



東海大学

国際原子力研究所

2022年度 所報

2023年9月30日

原子力の新潮流を確かなものにするために

国際原子力研究所 所長 近藤 駿介

2021年10月に閣議決定された第6次エネルギー基本計画は、東京電力福島第一原子力発電所の事故の反省と事故後10年間の復旧・復興の取り組みを確認し、この取り組みを引き続き着実に進めるとした上で、2030年度までに温室効果ガス排出量を50%削減し、2050年にはカーボンニュートラルを達成するという野心的な目標を掲げ、その実現に向けて、これまで培ってきた脱炭素技術を普及させる取り組みや、エネルギー安定供給の確保やエネルギーコストの低減に資する取り組みを着実に進めるとしています。

その核となる取り組みは、エネルギー消費部門における効率向上とエネルギー供給部門における構造改善です。特にエネルギー供給部門では非炭素エネルギーである再生可能エネルギーや二酸化炭素排出量の少ない天然ガスの利用と二酸化炭素回収事業の拡大、そして再生可能エネルギー供給の間欠性を補うエネルギー貯蔵技術やそうした欠点を持たない原子力発電技術の利用拡大が重要です。

ところが、その後、この方針において一定の役割が期待されていた天然ガスの供給環境が激変しました。世界の天然ガス供給において大きなシェアを担っているロシアが、自国の安全確保を理由に隣国ウクライナに侵攻したからです。我が国を始め、このロシアの暴挙を止めさせたいとする国々は共同して同国に経済制裁を課し、この国からの天然ガスの購入契約を打ち切り、他に供給源を見出すこと、再生可能エネルギー利用の拡大、エネルギー貯蔵能力の増大、あるいは原子力発電割合の増大を実現することに格段の力を入れる方向に舵を切りました。

このうち、原子力発電の利用を拡大するためには、我が国の場合、第一に既存の設備の再稼働の実現を丁寧に追求していくことが大切です。今日（2023年8月）再稼働しているのは11基であり、設置変更許可を得て再稼働に向けて所要の工事を行い、あるいは、地域社会の同意を得る取り組みの最中にあるのが6基、審査中が10基です。

原子力規制委員会の許可を得てから再稼働に至るまで時間が長いのは、津波対策や重大事故対策の設備工事、改定した防災対策に関して地域社会の同意を得るのに時間が掛かるからです。東京電力福島第一原子力発電所事故から得た教訓を踏まえて、電気事業者が原子力発電に係るリスクを社会の受け入れ可能な水準にすることに効果的な事故拡大防止対策と防災対策を整備するための工事の実施や、周辺住民がその妥当性について判断することに時間を要するのは当然です。この間、手戻りやボタンのかけ違いが生じないように、丁寧に取り組みを進めていくことが大切です。

加えて、使用済み燃料の再処理を実施し、その過程で発生する放射性廃棄物の地層処分場を開設する取り組みや廃炉を選択した24基の廃止措置とともに発生する放射性廃棄物の最終処分の取り組みを、原子力発電を持続可能な技術とするためにこれらは必須のものであることの認識を国民と共有して、確実に前に進めることも大切です。

一方、中期的取り組みとして求められるのは、産業界が市場価値を認めて実用化に投資する意欲を持つ革新的原子炉を、実用化できる成熟度を有するかどうかを見極め、確実に実用化していくことです。新しい安全規制基準に適合すると考えられる革新的な軽水炉や、再生可能エネルギーとの共存可能性が高いと考えられる発電と水素製造の二重目的をもつ原子炉システム、エネルギー貯蔵能力を強化した原子炉システム等が、この観点から最有力候補であると考えます。

現下の情勢に鑑みれば、これらを廃炉のリプレースの取り組みとして実用化・先導的に採用することが合理的です。そうした観点からよく設計されたリードプロジェクトを選定し、これらがこの国の安全保障の確保に有効であることを踏まえて、国がその実現を手助けするべく、これへの投資の確実な回収を可能にする制度の整備を急ぎ、これらの実現に向けて国民と対話を重ねるべきです。

長期的取り組みは、革新的エネルギー技術や高い分野横断性を持つ基盤的新技術の開発を、そのもたらす公益の大きさに応じて国が投資を分担して推進することです。具体的な例は、革新材料、AI/IT、バイオ、ナノテクに基づく革新機器、構造、設備を取り入れた革新的原子炉や革新的放射線発生装置の開発ですが、同時に、これらの取り組みの前提条件となる人材育成や国際核不拡散体制の充実・強化に貢献していくことも忘れてはなりません。

原子力人材育成の取り組みが直面している課題は、人々が日常の少ない局面で原子力科学技術の成果を享受しているにも拘らず、放射線、放射能に対する忌避感をもっていることです。これを乗り越えて熱心な若い世代をこの分野に惹きつけるためには、上述した原子力科学技術への社会の期待を彼らが感じられるようにすることが最も大切です。他方で、現代社会においては若い人を惹きつけるものが多様化しています。科学技術に限っても同様です。そして、そのことは実は核不拡散体制を支える学術を含む原子力科学技術においても、上述したように、若い人々を惹きつけてやまない革新材料、AI/IT、バイオ、ナノテクを駆使することで将来の貢献の道を探索している状況にあります。この状況において取り組むべき課題は、原子力科学技術やこれらの新興科学技術の専門家、そして将来において科学技術の活用を通じて社会に貢献したいとする人々の交流機会をできるだけ多く用意することだと思っています。

東海大学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し、より活発にすることで、内外の原子力界の発展に貢献していきます。

(2023年8月)

目次

地球温暖化を考慮した異常降雪事象に関する確率論的リスク評価 ．．．．．	堺 公明	1
医療への放射線応用技術評価 —重粒子線のがん治療向上のための基礎研究— ．．．．．	吉田 茂生、伊藤 敦	3
テクネチウム同位体の生体撮像実験 ．．．．．	櫛田 淳子	6
新規抽出媒体による金属イオンの抽出挙動と炭酸塩水溶液による ウラン廃棄物の処理 ．．．．．	浅沼 徳子、稲津 敏行	8
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 ．．．．．	利根川 昭	10
発電炉シミュレータSARSによる事故解析と原子力人材育成実習へ導入 ．．．．．	亀山 高範	12
IAEAとの協力による取組み ．．．．．	若杉 圭一郎	14
「国際原子力研究所特別公開講座-2022」開催報告 ．．．．．	櫛田 淳子	15

1. ナトリウム冷却高速炉の確率論的リスク評価

東京電力福島第一原子力発電所の事故以降、異常な気象事象を含む外部ハザード等の影響に対する確率論的リスク評価 (PRA: Probabilistic Risk Assessment) が規制要件として求められている。高速炉は最終ヒートシンクを大気とした設計例(図1)が多いことから、本研究では、上空側からのハザードに着目したリスク評価手法の研究を進めている。

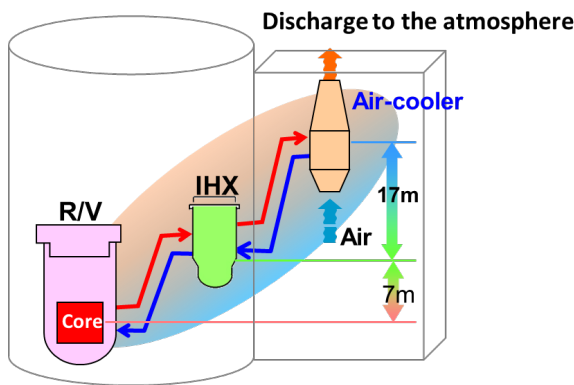
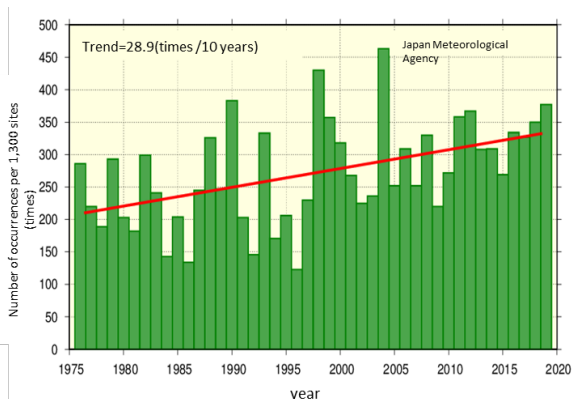


図1 ナトリウム冷却高速炉の崩壊熱除去の構成

近年、地球温暖化(GW: Global Warming)の影響により著しい気象現象による災害が頻発している。過去の記録の範囲を超えた異常事象の発生であり、リスク評価上もそれらの未来の発生頻度の統計処理に留意する必要がある。図2は日本における短時間強雨(50mm/hr以上)の年間発生回数の経時変化を示している。地球温暖化の影響により、短時間の豪雨回数は明らかに増加する傾向にあり、プラントへの影響がより大きな積雪事象について評価を実施することとした。本研究では、気象研究所の専門家にアドバイスを頂き、2050年までのGWの進展を考慮した異常な降雪事象を想定したハザード曲線を作成するとともに、それらのナトリウム冷却高速炉への影響を評価した。



Annual change in the number of occurrences of precipitation of 50 mm or more per hour in Japan (1976-2019) Source: Japan Meteorological Agency

図2 日本の短時間強雨の発生回数
出展: 気象庁「日本の気候変動」

2. 研究の概要

本研究で用いる確率論的リスク評価手法は、従来のイベントツリーによる固定された事象進展シナリオに対して発生頻度を評価する静的PRA手法をさらに発展させ、CMC法(Continuous Markov Chain Monte Carlo method)によって、事象発生のタイミングを確率的に設定したプラント動特性解析による動的なPRA手法を用いている(図3)。モンテカルロ法によってランダムなタイミングで事象を進展させて、結果的に発生した重大事故シークエンスの頻度を評価する手法である。

