

放射化学

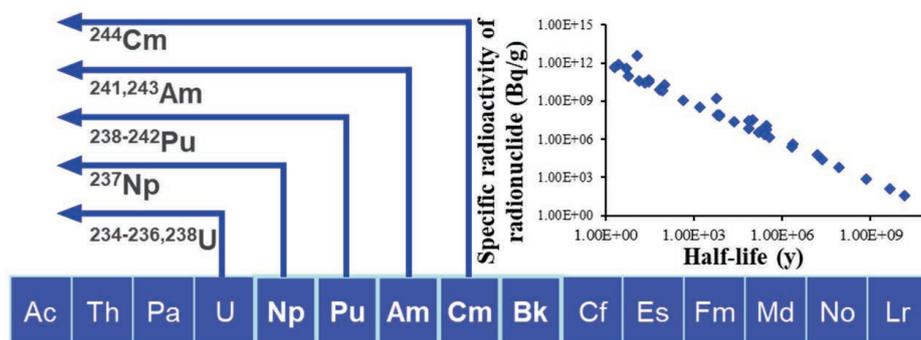
第51号

特集

学会奨励賞
若手優秀発表賞

解説

「もんじゅ」サイト新試験研究炉の概要と実験装置整備計画



短半減期核種

(例: Pu-238, $T_{1/2} = 87.8$ y;
Am-241, $T_{1/2} = 432.2$ y)
⇒放射線計測の方が有効である

長半減期核種

(例: Pu-239, $T_{1/2} = 2.41E+04$ y;
Pu-240, $T_{1/2} = 6.54E+03$ y)
⇒質量分析法の方が有効である



放射化学 第 51 号

令和 7 年 (2025 年) 3 月 20 日

目次

特集

学会奨励賞

プルトニウム等による緊急被ばく対応のための迅速・高感度なバイオアッセイ法の開発
(楊 国勝)…………… 1

若手優秀発表賞

量子化学計算による 102 番元素ノーベリウムのアンミン錯体形成反応の予測 (板倉 悠大) …… 5

都市ごみ焼却飛灰ジオポリマー固化における活性フィラーと ^{137}Cs 溶出抑制効果の関係
(伊藤 秀嶺) …… 8

非水溶媒系中の塩化物イオン濃度が塩化ウラン (IV) の酸化還元特性に与える影響
(植野 雄大) …… 11

水素吸蔵パラジウム中に生成した空孔型欠陥と水素の熱的挙動 (清水 悠介) …… 15

相対論的密度汎関数法による $^{235}\text{m}\text{U}$ ハロゲン化物の半減期と電子状態に関する研究 (橋場 奏) … 17

メスバウアー分光法を用いた還元的環境における粘土鉱物中の Fe の酸化状態と構造の分析
(森井 志織) …… 21

J-PARC ニュートリノ実験施設のビーム運転に伴い生成する放射性水銀 (渡邊 瑛介)…………… 24

解説

「もんじゅ」サイト新試験研究炉の概要と実験装置整備計画 (佐藤 信浩)…………… 27

会議報告

「第 15 回核融合エネルギー連合講演会」開催報告 (上田 良夫) …… 33

第 1 回 短寿命 RI 利用研究シンポジウムの開催報告 (豊嶋 厚史) …… 35

19th Workshop on Targetry and Target Chemistry (WTTC19) (鷲山 幸信) …… 37

日本放射化学会第 68 回討論会 (2024) 開催報告 …… 40

情報プラザ（国際国内会議）	48
学会だより	51
「放射化学」 規程など	56
「放射化学」論文編集委員会規程	
「放射化学」発行規程	
「放射化学」論文投稿規則	
「放射化学」論文投稿の手引き	
学位論文要録執筆候補者の推薦について	
「会員の声」欄へのご寄稿のお願い	
会員の異動に伴う連絡のお願い	
賛助会員リスト	
広告	

表紙の説明

アクチニド内部被ばく患者が発生する事態を想定し、質量分析法と放射線計測法を併用した高感度で高速なバイオアッセイ法の開発を進めています。

左側は短半減期核種の測定手法を現れています。右側は長半減期核種の測定手法を現れています。

特集 2024 年度学会奨励賞

学会奨励賞

楊 国勝 (Yang Guosheng) (量子科学技術研究開発機構 放射線医学研究所)

受賞題目：プルトニウム等による緊急被ばく対応のための迅速・高感度なバイオアッセイ法の開発



1. はじめに

プルトニウム(Pu)を始めとするアクチニドの多くは α 線放出核種であり、また、物理学的及び生物学的半減期が長いことから、少量の摂取であっても内部被ばく線量は著しく高くなる場合がある¹。したがって、アクチニド核種の内部取込み事象が発生した際は、内部被ばく線量を低減するための治療方針の検討が開始されることになるが、そのためには迅速かつ正確なバイオアッセイに基づく線量評価が不可欠である。著者らは現在、同時に最大10人程度のアクチニド内部被ばく患者が発生する事態を想定し、質量分析法と放射線計測法を併用した高感度で高速なバイオアッセイ法の開発を進めるとともに、アクチニド核種のみならず福島第一原発の廃炉作業等で生じるストロンチウム90 (⁹⁰Sr)等の β 核種についても、実用的なバイオアッセイ手法の確立に注力してきた。本稿では、筆者が近年取組んできた研究成果を中心に紹介する。

2. 量研機構におけるバイオアッセイの発展

2017年6月6日に日本原子力研究開発機構(JAEA)大洗研究開発センターにおいて発生した作業員5名のPu内部被ばく事故(以下、「大洗事故」という。)は、日本でPuの体内除染治療が行われた初の事例となった²。今後数十年をかけて進められることになる福島第一原発の廃炉作業や老朽化した核燃料関連施設の廃止措置等においても、アクチニド核種による内部被ばくリスクが存在する。こうした状況を鑑みると、内部被ばく線量評価を行うためのバイオアッセイや体外計測等の技術基盤を維持することが極めて重要である。

大洗事故において実施した内部被ばく線量評価

では、以下の2つの課題があった。1) アクチニド核種による内部汚染において基本となる線量評価手法は、患者から採取される尿・便を試料とするバイオアッセイであるが、試料の前処理→化学分離→ α 線計測の一連の分析工程が必要である。加えて、事故発生直後から数日間分の試料を採取しなければならないため、バイオアッセイによって試料中放射能濃度(Bq)が得られるまでに少なくとも1週間程度以上の時間を要する。2) 事故当時、量子科学技術研究開発機構(以下、「量研機構」という。)のバイオアッセイ処理能力は、ドラフトチャンバー等の設備類の不足や老朽化等のために不十分であった。そのため、1バッチとして処理できる0.5Lの尿試料は2、3個程度に限られていた。また、便試料の分析は当時の量研機構には十分な経験が無かったため、JAEAに分析を依頼することになった。このため、被ばく患者の体内よりアクチニド核種排出を促進する薬剤であるカルシウムまたは亜鉛を結合させたキレート化合物ジエチレントリアミン五酢酸(Ca/Zn-DTPA)の継続投与または休薬といった治療方針を決定する際に、定量的な判断材料をタイムリーに提供することが困難であった。



図1 量研機構のバイオアッセイ実験室。

2021年4月、量研機構は、原子力規制委員会の指定を受けた基幹高度被ばく医療支援センターとして、内部被ばく線量評価の機能に特化した高度被ばく医療線量評価棟を新設し、その運用を開始した。同施設の2階には、アクチニド核種を含む様々な放射性核種を対象としたバイオアッセイを行うための最新の設備・機器が整備されている(図1)。同施設では、バイオアッセイに係る高度専門的な技術普及を目的とした研修も行われている(図2)。



図2 量研機構でバイオアッセイ研修中の様子。

3. 緊急被ばく医療対応に資する種々のバイオアッセイ技術開発

表1 量研機構で確立または開発中のバイオアッセイの分析方法と適用核種

分析法	適用核種
ICP-MS/MS	^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{90}Sr , ^{241}Am , ^{244}Cm
SF-ICP-MS	^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm
β 線スペクトロメトリー	^{90}Sr
α 線スペクトロメトリー	^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{244}Cm
液体シンチレーション カウンタ	^3H , ^{90}Sr

筆者は、環境試料中の様々な長半減期放射性核種の迅速・高感度測定法を開発したこれまでの経験(例えば³⁻⁵)を基に、より実用的なバイオアッセイ法の開発に注力してきた(表1)。その結果、アクチニド核種及び ^{90}Sr に関しては、質量分析法と放射線計測法を最適に組み合わせることにより、従来よりも高感度かつ信頼性の高いバイオアッセイ手法の開発に成功した。主な研究成果は以下の3つである。

3.1. 尿中アクチニド分析技術開発

大洗事故と同様なアクチニド核種による内部取込み事象を想定し、尿試料中のU、Pu、Am、Cm同位体に対するアルファ線スペクトロメトリーによるバイオアッセイ法を整備した⁶。有機物分解については、1回または2回の湿式灰化分解によって生成した炭化残留物に追加の湿式灰化分解を施すことで、試料中の有機物を完全に分解及び核種の回収率が安定してできることを確認した。アクチニドの共沈には、水酸化鉄を用いる手法を選定した。その理由としては、従来まで一般的に使用されてきたリン酸カルシウムに比べて共沈に要する時間が短く、また、手順が簡便であるためである。また、同手法は、有機物分解後に行うクロマトグラフィーによる元素分離・精製の前においても、部分的塩分マトリックス除去にも最適である利点を有している。その後、TEVAおよびDGA樹脂カートリッジ、Dowex 1x8陰イオン交換樹脂カラムを用いたクロマトグラフィー分離・精製を行う。以上の最適化された手順で行う尿中バイオアッセイ法では、U、Pu、Amに対して安定した高い回収率(～80%)と低い検出限界(0.5 Lの尿サンプルを用いて約0.5 mBq)を達成した。また、分析所要時間は全体で38.5時間に短縮され、処理能力のハイスループット化を実現した。本手法は、2018年のPROCORAD (PRoMotion of Quality COntrol in RADiotoxicological Analysis) 国際相互比較試験(以下、「PROCORAD 試験」という。)に適用し、参加した全ての試験項目において $|Z\text{-score}| \leq 2$ の範囲内にあることが示され、その妥当性が検証された。

他方、公衆を含む大多数のアクチニド体内汚染

が生じる事象に際しても、迅速なトリアージを目指す観点から、発災直後に被検者から採取した少量の尿試料を対象として、SF-ICP-MS（二重収束型誘導結合プラズマ質量分析）や ICP-MS/MS（三重四極誘導結合プラズマ質量分析法やタンデム質量分析）などの質量分析法を利用したバイオアッセイ手法も新たに開発した⁷。多原子干渉と U によるテーリング効果を避けるため、2 mL AG MP-1M 陰イオン交換樹脂を充填したシンプルな単一クロマトグラフィーカラムを使用して、U を効果的に除去した後、²³⁷Np および Pu 同位体を収集した。これにより、²³⁸U に対して 10^8 という高い除染係数が得られた。分析手順全体の ²³⁷Np と ²⁴²Pu の化学フラクションは 0.974 ± 0.064 ($k=2$) であり、²⁴²Pu を追跡トレーサーとして ²³⁷Np と Pu の同位体を $76 \pm 5\%$ の回収率で測定することができた。低バックグラウンドの ICP-MS/MS を用いることで、尿試料 20 mL に対する ²³⁷Np, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu の検出限界は、それぞれ 0.025, 0.025, 0.015, 0.020 fg/mL (6.51×10^{-4} , 0.057, 0.126, 76.8 mBq/L) であった。これらの結果は、より高感度な SF-ICP-MS を使用して得られる検出限界と同等である。さらに、PROCORAD 試験に供された Pu スパイクを含む 3 種類の尿標準試料を、開発した手法と前述した従来法（アルファ線スペクトロメトリー）で比較分析することによって妥当性を確認した。さらに、同手法は、大洗事故で回収された Ca/Zn-DTPA を含む尿試料に適用し、Pu 同位体を問題なく定量できることを確認した。本分析手法の特筆すべき点は、9 時間で 12 試料の分析を可能とする処理能力であり、当初の目的を達成したものと考える。

3.2. 便中アクチニド分析技術開発

便バイオアッセイは、不溶性化合物の吸入摂取に有効であり、特にプルトニウムについては最も被ばく線量に対する検出感度が高い手法である¹。しかしながら、便試料中の放射能分布は不均一であるため、1 日あたり平均して約 150g とされる便（成人）を全量回収して分析に供する必要がある、そのためには迅速かつ効率的な化学分離やクロマトグラフィー分離が不可欠になる⁸。そこで我々は、ICP-MS/MS を用いて、大容量便試料

中の低濃度のアクチニド核種を測定する迅速便バイオアッセイを開発した⁹。乾燥と灰化の時間を数日から 8 時間に短縮した後、150 g の便を約 4 g の灰にしてホウ酸塩融解を用いて完全分解を行い、その後、AG MP-1M 樹脂カラムと DGA 樹脂カートリッジを用いた連続カラムクロマトグラフィーを行った。全分析手順における ²³⁷Np と ²⁴²Pu の化学フラクションは $0.993 - 1.002$ であり、²⁴²Pu を追跡トレーサーとして ²³⁷Np と Pu の同位体を約 80% の回収率で測定することができた。ヘリウムコリジョンガスを用いた ICP-MS/MS により、150g の便試料に対する ²³⁷Np, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu, ²⁴¹Am, ²⁴⁴Cm の検出限界は、それぞれ 1.33, 4.05, 2.43, 2.21, 2.21, 0.660 ag/g (3.47×10^{-5} , 9.30×10^{-3} , 2.04×10^{-2} , 8.48, 0.280, 1.98 mBq/kg) となった。分析手法の検証は PROCORAD 試験で供された標準物質を分析することで行い $|Z\text{-score}| < 2$ にあることを確認した。さらに 2023 年の同試験では、便灰中の他のアクチニド核種 (U 同位体) の分析項目において TOP LABO に認定された。この結果は、開発した手法の信頼性を裏付けるものであり、理論的にはハイスループット（18 時間で 12 検体を処理）かつ高感度（約 7 Mcps/ppb）な便バイオアッセイを可能とするものである。

3.3. 尿中 ⁹⁰Sr 分析技術開発

⁹⁰Sr の測定における従来の放射線計測法の主な欠点は、⁹⁰Sr と ⁹⁰Y の間の平衡状態を待つための長い分析時間（2-3 週間）であり、これは迅速な線量評価の要件を十分に満たすことができない。⁹⁰Sr を迅速に分析するために、O₂ を導入した ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析法）を用い、多原子干渉や同重体干渉（⁹⁰Zr⁺, ⁸⁹YH⁺ など）を緩和していた。しかしながら、酸化物による多原子干渉（例えば、⁷²Ge¹⁸O⁺ や ⁷⁴Ge¹⁶O⁺）は O₂ 導入後に深刻な問題となる。大規模原子力災害時の迅速な公衆スクリーニングのため、我々は ICP-MS/MS を用いた少量の尿試料を用いた ⁹⁰Sr バイオアッセイ法を新規に開発した¹⁰。この分析手法では、10 mL の尿サンプルを濃硝酸で有機物分解した後、DGA と Sr 樹脂カートリッジを組み合わせ、Sr のクロマトグラフィー分離・精製に直接使用した。Sr の回収率は、尿サンプルに元々

含まれていた安定な ^{88}Sr を回収率補正用トレーサーとして使用し、全手順で $94 \pm 5\%$ ($n=12$) と測定された。特に、Zr と Ge による多原子干渉を克服するために、 CO_2 が O_2 よりも優れた反応ガスであることが確認された。従来の導入システムに s タイプレンズを加え、第 4 セルガスラインに 75% CO_2 流量を用いた場合、検出限界は 10 mL 尿中 0.978 pg/L (5 Bq/L) と推定された。したがって、1 mSv を超える摂取/吸入被ばくを判定する公衆的スクリーニング要件を満たし、合理的なスループット (12 検体で ~6 時間) を達成した。さらに、我々の実験室は、2024 年の PROCORAD 試験において、| Z-score | の合計値が最も低かったことから、尿中の ^{90}Sr の比較項目において TOP LABO に認定された。

4. おわりに

この度、日本放射化学会 2024 年奨励賞を拝受する榮譽に浴し、大変光榮に思う。著者は、2012 年中国科学院高エネルギー物理学研究所 核分析技術重点実験室において学び、生物無機化学の研究により博士号を取得した。大学院修了後は、量研機構の前身である放射線医学総合研究所の内田滋夫先生、田上恵子博士、鄭建博士らのグループにおいて、環境放射能研究に携わる機会を得ることができた。その中で、試行錯誤を重ねながら、超高感度 ICP-MS を用いた分析手法の開発等を進めることができた。2015 年 4 月からは弘前大学被ばく医療総合研究所において、山田正俊先生の指導の下、さらに多くの分析化学に関する経験を積んだ。そして、2019 年 6 月からは再び量研機構に所属し、本稿で紹介したバイオアッセイに関する研究に従事している。

近年の社会情勢を鑑みると、放射線事故や災害のリスクがさまざまな場面で高まっていると言える。多様な形態を取り得る放射線被ばく事故に際し、患者に対して的確な被ばく医療を提供できるよう、平時から想像力を働かせ、不断の準備をしておくことが重要である。本稿で述べた大洗事故は、アクチニド核種による内部被ばく線量評価に必要なバイオアッセイの技術的課題を多くの関係者が再認識する契機となった。そして、それが高

度被ばく医療線量評価棟の建設にもつながった。同施設は現在まで順調に稼働しており、研究開発だけでなく、著者も関与しているバイオアッセイ研修等にも活用されている。同研修では、高度被ばく医療支援センターに所属する者を対象に、内部被ばく線量評価に関する講義を実施するとともに、放射線管理区域内で実試料を用いた分析実習も行っている。今後も、被ばく医療に携わる者の一人として、微力ながら社会に貢献していきたいと考えている。

引用文献

- [1] P. Thakur, A. L. Ward, *Health Phys.*, 2019, **116**(5), 694–714.
- [2] H. Tatsuzaki, T. Tominaga, E. Kim, S. Watanabe, Y. Tsutsumi, M. Sagara, C. Takada, T. Momose, O. Kurihara, M. Akashi, *Radiat. Prot. Dosim.*, 2018, **182**(1), 98–103.
- [3] G. Yang, H. Tazoe, M. Yamada, *Anal. Chim. Acta*, 2016, **944**, 44–50.
- [4] G. Yang, H. Tazoe, M. Yamada, *Anal. Chim. Acta*, 2016, **908**, 177–184.
- [5] G. Yang, H. Tazoe, M. Yamada, *Anal. Chim. Acta*, 2018, **1008**, 66–73.
- [6] G. Yang, M. Ohno, E. Kim, H. Seno, O. Kurihara, J. Zheng, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* 2024, **24**, 13–21.
- [7] G. Yang, J. Zheng, E. Kim, S. Zhang, H. Seno, M. Kowatari, T. Aono, O. Kurihara, *Anal. Chim. Acta*, 2021, **1158**, 338431, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338431>.
- [8] International Commission on Radiological Protection (ICRP), Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. ICRP Publication 89. *Annals of the ICRP* 32 (2002).
- [9] G. Yang, E. Kim, J. Zheng, M. Kowatari, O. Kurihara, *Microchem. J.*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.112659>
- [10] G. Yang, H. Tazoe, E. Kim, J. Zheng, M. Kowatari, O. Kurihara, *J. Anal. At. Spectrom.* 2023, **38**, 2562–2570.

特集 (日本放射化学会第68回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

量子化学計算による102番元素ノーベリウムのアンミン錯体形成反応の予測

板倉 悠大^{1,2}(阪大院理¹、理研仁科セ²)

1. 緒言

原子番号が100を超えるような元素は、相対論効果の影響で周期律を逸脱する可能性があり、興味が持たれている。しかし、一度に取り扱える量が少ないために化学実験を行うことが難しく、性質は未解明な点が多い。102番元素ノーベリウム(No)は、アクチノイド元素において唯一水溶液中で+2価を最安定にとり、性質は2族元素、特にイオン半径の近いCaやSrに類似することが知られている[1]。本研究室では、独自に開発した手法によりNoおよび2族元素の水酸化サマリウム共沈挙動を調べ、Noは2族元素よりもアンミン錯体を形成しやすいという興味深い可能性を示した。本研究ではNo(II)とアンモニアの相互作用に関して理解を深めるため、No(II)アンミン錯体形成の可能性を量子化学計算により調べた。Noとアンモニアとの錯形成定数を反応ギブズエネルギー変化から $\ln K = -\Delta G/RT$ という関係式を用いて予測し、アンミン錯体の電子状態解析からNo(II)と2族元素、Co(II)、Yb(II)とのアンミン錯体の安定性の違いについて議論を行った。

2. 計算

全ての量子化学計算はORCA v5.0.3 [2]を用い、ZORA-PBE0/TZVP//ZORA-B3LYP/TZVPレベルでRI近似を含む密度汎関数法を適用した。金属錯体については、アコ錯イオン $[M(H_2O)_n]^{2+}$ 及び1:1アンミン錯イオン $[M(NH_3)(H_2O)_{n-1}]^{2+}$ ($M = Mg, Ca, Sr, Ba, Yb, No; n = 6-9$)をモデル化し、第一配位圏より外側については連続誘電体近似(COSMO)により水和を考慮した。水溶液中での水和数は2族元素間で一定でないため、

$[M(H_2O)_n]^{2+}$ と $[M(H_2O)_{n-1}]^{2+} \cdot H_2O$ のエネルギー差からボルツマン分布を作成し、様々な水和数の錯イオンの存在比からボルツマン平均化した水和数を求め、反応エネルギーの計算においても平均のギブズエネルギーを用いた。得られた波動関数を用いて、Mulliken, NBO, QTAIM法に基づいて電子状態解析を行った。電子状態解析にはNBO 7.0 [3]およびMultiwfn [4]を用いた。錯形成定数はNIST Database [5]の実験値 K にSIT [6]によるイオン強度の補正と水和による補正項を加えた K' を用いた。

3. 結果と考察

本研究で得られた平均の水和数はAIMD計算やEXAFS解析による文献値と一致した。2族元素のアンミン錯体形成反応に関する錯形成定数の文献値 $\ln K'$ を計算された反応ギブズエネルギー $\Delta G = (G_{\text{amine}} + G_{\text{H}_2\text{O}}) - (G_{\text{aq}} + G_{\text{NH}_3})$ に対してプロットした結果(Figure 1)、よい線形関係を示した。この直線と計算で得られたNo(II)の ΔG からNo(II)のアンミン錯体形成に関する $\ln K'$ を予測し

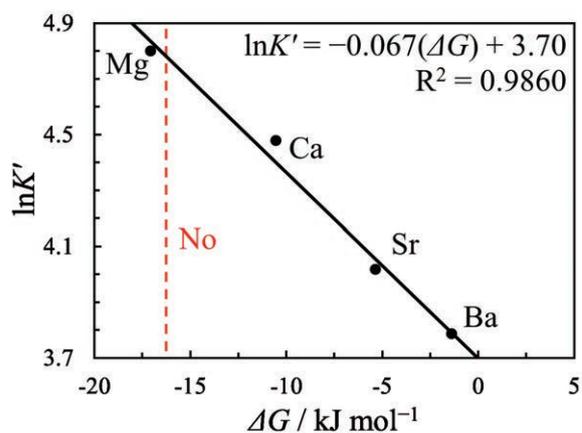


Figure 1 2族元素の錯形成定数を反応ギブズエネルギーに対してプロットしたグラフ。

た結果、 $\ln K' = 4.78(11)$ と求められた。この値は Ca(II) や Sr(II) よりも大きく、No(II) は Mg(II) と同程度の錯形成定数を持つことが示唆された。これは No がアンミン錯体を形成しやすいという実験結果を支持する結果である。2族元素以外の元素との比較を行うため、Noと同族元素の Yb(II), Yb(III) および安定なアンミン錯体を形成する Co(II) の錯形成エネルギーを求め、イオンポテンシャル Z/r に対してプロットを行った (Figure 2)。錯形成に静電相互作用が支配的に関与するとき、このプロットは線形関係を示すことが知られている [7]。Yb は 2 族元素とほぼ同じ線形関係にあるのに対し、No は直線から逸脱した。これは錯形成に配位結合が支配的に寄与する Co と同じ傾向であり、No とアンモニアの錯形成に配位結合が寄与することを示唆する。

モノアンミン錯体 $[M(\text{NH}_3)(\text{H}_2\text{O})_7]^{2+}$ (Mg(II), Co(II)のみ $[M(\text{NH}_3)(\text{H}_2\text{O})_5]$) の NBO 解析によって得られた金属原子の電荷移動および自然電子配置を Table 1 に示す。No(II) では 2 族元素と比較して多くの電荷が金属原子に流れ込んでおり、それらは主に d 軌道に存在することがわかった。これは 2 族元素よりも Yb(II) や Co(II) に類似した傾向である。モノアンミン錯体の M-O, M-N 結合について QTAIM 解析を行い、結合臨界点における電子密度の二次微分と全電子エネルギー密度から結合特性を調べた [8] ところ、Yb(II) と No(II) は M-O 結合はイオン結合性、M-N 結合は配位結合性であることがわかった。これより、No は 2 族元素と異なり配位性の高い配位子と配位結合を形成することが示された。一方で、Figure 2 にて示唆された Yb との ΔG の差はこの観点からは説明できなかった。そこで、M-O, M-N 結合をさらに詳細に解析するため、 $[M(\text{NH}_3)(\text{H}_2\text{O})_7]^{2+}$ (M=Yb, No) について、O 原子または N 原子と中心金属の d, f 軌道との重なり状態密度 (OPDOS) を算出した。OPDOS を全状態密度 (TDOS) および中心金属の原子軌道の部分状態密度 (PDOS) とともに Figure 3 に示す。図より、d 軌道の配位子との重なりは Yb と No の間で大きな差がないが、f 軌道の重なりには差がみられ、No では Yb と比較して N との結合性成分が多く、O との反結合性成分が多いことがわかった。これより、

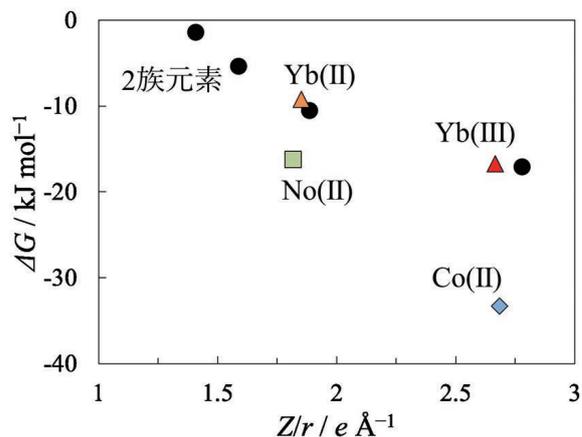


Figure 2 錯形成エネルギー ΔG をイオンポテンシャル Z/r に対してプロットしたグラフ。丸点は 2 族元素を、三角の点は Yb, 菱形の点は Co, 四角の点は No を表す。

