

201425015B

厚生労働科学研究費補助金
労働安全衛生総合研究事業

除染等作業における作業環境の線量率・土壌中放射能濃度と
労働者の身体汚染の関係に関する研究

平成25～26年度 総合研究報告書

研究代表者 辻村 憲雄

平成27(2015)年 3月

厚生労働科学研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

除染等作業における作業環境の線量率・土壌中放射能濃度と

労働者の身体汚染の関係に関する研究

平成 25～26 年度 総合研究報告書

研究代表者 辻村 憲雄

平成 27 (2015) 年 3 月

目 次

I. 総合研究報告	5
除染等作業における作業環境の線量率・土壌中放射能濃度と 労働者の身体汚染の関係に関する研究 辻村 憲雄（日本原子力研究開発機構）	7
（資料Ⅰ）線量当量率と土壌中放射能濃度の関係の計算	20
（資料Ⅱ）作業服等への土壌の付着試験	23
（資料Ⅲ）除染等作業に従事した作業者の作業服，手袋，及び靴の放射能測定	31
II. 研究成果の刊行に関する一覧表	37
III. 研究成果の刊行物・別刷	39

I. 総合研究報告

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
総合研究報告書

除染等作業における作業環境の線量率・土壤中放射能濃度と
労働者の身体汚染の関係に関する研究

研究代表者 辻村 憲雄（日本原子力研究開発機構）

研究要旨

除染等作業現場の線量当量率及び土壤中放射能濃度と作業者の身体汚染の程度の関係に関する知見を得ることを目的に、(1) 線量当量率と土壤中放射能濃度の関係、(2) 作業服等への土壌の付着密度、さらに(3) 除染等作業に実際に従事した者の作業服等の表面に付着した放射性物質の表面密度に係る研究を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 線量当量率と土壤中放射能濃度の関係については、文部科学省からの委託事業として日本原子力研究開発機構が中心となって測定・収集したデータを分析するとともに、計算シミュレーションによる評価を行った。その結果、少なくとも直径 30 cm の広がりをもった汚染土壌については、その緩衝深度に関係なく、地表 5 cm での線量当量率が 5 $\mu\text{Sv/h}$ 未満であれば放射能濃度は 500 Bq/g（平成 26 年 4 月現在）を超えないと判断できることが分かった。
- (2) 作業服、手袋、及び長靴への土壌の付着密度を実験によって調べた。付着密度は、土の種類よりも水分量に依存し、水分量が増えるにつれ増加することを確認した。作業服及び手袋の付着密度は、含水率 30～50%の黒土で 10～30 mg/cm^2 であり、放射能濃度 500 Bq/g を仮定したとしても表面密度限度を超えそうにない。一方、長靴については、降雨後の畑での歩行において 500 mg/cm^2 を超える付着密度が観測され、濃度によっては表面密度限度を大きく超える可能性が高い。付着しやすい土壌での作業で、かつ高濃度の場合は、汚染検査を受ける前に土汚れをできるだけ取り除く等の対応が必要である。
- (3) 茨城県東海村の原子力機構核燃料サイクル工学研究所構内、福島県内の居住制限区域及び帰還困難区域において除染等作業に従事した作業者の着用した作業服、手袋、及び長靴について放射能測定を行った。その結果、例えば、比較的ウエットな農地での除染作業に従事した者の長靴から最大 2,000 Bq を超える放射能が観測されたものの表面密度に換算すると 5.1 Bq/cm^2 であったなど、いずれの作業においても表面密度限度を超える事例は観察されなかった。また、靴底に付着した土の付着密度を調べた結果、(2)の歩行試験で得られた値と同程度の値であること、また、実験的に得られた土壌付着密度と作業現場の放射能濃度の乗算から表面密度の予測が可能であることが確認された。

研究分担者	
齋藤 公明	(日本原子力研究開発機構 福島環境安全センター)
研究協力者	
三上 智	(日本原子力研究開発機構 福島環境安全センター)
吉田 忠義	(日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所)
星 勝也	(日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所)

A. 研究目的

本研究は、福島第一原子力発電所事故によって環境中に放出された放射性物質の除染等作業において、作業現場の線量率・土壌中放射能濃度と労働者の身体汚染の程度、すなわち作業服等を含む身体表面の表面密度の関係を明らかにするとともに、作業現場での簡易な測定から労働者の身体表面密度を十分な安全裕度で推定する方法を確立し、除染等作業における労働者の合理的な防護対策の立案と実施に資することを目的とする。

背景

福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性物質の除染等作業が、専門業者だけでなく住民・ボランティア等によっても行われている。当該作業の実施にあたって最も重要な点は、労働者の放射線障害を防止することである。こうした目的で、「東日本震災により生じた放射性物質により汚染された土壌等を除染するための業務等に係る電離放射線障害防止規則」[1]並びに「除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」[2]が制定

されており、汚染拡大防止の一環として、例えば、作業場所から退去する者について汚染検査を実施し、身体汚染の程度、すなわち作業服等を含む身体表面に付着した放射性物質の表面密度（単位面積当たりの放射能）が表面密度限度 40 Bq/cm^2 以下であることを確認することが定められている。しかしながら、除染作業現場の線量率・土壌中放射能濃度と、労働者の身体表面密度の関係に関する知見が十分ではないため、除染対象物の放射能濃度の大小（例えば 50 万 Bq/kg を超える高濃度汚染土壌であるか否か）に関係なく、一律の汚染検査の実施が求められている。このことは、例えば汚染レベルが極めて低い作業現場においては、著しく非効率かつ不合理な管理につながるおそれがあるため、除染現場の放射線状況や予測される身体表面密度に応じて検査の要件を緩和するなど、より弾力的な対応をとることが望ましい。

B. 研究方法

研究は、(1) 線量当量率と土壌中放射能濃度の関係、(2) 作業服等への土壌の付着密度の評価、及び(3) 除染等作業における作業者の身体表面密度の評価からなり、研究着手時に立案された流れ図（19 頁）に沿って実施された。それぞれの研究方法を以下に示す。

