

## 放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和3年度年次報告書（詳細版）

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3年4月1日～令和4年2月28日

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・准教授

氏名		所属機関・職名
研究協力者	吉田 浩子	東北大学大学院薬学研究科ラジオアイソトープ研究教育センター・准教授
研究協力者	眞田 幸尚	日本原子力研究開発機構・グループリーダー
研究協力者	Alex Malins	日本原子力研究開発機構・研究員
研究協力者	町田 昌彦	日本原子力研究開発機構・研究主席
研究参加者	須藤 慎仁	東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻・大学院生
研究参加者	大槻 謙太郎	東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻・大学院生

研究要旨	本研究は、福島第一原子力発電所事故被災地のアスファルトやコンクリートなどの人工被覆面に沈着した放射性セシウム（以降 Cs）の深度分布を調査することで、人工被覆面による空間放射線量率への影響の評価と、除染や建築的な緩和対策の検討に貢献するデータを得ることを目的とする。また、調査結果を用いて、 $\gamma$ 線シミュレーションで建物内外の空間線量率を簡易に予測することを目的として、放射線解析に用いる $\gamma$ 線境界条件の開発を行う。以上の目的を達成するため、本研究は3年間の研究期間で、次の4つの課題に取り組む。（〔課題①〕避難指示区域における人工被覆面へのセシウムの沈着状況調査、〔課題②〕人工被覆種別ごとのCs深度分布の傾向分析及び地上への影響評価、〔課題③〕試験体を用いたCs深度に関するウェザリング影響評価、〔課題④〕空間線量率予測のための実用的 $\gamma$ 線境界モデルの検討）
キーワード	人工被覆面、放射能深度分布、放射線測定、放射線解析、 $\gamma$ 線境界条件

## I 研究目的

福島第一原子力発電所事故被災地では、放射性セシウムをはじめとする事故由来の放射性物質の影響で発災直後には広範囲に非難指示区域が設定されたが、その後の精力的な除染によって発災後10年を経た現在では、多くの地域で住民の帰還が可能になっている。今後、特定復興再生拠点区域など、当初の放射性物質の沈着が大きかった地域においても避難指示解除が進んでいく。住民の帰還に際しては、残存する放射性物質に起因する放射線に留意して新たな生活の場となる建築物の改修や新築を進めることが望まれる。

発災後一定期間を経た被災地の空間放射線量率は、主に地表面に沈着、浸透した半減期の長い放射性セシウム（以降Cs）由来の $\gamma$ 線によって形成される。放射線源となる地表面には、被覆のない土壌面と舗装された人工被覆面があり、生活環境の放射線対策の立案や実施には、これら地表面の放射線源としての特性の把握が求められる。同特性は主にCsの地中深度分布に応じて決まるため、生活空間の地面、即ち土壌露出面及びアスファルト舗装面、コンクリート舗装面等の人工被覆面のCs深度分布情報が必要になる。土壌露出面については、時間と共に地中へ浸透するCsの深度分布が指数関数で近似されることが示されている<sup>1,2)</sup>。その一方で、人工被覆面の同様のデータはごく少ない<sup>3)</sup>。

そこで、本研究では人工被覆面の放射線源としての特性の把握を目的として、放射能深度分布調査を中心とした以下の4課題を実施する（[課題①] 避難指示区域における人工被覆面へのセシウムの沈着状況調査、[課題②] 人工被覆種別ごとのCs深度分布の傾向分析及び地上への影響評価、[課題③] 試験体を用いたCs深度に関するウェザリング影響評価、[課題④] 空間線量率予測のための実用的 $\gamma$ 線境界モデルの検討）。また、その成果となる人工被覆面の放射能沈着実態データを学術論文として公開することで基礎資料の充実に貢献する他、成果を用いた建築空間の放射線解析、建築的対策案の効果試算結果などを地域自治体に情報提供することで、安心な復興の一助となることを目指す。

## II 研究方法

以下に、課題ごとに研究方法を示す。

### 1. [課題①] 避難指示区域における人工被覆面へのセシウムの沈着状況調査

福島県内の避難指示区域にて、人工被覆面（不透水性アスファルト、透水性アスファルト、コンクリート面）のCs沈着状況の調査を目的として、人工被覆面のコア試料を研究期間に亘って複数回採取する。採取した試料を地表面側より0.5 mmないし1.0 mm毎に切削、粉末化して深度毎の検体を作り、Ge半導体検出器にて $\gamma$ 線測を行うことで、Csの沈着状況を明らかにする。調査方法を図1に示す。なお、調査対象施設は福島県大熊町の町有施設で、町への申請と許可を得て実施した。対象地については後述する。

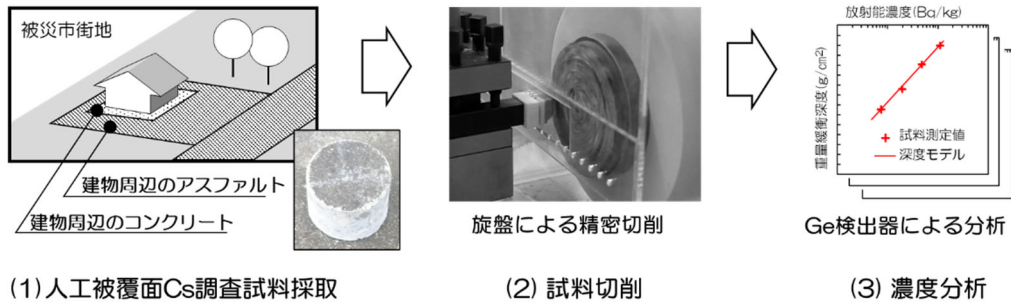


図 1 人工被覆面への Cs の沈着状況調査方法

### 1.1. 人工被覆面 Cs 調査試料採取

人工被覆面のコア抜き試料の採取に際して、引きずり（浅層のCsがコア採取時に移動して深層のコンタミネーションとなること）を生じないこと及び、試料が欠けたり変形したりしないことが条件となる。採取は可搬型のコアドリル+コアビット100φを用い、引きずりを避けるため乾式とした。コアビットは乾式用を用いず、湿式用を乾式で用いる方が良好な試料を採取できた。コアドリルの固定はアンカーボルトによった。研究当初は夏季に軟化するアスファルトへのアンカー固定に不安があり、固定に鋼製架台を用いたが、架台使用は寧ろ問題が多く、夏季のアスファルトでもアンカー固定で作業可能であることを確認の上で方法を変更した。図 2に採取作業と採取コアを示す。採取されるコア外径は92～95φ程度になる。



図 2 人工被覆面コア試料の採取作業と採取された試料（夏季）

### 1.2. Cs 深度分布測定のためのコア試料の旋削

深度毎にコア試料を切削、粉末化する方法は、作業性、加工精度、加工時の引きずり回避を条件として、汎用卓上旋盤を用いた旋削（乾式）とした。ポーラスな試料や硬度の低いアスファルトは、旋盤に取り付ける際の締め付けや機械加工に伴って変形や崩れを生じ、加工精度の低下と引きずりに問題が生じる。これを回避するため、旋削に先行して試料に準備加工を施した。準備加工は、当初はコア試料を真空含浸にて樹脂包埋処理した上で旋削する方法を採用した。含浸による包埋は試料の機械的強度を上げ、加工時の資料保護に優れるが、空隙に含浸した樹脂が試料の重量に影響すること及び試料内の物質の移動の原因となる恐れからこれを変更し、図 3に示す方法を開発した。コア試料毎に底面形状を3Dスキャンし、3Dモデリングソフトで試料底面に嵌る3D台座モデルを作成。3D台座を3Dプリンターで実体化して試料に嵌め込み、プラスチック円筒容器を型としてエポキシ樹脂で固定した。以上の加工によって試料底部を精度よくフラット化すると共に、機械的強度の向上によって、旋盤のチャックによる締め付けに対する強度を確保しながら、試料地表付近の調査対象部位には手を加えない方法を確立した。

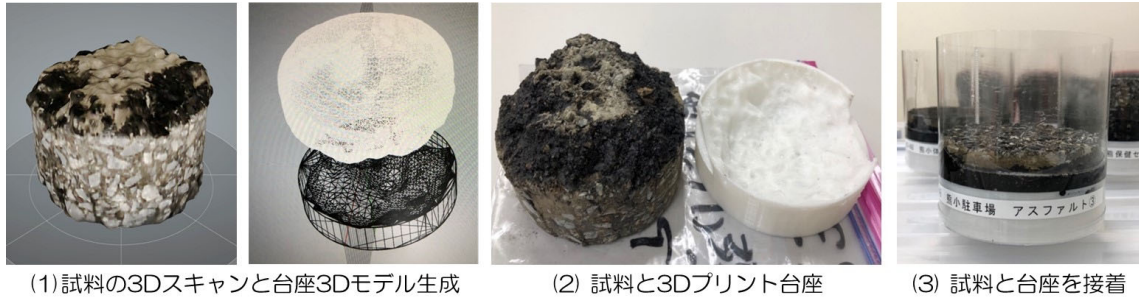


図 3 コア試料に合わせた 3 D 台座の製作

旋削はバイト（旋盤の切削刃）と切削方法の自由度が高いため、精度と作業性を確保する目的で検討を行い、当初はバイトにボーリングバー（試料中央から中ぐりで切削）を選定して試料中央から切削する方法を採用（初年度報告）したが、試料の欠けを生じ易いことから、剣先バイト（外周から切削）にて外周から切削する方法とした。バイトはすくい角が負になるネガ仕様のホルダにブレーカ（エッジを鋭くするしゃくり）のない超硬チップを選定組み合わせた。図 4 に作業状況を示す。

切削粉末の回収方法については、当初はサイクロン式の吸引方式を採用したが、最終的には旋盤の切削部分を極力小さく囲むように設計した防塵カバーで覆い、積極的に吸引せずにカバー底部に設置した薬包紙上に切削粉末を落として回収する方法に変更した。本研究では初年度迄のサイクロン集塵を用いる方法で吸引条件を極力調整しても 10 $\mu$ m 以下の微細粉末が回収し切れず、切削重量に対する試料回収率はアスファルトで 93 wt%程度が限界であった。今回確立した方法により回収率をアスファルトで 98 wt%～99 wt%まで向上した（コンクリートは若干劣る）。

切削深度の打ち切り条件は、試料のCs深度分布の把握目的としているため、既往研究<sup>3)</sup>に倣い、切削毎に試料の表面汚染密度を測定してカウントが地表面の 1/10 以下となる深度迄とした。

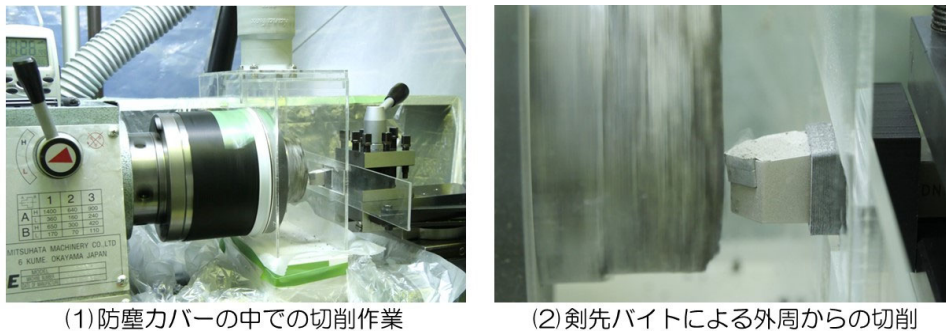


図 4 旋削状況



図 5 切削加工による深度毎の試料粉末

### 1.3. 深度毎の Cs 沈着量測定

切削加工による深度毎の試料粉末 (図 5) をGe検出器にて分析し、 $^{137}\text{Cs}$ のカウント、分析時間、試料重量より $^{137}\text{Cs}$ 濃度を求めた。

