

放射能環境動態・影響評価  
ネットワーク共同研究拠点（ERAN）

FY2025 Final Report

【若手/Young 共同研究】

若手共同研究（日本国内機関所属）

採択No.	研究代表者名	所属機関	職名・学年	課題名	受入研究者	受入機関	共同研究者
Y-25-01	榊原 厚一	信州大学	助教	森林源流域におけるマルチ同位体トレーサー法による地下水流動過程の解明	恩田 裕一 辻村 真貴	CRIES	平松 翼
Y-25-02	佐藤 ひかる	株式会社笠原建設	土木技術職	福島第一原発事故後の地下水中のH-3を用いた海洋への放射性物質の流出解析	恩田 裕一 津旨 大輔	CRIES	
Y-25-03	西野 圭佑	一般財団法人 電力中央研究所	研究員	数値水槽実験を用いた懸濁土砂粒子の凝集特性の推定に関する理論的考察	津旨 大輔	CRIES	吉川 裕
Y-25-04	米田 壮汰	公益財団法人海洋生物環境研究所	研究員	東京湾における放射性セシウムの動態と輸送経路の解明	津旨 大輔	CRIES	杉原 奈央子
Y-25-05	徳永 紘平	日本原子力研究開発機構	研究員	人形峠堆積物におけるウラン移行の特定を目的とした鉄(II)鉱物へのウラン濃集機構の解明	山崎 信哉 坂口 綾	CRIES	
Y-25-06	井上 裕貴	九州大学	学生・博士後期課程3年	ラマン質量分析法に適したカルサイトの酸素同位体標準の合成	丸岡 照幸	CRIES	山本 順司
Y-25-07	西澤 達治	山梨県富士山科学研究所	研究員	温泉水・地下水の化学的指標に基づく富士山の火山活動評価に向けた研究	丸岡 照幸	CRIES	角野 浩史
Y-25-08	五十嵐 悠	東京大学	特任助教	日本周辺におけるPb-214およびBi-214の大気拡散・沈着過程の解明	平尾 茂一	IER	Li Hanting Cai Yu 飯本 武志
Y-25-09	村島 和基	北海道大学	博士後期課程2年	ダイズにおけるセシウムの吸収・移行に及ぼす根粒着生の影響	二瓶 直登	IER	信濃 卓郎 渡部 敏裕 丸山 隼人
Y-25-10	山下 琢磨	東北大学	助教	電子スピン共鳴法によるニホンザルの被ばく線量推定	三浦 富智	IREM	高橋 温 岡 壽崇 鈴木 正敏 木野 康志
Y-25-11	Batkhuuyag Enkh-Uchral	University of Toyama	1st year of PhD	Determination of Nd isotopic composition in water samples from urban and mining areas in Central Mongolia	田副 博文	IREM	Tseren-Ochir Soyol-Erdene Alifia Zaskia 張 勁
Y-25-12	Haryanto Julian Michael	University of Toyama	D1	Multi-scale Onshore-offshore Dynamic and Nutrient Transport of Kuroshio onto The Outer Shelf of the East China Sea Quantified Using Multi-chemical Tracers	田副 博文	IREM	大塚 進平 YAN TU 張 勁
Y-25-13	小林 雅俊	名古屋大学	特任助教	宇宙暗黒物質探索に向けた環境トリチウムバックグラウンドの影響評価とその高感度化	柿内 秀樹	IES	山下 雅樹 宇都山 光輝
Y-25-14	城谷 勇陸	公益財団法人海洋生物環境研究所	研究員	液体シンチレーションカウンターによるトリチウム分析方法の改良検討	柿内 秀樹	IES	杉原 奈央子 赤田 尚史 田副 博文 桑田 遥
Y-25-15	小畑 結衣	茨城大学	Assistant Professor	OBT生成反応における同位体効果の検証	石川 義朗 柿内 秀樹	IES	鳥養 祐二 猪狩 直哉 清水 文香 遠藤 陸冬 狩谷 陸斗 佐々木 俊 溝淵 一馬
Y-25-16	Wang WeiZhi	Kyoto University	博士 3 年生	Effects of long-term irradiation of low-dose radiation on cells	森脇 隆仁	IES	秋山 秋梅 Yan LanYun

## 森林源流域におけるマルチ同位体トレーサー法による地下水流動過程の 解明

研究代表者：榊原 厚一

受入研究者：恩田 裕一

辻村 真貴

共同研究者：平松 翼

### 1. 成果

福島第一原子力発電所 (FDNPP) 事故により森林生態系へ沈着した放射性セシウムは、現在も表層土壌に多く残存している。一方で、森林源流域からの Cs-137 の移行は、地下水流動を主とする水文過程に強く影響されることが示唆されている。近年、セシウムの唯一の天然安定同位体である Cs-133 が Cs-137 の動態や長期的な環境リスクを評価するうえで重要な要素の一つとして注目されている。しかしながら、Cs-133 の動態に関する知見は主として実験室スケールに限られており、Cs-137 の沈着が顕著な森林源流域において、水文過程との関係を含めた流域スケールの Cs-133 の動態には未解明な部分が多い。そこで本研究では、FDNPP 事故の影響を受けた森林源流域を対象として、地下水流動プロセスとの関係に着目し、地下水中 Cs-133 の分布特性を明らかにすることを目的とした。

研究対象地は FDNPP の北西約 35 km に位置する世戸八山集水域 (面積: 0.048 km<sup>2</sup>) である。研究対象地において、2023 年 7 月 7 日から 2025 年 1 月 16 日までの降水量、地下水位、地下水温および流量を連続的に測定した。また、上記期間中に 9 回の現地調査を実施し、地下水 (9 地点) および湧水 (1 地点) を採水した。採水時には水温、pH、電気伝導度 (EC) を測定し、主要無機溶存イオン濃度、酸素・水素安定同位体比、Rn-222 濃度および Cs-133 濃度を分析した。さらに、本研究で取得したデータとの比較を目的として、同調査地域における地下水および湧水中 Cs-137 濃度、SiO<sub>2</sub> 濃度ならびに地下水年代を先行研究 (Iwagami et al., 2019; Sakakibara et al., 2019) から引用した。

本研究では、主に定常条件と解釈される既往研究データとの比較を目的として、前日に降雨のあった調査回を除き、分析値の平均値で比較した。土壌層地下水および湧水では、Cs-133 濃度は岩盤層地下水より高く、Cs-137 および K<sup>+</sup> と強い正の関係を示した。一方、岩盤層地下水では、Cs-133 は Cs-137 および K<sup>+</sup> との明瞭な関係を示さなかった。これらの結果は、浅層における Cs-133 が粘土鉱物を主体とする反応場において、イオン競合を伴う交換・脱離過程の影響を強く受けて動員されていることを示唆しており、Cs-137 はこれらのプロセスに追随している可能性が考えられる。岩盤層地下水では、これらの影響は限定的であると考えられる。岩盤層地下水中 Rn-222 濃度は深度の増加に伴って高くなり、地下水年代や SiO<sub>2</sub> と整合的な関係を示した。これは、滞留時間の増大に伴い水-岩石接触が進行していることを反映していると考えられる。また、水文条件が比較的安定した定常時に限り、岩盤層地下水中の Cs-133 は地下水年代、Rn-222 および SiO<sub>2</sub> と一貫した正の関係を示した。このことは、Cs-133 が地下水流動に伴う水-岩石接

