

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和 2 年度～令和 4 年度実施総括報告書

研究課題名	人工被覆面の放射能深度分布調査及び空間線量率への影響に関する研究
研究期間	令和 2 年度 ～ 令和 4 年度（3 年間）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	小林 光	東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻・教授
分担研究者		
若手研究者		

1. 研究の概要

福島第一原子力発電所事故被災地の住民の帰還では、残存する放射性物質に起因する放射線に留意して生活の場を再建する必要がある。発災後一定期間を経た被災地の建築空間の放射線量率は主に建物周囲の地表面に沈着、浸透したセシウム 137（以降 Cs-137）由来の γ 線で形成される。建物周りの地表面は殆どが土壌露出面、透水性アスファルト面、不透水性アスファルト面、コンクリート面であることから、これら地表面の放射線源としての特性把握が望まれる。また、この特性は Cs-137 の深度分布に支配される。これ迄土壌露出面の Cs-137 深度分布については調査、研究がなされ、時間経過と共に変化する深度分布を指数関数で表現可能であることも示されている^{1, 2)}。その一方で上記 3 種の人工被覆面のデータは極少なく³⁾、人工被覆面の Cs-137 深度分布調査及び空間線量率への影響に関する研究が必要であると考えられた。

そこで本研究は、復興期の建築空間の線量率に作用する人工被覆面について、その放射線源としての特性と対策の検討を目的として、Cs-137 深度分布調査を中心に以下の 4 つの課題を設定した。

[課題①] 避難指示区域における人工被覆面への Cs-137 沈着状況調査

[課題②] 人工被覆種別毎の Cs-137 深度分布の分析及び地上への影響評価

[課題③] Cs-137 深度分布に関するウェザリング影響評価

[課題④] 空間線量率予測の為の実用的 γ 線境界モデルの検討。

研究の実施においては、福島県大熊町の町有施設にて 3 種の人工被覆面のコア試料を多数採取し、これを薄く切削して得た切削粉を Ge 半導体検出器にて分析することで Cs-137 の深度分布（濃度 [Bq/g] 分布）を調査した。また、その経時変化を検討する為、採取したコアを乾、湿（注水）2 条件で 1 年間保管した後に深度分布を比較した。また、調査で得た Cs-137 深度分布を用いた放射線解析を行い、地表面及び地上の垂直面を通過する γ 線の方向と強度を分析し、このデータを基本として解析用の γ 線境界条件の開発を行った。

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	1) 人工被覆面の Cs-137 深度分布調査法の確立
令和2年度	<p data-bbox="405 309 1430 817">人工被覆面のコア採取、切削、分析による深度調査方法及びウェザリング試験法を決定した。コア採取（図1）は汎用コアドリルによる乾式で晴天日に実施し、作業時の引きずりに配慮した。アスファルトの採取は摩擦熱による変形等が生じ易い為、刃数が多く作業時間を短縮できる湿式コアビットを乾式で用いた。コア試料の切削（図2）は旋盤による旋削とし、約100φのコア用の特注チャック、防塵カバー、集塵機を備えた装置を用いた。旋盤への正確なコア取り付けの為、各コアに合せた台座を製作して切削精度の確保に努めた（図3）。旋削は陰圧室を陽圧室に内包する2重ブース内で行い、環境を清浄に保ち、旋削中の作業員、周辺環境、検体へのコンタミに配慮した。旋削による試料の回収率は最終的に95～99%程度である。尚、初年度はコロナ禍によりコア採取時期が大幅に遅れ、試料採取は少数に留まった。</p> <div data-bbox="405 884 1430 1052"> </div> <div data-bbox="542 1070 785 1104">図1 コア試料採取</div> <div data-bbox="1037 1070 1310 1104">図2 コア試料の旋削</div> <div data-bbox="507 1176 1329 1346"> </div> <div data-bbox="531 1350 823 1384">(a) コア試料形状スキャン</div> <div data-bbox="975 1350 1225 1384">(b) 台座の製作と接着</div> <p data-bbox="754 1406 1078 1440">図3 試料の個別台座加工</p> <p data-bbox="405 1503 1430 1680">ウェザリング試験は恒温恒湿槽に複数のコアを乾燥、湿潤の2条件で保管し（図4）、庫内を福島県浜通りの各月平均気温に維持した。湿潤条件の検体には週2回の注水を行い、約3日で乾燥する為の条件として庫内相対湿度を50%とした。尚、試験は第2年度に採取した検体で1年間実施した。</p> <div data-bbox="600 1738 1246 1928"> </div> <div data-bbox="600 1939 1241 1973">(左) 恒温恒湿槽、(中) 乾燥状態の試料、(右) 注水状態の試料</div> <p data-bbox="754 1982 1078 2016">図4 恒温恒湿槽内の試料</p>