## 2. [課題②] 人工被覆種別ごとの Cs 深度分布の傾向分析及び地上への影響評価

Csが沈着した人工被覆面による地上への影響を評価するため、課題②では人工被覆面の採取場所にて放射線測定を行う。また、課題①で得られる被覆種別ごとのCs深度分布の傾向を分析し、地上で観測される放射線の状況との関係を明らかにする。

### 2.1. Cs の深度分布による地上への影響調査

人工被覆面の試料採取地点の地上における $\gamma$ 線スペクトル、地表面における $\gamma$ 線スペクトル、 $\beta$ 線計数率、 $\gamma$ 線計数率を測定することを目的として、可搬型Ge半導体検出器、NaI (Tl) シンチレーション検出器、GM管検出器を用いたIn-situ測定を行った。可搬型Ge検出器は、コリメータを付した可搬型Ge半導体検出器 (FALCON-5000、CANBERRA、USA) を用い、1m高で30分間測定した<sup>2)</sup>。 $\gamma$ 線スペクトルは、In-Situ Object Calibration Software (CANBERRA、USA) により解析した。解析に用いるパラメータとして、測定対象の密度は $2.35\text{ g cm}^{-3}$ 、緩衝深度は $0.1\text{ g cm}^{-2}$ とした。

シンチレーション検出器 (シンチレーションスペクトロメータEMF211、EMFジャパン) はGe半導体検出器と同じく1m高で15分間 $\gamma$ 線スペクトルを測定した (図 6)。GM管検出器 (TGS-146B、日立アロカ) は鉛コリメータを併用して、試料採取位置の地表面直上で時定数30秒にて3回測定した。なお、GM管検出器による測定は $\beta$ 線の影響の有無による評価を意図して樹脂製遮蔽体の有・無を条件に測定した。測定状況を図 7に示す。



(1) 可搬型Ge半導体検出器 (2) NaI(Tl) シンチレーション検出器 (中央)

図 6 地上1mにおける空間線量率測定の様況



(左: シンチレーション検出器による測定、中: 樹脂遮蔽体無のGM管による測定、右: 樹脂遮蔽体有のGM管による測定)

図 7 地表面測定の様況

## 2.2. Cs 深度分布の被覆種別ごとの傾向分析

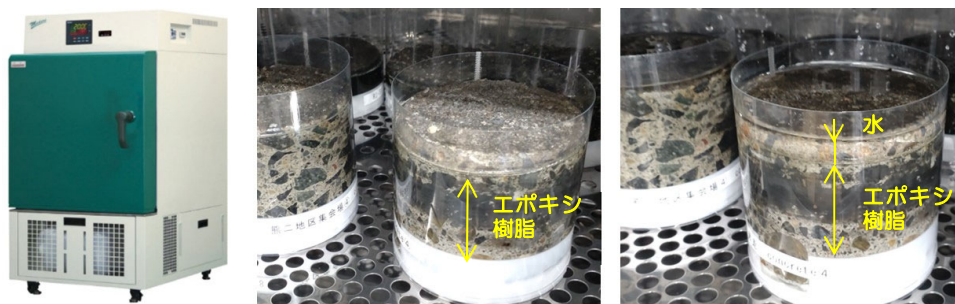
課題①の結果を用い、人工被覆面試料の種別ごとにCs深度分布の特徴を分析する。ここで得られる特徴と地上面で観測される放射線の関係を明らかにする。本研究では、不透水性アスファルト、透水性アスファルト、コンクリート面について整理を行う。

## 3. [課題③] 試験体を用いた Cs 深度に関するウェザリング影響評価

地表に沈着したCs濃度の深度分布は、地面内でCsが濃度勾配に応じて拡散する場合には発災後の時間経過に応じて地表から地中に拡散することで、また、地面内で雨水等の水流に伴って輸送される場合は移流によって、形成されることが考えられる。土壌の場合、Cs濃度の深度分布は時間経過とともに変化することが報告されており<sup>2)</sup>、地表面への沈着後も継続して移動することを示している。人工被覆面内部のCs濃度の深度分布については、その性質に応じて経時変化が生じると考えられる。そこで、不透水性アスファルト、透水性アスファルト、コンクリート面について、採取した試料を実験室で湿潤と乾燥の2条件で温度を管理して1年間保管し、その後新たに現地から採取した試料と比較することで、Cs深度分布の経時変化に関する情報を得る。

### 3.1. 試験体保管条件と方法

試験体保管方法を図 8 に示す。同日に採取した試験体 2 個を用い、実験室にて 2 条件 A:ドライ条件、B:定期的に試料表面に注水するウェット条件（降雨想定）で保管する。温度は試料採取地に近い条件とすることを意図して、浪江のアメダス統計値より月平年値を採用し、月毎に変化させる。湿度は、注水した水が適度に乾燥することを意図して相対湿度 50%に設定する。A 条件の試験体は採取したままの状態を上記温湿度環境に暴露する。B 条件の試験体は透明樹脂製の容器に試料を納め、試料表面を水平にした状態でエポキシ樹脂にて試料外周部の水密を確保する。試料上面はカバーせず地表面のままの状態として、注水時には地表面のみから水が浸透する条件とする。この状態で恒温恒湿槽（いすゞ、TPAC-154-20、庫内 600\*600\*430）内に設定した上記温湿度環境に暴露する。注水は水の乾燥を確認しながら実施する。



(左) 恒温恒湿槽、(中) 乾燥状態の試料、(右) 注水状態の試料

図 8 恒温恒湿槽内の試料

## 4. [課題④] 空間線量率予測のための実用的 $\gamma$ 線境界モデルの検討

課題①で得られる深度毎のCs深度分布を用いた放射線解析により、建物の解析に用いる境界条件を作る。図 9 に境界モデルの体系を示す。鉛直の境界面（図 9、A、仮想境界面）を解析領域外から領域内に通過する $\gamma$ 線を立体角毎に整理し（可視光における光度[cd]に相当）、その方向プロファイル（可視光における配光分布に相当）をエネルギー帯ごとに整理することで、仮想境界面

の $\gamma$ 線境界モデルを構築する。同様に、地表面境界（図 9、B、地表面）を解析領域外から領域内に通過する $\gamma$ 線を立体角毎に整理して地表面の $\gamma$ 線境界モデルを構築する。このA,Bの境界モデルを作成する際に、解析に与える解析上のCs線源（図 9、C）をここでは模擬実線源と称する。模擬実線源には課題①から得た人工被覆面のCs深度分布を用いる。模擬実線源には、周辺敷地の地表面の種別の構成比率を反映するとともに、遮蔽・拡散体として寄与する周辺敷地の建物等も含まれる。

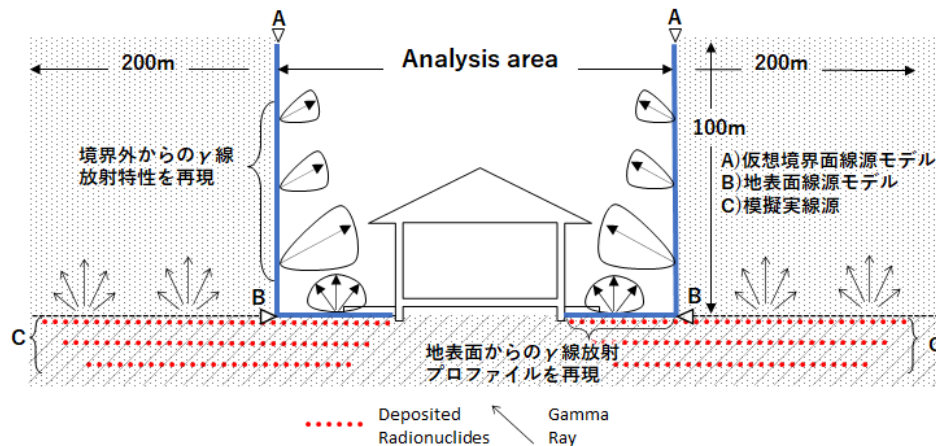
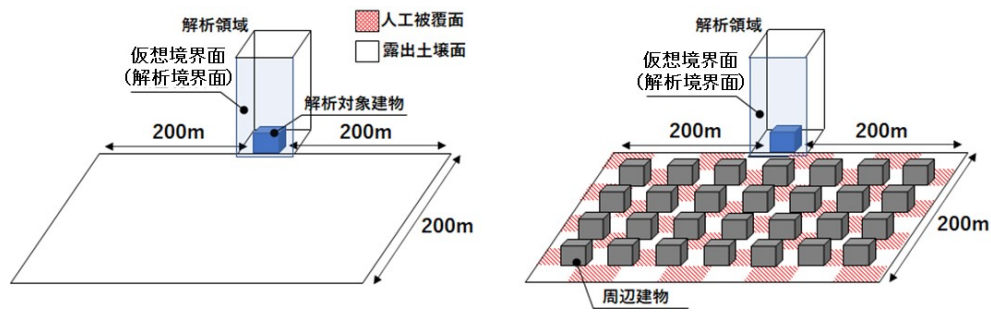


図 9  $\gamma$ 線境界モデルの体系

なお、課題④は、初年度（令和2年度）にモデルのフレームワークを完成しており、本年度は新たな境界モデルの開発は行わず調査に注力した。課題①にて得られるCsの深度分布を用い、境界モデルの基本となる人工被覆面の $\gamma$ 線放射特性を試算した。また、施設K2にて今後解析を実施する際に比較対象となる空間線量率分布測定を行った。

#### 4.1. $\gamma$ 線境界モデルのフレームワーク

ここでは $\gamma$ 線境界モデルのフレームワークを示す。鉛直の境界面（図 9 中 A：仮想境界）について、これまで筆者らが放射線解析（粒子・重イオン輸送計算コード PHITS<sup>4</sup>）を使用）による建築環境の実用的解析を意図して、周辺敷地の模擬実線源が露出土壤面である場合を対象として開発を進めた仮想境界モデル<sup>5</sup>）を人工被覆面に拡張すると共に、街区中の建築空間の解析を意図して周辺建物を含む街区形状を取り入れた。仮想境界の外側に単一の模擬実線源が広がるモデル（図 10、a）を基本として、仮想境界外側に均質ではない模擬実線源が広がるケースと、その上に建物が存在するケースなど、都市・建築的な要素を取り入れた（図 10、b）。



a) 均質な模擬実線源が広がるモデル      b) 様々な都市・建築的環境に対応するモデル

図 10 周辺敷地の状況に応じた  $\gamma$  線境界モデル

表 1 周辺建物、街区形状、地表面被覆条件

要素	解析条件設定
周辺敷地の地表面被覆	人工被覆面率 0%, 50%, 80%, 100% の 4 水準
周辺敷地の建蔽率	木造戸建簡易モデルを作成し、グロス建蔽率 25%、40% の 2 水準
周辺敷地の建物配置	建物配置を、千鳥配置、格子配置の 2 水準

