

# 放射化学

## 第49号

年頭にあたって

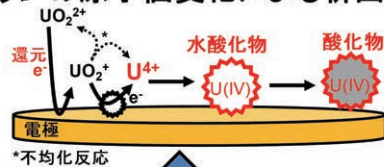
特集

2023年度学会奨励賞

日本放射化学会第67回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介

### アクチノイドの溶液内複合反応研究

#### ウランの原子価変化による析出反応



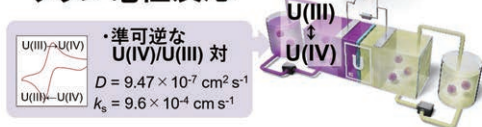
反応

酸化還元で反応や分離を自在に

分離

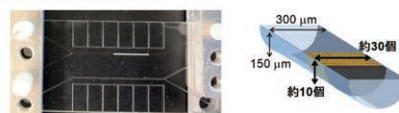
利用

#### イオン液体-有機溶媒混合系のウラン電極反応

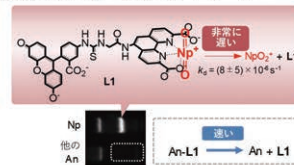


### アクチノイドの微量分析手法開発

#### 樹脂充填マイクロチャンネルによるウラン分離法



#### ゲル電気泳動法によるネプツニウム分析法



# 放射化学 第 49 号

令和 6 年 (2024 年) 3 月 20 日

## 目次

年頭にあたって (五十嵐 康人) ..... 1

## 特集

### 学会奨励賞

アクチノイドの溶液内複合反応研究と微量分析法開発 (大内 和希) ..... 3

### 若手優秀発表賞

Th-229m の電子架橋遷移の観測に向けた

Th-229m イオンの引き出しとトラップ (重河 優大) ..... 8

ノーベリウムの化学的性質解明に向けた

水酸化ストロンチウム沈殿の分光分析と量子化学計算 (板倉 悠大) ..... 12

ICP-MS/MS のリアクションセル内におけるアクチノイド気相反応の反応定数評価

(風間 裕行) ..... 15

光核反応による Lu-177 の製造 (田村 彩乃) ..... 18

マイナーアクチノイド抽出配位子の迅速設計に向けた電子状態インフォマティクス (住吉 剛) ..... 20

ガスクロマトグラフィーと量子化学計算を用いた At 芳香族化合物の

ハロゲン結合エネルギーの導出 (床井 健運) ..... 23

## 会議報告

日本放射化学会第 67 回討論会 (2023) の開催報告 (中島 覚) ..... 26

International Conference on Hyperfine Interactions and

Their Applications (HYPERFINE 2023) (佐藤 渉) ..... 32

トピックス

福島第一原子力発電所事故に伴う新潟県内の放射線等の監視結果  
(10年とりまとめ版)の英語版の公開

(菊池 真梨子、松谷 亮、春日 俊信、飯吉 栄輔)…………… 35

情報プラザ (国際国内会議) …………… 37

学会だより…………… 39

「放射化学」規程など …………… 43

「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

原子価状態に着目し取り組んだ反応研究や分析法の開発の概念図

U や Np などのアクチノイドの反応性は各原子価によって異なることから、溶液内反応の素過程の解明や分離手法を開発するうえで原子価状態を把握・制御することが重要である。(日本原子力研究開発機構・大内和希)

## 年頭にあたって

日本放射化学会会長 五十嵐 康人  
(京都大学複合原子力科学研究所)

新年あけましておめでとうございます。2024年頭のご挨拶を申し上げます。皆さま、穏やかに新年をお迎えになったと思いますが、元旦の夕刻には石川県能登地方にて大きな震災、次いで2日にはこの被災者の救援に向かう海上保安庁の飛行機が羽田空港にて日本航空機と接触して炎上、5名の海上保安庁職員が殉職されました。被災なさった皆さまには、心よりお見舞いを申し上げます。幸いにも日本航空機では乗員・乗客全員が無事とのことですが、本当に、波乱の年明けとなりました。あらためて、大規模災害への備えが重要であることを肝に銘じた正月と感じた次第です。

さて、小生が会長を仰せつかってから早くも1年半余が経過しました。理事会などでの動きは牛歩のごとくですが、着実に進めることが出来た部分もあります。ここでは、残り半年ほどの任期を無事に終えて、学会の継続・発展と云うタスキを次期執行部へ繋ぐべく、会員の皆さまにご報告とお願いを申し述べます。

まずは、本学会にとって冒頭の「備えあれば憂いなし」とも言える若手の支援策についてです。若手の育成は、本学会が永続的に一般社団法人としての活動を繋いでいくための基礎ともなるべき事業と捉えています。去る9月の放射化学討論会会場での会員総会、続く若手奨励支援策検討のワーキンググループや理事会での議論を通じて、また、担当理事や若手会役員諸氏のご尽力により（一社）放射化学会として、基金設立と支援策を、ほぼほぼ確定させております。概要をまとめると、下記のような3つの支援策を骨子としています。また、同時にこの事業を支える委員会も組織します。

- 1) 学費支援（経済的に困窮する博士後期課程学生を対象とした修学費の支援）
- 2) 海外旅費支援（若手の会会員のキャリア形

成を目的とした国外での研究活動の経費を支援）

- 3) 研究費支援（若手の会会員が自身の研究に必要なとする研究費を支援）

この3つを約6,000千円の基金によって、実施していく予定です。当面許される予算額は、各年、各支援に対し1名でそれぞれ500千円、合計1,500千円の額を想定しています。近々に関連規程の公表と候補者募集のアナウンスがなされるものと考えていますが、各大学の指導教員の先生方は、ご自身の下の学生・院生諸氏に若手会への参画とこれらの支援策への応募を積極的にご指導くださるよう、お願いを致します。

これまでも繰り返し述べて来ましたが、若手の育成は本当に急務です。我が国におけるこの分野の5年先、10年先、20年先に「知的な空白」や「知的な飢餓」状態を生み出さないためにも、学術分野での「若手支援の義倉」を作り出したいと思います。ここで「義倉」ですが、ウィキペディアによれば[1]、「中国、朝鮮及び日本で、国内の要地に置かれた穀物を備蓄する倉庫。災害や飢饉に備えて米などの穀物を一般より徴収し、または富者から寄付を得て蓄えた。非常時に備える一方で穀物の腐敗の防止と義倉の維持のために古い穀物を安価で売却（出糶）し、また一般に低利で貸し付ける（借放）事も行われていた。」とのこと。飢饉において窮民を救済するための制度であり、江戸時代中期の名君の誉れも高い上杉鷹山公も採用した懸命な施策[2]です。米沢藩では天明の飢饉もこの策で乗り切ったとのこと。他にも、我が国には江戸時代には人助けや相互扶助の文字通り美しい伝統や仕組みがありました。今でも地方には残っているかと思いますが、無尽講[3]などはそのよい例です。上述のどちらにおいても、参加者からの寄金や供出が要になります。

ご存知のない若手のためにコトバンク [4] から引用すると、無尽とは「一定の口数を定め加入者を集め、一定の期日ごとに各口について一定の出資（掛金）をさせ、一口ごとに抽選または入札によって所定の金額を順次加入者に渡す方式でお金を融資するもの」との説明です。さらにくだけて、江戸時代のお伊勢参りの例で説明しましょう。当然ですが、江戸から伊勢に出かけるには旅行資金が必要です。この資金は庶民にとっては非常に大金ですから、自前の資金だけでは出かけることが出来ません。特に江戸っ子なんざ、宵越しの金は持たねえ、と云うわけですから、伊勢に行けるわけはありません。そこで、世話人の元で多数の人が少額を積み立てして、順番やくじ引きで少数の人がこの旅費を受け取ってお伊勢参りへ出かける、と云う仕組みがあり、「伊勢講」と呼んだそうです。これは目的がお伊勢参りですが、他の目的でも何かを購入するのでも、何でもよいのです。この仕組み、無尽講の狙いは、あくまでも相互扶助でした。しかし、年代が下るとより商売に、商業上の小金融の仕組みとなっていき、相互銀行や信用組合の制度となって、現代に至っています。しかし、なお、現代でも無尽講は続いているようです。小生が子供時代は戦後の貧しさから脱却する時期でしたが、母親が5、6名の主婦のみなさんとこの無尽を実践していたことを記憶しています。

日本放射化学会は大規模な学会ではありませんので、余裕が若干あるとは言え、現状の基金の総額には限りがあります。したがって、上述の仕組みは当面3年間ほどを目途に時限的なものと考えています。新しい仕組みの成果や問題点を受けて、よりよき若手支援の仕組み確立を目指します（次々期の理事会メンバーに託します）。そこで、諸先輩やシニアの先生方へのお願いは、上記の支援策を長期的なものとならしめるため、もっと多くの若手を支援するための、ご寄付です。少額の寄金でも若手への力となると思います。今後、会員管理サービスとして導入したウェブシステムである Smoosy 上での寄付も設けていく予定です。上述の放射化学分野での「知の義倉」を確立するために、相互扶助として、皆さま、ご篤志をお寄せください。ご協力、何卒よろしくお願い致します。

もうひとつ、会員の皆さまにお願いがあります。

それは、本学会と賛助会員の皆さまとの関わりです。当期においては、担当理事諸氏のご活躍により賛助会員の拡大も達成でき、進展がありました。しかし、賛助会員への「メリット」を十分に大きくするところまでは至っていません。学会として可能なこととして、インターンシップの若手への紹介があります。賛助会員から募集のお知らせを募り、若手会を通じて、学生・院生の会員諸氏へインターン募集について周知していくことが出来るだろうと考えます。渉外担当理事や若手会関係者の皆さまに動いて頂きたく、どうぞよろしくお願いを致します。

最後に、「放射化学の夢ロードマップ」に関するお願いです。当学会の各部会にあつては、ロードマップの改訂に向けたご議論をお願いしています。現在の2021年版のアップデートに繋げて参りたく、特に、部会長の皆さまには、ご協力をよろしくお願い致します。

会員諸氏、シニアの先生方、皆さま方、お願いばかり列挙しましたが、現理事会諸氏を代表して、この6月の任期の終了まで、全力で「未来につなぐ」ための努力を続けて参ることをお約束して、新年のご挨拶と致します。波乱を吹き飛ばして未来へつながる一年として参りましょう！よろしくお願い致します。

2024年1月吉日

- [1] <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%BE%A9%E5%80%89>
- [2] Frich 株式会社ホームページ コラム 江戸時代における、強制抛出・連帯責任などの「助け合いのしくみ化」の話 <https://frich.co.jp/several-liability/>
- [3] <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%84%A1%E5%B0%BD>
- [4] [https://kotobank.jp/word/%E7%84%A1%E5%B0%BD-140498#goog\\_rewarded](https://kotobank.jp/word/%E7%84%A1%E5%B0%BD-140498#goog_rewarded)

## 特集 2023 年度学会奨励賞

### 学会奨励賞

大内 和希 (日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター)

受賞題目: アクチノイドの溶液内複合反応研究と微量分析法開発



#### 1. はじめに

ウラン (U) やネプツニウム (Np) などのアクチノイドは溶液中で 3 ~ 6 価の原子価が比較的安定である。その反応性は各原子価によって異なることから、溶液内反応の素過程の解明や分離手法を開発するうえで原子価状態を把握・制御することが重要である。ここでは、原子価状態に着目し取り組んだ反応研究や分析法の開発として、U の原子価変化による析出反応、イオン液体-有機溶媒混合系の U 電極反応、樹脂充填マイクロチャンネルによる U 分離法、ゲル電気泳動法による Np 分析法について紹介する。

#### 2. アクチノイドの溶液内複合反応研究

##### 2.1. ウランの原子価変化による析出反応

東京電力福島第一原子力発電所 (1F) 事故で発生した原子炉建屋内の滞留水には、ウラン (U) はイオン又は固形の状態として存在している<sup>1</sup>。また、地層処分における U の移行挙動はイオン種または析出状態で大きく異なる<sup>2</sup>。そのため、イオン種から析出状態の反応を正確に把握する必要がある。イオン種から析出状態への反応は弱酸性~中性条件で進行するが、従来の U のイオン種と析出状態の間の主な研究は各原子価での錯形成や溶解反応など平衡論的なアプローチが多く、析出反応の素過程を正確に理解するためのものは皆無である。U は原子価によって析出のしやすさが異なるため、溶液中の U イオンの原子価変化により誘起される析出反応を電気化学的にとらえることを考えた。

まず、U の原子価変化と析出反応の経時変化量の相関を同時測定した。測定手法として電気化学

測定と電極上の重量を同時測定可能な電気化学水晶子振動マイクロバンス (EQCM) を用いた。弱酸性条件でイオン種である  $U(VI)O_2^{2+}$  を  $U(V)O_2^+$  に還元しながら析出物の重量測定を実施した結果を図 1 に示す。U(VI) から U(V) に還元する電位 (-0.35 V vs. Ag/AgCl) を印加すると還元電流が流れ、還元反応の進行が確認できる (図 1 実線)。析出重量の経時変化 (図 1 破線) に着目すると、反応初期の過程 [1] では、還元は進行するが還元生成物はイオン種であり析出物は観測されていない。時間が経過し還元反応が進行すると析出し始める (過程 [2])。析出開始後さらに時間が経過すると時間あたりの析出重量である析出速度が変化する (過程 [3])。電流値と析出重量の同時測定により、3 段階の析出反応過程を初めて追跡することができた<sup>3</sup>。

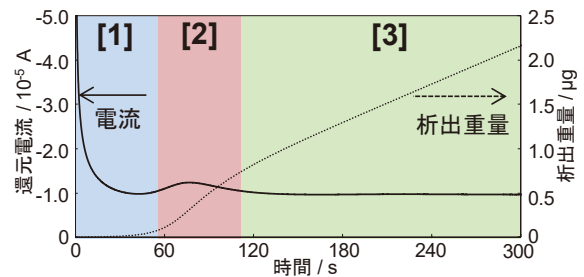


図 1  $UO_2^{2+}$  から  $UO_2^+$  への還元に伴う析出重量の経時変化。[U(VI)O<sub>2</sub><sup>2+</sup>] = 1 mM, [NaClO<sub>4</sub>] = 1 M, pH 3.42.

次に、各種分光法により各過程の U の化学状態を調べた。過程 [1] から [2] への変化は、あらかじめ  $U(V)O_2^+$  イオンに調製した試料の吸光スペクトルの経時変化を測定することで明らかにした。溶解した U(IV) イオン由来の吸収と時間経過により析出物由来の光散乱に伴うベースライン上昇が確認されたことは (図 2 (a))、U(V) は

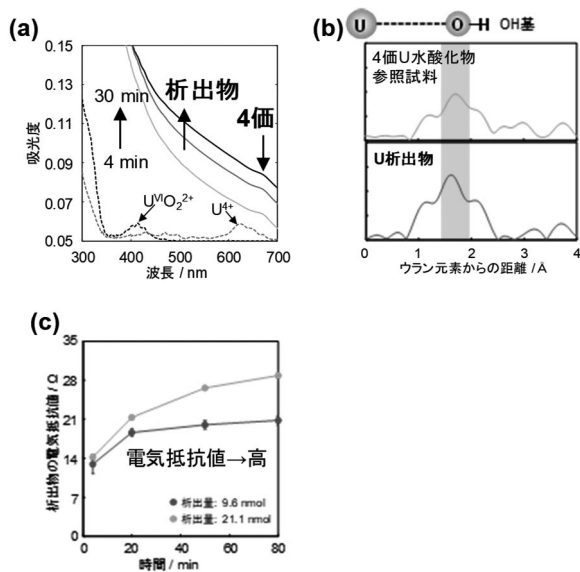


図2 (a)  $U(V)O_2^+$  試料の吸光スペクトルの経時変化。[ $U(V)O_2^+$ ] = 1 mM, [ $NaClO_4$ ] = 1 M, pH 3.50. (b) U析出物とU(IV)水酸化物のEXAFS。[ $U(VI)O_2^{2+}$ ] = 10 mM, [ $NaClO_4$ ] = 1 M, pH 2. (c) U析出物の電気抵抗値の経時変化。[ $NaClO_4$ ] = 1 M, pH 4.0.

U(IV)に変化して析出物を形成することを示している。形成したU析出物の化学状態を、X線吸収微細構造により分析し、化学状態が既知のU(IV)水酸化物の参照試料のスペクトルと比較したところ、U水酸化物に特徴的なシグナル(図2(b)網掛け部分)を観測した。よって、析出物は、U(IV)水酸化物であることが確認できた。さらに過程[2]から[3]への変化は、析出物の電気抵抗値の経時変化から明らかにした(図2(c))。電気化学インピーダンススペクトル解析から得た析出物の電気抵抗値は時間経過とともに上昇した。一般的に、酸化物の電気抵抗値は水酸化物より高いことから、水酸化物から電気抵抗値の高い酸化物への変化が示唆される。

これらの結果から反応初期では電解生成したU(V)が不均化反応によりU(IV)を形成し、U(IV)が水酸化物として析出し、最終的には水酸化物は酸化物へ変化する析出機構(図3)が明らかになった<sup>4</sup>。

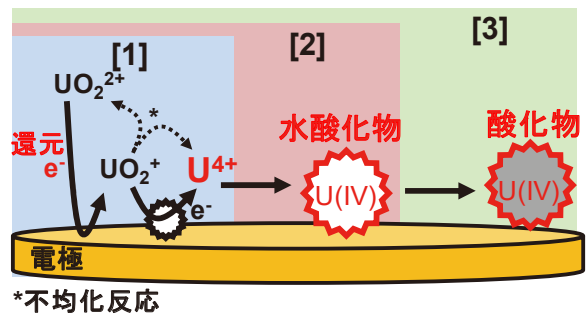


図3 Uの電解析出の反応機構.

## 2.2. イオン液体-有機溶媒混合系のウラン電極反応

核燃料製造工程で発生した劣化Uのほとんどは用途がないまま貯蔵されている<sup>5</sup>。大量の劣化Uを資源として有効利用する方法として、Uを活物質とするレドックスフロー(RF)電池が提案されている<sup>6</sup>が、Uを電池とするためには、水溶液中で不安定なU(III)とU(V)を安定化することが課題である。これらの安定化のためにイオン液体を利用することを着想したが、一般にイオン液体は高粘度でポンプによる送液の負担が大きい。有機溶媒と混合して低粘度化する解決策を考えた。そこで、イオン液体-有機溶媒混合系のU電極反応を調べ、RF電池に利用できる電極反応を探った。

イオン液体1-エチル-3-メチルイミダゾリウムビス(トリフルオロメチルスルホニル)イミドの粘度(40.6 mPa s)は、有機溶媒N,N-ジメチルホルムアミドと1:1で混合することによりポンプ送液可能な4.83 mPa sに低下できた。まず、1:1イオン液体-有機溶媒混合系における $UCl_4$ の電極反応に適した電極材料を選定するために、作用極としてグラッシーカーボン(GC)、白金(Pt)及び金(Au)を用いてサイクリックボルタメトリーを行った。得られたサイクリックボルタモグラムを図4に示す。各電極でU(IV)の還元ピーク( $E_p^c$ )と還元生成物であるU(III)の酸化ピーク( $E_p^a$ )が観測されたが、ピーク電位差は、GC(0.2 V) < Pt(0.9 V) < Au(1.1 V)の順となり、GCを用いた時に最もピーク電位差が小さくなり、電荷移動速度が大きいことが分かった。電池の充放電では速い電子移動が求められることから観測された

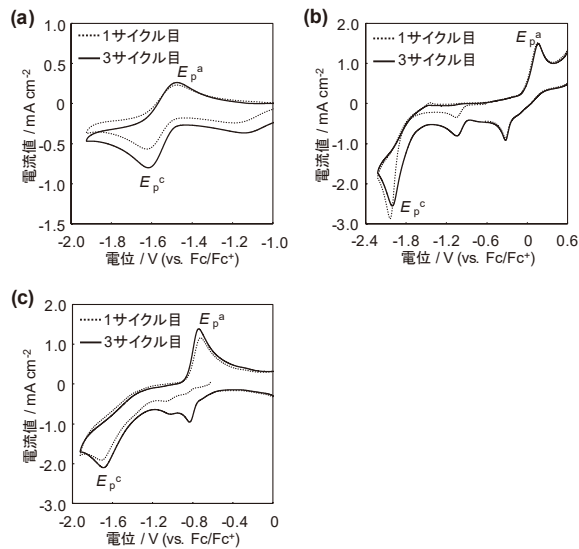


図4 1:1 イオン液体-有機溶媒混合系における U (IV)  $\text{Cl}_4$  のサイクリックボルタモグラム. 作用極: (a) GC, (b) Pt, (c) Au,  $[\text{U}(\text{IV})\text{Cl}_4] = 11 \text{ mM}$ .