触の累積効果と、吸着・固定を含む反応過程のバランスを反映して分布していることを示唆する。一方、水文条件が時間的に変動する状況下では、これらの対応関係は維持されず、Cs-133 の挙動は流動経路の切替えや地下水混合の影響を受けることが示唆された。

## 2. 論文

## 福島第一原発事故後の地下水中の H-3 を用いた海洋への放射性物質の流出解析

研究代表者：佐藤 ひかる

受入研究者：恩田 裕一

津旨 大輔

### 1. 成果

原子力発電所事故に起因する放射性物質の環境中への放出は、周辺環境の回復過程を長期化させる要因となっている。特に、2011 年の 東日本大震災 に伴う 東京電力福島第一原子力発電所 事故では、Cs-137 を主とする放射性核種が広範囲にわたり環境中へ放出された。これまで周辺環境における放射性物質の動態については多くの研究が蓄積されている一方で、発電所敷地からの放射性物質の流出機構については未解明な点が依然として多い。本研究では、敷地からの Cs-137 流出経路の一つである K 排水路に着目し、流域モデルに基づく解析を用いて、排水路から流出する Cs-137 濃度の推定およびその流出機構の解明を試みた。さらに、2016 年から 2021 年の観測データを基に構築した濃度推定式を用い、2022 年以降の Cs-137 濃度の再現性について検証を行った。

K 排水路の流出水は、主に敷地内の台地（いわゆる 35 m 盤）からの湧水に由来する基底流、および降雨に起因する表面流（地表流および屋根排水）の三成分から構成されると仮定した。地下水と表面流の分離には、Sato et al. (2025) による地下水中トリチウム（H-3）濃度を用いた手法を適用した。さらに、実効雨量法を用いて表面流を地表流と屋根排水に分離し、それぞれの流量比を推定した。これらの流量比を混合モデルに適用することで、各流出成分における Cs-137 濃度を推定した。

その結果、2016 年から 2021 年における K 排水路の Cs-137 濃度は、屋根排水が約 50%、表層流出が約 30%、基底流が約 20% を占めており、特に屋根排水が主要な流出源であることが示唆された。

一方で、2022 年から 2024 年の観測データに対して同推定式を適用したところ、各流出成分の Cs-137 濃度には 2021 年以前とは異なる傾向が認められた。特に基底流については、全体的な濃度低下が見られるとともに、従来観測されていた気温との正の相関は維持されているものの、その温度依存性は弱まっていた。具体的には、2021 年までの温度係数 0.047 に対し、2022 年以降は 0.033 へと低下しており、これは Nakanishi and Sakuma (2019) で報告された係数 (0.040–0.097) を下回る値であった。

このため、2022 年以降の基底流に対する Cs-137 濃度推定式の再構築を行った結果、推定精度の改善が確認された。再推定の結果、2022 年および 2023 年における流出成分の寄与割合は、屋根排水約 50%、表層流出約 30%、基底流約 20%と、2021 年以前と概ね同様であった。しかしながら、2024 年においては、屋根排水約 31%、表層流出約 34%、基底流約 34%と、基底流および表層流出の寄与が増大する傾向が認められた。

この変化の要因として、2023年および2024年の年間降雨量が約1,000 mmと比較的少なかったことから、降雨に伴うCs-137の流出量が減少した可能性が考えられる。また、2022年に新設されたD排水路が、K排水路へ流入するCs-137濃度に影響を及ぼした可能性も示唆される。今後は、特に基底流におけるCs-137濃度変動の支配要因について、さらなる詳細な解析を進める必要がある。

## 2. 論文

Sato, H., Onda, Y., Tsumune, D., Kohata, K., Okamura, T., Leaked tritium reveals the source of  $^{137}\text{Cs}$  from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant to the ocean, *Water Research*, 2025, DOI: 10.1016/j.watres.2025.124464

## 数値水槽実験を用いた懸濁土砂粒子の凝集特性の推定に関する理論的考察

研究代表者：西野 圭佑

受入研究者：津旨 大輔

共同研究者：吉川 裕

### 1. 成果

河川水中の懸濁土砂粒子は放射性セシウムの一部を粒子態として輸送するが、河口域においてその一部は溶存態へと移行し外洋へと拡散されていく (Kakehi et al., 2016) . 一方で河口域の乱流混合は懸濁土砂を凝集させる (Ayala et al., 2008) ため、粒子態セシウムの一部は沈降して堆積泥にとどまることも知られている (Kubo et al., 2018).

粒子の凝集傾向を特徴づける stickiness パラメータは水柱にとどまる懸濁粒子量と関連し、数値計算において凝集動態を表現する重要なパラメータの1つだが、その値を測定することは一般に容易でない。そのため河川水中の懸濁土砂についても、ほとんどの場合で stickiness パラメータは未知である。本課題は先行研究 (e.g., Edzwald et al., 1974) により発展してきた stickiness の推定手法を理論的考察に基づいて発展させ、より現場の粒子に適した手法へと発展させることを目的とした。

過年度の採択課題の結果から、Edzwald et al. (1974) により提案された手法は単分散の粒子群を対象としており、現場で採取されるような一般の多分散分布においては stickiness の推定精度が悪化することが明らかとなった。そのため彼らの手法を一般の分布に単純に適用することはできない。そこで今年度の課題では、一般の多分散分布に適用可能な推定手法の開発を行った。

凝集の基礎方程式に立ち戻った理論的考察により、分布形状が stickiness の推定値を歪める効果を“補正係数”として定量化することに成功した。そして従来手法 (Edzwald et al., 1974) に補正係数を用いた修正を加えることにより、より高精度に stickiness を推定可能な新規手法を開発した。新規手法の性能検証にあたっては、厳密に条件をコントロールできる数値水槽実験を実施した。粒子モデルには Lagrangian cloud model (Riechelmann et al., 2012; Nishino and Yoshikawa, 2024) を用い、懸濁粒子の粒度分布には現実の河川懸濁土砂を想定した多分散粒度分布 (Edzwald et al., 1974; Ou et al., 2016) を与えた。その結果、新規手法を適切に用いた場合、多分散分布についても stickiness の推定誤差は 1% 以下に抑えられると分かった。同条件下で従来手法を適用した場合、推定誤差は 50% 程度となるため、これは大幅な精度向上である。また新規手法の適用には分布形状の測定に基づいた“補正係数”の計算が必要となるが、分布形状の測定に通常用いられる LISST や Malvern Mastersizer は推定誤差を小さくするために十分な性能を有していることも確認できた。ほか、すでに提案されている従来手法の改善版 (Kjørboe et al., 1990) との性能比較や、現実の水槽実験で精度に影響する各種要因についての議論も行った。

