

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  
【重点/Priority 共同研究】

重点共同研究（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
P-25-01	那須 康輝	福島県環境創造センター	副主任研究員	阿武隈川流域における河川水中の放射性セシウムに関する測定データの解析	恩田 裕一	CRIES	Fan Shaoyan 福田 美保 谷口 圭輔 和田 理志
P-25-02	平野 篤	東京電力ホールディングス株式会社	首席研究員	森林生態系における放射性物質の循環にかかわる樹皮の剥離過程の解析	恩田 裕一	CRIES	
P-25-03	星 正治	広島大学	名誉教授	カザフスタンの核実験場やウラン鉱山近郊住民の放射線被曝とその影響及び放射性微粒子の動物実験	坂口 綾	CRIES	横山 明彦
P-25-04	市村 晃一	東北大学	助教	次世代宇宙粒子実験のための有機物材料中極微量放射性元素の高感度測定手法の確立	坂口 綾	CRIES	高久 雄一 細川 佳志 三宅 春彦 見藤 駿 佐々木 息吹 岸本 康宏 蜂谷 尊彦
P-25-05	伏見 賢一	徳島大学	教授	宇宙素粒子探索のための無機シンチレータ結晶の純化方法確立	坂口 綾	CRIES	梅原 さおり 黒澤 俊介
P-25-06	保倉 明子	東京電機大学	教授	偏光光学系蛍光X線分析装置を用いる環境水中のヨウ素および微量重元素の迅速定量法の開発	坂口 綾	CRIES	高久 雄一 所 雅人 工藤 菜 塩見 嵐 水谷 晶代
P-25-07	廣瀬 勝己	認定NPO法人富士山測候所を活用する会	第一研究部長	極東海域の海水中のプルトニウムの時間変動：気候変動の影響	津旨 大輔 坂口 綾	CRIES	
P-25-08	速水 洋	早稲田大学	教授	海域観測と海洋モデルと連携した福島沖海域における降水と霧に対する数値気象モデルと <sup>137</sup> Cs大気放出シナリオの検証	津旨 大輔	CRIES	
P-25-09	関口 俊男	金沢大学	准教授	日本海域の海洋環境の基礎情報と環境放射能のデータベース化による共同研究	津旨 大輔	CRIES	松木 篤 松中 哲也 本田 匡人 井上 睦夫 猪股 弥生
P-25-10	猪股 弥生	金沢大学	准教授	海洋放射能データベースを利用した北半球太平洋における海洋循環	津旨 大輔	CRIES	
P-25-11	太田 朋子	長岡技術科学大学	准教授	森林中の放射性ヨウ素の降下量	津旨 大輔	CRIES	馬原 保典 速水 洋 松崎 浩之
P-25-12	丸山 隼人	北海道大学	助教	シロバナルーピンのCs体内分配に関わるHKT遺伝子の機能解析	古川 純	CRIES	樹本 和昭
P-25-13	宇都宮 聡	九州大学大学院	准教授	高濃度放射性セシウム含有微粒子の化学的特性に基づく環境影響と炉内状態の 解明：CsMPの生成時期と動態解析	山崎 信哉	CRIES	宮崎 加奈子 山本 朋希
P-25-14	辻 英樹	福島国際研究教育機構(予定)	未定	河川水における温度と <sup>137</sup> Cs分配係数の関係の熱化学的検証	五十嵐 康記 脇山 義史	CRIES	
P-25-15	柴田 智郎	福岡大学	教授	断層活動に関連する地殻流体中のヘリウム同位体の特徴と時間変動	丸岡 照幸 山中 勲	CRIES	
P-25-16	高橋 良	北海道立総合研究機構	主査	温泉・火山ガスの硫黄同位体比を用いた火山活動評価の検討	丸岡 照幸	CRIES	
P-25-17	越後 拓也	秋田大学大学院	准教授	窒素同位体比分析に基づく浅熱水性金鉱床の成因研究	丸岡 照幸	CRIES	
P-25-18	小林 孝行	日本大学	准教授	森林植生がもたらす樹幹流がアロフェン質黒ボク土の理化学性と放射性セシウム動態に及ぼす影響	高橋 純子	CRIES	
P-25-19	吉川 英樹	東京慈恵会医科大学	訪問研究員	樹皮表面に繁殖する苔類による放射性セシウム保持についての研究	難波 謙二	IER	箕輪 はるか
P-25-20	有馬 ボシールアハammad	山形大学	准教授	選択的に水中の重金属イオンの除去するために多孔性と磁性粉体の開発	ラハマン モハマド モフィズリスマイル	IER	Begum Zinnat Ara Anju Anjuman Nesa
P-25-21	杉原 真司	大分大学	特任准教授	年輪中有機結合型トリチウム（OBT）から見たトリチウムの拡散予測	平尾 茂一	IER	
P-25-22	Cauquoin Philippe Alexandre	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo	Project Assistant Professor	Simulation of anthropogenic tritium discharge into the ocean due treated water release from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant	グシエフ マキシム	IER	芳村 圭 小室 芳樹
P-25-23	渡部 敏裕	北海道大学	准教授	FT-IRを用いた交換性放射性セシウム予測モデルの開発	二瓶 直登	IER	信濃 卓郎 丸山 隼人 岩井 純平
P-25-24	Hu Jun	National Institutes for Quantum Science and Technology	Researcher	The development of CR-39-based alpha spectrometer	床次 真司 大森 康孝 クランロッド チュティマ	IREM	
P-25-25	安岡 由美	神戸薬科大学	准教授	排気モニターによる大気中ラドン濃度の測定について	床次 真司 細田 正洋 大森 康孝	IREM	向 高弘
P-25-26	有吉 健太郎	福島県立医科大学	准教授	野生動物におけるバイスタンダー効果の解析	三浦 富智	IREM	
P-25-27	中田 章史	北海道科学大学	准教授	プロモーター領域におけるDNAメチル化状態の解析	三浦 富智 山内 一己	IREM	山城 秀昭
P-25-28	山城 秀昭	新潟大学	教授	インド ケララ州の高自然放射線地域におけるクマネズミの精子形成能評価	三浦 富智	IREM	中田 章史
P-25-29	栗田 直幸	名古屋大学	准教授	青森県弘前市で採取された降水の同位体地球化学的特徴	赤田 尚史 アンダーソン ドノヴァン	IREM	柳澤 文孝 高橋 祥基 北山 結彩 James William Stephenson Chuenbubpar Darunwan
P-25-30	杉原 奈央子	(公財)海洋生物環境研究所	主査研究員	二枚貝貝殻を用いた週的放射性核種モニタリング手法の確立	田副 博文	IREM	白井 厚太郎 山田 正俊

重点共同研究（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
P-25-31	古川 理央	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	主任研究員	放射性希ガスモニタ校正に向けた標準測定器の精度評価	大森 康孝	IREM	原野 英樹
P-25-32	田中 将裕	核融合科学研究所	准教授	大気中のトリチウム濃度測定とその化学形態別評価	柿内 秀樹	IES	
P-25-33	小林 大輔	福島県立医科大学	講師	セシウムの経皮移行と体内分布	柿内 秀樹 田副 博文	IES	永峰 恵介
P-25-34	小松 仁	福島県環境創造センター	主任研究員	福島県内におけるイノシシの放射性セシウム濃度の長期モニタリング	柿内 秀樹	IES	村上 貴恵美 神田 幸亮
P-25-35	壁谷 昌彦	福島県野生生物共生センター	専門獣医技師	福島県内における野生傷病鳥獣等の放射性セシウムのモニタリング	柿内 秀樹	IES	村上 貴恵美 小松 仁 神田 幸亮 稲見 健司
P-25-36	信濃 卓郎	北海道大学	教授	セシウムの吸収・移行に及ぼす生育環境の影響	海野 佑介 武田 晃	IES	富宅 優晴
P-25-37	中尾 淳	京都府立大学	Associate Professor	土壌中での放射性セシウムの難交換態化を駆動する鉱物の実態解明	武田 晃	IES	橋井 一樹 坂井 亜優
P-25-38	大森 裕子	筑波大学	助教	海中における有機結合型トリチウムの残存率推定に向けた有機物の分解・残存過程の解明	佐藤 雄飛	IES	小野 つかき
P-25-39	桐原 慎二	八戸工業大学	Professor	餌料中FWTを用いた魚類筋肉中のOBTへの移行実験	石川 義朗	IES	
P-25-40	宗林 留美	静岡大学	准教授	富士山の地下水の化学的特性	石川 義朗	IES	
P-25-41	笹谷 めぐみ	広島大学	教授	低レベル放射線による発がんリスク評価を目指した高感度検出系の開発	山内 一己	IES	
P-25-42	大野 みずき	九州大学	Assistant Professor	低線量放射線影響評価のためのマウス活性酸素種の影響の検討	山内 一己	IES	
P-25-43	藤通 有希	電力中央研究所	主任研究員	放射線による腫瘍発生部位の競合に関する研究	小村 潤一郎	IES	吉田 和生 内之宮 光紀 木村 建貴 橋 拓孝
P-25-44	石川 敦子	量子科学技術研究開発機構	主任技術員	低線量放射線被ばく実験データベースおよびマウス組織標本デジタルアーカイブのフォーマットの共通化とその活用方法の検討	中平 嶺	IES	森岡 孝満 山田 裕 金 佳香
P-25-45	渡邊 未来	国立環境研究所	主任研究員	福島県の森林における野外菌床栽培キノコへの <sup>137</sup> Csの移行と蓄積	林 誠二 操上 広志 佐々木 祥人	F-REI	境 優
P-25-46	佐久間 一幸	日本原子力研究開発機構	研究副主幹	太田川上流域を対象とした福島事故後初期のセシウム流出場の再構築	林 誠二 操上 広志	F-REI	
P-25-47	中西 貴宏	日本原子力研究開発機構	主任研究員	河川水中放射性セシウム観測のためのカートリッジフィルターの選定	辻 英樹	F-REI	那須 康輝

## 阿武隈川流域における河川水中の放射性セシウムに関する測定データの解析

研究代表者：那須 康輝

受入研究者：恩田 裕一

共同研究者：Fan Shaoyan

福田 美保

谷口 圭輔

和田 理志

### 1. 成果

#### 1. 背景と目的

2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故に伴い、Cs-134及びCs-137などの放射性物質が環境中へと放出された。陸域におけるCs-137の蓄積量は、約2.7PBqと推定された[1]。陸域に沈着した放射性セシウムは、河川を經由し海へと移行する。この移行状況を把握するため、2011年6月から阿武隈川水系で筑波大学が河川調査を開始し、2015年4月に福島県環境創造センターが引き継ぎ、現在まで継続して調査を行ってきた。2021年2月までに取得したデータは、ERANデータベースにて既に公開している[2]-[5]。本研究では、2021年4月から2025年2月までに取得したデータについて精査及び整理を行った。

#### 2. 測定データについて

阿武隈川水系の17地点で下記の試料を採取し、測定を行った。

##### (1)浮遊砂

浮遊砂は、各地点で浮遊砂サンプラー[6]を用いて、年4回程度試料を回収した。回収した浮遊砂を凍結乾燥し、Cs-134及びCs-137濃度の測定をGe半導体検出器で、粒度分布の測定を粒子径分布測定装置で、それぞれ行った。

##### (2)河川水

河川水は、各地点で平水時に年2回程度採取した。採水時に水温、pH及び電気伝導度を測定した。採水した河川水をセシウムモニタリング用カートリッジフィルタ(RP13-011、日本バイリーン)に通水し、さらにろ液を陽イオン交換樹脂(デュオライトC20、デュポン社)に通水した。カートリッジおよび陽イオン交換樹脂に含まれるCs-134及びCs-137濃度の測定をGe半導体検出器で行い、それぞれ懸濁態、溶存態とした。

#### 3. 成果および今後の展開

2021年4月から2025年2月までに取得した阿武隈川水系の各測定データを、採取地点の緯度、経度、標高及び採取日時を含めて整理し、近日中にERANデータベースに登録する予定である。福島県浜通り地域を流れる二級河川においても同様のデータを取得しており、今後データを整理し、ERANデータベースへの登録を目指す予定である。

#### 参考文献

- [1] Kato et al., 2019, J. Environ. Radioact. 210, 105996.
- [2] Taniguchi et al., 2020, <https://doi.org/10.34355/CRiED.U.Tsukuba.00020>.
- [3] Taniguchi et al., 2020, <https://doi.org/10.34355/Fukushima.Pref.CEC.00021>.
- [4] Takeuchi et al., 2023, <https://doi.org/10.34355/Fukushima.Pref.CEC.00115>.
- [5] Takeuchi et al., 2023, <https://doi.org/10.34355/Fukushima.Pref.CEC.00143>.
- [6] Phillips et al., 2000, Hydrol. Process. 14, 2589-2602.

## 2. 論文

## 森林生態系における放射性物質の循環にかかわる樹皮の剥離過程の解析

研究代表者：平野 篤

受入研究者：恩田 裕一

### 1. 成果

福島第一原子力発電所事故により森林に降下した放射性 Cs は、樹皮と強固に結合し、木材利用の足枷となっている。さらに、樹皮を介して放射性 Cs が樹体内部へと拡散すれば、影響は深刻化する。本研究では日本スギ (*Cryptomeria japonica*) を対象に (1) 樹幹表面の放射性 Cs を減少させる樹皮剥離過程の定量化と、(2) 樹体内部への放射性 Cs の拡散経路となり得る樹皮の亀裂の観察を行った。組織観察法と、塗装した樹皮表面を経時観察する 2 手法を併用し、樹皮の剥離周期を 9~23 年 (平均 15 年程度) と推定した。剥離周期の個体差は、成長速度や生育環境では説明できず、樹皮更新過程に固有の変動性が存在することが示唆された。亀裂周辺組織のダメージを観察し、亀裂による樹皮破断面を起点とした師部繊維の膨張が組織崩壊をもたらし、放射性 Cs の浸透経路を形成し得ることを確認した。一方、亀裂が内樹皮に到達することで、放射性 Cs が樹体内に拡散する可能性を示唆する観察結果を得た。これらの結果より、樹皮中の放射性 Cs 動態は、剥離による減少と、亀裂を介した内部への移行という両面から評価する必要があり、継続的なモニタリングの必要性が示された。

### 2. 論文

## カザフスタンの核実験場やウラン鉱山近郊住民の放射線被曝とその影響 及び放射性微粒子の動物実験

研究代表者：星 正治

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：横山 明彦

### 1. 成果

F-25-03\_Corrase\_PO カザフスタンの核実験場やウラン鉱山近郊住民の放射線被曝とその影響及び放射性微粒子の動物実験

(Effects of radiation exposure on residents living around nuclear test sites and uranium mines in Kazakhstan, and animal experiments of radioactive microparticles)

M Hoshi (PI, Hiroshima Univ), A Kushugulova (Nazarbayev Univ), S Tokonami, Y Omori (Hirosaki Univ), A Sakaguchi (AR), Y Onda (Univ Tsukuba), M Bakhtin, D Ibrayeva, M Aumalikova, Y Kashkinbayev, P Kazymbet (Astana Med Univ), S Endo, N Fujimoto, N Kawano (Hiroshima Univ), S Toyoda (Okayama Univ Sci), H Sato (IPUMS), Z Serikov, A Klivenko, S Dyussebaev (Shakarim Univ), K Zhumadilov (Eurasian Univ), S Shinkarev, (Biophys), V Stepanenko (MRRC), K Apsalikov A Lipikhina (SRIRME), B Grosche, E Ostroumova (IARC), Z Zhumadilov

Our studies:

Our international research group has been conducting comprehensive research on radioactive contamination, radiation doses, and their effects in Kazakhstan since 1994. The content of this research is as follows.

- (1) Assessment of radiation doses and risks around the people near the Semipalatinsk nuclear test site.
- (2) Radon and atmospheric dust measurements in the uranium mining area.
- (3) The effects of exposure to radioactive microparticles through animal experiments.

Results:

(1) Radiation doses of the exposed have been estimated using archival data, Cs-137 deposition and etc. Risks will be estimated. We wrote two papers as follows and final papers of individual dose estimation is soon published. By this final paper of dosimetry we will estimate radiation risks using about 30,000 registry of exposed people.

1. Stepanenko et al. J. Radiat. Res., 65, 2024, 36-46, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrad082>,
2. Ibid, J. Radiat. Res., 66, 2025, 496-508, <https://doi.org/10.1093/jrr/rraf049>.

(2) The results of the radiation measurements such as radon have been obtained. Now epidemiological studies are going on. From these data we made some advises for its protection and further necessary studies. Our recent study related to the radon

measurement and dosimetry are as follows:

1. Tokonami et al. *J. Radiol. Prot.* 43 (2023) 023501 <https://doi.org/10.1088/1361-6498/acda41>, 2. A. Bagramova et al. *Radioanal. Nucl. Chem.*, 334, 2025, 381-387, <https://doi.org/10.1007/s10967-024-09839-2>, 3. K. Zhumadilov et al. *Environmental Challenges* 18, 2025, 101098, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101098>.

(3) Animal experiments on exposure to radioactive microparticles using Si-31 have been analyzed and found its uniqueness comparing with external exposure. Related dosimetry studies are published in

1. Stepanenko et al. *J. Radiat. Res.*, 2024, 65, 744-751, doi: 10.1093/jrr/rrae063, 2. Ibid, *J. Radiat. Res.*, 66, 2025, 16-23, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrae096>.

About the effects for rats Fujimoto et al found gene expression specific to Si-31, which led to the discovery of a new effect of radioactive particles on rats, following on from Mn-56, which is published in 3. Fujimoto et al., *Int. J. Mol. Sci.* 26, 2025, 2693, <https://doi.org/10.3390/ijms26062693>.

We also discovered a specific effect on the rat intestinal microflora, and a paper on this is currently in preparation.

