

放射能環境動態・影響評価
ネットワーク共同研究拠点（ERAN）

FY2023 Final Report

【重点/Priority 共同研究】

重点共同研究

採択番号	申請者	所属	課題名	共同研究者	受入研究者	受入機関
P-23-01	那須 康輝	福島県環境創造センター	福島県の河川を流れる懸濁物質の放射性セシウム濃度と物理化学的特徴の関係性	樊 少艶 福田 美保 竹内 幸生 谷口 圭輔	恩田 裕一	CRiES
P-23-02	樊 少艶	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観測	福田 美保 那須 康輝 竹内 幸生 谷口 圭輔	恩田 裕一	CRiES
P-23-03	廣瀬 勝己	富士山環境研究センター	天然水中の溶存と懸濁態間の ¹³⁷ Csの分配係数の化学的意味付け		恩田 裕一	CRiES
P-23-04	五味 高志	名古屋大学	航空機およびドローンレーザー計測を活用した森林状態と水循環の把握		恩田 裕一 加藤 弘亮	CRiES CRiES
P-23-05	西田 翔	佐賀大学	不均一な土壌環境に応答した根における偏在的K ⁺ /Cs ⁺ 輸送制御の検証		古川 純	CRiES
P-23-06	YIN Yong-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分析技術の確立	三好 悠太	古川 純 海野 佑介 今田 省吾	CRiES IES IES
P-23-07	伏見 賢一	徳島大学	宇宙・素粒子の稀現象探索実験のためのウラン・トリウム不純物計測と純化方法の開発	高久 雄一 梅原 さおり 黒澤 俊介	坂口 綾	CRiES
P-23-08	浅井 志保	産業技術総合研究所	環境中I-129の質量分析のためのSIトレーサブルなよう素標準液の開発		坂口 綾	CRiES
P-23-09	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 千葉 健太郎 AZZI Louise, Adèle Marthe 高久 雄一	坂口 綾	CRiES
P-23-10	保倉 明子	東京電機大学	蛍光X線分析法を用いる環境水中の極微量ウラン、トリウムおよび重金属元素の迅速定量法の開発	高久 雄一 小川 颯士 所 雅人	坂口 綾	CRiES
P-23-11	ZHENG Jian	national Institutes for Quantum Science and Technology	Pseudo isotope dilution as an approach for quantification of Np-237 in environmental samples by ICP-MS	QIN Lin 青野 辰雄	坂口 綾	CRiES
P-23-12	箕輪 はるか	東京慈恵会医科大学	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・陸水中の低レベル放射性ストロンチウム測定法の研究	緒方 良至 小島 貞男 有信 哲哉 加藤 結花 杉原 真司	坂口 綾	CRiES
P-23-13	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 島村 蓮 田中 雅士 吉田 斉	坂口 綾	CRiES
P-23-14	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影響		坂口 綾 恩田 裕一	CRiES CRiES
P-23-15	宇都宮 聡	九州大学大学院	高濃度放射性セシウム含有微粒子の化学的特性にもとづく環境影響と炉内状態の解明	杉本 侃駿 宮崎 加奈子	山崎 信哉	CRiES
P-23-16	渡来 靖	立正大学	安価なドローンによる風況観測システムの精度検証		中村 祐輔	CRiES
P-23-17	齋藤 誠紀	山形大学	赤城大沼湖水中セシウム濃度時間予測モデルの精密化に関する検討	中村 誠 大高 郁斗	羽田野 祐子	CRiES
P-23-18	松中 哲也	金沢大学	Pb-210を用いた湖沼堆積物の年代決定とI-129・Cs-137の沈着量変動	落合 伸也 坂口 綾	笹 公和	CRiES
P-23-19	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	難波 謙二	IER

採択番号	申請者	所属	課題名	共同研究者	受入研究者	受入機関
P-23-20	信濃 卓郎	北海道大学	土壌の放射性セシウムの植物利用に及ぼす有機物の影響について		塚田 祥文	IER
P-23-21	長谷川 浩	金沢大学	機能性界面活性剤を用いた放射性物質汚染土壌の減容化	Begum Zinnat Ara	Rahman M.M. Ismail	IER
P-23-22	高木 淳一	京都大学	福島県の淡水・汽水域におけるニホンウナギの放射能セシウム濃度とその移動生態の関係解明	三田村 啓理 荒井 優志	和田 敏裕	IER
P-23-23	大手 信人	京都大学	帰還困難区域内の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 長澤 和佳 脇 嘉理	和田 敏裕	IER
P-23-24	平良 文亨	長崎大学原爆後障害医療研究所	帰還困難区域における工事車両の往来に伴い再浮遊する粉塵中の ¹³⁷ Cs及び重金属の成分特性の解析	CUI Limeng 松尾 政彦	平尾 茂一	IER
P-23-25	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	出口 将斗	高田 兵衛	IER
P-23-26	青野 辰雄	福島国際研究教育機構	福島県前田川、高瀬川および猿田川における粒子態セシウムフラックスに関する研究	FAN Shaoyan 那須 康輝 福田 美保	高田 兵衛	IER
P-23-27	遠藤 大二	酪農学園大学	原発事故周辺地域・高放射線環境下に生息するアカネズミ放射線損傷修復遺伝子への影響解析	大沼 学 中嶋 信美	石庭 寛子	IER
P-23-28	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 ⁹⁰ Sr汚染について	青木 譲	高貝 慶隆 石庭 寛子	IER IER
P-23-29	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5：活性炭型ラドン検出器による感度確認	向 高弘	床次 眞司 細田 正洋 大森 康孝	IREM IREM IREM
P-23-30	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		三浦 富智	IREM
P-23-31	山城 秀昭	新潟大学	被災アカネズミの精子形成能評価における放射線高感受性バイオマーカーの検索	中田 章史	三浦 富智	IREM
P-23-32	中田 章史	北海道科学大学	エピジェネティクス解析を利用した放射線影響評価系の開発	山城 秀昭	三浦 富智	IREM
P-23-33	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	三浦 富智	IREM
P-23-34	飯本 武志	東京大学	環境放射線に関するリテラシーの醸成に資する教育戦略		赤田 尚史	IREM
P-23-35	柳澤 文孝	山形大学	山形蔵王の樹氷に含まれている鉛-210の動態	岩田 尚能	赤田 尚史	IREM
P-23-36	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の動態	柳澤 文孝	赤田 尚史	IREM
P-23-37	栗田 直幸	名古屋大学	福島県浜通り地域における降水の同位体組成に関する研究		赤田 尚史	IREM
P-23-38	岩井 敏	東京大学	Indoor Environment Radiation Assessment and Radiation Protection in Veterinary Hospitals	飯本 武志 小池 弘美 WANG Xueqing	細田 正洋	IREM
P-23-39	永井 尚生	日本大学	太平洋における海水中Be同位体の分布	山形 武靖 松崎 浩之	田副 博文	IREM
P-23-40	杉原 奈央子	海洋生物環境研究所	二枚貝殻を用いた遡及的放射性核種モニタリング手法の確立	白井 厚太郎 山田 正俊	田副 博文	IREM
P-23-41	反町 篤行	東洋大学	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観測		大森 康孝	IREM
P-23-42	佐々木 隆之	京都大学	酸化鉱物表面の核種濃集挙動に関する分光学的研究	土肥 輝美 長澤 圭太	藤原 健壮	JAEA
P-23-43	黄倉 雅広	東京大学	福島県以外の自治体の放射能汚染された土壌や物品の適切な管理・処分に関する考察	橋間 俊 飯本 武志	土肥 輝美	JAEA
P-23-44	吉川 英樹	東京慈恵会医科大学	樹皮表面に繁殖する苔類による放射性セシウム保持についての研究	箕輪 はるか	土肥 輝美 佐々木 祥人	JAEA JAEA

採択番号	申請者	所属	課題名	共同研究者	受入研究者	受入機関
P-23-45	高橋 成雄	会津大学	統合空間線量率マップに基づく除染効果の視覚解析	櫻井 大督	操上 広志 真田 幸尚	JAEA JAEA
P-23-46	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鉱物学的研究	萩原 大樹	萩原 大樹	JAEA
P-23-47	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 浜島 靖典 津旨 大輔	林 誠二	NIES
P-23-48	小松 仁	福島県環境創造センター	福島県内における野生傷病鳥獣の放射性セシウムのモ ニタリング	村上 貴恵美 神田 幸亮 稲見 健司 壁谷 昌彦	玉置 雅紀	NIES
P-23-49	神田 幸亮	福島県環境創造センター	福島県内におけるキジの行動圏調査	小松 仁 村上 貴恵美	玉置 雅紀	NIES
P-23-50	高橋 真哉	筑波大学	植物培養細胞を用いた帰還困難区域における遺伝子発 現を指標としたモニタリング手法の検討		玉置 雅紀	NIES
P-23-51	坪野 考樹	電力中央研究所	尾駁沼における物質循環把握		植田 真司	IES
P-23-52	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	柿内 秀樹	IES
P-23-53	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		柿内 秀樹	IES
P-23-54	橋本 晃佑	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	柿内 秀樹	IES
P-23-55	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 桑田 遥	柿内 秀樹 今井 祥子 赤田 尚史	IES IES IREM
P-23-56	鳥養 祐二	茨城大学	生体への水素同位体取り込みの同位体効果の検証	細根 孟留 南場 大輝	柿内 秀樹 石川 義朗	IES IES
P-23-57	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	水野 亜紗美	海野 佑介 武田 晃	IES IES
P-23-58	桐原 慎二	弘前大学地域戦略研究所	海藻類から排出される有機物の挙動に関する検討	田中 義幸	石川 義朗	IES
P-23-59	柳原 啓見	量子科学技術研究開発機 構	低線量・低線量率放射線による消化管腫瘍の発がんリ スク評価	森岡 孝満 今岡 達彦 鈴木 健之	山内 一己	IES
P-23-60	石川 敦子	量子科学技術研究開発機 構	低線量放射線被ばく実験データベースおよびマウス組 織標本アーカイブ フォーマットの共通化とその活用 方法の検討	森岡 孝満 今岡 達彦 山田 裕 KIN Yoshika	田中 聡 中平 嶺	IES IES

福島県の河川を流れる懸濁物質の放射性セシウム濃度と物理化学的特徴の関係性

氏名：那須 康輝

受入研究者：恩田 裕一

共同研究者：樊 少艶・福田 美保・竹内 幸生・谷口 圭輔

1. 成果

東京電力福島第一原子力発電所事故によって、環境中に Cs-137 をはじめとする人工放射性核種が拡散及び沈着した。これらの核種は河川を介して陸域から海域へと移行しているが、平水期間の阿武隈川による Cs-137 移行において、懸濁態が大きく寄与することが報告されている[1]。出水期間の水位変化に伴う陸水中の Cs-137 濃度の変化に関して、これまで渓流域[2]や宮城県の一級河川である大川[3]などで報告されているが、出水による水位変化が比較的緩やかな一方、流量が多い一級河川での報告例は少ない。そこで本課題では、福島県の一級河川である阿武隈川で、出水期間の水位変化に伴う懸濁物質の濃度、懸濁物質中の Cs-137 濃度及び懸濁物質の粒度分布の変化について、その関係も含めて明らかにすることを目的とした。福島県二本松市の阿武隈川中流域で、2023年11月7～8日の出水期間に、2時間ごとに河川水を約60L採取した。河川水試料のうち約40Lを懸濁態カートリッジフィルター（孔径1 μ m）でろ過したのち、Ge半導体検出器を用いてカートリッジのCs-137を測定し、懸濁物質中のCs-137濃度を算出した。残りの河川水試料約20Lはメンブレンフィルター（孔径0.45 μ m）でろ過したのち、フィルター上の懸濁物質を超音波洗浄して、懸濁液として回収した。この懸濁液から遠心分離（12,860 \times g、30分間）及び凍結乾燥によって懸濁物質を取り出し、粒度分布分析装置（LA-960、堀場製作所）で懸濁物質の粒度分布を測定した。比較として、2022年8月～2023年12月の期間のうち、前日に1.0mmを超える降雨がみられない日を選び、月1回程度の頻度で河川水を採取し、同様に測定を行った。二本松アメダス観測所での11月7～8日の総降水量は33.0mmで、このうち11月7日5～10時の間に31.5mmの降水がみられた。二本松水位観測所の河川水位は、11月7日6時の2.65mから急速に上昇し、11月7日13時に4.37mを観測したのち、緩やかに低下した。河川水位の上昇とともに懸濁物質濃度（17～388mg/L）と懸濁態Cs-137濃度（19～261mBq/L）も上昇し、平水期間の範囲（それぞれ4～28mg/L、2～32mBq/L）と比較しても、1桁以上高かった。河川水位の上昇によって冠水した河川敷などから懸濁物質が大量に流入したものと考えられる。一方、懸濁物質中のCs-137濃度は810～2580Bq/kg乾の範囲であり、平水期間の範囲内（460～3520Bq/kg乾）

にあった。宮城県の大川での結果[3]と同様に、一級河川の阿武隈川でも、懸濁物質濃度と懸濁態 Cs-137 濃度との間に有意な正の相関関係がみられた ($R^2 = 0.55$, $p < 0.01$)。懸濁物質の粒度分布について、水位が上昇し始めた 11 月 7 日 6 時の懸濁物質は粒径の大きい粒子 ($> 50 \mu\text{m}$) の割合が多く、水位が高かった 11 月 7 日 12 時の懸濁物質は粒径の小さい粒子 ($< 15 \mu\text{m}$) の割合が多かった。なお、懸濁物質の中央粒径と懸濁物質中の Cs-137 濃度との間には明確な関係性はみられなかった。今後は、今回得られた試料について、鉍物組成や有機物含有量、炭素及び窒素の同位体比などの分析を行い、懸濁物質の起源についても推定を行いたい。引用文献 [1]K. Taniguchi et al., Environ. Sci. Technol., 2019, 53, 12339-12347, [2]篠宮佳樹, 水利科学, 2017, No.354, 19-31, [3]橋本達範ら, 土木学会論文集 B1 (水工学), 2015, Vol.71, No.4, I_1195-I_1200

2. 論文

Fan, S., Nasu, K., Takeuchi, Y., Fukuda, M., Arai, H., Taniguchi, K. & Onda, Y. (2024). Transport of radioactive materials from terrestrial to marine environments in Fukushima over the past decade. Pure and Applied Chemistry. <https://doi.org/10.1515/pac-2023-0802>

福島県を流れる河川における放射性セシウムの長期観測

氏名：樊 少艶

受入研究者：恩田 裕一

共同研究者：福田 美保・那須 康輝・竹内 幸生・谷口 圭輔

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、大量のセシウム¹³⁷（¹³⁷Cs）をはじめとする放射性物質が環境中へ放出された。¹³⁷Csの物理的半減期が約30年と長いため、生物に対する長期的な被ばく線量を評価するうえで、¹³⁷Csの環境中における動きを把握することは重要である。このため、河川を介してイオンなどのように河川水中で溶存した状態（溶存態）あるいは河川水中の土壌粒子などに吸着された状態（懸濁態）で移行する¹³⁷Csの動きを把握することを目的とし、2011年～2015年にかけて筑波大学が、2015年以降は福島県環境創造センターが、福島県内を流れる河川水の放射性セシウム濃度を継続的に観測している。本研究課題においては上記観測を引き続き実施し、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。河川を介して海洋へ移行する¹³⁷Csの動きを把握することを目的とし、長期間にわたって観測した懸濁態¹³⁷Cs濃度、懸濁物質、河川流量などの結果をもとに、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、2012年10月から2020年12月までの、福島県内陸域から海洋への¹³⁷Cs移行量を推測した。河川の懸濁態¹³⁷Cs濃度は、事故直後の高濃度（ $3.2\sim 5.7\times 10^4$ Bq/kg-dry）から2023年10月時点では、1/10から1/100まで低下した（阿武隈川水系 $333\sim 6995$ Bq/kg-dry、浜通り河川 $179\sim 19122$ Bq/kg-dry）。2023年7月時点の溶存態¹³⁷Cs濃度は阿武隈川水系で $0.00056\sim 0.011$ Bq/L、浜通り河川で $0.0021\sim 0.058$ Bq/Lであり、日本の飲用水基準（10 Bq/L）より2～4桁低かった。各河川の懸濁態¹³⁷Cs濃度の減少傾向の平均値は $Y=a_1 e^{-k_1 t}+a_2 e^{-k_2 t}$ 式により近似できた。この傾向は流域ごとに異なり、 k_1 は、土地利用が草地・裸地や水域の割合が高いところで大きかった。一方、 k_2 は、土地利用が都市域の割合が低いところで大きかった。福島県沿岸域（9河川、11地点）における2012年10月から2020年12月までの海洋への懸濁態¹³⁷Cs移行量は17TBqと推定された。各地点の流域初期沈着量に対する懸濁態¹³⁷Cs移行率は、相対的に小さかったところは0.1%、大きかったところは1.7%であった。各地点の懸濁態¹³⁷Cs移行率の違いは、上流域におけるダム湖被覆率の大小（負の相関）と年間河川比流量の多少（正の相関）に応じていると考え

られる。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、本結果は学術誌 *Pure and Applied Chemistry* に掲載された。(Fan, S., Nasu, K., Takeuchi, Y., Fukuda, M., Arai, H., Taniguchi, K. & Onda, Y. (2024). Transport of radioactive materials from terrestrial to marine environments in Fukushima over the past decade. *Pure and Applied Chemistry*. <https://doi.org/10.1515/pac-2023-0802>)。本結果が現状の国際的な理解に寄与し、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

Fan, S., Nasu, K., Takeuchi, Y., Fukuda, M., Arai, H., Taniguchi, K. & Onda, Y. (2024). Transport of radioactive materials from terrestrial to marine environments in Fukushima over the past decade. *Pure and Applied Chemistry*. <https://doi.org/10.1515/pac-2023-0802>

天然水中の溶存と懸濁態間の ^{137}Cs の分配係数の化学的意味付け

氏名：廣瀬 勝己

受入研究者：恩田 裕一

1. 成果

2011年3月の福島第一原子力発電所事故により、多量の放射性セシウムが環境中に放出された。地表に沈着した放射性セシウムは、主に土壌粒子に吸着して固定される。一部の ^{137}Cs は河川水により陸域から海洋に移行することが知られている。福島の高濃度 ^{137}Cs 汚染域の時間変遷等の実態解明をするためには、淡水系を含め水圏の ^{137}Cs の動態を解明することが求められている。中でも、溶存 ^{137}Cs と懸濁粒子の分配挙動についての理解を深めることがその動態解明の鍵となる。現在までに、淡水系、海水を含め多くの分配定数が求められている。その結果によると、日本の淡水ではその値が $104\sim 108\text{ L kg}^{-1}$ まで大きく変動することが明らかにされている。従って、分配定数の変動を支配する化学的・物理的要因を明らかにすることが重要である。 ^{137}Cs の天然水及び懸濁粒子の間の分配挙動は、典型的な化学過程と考えることができる。この場合、セシウム同位体の中で主要な核種である安定セシウム(^{133}Cs)が基本的な化学過程を支配している。事実、福島県の灌漑水中の ^{133}Cs 濃度は $11\sim 700\text{ pmol L}^{-1}$ に対して ^{137}Cs は 0.2 pmol L^{-1} (200 Bq L^{-1} に相当)以下であり圧倒的に ^{133}Cs 濃度が高い。天然水と懸濁粒子(あるいは堆積物)の間の ^{133}Cs の固液平衡及び ^{133}Cs と ^{137}Cs の間の同位体平衡が成立していると仮定すると、 ^{137}Cs で求められた分配定数 K_d は ^{133}Cs の濃度の関数になることが分かった。この関係は条件を設定すれば、次の式で表される。 $\log K_d = -\log [^{133}\text{Cs}] + C$ ここで、 $[^{133}\text{Cs}]$ は固液平衡にある溶液(河川水など)の ^{133}Cs 濃度である。また、 C は定数であるが、懸濁粒子中の Cs イオンの結合サイトの濃度(近似的には、懸濁粒子中の交換可能 ^{133}Cs 濃度)を表し、同じ条件の懸濁粒子濃度の場合定数になるが、異なった条件では結合サイト濃度が増減する。灌漑水、海水、及び火口湖(今回、バッチ抽出法で K_d を求めたところ、 20 L kg^{-1} であった)の ^{137}Cs の分配定数はこの関係で説明できることが明らかになった。日本の淡水中の ^{133}Cs は低濃度であるが大きく変動しており、それが分配定数の変動の主要な要因の一つとなる。