2) 実用的 γ 線境界モデル開発

コロナ禍で、机上で実施可能な γ 線境界モデル開発を先行実施した。吉村らの既往調査データを用いて PHITS^{4,5)}にて図5中A：垂直境界面、B：地表境界面を通過する γ 線の特性を分析した。周辺敷地が土壌面、アスファルト面、その複合条件及び周辺建物の効果を含む境界モデルを検討した。

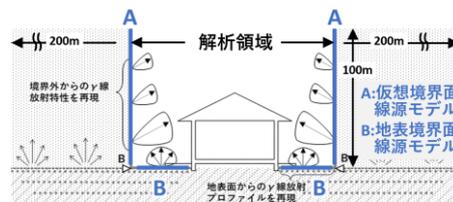


図5 仮想境界面 (A、B)

図6にこれらの適用例を示す。

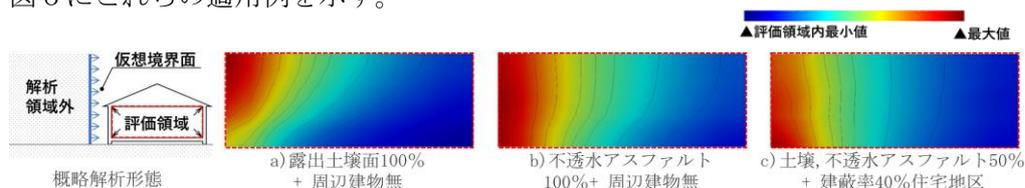


図6 仮想境界モデルによる建物内空間線量率 (各最大値で規準化)

2年目

1) 試料採取及びCs-137深度分布調査を推進

令和3年度

第2年度は福島県大熊町の5カ所の町有施設で3種の人工被覆面コア試料59個を採取した。前年のコロナ禍による試料採取の遅れを回復し、全試料の旋削を完了した。Ge半導体検出器による分析は一部を第3年度に持ち越した。Cs-137深度分析結果より、人工被覆面のCs-137は疎水性である不透水アスファルト(図7左)、親水性であるコンクリート(図7右)共に地表面より3mm程度、透水性アスファルト(図8)は~10数mm程度の浅層に殆どが含まれることが確認された。また、不透水性アスファルトについて、2016年の吉村ら³⁾の測定と同地点で試料採取して比較した結果、発災後5年と10年で深度分布に殆ど変化がないことを確認した(図10)。

