

2025 年度

第 34 回

放射線利用総合シンポジウム

資料集

2026 年 1 月

公立大学法人大阪 大阪公立大学

量子ビーム誘起反応科学研究所

一般社団法人 大阪ニュークリアサイエンス協会

目 次

1. 第 34 回放射線利用総合シンポジウム開催概要	1
2. 講演資料	4
テーマ 1「関西北陸の放射線関連組織の現状と将来」	
① ONSA の活動状況とその意義 （一社）大阪ニュークリアサイエンス協会 専務理事 奥田 修一	5
② パッシブタイプ放射線検出器用蛍光体の開発とその応用 金沢工業大学高信頼理工学研究センター 教授 南戸 秀仁	11
③ 福島県浜通り地域環境放射線研修を通じた大阪大学 放射線科学基盤機構の人材育成 大阪大学放射線科学基盤機構 放射線教育部門長 岡田 美智雄	27
テーマ 2「最前線の研究報告（学生、若手研究者による）」	
④ ホウ素中性子捕捉療法における深部がん照射プロトコルの開発 大阪大学大学院工学研究科 D1 守實 友梨	35
⑤ 中性子イメージングを利用した混相流の可視化 京都大学複合原子力科学研究所 助教 大平 直也	41
⑥ 低線量肺がん CT 検診における Silverbeam Filter の有用性に関する検討 （公社）地域医療振興協会 市立奈良病院、 奈良県立医科大学大学院医学研究科 M2 吉川 武志	45
テーマ 3「新たな研究開発の動き」	
⑦ AI と放射線非破壊検査 （元）大阪府立大学 谷口 良一	53
⑧ 宇宙の放射線と原子力利用 （国研）宇宙航空研究開発機構研究開発部門 ファンクションマネージャ 川崎 治	63
⑨ もんじゅサイトの新試験研究炉の現状 福井大学附属国際原子力工学研究所 所長 宇埜 正美	69
3. ONSA の活動とこれから	78
編集後記	82

1. 第 34 回放射線利用総合シンポジウム開催概要

第 34 回 放射線利用総合シンポジウム

主催 大阪公立大学量子ビーム誘起反応科学研究所、一般社団法人 大阪ニュークリアサイエンス協会

後援：文部科学省 経済産業省近畿経済産業局（国研）日本原子力研究開発機構

（国研）量子科学技術研究開発機構（一財）電子科学研究所（一財）大阪科学技術センター

大阪商工会議所 堺商工会議所

協賛：（一社）日本物理学会（公社）日本化学会（公社）応用物理学会（一社）電気学会（公社）高分子学会（公社）日本分析化学会（一社）日本原子力学会（公社）日本医学放射線学会（一社）日本非破壊検査協会（公社）日本放射線技術学会（公社）日本アイソトープ協会（一社）近畿化学協会（一社）大阪府技術協会（公社）大阪府診療放射線技師会（一財）量子放射線利用振興協会 日本放射線化学会 日本放射光学会（一社）日本放射線影響学会（一社）日本保健物理学会（一社）日本接着学会（公社）日本表面真空学会（一社）日本核医学会 日本バイオマテリアル学会 日本防菌防黴学会 日本陽電子科学会 関西原子力懇談会（一社）日本放射化学会

開催日時：2026 年 1 月 26 日（月）10:00～17:00

会場：サンエイビル（ONSA 事務局のビル）3F 講義室（大阪市中央区南船場 3-3-27）

開催形式（講演、参加共）：実開催（約 40 名）と Zoom のハイブリッド、参加予定人数 100 名

対象：大学や研究機関、民間企業の研究者、技術者などの専門家から一般市民まで

【開催の趣旨】 放射線は、多くの研究分野における基本的なツールとして利用され、先端科学を牽引してきました。放射線に関する研究は、放射線利用を基本とする広範な境界領域の学際研究です。また放射線の利用技術の向上が、利用分野の研究を飛躍的に発展させてきました。

今回で第 34 回目となる放射線利用総合シンポジウムは、学術研究から産業応用まで放射線利用技術の普及と向上を目的とし、異分野の研究者、技術者が相互に情報交換するという、他の講演会には見られない特徴があります。テーマとして取り上げられた放射線利用は、ナノ材料、バイオ、医療、環境、エネルギーなど様々な先端科学や産業応用の基盤となっています。本シンポジウムでは、このように多くの分野で注目される最先端の話題を取り上げ、さらに基礎からわかりやすく紹介することで、専門家から一般市民まで広く参加いただきます。

《この事業は、（公財）中部電気利用基礎研究振興財団の開催助成を受けています。》

◇**参加費**：無料（Zoom 参加、会場参加とも）

◇**予稿資料集**：希望者に 1 冊 1,800 円で事前送付、りそな銀行 船場支店 普通預金 No.3635459

（主催団体の教職員、ONSA 会員は無料）

◇**定員**：会場参加 40 名、Zoom 参加 100 名

◇**WEB 案内**：<https://onsa.g.dgdg.jp/sy34-0.pdf>

◇**参加申込**：<https://ws.formzu.net/fgen/S59578870/> または右の QR コードから WEB 案内に従って

お申し込みください（定員になり次第締切）。Zoom 参加者には Zoom 参加方法などをメールでご連絡します。

◇**問合先**：（一社）大阪ニュークリアサイエンス協会事務局

〒542-0081 大阪市中央区南船場 3-3-27

[TEL:06-6282-3350](tel:06-6282-3350)

FAX:06-6282-3351

e-mail:onsa-ofc@nifty.com



シンポジウムプログラム

10:00～10:05 開会の挨拶 大阪ニュークリアサイエンス協会 会長 水田 仁

テーマ1「関西北陸の放射線関連組織の現状と将来」(講演 (1)10分、(2, 3)40分、質疑5分) -
(1) ONSAの活動状況とその意義

(一社)大阪ニュークリアサイエンス協会 専務理事 奥田 修

—

(一社)大阪ニュークリアサイエンス協会(ONSA)は、放射線利用技術の向上と産業振興を目的として、関西を中心に40年にわたり活動が続けてきた。放射線利用施設の維持が厳しくなる中、2024年度より、新しい方針に基づく活動を開始した。この現状と意義について報告する。

【座長：岩瀬 彰宏 大阪府立大学 名誉教授】

(2) パッシブタイプ放射線検出器用蛍光体の開発とその応用

金沢工業大学高信頼理工学研究センター 教授 南戸 秀仁

光刺激ルミネッセンス(Optically Stimulated Luminescence:略してOSL)やラジオフォトルミネッセンス(Radiophotoluminescence:略してRPL)現象を利用したパッシブタイプ線量計は、個人被ばく線量計測などに応用されているが、線量計に使用されている放射線誘起蛍光体は限られており、微量の放射線照射に対し高感度のルミネッセンスを示し、かつ、広いダイナミックレンジで直線応答を示す新規蛍光体の開発が望まれている。

本講演では、パッシブタイプ線量計用の放射線誘起蛍光体、特にRPL現象を呈する蛍光体を用いたパッシブタイプ放射線量計の開発現状ならびに将来展望について言及する。

また、この放射線誘起現象を測定するための装置、RPL蛍光体を用いた放射線のイメージング装置ならびに重粒子線を用いた癌の診断・治療時の放射線量の二次元分布を測定するための装置等の開発についても言及をする予定である。

(3) 福島県浜通り地域環境放射線研修を通じた大阪大学放射線科学基盤機構の人材育成

大阪大学放射線科学基盤機構 放射線教育部門長 岡田 美智雄

原子力規制人材育成事業の支援のもと大阪大学放射線科学基盤機構で実施している全学部・大学院生を対象にした共創的放射線教育プログラム(CREPE)について紹介する。このプログラムは、福島県浜通り地域環境放射線研修を基盤にした放射線教育プログラムで、環境放射線に関心を持ち、福島県浜通り地域の復興に目を向ける学生を増やすことができたのは大きな成果と考えている。

11:50～12:50 <昼休憩>

テーマ2「最前線の研究報告(学生、若手研究者による)」(講演25分、質疑5分)

【座長：川端 祐司 京都大学 名誉教授】

(4) ホウ素中性子捕捉療法における深部がん照射プロトコルの開発

大阪大学大学院工学研究科 D1 守實 友梨

医学の進歩によりがんは「治せる」時代になってきているが、未だ膵臓がんや肝臓がん等の深部に位置するがんの治療成績は低迷している。ホウ素と中性子を用いた低侵襲ながん治療法であるホウ素中性子捕捉療法(BNCT)による深部がん治療を実現するため、プロトコルの開発や取り組みについて紹介する。

(5) 中性子イメージングを利用した混相流の可視化

京都大学複合原子力科学研究所 助教 大平 直也

中性子イメージングは金属部品等の可視化、部品等に含まれる少量の水分・オイルの可視化・定量化などにおいて、有効な観察手法である。近年の撮影装置の発達により、短時間かつ高画質で中性子透過像の撮影が行えるようになった。本技術は様々な応用が行われており、本発表では特に、中性子イメージングを利用した混相流の研究に焦点を当てて最近の事例を紹介する。

(6) 低線量肺がん CT 検診における Silverbeam Filter の有用性に関する検討

(公社) 地域医療振興協会 市立奈良病院、
奈良県立医科大学大学院医学研究科 M2 吉川 武志

低線量肺がん CT 検診において、検診受診者も CT による肺がん検診に関心が強くなっている。被ばくに関しても関心が強く、対象が健常者となる検診において、可能な限り低線量であることが望ましい。今回当院に搭載された Silverbeam Filter という機構を用いて、さらなる被ばく低減が期待できるのではないかと考え、本研究を始めた。本研究は、胸部ファントムを用いて、Silverbeam Filter が低線量肺がん CT 検診においてどの程度有用であるかを物理評価、視覚評価で検討した。

14:20～14:40 <休憩>

テーマ 3「新たな研究開発の動き」(講演 40 分、質疑 5 分)

【座長：佐藤 文信 大阪大学大学院 工学研究科 環境エネルギー工学専攻 教授】

(7) AI と放射線非破壊検査

(元) 大阪府立大学 谷口 良一

非破壊検査分野で”NDE4.0”というワードが話題となっている。これは、検査でのデータを統一的な規格、規範でデジタル化し、非破壊検査の AI 化を促進しようとする動きである。放射線非破壊検査の分野では、これに先行する形で、数十年前から、パターン認識の技術を用いて欠陥を抽出することが試みられてきたが、余り成功したとは言い難い。最新の AI 技術を用いて、これらの技術的な壁を突破する可能性について考えてみたい。

(8) 宇宙の放射線と原子力利用

(国研) 宇宙航空研究開発機構研究開発部門 ファンクションマネージャ 川崎 治

宇宙の放射線環境とその影響については原子力業界からはなじみの薄い分野と思われ、また過去の米ソ(ロシア)を中心とした宇宙探査ミッションでの原子力利用、また将来の展望についても十分に知られていないものと思われる。これらについて解説する。

(9) もんじゅサイトの新試験研究炉の現状

福井大学附属国際原子力工学研究所 所長 宇埜 正美

令和 5 年 3 月より始まった「もんじゅ」サイトに設置予定の新試験研究炉の詳細設計では、JAEA が主に炉心設計と地盤調査を、京都大学は装置の検討・開発を担当している。福井大学は中性子利用の部門の設置を目指したカリキュラム構築の他、地元関連施策検討部会で利用促進団体や複合施設に関する議論に加わるとともに、福井県の地元企業を集めた研究会にも協力している。当日はこれまでの詳細設計の成果について紹介する。

16:55～17:00 閉会の挨拶 大阪公立大学量子ビーム誘起反応科学研究所 所長 松浦 寛人

2. 講演資料

テーマ1「関西北陸の放射線関連組織の現状と将来」

①

ONSA の活動状況とその意義

(一社) 大阪ニュークリアサイエンス協会

専務理事 奥田 修一

(一社) 大阪ニュークリアサイエンス協会 (ONSA) は、放射線利用技術の向上と産業振興を目的として、関西を中心に40年にわたり活動が続けてきた。放射線利用施設の維持が厳しくなる中、2024年度より、新しい方針に基づく活動を開始した。その2つの柱は、(1)放射線に係る多様な分野で会員の自主的な活動を推し進め、関西を中心とする活動拠点とすること、(2)ONSA内外で産学官民相互の連携を推し進め、関西を中心とする連携拠点とすることである。この現状と意義について報告する。

ONSA の活動状況とその意義

(一社) 大阪ニュークリアサイエンス協会

奥田 修一

1. はじめに

放射線は、身近な日用品の製造工程にも広く利用されており、病気の診断や治療にも役立っている。そして放射線利用技術は、日本経済を支える科学技術の基盤となっており、その重要性は一層高まっている。

(一社) 大阪ニュークリアサイエンス協会 (ONSA) は、放射線利用技術の向上と産業の振興を図り、国際化に貢献することを目的として、関西を中心に 40 年にわたり活動を続けてきた。この放射線利用総合シンポジウムは第 34 回目となり毎年継続して主催 (共同主催を含む) している。ただ、ONSA を取巻く環境は近年大きく変化した。これを受けて、ONSA は大きく方針を転換することになり、現在に至っている。

このシンポジウムを開催するにあたり、ONSA の新たな活動方針と現状について報告する。

2. 背景と ONSA の取り組み

ONSA が主に活動を行っている関西には、放射線・原子力分野で活躍する多くの大学、研究機関、法人、企業、団体があるが、放射線利用分野の多様性を反映して、これらの結びつきは必ずしも十分ではない。共通する放射線利用技術についての情報を共有することが重要であり、放射線利用施設には、多くの利用者が集まることから、新しい放射線の可能性を生み出す基盤、連携の拠点になってきた。しかし近年、施設の利用停止が顕著に認められ、またそれらを支えて連携を図る ONSA のような団体も継続が難しくなっている。

ONSA はこのような現状に鑑み、放射線に関する活動目的の基本は変えることなく、2022 年度に活動方針を大きく見直し、広く関西を中心とする多くの大学、研究機関や民間企業など個人や団体の放射線に関連する活動に幅広く貢献することとした。さらに 2024 年度よりより多くの会員が活躍できるよう、そのニーズに合った活動を行うための新たな取り組みを開始した [1, 2]。

3. ONSA の新たな活動方針とその意義

ONSA の活動の目的、2024 年度からの新たな活動方針と定款に定められた主な活動の内容などを図にまとめた。この新たな方針における主要な柱は、次に示す 2 つの拠点を形成することである。この実現のために、「置くことができる」と定款に記されている「専門部会」を新たに設けた。

基本とする活動の目的：

放射線利用技術の向上による科学技術、産業の振興を図り、国際化に貢献する。

新たな活動方針：

(1) 放射線に関連する活動拠点とすること

「専門部会」を新たに設け、放射線に係る多様な分野で会員の自主的な活動を推し進め、関西を中心とする活動拠点とする。

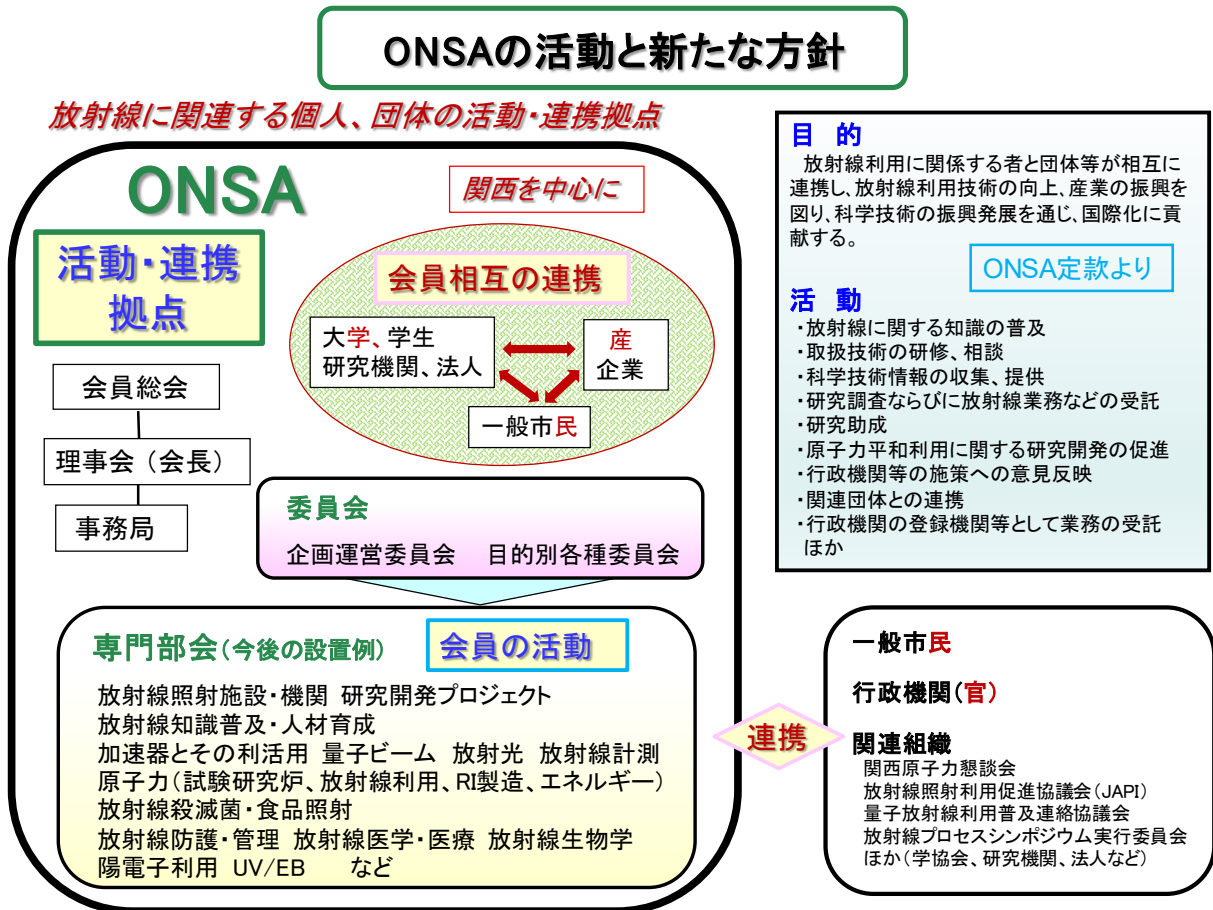
(2) 放射線に関連する連携拠点とすること

ONSA 内外で産学官民相互の連携を推し進め、関西を中心とする連携拠点とする。
活動の内容：

これまでのものを継承する。

専門部会は、少人数の会員でも設置することができ、ONSA が支援することで、その専門分野の活動を自由に行うことができる。この特徴を活かして個人会員を増やし、広範な連携を実現することが目標である。

この方針の下で 2025 年度も引き続き活動が行われている [3]。



図：ONSA の活動と新たな方針

4. 専門部会の活動状況と準備状況

会員がそれぞれの分野で専門部会を設置し、活動を開始している。また設置の準備も行われている。

1) ガンマ線照射利用部会

特に関西では、大学などの研究機関において、コバルト 60 ガンマ線照射施設の数が減っている。これは維持管理の予算減少などによる。これにより自由な着想に基づく新しい放射線利用研究の進展の遅れが懸念される。部会では、この現状と、一方で広く利用が行われている民間の照射施設の状況について調査する。さらに、株式会社コーガイソトープの大規模な照射施設では、医療器具の滅菌を中心に広く利用が行われているが、関係者の協力により

照射条件を柔軟に設定した基礎研究・試験への応用可能性を探る。

- ・代表：未定
- ・これまでの活動状況

2024年11月設置。部会の主催で「関西におけるガンマ線利用施設の現状と将来」をテーマに第81回放射線科学研究会を開催し、学術研究や試験のために利用できるガンマ線照射利用施設の維持・継続の困難さやいくつかの施設の利用停止が明らかになった。この状況を受けて、部会のメンバーである(株)コーガアイソトープから、保有施設をこれら基礎研究へも利用拡大することについて提案があるなど、この分野の将来に貢献できる大きな成果が得られている。関西を代表する利用研究機関である大阪大学産業科学研究所の量子ビーム科学研究施設が加わり、日本を代表する利用研究施設による研究会開催を予定している。

2) 放射線知識普及部会

放射線知識普及活動として、「みんなのくらしと放射線展」は40回を迎え、大学教員を中心として関西地域住民の放射線に係る知識、とりわけ身近に利用されている放射線の正しい知識の普及に広く貢献を果たしてきた。一方で、これまで「放射線展」では、低線量放射線被ばくに係る地域住民の漠然とした「不安」に向きあう放射線リスクコミュニケーションの実践については、取り組みが比較的低調な印象であった。そこで、本専門部会は、放射線利用の知識普及に取り組むと共に、低線量被ばくの不安解消に向けた住民との対話の推進を行うに資する情報交換を活発化させることを目指したい。

- ・代表：児玉靖司 大阪公立大学名誉教授
- ・これまでの活動状況

2025年4月設置。第1回の部会を開催し、現状での課題や今後の活動について話し合われた。

3) イオンビーム利活用専門部会

(検討中の方針案) イオンビームを用いた物性・材料、育種、医療等における研究開発は、学術及び、社会実装分野において精力的に進められており、特筆すべき成果も多く輩出されている。一方、イオン加速器施設の老朽化、ユーザーの固定化・減少化、イオンビーム関連学会における講演数減少、本分野における若手研究者の減少など問題点も多い。これら現状を踏まえ、関西および近隣地区におけるイオン加速器施設関係者、イオンビームユーザーが集い、イオンビームのさらなる利活用を目指して、イオンビーム関連研究の情報共有・新規研究テーマの開拓を図るとともに、上記問題点を解決すべく、議論の場を設けることは重要である。

- ・代表：岩瀬彰宏 大阪府立大学名誉教授
- ・これまでの活動状況

2025年12月、第1回の部会において部会の設置を決め、意見交換を行った。

4) 新試験研究炉民間利用促進のための専門部会(準備中)

(本シンポジウムにおける、福井大学宇野正美特任教授の講演[4]より) 福井県が中心となって行われている地元企業への理解・利用促進活動もかなりの活動を行っているが、地元企業での理解は十分に進んだとは言えず、活動の継続が必要である。さらに、運転開始後の利用の活性化のためには、今後は福井県内だけではなく、北陸・関西・中京圏においても、情報発信を行っていく必要がある。この関西地方に対しては、この大阪ニュークリアサイエンス協会の活動を通して、情報を発信していきたい。

5) その他

放射線滅菌・殺菌に関する専門部会などの設置が検討・準備されており、いくつかは間もなく活動を開始する。

5. おわりに

科学技術のさまざまな分野で、放射線利用の重要性が増す中、近年特に、放射線利用施設や関連組織の継続が困難になっている。この現状において、ONSAは今後の展開を見据えて新たな活動方針を設定し、その実現に向けて着実に成果をあげつつある。

放射線の利用に関心をお持ちの皆様、会員や関係者の皆様には、今後ともご支援ご協力をお願い申し上げます。

参考文献・資料

- [1] “2024年度からのONSAの新しい活動方針”、奥田修一、ONSA ニュース No. 34-1 (2024. 7) p. 3-4.
- [2] “ONSAの活動と新たな取組み”、奥田修一、2024年度第33回放射線利用総合シンポジウム資料集、第2章 (2025) pp. 5-9.
- [3] “ONSAの活動とこれから”、2025年度第34回放射線利用総合シンポジウム資料集、第3章 (2026) pp. 78-81.
- [4] “もんじゅサイトの新試験研究炉の現状”、宇埜正美、2025年度第34回放射線利用総合シンポジウム資料集、第2章 (2026) pp. 69-77.
- [5] ONSA ホームページ、<http://onsa.g.dgdg.jp/>

講演者略歴



奥田 修一 (おくだ しゅういち)

所属 一般社団法人大阪ニュークリアサイエンス協会 専務理事
住所 〒542-0081 大阪市中央区南船場 3-3-27 サンエイビル 4F
連絡先 TEL/FAX : 06-6282-3350/3351、E-mail:manager-onsa@osaka.nifty.jp
学職歴 1980年 大阪大学工学研究科原子力工学専攻博士後期課程修了
1980-1987年 大阪府立放射線中央研究所
1987-2002年 大阪大学産業科学研究所附属放射線実験所
2002-2017年 大阪府立大学工学研究科 教授 (現、名誉教授)
2019年- 現職 現在に至る