Table 1 NBO 解析によって得られたモノアンミン錯体における金属原子の自然電荷移動および自然電子配置。解析は $[M(\text{NH}_3)(\text{H}_2\text{O})_7]^{2+}$ について (Mg(II), Co(II) のみ $[M(\text{NH}_3)(\text{H}_2\text{O})_5]$ について) 行われた。

M =	Natural charge transfer of M	Natural electron configuration of M
Mg	-0.24	[core]3s ^{0.22} 3d ^{0.01} 3p ^{0.01}
Ca	-0.18	[core]4s ^{0.13} 3d ^{0.04}
Sr	-0.16	[core]5s ^{0.12} 4d ^{0.03}
Ba	-0.15	[core]6s ^{0.11} 5d ^{0.03}
No	-0.53	[core]7s ^{0.18} 5f ^{13.99} 6d ^{0.34}
Yb	-0.52	[core]6s ^{0.15} 4f ^{13.99} 5d ^{0.34} 5f ^{0.01} 6d ^{0.02}
Co	-0.43	[core]4s ^{0.23} 3d ^{7.18} 4p ^{0.01} 4d ^{0.02} 5d ^{0.02}

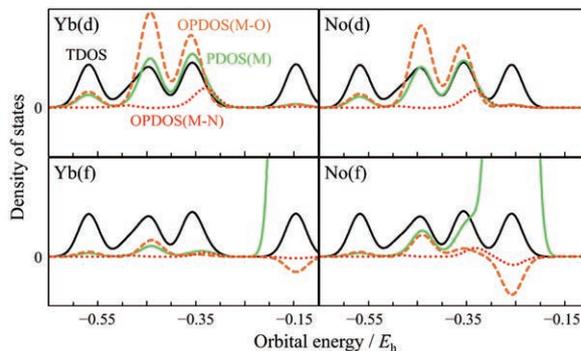


Figure 3 $[\text{Yb}(\text{NH}_3)(\text{H}_2\text{O})_7]^{2+}$ (左) および $[\text{No}(\text{NH}_3)(\text{H}_2\text{O})_7]^{2+}$ (右) の状態密度スペクトル。上段が金属の d 軌道、下段が金属の f 軌道の寄与を表す。なお、PDOS および OPDOS は 100 倍に拡大された。

No は O との結合が弱くかつ N との結合が強いことにより、M-N 間に働く軌道相互作用の寄与が相対的に大きくなったことでアンミン錯体を形成しやすくなっていると考えられる。このように、原子軌道の重なりに着目することで、Yb と No の ΔG の違いを定性的に説明することができた。これは重元素の化学的性質について、分子軌道の状態や結合性を調べるだけでは得られない特徴が各結合における原子軌道間の相互作用を解析することで観測できる可能性を示唆する興味深い結果である。

4. まとめ

No がアンミン錯体を形成する可能性を量子化学計算の立場から検証するため、2 族元素および No のアンミン錯体形成エネルギーの計算、アンミン錯体の電子状態解析を行った。

No のアンミン錯体形成エネルギーを初めて計算し、値を 2 族元素の $\ln K'$ vs. ΔG プロットに内挿することで No のアンモニアとの錯形成定数が Ca や Sr よりも大きいと予測した。これはイオン半径からの予測値とは異なり、実験結果を支持する。

アンミン錯体の NBO, QTAIM 解析により、No

は Yb(II) と類似して空の d 軌道への供与によりアンモニアと共有結合性の軌道を形成することがわかった。OPDOS 解析により、No は Yb より O との結合が反結合的であり、さらに N との結合では f 軌道の寄与により M-N 結合を安定化している可能性が示された。Yb との錯形成エネルギーの差は両者の複合的な影響であると考えられる。

5. 参考文献

- [1] R. J. Silva *et al.*, *Inorg. Chem.* **13**, 9 (1974).
- [2] F. Neese, *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Mol. Sci.* **2**, 1 (2012).
- [3] E. D. Glendening *et al.*, *J. Comput. Chem.* **40**, 25 (2019).
- [4] T. Lu and F. Chen, *J. Comput. Chem.* **33**, 5 (2012).
- [5] D. R. Burgess, NIST SRD 46. (2004).
- [6] NEA, TDB-2: Guidelines for the extrapolation to zero ionic strength, OECD(2013)
- [7] R. J. P. Williams, *J. Chem. Soc.* 3770 (1952).
- [8] W. Nakanishi *et al.*, *J. Phys. Chem. A* **112**, 51 (2008).

特集 (日本放射化学会第 68 回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

都市ごみ焼却飛灰ジオポリマー固化における活性フィラーと¹³⁷Cs 溶出抑制効果の関係伊藤 秀嶺¹、平林 万結²、白田 ひびき¹、小池 裕也²
(¹ 明治大学大学院理工学研究科、² 明治大学理工学部)

1. はじめに

都市ごみ焼却飛灰(以下、焼却飛灰)に濃縮された重金属や放射性セシウムの多くは水溶性形態として存在しており、埋め立て後に雨水などの環境水と接触し、溶出することで環境汚染へとつながる。そのため、焼却飛灰を埋立処分する際は固化処理などの安定化処理を施す。ジオポリマー固化(GS)法は固化処理手法の一つであり、アルミノケイ酸塩(活性フィラー)を出発物質とする非晶質ポリマーとして固化体を生成することで重金属や放射性セシウムを含む焼却飛灰を安定化できる。これまで、焼却飛灰中放射性セシウムの安定化処理法として、活性フィラーに土壌を用いる「都市ごみ焼却飛灰・土壌混合ジオポリマー固化法」を研究してきた[1,2]。活性フィラーの性状は、固化体の強度や放射性セシウムの溶出抑制効果を決める重要な要素である。本研究では、活性フィラーとして

8種の異なる土壌を用いて土壌混合GS体を作製した。作製した土壌混合GS体について、活性フィラーの性状と¹³⁷Cs溶出抑制効果の関係を調査した。

2. 実験

焼却飛灰試料は、埼玉県の一般焼却処理場で2023年3月に採取したものを使用した。活性フィラーとして、赤玉土(あかぎ園芸)、黒土(あかぎ園芸)、鹿沼土(あかぎ園芸)、パーライト(あかぎ園芸)、軽石(あかぎ園芸)、富士砂(あかぎ園芸)、明治大学生田キャンパス土壌(以下、生田土壌)、明治大学理工学部「基礎化学実験」の廃陶器の計8種の土壌試料を使用した。土壌混合GS体の作製手順を図1に示す。遊星型ボールミル(Fritsch, Pulverisette 6)で20分間粉碎した焼却飛灰試料と土壌試料を質量比1:1になるように分取した。その後、メノウ乳棒とメノウ乳鉢を用いて5分間混合し、テフロン皿に移した。33wt%水酸化ナトリウム水溶液を1.5~2.0 mL加えて、ペースト

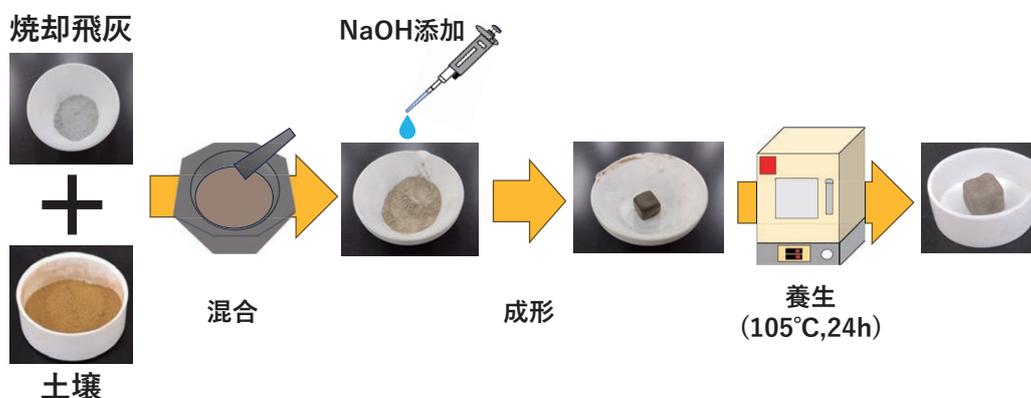


図1 都市ごみ焼却飛灰・土壌混合GS体の作製手順概略図.

状になるまで混練した後に手で立方体に成形した。成形後に定温乾燥機（ヤマト科学, DVS402）を使用して 105℃ で 24 時間養生し、土壤混合 GS 体を得た。

土壤混合 GS 体の放射性セシウム¹³⁷Cs の溶出抑制効果を調査する目的で、JIS K0058-1 [3] に基づく有姿攪拌試験を行った。有姿攪拌試験は、液固比 10 となるように試料に純水を加え、攪拌（毎分 200 回転、6 時間）した（図 2）。試験後、ガラス繊維フィルター（Whatman, GF/F, 47 mmΦ, 保持粒径 0.7 μm）で溶出液をろ過した。試料中¹³⁷Cs

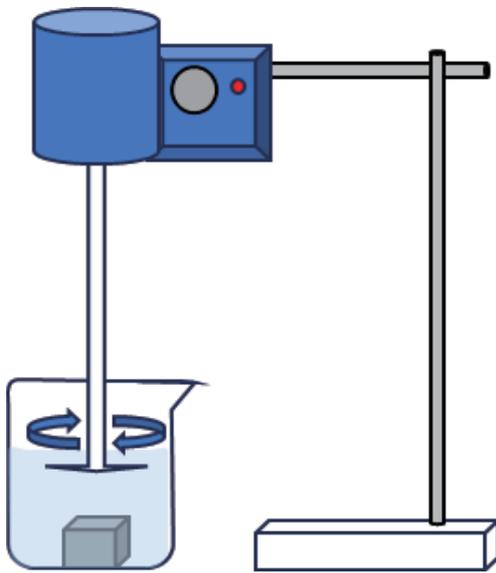


図 2 有姿攪拌試験の概略図。

を高純度ゲルマニウム半導体検出器（High-purity germanium detector (HPGe) ; PGT. Inc., ICG-10200 NPR) を用いて定量した。有姿攪拌試験前後の土壤混合 GS 体の¹³⁷Cs 定量値から溶出率を算出した。さらに、活性フィラーの性状と¹³⁷Cs 溶出抑制効果の関係を評価するため、焼却飛灰および土壤中の結晶成分を粉末 X 線回折法で、元素組成を蛍光 X 線分析法により分析した。

3. 結果と考察

有姿攪拌試験による土壤混合 GS 体からの¹³⁷Cs 溶出率を図 3 に示す。未処理の焼却飛灰における¹³⁷Cs 溶出率は 58.9%であった。作製したすべての土壤混合 GS 体で溶出率が 30%を下回っており、溶出抑制効果が確認された。特に赤玉土と黒土を活性フィラーとした土壤混合 GS 体の溶出抑制効果が高く、溶出率はそれぞれ 0.5%と 3%であった。齋藤ら [2] は、活性フィラーとして赤玉土を用いた場合、赤玉土の放射性セシウム吸着能にジオポリマー固化の機能が加えられることで、より強く放射性セシウムが固化体内に保持されると推察している。他の土壤についても同様の効果が生じていると考える。そこで、土壤性状を把握するために、¹³⁷Cs 溶出抑制効果の高かった赤玉土と黒土の 2 種類について X 線回折分析を実施した。赤玉土と黒土には放射性 Cs を吸着するクロライトや白雲母などの雲母系粘土鉱物 [2] の含有が確認された。これらの雲母系粘土鉱物の存在

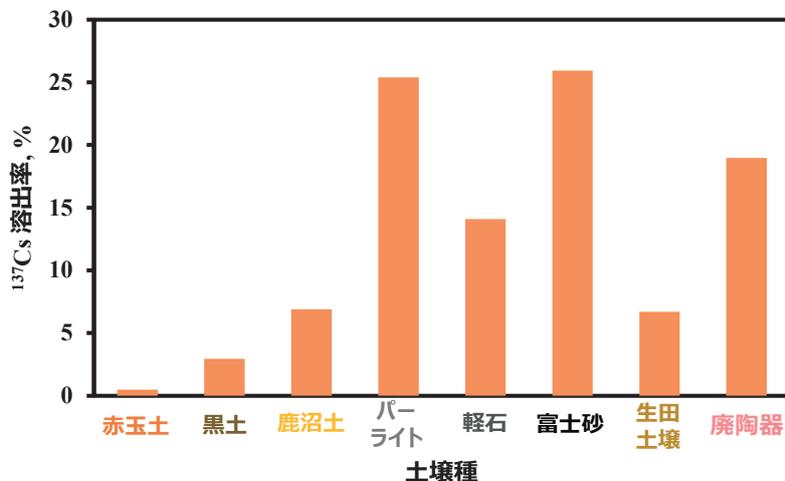


図 3 都市ごみ焼却飛灰・土壤混合 GS 体からの¹³⁷Cs 溶出率。

が¹³⁷Csの溶出抑制効果に影響したと考えられる。

作製した土壤混合 GS 体の埋立強度を比較するため、卓上型引張圧縮試験機 (A&D, MCT-1150) を用いて一軸圧縮強度を測定した。一軸圧縮強度は、環境庁告示第 5 号により定められている 0.98 MPa [4] を基準値として評価した。8 種の土壤混合 GS 体一軸圧縮強度は、0.507 ~ 1.84 MPa であり、パーライトと廃陶器を活性フィラーとした土壤混合 GS 体が高い値を示した。赤玉土と生田土壤を使用した固化体を除く 6 種の土壤混合 GS 体について、埋立基準を上回る結果となった。土壤混合 GS 体の一軸圧縮強度について、固化反応の出発物であるケイ素、アルミニウムの含有量が関連していると考え、土壤の元素分析を行った。GS 体の一軸圧縮強度は土壤中のケイ素 / アルミニウム比 (Si/Al) に依存していることが報告されている [5]。本研究で使用した土壤中の Si/Al は、1.14 ~ 5.10 であった。Si/Al はパーライトが特に大きい値を示した。一軸圧縮強度が 1.8 MPa 以上を示した固化体に使用した土壤はいずれも Si/Al は 2 を超えていた。本研究で作製した土壤混合 GS 体の一軸圧縮強度も Si/Al に依存していることが推察できるが、一軸圧縮強度と Si/Al の値には直接の相関は得られなかった。焼却飛灰および土壌中には鉄やカルシウムなどの元素も存在しているため、土壤混合 GS 法の¹³⁷Cs 溶出抑制メカニズムの解明も含め一軸圧縮強度と元素組成の関連について調査したいと考えている。

4. おわりに

本研究では、焼却飛灰中放射性セシウム溶出抑制のための土壤混合 GS 法について、8 種の異なる活性フィラーの性状と土壤混合 GS 体の¹³⁷Cs 溶出抑制効果の関係について調査した。実験結果から、¹³⁷Cs の溶出抑制効果には雲母系鉱物の含有が、一軸圧縮強度にはケイ素とアルミニウムの含有比が関係していることが示唆された。今後は、焼却飛灰中の放射性セシウムと重金属の環境中への溶出率 0% を目指して研究を進めたいと考えている。

謝辞

本研究の遂行にあたり、明治大学放射化学研究室メンバーのご助言、ご協力に対して心から御礼申し上げます。本研究は JSPS 科研費 JP23K04826 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 小池裕也ら, *Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan*, **31**, 33-38 (2024).
- [2] 齋藤凜太郎ら, 廃棄物資源循環学会論文誌, **33**, 18-29 (2022).
- [3] JIS K0058-1:2005 「スラグ類の化学物質試験方法. 第 1 部: 溶出量試験方法」.
- [4] 遠藤和人ら, 廃棄物資源循環学会論文誌, **27**, 18-26 (2016).
- [5] Hengels Castillo *et al.*, *minerals*, **11**(12), 1317-1345 (2021).

特集 (日本放射化学会第 68 回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

非水溶媒系中の塩化物イオン濃度が塩化ウラン (IV) の酸化還元特性に与える影響

植野 雄大、大内 和希、渡邊 雅之

(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター 原子力化学研究グループ)



1. 緒言

劣化ウランは、原子力発電の燃料の製造工程における副産物であり、天然ウランと比べてウラン 235 の濃度が低いことが特徴である。次世代炉（高速炉）での利用が将来的に見込まれており、日本国内ではおよそ 16,000 トンが保管されている¹。

劣化ウランの新たな資源価値を生み出すため、2000 年代初頭、ウランを活物質とするレドックスフロー電池 (URFB) の概念が提唱された²。URFB の模式図を図 1 に示す。URFB では、 U^{III} および U^{IV} の安定化のため、電解液は非水系が選択される。近年、イミダゾリウム系イオン液体 (1-ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl) imide, $[EtMeIm]^+[Tf_2N]^-$) とジメチルホルムアミド (DMF) の混合系電解液において、塩化ウラン (IV) ($U^{IV}Cl_4$) が U^{IV}/U^{III} の酸化還元反応を示し、塩化物イオン (Cl^-) の添加によって反応の可逆性

が向上することが見いだされた³。これは、電解液中でのウラン (IV) 塩化物錯体 ($U^{IV}Cl_6^{2-}$) の形成に由来すると考えられる。しかし、 U^{IV}/U^{III} の酸化還元反応速度と電解液中の Cl^- 濃度との定量的な相関関係は明らかでない。高効率な URFB の実現のためには電極反応速度の向上による過電圧の低減が重要であることから、本研究では、DMF 中の Cl^- 濃度が $U^{IV}Cl_4$ の酸化還元特性に与える影響の解明を目指した。

2. 実験方法

塩化ウラン (IV) はウラン酸化物を出発原料とする乾式合成手法により作製した⁴。溶媒には DMF、 Cl^- の供給源として 1-ethyl-3-methylimidazolium chloride ($[EtMeIm]^+[Cl]^-$) を使用した。 $[EtMeIm]^+[Cl]^-$ は電解液の電解質としても機能する。組成が $10 \text{ mM } U^{IV}Cl_4 - x \text{ M } [EtMeIm]^+[Cl]^- - \text{DMF}$ ($x = 0.01 - 1.0$) となるように各試薬を混合し、試料溶液を調製した。

試料溶液中のウランの化学状態の評価には、紫

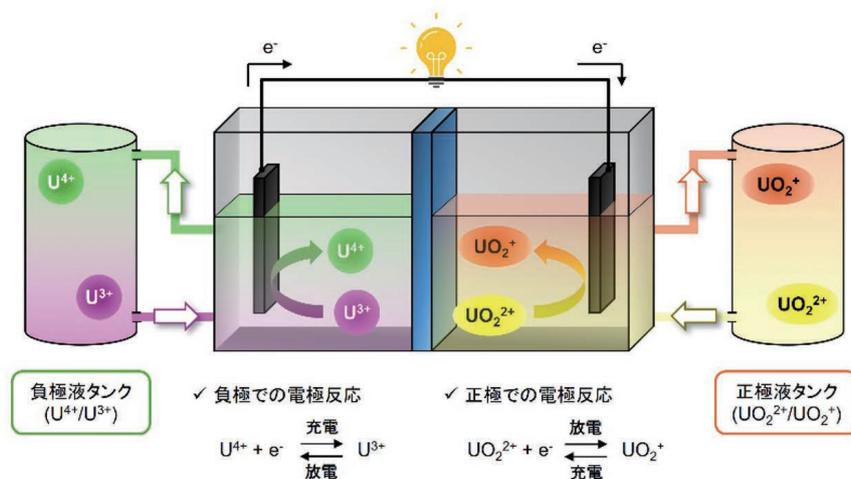


図 1 ウランを活物質とするレドックスフロー電池の模式図²。

外可視(UV-Vis)分光測定を実施した。また、 U^{IV}/U^{III} の酸化還元特性を評価するために三電極法サイクリックボルタンメトリー(CV)を、CVのIR補償のために交流インピーダンス測定を実施した。作用極にはグラッシーカーボン(GC)ディスク電極(電極面積 0.07 cm^2)、対極には白金(Pt)線を使用した。また参照極には $0.1 \text{ M AgCl} - x \text{ M [EtMeIm}^+][\text{Cl}^-]$ - DMF 溶液に浸漬した銀(Ag)線を使用し、多孔質ガラスを液絡として測定溶液と接触させた。

3. 結果と考察

試料溶液の UV-Vis スペクトルを図2に示す。 $x = 0.1 - 1.0$ のとき、UV-Vis スペクトルは $U^{IV}Cl_6^{2-}$ を構造内に有する結晶と同様のピークを示した⁵。一方、 $x = 0.01$ のときの UV-Vis スペクトルは $x \geq 0.1$ のそれとは大きく異なり、 $U^{IV}(\text{H}_2\text{O})_4\text{Cl}_4 \cdot (\text{HPy}\cdot\text{Cl})_2$ (HPy: Pyridine) 結晶で観測されるピークが確認された。したがって、 Cl^- 濃度が極めて小さい条件において U^{IV} は4つの Cl^- と4つの DMF 分子が配位した状態で安定化し、 Cl^- 濃度が十分大きな条件では U^{IV} が6配位の塩化物錯体

として存在することが推察された。

図3(a)に試料溶液($x = 0.1 - 1.0$)の CV 測定結果を示す。すべての溶液において、 $-1.0 - -1.4 \text{ V vs. Ag/Ag}^+$ の電位において一つの還元ピーク(E_p^c)と一つの酸化ピーク(E_p^a)が確認され、準可逆的な酸化還元特性が確認された。これは下記に示すウラン(IV)塩化物錯体の酸化還元反応の進行に由来すると考えられる。



x の増大に伴ってピーク電流値の増大が確認された。ゆえに $x = 0.1 - 1.0$ の範囲において、 Cl^- 濃度の増大が U^{IV}/U^{III} 酸化還元反応の可逆性の向上に寄与することが示唆された。これらの反応を可逆とみなし、 U^{IV} の拡散係数($D_{U^{IV}}$)および電極反応速度定数 k_s を算出した結果を図3(b)に示す⁷。 Cl^- 濃度の増大に対し、 $D_{U^{IV}}$ はほとんど変化しなかったのに対し、 k_s は増大する傾向を示した。以上より、電解液中の過剰な Cl^- の存在が $U^{IV}Cl_6^{2-}$ の安定化と電極反応速度定数の向上の原因である

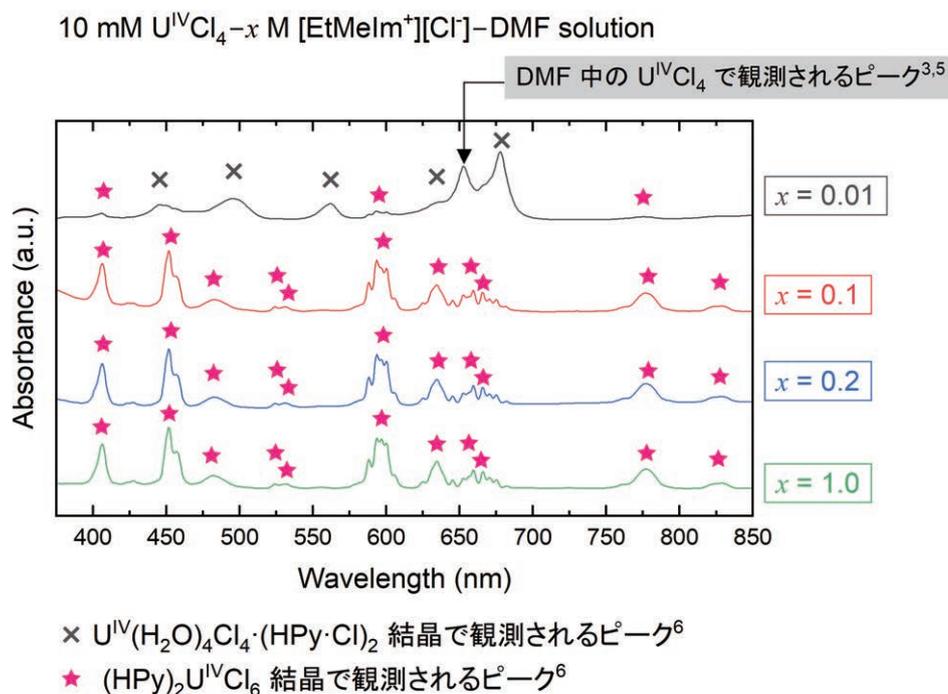


図2 $[\text{EtMeIm}^+][\text{Cl}^-]$ 濃度を変化させたときの試料溶液の UV-Vis スペクトル^{3,5,6}。

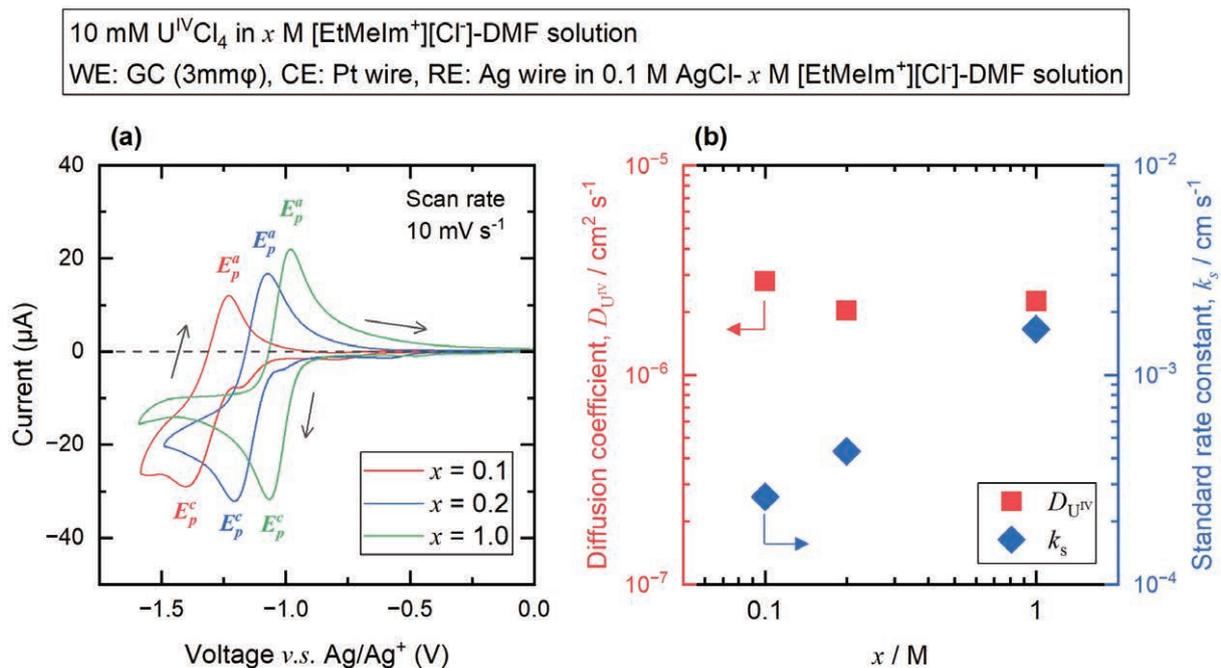


図3 (a) 10 mM $U^{IV}Cl_4$ - x M [EtMeIm⁺][Cl⁻] - DMF 試料溶液のサイクリックボルタモグラム。矢印は電位の掃引方向を示す。(b) U^{IV}/U^{III} 酸化還元反応での拡散係数($D_{U^{IV}}$)と電極反応速度定数(k_s)の Cl^- 濃度依存性。

ことが明らかとなった。

4. 結言と今後の展望

本研究では、DMF 中の Cl^- 濃度が $U^{IV}Cl_4$ の安定な化学状態および U^{IV}/U^{III} 酸化還元特性へ与える影響を評価した。その結果、 Cl^- 濃度の増大によって U^{IV} は塩化物錯体 $U^{IV}Cl_6^{2-}$ として安定に存在し、 U^{IV}/U^{III} 酸化還元反応の反応速度定数が向上することが見いだされた。今後、高性能なウラン蓄電池の実現を目指し、支持電解質のイオン種や有機溶媒の有無がウランの酸化還元特性に与える影響の評価を進める予定である。

参考文献

- [1] 原子力規制庁. 我が国における令和5年(2023年)の保障措置活動の実施結果. <https://www.nra.go.jp/data/000473293.pdf> (accessed 2025-01-19).
- [2] SHIOKAWA, Y.; YAMANA, H.; MORIYAMA, H. An Application of Actinide Elements for a Redox Flow Battery. *J. Nucl. Sci. Technol.* **2000**, *37* (3), 253–256. <https://doi.org/10.1080/0/18811248.2000.9714891>.
- [3] Ouchi, K.; Komatsu, A.; Takao, K.; Kitatsuji, Y.; Watanabe, M. Electrochemical Studies of Uranium (IV) in an Ionic Liquid–DMF Mixture to Build a Redox Flow Battery Using Uranium as an Electrode Active Material. *Chem. Lett.* **2021**, *50* (6), 1169–1172. <https://doi.org/10.1246/cl.210060>.
- [4] Hussonnois, M.; Krupa, J. C.; Genet, M.; Brillard, L.; Carlier, R. Synthesis and Crystal Growth of Some Thorium and Uranium Tetrahalides: $ThCl_4$, $ThBr_4$, UCl_4 and UBr_4 . *J. Cryst. Growth* **1981**, *51* (1), 11–16. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(81\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0022-0248(81)90004-X).
- [5] Wacker, J. N.; Vasiliu, M.; Huang, K.; Baumbach, R. E.; Bertke, J. A.; Dixon, D. A.; Knope, K. E. Uranium(IV) Chloride Complexes: UCl_6^{2-} and an Unprecedented $U(H_2O)_4Cl_4$ Structural Unit. *Inorg. Chem.* **2017**, *56* (16), 9772–9780. <https://doi.org/10.1021/acs>.