U の酸化還元反応が活物質として利用できるか調べるため、U (III)/U (IV) 対の拡散係数と電荷移動速度を調べ、それぞれ  $1.82 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 $1.3 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  と決定した。得られた電荷移動速度は、電池として適用可能な基準 ( $> 5.9 \times 10^{-6} \text{ cm s}^{-1}$ ) より十分速いことから、本系で観測された U (III)/U (IV) 対が U 電池の陰極反応として利用可能であることが分かった<sup>7</sup>。

### 3. アクチノイドの微量分析手法開発

#### 3.1. 樹脂充填マイクロチャンネルによるウラン分離法

U やネプツニウム (Np) は放射性廃棄物を評価するための重要な核種であり、現行の U 分析法では、妨害金属イオンをカラム分離で除去したのちに ICP-MS で定量している<sup>8</sup>。しかし、必要な試料量および廃液が ml オーダーと高放射能試料における分析では被ばくリスクの大きさと手作業による複雑な分離操作による分析時間の長さが課題となっている。そこでマイクロ化学チップを用いるカラム分離による分析スケールの微量化を着想し、微量分離に適した設計と U 分離性能の評価をした。

マイクロチャンネルカラムの設計は、流路の断

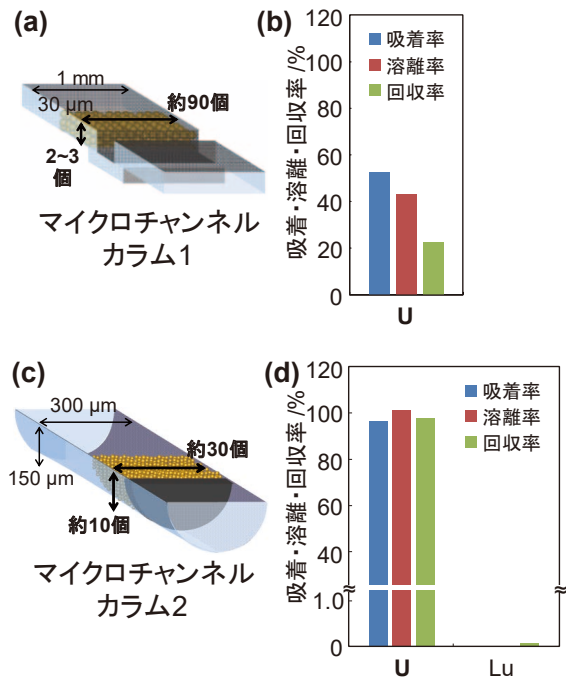


図5 (a) マイクロチャンネルカラム 1 と (b) その分離挙動、(c) マイクロチャンネルカラム 2 と (d) その分離挙動。

面積を同程度とし外周の長さを変化させて陰イオン交換樹脂 (粒子径  $11 \mu\text{m}$ ) の配列数を制御した。マイクロチャンネルカラム 1 は、外周が大きい矩形とし、深さ方向に 2~3 個、幅方向約 90 個配列する設計とした (図 5 (a))。マイクロチャンネルカラム 2 は、外周が小さくなるように半円筒系とし、深さ方向に最大約 10 個、幅方向に 30 個配列する設計とした (図 5 (c))。設計製作したカラムの性能は、U (樹脂に吸着) 及びランタノイド (樹脂に吸着しない) イオンの混合溶液を用いて行った。マイクロチャンネルカラム 1 は、U の吸着率が約 50% で、吸着した U のうち約 40% しか溶離されず、全体の U 回収率は 20% 程度と分離に求められる性能が得られなかった (図 5 (b))。これはマイクロチャンネルの深さが樹脂を均一充填されるのに不十分でカラム内にチャネリングを形成し一部の樹脂と溶液が接触しない可能性が考えられる。マイクロチャンネルカラム 2 は、U のみ吸着・溶離・回収率が 95% 以上で、ランタノイドの 1 つであるルテチウム (Lu) は 1% より小さく期待した分離性能が得られた (図 5 (d))。よっ



て、十分な分離性能を得るためにはマイクロチャンネルの深さ及び幅方向に10個以上の樹脂を配列する設計が有効であることが分かった。十分な分離性能が得られたマイクロチャンネルカラム2 (カラム容積  $0.39 \mu\text{l}$ ) に対し、1F 滞留水と同程度の濃度のセシウムを添加した海水試料を用いて実証試験を行ったところ、Uの吸着・脱離・回収率はほぼ100%で、得られたUの分析値 ( $2.85 \pm 0.07 \text{ ppb}$ ) は認証値 ( $2.81 \pm 0.16 \text{ ppb}$ ) とよく一致した。このカラムサイズは、一般的な分離カラムの1/5000と非常に小さく、使用する試料量を少なくすることが可能となり被ばくリスクを1/10に、放射性廃液の発生を1/800に低減できる<sup>9</sup>。

### 3.2. ゲル電気泳動法によるネプツニウム分析法

Np分析は、試料溶液中でNpは抽出剤やイオン交換樹脂との反応性が低いNp(V)で存在していることから分離の前段階でそれらと反応性が高いNp(IV)に原子価を制御する必要がある。そのためより工程の多い分離操作が求められることが課題である。また、酸化状態制御・分離・定量工程がそれぞれ独立していることも操作の煩雑や分析時間の長さ起因している。そこで本研究では、従来の分離剤への吸着を利用するカラム分離とは全く異なるアプローチとして、電位を印加して生じるイオンの移動現象を利用する分析手法であるゲル電気泳動法に着目し、簡易及び迅速なNp分析法の開発を目的とした。ゲル電気泳動法の利点は、試料量が  $150 \mu\text{L}$  と少量であり、被ばくリスクと二次廃棄物の発生を低減できることである。また、ゲルは可視光を透過するため検出に光を用いることで1枚のゲルで分離と定量操作を完結することができる利点がある。しかし、Npは光を発する性質がないことから、蛍光部位を持つプローブと錯形成する必要がある(誘導体化)。誘導体化法のうち、分析試料をあらかじめ錯形成した後ゲルに注入するプレ誘導体化法では、泳動用緩衝液に蛍光プローブを含まないため高感度な検出が可能となる。一方で、ゲル内に注入された錯体は泳動中に遊離の蛍光プローブと分離され、錯体周辺から遊離の蛍光プローブが存在しない非平衡状態となることから、速度論的に解離しやすい錯体は分解し、解離し難い錯体のみを分離検出

できる。しかし典型的なNp(V)  $\text{O}_2^+$  錯体の解離速度 ( $5\text{--}60 \text{ s}^{-1}$ ) は速く<sup>10,11</sup>、解離しにくい錯体の報告例はほとんどない。

まず解離しにくい錯体を種々のプローブ群から探索した。プローブは、Npと結合し錯体を形成する結合部位、蛍光を発する蛍光部位、結合部位と蛍光部位を接続するスペーサーで構成される(図5(a))。FTC-PDA(L1)による泳動図を図5(b)に示す。イオンの移動はイオン全体の負電荷の大きさに依存し、小さいものほど移動度が大きくなり下の位置に検出される。サンプルレーン1はL1試料の泳動後のバンド位置を示し、一番上の位置に遊離のL1(負電荷-4)が検出された。レーン2は、プローブがアクチノイドイオンと錯形成すると負電荷は小さくなりU(VI)  $\text{O}_2^{2+}$  錯体(負電荷-2)は下の位置に検出された。レーン2で検出されたNp錯体は遊離プローブとU(VI)  $\text{O}_2^{2+}$  錯体の間に検出されていることから、Np(V)  $\text{O}_2^+$  錯体(負電荷-3)として検出されていることが分かった。その他のアクチノイド及びランタノイドは検

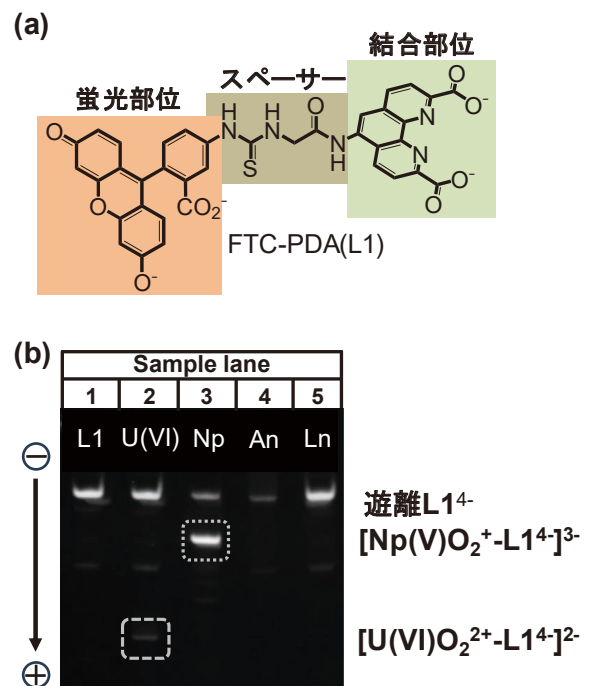


図6 (a) 蛍光プローブL1と(b) L1と錯形成したNp, U(VI)と他のアクチノイド ( $\text{Th}^{4+}$ ,  $\text{Pu}^{4+}$ ,  $\text{Am}^{3+}$ ,  $\text{Cm}^{3+}$ ) 及びランタノイド ( $\text{Sc}^{3+}$ ,  $\text{Y}^{3+}$ ,  $\text{La}^{3+}$ ,  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Lu}^{3+}$ ) の典型的な電気泳動図。

出されなかった。この  $\text{Np(V)O}_2^+-\text{L1}$  錯体の解離速度定数を測定した。測定は蛍光性の L1 錯体に大過剰の非蛍光性の PDA を添加して生じる配位子置換反応により行った。この測定における反応は、L1 錯体が解離し PDA が配位する反応と配位子の交換反応から成る。この反応から得られた速度定数は  $(8 \pm 5) \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  と、90 分の泳動時間では解離を無視でき、典型的な Np 錯体の 10 万倍遅い、極めて解離しにくい錯体であることが分かった。

最後に模擬使用済み燃料試料の分析に適用し実用性を確認した。模擬試料は核分裂生成物の主要元素やアクチノイドが混在する組成である。模擬試料と L1 を混合して泳動した結果、 $\text{Np(V)O}_2^+-\text{L1}$  錯体バンドを検出することができた。ピーク面積から得られた Np の分析値は添加濃度と一致（回収率 96%）し定量性があることも確認した。本法は、複雑な元素組成の試料に対しても十分適用可能な実用性を示すとともに、従来法を比較すると試料量は 1/20 以下、時間は 1/36 以下と被ばくリスク低減と迅速化にも成功した<sup>12</sup>。

#### 4. おわりに

栄誉ある日本放射化学会奨励賞を授与していただき光栄です。日本原子力研究開発機構に入所後、電気化学やアクチノイドを用いるホット実験に携わることになりましたが、直属の上司である北辻章浩グループリーダーには電気化学、ホット実験、放射性物質の管理の基礎からご指導いただきました。ホット実験を実施するにあたりグループ員ならびに施設管理の皆様には多くのご協力をいただきました。また、ゲル電気泳動法によるネプツニウム分析法では、大学院時の指導教官であった埼玉大学の齋藤伸吾教授と研究者として共同で取り組めたこと嬉しく、あらためて多くのことを学ば

せていただきました。この度の奨励賞受賞は、在学中から現在まで、非常に多くの皆様にご協力のおかげだと思います。この場を借りて皆様に深く御礼を申し上げます。

#### 引用文献

- [1] T. Yomogida, K. Ouchi, T. Oka, Y. Kitatsuji, Y. Koma, K. Konno, *Sci. Rep.*, 2022, **12**, 7191.
- [2] H. Guo, Y. Jia, R. B. Wanty, Y. Jiang, W. Zhao, W. Xiu, J. Shen, Y. Li, Y. Cao, Y. Wu, D. Zhang, C. Wei, Y. Zhang, W. Cao, A. Foster, *Sci. Total Environ.*, 2016, **541**, 1172–1190.
- [3] K. Ouchi, H. Otobe, Y. Kitatsuji, M. Yamamoto, *ECS Trans.*, 2017, **75**, 51–57.
- [4] K. Ouchi, D. Matsumura, T. Tsuji, T. Kobayashi, H. Otobe, Y. Kitatsuji, *RSC adv.*, 2023, **13**, 16321–16326.
- [5] WINA, *The Global Nuclear Market*, 2007.
- [6] Y. Shiokawa, H. Yamana, H. Moriyama, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2000, **37**, 253.
- [7] K. Ouchi, A. Komatsu, K. Takao, Y. Kitatsuji, M. Watanabe, *Chem. Lett.*, 2021, **50**, 1169–1172.
- [8] Y. Kameo, A. Shimada, H. Ishimori, T. Haraga, A. Katayama, A. Hoshi, M. Nakashima, *JAEA-Tech*, 2009, 051.
- [9] K. Ouchi, T. Tsukahara, A. Brandt, Y. Muto, N. Nabatame, Y. Kitatsuji, *Anal. Sci.*, 2021, **37**, 1789–1194.
- [10] G. A. Fugate, K. L. Nash, J. C. Sullivan, *Radiochim. Acta*, 1997, **79**, 161–166.
- [11] K. L. Nash, J. C. Sullivan, *Alloys Compd.*, 1998, **271–273**, 712–718.
- [12] K. Yamagata, K. Ouchi, K. Marumo, Y. Tasaki-Handa, T. Haraga, S. Saito, *Inorg. Chem.*, 2023, **62**, 730–738.

## 特集 (日本放射化学会第 67 回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

## Th-229m の電子架橋遷移の観測に向けた Th-229m イオンの引き出しとトラップ

重河 優大

(理化学研究所仁科加速器科学研究センター)

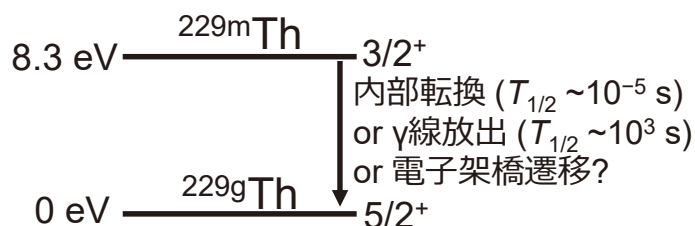


## 1. 緒言

ほとんどの原子核のエネルギーレベルは 10 keV ~ 10 MeV 程度であるが、 $^{229}\text{Th}$  原子核の第一励起準位  $^{229\text{m}}\text{Th}$  は、8.3 eV [1] という極めて低い励起エネルギーを持つ (図 1)。核の励起エネルギーが価電子の結合エネルギーに近い場合、 $^{229\text{m}}\text{Th}$  の壊変過程や半減期が化学状態に応じて変化するなど、一般的な原子核では見られない特異な現象が観測されると期待されている。また、 $^{229}\text{Th}$  原子核をレーザーで励起することで超高精密な原子核時計を作製できる可能性があり [2]、大きな注目を集めている。 $^{229\text{m}}\text{Th}$  は、電子のイオン化エネルギーが 8.3 eV 以下の場合、内部転換過程によって半減期  $10^{-5}$  s 程度で壊変する [3,4]。一方、イオン化エネルギーが 8.3 eV を上回る場合、内部転換が禁制となり、 $\gamma$  線放出によって半減期  $10^3$  s 程度で脱励起する [1]。一方、軌道殻電子の占有準位から非占有準位への遷移エネルギーが 8.3 eV に近い場合、電子架橋遷移という第 3 の特異な壊変過程により脱励起することが予測されている。電子架橋遷移では、原子核の励起エネルギーが電子遷移に受け渡され、最終的に 1 個の光子が放出される。電子架橋遷移の半減期は  $^{229\text{m}}\text{Th}$  の化学状態によって変化する

可能性があり非常に興味深いものの、未だ実験的な観測例はない。

電子架橋遷移で壊変する可能性のある有力な候補として、1 価の  $^{229\text{m}}\text{Th}$  イオン ( $^{229\text{m}}\text{Th}^+$ ) が挙げられている。理論的な計算によると、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  の電子架橋による半減期は 1 s 程度と予測されている [5]。一方、ミュンヘンのグループは、 $^{233}\text{U}$  線源から飛び出してくる  $^{229\text{m,g}}\text{Th}$  イオンを RF ファネルガスセルで減速・収集し、低速イオンビームとして引き出す実験を行った [3,4]。 $^{229\text{m,g}}\text{Th}^{3+}$  と  $^{229\text{m,g}}\text{Th}^{2+}$  ( $^{229\text{m}}\text{Th}$  の割合は 2% [6]) を質量分離して MCP (microchannel plate) 検出器に引き出した場合、 $^{229\text{m,g}}\text{Th}^{3+,2+}$  が MCP 上で中性原子になり、 $^{229\text{m}}\text{Th}$  の内部転換が許容となって内部転換電子が検出された。一方、 $^{229\text{m,g}}\text{Th}^+$  を MCP まで運搬した場合は、内部転換電子の信号が観測されなかった。これは、MCP に運ばれるまでの間 (数 ms) に  $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  が脱励起したということであり、理論的な半減期 ( $\sim 1$  s) と矛盾しているようにも思える。しかし、上記の実験では、高エネルギーの  $^{229\text{m}}\text{Th}$  多価イオンが RF ファネルガスセル中で減速される際に  $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  が生成されており、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  の電子が励起されてしまって、内部転換許容 (半減期  $\sim 10^{-5}$  s) になってしまった可能性が高い。そこで本研究では、イオントラップ中でのイオン分子反応という新しい方法で  $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  を生成する

図 1. 超低エネルギー励起核  $^{229\text{m}}\text{Th}$

ことを目指した。この方法では、低エネルギーの  $^{229\text{m}}\text{Th}^{2+}$  を NO ガス等で満たしたイオントラップ中に導入し、 $^{229\text{m}}\text{Th}^{2+}$  とガスとの反応により  $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  を生成する。その後、イオントラップから  $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  を MCP まで引き出して内部転換電子を検出できれば、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  がトラップ中で脱励起せずに生き残ったことが分かる。今回、 $^{233}\text{U}$  線源から低速の  $^{229\text{m}}\text{Th}^{2+}$  ビームを引き出してトラップする装置を開発し、トラップ中で  $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  を生成することに成功したので報告する。

## 2. 装置開発

開発した  $^{229\text{m,g}}\text{Th}$  イオンの引き出し・トラップ装置を図 2 に示す。まず、 $^{233}\text{U}$  線源 (直径 90 mm) から  $\alpha$  壊変の反跳エネルギーによって飛び出てきた  $^{229\text{m,g}}\text{Th}$  イオンが、He ガスとの衝突により減速され、直流電圧勾配によって RF カーペットの表面まで運搬される。RF カーペットには 2 種類の周波数の交流電圧が印可されており、イオンを中心の穴 (直径 0.3 mm) まで運搬することができる [7]。その後、 $^{229\text{m,g}}\text{Th}$  イオンは四重極イオンガイド (QPIG) によりイオントラップへと運搬される。イオントラップは 3 つのセグメント (Trap 1-3) からなっており、1 Pa 程度までのガスを導入することができる。ガス中でイオンを素早く運搬するため、Trap 1 には直流電圧勾配を