研究・分野 主な研究分野：量子線材料科学、加速器と放射光源開発、放射線安全管理学
主な利用施設：研究用原子炉施設（中性子、電子利用）、 ^{60}Co γ 線照射施設、
X線装置、非密封RI施設
維持管理、開発、利用に取り組んだ装置：
40 keV (H, He), 1 MeV (H, D) 静電イオン加速器 (D-T 中性子源)、
15 MeV S-band, 37 MeV L-band, 145 MeV S-band 電子 linac、
100 keV, 500 keV 静電電子加速器、Free Electron Laser, THz 放射光源

②

パッシブタイプ放射線検出器用蛍光体の 開発とその応用

金沢工業大学 高信頼理工学研究センター
教授 南戸 秀仁

光刺激ルミネッセンス (Optically Stimulated Luminescence : 略して OSL) やラジオフォトルミネッセンス (Radiophotoluminescence : 略して RPL) 現象を利用したパッシブタイプ線量計は、個人被ばく線量計測などに応用されているが、線量計に使用されている放射線誘起蛍光体は限られており、微量の放射線照射に対し高感度のルミネッセンスを示し、かつ、広いダイナミックレンジで直線応答を示す新規蛍光体の開発が望まれている。

本講演では、パッシブタイプ線量計用の放射線誘起蛍光体、特に RPL 現象を呈する蛍光体を用いたパッシブタイプ放射線量計の開発現状ならびに将来展望について言及する。

また、この放射線誘起現象を測定するための装置、RPL 蛍光体を用いた放射線のイメージング装置ならびに重粒子線を用いた癌の診断・治療時の放射線量の二次元分布を測定するための装置等の開発についても言及をする予定である。

パッシブタイプ放射線検出器用蛍光体の開発と その応用

金沢工業大学 高信頼理工学研究センター 南戸 秀仁、岡田 豪
千代田テクノ大洗研究所 小口 靖弘

1. はじめに

固体に放射線が入射した場合、固体内では、励起 (Excitation) および電離 (Ionization) が行われ、固体の物理的あるいは化学的性質に変化をもたらす。その際、それらの効果の緩和 (Relaxation) 現象は、物質により異なり、放射線入射後、直ちに緩和し元の状態に戻るものもあれば、準安定あるいは永続的に残存するものもある。緩和に伴い、エネルギーの放出が起こるが、大部分のエネルギーは、固体の原子、分子の振動、回転などの熱運動に消費される。しかし、光 (可視光) のエネルギーよりバンドギャップの大きい固体においては、そのエネルギーの一部が可視光線の形で放出される (シンチレーション) ことがある。

一方、直ちに緩和せずにその状態が準安定あるいは永続的に存在する場合においては、その被照射固体に、外部より、熱的あるいは光学的に刺激 (Stimulation) を与えると、光放出を伴って準安定状態が緩和され基の状態に回復することがある。この熱的な刺激 (具体的には固体を加熱) による緩和に伴う発光現象は、熱刺激ルミネッセンス (Thermally Stimulated Luminescence: 略して TSL) あるいは熱ルミネッセンス (Thermoluminescence: 略して TL) と呼ばれ、個人被ばく線量計測等に広く利用されてきた。一方、熱に代わって、ある特定の波長の光を用いて刺激を行っても発光が観測されることがある。この現象は光刺激ルミネッセンス (Optically Stimulated Luminescence: 略して OSL) と呼ばれており、緩和の際、放出される発光の強度が、あらかじめ照射した放射線量に比例することから、上述の TSL 現象同様、この現象も放射線量計測へ応用され、現在広く利用されている。同じような現象で、最近注目を集めているのがラジオフォトルミネッセンス (Radiophotoluminescence: 略して RPL) という現象があり、この現象についても発光量が放射線照射量に比例することから、近年、個人被ばく線量計測等に広く用いられるようになってきている[1-5]。

図1に TSL、OSL および RPL プロセスにおける電子構造を示すエネルギーバンドダイアグラムを示す。

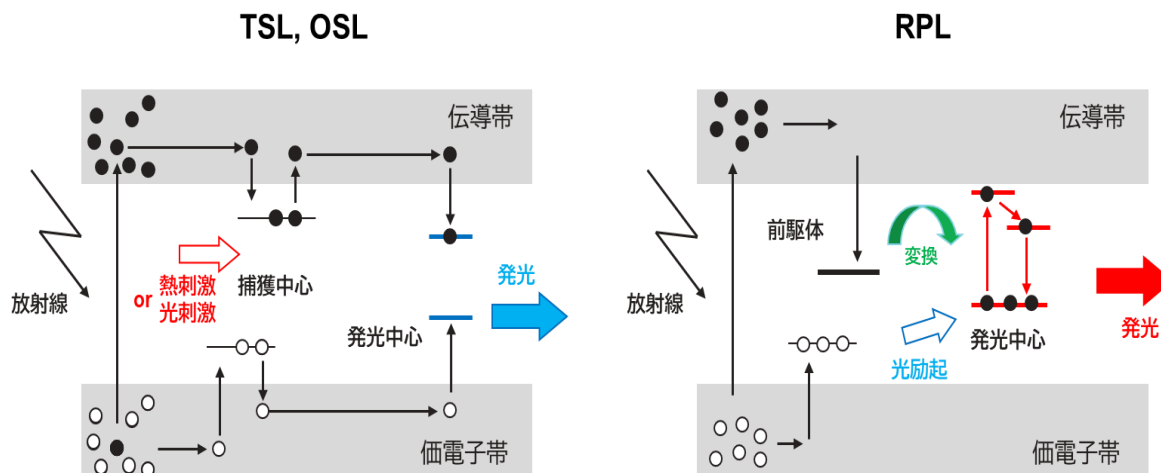


図 1 TSL、OSL および RPL プロセスの電子構造を示すエネルギーバンドダイアグラム

しかし、OSL や RPL 現象を利用したパッシブタイプ線量計は、個人被ばく線量計測などに応用されているが、線量計に使用されている放射線誘起蛍光体は限られており、微量の放射線照射に対し高感度のルミネッセンスを示し、かつ、広いダイナミックレンジで直線応答を示す新規蛍光体の開発が望まれている。

本研究では、この RPL や OSL 感度の高い新規放射線誘起蛍光体の開発を行ってきた。本講演では、パッシブタイプ線量計用の放射線誘起蛍光体、特に RPL 現象を呈する蛍光体を用いたパッシブタイプ放射線量計の開発現状ならびに将来展望について言及する。また、当日、時間が許せば、この放射線誘起現象を測定するための装置、RPL 蛍光体を用いた放射線のイメージング装置ならびに重粒子線を用いた癌の診断・治療時の放射線量の二次元分布を測定するための装置等の開発についても言及をする予定である。

2. 新規放射線蛍光体材料の探索

RPL を示す放射線誘起蛍光体の中で Ag 添加したリン酸塩ガラスがパッシブタイプの個人被ばく線量計として広く実用化されているが、湿気に弱く、さらには高価であるため、さらに安価でいろいろな環境で安定な放射線誘起蛍光体の開発が強く望まれている。

これまでに研究報告されている RPL 材料を表 1 に示す[1]。かなりの数の新規蛍光体が報告されているが、未だ、Ag 添加したリン酸塩ガラスの RPL 特性を超えるものが見つかっていない。著者らの研究グループでは、RPL 材料開発の指針を構築する目的で、いろいろな母体材料に発光中心となる希土類元素などを添加し、系統的な探索を行って

きた。その過程で、ずいぶん昔に TLD 材料として使われていた CaSO_4 (硫酸カルシウム) 蛍光体が高い RPL 感度を示すことを発見した。

表 1 これまでに報告されている RPL 放射線誘起蛍光体材料[6]

Material	Z_{eff}	Material form	RPL center	λ_{em} (nm)	λ_{ex} (nm)	Sensitivity (Gy)
Na-Al-P-O:Ag	12.4	Glass	Ag^0 , Ag^{2+} , Ag_2^+	450 630	340 310	10 μ -10
$\text{Li}_3\text{PO}_4\text{-Al}(\text{PO}_3)_3\text{:Ag}$	(11.9)	Glass	Ag^{2+}	630	340	
$\text{KPO}_3\text{-Al}(\text{PO}_3)_3\text{:Ag}$	(13.4)	Glass	Ag^{2+}	550- 700	300- 350	0.1-10
$\text{NaPO}_3\text{-Al}(\text{PO}_3)_3\text{:Ag}$	(11.6)	Glass	Ag^0 , Ag^{2+}	400- 500 600- 700	325/339	
$\text{NaPO}_3\text{-(KPO}_3)_n\text{:Ag}$		Glass	Ag^{2+}	400- 600	325/339	
$\text{Al}(\text{PO}_3)_3\text{-}$ $(\text{KPO}_3)_n\text{:Ag}$		Glass	Ag^0 , Ag^{2+}	400- 500 600- 750	325/339	
NaCl:Ag	(15.3)	S.cf	Ag^0	550- 650 500- 600	289 339	
KCl:Ag	(18.1)	S.cf	Ag^0	400- 550 500- 700	289 339	
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C,Mg}$	11.3	S.C.	$\text{F}^+(\text{Mg})$, F_2 , $\text{F}_2^+(2\text{Mg})$, $\text{F}_2^{2+}(2\text{Mg})$	325 500 750 510	255 300 355 435	2m-10
LiF:Mg	(8.3)	S.C.,P.C.	F_3^+ , F_2	530	450	~0.1-14k
LiF:Mg,Ti	(8.3)	P.C.	F_3^+ , F_2			500-10k
LiF:Mg,Cu,P	(8.3)	P.C.				500-50k

KBr:Sm	(31.5)	S.C.	Sm ²⁺	730	350– 450	1m–100m
CaF₂:Sm	(16.9)	G.C.	Sm ²⁺	730	630	1–10k
CsBr:Sm	(49.5)	S.C.	Sm ²⁺	690	300– 400	1m–10
MgF₂:Sm	(10.5)	P.C.	Sm ²⁺	700– 800	340	1–1k
SiO₂–Al₂O₃:Sm	(11.7)	Glass	Sm ²⁺	683	400	
B₂O₃–Al₂O₃– Na₂O:Sm	11.4	Glass	Sm ²⁺	670– 800	515	
MgF₂–AlF₃–CaF₂– SrF₂–Sr(PO₃)₂:Sm	(24.6)	Glass	Sm ²⁺	670– 800	460	1–1k
MgF₂–AlF₃–CaF₂– SrF₂–YF₃–BaF₂:Sm	(34.1)	Glass	Sm ²⁺	670– 800	460	1–1k
SrB₄O₇:Sm	(27.8)	P.C.	Sm ²⁺	670– 830	408	~0.2–5k
BaBPO₅:Sm	(45.5)	P.C.	Sm ²⁺	670– 830	408	~0.2–50
SrBPO₅:Sm	(29.2)	P.C.	Sm ²⁺	670– 830	408	~0.2–200
BaAlBO₃F₂:Sm	(45.5)	G.C.	Sm ²⁺	670– 850	300– 500	10m–10
LiCaAlF₆:Sm	(14.1)	P.C.	Sm ²⁺		340	
CaSO₄:Sm	(15.6)	P.C.	Sm ²⁺	600– 900	300	~15m–5
SrSO₄:Sm	(30.3)	P.C.	Sm ²⁺			
BaSO₄:Sm	(47.0)	P.C.	Sm ²⁺			
Ca₂SiO₄:Eu	(15.2)	P.C.	Eu ²⁺	500– 800	250– 500	10m–10
BaAlBO₂F₃:Eu	(47.1)	G.C.	Eu ²⁺	510 300–	450	20m–10
CaSO₄:Eu	(15.6)	P.C.	Eu ²⁺	382	300	~5m–5
NaCl:Yb	(15.3)	S.C.	Yb ²⁺	425– 430	200– 400	0.1–100
C:N	(6.0)	S.C.Film	NV	689	546	

SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃- Na₂O:Cu	(11.0)	Glass	Cu ⁺	500- 800	240	-500
MgF₂	10.5	P.C.		415	340	100-1k
Li₂CO₃	7.3	P.C.		470	340	100μ- 100m
Na₂CO₃	9.5	P.C.		430	340	100μ-10m
K₂CO₃	16.2	P.C.		440	340	1m-10
Mg₂SiO₄	11.2	S.C.		630	270	0.2-20
CaSO₄	15.6	P.C.		690	590	400μ-5

図2にCaSO₄蛍光体のRPL発光特性を示す。波長690nm付近に現れるPL発光強度が照射線量とともに増加することが明瞭に確認できる。挿入図には、600~800nmのPL強度の積分量に基づく線量応答関数を、市販のRPLガラス線量計（AGCテクノグラス製）の応答（星印で表示）と比較して示している。

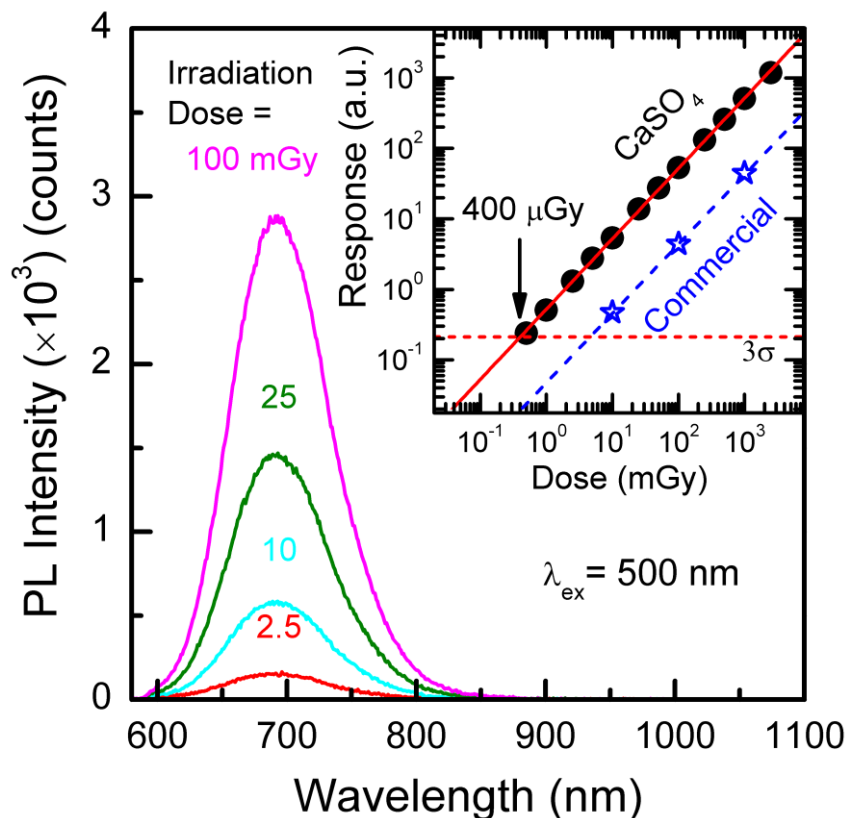


図2 照射線量が異なる不純物非添加CaSO₄試料のPLスペクトル。挿入図は、照射線量応答関数を、市販のRPLガラス線量計（AGCテクノグラス製）の応答（星印で示す）と比較して示している

RPL 応答は線量の増加とともに増大し、その関係はべき乗関数によって良好に近似され、指数はほぼ 1 (0.998) であった。この結果は、対数スケール上で RPL 応答が照射線量に対して直線的に増加することを示し、広いダイナミックレンジにおいて定量性が維持されるという、線量計として極めて望ましい性質を示している。さらに、フィッティング曲線の延長と装置ノイズの 3σ 水準との交点から、本測定条件における検出下限値は最適化されていない条件下でも約 $400 \mu\text{Gy}$ であることが示唆された。この比較から、本研究で特性評価をした CaSO_4 蛍光体材料は、市販品の約 1 桁高い感度を有することが明らかとなった[7]。この結果は、 CaSO_4 が放射線量計測における RPL 材料として、大変有望であり、RPL 新規材料として高いポテンシャルを有することを示すものである。

3. TSL、OSL および RPL 同時測定システムの開発

RPL 材料を線量測定へ応用するには、感度、線量応答の直線性、エネルギー依存性、信号安定性（フェーディング）、ビルドアップ特性、熱処理依存性、信号消去性、再現性など、多角的な評価が不可欠である。本研究ではこれらを高精度かつ効率的に測定するため、TSL、OSL および RPL 特性を統合的に評価可能な自動測定システム TORAIMS (TSL/OSL/RPL Automated Integrated Measurement System)」を用いた。図 3 に、TORAIMS の外観と構成を示す。

本システムは、照射、光励起、発光測定、熱処理を一体化しており、照射にはタングステンターゲットおよびベリリウム窓を備えた X 線管 (XRB80 N, Spellman) を使用した。管電圧は 40 kV に固定し、管電流は 0.12~1.2 mA の範囲で可変とした。これにより線量率 0.05~0.5 Gy/min で調整可能であり、照射線量は空気カーマに基づいて定義した。光励起源にはキセノンアークランプユニット (LAX-100、朝日分光) を用い、 $500 \pm 30 \text{ nm}$ のバンドパスフィルター (PB0022, 朝日分光) を通過させることで安定した狭帯域励起光を供給した。試料からの発光はカットオフ波長 590 nm のショートカットフィルター (LVX590、朝日分光) を通過後、光ファイバーで収集し、マルチチャンネル分光器 (QE Pro, Ocean Optics) によりスペクトルとして取得した。

試料はセラミックヒーター上に設置し、熱処理および温度制御を行った。これらすべての操作はコンピュータにより統合制御される。従来、照射・測定・熱処理は別個の装置で実施されることが多く、試料の移動による時間的ロスや紛失・損傷、再配置誤差による測定のばらつきといった問題があった。TORAIMS はこれらの課題を解消し、安定かつ再現性の高い測定を可能とする[8]。

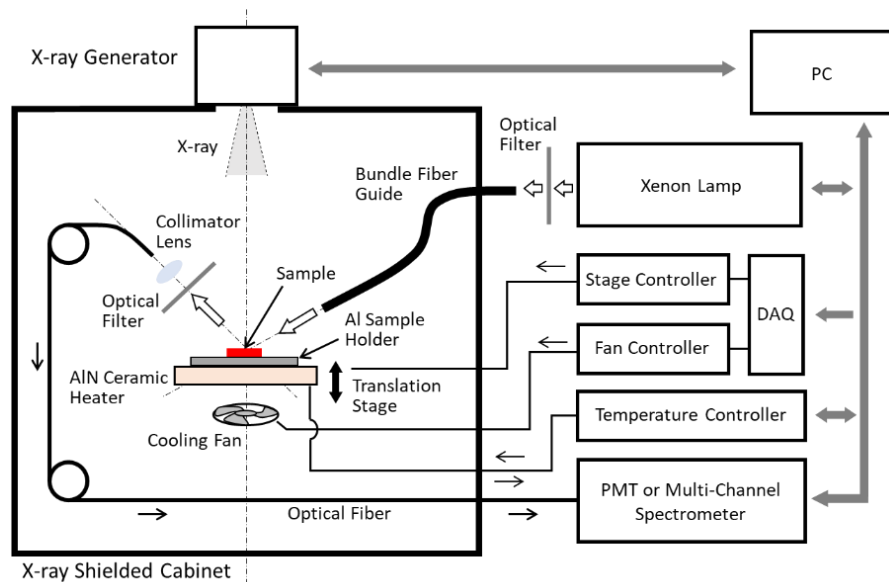
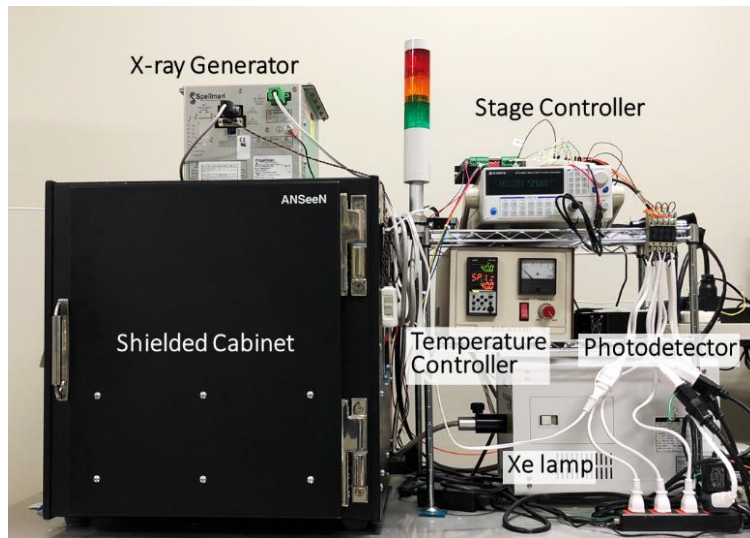


図3 TORAIMSの外観とシステム構成

さらに TORAIMS は RPL のみならず、TSL および OSL の測定にも対応している。これら 3 つの現象はいずれも、放射線照射による電荷生成および捕獲という共通の物理過程に基づくが、捕獲中心の性質に応じて異なる刺激(光学的あるいは熱的)に応答する。RPL 材料が TSL や OSL 特性を併せ持つ場合や、逆に TSL・OSL 中心が RPL 応答に影響を及ぼす場合も考えられる。このため、同一試料を同一システムで評価することは、RPL 材料の本質的特性を理解する上で極めて有用であるとともに、世界に一台しかないシステムである。

4. 放射線誘起蛍光体を用いた放射線量分布のイメージング

図4に、本研究で構築したRPLイメージングリーダシステムの外観および構成を示す。図4(a)は外観、図4(b)はシステム構成図である。本システムは、冷却型CMOSカメラ(2048×2048画素; CS-66UV、ビトラン)、対物レンズ(UV2528B、ユニバース光学工業)、撮像対象物の特性に応じて選択される光学フィルタ、LEDディスク照明(自作)、暗箱(自作)、電源装置(P4K36-1、松定精密)、マイクロコントローラー(Arduino UNO R3, Arduino)および制御用コンピュータから構成される。

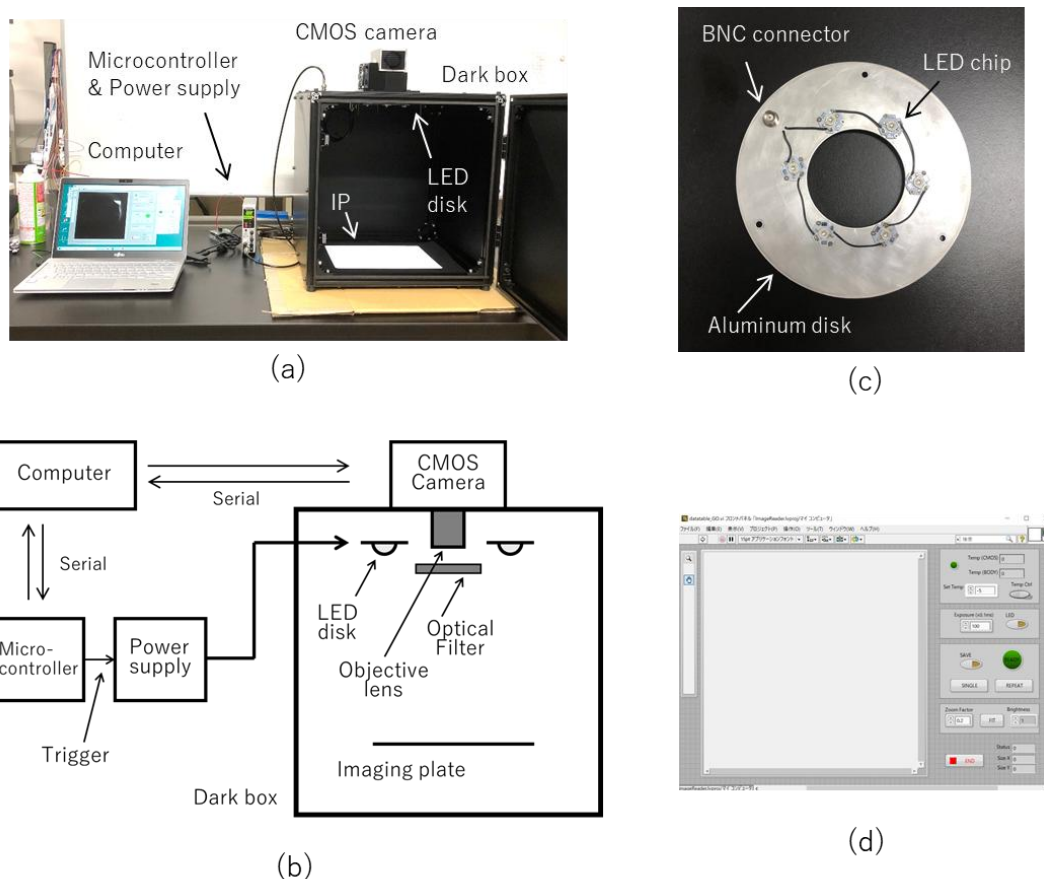


図4 画像読取システム。(a)外観、(b)システム構成、(c)LEDアレイディスク、(d)システム構成、(d)管理プログラム

コンピュータからの指令に従って、マイクロコントローラーが電源を制御し、LEDディスクアレイの点灯・消灯をトリガーすることで、撮像対象物に対して光学的な励起/刺激を行う。LEDディスクアレイの外観を図4(c)に示す。アルミニウム製ディスク上に複数のLEDチップが配列されており、イメージングプレート(Imaging Plate:略して

