

放射化学

第45号

原著

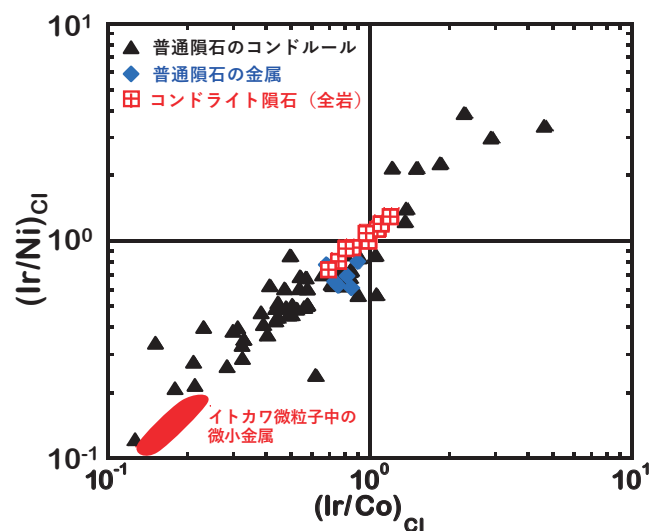
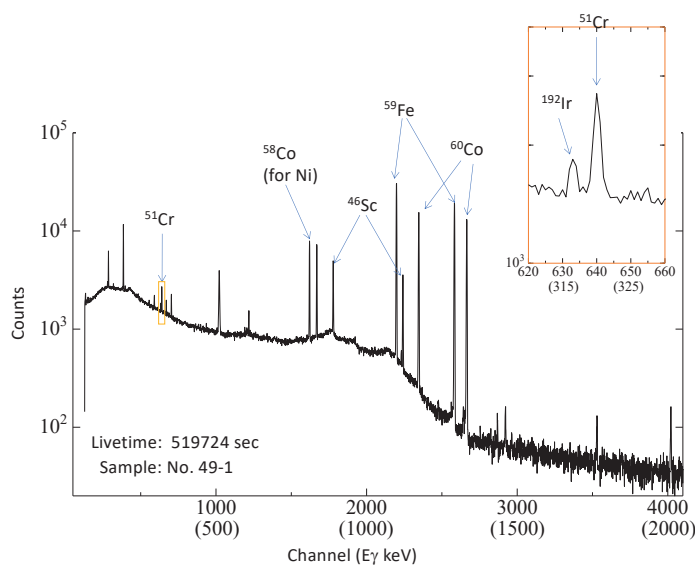
福島第一原子力発電所事故後の多摩川集水域における河川水中溶存態放射性セシウムの濃度分布

特集

2021年学会賞

日本放射化学会第65回討論会 若手優秀発表賞受賞者による研究紹介

「放射化学の夢ロードマップ」について



放射化学

第 45 号

令和 4 年 (2022 年) 3 月 20 日

目次

原著

- 福島第一原子力発電所事故後の多摩川集水域における河川水中溶存態放射性セシウムの濃度分布
(猪瀬 聡史、萩原 健太、青林 諒、小池 裕也)…………… 1

特集

学会賞

- 中性子放射化分析法の高度化と宇宙地球化学研究への応用 (海老原 充) …………… 9

若手優秀発表賞

- アクチノイド核を標的としたアイソマー核分光 (杉山 晃一) …………… 25
EXAFS による Ra の水和状態と粘土鉱物への吸着状態の解明 (山口 瑛子) …………… 28
負ミュオンによる非破壊イメージングに向けた 2 mm 厚 CdTe 半導体二次元検出器の開発
(邱 奕寰)…………… 31

特集

- 「放射化学の夢ロードマップ」について (篠原 厚)…………… 33

会議報告

- 日本放射化学会第 65 回討論会 (2021) 実施報告 (大浦 泰嗣、羽場 宏光)…………… 39

情報プラザ (国際国内会議)

- …………… 44

学位論文要録

Dose Assessment on the Mean Absorbed Estimates Derived from the Simple Approach
Method Applying Marinelli-Quimby's Formula for Ambient Risk Organs to Thyroid
Uptake in the Administered ^{131}I Radiopharmaceutical of Graves' Disease Using PHITS and
ICRP Reference Computational Voxel Phantom

(川口 (松本) 絵里佳)…………… 46

学会だより…………… 48

「放射化学」規程など…………… 51

「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

探査機はやぶさによって小惑星イトカワから回収された微粒子 (約 $3.3\ \mu\text{g}$) の INAA スペクトル (左)。約 $34\ \text{fg}$ の Ir が太陽系初期の物質の挙動を解明するヒント (右) を与えてくれた (Ebihara et al., Science 333, 1119 (2011) より)。

原 著

福島第一原子力発電所事故後の多摩川集水域における 河川水中溶存態放射性セシウムの濃度分布

Distribution of dissolved radioactive cesium in river water at the Tama river watershed after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident

猪瀬 聡史¹、萩原 健太¹、青林 諒¹、小池 裕也^{2,*}

¹ 明治大学大学院理工学研究科：〒 214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

² 明治大学理工学部：〒 214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

Satoshi INOSE¹, Kenta HAGIWARA¹, Ryo AOBAYASHI¹, Yuya KOIKE²

¹ Graduate School of Science and Technology, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, 214-8571, Japan

² School of Science and Technology, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, 214-8571, Japan

(2021年12月16日受理)

要旨

福島第一原子力発電所事故により放出された放射性セシウム (¹³⁴Cs および ¹³⁷Cs) は、多摩川集水域でも検出されている。濃度分布把握のため、2013年6月から2014年9月にかけて河川水中溶存態放射性セシウムの挙動を調査した。上流域では溶存態放射性セシウム濃度が0.78 mBq/L以下であった。一方、下流域では溶存態¹³⁴Csと¹³⁷Csはそれぞれ1.34～5.82 mBq/L、2.99～13.90 mBq/Lであった。多摩川集水域では、上流域にある森林地帯からの再懸濁や溶出による溶存態放射性セシウムの濃度上昇は観測されなかった。中流域から下流域にかけて溶存態放射性セシウム濃度の上昇がみられたため、市街地から流入していると考えられる。

キーワード

多摩川集水域、溶存態放射性セシウム、河川水、水質データ

Key words

The Tama river watershed, Dissolved radioactive cesium, River water, Water quality data

1. 緒言

東京電力株式会社福島第一原子力発電所(FDNPP)事故により、原子炉内から大量の放射性核種が大気中に放出された¹⁵⁾。放出された放射性核種は、ブルームとなって移動・拡散したと考えられている。これは、福岡⁶⁾、大阪⁷⁾、水戸⁸⁾、川崎⁸⁾、京都⁹⁾、筑波¹⁰⁻¹²⁾、高崎¹³⁾、和光¹⁴⁾、北

海道¹⁵⁾、関東圏^{16,17)}で行われた大気粉塵試料中放射性核種のモニタリングより判明している。また、日本原子力研究開発機構¹⁸⁾、高エネルギー加速器研究機構¹²⁾、産業技術総合研究所¹⁹⁾、日本分析センター²⁰⁾、文部科学省²¹⁾が行った空間線量率の測定結果からも確認できる。大気中に放出された放射性核種は降雨等により湿性沈着し、福島県北東

* Corresponding author, e-mail: koi@meiji.ac.jp

部を中心に広範囲の陸域で放射能汚染が確認された^{22,23)}。事故から約10年が経過し、現在は短半減期核種である¹³¹I (半減期: 8.023日) や¹³²Te (半減期: 3.20日) は検出できなくなっている。一方で、¹³⁴Cs (半減期: 2.065年) と¹³⁷Cs (半減期: 30.07年) は土壌^{24,29)}、森林^{30,32)}、大気、河川³³⁾ など様々な環境で検出されている。放射性セシウムの中での挙動や、将来どのような移行を示すのかを調査するためにも、中長期的なモニタリングが必要である。

陸域に拡散した放射性核種は約7割が森林に沈着した³³⁾。森林内では、樹冠や地表面に沈着する。この内、樹冠に沈着したものは、降雨や落葉等により地表面へ移行し、主に表層土壌に保持されるが、鉛直方向への浸透は小さい³⁴⁾ ことがわかっている。表層土壌中に保持された放射性セシウムは、降雨などにより森林表層から流れ出した土壌と共に河川へと流れ込んでいると考える。河川水中に流れ込んだ放射性核種はイオンの状態として存在する溶存態、浮遊物質に付着した懸濁態として河川水中を移行する。河川水は浄水や灌漑水にも利用されることから、汚染地域を拡大させる二次拡散だけでなく、摂取することによりヒトに対する影響といった観点から注視する必要がある。河川水中放射性セシウムの挙動に関する研究は、FDNPPの近傍に位置する高線量地域である阿武隈川集水域^{35,37)} およびその周辺河川^{38,40)} を中心に行われている。しかし、関東地方の河川におけるモニタリング例は多くない。森林地帯や市街地を有する、河川集水域における放射性セシウムの移行状況を定量的に把握することは非常に重要であると考えられる。また、迅速な除染対策を講じるにあたって、河川水中の放射性セシウムの挙動を解明することは有用である。

FDNPPから南西に約250km離れたところに位置する多摩川集水域を研究対象とした。多摩川は笠取山を原流域として、山梨県、東京都、神奈川県を流れ、東京湾に流入する関東の一級河川である。全長は138km、流域面積は1240km²であり、上流部に奥多摩湖、支流には山地河川の秋川や浅川、都市河川の大栗川や野川などがある。多摩川集水域の土地利用としては、本流上流部で96%が山林、下流部では35%が市街地となっており⁴¹⁾、

上流から下流へかけて河川周辺の環境が変化している。これまでの調査により、多摩川集水域での河川底質中放射性セシウム濃度は、本流の上中流域に比べ、支流と本流の下流域で高い傾向にあることがわかっている⁴²⁾。本研究では、環境中で移行しやすい溶存態放射性セシウムに着目して、河川水中での挙動を観測した。

2. 実験

2.1 多摩川河川水試料の採取

河川水試料のサンプリング地点は、「放射能測定法シリーズ16環境試料採取法」⁴³⁾を参考に選定した。多摩川集水域におけるサンプリング地点をFig. 1に示す。試料採取は、2013年6月11日に丹波川丹波村道の駅付近(U1)、小菅川小菅村役場付近(U2)、奥多摩湖丹波川寄り(U3)、日原川本流合流地点(U4)、秋川檜野街道荷田子交差点付近(M1)、多摩水道橋付近(D2)、2013年8月2日に二子玉川ゲートボール練習場付近(D3)、丸子橋ゴルフ練習場付近(D4)、多摩大橋川崎リバーサイドゴルフ練習場付近(D5)、六郷土手味の素工場川崎事業所付近(D6)、2013年11月14日に青梅澤野井櫛かざし美術館付近(U5)、友田町リバーサイドゴルフパーク付近(U7)、浅川萩原橋架橋下(M4)、多摩大橋高架下(M3)、多摩市立多摩第一小学校付近河川敷(M6)、2014年9月16日に小作取水堰付近長淵遊泳場(U6)、秋川ふれあいランドキャンプ場(M2)、浅川都道503号線新井橋架橋下(M5)、多摩川原橋北付近(D1)の計19地点にて実施した。

河川水は20Lポリエチレン製容器を用いて、表層水を100L直接採水した。本研究では分析対象核種を放射性セシウムとしているため、サンプリング直後に酸類の溶液は加えずに試料容器を密封した⁴³⁾。

2.2 水質測定

サンプリング地点の水質測定は、マルチ水質チェッカー(HORIBA, U-52)を用いた。水質データとして、電気伝導率、濁度、全溶存固形物量、塩分濃度をサンプリング時に測定した。

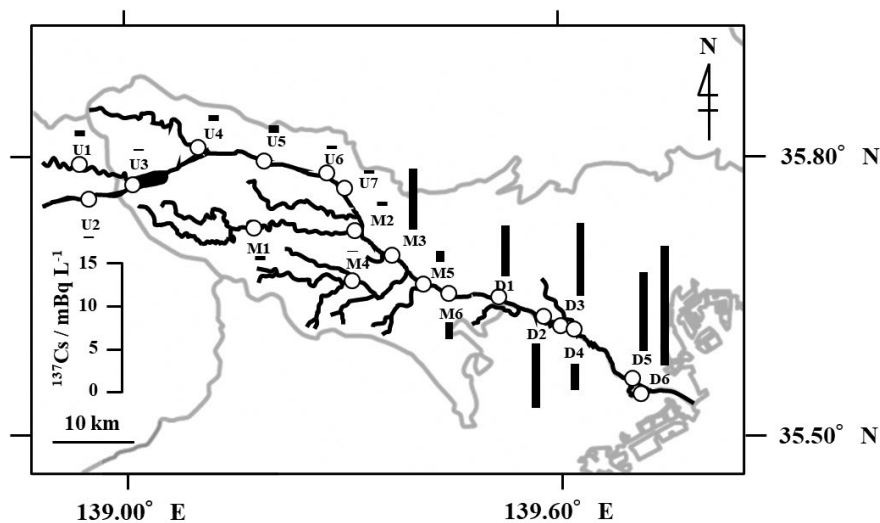


Fig. 1 Map of sampling point and distribution of dissolved ^{137}Cs in river water sampled at Tama river watershed. Black line: Tama river and tributary; Gray line: Prefectural border; Black bar: activity concentration of ^{137}Cs .

2.3 河川水の放射能分析

河川水試料は、ろ紙 (ADVANTEC, No.5C, 保留粒子径 $1\ \mu\text{m}$) を用いて吸引ろ過を行い、懸濁物質を取り除いた。懸濁物質を除去したろ液 $5\ \text{L}$ に対して、 $12\ \text{mol/L}$ 塩酸 $30\ \text{mL}$ とリンモリブデン酸アンモニウム (AMP) $2\ \text{g}$ を加えて1時間攪拌した⁴⁴⁾。一晚静置させてAMPが沈降してからデカンテーションを行った。AMPは定量ろ紙 (ADVANTEC, No.5B, 保留粒子径 $4\ \mu\text{m}$) を用いた自然ろ過によりろ紙上に回収した。ろ紙は、ねじ口U形容器 (関谷理化学工業, U-8) に詰めて溶存態試料とした。分析には河川水試料 $100\ \text{L}$ を供した。また、本研究で用いたAMP法による溶存態放射性セシウムの回収率を 100% とした。

溶存態試料中の ^{134}Cs および ^{137}Cs は、高純度 Ge 半導体検出器 (Princeton Gamma-Tech, IGC-10200NPR) で約1~2日間 γ 線測定することで放射能分析した。 ^{134}Cs および ^{137}Cs の検出効率を ^{152}Eu 標準線源 (日本アイソトープ協会、外径: $25\ \text{mm}\ \phi$, 高さ: $6\ \text{mm}\ \text{h}$) による検出効率曲線を、試料形状と同一に充填した塩化カリウム (KCl, 和光純薬, 99.9%) 中の ^{40}K を用いて算出した検出効率まで平行移動することで得られた検出効率曲線を用い算出した⁴⁵⁾。本研究では、 ^{134}Cs によるサム効果の補正は行っていない。この手法による定量値の正しさは日本分析化学の土壤標準試料 JSAC

0471 を測定し評価を行った。測定値が認証値と誤差範囲内で一致したことからこの手法で放射能分析を行うことが可能である。検出下限値は、バックグラウンド測定により得られた計数値の標準偏差の3倍から算出した。

3. 結果と考察

3.1 放射性セシウム濃度と水質データの観測結果

サンプリング日を基準に半減期補正をした溶存態 ^{134}Cs および ^{137}Cs の放射能濃度を Table 1 に示す。上流域 (U1~U7) において ^{134}Cs および ^{137}Cs はそれぞれ検出下限以下 ($0.06\ \text{mBq/L}$) ~ $0.39\ \text{mBq/L}$ 、 $0.23\ \sim 0.78\ \text{mBq/L}$ の範囲であった。中流域 (M1~M6) ではそれぞれ検出下限以下 ($0.06\ \text{mBq/L}$) ~ $2.45\ \text{mBq/L}$ 、 $0.13\ \sim 7.10\ \text{mBq/L}$ の範囲であった。下流域 (D1~D6) ではそれぞれ $1.34\ \sim 5.82\ \text{mBq/L}$ 、 $2.99\ \sim 13.90\ \text{mBq/L}$ の範囲であった。多摩川集水域にて観測された放射能濃度の最大値と最小値の比は ^{134}Cs および ^{137}Cs でそれぞれ 39 倍、107 倍となった。2013 年から 2014 年の同一採取日に宿河原 (D2) で経時変化を観測したところ、溶存態 ^{137}Cs は $5.29\ \sim 8.85\ \text{mBq/L}$ の濃度範囲であった。1 年間の濃度変動が上流から下流にかけての濃度差と比較して十分小さい値であったため、採取日が異なるが多摩川集水域での濃度分布とした。2011 年 3 月 15 日を基準に減衰補正を行った $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$

Table 1 Activity concentration of ^{134}Cs and ^{137}Cs in river water sampled at Tama river watershed in 2013-2014

Sampling point	Sampling date (year/month/day)	Distance from estuary/ km	Activity concentration / mBq L ⁻¹		
			^{134}Cs	^{137}Cs	$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ ※
Taba River (U1)	2013/6/11	108.4	0.30 ± 0.04	0.67 ± 0.07	0.91
Kosuge River (U2)	2013/6/11	107.6	0.15 ± 0.03	0.30 ± 0.05	0.99
Okutama Pond (U3)	2013/6/11	99.0	N.d(0.06)	0.23 ± 0.04	-
Nippara River (U4)	2013/6/11	85.0	0.39 ± 0.05	0.63 ± 0.07	1.23
Oume sawano (U5)	2013/11/14	71.8	0.37 ± 0.06	0.78 ± 0.09	1.09
Kosaku (U6)	2014/9/16	59.5	0.12 ± 0.03	0.35 ± 0.06	1.04
Oume tomoda (U7)	2013/11/14	56.4	N.d(0.06)	0.42 ± 0.06	-
Akigawa River(Upper) (M1)	2013/6/11	67.4	N.d(0.06)	0.59 ± 0.06	-
Akigawa River(Lower) (M2)	2014/9/16	51.0	N.d(0.06)	0.55 ± 0.07	-
Akishima (M3)	2013/11/14	44.6	2.45 ± 0.13	7.10 ± 0.24	0.79
Asagawa River(Upper) (M4)	2013/11/14	49.9	N.d(0.06)	0.13 ± 0.03	-
Asagawa River(Lower) (M5)	2014/9/16	38.9	0.38 ± 0.06	1.31 ± 0.12	0.87
TamadaichiE.S (M6)	2013/11/14	35.0	0.76 ± 0.07	2.00 ± 0.13	0.88
Tamagawarabashi (D1)	2014/9/16	29.3	2.08 ± 0.13	5.94 ± 0.23	1.05
Shukugawara (D2)	2013/6/11	22.8	3.36 ± 0.15	7.59 ± 0.25	0.89
Futagotamagawa (D3)	2013/8/2	19.8	4.00 ± 0.17	8.40 ± 0.27	1.00
Marukobashi (D4)	2013/8/2	19.0	1.34 ± 0.10	2.99 ± 0.16	0.94
Kawasaki Riverside (D5)	2013/8/2	9.1	4.46 ± 0.18	8.91 ± 0.29	1.06
Ajinomoto (D6)	2013/8/2	5.1	5.82 ± 0.23	13.90 ± 0.37	0.88

N.d;Not detected, 0;Detection limit, ※ ;Activity concentration was corrected at the time of March 15, 2011.

の値は 0.79 ~ 1.23 の範囲であり、FDNPP 事故由来の放射性セシウムであると考えられる。河川水の水質データと河口からの距離の関係を Fig. 2 に示す。森林地帯のダム湖である U3 においては濁度が増大した。中流域の M3 で電気伝導度、濁度、塩分濃度、全溶存固形物量の上昇が確認された。M3 では、サンプリング地点付近に下水処理施設が存在する。下水処理施設の放流水は電気伝導度が上昇することが報告されている⁴⁶⁾。また、濁度と全溶存固形物量は、放流水と本流が合流した際底質の巻き上げ等により濃度上昇したと考えられる。汽水域である D6 での電気伝導度、濁度、全溶存固形物量、塩分濃度は他の地点よりも大きいことが確認された。これは東京湾からの海水の侵入が要因であると考えられる。多摩川集水域では、上流から下流にかけて、電気伝導度、濁度、塩分濃度、全溶存固形物量が高くなる傾向となった。

溶存態放射性セシウム濃度と水質データとの相関図を Fig. 3 に示す。相関係数は、電気伝導度、濁度、塩分濃度、全溶存固形物量それぞれで、 $r = 0.780$ 、 $r = 0.493$ 、 $r = 0.784$ 、 $r = 0.780$ となった。溶存態放射性セシウム濃度は、電気伝導度、塩分濃度、全溶

存固形物量と、強い正の相関があることがわかった。

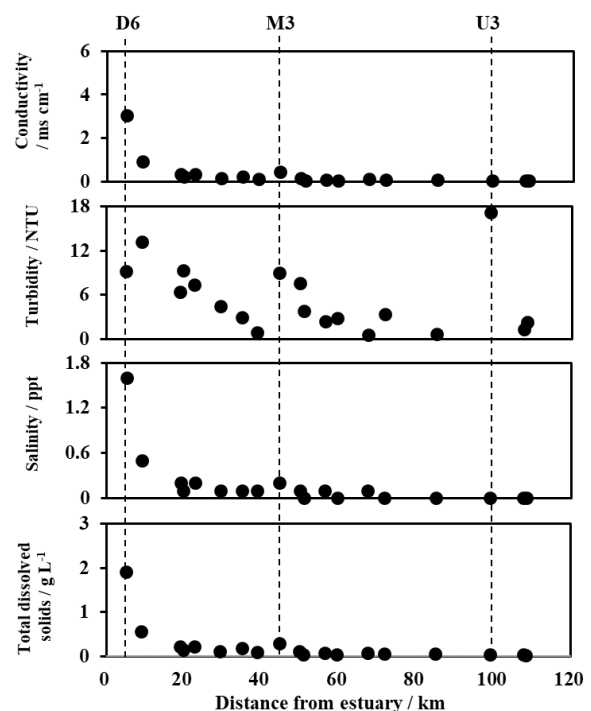


Fig. 2 Water quality parameter of river water sampled at Tama river watershed in 2013 to 2014.

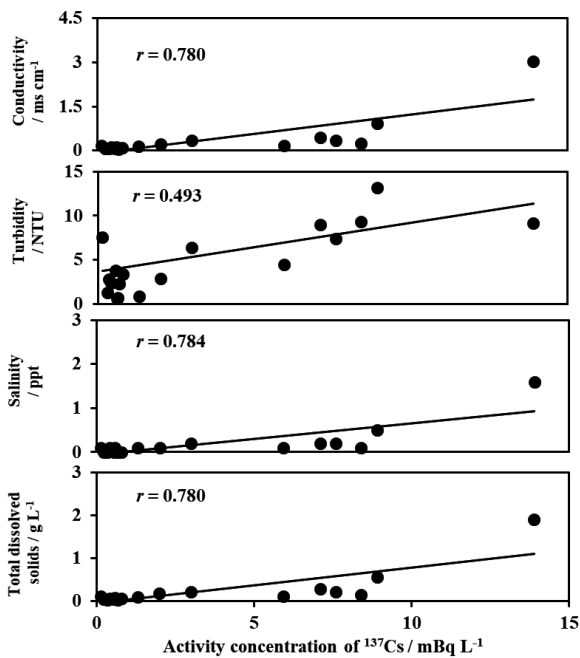


Fig. 3 Relationship between activity concentration of ^{137}Cs and water quality parameter.