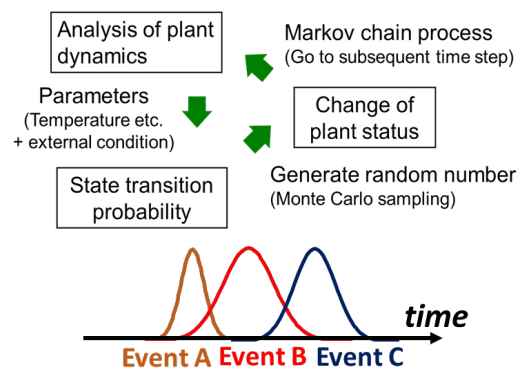


図3 CMC法による動特性解析手法概念

既存の気象観測記録に加えて、今後のGWによる異常降雪の増加傾向を考慮してハザード曲線を作成した。図4に示すように、年最大の日降雪量(24時間に積雪する雪の深さ)について、1万年再現期待値により比較した場合、GWの考慮無しの降雪量は1.4(m/day)、GWを考慮した場合の降雪量は2.2(m/day)となった。

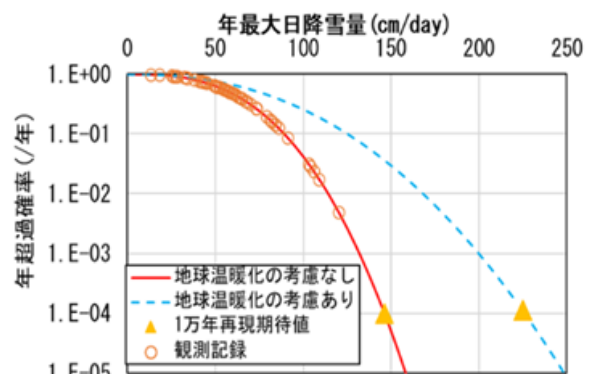


図4 年最大の日降雪量に関するハザード曲線

これらの1万年再現期待値に対して、CMC法による解析をそれぞれ1000ケース実施した。積雪による送電線の損傷、崩壊熱冷却用の空気冷却器の吸気フィルタの雪による閉塞、それらに対するアクセシビリティ管理としての除雪を繰り返して実施することを考慮し、積雪スピードが大きい場合は、除雪に失敗する確率が大きくなるものと仮定した。それらの解析の結果、炉心損傷に至る

年超過確率はGWを考慮しない場合 32.3%、考慮した場合 70.7%となり、GWを考慮することによって、炉心損傷の確率は倍増することが明らかになった。また、24時間経過までに到達する炉心出口温度を評価した。図5に示すように、GWを考慮した場合の解析結果は、炉心出口温度のピークがより高い温度に多くが分布しており、炉心損傷への影響が大きいことを示す結果となった。

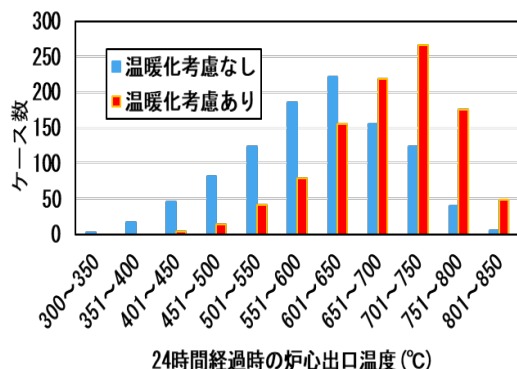


図5 24時間経過時に炉心出口温度が到達する最高温度の度数分布

3. 展望

本研究は、日本原子力研究開発機構から東海大学への委託研究契約に基づき、解析コードの貸与と実プラント情報の開示を受けて実施した。解析を実施した学生は、JAEAの夏季実習生として、一定期間JAEAに滞在して解析手法を習熟し、大学のコンピュータにて解析評価を実施した。従来より、研究成果は公表しており、米国機械学会主催の原子力工学国際会議(ICONE29)へプロシーディングス論文²⁾を投稿し、2022年8月に発表講演を実施した。北米、欧州、中国、アジアの世界各地から事前の選抜により参加した60名の学生によるコンペティションにおいて、本発表講演がベストポスター賞を受賞した。また、2022年11月には、日本原子力学会が主催した日韓の第12回原子炉熱流動と安全に関する日韓シンポジウムの学生セッションに3名が参加し、本テーマの成果を2件紹介した^{3,4)} (写真)。



写真 第12回原子炉熱流動と安全に関する日韓シンポジウム学生セッション

(<https://www.nthas12.org/Student.html>)

今後、さらに懸念される人的過誤の条件等を考慮したPRA研究^{5,6)}を蓄積し、国際的な高速炉のリスク評価手法の高度化に貢献していきたい。尚、本研究を遂行した大学院生中島理紗子はその成果が評価され、2022年度学校法人東海大学松前重義記念基金「松前信子奨励賞」を受賞した。

4. 業績

【国際会議論文】

- 1) Suzuki, M. et al., "Quantitative risk assessment of accident managements against volcano ash hazard in a sodium-cooled Fast reactor," Ibaraki, Japan 27th Int. Conf. on Nucl. Eng., Ibaraki, Japan (2019). <https://doi.org/10.1299/jsmeicone.2019.27.1982>.
- 2) Nakashima, R. et al., "Quantitative risk assessment with CMMC method on abnormal snowfall incident for a sodium-cooled Fast reactor", paper No: ICONE29-93039, Shenzhen, China 29th Int. Conf. on Nucl. Eng., Shenzhen, China (2022). <https://doi.org/10.1115/ICONE29-93039>

【国際会議発表】

- 3) Risako Nakashima, Akari Koike, Takaaki Sakai, "Risk Assessment of a Sodium-cooled Fast Reactor for Abnormal Snowfall with Considering Global Warming 1) Hazard Curve Analysis with Annual Exceedance Probability for Abnormal Snow Fall Risk", 8th Japan - Korea Joint Seminar on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety for Students and Young Researchers -NTHAS12 joint seminar-, Miyazaki, Japan, October 28-30, 2022.
- 4) Akari Koike, Risako Nakashima, Takaaki Sakai, "Risk Assessment of a Sodium-cooled Fast Reactor for Abnormal Snowfall with Considering Global Warming 2) Quantitative risk assessment using CMMC method", 8th Japan - Korea Joint Seminar on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety for Students and Young Researchers - NTHAS12 joint seminar -, Miyazaki, Japan, October 28-30, 2022.

【国内学会発表】

- 5) 中島理紗子, 他, 「ナトリウム冷却高速炉における異常降雪事象に関するCMMC法を用いた定量的リスク評価」, 学生ポスターセッション, 日本原子力学会 2022年春の年会(2022年3月).
- 6) 小池朱里, 他, 「CMMC法によるナトリウム冷却高速炉の確率論的リスク評価 -外部ハザードに対する運転員の認知確率の検討-」, 学生ポスターセッション, 日本原子力学会 2023年春の年会(2023年3月).

医療への放射線応用技術評価

—重粒子線のがん治療向上のための基礎研究—

工学部応用化学科 吉田 茂生、伊藤 敦

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、前年度まで行ってきた放射光施設におけるマイクロビーム装置の利用減少に伴い、新たに重粒子線に関する以下の2テーマを設定した。

- 1) 重粒子線によるがん治療効果向上のための基礎研究：重粒子線のエネルギー付与とDNA損傷
- 2) 放射線によるがん治療向上を目指した低酸素下にある細胞の放射線応答の研究

これらは量子科学技術研究開発機構(QST)の2研究所の重粒子線加速器を用いた課題である。重粒子線によるがん治療は、通常のX線に比べてがんへの線量集中性、致死効率の点で優れた特性をもつとされる。なぜ致死効率が高いのかについては多くの研究があるが、我々は重粒子線の生体へのエネルギー付与という基礎的過程の観点からX線と比べての違い、有効性を明らかにすることを目的とした。

もう一つの重粒子線の生物作用の重要な特徴は、X線で見られる酸素効果(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)がなくなるというものである。腫瘍組織には低酸素領域が存在し、X線抵抗性となるため、その領域をいかに制御するかががんの放射線治療で重要な課題の一つとなっている。重粒子線は低酸素領域も酸素領域と同様に作用するためにX線治療に比べて有利であるとされるが、低酸素領域が放射線に対してどのように反応するのかを理解することは、重粒子線での酸素効果減少の機構を明らかにするばかりでなく、X線による治療効果の向上のためにも重要である。

2. 研究の概要

- 1) 重粒子線のエネルギー付与と誘発されるDNA損傷
共同研究者：平山亮一博士(QST量子医科学研究所)
舟山知夫博士(QST高崎量子応用研究所)
浦野建太氏(JAEA安全研究センター)