IP) 全体を均一に照射できるよう設計されている。

発光画像は、光学フィルタを通してカメラによって取得され、画像データはコンピュータに送信・記録される。LED アレイディスクには 365、405、460、530 および 630 nm の波長の LED が用意されており、波長の切り替えはディスクの交換または電源ケーブルのコネクタ変更によって行う。LED のスペクトル半値幅は通常～5 nm である。カメラの検出可能なスペクトル範囲はおよそ 200～1000 nm、視野範囲は約 40 cm × 40 cm である。画像の取得およびシステム全体の操作は、図 4 (d) に示すように、LabVIEW で作成した専用プログラムにより制御することができる。

図 5 に、銀活性リン酸塩ガラスを用いて X 線照射により可視化した集積回路 (IC) 内部の RPL イメージを示す。IC の内部構造が鮮明に描写されており、IC によって遮蔽されていない IC の外側からのオレンジ色の発光は銀活性リン酸塩ガラスからの RPL であることが分かる。図 5 (b) は、本研究で開発したイメージングリーダーを用いて取得した画像であり、矢印で示すように、ボンディングワイヤが IC のリード電極と中央のチップドアの間を通っている様子が確認できる。ボンディングワイヤの直径は通常約 25 μm であるため、本システムはこれと同等以上の空間分解能を有していることが分かる[9]。

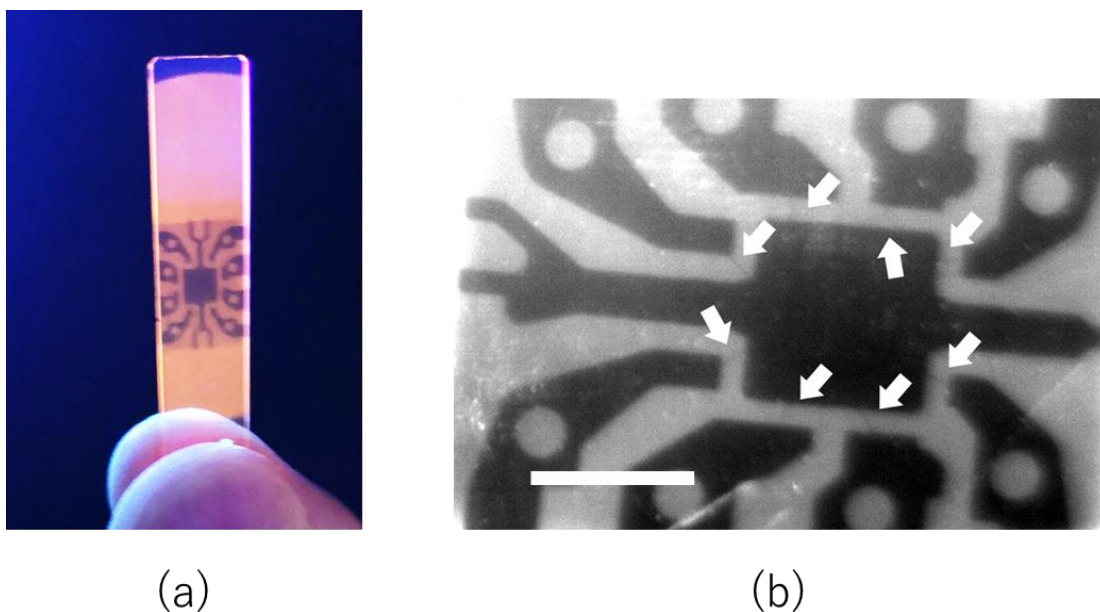


図 5 銀活性リン酸塩ガラス上に記録された IC チップの X 線像、(a) 365 nm の励起光下、(b) 本研究で開発したリーダーを使用して取得した画像

図6(c)に、プレート型 RPL-IP を用いて取得したペーパークリップの X 線投影画像を示す。照射線量は 10 Gy、励起には波長 365 nm の LED 光を使用した。図から明らかなように、ペーパークリップの形状が鮮明に可視化されており、本 RPL-IP による高精細な X 線イメージングが可能であることが示された。

今後は、A4 サイズの線量計の実用化を目指し、蛍光体をより均一に分散または塗布可能なシート状 RPL-IP の改良・開発をさらに進めていく予定である。

また、構築したイメージリーダシステムの補助機能として、Eu 添加 BaFBr 蛍光体を検出素子とする市販の OSL イメージングプレート (OSL-IP) (BAS-MS、富士フイルム製) [10]を用いた X 線撮像の実証も行った。この OSL-IP は、医療や歯科診断分野における X 線画像媒体として広く使用されており、OSL 現象に基づく高感度な線量検出が可能である。OSL 現象[11]は、RPL と同様に放射線検出に有用な発光現象であり、放射線照射により生成された電荷が結晶中の捕獲中心に蓄積された後、光刺激によって再活性化され、発光中心での再結合により発光が生じる。このときの発光強度は、蓄積された電荷の量、すなわち入射した放射線量に比例するため、OSL は光強度を通じて間接的に線量評価が可能である。

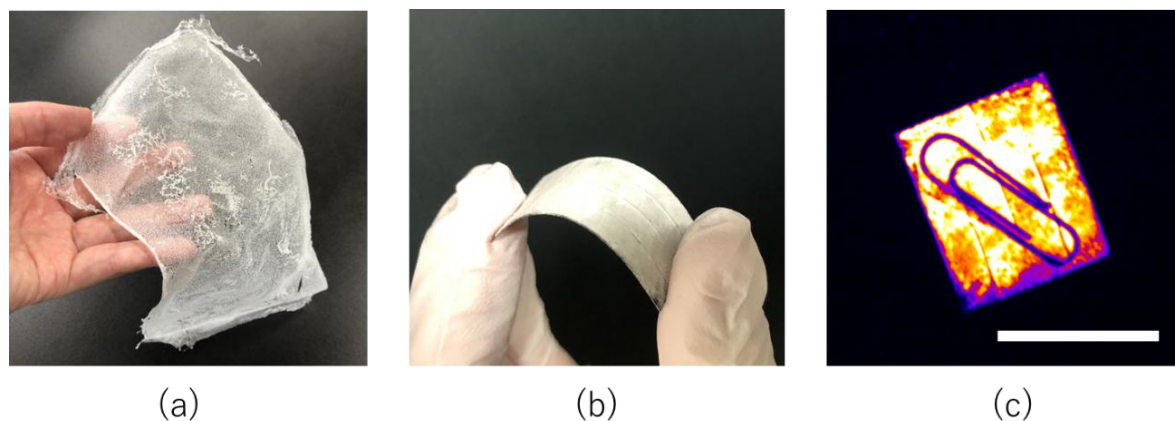


図6 フレキシブル RPL-IP の試作品と X 線撮像デモ、(a) PVA マトリックスに Sm 添加 CaSO_4 セラミック粉末を埋め込んだフレキシブルフィルムタイプ。(b) プラスチック板に Sm 添加 CaSO_4 セラミック粉末をコーティングしたフレキシブルプレートタイプ。(c) プレート型 RPL-IP を使用して取得したペーパークリップの X 線画像 (スケールバー=2cm)

図7には、OSL-IP を用いて撮像したさまざまな対象の X 線画像を示す。(a)はコンピュータのマウス、(b)はプラスチックケースに収納されたポケットツール、(c)はクレジットカード、(d)は石川県日本海沿岸で捕獲されたクロソイ (ノドグロ) の画像である。い

ずれの画像も、LED 波長 630 nm の光刺激により得られたものであり、構造や輪郭が明瞭に可視化されている。

本研究で開発した新たな画像読取システムでは、画像取得にペルチェ冷却型 CMOS カメラを用い、複数の波長の励起光源を切り替えて使用可能な構成とすることで、上記の問題点をすべて解消した。さらに、得られる画像の解像度も従来システムと同等以上であり、さまざまな RPL 材料に対応可能な、汎用性と操作性に優れたシステムとなっている。

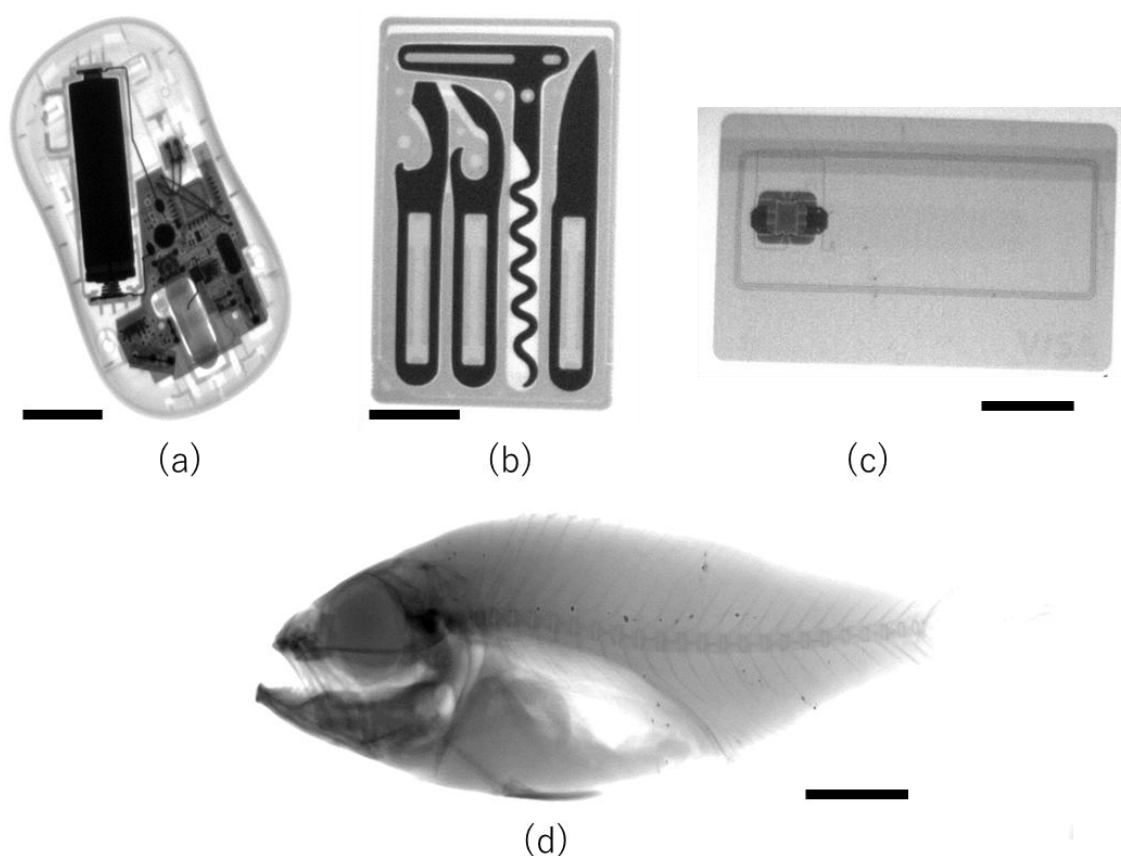


図7 (a)コンピュータのマウス、(b)プラスチックケースに入ったポケットツール、(c)クレジットカードおよび (d)石川県日本海沿岸で捕獲されたクロソイ（ノドグロ）の X 線画像、画像はすべて OSL-IP (BAS-MS、富士写真フイルム (株) 製) と本研究で開発した画像読取装置を用いて取得 (スケールバー=2cm)

5. おわりに

RPL を呈する放射線誘起蛍光体の開発現状ならびに RPL 現象を用いた二次元の放射

線量分布のイメージング装置の開発について言及をしてきた。近年、重粒子線などの放射線が、癌治療に有効であること、さらには、ガンマ線照射による治療に比べ、重粒子線の場合は、癌の部分を選択的にアタックすることが可能である。そしてその有効性のため、全国的に広く利用され、癌治療が行われるようになってきている。

その際、癌患部およびその周辺の正常部に照射され、吸収される放射線量の三次元分布を測定することが、大変重要になってきている。本研究で開発した CaSO_4 放射線誘起蛍光体は、いろいろな放射線に対し高い感度の RPL を示すことから、今後、この蛍光体と開発した RPL によるイメージング装置を用いることで、放射線による癌治療の際の放射線量を鮮明にイメージングできると思われる。実用化に向け、更なる研究を推進したい。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費助成（19K22158、20K15202、22H02009）による支援を受けて実施されました。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Hidehito Nanto, Go Okada "Optically stimulated luminescence dosimeters: principles, phosphors and applications" *Japanese Journal of Applied Physics*, **62**, 010505 (2023)
- [2] 南戸秀仁, 岡田豪 "光刺激蛍光線量計", *金属*, **89** (11), 46-56 (2019)
- [3] 岡田豪, 柳田健之, 南戸秀仁, Safa Kasap "RPL 現象と放射線計測", *金属*, **89** (11), 38-45 (2019)
- [4] Hidehito Nanto, Go Okada "Optically-Stimulated Luminescence Dosimeters", in *Phosphors for Radiation Detectors*, 225-246, Wiley (2020)
- [5] Go Okada, Takayuki Yanagida, Hidehito Nanto, Safa Kasap "Radio-photoluminescence (RPL)", in *Phosphors for Radiation Detectors*, 247-282, Wiley (2020)
- [6] Go Okada "Novel Radio-photoluminescence Materials and Applications" *Journal of the Ceramic Society of Japan*, **129** (7), 419-424 (2021)
- [7] Go Okada, Wakako Shinozaki, Satoshi Ueno, Yasuhiro Koguchi, Kazuki Hirasawa, Francesco d'Errico, Takayuki Yanagida, Safa Kasap, Hidehito Nanto "RPL Properties of Samarium-doped CaSO_4 ", *Japanese Journal of Applied Physics*, **61**, SB1035 (2022)
- [8] Go Okada, Kazuki Hirasawa, Takayuki Yanagida, Hidehito Nanto "TSL/OSL/RPL Automated and Integrated Measurement System (TORAIMS)", *Sensors and Materials*, **33** (6), 2117-2128 (2021)
- [9] Hidehito Nanto, Go Okada, Kazuki Hirasawa, Yasuhiro Koguchi, Wakako Shinozaki, Satoshi Ueno, Yuka Yanagida, Francesco d'Errico, and Takayoshi Yamamoto "Radiophotoluminescence Imaging Reader for Passive-type Dosimetry", *Sensors and*

Materials, **34** (2), 757-764 (2022)

[10] Y. Amemiya and J. Miyahara, "Imaging plate illuminates many fields", *Nature*, **336** (6194), pp.89-90 (1988)

[11] H. Nanto, "Photostimulable Storage Phosphor Materials and Their Application to Radiation Monitoring," *Sensors & Materials*, **30** (3), pp.327-337 (2018)

講演者略歴



南戸 秀仁 (なんと ひでひと)

所 属 金沢工業大学 高信頼理工学研究センター 教授

住 所 〒924-0838 石川県白山市八束穂 3-1

連絡先 TEL:076-274-9261, E-mail: hnanto@neptune.kanazawa-it.ac.jp

略 歴 1980 年大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻博士後期課程修了、金沢工業大学工学部電子工学科助教授を経て、1988 年同教授、同大学ロボティクス学科主任、同大学研究部長、同大学高度材料科学研究開発センター所長などを経て、現在に至る。その間、アメリカ MIT 客員研究員、応用物理学会放射線分科会幹事長、名古屋大学、金沢大学、奈良先端大学院大学の非常勤講師、日本原子力研究機構嘱託研究員、千代田テクノル大洗研究所技術アドバイザーなどを務める。

業 績 放射線センサ、半導体薄膜、匂いセンサシステムの研究開発に従事し、その間、査読あり論文約 300 編以上、著書約 60 件、特許（知的財産権）29 件 (<https://researchmap.jp/read0032028>)、応用物理学会フェロー表彰(2008 年)をはじめとして表彰・受賞 37 件、2024 年よりスタンフォード大学とエルゼビア社が論文引用数などを基にリスト化した「世界のトップ科学者上位 2%」に選出される。

テーマ1「関西北陸の放射線関連組織の現状と将来」

③

福島県浜通り地域環境放射線研修を通じた 大阪大学放射線科学基盤機構の人材育成

大阪大学 放射線科学基盤機構
放射線教育部門長 岡田 美智雄

原子力規制人材育成事業の支援のもと大阪大学放射線科学基盤機構で実施している全学部・大学院生を対象にした共創的放射線教育プログラム(CREPE)について紹介する。このプログラムは、福島県浜通り地域環境放射線研修を基盤にした放射線教育プログラムで、環境放射線に関心を持ち、福島県浜通り地域の復興に目を向ける学生を増やすことができたのは大きな成果と考えている。

福島県浜通り地域環境放射線研修を通じた大阪大学 放射線科学基盤機構の人材育成

大阪大学放射線科学基盤機構
岡田 美智雄

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災と、それに伴う福島第一原子力発電所事故の発生から、まもなく15年が経とうとしています。この間、原子力災害の被災地である福島県浜通り地域では復興が進められてきました。しかし、放射線への不安や風評被害、コミュニティの分断といった複雑な社会的問題や課題は、今なお残されています。

大阪大学では、2011年の福島第一原子力発電所事故の直後から、核物理研究センターを中心に空間線量の測定や土壌中の放射能測定などを実施してきました。これらの経験を、次世代を担う学生の教育に活かすため、2016年に浜通り地域環境放射線研修（以下、**浜通り研修**）を開始しました。**浜通り研修**は、当初は飯館村と協定を結び実施していましたが、2021年度からは大熊町とも協定を結び活動範囲を広げ、2023年度からは双葉町とも協定を結び実施しています。

当初は10名の学生から始まりましたが、図1に示すように、2024年には約200名が参加する規模にまで成長しました。この間、大学等による「復興知」を活用した人材育成基盤構築事業や、原子力規制人材育成事業「社会との共創による原子力規制人材育成プログラム」からの支援を受け、研修内容を充実させてきました。その結果、学生にとって魅力あるプログラムとなり、参加者数が増加しました。

また、大学初学年を対象とした浜通り研修は授業として単位化され、さらに、発展的な教育を行う共創的放射線教育プログラム（CREPE）を、放射線科学基盤機構を中心に立ち上げました。立ち上げからの期間は短いものの、環境放射線に強い関心を持ち、浜通り地域の復興に目を向ける学生が増えたことは、大きな成果だと考えています。

2024年8月に、大阪大学では大熊町に福島拠点を開設しました。これを機に、復興の次のステージに共創していくために、浜通り地域での環境放射線に関するフィールドワークを基盤として学生教育の質を高め、浜通り地域での関係人口も増やしていくことが必要となります。本稿では、これまでの**浜通り研修**とそれを基盤とする教育プログラム CREPE を振り返り、その内容を紹介するとともに、次のステージに向けてなすべきことを考えます。

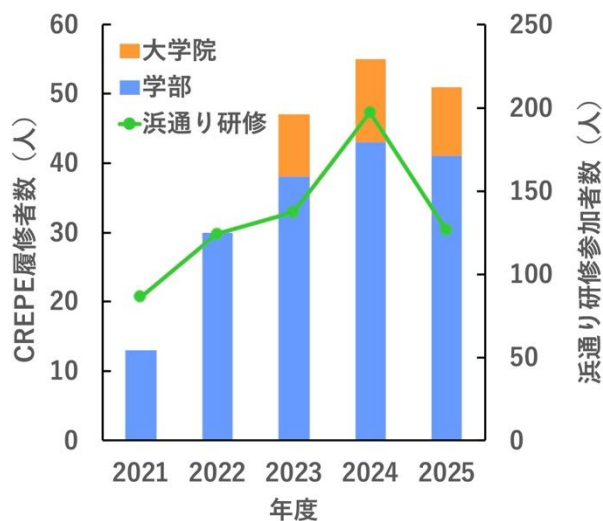


図1. CREPE 履修者数と浜通り研修参加者数の年度推移

2. 浜通り地域環境放射線研修(浜通り研修)

2011年の福島第一原子力発電所事故直後から、大阪大学では核物理研究センターを中心に全国科学者の協力により、空間線量測定や土壌の放射能測定などを実施し、図2に示す空間線量マップやCs-137土壌マップを作成しました。ここでは、その経験をもとに実施している浜通り研修について、2024年度の内容を例に説明します。

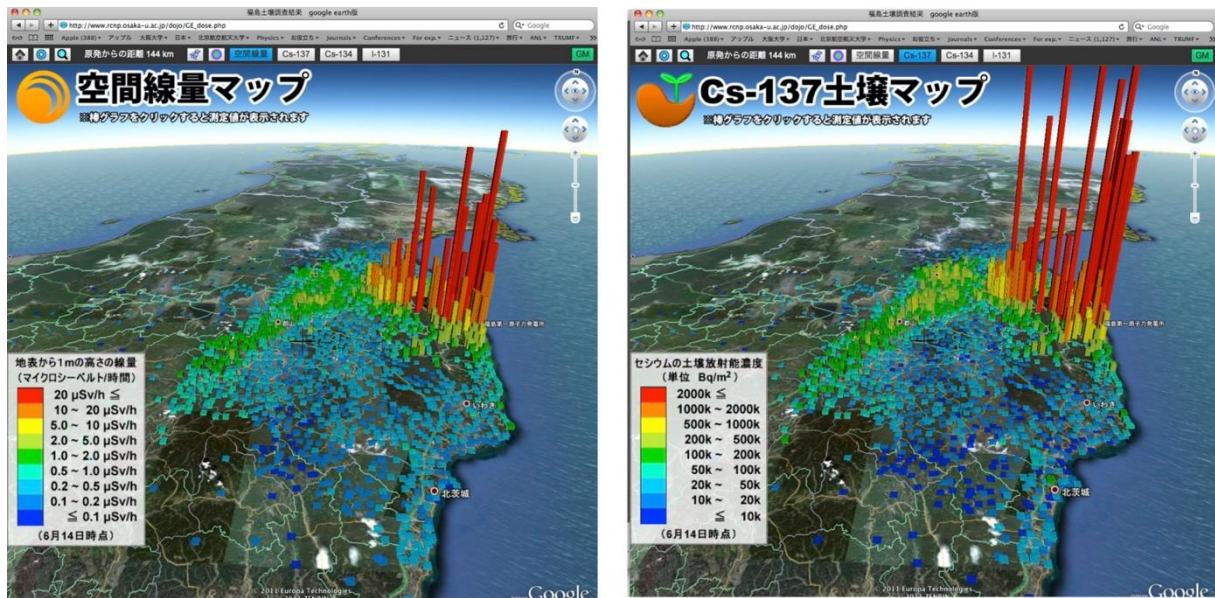


図2. 事故後間もない時期の空間線量マップとCs-137土壌マップ

研修は、まず6月頃に3日間の集中講義として事前講義を行い、現地研修に必要な放射線に関する基礎知識を身につけるとともに、試料採取や放射能測定の実習で学びます。また、浜通り地域に対する参加者の印象や考えを共有する時間も設けています。集中講義の具体的な時間割は図3のとおりです。

本研修は、理系の学生だけでなく文系の学生も参加する文理融合型の実習プログラムであるため、特に放射線に関するリテラシーを丁寧に身につけられる内容になっています。現地研修ではグループワークが基本となるため、学生間の交流にも重きを置き、自主的に決めた課題に関する議論の方法もあわせて修得できるよう配慮されています。

事前講義1日目	事前講義2日目	事前講義3日目
事前講義概要/ 研修の趣旨	放射線の生物影響とそのメカニズム	放射線の物理
身の回りの放射線 / 放射線と化学	社会の中の放射線	原子力規制人材育成事業教育プログラム紹介
放射線の物理	がんと放射線	福島県紹介
放射線測定講義	復興の方向性	福島イノベーション・コースト構想紹介
避難と帰還、除染と最終処分		試料採取講義・実演
実習	実習	実習

