

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。 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。
令和 5 年度	
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の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.