## 2. 論文

## 次世代宇宙素粒子実験のための有機物材料中極微量放射性元素の高感度測定手法の確立

研究代表者：市村 晃一

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：高久 雄一，細川 佳志

三宅 春彦，見藤 駿

佐々木 息吹，岸本 康宏

蜂谷 尊彦

### 1. 成果

世界最高感度でニュートリノの出ない2重ベータ崩壊探索を行っている KamLAND-Zen 実験では、さらなる高感度探索のために検出器の極低放射能化を計画している。次世代 KamLAND2-Zen 実験では検出器材料としてポリエチレンナフタレート製シンチレーションフィルムや波長変換剤(Bis-MSB)などの有機物を用いる計画がある。それら有機物中に含まれる天然の極微量放射性核種による信号が妨害シグナルになることから  $^{238}\text{U}$  や  $^{232}\text{Th}$  について濃度の上限值が定められている(シンチレーションフィルムについては  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  とも 10 ppt 未満、波長変換剤については  $^{238}\text{U}$  は 30 ppt,  $^{232}\text{Th}$  は 1 ppt 未満)。本研究では乾式灰化法を用い、有機物中の放射性元素を ppt レベルで測定する手法の確立、および確立した手法による極低放射能検出器部材の選定を目的としている。

2024 年度の研究で波長変換剤の純化が必要であると判明したため、2025 年度は波長変換剤の純化プロセスの確立と純化性能の評価を行った。2024 年度に試みていた偏析法による純化方法に加え、溶解度の温度依存性を活かした再結晶法による純化も試みた。また、これらの手法を繰り返し適用することで  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  量の低減が見られるかの評価も行った。

偏析法を3回繰り返し適用した試料中の  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  量を評価したところ、元々の試料から  $^{238}\text{U}$  は約 140 分の1、 $^{232}\text{Th}$  は約 200 分の1まで低減することができたが、目標値までは  $^{238}\text{U}$  量はさらに3分の1に、 $^{232}\text{Th}$  量は6分の1に低減する必要があり、純化での低減量に頭打ちの傾向が見られることも判明した。

再結晶法による純化を5回繰り返した試料中の  $^{238}\text{U}$  量は約 46 ppt,  $^{232}\text{Th}$  量は約 2 ppt と、目標値には到達しなかったが元々の試料からそれぞれ約 330 分の1、約 430 分の1まで低減を達成した。再結晶法による5回の純化では低減量の頭打ちの傾向も見られず、あと数回の純化で目標値を達成できる見込みが得られた。純化処理量に関しても約 25g の1回純化に10日必要な偏析法と比較し、再結晶法では1回あたり約 20g を1日で純化できることから現状再結晶法が最適であることが本共同研究で判明した。

来年度以降も再結晶法による純化を軸に研究を継続し、KamLAND2-Zen 実験への極低放射能波長変換剤導入に向けたプロセスの確立を目指す。

### 2. 論文 なし

## 宇宙素粒子探索のための無機シンチレータ結晶の純化方法確立

研究代表者：伏見 賢一

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：梅原 さおり

黒澤 俊介

### 1. 成果

フッ化カルシウムの純度向上に関する開発を行った。フッ化カルシウムに含まれるウランおよびトリウムの濃度を 1 ppt 程度以下まで低減させるため、フッ化カルシウムの原料に含まれるウランおよびトリウムの濃度を低減させる方法を検討した。同時に、試料に含まれるウランおよびトリウムの濃度を 1 ppt よりも低い濃度を測定できる感度で計測する方法を開発した。

昨年度までの研究結果により、試料の調整段階におけるウランおよびトリウムの汚染を防ぐ方法が必須であることと、ウラン・トリウムの回収方法の効率化が重要であることを確認した。

今年度は試料調整段階の汚染を防ぐための環境整備を行い、試料準備に伴う汚染をほぼゼロにすることができた。

次に、ウラン・トリウムの除去方法について検討した。これらの除去には樹脂による吸着を行ってウランとトリウムを水溶液から除去する必要があった。この過程で大量の濃硝酸を使用する必要があり、将来の大規模化に向けたコスト低減が重要な課題であった。本研究によって、濃硝酸の濃度が低い場合においても機能する樹脂を探索し、これまで 8 M の高濃度が必要であったところを 1 M の硝酸によって十分な純化効率を得ることができ、目標としていた 1 ppt の純度を達成することに成功した。

### 2. 論文

伏見 賢一 . 天羽悠太. D.Chernyak. 江尻宏泰. 畑和実. 碓隆太. 飯田 崇史, 池田 晴雄<sup>5</sup>, 今川 恭四郎, 井上 邦雄, 伊藤 博士, 岸本 忠史, 古賀 真之, 小寺健太, A. Kozlov, 黒澤俊介, 永見 未空, 中村 健悟, 西島涉悟, 折戸 玲子, 坂口 綾, 嶋達志, 高久 雄, 竹本 康浩, 梅原 さおり, 浦野 雄介, 山路 晃広, 山本 祐平, 保田 賢輔, 吉田 斉, 「宇宙・素粒子分野における, 極微量元素除去技術を応用したシンチレータの高純度化技術」、『日本結晶成長学会誌』 Vol. 52, No.2(2025) 52-2-04.

## 偏光光学系蛍光 X 線分析装置を用いる環境水中のヨウ素および微量重元素の迅速定量法の開発

研究代表者：保倉 明子

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：高久 雄一，所 雅人

工藤 栞，塩見 嵐

水谷 晶代

### 1. 成果

環境水中の元素測定は、ヒトの健康リスク評価や環境汚染の監視、生態系の保全に直結する重要な課題であり、臭素やヨウ素は、動植物の生存や生長に影響を及ぼすことが知られている。我々は、偏光光学系蛍光 X 線分析装置を用いた土壌中の臭素およびヨウ素の定量を実現しており、標準添加法により正確な分析が可能であることを示した。しかし、環境水中の濃度は著しく低いため、XRF による測定には高倍率の濃縮法との併用が不可欠である。本研究では、陰イオン交換樹脂を用いたバッチ法による高倍率濃縮を前処理に導入し、環境水中のヨウ素および微量元素の迅速な定量法の開発を目的とした。

前処理には、強塩基性陰イオン交換樹脂 Muromac XSA-2415 HG（室町ケミカル）を用いた。臭素酸ナトリウムまたはヨウ素酸ナトリウムを超純水に溶解し、濃度既知の標準溶液を調製して適宜希釈した。ビーカーに調製溶液 5.0 L および陰イオン交換樹脂 5.0 g を入れ、スターラーで 2 時間攪拌した。一定時間経過後に、上澄み溶液 5.0 mL を分取し、ICP-MS (Agilent 8800) で臭素およびヨウ素濃度を測定し、樹脂に捕捉されず溶液内に残った元素の残存率の測定を行った。攪拌後の樹脂は減圧濾過により回収し、40 °C で 24 時間熱乾燥し、樹脂 2.0 g を偏光光学系エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 (Epsilon 5, PANalytical) の測定に供した。測定条件は、X 線管球電圧 80 kV、電流 6 mA とし、二次ターゲット材に Zr, Mo, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いて、計数時間 600 ~ 3600 秒とした。

臭素とヨウ素を 10 ppb 含む溶液と樹脂を攪拌し、ICP-MS により溶液中の経時変化を測定したところ、各元素の強度 (cps) は時間とともに減少し、120 分後の残存率は、臭素 3.4 %、ヨウ素 4.1 % となり、両元素がほぼ定量的に樹脂へ捕捉されることが確認された。すなわち、約 1000 倍の濃縮が達成されたことになる。XRF 測定時の検出下限値について吸着率を考慮し溶液中濃度として算出したところ、臭素が 0.1 ppb (計数時間 600 秒)、ヨウ素は 0.3 ppb (計数時間 3600 秒) となった。各元素の濃度既知溶液と樹脂を攪拌し、回収した樹脂を XRF で測定することにより、検量線を作成したところ、良好な直線性を示した。

以上より、本研究で構築した樹脂濃縮-XRF 測定法により、環境水中の微量元素を高感度に定量できる可能性が示された。現在、ミネラルウォーターへの適用実験を進めており、実試料分析への展開をしている。

### 2. 論文 なし

## 極東海域の海水中のプルトニウムの時間変動：気候変動の影響

研究代表者：廣瀬 勝己

受入研究者：津旨 大輔

坂口 綾

共同研究者：P.P. Povinec、猪股弥生

山田正俊、J. Zheng

### 1. 成果

人工放射性核種の中でも、プルトニウムは半減期も長く放射能毒性も高いので監視すべき核種である。また、 $^{137}\text{Cs}$  と異なり、生物起源の有機物と化学的に親和性が高く、生物地球化学的トレーサーとして有用と考えられている。1960年代以降、海洋の海水、堆積物等に含まれるプルトニウム( $^{239,240}\text{Pu}$ )の測定が行われてきた。 $^{137}\text{Cs}$  と比較して海水中の  $^{239,240}\text{Pu}$  濃度のデータは少なく解析例は比較的少ない。極東海域に含まれる西部北太平洋、特に日本周辺海域で海水温の上昇速度が大きく日本海と同様に気候温暖化の影響を受けやすい海域である。本研究では西部北太平洋の海水中の  $^{239,240}\text{Pu}$  の時系列データに着目してその挙動を研究した。

解析には筑波大の HAM データベースを使用した。なお、1987年から2021年まで海上保安庁のデータが含まれる。特に、亜寒帯の  $40^\circ \text{N}$ 、 $144^\circ \text{E}$  と亜熱帯域の  $30^\circ \text{N}$ 、 $147^\circ \text{E}$  では不完全ながら時系列データが得られているので活用した。

海洋における  $^{239,240}\text{Pu}$  の挙動を理解するために、表面水中の  $^{239,240}\text{Pu}$  濃度の時間変化を調べた。西部北太平洋は大きく分けると、黒潮を含む亜熱帯循環と親潮に代表される亜寒帯循環に分けられる。この研究では、亜熱帯循環域を黒潮・黒潮再循環域及び北赤道海域の2つの海域に分けて解析した。北赤道海域には、サンゴのコアのバンドの  $^{239,240}\text{Pu}$  濃度の分析が行われ濃度が指数関数的に減少することがわかっている。1968年から1980年までは見かけの半減時間 6.4年で減少することが分かった。亜熱帯循環域では、海水中の  $^{239,240}\text{Pu}$  濃度は同様の見かけの半減期で減少していることが分かった。一方、亜寒帯域では、比較的データは少ないが、2000年までは表面海水中の  $^{239,240}\text{Pu}$  濃度が高いレベルで推移した。2010年以降は、表面海水中の  $^{239,240}\text{Pu}$  濃度は亜熱帯循環域と同じ見かけの半減時間で減少していることが分かった。海洋の気候変動の影響の研究によると 21世紀に入って、温暖化により黒潮の流れが北にシフトしていることが明らかにされていることを考慮すると、 $^{239,240}\text{Pu}$  の結果は亜熱帯循環が強化され北にシフトしていることを反映していることと推測される。

### 2. 論文 なし

## 海域観測と海洋モデルと連携した福島沖海域における降水と霧に対する 数値気象モデルと 137Cs 大気放出シナリオの検証

研究代表者：速水 洋

受入研究者：津旨 大輔

### 1. 成果

福島第一原子力発電所事故により大気中に放出された 137Cs の量は、最近の研究で 10 PBq と推定されている (Terada et al., 2020)。しかしながら陸風時の大気放出シナリオは不確実性が大きく、海域観測データを説明するには 15~18 PBq 相当の大気放出が必要とされる (Aoyama et al., 2016)。本研究はこのギャップを埋めるべく、福島沖海域を対象に大気モデルと海洋モデルの連携により海上に輸送された 137Cs の大気放出シナリオを再構築することを最終目標としている。

前述のギャップは陸風時の大気放出量に加えて、海上での大気降水率が小さくてももたらされうる。海上においても効果的な降水プロセスは湿性沈着と考えられるが、そもそも大気モデルは海上の降水を的確に再現できるのか。そこで 2025 年度は昨年度に引き続き、数値気象モデルによる降水の再現性を検証した。

数値気象モデルとして WRF v.4.5.2 (Weather Research and Forecasting ; Skamarock et al., 2019) を使用し、海上降水量の再現性を調べた。計算領域は東日本とその東側海域で、5 km 格子で東西 193×南北 203 の範囲とした。計算は 2011 年 3 月 1 日を開始時刻として、11~31 日を評価期間とした。入力データとして、MODIS (土地利用)、客観解析 (FNL/MSM)、海面温度 (GHRSSST) を使用した。放射性物質は Terada et al. (2020) の放出シナリオを使用し、大気中の輸送と沈着は CAMx v.7.3.2 (Comprehensive Air quality Model with extensions ; RAMBOLL, 2024) を改造して計算した。既往研究 (Kajino et al., 2019; Terada et al., 2019) を参考に WRF の構成を 3 パターン用意し、計算結果を気象庁レーダー・アメダス解析雨量 (緯度経度 0.1 度×1 時間) および航空機サーベイによる空間線量率と比較し、最善の構成を抽出した。このモデルによる 137Cs と 129I の観測濃度 (Ebihara et al., 2020) と比較したところ、双葉町では過小予測となったが、それ以外の地点はよく整合していた。なお、129I の放出は 131I に対する比を一定と仮定して与えた。今後は、この結果を用いて福島沖海域への沈着量を求め、海洋モデルと連携することで陸風時の大気放出シナリオの検証を行っていく。

### 2. 論文 なし

## 日本海域の海洋環境の基礎情報と環境放射能のデータベース化による共同研究

研究代表者：関口 俊男

受入研究者：津旨 大輔

共同研究者：松木 篤、松中 哲也

本田 匡人、井上 睦夫

猪股 弥生

### 1. 成果

本研究では、金沢大学環日本海域環境研究センター（環日センター）が蓄積してきた環日本海域の環境データについて、その学術的利活用を一層促進することを目的として、筑波大学の放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同研究拠点（ERAN）データベースとの連携を通じたデータ基盤の高度化を目指す。近年のオープンサイエンスの進展を背景に、観測データの公開と再利用性の確保は重要性を増しており、とりわけ DOI（Digital Object Identifier）を付与したデータ公開は、研究データを引用可能な学術資源として位置付ける上で有効な手段とされている。本研究では、環日センター独自に構築・運用してきたデータベースに収録された多様な環境データを対象に、ERAN データベースへの転載および DOI 付与を進めることにより、データの永続性および可視性の向上を図った。

具体的には、環日センターが保有する大気・海洋・陸域にわたる環境観測データのうち、海水中の放射性セシウム濃度、海洋の基礎観測データ（海水温・塩分等）、多環芳香族炭化水素（PAH）濃度などについて、ERAN データベースに転載した上で DOI を付与し、外部研究者による利用を想定したデータ公開基盤の構築を進めた。これにより、従来は個別管理されていた観測データが、分野横断的に利用可能な形で統合される環境が整備された。ERAN との連携後、公開データへのアクセス数およびダウンロード数が顕著に増加し、従来の環日センター単独での公開に比べて、より広範な利用が促進されていることが確認された。実際に、環日センター独自データベースのアクセス数に加え、ERAN 経由でのダウンロード件数は大幅に増加しており、データ流通の拡大に対する拠点連携の有効性が示唆された。また、DOI 付与により公開データが出版物として扱われ、Google Scholar 等の学術検索サービスにおいて引用対象として認識されるようになったことは、データ公開のインセンティブ向上という観点からも重要な成果である。一方で、アクセス数の増加には自動収集プログラム等による機械的トラフィックの影響も含まれる可能性があり、今後は人為的アクセスとの識別など評価手法の精緻化が課題として挙げられる。今後も引き続き、対象データのさらなる拡充と未登録データの ERAN への段階的な転載を進め、データベースの網羅性と利便性を高めていく予定である。

### 2. 論文 なし

## 海洋放射能データベースを利用した北半球太平洋における海洋循環

研究代表者：猪股 弥生

受入研究者：津旨 大輔

### 1. 成果

本研究では、1964年から2022年までの過去のデータセット (HAMGlobal2021: Historical Artificial radioactivity database in Marine environment, Global version 2021/doi: 10.34355/CRiED.U.Tsukuba.00085) を用いて、日本海における Cs-137 や Sr-90 などの放射性核種の分布変動を調査した。4000 データ以上の観測データを使用した。

特に 1990-2022 年に海上保安庁で計測された鉛直分布に注目した。その結果、日本海極前線を境界として、日本海の北と南側では、放射性核種の拡散深度に著しい違いがあることが明らかになった。日本海極前線の南側の地域では、Cs-137 の拡散深度は 500 m でほぼ安定しており、これは対馬暖流の高温・高塩分な海水のために深層への輸送が限定的であること、表層水では福島第一原子力発電所由来の Cs-137 の流入が続いていることが示唆された。対照的に、北側の地域ではかなり深い浸透が見られ、2021年から2022年にかけて拡散深度は 1500 m に達していた。この拡散深度の増加は、極前線北部における強い渦と低温条件により深層への鉛直輸送が起りやすいためであると考えられた。特に、2011年の福島第一原子力発電所事故後数か月以内に、Cs-137 の放射能濃度は表層水のみならず底層水でも高濃度が検出された。2011年3月は非常に海水温が低く、過去に深層水形成が報告されている2001年と同程度の低温であった。Hirose and Povinec(2020)は、高気圧性の渦により Cs-137 と Sr-90 は深層に輸送されることを提示している。JCOPE データをもとに計算した渦度分布から、2011年3-4月には高気圧性の渦が日本海北西部に存在していた。高気圧性の渦によって、降水により日本海表層水に沈着した放射性 Cs-137 が急速に深層まで輸送された可能性があった。なお、2011年に Cs-137 を測定した海水では溶存酸素濃度は、前年2010年の濃度と比較して高かった。

日本海の水深 2000 メートル以深の Cs-137 および Sr-90 の濃度は、横ばいまたはわずかに増加する傾向を示した。さらに、日本海極前線より北側では Cs-137 および Sr-90 のインベントリが年々増加していた。これらのことから、日本海極前線よりも北側では Cs-137 および Sr-90 が蓄積されている可能性が示唆された。また、放射性核種の輸送に関するこれらの知見から、日本海の海洋循環や深層水形成は、地球温暖化に伴う環境変化を反映しているものと考えられた。

(参考文献)

Hirose, K., P. P. Povinec. 2020. <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs as Tracers of Oceanic Eddies in the Sea of Japan/East Sea. *J. Environ. Radioact.*, 216, 106179.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106179>.

