



東海大学

国際原子力研究所

2020 年度 所報

2021 年 3 月 31 日

所報創刊にあたって



東海大学
学長 山田 清志

2020年4月に発足したばかりの国際原子力研究所が、初年度から所報を発行される
とのこと、研究所員をはじめご関係の皆様にお喜びを申し上げたい。本学の付置研究所
として研究成果の社会への公表には大きな期待を寄せている。

ところで、本学は創立者松前重義先生の遺志を継ぎ、原子力分野の教育・研究、人材
育成に注力し、大きな研究成果を挙げるとともに、原子力技術立国を支える原子力人材
を長年にわたって輩出している。

一方、国際的な視野に立つと、原子力の安全向上や平和的利用、核不拡散や核セキュ
リティ分野等における積極的な貢献は、我が国の責務である。昨年には本学で「国際原
子力機関（IAEA）国際スクール 原子力・放射線安全リーダーシップ」を日本で初めて
実施している。

私立大学故に、資金や設備には限りがあるが、今後この国際原子力研究所を中心にグ
ローバルな視点から、新たな原子力技術の研究開発と未来を担う原子力人材の育成に、
大いにその実を挙げてくれることを期待している。所員一同には、なお一層の研鑽と躍
進を御願いする。

所報創刊にあたって

国際原子力研究所 所長 稲津 敏行

2020年4月に新たな付置研究所として東海大学国際原子力研究所(Global Research Institute of Nuclear Energy, Tokai University)が発足致しました。創立者・松前重義博士の「大きな力を持つ技術だからこそ、人類の発展のために活用すべきである」という強い思いを受け継ぎ、原子力分野の研究推進、人材育成に貢献すべく、所員一同決意を新たにしております。

現代研究は、様々な分野の融合、異分野研究者の共同研究が必要不可欠になっております。特に、原子力分野は、理工系のみならず、医療や環境問題、あるいは、社会制度や政策などもかかわる社会性の強い分野です。本研究所でも、工学、医学や農学、政治学など幅広い学部学科の英知の融合を計り、持続可能な社会の実現に貢献したいと思っております。

また、分野横断型の共同研究という場を提供することで、学生たちが大きく成長できるものと期待しております。原子力分野で活躍する人材には、極めて高度な専門知識のみならず、社会全般に関する広い視野と倫理感が求められます。本研究所では、国際原子力機関や国内の研究機関と連携し、原子力安全について学ぶ教育プログラムも開発・展開して参ります。

本年度は、研究所を設立することが目的となり、研究所活動は歩み始めたばかりで、研究所の成果としてまとめることができるか危惧致しました。しかし、所員各位の地道な努力の賜として、ここに所報第1号を発行する運びとなりました。関係各位からの忌憚のないご意見ご教示を御願ひするとともに、併せて今後の研究所の活動に皆様のお力添えを切に御願ひ申し上げます。

目次

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堺 公明	1
放射性廃棄物処分における閉鎖性能の長期安全性評価若杉 圭一郎	3
医療への放射線応用技術評価 — X線マイクロビーム技術の生物影響およびがん診断研究への応用—伊藤 敦、吉田 茂生	5
新規抽出媒体の核燃料サイクルへの適用とゼオライトを用いた放射性廃液の処理浅沼 徳子、稲津 敏行	8
シートプラズマを用いた核融合炉用非セシウム型負イオン源の開発利根川 昭	11
新規核種 96-Tc を用いた次世代医療用ガンマ線カメラの開発櫛田 淳子	13
未来社会に向けた先進的原子力教育コンソーシアム ANEC へ参加亀山 高範	15

1. はじめに

ナトリウム冷却高速炉の炉心崩壊事故時に水平構造物上に衝突する溶融炉心物質の冷却挙動(図1)は、炉心崩壊事故の事象推移を明確にし、安全評価の不確かさを低減するために解明すべき重要な現象の一つである。日本原子力研究開発機構(JAEA)は、ナトリウム中での炉心溶融物質の冷却挙動の解明を目的の一つとして、カザフスタン共和国の試験施設を利用した EAGLE-3 計画を実施している。高速炉の再臨界防止実験を意味する言葉の頭文字を取って「EAGLE」プロジェクトと呼ばれるこの研究は、カザフスタンのクルチャトフ市にある国立原子力センターの試験用原子炉を使って行うもの。本研究は EAGLE-3 計画の一環として炉外のコールト施設にて実施された模擬実験¹⁾を対象として、高速炉安全解析コード SIMMER-IIIによる解析を大学にて実施し、実験値と解析値の比較による解析体系モデルの妥当性の検証及び解析評価を通じた定量的な分析を行うことを目的としている。

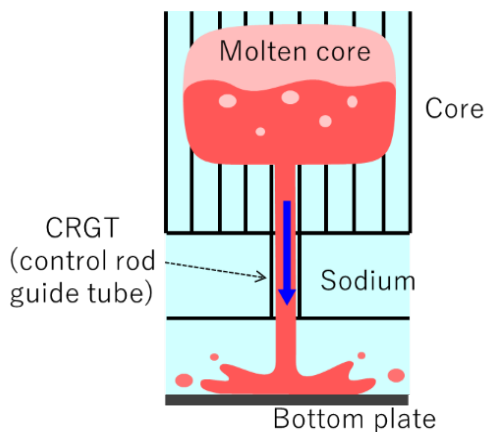


図1 炉心損傷時における溶融炉心物質の移動¹⁾

2. 研究の概要

本研究で解析に使用する SIMMER-III は、円筒 $r-z$ の2次元座標系、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つけられるマルチ

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開発を実施している。本研究で解析対象とした模擬実験は、溶融炉心物質の模擬物質として加熱炉で溶融したアルミナ(以下、「融体」と呼称)をナトリウム中に設置した水平平板上に流下させ、この時の現象を熱電対及び圧力計にて測定するものである。解析体系を図2に示す。

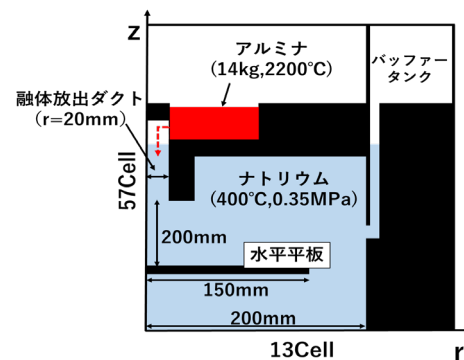


図2 解析体系²⁾

解析体系は融体放出ダクトを中心軸とした rz の円筒座標系であり、融体及びナトリウムの初期温度はそれぞれ 2200°C 、 400°C とした。また、融体を含む上部トラップ及び冷却材中圧力の初期圧力は実験と同じく、それぞれ 0.61MPa 、 0.35MPa とした。

図3に実験及び解析における平板上部の冷却材温度を示す。実験値と解析値の比較により、温度上昇時刻及び温度推移が実験と解析で概ね一致する結果となり、その他にも圧力挙動、融体注入速度、冷却材中の熱移行等が再現されていることから解析体系モデルの妥当性について確認することができたと考えている。

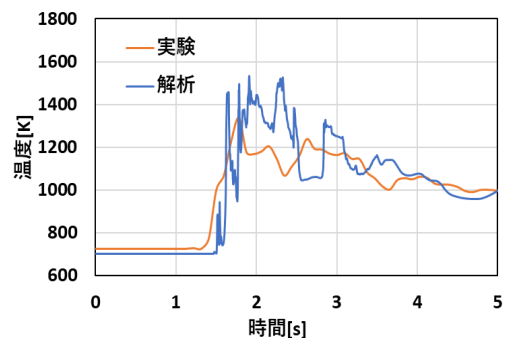


図3 平板上冷却材温度²⁾

図4に融体注入時の平板衝突後0.3secにおける融体とデブリ状に固化した融体の分布に関する解析結果を示す。

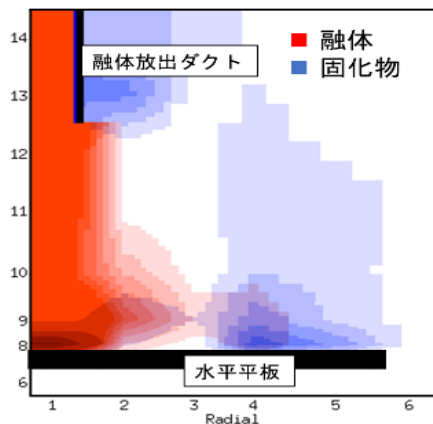


図4 融体注入中の融体/固化物の挙動 (平板衝突後0.3秒)²⁾

図4より融体は平板に衝突した後、水平平板に沿って拡散していき、その過程で液体金属ナトリウムによって冷却され、固化している様子が確認された。模擬実験においても平板上にて融体が微粒化して固化し、粒子状となって散乱することが確認されており、微粒化した融体とナトリウムが接触することにより、融体が冷却され固化するメカニズムが解析的に再現された。

3. 展望

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。解析を実施した学生は、JAEAの特別研究生として、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及び実験との比較などの分析作業を実施した。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^{3) 6)}しており、2020年8月に米国機械学会主催の原子力工学国際会議(ICONE2020)へプロシーディングス論文¹⁾を投稿し、発表講演を実施した。生憎、遠隔参加でのビデオ講演となったが、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プレゼンテーション賞を受賞したことは大きな励みとなった。

今後、種々の条件に対する解析的研究を継続して成果を蓄積し、国際的な高速炉の炉心損傷評価手法の高度化に反映していきたい。

4. 業績

【論文】

- 1) Kai IGARASHI, Ryoji ONUKI, Takaaki SAKAI, et al., "Validation of Analysis Models on Relocation Behavior of Molten Core Materials in Sodium-Cooled Fast Reactors based on the Melt Discharge Experiment", Proc. of the 2020 Int. Conf. on Nuclear Engineering, August 4-5, 2020, Virtual, Online ICONE2020-16440, (2020).