本成果については、すでに論文として投稿済みであり、本稿執筆現在で査読対応中である。今年度の成果として得られた新規手法を用いることで、現実の河川を流下する懸濁土砂粒子の stickiness パラメータを簡便かつ高精度に評価することが可能となる。その結果、河口～沿岸域において懸濁土砂とともに沈降堆積する放射性物質の量を定量的に評価できるほか、より現実的な数値実験を行うことが可能になるだろう。

## 2. 論文

## 東京湾における放射性セシウムの動態と輸送経路の解明

研究代表者：米田 壮汰

受入研究者：津旨 大輔

共同研究者：杉原 奈央子

### 1. 成果

東電福島第一原発の事故以降、陸域に沈着した Cs-137 が河川経由で流入することによる、東京湾への Cs-137 付加が注目されてきた。原子力規制庁委託事業の一環として、公益財団法人海洋生物環境研究所は海水・海底堆積物の放射能調査を行っており、詳細な時空間的挙動を精査できるほどのデータが蓄積されている。Cs-137 は、その吸着・溶出特性および東京湾全体の物質循環経路を反映して、河川水-海水-堆積物の間で複雑な挙動を示しているものと考えられる。本研究は、当該事業により調査された東京湾の Cs-137 の時空間的分布に基づき、河川水-海水-堆積物間での Cs-137 輸送過程の解明を目指すものである。

東京湾の表層海水（採水深度 0.5 m）の Cs-137 濃度は同事故後 10 年間で顕著に低下し、その後は湾外海水（1-3 mBq/L）に近い濃度となっていた。しかし 2021 年 8 月 20 日に東京湾内の測点 K-T1 において Cs-137 濃度が 10 mBq/L まで上昇しており、採取時に低塩分高濁度であったことから、河川水による Cs-137 付加が示唆される。加えて、東京湾表層海水の Cs-137 濃度は季節変化を示し、夏季（6-9 月）に高い傾向にあった。夏季に表層海水の塩分が低下することから、河川流入の増加による Cs-137 付加が起きていると考えられる。

東京湾表層海水の Cs-137 濃度および塩分のデータを用い、Cs-137 濃度と塩分が報告されている湾外海水と、塩分 0 と仮定した河川水の混合と見なすことで、河川水の Cs-137 濃度を推定した。その結果、河川水 Cs-137 濃度は、事故直後から現在に至るまで、二重指数関数的な低下を示していることが明らかになった。本推定によって算出された河川水 Cs-137 濃度は、東京湾流入河川における既報値と概ね一致していた。福島県周辺における河川水 Cs-137 濃度も二重指数関数的に低下することが報告されている。

東京湾表層堆積物（表面から 0-3 cm）の Cs-137 濃度は同事故の 2 年後から現在に至るまで低下を続けていた。各測点の Cs-137 蓄積量を計算し、ポロノイ分割により東京湾全体での表層堆積物の Cs-137 総蓄積量を推定したところ、2013 年 6 月時点では 160 GBq であったのが 2025 年 1 月には 84 GBq まで、指数関数的に減少していた。この総蓄積量の減少分が全て海水中に溶出したと仮定し、海水 Cs-137 濃度の上昇量を推定すると、同事故の 2 年後で 0.090 mBq/L、14 年後では 0.040 mBq/L であった。これらは表層海水の Cs-137 濃度の 1/100 程度であり、海水の Cs-137 濃度を考える上で、海底からの Cs-137 溶出の影響は無視できるレベルであると結論される。

次年度は、河川水の流入量と Cs-137 濃度を積算することで、河川から海水への Cs-137

流入量の評価を試みる。最終的には、河川水-海水-堆積物間での Cs-137 輸送量を推定し、東京湾全体での Cs-137 動態の概観することを目指している。

## 2. 論文

## 人形峠堆積物におけるウラン移行の特定を目的とした鉄(II)鉱物へのウラン濃集機構の解明

研究代表者：徳永 紘平

受入研究者：山崎 信哉

坂口 綾

### 1. 成果

原子力機構人形峠環境技術センターでは、旧ウラン鉱床を通してウラン (U)が溶存した浅部地下水を鉱さいたい積場で一次処理している。鉱さいたい積場では天然の浄化作用により、地下水 (坑水)中の U は水酸化鉄等に吸着・共沈して堆積している。こうした天然の浄化システムにおいて U の固定及び、固定されていた U の溶出挙動を解明することは、1F 廃棄物処分に想定される多種多様な処分方法を検討する上で、表層近傍におけるアクチノイドの動きを理解する上で重要な知見を与える。これまでに、人形峠センターの表層環境において堆積物中に多く含まれる鉄鉱物が U 等元素の挙動に大きな影響を与えることを示す分析結果が得られた。一方で、鉄鉱物は土壌の酸化還元電位 (Eh)や酸性度 (pH) に応じて化学状態が変化するため、鉄鉱物に一度固定された元素がそのままの状態でも保持され続けるとは限らない。そこで本研究では、鉱さいたい積場の浅地堆積物中の U 濃度や価数・結合状態を、特に Eh 変化の観点から検討した結果を報告する。

本研究では、鉱さいたい積場で採取した深さ 10m のコア試料を対象に、鉄鉱物に固定された U の挙動を、X 線吸収端微細構造(XAFS)法による化学種解析と室内実験から明らかにした。コアは深部から、鉱さいたい積場の地盤である「風化花崗岩相 (8-10m)」、「真砂土相 (6-8m)」、「表土相 (5-6m)」、U 鉱石から U を抽出したあとの中和残渣を表土の上に敷設した「鉱さい相 (3-5m)」、主に坑水の鉄が沈殿堆積した「堆積物相 (0-3m)」の 5 層で構成される。10m のコア試料全体としては、U の価数と Eh の間には明確な関係は見られなかった。一方、堆積物の部分については Fe の価数(Fe(II)/Fe(III))と U の価数(U(IV)/U(VI))の価数とに相関が認められた。具体的には、Fe(III)の割合が多いほど、U(VI)の割合が多い傾向にある。また、堆積物相では他の相と比較して U が顕著に濃集し(最表層で約 1000ppm)、その濃度は Eh の変動に強く依存していた。最表層 (0-10cm, Eh 400~500 mV)に存在する鉄は主に 3 価の鉄鉱物(フェリハイドライト、ゲーサイト)であるのに対し、堆積物の Eh が大きく低下する深さ 50-80cm 層 (Eh -30~200mV)では 2 価鉄を含む鉄鉱物 (シデライト、マグネタイト、パイライト)の存在も確認された。同様に U は最表層では U(VI)のみで存在するのに対し、以深では U(IV)が Eh に応じて割合を変えて存在することが確認された。この傾向は、逐次抽出法により、堆積物中の鉄鉱物に結合する U を逐次的に抽出した結果でも確認されており、層ごとに U と強く結合する鉄鉱物は異なっていた。また、 $\mu$ -XRF-XAFS を用いた分析からも、嫌気的な 50-80cm 層において、鉄と相関しない U 粒子(UO<sub>2</sub> 沈殿)も、Fe(II)鉱物への U(IV)吸着(固定)とは別に確認された。