- inorgchem.7b01293.
- [6] Afonso, M. L.; Gomes, A.; Carvalho, A.; Alves, L. C.; Wastin, F. Electrochemical Behaviour of Uranium (IV) in DMF at Vitreous Carbon. *Electrochem. Acta* **2009**, *54*, 7318–7323. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.07.057>.
- [7] Bard, A. J.; Faulkner, L. R. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, 2000.

特集 (日本放射化学会第68回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

水素吸蔵パラジウム中に生成した空孔型欠陥と水素の熱的挙動

清水 悠介¹、古本 雅之¹、原 大輔²、清水 弘通³、谷口 秋洋⁴、大久保 嘉高⁴、佐藤 渉^{1,2}
 (金沢大院自然¹、金沢大理工²、理研仁科セ³、京大複合研⁴)



序論

水素は二酸化炭素を排出しない燃料であるため次世代のエネルギーとして期待されており、その貯蔵材料として水素吸蔵合金が注目されている。その中でパラジウムは水素が固溶する性質を持つことが知られており、水素の可逆的な吸収と放出が可能である。しかし、水素を吸収することで強度が低下する水素脆化という現象が知られており、これは水素の固溶に伴う格子欠陥の生成が原因の一つと考えられている。パラジウムの水素貯蔵材料としての応用を見据えるにあたってパラジウム内の水素の挙動や格子欠陥の状態に関する情報は極めて重要である。そこで本研究では吸蔵された水素のパラジウム内部での熱的挙動を ^{111}Cd ($\leftarrow ^{111}\text{Ag} \leftarrow ^{111,111\text{m}}\text{Pd}$) 核プローブを用いた摂動角相関法 (PAC) によって調べた。また、水素固溶に伴って形成される空孔型欠陥の状態を陽電子消滅寿命分光法 (PALS) によって調べた。

実験

京都大学複合原子力科学研究所の研究用原子炉にてパラジウムに中性子照射し ^{111}Cd ($\leftarrow ^{111}\text{Ag} \leftarrow ^{111,111\text{m}}\text{Pd}$) 核プローブを生成した。中性子照射によって格子欠陥が生成することが懸念されたため、真空中、1073 Kで5h アニールを行った。水素導入はパラジウムを陰極として0.1 M KOH 水溶液の電気分解によって行った。アニール後(RT)、水素吸蔵後(RT、323 K)、水素放出後(323 K)のパラジウム試料についてPAC測定を行い、パラジウム内部における水素の熱的挙動を調べた。また、未処理、アニール後、水素吸蔵後、323 Kと373 Kでの加熱後のパラジ

ウム試料における空孔型欠陥の状態をPALS測定によって調べた。

結果と考察

Fig. 1に各測定条件におけるPACスペクトルを示す。アニール後のスペクトル(a)は無摂動である。これはPdの面心立方構造を反映した結果であり、プローブ近傍に格子欠陥が生じてい

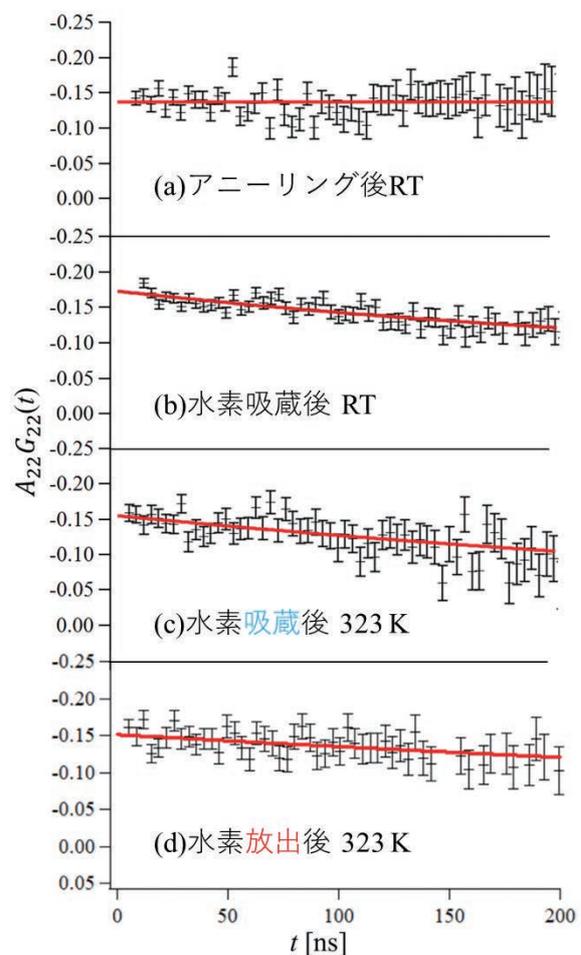


Fig. 1 PAC spectra of the ^{111}Cd ($\leftarrow ^{111}\text{Ag} \leftarrow ^{111,111\text{m}}\text{Pd}$) probe in a hydrogen-absorbed Pd plate.

ないことが分かる。(b)のスペクトルは緩和を示している。これはプローブが水素の熱運動によって動的摂動を受けていることを示唆しており、先行研究^[1,2]の結果を再現した。(c)のスペクトルでも動的摂動が観測されたことから、323 Kにおいても水素がパラジウム内に留まり、熱運動していることが分かった。(d)の水素放出後のスペクトルも異方性の変化が観測されたことから、水素吸蔵による格子欠陥は水素が放出されても残存し、電場勾配の原因となっていることを示唆している。

Fig. 2に各測定温度における緩和定数 λ を示す。160 Kから温度が上がるほど緩和定数が小さくなる傾向が見られた。これは温度が上がるほど水素の熱運動が活発になり、スペクトル緩和が緩やかになることを反映していると考えられる。また、緩和定数から作成したアレニウスプロットの傾きから水素の熱運動に必要な活性化エネルギー E_a を導出した結果、 $E_a=47(3)$ meVという値が得られた。

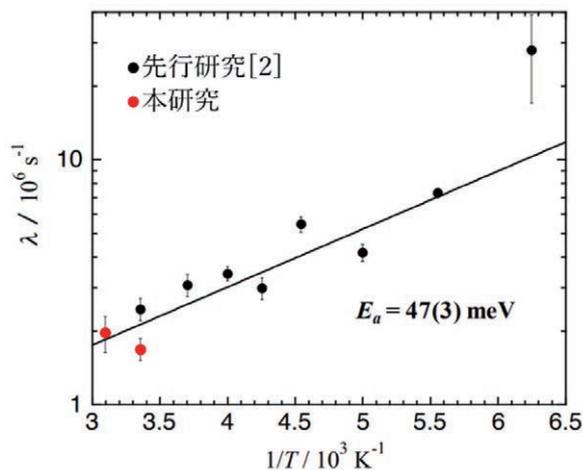


Fig. 2 Temperature dependence of the relaxation constant λ .

Fig. 3に水素吸蔵後の加熱（323 K、383 K、5 h）した試料におけるパラジウム内の陽電子の平均寿命（ τ_{ave} ）と水素とパラジウムの原子数比（H/Pd）^[2]を示す。未処理（Pristine）とは圧延加工したままの試料を示す。1073 Kで5 hアニーリングすると格子欠陥が除去され陽電子寿命が減少し、バルクのパラジウム原子配列を示す値になった。水素吸蔵後は水素がPd格子内に入り込み空孔を形成したことで寿命が増加している。323 Kで5 hの加熱では陽電子寿命と水素濃度ともに変化しなかつ

たが、383 Kの加熱では格子欠陥が一部が除去され、水素は完全に放出された。

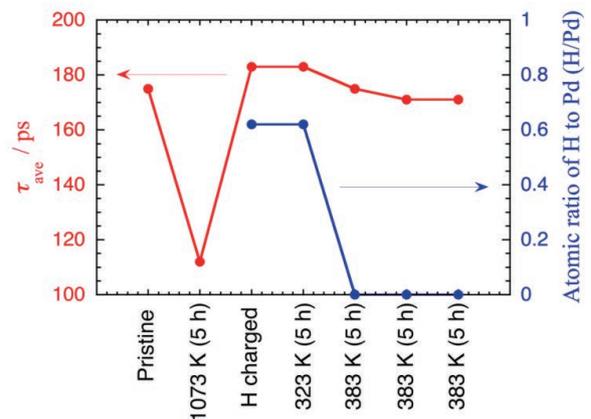


Fig. 3 Effects of thermal and chemical treatments on the averaged lifetime (τ_{ave}) of positrons annihilated in the Pd lattice and on the atomic ratio of hydrogen to Pd (H/Pd). The heat treatment at 1073 K was performed in vacuum and that at 323 and 383 K was performed in air.^[2]

まとめ

PACの観測結果から、323 Kにおいてパラジウム内で水素が熱運動していることと水素吸蔵によって形成された格子欠陥は水素放出後も残存することが確認され、微視的手法による水素脆化の観測に成功した。PALSの観測結果から、水素放出後も陽電子寿命がバルクのパラジウムの値にならないことから、水素吸蔵によって形成される空孔型欠陥は水素放出後も残存することが確認された。この結果は水素放出後のPACスペクトルが格子欠陥による電場勾配を反映しているという解釈と整合する。

今後は水素吸蔵と放出の繰り返しによる影響とパラジウム中の空孔型欠陥生成の相関をさらに調べ、水素脆化の影響に対する考察を深めていく予定である。

参考文献

- [1] 古本雅之 金沢大学大学院自然科学研究科物質化学専攻 修士論文(2020) .
- [2] W. Sato, M. Furumoto, H. Shimizu, Y. Ohkubo, *J. Appl. Phys.* **135**, 245103 (2024).

特集 (日本放射化学会第 68 回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

相対論的密度汎関数法による $^{235\text{m}}\text{U}$ ハロゲン化物の半減期と電子状態に関する研究

橋場 奏

(大阪大学理学研究科 化学専攻)



1. 緒言

原子核は 10^{-15} m、数十 keV ~ MeV 程度の、軌道殻電子は 10^{-10} m、eV ~ 数 keV 程度の空間的広がりおよびエネルギーを持ち、それぞれの値は大きく異なる。そのため、原子核と軌道殻電子は各々独立したものとして扱われる。一方、内部転換過程は、軌道殻電子と原子核が相互作用する壊変過程である。内部転換を起こすのは原子核に近い、化学的に不活性な内殻電子である。そのため、原子核の壊変は一般に温度、圧力、化学状態などの外的環境に左右されない。しかし、ごく一部の核種では外殻電子と相互作用し、原子核の半減期が化学状態により変化することが知られている。

本研究で対象とする $^{235\text{m}}\text{U}$ は ^{235}U の第一励起状態であり、76.7 eV の非常に低い励起エネルギーをもつ。ほぼ 100% の確率で内部転換により崩壊し、主に U 原子の 6p、6d 電子と相互作用する。実験的には U の化学状態により半減期が数% 変化すると知られている [1,2] が、軌道殻電子の変化と半減期変化の関係はよくわかっていない。また、これらの報告では各分子軌道からの内部転換への寄与に相当する内部転換電子スペクトルは測定されていない。

本研究グループの先行研究では、 ^{239}Pu 線源から α 崩壊の反跳により飛び出してきた $^{235\text{m}}\text{U}$ を銅板表面に捕集し、ハロゲン化水素ガスを反応させた試料について半減期、内部転換電子スペクトルの測定が行われた [3-5]。測定された半減期の序列は $\text{F} < \text{I} < \text{Br} < \text{Cl}$ と単なる原子番号、電子供与性などの順ではない興味深い結果が得られた。また、内部転換電子スペクトルと各種 U 化合物の X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) スペクトルと

の比較から化学状態の推定・半減期変化の考察が試みられた。XPS、内部転換電子スペクトルのどちらも分子軌道からの電子の放出を観測しているものの、前者は分子中の全原子からの、後者は U 原子のみからの寄与が見えることから単純に比較することが難しく、化学状態はよくわかっていない。そのため、半減期変化とスペクトル変化の関係は不明のままである。

そこで、本研究では相対論的密度汎関数 (相対論的 DFT) 法を用い、 $^{235\text{m}}\text{U}$ ハロゲン化物の半減期の理論計算を行い、その変化について理解することを目的とする。また、錯体の電子状態の観点から半減期変化について考察を行った。

2. 計算手法

相対論的 DFT 計算は ORCA version 5.0.3 [6] および DIRAC23 [7] を用いて行った。

まず、 $^{235\text{m}}\text{U}$ ハロゲン化物の化学状態を推定するために、 UO_2^{2+} のエクアトリアル面にハロゲン化物イオン X が 1 から 4 配位 (フッ素のみ 1 から 5 配位) した錯体 $[\text{UO}_2\text{X}_n]^{2-n}$ 、X⁻ が 2 配位、水が 1-3 配位した中性錯体 $[\text{UO}_2\text{X}_2(\text{H}_2\text{O})_n]$ について計算を行った。これら分子を結晶構造に基づいてモデリングし、構造最適化を PBE0 汎関数、SARC-TZVP (U, I 原子)、def2-TZVP (その他原子) 基底関数、スカラー ZORA ハミルトニアンを用いて行った。その後一点計算を PBE0 汎関数、Dyall.v3z 基底関数、Spin-orbit X2C ハミルトニアンを用いて行った。この結果を基に、ある原子軌道 (AO) のエネルギーに対する分布がわかる DOS 解析 [8] を行い、内部転換電子スペクトルとの比較から化学状態の推定を行った。

次に、推定した各化合物について原子核の壊変定数、つまり半減期の計算を行った。壊変定数は分子中での U 原子軌道の変化が十分小さいと仮

定し、式(1)により計算した。

$$\lambda(\text{s}^{-1}) = A \times \sum_{j \in \text{AO}} N(j) \times w_e(j) \quad (1)$$

ここで、 $N(j)$ は分子中におけるU原子のAO j の電子占有数、 $w_e(j)$ はAOからの壊変確率である電子因子、 A は核構造に依存する定数である。 A 、 $w_e(j)$ は真空中のU単原子を仮定した場合の計算値[9]を用いた。 $N(j)$ は各ハロゲン化物の一点計算の結果をProjection Analysis [10,11]により解析し算出した。この際、一点計算における汎関数を変化させ妥当性の確認を行った。汎関数は既存のもの(LDA、BP86、BLYP、PBE、B3LYP、PBE0、PBE38、CAM-B3LYP、HF)およびPBE0汎関数のMixing Parameter a を表1に示すように変化させたものを使用した。

表1 PBE0汎関数からを変化させた汎関数

Functionals	a
PBE	0.0
PBE13	12.5
PBE0	25.0
PBE38	37.5
PBE50	50.0
PBE63	62.5
PBE75	75.0
PBE88	87.5
PBE100	100.0

ただし、 a は式(2)に示すように交換相関エネルギー E_{xc} に含まれる経験的パラメーターである。

$$E_{xc} = (1-a)E_x^{\text{PBE}} + aE_x^{\text{HF}} + E_c^{\text{PBE}} \quad (2)$$

ここで E_x^{PBE} 、 E_c^{PBE} はそれぞれPBE汎関数の交換・相関エネルギー、 E_x^{HF} はHF法による厳密交換エネルギーである。

妥当性は ^{235}U 半減期の実験値と計算値のプロットに対する線形回帰によるRMSE (Root Mean Squared Error)により評価した。

最後に、RMSE値が最も低い汎関数による計算結果を用いて、半減期変化への各軌道殻電子の寄

与や、より詳細な解析を行い電子状態と半減期の相関を調べた。

3. 結果と考察

Uの6p軌道について、DOS解析を行った結果を図1に示す。ここから、6p軌道の分布の配位数・配位構造による変化は小さいことがわかった。先行研究においては、ハロゲン化水素との反応時間依存性が取得されており、化学反応は十分進行していることが確認されている[5]。そのため、 UO_2^{2+} のエクアトリアル位はすべてハロゲン化物イオンが配位しているとし、文献[12-15]での最大配位数から、フッ化物は $[\text{UO}_2\text{F}_6]^{3-}$ 、他のハロゲン化物は $[\text{UO}_2\text{X}_4]^{2-}$ として存在すると推定した。

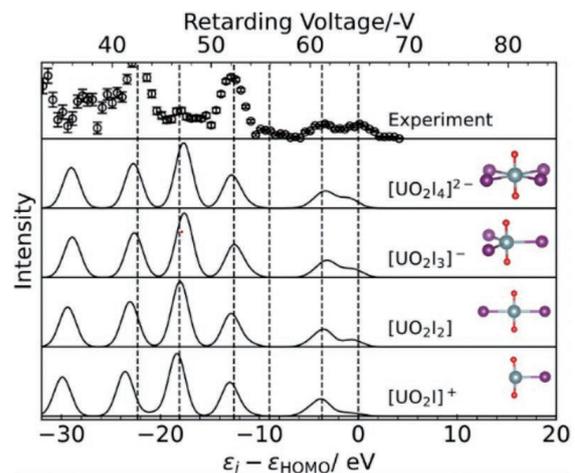


図1 $[\text{UO}_2\text{L}_n]^{2-n}$ のU 6p軌道のPDOSとヨウ化物の内部転換電子スペクトル。線スペクトルを半幅値2 eVのガウス関数で畳み込んだ。

次に、 ^{235}U 半減期のRMSEの値の汎関数依存性を図2に示す。どの汎関数においても計算値はハロゲン化物の半減期の実験値の序列を再現した。最も良い結果を示したPBE63汎関数ではRMSEが実験誤差よりも小さく、半減期の回帰直線からの予測が可能であるといえる。また、Mixing ParameterとRMSEの関係を見ると、より a の値が大きい、つまりより厳密交換エネルギーの割合が大きい汎関数がよりよい線形性を示す事がわかった。ここから、共有結合性が半減期変化に関与することが示唆された。

最後に、PBE63汎関数による結果を用い詳細

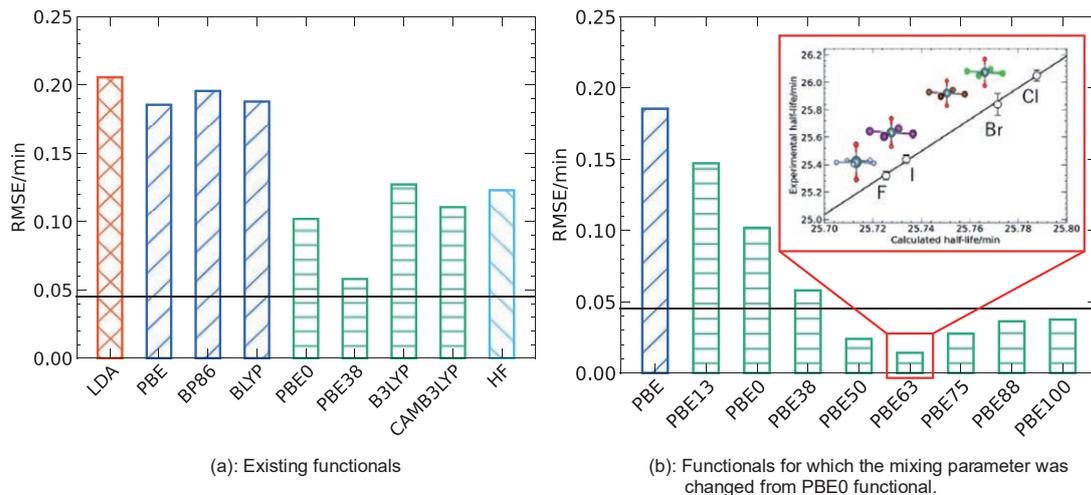


図 2 ^{235}U 半減期の RMSE 値の汎関数依存性および PBE63 汎関数を用いた場合の半減期の計算値と実験値の関係。(a) は既存の汎関数による結果、(b) は PBE0 汎関数の Mixing Parameter を変化させた汎関数を用いた結果。図中の黒線は各ハロゲン化物における実験の誤差の平均値を表す。

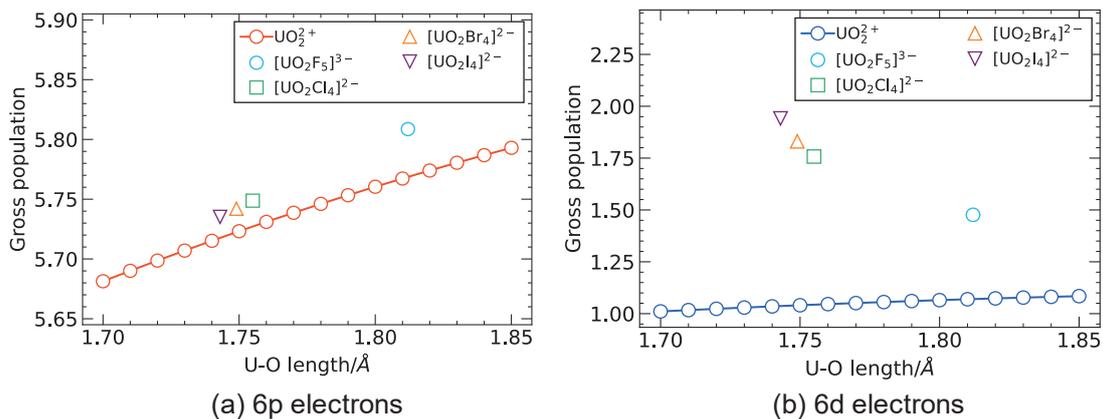


図 3 U-O 結合長と 6p(a)、6d(b) 電子数の関係

表 3 各ハロゲン化物における $\Delta\lambda_j$ の計算値および構造最適化後の U-O 結合長

	F	Cl	Br	I
$6p_{1/2}$	29.3	20.1	18.2	15.9
$\Delta\lambda_j$				
$6p_{3/2}$	37.7	23.0	20.7	18.1
(%)				
$6d_{3/2}$	12.2	21.7	24.0	27.1
$6d_{5/2}$	21.2	35.2	37.1	39.0
U-O length/Å	1.821	1.755	1.749	1.743

な解析を行った。表 2 に、各ハロゲン化物における壊変定数の UO_2^{2+} からの変化に対する AO j の寄与 $\Delta\lambda_j$ と U-O 結合長を示す。 $\Delta\lambda_j$ の値はフック

物は 6p 軌道、他のハロゲン化物は 6d 軌道からの寄与が大きいことがわかった。また、この違いは各ハロゲン化物における U-O 結合長の関係と類似していることがわかった。

そこで、 UO_2^{2+} 、各ハロゲン化物の U-O 結合長と電子配置の関係に着目し解析を行った。図 3 に、各ハロゲン化物、 UO_2^{2+} の U-O 結合長と電子数の関係を示す。ここから、6p 電子数は UO_2^{2+} とハロゲン化物で同様の傾向を示したのに対し、6d 電子数は異なる傾向を示すことがわかった。

6p 電子数の変化は UO_2^{2+} 分子に特徴的な、本来完全充填されているはずの 6p 電子が f、d 電子との混成、U-O 共有結合により減少する 6p-hole

効果 [16] に起因すると考えられる。U-O 結合距離が長くなるにつれ共有結合性は弱まるため、図 3(a) に示すような関係、つまり 6p 電子数の増加が得られる。各ハロゲン化物の 6p 電子数の序列は $F \gg Cl > Br > I$ となる。また、図 3(b) から、6d 電子数はハロゲンの原子番号が大きいほど電子数が多く、U-O 結合長と相関がないことがわかる。ここから、6d 電子はハロゲンからの電子供与により変化していると考えられる。各ハロゲン化物の 6d 電子数の序列は 6p 電子の場合とは逆に、 $I > Br > Cl > F$ となる。

また、どちらの電子の変化についても結合性、反結合性を調べることができる OPDOS 解析や電子密度解析からもこの考察を支持する結果が得られた。

電子数が増加するほど半減期は短くなるため、6p 電子の変化は半減期変化に対し $F \ll Cl < Br < I$ の序列で、6d 電子数の変化は $I < Br < Cl < F$ の序列で寄与する。これら 2 つの、反対の序列を示す効果が合わさることにより、特徴的な半減期変化が引き起こされたものであると考えられる。

4. まとめ

実験結果からは十分理解されていなかった ^{235m}U ハロゲン化物の半減期変化について、相対論的 DFT 計算を用いた考察を行った。DOS 解析、実験条件から各 ^{235m}U ハロゲン化物における化学状態を $[\text{UO}_2\text{F}_5]^{3-}$ 、 $[\text{UO}_2\text{X}_4]^{2-}$ ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) と推定した。これら化合物について半減期の計算を行ったところ、実験結果の傾向をよく再現した。また、半減期変化について電子状態の観点から考察を行ったところ、ハロゲン、酸素それぞれとの共有結合性が合わさり特徴的な半減期変化が引き起

こされたことが示唆された。

参考文献

- [1] M. N. Mevergnies and P. D. Marmol, *Phys. Lett.* **49B**, 428 (1974).
- [2] M.N. Mevergnies, *Phys. Rev. Lett.* **29**, 1188 (1972).
- [3] Y. Shigekawa, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **976**, 164207 (2020).
- [4] Y. Shigekawa, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 053508 (2016).
- [5] 益田ら、日本放射化学会第 67 回討論会 (2023)、1B03.
- [6] F. Neese, *WIRES Comput. Molec. Sci.* **12**, 1(2022).
- [7] T. Saue, *et al.*, *J. Chem. Phys.* **152**, 204104 (2020).
- [8] R. S. Mulliken, *J. Chem. Phys.* **23** 2338 (1955).
- [9] A. M. Frolov, *Radiat. Phys. Chem.* **72**, 541 (2005).
- [10] S. Dubillard, *et al.*, *J. Chem. Phys.* **124**, 154307 (2006).
- [11] G. Knizia, *et al.*, *J. Chem. Theory Comput.* **9**, 4834(2013).
- [12] V. Vallet, *et al.*, *Inorg. Chem.* **40**, 3516 (2001).
- [13] K. Servaes, *et al.*, *Inorg Chem.* **44**, 7705 (2005).
- [14] M. Sornhein, *et al.*, *Polyhedron* **28**, 1281 (2009).
- [15] M.J. Crawford and P. Mayer, *Inorg. Chem.* **44**, 5546 (2005).
- [16] S. Larsson and P. Pyykkö, *Chem. Phys.* **101**, 355 (1986).