【学会発表】

- 2) 五十嵐 魁, 堺 公明, 他, 「ナトリウム冷却高速炉の炉心崩壊事故時における溶融炉心物質の再配置挙動に関する研究 (9) ナトリウム中水平構造物に衝突する炉心溶融物質の微細化・冷却挙動に対する解析モデルの検証」, 日本原子力学会「2020年秋の大会」オンライン, 3K11, 2020年9月.
- 3) 磯崎一馬, 大貫涼二, 五十嵐 魁, 「ナトリウム冷却高速炉の炉心崩壊事故時における溶融炉心物質の再配置挙動に関する研究 -低水深プール中での枠付き融体流出試験に対する解析モデルの検証-」日本原子力学会「2020年秋の大会」オンライン, 学生ポスターセッション, 2020年9月.
- 4) 松下肇希, 五十嵐魁, 磯崎一馬, 堺公明, 他, 「ナトリウム冷却高速炉における水平構造物に衝突する炉心溶融物質の冷却挙動解析」, 日本原子力学会関東・甲越支部 第14回 学生研究発表会, オンライン, B4-2, 2021年3月.

【参考文献】

- 5) K. Matsuba, K. Kamiyama, D. A. Ganovichev, V. V. Baklanov, "Results of an out-of-pile experiments for fragmentation of a simulated molten core material discharged into a shallow sodium pool", The 11th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS-11), Busan, Korea, Nov. 18-21, 2018.
- 6) 五十嵐魁, 堺公明, 他, 「ナトリウム冷却高速炉の炉心崩壊事故時における溶融炉心物質の再配置挙動に関する研究 (7) 低水深プール中での融体流出試験に対する解析モデルの検証」, 日本原子力学会「2019年秋の大会」富山大学, 2G09, 2019年9月.

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持続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り、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、その影響が数十万年以上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⁾。地層処分の閉鎖後長期の安全性の確保においては、埋め戻した坑道や掘削影響領域が、放射性物質の生活圏に至る移行経路となり得る有意な水みちとならないことが重要である。すなわち、処分坑道やアクセス坑道といった地下空間とその周辺部に対して埋め戻し材やプラグ、グラウトなどの工学的対策（以下、シーリングシステム）を講ずることが必要である。

これまで、トンネルなどの地下環境における一般的な土木工事では、作業安全性の確保のためにシーリングシステムを活用し、多くの使用実績が存在するとともに、シーリング材料の個別の現象理解についても研究が進められてきた。一方、地層処分に用いられるシーリングシステムは、処分場建設時や作業時の安全性のみならず、坑道や周辺岩盤が生活圏に至る移行経路となることを防止すること、さらには岩盤と同様に核種の移行遅延機能が維持されることなど、短期的な作業安全に加えより長期的なバリア性能が期待されている²⁾。しかしながら地層処分では、これまでシーリングシステムに対して積極的に安全機能を期待していなかったことから、シーリング材料の劣化・変質の可能性や、坑道が卓越した移行経路となることの影響については十分に検討がなされていなかった。このため、本研究ではシーリングシステムの長期性能を考慮したシナリオ解析を実施するとともに、これに基づく影響要因評価および性能評価の検討を通じて、シーリングシステムの長期安全性について評価するための技術を整備する。

2. 研究の概要

まず、シーリングシステムに対するシナリオ解析として、シーリング材料が劣化し、所期の安全機能に影響を与えるような地下水流動パターンおよびその組合せを抽出し、それらを重要な影響モード（安全機能が低下する状態）としてトップダウン的に整理した。また、それらの影響モードを生じさせる要因となる FEP（Feature、Event and Process）を抽出するとともに、FEP 間の関連性についてインフレンスダイアグラム（ID）として整理した。Fig.1 に埋め戻し材中のベントナイトを例とした ID を示す。ベントナイトの変質・劣化については、支保工等のコンクリートの劣化・変質と密接に関係する。また、セメント溶解成分が供給されることでモンモリロナイトの溶解やイオン交換反応によるベントナイトの変質・劣化が促進されるプロセスと、二次鉱物の沈殿によって間隙が閉塞された結果、変質・劣化を抑止するプロセスが生じ得ることが整理された。

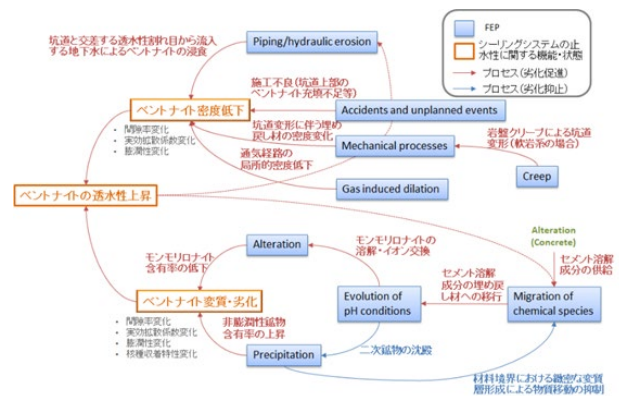


Fig. 1 Influence diagram for bentonite in the backfilling material

次に、3次元不均質場を仮定した地下水流動解析を実施し、あえて坑道が卓越した移行経路となり得ることを仮定したシナリオを検討した。具体的には上記シナリオ解析で抽出された「コンクリートによるモンモリロナイトの溶解とこれに伴う埋め戻し材の透水性の増加」と「コンクリート支保中のセメント成分の溶脱による二次鉱物の生成とこれに伴う緻密層の形成」の二つのプロセ

スを想定し、Fig.2 に示したシナリオとして具体化した。このシナリオの蓋然性は極めて低いと考えられるものの、シーリングシステムの劣化に起因する影響の最大値を把握することを目的とした最も悲観的なシナリオとして位置づけられる。

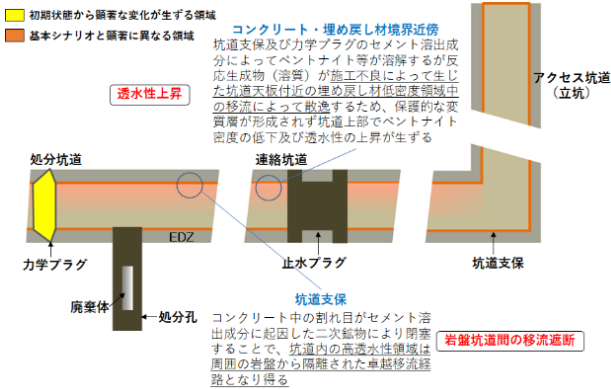


Fig.2 Scenario assuming major transport pathways within sealing system

上記シナリオに対し、3次元不均質場の物質移行解析を行い、それに対する影響を検討した。具体的には、地下水流動解析によって得られた地下水流動場において、モデル化した上流および下流の廃棄体位置から発生させた粒子を対象にランダムウォーク法による物質移行解析を行い、処分坑道端部まで到達する粒子割合を算出した。解析結果の一例を Fig.3 に示す。処分坑道の下流側に配置した粒子は、処分坑道周辺の地下水流動に沿って、処分坑道を通らず直ちに岩盤へ進入することが確認された。一方上流側では、粒子は100mほど坑道内を移行するものの、その後下流側に配置した粒子の挙動と同様に岩盤へ進入するため、処分坑道の下流端まで到達した粒子は、配置した粒子の十数%程度であった。以上のことから、コンクリート支保の劣化や埋め戻し材の透水性を考慮した過度に保守的なシナリオにおいても、坑道そのものが卓越した移行経路にはならない可能性が示唆された。