これらの結果は、堆積物中の U の化学状態を決める要因が、鉄鉱物のみならず有機物などの相ごとの固相組成と密接に関わっていることを示唆しており、鉱さいたい積場における U の移行は単純な Eh 変化だけでは説明できないことを明らかにした。

## 2. 論文

## ラマン質量分析法に適したカルサイトの酸素同位体標準の合成

研究代表者：井上 裕貴

受入研究者：丸岡 照幸

共同研究者：山本 順司

### 1. 成果

本研究では、ラマン分光法を用いて同位体置換種のピーク強度比から酸素同位体比を評価する手法（ラマン質量分析法）の定量化に向けた基盤を構築した。定量分析に不可欠である標準試料を新たに開発し、酸素同位体組成の異なるカルサイトの合成およびその分光学的評価を行った。

従来、ラマン分光法を用いた同位体分析では、同位体置換種に由来する微弱ピークの強度比が同位体比の指標として利用されてきた。しかしながら、強度比と同位体比の関係を定量的に検証するための標準試料が存在せず、定量分析への展開には課題が残されていた。本研究では、この課題を解決するため、既知の酸素同位体比を有するカルサイト試料の合成を行った。

炭酸水素アンモニウムおよび塩化カルシウム水溶液を用い、炭酸カルシウムを析出させた。得られた試料について粉末 X 線回折およびラマン分光測定を行った結果、同位体組成の異なるすべての試料においてカルサイト単相であることを確認し、炭酸カルシウムの多形であるアラゴナイトおよびバテライトの混在は認められなかった。これにより、結晶相の違いによる分光特性の影響を排除した評価が可能となった。

カルサイトのラマンスペクトルは主ピーク（約 1085  $\text{cm}^{-1}$ ）に対応する  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_3$  に加えて、低波数側に微弱ピーク（約 1074  $\text{cm}^{-1}$  および 1065  $\text{cm}^{-1}$ ）が明瞭に観測された。これらのピークは同位体置換種に対応するものであり、1065  $\text{cm}^{-1}$  のピークは  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  に帰属される。したがって、1065  $\text{cm}^{-1}$  および 1085  $\text{cm}^{-1}$  のピーク強度比を用いることで酸素同位体比の評価が可能となる。

合成した各試料の酸素同位体比は、安定同位体質量分析装置を用いて測定・決定した。これらの試料について、同位体置換ピークと主ピークの強度比 ( $I_{1065}/I_{1085}$ ) を算出し、カルサイトの酸素同位体比との関係性を評価した。その結果、両者の間には明瞭な一次関係が認められた。また、得られた回帰直線の傾きは概ね 3 に近い値を示し、炭酸イオン中に存在する 3 つの酸素サイトに対応する関係性として整合的であることが確認された。

以上の結果は、ラマン強度比を指標とした酸素同位体比の定量評価が可能であることを示すものであり、ラマン質量分析法の基盤構築に資する重要な知見である。本研究により、従来は定性的手法に留まっていたラマン分光による同位体解析を、定量的手法へと発展させるための基礎が確立された。

### 2. 論文 現時点では該当なし（投稿準備中）

## 温泉水・地下水の化学的指標に基づく富士山の火山活動評価 に向けた研究

研究代表者：西澤 達治

受入研究者：丸岡 照幸

共同研究者：角野 浩史

### 1. 成果

富士山は日本最大の活火山であり、大規模な爆発的噴火が発生した場合、上空の卓越風の向きによっては、首都圏の広域に降灰をもたらす可能性が示唆されている。噴火災害の軽減には初動対応の迅速化が求められており、噴火の前兆現象をより早く正確に捉える観測体制の構築が必要とされている。現在、富士山では地震計や傾斜計など主に地球物理学的な観測に基づき火山活動が監視されている。一方で、山体表面における熱水活動や噴気活動が乏しいため、地球化学的指標に基づく活動評価はほとんど実施されてこなかった。しかし、富士山周辺の大深度掘削泉において、大気よりも有意に高いヘリウム同位体比を示す溶存ガスが報告され (Aizawa et al., 2016)、深部においてマグマ由来の火山ガスが地下水系へ溶解していることが示唆されている。そこで本研究では、化学的指標に基づく富士山の活動モニタリングの確立に向けて、富士山周辺の温泉水・地下水・湧水の化学的特徴とその起源を検討し、マグマ由来成分による化学的影響の有無と指標としての有効性を検証した。

2023年以降に富士山周辺で採取した計75試料(温泉水32、地下水32、湧水11)を対象に、水質測定、主要溶存イオン濃度、水素・酸素同位体比、硫黄同位体比、および溶存ガスのヘリウム同位体比分析を実施した。分析の結果、温泉水は水温が20~40°C、pH=6.4~10.5の中性~アルカリ性であり、一般的な火山性温泉(箱根温泉など)に比べて水温が低く、高いpHを示す。水素・酸素同位体比の解析からは、いずれの試料も世界天水線(GMWL)およびローカル天水線に沿って分布しており、起源は日本海側からの水蒸気(雪)の寄与が大きい天水であることが示された。また、温泉水は地下水や湧水よりも塩化物イオンおよび硫酸イオン濃度が著しく高く、同位体シフト等の特徴から、地下深部まで浸透した天水が新第三紀基盤岩(グリーンタフ層)中の古海水(化石海水)の混合や石膏の溶解による影響を受けている可能性が推測される。

マグマ性流体の寄与の指標としてヘリウムおよび硫黄同位体比を解析した結果、大深度掘削泉においてマグマ起源の寄与を示す高いヘリウム同位体比(>5 Ra)が確認され、深部においてマグマ由来の火山ガスが地下水系へ溶解していることが改めて示唆された。さらに、硫酸イオンが高濃度の温泉水における硫黄同位体比( $\delta^{34}\text{S}$ )の解析から、その値が大きく二極化する傾向が見られた。一方は化石海水(海成石膏)に由来すると考えられる重い硫黄(+15~+20 ‰)のグループであり、もう一方は軽い硫黄(0 ‰~マイナス値)のグループである。特に、富士山の西側にある天子山以西から採取した温泉水2試料は-5

～-11%と著しく低く、これは基盤岩を構成する海成堆積物中の黄鉄鉱による影響を受けている可能性がある。また、一部の試料では+25%を超える極めて高い硫黄同位体比も確認されたが、その要因については現段階では不明であり、今後の検討課題である。

以上の結果から、表層の浅部地下水系（地下水・湧水）は主に山体を構成する玄武岩の化学的影響を反映しているのに対し、大深度の温泉水系には、化石海水等の影響とともにマグマから上昇した火山ガス成分（He）が溶存している可能性が示唆された。富士山の火山活動評価において、物理観測を補完する情報として「溶存ガス（ヘリウム同位体比）」や起源の推測に有用な「硫黄同位体比」の組み合わせが、化学的指標として活用できる可能性が期待される。

