

放射能環境動態・影響評価
ネットワーク共同研究拠点（ERAN）

FY2024 Final Report
【重点/Priority 共同研究】

重点共同研究

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-24-01	Fan Shaoyan	福島県環境創造センター	主任研究員	福島県を流れる河川における137Csの長期観測	恩田 裕一	CRIES	福田 美保 那須 康輝 谷口 圭輔
P-24-02	福田 美保	福島県環境創造センター	主任研究員	福島県複数河川にて採取した浮遊砂中の237NpとPu同位体について	恩田 裕一	CRIES	樊 少艶 鄭 建
P-24-03	横山 明彦	金沢大学	教授	環境中ネプツニウム測定用AMSトレーサー調製法の検討	坂口 綾	CRIES	
P-24-04	星 正治	広島大学	名誉教授	カザフスタンのウラン鉱山近郊の大気中のエアロゾルの収集と測定及び放射性微粒子の影響	坂口 綾	CRIES	
P-24-05	ZHENG Jian	量子科学技術研究開発機構	上席研究員	Pseudo isotope dilution as an approach for quantification of Np-237 in environmental and biological samples by ICP-MS	坂口 綾	CRiES	Yang Guosheng Yang Bo 青野 辰雄
P-24-06	市村 晃一	東北大学	助教	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	坂口 綾	CRIES	岸本 康宏 千葉 健太郎 高久 雄一
P-24-07	南野 彰宏	横浜国立大学	教授	地下宇宙素粒子実験のための低バックグラウンド液体シンチレーター中性子検出器の開発	坂口 綾	CRIES	佐々木 優斗 田中 将士 吉田 斉
P-24-08	保倉 明子	東京電機大学	教授	蛍光X線分析を用いる土壌中の微量ヨウ素および重金属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
P-24-09	箕輪 はるか	東京慈恵会医科大学	准教授	ケイ酸バリウムを主成分とするストロンチウム吸着剤を用いた海水・陸水中の低レベル放射性ストロンチウム測定法の研究	坂口 綾	CRIES	緒方 良至 小島 貞男 有信 哲哉 加藤 結花 杉原 真司
P-24-10	伏見 賢一	徳島大学	Professor	ウラン・トリウム不純物濃度の精密測定で推進する結晶の超高純度化と宇宙・素粒子研究の高度化	坂口 綾	CRIES	高久 雄一 梅原 さおり 黒澤 俊介
P-24-11	廣瀬 勝己	富士山環境研究センター	部長	極東海域の底層水と堆積物間のプルトニウムの分配について	津旨 大輔 坂口 綾	CRIES	Povinec P. Pavel
P-24-12	乙坂 重嘉	東京大学	准教授	福島周辺海域における溶存有機態放射性炭素動態のモデル化	津旨 大輔	CRIES	
P-24-13	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137Cs大気放出シナリオの検証	津旨 大輔	CRIES	
P-24-14	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放射性核種の全球鉛直分布の解析	津旨 大輔	CRIES	
P-24-15	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測定	津旨 大輔	CRIES	馬原 保典 速水 洋
P-24-16	板井 啓明	東京大学	准教授	陸水域の生元素循環に関する比較湖沼学的アプローチ	丸岡 照幸	CRIES	
P-24-17	後藤 孝介	国立研究開発法人産業技術総合研究所	主任研究員	ヒューロニアン累層群における漂砂型ウラン鉱床のモリブデンと硫黄分析	丸岡 照幸	CRIES	
P-24-18	永田 宏次	東京大学	教授	生産地域や蜜源植物が異なる国産蜂蜜の同位体組成分析	丸岡 照幸	CRIES	平田 岳史
P-24-19	長谷川 秀一	東京大学	教授	光学的同位体分析法における新たなスキームの検討および開発提案	丸岡 照幸	CRIES	
P-24-20	越後 拓也	秋田大学大学院	Associate Professor	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-24-21	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炭素・硫黄同位体の特徴と時間変動	丸岡 照幸 山中 勤	CRIES	
P-24-22	菅野 里美	名古屋大学	准教授	タンパク質還元酵素遺伝子MSRB5によるNa、K、Cs吸収制御の検証	古川 純	CRIES	三村 徹郎 Chan Ming-Tsair
P-24-23	宇都宮 聡	九州大学大学院	Associate Professor	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：放射性セシウム原子の可視化	山崎 信哉	CRiES	宮崎 加奈子
P-24-24	齋藤 誠紀	山形大学	准教授	赤城大沼湖水中セシウム濃度時間発展の素過程解明を目指した流体シミュレーション	羽田野 祐子	CRIES	
P-24-25	信濃 卓郎	北海道大学	教授	土壌の放射性セシウムの利用に及ぼす植物種間差の機構解析	塚田 祥文	IER	丸山 隼人 望月 杏樹
P-24-26	坂下 哲哉	量子科学技術研究開発機構	Senior Principal Researcher	ラットのCsイメージングデータを用いたセシウム動態モデルの構築	塚田 祥文	IER	柿崎 竹彦
P-24-27	長谷川 浩	金沢大学	教授	廃水中における放射性核種を分離する新規な超分子複合材料の開発	ラハマン モハマド モフィズル イスマイル	IER	Begum Ara Zinnat
P-24-28	有馬 ボシールアハンマド	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 モフィズル イスマイル	IER	Begum Zinnat Ara Anju Anjuman Nesa
P-24-29	高木 淳一	京都大学	特定助教	福島県松川浦周辺水域におけるニホンウナギの放射能セシウム濃度とその移動生態の関係解明	和田 敏裕	IER	三田村 啓理
P-24-30	杉原 真司	大分大学	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-24-31	大沼 学	国立環境研究所	Chief Senior Researcher	原発事故周辺地域・高放射線環境下に生息するアカネズミ放射線損傷修復遺伝子への影響解析	石庭 寛子	IER	遠藤 大二
P-24-32	横畑 泰志	富山大学	教授	福島県の放射能汚染地におけるアズマモグラの汚染状況、特に90Sr汚染について	高貝 慶隆 石庭 寛子	IER	青木 譲 福田 朋寛 山澤 泰
P-24-33	安岡 由美	神戸薬科大学	准教授	環境中のラドン散逸率の簡易測定法について	床次 真司 細田 正洋 大森 康孝	IREM	向 高弘

重点共同研究

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-24-34	Hu Jun	量子科学技術研究開発機構	Researcher	Validation of stochastic method on track density analysis for passive radon measurement	床次 眞司 クランロッド チュティマ	IREM	
P-24-35	山城 秀昭	新潟大学	准教授	低線量・低線量率慢性被ばくしたクマネズミおよびアカネズミの精子形成能評価における放射線高感受性バイオマーカーの検索	三浦 富智	IREM	中田 章史
P-24-36	木野 康志	東北大学	教授	野生キノコの放射性セシウム濃度の測定	三浦 富智	IREM	山下 琢磨
P-24-37	有吉 健太郎	福島県立医科大学	准教授	野生動物への低線量放射線影響評価のためのバイスタンダー効果の検討	三浦 富智 藤嶋 洋平 アンダーソン ドノヴェン	IREM	
P-24-38	中田 章史	北海道科学大学	准教授	遺伝子プロモーター領域における放射線影響評価系の開発	三浦 富智 山内 一己	IREM	山城 秀昭
P-24-39	飯本 武志	東京大学	教授	環境放射線に関するリテラシーの醸成に資する教育戦略	赤田 尚史	IREM	小池 弘美
P-24-40	柳澤 文孝	山形大学 蔵王樹氷火山総合研究会	副会長	蔵王の樹氷に含まれているベリリウム-7および鉛-210の動態解析	赤田 尚史	IREM	岩田 尚能 高橋 祥基
P-24-41	栗田 直幸	名古屋大学	准教授	西日本における降水中トリチウム及び水素安定同位体比に関する研究	赤田 尚史	IREM	北山 結彩 KHEAMSIRI Khemruthai 森田 遥
P-24-42	岩井 敏	東京大学	研究員	動物医療環境のための放射線防護の新しい枠組みの検討	赤田 尚史	IREM	WANG XUEQING 小池 弘美 黄倉 雅広 飯本武志
P-24-43	JANIK MIROSLAW	量子科学技術研究開発機構	Researcher	Investigation of radon-climate relationships in volcanic area using AI	細田 正洋	IREM	
P-24-44	永井 尚生	日本大学	上席研究員	Be同位体の海洋循環トレーサーとしての利用	田副 博文	IREM	山形 武靖 松崎 浩之
P-24-45	杉原 奈央子	海洋生物環境研究所	研究員	二枚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	田副 博文	IREM	白井 厚太郎 山田 正俊
P-24-46	反町 篤行	東洋大学	教授	林床からのラドン散逸に関する予備的な観測	大森 康孝	IREM	
P-24-47	佐々木 隆之	京都大学	教授	土壌構成鉱物への核種収着に及ぼす有機物の影響評価	藤原 健壮	JAEA	土肥 輝美
P-24-48	黄倉 雅広	東京大学	助教	福島県以外の自治体の放射能汚染された土壌や物品の適切な管理・処分に関する考察	土肥 輝美	JAEA	飯本 武志
P-24-49	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	土肥 輝美 佐々木 祥人	JAEA	箕輪 はるか
P-24-50	高橋 成雄	会津大学	教授	空間線量率および低減度分布の地理的環境依存性解明のための視覚解析	操上 広志 眞田 幸尚	JAEA	吉田 竜
P-24-51	小西 博巳	新潟大学	教授	放射性セシウムの移動媒体についての鉱物学的研究	萩原 大樹	JAEA	渡辺 勇輔
P-24-52	小松 仁	福島県環境創造センター	主任研究員	ブタにおける消化管内での安定セシウム吸収率	玉置 雅紀	NIES	村上 貴恵美 神田 幸亮
P-24-53	村上 貴恵美	福島県環境創造センター	主任研究員	福島県内における野生傷病鳥獣の放射性セシウムのモニタリング	玉置 雅紀	NIES	小松 仁 神田 幸亮 稲見 健司 壁谷 昌彦
P-24-54	神田 幸亮	福島県環境創造センター	研究員	福島県内におけるキジの行動圏調査	玉置 雅紀	NIES	小松 仁 村上 貴恵美
P-24-55	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アーカイブフォーマットの共通化とその活用方法の検討	小林 敏之 中平 嶺 藤川 勝義	IES	小林 悦子 山田 裕
P-24-56	坪野 考樹	電力中央研究所	研究推進マネージャー	尾鰭沼における物質循環把握	植田 真司	IES	三角 和弘 津旨 大輔
P-24-57	橋本 晃佑	福島県環境創造センター	研究員	環境試料中トリチウムの相互比較分析に関する検討	柿内 秀樹	IES	前川 暁洋
P-24-58	田中 苺裕	自然科学研究機構核融合科学研究所	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-24-59	渡部 敏裕	北海道大学	准教授	根圏効果による粘土鉱物の放射性セシウム動態への影響解析	海野 佑介 武田 晃	IES	信濃 卓郎 鷲尾 太一 丸山 隼人
P-24-60	久保 堅司	農研機構	上級研究員	鉄資材の施用が土壌中の放射性セシウムの動態と作物への放射性セシウムの移行に及ぼす影響の解析	海野 佑介 武田 晃	IES	山本 修平 信濃 卓郎 丸山 隼人 村島 和基
P-24-61	鳥養 祐二	茨城大学	教授	生体への水素同位体取込みの同位体効果の検証	石川 義朗 柿内 秀樹	IES	細根 孟留 小畑 結衣
P-24-62	宗林 留美	静岡大学	准教授	流域から駿河湾への輸送物質の形態	石川 義朗	IES	

福島県を流れる河川における 137Cs の長期観測

研究代表者：Fan Shaoyan

受入研究者：恩田 裕一

共同研究者：福田 美保・那須 康輝・谷口 圭輔

1. 成果

2011 年 3 月東京電力福島第一原子力発電所事故によって放出されたセシウム-137 (137Cs) は、福島県の土地利用ごとの 137Cs の蓄積量は、森林で約 67%、水田・畑・都市 (PFU) で 22.4%を占めていた (Kato et al.,2019)。これらの地域から下流域への 137Cs の移動は、9 割以上が土壌粒子や粘土鉱物などに付着し、懸濁態(粒径 $\geq 0.45\mu\text{m}$)として河川を介して運ばれる (Taniguchi et al.,2019)。初期沈着量に対する、約 10 年間陸域から海への懸濁態 137Cs 積算移行率は、各河川で 0.1-1.7%と算出した (Fan et al.,2024)。この幅広い移行率は、各調査地点のダム集水域面積の割合や集水域面積あたりの河川水流量の影響と考えられた。しかし、集水域の河川懸濁物質流失が、懸濁態 137Cs 濃度の変動や移行量との相関関係が未解決課題となっている。各集水域の土地利用及びダムの集水域面積が、河川懸濁物質と懸濁態 137Cs の流出量に及ぼす影響の長期評価が必要とされる。

そこで本研究では、福島県内 27 ヶ所 (阿武隈川本流 6 地点、支流 9 地点、福島県浜通り地域の 8 河川 12 地点) の長期調査のデータを用いて、河川流量の変動に伴う懸濁物質流失の特徴、と流域土地利用及び懸濁態 137Cs 移行量との関係を明らかにすることを目的とした。事故から十年間の、1 ヶ月あたりの懸濁物質移行量 C 、河川流量 X 、懸濁態 137Cs 移行量を、濁度や水位データ、懸濁態 137Cs 濃度を用いてそれぞれ算出した。各地点を対象に、河川流量 X の変化に伴う河川流域面積で正規化された懸濁物質移行量を $Y = a X^k$ で近似した。べき関係係数 k は各集水域面積あたり、懸濁物質流失係数と定義する。

懸濁物質流失係数 k は、上流から下流にかけて、流れとともに増大する傾向があった。支流の流入による懸濁物質の混合や希釈の影響は、 k 値の増減に反映された。ダムがある集水域における、 k 値とダム集水面積の割合に負の関連があった。ダムによる懸濁物質との貯留効果も k 値で表された。ダムなし集水域 (浜通り中小河川など) では、 k 値が PFU (畑地、水田、都市) の割合が高いところで大きかった、PFU から懸濁物質を寄与と考えられた。一方、ダムあり集水域 (阿武隈川本流など) では、 k 値が森林や草地の割合が高いところで大きかったため、懸濁物質が森林域からの寄与が大きいと考えられた。

初期沈着量に対する懸濁態 137Cs 移行率は、 k 値が大きい地点で大きかったことが分かった。特にダムなし阿武隈川支流では、懸濁態 137Cs 移行率と k 値とは有意な正の相関があった ($R^2 = 0.57, p < 0.01$)。

2. 論文

なし

福島県複数河川にて採取した浮遊砂中の ^{237}Np と Pu 同位体について

研究代表者：福田 美保

受入研究者：恩田 裕一

共同研究者：樊 少艶・鄭 建

1. 成果

環境動態トレーサの 1 つである $^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比は、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ と比べて幅広い値をとることがあり(Kelly et al., 1999、Fukuda et al., 投稿準備中など)、環境中での Np と Pu の挙動の違いが一因として挙げられる。本研究では、福島県双葉町と浪江町の猿田川や双葉町の前田川を対象に、浮遊砂の ^{237}Np や Pu 同位体(^{239}Pu や ^{240}Pu 、 ^{241}Pu)濃度や $^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比とその要因を明らかにすることを目的とした。浮遊砂サンプラーを設置し、約 3 ヶ月ごとに試料を回収した。採取した浮遊砂は 1 週間静置し、凍結乾燥を行った。凍結乾燥を行った試料について、 ^{237}Np と Pu 同位体の同時抽出 (Huang et al., 2019、Yang et al. 2024)を行い、SF ICP-MS を用いて測定を行った。同試料では放射性セシウム(^{134}Cs , ^{137}Cs)濃度の測定や粒度分析も行っている。

浮遊砂の ^{237}Np 濃度は、猿田川(2022 年 2 月から 2023 年 11 月)で $(0.08 \pm 0.02) \sim (0.16 \pm 0.02)$ mBq/kg-dry、前田川(2022 年 4 月から 2022 年 10 月)で $(0.27 \pm 0.04) \sim (0.79 \pm 0.08)$ mBq/kg-dry であり、浪江町の土壌(2017 年 8 月採取、 $(0.22 \pm 0.003) \sim (5.7 \pm 0.1)$ mBq/kg-dry)と同程度の値であった。一方で、猿田川の河床堆積物(2018 年 6 月から 8 月採取、 $(0.013 \pm 0.003) \sim (0.093 \pm 0.01)$ mBq/kg-dry)よりも約 1 桁高かった。2022 年から 2023 年の猿田川における浮遊砂の比表面積(SSA、0.069-0.12 m²/g)は同時期の河床堆積物(0.0090-0.019 m²/g)と比較して約 1 桁高かった。SSA と ^{237}Np 濃度との有意な相関関係は見られなかったものの、より細粒の粒子で構成されていたことは、浮遊砂の ^{237}Np 濃度が比較的高かった要因であったと考えられる。さらに、2 河川における浮遊砂の $^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比は $(0.33 \pm 0.1) \sim (0.4 \pm 0.1)$ であり、誤差を踏まえると 1.5 年間でほぼ変化は見られなかった。浮遊砂の $^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比は、河床堆積物($(0.16 \pm 0.03) \sim (0.24 \pm 0.03)$)よりも有意に高かった($p < 0.01$)。GF 起源の大気降下物や土壌における $^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比は、それぞれ (0.41 ± 0.01) (Yang et al. 2024)、 (0.46 ± 0.01) (Kelly et al., 1999)であり、浮遊砂試料の $^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比はこれらの GF 起源の値により近かったとことが明らかになった。

2. 論文

なし

環境中ネプツニウム測定用 AMS トレーサー調製法の検討

研究代表者：横山 明彦

受入研究者：坂口 綾

1. 成果

^{237}Np (半減期 2.1×10^6 年) は、核実験等によって環境中に微量に存在し、環境モニタリングの対象核種とされている。近年、加速器質量分析法 (AMS) を用いた高精度な定量が期待されているが、測定のために必要なスパイクとなる適切な核種が開発されていない。本研究では、 ^{236}gNp (半減期 1.5×10^5 年) をスパイク候補とし、 $^{232}\text{Th}+7\text{Li}$ 核反応による製造の可能性を検討した。 7Li を用いた反応では、入射粒子のすべてがターゲット核と融合する「完全融合反応」と、 7Li が α 粒子とトリチウム (t) に分裂し一部のみが融合する「不完全融合反応」が生じ、不完全融合が ^{236}gNp の生成を阻害する可能性がある。そこで、 $^{232}\text{Th}+7\text{Li}$ 反応で生成される Pa 同位体、U 同位体の断面積を測定し、不完全融合反応の影響を評価した。

本実験では、硝酸トリウム溶液を用いて作製した電着試料 (^{232}Th : 約 $1\text{mg}/\text{cm}^2$) を用い、理化学研究所 AVF サイクロトロンにて 7Li イオンを 3 時間照射した。調査した照射エネルギー 40.4 MeV および 38.8 MeV は、 ^{236}gNp 生成と競合するエネルギー領域である。照射後、時間経過により Pa から U への壊変が生じる可能性があるため、迅速にターゲットを溶解し、Pa と Th を TK400 resin で分離 (分離 I) し、その後 Pa と U を分離 (分離 II) した。また、不完全融合反応で生成する ^{232}U を定量するため、分離 III として Th 成分から U を分離した。分離後、各成分を硫酸アンモニウム系で電着し、Si 半導体検出器を用いた α 線スペクトロメトリーを実施し、 ^{231}Pa および ^{232}U の測定を行った。

その結果、 ^{231}Pa の生成は確認されず、反応断面積の上限値は 40.4MeV で 5.7mb、38.8MeV で 4.9mb であった。一方、U 成分のスペクトルには ^{232}U が確認されたが、その生成断面積は ^{232}Pa に近い値を示した。これは、 ^{232}U が主に不完全融合反応で生成された ^{232}Pa (半減期 1.32 日) の壊変によるものであることを示している。さらに、分離 III 後の U 成分からは不完全融合による ^{232}U の生成は確認されず、その反応断面積の上限値は 40.4MeV で 0.65mb、38.8MeV で 0.42mb であった。これらの結果から、 ^{232}U および ^{231}Pa の不完全融合による生成はない、もしくは全体の生成断面積に対して極めて小さいことが示唆された。

不完全融合反応が ^{236}Np 生成に与える影響を評価するため、 α 線測定に加えて γ 線測定、質量分析によって得られた Pa 同位体、U 同位体、核分裂片、Np 同位体の反応断面積を合計し、理論計算による励起関数と比較した。主な反応チャネルは核分裂 (FP) であり、Pa 同位体は 25MeV 付近から生成が確認され、断面積は数十～数百 mb であった。U 同位体は約 35MeV から生成され、数十 mb の断面積を示した。一方で、目的の ^{236}gNp は約 0.1mb 程度であり、30MeV～40MeV の範囲で大きな変化はなかった。このことから、 $^{232}\text{Th}+7\text{Li}$ 反応では不完全融合反応が主要なチャネルとなっており、 ^{236}gNp の生成が抑制されていると考えられる。

しかしながら、この反応系では Np とターゲットの分離が容易であり、AMS による ^{236}gNp の

測定を妨害する ^{236}U などの同重体の生成が少ないという利点があることも分かった。よって、 ^{236}gNp の断面積が小さいという欠点はあるものの、実際の製造過程を考慮すると、この系による ^{236}gNp 試料は AMS スパイクとして適していると結論付けられた。

2. 論文

カザフスタンのウラン鉱山近郊の大気中のエアロゾルの収集と 測定及び放射性微粒子の影響

研究代表者：星 正治

受入研究者：坂口 綾

1. 成果

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. Most recent paper is as follows. Stepanenko et al. J. Radiat. Res., 65, 2024, 36–46, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrad082>.
- (2) The results of the radiation measurements such as radon have been obtained. From these data we made some advises for its protection and further necessary studies. Our recent study of radon measurement is as follows. Tokonami et al. Residential radon exposure in Astana and Aqsu, Kazakhstan. J. Radiol. Prot. 43, 2023, 023501 <https://doi.org/10.1088/1361-6498/acda41>.
- (3) Animal experiments (rats) on exposure to radioactive microparticles using Si-31 have been analyzed and found its uniqueness comparing with external exposure. Our recent publications are as follows. Stepanenko et al. J. Radiat. Res., 65, 2024, 744-751, doi: 10.1093/jrr/rrae063, Ibid, 66, 2025, 16–23, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrae096>.

