 法 の 詳 細 化 条 件 に よ り 非 定 常 渦 の 発 生 を 高 精 度 か つ 効 率 的 に 解 析 でき る こと が 明 ら か と な っ た .

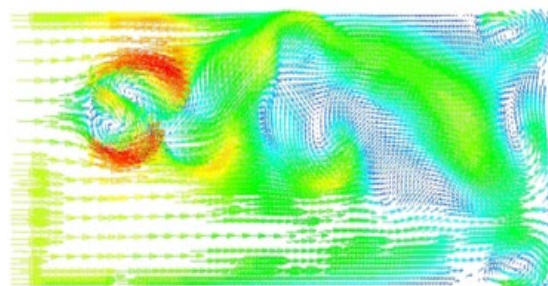


Fig.8 Stream line of Mesh refined with index #1.

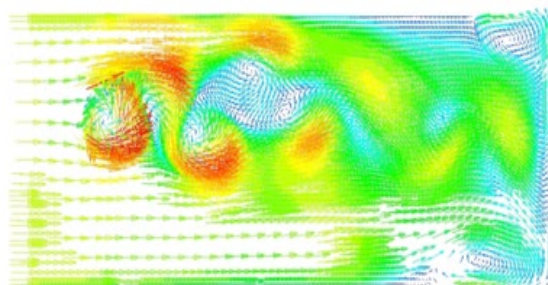


Fig.9 Stream line of Mesh refined with index #2.

3) 結 言

AMR 法 による 解 析 メ ッ シ ュ の 詳 細 化 条 件 を 検 討 し , 二 つ の 詳 細 化 条 件 に つ い て 比 較 し た . そ の 結 果 か ら 非 定 常 後 流 渦 が 発 生 す る 本 実 験 体 系 に つ い て AMR 法 の 有 効 性 が 確 認 さ れ た .

3. 展 望

本 研 究 は , JAEA か ら 東 海 大 学 へ の 委 託 研 究 契 約 に 基 づ き 実 施 し た . 解 析 を 実 施 し た 学 生 (ア ル ザ ハ ラ ー ニ ハ ニ ー ン) は , JAEA の 夏 季 休 暇 実 習 生 と し て , 一 定 期 間 JAEA に 滞 在 し て 解 析 手 法 を 習 熟 し , 本 学 の コ ン ピ ュ ー タ に て 同 解 析 評 価 を 実 施 し た . 本 研 究 成 果 に つ い て , 米 国 原 子 力 学 会 主 催 の 20th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-20)へ プロシーディングス論文[7]を 投 稿 し , 2023 年 8 月 に ワ シ ン ト ン D.C. に て 発 表 講 演 を 実 施 し た . 今 後 は , 国 際 原 子 力 研 究 所 に て , さ ら に GE 試 験 デ ー タ の 蓄 積 を 進 め る と と も に , CFD 解 析 と の 比 較 か ら 評 価 手 法 の 高 度 化 を 進 め て い く 方 針 で あ る .

4. 業 績

【国内会議発表】

- [1] アルザハラニ ハニーン, 堺公明, 他, 「自由液面からのガス巻き込み評価手法に関する研究-非定常後流渦解析に関する Adaptive Mesh Refinement 法の適用-」, 学生

- ポスターセッション, 日本原子力学会2022年春の年会, (2023.3).
- [2] 小林駿輔, 堺公明, 他, 「ナトリウム冷却高速炉の自由液面からのガス巻込み評価手法に関する実験(1) PIVによる実験体系内の速度分布の評価」, 第27回 動力・エネルギー技術シンポジウム, 東京海洋大, No.B121 (2023.9).
- [3] 遠藤和紀, 堺公明, 他, 「ナトリウム冷却高速炉の自由液面からのガス巻込み評価手法に関する実験 (2)動的画像処理によるガスコア長さの計測」, 第27回 動力・エネルギー技術シンポジウム, 東京海洋大, No.A124 (2023.9).
- [4] ハメルバーグ ジャスミン, 堺公明, 他, 「ナトリウム冷却高速炉の自由液面からのガス巻込み評価手法に関する実験」, 学生ポスターセッション, 日本原子力学会2023年秋の大会, 名古屋大 (2023.9).
- [5] 武田承太郎, 堺公明, 他, 「ナトリウム冷却高速炉の自由液面からのガス巻込み評価手法に関する実験-出口流路の影響」, 日本原子力学会 関東・甲越支部第17回 学生研究発表会, 東海大 (2024.3).
- [6] 遠藤和紀, 堺公明, 他, 「ナトリウム冷却高速炉の自由液面からのガス巻込み評価手法に関する研究」, 学生ポスターセッション, 日本原子力学会2024年春の年会, 近畿大 (2024.3).

【国際会議発表】

- [7] Haneen Alzahrani, Takaaki Sakai (Tokai Univ.), Kentaro Matsushita, Toshiki Ezure, Masaaki Tanaka (JAEA), "Application study of Adaptive Mesh Refinement Method on Unsteady Wake Vortex Analysis", Proc. of the 20th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-20), Washington, D.C., August 20-25, 2023, American Nuclear Society, Paper No.1262.
<https://www.ans.org/pubs/proceedings/article-54165/>
- [8] Haneen Alzahrani, Kentaro Matsushita, Takaaki Sakai, "Study on Gas Entrainment Evaluation Method at Free Liquid Surface -Application Study of Adaptive Mesh Refinement Method on Unsteady Wake Vortex Analysis-", NTHAS12: The 12th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety Miyazaki, Japan, Oct. 30–Nov. 2, 2022, Paper Number N12P1017.
- [9] Haneen Alzahrani, et.al., Presentation at the 8th Japan - Korea Joint Seminar on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety for Students and Young Researchers - NTHAS12 joint seminar -, Miyazaki, Japan, Oct. 28–30, 2022.

1. はじめに

本研究は医療への放射線技術の展開を目標に、医学、生物学分野での様々の課題に対して特徴的な放射線利用の可能性を探ることを目的としている。今年度は、「放射線によるがん治療向上を目指した、放射線照射後の低酸素環境下での放射線生物応答研究」をテーマに研究を実施した。

がん治療では高線量を一度に照射するのではなく、数週間の治療期間で複数回照射が行われる（分割照射と呼ばれる）。分割照射では、初回照射で腫瘍組織内の酸素に富んだ領域を酸素効果（酸素下での生物作用が低酸素下での生物作用より大きい現象）により不活性化する一方、放射線抵抗性の低酸素領域のがん細胞が残る。次の照射までに、この低酸素領域の一部が再酸素化（腫瘍組織内の低酸素領域が酸素を含んだ組織へ変化する現象）されるため、放射線が効果的に働く。しかしながら、全ての低酸素領域の細胞が再酸素化されるわけではなく、一部の低酸素細胞は低酸素状態のまま存在することがわかっている¹⁾。分割照射によって残った低酸素細胞をいかに効率よく不活性化できるかは、重要な課題であるため、この問いに対し、照射後の低酸素状態の細胞が、放射線刺激に対してどのような生物応答を行うかを調べることにした。これまで報告されてきた多くの低酸素研究では、X線照射時のみ低酸素環境が維持され、照射後の低酸素状態での細胞応答を調べる研究はほとんどない。さらに重粒子線によるがん治療で用いられている炭素線でも、照射後の低酸素状態での放射線応答を調べた研究はほとんど無い。よって、本研究では放射線の標的であるDNAや染色体を生物エンドポイントとし、放射線照射後の低酸素状態でのDNA損傷修復応答や微小核形成を調べることにした。本研究の共同研究者として、量子科学技術研究開発機構の平山亮一博士と共に研究を実施した。

2. 研究概要

1) X線照射に対する低酸素環境下でのDNA損傷修復応答

本テーマでは、DNA二本鎖切断（DSB: Double Strand Breaks）に着目し、低酸素下での照射後酸素下で培養するものと照射後低酸素下で培養するものに分け、照射後の酸素濃度がDSB修復にどのような影響をおよぼすのかを調べるため、DSBに集積する修復タンパク質53BP1を蛍光色素で染色し、集積された53BP1の細胞当たりのフォーカス数の計測を行い、DSBの指標とした。細胞はチャイニーズハムスター卵巣細胞（Chinese Hamster Ovary: CHO細胞）を使用した。X線照射後、酸素下ならびに低酸素下で30分間および2時間培養を行い、1.5Gyで照射した場合の結果を図1(a)に、3Gyで照射した場合の結果を図1(b)にそれぞれ示す。（有意差はt検定を行った。）

図1より、1.5Gy照射のH-OとH-Hを比較すると、30分培養ではH-Hの方が残存するDSBが多く、2時間培養ではH-Hの方がDSBがよく修復されている事が分かった。3Gy照射のH-OとH-Hを比較すると、30分培養ではH-OとH-Hに差がみられなかったが、2時間培養ではH-Hの方が残存するDSBが多い事が分かった。

図1(b)の結果は低酸素下のγ線照射後の低酸素状態が続くと53BP1フォーカスが残存する報告と一致している²⁾。今後はサンプル数を増やすことでデータに一貫性をもたせる事とDNA修復欠損細胞を用いて、DNA修復と照射後の関係について検討を進めたい。

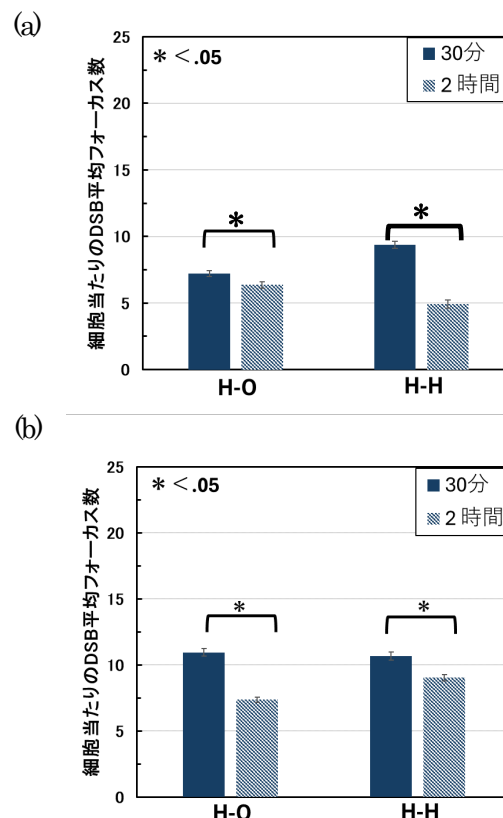


図1 X線照射後のCHO細胞内に生じた53BP1を指標としたDSBのフォーカス形成数(a: 1.5 Gy, b: 3 Gy).
H-O: 照射時低酸素, 照射後酸素下で培養.
H-H: 照射時低酸素, 照射後低酸素下で培養.