形成するための電極 (LINAC rod) を設置している。イオンを一定時間トラップした後、四重極質量分離器 (QMS) で目的の質量電荷比 ( $m/z$ ) のイオンのみを分離し、MCP 検出器まで運搬する。

## 3. 実験・結果

今回の実験では、MCP まで引き出される  $^{229\text{m,g}}\text{Th}^{2+}$  のイオン数が最大となるように電圧条件を最適化した。そして、イオンを冷却・トラップするために、イオントラップ中に Ar ガス (純度 99.9999%) を導入した。また、Ar ガス中に微量に含まれる不純物ガスを利用して、 $^{229\text{m,g}}\text{Th}^{2+}$  を  $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  に変換した。トラップ実験の際は、RF カーペットガスセルからイオンを引き出して Trap 2, 3 に一定時間蓄積し、その後イオンの供給を止めてさらに一定時間トラップした。その後、イオンをトラップから放出し、質量分離して MCP まで運搬した。

まず、イオンをトラップせずに連続的に引き出した場合、図 3 のような質量スペクトルが得られた。 $^{229\text{m,g}}\text{Th}^{2+}$  は 1 秒当たり約  $2 \times 10^4$  個程度であり、引き出し効率 20% 程度で引き出していることが分かった。次に、Ar 0.5 Pa 中でイオンを 0.8 s 蓄積し、1 s トラップした場合 (図 3)、 $^{229\text{m,g}}\text{Th}^+$  などのイオンが Ar 中の不純物により生成されていることが分かった。

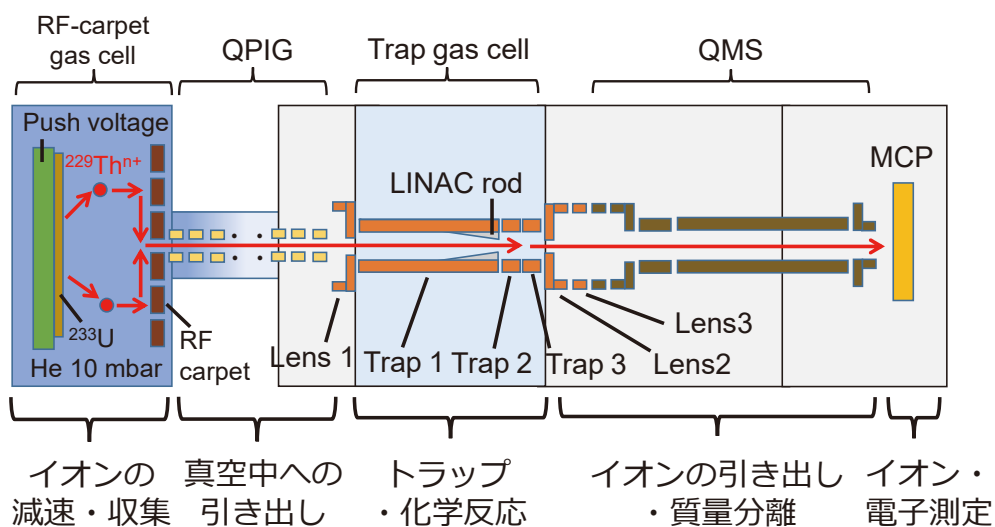


図 2.  $^{229\text{m,g}}\text{Th}$  イオンの引き出し・トラップ装置

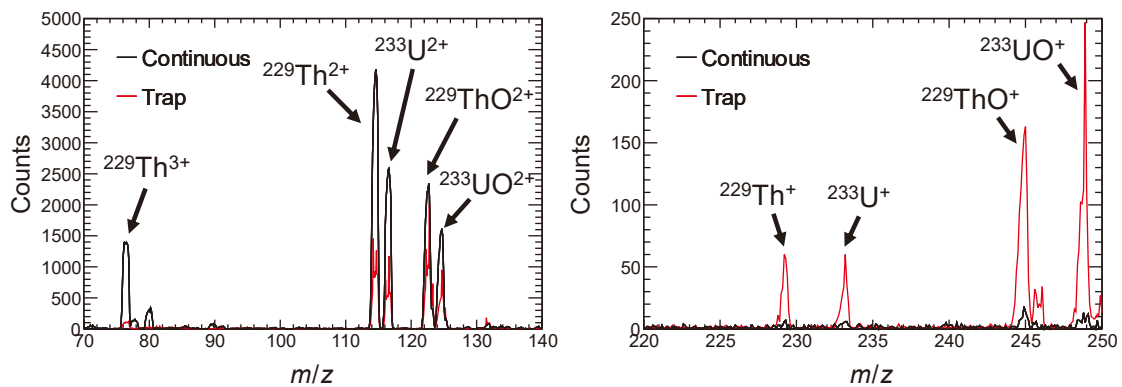


図3. トラップなし(黒)とトラップあり(赤)の場合の質量スペクトル

次に、 $^{229\text{m}}\text{Th}$  の内部転換電子を検出するために、トラップしたイオンを素早く引き出して、イオンバンチとして MCP まで引き出す実験を行った。その際、MCP の表面電圧を  $-2000\text{ V}$  に設定することで  $^{229\text{m}}\text{Th}$  イオンの信号を検出した。一方、MCP の電圧を  $-35\text{ V}$  に設定することで、イオンの検出効率を落として  $^{229\text{m}}\text{Th}$  の内部転換電子の信号を検出できるようにした。まず、 $^{229\text{m}}\text{Th}^{2+}$  を引き出した場合の結果を図4に示す。MCP  $-2000\text{ V}$  の場合に比べて MCP  $-35\text{ V}$  の場合に寿命の長い減衰曲線がみられた。この減衰成分の半減期は先行研究で報告された  $7\text{ }\mu\text{s}$  程度[4]であり、 $^{229\text{m}}\text{Th}$  の内部転換電子の信号を観測できたことが分かった。次に、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  を生成して同様の測定を行った場合、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  の MCP  $-35\text{ V}$  について半減期  $7\text{ }\mu\text{s}$  程度の減衰曲線を観測した。したがって、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  を引き出した場合にも内部転換電子の信号を観測することに成功した。 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  を生成した際のトラップ時間は  $0.1\text{ s}$  であり、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  が  $0.1\text{ s}$  の間トラップ中で生き残った (= 半減期が少なくとも  $0.1\text{ s}$  程度である) ことが分かる。つまり、先行研究 [3,4] では、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  の電子が RF ファネルガスセル中で励起され、内部転換によって脱励起してしまった可能性が高いと考えられる。

#### 4. まとめと今後

本研究では、 $^{229\text{m}}\text{Th}^{2+}$  を引き出してトラップする装置を開発し、トラップ中でのイオンとガスの反応によって  $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  を生成することに成

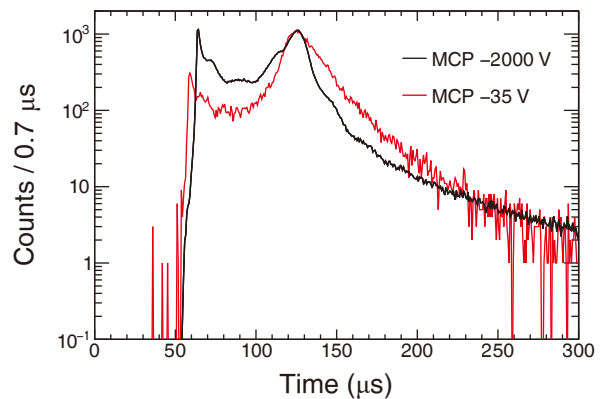


図4.  $^{229\text{m}}\text{Th}^{2+}$  のイオンバンチを MCP に引き出した場合の検出時間スペクトル。MCP の表面電圧は  $-2000\text{ V}$  (黒) もしくは  $-35\text{ V}$  (赤) に設定した。MCP  $-2000\text{ V}$  のバンチのピークが、 $-35\text{ V}$  のピークに一致するように規格化している。

功した。さらに、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  を MCP まで引き出して  $^{229\text{m}}\text{Th}$  の内部転換電子を検出することに成功した。予備的な実験として、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  のイオン数とトラップ時間の関係を調べると、成長減衰曲線が検出された。これは、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  が生成したのち、不純物ガスとの反応によって  $^{229\text{m}}\text{ThO}^+$  などの分子イオンに変化したということを意味している。今後は、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  の個数 (= 内部転換電子数) とトラップ時間の関係を調べる。 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  がトラップ中で脱励起する分、 $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  のイオン数の場合に比べて成長減衰曲線の形が変化するはずであり、その変化から  $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  の半減期を求めることができるかと期待される。この実験にはより多くの  $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  が必要であり、そのために Ar ガス中に

微量の NO ガスを混合して  $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  を生成しようと試みている。最終的に  $^{229\text{m}}\text{Th}^+$  の半減期を決定できれば、電子架橋遷移由来の光子の観測にも挑戦したい。

#### 参考文献

- [1] S. Kraemer *et al.*, Nature **617**, 706 (2023).
- [2] E. Peik *et al.*, Europhys. Lett. **61**, 181 (2003).
- [3] L. von der Wense *et al.*, Nature **533**, 47 (2016).
- [4] B. Seiferle *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 042501 (2017).
- [5] F. F. Karpeshin *et al.*, Nucl. Phys. A **969**, 173 (2018).
- [6] J. Thielking *et al.*, Nature **556**, 321 (2018).
- [7] F. Arai *et al.*, Int. J. Mass Spectrom. **362**, 56 (2014).

## 特集 (日本放射化学会第 67 回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

### ノーベリウムの化学的性質解明に向けた水酸化ストロンチウム沈殿の分光分析と量子化学計算

板倉 悠大<sup>1,2</sup>、王 瑞麟<sup>1,2</sup>、渡邊 瑛介<sup>1,3</sup>、大高 咲希<sup>1</sup>、中西 諒平<sup>1</sup>、  
永田 光知郎<sup>1</sup>、金子 政志<sup>1</sup>、篠原 厚<sup>1,4</sup>、笠松 良崇<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 大阪大学、<sup>2</sup> 理化学研究所、<sup>3</sup> 高エネルギー加速器研究機構、<sup>4</sup> 大阪青山大学)



#### 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、興味を持たれている。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、アメリカシウム以降の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 族元素に類似している [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 族元素と違いアンミン錯体を形成する可能性を示したが、比較対象である 2 族元素の水酸化サマリウム共沈挙動がマクロ量での水酸化物沈殿の挙動と一致しないという課題があった。2 族元素の水酸化物沈殿の質量分析の結果、2 族元素はマクロ量では多核錯体を形成し、ミクロ量とは異なる沈殿挙動をとる可能性が指摘された。本研究では多核錯体形成の可能性をより詳細に調べ、2 族元素のマクロ量水酸化物沈殿と水酸化サマリウム共沈における挙動の違いを明らかにすることを目的とし、水酸化ストロンチウム沈殿試料の XAFS、ラマンスペクトル測定を行い、特に XAFS スペクトルには新たな手法を取り入れて解析を行った。さらに、XAFS 測定から得られた局所構造をもとにストロンチウム多核錯体の構造を量子化学計算により推定した。

#### 2. 実験

XAFS スペクトルの測定は、あいちシンクロトロン光センター BL5S1 にて、Sr K-edge につい

て透過法で行った。測定試料には試料 (Table 1) を窒化ホウ素と適切な割合で混合し、 $\phi 7$  mm のペレットに成型したものをを用いた。沈殿試料は、マクロ量沈殿 (1 mg 沈殿、10 mg 沈殿) を 3 種類作成した。ラマンスペクトルは日本分光 NRS-3100T を用いてレーザー波長 532 nm で取得し、試料 (Table 1) をガラス板に載せたものを測定試料とした。沈殿試料は、マクロ量沈殿 (1 mg 沈殿) を 2 種類とミクロ量沈殿 (100  $\mu$ g 沈殿) を 1 種類作成した。

二核錯体の DFT 計算は、ORCA 5.0 を用いて行った。汎関数は構造最適化に BP86 を、1 点計算に CAM-B3LYP を用い、基底関数は O,H に ZORA-def2-TZVP を、Sr に SARC-ZORA-TZVP を用いた。構造最適化、1 点計算のどちらにも COSMO による溶媒和の考慮を取り入れた。

Table 1 試料と行った測定の一覧

試料	XAFS 測定	ラマンスペクトル測定
Sr(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	○	○
Sr(OH) <sub>2</sub>	○	○
SrCO <sub>3</sub>		○
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	○	
100 $\mu$ g 沈殿	○	
1 mg 沈殿	○	○
1 mg 沈殿 (脱気)	○	
10 mg 沈殿	○	
10 mg 沈殿 (硝酸なし)	○	

### 3. 結果と考察

異なる条件下で沈殿させた沈殿試料間で XANES スペクトルに差はみられなかった。沈殿試料の動径構造関数には、第二配位圏にピークが存在し、EXAFS スペクトルのウェーブレット変換によってこのピークは酸素より原子番号が大きい原子の寄与である可能性が示された (Figure 1)。さらに、沈殿試料の動径構造関数に Sr-O および Sr-Sr の散乱経路を使用した非線形カーブフィッティングを行い、沈殿試料中での Sr-O 間の距離を 2.59 Å、配位数を 6、Sr-Sr 間の距離を 4.19 Å、配位数を 7~8 と決定した。得られた Sr-O の配位数および Sr-Sr の距離を用いて、DFT 計算により二核錯体のモデリングを行い、

二核化反応についてエネルギープロファイルを作成した (Figure 2)。系中の全エネルギーは単核錯体 2 つの状態よりも二核錯体 1 つの状態の方が低く、二核化反応が熱力学的に進行する可能性が示唆された。

異なる金属量の沈殿試料で、ラマンスペクトルに違いは見られなかった。これらの沈殿試料のラマンスペクトルは炭酸ストロンチウムに類似していた (Figure 3)。さらに沈殿試料の元素分析を行ったところ、炭酸ストロンチウムと元素組成が一致した。これらより、炭酸イオンが沈殿挙動に影響を与えている可能性が示された。また、溶解度積と平衡シミュレーションにより、実験に使用する塩基性溶液に  $\sim 10^{-6}$  M の二酸化炭素が溶存

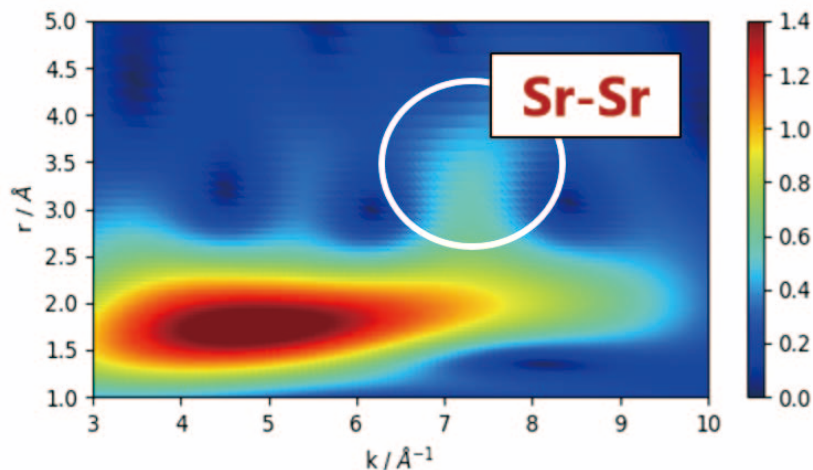


Figure 1 10 mg 沈殿の EXAFS スペクトルのウェーブレット変換

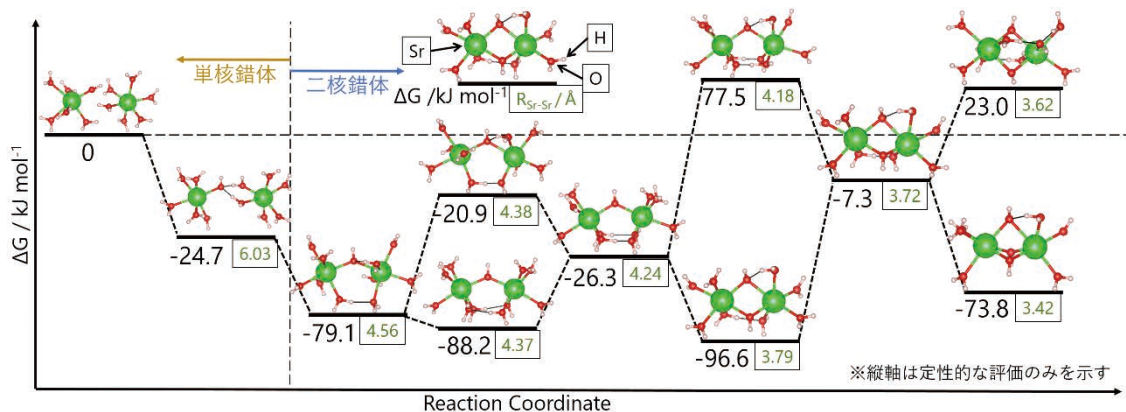


Figure 2 二核化反応のエネルギープロファイル。各構造について、相対自由エネルギーと Sr-Sr 距離を付記した。



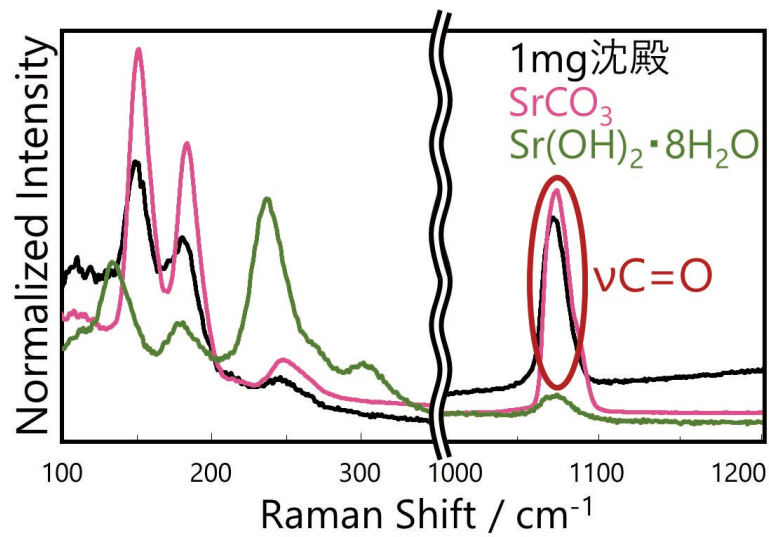


Figure 3 取得したラマンスペクトル

していただけで沈殿形成に影響を及ぼし得ることがわかった。

#### 4. まとめ

二族元素の水酸化サマリウム共沈挙動と水酸化物沈殿挙動が異なる原因を調べるため、水酸化ストロンチウム沈殿試料について XAFS スペクトル測定、DFT 計算およびラマンスペクトル測定を行った。

XAFS スペクトルの二次元解析より、沈殿試料中では Sr-Sr 間の距離が 4.19 Å、配位数が 7～8 となり、多核錯体が形成されていることが示され

た。DFT 計算による二核化反応のエネルギープロファイルを作成した結果、二核化反応が熱力学的に進行する可能性が示された。ラマンスペクトルと元素分析より、水酸化ストロンチウム沈殿挙動に炭酸イオンが影響を与えていることが示された。また、平衡計算により二酸化炭素がわずかに溶存しただけで沈殿挙動に影響を及ぼすことが示された。

#### 参考文献

[1] R. J. Silva *et al.*, *Inorg. Chem.*, **13**, 2233 (1974).