2. 論文

航空機およびドローンレーザー計測を活用した森林状態と水循環の把握

氏名：五味 高志

受入研究者：恩田 裕一 ・加藤弘亮

1. 成果

森林の水源涵養機能を考える場合、森林の空間的・時間的な広がりを考える必要がある。だが、とくに水文プロセスの把握では、単木レベルから斜面区画、さらには小流域（数ヘクタール）といった小スケールでの調査研究が行われてきた。これらの研究では、スケールや立地条件により水文プロセスが多様であり空間的な「ばらつき」も大きい。それに対して、近年対象となる水源涵養機能の発揮は、流域などのまとまった範囲が対象となる。流域治水のように下流域の災害対策や水資源管理を含めた流域の資源管理とも関連している。流域的視点で森林を考える場合、多様な林分を考慮する必要が出てくる。そこで、流域スケールでの森林状態と森林管理の指標と森林水文プロセス指標をつなげることを目的とした。森林管理の影響を加味した森林の水源涵養機能の評価に向けて、森林状態と水文プロセスを関連付けていく必要がある。しかし、流域を対象とした場合、人工林のみならず広葉樹林が含まれること、降雨のみならず降雪を考慮した森林水文プロセスが必要であることなど課題も多い。そこで、多様な林分で構成される流域スケールでの蒸発散量推定を目的とし、森林状態を考慮した蒸発散モデルの構築が行われた。温帯森林地域を中心とした国内外の既往研究（65 報）およびデータベース（FLUXNET：38 サイト）のデータを整理し、樹高・立木密度・樹種（針葉樹・広葉樹）との関係を検討し、遮断と蒸散についてのモデル化を実施した。加えて、降雨と降雪による遮断の違いも考慮することで、積雪地域における遮断量の評価が行えるようになった。その上で、針葉樹林では遮断と立木密度、広葉樹林では遮断と樹高との関係を明らかにした。蒸散については樹高や気孔のガスの通りやすさを示す指標 の関係から、蒸散モデル（簡略化ペンマン・モンテース式）を構築した。これらのモデルに森林簿などの森林情報を適応した。本モデルを、国内外の实地観測点の結果と比較したとこと、良好な整合性が得られた。このように、既往のデータを統合的に解析することで、水源涵養機能の評価に必要となる広域での蒸発散量評価を可能とした。さらに、水源涵養機能の評価で重要となる森林情報の整備やその高度化のために、航空機レーザー計測を用いた高分解能の森林実態調査技術を適応した。これにより、樹高と密度の精度が向上された。また、過密林分（1000 本/ha 以上）や広葉樹林などの解析手法の構築にむけて、ドローン搭載型 LiDAR やマルチスペクトルによる解析手法とその広域展開などの技術要素の発展も検討した。

2. 論文

不均一な土壌環境に応答した根における偏在的 K⁺/Cs⁺輸送制御の検証

氏名：西田 翔

受入研究者：古川 純

1. 成果

【目的】植物体において Cs⁺は K⁺の吸収・輸送経路を介して集積する。植物は低 K⁺条件に曝されると、根から葉への K⁺輸送を活性化することで K⁺不足を回避すると考えられている。しかし実際の土壌では K⁺は不均一に分布しており、K⁺濃度の高い領域にある根と低い領域にある根で K⁺/Cs⁺吸収活性にどのような違いがあるのかは明らかにされていない。本研究では、水耕栽培系を用いた根分け実験により不均一 K⁺条件を再現し、各種 K⁺輸送関連遺伝子の発現を調査することで、不均一 K⁺条件における植物の K⁺吸収および輸送のメカニズムを明らかにすることを目的とした。

【方法】水耕栽培で4週間栽培した個体の根を二手に分け、それぞれを+K条件および-K条件に暴露し、0、1、3、5、7日目に根をサンプリングした。根から RNA を抽出し、RT-qPCR により K⁺輸送関連遺伝子の発現量を調査した。培地からの K⁺吸収に関わる輸送体として高親和性 K⁺トランスポーターの HAK5 および低親和性 K⁺チャネルの AKT1、根から地上部への K⁺輸送を担う輸送体として高親和性 K⁺トランスポーターの NPF7.3 および低親和性 K⁺チャネルの SKOR、そして NPF7.3 および HAK5 の発現誘導を担う転写制御因子として MYB59 を調査対象とした。

【結果】低親和性 K⁺チャネルの AKT1 の発現パターンは異なる K 条件の間で違いは認められず、一方で親和性 K⁺トランスポーター HAK5 は-K 条件の根においてのみ著しい発現誘導が確認された。このことから培地からの K⁺吸収は、+K 条件では AKT1 が、-K 条件では HAK5 がそれぞれ担うと考えられた。これまで MYB59 は-K 条件でのみ発現が誘導されることが報告されていたが、不均一 K 条件では、-K のみならず +K 条件でも発現の誘導が認められた。これは、全身性シグナリングにより-K 条件下の根から +K 条件下の根へ K 欠乏シグナルが伝達したことを意味している。この時、低親和性 K⁺チャネルである SKOR の発現は異なる K 条件の間で違いが無かった一方で、高親和性 K⁺トランスポーターである NPF7.3 の発現はむしろ +K 条件で有意に高いことが明らかとなった。これは、NPF7.3 の発現が未知の因子により +K で促進、あるいは -K で抑制されることで、高 K 領域の根で偏在的に K⁺吸収能が高まることを示唆している。これは経済合理性に優れた能力だと言える。

【考察】本研究により初めて不均一 K 条件における植物の K⁺吸収・輸送のメカニズム

おける実験では明らかにされなかったものである。現在、放射性同位体を用いたトレーサー実験により、実際の K^+ 動態を明らかにするべく研究を進めている。また、各種輸送体の Ca^{2+} 輸送能を調査することで、不均一条件における Ca^{2+} 動態の解明につなげる。

2. 論文

植物器官間炭素動態解析に向けた炭素同位体分析技術の確立

氏名：YIN Yong-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

葉で作られた光合成産物（炭素）の輸送と分配の効率化は、農作物の収量性を向上させる上で重要である。しかし、体内を流れる炭素の輸送経路や分配様式は目に見えない複雑な生理機能であるため、その正確な計測は技術的に困難である。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) または炭素 11 (C-11) がトレーサとして用いられている。申請者らは、これまでに異なる 3 つのトレーサ (C-11、C-13、C-14) 実験を同一メソッドで実施できるように実験手法の統一化を行って来た。本研究では、3 つの共同研究機関が有する C-11、C-13、C-14 の炭素トレーサ実験技術に加えて、それぞれの成分分析手法を開発することで新しい実験体系を確立することを目的として実施した。具体的に、QST・高崎研では $^{11}\text{CO}_2$ を用いてトマトの葉から果実へ向かう光合成産物の輸送過程をリアルタイムで可視化することで、短期間（～3 時間）における果実へ流入する光合成産物の転流パターンの把握を行った。同様なメソッドを用いて $^{13}\text{CO}_2$ をトレーサとしてトマトの葉に与え、長期間（約 24 時間）転流させた後、茎や果実などを採取し、筑波大学が所有する C-13 分析装置 (IR-MS) を用いて、各器官における ^{13}C の分配量の分析に供試した。また、筑波大学アイソトープ環境動態研究センターにおいて上記と同じメソッドで $^{14}\text{CO}_2$ をトマトの葉に与え、約 24 時間後、葉や果実などの器官を採取し、輪切りした組織内の C-14 の分布をイメージングプレート (IP) を用いて画像化した。その後、葉や茎などの組織から可溶性成分を抽出し、薄層クロマトグラフィー (TLC) による可溶性成分の分離および液体シンチレーションカウンター (LSC) による C-14 放射エネルギーの定量を行った。茎内部の C-14 の内分布は葉柄と連結した維管束組織に集中しており、他の維管束では検出されなかった。可溶性成分の TLC 実験の結果、C-14 で標識された可溶性糖のうちスクロース、グルコース、フルクトースのシグナルバンドが IP によって検出された。それぞれの糖が葉と茎で異なる分布を示しており、葉ではスクロースが検出されず、茎ではフルクトースが検出されなかった。このことは、サンプリングしたタイムポイント (C-14 投与 24 時間後) において、葉にパルスで与えた C-14 がスクロース (転流糖) として茎への移行がほとんど終了しており、グルコースとフルクトース

として葉に残されていることが示唆された。また、茎においてはスクロースの移行が継続されている可能性が示唆された。今後、本研究で確立した実験系を基に、各器官・組織レベルの炭素動態と代謝の解析を進める予定である。

2. 論文

なし

宇宙・素粒子の稀現象探索実験のためのウラン・トリウム不純物計測と

純化方法の開発

氏名：伏見 賢一

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：高久 雄一・梅原 さおり・黒澤 俊介

1. 成果

無機シンチレータ結晶は、二重ベータ崩壊現象の探索などニュートリノの質量探索などの基礎物理学過程を探索するために幅広く応用されている。カルシウム 48 (^{48}Ca) を含むフッ化カルシウムは大容量の結晶を作製することができ、 ^{48}Ca の濃度を濃縮することができれば高感度の二重ベータ崩壊探索実験を実行することができる。二重ベータ崩壊の感度は、現時点では結晶及び周辺材料に含まれる放射性不純物によるベータ線やガンマ線によるバックグラウンド事象によって制限されている。二重ベータ崩壊の感度目標は、半減期 1021 年以上と考えられ、これに対応するための放射性不純物濃度に対する制限は ^{238}U および ^{232}Th についていずれも 1 ppt 以下であることが要求されている。本研究では、 CaF_2 結晶に含まれる ^{238}U および ^{232}Th を減らすために結晶偏析による不純物除去の効果を検討した。フッ化カルシウムを直接純化するためには結晶化における偏析効果を期待し、長さ 9 cm、直径 0.9 cm の長尺結晶を作製して結晶化の順にウランおよびトリウムの濃度が高くなっているかどうかを確認した。ウランおよびトリウムの濃度は、フッ化カルシウムを粉砕して硝酸で溶かし、ICP-MS によって濃度を測定した。その結果、ウランの濃度については結晶成長と共に濃度が上昇し、順調に偏析が進んでいることが確認された。しかしながら、トリウムについては ICP-MS に導入するサンプルを作成する過程で環境からの汚染が起り、ただしい濃度を測定することができなかった。フッ化カルシウムそのものを純化する方法は結晶化の偏析以外では困難なため、その原料を純化した後に合成する方法を提案した。原料の一つとして塩化カルシウムの純化を試みた。適切なキレート樹脂を使用してウランとトリウムを純化する工程を施し、その結果得た水溶液中に含まれるウランとトリウムの濃度を ICP-MS で測定した。その結果、ウランについては純化によって 2 桁近く減少したことを確認した。ただし、トリウムの濃度については、回収率が低い条件であったため適正に測定することができなかった。本年度の研究によって、ウランの濃度を正しく測定することはできたが、トリウムの濃度については汚染や回収率の低減など予測

できなかった要因によって正しく測定できなかった。次年度以降には、試料の準備段階における汚染の防止、トリウム回収率の確認と液性の適切な管理を行って正確な測定を可能にする。

2. 論文

発表論文 1. “Present status of PICOLON project”, K. Fushimi, D. Chernyak, H. Ejiri, K. Hata, R. Hazama, T. Iida, H. Ikeda, K. Imagawa, K. Inoue, H. Ito, T. Kisimoto, M. Koga, K. Kotera, A. Kozlov, S. Kurosawa, K. Nakamura, R. Orito, A. Sakaguchi, A. Sakaue, T. Shima, Y. Takaku, Y. Takemoto, S. Umehara, Y. Urano, Y. Yamamoto, K. Yasuda, S. Yoshida, Proceedings of the 37th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, KEK Proceedings 2023-1, (2024), p43, arXiv:2402.08786v1 学会発表（招待講演） 1.

「宇宙・素粒子分野における、極微量元素除去技術を応用したシンチレータの高純度化技術」、伏見賢一、日本結晶成長学会 バルク成長分科会 第 115 回研究会「シンチレータ結晶開発と放射線検出器応用の動向」、東北大学金属材料研究所、2024 年 2 月 21 日 2.

「極微量元素除去技術を応用した放射線検出器材料の高純度化と高感度化」、伏見賢一、坂上陽俊、西島渉悟、梅原さおり、黒澤俊介、高久雄一、坂口綾、裕隆太、山本祐平、今川恭四郎、保田賢輔、小寺健太、浦野雄介、極低放射能技術研究会(LBGT2024)、2024 年 2 月 5 日（リモート会議） 3. 「無機シンチレーターの純化について」、伏見賢一、研究会「放射線計測技術と濃縮同位体」、大阪産業大学梅田サテライトキャンパス、2023 年 10 月 18 日 学会発表（招待講演以外） 1. 「二重ベータ崩壊探索用 CaF₂ の高純度化」、伏見賢一、坂上陽俊、裕隆太、今川恭四郎、小寺健太、黒澤俊介、坂口綾、高久雄一、梅原さおり、山路晃広、山本祐平、保田賢輔、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン開催、2024 年 3 月 19 日 2. 「高純度 CaF₂ 開発に向けた CaCl₂ の純化」、坂上陽俊、伏見賢一、裕隆太、今川恭四郎、小寺健太、黒澤俊介、坂口綾 D、高久雄一、梅原さおり、山本祐平、保田賢輔、日本物理学会第 78 回年次大会、東北大学、2023 年 9 月 17 日

環境中 I-129 の質量分析のための SI トレーサブルな よう素標準液の開発

氏名：浅井 志保

受入研究者：坂口 綾

1. 成果

【背景】福島第一原発では、ALPS 処理水の海洋放出が開始された。半減期 1610 万年の放射性よう素 I-129 は、処理水中に存在する可能性のある核種の 1 つで安全評価対象となっていることから、迅速測定が可能な ICP-MS を用いた分析法の整備が進められている。ICP-MS による I-129 の定量では、得られる測定値を国際的に認められる値とするために、I-129 の放射能濃度を認証値とする認証標準物質 (CRM) を用いて検量線法等により定量するのが望ましい。しかしながら、現状入手可能な CRM は、把握できる限り、NIST SRM 等の輸入品のみである。さらに、回収率補正に用いる「よう素標準液」は、質量分析用に値付けされた標準物質の供給がない。【目的と実験】ICP-MS の一般的な定量法である検量線法では、濃度既知の基準液を CRM 等から調製して測定し、計数率と濃度の関係を決定する。しかし、現状入手可能な I-129 の放射能濃度の認証値をもつ CRM は NIST SRM 4949d のみである。そこで、非放射性のよう素標準液 (I-127 天然存在度ほぼ 100%) を代替物質として用いれば、RI 管理負担や供給安定性の課題を解決できると考えた。本研究では、日本の国家計量標準機関である産総研 NMIJ が供給する高純度物質よう素酸カリウム (NMIJ CRM 3006-a) から I-127 標準液を調製し、検量線の基準とすることで I-129 分析結果の国際同等性を確保することを目指した。【結果と考察】NMIJ CRM 3006-a を原料物質として作成した I-127 標準液の「よう素」としての濃度は 682.91 mg/kg、拡張不確かさの相対値は 0.022% となり、十分に低い不確かさで調製できた。この I-127 標準液は、試料に近い濃度レベルまで希釈して検量線の作成に使用する。ところが、ICP-MS における感度が I-129 > I-127 となるため補正が必要となる。そこで、よう素同位体に近い質量数をもつテルル同位体 (Te-124, Te-125, Te-126, Te-128, Te-130 など) を測定して感度の違いの補正を試みた。テルル同位体は、酸素コリジョンモード (Xe-129 を除去) でも高感度かつ安定して測定が可能であったため、再現性よく質量差別効果補正係数を算出できた (Δm^2 で 0.974)。しかし、テルルとよう素は別の元素であるため、今後、NIST SRM の I-129 と I-127 を実測しモル比/計数率比を算出することで感度のずれ方が一致することを確認する計画である。

2. 論文

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

氏名：市村 晃一

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：岸本 康宏・千葉 健太郎

AZZI Louise, Adèle Marthe・高久 雄一

1. 成果

世界最高感度でニュートリノの出ない2重ベータ崩壊探索を行っている KamLAND-Zen 実験ではさらなる高感度探索のために検出器の極低放射能化を計画している。次世代 KamLAND2-Zen 実験では検出器材料としてポリエチレンナフタレート製シンチレーションフィルムや波長変換剤(Bis-MSB)などの有機物を用いる計画がある。それら有機物中に含まれる天然の極微量放射性核種による信号が妨害シグナルになることから 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の有機物中の放射性元素測定手法の確立を目的とし、2023 年度はこれまでに確立した器具の洗浄を含む測定プロセスによる検出下限の評価を行った。<測定プロセス> 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。<洗浄方法の確立> 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の灰化・溶液化に用いる石英ビーカーの洗浄を以下の手順で行った。(1)耐薬品性ドラフト内で電子工業用硝酸 1.5 mol/L に加熱しながら数日つけ置く (2)ビーカーを超純水ですすいだ後、超純水で加熱しながら数日つけ置く (3)ビーカーを超純水ですすぎ、使用直前まで 10 倍に希釈した TMSC 溶液につけ置く (4)使用直前にクリーンベンチ内において超純水ですすいだ後高純度硝酸 15.2 mol/L 1 mL をビーカーに加え、内部を洗うようにしてビーカーを振って洗浄する。(5)クリーンベンチ内で高純度硝酸 0.15 mol/L 2 mL を用いて同様に洗浄を 2 回行い、最後に超純水でよくすすぎ、クリーンベンチ内で乾燥させる。<ブランク試験> 上記手法で洗浄したビーカーを用い、乾式灰化と溶液化のプロセスのブランク試験を行った結果、238U や 232Th の検出下限は数 ppt であることが分かった。ICP-MS の装置自体の検出下限は 1.1 ppq (238U)および 8.1 ppq (232Th)であり、今後さらに実験環境のクリーン化を行うことでより微量の 238U、232Th 測定を可能にすることを目指す。