2) X線照射に対する低酸素環境下での微小核形成頻度

本テーマでは、「2-1」と同様に照射後の低酸素下でのDNA損傷応答を扱うが、微小核形成を指標とし、2022年度に実施した研究を発展させたものである。HO細胞とDSBの修復経路の一つ非相同末端再結合（Non-Homologous End Joining: NHEJ）が欠損したxrs6細胞と相同組換え修復（Homologous Recombination: HR）が欠損したirs1SF細胞を用いて、染色体異常の一種である微小核形成頻度を指標に照射後の酸素濃度の影響を調べた。X線照射後40時間酸素下および低酸素下で培養し、DNAを蛍光色素ヘキストで染色後、微小核をもつ細胞核を蛍光顕微鏡にて計数し、その割合を求めた。

図2からX線照射された各細胞の微小核形成頻度は、いずれの細胞においても線量の増加に伴い微小核形成頻度は増加する傾向を示した。また、照射後の培養酸素条件において、CHO細胞では培養酸素濃度依存性は見られないが、xrs6細胞、irs1SF細胞では共に大気下培養で有意に微小核形成頻度が高くなる結果となった。これらの結果から、DSBの修復機構は放射線照射後の酸素環境に依

存することが示唆された。

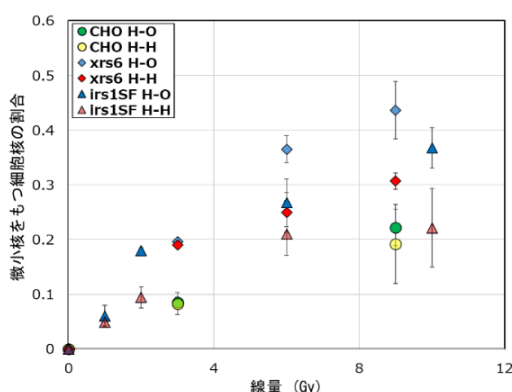


図2 X線照射後の3細胞における微小核形成の線量依存性。(CHO:野生株, xrs6:NHEJ欠損株, irs1SF:HR欠損株)。

H-O:照射時低酸素,照射後酸素下で培養。

H-H:照射時低酸素,照射後低酸素下で培養。

3) 重粒子線照射に対する低酸素環境下の微小核形成頻度

重粒子線はX線と異なったタイプのDNA損傷が生成されるので³⁾,重粒子線誘発微小核形成に対する酸素および低酸素の影響を調べた。重粒子線は,量子科学技術研究開発機構の重粒子線がん治療装置(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba:HIMAC)から供給された炭素線(C線:LET 13 keV/μm)を使用した。微小核の観察は2-2と同様の手法にて行った。図3にC線での微小核形成の線量依存性を示した。C線照射では,X線照射とは異なり,照射後の酸素下培養の方が低酸素下より微小核形成頻度が有意に大きいことが判明した。

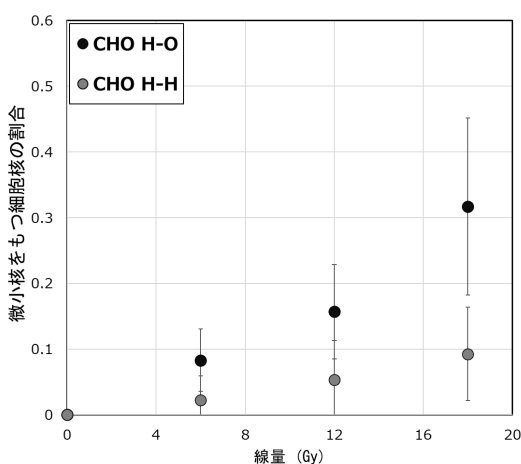


図3 C線照射後のCHO細胞における微小核形成の線量依存性。

H-O:照射時低酸素,照射後酸素下で培養。

H-H:照射時低酸素,照射後低酸素下で培養。

この結果は,図2のCHO細胞と比較して重粒子線照射後の酸素濃度が微小核形成に大きく影響することを示唆している。今後はさらに高いLETでのデータを蓄積し,照射後の酸素下および低酸素下での微小核形成頻度のLET依存性を調べる予定である。

3. 展望

酸素効果は放射線照射時の細胞内の酸素状態がもたらす放射線増感効果を意味しているが,本研究では放射線照射後の酸素状態も細胞応答に“酸素効果”として影響をおよぼす可能性があることを明らかにした。X線や重粒子線によるがん組織の低酸素領域の制御を目指すため,照射後低酸素状態にある細胞の種々の放射線応答を調べていきたいと考えている。さらにDSBや染色体異常のDSB修復機構との関連性を分子生物学的および生物物理学的な解析手法により明らかにしていきたい。

4. 業績

【学会等発表】

- [1]小泉凱也,澤田陽加,吉田茂生,伊藤敦,平山亮一, DNA修復欠損細胞における低酸素培養環境下での放射線応答解析,第60回アイソトープ・放射線研究発表会,2023年7月。
- [2]井原浩都,小泉凱也,吉田茂生,伊藤敦,平山亮一, DNA修復欠損細胞を用いた大気下および低酸素化の影響調査に関する研究,2023年度東海大学工学部原子力工学科卒業研究発表会,2024年2月。
- [3]森田光紀,小泉凱也,澤田陽加,吉田茂生,伊藤敦,平山亮一,がん細胞を模擬した低酸素培養環境下におけるX線誘発微小核形成頻度について,2023年度東海大学工学部原子力工学科卒業研究発表会,2024年2月。
- [4]實川佳那・角田智哉,小泉凱也,澤田陽加,吉田茂生,伊藤敦,平山亮一,がん組織を模擬した低酸素培養下でのX線照射によるDNA二本鎖切断の生成と修復,2023年度東海大学工学部原子力工学科卒業研究発表会,2024年2月。

【学生卒業論文】

- [5]井原浩都,小泉凱也,吉田茂生,伊藤敦,平山亮一, DNA修復欠損細胞を用いた大気下および低酸素化の影響調査に関する研究(2024)。
- [6]森田光紀,小泉凱也,澤田陽加,吉田茂生,伊藤敦,平山亮一,がん細胞を模擬した低酸素培養環境下におけるX線誘発微小核形成頻度について(2024)。
- [7]實川佳那・角田智哉,小泉凱也,吉田茂生,伊藤敦,平山亮一,がん組織を模擬した低酸素培養下でのX線照射によるDNA二本鎖切断の生成と修復(2024)。

参考文献

- 1) Yanyan Jiang et al. Mol Cancer Ther. (2021) DNAPK Inhibition Preferentially Compromises the Repair of Radiation-induced DNA Double-strand Breaks in Chronically Hypoxic Tumor Cells in Xenograft Models.
- 2) Ramya Kumareswaran et al. J Cell Sci. (2012) Chronic hypoxia compromises repair of DNA double-strand breaks to drive genetic instability.
- 3) Ryoichi Hirayama et al. Radiat Res. (2009) Contributions of direct and indirect actions in cell killing by high-LET radiation.