## 特集 (日本放射化学会第67回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

### ICP-MS/MS のリアクションセル内におけるアクチノイド気相反応の反応定数評価

風間 裕行

(日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター  
燃料デブリ研究ディビジョン 燃料デブリ取扱技術開発グループ)



#### 1. 緒言緒言

トリプル四重極誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS/MS) は、直列に配置された二つの質量分離部の間に位置するリアクションセルに反応ガスを導入することで同重体干渉の低減が可能であり (図1)、高精度かつ迅速性が求められる燃料デブリ分析等への活用が期待される。燃料デブリの取り出し、処理、保管等の方策を検討する上で重要なアクチノイド核種分析では、 $^{242\text{m}}\text{Am}/^{242}\text{Cm}$  や  $^{243}\text{Am}/^{243}\text{Cm}$  等の様々な同重体干渉が予想される。ICP-MS/MS でこれらを分別するためには、セル内で生じるアクチノイドイオン ( $\text{An}^+$ ) と反応ガスとの気相反応を理解することが重要である。本研究では、ICP-MS/MS のリアクションセルに  $\text{O}_2$  を導入した際の  $\text{An}^+$  の反応挙動を調査し、反応のモデル化及び数値解析を行うことによる反応定数評価を試み、ICP-MS/MS における  $\text{An}^+$  と反応ガスの反応性を実験及び理論の双方から明らかにすることを目的とした。

#### 2. 実験

$^{237}\text{Np}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{244}\text{Cm}$  を  $10^3$  ng/L 含む  $0.8$  mol/L 硝酸水溶液を調製し、リアクションセルに  $\text{O}_2$  を  $0$ 、 $0.15$ 、 $0.30$ 、 $0.45$ 、 $0.60$ 、 $0.75$  mL/min の流量で導入し、ICP-MS/MS (Agilent 8900) による測定を行った。第1質量分離部 (Q1) では  $\text{An}^+$  のみを通し、セルにおける  $\text{O}_2$  との反応後、第2質量分離部 (Q2) で各アクチノイドの生成イオン ( $\text{An}^+$ 、一酸化物イオン ( $\text{AnO}^+$ ) 及び二酸化物イオン ( $\text{AnO}_2^+$ )) を検出した。

#### 3. 結果と考察

各元素において、 $\text{An}^+$ 、 $\text{AnO}^+$ 、 $\text{AnO}_2^+$  が確認された。低い  $\text{O}_2$  流量 ( $0 \sim 0.15$  mL/min) では、流量が増加するのに伴い  $\text{An}^+$  の強度は減少し、 $\text{AnO}^+$  の強度が増加する傾向が確認された。より高い  $\text{O}_2$  流量では、 $\text{AnO}^+$  の強度は減少し、 $\text{AnO}_2^+$  の強度が増加する傾向が確認された。これらの挙動から、見かけ上セル内で式 (1) 及び式 (2) の反応が逐次的に進行したと考えられる。

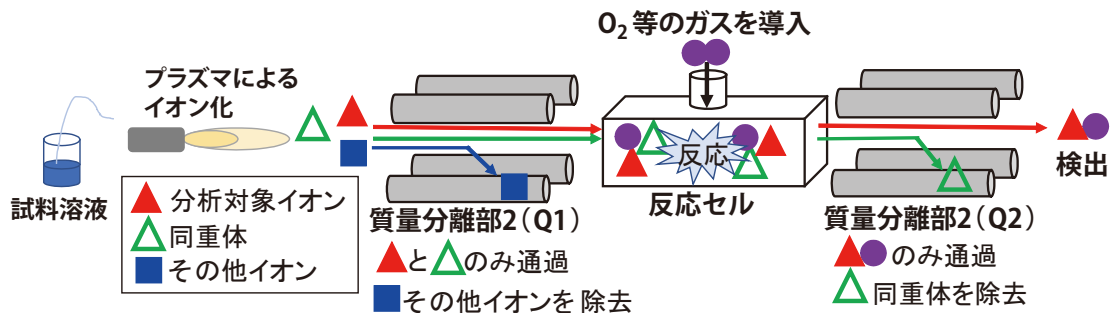


図1 ICP-MS/MS の模式図。



式(1)、式(2)の反応に関する反応定数を評価するため、リアクションセル内で生じる気相反応モデルを微分方程式として導出した。図2にリアクションセル内で生じるアクチノイドイオン種と $\text{O}_2$ の反応の模式図を示す。

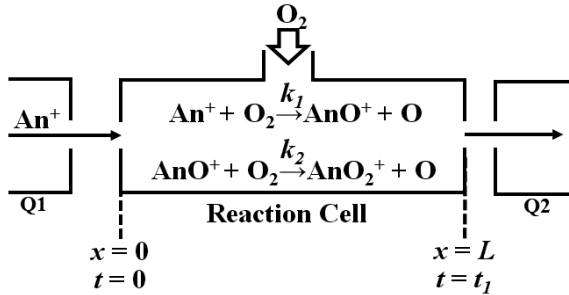


図2 リアクションセル内で生じるアクチノイドイオン種と $\text{O}_2$ の反応の模式図。

$\text{An}^+$ が位置 $x=0$ 及び時間 $t=0$ でリアクションセルに入射され、セル内で、 $\text{An}^+$ と $\text{O}_2$ が衝突し、時間 $t_1$ において距離 $L$ のセル出口に到達する際、 $\text{An}^+$ のセル内における密度変化は式(3)で表される。<sup>[1]</sup>

$$\frac{dn_A(x)}{dx} = -n_A(x)n_g\sigma \quad (3)$$

ここで、 $n_A$ は $\text{An}^+$ のセル内密度、 $n_g$ は $\text{O}_2$ のセル内密度、 $\sigma$ は $\text{An}^+$ と $\text{O}_2$ の反応断面積である。式(3)の積分形は式(4)で与えられる。

$$n_A(x) = -n_{A0}e^{-n_g\sigma x} \quad (4)$$

ここで、 $n_{A0}$ は $\text{An}^+$ の初期密度である。セル出口における $\text{An}^+$ の密度( $n_{AL}$ )は式(5)で表される。

$$n_{AL} = n_{A0}e^{-n_g\sigma L} \quad (5)$$

式(5)を $n_g$ で微分すると、式(6)が与えられる。

$$\frac{dn_{AL}}{dn_g} = -\sigma L n_{AL} \quad (6)$$

リアクションセル内の反応ガスの密度( $n_g$ )は反応ガス流量( $\Phi$ )に比例すると考えられるため、式(6)は式(7)として表すことができる。

$$\frac{dn_A(\Phi)}{d\Phi} = -k_1 n_A(\Phi) \quad (7)$$

ここで、 $k_1$  [ $\text{cm}^3/\text{粒子数}$ ]は反応断面積( $\sigma$ )と移動距離( $L$ )の積であり、反応式(1)の反応定数である。

同様にして、式(2)の反応について反応定数 $k_2$  [ $\text{cm}^3/\text{粒子数}$ ]の関数として表現すると、式(8)、式(9)が与えられる。<sup>[2]</sup>

$$\frac{dn_B(\Phi)}{d\Phi} = -k_1 n_A(\Phi) - k_2 n_B(\Phi) \quad (8)$$

$$\frac{dn_C(\Phi)}{d\Phi} = k_2 n_B(\Phi) \quad (9)$$

ここで、 $n_B$ は $\text{AnO}^+$ のセル内密度、 $n_C$ は $\text{AnO}_2^+$ のセル内密度である。

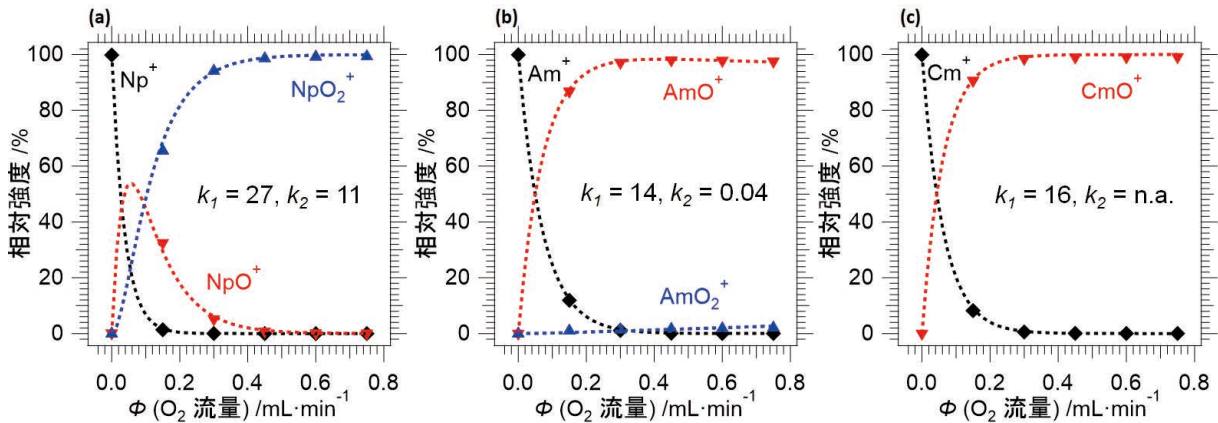


図3  $\text{O}_2$ 流量に対するAnイオン種の相対強度、実験値(▲, ▼, ◆)、計算値(点線)、(a) Np、(b) Am、(c) Cm。

表1 反応定数の比較 ( $k_{\text{An}}/k_{\text{Np}}$ )<sup>[3]</sup>

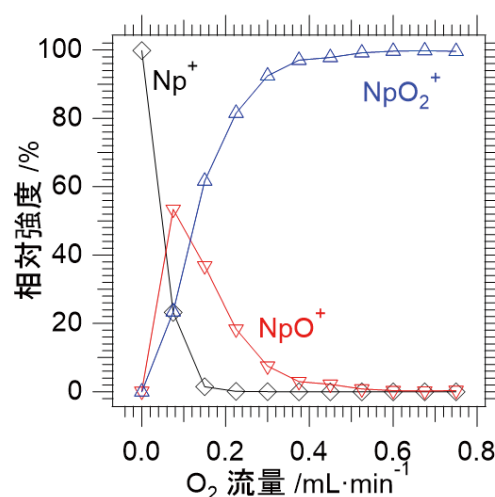
反応モデル	先行研究 (FT-ICR-MS)		本研究 (ICP-MS/MS)	
	$k_{\text{eff}}(\text{An}) / k_{\text{eff}}(\text{Np})$		$k(\text{An}) / k(\text{Np})$	
	Am	Cm	Am	Cm
$\text{An}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{AnO}^+ + \text{O}$	0.47	0.54	0.52	0.59
$\text{AnO}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{AnO}_2^+ + \text{O}$	<0.004	n.a.	0.004	n.a.

式(7)–(9)の連立微分方程式を解くことにより、式(1)、式(2)の反応定数を求めた。図3に $\text{O}_2$ 流量変化に伴う各アクチノイドイオンの強度変化を示す。式(7)–(9)の連立微分方程式より求めた計算値は、実験値と良い一致を示し、実験値を再現可能な反応定数の決定に成功した。決定した $\text{Am}^+$ 、 $\text{Cm}^+$ の $k_1$ を $\text{Np}^+$ の $k_1$ で規格化し、既往の気相反応研究で報告されている反応速度定数の比と比較したところ、双方は良い一致を示した(表1)。異なる手法で評価した反応定数の値が一致したことから、本研究で考案したアクチノイド気相反応の反応モデル及び解析手法は妥当であると結論付ける。

図3(a)において、 $\text{NpO}^+$ の相対強度に関する計算値は、 $\text{O}_2$ 流量0.06 mL/minで極大を示す。この挙動を実験的に確認するため、 $\text{O}_2$ ガス流量の測定点を2倍に増やし、図3(a)の検討と同様の試料及びプラズマ条件でICP-MS/MS再測定を行った。その結果を図4に示す。再測定での各イオンの挙動は、 $\text{NpO}^+$ の強度変化を含め、図3(a)に示す計算値と良い一致を示した。本結果は、反応定数評価を応用することにより、少ない測定点から各イオン種の生成効率が最大となる流量を推定できることを意味する。また、分析手法開発において、分析対象イオンの感度向上や核種分別に向けた反応ガス導入量の最適化に本法は有効であると考えられる。

#### 4. 結言

$\text{O}_2$ をリアクションセルに導入し、Np, Am, Cmを対象としたICP-MS/MS測定を実施し、各アクチノイドの生成イオン種の検出挙動を実験的に明らかにした。実験値に基づく反応のモデル化およ

図4.  $\text{O}_2$ 流量に対するNpイオン種の相対強度。

び生成イオン種の増減挙動の数値解析を経て、リアクションセル内で生じる気相反応の反応定数の決定に成功した。本法により評価した反応定数はイオン–分子気相反応の反応性を物理的パラメータとして普遍的に表すことを可能とする。今後他のアクチノイド元素等へ検討を拡張し、求めた反応定数を用いて任意の反応ガス流量における各アクチノイドイオンの強度を推定し、核種分別条件を最適化できる。

#### 参考文献

- [1] N. Yamada et al., *Spectrochim. Acta, Part B*, 110, 31, (2015).
- [2] H. Kazama et al., *J. Anal. At. Spectrom.*, 38, 1676, (2023).
- [3] J. K. Gibson et al., *Coord. Chem. Rev.*, 250, 776, (2006).

## 特集 (日本放射化学会第67回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

## 光核反応による Lu-177 の製造

田村 彩乃

(東京都立大学大学院理学研究科)



## 1. 緒言

放射性同位元素 (RI) 内用療法に用いる核種の一つとして  $^{177}\text{Lu}$  が有望視されている。約 6.7 日の比較的短い半減期を持ち、 $\beta$  線と  $\gamma$  線ともに放出することにより治療と診断の融合 (セラノスティクス) が可能である。 $^{177}\text{Lu}$  の製造方法として原子炉中性子を用いた  $^{176}\text{Lu} (n, \gamma) ^{177}\text{Lu}$  反応による直接法と、 $^{176}\text{Yb} (n, \gamma) ^{177}\text{Yb}$  反応で得られた  $^{177}\text{Yb}$  の娘核種として  $^{177}\text{Lu}$  を得る間接法がある。直接法では標的となるルテチウムの安定同位体が大量に存在するため  $^{177}\text{Lu}$  の比放射能が低く、間接法では Lu と Yb の相互分離が困難であることが欠点である。また現在  $^{177}\text{Lu}$  の供給は国外の原子炉で製造したものの輸入に頼っている。原子炉の代替として近年提唱されている電子線形加速器 (電子 LINAC) を用いた  $^{178}\text{Hf} (\gamma, p) ^{177}\text{Lu}$  反応による製造方法では、Hf と Lu の化学分離が容易であることに加えて、 $^{177}\text{Lu}$  の核異性体である  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  (半減期約 160 日) の生成を直接法に比べ抑えることができるとの報告がある<sup>[1]</sup>。

本研究では高エネルギー領域での光核反応による  $^{177}\text{Lu}$  の製造を試み、その生成放射エネルギーや副生成物である  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  との生成比などを調べた。また照射後の試料について LN レジンを用いた抽出クロマトグラフィーによる Hf と Lu の化学分離を試みた。

## 2. 実験

約 0.1 g の  $\text{HfO}_2$  を 9  $\phi$ mm のペレット状に形成し高純度の Al 箔で包装した。この試料を石英管に減圧封入し、東北大学電子光物理学研究センターの電子線形加速器を用いて最大エネルギー

30 ~ 60 MeV の制動放射線を 10 分間照射し  $^{177}\text{Lu}$  の製造を行った。得られた照射試料から放出される  $\gamma$  線を Ge 半導体検出器で測定することにより、生成核種の放射エネルギーを調べた。また照射した  $\text{HfO}_2$  にフッ化水素酸を加え加熱溶解し、硝酸で希釈した溶液を LN レジン (Eichrom、粒径 20 ~ 50  $\mu\text{m}$ ) を充填したカラムに展開した。移動相として混酸 (1 M  $\text{HNO}_3$  + 0.1 M  $\text{HF}$ )、2.5 M、6 M  $\text{HNO}_3$  を連続的に用いて Lu の化学分離を行った。分離した Lu 分画を濃縮したものを試料とし  $\gamma$  線モニタを行い、 $^{177}\text{Lu}$  と  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  とともに最も放出率の高い 208 keV における  $\gamma$  線計数率の減衰曲線から  $^{177}\text{Lu}$  と  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  の放射能比を求めた。

## 3. 結果と考察

Fig. 1 は制動放射線の最大エネルギーに対するそれぞれの生成核種の放射エネルギーを示しており、エネルギーの増加に伴い  $^{177}\text{Lu}$  の生成量が増加する傾向があった。また  $\text{HfO}_2$  の不純物である Zr や ( $\gamma, p2n$ ) 反応由来の核種が確認できた。

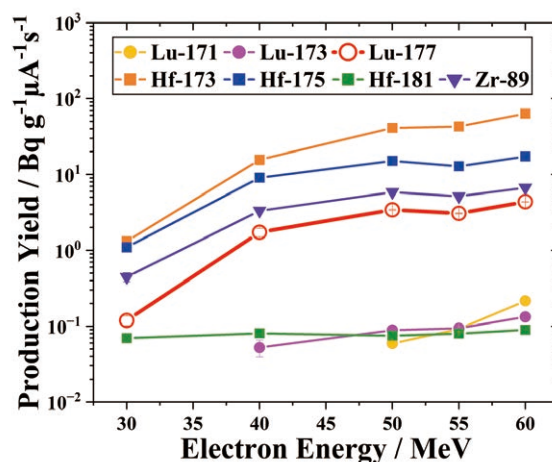


Fig. 1 Production yields of observed radionuclides.

Fig. 2 には LN レジンを用いた抽出クロマトグラフィーにおける溶離挙動を示す。フッ化物イオン共存下において Hf と Zr は陰イオン性フッ化物錯体形成のため樹脂に保持されず、 $\text{HfO}_2$  の不純物である Zr に由来する Y は 2.5 M  $\text{HNO}_3$  で溶離することを確認した。移動相を 6 M  $\text{HNO}_3$  に変えることで Lu をほぼ定量的に分離・回収することができた。この操作によって得た Lu 試料から放出される 208 keV の  $\gamma$  線をモニタした減衰曲線を Fig. 3 に示す。Lu-177 が減衰した概ね 100 日前後から  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  の寄与が確認でき、ここから照射終了時のそれぞれの放射能の寄与を求めた。Lu-177 に対する  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  の放射能比は 50 MeV 照射時で  $2.89 \times 10^{-3} \%$ 、55 MeV 照射時では  $3.77 \times 10^{-3} \%$  であった。これは先行研究と同等の値であり、直接法<sup>[2]</sup>の約 10 分の 1 となったことから電子線形加速器による  $^{177}\text{Lu}$  の製造は有効な手法であることが分かった。

#### 引用文献

- [1] A. G. Kazakov, et al., *Molecules*, **27**, 3179 (2022).  
 [2] S. Chakraborty, K. V. Vimalnath, S. P. Lohar, et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **302**, 233 (2014).

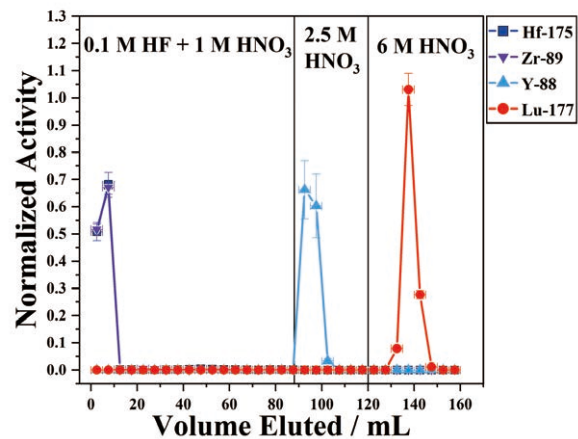


Fig. 2 Elution curves of Hf, Zr, Y and Lu on LN resin.