### 2. 論文 なし

## 森林中の放射性ヨウ素の降下量

研究代表者：太田 朋子  
受入研究者：津旨 大輔  
共同研究者：馬原 保典  
速水 洋  
松崎 浩之

### 1. 成果

[はじめに]

福島原子力事故で内部被ばくの原因となる  $^{131}\text{I}$  が環境中に放出され、2011 年は都内の水道でも  $^{131}\text{I}$  が乳幼児の飲料摂取の基準値を上回った。Muramatsu et al. (2015)は福島県内の表層土壌中の  $^{129}\text{I}$  から  $^{131}\text{I}$  降下量を推測したが、採取地点は限定的である。本研究では、水源のオリジンとなる森林地帯を対象に、福島県郡山市の土壌コア中の  $^{129}\text{I}$  のインベントリーを得、事故由来の降下量を得ることを目的とした。

[手法]

試料（リター、表層土壌および 6m コア試料）は 2012 年～2014 年に福島県郡山市にある福島県林業研究センターの演習林でフィールドワークを行い採取した試料(Mahara et al., Sic. Rep., 4, 7121 (2014), Ohta et al., Sci. Rep., 13, 19627 (2023))を用いた。6m コアは現場で約 25cm にカッティングを行い、大学まで冷凍輸送を行った。リターおよび土壌試料をリター層から 50cm まで 11 深度、25cm～600cm まで 9 深度に分類し、それぞれの試料中のヨウ素同位体をアルカリトラップにより分離を行った。分離したリターおよび土壌試料中の  $^{127}\text{I}$  は ICP-MS で測定を行った。一方、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  同位体比分析用にヨウ素同位体を  $\text{AgI}$  の化学形で回収を行い、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  同位体比を加速器質量分析計(東京大学 AMS-MALT)で測定を行った。

[結果]

表層から 6m までのリターおよび土壌中の  $^{129}\text{I}$  のインベントリーから、福島由来の  $^{129}\text{I}$  降下量は少なくとも  $81\text{mBq}/\text{m}^2$  であると推測された。得られた成果は、APSORC25 で発表を行った。今後は、大気シミュレーションと実測値の比較を行う。

### 2. 論文 なし

## シロバナルーピンの Cs 体内分配に関わる HKT 遺伝子の機能解析

研究代表者：丸山 隼人

受入研究者：古川 純

共同研究者：榎本 和昭

### 1. 成果

#### 【背景・目的】

マメ科植物シロバナルーピン (*Lupinus albus* L.) は、リン欠乏耐性や耐塩性を有し、特定の重金属を選択的に吸収する特性を持つ。また、ダイズと比較して非常に高い放射性セシウム (RCs) 吸収能を示すことが知られているが、そのメカニズムは未解明である。先行研究では、シロバナルーピンにおいて根部ナトリウム (Na) 濃度と地上部 RCs 濃度との間に相互関係が観察されており、カリウム (K) に加え、Na も植物体内におけるセシウム (Cs) 動態に影響を与える重要な要因である可能性が示唆されている。そこで本研究では、根における Na 蓄積と地上部への Cs 移行の関連メカニズムの解明を目的として、他植物種において主に Na の体内分配に関与する HKT 輸送体に着目した。シロバナルーピンにおける HKT 輸送体の同定および *in silico* 解析 (実験 1) と、アフリカツメガエル卵母細胞を用いた Cs 輸送活性試験 (実験 2) を実施し、Cs と HKT 輸送体との関連性を検証した。

#### 【結果・考察】

シロバナルーピングenomに対する BLASTP 解析により、2つの HKT 遺伝子 (LaHKT1;1、LaHKT1;2) が同定された。系統解析の結果、これらはサブファミリー I に分類され、Na を単一輸送する可能性が示唆された。また、Cs 輸送活性が報告されている他植物種の HKT (GmHKT1;1 および OsHKT1;3) と近縁のクレードに属することから、Cs 輸送能を有する可能性も考えられた。組織別発現解析では、LaHKT1;2 はクラスター根や地上部組織でわずかに発現していたのに対し、LaHKT1;1 は主に根で著しく高発現していた。このことから、LaHKT1;1 は根における Na および Cs 輸送に関与する有力な候補遺伝子であると考えられた。しかしながら、アフリカツメガエル卵母細胞を用いた電気生理学的評価において、LaHKT1;1 は Cs 輸送活性を示さなかった。これらの結果は、LaHKT1;1 が Cs の体内分配に直接関与しない可能性を示唆する。一方で、根における Na 分配機能を通じて、結果的に Cs の地上部移行を間接的に抑制している可能性も考えられる。したがって、今後は輸送基質の詳細な調査とともに、変異体解析などを実施し、より詳細に機能解明を進める必要がある。

### 2. 論文

なし

## 高濃度放射性セシウム含有微粒子の化学的特性に基づく環境影響と炉内状態の 解明：CsMP の生成時期と動態解析

研究代表者：宇都宮 聡

受入研究者：山崎 信哉

共同研究者：宮崎 加奈子

山本 朋希

### 1. 成果

#### 1. 緒言

2011 年 3 月に福島第一原発から大気放出された放射性核種には高濃度放射性 Cs 含有微粒子(CsMP)が含まれていた。CsMP はメルトダウン時に炉内で生成し、3 月 13～15 日に最大 90%の Cs 放射能割合で放出されたことが分かっている。本研究は、原子力災害直後の福島県内における CsMP の分布や各時間帯における Cs 放射能寄与率、さらに CsMP の形成・放出の時間や拡散方向を明らかにすることを目的とした。

#### 2. 手法

本研究では、2011 年 6～7 月に実施された文部科学省サンプリングで採取された土壌試料のうち、100 地点の試料に対して CsMP 定量法(QCP 法)を適用し、各地点における CsMP の個数および放射能寄与率(RF 値)から初期の CsMP 広域分布図を作成した。さらに、WSPEEDI による放射性 Cs 大気拡散シミュレーション結果を用いて各時刻における放射性 Cs プルームの到達場所について検討を行い、沈着量の情報と合わせてプルーム中の CsMP 量を推計するとともに、CsMP の放出時刻や大気中動態の解析を行った。

#### 3. 結果

100 地点の試料を分析した結果、CsMP の個数および放射能寄与率 (RF 値) はそれぞれ最大 52,300 個/kg および最大 62%であり、原発から南西の方向で個数、RF 値ともに他の地点よりも高くなった。CsMP 個数分布は 134+137Cs 放射能マップと類似していたが、放射能の高い原発から北西方向において、放射能の増加率に対して個数の増加率は低くなる傾向が見られ、RF 値も低下した。これは北西方向における水溶性 Cs の沈着の影響が大きいためである。2011 年 3 月 15 日の放射性 Cs の大気拡散シミュレーションの結果および Cs 沈着量情報と QCP 法の結果を組み合わせると、10:00 頃に原発から南方向に分布したプルームに最大 2,030 個/m<sup>3</sup> の CsMP が、13:00 頃に原発から南南西方向に分布したプルームには最大 1,348 個/m<sup>3</sup>、22:00 頃に原発から北西方向に分布したプルームには最大 4,639 個/m<sup>3</sup> が含まれたと推定された。これから、プルーム中の CsMP の含有量は時間とともに大きく変動していたことが分かる。また、2011 年 3 月 15 日 10:00 頃に東京へ到達した CsMP を含むプルームの放出時間は 3 月 15 日 3:00 頃と推定された。

#### 4. 結論

メルトダウン過程で生成した CsMP の生成・放出時間帯、プルーム中の含有量、動態、拡散や沈着後の分布を定量的に解析することに成功した。得られた結果は、シビアアクシデント現象の考察や CsMP の環境・健康影響評価に資する、新しく有益な情報になると考えられる。

#### 2. 論文

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139670>

## 河川水における温度と $^{137}\text{Cs}$ 分配係数の関係の熱化学的検証

研究代表者：辻 英樹

受入研究者：五十嵐 康記

脇山 義史

### 1. 成果

【研究の背景】河川水中に存在する溶存態の放射性セシウム ( $^{137}\text{Cs}$ ) 濃度は、一般的に水温の変動に連動した変化を示すことが先行研究等により知られている。これまで水温と  $^{137}\text{Cs}$  分配係数との関係については、熱力学における van't Hoff 式による再現が可能であることが示されてきた。ここで分配係数には、懸濁物質中の  $^{137}\text{Cs}$  濃度と溶存態  $^{137}\text{Cs}$  濃度との比を示す見かけの分配係数がよく用いられている。この数式による再現性は、溶存態  $^{137}\text{Cs}$  濃度を形成する支配的なメカニズムが、懸濁物質と水との間のイオン交換反応であることを示唆するものである。しかしながら、実際の河川環境等の現場で観測される大規模な濃度変動が、実験室での室内試験によって定量的に再現可能であるか否かについては、これまで十分な検証が行われていなかった。本調査研究は、温度制御下における懸濁物質と水の混合試験を通じて  $^{137}\text{Cs}$  分配係数と水温の関係を詳細に検証し、実際の河川環境において観測された溶存態  $^{137}\text{Cs}$  濃度の変動と直接比較分析することを目的として実施した。

【調査および実験手法】 実験にあたっては、福島県の請戸川上流部に位置する小倉沢で採取した河川水をろ過し、対象水試料として用いた。懸濁物質については、2022年に採取された津島および請戸の試料、2023年に採取された請戸の平水時および出水時の試料の計4種類を用意した。現場における平水時の懸濁物質濃度が0.5~5mg/Lであることを踏まえ、本試験条件ではより明確な反応を捉えるため懸濁物質濃度を10mg/Lに設定した。これらの試料を混合し、実際の現場の水温変動範囲に合わせた5°C、20°C、30°Cの各条件の恒温槽内において48時間攪拌を行った。その後、孔径0.45 $\mu\text{m}$ のフィルタを用いてろ過し、80°Cから90°Cで蒸発濃縮を行うことで各温度における分配係数を算出した。得られた分配係数と絶対温度の関係を van't Hoff 式に適用し、得られた近似式の傾きと切片から、各試料における標準反応エンタルピー変化および標準反応エントロピー変化を導出した。

【実験結果および熱力学的考察】 室内混合試験の結果、標準反応エンタルピー変化は懸濁物質試料によって変動があり、-6.2~-12.2kJ/molの範囲を示した。一方、標準反応エントロピー変化はいずれの試料を用いた場合でも59.6~69.6J/mol Kと、近似した値を示す結果となった。これらの結果より、ギブス自由エネルギー変化は常に負の値となるため、懸濁物質への  $^{137}\text{Cs}$  の吸着反応が強く進行することが確認された。また、標準反応エンタルピー変化が試料ごとに異なる結果となったことは、懸濁物質の組成が採取地点や採取時期によってばらつきを持つことを反映している。さらに、標準反応エントロピー変化がいずれも近い値を示した点については、Cs 吸着時に水和殻が剥離するという反応の根本的

なメカニズムが各試料間で共通していることを示唆している。

【現場観測結果との乖離および要因分析】 上記で得られた室内混合試験の結果と、過去の現場観測データを比較した結果、現場観測データに基づいて算出された標準反応エンタルピー変化は、 $-18.2\sim-50.3$  kJ/mol となっており、これらはいずれの室内混合試験の結果よりも明らかに大きい値であった。これは、実際の河川環境における溶存態  $^{137}\text{Cs}$  濃度の変動幅が、室内試験の変動幅よりも著しく大きいことを意味している。そこで共存イオンや懸濁物質の成分の影響を検証したところ、Cs との競合性を示す主要陽イオンである  $\text{K}^+$  濃度は水温と連動して 1.9 倍程度の年変動が観測されたことから溶存態  $^{137}\text{Cs}$  濃度の季節変動幅を増幅する一つの要因であることが示唆された。一方  $\text{NH}_4^+$  濃度は 1 年間を通して  $1\text{mmol/L}$  未満であり、Cs のイオン交換への寄与は限定的と見られる。また、有機成分の季節変動は顕著ではなく、交換態  $^{137}\text{Cs}$  の濃度割合や揮発性懸濁物質の割合は、導出された熱力学パラメータとの間に明確な相関を示さなかった。これらの結果は、懸濁物質表面のフレイドエッジサイトが未だセシウムで飽和していない状態にあることを示している。

【結論】 本調査研究における実験結果および現地観測データとの比較分析から、懸濁物質とのイオン交換反応は、河川における溶存態  $^{137}\text{Cs}$  濃度形成の支配的なプロセスではないことが示された。また実験室で確認された熱化学的な反応挙動のみでは、実際の現場環境における大規模な濃度変動を説明することは不可能である。したがって、実際の河川環境においては、溶存態  $^{137}\text{Cs}$  の濃度変動を増大させる未知の因子がイオン交換以外に別に存在している可能性がある。

## 2. 論文

Tsuji, H., Nishikiori, T., Ito, S., Ozaki, H., Watanabe, M., Sakai, M., Watanabe, M., Hayashi, S. (2025). Response of  $^{137}\text{Cs}$  dynamics in dam lakes to temperature and weather conditions. *Environmental Pollution*, 378, 126445.

## 断層活動に関連する地殻流体中のヘリウム同位体の特徴と時間変動

研究代表者：柴田 智郎

受入研究者：丸岡 照幸

山中 勤

共同研究者：

### 1. 成果

P-25-15

断層活動に関連する地殻流体の化学組成・同位体比の特徴

氏名：柴田 智郎

受入研究者：丸岡 照幸

温泉中に含まれる揮発性物質は、断層活動を調べる上で有用なトレーサーである。特に、地震の震源分布や地震波観測、電磁気探査から震源付近に地殻流体の存在が確認され、それが地震発生機構と密接に関連していることが報告されている。また近年、断層や構造線を通じて継続的に上昇している流体が注目されている。本研究では断層や構造線から湧出していると考えられる九州中央部にある温泉・鉱泉水中の揮発性元素から地殻流体の動きを把握し、地殻活動との関係を理解することを試みた。九州は西南日本弧と類似した帯状構造を示し、臼杵－八代構造線を境に、北側は内帯、南側は外帯と分けられる。臼杵－八代構造線とその北方に平行する大分－熊本構造線は、中央構造線から連続し、その北側は低重力異常を示し、沈降帯となっている。この沈降帯の北端は、松山－伊万里構造線で、この間の領域を別府－島原地溝帯とよび、多くの断層や構造線が存在している。この地溝帯の西側の福岡県筑後市の温泉で定期的に観測するとともに、地溝帯の東側の大分県杵築市で温泉水および付随ガスを採取した。福岡県筑後市の温泉水の化学成分濃度は約 100mg/l で、主要イオン組成は、Ca-HCO<sub>3</sub> 型や Mg-HCO<sub>3</sub> 型で示される比較的流動性の良い地下水であった。一方大分県杵築市では約 30g/l で主要イオン組成は、Ca-SO<sub>4</sub> 型や Na-Cl 型などの火山性温泉や海水でみられるような組成を示す温泉があった。

温泉水の酸素・水素同位体比は、天水線よりも酸素同位体比が高い値を示し、島弧火山等に起因した流体の混合の影響を受けている。付随ガス中の希ガス、窒素、炭素の同位体比の測定結果から、マントル起源のヘリウムが 65～75% 混合していることが明らかとなった。このヘリウム同位体比の結果は、窒素と炭素の同位体比の結果とも調和的である。それぞれの揮発性物質の同位体比の結果は、互いに調和的であり、深部から上昇する地殻流体の存在を示唆している。これらの温泉の周辺には、現在活動的な火山がなく、温泉水の温度も 35°C 以下であることから、火山活動に関連した深部流体の輸送であるとは考え難いことから、断層や構造線などの地殻深部につながる亀裂を通しての輸送が考えられる。揮発性物質の同位体比の結果から、地殻流体が深部から上昇していることが示唆

された。このことは断層のような亀裂が存在していることを示唆しており、その経時的変化は地殻活動モニタリングとしての活用が期待できる。今後は、継続的に測定することで、その変動や地下深部物質の循環メカニズムの解明を試みる。また、このような断層や構造線での流体の挙動は、単なる水循環としてではなく、その流量や圧力変化はその母岩との相互作用にも影響し、沈澱・溶解といった地殻内での化学変化にも影響することから、地震の発生やテクトニクスといった地殻活動のモニタリングが期待される。

## 2. 論文

Kagoshima, T., Sano, Y., Takahata, N., Kawamoto, Y., Shibata, T., Li, Y., Morishita, T., Hiramatsu, Y. & Nakajima, J. (2025) Helium isotope anomaly in groundwater prior to the 2024 Noto Peninsula earthquake. *Nature Communications*. 16, 1, 10414.