特集 (日本放射化学会第 68 回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

メスbauer分光法を用いた還元的環境における 粘土鉱物中の Fe の酸化状態と構造の分析

森井 志織

(国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構)



1. 緒言

粘土鉱物は負電荷を帯びて共存陽イオンを吸着する性質があることから、放射性廃棄物地層処分時に放射性核種の環境中への拡散を防ぐための緩衝材として利用することが計画されている。そのため、地下環境（還元環境）における粘土鉱物に対する放射性核種の反応機構の解明は、放射性廃棄物地層処分時の安全性評価に対する科学的信頼性の向上のために重要である。

近年、粘土鉱物構造中の鉄(Fe)の酸化状態が陽イオン吸着容量に影響を及ぼすことや^[1]、粘土鉱物構造中の Fe が共存元素と酸化還元反応を引き起こすことで共存元素を水に可溶性化学種から不溶性化学種に変え粘土鉱物に吸着させる性質があること^[2]が報じられている。これらの性質から、粘土鉱物構造中の Fe の酸化状態は粘土鉱物の放

射性核種吸着能に影響を及ぼす可能性があると考えられる。しかし、特定の酸化還元電位(Eh)の環境における粘土鉱物構造中の Fe の酸化状態や配位構造の詳細は明らかになっていない。

本研究では、還元環境における粘土鉱物への放射性核種の吸着挙動を詳細に明らかにするために、特定の電位を印加して還元した粘土鉱物試料の、粘土鉱物構造中の Fe の酸化状態や配位構造を Fe-57 メスbauer分光法によって詳細に把握した。

2. 実験方法

八面体構造中に Fe(全てFe(III))を 20 wt% 程度含有しているノントロナイト（粘土鉱物標準試料 N Au-1)^[3] を、粘土鉱物試料として使用した。実験は酸素濃度 10 ppm 程度の嫌気性グローブボックス内で全て行った。使用した電気化学実験用セルの概要を図 1 に示す。pH 7.5 の支持電解質含有

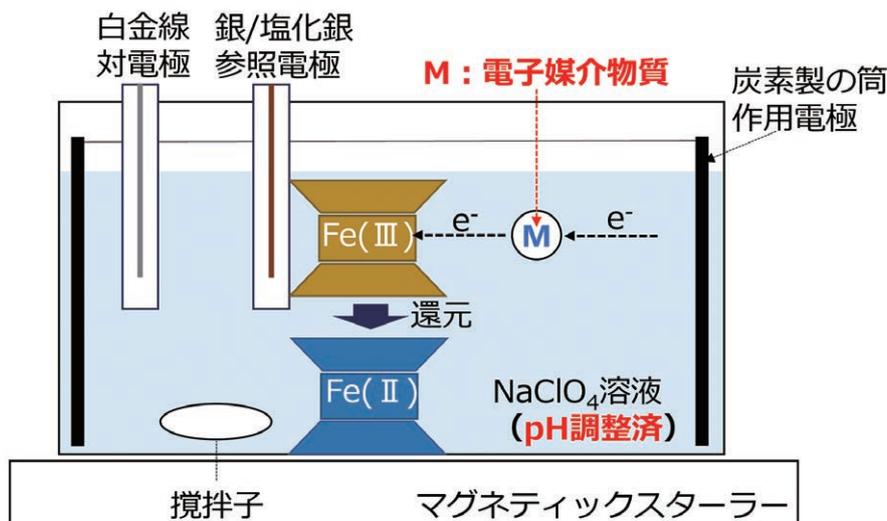


図 1 実験で使用した電気化学実験用セル

溶液に標準水素電極電位 -0.5 V の電圧を印加し、さらに試料の電子授受反応を促進する電子伝達物質を添加した。そこへ粘土鉱物試料を懸濁させ、電解還元を行った。約 20 mg の試料の電解還元を行い、その間に流れた電気量を算出することにより、粘土鉱物試料中の全 Fe のうち Fe(II) に還元された割合を調べた。

電解還元後の粘土鉱物試料をビニールでパックし、嫌気性環境を保った状態でメスbauer分光測定を実施した。本研究で使用した装置の写真と測定法の概要を図2に示す。メスbauer分光測定とは線源を試料に対して等加速度で近づけたり遠ざけたりすることによって γ 線のエネルギーをドップラー効果により変化させ、発生した γ 線の共鳴吸収スペクトルから、試料中の元素の軌道電子の状態や化学状態を調べる手法である。電解前後のメスbauerスペクトルを比較することで、粘土鉱物構造中の Fe の酸化状態と配位構造の変化を調べた。

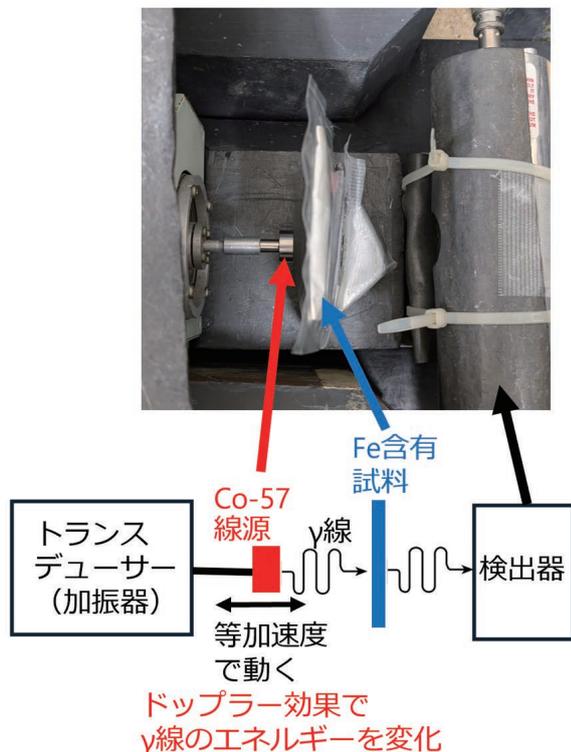


図2 Fe-57 メスbauer分光装置の概要

3. 結果と考察

電解後の試料のメスbauerスペクトルを図3に示す。ピークフィット解析を行い、メスbauerパラメーターである異性体シフト値と四極分裂値を、他の研究で報告されている値^[3-6]と比較したところ、粘土鉱物(NAu-1)の八面体構造中の Fe(III) と Fe(II) の値に一致した。これらの結果より、電解還元前後において Fe は粘土鉱物の八面体構造中に Fe(III) または Fe(II) として存在しており、粘土鉱物の構造内で動かずに還元されている可能性が示唆された。

各成分のピークフィッティング結果から求めたピーク面積より、電解還元によって粘土鉱物構造中の Fe(III) の約 40% が Fe(II) に還元されていることが明らかになった。一方、電解中に流れた電気量から計算した結果と比較したところ、粘土鉱物構造中の Fe が Fe(III) から Fe(II) に還元された割合は、メスbauer分光測定と電気化学実験で数%異なっていた。

電解時に粘土鉱物構造中の Fe が溶液中に数%以下の割合で溶けだすことが著者の実験では示唆されている。その影響で電解還元後の粘土鉱物試料に含まれる Fe の総量が減少し、メスbauerスペクトルと電解還元時の電気量により導出した Fe(II)、Fe(III) の割合が異なっている可能性がある。その点も踏まえ、今後、粘土鉱物構造中の Fe の還元機構を詳細に明らかにする。

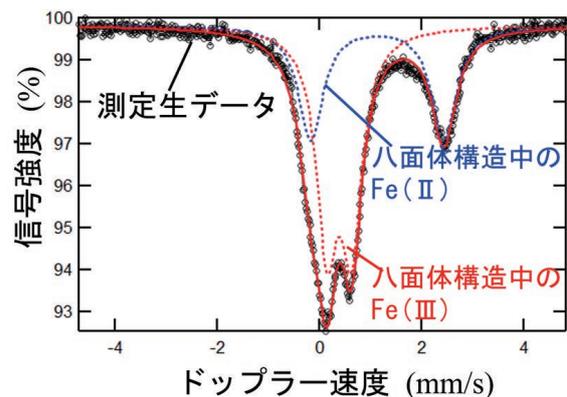


図3 標準水素電極電位 -0.5 V で電解した粘土鉱物試料のメスbauerスペクトル

4. 結言

粘土鉱物の八面体構造中に Fe を含むノントロナイトに対し、標準水素電極電位 -0.5 V の電圧を印加して電解することにより、粘土鉱物の八面体構造中の Fe(III) の一部が Fe(II) に還元されることが本研究により明らかになった。

還元環境における粘土鉱物構造中の Fe の酸化状態と配位構造が分かったので、今後、粘土鉱物構造中の Fe(II) が、共存する放射性核種と酸化還元反応を起こすか調べる。また、粘土鉱物構造中の Fe の酸化状態に対しては Eh のみではなく pH も影響することが著者の実験により明らかになっている^[7]。多様な Eh-pH 条件において電解をした粘土鉱物構造中の Fe の酸化状態や配位構造を調べることで、将来的には粘土鉱物と共存する元素の吸着挙動や酸化還元挙動の推定が可能になると考えられる。

引用文献

- [1] J. Hadi, C. Tournassat, C. Lerouge. Pitfalls in using the hexaamminecobalt method for cation exchange capacity measurements on clay minerals and clay-rocks: Redox interferences between the cationic dye and the sample. *Appl. Clay Sci.*, **119**, 393-400 (2016).
- [2] Y. Qian, A. C. Scheinost, S. Grangeon, A. Hoving, S. V. Churakov, M. Marques Fernandes. Influence of structural Fe content in clay minerals on selenite redox reactions: Kinetics and structural transformations. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **377**, 19-33 (2024).
- [3] C. A. Gorski, M. Aeschbacher, D. Soltermann, A. Voegelin, B. Baeyens, M. Marques Fernandes, T. B. Hofstetter, M. Sander. Redox properties of structural Fe in clay minerals. 1. Electrochemical quantification of electron-donating and -accepting capacities of smectites. *Environ. Sci. Technol.*, **46**, 9360-9368 (2012).
- [4] C. A. Gorski, L. E. Klüpfel, A. Voegelin, M. Sander, T. B. Hofstetter. Redox Properties of Structural Fe in Clay Minerals: 3. Relationships between Smectite Redox and Structural Properties. *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 13477-13485 (2013).
- [5] D. P. Jaisi, R. K. Kukkadapu, D. D. Eberl, H. Dong. Control of Fe(III) site occupancy on the rate and extent of microbial reduction of Fe(III) in nontronite. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **69**, 5429-5440 (2005).
- [6] A. Neumann, T. L. Olson, M. M. Scherer. Spectroscopic evidence for Fe(II)-Fe(III) electron transfer at clay mineral edge and basal sites. *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 6969-6977 (2013).
- [7] 森井志織ら、日本地球化学会 第 71 回年会 PR0128.

特集 (日本放射化学会第 68 回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

J-PARC ニュートリノ実験施設のビーム運転に伴い生成する放射性水銀

渡邊 瑛介

(高エネルギー加速器研究機構/J-PARC センター)



はじめに

茨城県東海村にある大強度陽子加速器実験施設 J-PARC は、高エネルギー陽子を標的に入射して発生させた二次粒子を用いて物質・生命科学的研究や素粒子・原子核実験を推進する共同利用施設であり、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) によって運営されている。KEK 放射線科学センター所属の筆者は、J-PARC 放射線管理セクションのメンバーとして、J-PARC の放射線安全等に関する業務を行っている。筆者らは、ニュートリノ実験施設の放射線管理業務で見えてきた放射性水銀の生成という現象について放射化学的なアプローチでその理解を試みており、本稿にて簡単に紹介する。

ニュートリノ実験施設と放射性排気

ニュートリノ実験施設は、30 GeV の陽子を黒鉛ターゲットへと照射することにより π 中間子を生成、崩壊してできるニュートリノをビームとして取り出す施設であり、295 km 離れた岐阜県神岡でのニュートリノ検出を行う T2K 実験[1] に代表される素粒子物理学実験が進行中である。

気体廃棄物中の放射能の測定から、放射性水銀 Hg-197, Hg-203 がニュートリノ実験施設の運転に伴い生成することがすでに分かっており、その放出量はおよそ年間 10^8 Bq オーダーである。この量は、法令で定められる放射性廃棄物の排出濃度基準と比較すると十分に低く、J-PARC の運転やニュートリノ物理の支障となるようなものではない。一方で、J-PARC は液体水銀を標的とする中性子源が運転中であり、この水銀ターゲット中には 10^{14} – 10^{15} Bq 程度の放射性水銀が存在すると見

積もられている [2]。J-PARC 内の各施設での放射性核種の生成過程やその挙動についての理解を進めエビデンスを積み重ねていくことは、万が一の事故時における素早く的確な状況理解や対策立案につながる。

本研究では、ニュートリノ実験施設での放射性水銀の生成源の解明に向けて、ビーム運転に伴い生成する放射性水銀を活性炭に捕集し、同位体分布を調べた。

実験

捕集実験はニュートリノ実験施設内ターゲットステーション地下 1 階機械室にて行われた。2024 年 6 月のニュートリノ実験施設の 750 kW 運転に伴い、活性炭カートリッジ (ADVANTEC, CHC-50-A00) を用いて、既設のハイボリュームエアサンプラにより放射化した空気を接触させた。活性炭カートリッジの前段には放射性ダスト用ろ紙 (ADVANTEC, HE-40T) を設置しており、Be-7 などの非揮発性核種はろ紙に吸着するようにした。ビーム運転時、地下エリアは高線量のインターロックエリアとなるため、機械室の空気中に含まれる核種のみがターゲットステーション棟地上部にて捕集され、放射化したガス成分の Ar-41 等核種は再び地下へと戻る循環系での捕集システムとした。

結果と考察

ガンマ線解析の結果、ビーム運転に同期して捕集を行った活性炭中には、Hg-190、191g、191m、192、193g、193m、195g、195m、197g、197m および 203 の幅広い放射性水銀が検出された。そのほか、活性炭カートリッジには Br-82 が、ダストろ紙に Be-7 などの核種が検出された。活性炭中に捕集された放射性水銀の質量分布を図 1 に示す

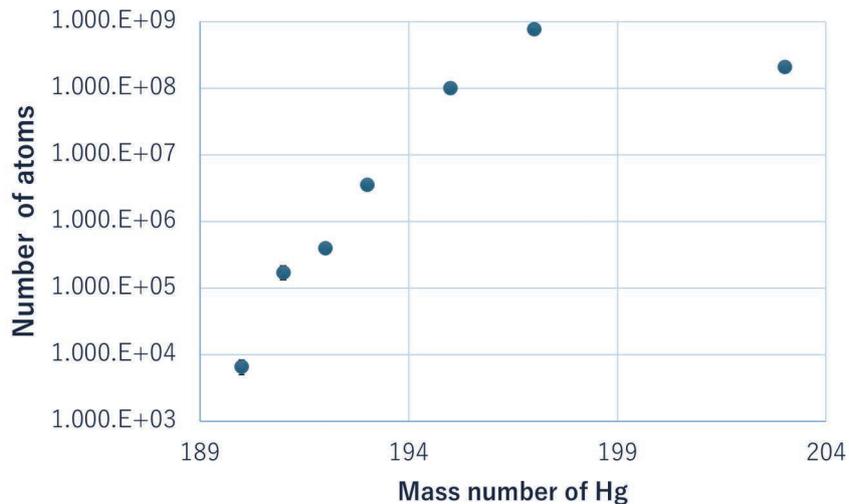


図 1. 活性炭中に捕集された放射性水銀の質量分布

が、中性子過剰側から不足側にかけて生成量が単調に減少していく様子がわかる。

放射線輸送コード PHITS[3]を用いて、実際のニュートリノ実験施設の体系にて放射線輸送シミュレーションを行った。30GeV陽子の黒鉛ターゲットへの入射に伴い発生する高エネルギー粒子が、2次3次反応を引き起こして、ターゲット容器の位置する部屋から機械室へと粒子が抜けていく描像が明らかとなった。本捕集実験を行った機械室空間のターゲット側壁面の平均的な粒子スペクトルの計算結果を図2に示す。数十から数百 MeV の中性子が多く分布することが特徴的であるが、このエネルギー帯の陽子・中性子を入射粒子として考えると、天然に存在する安定同位体 Pb-204 や Hg-196, 198 を標的として Hg-190 等の中性子不足核が生成する反応が起きることは十分あり得ると考えられる。また、 ^{nat}Au 、 ^{nat}Hg 、 ^{nat}Pb および Rn-222 を対象とした核反応モデル計算からは、 ^{nat}Hg および ^{nat}Pb を標的としたときに図1で示した実験データと類似した質量分布をもつ放射性水銀が生成されることが定性的ではあるものの明らかになった。

おわりに

現時点では放射性水銀の生成源として定性的に鉛や水銀を候補として挙げるにとどまっているが、今後は仮説の定量的な検証に向けて空気中金

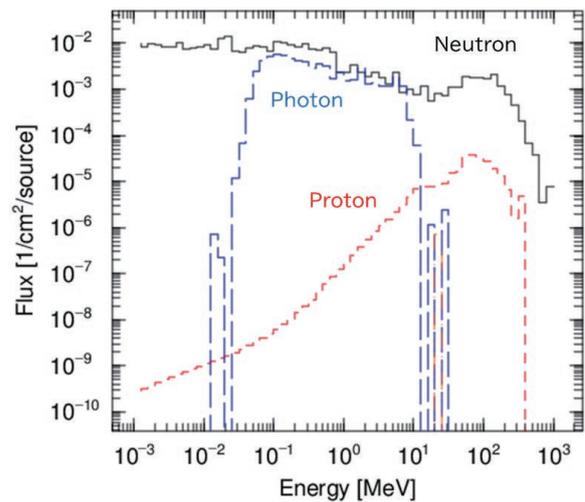


図 2. PHITS により計算されたニュートリノ実験施設地下機械室壁面における平均的な粒子スペクトル

属濃度の測定などを行っていく予定である。放射性水銀は、ニュートリノ実験施設のみならず水銀ターゲット擁する物質・生命科学実験施設 (MLF) や金ターゲット擁するハドロン実験施設においても検出され、J-PARC における「要注意元素 (核種)」である。その一方で活性炭への吸着率といった基礎データも十分に取得されていない状況である。放射化学的観点に基づき、生成メカニズム理解から基礎データ取得、そして実際の放射線管理実務までへと一貫通貫で展開していきたい。

謝辞

捕集実験は大山雄一博士（KEK 素粒子原子核研究所）の協力を得て行われ、また PHITS 計算は李恩智博士（KEK 放射線科学センター）によって行われた。本研究は科研費 24K17636 の助成を受けている。

参考文献

- [1] K. Abe et al., *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A* **659** (1), 106-135 (2011).
- [2] Y. Kasugai and T. Kai, *JAEA-Technology* 2009-010 (2009).
- [3] T. Sato et al., *J. Nucl. Sci. Tech.* **55** (6), 684-690 (2018).

解 説

「もんじゅ」サイト新試験研究炉の概要と実験装置整備計画

佐藤 信浩、稲垣 誠、高宮 幸一
(京都大学複合原子力科学研究所)

〒 590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西 2-1010

要旨

「もんじゅ」サイト新試験研究炉は、西日本における原子力科学・中性子利用分野の研究開発および人材育成の中核的拠点として、設置に向けた計画が進んでいる。京大複合研を中心に、中性子ビーム実験装置と中性子照射実験装置の両者について検討が行われており、利用ニーズの高い優先設置装置や原子炉設計に密接に関連する炉周辺装置について先行して取り組みが進められている。中性子照射実験装置についても、垂直照射孔やホットラボラトリなどについて具体的な案が検討されている。各装置ごとに編成されたタスクフォースを中心に、関連コミュニティの意見を積極的に取り入れながら、利用者のニーズに応える高度な研究施設の実現を目指している。

キーワード

新試験研究炉、中性子ビーム利用、中性子照射利用、「もんじゅ」サイト

はじめに

高速増殖原型炉「もんじゅ」(福井県敦賀市)の廃止措置にともない同サイトに設置されることになった新試験研究炉は、中性子ビーム利用を主目的とする熱出力 10 MW 未満の中出力炉として、日本原子力研究開発機構(JAEA)、京都大学、福井大学からなる実施機関において計画が進められている。西日本における原子力科学・中性子利用研究の中核的拠点としてふさわしい機能の実現と地元への貢献を念頭に、中性子照射利用も含めた多目的利用を視野に入れ、多様な分野の学術研究や産業利用に供される研究施設の実現を目指している。本稿では、新試験研究炉の概要について述べるとともに、中性子照射利用設備やホットラボラトリを含む新試験研究炉の実験装置検討の現状と今後の計画について紹介する。

新試験研究炉設置の経緯

施設の高経年化や新規制基準への対応等の理由

から日本国内の試験研究炉の数が減少の一途をたどる中、西日本における原子力・中性子研究の拠点として利用されてきた京都大学研究用原子炉 KUR も 2026 年の運転停止が決定し、原子力・中性子分野の研究開発や人材育成の基盤が脆弱化することへの懸念が増している。一方、カーボンニュートラルの実現や増加する原子力施設の廃止措置への対応、中性子産業利用の拡大など、原子力分野を取り巻く社会的状況の変化に伴い、将来に向けた研究基盤の維持発展と高度な原子力人材の継続的な育成強化がこれまで以上に重要となっている。このような状況のもと、2016 年 12 月の原子力閣僚会議において、「もんじゅ」を廃止措置し、将来的に同サイトへ新たな試験研究炉を設置することが決定された¹⁾。その後、文部科学省による調査等を経て、2020 年 9 月、複数の炉型候補の中から材料・ライフサイエンス等の幅広い分野における学術・産業利用が見込まれる炉型として、新試験研究炉を「中性子ビーム利用を

主目的とする熱出力 10 MW 未満の中出力炉」とすることが決まり²⁾、2020 年 11 月より JAEA、京都大学、および福井大学の 3 機関を中核的機関として文部科学省による委託事業「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および運営の在り方検討」が開始された³⁾。この中で、JAEA は「試験研究炉の設計・設置・運転」、京都大学は「試験研究炉の幅広い利用」、福井大学は「地元関係機関との連携構築」を担当し、ワーキンググループを設けて具体的な検討を実施するとともに、新試験研究炉のステークホルダーである学术界、産業界、地元関係機関等からなるコンソーシアムに対し定期的に検討状況の報告と意見の聴取を行って、幅広い意見を集約しながら検討を進めた⁴⁻⁸⁾。その後、2023 年 3 月から新試験研究炉は JAEA を実施主体とする詳細設計段階へと移行し、上記 3 機関の間で協力協定を締結して緊密な連携を取りながら引き続き詳細設計の検討を実施する一方⁹⁻¹¹⁾、2023 年 11 月には、設計、製作および据付を実施する主契約企業として三菱重工業株式会社が選定され原子炉設置に向けた計画の策定が進められている。

京都大学複合原子力科学研究所（京大複合研）では、新試験研究炉に関する主体的な取り組みを推進するため、2021 年 5 月に新型研究炉開発・利用センター（2024 年 5 月、新試験研究炉開発・利用センターに改称。以下、新試験研究炉センターという。）を設立し、さらに 2023 年 4 月に JAEA と

の共同研究契約に基づき設置された新試験研究炉産学共同研究部門に専従の教職員を配置して新試験研究炉センターを支援する体制を構築した¹²⁾。新試験研究炉センターは、KUR の運用や管理を通じて得た経験や知見を活かし、実験装置や運営体制に関する検討を進めており、後述の実験装置検討タスクフォースにおいても中心的な立場で個別の実験装置における計画立案や仕様検討に関する活動を主導している。

原子炉の設計

ここでは 2024 年までの検討における原子炉の設計の要点を簡単に紹介する。詳細については参考資料⁵⁻¹¹⁾を参照されたい。新試験研究炉は、国内の他の中性子ビーム炉である JAEA の JRR-3 や京大複合研の KUR と同様軽水減速軽水冷却のスイミングプール型原子炉であり、燃料要素の周囲に反射体として重水を配置する。複数の炉心形状を検討した結果、JRR-3 に匹敵する 1.5×10^{14} n/cm²/sec 以上の熱中性子束（重水反射体領域）が得られると同時に、400 日以上運転持続可能日数や、中心と四隅を垂直照射孔として利用できる利点を有する ce20 炉心（Fig. 1）を検討が進められている。さらに、物質・生命科学研究において重要度の高い冷中性子ビームに関しては、液体重水素を利用した冷中性子源（CNS）の設置によって大幅な冷中性子強度の向上が期待されることから、安全性の確保やビーム取出しの最

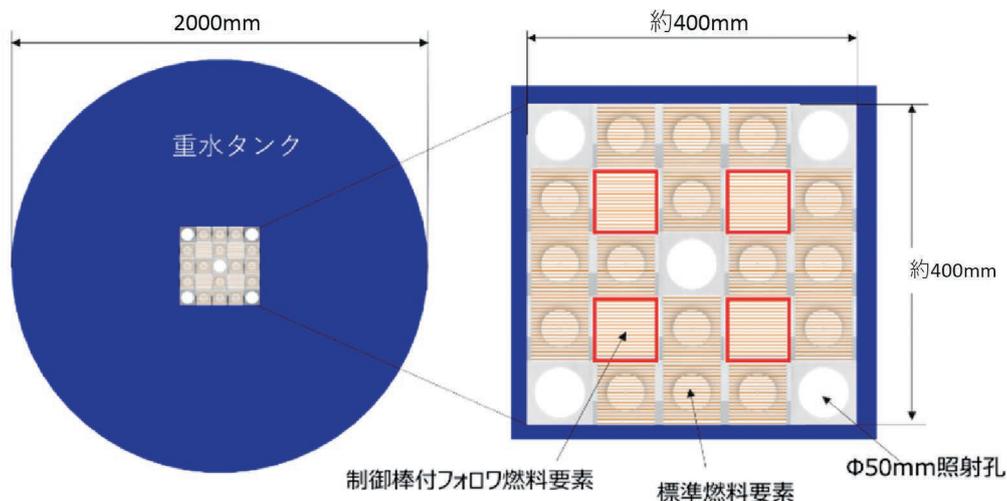


Fig. 1 Design of the ce20 core. (cited from Ref. 11)

適化の検討を進め、高性能 CNS を備えた競争力の高い研究施設の実現を目指している¹⁰⁾。水平実験孔や垂直照射孔のサイズや配置については、実験装置の種類や仕様に応じて最適化する必要があり、現在、後述の実験装置検討タスクフォースとの間で意見交換を行いながら、望ましい設計に向けた検討を加えている段階である。

中性子実験装置の検討

新試験研究炉は中性子ビーム利用を主目的とするものの、広範な利用を促すために中性子照射利用も視野に入れて実験装置の検討を行っている。中性子実験装置は、研究施設としての新試験研究炉の特徴を決定する重要な要素であり、新試験研究炉が長期にわたって持続的に活用し得るか否かは、実験装置の選定と設計によるところが大きい。世界と伍する先端性と幅広い利用を支える汎用性のバランスがとれた多様な実験装置群を整備することで、学術研究、産業振興、人材育成、地域貢献に資する有用性の高い研究拠点を構築することができる。

実験装置レイアウトのイメージ図を Fig. 2 に示す。中性子ビーム利用においては、原子炉で発生した熱中性子や冷中性子を炉室内または炉室に隣接したビームホールに設置された実験装置に導いて実験を行う。一方、中性子照射利用は、主に原子炉炉心またはその近傍に試料を移送し、一定時間中性子を照射した後に試料を取り出し必要な処理や分析を行う。中性子照射後の試料は放射性

を帯びているため、取り出した試料の分析を行うホットラボなどの施設を併設する必要がある。

実験装置の検討にあたって、想定されるすべての実験装置を同時並行で進めることはコストや人材確保の点から難しい。そこで、利用ニーズや汎用性の点から重要度の高い装置に絞り込み、優先設置装置として最初の検討と設置を進めることとした¹¹⁾ (Table 1)。ここに掲げた優先設置装置は、学術研究だけでなく産業利用においても広く利用されており、新試験研究炉の稼働直後から多数

Table 1 Neutron instruments for prior consideration.