2. 論文

Ken Inoue, Yasuyuki Fujita, Yuri Murayama, Shigeto Moriwaki, Nobuo Takeichi, Yoshihiro Noso, Noriyuki Kawano, Masaharu Hoshi, Haruo Takeshita, Takuji Inagaki, The importance of continued measures to prevent suicide among younger age groups in Japan: Focusing particularly on the results of studies in two sides. J. St. Marianna Medical Institute 2024, 24, 5-9.

Ken Inoue, Tatsushige Fukunaga, Haruo Takeshita, Yasuyuki Fujita, Satomi Kameo, Masaharu Hoshi and Noriyuki Kawano, Identifying focal points to prevent traffic accidents in Japan and specific measures proposed: Aspects common to Japan and South Korea and suggested preventive measures. *Medicine, Science and the Law* 2024 Apr 5:258024241245873. doi: 10.1177/00258024241245873.

Ken Inoue, Kamila Akkuzinova, Elaman Toleuov, Timur Moldagaliyev, Yoshihiro Noso, Nobuo Takeichi, Nariaki Fujimoto, Masaharu Hoshi, Nargul Ospanova, Nursultan Seksenbayev, Systemizing international academic exchanges and the enrollment of study abroad students and sustaining that approach: Seeking to establish further cooperative frameworks in Semey and Japan (Kochi and Hiroshima). *Science & Healthcare*, 2024 26, 1, DOI 10.34689/SH.2024.26.1.027.

Valeriy Stepanenko, Hitoshi Sato, Andrey Kaprin, Nariaki Fujimoto, Almagul Kushugulova, Sergey Ivanov, Peter Shegay, Viktoria Bogacheva, Alexey Petukhov, Kassym Zhumadilov, Evgenia Ostroumova, Hiroshi Yasuda, Noriyuki Kawano, Megu Ohtaki, Satoru Endo, Aya Sakaguchi, Laura Chulenbayeva, Nurislam Mukhanbetzhanov, Masaharu Hoshi, Internal radiation dose estimates in organs of Wistar rats exposed to sprayed neutron-activated $^{31}\text{SiO}_2$ microparticles: first results of international multicenter study. *J. Radiat. Res.*, 2024, 65, 744-751, doi: 10.1093/jrr/rrae063.

Valeriy Stepanenko, Sergey Shinkarev, Andrey Kaprin, Kazbek Apsalikov, Sergey Ivanov, Peter Shegay, Evgenia Ostroumova, Ausrele Kesminiene, Alexandra Lipikhina, Viktoria Bogacheva, Kassym Zhumadilov, Masayoshi Yamamoto, Aya Sakaguchi, Satoru Endo, Nariaki Fujimoto, Bernd Grosche, Vladimir Iatsenko, Alla Androsova, Zukhra Apsalikova, Noriyuki Kawano, Masaharu Hoshi, Comparison of external dose estimates using different retrospective dosimetry methods in the settlements located near Semipalatinsk Nuclear Test Site, Republic of Kazakhstan, *J. Radiat. Res.*, 65, January 2024, 36–46, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrad082>.

A. Bagramova, K. Zhumadilov, S. Endo, T. Kajimoto, A. Sakaguchi, Zh Zeinulla, M. Hoshi, Simulation of gamma-ray registration efficiency of a HPGe detector with PHITS. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2024, <https://doi.org/10.1007/s10967-024-09839-2>.

V.Stepanenko, A. Kaprin, S. Ivanov, P. Shegay, V. Bogacheva., S. Shinkarev, H. Sato, N. Kawano, M. Ohtaki, N. Fujimoto, S. Endo, A.Sakaguchi, E.Ostroumova, K.Zhumadilov, A.Kushugulova, M Hoshi. Features of internal absorbed dose microdistribution in biological tissue irradiated by $^{31}\text{SiO}_2$ microparticles compared with dose microdistribution from exposure to $^{56}\text{MnO}_2$ particles. *J. Radiat. Res.*, 66, 2025, 16–23, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrae096>.

Inoue K, Seksenbayev N, Takeichi N, Toleuov E, Akkuzinova K, Murayama Y, Noso Y, Fujimoto N, Hirabayashi K, Kawano N, Hoshi M, Chaizhunusova N, Shabdarbayeva D, Ospanova N, Moldagaliyev T. The study to encourage cooperation on suicide prevention measures worldwide as well as in individual countries: Devising suicide prevention

efforts that need to be implemented in times like these. J St Mar Med Ins in press 2024.
Publication in 2025.

Kassym Zhumadilov, Alexander Ivannikov, Murat Kassymzhanov, Assel Bagramova, Issa Zhanthore, Sarsenova Samal, Valeriy Stepanenko, Artem Khailov, Masaharu Hoshi. Estimation of radiation doses of population residing nearby area of uranium ore mining and processing in Kazakhstan by tooth enamel EPR spectroscopy, Environmental Challenges (2025), doi:<https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101098>.

Pseudo isotope dilution as an approach for quantification of Np-237 in environmental and biological samples by ICP-MS

研究代表者：ZHENG Jian

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：Yang Guosheng・Yang Bo・青野 辰雄

1. 成果

Pseudo isotope dilution as an approach for quantification of Np-237 in environmental and biological samples by ICP-MS

Plutonium in the environment is a well-known tracer for contamination source identification and for study in biogeochemical processes of radionuclides. Another transuranic isotope, ^{237}Np ($t_{1/2}=2.14 \times 10^6$ y) also has great potential to act as a tracer since it has a similar behavior of ^{137}Cs . However, ^{237}Np has presented limited information in the environment due to its low-level radioactivity and great challenges for its analysis. The challenge for its analysis is mainly due to the lack of suitable Np isotope tracer for the quantification of ^{237}Np .

This study carried out for the determination of the ^{237}Np activity concentration, $^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$ atom ratio, and $^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}$ activity ratio in the reference fallout material by using the pseudo isotope dilution method with non-isotopic tracer ^{242}Pu developed in 2023 ERAN study (Qin et al., 2024), and validated the evaluation value of $^{237}\text{Np}/^{239+240}\text{Pu}$ activity ratio in global fallout. The ^{237}Np and Pu isotopes were detected after being separated and purified by using anion exchange chromatography, and the ^{237}Np activity concentration was quantified by using ^{242}Pu as a pseudo isotope dilution tracer. Four sediment SRMs were tested to validate the analytical method with sufficient accuracy and precision for ^{237}Np and Pu isotopes analysis in environmental samples. The activity concentrations of ^{237}Np and $^{239+240}\text{Pu}$ in the reference fallout material were $(25.9 \pm 0.6) \times 10^{-3}$, 6.98 ± 0.04 Bq/kg, respectively. The measured $^{237}\text{Np}/^{239+240}\text{Pu}$ activity ratio of $(3.7 \pm 0.1) \times 10^{-3}$ in the reference fallout material excellently agreed with the estimated value of global fallout. The $^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$ atom ratio of 0.561 ± 0.014 is higher than the average global fallout value of 0.41 ± 0.10 . These results highlight the necessity of establishing the regional characteristic global fallout value for assessment of potential impact of radioactive contamination in the environment (Yang et al., 2024).

The comparison of $^{237}\text{Np}/^{239+240}\text{Pu}$ activity ratios between the reference fallout material and the surface soils in the past decades indicated that ^{237}Np showed stronger migration capability than Pu isotopes by showing the decrease of

$^{237}\text{Np}/^{239+240}\text{Pu}$ activity ratio in the soils over several decades. The characterization of ^{237}Np , ^{241}Am and Pu isotopes activity concentration and their atom/activity ratios in the reference fallout material was crucial for establishing a baseline to assess the possible additional inputs of ^{237}Np , ^{241}Am and Pu isotopes into the environment.

Publication

1. B. Yang, J. Zheng, G. Yang, N. Qin, K. Tagami, S. Shigeo (2024): Characterization of typical transuranic nuclides in a reference fallout material using SF-ICP-MS. J. Environ. Radioact. 278, 107506.
2. N. Qin, J. Zheng, G. Yang, K. Tagami (2024): A comprehensive survey of reference materials for their use in quality assurance for the determination of Np-237 in environmental samples. J. Environ. Radioact. 271, 107328.

2. 論文

B. Yang, J. Zheng, G. Yang, N. Qin, K. Tagami, S. Shigeo (2024): Characterization of typical transuranic nuclides in a reference fallout material using SF-ICP-MS. J. Environ. Radioact. 278, 107506.

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：岸本 康宏・千葉 健太郎・高久 雄一

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}U や ^{232}Th について濃度の上限値が定められている(シンチレーションフィルムについて ^{238}U , ^{232}Th とも 10 ppt 未満、波長変換剤について ^{238}U は 10 ppt, ^{232}Th は 30 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を目的としている。2024 年度は、それまでの研究成果で確立したシンチレーションフィルム中の放射性不純物量の ppt レベルでの微量分析測定手法に関する論文を発表した。波長変換剤中の放射性不純物量分析については、まず環境由来の ^{238}U , ^{232}Th が本研究の目標レベルである 10 ppt レベルの測定では問題ないことを示し、広い範囲 (5 ppt から 370 ppt) と試料重量 (0.1 g から 0.5 g) の範囲で適用できる回収率を求めるための添加回収実験を行い、得られた回収率は ^{238}U が $93.5 \pm 4.6\%$ 、 ^{232}Th が $95.1 \pm 8.4\%$ であることを決定した。市販の高純度波長変換剤に関して、形状が粉末状、鱗片状と異なる波長変換剤では不純物量が1桁以上異なるが、どちらの形状の波長変換剤も放射性不純物量の要求値を満たしていないことが分かり、純化が必要なことが判明した。放射性不純物量がより多い粉末状の波長変換剤についてゾーンメルティング法を用いた純化を試みたところ、元々の試料から ^{238}U は約 150 分の1、 ^{232}Th は約 72 分の1まで低減することができ、 ^{238}U についてはさらにあと1桁の低減が必要であるが ^{232}Th については要求値を満たすレベルでの純化が出来た。来年度以降も引き続き純化手法の確立、および極微量放射性不純物量測定手法の確立を継続して進める。

2. 論文

K. Ichimura, K. Chiba, Y. Gando, H. Ikeda, Y. Kishimoto, M. Kurasawa, K. Nemoto, A. Sakaguchi, Y. Takaku, Y. Sakakieda, "Development of a Method to Measure Trace Levels of Uranium and Thorium in Scintillation Films", PTEP (Progress of Theoretical and Experimental Physics), Volume 2024, Issue 6, June 2024, 063H01, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptae071>

地下宇宙素粒子実験のための低バックグラウンド液体シンチレーター 中性子検出器の開発

研究代表者：南野 彰宏

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：佐々木 優斗・田中 将士・吉田 斉

1. 成果

[背景]

環境中性子は、地下実験室で進められている宇宙暗黒物質の直接探索実験やニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索実験において重要なバックグラウンドである。この環境中性子の直接観測には液体シンチレーター検出器が最適である。しかし、液体シンチレーター検出器の構成部材に含まれる放射性不純物からのアルファ線バックグラウンドのために、地下実験室の環境中性子の直接観測には未だ成功していない。

[研究の目的]

本研究では、液体シンチレーター検出器の構成部材の中の放射性不純物含有量を測定し、アルファ線バックグラウンドの発生源を突き止める。そして、その部材をより放射性不純物含有量の少ない部材に交換することで、アルファ線バックグラウンドを1桁低減し、地下実験室での環境中性子の直接観測を実現したい。

[方法]

アルファ線バックグラウンド源は突き止められていないが、希ガスの放射線不純物である ^{222}Rn が有力な候補である。そのため、液体シンチレーター検出器の構成部材であるステンレス容器内壁から液体シンチレーターへの ^{222}Rn の放出を防止するため、ステンレス容器内壁にガスバリアであるEVOHシートを貼り、さらに内側に放射性不純物含有量が低いことが知られている反射材であるPTFEシートを貼る改造を計画している。2024年度は、LED光源（ピーク波長460 nm）を用いて、PTFEシートの反射率を厚さの関数として測定した。LED光源は、使用する液体シンチレーター（BC501A）のピーク波長である425 nmに近いものを選択した。

[結果]

PTFEの厚さが0.1 mmから6.3 mmまで変えながら反射率を測定した結果、PTFEの厚さが2 mmより大きい場合は、反射率が90%以上と十分に大きく、理論値（クベルカムンクの式）と近い値を取ることが分かった。この結果から、液体シンチレーター検出器に使うPTFEシートの厚さは2 mmと決定した。

[今後の予定]

今後は、EVOH シートの有機溶媒である液体シンチレーター（BC501A）への耐性を確認後、液体シンチレーター検出器の改造を行い、地上の放射線遮蔽体中でアルファ線バックグラウンド量を確認する。目標のアルファ線バックグラウンド量を達成後、神岡地下実験室で地下環境中性子の測定を開始する。

2. 論文

蛍光 X 線分析を用いる土壌中の微量ヨウ素および重金属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

1. 成果

土壌中の臭素およびヨウ素は、農業生態系に大きな影響を与えることが知られている。偏光光学系エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置を適用し、標準添加法を用いることで土壌中の臭素とヨウ素の XRF 定量分析が有用であることが報告されている。ただし、適用された試料数は限られており、複雑なマトリックスをもち、微量な臭素やヨウ素の含有量の土壌試料について、XRF が有効であるかどうかは未検討である。本研究では、様々な組成の土壌試料について、土壌中の微量ヨウ素および重金属元素を、迅速簡便に定量する手法の開発を目的とした。

土壌試料には、青森県の畑で採取された土壌と土壌認証標準物質の JSAC 0411, GSJ CRM JSO-1, JSAC 0401, NMIJ CRM 7302-a, NMIJ CRM 7303-a, GSJ CRM JLk-1 の合計 8 種を用いた。精秤した臭素酸ナトリウムあるいはヨウ素酸ナトリウムと窒化ホウ素 (BN) を均質に混合し、絶対検量線用の標準試料とした。この標準試料と土壌試料を適宜混合し、標準添加法の検量線作成に用いた。いずれの試料においても、精秤した 0.3 g を加圧成型 (3 tonf/cm², 3 分間) し、10 mm 径の錠剤とした。1 試料につき錠剤を 3 つ作製し、蛍光 X 線 (XRF) 分析に供した。偏光光学系蛍光エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 (Epsilon5, PANalytical) において、二次ターゲット材 Zr, Mo, Al₂O₃ を選択し、測定時間をヨウ素 3600 秒、臭素 600 秒として計測した。

JSAC0411 では臭素およびヨウ素の認証値や参考値が付与されていないため、ICP-MS 等を用いて報告されている文献値を用いて、各元素の検出下限値を算出したところ、臭素の検出下限値は 0.3 mg/kg (計数時間 600 秒)、ヨウ素の検出下限値は 0.5 mg/kg (計数時間 3600 秒) となった。

今回測定した試料のうち、JSd-3 (河川堆積物) では、As K β 線が Br K α 線に、Sn K β 線が I K α 線にスペクトル干渉した。これらについて、装置内蔵の解析ソフトを用いてピーク分離を行ったところ、より確からしい値が得られた。Sn についても XRF で定量したところ、この試料においては、187.9 mg/kg 含まれていた。

低濃度の臭素では、標準添加法を用いる定量法の方が ICP-MS 測定値と一致した。本研究で用いた様々な組成の土壌試料に対して、スペクトル干渉を補正し、標準添加法を用いて定量する場合、臭素 5 ～ 250 mg/kg、ヨウ素 25 ～ 60 mg/kg の範囲で ICP-MS 測定値と近い値を得ることができた。よって、標準添加法および絶対検量線法を用いた迅速簡便な XRF 定量分析が有効であることが示された。

2. 論文

ケイ酸バリウムを主成分とするストロンチウム吸着剤を用いた海水・陸水中の低レベル放射性ストロンチウム測定法の研究

研究代表者：箕輪 はるか

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：緒方 良至・小島 貞男・有信 哲哉・加藤 結花・杉原 真司

1. 成果

放射性 Sr は、環境モニタリングにおいて影響評価上重要な核種であるが、 β 線測定前の化学分離操作が複雑で劇薬を用い時間がかかるため、より簡便で安全な分析方法が望まれている。本研究では、海水試料をターゲットとし、Sr を Ca や他の元素と分離するためケイ酸バリウムを主成分とする Sr 吸着剤ピュアセラム MA-q（日本化学工業、以下 P-MAq）を用いた放射性 Sr 分析方法を開発した。放射性トレーサー Sr-85、Sr-90、Y-90 を使用し、化学分離操作 (1) Sr 吸着、(2) Sr 脱離、(3) Y ミルキング、の最適化を行った。

平均的な海水濃度（野崎, 1997）に調製した模擬海水を試料溶液とし、様々な硫酸イオン濃度で P-MAq への Sr 吸着実験を行ったところ、硫酸イオン濃度が 12.5mM 以上のとき、4 時間の攪拌で溶液中 Sr の 90%以上が回収できた。硫酸イオン濃度 12.5~100m M の範囲で硫酸イオン濃度と Sr 吸着率との相関はみられなかった（海水の平均的な硫酸イオン濃度は約 25mM）。硫酸イオンを添加しない場合の Sr 収着率は、2 時間の攪拌で 10%、4 時間の攪拌で 19%であった。P-MAq に Sr が選択的に回収されるメカニズムは単なる吸着ではなく、硫酸ストロンチウムとしてケイ酸バリウムに吸着されたのちに Sr が Ba と置換しケイ酸ストロンチウムとなることで強固に収着されると推測された。これは吸着ではなく収着と言えるので、以後は Sr 収着と称する。

Sr 収着実験を実際の海水（小笠原海水、小笠原海藻研究会）等に適用したところ、Sr 収着率が安定しなかった ($79.7 \pm 4.0 \sim 94.0 \pm 2.9\%$)。模擬海水を用いて Sr 収着実験を行った結果、Ca 濃度 0~20mM の範囲で Sr 収着率は $98.0 \pm 1.6 \sim 79.7 \pm 1.0\%$ の値を示し、Ca 濃度と Sr 収着率に強い相関がみられた（海水の平均的な Ca 濃度は約 10mM）。試料中の Ca 濃度を別に測定することで P-MAq への Sr 収着率を予測できると考えられる。

海水組成の模擬海水を 0.1M HCl 相当に調製し、Sr 収着剤と混合し 4 時間攪拌したところ、Sr が 90%以上収着された。収着剤を試料溶液から分離し、2M HCl 溶液中で 60°C に加熱し Sr を脱離させた。Sr 脱離率は約 70%であった。溶液状態で 2 週間以上保管し、Sr-90 が壊変し Y-90 が生成して平衡状態になるまで置いた。その後、溶液から水酸化物沈殿生成により Sr と Y を分離し、シュウ酸イットリウムとして Y-90 を回収した（Y ミルキング）。濾紙上の沈殿を乾燥させ、低 BG ガスフローカウンタ（LBC-4601, Aloka Co. Ltd.）で β 線測定した。Y ミルキング操作における Y の回収率は約 60%であった。Y の回収方法はさらに改良が必要であり、沈殿生成の方法の工夫により回収率向上が見込まれる。

本実験条件（試料量 100mL、全体を通した Y の回収率 40%、低 BG ガスフローカウンタの

90Y 計数効率 30%、測定時間 60 分) における Sr-90 濃度の検出下限濃度は、0.23 Bq L⁻¹ であった。今後、試料量を増やし化学分離操作を改良することで、検出下限濃度を 0.001 Bq L⁻¹ 以下にすることを目指している。本方法の操作時間は保管時間を除くと 2 日間 (Sr の収着と脱離に 1 日、Y ミルキングに 1 日) で、劇薬や複雑な操作は不要であり、汎用の測定器での測定が可能である。原子力施設周辺の平時の環境モニタリングや、環境試料中の低濃度の放射性ストロンチウムの分析に適用できるだろう。

2. 論文

ウラン・トリウム不純物濃度の精密測定で推進する結晶の超高純度化と 宇宙・素粒子研究の高度化

研究代表者：伏見 賢一

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：高久 雄一・梅原 さおり・黒澤 俊介

1. 成果

二重ベータ崩壊実験は、素粒子・原子核物理学における基礎過程の性質を調査する重要なプローブの役割を果たしている。ニュートリノを出さない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) 事象は、その半減期が 1027 年以上と見積もられており、大規模な放射線検出器を用いた実験が必須となっている。 $0\nu\beta\beta$ 事象の探索にとって深刻なバックグラウンドとなるのは、検出器の原料に含まれる微量な放射性不純物で、数 ppt レベルのウラン・トリウムの不純物濃度を目指して除去方法を確立する必要がある。本研究では、昨年度の結果を元にして高精度の濃度測定を行うことのできる条件を探索することを中心課題にした。

昨年度において、トリウム濃度の測定値が不安定であったことの原因を除去するため、汚染源渡考えられる試料作成場所を class 5 レベルのクリーンブースに設置し、試料作成時の汚染を防止した。フッ化カルシウムを分析するために、硝酸による分解、樹脂による分離工程のバックグラウンド混入を防ぐための処置を施した。その結果、すべての測定においてブランク試料の計数値がバックグラウンドレベルに落ち着き、試料の準備工程における汚染は除去できたことを確認した。

もう一つの課題はトリウムの回収率を正確に測定する事とした。回収率とは、試料中に存在するトリウムを分析用の溶液内に回収できる効率をいう。フッ化カルシウムなどカルシウムイオンが高濃度で含まれる水溶液では、樹脂によるウランやトリウムの吸着が阻害され、回収率が低下することが懸念されていた。本研究によってイオン吸着および脱離の際における様々な条件を探索し、安定して高い回収率を得ることが可能になった。

測定すべき同位体の精度が確認できたため、昨年度の測定で不安定な結果しか得られていなかった結晶内の不純物濃度を測定した。フッ化カルシウム粉末を長さ 10 cm、内径 1 cm のグラファイト坩堝に入れ、一端から順次結晶化させて不純物の偏析効果を確認することが目的である。確立された結晶の粉碎・分解作業及び樹脂による吸着・脱離行程を実行し、昨年製造した結晶に含まれる不純物濃度を再び測定した。その結果、結晶内の濃度は昨年度と変わらないことが明らかになった。

この結果を考察したところ、グラファイト坩堝の純度が十分でなく、坩堝からの不純物混入があるとの結論に至った。これは、今年度に確立した作業工程の見直しによって不確実性がなくなった事による明確な結論である。この考察に基づいて改良すべきは坩堝の高純度化であるとし、超高純度坩堝を現在整備中である。次年度以降には、超高純度の坩堝を使用して結晶の偏析効果を確認する計画である。これらの結果は、日本結晶学会誌の招待論文として原稿準備

中である。

2. 論文

1. " CANDLES-III detector: Low-background spectrometer for studying neutrino-less double decay of ^{48}Ca ", S.Ajimura, K.Akutagawa, T.Batpurev, F.Doukaku, K.Fushimi, R.Hazama, K.Ichimura, T.Iida, H.Kakubata, K.Kanagawa, S.Katagiri, B.T.Khai, T.Kishimoto, X.Li, T.Maeda, A.Masuda, K.Matsuoka, K.Mizukoshi, K.Morishita, K.Nakajima, N.Nakatani, M.Nomachi, I.Ogawa, T.Ohata, A.Rittirong, M.Saka, K.Suzuki, N.Takahashi, Y. Takemoto, Y.Takihira, Y.Tamagawa, K.Tetsuno, M.Tozawa, V.T.T.Trang, M.Tsuzuki, T.Uehara, S.Umehara, K.Yasuda, S.Yoshida, M.Yoshizawa, N.Yotsunaga, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1069 (2024) 169982.