## 温泉・火山ガスの硫黄同位体比を用いた火山活動評価の検討

研究代表者：高橋 良

受入研究者：丸岡 照幸

### 1. 成果

火山活動に伴い放出される硫黄化学種には、火山ガス中の二酸化硫黄 ( $\text{SO}_2$ ) や硫化水素 ( $\text{H}_2\text{S}$ )、温泉水中の硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) など多様な形態が存在する。これらの硫黄同位体比を分析することで、硫黄の起源を特定し、火山体および熱水系内における硫黄化学種の挙動を明らかにすることが可能である。温泉水中の  $\text{SO}_4^{2-}$  は、主に  $\text{SO}_2$  の不均化反応によって生成されるものと、硫化鉱物や  $\text{H}_2\text{S}$  の酸化によって生成されるものに分類される。前者は高い硫黄同位体比を、後者は低い値を示すことが知られている。また、 $\text{SO}_2$  はマグマ由来の成分とされ、火山活動の活発化に伴いその放出量が増加するため、温泉水中の硫黄同位体比が高くなることが予想される。さらに、火山ガス中の  $\text{SO}_2$  と  $\text{H}_2\text{S}$  の同位体比の差を用いることで、同位体平衡温度の推定が可能である。これらの指標が火山活動の変化に応答する場合、硫黄同位体比は火山活動評価における有用なツールとなり得る。

本研究では、十勝岳の大正火口および振子沢噴気孔群で採取した火山ガス ( $\text{SO}_2$  および  $\text{H}_2\text{S}$ )、ならびに十勝岳温泉の翁温泉で採取した温泉水中の  $\text{SO}_4^{2-}$  について硫黄同位体比を測定した。火山ガス試料は、大正火口と振子沢噴気孔群において 2024~2025 年に採取された  $\text{SO}_2$  および  $\text{H}_2\text{S}$  各 5 試料を対象とした。これらのガス成分は、小沢 (1968) の方法により  $\text{SO}_4^{2-}$  として水溶液化されており、塩化バリウム ( $\text{BaCl}_2$ ) を添加して硫酸バリウム ( $\text{BaSO}_4$ ) として回収した。温泉水試料は、2011~2024 年に採取された翁温泉の 102 試料を用いた。温泉水中の  $\text{SO}_4^{2-}$  も同様に、 $\text{BaCl}_2$  を添加して  $\text{BaSO}_4$  とした。得られた  $\text{BaSO}_4$  は、筑波大学の連続フロー型安定同位体質量分析計により硫黄同位体比を測定した。

翁温泉の温泉水の硫黄同位体比は 0.90~1.98‰ であった。火山ガスについて、大正火口における  $\text{SO}_2$  の硫黄同位体比は 10.57~12.48‰、 $\text{H}_2\text{S}$  の同位体比は -7.45~-5.97‰ であった。振子沢噴気孔群では、 $\text{SO}_2$  が 8.57~10.19‰、 $\text{H}_2\text{S}$  が -6.20~-9.76‰ であった。翁温泉における硫黄同位体比は、2011 年から 2020 年秋頃までは一定であったが、その後若干高い値を示した。この変化は、同時期に 62-2 火口で噴気高度の上昇といった表面現象が活発化した時期と一致しており、地下の熱水系やガス供給条件に何らかの変化が生じた可能性を示唆する。また、火山ガスの同位体比の差 ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_2-\text{H}_2\text{S}}$ ) が 2020 年 8 月と比較して 2024 年 5 月以降に小さくなり、同位体平衡温度が低下した。これらの変化は、翁温泉の硫黄同位体比に変化が見られた期間と重なり、ガスの起源や反応過程に変化があった可能性が考えられる。翁温泉は火山ガスの影響を受けた浅部帯水層由来の熱水であることから、硫黄同位体比の変化は火山活動の変化を反映している可能性がある。

### 2. 論文 なし

## 窒素同位体比分析に基づく浅熱水性金鉱床の成因研究

研究代表者：越後 拓也

受入研究者：丸岡 照幸

### 1. 成果

浅熱水性金鉱床とは低温・低圧環境（150°C以下・地表付近）で形成される金鉱床を指し、鹿児島県の菱刈鉱床や新潟県の佐渡鉱床など日本の代表的な金鉱床である。浅熱水性鉱床における金鉱化帯にアンモニウム（NH<sub>4</sub><sup>+</sup>）を含む鉱物（例：アンモニウム含有カリ長石（K, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>）AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>）が産出することがあるが、その産出と金の濃集に直接的な関係があるかは明らかになっていない。そこで、本課題では、浅熱水金鉱床に産出するアンモニウム含有鉱物の種類および分布を明らかにし、金の濃集とアンモニウム含有鉱物の産出に直接的な関係があるかを検討することと、アンモニウム含有鉱物の窒素の起源をその同位体比に基づいて明らかにし、浅熱水性金鉱床における金の濃集とアンモニウム含有鉱物の産出の関係を考察することを目的とし、研究を行った。

北海道北見地域には「紋別－留辺蘂地溝帯」と呼ばれる構造帯が存在し、その構造体帯内部には多くの浅熱水金鉱床がある。報告者は2018年からこの地域の金鉱床を調査・研究しており、北ノ王鉱床・曙鉱床・昭和鉱床でアンモニウム含有鉱物の産出を確認している。本研究課題では、これらの鉱床のなかでも金鉱化作用が認められている北ノ王鉱床の試料を用いて薄片観察による岩石記載・粉末 XRD 分析による鉱物同定・赤外線吸収分光分析によるアンモニウム濃度の見積もり・顕微ラマン分光分析によるアンモニウム鉱物のマッピング、金品位分析を行った。

北ノ王鉱床東部で得られた試錐試料について、金品位と N-H 吸光度、カリ長石（220）ピーク強度、イライト（001）ピーク強度の相関を調べた結果、金品位と N-H 吸光度の相関がもっとも強かった。このことはアンモニウム変質作用と金鉱化作用に直接の関係があることを示唆する。なお、同試料において、N-H 吸光度、カリ長石（220）ピーク強度、イライト（001）ピーク強度の相関を調べた結果、相関は認められなかった。このことと、金品位とカリ長石（220）ピーク強度、イライト（001）ピーク強度の相関が認められなかったことから、カリウム変質はアンモニウム変質を伴わないことを示し、本研究地域においてカリウム変質よりもアンモニウム変質に金の鉱化作用が伴うことが示唆された。本研究で得られた結果は、アンモニウム含有鉱物と金鉱化作用の関係を利用することで効率的な金の探査を行うことが可能になることを示唆している。

### 2. 論文

1) Seno, K., Watanabe, Y., Echigo, T., Aoki, S., Itano, K., Satori, S., & Kon, Y. (2026). Hematite Formation During Skarn Mineralization in the Akatani Iron Deposit, Niigata Prefecture, Japan. *Resource Geology*, 76(1), e70032.

- 2) Born, J. B., Watanabe, Y., Echigo, T., Kon, Y., & Mimura, T. (2026). Gold Mineralizing Potential of the Late Triassic Calcareous, Carbonaceous and Sulfide - Rich Sedimentary Rocks of the Isatomae Formation in the South Kitakami Belt, Japan. *Resource Geology*, 76(1), e70031.
- 3) Satori, S., Kon, Y., Watanabe, Y., Ogata, T., Echigo, T., & Aoki, S. (2025). Contribution of magma mixing to hydrothermal Cu mineralization: Evidence from the Arakawa area, Akita, Japan. *Ore Geology Reviews*, 106862.
- 4) Abdelkader, M. A., Watanabe, Y., Dawoud, M., Aoki, S., Kon, Y., Tupaz, C., ... & El-Dokouny, H. A. (2025). Secondary rare metal enrichment following biotite alteration in the Umm Naggat granitic pluton, Central Eastern Desert, Egypt. *Lithos*, 108191.
- 5) Echigo, T. (2025). Extraordinary Crystals of Natural Minerals in Mining Sites and Volcanoes. In *Engineering Crystal Habit: Applications of Polymorphism and Microtexture Learning from Nature* (pp. 17-28). Singapore: Springer Nature Singapore.

## 森林植生がもたらす樹幹流がアロフェン質黒ボク土の理化学性と放射性セシウム動態に及ぼす影響

研究代表者：小林 孝行

受入研究者：高橋 純子

共同研究者：

### 1. 成果

ヒノキ・スギ・マツなどの針葉樹の樹幹近傍土壌は、強酸性（pH4.0 以下）の樹幹流が多量に供給される特異的な環境であり、遠方土壌より酸性化している場合が多い。土壌酸性化によって粘土鉱物の風化が進行することで、放射性セシウムの挙動も変化すると予想されるが、これを調べた例は少ない。本研究では、強酸性のヒノキ樹幹流がアロフェン質黒ボク土の粘土鉱物組成を含む諸性質の変化と、放射性セシウムの輸送（蓄積および溶出）に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

アロフェン質黒ボク土が分布する静岡県内のヒノキ林から樹幹距離別（0.2m, 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m）に深さ 5cm 毎に 30cm までコアサンプリングした。採取土壌の一般理化学性とグローバルフォールアウト由来の放射性セシウム濃度等（Cs-137）について分析を行った。また、ヒノキ樹幹流に加えて林内雨および林外雨も定期的に採取し、pH やイオン組成などの分析も実施した。

ヒノキ樹幹流の pH は年間を通じて 3.9～4.1 と強酸性を示した。一方、ヒノキ林内雨および林外雨の pH はそれぞれ 4.8～6.6、4.8～6.3 を示し、樹幹流より高かった。ヒノキ樹幹流の pH が強酸性を示した要因のひとつに、フルボ酸様物質などの溶存有機物の存在が、目視および TOC 分析結果より考えられた。ヒノキ樹幹周辺土壌の pH(H<sub>2</sub>O)は、表層および樹幹に近いほど低い傾向を示した（3.9～5.3）。また、生物に有害な交換性 Al を反映する pH(KCl)も同様の傾向を示した（3.6～5.1）。これらの結果より、ヒノキ樹幹流は周辺のアロフェン質黒ボク土の酸性化をもたらすことを明らかにした。

次に、採取した土壌試料の酸性シュウ酸塩（pH3.0）およびピロリン酸ナトリウム（pH10.0）で抽出される Al、Si 含量から、主要粘土鉱物であるアロフェンの含量と Al/Si 比を算出した。その結果、アロフェン含量は樹幹近くの表層ほど低い傾向が認められた。また Al/Si 比も樹幹近くの表層ほど低い傾向が見られた。pH(H<sub>2</sub>O)と Al/Si 比の相関係数は強い正の相関（ $r=0.72^{***}$ ,  $p<0.001$ ,  $n=30$ ）を示した。これらの結果より、ヒノキ樹幹流によって周辺土壌の酸性化が進行した結果、アロフェンの部分的な Al および Si の溶解が示唆された。また溶解した Al は、交換性 Al および腐植複合体に形態変化することも交換性 Al 含量および選択溶解の結果より推察された。

Cs-137 含量は樹幹近くの表層ほど高い傾向を示し（2.9～70Bq/kg）、pH(H<sub>2</sub>O)やアロフェンの Al/Si モル比と負の相関関係を示した（それぞれ  $r=-0.93^{***}$ ,  $-0.63^{***}$ ,  $n=30$ ）。樹幹近くの表層で Cs-137 含量が高かった理由として、ヒノキ林冠に堆積した Cs-137 が樹

幹流の流れに沿って樹幹周辺の土壌に蓄積したことが推察された。また、本調査地点は傾斜地である事から、土壌粒子の物理的な移動も Cs-137 の動態に影響を及ぼすことが考えられた。

今後は、ヒノキ樹幹流と同程度の pH を示すスギについても同様の調査を行うとともに、逐次抽出などによる形態別の Cs-137 の分布についても検討する予定である。

## 2. 論文

なし

## 樹皮表面に繁殖する苔類による放射性セシウム保持についての研究

研究代表者：吉川 英樹

受入研究者：難波 謙二

共同研究者：箕輪 はるか

### 1. 成果

(研究の背景と目的)

2011年の福島第一原子力発電所事故後十数年を経過したが、ケヤキの樹皮表面に繁殖するコケ類が現在も大気中に放出された放射性セシウム（以下放射性 Cs と記す）を保持していることを確認した。2024年度も継続して、これら放射性 Cs の存在状態を把握するために実験を進めた。

(実験方法)

①放射性 Cs 含有粒子の単離と分析：分析試料は福島市内に存在する樹齢 50～80 年程度のケヤキ（高さ約 1m、幹周り約 160cm）の樹木の樹皮表面に繁殖していたコケ類（ヒナノハイゴケ、ツヤゴケ）や地衣類（ロウソクゴケ属）であり、2023年に採取した。IP 測定 (Typhoon FLA7000, Ge Healthcare) により放射能が確認できた大きさ約  $200 \times 300 \mu\text{m}$  の粒子を実体顕微鏡 (SZX16, OLYMPUS) 下で単離した。本試料について  $\gamma$  線分析および EPMA (JXA-8530F, JEOL) で表面分析を実施した。本試料はコケ類とともに野外で風雨にさらされた試料とみなせる。

②放射性 Cs 含有粒子の単離と分析：比較試料として、2020年に 1F 近傍の雨水桝より採取した埃、土壌から、①と同様に粒子の単離操作および分析を実施した。本試料もまた約 10 年間野外にて風雨にさらされてきたが、コケ類との接触は現場では認められなかった試料である。

(結果及び考察)

①単離された放射性 Cs 含有粒子は、実体顕微鏡観察によると有機物の集合体と推定され、 $^{137}\text{Cs}$  を含有していた。既報の 1F 近傍で確認できたガラス質の不溶性放射性 Cs 含有粒子若しくは土壌鉱物粒子と結合した放射性 Cs 含有粒子とも異なることから、コケ類の活動の影響が示唆された。

②比較試料は、 $\gamma$  線計測で  $^{137}\text{Cs}$  が検出された。今後、両粒子の溶解・浸食分析を実施予定である。

### 2. 論文

本研究で用いた比較試料の放射性 Cs 含有粒子と類似の粒子について Pu 分析した結果を共著として報告

J.Igarashi et.al. "Isotopic ratios of plutonium in radioactive particles released by the accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant", J. Environ. Radioactivity 291, (2026), 107856.

## 年輪中有機結合型トリチウム（OBT）から見たトリチウムの拡散予測

研究代表者：杉原 真司

受入研究者：平尾 茂一

### 1. 成果

有機結合型トリチウム（OBT）は、主に H<sub>2</sub>O で存在する環境トリチウムに比べると移動が遅く、生成当時の環境の歴史を記録している。本研究は、福島原発近傍及び福島県内数か所で採取した年輪中の OBT を測定し、事故当時及び事故後のトリチウム拡散状況を推定し、拡散のモデル化のための実測値を整備することを目的としている。

福島県内（主に浜通り）で採取した年輪中の OBT の測定では、事故発生 2011 年の年輪近傍に OBT 濃度のピークが見られ、その地点へのトリチウムの到達が確認された。しかしその前後の年輪中にも BG 以上の濃度を示す部分が存在するため、OBT 形成後の移動の有無、交換型トリチウムの除去方法、BG の再評価等の精査が必要であることが判明した。本研究では、事故後のトリチウムの放出、拡散の情報を得るために、福島原発近傍で採取した杉の木の年輪を利用し、確立した分析法により、事故当時からの放出の履歴を検証する。

OBT の分析法は、胸高の輪切りにした杉樹木を年輪ごとに分割、凍結乾燥、BG 水による洗浄後、燃焼法により OBT 濃度を低バック液体シンチレーションカウンタで測定する。本年度は、試料処理・測定系をトリチウム汚染の少ない実験環境に移設し、低バックグラウンドの測定環境の再構築を行うとともに、過去の測定データの検証を実施した。また、近年の放出状況を確認するために、原発近傍の隈小学校跡地で松葉試料を採取した。

本研究により樹木年輪中の OBT 測定技術を確立するとともに、事故的トリチウム放出や通常時のトリチウム放出環境における周辺環境の汚染状況、拡散状況を予測する局地的モデルを確立することにより、事故時、通常時の放射線施設の安全管理体制の検証が可能となる。

### 2. 論文      なし

# Simulation of anthropogenic tritium discharge into the ocean due treated water release from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

研究代表者：Cauquoin Philippe Alexandre

受入研究者：グシエフ マキシム

共同研究者：芳村 圭、小室 芳樹

## 1. 成果

Since the beginning of the discharge of water treated by Advanced Liquid Processing System (ALPS) in August 2023, tritium concentrations in seawater and aquatic ecosystems near the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP) site are continuously monitored and disseminated publicly. It is essential to assess the long-term safety threshold of ALPS-treated water discharge procedure in terms of tritium concentration in coastal areas of Japan and the Pacific Ocean. However, there was no global oceanic simulation with anthropogenic tritium concentration using a realistic discharge scenario and, by extension, no projection of tritium concentration at Pacific Ocean scale that accounts for the impact of current global warming on, for example, the Kuroshio current, which is one the main ocean current near Japan. Therefore, the purpose of our ERAN project P-25-22 was to investigate the tritium radionuclide movement released from the FNDPP site in the ALPS-treated water discharge.

For that, we used the ocean General Circulation Model (OGCM) COCO4.9 to examine for the first time the influence of climate conditions and horizontal resolutions on the spatial and temporal distributions of anthropogenic tritium released from the FDNPP site into the ocean. Compared to previous studies, we utilized a Tokyo Electric Power Company (TEPCO) release scenario as input to an OGCM to simulate the contribution of this anthropogenic tritium signal to tritium concentrations in the ocean. Moreover, for the first time, the projected tritium concentrations for the entire 21st century was modeled at global scale, considering the impact of global warming and horizontal resolution. These two aspects have an influence of the ocean velocities and the representation of the Kuroshio current, which are the main controllers of the spatial and temporal distribution of passive tracers such as tritium in the ocean. Under the SSP5-8.5 climate scenario, the shifting of the Kuroshio extension northward and the associated enhanced eastward transport affect the temporal variability of the tritium signal, without significantly changing the tritium concentration values (which remain very low). The high-resolution experiment ( $0.25^\circ$  instead of  $1^\circ$  horizontal resolution) allowed to represent more accurately the mesoscale eddies. At such resolution, the

Kuroshio current and its extension are narrower and stronger, and the transport of tritium is strengthened, allowing it to reach the western US or the Asian coast from the release point in a shorter time. However, except near the FDNPP discharge site, tritium concentration values are only slightly affected by the horizontal resolution, showing that the long-term tritium concentration threshold is not exceeded with the currently planned treated water release.

This study has been presented at several international conferences such as EGU, and an invited talk was given at the Japan Geosciences Union in May 2024. This work has been published in the *Marine Pollution Bulletin* journal, and a press release is available at <https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/4809/>.

Cauquoin et al. (2025). Ocean general circulation model simulations of anthropogenic tritium releases from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant site, *Mar. Pollut. Bull.*, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118294>.

Cauquoin et al.: Simulation of anthropogenic tritium discharge into the ocean from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, oral, EGU 2025, Vienna (Austria), April 2025.

Cauquoin et al.: Simulation of anthropogenic tritium discharge into the ocean from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, poster, 11th Annual Symposium of the Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima (Japan), March 2025.

Cauquoin et al.: Simulation of tritium releases into the ocean from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, invited talk, JpGU 2024, Chiba (Japan), May 2024.

## 2. 論文

Cauquoin, A., Gusyev, M., Komuro, Y., Ono, J., and Yoshimura, K. (2025). Ocean general circulation model simulations of anthropogenic tritium releases from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant site, *Mar. Pollut. Bull.*, 220, 118294, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118294>.