なお、本報告書中で使用する用語「線量当量」は、サーベイメータ等で観測される「周辺線量当量」を指す。

1. 線量当量率と土壌中放射能濃度の関係に係る研究方法

放射性セシウムに汚染された環境におけ

る線量当量率 (Sv/h) と地表面の土壤中放射能濃度 (Bq/g) の関係を実測と計算によって評価する。前者の実測は、日本原子力研究開発機構 (以下、「原子力機構」と記す) が文部科学省からの委託研究として福島県内の平坦な開けた場所で行った放射線モニタリングの結果 (平成 24~25 年度実施分) [3][4] の分析に基づく。後者の計算は、放射性セシウムによって局所的に汚染された箇所をモデル化した体系におけるモンテカルロ光子輸送計算 (MCNP コード) による。ここでは、十分な広がりを持つ土壌と高さ 200 m の空気からなる体系を基本とし、地表に ^{134}Cs 及び ^{137}Cs 線源を適当な広がり度で分布させたときの地上 5 cm 及び 100 cm における線量当量率と地表面の放射能濃度の関係を調べる。資料 I の図 I.1 及び表 I.1 に計算条件の詳細を記す。計算モデルは、「放射性物質による局所的汚染箇所への対処ガイドライン」[5] を参考に、① スポット状汚染を模擬する様々な直径の円形汚染土壌、② 汚染土壌区画と非汚染土壌区画が接する境界近傍、及び③ 幅 30 cm × 深さ 30 cm のコンクリート製水路の底に堆積した汚染土壌とする。汚染土壌中の放射性セシウムの分布は、水平方向については一様分布、鉛直方向については指数関数分布 (①と②) 又は一様分布 (③) とする。ここで、指数関数分布とは、地表面からの深さ d (g/cm^2) における放射能強度が指数関数 $\exp(-d/\beta)$ に表される分布であり、緩衝深度 β (放射能強度が $1/e$ 倍になる深さ) の値は、福島県内での放射線モニタリング結果 [3][4] をもとに $1.2\sim 2.0 \text{ g}/\text{cm}^2$ とする。計算は、平成 26 年 4 月時点における $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比 0.38 を基本とするが、放射性セシ

ウムの壊変に伴って線量当量率と濃度の関係がどのような時間変化を示すかについても併せて調べる。

2. 作業服等への土壌の付着密度の評価方法

同じ放射能濃度の土壌を取り扱う場合、作業服等の表面密度 (Bq/cm^2) は土壌の付着密度 (g/cm^2) に比例すると考えられる。ここでは、土壌と接触させた作業服等の質量を電子天秤で測定し、土の付着によるその増分を接触面積で除することによって付着密度を評価する。使用した作業服 (A~C) と手袋 (D~F) の仕様及び土壌の特性を資料 II の表 II.1 及び表 II.2 に示す。

(1) ピリング試験

JIS L 1919 防汚性試験[6] (粉体汚染物質による繊維の汚れにくさを調べる) に定める手順に基づき、一般的なポリエステル製の作業服に土がどれだけ付着するかを調べる。作業服から $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ に裁断した試験布 (A) と 10 g の土を封じたプラスチック容器を ICI 形ピリング試験機の回転箱に入れて毎分約 60 回転の速度で 20 分間攪拌し、試験布に土を付着させる。実験に使用した土は、建材業者から入手した「黒土」、「赤土」及び「川砂」であり、このうち黒土については、水を添加し、含水率を約 50% に調整したものも使用する。一回の試験につき 3 枚の試験布を使う。

(2) 静的荷重試験

黒土の上に試験布 (A~C) を置き、その上に重しを載せて $0.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ の一定荷重 (体重 70 kg の者の足裏にかかる平均荷重にほぼ相当する) をかけたまま 5~120 分間放置する。一回の試験につき 3 枚の試験布

を使う。

(3) 動的荷重試験

台ばかり上に固定した試験布 (A~C) の上に 10 g の黒土を均等に載せ、その上から約 0.2 kg/cm² の荷重でゴム板を押し付けつつ前後に小刻みに動かすことによって土を擦り付ける (図 II.1)。試験布の質量の測定は、試験片の縁をクリップで摘み空中で数回振りまわすことによって付着した土のうち容易に剥落する成分を取り除いてから行う。黒土は、表 II.2 に示したもの (生土) を基本に、それを暗所に放置して乾燥させたもの (乾土)、水を添加して含水率約 50% に調整したもの (湿土) の三種類とする。一回の試験につき 3 枚の試験布を用いる。気温・湿度によって水分量がわずかに変化すると考えられる生土等については、試験日時を変えて 3~4 回繰り返す。

(4) 手袋への土壌付着試験

三種類の手袋 (D: すべり止め付き軍手, E: すべり止めなし軍手, 及び F: ゴム製) を試験者が着け、(3)動的荷重試験で使用したのと同じ黒土約 100 g を両手で握りしめ掌上で揉む行為を 10 回繰り返す (図 II.2)。質量の測定は、手袋の両掌を軽くこすり合わせるなどして容易に剥落する土を払い落としてから行う。一回の試験につき 3 双使用する。気温・湿度によって水分量がわずかに変化すると考えられる生土等については、試験日時を変えて 3~4 回繰り返す。接触面積は、手袋を着けた状態の掌のスクリーン画像をもとに 160 cm² (片手) とする。なお、手袋の汗等が付着しないよう試験者はポリエチレン製の薄い手袋を内側にはめて試験を行う。

(5) 長靴への土壌付着試験

屋外の土が露出した場所を、長靴を履いて歩行し靴底に土を付着させる。使用した 3 種類の長靴 (G, H 及び I) の靴底のパターンと面積を図 II.3 に示す。

歩行した場所は、畑 (収穫後に地表を掘り返した状態)、運動場・公園 (植栽物のない土が露出した遊び場) 等であり、土壌はそれぞれ黒土、川砂等からなる。同じ場所を、降雨後と降雨後しばらく晴天が続いた後に歩行し、土の付着の程度を比較する。歩数は、5,000 歩又は 500 歩とし、試験者が身に着けた歩数計で計測する。

長靴の質量は、①歩行終了直後に長靴を秤量済みのポリ袋に收容した場合、②長靴を再び履き、平坦なコンクリート面に靴底を打ちつけるなどして余分な土を取り除いた場合、③ (②に続いて) 泥落とシマツトに靴底を擦り付けて土を落とした場合、④ (③に続いて) ブラシを用いて長靴の側面等に付着した土を落とした場合、さらに⑤ (④に続いて) 深さ 5 cm 程度に水を張った桶に長靴を浸しつつ、ブラシがけして土を落とした場合のそれぞれについて、左右別々に測定する。降雨後の畑での歩行試験の様子と靴底への土の付着の程度を図 II.4、靴底から土を取り除く動作 (②~⑤) をしたときの様子を図 II.5 に示す。なお、試験者は、体重 60~80 kg の成人男性である。歩行に際して、長靴に汗等が付着しないよう靴下の上にポリエチレン袋をかぶせる等の対策をする。