極東海域の底層水と堆積物間のプルトニウムの分配について

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：Povinec P. Pavel

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}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}Cs と比較して海水中の $^{239,240}\text{Pu}$ 濃度のデータは少ないが、比較的日本海に多いので、日本海海水中の $^{239,240}\text{Pu}$ に着目してその挙動を研究してきた。海洋の放射性核種の循環を考える上で、放射性核種と堆積物の相互作用は重要である。この相互作用を理解するために、見かけの分配係数が導入されてきた。これまでの研究のなかでは、 ^{137}Cs を対象として日本海の時系列データを解析することにより、同じ地点では見かけの分配係数の時間変化は少なく、凡そ平衡に近いことが分かった。さらに、分配係数は深さと共に増加することが分かり、 ^{137}Cs は深海堆積物で安定化することが示唆された。今回は殆ど研究例がない $^{239,240}\text{Pu}$ の海水と堆積物の間の分配に着目して日本海における $^{239,240}\text{Pu}$ の海水—堆積物相互作用を明らかにする。

解析に使用したデータは 1994 年から 2022 年まで海上保安庁が日本海の 10 定点で毎年観測した値である。このデータは保安庁のホームページで公表されている他、筑波大の HAM データベースや ERAN データベースに収納されている。

海洋における $^{239,240}\text{Pu}$ の挙動を理解するために、基本的な問題は「 $^{239,240}\text{Pu}$ が海底堆積物中で安定に存在しているか」である。この問題を解決するために、海水（海底直上水）、堆積物中の $^{239,240}\text{Pu}$ 濃度の時間変動を調べた。海水中の $^{239,240}\text{Pu}$ 変動は浅い海底で僅かであるが減少の傾向が見られたが、1000m 以深では、比較的小さく特定のトレンドは見いだせなかった。堆積物の場合は、 $^{239,240}\text{Pu}$ 濃度は St.3 と St. 8 を除けば、比較的一定で時間変化は観測されなかった。ただし、底層水と同様水深の浅い海底土では減少の傾向が見られた。 $^{239,240}\text{Pu}$ の底層水と堆積物の間の見かけの分配係数を求め、その変動を調べた。見かけの分配定数は殆ど時間変動を示さず、北海道沖の日本海の浅い海底堆積物を除き、殆ど見かけ上の平衡にあることが分かる。一方、深度との関係は、 ^{137}Cs と異なり（ ^{137}Cs の場合深度の増加と共に分配係数は増加する）、深度の増加と共に、 $^{239,240}\text{Pu}$ の分配係数は減少することが分かった。

2. 論文

Hirose, K., Onda, Y., Tsukada, H., Hirayama, Y., Okada, Y., Kikawada, Y., 2024. Chemical implication of the partition coefficient of ^{137}Cs between the suspended and dissolved phases in natural water. *J. Environ. Radioact.* 278, 107486. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2024.107486>.

Hirose, K., 2024. Review of the sources and behaviors of plutonium isotopes in the atmosphere and ocean. *J. Environ. Radioact.* 277, 107446. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2024.107466>

福島周辺海域における溶存有機態放射性炭素動態のモデル化

研究代表者：乙坂 重嘉

受入研究者：津旨 大輔

1. 成果

福島第一原子力発電所（福島第一原発）では、2023 年 8 月より、施設内で発生した汚染水を多核種除去設備（ALPS）等で浄化することで生じた「処理水」を海洋に放出している。炭素-14（ ^{14}C ）は、その汚染レベルは十分に低いものの、処理水の放出によって濃度増加が懸念される核種の一つである。ただし、 ^{14}C のモニタリングは炭酸種のみを対象としており、溶存有機物を構成する炭素、すなわち DOC（Dissolved Organic Carbon）中の ^{14}C （DO14C）濃度は評価されていない。福島沿岸域には、福島第一原発の水処理システム内での無機炭素の有機化や、陸上の有機物の流出によって、微量の DO14C が供給される可能性がある。海水中の DOC の一部は、海水の循環に比べて数倍の期間にわたって海洋内部にとどまることが知られている。福島周辺海域における DO14C 分布を把握し、モデルによって再現することは、処理水放出に伴う ^{14}C 濃度変化のレベルをより正確に把握するとともに、 ^{14}C 動態の長期的な予測にも役立つことが期待される。

本研究では、その第一段階として、DO14C のデータ数が限られている北太平洋北西部およびその縁辺域における表層海水中の DOC が持つ ^{14}C 同位体比（ $\Delta^{14}\text{C}$ ）の分布を俯瞰するとともに、処理水の放出前後での福島第一原発周辺での DO14C 濃度の分布を明らかにした。福島周辺海域での海水試料は、2021 年 10 月から 2024 年 4 月にかけて、福島第一原発から 2~18 km の距離にある 5 観測点で研究船「新青丸」の協力を得て採取した。北西太平洋の広域でのデータは、Otosaka et al. (2024) による既報データに加えて、2021 年 1 月から 2023 年 8 月にかけて、研究船「新青丸」および「みらい」の 4 航海で得た 22 観測点のものをを用いた。DOC 濃度及び DOC- $\Delta^{14}\text{C}$ は、海水を冷凍保存して陸上の実験室に持ち帰った。海水中の DOC- $\Delta^{14}\text{C}$ は、Otosaka et al. (2021) の方法で前処理後、東京大学大気海洋研究所のシングルステージ加速器分析装置（YS-AMS）で計測した。

表層海水中 DOC の $\Delta^{14}\text{C}$ と DOC 濃度との関係から、北西太平洋の多くの観測点の DOC は、表層で生産された新鮮な DOC と深層由来の古い DOC の 2 成分の混合物として説明することができた。一方で、縁辺海や、縁辺海からの表層流が収束する一部の観測点では、陸域や海底堆積物を起源とすると思われる、年齢の古い DOC が存在することが示唆された。福島海域における DOC が持つ DOC の $\Delta^{14}\text{C}$ 値は $-248 \sim -170\text{‰}$ であった。処理水放出前の 2022 年 10 月の DOC- $\Delta^{14}\text{C}$ 値は、図 2 に示す混合直線に対して最大で 50%程度高く、人為起源の

14C による値の増加の可能性を示したが、これに伴う DO14C の濃度増加は 0.01mBq/kg 程度であった。ALPS 処理水放出開始後の 2024 年 3 月における DOC- Δ 14C 値は 2022 年に比べて低く、目立った濃度増加は見られなかった。2024 年の観測は 3 回目の ALPS 処理水放出期間 7~8 日後で、少なくともこの時点においては、放出に伴う DO14C 濃度の増加は極めて小さいと推定された。本研究によって得られた DO14C の移行過程を、領域海洋モデル (ROMS; 海水循環) 及び 海洋生態系モデル (BEC; 炭素循環) で再現し、同海域における DO14C 動態の基盤情報として活用する予定である。

2. 論文

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

研究の背景と目的

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、海上での大気降下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下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 2024 年度は、大気モデルの検証に使用する海上の降水量データを探索するとともに、数値気象モデルによる降水の再現性を検証した。

海上降水量データの探索

気象庁は海洋気象観測船により海上の気象を観測しており、2011 年 3 月には凌風丸 1102 航海 (2011 年 3 月 7~15 日) と凌風丸 1103 航海 (2011 年 3 月 22~29 日) を本州東方で実施している。しかしながら、降水量観測は船上での困難さから行われていない。

気象庁は、気象レーダーと雨量計のデータを組み合わせて 1 km 四方における毎時の降水量 (解析雨量) を作成している。気象レーダーは半径数百 km をカバーするので、沿岸部であれば海上の降水量データが得られる。

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) などによる GSMap (Global Satellite Mapping of Precipitation) は、複数の人工衛星データを組み合わせて作成された全球降水データである。解像度は 1 時間、緯度経度 0.1 度であり、沿岸部のみならず海上の気象データを得ることができる。陸上の雨量計データで補正したデータもあるが、沿岸部の降水量が不自然であり、本研究では補正なしデータを使用した。

数値気象モデルによる海上降水量の再現性

数値気象モデルとして WRF v.5.4.2 (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 (GHR SST) を使用した。計算結果を GSMaP データと比較したところ、物理モデルとパラメタにより相違はあるものの、概して降水イベントの有無はほぼ的確に予測していた。しかしながら、計算された降水域は実際より南に寄っていた。この特徴は既往のモデル比較研究 (Kajino et al., 2019) にも確認でき、要因が共通した可能性がある。

引き続き最適な計算条件を探索し、海上降水量の再現精度をさらに高める必要がある。

2. 論文

なし

海洋放射能データベースを利用した放射性核種の全球鉛直分布の解析

研究代表者：猪股 弥生

受入研究者：津旨 大輔

1. 成果

福島第一原子力発電所（F1NPS）事故により環境中に放出された放射性セシウム(Cs-137)は、北太平洋の西部亜熱帯循環域から、数年未満の短い時間スケールで東シナ海底層部を経由して日本海に到達していることが明らかになるなど (Aoyama et al., 2017; Inomata et al., 2018a)、海水循環を示すトレーサーとして有効である。放射性核種の濃度変化は、半減期やその物理化学特性により異なるために“見える”事象が異なることが予想される。本研究では、環境放射能データベースやモニタリングデータを使用し、Cs-137 と Sr-90 についての時空間変動について解析を行った。

本研究では、環境放射能データベース (HAMGlobal2021) や新たに報告されているデータを使用した。Cs-137 解析時では海洋を 37 地域に分割して解析を行ったが、Sr-90 のデータ数が少ないため、Sr-90 データの報告例が多い、日本海を中心とした太平洋縁辺海について解析を行った。日本海については、表層水 (～300m)、上部固有水(300-1000m)、深層水(1000-2000m)、底層水(2000m 以深)に分けて解析を行った。

日本海表層水の Cs-137 濃度の長期間解析から、F1NPS 事故由来の Cs-137 の日本海への流入は 2015/2016 年で濃度は減少傾向にあるものの、依然として事故前の値には戻っておらず、現在も追加のフラックスが供給され続けていることが示された。F1NPS 由来の Cs-137 と Sr-90 は 2011 年にすでに底層水に到達していた。2000m 付近では Cs-137 と Sr-90 及びその比の増加が確認された。この濃度や比の増加には、表層から下層への輸送と共に、ロシアによる核物質の投棄の影響の可能性もある。特に 1990 年代半ばには、底層水でもこれらの濃度の増加が確認できた。鉛直分布を解析した結果、日本海盆付近で、1990 年代からインベントリの増加が認められた。また、インベントリ増加が認められた海域では推定された鉛直拡散係数が大きかった。

2. 論文

森林中の放射性ヨウ素の降下量測定

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

1. 成果

[目的]福島原子力事故で内部被ばくの原因となる ^{131}I が環境中に放出され、2011 年は都内の水道でも ^{131}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}I から ^{131}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}I の実測データを得ることを目的とした。

[結果]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}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 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。表層から 6m までのリターおよび土壌中の ^{127}I と ^{129}I の濃度は $3\text{--}99\text{mg/kg}$ と $6 \times 10^8 - 3 \times 10^{12} \text{ atoms/kg}$ であった。同フィールドで得られたコア中の ^3H と ^{36}Cl は 300cm-350cm の間にピークが見られたが、 ^{129}I はリターおよび表層数 cm 程度にピークが見られた。

2. 論文

陸水域の生元素循環に関する比較湖沼学的アプローチ

研究代表者：板井 啓明

受入研究者：丸岡 照幸

1. 成果

イ素は地殻を構成する主要元素であり、珪藻などの微生物の硬組織を構成する必須元素である。湖沼は生物性ケイ酸(BSi)の生成によりケイ素のシンクとして働くため、陸域から海洋へのケイ素フラックスに及ぼす湖沼の役割が注目されている(e.g., Frings et al., 2014; Maavara et al., 2014)。しかし国内では、琵琶湖や霞ヶ浦など重点調査湖沼を除くと、ケイ素の動態が系統的に調べられた湖沼は少ない。本研究では、夏期に成層が形成される複数の国内湖沼について、(1)湖水中鉛直分布と季節変化の解析、(2)堆積物中生物性ケイ酸(BSi)の定量、(3)ケイ素安定同位体比の測定を実施し、ケイ素動態を解析した。解析対象は、長野県の青木湖・中綱湖・木崎湖、山梨県の山中湖・河口湖・西湖・精進湖・本栖湖、福島県の桧原湖・小野川湖・秋元湖の11湖沼とした。湖水中の総溶存ケイ素(DSi)はICP発光分光分析法で定量した。反応性ケイ酸濃度(SRSi)は、モリブデンイエロー吸光光度法で定量した。

全湖沼の分析結果から、DSiに占めるSRSiの割合は72–88%であり、主に単量体のケイ酸として溶存していることが明らかになった。DSiの鉛直分布は大半の湖沼で表層から深層にかけておおむね一定の値を示す傾向が認められた。表水層の年間最小DSi濃度は、全湖沼においておおむね150 μM 付近に収斂するため、珪藻の生成は循環期直後の濃度に依存せず、ケイ素レベルが閾値付近まで低下するまで継続されることが示唆された。堆積物中BSiは、総有機炭素濃度(TOC)と正の相関を有し、BSiとTOCの比率は先行研究における淡水珪藻のSi/Cと類似していた。BSiとTOCは、湖沼内部生産の指標である循環期TPとTOCの関係よりも高い正の相関を有しており、珪藻由来有機物の堆積物への埋没効率が高いことが示唆された。

8湖沼の堆積物と河口湖の湖水についてケイ素安定同位体比測定を行った結果、堆積物中 $\delta^{29}\text{Si}$ は富土地域で−2.66–2.58‰、仁科地域で−0.67–−0.49‰、裏磐梯地域(小野川湖)で−0.6‰、河口湖湖水中 $\delta^{29}\text{Si}$ は0.91–1.46‰であった。河口湖湖水中 $\delta^{29}\text{Si}$ は堆積物中 $\delta^{29}\text{Si}$ よりも高い値をとり、6月に極大値を示した。3月の表水層中 $\delta^{29}\text{Si}$ (0.9‰)を $\delta^{29}\text{Si}_{\text{input}}$ とし、湖水-珪藻間の同位体分別係数(ε)を−0.55‰として、開放系定常状態を仮定した計算を実施した結果、湖水に供給されるSiに対して、6月は100%、8月は58%が珪藻の増殖に使われていると推定された。本研究を通じ、これまで知見が乏しかった国内湖沼におけるケイ素動態に関する基礎的な知見を提供するとともに、陸水ケイ素動態のトレーサーとしてのケイ素安定同位体比の有効性を示すことができた。

2. 論文

ヒューロニアン累層群における漂砂型ウラン鉱床のモリブデンと硫黄分析

研究代表者：後藤 孝介

受入研究者：丸岡 照幸

1. 成果

本研究では、太古代や原生代前期における化学風化の詳細な特徴の理解を念頭に、砕屑性ウラン・硫化鉱物の存在が報告されているカナダのヒューロニアン累層群マチネンダ層を対象とした各種化学分析を行った。特に、酸化的風化の指標として多くの先行研究によって着目されているモリブデンの挙動について、モリブデンおよび硫黄の定量・同位体分析に基づき検証した。試料は、マチネンダ層の砂岩・礫岩層を含む2つのコアを活用した。これらのコアには、砕屑性ウラニナイトやパイライトを含む試料も存在していることが確認されている。モリブデン同位体は、産業技術総合研究所の所有するマルチコレクター型誘導結合プラズマ質量分析装置（Thermo Fisher Scientific 社製 NEPTUNE）を、硫黄同位体は、筑波大学の所有する連続フロー型質量分析装置（GV Instruments 社製 Isoprime-EA）を用いてそれぞれ測定した。なお、モリブデン同位体に関しては、主に科学研究費助成事業の一環として行った。

多くの試料で、低い全岩硫黄濃度（< 0.5 wt%）を示し、火成岩と同様の硫黄同位体比（ $\delta^{34}\text{S} = 0\text{--}5\text{‰}$ ）を示した。しかし、高い硫黄濃度（最大で 5 wt%）を示す試料も存在した。モリブデンの定量・同位体分析の結果と比較したところ、得られているデータ全体としては、モリブデン濃度と硫黄濃度に明瞭な相関は見られないが、硫黄濃度の高い試料において、モリブデン濃度が高くなる場合があることが分かった。また、硫黄濃度の高い試料の中には、モリブデン同位体比が、一般的な大陸地殻の値よりも顕著に低い値（ $\delta^{98/95}\text{Mo} < -0.3\text{‰}$ ）を示す場合があることも確認できた。モリブデン濃度は、全岩のチタン濃度と正相関を示すため、チタン酸化物などがモリブデンの主要なホストである可能性が高い。しかしながら、今回の測定結果は、硫化物もモリブデンの重要なホストの一つであることを示唆する。一般に熱水性の硫化物に含まれるモリブデンの同位体比は非常に大きな不均質性を示すことが知られているため、分析したコアの全岩モリブデン同位体比は、砕屑性パイライトに含まれるモリブデンの同位体比によって、一部変動している可能性が高い。このことは砕屑性堆積岩のモリブデン同位体分析に基づく酸化的風化の議論において、砕屑性パイライトの影響を評価する必要があることを意味する。得られた成果は、2024 年の 9 月に米国・アナハイムで開催された米国地質学会の年会にて発表した。

2. 論文

生産地域や蜜源植物が異なる国産蜂蜜の同位体組成分析

研究代表者：永田 宏次

受入研究者：丸岡 照幸

共同研究者：平田 岳史

1. 成果

【目的】蜂蜜の約 75%は分子式 $C_6H_{12}O_6$ で表される単糖（果糖とブドウ糖）である。蜂蜜の同位体組成分析は、これまで主に炭素の安定同位体比（ $^{13}C/^{12}C$ ）を用いて行われてきた。蜂蜜の蜜源植物は C_3 植物、サトウキビやトウモロコシは C_4 植物であり、後者は ^{13}C を取り込む割合が高いため、サトウキビやトウモロコシに由来する等の混入の有無を判別するために使用される。本研究では、精密な同位体比分析（炭素（ $^{13}C/^{12}C$ ）、酸素（ $^{18}O/^{16}O$ ））により、日本国内の①産地または②蜜源植物が異なる蜂蜜を区別可能であるかどうか検証する。

【方法】山田養蜂場から信頼できる蜂蜜サンプルを入手し、研究室内で実行可能な NMR 分析等を行った。同じサンプルについて、各蜂蜜サンプルの炭素（ $^{13}C/^{12}C$ ）、酸素（ $^{18}O/^{16}O$ ）の安定同位体分析を元素分析同位体比質量分析法（Elemental Analyzer Isotope Ratio Mass Spectrometry = EA-IRMS）により行う。安定同位体比と NMR 分析等の結果を組み合わせ、蜂蜜の①産地および②蜜源植物の特定がどこまで可能かを検証する。

【結果】永田研究室では、①産地または②蜜源植物が異なる国産蜂蜜の NMR による微量成分分析技術を確立し、蜜源植物についてはある程度判別できるという結果を得ている（投稿準備中）が、同じ蜜源植物であっても産地が違っていると成分組成が異なるという例もあった。国内外で農産物の安定同位体組成比が異なる例は知られているが、単糖が 75%を占める蜂蜜の安定同位体分析により、同じ蜜源植物でも国内の産地が異なる蜂蜜を区別できるかどうか、また、同じ産地でも蜜源植物が異なる蜂蜜を区別できるかどうかを安定同位体分析を EA-IRMS により検証する。分析装置の状態等の事情により、分析は 2025 年度に行うことになったが、日本各地の蜂蜜の同位体組成の特徴づけ、および蜜源植物の違いによる同位体組成の特徴づけを進めて、結果を得る予定である。

2. 論文

光学的同位体分析手法における新たなスキームの検討および開発提案

研究代表者：長谷川 秀一

受入研究者：丸岡 照幸

1. 成果

極微量同位体分析については、試料を気体化し、原子あるいは分子に電荷をもたせ荷電粒子にすることで、電磁場を用いて正負イオンを質量電荷比に応じて分解する、いわゆる質量分析法が広く用いられている。特に、Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS: 誘導結合プラズマ質量分析法)は、様々な改良が進められており高い汎用性をもつに至っている。また、Accelerator Mass Spectrometry (AMS: 加速器質量分析法)は、極微量同位体の同位体比測定において高い感度を有している。

一方、元素・同位体は、原子核の陽子・中性子の数が異なることにより、電子遷移において固有の吸収・発光エネルギーを有している。そこで、レーザー光の高い分解能を利用した分光分析手法を用いて、同位体レベルでの分析が実現されている。例えば、近年では、Atom Trap Trace Analysis (ATTA: 原子トラップ微量分析法)は、レーザー冷却の技術を用いた新しい分析手法として、非常に高い感度を有しており、希ガスの分析に利用されている。また Cavity RingDown Spectroscopy (CRDS: キャビティリングダウン分光法)では、AMS に匹敵する感度が $^{14}\text{CO}_2$ に対して実現されている。

そこで、本研究ではレーザー光を用いた同位体レベルでの分光分析を進めるとともに、新たな同位体分析システムの構築に向けて「放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同研究拠点」における現場のニーズを調査することも合わせて行った。