図3. 浜通り研修の事前講義内容

8月から9月にかけて実施される現地研修は、浜通り地域(飯館村・大熊町・双葉町)にお

いて5泊6日の日程で実施しています。2024年の大熊町での研修を例に、具体的なスケジュールの例を図4に示します。現地研修の内容は、帰還困難区域などでの空間線量の測定、植物や土壌試料の採取と放射能測定、福島第一原子力発電所・中間貯蔵施設などの施設見学、地域住民の方々との交流、そしてこれらの経験を基にした浜通り地域の未来に向けた議論で構成されています。学生は五感を通して浜通り地域を理解し、自然科学的に正しい知識をもとにさまざまな事象を考え、行動へつなげる力を養う“STEM”教育となっています。

福島浜通り環境放射線研修 2024年【 8月 大熊組 】 予定表

8月大熊		福島浜通り環境放射線研修 2024年【 8月 大熊組 】 予定表					2024/9/17更新
	8/19 (月)	8/20 (火)	8/21 (水)	8/22 (木)	8/23 (金)	8/24 (土)	
8:00	集合 8:20 (伊丹空港)	バス移動 8:30~	バス移動 8:30~	バス移動 8:30~	バス移動 7:45~ 福島県大熊町 環境放射線 工事情報センター 8:40	チェックアウト	8:00
9:00	伊丹09:20→仙台10:35	A班 B班 C班 D班 E班 集会所 小長浜	A班 B班 C班 D班 E班 小長浜 集会所	試料整理 阪大福島拠点 (大熊町)	精選困難区域視察 @ヒラメ養殖場、 クリーンセンターふたばなど 9:00~11:30	講義 阪大福島拠点 (大熊町)	9:00
10:00	仙台空港集合 10:40	土壌・植物採取 9:00~12:00	土壌・植物採取 9:00~12:00	バス	バス	成果発表会 の準備	10:00
11:00	移動	バス 12:00~	バス	バス	バス	バス (大野駅行)	11:00
12:00	昼食購入 南相馬SA	バス 12:00~	バス	バス	バス	バス (仙台空港行)	12:00
13:00	バス 昼食 拠点 大野駅 PicUp	バス 昼食 12:30-13:30 linkる大熊	バス 昼食 12:30-13:30	バス 昼食 12:00-13:00 さくらモール 廃炉資料館会議室	バス 昼食 12:00-13:00	バス (仙台空港行)	13:00
14:00	開演式 オリエンテーション 14:00~16:00	バス 試料整理 14:00-16:00	交流 linkる大熊	1F視察 13:00~16:50	測定 (片付け)	測定 (道の駅のみえ)	14:00
15:00	自己紹介 16:00~17:00	試料整理 (押し花)	試料整理 (押し花)	バス	測定考察	バス (仙台空港行)	15:00
16:00	自己紹介 16:00~17:00	議論 阪大福島拠点 (大熊町)	議論 阪大福島拠点 (大熊町)	バス	測定考察	解散 自由行動	16:00
17:00	議論	議論	議論	バス	測定考察	仙台17:30→伊丹18:50	17:00
18:00	バス	バス	バス	バス	振り返り・議論		18:00
19:00	チェックイン	バス	ホテル	バス	バス		19:00
20:00	夕食 ホテル	夕食 ホテル	夕食 ホテル	夕食 ホテル	夕食 ホテル		20:00

図4. 浜通り研修現地研修スケジュール (2024年8月大熊町を例として)

研修の放射能測定では、自ら採取した試料を処理し、現地でNaI検出器を用いてCs-137から放出されるγ線の定量を行い、単位重量あたりの放射能を算出するところまで実習します。また、試料採取した場所の環境や空間線量と放射能の関係を考察したり、浜通り地域における放射線の影響について議論したりします。この実習では、文理を問わずすべての学生が自ら手を動かし実習し、自ら考える姿勢が求められます。

10月には、夏の**浜通り研修**の成果を共有する成果発表会を大阪大学豊中キャンパスにおいて開催しています。その後、さらに発展的な実習として、現地で採取した土壌や植物を大阪大学に持ち帰り、ゲルマニウム半導体検出器やイメージングプレートを用いた測定を行い、さらに環境放射線に関する考察を深めます。そして翌年1~2月には、再度学生代表が現地実習を行わせていただいた自治体へ赴き研修の総括の報告も行っています。

以上述べたような**浜通り研修**を通して、複雑な社会課題に対して自然科学的なりテラシーをもち、自ら考え、主体的に行動できる人材を育成できていると考えています。また、この研修には、後述する共創的放射線教育プログラム(CREPE)を履修し、既に**浜通り研修**に参加した学生が、初学年の学生と協働するチューターとして参加しています。さらに、研修参加経験をもつ学生には、社会科学のアプローチから浜通り地域の課題を考える「社会技術研修」も研修プログラムとして用意し、希望者が選択して参加できるようにしています。この研修で、学生は、自ら「問い」を立て、地域住民との対話を通してその答えを探求する経験を通じ、人間と社会の問題に取り組んでいます。

以上が**浜通り研修**の内容紹介になりますが、これから先の次のステージでは、この浜通り研修から生まれた意欲的で主体的に活動する学生を支援し、地域の「関係人口」へとつなげていくことが未来に向けた課題となります。

3. 共創的放射線教育プログラム(CREPE)

放射線科学基盤機構では、原子力規制人材育成事業の支援を受けて、上述の浜通り研修を基盤とした、原子力規制の重要性を総合的に学べる共創的放射線教育プログラム (CREPE) (<https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/crepe/>)を立ち上げ推進しています。本プログラムは、放射線に関わる座学科目からなる放射線社会共創コース科目群および、放射線測定技術などをさらに深く習得する放射線実習コース科目群から構成されています(図5参照)。



図5. CREPE 説明図

CREPE は、当初学部生向けに立ち上げて整備しましたが、放射線科学分野への高度な人材輩出を意識して大学院版 CREPE も立ち上げて、学部・大学院一貫プログラムへと整備しているところです。大学院では、図6に示すように文理融合型でありながら、より理系の人材を育成できるような内容になっています。放射線科学分野を意識した特徴としては、放射線取扱

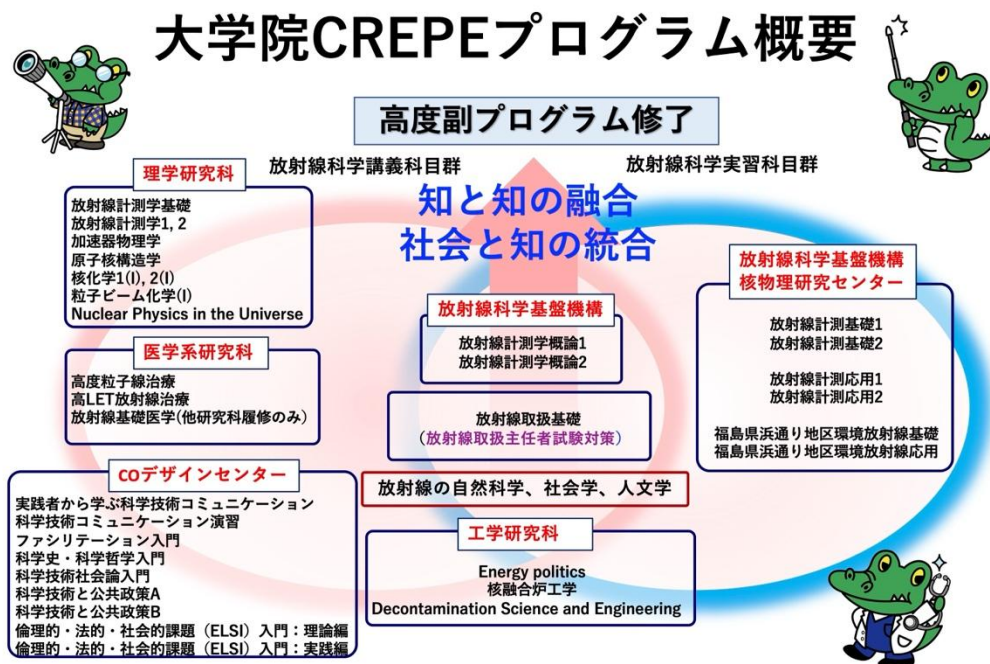


図6 大学院学生 CREPE

主任者試験対策を講義としている点、医科学系研究科から放射線の医学利用関連の講義、工学研究科から原子力関連の講義の提供がある点、並びに高度な各種放射線測定実習を含んでいる点が挙げられます。

図1に**浜通り研修**参加人数とともに**CREPE**履修人数の年度推移を示しています。**浜通り研修**の人数が増えるに従い**CREPE**履修人数も増えていることから、幅広い分野を対象にした**浜通り研修**を入り口にした人材育成の方針は間違っていないと言えます。2024年度初めて輩出した**CREPE**修了卒業生の進路先の内訳を見ると、大学院へ進学する学生が比較的多く、原子力発電に関係する電力会社や放射線医薬品に関連する会社への就職もあり、放射線科学分野に関わっていく学生が多く見受けられます。2025年度には環境省に就職する予定の学生も出てきております。

CREPEの中では発展的研修の一つとして、放射線科学に関する国際的視野を養うため、大阪大学欧州拠点のあるオランダ国グローニンゲン大学において国際シンポジウムをこれまで3回開催し、延べ12名の**CREPE**学生並びに4名の若手教職員を現地に派遣してきました。シンポジウム参加者の中には、本格的に海外留学を予定している学生も出てきており、少しずつ国際性も涵養できるプログラムになっていることを実感しています。今後、大阪大学に来る留学生を対象にした講義や実習を準備して日本人学生と国際交流・協働する中で、多文化共修を目指したプログラム展開を行いたいと考えています。

CREPEの中で発展的研修として、浜通り地域の帰還困難区域での試料サンプリングならびに放射線計測に関する高度な研修を、岐阜大学と協働で行っています。現在、「科学班」と呼んでいる環境放射線に関する自主研究を行う学生グループが、大熊町役場と連携して教員の指導の下で科学面から浜通りについて考える活動をしています。9月に松江で開催された日本放射線化学会の国際会議 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry 2025において学部生でありながら2名が発表できたのはとても大きな成果と考えています。また、2025年12月の日本放射線安全管理学会第24回学術大会でも、**CREPE**学生が1名発表する予定になっています。放射線リテラシーを備えた優れた学生の人材育成になっていると確信していますので、この研修（「科学班」活動）については今後強化し、浜通り地域の地形・地質等の関連調査や化学分析等の実習も行って行けるように他大学も含めて教育体制を整えられるように進めていきたいと考えています。

本稿で紹介いたしました共創的放射線教育プログラム（**CREPE**）につきましては、大阪大学広報誌 NewsLetter (<https://www.osaka-u.ac.jp/ja/guide/public-relations/newsletter/newsletter-new>) および大阪大学 Dialogue (<https://dialogue.osaka-u.ac.jp/104/>) で取り上げられました。また、浜通り研修会のことは総長メールマガジン「大阪大学の今とこれから」(Vol.38)でも取り上げられ、学内外に広報されました。さらに、大阪大学学際大学院機構より、教育の成功例としてインタビューを受け、教職員向けの学際教育授業実践ガイド2025の事例集の中においても取り上げられています。学部・大学院を跨ぐ**CREPE**は、大阪大学の中で分野横断型教育・学部大学院一貫教育のモデルケースとして考えられています。

以上のように、放射線や環境エネルギー問題等に関心を持つ様々な分野の学生に、発展的研修内容を含む**CREPE**を提供し、科学的な側面と倫理的・法制度的および社会的側面の両面から、環境放射線に関連した課題について考えてもらっています。今後も継続して**CREPE**で育成される人材の流れが持続して社会へと繋がっていく学部・大学院一貫の教育プログラムを提供し、放射線科学分野の人材育成につなげたいと考えています。

4. おわりに

大阪大学で行っている**浜通り研修**およびそれを入り口とする教育プログラムである **CREPE** について紹介してきました。私は、化学分析手段として放射光や原子核反応を利用してきてはいたもののほとんど異分野から、この放射線教育分野に飛び込み教育プログラムを立ち上げました。異分野の視点があるからからこそ、怖いもの知らずに大胆に、プログラム運営をできている部分もあると思っています。

福島第一原発事故は、科学技術と社会の関係、リスクコミュニケーション、災害からの復興といった複雑な課題を社会に投げかけました。浜通り地域のフィールドを使わせていただき教育を行うことで、多様な視点から考え、主体的に行動できる人材を育成できていると思っています。教育には時間がかかりますが、中には浜通り地域の復興に主体的にかかわる人材も生まれてくるとしています。地域とともに学び、地域とともに歩む大阪大学福島拠点を中心とする教育の中で、地球規模の課題解決に貢献する人材が育ち、日本の未来に貢献することを願っています。

最後になりましたが、本稿を締めくくるにあたり、私を放射線科学基盤機構へと導いてくださいました篠原厚先生、ならびに大阪大学福島拠点の開設や研修の運営に多大なご尽力をいただいている中野貴志先生に心より御礼申し上げます。また、私を浜通り地域での活動へ導いてくださった谷畑勇夫先生、青井考先生、中島裕夫先生、高橋賢臣先生、ならびに「科学班」の活動に尽力いただいている住濱水季先生にも深く感謝申し上げます。ここではすべてのお名前を挙げきれませんが、浜通り地域の自治体の皆様、放射線科学基盤機構の皆様、浜通り研修に携わる多くの教職員の皆様に、改めて感謝申し上げます。

講演者略歴



岡田 美智雄 (おかだ みちお)

所属 大阪大学放射線科学基盤機構 附属学際研究センター 放射線教育部門
部門長・教授

住所 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1

連絡先 TEL/FAX : 06-6850-6028、E-mail: okada@chem.sci.osaka-u.ac.jp

学職歴 1988年 東京大学 理学部 化学科卒業
1993年 東京大学 大学院理学系研究科 化学専攻 修了
1993年 博士(理学)(東京大学)「金属表面における電荷移動現象の基礎研究」
1993年 テネシー大学物理天文学科・博士研究員
1993年 オークリッジ国立研究所・客員研究員
1995年 大阪大学 大学院理学研究科 化学専攻 助手
2006年 大阪大学 大学院理学研究科 化学専攻 講師
2008年 大阪大学 科学教育機器リノベーションセンター 教授
2013年 大阪大学 大学院理学研究科 化学専攻 教授
2018年 大阪大学 放射線科学基盤機構 教授 現在に至る

研究・活動分野など 量子状態制御原子・分子ビームやイオンビーム等の粒子ビームを用いた表面化学反応研究を行っています。大阪大学および福島県浜通り地域で環境放射線に関する教育活動を行っています。

テーマ2「最前線の研究報告（学生、若手研究者による）」

④

ホウ素中性子捕捉療法における 深部がん照射プロトコルの開発

大阪大学 大学院工学研究科

D1 守實 友梨

医学の進歩によりがんは「治せる」時代になってきているが、未だ膵臓がんや肝臓がん等の深部に位置するがんの治療成績は低迷している。ホウ素と中性子を用いた低侵襲ながん治療法であるホウ素中性子捕捉療法(BNCT)による深部がん治療を実現するため、プロトコルの開発や取り組みについて紹介する。

ホウ素中性子捕捉療法における深部がん照射プロトコルの開発

大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻

守實 友梨

1. はじめに

がんによる年齢調整死亡率は全年齢を通じて 1990 年代以降から減少傾向にあり、近年の医療の発展によりがんは「治せる」病気になってきている[1]。しかし、深部がんに位置するがんの死亡率は上昇傾向にある。年齢調整死亡率では浅在部位のがんに比べ男女ともに膵臓がんが増加傾向がみられている。膵臓がんをはじめとする深部がんを対象とした治療成績改善の取り組みは現在活発に進んでおり、標準治療法である薬剤療法だけでなく、第 5 のがん治療とよばれる革新的ながん治療法の開発も盛んである。現在注目されているがん治療法の一つであるホウ素中性子捕捉療法も、深部がんへの適用拡大が大いに期待されている。

ホウ素中性子捕捉療法(Boron Neutron Capture Therapy; BNCT)とは、ホウ素薬剤と中性子による核反応を利用したがん治療法である[2]。予め体内に ^{10}B を蓄積させ、体外から低エネルギー中性子を照射し、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応により内部から腫瘍細胞を死滅させる。BNCT ではホウ素を選択的に蓄積させる腫瘍細胞のみを死滅させ、細胞単位で周りの正常細胞を傷つけることなく治療が可能である。

BNCT はその治療効果と腫瘍細胞選択性から、治療適用部位の拡大に多大な期待を寄せている。深部の腫瘍に対しても肝臓がんへの治療効果について研究が行われている[3]。しかし、BNCT には中性子の到達深さの限界という課題がある。人間の体内に中性子が入射すると、体内の陽子と弾性散乱し、たちまち減速していく。

また、深部がん治療のビームは、単一方向からの照射ではなく、複数方向から照射を行う多門照射が有効であると考えられる。多門照射では、治療に用いる中性子ビームにおける照射位置、ビーム半径、ビームエネルギー、カレントフラックス比など、多数のパラメータを同時に検討・調節する必要がある。カレントフラックス比はビームの方向の揃い具合を示す指標で、面を横切る粒子の総数(カレント)をその面のフラックスの総数で割ったものである。1.0 のときは(C=F)平行、0.5 のとき cosine の平均値が 0.5 になることから等方ビームを意味する。

従来のモンテカルロシミュレーションに基づく治療計画では、これらの条件を網羅的に探索することは計算時間の観点から現実的ではない。したがって、計算効率を向上させつつ、多様な照射条件を評価可能な治療計画手法の開発が求められている。

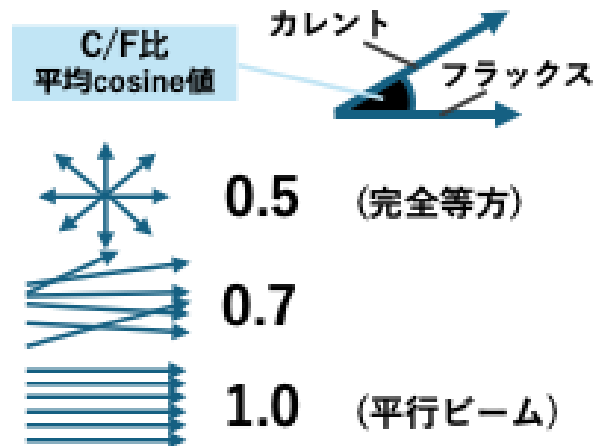


図 1. カレントフラックス比の概要

本研究では、計算の簡略化と汎用性の確保を目的として、多門照射 BNCT における深部がん治療の適用を目指し、単純化した球形頭部ファントムモデルを用いた照射計画システムを提案する。

2. 手法

本研究において提案する球モデルは、人間の頭部直径 20 cm の球を模擬し、皮膚、頭蓋骨、正常脳組織の三層構造から構成されている。初めに、球形モデルに対して点線源を用いて、様々な余弦角度及びエネルギーの入射についてモンテカルロ計算を実施し、線量分布データベースを構築した。中性子エネルギー範囲は 0.01 eV から 10 MeV とし、入射角は $\cos \theta$ で 0 から 1 まで 20 郡点を対象とした。計算には PHITS コードを用い、ボクセルサイズは 2 mm とした。

次に、構築したデータベースを用いて、任意の照射条件に対応する線量分布を生成した。まず、ビーム中心を基準として、xz 平面上に $\cos \alpha$ で傾いた円板を定義する。その円板内において、指定したフラックスポイント数に応じて照射点をランダムに配置し、各照射点から z 軸方向へ直線を引き、球形モデルとの交点を求めることで、実際の入射位置および方向を決定した。

その後、対応する点線源線量分布をデータベースから選択し、入射方向に合わせて回転させることで、球形モデル内の線量分布を合成した。

3. 結果及び議論

本手法により、ビーム半径および照射位置を連続的な変数として取り扱うことが可能となり、多門照射条件における柔軟な設定が可能になった。さらに、線量分布をボクセル表現から点群表現へ変換することで、回転処理や補間処理を効率的に実装した。

また、線量分布の高分解能化を目的として、三次スプライン補間を用いたボクセル補間を行った。2 mm ボクセルから 1 mm ボクセルへの変換において、元の線量分布との平均二乗誤差は最大でも 10 のマイナス 4 乗オーダーに抑えられており、精度を維持したまま空間分解能を向上させることができた。

さらに、ホウ素、窒素、水素およびガンマ線の BNCT における四つの線量を個別に評価することで、BNCT 特有の線量特性を考慮した治療計画評価を可能としている。計算効率の観

点では、球表面に入射する中性子を集約して扱う手法や、ベクトル演算を用いた回転処理を導入することで、高フラックス条件下においても実用的な計算時間(1 計算 15 分程度)を達成した。

今後は照射位置およびビーム半径を設計変数とし、腫瘍線量の確保と正常組織線量の低減を同時に満たす条件探索アルゴリズムの構築を行う。

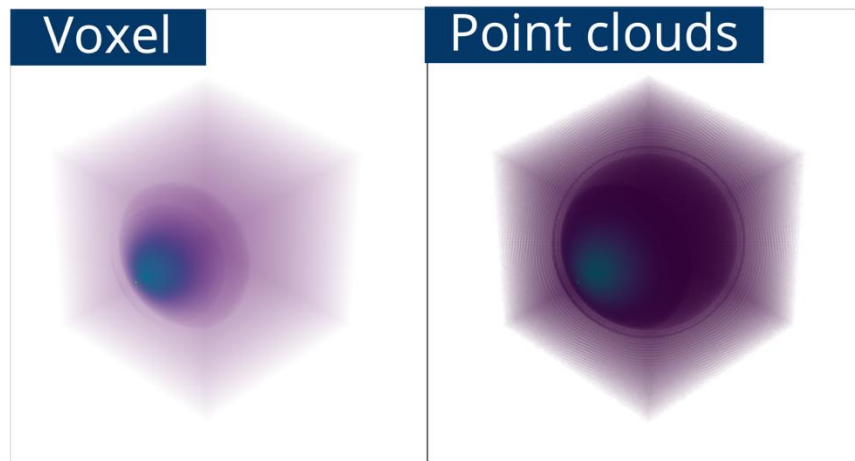


図 2. ボクセルと点群における線量分布の例

4. おわりに

本研究では、BNCTにおける深部腫瘍治療を目的として、球形頭部ファントムモデルを用いた多門照射計画システムを提案した。点線源に基づく線量分布データベースを構築し、照射位置およびビーム半径を連続変数として扱う線量分布構築手法を開発することで、多門照射条件を効率的に評価可能とした。

さらに、線量分布を点群表現に変換し、高分解能化および回転処理を導入することで、計算効率と精度の両立を実現した。これにより、高フラックス条件下においても実用的な計算時間で線量評価が可能であることを示した。

最終的には、深部腫瘍に対して正常組織への影響を最小限に抑えつつ、最適な多門照射条件を自動的に提示可能なBNCT照射計画システムの確立を目指す。

参考文献・資料

- [1] 国立がん研究センターがん情報サービス「がん統計」 新基準人口：全国がん死亡データ (1979年～2022年) 人口動態統計 (厚生労働省大臣官房統計情報部)
- [2] Barth R, Soloway A and Fairchild R G 1990 Boron neutron capture therapy for cancer *Sci. Am.* **263** 100-3,106-7
- [3] Zonta A, Pinelli T, Prati U, Roveda L, Ferrari C, Clerici A M, Zonta C, Mazzini G, Dionigi P, Altieri S, Bortolussi S, Bruschi P and Fossati F 2009 Extra-corporeal liver BNCT for the treatment of diffuse metastases: what was learned and what is still to be learned *Appl. Radiat. Isot.* **67** S67-75

講演者略歴



守實 友梨(もりざね ゆり)

所属 大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻 博士後期課程 1年
住所 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 A15 棟
連絡先 TEL/FAX : 080-8504-0208、E-mail:morizane22@qr.see.eng.osaka-u.ac.jp
学職歴 2022年 大阪大学 工学部 環境・エネルギー工学科卒業
2023年 University of Birmingham MSc Healthcare Technology 修了
2025年 大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻 博士
前期課程 修了
2025年 大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻 博士
後期課程 入学 現在に至る

研究・活動分野など 中性子とホウ素の核反応を用いた低侵襲ながん治療であるホウ素中性子捕捉療法(BNCT)を深部がんへ応用するために照射プロトコルの開発を行っている。

テーマ2「最前線の研究報告（学生、若手研究者による）」

⑤

中性子イメージングを利用した混相流の可視化

京都大学 複合原子力科学研究所
助教 大平 直也

中性子イメージングは金属部品等の可視化、部品等に含まれる少量の水分・オイルの可視化・定量化などにおいて、有効な観察手法である。近年の撮影装置の発達により、短時間かつ高画質で中性子透過像の撮影が行えるようになった。本技術は様々な応用が行われており、本発表では特に、中性子イメージングを利用した混相流の研究に焦点を当てて最近の事例を紹介する。