3. 除染等作業における作業者の表面密度 (放射能) の評価方法

除染等作業に従事した作業者が着用した作業服、手袋及び長靴について放射能測定

を実施し、放射性表面汚染の程度を評価する。放射能測定に使用した高純度 Ge 半導体検出器等の詳細については資料 III に記す。

調査対象とした除染等作業は、①茨城県東海村の原子力機構核燃料サイクル工学研究所の構内で実施された草刈作業、②同構内の海沿いの松林周辺で実施された落葉落枝の清掃作業、③福島県内の居住制限区域で行われた除染作業（大成・熊谷・東急特定建設工事共同企業体の協力による）、及び④福島県内の帰還困難区域で行われた道路工事作業（NEXCO 東日本、大成建設の協力による）である。汚染レベルの低い場所での作業である①及び②は、③等の汚染レベルの高い場所での作業の比較対照として選んだものであるが、このうち②については作業場所の一部に局所的に線量当量率の高い箇所（地表面で $\sim 1 \mu\text{Sv/h}$ 、福島第一原子力発電所事故の影響による）を含む。③の除染作業は、重機を使用することなく除染作業に一日間従事した作業者を対象としたもので、主たる作業は、農地除染（表土の削り取り）、住宅除染（屋根・壁の拭き取り、庭の表土の削り取り）、及び仮仮置場建設である。④の道路工事作業の主たる内容は、震災後長期にわたって高速道路建設現場に放置されていた建設資材（大口径排水管）の片付けである。それぞれの作業について、作業者の人数、作業現場の線量当量率と土壤中放射能濃度、着用された作業服、手袋及び長靴の一覧を表 III.1 に示す。

各作業者に、作業開始前に未使用（又は洗濯済み）の作業服等を渡しておき、作業終了後に所定の手順に従って実施する汚染検査において表面密度限度を超えていない

ことを確認してから回収する。なお、表 III.1 の線量当量率は、アロカ日立メディカル製 TCS-161 型線量当量率サーベイメータ等を用いて測定した値である。

（倫理面への配慮）

本研究は、特定の個人（またその体から採取された試料等）を対象としたものではないので人権擁護上の配慮等を特に必要としない。なお、放射性セシウムによる汚染地域で活動は、電離則等関係法令の適用下において実施したものであり、特別な不利益や危険性等は発生しない。

C. 研究結果

1. 線量当量率と土壤中放射能濃度の関係

平成 24 年 9 月に福島県内各地で実施した放射線モニタリングの結果[3]によると、人為的かく乱の少ない平坦な開かれた地形における地表 100 cm での線量当量率（自然放射線による寄与を含む）観測値 $1.0 \mu\text{Sv/h}$ は、 28.2 Bq/cm^2 （内訳： ^{134}Cs 11.5 Bq/cm^2 、 ^{137}Cs 16.7 Bq/cm^2 ）の沈着密度に相当する。別に評価された緩衝深度 1.2 g/cm^2 を用いると、この沈着密度は、地表面の放射能濃度 23.5 Bq/g に換算される。一方、同じ条件（緩衝深度 1.2 g/cm^2 ）でのシミュレーション計算結果は、

^{134}Cs : 1 Bq/cm^2 当たり $0.051 \mu\text{Sv/h}$

^{137}Cs : 1 Bq/cm^2 当たり $0.019 \mu\text{Sv/h}$

であった。 ^{134}Cs と ^{137}Cs の沈着密度を観測された値と同じとすると、両核種による合計の線量当量率は、 $0.90 (= 0.051 \times 11.5 + 0.019 \times 16.7) \mu\text{Sv/h}$ になる。上述した観測値には自然放射線による寄与も含まれていることを考えると、本計算結果は、観測結

果をほぼ再現すると言える。また、この計算結果との一致の程度は、平成 25 年 6 月のモニタリング結果（緩衝深度 2.06 g/cm²）[4]でも同様であった。

汚染土壌の広がりを変えたシミュレーション計算結果のうち、地上 5 cm と 100 cm における線量当量率が汚染土壌領域の中心（又は境界）からの水平距離によってどのように変化するかを示したものを、計算モデル①～③について、それぞれ資料 I の図 I.2～図 I.4 に示す。ここでは、靴底等の放表面密度に直接的に関係すると考えられる地表面の放射能濃度を高濃度汚染土壌に相当する 500 Bq/g（50 万 Bq/kg）、その中に含まれる ¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs の内訳を、平成 26 年 4 月の濃度比 0.38 に基づくものとした。図は、線量当量率を汚染土壌の位置とその広がりに関連付ける場合、汚染土壌に近接させて（すなわち 5 cm で）測定する方が明らかに有利であることを示す。また、図示した中で、同じ程度の水平方向の広がりを仮定したとき最も低い線量当量率を与える計算モデル①について、汚染土壌の直径と地上 5 cm における線量当量率の関係を図 II.5 に示す。図は、線源の直径が大きくなるにつれて、さらに緩衝深度が長く（深く）なるにつれて、線量当量率が増加することを示す。これは、地表面の放射能濃度をある決められた値に固定する場合、線源直径と緩衝深度の増加は、線源領域に含まれる放射能の総量の増加を意味するためである。図から、汚染土壌の広がりが直径 30 cm 以上であれば高さ 5 cm での線量当量率は、緩衝深度（の今後の変化）に関係なく、約 5 μSv/h を超える。また、上記直径（30 cm）において最小の線量当量率を与える緩

衝深度（1.2 g/cm²）について、線量当量率を時刻の関数として表したものを図 II.6 に示す。

2. 作業服等への土壌の付着密度の評価結果

(1) ピリング試験

土壌の付着密度を表 II.3 に示す。黒土、赤土及び川砂間で付着密度に大きな違いは見られず、いずれも約 1 mg/cm²であった。一方、水を添加した黒土（湿土）では約 11 mg/cm²に増加した。これらの値は、藤原ら [7]によるタオルを用いた実験と同じオーダーであった。