3.2 河川水中放射性セシウムの上流から下流への移行

溶存態放射性セシウム濃度と河口からの距離の関係を示す。多摩川集水域における溶存態 ^{134}Cs と ^{137}Cs は、中流域から下流域、河口付近へと流れが進むにつれて濃度上昇が確認された。

溶存態放射性セシウム濃度の変動は、Yoshimuraら³⁷⁾が阿武隈川集水域において、重度に汚染している山岳地帯周辺の河川水中の溶存態濃度は高くなると報告しており、汚染された森林や山岳地からの再懸濁・溶出などによる濃度上昇が考えられる。しかし、2011年10月に実施された航空機モニタリングの結果、多摩川上流域においてFDNPP周辺のような重度に汚染された地点は確認されなかった²¹⁾。また、上流域の放射性セシウム濃度は極低濃度で推移している。これらのことから、多摩川源流の森林地帯には、FDNPP事故初期における放射性物質の沈着量は少なく、重度に汚染されているとは考えにくい。加えて、溶存態放射性セシウムは事故後1年ほどで大きく減少することが報告³⁵⁾されている。そのため、多摩川における溶存態放射性セシウム濃度上昇は森林からの再懸濁・溶出によるものとは考えにくい。濃度上昇が観測された多摩川中流域以降では、上流と比べて流域に市街地の割合が増えている⁴¹⁾。流域に市街地が増えると、溶存態放射性セシウム濃度が上昇し⁴⁷⁾、さらに下水処理施設の存在がそれらに寄与している⁴⁸⁾との報告もある。市街地は、家屋や道路、街路樹など、様々な土地利用がある。建材として、アスファルトやコンクリートが使われていることが多いため、放射性セシウムは下部へ浸透せず表面上に留まる⁴⁹⁾。建材に付着した放射性核種

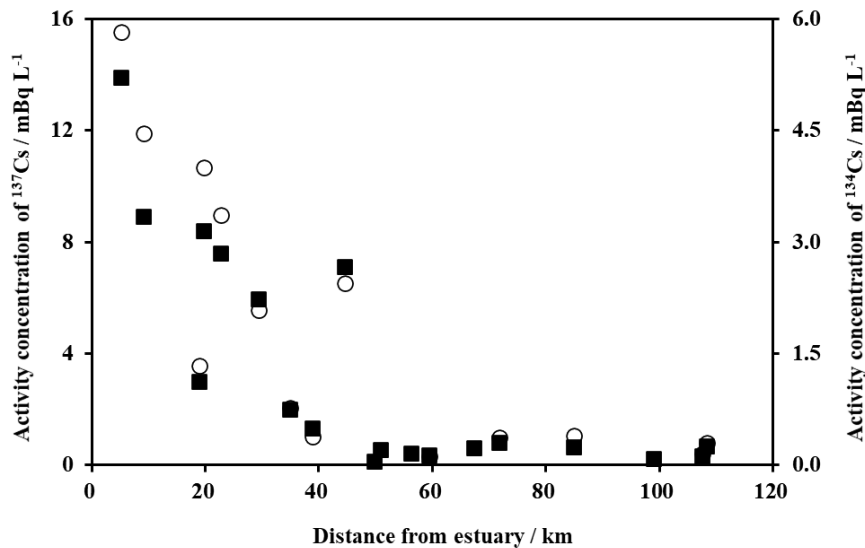


Fig. 4 Activity concentration of ^{137}Cs (■) and ^{134}Cs (○) in river water sampled at Tama river watershed in 2013 to 2014.

は、風雨等により、洗い流され地面へと流出する。多摩川集水域では、河口から上流へ30 km周辺では流水の約6割が下水道放流水となっている⁵⁰⁾。多摩川でも市街地の割合が増加する中流域以降から、溶存態放射性セシウム濃度が上昇する傾向にある。特に中流域の地点M3は下水道処理施設のすぐ下流であり、他の中流域(M1～M6)と比較して溶存態放射性セシウム濃度が高くなっている。下水処理施設は市街地に降った雨水などを集め、河川へと放流している。そのため、市街地に沈着した放射性セシウムが集積しやすいと推察される。前述のように中流域の河川水は、上流域からの移行を直接受けず、市街地からの流れ込みなど都市型河川特有の挙動を示すと考える。水質データのそれぞれの測定値についても下流域で著しい上昇が確認できる。河口に近い地点では、海水の流入が起こりえる。海水に懸濁物質が触れると海水中に放射性セシウムが溶出することが示唆されている⁵¹⁾。したがって、河口に近いD5、D6は満潮・干潮などによる東京湾からの海水の侵入が放射性セシウム濃度の上昇に寄与しているとも考えられる。多摩川集水域において、溶存態放射性セシウムは市街地から流入している可能性が高いと推察した。

4. 結言

FDNPP事故から数年が経過した多摩川集水域で放射性セシウムの濃度分布を観測した。観測の結果、上流域における溶存態放射性セシウムは0.78 mBq/L以下と極微量であった。FDNPP事故から数年が経過し、沈着した放射性セシウムはそのほとんどが流出、または鉱物や有機物に吸着した形態へと移行していると考えられる。一方で、市街地の増加と共に中流域以降から放射性セシウム濃度の上昇がみられた。このことから、溶存態放射性セシウムは、森林・山岳地帯からの流出による再懸濁・溶出の過程で河川へ流入するのではなく、市街地からの流入による寄与の方が高いと考えた。また、事故から数年が経過しても中流域以降で溶存態放射性セシウムが検出されていることから、市街地からの流入が続いていることが示唆された。

謝辞

本研究の実施にあたり、明治大学名誉教授の中村利廣博士のご指導、明治大学大学院在学時にご尽力いただいた越智康太郎氏（現 日本原子力研究開発機構福島研究開発部門および東京大学大学院新領域創成科学研究科）および明治大学放射化学研究室メンバーのご協力に対して心からの謝意を表します。

引用文献

- 1) 首相官邸原子力災害対策本部一原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書－東京電力福島原子力発電所の事故について－, IV. 福島原子力発電所等の事故の発生と進展 **2011**, <https://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/pdf/04-accident.pdf> (accessed September 25, 2021).
- 2) 原子力安全基盤機構, “東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機、2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価”, JNES-RE-Report Series **2011**, JNES-RE-2011-0002.
- 3) 東京電力株式会社一福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大气中への放出量の推定について **2012**, http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120524j0105.pdf (accessed September 25, 2021).
- 4) 鶴田治雄; 中島映至 地球科学 **2012**, 46, 99-111.
- 5) Morio, Y.; Ohara, T.; Watanabe, M.; Hayashi, S.; Nishizawa, M. *Environ. Sci. Tech.* **2013**, 47, 2314-2322.
- 6) Momoshima, N.; Sugihara, S.; Ichikawa, R.; Yokoyama, H. *J. Environ. Radioact.* **2012**, 111, 28-32.
- 7) 山崎秀夫 *RADIOISOTOPES* **2014**, 63, 299-316.
- 8) Zhang, Z.; Ninomiya, K.; Yamaguchi, Y.; Kita, K.; Tsuruta, H.; Igarashi, Y.; Shinohara, A. *Environ. Sci. Tech.* **2018**, 52, 9917-9925.
- 9) 五十嵐泰人; 宮武秀夫; 戸崎充男 ぶんせき **2011**, 439, 387-392.
- 10) Adachi, K.; Kajino, M.; Zaizen, Y.; Igarashi Y. *Sci. Rep.* **2013**, 3, No. 2554.

- 11) 金井豊 地震調査研究報告 **2012**, 63, 107-118.
- 12) 高エネルギー加速器研究機構—環境放射線の測定結果 (1) つくば市で観測された空气中放射性物質の種類と濃度の測定結果 **2011**, <http://www.kek.jp/ja/Research/ARL/RSC/Radmonitor/> (accessed September 25, 2021).
- 13) 米沢伸四郎; 山本洋一 ぶんせき **2011**, 440, 451-458.
- 14) Haba, H.; Kanaya, J.; Mukai, H.; Kambara, T.; Kase, M. *Geochem. J.* **2012**, 46, 271-278.
- 15) 北海道大学大学院工学研究院量子理工学部門; 北海道大学 原子力系研究グループ—北海道大学工学部における空間線量率 **2011**, <http://www2.qe.eng.hokudai.ac.jp/nuclear-accident/dose/dose.htm> (accessed September 25, 2021).
- 16) Tsuruta, H.; Oura, Y.; Ebihara, M.; Ohara, T.; Nakajima, T. *Sci. Rep.* **2014**, 4, No. 6717.
- 17) Oura, Y.; Ebihara, M.; Tsuruta, H.; Nakajima, T.; Ohara, T.; Ishimoto, M.; Katsumura, Y.; Nitta, W. *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **2015**, 15, 1-12.
- 18) 日本原子力研究開発機構—原子力機構各拠点のモニタリングポスト (代表点) における線量率の推移 **2011**, <https://www.jaea.go.jp/jishin/monitor.pdf> (accessed September 25, 2021).
- 19) 日本原子力研究開発機構放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト—つくばセンター放射線測定結果. 空气中的線量測定結果 **2013**, <https://emdb.jaea.go.jp/emdb/portals/1010102000/> (accessed September 25, 2021).
- 20) 日本分析センター—空間放射線量率 (2011年3月～2013年3月) **2013**, <https://www.jcac.or.jp/site/senryo/senryoritu-kekka.html> (accessed September 25, 2021).
- 21) 文部科学省—放射線量等分布マップ拡大サイト **2011**, <http://ramap.jaea.go.jp/map/> (accessed September 25, 2021).
- 22) Kinoshita, N.; Sueki, K.; Sasa, K.; Kitagawa, J.; Ikarashi, S.; Nishimura, T.; Wong, Y.S.; Satou, Y.; Handa, K.; Takahashi, T.; Sato, M.; Yamagata, T. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.* **2011**, 108, 19526-19529.
- 23) Saito, K.; Tanihata, I.; Fujiwara, M.; Saito, T.; Shimoura, S.; Otsuka, T.; Onda, Y.; Hoshi, M.; Ikeuchi, Y.; Takahashi, F.; Kinouchi, N.; Saegusa, J.; Seki, A.; Takemiya, H.; Shibata, T. *J. Environ. Radioact.* **2015**, 139, 308-319.
- 24) Takahashi, J.; Tamura, K.; Suda, T.; Matsumura, R.; Onda, Y. *J. Environ. Radioact.* **2015**, 139, 351-361.
- 25) Terashima, I.; Shiyomi, M.; Fukuda, H. *J. Plant Res* **2014**, 127, 43-50.
- 26) Yoshimura, K.; Onda, Y.; Kato, H. *J. Environ. Radioact.* **2015**, 139, 362-369.
- 27) Matsunaga, T.; Koarashi, J.; A.-Andoh, M.; Nagao, S.; Sato, T.; Nagai, H. *Sci. Total Environ.* **2014**, 447, 301-314.
- 28) Vandebroeka, L.; Heesa, M.V.; Delvaux, B.; Spaargaren, O.; Thirya, Y. *J. Environ. Radioact.* **2012**, 104, 87-93.
- 29) Kozai, N.; Ohnuki, T.; Arisaka, M.; Watanabe, M.; Sakamoto, F.; Yamasaki, S.; Jiang, M. *J. Nucl. Sci. Tech.* **2012**, 49, 473-478.
- 30) Kato, H.; Onda, Y.; Gomi, T. *Geophys. Res. Lett.* **2012**, 39 (2), No. L20403.
- 31) Kato, H.; Onda, Y. *Prog. Nucl. Sci. Tech.* **2014**, 4, 18-22.
- 32) Hashimoto, S.; Ugawa, S.; Nanko, K.; Shichi, K. *Sci. Rep.* **2012**, 2, No. 416.
- 33) Hagiwara, K.; Ochi, K.; Koike, Y. *RADIOISOTOPES* **2021**, 70, 227-237.
- 34) 飯島和毅 地球化学 **2015**, 49, 203-215.
- 35) Yasutaka, T.; Kawabe, Y.; Kurosawa, A.; Komai, T. Proceedings of the international symposium on environmental monitoring and dose estimation of residents after accident of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations **2012**, Part 2-17.
- 36) Tsuji, H.; Yasutaka, T.; Kawabe, Y.; Onishi, T.; Komai, T. *Water Res.* **2014**, 60, 15-27.
- 37) Yoshimura, K.; Onda, Y.; Sakaguchi, A.; Yamamoto, M. *J. Environ. Radioact.* **2015**, 139, 370-378.
- 38) Nagao, S.; Kanamori, M.; Ochiai, S.; Tomihara, S.; Fukushi, K.; Yamanoto, M. *Biogeosciences*

- 2013, 10, 6215-6223.
- 39) Ueda, S.; Hasegawa, H.; Kakiuchi, H.; Akata, N.; Ohtsuka, Y. *J. Environ. Radioact.* **2013**, 118, 96-104.
- 40) Ochiai, S.; Ueda, S.; Hasegawa, H.; Kakiuchi, H.; Akata, N.; Ohtsuka, Y.; Hisamatsu, S. *J. Environ. Radioact.* **2015**, 144, 86-95.
- 41) 武川一樹; 二瓶泰雄; 田中健太郎 土木工学論文集 (B1) **2012**, 68, I_913.
- 42) 小池裕也; 萩原健太 とうきゅう環境財団研究助成・学術研究報告書 **2017**, Vol.46, No.326.
- 43) 文部科学省 環境試料採取法“放射能測定法シリーズ 16” **1984**, pp.26-29, 日本分析センター.
- 44) Aoyama, M.; Hirose K. *Radioactivity in the Environment* **2008**, 11, 137-162.
- 45) 小池裕也; 鈴木亮一郎; 越智康太郎; 萩原健太; 中村利廣 分析化学 **2017**, 66, 263-270.
- 46) 春日郁朗 とうきゅう環境財団研究助成・学術研究報告書 **2020**, Vol.49, No.343.
- 47) Tsuji, H.; Ishii, Y.; Moono, S.; Taniguchi, K.; Arai, H.; Kurihara, M.; Yasutaka, T.; Kuramoto, T.; Nakanishi, T.; Lee, S.; Shinano, T.; Onda, Y.; Hayashi, S. *Sci. Total Environ.* **2019**, 697, No. 134093.
- 48) Tsushima, I.; Ogoshi, M.; Yamashita, H.; Harada, I. *J. Jap. Soc. Water Environ.* **2013**, 36, 23-28.
- 49) Maslova, K.; Stepine, I.; Konoplev, A.; Popov, V.; Gusarov, A.; Pankratov, F.; Lee, S.D. *J. Environ. Radioact.* **2013**, 125, 74-80.
- 50) 京浜河川事務所—多摩川について **2015**, https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000627905.pdf (accessed September 25, 2021).
- 51) Hyoe, T.; Yoshihumi, W.; Takuya, N.; Yasunori, I.; Alexei, K. *Chemosphere*, **2021**, 281, No. 130751.

Abstract

Radioactive cesium (^{134}Cs and ^{137}Cs) derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP) accident was detected in the southern Kanto region, Japan. Concentrations of dissolved radioactive cesium in river water of throughout the Tama river watershed during June 2013 - September 2014 was investigated. The concentrations of dissolved radioactive cesium were under 0.78 mBq/L in the upper reaches. On the other hand, the concentrations of dissolved ^{134}Cs and ^{137}Cs in the lower reaches were 1.34-5.82 mBq/L, 2.99-13.90 mBq/L respectively. The concentrations of dissolved radioactive cesium in the upper reaches were lower than that in the middle and lower reaches, and the concentrations of dissolved radioactive cesium were increased from the middle to the lower reaches. Therefore, it is considered that the radioactive cesium in the Tama river is supplied from municipal effluent instead of an environment water from forest region.

特集 2021年度学会賞

学会賞

海老原 充 (早稲田大学 教育・総合科学学術院、大学院創造理工学研究科)

受賞題目：中性子放射化分析法の高度化と宇宙地球化学研究への応用

<授賞理由>

海老原充博士は、中性子放射化分析法を中心として宇宙化学・地球化学の分野において多大な学術的成果を得て、その進展に大きく貢献してきた。中性子放射化分析は、分析対象となる試料に中性子を照射して目的元素の安定核種の中性子捕獲反応により放射性核種を生成させ、生成した放射性核種の壊変に伴って放出する放射線 (γ 線が主な対象) を測定して、反応前の安定核種の存在量を定量する手法である。海老原充博士は、特に、中性子照射後に化学分離を行う手法である放射化学的中性子放射化分析法 (Radiochemical Neutron Activation Analysis; RNAA) を分析手段として用い、その結果得られた正確さの高い分析値を基に、隕石等の貴重な宇宙地球化学的試料の成因等について考察を行う研究を一貫して進めてきた。その成果は150編を超える論文として公表されており、以下の5項目に整理できる。

① RNAAによるCIコンドライトの元素存在度の決定

原始的な隕石であるCIコンドライト中のAg, Au, Bi, Br, Cd, Ce, Cs, Eu, Ge, In, Ir, Lu, Nd, Ni, Os, Pd, Pt, Rb, Re, Sb, Se, Sn, Tb, Te, Tl, Yb, ZnをRNAAで精密に定量した。得られた分析値と文献値を合わせてCIコンドライトの元素存在度を明らかにした。またCIコンドライト中のAu-Br、Re-Pd、Rb-Csの存在度の相関を検証した結果、CIコンドライトの母天体上で水質変成過程が起きたことが強く示唆された (Ebihara et al., 1982)。Anders & Ebihara, *Geochem. Cosmochim. Acta* (1982) は、海老原博士のこうした経験が活かされた世界的に極めて著名な論文であり、その被引用数は1100件を超え、同博士の隕石化学分野への貢献を如実に示している。

② INAA、RNAAの正確さの向上と隕石試料中の微量元素の分析への応用

中性子照射時間、壊変時間、測定対象とする放射線 (γ 線、X線) ピークを、詳細に検討したうえで適切に設定し、鉄隕石及びコンドライト中の金属相中の白金族 (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) と親鉄元素 (Fe, Co, Ni, Cu, Ga, Ge, As, Mo, Sb, W, Re, Au) の合計18元素を、開発した機器中性子放射化分析 (Instrumental Neutron Activation Analysis; INAA) によって定量することに成功した (例えば Kong, Ebihara, Nakahara, *Anal. Chem.*, 1996)。INAAをさらに複数の隕石試料に応用し、隕石中の金属相の生成について研究を進めた (例えば Kong & Ebihara, *Geochem. Cosmochim. Acta*, 1997)。また、橄欖 (カンラン) 岩、石鉄隕石中の橄欖石に含まれる極微量の希土類元素を精密に定量するため、陰イオン交換樹脂分離法と抽出クロマトグラフィーを併用する化学分離法を開発した (例えば、Minowa & Ebihara, *Anal. Chim. Acta*, 2003)。本法によれば、希土類元素測定の妨害となる ^{46}Sc , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{51}Cr を効果的に除去でき、目的試料100 mgに含まれる0.1 ng/gレベルの希土類元素の定量が可能となった。本法を石鉄隕石中の橄欖石中の希土類元素定量に応用し、得られた結果から石鉄隕石の生成過程を考察することに成功した。

③宇宙・地球化学的試料中ハロゲンの高精度分析

ハロゲンは一般に揮発性が高く、固体試料中のハロゲンの定量は容易でない。中でもヨウ素は含有量も小さく、また揮発性が高いことから、正確な定量値を求めるのは非常に難しい。宇宙化学におけるハロゲンの研究を推進するため、固体試料中のCl, Br, I、特にヨウ素のRNAA操作法の開発・改良を長年にわたって実施した (例えば、Ebihara et al., 1987; 1997)。立教炉、JRR-4の

停止後は、京大炉を利用することによって現在でも継続されている（例えば Sekimoto & Ebihara, *Anal. Chem.*, 2013）。RNAA におけるヨウ素分離法は、福島第一原子力発電所事故後の放射性ヨウ素 ^{131}I の拡散状況を明らかにすべく、加速器質量分析法を用いた浮遊粒子状物質中の ^{129}I の定量にも応用され、成果が得られている（Ebihara et al., *J. Environ. Radioactivity*, 2019）。

④中性子ビームを用いた即発 γ 線分析法・多重即発 γ 線分析法の開発

原子炉にスーパーミラー中性子導管を設置することで中性子ビームを引き出すことができる。この中性子ビームを分析目的試料に照射し、試料中の目的元素と中性子の反応により生成する即発 γ 線を測定する分析法が即発 γ 線分析法（Prompt γ -ray Analysis; PGA）である。PGA の測定条件、検出限界を検証し、隕石、地球化学的試料中の H, B, Cd, Si, Cl の定量を可能にした（例えば Latif, Ebihara et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 1999）。また、PGA に多重 γ 線測定を組み合わせた多重即発 γ 線分析法（Multiple prompt γ -ray Analysis; MPGA）の実証にも成功した（Islam, Ebihara et al., *Anal. Chem.*, 2011）。

⑤小惑星イトカワから回収された微粒子の中性子放射化分析

惑星探査機はやぶさによって小惑星イトカワから回収された微粒子（2 試料）の INAA により、Na, Sc, Cr, Fe, Co, Ni, Zn, Ir を定量することに成功した（Ebihara et al., *Science*, 2011）。微粒子は、INAA の事前実施したエネルギー分散型 X 線分析装置付き走査電子顕微鏡（SEM-EDX）測定により橄欖石と考えられた。微粒子の Fe/Mg 比と Fe の定量値から微粒子の質量を 1.6 μg 、1.5 μg と決定した。INAA により、1 μg オーダーの試料中の元素分析を達成した特筆すべき成果である。INAA で得られた結果を宇宙科学的な知見から考察した結果、小惑星イトカワは未分化なコンドライト隕石を構成する物質と同様な組成を持つこと、Ir, Ni, Co 元素組成から太陽系初期の元素凝縮過程を反映することが明らかになった。

これらに加えて、海老原充博士は国際純正・応用化学連合（IUPAC）原子量及び同位体存在

度委員会（Commission on Atomic Weight and Isotopic Abundances; CAWIA）委員としての活動、International Committee on Activation Analysis (ICAA) 委員としての活動の他、放射化分析技術を通じたアジア地域の国際協力を目的とする（Forum for Nuclear Cooperation in Asia; FNCA）の研究炉利用プロジェクトリーダーを長期間担当し、プロジェクトを主導してきた。国内での活動としては日本放射化学会会長、日本地球化学会会長、日本で初開催となった MTAA12 (Modern Trends on Activation Analysis XII) 実行委員長として国際学会を成功させた他、JRR-3、KUR 等の国内共同利用施設、研究機関、学術会議等の各種委員会において多くの委員として活動しその貢献も多大である。

以上のように、海老原充博士は、これまで長期間に渡り極めて多岐に渡る優れた研究を進めてきただけでなく、群馬大学、東京都立大学（首都大学東京）、早稲田大学において研究室を主宰し、本分野の研究者を多数育成・輩出すると共に、2005 年には「現代放射化学」（化学同人）を単著で出版し、さらには 2015 年に日本放射化学会編として出版された「放射化学の事典」の編集責任者を務めるなど、この分野の教育・啓蒙における貢献は計り知れない。また、福島第一原発事故時には、日本地球化学会会長（2010～2012 年）、日本放射化学会会長（2012～2014 年）を務め、その事故対応においてもこれら分野のリーダーとして献身的に活動するなど、放射化学に関する社会貢献を継続して行ってきた。上記の極めて顕著な研究活動と、本分野に係わる教育・社会貢献における尽力は、日本放射化学会学会賞に相応しい業績と高く評価でき、当選考委員会は、海老原充博士を日本放射化学会学会賞を受けるに相応しい人物として推薦するものである。

（日本放射化学会賞選考委員会）

<受賞者の紹介>

海老原充早稲田大学教育・総合科学学術院教授は「中性子放射化分析法の高度化と宇宙地球化学研究への応用」のタイトルで令和 3 年度放射化学会賞を受賞されました。受賞のお知らせを頂いた

ときに先生の指導を受けた者として非常に喜ばしく感じました。ここでは、放射化学会賞受賞を記念して海老原先生について紹介いたします。

海老原先生は1979年3月に東京大学大学院理学系研究科博士課程を修了され「Study on formation of Chondrites based on Rare Earth Abundances」のタイトルで理学博士の学位を取得されました。東京大学理学部では精緻な化学分析技術を放射化分析研究に応用された浜口博教授、大学院では物性研究所に所属し、宇宙線生成核種の先駆的な研究を進めた本田雅健教授に師事され、中性子放射化分析法を駆使した隕石等の宇宙地球化学研究を開始されました。1979年9月より、米国シカゴ大学エンリコ・フェルミ研究所Edward Anders教授のグループに博士研究員として赴任されました。1982年3月に帰国、群馬大学教養部に講師として着任されました。1986年10月に群馬大学教養部助教授に昇任後、1988年4月に東京都立大学理学部化学科助教授に転任されました。2001年1月に東京都立大学理学部化学科教授に昇任された後、2017年3月に首都大学東京大学院理工学研究科教授として定年退職されました。その後、2017年4月から2018年3月まで首都大学東京首都大学東京大学院理工学研究科特任教授の後、2018年3月より早稲田大学教育・総合科学学術院教授として、教育・研究活動を継続されています。

海老原先生は、固体試料に含まれる微量元素を正確に測定し、得られた信頼性の高い分析値を基

に隕石・小惑星等の貴重な宇宙地球化学的試料の成因等について考察を行う研究を一貫して進めてこられました。この研究には、正確かつ精密な信頼性の高い定量値を得ることが基準となります。先生は、放射化学分離を伴う中性子放射化分析法（Radiochemical Neutron Activation Analysis; RNAA）、機器中性子放射化分析法（Instrumental Neutron Activation Analysis; INAA）、即発 γ 線分析法、多重即発 γ 線分析法、ICP質量分析法、ICP発光分析法を目的試料、目的元素ごとに組み合わせ最適化した分析法を開発し、正確な分析値を求め多くの研究成果を挙げられました。岩石・隕石中の極微量ハロゲン分析用に開発された分析法は、2011年に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故で放出された ^{129}I の拡散状況の解明を目的とした加速器質量分析法による浮遊粒子状物質中 ^{129}I の定量にも応用されています。

海老原先生は「研究の基本は正確で信頼できる分析データである。」と考えられています。この分析データに対する真摯な考えは、私が1980年代後半に群馬大の学生として指導を受けていた時期だけでなく、就職した後に共同利用先の研究炉、学会、研究会等で度々お会いする際にも繰返しお聞きしています。海老原先生の基本的な研究の原理は、群馬大、都立大、早稲田大で直接研究指導を受けた学生だけでなく、多数の共同研究者にも伝わっています。

(三浦 勉)

＜学会賞受賞者による研究紹介＞



中性子放射化分析法の高度化と宇宙地球化学研究への応用

海老原 充
(早稲田大学 教育・総合科学 学術院)