中性子ビーム実験装置	
中性子小角散乱	優先設置装置
中性子反射率	優先設置装置
中性子イメージング	優先設置装置
	炉周辺装置
中性子粉末回折	優先設置装置
	炉周辺装置
三軸分光	炉周辺装置
素粒子原子核	炉周辺装置
中性子照射実験装置	
中性子放射化分析	優先設置装置
	炉周辺装置
RI 製造 (研究用)	炉周辺装置
陽電子ビーム	炉周辺装置
材料照射	炉周辺装置
生物照射	炉周辺装置

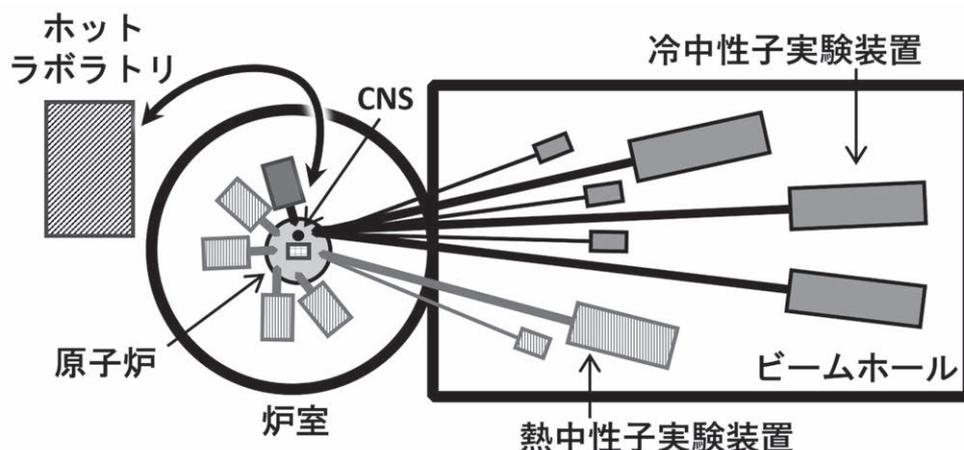


Fig. 2 Conceptual illustration of the neutron instruments layout.

の成果が期待される。一方、炉室内に設置される実験装置や炉心とその近傍に試料を移送する実験装置などの装置（炉周辺装置）は、原子炉本体の設計と密接に関連するため、必要な装置の仕様に関する情報を原子炉設計と実験装置検討の担当者間で十分に共有する必要がある¹¹⁾。現在、Table 1に示した炉周辺装置について優先設置装置と合わせて先行して検討を進めている。また、多様化・高度化する学術研究や産業利用に対応するためには、上述の装置のみならず、さらに発展的な実験装置群を整備する必要がある⁷⁾。関連コミュニティの意見や要望をもとに後続して整備する実験装置の検討を行い、新試験研究炉の利用価値を最大限に引き出す取り組みが求められる。

中性子実験装置は新試験研究炉の中核をなす要素であるが、機能的かつ円滑な実験を実施するためには、それ以外の周辺実験環境の整備も必須である¹¹⁾。これに該当するものとして、①中性子実験を補完するX線測定装置や電子顕微鏡、分光測定装置などの機器分析装置、②対象となる試料の種類に応じて最適化された複数の試料準備室、③自動測定や遠隔測定、ビッグデータ解析等に対応したDX環境などが挙げられる。新試験研究炉を使い勝手の良い研究施設として実現するためには、周辺実験環境の充実が不可欠である。

中性子照射実験装置

新試験研究炉に設置される中性子照射実験装置に関して、京大複合研は2021年2月16日付けで日本放射化学会より「福井県もんじゅサイトに新設される試験研究炉への要望」を受領した。これは、日本放射化学会新研究炉検討委員会により会員へのアンケート等を通じて集約された要望を提言として取りまとめたものであり、中性子放射化分析や核化学等の分野における専門家の意見が反映されている¹³⁾。京大複合研ではこれらの要望を参考に新試験研究炉に設置する中性子照射実験装置の検討を進めている。中性子放射化分析やRI製造、材料照射試験などにおいては、原子炉の炉心近傍や重水反射体領域に試料を移送し、目的に応じたスペクトルや線束の中性子を一定時間照射した後、試料を外部に取り出して分析を行う。新試験研究炉において、多様な分野の中性子照射実

験を最適な条件で実施するためには、試料の形状やサイズ、中性子のスペクトルや線束、あるいは試料移送の頻度等に応じた複数の垂直照射孔を整備し、最適な試料移送装置を備え付けることが求められる。また照射後の放射化した試料を取扱うためのホットラボの整備も欠かせない。

新試験研究炉において設置を検討している中性子照射装置には、気送照射装置、水力照射装置、吊下げ照射装置がある¹¹⁾。気送照射装置は圧縮気体によって試料カプセルを原子炉内部に移送する装置であり、高速移送が可能のため、短寿命核種の測定が可能である。一方、照射試料は小型軽量のものに限られ、カプセルの素材にポリエチレンなどのプラスチックが用いられることから長時間照射には適していない。気送照射装置の主要な用途は中性子放射化分析であり、異なる条件の照射を可能とするため、異なる位置に配置した複数の照射孔を整備する。また、照射後試料の迅速自動測定や、自動繰り返し照射測定に対応できるシステムの構築も検討している。

水力照射装置は試料カプセルを水流で原子炉内部に移送する装置であり、移送速度は遅いものの、耐久性の高い金属製カプセルを用いることができるため、長時間照射に適している。1つの照射孔の占有時間が長くなるため複数の照射孔を整備して多数の試料の照射に対応する。水力照射装置は主に長寿命核種の放射化分析や、Ar/Ar年代測定、RI製造のための利用を想定している。

吊下げ照射装置は、KURの傾斜照射孔と同様、原子炉上部から試料をワイヤーで吊り下げ炉心近傍に移送する装置である。気送・水力照射装置よりさらに大きな試料の照射が可能であり、機械部品やデバイスの照射試験などに用いることを想定している。

以上の照射装置はいずれも原子炉の運転中に試料の移送が可能な装置であり、任意のタイミングで試料の挿入・取出しが可能である。一方、燃料領域に設置される垂直照射設備は、原子炉運転中の試料の挿入・取出しはできないものの、高中性子束の高速中性子が照射可能であり、RI製造や材料照射に利用することが可能である。また、材料照射試験のための大口徑照射孔などの設置も検討されており、様々な用途に対応する照射装置を

整備することで多様な研究に対応可能な中性子照射装置の実現を目指す。

ホットラボラトリ

原子炉で中性子照射した試料は放射化しているため、放射線管理区域内の実験室であるホットラボラトリで取扱う必要がある。ホットラボラトリでは試料カプセルの移送や照射後試料の開封、化学処理、放射線測定を行うため、気送照射装置や水力照射装置に対応した照射ステーション、マニピュレータとカプセル開封装置を備えたホットセル、グローブボックス、化学フード、放射線測定器を備えた計測室等の設置が必要となる。また、高線量試料を冷却するための保管場所や外部輸送のため照射後の試料を安全に収納する設備、放射線管理区域に近接した非管理区域の実験室なども必要とされる。核燃料物質や α 線放出核種の取扱いに関するニーズもあることから、それらも含めてホットラボラトリの検討を進めている。

実験装置の検討体制

試験研究炉に設置される実験装置は、学術や技術の発展に即応し原子炉運転開始の時点で最先端の利用が期待できるものでなければならない。そのためには、長期にわたって設計や建設のプロセスに主体的に取り組むプロジェクトチームを装置ごとに編成し、装置の用途や研究の目的に応じた仕様を綿密に検討し最適な設計をする必要がある。このプロジェクトチームとして、京大複合研では、国内の専門家の協力のもと実験装置検討タスクフォースを編成した¹¹⁾。タスクフォースは実験装置ごとに設置され、京大複合研新試験研究炉センターのメンバーを中心に、国内の大学や研究機関に所属する各分野の専門家によって構成されている。2024年末の時点で、先行して検討を進めている Table 1 の各装置についてタスクフォースが編成されており、タスクフォースの活動を取りまとめる組織として実験装置検討委員会（仮称）を設けて実験装置整備全体の計画立案や情報集約を行っている。前述したように炉周辺装置については原子炉設計に実験装置の仕様に関する情報を反映させる必要があるため、炉周辺装置の各タスクフォースと JAEA の設計グループの間で装

置の仕様に関する情報を共有し意見交換を行いながら、最適な原子炉の設計を進めている段階である。放射化分析と RI 製造（研究用）に関しては検討項目に共通する要素が多いため合同でタスクフォースを設置しており、高宮、稲垣の他、三浦勉（産総研）、鷺山幸信（福島県立医大）の各氏を幹事として検討を実施している。

タスクフォースの活動段階は、全体計画立案と基本仕様策定を行う Phase 1、装置の詳細設計や構成機器の選定を行い装置建設を進める Phase 2、利用開始後の装置運用を行う Phase 3 の3つの段階に分かれる¹¹⁾ (Fig. 3)。Phase 1 と Phase 2 の各段階において、検討の状況を定期的にチェックし、新試験研究炉計画全体の進捗との整合性を図りながら実験装置整備のプロセスを進めるとともに、基本仕様策定の Phase 1 から装置詳細設計の Phase 2 への移行に際しては、適切なデザインレビューを行い検討の妥当性を確認したうえで次の段階に進む。現在は Phase 1 として、今後の検討の進め方や基本仕様の検討を実施している段階である。

タスクフォースのもう1つの重要なミッションとして、既存の中性子施設を利用した実験装置のプロトタイプ開発や解析の高度化等を行い、新たな利用分野の開拓や新試験研究炉への活用を目指すことが挙げられる。これは、施設完成に10–20年と長い期間が見込まれることから、その間、装置に関連する学術や技術を維持継承し、設置や運用に携わる人材の育成や確保を図るための重要な取り組みである。新試験研究炉での活用に向けた研究開発を継続的に実施し、装置の検討や設計にフィードバックすることで、科学技術の進展に合わせた実験装置の実現が期待される。

さいごに

「もんじゅ」サイト新試験研究炉の概要と実験装置の検討状況、そして今後の計画について解説した。新試験研究炉の建設は、新たな中性子利用研究や地元貢献のための拠点形成という役割に加えて、中性子利用に関連する学術・技術の継承発展と産業振興、人材育成の好機でもある。広範な利用を喚起し長期にわたって持続的に成果を生み出す利用価値の高い研究施設を作るためには、国

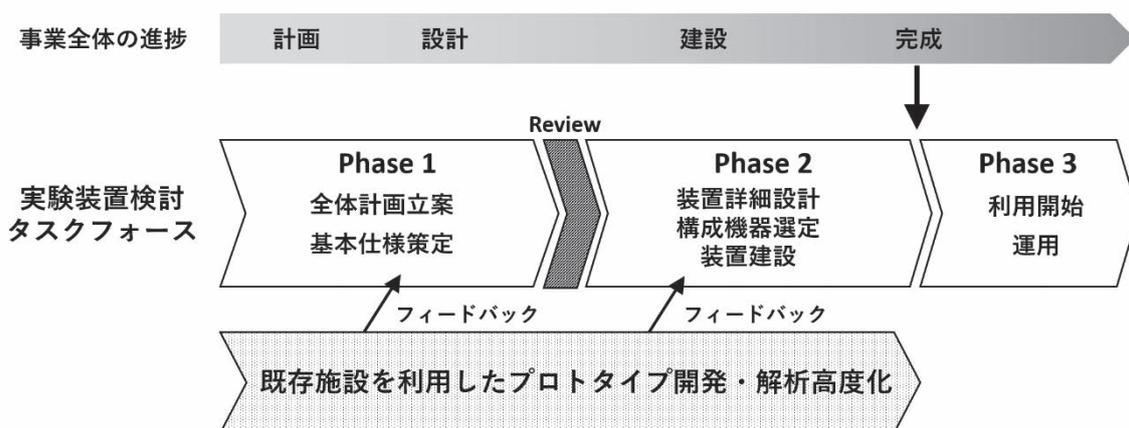


Fig. 3 Activity phases of the neutron instrument task force

内外の大学や研究機関等の学術コミュニティ、産業界、地域社会といった多方面の意見や要望を募るとともに協力や支援を仰いで、持続的なプロジェクトとして計画を推進することが重要である。今後も適切な情報発信と積極的な対話に努めたいと考えるので、引き続き、皆様のご理解とご協力をいただければ幸甚である。

引用文献

- 1) 文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 (第18回) 資料 1-3 「もんじゅ」の取扱いに関する政府方針 https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11293659/www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/055/shiryu/1381539.htm
- 2) 文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 原子力研究開発・基盤・人材作業部会 (第4回) 資料3 もんじゅサイトに設置する新たな試験研究炉の在り方について (案) https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/100/shiryu/1422932_00002.htm
- 3) 「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」の公募の採択機関の決定について https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1414162_00005.htm
- 4) 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 第1回コンソーシアム委員会 令和3年3月23日開催 <https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2021/032301/s01.pdf>
- 5) 同第2回コンソーシアム委員会 令和3年10月22日開催 <https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2021/102201/s01.pdf>
- 6) 同第3回コンソーシアム委員会 令和4年3月24日開催 <https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2022/032401/s01.pdf>
- 7) 同第4回コンソーシアム委員会 令和4年11月15日開催 <https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2022/111501/s01.pdf>
- 8) 同第5回コンソーシアム委員会 令和5年3月24日開催 <https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2023/032401/s01.pdf>
- 9) もんじゅサイトに設置する新たな試験研究炉に係る第1回コンソーシアム会合 令和5年11月20日開催 <https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2023/112001/s01.pdf>
- 10) 同第2回コンソーシアム会合 令和6年3月25日開催 <https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2024/032501/s01.pdf>
- 11) 同第3回コンソーシアム会合 令和6年10月29日開催 <https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2024/102901/s01.pdf>
- 12) <https://labo.rri.kyoto-u.ac.jp/labnrr/>
- 13) 三浦勉、高宮幸一：放射化学、Vol. 44, 1-11, 2021.

会議報告

「第15回核融合エネルギー連合講演会」開催報告

プログラム委員会委員長 上田 良夫
(第15回核融合エネルギー連合講演会)

核融合エネルギー連合講演会は、究極のエネルギー源の実現をめざす核融合エネルギー研究の進捗状況に鑑み、多くの関連専門分野の総合的学術講演会を開催するという目的で、一般社団法人プラズマ・核融合学会と一般社団法人日本原子力学会が主催団体となり、2年に1度、交互に主担当を務めることで開催を続けている。今回はその15回目で、一般社団法人プラズマ・核融合学会が担当した。2024年6月13日(木)・14日(金)の両日、青森県八戸市の「八戸市公民館」において開催した。近年、核融合エネルギー研究開発の環境は大きく変わろうとしている。2023年に内閣府で「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」が策定され、それを受けて一般社団法人フュージョンエネルギー産業協議会(J-Fusion)が2024年3月に発足し、産学官が連携して取り組む体制が整いつつある。今回の連合講演会では、このような核融合エネルギーを取り巻く環境の変化を鑑みて、従来のアカデミアのみならず多くの産業界の方にも参加いただけるようなプログラムを策定することを心掛け副題は「フュージョンエネルギーによる脱炭素社会の実現」とした。

参加者総数は314名(正会員173名、学生会員62名、会員外49名、学生非会員8名、招待者22名)、企業展示28社、一般講演:ポスター発表171件(うち若手発表賞対象71件)、懇親会参加者160人であった。

オープニングでは、安藤晃組織委員会委員長の開会挨拶に続き、竹永秀信現地実行委員会委員長が挨拶、その後、宮下宗一郎青森県知事代理、山下真一青森県環境エネルギー部次長からご挨拶をいただいた。最後に、戸田衛六ヶ所村村長からのご祝辞を司会が代読した。

招待講演は、「将来のエネルギー見通し」エネルギー総合理工学研究所理事長の寺井隆幸氏、

「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略について」内閣府/文部科学省戦略官の馬場大輔氏、「次世代の先進産業地域を目指して」八戸地域ゼロエミッション連絡協議会の松坂洋司氏、「官民連携で加速する核融合技術開発:機構技術イノベーション研究の成果」東京大学の岩田紘宜氏、の4件である。

特別講演は、「ITER計画の意義と日本の核融合界への期待」ITER機構副機構長の鎌田裕氏、「QST六ヶ所フュージョンエネルギー研究所における最近の成果と今後の展望」六ヶ所フュージョンエネルギー研究所所長の竹永秀信氏、「JT-60SA統合運転の総括」JT-60システム統合グループリーダー諫山明彦氏、「核融合科学研究所の核融合エネルギー実現に向けた取り組み」核融合科学研究所坂本隆一氏、の4件であった。

さらにシンポジウムは、「パワーレーザー国際共創プラットフォームにおけるフュージョンエネルギー開発の展望」、「プラズマ・核融合科学におけるシミュレーション研究の新展開」、「JT-60SAが挑む研究開発と人材育成」、「国内・国際共同研究による核融合炉材料およびプラズマ壁相互作用研究の進展と今後の展望」の4件を企画し、最新の研究成果や今後の研究開発の展望についてご紹介いただいた。

パネルディスカッションでは、「フュージョンエネルギー産業協議会(J-Fusion)の今後の活動への期待」と題して、産業界との連携を明確に示すために、J-Fusionとのコラボレーションセッションを企画した

一般講演は、過去開催時と同様全てポスターセッションとし、若手優秀発表賞も選び、9名に授与した。

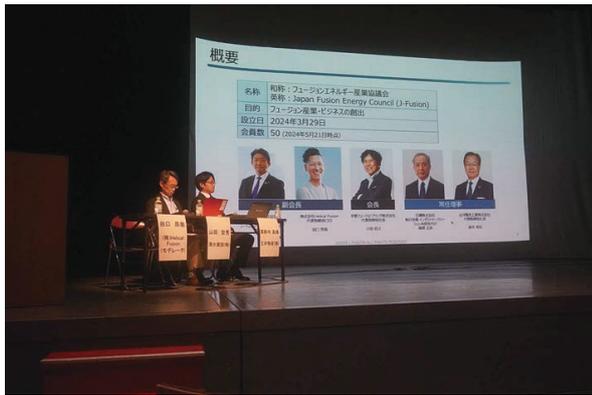
コロナ後初めてとなる懇親会は、八戸グランド

ホテルで行われ、八戸市副市長の佐々木郁夫様にご祝辞をいただいた。また、余興として国の重要無形民俗文化財に指定されている八戸えんぶりの実演があった。さらに東北の地酒も多く用意され、八戸市の温かい雰囲気に触れて夜が更けていった。

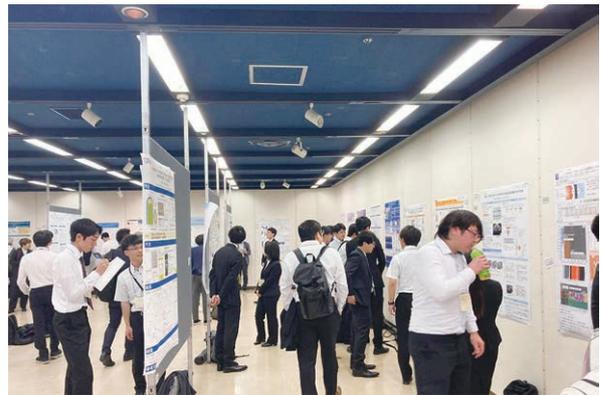
今後は、フュージョンエネルギー・イノベーション戦略に掲げられた研究支援や人材育成事業が進展することが想定され、産業界との連携も進

んでいくことが想像される。今回の連合講演会では、このような雰囲気を感じることができ、フュージョンエネルギーの今後に大いなる期待を抱かせてくれた会合であった。

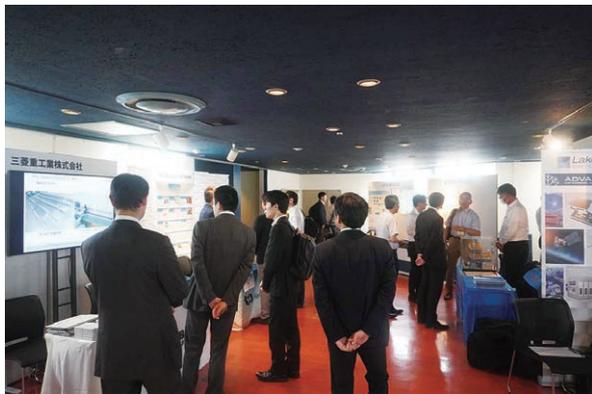
最後に、日本放射化学会様をはじめ24の学協会からご協賛いただき、有意義な講演会を開催することが出来ましたこと、感謝いたします。



パネル講演



ポスター



企業展示



講演

会議報告

第1回 短寿命 RI 利用研究シンポジウムの開催報告

豊嶋 厚史
(大阪大学)

2023年8月2日(水)から3日(木)にかけて、大阪大学銀杏会館で「第1回 短寿命 RI 利用研究シンポジウム」がハイブリッド形式で開催されました。本シンポジウムは、大阪大学放射線科学基盤機構、福島県立医科大学ふくしま国際医療科学センター先端臨床研究センター、短寿命 RI 供給プラットフォームの共催によるもので、量子アプリ社会実装コンソーシアムの協賛、日本核医学会、日本放射化学会、多彩な知の協奏による先導的量子ビーム卓越大学院の後援を受けて実施されました。

本シンポジウムは、短寿命 RI を活用する幅広い分野の研究者や技術者が集まり、講演や討論を通じて異分野交流や産学連携を促進するとともに、短寿命 RI に関する研究支援および共同研究・共同利用を活性化することを目的に2023年度に

新たに設立されたものです。猛暑の中でしたが、アカデミアや民間企業からオンラインと現地参加の合計で216名の参加がありました。

初日の基調講演では、理化学研究所の羽場宏光博士による「ラジオアイソトープの製造と応用～新元素の探索からがん治療まで～」と題した講演が行われ、理研での RI 製造技術や利用例について幅広く紹介されました。また、大阪大学医学系研究科の渡部直史先生は、「アスタチンを用いた標的 α 線治療：創薬から臨床への展開」と題し、阪大病院で院内製造される治験薬 $[^{211}\text{At}]\text{-NaAt}$ の医師主導治験や次の治験薬である PSMA 標的薬 ($[^{211}\text{At}]\text{-PSMA-5}$) などについて講演しました。

基調講演に続いて、核医学研究ならびに RI 利用研究に関する19件の口頭発表と13件のポス



シンポジウム参加者

ター発表がなされました。核医学セッションでは、At-211 や Ac-225 などの RI 製造供給から、RI 標識薬剤の開発、医師主導治験に至るまで、放射性薬剤の社会実装を目指した多様な研究が報告されました。特に At-211 に関する講演が多く、我が国での研究開発の急速な進展が伺えました。RI 利用研究セッションでは、家庭ごみ焼却灰からの希少金属回収を目指す研究、植物の生理機能に関する研究、物質科学分野での RI 活用、さらには廃炉研究など、RI 利用の多岐にわたる成果が紹介され、RI のポテンシャルの高さが示されました。

最後のセッションでは、福島県立医科大学の鷲山幸信先生を進行役に、パネルディスカッションが行われました。今後の RI 供給プラットフォー

ムに関する議論を中心に、利用者と運営側の双方の視点からのプラットフォームの在り方や At-211 供給の将来について意見交換が行われました。また、ポスター発表をした学生の中から 4 名が優秀ポスター賞を受賞し、研究の質の高さが評価されました。

本シンポジウムの詳細な内容は、大阪大学放射線科学基盤機構の機関紙「放射線科学フロンティア 2023」の特集記事をご覧ください（ホームページより閲覧可能）。なお、第 2 回短寿命 RI 利用研究シンポジウムは、2024 年 12 月 13 日（金）から 14 日（土）にグランフロント大阪で開催され、こちらも大盛況のうちに終了しました。

会議報告

19th Workshop on Targetry and Target Chemistry (WTTC19)

鷲山 幸信

(福島県立医科大学 先端臨床研究センター)