中性子イメージングを利用した混相流の可視化

京都大学複合原子力科学研究所

大平 直也

1. はじめに

中性子イメージングは、放射線を使ったイメージングの一種であり、基本的な原理は最も汎用的に用いられる X 線イメージングとほとんど同じである。X 線と中性子で大きく異なる点は、その減衰特性である。X 線は一般的に原子番号が大きい物質に対して減衰しやすく、原子番号が小さい物質に対しては透過しやすい。一方中性子は、水素やリチウムといった軽い元素を含んだ物質に対しては減衰しやすいが、アルミや鉄などの金属に対しては比較的透過しやすい。また、原子番号というよりは各同位体に対して減衰挙動が異なり、例えば 6-Li は中性子を吸収する性質をもつが、7-Li はそういった性質をもたない。

液体金属は、主に高速炉の冷却材として注目を集めており、様々な研究開発が行われてきた[1]。また、家庭用ゲーム機等の電子機器の冷却に液体金属を用いる例もあり、さらに注目を集めているといえる。しかしながら、特に液体金属の混相流現象については明らかでない部分が多いため、基礎的な研究を実施することが重要である。我々が普段用いる液体は、水に代表されるように透明であることが多いため、可視光による撮影が可能である。しかしながら水銀などに代表されるように、液体金属は可視光を透過しないため (Fig. 1)、流れを実験的に「視る」ことは困難である。そのため、様々な研究者が超音波や電磁プローブ、X 線 (または γ 線) や中性子などを用いて液体金属の流れを評価してきた。本稿では、当研究室で取り組んでいる中性子を用いた混相流のダイナミックイメージングについて紹介する。



Fig. 1 溶融した液体金属

2. 中性子ダイナミックイメージング

Fig. 2 に中性子ダイナミックイメージングにおける撮影装置の概略図を示す。撮影システムは、シンチレータ、ミラー、レンズ、イメージンスフィア、高速度カメラからなる。中性子は目に見えないため、シンチレータによる蛍光発光を使うことで中性子を可視光に変換し、カメラで撮影する。しかしながらシンチレータによる蛍光は弱いため、一般的には数秒～数十秒の露光時間が必要である。そのため、静的なイメージングであればシンチレータ、レンズ、カメラのみで撮影可能である。しかし高速度撮影に必要なミリ秒オーダーの露光時間では非常に暗く、中性子の透過像をはっきりと得ることができない。そこで、イメージンスフィアを用いることで蛍光を増倍し、高速度撮影を可能にしている。

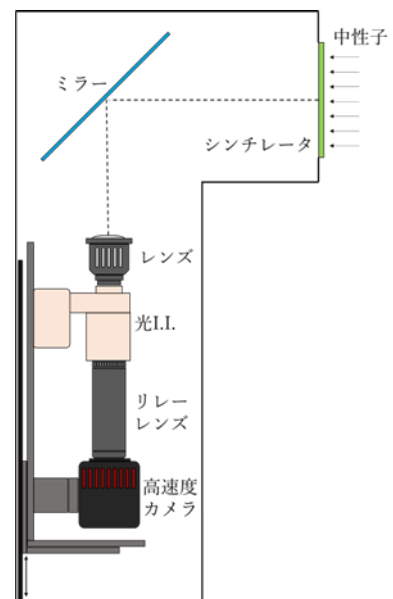


Fig. 2 高速度中性子イメージングの撮影システム

3. 液体金属二相流の可視化

Fig. 3 に、液体金属二相流を形成する実験装置の概略図を示す。装置は矩形の容器（幅 100 mm、奥行き 10 mm、高さ 300 mm）になっており、容器の底部から窒素を吹き込むことで気液二相流を形成した。使用した液体金属は、融点 125°C の LBE（鉛ビスマス共晶合金）である。この装置の奥行き方向に中性子を透過させて高速度撮像を実施した。Fig. 4 に示すような①空の容器、②満水状態、③二相流状態の 3 種類の画像を用いて画像間の演算をすることで、Fig. 5 に示すような透過方向の気液の割合（ポイド率）を二次元的に算出できる [2]。さらに、Fig. 5 に示すように、液体金属中に同程度の密度をもち、かつ中性子吸収体（ AuCd_3 ）の粒子を混入させることで、液体の動きに追従するトレーサー粒子とすることができる。これらの技術により、気液両相の挙動の観察ができる液体金属気液二相流のダイナミックイメージングが可能である。

4. おわりに

本稿では中性子を用いた液体金属二相流のダイナミックイメージングについて紹介した。これ以外にも狭間隙中の水の沸騰凝縮挙動の観察や、観察が困難な複雑流路中の気液二相流の観察などにも用いられている。ただし、ノイズ処理については未だ改善の余地があり、空間分解能や時間分解能を犠牲にしつつノイズ処理をしているのが現状である。今後は、機械学習などの技術も取り込みながらノイズ処理を改善し、中性子ダイナミックイメージングを応用範囲がより広い研究ツールとして進化させていきたい。

参考文献・資料

- [1] OECD/NEA, Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies, Nuclear Science (2015).
- [2] T. Hibiki, K. Mishima, H. Nishihara, Influence of Scattered Neutrons on Void Fraction Measurement of Two-Phase Flow Using Thermal Neutron Radioscopy, J. Nucl. Sci. Tech., 34 (10), 996-1005(1997).

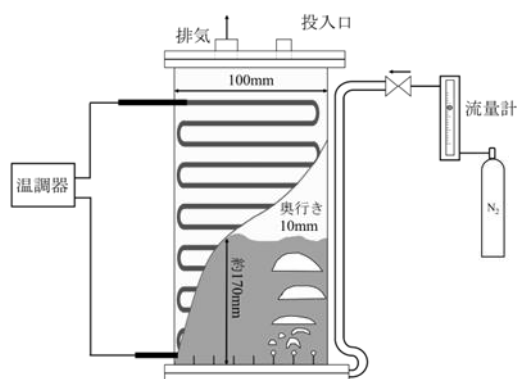


Fig. 3 実験装置の概略図

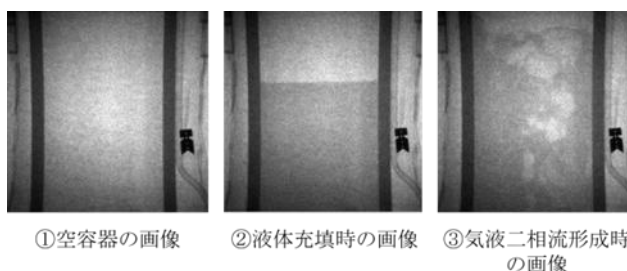


Fig. 4 各状態における中性子透過像

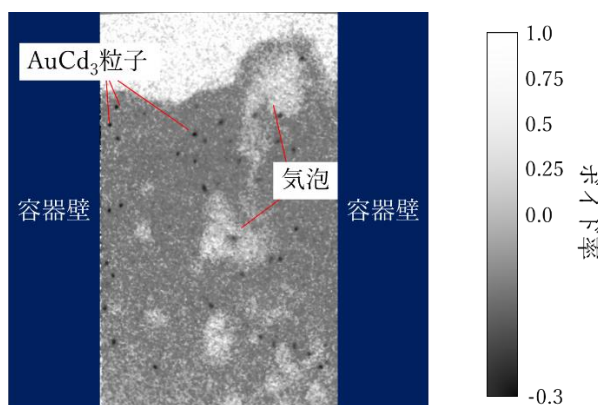


Fig. 5 ポイド率画像

講演者略歴



大平 直也 (おおだいら なおや)

所 属 京都大学 複合原子力科学研究所

住 所 〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西2丁目1010番地

連絡先 TEL/FAX : 072-451-2674、E-mail: odaira.naoya.4e@kyoto-u.ac.jp

学 職 歴 2015年 福井大学 工学部 機械工学科卒業

2017年 福井大学 工学研究科 原子力・安全工学専攻 修了

2020年 博士(工学)(福井大学)

2020年 京都大学 複合原子力科学研究所 助教 現在に至る

研究・活動分野など 福井大学の学生時代は原子力専攻に所属し、高速炉用金属燃料や高速炉用冷却材の固体挙動について研究。その後京都大学に移り、液体金属をはじめとした混相流現象の解明を目指して研究。液体金属二相流など複雑な流動を可視化できるX線・中性子イメージングに興味をもち、これらを用いた計測手法の改善にも取り組んでいる。

⑥

低線量肺がん CT 検診における Silverbeam Filter の有用性に関する検討

(公社) 地域医療振興協会 市立奈良病院、
奈良県立医科大学大学院 医学研究科
M2 吉川 武志

低線量肺がん CT 検診において、検診受診者も CT による肺がん検診に関心が強くなっている。被ばくに関しても関心が強く、対象が健常者となる検診において、可能な限り低線量であることが望ましい。今回当院に搭載された Silverbeam Filter という機構を用いて、さらなる被ばく低減が期待できるのではないかと考え、本研究を始めた。本研究は、胸部ファントムを用いて、Silverbeam Filter が低線量肺がん CT 検診においてどの程度有用であるかを物理評価、視覚評価で検討した。

低線量肺がん CT 検診における Silverbeam Filter の有用性に関する検討

公益社団法人 地域医療振興協会 市立奈良病院 放射線室
診療放射線技師 吉川 武志

1. はじめに

肺がんは我が国の部位別死亡数において男女計で第 1 位となっている。また、がん死亡率は男性で 1 位、女性で 2 位となっている [1]。このような状況の中で、治りうる時期にある肺がんを治りうる大きさで発見し、治療する。すなわち肺がんの早期発見、早期治療が社会的要請となっている [2]。我が国では胸部 X 線写真による肺がん検診は安価で簡便であり、短時間に多くの受診者を検査できるため対策型検診として日本で広く普及している。しかし、胸部 X 線検査での肺がんの検出感度は 59.6% ~73.5% 程度 [3, 4] であり、低線量胸部 CT 検査 (Low-Dose CT : LDCT) の検出感度 93.3% ~94.4% と比べ低く、特に早期肺がんにおいてその検出感度に差がある [5]。そこで近年、肺がん検診に CT 検査を活用する取り組みがなされている。2010 年の米国肺がん CT 検診無作為化割り付け試験 (National Lung Screening Trial : NLST) において、55 歳から 74 歳、喫煙歴あるいは 15 年以上の喫煙歴のある、30pack-year 以上の喫煙歴を持つ人を対象とした低線量胸部 CT と標準的な胸部単純撮影という 2 種類の肺がん検診法で肺がん死亡率を比較した結果が報告された。その結果によると、対象者が重喫煙者であったため、偽陽性が多かったなどの問題もあるが、低線量胸部 CT による検診を受けた被験者群の肺がんによる死亡率が 20%、総死亡率が 6.7% 減少し、肺がん CT 検診は肺がん死亡率低減に有効であることが示された [6]。これを受けて、我が国でもますます肺がん CT 検診に対する期待が高まると予想される。しかし、NLST において有効性が証明された CT 検診においても、問題となるのが放射線被ばくである。近年、CT 装置において逐次近似再構成法や人工知能を用いた Deep Learning 再構成法などの再構成技術の進歩によりさらなる被ばくの低減が可能となった。さらに当院のキヤノン社製の CT 装置に新しく搭載された Silverbeam Filter の機能を使用してさらなる被ばくの低減が可能となった。今回、我々は胸部ファントムを使用し、物理評価、視覚評価にて Silverbeam Filter の有用性について検討したので報告する。

2. 方法

2.1 使用機器

CT 装置には、320 列検出器を搭載したマルチディテクタ CT 装置 (Aquilion ONE Prism Edition, Canon Medical Systems, Otawara, Japan) を使用した。

ファントムには、直径 5mm の模擬腫瘍 (-800HU) を封入した胸部ファントム (N-1 “ラングマン” 京都科学社, Kyoto) を使用した。

画像計測には、CT measure ver 0.98f (Japanese Society of CT Technology) を使用した。



図 1. Aquilion ONE Prism Edition(Canon Medical Systems)

2.2 撮影条件

本研究での撮影条件は、管電圧 120kV, X線管球回転速度 0.5s/rot, ピッチファクタ 1.388 とした。

2.3 TTF (Task-based modulation transfer function) の測定

直径 5mm の模擬腫瘍 (−800HU) を封入した胸部ファントムを 20 回撮影し、Circular Edge 法を用いて TTF を算出した。計測には CT measure を使用した。

撮影線量は、従来のフィルタ (Cu Filter) と Silverbeam Filter (SBF) で被ばく線量の指標である CTDIvol が同等となるように設定した。本研究では、CTDIvol が 2mGy、0.2mGy となるように撮影線量を設定した。

画像再構成関数には、FC50 (Filtered Back Projection:FBP) と AiCE Lung Standard (Deep Learning Reconstruction : DLR) を選択した。

2.4 NPS (Noise Power Spectrum) の測定

模擬腫瘍を封入していない胸部ファントムを 10 回撮影し、Radial 法を用いて NPS を算出した。ROI (Region of Interest) は、128Square ROI を使用し、計測には、CT measure を使用した。

撮影線量は、TTF の測定時と同様、Cu Filter と SBF で CTDIvol が同等となるように設定した。本研究では、CTDIvol が 2mGy、0.2mGy となるように撮影線量を設定した。

画像再構成関数には、FC50 (Filtered Back Projection:FBP) と AiCE Lung Standard (Deep Learning Reconstruction : DLR) を選択した。

2.5 模擬腫瘍検出試験による視覚

直径 5mm の模擬腫瘍を封入した胸部ファントムを 4 種類 (左中葉、右肺尖、右中葉、右肺底) と封入していないファントム 1 種類、計 5 種類のファントムを作成し、それぞれのファントムを 18 の撮影条件で撮影した。撮影条件を表 1 に示す。撮影した画像を、肺がん検診認定技師を含む CT 検査に従事する計 7 名を対象に視覚評価を行い、それぞれの感度、特異度を算出した。

表 1. 視覚評価の撮影条件

No	管電流 [mA]	CTDIvol [mGy]	Filter
1	130	2.4	Cu
2	110	2	
3	80	1.5	
4	50	0.9	
5	30	0.6	
6	10	0.2	
7	130	0.6	SBF
8	110	0.5	
9	80	0.4	
10	50	0.2	
11	30	0.1	
12	10	0.1	
13	500	2.5	SBF
14	400	2	
15	300	1.4	
16	200	0.9	
17	130	0.6	
18	50	0.2	

3. 結果

3.1 TTF の測定

TTF の測定結果を図 2、3 に示す。TTF において、CTDIvol : 2.0mGy では FC50 AiCE Lung Standard どちらにおいても SBF より Cu Filter のほうが高い結果となったが、CTDIvol : 0.2mGy では、高周波数領域において Cu Filter より SBF のほうが高い結果となった。

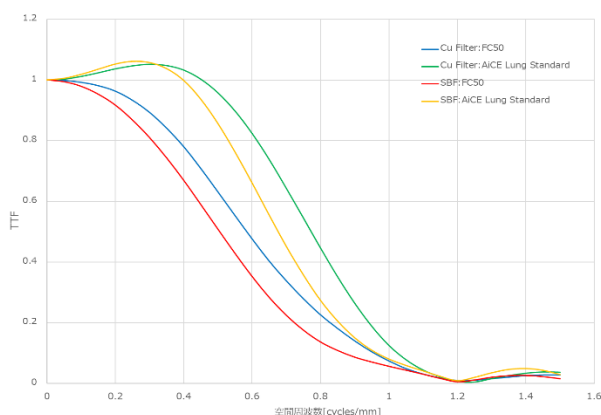


図 2. CTDIvol : 2mGy の TTF

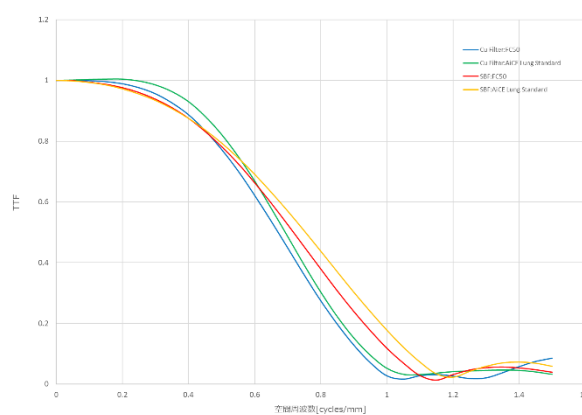


図 3. CTDIvol : 0.2mGy の TTF

3.2 NPS の測定

NPS の測定結果を図 4、5 に示す。NPS において、CTDIvol : 2.0mGy では Cu Filter と SBF で差が認められなかったが、CTDIvol : 0.2mGy では、Cu Filter より SBF のほうが低くなる結果となった。

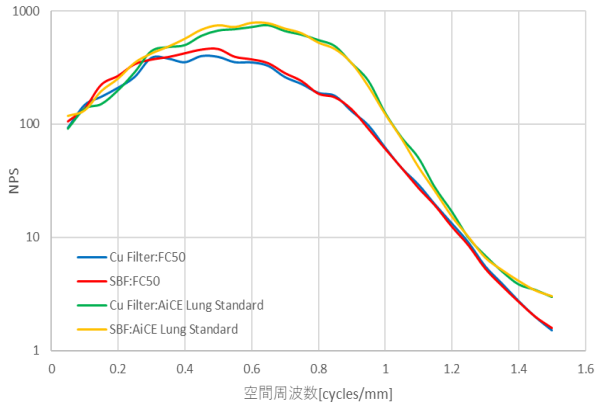


図 4. CTDIvol : 2.0mGy の NPS

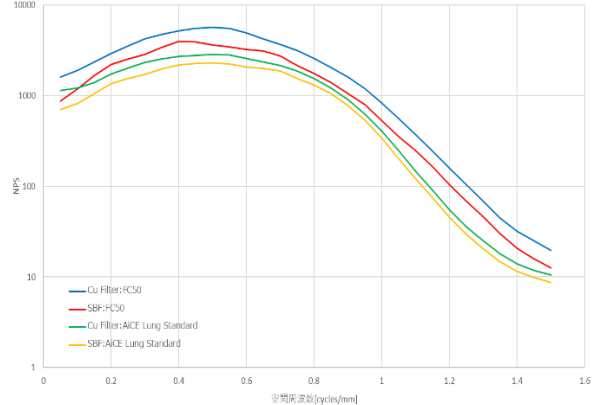


図 5. CTDIvol : 0.2mGy の NPS

3.3 模擬腫瘍検出試験による視覚評価

視覚評価の結果を図 7 に示す。視覚評価では、特異度は Cu Filter とともに 85-100%の間であった。また、感度は Cu Filter で 39.3-85.7%であったが、SBF では 67.9-85.7%であった。特に 0.6 mGy 以下で Cu Filter より SBF のほうが検出できている結果となった。

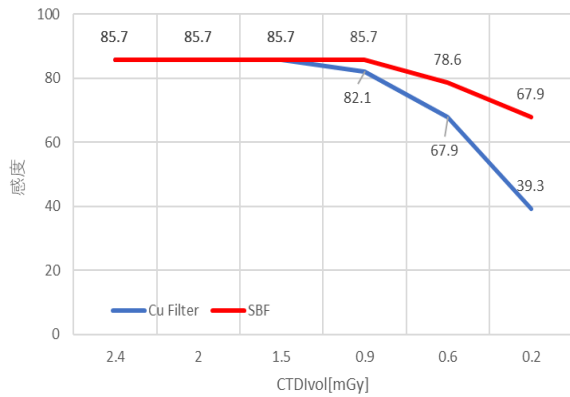


図 7. 模擬腫瘍検出試験による視覚評価

4. 考察

4.1 TTF の測定

CTDIvol 2mGy での TTF の結果において、SBF より Cu Filter の方が TTF が高い結果となった。これは、CT 装置の仕様により 350mA で焦点サイズが変化する。本研究の SBF での撮影線量が 400mA となっており、焦点サイズが小焦点から大焦点に移行したためであると考えられる。一方で CTDIvol : 0.2mGy では、高周波数領域で SBF が Cu Filter より高い結果となった。SBF は、X線スペクトルから低エネルギー成分を除去するフィルタであり、実効エネルギーの上昇と量子ノイズ低減により、肺野条件における結節や血管境界のコントラストを保持しやすいことが想定される。以上より、低線量条件であっても TTF が相対的に良好に保たれたものと考えられる。

4.2 NPS の測定

CTDIvol 2mGy での NPS の結果では、両フィルタ間に大きな差は認めなかったものの、CTDIvol : 0.2mGy では、SBF は Cu Filter より低いノイズ成分を示した。低線量領域では量子

ノイズが画質劣化の原因となるが、ビームシェーピングフィルタを用いたスペクトルシェーピングは、高エネルギー成分の割合を増加させることで、被写体吸収に対する安定性を高め、結果として量子ノイズを抑制しうるということが報告されている[7, 8]。本研究の結果も同様の傾向を示しており、SBF が低線量条件においてノイズ低減に寄与している可能性が示唆された。

4.3 模擬腫瘍検出試験による視覚評価

本研究における視覚評価では、特異度は両フィルタで同程度であった。それに対し、感度は、高線量帯では差がほとんど出なかったが、低線量帯では SBF の方が Cu Filter より感度が高いという結果になった。この結果は、スペクトルシェーピングフィルタを用いた低線量胸部 CT においても、主観評価上の画質と診断能が保たれるとした先行研究と一致している[7-9]。肺癌検診 CT 検査は、より低線量での撮影が望まれる。視覚評価の結果から、低線量撮影において結節の検出感度が高い Silverbeam Filter の使用は効果的であると考えられる。

4.4 本研究の限界と今後の課題

本研究は、胸部ファントムを用いた基礎的検討であり、胸部ファントムは臨床でみられる肺血管走行、気腫性変化、石灰化、すりガラス陰影などの多様な背景を再現できない。また被写体の体格差に伴う散乱線量や線質変化を考慮できていない。

今後は、実際の臨床画像を用いて検討を進めていきたい。

5. まとめ

今回の検討で、物理特性、視覚評価より肺癌検診 CT 検査での低線量撮影において Silverbeam Filter は有用であることが示唆された。

参考文献・資料

- [1] 国立がん研究センター がん情報サービス. がん統計：最新のがん統計.
https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/stat/cancer/12_lung.html.
「参照:2025-11-16」
- [2] 山口功, 村松禎久, 花井耕造 他. 低線量肺癌 CT 検診の知識と実務 改訂 3 版,
2019;3.
- [3] L. G. Quekel, A. G. Kessels, R. Goei, et al.: Miss rate of lung cancer on the chest radiograph in clinical practice., Chest, Vol.115, No. 3, pp.720-724, 1999.
- [4] D. R. Aberle, S. DeMello, C. D. Berg, et al.: National Lung Screening Trial Research Team. Results of the two incidence screenings in the National Lung Screening Trial. New England Journal of Medicine, Vol. 369, No. 10, pp.920-931, 2013.
- [5] National Lung Screening Trial Research Team, T. R. Church, W. C. Black, A. Jain, et al.; Results of initial low-dose computed tomographic screening for Lung cancer., New England Journal of Medicine, Vol. 368, No. 21, pp.1980-1991, 2013.
- [6] National Lung Screening Trial Research Team, D. R. Aberle, C. D. Berg, et al.:

- The National Lung Screening Trial: overview and study design. *Radiology* 2011; 258(1): 243-253.
- [7] Greffier, J., et al. "Effect of tin filter-based spectral shaping CT on image quality and radiation dose for routine use on ultralow-dose CT protocols: a phantom study." *Diagnostic and interventional imaging* 101.6 (2020): 373-381.
- [8] Mozaffary, A., Tack, D., De Maertelaer, V., et al. Comparison of tin filter-based spectral shaping CT and low-dose CT protocols for chest imaging. *AJR Am J Roentgenol.* 2019;213(4):839-846.
- [9] Golbus, AE., Johannessen, A., et al. Ultra-low dose chest CT with silver filter and deep learning reconstruction for quantification of cystic lung disease. *Eur Radiol.* 2024.