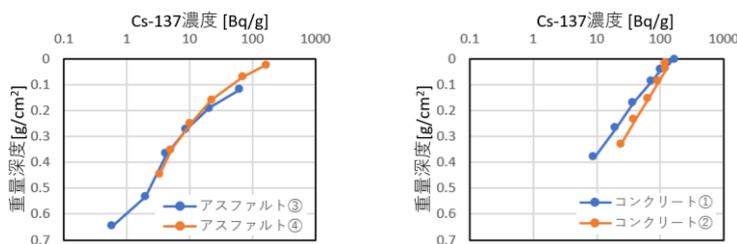


図7 同施設のアスファルト(左)、コンクリート(右)の深度分布

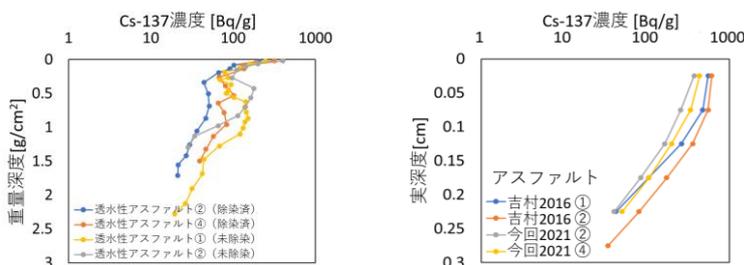


図8 透水性アスファルト

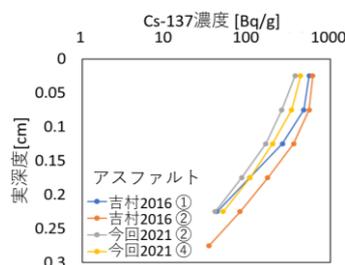


図9 発災後5年、10年比較

2) 実用的 γ 線境界モデル開発

本研究によるCs-137深度データ及び、発災10年後の土壌の深度分布を再現した対数式²⁾を用いた放射線解析を実施し、地表面の γ 線境界条件として利用可能

なデータ整理を行った。図 10 は Cs-137 由来の γ 線総量を 1 Bq とした際に、各方位に放射される立体角当たりの γ 線量[Sv/sr]をエネルギー帯別に示す。Cs-137 が地中に浸透した(a)土壌面では、人工被覆面(b)(c)(d)に比べ、地上に放射される直射線（黒実線）が少なく、直射線、拡散線ともに円形に近い角度特性を示してランペルト面的である。一方、Cs-137 が浅層に存在する(b)コンクリート、(c)不透水性アスファルトの直射線は、等方的な角度特性を示し、(d)透水性アスファルトでも、土壌面と比較して Cs-137 が浅層に存在し、傾向は(b)(c)に近いことが確認された。人工被覆面は地上に放射する直射線が大きく、等方的であるため、水平方向に強い指向性を有し、汚染量が等しければ、土壌面に比して建築内の空間線量率を大幅に高める可能性が確認された。

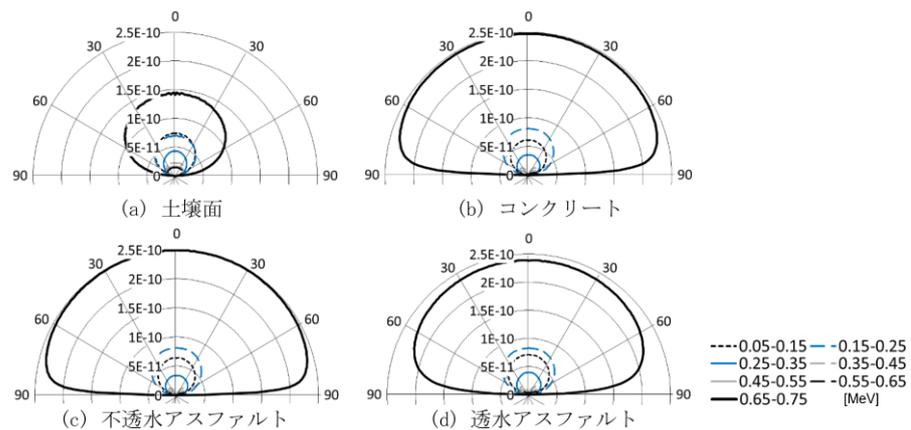


図 10 地表面種別による 1 Bq あたりの γ 線射出特性 [Sv/sr]

3 年目

1) Cs-137 深度分布調査とまとめ [課題①]