本テーマは、重粒子線のような高LET放射線の生物作用はその粒子トラック構造と密接に関連しているとの観点

から、高LET放射線の生物作用の特徴をトラック構造に沿って生成されるDNA放射線産物を検出することによって明らかにしようとするものである。

高LET放射線のトラック構造は、一般に電離密度の高い中心部のコアと周辺部の二次電子による低LET領域であるペナンプラに分けて考えられている。従ってこの両者の寄与を評価することが高LET線の生物作用を知るために必要である。ペナンプラの生物作用への寄与について、我々は高LET線の細胞死においても低LET放射線での作用に主要なOHラジカル由来の損傷の寄与が大きいことを示してきた^{1,2)}。そこで次段階として、ペナンプラ領域とそれによるDNA損傷領域を可視化するために、OHラジカルによるDNA塩基の酸化的損傷8-ヒドロキシデオキシグアニン(8-OHdGと略記)の生成の空間分布を免疫染色法によって求める方法を開発した。水を含んだ環境下で照射するために、試料として水不溶性のDNAシート(DNAと脂質の複合体シート)³⁾を用い、均一なDNAシート作製法の開発、照射したDNAシートでの8-OHdG検出法の検討などを行った。その結果、DNAシートに垂直に重粒子線を照射した場合、8-OHdG由来と思われる蛍光ドットを観察することができた。

本年度は、観察された蛍光ドットが粒子トラック由来であることを確認するため、粒子トラックをエッチピットとして検出できる固体飛跡検出用プラスチック板CR-39上にDNAシートを作製し、入射粒子によるエッチピットと8-OHdGの蛍光ドットの位置の比較を行った。

図1にHeイオン由来のエッチピットを示す。

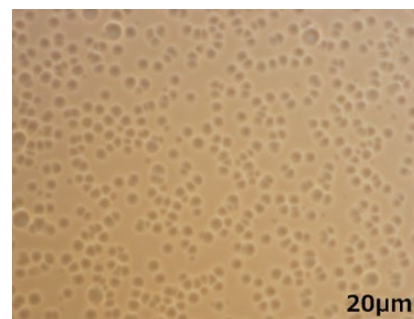


図1 炭素イオンビーム照射によるCR-39上のエッチピット。LET: 13keV/ μm , 線量: 0.67Gy

同時に撮影した8-OHdGの蛍光ドット画像を図1に重ね合わせた(図2)。赤丸は蛍光ドットとエッチピットが

ほぼ一致した部位を示した。エッチピット上で 8-OHdG ドットが見られないもの、ノイズと思われる蛍光ドットもあり、さらにデータを集積することが必要である。

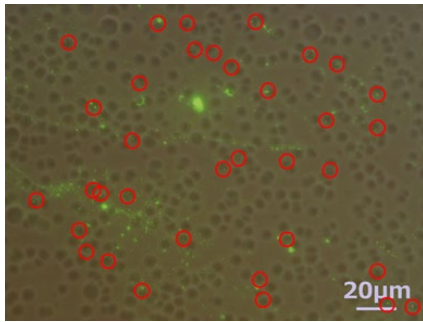


図 2 炭素イオンビーム照射による DNA シート上の蛍光ドット。赤丸は蛍光ドットとエッチピットが一致していると思われる部位を示す。

2) 低酸素下での放射線に対する応答

共同研究者：平山亮一博士 (QST 量子医科学研究所)

① X 線照射に対する応答

がんの X 線治療では通常総放射線量を一度に照射するのではなく、分割して照射する (分割照射と呼ばれる)。まず初回照射で腫瘍組織内の酸素を含んだ領域を酸素効果により不活性化する一方、X 線抵抗性の低酸素領域が残る。第 1 回目と第 2 回目照射の間にこの低酸素領域の一部は再酸素化され、第 2 回目照射によってその部分が消滅する。しかしながら、再酸素化されずに残った低酸素領域もあり、さらに第 3 回目の照射で低酸素領域の一部酸素化された領域に損傷を与える。こうして照射を繰り返すことによって、低酸素領域を徐々に縮小させ、最終的に消滅させる。この過程で照射後の低酸素領域は、一部酸素下され一部はそのまま低酸素状態にある。この低酸素領域をいかに効率よく不活性化できるかが問題である。そのために、まずは照射後低酸素状態で組織 (細胞) がどのように放射線による損傷に対処するのかを調べる必要がある。これまでの研究では X 線照射時のみ低酸素環境としており、照射後低酸素状態に維持して細胞の応答を調べる研究はほとんどない。本研究では低酸素状態で DNA 損傷の修復応答を調べる目的で、DNA 二重鎖切断 (double strand breaks: dsb) 修復の経路の 1 つが欠損した細胞を用いて、酸素下及び低酸素下の環境下での野生株 (dsb 修復が正常な細胞) の応答と比較した。

細胞はチャイニーズハムスター卵巣細胞 (Chinese Hamster Ovary: CHO 細胞) 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* 細胞を用いた。DNA 損傷は染色体異常の一種である微小核形成頻度を指標とした。X

線照射後 40 時間培養し、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 3 に結果を示す。野生株、*xrs6* 株ともに線量増加につれて微小核頻度は増加した。また、酸素・低酸素環境下ともに、*xrs6* 細胞の方が野生株に比べて微小核頻度が高かった。照射後培養時の酸素環境に関しては、野生株での微小核形成は酸素濃度に依存しなかったが、対照的に *xrs6* 細胞では低酸素下での培養で微小核形成頻度が有意に高かった。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。

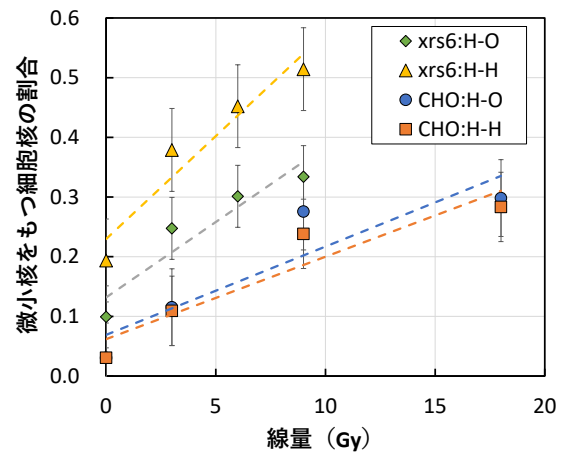


図 3 X 線による微小核形成の線量依存性。

CHO: 野生株, *xrs6*: dsb 修復経路 NHEJ 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。

② 重粒子線照射に対する応答

重粒子線は X 線と異なったタイプの DNA 損傷生成が予想されるので、照射後の低酸素環境で重粒子線による DNA 損傷に細胞がどのように応答するかは大変興味深い。本テーマでは CHO 細胞を用いて種々の重粒子線を照射し、照射後酸素環境の影響を調べた。

用いた重粒子は、量子医科学研究所重粒子線がん治療装置 (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba: HIMAC) からの Ar (LET 90keV/μm)、Fe (LET 200keV/μm)、Si (LET 55keV/μm)、C (LET 13keV/μm) である。微小核形成検出の方法は X 線の場合と同様である。

いずれの重粒子でも酸素存在下の方が低酸素下より微小核形成が有意に大きいことが判明した。これは X 線では酸素の有無にかかわらず同程度の微小核形成が観察されたことと異なる結果となった。一例として図 4 に Ar 粒子での微小核形成の線量依存性を示した。

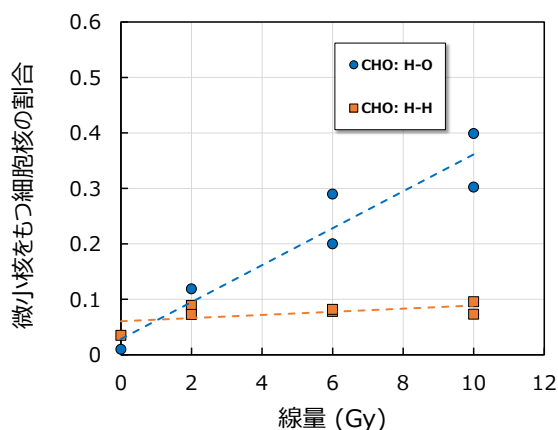


図4 Ar線による微小核形成の線量依存性。

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。

これらの結果は、重粒子線によるDNA損傷生成あるいはDNA損傷の修復に照射後の酸素濃度が大きく影響することを示唆している。今後は粒子種及びLETによる違いなどさらにデータを蓄積し、X線の場合との応答の違いを明らかにしたい。

3. 展望

今年度は重粒子線によるがん治療の有効性を、生物作用機構を明らかにすることによって裏付け、さらに作用メカニズムを理解することから将来的により効率的な治療方法を提案することを目標として2つのテーマを設定した。すなわち、重粒子線特有の生物作用をエネルギー付与の構造から明らかにすること、及び重粒子線によるがん組織の低酸素領域の制御を目指して照射後低酸素状態にある細胞の応答を調べる2つの課題に取り組んだ。

どちらの課題もX線の場合と異なる結果が得られており、今後さらにさまざまな重粒子線種及びLETでの照射結果から一貫した解釈を得たいと考えている。

本研究は前年度までのテーマと同様に外部研究機関との共同研究によって実施された。加速器のような大型の装置、あるいは特殊なビームを作り出す装置の活用は、研究の独自性の点で優位となるばかりでなく、学生の教育面からも大変有効であったことを付記したい。

4. 業績

【論文】

- 1) A. Ito, K. Urano, A. Sudo, B. Daisi, S. Yoshida, R. Hirayama, Y. Furusawa, Y. Yokota, T. Funayama,

New trial toward the precise identification of fluorescence dots originated from oxidative damage in DNA thin sheet perpendicularly irradiated with heavy ions, QST Takasaki Annual Report 2021, 75, National Institutes for Quantum Science and Technology, (2023).

- 2) M. Torigata, A. Ito, K. Urano, S. Yoshida, K. Yokoyama, R. Oshitanai, N. Niikura, Y. Tokuda, Ca accumulation in hair medulla as a possible early diagnosis of breast cancer: Characteristics of Ca content in hair specimens from breast cancer in advanced stages, Photon Factory Activity Report, **39**, 92 (2022).