1. はじめに

原子力エネルギーは、気候変動や異常気象の一因と考えられている温室効果ガスの削減に寄与し、脱炭素社会を実現するために不可欠なエネルギーである。この原子力エネルギーの特性を維持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開発を進めている。特に放射能レベルの高い「高レベル放射性廃棄物」については、その影響が極めて長期間にわたって継続することから安全な地層処分を実現するための技術を整備しておくことが、原子力利用において重要なカギとなっている¹⁾。地層処分の安全評価では評価期間が数十万年に及ぶことから、地質の長期的な変動の影響を考慮することが重要である。このうち隆起・侵食については、わが国の幅広い地域で確認されている緩慢な自然現象であるため、長期的に処分場の深度が減少するとともに、地形が変化することにより、地下水流動が変化し、核種の移行時間を短くさせる可能性がある。このため、地質の長期変動が地層処分に与える影響を把握するには、隆起・侵食の影響を考慮した核種移行解析を行う技術を整備しておくことが必要である。そこで本研究では、隆起・侵食による処分場深度の変化を評価するとともに、これによる地下水流動の変化が核種移行に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 研究の概要

本研究に用いた隆起・侵食の影響を考慮するための評価の流れを図1に示す。まず、隆起・侵食による処分場の深度の経時変化を評価するために地形・処分場深度変遷解析を行った(Step1)。この解析では、簡略化のために断層などの影響を考慮せず均一な地質が一様に広がっていることを想定し、評価期間中に一定の隆起速度によって標高が高くなると仮定した。本解析ではプレートテクトニクス運動の予測可能な範囲を大きく超えて一定の隆起速度を仮定しているため、評価結果に無視しえない不確実性が含まれることに注意が必要である。さらに隆起に加え、河川による下刻や斜面での土砂の移動による侵食など、地形・標高に依存した侵食のプロセスを考慮した。これらのプロセスにより発生する起伏に応じた各地点における処分場深度を、地形・処分場深度変遷解析ツール²⁾を用いて解析した。

次に Step1 で構築された地形の変遷に基づき地下水流動解析を行うとともに、得られた流動場に対して処分場を始点として流出地点まで粒子を流す解析(Particle Tracking 解析：以下「PT 解析」という)により核種の移行経路を評価した(Step2)。さらに、PT 解析により得られた移行経路情報に基づき処分場からの核種の移行解析を行い、人間への被ばく線量を求めた(Step3)。

図2に処分場深度変遷解析により得られた処分場深度の平均値(実線)と標準偏差(点線)の時間変化を示す。解析では、隆起速度として0.3[mm/y]、0.6[mm/y]、および0.9[mm/y]の3つのケースを考慮し、隆起・侵食による処分場深度の経時変化を評価した。この結果、隆起速度が大き

いほど処分場深度が減少し、さらにその深度のばらつき(すなわち処分場直上の地形の起伏)が大きいことが確認された。これは隆起速度が大きいことで地表での標高差が大きくなり侵食作用が強まることに起因していると考えられる。

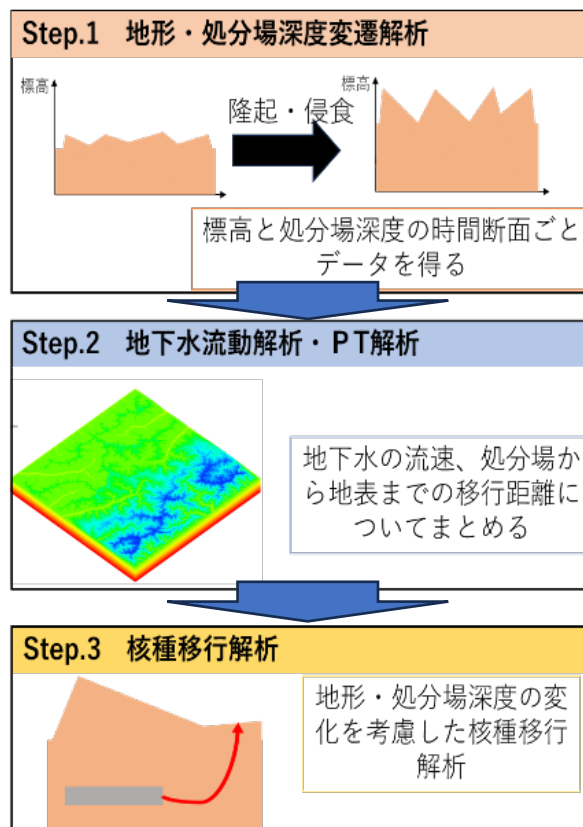


図1 隆起・侵食の影響を考慮するための評価フロー。

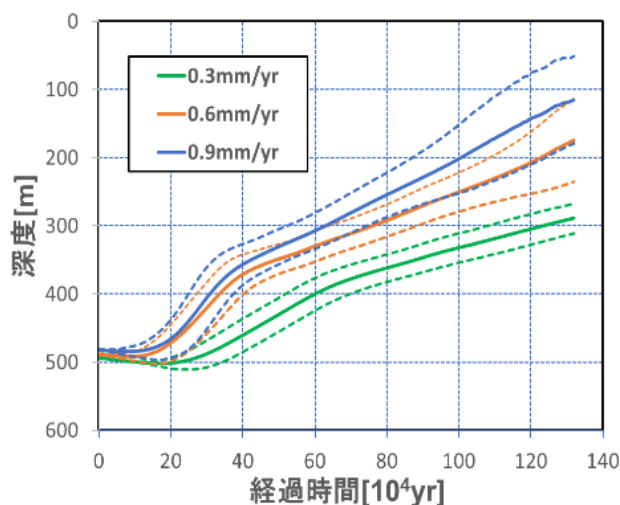


図2 隆起・侵食による処分場深度の平均値および標準偏差の経時変化。

また、図3に核種移行解析に基づく隆起速度ごとの線量を示す。なお、隆起速度0[mm/y]は比較のために設定

した評価期間中に隆起・侵食が生じないことを想定したケースである。この結果から、隆起・侵食を考慮すると最大線量を生じる時期が早まり、隆起・侵食を考慮しないケースよりその値が1から3オーダー増加すること、さらに隆起速度の速いケースが、より高い線量を生じることが確認できる。これは、隆起・侵食を考慮することにより大域的な地下水流動に変化が生じ、一部の核種の移行経路が短くなったことが原因であると考えられる。具体的には、処分場が地下深部に位置している間は、処分場周辺の地下水の流れは遅く、地表の流出点までの移行経路も長いものの、隆起・侵食により処分場深度が地表近くに接近する処分後数十万年経過した時間では、地表の起伏が激しくなることに起因して移行経路が短くなるとともに、動水勾配が大きくなり地下水の流速が増加する。その結果、隆起速度が大きいほど線量が高くなったと考えられる。

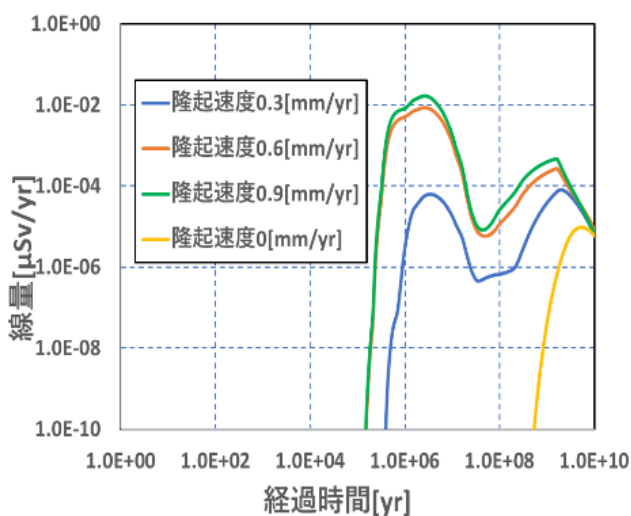


図3 隆起・侵食を考慮した線量の経時変化。

3. 展望

本研究は、日本原子力研究開発機構の特別研究生制度を活用して実施し、得られた成果に基づくものである。解析を実施した学生は、特別研究生として1年間核燃料サイクル工学研究所で研究活動に従事し、隆起・侵食に伴う地下水流動解析とPT解析、さらにはこれに基づく核種移行解析を一気通貫で行う世界でもほとんど前例のない研究テーマについて成果を得ることができた。

本研究を通じて隆起・侵食による地層処分安全性への影響を考慮するための方法論を確立することができたことから、今後は、地質の長期変遷の不確実性を考慮しつつ、処分場深度や移行経路の変化の事例を蓄積し、地層処分の安全評価の信頼性を向上する技術基盤の整備に取り組んでいく予定である。

4. 業績

【学会等発表】

- [1] 坂本道仁, 若杉圭一郎, 山口正秋, 樺沢さつき: 地形・処分場深度変遷評価に基づく隆起・侵食シナリオの影響解析, 第7回三私大学合同研究発表会, 2022年9月。
- [2] 樺沢さつき, 坂本道仁, 高橋裕太, 山口正秋: 隆起・侵食による地形・処分場深度の変遷の核種移行評価で

の取り扱いに関する検討, 日本原子力学会 2023年春の年会, 東京大学駒場キャンパス, 3G03, 2023年3月15日。

- [3] 坂本道仁, 若杉圭一郎, 樺沢さつき, 山口正秋: 隆起・侵食による地形・処分場深度の変化を考慮した核種の流出点評価, 日本原子力学会 2023年秋の大会, 名古屋大学東山キャンパス, 1D19, 2023年9月6日。

参考文献

- 1) 原子力委員会, 原子力白書, 令和4年7月。
- 2) 山口ほか, 原子力バックエンド研究, vol.27, No.2, pp72-82 (2020)。

電子飛跡検出型コンプトンカメラ 2 号機開発およびテクネチウム同位体の生体撮像実験

理学部物理学科 櫛田 淳子

1. はじめに

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を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 Tc-99m が最も多く、全体の約 60% の割合で使用されている。しかしこの Tc-99m の親核種である Mo-99 は、高濃縮ウランから生成され、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。そのため、国際情勢や原子炉の老朽化に伴う原子炉の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²⁾。この問題を解消するため、日本原子力研究開発機構でタンデム加速器を利用して Tc 同位体(Tc-95m 等) による新薬の開発を行っている。しかし Tc-95m の放射する最高エネルギー 835keV のガンマ線を、SPECT や PET での撮像は不可能である。そこで我々は新たな画像診断装置として 300~2000 keV のエネルギーが検出可能な電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron Tracking Compton Camera: ETCC) の開発を行っている。今年度は、ETCC の高速化および 2 号機の開発を行い、また、2024 年 2 月には 2 台の ETCC を用いて Tc-95m の生体撮像実験を行った。