人工被覆面を再現した模擬実線源は課題①の結果を整理して適用する。周辺敷地条件として、初年度の検討では、表 1 に示す周辺敷地の地表面被覆、周辺敷地の建蔽率、周辺敷地の建物配置をパラメータとして取り入れた。また、吉村らによるアスファルト面を対象とした Cs 深度分布調査<sup>3)</sup>を参照したモデル作成を試行した。

#### 4.2. 人工被覆面の $\gamma$ 線放射特性

本研究においては「 $\gamma$ 線放射特性」として以下の定義を用いる。 $\gamma$ 線源となる平面から放射される  $\gamma$ 線の方向と、その方向の立体角当たりの  $\gamma$ 線の本数を放射特性と称する（可視光を取り扱う際の配光に相当する）。また、放射特性は<sup>137</sup>Csに由来する直射線である0.662 MeVとこれよりも低いエネルギーを持つ散乱線で構成される。エネルギースペクトル毎に放射特性が異なるため、エネルギースペクトルを階級に分けて整理する必要がある。階級は0.05 MeVから0.1 MeV毎にスペクトルを切り分け、0.5 MeVから、直射線、0.662 MeVを含む0.65–0.75 MeVまでの7階級について整理する。可視光とのアナロジーでは、可視光の波長毎に配光特性が異なる光源面（見る角度で色が違う光源）の定義に相当する。課題①によるCs深度測定結果を用いて、各人工被覆面における $\gamma$ 線放射特性の解析を放射線解析コードPHITS<sup>4)</sup>により実施。対象被覆は①土壌、②コンクリート、③不透水性アスファルト、④透水性アスファルトの4種。解析は図 11の体系を用いる。 $\gamma$ 線の平均自由行程を考慮して200m先に到達する $\gamma$ 線まで評価するため、半径200m地下1m、地上1mの解析領域を設定し、地中に設定した半径10cmの線源領域から射出される $\gamma$ 線を高さ1mに設定する検出領域 (Tally) にて捉える。Tallyに入射する $\gamma$ 線のスペクトルと方向ベクトルを整理して地上1mの面で $\gamma$ 線の特性とした。なお、この解析では<sup>137</sup>Csのみを設定して計算を行う。



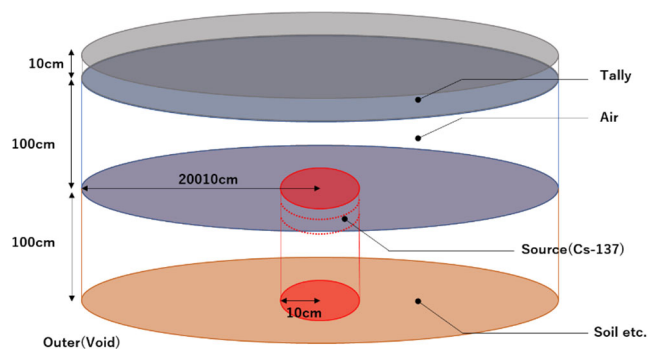


図 11  $\gamma$ 線放射特性解析の解析体系

#### 4.3. 解析対象としての空間線量率分布測定

施設K2（図 12）にて実施した屋内外空間線量率分布を例に示す。測定器は小型シンチレータ（CLEAR-PULSE社製Mr. Gamma A2700）によった。上下分布の計測の為、 $\gamma$ 線を遮蔽しないことを意図して軽量の紙管に床面から25 cm毎に200 cmまで8台の測定器を取り付けた測定器具を製作した（図 13）。室内の測定は135cm間隔で屋内外合わせて100点で行い、計800（8×100）点の空間線量率を調査した。測定に先立ち線量率の異なる開けた屋外にて地上1 m高さで全ての小型シンチレータとシンチレーションスペクトロメータ（EMF社製、EMF211）を比較して機差を補正した（図 6（2））。測定に際して床上1mの室代表点でEMF211にて同時に線量率を測定することで、測定誤差の圧縮に努めた。小型シンチレータは時定数60秒で、測定器具を測定位置に設置後60秒経過した後、30秒毎に3回記録して平均した。EMF211は7箇所各点30分間の測定を行った。

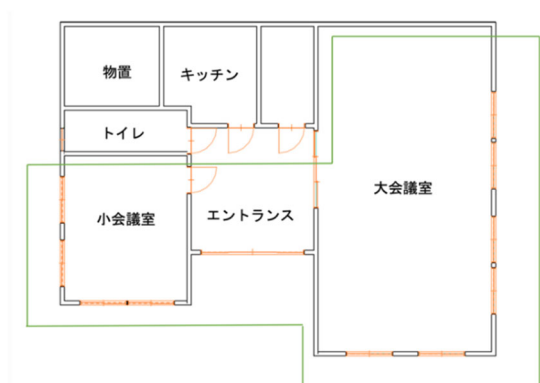


図 12 施設 K2 平面図（緑枠内が測定範囲）



図 13 紙管を使用した測定器具

#### （倫理面への配慮）

本研究では、以下の理由により倫理面の問題がないと判断した。

本研究はヒト、動物、自然を対象とする研究ではなく、また、研究初年度に調査対象とした施設は全て自治体などの公的機関が管理する建物に付随する駐車場その他であり、個人の財産等に影響せず、個人情報に該当する資料も含まれない。

### III 研究結果

#### 1. [課題①] 避難指示区域における人工被覆面へのセシウムの沈着状況調査

##### 1.1. 人工被覆面コア試料採取

令和3年8～9月及び令和3年12～令和4年1月に福島県大熊町内の5施設（図14及び表2、表3参照）を選定し、各箇所1～4地点、計9地点（site1～site9）で試料採取を行った。各地点にて計画した試料数（夏季4～8個/site、計36個、冬季2～4個/site、計22個）全ての採取を完了した。夏季に採取した試料の約半数は課題②試験用である。人工被覆面の種別は、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3種類である。試料採取地点は、調査の進捗に伴って追加しているため、夏季よりも冬季が多い。試料採取地点はSite8施設HC：透水性アスファルトのみ除染済と未除染を含むが、これ以外はいずれも未除染である。表4、表5に試料採取地点の写真を示す。

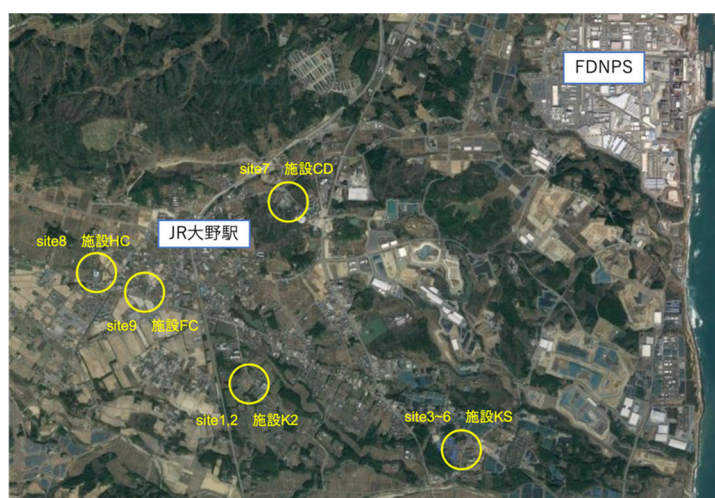


図14 試料採取地点

表2 夏季（令和3年8～9月）試料採取概要

採取名	施設・採取地点	人工被覆種別	採取個数	
site1	施設K2	駐車場	不透水性アスファルト	4
site2		駐車場	コンクリート	4
site3	施設KS	建物スロープ	コンクリート	4
site4		建物犬走	コンクリート	4
site5		体育館前	不透水性アスファルト	4
site6		駐車場	不透水性アスファルト	4
site7	施設CD	駐車場	不透水性アスファルト	4
site8	施設HC	駐車場	透水性アスファルト	8

表3 冬季（令和3年12月～令和4年1月）試料採取概要

採取名	施設・採取地点	人工被覆種別	採取個数	
site1	施設K2	駐車場	不透水性アスファルト	2
site2		駐車場	コンクリート	2
site3	施設KS	建物スロープ	コンクリート	2
site4		建物犬走	コンクリート	2
site5		体育館前	不透水性アスファルト	2
site6		駐車場	不透水性アスファルト	2
site7	施設CD	駐車場	不透水性アスファルト	2
site8	施設HC	駐車場	透水性アスファルト	4
site9	施設FC	駐車場	不透水性アスファルト	4

表 4 試料採取地 (2021 年度夏季)

試料情報	採取現場	試料情報	採取現場
2021/8/6 施設 K2 駐車場 コンクリート ①～④		2021/8/6 施設 K2 駐車場 コンクリート ①～④	
2021/8/19 施設 KS 建物スロープ コンクリート ①～④		2021/9/17 施設 KS 教室前犬走 コンクリート ①～④	
2021/9/24 施設 KS 体育館前 アスファルト ①～④		2021/9/24 施設 KS 駐車場 アスファルト ①～④	
2021/8/19 施設 CD 駐車場 アスファルト ①～④			
2021/9/17 施設 HC 駐車場 アスファルト 未除染 ①～④		2021/9/17 施設 HC 駐車場 アスファルト 除染済 ①～④	

表 5 試料採取地 (2021 年度冬季)

試料情報	採取現場	試料情報	採取現場
2022/1/17 施設 K2 駐車場 アスファルト ①～②		2022/1/17 施設 K2 駐車場 コンクリート ①～②	
2021/12/14 施設 KS 建物スロープ コンクリート ①～②		2021/12/14 施設 KS 教室前犬走 コンクリート ①～②	
2021/12/14 施設 KS 体育館前 アスファルト ①～②		2021/12/14 施設 KS 駐車場 アスファルト ①～②	
2022/1/17 施設 CD 駐車場 アスファルト ①～②			
2022/1/25 施設 HC 駐車場 アスファルト 未除染 ①～②		2022/1/25 施設 HC 駐車場 アスファルト 除染済 ①～②	
2021/12/14 施設 FC 駐車場 アスファルト ①～④			

### 1.2. コア切削加工結果

コアの切削加工は、今年度と前年度に採取した試料を合わせ、計画した45個全てを切削した。不透水性アスファルト試料とコンクリート試料は、地表より0.5mm厚で切削し、地表より6～8層（3mm～4mm）で地表面の表面汚染密度の1/10未満となった。表 6にコンクリートの切削状況の例を示す。透水性アスファルトは脆く且つ地表面の凹凸が大きいいため、第1層を0.2mm、次いで2～4層を0.5mmで切削した後、1.0mm厚で切削し、地表より15層程度（13mm程度）で地表面の表面汚染密度の1/10未満となった。表 7に透水性アスファルトの切削状況の例を示す。