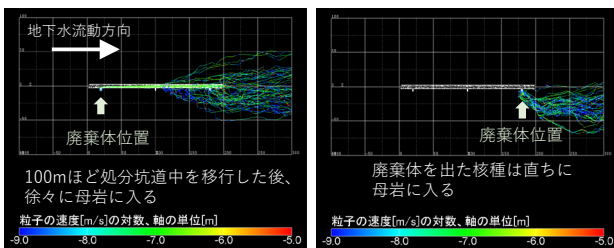


Fig.3 Trajectories based on particle tracking from upper-stream and down-stream in the tunnel

3. 展望

本研究は、経済産業省委託事業「平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地層処分施設閉鎖技術確認試験）」の成果の一部である。今後は地球化学解析等によりシーリングシステムの劣化に関わる現象理解を進めるとともに、これをシナリオ解析や影響評価に反映させた評価を通じて、シーリングシステムの長期安全性を検証していく。また、マルチフィジックスによる連成解析を行う解析ツールの整備を東海大学にて進めており、これらの成果を適宜反映していく予定である。

4. 業績

【招待講演】

- 1) 若杉圭一郎：放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅲ（公財）原子力環境整備促進・資金管理センターセミナー、オンライン、2020年12月8日

【学会等発表】

- 1) 杉田裕、武田匡樹、大野宏和、若杉圭一郎、高瀬博康：シーリングシステムの長期劣化が安全機能に与える影響評価（1）FEPの整理、日本原子力学会2020年秋の大会、オンライン、2020年9月16日。
- 2) 三津山和朗、武田匡樹、杉田裕、大野宏和、若杉圭一郎、高瀬博康、高橋博一、橋本朋子：シーリングシステムの長期劣化が安全機能に与える影響評価（2）シナリオ設定、日本原子力学会2020年秋の大会、オンライン、2020年9月16日。
- 3) 高橋博一、武田匡樹、杉田裕、大野宏和、若杉圭一郎、高瀬博康、三津山和朗、橋本朋子：シーリングシステムの長期劣化が安全機能に与える影響評価（3）物質移行解析、日本原子力学会2020年秋の大会、オンライン、2020年9月16日。
- 4) 尾形優一、若杉圭一郎：亀裂の不均質性を考慮した核種移行経路の取り扱いに関する検討、日本原子力学会 関東・甲越支部 第14回 学生研究発表会、オンライン、A3-4、2021年3月。

5. 参考文献

- 1) 原子力委員会、原子力白書、令和3年7月、2020。
- 2) NUMO 包括的技術報告、わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—、NUMO TR-20-03、2021。

医療への放射線応用技術評価

—X線マイクロビーム技術の生物影響およびがん診断研究への応用—

工学部原子力工学科

伊藤 敦、吉田 茂生

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。今年度は以下の2テーマを設定した。

1) 低線量放射線の生物影響評価

2) 乳がんの早期診断への放射線分析技術の利用

両テーマは、がん治療・診断に関連するものであるが、1) は原子力発電所事故などにおける低線量放射線の人体・環境影響にも関連した国際的に強い関心が持たれている課題でもある。いずれのテーマも加速器等により発生させたX線をミクロンサイズの微小なビーム（マイクロビームと呼ぶ）に絞って利用しており、それが本研究の独自性の一つとなっている。特にX線マイクロビームを生物照射に利用するシステムは国内外で物質構造科学研究所と電力中央研究所の2施設のみである。この意味でわが国はこの分野で国際的に牽引役を務めており、両機関に加えて低線量影響の専門家を擁する大分県立看護科学大学との協力により本研究を推進している。テーマ2) についてはX線マイクロビームによる局所元素分析を物質構造科学研究所と本学医学部と共同で進めている。

2. 研究の概要

1) 低線量放射線の生物影響評価

低線量放射線の人体影響の問題は、広島・長崎の原爆による被ばく、ラドンなど環境中の放射性物質などによる被ばく、レントゲン・CT検査などによる医療被ばくなど、さまざまな局面で関心を持たれてきた。2011年の福島第一原子力発電所事故による環境中への放射性物質の放出は、この分野の知見の蓄積を急務とするものであった。一般に低線量放射線の作用は非常に小さく、統計的に有意の結果を得ることは難しい。それを克服する一つの方法として、マイクロビームの利用があげられる。低線量領域では、照射される細胞とされない細胞が混在しているので、その状況を模擬するために特定の細胞を狙い撃ちできる放射線マイクロビームが有効である。X線マイ

クロビーム照射装置を利用できる2施設のうち、物質構造科学研究所・放射光実験施設（つくば市）の装置は大型加速器放射光からのX線を利用するもので、ビーム照射面積が μm^2 から mm^2 領域まで可変という特徴をもつ。電力中央研究所の装置はビームサイズは直径数 μm の固定であるが、実験室に設置されいつでも利用できる利点がある。これらの装置を用いて、照射細胞から非照射細胞、あるいは非照射細胞から照射細胞への影響（バイスタンダー効果という）を検出するテーマに取り組んだ。

まず、放射光実験施設マイクロビームを用いた実験について述べる。福島原発事故などによる内部被ばく（体内に取り込まれた放射性物質からの被ばく）では、外部からの被ばくと異なり組織が不均一に被ばくを受けると考えられる。被ばくを受けた領域がそれを取り囲む被ばくなしの領域からどのような影響を受けるかについて、ビームサイズを変えたマイクロビームを細胞シートに照射することによって検討した。図1は5.35keVのX線を1Gy照射後24時間の時点で照射領域の細胞内に生成されたDNA二重鎖切断（double strand breaks : dsb と略記）をdsb修復に必要な修復タンパク質の1つである53BP1の集積部位の数を指標として計測した結果である。照射面積が小さくなると照射領域での1細胞あたりのdsb数が減少し、ある一定レベルに落ち着くことがわかる。この結果は、照射領域周辺の未照射細胞から何らかのシグナルによってdsbの修復が促進されていると解釈できる。内部被ばくでの障害が外部被ばくのような均等被ばくと異なる可能性が示唆される。

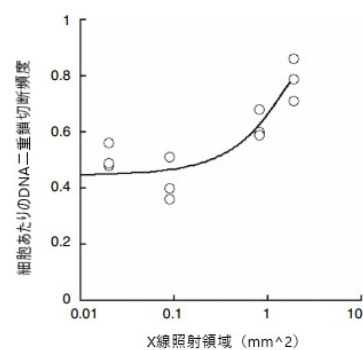


図1 DNA二重鎖切断頻度のマイクロビームX線照射面積依存性 (Ojima et al., Sci. Rep., 2021 を改変)

次に、電中研の X 線マイクロビームを用いた研究成果を紹介する。このマイクロビーム装置は X 線強度は弱いですが、放射光実験施設よりさらに微小サイズのビームを発生させることができ、個々の細胞核を狙い撃ちできる。細胞シートの中央付近にある数個の細胞核を照射し、照射後周囲の未照射細胞に dsb が誘導されるかを検討した。図 2 は照射後周囲の未照射細胞に dsb が誘導される時間経過を追跡したものである。照射は Ti 特性 X 線 (4.5keV)、2Gy である。dsb の誘導は dsb 修復に必要な修復タンパク質の 1 つである γ -H2AX の量を蛍光強度で調べた。バックグラウンドレベルより σ 以上の蛍光強度を示す細胞に dsb が誘導されたと見なし、そのような細胞の割合を求めた。この結果は、培養時間とともに照射細胞から周辺の未照射細胞に dsb が誘導されたことを示している。

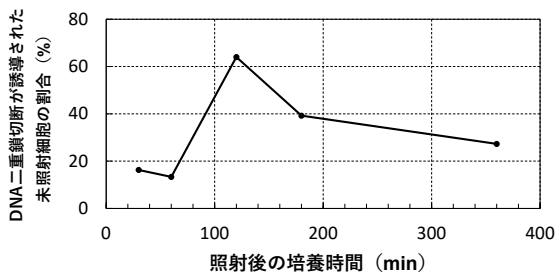


図 2 照射細胞周辺の未照射細胞への DNA 二重鎖切断誘発の照射後時間依存性

以上、2つの研究から、マイクロビームにより照射された細胞は dsb 損傷を受けるが、その損傷は周辺の未照射細胞から修復される場合もあり、また反対に未照射細胞にあたかも放射線が照射されたかのように dsb を誘導させる場合も存在することがわかる。このように、低線量放射線の影響の解釈には、照射細胞は常に周囲の細胞とシグナルをやりとりし相互に影響し合っている状況を考慮しなければならないと言える。