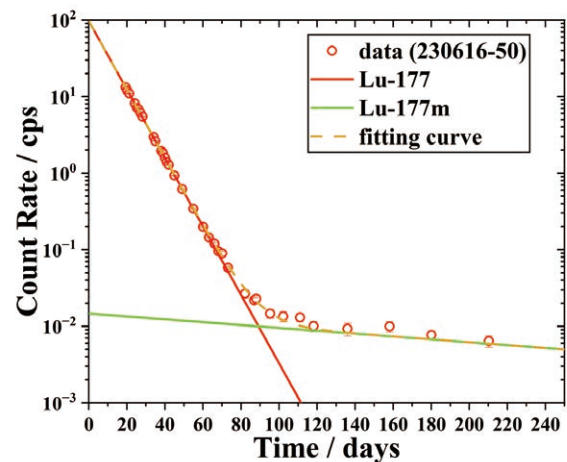


Fig. 3 Decay curve of  $^{177}\text{Lu}$  and  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  at 208 keV.

## 特集 (日本放射化学会第 67 回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

### マイナーアクチニド抽出配位子の迅速設計に向けた電子状態インフォマティクス

住吉 剛

(中央大学大学院 理工学研究科 応用化学専攻)



#### 1. 背景

放射性廃棄物に含まれるマイナーアクチニド (An) から、発光特性や触媒特性に優れたランタニド (Ln) を高効率分離することが求められている。ここで、An と Ln のイオン半径や配位幾何学が類似しており、構造化学の考慮だけでは、{Ln/An} の分離は難しい。そこで、HSAB (hard and soft acids and bases) 則を考慮した複素環配位子 (Fig. 1) が用いられてきた [1]。しかし、リスクとコストの観点から分離配位子の構造を網羅的に実験検討することはできない。

本研究の目的は、理論的な電子状態データベースに基づく {Ln/An} 分離配位子の迅速設計に向けたマテリアルズ・インフォマティクスを実現し、複素環配位子の設計指針を提示することである。本稿では、従来より {Ln/An} 分離配位子の設計に用いられてきた量子化学計算の高いコストを回避し、理論的根拠に根ざした配位子設計を実現する新技術「電子状態インフォマティクス」について簡潔に紹介したい。

#### 2. 理論

##### 2-1. 電子状態インフォマティクス

電子状態インフォマティクスは、化学現象を支配する分子を量子化学的に評価し、分子レベルの電子状態情報から、興味ある化学現象を迅速予測する手法である。当該手法を応用することで、これまでに、CO<sub>2</sub> 吸収性に優れたイオン液体 [2]、色純度に優れた電気化学デバイス [3] など、分野を問わず、世界最高記録をもつ種々の有用材料の具現化に成果をあげてきた。ここでは、放射化学分野への電子状態インフォマティクスの適用

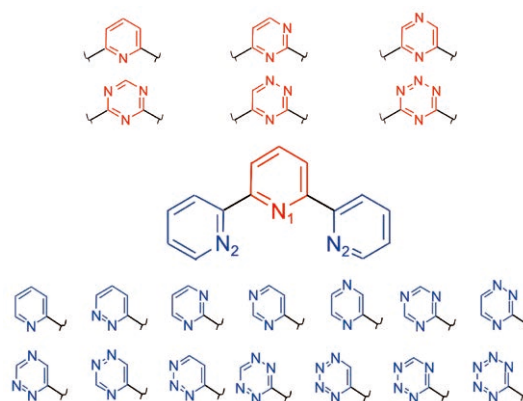


Fig. 1 Examples for terpyridine-based ligands.

例として、3 価の {Ln/An} 分離キレート配位子の設計研究の例を示す。

電子状態インフォマティクスでは、まず、(1) 興味ある物理量 (正解情報) と、(2) それに関する電子状態特徴量を量子化学計算によりデータベース化する。今回の場合、前者には {Ln/An} と分離キレート配位子の錯形成自由エネルギー ( $\Delta G$ ) が、後者には分離キレートの配位軌道 (孤立電子対など) に関わる物理量が対応する。前項の背景から、 $\Delta G$  の評価には、高コストな相対論的量子化学計算が強いられる。これについては仕方ないので、使用可能な計算機のスペックの範囲でなるべく多くのデータを集める。電子状態インフォマティクスでは、この高コストな錯体の計算を実施することなく  $\Delta G$  を高精度予測するため、各 {Ln/An} 錯体の  $\Delta G$  と、キレート配位子の電子状態の関係を機械学習する。キレート配位子から {Ln/An} への  $\sigma$  供与能や、{Ln/An} からキレート配位子への  $\pi$  逆供与能などの情報は、キレート配位子の「自然結合軌道あるいは正準分子軌道の軌道エネルギー」として定量化できる。ここで、キレート配位子の特徴量は、ごく簡便な量子化学計算を実行するだ

けで得られることに留意されたい。キレート配位子の特徴量から  $\Delta G$  を高精度に予測する機械学習モデルを構築することで、キレート配位子の簡単な量子化学計算を実施すれば、 $\Delta G$  を迅速に定量評価可能になる。即ち、キレート配位子の迅速な設計技術を構築できることを意味している。

## 2-2. 本研究で用いた計算の詳細

多配置量子化学理論の適用を必要とせずシンプルな相対論的量子化学計算でも  $\Delta G$  の高精度予測が可能な 3 価の Eu, Gd, Am, Cm を対象に議論を行う。terpyridine 系複素環キレート (Fig. 1; 336 構造) [1] の分子設計法を検討した。なお、より複雑な多配置量子化学理論を必要とする場合も、正解情報を多配置量子化学理論に差し替えれば、電子状態インフォマティクスは適用可能である。全ての結果は、量子化学計算プログラムとして ORCA 及び、Gaussian 16 を用いて得た。中心金属と配位子の基底関数には SDD および 6-31G\* を採用した。錯体およびキレート配位子の構造を、f ブロック錯体の結合長の実測値をよく再現する Pure DFT 法 (BP86) で最適化した。錯体の錯形成自由エネルギー ( $\Delta G$ ) は、動的電子相関を *ab initio* MP2 法で補強することで、数少ない実測値を定量的に再現した Double hybrid DFT 法 (B2PLYP) [4] で評価した。これらのデータに基づき、キレート配位子の電子状態特徴量から、錯形成時の  $\Delta G$  の予測モデルを作成した。学習データ数の小規模性を鑑み、機械学習モデルは、シンプルで解釈の容易な線形重回帰を採用し、5 分割交差検証により、その汎化性能を評価した。また、得られた回帰式における偏回帰係数から、特徴量の化学的重要性を定量評価した。

## 3. 結果と考察

データベース中の錯体の中心金属について、錯形成による各軌道の電子占有数変化  $\Delta q$  ( $= q_{\text{complex}} - q_{\text{ion}}$ ) と  $\Delta G$  の相関を示す (Fig. 2)。6s, 7s および 4f, 5f 軌道の占有数は小さく、 $\Delta G$  に対して変化しなかった。一方、5d, 6d 軌道の占有数はそれらよりも大きく、 $\Delta G$  と負の相関が見られる。また、Ln = Eu, Gd よりも An = Am, Cm の方が大きな  $\Delta q$  を持つ。これらの結果は、キレート配位子が Ln/An に配位する際、An の 6d 軌道の方がキレート配位子の  $\sigma$  供与を強く受け、共有結合性が強く配位することを意味する。

次に、キレート配位子の電子状態特徴量 (Table 1)

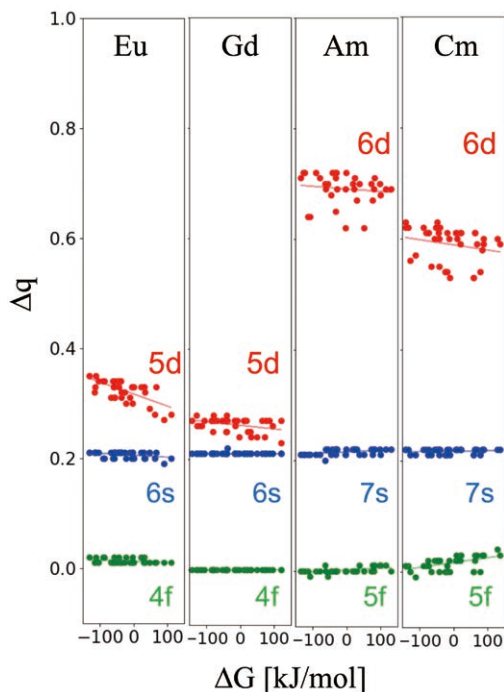
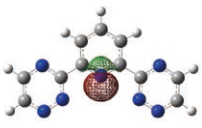

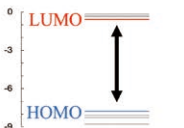
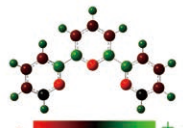
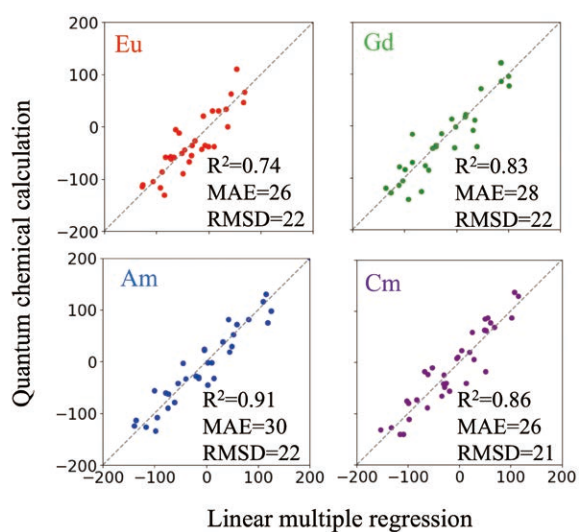


Fig. 2 Correlation between orbital occupation and Gibbs energy changes upon complexation ( $\Delta q$  and  $\Delta G$ ) for ligands in Fig. 1.

Table 1 Ligands' electronic features evaluated by quantum chemical calculation.

$\sigma$ donation	$\pi$ back donation	conjugate	charge distribution
			
LP orbital energy ( $LP_{N1,2}$ )	LUMO : $\pi^*$ orbital	HOMO-LUMO gap ( $\Delta_{\text{HOMO-LUMO}}$ )	Atomic charge ( $q_{N1,2}$ )



Fig. 3 Accuracy of  $\Delta G$  [kJ/mol] prediction.

を用いた、 $\Delta G$  の線形重回帰結果を示す (Fig. 3)。決定係数 (0.7 ~ 0.9) から、高精度に  $\Delta G$  予測を達成できたことが分かる。キレート配位子の電子状態計算のみから、錯体の  $\Delta G$  予測ができた。

最後に、回帰モデルの解析から、キレート配位子構造の設計指針が得られることを示す (Fig. 4)。今回のキレート配位子には、中心の窒素  $N_1$  と、両サイドの窒素  $N_2$  がある (Fig. 1)。今回の線形重回帰モデルでは、 $N_2$  の孤立電子対軌道エネルギーと電荷の偏回帰係数がその他特徴に比べ大きく、錯形成において重要性が大きいことが分かった。これは、Kolarik らのキレート配位子構造 [1] が  $\{Ln/An\}$  分離において理にかなっていたことを理論的に裏付けている。

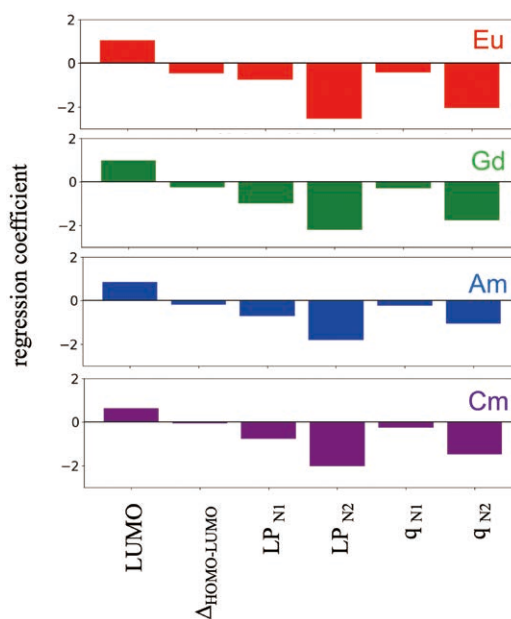


Fig. 4 Feature importance of ligands.

#### 4. まとめ

terpyridine ベースのキレート配位子構造を例に、電子状態インフォマティクスの可能性を示した。汎用的な量子化学計算と機械学習を基とした本手法は、他のキレート配位子についても適用できる。実験との連携による放射化学の更なる発展に期待する。

#### 引用文献

- [1] Kolarik *et al.*, *Solvent Extr. Ion Exch.* **1999**, *17*, 23.
- [2] Kuroki *et al.*, *J. Phys. Chem. B.*, **2023**, *127*, 2022.
- [3] <https://doi.org/10.11546/cicsj.40.2>.
- [4] Kaneko *et al.*, *Dalton Trans*, **2015**, *44*, 8080.

## 特集 (日本放射化学会第67回討論会・若手優秀発表賞受賞者による研究紹介)

ガスクロマトグラフィーと量子化学計算を用いた At 芳香族化合物の  
ハロゲン結合エネルギーの導出

床井 健運<sup>1</sup>、豊嶋 厚史<sup>2</sup>、金子 政志<sup>1</sup>、  
篠原 厚<sup>2,3</sup>、大江 一弘<sup>2</sup>、今 教禎<sup>2</sup>、羽場 宏光<sup>4</sup>、YIN Xiaojie<sup>4</sup>、笠松 良崇<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup> 阪大院理、<sup>2</sup> 阪大放射線機構、<sup>3</sup> 大阪青山大、<sup>4</sup> 理研仁科セ)



## 1. 緒言

ハロゲン結合は、ハロゲン化合物とルイス塩基間に働く分子間相互作用であり、結晶工学、有機化学反応、創薬など、様々な研究分野で広く利用されている<sup>1</sup>。ハロゲン結合は、ハロゲンの分極が大きくなるにつれて強くなることが知られている<sup>1</sup>。よって  $F < Cl < Br < I$  の順番で強くなる。しかし、At や Ts のような重いハロゲンに関するデータは非常に少ない。したがって、ハロゲン結合をより深く理解するためには、これらの重いハロゲンを研究することが非常に重要である。

I より重い At にはより強いハロゲン結合の形成が予想される一方、相対論的効果の影響によって At は I よりハロゲン結合が弱くなるという理論予測もされており<sup>2</sup>、実験によって明らかにする事が重要である。通常、ハロゲン結合エネルギー (HBE) は分光法を用いて測定されるが、短寿命核種しか存在せず微量でしか扱えない At には適用できない。そこで我々はトレーサー量でも実験が可能なガスクロマトグラフィー (GC) に着目した。本研究では、ルイス塩基樹脂を用いた GC 実験で決定する吸着エンタルピー ( $\Delta H$ ) と量子化学計算の併用によって HBE を導出する方法を新たに開発し、At 化合物の HBE を求めたので報告する。

## 2. 実験

最初に At の同族元素を用いて  $\Delta H$  の測定と、HBE との関係式を作成した。次にその式を用いて、At 化合物の  $\Delta H$  から HBE を導出した。ハロ

ゲン化合物としてハロペンタフルオロベンゼン ( $C_6F_5X$ ,  $X = Cl, Br, I, At$ ) とハロベンゼン ( $C_6H_5X$ ,  $X = Cl, Br, I, At$ ) を選び、ルイス塩基としてチオウレア担持シリカゲル樹脂を使用した。実験には GC 装置 (島津 GC-2014) を用いた。外径 5 mm、内径 3 mm のテフロン管に樹脂を 50 cm 充填して分析カラムとして用いた。At 以外の  $C_6F_5X$ ,  $C_6H_5X$  に対し、ガス流量 10 mL/min ならびにカラム温度 140 – 150°C における保持時間を測定した。カラム温度に対する保持時間の変化に対してフィッティングを行い  $\Delta H$  を導出した<sup>3</sup>。また、量子化学計算により  $C_6H_5X$ ,  $C_6F_5X$  とルイス塩基間の HBE を算出し、 $\Delta H$  と HBE との関係式を観測した。この際、量子化学計算の条件決定のため、別の系の HBE の実験値をもとにベンチマーク計算を行い、計算条件の信頼性を評価した。

次に  $C_6F_5At$  と  $C_6H_5At$  の合成を行った。白神らにより開発された有機ボロン酸を用いた反応で  $C_6H_5At$  の合成を行い<sup>4</sup>、HPLC 分析により同定した。次に、 $AtCl$  と  $C_6F_5I$  とのハロゲン交換反応を利用して  $C_6F_5At$  の合成を行い<sup>5</sup>、同様に HPLC 分析により同定した。合成した  $C_6H_5At$ ,  $C_6F_5At$  に対して、カラム温度 140 – 150°C の条件で GC 実験を行った。カラムから溶出した At 化合物を冷却捕集し、CdTeZn 検出器を用いて  $^{211}At$  の壊変に伴う特性 X 線を測定した。この際、カラムからの放射線を遮蔽するため、カラムオープン内に鉛板を設置した (Fig. 1)。捕集量の時間変化から保持時間を取得し  $\Delta H$  を算出した。

## 3. 結果と考察

Fig. 2 は、At 以外の化合物の  $C_6H_5X$  と  $C_6F_5X$  における  $-\Delta H$  と  $-HBE$  の関係を示している。

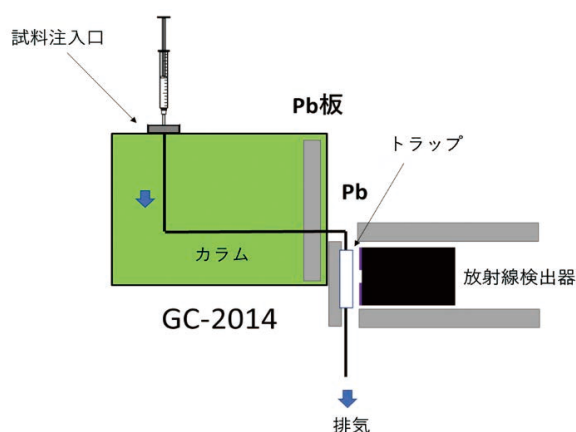


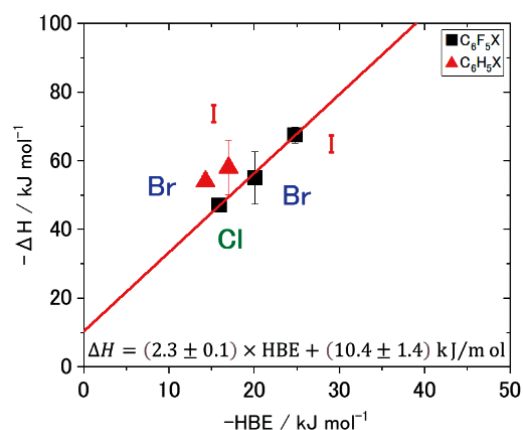
Fig. 1. GC setup for At sample experiments

$C_6H_5X$  は X によらずほぼ同じ  $-\Delta H$  を示し、ハロゲン結合の強さの傾向と一致しなかった。 $C_6F_5X$  では、ハロゲンが重くなるほど  $-\Delta H$  の増加が観察され、これは HBE の一般的な傾向と一致している。さらに、 $-\Delta H$  と  $-HBE$  はピアソン相関係数 0.9995 の良好な直線関係を示した。

Hogan らは、水と  $C_6H_5X$  の間の水素結合エネルギーと HBE を計算し、X がヨウ素までは水素結合の方がハロゲン結合よりも強いことを示した<sup>7</sup>。このことは、本研究における  $C_6H_5X$  の吸着挙動に母材のシリカゲルやチオウレアとの水素結合が大きく寄与していることが示唆された。したがって、 $C_6H_5X$  が HBE と相関を示さなかったのは、水素結合の影響によるものだと考えられる。

$C_6F_5X$  の  $\Delta H$  の HBE 依存性が観察されたことから、ハロゲン結合がチオウレア樹脂への吸着に寄与していることが示唆された。複数のルイス塩基を含むハロゲン結合様式があり、これは単一のハロゲン結合に比べて HBE を増加させることが知られている<sup>8</sup>。したがって、複数のハロゲン結合が関与しているため、Fig. 2 の式の傾きは 1 より大きいと考えられる。以上より、 $C_6F_5At$  の  $\Delta H$  から HBE を評価できる関係式の作成に成功した。

At 化合物の HPLC 分析では、観測した At のピークは  $C_6H_5I$  や  $C_6F_5I$  と一致し、ともに収率約 50% で  $C_6H_5At$  と  $C_6F_5At$  の合成に成功した事が示された。特に、 $C_6F_5At$  の合成報告例は初めてである。

Fig. 2. Relationship between  $\Delta H$ s and HBEs of  $C_6F_5X$  and  $C_6H_5X$  (X = Cl, Br, and I)<sup>6</sup>. The red line is the fitted straight line for the  $C_6F_5X$  data.

