

放射能環境動態・影響評価  
ネットワーク共同研究拠点（ERAN）

FY2022 FINAL REPORT

【重点/Priority 共同研究】

申請番号	氏名	所属機関	研究題目	共同研究者	受入研究機関	受入研究者
F-22-01	入澤 歩	福島県環境創造センター	福島県を流れる河川における放射性セシウムの長期的な移行挙動	谷口 圭輔 竹内 幸生 勝野 和美	CRIED	恩田 裕一
F-22-02	竹内 幸生	福島県環境創造センター	阿武隈川支流広瀬川流域における出水時の放射性セシウム濃度の経時的な変化	入澤 歩 新井 宏受 勝野 和美 谷口 圭輔	CRIED	恩田 裕一
F-22-03	笠原 玉青	九州大学	間伐による流域・斜面土砂流出の変化：移動土砂量と同位体データを用いて		CRIED	恩田 裕一
F-22-04	猪股 弥生	金沢大学	海洋におけるSr及び3Hの全球時空間変動-HAMglobal2021のデータ解析より		CRIED	青山 道夫
F-22-05	小島 貞男	愛知医科大学	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90Sr分析法の開発とミルク・食品中の90Sr測定への応用	有信 哲哉 緒方 良至 箕輪 はるか	CRIED	青山 道夫
F-22-06	緒方 良至	愛知医科大学	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90Sr分析法の検討2 一測定法の比較検討一	有信 哲哉 小島 貞男 箕輪 はるか	CRIED	青山 道夫
F-22-07	YinYong-Gen	量子科学技術研究開発機構	植物器官間炭素動態解析に向けた炭素同位体トレーサ実験体系の確立	三好 悠太	CRIED	古川 純 海野 佑介 今田 省吾
F-22-08	丸山 隼人	北海道大学	マメ科植物ルービンの放射性セシウム吸収と分配に関わる輸送体の機能解析	久保 堅司 菅 あやね	CRIED	古川 純
F-22-09	北 和之	茨城大学	大気と植物・菌類間での放射性セシウム移行可能性の研究		CRIED	古川 純
F-22-10	頼 泰樹	秋田県立大学	イネのセシウム吸収経路の全容解明		CRIED	古川 純
F-22-11	菅野 里美	名古屋大学	ナトリウムによるイネのセシウム吸収・輸送制御機構の解明	Nathalie PRAT	CRIED	古川 純
F-22-12	横山 明彦	金沢大学	環境中ネプツニウム測定用AMSトレーサー調製法の検討	永井 歩夢 細川 浩由	CRIED	坂口 綾
F-22-13	浅井 志保	産業技術総合研究所	環境中に放出されたCs-135の精密定量を目的とした国家標準にトレーサブルなセシウム同位体標準液の開発	佐藤 泰 古川 理央	CRIED	坂口 綾
F-22-14	星 正治	広島大学	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生物影響		CRIED	坂口 綾 恩田 裕一
F-22-15	梅原 さおり	大阪大学	超稀崩壊実験で用いる結晶素材に含まれるウラン・トリウム不純物量の微量分析	高久 雄一 伏見 賢一 黒澤 俊介	CRIED	坂口 綾
F-22-16	市村 晃一	東北大学	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	岸本 康宏 倉澤 真帆 高久 雄一	CRIED	坂口 綾
F-22-17	南野 彰宏	横浜国立大学	地下宇宙素粒子物理学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	天内 昭吾 田中 雅士 岩澤 広大 吉田 斉	CRIED	坂口 綾
F-22-18	山口 直文	茨城大学	非定常流下における堆積物輸送の時系列過程の解明		CRIED	関口 智寛
F-22-19	谷口 圭輔	津山工業高等専門学校	砂礫洲における細粒粒子の捕捉能に関する実験	遠藤 徳孝	CRIED	関口 智寛
F-22-20	宇都宮 聡	九州大学	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		CRIED	山崎 信哉
F-22-21	田中 万也	日本原子力研究開発機構	炭酸カルシウムへのラジウムの取り込みと結晶構造の関係		CRIED	山崎 信哉
F-22-22	中尾 淳	京都府立大学	地質の異なる福島森林土壌中での放射性セシウムの移動性と鉱物組成との関係解明		CRIED	高橋 純子
F-22-23	渡来 靖	立正大学	安価なドローンシステムによる気象観測手法の確立		CRIED	中村 祐輔
F-22-24	羽倉 尚人	東京都市大学	波長分散型PIXE分析法による大気浮遊元素の化学形態検出手法開発のための基礎検討		CRIED	羽田野 祐子
F-22-25	齋藤 誠紀	山形大学	赤城大沼湖水中セシウム濃度時間発展予測モデルの精密化に関する検討	中村 誠	CRIED	羽田野 祐子
F-22-26	岡田 往子	東京都市大学	放射性セシウムの湖底質への吸着実験	末富 英一 佐藤 勇 松浦 治明 内山 孝文	CRIED	羽田野 祐子
F-22-27	松中 哲也	金沢大学	北陸地区と北海道における1950年以降の原子力施設由来放射性ヨウ素129の沈着量変動	落合 伸也 坂口 綾	CRIED	笹 公和

申請番号	氏名	所属機関	研究題目	共同研究者	受入研究機関	受入研究者
F-22-28	藤島 政博	山口大学	福島第一原発事故のゾウリムシへの影響	児玉 有紀 Catania Francesco	IER	難波 謙二
F-22-29	信濃 卓郎	北海道大学	土壌のOrgano-mineral中の放射性セシウムの植物利用について	山口 紀子 鈴木 政崇	IER	塚田 祥文
F-22-30	長谷川 浩	金沢大学	有機ポリアニオンのセシウム汚染土壌に対する分散効果	Begum Zinnat Ara	IER	Rahman Md. Mofizur Ismail
F-22-31	大手 信人	京都大学	福島県伊達市、双葉郡の未除染森林土壌における高濃度放射性セシウム含有粒子の分布	村上 正志 二瓶 直登 辰野 宇大 角間 海七渡 脇 嘉理 長澤 和佳	IER	和田 敏裕
F-22-32	高木 淳一	京都大学	福島県の河川におけるニホンウナギの移動とその放射能セシウム濃度の関係解明	三田村 啓理	IER	和田 敏裕
F-22-33	野田 琢嗣	京都大学	魚類の放射能汚染のリスク評価に向けた原発周辺海域の魚類の移動生態の解明～バイオロギング技術の適用～	三田村 啓理	IER	和田 敏裕
F-22-34	津田 吉晃	筑波大学	阿武隈高地周辺の渓流魚種の地域固有系統の集団動態：機関困難区域の生物多様性保全		IER	和田 敏裕 兼子 伸吾
F-22-35	平良 文亨	長崎大学原爆後障害医療研究所	人為的な要因による粉塵の舞い上がり（再浮遊）に伴う放射性セシウムの環境動態	松尾 政彦	IER	平尾 茂一
F-22-36	大木 淳之	北海道大学	海洋表面でのオゾン反応によるヨウ素化合物の発生メカニズムの解明－海洋の放射性物質動態の基礎的研究－		IER	高田 兵衛
F-22-37	立田 穰	電力中央研究所	福島沿岸底生魚における137Cs移行機構の解明：底生生物生態系における生物可給態移行挙動のモデル解析と検証	青野 辰男 西川 淳 小林 卓也 浜島 靖典	IER	高田 兵衛 青山 道夫
F-22-38	青野 辰雄	量子科学技術研究開発機構	福島県高瀬川および猿田川における放射性Csフラックスに関する研究	竹内 幸生 藤田 一輝 勝野 和美	IER	高田 兵衛
F-22-39	Sahoo Sarata Kumar	National Institutes for Quantum Science and Technology	Study on the concentration of radionuclides in algae in the coastal area of Fukushima	青野 辰雄 榎本 昌宏 天野 洋典 渡部 翔	IER	高田 兵衛
F-22-40	遠藤 大二	酪農学園大学	原発事故周辺地域・高放射線環境下におけるアカネズミSNP変化の解析		IER	石庭 寛子
F-22-41	保坂 健太郎	国立科学博物館	きのこ類・寄生菌・菌捕食者の放射性セシウム濃度の経時的変化	糟谷 大河 山本 航平 Nam Kyung-Ok	IER	石庭 寛子
F-22-42	金盛 正至	東京大学	アジア太平洋地域各国の中等学校における放射線教育の効果に関する研究	宮崎 寛之 高嶋 隆太 小池 弘美 黄倉 雅広 飯本 武志	IER	山口 克彦
F-22-43	横畑 泰志	富山大学	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	青木 譲	IER	高貝 慶隆 石庭 寛子
F-22-44	樋口 健太	日本医療大学	RaA,B,Cにおける放射能環境動態の解明	秋葉 澄伯	IREM	床次 眞司 細田 正洋 大森 康孝
F-22-45	安岡 由美	神戸薬科大学	環境中ラドンによる放射線施設監視モニタの感度確認4：活性炭型ラドン検出器による感度確認	向 高弘 大森 康孝	IREM	床次 眞司 細田 正洋
F-22-46	岩岡 和輝	量子科学技術研究開発機構	流体シミュレーションを活用したガス曝露場構築の検討		IREM	床次 眞司 細田 正洋
F-22-47	大河内 博	早稲田大学	里山再生を目指した福島県浪江町における放射性物質の森林内動態解明	反町 篤行 栗原 大知	IREM	床次 眞司 赤田 尚史
F-22-48	高橋 温	東北大学	福島高線量地域に生息するアライグマの外部被ばく量推定		IREM	三浦 富智
F-22-49	有吉 健太郎	福島県立医科大学	野生動物細胞におけるバイスタンダー効果の解析		IREM	三浦 富智
F-22-50	山城 秀昭	新潟大学	被災アカネズミの卵成熟過程における染色体評価法の確立	中田 章史	IREM	三浦 富智
F-22-51	鈴木 正敏	東北大学	原子力災害に被災した野生動物体内の酸化ストレス状態	石川 諒椰	IREM	三浦 富智
F-22-52	中田 章史	北海道科学大学	細胞質分裂阻害微小核法を利用した精子形成過程における放射線感受性評価の検討	山城 秀昭	IREM	三浦 富智

申請番号	氏名	所属機関	研究題目	共同研究者	受入研究機関	受入研究者
F-22-53	木野 康志	東北大学	野生キノコの放射性セシウム濃度の測定	山下 琢磨	IREM	三浦 富智
F-22-54	清水 良央	東北大学	生体硬組織における放射性物質の蓄積性	篠田 壽 佐野 有哉	IREM	三浦 富智
F-22-55	飯本 武志	東京大学	放射線教育用簡易測定器の開発と校正に関する研究	小池 弘美	IREM	赤田 尚史
F-22-56	阪間 稔	徳島大学	PHITS計算空間に配置された高精細MRCPs四面体メッシュ人体ファン トム及び3D-CAD設計環境構造物における大気塵埃由来の放射性核種 による線量評価	佐瀬 卓也	IREM	赤田 尚史
F-22-57	栗田 直幸	名古屋大学	福島県請戸川周辺における同位体水循環研究	大野 花保	IREM	赤田 尚史 田副 博文
F-22-58	岩田 尚能	山形大学	山形蔵王の樹氷に含まれているベリリウム-7	柳澤 文孝 日下 なつみ	IREM	赤田 尚史
F-22-59	柳澤 文孝	山形大学	山形蔵王の樹氷に含まれている鉛-210	岩田 尚能 坂東 美希	IREM	赤田 尚史
F-22-60	佐瀬 卓也	核融合科学研究所	新学習指導要領施行後の検定教科書、副教材における放射線・環境・ 震災教育の記載調査	阪間 稔 丸山 晴男	IREM	赤田 尚史
F-22-61	黄倉 雅広	東京大学	線量体系についての公衆理解と線量定義の変更に伴う影響	飯本 武志 小池 弘美	IREM	細田 正洋
F-22-62	神田 獲太	東京海洋大学	福島沿岸海域における高線量粒子の海洋生態系影響に関する研究	石丸 隆 伊藤 友加里	IREM	田副 博文
F-22-63	YANG Guosheng	National Institutes for Quantum	The advancement of Sr-90 analysis method by ICP mass spectrometry		IREM	田副 博文
F-22-64	永井 尚生	日本大学	北太平洋における海水中10Be, 9Beの分布	山形 武靖 松崎 浩之	IREM	田副 博文
F-22-65	苅部 基一	近畿大学	貝殻を用いた海水中の放射性ストロンチウムモニタリング法の検討	白井 厚太郎 中田 裕希 江口 貴博	IREM	田副 博文
F-22-66	反町 篤行	福島県立医科学 大学	大気エアロゾル生成に対するラドン壊変生成物の寄与に関する基礎的 な観測		IREM	大森 康孝
F-22-67	佐々木 隆之	京都大学	酸化鈷物表面の核種吸着反応に関する分光学的研究	土肥 輝美 長澤 圭太	JAEA	藤原 健壯
F-22-68	尾崎 紀昭	秋田県立大学	生物の鈷物形成作用と核種固定化に関する研究		JAEA	土肥 輝美
F-22-69	高橋 成雄	会津大学	視覚解析のための統合空間線量率マップの目的別適応型サンプリング	櫻井 大督	JAEA	操上 広志 眞田 幸尚
F-22-70	二瓶 直登	福島大学	作物栽培に影響する浮遊放射性微粒子の解析		JAEA	吉村 和也
F-22-71	小西 博巳	新潟大学	放射性セシウムの移動媒体についての鈷物学的研究		JAEA	萩原 大樹
F-22-72	三角 和弘	電力中央研究所	松川浦から海洋への溶存放射性セシウムの供給過程の解明	辻 英樹 三浦 輝 青山 道夫 浜島 靖典 津旨 大輔	NIES	林 誠二
F-22-73	高橋 真哉	筑波大学	DNA相同組み換えレポータ遺伝子を持つ植物培養細胞を用いた帰還困 難区域におけるバイオモニタリング実施		NIES	玉置 雅紀
F-22-74	田中 将裕	核融合科学研究所	大気中のトリチウム濃度測定とその化学形態別評価		IES	柿内 秀樹
F-22-75	杉原 真司	九州大学	年輪中の有機結合型トリチウム (OBT) に記録されたトリチウム汚染	河中 大哉	IES	柿内 秀樹
F-22-76	玉利 俊哉	九州環境管理協 会	トリチウム分析前処理における試料水精製工程の効率化に関する研究	島 長義 山中 潤二	IES	柿内 秀樹 今井 祥子
F-22-77	鳥養 祐二	茨城大学	魚中のトリチウム濃度測定法の簡素化・最適化		IES	柿内 秀樹
F-22-78	山下 雅樹	東京大学	宇宙暗黒物質探索における環境トリチウムの影響の研究	小林 雅俊	IES	柿内 秀樹
F-22-79	井上 広海	福島県環境創造 センター	環境試料中トリチウムの相互比較分析に関する検討	前川 暁洋	IES	柿内 秀樹
F-22-80	坪野 考樹	電力中央研究所	尾駮沼における物質循環把握	津旨 大輔 三角 和弘	IES	植田 真司
F-22-81	渡部 敏裕	北海道大学	根圏効果による土壌の放射性セシウム動態への影響解析		IES	海野 佑介 武田 晃
F-22-82	矢内 純太	京都府立大学	Rhizo testを用いたセシウムの土壌-植物間移行動態の解明	中尾 淳 宇野 功一朗	IES	武田 晃

申請番号	氏名	所属機関	研究題目	共同研究者	受入研究機関	受入研究者
F-22-83	大場 恭子	長岡技術科学大学	技術的専門性を要する社会課題の解決に寄与する実践的人材の育成	鈴木 茂和 柳瀬 昇	IES	増田 毅
F-22-84	桐原 慎二	弘前大学	海藻類から排出される有機物の挙動に関する検討		IES	石川 義朗
F-22-85	鈴木 健之	量子科学技術研究開発機構	低線量・低線量率放射線によって生じた消化管腫瘍のリスク評価とその特徴	森岡 孝満 柳原 啓見	IES	山内 一己
F-22-86	山田 裕	量子科学技術研究開発機構	低線量放射線リスクの数理モデル解析に資する動物実験データベース構築	森岡 孝満 Kin Yoshika	IES	田中 聡

## 福島県を流れる河川における放射性セシウムの長期的な移行挙動

氏名：入澤 歩

受入研究者：恩田 裕一

共同研究者：谷口 圭輔・竹内 幸生・勝野 和美

### 1. 成果

2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う東京電力（株）福島第一原子力発電所事故により、大量の放射性物質が環境中へ放出された。河川水は、水道水や農業用水など、住民生活の中で幅広く利用されており、住民等の安心・安全の担保のためにはその調査が不可欠であった。

福島県内を流れる河川水中に含まれる放射性セシウム濃度の調査について、2011～2014年度に原子力規制委員会の委託により筑波大学が実施した調査を、2015年度以降福島県環境創造センターが引継いでこれまで行っている。本研究課題においてはこれを引き続き実施し、得られたデータについて両者の結果を併せて解析することで、福島河川における放射性セシウムの長期的な動態及び土地利用状況との関係を明らかにするとともに、森林火災や大規模出水等、水圏での放射性セシウム動態に影響を及ぼす可能性のある突発的事象が発生した場合の影響評価に資するデータの蓄積を行うことを目的とした。

その結果、2022年度についても、東京電力（株）福島第一原子力発電所事故直後から長期にわたり実施している河川水中の放射性セシウム調査の質を維持し、継続性のある試料およびデータを取得することができた。

なお、懸濁態放射性セシウム濃度の環境半減期を調べた結果、2011年から2012年までの早い減衰を除く2012年以降の濃度については、異常値等の影響を除くと現状では明確な環境半減期の変化は認められなかった。

本調査地点において、河川水中の放射性セシウム濃度が継続的に減少し続けていることを定量的に示すことで、河川水の安全・安心に係る情報発信を行った。また、福島県とIAEAの協力プロジェクトの中で本結果を示すことで、現状の国際的な理解に寄与した。

さらに、これらのデータは本年度末にERANデータベースサイト上での公開を予定しており、今後突発的事象が発生した場合や、避難指示の解除による住民帰還・営農再開などの社会情勢の変化を調査するうえで、比較対象値として広く利用可能となるほか、他の研究者等も参照できるデータとして活用されていくことが期待できる。

### 2. 論文

## 阿武隈川支流広瀬川流域における出水時の放射性セシウム濃度の経時的な変化

氏名：竹内 幸生

受入研究者：恩田 裕一

共同研究者：入澤 歩・新井 宏受・勝野 和美・谷口 圭輔

### 1. 成果

河川水中の放射性セシウム(Cs-137)濃度は、東京電力福島第一原子力発電所事故から 11 年経過した現在も低下している。2019 年の令和元年東日本台風（台風 19 号）による、広瀬川間野橋地点における Cs-137 移行量は、2019 年の年間移行量の 50%以上であったとの当センターの報告がある。出水時における Cs-137 移行量の調査は、下流域や海域への影響を調査するうえで重要であるため、本研究では、前年度に引き続き、阿武隈川支流の広瀬川流域を対象として、出水時及び平水時における流量、濁度及び河川水中の Cs-137 濃度の調査を行った。

広瀬川下流の間野橋付近に観測地点を設置し、河川水位・濁度のデータを 10 分間隔で収集し、出水時において 6 時間の間隔で大容量採水システムによる採水を行った。採水試料を孔径  $0.45\mu\text{m}$  のメンブレンフィルターに通水して懸濁態 Cs-137 を捕集し、ろ液をイオン交換樹脂に通水して溶存態 Cs-137 を捕集した。フィルター及び樹脂に含まれる Cs-137 を Ge 半導体検出器によって測定し、河川水中の Cs-137 濃度を算出した。

本調査では 2022 年 11 月 23 日～28 日における 1 つの出水イベントを観測した。アメダス梁川局におけるイベント降水量及び 1 時間最大降水量は、それぞれ 43 mm、4.5 mm（23 日 22 時及び 24 日 3 時）であった。降雨開始直後から徐々に河川流量は増加し、降雨強度が最大であった時間以降（24 時 3 時）に河川流量最大点へ到達した。

懸濁態 Cs-137 濃度は 750～2,000 Bq/kg、溶存態 Cs-137 濃度は検出下限値以下（ $<0.5\text{ mBq/L}$ ）～  $2.4\text{ mBq/L}$  の範囲で推移した。今回の出水イベントにおける懸濁態 Cs-137 濃度及び溶存態 Cs-137 濃度は、概ね平水時の濃度範囲（懸濁態 780 ～ 2,200 Bq/kg、溶存態  $0.70 \sim 0.86\text{ mBq/L}$ ）と同程度で推移していた。一方、懸濁物質濃度は、雨が止んでから  $1,100\text{ mg/L}$  を観測し、その後  $330 \sim 28\text{ mg/L}$  へ低下し、 $300\text{ mg/L}$  へ上昇した。このイベントでは、懸濁態 Cs-137 濃度と懸濁物質濃度との間に明瞭な関係はみられなかった。

今後、取得した水位と濁度データの解析を行い、河川水中の Cs-137 濃度と河川流量、或いは懸濁物質濃度の経時的な変動を明らかにし、このイベントにおける Cs-137 移行量の推定を行う。加えて、出水時の河川観測を実施し、これまでの出水時の観測と併せて、河川水中の Cs-137 濃度、流量、懸濁物質濃度の経時的な変動や、イベント降雨量及び降雨強度など、イベントごとの特徴把握を行う。

## 2. 論文

1. 竹内幸生, 入澤歩, 那須康輝, 樊少艶, 谷口圭輔, 恩田裕一 (2023) 福島県浜通りにおける河川中の放射性セシウムの動き, 全国環境研会誌, Vol. 48, No.1, pp.40-44, 2023. (査読無し)
2. 竹内幸生, 谷口圭輔, 藤田一輝, 新井宏受, 勝野和美, 那須康輝, 倉元隆之, 林誠二, 青野辰雄, 神林翔太, 浜島大輝, 高橋博路, 山崎慎之介, 山村充, 山田裕 (2021) 前田川における 2019 年台風 19 号以降の放射性セシウム動態の影響について, Proceedings of the 22nd Workshop on Environmental Radioactivity pp.56-61, 2021. (査読有)
3. 由井和子, 竹内幸生, 山本貴士, 倉持秀敏, 大迫政浩 (2020) 廃棄物焼却におけるストロンチウムの挙動と溶出特性. 環境放射能除染学会誌, Vol.8, No.3, pp.133-146, 2020. (査読有)



## 間伐による流域・斜面土砂流出の変化：移動土砂量と同位体データを用いて

氏名：笠原 玉青

受入研究者：恩田 裕一

### 1. 成果

間伐は、管理放棄された人工林の対策の 1 つとして全国各地で実施されている。森林の変化は、流域からの水や土砂の流出を変化させ、下流域にも影響を与える。間伐による流域からの土砂や水の流出の変化を理解することは重要である。近年では、集中豪雨による大規模な斜面崩壊や土石流の被害の報告も増えている。そこで、本研究では急峻な地形をもつ森林流域を調査地とし、本数で 50%の強度の点状間伐を行った際の土砂と水の流出の変化を 2 つの流域で観測することを目的とした。また同位体データも用いて、土砂流出の変化を考察した。

調査流域の 1 つ飯塚流域は、福岡県飯塚市に位置し、スギ・ヒノキの人工林が全体を覆う流域面積約 3 ha の小流域。年平均降水量は 2098 mm で、2012 年の 1~3 月にかけて間伐が実施され、立木密度が 1324 本/ha から 652 本/ha へと変化した。伐採木は流域外へ持ち出された。もう 1 つの調査流域（御手洗水流域）は、福岡県篠栗町に位置し、ヒノキの人工林が流域の 46%（谷部）を覆う、面積 9 ha の流域である。年平均降水量は 1611 mm で、2012 年の 1~3 月にかけて間伐が実施され、立木密度が 1900 本/ha から 950 本/ha へと変化した。切り捨て間伐で、伐採木は流域内に放置された。

両調査流域では、2011 年を間伐前、2013 年を間伐後とし、流量の観測を行った。流量堰を用い、10 分間隔で水位を測定、水位流量曲線から流量を計算した。飯塚流域においては、水の流出にともなって移動した土砂量と Cs-137 濃度も斜面と流路で測定した。御手洗水流域においては、間伐後の流量の観測を 2018 年と 2019 年にも実施した。

間伐直後は、両調査流域において、高流量に大きな変化は見られないが、低流量が高くなる傾向が流況曲線から確認できた。イベント降雨量と日流量の関係も、間伐前後で変化はみられなかった。御手洗水流域では、間伐から 6-7 年後には、低流量も間伐前の量に戻っていた。両流域とも本数 50%の強度間伐を実施したが、流量に大きな変動は見られず、比較的短い時間で間伐前の流況に戻ることが示唆された。

斜面における土砂移動量は、イベント降雨量、表面流量との正の相関がみられた。ただし、相関がみられたのは間伐後のみで、間伐前は降雨と土砂移動には有意な関係はみられなかった。間伐によって林床の植生が増えたものの、降雨量が大きいと間伐前に比べて土砂移動量が増えることが示唆された。流路内における土砂移動量に関しては、間伐後のみ測定し、ピーク流量と正の相関がみられ、流路に堆積した土砂が主な供給源であることが示唆された。流量堰で採取した浮遊土砂の Cs-137 濃度は、間伐前と比べると、間伐後に低い傾向が見られ、間伐によって細粒土砂供給源が変化したと考えられた。

### 2. 論文

## 海洋における Sr 及び 3H の全球時空間変動-HAMglobal2021 のデータ解析より

氏名：猪股 弥生

受入研究者：坂口 綾・青山 道夫

共同研究者：

### 1. 成果

2011年3月の東京電力福島第1原発事故で海に放出された放射性セシウム( $^{137}\text{Cs}$ )のうち一部が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經由して日本海に到達していることが明らかになっている(Aoyama et al., 2017; Inomata et al., 2018a)。本研究では、表層海水(0-20m)中の $^{90}\text{Sr}$ 及び $^3\text{H}$ の時空間変動解析を行った。HAMglobal2021(Aoyama, 2021)に収録されている1950年代から2020年までのデータ( $^{90}\text{Sr}$  11480、 $^3\text{H}$  37105 データ)を使用した。全球を37の海域に分けて解析をおこなった。

$^{90}\text{Sr}$ の高濃度は、 $^{137}\text{Cs}$ と同様に、西部北太平洋と北大西洋であり、大規模大気核実験及び再処理施設からの直接漏洩の影響があるものと考えられた太平洋及びその縁辺海(日本海, 東シナ海, 西部北太平洋, 亜寒帯北部太平洋, オホーツク海)における $^{90}\text{Sr}$ 濃度は、ほぼ指数関数的に減少していた。見かけの半減期(Tap; 1950-1970, 1970-1990, 1990-2010, 2011-2020年)は3.6-25.1年であり、1990年以降のTapはそれ以前と比較して長い傾向があった。最大のTapは2010-2019年の東シナ海であった。 $^{137}\text{Cs}$ を用いた同様の解析から、日本海やその上流に位置する東シナ海におけるTapは西部北太平洋のTapと比較してわずかに長い値であるため日本海への $^{137}\text{Cs}$ の流入が示唆されていたことから、 $^{90}\text{Sr}$ も $^{137}\text{Cs}$ と同様に西部北太平洋からの流入が示唆された。日本海への $^{90}\text{Sr}$ 流入量は、東シナ海への $^{90}\text{Sr}$ 流入量や日本海への $^{137}\text{Cs}$ 流入量と比較して少ない傾向が示唆された。また、 $^{90}\text{Sr}$ 濃度の減少は $^{137}\text{Cs}$ の濃度の減少率・勾配と一致しておらず、海水中での輸送プロセスなどの挙動が異なっていることが示唆された。

### 2. 論文

Evaluating the transport of surface seawater from 1956 to 2021 using  $^{137}\text{Cs}$  deposited in the global ocean as a chemical tracer, ESSD, accepted.