Resonance Ionization Mass Spectrometry (RIMS: 共鳴イオン化質量分析法)については Sr-90 の分析に向けた分光研究を行い、同位体シフトに対して電子状態への電場の影響を実験的に評価した。あわせて、2段階及び3段階共鳴励起・イオン化スキームにおける同位体選択性を実験的に評価した[RIMS, ITLCS]。

CRDS においては、大気中の $^{12}\text{CH}_4$ 及び $^{13}\text{CH}_4$ の濃度分析を実現した[CRDS]。さらに様々な様態の試料を気化し、分光分析を行うことが可能となる装置開発を進めている。ニーズにおいては、前処理の難しいアクチノイドや CH_4 、 CO_2 などの混合ガスでのアイソトポマー（同位体分子種）分析などについてレーザー光分光分析が可能と思われる。

謝辞：

本拠点において筑波大学丸岡照幸先生に受け入れていただき感謝申し上げます。

参考文献：

[RIMS] C. Zhang, R. Terabayashi, S. Hasegawa, *Spectrochimica Acta B* 225, 107118 (2025)

[ITLCS] C. Zhang, R. Terabayashi, S. Hasegawa, *Nucl. Instrum. Method A* 1074 , 170321(2025)

[CRDS] R. Terabayashi, F. Yoshida, T. Kunimaru, S. Hasegawa, *Rev. Sci. Instrum.* 95, 043005 (2024)

2. 論文

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℃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_4^+ ）を含む鉱物（例：アンモニウム含有カリ長石（ $\text{K, NH}_4^+\text{AlSi}_3\text{O}_8$ ）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、(1) 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、(2) 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、その内側に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を行った。

岩石記載の結果、流紋岩質角レキ岩・流紋岩質溶岩・凝灰岩室砂レキ岩などの珪長質な岩石が主な岩相であった。構成鉱物は後述するようによく似ているが、角レキ岩や凝灰岩は間隙が多く、溶岩は緻密で間隙が少ない点に特徴がある。これらの試料を粉末化し、XRD 分析を行った結果、カリ長石（ KAlSi_3O_8 ）やイライト（ $\text{K}_{0.65}\text{Al}_{2.0}[\text{Al}_{0.65}\text{Si}_{3.35}\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ ）といったカリウムを含む鉱物が多くみられたことから、本地域ではカリウム変質作用が卓越したことが分かる。さらに、赤外線吸収分光分析によって N-H バンドの吸収が強い試料を抽出し、さらに水処理によって分離されたイライトが全岩試料よりも有意に強い N-H バンド吸収を示すことから、イライトがアンモニウムイオンのホストとなっていることが分かった。顕微ラマン分光分析によるマッピングでは、カリ長石とアンモニウムの分布がよく一致することが分かり、カリ長石もアンモニウムイオンのホストとなっていることが判明した。

以上の結果から、本研究では以下の結論を得た。北ノ王金鉱床に産出するアンモニウム含有鉱物はイライトとカリ長石であり、いずれも K^+ と NH_4^+ に富む熱水から晶出したものである。金が濃集する領域の周辺に上記のアンモニウム含有鉱物が産出することから、 NH_4^+ を含む熱水が金を運搬したと考えられる。窒素同位体比測定が未完了のため、窒素

の起源について定量的な考察は出来ないが、鉍床の胚胎母岩である湧別層群（泥岩および砂岩）由来と考えられる。

2. 論文

- 1) T. T. Bui, Y. Watanabe, C. A. J. Tupaz, T. Echigo, S. Aoki, M. Hoshino (2025) Rare-Earth Mineralization in Dong Pao Deposit, Laichau Province, Vietnam, *Resource Geology*, 2025;75:e70006.
- 2) J. B. Born, Y. Watanabe, T. Echigo, P. Bounliyong, C. A. J. Tupaz, S. Aoki, Y. Kon (2024) Sediment-hosted disseminated gold mineralization at the Gegalaw deposit in Central Myanmar, *Resource Geology*, 2024;74:e12338.
- 3) A. Agangi, A. Hofmann, T. Echigo, R. Bolhar, D. Araoka, V. Mashoene, L. T. Ndhlovu, R. Takahashi, P. C. Manalo (2024) The use of combined CMg isotope compositions of carbonates from orogenic SbAu deposits as a tracer of fluid interaction with sea-floor altered crust, *Chemical Geology*, 673, 122442.

断層活動に関連する地殻流体中の炭素・硫黄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

1. 成果

温泉・鉱泉には地下深部に由来する成分が含まれている。地下深部に由来する水のなかには、プレート運動に伴い地下深部へ持ち込まれ、地殻活動によって再び表層に輸送されているものがある。地表への輸送過程には火山活動が広く認識されているが、近年は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と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。温泉水の化学成分濃度は約 100mg/ℓ～30g/ℓと差があり、また主要イオン組成は、Ca－HCO₃ 型や Mg－HCO₃ 型で示される比較的流動性の良い地下水から、Ca－SO₄ 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。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。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℃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。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

なし

タンパク質還元酵素遺伝子 MSRB5 による Na、K、Cs 吸収制御の検証

研究代表者名：菅野 里美

受入研究者：古川 純

共同研究者：三村 徹郎・Chan Ming-Tsair

1. 成果

【目的】

植物のストレス応答（塩ストレス、耐病性、重金属耐性など）においてタンパク質の酸化還元制御機構が働くことが多数報告されている。これは、タンパク質のアミノ酸メチオニンが酸化されることにより、タンパク質活性が抑制されることによる。一方で植物は、メチオニン還元酵素も細胞内に持つことから、酸化還元によるタンパク質制御は、細胞内で様々な生じることが考えられるがその全体像は描けていない。耐塩性の変異体として単離された *sst1* 植物体内の Na/K バランスが崩れることが報告されている。原因遺伝子である MSRB5 還元酵素遺伝子は *sst1* で発現量が増加する。我々の先行研究から Na と K の両方が Cs 吸収に影響することが分かっていることから、本研究は、MSRB5 の変異株を使い Na⁺、K⁺、Cs⁺ 吸収差の関係を検証することを目的としている。

【方法】

AtMSRB5 (methionine sulfoxide reductases 5) の欠損株と過剰発現株と野生型株を寒天培地で 8 日間培養し、Na-22、K-43、Cs-137 トレーサ実験により検証し、MSRB5 変異体株での Na/K 輸送比と Cs 輸送輸送の相関を調べる。K 10 μ M+K-43、Na 10 μ M+Na-22、Cs 1 μ M+Cs-137 をそれぞれ、20 分間と 40 分間吸収させ、Imaging Plate にて検出した。遺伝子欠損株 *msrb5* は Na/K 低くなることから Cs 吸収量が増加し、過剰発現株 B5OX は Na/K 高くなることから Cs 吸収量が低下することを仮説として考えた。

【結果】

私たちの先行研究においてイネの体内の Na/K バランスが Cs 吸収に影響することを明らかにしてきた。Na の吸収が減少する *oshkt2;1* は Na/K は低く保持され Cs⁺ の吸収が増加すること、WT は培地中の Na 濃度上昇に伴い Na/K は高まり、Cs⁺ の吸収が抑制されることが分かった。本実験から、欠損株 *msrb5* は Cs の吸収が野生型株に比較して増加し、Na/K 低くなった。一方、過剰発現株 B5OX は Cs の吸収は野生型株と比較して優位差はなかった。この時、Na/K は野生型株より高い傾向にあり、仮説と同様の傾向を示した。このことから、Cs の吸収には K と Na の両方のバランスが影響し、それらのバランスを制御する MSRB5 は Cs 吸収を間接的に制御する因子と言える。

2. 論文

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：放射性セシウム原子の可視化

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 朋季・鍋山 風

1. 成果

2011 年 3 月に発生した福島第一原発の事故により～520 PBq の放射性物質（希ガスを除く）が放出された。現在は ^{137}Cs による放射線量への寄与が大きく、環境中における放射性 Cs の動態の把握は重要な課題となっている。しかし、環境試料中に含まれる放射性 Cs の原子・分子スケールでの直接観察は濃度が低いために困難であった。

本研究では、環境試料から単離した高濃度放射性 Cs 含有微粒子（CsMP）に対して、 γ スペクトロメトリー、SEM、TEM を用いた系統的な分析に加えて HAADF-STEM とマルチスライス法像シミュレーションを行い、放射性 Cs 原子の可視化を試みた。

3 つの CsMP の中に Cs を高濃度(27-36%以上)含有する粒子が含まれ、ゼオライトの一種であるポルサイトを同定した。これらの組成式は
 $(\text{Cs}, \text{K}, \text{Ba})_{2.2}(\text{Fe}_{0.84}, \text{Zn}_{0.84}, \text{X}_{0.5})_{2.2}\text{Si}_{4.10}\text{O}_{12}$ と
 $(\text{Cs}, \text{K}, \text{Ba})_{1.5}(\text{Fe}_{0.66}\text{Zn}_{0.32}\text{X}_{0.6})_{1.6}\text{Si}_{4.60}\text{O}_{12}$ と
 $(\text{Cs}, \text{K}, \text{Ba})_{1.7}(\text{Fe}_{0.60}\text{Zn}_{0.32}\text{X}_{1.0})_{1.9}\text{Si}_{4.40}\text{O}_{12}$ (X には他の微量元素 Ti、Mn、Rb、Zr、Mo、Sn が含まれる)であった。[111]から観察したポルサイトの HAADF-STEM 像はポルサイト中の Cs 原子の六回対称の配列を示し、相対的な強度はシミュレーション像と一致した。Cs と比べて同サイトに位置する Ba, K の濃度が低いこと、Cs 同位体中の約 5 割が放射性 Cs 同位体であることを考えると、この像で可視化された Cs 原子は放射性 Cs の原子を示しており、世界初の放射性 Cs 原子の可視化に成功した結果である。ポルサイトはメルトダウンが起こった際に局所的に濃縮された Cs がシリカと反応し、熱水反応によって形成し、CsMP 中に取り込まれたと考えられる。また、これらのポルサイト中の放射性 Cs による β 線損傷エネルギーを計算したところ、非晶質化線量と比較して 2 桁以上低いため、結晶構造は長期間保持されることが予想される。これらの結果はメルトダウン時の炉内における Cs の分配挙動に新しい知見であり、その革新的技術の応用とともにシビアアクシデント現象の詳細や将来の廃炉作業時に有用であると期待される。

2. 論文

Kanako Miyazaki, Masato Takehara, Kenta Minomo, Kenji Horie, Mami Takehara, Shinya Yamasaki, Takumi Saito, Toshihiko Ohnuki, Masahide Takano, Hiroyuki Shiotsu, Hajime Iwata, Gianni F. Vettese, Mirkka P. Sarparanta, Gareth T.W. Law, Bernd Grambow, Rodney C. Ewing, Satoshi Utsunomiya、

“Invisible” radioactive cesium atoms revealed: Pollucite inclusion in cesium-rich microparticles (CsMPs) from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

Journal of Hazardous Materials、 Vol. 470、 2024 (査読 有)

赤城大沼湖水中セシウム濃度時間発展の素過程解明を目指した 流体シミュレーション

研究代表者：齋藤 誠紀

受入研究者：羽田野 祐子

1. 成果

1. 研究背景と目的

2011 年の福島第一原子力発電所事故により、赤城大沼では一時的にワカサギの ^{137}Cs 濃度が暫定規定値を超えた。このような背景のもと、赤城大沼における水中 ^{137}Cs 濃度の長期的な時間変化を予測できるモデルの開発が求められている。これまでのモデルでは時間発展が十分に再現できず、そのフィッティング結果から得られるパラメータ ($\alpha=0.685$) の物理的意味も不明確であった。

本研究では、赤城大沼を閉鎖系と仮定した簡略化モデルにより流体シミュレーションを行い、 $\alpha=0.685$ となる理由の解明を目的とした。特に、湖に接続する河川の流入・流出が流速場や ^{137}Cs 濃度分布に与える影響を検証する。

2. シミュレーション手法

オープンソースの数値解析ソフトウェア OpenFOAM を用い、赤城大沼の流体シミュレーションを実施した。支配方程式には定常状態のナビエ・ストークス方程式を採用し、湖水の流れを再現した。湖の形状は直方体メッシュ ($5\text{m} \times 5\text{m} \times 1\text{m}$) で構成され、全体のサイズは $1400\text{m} \times 1100\text{m} \times 16\text{m}$ である。

3. 河川の模擬と接合部の設定

実際の湖盆図に基づき、赤城大沼に接続する沼尾川および覚満川の流入・流出位置を特定。河川と湖が垂直に交わると仮定し、水速 1.25m/s で接合部における傾きを設定。湖と河川の接続部において流速場を固定し、自然環境に近い状態での水の流れを模擬した。

4. シミュレーション結果

河川の流入・流出を考慮したモデルでは、考慮しない場合と比較して湖内の速度分布に明確な差が見られた。特に接合部付近での流速が変化し、河川が存在が湖内循環の構造に影響を及ぼしていることが示唆された。

5. まとめと今後の展望

本研究では、河川と湖の接合部における流速場の設定により、赤城大沼におけるより自然な流体挙動を再現することに成功した。今後は、湖水に対流が生じやすい季節 (3~5 月、11~1 月) のシミュレーションを進めるとともに、水面の風の影響を取り入れることで、 ^{137}Cs 濃度の時間発展に関する理解をさらに深めることを目指す。

2. 論文

土壌の放射性セシウムの利用に及ぼす植物種間差の機構解析

研究代表者：信濃 卓郎

受入研究者：塚田 祥文

共同研究者：丸山 隼人・望月 杏樹

1. 成果

【背景・目的】2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所事故後、カリウム(K)とセシウム(Cs)が植物根のイオン吸収において拮抗関係にあることを利用し、土壌中の交換態カリウム(Ex-K)濃度を高めることで、主要農作物の放射性セシウム(^{137}Cs)吸収を抑制する取り組みが行われてきた。また、近年では土壌の交換態放射性セシウム(Ex- ^{137}Cs)が植物への ^{137}Cs 移行において土壌間の違いを説明する重要な要素であることが示唆されているが、各植物種との関係については調査されていない。さらに、植物はそれぞれ固有のCs吸収特性を持つと考えられているが、各植物種におけるCs吸収特性を正確に評価した研究はほとんどない。そこで、本研究ではコマツナ、ハウレンソウ、チンゲンサイなどの野菜類を対象とし、異なる土壌で栽培された複数の植物種を用いて ^{137}Cs 濃度と土壌のEx- ^{137}Cs およびEx-K濃度の関係を調査し、 ^{137}Cs 移行の植物種間差を評価した(実験1)。さらに、 ^{137}Cs 移行における植物種に固有の係数を水耕培養液の $^{133}\text{Cs}/\text{K}$ 濃度比から決定し(実験2)、植物体地上部の ^{137}Cs 濃度予測に適用できるかを検討した。

【結果・考察】実験1より、コマツナ、ハウレンソウ、チンゲンサイの栽培後における土壌中Ex- $^{137}\text{Cs}/\text{Ex-K}$ 濃度比と地上部 ^{137}Cs 濃度には有意な正の相関($p < 0.05$)が認められた。これより、地上部 ^{137}Cs 濃度の決定には、土壌種によらずEx- $^{137}\text{Cs}/\text{Ex-K}$ 濃度比が関与していることが示唆された。また実験2より、各植物種の培養液中 $^{133}\text{Cs}/\text{K}$ 濃度比と地上部 ^{133}Cs 濃度にも有意な正の相関($p < 0.05$)が認められた。さらに、植物種ごとに異なる回帰係数を示し、作物間に差があることが明らかとなった。これらの結果を踏まえ、土壌中Ex- $^{137}\text{Cs}/\text{Ex-K}$ 濃度比と、植物種に固有のCs吸収係数を用いて ^{137}Cs 移行予測式を立てた。この式を用いて、 ^{137}Cs 濃度($\text{Bq kg}^{-1} \text{ DW}$)の予測値および実測値(いずれも対数値)の比較をしたところ、両者の間に有意な直線関係($p < 0.05$)が認められた。以上のことから、複数の土壌種および異なる作物が対象であっても1つの予測式で ^{137}Cs 移行のリスクを評価できる可能性が示唆された。

2. 論文

無し

ラットの Cs イメージングデータを用いたセシウム動態モデルの構築

研究代表者：坂下 哲哉

受入研究者：塚田 祥文

共同研究者：柿崎 竹彦

1. 成果

【はじめに】

放射性セシウムは、大気圏内核実験や原発事故の際に、環境中に放出される人工放射性核種である。134Cs、137Cs の半減期が、それぞれ約 2 年と 30 年であることから、預託実効線量を考える時に重要な核種である。国際放射線防護委員会（ICRP）で注目され、放射性セシウムの体内動態コンパートメントモデルの開発が進められてきた。一方、量研の鈴井他は、非破壊的にセシウムの動態を可視化できるポジトロン放出核種、127Cs トレーサの開発に成功（Sci. Rep., 2020）した。127Cs は、半減期が 6.25 時間であり、セシウム動態の解析に利用可能である。また、ICRP の放射性セシウム体内動態モデルの消化器系のパラメータについては、未だ十分なコンパートメントの構成と値が得られていない。そこで、ラットのセシウム動態コンパートメントモデルを構築し、Cs イメージングデータ及び安定 Cs データを用いて消化器系のパラメータの情報を得ることを目的とした。

【方法】以下の手順にて研究を実施した。

- ① ICRP 体内動態モデルは、多くの臓器を含むため臓器の数を減少させてモデルの検証を容易にするため、モデルのダウンサイジングを行う。
- ② ダウンサイジングモデルを用いて、ICRP 自身が Cs の体内動態コンパートメントモデルを構築する際に参照したラットのデータを再現できるかを検証する。
- ③ ラットの ICRP 参照データに対応したダウンサイジングモデルを用いて、
 - 1) 短期間の Cs 動態を反映したイメージングデータ、
 - 2) 長期間の Cs 動態を反映した安定 Cs データ（血液中）
 と各々比較する。

【結果】

- ① ICRP モデルのダウンサイジングを行い、ヒト Cs 動態を再現できるか検証し、ダウンサイジングしたコンパートメントモデルにおいても、ヒト Cs 動態を再現できることを確認した。
- ② ①のダウンサイジングモデルを用いて、ICRP 参照ラットデータの再現ができるか検証し、ラット Cs 動態を再現できることを確認できた。
- ③ 結果②のラット Cs 動態モデルを用いて、ラットの CsPET のイメージングによる Cs 動態測定値と比較した。その結果、ラット Cs 動態モデルと Cs の PET イメージングの相対濃度の時間的变化が、主要な臓器において数倍内の範囲内で一致した。しかし、大腸(LC)について、CsPET イメージングとラット Cs 動態モデルの間に 2 オーダー以上の差があることが分かった。

④ 安定セシウムの静注摂取後の血中の Cs 濃度との比較を行ったところ、20 日程度までしか動態をトレースできないことがわかった。

【考察】

① ICRP の Cs の移行係数を用いた動態モデルでは、ラットの場合、Cs が胃腸に留まる傾向が強く、胃腸から大腸への移行を再現することができないことが示唆された。

② 安定セシウムによる血中の Cs 濃度が持続した点については、臓器等の長い滞留要因が示唆された。

2. 論文

なし

廃水中における放射性核種を分離する新規な超分子複合材料の開発

研究代表者：長谷川 浩

受入研究者：ラハマン モハマド モフィズル イスマイル

共同研究者：Begum Ara Zinnat

1. 成果

【Introduction】 Traditional methods for removing radioactive cesium (r-Cs) and strontium (r-Sr) from contaminated environmental aqueous matrix, such as liquid-liquid extraction using crown ethers, often generate significant secondary waste. Immobilizing crown ethers on mesoporous materials offers a promising solution for selective radionuclide capture while minimizing waste. This study focuses on the development, characterization, and application of a new sorbent featuring a di-formyl dibenzo-18-crown-6-ether (DFDB18C6) ligand grafted onto amino-modified mesoporous silica (SBA-NH₂).

【Experimental】 The sorbent, DFDB18C6@SBA-NH₂, was synthesized in a three-step process. First, SBA-15 was prepared using the sol-gel method with Pluronic P123 as a template and tetraethyl orthosilicate (TEOS) as a silica source. Second, the SBA-15 was amino-functionalized with 3-aminopropyltriethoxysilane (APTMS) to create SBA-NH₂. Finally, DFDB18C6 was synthesized from 3,4-dihydroxybenzaldehyde and then grafted onto the SBA-NH₂ via imine condensation. The resulting material was characterized using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), and thermogravimetric analysis (TGA). Batch sorption experiments were conducted to evaluate the r-Cs and r-Sr removal efficiency under various conditions, including pH, contact time, initial concentration, and temperature.

【Key Findings】 (a) Characterization techniques confirmed the successful grafting of DFDB18C6 onto SBA-NH₂, resulting in a material with a high surface area and well-defined mesoporous structure. (b) The sorption process for both radionuclides followed pseudo-second-order kinetics and fit the Langmuir model, suggesting monolayer sorption. (c) Thermodynamically, r-Cs sorption was exothermic, while r-Sr sorption was endothermic. (d) The sorbent achieved ~85% r-Cs removal from Fukushima-originated environmental water (Suzuuchi Pond) over four cycles and 99.7% r-Sr removal from Chornobyl cooling pond water over five cycles. (e) The sorbent exhibited better Sr retention compared to Cs retention.

【Conclusion】 The synthesized crown ether-based sorbent, DFDB18C6@SBA-NH₂, shows promise for effectively removing r-Cs and r-Sr from contaminated water.