(2) 静的荷重試験

土壌の付着密度を表 II.4 に示す。単なる接触では土壌はほとんど付着しない。

(3) 動的荷重試験

試験布に土壌を強く擦り付けた場合の付着密度を表 II.5 に示す。水分が増えるにつれて付着密度は増加した。付着密度は約 1～20 mg/cm²の範囲であり、(1)のピリング試験の付着密度よりもやや大きな値であった。また、本結果は、米軍による模擬フォーアウト上でのほふく前進実験の結果（0.5～13 mg/cm²）[8]や英軍による同種実験の結果（0.3～28 mg/cm²）[9]とよく合う。

(4) 手袋への土壌付着試験

試験結果を表 II.6 に示す。乾土・生土での付着密度は、軍手（D 及び E）>ゴム手袋（F）であり、編み目の粗い軍手には一般的な服素材よりも土が付着しやすいようである。作業服と同様に水分が増えるにつれて付着密度は増加し、観測された付着密度は、湿土で平均 30 mg/cm²であった。また、観測された最大値は約 50 mg/cm²（手袋 F）

であった。

(5) 長靴への土壌付着試験

歩行試験で得られた結果を表 II.7 に示す。試験当日の天候と直近の降雨情報をもとに、試験条件を「晴天時」と「降雨後」に便宜的に分類した。

同じ場所での歩行試験であっても、降雨後の付着密度は晴天時の付着密度に比べて圧倒的に大きい。例えば、収穫後に地表を掘り返した畑の場合、降雨後の付着密度は、歩行終了直後の①で 2,000~4,000 mg/cm² (図 II.4 の状態)、常識的な衛生習慣に基づいて靴の土汚れを落とした場合に相当すると考えられる②の動作後で 450~1,100 mg/cm² に達した。この値は、道具を使用して土汚れを除去することによって徐々に減少し、⑤では約 50 mg/cm² まで落ちた。一方、運動場・公園での付着密度は、畑での付着密度に比べて小さいことが確認された。なお、歩数(5000 歩と 500 歩)による付着密度の大きな変化は見られなかった。

靴底への土壌の付着密度は、前述した作業服・手袋への付着密度に比べて圧倒的に大きいことが確認された。

3. 除染等作業における作業者の表面密度(放射能)の評価結果

除染作業及び道路工事作業について、作業現場の様子と、最大の放射能が観測された長靴の写真を、それぞれ図 III.4 と図 III.5 に示す。作業者が着用した作業服、手袋及び長靴から観測された放射能、表面密度、及び靴底から採取した土の放射能濃度を、表 III.2~表 III.4 に示す。ここで、表面密度は放射能を接触面積で除して算出したものである。手袋と長靴については、実測に

基づき接触面積をそれぞれ 320 及び 400 cm² とした。土壌に接した範囲が明確に決められない作業服については、保守的に評価するため 100 cm² (10 cm×10 cm) を仮定した。

(1) 草刈作業及び落葉落枝の清掃作業

測定結果を表 III.2 に示す。局所的にやや高い放射能濃度(約 20 Bq/g)の箇所において、土壌に直に触れたり、そこだけを集中的に歩行したりするなど意図的に汚染させた手袋・長靴から、放射能で 120~380 Bq (表面密度で 0.37~0.96 Bq/cm²) が観測された。一方、当該箇所を含む作業区域全域において作業した者から観測された放射能は、最大で 10 Bq、表面密度はいずれも 0.1 Bq/cm² に満たない値であった。このことは、放射能濃度の局所的な高低は、作業者自身の移動によって、平均化されることを示す。

(2) 居住制限区域での除染作業

測定結果を表 III.3 に示す。作業服、手袋(綿手袋とゴム手袋の合計)、及び長靴の放射能の最大は、それぞれ 190, 24, 及び 2,050 Bq であり、長靴の放射能が圧倒的に大きい。作業グループ別にみると、主に農地で除染作業を行った者の長靴から高い放射能が観測された。作業服と手袋については全体的に低めであるが、宅地除染作業に従事した作業者グループは他のグループよりもやや高い傾向がみられた。

表面密度については、農地で除染作業を行った者の長靴から最大 5.1 Bq/cm² が観測された。手袋はいずれも 0.1 Bq/cm² に満たない。作業服については、接触面積を小さく見積もった場合でさえ最大 1.9 Bq/cm² であった。いずれも表面密度限度(40 Bq/cm²) を大きく下回る結果であった。

靴底から採取した土の放射能濃度は、作業グループで違いが見られた。最大は、主に農地で作業した者の靴底からで、22 Bq/g (グループ平均約 14 Bq/g) であった。

(3) 帰還困難区域での道路工事作業

測定結果を表 III.4 に示す。作業服、手袋及び長靴それぞれから最大で 3,600, 1,300, 及び 590 Bq の放射能が観測された。放射能の大小関係は、作業服>手袋>長靴であり、長靴の放射能が突出して大きかった除染作業のそれとは大きく異なる結果となった。これは、重機を使うことなく直径約 1 m の放置排水管を片付けるというその作業の性質上、作業服の広い部分が排水管表面に接したためと考えられる。手袋の泥汚れが除染作業のそれに比べて目立つものであったことも上記推測を裏付ける。

一方、上記の最大放射能は、表面密度に換算すると作業服で 36 Bq/cm²、手袋で 4.1 Bq/cm²、長靴で 1.5 Bq/cm² であり、いずれも表面密度限度未満であった。作業服の表面密度がやや高いが、これは接触面積を 100 cm² と小さく見積もったことによるもので、実際には 1.4 Bq/cm² (= 土壌付着密度 10 mg/cm² (図 II.6 から) × 当該作業者の靴底から観測された土壌中放射能濃度 140 Bq/g) 程度であったと推定される。なお、手袋の表面密度の値は、複数枚の手袋の合計放射能に基づいた値であるので、一双当たりで考えればさらに低い値になる。