【学会等発表】

- 1) 小嶋 光明、伊藤 敦、宇佐美 徳子、大原麻希、鈴木啓司、甲斐 倫明、マイクロビーム放射線療法の抗がん効果を細胞間コミュニケーションの視点から考える～不均一照射した正常細胞とがん細胞の生存率の比較～日本放射線影響学会第65回大会、2022年9月
- 2) 小泉 凱也、澤田 陽加、吉田 茂生、伊藤 敦、平山亮一、放射線がん治療における低酸素生物影響“CHO細胞におけるX線誘発微小核形成頻度の計測”、第7回三私大学合同研究発表会、2022年9月
- 3) 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環境下における放射線生物影響、令和5年度原子力学会関東・甲越支部学生研究発表会、2023年2月

【受賞】

令和5年度原子力学会関東・甲越支部学生研究発表会奨励賞（小泉 凱也）

参考文献

- 1) A. Ito et al.: Contribution of indirect action to radiation-induced mammalian cell inactivation: Dependence on photon energy and heavy-ion LET, Radiat. Res., **165**, 703-712 (2006).
- 2) R. Hirayama et al., Contributions of direct and indirect actions in cell killing by high-LET radiations, Radiat. Res., **171**, 212-218 (2009).
- 3) 岡畑恵雄、川崎剛美、サケ白子のDNAから作るバイオフィルム、未来材料、**3**, 46-51 (2003).

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

現在、がんの早期発見において、放射線診断装置は大きな役割を果たしている。現存の画像診断装置として PET (Positron Emission Tomography) や SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) が使用されており、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、それを目印として画像診断装置を使用して撮像を行う。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。しかしこの ^{99m}Tc の親核種である ^{99}Mo は、高濃縮ウランから生成されており日本国内では核不拡散条約から製造することが出来ず、全て海外からの輸入に頼っている[1]。また海外でも原子炉の老朽化や停止によって、日本国内での薬剤の供給不足が課題になってくる[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 (^{95}Tc) による新薬の開発を検討している。しかし ^{95}Tc のエネルギーは 765keV と高く、SPECT や PET では ^{95}Tc 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 $300\text{--}2000\text{keV}$ 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。本報告では、 ^{95}Tc の生体撮像実験の結果について述べる。

2. 研究の概要

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 ^{95}Tc を線源とし、京都薬科大学にてラットに投与して ETCC で撮像する実験を 2 回行った。1 回目は 2022 年 5 月 31 日から 6 日間、2 回目は 2022 年 12 月 13 日から 5 日間である。ここでは主に、1 回目の実験結果について報告する。 ^{95}Tc は、共同研究者の初川雄一氏、浅井正人氏によって MoO_3 をターゲットとしてタンデム加速器によって生成され[3]。精錬後に京都薬科大学まで運ばれる。京都薬科大学では、評価用のファントムとして ^{95}Tc の点線源 (1.9MBq) の撮像をおこなった後に、 ^{95}Tc を注

射したラット (2.2MBq) の生体撮像実験をおこなった。撮像時にラットは ETCC から 5cm 離れた状態で、体側左右に反転させて撮像した (図 1)。ETCC での撮像後に、京都薬科大学所有のペット用 CT を用いてラットの全身を撮像し、ラットの内臓と ETCC の撮像結果と重ね合わせて、ラットのどの部分から ^{95}Tc の放射が強く出ているかを確認した。また、各臓器での ^{95}Tc のカウントをガンマカウンターで計測した。

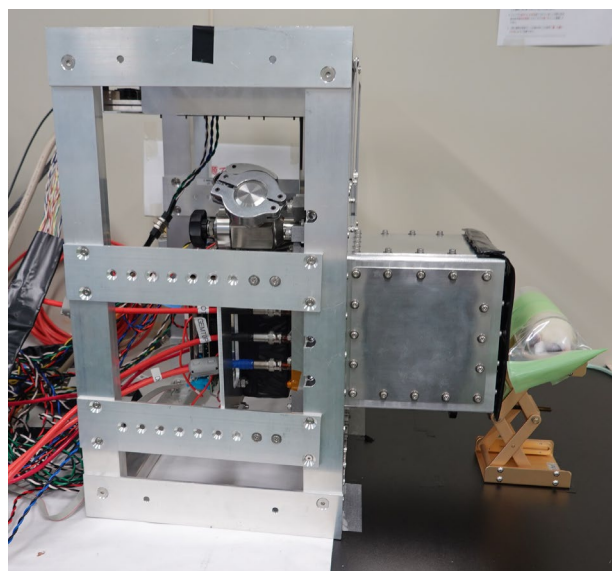


図 1 ラット生体撮像試験の様子

トータルで 65 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。その結果、図 2 で示した通り、ラットの撮像から検出されたエネルギースペクトルは 767keV と見積もられ (図 2 赤曲線のピーク値)、 ^{95}Tc からの放射ガンマ線のエネルギーである 765keV と非常に近いことが確かめられた。また、 ^{95}Tc からの放射のみを用いて画像再構成を行うため、エネルギーピークから 10% 以内のデータを用いて (図 2 紫線間のデータ)、放射位置の再構成を行った。さらに ETCC による撮像後に撮像した CT の画像との重ね合わせを行った結果を図 3 に示す。赤色が濃いところほど ^{95}Tc の強度が高いことを示す。この結果、ラットの肝臓周辺への集積がみられることがわかった。

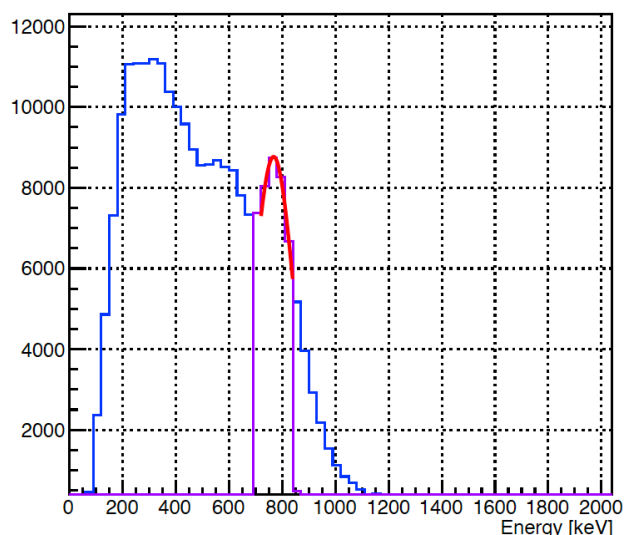


図2 ラット撮像全データのエネルギースペクトル

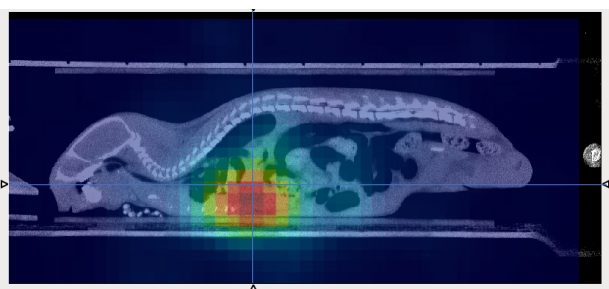


図3 ラットのCT画像とETCC撮像結果の重ね合わせ

また、撮像後の各臓器のガンマ線カウントを調べた結果、肝臓への集積が最も多く、2番目に集積の多い肺の5倍の強度であった。このことから、 ^{95}Tc は肝臓に集積していたことがわかった。

3. 展望

今回、 Tc-95 を用いたファントム撮像では21mm(FWHM)程度の空間分解能が得られ、生体の撮像実験では薬剤の集積が見られた。エネルギースペクトルは ^{95}Tc と一致し、計数率の減弱は半減期と同傾向であった。このことからETCCが ^{95}Tc などの既存のがん診断装置では検出できないエネルギー領域でも検出が可能であることがわかり、ETCCの医療現場への実用化および新たな放射線薬剤開発の可能性がより確かになってきた。次は現在開発中の2台目ETCCを用いた2台同時撮像および、よりがん診断の現実に近

い状況での撮像をおこなうため、担がんマウスの撮像試験を予定している。

4. 業績

【論文】

- 1) 野口幸稔, 電子飛跡検出型コンプトンカメラを用いた Tc-95 の生体多方向撮像とその定量的評価, 東海大学修士論文, 2022.
- 2) 茂木大地, 電子飛跡検出型コンプトンカメラの2台目の前段検出器の開発, 東海大学卒業論文, 2022.
- 3) 横田将史, 電子飛跡検出器コンプトンカメラ(ETCC)の2台目の後段検出器の開発, 東海大学卒業論文, 2022.
- 4) 土屋公平, Geant4 を用いたガンマ線形状変化シミュレーションおよび電子飛跡検出型コンプトンカメラの性能評価, 東海大学卒業論文, 2022.
- 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.

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- $^{95\text{m}}$. *PLoS ONE*, 13(12): e0208909, 2018.