表 6 Site 2、施設 K2 コンクリート②切削状況抜粋

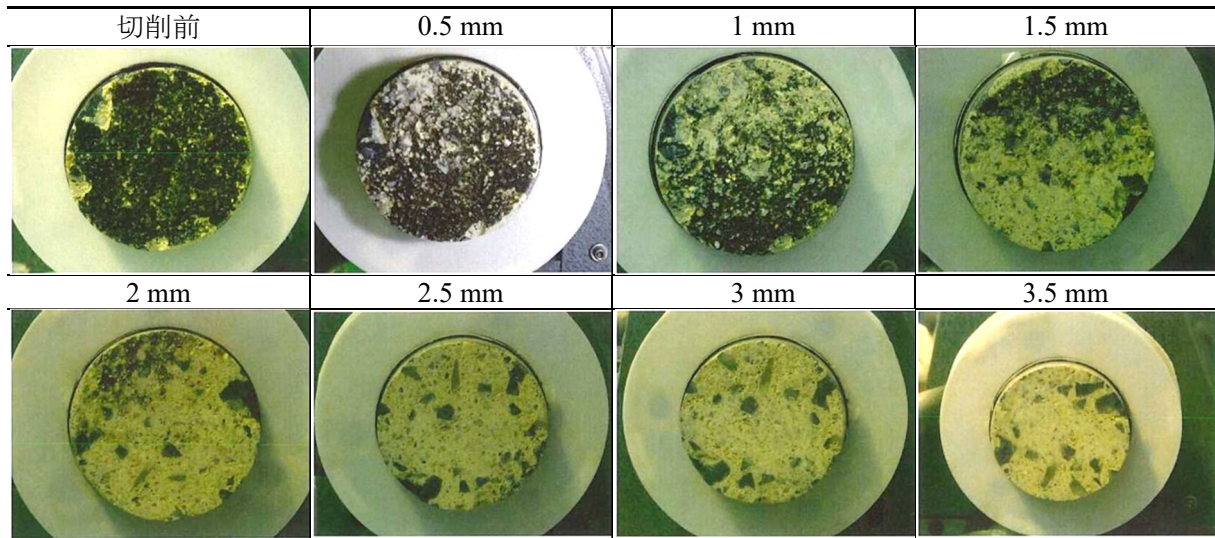
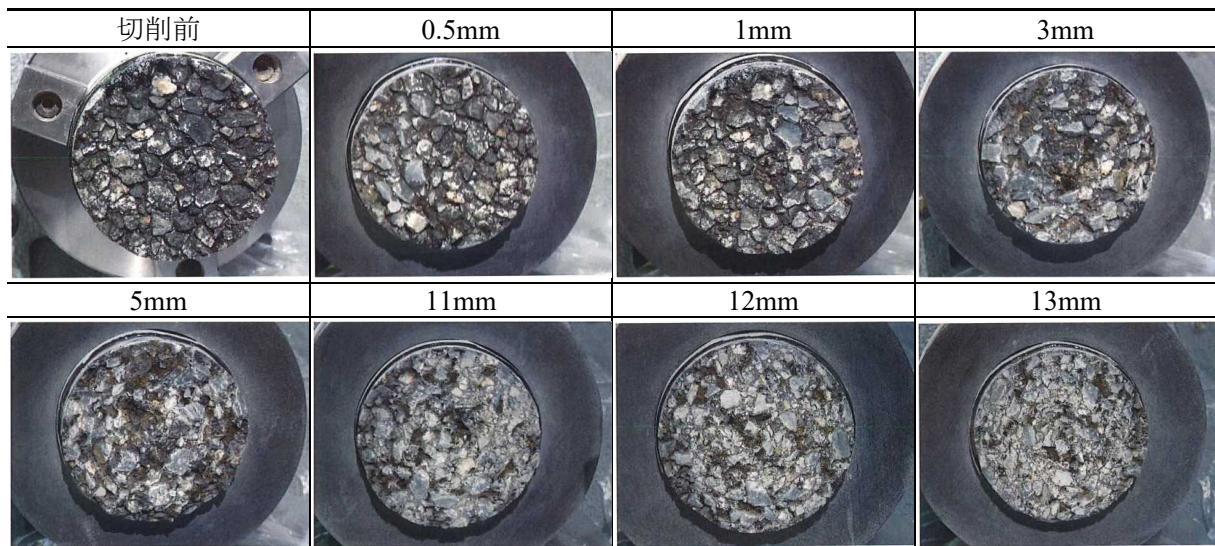


表 7 Site 8、施設 HC アスファルト④切削状況抜粋



### 1.3. 各地点の Cs 深度分布

切削して得られた検体をGe半導体検出器によって分析し、深度毎のCs汚染量（Bq）と検体の重量（g）から、Cs濃度（Bq/g）の深度分布（以降、Cs深度分布）を調査した。以下に各地点でのCs深度分布の調査結果を示す（図 15～図 23参照）。

なお、これらは重量深度で整理している。同一のサイトで採取された複数の不透水性アスファルト試料（図 15、図 21、図 23）、複数のコンクリート試料（図 16～図 18）の比較では、一部を除き深度分布はよく揃った傾向を示し、重量深度で0.5 g/cm<sup>2</sup>程度（実深度で3 mm程度）よりも浅い範囲にCsが沈着していることが確認された。

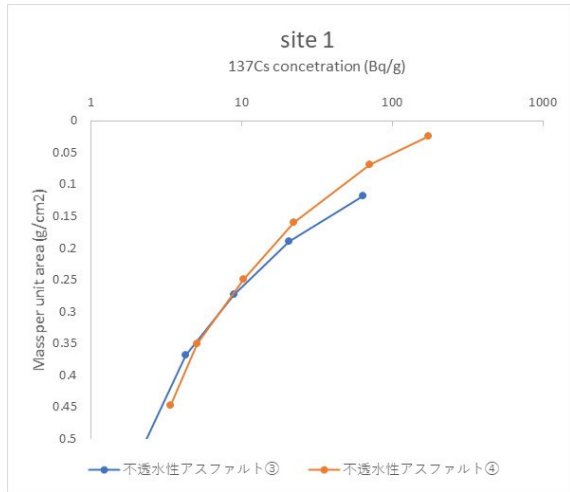


図 15 site1 深度分布（夏季試料）

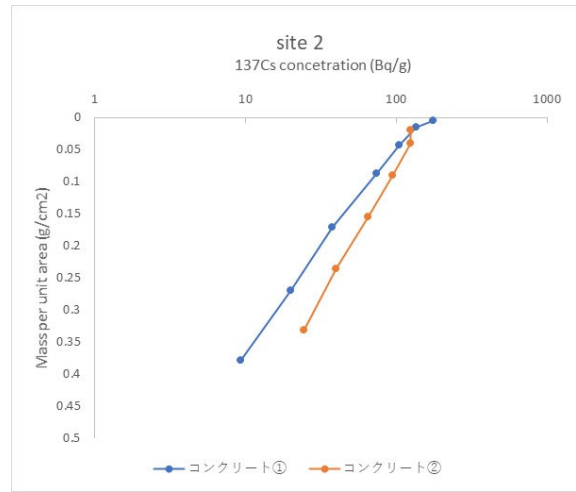


図 16 site2 深度分布（夏季試料）

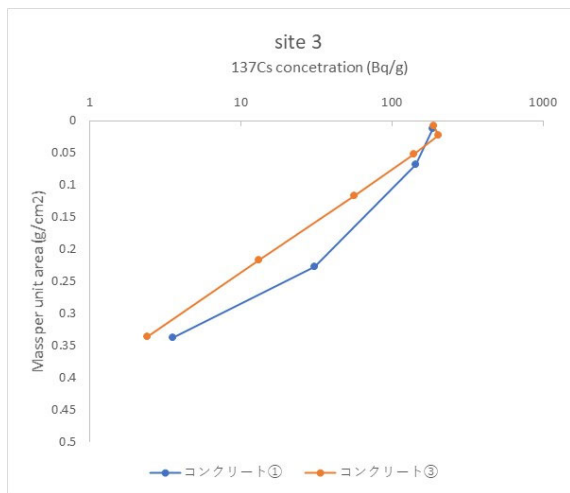


図 17 site3 深度分布（夏季試料）

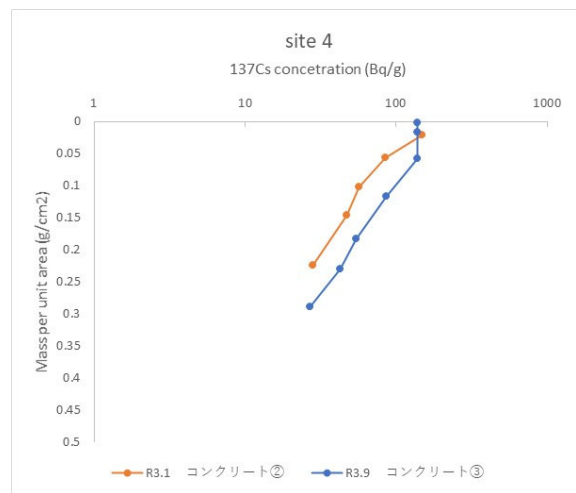


図 18 site4 深度分布（夏季試料）

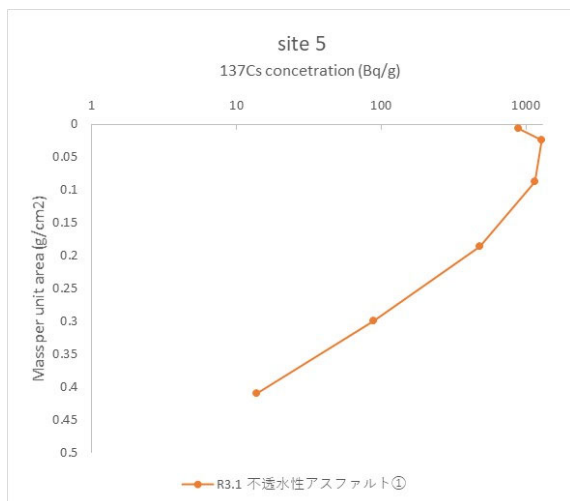


図 19 site3 深度分布（夏季試料）

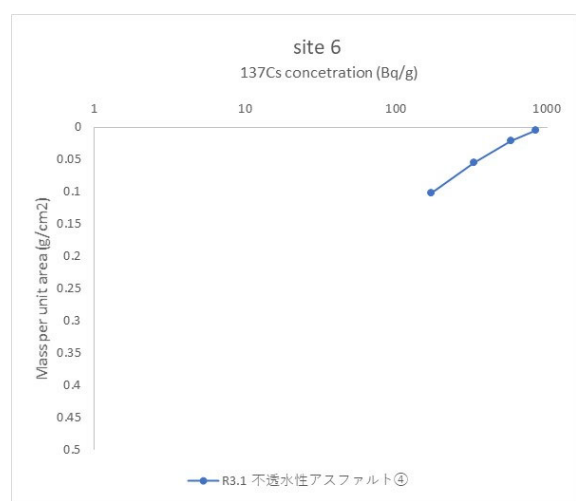


図 20 Site6 深度分布（初年度冬試料）

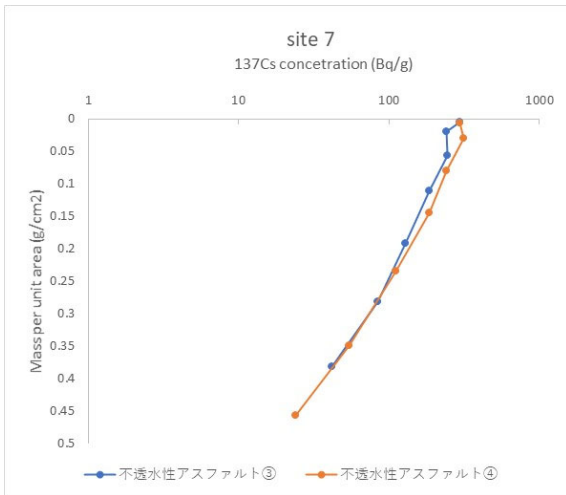


図 21 site7 深度分布 (夏季試料)