2024年8月25～30日の6日間、ドイツはハイデルベルグのドイツがん研究センターにて19th Workshop on Targetry and Target Chemistry (WTTC19) が開催された。WTTCは主に医療用のRIを製造する際の標的の準備の仕方やターゲット照射環境などのTargetryといわれる分野と、照射後のターゲットから目的RIを分離するためのTarget Chemistryについて議論をするワークショップである。ワークショップと謳うだけあって、口頭発表会場は常に一箇所で、参加者全員で発表者の研究成果を聞くスタイルとなっている。このWorkshopは今回で19回と歴史が深く、1985年に今回の開催地であるハイデルベルグ(当時はまだ西ドイツ)で開催された。今回約40年の節目として再び第1回の開催地に戻ってきた。この会議は、1970年代後半(50年以上前)に、一般に科学会議としての発表には適さないと考えられていた放射性核種の生成とそのシステムに関連する問題やアイデアを共有する場の必要性が研究者の間で認識されたことに端を発する。この解決を図るために1979年からの議論を経て、1984年7月9～13日に東京で開催された第5回放射性薬品化学のシンポジウムの後に正式な立ち上げが決定し、1985年の第1回開催に繋がっている。この会議が開催当初から掲げている理念は、可能な限り参加者がオープンなディスカッションと経験の交換ができる形式を採ることに現れている。文献を読むことや個々の施設で語り伝えられているTipsを知ることで達成する経験を、WTTCでは一箇所で行う発表とその後に続く自由な質疑応答のスタイルで、議論を特定の誰かに向けたものとするのではなく、参加者全員で共有することでコミュニティのレベルの底上げに繋がっている。ちなみに第15回の様子はQSTの渡辺茂樹博士が放射化学第32号に寄稿している。興味のある方は

そちらも一読願いたい。

WTTCで取扱う話題は、サイクロトロンを用いた(主に医療用)RI製造のための技術開発を主体として、固体・液体・気体の各状態の標的に対する照射装置の開発や、その後に続くオンライン・オフラインでの化学処理である。発足当初のWTTCが取扱う対象はいわゆるPET核種(^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F)がほとんどであったが、現在では ^{68}Ga 等のPET核種やTb同位体、アルファ放射体といった金属核種に展開し、診断と治療(セラノスティクス)に用いられるほとんどの核種が対象となっている。内容もシミュレーションを用いたターゲットの熱評価から、金属核種に適合するキレート開発やその後の薬剤への標識、細胞実験や動物実験など、さらに広がり続けている。そのため参加者は放射化学はもちろんのこと、工学系の研究者、理論研究が専門の人など多岐に亘り多方面の視点で議論が交わされて実に面白い。さらに、RIとは標的と加速器(・原子炉)の2つの要素の掛け合わせ(核反応)で生み出される産物であることから、世界の加速器企業は、このWTTCにスポンサーとして、あるいは技術の発表の場として参加している。また、RI製造は決して医学用だけではなく、ニホニウムなどの超重元素の探索や中性子過剰核、中性子欠損核などの核図表の辺縁を探索するための手段でもあることから、これらの技術開発の報告の場にもなっている。

今回の開催地であるドイツがん研究センター(DKFZ, Deutsches Krebsforschungszentrum)は、日本の国立がん研究センターと同様ドイツにおけるがん研究の中心地であり、ハイデルベルグ大学医学部キャンパス内にある。ハイデルベルグ大学は1386年創立のドイツ最古の大学であることはもちろんのこと、放射性医薬品の研究に携わっている人には2016年に α 放射体を標識した前立

腺がん治療薬 ^{225}Ac -PSMA-617 を用いて全身に転移している前立腺がんを完全に治療した論文を発表したチームの本拠地として知られている。現在の核医学分野における ^{225}Ac ブームはこの地の臨床結果から始まったと言っても過言ではない。そんな意義深い場所で開催されたこの会議の参加登録者は 237 名、うち口頭発表は 60 件、ポスター発表が 29 件であった。日本からは大阪大学核物理研究センターから 3 名と筆者、それに企業展示を行った住友重機械工業の 4 名であった。会場の DKFZ Conference Center は丁度良い大きさで、300 名を収容できる円形の講義室、コーヒープレイクや昼食、企業展示が一度に開催できる配置は、参加者同士の意見交換やネットワーク作りのハードルを下げる工夫が随所に見られた。この会議は（日曜日の Welcome Reception は除いて）月曜日から金曜日までの 5 日間で構成され、朝 9 時から夕方まで、1 つの会場（図 1）で口頭発表が行われた。口頭発表は、PET 核種の製造と分離、治療用核種の製造と分離、照射装置の紹介などはもちろんのこと、励起関数の測定や施設の紹介など多岐にわたった。もちろん休憩時間はたっぷり確保され、医学部キャンパス横のネッカー川沿いを散歩したり、多くの仲間と会話を楽しんだりすることが出来た。

どのような核種が研究対象となるのかは時代と共に変わってきており、今は専ら治療用核種とそのセラノスティクスペアとなる診断用核種の製造開発の研究が多い。 ^{64}Cu と ^{67}Cu は既に日本では商品化されアイソトープ協会を通じて購入可能な

核種であるが、その製造法は種々に亘る。イタリアやフランス、ドイツからは、Cu の放射性医薬品開発プロジェクトを支える製造と供給に関する開発研究が報告された。 ^{177}Lu の後継核種と考えられている ^{161}Tb を含む Tb 同位体シリーズや ^{225}Ac の製造や化学分離法の紹介、キレート開発等最先端の話題等はそれだけでセッションを

表 1. 過去の WTTC の開催時期と開催場所

	開催年	開催地
1	1985	Heidelberg, Germany
2	1987	Heidelberg, Germany
3	1989	Vancouver, BC, Canada
4	1991	Villigen, Switzerland
5	1993	Upton, New York, USA
6	1995	Vancouver, BC, Canada
7	1997	Heidelberg, Germany
8	1999	St. Louis, Missouri, USA
9	2002	Turku, Finland
10	2004	Madison, Wisconsin, USA
11	2006	Cambridge, England
12	2008	Seattle, Washington, USA
13	2010	Roskilde, Denmark
14	2012	Playa del Carmen, Mexico
15	2014	Prague, Czech Republic
16	2016	Sante Fe, New Mexico, USA
17	2018	Coimbra, Portugal
18	2022	Whistler, BC, Canada
19	2024	Heidelberg, Germany



図 1 WTTC の会場風景

構成できる演題数を誇った。ドイツのユーリッヒ研究センター（Forschungszentrum Jülich）からは最近導入した新しいサイクロトロン（IBA社 Cyclone 30XP）を用いた ^{211}At の製造に関する技術報告があった。Biターゲットを箔、水酸化物沈殿、電着、金属溶融等の手法で作成し、製造量や失敗例を紹介した。日本でもおなじみの ^{211}At は、質疑応答のやり取りから、欧州でも製造拠点が今後増えていくことが予想され、多くの研究者の技術交流でさらに最適化が進むことが伺えた。このワークショップでは成功体験だけを披露するのではなく、失敗もそれと同じく貴重だとする思想が共有され、さまざまな失敗事例を聞くことで、自分達の施設での研究開発に活かせるため、どの発表も活発な議論が交わされた。

さて、今回紹介したWTTCは約40年の間に19回開催されてきたが、そのほとんどの開催地は欧米に集約され、残念ながら日本はおろかアジ

アでの開催は一度もない（表1）。近年のアジアでの核医学分野の活動の高まりに加えて、日本でも ^{211}At などの α 放射体を用いた放射性医薬品の開発と臨床応用研究がますます活発になった今こそ日本での開催が必要と考え、日本放射化学会に所属する仲間と共に日本誘致を企画した。（実はこれこそがこの会への参加の目的である。）なぜアジア？なぜ日本での開催なのか？といったスライドを準備して臨んだ次回開催地選考委員会でのプレゼンテーションは、学会発表とは全く異なる準備と緊張で、とても勉強になった（と同時にとても観光する気持ちも余裕もなかった）。幸運にも日本が開催地となった決定の内諾は最終日前日のガラディナー（図3）中のことであり、今回の学会参加の労力が一気に報われた。このときのビールの味は今でも忘れられない。次回は2026年8月に奈良で開催である。ぜひ暑い奈良で熱い議論をしましょう！



図2 企業展示兼ランチエリア



図3 ガラディナーはネッカー川クルーズ



図4 WTTC20は日本の奈良で開催します！

会議報告

日本放射化学会第 68 回討論会 (2024) 開催報告

実行委員長 矢永 誠人
(静岡大学理学部附属放射科学教育研究推進センター)

1. はじめに

日本放射化学会第 68 回討論会(2024)を 2024 年 9 月 23 日(月)から 25 日(水)までグランシップ GRANSHIP (静岡県コンベンションアーツセンター)で開催させていただきました。その概要を報告させていただきます。

静岡での開催の打診をいただいたのは、2022 年 11 月のことであったと思います。京都大学複合原子力科学研究所でのマシントイムの際、同じく同所を訪れておられた鈴木達也先生からお声がけをいただきました。そのお話をいただいたこと自体は大変に光栄なことでしたが、私自身、学会等運営の実行委員長としての経験が全くなかったこと、また、翌 2023 年 11 月開催の日本放射線安全管理学会第 22 回学術大会の大会長も仰せつかっており、大会運営の未経験者が 2 年続けて実

行委員長の重責が務まるか大変不安に思いました。鈴木先生に、その旨をお伝えいたしましたところ、現地実行委員会だけで運営するのではなく、理事会も共同して運営にあたっていただけるとのことでしたので、だいぶ気が楽になるとともに、これまでは参加させていただく一方でしたので、そのご恩返しもしなければならぬとも思い、静岡での開催を内諾させていただきました。

静岡での開催が決まった後も、準備が遅れがちというレベルではなく、まったく準備に着手できる状況ではありませんでした。言い訳になりますが、2023 年に広島で開催されました第 67 回討論会の期間(2023 年 9 月 21 日～23 日)は、先に記しました同年 11 月開催の日本放射線安全管理学会の学術大会の準備の真っ只中におりました。同学術大会の講演申込締切が 8 月 25 日、予稿原



討論会 HP の表紙 (写真は静岡大学広報提供)

稿締切9月22日、プログラム暫定公開が9月24日でした。同学術大会の予稿集は冊子体とするのが通例でしたので、各講演者の予稿原稿に講演番号を記載してからPDF化し、会場案内やプログラム、さくいん、そして広告などをまとめて印刷会社に入稿するといった作業をすべて1人でやっておりました。学術大会HPも随時更新していきましたが、そもそも、私にはHPというものを作った経験はなく、HPの作り方の本を買って、まず、その本のとおりにお茶店のHPを作成し、それを学術大会のHPに作り替えていくという作業をしておりました。今でこそ思い出話のようになっておりますが、当時は、放射化学会の討論会の方でもこの作業をやるのか、と思うと絶望的な気分になってしまいましたが、HPの作成を含めてかなりの作業が学会理事会の方々や外部業者への委託により負担が軽減されることがわかり、相当に助かった次第です。

実行委員会のメンバーは次のとおりです(敬称略)

LOC

矢永 誠人 (静岡大学理学部附属放射科学教育研究推進センター・委員長)

大矢 恭久 (静岡大学理学部附属放射科学教育研

究推進センター)

近田 拓未 (静岡大学理学部附属放射科学教育研究推進センター)

柿添 崇文 (静岡大学理学部附属放射科学教育研究推進センター)

渥美 武 (静岡大学理学部附属放射科学教育研究推進センター)

竹内 浩昭 (静岡大学理学部生物科学科、放射科学教育研究推進センター長)

徳元 俊伸 (静岡大学理学部生物科学科)

大吉 崇文 (静岡大学理学部化学科)

宮澤 俊義 (静岡大学キャンパスミュージアム)

桧垣 正吾 (東京大学アイソトープ総合センター)

緒方 良至 (愛知医科大学医学部化学教室)

大日向 朱梨 (株千代田テクノル)

上島 淳慈 (株日本環境調査研究所)

学会理事会

秋山 和彦 (東京都立大学、討論会担当)

鈴木 達也 (長岡科学技術大学、討論会担当)

佐藤 志彦 (日本原子力研究開発機構、討論会担当)

木野 康志 (東北大学、表彰担当)

山村 朝雄 (京都大学複合原子力科学研究所、表彰担当)



グランシップ GRANSHIP (静岡県コンベンションアーツセンター)
(会議室等写真も含めて GRANSHIP HP より)

吉村 崇 (大阪大学放射線科学基盤機構)
 可見 祐子 (日立製作所)
 國分 陽子 (日本原子力研究開発機構)
 久保 謙哉 (国際基督教大学・学会長)

2. 本大会の位置づけ

静岡大学がこの討論会のお世話をさせていただくのは今回で5回目でした。一度目は、塩川孝信先生が世話人として開催された1959年の第3回討論会で、その後、神原富尚先生(1976年、第20回)、長谷川罔彦先生(1994年、第38回)、奥野健二先生(2007年、第51回)が世話人・実行委員長となり、開催されました。いずれも、1958年4月に設置された静岡大学文学部附属放射化学研究施設(現:理学部附属放射科学教育研究推進センター)の先生方です。

静岡大学におけるラジオアイソトープの利用及び放射化学に関する研究は、アメリカからラジオアイソトープが日本に提供された翌年、1951年に始まっております。その後、1954年1月に静岡大学放射性同位元素研究会が設けられ、当時の所在地であった静岡市大岩地区の理科館の一部にラジオアイソトープ実験室が設置され、共同利用に供されました。その直後、同年3月1日にビキニ事件が発生しました。ビキニ事件とは、アメリカが太平洋マーシャル諸島ビキニ環礁で行った水爆実験で飛散した「死の灰」により、焼津のマグロ漁船「第五福竜丸」の乗組員が放射線障害を受けた事件です。アメリカが設定していた危険水域の外にいたにもかかわらず被ばくした第五福竜丸は、アメリカに捕えられるのを恐れて一切打電することなく一目散に焼津に引返しました。3月14日に帰港できましたが、その間に船員に急性放射線障害の症状が現われていました。翌15日に症状の重い2人が東大病院に入院し、16日に新聞報道がなされると日本中が大騒ぎになりました。また、汚染されたマグロの一部が出荷されたことも判明し、「原爆マグロ」の行方を追う報道なども人々を不安に陥れました。そのような中、科学者として最初に船に乗り込み、その汚染状況の調査、処理に当たったのが塩川孝信先生のグループでした。この塩川先生の先駆的な取り組みが発端となって、静岡大学に地方大学として例を見ない

文学部附属放射化学研究施設が設置されることになったのであります。

2024年は、ビキニ事件から70年という一つの節目と言える年でした。そのことも踏まえつつ、多くの方々に静岡に集っていただき、学際的な研究交流の場、活発な議論の場にしていただきたく思っておりました。

3. 準備

通常であれば、討論会開催中には、翌年の討論会の開催場所や日程が定まっているところですが、開催の前年9月の段階では明年の9月中旬に静岡大学で行うということしか決めておりませんでした。広島での第67回討論会の懇親会場の席上でも9月に静岡大学で行うということのみ、お話しさせていただきました。日本原子力学会や日本地球化学会の年会予定を参考にしつつ、かつ、多くの大学で後期の授業が開始される日程等を考えますと、9月下旬が適当であろうと考えました。9月は、多くの学会が開催される時期ではありますが、静岡大学での開催というのはあまり多くなく、また、会場として考えていた本学の共通教育棟で学会が開催されることは減多にならないような状況ですので、生協食堂も目の前にあって昼食にも困らない共通教育棟の予約を取ろうといたしました。ところが、9月下旬は集中授業の期間につき集中授業での教室使用が決まってからでなければ予約はできないとのことでした。集中授業で共通教育棟が使われるとは思ってもおらず、あわてて会場探しを始めました。例年のごとく、A会場とB会場、状況によってはS会場またはC会場、さらにポスター会場等を設けられる施設となると自ずと候補は絞られてしまいました。問題は、3日間連続して空いているかどうかということでした。9月23日～25日の一択で空いておりました。3連休の最終日からの開始で、多くの方々の移動日とその前日、すなわち、連休の中日になることが日程として良いのか悪いのかわかりませんでした。もはや選択の余地はなく、グランシップGRANSHIP(静岡県コンベンションアーツセンター)を予約するとともに、この会場、この日程で決定させていただきました。

会計担当の理事の立場としては、会場費を抑え

るためにも大学で開催したかったところでしたが、吉村先生と可児先生には共催関係のみならず広告の依頼までご尽力いただき、経費面でも大変に助けていただきました。また、国立大学法人静岡大学からの学会等開催支援経費や静岡市全国大会等開催事業補助金も大変にありがたいものでした。この静岡市からの補助金につきましては、討論会に参加された方々に、それぞれのホテルで宿泊証明をとっていただくというご面倒をおかけした上で助成されたものであります。大変にありがとうございました。

グランシップでの開催にあたり、もう一つ問題となったのが昼食でした。近隣で昼食をとれるところは少なく、また、ゴミは持ち帰りが原則ですので弁当等を持ち込んだ場合にはその弁当がらの始末の困るという難点がありました。この点に関しましては、各部会においてグランシップ指定の業者による仕出し弁当をとりながらの総会を催していただき、解決することができました。各部会のご協力に感謝しております。

先にも記しましたとおり、2024年はビキニ事件から70年という年でもありましたので、静岡大学キャンパスミュージアムの協力も得て、同事件関連の展示コーナーを設けることとし、当時の

第五福竜丸から採取した試料や塩川孝信先生が参考とした書籍、当時の新聞記事等を展示することといたしました。

また、広島での第67回討論会で久しぶりに復活した懇親会を今回も催したく思い、グランシップのある東静岡駅からの交通の便や静岡駅からの距離、そして場所のわかりやすさから、ホテルグランヒルズ静岡を予約させていただきました。

4. 討論会概要

会期：2024年9月23日(月)～25日(水)

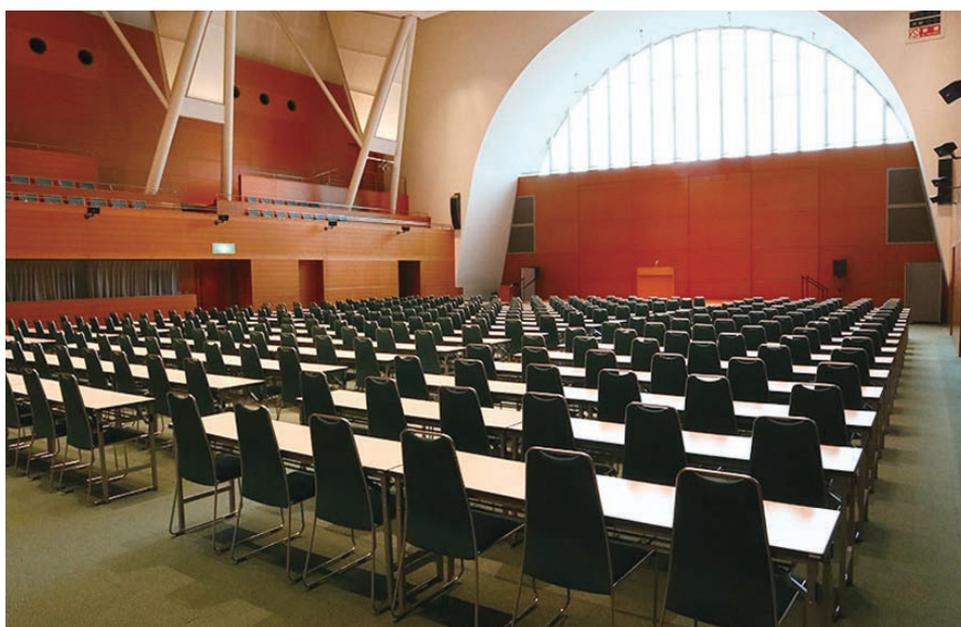
会場：グランシップ GRANSHIP (静岡県コンベンションアーツセンター)

主催：一般社団法人日本放射化学会

共催：公益社団法人日本化学会、一般社団法人日本放射線安全管理学会、一般社団法人日本保健物理学会、静岡大学理学部附属放射科学教育研究推進センター、静岡大学キャンパスミュージアム

協賛：国立大学法人静岡大学、公益社団法人日本分析化学会、一般社団法人日本放射線影響学会、公益社団法人日本薬学会、一般社団法人日本物理学会、一般社団法人日本原子力学会

協賛企業・団体：7社及び1団体



A会場として使用したグランシップ GRANSHIP 11階 会議ホール・風



B会場として使用したグランシップ GRANSHIP 10階 会議室 1001-2

学会等開催支援：国立大学法人静岡大学

全国大会等開催事業補助：静岡市

日本放射化学会賛助会員：22社

参加者数 188名

発表件数等

受賞講演 3件（敬称略）

＜木村賞＞

篠原 厚（大阪青山大学）

「エキゾチックアトムと超重元素の化学研究と放射化学分野への貢献」

＜日本放射化学会賞＞

高橋 嘉夫（東京大学大学院）

「分子地球化学的アプローチによる放射性核種の環境挙動の素過程解明」

＜日本放射化学会奨励賞＞

楊 国勝（量子科学技術研究開発機構）

「プルトニウム等による緊急被ばく対応のための迅速・高感度なバイオアッセイ法の開発」

なお、佐藤 志彦 氏（日本原子力研究開発機構）も今回奨励賞を受賞されましたが、受賞講演は2025年のAPSORC25において行われることとなりました。

一般発表

口頭 62件（招待講演を含む。キャンセル1件）

ポスター 56件

一般発表（招待講演を除く）は、これまでの討論会での考え方を踏襲し、研究内容の丁寧な説明としっかりとした討論のために、発表時間を15分間、質疑応答を5分間といたしました。ポスター発表も、昨年及びそれ以前のやり方にならない、実際のポスター発表の前に、それぞれ1分間のフラッシュトークをお願いいたしました。ポスター会場での発表は2日間に分けて行い、各グループの時間を1時間といたしました。活発な議論が続き、時間が足りないとお叱りをいただきました。

口頭発表及びポスター発表は、基盤セッションのカテゴリーに応じて申込をいただきました。各基盤セッションをご担当いただいたコンピーナーの先生方（敬称略）を改めて紹介させていただきます。先生方、大変にお世話になりました。ありがとうございました。

(A) 核化学（佐藤 哲也）

(B) 原子核プローブ（佐藤 渉）

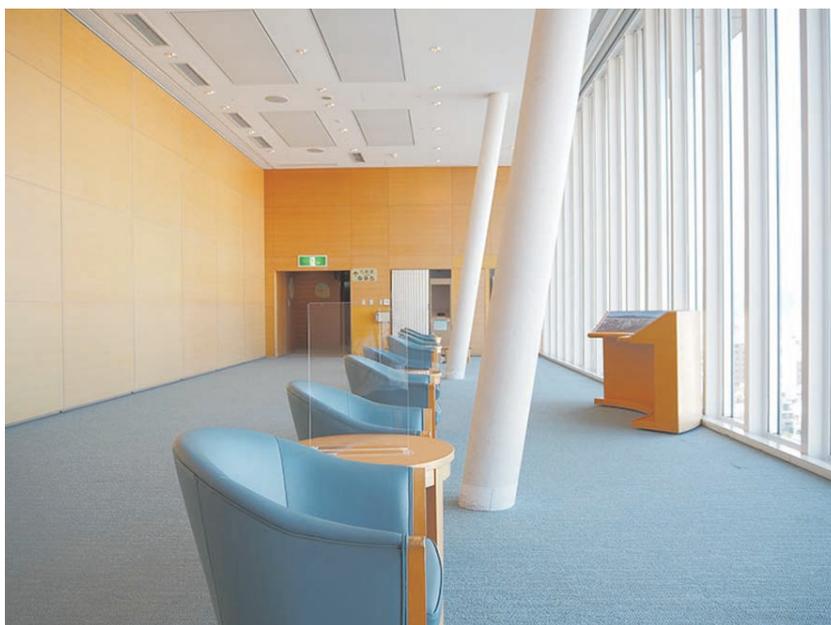
(C) 環境放射能（小池 裕也）

(D) 放射化分析及び放射性核種の分析化学（三浦 勉）

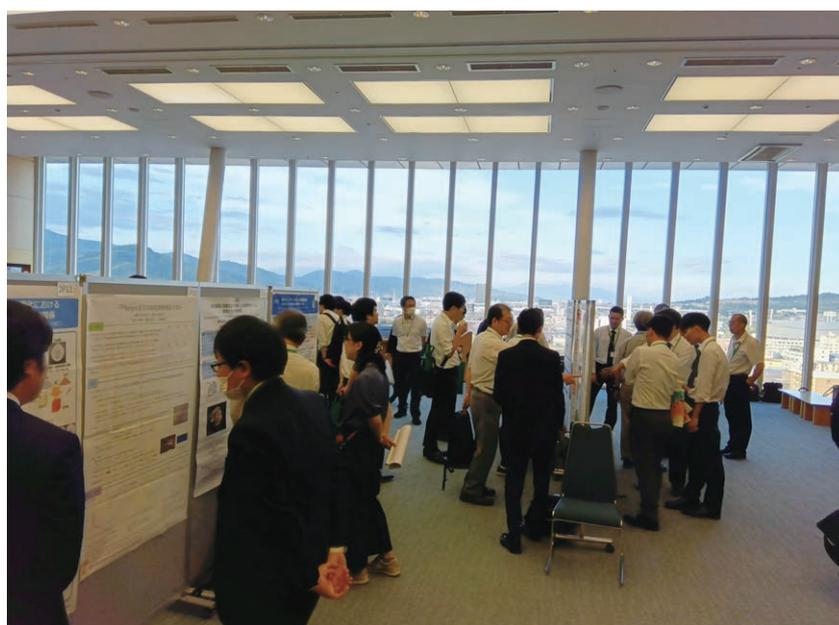
- (E) 原子力・アクチノイド化学及び関連分野
(鈴木達也)
- (F) 核医学・生物関連放射化学 (豊嶋厚史)
- (G) 教育関連 (緒方良至)
- (H) その他 (境界分野への放射化学の新展開など)
(秋山和彦、鈴木達也)

日本放射化学会各種会合

日本放射化学会各分会 (核化学分会、原子核プローブ分会、アルファ放射体・環境放射能分会、放射化分析分会、原子力化学・アクチノイド化学分会、教育分会及び若手の会) の総会が昼休みに開催されました。今回の討論会会場近辺には昼食



ポスター会場として使用したグランシップ GRANSHIP 10 階 展望ロビー
(左側のボードを撤去し、会議室 1001-1 と連結してポスター会場とした)



ポスター会場での様子 (箕輪氏提供)

参加登録費

	事前登録 (7/1-8/31)	9/1 以降の登録	懇親会費 (8/31 まで)	懇親会費 (9/1 以降)
正会員 (及び共催・協賛・後援学会会員)	6,000 円	7,000 円	8,000 円 (税込)	9,000 円 (税込)
学生会員 (及び共催・協賛・後援学会会員)	2,000 円	3,000 円	3,000 円 (税込)	4,000 円 (税込)
非会員	10,000 円 (税込)	12,000 円 (税込)	8,000 円 (税込)	9,000 円 (税込)
非会員 (学生)	3,000 円 (税込)	4,000 円 (税込)	3,000 円 (税込)	4,000 円 (税込)