1. イオン液体による金属イオンの抽出挙動

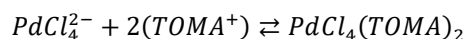
トリウム燃料再処理では、ThO₂が安定であることから、フッ化水素と硝酸の混酸系で燃料溶解が行われるため、腐食性及び反応性の高い燃料溶解液からの Th(IV)抽出が重要となる。また、Th(IV)の抽出錯体の有機相への溶解性が低いため、水相にも有機相にも混ざらない第三相の形成が課題となっている。そこで、化学的安定性に優れたフルオラス化合物と電解質の溶解性に富むイオン液体を、トリウム燃料再処理の抽出媒体として使用することを検討してきた[1, 2]。これまでに、Th(IV)の模擬元素として Ce(IV)を使用し、一連の抽出操作により、模擬トリウム燃料溶解液からフルオラス相を介してイオン液体相へ、Ce(IV)のみを回収できることを確認した。一方、模擬トリウム燃料溶解液中の Pd(II)は、methyl-trioctylammonium chloride (TOMAC, Fig.1)を抽出剤に用いると、イオン液体の 1-octyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (OMITf₂N)へ抽出されることが分かった。抽出率は硝酸濃度に依存し、低濃度ほど抽出率が高いことも明らかになった。TOMAC は 4 価アクチノイドの抽出剤として知られており、Pd(II)の抽出機構については明らかではない。そこで、本研究では、TOMAC 抽出剤に含まれる塩化物イオンに着目し、Pd(II)抽出機構を明らかにするため、塩酸水溶液を用いた抽出挙動について検討した。

Pd(II)濃度が 5mM となるように 0.025M 塩酸水溶液に塩化パラジウムを溶解し、水相として使用した。抽出相には TOMAC が所定の濃度となるように OMITf₂N に溶解したものをを用いた。抽出前後の水相中の Pd(II)濃度を測定し、分配比 D を下記の式から求めた。

$$D = \frac{C_0 - C}{C}$$

ここで、C₀と C はそれぞれ Pd(II)の初期濃度と分配後の濃度である。TOMAC 濃度と分配比 D の関係を Fig. 2 に示す。分配比 D は TOMAC 濃度の 2 乗に比例するものと考えられる。Pd(II)濃度に対して塩化物イオンが過剰に存在する塩酸水溶液中では、PdCl₄²⁻として溶存するものと考えられる。TOMAC は第 4 級アンモニウム塩であるため、イオン液体中で trioctylmethylammonium イオン (TOMA⁺) と塩化物イオンに解離しているものと考え

られ、PdCl₄²⁻と TOMA⁺の 2 分子がイオン対を構成して抽出されるものと推察する。



上記の分配平衡の平衡定数 K は分配比 D と以下の関係が成り立つ。

$$K = \frac{[PdCl_4(TOMA)_2]}{[PdCl_4^{2-}][TOMA^+]^2} = \frac{D}{[TOMA^+]^2}$$

これにより、分配比 D と TOMAC 濃度は次式の関係となり、Fig. 2 の相関関係となるが示される。

$$D = K[TOMA^+]^2$$

ここで、塩化物イオンは大過剰に存在し、Pd(II)との錯形成による濃度変化は影響しないものとする。

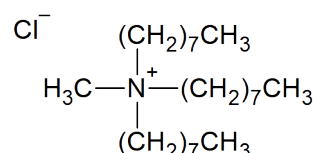


Fig. 1 TOMAC の構造式

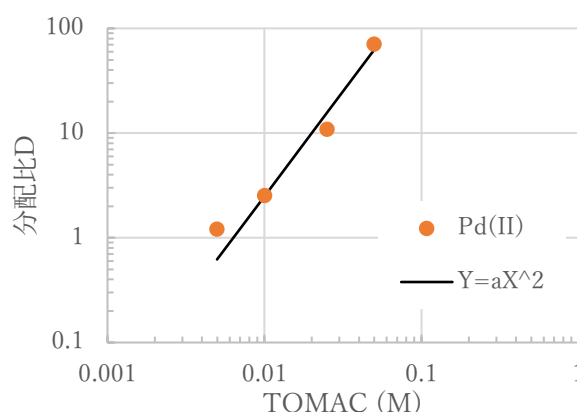


Fig. 2 OMITf₂N 中の TOMAC 濃度と Pd(II)分配比の関係
[HCl]=0.025M, [Pd(II)]₀=5mM

今後、硝酸水溶液中で Pd(II)が TOMAC/OMITf₂N に抽出される場合の抽出機構についても詳細に検討する。また、Tc(VII)の模擬元素として Re(VII)を使用した予備的検討において、Pd(II)と同様に低硝酸濃度環境下で、TOMAC/OMITf₂N に有意に抽出されることが分かっている。核燃料再処理工程において Tc(VII)の挙動を把握することは重要であり、今後詳細に検討する。

2. 炭酸塩水溶液浸出法によるシリカ澱物の処理

燃料加工施設等から発生するウラン廃棄物の中でも、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には、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。スラッジ中のウラン分離法として、 Na_2CO_3 水溶液を用いた炭酸錯イオン($\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$)形成によるウラン浸出法を検討している[3]。本研究では、ウラン廃棄物のうち模擬シリカ澱物を用いて、 Na_2CO_3 水溶液によるU(VI)浸出試験を行った。

U(VI)を含む硝酸水溶液と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。模擬シリカ澱物と Na_2CO_3 水溶液を固液比1:100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。

濃度の異なる Na_2CO_3 水溶液を用いて行った、浸出試験の結果をFig. 3に示す。 Na_2CO_3 濃度が高いほどU(VI)浸出率も高くなる一方、残渣率は低くなるのが分かる。また、浸出率と残渣率の合計は1に近いことから、シリカ澱物中のU(VI)の浸出には、澱物そのものの溶解を伴うことが分かった。水酸化ナトリウムのような強アルカリ性水溶液にシリカ澱物は溶解するため、濃度の高い Na_2CO_3 水溶液は強アルカリ性となり、シリカ澱物の溶解を促進したものと考えられる。そこで、 Na_2CO_3 とNaOHの混合溶液を用いて、模擬シリカ澱物の浸出試験を行った。その結果、0.3M Na_2CO_3 -0.4M NaOH水溶液では、2時間の攪拌によりU(VI)浸出率は97%に達した。また、浸出試験後の時間経過により、浸出液中には新たな沈殿物の発生を確認した。一度溶解したU(VI)が加水分解により沈殿したものと考えられる。沈殿後の溶液中のウラン残存率は23%であり、大部分が沈殿として回収されることが分かった。

今後は、 Na_2CO_3 水溶液だけでなく、NaOH水溶液も含めたシリカ澱物の浸出試験を行い、U(VI)の浸出と同時に沈殿回収できる条件について検討する。また、鉄澱物や焼却灰の処理についても模擬廃棄物を調製し、ウラン浸出挙動を検討する。

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁「令和4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。

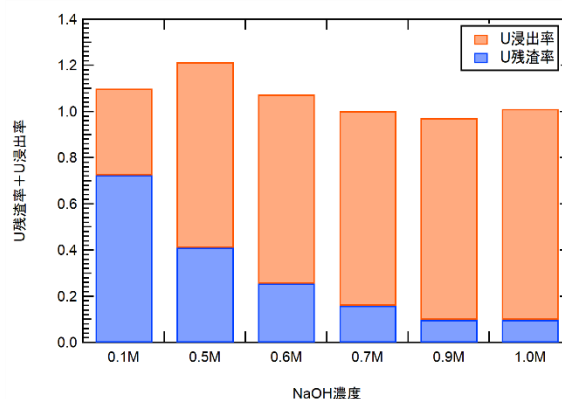


Fig. 3 Na_2CO_3 濃度とウラン浸出率及び残渣率の関係 (50°C , シリカ澱物 3.38%U)

3. 業績

【学会発表】

- 1) Masaru, Yokouchi, Ryoma Sunakawa, Toshiyuki Inazu, Noriko Asanuma, “Fundamental study on thorium fuel reprocessing by using phosphate-type fluorous extractant / fluorous solvent and TOMAC / OMIT₂N extraction systems”, International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems (IZES), A31-4, Jan. 2023, Tokyo Institute of Technology.
- 2) 黒木裕也, 浅沼徳子, 小林慎一, 深田 聖, 鈴木啓二, 藤永英司: 「 Na_2CO_3 水溶液を用いた模擬シリカ澱物からのウラン分離」, 日本原子力学会 2023 年春の年会, 3I07, 2023 年 3 月東京大学

参考文献

- [1] 横内優, 砂川凌摩, 山口恭弥, 稲津敏行, 浅沼徳子: 「イミダゾリウム型イオン液体とフルオラス溶媒による硝酸中 Ce(IV)の抽出」, 日本原子力学会 2021 年春の年会, 3H12, 2021 年 3 月オンライン開催
- [2] 横内優, 黒木裕也, 砂川凌摩, 稲津敏行, 浅沼徳子: 「イオン液体 TOMAC/OMIT₂N とフルオラス抽出剤 TBP-C₄F₉ による溶媒抽出試験～混酸中 Ce(IV)と FP 主要元素の抽出挙動検討」, 日本原子力学会 2022 年春の年会, 3I03, 2022 年 3 月オンライン開催
- [3] 黒木裕也, 浅沼徳子, 小林慎一, 久野義夫, 鈴木啓二, 藤永英司: 「炭酸塩水溶液を用いたウラン廃棄物からのウラン分離～模擬シリカ澱物のウラン浸出試験～」, 日本原子力学会 関東・甲越支部 第 15 回学生研究発表会, B4-2, 2022 年 3 月オンライン開催

1. 研究背景と研究目標

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。この熱流束を低減するため、X 点 MAFEE を防ぎ、磁場発散でダイバータ板の徐熱面積を拡大し、完全非接触プラズマを維持する必要がある。しかし、狭いダイバータレッグから広い磁場発散領域へプラズマを流出させると、プラズマの加速や粒子密度の減少など、ダイバータ形状変化に対する非接触プラズマの制御方法は明らかになっていない。一方、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し、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し、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させ、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 2022 年度から 3 年間にわたる各年度の目標と実施計画を記載する。