## FT-IR を用いた交換性放射性セシウム予測モデルの開発

研究代表者：渡部 敏裕  
受入研究者：二瓶 直登  
共同研究者：信濃 卓郎  
丸山 隼人  
岩井 純平

### 1. 成果

#### 1.はじめに

原子力発電所の事故により環境中へ放出された放射性セシウム( $^{137}\text{Cs}$ )は半減期が約30年と長く、植物への長期的な移行・蓄積が懸念されている。植物への $^{137}\text{Cs}$ 移リスクの評価においては、土壌中の $^{137}\text{Cs}$  (Ex $^{137}\text{Cs}$ )濃度が重要な指標であることが示されている。しかし、Ex $^{137}\text{Cs}$ の分析には時間とコストを要するため、実用面での課題が残されている。中赤外線分光器(MIRs)は土壌の多様な化学的特性を迅速に推定できる手法として報告されており、Ex $^{137}\text{Cs}$ の評価への応用も期待される。 $^{137}\text{Cs}$ は土壌本来の構成要素ではないため、Ex $^{137}\text{Cs}$ 濃度は飛来した全 $^{137}\text{Cs}$ (Total  $^{137}\text{Cs}$ )量に強く依存する。そのため、Total  $^{137}\text{Cs}$ に対するEx $^{137}\text{Cs}$ の割合(Ex $^{137}\text{Cs}$ /Total  $^{137}\text{Cs}$ )は、土壌の化学的特性を反映する指標となりうる。そこで本研究では、MIRsを用いて土壌中のEx $^{137}\text{Cs}$ /Total  $^{137}\text{Cs}$ 予測モデルを構築し、予測精度の検証を目的とした。

#### 2. 方法

2016年～2020年に福島県内で採取された839点の土壌試料について、Ex $^{137}\text{Cs}$ /Total  $^{137}\text{Cs}$ の値を農林水産省および農研機構のモニタリングデータから取得した。また、同一試料を用いてMIRsによるスペクトル測定を実施した( $n=4$ )。得られたスペクトルデータを説明変数、Ex $^{137}\text{Cs}$ /Total  $^{137}\text{Cs}$ を目的変数として部分最少二乗回帰(PLSR)による予測モデルを構築した。データセットの全体の65%をモデル構築用、10%をモデル調整用、25%を独立したテスト用データとした。構築したモデルを用いてテストデータを予測し、決定係数( $R^2$ )および二乗平均平方根誤差(RMSE)を算出することでモデル精度を評価した。さらに、土壌タイプ別に分類したデータセットでも同様の手法でモデル構築および評価を行った。

#### 3. 結果と考察

839点すべての試料をデータセットとした場合、構築したモデルのテストデータに対する予測精度は、 $R^2=0.57$ 、 $RMSE=0.12$ であった。一方、土壌タイプに分類してモデルを構築したところ、黒ボク土で $R^2=0.75$ 、 $RMSE=0.14$ となり、予測精度の向上が認められた。VIP (Variable Importance on projection)解析により各スペクトル波長の予測への寄与度を評価したところ、土壌中の粘土鉱物および有機物に由来する波長領域が予測モデルに強く影響していることが示された。特に黒ボク土ではこれらの波数領域の寄与度が他の土壌

タイプと比較して高く、黒ボク土特有の粘土組成および有機物特性が Ex 137Cs/Total 137Cs の推定において精度向上に寄与した可能性が示唆された。

#### 4. まとめ

本研究では、MIRs と PLSR を用いることで、Ex 137Cs/Total 137Cs を従来の分析方法よりも迅速に推定できる可能性が示唆された。一方で、実用的な利用を想定した場合には、さらなる予測精度の向上が求められる。そのため、鉱物組成や有機物特性といった土壌特性を考慮した解析手法を検討することで予測モデルの精度を高める必要がある。本手法は放射性セシウムの移行リスク評価における迅速なスクリーニング手法としての活用が期待される。

## 2. 論文

## The development of CR-39-based alpha spectrometer

研究代表者：Hu Jun

受入研究者：床次 眞司

大森 康孝

クランロッド チュティマ

### 1. 成果

CR-39, a solid-state nuclear track detector (SSNTD), provides a highly sensitive and reliable tool for alpha particle measurement by recording latent tracks that become visible after chemical etching. A significant challenge in utilizing CR-39 for alpha spectrometry is the accurate determination of particle energy. This difficulty arises from the complex correlation between track morphology (size and shape) and the incident energy, which is further influenced by etching conditions, detector uniformity, and the angle of incidence. Consequently, precise calibration under strictly controlled experimental conditions is essential. By synergizing standardized irradiation experiments with an advanced Deep Neural Network (DNN)-assisted analysis framework, this study aims to transition CR-39 from a conventional passive particle counter into a high-precision alpha spectrometer.

In this research, a precise energy gradient ranging from 0.66 MeV to 7.69 MeV was established using  $^{214}\text{Po}$  and  $^{241}\text{Am}$  sources coupled with aluminum foil filters. To ensure consistent detector response, chemical etching conditions were rigorously controlled. The CR-39 chips were processed using high-speed automated optical microscopy. Given the massive volume of tracks requiring detailed morphological analysis, an automated system is indispensable to eliminate human error and enhance throughput. To enhance analysis efficiency and mitigate human error, a customized DNN-assisted track analysis system was implemented. This system leverages a ResNet-101 backbone for robust feature extraction. Specifically, the anchor sizes within the detection framework were reconfigured to better match the high-aspect-ratio morphology of etched tracks, ensuring precise capture of tracks from various incident angles. This optimized architecture allows for high-fidelity segmentation and elliptical fitting of massive track datasets, providing a robust and automated foundation for high-precision energy reconstruction.

### 2. 論文

J. Hu, S. Kodaira, The development of a DNN-assisted track analysis system for CR-39-based space radiation dosimetry, *Radiation Measurements*, 190, 107565, 2026.

<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2025.107565>

J. Hu, C. Kranrod, R. Pradana, S. Musikawan, Y. Omori, M. Hosoda, S. Kodaira, S. Tokonami. Evaluation of stochastic method on track density analysis for passive radon measurement. *Applied Radiation Isotopes*, 225, 111998, 2025.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2025.111998>

## 排気モニターによる大気中ラドン濃度の測定について

研究代表者：安岡 由美

受入研究者：床次 眞司

細田 正洋

大森 康孝

共同研究者：向 高弘

### 1. 成果

#### 1. 成果

本研究で得られた知見を基に、排気モニターが大気中ラドン濃度の長期変動を正確に捉えていることを示す論文を執筆した。具体的には、測定データの解析結果および考察を英語でまとめ、国際的な学術誌への投稿準備を完了させた。本論文の作成により、全国の RI 施設に設置された排気モニターデータの有効性が実証され、地震先行現象の解明に向けた広域的な観測ネットワーク構築への道筋を示した。

#### 2. 論文内容

##### 2-1. 緒言と研究の目的

放射性希ガスであるラドン ( $^{222}\text{Rn}$ ) は、地震の先行現象として大気中濃度が異常変動することが報告されている。この解析には、全国の RI 施設に設置が義務付けられている「排気モニター」のデータが有用である。排気モニターは主要都市で稼働しており、長期データの入手が可能であるが、これまでの先行研究は測定期間が短く、季節をまたぐ長期的な変動において外気の状態を正確に反映しているか検証が必要であった。本研究では、神戸薬科大学にて約 4 ヶ月間の連続測定を行い、排気モニター値が大気中ラドン濃度の変動とどの程度一致するかを検討した。

##### 2-2. 測定方法

測定は 2021 年 8 月 20 日から 12 月 30 日までの 133 日間、神戸薬科大学の RI 施設（換気回数 17 h<sup>-1</sup>）で実施した。大気中ラドン濃度 (CS) の基準値として、給気中の濃度を高精度な静電捕集型モニターで測定し、排気中濃度 (CR) については既設の通気式電離箱（排気モニター）で測定した。解析では、環境変化やノイズの影響を抑えるために 1 時間ごとの測定値から日最低値を抽出した。さらに、指数平滑化法を適用してラドン濃度の平滑化変動を算出し、両モニター間の相関を比較した。

##### 2-3. 結果・考察

解析の結果、大気中および排気中のラドン濃度は、共に夏より冬に高くなる明確な季節変動を示した。平均濃度は大気中が  $2.2 \pm 0.7 \text{ Bq m}^{-3}$ 、排気中が  $7.5 \pm 0.2 \text{ Bq m}^{-3}$  であり、排気中の方が一貫して約  $5.3 \text{ Bq m}^{-3}$  高い値であった。この差は、建材（コンクリート壁等）からのラドン放出の影響と考えられる。特に神戸周辺は花崗岩地帯であり、建物内で濃度が高くなりやすい特性がある。変動の一致性を検証するため、排気中濃度の縦軸

を調整して比較したところ、全データの 97% が大気中濃度の誤差範囲内に収まった。この高い一致率は、建物内からの加算量が時期を問わず一定であることを示しており、排気モニタが大気中の変動を正確に捉えていることが実証された。

#### 2-4. 結論

本研究により、RI 施設の排気モニタは長期間にわたり大気中のラドン濃度変動を極めて正確に把握できることが確認された。壁面放出分等の一定のオフセット値を考慮することで、屋外ラドン濃度の実質的な推移を定量的に把握可能である。全国の排気モニタデータを活用することで、地震先行現象のメカニズム解明や災害軽減に向けた観測網の確立に大きく寄与することが期待される。

## 2. 論文

## 野生動物におけるバイスタンダー効果の解析

研究代表者：有吉 健太郎

受入研究者：三浦 富智

### 1. 成果

#### 「目的」

放射線が当たっていない細胞において、放射線が照射されたかのような反応（DNA 損傷、染色体異常、アポトーシスなど）が引き起こされる現象をバイスタンダー効果という。これまでの研究から、ヒト以外の生物種でバイスタンダー効果の報告は少なく、バイスタンダー効果は進化上保持されているか否かは依然はっきりしていない。これまでの我々の研究によって、放射線を照射したイトマキヒトデ (*Patiria pectinifera*) 卵の飼育海水を非照射の卵に加えて 24 時間飼育すると、バイスタンダー効果（卵の細胞死）が引き起こされることを確認した (Chiba et al, Rad. Res.,2025)。この結果から、バイスタンダー効果は原始的な生物から進化状保持されていることが考えられるが、しかし、この効果が異種間において伝達されるかは不明である。

そこで本研究では、放射線を照射したイトマキヒトデ卵の飼育海水を海水魚（カクレクマノミ：*Amphiprion ocellaris*）飼育海水中に加えることで、異種間でのバイスタンダー効果が誘導されるか否かを検討した。まず、カクレクマノミにおける DNA 損傷を解析するための条件検討として、カクレクマノミに放射線を 2Gy 照射した後、24 時間後における鰓組織および血球細胞における微小核試験の検討を行った。また、2Gy の放射線照射したイトマキヒトデ卵の飼育海水を海水魚飼育海水に加え、24 時間カクレクマノミを飼育したのちの鰓組織および血球細胞における微小核試験を行い、異種生物の個体間におけるバイスタンダー効果誘導の可能性を検討した。

#### 「結果と考察」

放射線非照射のカクレクマノミと比較して ( $0.0067 \pm 0.0058, n=3$ )、2Gy 照射されたカクレクマノミの鰓において微小核の頻度が有意に上昇していた ( $0.05 \pm 0.012, n=3$ )。一方で、放射線非照射のヒトデ卵の飼育海水をカクレクマノミに処理した際にも、微小核の頻度が有意に上昇していた ( $0.089 \pm 0.037, n=3$ )。放射線照射 (2Gy) のヒトデ卵の飼育海水をカクレクマノミに処理した際は、微小核の頻度は放射線非照射よりは有意に上昇するが、放射線非照射のヒトデ卵の飼育海水を処理した場合よりも微小核の頻度の上昇は見られなかった ( $0.018 \pm 0.0069, n=4$ )。本結果は、バイスタンダー効果によって増加すると考えていた鰓細胞の微小核を逆に減少させていることから、カクレクマノミ鰓細胞はヒトデ卵の飼育海水それ自体から遺伝毒性を受けていることが考えられ、かつ放射線照射によってヒトデ卵から放出される遺伝毒性物質が消失している可能性がある。

### 2. 論文

なし

## プロモーター領域における DNA メチル化状態の解析

研究代表者：中田 章史

受入研究者：三浦 富智

山内 一己

共同研究者：山城 秀昭

### 1. 成果

福島第一原発事故以降、低線量放射線の持続的な被ばくが次世代へ与える影響は、生物学的・社会的に極めて重要な課題となっている。高線量放射線が生殖腺に与える直接的なダメージについては多くの知見がある一方、低線量率の慢性被ばくが生殖細胞の分子基盤、特にエピジェネティックな制御系に及ぼす影響については未解明な点が多い。本研究では、ゲノム全体の DNA メチル化パターンを維持するために不可欠な酵素である Dnmt1 に着目した。放射線照射によって精巣における Dnmt1 の遺伝子発現およびその制御領域であるプロモーターのメチル化状態にどのような変化をもたらすかを明らかにすることを目的とした。

解析には、2023 年度の ERAN 共同研究にて、放射線照射およびサンプリングを行ったマウスの精巣を使用し、非照射群、低線量率慢性照射群 (LD: 0.076 mGy/min)、および高線量率急性照射群 (HD: 0.65 Gy/min) の比較解析を行った。なお、照射群の総線量は 4 Gy である。精巣組織から抽出した RNA および DNA を用い、Dnmt1 の mRNA 発現量を定量的 PCR (qPCR) により解析した。さらに、Dnmt1 遺伝子のプロモーター領域 (-0.5 kb、-0.6 kb、-1.7 kb の 3 箇所) における DNA メチル化頻度を算出するため、メチル化感受性制限酵素 Hha I を用いた MSRE-qPCR 法を実施した。

その結果、LD 群において、Dnmt1 の遺伝子発現量がコントロール群と比較して有意に減少していることが判明した。プロモーター領域のメチル化解析においては、LD 群の -1.7 kb 付近の領域でメチル化率の有意な上昇が認められた。この特定の領域におけるメチル化レベルの上昇は、観測された Dnmt1 遺伝子の発現抑制と負の相関を示しており、プロモーター領域のメチル化が転写抑制を誘導している可能性が示唆された。

本研究により、低線量率放射線の慢性照射が精巣における Dnmt1 の発現制御を攪乱することが示唆された。Dnmt1 は細胞分裂時のメチル化パターンの正確なコピーを担うため、その発現低下はゲノム全体のメチル化維持の不安定化を招き、次世代へ継承されるエピジェネティック情報の変容を引き起こすリスクを孕んでいる。

2023 年度の ERAN 共同研究の成果では、LD において Dnmt3A の遺伝子発現の増加が確認されている。そのため、Dnmt3A のプロモーター領域を特定する予定である。以上より、放射線被ばくによる生殖細胞への影響メカニズムの詳細な解明が期待される。

## 2. 論文

1. Annaka K, Tokita S, Shibata J, Fukuda R, Ikema H, Nakata A, Miura T, Yamashiro H (2026). Seasonal switches in testicular gene programs underlie spermatogenic plasticity in the large Japanese field mouse (*Apodemus speciosus*), *Theriogenology Wild* 8, pp. 100147.
2. Miyajima K, Daikuhara H, Shibata J, Annaka K, Ikema H, Tanaka S, Sugiyama T, Nakata A, Miura T, Yamashiro H (2025). Shortened non-breeding period and extended reproductive activity in male wild mice during a context of increased temperature, *Mammalia*, pp.
3. Yonekura S, Hasegawa C, Ochi S, Kinoshita Y, Shibata J, Kobayashi M, Ikema H, Nakata A, Miura T, Yamashiro H (2025). Effects of reversine and proTAME treatment on chromosome segregation during mouse oocyte maturation, *Zygote* 33(4), pp. 195-202.
4. Goh Valerie Swee T, Anderson D, Fujishima Y, Nakayama R, Tran T-M, Takebayashi K, Abe Y, Kasai K, Ariyoshi K, Nakata A, Yoshida Mitsuaki A, Miura T (2025). Cytogenetic Biodosimetry in Radiation Emergency Medicine: 6. Cytokinesis-block Micronucleus Assay and Its Role in Biodosimetry, *Radiation Environment and Medicine* 14(1), pp. 17-36.

# インド ケララ州の高自然放射線地域におけるクマネズミの精子形成能評価

研究代表者：山城 秀昭

受入研究者：三浦 富智

共同研究者：中田 章史

## 1. 成果

高自然放射線環境は、低線量放射線の生物影響を実環境下で評価する上で重要な研究対象である。本研究では、インド・ケララ州チャヴァラの高自然放射線地域（HBRA）に生息する野生 *Rattus rattus* を対象に、精子形成の組織学的構造および分子応答を解析した。

チャヴァラ地域の空間線量率は 0.09~16.5  $\mu\text{Sv/h}$ （平均 1.7  $\mu\text{Sv/h}$ ）であり、年間線量は約 15 mSv と推定された。一方、対照地点では 0.05~0.14  $\mu\text{Sv/h}$ （平均 0.1  $\mu\text{Sv/h}$ 、年間約 0.9 mSv）であった。精巣組織の解析により、HBRA 個体では精細管構造が良好に保たれ、活発な精子形成が確認された。精子形成細胞数の定量解析においても群間差は認められなかった。アポトーシス細胞は HBRA 個体で少なく、局在も限定的であった。また、AZAN 染色により間質線維化は認められなかった。PCNA 免疫蛍光染色解析では、細胞増殖活性に群間差は認められなかった。qPCR 解析では、放射線応答遺伝子 *Lsp1* および *Ptprk* の発現に有意差は認められず、HBRA 群で軽度の上昇傾向がみられたものの、明確な放射線影響は示されなかった。

以上の結果から、本研究で対象とした曝露範囲において、高自然放射線環境下での慢性低線量曝露は、野生 *R. rattus* の精子形成および選択した分子指標に対して検出可能な影響を及ぼさないことが示唆された。ただし、本研究は組織学的および限定的な分子指標に基づくものであり、生殖機能そのものは評価していない。したがって、微細な分子変化や長期的影響の可能性は否定できない。今後は、より大規模なサンプルおよび包括的分子解析を用いた検討が必要である。

## 2. 論文

Kinoshita Y, Shibata J, Annaka K, Ikema H, Goto J, Sasidharan K, Kumar MS, Madhavan A, Ravinesh R, Hatha AM, Nakata A, Toshihiko S, Shinoda H, Palmerini MG, Zaccardi S, Cocciolone D, Macchiarelli G, Abe M, Fukumoto M, Miura T, Yamashiro H. Chronic low-dose natural radiation exposure and testicular response in Wild *Rattus rattus* from high background radiation areas in Kerala, India. *Journal of Environmental Biology* (R2).

