

テーマ（１） 放射線健康管理に資する線量評価に関する研究  
健康管理に資する線量評価に関する研究  
線量推計に資する研究

- 1-1 浜通り地域を対象とした帰還住民の天然および人工放射性核種からの被ばく線量調査  
主任研究者：細田 正洋（弘前大学） ..... 1
- 1-2 複数の生物学的指標を組み合わせた長期放射線影響の予測と社会実装に向けた取り組み  
主任研究者：盛武 敬（量子科学技術研究開発機構） ..... 5  
分担研究者：中村 麻子（茨城大学）
- 1-3 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） ..... 9
- 1-4 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） ..... 13
- 1-5 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） ..... 18
- 1-6 原子力災害時における被災者の個人被ばく線量把握及び健康管理に資するインテリジェンスデータベースの構築  
主任研究者：金 ウンジュ（量子科学技術研究開発機構） ..... 22
- 1-7 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） ..... 26

# 放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和5年度研究報告書

研究課題名	浜通り地域を対象とした帰還住民の天然および人工放射性核種からの被ばく線量調査
令和5年度研究期間	令和5年4月3日～令和6年2月29日
研究期間	令和3年度～令和5年度（3年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	細田 正洋	弘前大学・教授
分担研究者		
若手研究者		

キーワード	浜通り地域、自然放射線、人工放射線、外部被ばく、内部被ばく、被ばく線量
-------	-------------------------------------

本年度研究成果
<p><b>I 研究背景</b></p> <p>我々は、浪江町において放射線の健康影響に係る研究調査事業「浪江町民のための被ばく線量調査」を2017年度から2019年度にかけて実施した<sup>1,2)</sup>。この調査事業ではフィールド調査のみでなく、浪江町民との交流も積極的に行った。浪江町での活動の中で、放射線と向き合って生活するためには、自然放射線に関する情報や他地域の放射線量の実態を知りたいとの声を多く聞いた。原発事故以前より自然界にはラドンをはじめとさまざまな放射性物質による被ばくがあったのにも関わらず、その実態は理解されていない。さらに、浜通り地域において多くの研究機関が地域に根付いた調査を実施しており、機関間の連携も浜通り地域の活性化において重要な課題である。</p> <p><b>II 目的</b></p> <p>富岡町、川内村および大熊町において自然放射線と原発事故由来の人工放射線からの被ばく線量の実態を明らかにし、自然放射線源からの被ばく線量を“ものさし”とすることで人工放射線による線量との比較が住民自身で容易にできるような資料を提供することを目的とする。</p> <p><b>III 研究方法</b></p> <p>1) 大気中の放射性セシウムの吸入摂取</p> <p>令和3年度中に決定したそれぞれの観測地点において3ヶ月ごとに可搬型ハイボリュームエアサンプラを用いて大気中ダストの採取を行い、高純度ゲルマニウム半導体検出器によって放射性セシウムを定量することで土壌から大気へと再浮遊した放射性セシウムの大気中濃度を評価した。</p> <p>2) 家屋内外のラドン・トロンの吸入摂取</p> <p>富岡町、川内村の各30家屋内及び大熊町内の10家屋にパッシブ型ラドン・トロン弁別モニタ(RADUET<sup>3)</sup>)とラドン・トロン子孫核種モニタ<sup>4)</sup>を設置した。季節変動を評価するためモニタを3ヶ</p>

月毎に交換し、4期の測定を実施した。また、比較対象地域として、弘前市内、北海道および沖縄県内の全30家屋で同様の調査を実施した。

### 3) 飲料水中の放射性セシウムの経口摂取

屋内ラドン濃度の調査を実施する各町村のそれぞれ10家屋において、3ヶ月ごとに2Lの飲料水を採水した。弘前大学において高純度ゲルマニウム半導体検出器によって放射性セシウムを分析した。

### 4) 飲料水中のラドンの経口摂取

屋内ラドン濃度の調査を実施する各町村のそれぞれ10家屋において、3ヶ月ごとに500mLの飲料水を採水した。可搬型ラドンモニタによって飲料水中ラドン濃度を評価した。さらに、飲料水の温度を60°C、80°C、90°Cに調整することで、加熱による飲料水中のラドン濃度の低減効果について検討した。

これらの個人の線量評価を行うための基礎情報（行動記録や家屋構造等）を取得するにあたり、弘前大学大学院保健学研究科に設置された倫理委員会の承諾を得た（承認番号: 2020-56）。

## IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

本年度で、川内村、富岡町、大熊町の3町村全ての屋内ラドン濃度の調査が終了した。川内村の屋内ラドン濃度は冬期に高く、夏期に低い一般的な季節変動を示した。一方、富岡町と大熊町では季節変動は観測されなかった。建築時期を2003年前後で区分し屋内ラドン濃度の平均値を比較した結果、2003年前に建てられた家屋は冬期のラドン濃度が夏期と比べて有意に高い傾向を示した。一方、2003年以降に建てられた家屋は季節変動が確認されず、かつ濃度の平均値も低かった。大熊町内の一施設の平均ラドン濃度は $586 \pm 160 \text{ Bq/m}^3$ と世界保健機関が勧告する参考レベルである $100 \text{ Bq/m}^3$ を超えた。これは、施設のある地域の基盤岩が花崗岩類であること、壁材として石膏ボードを使用しており多くの亀裂があること、ほとんど換気をしないことが高濃度化の要因であると考えられた。

川内村で得られた春期のトロン子孫核種濃度の平均値は $1.1 \pm 1.9 \text{ Bq/m}^3$ であり、富岡町での平均値( $0.4 \pm 0.5 \text{ Bq/m}^3$ )と比べ有意に高い傾向を示した。壁紙や壁に塗料が塗られていることでトロン濃度が低減することはいくつか報告されている。川内村の多くの家屋は壁紙が使用されていないことが、壁紙がある富岡町の家屋と比べて高い傾向を示した要因であると考えられる。

一方、対象地域である札幌市、弘前市、沖縄県内の屋内ラドン濃度は、それぞれ $17 \pm 19 \text{ Bq/m}^3$ 、 $16 \pm 13 \text{ Bq/m}^3$ 、 $15 \pm 17 \text{ Bq/m}^3$ であった。また、トロン子孫核種濃度は、それぞれ $0.4 \pm 0.4 \text{ Bq/m}^3$ 、 $0.3 \pm 0.3 \text{ Bq/m}^3$ 、 $0.9 \pm 1.2 \text{ Bq/m}^3$ であり、いずれも川内村、富岡町及び大熊町で得られた結果と同レベルであった。

大気中の $^{137}\text{Cs}$ 放射能濃度は、川内村では検出下限値以下( $16 \mu\text{Bq/m}^3$ )、富岡町では $4\text{--}31 \mu\text{Bq/m}^3$ 、大熊町では $33\text{--}210 \mu\text{Bq/m}^3$ であった。大気中のラドン濃度は $7 \pm 4 \text{ Bq/m}^3$ であり、わが国の平均値( $6 \text{ Bq/m}^3$ <sup>5)</sup>と同レベルであった。

川内村の全家屋において地下水を飲用に利用しており、その平均ラドン濃度は $18\text{--}351 \text{ Bq/L}$ であり、6家屋でEUが定める参考レベルである $100 \text{ Bq/L}$ を超えていた。そこで、残存率が1%になるまでの温度と時間について室内実験で検討した結果、60°Cでは65分、80°Cでは50分、90°Cでは38分を必要とすることが明らかとなり、水温上昇とともにラドン残存率は低下した。一方、本年度の調査結果でも $^{137}\text{Cs}$ は全ての飲料水で検出下限値以下であった。