令和 4 年度

3 種の人工被覆面の Cs-137 深度分布調査結果を図 11 に示す。(a)コンクリートは、表層は 100 Bq/g 程度で深度に対し指数関数的分布を示し、外れ値を除く重量緩衝深度 β 平均値は 0.124 g/cm²、(b)不透水性アスファルトは、表層 100~1000 Bq/g、深度はコンクリートと同様で β 平均値は 0.114 g/cm²、(c)透水性アスファルトは、表層 100~1000 Bq/g で濃度は重量深度 0.2g/cm²程度まで指数的に減少した後増加して減少する S 字分布を示す。但し表層の濃度は採取場所に依存する。

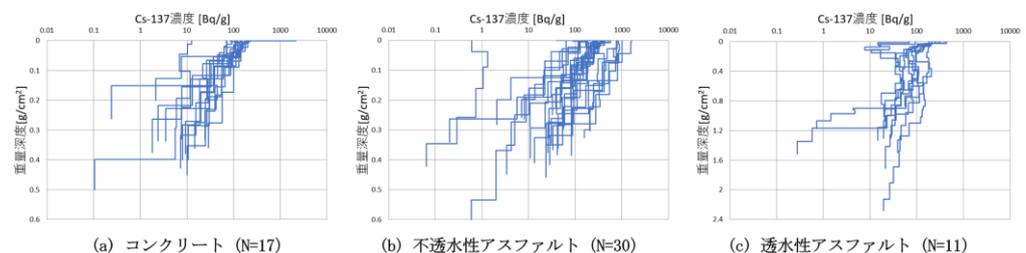


図 11 Cs-137 深度分布調査結果

2) ウェザリング試験と Cs-137 深度分布モデルの検討 [課題②③]

ウェザリング試験の結果を図 12 に、深度分布モデルを表 1 に示す。(a)コンクリート、(b)不透水性アスファルトに湿乾の差が無く、吉村らの調査との比較でも不透水性アスファルトは経時変化が確認できない為、ICRU¹⁾ による指数関数でモデル化した。(c)透水性アスファルトは湿潤条件で地中のピークが移行したと考えられる結果を得た。地表付近の指数関数的分布が発災後速やかに形成され、降雨に

伴って地中への移行が進行したと推定し、暫定的に斎藤ら²⁾の土壌のモデルと同じく指数関数に経時変化を導入して整理した。

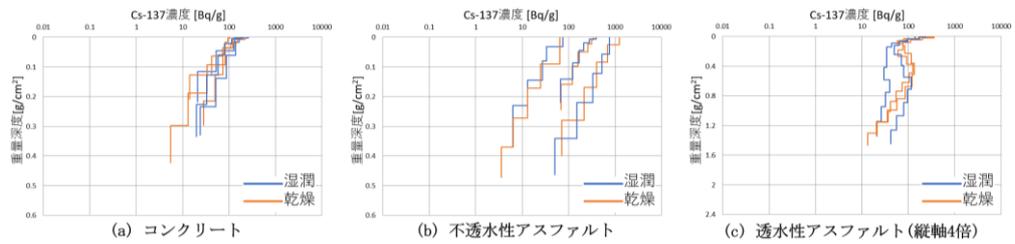


図 12 ウェザリング試験結果

表 1 Cs-137 深度分布モデル(暫定)

(a) コンクリート	(b) 透水性アスファルト	(c) 透水性アスファルト
$A_m(\zeta)$ $= A_{m,0} \cdot \exp(-\zeta/0.124)$	$A_m(\zeta)$ $= A_{m,0} \cdot \exp(-\zeta/0.114)$	$A_m(\zeta)$ $= A_{m,0} \cdot \exp(-\zeta/(0.550 + 0.1t))$
$A_m(\zeta)$: 重量深度 ζ における放射能濃度 [Bq/g]	β : 重量緩衝深度 [g/cm ²]	
$A_{m,0}$: 地表面における放射能濃度 [Bq/g]	t : 事故後経過時間の10年からの経過年数	
ζ : 重量深度 [g/cm ²]	(10年未満はマイナス値)	