2. 論文

- Y. Sakai, R.K. Shil, M. Endo, M. Marumoto, K. Nakakubo, M.M.H. Rocky, K.H. Wong, A.S. Mashio, H. Hasegawa, Rapid arsenate removal using novel adsorbent: Iron–zirconium nanoneedle-modified cellulose nanofibers, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *Colloids Surf. A*, 686, 133290, 2024.04.
- Z.A. Begum, R.I. Ripon, S. Yoshioka, H. Hasegawa, I.M.M. Rahman, Dispersant-enhanced migration of radiocesium among soil size fractions: A novel strategy for volume reduction of radioactively contaminated soil, *Environmental Research*, 250, 118467, 2024.06.
- M.M.H. Rocky, I.M.M. Rahman, M. Endo, H. Hasegawa, Comprehensive insights into aqua regia-based hybrid methods for efficient recovery of precious metals from secondary raw materials, *Chem. Eng. J.*, 495, 153537, 2024.09.
- M.S. Alam, S. K.H. Wong, A. Ishikawa, M. Li, , Y. Zai, R.I. Papry, A.S. Mashio, I.M.M. Rahman, H. Hasegawa Exploring phosphate impact on arsenate uptake and distribution in freshwater phytoplankton: insights single-cell ICP-MS, *Chemosphere*, 364, 143129, 2024.09.
- T. Mizuishi, S. Rahman, K. Mitsuboshi, S. Ni, S. Yoshioka, M. Imaizumi, , H. Sawai, K.H. Wong, A.S. Mashio, H. Hasegawa, Remediation of fluoride-contaminated wastes: Chelator-assisted washing and subsequent immobilization using CaO and H₃PO₄, *Chemosphere*, 366, 143431, 2024.10.
- S. Ni, S. Rahman, S. Yoshioka, M. Imaizumi, K.H. Wong, A.S. Mashio, A. Ohta, H. Hasegawa, Enhancing lead extraction efficiency from contaminated soil: A synergistic approach combining biodegradable chelators and surfactants, *Chemosphere*, 366, 143528, 2024.10.
- P. Sarker, M. Marumoto, I.M.M. Rahman, K.H. Wong, A.S. Mashio, T. Nishimura, K. Maeda, H. Hasegawa, Selective extraction of lead from chelator-rich effluents using a biomass-based sorbent, *Chem. Eng. J.*, 500, 156831, 2024.11.
- M.M.H. Rocky, I.M.M. Rahman, T. Shunsuke, M. Marumoto, S. Rahman, M. Endo, K.H. Wong, A.S. Mashio, H. Hasegawa, Recovery of precious metals from aqua regia leachate of E-wastes using dithiocarbamate-modified cellulose and development of novel kinetic model, *Chem. Eng. J.*, 500, 157040, 2024.11.
- S. Yoshioka, A. Ohta, S. Rahman, M. Imaizumi, S. Ni, T. Mizuishi, H. Sawai, K.H. Wong, A.S. Mashio, H. Hasegawa, Enhanced fluoride extraction from contaminated soil combining chelator and surfactant: Insights into adsorptive controlment of soil surface charge, *J. Environ. Manage.*, 372, 123421, 2024.12.

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

研究代表者：有馬 ポシールアハンマド

受入研究者：ラハマン モハマド モフィズル イスマイル

共同研究者：Begum Zinnat Ara・Anju Anjuman Nesa

1. 成果

産業廃水や鉱山排水などに含まれる重金属（例： Pb^{2+} 、 Cs^+ 、 Cd^{2+} など）による水質汚染は、環境や健康に対する深刻な懸念を引き起こしている。現在、排水処理に使用されている吸着材には、吸着量が低い、高価である、分離が困難であるといった課題がある。そのため、低コストで吸着量が高く、分離や処分が容易な吸着材の開発が求められている。

近年、水処理に適した新しい吸着材として、バイナリースピネルフェライト（ AFe_2O_4 、 $\text{A} = \text{Cu}$ 、 Ni など）が注目されている。これらは、特異な超常磁性や高い比表面積を有し、汚染物質との相互作用に優れた活性部位を持つが、その相互作用の機構は未解明である。また、スピネルフェライトの一種であるバイナリースピネルフェライト（ $\text{A}_{0.5}\text{B}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{A} = \text{Cu}$ 、 Ni など、 $\text{B} = \text{A}$ と異なる金属）に関する研究報告も少ない。本研究では、バイナリースピネルフェライトを合成し、その機構を解明することで、高効率な吸着材の開発を目指す。

これまでの研究では、燃焼法を用いて $\text{A}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ （ $\text{A} = \text{Mn}$ 、 Cu ）型バイナリースピネルフェライトを合成した。合成した材料を電子顕微鏡（SEM）、エネルギー分散型 X 線分析（EDX）、および X 線回折法（XRD）を用いて分析した。合成した試料を用いて、受入研究者の研究室において重金属イオンの吸着・分離評価を行った。特定の汚染物（金属イオン）を含む水に試料を分散・攪拌後、磁石を用いて吸着材を分離した。試料導入前後の汚染水中の金属イオン濃度を ICP-MS 装置で分析した結果、 $\text{Mn}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 試料は Ga 、 Ni 、 Be イオンを効率的に吸着できることが分かった。一方、 $\text{Cu}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 試料は Ga 、 Ag イオンを効率的に吸着することが明らかになった。

これらの結果から、バイナリースピネルフェライトの構成金属を変更することで、吸着可能な重金属イオンが変化することが示唆される。バイナリースピネルフェライトの構成金属を制御することで、汚染水中の特定の重金属イオンを選択的に吸着・分離できる可能性がある。今後は、試料合成の最適化を進めるとともに、試料による金属イオン（ Ga 、 Zn 、 Ni 、 Be 、 Ag など）の吸着特性について、温度や濃度などの影響を詳細に検討する。

2. 論文

なし

福島県松川浦周辺水域におけるニホンウナギの放射能セシウム濃度と その移動生態の関係解明

研究代表者：高木 淳一

受入研究者：和田 敏裕

共同研究者：三田村 啓理

1. 成果

福島県は原発事故に伴う淡水魚の放射性セシウム汚染に起因する内水面漁業活動の休止という問題を抱えている。原発事故から 10 年以上が経過しているが、淡水魚は海水魚に比べて今なお高い濃度で放射性セシウムが検出される。数年以内に活動再開を目指す福島県の複数の水域における内水面漁業にとって、この問題は大きな障害となっている。そこで本研究では、淡水域における食物網の上位魚種の一つであるニホンウナギの行動特性と放射性セシウム濃度の関係について松川浦周辺水域を舞台に探り、福島県の内水面漁業の復興に資することを目的とした。

調査地は、福島県唯一の汽水性の内湾である松川浦と、そこに流入する日下石川とした。ニホンウナギの移動を調べるために、超小型の電子標識である PIT タグを使用した。日下石川においてニホンウナギ 540 個体を、電気ショッカーを用いて新たに捕獲・タグ付けし、昨年度までと合わせて 1190 個体（全長 95–709 mm、体重 1–679 g）を追跡するベースを整えた。同河川の感潮区間より上流の淡水域に、河川敷設型の PIT タグ受信機を設置し、長期間を見据えた移動モニタリングシステムを構築し、運用を開始した。また、松川浦内及び河川内で採取した本種の放射性セシウム濃度を測定した結果、松川浦(1.1 ± 0.15 Bq/kg, $N = 5$)に比べて日下石川(5.2 ± 1.1 Bq/kg, $N = 15$)で有意に高かった（Wilcoxon の順位和検定、 $W=75$ 、 $p<0.01$ ）。サンプルは、日下石川にて追加で 18 個体を捕獲しており、分析中である。河川のニホンウナギの方が放射性セシウム濃度が高い理由は、海域に比べてセシウム濃度が高い陸域の餌を多く食べていること、海域では淡水域に比べてセシウムの排出が進む生理的メカニズムがあることが考えられる。

2. 論文

なし

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 H₂O 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、最新の状況把握のため、原発近傍の松葉試料を採取した。

本研究により樹木年輪中の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

原発事故周辺地域・高放射線環境下に生息するアカネズミ放射線損傷修復遺伝子への影響解析

研究代表者：大沼 学

受入研究者：石庭 寛子

共同研究者：遠藤 大二

1. 成果

目的:

高放射線環境下に生息するアカネズミゲノムへの放射線影響の解析

背景:

原発事故周辺地域のアカネズミゲノムへの影響を直接解析するためには、多大なコストがかかる。もし、高放射線環境下で放射線がゲノムの本体である DNA の二重鎖切断を増加させた場合には、その影響が放射線、特に二重鎖切断の損傷修復遺伝子に見られる可能性が高い。そこで、本研究グループでは、代表的二重鎖切断の損傷修復遺伝子である ATM の遺伝子変異をエクソンの増幅産物の次世代シーケンスにより解析することを試みた。2024 年度には青森、富山と比べて ATM の遺伝子変異の頻度が異なる傾向が認められた。この解析を継続的に進めるため、ナノポアシーケンス技術を応用することとした。具体的なシーケンス方法としては、ゲノムの直接シーケンスと、今後期待されるロング PCR 産物のシーケンスを試行した。

方法:

ナノポアシーケンスの対象: 1) ゲノムを直接にシーケンスする(参考)。2) 複数のエクソンとイントロンを含む領域のロング PCR 産物、の二種を実施。費用としては、1) 個体ごとに MinION フローセル: FLO-MIN114、¥151,800 が必要。2) 複数個体で Flongle フローセル: FLO-FLG114、¥12,600 が必要。PCR プライマーデザイン: 複数のエクソンを含む領域を PCR で増幅することにより、効率的にエクソンの増幅を検討した。電気泳動とシーケンス: PCR 産物についてラダー状になっているものも含めて、低分子産物除去を行わずにナノポアシーケンサーに掛けた。マッピングおよび変異遺伝子の検出: アカネズミゲノムからの対象領域の切り出し、全ゲノム対象と切り出し領域対象へのマッピング後、sam, bam および vcf データを作成して変異塩基を検出した。

結果:

ゲノムの直接シーケンス結果: 1) fastq.gz file: 8.4 GB、2) sam file: 19.4 GB、3) Coverage 4.36、4) vcf file: 3×10^7 件の mutation が記録された。PCR 産物のシーケンス結果: 1) シーケンス長については、1200 塩基以上のシーケンスが 1/10(7-8%)程度含まれていた。マッピング: ATM および GLUT については、それぞれ 7~33 および 196~498 本のシーケンスが遺伝子にマッピングされた。マップされたシーケンスの位置は PCR 対象とほぼ一致した。変異の検出: ATM および GLUT については、それぞれ 600~1135 および 76~170 個の塩基変異が検出された。

考察と展望:

ナノポアシーケンス対象: ゲノムの直接シーケンスでは 16GB のシーケンスが得られ、マッピングデータも 19.4GB 得られた。ゲノムシーケンスによる変異検出は十分に実用的であることが示された。今後はコストの安いショートリードも検討すべきであることが示唆された。PCR 産物を用いた変異検出: ロング PCR 産物のシーケンスの 80-90%はアカネズミゲノムにマッピングされた。

PCR 産物が局在しているはずの 3 種の遺伝子領域には 7-8%がマッピングされた。ロング PCR の条件の検討と低分子産物の除去を試みることにより、今後の解析手法の第一候補となることが示唆された。

2. 論文

なし

福島県の放射能汚染地におけるアズマモグラの汚染状況、 特に 90Sr 汚染について

研究代表者：横畑 泰志

受入研究者：高貝 慶隆・石庭 寛子

共同研究者：青木 譲・福田 朋寛・山澤 泰

1. 成果

2024 年度の分析に用いた材料は、福島県東部の双葉郡浪江町で 2015～2021 年の 8～10 月に捕えた 19 頭、および 2015 年 9 月に同県東部の南相馬市で捕えた 4 頭のアズマモグラ *Mogera imaizumii* である。捕獲は住民の避難により放置状態の水田畔などで行った。現地では除草が行われないことから植物遺体が地面に厚く積み重なっており、トンネルの探索が難しく、滞在時間も限られていることから、迅速に仕掛けることのできる金属製の捕殺用わな (Duffus trap) を用いた。捕獲はほぼ毎年行ったが、2019 年には台風の接近などのため捕獲には至らなかった。比較のため、2017 年 6 月および 2020 年 3 月、8 月に捕獲した富山県富山市産の 3 頭も用いた。これらの頭骨標本を作成し、下顎骨中の安定 Sr および放射性ストロンチウム (90Sr) 濃度を福島大学環境放射能研究所の表面電離型質量分析計で測定し、90Sr/安定 Sr 濃度比 (以下、Sr 濃度比) を算出した。また、上顎臼歯列の摩耗状況で齢を推定した。

Sr 濃度比は、富山県産の個体 (0.77 ± 0.64) よりも福島県東部産の個体がより高く、福島県東部では概ね浪江町 > 南相馬市南部 (5.18、25.17) > 同市北部 (0.94、2.38) となったが、南相馬南部でも非常に高い値 (25.17) を示す個体が見られた。浪江町産の個体では、齢による差異は見られず (0 歳 : 5.18、25.17 ; 1 歳以上 : 7.43 ± 5.94)、2021 年の捕獲個体 (16.40 ± 6.20) はそれ以前 (5.16 ± 1.72) よりも高値を示した。2018 年までに捕獲した個体 10 頭のデータにおいて、Sr 濃度比とこれまでに測定してきた筋肉中放射性セシウム ($^{134} + ^{137}\text{Cs}$) 濃度の間には相関関係は見られなかった (Spearman の順位相関係数 = 0.168)。しかし、南相馬市で顕著な Sr 濃度比を示した個体は筋肉中放射性セシウム濃度 (以下、筋中 Cs 濃度) も高く、浪江町で顕著な筋中 Cs 濃度を示した個体は Sr 濃度比も高かった。浪江町産の個体の Sr 濃度比の頻度分布は、単峰型で右方に向かって裾野が伸びるポアソン型の分布様式を示したが、平均値が 16.40、分散が 38.44 となり、平均 < 分散の過大分散を示した。

今回は富山県産の個体からも微量ではあるが 90Sr が検出され、過去の全地球的な汚染によるものか、ごくわずかに進入していた福島由来の 90Sr が地中の食物連鎖の最上位に位置するモグラにおいて生物濃縮により検出可能に至ったのか、今後より広範囲な調査により検討する必要があるであろう。福島県東部の値は概ね浪江町 > 南相馬市南部 > 同市北部となり、同市南部でも少数ではあるが非常に高い値を示す個体が見られた。これらの知見は筋中 Cs 濃度の場合と共通していた。特に非常に高い Sr 濃度比を示す個体が見られ、この値の頻度分布にも影響しており、筋中 Cs 濃度とも共通性が見られたことは、個体ごとの行動圏の環境による高リスク個体の存在を示唆している可能性が高い。また、放射性セシウムと異なり、90Sr は動物体か

らは容易に排出されず体内に蓄積することから、高齢の個体において高い値が示されると予想されたが、今回検討の対象とした浪江町産の個体では、齢による差異は見られなかった。骨組織と異なり基本的に新陳代謝の起きない歯牙の Sr 濃度比を計測すると、異なる結果が得られる可能性がある。今後は歯牙を含めて例数を追加し、多変量解析により詳細な分析を行いたい。

2. 論文

該当なし

環境中のラドン散逸率の簡易測定法について

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

日本におけるラドン散逸率は、Zhuo ら(2005)が $6.9 \sim 38 \text{ mBq m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 、Hirao ら(2010)が $8 \sim 33 \text{ mBq m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 、細田ら(2004)が $1.5 \sim 34 \text{ mBq m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ と報告している。しかし、土壌からの散逸率を測定する際、その地域を代表するラドン散逸率を測定する場所の選定が困難である。そこで、本研究ではラドン簡易測定器「ピコラド」を用いて、安価におおよそのラドン散逸率を推定する方法を検討した。

土壌量を変えて 3 レベルのラドン散逸率を持つ試料を作成した。ラドン散逸率の測定には RAD7 を使用し、空気を循環させながら実験を行った。循環経路内には乾燥剤を設置した。ラドンの蓄積開始から 30 分ごとに測定を行い、4 時間経過するまで記録した。さらに、Hosoda ら(2022)が公表している方法を用いてラドン散逸率を算出した。測定を継続し、ラドンの蓄積開始から 18~24 時間後のラドン濃度の平均値を「24h 蓄積ラドン濃度」と定義した。この間の湿度は 65%であった。一方、3 レベルの土壌試料をピコラドに 24 時間曝露させ、液体シンチレーター（インスタフロープラス）を投入した後、1.5 日後に液体シンチレーションカウンターでラドン濃度（ピコラドラドン濃度）を測定した。湿度は 84%でした。

「24h 蓄積ラドン濃度」は「ピコラドラドン濃度」の 1.24 倍の値を示した。この差異は、湿度が 80%を超えるとピコラドの測定値が低下するためであり、湿度補正を行った（補正後ピコラドラドン濃度）。以下に 3 レベルでの平均値と標準偏差をラドン散逸率、24h 蓄積ラドン濃度、ピコラドラドン濃度の順に示す：

- ・ レベル①: $16.5 \pm 0.7 \text{ mBq m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$, $13592 \pm 188 \text{ Bq m}^{-3}$, $13690 \pm 209 \text{ Bq m}^{-3}$
- ・ レベル②: $7.1 \pm 0.3 \text{ mBq m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$, $5833 \pm 138 \text{ Bq m}^{-3}$, $5519 \pm 308 \text{ Bq m}^{-3}$
- ・ レベル③: $4.9 \pm 0.2 \text{ mBq m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$, $3749 \pm 191 \text{ Bq m}^{-3}$, $3763 \pm 192 \text{ Bq m}^{-3}$

「24h 蓄積ラドン濃度」とラドン散逸率との相関は非常に強く、決定係数は 1.00 であった。これにより、24 時間蓄積濃度を用いてラドン散逸率を予測できることが示された。また、補正後のピコラドラドン濃度も「24h 蓄積ラドン濃度」の標準偏差 2 倍以内に収まり、ピコラドを使用した 24 時間測定で信頼性の高い蓄積ラドン濃度を推定可能であることが分かった。

ピコラドを用いて土壌を 24 時間曝露し、得られたラドン濃度を 1.24 倍することで湿度補正を行い、「24h 蓄積ラドン濃度」を推定できることが確認された。また、この濃度を用いてラドン散逸率を推定する可能性が示唆された。

参考文献 Hirao, S. et al., Jap. J. Health Phys. 45, 161-171, 2010. Hosoda, M. et al., Radiat. Prot. Dosim. 198, 904-908, 2022. 細田正洋 他, 保健物理 39, 206-214, 2004. Zhuo, W. et al., Int. Congr. Ser. 1276, 285-286, 2005.

2. 論文

Yasuoka, Y., Takemoto, J., Omori, Y., Kawamoto, N., Goda, N., Nagahama, H., Muto, J., Tokonami, S., Hosoda, M., ; Iimoto, T. & Mukai, T. (2024). Practical cut-off value for radon concentration in indoor air using an activated-charcoal radon collector. *Radiation Protection Dosimetry*, 200(16-18), 1701-1705.

Validation of stochastic method on track density analysis for passive radon measurement

研究代表者：Hu Jun

受入研究者：床次 眞司・克蘭ロッド チュティマ

1. 成果

Passive radon monitors with CR-39s are commonly used in major epidemiological surveys. However, the conventional CR-39 track density determination method makes it difficult to estimate the concentration accurately due to the heterogeneity of tracks on CR-39s and the small track reading area. Track heterogeneity in CR-39 detectors arises from exposure-related and detector-related factors. To improve the accuracy of track density determination in passive radon monitors, this study implemented a new stochastic approach utilizing Latin Hypercube Sampling (LHS) to compare the performance to the conventional method. Consequently, the root mean square deviation of 0.37 of mean track density using the stochastic method is lower than the conventional method of 0.39. The coefficient of determination of the stochastic method is significantly higher than that of the conventional method in the linear correlation of estimated track density and accumulated exposure. The stochastic method utilizing LHS for track density determination decreased the total counting area of CR-39 and performed congruently and effectively as the large counting area using the conventional strategy. These findings suggest the stochastic approach is a promising method for improving track density determination in passive radon measurements with CR-39 detectors.