1. 中性子放射化分析との出会い

私が中性子放射化分析 (NAA) と出会ったのは学部4年次の卒業研究の時でしたので、半世紀前になります。通常、NAAの中性子源として研究用原子炉を利用しますが、今思えば恵まれた環境でした。当時の日本原子力研究所 (以下、原研、あるいはJAERI; 現、日本原子力研究開発機構 JAEA) には2号炉、3号炉、4号炉の3基が健在で、その他に、京大炉、立教大炉、武蔵工大炉も稼働していました。卒研は理学部化学科浜口研究室で行いました。浜口博教授は東京教育大から東大に移られたときに工学部の原子力工学科と兼任になっていたこともあり、研究室には工学部出身の大学院生の方もおられました。小さいときから“原子力”に漠然として憧れがあり、大学入学時には原子力工学科に進学するつもりでしたが、私の中高以来の先輩のアドバイスのもと、放射化学研究室がある理学部化学科に進学しました。原子力工学科を出て、原研高崎研の所長から原研理事になった岡田漱平先輩のアドバイスが無ければ、私のその後の人生の歩みはだいぶ違っていたことだろうと思います。無事、浜口研に配属され、「毛髪中の微量元素の非破壊中性子放射化分析」のテーマで卒業研究を行いました。ここでのNAAは機器中性子放射化分析 (INAA) でした。照射は原研炉 (確か2号炉) を使いました。東大の弥生宿舎に一人で宿泊したことがありますが、当時ですからコンビニもなく、原研通日も寂しく、夕食を食べるに一苦労したことを今でも思い出します (どう食べたか、覚えがありません)。NAAについては日下讓著「放射化分析」で勉強しました。コンパクトながら、名著だと思います。

大学院は、浜口先生の定年のタイミングから物

性研究所の本田雅健教授の研究室に進学し、宇宙化学と出会いました。本田先生からは色々学びました。テクニカルなことも多々ありましたが、今思えばそれは些末なことで、先生の生き様から私のその後の生き方を学んだことの方が大きかったと確信します。例えば、データの重要性 (信頼できるデータあってはじめて意味のある discussion や model 展開が可能だとよく言われていました)、若いうちの海外修行 (本田先生の場合、決して若いときの海外生活ではありませんでしたが)、正直な発言 (ときには傷つくのですが、あとでありがたみが分かりました)、奇を衒わない・受けを狙わない研究態度 (研究者として当たり前なのですが、最近の風潮はどうでしょう)、等々。大学院時代の研究上の主要キーワードは希土類元素 (rare earth elements; 以下 REE と略記) とその関連としての ^{244}Pu 。隕石中のこれらの元素や核種の存在度をもとに宇宙化学的議論を行いました。元素分析の手法として各種 NAA (INAA、放射化学的中性子放射化分析 RNAA、化学分離中性子放射化分析 CNAA) に加えて、フィッシュントラック法、表面電離型質量分析計を用いた同位体希釈分析 (以下 ID-TIMS と略記)、電子線走査微小領域分析を利用し、加えて鉱物同定のためにデバイ・シェラー X 線粉末回折法を用いました。

大学院を修了し、何のためらいもなく国外にでました。D3の秋に米国、カナダ、西ドイツの大学5~6カ所の著名教授宛にポストドクの口がないか、ダイレクトメールを出したのですが、流石にすぐには色好い返事はありませんでした。幸い、翌年の9月からシカゴ大学の Edward Anders 教授のもとで働くことになりました。シカゴに行くことを決めた直後に UCLA の John Wasson 教授からも予算が確保できたからと連絡を受けたのですが、事情を話して丁重に辞退しました。シカゴ大には足掛け4年、実質2年半いました。もともと RNAA による月試料、隕石の微量元素分析をするつもりで出かけたのですが、滞在途中で Anders は RNAA のラボを店仕舞し、質量分析による貴ガスの研究に一本化したので、貴ガスの仕事に転職することになりました。貴ガスの質量分析の経験はありませんでしたので、1から勉強しました。授業料を払わないばかりか、給料をも

らいながら修行させてもらったこととなります。結局貴ガス関係の論文は1報も出せませんでしたから、今から考えると随分鷹揚なボスでした。Andersのデータに対する思い、それに関連して、信用できる研究者とそうでない研究者を仕分けする(!)態度は、本田先生のそれと完全に一致することを知り、驚きました。もう一つの驚きは、浜口先生をものすごく尊敬していることでした。浜口先生もシカゴ大で研究生活を送ったことがあり、A. Turkevichと一緒にいった隕石中のウランのRNAA分析の仕事は今でも引用されます。Turkevichは私がシカゴ滞在中もエンリコ・フェルミ研究所にいて、N. Sugeranと同じ研究室に同居していました。同じフロアでしたので、よく廊下で顔を合わせました。AndersのもとでのRNAAの修行は正味1年ちょっとでしたが、後々の宝になりました。

Andersから滞在延長のお誘いを受けたのですが丁重にお断りし、2年半の滞米を切り上げて1982年3月、群馬大学教養部に講師として勤務しました。当時、群大工学部には赤岩英雄先生が応用化学科教授として在籍されていました。赤岩先生とはそれまで面識はなかったのですが、かつてフルブライト留学生としてAndersのもとに滞在した経験があり、また、浜口博先生とも深い親交を持たれていたという二重の偶然から、誼を通じるに至ったことはとても幸運でした。研究室の客分として迎えていただき、毎年大学院進学希望の学生の指導を任せられました。教養部所属だったので研究室には学生はいませんでしたからとても心強く感じました。また、教養部のある前橋・荒牧キャンパスにはRIを使える施設がなく、桐生キャンパスの工学部の施設を利用させていただきました。その代わりに、放射性物質取扱主任者の代理を努めましたが、施設はほぼ独占して使わせていただきました。群大時代には赤岩先生の影響もあり、分析化学的な仕事にウエイトが置かれました。具体的には宇宙・地球化学的固体試料中の微量元素のNAA法の開発・改良で、比較的短い半減期の核種を使ったRNAAとREEのRNAAが中心となりました。前者ではIn, I, Uを対象とし、熱外中性子を利用して感度を向上させることを目指しました。後者では特に半減期約1日より短い

核種を使ったPr, Dy, Ho, Er (Hoは例外)の定量法を確立し、それよりもっと長い半減期核種を使って定量する残り10元素と合わせて、安定なランタノイド14全元素を定量することを目指しました。ここで挙げた元素は宇宙・地球化学的に重要だと考えた元素で、その後の研究でもこれらの元素に焦点を当てることとなりますが、その芽がこの群馬大学時代に生まれたことを考えると貴重な6年間でした。

以上、長々と書きましたが、学部4年の卒研期を入れて学生として6年間、シカゴで2年半、群馬で6年の約15年がその後の都立大-首都大-早大でのキャリアの助走期間、熟成期間だったと思います。

2. 希土類元素の分析化学、宇宙化学

希土類元素REEは大学院での研究テーマの中での主要キーワードで、修士論文、博士論文のタイトルに含まれますが、その後も、早稲田大学で大学人としてのキャリアを閉じるまで常に最重要キーワードでした。地球化学や宇宙化学の分野でのREEの重要性についてはここで改めて記述する必要はないと思います。(なお、化学的要素の分類ではREEはSc, Y, ランタノイドの総称として用いられますが、宇宙・地球化学分野ではランタノイドと同義で、本稿では区別する必要がある場合を除いてその意で用います。)REEの定量分析にはいろいろな手法が使われますが、含有量と分析対象物質、それに分析元素や分析値に対しての要求内容に応じて最適な方法が用いられています。地球化学や宇宙化学関連物質に対してはINAAがよく利用されます。たとえば地球に落下してくる隕石の8-9割を占めるコンドライト(質)隕石のREE含有量は地表上に見られる多くの岩石に比べて1桁から2桁低い($10^8 \sim 10^6$ g/gレベル)のですが、それでもLa, Sm, Eu, Yb, Luの5元素は定量できます。地球の玄武岩や火成岩ではこれらに加えてCe, Nd, Tbの3元素が定量できます。これはひとえにこれらREEの多くの安定核種が熱中性子に対して大きな中性子捕獲断面積を持つことに依ります。ただし、非破壊での分析なので、共存元素による妨害を排除できず、計数誤差に起因する精度は決してよくありません。

しかし、放射化分析の特徴である確度の高さゆえ、INAA でも多くの議論に十分応えうる分析値が得られます。

INAA では対応できないような低い含有量をもつ試料を分析する場合、あるいはできるだけ多くの元素の分析値が必要な場合にはより高い感度が得られる分析法が必要になります。かつては、固体岩石試料中の REE の定量には ID-TIMS と RNAA が用いられました。ID-TIMS の分析値の精度は非常に高く、また、同位体希釈分析による値であることから確度も高いという特徴があります。しかし、原理上、単核種元素は定量できず、REE では Pr, Tb, Ho, Tm の定量値が得られません。一方、RNAA では前記のとおり、14 の安定 REE すべての定量値を求めることができますが、精度の点では ID-TIMS に劣ります。

ここで、本稿の中での最重要キーワードである RNAA について簡単に記述します。図 1 に RNAA の流れ図を示します。ここでは固体試料中の微量元素の定量を想定しています。RNAA 操作は大きく次の 3 つのステップに分けられます：

- (i) 中性子照射後の試料に定量対象元素（担体）を一定量加え、固体試料を分解する。
- (ii) 化学分離操作によって定量目的元素由来の放射性核種を放射化学的に精製し、その放射能を測定する。
- (iii) 放射能測定の前、あるいは後に化学分離後の担体量を定量し、化学収率を求める。

RNAA では定量目的元素（厳密には目的元素から核反応によって生成した放射性核種）の化学分離操作が重要な意味を持ちますが、化学分離操作前に中性子照射して分析対象元素から放射性核種に変換するので、その後定量目的元素が加わっても、それが分析値にプラスの誤差をもたらすことはありません。つまり、汚染の影響を受けません。また、(i) の試料分解操作や (ii) の放射化学的分離操作の過程で中性子照射で生成した放射性核種が一部失われ、最終的に定量的に回収されないことは十分ありえますが、その損失を (iii) の操作で見積もることができます。つまり、定量値の正確さを左右する 2 つの主要誤差要因を排除することができます。ICP-AES や ICP-MS ではこの 2 つの誤差要因から免れ得ません。同位体希釈分析では汚

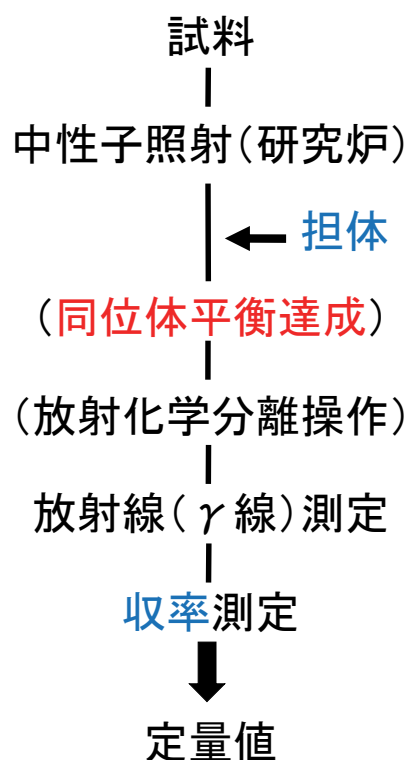


Fig. 1. Flow of RNAA procedure

染による影響は排除できません。従って、定量分析の方法論から言えば、RNAA で得られる値は、非常に信頼性が高いといっていると思います。ただし、RNAA で正しい値が得られるためには次の 2 つの条件をクリアする必要があります。

- (a) 中性子照射した試料中に生成した放射性核種と担体として加えた安定核種との間に同位体平衡が成立すること
 - (b) 定量値を比較法で求める場合、含有量既知の比較標準試料が正しく調整されていること
- (a) の同位体平衡は上記 RNAA の操作のうちの過程 (i) で成立します。固体試料の分解には通常、酸分解法かアルカリ融解法が利用されますが、同位体平衡の成立という点ではアルカリ融解の方が短時間で、かつ確実に成立するように思われ、気が楽です。同位体希釈分析でもこの同位体平衡の成立は必須条件です。(b) については RNAA に限らず、ICP-MS などでも求められることです。

さて、REE の RNAA の話に戻ります。ガンマ線スペクトロメトリに Ge 半導体検出器が使われ

る以前は元素ごとに分離し、放射能測定をしたために大変な労力を必要としました。REEのRNAAに取り組んだ最初の経験は大学院博士課程のときで、REEを陽イオン交換によって群分離し、La, Ce, Sm, Eu, Tb, Ho, Yb, Luの8元素を定量しました。ただし、分析対象は固体試料ではなく、コンドライト隕石のEDTA抽出フラクションでしたので、担体も用いず、その意味で正式なRNAAとはいえません。初めて固体隕石試料のRNAA分析を行ったのはシカゴ大学でのことでした。シカゴ大のAnders研究室はRNAAを用いた研究で多くの実績を持ち、私がポスドクで働くときには宇宙化学的議論で重要な約20元素のRNAAスキームが完成されていたのですが、分析対象元素にREEは入っていませんでした。そこでAndersにREEも一緒に定量することを提案し、スキームに組み入れました。REEのRNAAで最も厄介な妨害核種は化学的に同じ元素グループに入るScから中性子捕獲反応によって生じる⁴⁶Scで、水酸化物とフッ化物の沈殿生成と溶解を繰り返しながらREEから⁴⁶Scを放射化学的に分離除去する方法が慣例法でした。これは溶解度の僅かな違いを利用する方法ですが、時間がかかる割には分離効率が良くなく(同じREEですので当然ですが)、またランタノイド間での溶解度の違いがあるので、収率を正確に求めるためには元素ごとに担体を加える必要があり、既存のRNAAスキームに組み込むのは現実的ではありませんでした。そこで、イオン交換分離法を用いることを検討し、HBr系での陽イオン交換樹脂に対する分配係数がランタノイドとScで有意に異なることを文献で見出し、実用に移しました。その結果、従来からの約20元素に加えてREE6元素(Ce, Nd, Eu, Tb, Yb, Lu)について、太陽系を形成した物質(原始太陽星雲)と同じ元素組成をもつIvuna隕石タイプの炭素質コンドライト(以下CIコンドライトと略記)の分析値を得ることができ¹⁾、更には、この結果も含めて、Andersと連名で当時として最も信頼できる太陽系の元素存在度値の発表に繋がりました²⁾。定量できたREEは上記6元素に限られたのには理由がありました。これら元素はいわば“おまけ”として放射化学的分離スキームに組み入れられたので、REEの化学操

作は後回しになり、半減期の短い核種を使って定量する元素の値は得られなかったのです。HBr系陽イオン樹脂を用いたランタノイドとScの分離操作法についてはシカゴ大から群馬大に移ってから完成させ、当時日本分析化学会が待望の英文誌Analytical Sciencesを発刊したこともあって同誌に投稿し、Volume 1に論文として掲載されました³⁾。シカゴ大エンリコ・フェルミ研究所の所属として単名で発表した、私にとっては記念すべき論文です。

宇宙・地球化学関連試料中のREEの存在度を議論するには、含有量そのものの絶対量よりもある値に対する相対値を用いるのが普通です。多くの場合、この基準値には上で述べたCIコンドライトの元素組成値を用います。CIコンドライトに代表される基準物質中のREE濃度はできるだけ正確に求める必要があり、ID-TIMSがこれに応えていました。同位体希釈分析は定量分析法としてprimary methodとして認められているので、方法論的に言えば当然のことです。ただし、残念ながらPr, Tb, Ho, Tmの4元素の定量値は求められません。同位体希釈分析で正確な定量値を得るためには、特定の同位体を濃縮した元素(スパイクと呼ばれる)を分析試料に予め既知量添加し、試料中の定量目的元素との間に同位体平衡を成り立たせることが必須です。シカゴから日本に戻って、REEの宇宙・地球化学を展開するにあたり、上記の⁴⁶Sc分離法を組み入れたRNAA分析スキームを完成させました⁴⁾。このような場合、まずは標準岩石試料に適用し、分析操作の評価をすることは常道ですので、日本地質調査所(GSJ)の(当時の)代表的な標準岩石試料であるJB-1(玄武岩)とJG-1(花崗閃緑岩)を分析しました。結果として、JB-1では文献値とよく一致するのですが、JG-1では原子番号の大きなREE(重い希土類元素;以下重希土と略記)で大きな不一致が見られました。RNAAの値の方が文献値より系統的に約1.5倍大きな値が得られました。文献値としては同位体希釈分析で測定できる元素(複核種元素)はID-TIMSの値が採用されていたので、結果として分析法間での違いに帰着しました。RNAA分析では比較法を用いるのが普通ですが、比較標準試料は自作しました。即ち、REE

の各元素の高純度酸化物を白金るつぼを用いて恒量にした後、高純度酸に溶解し、標準溶液としました。もっと丁寧に調整するには、最終溶液の濃度をEDTAキレート滴定で標定すると良いのですが、そこまではしませんでした。とにかく、定量値には自信がありましたので、文献値、即ちID-TIMSの値が間違っていると主張すべく、論文として発表しました⁵⁾。図2はこの論文の要の図です。RNAAの値に加えて共著者のINAAの値も示されていますが、JG-1の重希土での文献値との大きな乖離はRNAAと良い一致を示しています。この論文の著者に当時、GSJの標準岩石試料を管轄する部門の責任者であった安藤厚さんの名前が加わっています。安藤さんとはこの論文を発表するにあたって何度か議論をし、結果としてそれまでのID-TIMS信仰を改められました。

上で述べたことはID-TIMSやRNAAに限定したことなく、定量分析一般に共通する問題だ

と認識しています(し、認識していただきたいと強く希望するところです)。問題点は煎じ詰めると、以下のようにまとめられるでしょう；

1. 同位体希釈分析で求めた値を無批判に絶対視してはいけない。
2. 標準試料(reference samples)の文献値を無批判に受け入れてはいけない。

再三強調する通り、同位体希釈分析で正しい値が求まるためにはスパイク試料中の濃縮同位体を含む元素と未知試料中の定量目的元素の間に同位体平衡が成立する必要がありますが、上で述べたJG-1での問題は未知試料中の定量目的元素が一部未溶解で、溶液中での同位体交換反応に加われなかったことに起因します。この、固体試料の溶液化に起因する分析上の問題は同位体希釈分析に限ったことではなく、固体を溶液化した上で定量分析を行う機器分析の場合にも(いやRNAAの場合でも)同様に起こりえます。例えば誘導結合

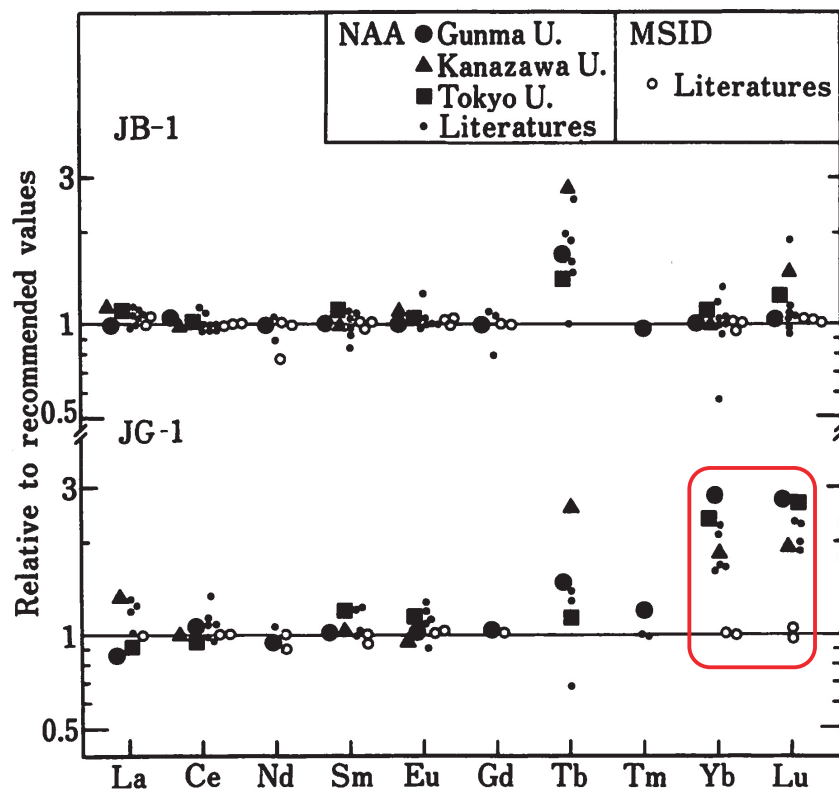


Fig. 2. REE contents determined by NAA and ID-TIMS (MSID) for GSJ standard rocks, JB-1 and JG-1. Data are normalized to literature values.

Table 1 Comparison of analysis values and compiled values of In contents in JB-2

	In contents (ng/g)*	Literature
Analysis values		
INAA (1988)	69 ± 10 (n=1)	7)
RNAA (1988)	67.1 ± 11.1 (n=5)	7)
RNAA (1994)	67 ± 11 (n=4)	8)
ID-TIMS (1987)	130	Geochem. J. 21, 237.
Compiled values		
GSJ (1987)	130	Geostand. Newsl. 11, 159.
GSJ (1989)	67.1	Geochem. J. 23, 143.
GSJ (1995)	94	Geostand. Newsl. 19, 135.
GeoRem (2022)	0.07 (µg/g)	Web site (see text)

* Uncertainties are due to counting statistics for n (number of analysis) =1 and external repeatability for n=4 and n=5.

プラズマ発光分光分析 (ICP-AES) や ICP 質量分析 (ICP-MS) による値と RNAA 値との間に見られた Zr と Hf の定量値の系統的な違いはこの例に該当します⁶⁾。この問題は、固体試料の分解法の違いに帰着します。一般的に ICP-MS、ICP-AES、ID-TIMS などの場合では酸分解法を、RNAA ではアルカリ融解法を用います。これは酸の方が高純度にしやすいからですが、固体試料の分解という点では、アルカリ溶解の方がはるかに効果的です。Na₂O₂ は金属も溶解するくらい強力です。分解に問題がない場合でも、溶液中で同位体交換が成立しないときには同様の問題は生じます。こうした問題の一例を表 1 に示します。この表は GSJ の標準岩石試料 JB-2 (玄武岩) 中の In の分析結果のいくつかをまとめたものです。RNAA で定量した値が中心ですが、INAA で求めた結果も含まれます。一度目の RNAA は熱外中性子照射後、迅速化学分離操作を行って求めた値で In だけを定量したもの⁷⁾、二度目の RNAA では熱中性子照射後、やはり迅速化学分離によって In, Cu, Zn の 3 元素を定量しました⁸⁾。internal repeatability はいずれも 16 % と精度の点では良くないのですが、INAA による定量値 (誤差は計数誤差) を含めて非常に良い一致度を示しました。一方、JB-2 については ID-TIMS による定量値が報告されていて、表 1 にあるとおり 2 倍近く大きな値となっています。興味深いのは 3 つの compiled values との比較です。1987 年の値は ID-TIMS の値、1989 年の

値は RNAA の値、1994 年の値は恐らく両者の平均値です。はじめの 2 つの値は安藤厚さんが筆頭著者として発表しています。安藤さんは報告された値を吟味して、推奨値を発表されていましたが、1989 年に値を変更したのは RNAA の信頼性を評価された結果だと思われます。おそらく、上で述べた JG-1 中の重希土問題で“同位体希釈信仰”が解けたのでしょうか。JB-2 の In の ID-TIMS の値は確信をもって誤りだと断言できます。それは、2005 年以降、研究室の主要研究テーマの一つとして、隕石中の揮発性 6 元素 (Zn, Cd, In, Tl, Pb, Bi) を ICP-MS によって定量する手法の開発、および得られた定量値に基づく宇宙化学的研究をはじめました。In を含めて、Bi (単核種元素) 以外は同位体希釈分析で定量しました。この分析操作検証のために JB-2 も分析しましたが、得られた In の値は RNAA、INAA で求めた値と非常に良い一致を示しました。首をかきげざるを得ないのは 1994 年発表の値で、明らかに RNAA と ID-TIMS の値の平均値を採用したことです。何故、1989 年の値を報告する際に安藤さんはじめとする著者が行ったであろうデータの信頼性に対する考察をリセットしてしまったのでしょうか？ この 1995 年の値は現在でも GSJ のホームページに推奨値 (!) として掲載されています。なお、世界の主要岩石標準試料の元素組成データを纏めたドイツのマックス・プランク研究所 @ マインツの GeoRem データベース (<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)