2) 乳がんの早期診断への放射線分析技術の利用

がん組織など病理試料における元素量の異常に X 線分析を利用する試みは、古くから多くの報告がある。たとえば蛍光 X 線分析を用いたがん組織と正常組織での Fe と Zn 量の違いなどである。近年、毛髪が毛根において血液中の栄養分とともに元素を取り込み伸長する、すなわち元素量を毛根から時系列で保持するメモリー組織であるという特徴を生かして、毛根から毛先までの Ca 量の変化と乳がん発症時期の関連を示唆する大変興味深い研究が千川らによって報告された¹⁾。彼らは将来的には乳がん予知に利用することを視野に入れている。しかしながら、より慎重な評価を目指して毛髪における Ca 蓄積

のメカニズムにさらに踏み込むためには、Ca の蓄積量だけではなく、毛髪内のミクロンレベルでの分布観察が重要である。この目的で、数ミクロンサイズの X 線マイクロビームを用いて蛍光 X 線分析による試料局所の Ca 量の測定を行った。毛髪は、周辺部のキューティクル、毛髪の大部分を構成する実質部のコルテックス、中央部の密度の低いメデュラの 3 構造から成るが、マイクロビームによって各部位での Ca 量を測定できる。なお、毛髪試料は本学医学部附属病院に来院した健常者とがん患者から提供を受けた (人試料を対象とする研究の倫理委員会承認済)。がん患者の試料の場合、がんの大きさ、増殖度などの病理データも合わせて提供いただいた。なお、これまでの我々の研究から、メデュラに分布する Ca が血液中の Ca を反映している可能性が高いことが判明しているので^{2,3)}、特にメデュラの Ca 量に着目した。

Ca の局所分布測定は、放射光実験施設のマイクロビーム蛍光 X 線分析装置を利用した。具体的には 4-5 ミクロンサイズのビームを試料上で走査することによって毛髪断面全域での Ca 分布を求めた。毛根位置は乳がん発見 (診断) 時であるので、メデュラ Ca 量を毛根からの距離に対してプロットすることにより、乳がん発見前の血液中 Ca 量の変動を追跡した。図 3 に代表的な結果を示す。

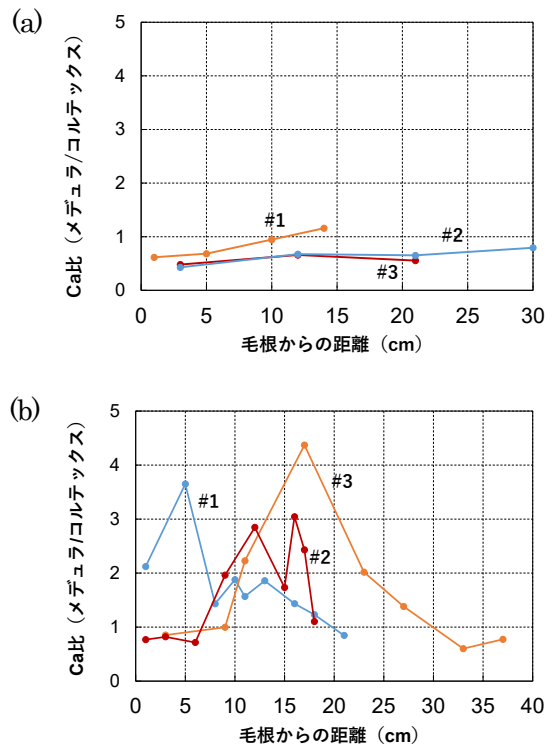


図 3 メデュラ Ca 量の毛根からの距離依存性 (a)健常人由来、(b)乳がん患者由来。Ki-67 値(%): 20 (#1), 30 (#2), 5 (#3)。

健常人毛髪（パネル a）では毛先にいくにつれて単調に増加することが分かる。単調増加の原因はおそらく外部からの酸化ダメージ等によるものと思われる。一方、乳がん患者毛髪の場合（パネル b）、乳がん発症前に Ca の大きな変動が見られた。試料#1 と#2 はほぼ同じ乳がん増殖率（Ki-67 値を指標とする）、#3 はより小さな増殖率の試料であるが、Ca ピーク位置は増殖率の大きい場合の方が毛根に近い傾向が見られた。この結果は、Ca ピーク時期と乳がん発症時期の密接な相関を示唆している。今後さらに多くの測定によって、病理データと Ca ピーク時期との関連を検討すべきであるが、メデュラの Ca 上昇が乳がん発症の前兆を示す指標として利用できる、すなわち乳がん予知の可能性を期待したい。

3. 展望

本研究は X 線マイクロビームを低線量放射線の人体影響、乳がん予知へ利用する試みである。X 線マイクロビームを利用できる施設は全国に 2 機関に限られており、その 2 機関のビーム特性を生かした研究を行ってきた。

低線量影響については、照射細胞と非照射細胞の相互作用の重要性を明らかにすることができた。今後の展望として、このような相互作用はすべての細胞で成り立っているのかが課題となる。また、低線量放射線影響研究ばかりでなく、X 線によるがん治療においても、照射されたがん組織と照射されない正常組織が隣接している状況にあることから、本研究での実験系はがん治療の基礎研究としても展開できると考えている。

Ca の毛髪内局所定量による乳がん予知の研究については、乳がん病理データと Ca 量ピーク位置の相関を求めることが当面の課題である。早期がん、若年性がん、進行性がんなど種々のタイプの乳がんについて Ca ピークとの関連を見いだすことも課題となる。

これらの研究は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) M. Ojima, A. Ito, N. Usami, M. Ohara, K. Suzuki, M. Kai: Field size effects on DNA damage and proliferation in normal human cell populations

irradiated with X-ray microbeams, Scientific Reports, DOI: 10.1038/s41598-021-86416-7 (2021).

- 2) M. Ojima, A. Ito, K. Suzuki, N. Usami, M. Ohara, M. Kai: The response of cells to DNA damage and cell proliferation depends on the size of the X-irradiated cell population, Photon Factory Activity Report, **37**, 175 (2020).
- 3) M. Torigata, A. Ito, H. Amano, K. Urano, S. Yoshida, K. Yokoyama, R. Oshitani, N. Niikura, Y. Tokuda: Human hair as a possible diagnostic tissue for breast cancer: Correlation between Ca accumulation in hair medulla and cancer status estimated by pathological data, Photon Factory Activity Report, **37**, 89 (2020).

【学会等発表】

- 1) 小嶋 光明, 伊藤 敦, 鈴木啓司, 宇佐美 徳子, 大原麻希, 甲斐 倫明, X 線マイクロビームを用いて照射野面積の違いがヒト正常細胞集団の DNA 損傷・細胞動態に及ぼす影響—内部被ばくの影響を考えるための基礎研究—日本保健物理学会第 53 回研究発表会, オンライン, 2020 年 6 月.
- 2) 鳥瀧諒也, 伊藤敦, 浦野建太, 吉田茂生, 新倉直樹, 大下内理紗, 横山梢, 徳田裕, 篠原邦夫, 大東琢治, 毛髪中心部メデュラでの Ca 量と乳がん腫瘍データの相関, 第 34 回日本放射光学会年会, オンライン, 2021 年 1 月.

5. 参考文献

- 1) J. Chikawa et al.: The universal concentrations and cancer signs of trace elements in hair observed by X-ray fluorescence analysis, J. X-ray Sci. Technol., **15**, 109-129, (2007).
- 2) A. Ito et al.: Difference in the distributions between Ca content and the degree of oxidative damage in human hair determined by X-ray imaging, AIP Conference Proceedings, **1696**, 020021 (2016).
- 3) A. Ito et al.: Biomedical application of soft X-ray microscopy with special reference to spectromicroscopy, Acta Physica Polonica A, **129**(2), 260-263 (2016).