## 2. 論文

## 日本周辺における Pb-214 および Bi-214 の大気拡散・沈着過程の解明

研究代表者：五十嵐 悠

受入研究者：平尾 茂一

共同研究者：Li Hanting

Cai Yu

飯本 武志

### 1. 成果

Short-lived radon progeny ( $^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi}$ ) are produced from surface-emitted  $^{222}\text{Rn}$ , attach to aerosols, and are efficiently removed during precipitation via in-cloud scavenging and below-cloud washout. This wet scavenging generates sharp deposition pulses and can contribute to transient increases in environmental gamma dose rate; such event-scale spikes are important because they can complicate routine monitoring interpretation by producing short-lived signals that may resemble non-weather anomalies and increase review burden if their meteorological origin is not quantified. However, event-scale spatiotemporal deposition patterns and their controlling meteorological drivers remain poorly quantified. In this research, we have established an end-to-end WRF–HIRAT workflow to simulate  $^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi}$  transport and wet/dry deposition over Japan, leveraging well-observed synoptic precipitation systems and dense operational monitoring context to support reproducibility and future validation.

We ran WRF for 2012/12/01–12/03 ( $\approx 2.5$  days; 48 km; 3-hourly outputs) and produced gridded precipitation rate, 10-m wind (speed/vectors), and sea-level pressure. This period was selected as a controlled baseline event window with a coherent synoptic evolution, which captured the transport–scavenging sequence while keeping the end-to-end pipeline development and QC tractable before scaling to longer periods and multiple events. WRF reproduced a coherent synoptic evolution with a low east of Japan and an evolving precipitation band, providing physically consistent drivers for advection and scavenging. We completed the coupling pipeline—variable extraction, unit and time-stamp harmonization (UTC $\leftrightarrow$ JST),  $\Delta t=3$  h averaging, spatial interpolation/grid alignment, and QC checks (missing values, range, continuity)—and successfully ingested these standardized drivers into HIRAT. In HIRAT, the  $^{222}\text{Rn}$  decay chain, gas/particle partitioning, and wet/dry deposition parameterizations for  $^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi}$  were configured and executed, producing maps and time series for further analysis.

Next, we will finalize deposition products and quantify key processes and outcomes. Specifically, we will clarify the spatial and temporal variability of wet and dry deposition of  $^{214}\text{Pb}$  and  $^{214}\text{Bi}$ , evaluate their relationship with precipitation intensity and movement,

and assess the influence of meteorological conditions on transport and removal processes. We will also quantify wet/dry budgets and precipitation–deposition timing, and validate the results against available data. These efforts will support the interpretation of short-term fluctuations in environmental gamma dose rates. Finally, higher-resolution and sensitivity experiments will be conducted to improve robustness and generality.

## 2. 論文

## ダイズにおけるセシウムの吸収・移行に及ぼす根粒着生の影響

研究代表者：村島 和基

受入研究者：二瓶 直登

共同研究者：信濃 卓郎、渡部 敏裕

丸山 隼人

### 1. 成果

東京電力福島第一原子力発電所の事故により、放射性セシウム ( $^{137}\text{Cs}$ ) が拡散および農地に沈着し、汚染土壌から作物への  $^{137}\text{Cs}$  移行が喫緊の課題として生じた。これまでセシウム (Cs) と化学的類似性を持つカリウム (K) による移行低減対策が取られてきた。一方で、同じ土壌交換態 K 濃度条件下において、ダイズは他の作物より Cs が多く移行することが報告されており、K に加えたマメ科特有の Cs 移行対策を検討する必要がある。申請者はこれまでの研究から、ダイズ根粒が他器官より Cs を有意に高く蓄積することを明らかにし、根粒着生の増加が地上部への Cs 移行を抑制する可能性を示唆した。しかしながら、上記の結果は異なる根粒着生システムを用いた試験から得られた結果であり、根粒菌共生の有無による Cs 移行抑制効果はさらなる調査が必要である。また、根粒での K 輸送機構に関する先行研究は限られており、Cs 輸送に関しては不明である。

本研究では、根粒菌共生の有無が Cs 移行に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。また、根粒で Cs 輸送に関わる輸送体遺伝子の同定を目指した。Cs 添加条件 (2.5  $\mu\text{M}$ , 1.0  $\mu\text{M}$ , 0  $\mu\text{M}$ ) と根粒菌接種の有無から 6 処理区を設けて、マメ科モデル植物のミヤコグサ (*Lotus japonicus* 'Miyakojima' MG-20) を滅菌ポットで栽培した。根粒菌 (*Mesorhizobium loti* MAFF303099) 接種後 21 日で、地上部、根、根粒を採取し、それらの元素分析を実施した。加えて、根と根粒の遺伝子発現解析を行った。

生育は全ての Cs 処理で一貫して、接種区で有意に増加した。一方で、地上部の Cs 濃度は接種区で低下傾向であった。地上部の K 濃度は Cs とは異なり、接種区で有意に増加した。同じ一価カチオンのナトリウムは接種の有無で変化せず、ルビジウムは K と同様に接種区で有意に増加したことから、根粒菌接種条件で Cs 移行が特徴的に抑制されることを示唆した。また、根と根粒の遺伝子発現解析から根粒で発現上昇する K 輸送体を同定した。それら K 輸送体の中で、Cs 添加濃度の増加とともに発現上昇する傾向を示した 3 つの K 輸送体遺伝子を同定した。以上のように本研究では、非共生条件に比べて、根粒菌共生条件で地上部への Cs 移行が抑制されることが示された。さらに遺伝子発現解析から、Cs 添加濃度に応答して根粒で特異的に発現増加する 3 つの K 輸送体遺伝子を同定した。今後は、これら候補遺伝子の欠損変異体を用いた遺伝子発現解析や時空間的な元素分析を通して、根粒での Cs 輸送の生理機能や分子メカニズムの解明を目指す。

### 2. 論文           なし

## 電子スピン共鳴法によるニホンザルの被ばく線量推定

研究代表者：山下 琢磨

受入研究者：三浦 富智

共同研究者：高橋 温

岡 壽崇

鈴木 正敏

木野 康志

### 1. 成果

我々は、福島第一原子力発電所事故後の旧警戒区域内外で、害獣として駆除されたニホンザルの放射線影響調査を行っている。放射線影響を解析する上で、個体ごとの被ばく線量評価は不可欠である。我々は、行動範囲が広い野生動物の各個体の被ばく線量を推定するため、歯のエナメル質に放射線によって誘起する炭酸ラジカルを定量し、累積の外部被ばく線量を再構成することを目指している。

本研究では、200 mGy 前後の被ばく線量を野生動物について推定することを目的に、電子スピン共鳴法 (Electron spin resonance, ESR) による線量推定法の開発を行った。200 mGy 前後の吸収線量では、歯のエナメル質中に生来存在する有機ラジカルの ESR 信号と炭酸ラジカルの ESR 信号が重なり合うため、慎重なスペクトル解析が必要となる。また、歯の主成分であるヒドロキシアパタイト結晶において、微量の不純物として置換している炭酸イオンに由来する炭酸ラジカル量は個体差の影響を受ける可能性があるため、線量応答曲線における個体依存性の有無を検証することも重要である。