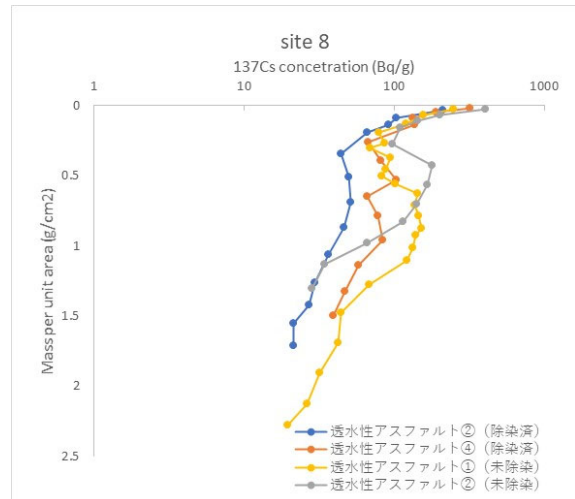


図 22 site8 深度分布 (夏季試料)

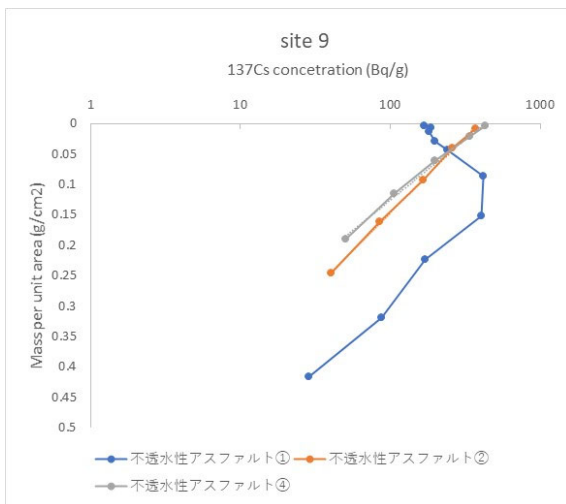


図 23 site9 深度分布 (冬季試料)

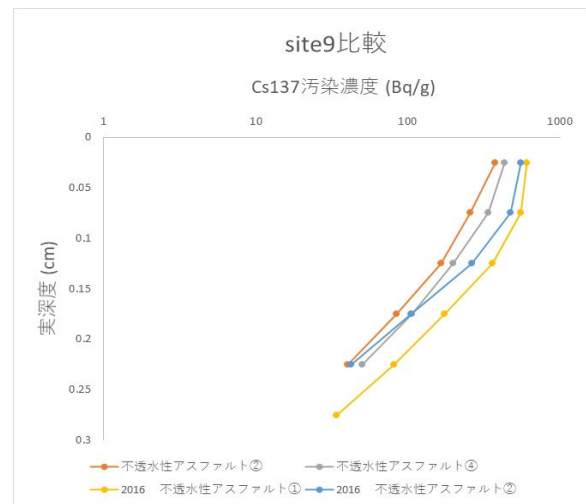


図 24 site9 既往調査との比較

不透水性アスファルト及びコンクリートの緩衝深度（地表面におけるCs汚染濃度の $e^{-1}$ 倍になる深度）は0.06~0.18cmである。図 23のsite 9では、3個の試料の内 1つの傾向が大きく異なっていた。アスファルト表面の凹凸や地表付近の状態の違いによって差異を生じていることが推察されるため、こうした特異な傾向を示す資料については今後更に検討を加える。図 22に示す透水性アスファルトは、地表付近の重量深度0.3 g/cm<sup>2</sup>程度までは深度と共に減衰し、以深は大きく傾向を異にして深度による減衰が小さくなる状況が確認された。

図 24はsite9の不透水性アスファルトについて、発災後5年の調査（2016年）で得られたCs深度分布<sup>3)</sup>と発災後10年の本調査で得られたCs深度分布を比較する（傾向が異なる不透水性アスファルト①を除く）。なお、図 24の比較では時間経過に伴う減衰を補正していない。緩衝深度は、既往研究が0.08cm、本研究が0.09cmで殆どCs深度分布の傾向は変化しない。不透水性アスファルトにおけるCs深度分布は発災後、早期に形成され、その後大きく変化していないことが考えられる。

## 2. 【課題②】人工被覆種別ごとの Cs 深度分布の傾向分析及び地上への影響評価

課題①の試料採取地における空間線量率測定及び地表面における表面汚染密度測定により、各試料採取地の地上への影響を実測した。

### 2.1. Cs 濃度の深度分布による地上への影響調査

#### 2.1.1. 可搬型 Ge 半導体検出器、NaI (TI) シンチレーション検出器を用いた In-situ 測定

可搬型Ge半導体検出器による各測定地点の空間線量率及び同測定より算出された放射性セシウム沈着量を表 8に示す。Cs-137沈着量の範囲は初年度の測定（2021/1/7）では161-1569 kBq m<sup>-2</sup>に対し、2年度の測定（2021/11/4）では141-1514 kBq m<sup>-2</sup>であった。取得されたγ線スペクトルを図 25に示す。空間線量率、放射性セシウム沈着量を反映し、Sites-5～8で波高の高いスペクトルが得られた。NaI (TI) 検出器による同上測定地点でのγ線スペクトルを図 26に示す。いずれの測定地点に於いても<sup>137</sup>Csの高いピークが確認される。測定地点間の比較では<sup>137</sup>Csよりも高エネルギー帯、低エネルギー帯で傾向が異なり、放射性核種の構成に差があることが推察された（図 26赤丸）。測定地点ごとの詳細な差異の確認は今後になる。現状ではγ線スペクトルによる深度分布や被覆種別の推定はできていない。今後Csの深度分布と波高分布のプロファイルを紐づける検討を継続する。

表 8 各測定地点の放射性セシウム沈着量

検出器：可搬型 Ge 検出器

設定パラメータ：密度=2.35[g/cm<sup>3</sup>]、重量緩衝深度=0.1[g/cm<sup>2</sup>]

測定地点	測定日	沈着量 (kBq m <sup>-2</sup> )	
		Cs-134	Cs-137
施設 K2 (Site-1)	2021/1/7	8	161
不透水性アスファルト	2021/11/4	5	141
施設 K2 (Site-2)	2021/1/7	10	206
コンクリート	2021/11/4	8	194
施設 KS (Site-5)	2021/1/7	74	1569
不透水性アスファルト	2021/11/4	56	1514
施設 KS (Site-6)	2021/1/7	32	684
不透水性アスファルト	2021/11/4	24	640
施設 CD (Site-7)	2021/1/7	52	1102
不透水性アスファルト	2021/11/4	39	1063
施設 HC (Site-8)	2021/11/4	54	1418
透水性アスファルト			



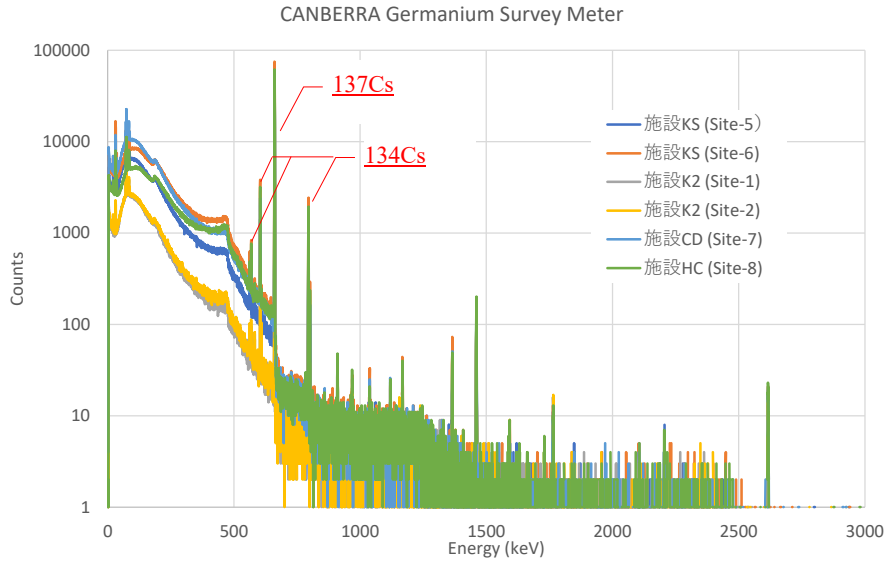


図 25 可搬型 Ge 検出器で測定した各点の  $\gamma$  線スペクトル (地上 1m、コリメータ使用)

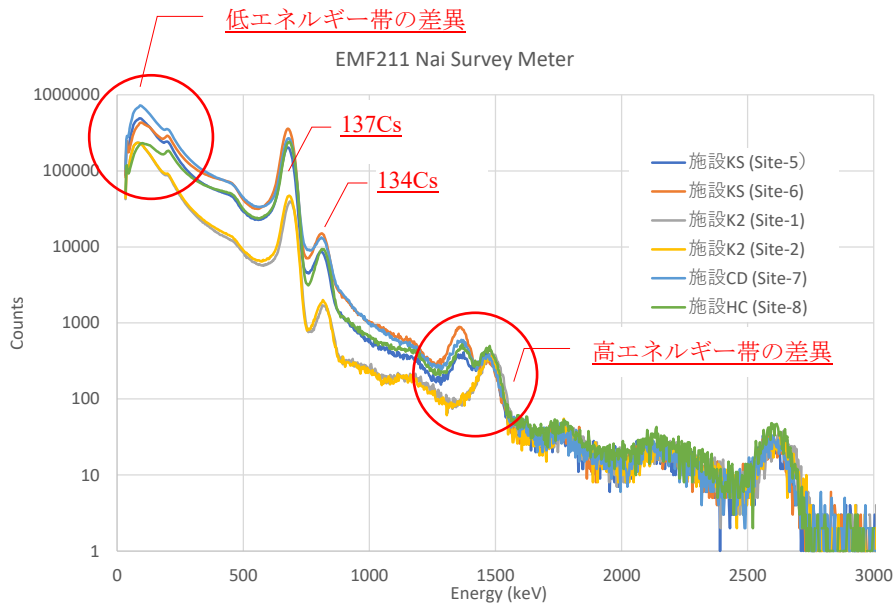


図 26 NaI 検出器で測定した各点の  $\gamma$  線スペクトル (地上 1m、コリメータなし)

### 2.1.2. GM 管検出器を用いた In-situ 測定

コア試料採取と同時に、コア試料採取位置の地表面でGM管検出器 (TGS-146B) を用いて放射線の計数率を測定した。コリメータを併用し、 $\beta$ 線の遮蔽を意図してa) 遮蔽体なし、b) 樹脂遮蔽体 (アクリル板) 5mmの条件にて測定を行った。測定結果を表 9、表 10に示す。また、図 27、図 28にこれらの測定結果を示す。ここでは、人工被覆の種類による、遮蔽体有無によるカウントの差異を確認することを意図して、グラフ中のプロットを、青：不透水性アスファルト、赤：コンクリート、紫：透水性アスファルトとした。

表 9 GM 管検出器を用いた計数率測定結果 (夏季)

測定器 : TGS-146 (R11893)

時定数 : 30 s

単位(cpm)

