

令和6年度 放射線の健康影響に係る研究調査事業

テーマ（１） 線量推計に資する研究

- 1-1 FISH 解析法による低線量被ばく評価に向けた基盤構築
主任研究者：数藤 由美子（量子科学技術研究開発機構） 1
- 1-2 大熊町など福島第一原発に近い地域の住家における掃除による屋内放射性物質の
低減効果
主任研究者：吉田 浩子（東北大学） 10
- 1-3 原子力事故後の居住環境における室内外の物質移行を考慮した住民の被ばく線量
評価に関する研究
主任研究者：高原 省五（日本原子力研究開発機構） 16
- 1-4 陸・水圏植物における有機結合型トリチウム（OBT）生産速度の網羅的把握
主任研究者：佐藤 雄飛（環境科学技術研究所） 21

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和 4 年度～令和 6 年度実施総括報告書

研究課題名	FISH 解析法による低線量被ばく評価に向けた基盤構築
研究期間	令和 4 年度～令和 6 年度（3 年間）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	数藤由美子	量子科学技術研究開発機構・グループリーダー
分担研究者		
若手研究者		

1. 研究の概要

染色体ごとに異なる蛍光標識をした染色体ペインティングプローブを用いる FISH 法により、2 個以上の染色体間で生じた交換型染色体異常が検出される。放射線によって生じる染色体異常の生成頻度と線量から検量線を作成し、被ばく患者の末梢血リンパ球の染色体異常頻度から線量評価が可能である。また、被ばく影響の調査で迅速な染色体異常スクリーニングや長期フォローアップでのモニタリングに有用である。

低線量被ばくの線量評価や人体影響研究を行う上で必要な観察細胞数は 1 検体当たり 1000～5000 個とされている。従来の報告は染色体分析精度が現在より低く、加齢とともに上昇することを示している年齢別染色体異常頻度や補正計算方法は、2008 年に公開されたものが利用されている。今後低線量被ばくの研究や検査を遂行するには、精度の高い基本データの存在と染色体判定の標準化、迅速化が重要な鍵となる。

本研究では、高精度 3 色 FISH 法を用いて、健常人 15 名（非喫煙・非職業被ばく、19～71 歳）の末梢血リンパ球染色体解析を行い、高品質な染色体異常バックグラウンドレファレンスデータを作成した。これにより、加齢による染色体異常増加は必ずしも年齢（物理的年数）と相関せず、今後の個体差要因研究が俟たれることを示した。

また、低線量被ばくにおいて膨大な画像枚数となる染色体解析を支える手法の開発として、深層学習法を適用した画像判定技術を導入し、ヒト末梢血リンパ球における交換型染色体異常の FISH 画像自動判定の基本モデルを開発した。基本モデルでは判定の再現性 100%、画像 1000 枚当たりの分析速度 4.5 分で（熟練検査者で 15 時間以上を要する）、染色体検出ほぼ 100%、正常染色体の判別は 97%以上と良好な成果を得ている。各種染色体異常の分類性能は現状目標値 85%未満で、今後追加学習や 2 段階モデルの導入などを試みていく。

2. 研究期間内に実施した内容

年目／実施年度	実施した内容
1 年目	3 か年を通じて血液試料はインフォームドコンセントが得られた被検者から採取し、プロトコールに従って利用した（研究倫理承認済みプロトコール 08-016、
令和 4 年度	

	17-018、18-023：量子科学技術研究開発機構）。 【調査研究 1】染色体異常バックグラウンドレファレンスデータ作成 健康人ボランティア 1 名（30 歳、男性）の末梢血試料より、リンパ球細胞 48 時間培養を行って染色体標本作製し、ヒト 1, 2, 4 番染色体ペインティングプローブ（Zeiss/Metasystems 社）を用いた 3 色 FISH^{1),2)} を行った。細胞分裂回数の確認のため、ブロモデオキシウリジン添加による FPG 法を応用した^{1),2)}。自動画像スキャニング顕微鏡システム Metafer 4（Zeiss/Metasystems 社）を用いて画像データを取得し、ソフトウェア MetaClient・ISIS（Zeiss/Metasystems 社）を用い、熟練観察者による目視観察を行い、25,594 メタフェーズの染色体異常解析を行い、その中から 1 回目分裂細胞のデータを取得した。 【調査研究 2】人工知能技術による染色体画像自動判別技術開発 健康人ボランティア 1 名（48 歳、女性）の末梢血試料由来の⁶⁰Co-ガンマ線 2.0 Gy 照射標本（線量率 0.5 Gy/min）を用いた 3 色 FISH^{1),2)} により、画像データを取得した。一部の画像につき熟練観察者によりアノテーションを行った。人工知能技術（深層学習法等）を導入。原子力規制庁令和 3 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費「染色体線量評価のための AI 自動画像判定アルゴリズム（基本モデル）の開発」（研究代表者 数藤由美子）³⁾ において開発した QST モデルをもとに、教師データ画像 505 枚（染色体 23,006 個）を用いて自動染色体画像判別モデルのプロトタイプを開発した。
2 年目	【調査研究 1】染色体異常バックグラウンドレファレンスデータ作成 研究外部評価委員のコメントにしたがい、当初計画（1～2 名）より多い、健康人ボランティア 7 名（非喫煙者 20～71 歳）の末梢血試料を得て、リンパ球細胞 48 時間培養を行って染色体標本作製し、3 色 FISH^{1),2)} を行った。細胞分裂回数の確認のため、FPG 法を応用した^{1),2)}。自動画像スキャニング顕微鏡システム Metafer 4 を用いて画像データを取得し、ソフトウェア MetaClient・ISIS を用い、熟練観察者による目視観察を行い、最大 12,663 メタフェーズ／検体の染色体異常解析を行い、その中から 1 回目分裂細胞のデータを取得した。同じ手法により、 翌年度研究の準備として、長期凍結保存標本の FISH 法を確立した。 【調査研究 2】人工知能技術による染色体画像自動判別技術開発 追加学習を試みるため、9,179 枚（染色体約 42 万個）の画像データを追加した。 目視観察ならば明らかに誤判定とわかる例があるために、正確さ向上のため、AI の挙動の可視化を試みた（EigenCam によりインプット画像のどの領域の情報をより強く利用しているのかを AI 内部のレイヤーの活性化状態を利用して可視化させた）。 Web ベースのアプリケーションを試作した。
3 年目	【調査研究 1】染色体異常バックグラウンドレファレンスデータ作成 研究外部評価委員のコメントにしたがい、当初計画（1 名）より多い、健康人ボランティア 6 名（非喫煙）の末梢血試料を得た。前年度の若年層分析に基づき、対象を 19～20 歳に絞った。リンパ球 48 時間培養を行って染色体標本作製し、
令和 5 年度	
令和 6 年度	

	ヒト 1,2,4 番染色体ペインティングプローブ (Zeiss/Metasystems 社) を用いた 3 色 FISH^{1),2)} を行った。細胞分裂回数の確認のため、FPG 法を応用した²⁾。熟練観察者による目視観察を行い、染色体異常解析を行った。一部の末梢血につき、⁶⁰Co-ガンマ線照射 (線量率 0.4 Gy/min, 1.0 Gy, 2.0 Gy) を行い²⁾、被ばくによる細胞周期遅延の有無を確認した。 長期内部被ばく症例 4 名 (造影剤インジェクション後 35~42 年目に検体採取、50 年凍結保存標本) で M-FISH 解析と 3 色 FISH 解析を行い、1,2,4 番染色体異常検出データ比較および遡及的線量評価を試みた。 研究期間 3 か年で得た染色体異常および細胞分裂回数のデータと過去データ (48 歳、1 名)²⁾ を併せて比較解析した。一般健常人における加齢・喫煙効果、放射線作業従事者との比較を試みた。 【調査研究 2】 人工知能技術による染色体画像自動判別技術開発 令和 6 年度は実験的照射血ではなく、実際の被ばく症例の検体 (調査研究 1 参照) で性能テストを行った。
--	--

3. 研究終了時に得られた結果・結論

① 研究結果・結論 (総括)・成果など

【調査研究 1】 染色体異常バックグラウンドレファレンスデータ作成

最大 25,594 メタフェーズ/検体の高精度 3 色 FISH 解析データを、健常人 14 名 (19~71 歳、男女各 7 名)、内部被ばく患者 4 名 (採血時 59~64 歳、²³²Th 内部被ばく 35~42 年、45~47 年間凍結保存標本) から得た。内部被ばく患者からは M-FISH (24 色 FISH) データも得た。分析では我々が過去に取得した FISH データ (48 歳、女性 1 名)²⁾、未公開データ (放射線作業従事者 5 名の FISH データ、健常人 72 名の細胞動態データ) を参考値として利用した。