## 青森県弘前市で採取された降水の同位体地球化学的特徴

研究代表者：栗田 直幸  
受入研究者：赤田 尚史  
アンダーソン ドノヴァン  
共同研究者：柳澤 文孝、高橋 祥基  
北山 結彩  
James William Stephenson  
、Chuenbubpar Darunwan

### 1. 成果

青森県弘前市は、国内夜臼の豪雪地域として知られている。2024/2025 冬季には雪による災害もたびたび発生し、線状降雪帯の発生など気象学的な解析は行われている。一方、その化学的特徴は未解明のままである。本研究では、青森県弘前市における降水/降雪の同位体地球化学的特徴を明らかにすることを目的に、弘前大学屋上に置いて月間降水を採取し、トリチウム、水素酸素安定同位体比等の分析を行った。

採取した試料は pH および電気伝導度(EC)を測定した後、蒸留し、改良した固体高分子膜電解濃縮装置 (XZ001, Tripure, デノラ) を用いて濃縮処理を行った。濃縮試料は再度蒸留を行い、試料と液体シンチレータ (UltimaGold LLT, Revtity) を 50 ml ずつ混合し、1 週間程度冷暗所で静置した後、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンタ (LSC-LB5, アロカ) を用いて 1000 分測定を行った。また、試料水の一部をメンブレンフィルタ (DISMIC 25CS045AS, ADVANTEC) でろ過し、イオン成分濃度はイオンクロマトグラフィ分析装置 (930 Compact IC Flex, Eco IC, Metrohm) を、水素・酸素安定同位体比は水安定同位体分析計 (L2130-I, Picaro) を用いて分析した。

2018 年から 2023 年の弘前における降水中トリチウム濃度範囲は 0.29–1.99 Bq/L の範囲で、平均 ( $\pm$ S.D.) は  $0.61 \pm 0.29$  Bq/L であった。2018 年から 2023 年までの各年の平均濃度は、それぞれ 0.52、0.67、0.62、0.56、0.79、0.49 Bq/L であり、2022 年が比較的高い傾向にあった。水素酸素安定同位体比は、春季から秋季にかけてはおおよそ Meteoric Water line 付近に分布し、降雪時期は比較的軽くなる傾向を示した。

今後も弘前市における月間降水調査を継続し、その特徴を明らかにするとともに、他地域との比較検討を実施したい。

### 2. 論文

北山結彩, 桑田遥, Khemruthai Kheamsiri, 福田ほのか, 田中和貴, 山田椋平, 栗田直幸, 滝沢宜之, 斉藤秀樹, 遠藤雅宗, 天野洋典, 鷹崎和義, 赤田尚史: 福島県浜通り地域における ALPS 処理水海洋放出前後の月間降水中トリチウム濃度. 東北の雪と生活, 40, 21-25 (2025)

## 二枚貝貝殻を用いた遡及的放射性核種モニタリング手法の確立

研究代表者：杉原 奈央子

受入研究者：田副 博文

共同研究者：白井 厚太郎

山田 正俊

### 1. 成果

2011年に発生した東電福島第一原発事故によって放出された放射性核種は、現在も環境中に残留しているものの、そのモニタリングの時空間解像度には制約がある。この課題を解決するため、生物硬組織を利用した遡及的環境モニタリングが有効と考えられる。特にSr-90は水溶性が高く、炭酸カルシウムで構成される貝殻に取り込まれやすい性質を有し、半減期も28.79年と長いことから、事故後数か月間の濃度変遷といったデータ空白期間の復元に資する可能性がある。本研究では、二枚貝貝殻中の放射性・安定ストロンチウム濃度を指標として、環境中の放射性核種の動態を復元する手法の確立を目的としている。

昨年度までに、弘前大学において淡水性二枚貝であるカワシンジユガイのSr-90分析を、東京大学大気海洋研究所において貝殻の成長履歴指標となる酸素安定同位体比分析を実施し、Sr-90濃度変遷と成長履歴の対応関係の解明を試みた。その結果、分析対象個体においては、縁辺から蝶番にかけてSr-90濃度に明瞭な時間的変動パターンは認められなかった。また、酸素安定同位体比の結果から、当該個体の成長速度が遅く、時間分解能が十分に確保できていないことが明らかとなった。これらの結果は、Sr-90履歴の復元には、より高い時間解像度を有する試料および分析手法の適用が必要であることを示唆している。

これを踏まえ、今年度は分析試料の微量化と高感度分析の実現を目的として、TIMSの適用に向けた条件検討および前処理手法の整備を行った。TIMS測定におけるフィラメント条件や測定パラメータの検討を実施した。また、時間解像度向上の観点から、成長速度の速い若齢個体の選別および試料調製を行い、微量分析に適した試料セットの構築を進めた。これらの取り組みにより、従来法では困難であった微小領域におけるSr-90分析の実現に向けた基盤が整備された。今後は、確立したTIMS分析条件を用いた実試料への適用を進めるとともに、貝殻成長線に沿った高分解能分析と安定同位体比データとの統合解析を行うことで、事故直後のSr-90濃度変遷の復元を目指す。

### 2. 論文

## 放射性希ガスモニタ校正に向けた標準測定器の精度評価

研究代表者：古川 理央

受入研究者：大森 康孝

共同研究者：原野 英樹

### 1. 成果

自然放射性ガスのラドン (Rn-222) とその子孫核種は一般公衆の放射線被ばくの大きな要因である。近年のラドン濃度の測定ニーズの高まりの一方、国内では一次標準を起点とした校正のトレーサビリティ体系が整備されておらず、国内で測定値の正しさを担保する事は困難である。放射能標準の保守・供給を行う国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (以下、産総研) は、Rn-222 の標準開発を目指し、同じ放射性希ガスの一つである Kr-85 の標準として稼働実績がある長さ補償式比例計数管 (Length Compensated Proportional Counter, LCPC) の Rn-222 への適用可能性について検討を行った。本研究では、LCPC による Rn-222 の測定結果を、海外計量研 (PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)) トレーサブルな通気式電離箱の測定結果と比較した。その結果、両者の測定値は約 5% の差で一致した。この結果は、LCPC が Rn-222 の測定に対しても適用可能であることを示唆する。今後は測定条件の最適化をはかるとともに、不確かさや測定レンジの評価を行い、測定手法および精度の高度化を目指す。

また、比例計数管が稼働する計数ガスは P-10 ガス (Ar 90%、CH<sub>4</sub> 10%) であるが、校正対象となる市販のガスモニタは空気中の Rn-222 濃度を測定することが想定されるため、P-10 ガス・空気の両方で測定が可能な通気式電離箱を仲介器として用いる校正体系を検討した。電離媒体ガスが空気の場合の通気式電離箱のレスポンスに対する P-10 ガスの場合のレスポンスを実測データに基づいて評価する手法を開発した。開発した手法により上記のレスポンス比は暫定的に 0.75 と求められた。今後他の手法との比較や不確かさの評価を行い、手法及びレスポンス比の信頼性を評価する。

さらに、放射性希ガスの Ar-41 について標準開発を目指し、通気式電離箱を用いた校正体系に関して検討した。具体的には、Rn-222 の場合と同様に、通気式電離箱による P-10 ガス及び空気の場合のレスポンス比を評価するため、短半減期 (約 2 時間) の Ar-41 を測定するために新たな測定方法を開発した。レスポンス比は  $0.680 \pm 0.008$  ( $k = 2$ ) と評価された。この値は数値計算及び既存手法によって求められたレスポンス比と不確かさの範囲内で一致し、実用的な精度において手法の妥当性を確認することができた。

### 2. 論文

R. Furukawa, T. Yamada, H. Yashima, H. Harano, Y. Sato, T. Matsumoto, M. Shimizu, Y. Omori, Y. Soeta, R. Nagata, H. Murata, S. Otsuka, R. Ichikawa, S. Manabe, C. Shimodan, R. Smith, S. Tokonami, Evaluating the response ratio of an ionization chamber filled with

air to that with P-10 gas for  $^{41}\text{Ar}$  calibration, Applied Radiation and Isotopes, Volume 226, 2025, 112211, ISSN 0969-8043, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2025.112211>.  
Furukawa, R., Miura, T., Hachinohe, M. et al. Long-term annual proficiency testing in Fukushima for quality control of activity measurement using gamma-ray spectrometry. J Radioanal Nucl Chem (2026). <https://doi.org/10.1007/s10967-025-10674-2>

## 大気中のトリチウム濃度測定とその化学形態別評価

研究代表者：田中 将裕

受入研究者：柿内 秀樹

### 1. 成果

[目的]: 天然起源のトリチウム(T)は、主に宇宙線生成核種として成層圏で生成され、速やかに酸化されて HTO となり、対流圏の水循環に取り込まれる[1]。人為起源では、原子力施設などから主に水の化学形態で放出される。そのため、雨水や河川水、海洋、水蒸気など水状(HTO)を対象としたトリチウム挙動研究が広く行われている。一方で、大気中では、トリチウムが水蒸気状(HTO)、分子状(HT)、炭化水素状(主に CH<sub>3</sub>T)で存在する。これらを化学形態別に弁別測定した観測例は少なく、各化学形態の生成起源など未解明な点がある。例えば、化学形態の観測結果では、分子状や炭化水素状のトリチウムが高い比放射能を有することが知られている[2]が、その要因は明らかでない。本研究では、挙動が理解されている大気中の水素(H<sub>2</sub>、滞留時間: 約 2 年)やメタン(CH<sub>4</sub>、滞留時間: 約 10 年)に着目し、大気中トリチウム濃度変動との相関から HT や CH<sub>3</sub>T の生成起源解明を試みる。

[方法]: 大気中トリチウム濃度の観測は、研究代表者が開発した化学形態別トリチウム捕集装置[3]を用いた。吸湿剤(モレキュラーシーブ(MS)3A)と温度の異なる酸化触媒を組み合わせ化学形態を弁別した。捕集期間を 1 月もしくは半月(夏季のみ)とし、捕集した水分を液体シンチレーション計数装置(アロカ、LSC-LB-7, バイアル容量: 20 mL、シンチレータ: Ultima-Gold LLT、計数時間: 1500 分、検出下限値: ~1.0 Bq/L)で測定した。大気微量成分は、ガスクロマトグラフ装置(GTR Tech, G2700F, 検出器: 水素炎イオン化検出器、分離カラム: MS-5A, Porapak<sup>TM</sup> Q)と還元性ガス検知器(ジェイサイエンス, TRD-1)[4]を組み合わせ測定システムを構築し、自動採取装置を利用することで 3 時間ごとの観測データを取得した。

[結果]: 大気微量成分測定と化学形態別大気中トリチウム濃度測定を 4 年間継続して実施し、観測データを蓄積した。観測を開始した 2022 年 6 月から 2025 年 12 月末までのデータを解析し、大気中トリチウム成分(HT, CH<sub>3</sub>T)と大気中微量成分(H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)との相関を評価した。その結果、HT と H<sub>2</sub>、CH<sub>3</sub>T と CH<sub>4</sub> の間には明確な相関(Spearman の順位相関係数: 0.07、-0.02)は確認されなかった。このことは、水素状および炭化水素状トリチウムの生成過程が、大気中の H<sub>2</sub> や CH<sub>4</sub> の生成・消滅過程と異なることを示唆している。分子状や炭化水素状のトリチウム供給源は、H<sub>2</sub> や CH<sub>4</sub> が主に生成される地表付近(対流圏)ではなく、他の領域に存在する可能性がある。例えば、成層圏にも水素(H<sub>2</sub>)が存在すること[5]、大気圏内核実験の影響が残る 70 年代に米国上空の高度 10-20 km(成層圏: 対流圏界面)で HT が観測されている[6]ことから、成層圏で生成されたトリチウムの一部は分子状で存在し、それが供給源となっている可能性がある。しかし、降水中 HTO に観測されるスプリングピーク(春季の成層圏から対流圏への移行)や緯度効果(土岐市と六ヶ所村の比

較では、大気中トリチウム濃度が同じレベル)は、これまでの観測では確認できていない。原子力施設(発電所や再処理工場)からのトリチウム放出は HTO の化学形態と考えられているが、分子状や炭化水素状の放出も想定した原子力施設周辺のトリチウム観測が肝要である。

[参考文献]

[1] N. Momoshima, Radiat. Prot. Dosim., 198 (2022) 896–903.

[2] M. Tanaka and T. Uda, Radiat. Prot. Dosim., 167 (2015) 187–191.

[3] T. Uda, et al., Fusion Eng. Des., 81 (2006) 1385–1390.

[4] M. Tanaka, et al., Plasma Fusion Res., 18 (2023) 2405038.

[5] D.H. Ehhalt and F. Rohrer, Tellus, 61B (2009) 500–535.

[6] A.S. Mason, J. Geophys. Res., 82 (1977) 5913–5916.

## 2. 論文

なし

## セシウムの経皮移行と体内分布

研究代表者：小林 大輔

受入研究者：柿内 秀樹

田副 博文

共同研究者：永峰 恵介

### 1. 成果

福島県立医科大学では、生体に対する安定セシウム (Cs-133) の影響について研究を進めている。これまでに、Cs-133 は細胞外から投与されると細胞内に取り込まれ、細胞内代謝に影響を及ぼすこと、さらにはがん細胞由来培養細胞の増殖を抑制することを明らかにしてきた。これらの結果は、異常な細胞増殖を示す細胞に対する新たな制御手段となる可能性を示している。一方、臨床現場では創傷治癒異常により生じるケロイドが依然として難治性疾患である。ケロイドは線維芽細胞の過剰増殖により形成され、治療後も再発率が高い。我々は、ケロイド由来線維芽細胞に対しても Cs-133 が増殖抑制効果を示すことを見出しており、新規治療法や創薬開発への応用が期待される。また、原子力発電所事故以降、野生動物や家畜におけるセシウムの体内分布に関する報告は蓄積されているが、その多くは経口摂取に基づくものである。経口投与や静脈投与に関する薬物動態の知見は存在する一方で、経皮吸収に関する報告は乏しく、投与経路の違いによる体内移行の差異は十分に解明されていない。

本研究では、セシウム含有外用薬の開発を見据え、皮膚塗布後の経皮移行と体内分布（血中および各臓器）を明らかにすることを目的とする。これにより、全身への移行様式や臓器到達濃度を把握し、臓器に対する影響を予測するための基礎的知見を得ることを目指す。動物実験には ICR 系統雄マウス（7 週齢、n=25）を用い、対照群（NaCl）および処置群（CsCl）に分け、背部皮膚に 1 日 1 回、1 週間または 4 週間塗布した。麻酔下で採血後に安楽死させ、心臓、肺、肝臓、腎臓など主要臓器を摘出し、洗浄・秤量後に凍結保存した。現在、塗布試験は終了し、検体の前処理を進めている。臓器試料は硝酸による熱分解後、超純水で希釈し、ICP-MS により Na、K、Cs、Mg、Ca の元素分析を行う予定である。予備試験では、特別な処理を行わずとも組織中 Cs が検出可能であり、その濃度は既報のヒト組織と同程度であった。一方、一部臓器（肺）で高値が認められたため、本試験において再現性を検証する。また、試験期間中、対照群と処置群の間で体重差は認められず、本条件（100 mM）での経皮投与は体重に影響を与えないことが示された。

### 2. 論文

なし

## 福島県内におけるイノシシの放射性セシウム濃度の長期モニタリング

研究代表者：小松 仁

受入研究者：柿内 秀樹

共同研究者：村上 貴恵美、神田 幸亮

### 1. 成果

2011年3月の福島第一原子力発電所事故により、森林生態系は広範な放射性セシウム汚染を受けた。イノシシ (*Sus scrofa*) は放射性セシウムの蓄積量が高く、重要な環境モニタリングの指標種とされている。しかし、福島県全域の長期的なデータを用いて、その時空間的な推移や汚染の生物学的要因をモデルベースで定量的に評価した研究はこれまで不十分であった。そこで本研究は、14年間にわたる大規模なモニタリングデータを解析し、地域別の生態学的半減期の算出、食性の影響の評価、および成長段階などの生物学的属性との関連を明らかにすることを目的とした。

解析には、2011年度から2025年度までの間に福島県内で捕獲された3,609頭のイノシシの筋肉中<sup>137</sup>Cs濃度のデータを使用した。捕獲地点のデータと土壌の<sup>137</sup>Cs沈着量データ(2012年基準)を空間的に統合し、線形混合モデルを用いて評価を行った。地域ごとの生態学的半減期を算出したほか、胃内容物の<sup>137</sup>Cs濃度を用いて食性の影響を検証し、さらに性別や成長段階(幼獣・亜成獣・成獣)の違いが筋肉中濃度に与える影響を分析した。その結果、全地域において筋肉中<sup>137</sup>Cs濃度の有意な減少が確認された。推定された生態学的半減期は3.0~9.2年であり、<sup>137</sup>Csの物理的半減期(30.1年)よりも短いことが示された。地域別では浜通りが最も短く(3.0年)、次いで中通り(6.8年)、帰還困難区域(7.2年)、会津(9.2年)の順となった。一方で、長期的な減少傾向の中、中通りでは2022年度に一時的な濃度上昇が観察された。また、胃内容物と筋肉の<sup>137</sup>Cs濃度には強い正の相関が認められ、短期的な濃度変動に採餌経路、すなわち食性が強く影響していることが裏付けられた。さらに、筋肉中<sup>137</sup>Cs濃度に性別による有意差はみられなかったものの、成長段階は筋肉中濃度と有意に関連しており、成獣は亜成獣よりも高い蓄積を示した。減少速度も成長段階によって異なり、若齢個体ほど見かけの減少が早い傾向(幼獣3.6年、亜成獣2.9年、成獣3.1年)が示唆された。

本研究により、イノシシにおける放射性セシウムの動態は、単なる物理的減衰だけでなく、地域の環境回復プロセス、食性経路、および年齢や成長段階といった生物学的な属性を複雑に反映していることが示された。一時的な上昇傾向や地域ごとの減衰速度の違いは、単一の土壌沈着量データのみで個体の被ばくや蓄積リスクを予測することの限界を示している。本成果は、事故後の景観における生態系回復の評価や野生動物管理において、環境条件と生物学的要因を統合した長期的な多変量モニタリングの重要性を強調するものである。

### 2. 論文 なし

## 福島県内における野生傷病鳥獣等の放射性セシウムのモニタリング

研究代表者：壁谷 昌彦

受入研究者：柿内 秀樹

共同研究者：村上 貴恵美、小松 仁

神田 幸亮、稲見 健司

### 1. 成果

東京電力（株）福島第一原子力発電所の事故により、現在でも狩猟対象鳥獣において放射性セシウムが検出されている。福島県では、有害鳥獣捕獲、個体数調整及び狩猟における捕獲・処理等の安全確保に必要な情報を県民に発信するため、イノシシ、ツキノワグマ等の野生鳥獣の放射線モニタリング調査を行っている。これらの野生鳥獣の放射線モニタリング調査の結果から、生物種によって体内のセシウム 137 濃度が異なり、とりわけイノシシにおいて筋肉中のセシウム 137 濃度が高い傾向が認められている。加えて、イノシシの筋肉中のセシウム 137 濃度と捕獲場所のセシウム 137 土壌沈着量に正の関係があること、同様な土壌沈着量の汚染レベルのエリアで捕獲されたイノシシであっても、個体間で測定値のバラツキが大きいという結果が得られている。一方で、狩猟対象種以外の野生鳥獣の筋肉中の放射性セシウム濃度については知見が少なくその野生鳥獣における放射性セシウムの汚染状況は不明である。本研究では、福島県における様々な野生鳥獣の筋肉中の放射性セシウム濃度についての知見を得ることを目的とする。