## 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 90Sr 分析法の開発とミ

### ルク・食品中の 90Sr 測定への応用

氏名：小島 貞男

受入研究者：坂口 綾・青山 道夫

共同研究者：有信 哲哉・緒方 良至・箕輪 はるか

#### 1. 成果

##### 1. 本研究の目的

我々は Sr 吸着剤（ピュアセラム MAq、日本化学工業社製）を用いた Sr 分離法、90Y ミルキング法、チェレンコフ光による測定法の開発に取り組んできている（発表論文 1、2）。前年度において魚骨試料中の 90Sr 測定への応用を試み、模擬試料では約 95% の Sr 吸着率を得た。市販の煮干しを用いた試料では約 70% の Sr 吸着率を得ており（発表論文 3）、さらに再吸着法により 90% の吸着率が見込まれる。本研究では、当該分析法を新たに食品であるミルクの分析に応用した。

##### 2. 実験方法

ミルク中の 90Sr の分析は一般には乾式灰化・湿式灰化により試料を溶液とした後に分析を行う。この方法は前年度の魚骨試料に用いた方法と同様である。本法では操作時間を短縮させるために、ミルクに酸を加え、沈殿した乳固形分を遠心分離法で除いた乳清を分析に供した。Sr および Y キャリアを加えた市販の牛乳 103.8 g に 1.6 kBq の 90Sr（子核種 90Y と放射平衡）を加えた。溶液試料中の 90Sr および 90Y の濃度を測定するために、溶液試料から 1 mL を分取、秤量し、LSC 測定を行った。この後、加えた試薬、分取した試料については秤量を行い、定量のための基礎データとした。溶液試料に濃塩酸 5 mL を加え、攪拌、遠心分離し、乳清と乳固形物に分けた。乳清中の 90Sr および 90Y の濃度を測定するために、1 mL を分取し LSC 測定を行った。また、90Y 測定用にも 1 mL を分取し、チェレンコフ光測定を行った。乳清に 2 mL の 1.25M 硫酸ナトリウムと 100 mg の Sr 吸着剤を添加し、攪拌を開始した。Sr 吸着率の経時変化を見るために、30 分、60 分経過時に懸濁溶液からシリンジフィルタを用いて乳清をそれぞれ 1 mL ずつ分取し、LSC 測定およびチェレンコフ光測定を行い、90Sr・90Y の定量を行った。120 分間攪拌した後に、遠心分離により、乳清と乳固形物を分離し、乳清からそれぞれ 1 mL ずつ分取し、90Sr・90Y の定量を行った。また、乳固形分の測定はゲル懸濁法（ERAN2022、研究課題番号 F-22-06 参照）によって行った。

##### 3. 結果と考察

LSC 測定、チェレンコフ光測定の結果から、投与された 90Sr、90Y はそれぞれ 1.64 kBq であった。塩酸添加による沈殿分離後の乳清中の 90Sr は 1.20 kBq、90Y は 1.24 kBq であ

り、74%の<sup>90</sup>Srが回収されたことが分かった。<sup>90</sup>Sr吸着剤添加後の攪拌時間が30分、60分、120分における、乳清中の<sup>90</sup>Srはそれぞれ6.71 kBq、5.35 kBq、4.54 kBqであった。これらの値から<sup>90</sup>Sr吸着率は44%、55%、62%と上昇することが分かった。<sup>90</sup>Yについては約95%以上が乳清中に残存し、<sup>90</sup>Yは<sup>90</sup>Sr吸着剤に吸着されないことが再確認された。また、ゲル懸濁法による経時測定では計数率は測定開始から徐々に増加し、18日後には約2倍となり、<sup>90</sup>Sr吸着剤には<sup>90</sup>Srのみが吸着していることが分かる。なお、120分の攪拌では<sup>90</sup>Srの吸着率は62%にとどまっており、これはミルクに投与した<sup>90</sup>Srの46%しか<sup>90</sup>Sr吸着剤に回収されていないことになる。改良すべき点は2点ある。攪拌時間を単に延長するよりは、<sup>90</sup>Sr吸着剤を乳清から分離・回収した後に、乳清に<sup>90</sup>Sr吸着剤を追加添加し、再吸着の操作を行う方がより効率的であることが予備実験で明らかになっており、今後この再吸着法を検討する必要がある。さらに塩酸添加により沈殿した乳固形物中に26%の<sup>90</sup>Srが残存しており、これからの<sup>90</sup>Sr回収法の検討も課題である。

### 3. まとめ

ミルク中<sup>90</sup>Srの測定にあたり分析操作時間を短縮するために、<sup>90</sup>Sr吸着剤を用いた乾式灰化を伴わない方法を検討した。<sup>90</sup>Srをスパイクしたミルクに塩酸を添加し、生成した乳固形物を遠心分離により除去した乳清に硫酸ナトリウム溶液と<sup>90</sup>Sr吸着剤を添加した。2時間の攪拌で投与した<sup>90</sup>Srの62%が<sup>90</sup>Sr吸着剤に吸着した。子核種<sup>90</sup>Yは<sup>90</sup>Sr吸着剤に吸着しなかった。課題としては<sup>90</sup>Sr吸着率の向上のために、再吸着法の検討が必要である。また、乳固形物に26%の<sup>90</sup>Srが残存しており、ここからの<sup>90</sup>Sr回収法の検討も必要である。

## 2. 論文

- [1] 箕輪はるか、緒方良至、加藤結花、小島貞男、ケイ酸バリウムを主成分とする吸着剤への海水・陸水における<sup>90</sup>Srの吸着特性、Proceedings of the 34th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, 176-179 (2020)
- [2] 小島貞男、緒方良至、箕輪はるか、加藤結花、ケイ酸バリウムを主成分とする吸着剤への<sup>226</sup>Raおよび放射性<sup>210</sup>Pbの吸着特性、Proceedings of the 21st Workshop on Environmental Radioactivity, KEK Proceedings 2020-4, 186-191 (2020)
- [3] 小島貞男、緒方良至、有信哲哉、箕輪はるか、加藤結花、青山道夫、<sup>90</sup>Sr特異的吸着剤による魚介類中の<sup>90</sup>Srの測定、第22回環境放射能研究会講演予稿集、B12 (2022)

## 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<sup>90</sup>Sr 分

### 析法の検討2 ー測定法の比較検討ー

氏名：緒方 良至

受入研究者：坂口 綾・青山 道夫

共同研究者：有信 哲哉・小島 貞男・箕輪 はるか

#### 1. 成果

##### 1. Sr 吸着剤への放射性ストロンチウムの吸着

海水に HCl を加え、pH を 1 にした後、<sup>90</sup>Sr を加え、攪拌後、少量採取し、<sup>90</sup>Sr 濃度を確認した。次に、ピュアセラム MAq(以後、P-MAq)を海水 1 L あたりに 1.5 g の割合で加え、4 時間攪拌した。デカンテーション、遠心分離あるいは吸引ろ過で P-MAq を分離し、(1) プラスチックシンチレータボトル(PSB)に入れ、低 BG 液体シンチレーションカウンタで測定(PSB 法)

(2) 標準液体シンチレーションバイアルに移し、ゲル懸濁シンチレーションカクテルあるいは乳化シンチレータを加え、汎用の液体シンチレーションカウンタで測定(ゲル懸濁法)

(3) 低 BG ガスフローカウンタで測定(LBC 法)

で測定し、比較した。

##### 2. 結果と考察

PSB 法では、P-MAq をろ紙上に薄く伸ばす必要があり、P-MAq は、150 mg が上限であった。これは、海水 100 mL に対応する。ゲル懸濁法では、P-MAq を 1.5 g まで使用することが可能で、海水 1 L に対応可能であった。LBC 法では、75 mg が上限であった。これは、海水 50 mL に対応する。60 分測定の場合のそれぞれの検出下限濃度(MDC)は、0.5、0.06、0.6 Bq L<sup>-1</sup>であった。PSB 法は、MDC は、高めであるが、廃シンチレータが発生しない。ゲル懸濁法は、1 L の海水に適用可能で、MDC が低いが発生シンチレータが発生する。LBC 法は、試料 50 mL であり、操作が簡便であり、また、経済的である。測定の目的や現有機器、コストなどを勘案して、適切な測定法を選択できる。

##### 3. まとめ

本法では、試料調製開始から 6 時間で測定結果を得ることができ、化学操作は簡単で、また、劇物を使用しない。汎用の測定器で測定できる。

#### 2. 論文

[1] 加藤結花、箕輪はるか、緒方良至、プラスチックシンチレータボトルを用いた放射

性ストロンチウムの測定法の開発、Proceedings of the 19th Workshop on Environmental Radioactivity、KEK Proceedings 2018-7、85-90 (2018)

[2] 箕輪はるか、緒方良至、加藤結花、小島貞男、ケイ酸バリウムを主成分とする吸着剤への海水・陸水における Sr の吸着特性、Proceedings of the 34th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, 176-179 (2020)

[3] 小島貞男、緒方良至、箕輪はるか、加藤結花、ケイ酸バリウムを主成分とする吸着剤への Ra および放射性 Pb の吸着特性、Proceedings of the 21st Workshop on Environmental Radioactivity、KEK Proceedings 2020-4、186-191 (2020)

## 植物器官間炭素動態解析に向けた炭素同位体トレーサ実験体系の確立

氏名：YinYong-Gen

受入研究者：古川 純・海野 佑介・今田 省吾

共同研究者：三好 悠太

### 1. 成果

農作物の収穫量を向上させる上で、光合成産物（炭素）の輸送と分配を精確に把握しコントロールすることが重要である。しかし、特に果菜類のように複数のソース（葉）とシンク（果実、根）器官を併せ持つ場合、炭素の輸送経路や分配様式が複雑に絡みあっているため、その正確な計測が困難である。炭素の輸送と分配に関する研究には、安定同位体の炭素 13 (C-13) や放射性同位体 (RI) の炭素 14 (C-14) 或いは炭素 11 (C-11) がトレーサとして用いられている。3 者は、時間的・空間的な観測スケールや実験手法が異なるため、取得データが断片的で整合性が低いという課題がある。本研究では、3つの共同研究機関が有する C-11、C-13、C-14 それぞれの分析手法を統一させることで、得られたデータの融合性と精確性を向上させるための新しい実験体系の確立を目的として実施した。

これまでに、申請者はトマトの葉に  $^{11}\text{C}\text{O}_2$  をトレーサとして吸収させると同時に、ポジトロンイメージング技術 (PETIS) を用いて撮像することで、葉で作られた  $^{11}\text{C}$ -光合成産物が茎を経由して果実へ輸送される過程をリアルタイムで可視化した。本研究では、この  $^{11}\text{C}\text{O}_2$  のトレーサ実験手法を基にして、同じような実施マニュアルを作成して  $^{13}\text{C}\text{O}_2$  または  $^{14}\text{C}\text{O}_2$  を用いたトレーサ実験に適用させた。具体的に、筑波大学アイソトープ環境動態研究センターにおいてトマトの葉を密閉容器に閉じ込めた後、送気ポンプを用いて  $^{14}\text{C}\text{O}_2$  または  $^{13}\text{C}\text{O}_2$  を密閉容器内の葉に与えた。約 17 時間後に葉や果実などの各器官をサンプリングし、C-14 の組織内分布についてはイメージングプレート (IP) による現像および液体シンチレーションカウンター (LSC) による定量、C-13 の各器官内の分配については同位体比質量分析 (IR-MS、環境科学技術研究所で実施) による定量を行った。これらの計測手法を用いて得られた定量値を考察することで、それぞれの炭素同位体トレーサの投与量やサンプリングのタイミングと採取量などについて最適化するための実験条件を検討した。

得られた PETIS 実験画像データにおける  $^{11}\text{C}$ -光合成産物の果房内の分配パターンについて、各果実への分配量が異なることがこれまでの実験で明らかにした。しかし、茎や果実内部を通る経路やパターンについて知ることは難しいため、C-14 トレーサ実験の後の茎や果実を輪切りにして IP で画像化した。この結果、C-14 は茎の内部においては葉柄との接点を中心に局所的に偏った分布をしており、果実へは果皮および胎座 (中心) を主な輸送経路として利用していることが明らかとなった。LSC および IR-MS による定量値から、葉に投与

した  $^{14}\text{CO}_2$  または  $^{13}\text{CO}_2$  がそれぞれ約 2MBq (C-14 の放射エネルギー) および 2.5 mmol ( $^{13}\text{CO}_2$  量) で各組織において良好な分析結果が得られることが分かった。これによって、炭素トリプトレーサ実験系の構築を実現した。将来、各炭素トレーサを用いた成分分析の実験系を確立し、炭素分配の詳細なメカニズムの解明を進める計画である。

## 2. 論文

なし



## マメ科植物ルーピンの放射性セシウム吸収と分配に関わる輸送体の機能解析

氏名：丸山 隼人

受入研究者：古川 純

共同研究者：久保 堅司・菅 あやね

### 1. 成果

【研究背景】 マメ科のシロバナルーピン（ルーピン）はダイズと比較して放射性セシウム（RCs）を非常に高い濃度で蓄積する。一般に植物によるセシウム(Cs)とカリウム(K)の吸収は拮抗することが知られるが、Csの吸収・体内輸送においてその他の元素の関与も指摘されている。ルーピンは重金属やナトリウム(Na)吸収が多いことでも知られており、これら元素吸収特性が高いCs吸収に関連する可能性があるが詳細は明らかでない。そこで本研究では、ルーピンのCs吸収・分配とその他元素動態との関係性を明らかにすることを目的とした。

【実験方法】 ルーピン2品種（Kievskij と Dieta）を用い、北海道大学の温室にて水耕栽培を実施した。発芽育苗後、標準水耕液（Naを100  $\mu$ M含む）へ移植し、6日後にCs（0.1  $\mu$ M）を含むK濃度3段階（30, 100, 500  $\mu$ M）の3処理区で12日間栽培した。栽培後植物体を部位ごとに収穫し、元素濃度をICP-MSを用いて測定した。また、Cs, K, Naの放射性同位体を用いて短期的なCsの取り込みに及ぼすKやNaの影響も調査した。

【結果・考察】 どちらの品種でも処理K濃度が低いほど、植物体中Cs、Na、マグネシウム（Mg）濃度が高く、特にNaとCs濃度は顕著に高まった。品種間を比較すると、KievskijがDietaと比べて高いCs濃度を示し、DietaではKievskijよりNaやMgで有意に高かった。また、Cs濃度のshoot/root（SR）比はKievskijでDietaより大きい傾向があったものの、K処理による有意な差は見られなかった。マンガンや亜鉛なども同様の傾向が観察された。一方、Na濃度は処理K濃度が低いほどSR比が高まった。放射性同位体を用いた試験においてもDietaがKievskijと比べてNaを多く吸収し、Csの地上部への分配が抑制される結果が得られた。以上のことから、ルーピンはKの不足を主にNaにより代替していると考えられ、KだけでなくNaの取り込みがCsの吸収・分配に関与していると考えられる。

### 2. 論文

## 大気と植物・菌類間での放射性セシウム移行可能性の研究

氏名：北 和之

受入研究者：古川 純

共同研究者：

## 1. 成果

(株)東京電力福島第一原子力発電所の事故により放出された放射性セシウムは地表や植生に沈着したあと、何らかの形で一部が再飛散により大気中に放出され、拡散・移行している。我々のグループでは、浪江町の森林の近傍の未除染地区において大気粒子の連続サンプリングを行い、大気中の放射性セシウムの動態を調べている。その結果、夏季に大気セシウム 137 (Cs-137) 放射能濃度が増加し、その原因は主にこの時期に増加する植生から放出される粗大有機物粒子(バイオエアロゾル)であり (Igarashi et al., 2019)、それを純水抽出すると 50-90%のセシウム 137 が水中に脱離することが分かった。

本共同研究は、この大気粒子から純水中に脱離する Cs-137 が、植物に吸収され植物-大気での循環が起これるか、実験によりその可能性を明らかにすることを目的としている。本研究では、下記のサンプリングおよび実験により目的にアプローチした。

- 1) 上記サイトにおいて、大気粒子を 1 か月程度連続的に捕集した試料を得る。
- 2) 1 で捕集した粒子試料を純水抽出し、その前後での放射能を測定し、大気中の Cs-137 が純水に脱離する割合を理解する。
- 3) 2 の抽出液でイネなど適切な植物を栽培し、Cs-137 が植物体内に移行するか実験する。
- 4) 浪江サイトで汚染土壌と非汚染土壌で植物を栽培し、植物が吸収する Cs-137 を比較し、大気・降水起源の寄与を推定する

2018 年および 2021 年について、ほぼ 1 年を通し、おおよそ 1 か月大気粒子を連続的に捕集した試料を対象とした。大気 Cs-137 放射能濃度は、2 年とも過去の観測 (Kinase et al., 2018) と同様に、春に比較的小さいピーク、8-9 月に最大のピークを持つ季節変化を示した。純水抽出し Cs-137 が純水に脱離する割合を調べたところ、春のピークでは約 45%、夏のピークでは 60~70%が純水中に抽出された。この抽出で得られた溶液中に微細な(不溶性)土壌鉱物が混入していないか SEM-EDS 分析で調べたが、検出されなかったことから、純水中に抽出されたほぼすべての Cs-137 が水溶性であると考えられる。

この抽出液でイネを栽培したところ、おおむね純水抽出液中の Cs-137 放射能に比例する形で、イネの根部および地上部に Cs-137 が検出された。その量は栽培開始 48 時間後と 144 時間後では、144 時間後で多くなり、吸収が時間とともに進む様子がわかる。多くのサンプルでは、誤差の範囲内で純水抽出液中の Cs-137 はほぼ 100%イネの根部あるいは地上部に移行したが、2 年とも 6-7 月のサンプルでは、移行割合が根部と地上部合計で約 70%と、有

意に 100%より低い結果が得られた。このイネへの吸収割合が低い原因について、抽出液中のカリウムイオン(K<sup>+</sup>)濃度が高く、Cs 吸収が阻害されたためではないかと考え、純水抽出溶液のイオン組成を調べたが、これらイネへの吸収割合が低い試料において有意に K<sup>+</sup>濃度が高いといった関係は見られず、今のところ原因は不明である。

2022 年は、この大気起源の Cs-137 が、植物体内に吸収される Cs-137 に占める割合を推定するため、観測サイトの林内 1 か所、林外 2 か所において植物を栽培する実験を実施した。土壌、リター、降水、大気から吸収する Cs-137 の寄与を推定するため、各地点において Cs-137 の多い土壌として地表 0-5cm の表土、土質が同じで Cs-137 の少ない 5cm 以深の下層土、および下層土に周囲のリターを加えた土の 3 種類の区画を設け、それぞれで植物を育成した。その結果、林外では土壌から吸収される Cs-137 が約 90%で、大気・降水の寄与は 10%以下であることが分かった。林内では、林内雨からの寄与が大きいことが分かった。

## 2. 論文

現在準備中

## イネのセシウム吸収経路の全容解明

氏名：頼 泰樹

受入研究者：古川 純

共同研究者：

## 1. 成果

東日本大震災に起因した原発事故による放射性セシウム(Cs)の環境汚染は深刻な影響を被災地に与えた。環境に放出された放射性 Cs の動態については経験がない部分が多く、植物についても Cs を K の吸収経路から取り込むであろうこと以外、その詳細は明らかにできていなかった。我々は主要作物のイネで Cs 低吸収変異体を作成し、K 輸送体の 1 つである OsHAK1 がほとんどの Cs<sup>+</sup>を根に取り込んでいることを突き止めた。しかし、イネは OsHAK1 以外の経路からも少量の Cs<sup>+</sup>を取り込んでいて、Cs の吸収量はゼロではない。OsHAK1 欠失変異体を水耕栽培すると通常の土壌の K の濃度範囲内での Cs 吸収は激減するが、その Cs 吸収量はゼロにはならない。

チェルノブイリ以降の植物の Cs 研究では HAK よりも電位非依存性 (VIC; Voltage-Insensitive Cation channel) の CNGC (Cyclic Nucleotide-Gated Channel) が Cs 吸収に大きく関与していると考えられてきた。OsHAK1 といずれかの CNGC がイネの根への Cs 吸収経路を構築している可能性が極めて高い。その二重変異体を作ればイネの根への Cs 吸収を全容解明できると考えられる。イネの CNGC 遺伝子はこれまでゲノム上に 16 個見つかっている。T-DNA によるノックアウト 10 系統について Cs<sup>+</sup>吸収速度の違いについて調べた。高 K 濃度を中心に異なる K 濃度における CNGC 変異体の Cs 吸収特性を解析した結果、2 系統について Cs<sup>+</sup>吸収が半分程度に低下していた。しかしながら、これらの系統については OsHAK1 の機能が保持されている。現在この系統と OsHAK1 との交配による 2 重変異体の作成を進めている。

## 2. 論文

新植物栄養・肥料学 トピックス セシウムを吸わないイネの開発

## ナトリウムによるイネのセシウム吸収・輸送制御機構の解明

氏名：菅野 里美

受入研究者：古川 純

共同研究者：Nathalie PRAT

### 1. 成果

申請者らのこれまでの実験から、イネの Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>輸送体変異体株 (hkt2;1 株) は、Cs<sup>+</sup>吸収および地上部への輸送が野生型株に比較して高いことを確認している。このことは、HKT2;1 遺伝子は Cs<sup>+</sup>の直接的な輸送を担わないが、植物の Cs<sup>+</sup>輸送に間接的に寄与することを示唆する。植物体内の Na<sup>+</sup>は、Cs<sup>+</sup>輸送に差が生じる条件下において hkt2;1 株で低く、K<sup>+</sup>は変わらない事から、Na<sup>+</sup>は Cs 輸送において重要な因子であると考えられた。

植物体内の Na<sup>+</sup>による Cs 輸送を制御する分子メカニズムについて調べるため、Cs<sup>+</sup>吸収への寄与が知られている輸送体遺伝子について qPCR による発現解析をしたが、野生株と変異体株の間で差が見られなかった。そこで、今年度は Cs<sup>+</sup>吸収が高まる条件下で働く輸送遺伝子について RNA-seq により網羅的に解析し hkt2;1 株内 Cs<sup>+</sup>輸送を増加させる原因となりうる新規因子を同定することを目指した。

RNA-seq の結果から、候補遺伝子として輸送体遺伝子を 2 つ絞り込むことができた。これらの遺伝子について Cs 輸送能について報告がないことから、次年度はこれらの遺伝子の変異体株での Cs 吸収解析、および輸送体タンパク質の輸送活性を電気生理学的実験から明らかにする必要がある。

本研究により 137Cs<sup>+</sup>の吸収が高まる K<sup>+</sup>と Na<sup>+</sup>の条件や、絞り込まれた遺伝子の 137Cs<sup>+</sup>輸送への寄与を解明することができれば、K<sup>+</sup>のみでなく Na<sup>+</sup>による土壤環境改良方法や作付け前の土壤元素環境の調査の際の新たな指標の提案などへの応用の可能性がある。

### 2. 論文

## 環境中ネプツニウム測定用 AMS トレーサー調製法の検討

氏名：横山 明彦

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：永井 歩夢・細川 浩由

## 1. 成果

環境中の超ウラン元素濃度を定量する方法として、 $\alpha$  スペクトロメトリー等の放射能による分析法が以前より行われてきた。近年では長寿命核種については従来の放射化学的手法と比較し高速かつ高感度な質量分析による測定が主流となりつつある。同様に、アクチニドなどの重核をターゲットとした核反応生成物の測定においても、半減期や壊変特性に依存しない質量分析は、従来の放射能による反応断面積測定を補完することが期待できる。 $^{236}\text{Np}$  ( $t_{1/2}=1.54\times 10^5$  y)は $^{232}\text{Th} + ^7\text{Li}$ 核反応により生成され、加速器質量分析法(AMS)による Np 測定のスパイクとして期待されている核種である。このような核反応による長寿命核種の測定において、質量分析は生成核種の断面積を得るための有力な手法となり得る。ただし照射済みの Th ターゲットから調製した Np 成分には、反応で生成する核異性体  $^{236m}\text{Np}$  の壊変生成物の  $^{236}\text{Pu}$  や  $^{236}\text{U}$ 、その他の反応の副生成物が混入している可能性がある。また、Th 中に不純物として存在する  $^{235}\text{U}$  は中性子を吸収し  $^{236}\text{U}$  を生成する。本研究では、このような質量分析の妨害核種となる同重体核種がスパイクへ混入する可能性を検討するために、Th ターゲット中の U 同位体と、核反応によって生成される U 同位体について高分解能 ICP-MS (ICP-SF-MS)を用いて定量を行う。また、Au 箔を用いて照射中の中性子束の測定を行い中性子の吸収により生成した  $^{236}\text{U}$  の量を推定する。

核反応のターゲットとして用いる Th 箔(約  $20\text{ mg/cm}^2$ )の一部を切り取って溶解し、ICP-SF-MS を用いて Th 箔中に不純物として存在する U 同位体を定量した。理化学研究所の AVF サイクロトロンにて Th 箔 2 枚を重ねてスタックターゲットとし 42 MeV の  $^7\text{Li}$  イオンを照射した。また、照射中 Au 金属箔と U 電着試料をそれぞれ中性子モニターとリファレンスとしてビームコース末端に設置した。照射後 Au 金属箔を Ge 半導体検出器により  $\gamma$  線測定し放射化法により中性子束を求めた。照射された Th ターゲットは溶解し、UTEVA レジンを用いて化学分離した。分離した U 成分を希釈し、ICP-SF-MS を用いて U 同位体濃度を測定した。測定対象として  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  を選び、検量線溶液には XSTC-13 (SPEX 社)を用いた。

未照射 Th 箔から分取した試料中の不純物  $^{238}\text{U}$  濃度として  $1.83 \sim 9.97\text{ }\mu\text{g/g}$  を得た。 $^{235}\text{U}$  はおおよそ天然存在比で存在し、 $^{235}\text{U}$  濃度の上限値は  $1.09\times 10^{-7}\text{ g/g}$  であった。Au 箔中の  $^{198}\text{Au}$  と  $^{196}\text{Au}$  の  $\gamma$  線スペクトルの測定から得られた熱中性子束と速中性子束は、それぞれ  $6.5\times 10^5\text{ s}^{-1}$ ,  $1.6\times 10^7\text{ s}^{-1}$  であった。(n, $\gamma$ ), (n,2n)反応の断面積データ[を参照し、測定された不純物 U 濃度と熱中性子束から、ターゲット中に生成される  $^{236}\text{U}$  の原

子数は  $2.4 \times 10^2$  と推定された。これはリファレンス中の  $^{236}\text{U}$  濃度(定量下限値以下)と矛盾はなかった。一方、 $^{236}\text{gNp}$  の生成数は  $1.4 \times 10^9$  個(反応断面積を 0.1 mb と仮定)であり  $^{236}\text{U}$  より 7 桁多く生成すると考えられる。このことから、Th 箔に不純物として含まれる  $^{235}\text{U}$  が中性子を吸収して生成される  $^{236}\text{U}$  による汚染は無視できると考えられる。

照射した Th ターゲット中の U 同位体比を求めると、 $^{236}\text{U}$  は検出限界以下であったが、照射による  $^{233}, ^{234}\text{U}$  の生成が確認された。U 同位体の反応断面積を計算し、先行研究の  $\gamma$  線スペクトロメトリーにより測定された、同じ核反応系における Pa 断面積と比較した。 $^{233}\text{U}$  の反応断面積は  $^{233}\text{Pa}$  の断面積と近い値となり、 $^7\text{Li}$  が  $\alpha$  と t に分裂し、t と  $^{232}\text{Th}$  の不完全融合反応によって生成した  $^{233}\text{Pa}$  の壊変により生成した  $^{233}\text{U}$  を分離、定量したものと考えられる。同様に  $^{234}\text{U}$  は  $^{234}\text{Pa}$  の壊変により生成されるものの、一部は  $\alpha$  と  $^{232}\text{Th}$  の不完全融合反応により直接生成されていることがわかった。この結果は  $\gamma$  線スペクトロメトリーを用いた放射化学的手法と質量分析により得られた反応断面積に矛盾がないことを示し、核反応により生成された極微量の U 生成物を質量分析で定量することに成功した。

## 2. 論文

A. Nagai, K. Teranishi, R. Morita, H. Hosokawa, A. Yokoyama, A. Nakajima, A. Sakaguchi, Y. Shigekawa, A. Nambu, T. Yokokita, H. Haba, Determination of  $^{236}\text{U}$  in a Th target irradiated with Li ions by ICP mass spectrometry 2021 Vol.55, 123.

## 環境中に放出された Cs-135 の精密定量を目的とした 国家標準にトレーサブルなセシウ

## ム同位体標準液の開発

氏名：浅井 志保

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：佐藤 泰・古川 理央

## 1. 成果

Cs-135 は半減期が 230 万年の核分裂生成物であり、その核分裂収率 (0.067) は Cs-137 に近く、比較的生成量が多い放射性核種である。このため、高レベル放射性廃棄物の処分安全評価において、数十万年から数百万年にわたり実効線量を支配する核種になると評価されている。また、福島第一原発の処理水を海洋放出する場合には、モニタリングや環境動態研究の観点で分析ニーズが高い核種の 1 つにもなる。しかし、Cs-135 は、定量に不可欠な基準物質 (標準液) の一般供給がないため、セシウム元素標準液や Cs-137 標準液などで間接的に校正するのが現実的な対応となっている。そこで、本研究では国家計量標準機関である産総研 NMIJ が所有する認証標準物質および標準物質生産設備を利用して、国家標準にトレーサブルな Cs-135 標準液の開発を進めることとした。

Cs-135 の値付けをする元液として、国内で容易に入手可能な JCSS 校正値付きの Cs-137 標準液を用いた。市販の Cs-137 標準液中には Cs-135 と Cs-137 が共存すると予想されるため、Cs-137 標準液中の Cs-135 の質量分率を算出することとした。これまでに誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) により Cs-135/Cs-133 を実測し、認証値付き元素セシウム (Cs-133) 標準液を基準として Cs-135 の質量分率を決定した。また、市販 Cs-137 標準液中の不純物元素 (同位体) を測定し、Cs 同位体の定量値に影響しないこと確認した。ここでは、想定試料の質量分率レベルを考慮し、0.02 pg/g~0.07 pg/g の希釈液を調製して、Cs 各同位体の質量分率を算出した。その結果、Cs-133、Cs-135、および Cs-137 の質量分率は、それぞれ 0.0475 ng/g ± 0.0006 ng/g、0.0145 ng/g ± 0.0006 ng/g、および 0.0214 ng/g ± 0.0004 ng/g となった。得られた希釈液中の Cs-135 質量分率算出過程における不確かさの要因を評価したところ、秤量値に起因する不確かさは無視できるほど小さかったが、小分け容器間の均質性の不確かさの寄与が半分近くを占めることがわかった。したがって、小分け溶液ごとに値付けをする方針とした。均質性とは別に、不確かさの寄与が大きくなる可能性がある質量差別効果の補正に付随する不確かさは、0.02 pg/g レベルの溶液では、計数率の相対標準偏差が 1%を超えるため、実質的には影響しなかった。今後は、安定性評価など、頒布に必要な技術情報の取得を進め、実用標準液としての評価法の確立を目指す。

## 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

### 生物影響

氏名：星 正治

受入研究者：坂口 綾・恩田 裕一

共同研究者：

#### 1. 成果

本研究の研究代表者は、1994年からカザフスタンの旧ソ連核実験場周辺で放射線とその人体への影響に関する研究を行ってきた。この間、土壌や水質汚染の測定や放射線量の評価を行ってきた。また、放射性微粒子の影響について動物実験を行い、放射性微粒子がラットの肺などに与える影響について研究した。その結果、その影響が外部放射線に比べて20倍以上大きいという新たな影響も発見した。ただ、6回の実験を繰り返したが、3回は影響が見えたが、残りの3回は影響が見えなかった。この理由は動物の状態による可能性が高いが、その解明は今後の課題である。

その他、旧ソ連核実験場周辺の住民の被曝とその影響の調査も継続している。本年度は周辺の村の被曝線量評価を行っている。はじめに、アンケート調査を実施し、放射線が遮蔽される家の中など人いた時間などを調査した。その後、被曝線量の推定のためセシウム137の土壌汚染を測定した過去の文献を調査した。主にその結果を基に被ばく線量を評価する。その他、レンガや歯の測定結果の文献も調査した。今後、それらを総合して被曝線量の評価を行う。

また、カザフスタンにはウラン鉱山や精錬所が多いので、その地域のラドンや重金属の測定も行っている。前回、ステップノゴルスク近郊のアクス村でラドンビジョン7によるラドン測定を行ったところ、露天掘りのウラン鉱山や工場排水貯水池に近い小学校の校舎内で平均3000~4000Bq/m<sup>3</sup>という高い数値が観測された。そこで、周辺の家屋にも高い場所があると考え、Raduetによる測定を開始した。これはラドンとトロンの両方が測定出来るように2対になっていて、安価であるため多数の測定ができる。今回、アクス村に約50台、首都アスタナに約50台設置した。その結果、アクス村では規制値を超える1,000Bq/m<sup>3</sup>を超える家屋があることが判明した。この測定は今年(2023年)も継続して行い、結果を確認する予定である。カザフスタンではラドンの規制値を200Bq/m<sup>3</sup>以下と定めており、IAEA、ICRP、WHOは対策を必要とするレベルを300Bq/m<sup>3</sup>としている。そのため、強制換気など何らかの防護策を講じるとともに、自治体に対策の必要性を伝える必要がある。また、引き続き大気中のエアロゾルを採取して微粒子として飛散している放射能や重金属を測定し、住民への影響も調査して行く予定である。

## 2. 論文

1. Masaharu Hoshi, The overview of neutron-induced <sup>56</sup>Mn radioactive microparticle effects in experimental animals and related studies. *J. Radiat. Res.* 63, Suppl.\_1, 2022, i1–i7, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac020>.
2. Valeriy Stepanenko, Andrey Kaprin, Sergey Ivanov, Peter Shegay, Viktoria Bogacheva, Masaharu Hoshi, Overview and analysis of internal radiation dose estimates in experimental animals in a framework of international studies of the sprayed neutron-induced <sup>56</sup>Mn radioactive microparticles effects. *J. Radiat. Res.* 63, Suppl.\_1, 2022, i8–i15, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac043>.
3. Valeriy Stepanenko, Hitoshi Sato, Nariaki Fujimoto, Kazuko Shichijo, Shin Toyoda, Noriyuki Kawano, Satoru Endo, Andrey Kaprin, Sergey Ivanov, Peter Shegay, Alexey Petukhov, Timofey Kolyzhenkov, Victoria Bogacheva, Nailya Chaizhunosova, Dariya Shabdarbaeva, Kassym Zhumadilov, Masaharu Hoshi, External dose estimates of laboratory rats and mice during exposure to dispersed neutron-activated <sup>56</sup>Mn powder. *J. Radiat. Res.* 63, Suppl.\_1, 2022, i16–i20, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac032>.
4. Valeriy Stepanenko, Andrey Kaprin, Sergey Ivanov, Peter Shegay, Viktoria Bogacheva, Hitoshi Sato, Kazuko Shichijo, Shin Toyoda, Noriyuki Kawano, Megu Ohtaki, Nariaki Fujimoto, Satoru Endo, Nailya Chaizhunosova, Dariya Shabdarbaeva, Kassym Zhumadilov, Masaharu Hoshi, Microdistribution of internal radiation dose in biological tissues exposed to <sup>56</sup>Mn dioxide microparticles. *J. Radiat. Res.* 63, Suppl.\_1, 2022, i21–i25, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac023>.
5. Keiko Otani, Megu Ohtaki, Nariaki Fujimoto, Darkhan Uzbekov, Ynkar Kairkhanova, Aisulu Saimova, Nailya Chaizhunosova, Dariya Habdarbaeva, Almas Azhimkhanov, Kassym Zhumadilov, Valeriy Stepanenko, Masaharu Hoshi, Effects of internal exposure to neutron-activated <sup>56</sup>MnO<sub>2</sub> powder on locomotor activity in rats. *J. Radiat. Res.* 63, Suppl.\_1, 2022, i38–i44, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac003>.
6. Valeriy Stepanenko, Andrey Kaprin, Sergey Ivanov, Peter Shegay, Hitoshi Sato, Shin Toyoda, Noriyuki Kawano, Nariaki Fujimoto, Satoru Endo, Viktoria Bogacheva, Timofey Kolyzhenkov, Artem Khailov, Kassym Zhumadilov, Aidana Zhumalina, Dana Yerimbetova, Masaharu Hoshi, Estimation of ‘dose-depth’ profile in the surface layers of a quartz-containing tile from the former Hiroshima University building indicates the possible presence of beta-irradiation from residual radioactivity after A-bombing. *J. Radiat. Res.* 63, Suppl.\_1, 2022, i54–i60, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac029>.
7. Kassym Zhumadilov, Alexander Ivannikov, Valeriy Stepanenko, Shin Toyoda, Polat Kazymbet, Andrey Kaprin, Sergey Ivanov, Peter Shegay, Satoru Endo, Masaharu Hoshi, Tooth enamel ESR dosimetry for Hiroshima ‘black rain’ zone residents. *J. Radiat. Res.* 63, Suppl.\_1, 2022, i61–i65, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac024>.