1) 3 色 FISH 解析の 1,2,4 番染色体異常検出力

染色体異常の理論的検出率 39%²⁾ に対して実測値は 42.6%とやや高かった。M-FISH より切断点が明瞭に検出された。3 色 FISH は高速スクリーニングに有用であると言える。

2) 細胞動態解析

0, 1.0, 2.0 Gy 照射血で細胞周期の遅延は見られなかった。

若年層に 2 回目分裂以上の細胞が比較的高頻度で観察される個体があった (図 1)。若年層の追加調査や個体差の要因解明が俟たれる。(報告書 3③参照)

3) 高精度な染色体異常頻度バックグラウンドデータ取得

文献 2 のデータを加えた 15 名のデータ分析で、有意な性差は見られなかった。自然発生が加齢により増大するとされる染色体転座に関し、従来の報告^{1,4)} (参考図) と異なり、加齢効果が見出されなかった (図 2)。遡及的線量評価や長期フォローアップ調査にあたり、被検者の染色体異常頻度から年齢別ベースライン平均値を差し引くより、個体差の最大幅を考慮して安全管理を行うことが現実的である。

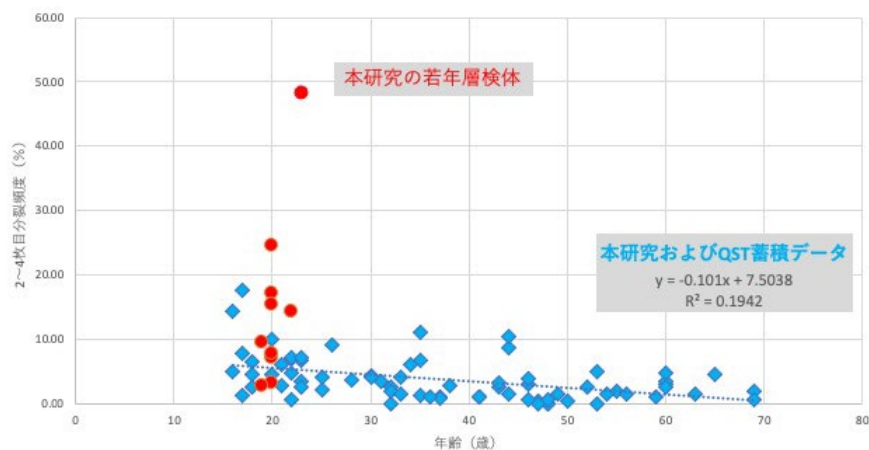


図1. 2～4回目分裂細胞の頻度と年齢の関係 [unpublished data を含む]

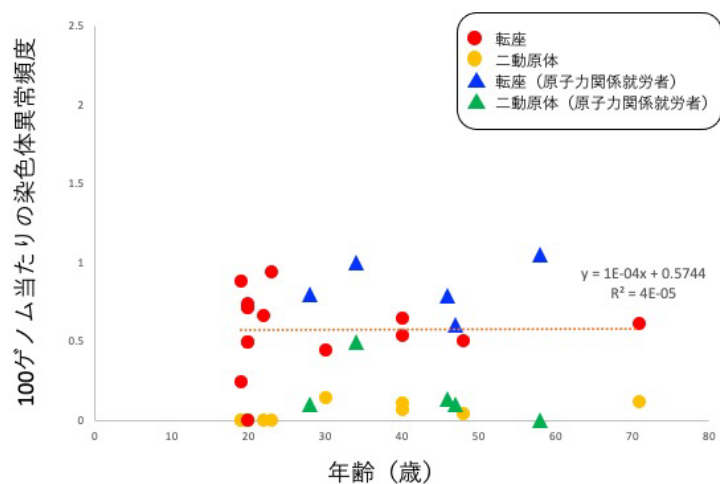
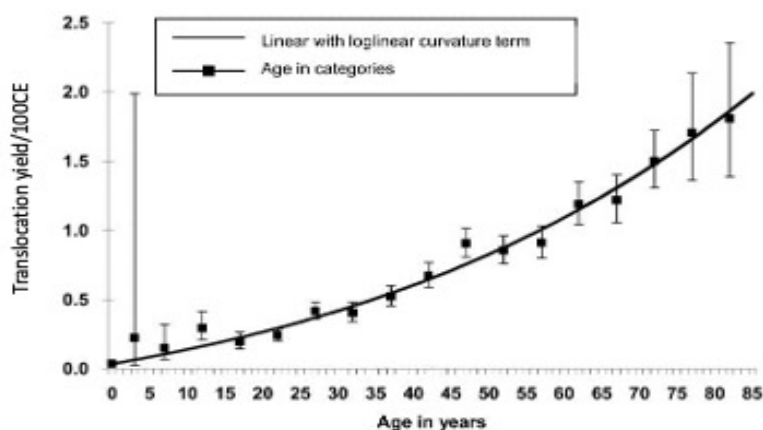


図2. 健常人（非喫煙・非放射線作業従事者）の年齢と染色体異常頻度の関係



参考図. 年齢と染色体転座頻度の関係

引用文献4より（改編）。図2の転座（赤丸）と比較可能。

$$\text{Translocation Rate (age)} = 100 \times [\exp(-7.925) + \exp(-9.284) \times (\text{age} \times \exp 0.01062 \times \text{age})]$$

【調査研究2】 人工知能技術による染色体画像自動判別技術開発

緊急時線量評価のために開発した二動原体検出用の基本モデル4)をもとに、交換型染色体異常の自動判別モデルの開発を進めた。その結果、分析の再現性%、速度は画像枚当たり.分、染色体の検出はほぼ%という好成績を得た(図3)。染色体異常の分類の性能については、正常染色体で~%と好成績を得た。実際の患者検体(内部被ばく)での試用でも、正常染色体の検出率は同率であった。転座や二動原体では%を超えない状況に留まっている。AIの挙動の可視化試験から、染色体の物体検出方法として現行法は適していることを確認した。放射線被ばくによる染色体異常の特徴として、生成頻度が低いこと、ランダムにゲノムを切断することから、用意した学習用画像データの%以上が正常染色体で、学習に偏りがある。最新情報に基づき、分類段階で別のアルゴリズムを導入することと発想の転換を検討して本研究を終了した。

ユーザーフレンドリーなベースのアプリケーションを試作した。

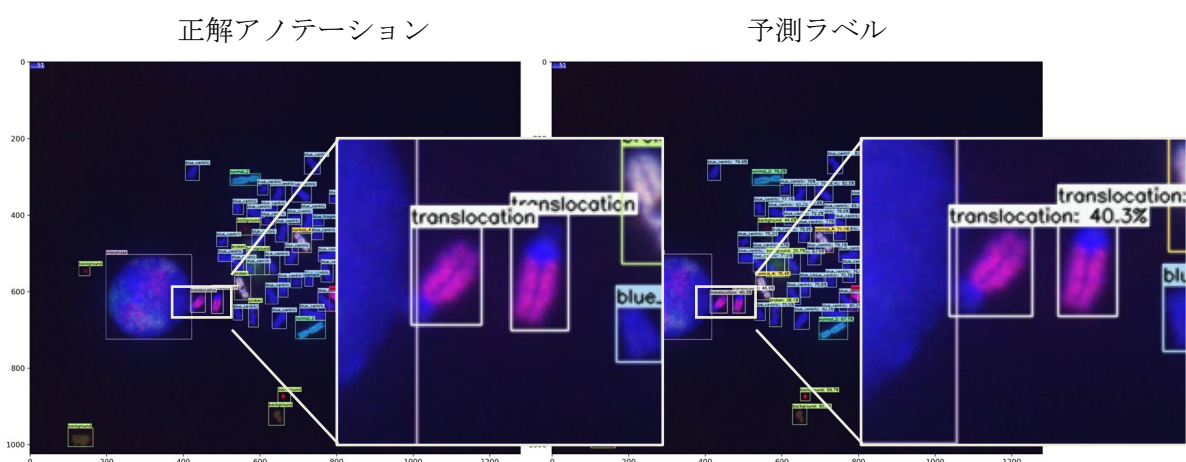


図3. 正解ラベルとモデルによる予測ラベルの比較例

染色体異常の分類は確度で表される。

② 計画・目標通り実施できなかった事項とその理由

アルゴリズム開発では、緊急時トリージ線量評価のための二動原体分析用に開発したモデルをもとに行った。しなしながら、二動原体の検出(-による動原体領域の染め分け。染色体上の動原体蛍光スポットを検出)と異なり、本研究対象(各染色体特異的ペイントプローブによる染め分け)では、パターンの種類が多く、学習データを増やすだけでは性能が大きくは上がらない可能性が見えてきた。放射線被ばくによる染色体異常をもつメタフェーズでは、一般に染色体異常の生成頻度は低く、染色体の切断と誤った修復は細胞ごとにゲノム上の位置が異なるため、深層学習のためのデータに大きな偏りが生じる(%以上が正常染色体。正常パターンのみ過剰学習となる)。今後、染色体の検出と染色体異常の分類で別々のアルゴリズムを導入することを検討する必要性が生じた。緊急時トリージ線量評価のための二動原体分析用のモデル開発は比較的容易で成功したが、染色体ペイントでは考え方を転換すべく検討した。残念ながら昨年度月以降(年月現在でも依然)、のリモートアクセスシステムが不正アクセス障害によって停止され、外部協力機関との間のアクセス(データやアルゴリズムの授受、試験運用)が不可能な状態が続いている。本研究事業は終了したものの、令和年度からは、昨