$C_6H_5At$  の GC 実験の結果、軽い  $C_6H_5X$  の  $-\Delta H$  より 20 kJ/mol 以上大きいことが分かった。量子化学計算により、At においては水素結合より HBE が強いいため、ハロゲン結合の寄与の影響が吸着に出たと考えられる<sup>7</sup>。

$C_6F_5At$  の GC 実験の結果、カラム温度 150°C で 36 時間の分析においても  $C_6F_5At$  は分析カラムから溶出されない事がわかった。この結果から  $C_6F_5At$  の  $-\Delta H$  の下限値を 80 kJ/mol として評価し、上述の直線関係式を用いて  $C_6F_5At$  の  $-HBE$  が 30 kJ/mol 以上である事を初めて実験的に見出した。この値は  $C_6F_5I$  の HBE よりかなり大きく、 $C_6F_5At$  のハロゲン結合が他の軽いハロゲンの  $C_6F_5X$  より著しく強い事が初めて示された。実験結果の At の HBE は、ハロゲンの分極のしやすさの系統性から予想される結果となった。

現在、 $C_6F_5At$  のハロゲン結合より詳細に理解するため、相対論量子化学計算を用いた At の電子状態解析を行っている。

#### 参考文献

- [1] Cavallo, G. *et al. Chem. Rev.* **116**, 2478–2601 (2016).
- [2] Galland, N., Montavon, G., Le Questel, J. Y. & Graton, J. *New J. Chem.* **42**, 10510–10517 (2018).
- [3] Greene, S. A. & Pust, H. *J. Phys. Chem.* **62**,

- 55–58 (1958).
- [4] Shirakami, Y. *et al. Sci. Rep.* **11**, 1–7 (2021).
- [5] Meyer, G.-J., Rossler, K. and Stocklin, G. *Radiochim. Acta* **24**, 81–85 (1977).
- [6] Tokoi, K. *et al. J. Nucl. Radiochem. Sci.* **23**, 20–25 (2023).
- [7] Hogan, S. W. L. & van Mourik, T. *J. Comput. Chem.* **40**, 554–561 (2019).
- [8] Stilinović, V., Grgurić, T., Piteša, T., Nemeč, V. & Cinčić, D. *Cryst. Growth Des.* **19**, 1245–1256 (2019).

## 会議報告

### 日本放射化学会第 67 回討論会 (2023) の開催報告

中島 覚 (広島大学自然科学研究支援開発センター)  
SORC67 実行委員会・委員長

#### 1. はじめに

日本放射化学会第 67 回討論会 (2023) が、2023 年 9 月 21 (木) から 23 日 (土) まで広島大学東広島キャンパスのサタケメモリアルホールと学士会館で開催されました。その概要を報告します。

2022 年の 2 月に当時の学会長の篠原先生から討論会担当機関を公募することになったので広島大学も応募してはどうかとのお誘いをいただきました。理事会と現地実行委員会 (LOC) で共同して開催するようにするとのこと、LOC の負担は、以前ほどは大きくない印象を持ちました。私のグループのメンバーにも相談し、私の退職前の開催であり、これまでお世話になった日本放射化学会に最後にお返しをした方が良いと判断し、応募しました。しばらくしてから広島大学での開催が決まったとの連絡をいただきました。

学内業務等のため、準備が遅れがちになりました。会場と日程を決めたのは、東京大学での 2022 年総会の少し前でした。各先生に実行委員会をお願いしたのも 2023 年の 1 月になってからであります。初会合は、4 月 19 日に開催された Confit システムの説明会でした。これは Zoom での会議でした。対面での実行委員会は 6 月 6 日に開催したもののだけです。その後の連絡はメーリングリストでの打ち合わせのみです。比較的短時間で準備しましたが、これはひとえに討論会担当理事の秋山先生と鈴木先生の忍耐とサポートのおかげです。

実行委員会メンバーは次の通りです (敬称略)。

#### LOC

中島 覚 (広島大学自然科学研究支援開発センター・委員長)

遠藤 暁 (広島大学先進理工系科学研究科)

長沼 毅 (広島大学統合生命科学研究科)

阿部穰里 (広島大学先進理工系科学研究科)

稲田晋宣 (広島大学自然科学研究支援開発センター)

松嶋亮人 (広島大学自然科学研究支援開発センター)

阪間 稔 (徳島大学医歯薬学研究部)

金子政志 (大阪大学理学研究科)

#### 学会理事会

鈴木達也 (長岡科学技術大学、討論会担当)

秋山和彦 (東京都立大学、討論会担当)

久保謙哉 (国際基督教大学、若手賞担当)

吉村 崇 (大阪大学放射線科学基盤機構)

可児祐子 (日立製作所)

浅井雅人 (日本原子力研究開発機構)

大浦泰嗣 (東京都立大学)

五十嵐康人 (京都大学・学会長)



写真 討論会 HP の表紙 (写真は広島大学広報グループ提供)

#### 2. 本大会の位置づけ

2020 年と 2021 年はコロナ禍で、オンラインで討論会を開催していただきました。コロナ禍での開催は大変であったと推測しますが、学位取得を目指す学生にとって大変ありがたいものでした。オンラインでの会議等は最初不慣れでしたが、いつの間にか慣れて大変便利であると感じるよう

になりました。それでも2022年度、東京大学により第66回討論会を対面とオンラインのハイブリッドで開催いただき、私自身も口頭で発表しましたが、多くの研究者から直接刺激をいただけて対面の良さを改めて感じました。2022年度の状況では懇親会の開催は無理でしたが、今回は懇親会もぜひ開催し、コロナ禍の終了を宣言する討論会にしたいと思いました。

開催する広島大学にとっても意義があると考えました。これまで1965年(第9回)、1989年(第33回)、2008年(第52回)の討論会を広島大学で開催し、今回で本学での開催は4度目です。退職前に討論会のお世話をすることも意味があると考えました。広島大学ではこれまで分析化学の講座、無機化学の講座、自然科学研究支援開発センターがそれぞれ中心になって開催しており、放射化学の多様性を感じさせます。放射化学という学問は、化学という学問分野の中でも特に他の分野との境界領域に展開していく印象が強いです。私たちのグループは自然科学研究支援開発センターのメンバーですが、同時に理学部化学科の一つの研究グループでもあります。広島大学も引き続きこの分野で活躍でき、将来的にも放射化学討論会をお世話できる広島大学であってほしいという思いもありました。

### 3. 準備

理事会との連携は秋山先生と鈴木先生のおかげで何とかできたと思っています。また、LOCの準備が滞っていると、ちょうど良いタイミングで秋山先生からメールをいただけたことも幸いでした。

会計に関しては大浦先生からご指示いただきました。LOCでやるべきことを紙でいただけ助かりました。共催関係と広告に関してはそれぞれ吉村先生と可児先生にお世話になりました。確かに、LOCと理事会が共同で開催するものでした。

プログラムを組むにあたってはConfitは役に立ちました。何もないところからプログラムを完成させるのは大変ですので、まずたたき台として中島の方でセッションの割振りを行った後原案を作成し、それを各コンビナーの先生方に修正をお願いしました。コンビナーの先生方には若手発表賞に応募されている方が容易には見えなかったの

応募者が3日目の午後の発表になったものがありました。それでは採点が間に合いませんので、この発表の順番を変更させていただきました。A、Bの2会場でしたが、その移動がスムーズにいくように休憩時間は両会場で合わせました。

懇親会の会場を探す際、ホテルによってはコロナ禍の影響を受けて宴会を行わなくなったところもあり、東広島市のような小さな町の苦勞を感じました。幸い、ラッセレ東広島を予約することができました。もしどこもなければ、B会場の机と椅子をポスターセッションの時間に取り除き、そこを懇親会の会場とすることも考えました。いざとなれば、力づくで進めようとも思っていました。懇親会会場を予約出来てよかったと思っています。交通が不便なため、バスの予約などはラッセレ東広島と共同で進めました。

お昼の時間に分科会、若手の会を計画しました。A、B二つの会場だけでは足りず、会場近くの教育学部の講義室も使用することにしました。

会場の設営などは、私どものスタッフが準備してくれました。これまでも様々な大会においていろいろお願いしてきましたので、スムーズにやっていただけました。

### 4. 討論会概要



写真 A会場の様子

会期：2023年9月21日(木)～23日(土)

会場：広島大学東広島キャンパス(サタケメモリアルホール、学士会館、教育学部K棟K109講義室)

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、公益社団法人日本分析化学会、広島大学自然科学研究支援開発センター

協賛：一般社団法人日本物理学会、公益社団法人日本薬学会、一般社団法人日本原子力学会、一般社団法人日本放射線影響学会

協賛：6社

日本放射化学会賛助会員：22社

資料提供：広島大学広報グループ、広島コンベンションビューロー



写真 懇親会の様子



写真 B会場の様子

参加者数 190名

発表件数等

特別講演 3件（敬称略）

羽場宏光（理化学研究所）「新元素の核化学」  
放射化学関係での重要な研究展開として羽場先生にお願いしました。

五十嵐康人（京都大学）「原爆による「黒い雨」領域推定のための基礎的研究」

広島らしさもあり放射化学の社会貢献でもあるので五十嵐先生にお願いしました。

片田元己（東京都立大学）「佐野博敏先生を偲ぶ」  
日本放射化学会賞木村賞受賞者である佐野先生がご逝去されましたので、片田先生にお願いしました。佐野先生は私の先生でもあり、広島ともご縁のある先生ですので選出させていただきました。

放射化学会奨励賞受賞講演 1件（敬称略）

大内和希（日本原子力研究開発機構）

「アクチノイドの溶液内複合反応研究と微量分析法開発」

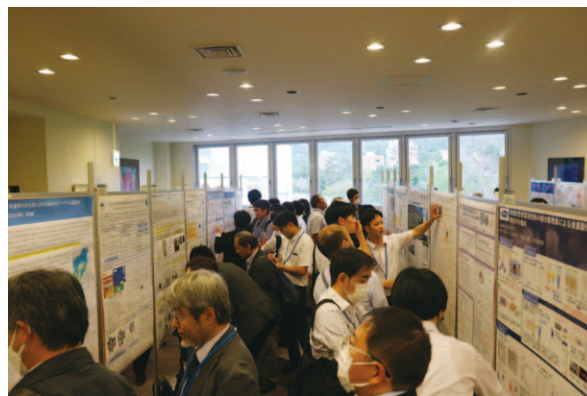


写真 ポスター会場の様子

特別セッション（担当コンビーナ（敬称略））

新試験研究炉計画（三浦 勉・高宮幸一・松江秀明）  
三浦先生（産総研）に特別セッション「新試験研究炉計画」を企画いただきました。JAEA、京都大学、福井大学が選定されて概念設計等を進めておられますが、それぞれの担当者から報告がありました。その後、総合討論が行われました。本討論会の幅を広げていただいた特別セッションでありました。



写真 特別セッションの様子

## 一般発表

口頭 65 件 (招待講演を含む)

ポスター 44 件

一般発表(招待講演を除く)は、15分間の発表、5分間の質疑応答を堅持しました。研究内容を丁寧に説明し、長い質疑応答に耐えるというのが討論会の基本であり、討論会で一番大事なところであるためです。

ポスター発表は2日間に分けて行いました。会場では大変活発な議論が行われていました。ポスター掲示は両日ともお願いしました。ポスター発表の時間だけでなく、時間が空いたときに見ておられた方もおられました。また、フラッシュトークは前年に続いて今回も行いました。若い人にとっても人前で発表することは良い経験になります。もちろん若い方のフラッシュトークも良いですが、年配の先生が頑張っておられる姿は、定年が近い私にも勇気をいただきました。

### 基盤セッション(担当コンビナー(敬称略))

核化学(笠松良崇)

原子核プローブ(久保謙哉)

環境放射能(小池裕也)

放射化分析及び放射性核種の分析化学(三浦 勉)

原子力・アクチノイド化学及び関連分野(鈴木達也)

核医学・生物関連放射化学(鷲山幸信)

教育関連(篠原厚)

その他(境界分野への放射化学の新展開など)(秋山和彦)

### 放射化学会各種会合

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)および放射化学若手の会の各会合

古い話ですが、本学会には4つの分科会がありました。理事会等のご努力により、その他(境界分野への放射化学の新展開など)を入れて8分会となったことは意義深いと思います。まさにいろいろな分野へ打って出ている印象を持ちます。多くの分会の中で特に教育分会は積極的に活動されており、昼食時の分会総会での講演から討論会の教育セッションへスムーズにつないでおられました。また、1日目の昼の時間に開催された若手の会では、自分たちでお弁当も用意し、積極的に活動されていました。大変心強い思いがしました。

総会は、議事を粛々とこなすのが一般的です。本学会の総会の特徴は、承認すべきことは承認した後、若手支援について参加者全員でディスカッションすることにあります。他の多くの学協会の総会とは異なる点に感じ入るとともに理事会の若手支援への強い思いを感じました。

### 参加登録費

	事前登録 (7/1-8/31)	9/1以降 の登録	懇親会費
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)
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)
非会員	8,000 円 (税込)	9,000 円 (税込)	8,000 円 (税込)
非会員 (学生)	4,000 円 (税込)	5,000 円 (税込)	3,000 円 (税込)

### 優秀賞

閉会式時に発表者の中から6名が選出され、表彰式が行われました。受賞者は次の通りです(敬称略)。

重河優大(理研仁科セ) 1B02「Th-229mの電子架橋遷移の観測に向けたTh-229mイオンの引き出しとトラップ」

床井健運(阪大院理) 1B10「ガスクロマトグラ



フィーと量子化学計算を用いた At 芳香族化合物のハロゲン結合エネルギーの導出」

田村彩乃 (都立大) 1P02 「光核反応による Lu-177 の製造」

板倉悠大 (阪大) 1P04 「ノーベリウム化学的性質解明に向けた水酸化ストロンチウム沈殿の分光分析と量子化学計算」

風間裕行 (JAEA) 2B05 「ICP-MS/MS のリアクションセル内におけるアクチノイド気相反応の反応定数評価」

住吉 剛 (中央大) 3A05 「マイナーアクチニド抽出配位子の迅速設計に向けた電子状態データベースの構築」

久保先生と相談し、副賞として地元呉市のセーラー万年筆 (株) の製品を贈呈しました。限られた時間での採点と印刷であるため、氏名などのミスが表彰式後見つかりました。これに関しては後日、修正した表彰状を送付しました。

討論会の閉会式では受賞者が不在のことが度々ありますが、今回、受賞者全員が最後まで残ってくれていました。モチベーションが高い若手が多いと感じました。受賞される方は今後もこの分野で活躍される可能性が高く、本学会を牽引される人材に成長されることを期待しています。

## 5. 振り返って

討論会の準備段階でさまざまな検討や依頼が遅れがちになりましたが、依頼に快くご協力いただいた LOC と学会理事会、特に討論会担当理事の皆様にご感謝申し上げます。短期間の準備で済みましたのも担当理事のお陰です。

また、広島大学自然科学研究支援開発センターのスタッフで各種事務や会場設営等を行いました。氏名を記して感謝申し上げます。

### 事務局 (敬称略)

中島 覚 (事務局長)、稲田晋宣、松嶋亮人、木庭亮二、寺元浩昭、山崎直美、稲田聡美

これまで中島が実行委員長として開催した学会や年次大会等でも快く協力いただいておりますが、完璧な仕事をしていただきました。

会場係やクローク係などは広島大学の学生がアルバイトを行いました。ここに記して感謝します。



写真 ホワイエの様子



写真 最後の記念写真

### アルバイト (敬称略)

村田 拓、菅原知佳、樫野理子、岡崎ななか、藤田大和、吉田光希、Habibur Rahman

今回、討論会、懇親会とも対面で行えてよかったです。対面だからこそできる議論もありますし、顔を見ながらの話は格別です。しかしながらオンラインに慣れてきた現在では、オンラインでも発表内容がよくわかりますし、ディスカッションもできます。もし情報を得るだけなら、オンラインでの参加でよい気もしています。ハイブリッド開催も一つですが、実施者の苦勞もありますし、対面での参加者が少なくなると白けてしまいます。個人的には対面での開催が好きですが、開催方法については、引き続き議論が必要かもわかりません。

これまでも LOC と理事会は連携を取って討論会を開催してきましたが、今回はその連携がより

強くなったと感じました。これは LOC の準備が大変なので理事会が積極的にサポートするようになったためであると理解しています。理事会のメンバーから多大な支援をいただきましたが、実行委員長が LOC の中で調整することや、理事会のそれぞれの担当（討論会、若手賞、総務等の担当）と調整することは、状況の把握が十分できていないと、少し大変であるとも感じました。

今回、LOC が担当すべきことが減り、すなわち LOC としては負担が減り、討論会をお引受けしやすくなったと思います。それでも、実行委員長は理事が良いように思いました。実行委員長が状況をよく理解していないと討論会担当理事の業務負担が大きくなります。学会準備は LOC マターと理事会マターに分けられますが、理事でないと実行委員長が理事会マターを把握するのは容易ではない点もあり、その準備状況に不安を覚えることがあります。実行委員長が理事だといくらか全体を把握しやすいと思います。

Confit を使えて助かりました。集中して準備したのは 4 カ月でした。放射化学の研究室が縮小傾向にある現状を考えると、討論会を引き受けられるグループは限られてきますが、小さなグループであっても、開催できるといえます。もちろん、もう少し早く準備をすればよかったという思いもあります。年々所属機関での業務が忙しくなり、学会活動の時間が制約を受ける状況での準備は大変ですが、多くの機関で討論会を引き受けていただければと思います。

10 月 18 日に振返り会（反省会）をアトラス様、秋山先生、鈴木先生、中島で行いました。その時のことも思い出しながら、正確でない点もありますが、いくつか記します。

カードでの支払いですが、複数のカードで支払いができたほうが良いようです。参加登録費の支払いは公のカードで支払えますが、懇親会の支払いは個人のカードで支払うしかありません。今回はそれができませんでした。

講演要旨のパスワード (PW) は討論会開始の数日前に登録者へアナウンスがありましたが、その後に登録いただいた方へ個別に PW をご連絡しました。さらに当日の登録者の方への PW のアナウンスも個別に対応せざるを得ませんでした。当日は、PW を書いた紙を渡すとか PW を受付横のボードに貼っておくかすればよかったと思います。

留学生の参加も年々多くなります。Confit へ氏名を入力する際、国に寄っては必ずしも氏と名がはっきりとしないことがあるようで、この点で苦労されたようです。

また、プログラムを作る際、コンピーナも若手表彰応募講演かどうか容易に判断できると良いことも確認しました。

最後になりましたが、参加いただいた皆様に感謝申し上げます。東広島市という小さな町での開催で交通の便などご不便をおかけしました。また、土曜日は休日でしたので、お弁当の準備などお手数をおかけしました。

## 会議報告

### International Conference on Hyperfine Interactions and Their Applications (HYPERFINE 2023)

佐藤 渉

金沢大学理工研究域 (HYPERFINE 2023 組織委員)