3) Cs-137 深度分布の非破壊測定法に関する検討 [課題②③]

Cs-137 深度分布と地表で計測可能なパラメータの関係による深度分布の非破壊測定法を検討した。現状計測値と重量緩衝深度 β 等に相関が見い出せないが、GM管サーベイメータによる測定で β 線遮蔽板の有無による計数率変化に被覆種毎に差が見られる。今後継続した検討が望まれる。

4) 実用的 γ 線境界モデル開発と建築的対応の検討 [課題④]

調査結果を用い、人工被覆種別毎の仮想境界面線源モデルを作成した。木造建物内の線量率を評価し、建築対策検討等への可用性を確認した。

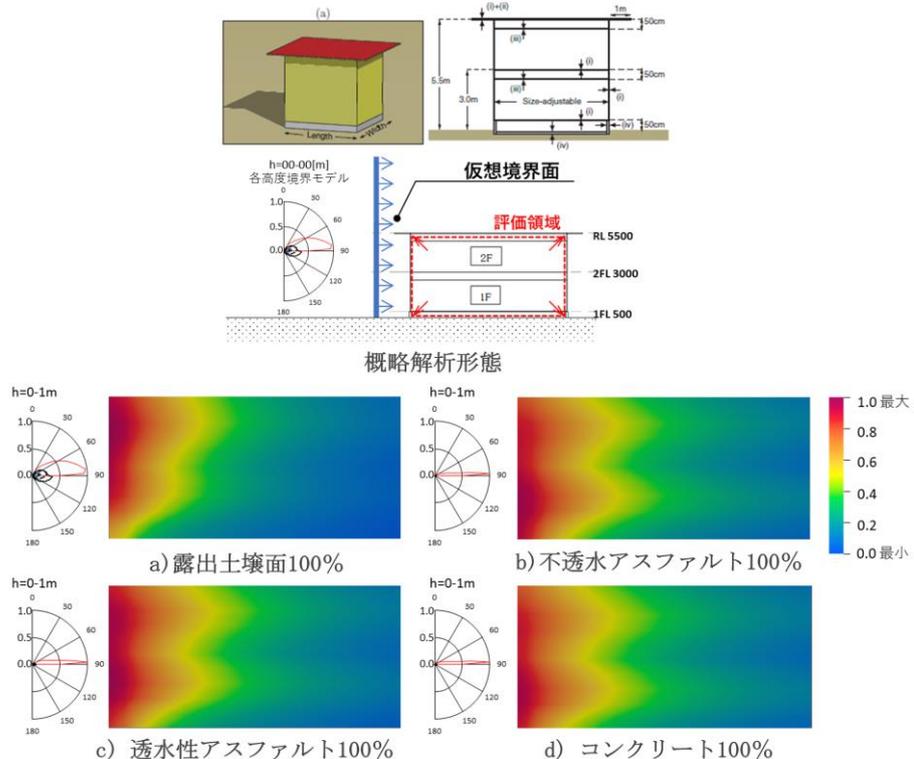


図 13. 境界モデルによる木造2層建物内空間線量率解析

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

人工被覆面：不透水性アスファルト、透水性アスファルト、コンクリートの放射能深度分布調査及び空間線量率への影響を明らかにすることを目的として以下の結果を得た。

1) 人工被覆面の Cs-137 深度調査

発災後 10 年を経た復興期の人工被覆面の Cs-137 沈着状況を実測により明らかにした。Cs-137 は地表の極浅い範囲に留まっており、不透水性アスファルト、コンクリートで表層 3 mm 程度、透水性アスファルトで表層 10 数 mm 程度に大部分が存在し、前者は深度に対して指数関数的減衰、後者は指数関数的減衰の後に地中に 2 つ目のピークを持つ S 字型の分布形状を持つことが明らかになった。