## 超稀崩壊実験で用いる結晶素材に含まれるウラン・トリウム不純物量の微量分析

氏名：梅原 さおり

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：高久 雄一・伏見 賢一・黒澤 俊介

### 1. 成果

物質優勢の宇宙の謎を説明するには、粒子と反粒子の転換可能性（マヨラナ性）が一つの鍵となる。このマヨラナ性を検証するほぼ唯一の実験的手法は、“ニュートリノを放出しない二重ベータ（ $0\nu\beta\beta$ ）崩壊”を観測することである。しかし、この $0\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期は $10^{26}$ 年以上と非常に長く稀な事象である。そのため観測に使用する放射線検出器は、極めて低いバックグラウンドを要求される。

この二重ベータ崩壊測定におけるバックグラウンド事象の起源は、検出器に不純物として微量含まれるトリウム系列・ウラン系列の放射性核種である。この検出器内部の放射性不純物量は、概ね $10\cdot\text{Bq/kg}$ 以下（数ppt以下）が要求される。そのために、我々は $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索に用いるフッ化カルシウム結晶の高純度化を目指している。本研究では、高純度化の方法として、下記の二種類の手法の調査を行った。

- 1、結晶化の際の温度勾配による不純物の偏析効果を用いた高純度化
- 2、フッ化カルシウムの原料候補の塩化カルシウムの高純度化

1、の開発として、5cm直径のフッ化カルシウム結晶(100g程度)中に含まれるウラン・トリウム不純物の位置分布を、ICP-MS装置を用いて調べた。結果、トリウム不純物量は0.1ppb以下の値が得られた。これは $\alpha$ 線測定による放射性不純物量測定結果と矛盾している。原因としては、トリウムを濃縮するための用いた樹脂が正常に機能していない可能性もある。そのため、トリウム添加回収実験を行い、樹脂によるトリウム回収率の評価を行う予定である。

一方、ウラン不純物量としては、0.4ppb~2.2ppbの濃度分布があることが分かった。ここから、1)  $\alpha$ 線測定によるウラン放射性不純物量分布と矛盾していない、2) 円筒中心部分にウラン不純物が集まっており、これは熱勾配による不純物の偏析の影響と考えると矛盾していない、という結果が得られた。特にこの2)の結果からは、高純度結晶を製造するために、結晶製造時の偏析効果が有効であることを示すことができた。

また、2、のフッ化カルシウムの原料候補の塩化カルシウムの高純度化、の開発も進めた。こちらでは、塩化カルシウム水溶液をウラン・トリウム吸着樹脂に泳動し、その前後でのウラン・トリウム濃度をICP-MS測定により分析した。結果、吸着樹脂を用いることでウラン不純物量は1/10まで低減できることを確認した。今後トリウム系列の不純物量定量手法を確立し、トリウムも含めた高純度化手法としての確立をめざす。

## 2. 論文

伏見賢一他、高純度 CaF<sub>2</sub> 開発に向けた CaCl<sub>2</sub> の純化、日本物理学会 2023 年春季大会、オンライン、2023.03.22-2023.03.25、口頭

K.Fushimi et al., Purification of CaF<sub>2</sub> crystal for double beta decay experiment Low Radioactivity Techniques (LRT2022), Sanford Underground Research Facility (SURF)(USA, remote), Jun 14 – 17, 2022

## 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

氏名：市村 晃一

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：岸本 康宏・倉澤 真帆・高久 雄一

### 1. 成果

#### 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予定があり、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 238U や 232Th 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 238U, 232Th とも 10 ppt 未満、波長変換剤について 238U は 30 ppt, 232Th は 100 ppt 未満)。本研究ではこのレベルで有機物中の放射性元素を測定することを目的とし、クリーン環境の整備と測定プロセスについて検討した。

<クリーン環境の整備>測定試料はあらかじめ東北大学で洗浄などの下準備をした後発送し、筑波大学の実験室でマイクロ波灰化装置を用いて乾式灰化を行い、残渣を溶液化したものを質量分析法(ICP-MS)で測定する。目標感度到達の妨げとなる環境からの試料汚染の低減を行うために東北大学のクリーンルームおよび筑波大学実験室のクリーン化を行い、灰化・溶液化に用いる石英ビーカーの洗浄プロセスを確立した結果、環境からの試料汚染は 1 ppt レベルの測定では問題にならないレベルまで低減出来た。

<乾式灰化と ICP-MS での測定>

乾式灰化と溶液化の過程で 238U や 232Th が回収されているかを確認するため XSTC-331 溶液を用いた溶液を試料に添加した添加回収実験を行った。結果シンチレーションフィルムについては 238U や 232Th が問題なく回収されている一方、波長変換剤については回収率が約 60-70%と低い値であったため今後灰化プロセスの最適化を検討する。

シンチレーションフィルム 1.0g, 1.5g, 2.0g の残渣で作成した溶液の ICP-MS 測定から、放射性不純物濃度は 238U, 232Th とも 5 ppt 程度であることが分かり、要求値を満たすことが確認された。一方波長変換剤については同様の手法の測定結果から要求値よりも大きい 238U, 232Th 濃度が得られたため純化手法について検討を行った。

<波長変換剤の純化方法>

波長変換剤の純化方法として、有機溶媒に波長変換剤を溶かした溶液と超純水などとの液-液抽出方を検討している。この手法後の波長変換剤中の放射性不純物濃度を評価するため、

有機溶媒を蒸発させ、さらに残渣を乾式灰化したのち ICP-MS で測定する手法を確立した。  
この手法で用いる有機溶媒中の放射性不純物濃度は問題にならないことを確認した。今後  
純化手法の最適化を進めていく。

## 2. 論文

なし

## 地下宇宙素粒子物理学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

氏名：南野 彰宏

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：天内 昭吾・田中 雅士・岩澤 広大・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、地下実験室の環境中性子の直接観測を実現したい。

##### [方法]

2022年度は、液体シンチレーター検出器の構成部材のうち、中性子測定に広く用いられているキシレンベースの液体シンチレーターである EJ-301 のウラン 238 とトリウム 232 含有量を測定した。具体的には以下のように作業を進めた。最初に、液体シンチレーターをホットプレート上で加熱し、有機溶媒であるキシレンなどの有機物をドライアップした。次に、残留した有機物を灰化装置で灰化した。そして、残留した無機物を硝酸で溶解し、試料液を準備した。最後に試料液を筑波大学アイソトープ環境動態センター所有の ICP-MS 装置を用いて測定し、ウラン 238 とトリウム 232 の含有量を測定した。

##### [結果]

超純水を用いた液液抽出による純化後の液体シンチレーター EJ-301 中のウラン 238 とトリウム 232 含有量は、0.1 ppt (ウラン 238) と 3 ppt (トリウム 232) と測定された。ウラン系列とトリウム系列での放射平衡を仮定すると、上記の含有量から期待される検出器で用いる 4.8 L の液体シンチレーター中のアルファ線バックグラウンド頻度は、ウラン系列で  $2.4 \times 10^{-5}$  mBq、トリウム系列で  $1.7 \times 10^{-6}$  mBq であり、液体シンチレーター中性子検出器で観測されているアルファ線バックグラウンド頻度である約 1 mBq に比べて十分に小さいことがわかった。

#### 2. 論文

## 非定常流下における堆積物輸送の時系列過程の解明

氏名：山口 直文

受入研究者：関口 智寛

共同研究者：

## 1. 成果

様々な環境での放射性物質の動態を考えるためには、多様な流れによる堆積物輸送を考える必要がある。2021年度のERAN共同研究で実施した水路実験によって、津波のような非定常な流れの下での堆積物の巻き上げのタイミングが、水深に依存した流れの乱れの影響を受けることが示唆された。こうした堆積物巻き上げプロセスの初期水深への依存が、実際に運ばれる堆積物量に影響するかについてはこれまで明らかになっていない。そこで本研究では、その影響を定量的に明らかにするため、水路実験によって実際に輸送された堆積物量を測定し、流速の時系列データから堆積物輸送モデルによって推算される量との比較を行った。

実験は筑波大学CRiED環境動態予測部門の複合流水路を使用した。津波を模した非定常流段波を作用させ、砂床（粒径：0.20 mm）から輸送された堆積物を下流側でメッシュクロスにより採取した。流速はプロペラ式流速計を用いて測定した値を用いた。実験では段波の規模と初期水深をパラメータとして変化させることで、それらの影響について調べた。採取された堆積物は乾燥重量を測定した。また、比較のための堆積物輸送モデルは、非定常流を反映できると考えられているRibberink (1998)による流砂量式を用いた。

実験で得られた実際の堆積物輸送量の総量と、堆積物輸送モデルの比較の結果、初期水深による明確な違いは見られなかった。このことから、初期水深による堆積物巻き上げの遅れなどの影響は、堆積物輸送総量に大きな影響を及ぼさないことが示唆された。ただし今回は一粒径でのみの結果であることから、より細粒な場合や粗粒な場合にどのような影響があるかについてはさらに検討が必要だと考えられる。

## 2. 論文



## 砂礫洲における細粒粒子の捕捉能に関する実験

氏名：谷口 圭輔

受入研究者：関口 智寛

共同研究者：遠藤 徳孝

### 1. 成果

福島第一原発事故由来の Cs-137 のうち、河川を流下するものの 90%以上が粘土などの微細土砂粒子に吸着されている。微細土砂粒子は、浮遊したまま海洋まで到達すると考えられているが、砂洲形成時には、しばしば細粒土砂が捕集されている様が観察される。本研究は、砂洲（礫洲）形成時に、粗大粒子間隙にトラップされる粘土粒子（およびそれに吸着されている Cs-137）を定量する実験を通じて、微細粒子の河道への滞留時間の予測モデリングに役立つ知見を得ることを目的とする。

前年度に、ふたつのサイズの粒子を混合させた初期地形に対して水流を作用させ、孤立ベッドフォームの形成過程を観察する予備的な実験を、筑波大学に設置されている流路幅 20cm、高さ 40cm、長さ 6m の水路を用いて行ったが、今年度は、礫からなる底面に、細粒粒子を含む流れが作用する場合の実験を行うため、津山高専にて、流路幅 7cm、高さ 14cm、長さ 180cm の水路を設計・制作した。今後は、制作した水路を用いて、初期礫床と浮遊細粒粒子の粒度比、流速条件を考慮した実験を推進する。

### 2. 論文

なし

## 高濃度放射性セシウム含有微粒子の化学的特性に基づく環境影響と炉内状態の解明

氏名：宇都宮 聡

受入研究者：山崎 信哉

共同研究者：

### 1. 成果

2011年、福島第一原発炉内には、中性子を吸収して核分裂反応を制御していた制御棒（炭化ホウ素（B4C）で構成される）も燃料デブリ中に残存し、核分裂の連鎖反応を防ぐ重要な要因になっている。一方でメルトダウン時には揮発したSiとCsが凝縮して原子炉内で大量のCsMPが生成し、環境中に放出された。本研究は4つのCsMPに含まれるホウ素同位体、<sup>10</sup>Bと<sup>11</sup>B、リチウム同位体、<sup>6</sup>Liと<sup>7</sup>Liを初めて定量することに成功し、<sup>10</sup>+<sup>11</sup>Bは1518～6733 mg kg<sup>-1</sup>、<sup>7</sup>Liは11.99～1213 mg kg<sup>-1</sup>含まれることを示した。CsMP中の<sup>11</sup>B/<sup>10</sup>B同位体比は4.15～4.21と分析され、天然存在比4.05よりも高くなった。また<sup>7</sup>Li/<sup>6</sup>Li同位体比も213～406と分析され、天然存在比12.5よりも高い。これはメルトダウン以前にB4C制御棒の中で<sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li核反応が起きていた証拠であり、ケイ素やセシウムが揮発、凝縮してCsMPが生成する時にB4C制御棒から揮発していたホウ素とリチウムが同時に取り込まれたことを示している。その時、BよりもLiの方がより揮発して取り込まれたことも分かった。また、熱力学計算コードより、揮発したホウ素の主要な化学形態がCsBO<sub>2</sub>であることも示唆された。一方でCsMPのホウ素含有量に基づき、CsMPの飛散量(>3×10<sup>12</sup>個)から原発から外部に放出されたホウ素量を計算すると0.024g程度、放射性核種を大量に含んだ2011年3月14～16日頃に放出された大気流（プルーム2と3）のほとんどがCsMPだったと仮定しても放出されたホウ素量は62gと計算される。これから、原子炉内にはB4Cが十分な量残留していることが分かるが、揮発したホウ素は原子炉内部、周辺で容易に凝縮、沈積する性質があるため、デブリ内部と周囲における不均一なホウ素分布に注意しながらデブリの取り出し方法を選定し、安全に遂行する必要があるだろう。

### 2. 論文

1. Satoshi Utsunomiya, Kazuki Fueda, Kenta Minomo, Kenji Horie, Mami Takehara, Shinya Yamasaki, Hiroyuki Shiotsu, Toshihiko Ohnuki, Gareth, T. W. Law, Bernd Grambow, and Rodney C. Ewing (2022) Radioactive nano- and micro-particles released from Fukushima Daiichi: Technical challenges of multiple analytic techniques. In: Javier Jimenez Lamana & Joanna Szpunar (eds) Environmental Nanopollutants: Sources, Occurrence, Analysis and Fate. p15 - 48, Royal Society of Chemistry Book series. DOI:

10.1039/9781839166570-00015

2. S. Yamasaki, H. Saito, T. Nakamura, K. Morooka, K. Sueki, & S. Utsunomiya, Gravitational separation of <sup>137</sup>Cs contaminated soil in Fukushima environment: Density dependence of <sup>137</sup>Cs activity and application to volume reduction. *Journal of Environmental Radioactivity*, 246, 106846.

DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106846

3. K. Fueda, R. Takami, K. Minomo, K. Morooka, K. Horie, M. Takehara, S. Yamasaki, T. Saito, H. Shiotsu, T. Ohnuki, G. T. W. Law, B. Grambow, R. C. Ewing, & S. Utsunomiya, Volatilization of B<sub>4</sub>C control rods in Fukushima Daiichi nuclear reactors during meltdown: B–Li isotopic signatures in cesium-rich microparticles. *Journal of Hazardous Materials*, 428 (2022) 128214.

DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128214

4. T. Kato, N. Kozai, K. Tanaka, D. I. Kaplan, S. Utsunomiya & T. Ohnuki, Chemical species of iodine during sorption by activated carbon -Effects of original chemical species and fulvic acids- *Journal of Nuclear Science and Technology* 59 (2022) 580-589.

DOI: 10.1080/00223131.2021.1993370

5. H. Yokoo\*, T. Oki\*, M. Uehara, I. D. Winarni, K. Yamaji, K. Fukuyama, Y. Ohara, T. Ohnuki, M. F. Hochella Jr. & S. Utsunomiya, Geochemistry of barium ions associated with biogenic manganese oxide nanoparticles generated by a fungus strain: Implications for radium sequestration in uranium mill tailings. *Gondwana Research* 110 (2022) 270-282.

\*Two authors contributed equally as the first author

DOI: 10.1016/j.gr.2021.09.020

6. S. Yamasaki & S. Utsunomiya, A review of efforts for volume reduction of contaminated soil in the ten years after the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 59 (2022) 135-147.

DOI: 10.1080/00223131.2021.1974596

7. B. Grambow, A. Nitta, A. Shibata, Y. Koma, S. Utsunomiya, R. Takami, K. Fueda, T. Ohnuki, C. Jegou, H. Laffolley & C. Journeau, Ten years after the NPP accident at Fukushima : review on fuel debris behavior in contact with water. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 59 (2022) 1-24.

DOI: 10.1080/00223131.2021.1966347

## 炭酸カルシウムへのラジウムの取り込みと結晶構造の関係

氏名：田中 万也

受入研究者：山崎 信哉

共同研究者：

### 1. 成果

#### 研究背景及び目的

炭酸カルシウム( $\text{CaCO}_3$ )は環境中に普遍的に存在し、結晶構造中のカルシウムサイト( $\text{Ca}^{2+}$ )を置換することで様々な陽イオンを取り込むことが知られている。そのため、炭酸カルシウムは貝殻やサンゴ骨格のような主成分構成物質から土壌を構成する微量成分まで様々なスケールにおいて放射性核種のホスト相となり得る。ラジウム(Ra)の同位体はすべて放射性であり、環境試料中の Ra は放射能濃度と重量濃度のいずれから見ても非常に低濃度である。このため、炭酸カルシウムへの取り込みについてはあまり良くわかっていない。そこで本研究では、炭酸カルシウムへの Ra の取り込みと局所構造の関係を明らかにすることを目的とした。

#### 実験方法

本研究では、Ra のアナログとしてイオン半径が近い同族元素のバリウム(Ba)を用いて実験を行った。炭酸カルシウム結晶中の Ba 局所構造は、X 線吸収微細構造(XAFS)法により調べた。分析試料として合成炭酸カルシウムと天然炭酸カルシウム(カーボナタイト)を準備した。Ba<sup>2+</sup>イオンを含む塩化カルシウム水溶液に重炭酸ナトリウム水溶液を添加することで Ba 含有炭酸カルシウム試料を合成した。Ba-K 吸収端 XAFS スペクトル測定は、SPRING-8 の BL01B1 において実施した。合成及び天然炭酸カルシウム試料の結晶形は、粉末 X 線回折(XRD)分析により同定した。

#### 結果及び考察

XRD 分析の結果、合成及び天然炭酸カルシウムはカルサイトであると同定された。XAFS スペクトル解析の結果、合成天然炭酸カルシウムの Ba-O 原子間距離は  $2.70 \pm 0.02 \text{ \AA}$  (配位数  $8.3 \pm 1.9$ ) であった。天然炭酸カルシウムもほぼ同様の解析結果であった (Ba-O 距離  $2.70 \pm 0.02 \text{ \AA}$ , 配位数  $6.9 \pm 1.7$ )。一方、カルサイトの Ca-O 距離は  $2.36 \text{ \AA}$  (配位数 6) である。したがって、Ba-O 距離と Ca-O 距離の間には  $0.3 \text{ \AA}$  以上の差があることになる。このことは、イオンのサイズから見て Ba<sup>2+</sup>が Ca<sup>2+</sup>サイトを置換しづらいことを示唆している。しかし実際には、EXAFS 振動をフーリエ変換して得られた動径構造関数には Ba-Ca 散乱経路に由来するピークが見られたことから、Ba が Ca サイトを置換していると解釈することが出来る。ただし、Ba-O 距離と Ca-O 距離の大きな差からは、Ca サイトにはフィットしておらず Ba 周囲には歪みが生じていると考えられる。こうした意味では、カルサイ

ト結晶構造は Ba にとって居心地の悪い環境であると言える。Ra は Ba よりもイオン半径が 0.06 Å 大きい (8 配位) ことから (Shannon, 1976)、Ra にとっても同様にあまり居心地の良い環境ではないと考えられる。

Ca<sup>2+</sup>イオンは 6 配位構造と 9 配位構造をとり、それぞれカルサイト及びアラゴナイトの Ca サイトに相当する。アラゴナイトの Ca-O 距離は 2.53 Å (配位数 9) であることから、Ba や Ra はアラゴナイト結晶構造によりフィットしやすいと考えられる。したがって、アラゴナイトに対する Ba 及び Ra 分配係数はカルサイトに比べて大きくなると予想される。今後は、アラゴナイト中の Ba 局所構造を調べることで、局所構造と分配係数の関係を明らかにしていきたい。

#### 引用文献

Shannon, R.D. (1976) Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides. *Acta Cryst.* A32, 751–767.

#### 2. 論文

Maamoun, I., Tokunaga, K., Dohi, T., Kanno, F., Falyouna, O., Eljamal, O. and Tanaka, K. (2023) Improved immobilization of Re(VII) from aqueous solutions via bimetallic Ni/Fe<sub>0</sub> nanoparticles: implications towards Tc(VII) removal. *Frontiers in Nuclear Engineering* (in press)

## 地質の異なる福島森林土壌中での放射性セシウムの移動性と鉱物組成との 関係説明

氏名：中尾 淳

受入研究者：高橋 純子

共同研究者：

### 1. 成果

#### 共同研究の目的

福島原発事故以降、居住区や農地は除染が徹底されたが、森林域は大部分未除染のままである。そのため森林域における放射性セシウムの環境動態を把握することは、被ばくりスク管理上重要である。放射性セシウムは土壌表層に集積する傾向が知られており、雲母系鉱物への特異吸着が原因とされている。近年の研究により地質の違いに由来する土壌中での雲母系鉱物の性状の違いが、放射性セシウムの挙動に影響を及ぼすことが明らかになってきたが、主に農地を対象とした研究が多く森林域での実態は不明である。そこで本研究では、福島県の蛇紋岩帯という雲母系鉱物の含有量が極めて少ない地質帯を対象に森林土壌間での鉱物組成と放射性セシウム動態の違いを明らかにすることを目的とした。

#### 共同研究の実施計画

福島県郡山市の蟹沢地区の落葉広葉樹林内にて土壌断面調査を行い、林内 3 地点からスクレーパープレートを用いて土壌を薄く層状に採取した。採取した土壌中に含まれる全  $^{137}\text{Cs}$  量、交換性  $^{137}\text{Cs}$  量、有機結合態  $^{137}\text{Cs}$  量について、適宜抽出試験を行い、土壌または抽出液をゲルマニウム半導体検出器にかけることで求めた。また、 $^{137}\text{Cs}$  の人工添加によって土壌の放射性セシウム捕捉ポテンシャル（通称 RIP）を求めた。加えて主要鉱物組成を X 線回折分析および各種湿式分析により調べることで、蛇紋岩土壌の放射性セシウム保持能と鉱物組成の関係を明らかにした。

#### 結果と考察

表層土壌（0 – 80 mm）に残存する  $^{137}\text{Cs}$  の単位面積あたりの総量を 3 地点の平均値（±標準偏差）で表すと  $42 \pm 4.7 \text{ kBq/m}^2$  であった。これは、事故当初（2011 年 7 月）に確認された  $^{137}\text{Cs}$  汚染量に減衰補正をして算出した  $^{137}\text{Cs}$  量の 99.7% に相当したため、森林内に降下した  $^{137}\text{Cs}$  の大部分は下方溶脱も侵食移動もせず 0 – 80 mm に留まっている可能性が強く示された。 $^{137}\text{Cs}$  量の深度分布は、10 – 15 mm に最大値  $960 \text{ Bq/m}^2/\text{mm}$ 、50 – 80 mm に最小値  $220 \text{ Bq/m}^2/\text{mm}$  を示し、85% が表層 50 mm 以内に存在していた。有機物吸蔵態  $^{137}\text{Cs}$  量は土壌の有機物量に比例して表層ほど多かったが、全  $^{137}\text{Cs}$  に占める有機物吸蔵態  $^{137}\text{Cs}$  の割合は 1.5 – 4.2%（平均 2.4%）とわずかであった。交換態  $^{137}\text{Cs}$  の割合もまた 0.4 – 3.8%（平均 1.5%）とわずかであり、およそ 9 割の  $^{137}\text{Cs}$  が土壌に無機的に強く吸着された状態すなわち固定態であった。さらに固定態 Cs の割合と RIP の間に正の相関

関係が認められた事から ( $r=0.90$ ,  $p < 0.05$ )、土壌中で  $^{137}\text{Cs}$  の固定を担っている物質が主に雲母鉱物であることが確認された。ただし RIP は雲母鉱物量とは相関せず、むしろ雲母鉱物の風化程度と正の相関を示した ( $r = 0.77$ ,  $p < 0.05$ )。以上より、事故後 10 年以上経過した現在では、森林内の  $^{137}\text{Cs}$  の大部分は風化の進んだ雲母鉱物の層間に吸着することで土壌の最表層付近にとどまっていると結論付けた。

## 2. 論文

## 安価なドローンシステムによる気象観測手法の確立

氏名：渡来 靖

受入研究者：中村 祐輔

共同研究者：

### 1. 成果

大気中の放射性・汚染物質などの微粒子の挙動調査として、高層大気における気象観測やモデル構築が行われてきた。一方、生物へ直接影響を及ぼす物質の取り込み過程を調査するうえで、地表面近傍における気象場の把握が重要である。近年、無人回転翼機（ドローン）は環境動態・自然災害等の調査に利用されるが、気象観測に特化した機体は、高価で運用に専門知識が必要となるため活用シーンが限られる。さらに、空間非一様な都市内などの気象場を把握するには複数点観測が理想であり、安価なシステムが求められる。本研究は、汎用のドローンと気象センサーによって比較的安価なシステムを構築し、データの精度検証を実施することで、観測手法の確立を目指す。特に、本研究では以下の点に着目した。すなわち、①高度や気象場の違いによる観測精度への影響、および②ドローン観測による気象要素の鉛直プロファイルの時系列、についてである。

精度検証のための観測は、筑波大学アイソトープ環境動態研究センターの観測圃場にて実施された。観測期間は、2022年3月3日、5日、10～11日である。観測時刻は、3月3日および5日が12時～14時、10～11日が16時～翌10時である。観測は、ドローンに小型の気象センサーを搭載し、地上から高度約100mまでを上昇・下降させることで実施された。使用されたドローンは、Phantom4 pro (DJI社製)である。気象センサーは、iMet XQ2 (温度・相対湿度・気圧・GPS; InterMET社製)が使用された。ドローンによる観測データは、観測圃場の鉄塔の観測データと比較された。今回比較されるのは、気温および相対湿度である。鉄塔の観測は、1.6m、12.3m、29.5mの3つの高度で実施されている。ドローン観測は上記の3高度で1分間のホバリングをすることで実施された。そして、ドローンの観測データは、同時刻の鉄塔データと比較された。

ドローンと圃場による気温・相対湿度のデータを比較した。観測期間内で平均された両者の差(ドローン-圃場)は、気温および相対湿度で、それぞれ $+0.1^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ ) および $+0.3\%$  ( $\pm 0.4\%$ )であった。本研究で使用された気象センサーの観測精度は、気温および相対湿度で、それぞれ $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  および $\pm 5\%$ である。そのため、ドローンと圃場の差は、非常に小さいと判断できる。一方、両者の差を日中(8:00-1600)と夜間(18:00-6:00)に分けた結果、それぞれ異なる特徴が認められた。日中および夜間における気温と相対湿度の差は、それぞれ $0.0^{\circ}\text{C}$ と $+2.1\%$ および $+0.5^{\circ}\text{C}$ と $-2.8\%$ である。この結果は、夜間にのみドローンの気温が高いことを示している。また、10～11日に観測された気温の鉛直プロファイルを見ると、



6時に強い接地逆転が認められた ( $-6.8^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ )。気温の接地逆転は静穏時に発生しやすく、同時刻の風速も平均  $0.6\text{ms}^{-1}$  であった。しかしながら、ドローン観測の場合、飛行による気流拡散が発生するため、静穏環境が弱ったことが考えられる。これらのことから、夜間におけるドローンの気温が圃場に対して高かった要因は、ドローンによる気流拡散による影響が大きかったと推察できる。

本研究では、ドローンによる気象観測の内、気温および相対湿度の観測精度が検証された。ドローンの観測データは圃場データと比較して差が小さく、特に日中の精度は非常に高かった。しかし、夜間は日中と比較して精度が低く、その要因としてドローンの飛行による気流拡散が示唆された。そのため、安価なドローンシステムによる気象観測手法の確立のためには、日中と夜間でセンサーの設置位置を変化させるなどの工夫が必要と考えられる。

## 2. 論文

**波長分散型 PIXE 分析法による大気浮遊元素の化学形態検出手法開発のための基礎検討**

氏名：羽倉 尚人

受入研究者：羽田野 祐子

共同研究者：

**1. 成果**

大気浮遊塵中の元素分析は以前から広く行われている。例えば、中性子放射化分析法を利用することにより、ごく微量の元素の存在まで明らかにすることが可能である。一方で、元素の化学形態を把握するためには複雑な化学処理を伴う操作が必要であり、大量のサンプルを分析するには困難な面がある。また、中性子放射化分析を行うには研究用原子炉が必要であるが、国内では利用可能な研究炉が限られている。そこで、イオンビーム技術を用いて簡便に化学結合状態を明らかにする方法を構築することで分析を実施しやすくしたいと考えた。本研究ではそのための基礎的な検討として、波長分散型 PIXE (WDS-PIXE) 分析法による手法の適用を念頭にシステムの構築を行う。WDS-PIXE 分析システムの構築については、2020 年度より「WDS-PIXE のエネルギー分解能を飛躍的に向上させるための画像処理手法の開発 (20K05385)」と題して進めている。MeV 級陽子線を試料に照射し、発生する特性 X 線を分光結晶により波長弁別し、CCD にて検出することで 1eV 以下の分解能での検出が可能となる。これにより試料中の化学結合状態を検知することができる。本システムの特徴は X 線光源と検出器の距離を短くし、高い集光効率を保持したまま画像処理手法を適用することでエネルギー分解能の劣化を防ぐという点にある。画像処理手法には中性子ラジオグラフィ法の開発において培った技術を応用する。今年度は、システムの基本構成と画像処理技法の適用可能性について検討し、実現可能な見通しを得た。今後継続して構築を進め、大気浮遊塵試料を対象として試測定を進めていく計画である。