超微細相互作用に関する国際会議 (HYPERFINE 2023) が、去る 11 月 13 日 (月) から 17 日 (金) の期間で、東大寺に隣接する「奈良春日野国際フォーラム 薨」にて開催された。日本放射化学会の共催を得ての開催である。本会議はその名の通り、超微細相互作用を介した物質科学ならびに原子核の研究に関する国際会議である。元は二つの会議 “International Conference on Hyperfine Interactions” と “International Symposium on Nuclear Quadrupole Interactions” を前身とし、1967 年の第 1 回の開催から半世紀以上にもわたる長い歴史を持つ。2004 年に一つの会議に統合され、2016 年以降は会議の名称を標記のように改称し、現在に至っている。前回日本で開催されたのが 1992 年であり、今回は実に 31 年ぶりの日本での開催となった。2 年前にルーマニアで開催された同会議において日本での開催が決定した折は、コロナ禍のために対面での開催が危ぶまれていたが、国内の組織委員会 (LOC) と執行委員会 (EC) で議論を重ねた結果、原則対面で開催することを決定した。その結果、数件のオンライン参加者 (口

頭、ポスター共) を除いてほとんどの発表者 (全発表件数 163 件) が奈良に集った。

開催にあたって LOC で特に注力した点は、1) 研究分野の若返りを期し、学生やポスドクなどの若手研究者の参加を奨励するため、参加費用の補助や若手優秀発表賞を企画したこと、2) プログラム編成にあたっては、口頭発表者や座長の選出において多様性 (研究分野、年齢、性別、国・地域) を重視して広く参加・協力を募った点にある。参加人数の内訳は図 1 に示すとおりである。旅費が高む対面開催にもかかわらず、全 173 名の参加者のうち海外 26 カ国から 53 名が参加しており、さらに特筆すべきは学生の参加者が全体の 30% におよんだことである。これは LOC の期待を大きく上回る人数であった。

発表内容については、固体 NMR やメスバウアー分光法、摂動角相関法、低温核偏極法などの原子核をプローブとする超微細場測定に基づく手法に加え、今回は特に  $\mu$ SR 法を用いた物質科学研究の発表が多くなされた。研究対象も多様化しており、金属化合物の固体物性に加え、有機化合

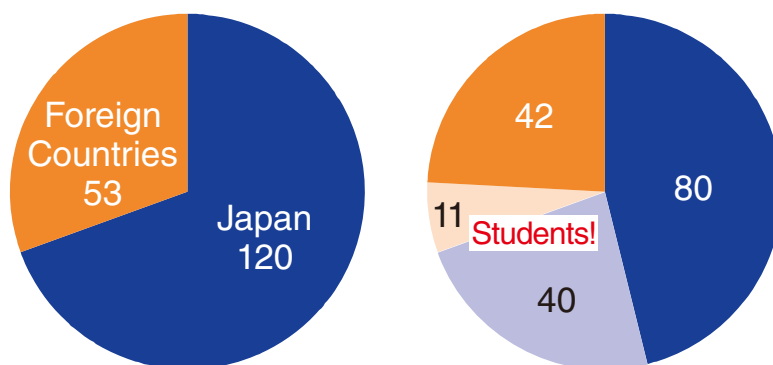


図 1 参加者の内訳

物やソフトマター、溶液の科学など多岐におよび、白熱した議論が展開された(図2)。また、物性研究のみならず、国内外からのレーザー分光や核反応による原子核の構造や電磁モーメントの研究なども多く、超微細相互作用や核分光を利用した研究分野の多様化を強く感じる会議となった。ポスター発表件数は113件であり、ワイングラスを片手にリラックスした雰囲気の中、自由闊達な議論がなされた。終了時間を1時間程も超過したセッションもあり、盛況を博した(図3)。

開催3日目にはエクスカージョンとして法隆寺へのバスツアーを行った。世界最古の木造建築として知られる五重塔(図4)をはじめ、法隆寺の伽藍を90分程度で見学した。残念ながら専門の

ガイドをつけなかったため、外国人参加者に対しては日本人の参加者たちが知る限りの説明しかできなかったが、日本が誇る世界文化遺産が海外の方々の目にどのように映ったのか、興味深いところである。

会議の最終日前夜のバンケットでは、参加者の懇親を大いに深めた(図5)。和洋中の料理に加え、特設された奈良の地酒の試飲コーナーには海外の方々も列を成し、日本酒を多少嗜む筆者も驚くラインナップであった。また、バンケットの企画として、日本文化の一つである折り紙が紹介され、折り方の実演もなされた。ほろ酔いの海外の参加者も意外に(?)熱心に聞き入り、見様見真似で折り鶴を楽しんでいた姿が印象深い。さらに若手



図2 口頭発表の様子

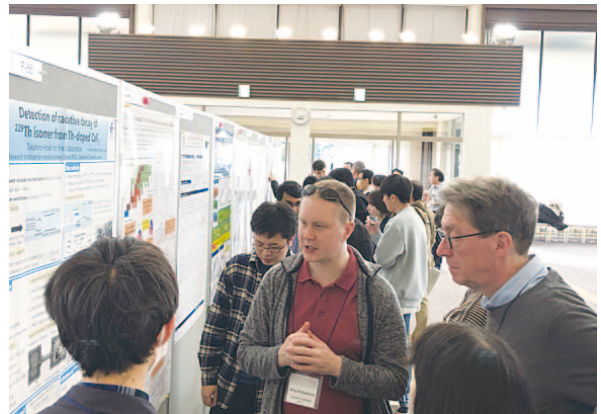


図3 ポスター発表の様子



図4 (a) みんなで遠足



図4 (b) 法隆寺 金堂と五重塔



図 5 バンケットの様子

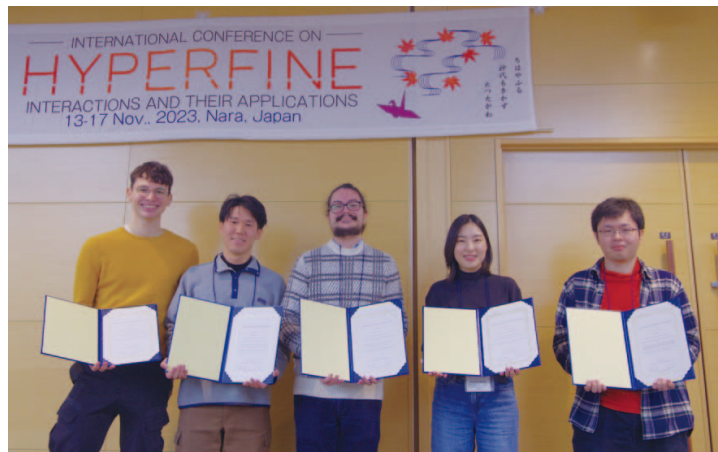


図 6 若手優秀発表賞の受賞者 5 名

研究者によって縄跳びも実演され、これに挑む海外の方々もいたが、酔いが回るのに一役買ったものと思われる。

最終日の閉会のセレモニーで、若手優秀発表賞の表彰式があり、口頭発表者 2 名（日本とポルトガル各 1 名）、ポスター発表者 3 名（日本 2 名、ドイツ 1 名）が参加者の投票で選ばれた（図 6）。この企画は Hyperfine の国際会議では LOC メンバーが知る限り初の試みであり、若手研究者の励みになるものと期待される。

今回の若手研究者の優秀な発表内容や、それを

支援・奨励する LOC の企画は、参加者から大いに称賛を受けた。国際諮問委員会（IAC）や EC の方々からも高い評価を受け、会議全体として成功裡に終えることができた。本会議の開催にあたり、多くの団体から寄付金をいただき、若手研究者の補助や奨励に大いに役立たせていただいた。この場をお借りして御礼を申し上げる次第である。

次回は 2025 年にポーランドで開催予定であり、メスbauer 分光の国際会議（International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect, ICAME 2025）と共同開催の予定である。

## トピックス

### 福島第一原子力発電所事故に伴う新潟県内の放射線等の監視結果 (10年とりまとめ版)の英語版の公開

菊池 真梨子\*、松谷 亮、春日 俊信、飯吉 栄輔  
(新潟県防災局原子力安全対策課)

#### 1. はじめに (新潟県の取り組み)

2011年3月11日に発生した東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所事故から、13年が経過しました。新潟県では、県民の皆様の安全・安心の醸成に資するため、事故発生直後から、新潟県内の空間線量率や降下物、河川水、水道水及び県内に流通する農林畜水産物などの放射能測定を実施し、監視を強化してきました。得られた調査結果は判明次第、速やかにお知らせするとともに、これまでに報告書を14回とりまとめ、学識経験者等からの評価を付して公表してきました。2022年12月には、事故から10年の調査結果をまとめた報告書「福島第一原子力発電所事故に伴う新潟県内の放射線等の監視結果(10年とりまとめ版)」を公表しました。

また、今年11月には当該資料の英語版を作成し公表しました。

本記事において、内容を一部ご紹介します。

#### 2. 調査結果 (概要)

10年の調査で得られた結果から、本県は、福島県の隣県という立地にも関わらず、偏西風と山脈により放射性物質の直接の飛来等が妨げられ、県内の河川水、農林水産物などからは、ほとんど人工放射性物質は検出されていないことがわかりました。

その一方で、河川や降下物等を介して県内に流入してきた人工放射性物質である放射性セシウムが浄水場汚泥、焼却灰などに人為的に濃縮されることや、きのこ、野生鳥獣、淡水魚など特定の生

物に移行し、濃縮・蓄積すること、また、地上に降下した放射性セシウムを含む土砂等が雨、河川水などにより下流域に流出し、時間経過とともに移動することがわかりました。

#### 3. 評価

新潟県では、事故後10年間に実施した県内の放射線等の調査結果について、「新潟県放射性物質の循環に関する実態調査検討委員会」の学識経験者等から以下のような評価をいただきました。

- ①本県のこれまでの調査結果から、福島第一原子力発電所事故由来の放射性物質が本県でも確認されたが、環境への影響は限定的であり、健康に影響のない放射能レベルであると考えられる。
- ②近年の調査では、新たな放射性物質の飛来は確認されておらず、10年間の時間の経過とともに多くの項目で事故の影響は見られなくなっている。
- ③基準値超過が確認されている山菜・野生きのこ・野生鳥獣の肉については、引き続き調査を行い、その濃度推移を確認する必要がある。その他の試料については、風評被害対策などの政策的な目的、環境挙動の把握などの学術的な目的に応じ、調査の必要性や頻度・方法等について適宜見直しを行っていくことが望ましい。

#### 4. 英語版公開のお知らせ

2023年11月、新潟県は、当該調査結果をよりたくさんの方にご覧いただくため、「福島第一原子力発電所事故に伴う新潟県内の放射線等の監視

KEY WORDS : 新潟県、福島第一原子力発電所事故、放射線、放射能、放射性セシウム、環境調査、とりまとめ  
Niigata, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Radiation, Radioactivity, Radioactive Cesium, Survey in Environment, Compilation

結果（10年とりまとめ版）」の全文を英語に翻訳し、公表しました。本報告書は、以下の URL からご覧になれますので、読者の皆様の業務や研究

に是非ご活用ください。

URL : <https://www.pref.niigata.lg.jp/sec/genshiryoku/fukushimasasshi-english.html>

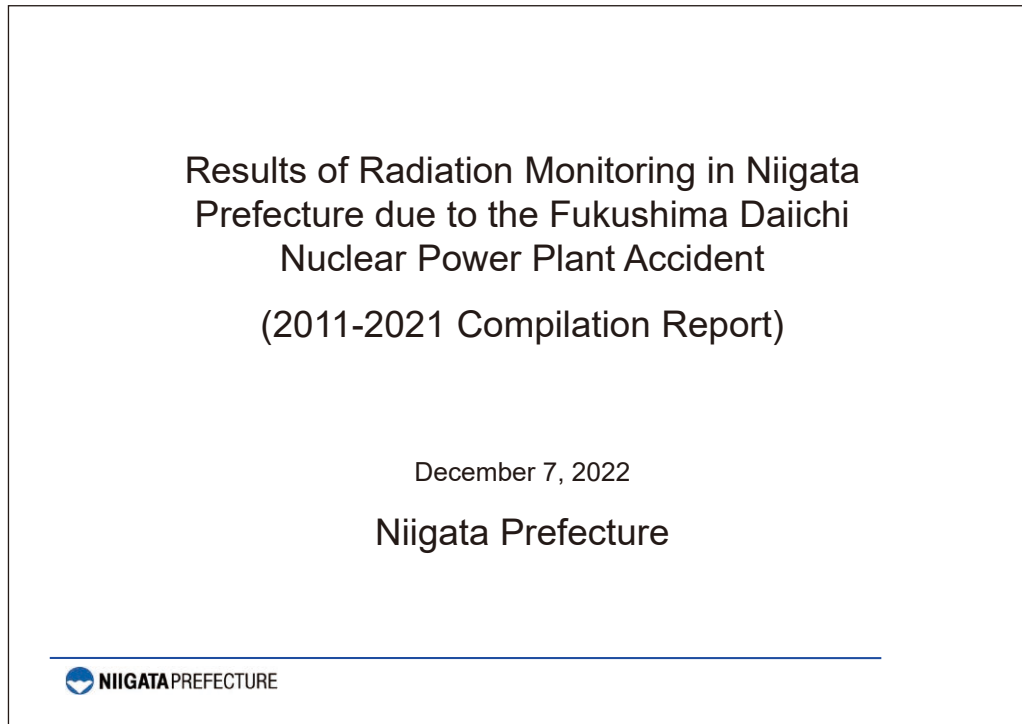


図 1 英語版「福島第一原子力発電所事故に伴う新潟県内の放射線等の監視結果（10年とりまとめ版）」の表紙

情報プラザ (国際国内会議)

(2024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 2024年春の年会

日時：2024年3月26日～28日

場所：近畿大学東大阪キャンパス (大阪府東大阪市)

URL：<https://confit.atlas.jp/guide/event/aesj2024s/static/overview>



日本薬学会 第144年会

日時：2024年3月28日～31日

場所：パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)

URL：<https://confit.atlas.jp/guide/event/pharm144/top>



第84回分析化学討論会 (京都)

日時：2024年5月18日～19日

場所：京都工芸繊維大学松ヶ崎キャンパス (京都府京都市)

URL：<https://confit.atlas.jp/guide/event/jsac84touroon/top>



第15回核融合エネルギー連合講演会

日時：2024年6月13日～14日

場所：八戸公民館 (青森県八戸市)

URL：<https://www.jspf.or.jp/15rengo/>



第61回アイソトープ・放射線研究発表会

日時：2024年7月3日～5日

場所：日本科学未来館未来館ホール (東京都お台場)

URL：<https://confit.atlas.jp/guide/event/jrias2024/top>



日本放射化学会 第68回討論会 (2024年)

日時：2024年9月23日～25日

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

URL：<http://www.radiochem.org/event/forum.html>





**日本核医学会 第 64 回学術総会**

日時：2024 年 11 月 7 日～9 日

場所：パシフィコ横浜（神奈川県横浜市）

URL：https://jsnm.org/meeting/



**10th International Conference on Nuclear and Radiochemistry (NRC-10)**

日時：25 – 30, August, 2024

場所：Brighton, United Kingdom

URL：https://www.rsc.org/events/detail/38385/10th-international-conference-on-nuclear-and-radiochemistry-nrc10



**第 5 回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会**

日時：2024 年 12 月 16 日～18 日

場所：大阪大学コンベンションセンター（大阪府吹田市）

URL：https://www.jrsm.jp/jrsm.html



**33rd Symposium on Fusion Technology (SOFT2024)**

日時：22 – 27, September, 2024

場所：Dublin, Ireland

URL：https://soft2024.eu/



**国際会議**

**Biological Effects & Application of Radiation (BEAR2024)**

日時：15 – 17, March, 2024

場所：Tokyo Institute of Technology, Tokyo

URL：http://radi.rirc.kyoto-u.ac.jp/bear2024/index.html



**The Asia-Pacific Symposium On RadioChemistry 2025 (APSORC 2025)**

日時：14 – 19, September, 2025

場所：Matsue, Shimane Japan

URL：http://www.radiochem.org/apsorc/



**Pacificchem 2025**

日時：15 – 20, December, 2025

場所：Honolulu, Hawaii

URL：https://pacificchem.org/



## 学会だより

### 1. 一般社団法人日本放射化学会第 11 回定例理事会 議事録抜粋

日時：2023 年 9 月 20 日 (水) 13:30 ~ 18:30

場所：広島大学東広島キャンパス

出席者：[会長] 五十嵐、[副会長] 久保、[理事] 浅井、大浦、羽場、三浦、秋山、可児、木野、小池、國分、鈴木、桧垣、矢永、吉村、鷲山 [監事] 北辻、箕輪、[オブザーバー] 渡邊瑛介

#### 報告

1. 総務担当理事より、前回理事会以降の理事会活動について報告があった。メール審議が 2 件あり、「2023 年日本放射化学会奨励賞授賞者について」と「文科省ロードマップ 2023 への提案に対するサポートレターの提出」について承認された。
2. 会員担当理事より、会員動向について報告があり、入会者 14 名を承認した。
3. 会計担当理事より、2022 年度会計中間報告があった。昨年度の法人税は 70,100 円であった。核化学夏の学校への補助金 20 万円を支出した。
4. インターネット・広報委員長より、会員 ML の配信状況と HP の更新について報告があった。部会 HP を SMOOSY の HP 上に移行する準備を行った。メールニュースの配信が滞っており、理事以外の担当者も加えた体制を作って進めるべきとの意見があった。
5. JNRS 編集委員長より、論文投稿状況について報告があり、現在論文 1 報査読中とのことであった。次期編集員を各部会から推薦してもらうよう依頼した。
6. 「放射化学」編集委員長より、第 48 号の出版が完了したとの報告があった。
7. 新研究炉検討委員会委員長より、今討論会で「新試験研究炉計画」の特別セッションを企画

したとの報告があった。

8. 各部会より活動状況について報告があった。放射化分析部会では、今討論会中の部会で JRR-3 照射利用に関する意見交換会を開催し、13 年間停止していた影響で放射化分析の民間利用がほとんど無くなった原因とそれに対する対策について議論するとのことであった。教育部会では、原子力学会再処理部会の夏期セミナーと合同で来週セミナーを開催することであった。核化学部会では、第 60 回核化学夏の学校を 8/30 ~ 9/1 に開催し、参加者 56 名、うち学生 16 名で、民間企業から多数の講師をお招きした。

#### 審議

1. 大浦理事より、報酬規程、旅費規程、謝金規程の提案があり、承認した。
2. 浅井理事より、次期役員選挙のための役員推薦委員会と役員選挙管理委員会の設置及び委員の提案があり、承認した。
3. 核プローブ部会より、既に後援承認済みの HYPERFINE2023 国際会議について、若手支援策として参加費を格安にするなどしたため収支が厳しく、学会に対して開催支援金の依頼があった。学会主催の国際会議ではないため、支出について多くの議論があったが、今回は核プローブ部会の予算の範囲内で 10 万円の支出を承認した。部会として必要であれば次年度予算を前借りして 20 万円まで認めることとした。ただし学会として支援するので、共催にしてもらうことにした。共催金の支出基準について今後検討することとした。

#### 検討

1. 会員総会で議論する内容について確認、検討した。
2. APSORC25 準備スケジュールについて検討し

た。開催時期は 2025 年 9-10 月とし、第 69 回討論会を兼ねるとした。12 月の理事会までに実行委員長と主要メンバーを決定することとした。

3. 若手研究者奨学金・助成プログラムと若手研究者支援のための基金創設について議論した。基金の設置は承認済みで、パブコメでも大半が賛成又は条件付き賛成だった。現在ある基金の設立経緯と用途、目的を精査し、一部の基金を若手基金に振り替えることとした。その他に一般会計からの繰り入れと新たな寄付の募集で若手基金を設立することにした。基金の目的、用途が不明確にならないような仕組み、定期的に基金の効果や存続の判断をする仕組みを作ることとした。次回理事会で基金運用規程案を議論することとした。
4. 学会入会勧誘パンフレットの作製について検討した。対象は、一般会員向けと賛助会員向け、研究室に見学に来る学生向け、近い分野の先生向け、など様々な意見が出た。ワーキンググループを立ち上げて検討することとした。