2. データ収集の高速化

ETCC (図 1) は、前段検出器と後段検出器の 2 つの検出器から構成されている。後段検出器ではコンプトン効果によってした散乱したガンマ線のエネルギーと吸収点を検出することができ、前段検出器ではコンプトン点に加え反跳電子のエネルギーと飛跡の検出が可能である。これらの情報からガンマ線の到来方向を再構成することができる。

ETCC の高速化のため、後段検出器からのデータ読み出しを VME (VERSA Module Eurocard) から Headamp Data Processor 80339 型(HADP)に変更した。HADP は内部に FPGA を持ち、データ処理をプログラムによって書き換えが可能である。HADP に変更するメリットとして装置の大幅なコンパクト化、データ取得速度の向上などが挙げられる。実際に HADP を用いたことにより、サイズは 40 分の 1 になった。前段検出器からの読み出しには Encoder Board を利用している。Encoder Board は主に FADC (Flash ADCs), Ethernet Port, FPGA, 8 ASIC chips によって構成されており、128 個の入力チャンネルから全ての信号は FPGA に繋がっている。HADP にあわせたデータ収集プログラムの変更を行った[業績 3]。

データ読み出しの制御には、トリガー制御ユニット (TCU) を用いている。TCU は前段の TPC 入出力ボード、後段の GSO シンチレータをアレイ化した PSA ボード、電源ボード、メインボードの 4 層構造になっている。後段読み出しを VME から HADP に変更したことに伴い、TCU 内の FPGA プログラムの変更を行った。TCU には

Microsemi 社の FPGA “ProASIC3E (A3PE600 FG G 484)” を用いている。

プログラム変更には Libero SoC (Ver.11.9) を用い、言語は VHDL を用いて書き換えを行った。ETCC データ取得の模式図を図 1 に示す。

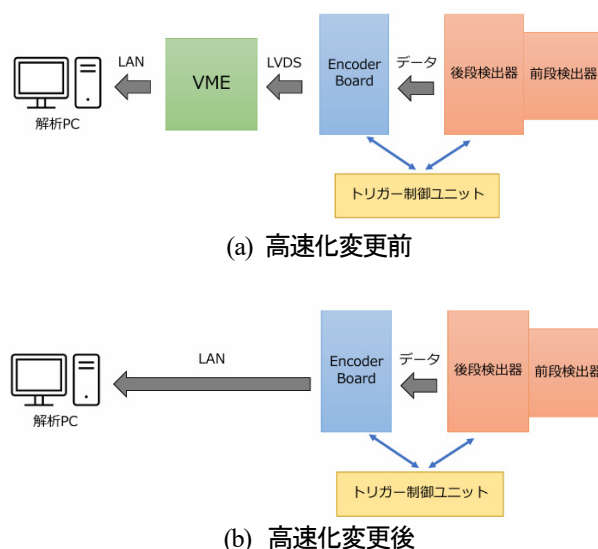


図 1 ETCC データ取得の模式図。

新システムの性能を評価するため、VME 経由と LAN 経由でデータ収集レートを変更した時の不感時間の変化を測定した。VME 経由では、VME モジュール間の転送速度に起因してデータ収集レートが 900Hz で不感時間が飽和したが、LAN 経由では 1kHz を超えても不感時間は飽和することなく要求値の範囲内で単調増加の傾向が見られたことから、新システムでは数 kHz でのデータ取得が可能であることがわかった。また、従来の VME 経由と、高いレートでデータ取得が可能となった LAN 経由とのデータ取得速度比較のため、2 台目 ETCC にて Ba-133 を用いて 100 ファイル分のデータを取得し、その取得時間を計測した。その結果、データ取得時間は VME 経由では 789 秒、HADP 経由では 183 秒となり、以前に比べて 4 倍高速化したことがわかった[業績 4]。

この新データ収集システムを実装した 2 台目の ETCC の製作もあわせて行った。

3. テクネチウム同位体の生体撮像実験

日本原子力研究開発機構のタンデム加速器を用いて生成された Tc-95m を線源とし、2023 年 2 月 27 日から 3 月 2 日にかけて、金沢大学にてファントムとラットを用いて 2 台の ETCC で撮像を行った(図 2)。評価用ファントムとして、2 つの容器に Tc-95m を投入し、その後ラットの生体撮像(0.66MBq)を行った。

ここでは評価用ファントムの解析結果について紹介する。Tc-95m は、共同研究者の浅井正人氏によって MoO₃ をターゲットとして日本原子力研究開発機構のタンデム加速器によって生成し³⁾、精錬後に金沢大学まで運んだ。

金沢大学にて、Tc-95m 溶液を 2 つの容器（高さ 15 mm、底面直径 17mm）に入れ、線源強度を測定したところ、それぞれ 0.65MBq、0.35MBq であった。2 つの容器を上下に間隔を 25mm あけて配置し（図 3）、また Tc-95m 線源から ETCC までは 55mm 離して撮像した。

トータルで 12 時間程度の撮像の後に、検出されたガンマ線のエネルギーを求め、放射位置の再構成を行った。図 4 は Tc-95m の放射する最も高いエネルギーである 835keV での再構成画像を示している。この結果より、25mm 間隔離れた 2 つの容器からの Tc-95m の像を分離して得られることが確かめられた。

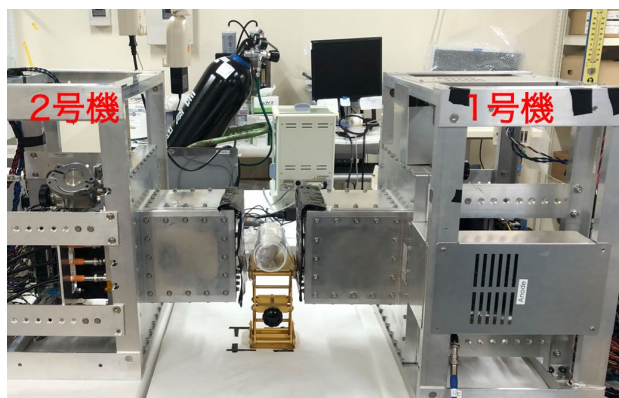


図 2 撮像試験の様子。

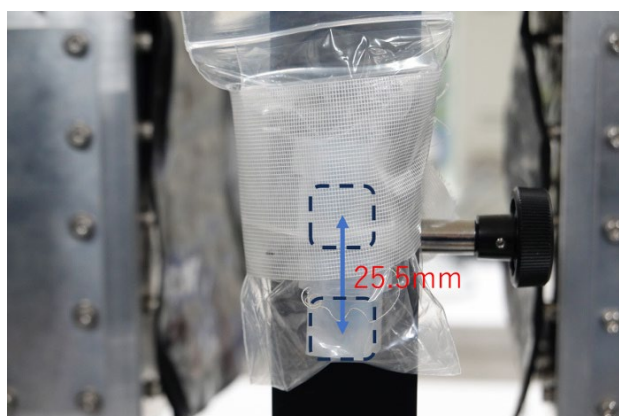


図 3 Tc-95m 線源の配置。

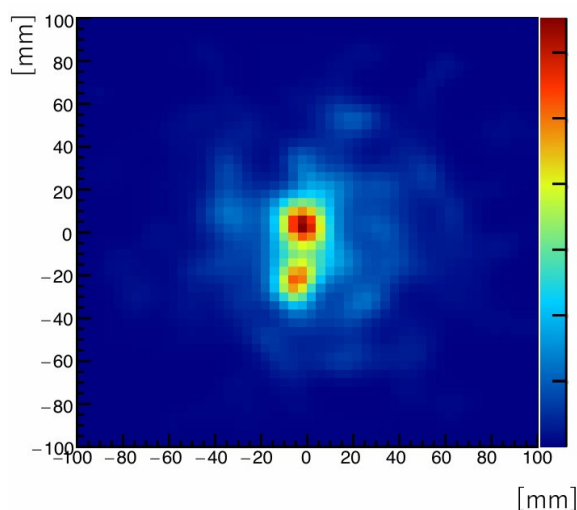


図 4 Tc-95m 点源の再構成画像(1号機)。

4. 展望

今年度の研究開発により、1 号機 ETCC のデータ収集速度の高速化を実現し、また、高速化したシステムでの 2 号機を製作して、2 台での撮像が可能になった。データ収集速度は 4 倍になり、データ不感時間も軽減した。また、2 台同時に撮像することにより、さらに倍の速度でデータを集めることが可能になる。金沢大学では FDG を用いた 100MBq の大強度耐久試験を行っており、この結果を踏まえて ETCC においてデータ取得可能な強度を求める。また、シミュレーションと比較して、トリガー条件等を見直し、取得可能な放射線強度を向上させていく予定である[業績 2]。

また、金沢大学で行った Tc-95m を投与したラットの撮像試験の結果は 2024 年 9 月に行われる第 10 回日韓医学物理学会学術合同大会(JKMP)において報告した。

5. 業績

【論文】

- [1] 遠藤冴星, 電子飛跡検出型コンプトンカメラを用いた放射性薬剤(Tc-95)による生体撮像, 東海大学修士論文, 2023.
- [2] 杉山諒, Geant4 を用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラと深層学習を用いた性能評価, 東海大学修士論文, 2023.
- [3] 岩崎凌大, 2 台目電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)のデータ収集システムの構築, 東海大学卒業論文, 2023.
- [4] 田中海司, 2 台目電子飛跡検出型コンプトンカメラに用いるトリガーコントロールシステムの開発, 東海大学卒業論文, 2023.
- [5] 吉田航也, Geant4 を用いたシミュレーションによる電子飛跡検出型コンプトンカメラのエネルギー別性能評価, 東海大学卒業論文, 2022.