年度後半以降にみられる新たな手法を導入し、開発を続ける。

③ 当初の計画で予定した成果以外（以上）に得られた事項

（１）染色体異常バックグラウンドレファレンスデータ

- 当初計画（４名）を上回るデータ取得（１４名）を果たした。
- 累積線量や他の変異原の影響として年齢差より個体差の方が大きい可能性がある。遡及的線量評価や長期フォローアップ調査にあたり、被検者の染色体異常頻度から年齢別バックグラウンド平均値を差し引くより、個体差の最大幅を考慮して安全管理を行うことが現実的である。今後、より大規模な健常人および放射線作業従事者の調査でのデータ蓄積が必要である。一部の検体（４名）に関しては 5000 メタフェーズ以上（最大 25,594 メタフェーズ）のデータを取得し、2.0 Gy 以下の検量線も作成した（論文化予定）。本研究で内部被ばく症例に関して累積線量推定²⁾を試みたものの、まだ不確定要素が多い。過去の被ばく事故や累積線量の遡及的線量評価には、今後、喫煙他様々な因子を含めた各集団データ収集が必須である。本研究データはその礎となる。
- これまで高精度で研究されていなかった 19～23 歳、10 名のデータを解析できたことで、細胞分裂の個体差が観察され、放射線被ばくの患者・住民調査における多検体細胞培養法の課題が明らかになった。

（２）細胞動態解析

- 0, 1.0, 2.0 Gy 照射血で、細胞分裂回数ごとの細胞頻度に変化はなく、細胞周期の遅延も見られなかった。
- 本研究で、若年層に 2 回目分裂以上の細胞が比較的高頻度で観察される個体を見出した（図 1）。頻度 10%以下であれば 2.0 Gy 以上の被ばく事故における線量の過小評価（患者の見逃し）は理論計算上起きないため、FPG 法による細胞分裂回数検出をしないラボは多い。従来の研究報告では検体取得にバイアスがかかっていた可能性がある（血液提供者の年齢層＝ラボの学生・研究者への偏り）（図 1、25 歳以上）。若年層の追加調査や個体差の原因解明が俟たれるが、実践的には、1 回目分裂細胞のみとらえる、より簡便な培養法の開発を行うのが有効である。
- 1 回の分裂で二動原体は半減し、転座は減少しない安定型染色体異常と考えられてきた。本研究で、2.0 Gy 照射血 48 時間培養の分析（20 歳、1 名）から、1 回の分裂で二動原体染色体は半減、転座染色体もやや減少することが示唆された（図）。転座をもつ細胞の一部は二動原体などの不安定型染色体異常ももつため、転座をもつ細胞が 100%維持されるわけではないと考えられる。今後は、長期フォローアップ被ばく者検体を用いて、同様の追跡調査を行う予定である。

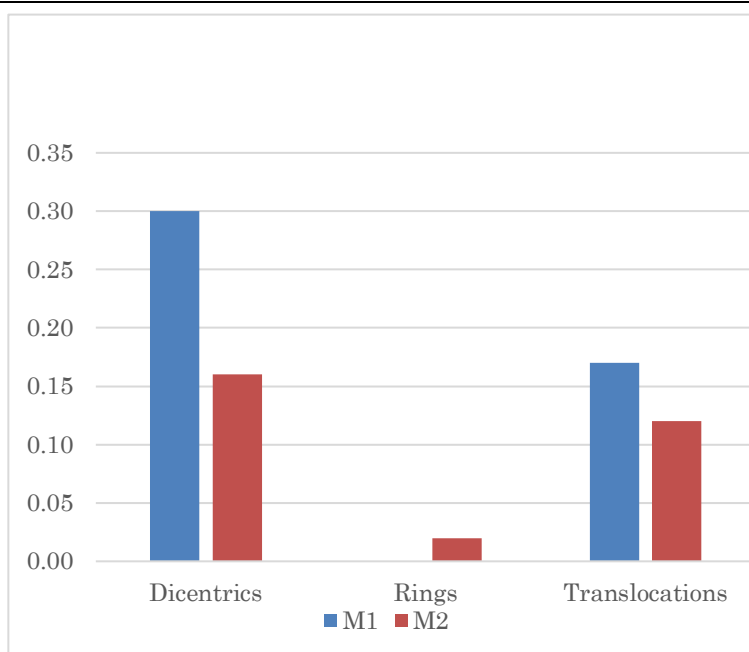


図2. 1回目分裂(M1)細胞と2回目分裂細胞(M2)における染色体異常頻度

末梢血（20歳1名）に2.0 Gy ガンマ線照射後48時間培養した。

4. 研究成果の活用方策の提案

本研究をさらに発展させる新たな研究や事業化の提案

（1）細胞培養法の開発

本研究で見出されたように、若年層の追加調査や個体差の原因解明が俟たれるが、実践的には、1回目分裂細胞のみとらえる、より簡便な培養法の開発を行うのが有効である。FPG法はISO標準プロトコールで推奨されているにもかかわらず、国内外の（QST以外の）線量評価担当機関で実施されないで居る。ひとつには手法に技術力を要するためである。細胞培養後に回収して得たメタフェーズが100%1回目分裂であり、かつ多検体対応でコンタミネーションを起こさないような簡便な培養法の確率を今後行うことは、放射線被ばくの住民・作業員調査、長期追跡調査に有用である。

（2）アルゴリズム開発の継続

現在、ISO TC85 SC2のWG18では、染色体画像判定の自動化に関して調査を進めているところである⁵⁾。緊急時トリアージ線量評価のための二動原体分析および小核分析のためのアルゴリズムは諸機関で開発競争が進められているが、現状、色や-のアルゴリズム解析の報告は見られない。本研究では基本モデルの開発に留まったが、今後いっそうの性能向上を進め、標準プロトコールでの引用（推奨）や特許取得を目指す。さらに、利用者に使いやすいアプリケーション開発も有用である。この手法は、染色体ペイントプローブを交換することで、放射線被ばくだけでなく様々な染色体異常を伴う疾患の臨床染色体検査に適用できる。

（3）バックグラウンドデータの更新と公開

本研究で得られたレファレンスデータや実験解析法をもとに、今後も様々な染色体異常頻度に影響する因子を考慮した集団染色体調査（特に若年層の調査と、各種の放射線作業従事者や医療被ばくといった計画された被ばくの対象者）を行い公開していく。

（４）様々な対象の調査への適用

３色 FISH 法および本研究で得られたバックグラウンドレファレンスデーは、医療上の事故被ばく・計画被ばく、多用な被ばく・曝露を受ける宇宙飛行士や自衛隊員のフォローアップ、放射線以外の変異原（有機フッ素化合物、排気ガス、薬物など）の定性的・定量的調査に利用できる。また、現在厚労省により進められている東電原発事故緊急時作業員 2 万人の遡及的線量評価および長期フォローアップのスクリーニングにも活用できる。

引用文献

- 1) 国際標準化機構. ISO 20046, Radiological protection – Performance criteria for laboratories using Fluorescence In Situ Hybridization (FISH) translocation assay for assessment of exposure to ionizing radiation, 2019.
- 2) Suto Y, Akiyama M, et al., Construction of a cytogenetic dose-response curve for low-dose range gamma-irradiation in human peripheral blood lymphocytes using three-color FISH, *Mutat Res - Genet Toxicol Environ Mutagen* 794: 32-38, 2015
- 3) 原子力規制庁令和3年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費「染色体線量評価のためのAI自動画像判定アルゴリズム（基本モデル）の開発」（研究代表者 数藤由美子），年度末報告書, 2022.
- 4) Sigurdson AJ, et al., International study of factors affecting human chromosome translocations, *Mutat Res.* 652(2):112-121, 2008.
- 5) Wilkins R et al. (Suto Y 含む), Activities of ISO Working Group 18: Biological and Physical Retrospective Dosimetry, *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 2025, in press.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和 4 年度～令和 6 年度実施総括報告書