靴底から採取した土の放射能濃度は、33 ~ 140 Bq/g (平均 81 Bq/g) であった。

D. 考察

1. 線量当量率に基づく土壌中放射能濃度の推定

土壌中放射能濃度と線量当量率の関係は一律ではなく、特に汚染土壌の広がりによって変化する。ただし、図 I.5 に示したように、広がり幅を 30 cm 以上に限定すれば、地表面の土壌中放射能濃度 500 Bq/g に相当する地上 5 cm の線量当量率は、緩衝深度の大小に関係なく 5 µSv/h を超える。ゆえに、線量当量率サーベイメータによる測定で 5 µSv/h に満たない指示値が観測された場合、その真下の土壌中放射能濃度は 500 Bq/g を超えないと判断することができる (濃度 100 Bq/g を超えるか否かを知りたい場合は、指示値 5 µSv/h を 1 µSv/h に読み替えればよい)。上記の濃度と線量当量率の関係は、平成 26 年 4 月現在の ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 比 0.38 に基づいた値であるが、¹³⁷Cs に比べて半減期が短く、また線量当量率への寄与が大きい ¹³⁴Cs の壊変によって、合計放射能濃度が同じあっても線量当量率は今後徐々に低下する。濃度と線量当量率の関係の将来的な変化については、図 I.6 から知ることができる。

2. 土の最大付着密度と最大表面密度の推定

ピリング試験の結果から、作業服表面への土の付着は、土の種類よりも水分量に依存することが確認された。また、ピリング試験と動的荷重試験の比較では、後者の方がやや大きな付着密度となった。ピリング試験は、繊維に粉体汚染物質を均一に付着させることができる反面、外部から強い力が加えられたときの汚れの付着具合を再現しないとの指摘がある[10]。付着密度の最大値を得る目的においては、今回実施した動的荷重試験の方が適していると考えられ

る。

試験布と手袋への土の付着密度を比較した結果を図 II.6 に示す。図の右軸には、放射能濃度を 500 Bq/g 及び 100 Bq/g と仮定したとき、その放射能濃度と土の付着密度の乗算から算出される放射性表面密度を示す。特別の撥水加工がなされていない作業服 (A 及び B) や手袋 (D 及び E) への付着密度は、約 10~30 mg/cm² であり、500 Bq/g の土壤中放射能濃度を仮定すると約 5~15 Bq/cm² に相当する。一方、撥水加工され滑らかな表面を持つ素材 (C 及び F) の場合、乾土・生土ではほとんど付着せず、湿土で急激に付着量が増える傾向が観測された。これは、外部から加圧によって土粒子間に保持されていた水が滲み出し、それが土粒子と繊維表面の隙間を埋めるなど、あたかも接着剤のような働きをした結果と考えられる (撥水加工されていない素材は水分を吸収する)。ただし、そうした場合であっても、観測された付着密度は最大で約 50 mg/cm² であり、放射能濃度 500 Bq/g を仮定したとき 25 Bq/cm² に相当するに過ぎない。以上の結果から、作業服及び手袋については、500 Bq/g を超える極めて高い濃度の汚染土壌を取り扱う作業でない限り、土の付着によって表面密度限度 (40 Bq/cm²) を超える汚染は生じそうにない。

歩行試験から得られた靴底の土壌付着密度が、靴底を地面に打ち付けるなどの除去動作によってどれだけ変わるかを図 II.7 (運動場・公園) 及び図 II.8 (畑) に示す。図には、放射能濃度 500 Bq/g 及び 100 Bq/g を仮定したとき、表面密度限度に相当する土壌付着密度を矢印で示す。ここで、常識的な衛生習慣に基づいて靴底の土汚れを落

とした場合に相当すると考えられる②を基準に考えると、何ら追加の除去動作もすることなしに靴底の表面密度が限度を超えないのは、比較的乾いた状態の地面を歩行した場合に限られる。反対に、降雨等 (除染作業時等の発塵防止のための散水を含む) によって地面が濡れている場合は、放射能濃度 500 Bq/g での密度限度相当である土壌付着密度 (80 mg/cm²) 未満まで付着した土を落とすには、除去動作⑤のように道具を使用しつつ水洗いするなどの対応を必要とすると考えられる。また、放射能濃度 100 Bq/g であれば、相当する土壌付着密度は 400 mg/cm² まで緩和される。この場合、除去動作③泥落としマットの利用や④のブラシがけなどは、その付着密度未満まで土を落とす確実な手段であると言えるし、また土質によっては、靴底を地面により念入りに打ちつけるなどの対応でも十分かもしれない。

3. 高濃度汚染土壌の場合に予想される表面密度

接触面積を定義しやすい手袋と長靴についてここでは議論する。(作業服と手袋の土壌付着密度は同程度であるため、接触面積が厳密に定義できれば、以下の議論は作業服にも当てはまる。)

手袋と長靴の土壌付着密度を、図 II.6 から 30 mg/cm²、図 II.8 から 1,000 mg/cm² (②条件相当) とそれぞれしたとき、除染等作業現場の土壌中放射能濃度の最大値との乗算から予測される表面密度を表 III.5 に示す。作業の条件・内容に関係なく予測値 > 実測値が成立した。したがって、上記の計算は、表面密度を保守的に予測するこ

とができる。道路工事現場で使用された長靴の予測値と実測値に約 100 倍の相違がみられたが、これは、図 III.4 と図 III.5 の作業現場写真の比較からも明らかなように、全く異なる土質に対して、黒土（畑）で観測された付着密度を一律に適用したためである。道路工事現場のような付着しにくい砂岩質土壌については、図 II.7（運動場・公園等）に基づき、たとえば 200～300 mg/cm²（②条件相当）の付着密度を選択することで保守的すぎない予測が可能になると考えられる。

除染等作業にあたって土壌との接触が不可避かつ付着密度も大きいという事実は、放射性表面汚染の管理にあたって最も注意を払うべきは長靴であることを示す。作業者が実際に着用した長靴で観測された表面密度 (Bq/cm²) と土壌中放射能濃度 (Bq/g) から、土壌付着密度 (g/cm²) を算出した結果を表 III.6 に示す。また、その結果に基づき、土壌中放射能濃度を 500 Bq/g 及び 100 Bq/g と仮定したときに予測される表面密度も同表に示す。比較的ウエットな農地の除染作業に従事した作業員 (1～5 番) の長靴の土壌付着密度は全体的に高めであり、約 100～500 g/cm² であった。これは、降雨後に畑で実施した歩行試験の結果 (図 II.8, ②～③条件) に近い値である。放射能濃度 500 Bq/g を仮定した場合、計 15 人の作業員のうち、農地除染に従事した作業員全員を含む 10 人が、放射能濃度 100 Bq/g を仮定した場合、1 人が表面密度限度 (40 Bq/cm²) を超えるという予想となった。本結果は、付着しやすい土壌 (水分の多い黒土等) での作業で、かつ高い放射能濃度の場合は、土汚れを取り除く何らかの対応を