- 2-1 2022 年度：発散磁場配位でのイオン温度に対する非接触プラズマ形成過程の解明
- ① 磁場発散での完全非接触プラズマ形成過程を実験的に明らかにする。
 - ② 定常・高密の水素プラズマ ($>10^{19}m^{-3}$) に対し、イオンサイクロトロン共鳴 (ICR) 加熱を行い、プラズマの蓄積エネルギー (イオン温度) を上昇させる。
 - ③ イオン温度を 2 から 10eV まで変化させた際の、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。
 - ④ 1次元 PIC コードを導入し、発散磁場配位及びイオン温度変化に対する非接触プラズマ形成過程について再現し、実験結果と比較検討を行う。
- 2-2 2023 年度：中性粒子密度分布変化での完全非接触プラズマの制御法の開発
- ① レッグ長やダイバータ部のリフレクター形状変化に

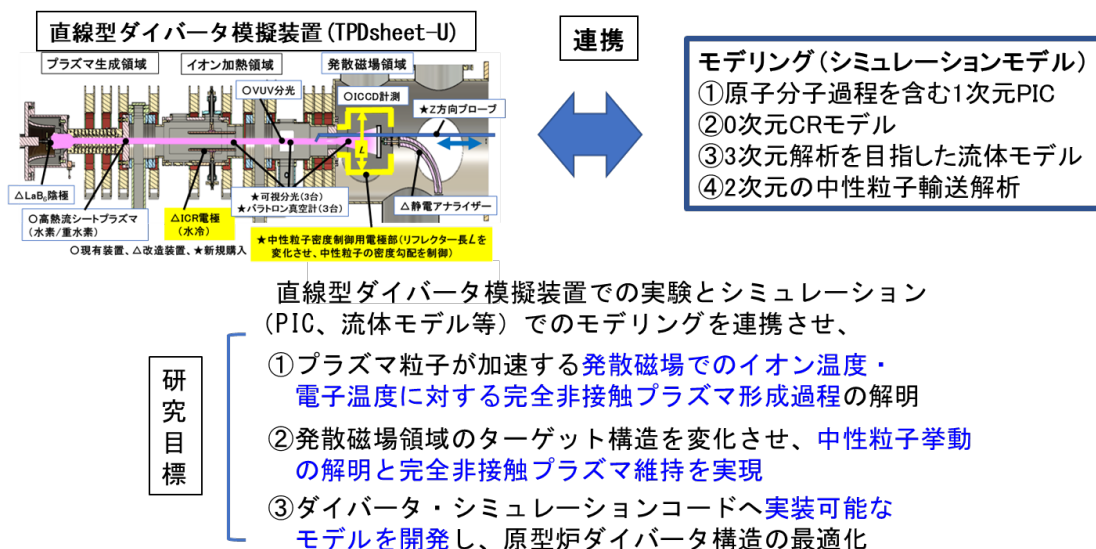


図1 イオン温度の制御可能な直線型ダイバータ模擬装置とモデリング (PIC、流体モデル等) の概念図

よる中性粒子密度分布の変化に対する完全非接触プラズマの形成過程を調べる。

- ② ICR 加熱電力を 1kW まで増加させ、イオン温度が電子温度以上に加熱し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。
- ③ PIC コードに中性粒子輸送解析コードを導入し、中性粒子密度分布変化での非接触プラズマ形成過程を再現する。

2-3 2024 年度：原型炉ダイバータ構造の最適化への貢献

- ① 重水素プラズマにおいて、発散磁場配位でのイオン温度変化に対する完全非接触プラズマの形成過程を明らかにする。
- ② PIC と流体モデルから運動論的效果のモデル化を検討する。
- ③ これまでの成果を踏まえイバータ・シミュレーションコード (SONIC) に実装可能なモデルへ発展させ、原型炉ダイバータ構造の最適化に貢献する。

3. 研究成果

2022 年度の研究テーマは、(a)発散磁場でのイオン温度に対する非接触プラズマ形成過程の解明である。イオン温度の制御可能な直線型ダイバータ模擬装置とモデリング (PIC モデル) を用いて、以下の成果が得られた。

- 1) 発散磁場配位では、電子密度が低いと電子冷却過程が促進されず電子温度が低下しないため、非接触プラズマの生成が困難であることを実験的に明らかにした。
- 2) 非接触プラズマに 400W 程度の ICR 加熱用電力を印加しイオン温度が増加すると、イオンのエネルギーが電子へ伝達され、プラズマの電子温度が 0.5-1eV から 2-4eV に増加すると共に、 $H\gamma/H\alpha$ の発光強度比が急激に減少した。この結果から、イオン温度の増加により非接触プラズマから接触プラズマへ遷移することを初めて観測した。(論文発表 1)、第 39 回プラズマ・核融合学会 (年会) 若手学会発表賞 1))
- 3) 更なるイオン温度の増加のため、ICR 加熱用マッチングボックスの性能を 800W 程度まで向上させた。これによりイオン温度を電子温度程度まで増加可能とした。
- 4) マッハプローブによる流速計測の準備を行い、発散磁場配位での非接触プラズマに対する粒子加速の影響を調べることを可能にした。

- 5) モデル計算を行うため、慶應義塾大学の星野一生准教授と連携し、PC 環境の整備を行い PIC コードを立上げた。

4. 業績

【論文発表】

- 1) N.Okada, S.Higuchi, A.Tonegawa, K.N.Sato, Effects of ion temperature on detached plasma formation using a linear divertor simulator TPDsheet-U, Fusion Engineering and Design, 192(2023)113596.

【国内外学会等発表】

- 1) Naonori Okada et.al., 33rd Symposium on Fusion Technology (SOFT 2022), 9/19~9/23,2022, Dubrovnik, Croatia, Effects of ion temperature on detachment plasma formation using a linear divertor simulator TPDsheet-U, ポスター (オンライン) .
- 2) Naonori Okada et.al., The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC31) 11/8~11/11, 2022, Toki, Japan, Characteristics of detachment plasma in ICR heating using the linear divertor simulator TPDsheet-U, ポスター.
- 3) 岡田尚徳, 他 3 名, 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, 2022/07/07~07/08, 直線型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生成特性, ポスター.
- 4) プラズマ・核融合学会, 富山国際会議場 2022/11/22~11/25, 岡田尚徳 他 4 名, 直線型ダイバータ模擬装置 TPDsheet-U を用いた ICR 加熱での非接触プラズマ生成特性, ポスター.

【受賞】

- 1) 第 39 回プラズマ核融合学会、年会、若手学会発表賞 (東海大学理学研究科、岡田尚徳)

【外部資金獲得】

- 1) 2022 年度科学研究費、基盤研究 (B) : 代表 5,000 千円
- 2) 2022 年度核融合科学研究所 原型炉研究開発共同研究 ; 代表 4,310 千円
- 3) 2022 年度核融合科学研究所 LHD 計画共同研究 : 代表 2,410 千円

本研究に参加した大学院生数、M1 : 3 名、M2 : 2 名

1. 発電炉シミュレータ SARS による事故解析

東海大学では 2015 年度に軽水発電炉シミュレータ (Severe Accident Reactor Simulator: SARS) を設置し、主に事故時の発電プラントの挙動を解明している^{1)~4)}。並行して SARS の機能拡張と解析結果の検証も継続している。SARS では、沸騰水型原子炉 BWR と加圧水型原子炉 PWR を対象とし、解析エンジンに機構論的コード RELAP5+SCDAP+COUPLE を統合⁵⁾することによって、事故時の複雑な事象を解析可能としている。SARS には実際の PWR/BWR プラント設計 (BWR-5/PWR4 ループ) を模擬したデータベースを備え、グラフィカルな入出力機能 (GRAPE)⁶⁾により、プラント状態・物理量データトレンド・炉心損傷進展を明快に表示できる。SARS の構成と解析の流れを図 1 に示す。

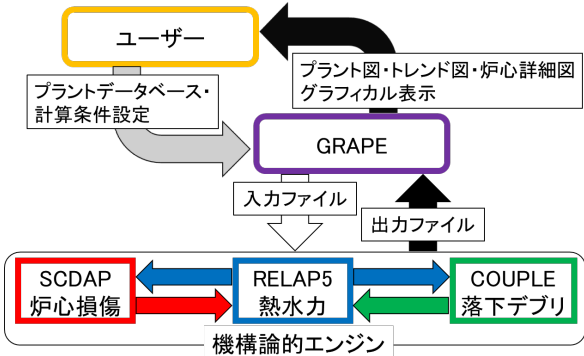


図 1 SARS の構成と解析の流れ。

本報告では、BWR プラントを対象に、運転サイクル初期 (Beginning of Cycle: BOC) と運転サイクル末期 (End of Cycle: EOC) に全電源喪失 (Station Black-Out: SBO) が発生した場合のプラント挙動を SARS を用いて解析し、炉心損傷の進展を記す。

BWR プラントで SBO を模擬するため、原子炉停止後、外部電源と非常用発電機、全ての非常時炉心冷却装置 (Emergency Core Cooling System: ECCS) を不作動とする条件を表 1 に示す。停止直前の原子炉出力は定格の 102% とし、その際の BOC/EOC の炉内の軸・径方向出力分布を図 2 に示す。原子炉停止直前の運転時の全出力とその分布は、原子炉停止後の崩壊熱分布と直接の相関があり、SBO などの事故後の炉心損傷の進展に重要な要因となる。