2. 論文

蛍光 X 線分析法を用いる環境水中の極微量ウラン，トリウム

および重金属元素の迅速定量法の開発

氏名：保倉 明子

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：高久 雄一・小川 颯士・所 雅人

1. 成果

環境水中のウランの定量法として、 α 線スペクトロメトリーや誘導結合プラズマ質量分析法が公定法として採用されている。極微量のウランから放出される α 線を検出するためには、環境水からの濃縮作業等に時間がかかる上、ウランは半減期が長い計測に長時間を要する。本研究では、環境水中のウラン、トリウムおよび重金属元素を、迅速簡便に定量する手法の開発を目的とした。環境水中において、これらは極微量で存在するため、分子認識型の吸着材を利用する固相抽出法と、偏光光学系を搭載したエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置を組み合わせ、迅速・簡便な定量法の実現に取り組んだ。超純水 1 L に、無機分析用混合標準液 XSTC-331 (Th, U など 29 元素を含む) を 0.1~1 mL 添加し、1~10 $\mu\text{g/L}$ の模擬水試料を調製した。試料水中の元素の濃縮には、セルロース繊維を基材とするキレート繊維吸着材 IRY CH-1(キレスト)を用いた。酢酸アンモニウム緩衝液で pH を調整した模擬試料水 1 L に、1 g の CH-1 を加えて 5~90 分攪拌した後、吸着材を回収して 60 $^{\circ}\text{C}$ で 24 時間乾燥させた。この固体粉末試料を試料カップに入れ、蛍光 X 線(XRF)分析に供した。偏光光学系エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置(Epsilon 5, Malvern Panalytical)において、二次ターゲット材 Al, Fe, Ge, Zr, Mo, CsI を選択し、測定時間を 600 秒として計測した。一方、溶液内の元素濃度を ICP-MS (Agilent 7700)で定量し、吸着材における捕集率を算出した。CH-1 は XSTC-331 に含まれる多くの元素を高効率で捕獲した。吸着は非常に速く、1 g の吸着材を用いて、溶存する 90 %以上を 30 分で捕集することが可能となり、固体吸着材で微量元素の 1000 倍濃縮が実現した。ただし、アルカリ・アルカリ土類金属元素および As, Se, Mo, Sb など陰イオンで溶存する元素については、捕獲率が 10 %以下となった。吸着材を XRF 計測し、各元素の検出下限値(計測時間 600 秒)を算出したところ、固体中において U は 0.01 mg/kg となり、これは溶液中では 0.01 $\mu\text{g/L}$ に相当した。また水道法で基準が定められている 11 元素のうち Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb について、基準値を計測するのに十分な検出下限値が得られた。今後は、水溶液中で陰イオンとして

溶存している元素を捕獲する吸着材を適用し、より多くの重金属元素の迅速定量法を確立する。

2. 論文

Masato Tokoro, Shi Zhiyuan, Isao Yamaji, Yuichi Takaku, Aya Sakaguchi, Akiko Hokura, Quantitative analysis of iodine and bromine in soil using an energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometer with three-dimensional polarized optics, *Analytical Sciences*, 10.1007/s44211-024-00541-7

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

氏名：ZHENG Jian

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：QIN Lin・青野 辰雄

1. 成果

Pseudo isotope dilution as an approach for quantification of Np-237 in environmental samples by ICP-MS Jian Zheng, Ning Qin, Tatsuo Aono Host researcher: Aya Sakaguchi Plutonium in the environment is a well-known tracer for contamination source identification and for study in biogeochemical processes of radionuclides. Another transuranic isotope, ^{237}Np ($t_{1/2}=2.14 \times 10^6$ y) also has great potential to act as a tracer since it has a similar behavior of ^{137}Cs . However, ^{237}Np has presented limited information in the environment due to its low-level radioactivity and great challenges for its analysis. The challenge for its analysis is mainly due to the lack of suitable Np isotope tracer for the quantification of ^{237}Np . The use of ^{242}Pu as a pseudo isotope dilution tracer has been proposed for quantification of ^{237}Np in environmental samples. However, due to the chemical property difference between Pu and Np isotopes, this approach often resulted in ca. 10 % lower recovery of Np than that of Pu, mainly caused by the chemical fractionation of Np and Pu during the sample pretreatment and subsequent chemical separation processes. Neptunium-237, owing to its long half-life ($t_{1/2}=2.14 \times 10^6$ y) and similar conservatism to ^{137}Cs , has the potential to replace ^{137}Cs for water mass circulation studies on decades and even longer time scales. A new method for the determination of ^{137}Cs , ^{237}Np , and Pu isotopes in seawater samples was proposed to solve the difficulty of ^{237}Np analysis in seawater. The developed method includes the separation technique of ammonium phosphomolybdate (AMP) adsorption for ^{137}Cs and anion exchange chromatography for ^{237}Np and Pu, measurement technique of gamma spectrometry for ^{137}Cs and SF-ICP-MS for ^{237}Np and Pu isotopes. ^{242}Pu as a pseudo isotope dilution tracer for Np, the negligible chemical fractionation between ^{237}Np and ^{242}Pu of 1.02 ± 0.06 ($k=2$) was obtained by implementing sophisticated control of the redox system and chromatographic elution optimization. The analytical results for the

International Atomic Energy Agency Certified Reference Materials (IAEA-443) agreed with the reference values, showing chemical yields of 65–88%, U decontamination factor above 10⁶ level, and improved sample throughput (5 days for 12 samples). Meanwhile, the lower method detection limits (MDLs) of ²³⁷Np, ²³⁹Pu, and ²⁴⁰Pu were 1.3 · 10⁻³, 0.065, and 0.15 μ Bq L⁻¹ for 15 L seawater, respectively. Results obtained by the developed method can be used to evaluate the impact on the marine ecological system of the planned marine discharge of Fukushima decontaminated wastewater. Working towards that purpose, we are the first to report the ²³⁷Np activity concentration in Pacific Ocean seawater sampled near the station site and we obtained the value of 0.122–0.154 μ Bq L⁻¹. Publication 1. S. Zhang, Z. Liu, G. Yang, J. Zheng, S. Pan, T. Aono, A. Sakaguchi (2023): Rapid method to determine ¹³⁷Cs, ²³⁷Np and Pu isotopes in seawater by SF-ICP-MS. Anal. Chem. 95, 16892-16901. 2. N. Qin, J. Zheng, G. Yang, K. Tagami (2024): A comprehensive survey of reference materials for their use in quality assurance for the determination of Np-237 in environmental samples. J. Environ. Radioact. 271, 107328.

2. 論文

Publication

1. S. Zhang, Z. Liu, G. Yang, J. Zheng, S. Pan, T. Aono, A. Sakaguchi (2023): Rapid method to determine ¹³⁷Cs, ²³⁷Np and Pu isotopes in seawater by SF-ICP-MS. Anal. Chem. 95, 16892-16901.
2. N. Qin, J. Zheng, G. Yang, K. Tagami (2024): A comprehensive survey of reference materials for their use in quality assurance for the determination of Np-237 in environmental samples. J. Environ. Radioact. 271, 107328.

ケイ酸バリウムを主成分とするストロンチウム吸着剤を用いた海水・陸水中の

低レベル放射性ストロンチウム測定法の研究

氏名：箕輪 はるか

受入研究者：坂口 綾

共同研究者：緒方 良至・小島 貞男

有信 哲哉・加藤 結花・杉原 真司

1. 成果

1. 成果 【背景と目的】 放射性ストロンチウム (^{90}Sr , ^{89}Sr) は、原子力施設の放射線モニタリングにおける重要な難測定核種である。これらは純ベータ線放出核種のため、放射能測定前に他の元素から分離する必要がある。従来の化学分離法は、煩雑で長時間の作業時間を必要とする。より簡便で迅速な化学分離法の開発が切望されている。我々はケイ酸バリウム (BaSi_2O_5) を主成分とするストロンチウム吸着剤 (ピュアセラム[®]MAq、日本化学工業社製) を用いた測定法の開発に取り組んでいる。メカニズムの推定から吸着剤ではなく吸着剤と称する。本吸着剤を用いた海水中放射性 Sr 迅速測定法を確立し、操作時間 5 時間程度で 0.6Bq L^{-1} の検出限界で測定できることを報告した (論文 1)。本研究ではこの手法を、より低レベルの放射性 Sr 濃度の海水試料に適用することを目的とした。【実験】 海水を 1M HCl 相当に調整し、Sr 吸着剤ピュアセラム[®]MAq とともに 4 時間攪拌したのち静置した。上清をデカンテーション除去したのち遠心分離により Sr 吸着剤を分離回収し、Y 担体を加え保管した。2 週間以上経過し ^{90}Sr - ^{90}Y の平衡到達後、Sr 吸着剤から Y を化学分離して回収し、低 BG ガスフローカウンタ (LBC-4601, Hitachi Co., Ltd) あるいは液体シンチレーションカウンタ (LSC-6100, Aloka Co., Ltd.) を用いて ^{90}Y の β 線を測定した。この Y の化学分離操作を、海水試料 100mL を出発物質とし、 ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{90}Y , ^{85}Sr トレーサーを添加して検討した。ピュアセラム[®]MAq を EDTA で溶解したのち HCl 酸性としてケイ酸塩沈殿を除去し、Y を Fe に共沈させ、陰イオン交換樹脂カラムを用いて Fe を除去し、Y を水酸化物沈殿として回収した。 ^{85}Sr による Sr 回収率の測定は、オートガンマカウンタ (2480 WIZARD2, Perkin Elmer Inc.) を用いて行った。【結果と考察】 Y の化学分離操作において、ケイ酸塩沈殿の生成に 12 時間以上の時間をかけることで Si, Ba を多く除去でき、また水酸化物沈殿生成の前に十分に沸騰させることで Fe への Y の共沈を促進させ、Sr 除去率および Y 回収率を上昇させることができた。Sr 除去率は 99.9%、Y

回収率は約 60%となった。今後の課題は、Y の回収率をさらに増加させること、Y と Sr とを短時間で分離すること、作業の簡略化および時間短縮が挙げられる。さらに大容量試料（5L）への適用を目指している。

2. 論文

1. 箕輪はるか, 緒方良至, 小島貞男, 有信哲哉, 加藤結花“ケイ酸バリウムを主成分とする Sr 収着剤を用いた環境水中の放射性ストロンチウムの迅速分析法” Radioisotope 投稿中

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・島村 蓮

田中 雅士・吉田 斉

1. 成果

[背景] 環境中性子は、地下実験室で進められている宇宙暗黒物質の直接探索実験やニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索実験において重要なバックグラウンドである。この環境中性子の直接観測には液体シンチレーター検出器が最適である。しかし、液体シンチレーター検出器の構成部材に含まれる放射性不純物からのアルファ線バックグラウンドのために、地下実験室の環境中性子の直接観測には未だ成功していない。[研究の目的] 本研究では、液体シンチレーター検出器の構成部材の中の放射性不純物含有量を測定し、アルファ線バックグラウンドの発生源を突き止める。そして、その部材をより放射性不純物含有量の少ない部材に交換することで、アルファ線バックグラウンドを1桁低減し、地下実験室での環境中性子の直接観測を実現したい。[方法] 2023年度は、液体シンチレーター検出器の構成部材のうち、液体シンチレーター中の放射性不純物含有量の低減を試みた。具体的には、液体シンチレーターの純化システムにパーティクルフィルターの一種である金属焼結フィルターを新たに加え、純化処理を行った。[結果] 上記の純化システムで液体シンチレーターを処理し、U系列の娘核である ^{214}Bi と ^{214}Po の連続崩壊を遅延同時計測でアルファ線バックグラウンド量を測定したところ、 ^{214}Po の崩壊頻度が1.2 mBqであった。金属焼結フィルター導入前の α 線バックグラウンド量も ^{214}Po の崩壊頻度で1.2 mBqであったため、金属焼結フィルターによってバックグラウンドを低減させることはできなかった。

2. 論文

カザフスタンのウラン鉱山近郊の大気中のエアロゾルの収集と測定

及び放射性微粒子の影響

氏名：星 正治

受入研究者：坂口 綾 ・ 恩田 裕一

1. 成果

本研究のグループは、1994年からカザフスタンのセミパラチンスク核実験場周辺で放射線被曝とその人の健康への影響に関する研究を行ってきた。その間、(1)土壌と水の汚染測定と線量測定研究を行い、(2)放射性微粒子の影響に関する動物実験が行い、放射性微粒子がラットの肺に与える新たな影響を発見した。そして、その影響は外部放射線の20倍以上であることが判明した。(3)ウラン鉱山地域のステップノゴルスク近くのアクス村では、建物内のラドン濃度が規制値を超えていることがわかった。今年度の調査研究と成果を以下に示す。(1)核実験場付近の放射線量の評価：この研究では、TL(レンガサンプルからの石英粒子による)およびESR(歯サンプルによる)線量測定データ、核実験時のアーカイブ線量データ、Cs-137の土壤汚染、を文献から収集した。そして、現在試験場周辺の村の住民の被曝線量を評価している。(2)放射性微粒子の研究：これまで $^{56}\text{MnO}_2$ を使用していたが、 ^{56}Mn はベータ線だけでなく、ガンマ線を多数放射するので、ベータ線だけの影響ではなかった。一方、 ^{31}Si はベータ線しか放出しないため、 ^{31}Si を初めて使用することにした。これにより、純粋な放射性微粒子の影響を観察できる可能性がある。 ^{31}Si は、 SiO_2 の数ミクロンの微粒子の粉末を、アルマトイの原子炉の熱中性子で放射化し生成した。そして、生成した $^{31}\text{SiO}_2$ をラットに1時間噴霧し、ラットの臓器の変化などをナザルバエフ大学、MRRC、広島大学などと共同で解析中である。(3)ラドン濃度などの測定：アクス村では、小学校と一般住民の住居でラドン濃度を測定した。空気中の粉塵もエアサンプラーで収集し、放射能と重金属を測定した。ラドン濃度の結果1は、調査地域全体で4~2000 Bq m⁻³の範囲であった(平均および標準偏差: 290 ± 173 Bq m⁻³)。また、アスタナでは、住居の19%でラドン濃度が推奨制限値の100 Bq m⁻³を超え、アクス村ではすべての住居がこの制限値を超えていることが分った。ラドン濃度は、100 Bq m⁻³増加するごとに肺がんのリスクが16%増加することが知られている。そのため、アスタナ市一部とアクス村では屋内ラドン濃度が高く、健康上のリスクを引き起こす可能性がある。したがって、ラドン濃度を低減するための何らかの対策が必要であると考えている。今後、この問題を協力者と一緒に考えていく。(1Tokonami, Omori et al. J Radiol Prot 43 (2023) 023501, doi.org/10.1088/1361-6498/acda41)。

2. 論文

高濃度放射性セシウム含有微粒子の化学的特性にもと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：杉本 侃駿・宮崎 加奈子

1. 成果

事故後 12 年経過し、除染等により環境中の放射能は大幅に低減してきたことから、帰還困難区域の一部解除が施行されてきています。現在残っている環境中の放射能は主に半減期が約 30 年のセシウム 137 によるもので、私たちの周辺や屋内においてその存在状態、分布を正しく知ることは、帰還をより安全なものにするために欠かせません。一方で通常は環境中に低い濃度で存在しているこの放射性セシウムが高濃度に濃集する直径数ミクロンの高濃度放射性セシウム含有微粒子（CsMP）がメルトダウンの時に大量に形成して、原発から環境中に放出されたことが分かってきました。PM2.5 と同じで見えないほど小さく、局所的に高い放射能を放つことからその分布が懸念されていますが、特に屋内に流入した粒子や沈積した粒子の数は分かっておらず、その定量的計測法の開発と建物内部での存在量や分布の解明が望まれていました。我々は、スタンフォード大学、ナント大学、ヘルシンキ大学、東工大、筑波大、国立極地研と共同で、福島第一原発から南西方向に約 2.8 km 離れた、事故後閉鎖されている小学校の建物内部を 2016 年に初めて調査して、独自で開発した手法を用いて廊下に残留する粉塵に含まれる高濃度放射性セシウム含有微粒子を定量することに成功しました。その結果、高濃度放射性セシウム含有微粒子が 1 平米から集められた粉塵中に 2,400 個以上含まれる場所、粉塵全体の放射能のうち約 39%がその微粒子由来の場所が存在しました。一方で、建物の外では微粒子由来の放射能が全体の 1.5%程度であることから、今回の結果は、事故時に放出されたセシウムの中に短い期間ですが多量の高放射性セシウム含有微粒子が含まれ、それらが建物の開閉状態によっては建物内部に流入して粉塵として残されることを示唆しています。今後は同様の手法を用いながら、帰還困難区域の建物内部にこの粒子がどの程度流入して、残留しているかを把握し、安心できる帰還につなげることが期待されます。

2. 論文

安価なドローンによる風況観測システムの精度検証

氏名：渡来 靖

受入研究者：中村 祐輔

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、無人航空機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)は環境動態・自然災害等の調査に利用されているが、気象観測の分野において、観測手法が確立しているとは言い難い。また、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。そこで本研究は、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、今年度は上空風況の精度検証に着目する。精度検証のための観測は、ドローンに小型の気象センサーを搭載し、地上から高度数 100m までを上昇・下降させることで実施された。観測は、2022 年 3 月において筑波大学放射線・アイソトープ地球システム研究センター観測圃場にて、2024 年 2 月においてエイブルスポーツ交流センタードローン練習場にて、それぞれ実施された。使用した UAV 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)、ドップラーライダーLR-S1D2GA (風向・風速; 三菱電機社製)、超音波風向風速計 FT205 (風向・風速; FT Technologies) が使用された。ドローンで観測された気温・湿度を観測圃場の鉄塔による観測データと比較した結果、ドローン-圃場の気温差が $+0.1^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度が $+0.3\%$ を示した。この差は、気温・湿度センサーの測定精度程度であるため、ドローンによる観測値が十分な精度を有していることを示している。一方、夜間の時間帯に限定すると、気温差が $+0.5^{\circ}\text{C}$ を示した。これは、ドローンによって生じる風が周囲の安定層を破壊したことで、気温が上昇したものと推測される。ドローンに搭載された超音波風速計の風向・風速をドップラーライダーによる風向・風速と比較した結果、ドローン-ドップラーライダーの風速差が $+0.9\text{m/s}$ 、風向差が -15.2° を示した。観測事例が少ないため、差の要因について十分な考察は行なえないが、超音波風速計のドローンへの搭載方法を改善する必要があると考えられる。以上のように、上記の検証を実施したことで、ドローンによる気象観測手法の一部が確立された。一方で、下記に挙げる課題も残されている。すなわち、ドローン自体が発生させる風の影響を低減させること、超音波風速計のドローンへの搭載方法である。今後は、このような課題を検証していくことで、ドローンによる気象観測手法の確立を目指す。