2013 年から 2025 年までに福島県内で保護され福島県野生生物共生センターに運び込まれたのち死亡した傷病鳥獣および有害捕獲等で捕獲された鳥獣の筋肉を採取し、筋肉中に含まれるセシウム 137 を測定した(鳥類:N=194, ほ乳類:N=198)。得られたデータを用いて、生息地域の放射性セシウム土壌沈着量と筋肉中放射性セシウム濃度との相関の確認、生息地域間における筋肉中放射性セシウム濃度の比較、ほ乳動物と鳥類間における筋肉中放射性セシウム濃度の比較、及び食性による放射性セシウム濃度の比較を行った。

その結果、生息地域の放射性セシウム土壌沈着量と筋肉中放射性セシウム濃度については会津と中通りで弱い正の相関、浜通りで強い正の相関がみられた。生息地域間における筋肉中放射性セシウム濃度は浜通り、中通りに比べて会津が有意に低かった。ほ乳動物と鳥類間における筋肉中放射性セシウム濃度は、ほ乳類が鳥類に比べ有意に高かった。食性による放射性セシウム濃度は、それぞれ会津の鳥類で雑食よりも動物食、中通りのほ乳類で雑食よりも植物食のほうが有意に高かった。

本研究によって、近年においても食品の基準値である 100 Bq/kg を超過する個体が鳥類とほ乳類の両方で存在することが明らかとなった。いっぽうで、イノシシのように食品基準値の 100 倍を超えるような極端な値を示す個体は存在しなかった。また、ほ乳類のほうが鳥類よりも放射性セシウムを体内に蓄積しやすい可能性があることと、鳥類、ほ乳類ともに環境中の放射性セシウムの汚染度合が筋肉中の放射性セシウム濃度に影響することが示唆された。

### 2. 論文      なし

## セシウムの吸収・移行に及ぼす生育環境の影響

研究代表者：信濃 卓郎

受入研究者：海野 佑介

武田 晃

共同研究者：富宅 優晴

### 1. 成果

#### 【背景・目的】

東京電力福島第一原発の事故により大量の放射線核種が放出され、一部地域では、現在でも農作物の汚染が懸念されている。特に飛散量が多く、半減期が比較的長い放射性セシウム ( $^{137}\text{Cs}$ ) の土壌から植物への移行の把握が重要である。セシウム ( $\text{Cs}$ ) はカリウム ( $\text{K}$ ) と植物根での吸収において拮抗関係にあることから、土壌から植物への  $^{137}\text{Cs}$  移行の抑制については、 $\text{K}$  の施肥により土壌の交換態  $\text{K}$  ( $\text{Ex-K}$ ) 含量を高める対策が広く行われてきた。植物種や土壌により  $\text{Ex-K}$  による移行抑制の程度が異なることが知られているため、それぞれの植物種や土壌に応じた  $^{137}\text{Cs}$  移行リスクを評価するための適切な手法が必要である。これまでの研究では、植物種と土壌の両面の要素を取り入れた、植物体地上部全体の  $^{137}\text{Cs}$  予測式がたてられた。本研究では、ダイズとルーピンを供試作物として、水耕栽培によって植物種固有の  $\text{Cs}$  吸収係数を求める。また、それを予測式に適用し、算出した予測値と観測値の関係を調査する。

#### 【材料と方法】

供試植物としてダイズ・ルーピンを用いた。栽培は北海道大学温室で行い、栽培期間はルーピンが 2025/10/16 ~ 2025/11/20 の 36 日間、ダイズが 2025/11/17 ~ 2025/12/19 の 33 日間であった。バーミキュライトに播種し、播種 10 日後に、前処理として各苗を  $\text{K}$  濃度  $750\ \mu\text{M}$  の水耕液 (32 L) に移植した。前処理期間中は 3 日ごとに水耕液を交換した。7 日後に、 $\text{K}$  濃度の変化による植物の  $\text{Cs}$  吸収の違いを検証するため、水耕液循環式の栽培装置に設置した各バケツ (4.0 L) にルーピンは 3 個体、ダイズは 2 個体を移植し、 $^{133}\text{Cs}$  添加処理試験を行った。水耕液循環式の栽培装置については、栽培期間中の水耕液中のセシウムとカリウムの比率の変動を軽減するために使用した。 $\text{K}$  濃度処理については、25, 200,  $750\ \mu\text{M}$  の 3 段階を設定した。同時に、 $^{133}\text{CsCl}$  を添加することで水耕液中の  $\text{Cs}$  濃度を  $0.1\ \mu\text{M}$  に設定した。各処理は 4 反復で行った。前処理・本処理期間を通して  $1\ \text{M HCl}$  および  $1\ \text{M NaOH}$  を用いて毎日  $\text{pH } 5.3$  に調整した。また、本処理期間中、水耕液は本処理開始から 7, 10 日後の 2 回交換を行った。水溶液中の無機元素濃度を測定するため、3 日ごとに 10 mL の溶液を採取した。本処理開始 14 日後に植物をサンプリングし、分析を行った。

#### 【結果と考察】

実験の結果より、ルーピン、ダイズともに水耕液  $\text{K}$  濃度が増加するにつれて地上部全体の  $\text{K}$  濃度は増加、 $^{133}\text{Cs}$  濃度は減少する傾向がみられた。また、どちらにおいても水耕液中

の Cs/K 比が高くなるほど地上部の  $^{133}\text{Cs}$  濃度が増加するという明確な関係が見られた。さらに、その増加の程度、すなわち Cs/K 比に対する植物体地上部  $^{133}\text{Cs}$  の関係を示す式の傾きは植物種によって大きく異なった。Cs/K 比に対する植物体地上部  $^{133}\text{Cs}$  の関係を示す式の傾きは植物種による違いを示す重要なパラメータであり、この植物側の指標と土壌側の指標 (Ex- $^{137}\text{Cs}$ /Ex-K 比) を統合することで、土壌や植物種が異なる条件でも適用可能な、より汎用性の高い  $^{137}\text{Cs}$  移行予測モデル式を構築できると考えられる。今回の水耕栽培試験で得られたそれぞれの固有の吸収係数と先行研究における土耕栽培試験での実測値、および予測式を用いて予測値を算出し、観測値との関係を調査したところ、ルーピンについては、実測値と予測値が概ね一致していたが、ダイズについては、実測値に対して予測値が大きくなっていた。この原因として考えられるのは、品種の違いである。今回実施した水耕栽培と土耕栽培モニタリングデータにおいて使用していた品種が異なることから、品種の違いにより観測値と予測値にずれが生じた可能性があり、作物種のみならず品種に着目した吸収係数を算出することが必要であると考えられる。

## 2. 論文

## 土壌中での放射性セシウムの難交換態化を駆動する鉱物の実態解明

研究代表者：中尾 淳

受入研究者：武田 晃

共同研究者：橋井 一樹

坂井 亜優

### 1. 成果

本研究は、福島第一原発事故後に森林土壌へ沈着した放射性セシウム (Cs-137) の存在形態とその固定メカニズムを明らかにすることを目的として実施された。放射性セシウムは長半減期核種であり、事故後十年以上が経過した現在でも森林表層土壌に多く残留している。住宅地や農地では表土除去を中心とした除染が進んだが、森林域は広大であるため多くが未除染のままであり、森林土壌における放射性セシウムの形態変化や移動の理解が、長期的な被ばくリスクの適切な評価に不可欠となっている。このような背景から、地質の違いが森林土壌における Cs の存在形態に影響を及ぼすという仮説を立て、異なる地質帯の森林表層土壌を比較することでその影響を検証した。

調査は、堆積岩地域に位置する福島県大熊町と、花崗岩帯に属する伊達郡川俣町山木屋の二ヶ所の森林で行われた。大熊町では 2016 年と 2017 年の二回、山木屋では 2016 年に採土を実施し、両地点とも地表から深度別に土壌を採取した。得られた土壌は風乾と篩分けを行ったのち、酢酸アンモニウム抽出による交換態 Cs、有機物分解による有機結合態 Cs の抽出を行い、さらに未処理試料の測定から全 Cs 量を求めることで、鉱物と強固に結合して抽出されなかった強固結合態の Cs を推定した。いずれの抽出液および土壌試料も Ge 半導体検出器により Cs-137 濃度を測定し、存在形態ごとの分布を詳細に解析した。

その結果、すべての地点において、放射性セシウムの九割以上が腐植層および 0-5 cm の鉱質土層に集中的に分布していることが明らかになった。この深度分布の傾向は採取年に左右されず共通していたが、腐植層と浅い鉱質層のどちらにより多く保持されているかは地点ごとに大きく異なっていた。腐植層では有機結合態が三～四割を占め、有機物による保持の寄与が大きい一方、0-5 cm の鉱質土層では九割以上が強固結合態であり、鉱物による固定が支配的であった。さらに地質帯の異なる二地点を比較しても、鉱質層における強固結合態の割合に顕著な違いは見られず、表層における強固固定の主要因が鉱物組成の違いよりも、土壌そのものの層位構造や有機物の量・性質に関係している可能性が示唆された。

一方で、大熊町の深度 10 cm 以深では、交換態の Cs-137 の割合が相対的に増加するという特徴的な挙動が確認された。この深層での交換態 Cs の増加は、腐植層からの選択流による移動、あるいは土壌動物の活動による攪乱が影響している可能性があり、必ずしも地質の違いだけでは説明できない局所的な環境因子の影響が大きいと考えられた。

以上の結果から、森林土壌における放射性セシウムの固定は、主に腐植層と浅い鉱質土層において進行し、特に鉱質層では強固結合態が卓越することで長期的な保持を可能にしていることが分かった。また、深層での交換態 Cs の増加は地点により異なり、土壌物理環境や生物的プロセスが影響を及ぼすことが示唆された。これらの知見は、森林域における放射性セシウムの長期挙動を評価する上で重要な基礎情報となる。

今後は、0-5 cm と 10 cm 以深の鉱質土層を対象に、鉱物組成や放射性セシウムの補足ポテンシャルをより詳細に解析し、深層で交換態 Cs が増加する機構が鉱物特性に起因するものかどうかを検証する。また、鉱物・有機物・水分移動の相互作用を考慮した Cs 固定メカニズムのモデル化を進めることで、森林域における長期的な放射性 Cs の移行予測の精緻化に寄与したい

## 2. 論文

## 海中における有機結合型トリチウムの残存率推定に向けた有機物の分解・残存過程の解明

研究代表者：大森 裕子

受入研究者：佐藤 雄飛

共同研究者：小野 つかさ

### 1. 成果

2023年8月より開始された、東京電力福島第一原子力発電所事故の事後処理過程で発生した処理水の海洋放出に伴い、海洋中のトリチウム動態は社会的及び学術的に高い関心を集めている。海洋放出されたトリチウムの大部分はトリチウム化水（Tritiated water: HTO）として存在し、このHTOは海水と相動的動態を示す。一方、HTOの一部は植物プランクトンの光合成により有機結合型トリチウム（Organically Bound Tritium: OBT）へ変化する。私達の先行研究では、福島沿岸における植物プランクトンによるOBT生成速度を推定している（Sato and Omori, 2023, Water Research）。植物プランクトン粒子中のOBTは有機物の微生物分解過程を経て再びHTOへ変化しつつ、一部はOBTとして残存する。ただし、これらの変化・残存の過程に関する定量的情報が無い。本研究では植物プランクトン粒子中のOBTについて海水中の微生物分解過程の定量的評価を目的とした実験を実施した。

2025年6月に青森県沿岸で採取した海水20Lをポリカーボネート容器へ移し、そこへHTOの代替物質として重水（ $2\text{H}_2\text{O}$ ）を添加した上、光量子束密度  $100\ \mu\text{mol photon m}^{-2}\ \text{sec}^{-1}$ 、室温  $15^\circ\text{C}$  に設定した人工気象チャンバー内で24時間の明培養を実施した。これにより海水中に有機結合型重水素（Organically Bound Deuterium: OBD）が生成した。続いて、光源を切り、150日間の暗培養へと移った。暗培養中には測物プランクトンが速やかに死滅するとともに生成したOBDの微生物分解が起こる。暗培養中は、0、1、3、7、15、35、70、150日目に海水2Lをそれぞれ回収した。回収した海水はGF/F（有効保持粒子径  $0.7\ \mu\text{m}$ ）およびAnodisc（孔径  $0.2\ \mu\text{m}$ ）によるろ過操作で、大型（ $>0.7\ \mu\text{m}$ ）及び小型（ $0.7\sim 0.2\ \mu\text{m}$ ）粒子態試料、並びに溶存態試料（ろ液）に分画し、各試料中のOBD濃度を測定した。

明培養時に主に大型粒子として生成したOBDは、暗培養時は速やかに減少し、150日目には殆ど消失した。この間、暗培養の3～7日目に小型粒子および溶存態試料中のOBD濃度が増加した。これは大型粒子中の有機物を微生物が消費する過程で、各々の画分へOBDが移行した結果であると考えられる。この際、特に溶存態試料への移行率が高く、大型粒子の減少量の～7割程度の増加が確認された。その後、溶存態試料中のOBD濃度はある程度の増減を繰り返しつつ、培養期間終了まで一定濃度が存在していた。これらの結果は、溶存態有機物が海水中のトリチウムプールとなる可能性を示唆するものである。

## 2. 論文

Yuhi Satoh, Takashi Tani, Tsubasa Ikenoue, Hideyuki Kawamura, Yuko Omori (accepted)  
Accumulation possibility of tritium released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power  
Station in marine organisms. Environmental Science and Pollution Research DOI :  
10.1007/s11356-026-37606-1

## 餌料中 FWT を用いた魚類筋肉中の OBT への移行実験

研究代表者：桐原 慎二

受入研究者：石川 義朗

### 1. 成果

東京電力福島第一原子力発電所から放出される処理水中のトリチウム(T)の有用魚種への移行が懸念されている。魚類筋肉の T は、海水中の自由水型トリチウム(FWT)と餌料中の T が起源と考えられ、このうち、餌料中の T について FWT と有機結合型トリチウム(OBT)を区別して移行を調べた報告は少ない。そこで、重水素(D)を用いて調整した餌料を与えた 2 種の魚類筋肉中の有機結合型重水素(OBD)濃度を測定し、餌由来 FWT の魚類筋肉 OBT 移行を検討した。

重水、脱イオン水、乾燥魚肉ミンチ、固形化のための粉末寒天または粉末ゼラチンを加熱溶解後に 5 mm角の細断し自由水型重水素(FWD)添加餌料を調整し、150 L の 15°C調温海水を循環させた水槽に収容した体長が 15cm 前後のマツカワ、14cm 前後のキツネメバル(各 7 個体)に摂餌状況を観察し残餌を生じないように各々 36 日、39 日間給餌した。実験終了時に体重を測定するとともに筋肉組織を摘出し乾燥・粉碎処理後に水素同位体比測定装置を用いて OBD 濃度を測定し、供試魚と同じ飼育群の実験開始前の値と比較した。供試魚が摂餌した餌料中の FWD 量と魚体中の OBD 増加量からへの D 移行率を求めた。

この結果、寒天調整餌料を与えた供試魚は、全ての個体で実験終了時には体重が減少し、筋肉中の OBD がマツカワ、キツネメバルで各々 153 ppm, 157ppm 以下であった。海藻由来の寒天は、供試魚が吸収しにくいため、餌料の固形化材料として不向きと考えられた。

一方、ゼラチン調整餌料を与えたマツカワ、キツネメバルでは体重に増加傾向が見られ、実験を通じた日間増加率が各々平均 0.067%/day(SD 0.103), 0.131%/day(SD 0.077)を示し、実験終了時の筋肉中の OBD 濃度は各々平均 166.3ppm(SD 4.82), 163.0ppm(SD 4.58)であった。ゼラチンを用いて調整した餌料中の総 FWD 量から魚体中で増加した OBD 量から試算した D 移行率は、マツカワ、キツネメバルで各々  $2 \times 10^{-6}$ ,  $5 \times 10^{-6}$  と計算され、両魚種ともに低い値に留まった。

### 2. 論文

## 富士山の地下水の化学的特性

研究代表者：宗林 留美

受入研究者：石川 義朗

### 1. 成果

本課題は、富士山の地下水による放射性元素などの物質輸送経路の解明に資することを目指して実施した。具体的には、富士山の地下水の化学的特性から、(1) 富士山山体内部の水みち、(2) 帯水層を構成する元素の地下水への溶出、(3) 人為起源物質の輸送を明らかにすることを目的とした。また、(4) 富士山およびその周辺地域における火山活動と地震活動が富士山の地下水の水質に及ぼす影響を検出することを視野に、そのための定期観測点を選定し、平時のデータを収集することも目的とした。

調査地域は、大学から近い富士山南西麓とし、予備調査を 2024 年 11 月～2025 年 3 月に計 3 回行った。調査した 6 か所の地下水と湧水の主要イオン組成は、アルカリ土類炭酸塩型、アルカリ土類非炭酸塩型、アルカリ非炭酸塩型のいずれかであることがわかった。これらの主要イオン組成型、行きやすさ、採水と前処理の容易さから定期観測点を 4 か所選定し、2025 年 6 月～現在までほぼ 30 日ごとに調査した。すべての試水の水の酸素水素安定同位体比は、富士山の天水線と世界の天水線の範囲に入り、降水起源であることが確認された。酸素安定同位体比から推定した涵養標高は、観測点により 1300～2760m と異なった。富士山は過去に噴火して出来た古富士火山の上に、新しく噴火して出来た新富士溶岩流が重なった構造をしており、地下水の  $K^+/Na^+$  モル比は両方でそれぞれ特有の値を取ることが報告されている。 $K^+/Na^+$  モル比に基づく帯水層の推定から、推定涵養標高が約 2000m 以上の場合に降水がより深い古富士火山まで涵養し、推定涵養標高が約 1500m 以下の場合に新富士溶岩流までしか涵養していないことが推測された。また、推定涵養標高が高い地下水ほどバナジウム濃度が高く、富士山の山体内部での滞留時間が長いほどバナジウムが多く溶出することが考えられた。古富士火山に涵養した地下水のうち、新富士溶岩流の産出時代に出来た火山砕屑岩に作られた井戸の地下水では、アルミニウムや鉄などの微量金属元素の濃度が高く、溶岩よりも火山砕屑岩の方がこれらを溶出しやすいと考えられた。試水中の窒素の栄養塩は、ほぼ硝酸塩で占められており、湧水と新富士溶岩流の地下水で高濃度であった。新富士溶岩流は間隙が多いことが報告されており、施肥、畜産、廃水などの人為起源の窒素が新富士溶岩流の地下水に移行しやすく、地下水により輸送されることを示した。