2) Cs-137 深度分布の経時変化

人工被覆内の Cs-137 深度分布の経時変化を確認する為、実験室にて乾湿 2 条件でウェザリング試験を実施して深度分布を比較した。不透水性アスファルト、コンクリートでは乾湿条件による差は認められず、加えて、これらの深度分布は極浅く、また不透水性アスファルトの吉村ら³⁾の研究（2016 年）と本研究（2021 年）に有意な差がない事から、経時変化は認められないと結論した。透水性アスファルトでは湿潤条件で Cs-137 が深く移行する結果を得たほか、分布が S 字型であることから、発災時地表に在った Cs-137 の一部が雨水浸透による移流で時間と共に輸送され深度分布はゆっくり変化すると結論した。

3) 空間線量率への影響を表す γ 線境界モデルの検討

地中の Cs-137 に起因して地表面から放射される γ 線及び、敷地境界や壁面等に入射する γ 線の特性（界面に対する角度と強度）を放射線解析で分析し、解析用の γ 線境界モデルとすることを検討した。地表面が土壌の場合の Cs-137 深度分布式²⁾と本研究による人工被覆面の深度情報を用いた解析から、復興期は土壌面と人工被覆面で特に直射線の特性が異なり、人工被覆面がより大きい影響を空間線量率に及ぼすことを確認した。

4) 地表面の空間線量率への影響と低減対策検討への成果活用

界面の γ 線の特性把握は空間線量率への影響と低減策の検討に有用となる。戸外の人工被覆面は水平方向に指向性を有する γ 線を放射し、建築壁面に垂直に近い角度で入射して室奥まで到達する為、コンクリート塀等を設けることで特に低層階の低減が可能になる。また、人工被覆面の Cs-137 は浅層に存在する為表層 5 mm 程度の削り取りでも多くを除去することが考えられる。

復興に際して、対象地域の人工被覆面の取り換えが難しい場合でも、本研究で得た知見に基づく効率的な低減対策の可能性があると考えられる。継続した検討を予定する。

② 計画・目標通り実施できなかつた事項とその理由

本研究の初年度はコロナ感染の発生、拡大と重なり、研究推進に多大な影響が生じた。第1年目は研究者、協力業者ともに身動きが取れず、初動が半年遅れた。また、第2年目も移動制限などにより、現地調査に影響が出るなど、研究遂行上の様々な障害に見舞われた。このことで、試料採取計画が遅れ、スケジュールを組み直しながら研究を遂行し、最初の深度分布の結果を得るまでに多くの時間を要したほか、最終的な分析結果を得た時期は研究期間の終盤になった。また、ウェザリング試験期間の短縮などの調整も余儀なくされた。本研究が掲げた4つの課題は、最終的に欠けたものはないものの、当初の目標に比べ、完成度が低くなった可能性がある。

特に「課題②：人工被覆種別毎の Cs-137 深度分布の分析及び地上への影響評価」の中で検討を進めた、Cs-137 深度分布の非破壊測定法に関する検討では、上記理由で深度分布の分析結果が遅れたことで、十分な時間がとれず、明快な結論を得るに至らなかった。非破壊測定法に関連する当初目論見では、不透水性アスファルト、コンクリート、透水性アスファルトは Cs-137 深度が明確に異なって順に深くなり、3種の差異が十分にあるものと期待したが、実際には何れも浅層で相互の差が小さいため、より詳細な検討を必要としている。今後、継続して検討を進め、実用上十分な意味を持つ簡易な非破壊検査法の構築を目指す。

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) Cs-137 深度分布に関する想定と実際の結果について