本調査で得られた実測結果に加え、食事中に含まれる天然放射性核種の経口摂取及び二次宇宙線に

よる年間実効線量をそれぞれ文献値<sup>6)</sup>及びEXPACS<sup>7)</sup>による計算から評価した。その結果、川内村、富岡町、大熊町の自然放射線源からの年間実効線量は、それぞれ 2.6 mSv、2.0 mSv、2.3 mSv と評価された。一方、それぞれの町村の人工放射線源からの年間実効線量は、それぞれ 0.12 mSv、0.34 mSv、0.59 mSv と評価された。

## V 結論

3年間の調査結果をもとに住民への説明資料を作成し、自然放射線源からの年間実効線量をものさしとした事故由来の放射性セシウムによる線量と比較し住民への説明を行った。約 90%の住民は自然放射線による被ばく線量をものさしとすることで、福島原発事故由来の放射性物質による線量を理解することが容易であると回答した。一方、県内でも浜通り地域とそれ以外の地域とでは放射線被ばくに対する認識が異なるとの話もあり、県内全域での調査の継続が重要であると認識した。

## 引用文献

1. Ploykrathok T, Ogura K, Shimizu M et al. Estimation of annual effective dose in Namie Town, Fukushima Prefecture due to inhalation of radon and thoron progeny, *Radiat Environ Med* 2021;10: 9–17.
2. Ogura K, Hosoda M, Tamakuma Y et al. Discriminative measurement of absorbed dose rates in air from natural and artificial radionuclides in Namie Town, Fukushima Prefecture, *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:978.
3. Tokonami S, Takahashi H, Kobayashi Y et al. Up-to-date radon-thoron discriminative detector for a large scale survey, *Rev Sci Instrum* 2005;76:113505.
4. Tokonami S. Characteristics of thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ) and its progeny in the indoor environment, *Int J Environ Res Public Health* 2020;17:8769.
5. Oikawa S, Kanno N, Sanada T et al. A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan. *J Environ Radioact* 2003;65:203–13.
6. Omori Y, Hosoda M, Takahashi F, et al. Japanese population dose from natural radiation. *J Radiol Prot* 2020;40(3):R99–R140.
7. Sato T. Analytical Model for Estimating Terrestrial Cosmic Ray Fluxes Nearly Anytime and Anywhere in the World: Extension of PARMA/EXPACS. *PLoS ONE* 2015;10(12):e0144679.

# 放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和5年度研究報告書

研究課題名	複数の生物学的指標を組み合わせた長期放射線影響の予測と社会実装に向けた取り組み
令和5年度研究期間	令和5年4月3日～令和6年2月29日
研究期間	令和3年度 ～ 令和5年度（3年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	盛武 敬	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・部長
分担研究者	中村 麻子	国立大学法人茨城大学・教授
若手研究者		

キーワード	放射線、レドックス、ミトコンドリア、DNA、晩期障害、バイオドシメトリ
-------	-------------------------------------

本年度研究成果
<p><b>I 研究背景<sup>1)</sup></b></p> <p>原子力災害等に起因する予期せぬ放射線被ばくでは、多数の放射線業務従事者や周辺市民が被ばくし、生命や健康が脅かされる恐れがある。放射線災害発生後の初期対応において、対象者の被ばく線量を推定することは緊急被ばく医療の優先度の決定および選別のために非常に重要であると同時に、災害発生数年～数十年後に発生しうるがん、白内障、心疾患などの晩期障害発症リスクを見積もる上でも重要である。一方で、被ばく線量から推定できるのは晩期障害発症リスクであって、将来的にその疾患の発症に繋がるバイオインディケーターや初期症状はほとんど同定されていない。</p> <p>酸化ストレスは様々な病気との関連が指摘されており、放射線においても照射された細胞でミトコンドリアからの活性酸素が増加し、細胞死や細胞老化の一因となっていることが報告されている<sup>2,4)</sup>。また、慢性的に放射線被ばくを受ける医療従事者、福島第一原発事故で被災した牛、チョルノービリ原発付近の高線量地域に生息する松の木に関する調査でも、酸化ストレス関連指標が増加しているとの報告がある<sup>5-7)</sup>。興味深いことに、多くの放射線晩期障害（例えば、がん、白内障、高血圧、慢性炎症、動脈硬化など）は、酸化ストレスの亢進によっても引き起こされる<sup>8)</sup>。これらのことから、放射線晩期障害の発症は被ばくによる酸化ストレスの増加によって仲介されている可能性があると考えられており、我々は、放射線被ばくという物理現象と生物影響とをつなぐ鍵として、酸化ストレス（関連指標）に着目している。</p> <p><b>II 目的</b>（①を盛武、中村、志村（研究協力者）、④を盛武、②③を中村、⑤を盛武と鈴木（研究協力者）、⑥を盛武が担当）</p> <p>① 一昨年度までに、ミトコンドリア損傷(Parkin)、抗酸化指標(Nrf2)、全血抗酸化能(i-STrap)がバイオドシメトリ指標として有用であり、さらにこの3指標とDNA損傷(γH2AX)を組み合わせることで（4指標の組み合わせで）、被ばく線量をレトロスペクティブに推定できる（急性被ばく、被ばく</p>

後1～7日間)ことを明らかにした。昨年度および本年度は、慢性被ばくでの推定精度の確認を行う。

- ② テロメア長変化が新規のバイオドシメトリ指標となりうるか解析する。
- ③ 迅速にDNA損傷( $\gamma$ H2AX)を評価するPDMSチップ搭載装置を開発する。また、健常人におけるDNA損傷データベースを構築する。
- ④ 抗酸化能関連指標が晩期障害(白内障)のバイオインディケータとなりうるか解析する。
- ⑤ 福島野生ニホンザルの抗酸化能を解析する。
- ⑥ 放射線被ばく後の抗酸化能変化がヒトで確認できるかを解析する。

### III 研究方法

- ① 量子技術研究開発機構(量研)でガンマ線の連続照射(0.105mGy/min $\times$ 476時間=20日間で3Gy、または0.21mGy/min $\times$ 238時間照射=10日間で3Gy)照射し、照射終了後24、48、72、168時間後に採血した。全血100 $\mu$ Lをi-STrapに供して、残りの血液からリンパ球を抽出し、茨城大と保健医療科学院へ送付し、茨城大が $\gamma$ H2AX、保健医療科学院がParkinとNrf2の評価を行った。急性照射に関しても、0.1、0.5、1、3Gyでの解析を行った。
- ② 上記①のサンプルを用いて、テロメア長変化(RT-PCR法による測定)が新規のバイオドシメトリ指標となりうるか解析した。
- ③ 装置ハイスループット化等に取り組む。健常人に関してはインフォームドコンセントを取得したボランティアから採血し、DNA損傷の量を評価した。同時に、アンケート調査により生活習慣を把握した。
- ④ 量研のガンマセルを用いて、放射線白内障へのなりやすさが異なる複数系統のマウスに5Gyを急性照射(0.5Gy/min)後、経時的(50日後100日後・・・)に採血し、抗酸化能を測定している。照射後300日と600日にはマウスを安楽死させて、水晶体の状況を観察する予定である。また、上記①で使用したマウスの水晶体を回収し、抗酸化能を解析している。
- ⑤ 福島の提携自治体で処分されたニホンザルから血液を採取し、抗酸化能の解析を行っている。
- ⑥ QST病院で重粒子線治療を受ける患者を対象とし、治療前後の血液を用いてi-STrap解析を行うことで、放射線被ばく後のヒトでの抗酸化能変化を評価する。

### IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

- ① 線量または線量率を変化させた場合に各指標がどのように変化するかというデータセットを構築した。同時に複数種類の指標の掛け合わせによりどれほど診断能が変化するか解析を行った。
- ② 被ばく168時間以降にテロメア長短縮がみられる傾向にあり、引き続き検討を要する。
- ③ 装置の開発が進んでいる。健常人データベースは、特許査定となった(特許第7394460)。
- ④ 照射群では白内障と思われる白濁を観察した。抗酸化能は解析中である。マウスの系統によって抗酸化能の変化パターンが異なる傾向が示されている。
- ⑤ 3年間合計で92頭のサンプルを得た。一方で、福島地区、対象地区で分けて解析したところ、有意な抗酸化能の変化は見られなかった。福島地区の被ばくの線量率は概算で数 $\mu$ Gy/dayとなっており、ほとんど生体影響が無いと考えられる。
- ⑥ QST病院で重粒子線治療を受ける患者の治療前後の血液を用いたi-STrap解析を実施するため、量研の臨床研究審査委員会に研究計画書を提出しその実施が承認された(研究計画書番号:N23-

016)。今後は協力患者を募り研究を実施する方針である。

## V 結論

我々が注目してきた抗酸化能関連指標について、バイオドシメトリ手法としてどれくらい有用か（検出限界）を評価してきた。研究室レベルでは、1Gyの急性照射が有効性を担保できる限度ではないかと考えられた。ハイスループット化、高再現性の測定装置が開発できれば、実用化もあり得ると考えている。DNA損傷の測定装置に関しては他の指標に先んじて社会実装に近づいている。国内でも医療被ばくにより白内障が増加することを推察するようなデータが出ている中で、放射線白内障のマウスモデルを構築できた。放射線白内障のメカニズムに迫ることができれば、放射線防護学にとって有益な情報となると考えている。福島地区に関しては、確かにサーベイメーターで測定すれば、線量率は高く出るが、生物影響は無視できる（さほどない）だろうという考えを我々の結果も支持している。現時点で、本研究成果を福島住民の線量評価や被ばくにかかる健康管理に直接的に利用することは困難であるが、今後の臨床研究を通して、各指標と被ばく線量、疾患、体質、生活習慣などの関連が明らかになれば、健康管理指標として利用できるようになることが期待される。

## 引用文献

1. 盛武敬、中村麻子、複数の生物学的指標を組み合わせた長期放射線影響の予測と社会実装に向けた取り組み、令和3年放射線健康管理・健康不安対策事業（放射線の健康影響に係る研究調査事業）報告書、2022, 187-222. <https://www.env.go.jp/content/000120095.pdf>
2. Kobashigawa S, Kashino G, Suzuki K et al., Ionizing radiation-induced cell death is partly caused by increase of mitochondrial reactive oxygen species in normal human fibroblast cells. *Radiat Res*, 2015; 183: 455-464.
3. Ogura A, Oowada S, Kon Y et al. Redox regulation in radiation-induced cytochrome c release from mitochondria of human lung carcinoma A549 cells. *Cancer Lett*, 2009; 277: 64-71.
4. Tominaga H, Kodama S, Matsuda N et al., Involvement of reactive oxygen species (ROS) in the induction of genetic instability by radiation. *J Radiat Res*, 2004; 45: 181-188.
5. Volkova P Y, Geras'kin SA and Kazakova EA, Radiation exposure in the remote period after the Chernobyl accident caused oxidative stress and genetic effects in Scots pine populations. *Sci Rep*, 2017; 7: 43009.
6. Urushihara Y, Kawasumi K, Endo S et al., Analysis of plasma protein concentrations and enzyme activities in cattle within the ex-evacuation zone of the Fukushima Daiichi nuclear plant accident. *PloS one*, 2016; 11: e0155069.
7. Malekirad AA, Ranjbar A, Rahzani K et al., Oxidative stress in radiology staff. *Environ Toxicol Pharmacol*, 2005; 20: 215-218.
8. Sun L, Ynaba Y, Sogo Y et al., Total body irradiation causes a chronic decrease in antioxidant levels. *Sci Rep*. 2021; 11, 6716.

# 放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和5年度研究報告書

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
令和5年度研究期間	令和5年4月1日～令和6年2月29日
研究期間	令和4年度 ～ 令和6年度（2年目）

	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		

キーワード	福島原発処理水、トリチウム、有機結合型トリチウム、光合成
-------	------------------------------

本年度研究成果	
I	<p><b>研究背景</b></p> <p>2011年に発生した福島原発事故への対応に伴って同原発の敷地内に高濃度のトリチウム（<sup>3</sup>H, tritium: T）を含む処理水が蓄積し、2023年中には蓄積許容量の上限に達することが見込まれていた。そこで東京電力は、この処理水について2023年より海洋放出することを公表し、実際に同年8月より放出を開始した。この放出に際しては、1500 Bq/L以下のT濃度とした上で放出する計画となっているが、このT濃度はWHOが飲料水について定めた基準（10000 Bq/L以下）と比較しても顕著に低い値である。また、放出後は海流によって更に速やかに希釈されることが想定され、実際に第1回の放出直後に行われたモニタリングでは放出口の直近ですら検出下限値（10 Bq/L）以下のT濃度であった。このように、処理水の海洋放出に関しては環境や人への影響に対して十分な配慮がなされている。一方、処理水中のTは主にトリチウム水（HTO）の化学形態で存在するが、このHTOの一部は一次生産者の光合成によって有機結合型トリチウム（Organically bound tritium: OBT）に変化する。このOBT生成は環境中におけるトリチウムの局在化を促す可能性がある<sup>1,2)</sup>。加えて、トリチウムによる内部被ばくの影響を考える場合、OBTはHTOの化学形態に比べて体内の滞留時間が長いために影響度合いが大きい<sup>1,2)</sup>。これらのことを勘案すると、処理水の放出に関して十分な安心感を担保するためには、HTOのみならずOBTの環境動態も把握しておくことが望ましい。本研究では海水中および海霧等により沿岸陸域へ移行した処理水中のHTOが、それらの領域に生息する一次生産者の光合成によってOBTに変化することを想定し、一次生産者によるOBT生産速度を評価することとした。</p>
II	<p><b>目的</b></p> <p>本研究では、日本の東北地方太平洋沿岸域において一般的に生息する水圏および陸圏の一次生産者を対象としてOBT生産速度の取得を目的とした。その中で、研究計画2年目の令和5年度は3種類の陸上植物（クロマツ苗木、イネ及びコマツナ）についてOBT生産速度を実験的に評価した。</p>

### III 研究方法

水素の安定同位体  $^2\text{H}$  (Deuterium: D) で標識された水 (重水) を HTO の模擬物質とし、系内に添加した重水から生産される有機態重水素 (Organically bound deuterium: OBD) を測定することによって、光合成生産される OBT の生産状況を評価した。令和 5 年度はクロマツ苗木、イネ及びコマツナについて気象チャンパー内で重水添加実験を実施し、植物中に生産された OBD 濃度を測定した。また、重水添加実験後、屋外において対象植物の栽培を継続して植物体内の D 濃度の減少過程を追跡した。

### IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

#### 結果と考察

各種植物における重水添加実験の結果を図 1～3 に示す。全ての実験において重水添加によって土壌水及び葉中自由水中の D 濃度は天然水準 (約 150 ppm) の数倍から数十倍まで増加した。これに伴って葉中 OBD 濃度も増加したが、その増加度合いは前者の 2 つに比べて顕著に小さいものであった。これは、添加した重水中の D が、土壌水⇒葉中自由水⇒葉中 OBD、という順番で移行することや、土壌水から葉中自由水への移行速度に比べて葉中自由水から葉中 OBD への移行速度 (つまり光合成速度) が遅いことが要因として挙げられる。チャンパー内の重水添加実験の期間中に葉中自由水から葉中 OBD への D の移行率を求めると各植物で数%程度であった。これは、土壌の HTO の数%程度が一日の光合成で植物中 OBT へ移行する可能性を示唆する。

チャンパー実験後、屋外で栽培を継続したところ、各植物において時間経過と共に葉中 OBD 濃度は概ね天然水準となった。これは降水や大気水蒸気等に由来する天然の環境水によって OBD が希釈された結果である。この希釈過程データは、チャンパー内で得られたデータと合わせて、今後、植物中の OBD 動態を解析する上で重要なデータとなる。具体的には、チャンパー内実験で得られた光合成過程における生産速度データに加えて、希釈過程で得られた代謝等による生理学的速度データを合わせることで、OBT 生産速度のモデル化に用いる予定である。

#### 今後 (令和 6 年度) の方針

今年度の重水添加実験によって得られたデータを基に、陸上植物における OBT 生産モデルの作成を試みる。また、残りの植物種 (牧草及び海藻類) についても重水添加実験を実施する。加えて、令和 4 年度に得られたデータを踏まえて水圏における OBT 生産モデルの作成にも着手する。

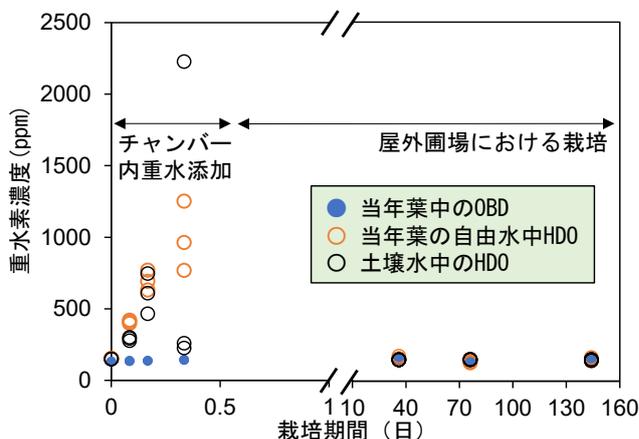


図 1 クロマツ苗木中の D 濃度の変化

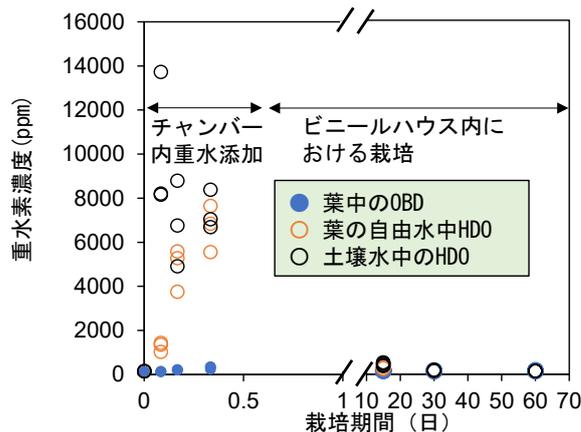


図 2 イネ中の D 濃度の変化

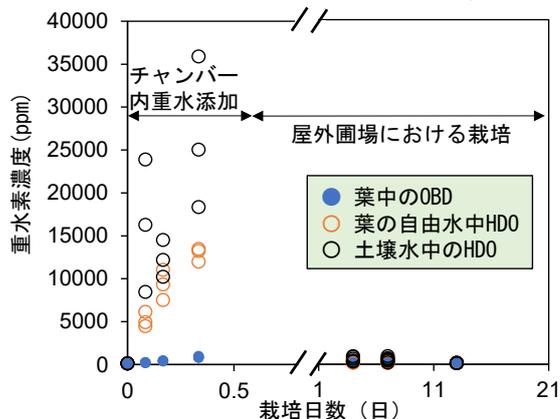


図 3 コマツナ中の D 濃度の変化

## V 結論

令和5年度当初の計画に予定されていたように、重水添加実験により各種陸上植物の OBT 生産速度の推定に資するデータを取得出来た。

## 引用文献

1. Eyrolle F, Ducros L, Le Dizès S, Beaugelin-Seiller S, et al. An updated review on tritium in the environment, *J. Environ. Radioact.*, 2018; 181, 128-137.
2. IAEA. Transfer of tritium in the environment after accidental releases from nuclear facilities, IAEA-TECDOC-1738, 2014.

# 放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和5年度研究報告書

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
令和5年度研究期間	令和5年4月3日～令和6年2月29日
研究期間	令和4年度 ～ 令和6年度（2年目）

	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		

キーワード	福島第一原発、住家屋内、掃除、放射性セシウム、低減効果、ハウスダスト
-------	------------------------------------

本年度研究成果
<p><b>I 研究背景</b></p> <p>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、ある程度大きくなった放射性セシウム（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<sup>1)</sup>。一方、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い。</p> <p><b>II 目的</b></p> <p>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年間継続して行うことによりハウスダストを集塵する。集塵されたハウスダストに含まれる放射性Csを測定し、その経時変化を評価することにより定期的な繰り返し掃除機がけによる屋内残存放射性Csの低減効果を調べることを目的とする。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、また、居住環境、ヒトの居住、出入りなどのヒトの活動が住家内放射性Csの挙動に与える影響について検討を行う。</p> <p><b>III 研究方法</b></p> <p>大熊町の木造住家10戸（図1）において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</p>



5. エアサンプラーを ID\_0\_7 (令和4年4月開始、現在も継続), ID\_0\_11 及び 12 (令和4年4月から令和5年2月まで)、ID\_0\_6 (令和5年2月開始、現在も継続中) に設置した (図1の\*印を付した ID)。気中浮遊粒子の重量濃度( $\text{g}/\text{m}^3$ )は、室内濃度は屋外濃度の 0.1 倍～0.6 倍であったが、一方、気中浮遊粒子の Cs-137 濃度( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )は、室内濃度は屋外濃度の 0.6 倍～1 倍前後であった。気中浮遊粒子の重量濃度分布は、 $2.1\sim 7.8\mu\text{m}$  辺りと  $0.30\sim 0.69\mu\text{m}$  辺りにピークを持つ二峰性であるが、気中浮遊粒子の Cs-137 濃度は、 $0.30\sim 0.69\mu\text{m}$  辺りにピークを持つ単峰性の粒径分布を示していた。 $0.02\sim 2.5\mu\text{m}$  の粒子の侵入係数は  $2.5\sim 10\mu\text{m}$  の粒子の侵入係数よりも大きい<sup>3)</sup>。このことが気中浮遊粒子の重量濃度と Cs-137 濃度の室内/屋外比の違いに関連している可能性が考えられる。