1. はじめに

トリウム燃料はウラン燃料と比べて、資源量が豊富ならうえ同位体濃縮の必要が無く、核反応による超ウラン元素の生成量が少ないため環境負荷を低減できる等、多くの利点がある。その一方で、Th(IV)の化学的安定性により使用済み燃料の化学分離が困難であることも知られており、トリウム燃料サイクルの確立にまでは至っていない。ここでは、トリウム燃料再処理法における課題を解決するため、フルオラス溶媒とイオン液体を新規抽出媒体として適用することを検討した。

また、使用済み燃料の再処理法に係る試験研究や福島第一原子力発電所の廃炉研究では、核燃料物質であるウランやプルトニウムを含む試験廃液が発生する。これらの試験廃液から核物質を回収し、廃棄物として安定かつ安全に処理する技術を開発する必要がある。ここでは、ゼオライトによる吸着法について検討した。

2. フルオラス溶媒とイオン液体による溶媒抽出

トリウム燃料の再処理法として、リン酸トリブチル (TBP: tributyl phosphate) を抽出剤に用いる溶媒抽出法が知られている。燃料であるトリウム酸化物は、化学的に極めて安定であり、燃料溶解にはフッ酸またはフッ化ナトリウムを添加した高濃度硝酸が用いられることから、腐食性・反応性の高い溶解液の取り扱いが課題である。一方、フルオラス化合物は耐薬品性に優れており、パーフルオロヘキサン (フロリナート™ FC-72) のようなフルオラス溶媒は水にも有機溶媒にも混和しない新たな抽出溶媒として着目されている。そこで、TBPを骨格としたフルオラス抽出剤 (Fig.1) を合成し、Th(IV)の模擬元素として Ce(IV)を用いて抽出挙動について検討した。

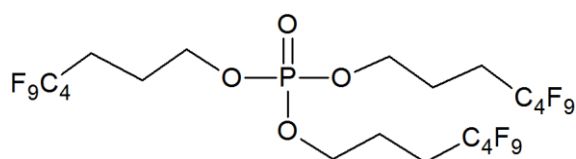


Fig.1 ホスフェート型フルオラス抽出剤 (TBP-C₄F₉)

Ce(IV)分配比の硝酸濃度依存性を Fig.2 に示す。分配比は硝酸濃度とともに上昇し、3M (M=mol/dm³)付近で最大値を示した。その後分配比は緩やかに減少したが、比較的広い硝酸濃度範囲で安定した抽出能を示した。

トリウム燃料再処理における代表的な課題として、第三相形成が知られている。Th(IV)の抽出錯体の有機溶媒に対する溶解性が低いことが要因として上げられる。そこで、低融点の有機塩として知られるイオン液体の適用を検討した。イオン液体は、電解質媒体でありイオン性の抽出錯体の溶解性に有利であると考えられる。本研究では、イミダゾリウム型イオン液体で疎水性の 1-pentyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (PMIT₅N)を抽出媒体に使い、4価アクチノイド元素の抽出剤として知られる methyltrioctylammonium chloride (TOMAC)を用いて Ce(IV)の抽出挙動を検討した。分配比の硝酸濃度依存性を Fig.2 に示す。硝酸濃度と共に分配比は上昇し、3M 以上ではほぼ一定の分配比となった。また、フルオラス溶媒を用いた抽出系に比べて分配比は高い値を維持した。

今後、燃料溶解液に共存するフッ化物イオンの影響や核分裂生成物の主要元素の挙動を把握する。これらの基礎データを基に、フルオラス溶媒抽出系とイオン液体抽出系の特性を総合的に判断し、これらの溶媒を用いた新しいトリウム燃料再処理法を提案する。

本研究は、JSPS 科研費 JP18K19047 の助成を受けたものである。

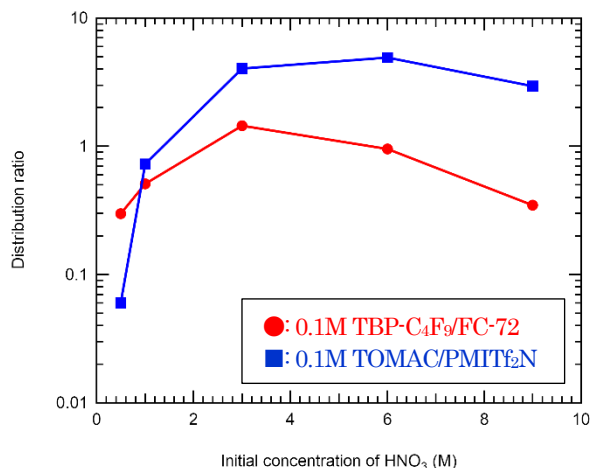


Fig.2 Ce(IV)分配比と初期硝酸濃度の関係¹⁾
[Ce(IV)]₀=10mM

3. ゼオライトによる吸着分離

核燃料物質を取り扱う試験研究施設では、ウランやプルトニウムの他に様々な試薬が混在した分析廃液が発生する。なかでも、硝酸塩やアンモニウム塩が含まれる場合、処理の段階で反応性の高い硝酸アンモニウムが生成する可能性がある。従って、廃液からアンモニウムイオンを分離回収し、適切な方法で分解処理することを検討している^{3,4)}。分離回収に際し、核燃料物質を含むため、グローブボックスやホットセルなど固有の設備内において処理可能であること、さらに高温高压などの過酷な条件や腐食性の高いハロゲン化物の使用は避ける必要がある。また、二次廃棄物の発生についても最小限に抑制できることが望まれる。このことから、ゼオライトを用いた吸着法について検討した。アンモニウムイオンに対して選択性の高いゼオライトを選定することで、高い分離能が期待でき、吸着溶離操作は常温常圧でも可能である。本研究では、天然ゼオライトで産地の異なるクリノプチロライト（二ツ井産と板谷産）と合成ゼオライトのIONSIV™IE-96（ユニオン昭和(株)）を用い、アンモニウムイオンの基礎吸着特性を評価するとともに、模擬分析廃液を用いたアンモニウムイオンの吸着実験を行った。

硫酸アンモニウムを用いた基礎吸着試験から、吸着平衡に達する時間は、二ツ井産クリノプチロライトで3時間、IE-96では1時間、板谷産クリノプチロライトは15分と見積もられた。また、吸着量はIE-96が最も高く、次いで板谷産、二ツ井産クリノプチロライトの順となった。クリノプチロライトは、含有するNaとKがアンモニウムイオンと交換することで吸着する。Naサイトとの交換がある程度進行した後にKサイトとの交換が起こるため、比較的吸着平衡に達するまでに時間を要する結果となった。一方、板谷産は二ツ井産に比べて粒径が極めて小さく、表面積が大きいため吸着速度も速かったものと考えられる。またIE-96は放射性廃液処理のために開発され、Csに選択性の高い吸着材である。アンモニウムイオンはCsとイオン半径が近く、高い選択性を示したものと考えられる。

処理対象となる分析廃液のうち、酸分析廃液とプルトニウム分析廃液の混合液について検討した。実廃液を模擬して、硝酸、硫酸アンモニウム、硝酸銀、ペルオキシ二硫酸アンモニウム、アミド硫酸、水酸化ナトリウムを含む模擬液を調製した。また共存するPu(IV)の模擬イオンとしてCe(IV)を添加し、模擬液中のアンモニウムイオンの吸着挙動を検討した。

バッチ式吸着試験の結果を Fig.3 に示す。IE-96 によるアンモニウムイオンの分配係数が最も高く、次いで板谷産、二ツ井産クリノプチロライトの順となり、硫酸アンモニウムを用いた基礎吸着試験と同等の結果となった。また、共存するCe(IV)の濃度はアンモニウムイオンの分配係数に影響しないことも明らかになった。従って、共存プルトニウムによるアンモニウムイオン分離への影響も少ないものと見込まれる。吸着したアンモニウムイオンは、より高い濃度の酸で容易に溶離できる。

今後、カラム処理によるアンモニウムイオンの吸着溶離試験を行い、共存イオンとの分離性能について検証していく。

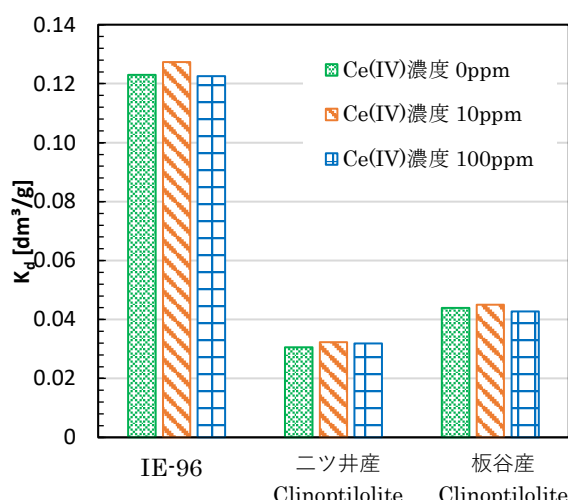


Fig.3 模擬廃液中アンモニウムイオンの分配係数 (酸濃度0.06M)²⁾

4. 業績

学会発表

- 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) 清水斗夢, 浅沼徳子, 栗飯原はるか, 渡部創: 「分析廃液処理のためのゼオライトによるアンモニウムイオンの分離に関する研究」, 日本原子力学会 関東・甲越支部 第14回学生研究発表会, B5-2, 2021年3月オンライン開催

5. 参考文献

- 3) S. Watanabe, H. Ogi, Y. Arai, H. Aihara, Y. Tkahatake, A. Shibata, K. Nomura, Y. Kamiya, N. Asanuma, H. Matsuura, T. Kubota, N. Seko, T. Arai, T. Moriguchi, "STRAD project for systematic

treatments of radioactive liquid wastes generated in nuclear facilities”, *Prog. Nucl. Energy*, 103090, 117 (2019).