2. 論文

なし

赤城大沼湖水中セシウム濃度時間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・大高 郁斗

1. 成果

群馬県にある赤城大沼湖水中のセシウム濃度を長期予測できるモデルの開発が望まれている。筑波大学の羽田野教授らによって非整数階拡散方程式によってセシウムの濃度の時間発展に関する研究が進められている。一般的な拡散方程式とは異なり、非整数階拡散方程式は非整数の微分階数 α を持つ拡散方程式である。赤城大沼のセシウム濃度の計測データを非整数階拡散方程式にフィッティングすることで、 α の値が 0.625 と求められている。本研究では流体計算シミュレーションによって α の値を求めることで、セシウム濃度の時間発展が非整数階拡散方程式に従う素過程を解明することを目指す。赤城大沼では春と夏の二度、水の温度変化による密度変化によって水の循環が起こる。そこで、密度による水の循環を予測する流体シミュレーションを実施した。水の温度が 4°C であるときに水の密度は最大となる。春の循環では水面あたりの温度が 0°C 付近だが、夏に近づくにつれ水面が 4°C を超え循環が起こる。また、秋の循環では水面が 4°C を超えるが、冬に近づくにつれ水面が 4°C を下回り循環が起こる。以上のシミュレーションを行うために、流体計算ソフトである OpenFOAM を用いて、循環が起こらない期間では定常状態での計算を行い、循環が起きる期間では非定常状態での計算を行った。具体的なシミュレーションモデルとして、x 軸方向、y 軸方向、z 軸方向の長さがそれぞれ 700m (70 セル)、600m (60 セル)、16m (32 セル) の直方体形状の水槽を用意し水の循環を求めた。定常のシミュレーションモデルは、2 月、6 月、8 月、10 月の 4 つの温度分布を初期温度として用いて、それぞれを定常状態で計算した。また、3 月～5 月、11 月～1 月の二つの期間を時間変化を考慮して、温度分布を設定した。非定常のシミュレーションモデルの時間の刻み幅は 0.25 秒、シミュレーション時間は 80 万秒に設定した。初期の温度分布 (3 月、11 月) を初期温度として設定する。メッシュの上面と下面を最終の温度分布 (5 月、1 月) になるように 8 回に分けて変化させた (1 回当たり 10 万秒の計算)。計算した流速ば分布を用いて、 α の値を以下の方法で見積もった。1. シミュレーションを通して計算した z 軸方向の流速場 u_z を得る。2. 飛躍距離の確率密度関数であるガウス分布から飛躍距離 x を得る。3. xu_z から待ち時間 t を求める。4. 両対数軸にとった待ち時間 t のヒストグラムを作成し、傾きを計算して α を求める。この方法で求めた α は 0.0 程度の値となり、0.625 とは異なる値を得た。拡散項が入っていないこと、乱流が計算が不十分であること、湖の流入、流出が考えられていないこと、湖の形状が考慮されていないことなどの原因が考えられる。次年度以降はこれらの点を考慮した計算を目指す。

2. 論文

Pb-210 を用いた湖沼堆積物の年代決定と I-129・Cs-137 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: 8.38×10^{-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 の高解像度分析結果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】 能登半島の湖沼堆積物中の余剰 Pb-210 (Pb-210ex) 濃度は、表層から深度 30 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/cm²）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 g/cm²/yr（深度 0–7.5 cm）、0.0638 g/cm²/yr（深度 7.5–15.5

cm)、0.192 g/cm²/yr (深度 15.5–25.5 cm)、及び 0.0522 g/cm²/yr (深度 24.5–29.5 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 8.6–71.2 Bq/kg (試料採取日に壊変補正済) の範囲にあり、深度 22–27 cm 付近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 1966–1978 年に形成されたことが分かった。堆積物中の I-129 は 0.13–93.0 μBq/kg の範囲にあり、沈着量に換算すると 0.004–77.8 nBq/cm²/yr であった。I-129 沈着量は 1946 年以前において 0.004–0.025 nBq/cm²/yr と低いレベルであったのに対し、1946 年以降増加し、1978 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

Rodrigo Mundo, Tetsuya Matsunaka, Takuya Nakanowatari, Yukiko Taniuchi, Mutsuo Inoue, Hiromi Kasai, Kaisei Mashita, Hayato Mitsunushi, Nagao Seiya, A review of the oceanographic structure and biological productivity in the southern Okhotsk Sea, *Progress in Oceanography*, 194, 103194, 2023.

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

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・各種行動等に変異を誘発している可能性を明らかにするため、中深沢池(大熊町)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生クロレラの状態を調べ、実験室の同種と比較した。また、実験室の株を 50 mL のプラスチック遠心管に入れ、穴径 15 μm のナイロンメッシュで管口を塞いで池に一定期間放置し、回収後に、実験室の同じ株のゾウリムシと比較した。中深沢池の岸の高さ 1 m の空間線量は、2021 年度が約 25 $\mu\text{Sv/h}$ 、2022 年 10 月 15 日が約 19.9 $\mu\text{Sv/h}$ であった。2021 年度に中深沢池から採集した *P. caudatum* は採集直後の細胞分裂速度が低く、実験室で培養すると分裂速度が回復した。しかし、2022 年度は、この結果の再現性が得られず、細胞分裂速度は、栄養状態や温度の変化の影響が大きい可能性が示唆された。一方、同年度に中深沢池から採集した *P. bursaria* は、どの細胞も細胞内共生クロレラの密度が低く、さらに宿主の後方に偏って存在していた。そこで、2022 年度は実験室の *P. bursaria* (Yadag1N 株) を前述の特殊容器に入れて中深沢池に 48 日間沈め、影響を調べた。しかし、クロレラの状態に変化は無かった。したがって、2023 年度は、前年度より長期間の 65 日間沈め、共生クロレラへの影響を調べた。また、中深沢池から採集した *P. bursaria* の共生クロレラの状態を調べた。どちらの *P. bursaria* でも共生クロレラの密度の減少と宿主細胞後端部への偏在が誘導されていた。この結果は、環境放射線量が高いと共生クロレラの密度と細胞内局在性が変化することを示している。また、環境放射線の影響の有無を調査する初期段階の方法として、この方法が利用できることが示された。共生クロレラの宿主細胞内での位置の安定化は、クロレラを包む宿主由来の特殊な膜 (perialgal vacuole 膜、PV 膜) と宿主ミトコンドリアとの接着に依存するので、2024 年度以降は、この現象が環境放射線で誘導される原因の解明を行う。また、今後の調査には、年度ごとに中深沢池の空中放射線量が除染によって減少していることに考慮が必要となった。

2. 論文

土壌の放射性セシウムの植物利用に及ぼす有機物の影響について

氏名：信濃 卓郎

受入研究者：塚田 祥文

1. 成果

土壌の放射性セシウムの植物利用に及ぼす有機物の影響について 氏名：信濃卓郎 受入研究者：塚田祥文 共同研究者：望月杏樹 1. 成果 東京電力福島第一原発の事故に由来する放射性物質による農地の汚染からの回復は、除染とカリウム肥料による移行抑制対策が確立している。一方で、これまでの知見では有機物の投入量が多くなると土壌から植物への移行性が高まることが報告されることが多いが、その影響は有機物中に多く含まれるカリウムによる効果に基づくのか、あるいは有機物そのものの効果なのかについては判然としていない。その理由として土壌中の有機物と放射性セシウムの関係に加えて、土壌中のカリウムと放射性セシウムの動態が重要な要因であることが想定され、これを明らかにすることを目的として以下の試験を行った。福島県南相馬市内の畑作圃場において複数年にわたり堆肥の施与を行っている圃場を利用して、異なるカリウム施肥を組み合わせた大豆栽培を行った。また、ポット試験により伊達市のカリウム欠乏土壌を利用して堆肥とカリウムを組み合わせた試験を行った。土壌の交換性カリウム、全放射性セシウム、交換性放射性セシウム、植物体の放射性セシウムを分析し、植物への土壌から放射性セシウムの移行に関して解析を行った。得られた結果からは、移行係数と交換性カリウムの関係が堆肥の施与の有無によって明かに異なっていた。このことは、放射性セシウムの移行に対しての有機物の施与効果は交換性カリウムによる影響に加えて有機物そのものによる影響があることが明らかになった。さらに、有機物の画分を行ったところ、堆肥の施与によって放射性セシウムの交換性放射性セシウム割合が減少していることが示された。この知見は堆肥を活用する意義をカリウムによる効果のみではなく、放射性セシウムの動態に対しても影響を与えることを初めて明らかにした内容である。

2. 論文

Suzuki, M., Kubo, K., Hachinohe, M., Sato, T., Tsukada, H., Yamaguchi, N., Watanabe, T., Maruyama, H., Shinano, T. Effect of cattle manure compost application to the crop growth and transfer of cesium from soil to crops in the field physically decontaminated the radionuclides. Science of The Total Environment, 2024, 908, 167939. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167939>

機能性界面活性剤を用いた放射性物質汚染土壌の減容化

氏名：長谷川 浩

受入研究者：Ismail Md. Mofizur Rahman

共同研究者：Begum Zinnat Ara

1. 成果

【Research objective】 In soil environments, Cs-137 is typically tightly bound to finer-sized particles rather than larger ones, and this association with soil clay particles is resistant to removal through conventional remediation methods. Consequently, the separation of soil particles containing the majority of radionuclides from those with minimal or no radioactivity could be a valuable strategy for minimizing the volume of contaminated soils. This study investigates the impact of the surfactant sodium N-dodecanoyl-taurine (SDT) on reducing the volume of radioactive waste by facilitating the movement of fine particles adhered to larger ones. Furthermore, the research aims to evaluate the retention behavior of Cs-137 contents across various soil size fractions both before and after treatment with Milli-Q water (MQW) and SDT. 【Experimental】 Soil samples (collected at a depth of 0–10 cm) were obtained from Minamitsushima, Namie machi in Fukushima prefecture. Suspensions comprising 10 g of soil (with particle size <2 mm) with MQW or SDT were shaken for 16 h at 60 rpm and passed through sieves of 500, 212, 100, 53, and 0.45 μm sizes. The soil particles collected on the sieves were oven-dried at 50 ° C for 24 h, removed using a sieve brush, and dried at 105 ° C. The MQW- and SDT-treated samples were analyzed for Cs-137 activity concentrations in soil size fractions, and the impact of SDT as a dispersing agent was assessed. 【Results and discussion】 Treatment with MQW revealed that around 18% of the total soil content (within the < 2000 μm size range) contains 2.5% of the entire Cs-137 content. In the < 100 μm size fraction, the retention of Cs-137 was $79 \pm 1\%$ with MQW treatment, which increased to $83 \pm 1\%$ after SDT treatment. Dissolution of Cs-137 in the dispersant was minimal, accounting for $\leq 0.4\%$. The FTIR spectrum analysis of both untreated and MQW- and SDT-treated soils indicated comparable absorbance peaks for the representative functional groups, with variations in absorbance intensity.

2. 論文

- 1) M.A.A. Mamun, S. Hayashi, R.I. Papry, O. Miki, I.M.M. Rahman, A.S. Mashio, H. Hasegawa, Influence of different arsenic species on the bioavailability and bioaccumulation of arsenic by *Sargassum horneri* C. Agardh: Effects under different phosphate conditions, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 30, 98246-98260, 2023.08, DOI: 10.1007/s11356-023-29371-2
- 2) M.M.H. Rocky, I.M.M. Rahman, F.B. Biswas, S. Rahman, M. Endo, A.S. Mashio, K.H. Wong, H. Hasegawa, Cellulose-based materials for scavenging toxic and precious metals from water and wastewater: A review, *Chem. Eng. J.*, 472, 144677, 2023.09, DOI: 10.1016/j.cej.2023.144677
- 3) M.S. Alam, S. Fujisawa, M. Zuka, Y. Zai, A.S. Mashio, I.M.M. Rahman, K.H. Wong, H. Hasegawa, Cellular uptake and biotransformation of arsenate by freshwater phytoplankton under salinity gradient revealed by single-cell ICP-MS and CT-HG-AAS, *Environ. Chem.*, 20, 183-195, 2023.08, DOI: 10.1071/EN23041
- 4) S. Rahman, M. Saito, S. Yoshioka, S. Ni, K.H. Wong, A.S. Mashio, Z.A. Begum, I.M.M. Rahman, A. Ohta, H. Hasegawa, Evaluation of newly designed flushing techniques for on-site remediation of arsenic-contaminated excavated debris, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 30, 112052-112070, 2023.10. DOI: 10.1007/s11356-023-30140-4
- 5) S. Rahman, I.M.M. Rahman, H. Hasegawa, Management of arsenic-contaminated excavated soils: A review, *J. Environ. Manage.*, 346, 118943, 2023.12, DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118943
- 6) F.B. Biswas, M. Endo, S. Rahman, I.M.M. Rahman, K. Nakakubo, S. Mashio, T. Taniguchi, T. Nishimura, A. K. Maeda, H. Hasegawa, Recovery of rhodium from glacial acetic acid manufacturing effluent using cellulose-based sorbent, *Sep. Purif. Technol.*, 328, 124995, 2024.01, DOI: 10.1016/j.seppur.2023.124995
- 7) M.M.H. Rocky, I.M.M. Rahman, Y. Sakai, F.B. Biswas, S. Rahman, M. Endo, K.H. Wong, A.S. Mashio, H. Hasegawa, Enhanced recovery of gold from aqua regia leachate of electronic waste using dithiocarbamate-modified cellulose, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 26, 816-829, 2024.3, DOI: 10.1007/s10163-023-01824-3
- 8) S. Barua, K. Dewan, S. Islam, S. Mojumder, O. Sikder, R. Sarkar, H. Hasegawa, I.M.M. Rahman, Chemical composition, anti-oxidant and anti-microbial activities of Bangladesh-origin jhum cultivar basil (*Ocimum basilicum* L.) essential oil, *International Journal of Secondary Metabolite*, 10, 511-524, 2023.11. DOI: 10.21448/ijsm.1230316

福島県の淡水・汽水域におけるニホンウナギの放射能セシウム濃度と

その移動生態の関係解明

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・荒井 優志

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12年以上が経過しているが、淡水魚は海水魚に比べて今なお高い濃度で放射性セシウムが検出される。数年以内に活動再開を目指す福島県の内水面漁業にとって、この問題は大きな障害となっている。そこで本研究では、淡水域における食物網の上位魚種の一つであるニホンウナギの行動特性と放射性セシウム濃度の関係を探り、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。ニホンウナギの移動を調べるために、超小型の電子標識である PIT タグを使用した。日下石川において、電気ショッカーを用いて捕獲したニホンウナギ 655 個体（全長 95–709 mm、体重 1–679 g）に PIT タグを装着した。そして日下石川の感潮区間より上流の淡水域に PIT タグの受信機を設置し、長期間を見据えた移動モニタリングシステムを構築した。次に、昨年度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測定した結果、松川浦(1.1 ± 0.2 Bq/kg, N = 5)に比べて日下石川(5.4 ± 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、 $p < 0.01$ ）。今年度はサンプルを日下石川にて 11 個体を、松川浦にて 3 個体を更に追加し、分析中である。河川のニホンウナギの方が放射性セシウム濃度が高い理由は、海域に比べてセシウム濃度が高い陸域の餌を多く食べていること、海域では淡水域に比べてセシウムの排出が進む生理的メカニズムがあることが考えられる。

2. 論文

帰還困難区域内の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・長澤 和佳・脇 嘉理

1. 成果

目的 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高濃度放射性セシウム含有微粒子 (CsMPs) が検出された。当研究グループの調査から、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 濃度や分配係数の一時的な増加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。本年は福島県内の帰還困難区域内の森林、特に降雨における土壌侵食に伴う移動が考えられる谷間地形の土壌を対象に CsMPs の分布調査を行った。方法 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。土壌は表層 0-5cm の表土試料と 0-30cm 深さのライナー試料をそれぞれ採取した。採取土壌は乾燥後 (ライナー試料は所定の土壌深さでの切り分けも含む)、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 表層土壌を用いた調査地内の Cs および CsMPs の分布に関して、斜面最上部と比べ、斜面下部の河床付近の土壌では単位面積当たりの Cs 濃度および CsMPs 由来の Cs 濃度 (CsMPs 濃度) が低く、降雨時の増水に伴う侵食作用により Cs とともに CsMPs が流出していることが示唆された。また、ライナー試料の分析において、斜面上部で Cs 濃度の土壌内鉛直分布のピークこそ土壌表層にみられるが、CsMPs 濃度のピークは土壌表層と土壌 10cm 以深の両方にもみられる採取地も存在した。Cs の分布から同採取地は比較的土砂の堆積や攪乱を受けていないと推察されるため、この結果から、CsMPs は土壌間隙中を移動する、またはミミズ等の土壌生物の働きによって土壌下層に異動しうることが示唆された。なお、当該資料の CsMPs と思われる微粒子を走査型電子顕微鏡を用いて分析を行ったが、単離した粒子自体はマイクロ団粒内であり、ミミズ等の活動によってできた微小な団粒内に CsMPs が取り込まれていることが示唆された。

2. 論文

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

氏名：大木 淳之

受入研究者：高田 兵衛

共同研究者：出口 将斗

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 (I₂) 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。オゾン発生器により、大気中オゾン濃度と同程度のオゾン (20 ppb) 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。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 (CH₂I₂) 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。ジヨードメタンの発生総量は 0.9 pmol であった。実験に使用した自然海水には、無機ヨウ素のヨウ化物イオンが 100 nmol/L ほど、ヨウ素酸イオンが 400 nmol/L ほど含まれている。自然海水にヨウ化物イオンを添加 (+900 nmol/L) して同様の実験を行ったところ、ジヨードメタンの発生量が 3.8 pmol と顕著に増えた。海水中のヨウ化物イオンをオゾンが酸化してヨウ素分子が発生、そのヨウ素分子と溶存有機物の反応によりジヨードメタンが発生したことが考えられた。自然海水にヨウ素酸イオンを添加 (+4 μmol/L) して同様の実験を行ったところ、ジヨードメタンの発生量が 1.6 pmol 増えた。この結果は、海水中無機ヨウ素とオゾン反応によるヨウ素分子の発生に関して、海水中のヨウ素酸イオンが関与していることを示唆する。これは、海洋大気間のヨウ素循環に関する新たな反応プロセスを提唱することにつながる。放射性ヨウ素も、通常のヨウ素反応と同じに移動するので、今後、この新プロセスを解明する必要がある。また、本研究では、ジヨードメタン発生に海水中の溶存有機物がどのように関与しているのかを調べるため、人工海水に有機物を添加して同様の実験を行った。その際、実験室内から超純水に混入する揮発性有機物を除去する目的で、人工海水に UV-C を 30 分以上照射して有機物分解をする処理を施した。有機物フリーにした人工海水に、アルギン酸やクエン酸を添加したところ、クエン酸添加区ではジヨードメタン発生が確認された。しかし、その理由は明らかではない。今後、乳酸ナトリウムなど、有機物の種類を変えて、同様の実験を継続する予定である。

2. 論文

福島県前田川、高瀬川および猿田川における粒子態セシウム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：FAN Shaoyan・那須 康輝・福田 美保