すべきだとする前節の提言を支持するものである。

E. 結論

除染等作業現場の線量当量率・土壌中放射能濃度と作業員の身体汚染の程度に関する知見を得ることを目的に、(1) 線量当量率と土壌中放射能濃度の関係、(2) 作業服等への土壌の付着密度、さらに(3) 除染等作業に従事した作業員の身体表面密度に係る研究を行った。

その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 線量当量率と土壌中放射能濃度の関係を計算シミュレーションによって評価した。その結果、少なくとも直径 30 cm の広がりをもった汚染土壌については、その緩衝深度に関係なく、地表 5 cm での線量当量率が 5 μSv/h 未満であれば放射能濃度は 500 Bq/g (平成 26 年 4 月現在) を超えないと判断できることが分かった。
- (2) 作業服、手袋、及び長靴への土壌付着密度を実験によって調べた。付着密度は、土の種類よりも水分量に依存し、水分量が増えるにつれ増加することを確認した。作業服及び手袋の最大付着密度は、含水率約 30～50%の黒土で 10～30 mg/cm² であり、放射能濃度 500 Bq/g を仮定したとしても表面密度限度を超えそうにない。一方、長靴については、降雨後の畑での歩行試験において 500 mg/cm² を超える付着密度が観測され、濃度によっては表面密度限度を大きく超える可能性が高い。付着しやすい土壌での作業で、かつ高濃度の場合は、汚染検査を受ける前に土汚れをできるだけ取り除く対応 (泥落としマット、ブラシがけ、水洗い等) が必要

である。

- (3) 茨城県東海村の原子力機構核燃料サイクル工学研究所構内，福島県内の居住制限区域及び帰還困難区域において除染等作業に従事した作業者の着用した作業服，手袋，及び長靴について放射能測定を行った。その結果，例えば，比較的ウエットな農地での除染作業に従事した者の長靴から最大 2,000 Bq を超える放射能が観測されたものの表面密度に換算すると 5.1 Bq/cm²であったなど，いずれの作業においても表面密度限度を超える事例は観察されなかった。また，靴底に付着した土の付着密度を調べた結果，(2)の歩行試験で得られた値と同程度の値であること，また，実験的に得られた土壌付着密度と作業現場の放射能濃度の乗算から表面密度の予測が可能であることが確認された。

文献

- [1] 厚生労働省；東日本震災により生じた放射性物質により汚染された土壌等を除染するための業務等に係る電離放射線障害防止規則，平成 24 年 1 月 1 日施行，平成 25 年 4 月 12 日改正。
- [2] 厚生労働省；除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン，平成 23 年 12 月 22 日制定，平成 25 年 12 月 26 日改正。
- [3] 日本原子力研究開発機構；平成 24 年度放射能測定委託調査事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」成果報告書，平成 25 年 3 月，
<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/c>

[at03/entry05.html](http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/504/list-1.html)

- [4] 日本原子力研究開発機構；「平成 25 年度東京電力（株）福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立事業」成果報告書，平成 26 年 3 月，入手先
<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/504/list-1.html>
- [5] 環境省；放射性物質による局所的汚染箇所への対処ガイドライン，平成 24 年 3 月制定，平成 25 年 4 月改正。
- [6] 日本規格協会，繊維製品の防汚性試験方法，JIS L 1919，(2012)。
- [7] 藤原慶子，山崎敬三，高橋知之，高橋千太郎，北川晃三，神藤克人；放射性セシウムを含有した土壌によるタオルの汚染と洗濯による除去効果，保健物理，47(4)，282-285 (2012)。
- [8] R. H. Black；Some factors influencing the β -dosage to troops, Health Phys. 8, 131-141 (1962)。
- [9] E. Neale and K. Sinclair；Radiological contamination: clothing trials, Porton Technical Paper No.(R)33, Chemical Defence Experimental Establishment, (1961)。
- [10] 明歩谷英樹；ユニフォーム上の汚れ発生メカニズムに関する研究，工業技術研究報告書 No.37，新潟県工業技術総合研究所，(2008)。

F. 健康危険情報

該当無し

G. 研究発表

口頭発表

辻村憲雄，吉田忠義，星勝也；除染等作業
における被服への土壌の付着量に基づく
放射性表面汚染密度の評価，日本原子力
学会 2014 年秋の大会 P51，京都大学，
2014.

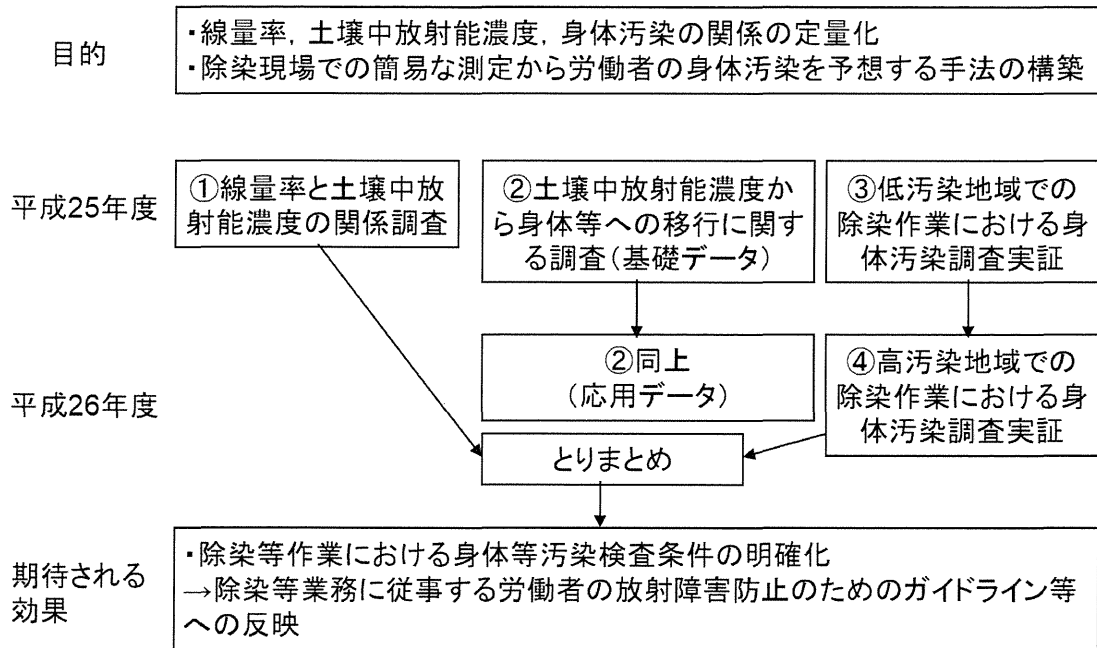
辻村憲雄，吉田忠義，星勝也；局所的土壌
汚染における土壌中放射性セシウム濃度
と線量当量率の関係，日本放射線安全管
理学会第 13 回学術発表会，徳島大学，
2014.