**2. 論文**

Takaaki Matsui, Koki Ushijima, Hong-Fu Liu, Jun Kawarabayashi, Sou Watanabe, Yuko Hatano and Naoto Hagura, Measurement of environmental and composite samples in the compact WDS-PIXE system, International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems (IZES), 10 - 12 January 2023, Tokyo, Japan

## 赤城大沼湖水中セシウム濃度時間発展予測モデルの精密化に関する検討

氏名：齋藤 誠紀

受入研究者：羽田野 祐子

共同研究者：中村 誠

## 1. 成果

## ■目的

福島第一原子力発電所の事故により、赤城大沼ではワカサギのセシウム濃度が一時的に暫定規定値を超えるなどの影響があった。そのため、赤城大沼のセシウム濃度を長期予測することが求められているが、古典的拡散モデルでは実測値に合わないことが知られている。羽田野教授らは、非整数階拡散方程式を用いて実測値を説明できることを示した。本研究では、以下の解析を行い、このモデルの高度化と素過程の解明を目指す。

1. 温度成層の形成等の影響を含む季節による循環混合の圧縮性流体計算を用いた解析
2. 湖面/大気境界面での Cs 原子拡散過程の分子動力学法を用いた解析
3. 湖盆形状が予測モデルに及ぼす影響の流体計算による解析
4. 非整数階拡散方程式の階数の乱流モデルによる説明可能性の検討

## ■成果

本年は、「1. 温度成層の形成等の影響を含む季節による循環混合の圧縮性流体計算を用いた解析」について流体計算コード OpenFoam を用いた解析を行なった。具体的には、底面 10 m 四方、深さ 18m の直方体形状の計算領域を水で満たし、11 月、3 月、5 月、8 月の赤城大沼の実際の水温の深さ分布を設定した。次にブシネスク近似を用いて温度分布のもとで浮力により駆動される流体の定常流れ場の解析を行なった。その結果、季節により水の循環の様子が異なることを確認した。

「3. 湖盆形状が予測モデルに及ぼす影響の流体計算による解析」として、解析を実際の湖盆形状で行うため、湖盆図から 3 次元形状の構築も行なった。湖盆図の等高線に細線化処理を施しポリラインを作成したのち、Autodesk Civil3D を用いてサーフェースを張り 3 次元形状のメッシュデータ (stl データ) を作成した。

## 2. 論文

## 放射性セシウムの湖底質への吸着実験

氏名：岡田 往子

受入研究者：羽田野 祐子

共同研究者：末富 英一・佐藤 勇・松浦 治明・内山 孝文

### 1. 成果

目的：赤城大沼中の放射性 Cs 挙動について、2012 年から調査を続けている。湖水中の放射性セシウム

濃度の減少は現在、緩慢になっている。湖底質に近い湖水の放射性セシウム濃度は夏季で比較的高く、初冬に起きる湖水大循環で、湖水全体に拡散すると考えられている。一方、2011 年放射性セシウムが降り注いだ時期の赤城大沼は厚い氷に覆われていた。その後、溶氷して湖水中に拡散した。セシウムは水溶性であるにもかかわらず、湖水に溶け込んだ後、比較的早い段階で湖底質に

全体の 90%が吸着した。水溶性のセシウムがどのようにして沈降して、底質に吸着したのかはわかっていない。本実験では実験室内で湖水から湖底質に沈降する模擬実験（コールドとホット実験）を行い、2011 年当時の放射性セシウムの挙動を解明することを目的とする。

実験：氷表面からどのように湖底に放射性セシウムが移動を模擬した実験を食用食紅と水溶性インクを用いて行う。2L メスシリンダーの内径に入る直径 70 mm・厚さ 30 mmの氷を作り、その上に、食紅着色（A）及び水溶性青色インク着色（B）を溶かした溶液を 10 mmの高さまで入れ、それぞれ再び凍らせる。凍った氷を 1.8 L 蒸留水の入った 2 L メスシリンダーの上に氷 A、B を静かに浮かばせ、氷が解けていく様子を観察する。

結果：観察する：氷をメスシリンダーに入れ、すぐに溶け始めた。色のついた氷から、色のついた液体が氷の内面に沿って流れ落ちるのが観察された。その後、着色した液体が渦を巻いて下層に向かって流れていくのを観察した。最終的にはメスシリンダー内で均一化した。着色 A も B も同じようであった。

結論：私たちは、放射性セシウムも同じような挙動を示すのではないかと考えている。

放射性セシウムは、表面の氷と一緒に溶け出し、一部は、底まで到達したものもあるが、多くは湖水に拡散した。湖水中に吸着物質があり、それが関与して、湖底質に沈降したと考える。吸着物質には 2 つの仮説を想定する。一つの仮説は赤城大沼に生息して、底質にその骨格が多く存在している植物性プランクトン（珪藻）である。珪藻の骨格は放射性セシウムの 50%を吸着することが実験でわかっている。珪藻の骨格の微細な穴に放射性セシウムが吸着するという仮説である。

2 つ目の仮説は 0.45  $\mu\text{m}$  のフィルターを通過する微量な生物やコロイド、微細な有機物、ウイルスなどである。カリウムとセシウムは高等動物の体内で同じ挙動を示すのであれば、下等生物でも同じことが言えるという仮説である。

### 2. 論文

## 北陸地区と北海道における 1950 年以降の原子力施設由来放射性ヨウ素 129 の沈着量変

## 動

氏名：松中 哲也

受入研究者：笹 公和

共同研究者：落合 伸也・坂口 綾

## 1. 成果

## 【はじめに】

過去 50 年間にわたって日本海底層水の水温上昇と溶存酸素減少が観測され、冬季気温上昇によって日本海の深層循環が弱まりつつあることが示唆されている。日本海において、放射性トレーサーを用いて表層・深層循環の変化を検知することは、近年の地球温暖化に伴う海洋循環の応答性を明らかにする上で重要である。熱中性子核分裂によって生成される人為起源の I-129（半減期：1,570 万年）は、日本海において大気、河川、および海流を介して供給され、海水循環トレーサーとしての利用が期待されている。日本海におけるその主な供給プロセスと供給量の実態を把握する必要がある。本研究は、越境汚染物質の 1 つであり主に 1950 年以降の核燃料再処理や核実験に起因する I-129 について、環日本海域における沈着量変動を明らかにすることを目的とした。

## 【試料と方法】

能登半島と渡島半島の湖沼から 2011 年に採取された柱状堆積物について 1 cm 毎に分割した堆積物を分析試料とした。均一化した乾燥堆積物（乾燥重量：1.5 g 程度）をプラスチック容器に密封し、金沢大学 LLRL の Ge 半導体検出器を用いて Pb-210 と Cs-137 を測定した。堆積物中 I-129 の熱加水分解法による抽出と精製は I-129 バックグラウンドが低い金沢大学 LLRL で実施した。堆積物（0.5 g）から生成した燃焼ガスをトラップしたアルカリ溶液に対し、1 mg の I-127 キャリア（Deepwater iodine, I-129/I-127:  $\sim 1 \times 10^{-14}$ ）を加えて同位体希釈を行った後、ヨウ素を溶媒抽出・逆抽出で精製し、硝酸銀を添加してヨウ化銀ターゲットを作製した。筑波大学の加速器質量分析計でターゲットの I-129/I-127 比を測定し、Purdue 1 (I-129/I-127:  $8.38 \times 10^{-12}$ ) を標準として規格化した。ICP-MS を用いて試料の I-127 濃度を測定した後、I-129 濃度を算出した。特に能登半島の湖沼堆積物に対し、Cs-137 と Pb-210 に基づく堆積層の形成年代と主に核燃料再処理施設から大気経由で供給される I-129 の沈着量変動を解析した。

## 【結果と考察】

堆積物中の余剰 Pb-210 (Pb-210ex) 濃度は、表層から深度 29 cm において 84.2–739 Bq/kg（試料採取日に壊変補正済）の範囲にあり、深度 29 cm 以深では未検出であった。質量深度（Mass depth: g/cm<sup>2</sup>）に対する Pb-210ex の深度分布を基に堆積速度を解析した結果、

表層から  $0.836 \text{ g/cm}^2/\text{yr}$  (深度 0–7.5 cm)、 $0.0638 \text{ g/cm}^2/\text{yr}$  (深度 7.5–15.5 cm)、 $0.219 \text{ g/cm}^2/\text{yr}$  (深度 15.5–24.5 cm)、及び  $0.0332 \text{ g/cm}^2/\text{yr}$  (深度 24.5–29.0 cm) と変化した。一方、Cs-137 濃度は表層から深度 29 cm において  $8.6\text{--}71.2 \text{ Bq/kg}$  (試料採取日に壊変補正済) の範囲にあり、深度 26–27 cm に極大を示す深度分布であった。Cs-137 の極大層は、Pb-210 から算出した堆積速度を基にすると 1962 年に形成されたことが分かった。堆積物中の I-129 は  $0.13\text{--}93.0 \text{ } \mu\text{Bq/kg}$  の範囲にあり、沈着量に換算すると  $0.004\text{--}77.8 \text{ nBq/cm}^2/\text{yr}$  であった。I-129 沈着量は 1946 年以前において  $0.004\text{--}0.025 \text{ nBq/cm}^2/\text{yr}$  と低いレベルであったのに対し、1946 年以降増加し、1980 年と 2011 年に極大を示した。この傾向は 1950 年以降の核燃料再処理、及び 2011 年の福島原発事故に伴って、大気放出された I-129 の沈着量増加を表している可能性が示唆された。

## 2. 論文

Sasa, K., Ochiai, Y., Tosaki, Y., Matsunaka, T., Takahashi, T., Matsumura, M., Sueki, K., 2022. Chlorine-36 deposition at Tsukuba, Japan, after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B 532, 73-77.

## 福島第一原発事故のゾウリムシへの影響

氏名：藤島 政博

受入研究者：難波 謙二

共同研究者：児玉 有紀・Catania Francesco・Lynch Michael

### 1. 成果

目的：原発事故による環境放射線がゾウリムシ(Paramecium)属の形態・細胞分裂速度・各種行動およびゲノム DNA に変異を誘発している可能性を明らかにする。

方法：福島第一原子力発電所近くで、周辺の 1 m 高さで昨年測定した空間線量率が 25 $\mu$ Sv/h 程度の中深沢池(双葉町)で Paramecium caudatum (ゾウリムシ) と P. bursaria (ミドリゾウリムシ) を採集し、その細胞分裂速度と細胞内共クロレラの密度を実験室で維持している同種と比較した。また、実験室で維持している P. caudatum、P. tetraurelia (ヨツヒメゾウリムシ)、P. bursaria を中深沢池に一定期間放置して、細胞分裂速度と細胞内共生クロレラの密度への影響を調べた。

#### 結果

1. 2021 年度は、中深沢池の P. caudatum は採集直後の細胞分裂速度が低いが、実験室で培養すると細胞分裂速度が回復することを明らかにした。そこで、2022 年 8 月に、実験室で維持している P. caudatum, YR15042 株)と P. tetraurelia, stock 51 株)を特殊容器に入れて中深沢池の水中に 48 日間放置し、両種の細胞分裂速度への影響を調べた。その結果、平均細胞分裂回数/日が被曝無しの同じ株(対照実験株)よりも有意に低下することが示された。

2. 2022 年度に中深沢池から採集した P. bursaria の細胞内共生クロレラの数が増加しており、実験室で P. bursaria 培養するとクロレラ数が正常値まで回復することを明らかにした。

3. 中深沢池での P. bursaria の細胞内共生クロレラ数の減少の原因が、環境放射線の影響によるのか、または飢餓等の影響なのかを明らかにするため、研究室で培養している P. bursaria の Yad1g1N 株と前述 2 の中深沢池で採集されて実験室で細胞内クロレラ数を回復した株を特殊容器に入れて中深沢池の水中に 26 日間放置し環境放射線の影響を調べた。しかし、共生クロレラ数の減少はいずれの株にも誘導されなかった。そこで、2023 年度は被曝期間を延長してその影響を調べる。

### 2. 論文

無し

## 土壌の Organo-mineral 中の放射性セシウムの植物利用について

氏名：信濃 卓郎

受入研究者：塚田 祥文

共同研究者：山口 紀子・鈴木 政崇

### 1. 成果

これまでの試験で利用をしてきた中通り、伊達市の土壌と浜通り、南相馬市の土壌を供試して交換性カリレベルと移行係数の関係性が異なることを確認した。この違いを説明する要因として交換性放射性セシウムの存在量が重要な要因となっていることを示すために、土壌の交換性放射性セシウムあたりの植物体の放射性セシウム濃度を指標として、交換性カリとの関係性を見たところ、土壌間の違いが大きく低減した。このことから土壌間の違いには交換性放射性セシウムが中心的な役割を示していることが明らかになった。この関係式は

$$CR-Ex137Cs = ((\text{ }^{137}\text{Cs concentration in shoot (Bq [kg]}^{-1} \text{ DW}))/(\text{exchangeable } ^{137}\text{Cs concentration in soil (Bq [kg]}^{-1} \text{ DW}))$$

として利用可能である。

また、南相馬市の圃場では過去 5 年間に亘り化学肥料のみを与えた処理区と、同様に牛糞堆肥を与えた処理区が設定されている。これまで土壌中の有機物は粘土層間を塞ぐことによって、放射性セシウムの移行が高まるという観点と、有機物中に含まれるカリウムが移行を抑制するという観点を相反する 2 つの役割が想定されていた。そこで、この関係を明らかにするために、それぞれの土壌に対して交換性カリと移行係数の関係を見たところ予想に反して堆肥施与土壌では同じ交換性カリレベルでの移行係数が低下することが確認された。さらにこの関係性は交換性放射性セシウムでは説明ができなかった。この時、土壌の有機物量は堆肥施与区で高く、さらに有機物の画分を大きさに別に詳細に分けた後に、それぞれに含まれる放射性セシウムを解析した。その結果、土壌中の有機物に結合した放射性セシウム画分が Organo-mineral を含めて処理による差がほとんど認められず、粘土鉱物による固定量が移行性を制御する主要因であると判断された。今後は有機物投入が放射性セシウムの粘土鉱物への取り込みを促進するメカニズムを解明していきたい。

### 2. 論文

Suzuki, M., Eguchi, T., Azuma, K., Nakao, A., Kubo, K., Fujimura, S., Syaifudin, M., Maruyama, H., Watanabe, T., and Shinano, T. The ratio of plant  $^{137}\text{Cs}$  to exchangeable  $^{137}\text{Cs}$  in soil is a crucial factor in explaining the variation in  $^{137}\text{Cs}$  transferability from soil to plant. The Science of the total environment. 2023, 857(1), 159208.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159208>



## 有機ポリアニオンのセシウム汚染土壌に対する分散効果

氏名：長谷川 浩

受入研究者：Rahman Md.

Mofizur Ismail

共同研究者：Begum Zinnat Ara

### 1. 成果

#### 【Research objective】

The objective of the current work is to understand the effect of organic polyanion (humic acid, HA) on reducing radioactive waste volume by moving fine particles attached to larger ones. Besides, the interaction and retention behavior of  $^{137}\text{Cs}$  and soil mineral contents in different soil size fractions before and after being treated with water and HA.

#### 【Experimental】

The soil samples (Soil depth 0–10 cm, particle size  $<2$  mm) were collected from Minamitsushima, Namie machi of Fukushima prefecture. A suspension of 10 g of soil was treated with water and HA (shaken for 16 h at 60 rpm) and passed through the 500, 212, 53, and  $0.45\ \mu\text{m}$  sieve. Soil particles collected on the sieves and membrane were oven-dried at  $50^\circ\text{C}$  for 24 h, removed using a sieve brush, and dried at  $105^\circ\text{C}$ . The soil samples, water, and HA-treated were analyzed to study the  $^{137}\text{Cs}$  in soil size fraction and the effect of humic acid (HA) as a soil dispersing agent.

#### 【Results and discussion】

The soil dispersion results from the water, HA, and Sodium hexametaphosphate (SHMP) showed that SHMP and HA appear more dispersive than water. SHMP and HA liberate 1.4 and 1.1 times higher values of silt and clay fraction ( $0.45$  to  $53\ \mu\text{m}$ ) content than water. The higher concentration of HA tends to form aggregate by bridging with finer particles. Soil washing with SHMP and HA increases  $^{137}\text{Cs}$  content in clay & silt ( $0.45$  to  $53\ \mu\text{m}$ ) fraction more than water. SHMP concentrate  $> 95\%$  of total  $^{137}\text{Cs}$  content to finer sand ( $53$  to  $212\ \mu\text{m}$ ) and clay & silt ( $0.45$  to  $53\ \mu\text{m}$ ) fraction. A negligible amount ( $\leq 0.1\%$ ) of  $^{137}\text{Cs}$  was dissolved in the dispersant. The higher release of cations in the SHMP solution could be attributed to the cation exchange process via SHMP containing sodium ions.

### 2. 論文

1. S. Rahman, I.M.M. Rahman, S. Ni, Y. Harada, S. Kasai, K. Nakakubo, Z.A. Begum, K.H.Wong, A.S. Mashio, A. Ohta, H. Hasegawa, Enhanced remediation of arsenic-contaminated excavated soil using a binary blend of biodegradable surfactant and chelator, J.

Hazard. Mater., 431, 128562(2022)

2. S. Rahman, N. Jii, S. Ni, Y. Harada, A.S. Mashio, Z.A. Begum, I.M.M. Rahman, H. Hasegawa, Biodegradable chelator-assisted washing and stabilization of arsenic-contaminated excavated soils, *Water Air Soil Pollut.*, 233, art.no.213(2022)

3. F.B. Biswas, S. Das, T. Nishimura, M. Endo, M. Fukuda, F. Morita, A. S. Mashio, T. Taniguchi, K. Maeda, H. Hasegawa, Functionalized polyvinyl alcohol aerogel for efficient and selective removal of arsenite from aqueous matrices, *Chem. Eng. J.*, 450, 138232(2022)

4. M.F. Alam, Z.A.Begum, Y. Furusho, H. Hasegawa, I.M.M. Rahman, Selective separation of radionuclides from environmental matrices using proprietary solid-phase extraction systems: A review, *Microchem. J.*, 181, 1070637(2022)

5. K. Nakakubo, M. Endo, Y. Sakai, F.B. Biswas, K.H. Wong, A.S. Mashio, T. Taniguchi, T. Nishimura, K. Maeda, H. Hasegawa, Cross-linked dithiocarbamate-modified cellulose with enhanced thermal stability and dispersibility as a sorbent for arsenite removal, *Chemosphere*, 307, 135671(2022)

**福島県伊達市，双葉郡の未除染森林土壌における高濃度放射性セシウム含有粒子の分布**

氏名：大手 信人

受入研究者：和田 敏裕

共同研究者：村上 正志・二瓶 直登・辰野 宇大・角間 海七渡・脇 嘉理・長澤 和佳

## 1. 成果

## 目的

本研究は福島県の帰還困難区域の森林土壌における高濃度放射性セシウム含有微粒子（CsMPs）の分布調査を行う。2011年の東電福島第一原子力発電所事故以降、河川水中からは放射性セシウム（Cs）を比較的多量に含むCsMPsが検出された。当研究組織の調査から、CsMPsは降雨の土壌侵食に伴い河川に流入し、河川水中の懸濁態Cs濃度を一時的に上昇させる要因となることが確認された。今後の河川水のCs濃度への影響やCsMPsの動態予測を踏まえ、河川上流域におけるCsMPsの分布把握は重要であると考えられる。本年は浪江町の帰還困難区域内の森林土壌、特に降雨における土壌侵食に伴う移動が考えられる溪流付近を対象に、CsMPsの分布調査を行った。

## 方法

福島県伊達市小国地区、および同県双葉郡浪江町内の帰還困難区域の森林域を調査対象地とした。森林内の谷筋を流れる溪流付近から、斜面方向にかけて試料を採取、地形を調査するトランセクト調査を行った。本研究では、対象地においてトランセクト調査を3斜面、各斜面斜面下部から上部にかけて4-5地点で試料採取を行った。土壌は100mLステンレス容器を用いて採取し、採取土壌は乾燥、篩分け処理を行った後、試料中のCs濃度をゲルマニウム半導体検出器で測定した。また、CsMPs由来のCs濃度をイメージングプレートを用いたオートラジオグラフィ法で測定した。本研究では、オートラジオグラフィ法における一粒子当たりの放射性セシウム含有量が一定以上の粒子を高濃度放射性セシウム含有粒子として識別した。

## 結果

本年は浪江町内で採取された試料について分析を行った。採取された試料のCs濃度に対するCsMPsの寄与は数%程度であることが確認された。また、森林斜面のトランセクト調査の結果から、土壌の放射性セシウム $^{137}\text{Cs}$ の分布とCsMPsの分布傾向は類似していることが確認された。分布傾向が類似していることから、降雨時の表面流去水や溪流水の増水に伴う土壌侵食作用によって、下流の河川における土粒子に吸着したCsとCsMPsの流出傾向も類似する可能性が考えられるが、昨年度までの調査（2021年度重点課題F-21-28，論文：Tatsuno et al., 2022 & Tatsuno et al., 2023）では上記のような結果は確認されていない。これは、土壌侵食によって河川に流入する懸濁態CsとCsMPsの流域内のソースが異なる可能性や、侵食を受けた際の斜面上または河川中における粒子の動態が異なる可能性も考えられる。

これらについては、今後も調査が必要であり、2022年度に分析、解析を行えなかった小国地区の試料の分析とともに2023年度における研究を検討する。

## 2. 論文

- 1, Tatsuno, T., Waki, H., Kakuma, M., Nihei, N., Takase, T., Wada, T., Yoshimura, K., Nakanishi, T., Ohte, N., 2023. Effect of Csmps on Radioactive Cesium Concentration and Distribution Coefficient in Rivers Flowing in the Watersheds with Different Contaminated Condition in Fukushima. SSRN Electron. J. 329, 116983. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4255789>
2. Tatsuno, T., Waki, H., Kakuma, M., Nihei, N., Wada, T., Yoshimura, K., Nakanishi, T., Ohte, N., 2022. Cesium-rich microparticles runoff during rainfall: A case study in the Takase River. Radiation Protection Dosimetry 198, 1052–1057

## 福島県の河川におけるニホンウナギの移動とその放射能セシウム濃度の関係解明

氏名：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。将来的な活動再開を目指す原発周辺地域の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種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を探り、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を選定した。ニホンウナギの行動を調べるために、超音波テレメトリー手法（発信機を対象に装着し、受信機でその信号を受信することにより行動追跡をする手法）を用いた。日下石川から松川浦を通り外海との接続部まで、計35台の受信機（VR2W、Innovasea社）を設置した。河川で捕獲したニホンウナギ40個体（全長 $449.2 \pm 127$  mm、体重 $160.6 \pm 160.4$ ）に超音波発信機（V5、Innovasea社）を装着し、2021年8月31日に捕獲地点近くに放流し、2022年3月14日まで移動を追跡した。体サイズが比較的大きい個体のうち4個体は外海へ移出し、小さい個体は全個体が捕獲域に留まった。本種の滞在と移動の傾向は体サイズごとに異なった。次に、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、福島大学放射能研究所にあるゲルマニウム半導体検出器を使用して測定した。結果、放射性セシウム濃度は、松川浦（ $1.1 \pm 0.2$  Bq/kg、N=5）に比べて日下石川（ $5.4 \pm 1.4$  Bq/kg、N=8）で有意に高かった（マン・ホイットニーのU検定、 $p < 0.01$ ）。河川の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Cs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

## 魚類の放射能汚染のリスク評価に向けた原発周辺海域の魚類の移動生態の解明

## ～バイオリギング技術の適用～

氏名：野田 琢嗣

受入研究者：和田 敏裕

共同研究者：三田村 啓理

## 1. 成果

福島県の沿岸漁業は、津波による直接的被害に加えて、原発事故に伴う魚介類の放射能汚染の問題により、復旧が著しく遅れている。その理由の一つとして、現在も原発港内に放射性セシウムの基準値を上回る魚類が生息し、潜在的なリスクとして存在することや、これらの「魚類の移動を制御することができない」ことが挙げられる。そこで本研究では、福島県の重要魚種であるカレイ類が、原発周辺の海域をいつどの程度利用しているかを明らかにすることで、魚類の放射能汚染の正確なリスク評価に資する情報を得ることを目的とした。2020年7月に、ホシガレイ人工種苗80尾(1歳魚：30個体、2歳魚：50個体)に深度・温度ロガーを装着した。その後、原発から5km北に位置する浪江町請戸漁港にて放流した。また2022年2月初旬および6月中旬にホシガレイの人工種苗(3歳魚)に水温・深度ロガーを装着し、それぞれ24個体(全長 $46.2 \pm 2.2$ cm)および16個体(全長 $45.9 \pm 2.0$ cm)を松川浦北部に放流した。カレイ類の多くは、海底に滞在する時間が存在するため、海底地形情報および潮汐予測モデルと照合することで、位置を絞ることができる(Tidal Location法)。また、再補された個体の筋肉中の放射性セシウム濃度を測定した。請戸漁港で放流した個体からは、これまでに4個体回収された。このうち1個体は、原発の港湾内で再補された。当個体の解析により、2ヶ月間にわたる放流場所から原発港湾内までの移動経路が明らかとなり、また、魚類が実際に原発港湾内に入ることが示された。東京電力の公表により、当個体の放射性セシウム濃度はND( $<2.0$  Bq/kg)であった。また、松川浦で放流した個体からは、これまでに18個体が回収された。Tidal Location法の適用の結果、原発の港湾内に移動した個体はなかったが、南下する個体だけではなく、北上する個体もいることがわかってきた。今後は他魚種にも展開するとともに、放流試験を継続し、移動経路と放射性セシウム濃度の関係の解析を進める予定である。

## 2. 論文

## 人為的な要因による粉塵の舞い上がり（再浮遊）に伴う放射性セシウムの環境動態

氏名：平良 文亨

受入研究者：平尾 茂一

共同研究者：松尾 政彦

### 1. 成果

東日本大震災及び東京電力(株)福島第一原子力発電所事故（以下、「事故」という）の発生から、10年以上が経過した。福島第一原子力発電所から半径20km圏内の警戒区域に位置していた福島県富岡町では、2017年4月に避難指示が一部解除（町の総面積の約88%）され、住民帰還が始まった。一方、帰還困難区域（町の総面積の約12%）では、特定復興再生拠点区域に認定された「夜の森地区」において、2018年7月から除染が開始され、2022年4月からは準備宿泊が開始されるなど、近く全面解除となるものの、当該拠点区域外である「小良ヶ浜地区」では、県内に一時保管されていた除去土壌等の中間貯蔵施設への主要な輸送路を有しており、作業車両の往来に伴い $^{137}\text{Cs}$ を含む粉塵（ダスト）の再浮遊が懸念されている。我々の先行研究では、建屋の解体作業に伴い発生したダストに含まれる $^{137}\text{Cs}$ 濃度は限定的であり、むしろダンプ等の作業車両の往来に伴いダストに含まれる $^{137}\text{Cs}$ の再浮遊が示唆されたため、人為的な要因によるダストの再浮遊に関して、詳細に解析することを目的とし、「小良ヶ浜地区」を対象に、ダストに含まれる $^{137}\text{Cs}$ の粒径別解析及びダスト吸入による作業員の内部被ばく線量評価を行った。具体的には、2022年9月から12月の期間、除去土壌等の輸送路に位置する小良ヶ浜地区の深谷において、ハイポリウムエアサンプラー（HV-RW・HV-1000R、1000L/min、柴田科学(株)）を設置し、ダストをガラス濾紙に捕集した。捕集後、ガラス濾紙をベルトポンチで円形に12穴打ち抜き、U8容器に梱包し測定試料とした。測定試料は、ゲルマニウム半導体検出器（GMX Series (Ortec)、MCA7600 (SEIKO EG&G))で80,000秒核種分析した。ダストの核種分析の結果から、PM<sub>2.5</sub>には0.054~0.12mBq/m<sup>3</sup>、PM<sub>2.5</sub>以上の粗大粒子には0.042~0.085mBq/m<sup>3</sup>、PM<sub>10</sub>には0.081~0.15mBq/m<sup>3</sup>及びPM<sub>10</sub>以上の粗大粒子には0.028~0.059mBq/m<sup>3</sup>の範囲で $^{137}\text{Cs}$ が含まれており、特にPM<sub>2.5</sub>の極微細な粒径のダストが再浮遊しやすく $^{137}\text{Cs}$ が集積する傾向にあることが明らかとなった（単位重量当たりの $^{137}\text{Cs}$ の放射能では、粗大粒子の方が微細粒子に比べて大きい傾向にあった）。なお、吸入による内部被ばく線量としては、 $<3.5 \times 10^{-6} \sim 7.5 \times 10^{-6}$  (粒径1 $\mu\text{m}$ ) ( $\mu\text{Sv/d}$ )及び $<3.8 \times 10^{-6} \sim 7.7 \times 10^{-6}$  (粒径5 $\mu\text{m}$ ) ( $\mu\text{Sv/d}$ )と極めて限定的であった。小良ヶ浜地区では、事故後10年以上が経過し、今なお環境中に残存する事故由来と考えられる放射性セシウムは、地表面などに賦存し、気象条件や工事に伴い再浮遊を繰り返しながら粒径の小さなダストに集積する傾向があることが示唆された。今後、本格除染により、夜の森地区のような環境改善が期待できる。

## 2. 論文

Yasuyuki Taira, Masahiko Matsuo, Makiko Orita, Hitomi Matsunaga Yuya Kashiwazaki, Xu Xiao, Shigekazu Hirao, Noboru Takamura. Regional case studies: Environmental radioactivity levels and estimated radiation exposure doses of residents and workers in areas affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Radiation Environment and Medicine*, 12 (1); 37-52, 2023.