若手優秀発表賞授賞式にて (高宮氏提供)

をとる場所が少なく、また、外部から弁当を持ち込んだ際のゴミの処理の問題がありましたところ、会場指定の業者からの昼食でのランチョンセミナー方式で部会総会等を開催していただき、とても助かりました。

若手優秀発表賞

本学会の若手優秀発表賞表彰規程に基づき、今回は、7名の方が選出され、閉会式の席上で表彰されました。受賞者は次のとおりです (敬称略・五十音順)。

1P06 板倉 悠大 (大阪大学)

「量子化学計算による 102 番元素ノーベリウムのアンミン錯体生成反応の予測」

2P11 伊藤 秀嶺 (明治大学)

「都市ごみ焼却飛灰ジオポリマー固化における

活性フィラーと ^{137}Cs 溶出抑制効果の関係」

1P26 植野 雄大 (日本原子力研究開発機構)

「非水溶媒系中の塩化物イオン濃度が塩化ウラン (IV) の酸化還元特性に与える影響」

2P03 清水 悠介 (金沢大学)

「水素吸蔵パラジウム中に生成した空孔型欠陥と水素の熱的挙動」

1B10 橋場 奏 (大阪大学)

「相対論的密度汎関数法による $^{235}\text{m}\text{U}$ ハロゲン化物の半減期と電子状態に関する研究」

1P30 森井 志織 (日本原子力研究開発機構)

「メスbauer分光法を用いた還元的環境における粘土鉱物中の Fe の酸化状態と構造の分析」

2P06 渡邊 瑛介 (高エネルギー加速器研究機構)

「J-PARC ニュートリノ実験施設のビーム運転に伴い生成する放射性水銀」

受賞された方々には、副賞として「漆の酒グラス」を贈呈しました。謳い文句をそのまま引用するならば、グラスに箔をはりその上から漆を塗り仕上げたちょっとお洒落な酒杯です。一見すると金沢の工房での作のように思えますが、富士山がデザインされているばかりではなく、実際に静岡の工房での作品です。

5. ビキニ事件関連展示

2024年は、ビキニ事件、第五福竜丸の被曝から70年ということで、事件を風化させてはならないと、第五福竜丸のみならず、同じように事件に巻き込まれてしまった方々の証言も語り継いでいこうという報道等が多く見られておりました。

静岡大学キャンパスミュージアムでは、焼津に帰港した第五福竜丸の船体から採取した試料やその分析の際に参考とした文献の他、当時の新聞記事等が展示されております。それらの資料を討論会の期間中、B会場の斜向かい10階会議室1004で展示させていただきました。大学での展示では、採取した試料が保存された瓶や分析の際に参考とした文献であるマンハッタンプロジェクトの研究

記録、Coryell, Sugarman 編、” Nucl. Energy, Ser. Radiochem. Studies of Fission Products” 1～3 (1951)などは、手を触れることができないようにしておりますが、今回は特別にお手にとっていただけるように展示させていただきました。多くの方に来場していただきました。ありがとうございました。

6. 謝辞

準備が遅れに遅れてしまい、すべてがギリギリになってしまったという感じでしたが、大きなトラブルなく3日間の開催を終えることができ、正直なところホッといたしました。これもひとえに皆様のご協力のおかげです。学会理事会、特に討論会担当の理事の先生方には多大なご尽力をいただきました。また、開催にあたってはLOCの先生方に、そしてアルバイトとして会場係を担当して下さった静岡大学理学部化学科や生物科学科の学生たちに助けをいただきました。討論会に集い盛り上げて下さった方々、準備・開催に奮闘して下さった方々、すべての方に衷心より御礼申し上げます。本当にありがとうございました。



ビキニ事件関連展示 (宮澤氏提供)

情報プラザ (国際国内会議)

(2025 年 2 月時点の情報。最新の情報については、各ホームページを参照してください。)

国内会議

日本原子力学会 2025 年春の年会

日時：2025 年 3 月 12 日～14 日

場所：オンライン開催

URL： <https://pub.conf.it.atlas.jp/ja/event/aesj2025s>



第 26 回「環境放射能」研究会

日時：2025 年 3 月 12 日～14 日

場所：高エネルギー加速器研究機構
(茨城県つくば市)

URL： <https://rcwww.kek.jp/enviconf/>



応用物理学会 2025 年(令和 7 年)春季学術講演会

日時：2025 年 3 月 14 日～17 日

場所：東京理科大学 野田キャンパス(千葉県野
田市)&オンライン開催

URL： <https://meeting.jsap.or.jp/>



日本物理学会 2025 年春季大会

日時：2025 年 3 月 18 日～21 日

場所：オンライン開催

URL： https://www.jps.or.jp/activities/meetings/spring/spring_index.php



第 25 回 AMS シンポジウム

日時：2025 年 3 月 25 日～26 日

場所：つくば国際会議場(茨城県つくば市)

URL： <https://www.nies.go.jp/chem/terra/japanese/AMS-25.html>



日本化学会 第 105 春季年会(2025)

日時：2025 年 3 月 26 日～29 日

場所：関西大学 千里山キャンパス
(大阪府吹田市)

URL： <https://pub.conf.it.atlas.jp/ja/event/cs105th/content/outline>



日本地球惑星科学連合 2025 年大会

日時：2025 年 5 月 25 日～30 日

場所：幕張メッセ(千葉県千葉市)&オンライン
開催

URL：https://www.jpogu.org/meeting_j2025/index.php



日本保健物理学会 第 58 回研究発表会

日時：2025 年 12 月 18 日～20 日

場所：水戸市民会館 (茨城県水戸市)

URL：<http://www.jhps.or.jp/>



第 62 回 アイソトープ・放射線研究発表会

日時：2025 年 7 月 2 日～4 日

場所：日本科学未来館 7 階 未来館ホール
(東京都江東区)

URL：<https://pub.conf.it.atlas.jp/ja/event/jrias2025>



国際会議

The 10th Asia-Oceania Mass Spectrometry Conference 2025(AOMSO2025)

日時：22 - 25, June, 2025

場所：ANA InterContinental Ishigaki Resort
(Ishigaki, Japan)

URL：<https://www.mssj.jp/conf/73/>



日本放射線影響学会 第 68 回大会 / 第 6 回アジア放射線研究会議(JRRS/ACRR2025)合同大会

日時：2025 年 /10 月 23 日～26 日

場所：広島国際会議場 (広島県広島市)

URL：<https://smartconf.jp/content/jrrsacrr2025/>



34th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2025)

日時：29 July - 5 August, 2025

場所：Sapporo Convention Center
(Sapporo, Japan)

URL：<https://www.icpeac2025.jp/>



**The 21st International Topical Meeting on Nuclear
Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-21)**

日時：31 August – 5 September, 2025

場所：BEXCO (Busan, Korea)

URL：<https://www.nureth-21.org/>



**7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry
2025 (APSORC25)**

日時：14 – 19, September, 2025

場所：Kunibiki Messe (Matsue, Japan)

URL：[https://pub.confit.atlas.jp/en/event/
apsorc2025](https://pub.confit.atlas.jp/en/event/apsorc2025)



学会だより

1. 一般社団法人日本放射化学会第 15 回定例理事會 議事録抜粋

日時：2024 年 9 月 22 日（日）13:00～17:40

場所：グランシップ 1101 室+オンライン

出席者：[会長] 久保、[副会長] 長尾、[理事] 秋山、
可児、木野、小池、國分、鈴木、桧垣、
矢永、吉村、鷺山、浅井、川端、後藤、
佐藤、豊嶋、松村、山村、[監事] 箕輪、
小林、[オブザーバー] 庭瀬、篠原、佐藤、
三浦、高宮、安田

報告

(1) 事務局報告

総務報告：年次大会、総会、理事会活動、研究の奨励、表彰等は資料の通り。メール審議を 5 件実施。

会員動向：会員数は増加傾向。10 年の会員変動・未納者リスト作成を提案。

会計報告：会費納入は順調。支出超過見込み、賛助会員増加が課題。

渉外報告：研究会の協賛状況を報告。

(2) ネット・広報委員会報告

メーリングリスト 41 件配信、HP 更新（論文、学会誌、ロードマップ掲載）。

(3) JNRS 編集委員会報告

委員長交代。投稿論文 2 件を発行。

(4) 「放射化学」編集委員会報告

編集委員長交代。学会誌印刷が遅延。討論会後に配布予定。

(5) 若手奨励委員会報告

若手支援方法を検討。支援のリターンを明確化へ。

(6) 新研究炉検討委員会報告

京大複合研を事務局に設置。NAA・RI 製造タスクフォースが活動中。

(7) 第 68 回討論会（2024）準備状況報告

参加者 180 名、発表 116 件。税制・補助金関連

の課題を確認中。

(8) APSORC2025 準備状況報告

2025 年 9 月に島根県で開催予定。参加費一般 6 万円 / 8 万円、学生 1 万円 / 2 万円。

(9) 各種部会報告

教育：討論会 3 日目にセミナー開催。技術伝承を議論。

環境放射能：2025 年 3 月に研究会開催予定。

核化学：重元素研究会開催。核化学夏の学校は台風で延期。

放射化学分析：討論会セッション D で新試験研究炉の進捗報告予定。

核プローブ：HYPERFINE 国際会議が盛況。

若手の会：APSORC の招待講演者推薦。研究発表助成金を再募集。

原子力化学：特記事項なし。

(10) 入会勧誘パンフレット作製状況報告

討論会で配布予定。学会紹介を重視し、修正作業中。今後は若手奨励委員会への引き継ぐ。

(11) ロードマップ 2024 報告

2 年ごとに更新。若手の意見を反映し、社会貢献の項目を修正。

(12) 表彰担当報告

文科省表彰に 2 名推薦。学会賞・奨励賞の受賞者決定。

(13) 各種委員会・WG 報告

特記事項なし。

審議

(1) 事業支援について

後援依頼：日本分析センターの環境放射能分析研修、日本放射線安全管理学会の合同大会共催依頼を審議。

議論：後援の価値を明確化、日本放射線安全管理学会との共催実績を考慮。

承認結果：両件とも賛成多数で承認。

(2) 公印管理規程の改定

提案：法人実印の管理場所を「事務所」と明記、銀行印の管理者を「事務所長」に変更、学会印の復活と用途整理を提案。

承認結果：賛成多数で承認。

(3) 第四種郵便の扱いについて

提案：発行者が直接発送しない現状を踏まえ、第 4 種郵便の登録廃止を提案。

議論：発送手続きの簡素化、コスト削減の影響を考慮。

承認結果：賛成多数で登録廃止を決定。事務局が日本郵便に廃止届を提出。

検討**(1) 第 68 回討論会の基調講演・招待講演者の旅費支給**

討論会事業予算の旅費交通費から、2 名に約 7 万円支給を承認。

(2) 旅費規程の変更

基調・招待講演者の旅費を部会の予算から支給する明確化を検討。旅費・謝金支給の公平性と税務対応について確認。旅費規程改定について、次回理事会での決定を持ち越し。

(3) 会員総会の準備とスライド内容

9 月 24 日開催。報告内容は現状報告、事業報告、会計報告、次回討論会報告など。総会成立要件は会員 1/10 の出席(33 名)。スライド案を確認・修正。

(4) 総会での会計資料報告

検討事項 (3) にて検討済み。

(5) HP 上のロードマップ 2021 版の扱い

古いバージョン (2021 年度版) の削除を決定。進捗確認のため、放射化学誌の解説記事にリンク。

(6) 理事会運営の効率化

報告事項のみの参加者は次回理事会への参加を不要とし、メール確認で対応。議論・決議事項に重点を置くため、時間配分を最適化。

(7) メール審議の審議方法について

現行の定款では、理事会の決議事項について全理事の同意が必要であり、決議の遅延や利害関係者の承認の問題が発生。過半数の同意への変更を検討。メール審議の効率化のため、返信がない場合の自動同意や開封通知の導入を提案。

定款変更には次回総会での議論と法務局の手続きが必要。現行方法を維持に決定。

以上

2. 一般社団法人日本放射化学会第 16 回定例理事会 議事録抜粋

日時：2024 年 12 月 7 日 (土) 13:00 ~ 17:40

場所：オンライン

出席者：[会長] 久保、[副会長] 長尾、[理事] 秋山、可児、木野、國分、鈴木、桧垣、矢永、吉村、鷲山、浅井、川端、後藤、佐藤、豊嶋、松村、山村、[監事] 箕輪、小林、[オブザーバー] 庭瀬、高宮、安田

報告**(1) 事務局報告**

総務報告：会議進行の効率化案を提案。メール審議の増加が指摘され、抑制の協力を求めた。

会員動向：担当理事が欠席であったため、資料共有で報告。

会計報告 (11 月時点)：収入 7,532,600 円 (個人会費 200 万円、賛助会費 95 万円、討論会収入 2,538,771 円、静岡市助成金 17 万円)。支出は討論会事業費 2,475,963 円などを含め赤字。預貯金残高 16,906,150 円。第 68 回討論会は収入 2,538,771 円、支出約 110 万円の赤字。収支改善を検討中。

渉外報告：共催 1 件、協賛 4 件の進捗を報告。12 月に 1 件の共催を予定。

学会賞報告：資料で受賞者情報を共有。

(2) 第 68 回討論会 (2024) 報告

参加者数：188 名

発表件数：118 件 (口頭 61 件、ポスター 56 件)

共催協賛：共催団体 5、協賛団体 6、協賛企業 8

参加者傾向：正会員増加、非会員減少 (理由不明)

若手発表賞：7 名受賞

(3) APSORC2025 準備状況

IC メンバー更新：IAC18 名中 12 名決定

共催依頼：国内 24 団体中 17 団体承認

ホームページ：12 月中旬に参加・演題登録開

始予定

基調講演者：4名決定

スポンサー依頼：約10社が参加表明

松江市の補助金：800～900万円を想定

その他：ビザ対応、ウェルカムレセプション、エクスクーション準備中。

(4) 各種委員会・WG 報告

ネット・広報委員会：会員 ML 配信数：15（2024/9/18～11/27）

新研究炉検討委員会：資料の通り。

若手奨励委員会：海外渡航支援規定を議論し承認。内規、申請書のフォーマット、審査方法を検討。大学院研究室紹介のウェブサイト作成方法を議論。

JNRS 編集委員会：投稿数の増加に向けた議論。倫理規程、引用規定、AI 利用規定の整備検討。インパクトファクター取得に向けた準備を進める。他誌との差別化や特徴の明確化を議論。APSORC の Proceedings 号対応。

「放射化学」編集委員会：次号は3月発行予定。

(5) 各種部会報告（教育、 α 環境、核化学、放射化分析、核プローブ、若手の会、原子力化学）

教育：教育セミナー開催や放射化学塾の準備、RI 製造研修会の後援を承認。

原子力化学：総会で部長任期を議論。

核化学：電子光物理学研究拠点の委員推薦と RI 製造研修会の後援を了承し、学会主導の後援が望ましいとの意見あり。

アルファ放射体：環境放射能研究会への5万円補助を申請。

(6) 学会紹介パンフレット対応状況報告

日本語版パンフレット：東京の加速器シンポジウム（150部）、大阪の短寿命 RI 研究シンポジウム（200部）で配布予定。

英語版パンフレット進捗：日本語版を基に英訳中。若手会・環境放射能部会の内容を追加予定。

ロードマップ英訳の扱い：英訳作業負担軽減のため、QRコードで最新情報を提供する案を検討。

英語版ホームページ更新依頼：広報委員会に更新を依頼。

(7) 大阪大学 CiDER 共同研究拠点申請に関する支援のお礼と報告

不採択となったが、感謝の意を伝える文書の送

付あり。

(8) 加速器シンポジウム共催報告

篠原元会長がパネラーとして参加予定。

審議

(1) 学会賞公募要領の決定

提案：奨励賞・木村賞の募集要項を更新し、締切日を2月末に設定。未納会費者の対象外記載を削除し、応募フォーム URL を短縮。

議論：応募条件の明確化が必要との意見あり。未納会費者の扱いについて確認。

承認結果：修正案を承認し、メーリングリストで配信。

(2) GMO-PG の 3DS 導入

提案：Confit 決済の 3D セキュア導入を 2025 年 12 月までに決定する必要がある、追加費用は月額 2,000 円。APSORC は別契約のため、次年度は休止し、再来年度の討論会で再稼働予定。

議論：費用対効果や導入による利便性向上について議論。APSORC との契約との整合性を確認。

承認結果：導入を承認。

(3) 第 22 回同位体科学研究会の協賛

提案：2025 年 3 月 7 日（芝浦工業大学）開催の協賛依頼を審議。学会の資金支援なし。

議論：協賛の意義や今後の協賛基準の明確化が必要との意見あり。

承認結果：協賛を承認し、今後の協賛依頼は申請書フォーマットを使用する方針とした。

(4) 研究発表助成制度

提案：第 47 回ケモインフォマティクス討論会（2024 年 12 月、金沢商工会議所会館）への参加助成。懇親会費は助成対象外となっていたため、次年度から明記する方針を確認。

議論：助成対象の明確化が必要との意見あり。懇親会費の取り扱いについて確認。

承認結果：申請者の希望確認後、必要に応じて申請書を修正し、助成を実施することを承認。

(5) APSORC 木村賞授賞式の主催

提案：APSORC で木村賞・ヘベシー賞の授賞式および講演を「アワードセッション」として開催し、理事会が主催する方針を承認。

議論：木村賞の国際化や外国人受賞者への旅費補助、若手研究者との交流機会を検討。

承認結果：今後、具体案を理事会に提案予定。

(6) 放射化学研究室紹介ウェブページの作成

提案：若手研究者向けの研究室情報ページを開設。アンケートを基に情報を収集し、HP 担当理事がデザインを作成。

議論：掲載許可の取得方法や、情報更新の頻度について議論。

承認結果：掲載許可取得後、ネット担当理事がページを公開。

(7) APSORC25 学生会員参加費助成制度

提案：2025 年 2 月開催の APSORC25 に参加する学生会員の登録費（1 万円）を全額補助する制度を承認。

議論：助成制度の公平性や財政への影響を考慮。助成金支給の流れについて確認。

承認結果：審査は若手奨励委員会が担当し、学生が一旦支払い、補助金を支給する形式とする。財政への影響を考慮しつつ、若手支援を継続。

検討

(1) 次年度事業計画の検討

各担当理事が 2024 年度事業計画を参考にし、次回理事会までに案を作成することを確認。

(2) 各種委員会委員の検討

新研究炉検討委員会および学会事務所の事務所長・事務局担当委員の次期委員を検討し、次回理事会で決定する。

(3) 若手海外渡航支援制度規程の検討

若手奨励委員会が提案する制度の支援範囲や要件を議論。学会参加・視察の定義や旅費規程との整合性について意見が分かれたため、詳細な規程や募集要項を整理し、次回理事会で再審議することを確認。

(4) 会費滞納者の対応

2 年以上の滞納者 13 名を含む滞納状況を確認。担当者を決めて連絡を行う。

(5) 事務所・事務局所在地のホームページ記載

郵送物の誤送問題を防ぐため、ホームページに事務所所在地と事務局連絡先を明記する方針を確認。問い合わせフォームの活用や、「郵送物は事務局へ」との注意書きを添える。

以上

3. 会員動向（令和 6 年 8 月～令和 7 年 1 月）

個人会員数（2025 年 1 月 31 日現在）

会員種別	会員数
正会員	268 名
学生会員	62 名
名誉会員	10 名
永年会員	8 名
外国人特別会員	4 名
合計	352 名

賛助会員数（2025 年 1 月 31 日現在）

会員種別	会員数
賛助会員	22 団体

新規入会（正会員）

氏名	所属
平山 賀一	高エネルギー加速器研究機構
塩原 良建	株式会社日本環境調査研究所

新規入会（学生会員）

氏名	所属
木本 周平	電気通信大学大学院
谷原 律輝	新潟大学理学部理学科
鶴田 祥丸	新潟大学理学部理学科
田長 和真	新潟大学理学部理学科
田嶋 大洋	筑波大学大学院理工情報生命学術院数理物質科学研究群
上原 孟	筑波大学大学院理工情報生命学術院数理物質科学研究群
東福 滯和	東京都立大学理学部
小川 颯士	筑波大学理工情報生命学術院生命地球科学研究群

退会（正会員）

氏名	氏名
高橋 正	菅原 誠之郎
村上 貴士	

退会（学生会員）

氏 名
中川 創太

所属変更等

変更項目	変更件数
所属（機関・役職）	11 件
メールアドレス	2 件
部会	9 件
その他（住所等）	17 件
変更会員数	22 名

オンライン会員管理システム「SMOOSY」の変更件数を表記しています。

「放射化学」規程など

「放射化学」編集委員会規程

(名称)

第 1 条 この規程は、一般社団法人日本放射化学会（以下「本会」という。）定款第 36 条に基づき、本会の和文誌「放射化学」の編集委員会を設置し、その運営に当たるために定める。

(編集委員会)

第 2 条 編集委員会は、編集委員長 1 名、出版担当理事 1 名及び編集委員約 7 名で構成する。

- 2 編集委員長は、出版担当理事が推薦し、理事会の承認を得て、会長が委嘱する。
- 3 編集委員長は、若干名の副編集委員長をおくことができる。
- 4 副編集委員長は、編集委員の中から編集委員長が指名する。
- 5 副編集委員長は、委員長の業務を補佐し、委員長が不在の場合にその職務を代行する。
- 6 編集委員は、各部会が学会員の中から 1 名以上を推薦し、理事会の承認を得て、会長が委嘱する。
- 7 編集委員長は、必要に応じて学会員の中から委員を推薦できる。推薦された編集委員は、理事会の承認を得て、会長が委嘱する。

第 3 条 編集委員長および編集委員の任期は 2 年とし、重任を妨げない。

第 4 条 編集委員会は、次の事項について企画・審議し、「放射化学」の継続的な発行を行う。

- (1) 「放射化学」の編集及び発行に関すること
- (2) 「放射化学」への投稿論文の審査に関すること
- (3) 編集委員長候補者及び編集委員候補者の推薦に関すること

(「放射化学」誌の発行)

第 5 条 本会は、「放射化学」を 1 年に 2 回発行し、それぞれ異なる巻数を割り振る。

(論文の審査)

第 6 条 編集委員会は、「放射化学」へ投稿された論文に対して、担当編集委員 1 名を決定する。

2 審査を要する記事については、担当編集委員は審査員 1 名を選出し、審査を依頼する。

第 7 条 論文審査の手続きは、別に定める「放射化学」投稿論文審査内規による。

第 8 条 本規程の改定は、理事会の決議による。

付則 この規程は、2021 年 4 月 1 日から施行する。

- 2 2023 年 3 月 4 日一部改訂。
- 3 2024 年 3 月 16 日一部改訂。

「放射化学」発行規程

(目的)

第 1 条 「放射化学」は、一般社団法人日本放射化学会（以下「本会」という。）の目的を達成するために、
(i) 放射化学並びにその関連領域における重要な進歩を含む学術論文と (ii) 会員および関連分野の研究者にとって有益な最新トピックスをまとめた記事を掲載する。

(「放射化学ニュース」との関係)

第 2 条 「放射化学」は日本放射化学会和文誌「放射化学ニュース」(2012 年まで発行、第 26 号が最終号)の後継誌であり、創刊年は 2013 年、巻数は第 27 巻からの発行とする。

(掲載記事)

第 3 条 「放射化学」は審査付き論文とそれ以外の放射化学関連分野の最新トピックスを掲載する。前者には、原著論文、総説論文、短報の各欄を設け、後者はこれまでの「放射化学ニュース」を引き継ぎ、様々な記事を積極的に掲載する。

1. 審査付き論文

- 1-1. 原著論文は、新規な内容にもとづき論理的に明瞭な結論を含む学術論文をいう。
- 1-2. 総説論文は、当該分野のこれまでの研究の進展を専門的な立場から解説する学術論文とする。
- 1-3. 短報は、重要な研究成果を含んだ短い学術論文で、編集委員会は特に迅速な公表を行う。
- 1-4. この他に、編集委員会が認めた場合、上記以外の学術情報を掲載することがある。

2. 審査付き論文以外の記事

上記審査付き論文以外は固定した枠にとらわれない内容とし、主に各種特集記事、解説、トピックス、学位論文要録、施設だより、学会だより、研究集会だより（国内・国外）、情報プラザなどを掲載する。

3. 審査付き論文（第 3 条第 1 項）の「投稿規則」を別途「放射化学」投稿規則に定めるが、審査付き論文以外の記事（第 3 条第 2 項）に関する投稿規則は特に定めず、編集委員会の編集方式に従う。

付則 この規程は、2021 年 4 月 1 日から施行する。

「放射化学」投稿規則

本規則は、一般社団法人日本放射化学会（以下「本会」という。）「放射化学」論文発行規程に基づき、編集委員会にて論文の投稿指針として制定するものである。

(投稿論文と依頼論文)

第 1 条 論文は投稿によるものと編集委員会からの依頼によるものとする。

(著者)

第 2 条 著者は本会会員であることを要しない。

(原稿の作成)

第 3 条 使用言語は日本語とする。

第 4 条 投稿論文の作成は、別に定める「放射化学」投稿の手引き（以下「投稿の手引き」という。）に従うものとする。

(論文の受け付け)

第 5 条 原稿が、「投稿の手引き」に定める「投稿先」に到着した日付けをもって、論文の受付日とする。

(審査)

第 6 条 編集委員会は、査読者を委嘱して論文の掲載に関する意見を求め、掲載の可否に関する審査を行う。掲載可となった日付をもって受理日とする。投稿によるものと依頼によるものに関わらず、編集委員以外の査読者の意見を参考として、編集委員会が掲載の可否を決定する。

(論文の掲載)

第 7 条 掲載可となった論文は、速やかに論文誌上および論文誌 web サイトに掲載する。

(掲載料、別刷り)

第 8 条 論文の掲載料は徴収しない。別刷りを作成する場合には実費を著者負担とする。

(原稿料)

第 9 条 編集委員会の依頼による論文については原稿料を支給することがある。

(著作権)

第 10 条 論文誌に掲載された全ての論文の著作権は本会に帰属する。原著論文、総説論文、短報については、著者は論文受理後速やかに「著作権譲渡同意書」を本会に提出しなければならない。

(本規則の改定)

第 11 条 本規則の改定には理事会の決定を要する。

付則 この規則は、2021 年 4 月 1 日から施行する。

「放射化学」投稿の手引き

1. はじめに

この「投稿の手引き」は一般社団法人日本放射化学会（以下「本会」という。）和文誌「放射化学」論文投稿規程に基づき、編集委員会にて原稿の作成の指針として制定されたものである。