研究課題名	大熊町など福島第一原発に近い地域の住家における掃除による屋内放射性物質の低減効果
研究期間	令和 4 年度～令和 6 年度（3 年間）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	吉田 浩子	東北大学 先端量子ビーム科学研究センター・研究教授
分担研究者		
若手研究者		

1. 研究の概要

避難指示区域及び特定復興再生拠点区域での解除とともに、帰還・あらたに居住する住民の増加が予想されるなか、住民がもっとも長い時間を過ごす住家内の汚染の状況及びその変化を把握することは重要である。同時に、屋内に残存する放射性物質を効果的に低減する具体的な方策を知ることは住民にとって生活再建のための大きな関心事である。平成 28～30 年度の原子力災害影響調査等事業で実施した「住家内汚染の包括的研究及びこれによる内部被ばく線量評価」において、1 回だけの掃除機がけにより、放射性セシウム（以下放射性 Cs という。）を含むハウスダストはある程度大きくなったものは集塵されるものの、床表面などに付着した放射性 Cs は残存したままであることを示したり。一方、平成 31～令和 3 年度事業「被ばく線量に影響を及ぼす住家内外の要因に関わる研究」での調査結果では、避難指示が解除された飯舘村及び南相馬市小高区の住家で居住（帰還）している住家のほうが表面汚染密度の値が明らかに低くなるという傾向が示された。住民が日常的に行う掃除機を用いた繰り返し集塵による屋内残存放射性 Cs の低減効果の有無や、その長期的な効果はまだ調べられていなかった。

そこで、本研究では大熊町を中心にヒトの出入り及びヒトの活動の頻度が異なる木造住家（最多で 10 戸）において定期的な掃除機がけを最長で 3 年間継続して行い、ハウスダストの集塵を行った。各住家における掃除機がけによるハウスダスト量及びハウスダストに含まれる放射性 Cs について、各住家での低減の有無及び低減（減少）速度の速さを評価し、何が低減に影響を与えているのかについて知見を得ることを目的とした。同時に、住家の換気率や外気中及び屋内の気中放射性エアロゾルなども測定し、あらたな放射性 Cs の屋内への入り込みがどの程度あるのかについて検討を行った。

2. 研究期間内に実施した内容

年目／実施年度	実施した内容
1 年目	ヒトの出入りの頻度が異なる木造住家において、定期的な掃除機がけを継続して
令和 4 年度	行いハウスダストを集塵し、床面積当たりのハウスダスト量及びハウスダスト中の重量当たりの Cs-137 濃度の低減（減少）の速さを評価した。住家の換気率、隙

	間率や屋外の外気中放射性エアロゾルなどの測定を開始した。 大熊町の木造住家 10 戸(ID_O_3,6,7,8,9,10,11,12,13,14)において調査を行った。10 戸のうち ID_O_3,7,11,12,13 の 5 戸は本研究による調査が開始される前の 2019/4/10 に避難指示が解除されている。ID_O_6,8,14 の 3 戸は特定復興再生拠点区域にあり 2022/6/30 に避難指示が解除された。ID_O_9,10 は帰還困難区域に位置しており、避難指示解除の目処は立っていない。コードレススティック型掃除機を用いて定期的にハウスダストを集塵し、粒径別 (<20 μm, 20–63 μm, 63–180 μm, 180–500 μm, 500 μm–1 mm, 1–2 mm, >2 mm) に分離した後秤量し、ハウスダスト中の Cs-137 をゲルマニウム半導体検出器(HPGe) で測定・定量評価した。調査住家の換気率をトレーサースガス (CO₂)とガスセンサーを用いて評価した。さらに、気密測定機器により住家の隙間がどのくらいあるかを評価した。電気が復旧した 4 戸(ID_O_6,7,11,12)において外気中及び屋内の放射性エアロゾルをエアサンプラーにより継続的に捕集した。スミア法により床面などに沈着している放射性物質(ダストに付着)の表面汚染密度を測定した。屋外・屋内の γ 線スペクトルについて解析を行い直達線/散乱線の分別評価方法を検討した。 本研究は、東北大学大学院薬学研究科ヒトを対象とする研究に関する倫理委員会にて令和 4 年 3 月 31 日に承認を受けた手法により実施した。
2 年目	昨年度に引き続き、大熊町の木造住家において定期的な掃除機がけを行った。集塵したハウスダストについて床面積当たりのハウスダスト量及びハウスダスト中の重量当たりの Cs-137 濃度の低減(減少)の速さを評価した。住家の換気率、隙間率や屋外の外気中及び屋内の気中放射性エアロゾルなどの測定を継続して行い、屋外・屋内気中浮遊粒子の Cs-137 濃度の変化と I/O 比についてデータを収集した。
令和 5 年度	大熊町の木造住家 8 戸(ID_O_3,6,7,8,9,10,13,14)について調査を続行した。ID_O_11,12 の 2 戸は住民の都合により令和 5 年度以降の調査継続はされないこととなった。2 年より短い期間での調査では繰り返し掃除機がけの効果についての考察が困難となるため、ID_O_11,12 に替わるあらたな調査住家の追加は行わないこととした。昨年度と同様にコードレススティック型掃除機を用いて定期的にハウスダストを集塵し、粒径別 (<20 μm, 20–63 μm, 63–180 μm, 180–500 μm, 500 μm–1 mm, 1–2 mm, >2 mm) に分離した後秤量し、ハウスダスト中の Cs-137 をゲルマニウム半導体検出器(HPGe) で測定・定量評価した。調査住家の換気率をトレーサースガス (CO₂)とガスセンサーを用いて評価した。さらに、気密測定機器により住家の隙間がどのくらいあるかを評価した。2 戸(ID_O_6,7)において外気中及び屋内の気中放射性エアロゾルをエアサンプラーにより継続的に捕集した。スミア法により床面などに沈着している放射性物質(ダストに付着)の表面汚染密度を測定した。屋外・屋内の γ 線スペクトルについてアンフォールディング手法により解析を行った。 本研究は、東北大学大学院薬学研究科ヒトを対象とする研究に関する倫理委員会にて令和 4 年 3 月 31 日に承認を受けた手法により実施した。
3 年目	昨年度に引き続き、大熊町の木造住家 8 戸(ID_O_3,6,7,8,9,10,13,14)においてコー

令和 6 年度	ドレススティック型掃除機を用いて定期的な掃除機がけを行った。3 年間における掃除機がけのトータル回数は各住家についてそれぞれ 21,23,21,25,17,17,13,15 回であった。ハウスダストは昨年度と同じく粒径別に分離した後秤量し、ハウスダスト中の Cs-137 をゲルマニウム半導体検出器(HPGe)で測定・定量評価した。床面積当たりのハウスダスト量及びハウスダスト中の重量当たりの Cs-137 濃度の低減(減少)の速さを評価し、減少速度の差について考察を行った。粒径ごとのハウスダストを化学的性状により水溶性・塩酸溶性・残渣の 3 つに分けそれぞれ Cs-137 の測定を行った。この実測値を用いてハウスダストの経口摂取による内部被ばく線量(大人の Cs-137 による預託実効線量)を DCAL (ORNL/TM-2001/190, 2006)により算出した。調査住家の換気率をトレーサーガス(CO₂)とガスセンサーを用いて評価した。さらに、気密測定機器により住家の隙間がどのくらいあるかを評価した。3 戸(ID_O_6,7,8)において外気中及び屋内の気中放射性エアロゾルをエアサンプラーにより継続的に捕集した。室内の放射性セシウム沈着量の外気からの寄与の評価を行い、あらたな放射性 Cs の屋内への入り込みがどの程度あるのかを検討した。スミア法により放射性 Cs の表面汚染密度を評価した。アンフォールディング手法により屋外・屋内の γ 線スペクトルについて解析を行い、エネルギースペクトル分析手法の除染前後の住家及び瓦等に堆積物のある住家への適用と評価について検討を行った。 本研究は、東北大学大学院薬学研究科ヒトを対象とする研究に関する倫理委員会にて令和 4 年 3 月 31 日に承認を受けた手法により実施した。
---------	--