## 海洋表面でのオゾン反応によるヨウ素化合物の発生メカニズムの解明—海洋の放射性物

## 質動態の基礎的研究—

氏名：大木 淳之

受入研究者：高田 兵衛

共同研究者：

## 1. 成果

海水中のヨウ化物イオンが大気中オゾンと反応すると、ヨウ化物イオンが酸化されてヨウ素分子 (I<sub>2</sub>) が生じる。最近の研究によると、海洋から大気へのヨウ素放出のうち、この反応に由来するヨウ素分子放出が最も大きな寄与を持つと報告されている。いっぽう、海水中でヨウ素分子が発生すると、海水中の有機物と反応して、有機ヨウ素ガスが発生することも考えられている。本研究では、海水中のヨウ化物イオンと大気中オゾンの反応に起因した有機ヨウ素ガスの発生を調べるため、海水とオゾンとを反応させる室内実験を行った。

大気中オゾン濃度の約 10 倍のオゾンを含むガスを生成して、4 mL/min で海水反応チャンバーに送り、海水 100 mL と約 2 日間反応させた。流速を 4 mL/min と遅くすること、反応チャンバーのヘッドスペースを 400 mL 設けることで、オゾンの反応効率を 100% にすることができた。オゾンと反応した後の海水をガラス瓶に密封して、冷暗所に置いた。オゾン反応後から 3 日以上経過すると、そのガラス瓶内でジヨードメタン (CH<sub>2</sub>I<sub>2</sub>) が増えることが確認された。オゾン反応後 13 日目までジヨードメタンが増え、その後は増えなかった。

オゾンと海水中のヨウ化物イオンが反応して分子状ヨウ素 (I<sub>2</sub>) が発生する。この分子状ヨウ素と海水中の溶存有機物が反応してジヨードメタンができたと考えられる。海水中には高分子溶存有機物が含まれており、ヨウ素原子二つと結合した有機物の基質ができ、数日の時間を経て、その基質が脱離したものと考えられた。表層海水中には、大気中オゾンとの反応を経てできた、ヨウ素の基質を持つ有機物が一定量存在すると考えられた。今後、どのような有機物基質なのかを調べる必要がある。

## 2. 論文

## 福島沿岸底生魚における $^{137}\text{Cs}$ 移行機構の解明：底生生物生態系における生物可給態移

### 行挙動のモデル解析と検証

氏名：立田 穰

受入研究者：高田 兵衛・青山 道夫

共同研究者：青野 辰男・西川 淳・小林 卓也・浜島 靖典

#### 1. 成果

福島第一原子力発電所事故（1 FNPS）から 10 年経過したが、沿岸の底生魚類における放射性 Cs 濃度は、表層魚の濃度推移に比較して、2010 年以前の濃度まで低下していない。底生魚類の放射性 Cs 濃度が表層魚のそれに比較して高い原因は、底層水より一桁濃度が高い海底土中間隙水中の放射性 Cs が底生生物に移行し、これが底生魚の餌となるためと推定されている。実際に、福島沿岸底生生物中濃度が高いことは、2021 年までの ERAN 共同研究により確認された。本研究では、底生生物中  $^{137}\text{Cs}$  の生物可給画分を求め、生物移行モデル解析により、底生魚の濃度推移における、食物連鎖移行の寄与を求めた。

新青丸研究航海 KS-18-12、KS-20-17、KS-21-23 における福島沿岸で採取された底生生物試料について、過酸化水素分解後の残渣画分における放射性セシウム濃度を、低レベルバックグラウンド環境下の井戸型ゲルマニウム検出器によりガンマ線スペクトロメータで測定した。得られた濃度を難分解性画分と考え、易分解性画分の比率を求め、これを有機態（生物可給性）とみなして、生物可給態放射性セシウムの食物連鎖を介した移行寄与を、底生魚への生物移行モデルで解析した。海水・生物移行モデルによる研究対象海域における、時系列濃度の計算結果は、本研究における海水、底生生物、底生魚の実測値、および学術論文と各研究機関の報告値を用いて検証した。

2018,2020,2021 年の新青丸福島沿岸の研究航海において、海水中放射性セシウム濃度に対する、底生生物中放射性セシウム濃度の、濃度比（aCR: apparent concentration ratio）は、1FNPS 前面海域（NP0 から NP2）で、およそ 30 から 800 であった。これに対して、 $\text{H}_2\text{O}_2$  分解可能であった底生生物試料中の易分解性画分は、 $^{137}\text{Cs}$  放射能総量の 6-93% であった。底生生物中の易分解性画分濃度の、海水中濃度に対する濃度比（labile fraction CR）は、2018 年の底生生物および 2020 年の YO2, YO3 エビジャコ試料では、事故前濃縮係数 CF15 とほぼ同オーダーであったが、2020 年の NP0, NPE1, NP2 および 2021 年のその他の底生生物では、labile fraction CR は、事故前 CF に比較して 5 から 15 倍程度大きかった。

#### 2. 論文

## 福島県高瀬川および猿田川における放射性 Cs フラックスに関する研究

氏名：青野 辰雄

受入研究者：高田 兵衛

共同研究者：竹内 幸生・藤田 一輝・勝野 和美

### 1. 成果

比較的空間線量率の高い流域の猿田川と合流する高瀬川（福島県浪江町）において、2019年までの調査では上流から下流に溶存態放射性 Cs 濃度が増加する傾向にあった。2019年秋の大出水以降は、溶存態と粒子態放射性 Cs 濃度のモニタリングを行ったが、2019年までに比べて、中流から下流域における放射性 Cs 濃度が減少傾向にあった。そこで放射性 Cs フラックスと形態別粒子態 Cs 濃度の割合について調査を行った。2021年から2022年にかけて猿田川上流で放射性 Cs 濃度とフラックス(MBq/month)は約75%の減少が観測された。途中で流入する沢水(Stn.4-3)は2022年が2021年に比べて放射性 Cs 濃度5倍ほど高くなった。下流の放射性 Cs 濃度は、上流に比べて2-3倍高い程度で、また下流になるにつれて、フラックスは高くなる傾向にあった。下流では、2022年の河川水中の Cs-137 濃度の溶存態と粒子態の割合は、おおむね50%であった。一方で、粒子態 Cs-137 濃度は、懸濁粒子(粒径:0.45-1 $\mu$ m)よりも小粒子(粒径:1 $\mu$ m以上)の放射性 Cs 濃度の濃度が高い傾向にあった。フィルターに捕集された粒子について、1M酢酸アンモニウム溶液と過酸化水素水を用いて溶出実験を行ったところ、懸濁粒子からは顕著な溶出が認められなかったが、小粒子ではイオン吸着態に約10%、有機態に約30%の溶出が認められた。粒径63 $\mu$ m以下の堆積物ではイオン吸着態に約1%、有機態に約10%の溶出が認められた。今後は得られた分析結果を基に粒子態 Cs-137 のより正確な輸送過程が解明されることが期待される。

### 2. 論文

該当なし

## Study on the concentration of radionuclides in algae in the coastal area of Fukushima

氏名：Sahoo Sarata Kumar

受入研究者：高田 兵衛

共同研究者：青野 辰雄・榎本 昌宏・天野 洋典・渡部 翔

### 1. 成果

沿岸に生息するほとんどの海藻は、初春に岩場などに付着し、水温が高くなる夏季には流れ藻になる。一方で海藻はヨウ素などを濃縮することが知られている。福島原発廃炉作業の中で、ALPS 処理水の海洋放出が計画されているが、放出前に福島沿岸の海藻中の放射性核種や安定元素濃度についてバックグラウンドを把握することは重要である。そこで福島沿岸に生息する海藻中の放射性核種と安定元素のデータを集積することを目的に、現在の状況の把握を行なった。2022年夏に富岡川と請戸川河口域でフノリ(Gloiopeltis)の採取を行い、真空凍結乾燥を行い、乾燥試料は灰化した。フノリ中の Cs-137 濃度は、富岡で 10.4 Bq/kg-生重量に対して、請戸では 2.9 Bq/kg-生重量であった。富岡と請戸の海藻を採取した付近の海水および堆積物中の Cs-137 濃度は、それぞれ 7.5 mBq/L と 223 mBq/g-dry および 7.6 mBq/L と 122 mBq/g-dry であった。海藻の Cs 濃縮比（海藻中濃度/海水中濃度）は 100 程度、海水と堆積物の Cs 移行係数は約 1000 と報告されているが、今回の結果では濃縮比や移行係数が従来のもものよりも 10 倍程度高い値を示した。安定 Cs 濃度も 0.045-0.033 mg/kg-生重量と既報値よりも高く、堆積物中の高い放射性 Cs 濃度の影響を受けて海藻中放射性 Cs 濃度が高く検出された可能性が考えられる。今後は、Sr などの得られた分析結果を基に海水や堆積物との濃度比を比較することで、沿岸における海藻への移行過程が解明されることが期待される。

### 2. 論文

該当なし

## 原発事故周辺地域・高放射線環境下におけるアカネズミ SNP 変化の解析

氏名：遠藤 大二

受入研究者：石庭 寛子

共同研究者：

### 1. 成果

#### 【目的】

福島原発事故周辺地域における野生動物ゲノムへの放射線の影響は、放射線の長期的な影響を検討する上で重要である。国立環境研究所と福島大学環境放射能研究所では、野生ネズミであるアカネズミに注目して放射線影響を調査している。本研究では、3個の遺伝子に注目し、次世代シーケンサーを用いてゲノム上の変異の種類と出現頻度を調べた。本研究では、二箇所の対照地域との比較により、種に長期的に影響する可能性があるゲノムの変異についての予備調査を行った。

#### 【材料と方法】

2013年に福島原発周辺地域で捕獲されたアカネズミ10匹、対照個体として青森県の5匹と富山県の5匹を用いた。ゲノム上の全遺伝子およびエクソンは、公表されているゲノムデータの exon・遺伝子予測ソフトである geneid により処理データから収集した。調査遺伝子は、電離放射線誘発 DNA 損傷修復関連遺伝子の ATM とし、ハウスキーピング遺伝子として beta-actin および Glucose transporter を用いた。ゲノムから対象遺伝子のエクソンを増幅するプライマーの設計には、Primer3 を用いた。対象個体ゲノムから個別・エクソン別に増幅されたエクソンの増幅産物は、PCR 精製キットで精製を実施した。その後、個別に精製 PCR 産物を集め、二回目の PCR 精製を実施した。個別の PCR 産物は、国立環境研究所において、Ion Torrent 次世代シーケンサーで解析された。次世代シーケンサーの Read からの変異検出は、茨城県つくば市で2014年に採取された個体の Whole Genome Shotgun Sequence (BDUI01000000)を基準として行われた。変異の検出のために、Read を Bowtie2 により基準ゲノムに整列した。整列配列の samtools および bcftools による分析から Read 上の変異が特定され、該当 Read 数が計数された。変異は個別の有効 Read 数に対する変異 Read 数として分析された。変異個体数の地域依存性については  $\chi^2$  二乗検定により検定された。

#### 【結果と考察】

Read 上の変異解析により、359個の変異が検出された。その内訳は、点突然変異188箇所、インサージョン121箇所 (Frame shift あり109個、なし12個) またデリージョン130箇所 (Frame shift あり106個、なし24個)であった。個々の変異について、福島と他地域での出現を  $\chi^2$  二乗検定で評価したところ、多くの変異について有意差は見られなかったが、10個の変異については有意差(5%)が認められた。ATM の変異については福島で

の出現が多い傾向が認められた。今後、トランスクリプトームを参照して、ATM、 $\beta$  アクションおよび GLUT 遺伝子の変異とタンパク質発現の関係を検証する必要があると示唆された。また、個体別の変異の分析により、ATM の機能が失われている個体が存在するかについて、検討を行う必要がある。今回は、小数例でも茨城県で 2014 年に採材されたゲノムを基準としたエクソンの次世代シーケンス解析により、福島県生息アカネズミ個体の変異を検出することが可能であった。国立環境研究所と福島大学放射能研究所では 2011 年から現在までアカネズミを捕獲・分析していることから、同様の方法で個体数を増やした調査の有用性が示唆される。

## 2. 論文

Satoh, S., Tanaka, R., Yokono, M., Endoh, D., Yabuki, T., & Tanaka, A. (2023). Phylogeny analysis of whole protein-coding genes in metagenomic data detected an environmental gradient for the microbiota. *Plos one*, 18(2), e0281288.

Kataoka, H., Koita, N., Kondo, Ito N., Ito, H., Nakajima N., Nakajima, M., Momose, K., Ima H., Yoshino, T., Amano, T., Kitazawa, T., Endoh, D. & Teraoka, H. (2022). Metabarcoding of feces and intestinal contents to determine carnivorous diets in red-crowned cranes in eastern Hokkaido, Japan. *Journal of Veterinary Medical Science*, 84(3), 358-367.

Hanazono, K., Itami, T., Hayasaka, I., Miyoshi, K., Hori, A., Kato, K., & Endoh, D. (2022). Evaluation of Renal Blood Flow in Dogs during Short-Term Human-Dose Epoprostenol Administration Using Pulsed Doppler and Contrast-Enhanced Ultrasonography. *Animals*, 12(9), 1175.

Kawasaki, E., Wenjing, D., Sawada, A., Nakajima, M., Momose, K., Yoshino, T., Amano, T., Endoh, D., Nakajima, N. & Teraoka, H. (2022). Conventional Gel Electrophoresis-Resolvable Insertion/Deletion Markers for Individual Identification and Analysis of Population Genetics in Red-Crowned Cranes in Eastern Hokkaido, Japan. *Animals*, 12(17), 2293.

Hanazono, K., Nakamoto, M., Hori, A., Miyoshi, K., Nakade, T., Itami, T., ... & Endoh, D. (2022). Evaluation of caudal vena cava size using computed tomography in dogs under general anesthesia. *Journal of Veterinary Medical Science*, 84(12), 1556-1562.

## きのこ類・寄生菌・菌捕食者の放射性セシウム濃度の経時的变化

氏名：保坂 健太郎

受入研究者：石庭 寛子

共同研究者：糟谷 大河・山本 航平・Nam Kyung-Ok

## 1. 成果

[背景] 陸上生態系において菌類は種多様性が最も高く、バイオマスも最大である可能性が指摘されている。さらに菌類、特にきのこ類は放射性物質の蓄積特性が、他の生物に比べ高いという観察結果も示されている。研究代表者らはこれまで限られたサンプリングから(1)地下生菌(トリュフ類)のセシウム濃度、(2)それらに寄生する菌類のセシウム濃度、(3)チェルノブイリおよび福島第一原発事故前後のきのこ標本からの放射性セシウムの検出、などを進めてきた。本研究課題ではさらに多様なきのことその寄生菌およびそれらを捕食する動物のセシウム蓄積特性と、過去40年間のセシウム濃度の変化を既存標本から明らかにすることを目的とした。

[方法] 国立科学博物館植物研究部の菌類標本庫に保管されているきのこ標本(乾燥標本)のうち、1990年代～2021年にかけて複数回かつ同一地点(茨城県つくば市など)で採集され、放射能濃度測定用に供試可能(十分量が確保できる、など)な標本を中心に抜き出し、幅広い分類群におけるセシウムの蓄積特性を明らかにすることを目的とした。特にこれまで放射性セシウムの蓄積特性に顕著なパターンを示した外生菌根性きのこ(タマゴタケ、クロハツ、クサウラベニタケなど)、寄生菌(ハナヤスリタケ、タンポタケなど)とその宿主(ツチダンゴ属など)について茨城県、福島県で採集された標本を中心に、NaIシンチレーションガンマカウンタ(パーキンエルマー社、2480 Wizard2)を使用して測定時間1800秒にて<sup>137</sup>Cs濃度を測定した。

## [結果と考察]

・放射性セシウム濃度の最高値は327,615 Bq/kgで、栃木県産のクサウラベニタケ(2012年10月採集)から確認された。茨城県つくば市産の同種においては概ね50,000 Bq/kg前後であり、2011年10月～2018年10月の期間中に明確な増加・減少は見られなかった。

・茨城県つくば市産のクロハツとそれに寄生するヤグラタケの放射性セシウム濃度は、2011年～2013年の期間中において、宿主(クロハツ)では500 Bq/kg以下で減少傾向にあったが、寄生菌(ヤグラタケ)においては増加傾向にあり、2013年10月採集分が最高値(2728 Bq/kg)を示した。また、寄生菌/宿主のセシウム濃度比は1.3～29であった。

・福島県産(2013年8月採集)の宿主(ツチダンゴ属)と寄生菌(ハナヤスリタケ属)においては、寄生菌のセシウム濃度が約9.3倍高く、12,393 Bq/kgを示した。一方で、山梨県産個体(2017年10月採集)においては、宿主のセシウム濃度が約4倍高く、743 Bq/kgを示した。

・これらのきのこ類は動物（げっ歯類、大型哺乳類、昆虫など）の主要な餌資源であることから、森林生態系においてきのこを寄生菌及び動物を介したセシウムの移動と循環が起こっている可能性がある。

## 2. 論文

後藤康彦・桧垣正吾・柴田尚・保坂健太郎. 2022. 福島第一原子力発電所事故後に富士山で採取された野生食用きのこ 3 種の方角別および標高別の放射性セシウム濃度. 日本菌学会会報 63 (2): 53-58.



## アジア太平洋地域各国の中等学校における放射線教育の効果に関する研究

氏名：金盛 正至

受入研究者：山口 克彦

共同研究者：宮崎 寛之・高嶋 隆太・小池 弘美・黄倉 雅広・飯本 武志

### 1. 成果

本研究の目的は放射線教育の内容と手法、放射線教育の実施効果等に関する項目を教師や生徒に問い、授業前後の結果の変動から効果の高い教師の特徴を明らかにすることである。本研究の対象を我が国国内にとどめずに、教育の方法や内容の異なるアジア太平洋地域の国々の協力も得て、関連の各国の情報も集約した。

日本を含むアジア太平洋地域 8 か国の中等学校とその教師に対してアンケート調査を実施した。2020 年末頃から 2021 年末頃まで調査を実施し、アンケートの各項目では、教師のもつ放射線に関する価値観や実際の授業実施の概要（項目別の内容等）、生徒の放射線に対する印象や知識、興味等を問う内容となっている。ここでは比較的多くの回答が得られた日本（中学生 283 回答、高校生 163 回答）、フィリピン（中学生 88 回答、高校生 200 回答、教師 69 回答）、インドネシア（中学生 616 回答、高校生 1093 回答、学年不明 23 回答、教師 70 回答）、マレーシア（中学生 339 回答、高校生 335 回答、学年不明 207 回答、教師 138 回答）の 4 カ国の結果を集計し、分析をした。IAEA はアジア太平洋地域協力プログラムの中で、中高生レベルの NST 教育に WOW ファクター（新しい発見や驚き、魅力を感じる要素）を付加して効果を高める試みを行っており、今回実施した放射線教育はその枠組みに沿ったものである。

授業の前後で生徒が「放射線」という用語から連想する印象として「面白い」と回答する度合いがほとんどの国で強まったことから、WOW ファクターを意識した放射線教育は生徒の興味・関心を高めることに資するといえる。

次に、教師の特徴に着目し、生徒の抱く「放射線」に対する「面白い」「わかりやすい」「親しみやすい」の 3 つの印象の変化に及ぼす効果を分析した。生徒回答における授業前後の「面白い」「親しみやすい」「わかりやすい」の変化量を目的変数、学年、教師の国籍、授業時間、教師の印象を説明変数として重回帰分析を行った。多重共線性が生じた変数は分析から取り除いた。「わかりやすい」と感じる教師が教えると生徒がより「面白い」と感じる傾向にあった ( $p<0.05$ )。インドネシアの高校 ( $p<0.1$ ) とマレーシアの高校 ( $p<0.1$ ) でも同じ傾向が見られた。全体の分析においては、「良い」と感じる教師が教えると生徒が「面白い」と感じる度合いが低くなる傾向にあった ( $p<0.05$ )。「単純」と感じる教師が教えると、生徒がより「わかりやすい」と感じる傾向にあった ( $p<0.05$ )。フィリピン ( $p<0.1$ ) とインドネシアの中学 ( $p<0.05$ ) でも同じ傾向が見られた。全体の分析においては、「良い」と感じる教師が教えると生徒が「わかりやすい」と感じる度合いが低くなる傾向にあった

( $p < 0.1$ )。放射線に対して理解のしやすさを感じている教師が教えると、生徒が「面白い」「わかりやすい」と感じる割合が大きくなったことから、教師が放射線について正しく理解をし、自信を持って教育することを支援する枠組みが必要といえる。また、放射線に対して「良い」と感じている教師が教えると、生徒が「面白い」「わかりやすい」と感じる割合が小さくなったことから、教師は中立的な立場で授業することの重要性が示唆された。

今後の課題として中長期的な教育効果の評価を行っていくことが考えられる。

## 2. 論文

## 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

氏名：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

### 1. 成果

#### 1. 成果

2011 年に発生した福島第一原子力発電所事故による福島県東部の高度放射能汚染地では、現地に生息する様々な野生生物の汚染状況が調査されている。我々は地中で生活し特異な生理的・生態的特性を有すると考えられるアズマモグラ *Mogera imaizumii* の汚染状況を 2013 年より調査してきたが、これまでの分析は放射性セシウムに関するもので、主に動物の骨格中に蓄積する放射性ストロンチウム (90Sr) については有効な検出・測定手法がなく、分析を行えていなかった。今年度から福島大学環境放射能研究所の共同研究者らの協力を得て、表面電離型質量分析計による 90Sr の質量比 (90Sr/安定 Sr) の分析を試みている。

本研究の初年度に当たる今年度は、野生小型哺乳類の骨格及び歯のサンプルを用いた予備的な測定とアズマモグラのサンプルの処理方法の検討を行った。前者のサンプルとして狭山丘陵で捕獲された外来種のキタリス *Sciurus vulgaris* 1 個体の寛骨を用いた。これは剥皮したキタリスの腰部から好気性細菌のタンパク質分解作用によって除肉を行ったもので、骨組織 1 mg から安定 Sr 濃度 354 mg/kg に対して 90Sr 重量濃度 5.95 pg/kg (放射能濃度 30.37 Bq/kg) が検出され、この手法で野生小型哺乳類の骨格を用いた分析が可能であることが確かめられた。

好気性細菌のタンパク質分解作用によって除肉を行う場合、剥皮後の筋肉の付着した骨格を温水に数日間浸漬し、曝気することで好気性細菌を増殖させるのであるが、この処理水中にストロンチウムが溶出する可能性がある。そこでこの方法で除肉を行った福島県産アズマモグラの前肢骨 7 点と処理水の分析を試みた。前肢骨は分析中であるが、処理水中からは安定ストロンチウム、90Sr はいずれも全く検出されず、この除肉方法が有効であることがわかった。2 年目はアズマモグラを用いた本格的な分析を行う予定である。

#### 2. 論文

なし

### 2. 論文

なし

## RaA,B,C における放射能環境動態の解明

氏名：樋口 健太

受入研究者：床次 眞司・細田 正洋・大森 康孝

共同研究者：秋葉 澄伯

### 1. 成果

桜島は現在も噴火を繰り返し火山灰や二酸化硫黄,放射性核種などを大気へ放出している。そこで、桜島近郊でラドン子孫核種を計測したデータを用いて環境放射能の動態について解析することを目的とした。測定方法と対象核種は、ラドン子孫核種測定器 S-2336 (応用光研) を用いて RaA (218Po), RaB (214Pb), RaC (214Bi) を測定した。場所と期間は、鹿児島市が 2001 年 3 月-2002 年 1 月(N=5,995), 垂水市が 2002 年 1 月~6 月, 2002 年 10 月~2004 年 9 月 (N=12,893)である。ラドン子孫核種である RaA,RaB,RaC の放射能濃度を比較したところ、桜島に隣接する垂水市の方が桜島より 10km 離れた鹿児島市よりも有意に高い濃度であった。

2022 年度は RaA (218Po) (子孫核種濃度) と火山活動 (噴火と火山性地震) の関係を重点的に着目したときに、高い濃度や平均値ではなく、日最低値は有効かもしれない。噴火よりも火山性地震の回数に影響されていそうであるが、今後も更なる解析が必要である。

### 2. 論文

## 環境中ラドンによる放射線施設監視モニタの感度確認 4：活性炭型ラドン検出器による

## 感度確認

氏名：安岡 由美

受入研究者：床次 眞司・細田 正洋

共同研究者：向 高弘・大森 康孝

## 1. 成果

【緒言】 屋内のラドン (Rn-222) は肺がんの主要な原因とされている。Darby らは、屋内ラドン濃度が  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  あたり肺がんリスクが 16%増加すると報告した 1)。世界保健機関 (WHO) は屋内ラドン濃度に対する参考レベルとして  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  を提案している 2)。ラドンの活性炭捕集器であるピコラド (AccuStar) は、簡易測定器として屋内の空气中ラドン濃度の測定に利用されてきた。しかし、屋内ラドン濃度のスクリーニング器としてのピコラドに対する有効性は確立していなかった。そこで、本実験では厚生労働省が示した食品中の放射性セシウムに対するスクリーニング法 3) をもとに、ピコラドが屋内ラドン濃度のスクリーニング器として有効であるか検討した。本研究の最終目的は、地震先行現象の検知を排気モニタデータから得るために、屋内ラドンを用いた排気モニタ値の校正をピコラドで実施することである。

【方法】 ラドンを含む地下水を線源とした自家製ラドンケース (12 L) に設置したピコラド 4 本に、ラドンを 48 時間曝露した。同時に PMT-TEL (Pylon) で、ピコラド回収前 6 時間の平均ラドン濃度を求め、基準値 CS ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) とした。ピコラドは曝露後、液体シンチレータ (インスタフロープラス、PerkinElmer Inc.) を 15 mL 添加し、液体シンチレーションカウンタ (Tri-Carb2300TR、PerkinElmer Inc.) にて 60 分で測定した。4 本のピコラドから平均ラドン濃度を求め 3) 検証値 C ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) とした。なお PMT-TEL は弘前大学被ばく医療総合研究所のラドン曝露場で校正した。

【結果・考察】自家製ラドンケース内の湿度を、ラドンの定量性が認められている範囲内 4) にある 32%~48%に調節し、計 8 回実験を行った。ケース内のラドン濃度測定の結果を、基準値を横軸に取り、検証値を縦軸として相関散布図とした。両者の相関係数は 0.99 で、強い相関を示した。基準値が参考レベルの  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  である時の検証値の 99%予測区間下限値 (検証法のスクリーニング値) は  $74 \text{ Bq m}^{-3}$  であり、判定基準 ( $100 \text{ Bq m}^{-3}$  の 1/2 に相当する  $50 \text{ Bq m}^{-3}$  以上) を満たした。このスクリーニング値が、99%予測区間上限値となるとき基準値 (基準法のスクリーニング値) は  $61 \text{ Bq m}^{-3}$  であり、判定基準 ( $100 \text{ Bq m}^{-3}$  の 1/2 に相当する  $50 \text{ Bq m}^{-3}$  以上) を満たした 2)。またピコラドの検出限界値 (自然計数率の標準偏差の 3 倍) は  $0.2 \text{ Bq m}^{-3}$  となり、判定基準 ( $100 \text{ Bq m}^{-3}$  の 1/4 に相当する  $25 \text{ Bq m}^{-3}$  以下) を満たしたため、検証法のスクリーニング値  $74 \text{ Bq m}^{-3}$  は有

効な値となった。よってラドン濃度の参考レベルである  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  を判定するスクリーニング器として、ピコラドは有効であると判定した。

【参考文献】 1) Darby, S., et al., 2006. Scand. J. Work Environ. Health. 32, 1–84. 2) WHO, 2009. WHO handbook on indoor radon. 3) 厚生労働省, 2012. 食品中の放射性セシウムスクリーニング法 p7. 4) Wakabayashi, A., et al., 2019. Radioisotopes 68, 317–329. 5) 合田奈央他, 2021. 第 22 回「環境放射能」研究会, つくば 2021/3/11.

## 2. 論文

Matsumoto, M. Yasuoka, Y., Takakaze, Y., Hosoda, M., Tokonami, S., Iwaoka, K., Mukai, T., (2023) "Evaluation of radon concentration measurements in water using the radon degassing method." J. Radioanal. Nucl. Chem. 332,167–172.