研究開始時点では、建築関係者の認識として不透水性アスファルト、コンクリート、透水性アスファルトの順でmmオーダー、10 mmオーダー、数cmオーダーで順に深度分布が大きくなると想定した。これに対し、何れも深度は小さく、親水性のコンクリートであってもあまり殆ど浸透していないことが判明し、感覚的な知見の修正に資するデータを得ることができた。また、多くの建築関係者は、ベクトルとしてのγ線の指向性について、地表面がγ線に関してランベルト面で、角度によらず等輝度であると認識しているが、人工被覆面には当てはまらないことをデータで示すことができる成果を得た。

2) 舗装面の試料採取と加工に関するノウハウの獲得について

今回の研究において、多数の人工被覆面試料（コア試料）の深度分析法の開発は技術的なテーマであった。コア試料を層毎に分割する方法として、当初は岩石切断機による方法を検討したが、精密に効率よく、且つ作業環境を汚染せず、試料のコンタミを防止できる方法として最終的に旋削を採用し、更に旋削時の固定方法、切削刃選択などに関する試行錯誤の結果、今回の方法を確立した。今後同様の検討の際に参考となるノウハウを得た。

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) 本研究から得られた知見の復旧・復興作業への適用に関する提案

今回明らかにした人工被覆面の特徴として Cs-137 が地表の近くに存在すること及び、 γ 線の水平方向の指向性があげられる。これらに応じた提案として、①緩和策としての Cs-137 の効率の良い除去、②適応策としての、水平方向の γ 線に配慮した遮蔽対策が考えられる。

①Cs-137 の効率の良い除去

復興作業において、汚染された全ての舗装面、被覆面を更新できない場合でも、不透水性アスファルト、コンクリートにおいては被覆面を 5 mm程度削り取ることで相当量の Cs-137 の除去が期待できる。廃棄物発生量を抑えながら、削り過ぎないことで舗装面を継続使用できる可能性もある。透水性アスファルトにおいても、表層 5 mmで多くの除去が期待できるが、地中のピークの除去のためには 15 mm程度の除去で効果が期待できる。

②水平方向の γ 線に配慮した遮蔽対策

人工被覆面が放射する水平方向の γ 線による影響が懸念される場合には、Cs-137 に起因する γ 線を減弱する目的で、簡易なコンクリート塀や築山等を建築的に築造することで建物の低層部分の線量率を下げる簡易な適応策が可能になる。

これらに関連し、人工被覆面の水平の指向性や透水性アスファルトの特性が建築内外の γ 線の空間線量率にどう影響するかを計算し、効果的な除染のあり方などの提案を検討する。

2) 本研究をさらに発展させる新たな研究

本研究で開発した γ 線境界モデルは、解析対象地に応じた地表面種別の構成比率や発災後の時間経過、遮蔽体としての建物の影響等を加味できるため、今後、土地利用を含む放射線環境に関する研究への発展を計画する。また十分な検討に至らなかった Cs-137 深度分布の非破壊測定法に関する研究を計画する。

3) 環境保健行政への貢献

本研究で得たデータ及び知見を利用可能な形で論文等として公開し、基礎データの充実に貢献する他、復旧・復興事業を推進する自治体への建築環境側面での情報提供を行う事で、環境保健行政への貢献を行う。

引用文献

1. International Commission on Radiation Units and Measurements: Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU Report 53, 1994.
2. 日本原子力研究開発機構. 福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査研究 成果報告書. 平成 23 年度原子力規制庁委託事業, 2013 ; 第 2 編 ; 2_3-16 <https://fukushima.jaea.go.jp/fukushima/try/pdf/pdf05/02-03.pdf>. Accessed 1 May 2023.
3. K. Yoshimura, T. Watanabe, H. Kurikami. Vertical and horizontal distributions of ^{137}Cs on paved surfaces affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environment Radioactivity*. 2020; 217: Article 106213
4. 橋本慎太郎, 仁井田浩二, 松田規宏, 他. 粒子・重イオン輸送計算コード PHITS の特徴と医学物理分野への応用. *Jpn. J. Med. Phys.*, 2013; 33: No.2: 88-95.
5. PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) WEB ページ. Accessed 1 May 2023.