1. 成果

福島県双葉町の十万山付近の空間線量率の低い地域を流域とする前田川と浪江町の比較的空間線量率の高い地域を流域とする猿田川と合流する高瀬川において河川水中の放射性セシウム（Cs： ^{134}Cs および ^{137}Cs ）濃度は、溶存態 Cs 濃度だけでなく、粒子態 Cs フラックスの影響が大きいことが明らかになっている。しかし粒子態 Cs の形態については十分に研究がなされていない。そこで空間線量率が異なる流域の形態別 Cs 濃度の季節変化について調査を行った。前田川、猿田川と高瀬川において季節ごとに河川水等のサンプリングを行い、河川中の放射性 Cs 濃度（溶存態および粒子態）のモニタリングを実施した。粒径毎の粒子態 Cs は分別濾過法等を行い、粒子態 Cs の化学形態も調査した。得られた結果より、Cs フラックス(MBq/month)を推定し、台風通過に伴う大出水時が発生した 2019 年の結果と比較を行い、経年変化を明らかにした。2021 年から 2022 年にかけて猿田川上流で Cs-137 の濃度とそのフラックス(MBq/month)は約 75%の減少が観測された。一方で、猿田川の中流で流入する沢水の Cs-137 濃度は 2023 年が 2021 年に比べて 5 倍ほど高くなった。下流の Cs-137 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もあった。2023 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。粒子態 Cs-137 濃度は、懸濁粒子（粒径:0.45-1 μm ）よりも小粒子（粒径:1 μm 以上）中の Cs-137 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 15%、有機態に約 30%の溶出が認められた。粒径 63 μm 以下の堆積物ではイオン吸着態に約 5%、有機態に約 15%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する。

2. 論文

原発事故周辺地域・高放射線環境下に生息するアカネズミ放射線損傷

修復遺伝子への影響解析

氏名：遠藤 大二

受入研究者：石庭 寛子

共同研究者：大沼 学・中嶋 信美

1. 成果

本研究では、アカネズミゲノムへの環境放射能の影響を調査することを目的として、Scaffold としてのみ報告されているゲノム上の遺伝子予測方法を開発した。Scaffold としてゲノムが報告されている場合の予測のための技術的背景は下記の 3 点となる。背景 1: 染色体レベルでのゲノム配列判明種はタンパク質およびゲノム上のエクソンが公開されているが公開レベルが Scaffold 段階の場合にはタンパク質も Scaffold 上のエクソンも公開されていない。背景 2: エクソン位置の推定方法は ①de Novo 遺伝子予測 と ②タンパク質との相同性検索 の 2 種の方法が存在する。背景 3: ①de Novo 遺伝子予測ではエクソン数の多いタンパク質は予測されないが、②ゲノムに対してエクソンに分割されたタンパク質との相同性検索は DNA のサイズが染色体レベルまで大きい場合には実行困難な場合が多い。一方、現状で可能な状況は、下記の通りである。①近縁のタンパク質情報判明種では、Scaffold 上のエクソン配列を高信頼性で予測可能である。②近縁種間では、エクソン構造はほぼ同じである。本研究では、これらの背景と状況を前提として、近縁のタンパク質情報判明種の情報を利用して Scaffold 上のエクソン配列を高信頼性で予測可能とする必要があった。本研究では、予測を行うために、下記の手順を確立した。①染色体 DNA データを分割(100 万塩基に分割-1 万塩基が重複)し、DNA の塩基配列をタンパク質をクエリとした tblastn 相同検索に対応するデータにした。②続いて、タンパク質情報判明種のタンパク質情報を利用するため、重複のないタンパク質セットを作出した。これは、基準種とできる種ではタンパク質アミノ酸配列情報に多数の重複が見られ、そのままでは利用できないためである。③登録タンパク質の重複を除くため、タンパク質のアミノ酸配列の相同性解析とクラスター化を実施した。④続いて、基準種の gff データに基づいて基準種のタンパク質をエクソン相当アミノ酸配列に分割した。これらの準備に基づいて、タンパク質データのゲノムに対する相同性検索を下記のように実施した。①エクソン相当アミノ酸配列をエクソンごとに分割したデータを作成した ②①をクエリ、適切な長さに分

割したゲノム DNA データをデータベースとする tblastn 相同性検索を実施した。③マウスとラットのような近縁種間で相同性検索の信頼性を検証した。結果として、基準種としてラットを設定した場合、上記手順①について、9.6 万件のタンパク質全長×9.6 万件のタンパク質全長→92.5 億件の blastp 相同性検索結果から 19866 件のクラスターを作出し、約 16 万件のエクソン相当アミノ酸配列を作成した。これらのデータでのタンパク質とゲノム DNA の tblastn による相同性検索を実施した結果、ラットタンパク質とラットゲノムでは、エクソン予測の正解率は 99.6%であり、ラットタンパク質とマウスゲノムでの予定の正解率は 88.6%であった。プログラム実行のための条件設定には 1 年間かかったが、結果的には、約 16 万件のエクソンと分割ゲノムデータベースによる tblastn を所要時間 6 時間程度で実行できるようになった。本研究の方法を用いることにより、アカネズミゲノムへの環境放射能の影響を調査することが可能となった。

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

2023 年度は、福島県双葉郡浪江町及び南相馬市で 2018 年に捕獲したアズマモグラ *Mogera imaizumii* 7 頭の下顎臼歯と、前肢骨（鎖骨または橈骨）の安定ストロンチウムと放射性ストロンチウム (90Sr) の濃度を表面電離型質量分析計で計測し、後者の前者に対する比（以下、放射性 Sr 比）を得た。上顎臼歯の摩耗状態から、捕獲個体を齢群 I（生後 1 年未満）、II（生後 1 年以上 2 年未満）、III（生後 2 年以上）に区分した。齢群 III の 1 頭を除く 6 頭の下顎臼歯と前肢骨の計測値の間には、安定ストロンチウム質量、90Sr 線量、90Sr 質量、放射性 Sr 比のいずれにも有意差は検出されなかった (Mann-Whitney の U 検定、 $P > 0.05$)。例数は少ないが、南相馬市と浪江町産の齢群 I 及び II の個体の前肢骨には Sr 濃度比の違いがほとんど見られず (南相馬市 (N=6) : $3.32 \pm 0.68 \times 10^{-11}$; 浪江町 (N=2) : 4.05×10^{-11} , 4.94×10^{-11})、一方浪江町産の齢群 III の個体はそれらよりも高い Sr 濃度比 (11.2×10^{-11}) を示した (* 平均 ± 標準誤差)。放射能汚染地において高齢のモグラが高い Sr 濃度比を示すのは、その環境下において多くの 90Sr が存在し、高齢個体の体内において、より蓄積が進んでいるためである可能性がある。浪江町では 2014 年以降齢群 I に相当する個体の捕獲が減少しており、繁殖活動の低下が示唆されるが、今後分析個体数が増加し、特に南相馬市産の齢群 III、浪江町産の齢群 I の個体が追加されていけば、この傾向がより明確になるものと予想される。一方、これまでに富山大学のゲルマニウム半導体検出器で測定していた当該個体の筋肉中の放射性セシウム濃度 ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) には、齢群による Sr 濃度比ほどの違いがなく、むしろ南相馬市-浪江町間で顕著な差が見られた (南相馬市: 17.92~26.68 Bq/kg; 浪江町: 269.15~324.21 Bq/kg)。両地域間には土壤中放射性セシウム濃度に大きな違いがあり、浪江町がより高い。体内に長期にわたって蓄積せず、常時摂取と排出を繰り返すセシウムにおいて、環境中の濃度がアズマモグラ体内の濃度に強く反映していると考えられる。アズマモグラの捕獲された地域や齢群に関わりなく、両地域のモグラ筋肉中放射性セシウム濃度と放射性 Sr 比には弱い正の相関がみられた (Spearman の順位相関係数: 0.25)。アズマモグラの捕獲場所の放射性 Sr 比の値はまだ断片的にしか得られていないが、汚染源が同一であるため、基本的に放射性 Cs 汚染の進んだ環境下では放射性 Sr 比も高い傾向があると予想されるので、今後アズマモグラの捕獲場所での土壤中の放射性 Sr 比の測定が進めば、この傾向もより明らかになるであろう。

2. 論文 分析の途中であるため、該当なし。

2. 論文

分析の途中であるため、該当なし。

環境中ラドンによる放射線施設監視モニタの感度確認 5 :

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・大森 康孝

共同研究者：向 高弘

1. 成果

【緒言】 屋内のラドン (^{222}Rn) 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 100 Bq m^{-3} あたりの肺がんリスクが 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 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、ピコラドの屋内ラドン濃度のスクリーニング器としての有効性は確立されていない。一方、食品中の有害物質に対してはスクリーニング法[3-5]が示されている。そこでは、横軸に基準値、縦軸に検証値を取り、回帰曲線とその 95%予測区間を求め、基準値が決定限界である時の 95%予測区間の下限値の検証値をカットオフ値として算出している。カットオフ値は、決定限界を確実に下回ると判断できるサンプルを選択するために使用される値である。この方法をもとに、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 (Bq m^{-3}) とした。曝露したピコラドに、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.) で 60 分間測定した。4 本のピコラドから平均ラドン濃度を求め[6]、検証値 C (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にある 32%–74%に調節し[7]、計 24 回実験 ($48\text{--}114 \text{ Bq m}^{-3}$) した。ラドン濃度の基準値を横軸に取り、本実験による検証値を縦軸として相関散布図を作成し、回帰曲線と 95%予測区間を求めた。検証値が 100 Bq m^{-3} (WHO 参考レベル) のとき、基準値の

範囲は 99–121 Bq m⁻³ のため、100 Bq m⁻³ を超える可能性がある。本実験で求めた検証値の 95% 予測区間を用いて、基準値 100 Bq m⁻³（決定限界）の時、カットオフ値は 83 Bq m⁻³ であり、さらに検証値が 83 Bq m⁻³ のとき、基準値の範囲は 79–100 Bq m⁻³ で、100 Bq m⁻³ を超える割合は 5% に減少した。結論として、PicoRad のカットオフ値はこの値の切り捨てにより 80 Bq m⁻³ となった。ピコラドは、カットオフ値を 80 Bq m⁻³ として判定すれば、WHO 参考レベルの屋内ラドン濃度をスクリーニングするための測定器として、有効であることがわかった。【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] Commission Regulation (EU) 2017/771 of 3 May 2017 amending Regulation (EC) No. 152/2009 as regards the methods for the determination of the levels of dioxins and polychlorinated biphenyls. *OJ L 115*, 4.5.2017, pp 22–42 (2017). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/771/oj>（閲覧：2024年3月21日） [5] United States Department of Agriculture Food Safety and Inspection Service. Office of Public Health Science. Screening for pesticides by LC/MS/MS and GC/MS/MS, April 2022. CLG-PST5.08. (2022). [6] Wakabayashi, A., et al., 2019. *Radioisotopes* 68, 317–329. [6] 川本他. In: *Proceedings of the 24th Workshop on Environmental Radioactivity* 90–97 (2023)

2. 論文

Yasuoka, Y., Takemoto, J., Omori, Y., Kawamoto, N., Goda, N., Nagahama, H., Muto, J., Tokonami, S., Hosoda, M., Iimoto, T., Mukai, T., Practical cut-off value for radon concentration in indoor air using an activated-charcoal radon collector, *Radiation Protection Dosimetry*, 2024 (in press) (P-23-29)

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

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、ニホンザル、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)、4Gy (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 4Gy 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と DNA 二重鎖切断のマーカである γ H2AX の免疫蛍光染色を行い、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、および γ H2AX フォーカスの細胞あたりの数に差は見られなかったが、4Gy 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と γ H2AX フォーカスが誘導された。また、エクソソーム中にミトコンドリア DNA (mtDNA) が増加することが判明したため、エクソソームに mtDNA の断片 (ND1, および ND5) を封入したものを作成し、対照群として核 DNA の断片 (SLCO2B1, および SERPINA1) を封入したものを作成し、ヒト細胞に処理したところ、mtDNA 断片を処理した群でのみ、 γ H2AX フォー

カスが誘導された。最後に、このエクソソーム中 mtDNA がヒト以外の細胞でも放射線照射によって増加するかを検討したところ、4 Gy X 線照射によって、ヒト細胞、アカネズミ細胞は増加するものの、ニホンザル、アライグマ細胞では mtDNA の増加は確認できなかった。放射線被ばくによるバイスタンダー効果を誘導する因子として mtDNA に着目したが、mtDNA がバイスタンダー因子であるか否かは種によって異なる可能性があることが判明した

2. 論文

被災アカネズミの精子形成能評価における放射線高感受性バイオマーカーの検索

氏名：山城 秀昭

受入研究者：三浦 富智

1. 成果

放射線は、DNA 損傷だけでなく、エピジェネティック、細胞—細胞間の相互作用、適応応答などの影響があることが報告されている。しかし、精子形成における放射線感受性が高い遺伝子が存在するのか明らかにされていない。これまで ERAN の助成を受け、被災アカネズミ精巢を用いて、精子形成に関連する遺伝子の発現を RNA-seq 法により網羅的に解析した。その結果、被災アカネズミの繁殖期精巢では、Lsp1, Ptpk, Tspear の発現量が、非繁殖期精巢においては Fmo2 が、対照区のそれら値に比較して有意に変動していたことを明らかにした。本研究では、被災アカネズミにおける精子形成能評価にこれら遺伝子が放射線高感受性バイオマーカーになり得るか否かを検討することを目的として、本年度では、対照のアカネズミ精巢を用いて選定した遺伝子に対するプライマーセットの有効性を RT-PCR にて検討した。その結果、RNA-seq 解析から得られた Lsp1, Ptpk, Tspear および Fmo2 の精子形成に関連する遺伝子に対するプライマーセットの有効性が確認された。今後は、被災アカネズミ精巢を用いてこれら遺伝子が精子形成能の放射線高感受性バイオマーカーになるか RT-PCR および q-PCR にて継続して検討する。

2. 論文

エピジェネティクス解析を利用した放射線影響評価系の開発

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

福島第一原発事故以降、放射線に感受性の高い子供や次世代への低線量慢性被ばくの影響に関しては依然として社会的な関心が高い。高線量放射線による配偶子形成および胚発生過程については明らかになっているが、低線量慢性被ばくあるいは放射線による損傷を逃れた生殖細胞の配偶子形成や受精・発生能に関する分子メカニズムは不明である。近年、放射線は、DNA 損傷だけでなく、エピジェネティックな変化を誘導することが報告されている。これまでの研究成果から、放射線汚染地域に生息するノネズミの精巣では遺伝子発現に変化が認められ、一方、低線量率連続照射したマウス精巣においてグローバルな DNA メチル化パターンが変化していることを明らかにしている。以上のことから、放射線が生殖細胞に影響を与える可能性があることを示唆している。エピジェネティックな変化の一つである DNA メチル化は、生殖細胞形成、受精、発生、分化過程に関与するため、継世代影響にも重要である。本年度は、低線量慢性被ばくにおける精巣のエピジェネティックな変化を捉えるための適切な評価法を検討する。放射線によるエピジェネティックな変化が生じている原因を探るため、DNA のメチル化に関与する遺伝子 Dnmt1、Dnmt3A、Dnmt3B、ヒストンのメチル化に関与する遺伝子 Wdr5 について、定量的 PCR を用いて遺伝子発現量を解析した。さらに、DNA のメチル化を評価するために遺伝子発現に影響する転写調節領域におけるメチル化頻度の測定として MSRE-qPCR が適用可能かどうか検討した。その結果、低線量放射線によって、DNA のメチル化、ヒストンのメチル化に関与する遺伝子の発現量が変わることが明らかになった。また、メチル化感受性制限酵素を利用した MSRE-qPCR と定量的 PCR の結果、Sox9 のプロモーター領域におけるメチル化頻度は、LDR で有意に減少し、Sox9 の遺伝子発現が有意に上昇していた。今後、プロモーター領域における DNA メチル化パターンの解析について検討したい。

2. 論文

Uemura I, Takahashi-Suzuki N, Kuroda S, Kumagai K, Tsutsumi Y, Anderson D, Satoh T, Yamashiro H*, Miura T*, Yamauchi K, Nakata A*, Uemura I, Takahashi-Suzuki N, Kuroda S, Kumagai K, Tsutsumi Y, Anderson D, Satoh T, Yamashiro H*, Miura T*, Yamauchi K, Nakata A*. Effects of low-dose rate radiation on immune and epigenetic regulation of the mouse testes. Radiation Protection Dosimetry (in press).

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

野生キノコの放射性セシウム濃度の測定 木野康志(A)、山下琢磨(B)(A)、三浦富智(C)
(A) 東北大学・理学研究科、(B) 東北大学・高度教養教育・学生支援機構、(C) 弘前大学、被ばく医療総合研究所 1. 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13年以上経過し、多くの混乱は収束してきたが、自生キノコの汚染は続いている。宮城県内でも、栗原市、大崎市、登米市、気仙沼市、南三陸町、仙台市、村田町で自生キノコの出荷制限が2023年10月10日現在も続いている[1]。我々は、仙台キノコ同好会と共同で、宮城県内の野生キノコを2011年から継続的に採取し、汚染の動向を調査している。同一日に同一場所で採取された同じ種のキノコを1検体とすると、これまでに4,411検体、近縁種などを含めないとすると、612種の野生キノコを採取した。平均すると、年間300検体に対して、200種の野生キノコが採取されている。毎年、およそ10種の新しい種の野生キノコが採取され、毎年同じ場所で採取される野生キノコもあれば、何年か毎にしか採取されない野生キノコもある。このため、種毎に分けると年次変化を追うには統計が足りない。そこで、地域毎に放射性セシウム濃度の頻度分布の年次変化を議論する。地域は、文部科学省の2011年7月2日航空機サーベイにより測定された線量マップ[2]中の汚染レベルの区分にしたがって、3つのグループ、「仙台近郊里山」、「宮城県北部・中部山地」、「県南部山地」に分けた。「仙台近郊里山」は、空間線量率が2011年7月2日現在で0.1 $\mu\text{Sv/h}$ 以下で、宮城県内で比較的放射性セシウムの沈着が少なかった地域である。「宮城県北部・中部山地」は、0.1 $\mu\text{Sv/h}$ 以上 0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 以下で放射性プルームが山間部に達した時降雨により放射性セシウムが沈着したと考えられる地域である。「県南部山地」は、0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 以上の宮城県内で比較的沈着量が多かった地域である。 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(HPGE)を用いた。HPGE の周囲は、天然の放射線を遮蔽するため厚い鉛(厚さ 10-15 cm)、銅(同 1 cm)、鉄(同 5 cm)、アクリル(同 1 cm)の板(放射線により生じる遮蔽体からの特性 X 線を効率よく遮蔽するため内側を低原子番号にする)で囲った。これにより、天然の放射線によるバックグラウンドの強度が 2 桁減少したが、遮蔽体の重量は 1 t 近くになる。

3. 結果と考察 2011 年から 2023 年までに採取されたキノコの放射能の値の範囲を、採取区分地毎にまとめて、年毎の推移をみると、中央値は仙台近郊以外の場所では依然として一般食品の基準値の 100 Bq/kg を超えていた。また、中央値の変動は、物理学的半減期による減衰をのぞくと、ほぼ一定の値となった。また、13 年間の推移や地区毎の汚染の傾向について、仙台市教育委員会主催のキノコ展のなかの講演会で市民に伝えている。野生キノコの放射性セシウム濃度はバラツキが大きく、一本一本を見ると偶々高い数値を示す個体もありえる。これがマスクミに取り上げられ騒ぎになることがあるが、大きくの検体を測定したデータから実際の汚染の影響をわかりやすく伝える活動をしている。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

1. “Estimation of external dose for wild Japanese macaques captured in Fukushima prefecture: decomposition of electron spin resonance spectrum”, Yusuke Mitsuyasu, Toshitaka Oka, Atsushi Takahashi, Yasushi Kino, Kenichi Okutsu, Tsutomu Sekine, Takuma Yamashita, Yoshinaka Shimizu, Mirei Chiba, Toshihiko Suzuki, Ken Osaka, Keiichi Sasaki, Masatoshi Suzuki, Manabu Fukumoto, Hisashi Shinoda, Radiat Prot Dosimetry 199, (2023) 1620-1625. 1. 尾田晃平、光安優典、山下琢磨、木野康志、奥津賢一、関根勉、高橋温、篠田壽、イメージングプレートを用いた試料中放射性核種推定法の開発、KEK Proceedings (第 24 回「環境放射能」研究会 Proceedings), 2023 (2022) 115-120.