講演者略歴



吉川 武志（よしかわ たけし）

所 属 公益社団法人 地域医療振興協会 市立奈良病院 放射線室

住 所 〒630-8305 奈良県奈良市東紀寺町1丁目50-1

連 絡 先 TEL/FAX : 0742-24-1251、E-mail:yoshikawa.t.1011@gmail.com

学 職 歴 2020年 大阪物療大学 保健医療学部 診療放射線技術学科 卒業

2020年 公益社団法人 地域医療振興協会 市立奈良病院 入職

2024年 奈良県立医科大学大学院医学研究科

先端画像下治療開発応用学講座 修士課程 入学 現在に至る

研究・活動 主にCT業務、MRI業務、アンギオ業務に従事しています。

分野など

テーマ3「新たな研究開発の動き」

7

AI と放射線非破壊検査

(元) 大阪府立大学

谷口 良一

非破壊検査分野で”NDE4.0”というワードが話題となっている。これは、検査でのデータを統一的な規格、規範でデジタル化し、非破壊検査のAI化を促進しようとする動きである。放射線非破壊検査の分野では、これに先行する形で、数十年前から、パターン認識の技術を用いて欠陥を抽出することが試みられてきたが、余り成功したとは言いがたい。最新のAI技術を用いて、これらの技術的な壁を突破する可能性について考えてみたい。

AI と放射線非破壊検査

元大阪府立大学

谷口良一

1. NDE 4.0 とは何か

Nondestructive Evaluation 4.0 の略語で、第4世代の非破壊評価という意味である。2017年にドイツが提唱したもので、2019年からアメリカも追随し、2020年から日本でも超音波分野が主導して、これまで2回の「NDE 4.0 シンポジウム」を開催している¹⁾。

NDE 4.0 という略語は、若干抽象的な表現であるが、表1のように、産業の発展と、それに対応した非破壊検査技術の進歩を歴史的に表している。産業革命によって、産業機械が出現すると、機械の信頼性を保証する検査が必要となった。当初の検査法は、目視検査や試運転等の第1世代の非破壊検査 (NDE 1.0) であった。その後の産業の発展と機械化の進展は、第2世代の非破壊検査 (NDE 2.0) の出現を促し、現在見られる放射線検査や超音波検査などの伝統的な非破壊検査法が利用されるようになった。さらに電子技術とコンピュータ技術の進歩は、画像検査をはじめとしたデジタル技術を中心とした、第3世代の非破壊検査 (NDE 3.0) を発展させた。

表1 産業の発展と非破壊検査技術の進歩

名称	対象	検査法
NDE 1.0	産業革命、蒸気機関、圧力容器	目視検査、破壊試験
NDE 2.0	大量生産、機械化	X線検査、超音波検査
NDE 3.0	電子技術、コンピュータ	多次元検査
NDE 4.0	デジタル化、汎用化	次世代検査

NDE 4.0 はこれらに続く次世代検査技術と称しているが、その内容は漠然としている。非破壊検査協会では、より具体的に表2のような解釈を行っている。ここでは、NDE 4.0 の対象分野として、計測、伝送、評価、構成の4分野に分類し、対応する技術項目を示している。以上のように、NDE 4.0 は、デジタル技術とデータ処理を中心に、汎用化されつつあるハード、ソフトを非破壊検査技術に取り込み、実用性の高い次世代技術とすることを目標としているようである。

一方、放射線非破壊検査の立場から見ると、表2の半分近くの分野は、これまでも取り組んできたものである。画像センシング、画像データ処理、パターン認識、画像判定などが、これに相当するが、大きな成果を上げたとは言い難い。どのような理由でそうなったのか、これを明らかにすることが、今後の展開に大きく影響すると考えられる。

2. AI と RT

AI は人工知能 (artificial intelligence) の略で、近年様々な分野で話題となっている。簡単に定義すると、“計算とコンピュータを用いて知能を研究する計算機科学の1分野で、言語の

表2 NDE 4.0 の分類

分野	技術項目
計測	センシング、ロボット
伝送	ローカル5G、携帯端末、データクラウド
評価	人工知能 (AI)、シミュレーション
構成	プラットフォーム、モデル化、デジタルツイン

理解や、推論、問題解決などの知的行動を人間に代わってコンピュータに行わせる技術”であるとされている。その基本はパターン認識と学習作業であり、大量の訓練データを用いて、コンピュータが学習することで、結論に近づくアルゴリズムが中心となる。近年ではニューラルネットワークを、さらに多層化する深層学習が注目されており、これによって学習力が向上し、音声、画像、自然言語、あるいはゲームを対象とする諸問題に対して、他の手法を圧倒する性能を示すようになってきている。

表3 放射線非破壊検査技術の歴史

年代	線源	センサー	画像処理
1895年 1940年代以降	X線管 原子炉 加速器	写真フィルム 撮像管	現像 増感現像
1960年代以降	小型加速器	画像増幅器 IP	デジタル画像処理 空間変換(CT)
1990年代以降	マイクロフォーカス	フラットパネル	パターン認識

非破壊検査分野でも、古くから画像診断におけるパターン認識が課題とされてきた。放射線検査の英文名が Radiographic Testing であることを見てもわかるように、この検査法は当初から画像を用いた検査であった。表3に、この技術の発展の歴史をまとめている。はじめは写真フィルムを用いた単純な透過画像検査であったが、透過X線の方向分布データを空間変換して断層画像を得るCT(Computed Tomography)という革新的な技術が60年代に開発された。この技術は医療用として普及したが、X線の方向を揃えるためのコリメータが必要であり照射方向を変化させて多数回測定する必要もあり、単体の放射線検出器を使用していた初期は、X線の利用効率が悪く、長い測定時間を要した。そのため、医療用が先行し、産業用としては、それほど普及しなかった。

CTでは、検出器を多数配置するなどの改良が行われ、上記の欠点は若干改善されたが、本格的な改良は90年代に行われた。まずIP(イメージングプレート)、フラットパネル検出器などの新しい画像検出器の開発が大きな影響を与えた。これらの検出器は、2次元に多数の検出器を配置したものと等価の構成をしており、個々の検出素子も単体の放射線検出器と同等のダイナミックレンジを有している。これを用いることでCTの測定時間と経済性は大幅に向上した。さらに、X線管の焦点を大幅に絞ったマイクロフォーカスX線管の開発によって、X線の方向をそろえるコリメータが簡略化でき、X線の利用効率が劇的に改善した。その結果、産業用としてもCTが普及し始めて、現在に至っている。また上記の画像検出器は、検出効率が高くデジタル化も容易であることから、単体の画像検出器としても普及しており、放射線非破壊検査の高感度化、高機能化にも寄与し、経済性の向上も得られている。

以上のように放射線非破壊検査分野は、画像処理、画像センシング技術などの開発など、NDE 4.0の目指す“次世代非破壊検査”を先取りするような形で展開してきた。但し、AIと関係が深い画像情報などのパターン認識の分野では、必ずしも十分な成果が得られていない。この原因について以下で考えてみたい。

3. パターン認識とRT

放射線非破壊検査(RT)では、「放射線画像中の不連続部の検出」を検査と定義している。この目的のために画像中の欠陥検出技術が進化してきた。当初は検査技術者の直観的な画像認識を中心としたものであったが、デジタル画像処理技術の発展に伴って、検査のための有力

な補助ツールとして画像処理が利用できるようになってきた。この技術の歴史を表4にまとめている。ここではNDE 4.0と同様に世代別に表示している。第1世代は、「欠陥を見つけやすくする」ことを主眼としたもので、画像の濃淡の調整、注目部分のコントラストの拡大等を中心とするものであった。次の世代では、画像そのものを変換して欠陥部分を強調する、あるいはノイズを圧縮して画像情報のS/Nを向上させ、欠陥抽出の補助を行うものとなった。

ここまでは、最終的な「検査」は技術者が行うものであったが、第3世代になると、検査も画像処理が行うという「自動検査」を目的とするようになった。これはAIでも主要な分野となっているパターン認識という技術と共通する領域となっている。非破壊検査以外の分野では、顔認証、音声認証など実用化が進んでいるが、非破壊検査分野では実用化が遅れている。

表4 非破壊検査におけるデジタル画像処理の進化

画像処理の世代	技術項目	用途
第1世代 (画像調整)	画像のデジタル化 濃淡調整、コントラスト拡大	非破壊検査データのデジタル化
第2世代 (画像変換) (空間変換)	エッジ強調：空間微分 平坦強調：空間積分 メディアンフィルター	画像強調 ノイズ圧縮 点状ノイズ除去
第3世代 (パターン認識)	パターン抽出（圧縮） 細線化、特徴抽出 異常検知	ノイズパターン除去（抽出） 顔認証、指紋認証 検査の支援→非破壊検査の自動化

非破壊検査で言うところの不連続部の検出は材料の分野では、もっと幅広く「欠陥検出」と称する場合もある。これらはAIを利用したパターン認識分野で言うところの「異常検知」と分類されるものである。ただし、非破壊検査では、何をもって異常とするのかということが問題となる場合が多い。欠陥には多くの種類がある。非破壊検査における欠陥の種類を表5に簡単に分類している。ここでは欠陥の種類を次元別に表示している。

0次元の欠陥とは点状の欠陥ということであるが、単なる点状ではなく、面積が最小の1画素の異常と言うことであり、実際の撮像対象では、現実には、ほとんどあり得ない画像であるが、デジタル画像では、しばしば見かける現象である。これは撮像系の不具合による特異点、特異画像であることが大半であり、点状ノイズとして一括して画像処理することが多い。そのため、0次元ノイズは非破壊検査の対象ではなく、非破壊検査の妨害要素に分類される。

1次元の欠陥とは、線状の欠陥、あるいは線状の不連続境界を持った欠陥ということである。非破壊検査で最も重視される「割れ」は、これに相当する。同じく断層状の輝度変化線も重要な不連続部であり、これをパターンとして認識するためには細線化という操作が必要となる。このパターンが重要となるが、現実の画像では、様々な曲線が登場し、認識の障害となる。溶け込み不良のような直線状の欠陥は簡単に判別可能であるが、実際の割れは、直線状と言っても様々な形状と曲率を持ったものが多く、自動判定は簡単ではない。

2次元の欠陥とは、様々な形状を持った欠陥であり、これを判別するためには、欠陥形状の学習が不可欠となる。

表5 非破壊画像検査における欠陥画像の分類

欠陥の次元	非破壊検査における欠陥
0次元	特異点、点状ノイズ、量子ノイズ
1次元	線状ノイズ、割れ（クラック）、溶け込み不良
2次元	異物混入、ボイド、パターンを持った欠陥

AIにおける異常検知には、(1)教師なし異常検知と(2)教師あり異常検知、の2種類があると言われている。異常が極めて少ない場合、(1)の異常検知が適用可能であるが、様々な形状の像が点在する非破壊検査での欠陥の場合、これが適用できる場合は少ない。(2)の場合、教師となる巨大なデータベースが不可欠であるが、あまりに多種多様な欠陥が分布する非破壊検査の場合は有効なデータベースを整備することは大変な作業となる。

このため、自動検査として実用化されたものは、製品検査での異物混入検査のように、欠陥の形状が限られた対象に絞られる。医療検査におけるガンの検出のような場合でも、AIは警告を発する程度に留まり、最終判断は担当医師が行うことが多い。非破壊検査も医療検査と同様に重い社会的な責任を負っている。このことも自動検査の大きな壁になっていると考えられる。

表6 利用可能な放射線粒子

放射線粒子の種類	重粒子		軽粒子			光子
	陽子	中性子	電子	中間子 (ミューオン)	中性微子 (ニュートリノ)	X線 γ線
材料中の透過力	数 μm	数十 cm	数 cm (~MeV)	数 mm (~MeV)	km 以上	数 cm
寿命	安定	880sec	安定	2.2μsec	安定	安定
線源	加速器	原子炉 加速器	加速器	宇宙線 加速器	宇宙線	X線管 RI
特徴	表面検査	元素別の 検出	高輝度	大型試料 の検査	検出器が 巨大	線源の入手が容易

4. 放射線非破壊検査における次世代検査の検討

第4世代の放射線非破壊検査(RT)という意味では、第一に新たな放射線プローブの利用を考える必要がある。現在 RT では X/γ線と中性子線が利用されているが、放射線には多くの種類がある。表6に非破壊検査として利用できる可能性があると考えられる放射線を列挙した。放射線粒子の中で適当な透過力を持ち、寿命が比較的長いものを選んでみる。放射線粒子は大きく分けて、重粒子、軽粒子、光子に分けることができる。重粒子は透過力が小さく、多くはマイクロメートル(μm)程度であり、利用する場合でも表面検査に限られる。重粒子の中では中性子のみが十分な透過力を持っている。この粒子の透過力は、材料の密度だけでなく元素によって大きく異なる。一方、軽粒子の中で利用可能なものとして電子と中間子(ミューオン)があげられる。X線では10cm程度が限度となる。放射線のエネルギーが高くなると透過力は増大するが、その変化は粒子によって大きく異なる。これらの放射線粒子の材料中での透過力の概略を図1に示す。図は縦軸に鉄中の飛程(range)、横軸に粒子のエネルギーを示している。図では飛程が長いほど透過力が強いことを意味している。図中に実線で中性子(n)、光子(X/γ)、電子(e)、中間子(μ)の飛程とエネルギーの関係を示している。

放射線粒子の透過力はエネルギーに強く依存する。

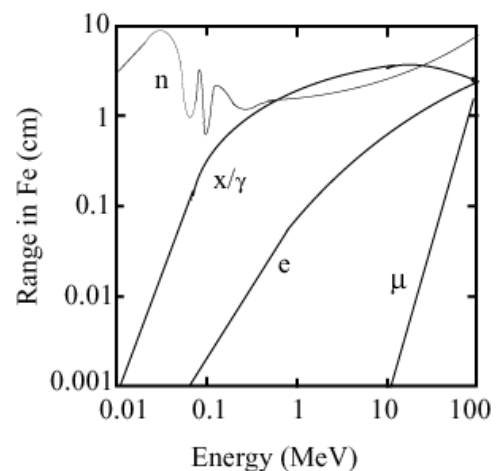


図1 放射線粒子の鉄中の飛程^{2),3)}

通常用いる数百 keV の X 線では、図のように鉄中の飛程は 1cm 前後となる。現実の透過検査は飛程の数倍程度の厚みが限界であると言われている。中性子の場合は特にエネルギーによる変化が複雑であるが、1MeV 付近のエネルギーでは、X 線と同程度の透過力である。電子 (e)、ミューオン (μ 、中間子) などの荷電粒子の場合、低エネルギーでは、X 線などと比べて、はるかに低い透過力であるが、100MeV 程度の高エネルギーになれば、X 線と同程度の透過力となる。この程度のエネルギーの放射線粒子が得られれば、非破壊検査にも十分利用できることが分かる。これらの新たな放射線の中で、最も実用に近く、様々な画像センシング技術を含む例として電子線と中性子線の例を紹介したい。

[電子線] エネルギーが数 MeV の電子線は数 cm 程度の透過力が期待でき、透過写真を撮れる可能性がある。線源としては加速器が必要となるが、数 MeV 程度ならば卓上サイズの小型加速器が利用可能である。図 2 に大阪府立大学 (現大阪公立大学) の電子線形加速器を用いて 6 MeV の電子線を 1 円玉に照射した時の透過画像の例を示す。画像は IP (イメージングプレート) を用いて測定している。6MeV 程度のエネルギーの電子線は 1 円玉をすべて透過してしまう。



図 2 1 円玉の電子線透過画像⁴⁾

そのため透過画像の濃淡は、アルミの厚さでは変化しない。エッジの有無による散乱線の変化に対応する。このため画像の濃淡は、アルミの厚さが変化した部分に現れるエッジ強調画像である。電子線形加速器ではパルス状に電子を放出することから、これを利用することもできる。図 3 は、大阪府立大学での実験例である。(a)に示すようにアクリル製の水槽中に空気を吹き込んで発生する泡の撮影を行った。(b)はその様子をビデオ撮影したものである。発生した泡は水中を上昇するが、30 フレーム/秒程度のビデオ撮影では、個々の泡が認識できないので、泡の上昇画像は重なってしまいパイプ状の画像となっている。同じ実験体系を 6MeV の電子線で透過撮影したものが図 3 (c)である。ここでは上昇する泡の個々の形状が認められる。用いた電子線は 4 μ sec のパルスビームであることから、この画像は 25 万分の 1 秒のシャッター速度を持ったストロボ画像であることが分かる。電子線形加速器のビームを用いた場合、このような速い動きの検出にも有効であることが分かる。

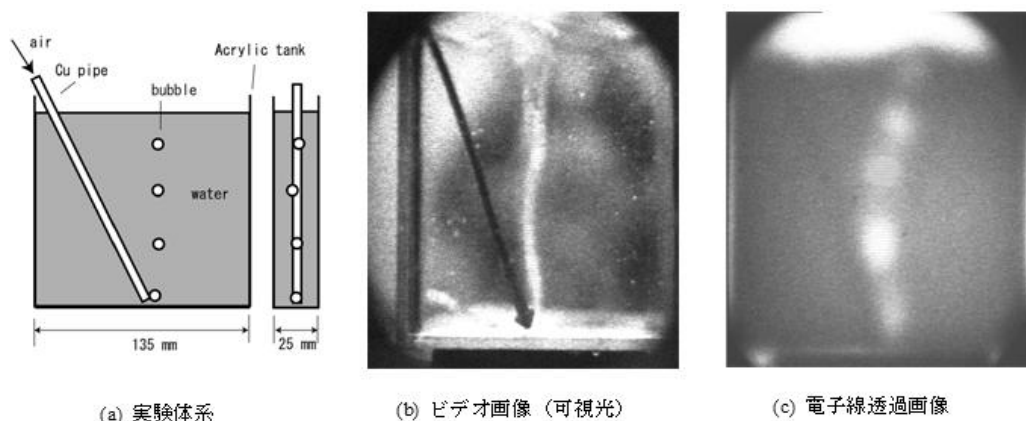


図 3 電子線を用いたストロボ透過画像⁵⁾

[中性子線] 中性子ラジオグラフィ(NRG)は 1960 年に登場しているが、中性子源が原子炉に限られていた時期は一般の産業利用は困難であった。その後、加速器中性子源が開発された

ことから実用化は近いと期待されたが、大型の加速器は経済性に問題があり、普及は進んでいない。筆者のグループは高感度の中性子画像装置の開発を行ってきた。これは、小型加速器、RI線源等の弱い中性子源でも実用に耐える画像を得ることをめざしたものである。この高感度化が最も進んだものが、2次元光子計数装置と中性子有感シンチレータを組み合わせた装置であり、従来のNRG装置の1万分の1から百万分の1という弱い中性子場においても中性子画像を得ることに成功している。

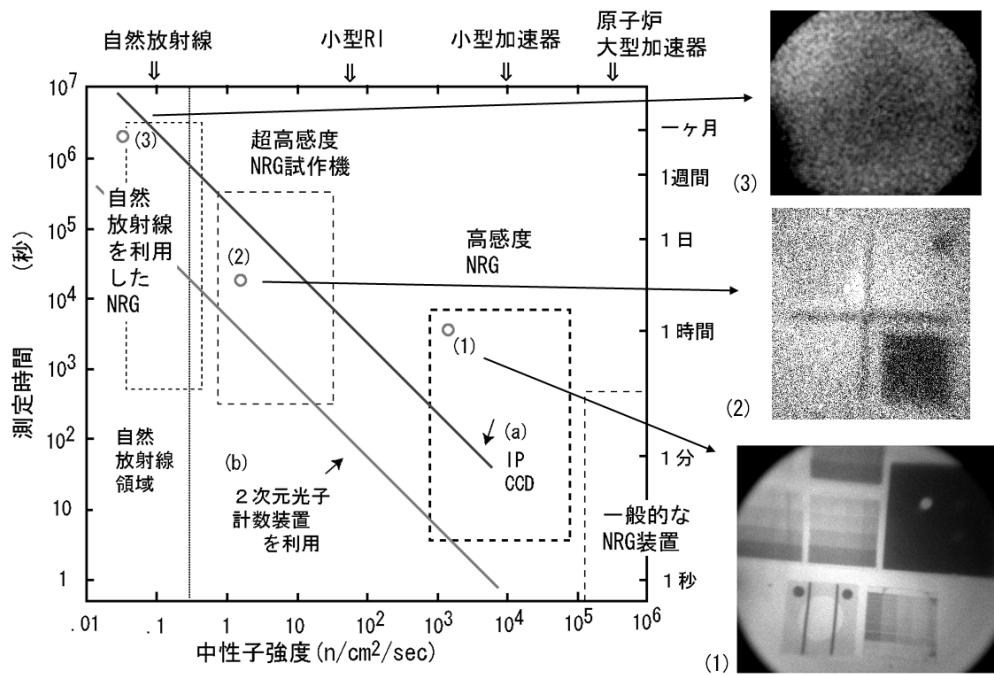


図4 高感度中性子ラジオグラフィ

図4は、横軸に中性子強度、縦軸に露光時間を対数で示している⁶⁾。弱い中性子場であっても、露光時間を長くすれば、同じような画像は得られるはずであるが、長時間撮影を行った画像は大きく劣化している場合が多い。筆者のグループは、3種類の撮像装置（イメージングプレート、冷却型CCD、2次元光子計数装置）を用いて高感度中性子画像装置の開発を行ってきた。特に、2次元光子計数装置を用いた装置は、低中性子領域で優れた特性を示した。図中の(1),(2)の領域で得られた中性子画像を図4右の(1),(2)に示す。図中の白丸は、測定を行った中性子強度、測定時間をそれぞれ示している。図は厚さ0.5mmのカドミウム板でパターンを構成した試料を撮像している。

次世代の放射線非破壊検査を考えた場合、放射線源と画像センサーの将来像を考えることが最初のステップとなる。放射線としては、X線、 γ 線、中性子線がもっとも実用に近く、続いて、中間子、中性微子などの可能性もある。線源としては宇宙線由来の放射線の利用と加速器の利用が有望であると考えられる。また画像検出器の開発も、パターン認識を中心とした画像処理技術の開発、経済性の向上が鍵であると考えられる。これらの技術開発は、現在も進行しているものであり、NDE 4.0に取り上げられるものと考えられる。

[参考文献]

- 1) 中畑和之編「第2回NDE 4.0 シンポジウム」非破壊検査、74巻9号(2025) pp. 355-387
- 2) 山崎文男編、実験物理学講座26、放射線

- 3) 国立天文台編、理科年表 (2012)
- 4) H. Shimomura, et al., *Progress in Nuclear Science and Technology* (4) (2014) pp. 721-724
- 5) R. Taniguchi, et al., *Proc. 3rd US-Japan NDE Symposium* (2005) pp. 401-406
- 6) R. Taniguchi, et al., *Physics Procedia* (69) (2015) pp. 374-381

講演者略歴



谷口 良一 (たにぐち りょういち)

所 属 元大阪府立大学

住 所 〒565-0854 大阪府吹田市桃山台 2-2-1-1

連絡先 TEL/FAX : 06-6872-3255、E-mail:tan65@outlook.jp

学 職 歴 1982年 大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了

1982年 大阪府立放射線中央研究所 研究員

1990年 府立大学との統合にともない、大阪府立大学、助手、
講師、助教授、准教授を経て

2009年 大阪府立大学産学官連携機構放射線研究センター 教授

2020年 大阪府立大学を退職 現在に至る

研究・活動分野など 現在は非破壊検査協会を中心に活動を行っています。

テーマ3「新たな研究開発の動き」



宇宙の放射線と原子力利用

宇宙航空研究開発機構研究開発部門
ファンクションマネージャ 川崎 治

宇宙の放射線環境とその影響については原子力業界からはなじみの薄い分野と思われ、また過去の米ソ（ロシア）を中心とした宇宙探査ミッションでの原子力利用、また将来の展望についても十分に知られていないものと思われる。これらについて解説する。

宇宙の放射線と原子力利用

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
研究開発部門 第一段再使用飛行実験 (CALLISTO) プロジェクトチーム
ファンクションマネージャ
宇宙探査イノベーションハブ 主管研究開発員
川崎 治

1. はじめに

宇宙の放射線環境とその影響については原子力業界からはなじみの薄い分野と思われ、また過去の米ソ (ロシア) を中心とした宇宙探査ミッションでの原子力利用、また将来の展望についても十分に知られていないものと思われる。これらについて概説する。

2. 宇宙放射線の発見

宇宙空間は放射線の照射環境ともいえる放射線にあふれた環境であることが発見されたのは 1912 年のオーストリアの科学者 V. F. Hess による気球実験である。彼は自ら高度 4km まで昇って観測、機体の電離度が高度上昇に伴って増加することを観測し、これはエネルギーの極めて高い放射線が宇宙から入射していると推論した。これは飛翔体による宇宙科学研究の嚆矢でもあり、彼はこの業績により 1936 年にノーベル物理学賞を受賞することになる。その後、1930 年代になり宇宙物理学的な研究と新粒子の発見がもたらされ、宇宙線研究が学問の一つの分野として発展していくことになる。