2025 年度の研究では、対照地域で害獣駆除された野生ニホンザル 3 頭の歯からエナメル質試料を作製し、高崎量子技術基盤研究所の Co-60 線源を用いて付加線量法を実施した。100, 200, 500, 1000, 1800 mGy の付加吸収線量の試料を作製し、東北大学の ESR 装置 (JES-X320) で測定した。スペクトル解析には独自に開発した多成分分解コードを適用し、再現性の高い解析を実現するため、解析プロトコルをフィッティング領域ごとに段階化して各制御パラメータを最適化した。

今年度の研究成果として、ESR 測定時の掃引回数を 360 回程度まで増加させることで、解析における白色ノイズの影響を効果的に抑制できることを示した。特に、IAEA TECDOC で推奨される従来の標準的な 60 回掃引と比較して、検出限界を半分程度にまで改善することに成功した。さらに、3 個体の線量応答曲線の傾きのばらつきが 6.3% の範囲内に収まることを確認した。これにより、ニホンザルにおける検量線の精度を  $\pm 100$  mGy (90% 予測区間) で確定するに至った。今後はさらに掃引回数を最適化し、検量線の更なる精度向上と個体依存性のさらなる検証を図る。

本研究の成果は、T. Yamashita et al., *International Journal of Radiation Biology* (2025) および T. Hayashi, T. Yamashita, et al., *International Journal of Radiation Biology* (2025)

の原著論文2報として掲載された。スペクトル解析のコードは論文内で公開し、一般の利用も可能な状態として整備した。また、ESR 応用計測研究会（岡山理科大学）、第27回「環境放射能」研究会（高エネルギー加速器研究機構）での口頭発表で成果報告を行った。さらに、本研究は修士課程学生1名の学位論文の基盤となり、専門的な人材育成に貢献できた。

## 2. 論文

Teppei Hayashi, Takuma Yamashita, Yusuke Mitsuyasu, Kenta Ono, Satone Iwami, Yasushi Kino, Tsutomu Sekine, Toshitaka Oka, Atsushi Takahashi, Yoshinaka Shimizu, Mirei Chiba, Toshihiko Suzuki, Ken Osaka, Keiichi Sasaki, Taku Sato, Rio Isobe, Masatoshi Suzuki, Tomisato Miura, Manabu Fukumoto, Hisashi Shinoda, "Optimization of microwave power in ESR dosimetry of tooth enamel in Japanese macaques", *International Journal of Radiation Biology*, 1-8 (2025);

<https://doi.org/10.1080/09553002.2025.2534998>

Takuma Yamashita, Teppei Hayashi, Yusuke Mitsuyasu, Kenta Ono, Satone Iwami, Yasushi Kino, Tsutomu Sekine, Toshitaka Oka, Atsushi Takahashi, Yoshinaka Shimizu, Mirei Chiba, Toshihiko Suzuki, Ken Osaka, Keiichi Sasaki, Taku Sato, Rio Isobe, Masatoshi Suzuki, Tomisato Miura, Manabu Fukumoto, Hisashi Shinoda, "Development of an electron spin resonance spectroscopy code for measuring carbonate radicals in tooth enamel and verification of its practicality using irradiated Japanese macaque teeth", *International Journal of Radiation Biology*, 1-8 (2025); doi:10.1080/09553002.2025.2510676

林哲平、山下琢磨、光安優典、小野健太、岩見聡音、岡壽崇、高橋温、木野康志、関根勉、清水良央、千葉美麗、鈴木敏彦、小坂健、佐々木啓一、佐藤拓、鈴木正敏、福本学、篠田壽、「ニホンザル歯中炭酸ラジカルの電子スピン共鳴法測定におけるマイクロ波パワーの最適化」, *Proceedings of the 26th Workshop on Environmental Radioactivity* (第26回「環境放射能」研究会), 2025-2, 71-76 (2025).

## Determination of Nd isotopic composition in water samples from urban and mining areas in Central Mongolia

研究代表者：Batkhuuyag Enkh-Uchral

受入研究者：田副 博文

共同研究者：Tseren-Ochir Soyol-Erdene

Alifia Zaskia

張 勁

### 1. 成果

Surface water, including streams and rivers, is susceptible to contamination from both natural processes and anthropogenic activities (Saeed et al., 2024). Industrial effluents from sectors such as mining, agricultural runoff, and the direct discharge of untreated sewage into rivers have significantly degraded water quality, posing risks to aquatic ecosystems and human health (Fida et al., 2023). Therefore, it is essential to understand how natural processes and anthropogenic impacts, particularly mining activities, jointly influence river water chemistry in semi-arid regions, including Mongolia. This study investigates the integration of chemical and isotopic compositions using physicochemical parameters (pH, EC and TDS), major ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ ), water stable isotopes ( $\delta^{2}\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) and rare earth elements (REEs) to examine geochemical processes in north-central Mongolia. River water samples were collected from three major river basins (Tuul, Kharaa and Orkhon), which represent diverse geochemical characteristics and varying degrees of anthropogenic influence. In the study area, pH values ranged from 6.65 to 9.41, and the river water was predominantly of the Ca- $\text{HCO}_3$  facies, indicating that rock weathering is the primary controlling process. The  $\delta^{2}\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values for water samples in the region ranged from -113.1‰ to -92.4‰ and from -15.0‰ to -12.1‰, respectively. REEs were preconcentrated from the samples using a chelating resin (InertSep ME-2), and their concentrations were determined using ICP-MS 7700 (Agilent, USA). Light rare earth elements (LREEs) concentrations were higher than those of heavy rare earth elements (HREEs), mainly in the upstream of rivers. River water samples have been processed through sequential chromatographic separation using cation exchange, DGA and Ln resins in preparation for the determination of Nd and Sr isotopic ratios. The research is ongoing and isotopic analyses will be conducted. The expected results aim to provide insights into the hydrological and geochemical processes within the terrestrial aquatic ecosystems.

### 2. 論文 なし

# Multi-scale Onshore-offshore Dynamic and Nutrient Transport of Kuroshio onto The Outer Shelf of the East China Sea Quantified Using Multi-chemical Tracers

研究代表者：Haryanto Julian Michael

受入研究者：田副 博文

共同研究者：大塚 進平

YAN TU

張 勁

## 1. 成果

Using a spatial and temporal basis, this study aims to identify and quantify multiple water mixing processes and related nutrient transport in the bottom water of the outer shelf of the East China Sea due to Kuroshio Current (KC). In this study, traditional tracers of temperature and salinity and modern tracers of Heavy Rare Earth Elements (HREEs), and Nd and Ra isotopes were employed in the water and mass mixing model. Additionally, shipboard and moored data from the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), microstructure profilers, and satellite-derived observations were utilized to help interpret physical forces further.