## 流体シミュレーションを活用したガス曝露場構築の検討

氏名：岩岡 和輝

受入研究者：床次 眞司・細田 正洋

共同研究者：

### 1. 成果

事故による追加の被ばくを評価するために、全体の被ばくから自然核種を分けて評価する必要がある。全体の被ばくから自然核種の影響を分けて評価するためには、自然核種の影響の割合を正しく評価することが重要となる。自然核種の影響を正しく評価するには、正しく校正された測定器が必要であり、そのためにも測定器を正しく校正できる場（濃度の空間分布の時間変化がわかる場）が必要である。本研究では、ガス状の自然核種について、その適切な校正場の設計の検討を流体シミュレーションにより行った。流体シミュレーションを用いて校正場のガス濃度の空間分布を計算した結果、経時的にガス濃度分布のデータを取得ことができ、流体シミュレーションは校正場の設計に有用であることが示唆された。

今後、流体シミュレーションなどにより校正された測定器を用いて、福島原発事故の影響を受けた地域における自然核種の被ばくデータが取得されることが期待される。自然核種の被ばくデータは福島原発事故による放射線影響に不安を感じる地域住民に対してのリスクコミュニケーションに役立つものになるかもしれない。

### 2. 論文

## 里山再生を目指した福島県浪江町における放射性物質の森林内動態解明

氏名：大河内 博

受入研究者：床次 眞司・赤田 尚史

共同研究者：反町 篤行・栗原 大知

### 1. 成果

#### 研究目的

2011年3月に発生した福島第一原子力発電所事故によって環境中に放出された放射性物質は、輸送、拡散されて森林においても捕捉された。福島県面積の約7割を占める森林における除染は労力、費用、廃棄物等に課題があり、ほとんどの地域で除染が実施されていない。森林のうち、住民生活と密接にかかわってきた里山においては社会活動の再開に向けて早急な除染が求められ、そのためにはより効率的な除染方法が必要である。

本研究では、森林における効率的な原位置除染方法の提言を目的に、浪江町南津島の里山をモデル地域として、森林生態系における放射性セシウムの分布、動態、森林系外への流出を長期的に調査、分析している。将来的にはそれらの調査により得られた知見を活用して環境負荷の少ない除染技術を開発し、福島県における里山再生、今後の原子力災害の復興に役立てることを目指す。

#### 研究成果

森林を構成する樹種による違いを検討するため、落葉広葉樹林と常緑針葉樹林の2箇所において生葉、落葉、表層土壌、川砂中の放射性セシウム量を2012年から2022年にわたって長期的に調査した。放射性セシウムの樹冠から地表への移行が確認されたほか、土壌においては深部へ浸透する傾向が見られた。また、土壌から河川への流出、経根吸収による土壌から樹木への再移行の可能性も考えられた。川砂の分析から、粒径が小さいほど高濃度に放射性セシウムを吸着していることが確認された。里山を流れる小川を通じた放射性セシウムの移動量の解明には更なる調査が必要である。

スクレーパープレートを用いて深度毎に採取した土壌については放射性セシウムの化学形態を分析した。土壌中放射性セシウムのほとんどは土壌鉱物に強固に捕捉された固定態をとっていることが確認された。原位置除染技術の開発に向けては固定態セシウムに着目して方法を検討する必要がある。

#### 今後の展望

これまでの放射性セシウム濃度測定や化学形態分析に加えて、土壌pH、土壌中イオン濃度の分析を新たに行うことによって森林土壌中のセシウムの結合状態や共存する物質の動態を明らかにする。

土壌中の化学的な動態に関する知見を基に、効率的かつ環境負荷の少ない除染方法を検討する。除染方法として、セシウムを吸着することが報告されているプルシアンブルーや、土壌鉱物とセシウムとの結合を分解することが期待される土壌生物の導入を検討している。

### 2. 論文



## 福島高線量地域に生息するアライグマの外部被ばく量推定

氏名：高橋 温

受入研究者：三浦 富智

共同研究者：

### 1. 成果

#### 【緒言】

本研究は、アライグマの外部被ばく量の測定を、ESR 計測により、歯のエナメル質を用いて推定するプロトコルを確立することを目的に実施している。研究の背景として、受け入れ研究者の弘前大学 IREM 三浦富智教授が主体的に実施している、福島第一原発事故被災地に生息するアライグマにおける被ばく影響に関する研究がある。当該事業で、捕獲された野生アライグマの個々の外部被ばく線量を推計することは非常に重要であり、そのために現在、ヒトやサルに用いている ESR 計測をアライグマに適用する具体的な手法を確立する必要がある。ESR 計測法は放射線被ばくにより歯のエナメル質に発生した炭酸ラジカルを計測して個体の外部被ばく量を推定する方法である。アライグマにおいては従来の動物種と異なり、①抽出エナメル質の ESR 計測時のベースラインが一定しない、②かつ炭酸ラジカルのスペクトルを解析する際に妨害スペクトルが出現する③ヒトやサルのエナメル質の比重で分離するとともに歯の体積が小さいことや、捕獲時あるいは闘争などでエナメル収量に大きく貢献する犬歯を失っている場合は収量が極めて少ない、という問題点があった。これらを解決し、個々のアライグマ外部被ばく線量計測のためのプロトコルの確立を行った。

#### 【方法】

福島県の高線量地域あるいはコントロール地域で捕獲されたアライグマの歯を用いた。歯はエナメル質の抽出のために、粒径  $425\mu\text{m}$  から  $1000\mu\text{m}$  になるよう粉碎、精製水で洗浄乾燥したのち、比重 2.6 のメタタングステン酸 Na 溶液あるいはプロモホルムを用いて分離し、沈殿したものを洗浄乾燥し、ICRP のプロトコルを参考に、EDTA、NaOH 溶液、酢酸による処理を行い、ESR 計測のためのエナメル質試料として用いた。ESR 計測自体は従来のヒトで用いている計測条件とした。

#### 【結果】

炭酸ラジカルのスペクトルを解析する際に妨害スペクトルが出現する場合は、ケミカル処理を再度実施することで妨害スペクトルを軽減することができたが、ベースラインが一定しない事象について、ICP により妨害元素の検索を行ったが特定できず、外界からの取り込み成分を排除してエナメル調整をしても解決には至らなかったため、ガンマ線を追加照射して炭酸ラジカルの比率を上昇させ、ベースラインの変動の影響を相対的に軽減させる、付加線量法によりスペクトル解析が可能となった。さらにエナメル収量が極めて少ない点に

ついて、分離に用いる重液の比重を小さくして、ケミカル処理を行うことで個体あたり ESR 計測を実施できる 100mg 以上のエナメル質を得ることができた。

#### 【考察】

本研究により、付加線療法によるアライグマの外部被ばく量を推定する手法を確立した。本法によりアライグマの外部被ばく量が推定できることで、アライグマの被ばく影響を扱う研究全般にきわめて有効な情報が得られる、すなわち、従来は環境線量を指標とせざるを得なかった外部被ばく量を、個体ごとに特定でき、関連する研究全般の結果の信頼性を著しく向上させることができる。さらに、アライグマで検討した、エナメル抽出法や付加線療法などのノウハウは、ESR 線量計測の適用が困難であるほかの動物種への応用するための重要なデータとなり、歯を持つほかの動物への外部被ばく量推定を視野に入れるものである。

## 2. 論文

Toshitaka Oka, Atsushi Takahashi, Kazuma Koarai, Yasushi Kino, Tsutomu Sekine, Yoshinaka Shimizu, Mirei Chiba, Toshihiko Suzuki, Ken Osaka, Keiichi Sasaki, Hisashi Shinoda: Detection limit of electron spin resonance for Japanese deciduous tooth enamel and density separation method for enamel–dentine separation. *J. Radiat Res* 63, 2022, 609–614. DOI: 10.1093/jrr/rrac033

## 野生動物細胞におけるバイスタンダー効果の解析

氏名：有吉 健太郎  
受入研究者：三浦 富智  
共同研究者：

### 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、被ばくしたヒト細胞の培養培地が、非被ばくのニホンザル細胞、アライグマ細胞、アカネズミ細胞に DNA 損傷を引き起こす結果を得ている。本研究では、細胞間シグナル伝達に参与している細胞外小胞（エクソソーム）に注目し、ヒト細胞由来のエクソソームを回収したのち、ニホンザル、アライグマ、アカネズミ細胞、に処理しバイスタンダー効果が引き起こされるかを調べることで、種を超え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】 ヒト細胞(HDFn)に 0Gy (sham-irradiated)、2 Gy (1Gy/min) X線を照射したのち、48 時間培養を行った培養液からエクソソームを抽出する。0Gy 培地エクソソームと 2Gy 照射エクソソームをバイスタンダー細胞（ニホンザル細胞 (mff441)、アライグマ細胞(PL033)およびアカネズミ細胞(N3(1))）にそれぞれ処理し 24 時間培養を行う。その後、バイスタンダー細胞における小核試験を行い、DNA 損傷頻度の定量化を行った。その結果、0Gy 培地エクソソーム処理群では未処理のバイスタンダー細胞と比較して微小核の出現頻度に差は見られなかったが、2Gy 照射エクソソーム処理群の全てで、エクソソーム未処理/0Gy 照射エクソソーム処理群より高い頻度で微小核が誘導された。この結果から、放射線被ばくしたヒト細胞由来のエクソソームがバイスタンダー効果を誘導することが判明した

### 2. 論文

## 被災アカネズミの卵成熟過程における染色体評価法の確立

氏名：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

卵子形成は、生殖腺刺激ホルモンなど様々な内分泌因子および成長因子によって複雑に制御されている。これまで ERAN の助成を受け、アカネズミの過排卵誘起処理には、IASe (抗インヒビン血清+eCG) 投与が有効であることを明らかにしてきた。一方、その卵巣には多くの未成熟卵胞が残存し、一部の卵子しか採卵できていない課題が残った。申請時の計画では、福島原発旧警戒区域内にて継続して被災アカネズミを捕獲し、IASe と ActivinB による採卵数と体外成熟率および染色体正常性への影響を検討することにより、被災アカネズミの卵成熟過程における染色体評価法の確立を目的としていた。一方、低線量率・低線量慢性被ばくの異数性の発生原因には、卵成熟過程における第一減数分裂の染色体分配エラーがあげられる。コヒーシ複合体は、染色体分配のために DNA 複製後の姉妹染色分体を接着する。その中でも RAD21 は有糸分裂と減数分裂で機能し、減数分裂では第二減数分裂以降に分解される。しかし、低線量率・低線量慢性被ばくの卵成熟過程において、RAD21 と異数性との関連は明らかにされていない。そこで本研究では、被災アカネズミに応用する方法を確立させるため、紡錘体チェックポイントの開始を阻害するリバーシにて異数性を誘発させた ICR マウス卵成熟過程における RAD21 の動態と染色体評価法を検討した。その結果、マウス成熟卵子過程のリバーシ処理における染色体標本作製の結果、異数性の成熟卵子の割合は対照区の値と比較して有意に高い値が認められた。卵成熟時の第一減数分裂における RAD21 の動態は、GV 期では核膜内に局在し、GVBD に先駆けて染色体上、さらに紡錘体形成と同時期に M1 期の微小管形成中心に局在していた。異数性を誘発させた場合の RAD21 は、対照区と比較して、細胞質へ分散して局在した。mFISH については、標本作製の卵細胞質除去、染色体分散、ハイブリダイゼーション法を検討する必要がある。今後、被災アカネズミを用いた卵胞刺激処置による卵巣内未成熟卵母細胞の体外成熟培養、染色体分配に係わる RAD21 および染色体マルチカラープローブ解析を実施することにより、低線量率・低線量慢性被ばくの卵成熟過程における染色体を評価する。

### 2. 論文

Kazu Nihei, Syun Tokita, Hideaki Yamashiro, Valerie Goh Swee Ting, Ryo Nakayama, Yohei Fujishima, Yasushi Kino, Yoshinaka Shimizu, Hisashi Shinoda, Kentaro Ariyoshi, Kosuke Kasai, Yasuyuki Abe, Manabu Fukumoto, Akifumi Nakata, Tomisato Miura,

Evaluation of sperm fertilization capacity of large Japanese field mice (*Apodemus speciosus*)  
exposed to chronic low dose-rate radiation after the Fukushima accident,  
Journal of Radiation Research and Applied Sciences,  
Volume 15, Issue 3,  
2022,  
Pages 186-190,  
ISSN 1687-8507,  
<https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.07.001>.

## 原子力災害に被災した野生動物体内の酸化ストレス状態

氏名：鈴木 正敏

受入研究者：三浦 富智

共同研究者：石川 諒椰

## 1. 成果

原子力災害などによって環境中に放射性物質が放出されると人間や環境動植物の被ばくの原因となる。半減期の長い放射性核種が含まれるため、事故後の短期的な被ばくだけではなく、環境汚染の回復期間中を含めた長期の低線量・低線量率被ばく影響の知見は、原子力災害時の被ばく影響リスクの推定に役立つ。福島第一原子力発電所事故では環境中に放射性物質が放出された一方で、環境汚染によって生じる被ばく線量率は過去に生じた原子力災害事故と比べて低い。被ばく影響は線量・線量率に依存するため、福島原発事故後の旧警戒区域に生息する野生動物調査は知見が少ない線量率領域の影響評価に資するために科学的な意義がある。本共同研究では、有害鳥獣駆除後の野生ニホンザルから採取した試料を用いて線量評価と生物学的解析を行い、両者の相関から放射線被ばく影響について検討を行なった。実験的に低い線量率での被ばくによって酸化ストレスを原因とする影響が生じる可能性が示唆されており、本共同研究ではさらに低い福島第一原発事故による低線量率の生物影響を酸化ストレスとその生体防御機構の活性状態とのバランスである酸化ストレス状態を指標に解析した。

本解析では福島県外の対照群、及び福島県の旧警戒区域で有害鳥獣駆除された個体から採取した試料を用いて解析した。いずれの地域の個体も大腿筋に含まれる放射性セシウム濃度をゲルマニウム半導体検出器を用いて測定し、野生ニホンザルのサイズを模擬した楕円体ファントムを用いた PHITS モンテカルロシミュレーションによって決定した線量率換算係数を用いて内部被ばく線量・線量率を評価した。解析個体の一部について、ニホンザルの歯から抽出したエナメル質を電子スピン共鳴分析によって外部被ばく線量を評価した。酸化ストレス状態の指標として酸化ストレスについてはマロンジアルデヒド(MDA)濃度、生体防御機構については抗酸化酵素スーパーオキシドディスムターゼ(SOD)とグルタチオンペルオキシダーゼ(GPx)活性を測定した。MDA濃度、SOD活性、GPx活性は測定試料中に含まれるタンパク質量で補正し、被ばく線量評価との関連性を検討した。

野生ニホンザルから採取した肝臓を測定種類ごとに適した方法で試料を調整し、酸化ストレスマーカーの計測を行なった。MDA濃度は、今回解析した個体の中で線量・線量率が高い2個体で対照群の解析結果範囲を超えた。その他の多くの被ばく群個体は対照群のMD濃度平均値よりも高い値を示したが、対照群の分布範囲の上限を超えなかった。一方、SOD活性とGPx活性は対照群の解析範囲の低値側に集束し、特にMDA濃度が対照群の解析範囲を超えなかった個体においてもSOD活性とGPx活性は低下していた。以上の結果より、

今回解析した線量・線量率範囲では酸化ストレスが誘発される領域と対照群と同レベルで酸化ストレスに対する放射線影響が生じない領域が存在することが示された。ただ、酸化ストレスが誘発されない範囲において抗酸化酵素活性が低下していることから、放射線以外の要因で生じる酸化ストレスへの防御活性が低下している可能性が考えられた。

## 2. 論文

## 細胞質分裂阻害微小核法を利用した精子形成過程における放射線感受性評価の検討

氏名：中田 章史

受入研究者：三浦 富智

共同研究者：山城 秀昭

### 1. 成果

放射線汚染地域においては、精力的な除染・復興活動により環境中の空間線量率が低下してきている。しかしながら、将来の帰還住民において、低線量慢性被ばくによる発がんや継世代影響が最も関心の高い人体影響であると考えられる。放射線による生物影響において、体細胞に関しては歴史的にも多くの研究がなされ、急性障害や晩発障害が生じる線量が明らかとなってきている。一方、次世代への影響が関与する生殖細胞においては、生殖・発生に関する知見が乏しいのが実情である。しかしながら、生殖細胞で起こる減数分裂で観察される染色体は、体細胞分裂と比べ染色体構造が不明瞭であり、減数分裂の様々なステージを経るため染色体形態も多様であることから、異常の検出が困難である。申請者らは、ヒト末梢血リンパ球における細胞遺伝学的線量評価法で用いられる細胞質分裂阻害微小核（CBMN）法が生殖細胞に対しても有用であり、蛍光免疫染色によって、減数第二分裂期（MII）に特異的に発現している REC8 タンパク質が核に存在していることを示した。今年度は、微小核の原因となる DNA 二重鎖切断の検出するために、リン酸化 H2AX ( $\gamma$ H2AX) を指標とした蛍光免疫染色法が適用可能か検討した。その結果、微小核を有する二核細胞において、 $\gamma$ H2AX を確認することができたため、精細胞においても適用可能であることを示すことができた。しかし、微小核の判定が困難であったため、微小核の判定のための標本作製法の検討が必要である。

2020 年度 ERAN の研究結果から、2 核細胞における微小核の判定には、核と細胞質の二重染色が必須でありアクリジンオレンジ染色が最適である。しかし、今年度使用した検出用の二次抗体の蛍光色素とアクリジンオレンジは波長が類似しているため識別が困難である。今後は、検出用の二次抗体の波長の選択および蛍光フィルターセットの最適化を行い、核、細胞質、細胞周期マーカー、 $\gamma$ H2AX の多重染色法の確立を目指していきたい。

### 2. 論文

なし



## 野生キノコの放射性セシウム濃度の測定

氏名：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

はじめに

2011年3月、東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故（以降、原発事故）により、多くの放射性物質が大気中に放出された。原発事故直後は、東日本各地で食物の放射能汚染が報道され、社会問題となった。原発事故から11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、仙台市、村田町で自生キノコの出荷制限が2023年3月現在も続いている[1]。

放射性Csによる自生キノコの汚染は、採取場所や種類により様々であり、安全なキノコもあれば、基準値を超えるキノコもある。自生キノコの安全性を判断するには、多くのデータを広い範囲で長期間にわたって集める必要がある。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現在まで継続的に採取し、汚染の動向を調査している。

### 2. 試料と測定方法

採取したキノコは、表面の土や落ち葉等をティッ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を用いた。一つの試料の計測時間は3時間程度であるが、汚染が弱いものや、重さが少量のものは最大10日間かけて測定した。汚染の強さは放射能濃度で評価した。放射能濃度は、1キログラムあたりの放射能の強さ（単位：ベクレル, Bq）を意味し、Bq/kgと表す。本稿では、この放射能濃度（Bq/kg）の算出には、キノコ試料の重量は乾燥前の生の重量を用い、Bq/kg生 または単にBq/kgと記す。キノコの含水量は、80%から95%であるので、表示の値の5倍から20倍が乾燥重量あたりの値となった。

高純度ゲルマニウム半導体検出器(HPGE)をもちい、 $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  のベータ壊変に伴い放出されるガンマ線を測定し、放射能を求めた。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1 t 近くになった。

3. 結果と考察 2011年から2022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、年毎の推移を示す。汚染の全体的な推移を調べるため、キノコを採取した場所を、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つのグループに分けた。(1) 比較的汚染の低かった仙台近郊の標高の低い里山や林、(2) 次に汚染が高かった宮城県北部・中部の山間部、(3) 宮城県内では汚染が高かった宮城県南部の山間部とした。中央値をみると、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100 Bq/kg を超えていた。また、中央値の変動をみれば、年変化の傾向がわかるが、全体的な傾向としては、2012年に増加した後、徐々に減少している。この減少の主な原因は、半減期2年のCs-134の減衰によるものであり、この減衰をのぞくと、ほぼ一定の値となった。

#### References

[1] <http://www.rinya.maff.go.jp/j/tokuyou/kinoko/qa/seigenmiyagi.html>

[2] <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/362/list-1.html>

## 2. 論文

Motoko Morimoto, Jin Kobayashi, Yasushi Kino, Radiation dose and gene expression analysis of wild boar 10 years after the Fukushima Daiichi Nuclear Plant accident, Scientific reports, 12 (2022) 18653 (7 pages).

Kazu Nihei, Syun Tokita, Hideaki Yamashiro, Valerie Goh Swee Ting, Ryo Nakayama, Yohei Fujishima, Yasushi Kino, Yoshinaka Shimizu, Hisashi Shinoda, Kentaro Ariyoshi, Kosuke Kasai, Yasuyuki Abe, Manabu Fukumoto, Akifumi Nakata, Tomisato Miura, Evaluation of sperm fertilization capacity of large Japanese field mice (*Apodemus speciosus*) exposed to chronic low dose-rate radiation after the Fukushima accident, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 15 (2022) 186-190.

Toshitaka Oka, Atsushi Takahashi, Kazuma Koarai, Yasushi Kino, Tsutomu Sekine, Yoshinaka Shimizu, Mirei Chiba, Toshihiko Suzuki, Ken Osaka, Keiichi Sasaki, Hisashi Shinoda, Detection limit of electron spin resonance for Japanese deciduous tooth enamel and density separation method for enamel–dentine separation, Journal of radiation research, 63 (2022) 609-614

尾田晃平, 光安優典, 奥津賢一, 山下琢磨, 木野康志, 関根勉, 高橋温, 篠田壽

イメージングプレートを用いた歯中放射性核種推定のための数値シミュレーション

KEK Proceedings (第23回「環境放射能」研究会 Proceedings), 2022 (2022) 126 (6pp)

光安優典, 岡壽崇, 高橋温, 木野康志, 奥津賢一, 関根勉, 山下琢磨, 清水良央, 千葉美麗, 鈴木敏彦, 小坂健, 佐々木啓一, 鈴木正敏, 福本学, 篠田壽

歯のESRスペクトルにおける放射線誘起成分の解析精度の検討

KEK Proceedings (第23回「環境放射能」研究会 Proceedings), 2022 (2022) 120 (6pp)

## 生体硬組織における放射性物質の蓄積性

氏名：清水 良央

受入研究者：三浦 富智

共同研究者：篠田 壽・佐野 有哉

### 1. 成果

**目的** 福島第一原発事故に伴う縫製物質の拡散に伴う生物影響調査は、短期から中期に移行してきている。時間経過に伴って環境放射線量の減少や生物学的半減期により生物影響の評価方法が複雑になっている。我々は生物影響を評価する基準として、被ばく履歴の情報を一生涯保存する臓器として歯に注目し、歯への取り込みを調査してきた。歯は、改造がないため、取り込まれた放射性物質は生涯保存される。一方で、細胞や細胞外基質の入れ替え、代謝が行われる内臓や硬組織でも骨は、取り込まれた放射性物質が徐々に体外に排出されるために減少することが知られている。

**材料および方法** 本研究では、高線量地域で捕獲されたアカネズミを放射性フリーの環境、食餌を与えて、10日、20日、30日飼育後に安楽死した。様々な臓器の減少パターンをとらえるため、安楽死後、アカネズミの生体サンプルを採取した。採取臓器は、歯、頭蓋骨、脳、眼球、耳、咬筋（筋）、舌（筋）、耳下腺、顎下腺、皮膚、上腕筋（筋）、胸腺、リンパ節、心臓、肺、褐色脂肪、脊柱起立筋（筋）、白色脂肪、下顎骨（骨）、肩甲骨（骨）、大腿骨（骨）、上腕骨（骨）、椎骨（骨）、肋骨（骨）、骨盤骨（骨）、胎盤、胎児臓器が採取された。評価方法は、微量検体から客観的に放射性物質量を検討することが可能なイメージングプレートを用いた微量検体測定法を用いて測定した。各個体で放射性物質の取り込み量が異なるため、白歯の取り込み量に対する相対値で検討を行った。

**結果** 1. 白歯の含有量と各臓器の含有量に相関があることを捕獲直後のアカネズミで確認した。肝臓、筋、骨について、肝、筋は歯の3倍程度の量が含まれ、高い相関係数を示して有意な相関がみられた。骨は1.5倍で、 $R^2$ 乗0.9以上の高い相関をしめした。2. 放射線フリー環境での放射線量の変化、白歯相対QL値の平均値（0日-10日-20日-30日）は以下ようになった。脛骨：0.98-0.95-0.74-0.53、胸骨：1.67-1.72-0.50-0.52、肝臓：2.10-1.17-1.18-0.65、大腿筋：5.50-4.71-1.24-0.61、肋軟骨：0.97-0.77-0.54-0.46、心臓：4.07-1.82-1.14-0.69であった。半分の数値を示す日は、脛骨では30日、胸骨は10-20日、肝臓は20日、大腿筋は20-30日、肋軟骨は20日、心臓は10日未満であった。

**考察** 1. 本法によって各臓器の蓄積量は、白歯の蓄積量と相関関係を示し、各臓器で異なることが示された。また白歯の蓄積量から臓器の蓄積量が推察できると考えられた。2. 全身臓器の生物学的半減期は臓器によって異なることがあきらかになった。3. 白歯の放射線量と各臓器の放射線量の相対値から放射線フリー環境への移動期間を推察できると思われた。

### 2. 論文

## 放射線教育用簡易測定器の開発と校正に関する研究

氏名：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

本研究では、学校教育現場での使用を想定して開発された簡易サーベイメータに特化して、求められるさまざまな特徴について検討、調査してきた。これまで日本科学技術振興財団が開発した、文部科学省が推進する ITC 教育にも適用できる「KIND-pro (CsI(Tl)シンチ式)」を実機の例として選定し検討を進めてきた。 $\gamma$  線の周辺線量当量や方向性線量当量の測定性能に関する規格基準として、一般線量計についての JIS Z 4333:2014「X 線、 $\gamma$  線及び  $\beta$  線用線量当量 (率) サーベイメータ」を参考にすることで、教育用放射線量計を使用する際に重要となるであろう「温度特性」「方向特性」「エネルギー特性」について着目する方針を定めた。昨年度には「温度特性」や「方向特性」について一定の成果を得ており、それを受けて、本年度は特に「エネルギー特性」について検討した。

教育用放射線量計のエネルギー補償設定に適用される各エネルギーチャンネルに対応する係数について、日本原子力研究開発機構が開発した PHITS を活用し、さまざまなエネルギーの並行ビームを線量計に繰り返し照射するモンテカルロシミュレーションによって、以下のような連立方程式を得た。これを基に、MATLAB lscov 関数を通じて重み付き最小二乗解を求めることで、各エネルギーチャンネルに適用できる係数を決定した。

$$\Sigma (W1 \times R1, \dots, Wn \times Rn) = H^*(10)$$

$Wn$  : 各チャンネルの係数      $Rn$  : 各チャンネルの出力 (レスポンス)

$H^*(10)$  : 周辺線量当量 (1cm 線量当量)

同時に、教育用放射線量計が用いられる可能性のある代表的な環境として 2 系統 4 種を想定することで、事前に設定された 7 つの観測領域のエネルギー区分をあらかじめパターン化してエネルギー応答補償することで、線量計がたとえ簡易な構造でも、精度よく目的を達成できる性能を発揮できることを目指した。具体的には、(i) 国内野外環境で使用する設定 (①K-40 と Cs-137 に注目 ②ウラン系列の Ra-226 に注目)、(ii) 原子力災害に関連した環境で使用する設定 (③Xe-133 に注目、④放射性セシウムと放射性ヨウ素に注目) である。たとえば、KIND-Pro を事例とした上述の PHITS による計算上のモデル計算では、上述の対応効果として 20~30%程度のエネルギー応答特性の向上が示唆されている。ここでは観測領域として 7 チャンネルの分割を想定して検討を進めてきたが、無理のない観測領域数の追加ができるのであれば、低エネルギー領域の分割を更に細分化した補償設定を検討すると、より精度が向上することが見込まれている。

## 2. 論文

Hiroki Koike, Takao Kawano, Takeshi Iimoto; Estimation of Radiation Field Produced by a Coin-shaped Naturally Radioactive Source and its Application to School Education; Radiation Environment and Medicine; (2023年2月受理)

PHITS 計算空間に配置された高精細 MRCPs 四面体メッシュ人体ファントム及び 3D-CAD 設計環境構造物における大気塵埃由来の放射性核種による線量評価

氏名：阪間 稔

受入研究者：赤田 尚史

共同研究者：佐瀬 卓也

1. 成果

本研究は、モンテカルロ・シミュレーション計算 PHITS による放射線輸送解析を基盤として、原子力災害で発生した放射性セシウムや放射性ヨウ素を中心とする原発災害由来核種の環境中での動態と、その空間で滞在していた公衆（住民等）の人体に対する外部被ばく・内部被ばくを限りなく精密に再現することが、研究目的である。これまでこの PHITS 計算モデルの構築を着実に進捗させて、ICRP-145 ベースの人体ファントムの四面体構造メッシュ化の基礎体型から変形体型に至る PHITS 用データの整備と、その人体ファントムが活動する環境構造体を 3D-CAD/CAE ベース解析のソリッドメッシング環境の整備した。本研究期間では、本研究室で整備している ICRP-145 の Adult Mesh-type Reference Computational Phantoms (MRCPs)の漢陽大学・現フロリダ大学の Chansoo らのコラボレーションで構築された体系基礎変形データの PHITS 計算インプットへのインポートとそのビルド検証を行い、さらに 3D-CAD/CAE 解析システム（約 80 万円規模）の高性能ダイレクトモデリング及びソリッドメッシングの最適化検証を、共同研究機関である赤田先生らとのアドバイスを受けながら進捗させることができた。本研究の成果では、元来、モンテカルロ・シミュレーション計算における線量評価計算では、臓器を含む人体に関わる線量値のみ、もしくは、幾何学的な環境構造体・物質の放射線影響による放射線飛跡分布やエネルギー分布の把握から放射化影響、とそれぞれ個別対象の扱いで行われていることがほとんどであったが、その双方を PHITS 計算空間上へ一つの体系として融合させたことで、より精密な放射線挙動からその複雑な影響までをも網羅的に理解することへの方策を与えることができた。

2. 論文

## 福島県請戸川周辺における同位体水循環研究

氏名：栗田 直幸

受入研究者：赤田 尚史・田副 博文

共同研究者：大野 花保

## 1. 成果

福島県浪江町を流れる請戸川は、流域面積 428.2 km<sup>2</sup> の 2 級河川である。この請戸川は、福島第一原子力発電所事故により避難を余儀なくされた町民にとっても町を象徴する存在でもある。請戸川の上流は、現在でも住民が避難している帰還準備区域であり、下流域は町民が帰還している区域である。そのため、請戸川が町全体を繋いでいる状況にある。近年は、河川水中放射性セシウム濃度も低下傾向にあり、町民の請戸川への関心が高まっているものの、震災後の請戸川集水域における同位体地球化学的特徴についての報告は限られている。本研究では、請戸川の上流から下流までの定点において降水と河川水を採取するとともに、集水域にある地下水の物理観測および定期採取を実施し、水素酸素安定同位体比およびトリチウムの測定を行い、気象データも含めた集水域における同位体地球化学的特徴を明らかにすることを目的とする。

請戸川源流に近い南津島地区、下流のなみえ創成小・中学校において気象観測を実施すると共に月毎の降水試料を採取した。また、請戸川の上流である南津島地区と下流である幾世橋地区において河川水の採取を実施した。さらに、下流域の加倉地区の井戸を利用して水位や電気伝導度の物理計測を行うとともに、河川水試料の採取に合わせて井戸水の採取を行った。得られた試料については、pH および電気伝導度 (EC) のち、共同利用装置である水安定同位体分析装置 (L2130-i) を用いて水素酸素安定同位体比の測定を行った。更に、低バックグラウンド液体シンチレーション計数装置を用いて水素の放射性同位体であるトリチウムの分析を行った。トリチウムについては、低濃度であることが想定されることから、固体高分子膜電解濃縮装置を用いて濃縮操作を行ったのちに測定を実施した。

図に南津島地区の請戸川 (2021 年 4 月～2022 年 5 月)、幾世橋地区の請戸川 (2021 年 10 月～2022 年 5 月) および加倉地区における井戸水 (2021 年 10 月～2022 年 5 月) の水素・酸素安定同位体比の関係を示す。南津島地区の水素同位体比は -59.20～-58.09 ‰ の範囲で平均 (±S.D.)  $-58.53 \pm 0.59$  ‰、酸素同位体比は -9.12～-9.20 ‰ の範囲で平均 (±S.D.)  $-9.15 \pm 0.05$  ‰ であった。幾世橋地区の水素同位体比は -52.49～-54.24 ‰ の範囲で平均 (±S.D.)  $-52.67 \pm 0.90$  ‰、酸素同位体比は -8.29～-8.55 ‰ の範囲で平均 (±S.D.)  $-8.32 \pm 0.13$  ‰ であった。一方、加倉地区井戸水の水素同位体比は -46.92～-48.33 ‰ の範囲で平均 (±S.D.)  $-46.94 \pm 0.86$  ‰、酸素同位体比は -7.23～-7.38 ‰ の範囲で平均 (±S.D.)  $-7.26 \pm 0.07$  ‰ であった。水素酸素同位体比は上流側である南津島が最も軽く、下流に向かうにつれて重くなる傾向にあった。これは、水が流れる過程において軽い水蒸発に寄り失われ

たことを示すものである。

## 2. 論文

Kuwata H, Akata N, Okada K, Tanaka M, Tazoe H, Kurita N, Otashiro N, Negami R, Suzuki T, Tamakuma Y, Shiroma Y, Hosoda M, Monthly Precipitation Collected at Hirosaki, Japan: Its Tritium Concentration and Chemical and Stable Isotope Compositions, *Atmosphere*, 13(5):848, 2022, DOI:10.3390/atmos13050848



## 山形蔵王の樹氷に含まれているベリリウム-7

氏名：岩田 尚能

受入研究者：赤田 尚史

共同研究者：柳澤 文孝・日下 なつみ

### 1. 成果

Be-7 is formed by cosmic ray in the upper levels of the atmosphere (stratosphere) and descends to troposphere through gap between stratosphere and troposphere. Ice samples of rime attached to the off-limits rope were collected on the top of Mt. Zao (140.4E, 39.9N, 1650m), Yamagata, Japan during 2016 to 2022 in winter. Be-7 concentrations were measured. Backward air-mass trajectories were calculated by METEX.

Be-7 concentrations ranged from 43.1 to 0.5Bq/l. Be-7 concentrations were very high (higher than 14.0Bq/l), the air-mass had been transported from Russia. Be-7 is formed by cosmic ray in the upper levels of the atmosphere and descends to the lower part of the atmosphere north side of Lake Baikal, Siberia. Be-7 concentrations were high (from 14.0 to 8.0 Bq/l), the air-mass had been transported from northern part of China and/or Mongolia. On the other hand, Be-7 concentrations were low (lower than 8.0 Bq/l), the air-mass had been transported from southern part of China.