- 4) 浅沼徳子, 宮野陸, 清水斗夢, 栗飯原はるか, 渡部創, 野村和則:「放射性溶液安定化処理のためのアンモニウム分離分解フローの開発 (2)ゼオライト系吸着剤によるアンモニウム分離前処理法の検討」, 日本原子力学会「2018年秋の大会」3G03, 2018年9月, 岡山大学

1. はじめに

将来のエネルギー源として、D（重水素）とT（トリチウム）のD-T反応を用いた核融合発電の研究が進められている。D-T反応の核融合条件を満たすためには、プラズマの温度が1億度で、 10^{20}m^{-3} 程度の高密度プラズマを1秒間以上閉じ込める必要がある。そのため、核融合装置にはプラズマを加熱するための負イオンビームを用いた中性粒子ビーム（NNBI）加熱装置が必須である。

現在、開発が進んでいる国際熱核融合装置（ITER）用NNBIとして、セシウムを用いた高周波型大電流負イオン源（負イオンビーム電流密度： $30\text{mA}/\text{cm}^2$ 、40A、引き出し面積 1000cm^2 、運転時間1時間）の開発が遂行されている¹⁾。セシウムを用いると、表面生成法により高密度の負イオンプラズマを容易に生成することができる。

一方、セシウムを用いない負イオン生成法として、プラズマ中の水素の振動励起分子が介在する解離性付着反応を利用した体積生成法がある。この解離性付着反応を利用するには、プラズマ内に振動励起分子を生成する高エネルギー電子（ $>12\text{eV}$ ）と、その振動励起分子に付着する低エネルギー電子（ $<1\text{eV}$ ）が必要である。そこで既存の負イオン源内に磁気フィルターを設置し、これらの電子を空間的に分離し、解離性付着反応により負イオンを生成している。しかし、通常のプラズマでは高エネルギー電子と低エネルギー電子が混在するプラズマの生成が難しく、また、プラズマの体積が大きくなり負イオン生成効率が低下するなど、体積生成法では高密度の負イオンを生成することは困難とされてきた。

将来のデモ級核融合実証炉では、核融合反応を長時間維持させるため、連続運転が可能で大電流、かつメンテナンスの容易な中性粒子ビーム入射装置用負イオン源の開発が要求されている。しかし、セシウムを用いた負イオン源では、長パルス時でのビームの安定性、導入するセシウム量の管理、負イオン源内壁温度の制御等、長時間運転を目指す核融合加熱装置として解決しなければならない課題が存在する。そのため、セシウムを用いない連続運転が可能で、大電流、かつメンテナンスの容易な非セシウム型の中性粒子ビーム入射装置用負イオン源の基盤技術の開発が急務となっている。

2. 研究の概要

本研究では、長時間運転可能で大電流、かつメンテナンスの容易なセシウムを用いない非セシウム型の中性粒子ビーム入射装置用負イオン源の開発を行っている。本研究室で独自に開発した高密度シートプラズマを用いると、数cmの狭い領域内で、プラズマ中心付近で生成された振動励起分子が、周辺に存在する低エネルギー電子と解離性付着反応を起こす。そのため、セシウムを用いずに体積生成法で効率よく負イオンを生成することができる²⁾。

本研究の最終目標は、シートプラズマを用いた非セシウム型負イオン源のプロトタイプを開発し、(1)ITER用実機と同程度の高密度水素原子負イオンビーム電流値（目標値： $30\text{mA}/\text{cm}^2$ ）、(2)実機の1/20スケールの大面積化（目標値：約 50cm^2 ）、(3)実機と同程度の連続運転（目標値：1時間）、(4)重水素原子負イオンビーム実験（目標値： $20\text{mA}/\text{cm}^2$ ）を実現することである。

2020年度は、負イオンビームの連続運転（目標値：1時間）を実現するため、負イオンビームと共に引き出される電子ビーム（随伴電子）を減少させ、引き出し電極部の熱負荷を抑制する。実験では、随伴電子電流値と水素原子負イオン電流値の比 I_{EG}/I_C を1以下に低減させるため、制御が容易な磁性体フィルター（SMF: Soft Magnetic material plate for Magnetic Filter）を単孔電極部に設置し、引き出された負イオンビーム I_0/I_H の特性を調べた。

図1は、非セシウム型負イオン源TPDsheet-Uを用いた実験装置の概略図である²⁾。TPDsheet-Uは、シートプラズマ源と引き出し電極の2つの領域から構成されている。水素のシートプラズマは、 LaB_6 熱陰極とスリット付き陽極（幅 40mm ×高さ 2.0mm ）間の直流放電により生成した。放電室内に1次ガスを導入し、プラズマ源内圧力は約 270Pa である。放電電流は $40\sim 100\text{A}$ の間で変化させ、最大放電電力は約 30kW である。陽極から流出したプラズマは $34\sim 47\text{mT}$ の外部磁場により、陽極とターゲットの間でシート状の形状を維持している。典型的なプラズマの電子温度は 15eV 、電子密度は $1\times 10^{18}\text{m}^{-3}$ である。負イオンを生成するために、引き出し電極下部から2次ガスを導入し、圧力は約 0.3Pa に維持した。

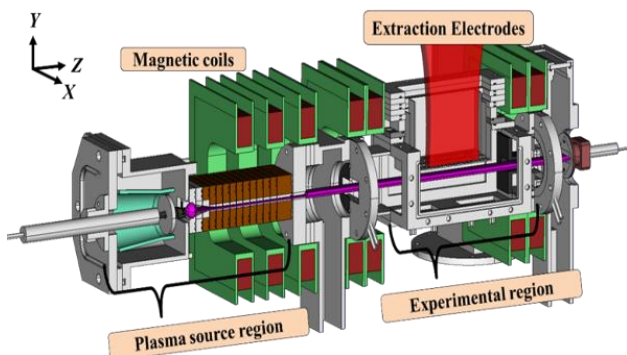


Fig. 1 空芯コイルを用いた既 TPDsheet-U の概念図

引き出し電極は、シートプラズマの中心から Y 軸方向に 22mm 離れた場所に設置された 2 グリッド (PG と EG) で構成されている (図 2)。PG と EG の直径はそれぞれ $\Phi 4\text{mm}$ と $\Phi 8\text{mm}$ 、EG と PG の間のギャップは 6mm である。

接地された PG と EG の間には最大で約 10kV の電圧が印加され、シートプラズマ周辺からコレクターに向けて負イオンが引き出される。負イオンと共に引き出される随伴電子ビームは、外部磁場により EG に偏向され電流密度 $J_{EG}(e)$ として測定された。引き出しされた H⁻ の電流密度 $J_C(H^-)$ はコレクター (C) で測定された。

磁性体フィルター SMP (厚さ : 0.3mm、幅 : 30mm、長さ : 10mm) は、PG 開口部付近に配置された。磁場中に設置された磁性体により、磁力線が曲げられ、PG に近い電子は磁力線に沿って補足される。図 2 のグレーの実線は、計算により求めた外部磁場 40 mT での SMP による磁場分布を示している。

図 3 は引き出し電流比 I_{EG}/I_C 、並びに引き出し電流密度 $J_C(H^-)$ と $J_{EG}(e)$ の磁場強度 B に対する依存性を示す。

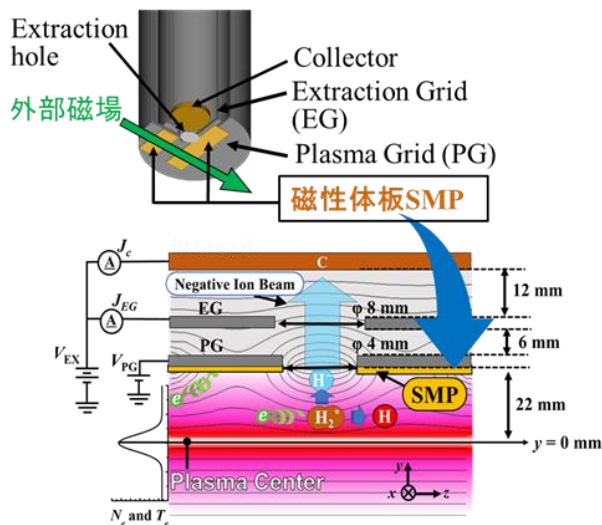


Fig. 2 単孔引き出し電極と SMP の概念図

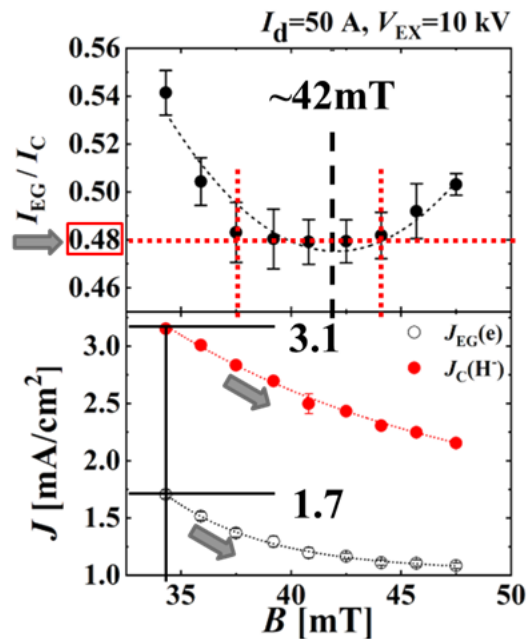


Fig. 3 外部磁場に対する引き出し電流密度 $J_C(H^-)$ と $J_{EG}(e)$ の及び I_{EG}/I_C の特性

I_{EG}/I_C の最小値を $B = 42 \text{ mT}$ で 1.0 以下の 0.48 まで減少させることに成功した。また、37mT と 43mT の間では、 I_{EG}/I_C の比率はほとんど一定であるが、 $J_{EG}(e)$ と $J_C(H^-)$ は、 B の増加とともに徐々に減少している。これらの結果から、随伴電子の影響を抑制するには、 I_{EG}/I_C 値が小さく、H-電流が大きい 37mT 付近の磁場強度が最適であることを実験的に明らかにした。