3. 地球をとりまく宇宙放射線環境

地球に影響を及ぼす宇宙放射線には大きく分けて 3 つの種類に大別される。それは

- (1) 太陽粒子線
- (2) バンアレン帯補足粒子線
- (3) 銀河宇宙線

である。(1)の太陽粒子線は太陽活動に伴って放出される高エネルギー粒子であり、電子や陽子、あるいは重粒子イオン (1%程度) が常に太陽から放出されている。これは太陽フレアやコロナの衝撃波で加速され、数 keV から数 GeV のエネルギーを持つ。巨大な太陽フレア時には静穏時の太陽活動の 1000 倍程度の粒子が一気に放出され、地球近傍の人工衛星の故障原因になりうる場合があり、また国際宇宙ステーションで活動する宇宙飛行士への被曝量が増大する原因にもなりうる。(2)のバンアレン帯補足粒子線は地球磁場によって捕らえられた、大多数が太陽起因の電子・陽子からなる比較的弱い MeV レベルのエネルギーを持つ放射線である。(3)の銀河宇宙線は太陽系外 (銀河遠方) から飛来する高エネルギー粒子である。超新星爆発に由来すると言われているが、粒子の加速メカニズムはいまだ不明な点が多い。太陽系において数 MeV \sim 10⁹GeV まで非常に広いエネルギー分布を有する。ピークは 1 GeV 付近であり粒子の 98%が陽子及び重粒子イオン、2%が電子・陽電子で構成されている。特に LET の大きな重粒子は半導体部品との相互作用を誘発し、様々な現象 (シングルイベント) を起こす原因となっている。

4. 半導体デバイスと放射線の基本相互作用

宇宙開発利用において宇宙放射線が与える影響は宇宙へ進出する人体に対するものと半導体デバイスに対するものがある。

(1) 人体に対する影響

地上で暮らす人間が自然から受ける放射線量は世界平均で約 2.4mSv/年と言われており。そのうち宇宙線によるものは 0.39mSv/年といわれている。1項で述べたように高度が高くなるほど放射線の影響は増え、東京-ニューヨーク往復の飛行機旅行では 0.2mSv を被曝するともいわれている。現在、再び月へ向かうことを主眼の一つとした米国主導のアルテミス計画が進行中であるが、月は磁場が弱く、大気と磁場に守られていない月面での年間被曝量は 420mSv に達するといわれている。これは地上における宇宙放射線の影響の 1000 倍以上であり、人類が月面上で恒久的な拠点を築くうえで効果的な遮蔽など解決すべき課題の一つである。

(2) 半導体デバイスに対する影響

銀河宇宙線が起因と推定される予期せぬデジタル回路の軌道上の誤動作発生に関する重要な最初の論文の一つが 1975 年の IEEE Transactions on Nuclear Science に発表された「Satellite Anomalies from Galactic Cosmic Rays」[1]であり、軌道上の放射線フラックスモデルからの誤動作のイベント発生頻度の予測値が現象に符合することを確認したものである。1970 年代から 1980 年代初頭は宇宙放射線による半導体への影響の研究が重要な研究の一分野として確立された時期である。放射線による代表的なデバイスへの影響は大きく 2 つに分かれ、ひとつは「変異損傷」もう一つは「電離損傷」である。

「変異損傷」は端的には放射線粒子が対象となるデバイスを構成する半導体結晶格子へ相互作用を起こした結果の結晶格子の変位によってデバイスが劣化することに起因するものであり、「電離損傷」は放射線が対象となる半導体デバイスを通過するときの LET によって発生した電荷によって様々な半導体の誤動作、時には永久故障を引き起こす損傷である。

「変異損傷」は太陽電池の出力特性の劣化、「電離損傷」はメモリデバイスのビット反転やロジック回路の演算ミス、パワーデバイスの破壊や CMOS 全般のラッチアップを引き起こす。

5. 耐放射線半導体デバイスの研究開発

半導体の耐放射線技術開発の手法としては、まず事象を十分に観測してメカニズムを推定することが必要である。近年様々な半導体の微細化とともにその構造が進化し、また Si にとどまらない新たな材料が適用されている、まずはこの構造と材料特性を十分に把握し、電界の集中など脆弱な点を推定することがエラーモードの推定につながる。エラーモードが推定できた後でこの特徴によるエラーを端的に再現して評価できる評価手法を選定する必要がある。評価手法の一番重要な点は、エラーを発生する粒子を模擬する加速器の照射技術であり、それを含めた適切な計測評価技術を確立することが必要である。照射試験を踏まえて事象のメカニズムを特定し、半導体設計への対策とすることが耐放射線半導体のオーソドックスな方法である。

従来はこのオーソドックスな方法により、耐放射線構造の提案や回路技術の提案、あるいは製造プロセスの宇宙用への仕様特化 (Radiation Hardening-By-Design、あるいは Radiation Hardening-By-Process) などが行われてきたところであるが、複雑な構造と微細化が日々進歩する半導体へ適用するに難しい局面もあり、近年では、そもそも放射線起因ノイズの影響を受けない電子部品技術の導入 (原子スイッチやスピン注入メモリ (STT-MRAM)) やデバイス

の駆動原理を電氣的なものから光駆動へ置き換える研究（シリコンフォトニクス）が進んでいる。

6. 宇宙における原子力のニーズ

前項までは宇宙「放射線」の影響を中心に述べたが、ここからは「原子力」技術の宇宙におけるニーズについて述べる。

原子力技術の宇宙開発利用におけるニーズの中心は宇宙探査にある。アルテミス計画から始まる月面の探査と収益化、人類の生存圏の拡大と火星以遠への進出を考えた場合、そのエネルギー源としては原子力エネルギーに頼らざるを得ないのが事実である。

地球周辺の平均太陽光エネルギーは約 1.36kW/m^2 であり、太陽電池による利用効率を電力系ロスを含めて 15%とした場合に 500W の人工衛星を動作させるのに必要な太陽電池面積は 2.4m^2 ですむ。一方太陽からの距離が 5.2 天文単位である木星周辺で 500W の電力を得ようとすると、同様の条件では 64.9m^2 となり宇宙機の構造上限界ともいえる大きさとなる。必然的にこれより遠い土星系以遠の探査には太陽電池は使用できない。

またアルテミス計画で進む月面探査においては、月では地球時間の 14 日ほど夜が継続する。大気のない月での夜間の月表面温度は -170degC といわれており、探査活動を一旦停止したとしても機器の機能維持のために「越夜」が必要である。仮に平均的な家庭の電力の 1/3 程度の電力である 1kW を賄うのに現在の宇宙用リチウムイオン電池の性能は高々 250Wh/kg であるため、1kW を供給する場合、その重量は $4\text{kg} \times 354\text{h} = 1,416\text{kg}$ となる。月面への物資輸送費は現在のところ 1kg あたり 1 億円とも 2 億円ともいわれており、この重量を輸送することは不可能である。一方このエネルギー供給に原子炉を想定すると電気出力 1kW に対して約 40kg 程度の重量ですむことが予測される（過去の米国の SP-100 計画ベース）。

このため原子力の利用は探査を中心とした将来の宇宙開発利用においては不可欠なものであるといえよう。

7. 宇宙における原子力利用の実例

(1) 宇宙用原子力技術の概観

宇宙活動で利用が想定される原子力エネルギーはそのエネルギー源によって大きく 2 種に大別される。一方は放射性同位体（ラジオアイソトープ）の崩壊熱を用いるものであり、もう一方は核分裂を用いた宇宙用の原子炉である。

その用途としては、前者は比較的総エネルギー量が少ないため宇宙機の保温や熱電発電による電源として小規模な探査機に用いられ、後者はより大きな電力を要するシステムの電力源やロケットの推進力としての利用が想定されている。

(2) 放射性同位体（ラジオアイソトープ）の利用

長半減期の同位体を用いることで数十年単位という非常に寿命の長いエネルギー源が得られ、Po-210 や Pu-238、Sr-90 などが使用されている。海外では米国 NASA をはじめとして宇宙探査においては確立した技術である一方、日本としては技術が立ち遅れており、令和 6 年度宇宙戦略基金事業での公募において「半永久電源システムに係る要素技術」としてアメリカシウム利用が前提とされた検討が始まったところである [2]。

(2-1) RHU (Radioisotope Heater Unit)

放射性同位体（ラジオアイソトープ）の崩壊熱を保温用熱源として利用するもの。

(2-2) RPS (Radioisotope Power Source)

放射性同位体（ラジオアイソトープ）の崩壊熱で熱電発電を行うもの。あるいは熱電子を直接利用する熱電子発電を行うもの。原子力電池とも呼ばれる。前者は特に RTG (Radioisotope thermoelectric generator) と呼ばれ米国 NASA の惑星探査ミッションを中心として海外において十分な実績がある。

(3) 原子炉の利用

原子炉での核分裂の熱あるいは熱電変換を利用した推進力としての利用と電力源としての利用に分かれる。

(3-1) 推進力としての利用

所謂原子力ロケット。熱を利用して水素等の軽元素の推進剤を加熱、噴射して推進力を得る NTP (Nuclear Thermal Propulsion) 及び発電した電力でイオンエンジンなどを駆動する NEP (Nuclear Electric Propulsion) が主なものである。前者については 1960 年代から 1970 年代にかけて米国で進められた「NERVA/Rover 計画」が代表的であるが、地上試験を経た後に計画は中止されており、世界的には実利用に至っていない。

(3-2) 電力源としての利用

電力源としての利用は人工衛星等宇宙機の電源及び将来的な探査拠点での電源が想定される。

過去、原子炉を宇宙において積極的に利用したのは旧ソ連であり、US-A (RORSAT) プロジェクトと呼ばれる偵察衛星 Cosmos に搭載された実績がある。BuK (電気出力 3kW)、TOPAZ (電気出力 5kW) と呼ばれる原子炉が知られており、合計 35 ミッションへ用いられていることが判っている。米国は SNAP-10A や SP-100 などの開発計画を進めたが、実際に軌道上で運用されたのは SNAP-10A のみである[3]。

月面等、将来の探査拠点での電源としての原子力発電については、米国において 2018 年 3 月 KRUSTY (Kilopower Reactor Using Stirling Technology) プロジェクトの実験結果をベースに、2021 年に設計コンセプト提案を求める研究提案募集 (RFP) が NASA から出され検討が進められているところである[4]。

参考文献・資料

- [1] D. Binder, E. C. Smith and A. B. Holman, "Satellite Anomalies from Galactic Cosmic Rays", in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 22, no. 6, pp. 2675-2680, Dec. 1975, doi: 10.1109/TNS.1975.4328188.
- [2] 公募要領 技術開発テーマ ～半永久電源システムに係る要素技術～
https://fund.jaxa.jp/content/uploads/koboyoryo_20.pdf
- [3] 例えば Nuclear Powered Payloads https://space.skyrocket.de/doc_sat/nuclear.htm
- [4] NASA Announces Artemis Concept Awards for Nuclear Power on Moon
<https://www.nasa.gov/news-release/nasa-announces-artemis-concept-awards-for-nuclear-power-on-moon/>

講演者略歴



川崎 治 (かわさき おさむ)

所属 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門
第一段再使用飛行実験 (CALLISTO) プロジェクトチーム
(併任) 宇宙探査イノベーションハブ

住所 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

連絡先 TEL : 070-3117-7496、E-mail:kawasaki.osamu@jaxa.jp

学職歴 1991年 大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻博士前期課程 終了

1991年 宇宙開発事業団 (当時) 入社 種子島宇宙センター電気課

1994年 研究開発部門 太陽電池グループ

1997年 HOPE-X (日本版スペースシャトル) プロジェクト

1998年 宇宙ステーション補給機 (HTV) プロジェクト 電力系

2012年 はやぶさ2プロジェクト 電力系

2015年 研究開発部門 宇宙用MPU開発プロジェクトサブマネージャ

2025年 現職
宇宙探査イノベーションハブ 主管研究開発員 併任

研究・活動分野など 宇宙開発利用の研究及び開発に従事し、設計、試作、製造、試験、検証に取り組むとともに、信頼性管理、品質管理を含めたシステム工学及びプロジェクトマネジメントに携わってまいりました。2021年度からは「宇宙探査イノベーションハブ」に所属し、宇宙に経験のない企業・大学・研究団体を中心に、相手方が所有するイノベティブな技術を宇宙に適用するための課題と、相手方が地上事業化・事業版図の拡大において識別する課題を共通的にとらえてオープンイノベーションにて解決する事業を行ってまいりました。現在、この職務を併任しつつ研究開発部門第一段再使用飛行実験 (CALLISTO) プロジェクトチームにて日本の再使用ロケット技術獲得のためシステムインテグレーションを統括しています。

テーマ3「新たな研究開発の動き」

⑨

もんじゅサイトの新試験研究炉の現状

福井大学附属国際原子力工学研究所
所長 宇埜 正美

令和5年3月より始まった「もんじゅ」サイトに設置予定の新試験研究炉の詳細設計では、JAEAが主に炉心設計と地盤調査を、京都大学は装置の検討・開発を担当している。福井大学は中性子利用の部門の設置を目指したカリキュラム構築の他、地元関連施策検討部会で利用促進団体や複合施設に関する議論に加わるとともに、福井県の地元企業を集めた研究会にも協力している。当日はこれまでの詳細設計の成果について紹介する。

もんじゅサイトの新試験研究炉の現状

福井大学附属国際原子力工学研究所

宇埜 正美

1. はじめに

「もんじゅ」の廃炉を受けて設置が決まった新試験研究炉については、令和2年度より文科省の受託事業「もんじゅサイトに設置する新たな試験研究炉の概念設計及び運営の在り方検討」により概念設計が始まった。ここでは、日本原子力研究開発機構（JAEA）が中心となり炉の設計・設置・運転および地質調査を行うワーキンググループ1（WG1）、京都大学が中心となり幅広い利用・運用について検討するWG2および福井大が中心となり地元関係機関との連携を構築していくための活動を行うWG3に分かれて活動を行ってきた。令和5年3月から新たに始まった詳細設計は、JAEAが受託し京都大学および福井大学との共同研究として行われているが、引き続きJAEAが中心となり炉心設計や地質調査、京都大学が中心となり新試験研究炉に設置する実験装置の検討が行われている。一方、これまでの福井大学が担当してきた地元との連携構築については、それ以外の地元関連の検討事項と合わせて地域関連施策検討WGで議論していくこととなった。

これらの活動の成果は、年2回開催されるコンソーシアム会合（概念設計の期間はコンソーシアム委員会）において報告されている。本報告では、令和7年10月20日に開催された第5回コンソーシアム会合までで報告された成果を元に、もんじゅサイトの新試験研究炉の現状を、主に福井大が担当する地域施策関連の活動を中心に報告する。なお、各コンソーシアム会合の資料はJAEAのHPにアップロードされているので、詳細はそれを参照されたい。

2. 炉心設計と地盤調査

JAEAは概念設計において、図1^[1]に示すように安全性～将来性までの5つの性能目標を設定、5x5のce20という炉心仕様を作成し、原子炉の成立性、制御手法の検討および原子炉の性能の評価を行い、JRR-3の半分の出力で同等の性能が得られる見通しを得ている。詳細設計においては^[2]、反射体や減速材などの炉心構造物の仕様の策定や実験設備を配置した場合の核的制限値や熱的制限値への影響評価など実験設備等を含めた炉心構造物の設計、通常運転時に加え異常な過渡変化時および設計基準事故時の評価も行っている。また、基本設計より始まった地質調査を継続するとともに令和6年10月に公表された国土地理院の推定活断層の調査も開始している。

3. 実験装置の検討

京都大学は概念設計においてビーム実験装置の検討を行い、図2^[1]に示すように、汎用性や利用頻度の観点から4つの装置を最優先で設置し、新試験研究炉の存在意義をアピールする必要があるという検討結果を示した。加えて照射利用についても検討し、放射化分析設備も最優先で設置するとしている。詳細設計では、新試験研究炉の稼働開始時に最新の知見を反映した実験装置を導入するため、京都大学が中心となり国内の専門家とタスクフォースを組

み、装置開発だけでなく人材育成を含む要素技術や解析手法の開発なども行っている。^[2]

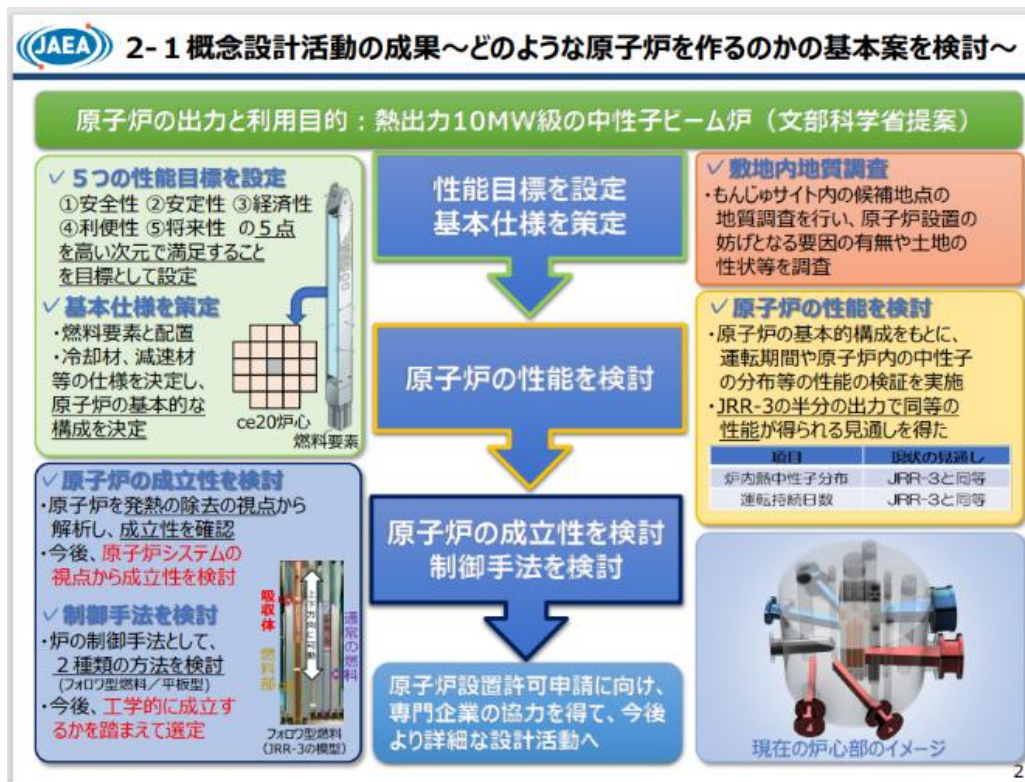


図1 概念設計の結果（炉心設計）



図2 概念設計の結果（装置検討）

3. 地域関連施策

概念設計における福井大学のミッションは、産業利用として有力な中性子ビームや照射利用技術を検討し、既存炉のトライアルユースを促すなど地元企業との意見交換や情報発信により伴走型連携の仕組みを構築することと、福井大学から福井県内の企業を中心に中性子利用に長けた人材を輩出するためのカリキュラムの構築である。さらに福井県が地元企業向けに行う情報発信やニーズ調査への協力である。

詳細設計では、図 3^[3]に示すように、この福井大学の活動は、その他の地域関連政策と合わせて地域関連施策検討 WG に組み込まれた。この WG は、主に利用促進体制について検討するサブグループ 1 (SG1)、主に複合拠点について検討する SG2、これまで福井大が行ってきたカリキュラム構築を含む人材育成について検討する SG3 に分かれて活動している。以下各 SG についての活動を簡単に解説する。

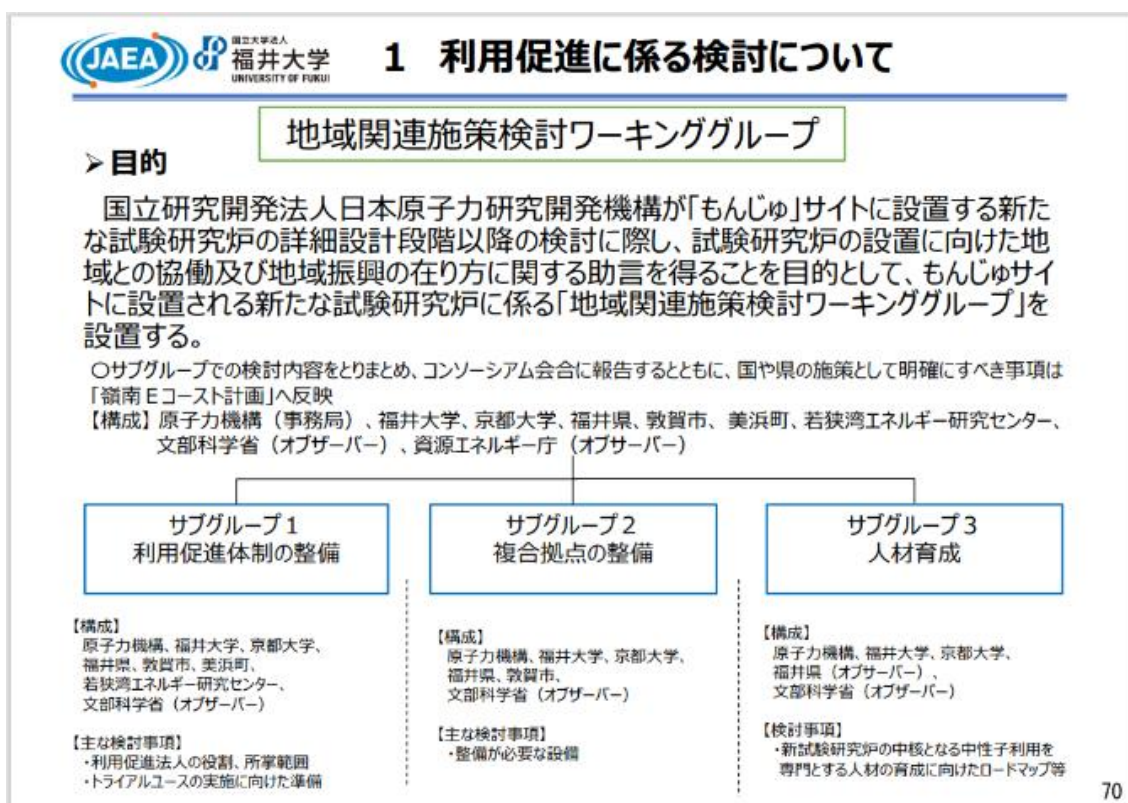


図 3 地域関連施策 WG

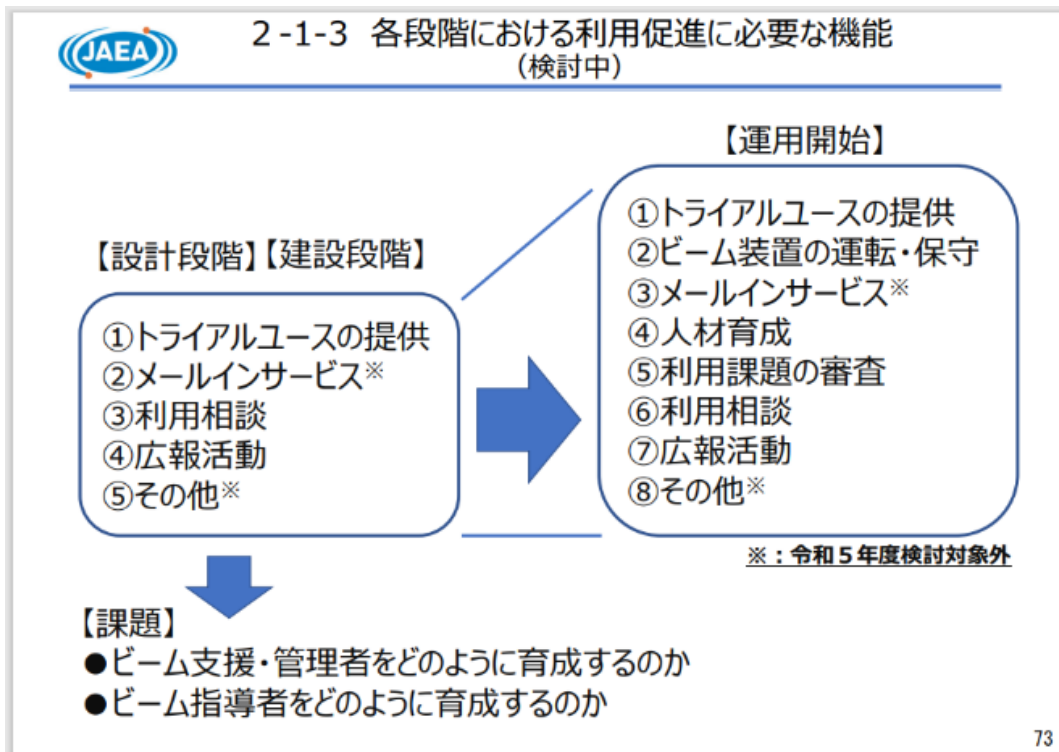
3.1 SG1

この SG では、JAEA、京都大学、福井大学の他、地元自治体、県の機関である若狭湾エネルギー研究センターが加わり、利用促進法人の役割や所掌範囲、トライアルユースの実施に向けた準備について検討している。これまでに例えば、図 4^[3]に示すように、各段階（設計～運転開始）での利用促進法人の機能を調査した。また、これまでの既存炉のトライアルユースの実績や総合科学研究機関（CROSS）の利用促進活動なども調査している。