2. 論文

J. Hu; C. Kranrod; Y. Omori; M. Hosoda; S. Tokonami. Radiation dose estimation for indoor radon, thoron, and their progenies using a stochastic method—A small-scale survey in Wuhan, China. *Radiation Protection Dosimetry*. 200, 1720–1725, 2024. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncae012>

低線量・低線量率慢性被ばくしたクマネズミおよびアカネズミの精子形成能評価における放射線高感受性バイオマーカーの検索

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

本研究では、インド南部ケララ州の海岸地域における高自然放射線環境下でのクマネズミ (*Rattus rattus*) の精子形成能および遺伝子発現への影響を評価することを目的とした。ケララ州チャバラ地区において空間線量率の測定を実施し、高自然放射線地域を特定したうえで、同地域に生息するクマネズミを捕獲した。これまでの ERAN 研究の福島原発事故後のアカネズミを対象とした精子形成能の評価により、精巣特異的な放射線高感受性バイオマーカーとして Lsp1 (Lymphocyte-specific protein 1) および Ptprk (Protein tyrosine phosphatase receptor type K) を同定した。本研究では、これらの遺伝子の発現解析を通じて、低線量・低線量率慢性被ばくの影響を評価した。

調査は、ケララ州チャバラ地区および対照区 (コーチン科学技術大学: CUSAT) において実施された。測定項目としては、空間線量率の測定、シャーマントラップを用いたクマネズミの捕獲、精巣組織のサンプリング、組織学的解析および Lsp1 および Ptprk の相対発現量の定量解析を行った。

精子形成能の評価において、精細管 1 本あたりの平均精細胞数を測定した結果、高自然放射線地域と対照地域において有意な差は認められなかった。さらに、Lsp1 および Ptprk の遺伝子発現解析を行ったところ、いずれの遺伝子についても対照区と比較して統計学的に有意な変動は確認されなかった。

本研究の結果から、高自然放射線環境下においてもクマネズミの精子形成能および Lsp1/Ptprk 遺伝子発現に顕著な影響は認められなかった。これらの知見は、低線量・低線量率慢性被ばくが野生動物の生殖機能に及ぼす影響を評価するうえで基礎的なデータを提供するものであり、今後さらなる包括的な解析が求められる。

2. 論文

Tokita, S., Nakayama, R., Fujishima, Y., Goh, V. S. T., Anderson, D., Uemura, I., Ikema, H., Shibata, J., Kinoshita, Y., Shimizu, Y., Shinoda, H., Goto, J., Palmerini, M. G., Hatha, A. M., Satoh, T., Nakata, A., Fukumoto, M., Miura, T., & Yamashiro, H. (2025). Potential radiosensitive germline biomarkers in the testes of wild mice after the Fukushima accident. *FEBS open bio*, 15(2), 296–310. <https://doi.org/10.1002/2211-5463.13927>

野生キノコの放射性セシウム濃度の測定

研究代表者：木野 康志

受入研究者：三浦 富智

共同研究者：山下 琢磨

1. 成果

原発事故から 14 年以上経過し、多くの混乱は収束してきたが、自生キノコの汚染は続いている。宮城県内でも、栗原市、大崎市、登米市、気仙沼市、南三陸町、仙台市、村田町で自生キノコの出荷制限が 2024 年 12 月 25 日現在も続いている[1]。我々は、仙台キノコ同好会と共同で、宮城県内の野生キノコを 2011 年から継続的に採取し、汚染の動向を調査している。同一日に同一場所で採取された同じ種のキノコを 1 検体とすると、これまでに 4,697 検体、近縁種などを含めないとすると、619 種の野生キノコを採取した。

14 年間の推移や地区毎の汚染の傾向について、仙台市教育委員会主催のキノコ展のなかのデータを掲示するとともに、講演会で市民に実情を伝えている。野生キノコの放射性セシウム濃度はバラツキが大きく、一本一本を見ると偶々高い数値を示す個体もある。多くの検体を測定したデータから実際の汚染の影響をわかりやすく伝える活動をしている。

2011 年度から 2024 年度まで平均すると、年間 300 検体に対して、200 種の野生キノコが採取されている。毎年、およそ 10 種の新しい種の野生キノコが採取され、毎年同じ場所で採取される野生キノコもあれば、何年か毎にしか採取されない野生キノコもある。このため、種毎に分けると年次変化を追うには統計が足りない。そこで、地域毎に放射性セシウム濃度の頻度分布の年次変化を議論する。地域は、文部科学省の 2011 年 7 月 2 日航空機サーベイにより測定された線量マップ[2]中の汚染レベルの区分にしたがって、3 つのグループ、「仙台近郊里山」、「宮城県北部・中部山地」、「県南部山地」に分けた。「仙台近郊里山」は、空間線量率が 2011 年 7 月 2 日現在で $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 以下で、宮城県内で比較的放射性セシウムの沈着が少なかった地域である。「宮城県北部・中部山地」は、 $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 以上 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以下で放射性プルームが山間部に達した時降雨により放射性セシウムが沈着したと考えられる地域である。「県南部山地」は、 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以上の宮城県内で比較的沈着量が多かった地域である。採取したキノコは、表面の土や落ち葉等をティシュペーパー等で拭き取り、放射能を測る効率を高くするため 1 週間以上 50°C のオーブンで乾燥させた後に破碎し、100 mL の円筒形のプラスチック容器に均一に詰めた。キノコは乾燥により、体積が 10 分の 1 以下になった。乾燥すれば、放射能測定後に常温で保存できる。将来、放射能以外の測定の可能性も考えて、または事故の記録として、全ての検体を保存している。キノコ同士の放射能が混じらない様、それぞれの処理はキノコ毎に別々に行った。試料に含まれる放射能の測定は、低汚染の試料の放射能も精度よく測定できる高純度ゲルマニウム半導体検出器(HPGE)を用いた。HPGE の周囲は、天然の放射線を遮蔽するため厚い鉛(厚さ 10-15 cm)、銅(同 1 cm)、鉄(同 5 cm)、アクリル(同 1 cm)の板(放射線により生じる遮蔽体からの特性 X 線を効率よく遮蔽するため内側を低原子番号にす

る)で囲った。これにより、天然の放射線によるバックグラウンドの強度が2桁減少したが、遮蔽体の重量は1t近くになる。Cs-134は事故から6半減期半経ち、2011年当時と比べ100分の1の値になっているが、統計誤差が5%以下になるまで測定した。

2011年から2023年までに採取されたキノコの放射能の値の範囲を、採取区分地毎にまとめて、年毎の推移をみると、中央値は仙台近郊以外の場所では依然として一般食品の基準値の100Bq/kgを超えていた。また、中央値の変動は、物理学的半減期による減衰をのぞくと、個々の野生キノコの変動を考慮すると、ほぼ一定の値となった。

2. 論文

イメージングプレートを用いた歯中放射能濃度の再構成シミュレーション

Proceedings of the 25th Workshop on Environmental Radioactivity (第25回「環境放射能」研究会), 2024-6, 96-101 (2024).

尾田晃平、山下琢磨、木野康志、関根勉、高橋温、篠田壽

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検討

Proceedings of the 25th Workshop on Environmental Radioactivity (第25回「環境放射能」研究会), 2024-6, 91-95 (2024).

岩見聡音、山下琢磨、光安優典、小野健太、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、礒部理央、鈴木正敏、福本学、篠田壽

ガンマ線照射した歯エナメル質の電子スピン共鳴スペクトルの多成分解析法の改良

Proceedings of the 25th Workshop on Environmental Radioactivity (第25回「環境放射能」研究会), 2024-6, 85-90 (2024).

山下琢磨、岩見聡音、光安優典、小野健太、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、礒部理央、鈴木正敏、福本学、篠田壽

福島第一原子力発電所事故で被災したニホンザルの筋肉中の放射性セシウム濃度の測定

Proceedings of the 25th Workshop on Environmental Radioactivity (第25回「環境放射能」研究会), 2024-6, 73-78 (2024).

小菅楽、山下琢磨、岩見聡音、尾田晃平、木野康志、石川諒椰、礒部理央、佐藤拓、鈴木正敏、千田浩一、福本学

野生動物への低線量放射線影響評価のためのバイスタンダー効果の検討

研究代表者：有吉 健太郎

受入研究者：三浦 富智・藤嶋 洋平・アンダーソン ドノヴァン

1. 成果

【目的】 放射線を被ばくした細胞からのシグナルによって、非被ばく細胞に放射線被ばくを受けたかのような反応を示す現象をバイスタンダー効果という。この現象は、被ばく/非被ばく細胞が混在する低線量被ばくにおいて、その影響を増大させる可能性を孕む。実験的には、照射された細胞の培養培地を非照射細胞に加える方法が多用されており、現在までにヒトがん細胞株や正常ヒト細胞株を用いた報告が多くを占める。一方で、ヒト以外、特に野生動物でバイスタンダー効果が確認された事例は少なく（ヨーロッパアカザエビ、ニジマス、ミジンコ、アカネズミ等）であり、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。我々はこれまで、アカネズミ細胞やアライグマ細胞、ニホンザル細胞においてバイスタンダー効果が生じることを確認するとともに、被ばくイトマキヒトデ卵細胞の飼育培地が、非被ばくのイトマキヒトデの卵細胞にアポトーシス様の細胞死を引き起こす結果を得ている。この結果は、イトマキヒトデのような非常に原始的な生物（棘皮動物）からバイスタンダー効果が保存されていることを示している。本研究では、プラナリア（ナミウズムシ）個体に放射線を照射し、非照射の個体としばらく共飼育したのち、非被ばくの個体細胞に DNA 損傷や細胞死が誘導されるかを調べることで、非常に原始的な種から進化上保存されたバイスタンダーシグナルの存在を検討した。

【研究結果】野生環境にて捕獲したナミウズムシ(*Dugesia japonica*)に 0Gy (sham-irradiated)、4Gy (1Gy/min) X 線を照射したのち、非照射のナミウズムシ（バイスタンダー個体）を共飼育し 48、72 時間後に、個体を破碎しトリプシン処理によりシングルセルとした。その後 4Gy 被ばく個体、およびバイスタンダー個体由来の細胞において、（１）DNA 二重鎖切断のマーカーである γ H2AX の免疫蛍光染色、（２）アポトーシス細胞を確認するための TUNEL 染色、（３）プラナリア細胞用の培養培地にて 24 時間培養を行い、染色体サンプルの作成、（４）DNA 損傷の程度を電気泳動装置を使って可視化するコメットアッセイを行った。その結果、（１）実施の際、複数社の抗体を検討して免疫染色を行ったが、染色像は得られなかった。また（２）実施の際、条件をいくつか変えてアポトーシス細胞の染色を試みたが、染色像は得られなかった。また（３）において、シングルセルにしたナミウズムシ細胞を培養し、その後の細胞分裂像は得られなかった。しかし、（４）のコメットアッセイは 4Gy 被ばく個体（被ばく後 48 時間後）において、損傷した DNA の存在を示すコメットテールの存在を確認することができたため、このコメットアッセイを用いて DNA 損傷の定量化が可能であると思われる。今後、4Gy 被ばく個体、および被ばく個体と 48、72 時間共飼育したバイスタンダー個体由来の細胞を、コメットアッセイを用いて DNA 損傷の定量化を行う予定である。

2. 論文

Haruki Chiba, Hinata Horikawa, Valerie Swee Ting Goh, Tomisato Miura, Kentaro Ariyoshi,
Radiation-induced Bystander Effect in Starfish (*Patiria pectinifera*) Oocytes, Radiation
Research, 203, 53-59 (2024)

遺伝子プロモーター領域における放射線影響評価系の開発

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、放射線に感受性の高い子供や次世代への低線量慢性被ばくの影響に関しては依然として社会的な関心が高い。配偶子形成および胚発生過程における高線量放射線による生物影響については明らかになっているが、低線量慢性被ばくあるいは放射線による損傷を逃れた生殖細胞の配偶子形成や受精・発生能に関する分子メカニズムは不明である。

近年、放射線は、DNA 損傷だけでなく、エピジェネティックな変化を誘導することが報告されている。これまでの研究成果から、放射線汚染地域に生息するノネズミの精巣では遺伝子発現に変化が認められ、一方、低線量率連続照射（LD）したマウス精巣においてグローバルな DNA メチル化パターンが変化していることを明らかにしている。これらのことから、放射線が生殖細胞に影響を与える可能性があることを示唆している。エピジェネティックな変化の一つである DNA メチル化は、生殖細胞形成、受精、発生、分化過程に関与するため、継世代影響にも重要である。

本研究は、マウスを用いて放射線被ばくにおける精巣のエピジェネティクスな変化を捉えるための適切な評価法を検討することを目的としている。2023 年度の ERAN 共同研究の成果より、LD によって、マウス精巣において Dnmt1 の遺伝子発現が低下することが明らかになった。そのため、本年度は、Dnmt1 のプロモーター領域のメチル化を評価するために、メチル化感受性制限酵素（MSRE）を利用した MSRE-qPCR が適用可能性について検討した。

精巣における Dnmt1 の遺伝子発現を測定したところ、昨年同様にコントロール群に対して LD 群で有意に Dnmt1 の遺伝子発現が減少していることが確認できた。そのため、Dnmt1 のプロモーター領域内の 2 箇所におけるメチル化を MSRE-qPCR で評価したところ、-560 領域、-473 領域ともにコントロール群と LD 群の間に有意差を示さなかった。しかし、-437 領域と比較して-560 領域のメチル化率は有意に高いことが明らかとなった。

以上のことから、本研究で設計した MSRE-qPCR のプライマーセットは遺伝子発現との関連性が低いため、今後は LD の影響を特異的に受けるプロモーター領域を特定する予定である。これにより、放射線被ばくの生殖細胞へのエピジェネティックな影響メカニズムについて、より詳細な知見が得られることが期待される。

2. 論文

1. Miura, T., Imada, S., Ohtsuka, Y., Nakahira, R., Ishiniwa, H., Yamashiro, H., Nakata, A., Anderson, D., Fujishima, Y., (2024) Biological samples of wild animal (large Japanese field mouse: *Apodemus supecciosus*) in Rokkasho, Aomori, Japan, Center for Research

in Radiation, Isotopes, and Earth System Sciences (CRiES), University of Tsukuba, DOI: 10.34355/sample-IREM.Hirosaki.U.00137

2. Tokita S, Nakayama R, Fujishima Y, Goh V S T, Anderson D, Uemura I, Ikema H, Shibata J, Kinoshita Y, Shimizu Y, Shinoda H, Goto J, Palmerini M G, Hatha A M, Satoh T, Nakata A, Fukumoto M, Miura T, Yamashiro H (2024). Potential radiosensitive germline biomarkers in the testes of wild mice after the Fukushima accident, FEBS Open Bio, pp.
3. Uemura I, Takahashi-Suzuki N, Kuroda S, Kumagai K, Tsutsumi Y, Anderson D, Satoh T, Yamashiro H, Miura T, Yamauchi K, Nakata A (2024). Effects of low-dose rate radiation on immune and epigenetic regulation of the mouse testes, Radiat Prot Dosimetry 200(16-18), pp. 1620-1624.
4. Gatti M, Belli M, De Rubeis M, Tokita S, Ikema H, Yamashiro H, Fujishima Y, Anderson D, Goh V S T, Shinoda H, Nakata A, Fukumoto M, Miura T, Nottola S A, Macchiarelli G, Palmerini M G (2024). Ultrastructural Analysis of Large Japanese Field Mouse (*Apodemus speciosus*) Testes Exposed to Low-Dose-Rate (LDR) Radiation after the Fukushima Nuclear Power Plant Accident, Biology (Basel) 13(4)

環境放射線に関するリテラシーの醸成に資する教育戦略

研究代表者：飯本 武志

受入研究者：赤田 尚史

共同研究者：小池 弘美

1. 成果

エネルギーのみならず医療、工業、農業など、幅広い分野で原子力科学技術は国や地域を問わず重要な役割を果たしており、この状況は当面続くでしょう。一方、ニーズが存在しながらも、世界的に、特にアジア太平洋地域の諸国では関連する人材が現に不足し、かつ優秀な専門家を育てる仕組みを持たない国が少なくなく、各国関係者から将来を懸念する声が上がっています。このような国際状況に鑑み、国際原子力機関（IAEA）は2012年、多くの生徒に原子力科学技術（NST）の情報と知識を届けることを目的とした、新たな地域技術協力プログラム（TCP）を開始しました。第2期（2018年からの4年間）では「STEAM」や「WOW ファクター」をキーワードにして、「中等学校生徒 100 万人に原子力科学技術教育を」とのスローガンを掲げ、2019 年以降のコロナ禍ではほとんどの国の教育システムが大混乱に陥った背景があったにもかかわらず、結果として 200 万人を超える教育実績を残すことができました。この成功体験が、ここでご紹介する INSTA や INSO の企画立案につながっています。

この TCP の枠組みで教育を受けた高校生の中に NST を専門とする高等教育を自国で受けたというメンバーが現れたにもかかわらず、アジア太平洋地域の多くの大学や大学院にはそのような枠組みがない、あるいはあっても脆弱でした。そこでいかなる学部学科、研究科専攻でも NST を講義で扱うことのできるようその可能性を模索しつつ、各国の高等教育関係者（主に大学の若手・中堅の教員、教育省職員 等）を集中育成するための仕組みを整備しつつあります。これが INSTA です。現在その一期生約 60 名が活動中で、早ければ 2024 年度中に 15 名程度の地域の強いステークホルダーたちが規定の課程を修了する見込みです。また、上記 TCP の枠組みで教育を受けた高校生の中には独学で学習や研究を深め、さらなる高みを目指すメンバーが現れはじめてきました。このような生徒を国際的な視点で関係者が支援し、さらなる動機づけをし、活躍の場を設けることも必要ではないか、との意見があり、それに多くの TCP 参加国代表者が各国教育省の理解と支援を受けて賛同したことを受け、約 3 年間の準備期間を経て 2024 年 8 月に第 1 回 INSO 大会がフィリピン・クラークで開催され、14 カ国 55 名の高校生がメダルを争いました。

当研究チームはこれら一連の国際活動に専門家として深く関与し、ERAN 等の仕組みも活用させていただきつつ、環境の放射線や放射能に関するリテラシーの醸成に関する活動を展開しています。まずこれらの近況を関係者で共有することが重要で、国内関係者と広い意味での NST 領域の高度人材育成について議論を深める挑戦を継続したいと考えています。

2. 論文

8 にて入力済です。

蔵王の樹氷に含まれているベリリウム－7および鉛－210の動態解析

研究代表者：柳澤 文孝

受入研究者：赤田 尚史

共同研究者：岩田 尚能・高橋 祥基

1. 成果

1. はじめに

冬季の蔵王山の標高 1550m 以上にはアオモリトドマツの上で過冷却水滴と雪が一体化して氷の塊となった樹氷（アイスモンスター）が存在しており、 ^7Be や ^{210}Pb が含まれている。 ^7Be は大気上層（成層圏）に存在する酸素（O）および窒素（N）が宇宙線による核破砕反応によって生成される放射性核種である。 ^7Be は圏界面ギャップから対流圏に降下し、大気の流れに乗って蔵王に飛来したと考えられることから、空気塊がシベリア方面から飛来した指標となる。一方、 ^{210}Pb は、地殻中の ^{238}U が壊変して ^{222}Rn となり、 ^{222}Rn が壊変して ^{210}Pb となったものである。寒冷前線による上昇気流によって、中国北部やモンゴル南部の乾燥地帯（ゴビ沙漠・黄土高原）で砂嵐が生じて黄砂となる。大気中に拡散した ^{210}Pb は黄砂に付着し大気中を移動することから、空気塊がゴビ沙漠・黄土高原等から飛来した指標となる。 ^7Be と ^{210}Pb から蔵王に飛来する空気塊の動態を検討した。

2. 研究手法

2017－2022 年の山形県蔵王山にある蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅前（標高 1661m）の立入禁止用ロープに付着した着氷を採取し、 ^{210}Pb と ^7Be の測定を行った。後方流跡線解析・人工衛星 MODIS 画像を用い蔵王に飛来した空気塊の移動過程・移動条件を検討した。

3. 結果と考察

蔵王に飛来した空気塊は①～⑤に分類された。

- ① ^{210}Pb , ^7Be ともに高濃度：バイカル湖付近にある高気圧の北側から高度を落としながら時計回りの円弧を描く流跡線と、低気圧により黄砂が発生しているゴビ沙漠・黄土高原からの流跡線が蔵王で合流している。
- ② ^{210}Pb , ^7Be ともに中濃度：バイカル湖付近にある高気圧の南側から高度を落としながら反時計回りの円弧を描く流跡線が、黄砂が発生しているゴビ沙漠・黄土高原を経由して蔵王に飛来している。

- ③ ^{210}Pb が高濃度, ^7Be が低濃度：黄砂が発生しているゴビ沙漠・黄土高原から蔵王まで流跡線がのびている。
- ④ ^{210}Pb が低濃度, ^7Be が高濃度：バイカル湖付近にある高気圧の北側から高度を落としてながら時計回りの円弧を描く流跡線が蔵王までのびている。
- ⑤ ^{210}Pb , ^7Be ともに低濃度：バイカル湖や乾燥域からの流跡線がない。バイカル湖や乾燥域からの流跡線があっても、バイカル湖付近に低気圧があったり、乾燥域で黄砂が発生していない。

2. 論文

西日本における降水中トリチウム及び水素安定同位体比に関する研究

研究代表者：栗田 直幸

受入研究者：赤田 尚史

共同研究者：北山 結彩・KHEAMSIRI Khemruthai・桑田 遥

1. 成果

日本で観測された降水に含まれるトリチウムは、高緯度地域ほど高い傾向を示す「緯度効果」が認められていることが知られている。これまでに国内各地で月間降水を採取し、トリチウム濃度と化学組成および安定同位体組成を報告してきた。本研究では、データの少ない西日本に着目し、長崎市と鹿児島市において月間降水を採取し、トリチウム濃度その他、主要イオン組成、水素・酸素同位体組成を明らかにすることを目的とした。

月間降水試料は、降水採取装置(RS-1D, Palmex)を用いて採取した。採取した試料は、弘前大学の実験室において、重量を測定し、開口部面積より降水量 (mm/month) を求めた。その後、資料の一部を蒸留し、固体高分子膜電解濃縮装置を用いて濃縮後、再蒸留した。再蒸留試料の50mL を同量の液体シンチレータ (UltimaGold) とポリエチレンバイアル内で混合したのち、低バックグラウンド液体シンチレーション計数装置 (LSC-LB5, Aloka) により 1,000 分測定を行った。残りの試料水の一部をシリンジフィルターを用いてろ過後、水素酸素安定同位体比とイオン成分濃度の測定も行った。

2022 年 6 月から 2024 年 7 月の長崎における降水中トリチウム濃度範囲は 0.11–0.59 Bq L⁻¹ で、2023 年の平均は 0.24 Bq L⁻¹ であった。一方で、2022 年 1 月から 2024 年 8 月の鹿児島における降水中トリチウム濃度範囲は 0.11–0.67 Bq L⁻¹ で、2023 年の平均は 0.26 Bq L⁻¹ であった。降水中トリチウム濃度について、日本では一般に晩冬から春季に高く、夏季に低くなる「季節変動傾向」が認められており、この 2 地点でも確認することができた。

水素・酸素安定同位体比の範囲は、長崎で δD : -76.88–-8.61‰、 $\delta^{18}O$: -10.85–-3.28‰、鹿児島で δD : -72.55–-12.28‰、 $\delta^{18}O$: -10.49–-0.82‰であった。どちらも天水線付近に分布する結果が得られた。

2. 論文

N. Akata, K. Ohno, H. Kuwata, K. Kheamsiri, Y. Yoshinaka, R. Yamada, Y. Kitayama, S. Aizawa, S. Nakasone, A. Ishimine, M. Tanaka, Y. Shiroma, S. Tokonami, M. Furukawa: Tritium concentration in monthly precipitation in Okinawa and Kagoshima, southern Japan. Radiat. Prot. Dosim., 200, 1792-1796 (2024) <https://doi.org/10.1093/rpd/nae021>

動物医療環境のための放射線防護の新しい枠組みの検討

研究代表者：岩井 敏

受入研究者：赤田 尚史

共同研究者：WANG XUEQING・小池 弘美・黄倉 雅広・飯本武志

1. 成果

With the increasing integration of pets into human families, their health and safety have become a significant concern. The increasing use of radiological equipment in veterinary hospitals highlights the need for radiation safety of pets and humans. However, existing radiation protection guidelines primarily focus on human patients and medical staff, leaving a gap in protection strategies for animals and their stakeholders. The study aims to investigate the latest radiation protection systems in veterinary hospital, focusing on radiation exposure to human patients and medical staff and estimate and analyze general radiation doses affecting animal patients and related stakeholders in veterinary hospitals. The study employed PHITS for radiation exposure simulations in veterinary hospitals. Different modeling approaches were utilized, including the use of geometric phantom models for humans and animals to assess radiographic distribution. Initial simulations were conducted using simplified geometric models to determine radiation distribution in human subjects. The PHITS simulation successfully demonstrated dose distribution in different anatomical models, laying the groundwork for future computational refinements. A field survey was performed at hospitals to evaluate radiation exposure levels for medical staff and patients. Current radiation protection systems do not adequately address the unique needs of animal patients. Veterinary staff lack clear guidelines on how to effectively protect animals from radiation exposure during medical procedures.

The study highlights the urgent need for a dedicated radiation protection framework for veterinary hospitals. The next steps will involve refining computational analyses and formulating practical protection measures to bridge the existing research gap.