対象	被覆面タイプ ロケーション	No.	date	time	遮蔽体		
					遮蔽体なし	アクリル板5mm	
施設K2	アスファルト 駐車場 Site-1	a	2021.8.10	10:05	1620	165	
					1700	156	
					1660	173	
					1180	160	
		b	2021.8.10	10:15	1230	145	
					1280	150	
					1670	170	
					1750	159	
	c	2021.8.10	10:25	1660	157		
				1750	158		
				1790	142		
				1820	139		
		d	2021.8.10	10:35	1820	210	
					1890	192	
					1850	215	
					1740	200	
	施設KS	コンクリート 駐車場 Site-2	a	2021.8.10	10:45	1840	210
						1810	195
						1590	205
						1540	200
b			2021.8.10	10:55	1570	190	
					2760	213	
					2770	208	
					2830	200	
c		2021.8.10	11:05	2660	263		
				2730	220		
				2750	216		
				2720	207		
d	2021.8.10	11:15	2830	245			
			2740	215			
			2350	185			
			2290	204			
施設CD	コンクリート 運動場前スロープ Site-3	①	2021.8.19	14:35	2320	182	
					2510	183	
					2540	215	
					2420	220	
		②	2021.8.19	14:40	2540	215	
					2420	220	
					2320	182	
					2510	183	
	③	2021.8.19	14:30	2540	215		
				2420	220		
				2320	182		
				2510	183		
④	2021.8.19	14:25	2540	215			
			2420	220			
			2320	182			
			2510	183			
施設KS	アスファルト 体育館前 Site-5	①	2021.9.24	14:08	16200	1020	
					16400	1010	
					16200	1010	
					16400	1010	
		②	2021.9.24	9:58	16500	1000	
					16600	950	
					15500	970	
					15600	938	
③	2021.9.24	10:20	15800	963			
			15200	941			
			15300	963			
			15400	923			
施設CD	アスファルト 駐車場 Site-7	①	2021.8.19	10:05	4100	329	
					4040	317	
					4090	352	
					4630	350	
		②	2021.8.19	10:00	5060	355	
					4950	393	
					5560	385	
					5740	404	
	③	2021.8.19	10:10	5680	368		
				5240	395		
				5260	375		
				5200	351		
	④	2021.8.19	9:50	5240	395		
				5260	375		
				5200	351		
				5200	351		

表 10 GM 管検出器を用いた計数率測定結果 (冬季)

対象	被覆面タイプ ロケーション	No.	date	time	遮蔽体	
					遮蔽体なし	アクリル板5mm
施設K2	アスファルト 駐車場 Site-1	①	2022.1.17	9:38	1730	165
					1760	139
					1750	143
		②	2022.1.17	9:57	1930	156
					2000	147
				1890	160	
	コンクリート 駐車場 Site-2	①	2022.1.17	10:21	1850	194
					1930	171
					1870	180
		②	2022.1.17	10:07	1990	206
				1950	186	
			1940	173		
施設KS	コンクリート 運動場前スロープ Site-3	①	2021.12.14	11:07	3090	276
					2990	257
					3040	235
		②	2021.12.14	10:46	2470	213
					2500	215
				2550	219	
	コンクリート 教室前犬走 Site-4	①	2021.12.14	10:30	1720	232
					1770	253
					1750	194
		②	2021.12.14	10:23	2570	369
					2600	325
				2600	320	
	アスファルト 体育館前 Site-5	①	2021.12.14	11:46	16700	929
					16700	896
					16700	933
		②	2021.12.14	11:26	15800	896
					15700	950
				15700	897	
	アスファルト 駐車場 Site-6	①	2021.12.14	10:02	7020	490
					2090	428
				6960	420	
②		2021.12.14	9:46	6780	468	
				6900	455	
			6680	440		
施設CD	アスファルト 駐車場 Site-7	①	2022.1.17	13:20	5050	323
					4990	301
					4850	303
		②	2022.1.17	13:08	3430	260
					3480	280
			3470	290		
施設HC	アスファルト 駐車場 Site-8	①未	2022.1.25	9:45	4650	789
					4660	757
					4780	788
		①済	2022.1.25	10:08	4180	541
					4250	587
					4170	562
		②未	2022.1.25	9:32	4810	812
					4820	825
					4880	814
		②済	2022.1.25	9:57	3710	656
			3640	612		
			3600	597		
施設FC	アスファルト 駐車場 Site-9	①	2021.12.20	9:31	14300	530
					14400	526
					14500	545
		②	2021.12.20	9:44	3740	298
					3700	298
					3670	283
		③	2021.12.20	10:05	4640	306
					4530	302
					4570	318
		④	2021.12.20	9:53	2980	249
			2930	257		
			2970	230		

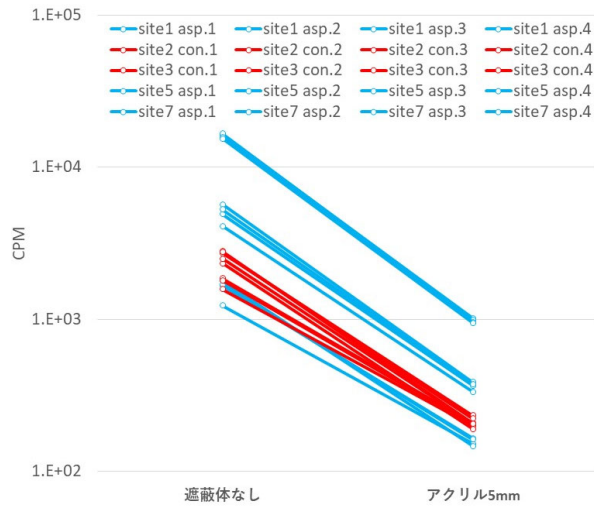


図 27 GM 管検出器による計数率（夏季）※

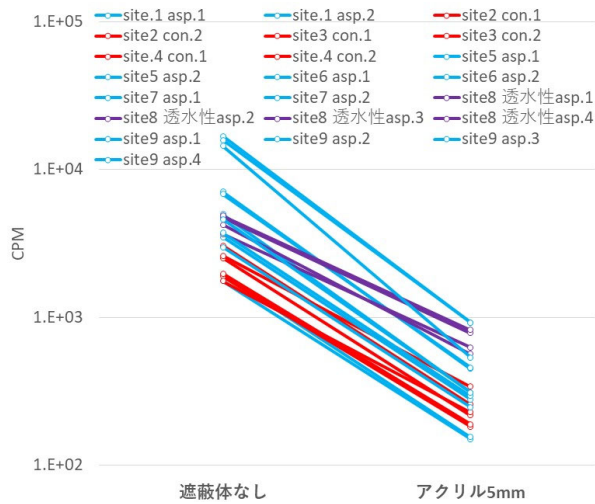


図 28 GM 管検出器による計数率（冬季）※

※青：不透水性アスファルト、赤：コンクリート、紫：透水性アスファルト

Csが地表付近にあれば遮蔽体なし条件と、β線が遮蔽される遮蔽体あり条件の差が大きくなると考えられる。浸透の程度に応じてその差異には変化が生じると考えられるが、コンクリートと不透水性アスファルトの差異は顕著ではない。透水性アスファルトは図 28より、傾向が異なることが確認される。

GM管検出器（TGS-146B）で測定されるβ線による計数率を $\beta_{\text{CPM}}$ 、γ線による計数率を $\gamma_{\text{CPM}}$ とすると、遮蔽体なしの条件で測定される計数率を $(\beta_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}})$ 、アクリル板5mmの条件で測定される計数率を $(\gamma_{\text{CPM}})$ とした場合、仮に $\beta_{\text{CPM}} \doteq R * \gamma_{\text{CPM}}$ と整理できれば係数 $R$ は $(\beta_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}})$ と $(\gamma_{\text{CPM}})$ から簡単に計算される（式（1））。 $R$ に含まれる定数部分を適切に消去すれば、Cs深度分布を説明できる可能性がある。

$$\frac{\text{遮蔽体なし} = \beta_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}}}{\text{アクリル 5 mm} = \gamma_{\text{CPM}}} \doteq \frac{R\gamma_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}}}{\gamma_{\text{CPM}}} = R + 1$$

$$R = \frac{\beta_{\text{CPM}} + \gamma_{\text{CPM}}}{\gamma_{\text{CPM}}} - 1 \quad (1)$$

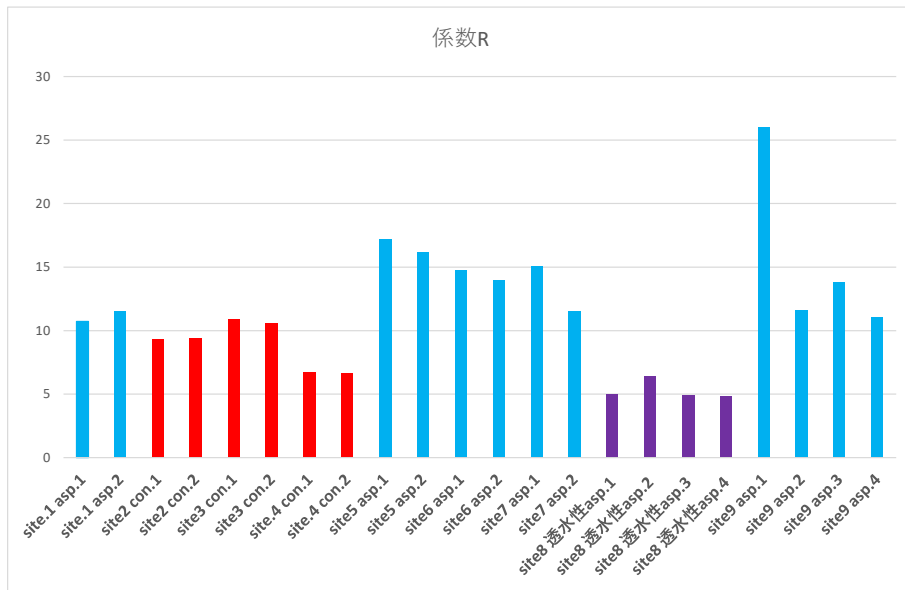


図 29 各測定位置における係数 R 試算値 (冬季)

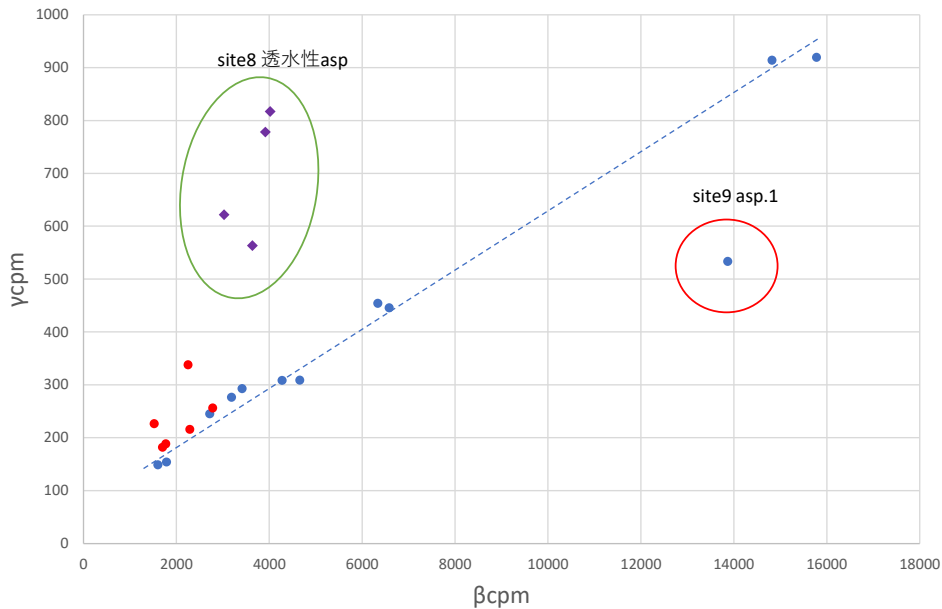


図 30  $\beta_{CPM}$  と  $\gamma_{CPM}$  による整理 (冬季)