星勝也，吉田忠義，辻村憲雄；除染等作業
における体表面汚染に関する研究（1）
靴底への土壌付着量の評価，日本原子力
学会 2015 年春の年会 L55，茨城大学，
2015.

辻村憲雄，吉田忠義，星勝也；除染等作業
における体表面汚染に関する研究（2）
労働者の作業服等の放射能測定，日本原
子力学会 2015 年春の年会 L56，茨城大
学，2015.

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含
む）

なし



研究の流れ図

資料 I 線量当量率と土壤中放射能濃度の関係の計算

1. 概要

放射性セシウムに汚染された環境における線量当量率と土壤中放射能濃度の関係を計算シミュレーションによって調べる。

2. 方法

計算コード：モンテカルロ粒子輸送計算コード MCNP-4C3

計算基本体系：直径 200 m 以上×厚さ 30 cm 以上の土（密度

1.6 g/cm³）及び高さ 200 m の空気（密度 1.2 mg/cm³）

線源核種：¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs

検出器：汚染土の表面から高さ 5 cm, 100cm に点検出器（F5 タリー）

換算係数：ICRP Publ. 74 光子フルエンス一周辺線量当量換算係数（表 A.21）

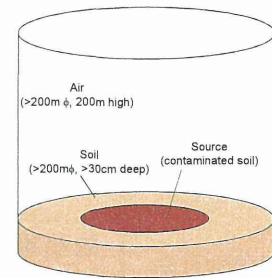


図 I.1 計算の基本体系

表 I.1 土に含まれる放射性セシウムから放出されるγ線による線量当量率の計算条件

計算モデル	①円形汚染	②半円形汚染	③排水路（幅 30 cm×深さ 30 cm×全長 50 m）
水平方向の汚染土の分布	一様分布（ラジアル方向） 半径(Rs): 5, 10, 15, 25, 50, 100 cm 及び 200 m	一様分布（ラジアル方向） 半径：100 m	一様分布 長さ(Ls)：10, 20, 30, 50, 100, 200 cm 及び 50 m
鉛直方向の汚染土の分布	指数関数分布 *1 緩衝深度(β)：1.2, 1.6 及び 2.0 g/cm ²	指数関数分布 *1 緩衝深度(β)：1.2 g/cm ²	一様分布 底の堆積厚さ(Ds)：1, 3 及び 5 cm
放射能濃度	地表面で 50 万 Bq/kg (= 500 Bq/g) *2		50 万 Bq/kg (= 500 Bq/g)
それぞれの計算体系			

*1 深さ d (g/cm²) における濃度が exp(-d/β) に比例する分布。ここで、緩衝深度βは、放射能濃度が地表面の 1/e (= 1/2.72) 倍になる深さを指す。

*2 単位面積当たりの沈着密度 (Bq/cm²) = 緩衝深度 (g/cm²) × 表層の放射能濃度 (Bq/g)。なお、50 万 Bq/kg は高濃度汚染土壌に相当する。

3. 結果

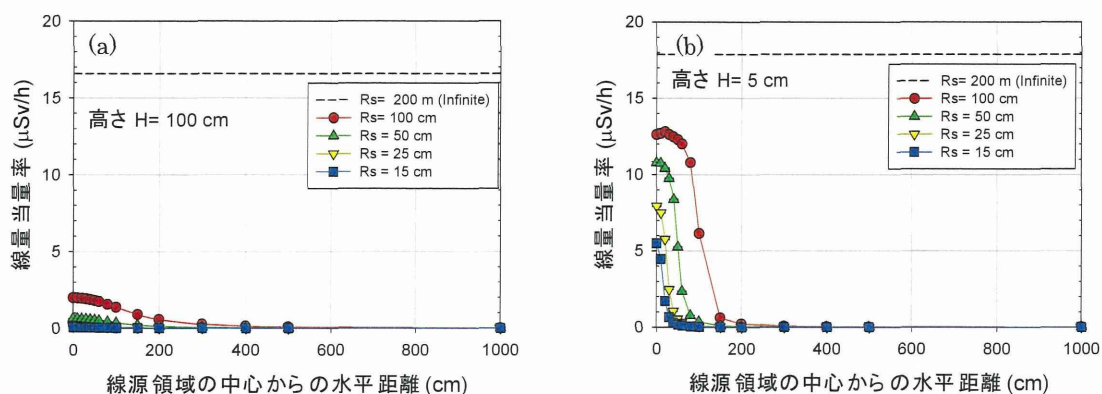


図 I.2 計算モデル① (円形汚染), 地上 100 cm 及び 5 cm における線量当量率
 地表面の放射能濃度: 500 Bq/g (平成 26 年 4 月)