3.2 SG2

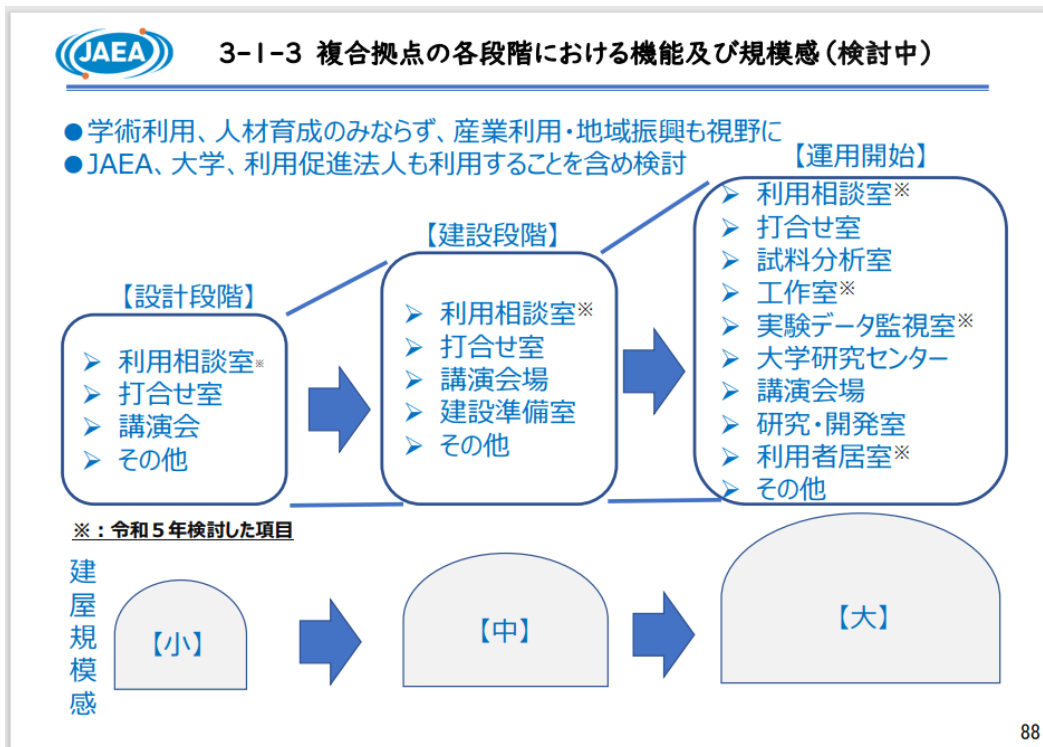
SG では、JAEA、京都大学、福井大学の他、福井県と敦賀市が参加して、複合拠点に必要な機能を検討した。その結果、図 5^[3]に示すように複合拠点の機能と規模を設計、建設および運

用開始の各段階に分けて整理している。



73

図4 利用促進法人の機能



88

図5 複合拠点の機能と規模

3.3 SG3

福井大学が中心となって行っている SG3 のミッションは福井大学におけるカリキュラムの構築である。概念設計では中性子利用に関する研究・実用例を広く調査し、それを元に福井大学でセミナーを行い、中性子利用に関する理解とそれを用いた研究の促進を図った。この概念設計の伴走型連携の構築活動において、地元企業から中性子利用は高度な知識が必要なので大学教員との共同研究で利用したいという要望が出されたこと、また構築したカリキュラムは、中性子を利用する研究室に配属あるいは配属希望の学生が受講することを考えると、まず福井大学内で中性子を利用した研究を行う教員を増やし、その教員の研究内容を元に、その研究室に配属されたまたは配属される学生の教育に必要なカリキュラムを構築する必要があることがわかった。

そのために詳細設計では、福井大学内の部局間を超えた研究支援制度である研究ファームに「試験研究炉における中性子科学研究の調査研究」を設立し、そこを通じて中性子を利用している或いは利用する予定のある教員に研究資金の支援を行う。支援を受けた教員にはその研究および進捗をセミナーで紹介してもらい、それを元に必要なカリキュラムを講義用資料 (ppt) として構築することとした。この講義用資料の作成は、JAEA からクロスアポイントメント制度で雇用した特命教授により行われた。これまでに作成した講義用 ppt を図 6^[2]に示す。

福井大学
UNIVERSITY OF FUKUI
University of Fukui

3-2 カリキュラム用教材

ミニセミナーで作成した講義資料は寄せられた意見を反映するとともに、より多くの意見を集めるためにSG3のメンバーに加えてコンソーシアム委員に、期間限定で公開する

- 第1回：中性子概論
(中性子で何ができるのか, 中性子実験施設, 中性子の有用性, 中性子の基礎知識, 中性子の散乱と吸収)
- 第2回：中性子散乱法 1
(中性子散乱の分類, 中性子回折, 中性子磁気回折, 中性子反射, 中性子小角散乱)
- 第3回：中性子散乱法 2
(全散乱法, 中性子スピンエコー法, イメージング)
- 第4回：中性子実験施設
(定常中性子源 (原子炉), パルス中性子源 (加速器), 定常中性子源とパルス中性子源の比較, 小型中性子源 (加速器), その他の中性子源)
- 第5回：中性子実験装置
(角度分散法と波長分散法, 中性子ビーム実験装置)
- 第6回：代表的な研究例
(機能性材料, 建築・工学分野, 生命科学・農業分野, 電気・電子関連原子力関連分野)

SG3~コンソ員まで大学サーバーにアップ

2025/3/17 第4回コンソーシアム会合 79 / 86

図 6 カリキュラム用教材

本年度は、この作成した ppt に音声を入れ、クラウドサーバー上の講義配信システムにアップロードし、広く関係者に配信してコメントをもらい、講義資料のブラッシュアップを進めている。


福井大学ではこれ以外に学内の中性子利用研究の促進のため、上記特命教授による工学部の各学科の教員会議で試験研究炉と中性子利用を紹介するセミナーを実施し、また福井大教

員および学生を対象とした JRR-3 他東海・大洗地区における中性子関連施設の見学会なども実施している。

3.4 ふくい新試験研究炉利活用促進研究会

福井県は以前より地元企業等のニーズ調査や福井大学の工学部以外の学部である医学部、教育地地域学部、他大学である福井工大、福井県立大学さらには高校生に対しても試験研究炉と中性子利用の情報発信を行ってきた。それまでの活動でかなりの数の地元企業に情報発信をしたものの中性子利用の理解はあまり進んでいないのが実情であった。利用促進のための理解活動に加えて運転開始後の利用の利便性を考えると地元が必要とする実験装置や利用促進体制に対する要望をとりまとめ、内容によっては設計の早い段階で、国等へ提出する必要がある。そのために、令和7年3月に福井県が主催して、地元企業を集めた当研究会が設立された。図7^[6]に示すように、現在研究会は4つの県内経済団体、22の県内企業、4つの学術機関、3つの公的機関、7自治体で構成され、機械・建築、電気・磁気、繊維・化学、原子力の4つの分科会に分かれて活動している。本年度は、企画検討委員会、分科会、総会を2回ずつ行い、地元企業の要望をとりまとめる予定である。この研究会の会長および4つの分科会の主査は福井大教員が務めている。

ふくい新試験研究炉利用促進研究会

University of Fukui

福井県「ふくい新試験研究炉利活用促進研究会」の発足

目的

- ・新試験研究炉に関する情報提供、中性子利用に必要な支援体制の構築
- ・地元が必要と考える実験設備や利用促進体制の取りまとめ、国等への提言

事業内容

- ・新試験研究炉の利活用促進に向けた情報共有、検討
- ・県内企業等による既存研究炉等を活用した中性子利用の推進
- ・新試験研究炉の整備・施設や利用促進体制に関する提言

参加機関: 4経済団体、22県内企業、4学術機関、3公的機関、7自治体
3オブザーバー

活動実績

第1回 ・企画検討委員会 : 7月10日
・分科会 : 8月4日 於アオッサ
武田先生の講演
・総会 : 8月25日 於あいあいプラザ
(講演)
「大強度陽子加速器J-PARCでの中性子産業利用」 茨城大学・小泉教授
「日華化学における研究開発活動への量子ビーム活用の試みと新試験研究炉への期待」 日華化学 稲継取締役
・4つの分科会(機械・建築、電気・磁気、繊維・化学、原子力)で活動

第2回今年度中に実施予定
研究会会長と4つの分科会主査を福井大教員が担当。

2025/10/20第5回コンソーシアム会合24
77/80

図7 ふくい新試験研究炉利用促進研究会

4. おわりに

もんじゅサイトに設置予定の新試験研究炉は詳細設計段階に移行した。敷地内における推定活断層の問題が新たに加わったが、主契約企業が三菱重工に決まり、JAEAが中心となって行っている炉心設計や地質調査、京都大学が中心となって行っている実験装置の検討も順当に進捗している。また地域関連施策検討WGによる利用促進法人や複合施設の議論も活発に行われ、福井大学の担当するカリキュラム構築も一通りの講義資料の作成まで進んでいる。

一方で、福井県が中心となっていて行われている地元企業への理解・利用促進活動もかなりの活動を行っているが、地元企業での理解は十分に進んだとは言えず、活動の継続が必要である。さらに、運転開始後の利用の活性化のためには、今後は福井県内だけではなく、北陸・関西・中京圏においても、情報発信を行っていく必要がある。この関西地方に対しては、この大阪ニュークリアサイエンス協会の活動を通して、情報を発信していきたい。

参考文献・資料

- [1] 科学技術学術審議会 原子力研究開発・基盤・人材作業部会（第16回）
https://www.mext.go.jp/content/20230605-mext_genshi-000030249_6.pdf
- [2] 第4回コンソーシアム会合（令和7年3月17日）
<https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2025/031701/s01.pdf>
- [3] 第2回コンソーシアム会合（令和6年3月25日）
<https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2024/032501/s01.pdf>
- [4] 第3回コンソーシアム会合（令和6年10月29日）
<https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2024/102901/s01.pdf>

講演者略歴



宇埜 正美 (うの まさよし)

所 属 福井大学附属国際原子力工学研究所 所長・特任教授

住 所 〒914-0055 福井県敦賀市鉄輪町 1-3-33

連絡先 TEL/FAX : 0770-25-0039、E-mail: uno@u-fukui.ac.jp

学 職 歴 昭和 63 年 大阪大学大学院工学研究科博士後期課程原子力工学専攻修了
昭和 63 年 博士 (工学) (大阪大学)「トリウム窒化物の合成とその酸化挙動に関する研究」

昭和 63 年 (株) 日本核燃料開発入社

平成 3 年 大阪大学工学部 助手

平成 10 年 大阪大学工学部 助教授

平成 21 年 福井大学附属国際原子力工学研究所 教授

令和 2 年 同 所長

令和 7 年 定年退職。引き続き特任教授、所長

研究・活動 専門分野：核燃料工学、軽水炉燃料の照射挙動

分野など 福井大学の文科省国際原子力人材育成イニシアティブ事業および JAEA 共同研究、もんじゅサイトの新試験研究炉詳細設計担当
クロスアポイントメント制度により、週に 1 回、JAEA 敦賀総合研究開発センター センター長

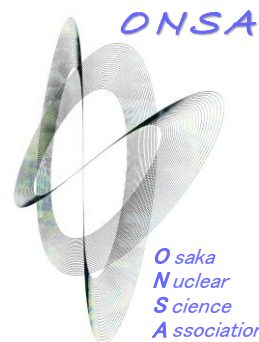
3. ONSA の活動とこれから

放射線は、身近な日用品の製造工程にも広く利用されており、病気の診断や治療にも役立っています。そして放射線利用技術は、日本経済を支える科学技術の基盤となっており、その重要性は一層高まっています。

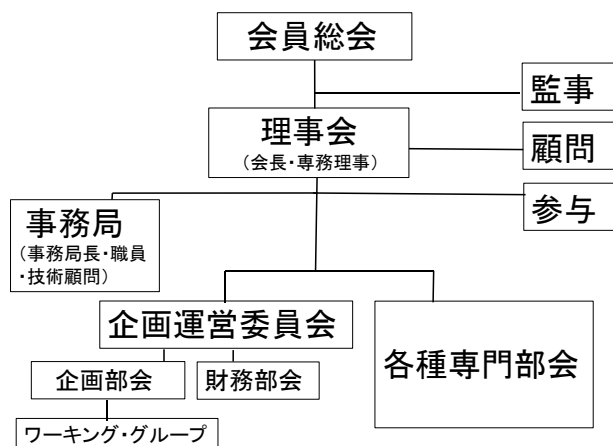
一般社団法人大阪ニュークリアサイエンス協会 (ONSA) は、1984年に発足した後、1988年に社団法人として認可され、2013年に一般社団法人となりました。これまで一貫して、放射線利用技術の向上と産業の振興を図り、国際化に貢献することを活動目的の基本としてきました。ただ、周辺の状況は大きく変化してきました。

ONSA が主に活動を行っている関西には、放射線・原子力分野で活躍する多くの大学、研究機関、法人、企業、団体がありますが、放射線利用分野の多様性を反映して、これらの結びつきは必ずしも十分ではありません。共通する放射線利用技術についての情報を共有することが重要であり、放射線利用施設には、多くの利用者が集まることから、新しい放射線の可能性を生み出す基盤、連携の拠点になってきました。しかし近年、施設の利用停止が顕著に認められます。またそれらを支えて連携を図る ONSA のような団体も継続が難しくなっています。

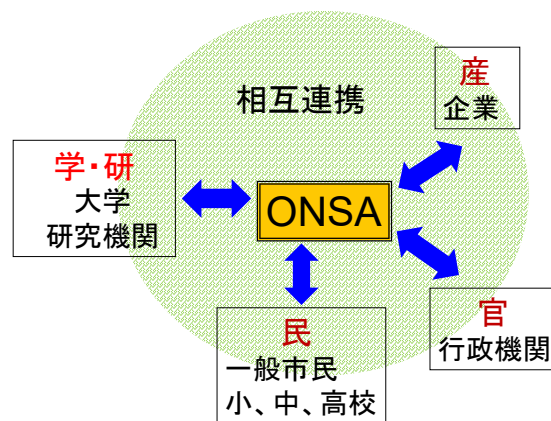
ONSA はこのような現状に鑑み、放射線に関する目的の基本は変えることなく、2022年度に活動方針を大きく見直し、関西を中心とする多くの大学、研究機関や民間企業など個人や団体の放射線に関連する活動に幅広く貢献することとしました。さらに2024年度より、より多くの会員が活躍できるようそのニーズに合った活動を行うための新たな取り組みを開始しました (2024年度第33回シンポジウム資料集講演1、2025年度第34回本シンポジウム資料集講演1参照)。その主要な柱は、放射線に関連する活動拠点とすること、また産学官民連携をサポートする連携拠点とすること、です。そのために、定款に「置くことができる」とされている「専門部会」を新たに設けることとしました。この2年間にわたる取り組みの結果、3つの部会の活動が開始され、またいくつかの部会の設置が準備されています。



ONSA の組織



連携



ONSA の会員構成は、大学や研究機関、法人組織から様々な業種の民間企業など多岐に亘ります。会員相互の協力のもとに学術・技術情報を収集・提供し、放射線利用に関する技術支援を積極的に行っています。また放射線利用に関する技術相談や、放射線科学についての一般社会への知識普及活動を行うと共に、学生会員を設けて人材育成にも取り組んでいます。この活動の内容はこれまでのものを継承しています。

以下に活動の内容を示します。

1. 放射線に関する科学技術情報の収集および提供

企画運営委員会での企画をもとに、放射線・原子力分野で、放射線科学研究会、放射線利用総合シンポジウム、などの講演会や施設見学会を開催し、情報交換を行うと共に、相互交流を図ります。また依頼に応じて講師を派遣します。これまでの研究会等の資料のほか、レポートなどの情報をホームページにまとめて提供します（一部は会員のみが閲覧可能）。

[ONSA 会議室や Online 機能の活用] ONSA 事務局にある会議室を活用し、会員の企画によるミニ研究会（出席者 10 人前後）やミーティングをサポートします。また Online 機能の活用も可能です。ご希望があればご相談ください。いろいろな資料もありますので、気軽に事務局をご訪問ください。

[ONSA ニュースの活用] 冊子は年 4 回発行、電子版 ONSA-eNEWS は随時配信され、広く ONSA の会員と関係者を中心に様々な情報を提供し、また広報にも利用されます。原稿の寄稿をお願いします。情報発信のため、これらを是非ご活用ください。

2. 放射線に関する知識普及

これまで関西を中心に 40 年以上活動が続けてきた、「みんなのくらしと放射線」知識普及実行委員会に当初からのメンバーとして参加しています。「みんなのくらしと放射線展」を開催するなど、子供から大人まで、広く一般市民などへの放射線の知識普及を行っています。また、高校生などの学生を対象として放射線に関係する研究を後押しするイベントや意見交換会なども企画しています。

3. 委託業務、調査・研究などの受け入れ

公設研究機関、民間などから調査や研究を受託し、また行政機関の登録機関等としての業務を受託します。

4. 放射線関係団体、行政との連携活動

全国の放射線関係団体との連携、組織委員会などの委員として、行政機関等や関連団体への協力を行っています。

5. 放射線利用に関する優れた研究・活動の顕彰と支援

放射線や放射性同位元素等に関わる優れた研究や活動を行っておられる方に ONSA 賞を贈り顕彰すると共に、今後の活動を応援します。この賞は 1985 年に設置されました。広く企業、学校、研究機関などにおいて、関係する研究、産業における放射線利用の促進や普及、または人材育成での優れた業績を対象としています。

6. 技術相談

放射線計測等の実施、放射線利用機関の紹介や、放射線被ばくなどの相談に応じています。放

放射線に関する問題などについては、一般の方の相談窓口となってきました。

7. 学生会員としての入会のお勧め

新たに設置した学生会員は、原則として ONSA の会員または参加が教員として指導し、入会を承認した学生を対象としています。

【ONSA の学生会員になると】

- 1) 会員として有用な学術、社会的な情報が得られます。ONSA ホームページの会員情報が閲覧できます。
- 2) 関西を代表する、放射線、原子力関連の会社、大学、研究機関などについて知ることができ、また関係者との交流のサポートが受けられます。
- 3) ONSA のネットワークを通して自己アピールできます。
- 4) ONSA が開催する研究会、見学会などに無料、または有利な条件で参加できます。
- 5) ONSA 事務局の機能や設備（会議室、Online 会合システム、関係資料閲覧、など）を活用し、学生会員同士の交流や諸活動を行うことができます。
- 6) そのほか自由にご提案ください。

8. 会員が専門分野で活動する専門部会

上述のように会員がそれぞれの分野で専門部会を立ち上げ、その活動を ONSA が支援します。現在次の専門部会が活動しています。

1) ガンマ線照射利用部会

特に関西では、大学などの研究機関において、コバルト 60 ガンマ線照射施設の数が減っている。これは維持管理の予算減少などによる。これにより自由な着想に基づく新しい放射線利用研究の進展の遅れが懸念される。部会では、この現状と、一方で広く利用が行われている民間の照射施設の状況について調査する。さらに、株式会社コーガアイソトープの大規模な照射施設では、医療器具の滅菌を中心に広く利用が行われているが、関係者の協力により照射条件を柔軟に設定した基礎研究・試験への応用可能性を探る。

2) 放射線知識普及部会

放射線知識普及活動として、「みんなのくらしと放射線展」は 40 回を迎え、大学教員を中心として関西地域住民の放射線に係る知識、とりわけ身近に利用されている放射線の正しい知識の普及に広く貢献を果たしてきた。一方で、これまで「放射線展」では、低線量放射線被ばくに係る地域住民の漠然とした「不安」に向きあう放射線リスクコミュニケーションの実践については、取り組みが比較的低調な印象であった。そこで、本専門部会は、放射線利用の知識普及に取り組むと共に、低線量被ばくの不安解消に向けた住民との対話の推進を行うに資する情報交換を活発化させることを目指したい。

3) イオンビーム利活用専門部会

(検討中の方針案) イオンビームを用いた物性・材料、育種、医療等における研究開発は、学術及び、社会実装分野において精力的に進められており、特筆すべき成果も多く輩出されている。一方、イオン加速器施設の老朽化、ユーザーの固定化・減少化、イオンビーム関連学会における講演数減少、本分野における若手研究者の減少など問題点も多い。これら現状を踏まえ、関西および近隣地区におけるイオン加速器施設関係者、イオンビームユーザーが

集い、イオンビームのさらなる利活用を目指して、イオンビーム関連研究の情報共有・新規研究テーマの開拓を図るとともに、上記問題点を解決すべく、議論の場を設けることは重要である。

そのほか、「新試験研究炉民間利用促進部会（案）」、「放射線滅菌・殺菌関連部会（案）」などの設置が検討されており、間もなく活動を開始するものもあります。

入会のご案内

放射線利用技術の向上、研究開発、先端科学技術に関する情報収集、関連各機関との相互連携、新しく設置が進められている専門部会における活動など、ONSAの優れた機能を活用することができます。是非ご入会ください。詳しくはホームページをご覧ください。

ONSA事務局

一般社団法人 大阪ニュークリアサイエンス協会

〒542-0081 大阪市中央区南船場3-3-27 サンエイビル 4F

Tel: 06-6282-3350, Fax: 06-6282-3351, E-mail: onsa-ofc@nifty.com

ホームページ <http://onsa.g.dgdg.jp/>

アクセス：大阪メトロ御堂筋線心斎橋駅1番出口から北東へ徒歩5分



編集後記

この放射線利用総合シンポジウムは、ONSAが当初から共同主催を含む主催団体となって毎年開催され、今回で第34回目となりました。Online開催を中心に、全国から毎回100名ほどの皆様にご参加いただき、日本を代表する放射線関連のシンポジウムであると言えます。

ONSAの活動拠点は主に関西にあり、この特徴も継承しています。重要な3つのテーマ、テーマ1「関西北陸の放射線関連組織の現状と将来」、テーマ2「最前線の研究報告（学生、若手研究者による）」、テーマ3「新たな研究開発の動き」、をとりあげ、各テーマの分野を代表する皆様に講師をお願いしました。一般の方にもわかりやすく、との配慮をお願いしています。

通常の講演会では対象となる領域が決まっていますが、「放射線関連」ということになると、さまざまな分野が含まれます。しかしそれぞれに共通する放射線の知識や技術があることが、講演会の大きな特徴です。主なテーマは、特に放射線に関する計測、知識の普及、非破壊検査、宇宙開発における課題や新たな展開などで、原子力分野では放射線利用を推進するための新たな動きがあります。今回のシンポジウムでは、このような動きを感じていただくと共に、今後一層の活躍が期待される、学生・若手研究者の皆様のご発表にもご注目いただき、さらなる連携の契機となることを期待します。

講演者や座長、参加された皆様にはご協力をいただき感謝申し上げます。この資料集には、講演者の皆様方からいただきました貴重なご講演の資料がまとめられています。是非ご覧いただきますようお願い致します。

開催にあたり、(公財) 中部電気利用基礎研究振興財団の開催助成を受けました。また例年のように、文部科学省はじめ8団体の後援、27の学協会などの協賛を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

編集：ONSA事務局

住所：〒542-0081 大阪市中央区南船場3-3-27 サンエイビル4F

TEL 06-6282-3350、FAX 06-6282-3351、E-mail:onsa-ofc@nifty.com

ONSA ホームページ：<http://onsa.g.dgdg.jp/>