【口頭発表】

- [6] In vivo imaging of technetium isotope (Tc-95) using electron tracking compton camera, 遠藤冴星, 株木重人, 櫛田淳子, 他, 第 125 回日本医学物理学会学術大会, 2023.4, 「大会長賞銅賞」.
- [7] 電子飛跡検出型コンプトンカメラを用いた放射性薬剤(Tc-95)による生体撮像, 吉田航也, 株木重人, 櫛田淳子, 他, 東海・重イオン科学シンポジウム, 2024.1.

参考文献

- 1) Steven C. 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.
- 2) 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.
- 3) Hatsukawa, et al, Electron-tracking Compton camera imaging of technetium-95m. PLoS ONE, 13(12): e0208909, 2018.

1. 陰イオン吸着材によるヨウ素と塩素の吸着挙動

使用済み核燃料の再処理において発生する放射性廃棄物のうち、溶解工程で発生する燃料被覆管（ハル）と燃料集合体の両端片（エンドピース）、気体処理で発生するヨウ素フィルターは、TRU 廃棄物に分類される。ハル・エンドピースには放射化生成物の ^{36}Cl （半減期 30 万年）が、ヨウ素フィルターには核分裂生成物の ^{129}I （半減期 1570 万年）が含まれる。いずれも長半減期核種のため地層処分における安全評価上、影響の大きい核種として重要視されている。地層処分の際に緩衝材として使用されるベントナイトは、陽イオンに対する吸着性能は高いが、ハロゲンのような陰イオンは吸着しない。そこで、地層処分環境下で陰イオン吸着材を適用できれば、陰イオン核種の移行遅延効果が期待できる。これまでに、含水酸化硝酸ビスマスと Mg-Al 層状複水酸化物は、塩化物イオンやヨウ化物イオンの吸着能を有することを確認した。本研究では、吸着速度や pH の影響等について検討し、吸着材の基礎吸着特性を評価した。

陰イオン吸着材として、東亜合成株式会社製の含水酸化硝酸ビスマス（IXE-500）及び Mg-Al 層状複水酸化物（IXE-700F）を用いた。吸着液には、塩化ナトリウムまたはヨウ化カリウム水溶液を用いた。吸着速度試験では、吸着材と吸着液を固液比 1:300 となるように添加し、恒温振とう機を用いて振とう速度 160 rpm で振とうしながら所定の時間でサンプリングを行った。pH 特性試験では、吸着液の初期 pH を硝酸または水酸化ナトリウムを用いて調整し、固液比 1:100 で所定の時間振とうした。溶液中の各イオン濃度はイオンクロマトグラフ装置（IC-2001, 東ソー）を用いて分析した。

IXE-500 に対する塩化物イオンの吸着量は時間と共に急激に増加し、6 時間と 24 時間では吸着量の差はわずかであった。このことから、IXE-500 は 24 時間で吸着平衡に達すると判断した。一方、IXE-700F は、1～2 日あたりで吸着量のピークを迎え、その後時間と共に吸着量は低下する傾向が見られた。IXE-700F による塩化物イオンの吸着では、吸着材の構成成分である水酸化物イオンとのイオン交換による吸着機構が想定される。従って、塩化物イオンの吸着に伴い吸着液の pH が上昇するため、一度吸着した塩化物イオンが脱離している可能性がある。

塩化物イオンに対する各吸着材の pH 特性を Fig.1 に示す。初期 pH が 4～9 あたりでは、いずれの吸着材も安定した吸着量となったが、pH12 では塩化物イオンの吸着量が低下する結果となった。pH 特性については、ヨウ化物イオンも同様の傾向が見られた。いずれの吸着材もイオン交換型の吸着機構が想定されており、IXE-500 は硝酸イオンと、IXE-700F は水酸化物イオンとのイオン交換が生じる。従って、吸着液中の pH が上昇すると、イオン交換が起こりにくくなることが想定される。

放射性廃棄物の地層処分環境において、廃棄体周辺の人工バリア材（セメント系材料やベントナイト等）と地下水の接触を考えると、液性が高 pH 条件となることが想定される。また、廃棄体の発熱や地下環境により、常温より高い温度条件の可能性もある。従って、今後より地下環境を具体的に想定した条件における吸着量評価を行う必要がある。

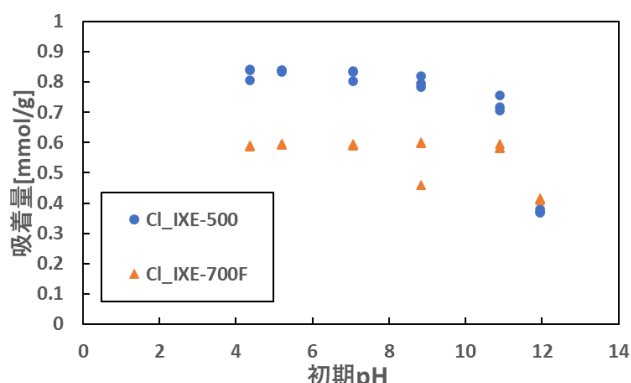


Fig.1 塩化物イオンの吸着量の pH 特性.

[Cl]₀ = 9 mM, 25°C, IXE-500: 1 day, IXE-700F: 4 days.

2. 炭酸塩水溶液浸出法によるウラン廃棄物の処理

燃料加工施設等から発生するウラン廃棄物には、ウランを含む排水の処理により発生するスラッジ状の廃棄物、ウエス等の焼却により発生する焼却灰等、多種多様な廃棄物が含まれる。中でも、スラッジ類や焼却灰は、ウラン濃度が比較的高いものがあり、浅地中へ処分するために、あらかじめウランを分離して濃度を低減させる必要がある。ウラン分離法として、炭酸塩水溶液を用いたウラン浸出法を検討している。海水中のウランが炭酸錯イオンとして安定溶存することは古くから知られており、炭酸塩水溶液を用いたウラン浸出法は、ウラン廃棄物のマトリクス成分から U(VI) のみを炭酸ウラニル錯イオン ($\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$) として浸出させる方法である。本研究では、スラッジ類のうちシリカ澱物と焼却灰に着目し、それぞれの模擬試料を調製して、炭酸塩水溶液による浸出試験を行った。

U_3O_8 を硝酸水溶液に溶解し、ケイ酸ナトリウム溶液（約 38%）を混合してゲル化させた後、ろ過及び乾燥したものを模擬シリカ澱物として使用した。ウラン含有率の異なる 3 種（1.4%、3.4%、5.6%）の模擬シリカ澱物を調製した。模擬シリカ澱物と 1M Na_2CO_3 水溶液を固液比 1:100 または 5:100 で、50°C、4 時間攪拌して浸出試験を行った。また、試験後の残渣をろ別回収し、自然乾燥後の重量から残渣率を決定した。浸出液中のウラン濃度は、アルセナゾ III 発色法による吸光光度分析により定量した。ウラン含有率 1.4% 及び 3.4% の模擬シリカ澱物は、4 時間後のウラン浸出率が 80～90% に到達した。しかし、残渣率はそれぞれ 28%（固液比 5:100）と 10%（固液比 1:100）となり、模擬シリカ澱物が Na_2CO_3 水溶液に溶解することが分かった。一方、ウラン含有率 5.6% の模擬シリカ澱物を固液比 5:100 で浸出した結果、4 時間後のウラン浸出率は 46% にとどまったが、残渣率は 91% と高い値となった。以上から、固液比を高めることで、U(VI) を浸出させつつ残渣率を高い値に維持できる可能性を見出した。

模擬焼却灰には、一般焼却灰の飛灰（はだのクリーンセンター提供）に UO_2 を混合し、800°C で 3 時間焼成したものを使用した。なお、実焼却灰（ウラン廃棄物）と異なり、一般焼却灰には塩類が多量含まれるため、調製した模擬

焼却灰を蒸留水で予備洗浄したものを浸出試験に用いた。その結果、模擬焼却灰中のウラン含有率は8.4%となった。浸出液として1M Na₂CO₃水溶液、1M NaHCO₃水溶液、それらの1:1混合液の3種を用いた。模擬焼却灰と浸出液を固液比1:100とし、50°Cで2時間攪拌した。浸出試験の結果をFig.2に示す。1M Na₂CO₃に比べ、1M NaHCO₃や1:1混合液によるウラン浸出率が高く約80%となった。模擬焼却灰中のウランはU(VI)であると考えられ、浸出液のpHが比較的低い方が浸出に適しているものと推察する。なお、ウラン浸出率の経時変化及び温度の影響はほとんど見られず、模擬焼却灰を浸出液に投入した直後にU(VI)が浸出していることが分かった。一方、実焼却灰では比較的ウランが浸出しにくいことが分かっている。模擬試料と実試料のウラン化学形の違いにも今後着目する必要がある。

「無機陰イオン交換体によるヨウ化物イオンの基礎吸着特性の評価」, 日本原子力学会 2024 年春の年会, 2A12, 2024 年 3 月 27 日, 近畿大学.