6. 換気回数は前回事業での調査 (2016–2019) と同等もしくはやや小さかった。外気の Cs-137 濃度と換気回数の結果から、室内の沈着量を推定したところ、無人の家屋における 30 日間で  $57\pm 9.4\text{ mBq}/\text{m}^2$  ( $31\sim 65\text{ mBq}/\text{m}^2$ ) であり、ハウスダスト中で検出される Cs-137 濃度 ( $0.13\sim 169\text{ Bq}/\text{m}^2$ ) よりかなり小さい値であった。少なくともこの2年間に採取したハウスダスト中の Cs-137 濃度に対して、外気の寄与は小さかったと言える。

7. 今年度あらたに加わった住家1戸 (ID\_O\_14) についてスミア法により放射性 Cs の表面汚染密度を評価し、計 10 戸についての全体的な傾向を調べた。住家ごとの表面汚染密度の分布の中央値の大きさの順は ID\_O\_10 >> ID\_O\_8 > ID\_O\_14 = ID\_O\_6 > ID\_O\_9 = ID\_O\_3 > ID\_O\_7 = ID\_O\_13 = ID\_O\_12 = ID\_O\_11 であり、上述 2. で得た重量当たりのハウスダスト (<2 mm) 中 Cs-137 濃度 ( $\text{Bq}/\text{g}$ ) の値の大きさの順と全く同じ傾向を示していた。表面汚染密度の採取箇所は主にタンスなどの家具の上 (住民が掃除していないところ) であり事故直後に家屋内に入り込んだ放射性物質の残存物を観察している。一方、掃除機がけで観察している対象はヒトの活動が大きく影響する床の上のダストであるが、双方で傾向が同じということは、床の上のダスト中の放射性 Cs を支配しているのは事故直後に家屋内に入り込み残留している放射性物質であることを示唆するものである。この結果は前述 6. の知見と整合している。

8. アンフォールディング手法による  $\gamma$  線スペクトルの解析を行い、除染前後の屋外・屋内の直達線/散乱線の比率に差があることが示した。この知見を含めて除染前後の屋内と屋外での放射線量の変化の違いは協力住民への説明に有用である。一方、屋根にあらたな放射性物質集積因子が観察される住家の直達線/散乱線の比率に、集積が観察されない住家との差は認められなかった。

以上の成果に基づいた今後の研究方針を以下に述べる。

引き続き定期的な掃除機がけを実施し、経時変化のより長期の傾向を調べるとともに、ヒトの活動やほかの要因との関連性について検討を行う。同時にエアサンプラーによるサンプリングを継続して行い、屋外・屋内の気中粒子濃度及び気中 Cs-137 濃度についてもより長期の傾向を調べる。スミア法による Cs-137 の表面汚染密度の評価は来年度に再度実施し、掃除機がけで集塵したハウスダストからの傾向と合わせて検討を行う。

## V 結論

定期的な掃除機がけにより住家内から除去される床面積当たりのハウスダストの量は全体的に右下がりに減少していく傾向が観察された。減少傾向は最初は大きく、何度か (3～9回目) 掃除機がけを行うと小さくなった。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) はハウスダスト量の減少に伴い減少する。一方、重量当たりのハウスダストの中 Cs-137 濃度は減少傾向が小さいことがわかった。その中で明確な減少傾向が観察された住家1戸ではヒ

トの出入りと活動が活発であり、コールドダストによる希釈効果が示唆された。外気の Cs-137 濃度と換気回数の結果から推定した室内の沈着量は、ハウスダスト中で検出される Cs-137 濃度よりかなり小さい値であった。スミア法による Cs-137 の表面汚染密度の調査結果と総合すると、床の上のダスト中の Cs-137 濃度を支配しているのは事故直後に家屋内に入り込み残留している Cs-137 であり、外気中 Cs-137 の寄与はかなり小さいと考えられる。来年度、引き続き掃除機がけを実施し、経時変化についてより長期の傾向を調べるとともに、ヒト活動との関連性について検討を進める。

## 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. Shinohara N, Yoshida-Ohuchi H. Radiocesium contamination in house dust within evacuation areas close to the Fukushima Daiichi nuclear power plant. *Environ. Int.* 2018; 114: 107-114.
3. Chen C, Zhao B. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor, *Atmos. Environ.* 2011; 45: 275-288.

# 放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和5年度研究報告書

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
令和5年度研究期間	令和5年4月3日～令和6年2月29日
研究期間	令和4年度 ～ 令和6年度（2年目）

	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 安全研究センター 原子炉安全研究ディビジョン 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		

キーワード	原子力事故、住民被ばく線量、再浮遊、屋内退避、被ばく低減効果
-------	--------------------------------

本年度研究成果	
I 研究背景	<p>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。特に、福島事故の経験を経て、原子力防災分野においては、事故後初期に自宅への屋内退避が防災計画の主軸の一つとして位置付けられている。また、福島事故後に避難指示を受けた地域についても、避難指示の解除が進み帰還した住民の日常生活が開始されようとしている。このような社会的な背景を踏まえると、事故後初期において屋内退避をした場合にどのくらいの被ばくが想定されるのか（または、どのくらいの被ばく低減効果が見込まれるか）ということと、帰還後の生活においてどのくらいの被ばくが想定されるのかという情報は、原子力防災計画や帰還後の住民に対する放射線防護対策を策定する国・自治体や住民にとって重要な情報である。</p>
II 目的	<p>本研究では、上記のような研究背景のもとで、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と、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実施することを目的とする。</p>
III 研究方法	<p>上記の目的に記載した目的を達成するためには、再浮遊に係る現象論的モデルの開発に加え、地域や季節による社会条件や気象条件の変動を考慮した確率論的な影響評価を実施する必要がある。これらの方法を実現するため、令和5年度は、目的①に関連して、1) 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。また、目的②に関連して、1) 室内再浮遊モデルに関する</p>

解析及び実験を実施した。なお、確率論的事故影響評価には、既に原子力機構が開発した確率論的事故影響評価コード OSCAAR (Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Release in Reactor Accident)<sup>1)</sup>を用いた。OSCAAR は、国際比較計算への参加等する等して移行モデルに関する検証等を行い、適用性能の確認や機能の検証が行われてきたコードである<sup>2)</sup>。なお、本事業の令和4年度成果発表会において、OSCAAR で同心円メッシュを利用することの妥当性について、委員から指摘を受けた。この点について、過去に OSCAAR と直交格子メッシュを採用している他のコードの結果を比較した経験があり、これによると両者において距離別の被ばく線量の統計値に大きな違いは見られておらず、メッシュの違いによる解析の結果への影響はないことが確認されているところである<sup>3)</sup>。

#### IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

研究方法①-1) 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の双方による甲状腺等価線量と実効線量を評価した。さらに、屋内退避の実施時と未実施時の線量を比較して被ばく低減係数 (= 屋内での線量/屋外での線量) を算出した。対象サイトは、国内の原子力発電所を有する全サイト (17 サイト) であり、各サイトの気象条件 (風向風速、降雨)、屋外再浮遊係数の評価に必要な周辺の地目と建蔽率、人口分布を考慮した。線量評価には OSCAAR を利用し、5つの事故シナリオ (過去のシビアアクシデント研究<sup>4)</sup>、福島事故の経験<sup>5)</sup>、新規規制基準<sup>6)</sup>を踏まえて放出量等を設定) に対して評価を実施した。放出点から 5 km での実効線量と甲状腺等価線量をサイトごとに比較したところ、95%値はサイトによらずオーダーで一致したものの、50%値は人口分布がまだらなサイトで他のサイトよりも一桁以上小さくなっていた。これは、人口のいる場所にプルームが直接到達するよりも、吹き返し等で濃度の低いプルームが通過する回数が多いことに起因する。被ばく低減係数をサイト間で比較したところ、20%程度の差が見られ、平均風速が大きいサイトで被ばく低減係数が大きくなる傾向であった。被ばく低減係数は事故シナリオにも依存しており、全体の放出量に対する希ガスの割合が多いシナリオでは、被ばく低減係数が大きくなること (低減効果が小さくなること) が示された。

研究方法②-1) の作業では、室内での再浮遊係数を取得するため、実建屋内における再浮遊係数取得実験を実施した。実験では、日本における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。その結果、粒径ごとに再浮遊係数は異なっており、自然換気の場合は  $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ 、歩行時は  $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0$ 、掃除機掛けは  $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-1}$ 、エアコン稼働時は  $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-2}$  の範囲内であった。床材ごとの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。

#### V 結論

令和5年度の作業は、滞りなく予定通り完遂した。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と再浮遊モデルの OSCAAR への実装を完了するとともに、室内環境での再浮遊モデル開発のための実験データの取得、再浮遊係数の評価を行うことができた。令和5年度成果報告会において、成果の取りまとめに際し、生活者感覚で活用できる情報を分かりやすくまとめるように指摘を受けているので、国や自治体の職員が住民に向けて屋内退避に関する情報を提供する際などを想定して、平易な表現で有用性の高い情報を取りまとめた資料を作

成すことを目指したい。

## 引用文献

1. JAEA, OSCAAR コードパッケージの使用マニュアル, JAEA-Testing 2020-001; 65 Pages.
2. 本間俊充, レベル 3PSA の現状, 第 3 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループ, 資料 3. ([https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/genshiryoku/genshiryoku\\_jishuteki/pdf/003\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/genshiryoku_jishuteki/pdf/003_03_00.pdf) (最終閲覧日 2023 年 5 月 23 日))
3. 日本原子力研究開発機構, 令和 2 度原子力規制庁委託成果報告書「原子力施設等防災対策等委託費 (被ばく解析手法の整備) に関する研究」 (<https://www.nra.go.jp/data/000359619.pdf> (最終閲覧日 2023 年 5 月 23 日))
4. 本間俊充, 石川淳, 富田賢一, 村松健, 軽水炉モデルプラントの広範な事故シナリオに対する環境影響評価, JAERI-Research 2000-060, 2000.
5. 原子力災害対策本部, 原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書-東京電力福島原子力発電所の事故について-; 添付 IV-2 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る 1 号機、2 号機及び 3 号機の炉心の状態に関する評価のクロスチェック解析 (<https://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/pdf/app-chap04-2.pdf> (最終閲覧日 2024 年 1 月 9 日)) .
6. 原子力規制委員会, 緊急時の被ばく線量及び防護措置の効果の試算について. (<https://www.nra.go.jp/data/000390844.pdf> (最終閲覧日 2024 年 1 月 9 日))

# 放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和5年度研究報告書

研究課題名	原子力災害時における被災者の個人被ばく線量把握及び健康管理に資するインテリジェンスデータベースの構築
令和5年度研究期間	令和5年4月3日～令和6年2月29日
研究期間	令和5年度 ～ 令和7年度（1年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	金 ウンジュ	量研機構・主幹研究員
分担研究者		
若手研究者		

キーワード	インテリジェンスデータベース (IDB)、初期内部被ばく線量、外部被ばく線量
-------	--

本年度研究成果
<p><b>I 研究背景</b></p> <p>量子科学技術研究開発機構（以下、量研）では、東電福島第一原発事故（以下、福島原発事故）による住民の初期内部被ばく線量の推計を長年にわたり進めてきた。初期内部被ばくで最も重要なのは放射性ヨウ素による甲状腺内部被ばくであるが、主要核種である I-131 を対象とした人の実測データは極めて限られている。このため、事故発生から数カ月後に開始されたセシウムを対象としたホールボディカウンタ（WBC）の測定データ、人の実測データを有する個人の避難行動データ、放射性核種の大気拡散シミュレーションの結果を収集し、これらの情報を活用して線量推計を行ってきた<sup>1-4</sup>。今後は量研だけの研究に留めることなく、福島県立医科大学等の協力機関においても解析を行えるようにすること、及び、福島原発事故で得られた貴重なデータを将来のために管理・保全する環境を整備することが重要である。</p>
<p><b>II 目的</b></p> <p>本研究では、前述の初期内部被ばく線量推計のために収集あるいは解析に用いた様々な種類のデータを有機的に統合し、GUIを介して多角的な解析を行えるインテリジェンスデータベース（IDB）を作成すること、及び、その成果を基に、将来の原子力災害における被災者の健康調査や疫学調査に適したデータベースの要件を示すことである。</p>
<p><b>III 研究方法</b></p> <p>避難行動データを有する小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者及びWBC被検者（約6千名）について、実測値及び大気拡散シミュレーションから推定した被ばく線量及び避難場所の履歴等の関係を任意に抽出した被検者集団（出身自治体、年齢群、性別、測定値、避難パターン等）に対する線量データを可視化できるIDBを複数試作した。IDBのプラットフォームにはMicrosoftが無償で提供するPower BIを使用した。IDBには、滞在位置を地図上に表示できる機能やPythonスクリプトを用いた線量分布表示機能などを実装した。後者は、人実測データでは未検出者が多いことから打ち切り</p>

線量分布になるため、対数正規分布を仮定した QQ プロットに対する適合関数により、線量分布の中央値及び幾何標準偏差を表示できるようにした。また、研究計画に従って、量研で開発し福島県民健康調査にも用いられている外部被ばく線量推計システムを参考にして、福島県内避難区域に適用された代表的行動 18 パターンにおける外部被ばく線量計算を計算し、Akahane らの計算値<sup>5)</sup>との比較検証を行った。

(倫理面への配慮)

本研究において使用する個人の避難行動データの利用については、量研機構及び福島県立医科大学の両機関における臨床研究審査委員会から承認がえられている。(13-011)

#### IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

図 1 に試作した IDB の GUI の一例を示す。これらの図が示すように、IDB の最大の利点は 1 画面に多くの情報を同時に表示できることであり、また、任意の条件で抽出した集団に対する線量分布を瞬時に計算することができるため、被ばく線量の比較的高い決定集団の特定が容易である。また、大気拡散シミュレーションに基づく吸入被ばく線量推計では、使用する WSPEEDI-II の Version の違い<sup>6, 7)</sup>、使用するシミュレーションの計算グリッドの選択方法、移動中の計算方法などによる線量分布の変化も把握できるようにした。これらは EXCEL のフィルター機能を使っても行えるが、Power BI が有するデータリネーション機能や GUI 機能を活用することにより、第三者でも利用しやすいデータベースが試作できた。その他、令和 5 年度は、福島原発事故初期の外部被ばく線量について、Akahane らが示した代表的避難行動 18 パターンに対する計算を行い、文献値を概ね再現することを確認した。ここで、同計算では、福島県民健康調査（基本調査）に使われている外部被ばく線量評価システムに組み込まれている時系列空間線量率マップを用い、屋内防護係数や移動中の計算方法等は元文献に準じて行った。加えて、UNSCEAR2020/2021 レポート<sup>8)</sup>に示された更新された代表的避難行動 37 パターンについても外部被ばく線量の計算を行った。来年度は当初の研究計画に従って、試作した IDB に