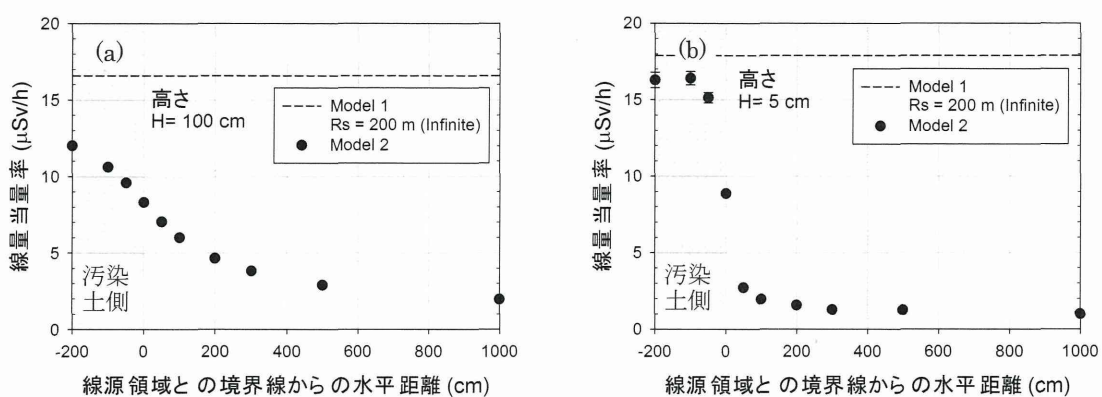


図 I.3 計算モデル② (汚染土壌境界), 地上 100 cm 及び 5 cm における線量当量率
 地表面の放射能濃度: 500 Bq/g (平成 26 年 4 月)

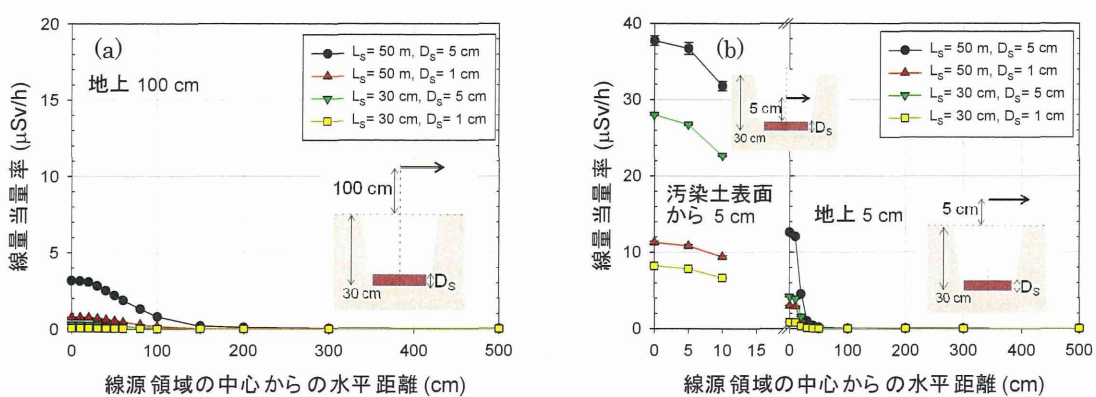


図 I.4 計算モデル③ (水路の堆積土), 地上 100 cm 及び 5 cm における線量当量率
 地表面の放射能濃度: 500 Bq/g (平成 26 年 4 月)

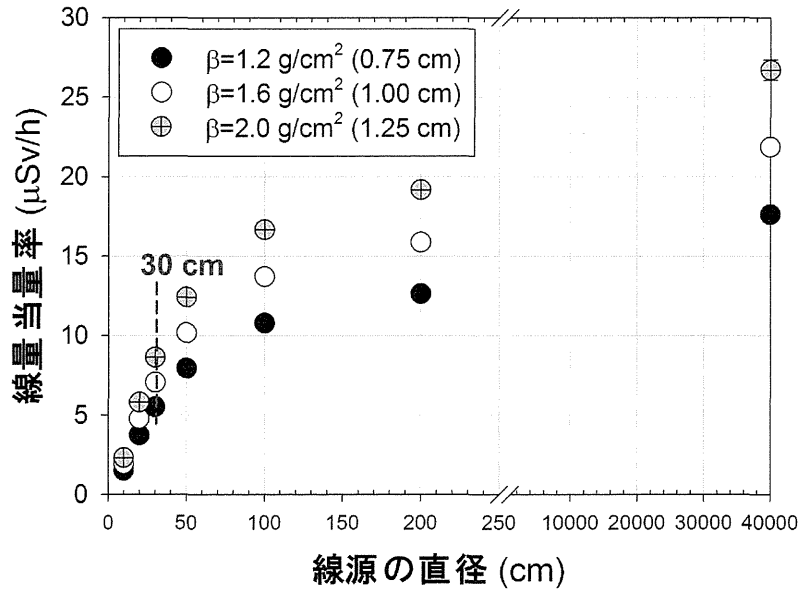


図 I.5 指数関数的な土壌中深さ分布を有する放射性セシウムの円形汚染土壌（計算モデル①，地表面の放射能濃度：500 Bq/g（平成 26 年 4 月））の中央高さ 5 cm における線量当量率

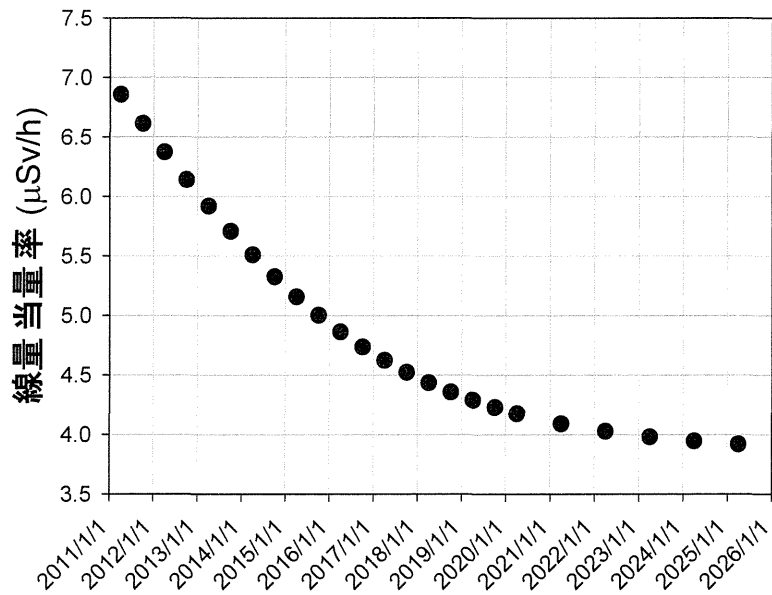


図 I.6 放射性セシウム濃度 500 Bq/g（地表面）を有する直径 30 cm の円形汚染土壌（計算モデル①，緩衝深度：1.2 g/cm²（最小の線量当量率を与える））の中央高さ 5 cm における線量当量率の経時変化