3. 展望

2021 年度は、昨年度考案した SMF の最適化を行い、電子電流値と負イオン電流値の比 I_{EG}/I_C を 1 以下に維持し、負イオン電流値 $J_C(H^-)$ の増加を目指す。

4. 業績

論文発表

- 1) H.Kaminaga, T.Takimoto, A.Tonegawa, and K.N.Sato, Characteristics of extracted ion beam from a cesium-free negative ion source using sheet plasma, *Rev. Sci. Instrum.* **91** pp113302-113307, 2020.

5. 参考文献

- 1) U. Fantz, C. Hopf, D. Wunderlich, R. Friendl, M. Froschle, B. Heinemann, W. Kraus, U. Kurutz, R. Riedl, R. Nocentini, and L. Schiesko, *Nucl. Fusion* **57** pp116007-116019, 2017.
- 2) K.Hanai, S.Ishihara, R.Endo, T.Takimoto, A.Tonegawa, and K.N.Sato. Characteristics of cesium-free negative hydrogen/deuterium ion source by sheet plasma, *Fusion Eng. and Des.* **146** pp2721-2724, 2019.

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) が知られており、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で撮像を行う。放射性薬剤の核種としては $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 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 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 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新薬の開発が急務であり、共同研究先である量子科学技術研究開発機構のタンデム加速器を利用して Tc 同位体 (^{96}Tc) を用いた新薬の開発を行っている。しかし ^{96}Tc の放射エネルギーは 778、812、850keV と高く、約 300keV 以下しか検出できない SPECT や、511keV しか検出できない PET では ^{96}Tc の撮像は不可能である。そこで我々は次世代の画像診断装置として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。ETCC の開発および新規核種を用いた撮像試験の現状について述べる。

2. 研究の概要

我々が開発している 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。独創的な点は、既存の画像診断装置よりも測定可能なエネルギー範囲が広く 300-2000keV まで撮像可能なことである。

このことから、使用できる薬剤の選択肢の拡大につながる。また、反跳電子の飛跡が検出できることで従来のコンプトンカメラよりも分解能の向上や再構成画像のノイズの低減がされている[3]。

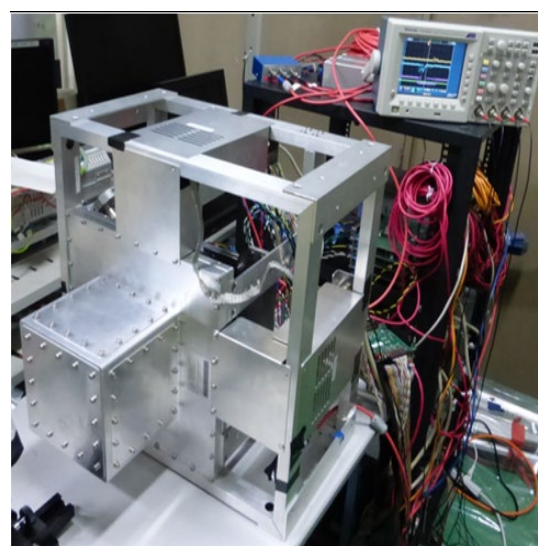


図 1 電子飛跡型コンプトンカメラ (ETCC)

既存の ETCC には、検出器のデータ収集率の問題があった。原理実証機は汎用回路を用いており処理速度がミリ秒程度掛かり大変遅かったため、100Mbit の LAN 読み出し可能な基板の導入試験を行った[4]。現在は更に Gigabit 読み出し基盤を実装し、それに合わせてデータ収集システムの構築を行っている。

画像診断装置では、放射性薬剤ががん細胞に集中することを利用してがんの位置を特定するため、再構成画像の精度が重要となる。核医学でよく使用される画像再構成アルゴリズム LM-MLEM (List-mode Maximum-Likelihood Expectation Maximization) は簡便に画像再構成ができる一方で、定量的な画像を得ることが困難であった。そこで我々はマルコフ過程モンテカルロを用いた再構成アルゴリズムである SOE を導入しその有用性を実証してきた。さらなる再構成性能の向上を目的として、Deep Learning を用いた解析を導入している(業績 1)。さらに臨床ガンマ線カメラと同等の画質 (定量性 $\leq 10\%$) を得ることを目標として、体内での散乱吸収補正、3 次元カメラ位置補正と

最適化を行い、また患部内の薬剤集積のデータ処理解析機能を実装する予定である。

ETCC の生体撮像時の性能を調べ、かつ、新たな放射性薬剤の可能性を探るため、量子科学技術研究開発機構のタンデム加速器で生成した ^{96}Tc (業績 4) を用いた放射性薬剤を利用し、京都薬科大学でマウスの体内へ投与した後に、ETCC を用いてマウスの腎臓に集積された薬剤の撮像実験を行った。

マウスを ETCC に対し背中を向けている状態で設置し、またマウスの中心をカメラの入射面から 4.3cm 離した。一定時間撮像後マウスを 120° 右に回転させ撮像を行った。また同様に始めの状態から 120° マウスを左に回転させ、合計で 3 方向から撮像した。

撮像実験より得られたデータからの画像再構成の結果を図 2 に示す(業績 2, 4)。この図からマウスの腎臓の位置に薬剤が集積されていることがわかる。このようにマウスの体内に投与した ^{96}Tc 放射性薬剤の画像化に世界で初めて成功した。これらの結果から ^{96}Tc が $^{99\text{m}}\text{Tc}$ に代わる新たな新たな放射性薬剤として期待できることがわかった。

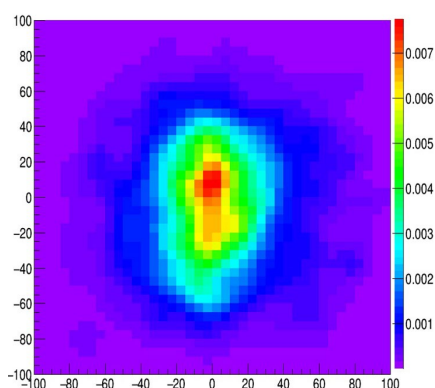


図 2 マウス体内に投与した ^{96}Tc の再構成画像

3. 展望

マウスの体内に投与した ^{96}Tc 放射性薬剤の画像化に世界で初めて成功したことを受けて、現在マウスを用いた生体多方向撮像を予定している。次の撮像試験では半減期やエネルギーが異なる $^{95\text{m}}\text{Tc}$ を投与する。 $^{95\text{m}}\text{Tc}$ は 500keV 以上の高エネルギーガンマ線の他、200keV のガンマ線も出すため、京都薬科大学にある SPECT と同時測定することにより、既存の画像診断装置との比較が可能となる。また、現在 2 台目の ETCC の開発および立ち上げを行っており、2 台のカメラを用いたステレオシステムで撮像を行うことにより、よ

り画像再構成を向上させて撮像することが可能になる。

今回の結果により、ETCC の検出可能エネルギーが広いという特長を活かし、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見えてきた。また、既存の薬剤への置き換えだけでなく、4.3 日という長い半減期を活かして、抗体反応やドラッグデリバリーシステムを用いた薬剤の応用の検討を行っていく。

4. 業績

【論文】

- 1) 加田孟, Geant4 を用いた電子飛跡型コンプトンカメラのシミュレーションと機械学習による再構成画像評価, 東海大学修士論文, 2021.
- 2) 幾田敦也, 電子飛跡検出型コンプトンカメラを用いた腎シンチグラフィ放射性薬剤 ($^{96}\text{Tc} - \text{DTPA}$) による生体の多方向撮像の基礎実験, 東海大学修士論文, 2021.