### 2. 論文

## 山形蔵王の樹氷に含まれている鉛-210

氏名：柳澤 文孝

受入研究者：赤田 尚史

共同研究者：岩田 尚能・坂東 美希

## 1. 成果

Lead-210(Pb-210) is a natural radioisotope in the U-238 decay series. Pb-210 is produced from Rn-222 emanating from the ground surface, and exists in the atmosphere adsorbed onto the surfaces of aerosol particles. Pb-210 is used for tracers of the earth's crust. Ice monsters are formed, when strong northwest monsoon winds blow down from Siberia, by repeated icing of supercooled water droplets, accretion of snow and sintering on *Abies mariesii*, at elevations of 1650 meters or higher in the Mt. Zao. Ice samples of rime attached to the off-limits rope were collected on the top of Mt. Zao (140.4E, 39.9N, 1650m), Yamagata Prefecture, Japan during 2017 to 2022 in winter. Pb-210 concentrations were measured. Backward air-mass trajectories were calculated at 1650m level starting at top of Mt.Zao by METEX.

Pb-210 concentrations ranged from 8.0 to 0.1 Bq/l. Pb-210 concentrations were high (higher than 4.0Bq/l), the air-mass had been transported from the desert area of Asian continent. Dust storm occurred in desert area of China, such as the Gobi Desert and/or the Loess Plateau. Soil particles are blown up into atmosphere by strong wind. Micron size of Kosa particles were transported from Asian arid and/or semi-arid region to Mt. Zao. Pb-210 concentrations were middle (from 4.0 to 1.6 Bq/l), the air-mass had been transported from northern region of China without Kosa. Pb-210 concentrations were low (lower than 1.6 Bq/l), the air-mass had been transported from southern region of China.

## 2. 論文

新学習指導要領施行後の検定教科書、副教材における

放射線・環境・震災教育の記載調査

氏名：佐瀬 卓也

受入研究者：赤田 尚史

共同研究者：阪間 稔・丸山 晴男

1. 成果

Survey of changes in educational content in Japanese school textbooks based on the new course of study

Takuya Saze (National Institute for Fusion Science), Minoru Sakama (Tokushima Univ.), Haruo Maruyama (Nakatsugawa Technical High School : Gifu Prefecture) , Naofumi Akata (Hirosaki Univ.),

<Introduction>

In 2017, a new study course was promulgated by the Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. In high schools, the new curriculum will be fully enforced from 2022, and textbooks corresponding to the new curriculum guidelines will be used. Descriptions related to the Great East Japan Earthquake and radiation education has been added or revised in science, social studies, and general textbooks.

<Purpose>

Investigate descriptions of radiation education and the environmental impact of the Great East Japan Earthquake in three subject of textbooks used in Japanese high schools: "Science and Our Daily Life" (basic science), "Basic Chemistry", and "Advanced Chemistry".

<Result>

Subject 1 : "Science and Our Daily Life"

Seven textbooks have been selected and are mainly used by first-year high school students in Japan. The description of "radiation" was written in all seven textbooks, one of which was 3 pages long. "Nuclear power plant accident" was described in three textbooks, and "nuclear power plant" was described in six textbooks.

Subject 2 : "Basic Chemistry"

Thirteen textbooks were selected and used mainly by first-year high school students in science courses in Japan. All 13 textbooks contain descriptions of "radiation," of which 8 have more than 5 pages. "Nuclear power plant accident" was mentioned in only one textbook, and "Nuclear power plant" was also mentioned in only one textbook.

Subject 3 : "Advanced Chemistry"

Eight textbooks have been selected and are mainly used in Japan for second and third year high school students in science courses. The description of "radiation" appeared only in two textbooks. There was no mention of "nuclear power plant accident" and "nuclear power plant" in any of the textbooks.

<Discussion>

There are many descriptions about radiation in the textbooks "Science and Our Daily Life" and "Basic Chemistry". However, in "Advanced Chemistry", descriptions about radiation were not found in most textbooks. In all chemistry textbooks investigated this time, descriptions of nuclear power plant accidents were extremely limited.

## 2. 論文

## 線量体系についての公衆理解と線量定義の変更に伴う影響

氏名：黄倉 雅広

受入研究者：細田 正洋

共同研究者：飯本 武志・小池 弘美

### 1. 成果

放射線防護の分野で用いられる防護量と実用量に関して、正しい理解がされていないことによる混乱や指標の誤用、混同が公衆のみならず放射線業界関係者の間でさえ多数報告されている。この状況に加えて ICRP や ICRU より提案された防護量と実用量の新たな定義が我が国で導入されれば、多分野で新たな問題が生じてしまう可能性が考えられる。このような背景を踏まえ、「放射線量」という情報がそもそもどのように理解されているのか、その実態を明らかにするため、情報の伝え方や聞き手の受け取り方に詳しい専門家に聞き取り調査を行った。調査対象の専門家は、放射線量の理解に関わる人材育成や広報、産学官民のコミュニケーションなどの経験が豊富な7名であった。

本調査の主な結果を下に示す。

- ・専門家などの伝える側が丁寧に教えすぎる（初歩的なものなど情報が多すぎる）と、結果としてメッセージが難しくなり、受け手側の理解のための意欲が低下するリスクとなる。また公衆が求めるのは、自身が安全かどうか注目することであり、それ以外の情報には関心がない傾向がみられた。

- ・日本の学習指導要領では、中学校における放射線の基礎的教育の必要性が明記されているが、現在、その教育に対する支援は不足しており、これが大きな問題として認識されていた。

- ・最も多く得られた発話内容は次の2項にまとめられた：(1)メッセージ内容が意図したとおりに伝わったとしてしまう送り手の誤認識、(2)受け手の情報ニーズを伝え手は事前に正確に把握しておくべきこと。

また、昨年度来の調査研究を踏まえた現時点での結論として、放射線量単位の定義と安全基準値に関する知識（とくに放射能汚染地域などの環境データに関わるもの）とその学習（教育）は、すでに中学校の指導要領にもあるように、物理学分野に留まらず今後より大きな問題となり得ると言える。さらに、放射線緊急事態が発生した際に大きな混乱を生じさせないためにも、学校教育と併せて一般社会においても日頃から積極的に情報提供を行い、公衆の放射線リテラシーを徐々に高めていく必要がある。

### 2. 論文

## 福島沿岸海域における高線量粒子の海洋生態系影響に関する研究

氏名：神田 穰太

受入研究者：田副 博文

共同研究者：石丸 隆・伊藤 友加里

## 1. 成果

福島第 1 原子力発電所事故による沿岸域生態系への放射性物質移行に関し、我々は東京海洋大学による 13 回の研究航海（2011 年 7 月～2017 年 5 月）の他、福島県水産海洋研究センター（福島県水産試験場）等との共同調査にも協力し、多くの生物試料を得てきた。プランクトンは、底生生物群集を含めた海洋生態系全体の物質移行の出発点であるが、これまでに得られている試料の一部については、海水の値から考えて高いセシウム放射能レベルの試料が散発的に得られ、通常想定される濃縮比を超えた値の試料が多く見られる。一般にプランクトンの放射能は、海水のセシウムレベルの変動にすみやかに追従すると考えられるため、これらの試料については高セシウム含有微細粒子（CsMPs）の影響が考えられる。プランクトンの採取は、メッシュサイズ 100  $\mu\text{m}$  や 330  $\mu\text{m}$  などの「プランクトンネット」によって行っている。プランクトンネットでは、あるサイズ以上の粒子はほぼ全て捕集されるため、夾雑物混入の影響も考慮する必要がある。プランクトンネットで捕集される大きさの粒状物で、質量あたりの放射能レベルが高い特定の種類の粒状物は確認されていない。プランクトンネットに捕集された大型浮遊物で、これまでに我々が確認した CsMPs の含有は 1 例のみであった。2011 年 7 月に東京海洋大学「海鷹丸」で得た試料で、2 mm 角の繊維強化プラスチックの 1 つに 4 個の CsMPs を含む約 20  $\mu\text{m}$  の粒状物が包含されていたものである。

高い放射能を示すプランクトンネット試料についてのイメージングプレート（IP）画像から、CsMPs の確認を行った。1Bq スタンダード粒子の volume 値に対し、およそ 1/10 値以上の粒子を明瞭な CsMPs としたところ、こうした粒子を含む複数の試料が確認された。これらの試料は、特に顕著な夾雑物を有するものではなかった。ただし、CsMPs（我々の基準による）の寄与率は 0～56% であり、高い放射能の全てを CsMPs で説明することはできなかった。そこで、明瞭な CsMPs を含まない試料について、長時間曝露による IP 画像を解析したところ、線量は CsMPs よりずっと低いものの、数個～数十個の粒子が全体の放射能レベルに大きな寄与をしていることが推定された。こうした粒子の単離には至っていないが、比較的放射性セシウムを多く結合するとされる粘土等の鉱物粒子である可能性も考えられる。しかし、粘土粒子は非常に小さく、単独ではプランクトンネットに捕集される可能性はない。これらがプランクトンネット試料に含まれるのは、動物プランクトンに誤食され、消化管内に入ったままネットで捕集された可能性や、糞粒に入って捕集された可能性も考えられる。また、一部の植物プランクトンおよび植物プランクトン由来の粘着性高分子、糞

粒、鉍物粒子などが凝集して形成されるデトリタス（マリンスノー）として捕集される可能性もあると考えられる。

我々が保有しているプランクトンネット試料の一部は、顕微鏡観察用にホルマリン固定した状態で保存されている。今年度はその試料について、IP 画像による解析を試みた。解析は未だ継続中であるが、ホルマリン固定試料のデトリタス部分と考えられる領域から、長時間曝露によって検出が可能となる比較的線量の高い粒子が見いだされた例があり、鉍物粒子がデトリタスに吸着された状態でプランクトンネットに捕集された可能性が考えられた。

## 2. 論文

Holmerin, I., F. Svensson, T. Hirawake, T. Ishimaru, Y. Ito, J. Kanda, F. Nascimento and C. Bradshaw (2022) Benthic food web structures as an explanation for prolonged ecological half-life of  $^{137}\text{Cs}$  in flatfish species in the Fukushima coastal area. *Journal of Environmental Radioactivity*, 246, 106844.

## The advancement of Sr-90 analysis method by ICP mass spectrometry

氏名：YANG Guosheng

受入研究者：田副 博文

共同研究者：

### 1. 成果

In present study, we developed a simple and rapid method for urinary bioassay to determine ultra-trace  $^{90}\text{Sr}$  using ICP-MS/MS, in order to provide timely information for prompt decision-making in radiation emergency therapy. After only organic matter decomposition of 10-mL urine by  $\text{HNO}_3$  without other chemical separation, stacked DGA and Sr resin cartridges were used directly for chromatographic separation and purification of Sr from the urine matrix and other interfering elements. During chromatographic purification and the whole procedure, Sr yields were measured as  $94.0 \pm 5.4\%$  ( $n=3$ ) and  $88.4 \pm 7.8\%$  ( $n=3$ ), respectively, using stable  $^{88}\text{Sr}$  originally in the urine sample as a yield tracer. To overcome isobaric/polyatomic interferences further and peak tailing effect from stable  $^{88}\text{Sr}$  with high concentration in urine, different collision/reaction gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ , He, and  $\text{H}_2$ ) were introduced into the gas cell of the triple-quadrupole inductively coupled plasma – mass spectrometry (ICP-MS/MS) for optimizing measurement conditions. Using  $\text{CO}_2$  as the optimal collision/reaction gas, the low method detection limit of  $9.78 \times 10^{-4}$  pg/mL was obtained. Finally, for method validation, the standard reference materials provided by PROCORAD (Association for the PROMotion of Quality COntrol in RADiotoxicological Analysis), France, were analyzed and compared with other international laboratories.

### 2. 論文



北太平洋における海水中  $^{10}\text{Be}$ ,  $^9\text{Be}$  の分布

氏名：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

〔背景と目的〕長半減期放射性核種  $^{10}\text{Be}$  ( $1.36 \times 10^6 \text{y}$ ) は短半減期放射性核種  $^7\text{Be}$  ( $53.35 \text{d}$ ) と共に大気上層において宇宙線と大気との核反応により定常的に生成し、大気循環により輸送され地表・海面へ降下する。我々はこれまで大太平洋の洋上大気において  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$  濃度が大気循環の下降域 ( $20\text{-}30^\circ \text{N,S}$ ) で極大値、上昇域 ( $0^\circ, 50\text{-}60^\circ \text{N,S}$ ) で極小値を示すことを明らかにした。また、表層海水中  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$  濃度も大気中濃度と類似した緯度分布を示すことも明らかにしたが、混合層の平均滞留時間が数年以上のため、 $^{10}\text{Be}$  濃度の緯度分布は極大値と極小値の比が小さい分布であった。海水中の  $\text{Be}$  の平均滞留時間は数 100 年と推定されており、長半減期  $^{10}\text{Be}$  は安定同位体  $^9\text{Be}$  と挙動を共にし、最終的には海水から海底に除去され海底堆積物に蓄積される。本研究は北太平洋における  $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$  の鉛直分布を求め、他の海域との比較を行い海洋循環に関するトレーサーとして活用することを目的とする。

〔方法と結果〕2012-2017 年に北太平洋北部  $47^\circ \text{N}$  付近（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  $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$  濃度の鉛直分布測定を行う。 $^{10}\text{Be}$  は海水 (250/20 L) 採取時に  $\text{Be}$  担体 (2/0.5 mg) を加え鉄共沈により回収し、 $\text{Be}$  の分離精製後、東大 MALT において  $^{10}\text{Be}$ -AMS 測定を行う。 $^9\text{Be}$  は海水 250mL をシリカゲルカラムを用いて脱塩濃縮し、弘前大 IREM において ICP-MS により  $^9\text{Be}$  濃度測定を行う。現在、 $^{10}\text{Be}$  濃度測定は概ね終了し、主に  $^9\text{Be}$  濃度測定を行っている。これまで  $^9\text{Be}$  濃度が得られた 2012 年北部北太平洋  $47.0^\circ \text{N}$  (KH-12-4 BD09, 11, 14 :  $170.6^\circ \text{E}$ ,  $180.0^\circ \text{E}$ ,  $170.0^\circ \text{W}$ ) における  $\text{Be}$  同位体の鉛直分布は概ね相互に類似した分布であった。 $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$  の鉛直分布は表層以外はほぼ同じであり、 $^9\text{Be}$  濃度 ( $\times 10^{10} \text{atoms/cm}^3$  又は  $\times 16.6 \text{pM}$ )、 $^{10}\text{Be}$  濃度 ( $\times 10^3 \text{atoms/cm}^3$ ) は表層で 0.3 及び 0.5、300-500m 付近で共に  $\sim 1$ 、その後ほぼ直線的に増加し 6000m 付近で共に  $\sim 2$  であった。従って  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  ( $\times 10^{-7} \text{atom/atom}$ ) は 300m 以深で BD09:  $1.10 \pm 0.10$ , BD11:  $1.17 \pm 0.21$ , BD14:  $1.07 \pm 0.13$  と一定であり、北太平洋 ( $25.0^\circ \text{N} 170.0^\circ \text{E}$ ) における文献値  $1.23 \pm 0.10$  [1] に近い値が得られた。現在  $^9\text{Be}$  測定方法の海水試料の脱塩・濃縮過程において溶離液の加熱濃縮過程を省略する方法を試みており、大幅な測定時間短縮と汚染の影響の軽減を目指している。

[1] M.Kusakabe et al., EPSL, 82(1987)231-240

## 2. 論文

## 貝殻を用いた海水中の放射性ストロンチウムモニタリング法の検討

氏名：苅部 甚一

受入研究者：田副 博文

共同研究者：白井 厚太郎・中田 裕希・江口 貴博

## 1. 成果

2011年の福島福島第一原子力発電所事故（原発事故）により東日本太平洋沿岸に放射性ストロンチウム（Sr）が流出したことが分かっている。また、この原発にたまり続けているトリチウムなどの放射性核種を含む処理水の海洋放出が決まっている。この処理水には放射性 Sr も含まれている可能性があり、この海域における放射性 Sr モニタリングは今後も必要である。一方で、この放射性 Sr 分析法は作業工程が多く、時間がかかる分析法である。そのため、長期的に放射性 Sr モニタリングを継続して行うためにも、放射性 Sr 分析法の簡略化は必要である。そこで本研究では、海水中の Sr を濃縮する特性を持つ貝殻を用いて、海水中の放射性 Sr 濃度を簡易的に把握する方法を検討した。

今回の研究では 2009～2022 年にかけて福島県の南相馬市、浪江町、富岡町、広野町、いわき市の海岸で採取したムラサキガイ、ムラサキインコの殻を用いた。本研究で扱った貝殻のサイズは全個体で 36～58mm であり、それぞれの貝殻を酸分解し、DGA レジンを用いた固相抽出法による Y 分離を行った。固相抽出による溶離液から水酸化鉄の沈殿とともに放射性 Sr（Sr-90）の娘核種である放射性イットリウム（Y-90）を含む Y を回収し、 $\beta$  線測定試料を作成した。その試料に対して低バックグラウンドガスフローカウンターを用いて  $\beta$  線を計測し、最終的に放射性 Sr（Sr-90）濃度を算出した。

2013年の南相馬市、富岡町、広野町、いわき市で採取した貝殻の Sr-90 濃度は、原発の南側でかつ最も近い富岡町で高い値（50Bq/kg）を示した。2015 年も同様に原発の南側でより原発に近い地点で高い傾向がみられた。原発事故後に福島県沿岸海域に漏出した放射性 Sr の多くが南側に流れたことが指摘されているが、それらの結果と本研究の結果は一致した。広野町において、2011 年から 2022 年までの貝殻の Sr-90 濃度を比較すると 2011 年では 12Bq/kg、2013 年で 20～30Bq/kg、2022 年は定量下限値（2.6Bq/kg）以下となった。原発事故後に Sr-90 が継続的に放出され海水中の濃度が高い状態が続いている間は、その環境に生育し続けた個体は原発事故由来の Sr-90 を継続して蓄積することになる。つまり、2013 年で最も高くなる傾向は、2011 年に比べて 2013 年の個体はより多くの原発事故由来の Sr-90 を貝殻に蓄積していることが反映されていると解釈できる。2022 年では検出できなかった点については、原発沖の海水中の Sr-90 モニタリング結果では 2015 年位を境に Sr-90 濃度が低濃度で推移する傾向になっており、それを反映していることが考えられる。いわき市の個体では 2009 年では定量下限値（2.2Bq/kg）以下であったが、2013 年では 5～7Bq/kg となった。このように事故後に貝殻の Sr-90 濃度が高くなっていることは、原発事故に由来する Sr-90 が貝殻に取り込まれていることを意味している。これらの結果から、貝殻を用いることで海水中の放射性 Sr のモニタリングが可能であると考えられる。

## 大気エアロゾル生成に対するラドン壊変生成物の寄与に関する基礎的な観測

氏名：反町 篤行

受入研究者：大森 康孝

共同研究者：

### 1. 成果

森林などの生態系は大気エアロゾルの物質交換が起こるため、大気エアロゾルのソース（放出体）またはシンク（吸収体）として作用する。放出されたエアロゾル粒子は、大気汚染などによる健康影響や地球温暖化などによる環境影響を及ぼす可能性がある。森林において、林内のクラスターイオン濃度が林外よりも高いことが観測されている（Jayaratne et al., 2011）。そのため、森林が大気エアロゾルのソースとして作用する可能性がある。ラドンは土壌から大気へ散逸し、壊変後、クラスター（非付着ラドン壊変生成物）を形成し、既存のエアロゾル粒子に付着する（付着ラドン壊変生成物）。最終的には、湿性または乾性沈着により地表面へ沈着する。林内におけるクラスターは林床から散逸した非付着ラドン壊変生成物の可能性がある。本研究では、主に森林における大気エアロゾル生成に対するラドン壊変生成物の寄与に関する基礎的な観測を実施するため、関連する情報収集、観測場所や観測機器の整備を行った。

観測場所はアクセスや観測実績などから東京農工大学実習林を選定し、電源や観測機材の設置場所の確保・整備を行った。観測で用いる、ラドンおよびその壊変生成物濃度、エアロゾル個数濃度粒径分布、気象データなどの観測機器の整備を行った。

今後、森林においてラドンおよびその壊変生成物濃度、エアロゾル個数濃度粒径分布、気象データなどを測定する。測定データの関係性を調査し、大気エアロゾル生成に対するラドン壊変生成物の寄与に関する基礎的データの取得を目指す。

### 2. 論文

## 酸化鉱物表面の核種収着反応に関する分光学的研究

氏名：佐々木 隆之

受入研究者：藤原 健壮

共同研究者：土肥 輝美・長澤 圭太

### 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。これまで本研究では、非放射性金属イオンを収着させた微斜長石試料及び Cs が収着した 1F 周辺の土壌試料に対し、電子顕微鏡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、複数の収着期間及び初期核種濃度の条件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用いて、土壌構成物表面の核種収着状態の分析法として EPMA, STEM-EDS を適用した。

核種としての Eu を含む液相に数日間浸漬した種々の試料について、EPMA, TEM 測定を行った。Eu については、カオリナイト試料の粒単位のマッピングで僅かなピークが検出された。そこで、より高濃度、長期間の浸漬試料を調製し測定を行った結果、Eu のシグナルがより明瞭に確認できることが分かった。これらのデータに基づいて、Eu と固相マトリクス元素の強度比較が行える可能性が示唆された。今後、固相表面のマトリクス元素構成と核種の収着能を関連付けるために、固相元素群と核種の強度比について、これまでの測定データも含めて再解析する必要がある。

### 2. 論文

T. Dohi, K. Iijima, M. Machida, H. Suno, Y. Ohmura, K. Fujiwara, S. Kimura, F. Kanno, Accumulation mechanisms of radiocaesium within lichen thallus tissues determined by means of in situ microscale localization observation, PLOS ONE, 2022, doi.org/10.1371/journal.pone.0271035

## 生物の鉍物形成作用と核種固定化に関する研究

氏名：尾崎 紀昭

受入研究者：土肥 輝美

共同研究者：

## 1. 成果

生体鉍物（バイオミネラル）は、生物によって高度に制御された複雑なプロセスによって形成される。このようにして形成されたバイオミネラルは、多くの生物で知られており、体構造の維持、重力の感知や平衡保持、外敵からの防御、無機栄養の貯蔵などの役割を持つと考えられている。その中でも海洋性植物プランクトンの円石藻が外殻として形成する石灰化した鱗片「ココリス」は、典型的な結晶化制御のモデルである。本研究では、この円石藻の鉍物形成作用（バイオミネラリゼーション）であるココリスの形成に着目し、円石藻が Ca の代替として Sr を細胞内に吸収し、炭酸塩として生体内の核種固定化への寄与を評価することを目的としている。そのため、まずは基礎知見として、Ca イオンの固定化のメカニズムを調べることにした。

これまで本研究では、培養株の入手・培養の容易性・生体内核種分析への適用性の観点から、培養株の選定、培地の検討を重ねてきた。また、円石藻の細胞内 Ca 分布や炭酸塩形成に関与する器官を探索するのに適した前処理法から観察までの TEM 分析法を検討・整備してきたところである。

今年度は、選定種 *Pleurochrysis carterae* のココリス形成に適する培地を比較検討し、CaCO<sub>3</sub> 形成量増大の効果が認められた培地を決定した。さらに、共焦点レーザー顕微鏡を用いて生細胞の核・リン酸を特異的に染色した *P. carterae* の細胞観察と、プロトプラスト化を経た細胞小器官の分離を組み合わせることで、Ca を貯蔵する小器官（Ca-P-リッチボディ）の存在を初めて明らかにした。今後、この方法を発展させ、当該小器官の構造を調べることで、Ca のココリス形成部位への輸送や固定に係る生体物質の関与などを明らかにしていく。

## 2. 論文

T. Dohi, K. Iijima, M. Machida, H. Suno, Y. Ohmura, K. Fujiwara, S. Kimura, F. Kanno, Accumulation mechanisms of radiocaesium within lichen thallus tissues determined by means of in situ microscale localization observation, PLOS ONE, 2022, doi.org/10.1371/journal.pone.0271035

## 視覚解析のための統合空間線量率マップの目的別適応型サンプリング

氏名：高橋 成雄

受入研究者：操上 広志・眞田 幸尚

共同研究者：櫻井 大督

### 1. 成果

空間線量率マップなどの計測データから得られる科学的な知見は、東日本大震災後の福島第一原発周辺地域の効果的な除染や避難指示解除などの計画立案に重要な役割を果たす。

我々は、航空機モニタリング、走行サーベイ、歩行サーベイなど複数の測定データを統合することで得られる統合空間線量率マップを用いて、そのような科学的な知見を得るための視覚解析システムの実装を長期的に目指している。特に本研究では、データの信頼度、土地利用、線量率低減度などの、解析目的ごと異なる重要度の指標に対応して、必要な精度や解像度を実現するための統合空間線量率マップの適応的サンプリング手法を構築した。

統合空間線量率マップの適応的なサンプリングには、ポアソンディスクサンプリングを導入して実現した。ポアソンディスクサンプリングでは、近接するサンプル点同士の間隔を必要な適応度に応じて調整する。本研究では、Bridson (2007)により提案されたダーツ投げ手法を利用し、サンプル点をグリッド状に管理して近接サンプル点同士の間隔を高速に計算することで、サンプル点数  $n$  に対して  $O(n)$  の計算量のアルゴリズムの実装を行った。

実装した適応的サンプリング手法を用いて、実際に統合空間線量率マップの視覚解析を行った。具体的には、階層ベイズ手法で得られる統合空間線量率マップに付随するデータの信頼度(標準偏差分布)、土地利用の違い、線量率低減度に応じた適応的サンプリングを、福島第一原発周辺や福島市周辺地域の線量率マップに適用し、ユーザが対話的に対象地域の縮尺や位置を変更して、視覚的解析を実施できるシステムの実装を実現した。

また、上記視覚解析システムを利用して、2014～2017年と2017～2020年のふたつの期間の線量率低減度を計算し比較を行うことで、除染の効果の評価を行った。特に、福島第一原発近隣の市町村に残る帰還困難区域内の、特定復興再生拠点区域における除染効果について解析を進めた。これらの地域では、2018年ごろから順次除染作業が進められているが、実際に2014～2017と2017～2020のふたつの期間の線量率低減度を比較すると、特に特定復興再生拠点区域においては、後者の期間の線量率低減度が高い領域が多く含まれることが視覚的に確認できた。また、福島市周辺地域において線量率低減度をふたつの期間で同様に評価すると、窪地において線量率低減度が鈍る傾向にあるところが見受けられる。

このように、除染の効果は、放射性物質の自然減衰に加えて、除染作業の実施の有無、放射線物質の沈着過程、該当地域の土地利用状況、さらに地形特徴などが密接に関係することが予想される。今後の目標として、このような地域ごとの特性に応じて除染作業がどのように効果を発揮できるかを評価するためのモデルを、視覚解析を通して検討することがあげられる。

### 2. 論文

## 作物栽培に影響する浮遊放射性微粒子の解析

氏名：二瓶 直登

受入研究者：吉村 和也

共同研究者：

### 1. 成果

#### 目的

東京電力福島第一原発事故で農地に降下した放射性セシウムの農作物への汚染は除染やカリウム施肥により大幅に低下した。しかし、現在でも大気浮遊物微粒子中から放射性セシウムは検出されており、それが作物への程度影響するかは農業再生上大いに懸念される。これまで、微粒子の放射性セシウムは土壌に沈着後、経根から植物に吸収することが明らかにされている。本研究では、福島県大熊町の帰還困難区域内の圃場で大気浮遊物微粒子の採取と同地に設置した土壌試料を用いた作物栽培試験を行い、作物への  $^{137}\text{Cs}$  吸収について評価した。

#### 方法

福島県大熊町内の帰還困難区域の圃場を試験区域とした。試験区内に大気降下物を採取する用の土壌または水を入れたポットを設置し、2022年6-11月の間で計5回、月に1回程度の頻度でポット内の試料を回収した。また、降雨時には大気降下物だけでなく、雨滴浸食等によって飛散した土粒子も回収され、それらが試料の  $^{137}\text{Cs}$  濃度に大きく影響することも考えられた。そのため、本研究では地表部と地表から約120cmの高さに設置した作業台上の2か所にポットを設置し（上部および下部試料）、地表部の土粒子の寄与の違いが試料の汚染に与える影響についても検討した。

回収した土壌を用いて人工気象機内で小松菜を栽培し、大気浮遊物微粒子によって汚染された土壌から小松菜への  $^{137}\text{Cs}$  の吸収について評価した。また、水試料はろ過を行って、懸濁物と濾液（水溶態  $^{137}\text{Cs}$ ）に分けたのち、イメージングプレートを用いて懸濁物試料の高濃度放射性セシウム含有微粒子（CsMPs）の定量や、過酸化水素を用いた有機物吸着態画分の抽出を行い、期間中に圃場内（土壌試料）に降下した微粒子の特性を分析する試料とした。

#### 結果

上部・下部ともに懸濁物中の CsMPs の寄与は数%以下であり、CsMPs のような不溶性粒子による汚染は比較的軽度であると考えられた。下部に設置したポットにおいて、水試料中の懸濁物量は上部の試料よりも多く、水・土壌試料ともに  $^{137}\text{Cs}$  濃度も大きくなった。しかし、水試料から回収された粒子中の  $^{137}\text{Cs}$  は過酸化水素でも抽出できない難交換性画分であった。一方、上部に設置したポットから回収された懸濁物の5割以上は水溶態または有機物吸着態画分であり、既往の研究同様に大気降下物においては交換性の高い形で

137Cs が保持されていることが確認された。また、上部に設置した土壌で栽培された小松菜への 137Cs 移行係数は下部のものよりも大きく、各試験期間の土壌を用いた小松菜の移行回数は水試料中の水溶態および有機物吸着態画分と高い相関関係があった。本研究より、大気降水物中の 137Cs は土壌由来のものよりも交換性画分の割合が高く、作物へも比較的吸収されやすい（移行係数が高い）ことが示された。

## 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

氏名：小西 博巳

受入研究者：萩原 大樹

共同研究者：

### 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の観点で重要である。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  $\mu\text{m}$ ）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があることを報告した。本研究では、有色鉱物のうち、特に角閃石の結晶構造を把握することを目的として、走査型電子顕微鏡（SEM）および透過型電子顕微鏡（TEM）観察を行った。

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、ハンドピックした有色鉱物中の角閃石とした。TEM 分析用試料は、集束イオンビーム加工装置を用いて薄膜化し、001 方向の断面を作成した。

角閃石の表面形態を SEM で観察した結果、表面にレンズ状、洞窟状形態を示し、典型的な風化・変質構造を確認した。また、表面と内部の化学組成を TEM のエネルギー分散型 X 線分析法を用いて比較すると、表面では内部より溶脱されやすい成分（Na, Mg, Ca, Fe）が少なく、Al の含有量が多かった。電子回折図形から、表面と内部の結晶構造が異なり、表面は雲母粘土鉱物への変質の可能性があることが分かった。さらに、割れ目周辺では、粘土の集合体が存在した。したがって、角閃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。今後は、細粒分画における変質した粘土鉱物種の同定、放射性セシウムと変質した鉱物種の吸着形態を考察する。