図 29に冬季データを用いた係数Rの試算結果を示す。また、図 30に冬季データを用いた $\beta_{CPM}$ と $\gamma_{CPM}$ をプロットした結果を示す。なお、ここでは測定値の単純な操作による比較を意図して、 $\beta_{CPM}$ と $\gamma_{CPM}$ は共に実測から得られた生データを用いており、GM計数管の $\beta$ 線と $\gamma$ 線に対する感度を考慮していないほか、バックグラウンドによる補正等も行っていない。図 29では、浸透が深い透水性アスファルトの係数Rが小さくなることが示され、簡単な測定によってある程度浸透状況を地表から確認できる可能性が示された。また、図 30ではCsが地表付近に分布する不透水性アスファルトは概ね同じ比率を示すのに対してコンクリート、透水性アスファルトでは比率が異なる状況が観察された。また、図 23にて、特異な傾向を示したSite-9アスファルト①は $\beta_{CPM}$ が大きい傾向を示した。今後、N数を積み増しこれらの傾向と深度分布の関係を更に検討する。

### 3. 【課題③】試験体を用いた Cs 深度に関するウェザリング影響評価

課題③は、課題①にて採取した試料の内24個（ドライ12個+ウェット12個）を保管している。本年度夏季の試料採取で得た試料より、対象とする試料を2021年9月～10月に恒温恒湿槽内で保管を開始した。浜通りの月平均気温、相対湿度50%条件にて恒温恒湿槽で保管することで、週2回の注水及び乾燥の繰り返しを実現した。大熊町を含む地域の年間降雨日数は95日程度で、年間平均で3.8日毎に1回の降雨頻度である。週2回の注水は3.5日毎の降雨相当するものとして適切な頻度と考えられる。1年間の保管期間を目指して最終年度の9月～10月に恒温恒湿槽より取り出し、課題①の手順に従ってCsの深度分布を測定する。

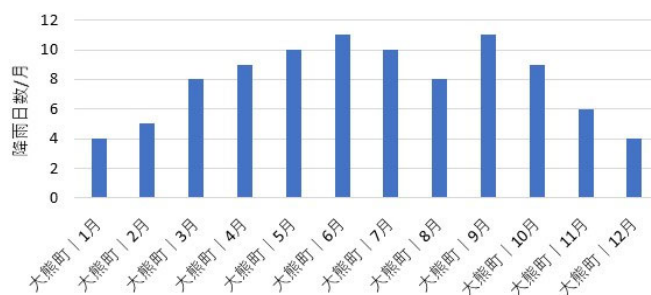


図 31 月別降雨日数

### 4. 【課題④】空間線量率予測のための実用的 $\gamma$ 線境界モデルの検討

#### 4.1. 人工被覆面の $\gamma$ 線放射特性

図 32に①土壌、②コンクリート、③不透水性アスファルト、④透水性アスファルトの4種の地表面による $\gamma$ 線放射特性の試算結果をエネルギー帯毎に示した。解析結果は地中のCsから放射される $\gamma$ 線の総量を1.0としている。なお土壌のCs深度分布は、対数表現によるCs深度モデルで発災10年後に相当する $\beta=10^2$ として求めた分布を用いた。土壌の場合、直射線のエネルギー帯0.65–0.75 MeVを含め、全てのエネルギー帯でほぼ円形の放射特性を示しており、均等拡散面（ランベルト面）に近い特性である。地表面付近の浅層にCsが分布する②コンクリート、③不透水性アスファルトでは直射線のエネルギー帯は、地表面に点線源を配置した際の特性に近く、④透水性アスファルトではその中間的な特性となった。今後、解析への地表面形状の導入などを行い、更に検討を進める。なお、この解析では、地表面には凹凸が無いものとして計算している。今後、地表面形状を考慮することで、放射特性が修正される可能性がある。

#### 4.2. 施設 K2 における空間線量率分布測定

施設K2における空間線量率分布測定結果を図 33に示す。屋外の空間線量率は0.6~1.1 $\mu$ Sv/h、屋内の空間線量率は0.4~0.9 $\mu$ Sv/hであった。これまで報告されている多くの事例と同じく建物中央に向かって空間線量率が低下する状況が確認された。また、高さが高くなるほど空間線量率は上昇していることも確認された。この傾向は、建物の床下は汚染されておらず、建物中央付近の空間線量率が低いこと、周辺敷地が建築空間に影響する主要な線源になっていること、建物が木構造等で建築外皮の遮蔽力が低いこと、屋根面が風雨で洗い流されて主要な線源となっていない事などの条件で形成されると一般に考えられている。但し、周辺敷地の地表面境界から放射される $\gamma$ 線の射出特性（角度及び強度）と建物と線源面の位置関係によって決定されることを考慮して理解する必要がある。なお、小型シンチレータとEMF211による測定値の差はEMF211に対して最大5%

であった。簡易な計測機を用いた測定ではあるが、3次元的な空間線量率分布は今後の解析との比較等に於いて有用な資料となる。

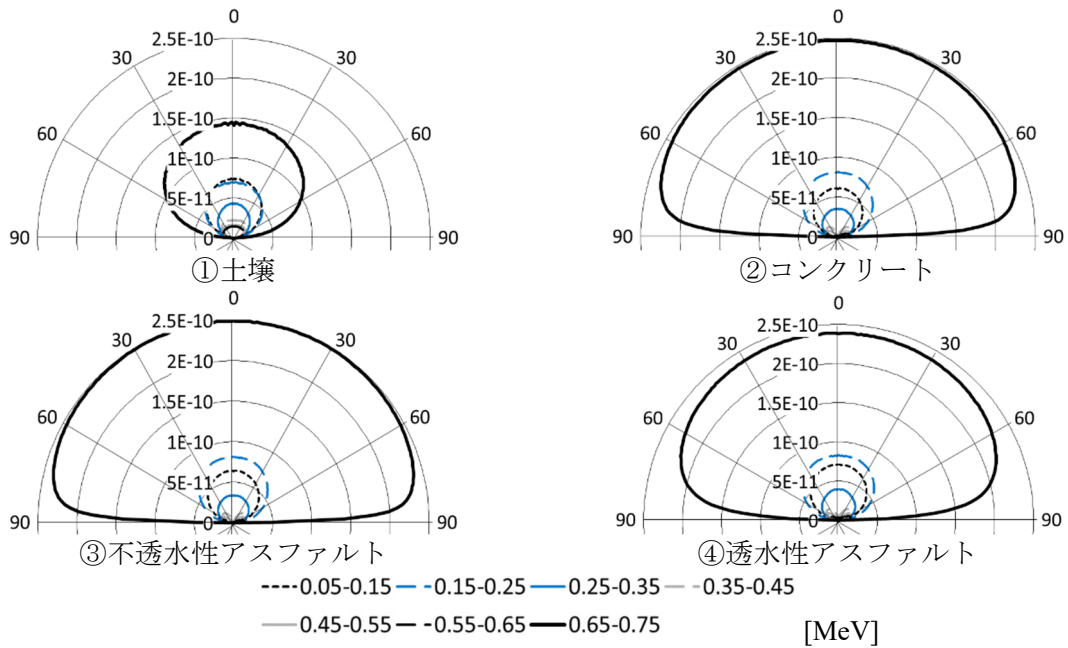


図 32 地表面からの  $\gamma$  線放射特性

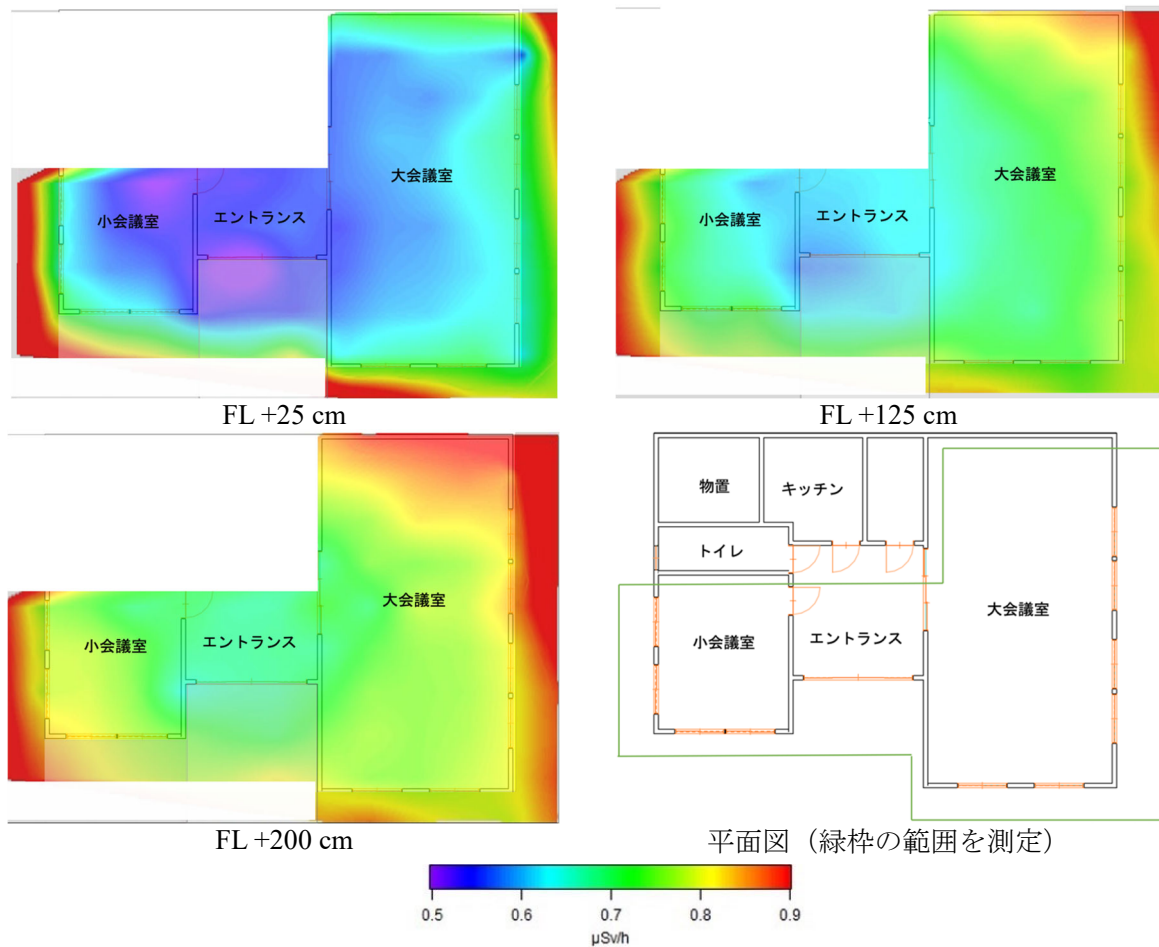


図 33 空間線量率分布測定結果

## IV 考察

### 1. 【課題①】避難指示区域における人工被覆面へのセシウムの沈着状況調査

人工被覆面のCs深度分布を測定した結果、不透水性アスファルト、コンクリートは、共に地表面より3 mm程度の範囲にCsが存在することが判明した。発災後10年を経過して、表層3 mm程度にCsが存在していることから、土壌で見られるような時間経過に伴う浸透はほぼ無い可能性が確認された。当初、Csは不透水性アスファルトにはあまり浸透しないが、親水性のコンクリートには雨水と共に拡散によってある程度浸透することを想定した。しかしながらどちらも積極的な浸透は確認できなかった。また、不透水性アスファルトについては、既往研究と同じ場所で採取した試料を比較した結果、ほぼ同様のCs深度分布が得られた。このことから不透水性アスファルトでは深度方向への移行が殆ど進行しない可能性が示唆された。それにも関わらず切削によって深度分布が確認される要因として、地表面の凹凸が寄与していると考えられる。アスファルト、コンクリート共に表面の凹凸は数mmに達するものもあり、0.5 mm毎に地表面から切削して得られるデータはCsが浸透せず表面に付着していることによる可能性がある。今後シミュレーションと現地における放射線測定などを併用して更に検討を進める。