2. 論文

なし

Investigation of radon-climate relationships in volcanic area using AI

研究代表者：JANIK MIROSLAW

受入研究者：細田 正洋

1. 成果

This report presents the findings of a 9-year study investigating soil temperature variations near Sakurajima volcano. This research, conducted as part of the project “Investigation of radon-climate relationships in volcanic areas using AI,” aimed to improve geohazard assessment through enhanced radon monitoring. Specifically, the study analyzed soil temperature profiles at various depths and developed mathematical models to predict temperature fluctuations.

The soil temperatures at three depths (10cm, 40cm, 100cm) alongside comprehensive meteorological monitoring including atmospheric parameters and soil moisture were continuously monitored.

The study revealed that soil thermal diffusivity increases with depth, challenging the conventional assumption of constant thermal properties throughout soil layers.

Clear seasonal variations were observed at all depths throughout the monitoring period. An interesting phenomenon emerged where temperature extremes were progressively delayed with increasing depth. Temperature minimums at 100cm depth lagged approximately 28 days behind atmospheric minimums, with similar delays observed for maximum temperatures. Similar temperature patterns were observed between winter and autumn, and between summer and spring, suggesting consistent heat transfer processes during these paired seasons. Temperature oscillations were modeled using sinusoidal functions, where parameters such as amplitude, phase shift, and mean temperature were derived from the measurement data.

The developed model showed notable discrepancies at shallow depths, particularly at 10cm, suggesting complex near-surface processes not fully captured by the current approach. Additionally, these site-specific findings may require calibration before application to other volcanic regions with different geological characteristics and climate conditions.

This research advances understanding of soil temperature dynamics in volcanic regions, providing a framework for improving radon monitoring accuracy. The identified thermal buffering properties of soil and quantified temperature effects on permeability offer practical approaches for correcting radon measurements in geohazard assessment programs. Future research should focus on investigating additional environmental

parameters affecting temperature and radon transport dynamics.

2. 論文

Mirosław Janik, Mashiro Hosoda, Shinji Tokonami, Yasutaka Omori, Naofumi Akata,
Evaluating Soil Temperature Variations for Enhanced Radon Monitoring in Volcanic Regions,
Atmosphere (Preprints), <https://www.preprints.org/manuscript/202501.1405/v1>

Be 同位体の海洋循環トレーサーとしての利用

研究代表者：永井 尚生

受入研究者：田副 博文

共同研究者：山形 武靖・松崎 浩之

1. 成果

2024 年度の分析に用いた材料は、福島県東部の双葉郡浪江町で 2015～2021 年の 8～10 月に捕えた 19 頭、および 2015 年 9 月に同県東部の南相馬市で捕えた 4 頭のアズマモグラ *Mogera imaizumii* である。捕獲は住民の避難により放置状態の水田畔などで行った。現地では除草が行われないことから植物遺体が地面に厚く積み重なっており、トンネルの探索が難しく、滞在時間も限られていることから、迅速に仕掛けることのできる金属製の捕殺用わな (Duffus trap) を用いた。捕獲はほぼ毎年行ったが、2019 年には台風の接近などのため捕獲には至らなかった。比較のため、2017 年 6 月および 2020 年 3 月、8 月に捕獲した富山県富山市産の 3 頭も用いた。これらの頭骨標本を作成し、下顎骨中の安定 Sr および放射性ストロンチウム (^{90}Sr) 濃度を福島大学環境放射能研究所の表面電離型質量分析計で測定し、 ^{90}Sr / 安定 Sr 濃度比 (以下、Sr 濃度比) を算出した。また、上顎臼歯列の摩耗状況で齢を推定した。

Sr 濃度比は、富山県産の個体 (0.77 ± 0.64) よりも福島県東部産の個体がより高く、福島県東部では概ね浪江町 > 南相馬市南部 (5.18、25.17) > 同市北部 (0.94、2.38) となったが、南相馬南部でも非常に高い値 (25.17) を示す個体が見られた。浪江町産の個体では、齢による差異は見られず (0 歳 : 5.18、25.17 ; 1 歳以上 : 7.43 ± 5.94)、2021 年の捕獲個体 (16.40 ± 6.20) はそれ以前 (5.16 ± 1.72) よりも高値を示した。2018 年までに捕獲した個体 10 頭のデータにおいて、Sr 濃度比とこれまでに測定してきた筋肉中放射性セシウム ($^{134} + ^{137}\text{Cs}$) 濃度の間には相関関係は見られなかった (Spearman の順位相関係数 = 0.168)。しかし、南相馬市で顕著な Sr 濃度比を示した個体は筋肉中放射性セシウム濃度 (以下、筋中 Cs 濃度) も高く、浪江町で顕著な筋中 Cs 濃度を示した個体は Sr 濃度比も高かった。浪江町産の個体の Sr 濃度比の頻度分布は、単峰型で右方に向かって裾野が伸びるポアソン型の分布様式を示したが、平均値が 16.40、分散が 38.44 となり、平均 < 分散の過大分散を示した。

今回は富山県産の個体からも微量ではあるが ^{90}Sr が検出され、過去の全地球的な汚染によるものか、ごくわずかに進入していた福島由来の ^{90}Sr が地中の食物連鎖の最上位に位置するモグラにおいて生物濃縮により検出可能に至ったのか、今後より広範囲な調査により検討する必要があるであろう。福島県東部の値は概ね浪江町＞南相馬市南部＞同市北部となり、同市南部でも少数ではあるが非常に高い値を示す個体が見られた。これらの知見は筋中 Cs 濃度の場合と共通していた。特に非常に高い Sr 濃度比を示す個体が見られ、この値の頻度分布にも影響しており、筋中 Cs 濃度とも共通性が見られたことは、個体ごとの行動圏の環境による高リスク個体の存在を示唆している可能性が高い。また、放射性セシウムと異なり、 ^{90}Sr は動物体からは容易に排出されず体内に蓄積することから、高齢の個体において高い値が示されると予想されたが、今回検討の対象とした浪江町産の個体では、齢による差異は見られなかった。骨組織と異なり基本的に新陳代謝の起かない歯牙の Sr 濃度比を計測すると、異なる結果が得られる可能性がある。今後は歯牙を含めて例数を追加し、多変量解析により詳細な分析を行いたい。

2. 論文

分析の途中であるため、該当なし。

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

[背景と目的] 長半減期放射性核種 ^{10}Be ($1.36 \times 10^6 \text{y}$) は成層圏・対流圏上部において宇宙線と大気との核反応により生成し、エアロゾルに吸着して大気循環に従い地表・海面へと輸送されるが、地表・海洋への降下速度は不均一で緯度分布を持つと推定されている。海洋においては陸源の安定同位体 ^9Be と共に循環し、リサイクル型の鉛直分布を示すとされるが、海域毎にかなり異なる ^9Be , ^{10}Be 鉛直分布が報告されており、供給源の違いと共に海水の循環の影響が示唆される。本研究では、データの少ない海域における ^9Be , ^{10}Be の鉛直分布を求め、海域間の比較を行い、海洋循環トレーサーとしての活用を目指す。[方法] 2017 年に北太平洋北部 47°N (160°E - 131°W , 13 測点) 145°W (60 - 44°N , 7 測点) (東京ーバンクーバー) において採取した海水試料について ^9Be , ^{10}Be 濃度の鉛直分布測定を行った。海水中 ^9Be 濃度は 0 - 30pM と極めて低く測定のため濃縮と脱塩が必要となる。本研究では東大 MALT においてシリカゲルカラムを用いて海水試料の脱塩・ ^9Be 濃縮を行い、弘前大 IREM において ICP-MS により ^9Be 濃度測定を行った。 ^{10}Be は海水採取時に Be 担体を加え、鉄共沈により回収後 Be の分離精製を行い、東大 MALT において AMS により ^{10}Be 濃度測定を行ったデータを用いた。[結果] ^9Be , ^{10}Be 濃度の鉛直分布は栄養塩型であり、 ^9Be 濃度 ($\times 10^7 \text{atoms cm}^{-3}$), ^{10}Be 濃度 (atoms cm^{-3}) は表層で共に 200 - 500 と深層の $1/5 \sim 1/10$ 程度であり、 500m まで急激に増加し深層の $1/2$ 以上となり、その後は緩やかに上昇し底層では、 1500 - 2000 になる。全測点において ^9Be , ^{10}Be 濃度の鉛直分布は表層 200m 以深ではほぼ同一であった。従って測点毎の $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ も 200m 以深の平均は 1.03 ± 0.04 (47°N), 1.04 ± 0.02 (145°W) とほぼ一定であったが、西部 (160°E - 165°W) より東部 (160°W - 131°W)、また上層 (200m - 2000m) より下層 (2000m 以深) の方が比がやや高く、上層においては西部: 1.00 ± 0.01 に対し、東部 47°N : 1.02 ± 0.03 , 145°W : 1.04 ± 0.02 、と大きな差異は見られなかったが、下層においては西部: 1.04 ± 0.01 に対し、東部 47°N : 1.08 ± 0.04 , 145°W : 1.10 ± 0.05 、と増加していた。本研究の結果は、これまで報告されている大平洋の ^9Be , ^{10}Be 濃度の鉛直分布と概ね一致していた。他の海域との比較においては、 ^9Be 濃度は表層では海域毎の差が大きいが、深層では余り大きな差は見られない。これに対し ^{10}Be 濃度は深層で海域毎の差異が大きく、南極海・大平洋が最も高く北極海・北大西洋はその $1/2$ 程度であった。従って $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ も南極海・大平洋は北極海・北大西洋の 2 倍程度となっている。この原因については南極海付近で大気から ^{10}Be のみ供給され ^9Be と比べ相対的に過剰となった可能性が考えられる。

2. 論文

なし

土壌構成鉱物への核種収着に及ぼす有機物の影響評価

研究代表者：佐々木 隆之

受入研究者：藤原 健壮

共同研究者：土肥 輝美

1. 成果

放射性核種の保管や廃炉工程の安全評価に資する放射性核種の地中移行挙動を検討するには、原位置あるいはそれに関連した地質環境における収着や拡散等の反応機構理解に資する基礎データやモデルが必要である。本研究ではこれまで、非放射性金属イオンを収着させたカオリナイト試料を対象に、透過型電子顕微鏡(TEM)や電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)などを用いて固相表面における元素情報を取得し、吸着現象の解明につながるデータの蓄積を進めてきた。今年度は、熱硫酸による変質処理を施したカオリナイト試料を用い、幅広い pH 条件下で非放射性金属イオンを収着させ、収着分配係数 K_d の取得および STEM-EDS による元素マッピングを実施した。

粉末状のカオリナイト試料を TEM (JEM-2800, 日本電子) による STEM-EDS 分析に供するため、以下の手順で薄膜処理を施した。まず予備加工として、スライドガラス上で試料とエポキシ樹脂をスパチュラで混ぜ合わせた後、シリコン基板上に乗せ、ホットプレートで 130°C、15 分間加熱し硬化させた。次に、硬化した試料の厚さが 100 μm 程度になるまで、研磨紙で試料面および Si 基板面を研磨した。さらに最終的に試料全体の幅が 2 mm 程度、試料高さが 0.5 mm 程度になるよう調整した。これをイオンスライサー (EM-0900IS, 日本電子) を用いて薄膜化を行った。具体的には、予備加工した試料の上方からマスキングベルトを取り付け、Ar+イオンの照射角度を連続的に変えながら、また、加速電圧も段階的に変えながらミリングを繰り返した。この操作で試料の中心に穴を開け、その周辺の薄膜部分を TEM で分析した。TEM の加速電圧は 200 kV とし、STEM-EDS で元素マッピングを行った。得られたマッピング像のバックグラウンド影響を排除するため、カオリナイト粒子内部の任意の面積を 1 粒子あたり 2~3 か所設定し、複数の粒子について Al および Si の原子パーセント濃度を測定した (半定量)。その結果を基に、Al/Si 比を算出することに成功した。

2. 論文

福島県以外の自治体の放射能汚染された土壌や物品の適切な 管理・処分に関する考察

研究代表者：黄倉 雅広

受入研究者：土肥 輝美

共同研究者：飯本 武志

1. 成果

福島第一原子力発電所事故で発生した環境放射能汚染により、首都圏のとくに原子力施設のない自治体では、専門的知識だけでなく事故に対する備えも十分ではなかったために厳しい対応を迫られた。中でも千葉県柏市は、事故当時の高線量の検出等による騒動から、市民と多くのコミュニケーションを図りながら、いわば官民が協働しつつ徐々に平静を取り戻していったという経緯をもつ。そのような経緯を記録として残すべく、本研究ではまずアーカイブの作成を続けてきた。

本アーカイブは、現在すでに散逸されつつある文書類を収集するだけでなく、映像や音声記録、さらに実際に対応にあたった当事者たちの証言なども資料として加えることで、当時の状況を追体験でき、次代にも活用できることを目標に作成を進めている。本研究では、市役所側の当事者（3名）および市民側を代表する役割を担った者（1名）へのインタビューを行い、当時の騒動から平静に向かう過程において、対話集会や除染作業、住民健康調査などの官民協働イベントがとりわけ効果的であった等の証言を得ることができた。

また、本研究はこのような史的経緯を踏まえた上で、現在もなお残る汚染された土壌や物品の処分に関わる諸問題にアプローチする。とくに官民協働の除染作業等により生じた「除染土壌」の多くは、作業現場に埋設あるいは覆土されたままの状態にあり、それらの処分方法をめぐっては地方自治体だけでなく国レベルでも議論が重ねられている。おそらく将来的に土壌等を他所へ移動させるなど何らかの操作を加えるということになれば、再び線量に少なからぬ関心が向けられることとなろう。

そこで本研究では、今現在の住宅地やその周辺環境の線量を測定し、さらに住民等の非専門家にも扱える簡便な評価手法の開発を試み、下の論文を準備している。航空機調査(JAEA)やシミュレーション(PHITS)を活用し、広く利用しやすい下のような線量評価法を構築、公表することは、再び官民を交えた今後の自治体全体の方針づくりにも寄与し得る。

Evaluation of Radioactivity and Exposure Dose on Buried Decontaminated Soil.

Changting GUH, Hiromi KOIKE, Masahiro OKURA, Takeshi IIMOTO（準備中）

2. 論文

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：土肥 輝美・佐々木 祥人

共同研究者：箕輪 はるか

1. 成果

(研究の背景)

2023 年度は、事故後十数年を経過し樹皮表面の線量率は BG レベルに低減しているものの、樹皮表面に繁殖するコケ類が 2011 年の福島第一原子力発電所事故により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）を現在も保持し、粒子形態の放射性 Cs の存在が示唆されたことを報告した。2024 年度はこれら放射性 Cs の存在状態を把握することを目的として調査を進めた。

(実験方法)

① 放射性 Cs の分布状況：測定対象は、福島市内に存在する樹齢 50～80 年程度のケヤキ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）である。これらは、高さ 20cm から 1m の高さで 170cm の幹周り範囲の中で樹皮表面面積の約 40% を占めていた。これらコケ類の生息域と GM 管式サーベイメータで計測した表面線量率の強度分布結果と比較した。

② 放射性 Cs 含有粒子の単離と非破壊分析：2023 年に樹皮表面から約 10cm 四方のコケ類を採取し、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。同試料について Ge 半導体検出器（GEM30185-P ORTEC）で γ 線スペクトル分析を、EPMA（JXA-8530F, ）で粒子表面の一部について表面分析を実施した。

(結果及び考察)

① コケ類の生息域と表面線量率の強度分布を比較した結果、コケ類の生息範囲の外縁部に集中して線量率が高い場所が観測された。このことから放射性 Cs は樹木の上部から樹幹流によって運ばれてきてコケ類の外縁部に蓄積したと考えられる。

② 放射性 Cs 含有粒子はデジタルマイクロスコープ観察によると有機物の集合体と推定され、EPMA による元素分析で Si、Ca、Fe 等が検出されたため粘土鉱物などが取り込まれている可能性がある。また、 γ 線計測で ^{137}Cs が検出されたが EPMA では Cs が痕跡量確認されたが検出の決定にはいたらなかった。

今後、放射性 Cs 含有粒子を化学分離により Cs 成分を分離して存在状態の把握を行う。

2. 論文

なし。

空間線量率および低減度分布の地理的環境依存性解明のための視覚解析

研究代表者：高橋 成雄

受入研究者：操上 広志・眞田 幸尚

共同研究者：吉田 竜

1. 成果

東日本大震災に伴う原発事故以来実施されてきた、航空機、走行、歩行によるさまざまな形態の放射線計測により得られた統合空間線量率マップは、現在までに過去 12 年の空間線量率時空間変化の詳細なデータを提供する。本研究では、この時空間マップを用いた空間線量率やその低減度と、地形特徴、土地利用、さらには除染実施状況などの地理的な背景や周囲の環境との有意な関係性を、視覚解析を通して抽出を試みた。さらに、得られた結果を利用して、除染効果の検証とともに、地理的環境の空間線量率の低減度への影響の評価や将来の予測を行い、効果的な避難指示解除の実現ための支援に関する基礎的な知見の収集を行った。

本研究では、従来までの研究において統合空間線量率マップの 2011～2022 年までの 12 年間の時系列データを用いて、セシウム 134 とセシウム 137 の半減期を考慮に入れた定式化を介して、ある特定の期間の空間線量率低限度の計算を行ってきた。本年度は、さらに解析対象地域のサンプル点における標高や勾配、局所的な地形表面形状の特徴である頂上、谷底、峠、さらには尾根や溪谷などの地形特徴、さらには土地利用形態(都市、森林など)の属性値データを準備し、これらの属性値が空間線量率やその低限度に寄与する度合いを視覚的に解析することとした。

基本的なアプローチは、興味対象である空間線量率やその低減度を目的変数、先に記した地形形状特徴や土地利用を表す属性値を説明変数として、説明変数の値から目的変数の値を予測するモデル(関数式)を、重回帰分析や決定木、さらにはランダムフォレストや LightGBM などの教師あり学習を用いて構築をするところから始める。そして、その予測モデルにおいて、各説明変数の目的変数に対する寄与の度合いを、説明可能 AI の枠組みである Permutation Feature Importance (PFI)や SHapley Additive exPlanations (SHAP)を用いて解析を行う。

本研究で得られた知見は、大きく以下の 2 点にまとめられる。

1. 土地利用における空間線量率の低減度は、市街地及び住宅地において大きい

福島県伊達市周辺地域における 2011 年から 2017 年の空間線量率低限度と土地利用の分類を解析した結果、都市と分類される市街地や住宅地において顕著に低減度が大きくなることがわかった。これは、マクロな特徴をとらえる PFI およびミクロな特徴を捉える SHAP の両方の道具立てにおいて、矛盾なく得られる結果であり、活発な人間活動が空間線量率の大きな低減度を促すというよく知られている知見と合致する。

2. 地形特徴における空間線量率の低限度は、渓谷や窪地で小さくなる

福島県双葉郡大熊町の、国道 288 号線の南側地域の国有林地帯は、原発事故以来除染が行われていない地域として知られている。この地域において、2011 年から 12 年間の空間線量率の低減度と、局所的な地理的特徴である頂上、谷底、峠、尾根や渓谷などの関係を、SHAP を用いて解析を行った。この結果、渓谷や谷底に該当する地域では、空間線量率の低減度が抑制され小さくなる傾向があることがわかった。さらに、SHAP の解析結果から、その抑制の度合いに応じて解析対象地域の色分けを行ったところ、谷底などの窪地が顕著に抑制の度合いが強く低限度が低くなることがわかった。これにより、空間線量率の低減度は、除染などの影響を受けない場合、窪地などの地理的環境に影響を受けることがわかった。

今後は、現在までに得られた空間線量率と地理的環境との関係に重要な知見を系統的に整理し、論文等のかたちでまとめることを目指す。

2. 論文

放射性セシウムの移動媒体についての鉱物学的研究

研究代表者：小西 博巳

受入研究者：萩原 大樹

共同研究者：渡辺 勇輔

1. 成果

福島第一原子力発電所（FDNPP）の事故により環境中に放出された放射性セシウムは、湖や河川の堆積物中に沈着し、長期にわたり環境中を移動する。河床堆積物中の鉱物の放射性セシウムの吸着特性を明らかにすることは、放射性セシウムの動態予測に重要である。近年、著者らは福島県内の河川水系の放射性セシウムの含有量が支配的な細粒分画（250-106 μm ）において、雲母鉱物だけでなく、有色鉱物や無色鉱物にも放射性セシウムが吸着し、移動に寄与する可能性を報告した。さらに、有色鉱物のうち、角閃石の表面は、風化・変質により粘土鉱物に変化し、放射性セシウムが表面に吸着することが示唆された。本研究では、鉱物への吸着メカニズムの解明を目的として、無色鉱物の風化・変質程度と放射性セシウムの関係を調べた。試料は、FDNPP 周辺の富岡川で採取した河床土の細粒分画から、ハンドピックした無色鉱物のうち、表面の形態や透明度を基に、長石と石英に分けて、それぞれの鉱物の放射性セシウム濃度を Ge 半導体検出器で測定した。さらに、長石の化学組成と結晶構造を透過型電子顕微鏡で分析した。

河川水系の上流から下流にかけて、長石および石英いずれも放射性セシウムが吸着していた。長石の空隙周辺は、チューブ状のハロイサイトが生成していた。また、表面から数 μm の深部まで、変質化が顕著であった。したがって、長石の表面や割れ目周辺は、風化・変質により粘土鉱物化し、これらに放射性セシウムが吸着することが示唆された。

2. 論文

ブタにおける消化管内での安定セシウム吸収率

研究代表者：小松 仁

受入研究者：玉置 雅紀

共同研究者：村上 貴恵美・神田 幸亮

1. 成果

福島県内で捕獲される野生イノシシにおいて、筋肉中の放射性セシウム濃度は同一地域内でも個体差が大きく、場合によっては桁が異なることが報告されている。こうしたばらつきの一因として、摂取する採食物中の放射性セシウム濃度や、消化管における放射性セシウムの吸収、さらには糞・尿などの各排出経路における放射性セシウムの排出の個体差が影響していると考えられる。しかしながら、採食物からの放射性セシウム吸収および排出については未だ不明な点が多い。本研究では、イノシシの同種であるブタをモデル動物とし、安定セシウムを用いてこの体内移行動態を実験的に明らかにすることを目的とした。