では information value として $0.07 + - 0.008 \mu\text{g/g}$ と掲載されています。

REE に関する記述が長くなりましたが、その後の展開について手短かに述べたいと思います。RNAA の放射化学分離操作について、引き続き改良を加えました。従来のフッ化物-水酸化物沈殿生成溶解サイクル法や HBr 系陽イオン交換分離法では限界があった ^{46}Sc の分離・除去効率を上げるため、抽出吸着樹脂の一種である TRU-spec. resin の利用を検討し、良好な結果を得ました。これまでの分離スキームと組み合わせ、岩石試料中の REE を RNAA で定量するためのほぼ完璧な放射化学的分離スキームを完成させることができました⁹⁾。この方法を利用することにより、コンドライトレベルの 10^4 レベルの REE を定量することが可能となりました。岩石試料中のこの濃度レベルの REE を正確に定量する方法としては唯一のものと確信します。この手法を用いて、パラサイト隕石を構成する橄欖石中の REE の定量を行い、そのデータを元にパラサイト隕石の形成過程を考察しました。これは箕輪はるかさん（現、慈恵医大）の大学院博士課程での研究テーマで、現在、論文投稿の準備をしているところです。なお、多少詳細な議論内容については文献¹⁰⁾に記載してありますので、そちらを参照してください。更にその後の展開ですが、こうして濃度の低い固体試料に対応する分析法は完成しましたので、次に安定 REE 全 14 元素について、ID-TIMS による値に匹敵する精度 (repeatability) をもち、かつ RNAA に匹敵する正確度 (accuracy) をもつ定量値を求める手法の開発を行いました。分析手法としては RNAA ではなく、ICP-MS を用いました。ICP-MS による宇宙・地球化学的固体試料中の REE の定量については 1991 年、旧・都立大が都心から八王子に移転した直後から始めたのですが、1999 年から本格的に改良を加え、その後、何人かの学生の努力によって目的を達成することができました。論文としては比較的最近まとめることができました¹¹⁾。この手法を用いることによって、本来 REE 相互の元素分別は殆どないと考えられてきたコンドライト隕石間で僅かながら、しかし有意な分別があることが明らかになり、初期太陽系における各隕石グループの形成過

程を詳細に議論できるようになりました¹²⁾。前述の通り、こうした議論を行う場合の土台となるのは、太陽系の元素存在度を反映した CI コンドライトの REE 元素組成です。研究者としてのキャリアを始めたシカゴ大学でのポストドク時代、RNAA によっていわば無理やり CI コンドライト中の REE6 元素の定量を行いました。元素数もさることながら、精度・確度ともに不満足なデータでした。RNAA とは異なる分析手法を用いることになりましたが、これらを大幅に改善するデータを、全安定 REE14 元素に対して求めることができました。現在論文としてまとめているところで、近々公表できるものと考えています。

3. 白金族元素の分析化学、宇宙化学

白金族元素 (platinum group elements ; 以下 PGE と略記) は周期表の中央に位置する Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt の 6 元素の化学的分類としての総称で、地球化学的には親鉄性元素、宇宙化学的には難揮発性元素に分類されます。これらの分類で示される通り、PGE は太陽系形成初期の固体形成過程で、高温の気体状原始太陽系物質から最初期に固体に凝縮した元素群で、隕石中では PGE ナゲットや金属相に高濃度に存在します。固体凝縮物が集積することで隕石母天体ができ、衝突合体しながら成長し、やがて原始惑星が形成されました。太陽系初期には ^{26}Al に代表される比較的半減期の短い放射性核種が生き残っていたために、その壊変熱で母天体の大規模な溶融が起こり、重力によって比重の大きな金属相は惑星の中心に引き寄せられました。その結果、最終的には地球に見られるような核が形成されました。PGE はこうして地球の中心部に濃集されてしまったために、マントルや、その外側を包む地殻を構成する岩石中での存在度は極めて低くなり、地表上で希少価値を生むことになりました。(なお、貴金属元素は PGE6 元素に Ag, Au を加えた呼び方ですが、この名称の「貴」を precious と解釈する向きもあるようです。世俗的にはそのとおりでしょうが、化学的には noble、つまり反応性に乏しいと理解すべきで、最近 18 属元素を貴ガスと呼ぶようになったことと相通じるところです。)

PGE のなかで Ir は熱中性子、熱外中性子に対

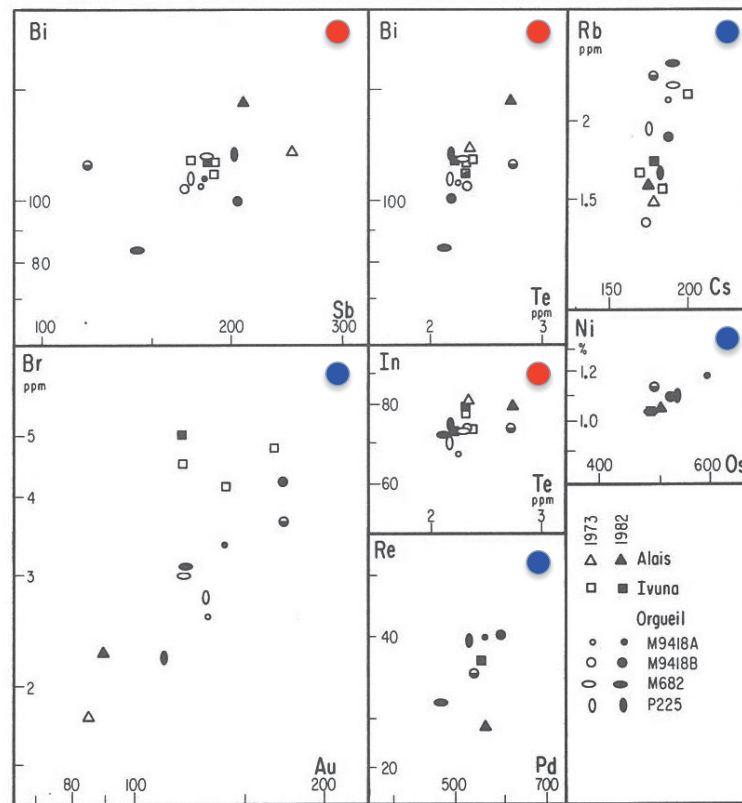


Fig. 3. Abundance correlations of some trace elements in CI chondrites. Correlations marked with red dots must have been caused by nebular processes, while those with blue dots may be due to aqueous alteration.

する捕獲断面積が大きい（同位体存在度 37.3 % の ^{191}Ir に対してそれぞれ 920, 5100 バーン）ので、例えばコンドライト隕石などの場合（Ir 濃度約 700 ng/g）には INAA で優に定量できますし、月試料など、1 桁から 2 桁近く低い場合でも定量可能です。しかし、含有量が 1 ng/g 以下の、地球上の地殻やマントルを構成する岩石に対してはその Ir 濃度を INAA で求めることは不可能です。コンドライト隕石では Os もかろうじて定量できますが、参考値程度の値です。そこで RNAA の利用になるのですが、PGE の RNAA はシカゴ大で経験しました。PGE6 元素のうち、Pd, Os, Ir, Pt の 4 元素に加え、貴金属元素として Ag, Au の 2 元素、それに Os や Ir と同等の難揮発性をもつ Re をあわせて定量しました。これらの元素は PGE や貴金属元素とし括れるものの、REE のように十把一絡げで化学分離することは無理で、各元素に応じた化学操作を駆使して、丁寧に放射化学的にきれいにする必要があります。その努力の

おかげで、随分面白い結果を得ることができました。例えば図 3 などはその最たるもので²⁾、CI コンドライト間で Au と Br の含有量に現れたきれいな相関は感動モノでした。明らかに CI コンドライト母天体で、液体の水が存在したことを示唆します。CI コンドライトを加熱すると、重量 % で 20 % に及ぶ H_2O が回収され、CI コンドライト物質が水質変成を受けた結果であることは明らかです。ただ水質変成を受けたタイミングとして母天体に集積する前なのか、母天体形成後なのかで意見が割れていましたが、これで決着がつかしました。

PGE、特に Ir については恐竜絶滅の話題と結びつけて、よく取り上げられます。地球上に生命が誕生してからこの方、生物が突然絶滅する現象が繰り返されて来たことはよく知られています。特に大量に絶滅した出来事として、シカゴ大学の地球物理学者ジャブロンスキーの提唱した 5 大絶滅事象が挙げられます。この中で、最も新しいの

が6600万年前に起こったもので、地質区分として中生代白亜紀（英 Cretaceous；独 Kreide）と新生代古第三紀（Paleogene）を分けるものとなりました。白亜紀は大型恐竜が活躍していた時代で、それが突然絶滅したということで注目されるわけですが、生物の種としては約70%が絶滅したと推定されていて、5大絶滅イベントの中では最小の値ではあります。恐竜についても、陸上の大型恐竜はその多くが絶滅に瀕したものの、水中に生息する種類についてはそれほどでもなかったようです。この恐竜絶滅とPGEが結びついて話題になるきっかけは、Alvarezらがイタリアとデンマーク（とニュージーランド）の中生代白亜紀と新生代古第三紀を分ける地層（以下、K-Pg境界層と略記）中にIrが予想される濃度より20～30から160倍高い濃度で存在しているのを見出したことでした¹³⁾。本来、地表上にはIrはほとんど存在しないので、これだけ高いIr含有量は何らかの付加によるものと考え、いろいろな可能性の中から隕石衝突説を提唱しました。しかし、Irだけの濃縮であれば火山ガスに由来するとの意見も出ました。ハワイ島のキラウエア火山の噴火によって放出された大気浮遊粒子を分析したところ、Ir/Al比でハワイの玄武岩に比べて17,000倍も高い値が得られ、マントルに達するかなり深い場所からIrF₆（沸点53℃）として運ばれたのではないかと考えられました。地質年代としてちょうどK-Pg境界に対応する時期にデカン高原ができたことが知られていますが、この時、大量の玄武岩がかなり短期間に噴出したものと考えられています。しかもこの噴火はハワイのキラウエアと同じように、マントルプルームとして地下深くから（地殻ではなく、マントルから）供給されたものと理解されています。この時大量のIrが火山ガスと一緒に地上に噴出したことは十分考えられます。このときの火山噴火物が地球を覆い、地表の環境を激変させ、生物の大量絶滅をもたらしたかもしれません。従って、Irだけを測定したのではK-Pg境界層中の高濃度Irが隕石由来なのか、火山ガス由来なのか特定するのは難しいわけです。地球史の中での絶滅事象に着目する研究はK-Pg境界粘土層中の高Ir濃度発見以来、非常に盛んになりました。そうした中、絶滅の原因を地

球外物質に結びつける根拠として境界層での高いIr含有量（“イリジウム異常”と呼ばれます）を取り上げ、“イリジウム異常”イコール地球外物質の寄与と考える風潮があります。上記の通り、これは極めて短絡的な考えです。このことに違和感を感じた（とペンシルバニア州の自宅で伺いました）R. GanapathyはデンマークのK-Pg境界試料をINAAとRNAAによって分析し、Irに加えてOs, Au, Pt, Re, Ru, Pd, Ni, Coの定量値を求めました¹⁴⁾。このうち、IrとCoをINAAで、それ以外の元素をRNAAで定量したのですが、結果はRe以外の元素はCIコンドライトの値に比べて約0.07倍とほぼ一定の相対濃度を示しました。この値は玄武岩試料の含有量に比べてPGEで10³倍高い値でした。この結果はK-Pg境界層にはIrばかりでなくPGEが一様に濃縮していることを示すもので、“PGE異常”とでも言うべき特徴です。“PGE異常”は紛れもなく隕石、それもコンドライト質隕石の寄与によるものと断言できます。Alvarezらの論文ではなく、Ganapathyの論文こそがK-Pg境界における恐竜絶滅が隕石衝突に起因するものであることを明確に証明してくれたわけです。

Alvarezらはイタリア、GubbioのK-Pg境界層試料で“Ir異常”を見出したのですが、一歩進めて“PGE異常”を見出すべく、採取地点は異なりますが、同じGubbio地域で採取された境界粘土試料についてRNAAを利用してIr, Au, Pt, Pdの4元素を定量しました¹⁵⁾。堆積環境を地球化学的に考察するために、境界粘土試料に加えて層序で境界層の上と下の岩石試料（チャート）をINAAでも分析し、約30元素の定量値を求めました。RNAA操作はChicago scheme¹⁶⁾を基本に、大幅に簡略化し、効率化を図りました。得られた結果から、RNAAで定量したPGE3元素と親鉄元素であるNiはすべてCIコンドライトと同じ相対存在度を示し、CIコンドライトであれば地層中に約2%存在していると結論しました。ただ、K-Pg境界層から採取した複数の試料間でこれらの元素の濃度に有意な変動が見られたのですが、元素間にはその濃度において相関が認められませんでした。PGEはコンドライト隕石由来で間違いないと思いますが、その地球外物質が地表（ユ

カタン半島と推定されています)に衝突すると同時に破碎され、かなりの質量の物質が一度気化したと想像されます。温度の降下とともに微粒子として固化し、一定時間大気圏に浮遊しながら全地球に広がり、やがて地表に沈降したでしょう。海に落ちたPGEを含む微粒子が海水中に滞留している間にはやがて(少なくとも一部は)溶解し、PGEが元素ごとにバラバラになることもありえたと思われます。やがてはPGEは海底に沈降して、堆積岩中に保持されたわけですが、その間、各PGEは元素ごとの溶液化学的特性に従って挙動したでしょうから、海底堆積物中では局所的にはPGEの元素間での分別が生じることになります。K-Pg境界試料でPGE濃度に相関が見られないのはこうした理由によるのではないかと考えています。世界各地のK-Pg境界層から試料を集め、陸起源と海起源の違い、ユカタン半島からの距離をパラメータにとり、PGEの溶液化学を考慮しながら隕石衝突時からK-Pg境界層に沈着するまでの間にPGEがどう挙動したかを明らかにしたい。これはGubbio試料を分析し、論文を発表してから、次の研究テーマだと考えていた内容ですが、ちょっと温めすぎてしまい、時間切れになってしまいました。なお、上記のGubbio試料のRNAA、INAAは当時群大の大学院生だった三浦勉さん(現、産総研)と一緒にやった仕事でした。

PGEのNAAに関連する特筆すべき研究として、コンドライト隕石中の金属相中のPGEを含む親鉄性元素をINAAで定量し、その結果をもとに金属相の形成過程、更にはコンドライト隕石の形成過程を考察したことが挙げられます。中国人留学生の孔屏さん(現、中国科学院地質・地球物理研究所)が博士課程学生とそれに続く学振研究員のときの研究テーマで、多くの宇宙化学的成果が得られました¹⁷⁾が、その成果の基となったのは周到なINAAスキームでした¹⁸⁾。いくつかのグループのコンドライト隕石から金属相を分離し、その元素組成をINAAで求めたのですが、PGE全6元素に加えて親鉄性元素12元素(Fe, Co, Ni, Cu, Ga, Ge, As, Mo, Sb, W, Re, Au)を定量するとともに、不純物として含まれる珪酸塩の量の見積りのために、親石性元素6元素(Mg, Al, V, Mn, Na, Sc)も同時に定量しました。GeとRhの定量には

半減期がそれぞれ48 s, 43 sの⁷⁵Ge, ¹⁰⁴Rhを利用し、特にRhについては¹⁰⁴Rhと^{104m}Rh(半減期4.39 m)の減衰を正しく追う必要があります。また、Pdの定量には¹⁰⁹Pdからの γ 線と^{109m}AgからのK α X線を利用しましたが、後者の方が約10倍感度が高いのですが、X線の自己遮蔽の補正が必要となります。PGEのなかでRhは唯一単核種元素で、その中性子捕獲生成核種の半減期は上記の通り数分かそれ以下で、とても化学分離して γ 線測定すること、即ちRNAAを適用することは無理です。INAAでPGE全6元素を定量できることは特筆されることだと思います。

PGEは宇宙化学、地球化学の研究で(少なくとも私にとっては)REEに並んで重要な元素群でしたので、研究を継続、発展させるために1999年からICP-MSによる測定をはじめました。ICP-MSを用いれば宇宙・地球化学的固体試料中のPGE全6元素が定量できます。できるだけ正確な値を求める為に、単核種元素のRhを除いた5元素については同位体希釈法を適用しました。多くの地球上の岩石試料の場合PGE含有量が極めて低いので、感度を上げるためにgオーダーの試料を用い、硫化ニッケルによってPGEを硫化物として抽出することにしました。ちょうどタイミングよく、中国科学院から学振招聘研究員としてDr. Li Xiaolinが来日しており、彼の経験と協力、それに当時修士学生だった西野朋恵さん(現、化学物質評価研究機構)の努力によって2年間で操作法の基本骨格が完成しました。できるだけ正確な値を得るために、第5周期のPGEに対する同重体やアルゴン化合物の妨害補正やRhの収率の補正法の検討をし、分析スキームを完成させました。分析法を評価する目的で、GSJの標準岩石試料JP-1(橄欖岩)のPGE6元素の定量を行い、満足すべき結果が得られました¹⁹⁾。その後も同位体希釈ICP-MSによるPGEの分析は順調に推移し、多くの成果が得られました。首都大学での最後の約7年間、助教として一緒に過ごした白井直樹さん(2022年4月から神奈川大)の貢献があったればこそでした。

4. ハロゲン元素の分析化学、宇宙化学

ハロゲン元素は周期表ではFからTs(テネ

シンですが、ハロゲンの接尾語をもっていますね) までの6元素の総称ですが、安定元素としては F, Cl, Br, I の4元素で、地球化学や宇宙化学でも当然この4元素が対象となります。ハロゲン元素は周期表で貴ガス元素の隣なので、研究上でも両者の関係がいろいろなところで現れます。例えば代表的な消滅放射性核種である ^{129}I は β^- 壊変すると ^{129}Xe になりますが、隕石中の Xe の同位体比測定によって ^{129}Xe の存在度過剰が見つかり、太陽系形成初期に存在した ^{129}I が壊変し尽くされる前に固体中に保持されたものと解釈されました。もう一つの代表的な消滅核種である ^{244}Pu も、重い Xe 同位体の存在度が ^{244}Pu の自発核分裂片の寄与を受けていることが貴ガスの質量分析によって明らかにされたことで、その存在が証明されました。これらの結果は貴ガスの質量分析が他の元素に比べて遥かに高感度に行えることを反映したものと いえます。大学院時代の ^{244}Pu 、シカゴ大時代の貴ガス質量分析、その後の、これから述べる I を主体とするハロゲン元素の定量分析はゆるい輪でくくられますし、更にはアクチノイド核種 ^{244}Pu の宇宙化学的挙動を理解するにはランタノイドの挙動を知ることが重要ですので(これはまさに大学院博士課程の研究テーマでした)、今考えるとこれまでの研究の多くが同じ枠の中で行われたように見えるのは、偶然かもしれませんが、感慨深いものがあります。

岩石試料中のハロゲン元素、特に I の分析は群馬大時代の主要テーマでした。客分として迎えていただいた赤岩先生の研究室では以前から堆積岩中のハロゲン元素の定量が行われていましたので、それを引き継ぐかたちで始めたのですが、私としてはハロゲンの宇宙・地球化学、特に宇宙化学における研究上の大きな空白を埋めたいという思いがありました。はじめは I の NAA を INAA、RNAA の両方から進めました。I は ^{127}I からなる単核種元素で、(n, γ) 反応で生成する ^{128}I の半減期が25分なので、岩石試料を分析する場合、 ^{28}Al は減衰させるにしても ^{56}Mn や ^{24}Na の妨害は避けることができず、INAA では定量できる濃度に限界があります。ただ、熱外中性子に対する吸収断面積がこれらの妨害核種を生成する核反応断面積に比べて相対的に大きいので、試料を金属 Cd や

B_4C でできたカプセルに入れて中性子照射することにより、相対的に感度を上げることが可能です。が、自ずと限界があり、岩石中の低濃度の I の定量には RNAA を利用するのが得策です。照射後、迅速に放射化学的分離操作を行う必要がありますが、この場合も、熱外中性子照射を行うと、被ばく線量を低く抑えられるという利点があり、その点を強調したタイトルの論文を1986年に発表しました²⁰⁾。その後の一連のハロゲンに関連する論文の初めての、記念すべき論文になりました。この論文に関連して、分析法上問題になりそうな諸点を検討した結果を、遅ればせながら5年後に発表しました²¹⁾。数少ない日本語の論文の一つで、minor な論文誌ですが、私にとっては重要な論文の一つです。その後、都立大に移ってから、同一試料から、一連の放射化学分離操作のなかで I に加えて、Cl と Br も一緒に定量する分析法を確立しました²²⁾。群馬大、及び都立大時代のハロゲンの NAA は横須賀市長坂にあった立教大学原子力研究所の TRIGA-II 炉を利用して行いました。同炉は NAA、特に RNAA を行うにはうってつけの炉でした。本田先生が若い頃、理学部化学科設立時の助教授として立教大学に在籍していたことや、研究所の戸村健二教授が東京教育大(現、筑波大)大学院時代に浜口先生の弟子だったこと、おまけに戸村先生のお父さんが私の中学時代の漢文の先生だった(!)りといった関係も使いやすさを後押ししていたと思います。立教大炉は残念ながら、諸般の事情によって2001年に運転を停止しました。1961年に臨海に達したので、ちょうど40年稼働していたわけですが、1974年から停止直前まで大変お世話になりました。ただ、分析法が確立したので、いざ、それをもとにハロゲン元素の宇宙化学の研究を始めようとした矢先の運転停止で、非常に残念でした。

ハロゲン元素の RNAA を継続すべく、立教大炉の代替として JAERI の原子炉の利用を検討しました。当時稼働していた3号炉と4号炉のうち、照射後すぐに化学操作が行えることから4号炉を利用する実験の見込みが立ちました。ただ、実施に至るまでに難問が山積で、特に火気使用の許可を得るのは大変でしたが、フッドの周りを防火シートで覆い、衆人環視のもと、なんとか放射化

学分離実験にこぎつけました。この時行った実験の目的は、立教大学炉を利用して確立したハロゲン3元素のRNAAスキームがJRR-4を使ってどの程度機能するかを確認することと、ハロゲン元素を定量するために比較標準試料を使う代わりに k_0 標準法を利用してどの程度信頼できる定量値が求まるか確認することでした。結果として、どちらの目的に対しても非常に満足の行く結果が得られました。分析スキームは問題なく機能しました。何より大きな収穫は比較法と k_0 標準法で一致した結果が得られたことでした。以前、Iの比較標準試料作成について詳細な検討実験を行ったときに、標準溶液をろ紙に滴下し、赤外ランプ下で乾燥する過程で、条件によってはIの揮散が起りうることを確認するとともに、揮散を免れる条件を見出しました²¹⁾。JRR-4での実験によってこの条件の正しさを再確認できました。もう一つは、比較標準試料中のIが中性子照射の影響で一部揮散する可能性が指摘されていたのですが、当該実験条件下では揮散は起らないことが確認できたことでした。これらの仕事は当時、JAERI内の東大・大学開放研究室に在籍していた尾畷大真さん（現、東大博物館）と一緒に行いました。実験の成果は十分満足すべきもので、論文としてまとめましたが²³⁾、ルーティーン的にRNAAを行える実験環境ではなく、JRR-4を使ってハロゲン元素の宇宙・地球化学の研究を展開することは断念せざるを得ませんでした。

2011年2月末日にJAEAが「JRR-3改造20周年記念シンポジウム」をお台場で開催し、その場で「放射化分析はいかに優れた分析法か」というタイトルの講演をさせていただきました。JRR-3の次の10年、20年を見据えた、希望に満ちたシンポジウムだったと記憶しています。でも、その希望が直後に起こった東北地方太平洋沖地震によって打ち砕かれました。JRR-3はちょうど定期点検中だったことは不幸中の幸いだったのかもしれませんが。その後紆余曲折の末（と見えました。なにせ、何度もゴールポストが遠ざかるように思えましたから）、ちょうど10年後の2021年2月に運転が再開されたことは心から嬉しく思います。この10年間のJRR-3運転休止は私にとって新しい経験を積みきっかけを作ってくれまし

た。京都大炉（KUR）の利用です。今考えると不思議に思うのですが、それまで一度もKURを使った実験をしたことがありませんでした。ことNAAに関しては、立教大炉や原研炉が近県にあり、わざわざ熊取まで出かける必要がありませんでしたので。背に腹は代えられないとの思いから、また、幸い、地震の直接の影響を免れていたために運転が継続されていたので、KURをつかったNAAを始めました。INAAに加えて、ハロゲンのRNAAの実施を検討しました。京都大学原子炉実験所（現、複合原子力科学研究所）の助教、関本俊さんの助力により立教大炉での実験を再現できることを確認したときは、これまで続けてきたハロゲンの宇宙化学、地球化学の研究が再開できると素直に嬉しく思いました。ただ気になったのは、私の定年までの年数でした。それはともかく、まず、KURでの照射条件下でのRNAAでも立教大炉や原研炉を利用したときと同様のデータの質が確保できることを確認したのち、GSJの標準岩石試料のなかから堆積岩試料について、そのハロゲン3元素の含有量を定量しました。一つの試料を複数回分析してデータの再現性 external repeatabilityを確認するとともに、分析値を相互に比較できる試料について、これまで立教大炉や原研炉を用いて得られた値との間に良い一致が認められることを確認しました。得られた値を中心に、分析操作にも多少改良を加えたこと、また、同一堆積岩試料のICP-MSによる文献値との比較で系統的な差が認められることなどを記載し、論文としてまとめました²⁴⁾。その後、KURも2014年から3年間、余儀なく、運転休止となり、再び（いや、三度か）RNAAの実験を断念せざるを得なくなりました。この間、2017年春に首都大学を定年となりましたが、翌2018年から早稲田大学に再就職し、KURの運転とともにハロゲン3元素のRNAAを再開（いや、再再再開）しました。しかし2022年春に二度目の定年を迎えることとなり、残念ながらハロゲンの宇宙化学、地球化学の研究目的は中途というか、まだ入り口に佇んでいる状態で現役を離れざるを得ません。途中、何度か中断を余儀なくされたことが悔やまれますが、個人の力の及ぶところでないところがNAAにつきまとう危うさかもしれません。KURの運

転停止も具体的に議論されているやに伺います。できればそれまでに、もう1歩でも2歩でも、当初の目的に近づいて見たい気がします、果たしてどうでしょう。それはともかく、現在、CIコンドライトを含めた主要炭素質コンドライトグループのハロゲン3元素の含有量について論文としてまとめています。

5. 稿を閉じるにあたり

受賞記念論文ということで原稿依頼を受けたのですが、回想録と現状報告、時に解説のような文章になってしまいましたが、ここまで我慢してお読みいただいた皆様に感謝いたします。もっとも、論文には広い意味があって、我々がイメージする研究論文はその一つとのもので、屁理屈ともにお許しください。最後に、形式的な締めになってしまいますが、学会賞につながるこれまでの一連の仕事を支えていただいた方々に深く感謝申し上げます。ありがとうございました。一部の方については本文中に名前を書かせていただきましたが、それ以外の方については紙面の都合で割愛させていただきました。ご了承ください。

引用文献

- 1) M. Ebihara, R. Wolf, E. Anders. *Geochim. Cosmochim. Acta* 46, 1849 (1982).
- 2) E. Anders, M. Ebihara. *Geochim. Cosmochim. Acta* 46, 2363 (1982).
- 3) M. Ebihara. *Anal. Sci.* 1, 241 (1985).
- 4) M. Ebihara, K. Tomura, M. Masutani. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 109, 69 (1987).
- 5) M. Ebihara, Y. Minai, M.K. Kubo, T. Tominaga, N. Aota, T. Nikko, K. Sakamoto, A. Ando. *Anal. Sci.* 1, 209 (1985).
- 6) M. Ebihara, H. Minowa, H. Nakahara, C. Yonezawa. *Anal. Sci.* 10, 43(1994).
- 7) M. Ebihara, A. Nemoto, H. Akaiwa. *Anal. Sci.* 4, 169 (1988).
- 8) M. Ebihara, S. Fukatsu, K. Hirano, H. Ozaki. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 182, 295 (1994).
- 9) H. Minowa, M. Ebihara. *Anal. Chim. Acta* 489, 25 (2003).
- 10) 海老原充. *地球化学* 51, 1 (2017).
- 11) M. Ebihara, K. Hayano, N. Shirai. *Anal. Chim. Acta* 1101, 81 (2020).
- 12) R. Khan, N. Shirai, M. Ebihara. *Earth Planet. Sci. Lett.* 422, 18 (2015).
- 13) L. W. Alvarez, W. Alvarez, F. Asaro, H. V. Michel. *Science* 208, 1095 (1980).
- 14) R. Ganapathy. *Science* 209, 921 (1980).
- 15) M. Ebihara, T. Miura. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 5133 (1996).
- 16) E. Anders, R. Wolf, J. W. Morgan, M. Ebihara, A. Woodrow, M.-J. Janssens, and J. Hertogen. National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce (NAS-NS-3117), 95pp. (1988).
- 17) (たとえば) P. Kong, M. Ebihara. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 2317 (1997).
- 18) P. Kong, M. Ebihara, H. Nakahara. *Anal. Chem.* 68, 4130 (1996).
- 19) N. Shirai, T. Nishino, X. Li, H. Amakawa, M. Ebihara. *Geochem. J.* 37, 531 (2003).
- 20) M. Ebihara, N. Saito, H. Akaiwa. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 108, 241 (1986).
- 21) 海老原充、斎藤直美、赤岩英夫、戸村健児. *Radioisotopes* 40, 433 (1991).
- 22) M. Ebihara, H. Ozaki, F. Kato, H. Nakahara. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 216, 107 (1997).
- 23) H. Ozaki, M. Ebihara. *Anal. Chim. Acta* 583, 384 (2007).
- 24) S. Sekimoto, M. Ebihara. *Anal. Chem.* 85, 6336 (2013).