3. 研究終了時に得られた結果・結論

① 研究結果・結論(総括)・成果など

掃除機を用いた繰り返し集塵により、床面積当たりのハウスダスト量は調査した大熊町内の 10 戸のうち 7 戸で低減(減少)傾向が観察された。(10 戸のうち 2 戸は短期で調査が終了したため傾向の把握ができなかった。)初期値のハウスダスト量が高い住家ほど減少速度が速い。減少が速くない住家は、ヒトの出入りが多い時期があり、その際に外からコールドダストの持ち込みがありハウスダスト量が増えたためと考えられる。粒径ごとのハウスダストを化学的性状により水溶性・塩酸溶性・残渣の 3 つに分けそれぞれ Cs-137 の測定を行い、この実測値を用いてハウスダストの経口摂取による内部被ばく線量(大人の Cs-137 による預託実効線量)を DCAL (ORNL/TM-2001/190, 2006)により算出した。ハウスダスト量の減少に伴い預託実効線量は減少する。ハウスダスト量とともに重量当たりのハウスダスト中 Cs-137 濃度が減少すると預託実効線量はさらに減少するが、床面積当たりのハウスダスト量の減少の速さに比べて、重量当たりのハウスダスト中の Cs-137 濃度の減少速度は小さいことがわかった。この原因として、事故直後に家の中に入り込んだ放射性物質がハウスダストに付着してさまざまな隙間に残留しており、それらが徐々に室内に出て来ていることによることが推定される。一番減少速度が速い住家では、毎日ヒトの活動があり、コールドダスト持ち込みによる希釈効果が大きいことが示唆された。エアサンプラーにより捕集した気中浮遊粒子の Cs-137 濃度は、屋外・屋内とも変動が大きく、両者に相関は見られなかった。Cs-137 屋内濃度は、平均で屋外濃度の 0.87 倍±0.27 倍で、調査期間中に一定の変化傾向は見られなかった。エアサンプラーによる測定値から屋外気中浮遊粒子の Cs-137 濃度を 1 mBq/m³とし、換気回数実測値を用いて無人の家屋における

室内沈着量をストークスの式を用いて推定した結果、床面積当たりの Cs-137 濃度が低い住家では、平均で 33.3%が外気からの寄与と評価された。しかし、屋内で測定された気中 Cs-137 は既築住家屋内に残存している Cs-137 の付着したハウスダスト由来である可能性が考えられる。このことを確認するために、新築の家での屋外・屋内の気中 Cs-137 を測定する調査がさらに必要である。

② 計画・目標通り実施できなかった事項とその理由

平成 31～令和 3 年度の「被ばく線量に影響を及ぼす住家内外の要因に関わる研究」での調査において、放射性 Cs を含む土やホコリなどが屋根瓦と野地板の間に堆積している住家が存在すること、これらの住家では屋内の放射線量が他の住家に比べて高くなる（屋内空間線量率/屋外空間線量率の比が高くなる）ことを示してきた。住民は、なぜ屋外の空間線量率が同じ程度なのに自分の家の屋内の放射線量だけが他の家より高いのか、疑問と不安をいだいており、納得のいく説明が必要とされていた。しかしながら、原因解明のためには屋根の瓦を剥いで堆積物を採集し放射性 Cs を測定することが必要であり、この一連の作業はかなりの経費と労力を要する。そこで、本研究では、住家で取得した屋外・屋内の γ 線スペクトルをアンフォールディング手法により解析し、そこから得た散乱線成分/直達線成分 (S/D) の値を屋根瓦と野地板の間の堆積物の有無の判断に使うことができないか検討を行うこととした。

これにあたり、まず除染前と除染後とで散乱線成分/直達線成分 (S/D) に差が出るかどうかを調べた。その結果、除染前に比べて除染後に S/D 値は大きく増えていることがわかった。次に、瓦と野地板の間に堆積物のある住家について、堆積物の無い住家との S/D 値に有意な差が出るかどうかの検討を行った。その結果、両者間に S/D 値の違いは観察されなかった。屋内のスペクトル測定箇所の検討を行い、屋根に近い屋内の場所で測定したスペクトルを用いても同じく差は観察されなかった。住環境におけるあらたな放射性物質集積因子にスペクトル解析からの S/D 情報を使用することは難しいことがわかった。

なお、除染の前後で S/D 値の差が明らかにすることは住民に除染のもたらす変化や効果を説明する用途には有用であるため、住民への説明に活用を図った。

③ 当初の計画で予定した成果以外（以上）に得られた事項

電気が復旧したのべ4戸(ID_O_6,7,11,12)において外気中及び屋内の気中放射性エアロゾルをローバリュームポンプを用いて5 L/minで1～2ヶ月連続でフッ素樹脂バインダーガラス繊維フィルター Emfab; $\phi 47$ mm; Cytiva) に捕集し、屋外・屋内のCs-137濃度とともに気中粒子濃度の評価も同時に行った。さらに、1戸 (ID_O_6) においてはアンダーセン型ロープレッシャーインパクターも加えて設置し、粒径別のエアロゾルをEmfab ($\phi 80$ mm) に捕集した。

気中粒子濃度について、屋内と屋外の気中粒子濃度には相関がみられたが、屋内の方が低かった（平均 $\pm$ SD： 屋内 $6.0\pm 3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 屋外 $15\pm 7.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, I/O比 (Indoor/outdoor比) 0.39 ± 0.14)。これに対し、気中のCs-137濃度は、屋内外で相関は見られず、屋内外が同等もしくは室内の方が高いこともあった（屋内 $1.0\pm 0.27 \text{ mBq}/\text{m}^3$, 屋外 $0.90\pm 0.42 \text{ mBq}/\text{m}^3$, I/O比： 平均 $\pm$ SD: 0.87 ± 0.27)。このことは、屋内の気中Cs-137の変動が、外気濃度の変動よりもヒトの活動によって左右されている可能性を示唆する。すなわち、屋内で測定された気中Cs-137は既築住家屋内に残存しているCs-137の付着したハウスダスト由来である可能性を示唆している。

気中粒子（重量）の粒径分布は、既存の研究結果と同様に、2.1–5.2 μm と0.30–0.69 μm 辺りにピークを持つ二峰性の粒径分布だった。一方、気中Cs濃度は、0.49–0.69 μm にピークを持つ単峰性の粒径分布を示していた。粗大粒子は、海塩粒子や土壌粒子とされており²⁾、大気中で見られるセシウムの起源は土壌や海塩ではないことが示唆された。

4. 研究成果の活用方策の提案

本研究をさらに発展させる新たな研究や事業化の提案

本事業で得られた結果に関して、地方自治体及び住民につど説明・対話してきたが、その際に居住環境におけるさまざまな放射線に関する不安、疑問やリクエストが寄せられた。具体的には、既築戸建住家においてそのまま暮らしていて大丈夫なのか、リフォームやハウスクリーニングによって屋内放射性物質の低減効果はどの程度あるのか、その低減効果は持続するのか、外気からのあらたな放射性Csの屋内への入り込みと沈着はどの程度なのか、それは掃除機がけによって低減できるのか、新築の家と既築戸建住家ではどのような違いがあるのか、などである。既築戸建住家におけるリフォームやハウスクリーニングによる屋内放射性物質の低減効果及び長期にわたり低減効果が持続性するかどうかについてはまだ調べられていない。外気からのあらたな放射性Csの沈着に対する掃除機がけによる低減効果については、既築戸建住家に加えて新築の家で検証する必要がある。これらは特に福島第一原子力発電所に近い拠点区域等で生活再建をする住民及び帰還を検討している住民の不安解消のために重要な知見である。これらの疑問やリクエストに答えるための調査と検証を行い、その成果をまとめたものをリスクコミュニケーションに活用していくことを提案する。

引用文献

- 1) Yoshida-Ohuchi H, Shinohara N. Estimated internal exposure doses due to indoor radiocaesium contamination in residential houses after the Fukushima nuclear accident
Sci. Rep. 2020; 10: 17212.
- 2) Whitby KT. 1978; The physical characteristics of sulfur aerosols. In Sulfur in the Atmosphere (pp. 135-159). Pergamon.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和 4 年度～令和 6 年度実施総括報告書

研究課題名	原子力事故後の居住環境における室内外の物質移行を考慮した住民の被ばく線量評価に関する研究
研究期間	令和 4 年度～令和 6 年度（3 年間）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	高原 省五	日本原子力研究開発機構原子力安全・防災研究所安全研究センターリスク評価・防災研究グループ・グループリーダー
分担研究者		
若手研究者		

1. 研究の概要

家屋の内外を含む居住環境における放射線被ばくは、原子力事故後の初期から長期間にわたって汚染地域での住民生活を管理するために必要不可欠な情報の一つである。本研究では、居住環境のうち室内における住民の被ばくに着目し、「①事故後の初期における屋内退避時における住民被ばく線量の評価」及び「②事故後の長期における帰還後の居住環境での被ばく線量評価」を目的とした¹⁾。