体重約 30 kg のブタを対象に、実験群として湿重量あたり 100 ppm の CsCl を添加した試験飼料を、対照群として CsCl を含まない飼料を、それぞれ 5 日間連続で給与した。飼料の水分含有量から算出される乾物割合を用いて、湿重量あたりの Cs 濃度を乾物ベースに換算した。各個体の日々の飼料給与量に Cs 濃度を乗じて、各個体の 1 日あたりの Cs 摂取量を算出した。さらに、各日ごとに全糞および全尿を採取し、糞の乾物重量に乾物中の Cs 濃度を乗じて Cs 排出量を算出した。一方、尿は湿重量ベースで Cs 排出量を計算した。消化管での Cs 吸収率(%) = (飼料からの Cs 摂取量 - 糞中排出量) / 飼料からの Cs 摂取量 × 100 として求め、尿を含めた総排出量から算出した吸収率(%) = 飼料からの Cs 摂取量 - (糞中排出量 + 尿中 Cs 排出量) / 飼料からの Cs 摂取量 × 100 として求めた。

消化管での Cs 吸収率は、各個体とも概ね 97% 前後であった。一方、尿を含めた総排出量で算出した場合、個体 A および B では 84% 前後と比較的高い吸収率となったが、個体 C および D では特定日の尿中 Cs 排出が著しく、3 日間の総収支では吸収率が 0.4% および 2.4% と極めて低い値であった。これらの値は、個体間で Cs 吸収率に大きな差異が存在することを示唆している。特に、尿排出量の個体差が Cs の体内移行に大きな影響を与える可能性があり、それぞれの個体が同濃度のセシウムに汚染された採食物を摂取した場合でも、体内に留まる割合が個体によって大きく異なることが示唆された。

本研究の結果、野生イノシシにおける筋肉中の放射性セシウム濃度の個体差は、採食物中の放射性セシウム濃度だけでなく、個体ごとの代謝や排出機構の差異も大きく影響している可能性が考えられる。

2. 論文

福島県内における野生傷病鳥獣の放射性セシウムのモニタリング

研究代表者：村上 貴恵美

受入研究者：玉置 雅紀

共同研究者：小松 仁・神田 幸亮・稲見 健司・壁谷 昌彦

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き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 2024 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の筋肉を採取し、筋肉中に含まれるセシウム 134 及びセシウム 137 を測定した(鳥類：N=177, ほ乳類：N=122)。得られたデータを用いて、土壌沈着量を共変量として地域、食性、動物種の 3 つの因子の主効果を評価する一般化線形モデルを構築して解析を行った。

その結果、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り、基準値超過率は鳥類が 4.5%、哺乳類が 20.5%だった。しかし、イノシシのように食品基準値の 100 倍を超えるような値を示す個体は検出されなかった。哺乳類と鳥類間における筋肉中の放射性セシウム濃度は哺乳類が鳥類に比べて有意に高く ($p<0.0001$)、平均値の差は 134.7Bq/kg だった。食性による放射性セシウム濃度の比較では、雑食が植物食と動物食に比べて有意に高く ($p<0.0001$)、雑食と植物食の平均値の差は 88.1Bq/kg、雑食と動物食の平均値の差は 80.6Bq/kg だった。また、生息地域による放射性セシウム濃度の比較では、浜通りと中通りが会津に比べて有意に高く ($p<0.0001$)、浜通りと会津の平均値の差は 191.9Bq/kg、中通りと会津の平均値の差は 28.8Bq/kg だった。

鳥類、哺乳類ともに近年でも食品基準値を超える個体が存在することが明らかとなったが、基準超過率や統計的な比較でも哺乳類の方が放射性セシウムを蓄積しやすいと考えられる。また、生息地域による比較の結果から、浜通りや中通りの方が鳥類、哺乳類ともに筋肉中の放射性セシウムの濃度が高いため、環境中の放射性セシウムの汚染度合いの違いが筋肉中の放射性セシウム濃度に影響を与えることが示唆された

2. 論文

福島県内におけるキジの行動圏調査

研究代表者：神田 幸亮

受入研究者：玉置 雅紀

共同研究者：小松 仁・村上 貴恵美

1. 成果

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故の影響により、福島県では現在でもイノシシ等の狩猟対象鳥獣において放射性セシウムが検出されており出荷制限等がかけられている。一方、近年キジの放射性セシウム濃度は減衰しており、食品基準値である 100 Bq/kg を大きく下回っているものの依然として出荷制限がかけられている。福島県二本松市周辺を例に見ると、2021 年～2023 年のキジ筋肉中の放射性セシウム濃度は、サンプル数 67 個体に対し、平均値 10 Bq/kg、最大値 51 Bq/kg となっている。国が示す出荷制限解除の条件では、動物の移動性を考慮することとされているため、今後出荷制限解除を検討するためには移動性を明らかにする必要がある。そこで、本研究ではキジの行動圏を明らかにし、出荷制限解除の検討に資する知見を得ることを目的とした。

当方がキジ筋肉中の放射性セシウム濃度の調査を行っている福島県二本松市にて、令和 3 年から令和 6 年にかけて、カモ網等を用いてメスキジ 6 羽を捕獲した。これらに GPS 発信器を装着して放鳥した。データの収集期間は、キジの狩猟が可能となる 11 月から 2 月まで（狩猟期間）の 4 ヶ月間とした。行動圏サイズは、より安全側（過大）の評価をするため最外郭法を用いて算出した。なお、令和 6 年に捕獲したメスキジ 2 羽については、データ収集中であるため今回の行動圏解析から除いた。また、今回、衛星捕捉数が 5 以下のデータについては除外したうえで解析を行った。

その結果、メスキジ 4 羽の推定行動圏サイズは各々 0.036 k m²、0.024 k m²、0.069 k m²、0.016 k m²であり、いずれも阿武隈川河川敷にモザイク状に分布する高茎草地や竹林、堤内地における畑地と隣接する低木が疎らに生育する高茎草地を含む地域を利用していた。

行動圏サイズは、最大でも 0.069 k m²であり、少なくとも調査を行なった 11 月から 2 月の 4 ヶ月間は捕獲場所の周辺のみを利用していたことが明らかとなった。このことからキジについては、放射性核種により高濃度に汚染された原発周辺地域から汚染が少ない会津等の地域へ移入する可能性は低いと考えられる。

なお、この結果は、福島県が開催した「野生動物肉の出荷・摂取に係る検討会」において報告され、出荷制限解除の検討に資する知見として活用された。今後は個体数を増やすとともに性差や通年の行動についても調査を行う必要があると考えられる。

2. 論文

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アーカイブ 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：小林 敏之・中平 嶺・藤川 勝義

共同研究者：小林 悦子・山田 裕

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（病理診断結果について病変部位のアノテーションを付加した組織画像およびサンプルの保存情報）および組織標本のバーチャルスライドスキャナーを用いた病理画像データを共通フォーマットに基づいて整理し、実験動物放射線影響研究アーカイブ（J-SHARE）システムへの取り込みを進めた。さらに、J-SHARE システムを紹介するホームページを作成し、外部公開に向けた準備を行った。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。

【参考文献】

K. Ariyoshi, T. Imaoka, Y. Ohmachi, Y. Ishida, M. Uda, M. Nishimura, M. Shinagawa, M. Yoshida, T. Ogiu, M. Kaminishi, T. Morioka, S. Kakinuma, Y. Shimada. Influence of Age on Leukemia Mortality Associated with Exposure to γ rays and 2-MeV Fast Neutrons in Male C3H Mice. Rad. Res. 2024 Oct 1;202(4):685-696.

2. 論文

A. Ishikawa, Y. Kin, Y. Yamada, T. Morioka, M. Nishimura, T. Imaoka, S. Kakinuma, S. Tanaka, R. Nakahira, E. Kobayashi, K. Fujikawa, J. Komura, T. Kobayashi, Y. Shimada. Radiat. Prot. Dosimetry. 2024 Nov 13;200(16-18):1651-1655.

尾駁沼における物質循環把握

研究代表者：坪野 考樹

受入研究者：植田 真司

共同研究者：三角 和弘・津旨 大輔

1. 成果

大型再処理施設が稼働すると、 ^3H 等の放射性核種が大気や海洋へ放出され、施設近傍の汽水湖尾駁沼における濃度レベルが上昇することが予想される。これらの放射性核種は、上流の二又川からの淡水および下流の海に接続する尾駁川からの海水とともに尾駁沼に流入する。尾駁沼は準閉鎖水域であるため、濃度低減が遅いことが予測され、その滞留期間中における希釈・移行・分配・蓄積の実態解明が課題となる。流入した放射性核種の希釈を精度良く評価するためには、淡水および海水の流量を把握することが重要となる。本研究は、海水の流入出量変化を定量的に把握し、放射性核種の希釈過程を数値計算で再現することを目的としている。

尾駁沼・尾駁川に水面下に圧力計を設置して水圧計測するとともに、浮体に搭載した RTK-GPS を圧力計の近傍に設置することで、水面高度を計測した。RTK-GPS は、Softbank の ichimill を利用することで、基地局を新に設定することなく、沼の水位高度を高精度で計測できた。これら結果から水圧計設置位置の高度を推定した結果、複数年で計測された水圧データから、より長期の沼・河川の高度を検討することが可能となった。これら水位差の結果から、沼の水面高度は、海面高度の 9 月に高く、4 月に低くなる年周期に応答していた。そして、尾駁沼の河口となる流量を検討した結果、流量の半日・日周潮の振幅も同様となっていた。そして、沼内の塩分も海側からの流入量が増加する 9 月で高塩分・低下する 4 月で低塩分となっていた。このことから、尾駁沼内に流入した物質は、9 月（4 月）に低減しやすく（しにくく）なると推測される。

2. 論文

観測結果を表現する数値モデルに関する論文を準備中。

環境試料中トリチウムの相互比較分析に関する検討

研究代表者：橋本 晃佑

受入研究者：柿内 秀樹

共同研究者：前川 暁洋

1. 成果

東京電力福島第一原子力発電所事故に関連し、令和3年4月に日本政府はALPS（多核種除去設備）処理水の海洋放出の方針を決定し、令和5年8月より放出が開始され、ALPSで除去できないトリチウムについては、社会的な関心が高まった。低濃度トリチウムや有機結合型トリチウム（以下、「OBT」という。）等の分析においては、一般的な水中のトリチウム分析に比べ、高度な手法が適用されるため、分析の信頼性担保がより一層重要となる。

そこで、本研究課題では福島県環境創造センターと(公財)環境科学技術研究所が協力し、環境中トリチウムの相互比較分析に関する検討を実施することとし、両機関におけるトリチウム分析の信頼性を向上させることを目的とした。

一昨年度は、環境水中の低濃度トリチウムをターゲットに、福島県沖で採取された海水試料をそれぞれの機関で分析し、全試料で十分なパフォーマンスを示す $En < 1$ を満たしていることを確認した。

昨年度は、前処理法が煩雑であり検出も困難である OBT をターゲットとして、トリチウム標識した魚試料の OBT 分析を実施し、福島県環境創造センターにおける OBT 分析の妥当性を確認した。

今年度は、福島県内の環境試料（松葉）を対象に、組織自由水中トリチウム（以下、「TFWT」という。）及び OBT 分析を実施した。以下、工程を示す。

2024 年 9 月に大熊町及び双葉町で採取した松葉を凍結乾燥し、昇華した組織自由水をコールドトラップで捕集した。OBT は有機物試料を燃焼させて生じる水（以下、「燃焼水」という。）を回収して分析する必要がある。そこで、乾燥させた松葉を二連式管状型電気炉により燃焼させ、燃焼水を回収した。回収した組織自由水及び燃焼水には微量の有機物が含まれるため、過マンガン酸カリウム及び沸騰石を添加し、7 時間以上還流して分解を行った。還流後、過酸化ナトリウムを添加し、蒸留・精製した。得られた水試料と液体シンチレータ（Ultima Gold LLT, Revvity）を混合し、液体シンチレーションカウンタ（LSC-LB7, ALOKA）でトリチウム濃度を測定した。

その結果、大熊町で採取した松葉は TFWT 濃度 1.05 ± 0.14 Bq/L、OBT 濃度 1.03 ± 0.23 Bq/L・燃烧水、OBT 濃度 0.56 ± 0.13 Bq/kg・乾、双葉町で採取した松葉は TFWT 濃度 0.55 ± 0.14 Bq/L、OBT 濃度 0.72 ± 0.14 Bq/L・燃烧水、OBT 濃度 0.40 ± 0.08 Bq/kg・乾であり、環境中松葉の TFWT 及び OBT を検出することができた。また、それぞれの地点で採取した松葉について TFWT と OBT の濃度に大きな違いは見られなかった。

一連の取組により、環境試料中のトリチウム分析に関する技術向上及び知見の蓄積が図られた。今後も、継続的に分析精度を担保するための取組を検討していく。

2. 論文

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

1. 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大気上層で生成され、速やかに酸化されて自然環境の水循環に取り込まれる。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 CH₃T)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、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[1]が、その要因は明らかでない。ここでは、挙動がよく理解されている大気中の水素(H₂、滞留時間: 約 2 年)やメタン(CH₄、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 CH₃T の生成起源解明を試みる。

2. 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[2]を用いた。吸湿剤(モレキュラーシーブ(MS)3A)と酸化触媒を組み合わせることで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, PorapakTM Q)と還元性ガス検知器(ジェイサイエンス, TRD-1)[3]を組み合わせた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 時間ごとのデータを取得した。

3. 結果:

大気微量成分測定システム(水素、メタンを対象)と化学形態別大気中トリチウム濃度測定を本年度も継続して運用し、約 3 年分の観測データを蓄積した。観測を開始した 2022 年 6 月から 2024 年 12 月までのデータを解析し、大気中トリチウム成分(HT, CH₃T)と大気中微量成分(H₂, CH₄)との相関を確認した。その結果、HT と H₂、CH₃T と CH₄ の間には明確な相関(相関係数: 0.12、0.23)が確認されなかった。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 H₂ や CH₄ の生成過程・挙動と異なることを示唆している。大気中のトリチウム供給源は、H₂ や CH₄ が生成される地表付近ではなく、他に存在する可能性がある。2025 年度も継続して大気観測を行い、4 年分の観測データをまとめて論文投稿を検討する。

[参考文献]

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

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

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

2. 論文

今年度はありません。

根圏効果による粘土鉱物の放射性セシウム動態への影響解析

研究代表者：渡部 敏裕

受入研究者：海野 佑介 ・ 武田 晃

共同研究者：信濃 卓郎・鷺尾 太一・丸山 隼人

1. 成果

セシウム (Cs) は、土壤粘土鉱物中のフレイドエッジサイトに強く固定され、土壤中に存在している。植物による放射性セシウムの吸収には、土壤の種類に加えて、植物種による違いも影響を与える。これまでの圃場試験およびポット試験の結果から、マメ科作物であるシロバナルーピンは特に高い放射性セシウムの吸収能を示すことが明らかになっている。この要因として、本種が持つ特徴的な根（クラスター根）と、そこから多量に分泌される有機酸が関与している可能性が示唆されている。そこで、本研究では、有機酸が土壤（鉱物）に及ぼす影響をマイクロダイアリシスによる有機酸添加試験で評価するとともに、シロバナルーピンクラスター根による土壤中各種元素の動態変化を明らかにすることを目的とした。本年度は土壤(粘土鉱物)-マイクロダイアリシスによる溶液回収と ICP-MS による元素分析実験系の条件検討を行い、根箱を用いた根圏元素動態調査試験の予備的な栽培も行った。マイクロダイアリシスの実験では、有機酸による土壤中の元素の可溶化が確認でき、有機酸の濃度による効果の違いが見られ、根からの有機酸分泌の土壤への影響を評価できる模擬試験系を確立できた。今後は異なる土壤や調整鉱物(Cs 添加鉱物)を用いた調査や、有機酸濃度の検討、長期的な有機酸を添加試験など、さらなる調査を行う予定である。シロバナルーピンクラスター根圏での元素動態の調査では予備的な根箱栽培試験を行った。クラスター根、非クラスター根、非根圏にマイクロダイアリシスを設置し、経時的な土壤溶液の回収を実施した。今後、回収液の元素測定、土壤分析を行う予定である。

2. 論文

鉄資材の施用が土壤中の放射性セシウムの動態と作物への放射性セシウムの移行に及ぼす影響の解析

研究代表者：久保 堅司

受入研究者：海野 佑介・武田 晃

共同研究者：山本 修平・信濃 卓郎・丸山 隼人・村島 和基

1. 成果

東京電力福島第一原子力発電所の事故以降、農地に降下した放射性セシウム（RCs）の作物への移行は、主に除染（表土剥ぎ取り、客土等）やカリウム肥料の追加施用により、低減が図られてきた。一方で、近年の研究により、カリウムの追加施用による RCs の移行低減効果が土壌によって一様ではないことが明らかになりつつある。また、カリウム以外の成分が作物への RCs の移行に及ぼす影響については不明な点が多い。本研究では、申請者らの事前調査において示唆された、作物への RCs の移行性に石灰資材の種類が影響する可能性に着目し、異なる石灰資材を施用した際の作物への RCs の移行に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。試験として、ダイズを苦土石灰または転炉石灰（鉄資材）を施用した条件下（石灰分の投入量を同程度に設定）のポット土壌（事前調査とは異なる圃場から採取）において開花期まで栽培したところ、ダイズ地上部の生育量は同程度だったが、 ^{137}Cs の移行係数（ダイズ茎葉の ^{137}Cs 濃度 ÷ 土壌の ^{137}Cs 濃度）は転炉石灰を施用した方が苦土石灰を施用した場合よりも低い傾向にあった。同様の傾向が認められた事前調査のポット試験において、 ^{137}Cs の移行係数と栽培後土壌の化学特性との関係を解析したところ、 ^{137}Cs の移行係数は土壌中の交換性カルシウム含量や可給態鉄含量と有意な負の相関関係を示した（交換性カルシウム含量 $P < 0.05$ 、可給態鉄含量 $P < 0.10$ ）。この試験は土壌の交換性カリウム含量が比較的高い（平均値で $22.2 \text{ mg K}_2\text{O} / 100\text{g}$ ）栽培条件であったことから、非選択的な陽イオン輸送系である VICC（Voltage-independent Cation Channel）が Cs^+ の吸収に関係していることが考えられ、土壌中の Ca^{2+} 等陽イオンの影響で作物による Cs^+ 吸収の拮抗阻害が生じている可能性が示唆された。以上のように、本研究では土壌から作物への放射性セシウムの移行にカリウム以外の元素も関係していることが示唆された。今後、得られた知見をもとに、カリウム以外の化学特性にも着目した作物への RCs 移行低減技術を検討する。また、データの解析を進め、論文として取りまとめることを計画している。

2. 論文

なし

生体への水素同位体取込みの同位体効果の検証

研究代表者：鳥養 祐二

受入研究者：石川 義朗・柿内 秀樹

共同研究者：細根 孟留・小畑 結衣

1. 成果

重水素とトリチウムを含む海水中でヒラメ、ウバガイ、ホタテおよびマコンブを育成し、海生生物における水素同位体の取込みと放出の同位体効果について検討した。海生生物に含まれる水分の迅速な測定法として、自由水を電子レンジで迅速かつ簡便に回収する“マイクロ波加熱法”を提案し、同位体効果の検証に応用した。自由水型トリチウムの測定は液体シンチレーション法により測定した。トリチウム源として重水中に含まれるトリチウムを使用した。重水及びトリチウムを含んだ海水で飼育したヒラメ、ウバガイ、ホタテおよびマコンブの水素同位体の取込み挙動と、重水及びトリチウムを含んだ海水で飼育した物を通常の海水に移して飼育したときの放出挙動を検討した結果、取込み過程と放出過程において、水素同位体の同位体効果は認められなかった。また、十分に重水素とトリチウムを取り込んだ、ヒラメ、ウバガイ、ホタテおよびマコンブを通常海水に戻したときに、重水素とトリチウムの残存は観測されず、速やかに生育環境の水素同位体濃度と平衡になることが明らかとなった。3年間の研究により、海生生物への自由水への取込みと放出においては、同位体効果は無いこと、生育環境の水の水素同位体濃度と平衡になること、が明らかとなった。この研究成果は、2025年9月にオタワで開催される Tritium 2025 国際会議で報告する。

2. 論文

流域から駿河湾への輸送物質の形態

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、海洋生態系への放射性元素等を含む物質の移行経路として河川に着目し、河川水とそれが流入する湾の海水中の物質の形態（溶存態・粒子態）を特に有機物について明らかにすることを目的とした。調査対象は、駿河湾と、駿河湾に流入する河川のうち、流量が大きい狩野川、富士川、安倍川、大井川とした。これら4つの主要流入河川は、河川の規模（流域面積、幹川流路延長、流量）、流域の主要な地質、土地利用が異なっており、輸送する有機物の形態構成が異なることが予想される。観測は、河川については駿河湾への供給フラックスを求めるために最下流の水位流量観測点で行い、駿河湾では沖合部の測点 SR1 (35° 03' 20" N, 138° 41' 00" E、水深約 1000m) で、ほぼ毎月行った。試水をガラス繊維フィルター（Whatman GF/F）でろ過し、溶存有機物（ろ液画分）と粒状有機物（フィルター画分）に分けて分析を行った。本報告では、2024 年の安倍川に注目して結果を記載する。溶存有機物の濃度である溶存有機炭素（DOC）濃度は、安倍川で $0.15 \pm 0.05 \text{ mg C/L}$ （平均±標準偏差）で、他の河川 ($0.61 \pm 0.17 \sim 1.41 \pm 0.78 \text{ mg C/L}$) に比べて顕著に低かった。安倍川の源流部が日本三大崩れの大谷崩であることから、大谷崩から供給される土砂粒子が DOC を吸着し（「安倍川餅理論」）、沈降または懸濁化することで表流水の DOC の濃度を低下させるという仮説を立て、検証実験を行った。検証実験では、安倍川下流の粒子を遠心分離により集め、それを元の安倍川の表流水と同じ体積比で狩野川のろ過表流水に加え、攪拌子で攪拌した。その結果、安倍川の粒子は 2 時間の攪拌で狩野川表流水の DOC を約 15% 吸着させ、「安倍川餅理論」が証明された。また、安倍川の地下水と伏流水の DOC 濃度は $<0.08 \text{ mg C/L}$ であり、上流域の表流水 ($<0.1 \text{ mg C/L}$) 並みに低かった。この結果から、安倍川では、伏流水と地下水が、堆積した土砂の間隙を流れる間に「安倍川餅理論」が働き、DOC の一部が土砂粒子に吸着・除去され、下流の自噴帯で湧出して表流水の DOC を希釈していることが考えられた。安倍川で DOC 濃度が低い根本的な要因として、ダムがなく、下流でも河床勾配が 1/250 と急流であるため、生物による有機物の生産と蓄積が少ないまま河口に到達することが考えられる。

2. 論文