### 2. 論文

該当なし

## 低レベル放射線による発がんリスク評価を目指した高感度検出系の開発

研究代表者：笹谷 めぐみ

受入研究者：山内 一己

### 1. 成果

福島第一原子力発電所事故に伴うトリチウムの海洋放出により、環境汚染や健康影響に対する社会的関心および不安が高まっている。その背景には、トリチウムを含む低レベル放射線による生体影響に関する科学的知見が十分に蓄積されていないことが挙げられる。特に、低線量・低線量率放射線被ばくによる発がんリスクについては、疫学的にも分子生物学的にも未解明な点が多い。このような状況を踏まえ、本共同研究では、マウス個体を用いた高感度な放射線発がん検出系を構築し、低線量・低線量率放射線による発がんリスクの定量的評価およびその作用機序の解明を目的とする。

本年度は、変異細胞を可視化・検出するための基盤技術の確立を目的として、実験系の構築を行った。具体的には、実体顕微鏡および共焦点顕微鏡を用いた観察系を整備し、モデルマウス組織における変異細胞の検出および空間的分布の解析が可能な実験系を立ち上げた。

これにより、従来は困難であった微小な変異細胞クローンの検出および定量解析が可能となり、放射線発がんの極初期過程を個体レベルで捉えるための基盤が確立された。本研究により得られる低線量・低線量率放射線発がんリスクに関する知見は、トリチウムをはじめとする低レベル放射線に対する科学的根拠に基づいた放射線防護基準の策定に貢献することが期待される。さらに、変異幹細胞の動態を可視化する本実験系は、放射線発がんの分子機構の解明に資するものであり、将来的には発がんリスクの低減化に向けた新規戦略の構築にもつながると考えられる。

今後は、本年度確立した解析基盤を活用し、低線量・低線量率条件下における変異細胞の出現頻度および増殖挙動の定量解析を進めるとともに、年齢依存性や微小環境の影響を統合的に評価していく予定である。

### 2. 論文

なし

## 低線量放射線影響評価のためのマウス活性酸素種の影響の検討

研究代表者：大野 みずき

受入研究者：山内 一己

### 1. 成果

低線量率放射線 (low dose-rate radiation, LDR) による長期被ばくの生体影響の解明は重要な課題である。これまでに、20 mGy/day のガンマ線を長期間連続照射した野生型メスマウスにおいて寿命短縮が観察され、さらに抗酸化剤 NAC (N-acetylcysteine) の投与によりその影響が抑制されることが報告されている (Yamauchi 2019)。これらの結果は、LDR 長期被ばくによる活性酸素種 (ROS) の持続的な発生と、それに伴う脂質、タンパク質、DNA などの生体分子の酸化的損傷が寿命短縮に関与する可能性を示唆する。しかしながら、これまでに実際の ROS 発生量や酸化的損傷に関する定量的データは得られていない。そこで本研究では、LDR 照射マウスの臓器サンプルを用いて酸化ストレスの影響を評価し、酸化的損傷の程度を定量的に把握することにより、LDR 放射線による生体影響のメカニズム解明を目的とする。

本年度は、上記目的の達成に向けた基盤構築として、解析対象および評価指標の検討を行った。まず、放射線や ROS の影響を受けやすい臓器として、肝臓、腎臓、脳、小腸などを中心に解析対象の選定を行った。また、将来的な経時的解析への展開を見据え、血液および尿サンプルを用いた酸化ストレス評価指標についても併せて検討した。さらに、脂質過酸化 (TBARS、MDA)、タンパク質酸化 (カルボニル化、3-NT)、核酸損傷 (8-OHdG、8-NO2-G) などの酸化損傷マーカーを候補として整理し、それぞれの測定法の特性や定量性、適用可能性について比較検討を進めた。

一方で、野生型マウスでは抗酸化機構や DNA 修復機構により LDR 被ばくの影響が補償され、短中期では検出可能な変化が顕在化しにくい可能性がある。そこで本年度は、酸化 DNA 損傷修復に関与する遺伝子の欠損マウスを用いて、週齢グループごとに血清を含む複数の臓器を採取・保存した。今後これらのサンプルを利用して各種酸化ストレスマーカーの検証を行う予定である。

### 2. 論文

## 放射線による腫瘍発生部位の競合に関する研究

研究代表者：藤通 有希  
受入研究者：小村 潤一郎  
共同研究者：吉田 和生  
内之宮 光紀  
木村 建貴  
橘 拓孝

### 1. 成果

#### 【背景と目的】

近年、放射線によるリスクを疾病発症・死亡の「確率の増加」ではなく、「時期の早期化」として評価する提案があり、早期化を指標とした解析結果が徐々に報告され始めている。我々は、放射線被ばくによるリスクを「早期化指標」を用いて評価してきた（Sasaki et al., JRPR 2022, Fujimichi et al., JRR 2023）。がん死亡については単純な確率の増加や時期の早期化でリスクを表せないことから、我々は死亡リスクをより正確に評価するためには複数の死因（死因の競合）を考慮する必要があると考え、評価手法の検討を進めている（Kimura et al., 投稿準備中）。一方で、放射線防護におけるがんリスク予測では、致死性の低いがん部位の考慮や診断の正確性の観点から死亡リスクよりも発症リスクの方が重要視されるが、異なる複数の疾病が発症して、そのうちのどれかが死因となる場合のリスクについては未検討であり、他の研究報告もあまりない状況である。腫瘍発生を評価した動物実験では、マウスの数に対する部位別腫瘍の合計数の比は1を超えることが報告されている（Tanaka et al., RR 2017）。死因の競合を考慮したリスク評価では、がん以外にも含めた全ての死因が関係しており、全ての疾病を踏まえたうえで腫瘍発生と死亡リスクの関係性について検討することが重要である。本研究は、全ての疾病をふまえた腫瘍発生確率とその後の死因の関係を整理し、整理結果に基づく放射線リスクを試算することを目的とする。

#### 【結果】

環境科学技術研究所と共同で、まずはどのような疾病が死因になるかを整理した。これにより、個別の疾病と各死因を紐づけることが可能となった。放射線防護の目的からはリスク推定値が安全側の推定値となることは重要であると考え、本研究では良性腫瘍についても死因となりうると定義した。

本試算では、固形がんとリンパ腫とその他疾患の3つの疾病グループを設定した。少なくとも1つ以上の疾病が発症している状況を考慮し、各疾病の平均罹患日齢を試算した。非照射群と21 mGy/day 照射群の固形がんの平均罹患日齢を比較したところ、放射線照射により発症が約300日早まることがわかった。平均罹患日齢と平均死亡日齢の関係性から、死因の競合について考察を進めている。また、腫瘍の個数や悪性度は今回の検討に考慮しておらず、今後の検討課題である。

### 2. 論文

なし

## 低線量放射線被ばく実験データベースおよびマウス組織標本デジタルアーカイブのフォーマットの共通化とその活用方法の検討

研究代表者：石川 敦子

受入研究者：中平 嶺

共同研究者：森岡 孝満

山田 裕

金 佳香

### 1. 成果

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（QST）・放射線医学研究所（NIRS）および環境科学技術研究所（IES）は、膨大な数の実験動物を用いて放射線の生物影響の研究を行っている。本研究では、これらの研究で得られたデータおよび組織標本を国内外の研究機関で有効利用すべく、データベースおよび組織標本のアーカイブ（デジタル化）のフォーマットの共通化とその活用方法を構築し、放射線生物影響研究の成果の最大化に繋げることを目的とする。

今年度は、QST・NIRS と IES に保管されている動物実験データ（数値データ、サンプルの病理診断結果・保存情報および病変部位のアノテーションを付加した組織画像）についてシステムに導入するためのフォーマットを確定し、実験動物放射線影響研究アーカイブ（J-SHARE）システムの改修を行った。改修後、IES の動物実験データ（実験群 1：約 4,000 件、実験群 2：約 1,300 件）の数値データを追加した。また、J-SHARE のホームページ (<https://www.qst.go.jp/site/radefr-en/j-share-e.html>) 上に QST の動物実験データの解析を行った論文および解析で使用した実験データを公開した。

これまでに蓄積してきた実験動物データをアーカイブ化して公開することで、国内外の研究機関において遠隔での有効活用が可能となり、放射線リスク評価および放射線防護施策に役に立つ科学的根拠に基づく新たな知見の取得への貢献が期待できる。

### 2. 論文

なし

## 福島県の森林における野外菌床栽培キノコへの $^{137}\text{Cs}$ の移行と蓄積

研究代表者：渡邊 未来

受入研究者：林 誠二

操上 広志

佐々木 祥人

共同研究者：境 優

### 1. 成果

2011年の原発事故以降、土壌からの放射性Cs吸収に対する不安から、福島県では森林内での菌床栽培によるキノコ生産は自粛が続いている。本研究では、菌床キノコの安全な栽培条件を抽出して生産再開につなげるため、野外で菌床栽培したキノコへの $^{137}\text{Cs}$ の移行と蓄積について調べた。まず、森林内で基準値を下回る菌床キノコが生産できるかを調べるため、生産が自粛されているハタケシメジ (*Lyophyllum decastes*) とムラサキシメジ (*Lepista nuda*) を対象に、福島県全域で試験栽培を行なった。2024年7~8月、空間線量率が $0.04\sim 0.89\ \mu\text{Sv/h}$ の落葉広葉樹林14地点に菌床を伏せ込んだ。ハタケシメジは、深さ14cmに掘った穴に菌床を埋め込み、穴掘りで得た7-14cm深の土壌で菌床を被覆した。ムラサキシメジは、腐葉土を掻き集めて露出した土壌表面に菌床を置き、これを腐葉土でマウンド状に被覆した。同年10~11月に収穫したキノコの $^{137}\text{Cs}$ 濃度から求めた放射性Cs濃度(90%水分量換算)は、ハタケシメジが $0.4\sim 12\ \text{Bq/kg}$ 、ムラサキシメジが $0.2\sim 43\ \text{Bq/kg}$ であった。いずれも一般食品の基準値である $100\ \text{Bq/kg}$ を下回っており、空間線量率が $1\ \mu\text{Sv/h}$ 未満の落葉広葉樹林では、ハタケシメジとムラサキシメジの野外菌床栽培による生産を再開できる可能性が示された。一方で、それぞれのキノコの $^{137}\text{Cs}$ 濃度は、栽培地点における空間線量率や土壌の $^{137}\text{Cs}$ 汚染度と正の相関を示した。さらに、Cs同位体を用いた二起源混合モデルによりキノコ中の $^{137}\text{Cs}$ を菌床由来と土壌由来に分けた結果、大部分が土壌由来であった。これらの結果は、土壌や腐葉土に含まれる $^{137}\text{Cs}$ がキノコへの $^{137}\text{Cs}$ 供給源であることを示しており、土壌中の放射性Csの汚染度や移動性の高い地点では、キノコの放射性Cs濃度が高くなることに注意が必要である。また、同じ菌床から翌年の10~11月に発生した2年目のキノコは、収穫量は減る一方で、1年目に比べ $^{137}\text{Cs}$ 濃度が高くなる場合があった。したがって、森林内で菌床栽培によるハタケシメジとムラサキシメジの生産を再開する際には、以上の事実を考慮した栽培や対策を行うことが必要である。

### 2. 論文

なし

## 太田川上流域を対象とした福島事故後初期のセシウム流出場の再構築

研究代表者：佐久間 一幸

受入研究者：林 誠二

操上 広志

### 1. 成果

本研究は、「太田川上流域を対象とした福島事故後初期のセシウム流出場の再構築」を目的として実施するものである。福島第一原子力発電所事故直後の河川水中における放射性セシウム、とりわけ溶存態  $^{137}\text{Cs}$  の挙動については、当時の観測データが極めて乏しく、被ばく量評価や流出メカニズムの理解に大きな不確実性が残されている。本研究では、流域スケールの数値モデルを用いることで、事故後初期における放射性セシウムの流出場を物理的に再構築することを目指す。

対象地域は福島県太田川上流域（流域面積約  $21 \text{ km}^2$ ）であり、森林に覆われた典型的な山地流域である。日本原子力研究開発機構（JAEA）と福島国際研究教育機構（F-REI）が連携し、JAEA がこれまでに整備してきた三次元水理地質構造モデルおよび森林生態系内の移行過程を考慮した流域水循環モデル GETFLOWS を活用した。これにより、地表水・地下水流動、土砂流出、懸濁態および溶存態セシウムの動態を統合的に取り扱うことができる。

解析にあたっては、大気拡散モデルから得られる 2011 年 3 月の時々刻々の  $^{137}\text{Cs}$  沈着量（ $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  格子）及びレーダーアメダス解析雨量を入力条件として用いた。

本研究の成果として、事故直後のフォールアウトしたセシウムが森林の樹冠、リター、土壌、河川へと移行・流出する過程を再現した。また、対象流域における事故後初期の河川水中の  $^{137}\text{Cs}$  濃度は数千 Bq/L オーダー程度であること、事故後初期の半減期は数日～数十日程度のオーダーであることが推測された。これらの知見は、将来の原子力災害時の環境影響評価やリスク管理手法の高度化にも貢献するものである。

今後はより一層、解析条件を整理し、現実に即したパラメータを整備すること、フォールアウトしたセシウムの樹冠やリターへの取り込まれ方（溶出可能・不可能割合）の違いを考慮した移行挙動、流出挙動を評価する。

### 2. 論文

なし

## 河川水中放射性セシウム観測のためのカートリッジフィルターの選定

研究代表者：中西 貴宏

受入研究者：辻 英樹

共同研究者：那須 康輝

### 1. 成果

#### 1. 背景と目的

これまで河川水中の粒子態  $^{137}\text{Cs}$ （放射性セシウム）の回収に使用されてきたカートリッジフィルタ（従来品：RP013-11）が生産中止となった。そのため、ろ過効率の高い後継資材を選定し、評価を行う必要が生じた。本研究の目的は、新たに選定したフィルタを用いて 1)懸濁物質（SS）中の  $^{137}\text{Cs}$  濃度の非破壊測定法を確立すること、2)フィルタの SS 回収容量を評価すること、を目的とした。

#### 2. 選定資材と従来品との比較

後継資材として、ADVANTEC 社製の「MCS-045-C10S」を選定した。従来品と選定品の仕様の主な違いは、

- ・従来品（RP013-11）：プリーツ形状、通水方向「内側から外側」、濾材ポリプロピレン、孔径  $1\ \mu\text{m}$
- ・選定品（MCS-045）：プリーツ形状、通水方向「外側から内側」、濾材ポリプロピレン、孔径  $0.45\ \mu\text{m}$

である。すなわち選定品は通水方向が逆転しており、孔径がより小さくなっているため、より微細な粒子を捕捉できる仕様である。

#### 3. 実験方法

上記の目的を達成するため、2つの観点から実験と評価を実施した。まず  $^{137}\text{Cs}$  濃度の非破壊測定法の確立として、多様な環境水を対象に、選定したフィルタに通水する実験を行った。対象試料は全 17 試料（河川水 11（うち出水時 3）、ダム湖水 2、ため池水 4）で、SS 濃度  $10^{-1}\sim 10^2\ \text{mg/L}$  の水を、通水量 5~50 L、通水速度 約 5 L/分の条件で処理した。測定手順として、まず通水後のフィルタを非破壊（湿潤）状態で  $^{137}\text{Cs}$  を測定した。次に、そのフィルタを  $105^\circ\text{C}$  で乾燥させた後、破壊・裁断して U8 容器に詰め込み、再度  $^{137}\text{Cs}$  を測定した。この非破壊時と破壊時の測定値を比較することで、非破壊測定時のジオメトリ補正係数を算出した。

つぎに SS 回収容量の評価として、土壌粒子（河床堆積物 6 試料、湖底質 3 試料）を用いて調製した濁水試料をフィルタに通水した。処理前後のフィルタ乾燥重量の差から、回収された SS の重量を算出した。また、通水前の濁水と、通水後にハウジング（カップ）内に残留した土壌の粒度分布（比表面積および中央粒径）を比較・分析した。

#### 4. 実験結果

まず非破壊測定と破壊測定の比較の結果、両者の測定値には「 $y = 0.984x$ 」という強い相

関関係が見られた。この結果から、非破壊測定時のジオメトリ補正係数は  $0.98 \pm 0.03$  であると同定された。これにより、フィルタを破壊することなく、精度の高い  $^{137}\text{Cs}$  濃度の測定が可能であることが実証された。

つぎに SS このフィルタによる SS の回収容量は、土壌の質によって変動したが、9.6 g 以上の SS が回収可能であることが確認された。粒度分布（比表面積と中央粒径）の分析から、比較的細かい粒子から優先的にフィルタに吸着される傾向が確認された一方で、より粗大な粒子はフィルタには吸着されず、ハウジング内に沈殿しやすいことが明らかになった。

## 5. 課題と解決策

選定資材（MCS-045）は高い性能を示す一方で、製品の仕様（通水方向など）に起因する運用上の課題が明らかになった。具体的には通水方向が「外側から内側」であるため、濁水処理時にハウジング（カップ）内に SS が沈殿・残存すること、リター（落ち葉などの有機物）や砂といった粗い粒子は、フィルタに定着せず剥離しやすい傾向があること、処理時の水圧が低いと、SS の付着箇所がフィルタの下側に偏ってしまうことが問題である。これらの問題への解決策としては、全 SS 中  $^{137}\text{Cs}$  の正確な測定のため、フィルタ本体に付着した SS だけでなく、ハウジング（カップ）内に沈殿・残存した SS についても U8 容器等に回収し、別途測定を行う必要がある。また圧力低下への対策として、装置内の圧力低下を防ぎ、SS をフィルタ全体に均一に付着させるため、高出力ポンプなどを用いて高流量で処理することが求められる。

## 2. 論文