本研究では、まず、①の目的に関連して、東京電力福島第一原子力発電所（以下、1F）事故後の環境測定をもとに開発された室外再浮遊モデル²⁾及び室外粒子の室内侵入モデル⁴⁾⁵⁾を、当研究グループの有する事故影響評価コード OSCAAR³⁾に実装し、気象データ及び建蔽率データを整備して再浮遊及び室内への侵入を評価できるようにした。改良した OSCAAR を用いて国内全サイトに対する屋内退避時の被ばく低減係数を評価し、原子力規制庁⁶⁾、内閣府（原子力防災）⁷⁾等の既存の研究成果を踏まえて知見を整理した⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。また、屋内退避に関して、住宅の広さや気密性能による被ばく低減係数の違い、屋内退避の低減効果を高くするための行動を整理した資料を作成してアウトリーチ活動を実施した¹¹⁾¹²⁾。

次に、②の目的に関連して、室内での再浮遊モデルを開発した¹³⁾¹⁴⁾。粒径、床材、床面からの高さ及び人の室内における行動による室内再浮遊係数の変動を反映した実験を設計して再浮遊係数を評価し、同係数を組み込んだコンパートメントモデルを作成して室内空気中の放射性物質濃度の時間変化を解析できるようにした。開発したコンパートメントモデルを用いて住民帰還後の被ばく線量評価を行い、(i) 住民帰還後の被ばく線量のうち室内再浮遊の占める割合は極めて小さいこと、(ii) 帰還時に床面を丁寧に掃除することで、再浮遊による被ばくを大幅に低減できることを示すことができた¹⁵⁾。

2. 研究期間内に実施した内容

年目／実施年度	実施した内容
1 年目	令和 4 年度は、目的①に関連して、1) 各サイトの地域性・季節性及び社会状況

令和4年度	に関するデータの整備を実施した。また、目的②に関連して、1) 室外再浮遊モデルの評価への組み込みと、2) 室内再浮遊モデルに関する解析及び実験の設計を実施した。 ①-1) の作業では、国内の原子力発電所を有する全サイトに対して、気象と建蔽率のデータを整備した。気象データとして、風速、風向及び降雨量を整備した。また、2 分の 1 地域メッシュに含まれる建物面積をもとに、建蔽率データを整備した。これにより、各サイトで確率論的事故影響評価及び再浮遊解析を実施するために必要な情報の整備を完了した。 ②-1) の作業では、地表面からの再浮遊を「再浮遊係数」を用いてモデル化することとした。再浮遊は沈着後の経過時間により異なる現象で生ずると考えられることから、事故後の早期と長期に分けて再浮遊係数を評価することにした。早期及び長期のそれぞれについて、福島事故後の実測に基づく経験モデルと現象に基づく理論モデルを採用し、評価への組み込みに必要な情報の整備を完了した。 ②-2) の作業では、第一に、令和5年度以降の実験及びCFD解析における室内の再浮遊粒子性状を決めるための調査を行った。この結果、文献値と整合性があり、吸入被ばくへの寄与の大きな粒径で、かつ、バックグラウンドの影響が小さいとの観点から、粒径 $1\mu\text{m}\sim 250\mu\text{m}$ の TiO_2 と標準粉体を利用することにした。また、第二に、実験装置の改良点を模索するため、TSI社製の Optical Particle Sizer と PIV 装置での予備的な測定を行う実験系を構築し、ダストの分布や初速度を実験的に評価可能であることを確認するとともに、効率化等に関する課題を抽出した。
2年目	令和5年度は、目的①に関連して、2) 各サイトにおける事故後初期の屋内退避時における被ばく線量評価を実施する。また、目的②に関連して、3) 室内再浮遊モデルに関する解析及び実験を実施した。
令和5年度	①-2) の作業では、屋内退避を実施しない場合と実施した場合のそれぞれについて、外部被ばく及び内部被ばくによる甲状腺等価線量と実効線量を評価し、さらに、屋内退避による被ばく低減係数 (= 屋内と屋外での被ばく線量の比) を算出した。国内の全 17 サイトを対象とし、各サイトの気象条件 (風向風速、降雨)、地理条件 (地目、建蔽率) 及び人口分布を考慮した。原子力機構が開発した確率論的事故影響評価コード OSCAAR を利用し、5 つの事故シナリオ (福島事故や新規規制基準を踏まえたシナリオ等) に対して評価した。 ②-3) の作業では、室内での再浮遊係数を評価するため、日本の一般住宅と同程度の規模かつ換気設備を備えた実建屋の一室において、フローリングの床面に試験用ダストを散布し、自然換気時、歩行時、掃除機掛け時、エアコン稼働時について、床面から 50 cm 及び 150 cm における粒径別空気中粒子濃度分布を測定した。測定には TSI 社製の Optical Particle Sizer を使用し、室内中心におけるデータを取得した。測定は、自然換気時、人の歩行時、掃除機の稼働時、及び、エアコンの稼働時について実施、それぞれの条件における再浮遊係数を評価した。また、床材による粒子の床材からの離脱率を評価するため、風洞試験を実施した。その結果、床材と試験用ダストの散布濃度により、違いが生じることが分かった。
3年目	令和6年度は、目的①に関連して、3) 屋内退避に関する情報提供資料の作成を

令和 6 年度	実施した。また、目的②に関連して、4) 床材・行動別の室内再浮遊係数を評価するとともに、5) 各サイトにおける事故後初期の屋内退避時における被ばく線量評価を実施した。 ①-3) の作業では、国・自治体・住民に向けての屋内退避に関する情報を提供する資料を作成した。資料には、令和 5 年度に評価した屋内退避による被ばく低減係数（事故シナリオごと、国内のサイトごと）と当グループの有する屋内退避に関する知見（原子力規制庁受託及び内閣府受託）を組み合わせ、屋内退避の被ばく低減効果の依存性及び屋内退避時の行動に関する知見を整理した。 ②-4) に関して、室内床面に沈着した放射性物質の再浮遊による被ばくを評価するためのモデルを開発した。室内再浮遊係数は粒径、床材、床面からの高さ、人の室内における行動により生じる風速場等の条件によって異なることが考えられるため、本研究ではこれらの条件ごとに室内再浮遊係数を実家屋内における実験によって求めた。 また、目的②-5) に関して、実験的に得られた室内再浮遊係数を用いて、室内再浮遊放射性物質による吸入被ばく線量評価モデルを開発した。開発したモデルを用いて、事故発生から 1 年間自宅を離れて再度居住開始した場合の被ばく線量評価を行い、屋外グランドシャイン等の居住環境下における総被ばく線量に対する室内再浮遊による被ばく線量の寄与割合を評価した。
---------	---

3. 研究終了時に得られた結果・結論

① 研究結果・結論（総括）・成果など

季節性・地域性と社会状況を考慮して、国内のサイトごと、事故シナリオごとに屋内退避時の被ばく低減効果の評価した。その結果、サイト間の被ばく低減効果の違いに関して、風速が弱いサイトほど被ばく低減効果が高くなる傾向が見られた。この結果より、サイト間の地目や建蔽率などの違いよりも風速の違いが被ばく低減効果に大きな影響を与えることが明らかとなった。事故シナリオ間の被ばく低減効果の違いに関して、特に大気中に放出された放射性物質中のヨウ素・セシウムに対する希ガスの割合によって被ばく低減効果が異なることが示された。このような情報は、原子力防災計画を策定する国・自治体にとって重要な情報となる。さらに、本事業での成果と今までの原子力規制庁事業と内閣府事業で得られた屋内退避に関する知見を組み合わせ、事故後初期における屋内退避に関する情報を提供するための資料を作成した。この資料では、屋内退避の低減効果のみならず、住宅の広さ・建築年の違い、屋内退避の低減効果を高くするための行動をまとめており、住民にとって有用な情報を提供できる資料となっている。

室内床面に沈着した放射性物質の再浮遊係数を粒径・床材・床面からの高さ・人の室内における動作により生じる風速場ごとに実家屋を用いた実験により取得することができた。得られた室内再浮遊係数を用いて、室内滞在時の様々な条件下における室内再浮遊による被ばく線量評価を行うことができるようになった。家屋の換気率や事故後一定期間自宅を離れて居住を再開した場合等様々な条件に関して室内再浮遊を考慮した居住環境下における被ばく線量評価の結果、室内再浮遊による被ばく線量は居住環境下で影響を及ぼす全ての被ばく経路の総被ばく線量に対して数パーセント以下になることがわかった。

これらの結果を取りまとめて、査読付論文 1 報¹⁰⁾、原子力機構報告書 1 報⁹⁾、国内発表 6 件¹⁾⁵⁾⁸⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾、