環境放射線に関するリテラシーの醸成に資する教育戦略

氏名：飯本 武志

受入研究者：赤田 尚史

1. 成果

大規模な原子力災害のみならず、原子力施設や放射線施設での事故トラブル情報により、そのリスクレベルに必ずしも相応しない不安をいだき、反応してしまう人々が多く存在する事実を、我々は過去の国内外での長い原子力・放射線の利用の歴史で経験してきた。その原因のひとつに、放射線リテラシーの不完全さがあるとも指摘されている。本研究では、安定的な環境放射線リテラシーを構築するための手段のひとつとして学校教育に着目し、我が国のみならず、国際的な視点での放射線教育に関する実践戦略を検討し、その効果を分析した。具体的には、アジア・太平洋地域諸国の協力を得て、中等学校における放射線教育の実施状況を調査し、この地域全体としての特徴のみならず、各国別の特徴にも着目して整理することを試みた。特に、教員側の放射線に関する知識、興味や意欲、実際に授業で扱った教育項目に加え、生徒側の放射線に対する授業前後の知識や理解度、印象等の変化をアンケート調査し、何が生徒の心を動かし、放射線に関する教育効果を高める条件になり得るかについて重回帰分析、ウィルコクソンの符号付順位検定、クラスター分析等を駆使し考察した。これまでのフィリピン、マレーシア、インドネシアの中等学校放射線教育の実施実態調査及びアンケート調査の解析によれば、特筆すべき結果として、「放射線」という語や関連の学習に関して教師側が特定の感情を強く持ちすぎると、生徒の心が離れ、学習動機が低下する傾向が有意にみられた。

(論文) 1. Ai SHUHARA, Ayako MORIMOTO, Jo NAKAYAMA, Rumiko HAYASHI, Ryuta TAKASHIMA, Takeshi IIMOTO. STEAM Educational Development of Risk Management Education Framework for Secondary School Students. *Jpn. J. Health Phys.* 2023; 58 (1): 5-9. 2. Hiromi Koike, Takao Kawano, Takeshi Iimoto. Estimation of Radiation Field Produced by a Coin-shaped Naturally. *Radiation Environment and Medicine.* 2023;12(1) :74-79. 4.

2. 論文

山形蔵王の樹氷に含まれている鉛-210の動態

氏名：柳澤 文孝

受入研究者：赤田 尚史

共同研究者：岩田 尚能

1. 成果

^7Be は大気上層（成層圏）に存在する酸素（O）および窒素（N）が宇宙線による核破碎反応によって生成される放射性核種である。冬季の蔵王（図1）の1600m以上に存在している樹氷（Ice Monster）には ^7Be が含まれている。 ^7Be は圏界面ギャップから対流圏に降下し、大気の流れによって蔵王に飛来したと考えられる。冬季（11月～翌3月頃）に山形県蔵王にある蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅前（標高1661m）の立入禁止用ロープに付着した着氷を採取した。試料を自然融解させ、前処理を行ってから ^7Be を測定した。地上・高層天気図や人工衛星MODIS画像、気象データ、流跡線解析、等温位面解析などを用いて ^7Be の飛来経路、飛来する気象条件について考察した。

(1) ^7Be が高濃度(14 Bq/L以上)の場合 バイカル湖付近に高気圧が存在している。バイカル湖の北側に伸びている流跡線が多い。(2) ^7Be が中濃度(8~14 Bq/L)の場合 バイカル湖付近に高気圧が存在している。バイカル湖の南側に伸びている流跡線が多い。流跡線の始まりが高気圧の北側の方が圏界面ギャップに近い。また、高気圧における風は時計回りになっていることから、流跡線の始まりが高気圧の北側の方が ^7Be 濃度の高い空気塊が蔵王に飛来しやすいと考えられる。(3) ^7Be が低濃度(8 Bq/L未満)の場合 バイカル湖付近に高気圧が存在しておらず、成層圏から供給される ^7Be が活発でなかった。バイカル湖付近まで伸びている流跡線が少なく、バイカル湖付近の ^7Be 濃度の高い空気塊が蔵王に運搬されていない。海洋上で高度が低下する流跡線が多いことから、運搬されてきた ^7Be が途中で海に落下したなどが考えられる。

2. 論文

山形蔵王の樹氷に含まれているベリリウム-7の動態

氏名：岩田 尚能

受入研究者：赤田 尚史

共同研究者：柳澤 文孝

1. 成果

地殻中にある ^{238}U が壊変して ^{222}Rn となり、 ^{222}Rn が壊変して ^{210}Pb となって大気中に拡散する。一方、寒冷前線による上昇気流によって、中国北部やモンゴル南部といったアジアの乾燥・半乾燥地帯(沙漠地帯)で砂嵐が生じる。大気中に拡散した ^{210}Pb は黄砂に付着して、黄砂と共に大気中を移動することになる。過冷却水滴と雪が高度 1600m 以上(自由大気層)にあるオオシラビソの上で一体化して大きな氷の塊となったものが樹氷(Ice Monster)である。樹氷には ^{210}Pb が含まれている。山形県蔵王にある蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅前(標高 1661m)の立入禁止用ロープに付着した着氷を採取した。主要・微量化学組成、 ^{210}Pb 、ベリリウム-7、トリチウム、水素・酸素同位体の測定を行った。後方流跡線解析・人工衛星 MODIS 画像を用いて ^{210}Pb を含む黄砂の移動過程・移動条件を検討した。(1) 高濃度の場合、乾燥域付近を低気圧が通過することで地上では砂嵐が発生して上空では黄砂が観測される。大気塊の移動中に雲が無いことから降雪の影響を受けていない。(2) 中濃度の場合、乾燥域付近を低気圧が通過することで地上では砂嵐が発生して上空では黄砂が観測される。大気塊の移動中に雲があることから、黄砂の一部が蔵王に着氷する前に降雪と共に降下したと考えられる。(3) 中濃度の場合、乾燥域付近に高気圧が存在しており、地上では砂嵐が発生して上空では黄砂が観測される。大気塊の移動中に雲が無いことから、降雪の影響を受けていないと考えられる。(4) 低濃度の場合、大気塊が乾燥域を通過していない、あるいは、大気塊が乾燥域を通過しているが黄砂が発生していないなどが考えられる。

2. 論文

福島県浜通り地域における降水の同位体組成に関する研究

氏名：栗田 直幸

受入研究者：赤田 尚史

1. 成果

気圏-水圏環境における物質の動態を明らかにするためには、輸送媒体である水の挙動、循環過程を書きらかにすることは重要である。福島県浜通り地域では原子力発電所事故に起因する放射性物質濃度に関するデータは数多く公表されているが、水の同位体組成については十分とは言えない。本研究では、福島第一原子力発電所に比較的近い浜通り地域において月間降水を採取し、その水素・酸素同位体組成を明らかにすることを目的とした。福島第一原子力発電所の北側に位置する浪江町と南側に位置する富岡町において月ごとに降水試料を採取する。採取された試料を実験室に輸送し、pH、EC、水素・酸素安定同位体比、トリチウムおよび主要イオン成分の測定を行う。トリチウムについては、濃度が低いことが予想されることから、濃縮操作を行った後に測定した。ここでは津島地区で採取された月間降水のトリチウム濃度を示す。福島第一原子力発電所事故から約1年半経過した2012年10月から2021年12月までの月間降水中トリチウム濃度は0.10 - 0.85 Bq/Lの範囲であり、春季に高く夏季に低くなる季節変動傾向が認められた。2013年から2021年の年平均濃度は0.39 - 0.48 Bq/Lであり、日本で観測されるバックグラウンド濃度と同程度であった。

2. 論文

Indoor Environment Radiation Assessment and Radiation Protection in Veterinary Hospitals

氏名：岩井 敏

受入研究者：細田 正洋

共同研究者：飯本 武志・小池 弘美・WANG Xueqing

1. 成果

愛玩動物は人間社会における家族の一員としての側面が強いことから、放射線防護の対象としては国際放射線防護委員会（ICRP）が勧告する「ヒト以外の生物種」の枠組みに収まるはずはなく、また、獣医療における計画的な被ばくや、原子力災害時の環境汚染に巻き込まれてしまうような緊急時の防護の考え方の整理もない。本研究の究極の目標は、愛玩動物に関連した放射線防護システムを構築し、社会実装プロセスを想定した課題を具体的に整理し、その解決のための選択肢を明らかにすることにある。研究実施初年度の令和 5 年度は獣医療環境に着目し、患者としての愛玩動物等や彼らを取りまくステークホルダー（医療従事者等）の放射線防護に関して、特に彼らの被ばく線量や周辺環境の線量分布の実態を明らかにするプロセスに着手した。具体的には、国内の獣医療関係者へのヒアリングを通じて本研究の設計を強化し、動物病院施設の体系を完全に復元した現場を用意し、エックス線装置や CT 装置利用時の周辺環境と関係者の放射線量を実測すると共に、放射線輸送計算コード PHITS によりモデル解析をする環境を整えた。これに基づき、次年度以降に獣医療環境における被ばく対象者や周辺環境の放射線量を実測すると共に、モデル解析の検討を進める。また、診療上に役立つ防護具や治具の開発、ALARA を推進するためのステークホルダーへの新しい教育モジュールと教材（動画や VR の導入等も検討の対象とする）の開発なども想定して、研究計画をより具体化していく。

2. 論文

1. Kazuji Miwa, Takeshi Iimoto. A Source-Related Approach for Discussion on Using Radionuclide-Contaminated Materials in Post-accident Rehabilitation. *Journal of Radiation Protection and Research*. 2023;48(2):68–76.
2. 嶋田和真, 永井晴康, 橋本周, 飯本武志. 特集 1F 事故の教訓と課題 III 1F 事故の教訓を踏まえた原子力防災の在り方. *日本原子力学会和文誌 (ATOMZ)*.

3.五十嵐悠、榎本敦、小嶋光明、小田啓二、高橋賢臣、飯本武志. 日本保健物理学会「エックス線被ばく事故検討 WG」活動報告—第 1 分科会 エックス線利用上の安全規制と現場管理—. Jpn. J. Health Phys. 2023;58 (3):141-150. 4.高橋康幸 監修、飯本武志 (担当:共著). 放射線安全管理学. 南江堂 2023 年 11 月 5 日. ISBN978-4-524-20394-9.

太平洋における海水中 Be 同位体の分布

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}Be ($1.36 \times 10^6 \text{y}$) は短半減期放射性核種 ^7Be (53.35d) 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。我々はこれまで太平洋の洋上大気において ^7Be , ^{10}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 ^7Be , ^{10}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}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 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}Be は安定同位体 ^9Be 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 ^9Be , ^{10}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°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 ^9Be , ^{10}Be 濃度の鉛直分布測定を行う。 ^{10}Be は海水 (250/20 L) 採取時に Be 担体 (2/0.5 mg) を加え鉄共沈により回収し、Be の分離精製後、東大 MALT において ^{10}Be -AMS 測定を行う。 ^9Be 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 ^9Be 濃度測定を行う。現在、 ^{10}Be 濃度測定は概ね終了しており、今年度は海水試料の脱塩・濃縮過程において溶離液の加熱濃縮過程を省略する手法を確立して ^9Be 濃度測定を行った。北部北太平洋 47°N における 2012 年 (KH-12-4 BD09, 11, 14: $171^\circ\text{E}, 180^\circ\text{E}, 170^\circ\text{W}$) および 2017 年 (KH-17-3 CL02, 04, 05, 07: $160^\circ\text{E}, 175^\circ\text{E}, 170^\circ\text{W}, 160^\circ\text{W}$) の 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。 ^9Be , ^{10}Be の鉛直分布は表層以外はほぼ同じであり、 ^9Be 濃度 ($\times 10^{10} \text{atoms/cm}^3$ 又は $\times 16.6 \text{pM}$)、 ^{10}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 ~ 1 、その後ほぼ直線的に増加し 5000m 以深で共に ~ 2 であった。 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ($\times 10^{-7} \text{atom/atom}$) は 2000m 以深で、BD09, 11, 14: 1.10, 1.12, 1.07, CL02, 04, 05, 07: 0.93, 0.91, 0.94, 0.97 とおおむね一定であり、北太平洋 ($25.0^\circ\text{N}170.0^\circ\text{E}$) における文献値 1.23 ± 0.10 [1] に近い値が得られた。[1] M.Kusakabe et al., EPSSL, 82(1987)231-240

2. 論文

二枚貝貝殻を用いた遡及的放射性核種モニタリング手法の確立

氏名：杉原 奈央子

受入研究者：田副 博文

共同研究者：白井 厚太郎・山田 正俊

1. 成果

2011年に発生した東電福島第一原発事故によって放出された放射性核種は未だ環境中に残留しているものの、そのモニタリングの時間解像度には制約がある。これを解決するために生物硬組織による遡及的環境モニタリングが有効である。特に ^{90}Sr は水溶性が高く、炭酸カルシウムで構成される貝殻に取り込まれやすい性質を持ち、半減期も28.79年と長いことから、データの空白期間である事故から数ヶ月後の濃度変遷も解明できる可能性がある。本研究では二枚貝貝殻中の放射性・安定ストロンチウム濃度を指標とすることで、環境中の放射性核種の動態を復元する手法の確立を目指す。今年度は2015年6月に福島県内の河川で採取したカワシンジュガイ2個体を分析に供した。貝殻を次亜塩素酸Naで1時間程度処理することで、殻皮を除去し、精密ドリルを用いて成長方向に沿って貝殻粉末を削り出した。 ^{90}Sr 濃度はDGAレジンを用いた固相抽出法(Tazoe et al., 2016)により前処理を行い、ガスフローカウンタで測定することで、公定法よりも迅速に測定することができた。これらの作業は弘前大学にて実施した。 ^{90}Sr 分析に加えて、カワシンジュガイの成長速度を推定するために、粉末の一部を酸素安定同位体比分析に供した。酸素安定同位体比分析は東京大学大気海洋研で実施した。結果、カワシンジュガイ貝殻中の ^{90}Sr 濃度は個体①は18.1-26.1mBq/g、個体②は25.9-50.2mBq/gであった(採取日に減衰補正)。縁辺から蝶番にかけて ^{90}Sr 濃度に明瞭な傾向はみとめられなかった。今回の分析において、貝殻の部位ごとに ^{90}Sr の濃度差がみられなかった理由として、カワシンジュガイの貝殻は付加成長している外層が溶解していたこと、特に蝶番付近での溶解が激しかった。また、成長速度が遅く、今回分析に供した試料量、0.3g/試料では十分な時間解像度が得られていないことなどが考えられた。酸素安定同位体比分析の結果からもカワシンジュガイの成長速度が遅いことが明らかとなっている。今後は試料の微量化や、貝殻断面の成長線との対応を行うことで、二枚貝が経験した ^{90}Sr 暴露の履歴を復元することを目指す。

2. 論文

N/A

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観測

氏名：反町 篤行

受入研究者：大森 康孝

1. 成果

森林で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。自然放射性物質であり、希ガスであるラドンは土壌から大気中へ散逸される。ラドンは大気中において壊変後、帯電した成分と中性成分（非付着ラドン壊変生成物）を形成し、大気エアロゾル粒子に付着した成分（付着ラドン壊変生成物）を生成する。森林における林内においてクラスターイオン濃度が林外よりも高いことが報告され(Jayaratne et al., 2011)、森林からの大気エアロゾルの放出にラドン壊変生成物が関与している可能性が示唆されている。そこで本研究では、都市郊外の森林において大気エアロゾル生成過程に対するラドン壊変生成物の寄与に関する観測の実施、基礎データの取得することを目的とした。観測は、2023年8月31日～9月4日（5日）に東京農工大学FM多摩丘陵のスギ・コナラ混合林（樹冠高度：約20 m）に設置された観測鉄塔において実施された。ラドンとその壊変生成物濃度はそれぞれ電離箱法（拡散モード）とシリコン半導体検出器（流量：0.5 L/min）により1時間間隔で測定された。エアロゾル個数濃度は0.3、0.5、1、3、5 μm の分級でエアロゾル計測器（光散乱方式）により5分間隔で測定された（データ解析では1時間平均値を使用）。測定高度は約2 mであった。ラドンとその壊変生成物濃度は午前中、エアロゾル個数濃度は夕方から翌日午前中に濃度が増加する傾向であった。これは林床付近の乱流拡散などの微気象条件が影響した可能性があった。大気エアロゾル個数濃度とラドン壊変生成物濃度の関係では、午前中において粒径0.3-0.5 μm で正の相関関係、午後から夜中において粒径0.3 μm 以上で負の相関関係が確認された。したがって、ラドン壊変生成物が大気エアロゾル生成・成長過程に寄与の可能性が示唆された。

2. 論文

酸化鈹物表面の核種濃集挙動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

1. 研究成果報告 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吸着や拡散等の反応機構理解に資する基礎データやモデルが必要である。本研究ではこれまで、非放射性金属イオンを吸着させたカオリナイト試料に対し、透過型電子顕微鏡(TEM)および電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)などを用いて固相表面における元素情報を取得し、吸着現象の解明につながるデータの蓄積を進めてきた。今年度は、熱硫酸により変質処理を施したカオリナイト試料について、幅広い pH 条件で非放射性金属イオンを吸着させ、吸着分配係数 K_d の取得および STEM-EDS による元素マッピングの取得を行なった。硫酸処理後のカオリナイト試料について XRD, XRF を適用したところ、濃度の高い硫酸で処理した試料ほど、Al/Si 比が低下し、また結晶性が低下した。3 価アクチノイドの化学アナログとしての Eu の同固相への吸着については、酸性から中性の pH 領域では変質影響が見られなかった一方で、塩基性 pH 領域では K_d の低下が確認された。STEM-EDS によるカオリナイト試料の粒単位の元素マッピングでは、変質の程度に関わらず弱酸性領域では Eu が固相の全面に吸着することが確認された。これらの結果は、弱酸性領域では Eu が主に Si 成分のサイトに吸着するため、固相の変質影響を受けにくいことを示唆している。本研究で得た Al/Si 比やヒンクレイ指数などのパラメータと、 K_d 値との相関を評価するには、今後、Si 成分および Al 成分の吸着サイトにおける Eu の表面錯体反応モデルに基づく考察、さらに、モデルフィッティングパラメータと変質固相のゼータ電位や原子間距離といったミクロスコピックな表面状態との関連を検討することが肝要である。