BOC と EOC で SBO が発生した場合、原子炉を停止 (200s) 後の BWR プラント状態 (被覆管最高温度・酸化熱・崩壊熱) の変化を図 3 に示す。炉心損傷レベルを「健全→破損→瓦礫→閉塞→熔融→空洞」の 6 段階でその進展を図 4 に示す。燃料熔融 (温度 2830K 以上) は BOC では 6640s に (1, 10) から、EOC では 6360s に (1, 11) から開始した。崩壊熱が上部で大きい EOC で BOC より早く熔融が開始した。BOC では軸方向上側→径方向に、EOC では径方向→軸方向下側に熔融+空洞が広がり、EOC と BOC で熔融の広がる過程は異なった。(熔融+空洞) 領域の体積比は熔融開始から 7200s までは EOC で大きく、それ以後、BOC と EOC でその差は縮まり、7800s までに同等となった。SBO が BOC と EOC で発生した場

合、炉心損傷の進展が崩壊熱分布と燃料露出時間などと整合する解析結果を得ることができた。

表 1 BWR-SBO 解析条件

項目	SBO	
	BOC	EOC
発生時期	BOC	EOC
外部電源	×	×
非常用発電機	×	×
高圧炉心スプレイ系	×	×
低圧炉心スプレイ系	×	×
低圧炉心注入系	×	×
原子炉隔離時冷却系	×	×

× : 不作動

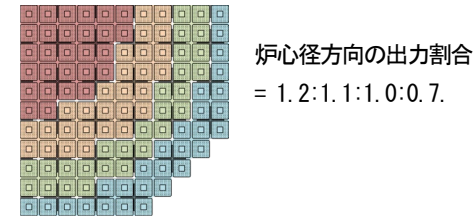
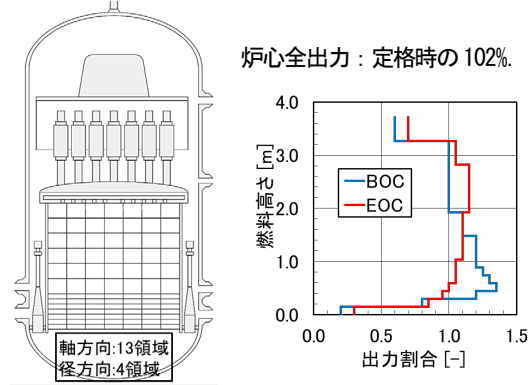


図 2 BWR 炉心の断面と軸・径方向の出力分布。

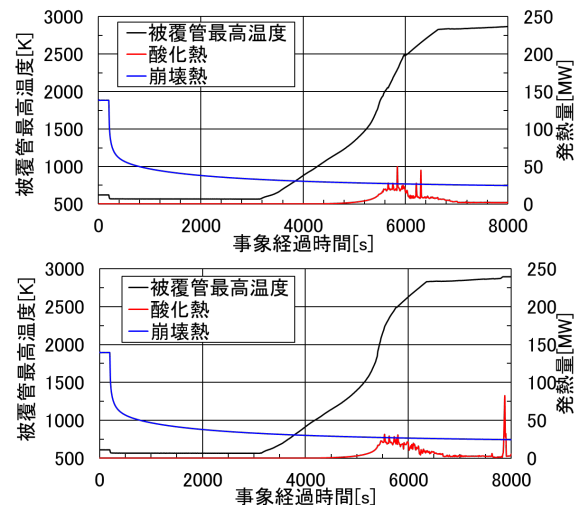


図 3 SBO 発生後の被覆管最高温度・酸化熱・崩壊熱の変化 (上: BOC, 下: EOC)。

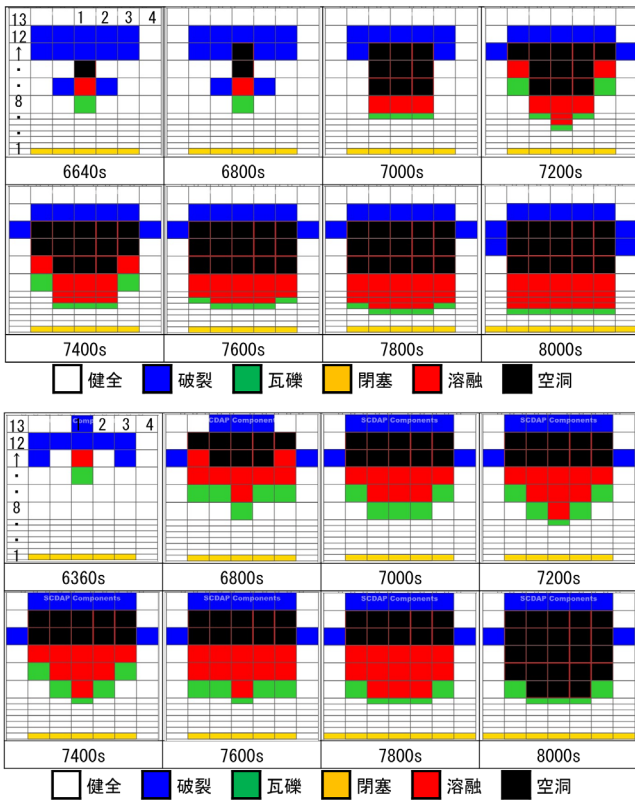


図4 SBO発生後の炉心損傷の進展(上:BOC, 下:EOC)。

2. 原子力人材育成実習へ導入

文部科学省が公募する原子力人材育成イニシアティブ事業により構築される「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)」に当研究所は2020年度から参加している⁷⁾。ANECの中で、当研究所はSARSを用いて原子力発電炉で事故が発生した場合の原子炉の挙動と対応を理解する「発電炉シミュレータ実習」を行っている⁷⁾。2022年度に大学院生・大学生および高専生を対象に行った本実習(2日間×2回)のプログラムを表2に示す。

表2 発電炉シミュレータ実習2022年度プログラム

講義	原子力発電プラントPWR/BWRの構造と機能 原子炉シミュレータSARSの概要と機能 発電炉の事故例と対応
実習	SARSの操作 PWRの事故解析と解析結果の考察 BWRの事故解析と解析結果の考察

本実習のPWRの事故解析では冷却材喪失事故(Loss of Coolant Accident: LOCA)を、BWRの事故解析ではSBO事故を、それぞれ対象とした。BWRのSBO事故(BOCとEOC)解析には1章で記した最新の成果を2023年度から導入する計画であり、PWRのLOCA(中破断)解析には次に示す解析を2021年度から適用している。

PWRの解析では、EOCに炉心定格出力の102%運転時にLOCA(中破断)が発生(0s)、原子炉を停止(16s)した後、ECCSのうち高圧注入・低圧注入・蓄圧注入・タービン動補助給水の全てが作動する場合(LOCA1)、高圧注入のみが作動しない場合(LOCA2)を、それぞれ解析条件とし

た(表3)。SARSによるLOCA1とLOCA2の解析結果のうち炉心水位・被覆管最高温度の変化を比較し、図5に示す。炉心水位はLOCA1で最低時40%、平衡時60%、LOCA2で最低時14%、平衡時45%にて推移した。LOCA発生後の被覆管最高温度はLOCA1で600Kと定格運転時よりも低く抑えられ、LOCA2で865Kまで上昇したが、燃料棒が損傷するとされる制限温度1473Kへは大きな余裕があった。ECCS作動によって燃料棒は健全に保たれた。

これまでの実習後アンケート調査の結果から、本実習の参加者は原子力発電プラントの事故時の挙動と対応について理解を深めたことが確認されている。今後も、当研究所はSARSによる最新の解析成果を本実習へ導入・適用することを継続し、ANECを通して本学内外で原子力人材育成に貢献していく。

表3 PWR-LOCA(EOC)解析条件

項目	LOCA1	LOCA2
外部電源	○	×
非常用発電機	○	○
高圧注入	○	×
低圧注入	○	○
蓄圧注入	○	○
タービン動補助給水	○	○

○:作動
×:不作動

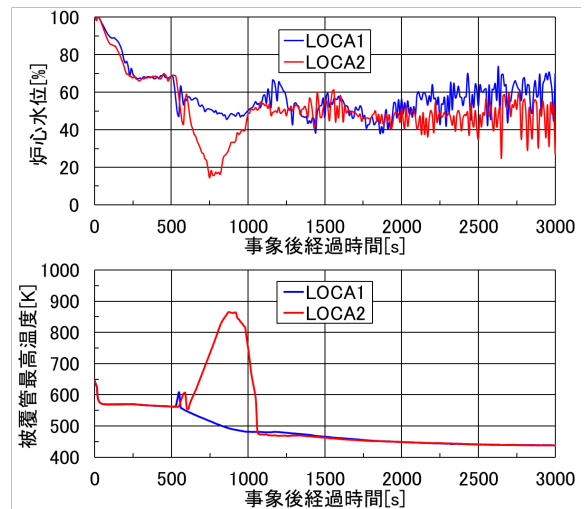


図5 EOCでLOCA発生後の炉心水位(上)・被覆管最高温度(下)の変化。

参考文献

- 1) 日本原子力学会 2016 春の年会 1I17, 1I18 (2016).
- 2) 日本原子力学会 2017 春の年会 2M01, 2M02 (2017).
- 3) 日本原子力学会 2019 春の年会 3L08 (2019).
- 4) 日本原子力学会 2021 年春の年会 2F11 (2021).
- 5) NUREG/CR-6150-Rev. 2, INEL-96/0422 (2001).
- 6) 日本原子力学会 2015 年秋の大会 D19, D20 (2015).
- 7) 東海大学国際原子力研究所報 2020 (2021).