アウトリーチ活動 2 件¹¹⁾¹²⁾の成果を挙げることができた。

② 計画・目標通り実施できなかった事項とその理由

計画・目標通り実施できなかった事項はない。

③ 当初の計画で予定した成果以外（以上）に得られた事項

当初の計画で予定した成果以外（以上）に得られた事項はない。

4. 研究成果の活用方策の提案

本研究をさらに発展させる新たな研究や事業化の提案

事故初期時の評価において、屋内退避のみならず避難などの防護措置の低減効果をまとめ、本事業の成果と合わせて防護措置を最適に組み合わせた戦略の立案につながる研究が必要と考えられる。また、このような戦略を実効的なものとするためには、事故対応において主体となる住民の防護措置に対する理解や知識の向上が不可欠である。そのためには、戦略全体の効果や措置の流れなどを網羅した資料や、住民との効果的なリスクコミュニケーションに関する検討も必要と考えられる。さらに、そのような資料を用いた取り組みやリスクコミュニケーションの結果として、住民の防災リテラシーがどの程度向上したのかを評価するための方法も必要である。例えば、社会調査を継続的に実施し、様々な教育の機会や災害等の経験の前後において、防護戦略に対する住民の認知率がどの程度変化するかを把握することで、そのような評価につなげていくことが可能ではないかと考えている。

引用文献

- 1) 高原省五, 長久保梓, 廣内淳, 林奈穂, 松井康人, 米田稔, 原子力事故後の居住環境における物質移行を考慮した住民の被ばく線量評価に関する研究その 1—研究の概要—, 日本原子力学会 2023 秋の大会, 2023 年 9 月 6-8 日.
- 2) M. Ota, S. Takahara, K. Yoshimura, et al., Soil dust and bioaerosols as potential sources for resuspended ^{137}Cs occurring near the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant Journal of Environmental Radioactivity, 264 (2023) 107198.
- 3) JAEA, 2020, OSCAAR コードパッケージの使用マニュアル, JAEA-Testing 2020-001.
- 4) J. Hirouchi, S. Takahara, H. Komagamine, et al., Penetration factor and indoor deposition rate of elementary and particulate iodine in a Japanese house for assessing the effectiveness of sheltering for radiation exposures, J Radiol Prot. 41, (2021), S139-S149.
- 5) 廣内淳, 渡邊正敏, 林奈穂, 長久保梓, 松井康人, 米田稔, 高原省五, 原子力事故後の居住環境における物質移行を考慮した住民の被ばく線量評価に関する研究その 2—屋外で再浮遊した物質の屋内への侵入—, 日本原子力学会 2023 秋の大会, 2023 年 9 月 6-8 日.
- 6) NRA, 2021, 屋内退避による被ばく低減効果に係る委託研究の成果（概要報告）（第 49 回技術情報検討会資料 49-1）.
- 7) 内閣府, 2022, 原子力災害発生時の防護措置—放射線防護対策が講じられた施設等への屋内退避—, 令和 4 年 10 月 27 日.
- 8) 廣内淳, 渡邊正敏, 林奈穂, 長久保梓, 松井康人, 米田稔, 高原省五, 原子力事故後の居住環境における物質移行を考慮した住民の被ばく線量評価に関する研究その 4—原子力事故初期時の屋内退避による低減効果の評価—, 日本原子力学会 2024 秋の大会, 2024 年 9 月 11-13 日.
- 9) 廣内淳, 渡邊正敏, 林奈穂, 長久保梓, 高原省五, 各事故シナリオにおける原子力サイトごとの被ばく線量と屋内退避時の被ばく低減係数の評価, JAEA-Research 2024-015
- 10) Jun Hirouchi, Masatoshi Watanabe, Naho Hayashi, Azusa Nagakubo, Shogo Takahara, Effects of different accident scenarios and sites on the reduction factor used for expressing sheltering effectiveness, J. Radiol. Prot. 45, 011506.
- 11) 高原省五, 原子力災害時の屋内退避に関する考察について—被ばく線量シミュレーションの結果より—, 令和 6 年度鳥取県原子力防災講演会, 2024 年 12 月 10 日.
- 12) 高原省五, 福島第一原子力発電所事故の教訓—原子力災害時の対応について—, 令和 6 年度ラジエーションカレッジセミナー, 2025 年 1 月 28 日.
- 13) 長久保梓, 林奈穂, 松井康人, 廣内淳, 米田稔, 高原省五, 原子力事故後の居住環境における物質移行を考慮した住民の被ばく線量評価に関する研究その 3—屋内沈着粒子の再浮遊—, 日本原子力学会 2023 秋の大会, 2023 年 9 月 6-8 日.
- 14) 長久保梓, 林奈穂, 廣内淳, 松井康人, 米田稔, 高原省五, 原子力事故後の居住環境における物質移行を考慮した住民の被ばく線量評価に関する研究その 5—室内粒子再浮遊係数の実験を基にした評価, 日本原子力学会 2024 秋の大会, 2024 年 9 月 11-13 日..
- 15) 林奈穂, 長久保梓, 廣内淳, 松井康人, 米田稔, 高原省五, 原子力事故後の居住環境における物質移行を考慮した住民の被ばく線量評価に関する研究その 6—室内再浮遊粒子を考慮した室内滞在時の被ばく線量評価, 日本原子力学会 2024 秋の大会, 2024 年 9 月 11-13 日..

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度～令和6年度実施総括報告書

研究課題名	陸・水圏植物における有機結合型トリチウム（OBT）生産速度の網羅的把握
研究期間	令和4年度～令和6年度（3年間）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	佐藤 雄飛	公益財団法人環境科学技術研究所・副主任研究員
分担研究者		
若手研究者		

1. 研究の概要

本研究は、福島第一原子力発電所より海洋放出される ALPS 処理水に関連したトリチウム（^3H）の環境動態把握を目的とした。その中でも特に、植物有機物中への蓄積（有機結合型トリチウム：Organically Bound Tritium：OBT としての蓄積）に着目した。これは、降水や海水といった水中のトリチウム（トリチウム化水：HTO として存在）に比べて、有機物と結合したトリチウムに関しては環境動態に関する知見が希薄であること、また植物中の OBT がより直接的に人の経口摂取に寄与する可能性があるためである。本研究では、東北地方の太平洋側沿岸域において一般的に生息する各種の陸上植物 {クロマツ（苗木）、ミズナラ（苗木）、イネ、コマツナ、牧草} 及び水生一次生産者 {植物プランクトン（珪藻、ハプト藻、緑藻、クリプト藻）、海藻（アオサ、オゴノリ）} について、水素の安定同位体である重水素（^2H）をトリチウムの代替物質としたトレーサー培養実験を実施し、これら生物種における OBT 生産能力を評価した。また、これら培養実験で得られた結果に基づいて、陸上植物（コマツナ）中の OBT 濃度を再現する数値モデルを構築し、環境中にトリチウムが放出された際の同植物中における OBT 濃度の推定が可能になった。さらに、本研究の成果と環境科学技術研究所における過去の研究成果を合わせて、福島沿岸海域における魚類（ヒラメ）中の OBT 濃度を予測する数値モデルを開発した。そして、実際に処理水に由来するヒラメへの OBT の蓄積を推定した結果、この蓄積は実測的に検出可能な水準よりも低いものであり、ヒラメを経口摂取した場合より被ばくを考慮した際には十分に無視できる程度であることが示唆された。
--

2. 研究期間内に実施した内容

年目／実施年度	実施した内容
1 年目	環境科学技術研究所の構内に陸上植物（樹木、草本類、イネ）を栽培するための実験圃場を整備した。その後、各種の植物種 {クロマツ苗木、ミズナラ苗木、イネ、牧草（オーチャードグラス）、コマツナ} を実際に栽培し、栽培方法、試料の採取及び採取の方法、分析法の確認を行った。また、同時に、これらの植物に関する成長度合い（重量変化等）や有機物の元素組成といった、植物中の OBT 動態を解析する上で基盤情報となるデータを取得した ¹⁾ 。また、水生一次生産者である植
令和4年度	