2. 発表論文リスト T. Dohi, K. Iijima, M. Machida, H. Suno, Y. Ohmura, K. Fujiwara, S. Kimura, F. Kanno, Application of radiocaesium microscale observation methodology to parmelioid lichen and ultrastructural analyses using STEM-EDS, Environmental radiochemical analysis VII, Chapter 5 (2023) 50-57. 日本原子力学会 2023 年秋の大会、口頭発表、Eu のカオリナイトへの吸着に及ぼす変質影響、1D01、長澤圭太、菅野太志、土肥輝美、藤原健壮、佐々木隆之

2. 論文

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

氏名：黄倉 雅広

受入研究者：土肥 輝美

共同研究者：橋間 俊・飯本 武志

1. 成果

2011年3月の東京電力・福島第一原子力発電所事故（以下、原発事故）に起因した環境放射性物質汚染により、サイトから約200km離れた首都圏も大きな混乱に巻き込まれ、原子力施設非立地地域がゆえに関連する自治体は専門知識や準備が十分ではなく、各々に厳しい対応を迫られた。本研究ではそのような影響を受けた自治体のうち、高い線量を示す土壌の発見や、市民の混乱から協働除染に至るプロセスを経験した千葉県柏市をケーススタディとした。当時の市の職員らは、課題解決のため参考資料の一つとしてICRP勧告の原発事故後の対応に関する記述を参考にさまざまな対応策を模索した。しかし、ICRP勧告に記載されている記述は抽象的な表現が用いられており、地方行政官や地域住民など実際の現場で活動する非専門家が読み解くことは難しい傾向にある。本研究では実際の現場での事例を振り返り、最新の知見が掲載された勧告と比較、検証を行い、勧告の趣旨をより具体的かつ明確にすることを試みた。現場で経験したさまざまな知見が最新の勧告に反映されているかの視点でまた逆に実例が勧告の記述から解釈できるかどうかという観点からも考察を行った。柏市の特徴のひとつに「市民との協働した除染活動」が挙げられるが、これに該当する記述はいずれの勧告書にも見当たらない。地域住民と市職員が町会単位で相互にコミュニケーションをとりつつその地域に相応しい方法を自らが計画し、放射線の基礎や除染の技術を学び、地域活動の一環として官民一体となって協働をすることで、結果として放射線リスクの相場観が共有された。柏市のような周辺に原子力施設がない人口密集地において、このような言わば協働除染を実施したことで住民の不安軽減につながった可能性があると考えられる。勧告の記述からの解釈の例として、ICRP Pub.146に記載された廃棄物の処理プロセスが挙げられる。うち150項には廃棄物の処理プロセスについて適切な特性評価、分別、一時保管、処分ルート確保と記載がある。柏市では、市内に存在する放射性物質の付着した廃棄物は「指定廃棄物」「市の管理する土地内の廃棄物」「民有地内の除去土壌」に大別され（分別）、例えば「指定廃棄物」についてはゴミ焼却により発生した指定廃棄物は市内清掃工場（北部・南部）、最終処分場に保管されている状態である（一時保管）。また「民有地内の除去土壌」については協働除染により発生した除去土壌が該当する。一方で、現在物量や放射エネルギーといった特性評価は未実施であり、今後処分ルート確保に向けて更に検討を進めていく必要がある。

2. 論文

樹皮表面に繁殖する苔類による放射性セシウム保持についての研究

氏名：吉川 英樹

受入研究者：土肥 輝美・佐々木 祥人

共同研究者：箕輪 はるか

1. 成果

(研究の背景) 樹木の放射性セシウム(以下放射性 Cs と記す)の汚染が、事故後どのように変化しているかを把握する目的で、2013年に樹木の表面の放射性 Cs 汚染について調査した同一地点の約10年後の放射性 Cs を同様に調査した。放射性 Cs の存在状態の変化が樹皮表面の線量変化の評価に資すると考えている。さらに、樹皮表面は様々な状態にあることから、2013年当時、放射性 Cs の存在割合の高かった樹皮表面に繁殖した苔を対象とし、放射性 Cs の保持能の把握を試みた。(実験方法) 報告者らは、福島市内にて2013年に調査した樹木が、現在でも同じ場所に存在していることを確認した。推定年齢50~80年程のケヤキであり、ケヤキの根元が除染のために新しい土が10cmほど盛り上げられているほかは、大きな枝ぶり、樹形、周辺の建物との位置関係などほとんど変化がないことを確認した。樹皮表面の放射性 Cs の測定は次のように実施した。①まず、1m x 2mの透明なビニールシートに実験室であらかじめ10cm四方のマスをマジックで書き込み測定座標軸が分かるシートを用意した。現場で樹木の幹回りに巻き付け、その上からGMサーベイメータを用いて表面線量率を測定し記録した。また、樹皮表面の様子について、樹皮が剥げて木部がむき出しになっている場所、苔や地衣類の生育している場所などをシートに直接書き写し表面観察のデータとした。②2013年の時に、報告者らは3cm四方に切断したIPフィルム36枚を格子状につなげたフレキシブルIPフィルムを作成し、現場で樹木の幹回りに巻き付けることにより、樹木表面での放射性 Cs のIP撮像を行った。2013年の樹木表面の測定箇所が判明できたので今回も同一箇所と同様にIPフィルムを巻き付け一晩曝射し、翌朝実験室まで持ち帰り解析した。(結果及び考察)①2013年と2023年のケヤキ表面の線量率を比較したところ、10年経過後の表面線量率は最大で0.17cpmとBGと同等になり、2013年当時の最大19.7kcpmから大幅に減少していた。②IP測定で樹木表面の放射性 Cs の分布状態が観測され、その中に粒子形態のCsの残存が示唆された。以上のように2013年と2023年に同一ケヤキ表面における樹皮・苔でのCsの保持能が調査できた。今後、樹皮や苔に付着したCsの存在形態を化学的に把握し、それらの減衰予測評価を行う。

2. 論文

なし

統合空間線量率マップに基づく除染効果の視覚解析

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、統合空間線量率マップの2011～2022年までの12年間の時系列データを用いて、セシウム134とセシウム137の半減期を考慮に入れた定式化を介して、ある特定の期間の空間線量率低限度を計算した。そして、統合空間線量率マップデータを視覚的解析する対話処理システムを実装し、空間線量率マップ上のサンプル点ごとに異なる期間における線量率低減度を比較し、過去に実施された除染作業の実際の効果などの確認を行った。まず、福島第一原発周辺地域に対し、2014～2017年の期間と2017～2020年の期間の空間線量率低減度を計算し、どちらの期間において優位に空間線量率が下がっているかを、マップ上の各サンプル点において比較を行い、その結果を文献[1]にまとめた。具体的には、2017～2020年の期間の空間線量率の低減度が大きく減少しているところは、特定復興再生拠点区域として指定された場所に多く含まれることを視覚的に確認した。これは、それらの地域で2018年頃から順次除染作業を進められてきたが、そのことを視覚的データ解析により確認できたことを意味し、実施された除染作業が一定の効果を上げていることを示す結果となった。また、Feng, Onda, Wakiyamaらにより2022年に発表された文献[2]では、飯舘村新田川周辺の2012～2014年の除染実施の詳細が紹介されている。これについても、当該地域の2011～2013年の期間と2013～2015年の期間の空間線量率低限度を計算し、どちらの期間において優位に空間線量率が下がっているかを視覚的に解析することで、実際に行われた除染作業の効果の検証を行った。その結果、2013～2015年の期間の新田川周辺地域の空間線量率低減度が非常に高いことが、視覚的に確認することができた。文献[2]によると、2013年と2014年において新田川上流域周辺で集中的に除染作業が行われているが示されており、得られた結果はこの除染作業の効果を裏付ける事実ととらえることがで

きる。 今後の課題として、時系列統合空間線量マップから得られる各サンプル点における空間線量率低限度が、除染作業の履歴に加えて、地形特徴や土地利用の違いと特定の関係があるかなどを調べるための視覚解析作業を進めていく。これにより、除染作業を行う地域選定において、いろいろな要因を考慮したより効果的な指標の提示を実現していく。 参考文献 [1] 高橋 成雄, 櫻井 大督, 長尾 郁弥, 操上 広志, 眞田 幸尚, 可視化研究の最前線: 空間線量率マップの視覚解析, シミュレーション (Journal of the Japan Society for Simulation Technology), 42(2), pp. 68-75, 2023. (in Japanese) https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=202302246379998755 [2] B. Feng, Y. Onda, Y. Wakiyama, et al. Persistent Impact of Fukushima Decontamination on Soil Erosion and Suspended Sediment. *Nat Sustain* 5, 879?889 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00924-6>

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：萩原 大樹

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 μm ）において、雲母鉱物だけでなく、有色鉱物や無色鉱物にも放射性セシウムが吸着し、移動に寄与する可能性があることを報告した。さらに、有色鉱物のうち、角閃石の表面は、風化・変質により粘土鉱物に変化し、放射性セシウムが表面に吸着することが示唆された。本研究では、鉱物への吸着メカニズムの解明を目的として、有色鉱物の風化・変質程度と放射性セシウムとの関係を調べた。試料は、FDNPP 周辺の富岡川で採取した河床土の細粒分画から、ハンドピックした有色鉱物の中から、表面の形態、色を基にさらに分画し、それぞれの放射性セシウム濃度を Ge 半導体検出器で測定した。河川水系の上流から下流にかけて、風化・変質が多い有色鉱物および風化・変質が少ない有色鉱物のいずれも放射性セシウムが吸着していた。特に、風化・変質が多い有色鉱物に放射性セシウムをよく吸着する傾向が認められた。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、細粒分画における無色鉱物と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

浜島 靖典・津旨 大輔

1. 成果

福島第一原子力発電所の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2022年度にかけて夏と冬の合計6回の観測を実施した。2023年度にも夏の観測を実施し、水や堆積物の間隙水中の溶存放射性セシウムの測定を行った。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、これまでの観測データ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。これまで主に観測を行ってきた松川浦の南部の観測点では、間隙水中の塩分が直上水よりも高い傾向がみられ、海水系の海底湧水の影響が示唆されている。2023年度の観測でも南部の観測点では同様の傾向が見られた。一方、2023年度に新たに実施した松川浦の北西部の観測点では、間隙水中の塩分と直上水の塩分が同程度であり、松川浦内でも海底湧水の影響の強弱があることが示唆された。今後、日本原子力研究開発機構にて実施されている、松川浦内の堆積物中のセシウムのインベントリの長期変化のデータを参照しつつ、松川浦から海洋への放射性セシウムの供給量を推定する。

2. 論文

福島県内における野生傷病鳥獣の放射性セシウムのモニタリング

氏名：小松 仁

受入研究者：玉置 雅紀

共同研究者：村上 貴恵美・神田 幸亮

稲見 健司・壁谷 昌彦

1. 成果

1. 成果 東京電力（株）福島第一原子力発電所の事故により、現在でも狩猟対象鳥獣において放射性セシウムが検出されている。福島県では、有害鳥獣捕獲、個体数調整及び狩猟における捕獲・処理等の安全確保に必要な情報を県民に発信するため、イノシシ、ツキノワグマ等の野生鳥獣の放射線モニタリング調査を行っている。これらの野生鳥獣の放射線モニタリング調査の結果から、生物種によって体内のセシウム 137 濃度が異なり、とりわけイノシシにおいて筋肉中のセシウム 137 濃度が高い傾向が認められている。加えて、イノシシの筋肉中のセシウム 137 濃度と捕獲場所のセシウム 137 土壌沈着量に正の関係があること、同様な土壌沈着量の汚染レベルのエリアで捕獲されたイノシシであっても、個体間で測定値のバラツキが大きいという結果が得られている。一方で、狩猟対象種以外の野生鳥獣の筋肉中の放射性セシウム濃度については知見が少なくその野生鳥獣における放射性セシウムの汚染状況は不明である。本研究では、福島県における様々な野生鳥獣の筋肉中の放射性セシウム濃度についての知見を得ることを目的とする。2013年から2022年までに福島県内で保護され福島県野生生物共生センターに運び込まれたのち死亡した傷病鳥獣の筋肉を採取し、筋肉中に含まれるセシウム 134 及びセシウム 137 を測定した(鳥類:N=143, ほ乳類:N=76)。得られたデータを用いて、生息地域の放射性セシウム土壌沈着量と筋肉中放射性セシウム濃度との相関の確認、生息地域間における筋肉中放射性セシウム濃度の比較、ほ乳動物と鳥類間における筋肉中放射性セシウム濃度の比較、及び食性による放射性セシウム濃度の比較を行った。その結果、生息地域の放射性セシウム土壌沈着量と筋肉中放射性セシウム濃度については会津と中通りで弱い正の相関、浜通りで強い正の相関がみられた。生息地域間における筋肉中放射性セシウム濃度は浜通り、中通りに比べて会津が有意に低かった。ほ乳動物と鳥類間における筋肉中放射性セシウム濃度は、ほ乳類が鳥類に比べ有意に高かった。食性による放射性セシウム濃度は、それぞれ会津の鳥類で雑食よりも動物食、中通りのほ乳類で雑食よりも植物食のほうが有意に高かった。本研究によって、近年においても食品の基準値である 100 Bq/kg を超過する個体が鳥類とほ乳

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

2. 論文

福島県内におけるキジの行動圏調査

氏名：神田 幸亮

受入研究者：玉置 雅紀

共同研究者：小松 仁・村上 貴恵美

1. 成果

1. 成果 東京電力(株)福島第一原子力発電所事故の影響により、福島県では現在でもイノシシ等の狩猟対象鳥獣において放射性セシウムが検出されており出荷制限等がかけられている。一方、近年キジの放射性セシウム濃度は減衰し、食品基準値である 100 Bq/kg を大きく下回っているものの出荷制限がかけられたままである。国が示す出荷制限解除の条件では、動物の移動性を考慮することとされているため、今後出荷制限解除を検討するためには移動性を明らかにする必要がある。そこで、本研究ではキジの行動圏を明らかにし、出荷制限解除の検討に資する知見を得ることを目的とした。キジの捕獲数とモニタリング数が多い福島県二本松市にて、令和3年および令和4年の11月にカモ網等を用いてメスキジ2羽を捕獲した。これらにGPS発信器を装着して放鳥した。データの収集期間は、狩猟期間である11月から2月までの4ヶ月間とした。行動圏サイズを最外郭法及び固定カーネル法を用いて算出した。その結果、最外郭法により推定した捕獲個体の行動圏サイズは0.06から0.31 km²であった。キジは主に阿武隈川の河川敷内の高茎草地、竹林等がモザイク状に分布している地域及び堤内地の畑地と畑地に隣接する低木が疎らに生育する高茎草地を包括する地域を利用していた。また、カーネル法により推定した捕獲個体の行動圏サイズは、50%行動圏で0.009から0.006 km²、95%行動圏で0.04から0.03 km²であった。利用頻度の高い地域は高茎草地、竹林等がモザイク状に分布している阿武隈川の堤内地であった。今回調査をおこなったメスキジ2羽の行動圏サイズは、最大でも0.3 km²程度であり、少なくとも調査を行なった11月から2月の4ヶ月間は捕獲場所の周辺のみで暮らしていたことが明らかとなった。このことからキジについては、放射性核種により高濃度に汚染された原発周辺地域から汚染が少ない会津等の地域へ移入する可能性は低いと考えられる。今後は個体数を増やすと共に性差についても調査を行う必要があると考えられる。

2. 論文

植物培養細胞を用いた帰還困難区域における遺伝子発現を指標とした

モニタリング手法の検討

氏名：高橋 真哉

受入研究者：玉置 雅紀

1. 成果

放射性物質蓄積に伴う空間線量率の高い帰還困難区域を含む計画的避難区域は、2013年から面積比で30%弱にまで縮小しているが、環境放射線による生物影響は長期間継続的なモニタリングが必要である。野外の放射性物質汚染による直接的な生物影響は定量的評価が困難であり、現在まで効果的なモニタリング法は存在しない。我々はこれまで、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取り組んできた。本研究では、従来のゲノムDNA相同組み換え頻度定量に加え、新たに遺伝子発現量を指標とした継続的な野外放射線モニタリングについて検討を開始している。今年度は、1 mGy以下での曝露を行ったシロイヌナズナカルスを用いたRNA-Seq解析を実施した。シロイヌナズナ野生株(Col-0)胚軸から誘導したカルスに対して、帰還困難区域内にて採取した放射性物質を含む土壌を用いて、国立環境研究所内に設置されたチャンバーにて曝露を行った。24時間(91 μ Gy)、168時間(649 μ Gy)曝露後、カルスを回収し、凍結保存をおこなった。その後、総RNA抽出を行い、RNA-Seq解析に用いた。その結果、24時間曝露と168時間曝露で計93遺伝子の発現変動が確認できた。GO解析では、DNA修復に関連した遺伝子は検出できなかったが、二次代謝関連遺伝子、ストレス応答関連遺伝子の発現変動が見られた。現在、同様の曝露条件での植物体における遺伝子発現解析を実施している。

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

1. 成果

大型再処理施設が稼働すると、³H 等の放射性核種が大気や海洋へ放出され、施設近傍の汽水湖尾駁沼における濃度レベルが上昇することが予想される。これらの放射性核種は、上流の二又川からの淡水および下流の海に接続する尾駁川からの海水とともに尾駁沼に流入する。尾駁沼は準閉鎖水域であるため、濃度低減が遅いことが予測され、その滞留期間中における希釈・移行・分配・蓄積の実態解明が課題となる。流入した放射性核種の希釈を精度良く評価するためには、淡水および海水の流量を把握することが重要となる。本研究は、海水の流入出量変化を定量的に把握し、放射性核種の希釈過程を数値計算で再現することを目的としている。尾駁沼・尾駁川に水面下に圧力計を設置して水圧計測するとともに、浮体に搭載した RTK-GPS を圧力計の近傍に設置することで、水面高度を計測した。RTK-GPS は、Softbank の ichimill を利用することで、基地局を新に設定することなく、沼の水位高度を精度よく計測できた。この水位高度を用いて、水圧計の高度を推定することにより、水圧データから沼・河川の高度を高精度で検討することが可能となった。この水位差結果より、長期観測が可能となり、上げ潮・下げ潮時で尾駁川から尾駁沼へ流入・出する流速が異なることが分かった。上げ潮時と下げ潮の水位変化の非対称性により、尾駁沼の水位振幅には、大潮小潮の周期（約 14 日）をもつことが説明できた。雪により水圧計が回収できなかったことから、3 月以降に再回収を行う予定である。

2. 論文

CO₂ の観測結果について論文を準備中。

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

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 共同研究者：小林雅俊、柿内秀樹

1. 実験概要 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 Xe 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。

2. 成果 <XENONnT 実験 山下・小林> 本研究を通してトリチウムバックグラウンドが次期 XENONnT 実験に及ぼす可能性が分かったため、その対策を行なった。検出器内、配管内に HTO, HT などのアウトガスとして存在しうるため、観測前にキセノンガス用の水素除去装置(ゲッター)の再生や数週間におよぶ検出器及び配管の真空引き、またさらにガス循環によるアウトガスの低減を行った。効果を定量的に評価できていないが、実際の観測データをみると XENON1T に比べ 1/6 ほど他のバックグラウンド含めてを下げることに成功し、2020 年の超過事象はトリチウム由来の可能性が高いと結論づけた。 <環境研におけるトリチウム定量評価 柿内> 神岡およびイタリア・グランサッソ研究所で採取したすべてのサンプルの分析を終了した。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。昨年度に続き最終サンプルであるグランサッソでの水サンプル中を測定し、HTO $0.63 \pm 0.11 \text{Bq/L}$ 結果が得られ日本での値とほぼ同じことが確認できた。HT の比放射能は HTO の比放射能よりも約 105 倍高いことが日本と同様イタリアでも初めて測定された。