以上

## 2. 一般社団法人日本放射化学会第 12 回定例理事会 議事録抜粋

日時：2023 年 12 月 9 日（土）13:00～18:00

場所：オンライン

出席者：[会長] 五十嵐、[副会長] 久保、田上、[理事] 浅井、大浦、阪間、羽場、三浦、秋山、可児、國分、鈴木、桧垣、矢永、吉村、鷲山、[監事] 北辻、箕輪、[オブザーバー] 豊嶋厚史、渡邊瑛介

### 報告

1. 総務担当理事より、前回理事会以降の理事会活動について報告があった。1 件のメール審議があり、APSORC25 開催内容の承認について審議中とのことであった。
2. 会員担当理事欠席で資料もないため、会員動向報告は後日とした。
3. 会計担当理事より、2023 年度会計中間報告があった。今年度会費既納者 226 名で、未納者

多数。討論会を含めた単年度収支は現時点で大幅な赤字とのことであった。討論会収支は、Confit の使用料を除けばほぼ収支均衡であった。

4. インターネット・広報委員長より、会員 ML の配信状況と HP の更新について報告があった。
5. JNRS 編集委員長より論文投稿状況について報告があり、現在論文 1 報英文校閲中とのことであった。JNRS の SCOPUS 登録について問い合わせたところ、EPICS 未作成のため登録できない、とのことであった。EPICS 作成には多くの編集方針を明文化する必要がある、また編集委員が様々な国に所属していること、AI 対応方針の決定など、ハードルが高いことが判った。羽場理事が中心となって WG を組織し、和文誌も含めて検討することとした。
6. 「放射化学」編集委員長より、第 49 号を編集途中で、3 月中に冊子の発送もする予定との報告があった。
7. 新研究炉検討委員会委員長より、新試験研究炉の準備状況について報告があった。現在原子炉詳細設計の段階で、設置申請書の作成を始めている。設置場所は、当初計画の山の上は土石流の危険性があるため、もんじゅの隣に変更になった。実験装置の検討も進んでおり、放射化分析を含む 6 装置を最初に整備する計画とのことであった。
8. 鈴木理事より、第 68 回討論会（2024）の準備状況について報告があり、日程は 2024 年 9 月 23～25 日、場所は静岡県コンベンションアーツセンター／グランシップに決定した。
9. 各部会より活動状況について報告があった。若手の会では討論会中に総会と、4 年ぶりとなる懇親会を開催した。総会では、南部明弘氏に「修士卒のキャリアを考える」と題して講演いただき、好評だった。来年度 4 月からの代表世話人に庭瀬暁隆氏を選出した。教育部会では、10/5 に放射化学塾を開催し、好評だった。3 月に第 4 回教育セミナーを開催予定。部会内にロードマップ WG を立ち上げた。核化学部会では、次期理事候補、次期 JNRS 編集委員、阪大 RCNP 研究計画検討委員会の核化学分野委員の人選を行った。放射化分析部会からは、12/19 に京大複合研で放射化分析

の専門研究会を開催する予定との報告があった。核プローブ部会では、部会長として佐藤渉氏、副部会長として金子政志氏を選出した。HYPERFINE2023を無事開催し、学会からの共催金により赤字にならずに済んだとのことであった。

### 審議

- 量子ビームサイエンスフェスタの協賛について吉村理事より説明があり、異論なく承認された。
- 学会賞公募要領について可児理事より提案があり、昨年度と同様の内容で承認された。
- 次期役員候補の人選について役員推薦委員会の結果報告があった。10月に実施した会長公募の結果、1件の推薦書を受理した。10～11月に役員推薦委員会を3回開催し、理事、監事候補者を選考した。これらの役員候補者合計21名に対して役員選挙を実施することを承認した。
- 浅井理事より、役員選挙管理委員会委員の一部交代について提案があり、承認した。
- 田上副会長より、JNRS編集委員会規程の改訂について提案があり、副編集委員長の設定と、編集委員を部会から推薦するとの改訂を承認した。
- 五十嵐会長より、ワーキンググループ規程の制定について提案があり、文言の修正をしたうえで承認することとした。
- 若手の会より、若手の会規程の改訂の提案があり、世話人の再任を可能にする改訂を承認した。
- 第25回「環境放射能」研究会の開催について説明があり、事業経費5万円の支出を承認した。

### 検討

- 名誉会員候補者について、MLで候補者を募集したが推薦はなかった。名誉会員の基準について理事会内でのコンセンサスができておらず、今後検討を進めることとした。
- 学会入会勧誘パンフレットについて、阪間理事と箕輪監事で検討を進め、3つ折りのパンフレットのイメージを作成した。まずは作る

ことが大事なので、素人ベースで作成することとし、各部会にパンフレットに掲載する画像と短い文章の提供を依頼することとした。

- 鷲山理事より、若手支援に関する規程案の提案があり、議論した。若手奨励委員会規程について、本委員会の目的は基金の運営と活用に留まらず、もっと広く若手支援全般を取り扱うことを目的とすべき、との意見があった。基金運用規程は、各基金毎に作成するのではなく、規程は1つだけとし、規程の中で箇条書きに各基金について定める方が良い、との意見があった。若手奨励費制度の審査では個人の機微情報を取り扱うため、審査委員の指名や審査方法について多くの議論があった。研究費支援制度については、使途が妥当であったか事後評価すると募集要項に記載すべき、旅費支援制度の会計報告については、領収書の提出なども課すべき、という意見があった。制度設計の詳細については、今回の意見も踏まえ更にWG等で検討し、提案することとした。
- 浅井理事より、次期役員選挙は電子投票とすることを前提に検討しており、1月中に選挙を開始する予定である、との報告があった。

以上

### 3. 会員動向（令和5年7月～令和5年12月）

個人会員数（2023年12月31日現在）

会員種別	会員数
正会員	270名
学生会員	44名
名誉会員	10名
永年会員	7名
外国人特別会員	4名
合計	335名

賛助会員数（2023年12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
池上 麻衣子	京都大学複合原子力科学研究 研究所

新規入会（学生会員）	
氏名	所属
高橋 亘	明治大学工学部応用化学科
眞下 海成	金沢大学大学院自然科学研究科 物質化学専攻
田村 彩乃	東京都立大学大学院理学研究科 化学専攻
中村 大生	東京都立大学大学院理学研究科 化学専攻
田中 皐	金沢大学大学院自然科学研究科 物質化学専攻
細川 浩由	金沢大学大学院自然科学研究科 物質化学専攻
尹 鳳	長岡技術科学大学大学院
大鳥 慎治	金沢大学大学院自然科学研究科 物質化学専攻
石井 勇希	金沢大学大学院自然科学研究科 物質化学専攻
住吉 剛	中央大学大学院理工学研究科応 用化学科
Thien Ngoc Bui	総合研究大学院大学加速器科学 専攻放射線科学センター

退会（名誉会員）	
氏名	
藤原 一郎	

退会（正会員）	
氏名	氏名
川村 秀久	三頭 聰明

所属変更（令和 5 年 1 月～ 12 月）	
変更項目	変更件数
所属（機関・役職）	142 名
メールアドレス	23 名
部会	48 名
その他（住所等）	142 名
変更会員数	176 名

令和 5 年はオンライン会員管理システム「SMOOSY」の導入後の移行期間のため変更件数を表記していません。令和 6 年以降は所属変更の詳細を報告する予定です。

## 「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「放射化学」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、編集担当理事 1 名、並びに編集委員約 5 名で構成する。編集委員長は、前委員長の推薦により選任され、理事会の承認を得て、会長が任命する。編集委員は、編集委員長の推薦により選任され、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」の編集およ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

(「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。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** 本規定の改定は理事会の決議による。

付則 この規程は、2023 年 4 月 1 日から施行する。

### 「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

〒 770-8509 徳島県徳島市蔵本町 3-18-5  
徳島大学医学部保健学科 阪間 稔 編集委員長  
Fax: 088-633-9862  
e-mail: [minorusakama@tokushima-u.ac.jp](mailto:minorusakama@tokushima-u.ac.jp)  
[houshakagaku@radiochem.org](mailto:houshakagaku@radiochem.org)

### 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 49 号

令和 6 年 (2024 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：阪間 稔、委員：佐藤 渉、鈴木 達也、井上 睦夫、藤 暢輔、  
富田 純平

連絡先：〒 770-8509 徳島県徳島市蔵本町 3-18-15

徳島大学大学院 医歯薬学研究部保健科学部門 放射線理工学分野  
阪間 稔 (e-mail: minorusakama@tokushima-u.ac.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  
簡単にできる



**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

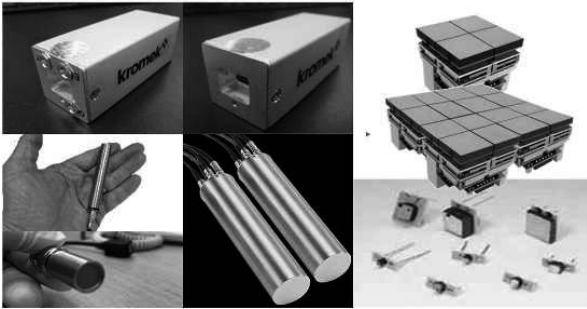
目の水晶体被ばく測定  
「DOSIRIS® モニタリングサービス」  
目のすぐ近くで装着でき  
各種防護眼鏡にも対応



DOSIRIS: IRBMの登録商標 (国特許番号1293048) です

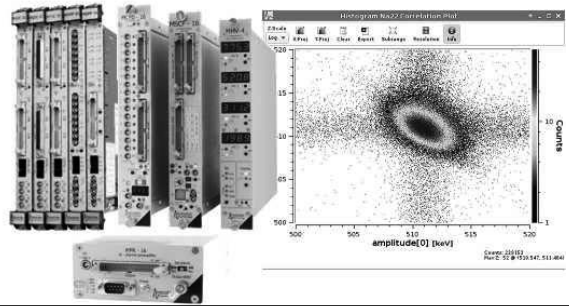
**kromek**  
detect image identify

CdZnTe 半導体検出器



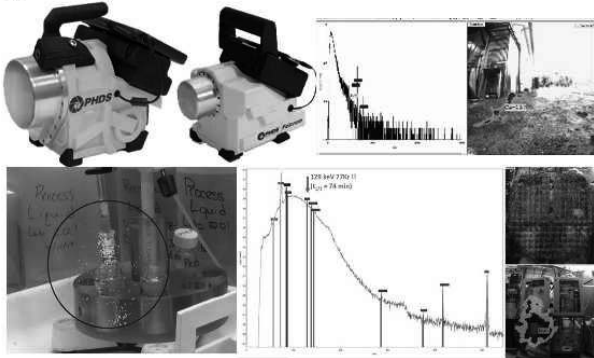
**amesytec**

NIM/VME Electronics



**PHDS**  
Gamma Ray Imaging Detectors

Gamma Imager & Portable Ge



**AMPT**

X-ray detector(SDD/Si-pin/CdTe)



仁木工芸株式会社

〒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



## ラジオアイソトープ(RI)取扱施設

RADIOISOTOPE(RI) HANDLING FACILITY

## 加速器取扱施設

ACCELERATOR HANDLING FACILITY

## 原子力施設

NUCLEAR POWER FACILITY

放射線モニタリング  
施設の総合管理  
施設・設備の設計・監理  
放射能分析・測定  
管理区域解除工事  
コンサルタント業務  
PET被験者管理システム

放射線管理  
除染工事  
放射能分析測定  
原子力・核燃施設 D&D技術開発・事前調査・工事  
コンサルタント業務

特殊施設管理技術の研究開発  
放射線防護用品と機器の開発  
除染関連技術の研究開発  
研究・開発・調査業務の受託

## 技術開発・研究

TECHNOLOGY STUDY AND DEVELOPMENT

**ALARA**  
As Low As Reasonably Achievable

JAPAN ENVIRONMENT RESEARCH CO., LTD.

**株式会社 日本環境調査研究所**

ホームページ <http://www.jer.co.jp/>

本社：〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6 丁目 24-1  
技術開発研究所：〒342-0008 埼玉県吉川市旭 8 番 3  
青森営業所：Tel.0175-75-2130 東京営業所：Tel.048-991-9461  
仙台営業所：Tel.022-715-6081 静岡営業所：Tel.0537-86-7176  
柏崎営業所：Tel.0257-21-4868 掛川オフィス：Tel.0537-28-8181  
福島営業所：Tel.0244-26-5245 名古屋営業所：Tel.052-588-5875  
茨城営業所：Tel.029-860-5073 大阪営業所：Tel.06-4963-2500

Tel.03-5322-2271 Fax.03-5322-2272  
Tel.048-991-9461 Fax.048-991-9460

作業環境測定機関11-4(放射性物質) ISO9001:2008認証

非密封放射性同位元素取扱施設(技術開発研究所)

管工事業/建具工事業/とび・土木工事業/機械器具設置工事業

一般労働者派遣事業 高度管理医療機器等販売業・賃貸業

## 富士電機の放射線測定器

**FE 富士電機**

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  
R I 排水管理システム  
出入管理システム  
非密封 R I 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](mailto: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



電気冷却式  
クライオスタット  
(CPS)

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  
機種同定  
サーベイメータ  
(SPIR-Ace  
-GenieXport)

デジタルシグナル  
アナライザ  
(DSA-LX)

可搬型HPGe  
スペクトロメータ  
(Aegis)

低バックグラウンド  
α/β自動計測システム (S6LB)

サービス&サポート、  
トレーニング

ガンマ線分析システム  
(ISOCS)

多チャンネル  
低バックグラウンド  
α/β計測システム  
(LB4200)



**MIRION**  
TECHNOLOGIES

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

ミリオンテクノロジーズ・キャンペラ (株)  
E-mail: [jp-sales@mirion.com](mailto:jp-sales@mirion.com)  
U R L: [www.mirion.com/jp](http://www.mirion.com/jp)



# 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

**登録運搬物確認機関**

承認された積載方法による  
輸送の運搬物確認

**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61回 アイソトープ・放射線研究発表会

会 期：2024年7月3日(水)～5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8日(月)～6月14日(金)12時) 7,000円(税込)

後期登録(6月24日(月)～7月5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://confit.atlas.jp/guide/event/jrias2024/top>



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、トリチウム、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対応できます。

IAEAが主催する国際的な相互比較分析プログラムなど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)として登録しています。

### 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、公的マニュアル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、スポーツサプリメント中のドーピング禁止物質の分析、安定同位体分析や原子炉の廃炉関連の難測定核種の迅速分析法の開発などを行っています。

**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 FAX: 043-423-5372

e-mail: [koho@jcac.or.jp](mailto: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

国内メーカーによる ワンストップ! トータルソリューション!

TechnoAP



シンチレーション検出器  
XC700



半導体検出器用  
チャージアンプ  
APG1603



入力8ch.  
デジタルパルスプロセッサ  
APU8108-14



LaBr<sub>3</sub>(Ce)検出器  
サーベイメータ  
TS215



CdTe検出器  
XCT101001



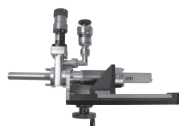
入力4ch. USB駆動  
MCA  
APG7400A



入力16ch.  
デジタルシグナルプロセッサ  
APU8016A



陽電子消滅寿命  
ドップラー拡がり測定装置  
DPALMS-LCA



シリコンドリフト検出器  
XSDD50-01



出力2ch.  
ランダムパルスジェネレータ  
APU6001



入力8ch.  
高計数スケーラ  
APU2508

ハードウェア・ソフトウェア開発、ご相談お待ちしております。

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](mailto: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。

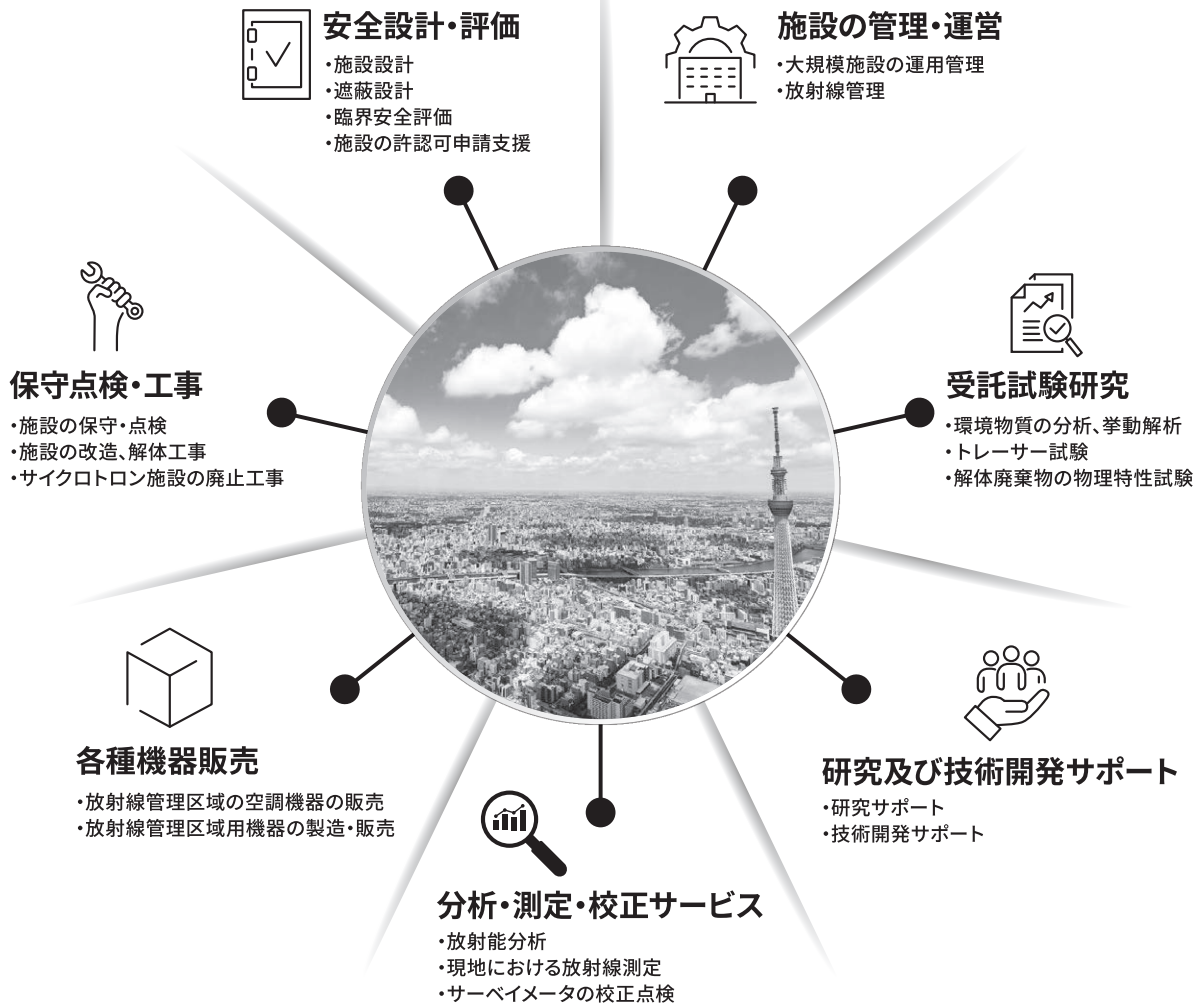


東京パワーテクノロジー株式会社  
環境事業部 分析センター

〒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](mailto: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](http://www.radiochem.org/community/toiawa_o.html)