	物プランクトンに関しては、国立環境研究所より東北沿岸海域に一般的に生息する植物プランクトン 4 種（珪藻、ハプト藻、緑藻、クリプト藻）の単離株を購入し、それらのプランクトン類について培養条件（人工海水の組成や光条件等）を検討した。その結果、環境科学技術研究所の実験室内における同プランクトン類の安定的な培養が可能となった。
2 年目	陸上植物 3 種（クロマツ苗木、コマツナ、イネ）に関して、環境科学技術研究所に設置された気象チャンバー（気温等の生育条件を制御できる培養器）内において栽培ポット内の土壌へ重水（^2H で標識された水：$^2\text{H}_2\text{O}$）を添加したトレーサー実験を実施し、植物の OBT 生産能力の指標となる有機結合型重水素（Organically Bound Deuterium：OBD）の生産速度に関するデータを取得した。また、植物プランクトンに関しては、海水中に重水を添加したトレーサー実験を実施し、陸上植物と同様に OBD の生産速度を取得した。さらに、ここで得られた植物プランクトンの OBD 生産速度データと環境科学技術研究所における過去の研究成果を合わせて解析し、福島沿岸海域における植物プランクトンの OBT 生産速度と底生魚（ヒラメ）への移行度合いを推定した。その結果、この OBT 生産速度は海底堆積物や魚介類への OBT の蓄積にほとんど影響しない程度であることが示唆された^{2,3)}。なお、トリチウムの代替として ^2H を用いた場合の実験結果に対する同位体効果は、安全評価上の解釈にほとんど影響しない。
令和 5 年度	
3 年目	陸上植物 2 種 {ミズナラ苗木、牧草（オーチャードグラス）} に関して、前年度と同様にトレーサー実験を実施し、これら植物種の OBD の生産速度に関するデータを取得した。また、海藻 2 種（アオサ、オゴノリ）を環境科学技術研究所近隣の沿岸海域より採取すると共に、同海藻類を水温及び光条件の制御下で培養するための実験系を構築した。その後、植物プランクトンと同様にトレーサー実験を実施し、これらの海藻における OBD の生産速度データを取得した。さらに、前年度にコマツナについて取得した各種データを用いて、同植物種の生育期間中における OBT の蓄積状況を推定する数値モデルを構築した。加えて、前年度に構築した数値モデル（植物プランクトンからヒラメへの OBT の蓄積を推定）に海水中の HTO の拡散を再現する数値モデル⁴⁾を組み合わせ、福島沿岸海域における ALPS 処理水に由来するトリチウムのヒラメへの蓄積度合いを推定した。この際、これまでの処理水の放出状況を参考にした現実に即した処理水放出（現実的放出シナリオ）と、東京電力が定める排出基準上限値のトリチウム濃度（$1,500 \text{ Bq L}^{-1}$）を仮定した放出（最大リスクを想定した放出シナリオ）の、各々で推定計算を実施した。その結果、最大リスクを想定したシナリオでさえも、ヒラメを経口摂取した場合による被ばくを考慮した際には十分に無視できる程度 {国際放射線防護委員会（International Commission on Radiological Protection：ICRP）が定める公衆被ばくの線量限度（1 mSv y^{-1}）の 0.001%以下} であることが示唆された。
令和 6 年度	

3. 研究終了時に得られた結果・結論

① 研究結果・結論（総括）・成果など

本研究の当初の計画では、東北沿岸域に生息する陸上植物及び水生一次生産者についての OBT 生産速度に関する実測的情報の提示までを目標としていた。しかしながら、計画初年度の終了時における評価委員からの要望と社会的必要性を鑑みて、計画 2 年目からは OBT 生産過程の数値モデルの作成を目標に加えた。まず OBT 生産速度の実測的評価については、重水トレーサー実験により、陸上植物 5 種（クロマツ、ミズナラ、イネ、牧草、コマツナ）及び水生一次生産者 6 種 {植物プランクトン 4 種（珪藻、ハプト藻、緑藻、クリプト藻）、海藻 2 種（アオサ、オゴノリ）} について同生産速度に関する情報を取得し、その一部を科学論文として公表した²⁾。また、ここで取得された実測データに基づいて、ALPS 処理水が放出された状況下の福島沿岸海域における植物プランクトンの OBT 生産量や底生魚（ヒラメ）へのトリチウムの蓄積量を推定するための数値モデルを開発した^{2,3)}。このモデルで実際に計算を実施した結果、ALPS 処理水に由来するトリチウムは、放射性核種を保持する重要な環境媒体である海底堆積物への滞留（ $10 \text{ Bq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 以下）や人の経口摂取による被ばく {ICRP が定める公衆被ばくの線量限度（ 1 mSv y^{-1} ）の 0.001% 以下} を考えた場合に無視できる程度の蓄積度合いであることが示された^{2,3)}。また、陸上植物に関しては、海水中のように ALPS 処理水が植物中 OBT 濃度に影響を与えうる状況が明確に想定されるシナリオが無いものの、万が一の不慮の事象に備えるという意味で、OBT 濃度を推定するための数値モデルを構築した。この際、経口摂取に寄与する葉菜であり、また栽培期間の短さや植物体の大きさの観点でモデル構築を行い易かったコマツナを対象植物とした。ここで構築したモデルは、本研究で取得した実測データの精緻さと、これまで勘案しなかった非光合成反応の概念を構造に組み込んだことにより、従来の研究で用いられた数値モデルよりも推定精度の高いものとなった。この数値モデルに関しては、現在、科学論文としての公表を検討している。また、副次的成果として、本研究で得られた植物有機物の元素組成データを解析した結果、植物の種類及び部位によって OBT の蓄積効率が異なることが明らかとなり、具体的には植物種として木本植物、部位として根において OBT の蓄積効率が比較的低いことが示唆された¹⁾。これらの成果は、ALPS 処理水に伴う風評被害の防止や、原子力関連施設の運用に伴う安心・安全の保証に寄与することが期待されるものである。

② 計画・目標通り実施できなかった事項とその理由

本研究は計画通り遂行され、設定された目標も十分に達成された。したがって、実施出来なかった事項は特に無い。

③ 当初の計画で予定した成果以外（以上）に得られた事項

当初の計画では重水トレーサーを用いて陸上植物及び水生一次生産者の OBT 生産速度に関する実測的データを取得することを目標としており、この目標は十分に達成した。これに加えて本研究では、この実測データを基に海水中における植物プランクトンや魚類への OBT 蓄積の数値モデルを構築した。また、このモデルを用いて ALPS 処理水に由来するトリチウムを蓄積した魚を摂取した場合の被ばく線量を具体的に評価し、その線量が非常に軽微であることを示した。さらに、陸上植物に関して、生育期間中の OBT 蓄積過程を再現する数値モデルを構築すると共に、トリチウムの蓄積効率に関する植物種や部位による差異を明らかにした。これら予定された以上の成果は、ALPS 処理水由来のトリチウムに関するリスク評価や風評被害の防止に直接的に貢献するだけでなく、原子力技術の運用に伴う環境リスク評価や安全性評価への活用が期待されるものである。

4. 研究成果の活用方策の提案

本研究をさらに発展させる新たな研究や事業化の提案

本研究では時限や予算の関係上、限定的な陸上植物種でのデータ取得や数値モデルの構築を行った。一方、本研究で対象とした植物種以外にも福島沿岸域には多くの種が存在する。その中には、野菜や穀物等、人の経口摂取による被ばくに寄与する可能性が高いものもある。また、水生一次生産者に関しても同様に、全て種類を網羅した訳ではなく、本研究では調査しなかった可食海藻も存在する。今後は、これら「食物」となる植物種に対して本研究のようなアプローチを広げてくことが、ALPS 処理水に関連したリスクに対する正確な科学的評価や風評被害の防止に繋がる可能性がある。さらに、本研究では数値モデルを用いて、植物プランクトンから魚（ヒラメ）へのトリチウムの蓄積を推定し、この魚を摂取した場合の被ばくリスクを評価したが、ここで想定した以外の蓄積経路（海藻から魚、など）や魚種についても同様のモデル計算を実施することで、福島沿岸で採取される水産物に対する ALPS 処理水の影響について網羅的でかつ定量的な情報を提示できる可能性がある。

引用文献

- 1) Satoh, Y., Imada, S., Nagai, T., Yamagami, M., Tani, T. 2025. Factors regulating the accumulation efficiency of organically bound tritium in plants across species, parts, and environmental conditions: Investigation using the C/H ratio in plant organic matter. *Journal of Environmental Management*, 380, 125168.
- 2) Satoh, Y., Omori, Y. 2023. Evaluating production rates of particulate organic hydrogen by marine phytoplankton for estimating phytoplanktonic productivity of organically bound tritium. *Water Research*, 242, 120592.
- 3) Satoh, Y, Tani, T. 2024. Estimation of accumulation potential for tritium in olive flounder on exposure of treated water derived from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: Tritium transfer from seawater and food chain into organically bound tritium in the targeted fish. *Environmental Research*, 257, 119278.
- 4) Kamidaira Y, Uchiyama Y, Kawamura H, Kobayashi T, Otosaka S, 2021. A modeling study on the oceanic dispersion and sedimentation of radionuclides off the coast of Fukushima. *Journal of Environmental Radioactivity*, 238–239, 106724.