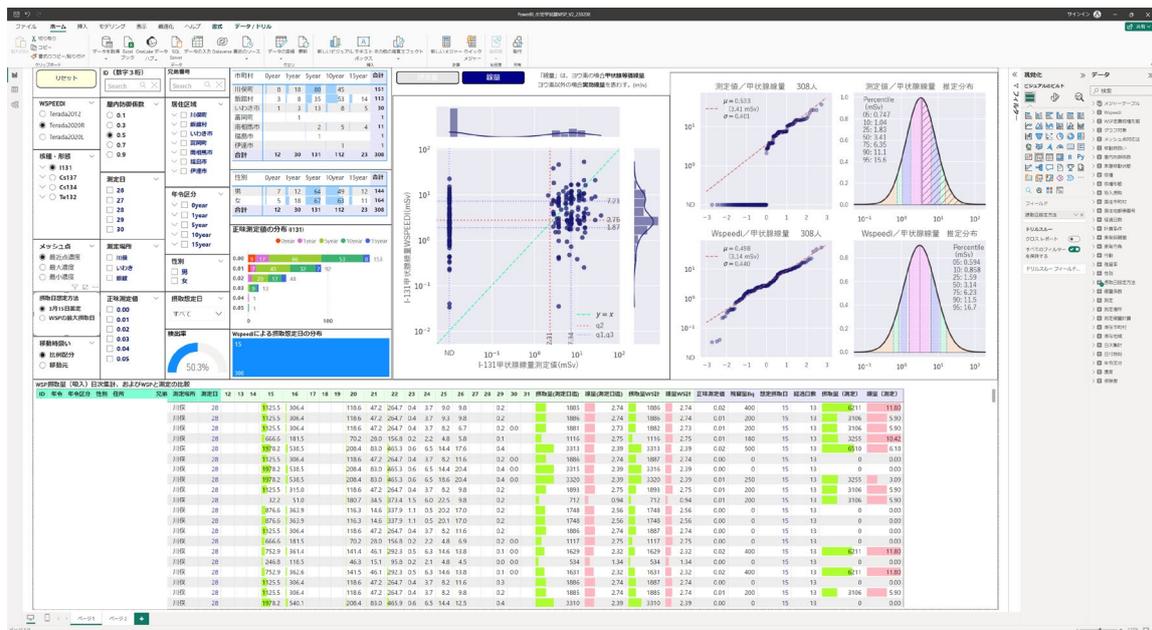


図 1. 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者の内、行動データを有する約 300 名の WSPEEDI による吸入被ばく線量推計値を表示する IDB。画面左上の選択タブ及び被検者の抽出が行える。画面右上は対数正規分布で近似した線量分布、画面下は被検者毎の日々の吸入摂取量を計算値が表示される。

ついて外部有識者からのフィードバックを踏まえて改良するとともに、事故初期に福島住民が受けた内部被ばく線量と外部被ばく線量の累積傾向の特徴等に注視して解析を行う予定である。

## V 結論

量研が福島原発事故による被災住民の初期内部被ばく線量推計のためにこれまでに収集及び解析を行った様々な線量関連データを有機的に統合し、GUIを実装したIDBを複数試作した。IDBによって、膨大なデータの一元管理を行える他、任意の抽出条件に応じた集団に対する線量分布を瞬時に得ることが可能となった。外部被ばく線量推計については、代表的避難行動18パターンに対する試算を行い、文献値とほぼ一致することを確認した。

## 引用文献

1. Kim E, Kurihara O, Suzuki T. *Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident*. In: Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. National Institute of Radiological Sciences. Chiba, Japan, July 2012. NIRS-M-252, 59–66 (2012). Available at [http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs\\_m\\_252.pdf](http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs_m_252.pdf)
2. Kim E, Kurihara O, Kunishima N. Internal thyroid doses to Fukushima residents —estimation and issues remaining. *J Radiat Res* 57: i118–i126; 2016a.
3. Kim E, Kurihara O, Kunishima N. Early intake of radiocesium by residents living near the TEPCO Fukushima Dai-ichi nuclear power plant after the accident. Part 1: Internal doses based on whole-body measurements by NIRS. *Health Phys* 115(5): 451–464; 2016b.
4. Kim E, Yajima K, Shozo Hashimoto. Reassessment of internal thyroid doses to 1,080 children examined in a screening survey after the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys* 118(1): 36–52; 2020.
5. Akahane K, Yonai S, Fukuda S. NIRS external dose estimation system for Fukushima residents after the Fukushima Dai-ichi NPP accident. *Sci Rep* 3:1670; 2013
6. Terada H, Katata G, Chino M. Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. Part II: Verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion. *J Environ Radioact* 112: 141–154; 2012.
7. Terada H, Nagai N, Tsuduki K. Refinement of source term and atmospheric dispersion simulations of radionuclides during the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *J Environ Radioact* 213: 106104; 2020.
8. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Levels and effects of radiation exposure due to the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: implications of information published since the UNSCEAR 2013 Report UNSCEAR 2020/2021 Report Volume II Scientific Annex B (2021)

# 放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和5年度研究報告書

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
令和5年度研究期間	令和5年4月3日～令和6年2月29日
研究期間	令和4年度 ～ 令和6年度（2年目）

	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		

キーワード	低線量被ばく、FISH 法、人工知能、画像解析、染色体
-------	-----------------------------

本年度研究成果
<p><b>I 研究背景</b></p> <p>交換型染色体異常は放射線被ばく後の線量評価や長期フォローアップ調査研究に利用可能である。低線量被ばく影響研究のためには課題が2つある。</p> <p>1) 健常人バックグラウンド・データは不十分である。従来の調査は観察数・基準がまちまちで、また、検査者の熟練度により画像判定基準が変動する（再現性の問題）。</p> <p>2) FISH 画像による染色体異常判定は未だ自動化されていない。低線量被ばく調査に必要な観察細胞数は1検体当たり目視観察で1000ゲノム以上<sup>1)</sup>であり、時間と労力を要する。人工知能（AI）技術による支援が有望である。</p> <p><b>II 目的</b></p> <p>本研究では、ヒト1、2、4番染色体ペインティングプローブによるFISH解析法を用い、低線量被ばく評価に向けた基盤構築を行う。より具体的には、健常人の染色体異常頻度バックグラウンド値の高精度レファレンス・データを作成する。また、深層学習法を用いて交換型染色体異常のFISH画像自動判定技術を開発し、判定の標準化・迅速化を達成する。</p> <p><b>III 研究方法</b></p> <p>量子科学技術研究開発機構・臨床研究審査委員会承認済みのプロトコール（ID: 08-016、17-018、18-023）に従い実施した。</p> <p><b>【調査研究1】 染色体異常バックグラウンドのレファレンス・データ作成</b></p> <p>健常人ボランティア7名（非喫煙者）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を作製し、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<sup>1,2)</sup>を行った。細胞分裂回数の確認のため、プロモデオキシウリジン添加によるFPG法を応用した<sup>1,2)</sup>。自動画像スキャニング顕微鏡システムMetafer4（Zeiss/Metasystems社）を用いて画像データを</p>