特集 (日本放射化学会第65回討論会・学生若手優秀発表賞による研究紹介)

アクチノイド核を標的としたアイソマー核分光

杉山 晃一¹、郷 慎太郎¹、富松 太郎¹、甲斐 民人¹、長江 大輔¹、石橋 優一¹、
松永 壮太郎¹、永田 優斗¹、西畑 洸希¹、鷲山 広平¹、坂口 聡志¹、森田 浩介¹、
Riccardo Orlandi²、西尾 勝久²、牧井 宏之²、廣瀬 健太郎²、伊藤 由太²、洲崎 ふみ²、
佐藤 哲也²、塚田 和明²、浅井 雅人^{1,2}、静岡 俊行³、井手口 栄治⁴

Tung Thanh Pham⁴、庭瀬 暁隆⁵

(¹ 九大理、² 原研 ASRC、³ QST、⁴ 阪大 RCNP、⁵ KEK)



我々の世界を形作る原子核の存在限界はどのように決定づけられるのであろうか。原子核は陽子と中性子から構成される量子多体系である。原子核は一般に原子番号が大きくなるにつれてクーロン斥力の影響が強くなるため不安定になる。一方、ある陽子数、中性子数を持つとき、原子核は閉殻構造をとり安定化する。超重元素領域には人類未踏の原子核領域「安定の島」の存在が予想されており、陽子数 114、中性子数 184 周辺の二重閉殻構造がその背景にあると考えられている。しかし、安定の島に属する原子核は既存の手法を用いて合成できず、その性質は理解されていない。そこで我々は安定の島の原子核を合成せずにその性質にアプローチする手法の開拓を目指している。変形したアクチノイド核には、安定の島の閉殻構造を構成する軌道に由来する量子状態が発現することが報告されている^[1]。四重極変形によって球対称原子核における 1 粒子軌道の縮退が解け、変形度に応じて軌道のエネルギーが大きく変化するためである。安定の島の閉殻構造を構成する軌道の一部は変形核において大きくそのエネルギーを下げ、アクチノイド核の励起状態に現れる可能性がある。このため、アクチノイド核の核構造を詳しく調べることは安定の島の性質を明らかにするための研究の基礎データとなりうる。しかし、アクチノイド核は放射能を持ち、これらを標的として用いた場合、背景事象が多くなり、検出器が正常に動作する範囲の計数率を超える可能

性がある。また、標的核周辺の様々な核を生成するために多核子移行反応が用いられるが、この際に標的近傍から多くの背景事象が発生する。これらの困難を克服するため、本研究ではアイソマーと呼ばれる準安定状態の測定に特化した実験手法を開発した。物理的な遮蔽と遅発ガンマ線成分に着目した測定を行うことによって、背景事象との弁別が容易になると期待される。この実験手法は 1990 年代に原子力機構で開発されたアイソマー核分光手法^[2]を元に立案した。

実験は原子力機構タンデム加速器施設にて行った。実験セットアップの概略図を Fig. 1 に示す。標的には厚さ $251 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の ^{248}Cm 、ビームには 96.5 MeV の ^{18}O を用いた。本手法では、標的付近で発生した放射線をタングステン製の遮蔽体で遮蔽した。一方、生成されたアイソマー状態の原子核は一定時間飛行し、捕集箔で停止した後脱励起する。このため、捕集箔周辺に検出器を

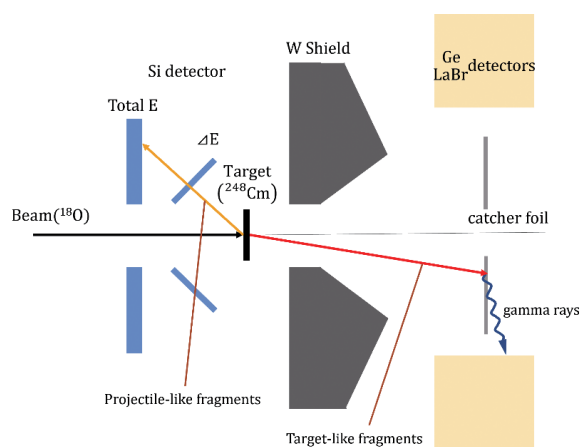


Fig.1. Schematic overview of the experimental setup

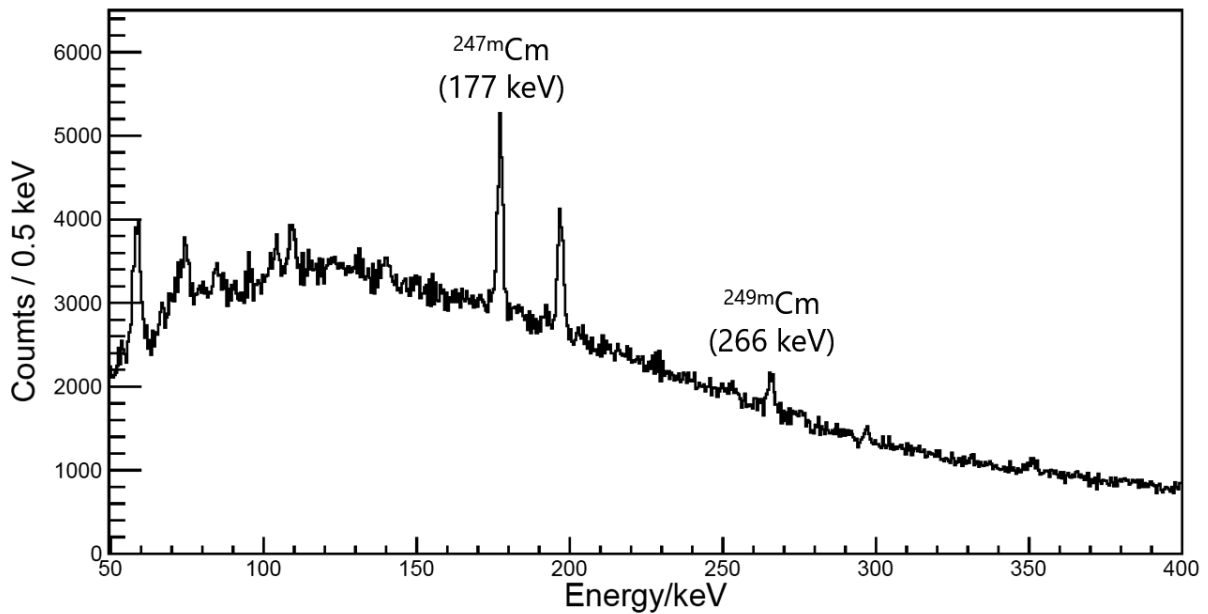
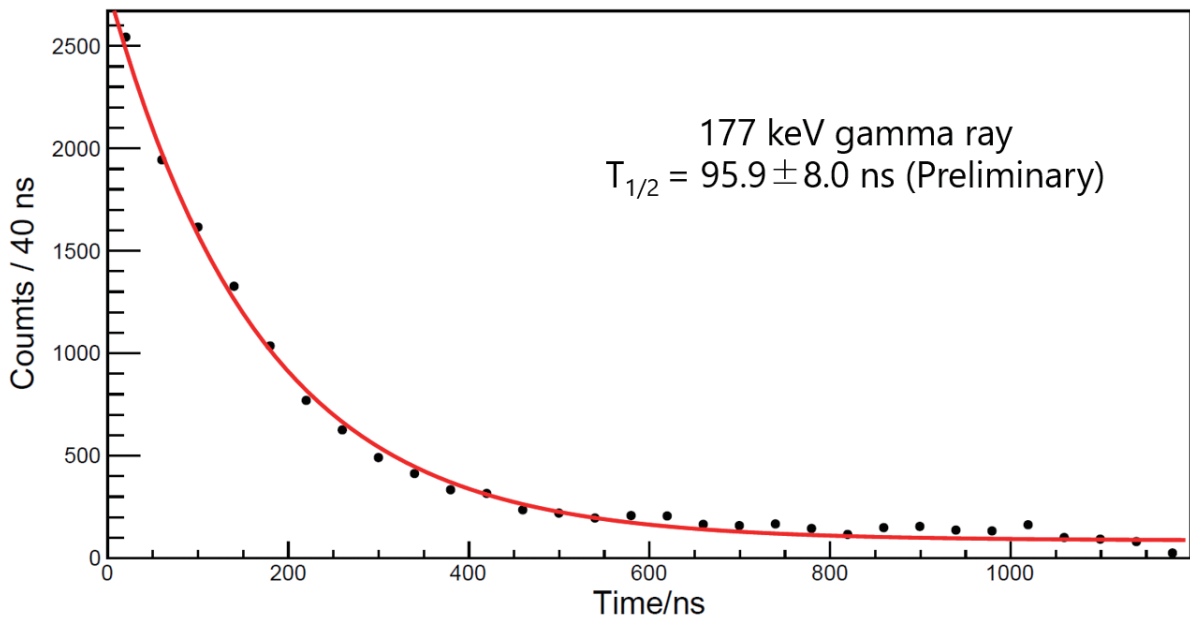


Fig.2. Delayed gamma-ray spectrum

Fig.3. Decay curve of the transition from the 375-keV isomer of ^{247}Cm

設置することによって、アイソマーからのガンマ線を選択的に測定することができる。ビーム様散乱核の粒子識別は標的後方角側に設置したシリコン検出器アレイを用いて検出器を透過する際のエネルギー損失と、その後の残りの運動エネルギーを測定することによって行った。ビーム様散乱核の情報から標的核に移行した陽子・中性子数を同

定し、アイソマー核を識別した。

データ解析では、シリコン検出器の情報をもとに多核子移行反応の生成チャンネルと、核反応が起きた時刻をイベントごとに決定した。それらのイベントが発生した時刻から、遅れて測定された遅発ガンマ線のイベントを抽出し、エネルギースペクトルを作成した (Fig. 2)。177 keV にみられ

るピークは ^{247}Cm の既知のアイソマー状態から放出される脱励起ガンマ線である。また、核反応の時刻と遅発ガンマ線が測定された時刻との差を用いてアイソマー状態の崩壊曲線を作成したところ、半減期が誤差の範囲内で一致した (Fig. 3)。さらに ^{249}Cm 、 ^{250}Bk 、 ^{251}Cf の既知のアイソマーを同定することに成功した。

今後の展望としては、本実験で得られたデータの解析を更に進め、未知のアイソマーを探索する。また、本実験手法を ^{249}Cf 、 ^{254}Es など他のアクチ

ノイド標的に対して適用し、得られたデータと理論計算から、安定の島の性質の理解に繋げていきたい。

参考文献

- [1] T. Ishii *et al.*, *Physical Review C* **78**, 054309 (2008).
- [2] T. Ishii *et al.*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **395**, 210 (1997).

特集 (日本放射化学会第65回討論会・学生若手優秀発表賞による研究紹介)

EXAFS による Ra の水和状態と粘土鉱物への吸着状態の解明

山口 瑛子^{1,2}、永田 光知郎³、田中 万也¹、小林 恵太¹、小林 徹¹、
下条 晃一郎¹、谷田 肇¹、関口 哲弘¹、金田 結依¹、松田 晶平¹、
横山 啓一¹、矢板 毅¹、吉村 崇³、奥村 雅彦¹、高橋 嘉夫²
(¹JAEA、²東大、³阪大)



1. 緒言

近年、放射性元素であるラジウム (Ra) の環境汚染が注目されている。ウラン鉱山周辺の環境汚染問題や放射性廃棄物処理問題に加え、自然由来の Ra による飲料水中の基準値超過の問題も近年報告されているため [1]、Ra の環境挙動の早期解明が望まれる。Ra の環境挙動については、オクロの天然原子炉周辺土壌における鉛の同位体比の分析 [2] や分配係数の比較 [3] 等から、粘土鉱物への吸着挙動の重要性が示唆されているが、吸着様態や吸着機構は不明なままである。

一般に粘土鉱物への吸着反応では、イオンが水和したまま吸着する外圏錯体と脱水して吸着する内圏錯体のどちらを形成するかにより環境挙動が大きく変わる。例えば、放射性セシウム (Cs) とストロンチウム (Sr) は、共に原子力発電所の事故で放出されたが、内圏錯体を形成する Cs は土壌表層に固定された一方で外圏錯体を形成する Sr は固定されなかった [4]。従って、Ra の環境挙動を解明するためには、Ra が外圏 / 内圏錯体のどちらを形成するか明らかにする必要がある。

しかし Ra については、放射壊変により貴ガスのラドンを放出するなどの取り扱いの難しさから、物理化学的に基本的な情報である水和構造でさえも、分子レベルでの解明は行われていなかった。本研究では、世界で初めて広域 X 線吸収微細構造 (EXAFS) 法を用いて Ra の水和構造及び粘土鉱物への吸着構造を調べ、それらの分子レベル構造の解明を目指した。本稿では、特に Ra の水和構造の研究結果の詳細について紹介する。

2. 実験方法

EXAFS 測定用の溶液試料及び粘土鉱物吸着試料は、大阪大学にて精製された Ra²⁺ 水溶液を用い、許認可に則った密封線源を日本原子力研究開発機構にて作製した。EXAFS 測定は、Ra の L₃ 吸収端について 19 素子ゲルマニウム半導体検出器 (SSD) を用いた蛍光法により行った。Ra の子孫核種である鉛の蛍光 X 線 (L_{β4}: 12.307 keV) が Ra の蛍光 X 線 (L_{α1}: 12.339 keV) に干渉することを避けるため、Ra²⁺ 溶液の精製後速やかに SPring-8 の BL22XU にて測定を行った。

EXAFS の結果を考察するため、Vienna Ab initio Simulation Package (VASP) を用いた第一原理分子動力学法 (AIMD) によるシミュレーションを実施した。AIMD は、Ra²⁺ の回りに水分子を 100 個配置したセル (図 1) について、60 ps (ピコ秒) の計算を行い、最初の 10 ps を平衡への緩和の時間とし、後半の 50 ps について解析を行った。この手法については、アナログ元素であるバリウム

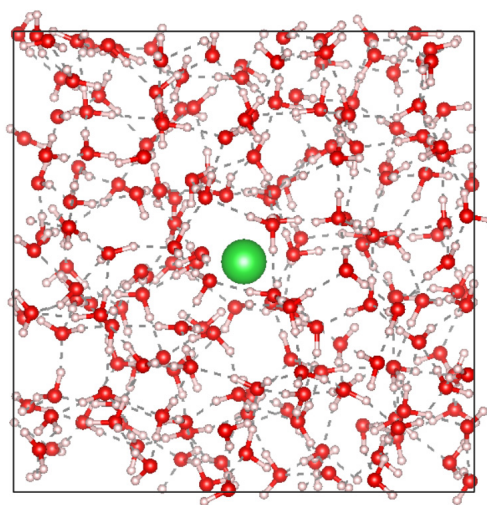


図 1. AIMD を行ったセルのスナップショット。緑、赤、白はそれぞれ Ra、O、水素を示す。

(Ba)について既の実施しており [5]、手法の妥当性は確認済である。

3. 結果と考察

水和した Ra^{2+} における第一水和圏の酸素 (O) の配位数及び Ra との距離 (Ra-O) を、EXAFS と第一原理計算によりそれぞれ求めた結果 (表 1)、整合的な結果が得られた。Ra-O の距離と有効イオン半径から、「水分子の有効半径」を次式の通り求めることができる [6,7]。

(水分子の有効半径) = (Ra-O の距離) - (有効イオン半径)

8 配位の Ra^{2+} の有効イオン半径は 1.48 \AA であることから [8]、「水分子の有効半径」は約 1.4 \AA と求められた。Ba や Sr などの同族元素についても同様の値となることから [7]、今回得られた Ra の水和構造は妥当であると考えられる。

さらに、AIMD を用いて水和構造のダイナミクスについても検討した。第一水和圏内の酸素の平均二乗変位 (MSD) を Ra と Ba で比較したところ (図 2)、一定時間で動く距離が Ra の方が大きいことが分かり、 Ra^{2+} への配位水分子が Ba^{2+} への配位水分子よりも動きやすいことが示唆された。水和構造における水分子のダイナミクスは様々な反応に影響を及ぼす。例えば、地球上に広く存在する石英について、配位水の交換反応速度定数が大きいイオンが吸着すると溶解反応を促進することが知られている [9]。今回の結果を鑑みると、比較的交換反応速度定数が高い Ba^{2+} よりも Ra^{2+} への配位水分子の方がより動きやすいことから、石英の溶解をさらに促進する可能性がある。

4. 結言

Ra の水和構造および粘土鉱物への吸着構造について世界初となる EXAFS 測定を行った。水和構造について AIMD 計算を実施して実験結果と比較した結果、整合的な結果が得られた。また、AIMD の結果から、Ra に配位した水分子が Ba に配位した場合よりも動きやすいということが示唆された。これは石英の溶解反応など、他の反応にも影響を及ぼす可能性がある。

本稿では触れられなかったが、粘土鉱物への吸着構造についても EXAFS 測定を行った。その結

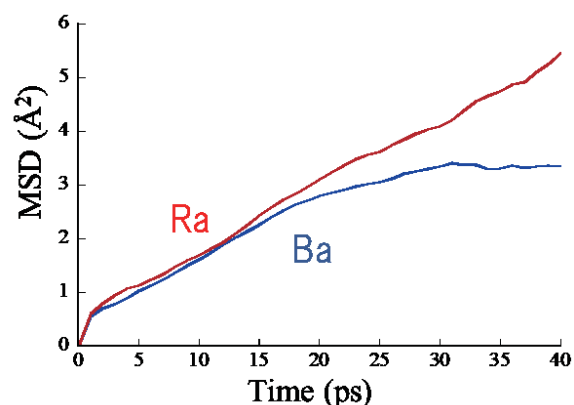


図 2. 第一水和圏内の酸素の MSD の比較

表 1. Ra-O の距離と配位数

	距離 (Å)	配位数
EXAFS	2.87 ± 0.06	9.2 ± 1.9
AIMD	2.88	8.4

果、バーミキュライトについては内圏錯体を、モンモリロナイトについては外圏錯体を形成することが分かった。この結果を確かめるため、Ra のバーミキュライトへの分配係数を異なる pH やイオン強度の条件下で調べたところ、分配係数における pH やイオン強度への依存性が比較的小さく、内圏錯体の形成が示唆され、EXAFS と整合的な結果を得た。これらの結果は、環境中で Ra がバーミキュライトや風化黒雲母 (バーミキュライトの前駆体) などの層状ケイ酸塩に固定されることを示唆している。

引用文献

- [1] Z. Szabo et al. *Appl. Geochemistry*. **27**, 729 (2012).
- [2] H. Hidaka et al. *Earth Planet. Sci. Lett.* **264**, 167 (2007).
- [3] M.A. Chen et al. *Environ. Sci. Technol.* **52**, 4023 (2018).
- [4] A. Yamaguchi et al. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **317**, 545 (2018).
- [5] A. Yamaguchi et al. *Chem. Phys. Lett.* **780**, 138945 (2021).
- [6] Y. Marcus et al. *Chem. Rev.* **82**, 1889 (2009).
- [7] H. Yokoyama et al. Molecular pictures of solu-

- tion, "structure of hydrated ions," Center for Academic Publications Japan, Tokyo, Japan (in Japanese), 1995.
- [8] R.D. Shannon et al. *Acta Crystallogr.* **A32**, 751 (1976).
- [9] P.M. Dove et al. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **61**, 3329 (1997).

特集 (日本放射化学会第65回討論会・学生若手優秀発表賞による研究紹介)

負ミュオンによる非破壊イメージングに向けた
2 mm 厚 CdTe 半導体二次元検出器の開発

邱 奕寰¹、二宮 和彦¹、武田 伸一郎²、桂川 美穂²、南 喬博^{2,3}、
長澤 俊作^{2,3}、高橋 忠幸²、渡辺 伸⁴
(阪大 IRS¹、Kavli IPMU²、東大理³、JAXA⁴)



近年開発されたミュオンビームを用いたミュオン特性 X 線測定による元素分析法は、考古物や地球外物質など貴重な試料の分析に重要な手段を提供している [1,2]。本研究グループ

では、この方法を三次元的な元素分布調査に拡張するために、X 線のエネルギーと入射位置を同時に測定できる CdTe 両面ストリップイメージング検出器 (CdTe-DSD) の開発を行ってきた。これまで、750 μm 厚の CdTe-DSD に関する研究が行われてきたが [3,4]、高エネルギーのミュオン特性 X 線に対する吸収率は低いという問題点があった。例えば、750 μm 厚の CdTe-DSD に 100 keV の X 線の吸収率は 40% 以下である [5]。より多くの元素を分析するためには、高いエネルギーのミュオン特性 X 線にも良い検出感度を持つ厚い CdTe 素子を使う必要がある。本研究では、2 mm 厚の CdTe-DSD の開発を行った。図 1 に本研究で iMAGINE-X 社と共同で開発した 2 mm 厚の CdTe-DSD の写真を示す。32 \times 32 mm² 大面積の半導体検出素子が FEC ボードの右上に設置され、CdTe 結晶の両面に Pt 電極 (陰極) と Al 電極 (陽極) が 128 本ずつを取り付けられている。両面にそれぞれ 2 枚 ASIC をつけており、データ読み出しシステムとして使用されている。

厚い CdTe 結晶では、X 線の吸収効率が高くなるが、内部に生成した電荷キャリア (正孔 - 電子対) が両側の電極までの距離も増加するため、電荷キャリアが移動する途中での再結合の寄与が大きくなり、エネルギー分解能が低下する。我々は、点線源 ⁵⁷Co を利用して、検出器の特性を把握した。高いエネルギーの光子 (⁵⁷Co 由来の 122.1 keV X 線)

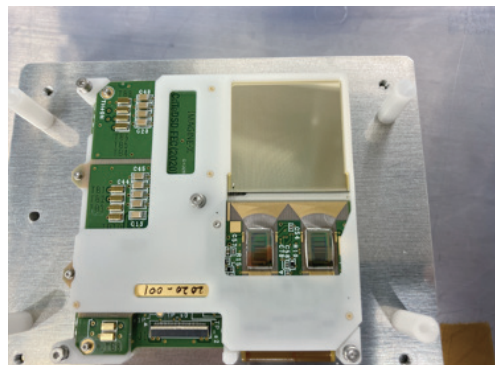


Fig. 1 Schematic overview of 2 mm CdTe-DSD.