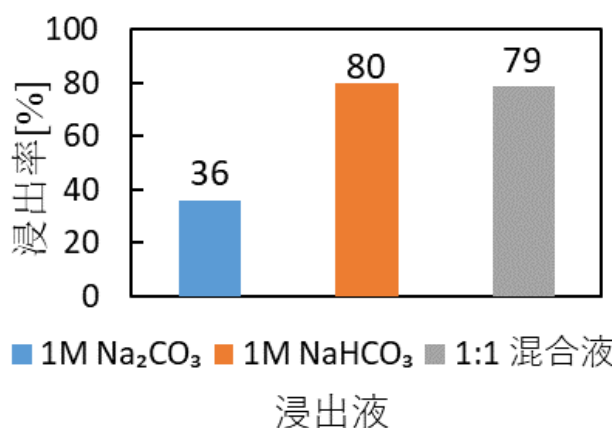


Fig. 2 組成の異なる浸出液による模擬焼却灰のウラン浸出試験結果(50°C).

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁「令和5年度放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業(JP1010599)」の成果の一部である。

3. 業績

【学会発表】

- [1] 齊藤波音：「TRU 廃棄物処分環境下における陰イオン吸着材の適用性検討 ～含水酸化硝酸ビスマス及び Al-Mg 層状複水酸化物のヨウ化物イオン吸着～」, 日本原子力学会 2023 年秋の大会, 学生ポスターセッション, 2023 年 9 月 6 日, 名古屋大学, 「優秀賞」.
- [2] 芝田健一, 小城 要, 齊藤波音, 浅沼徳子：「含水酸化硝酸ビスマス及び Mg-Al 層状複水酸化物を用いた塩化物イオンの吸着特性と吸着機構の検討」, 日本原子力学会 関東・甲越支部 第 17 回学生研究発表会 原子力・放射線分野, 2024 年 3 月 8 日, 東海大学.
- [3] 黒木裕也, 浅沼徳子, 櫻井博成, 布川公一, 藤永英司, 小林慎一：「炭酸塩水溶液を用いたウラン含有シリカ澱物からの U(VI)浸出挙動」, 日本原子力学会 関東・甲越支部 第 17 回学生研究発表会 原子力・放射線分野 2024 年 3 月 8 日, 東海大学, 「奨励賞」.
- [4] 齊藤波音, 芝田健一, 小城 要, 浅沼徳子, 新井 剛：

核融合原型炉での完全非接触プラズマ形成に向けたダイバータ形状の最適化手法の開発

理学部物理学科 利根川 昭

1. 研究背景及び研究目標

現在、自然科学研究機構 核融合科学研究所との原型炉研究開発共同研究（2022～2024 年度）を実施している。今年度(2023 年度)はその 2 年目にあたり、その研究活動報告を中心に記載する。

トカマク型核融合原型炉のダイバータ部には、国際熱核融合実験炉 ITER のダイバータ部の約 6 倍の熱流束が到達するため、熱流束を低減するため、ダイバータプラズマの制御の研究が直線型模擬装置を用いて推進されている。しかし、従来の直線型ダイバータ模擬装置の実験では、プラズマ中のイオン温度が低く実機でのダイバータ現象を再現できず、学術的に未解決な課題になっている。

本研究では、イオン温度の制御可能な模擬実験とモデリングにより中性粒子を制御し、完全非接触プラズマの維持を実現するダイバータ形状の最適化手法を開発する。具体的には、イオン温度の制御可能な直線型ダイバータ模擬装置での実験とモデリング（PIC、流体モデル等）により（図 1 参照）、①磁場発散でのプラズマ加速と完全非接触プラズマ形成過程の関係を解明、②レッグ長やリフレクター形状変化により完全非接触プラズマの制御法を開発、③ダイバータ・シミュレーションコード（SONIC）に実装可能なモデルへ発展することで、原型炉ダイバータ形状の最適化に貢献する。

2. 研究体制と研究計画

研究体制は、直線型ダイバータプラズマ模擬装置での実験、シミュレーションコードでのモデリング、更には、ダイバータ・シミュレーションコード（SONIC）に実装可能なモデルを開発するため、東海大学、慶応義塾大学、量子科学技術研究開発機構、核融合科学研究所の 4 つの機関が連携して推進する。以下に 2023 年度の研究目標と実施計画を記載する。

研究目標：中性粒子密度分布変化での完成非接触プラズ

マの制御法の開発

実施計画：

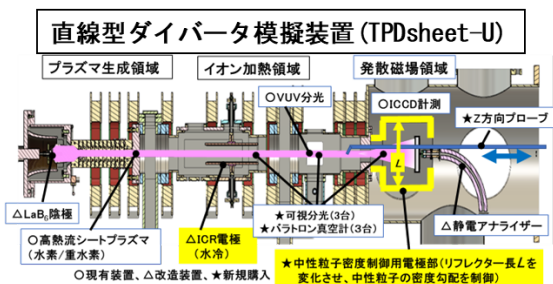
- ①レッグ長やダイバータ部のレフレクター形状変化により中性粒子密度分布を変化させ、完全非接触プラズマの形成過程を調べる。
- ②ICR 加熱電力を 1kW まで増加させ、イオン温度を電子温度以上に増加させた時の非接触プラズマの形成・崩壊過程を実験的に明らかにする。
- ③PIC コードに中性粒子輸送解析コードを導入し、中性粒子密度分布の変化にともなう非接触プラズマ形成過程を再現する。

3. 研究成果

本研究の特徴は、ICR 加熱法を組み入れた直線型ダイバータ模擬装置(TPDsheet-U)による実験とシミュレーション（PIC、流体モデル等）でのモデリングを併用した内容である（図 1 参照）。

2023 年度の目標は、中性粒子密度分布変化での完成非接触プラズマの制御法の開発である。このテーマを遂行する上で前年度の成果を受け 2 次元物理量計測が必要となり、新たに Balmer 系列の 2 次元発光分光計測と 2 次元プローブ計測の実験を追加している。

本実験では、発散磁場配位において、ICR 電力に対する Balmer 系列($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$)の 2 次元発光分布及びプローブ測定を行った（図 2 参照）。非接触プラズマ(0.87Pa)において ICR 電力(イオン温度)を増加させると、 $H\beta$, $H\gamma$ の発光強度の減少、電子密度 n_e の急激な増加、電子温度 T_e のゆるやかな増加が観測された。これはイオン温度 T_i が増加し T_e の値に近づく、エネルギー緩和時間は長くなり、電子からイオンへ伝達されるエネルギーが減少するためである。その結果、 T_e は減少せず緩やかに増加し、非接触プラズマから接触プラズマに遷移している。このことからイオン温度の増加は、非接触プラズマの形成を抑制していることを実験的に明らかにした。



連携

モデリング(シミュレーションモデル)

- ①原子分子過程を含む1次元PIC
- ②0次元CRモデル
- ③3次元解析を目指した流体モデル
- ④2次元の中性粒子輸送解析

研究
目
標

直線型ダイバータ模擬装置での実験とシミュレーション（PIC、流体モデル等）でのモデリングを連携させ、

- ①プラズマ粒子が加速する発散磁場でのイオン温度・電子温度に対する完全非接触プラズマ形成過程の解明
- ②発散磁場領域のターゲット構造を変化させ、中性粒子挙動の解明と完全非接触プラズマ維持を実現
- ③ダイバータ・シミュレーションコードへ実装可能なモデルを開発し、原型炉ダイバータ構造の最適化

図 1 直線型ダイバータ模擬装置とモデリングの概念図と研究目標

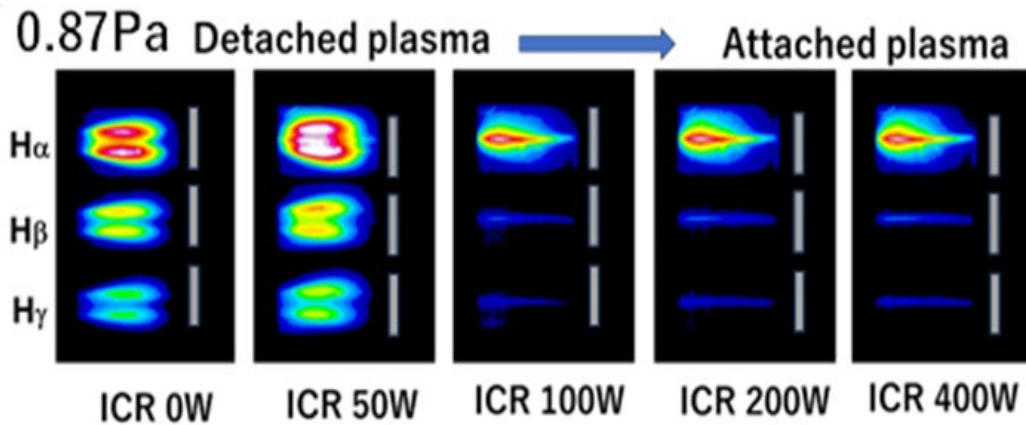


図2 非接触プラズマでの ICR 電力に対する Balmer 系列($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$)の 2 次元発光分布特性

また、ダイバータレッグを模擬したドリフト管を製作し、リフレクター形状変化による中性粒子密度分布を変化させ、完全非接触プラズマの形成過程を調べる実験準備を行った。更に、マッチング回路の改修を行い、ICR 加熱電力を 500W から 1kW まで増強した。

更に、シミュレーションでは、PIC コードを用いてイオン温度の変化に対する電子温度・密度変化を計算し、実験結果と定性的に傾向が一致していることを確認した。

造での非接触プラズマ形成過程”，2023.11/27-30.