取得し、ソフトウェア MetaClient・ISIS (Zeiss/Metastystems 社) を用い、熟練観察者による目視観察を行い、1 検体につき 2500 メタフェーズ (1000 ゲノム相当数) 以上<sup>1)</sup>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の末梢血試料由来の<sup>60</sup>Co-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<sup>1),2)</sup> により、1) と同様に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。本研究・令和 4 年度、人工知能技術 (深層学習法等) を基盤とし、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」<sup>3)</sup> において開発した QST モデルをもとに、自動染色体画像判別モデルのプロトタイプ<sup>4)</sup>を作成した。令和 5 年度は画像を増やすなどにより、性能向上を試みた。

### IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

#### 【調査研究 1】 染色体異常バックグラウンドのレファレンス・データ作成

令和 4 年度、非喫煙・健康人ボランティア 30 代 1 名について調査し、基本データ (40 代 1 名)<sup>2)</sup>と比較した。令和 5 年度、当初計画では追加 1 名の調査予定であったが、より多くの被検者からデータを取得した。具体的には、20 代 4 名 (2024 年 1 月 30 日採血実施。分析中)、40 代 2 名、70 代 1 名の染色体分析を行った。低線量被ばくの検出力を検討するため、対照実験として、放射線業務従事者健康人 5 名について調べた。結果を表 1 にまとめた。20 代前半の調査を優先したのは、20 歳以降の世代で最も加齢・生活習慣による染色体異常頻度上昇が少なく、個体差を確認するためである。20 代について現在染色体解析中で、特筆すべきは 2 回目分裂細胞、3 回目分裂細胞の頻度で、本研究で 20~23 歳 4 名につき 5~40%を得ている。これまでの観察最高値は福島原発事故緊急作業被ばく者の 15%である<sup>6,7)</sup>。従来多くのラボでは血液採取しやすい 28 歳以上からのデータ取得が多く、また分裂回数が調べられていないため評価が正確では無かった可能性がある。若い世代のバックグラウンド調査を行う重要性が明らかになった。

さらに、長期低線量被ばく (内部被ばくによるリンパ球外部被ばく) の 5 症例について調べた。被ばく歴 35~42 年の症例で、血液採取年 1977~1979 年、採血時の年齢 59~66 歳である。安定型染色体異常の頻度は 6~14%で、不安定型染色体異常も存在した (頻度 3~5%)。本研究や継続研究でのバックグラウンド調査で加齢効果が明らかになれば、累積線量の推定が可能となる。また他の採血年の試料も調査することで個体ごとの加齢影響の観察も可能になる。なお、検体の詳細および結果については 2024 年 5 月論文投稿予定のため、ここでは非公開とする。

令和 6 年度は今後もより多くの検体数、観察細胞数を目指す。さらに、【調査研究 2】で開発する自動判定アルゴリズムを実際に用いて解析効率アップしたい。また、将来の長期フォローアップでの利用に備えて、一部の検体につき M-FISH 解析を行い、1、2、4 番染色体の検出力を 3 色 FISH と比較し、スクリーニング精度を確認する。

#### 【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 4 年度に作成したプロトタイプをもとに、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。現在のモデルでは、染色体画像判定速度は画像 1000 枚 (約 1000 メタフェーズ) 当たり 1 分未満を達成した。熟練者目視観察では 17 時間を要した。

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ところ、作成した AI モデルは染色体が存在する領域全体の情報を集中して利用していることがわかった。このことは、染色体を切り取るのではなく、全体を掌握させる（現モデルの開発方法）ことが適切であることを意味する。また、【調査研究 1】で用いた長期凍結保存標本の利用や、他機関で異なるプロトコールにて作製される標本への適用、すなわち染色体の凝縮度が高い染色体画像への対応（汎用性を高める）のためには、個別のアルゴリズムを作成する（ファイン・チューニングを行う）のではなく、追加学習でより多様な画像を学習させることで達成可能である感触を得た。以上に基づき、令和 6 年度は引き続き現モデルの開発方法を続行し、いっそうの追加学習をさせていく。余力があれば他の環境変異原への試験適用を行う。

## V 結論

- 1) 今後より多くの血液提供ボランティアを募り、レファレンス・データを充実させ、公開していく。
- 2) 深層学習法を基盤としたアルゴリズムにより、3 色 FISH による染色体画像の自動判別が実現可能で、解析速度は画像 1000 枚当たり 1 分未満となった。今後画像データを増やし、より性能の高いアルゴリズムを開発する

表 1 1 番、2 番、4 番染色体 3 色 FISH 法による健常人末梢血リンパ球 1 回目分裂細胞の交換型染色体異常解析

Donor	Cells selected	TL	Dic	Ins	cR	aR	exFrg	Del	Complex	Others	TL Freq	Dic Freq	TL+Dic Freq
48, F*	23826	48	4	4	0	0	11	0	7	0	0.0020	0.0002	0.0022
30, M**	25594	46	15	0	0	0	7	2	0	0	0.0018	0.0006	0.0024
40, F	7738	20	2	0	0	0	5	0	5	0	0.0026	0.0003	0.0028
40, F	4666	10	2	1	1	1	8	0	0	0	0.0021	0.0004	0.0026
71, M	12663	31	6	1	1	0	15	0	0	0	0.0024	0.0005	0.0029
20, F	分析中												
20, F	分析中												
22, M	分析中												
23, M	分析中												
28, M	2497	8	1	0	0	0	3	0	0	0	0.0032	0.0004	0.0036
34, M	2499	10	5	0	0	0	3	0	0	0	0.0040	0.0020	0.0060
46, M	1906	6	1	0	0	0	2	0	0	0	0.0031	0.0005	0.0037
47, M	2481	6	1	0	0	0	1	0	0	0	0.0024	0.0004	0.0028
58, M	2623	11	0	1	1	0	1	0	0	0	0.0042	0.0000	0.0042

Donor (被検者) 情報として年齢 (数字)、性別 (M: 男性、F: 女性) を示した。

Cells selected: 全観察細胞中データ採択された 1 回目分裂の細胞数、TL: 転座、Dic: 二動原体、Ins: 挿入、cR: セントリックリング、aR: アセントリックリング、exFrg: 過剰断片、Del: 欠失、Complex: 複雑な異常、Freq: 頻度。橙色: 職業被ばく無しの健常人、緑色: 対照群 (放射線業務従事者)。

\*過去に取得した詳細な QST レファレンス・データ (引用文献 2)。\*\*本研究、令和 4 年度報告。

## 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. Ishii K, Akiyama M, Kamimoto K, Kawai H, Suto Y, Application of automated scoring system of dicentric chromosome for biodosimetry, *Cytologia* 88(4): 281-282, 2023.
5. Akiyama M, Tominaga T, Takashima Y, Ishii K, Suto Y, Assessing the applicability of a modified replication banding protocol for the analysis of radiation-induced chromosomal aberrations in cultured human lymphocytes. *Cytologia* 89(1): 39-46, 2024.
6. Suto Y et al., Biodosimetry of restoration workers for Tokyo Electric Power Company (TEPCO) Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident, *Health Physics* 105(4): 366-373, 2013.
7. Suto Y, Review of cytogenetic analysis of restoration workers for Fukushima Daiichi nuclear power station accident, *Radiat Protect Dos* 171(1): 61-63, 2016.