透水性アスファルトでは、数cmのオーダーでCsが浸透していることが確認された。課題④では不透水性アスファルト、コンクリートと透水性アスファルトでは地表への放射線の放射特性が若干異なることが確認されている。

これらの結果から、除染を行う場合には、不透水性アスファルトやコンクリート舗装のケースではCsの深度が浅いため、地表面を2～3mmは取り取るだけで対策できる可能性がある。一方、透水性アスファルトはCsの深度が深いことから、地表面を数mmは取り取っても十分な対策とならない可能性が示唆される。

今後、人工被覆面の種別ごとのN数を増して検討する。

### 2. 【課題②】人工被覆種別ごとのCs深度分布の傾向分析及び地上への影響評価

課題①試料採取地における地上1mのγ線スペクトル測定及び地表面における表面汚染密度測定より、Csの深度分布による地上への影響を検討した。地上で観測されるγ線スペクトルはCsの深度分布を反映していると考えられるものの、人工被覆面の場合、Csの深度が比較的浅く地面がγ線の遮蔽に大きく作用しないほか、測定地点により<sup>137</sup>Cs由来のγ線（0.662 MeV）よりも高エネルギー帯、低エネルギー帯でスペクトルの傾向が異なり、放射性核種の構成に差がある可能性が考えられた。そのため、現状では地上のγ線のスペクトルを地中のCsの深度分布と結びつけることが難しく更に検討を要する結果となっている。GM管検出器を用いたIn-situ測定では、遮蔽体を用いて測定したβ線とγ線の比較により、地中の深度分布に応じた差異が確認され、検討を進める事で深度分布の傾向を捉えられる可能性が確認された。今後、課題①による地中のCs深度分布の分析を進め、地中のCs深度分布と地上の線量率を関係づける検討を進める。

### 3. 【課題③】試験体を用いたCs深度に関するウェザリング影響評価

課題①にて採取した試料の内24個（ドライ条件、ウェット条件各12個）を保管している。最終年度まで継続して約1年の保管期間を確保した後に切削分析を行う。本報告の時点では保管を遂行中であり、考察すべき結果は得ていない。



#### 4. 【課題④】空間線量率予測のための実用的 $\gamma$ 線境界モデルの検討

課題①にて得られた発災後10年のCs深度分布を用いた人工被覆面の $\gamma$ 線放射特性の結果と、発災後10年を想定した土壌面の場合を比較した。

土壌面の場合、Csが地中にある程度深く拡散しているため、地中で放射された $\gamma$ 線が散乱され、地表面における放射特性は、均等拡散面（ランベルト面）に近く、地表面の $\gamma$ 線の輝度は角度によらずほぼ等輝度になると考えられる。その結果、住宅等の空間線量率測定では、等輝度の $\gamma$ 線を発する地面が広く見える上層階で高線量が観測されることとなる。これに対し、不透水性アスファルトとコンクリートはCsが地表付近にあるため、直射線のエネルギー帯が卓越し、且つ、法線方向に対する射出角 $0^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 程度の角度範囲にほぼ同じ強度で $\gamma$ 線が放射され、更に $90^{\circ}$ 方向（水平方向）迄高い強度を維持する。これらの放射特性から、不透水性アスファルトやコンクリート面で囲まれた場所で観測される $\gamma$ 線は、土壌面の場合と比較して地表面と平行な方向に遥かに強い指向性を示すと考えられる。透水性アスファルトはCsの深度分布がやや深いため、地表面下で散乱される $\gamma$ 線が増え、土壌の放射特性に近づく結果となったが、土壌面に比べれば水平方向への放射が多く、地表面と平行な方向に強い指向性を示すと考えられる。これらの特性を踏まえれば、人工被覆面に囲まれ、且つ、木造など遮蔽力の小さい外壁の構造物においては、 $\gamma$ 線の指向性に起因して、屋内外の線量率の差が小さくなることが考えられ、その結果として土壌面に囲まれた建物に比べてRFが下がらない可能性が示唆される。また、こうした状況で建物周辺のみを除染すると、屋外の真下からの $\gamma$ 線の寄与の差が小さくなるため、更にRFが下がりにくくなることが考えられる。建築的対策としては、コンクリート塀などの遮蔽体を用いることで、塀の高さ $+\alpha$ の範囲で $\gamma$ 線を効果的に遮蔽できる可能性が示唆される。

但し、今回の試算は試料地表面の凹凸による影響を考慮していないため、今後地表面の凹凸と沈着状況及び $\gamma$ 線の放射特性の関係を検討する必要がある。

#### V 結論

これ迄の調査により、人工被覆種別毎のCsの深度分布の特徴が確認され、不透水性アスファルト舗装面とコンクリート面の深度分布がほぼ同様であること、透水性アスファルトは傾向が異なり、より深く浸透していることが詳細な測定データを伴って確認された。また、人工被覆種別ごとの地上への影響評価を目的とした測定では、地表面で測定した結果から地中の状況のある程度推測できる可能性が確認された。調査結果とシミュレーションを用いた検討では、人工被覆種別ごとの $\gamma$ 線の放射特性を試算して種別毎の特徴を示した。本年度の調査結果から、人工被覆面の凹凸と沈着、浸透についての検討、調査地点によるCs以外の放射性核種による調査結果への影響の可能性の検討、が課題として見出された。

#### VI 次年度以降の計画

最終年度、課題①は、第2年度に採取した試料の内、分析未了の試料の分析を進めるとともに、夏季には最終年度の試料採取を行い加工分析することで、試料のN数を増して調査の精度を向上する。Ge分析器による分析が進捗の律速にならないよう、手元での分析に外注業者による分析を加えて推進する。課題②は、人工被覆種別ごとのCs深度分布について対数表現等を用いて説明するモデル式を整理するとともに、地表面における現実的なIn-situ測定で地表面下を推定する方法をまとめる。課題③は、ウェザリング試料の加工及び分析を10月、11月に実施し、試料内のCsの移

動について検討を行う。課題④は、初年度に構築した $\gamma$ 線境界モデルの枠組みに課題①で得る人工被覆種別ごとのCs深度分布を適用したモデルを提案し、これを用いた簡易な解析により、建築内外空間に対する人工被覆面の影響と対策例を示す。

本研究の成果となる人工被覆面の放射能沈着実態データを学術論文として公開することで基礎資料の充実に貢献する他、成果を用いた建築空間の放射線解析、建築的対策案の効果試算結果などを地域自治体に情報提供する。

#### この研究に関する現在までの研究状況、業績

現時点（第2年度）でジャーナルへの投稿はありません。

#### 引用文献

- 1) ICRU, 1994. Gamma-ray spectrometry in the environment. ICRU (Int. Comm. Radiat. Units Meas.) Rep. 5
- 2) N. Matsuda, S. Mikami, S. Shimoura et al., Depth profiles of radioactive cesium in soil using a scraper plate over a wide area surrounding the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Japan. Journal of Environmental Radioactivity, 2015, 139, 427-434.
- 3) K. Yoshimura, T. Watanabe, H. Kurikami, Vertical and horizontal distributions of  $^{137}\text{Cs}$  on paved surfaces affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident Journal of Environmental Radioactivity, 2020, 217.
- 4) 日本原子力研究開発機構 (JAEA), 粒子・重イオン輸送計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System), <https://phits.jaea.go.jp/Newsj.html>, (2022年4月20日閲覧)
- 5) 小林光, 山守諒, 中島主策 他, 原発事故被災地の建築空間内  $\gamma$  線空間線量率分布に関する研究 (その1)  $\gamma$  線空間線量率解析に用いる実用的な放射線境界条件モデルの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 2019, 683-686. 等

# Radioactivity depth distributions in artificial pavement surfaces and their effects on air dose rates in areas affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident

Hikaru Kobayashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan

*Keywords:* Artificial pavement surface, depth distribution of radioactivity, radiation analysis, gamma-ray boundary conditions

## Abstract

This study aimed to evaluate the air dose rate of Cs radiation and examine decontamination and architectural mitigation measures in the areas affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (FDNPP) accident by investigating the depth distribution of radioactive Cs deposited on artificial pavement surfaces. Additionally, practical  $\gamma$ -ray boundary conditions for computational radiation analysis are being developed to evaluate the radiation air dose rates inside and outside buildings.

To achieve the abovementioned objectives, the overall study focused primarily on the following four aspects during a three-year research period: Task (1): Investigation of Cs deposition on the artificial pavement surfaces in the FDNPP accident-affected area, Task (2): development of an experimental Cs concentration distribution model for the pavements and a non-destructive investigation method for studying the Cs distribution, Task (3): weathering impact assessment using test specimens, and Task (4) : development of a practical  $\gamma$ -ray boundary model for predicting the air dose rate. This paper reports the results of the second year of the research period.

In the second year, focus was primarily on Tasks (1) – (3). During these tasks, in total, 73 core samples of artificial pavement, permeable/impermeable asphalt, and concrete were collected from five facilities and nine sites in Okuma Town, Fukushima Prefecture, including the samples of the first year. Further, 47 specimens of these samples were carved from the surface layer every 0.5 mm and the Cs depth distribution was analyzed using a Germanium detector. The weight buffer depth ( $\beta$ ) of impermeable asphalt and concrete (depth being  $1 / e \approx 0.4$  times of the surface concentration) was approximately 0.15 g/cm<sup>2</sup>. Cs was observed even ten years after the disaster, in an extremely shallow range of concrete and impermeable asphalt. Permeable asphalt showed a different depth distribution property, which exceeded 1 g/cm<sup>2</sup> when it was evaluated through the weight buffer depth, thus, confirming that Cs penetrated at deeper depths. However, the depth distribution was not explained by the exponential function distribution, and the evaluation by the weight buffer depth ( $\beta$ ) was considered unsuitable. In the final year, focus will be on Tasks (3) and (4) using collected samples and survey results, respectively. Additionally, the number of samples will be increased, and the survey accuracy will be improved through continuous sampling and analysis.