Preliminary results are: (1) Hydrodynamic processes influence the distribution of chemical and physical properties in the bottom water of the East China Sea on an hourly basis; (2) Reintroduction of deep Kuroshio Intermediate Water during the onshore flow was also notable for its high nutrient content, resulting in net Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN) and Dissolved Inorganic Phosphate (DIP) fluxes from the KC region 5.59 and 6.69 times larger, respectively, compared to the DIN and DIP fluxes from the continental shelf water.

This is a crucial first step in efforts to investigate overlooked pathways and temporal variabilities of water and nutrients in and out of the continental shelf due to tidal forcings.

## 2. 論文

## 宇宙暗黒物質探索に向けた環境トリチウムバックグラウンドの影響評価 とその高感度化

研究代表者：小林 雅俊

受入研究者：柿内 秀樹

共同研究者：山下 雅樹

宇都山 光輝

### 1. 成果

本研究で我々が取り組むのは、宇宙暗黒物質の探索における環境トリチウムの影響評価、およびその測定法の開発である。

暗黒物質は我々の宇宙に存在する未知の質量で、重力を通じた観測が通常の物質の5倍以上の存在が示唆されるものの、その正体はわかっていない。暗黒物質の性質解明に向け、我々が取り組んでいるのが直接探索という手法で、XENONnT 実験では8.6トンの液化キセノンガス検出器をグランサッソ国立研究所(イタリア)で運用し、暗黒物質と通常の物質が極稀に衝突する現象を観測することを目指している。暗黒物質と検出器内キセノンとの衝突レートは年に1発以下と期待されているが、検出器に放射性物質が含まれると放射線により偽の信号が作られてしまい、背景ノイズとなる。そのため、放射性物質を極限まで排除した環境での観測が必要である。

水素の同位体であるトリチウムは水素分子や水蒸気などの形で液体キセノンに溶け込むため、主要な背景事象源の一つと目される。非常に少ない濃度( $10^{-25}$  mol/mol かそれ以下)のトリチウムであっても暗黒物質探索に影響を与えうることからその測定法の開発が求められており、本研究では1. 環境中のトリチウム/水素比の測定、2. キセノン中の水素/キセノン比の測定という2段階を踏むことで間接的に検出器のキセノン中に含まれるトリチウムの測定を目指してきた。

本年度は昨年度からの継続として、キセノン中に含まれる微量水素の測定法の開発と、装置の感度改善に取り組んだ。装置の仕組みはパラジウム薄膜の特性に基づいている。パラジウム薄膜は水素原子の大きさに近い結晶構造を持つため、水素が混合するガスから水素のみを選択的に透過させる。本研究で用いる装置では、アルゴンと水素ガスを既知の濃度で混合させ、残留ガス分析装置によって解析を行った。昨年度は原理実証として10ppb ( $10^{-8}$ )の混合水素ガスで感度を確認することに成功しており、本年度は特に装置の温度安定性を高めることでアウトガスによるバックグラウンドノイズの安定化を図った。フィードバックループの導入により測定中の温度を0.01度程度のふらつきに安定させることに成功し、最終的な濃度として51pptでの測定を達成した。今後更なる好感度化と、最終的には検出器におけるトリチウム量に対して制限をかけていくことを目指す。

環境中トリチウム測定に関しては、昨年度までの研究による成果であるイタリアの実験サイトにおける環境中のトリチウム/水素濃度比の数値について、データの整理と共にミーテ

ィングを開催するなど論文としての投稿に向けての準備を進めた。その際には環境中にメタンの形で存在するトリチウムの測定に向けた準備も同時に進めている。

## 2. 論文

E. Aprile, M. Kobayashi, et al (XENON collaboration), Challenging Spontaneous Quantum Collapse with the XENONnT Dark Matter Detector, *Phys. Rev. Lett.* 136 (2026) 120201

E. Aprile, M. Kobayashi, et al (XENON collaboration), WIMP Dark Matter Search Using a 3.1 Tonne-Year Exposure of the XENONnT Experiment, *Phys. Rev. Lett.* 135 (2025) 221003,

E. Aprile, M. Kobayashi, et al (XENON collaboration), XENONnT WIMP search: Signal and background modeling and statistical inference, *Phys. Rev. D* 111, 103040 (2025),

E. Aprile, M. Kobayashi, et al (XENON collaboration), Search for light dark matter in low-energy ionization signals from XENONnT, *Phys. Rev. Lett.* 134, 161004 (2025),

## 液体シンチレーションカウンターによるトリチウム分析方法の改良検討

研究代表者：城谷 勇陞  
受入研究者：柿内 秀樹  
共同研究者：杉原 奈央子  
赤田 尚史  
田副 博文  
桑田 遥

### 1. 成果

**【目的】**トリチウム ( $^3\text{H}$ ) は天然起源、人為起源を含め広く環境中に存在する核種である。福島第一原発事故以降、ALPS 処理水の放出などにより海洋環境中のトリチウム濃度が注目を集めている。しかし、海水中ではその濃度は低く、定量するために分離・濃縮や長時間測定など複雑な分析が必要である。放射能測定法シリーズ「トリチウム分析法」が改訂されたが、試料の測定時間については「各試料につき、10 分～50 分測定を繰り返し、合計 100 分～1000 分間程度測定する。」となっており、具体的な測定時間は明記されていない。本研究では計数値とバックグラウンド計数値の関係からトリチウムを測定するための最適な一回の繰り返し測定時間 ( $X$  分 $\times$ 10 回 など) を検討した。併せて、トリチウム濃度を計算する際の解析方法について、100～1000 分測定 (50 分 $\times$ 10 回 など) を複数回行った場合に、それぞれの結果を統合して解析を行う方法について検討した。

#### **【結果】**

##### 1) 最適な一回当たりの測定時間の検討

ALOKA 社製の LB-7 (バックグラウンド cpm : 1.5～2.0) を用いて、海水試料を Ni-Ni 電極による電解濃縮 (トリチウム濃縮率 : 約 6.5 倍) または固体高分子電解膜による電解濃縮 (トリチウム濃縮率 : 約 10 倍) を行った試料の測定を行うことを想定して検討を行った。その結果、Ni-Ni 電極による電解濃縮を行った試料の場合は一回の測定時間を 50 分以上、固体高分子電解膜による電解濃縮を行った試料の場合は一回の測定時間を 30 分以上とすることで、バックグラウンドの計数値と有意な差 ( $1\sigma$  以上) が生じることが分かった。

##### 2) 解析方法の改良検討

50 分 $\times$ 10 回の測定を 1 サイクルとして、この測定を 2 サイクル行い、それぞれの測定結果から正味の計数値を求め、1 サイクル目と 2 サイクル目の結果について Student の t 検定を行う。有意差が認められない場合に、2 サイクル分の結果を合算して放射能濃度計算を行うことで、測定間の静電気などのノイズを比較することができ、より精度よく検出下限値や誤差を小さくすることができる。