【外部資金獲得】

- 1) 2023 年度科学研究費，基盤研究(B)：代表，7,930 千円。
- 2) 2023 年度核融合科学研究所 原型炉研究開発共同研究：代表，4,170 千円

【研究に参加した大学院生数】 M1: 3 名，M2: 2 名。

4. 業績

【論文発表】

- [1] A. Tonegawa, N. Okada, R. Onuma, K. Miura, K. N. Sato, Fusion Engineering and Design, 203 (2024) 114441., "2D-emission intensity measurement of the Balmer series for attached/detached plasma formation with ICR heating using TPDsheet-U."

【国内外学会等発表】

- [2] N. Okada, S. Higuchi, A. Tonegawa, K. Sato, 19th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, Bonn, Germany, "Analysis of the effect of ion heating on detached plasma formation using a linear divertor simulator TPDsheet-U," 2023/5/22-26.
- [3] N. Okada, R. Ohnuma, A. Tonegawa, K. Sato, GPF-Aomori Global Plasma Forum in AOMORI, 2023/10/15-18, JAPAN, "Student Presentation Award."
- [4] N. Okada, R. Ohnuma, A. Tonegawa, K. Sato, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP 2023) Port Messe Nagoya, JAPAN, 2023/11/12-17.
- [5] A. Tonegawa, S. Higuchi, N. Okada, K. Miura, K. Sato, 15th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-15), Las Palmas de Gran Canaria, Spain, "Characteristics of detached/attached plasma formation on ICR heating in a linear divertor plasma simulator TPDsheet-U," 2023/9/10-15.
- [6] 岡田尚徳，ダイバータ模擬装置 TPDsheet-U でのイオン温度変化に対する非接触プラズマの特性，2023 年度 NIFS 共同研究，夏の合同研究会，筑波大学，2023/9/5-6.
- [7] 利根川昭，岡田尚徳，佐藤浩之助，星野一生，林祐貴，増崎貴，矢本昌平，朝倉伸幸，第 40 回プラズマ・核融合学会 年会(アイーナ盛岡駅前)，27Ba08，"ダイバータ模擬装置 TPDsheet-U を用いた発散磁場構

1. 緒言

原子力工学では、 γ 線（光子）・中性子の遮蔽・線量計算、軽水炉・高速炉の燃料・炉心計算、使用済燃料の放射能・発熱量計算は基盤技術であり、本学でも重要な教育課題である。これらの計算を実行するプログラム（計算コード）は多種多様に存在するが、該当する計算コードを PC にインストールして利用するには教育と訓練が必須である。これらに対応するため、PC へ容易に導入でき、Microsoft 社の Excel + VBA 上で動作・利用が可能な教育訓練用計算コード S-Monte¹⁾, S-Dif²⁾, S-Decay³⁾の S シリーズを独自に開発し、本学の授業・研究に活用している⁴⁾。PC で Excel が動作すれば S シリーズの特別なインストール作業は不要である。計算の入力・出力を Excel 上で行うため、入力・出力は明解なうえ、出力を直接グラフにできる利点もある。S シリーズの開発と利用を各章に記す。

2. モンテカルロ法輸送計算コード S-Monte

γ 線・中性子の遮蔽・線量の各種の計算法と計算コードの中でもモンテカルロ法を用いる PHITS, MCNP, MVP/GMVP などのコードが開発され、広く実務で使われている。モンテカルロ法コードは 3 次元で精度の高い遮蔽・線量計算が可能であるが、利用にあたっては専門知識と訓練が必要である。モンテカルロ法の理解のため、初学者にも理解しやすい教育訓練用モンテカルロ法コード S-Monte を開発した^{1,4)}。

S-Monte は放射線の線量および線源位置・強度を計算する機能を持つとともに、計算体系の入力を XYZ 座標に限定するなど一部を直感的にし、Excel + VBA を用いることで初心者でも簡単に利用できる。S-Monte でモンテカルロ法の基礎と使用法を修得することにより、実務で既存のモンテカルロ法コードを用いる場合に、その理解と動作も容易になると期待される。

本学工学部原子力工学科の授業で S-Monte を利用している。建屋周辺の土壌表面に ^{137}Cs が分布している場合（図 1）、建屋内の空間線量率は図 2 に示すように建屋壁の γ 線遮蔽効果により減衰する。履修学生は建屋の壁（木材とコンクリート）による遮蔽効果の差異を自ら計算し、理解を深められる。S-Monte は原子炉の中性子束・中性子増倍率などを計算する機能も持ち、卒業研究でも軽水炉臨界炉 TCA を対象に S-Monte を適用し、原子炉核特性を検証した。

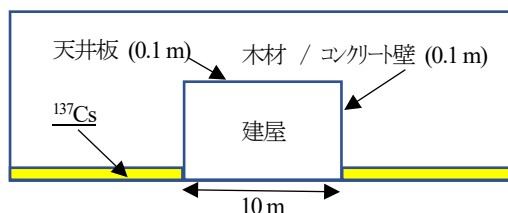
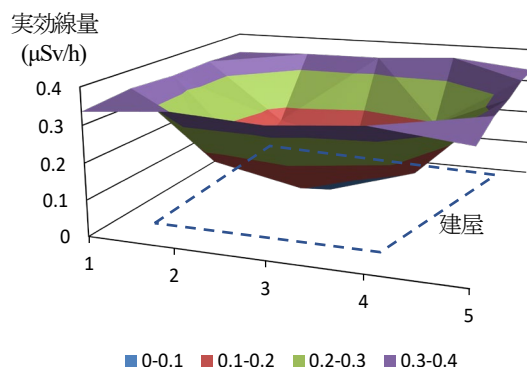


図1 建屋の周囲の土壌に ^{137}Cs が分布した計算体系。



位置 \ 壁材	木材 ($\mu\text{Sv/h}$)	コンクリート ($\mu\text{Sv/h}$)
屋外 (高さ 0~1m)	0.345	0.341
屋外 (高さ 1~3m)	0.215	0.209
屋内 (高さ 0~1m)	0.091	0.035
屋内 (高さ 1~3m)	0.121	0.040

図2 S-Monte による建屋内外の実効線量分布の結果。

3. 中性子拡散計算コード S-Dif

軽水炉・高速炉の燃料・炉心計算に中性子の拡散計算法を用いる CITATION, MOSRA-light などのコードが多数開発され、燃料設計、炉心管理に広く実用されている。これらの拡散コードは多機能な炉心管理システムの一部であったり、コンピュータサーバーで稼働するように複雑化している場合があり、学生などの初学者が学習や研究などで簡単に使えるコードは少ない。このため、コンパクトかつ便利な中性子拡散計算コード S-Dif を Excel + VBA 上に開発した^{2,4)}。

S-Dif の拡散計算には、簡便なメッシュ中心差分法および高速な交互方向陰解法型 (ADI : Alternating Direction Implicit method) の繰り返し計算法を用いている。領域単位の中性子バランスを用いる加速法も利用可能である。S-Dif は、計算機能を限定しているが、平板、無限円筒、球の 1 次元体系、直交座標 XY と円筒座標 RZ の 2 次元体系、および直交座標 XYZ の 3 次元体系の拡散計算が可能である。国際原子力機関 IAEA の 2 次元および 3 次元の炉心ベンチマーク問題を解析し、計算性能を検証した。

本学工学部原子力工学科の授業で S-Dif を利用している（図 3）。履修学生は IAEA の 2 次元問題に取り組み、燃料集合体の配置変更により炉心の出力分布が変化することを自ら計算し、理解を深められる。卒業研究でも軽水炉臨界炉 TCA を対象に S-Dif を適用し、実効中性子増倍率・中性子束分布などの原子炉核特性を計算した例を図 4 に示す。S-Dif の結果は TCA の実験結果、中性子輸送モンテカルロ計算コード MVP の結果と一致した。

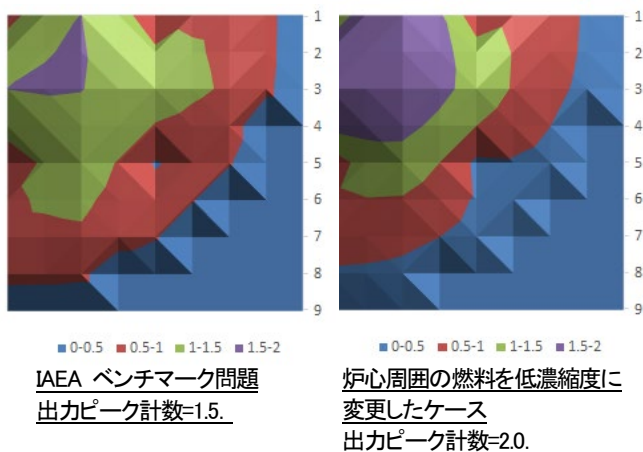


図3 S-Difによる炉心内の出力分布の結果.