2. 投稿に際しての注意事項

- 1) 採否が決定するまで同一趣旨の論文を他誌に投稿してはならない。
- 2) 他誌に投稿中の論文を投稿してはならない。
- 3) 投稿後の著者に関する変更は認めない。
- 4) 図版を転載する場合は、著者にて転載許可を著作権者より得なければならない。
- 5) 投稿原稿は以下の「3. 原稿作成時の注意事項」に従って作成し、その電子ファイル（PDF ファイル、MS-Word ファイルなどが望ましい）を編集委員会に電子メールにより送付する。到着次第、編集委員長より受付日が記載された受け取りの電子メールが送付される。

3. 原稿作成時の注意事項

- 1) (原稿の構成) 原稿は以下の順でそれぞれ改ページして編成する。(1) 表紙（論文題名、著者名、研究の行われた機関、同所在地などを記す。）、(2) 要旨およびキーワード（5 つ程度）、(3) 本文、(4) 引用文献、(5) 表、(6) 図、(7) 図の説明文。
- 2) (原稿の形式) A4 用紙を縦方向として、横書きに印字し、1 ページに 25 行程度とする。
- 3) (原稿の長さ) 短報以外は制限を設けない。短報は図表を含めて刷り上り 4 ページ以内を原則とする。なお刷り上がり 1 ページは約 2000 字であり、図・表は 1 枚につき 500 字とカウントする。
- 4) (要旨) 要旨として英文要旨（250 語以内）および和文要旨（400 字以内）の両方をつけること。
- 5) (引用の形式) 番号順とする。最初に引用された箇所の順で引用文献を並べる。引用文献の記載方法はアメリカ化学会発行の雑誌と同形式とする。なお本形式は本会の Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences 誌と同様である。

- 6) (表) 表は説明も含めて英文で作成する。本文中では Table として引用する。
- 7) (図) 図は説明も含めて英文で作成する。本文中では Fig. として引用する。なお投稿時のファイルサイズは 10 Mbyte を超えないこと。
- 8) (その他) 図表などの数値や軸の表記では物理量 / 単位の形式をとることとし、物理量 (単位) の表記は用いない。(例: Time/min とし、Time (min) は用いない。)
- 9) (カラーの図表) カラーの図表を掲載する場合には、実費を著者負担とする。なお、論文誌 web サイト公開用の PDF 版のみ無料でカラーとすることができる。
- 10) (注意事項) 上記に著しく逸脱した原稿については、受け付けないで返却することがある。

4. 校正および論文誌発行後の正誤訂正

- 1) 著者校正は 1 回行う。返送期日に著しく遅れた場合には編集委員会の校正のみで校了とする。
- 2) 発行後 6 ヶ月以内に著者から訂正の申し出があった場合には、正誤訂正に関する記事を掲載することがある。

5. 投稿先

〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村白方 2-4

日本原子力研究開発機構 安全研究センター 保障措置分析化学研究グループ

安田健一郎 編集委員長

Fax: 029-284-3665

e-mail: yasuda.kenichiro@jaea.go.jp

houshakagaku@radiochem.org

『放射化学 50 号』記事の修正のお知らせ

『放射化学 50 号』1 ページ右段にて下記の通り修正を入れさせていただきました。

(修正前)

・コロナ禍で延期・中止となった APSORC22 対応の件→ 2023 秋から APSORC25 の取り組みを開始しました。LOC-Chair の役目をお引き受けし、LOC のみなさまと共に成功へ向け取り組みを進めています。期間は、2025 年 9 月 14 日 (日) ~ 19 日 (金) で、島根県松江市のくにびきメッセで開催します。ふだんの討論会に倍する方々のご参加が望まれます。会員のみなさま方の積極的なご参加をお待ちする
(<https://pub.conf.it.atlas.jp/en/event/apsorc2025>)

(修正後)

・コロナ禍で延期・中止となった APSORC22 対応の件→ 2023 秋から APSORC25 の取り組みを開始しました。LOC-Chair の役目をお引き受けし、LOC のみなさまと共に成功へ向け取り組みを進めています。期間は、2025 年 9 月 14 日 (日) ~ 19 日 (金) で、島根県松江市のくにびきメッセで開催します。ふだんの討論会に倍する方々のご参加が望まれます。会員のみなさま方の積極的なご参加をお待ちすると共に、周辺の方々への勧誘もお願い致します。
(<https://pub.conf.it.atlas.jp/en/event/apsorc2025>)

学位論文要録執筆候補者の推薦について

「学位論文要録」欄では、最近 2 年間の範囲で博士の学位を授与された会員の方々の学位論文内容を抄録の形で掲載致しております。現代の放射化学およびその関連領域における進歩についての情報を読者の方々に提供することが主な目的であります。しかし、編集委員会が広範な領域で活躍されている執筆候補者につきまして、遺漏なく情報を得ることは困難であります。このため、会員の皆様に同欄の執筆候補者（学位取得者）を推薦いただきたく存じます。自薦・他薦は問いません。詳しくは編集委員会にご照会下さい。

☆☆☆

「会員の声」欄へのご寄稿のお願い

本誌では、学会や学会出版物に関する会員の皆様の意見を掲載するために、「会員の声」欄を設けております。1000 字以内（形式自由）におまとめいただき、編集委員会または学会事務局にお送り下さい。掲載の可否につきましては当方にご一任下さい。

☆☆☆

会員の異動に伴う連絡のお願い

会員の移動に伴い、所属、連絡先等に変更が生じた場合には、以下の web ページを参照し、修正をお願いします。会員情報変更等の手続き：<http://www.radiochem.org/community/update.html>

放射化学

第 51 号

令和 7 年 (2025 年) 3 月 20 日発行

編集

一般社団法人 日本放射化学会編集委員会

委員長：安田健一郎、副委員長：大江 一弘、小荒井一真、

委員：松村 達郎、小林 貴之、二宮 和彦、齊藤 敬、松尾 基之

連絡先：〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村白方 2-4

日本原子力研究開発機構 安全研究センター

保障措置分析化学研究グループ

安田健一郎 (e-mail: yasuda.kenichiro@jaea.go.jp)

発行

一般社団法人 日本放射化学会

〒 590-0494 大阪市泉南郡熊取町朝代西 2 丁目 1010 番地

<http://www.radiochem.org/>

印刷

松枝印刷株式会社

〒 303-0034 茨城県常総市水海道天満町 2438

本誌掲載記事の著作権は一般社団法人 日本放射化学会に帰属します。

賛助会員

クリアパルス株式会社

株式会社千代田テクノ

仁木工芸株式会社

東京ニュークリア・サービス株式会社

東京パワーテクノロジー株式会社

長瀬ランダウア株式会社

株式会社日本環境調査研究所

富士電機株式会社

ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ株式会社

株式会社テクノエーピー

株式会社化研

公益財団法人 原子力安全技術センター

新潟県放射線監視センター

公益社団法人 日本アイソトープ協会

公益財団法人 日本分析センター

公益財団法人 放射線影響協会

一般財団法人 放射線利用振興協会

九州電力株式会社

中国電力株式会社

中部電力株式会社

東京電力ホールディングス株式会社

北海道電力株式会社

PIONEER IN SPECTROSCOPY

アナログ測定技術で世界へ。

その他の製品はこちらのQRコードから→
検出器/プリアンプ/放射線測定器、他



お客様の安全を願って最良の個人線量測定サービスを提供

安心・安全をお届けする
「ガラスバッジ 個人線量測定サービス」
高精度の個人線量測定サービスを提供



ガラスバッジ

ガラスリング

放射線業務従事者
個人管理システム
「ACE GEAR (エースギア)」
各種データの一元管理で
法令に基づく個人線量管理を
やさしくサポート



簡単に半価層・
平均乳腺線量を測定
「マンモQC・測定サービス」
マンモグラフィ装置の精度管理が
簡単に行える



線量計測事業

いつも携帯できる手軽さと安心感
住民用 小型・軽量積算線量計
「D-シャトル」
データ・記録を残す小さな線量計
一日の積算線量と総積算線量を
自分の目で確かめられるから安心



型名: 23gと軽量!

独立研究開発法人 産業技術総合研究所
との共同開発製品

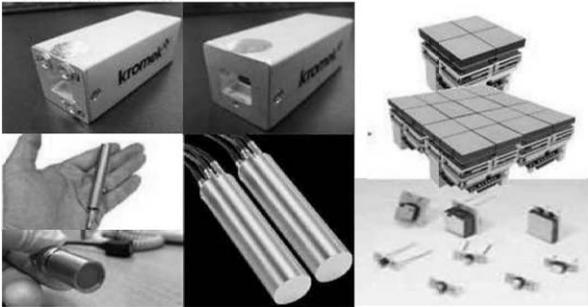
目の水晶体被ばく測定
「DOSIRIS® モニタリングサービス」
目のすぐ近くで装着でき
各種防護眼鏡にも対応



DOSIRIS: IRBMの登録商標 (国際登録番号1293048) です

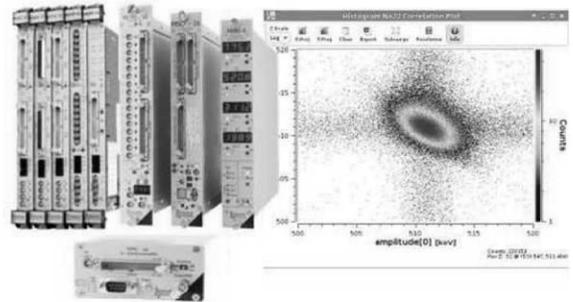
kromek
detect image identity

CdZnTe 半導体検出器



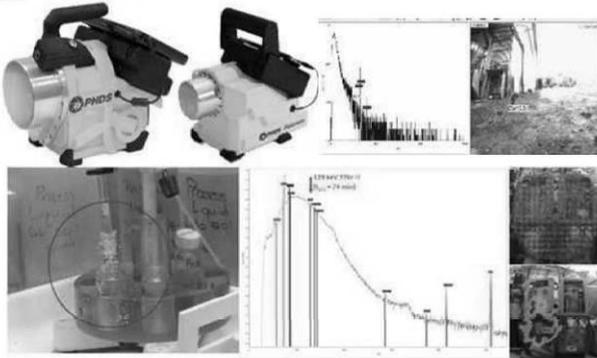
imesytec

NIM/VME Electronics



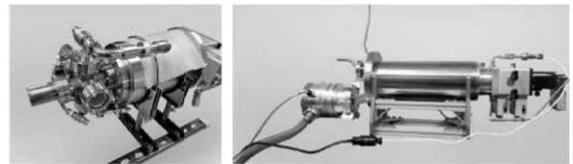
PHDS
Gamma Ray Imaging Detectors

Gamma Imager & Portable Ge



adelphi
TECHNOLOGY, INC.

DD/DT中性子発生源



〒140-0011 東京都品川区東大井 5-26-22
TEL 03-4218-4700 FAX 03-4212-3423
Email niki_sales@nikiglass.com

新型ハイブリッドサーベイメータ RaySafe 452

FLUKE®

Biomedical



半導体とGM管を組み合わせ、
1台で様々な測定用途に対応可能！

As versatile as you are

FLUKE®
Biomedical

LANDAUER®

RaySafe®

【お問い合わせ】 **長瀬ランドアウア株式会社** 営業部

TEL:029-839-3322 FAX:029-836-8441
mail@nagase-landauer.co.jp
https://www.nagase-landauer.co.jp/



【製品情報】 **フルークバイオメディカル**

https://www.flukebiomedical.com/
products/radiation-measurement/
radiation-safety



運用・管理・維持

- ・作業環境測定
- ・放射線施設管理
- ・設備保守
- ・高度医療機器及びRI関連備品販売

工事

- ・新設、改修工事
(各種シールド、内装、RI設備)

私たちの経験と技術で
お客様の安全を守ります

調査・解体・除染

- ・放射化物解体
- ・放射性物質による汚染検査、除染
- ・アスベスト調査
- ・PCB調査

計画

- ・遮蔽、RI設備設計、施工
- ・設備能力計算
- ・許認可申請
- ・廃止措置

 株式会社 **日本環境調査研究所**
作業環境測定機関 放射性物質 登録番号 1 1 - 4
<https://jer.co.jp/>

建設業東京都知事許可第136585号
特-03：管、解体、とび・土工
般-03：内装仕上、鋼構造物、
機械器具設置、建具



HPはこちら

本 社：〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-24-1 TEL.03-5322-2271

富士電機の放射線測定器



より正確に より簡単に

富士電機では、放射線管理システムをはじめ、放射線管理における様々な用途に応じた測定器類を取り揃えています。

〔取扱製品〕

放射線モニタリングシステム
RI排水管理システム
出入管理システム
非密封RI管理システム
従事者管理システム

各種サーベイメータ
個人線量計／環境線量計
モニタリングポスト
ホールボディカウンタ
体表面モニタ
食品放射能測定システム
その他



富士電機株式会社 放射線システム部

東京都日野市富士町1番地 〒191-8502 TEL 042-585-6024

<http://www.fujielectric.co.jp/> mail fric-info@fujielectric.co.jp

営業所

北海道	TEL 011-221-5482	東北	TEL 022-716-0203
東京	TEL 042-585-6024	中部	TEL 052-746-1032
関西	TEL 06-6455-3891	九州	TEL 092-262-7844

ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ株式会社

電気冷却式
クライオスタット
(CP5)

インテリジェント・
クライオサイクル
(ICC)

ゲルマニウム
半導体検出器

Genie対応
核種同定
サーベイメータ
(SPIR-Ace™)

デジタルシグナル
アナライザ
(DSA-LX®)

低バック
グラウンド
αβ自動計測
システム
(S6LB™)

可搬型HPGe
スペクトロメータ
(Aegis™)

温度補償型NaI
デジタルスペクトロメータ
(Osprey®, NAIS-2x2™)

ガンマ線分析システム
(ISOCSTM)

可搬型
トリチウムモニタ
(Bionix™ 3)

放射化学の
あらゆるニーズに
高い技術力と
最適な
放射線測定システム、
サービスで
お応えします。

E-mail

ホームページ



MIRION
TECHNOLOGIES



公益財団法人 原子力安全技術センター 放射性同位元素等規制法に基づく登録機関業務

登録検査機関

問い合わせ先: 03-3814-7301

使用施設、貯蔵施設、廃棄施設等
の施設検査・定期検査
及び定期確認

登録定期確認機関

問い合わせ先: 03-3814-7483

承認容器による輸送の
運搬物確認

承認された積載方法による
輸送の運搬方法確認

登録運搬物確認機関

登録運搬方法確認機関

登録認証機関

問い合わせ先: 03-3814-7301

放射性同位元素装備機器の
設計認証

登録試験機関

問い合わせ先: 03-3814-7480

第1種及び第2種の
放射線取扱主任者試験



登録資格講習機関

問い合わせ先: 06-6147-3580
03-3814-7100

第1種、第2種及び第3種の
放射線取扱主任者免状取得のための講習

登録特定放射性同位元素 防護管理者定期講習機関

問い合わせ先: 03-3814-5746

特定放射性同位元素防護管理者の
資質向上のための講習

登録放射線取扱主任者定期講習機関

問い合わせ先: 03-3814-5746

放射線取扱主任者の
資質向上のための講習

私たちは放射性同位元素等規制法に基づく
登録を受け、国に代わり、法令で定められた
資格要件を備えた検査員、確認員、講師等
によって業務を行っています。

〒112-8604

東京都文京区白山5丁目1番3-101号 東京富山会館ビル4階

ホームページ <https://www.nustec.or.jp/>

～アイソトープと放射線を用いた研究に携わる全ての皆さまへ～

第62回 アイソトープ・放射線研究発表会

会 期： 2025年 7月 2日(水)～ 4日(金)

会 場： 日本科学未来館 7階未来館ホールほか(東京・お台場)

参加登録期間/参加費:

【一般】

前期登録(4月14日(月)～6月13日(金)12時) 7,000円(税込)

後期登録(6月23日(月)～7月4日(金)) 9,000円(税込)(会場での現金授受は行いません)

【学生】

無料(要 学生証)

詳しくは大会サイトをご覧ください。

<https://pub.conf.it.atlas.jp/ja/event/jrias2025>



皆さまのご参加をお待ちしております

主催 公益社団法人日本アイソトープ協会

確かな分析力を礎に国民生活に貢献します

分析の
質の保証 **世界トップクラス**

環境と安全に対する国民の認識が高まる現在、日本分析センターは、環境放射能・放射線に関する分析専門機関として、国民に信頼される環境放射能データの提供に努めています。

身の回りにある環境試料中の放射性核種の分析サービスを提供しています。ストロンチウム90、セシウム137をはじめ、国内外から関心のあるトリチウムに加え、炭素14、クリプトン85、ヨウ素129、放射性キセノン、トリウム、ウランなどの様々な放射性核種の分析に幅広く対応できます。

IAEAが主催する国際的な技能試験に参加して分析技術の客観的な評価を受けるとともに、国際標準化機構(ISO)の認証・認定の取得やJCSS校正事業者(区分:放射線・放射能・中性子)として登録し、信頼性の高いデータを提供すべく努めております。

確かな
精度管理 **安全と信頼性**

日本分析センターは、分析結果の信頼性を確保するために、IAEAなどの国際機関が主催する環境放射能分析の国際相互比較分析のプロジェクトに参加しています。優れた成績を修めるほか、様々な認証・認定を取得しています。

一歩前へ **新技術開発への挑戦**

日本分析センターは、現在の分析技術に妥協せず、たゆまぬ努力による技術発展を目指し、新しい分析法の研究・開発を行っています。

放射能測定法シリーズの改訂作業を実施し、国としての標準法の作成に貢献しています。環境放射能分析・測定分野のほか、原子炉の廃炉関連の難測定核種の迅速分析法の開発や、ドローンに放射線測定器を搭載して空間線量及び放射能の分布を調査する手法の研究等を行っています。

JCAC
Japan Chemical Analysis Center

公益財団法人 日本分析センター
〒263-0002 千葉県千葉市稲毛区山王町295番地3
電 話：043-423-5325 F A X：043-423-5372
e-mail：koho@jcac.or.jp URL：http://www.jcac.or.jp



放射線分野における科学技術の進展に貢献しています



～主な業務～

- 放射線影響に関する知識の普及・啓発
- 放射線影響に関する研究活動への奨励助成、顕彰
 - 放射線影響に関する調査研究
 - ICRP調査・研究連絡会の運営
- 原子力施設及び除染等事業場で働く放射線業務従事者の被ばく線量の一元的な登録管理
 - RI施設で働く放射線業務従事者の被ばく線量の登録管理
 - 放射線管理手帳制度の運用管理
- 国の指定を受けた放射線管理記録等の保存業務（原子力、除染、RI等）
- 原子力施設等で働く放射線業務従事者を対象にした低線量長期被ばくによる健康影響の疫学調査

公益財団法人 放射線影響協会

〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町1-9-16 丸石第2ビル5階
TEL 03-5295-1481 FAX 03-5295-1486 <https://www.rea.or.jp>

放射線従事者中央登録センター
TEL 03-5295-1786 FAX 03-5295-1486

放射線疫学調査センター
TEL 03-5295-1494 FAX 03-5295-1485

放射線利用事業の振興と

原子力の利用に係る知識及び技術の普及を振興するために

◆ 照射サービス事業

- ・ ガンマ線・電子線照射：材料の耐放射線性試験、材料改質など多様な照射ニーズに応えます

◆ 技術移転事業

- ・ 産業界の「中性子利用による材料評価」の多様なニーズに応えます

◆ 原子力研修事業

- ・ 第3種放射線取扱主任者講習
- ・ 放射線業務従事者のための教育訓練
- ・ 原子力・放射線に関する研修会の開催

一般財団法人 放射線利用振興協会

<http://www.rada.or.jp>

本部・東海事業所：〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4 TEL 029(282)9533
高崎事業所：〒370-1207 群馬県高崎市綿貫町1233 TEL 027(346)1639

国内メーカーの放射線計測トータルソリューション

TechnoAP

2024年5月発売開始

2024年10月リリース間近

デモ、貸出し募集中です

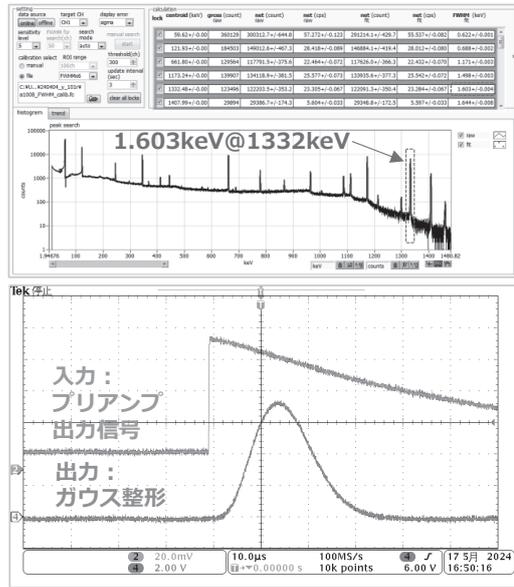


スペクトロスコピアンプ
A1008

入出力8ch. Ge半導体検出器で使用可能



スペクトロスコピアンプ
A100



放射線・放射能測定装置 設計・開発・販売

株式会社テクノエーピー

<https://www.techno-ap.com>

〒312-0012 茨城県ひたちなか市馬渡2976-15

電話 029-350-8011

メール info@techno-ap.com



安心・安全な環境を保つための 放射能測定サービス

東京電力
グループ

環境
モニタリング
他

放射能濃度
測定
(放射性セシウム)

放射能濃度
測定
(トリチウム)

灰化濃縮処理

ISO17025
認定取得

■ 国際原子力機関 (IAEA) の技能試験に参加し、品質維持に努めております。

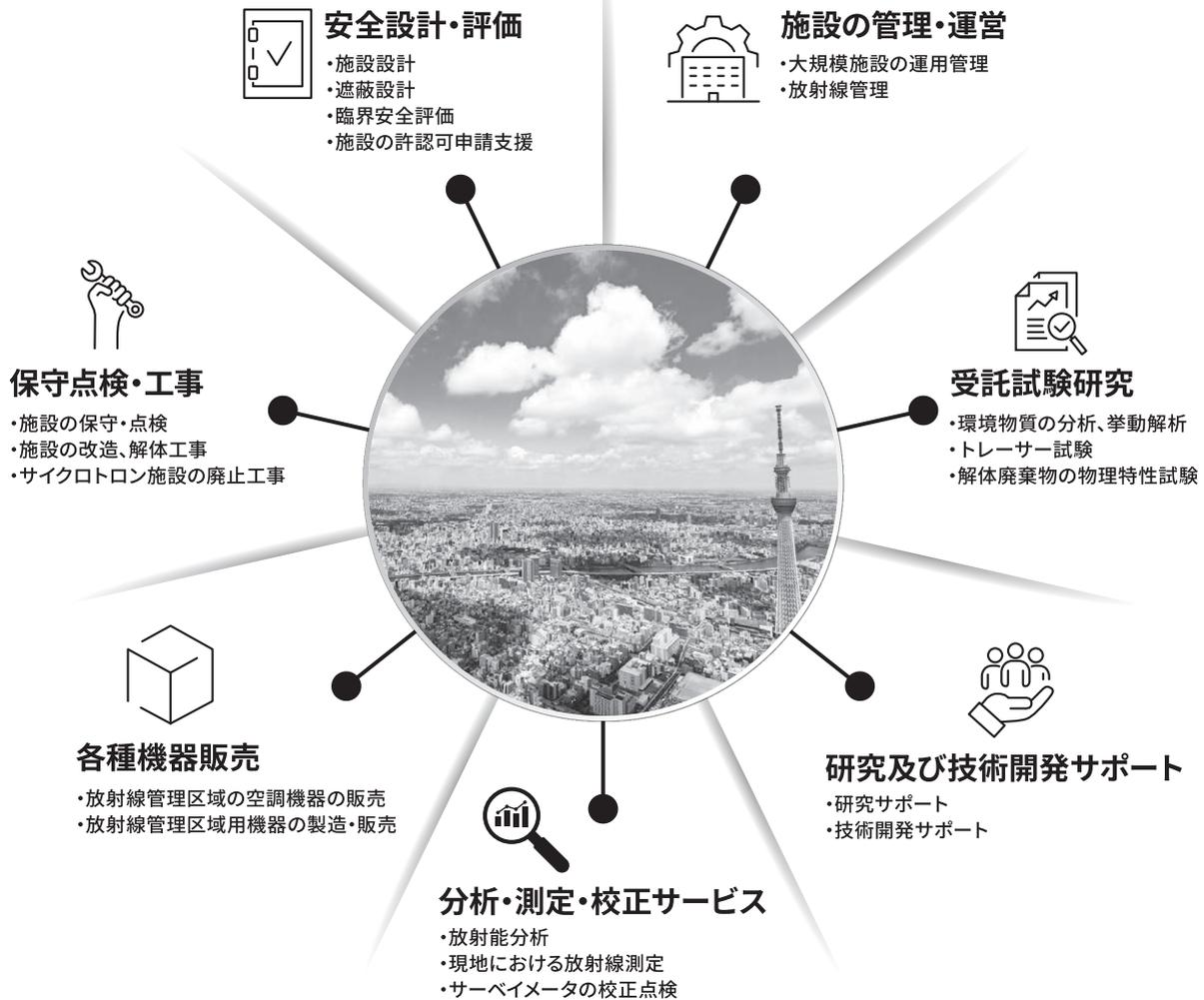


東京パワーテクノロジー株式会社
環境事業部 分析センター

〒267-0056 千葉県千葉市緑区大野台2-3-6 TEL:043-295-8405 FAX:043-295-8407

MAIL:act-bunseki@ml.tokyo-pt.co.jp HP:https://www.tokyo-pt.co.jp/

原子力・放射線活用を 未来への架け橋に。



TNSはエネルギーや医療の分野における原子力・放射線の活用を
トータルサポートいたします。



東京ニュークリア・サービス株式会社 <https://www.tokyo-nucl.co.jp/>



東京本社 TEL. 03-3831-7957 〒110-0016東京都台東区台東1丁目3番5号 反町ビル7階
 東海事業センター TEL. 029-282-3114 〒319-1112茨城県那珂郡東海村大字村松字平原3129番地31
 つくば開発センター TEL. 029-847-5521 〒300-2646茨城県つくば市緑ヶ原4丁目19番地2
 関西事業所 TEL. 078-570-5201 〒651-0096兵庫県神戸市中央区雲井通4丁目2番2号 マークラー神戸ビル7階
 六ヶ所事業所 TEL. 0175-71-0710 〒039-3212青森県上北郡六ヶ所村大字尾敷字野附1番地4
 いわき営業所 TEL. 0246-66-1210 〒979-0202福島県いわき市四倉町上仁井田字南姥田74番地1

賛助会員はこのスペースに無料で広告を掲載することができます（年2回以上）

日本放射化学会 賛助会員募集

本会の学会活動にご参加頂ける賛助会員をご紹介下さい

連絡先： 一般社団法人 日本放射化学会事務局

問い合わせ専用URL: http://www.radiochem.org/community/toiawa_o.html