### 2. 論文

なし

## OBT 生成反応における同位体効果の検証

研究代表者：小畑 結衣

受入研究者：石川 義朗

柿内 秀樹

共同研究者：鳥養 祐二

猪狩 直哉

清水 文香

遠藤 陸冬

狩谷 陸斗

佐々木 俊

溝淵 一馬

### 1. 成果

Isotope effects in organically bound tritium(OBT) production reactions

OBATA Yui\*1, TORIKAI Yuji1, SHIMIZU Fumika2, ENDO Rikuto2, KARIYA Rikuto3 et al., KAKIUCHI Hideki4, ISHIKAWA Yoshio4

1Faculty of Basic Natural Science, Ibaraki Univ., 2Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki Univ.,

3College of Science, Ibaraki Univ., 4Institute for Environmental Sciences

\*Corresponding author: yui.obata.cz30@vc.ibaraki.ac.jp

Seawater containing the radioactive isotope tritium has recently attracted attention, and understanding its biological transfer processes is therefore important. Although organically bound tritium (OBT) is believed to be mainly produced in plants, it remains unclear whether an isotope effect arising from the difference between hydrogen and tritium occurs during this process. To evaluate this possibility, the marine alga (sea lettuce, *Ulva Lactuca*) was cultivated in seawater containing both deuterium and tritium, and the concentrations of OBT and OBD (organically bound deuterium) were compared. Seawater collected from the ALPS-treated ocean discharge outlet provided by Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (tritium concentration equivalent to 230 Bq/L) was used as the culture medium. Heavy water was added to a final concentration of 0.3%, and *U. lactuca* collected from Mutsu-Ogawara Port, Aomori, was cultivated in this seawater. The algae were sampled at arbitrary intervals for up to 60 days. The OBD concentration exceeded approximately 20% after 10 days of cultivation and then gradually increased, reaching equilibrium at about 40%. The OBT concentration showed a similar trend during the early stage of cultivation but decreased around day 25 before increasing again. Throughout the experiment, the OBT concentration remained

consistently lower than the OBD concentration. This trend may reflect an isotope effect and represents a phenomenon that remains largely unexplored internationally. Further work is required to confirm reproducibility and improve measurement accuracy.

Keywords: Organically bound tritium, marine plants, hydrogen isotope effect, ocean discharge seawater.

OBT 生成反応における同位体効果の検証

小畑結衣\*1、鳥養祐二 1、清水文香 2、遠藤陸冬 2、狩谷陸斗 3 et al.、柿内秀樹 4、石川義朗 4

1 茨城大学基礎自然科学野、2 茨城大学院理工学研究科、3 茨城大学理学部、4 公益財団法人 環境科学技術研究所

\*責任著者：yui.obata.cz30@vc.ibaraki.ac.jp

放射性物質である三重水素（トリチウム）が含まれた海水は近年注目されており、生体移行過程の解明は重要である。有機結合型トリチウム（OBT）は主に植物で生成されると考えられているが、その際に水素とトリチウムの違いによる“同位体効果”が表れるのかは未解明である。重水素とトリチウムを含む海水中で海生植物であるアオサを実験室で栽培し、アオサ生体内部で存在する OBT と有機結合型重水素（OBD）を比較することで同位体効果の評価を試みた。東京電力 HD から提供された ALPS 処理後の海洋放出口から採取された海水（トリチウム濃度 230 Bq/L 相当）を栽培用海水として、これに重水を 0.3%となるように添加し、青森県むつ小川原港で採取したアナアオサを栽培した。任意期間ごとにアナアオサを栽培海水から回収する操作を最大 60 日間まで実施した。栽培日数に対する OBD 濃度は栽培期間 10 日で約 20%を超えた後、緩やかに上昇し最終的に約 40%で平衡となった。OBT 濃度は栽培初期では OBD 同様の傾向が見られたが栽培 25 日頃に一度低下後に再び上昇した。OBT 濃度は OBD 濃度を常に下回っており、この傾向は重水素とトリチウムの同位体効果に由来する可能性が示唆された。これは、日本国内外でもほとんど未解明な事象となるため、栽培計画並び OBT 測定精度の改善と共に、継続してデータを積み重ねる必要がある。

キーワード：有機結合型トリチウム、海生植物、水素同位体効果、海洋放出海水

## 2. 論文

X-ray-induced DNA damage spectrum in dilute aqueous solution: Selective protection by amino acid addition Yui Obata, Chaozhong Tian, Shinichi Yamashita Pages 815-823 | Received 25 Sep 2025, Accepted 20 Nov 2025, Accepted author version posted online: 25 Nov 2025, Published online: 01 Dec 2025

## Effects of long-term irradiation of low-dose radiation on cells

研究代表者：Wang WeiZhi

受入研究者：森脇 隆仁

共同研究者：秋山 秋梅

Yan LanYun

### 1. 成果

低線量率放射線が生体に及ぼす影響については、いまだ十分には解明されていない。これは、線量率が低いため細胞への影響が極めて小さく、解析が困難であることに起因する。本研究では、放射線感受性を増大させる細胞モデルとして、GLRX-1 欠損細胞および OGG1 過剰発現細胞を用い、低線量率放射線の生物影響を効率的に解析することを目的としている。

GLRX-1 および OGG1 は、いずれも細胞内の酸化還元調節や酸化 DNA 損傷の修復において重要な役割を担う。申請者らはこれまでに、HeLaS3 細胞において GLRX-1 欠損細胞および OGG1 過剰発現細胞を樹立し、これらの細胞が  $\gamma$  線、過酸化水素、ならびに低線量率放射線に対して高い感受性を示すことを明らかにしてきた。本研究では、これらの細胞を用いることにより、低線量率放射線の生物影響のさらなる解明を目指している。

本年度は、GLRX-1 欠損細胞および OGG1 過剰発現ヒト細胞株を用いて、低線量率放射線の長期被ばく影響を解析した。その結果、1 Gy/day の  $\gamma$  線照射に対して、いずれの細胞株もコントロール細胞と比較して高い感受性を示した。さらに、OGG1 過剰発現ハムスター細胞を作製し、この細胞を 50 mGy/day の線量率で 20 日間（総線量 1 Gy）照射した後、突然変異を生じた細胞の変異頻度を測定した。

また今後は、GLRX-1 欠損細胞において、低線量率放射線照射後の酸化タンパク質の蓄積量についても測定を進める予定である。

さまざまな環境ストレスにより、細胞内では活性酸素種 (reactive oxygen species; ROS) が産生される。過剰な ROS は酸化ストレスを引き起こし、DNA、タンパク質、脂質などの細胞内分子を酸化することで、細胞機能の異常や障害につながる。一方、低線量率放射線のような弱いストレスでは、その影響は小さく、通常の細胞では検出や解析が難しい。本研究では、放射線高感受性細胞を用いることにより、低線量・低線量率放射線が細胞に及ぼす影響をより鋭敏に捉えることが可能となる。したがって、本研究は低線量率放射線の生物影響の解明に資するものと期待される。

### 2. 論文

なし