【学会発表】

- 3) 初川雄一, 榎田淳子 他, 「 Tc-95 , Tc-96 を用いた ETCC 撮像による新しい診断法の開発」, 日本放射化学会第 64 回討論会, 2020 年 9 月.
- 4) 幾田敦也, 榎田淳子 他, 「電子飛跡検出型コンプトンカメラを用いた ^{95}Tc 及び ^{96}Tc の画像化試験」, 第 119 回日本医学物理学会学術大会, 2020 年 5 月.

【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] Toru Tanimori and on behalf of SMILE project, MeV Gamma-ray imaging spectroscopic observation for Galactic Centre and Cosmic Background MeV gammas by SMILE-2+ Balloon Experiment, Journal of Physics, Conference Series, 2020.
- [4] 植松真吾, 電子飛跡検出型コンプトンカメラを用いた Tc 同位体の撮像および画像再構成と検出器の構築, 東海大学修士論文, 2020.

未来社会に向けた先進的原子力教育コンソーシアム ANEC へ参加

工学部原子力工学科
亀山 高範

1. 原子力人材育成イニシアティブ事業

文部科学省が公募する令和2年度「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）」¹⁾では、「大学や研究機関等が組織的に連携し、原子力分野において育成する魅力的な人材像を掲げ、共通基盤的な教育機能を補い合うことで、拠点として一体的に人材を育成する体制の構築を促し、ひいては我が国の原子力分野の人材育成機能の維持・充実に寄与することを目的とした取組を進める機関を支援」するとされ、応募された11課題の中から課題①～⑥が採択された（表1）²⁾。各課題とも、初年度（令和2年度）はフィージビリティスタディ(FS)とし、その後の6年間（令和3-8年度）が実質の活動期間となる。また、各課題内には、大学・研究所などの複数の機関により教育コンソーシアムが形成され、それぞれの事業が計画・実施・報告される。

本学は、実施・協力機関として⑤⑥に、協力機関として①③にそれぞれ参画した。特に、⑤⑥では発電炉シミュレータ実習とIAEA原子力安全基準研修を実施する計画とした。

表1 令和2年度の採択事業

事業名	代表機関
①原子力エネルギー高度人材育成統合拠点	東京工業大学
②大型実験施設群を活用した実践的・持続的連携原子力教育カリキュラムの構築	東北大学
③機関連携強化による未来社会に向けた新たな原子力教育拠点の構築	北海道大学
④原子力技術の継承と継続的な人材育成を目指した福井県嶺南地域の国際原子力人材育成拠点形成	福井大学
⑤大学研究炉を中心とした原子力教育拠点の形成	近畿大学
⑥ネットワーク形成を通じた高専における原子力人材育成の高度化	国立高等専門学校機構

2. 原子力教育コンソーシアム ANEC

令和2年度のFSの実施・準備状況などから、令和3

年度の計画が文部科学省の指示により見直され、FSで採択された6課題が次の2課題へ集約・改編された³⁾。

1)機関連携強化による未来社会に向けた新たな原子力教育拠点の構築（代表機関：北海道大学）

2)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（代表機関：近畿大学）

さらに、課題1)、2)に参画する機関から構成される国内原子力教育のコンソーシアムが1個に統合され、「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)」と名付けられた³⁾。令和3年度ANECに参加する機関（実施・協力）は国内の大学20、国立高等専門学校機構、研究機関5、電力会社6、民間企業7、その他3、計42であり、このうち、実施機関は本学と11大学+国立高等専門学校機構である（表2）。ANEC事務局は北海道大学である。

表2 ANEC参加機関

実施機関
1) 北海道大学, 東北大学, 東京工業大学, 長岡技術科学大学, 静岡大学, 国立高等専門学校機構 2) 東北大学, 東海大学, 東京都市大学, 名古屋大学, 福井大学, 福井工業大学, 京都大学, 近畿大学
協力機関（実施機関を除く）
【大学】東京大学, 早稲田大学, 金沢大学, 藤田医科大学, 福井大学, 大阪大学, 岡山大学, 九州大学, 総合研究大学院大学 【研究機関】日本原子力研究開発機構, 高エネルギー加速器研究機構, 量子科学技術研究開発機構, 核融合科学研究所, 若狭湾エネルギー研究センター 【電力会社】北海道電力, 東北電力, 東京電力ホールディングス, 関西電力, 日本原電, 電源開発 【民間企業】日本原燃, 日立GEニュークリア・エナジー, 東芝エネルギーシステムズ, 三菱重工業, アトックス, NAT, 原子力エンジニアリング, 【他】電気事業連合会, 日本原子力産業協会, NPO 法人アトム未来の会

ANEC内には4グループ会議が設定され（表3）、グループ毎に参加機関の連携により各事業は進められる。本学は、実施・協力機関として「国際」・「実験・実習」グループ会議に、協力機関として「カリキュラム」グループ会議にそれぞれ参加する。

表3 ANEC内のグループ会議

グループ会議名	とりまとめ機関
カリキュラム	北海道大学
国際	東京工業大学
実験・実習	近畿大学・京都大学
産学連携	福井大学

3. 令和2年度実施と令和3年度計画

本学は、主に次の2項目について、令和2年度に準備・実施し、令和3年度に実施・継続を計画している。

a) 発電炉シミュレータ実習：大学院生・大学生・高等専門学校生を対象

b) IAEA 原子力安全基準研修：大学院生・大学生・高等専門学校生を対象

a) では、原子力発電所で異常・事故が発生した場合に、原子力発電炉の挙動と対応・安全策を理解するため、東海大学が所有するグラフィカルな原子力発電炉シミュレータ SARS⁴⁾を用いて、異常・事故時の原子力発電炉の挙動を学ぶ。

令和2年度には、当実習プログラムを準備し、本学内で試行した(図1)。SARSによる解析結果の妥当性を検証し、解析の実効と解析結果の分析に要する時間を確認し、実習の内容と構成を検討した。

令和3年度には、当実習テキストを整備したうえで、発電炉 PWR・BWR に関する講義の後、SARSによる実習を計画している。大学院生・大学生対象と高等専門学校生対象の2回を8月に実施する計画である。ただし、COVID-19 感染拡大により、本学内で実習が困難な場合、遠隔(オンライン)の実習に代替する。



図1 SARSを用いる実習の状況。

b) では、国際的な視野をもつ原子力人材を育成するため、国際原子力機関(IAEA)、原子力規制委員会(NRA)などの原子力安全基準を中心に学ぶ研修を実施する。

本学では、平成25年度からIAEAの専門家を講師とする原子力安全基準研修を継続しているが、COVID-19感染拡大により、令和2年度には3月8-11日に初めて遠隔で実施した。国内から大学院生13名(留学生を含む)が参加し、一般・社会人40名、そのうち国外(アジア5カ国)から12名も参加した。IAEAから10件、本学とNRAから3件の講演が行われ(表4)、国内外の時差を考慮して、日本時間の午後に講演を、夕刻に質疑応答を設定した。各講演後、遠隔ながらも、講師と参加者で活発な質疑応答が行われた。研修終了後のアンケート調査から、今後の対応も検討した。

令和3年度には、当研修を本学内(高輪キャンパス)と遠隔のハイブリッド形式で、令和2年度と同様な項目にて3月に実施する計画である。

表4 令和2年度原子力安全基準研修の講義例

1. Safety Standards, Safety Fundamentals (SF-1)
2. Leadership and Management for Safety (GSR Part2)
3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards (GSR Part3)
4. Site Evaluation for Nuclear Installations (SSR-1)
5. Safety of Nuclear Power Plants: Design (SSR 2/1 Rev.1 (including TECDOC))
6. Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation (SSR 2/2 Rev.1)
.....
11. Overview of Inspection System Reform
12. New Concept of Operations for Nuclear Emergency Preparedness and Response (EPR) Guide in Japan
13. Nuclear International Framework

ANECで実施される教育研修・原子炉実験・シミュレータ実習などに、大学院生・大学生・高等専門学校生が積極的に参加し、実りある成果と貴重な経験を得ることが期待される。当研究所は、ANEC内で実習・研修を行うことにより、全国から参加する学生の向学心を刺激し、専門知識の修得を支援することも重要な役割の1つであると認識している。

4. 参考文献

- 1) https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1419734_0001.htm
- 2) https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/attach/1419738_00001.htm
- 3) https://jinzai-initiative.jp/works/document/r3_initia.pdf
- 4) 日本原子力学会2016年春の年会 III17 & III18, 2017年春の年会 2M01 & 2M02, 2018年春の年会 2K14, 2019年春の年会 3L08, 2021年春の年会 2F11.

東海大学国際原子力研究所所報 2020
発行日：2021年3月31日
発行者：東海大学国際原子力研究所
〒259-1292
神奈川県平塚市北金目4丁目1-1