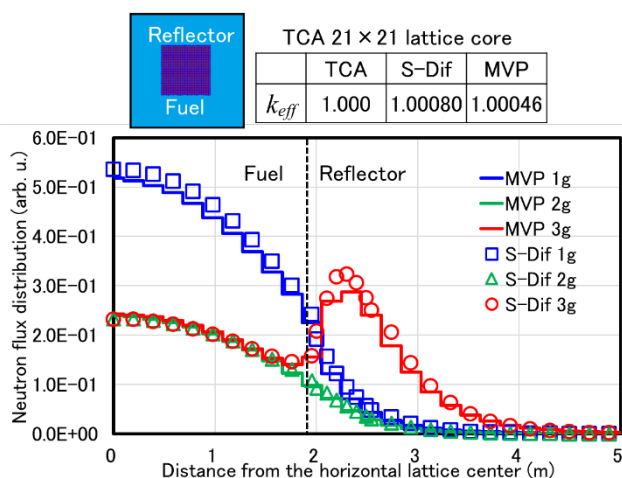


図4 S-DifによるTCA炉心計算の結果.

4. 核種生成・崩壊計算コードS-Decay

使用済燃料内の放射性核種の質量・放射能・発熱量、中性子照射による放射化量の計算には、ORIGEN2.2⁵⁾、DCHAIN⁶⁾などの計算コードが開発され、広く実務で使われている。中性子・光子の輸送・遮蔽・拡散計算コードと比較してORIGEN2.2コードの利用は容易であるが、より簡便かつ可視化に適する核種生成・崩壊計算コードS-DecayをExcel+VBA上に開発した³⁾。S-Decayでは核種生成崩壊連鎖の計算に簡便なBateman法を採用し、その循環・重根問題を近似法により回避している。

S-DecayではJENDL崩壊データファイル2015 (JENDL/DDF-2015)⁷⁾から γ 線のエネルギーと放出割合を抜き出し、個別 γ 線放出テーブル(Discrete gamma ray table)を用意している。このテーブルを用いる場合、例えば、 ^{60}Co の γ 線エネルギー1.173MeVと1.332MeVのデータはそのままテーブルに収納されているため、ORIGEN2.2の放出 γ 線エネルギー固定18群とは異なり、放出 γ 線エネルギー群構造を任意に指定できる。

^{235}U 濃縮度4.7%のPWR燃料10gの燃焼中の核種質量の変化について、核データライブラリORLIBJ40⁸⁾を共通に用いてS-Decayの計算結果とORIGEN2.2の計算結果を比較した。主要なアクチニド核種の計算結果を図5に示す。重要なFP核種 ^{90}Sr 、 ^{90}Y 、 ^{137}Cs の質量についても同様に比較し、両計算結果は一致した。同燃料を燃焼度60GWd/tで取り出した後、冷却2000日時点の γ 線放出率をエネルギー群毎に図6に示す。S-DecayではORIGEN型18群と

個別型18群の両型で γ 線放出率を出力できる。8群以下の低エネルギー群ではORIGEN型 γ 線データよりも個別型 γ 線データを用いた計算結果のほうがORIGEN2.2の計算結果と一致した。燃焼後に冷却中の燃料の崩壊熱・中性子発生率についても、S-DecayとORIGEN2.2の計算結果を比較し、S-Decayは教育訓練用として十分な計算精度を持つことを検証した。

本学工学部原子力工学科の授業でS-Decayを利用している。履修学生は使用済燃料内のアクチニド核種・核分裂生成核種の組成・放射能を計算し、核燃料サイクルの定量的な理解を深められる。卒業研究でもPWR燃料にS-Decayを適用し、燃焼後の燃料内の核種組成の実測値と計算値を比較し、計算精度を確認した。

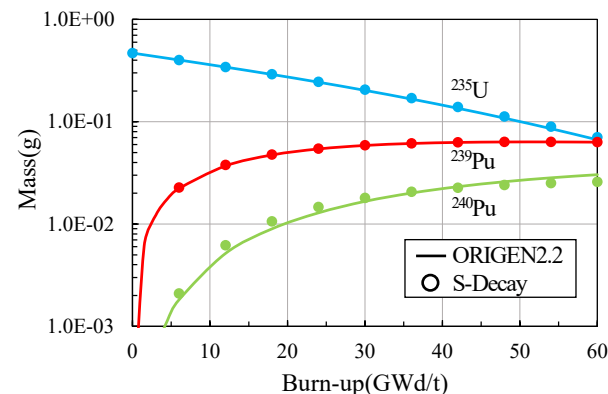


図5 S-DecayによるPWR燃料10gの燃焼中の核種質量変化の結果.

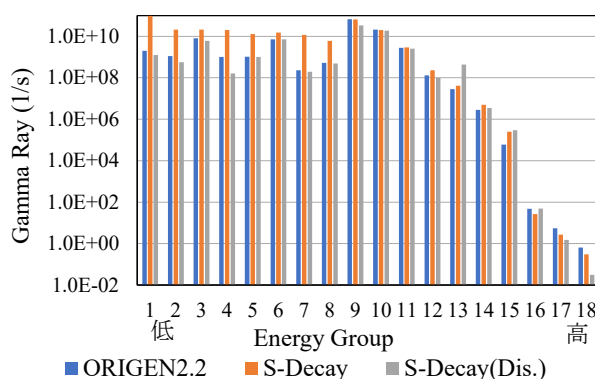


図6 S-DecayによるPWR燃料10gの燃焼後2000日冷却時の γ 線放出率の結果.

5. 結言

今後、原子炉・核燃料・放射線を対象とするSシリーズの3コードを公開・配布し、教育訓練・研究の利用から実践現場での利用へも展開していきたい。

参考文献

- 1) 東海大学紀要工学部 VOL.60, No.1, pp.25-32 (2020).
- 2) 東海大学紀要工学部 VOL.60, No.1, pp.17-24 (2020).
- 3) 東海大学紀要工学部 VOL.61, No.1, pp.13-20 (2021).
- 4) ICNC 2023 Sendai, Session07-Track09 (2023).
- 5) CCC-371 (2002).
- 6) JAERI 1250 (1976).
- 7) JAEA-Data/Code 2015-030 (2016).
- 8) JAEA-Data/Code 2012-032 (2013).

1. IAEA 原子力・放射線安全リーダーシップに関する国際スクール

東海大学は2024年2月19日～3月1日の10日間の日程で国際原子力機関(International Atomic Energy Agency : IAEA)との共同で、日本・アジア諸国の中堅の人材を対象にした「IAEA 国際スクール 原子力・放射線安全リーダーシップ」を開催した。本スクールは、IAEA が2017年10月から原子力・放射線分野の安全利用を担う次世代リーダーの育成を目的に世界各国で行っている研修プログラムの一つであり、IAEA と本学が2018年度に締結した「原子力安全教育分野における実施協定」に基づき実施している。今回で4回目の開催であり、IAEA、日本原子力研究開発機構、日本原子力産業協会の支援を得て参加者を募り、今年度は国内から13名、国外から14名の計27名の参加があった(図1)。

本スクールは、8日間の研修と2日間の施設見学(東京電力福島第一原子力発電所および廃炉に関連する施設)により構成され、IAEA が作成した一般安全要件のドキュメントの一つである GSR-Part2 に基づき、原子力安全のためのリーダーシップとマネジメントに関する能力を開発することを目標としている。また、本スクールでは、講師から参加者へ一方的に知識を提供するいわゆる授業形式の講義は一切行わず、グループワーク、ゲーム、ケーススタディなどを多用したダイナミックな教育アプローチが採用されている。このうち、特にケーススタディは本スクールのメインの教育プログラムであり、原子力分野の現場で起こり得る要件が競合する場面(例えば、スケジュールと安全の衝突)が想定され、場の設定、登場人物、事象の前段階から事象発生までのプロセスがシナリオとして具体化されている。本スクールでは、参加者が登場人物の振る舞いや意思決定プロセスをリーダーシップの観点から複数の切り口で検証し、最後にそれらを踏まえたロールプレイを行った。このようなプログラムを通じて、事故に至る可能性のある複雑な状況や原子力分野の現場で直面しそうな立場や役割を疑似体験し、改善を試みることでより深いレベルでの理解が達成された。

2024年度も中堅の人材を対象として IAEA 国際スクールの開催を2025年2月に予定していることから、関係機関・大学から多くの参加を期待している。



図1 IAEA 国際スクールでの集合写真。

2. IAEA 原子力安全基準研修

東海大学は2024年3月11～14日の4日間の日程で IAEA との共同で、「原子力安全基準研修」を実施した。本研修は、文部科学省が公募する「国際原子力人材育成イニシアティブ事業(原子力人材育成等推進事業費補助金)」のうち、「原子炉及び大型実験施設等を活用した持続的な原子力人材育成拠点の構築(令和2～8年度)」の中に位置付けられている。

研修では、国内外から大学14名、一般57名の計71名の参加があり(オンライン参加を含む)、IAEA および国内の専門家(原子力規制庁、東海大学)を講師とする原子力安全基準についての講義が行われた(図2)。研修は、対面と遠隔によるハイブリット形式にて実施し、IAEA が定めた安全原則を始めとして、IAEA 安全基準の全ての分野に共通した安全の基本的な考え方、安全基準に関連するドキュメントの作成プロセス、安全基準文書のデータベース、安全基準に関する最新の動向など多岐にわたるテーマについて講義が行われた。2023年度の講義に用いた資料を本学国際原子力研究所ホームページにて公開し、次の URL からアクセス・ダウンロードできる。

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

IAEA の安全基準に関するドキュメントを包括的かつ体系的に学べる機会は限られていることもあり、研修後に実施したアンケート調査では、参加者から高い評価が得られた。2024年度も先述のスクールと同様に本研修の開催を2025年3月に予定していることから、関係機関・大学から多くの参加を期待している。



図2 IAEA 原子力安全基準研修での集合写真。

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 所報 2023年度

発行日：2024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