2. 論文

“The XENONnT Dark Matter Experiment”, arXiv:2402.10446 Eur.Phys.J.C に投稿中
(共著者：Kobayashi Masatoshi, Masaki Yamashita)

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

1. 成果

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

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、水蒸気など水状トリチウムを対象とした研究が広く行われている。一方で、大気中のトリチウムは、水蒸気状(HTO)、分子状(HT)、炭化水素状(主に CH₃T)で存在していることが知られている。これらを化学形態別に弁別測定した研究例は少なく、生成起源など未解明な点がある。例えば、化学形態別の観測結果では、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、その要因は明らかでない。ここでは、挙動がよく理解されている大気中の水素(H₂)や炭化水素(CH₄)に着目し、大気中トリチウム濃度との相関からHT や CH₃T の生成起源解明を試みる。 方法: 大気中トリチウム濃度の観測は、研究代表者が開発した化学形態別トリチウム捕集装置を用いた。吸湿剤(モレキュラーシーブ(MS)3A)と酸化触媒を組み合わせることで化学形態を弁別した。捕集期間を 1 月とし、捕集した水分を液体シンチレーション計数装置(アロカ、LSC-LB-7, バイアル容量: 20 mL, シンチレータ: Ultima-Gold LLT, 計数時間: 1500 分、検出下限値: ~1.0 Bq/L)で測定した。装置の詳細は参考文献[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, PorapakTM 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 3 時間ごとのデータを取得した。 結果: 昨年度に整備した大気微量成分測定システム(水素、メタン、一酸化炭素を対象)を本年度も継続して運用し、観測データの蓄積を進めた。また、大気微量成分の測定と並行して、1 月もしくは半月毎の平均値として化学形態別大気中トリチウム濃度の測定を行った。観測した 2022 年 6 月から 2023 年 12 月までのデータを解析し、大気中トリチウム成分(HT, CH₃T)と大気中微量成分(H₂, CH₄)との相関を確認した。その結果、HT と H₂ との間には明確な相関が確認されなかった(相関係数: 0.04)。このことは、HT の生成過程は H₂ の生成過程とは異なり、他に供給源が存在することを示唆している。また、CH₃T と CH₄ の相関では、弱い相関が確認された(相関係数: 0.43)。現状では、大気微量成分の観測デー

タと比較可能な大気中トリチウム濃度データ数が少ないこともあり、今後も継続した観測データの収集を進め、来年度の観測データを加えてさらなる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, Saori Kurita and Naofumi Akata, “Chromatographic analysis of molecular hydrogen (H₂) in the atmosphere for understanding atmospheric tritiated hydrogen (HT)”

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：橋本 晃佑

受入研究者：柿内 秀樹

共同研究者：前川 暁洋

1. 成果

東京電力福島第一原子力発電所事故に関連し、令和3年4月に日本政府はALPS処理水の海洋放出の方針を決定し、令和5年8月より放出が開始されたことから、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と(公財)環境科学技術研究所が協力し、環境中トリチウムの相互比較分析に関する検討を実施することによって、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ている。昨年度、環境水中の低濃度トリチウムをターゲットに、福島県沖で採取された海水試料をそれぞれの機関で分析し、全試料で十分なパフォーマンスを示す $En < 1$ を満たしていることを確認した。今年度は、環境試料中の濃度レベルが低いために検出が難しく、前処理法が煩雑と言われている有機結合型トリチウム(以下、「OBT」という)について、魚試料を対象に分析を行うこととした。なお、福島県環境創造センターでは、OBT分析に関する知見が乏しいため、まずは分析精度・分析技術の向上を目的として、環境科学技術研究所の助言・技術指導のもと、トリチウムで標識した魚試料の分析を行った。まず、魚試料(ヒラメ)を凍結乾燥・粉碎処理し、複数のLotに分割の上、それぞれにトリチウム水(トリチウム濃度 109.1 ± 1.5 Bq/L)を添加した。この操作により、魚試料中の硫黄、窒素、酸素等に結合する水素が、ある程度の割合でトリチウムに交換する(以下、この操作を「トリチウム標識」という)。トリチウム標識した試料を乾燥させ、標識に使用したトリチウム水(以下、「標識後トリチウム水」という)を回収するとともに、乾燥させた魚試料を二連式管状型電気炉により石英管内で燃焼させ、燃焼水を回収した。回収した燃焼水に過酸化ナトリウムを加え、別発表(E-23-17)の手法(以下、「簡易蒸留」という)を二度繰り返すことにより精製し、液体シンチレーションカウンタ(LSC-LB7,ALOKA)でトリチウム濃度を測定した。一方、回収した標識後トリチウム水は、過マンガン酸カリウムを加えた後、7時間の還流と簡易蒸留により精製し、同様にトリチウム濃度を測定した。分析結果について、Lot①は燃焼水 20.3 ± 2.3 Bq/L、標識後トリチウム水 86.9 ± 3.9 Bq/L、Lot②は燃焼水 17.8 ± 3.5 Bq/L、標識後トリチ

ウム水 85.2 ± 3.4 Bq/L、Lot③は燃焼水 16.8 ± 2.7 Bq/L、標識後トリチウム水 81.4 ± 3.4 Bq/L であった。また、各 Lot について、添加したトリチウム水、回収した燃焼水及び標識後トリチウム水の量とそれぞれのトリチウム濃度から、各試料のトリチウム量を算出すると、Lot①はトリチウム水 0.65 ± 0.01 Bq、燃焼水 0.07 ± 0.01 Bq、標識後トリチウム水 0.52 ± 0.02 Bq、Lot②はトリチウム水 0.66 ± 0.01 Bq、燃焼水 0.06 ± 0.01 Bq、標識後トリチウム水 0.51 ± 0.02 Bq、Lot③はトリチウム水 0.66 ± 0.01 Bq、燃焼水 0.07 ± 0.01 Bq、標識後トリチウム水 0.49 ± 0.02 Bq となり、その収支を評価すると、一連の操作を通して概ね 84%~90% 程度のトリチウムを回収した結果となることから、本分析結果が妥当なものであることを確認した。本結果を踏まえ、次年度以降、両機関による相互比較分析等につなげていく予定である。

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・赤田 尚史

共同研究者：島 長義・山中 潤二・桑田 遥

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) を精製処理する必要がある。これらの試料水には有機物が多く含まれ、還流分解による精製処理には人手、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 (UV) 照射法の導入可否を検討したとともに、酸化剤添加一密閉加熱放置する方法を検討した。【実験】 2022 年度成果 (ERAN F-22-76) にて得られた UV 照射条件 (試料水 10 mL に H₂O₂ を 0.1 mL 添加後、UV 照射 60 分) が、高 DOC 濃度かつ低 pH である OBT 燃焼水に適用可能であるかを確認するため、魚試料の OBT 燃焼水とそれを中和処理した試料水 (中和済み OBT 燃焼水) について、上記の条件で処理を行い、DOC、pH、UV スペクトルを測定した。UV 照射装置は Metrohm 705 UV Digester (出力 500 W) を用いた。また、中和済み OBT 燃焼水 50 mL について、一般的な還流装置を用いた方法と、密閉容器内で酸化剤 (MnO₄) を添加し加熱放置する方法について、それぞれ異なる加熱時間で有機物分解を行い、DOC、pH、UV スペクトルを測定した。【結果】 魚試料の OBT 燃焼水と中和済み OBT 燃焼水の DOC 濃度は正確に測定することができなかった。理由は定かではないが、マトリックスの影響もしくは中和操作にて Na₂O₂ を使用したことにより多量の Na が含まれていたことが影響したと考える。UV 照射後の試料水の UV スペクトルを測定したところ、OBT 燃焼水と中和済み OBT 燃焼水のどちらも照射時間を 3 時間としても有機物分解は不十分であった。UV 照射法は松葉自由水の有機物分解には適用可能だが、魚 OBT 燃焼水には適用できないことが分かった。一般的な還流方法と酸化剤添加一密閉加熱放置する方法でそれぞれ有機物分解を行った試料水の UV スペクトルを測定したところ、それぞれ 8 時間と 24 時間の加熱時間で有機物分解は十分であった。ただし、OBT 燃焼水に含まれる有機物量は燃焼操作毎に異なるため、一般的な還流方法では 8 時間でも有機物分解が不十分な場合がある。酸化剤添加一密閉加熱放置する方法は還流装置のマシントime削減になり、手間も少ないため有用である。

論文

生体への水素同位体取り込みの同位体効果の検証

氏名：鳥養 祐二

受入研究者：柿内 秀樹・石川 義朗

共同研究者：細根 孟留・南場 大輝

1. 成果

重水素とトリチウムを含む海水中で魚と貝を育成し、海生生物における水素同位体の取込みと放出の同位体効果について検討した。海生生物の自由水に含まれるトリチウム濃度の測定では、既往の凍結乾燥法を用いた場合、1つに試料の測定に1ヶ月以上の測定時間が必要である。そのため、多数の試料測定が必用な研究は行うことができない。そこで、海生生物に含まれる水分の迅速な測定法として、自由水を電子レンジで迅速かつ簡便に回収する“マイクロ波加熱法”を提案し、同位体効果の検証に応用した。マイクロ波加熱法は、魚の可食部を蓋部分に穴の空いたレンジ対応容器に入れ、容器ごとチャック付きポリ袋に入れ、レンジ出力 100W で 10 分程度加熱を行った。放冷後、チャック付きポリ袋内に凝縮した水を回収し、液体シンチレーション法によりトリチウムを測定した。トリチウム源として重水中に含まれるトリチウムを使用した。魚はヒラメを、貝類はホッキ貝とホタテ貝を用いた。重水及びトリチウムを含んだ海水で飼育したヒラメ、ホッキ貝、ホタテ貝の水素同位体の取込み挙動と、重水及びトリチウムを含んだ海水で飼育した物を通常の海水に移して飼育したときの放出挙動を検討した結果、取込み過程と放出過程において、水素同位体の同位体効果は認められなかった。また、十分に重水素とトリチウムを取り込んだ、ヒラメ、ホッキ貝及びホタテ貝を通常海水に戻したときに、重水素とトリチウムの残存は観測されず、速やかに生育環境の水素同位体濃度と平衡になることが、明らかとなった。

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：水野 亜紗美

1. 成果

土壌中のセシウム (Cs) 動態に影響を与える要因の一つに、雲母などの粘土鉱物が挙げられる。雲母は通常では閉じた層間 (収縮層) にカリウム (K) を多く固定しているが、風化によって層間から徐々に K が放出されると層間が開き、膨潤層が形成される。この膨潤層と収縮層の間にできる Frayed Edge Site (FES) に Cs が選択的に強く固定され、植物への吸収は抑制される。一方、Cs は FES 以外では鉱物表面や膨潤層などの Regular Exchange Site (RES) にも吸着し、これらは他の陽イオンと交換されやすい。先行研究で植物根近傍の雲母の風化が促進され、層間から K が放出されることが示されており、Cs についても同様の現象が起こることが予想される。そこで本研究では、植物が粘土鉱物中の Cs に与える影響について調べるために Cs 吸収能の高いシロバナルーピンの根と粘土鉱物の接触試験を行った。金雲母に対して K 処理を行い、カルシウム/マグネシウム態に変換した後、Cs を添加し Cs 含有風化鉱物を調整した。これをナイロンメッシュバッグに入れ、根箱栽培した根に3日間接触させた。XRD の結果から、根の接触による鉱物の層構造への影響はなかったことが示唆された。酢酸アンモニウム抽出で測定した鉱物の交換態 K は根の接触の有無で違いはなかったが、交換態 Cs は根の接触により有意に減少した。また、非交換態 K および Cs は根の接触の有無で差がなかった。以上のことから、シロバナルーピンの根は鉱物の層構造を変化させないが、鉱物において酢酸アンモニウムにより抽出される形態の Cs の放出を促進している可能性が示唆された。今後は、鉱物中の Cs のより詳細な形態別の動態に与える根の影響を調べ、鉱物と植物根の関係について理解を深める必要がある。

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：田中 義幸

1. 成果

海藻は、海水中から炭素、窒素、水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それらを排出する。本研究では、マコンブ *Saccharina japonica* によるカーボンニュートラルの貢献を検討するため、マコンブ胞子体（以下、藻体）が生産する有機物中の炭素分解過程を調べた。さらに、大型再処理施設の本格稼働に伴い六ヶ所沖に放出が見込まれるトリチウムのマコンブ藻体内への移行を評価するため、重水素を用いたばく露実験に取り組んだ。（1）嫌気条件下での藻体外排出有機物の分解速度の検討 2023年6月にむつ小川原港で養殖した藻体を15°Cに保った35Lの海水に1週間浸漬後にGF-75で濾過し、好気性分解実験では144本の遠心管（容量50mL）に40mLずつ分注し、嫌気性分解実験では二酸化炭素を曝気した後に144本の遠心分離管に空気を含まないように充填し、試料とした。各試料を1,5,10,15,20°Cの恒温槽に36本ずつ移し、培養7,13,28,53,75,144,201日目に各温度段階の試料を6本ずつ取り出し、海水中の全有機炭素（TOC）とATPの含有量を測定した。この結果、藻体から放出されたTOCの分解過程には、好気及び嫌気条件で差異が認められた。好気条件下では、TOCは培養28日目までに比較的急減したのち大きな変化が見られなくなり、実験終了時に2.19-2.54 mg/Lの範囲にあって、低温ほど減少が緩やかであった。ATPは実験開始直後に急増したが、13日目には20 pmol/L前後の値を示した。一方、嫌気条件下では、TOCは低温ほど減少が緩やかで、実験終了時に2.95-3.41 mg/Lの範囲にあって好気条件下に比べ高い値を示した。また、ATPは培養144日目まで緩やかに増加した。本結果から、藻体が排出する有機物を低温で溶存酸素量が低い深海のような環境に輸送することで、より長期間、海洋中に炭素を貯蔵できるようになると推察された。（2）藻体の重水素ばく露実験 むつ小川原港内で養殖した藻体を27個体採取し、葉長約3cmに調整後に重水添加海水（2000 $\mu\text{molD/molH}$ ）の水槽中で35日間培養した。この間に3-8日間ごとに計7回、3個体ずつ藻体を採取し、藻体中の非交換型有機結合重水素（ NxOBD ）を測定した。この結果、藻体中の NxOBD 濃度は、実験開始時の152-154 $\mu\text{molD/molH}$ から培養14日目には774-804 $\mu\text{molD/molH}$ に増加した。その後、増加速度が緩やかになり、実験終了時に843-980 $\mu\text{molD/molH}$ の範囲を示した。濃度曲線は、次式に適合し、 C_{max} が823 molD/molH と計算された。 $\text{NxOBD} (\mu\text{molD/molH}) = 823 * (1 - \exp(-0.0743 * t)) + 153$
t: 培養日数 本結果から、藻体によるトリチウム固定の挙動について新たな知見が得ることができた。

2. 論文

低線量・低線量率放射線による消化管腫瘍の発がんリスク評価

氏名：柳原 啓見

受入研究者：山内 一己

共同研究者：森岡 孝満・今岡 達彦・鈴木 健之

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、消化管腫瘍を発症する放射線発がん高感受性モデルマウス（ApcMin/+マウス、ヒト家族性大腸腺腫症のモデル）を用い、異なる線量や線量率で得られた消化管腫瘍を解析し、低線量・低線量率被ばくの発がんリスクを評価することを目的とした。前年度に引き続き、量子科学技術研究開発機構放射線医学研究所と公益財団法人環境科学技術研究所の両研究所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。C3B6F1 ApcMin/+マウスと C57BL/6J ApcMin/+マウスを比較し、遺伝的背景の異なる2系統のデータを、どのように解釈し統合するかという課題がみえた。今年度は、腫瘍発生率、腫瘍数、腫瘍径などのデータを検討した結果、C3B6F1 ApcMin/+マウスでは小腸腫瘍、C57BL/6J ApcMin/+マウスでは小腸腫瘍および大腸腫瘍のデータを使用したリスク評価システムを構築できることが期待された。本研究の成果は、低線量・低線量率の被ばくによるがんリスクの予測につながり、動物実験データのヒトリスク評価への外挿の信頼性を向上させるための基礎情報となることが期待される。

2. 論文

低線量放射線被ばく実験データベースおよびマウス組織標本アーカイブ

フォーマットの共通化とその活用方法の検討

氏名：石川 敦子

受入研究者：田中 聡・中平 嶺

共同研究者：森岡 孝満・今岡 達彦・山田 裕・KIN Yoshika

1. 成果

量子科学技術研究開発機構放射線医学研究所（量研放医研）および環境科学技術研究所（環境研）は、膨大な数の実験動物を用いて放射線の生物影響の研究を行っている。本研究では、これらの研究で得られたデータおよび組織標本を国内外の研究機関で有効利用すべく、データベースおよび組織標本のアーカイブ（デジタル化）のフォーマットの共通化とその活用方法を構築し、放射線生物影響研究の成果の最大化に繋げることを目的とする。今年度は、量研放医研と環境研に保管されている動物実験データ（病理診断結果について病変部位のアノテーションを付加した組織画像およびサンプルの保存情報）のデータベースおよび組織標本のバーチャルスライドスキャナーを用いたデジタル化を行う際のフォーマットについて検討を行った。さらに、データベースの環境整備を行い、外部公開にむけた準備を開始した。これまでに蓄積してきた実験動物データをデータベース検索や出力機能を備えたアプリケーションへ実装し、組織標本を共通化したフォーマットでアーカイブ化して公開することで、国内外の研究機関において遠隔での有効活用が可能となり、放射線リスク評価に資する新たな知見が得られ可能性が期待できる。【参考文献】 R. Semba, T. Morioka, H. Yanagihara, K. Suzuki, H. Tachibana, T. Hamoya, Y. Horimoto, T. Imaoka, M. Saito, S. Kakinuma, M. Arai. Azithromycin induces read-through of the nonsense Apc allele and prevents intestinal tumorigenesis in C3B6F1 Apc(Min/+) mice. *Biomed Pharmacother.* 2023 Aug;164:114968. S. Yi, T. Morioka, K. Daino, T. Nakayama, M. Nishimura, S. Kakinuma. Ionizing radiation promotes, whereas calorie restriction suppresses, NASH and hepatocellular carcinoma in mice. *Int J Cancer.* 2023 Oct 15;153(8):1529-1542. H. Yanagihara, T. Morioka, S. Yamazaki, Y. Yamada, H. Tachibana, K. Daino, C. Tsuruoka, Y. Amasaki, M. Kaminishi, T. Imaoka, S. Kakinuma. Interstitial deletion of the Apc locus in β -catenin-overexpressing cells is a signature of radiation-induced intestinal tumors in C3B6F1 ApcMin/+ mice. *J Radiat Res.* 2023 May 25;64(3):622-631.

2. 論文 なし