が CdTe-DSD に入射すると、電荷キャリアが深い場所に発生し、CdTe 結晶の中での正孔の電荷輸送特性が小さいという特徴のため、電荷が効率よく電極に誘導されないことが分かった。正孔と電子由来の ⁵⁷Co のエネルギースペクトルを図 2 (a) に、それぞれ赤線と青線 (Cathode と Anode) で示す。Al side (Anode) から得られたスペクトルでは、比較的良好なエネルギー分解能が得られているのに対し、Pt side (Cathode) では正孔の移動度が低いため、低エネルギー側に tail 成分が存在している。我々は両極の信号の相関性を分析し、エネルギー情報を再構築する新たなアルゴリズムを開発した。図 2 (b) に両極のシグナルの差と平均の相関図と示す。Pt-side の tail 成分の原因で、122.1 keV のピークのところでは多くのイベントが $E_{Pt} < E_{Al}$ となっている。これにより、光子のエネルギーが 122.1 keV からシフトし (図 2 (b) の横軸)、分解能が悪くなっていた原因である (図 3 の上図)。そこで図 2 から 122.1 keV の主成分分析により計算した中心値を予測値に補正し、全領域に対応できる関数を作成した。図 3 の下図は補正後の比較図である。エネルギー分解能を大幅に改善し、FWHM は 3.6 keV@122.1 keV に達し

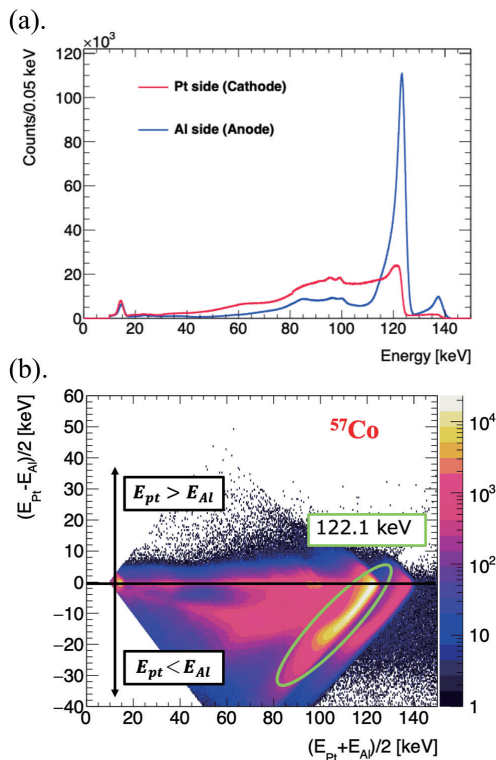


Fig. 2 Energy spectrum of ^{57}Co . (a). Pt and Al side of CdTe-DSD corresponds to cathode and anode side, respectively. (b). shows the difference and average of two sides.

た。なお、今回適用したエネルギーの補正方法は、CdTe 半導体検出器だけではなく、電子と正孔の輸送特性が異なる他の半導体検出器にも応用可能である。

点線源と X 線テストチャートを用いて、CdTe-DSD の位置分解能についても評価した。図 4 に実験セットアップと測定したイメージを示す。再構成した投影図はテストチャートの形を正しく再現し、 $333\ \mu\text{m}$ pitch についても分離可能であることが分かった。測定したイメージにフィッティングを行い、各 pitch のサイズ (FWHM) を導出したところ、この検出器の位置分解能として $164\text{--}216\ \mu\text{m}$ が得られた。

結論として、本研究で開発した $2\ \text{mm}$ CdTe-DSD は、十分なエネルギー分解能とサブミリメートルの空間分解能を備えており、ミュオン特性 X 線の非破壊三次元元素分析に適用な性能を持っていることが分かった。

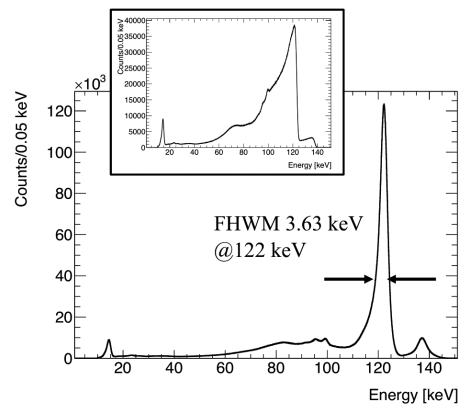


Fig. 3 Comparison of energy spectrums.

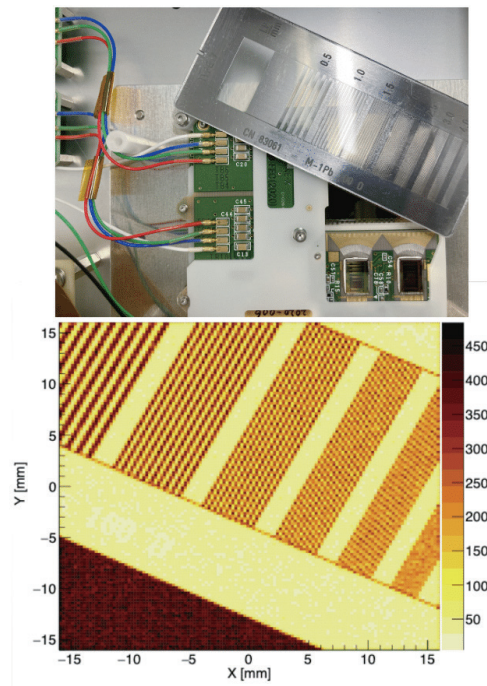


Fig. 4 Imaging experiment setup (upper) and shadow image of test chart (bottom).

引用文献

- [1] K. Terada et al., Sci. Rep., 4(2014).
- [2] K. Ninomiya et al., J. Radioanal Nucl Chem., 320 (2019).
- [3] M. Katsuragawa et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 140 (2018).
- [4] 邱奕寰 ほか, 放射化学 第 43 号, P37 (2021).
- [5] T. Takahashi et al., IEEE Trans Nucl Sci., 48 (2001).
- [6] K. Furukawa et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 978 (2020).

特集

「放射化学の夢ロードマップ」について

篠原 厚¹、羽場 宏光²、佐藤 渉³、高宮 幸一⁴、別所 光太郎⁵(¹ 会長・阪大 IRS・大阪青山大、² 理事・理研仁科セ、³ 理事・金沢大理工、
⁴ 理事・京大複合研、⁵ 理事・KEK 放射線科学セ)

[はじめに]

日本放射化学会は、昨年（2021年）4月1日から正式に新法人に移行し一般社団法人日本放射化学会としてスタートしました。9月に法人になって初めての（コロナ禍でオンラインとなりましたが）討論会を開催し、その特別セッションで、学会全体としての「(一社)日本放射化学会 研究展開ロードマップ(2021年度版)」を披露しました。この全体版のロードマップは、討論会やその後の意見収集(パブコメ)を経て、さらに改定を重ねた最終版を公表することが了解され、現在その作業を終えようとしています。

本稿では、会員の皆様に公開の同意を得るプロセス(これまでの経緯)、最終版の作成方針や理念、各分野の説明、ロードマップへの期待と今後の運用などについて、会員の皆様にご理解いただき、自分たちのロードマップとして活用いただけることを願って、作成に関わったロードマップ世話人グループで寄稿したものです。ぜひご一読いただき、「放射化学の夢ロードマップ」へのご意見などお寄せいただければと思っています。今後は、各部会を中心に2年ごとの更新を続けることとしていますので、その際に皆様のご意見を反映できればと思っています。

[これまでの経緯と全体方針]

学会のロードマップを作成するきっかけや理念、目的は、前回の記事(「放射化学」第43号、p.1-20)に記載させていただいていますので、詳細はそちらに譲り、ここでは、その後の経緯と全体版策定の方針、パブコメでいただきましたご意見の骨子とそれへの対応を簡単にまとめ、それぞれの分野の内容を担当頂いた世話人に概説頂きました。

このロードマップは、我々の新たな学会の教育研究のビジョンと夢を描くベースとして、現在一近未来から、未来の夢に至るまでのマイルストーン的なものを並べたものです。当然、我々の放射化学は分野によってかなり色合いも異なりますので、全員一致でゴールに向けて一丸となって進みましょう、などと言うモノではなく、会員各自の教育研究の方向・将来構想を描く一助として、また、いろいろな場で放射化学をアピールするために活用できればと思っているものです。さらに、ロードマップというものは、当然どんどん進化するもので、皆さんで書き換えてゆくような雰囲気こそが必要と思っています。

ここで簡単に経緯を復習しますと、このロードマップ作成の取り組みは、2019年度の第63回討論会(いわき)の学会創設20周年の記念事業の一つとして、分科会を軸にして4分野(核化学、核プローブ、放射化分析、環境)と教育の5つのワーキンググループ(WG)を立ち上げ、足掛け2年間にわたり、各分野のロードマップの検討を行いました。そのロードマップは、2020年の第64回討論会(豊中)で披露され、その際のパネル討論会で学会全体として公開のロードマップを作ろうということになりました。この作業は各分野のロードマップWGの世話人が集まり(当然その裏にWGメンバーが協力しています)、以下の方針で進めました。

(以下パブコメ実施の際の説明文を抜粋)……………
学会ロードマップ策定の方針

- 基本方針： 各ロードマップを元にまとめる(各ロードマップのエッセンスを抽出)
分科会の枠を外し共有、分野の理念・方向を示す、マイルストーン…

- 縦軸 (分野) : 分野として基礎 - 応用、社会貢献、基盤設備、教育人材を設定
- 横軸 (時間) : 現在 -10年 - (計画) -20年 - (構想・夢へ) -50年 -

今後の予定 (一般公開まで)

- 法人化記念式典で学会ロードマップを披露
⇒ 2021年の第65回討論会 (都立大・理研) にて実施済み
- 公開に向けた意見聴取 (パブコメ) : 第65回討論会から～2021年10月31日 ⇒ 実施済み
ポスターセッション コメント欄に意見を自由記入
学会ホームページ (会員ページ) 上に掲載 (詳細はMLでアナウンス)
- 改定作業を経て、学会ホームページ上で一般公開 : 2021年度内

現在、上記の一番下段の改定作業をほぼ終了し、2022年6月の会員総会までに、学会ホームページ上で一般公開すべく準備を進めています。

パブコメでは、いろいろ貴重なコメントを頂きました。ここでは詳細を省きますが、それぞれの専門のお立場からの内容・項目への意見や、分野ごとの表現の違い、体裁に関すること、第3者によるレビューの提案など多岐にわたりました。ただ、否定的なご意見は無く建設的なものばかりで感謝しています。改定作業では、コメントを精査させていただき、現時点で可能な改定と次期更新時の課題とさせていただく部分に仕分けし、対応することとしました。それゆえ、本稿に掲載しているロードマップ (ほぼ公開版) は当然完全なものではありませんが、今後、継続して更新をしてゆくことを前提にご容赦いただければと思います。

全体の方針と体裁は、上記の方針に記載してある通りで、時間軸の右のほうは「夢」に当たる部分で特に50年にこだわったものではありません。それぞれの分野の帯にその分野の理念や方針が記載されており右端 (赤枠) にゴールが示されています。社会貢献の部分は他学会・機関等との連携で我々が大きく貢献して実現したい項目です。それぞれ少し表現の仕方が違っていますが、以下の分野ごとの説明をお読みいただき、その思いをご理解いただければと思います。

[基礎科学・核化学分野]

核化学とは、「原子核の壊変や原子核反応が伴った化学研究分野」です。具体的には、新元素・新同位体の探索、放射性元素 (特に重・超重元素) の化学、原子核構造、原子核壊変、原子核反応、原子核分裂の研究等がそれにあたります。核化学の使命は、元素周期表と核図表を拡大するとともに、物質の構成要素である原子・原子核の特性を究極的に理解し、得られた知見を多分野に波及させて新しい応用を開拓することにあります。核化学は、原子核壊変や原子核反応を利用するため、物理学、特に原子核物理学や原子物理学と深い関係にあります。また、原子核・原子 (電子) の性質と反応、同位体製造・分離、トレーサ利用を通じて、放射化学の他の分野 (原子核プローブ、環境放射能、放射化分析、教育) のみならず、分析化学、無機化学、生化学、有機化学、地球化学、量子化学等、化学の広い分野と密接に関係します。さらに、天文学、環境科学、工学、医学、薬学、生物学、地学、考古学、RIの規制・管理に至るまで、他分野との繋がりは多岐にわたります。

2010年代、日本放射化学会の核化学研究者が貢献して、アジア初・日本発の新元素ニホニウムの発見、106番超重元素シーボーギウムのカルボニル錯体の化学合成、103番元素ローレンシウムのイオン化ポテンシャルの決定、トリウム-229mの人工的生成等、特筆すべき成果が多数上がりました。今後50年においても、新元素・新同位体の探索、原子核・原子の性質・反応の理解、核・原子模型完成による物質の究極的理解が核化学研究の基軸となっていくでしょう。これらを実現するためには、理化学研究所RIビームファクトリー、日本原子力研究開発機構タンデム加速器施設、大阪大学核物理研究センター等、我が国が世界に誇る最先端の加速器施設を駆使し、さらにこれらの施設の高度化を進めていくことが不可欠です。今後、より短寿命かつ希少な元素と同位体を研究対象としていくためには、単一原子から極微量物質の取り扱い、原子核、原子、分子、イオンの操作 (製造・分離・検出) 技術の革新も必要不可欠になります。

核化学分野の近未来 (～10年) のマイルストーンとして、119番新元素の発見、第7周期元素の

化学、Th-229m 原子核時計を、続いて(～20年後)、130番元素の発見、 $\pi \cdot \mu$ 原子化学、第8周期元素の化学、そして50年後以降、夢として、安定の島への上陸と反物質による化学を掲げました。核化学が探求する原子核・原子の基本的性質の理解は、究極的な原子核・原子模型の完成や、宇宙での元素合成過程の解明に繋がるだけでなく、新しい応用を切り拓く基盤となることはいまでもありません。

2022年1月現在、水素から118番元素オガネソンまで、118種の元素が知られ、元素周期表の第7周期が完成しています。元素は173番元素くらいまで存在するという理論があります。一方、原子核は約10,000種あると予測され、人類はその3分の1程度に手が届いたに過ぎません。今後も核化学は周期表と核図表を拡大し、物質を構成する原子・原子核の究極的理解を目指すべきでしょう。

[原子核プローブ分野]

物質科学において、研究対象の物質中に放射性核種や素粒子を探針(プローブ)として導入し、これらの壊変過程で放出される放射線を測定することによってホストの物性を微視的視点から評価する分野があります。いわゆる「原子核プローブの科学」です。放射化学においては、原子核の壊変現象が局所環境に及ぼす影響を調べる「ホットアトム化学」から発展した研究分野です。現在では実験設備・装置の目覚ましい進展により、内部磁場、局所構造、格子欠陥、プローブやその周辺の動的振舞いなど、物質内部のミクロな情報を原子レベルから議論することが可能となり、物性研究に欠かせない分野として成長を遂げています。研究手法ならびに研究対象は多岐にわたっているため、今後数十年の間にこの分野がどのように発展するのか、想像するのは容易ではありませんが、期待という意味では様々なことが言えます。このロードマップに冠された「夢」という言葉にはそぐわないかもしれませんが、現実的に次のような進展が期待できると考えられます。

原子核プローブの科学の最大の長所は、バルクの物性測定では得られない微視的な情報を与えることにあります。その反面、スピンやその偏極度、

半減期など、個々の分光法の原理の束縛によって、適用できるプローブが限定されるという短所も合わせ持っています。しかし、加速器や原子炉による核反応によって生成した短寿命粒子をオンラインでビームとして対象物質に注入する手法を採用することで、種々の新規プローブの開発が可能となり、上記の短所を克服することができるでしょう。新規プローブの開発に加えて、(偏極)RI、ミュオン、陽電子などの超低速ビームの開発によって、表面物性の研究の進展も大いに期待できます。また、原子核による放射光の共鳴吸収を利用した核共鳴散乱法では、試料中に存在する安定核がプローブとなるため、生体物質や宇宙・地球科学試料など、熱処理できない物質の研究の裾野を拡げる可能性にも期待できます。以上の方法論については、現時点で既に走り出しているものもありますが、物質内部の局所場を「隈無く」観測するには、ビームエネルギーの自在制御および高強度化が不可欠であり、しばらくはこの技術の蓄積に時間を費やすことになりそうです。

「物質を科学する」には、局所場の微視的な情報の取得に加え、構成元素の分析も不可欠になります。将来的には既存の放射線測定技術に立脚した元素分析法(中性子放射化分析法、即発 γ 線分析法、核反応分析法、ミュオンX線分析法など)と上記の局所場測定を組み合わせた非破壊同時解析法の開発も視野に入れたく思います。また、理想的な物質、極端な表現をすれば、特定の場所にプローブを含んだ希望する原子配列をもつ物質を構築する技術(例えばエピタキシャル合成など)の高度化を進めることも必要となるでしょう。これらのことを実現するためには、RI製造技術、測定技術のノウハウや方法論を蓄積している他の部会(核化学、放射化分析、環境放射化学)や放射化学会以外の分野の研究者との連携協力が必須になります。分野を横断した研究を展開することにより、「原子核プローブの科学」が物性研究の中で確固たる位置を占め、さらなる発展を遂げることを期待します。

[放射化分析分野]

2020年の討論会で説明しました放射化分析分野の研究展開ロードマップでは、約10年後まで

の比較的近い将来での本分野における展開が示されました。そこでは、国内での放射化分析研究の中心的な役割を担っている日本原子力研究開発機構 (JAEA) の研究炉 JRR-3 及び京都大学複合原子力科学研究所の研究炉 KUR、JAEA と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同で運営する大強度陽子加速器施設である J-PARC を中心とした、放射化分析法の高度化を目指した研究、教育の取り組みが紹介され、これらが最終的な (10 年後の) ゴールとしての新試験研究炉を用いた次世代の放射化分析法の実現へとつながっていました。このロードマップを出発点として、「(一社) 日本放射化学会 研究展開ロードマップ (2021 年度版)」中に時間軸を 50 年後まで伸ばしたロードマップが組み込まれ、その後さらに議論を重ね修正を試みてきました。その結果、前述の新試験研究炉での「次世代放射化分析法の実現」は「高度標準分析法への発展」へとより具体的な表現に変更し、小型中性子源・光子源の開発によって実現されるであろう「(放射化分析法の) 汎用化」、検出器や測定系の性能向上によって実現が期待される「あらゆる核事象の同時測定法の開発」を加えた 3 つの大きな研究開発の流れを記載することとなりました。50 年後にはこの 3 つの流れが結集することで実現が期待される「全元素リアルタイム 3D イメージング」を目標 (夢) として示しました。「全元素リアルタイム 3D イメージング」とは、原子核の励起、脱離、核反応などあらゆる核事象を駆使した融合型の次世代化学分析として、超微量 (アトモル) レベルの全元素を分析対象とした、in-situ かつ 3 次元での位置 (原子配列) 情報も同時に得られる分析手法を思い描いており、実現すれば放射化分析や放射化学の分野を超えた汎用的な分析技術として科学研究の広い分野で活用される手法となることが期待されるでしょう。

[環境放射化学分野]

我が国における環境放射能に関わる放射化学研究は、広島・長崎原爆に関わる残留放射能評価に始まり、核実験によるグローバルフォールアウト (1950-1960 年代)、チェルノブイリ原発事故 (1986 年)、福島第一原発事故 (2011 年) による放射性

物質の環境放出など、核関連事故と核汚染の歴史に係る調査研究活動を中心に進められてきました。福島第一原発事故以降は、国民の放射能に対する関心の高まりを背景に、様々な分野の研究者が環境放射能研究に関わるようになり、極微量の Pu, Cs の測定、顕微鏡技術を用いたマイクロパーティクルに関わる研究、航空機サーベイやロボット / 自動化測定装置などの新たな手法も活用した環境中の放射性核種に関わる調査研究成果を、様々な学会や報道等で目にする機会が増えました。環境放射化学は、核種を「きちんと測定」して「環境動態研究に生かす」ことを主目的とする分野ですが、環境試料中の極微量放射性核種の分析は技術的に容易ではないことに加え、調査地域への立入許可や規制の厳しさなどにより、希望する測定が容易に実施できないなどの状況も重なり、環境放射化学研究が分野内外から魅力的に感じられていない面もあったように感じます。

環境放射化学は、核化学と連携して未同定の放射性核種を探索する「周期表のフロンティア」、環境試料分析に必要な高度な分析手法の開発を目指す「分析化学のフロンティア」、放射性核種の挙動解明のために化学結合の性質の理解を進める「化学結合論のフロンティア」などの特徴を持ち、社会と多くの接点を持つ研究分野でもあります。今後の取り組みにおいて重要な点は「堅牢な学術分野としての環境放射化学」を確立していくことであり、自由な発想に基づく最先端研究、たとえば、環境中の極微量放射性核種 / 同位体を正確に定量し存在状態と性状を明らかにすることや、計算科学的アプローチも組み合わせ重元素も含めたすべての元素を対象とする「環境中のアラユルニウム」への取り組み、などが考えられます。さらに地球惑星科学や宇宙科学、生物科学、医学、年代学、地球温暖化関連科学など他分野への波及効果と新たな知見や手法の導入を意識し、他分野と積極的に連携をはかることも重要です。社会の要請を満たす責務として、バックエンド由来核種の環境動態評価を進めることも必須であり、これらの取り組みでも新しいサイエンスを見出しながら取り組む姿勢が必要です。福島、広島、長崎、人形峠などのレガシーサイトや、尾小屋の極微量放射線計測設備などのユニークな研究環境を、日本

独自の財産として風化させない、前進するための場として活用することをこころがけながら国際連携にも取り組み、測定データや研究成果の重要性や面白さを国民のニーズに対応する形で提供し、広く理解してもらえるように取り組むことで社会に還元することが求められます。

世界では、今後20～30年間に200基以上の原子力発電所が廃炉となると見込まれています。福島第一原発をはじめとする廃炉や除染を含めた環境回復への取り組み、放射性廃棄物の再処理・地層処分・核変換処理への取組みなど多くの社会活動において、放射性核種の環境挙動を定量的に評価し理解する「放射化学」が果たすべき役割は高まっています。研究用原子炉や加速器利用施設、最先端分析装置の活用、閉鎖型環境動態実験施設などの大規模施設の実現に他分野と協力して取り組むと共に、長い歴史と多くの知見を財産とする放射化学の手法と知識の継承も大切に、質の高い研究成果を発信し分野の活性化をはかっていくことをめざします。

[社会貢献パート]

2021年、福島第一原子力発電所事故から丸10年を迎えました。この事故は、放射化学の研究分野に大きな影響を与えてきました。今後も放射化学は、物理学、化学、工学等、他分野と協力し、除染技術の開発、核廃棄物の有効利用・発電、RI電池の実現に貢献すべきでしょう。さらに、核変換による廃棄物処理への貢献が期待されます。本ロードマップには、夢として、核反応による発電と生じた廃棄物の処理を同時に行う、無廃棄物核反応炉発電を提案しています。一方、生物学、医学、薬学分野では、2010年代、ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT: Boron Neutron Capture Therapy) が普及し、現在ではアイソトープ治療、特にアスタチン-211やアクチニウム-225等、アルファ放射体を用いた核医学治療が大きな注目を浴びています。日本発アルファ核医薬品、有用RI国産化、RI・核医薬品輸出、ホーム核医学診断治療を実現させる上で、放射化学が果たすべき使命は極めて大きいと思われれます。夢として、コンパクトかつ安全な加速器・原子炉・核融合炉を用いたRIの自家製造とRI利用を掲げています。放射化学が

探求する知見と技術は、確実に社会に還元され、安全安心健康長寿社会の実現に繋がっていくと著者らは確信しています。

[教育人材育成パート]

教育人材育成のロードマップは、前回ロードマップの記事でも述べましたが、特に50年先の夢の話にはすぐわないと考え、10-20年程度について検討しています。社会情勢や一般の教育環境の変化にも大きく関わるため、長期的課題・方針を持ちながらも、中期計画的にリアルに検討し進める必要がある分野と考えています。

ロードマップに上げている内容は、他との調整は少ないため、昨年度の分野別ロードマップをほぼそのまま（簡略化されていますが）掲載したのとなっています。その中で、組織的な取り組みの必要性を挙げ、教育部会の設置を提案しましたが、現在、それはすでに実現し、実際の行動に移す段階にあります。