### 2. 論文

## 松川浦から海洋への溶存放射性セシウムの供給過程の解明

氏名：三角 和弘

受入研究者：林 誠二

共同研究者：辻 英樹・三浦 輝・青山 道夫・浜島 靖典・津旨 大輔

### 1. 成果

福島第一原発事故によって陸域に降下した放射性セシウムは、河川を通じて海洋に供給されている。2014年に実施された観測から、福島県相馬市にある松川浦の水中の溶存放射性セシウム濃度は、松川浦に流入する宇多川や、松川浦の水が流出する相馬沿岸の水中の溶存放射性セシウム濃度より高かった。このことは、松川浦が海洋への溶存放射性セシウムの供給源になっていることを示唆している。本研究は松川浦、相馬沿岸、宇多川の水や松川浦の堆積物の間隙水中の溶存放射性セシウムを観測することで、松川浦から海洋への放射性セシウムの供給過程を把握することを目的としている。

2019年度から2021年度にかけて夏と冬の合計4回の観測を実施した。2022年度にも夏と冬の観測を実施し、水や堆積物の間隙水中の溶存放射性セシウムの観測を行った。松川浦の水中の溶存放射性セシウム濃度は宇多川や相馬沖よりも高く、過去の研究と整合的な結果が得られた。松川浦の堆積物の間隙水中の溶存放射性セシウム濃度は、水中の濃度よりも数倍程度高く、松川浦の堆積物から間隙水を通じて溶存放射性セシウムが供給されていることが示唆された。

間隙水中の溶存放射性セシウム濃度の支配要因を検討するため、間隙水と堆積物の放射性セシウム濃度の関係、間隙水中の溶存放射性セシウム濃度と水温、塩分、アンモニア濃度との関係を調べた。それらの結果からは明瞭な関係は見られなかった。間隙水中の塩分は松川浦の水中の塩分と比べて高かったことから潮汐の影響を受ける海水系の湧水の影響を受けて堆積物から間隙水に放射性セシウムが溶出している可能性が考えられた。今後、潮汐周期と溶出過程の関連について調べる。

### 2. 論文

DNA 相同組み換えレポーター遺伝子を持つ植物培養細胞を用いた帰還困難区域における

バイオモニタリング実施

氏名：高橋 真哉

受入研究者：玉置 雅紀

共同研究者：

1. 成果

本研究課題では、これまで、申請者が取り組んできた、DNA 相同組み換えレポーター遺伝子を持つ植物培養細胞を用いたゲノム DNA 相同組み換え頻度を測定パラメータとする簡便な新規放射線モニタリング法の構築に加えて、従来のゲノム DNA 相同組み換え頻度定量に加え複数のパラメータによる帰還困難区域での継続的な野外放射線モニタリングを実施することを目標としていた。

研究課題推進に必要な、シロイヌナズナ野生型のカルス誘導実施を試みたが、ほとんどのケースで誘導用培地（CIM 培地）に移植した段階でコンタミが発生し、カルスの誘導がうまくいかなかった。現在、誘導に成功したカルスの増殖を実施しており、次年度の計画実施に向けて準備をしている段階である。

2. 論文

なし

## 大気中のトリチウム濃度測定とその化学形態別評価

氏名：田中 将裕

受入研究者：柿内 秀樹

共同研究者：

## 1. 成果

## [目的]

トリチウムは、宇宙線生成核種として環境中にさまざまな化学形態で存在する。一方、人為起源として原子力施設などから環境へ放出されている。環境中のトリチウム挙動として、雨水や河川水、海洋、水蒸気など水に含まれるトリチウムを対象とした研究が広く行われている。水蒸気状トリチウムの観測では、大気中水分量や気団との相関が報告されている。一方で、大気中のトリチウムを対象とし、水蒸気状(HTO)、分子状(HT)、炭化水素状(C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>-1T)の化学形態別に弁別した研究例は少ない。化学形態別の観測結果では、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が、その理由や生成起源は明らかでない。ここでは、挙動がよく理解されている大気中の水素(H<sub>2</sub>)や炭化水素(主にCH<sub>4</sub>)に着目し、大気中トリチウム濃度との相関から生成起源を考察する。

## [方法]

大気中トリチウム濃度の観測は、研究代表者が開発した化学形態別トリチウム捕集装置を用いた。吸湿剤(モレキュラーシーブ 3A)と酸化触媒を組み合わせて化学形態を弁別した。捕集期間を 1 月とし、捕集した水分を液体シンチレーション計数装置(日本レイテック、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。詳細は参考文献[1]を参照のこと。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, ポラパック Q)と還元性ガス検知器(ジェイサイエンス, TRD-1)を組み合わせ、自動採取装置を利用することで数時間ごとの連続データを取得した。

## [結果]

今年度初めに、大気微量成分測定システムを整備し、試験運転を経て 6 月下旬より大気微量成分の観測を開始した。観測では、システムで検出可能な水素、メタン、一酸化炭素を対象とした。水素濃度は、明確な日変動と季節変動が確認された。大気中水素は、主に光化学反応により炭化水素から生成され、土壌内の細菌・微生物によって酸化される。そのため、太陽放射量(日射量)の日変動や季節変動と、水素の生成や消滅に相関があることを示唆している。本年度観測した期間で、分子状トリチウム濃度と大気中水素濃度との間には明確な相関が確認されなかった。今後も継続して観測を行い、長期間の観測データから考察を行う予定である。

## [参考文献]

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

2. 論文

Masahiro Tanaka, Chie Iwata, Miki Nakada, Akemi Kato and Naofumi Akata

Levels of atmospheric tritium in the site of fusion test facility

Radiation Protection Dosimetry, 198, (2022), 1084–1089

## 年輪中の有機結合型トリチウム (OBT) に記録されたトリチウム汚染

氏名：杉原 真司

受入研究者：柿内 秀樹

共同研究者：河中 大哉

### 1. 成果

有機結合型トリチウム (OBT) は、主に H<sub>2</sub>O で存在する環境トリチウムに比べ移動が遅く、生成当時の環境の歴史を記録している。トリチウムを使用している放射線施設周辺の樹木年輪中の OBT を測定し、周辺環境のトリチウム汚染の歴史を再現することが目的である。

複数の放射線施設 (トリチウムターゲットを使用していた加速器施設を含む) 周辺で伐採した杉の木を利用した。年輪ごとに分割、乾燥後、燃焼法により得た燃焼水中の OBT 濃度を低バックグラウンド液体シンチレーションカウンターで測定した。

測定した OBT 濃度は、トリチウムターゲット詰替え処理や加速器施設の解体工事が行われていた年代で高濃度を示し、当時の環境中トリチウム濃度が高かった (法定限度以下) ことが分かった。

樹木年輪中の OBT 濃度の測定技術を確立するとともに、放射線施設の安全管理体制の検証に利用できることが分かった。また、福島原発事故等の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の記録を抽出することが可能であることが示された。

### 2. 論文

## トリチウム分析前処理における試料水精製工程の効率化に関する研究

氏名：玉利 俊哉

受入研究者：柿内 秀樹・今井 祥子

共同研究者：島 長義・山中 潤二

## 1. 成果

## 【目的】

トリチウム分析の前処理は煩雑である。有機物試料の場合、組織自由水型トリチウム (TFWT)、組織結合型トリチウム (OBT) の形態を分析対象とするが、それぞれ真空凍結乾燥、燃焼法により得られた試料水 (自由水、OBT 燃焼水) は、液体シンチレーション計数装置による測定法を用いる際、試料水に含まれる不純物を除く精製処理が必要である。試料水には有機物が多く含まれ、これを還流分解により精製する処理方法が用いられるがこの手法は、人手と多くの時間を要する。本工程の省力化、迅速化のため、溶存有機物中の C-14 前処理等で実績のある紫外線照射法に着目し、導入可否について検討した。

## 【実験】

TFWT 試料水、OBT 燃焼水中の DOC 濃度、pH の傾向を把握するため、魚試料、松葉試料について真空凍結乾燥、乾燥物の燃焼処理を行った。それぞれの処理によって得られた TFWT および OBT 試料水の DOC、pH を測定した。次に、最適な UV 照射条件を検討するため、市販の UV 照射装置 (Metrohm 705 UV Digester, 出力 500 W) を用いて異なる UV 照射時間で処理を行い、DOC、pH を測定した。

## 【結果】

TFWT 試料水、OBT 燃焼水の DOC 濃度は魚 OBT、松葉 TFWT、松葉 OBT、魚 TFWT の順に高く、pH は魚 OBT、松葉 OBT、松葉 TFWT、魚 TFWT の順に低かった。最適な UV 照射条件を得るための実験には十分な試料水が必要であり、多量の試料を労力、時間をかけて燃焼処理する必要がある OBT 燃焼水を用いることは困難であるため、実験には松葉 TFWT 試料水を用いることとした。試料水 10 mL に対し UV を照射した結果、照射時間 4 時間においても DOC 濃度は十分に低下しないことがわかった。そこで H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> を僅かに (0.1 mL) 添加した後に UV 照射したところ、30 分の照射時間で DOC 濃度を十分に低下させることが可能であるとわかった。溶存有機物がより多い試料を想定し、最適照射時間は 60 min に設定することとした。さらに、この条件で照射した試料水の UV スペクトルにおいても、有機物分解は十分であることが確認できた。今後、今回実験に使用した松葉 TFWT 試料水よりも DOC 濃度が高く、かつ低 pH である OBT 燃焼水についても上記条件が適用可能であるか確認する必要がある。

## 2. 論文

## 魚中のトリチウム濃度測定法の簡素化・最適化

氏名：鳥養 祐二

受入研究者：柿内 秀樹

共同研究者：

## 1. 成果

福島第一原子力発電所からのトリチウム処理水の海洋放出処分に伴い、魚などの海生生物の安全性の確認を行う必要がある。既往の凍結乾燥を用いた分析法では、試料を採取してから凍結乾燥に2週間、蒸留に数時間、電解濃縮に3~5日かかるため、生体自由水の測定だけでも1ヶ月弱の時間が必要であり、魚の迅速な安全確認法の開発が必要不可欠である。また、凍結乾燥を用いた分析法では、測定に関する機器が環境レベル以上のトリチウムによって汚染された場合、以後の測定に影響を及ぼす。そこで、魚の迅速で汚染の心配が無い簡単な回収方法として、マイクロ波加熱法を提案する。またこのマイクロ波加熱法を用いて、重水素とトリチウムを含んだ海水中でヒラメの飼育を行い、ヒラメの生体自由水に含まれる重水素とトリチウムの取込みと放出の同位体効果の測定を行ったので報告する。

マイクロ波加熱法では、試料を蓋に穴の開いた市販のレンジ対応容器に入れ、その容器をチャック付きポリ袋に入れて密封し、電子レンジで加熱した。加熱により試料から水が蒸発し、チャック付きポリ袋内に凝縮した水を回収した。40 mLの純水を100 Wで15分間連続加熱を行うと、15 mL以上の水を回収することができた。トリチウムを含む重水を添加した純水を調製し、マイクロ波加熱法、減圧蒸留法、常圧蒸留法により蒸留進行度が約50%になるよう調整したところ、蒸発分と留分において同位体効果と思われる濃度変化が見られたが、マイクロ波加熱法の同位体効果が最も小さく理論濃度に近い値が得られた。

モニタリングを模擬してヒラメの自由水中のトリチウム濃度測定を検討した。30 g程度の可食部を100 Wで15分間加熱すると、約15 gの自由水を回収することができた。トリチウム環境で飼育した魚を模擬して、回収した自由水にトリチウムを含む重水を添加して測定すると、加えたトリチウムを測定することができた。従って、マイクロ波加熱法は、魚の自由水中のトリチウム濃度測定法として利用できると判断した。

そこで、重水とトリチウムを含んだ海水でヒラメを飼育し自由水への取り込み挙動の測定と、重水とトリチウムを含んだ海水中で飼育した後に通常の海水中で飼育した放出挙動の測定を行った。経過時間ごとに3個体ずつサンプリングしマイクロ波加熱法で自由水を回収・測定した。その結果、重水素およびトリチウム濃度の取込みと放出における経時変化は一致した。従って、取込み速度に関して重水素とトリチウムの間に同位体効果は認められなかった。従って重水素の実験からトリチウムの挙動が予測できる可能性が示唆される。取込み量に注目すると、マイクロ波加熱法では、安全側ではあるがトリチウム濃度が高く見積もられる傾向があった。今後は再現性を確認すると共にこの原因を追及する。また、ヒラメ



以外の他の魚介類、特にアワビのような移動しない貝類や、あおさのような海藻類についても検討する必要があり、本共同研究で購入した重水や機器を用いて順次測定を行っていく予定である。

## 2. 論文

## 宇宙暗黒物質探索における環境トリチウムの影響の研究

氏名：山下 雅樹

受入研究者：柿内 秀樹

共同研究者：小林 雅俊

## 1. 成果

## 1. 成果

XENON 実験はグランサッソ地下実験施設(イタリア)にて世界最高感度で暗黒物質直接探索や宇宙素粒子の探索を行っている。XENON 実験では気相・液相からなる二相型 XeTPC(Time Projection Chamber)を検出器として用い、Xe を標的及び検出媒体としている。2020 年、XENON1T 検出器の観測において予期せぬ信号超過が観測され、それは暗黒物質やアクシオンの可能性があるが一方でトリチウムのベータ崩壊による背景事象の疑いもあった。トリチウムによるバックグラウンドとして大気から何かしらの混入を疑い現地で大気中トリチウムの測定を行い背景事象の理解を進める。

<大気中・水及び水素のサンプリング 山下・小林> イタリアでの測定の準備段階としてまず、岐阜県飛騨市神岡町にある東京大学神岡宇宙素粒子研究施設と神岡地下実験施設でのサンプリングを行い、トリチウムの測定を行うことで実験方法の確認を行った。サンプリングの方法は冷凍庫を用いたコールドトラップとモルキュラーシーブス(MS)分離技術を用いた。水素のサンプリングには Pt 触媒を用い水に変換し、これも MS に吸着させた。水のサンプルはおおよそ 800 ml、水素に関してはキャリアガスに用いたトリチウムフリー水からの水素を含めて焼く 10ml 採取した。

<環境研におけるトリチウム定量評価 柿内> 採取したサンプルは環境研にて濃縮を行い、液体シンチレーションカウンターを用いてトリチウム含有量の定量評価を行った。結果として神岡地上 HTO:0.8+-0.02 Bq/L, HT 31.6+-0.4 Bq/L, 神岡地下 HTO 0.30 +- 0.03 Bq/L, HT 62.9+-0.7Bq/L という結果が得られ日本における過去の測定を再現できた。このことで測定器の動作確認を行い、また日本における地下実験施設・神岡坑内での新規情報を得ることができた。

<イタリア・グランサッソでのサンプリング> 同様にイタリア・グランサッソ研究所の地上及び地下においてサンプリングを行うことができた。現在、環境研にて定量評価を行う予定である。

## 2. 論文

## 環境試料中トリチウムの相互比較分析に関する検討

氏名：井上 広海  
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13日に日本政府はALPS処理水の海洋放出の方針を決定した。放出の具体的な時期は決定していないものの、この時点では、方針決定から2年程度後を目途に放出を開始するとされた。令和5年度は、方針決定から2年後に当たることから、トリチウムをはじめとした海水の放射能に関する社会的な関心が高まっている。

このことから、必要なモニタリングの確実な実施はもとより、分析の信頼性確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(福島県)と(公財)環境科学技術研究所(IES)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によって、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。

今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3試料をそれぞれの機関で分析し、分析値を比較した。分析手法は両機関とも電解濃縮法を使用した。電解濃縮装置はそれぞれの機関が持つ異なる型式のものを使用した。

両者の分析結果は、試料①は  $0.036 \pm 0.011$  Bq/L vs  $0.065 \pm 0.012$  Bq/L、試料②は  $0.050 \pm 0.011$  Bq/L vs  $0.051 \pm 0.011$  Bq/L、試料③は  $0.068 \pm 0.013$  Bq/L vs  $0.045 \pm 0.013$  Bq/L であった。なお、それぞれの値は福島県 vs IES、数字は、測定値±計数誤差(1σ)である。両者の分析結果を比較すると、2σの範囲で一致していた。また、計数誤差の値を不確かさとみなし、包含係数(k=2)として、En数による比較評価を行ったところ、試料①は  $En = 0.90$ 、試料②は  $En = 0.04$ 、試料③は  $0.61$  となり、全ての試料で十分なパフォーマンスを示す  $En < 1$  を満たしていた。

今後は、適用試料の範囲を陸域や生物試料に広げる等、分析精度確認のための取組をさらに進めて行く予定である。

### 2. 論文

なし

## 尾駁沼における物質循環把握

氏名：坪野 考樹

受入研究者：植田 真司

共同研究者：津旨 大輔・三角 和弘

### 1. 成果

#### 1. 成果

大型再処理施設が稼働すると、<sup>3</sup>H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、海水の流入出力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、基地局を設定することで、水位高度を精度よく計測でき、この水位高度と圧力により、沼・河川の水位差を高精度で検討することが可能となった。この水位結果より、上げ潮時は潮汐振幅による勾配、下げ潮時は川道による動水勾配で尾駁川から尾駁沼へ入出する流速が決まることが分かった。上げ潮時における海から尾駁沼への流入が下げ潮の流出と非対称なことから、尾駁沼の水位振幅には、大潮小潮の周期（約14日）をもつことが分かった。そして、海面水位における年周期の振幅が、尾駁沼の水位変化（海から尾駁沼への流入出）に影響を与えることが示唆され、この影響が尾駁沼の希釈や滞留に与えることが予想された。

観測期間中、工事影響によって水圧計の紛失があり、4か月程度しか計測できなかった。年周期の影響を確かめるためには、より長期の計測が今後の課題である。

### 2. 論文

## 根圏効果による土壌の放射性セシウム動態への影響解析

氏名：渡部 敏裕

受入研究者：海野 佑介・武田 晃

共同研究者：

### 1. 成果

福島第一原子力発電所の事故により放出された放射性セシウムは、地表に降下した後、土壌中の粘土鉱物に強く吸着された。セシウムは粘土鉱物の frayed-edge site (FES) に固定されることが知られている。一般に放射性セシウムの植物への移行はカリウム肥料の施肥量を増やすことで抑制されることが示されている。一方、カリウムが大量に施与された場合に pseudo-FES が形成されることも予想されているが、その詳細については明らかにされていない。白花ルーピンはダイズの 10～40 倍もの放射性セシウムを吸収することが分かっている。白花ルーピンは、クラスター根を形成し、有機酸を分泌して土壌中の難溶性リンを可溶化するという特徴を持つ。そこで、白花ルーピンの高い放射性セシウム吸収能に、根から分泌された光合成産物が粘土鉱物に固定されたカリウムやセシウムに影響することが関わるという仮説のもと、研究を行った。

イライトに対して脱カリウム処理を行い、カルシウム/マグネシウム態に変換した後、セシウムを添加した鉱物を調整した。調整した粘土鉱物に含まれるセシウムはカリウムを添加することで溶出されたが、時間とともに再吸着された。このことはカリウム添加により pseudo-FES が形成され、そこにセシウムが再吸着されたことが示唆された。有機酸を添加するバッチテストでは、リンゴ酸、クエン酸ともに粘土鉱物に吸着したカリウムとセシウムを粘土鉱物に可溶化することがわかった。実験で使用した粘土鉱物ではセシウムは層間に固定されていると考えられることから、有機酸によって粘土鉱物の構造が壊れ、セシウムが溶出したと予想された。クラスター根の発達段階により分泌する有機酸の特性が異なるため、今後、様々な形態のクラスター根と粘土鉱物の接触試験を行いたいと考えている。

### 2. 論文

## Rhizo test を用いたセシウムの土壌-植物間移行動態の解明

氏名：矢内 純太

受入研究者：武田 晃

共同研究者：中尾 淳・宇野 功一朗

### 1. 成果

#### 共同研究の目的

福島原発事故以降、農地土壌から作物への放射性セシウム（RCs）の移行低減化が課題となっており、これを継続的に達成するには移行制御因子の解明が重要である。風化黒雲母は RCs を吸着することで植物吸収を抑制することが知られてきたが、最近の研究では風化黒雲母層間からのカリウム放出によっても RCs の植物吸収を抑えている可能性が指摘され始めている。そこで本研究では、カリウム放出機能を失活させた黒雲母（K 欠損型黒雲母）を作製し、これを用いて栽培試験を行うことで、風化黒雲母の RCs 吸着とカリウム放出の 2 つの機能を分けて評価することを目的とした。

#### 共同研究の実施計画

市販の黒雲母から Na 塩を用いて人工的にカリウムを抽出した後、カリウムを再置換した“K 放出型”と、ルビジウム（Rb）と置換した“K 欠損型”の黒雲母を調製し、それぞれの構造状態を X 線回折分析により求めるとともに、K 放出能および RCs 吸着能を実験的に求めた。これらの黒雲母を土壌（雲母をほとんど含まない黒ボク土）と一定割合で混合し、低濃度の塩化セシウム（非放射性的安定 Cs）を予め添加した後 100 日間乾湿処理を繰り返した後に、酢酸アンモニウム（酢安）溶液を用いた化学抽出による Cs 交換抽出率を求めた。さらに、Rb 置換に伴う雲母構造内での Cs 安定性の変化について検証するために、白雲母型の単純構造モデルを用いたシミュレーション計算を行った。

#### 本年度の成果

Rb 置換によって作製した K 欠損型の黒雲母は、K 放出型の黒雲母とほぼ同様の構造状態であるにも関わらず、後者と比べて RCs 吸着能が 3 分の 1 程度に大きく低下した。これは白雲母モデルを用いたシミュレーション計算の結果とも一致していることから、Rb 型の構造をとる雲母に対しては Cs が吸着しにくいことが強く示唆された。ただし、黒雲母と黒ボク土を混合し安定 Cs を吸着させた後で酢安抽出を行った結果、Rb 型の方で小さい抽出率が示された。これは上記の結果と一見矛盾するが、酢安に含まれる  $\text{NH}_4^+$  が  $1 \text{ mol L}^{-1}$  と高濃度であり、安定 Cs だけでなく層構造を構成する  $\text{K}^+$  または  $\text{Rb}^+$  の一部も抽出した可能性が高い。この場合  $\text{NH}_4^+$  と比べた層間への吸着選択性は  $\text{K}^+ < \text{Rb}^+$  であるため、 $\text{Rb}^+$  を含む構造の方が層間陽イオンを放出しにくかったと考えられる。最後に、RHIZO test というデバイスを利用した栽培試験については、すでに混合土壌に安定 Cs を吸着させ 100 日間の乾湿処理が終了した段階であり、次年度すぐに本培養を開始する予定である。今年度得られた知見は、Rb 置換または K 再置換した黒雲母を用いた栽培試験での Cs の移行係数の違いを考察するための有用な基礎情報となることが期待される。

### 2. 論文

## 技術的専門性を要する社会課題の解決に寄与する実践的人材の育成

氏名：大場 恭子

受入研究者：増田 毅

共同研究者：鈴木 茂和・柳瀬 昇

### 1. 成果

#### 1. 成果

先行研究を参考に、学び、考え、話し合う場を設計し、松江高専、福井高専、長岡技科大、芝浦工大で実施した。また、トリチウム水および1F事故による土壌の再生利用に関する資料を新に作成するとともに、ALPS処理水に関する資料を改訂した。さらに、冊子体だけでは難しいことは、福島第一原子力発電所が起きた時の記憶がほとんどない世代の理解促進のため動画を作成した。

核燃料サイクルや放射性廃棄物処理処分事業への理解を深めるために下記のような六ヶ所村研修を実施した。

①日時 2022年9月13日(火)

②場所 (公財)環境科学技術研究所, 日本原燃株式会社,

③参加者 高専生12名

④内容

環境科学技術研究所：環境科学技術研究所概要紹介, 農水産物への放射性物質移行・残留性調査研究や低線量率放射線の生体影響研究に関する説明と関連施設の見学を行った。

日本原燃：日本原燃概要紹介, PR館見学, 濃縮工場外観見学, 低レベル埋設地見学, 使用済み燃料貯蔵プール等を見学した。

参加した学生からは、放射性物質の環境中の移行や低線量被ばく, 核燃料サイクルや低レベル放射性廃棄物処理処分を理解し, 興味を持つことが出来たとの感想があった。

### 2. 論文

## 海藻類から排出される有機物の挙動に関する検討

氏名：桐原 慎二

受入研究者：石川 義朗

共同研究者：

### 1. 成果

【目的】海藻は、海水中から炭素を取り込み有機物として固定すると同時に、藻体の分解や代謝を通じて海水中に炭素を放出する。その一部は、難分解性有機物炭素として長期間海中に残留する。そこで、海藻によるカーボンニュートラルの可能性を検討するため、マコンブについて藻体内外の有機炭素の分解速度を把握した。

【方法】2022年9月22日に青森県太平洋沿岸泊地先に漂着したマコンブ2年目藻体を環境科学技術研究所に運び、水温17°Cの調温海水を容れた50L水槽に浸漬した。10月7日に藻体と浸漬水を八戸工業大学に輸送し、浸漬水についてはGF-75でろ過後に40mlずつ144本の50ml遠沈管に分取し、藻体についてはコルクボーラーで直径7mmのディスクをくり抜き秤量後にGFC濾過海水40mlとともに144本の遠沈管に1片ずつ入れた。両種の遠沈管を各々36本ずつ1, 5, 10及び15°Cに設定したインキュベータに静置、培養した。培養0, 7, 14, 27, 42及び95日後に各温度段階の遠沈管を6本ずつ取り出し培養液の有機炭素量、藻体片の乾燥重量(105°C, 10hrs)及び有機炭素量を測定した。なお、20°C下での浸漬水の有機炭素量については、2022年5月30日から203日間同様に静置培養した結果を用いた。

【結果】浸漬水の有機炭素量は、実験開始時に9.64mg/Lであった。それに対する各測定時の有機炭素量の割合から求めた浸漬水の炭素含有比率は、高水温下ほど速やかに低下し、累乗関数に近似した。培養95日目の浸漬水の有機炭素量は、水温1°Cでは80%前後残存したのに対し、15°Cでは40%前後に留まった。この結果、培養水温と炭素分解率定数は、水温1°C, 5°Cで0.094, 0.146に対して水温15, 20°Cでは0.317, 0.333と2.2-3.5倍高い値を示した。

藻体片は、実験開始時の湿重量が平均129.5mg(SD11.4)であった。その炭素含有量は、経時的な減少がみられた。予備実験から求めた藻体の乾燥重量に対する有機炭素比(6.83%)を用いて各藻体片の炭素含有比率を求めた結果、累乗関数に近似した。炭素分解率定数は、水温1°Cの0.026に対して水温5°Cで0.35となり、10°C以上では0.52を超える値を示した。

【考察】本結果から、マコンブは、藻体及び藻体外の有機炭素の分解に顕著な水温依存が認められること、低温下で藻体の崩壊及び藻体外の有機物の分解を抑制されることが判明した。青森県沿岸水深400mでは高水温期においても水温3°C以下に留まる。したがって、深所に藻体を移すことで、藻体が固定した炭素を長期間大気から隔離するブルーカーボンとしての機能が発揮されることが考えられた。現在、むつ小川原港でマコンブを養殖しており、今後、養成藻体を用いて元素の取り込みについて検討する。

### 2. 論文



## 低線量・低線量率放射線によって生じた消化管腫瘍のリスク評価とその特徴

氏名：鈴木 健之

受入研究者：山内 一己

共同研究者：森岡 孝満・柳原 啓見

### 1. 成果

原爆被爆者や医療放射線に被ばくした集団の疫学調査から、放射線を被ばくした量に比例してがんのリスクが上昇することが示されている。しかしながら、低線量や低線量率の被ばくにおいては、がんの発生率が低いために正確な発がんのリスクは解明されていない。

そこで、本共同研究では、それぞれが得意とする照射技術や分析法を持ち寄り、消化管に腫瘍を発生させる放射線感受性の高い放射線発がんモデルマウス（ApcMin/+マウス、ヒト家族性大腸腺腫症モデル）を用いた実験で、異なる線量や線量率で得られた腸腫瘍を解析し、低線量・低線量率被曝の発がんリスクを評価することを目的とした。

本年度は互いの機関で得られたデータを共有することで、統一的なリスク評価モデルを構築できるか否かを検討したが、結果としていくつかの課題を洗い出すことに繋がった。その一つは、「系統の違うマウスの消化管腫瘍発生数のデータをいかに統一して解釈するか」である。C3B6F1 ApcMin/+マウス（放医研の実験で主に使用）では、小腸に数十個の腫瘍が発生するが、大腸ではほとんど発生しないという特徴があり、逆に C57BL/6J ApcMin/+マウス（環境研の実験で主に使用）では、小腸、大腸ともに多くの腫瘍が発生するが、特に小腸に発生する腫瘍数が多すぎて（百数十以上）、腫瘍同士が融合してしまうなど計数には不向きな点がある。このように遺伝的背景が異なる ApcMin/+マウスのデータを、いかに解釈し統合するかが課題となっている。

また、先行研究により、ApcMin/+マウスは週齢が進むほど消化管腫瘍の発生数もサイズも増加することが分かっているが、両機関の実験ではマウスの解剖時年齢が異なっており、両機関のデータをどのように統合させるかも一つの課題であると考えている。

これらの課題解決のためには、両機関の実験条件の統一をした上での動物実験の再設定も考えられるが、これまでに蓄積されてきた互いの研究機関のデータを統合できる数理モデルの構築の余地は十分にあるとも考えており、今後の検討の第一の方針として位置付けていきたい。

### 2. 論文

なし

## 低線量放射線リスクの数理モデル解析に資する動物実験データベース構築

氏名：山田 裕

受入研究者：田中 聡

共同研究者：森岡 孝満・Kin Yoshika

### 1. 成果

量子科学技術研究開発機構（量研）放射線医学研究所（放医研）および環境科学技術研究所（環境研）では、これまで長年にわたり実験動物を用いた大規模な放射線影響研究を行ってきた。本研究は、放射線の生物影響研究の成果の最大化に向けて、両研究所の動物実験データについて統一されたフォーマットでデータベースを構築し、相互補完・統合することにより、放射線照射による死亡リスクの線量依存性や線量率効果係数を求める解析、さらには数理モデル解析に利用できるシステムを創出することを目的とする。

データベースの項目としては、重要なエンドポイントである生存期間（寿命）、各臓器における病変の種類と発生率、および生存期間に寄与した死因とした。病変は腫瘍性病変（造血系腫瘍、固形腫瘍（良性、悪性））および非腫瘍性病変に分類し、腫瘍性病変については、MPATH (mouse pathology ontology)コードを付けてシステムに入力した（一部データ、入力経過中）。

次年度は、入力データを増やすと共に、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を含むアーカイブの構築に向けて検討を続ける。

本データベースは、必要なデータの検索と出力機能を備えたアプリケーションへ実装し、公開と周知活動を経て、実際に国内外で解析に利用してもらうことにより、放射線リスク評価に資する新たな知見や放射線防護に関する科学的根拠に関する情報を得ることができ、放射線防護施策の改善に役に立つことが期待される。

### 2. 論文

無し