1. 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2023年2月20日～3月3日に国際原子力機関 (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ものである。今回で3回目の開催であり、今年度は国内から17名、国外から17名の計34名の参加があった。

本スクールは、8日間の研修と2日間の施設(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) 見学により構成され、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。スクールでは、講師から受講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、ケーススタディー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た(図1参照)。これは、本スクールが GSR-Part2 に関する知識の習得のみを目指しているのではなく、参加者が実体験を通じてリーダーに必要なスキルを身に付け、これらを研修後の日々の業務に活かすことに主眼を置いているためである。特にケーススタディーでは、原子力分野の現場で起こり得る競合する要件(例えば、原子力発電所の定期検査でのスケジュール遵守と安全確認)が衝突する場面が想定され、登場人物、事故事象が発生する背景、事故事象発生までのプロセスなどがシナリオとして具体化されている。スクールでは、ファシリテーターが参加者に質問を投げかけ、参加者は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う。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る。

また、参加者の多様性も IAEA 国際スクールの特徴の一つであり、国、文化、職種、専門、など様々な背景をもつ参加者との協働は、多様な価値観を理解するための実践的な学びの場となっている。このような環境はリーダーシップに欠かせないコミュニケーションスキルやマネジメントスキルの能力開発の場としても適していると考えられる。

スクール終了後のアンケート調査から、このような参加型の研修による学びの有効性を支持する意見が多く見られた。これはこれまでの座学を中心とした“教わる”とともに、アクティブラーニングを活用した“学ぶ”行為の

重要性を示唆していると考えられる^[1]。以上のことから、グループワークやケーススタディーなどを活用した教育プログラムを通じて原子力安全に必要なスキルを学ぶことは合理的であり、学習効果も高いと考えられる。2023年度も中堅の人材を対象とした IAEA 国際スクールの開催を2024年2月に予定し、関係機関・大学から多くの参加を期待している。



図1 ゲームを活用したスクールの講義風景

2. 原子力安全基準研修

東海大学は2023年3月6～9日の4日間の日程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、大学20名、一般37名の計57名の参加があり、IAEA および国内の専門家(原子力規制庁、東海大学)が講師として原子力安全基準についての講義を行った。研修はコロナの感染防止の観点から、対面と遠隔によるハイブリット形式にて実施し、IAEA の定めた安全原則を始めとして、IAEA 安全基準の全ての分野への実践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。

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、参加者からの評価は高く、本研修は一定の成果があったと考えている。2023年度も上述のスクールと同様に本研修の開催を予定し(2024年3月の予定)、関係機関・大学から多くの参加を期待している。

参考文献

- [1] 若杉圭一郎, 明石眞言: 原子力・放射線安全リーダーシップに関する IAEA 国際スクールの取り組み, 日本原子力学会 2020 年秋の大会, 3J-05, 2020 年 9 月 18 日.

「国際原子力研究所 特別公開講座-2022」開催報告

世話人：理学部物理学科 榎田 淳子

1. 概要

本研究所は 2020 年度に開設して以来、原子力分野における安全かつ信頼性の高い技術開発、周辺分野への応用を目指した研究を進めている。また、これらの研究の最前線を広く地域・社会に発信するため研究所主催の公開講座を開催している。

ここでは、2023 年 3 月 1 日に開催された「医療・放射線科学への応用」をテーマとした公開講座（図 1）について報告する。

<開催概要>

開催日：2023 年 3 月 1 日（水）14 時～16 時 30 分

場所：東海大学湘南キャンパス 19 号館 311 室
(Teams を用いたハイブリッド開催)

講演 1

電子飛跡検出型コンプトンカメラによる医療ガンマ線イメージング

榎田淳子（東海大学教授、理学部物理学科、国際原子力研究所）

講演 2

ガンマ線完全可視化技術の確立と放射線科学への応用
谷森達（京都大学名誉教授、京都大学複合原子力科学研究所）

参加者数：約 50 名（対面 35 名、オンライン 15 名）

2. 講演内容

最初に榎田淳子教授が「電子飛跡検出型コンプトンカメラによる医療ガンマ線イメージング」と題し、放射線を用いたがん診断装置のしくみを解説した。また、現存のがん診断装置「SPECT」を紹介した。この検出器の問題点として、放射線薬剤として使用している「テクネチウム-99m (99mTc)」は、この原料となる⁹⁹Mo がほぼ輸入に頼っているため世界情勢の影響や⁹⁹Mo を製造する原子炉の老朽化などで供給が不安定となっていることを挙げ、安定供給に向けた体制づくりが急務であることを説明した[1][2]。

その上で、東海大学と京都大学で共同開発を行っている医療用電子飛跡検出型コンプトンカメラ（Electron Tracking Compton Camera=ETCC）のしくみを解説し、既存のがん診断装置より検出可能エネルギー範囲が広いという幅広い放射線薬剤が使用可能になるという特長から、テクネチウム-99m に変わる薬剤が使用可能になり、そのための新薬の開発や臨床利用に向けての取り組みについて紹介した[3]。

さらに東海大学、日本原子力科学研究所、京都薬科大学の共同で展開する「Tc 同位体を用いた医療用 TC 製剤と ETCC 臨床応用の開発」のための新薬の開発と装置の開発状況について話した。特に最新の研究結果として、2022 年 5 月と 12 月に行ったラットを用いた実験の成果を詳しく紹介した[4]。（本所報内の記事「テクネチウム同位体の生体撮像実験」にも記載。）

続いて、京都大学の谷森達名誉教授が「ガンマ線完全可視化技術の確立と放射線科学への応用」をテーマに講演を行った。ETCC は 1990 年代に谷森教授によって考案された、ガスチェンバーとピクセル電極を組み合わせた検出器である[5]。これまで電荷をもたないガンマ線の軌跡を求めるのは難しかったが、ガスチェンバーで散乱ガンマ線の軌跡を得ることができる。これまでの装置開発によって、どのようにガンマ線の完全可視化を実現してきたのが解説された。さらに位置決定精度を向上させるための定量 2 次元画像解析をはじめ、ガンマ線オンライン定量 3 次元線量解析の手法についても詳しい紹介があった[6]。

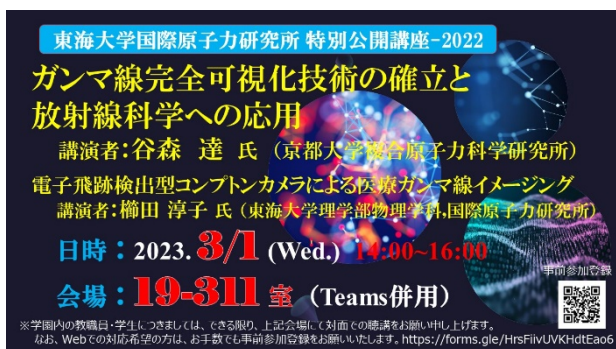


図 1 公開講座ポスター

さらに、この検出器を利用した医療以外の最新の研究成果についても2つ紹介された。

1つ目は東日本大震災で大きな被害を出した東京電力福島第一原子力発電所からの環境放射線のモニタリング観測である[7]。ETCCは優れた位置分解能と検出可能エネルギー範囲が広いことから廃炉周辺の放射線強度分布を測定しているのに適している。ETCCを高線量下で動作可能にした上で可搬型システムに改良し、実際に発電所敷地内の免振重要棟から炉を含む1km四方を一度に撮像した結果、空からはスカイシャイン、炉からは662keVガンマ線が明瞭に測定でき、見晴台50 μ Sv/hでも撮像に成功した。また同システムを用いた京大複合研原子炉の撮像では、動作中の原子炉からのガンマ線の3次元撮像に成功している。これにより放射性物質拡散の画像モニタリングが可能であることを実証され、3次元汚染物質飛散検知・予測システムの実用版への開発が進んでいることの説明があった。

もう1つは、この検出器を用いた宇宙観測である。この検出器が観測可能なMeVのエネルギー領域は他の検出器では観測が難しく、観測結果が少ないのが現状である。谷森教授らは2018年4月にオーストラリア・アリススプリングにおいて、この検出器を搭載した気球実験を行い、銀河MeVガンマ線直接観測に成功した[8]。宇宙観測に向けての開発や観測の様子、さらに詳細な研究成果について解説があった。

講演後には参加者から多数の質問が寄せられ、活発な議論が行われた。

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] Y.Hatsukawa et al., Electron-tracking Compton camera imaging of technetium- $^{99\text{m}}\text{Tc}$. *PLoS ONE*, 13(12): e0208909, (2018).
- [4] 野口幸稔, 電子飛跡検出型コンプトンカメラを用いた $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の生体多方向撮像とその定量的評価, 東海大学修士論文, (2022).
- [5] S.Kabuki, T.Tanimori et al., Development of Electron Tracking Compton Camera using micro pixel gas

chamber for medical imaging”, *Nucl. instrum. & Meth. A* 580, 1031-1035, (2007)

- [6] 谷森達, R1年度英知事業報告書「ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法」, *JAEA-Review* 2020-044, (2020)
- [7] D.Tomono, T.Tanimori et al., “First On-Site True Gamma-Ray Imaging-Spectroscopy of Contamination near Fukushima Plant”, *Scientific Reports*, 7, 41972, (2017).
- [8] A.Takada, T.Tanimori et al., “First observation of MeV gamma-ray universe with bijective imaging spectroscopy using the Electron-Tracking Compton Telescope aboard SMILE-2+”, *The Astrophys.J.*, 930:6, (2022)

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 2022

発行日：2023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