我々の分野の大きな課題は、人材であることは言うまでもなく、前回にも書きましたように、一放射化学のアカデミックな状況として、全国的な放射化学研究室の減少に伴い、関連する教育の機会減少が懸念されているにもかかわらず、一方では、福島第一原子力発電所の事故以降は特に、放射能汚染モニタリングや廃炉に関係する放射化学技術や研究者の必要性が叫ばれている。—という状況を鑑みると、放射化学会の果たす役割は大きいと考えます。具体的には、現在の学生・若手の支援はもとより、広く学生に我々の分野やその魅力を知ってもらうべく、大学、大学院の教育の充実を支援し、同時に関係する教育自体が無い大学等への教育機会の提案・提供、関連分野への放射線やRI実習等の支援、それらを効率的に進めるための教材コンテンツの開発やそのDXの推進などがあり、特に、コンテンツのDXはコンテンツアーカイブの作成と並行して、早期に進めるべきもとと考えています。また組織的な課題としては、関係学協会との教育人材育成面での連携や、社会教育、学校教育への関与も重要な課題であり、ロードマップに記載し、着実に進めるべきと考えています。

分野としての目標は、ロードマップに記載して

いますが、本当に放射線・RIが扱える人材が枯渇しつつある中、山積する人類的課題への対応や未来社会の自由度を失わないためにも、我々の分野の人材育成は最優先課題です。教育部会を司令塔として、放射化学会が組織的に当該分野の教育人材育成の推進もしくは支援を具体的に進め、ロードマップを実効性のあるものとすべく、会員各位の協力をお願いいたします。

【終わりに】

ロードマップの活用については、まだまだアイデア募集中と言ったところです。まずは、会員の皆様自身のモノとして、我々の分野の紹介や会員間の交流の切っ掛けに活用いただき、さらに学生に夢を語る際のネタの一つにさせていただければ、その役目の半分以上は果たせたと思います。また、以前から掲げているもう一つの施策、他学会

との連携の際にも重要な資料となりますし、日本学術会議が3年ごとに更新している大型研究のマスタープランの策定にも、ロードマップを基に取り組めればと考えています。さらに、会員の連携が進み、大きなプロジェクトの予算獲得の資料や国へのアピールの際に、学会や学問分野のビジョンを示すものとして活用できれば幸いです。

最後に、ロードマップを活用するには、それが常に新鮮で会員の思いが反映されていなければなりません。そのためには更新を続けることが必須です。ロードマップWGと理事会では、部長長に各部会のミッションとして2年ごとのロードマップ更新をお願いしています。世代を超えた部会員間の意見交換のネタとして、是非ともよろしく願います。ロードマップの各分野の右端にある「夢」は実現するためにあります。

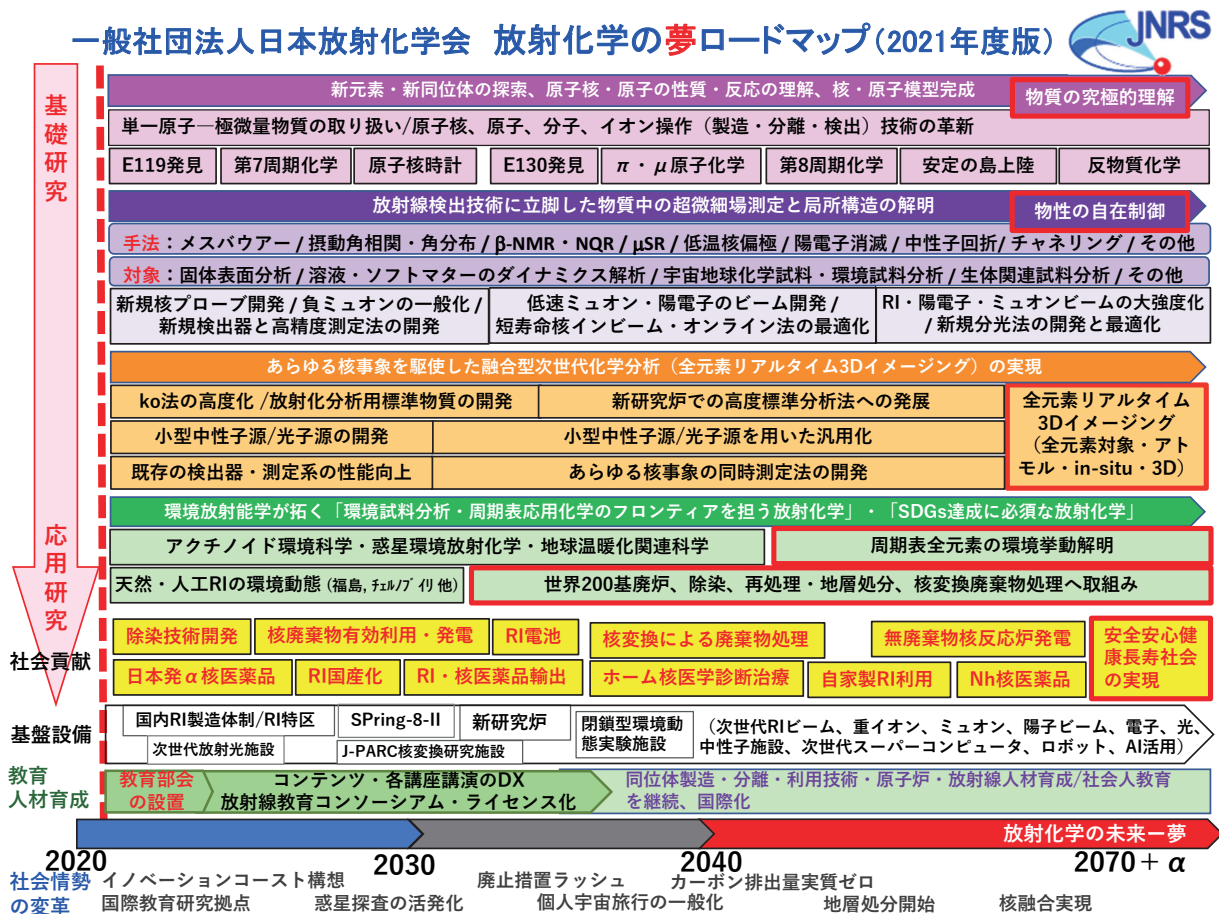


図 「放射化学の夢ロードマップ (2021年度版)」

会議報告

日本放射化学会第65回討論会（2021）実施報告

大浦泰嗣¹、羽場宏光²
 (¹ 東京都立大学、² 理化学研究所)

1. はじめに

本学会の法人化後初の討論会として、日本放射化学会第65回討論会が2021年9月22日(水)から24日(金)まで、オンライン形式にて開催されました。本討論会は、当初は福島県郡山市にて7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry 2021 (APSORC2021)との同時開催となる予定でした。しかし、コロナ禍によってAPSORC2021が1年延期され、急遽、開催約1年前に東京都立大学(都立大)と理化学研究所(理研)との共同開催による第65回討論会の通常開催が決定されました。都立大は第36回(1991年)、理研は第40回(1996年)にそれぞれ単独に開催して以来、25年ぶりに討論会を開催させていただきました。

2. 準備、運営

実行委員会は、都立大と理研の会員を中心に、日本大学と慈恵会医科大学の会員の協力も得て、14名で構成しました。第一回実行委員会を2021年2月にオンラインで開催し、その後7回の委員会もすべてオンラインで行い、一度も直接顔を合わせる機会はありませんでした。会期はAPSORC2021の旧日程内とし、会場は都立大南大沢キャンパス12号館/11号館としましたが、オンラインによる開催も視野に入れ、いつ開催方法を決定するかが問題でした。ハイブリッドによる開催は、実行委員会の陣容から負担が大きすぎると判断し、二者択一としました。2021年1月には東京都で緊急事態宣言が発令されましたが、2月下旬には収まりをみせ、このまま推移することを願いましたが、4月には再び感染者数の増加が見られ(第4波の始まり)、4月の実行委員会でオンライン開催を決定し、理事会で了承されました。その後東京都のコロナ新規感染者数は8月に1日当たり5000人を超える第5波のピークを

迎え、オンライン開催で致し方なかったと納得しました。

オンラインでの開催にあたり、利用する会議システムの選定を行いました。前回の討論会で採用されたシステム/業者の使用感や、APSORC2021組織委員会で採用されたシステム(アトラス社 Confit)の紹介、その他システムのWebでの情報収集から検討し、AIoTクラウド社のLINC Bizを利用することとしました。当時あまり採用例の多くないシステムではありましたが、ポスターセッションに特徴のあるシステムであること、東北大学電子光物理学研究センターシンポジウムでの利用経験がありよい印象があったこと、さらに価格面から採用を決めました。このシステムの運営は我々自身で行う必要があり、LINC Bizのプラットフォームに我々自身で各チャンネル(会議室)を作成し、参加者の招待を行いました。AIoTクラウド社担当者が常に監視しているわけではなく、支障が生じた場合に電子メールで連絡する体制でした。会期中は、都立大と理研で各委員が進行状況を見守り、必要に応じて参加者に適切な案内やサポートを、Zoom Web会議システム、電子メール、電話を通して行いました。特に初日はシステムに接続できない、画面共有できないなどの支障が生じ、AIoTクラウド社に助けを求めましたが、迅速に対処法を連絡いただきました。事務局のネット回線に不具合が生じた時に対処するため、都立大と理研の双方にWiFiルータをレンタルしましたが、幸いにこれを使用することはありませんでした。口頭発表は基本的にZoom等と同様な方法でしたが、初めてLINC Bizを使用する参加者が多数おられ、利用にあたってご不便をおかけしたことをお詫びいたします。

これまでの討論会のWebサイトを改修して本討論会のWebサイトを立ち上げました。この

Web サイトを通じて、各種情報配信、講演申し込み、参加登録等を行いました。クレジットカードによる参加登録費の支払いも可能としました。研究発表のシステムとは別の業者にクレジットカード支払いのための Web ページの作成と参加費の徴収を依頼しました。今回、要旨集に加えてプログラム集の冊子体も作成せず、PDF のみの配布としました。そのため、経費を削減でき、学会からの補助は必要なくなりました。

準備にあたって苦労したのは、参加登録費振込用の実行委員会の口座の開設でした。任意団体の口座開設は年を追うごとに難しくなっています。これまで毎年新たに口座を開設していましたが、今回、法人化の機会に今後引き継いでいける口座の開設を目指しました。ゆうちょ銀行に申請の相談に行ったところ、最近さらに審査が厳しくなったと郵便局担当者に言われ、何度か申請書類を作成し直しましたが、口座開設にはいたりませんでした。時間的余裕もなくなり、ちょうど法人の振替口座ができましたので、これを利用させてもらうこととしました。実行委員会の口座開設については、筆者の大浦が学会の会計担当理事であることもあり、引き続き検討を続けます。なお、法人化にあたり討論会の会計は学会の会計の一部となりますので、今回以降は収支をすべて証拠書類とともに理事会に報告しなければなりません。

共催/協賛学会は、実行委員の人数が少なく、関係する分野も広くないことから、前回よりも少なくなり、日本化学会、日本物理学会、日本分析化学会、日本放射線安全管理学会、日本保健物理学会、日本薬学会、日本原子力学会の7学会から共催/協賛を得ました。実は、8月末にある会員から、「日本原子力学会は第一回からの共催学会なのだが、今回は共催になっていない」との指摘がありました。実行委員の不手際で、申請方法を調べたものの、申請まで至っていませんでした。日本原子力学会につきましては会期終了後に協賛を承認していただきました。「討論会発足の時点では、日本化学会、日本分析化学会、日本原子力学会の3学会の共催、放射化学会発足後は年會に移行したが回数は以前からの積み重ねとして名前も継承するとしました。主催は日本放射化学会で、日本分析化学会、日本原子力学会、日本薬学会の

3学会は共催(または後援、協賛)のスタイルです。経緯を含めて次回にお伝えください。」とのことでした。ご指摘ありがとうございました。実行委員には討論会開催の経験者がおらず、今振り返ると経験者の方を実行委員に迎えて、いろいろアドバイスをいただければ準備がスムーズに進んだのではないかと思います。

今回、18社から協賛を得ることができました。討論会 Web ページに、協賛団体名とロゴ、各団体 Web ページへのリンク、講演要旨集とプログラムには広告を掲載しました。所定の基準を満たされた5社については、口頭発表の休憩時間に広告を配信しました。

3. 討論会概要

3-1 参加者数

本討論会には、合計 221 名の参加がありました。その内訳は、放射化学会正会員 114 名、同学生会員 36 名、共催学会会員 8 名、非会員一般 20 名、非会員学生 15 名、協賛企業社員 28 名です。講演発表申し込み数が例年よりもずいぶん少なかったため、参加者数も少なくなるかと不安でしたが、例年並みの参加者数となりました。オンライン会場の入場者数は、各日とも、常時 100 ~ 120 名でした。

参加登録費については、初期からオンライン開催として準備してきたこと、オンライン発表の委託費を初めてとして経費があまりかからなかったこと、多くの企業から協賛していただいたことにより、従来よりも安く設定することとしました。早期登録の参加登録費は、正会員 3000 円、学生会員 無料、一般非会員 6000 円、学生非会員 3500 円(共催協賛学会会員も本学会会員と同額)として設定し、理事会で承認いただきました。なお、財政に余裕があったため、協賛企業には各 3 名を無料で招待し、28 名(正会員 1 名と共催学会会員 2 名を含む)の参加がありました。

3-2 プログラム

法人化して初めての討論会ということで、初日の開会式に続き、法人化記念式典として第3代会長(2004 ~ 2006 年度)・近藤健次郎先生からご祝辞をいただきました。引き続き、篠原会長より

「(一社)日本放射化学会ロードマップの公開について」と題して講演いただきました。

一般講演は、オーソドックスに1.核化学、2.アクチノイド・バックエンド化学、3.環境放射能、4.原子核プローブの化学、5.医学・生物学におけるRI利用、6.放射化分析、7.その他(宇宙・地球化学、計測・核鑑識技術、放射線教育等)について募集しました。76件の申し込みがあり、その内訳は、1.核化学14件、2.アクチノイド・バックエンド化学3件、3.環境放射能24件、4.原子核プローブの化学9件、5.医学・生物学におけるRI利用6件、6.放射化分析8件、7.その他12件でした。最終的に、口頭発表38件とポスター発表38件が行われました。討論会の案内がいつもより遅くなったせいもあるかもしれませんが、発表件数は例年よりもずいぶん少なくなりました。そのため、口頭発表は一つの会場でちょうどすべて収まり、参加者は、普段聴くことがない分野も含めてすべての分野の発表を聞くことができたかと思えます。ポスターセッションは、これまでより1日多く、3日間に分けて実施し、一日当たりの発表件数を10数件に抑えてできるだけ討論の機会を増やしました。ポスター発表は、本討論会で採用したLINC Bizシステムの特徴で、テキストベースのチャットによる質疑とともに、コアタイムではそれぞれビデオ会議によるリアルタイムでの質疑が可能でした。初日は我々の説明が不十分だったせいかビデオ会議での質疑は低調でしたが、2日目以降はうまく誘導できたようで活発に討論が行われていました。オンラインの場合、口頭発表の質疑は発表後の5分間に限られてしまうため、口頭発表でも、希望者にはいつでもチャットやビデオ会議による質疑が可能ないようにポスター発表の場を設けました(ただし、コアタイムはなし)。負担にならないように口頭発表のスライドファイルの掲載を可能としましたが、残念ながら利用はあまり多くはありませんでした。ポスター発表は、会期終了後の9月末まで継続しました。

特別講演は、広島大学大学院先進理工学研究所・阿部穰里先生にお願いし、「電子と原子核の相互作用に関連する3つの理論的研究」と題して、同位体分別での核体積効果、原子核のシッフモーメ

ント、EC壊変の半減期に関する理論化学的研究について最近の成果を講演いただきました。阿部先生は相対論的量子力学をとり入れた電子状態の理論的研究を行っており、重元素の化学の研究もされています。会員の理論研究者との交流が進むことを願い、阿部先生に講演をお願いした次第です。

分科会も例年通り行われました。分科会もパラレルではなく、一会場で開催しましたので、普段出席できない分科会にも出席された方も多かったかのではないかと思います。各分科会は次のようにおこなわれました。

- 核化学分科会

世話人：羽場宏光(理化学研究所)

- 1. 依頼講演

講師：田中泰貴先生(オーストラリア国立大学)

タイトル：(超)重元素合成での原子核反応の研究

- 2. 連絡事項、情報交換、その他

- α 放射体・環境放射能分科会

世話人：本多真紀(日本原子力研究開発機構)

- 1. 依頼講演

講師：駒義和先生(日本原子力研究開発機構)

タイトル：福島第一原子力発電所の放射性廃棄物問題に対する放射化学からのアプローチ

- 2. 話題提供・意見交換

- ・アルファ放射体・環境放射能部会の立ち上げについて

- ・第23回「環境放射能」研究会のお知らせ

- 3. 事務連絡、その他

- 原子核プローブ分科会

世話人：久保謙哉(国際基督教大学)

- 1. 依頼講演(11:55-12:35)

講師：奥村拓馬博士(理化学研究所)

タイトル：超伝導転移端センサー型マイクロカロリメータによるミュオン原子の高分解能X線分光

- 2. 連絡事項、情報交換、その他

- 放射化分析分科会

世話人：三浦勉(産業技術総合研究所)

1. 各施設からの現状報告
東大開放研（神野）、JRR-3（松江）、J-PARC/MLF（藤）、電子光理学研究センター（菊永）、KUR（高宮）
 2. 放射化分析研究会総会
 3. 放射化分析に関する京大炉専門研究会の案内
 4. その他
- 若手の会分科会（Zoomで実施）
世話人：小荒井一真（日本原子力研究開発機構）
 1. 総会
 2. 研究室紹介
 3. 懇親会

会員総会は理事会主導の下、二日目午後に行われました。法人化に伴い、従来の会員総会に相当する社員総会（学生会員は出席権なし）が6月に実施されており、会員総会は議決を必要とする議案はなくなり、理事会からの報告/説明と、学生会員も含めた会員との議論の場となりました。本年は、学会賞が早稲田大学教育・総合科学学術院の海老原充会員に「中性子放射化分析法の高度化と宇宙地球化学研究への応用」に対して授与され、「中性子放射化分析法の高度化と宇宙地球化学研究への応用」と題した受賞講演が行われました。また、1999年の日本放射化学会創立当初から長らく学会の事務局メンバーとして、学会の運営維持に多大な貢献をされた功労に対して、京都大学複合原子力科学研究所の沖雄一会員に功労賞が授与されました。沖会員には、副賞として錫製タンブラーが贈られました。今回、木村賞と奨励賞の受賞者はいませんでした。討論会中の会員総会に議決事項がなくなったことから、今後対面開催となった場合も、オンライン配信も同時に行って広く意見交換ができるのではないかと感じます。（実行委員会には負担がかかるかもしれませんが。）

3日目の閉会式に先立って若手優秀賞の授与式が行われました。担当理事と実行委員からなる選考委員会から審査員を依頼して、その結果をもとに選考が行われました。本年は次の会員に授与されました（口頭2件、ポスター2件）。審査員の皆様、ご協力ありがとうございました。副賞として、氏名を刻んだ江戸切子を贈りました。

杉山晃一（九州大学理学研究院）「アクチノイ

ド核を標的としたアイソマー核分光」
山口瑛子（日本原子力研究開発機構）「EXAFSによるRaの水和状態と粘土鉱物への吸着状態の解明」
渡邊瑛介（大阪大学理学研究科）「ノーベリウムの化学研究に向けたCa, Sr, Ba, Raのクラウンエーテルによる固液抽出」
邱奕寰（大阪大学放射線科学基盤機構）「負ミュオンによる非破壊イメージングに向けた2 mm厚CdTe半導体二次元検出器の開発」

4. おわりに

以上のように、本討論会は成功裏に終了することができました。実行委員会を代表して、参加者、発表者、座長を初めとしてご協力いただいたすべて皆様に感謝申し上げます。

本討論会を実施するにあたり次の協賛企業様からご支援いただきました。おかげさまで、参加費を下げ、会員の学生は無料にすることができました。深く感謝申し上げます。

株式会社アトックス、株式会社アールデック、株式会社池田理化、有限会社ウッドベル、株式会社大阪真空機器製作所、株式会社カイズワークス、金属技研株式会社、住友重機械工業株式会社、大栄無線電機株式会社、株式会社千代田テクノル、株式会社テクノエーピー、東京ニュークリア・サービス株式会社、株式会社トミー精工、伯東株式会社、浜松ホトニクス株式会社、ハヤシレピック株式会社、ミリオンテクノロジー・キャンベラ株式会社、ヤトロ電子株式会社（50音順）

既に約2年間にも及ぶ世界的パンデミックの中、在宅勤務や自宅待機により研究設備を利用できない、海外はもとより国内出張もできない、外国人研究者・留学生が来日できない、研究資材の調達も遅れる等、皆様の研究に大きな支障が出ているのではないかと思います。この影響が少なからずあり、本討論会の発表件数は大幅に減りました。発表件数は、口頭発表38件とポスター発表38件を合わせて76件で、昨年度よりも27%減りました。特に口頭発表が減り（41%減）、本討論会是一个の会場で開催することにいたしました。

発表件数が減ってしまったのは残念ですが、どの講演を聴くべきか迷うことなく、分科会も含めた全てのプログラムに参加できるため、昼食をとる時間もなく密な3日間になった方もおられるのではないかと思います。今回、放射化学の研究課題がいかに幅広いかということを変更して実感できたのではないかと思います。新たな刺激を受けることができた方がおられたら幸いに思います。

数少ない陣容の実行委員会でも、準備・運営できたのは、オンライン開催であったことが幸いしたと思っています。対面開催では必須の準備/運営が必要なくなり、学生バイトの雇用も必要ありませんでした。これは財政的にも幸いしました。とはいっても、顔と顔を突き合わせた対面式の討論は、詳細な議論や新たな研究交流の発掘において重要です。現在、コロナ感染者数の第6波ピークのまっただ中です。今後どのように推移していくのか全く予想できませんが、次回こそ対面で討論会を実施できることを期待しています。コロナ禍、

やむを得ず研究のペースを落とした方もおられると思います。早急にペースを回復させるとともに、コロナ禍に得たオンライン会議や在宅勤務等、効率化のノウハウを取り入れ、皆様のご研究が今後ますます進み、次回討論会が盛大に開催されることを願っています。

最後に、本討論会は、以下の実行委員で開催させていただきました。

(共同代表) 大浦泰嗣(都立大)、羽場宏光(理研)
(委員) 秋山和彦(都立大)、白田祥子(理研)、加治大哉(理研)、久富木志郎(都立大)、小林貴之(日大)、佐藤望(理研)、重河優大(理研)、白井直樹(都立大)、南部明弘(理研)、箕輪はるか(慈恵医大)、Wang Yang(理研)、Yin Xiaojie(理研)

今回の討論会についてのご感想や反省点等、次回の討論会実行委員会に引き継ぎますので、上記実行委員までお気軽にお聞かせ下さい。

情報プラザ (国際国内会議)

(2022年3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

第23回「環境放射能」研究会

日時：2022年3月8日～10日

場所：オンライン開催

URL：<https://rcwww.kek.jp/enviconf/>

日本物理学会 第77回 年次大会 (2022年)

日時：2022年3月15日～19日

場所：オンライン開催

URL：<https://www.jps.or.jp/activities/meetings/annual/annual-index.php>

日本化学会 第102回 春季年会 (2022)

日時：2022年3月23日～26日

場所：オンライン開催

URL：<https://confit.atlas.jp/guide/event/cs102nd/top>

日本薬学会 第142年会

日時：2022年3月25日～28日

場所：オンライン開催

URL：<https://confit.atlas.jp/guide/event/pharm142/top>

日本核医学会 第22回 春季大会

日時：2022年5月7日～6月1日

場所：オンライン開催

URL：<https://www.jsnm-spring.org>

第82回 分析化学討論会

日時：2022年5月14日～15日

場所：茨城大学水戸キャンパス

URL：<https://www.jsac.jp/2021/12/22/meeting/>

第59回 アイソトープ・放射線研究発表会

日時：2022年7月6日～8日

場所：オンライン開催

URL：<https://confit.atlas.jp/guide/event/jrias2022/top>

2022年度 地球化学年会

日時：2022年9月7日～9日

場所：高知大学朝倉キャンパス

URL：<http://www.geochem.jp/meeting/index.html>

第4回 日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会

日時：2022年11月24日～26日

場所：九州大学伊都キャンパス

URL：<http://www.jrsm.jp/jrsm.html>

国際会議

Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry (MARC XII)

日時：3-8, April, 2022

場所：Kailua-Kona, Hawaii, USA

URL：<https://www.marconference.org>

ICRM-LLMRT 2022

日時：2-6, May, 2022

場所：Gran Sasso National Laboratory, Italy

URL：<https://icrm2022.lngs.infn.it>

19th Radiochemical Conference (RadChem-2022)

日時：15-20, May, 2022

場所：Marianske Lazne, Czech Republic

URL：<https://www.radchem.cz>

**13th World Federation of Nuclear Medicine
and Biology (世界核医学会) and Post-congress
Cultural Social Activities**

日時 : 7 – 11, 12 – 13, September, 2022

場所 : 京都・金沢

URL : <http://www2.c-linkage.co.jp/wfnmb2022/>

**International Conference on Radiochemistry
and Nuclear Chemistry (RANC-2023)**

日時 : 7 – 12, May, 2023

場所 : Budapest, Hungary

URL : <https://akcongress.com/jrnc-ranc/>

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

学位論文要録

Dose Assessment on the Mean Absorbed Estimates Derived from the Simple Approach Method Applying Marinelli-Quimby's Formula for Ambient Risk Organs to Thyroid Uptake in the Administered ^{131}I Radiopharmaceutical of Graves' Disease Using PHITS and ICRP Reference Computational Voxel Phantom

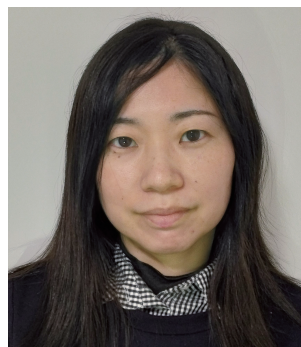
(^{131}I 内用療法 / グレーブス病の甲状腺吸収線量評価における Marinelli-Quimby の式と PHITS 及び ICRP ボクセルファントムを融合させた簡便法から導出される周辺リスク臓器の平均吸収線量評価)

川口 (松本) 絵里佳 (株式会社 堀場製作所)

学位授与：博士 (保健学) 徳島大学大学院
保健科学教育部 医用情報科学領域
指導教員：阪間 稔 (主査：芳賀昭弘)
令和3年10月21日

核医学治療における RI 内用療法では、RI をがん (悪性腫瘍) や腫瘍に集積しやすい薬剤に標識して体内に投与する。これは近年開発が著しく進展してきた、腫瘍細胞に特異的または過剰に発現している分子を対象とした分子標的治療の一つとして位置づけられている。放射性薬剤による分子標的治療では理論的に、RI 標識された薬剤分子が体内の血流によって運ばれ、原発巣のみならず転移先の腫瘍にも集積可能となる。その薬剤分子が標的である腫瘍細胞での結合部位からその近傍の腫瘍全体にわたって、標識された RI の壊変に伴い放出される放射線によりの確にねらい打ちし、腫瘍細胞にダメージを与えて治療する。

甲状腺機能亢進症 (グレーブス病) 患者の治療に提供されている RI 内用療法に、 β^- 線の殺細胞作用による β 放射体・ヨウ素-131 (^{131}I) の放射性ヨード治療法がある。この治療法の主な適用では、



甲状腺機能亢進症 (グレーブス病) 患者の治療に提供されており、米国ではこの疾患に対して第一選択に上げられるほどで、近年、外来でも実施可能な保険診療の RI 内用療法の一つでもある。この RI 内用療法では、標的臓器の甲状腺内で発現したびまん性腺腫に対して Na^{131}I カプセルを経口することで、血中から無機ヨードを捕獲し、その壊変に伴い放出される比較的高いエネルギーの放射線 β 線と γ 線の線量付与過程で、甲状腺腫の細胞にダメージを与えて治療する。この治療効果比の成否を決めるのは、標的臓器 (甲状腺) とその周辺リスク臓器の平均吸収線量 (S-value [Gy/Bq]) を正確に評価することが重要となる。このためには薬剤の高比放射能技術や薬物を滞留させる薬物動態制御術を高めていくことで、理論的にはこの治療効果比を最大限にできるが、現実的には複雑な人体組織の元素構成から幾何学的な配置構成の中で、ヨウ素-131 の β 線や γ 線エネルギーが物理的制約のもと、周辺リスク臓器への透過やエネルギー吸収で放射線輸送されていくので、内部被ばく線量を確実に評価することが必要不可欠である。これまで RI 内用療法における放射性薬剤の内部被ばく線量評価で先駆的な役割を果たしてきたのが ICRP Pub.53 (1987) の報告であるが、ここで採用されている MIRD 法では、主要な臓器のみへの Biokinetic behavior model に従った放射性薬剤分布割合より、標的及び周辺リスク臓器個々の限定的

な吸収線量評価に留まり、標的と周辺リスク臓器間での放射線輸送に起因する吸収線量を評価していない点や、MIRD ファントムを使用している点で、実際の各臓器に対する内部被ばく平均吸収線量を完全に再現しているとはいえない。

近年、RI 内用療法における平均吸収線量評価で、高速演算が可能になった計算機技術の発展により、放射線輸送の物理的な現象（原子レベルでの原子衝突・輸送過程）を忠実に再現できるモンテカルロ（MC）法が適用可能となり、様々な放射線輸送解析計算コード群（Geant4, MCNP/MCNPX, EGSnrc/EGS++, FLUKA, GATE, PENELOPE）の開発進展と、人体臓器を正確に再現する ICRP ボクセル人体ファントムの採用により、それら膨大な MC 計算結果をデータベース化したウェブコンテンツ OpenDose や、データベースソフトウェア IDAC-Dose の新たなユーザーインターフェース（UI）が広がっている。

本論文では、この RI 内用療法の平均吸収線量評価に焦点を当て、従前の内部被ばく評価基準となる ICRP Pub.53 との違いを、標的と周辺リスク臓器間の放射線輸送を再現する MC 法の観点から探りつつ、上述の UI に加わっていない MC 法の一つである国産 PHITS 計算コードを用いて、他の MC 計算コードとの比較検証とその有用性を明らかにすること、また従来から臨床現場で用いられている標的臓器・甲状腺部位の平均吸収線量導出の基準式 Marinelli-Quimby's formula に着目し、PHITS 計算コードで得られる標的臓器と周辺リスク臓器との平均吸収線量の比（S-value の比）と、この formula で得られる平均吸収線量の値を融合させることで、改めて MC 計算実行すること無く（MC 計算の欠点である計算時間に依存せず）、簡便かつ一斉に周辺リスク臓器群（詳細には脾臓、肝臓、腎臓、胸腺）の平均吸収線量の値を導出する方法を考案した。その結果、この RI 内用療法における標的及び周辺リスク臓器に対する簡便な平均吸収線量評価法の妥当性を、従来基準法での値とまた他の MC 計算コードによる結果、および PHITS 計算から直接的に求まる値と比較例証することで、実用性に十分に耐えることができる評価法であることを明らかにした。さらに、PHITS と ParaView から ICRP 人体ボクセルファントムの標

的臓器（甲状腺）から放出される放射線（ β 線と γ 線）の飛跡を3次元空間に表現することができ、人体内の放射線輸送の様子を視覚的かつ物理現象を解説できる図を与えることができた。

本研究成果が、RI 内用療法における核医学治療分野の医学物理士をはじめ、放射線防護医療に従事する PHITS 計算ユーザー等に与える効果は大きいと考えられる。

代表的な発表論文

- [1] Erika Matsumoto-Kawaguchi, Minoru Sakama, Ken'ichi Fujimoto, and Hitoshi Ikushima, "Dose Assessment on the Mean Absorbed Estimates Derived from the Simple Approach Method Applying Marinelli-Quimby's Formula for Ambient Risk Organs to Thyroid Uptake in the Administered ^{131}I Radiopharmaceutical of Graves' Disease Using PHITS and ICRP Reference Computational Voxel Phantom", *Radiation Environment and Medicine* **10(2)**, 87-95 (2021).
- [2] Minoru Sakama, Shinsaku Takeda, Erika Matsumoto, Tomoki Harukuni, Hitoshi Ikushima, Yukihiko Satou, and Keisuke Sueki, "Monte Carlo Evaluation of Internal Dose and Distribution Imaging Due to Insoluble Radioactive Cs-Bearing Particles of Water Deposited Inside Lungs via Pulmonary Inhalation Using PHITS Code Combined with Voxel Phantom Data", *Radiological Issues for Fukushima's Revitalized Future*, Chapter 19, p209-220 (2016). https://doi.org/10.1007/978-4-431-55848-4_19
- [3] M. Sakama, K. Fujimoto, K. Inoue, M. Fukushi, Y. Imajyo, T. Fukuhara, M. Matsuura, T. Yajima, M. Endo, M. Fujisawa and E. Matsumoto-Kawaguchi, "FEASIBILITY STUDY ON THE FUSION OF PHITS SIMULATIONS AND THE DLNN ALGORITHM FOR A NEW QUANTITATIVE METHOD OF *IN-SITU* MULTIPLE-CHANNEL DEPTH DISTRIBUTION SPECTROMETRY", *Radiation Protection Dosimetry* **184(3-4)**, 328-333 (2019). <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz093>

学会だより

1. 一般社団法人日本放射化学会第3回理事会 [2021年度第2回理事会] 議事録抜粋

日時：2021年9月4日（土） 13：00－18：50

場所：オンライン

出席者：[会長] 篠原、[副会長] 高橋、五十嵐、
[理事] 石岡、緒方、木下、桐島、佐藤、
高宮、別所、箕輪、浅井、大浦、久保、
阪間、羽場、三浦、[監事] 酒井、北辻

報告

- 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以下の通り報告があった。事業支援については、第58回アイソトープ・放射線研究発表会（協賛）、短寿命RI供給プラットフォーム成果報告会兼RI利用研究会（後援）、第59回核化学夏の学校（核化学分科会主催）の3件が開催された。メール審議については、第65回討論会参加登録費について、沖雄一先生の表彰について、「ゼロカーボンエネルギーシステム国際会議」の協賛について、の3件が審議され、すべて全会一致で承認された。その他、Zoom Pro 1 ライセンスの契約と堀井会計士事務所との顧問契約の締結が報告された。
- ネット広報委員会より、会員MLの配信状況とHPの更新について報告があった。入会申込手続きをwebフォーム化し、8月下旬から運用を開始した。メールニュースを1件配信した。
- JNRS編集委員会より、2021年の投稿論文数が前年に比して少ないとの報告があった。またJNRS論文賞について、毎年論文数が少なく最近授賞を見送ってきたが、APSORC開催に合わせて4年毎の授賞とし、APSORCで表彰する、選考に当たっては被引用件数も参考に、などの選考内規の改正提案があった。内規改正の方針について承認された。
- 第65回討論会実行委員会より、討論会準備状

況について報告があった。今回口頭発表件数が少なく一会場での発表となった。原因として、アナウンスが遅かった、オンライン学会が続いて心が折れているのではないかと、といった意見があった。実行委員の努力により協賛企業は多数集まった。休憩時間にビデオを流す企業は2社集まった。開会式の後に法人化記念式典を開催することにした。会員総会は討論会会場で開催するため、討論会の参加登録者でないと参加できない。開催案内にその旨記載し、参加登録を促すことにした。今回の会員総会では議決事項がないため、委任状は不要とした。

- APSORC組織委員会より、APSORC22準備状況について報告があった。9月1日第7回組織委員会を開催した。プレナリー講演者の決定、招待講演者の取りまとめ、Radiochemistry in Future というセッションの設置、1F見学会、Hevesy Award, JNRS Award の授賞式、市民講演会等について準備が進んでいるとのことであった。
- 核化学夏の学校の開催報告があり、8月26-27日にJAEAが主催してオンライン開催した、参加登録者は107名（うち学生45名）で、常時70～80名が接続していた、例年の宿泊を伴う開催では40～50名なので潜在的な参加希望者数が把握できた、とのことであった。参加費は無料としたが、講師謝礼を支出したのでその分を学会に補助金申請した。

審議

- 2021年度会員総会の開催日時、場所、目的について、承認した。
- 役員推薦委員会委員の委嘱、役員選挙管理委員会委員の委嘱について承認した。役員選挙スケジュールについて確認し、承認した。
- 研究部会規程の制定について、一部内容を修

正し、承認した。

- 若手の会 2021 年度日本国内における研究発表助成（2 次募集）について、募集を承認した。1 次募集では応募がなかったため 2 次募集を行う、今回からメールでの応募とし印鑑不要とした、とのことであった。

検討

- 大浦理事より、会員総会で報告・議論する 2022 年度予算案について提案があった。2022 年度は APSORC22 を開催するため討論会予算が不要になる。APSORC22 の会計を学会会計に含めるべきか、会計事務所と相談しつつ検討することにした。
- 浅井理事より、会員総会で報告するスライドの原案について提案があった。部会制度の説明と教育部会の設置、功労賞の新設、文部科学大臣表彰の推薦方法、堀井会計士事務所との顧問契約、法人化後新たに制定した慶弔規程、寄付金規程の内容などについて紹介することとした。また、会費長期未納者は 3 年以上未納で退会となることを周知することにした。
- 篠原会長より、部会制度立ち上げの具体的作業について提案があった。部会長の選任を討論会の各分科会で議論してもらおうが、今回決めるのが難しい場合は仮の部会長を決めて来年度選任することも良しとした。部会登録は総会後全会員に対し、Google フォームから選択登録してもらおうこととした。その際、社員総会で意見のあった新部会設置の提案もできるようにする。登録の追加変更もできるように検討し、会員名簿に情報を追加する。部会 HP の作成、部会メーリングリストの作成についても進めていくことにした。
- 2023 年度以降の討論会開催地について、過去の開催地の資料を基に検討した。いくつか候補地が提案されたが、開催できる研究室が少なくなっている現状を踏まえ、学会が運営をサポートする体制が必要、公募も検討すべき、という意見が出され、検討することにした。
- 篠原会長より、理事会年間スケジュールについて提案があった。最近理事会の議題が多く

時間が長くなりすぎている一方で、必要な検討項目に対する議論の時間が十分確保できていないため、理事会とは別に主に検討項目について議論する理事懇談会を開催することにした。

以上

- 一般社団法人日本放射化学会第 4 回理事会 [2021 年度第 3 回理事会] は、2021 年 12 月 11 日（土）に開催されましたが、議事録未承認のため、次号にて報告します。

3. 会員動向（令和 3 年 7 月～令和 3 年 12 月）

新規入会（正会員）

氏名	所属
浅井 志保	国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター物質計測標準研究部門無機標準研究グループ
佐藤 祐貴子	東京理科大学
白崎 謙次	東北大学金属材料研究所アルファ放射体実験室
本村 新	株式会社千代田テクノ大洗研究所研究開発課
湯原 勝	東芝エネルギーシステムズ株式会社

新規入会（学生会員）

氏名	所属
石下 燎矢	新潟大学理学部理学科
今田 彩香	大阪大学理学部化学科放射線化学研究室
内馬場 優太	茨城大学理学部理学科物理学コース
大高 咲希	大阪大学大学院理学研究科化学専攻
黒田 拓真	東京都立大学大学院理学研究科化学専攻
杉崎 史都	東京都立大学大学院理学研究科化学専攻無機化学研究室

杉山 晃一 九州大学大学院理学府物理学専
攻実験核物理研究室
高村 怜士 新潟大学理学部理学科化学プロ
グラム核・放射化学研究室
東江 直樹 京都大学工学部工業化学科先端
化学コース同位体利用化学研究
室
益田 遼太郎 大阪大学大学院理学研究科化学
専攻放射化学研究室

所属変更 (正会員)

氏 名	所 属
野村 貴美	東京医科大学 RI 研究室

「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
- (3) 「放射化学」の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。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。

「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
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、事務局（jnrs@ac-square.co.jp）までご連絡下さい。

会員情報変更等の手続き：<http://www.radiochem.org/community/update.html>

放射化学

第 45 号

令和 4 年 (2022 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

出版担当理事：佐藤 渉

Web: <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

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

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

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

関西電力株式会社

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

クリアパルス（株）が提供する主要製品

自社開発のハイブリッドICを用いた低雑音プリアンプ
低雑音スペクトロスコープアンプファイア

高性能パルスハイトアナライザ

多チャンネルプリアンプ、多チャンネルアンプファイア、多入力PHA

CdTe検出器プローブ、CsI(Tl)検出器プローブ、NaI(Tl)検出器プローブ、プラスチック検出器プローブ

電離箱、環境モニタ、高圧バイアス電源、NIMビン電源、ミニビン電源

電流電圧変換器、マルチワイヤビーム位置モニタ回路

加速器制御機器、信号変換器、アナログ/デジタル制御器

データ計測・収集・転送システム

その他物理計測器、特注機器



8630型ハンドボーン



8868A型IVC



580型プリアンプ



4066型アンプ



1216型PHA



6671型バイアス電源



E6660ミニビン電源



80110型プリアンプ



80112型MPX



広い分野で利用されている放射線源をより良い品質で安定供給



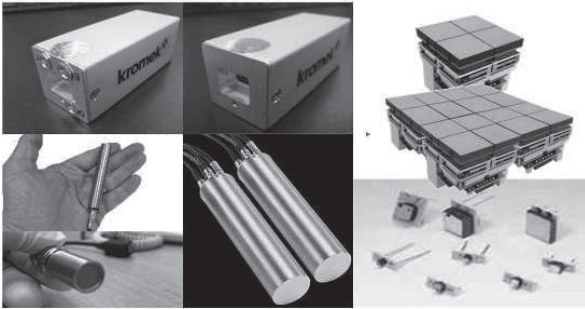
株式会社 千代田テクノル

URL: <https://www.c-technol.co.jp>

e-mail: ctc-master@c-technol.co.jp

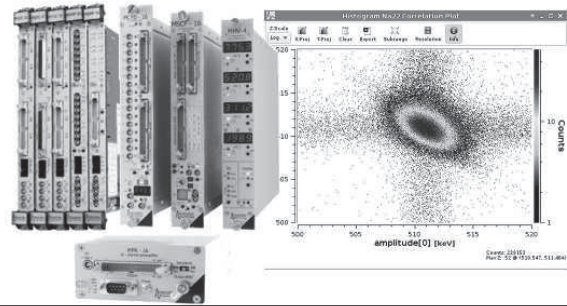
kromek
detect image identify

CdZnTe 半導体検出器



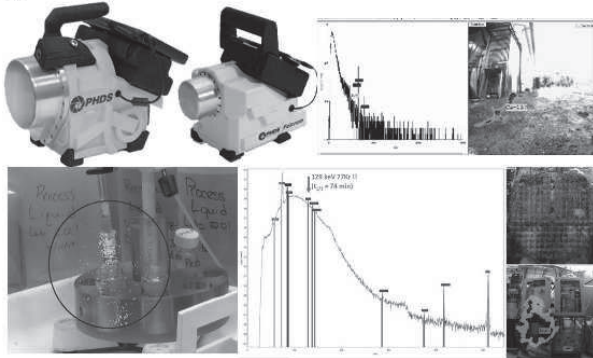
amesytec

NIM/VME Electronics



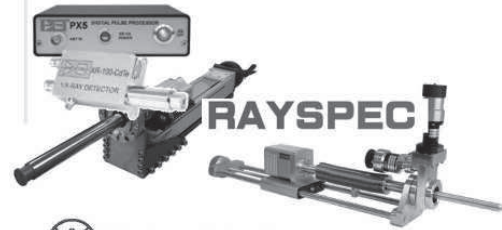
PHDS
Gamma Ray Imaging Detectors

Gamma Imager & Portable Ge



AMT TEK

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

お困りではありませんか？

- サイクロ施設など**加速器施設の線量計算**や**放射化評価**をしたい！
- R I を使用した**化学実験**を代行して欲しい！
- 作業環境測定**など**法令に基づく放射線測定**を代行して欲しい！
- 放射線施設、サイクロトロン施設を廃止**したい！
- 施設を**変更許可申請**したいが業務が多忙のため代行して欲しい！
- サーベイメーター**を校正したい！
- 放射線障害予防規程**を見直したい！
- 放射線に係わる業務について**相談**したい！

そのお悩みTNSが解決いたします

安全設計・評価

- ◆ 施設設計
- ◆ 遮蔽設計
- ◆ 安全評価
- ◆ RI施設の許認可申請業務代行

施設の管理・運営

- ◆ 大規模施設の運用管理
- ◆ 放射線管理

研究及び技術開発サポート

- ◆ 研究サポート
- ◆ 技術開発サポート

受託試験研究

- ◆ 環境物質の分析、挙動解析
- ◆ トレーサー試験
- ◆ 解体廃棄物の物理特性試験

保守点検・工事

- ◆ 施設の保守・点検
- ◆ 施設の改造、解体工事
- ◆ サイクロトロン施設の廃止工事

分析・測定・校正サービス

- ◆ 放射能分析
- ◆ 現地における放射線測定
- ◆ サーベイメーターの実用校正

各種機器販売

- ◆ 放射線管理区域の空調機器の販売
- ◆ 放射線管理区域用機器の製造・販売



東京ニュークリア・サービス株式会社

詳しくは弊社WEBサイトまで！ <https://www.tokyo-nucl.co.jp>

東京本社	TEL 03(3831)7957	〒110-0016 東京都台東区台東1-3-5 反町ビル7F
東海事業センター	TEL 029(282)3114	〒319-1112 茨城県那珂郡東海村松村字平原3129-31
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4-19-2
関西事業所	TEL 078(570)5201	〒651-0096 兵庫県神戸市中央区雲井通4-2-2 マーク神戸ビル7F
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鉾字野附1-4
いわき営業所	TEL 0246(66)1210	〒979-0202 いわき市四倉町上仁井田字南姥田74-1

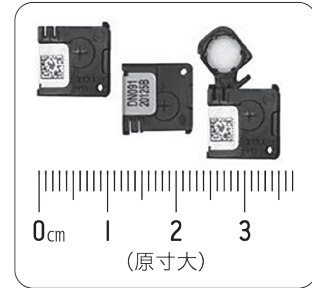
microSTAR ii

medical dosimetry system

nanoDot線量計を測定するために設計されたポータブルリーダーです。
nanoDot線量計はX線画像に写らないため、
放射線治療や診断時の患者線量の評価に適した小型OSL線量計です。



nanoDot線量計



- 外形寸法 W10×H10×D2mm
- 測定範囲 10 μ Gy~10Gy
- エネルギー範囲 5keV~20MeV

N 長瀬ランダウア株式会社

本社/〒300-2686 茨城県つくば市諏訪C22街区1 TEL.029-839-3322
大阪営業所/〒550-8668 大阪市西区新町1丁目1番17号 TEL.06-6535-2675
ホームページアドレス <https://www.nagase-landauer.co.jp>

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.
N 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

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

営業所

北海道 TEL 011-221-5482

東京 TEL 042-585-6024

関西 TEL 06-6455-3891

東北 TEL 022-716-0203

中部 TEL 052-746-1032

九州 TEL 092-262-7844



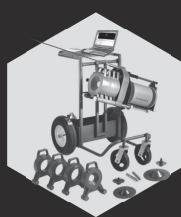
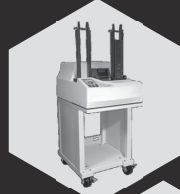
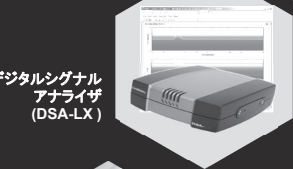
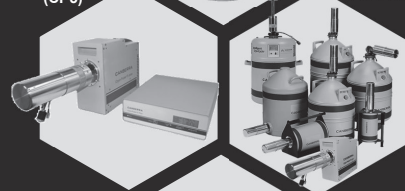
電気冷却式
クライオスタット
(CP5)

ゲルマニウム
半導体検出器



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・キャンベラ (株)

E-mail: jp-sales@mirion.com

URL: 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

登録運搬物確認機関

問い合わせ先: 03-3814-7483

承認容器による輸送の運搬物確認

登録運搬方法確認機関

承認された積載方法による輸送の運搬方法確認

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59回 アイソトープ・放射線研究発表会

会 期： 2022年7月6日(水)～8日(金)

形 態： オンライン大会

皆さまのご参加をお待ちしております

参加登録期間/参加費:

		事前登録	左記以降の参加登録
		4月6日(水)～6月10日(金)17時	6月13日(月)～7月8日(金)12時
参加費	一般	7,000 円(税込)	9,000 円(税込)
	学生	無料(要学生証)	無料(要学生証)(※1)

(※1) 学生の方は、学生証の提示(アップロード)が必要です。 学生証の確認及びID設定等の都合上、「事前参加登録」にご協力をお願いいたします。

詳しくはホームページをご覧ください。

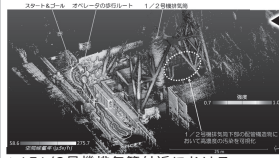
<https://confit.atlas.jp/guide/event/jrias2022/top>

主催 公益社団法人日本アイソトープ協会

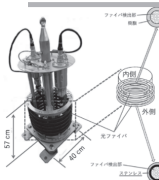


我が国唯一の原子力に関する総合的な研究機関として、東京電力HD 福島第一原子力発電所(1F)の廃止措置及び環境回復に取り組んでいます

研究開発知見の活用




放射線源の3次元分布の可視化
2021/5/14発表



水中でのβ線検出器の開発
2020/1/30発表

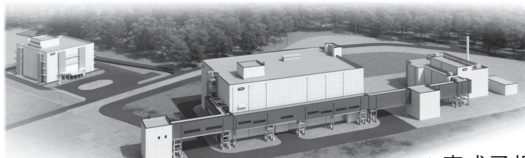
▲1F1/2号機排気筒付近における空間線量率と高濃度汚染箇所を可視化した3次元マップ

その他研究開発成果はコチラを参照ください。



大熊分析・研究センターの整備

1Fの低・中線量のカレキ類の各種分析を行う第1棟、水処理二次廃棄物、燃料デブリ等の分析を行う第2棟を整備中



▲完成予想図

FACE!S
- 福島総合環境情報サイト -



JAEAの環境モニタリング・環境動態研究の知見をWeb上で一般に分かりやすく公開



▲根拠情報Q&Aサイト
生活域での疑問にお答えします。



▲放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト



国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地1 TEL : 029-282-1122 (代表)

原子力機構ホームページ
<https://www.jaea.go.jp/>



福島研究開発部門ホームページ
<https://fukushima.jaea.go.jp/>



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JCSC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 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間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 <http://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

- ・ 産業界からの中性子利用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

◆ 放射線・原子力利用の普及事業

- ・ 「放射線プロセスシンポジウム」の支援

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

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

E-mail: office@radiochem.org

