

千葉県が実施した放射能除染とその効果について

市川 有二郎*

千葉県環境研究センター (〒290-0046 千葉縣市原市岩崎西 1-8-8)

Efficacies of Radioactive Decontamination Methods Conducted by the Government of a Municipality of Chiba Prefecture

Yujiro Ichikawa*

Chiba Prefectural Environmental Research Center (1-8-8 Iwasakinishi, Ichihara city, Chiba 290-0046, Japan)

Summary

A large amount of radioactive materials were discharged from Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant in March 2011, and this caused a serious radioactive contamination over large area of eastern Japan. This paper is designed to review the efficacies of decontamination methods that were conducted by the government of a municipality of Chiba Prefecture to eliminate radioactive materials. The efficacies of each decontamination methods were evaluated by reduction of air dose rate (1 cm dose equivalent dose) observed before and after decontamination (the natural air dose rate of 0.04 $\mu\text{Sv/h}$ derived from the ground was subtracted for the calculation of reduction rate). Following seven decontamination methods are cited from our past reports. 1) Coverage of ground with uncontaminated soil to thickness of 5 cm. 2) The topsoil was stripped and removed to the depth of 5 cm (exceptionally 1 cm at Japanese Garden). 3) Stripped and removed the topsoil containing radioactive materials in the range of 3 ~ 5 cm depth, subsequently coverage with uncontaminated soil to the thickness of 3 cm to the subsoil layer. 4) Replacement with uncontaminated sand 15 ~ 20 cm depth in sandbox. 5) Washing the paved road with high-pressure water jet washer (water pressure of 15 MPa, the rate of water usage was approximately 20 L/m²). 6) Replacement of contaminated sand at the artificial turf tennis court. 7) Lawns were mowed at 2 cm length. The observed air dose reduction rates were 57%, 64% (31% at Japanese Garden), 75%, 65 ~ 74%, 33%, 67% and 70% respectively. A point to notice is that, radioactive materials are known to transfer among environmental media by weathering effects (e.g. wind, precipitation) that may act as either increase or decrease of air dose rate. Therefore, great attention should be paid to the monitoring of air dose rate even after the decontamination was achieved.

Key Words: Decontamination, Chiba Prefecture, Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant,
Air dose reduction rate, Monitoring

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)と津波被害によって発生した東京電力福島第一原子力発電所(以下、「福島原発」とする。)事故により、大量の放射性物質が一般環境に放出・拡散され、広域的な環境汚染をもたらした。その後、福島県では避難、退避、居住制限、立入制限等の対策が講じられ、福島原発事故から3年以上が経つ現在においても不自由な生活を強いられている人が多い。

関東地方においては、公益財団法人日本分析センター(千葉市)で福島原発事故から放出された放射性物質(¹³⁴Cs、¹³⁶Cs、¹³⁷Cs、¹³¹I、¹³²I、¹³³I、¹³²Te、¹³³Xe など)による空間線

量率の上昇が2011年3月15日、16日と3月21日に観測され¹⁾、大気浮遊塵中ならびに降下物中放射能濃度もほぼ同時期に高い値が確認された²⁾。今もなお、外部被ばくのガンマ線源として最も関与している放射性セシウム(特に半減期の長い¹³⁴Csと¹³⁷Cs)の大部分は、3月21日の降雨時に関東地方の地上に降下した^{1,2)}。

米国エネルギー省(DOE)が、事故直後の3月17日から率先して航空機モニタリングを開始したことに端を発し、文部科学省も国内の汚染状況を広範囲に渡り航空機モニタリングや走行サーベイによるモニタリングをはじめた³⁻⁶⁾。また、文部科学省はDOEと共同で航空機モニタリング結果のスペクト

*Corresponding author: TEL: 0436-21-6371, FAX: 0436-21-6810, E-mail: y.ichkw17@pref.chiba.lg.jp

ル解析を実施し、フォールアウトした放射性物質の地表面沈着量の分布についても把握した⁷⁾。これらのモニタリング結果をベースに作成された「放射線量等分布マップ拡大サイト」⁸⁾によると、Fig.1のとおり千葉県北西部の ^{134}Cs と ^{137}Cs の合計沈着量は2011年9月12日時点で $30 \sim 100 \text{ kBq/m}^2$ と推測され、柏市、松戸市、野田市、流山市、我孫子市、鎌ヶ谷市、印西市、佐倉市及び白井市の全域が汚染状況重点調査地域として指定を受けた⁹⁾。国土交通省国土地理院の全国都道府県市区町村別面積調(2013年10月1日時点)¹⁰⁾によると、上記9市の総面積は 642.15 km^2 で千葉県の全面積($5,081.93 \text{ km}^2$)の約12.6%である。汚染状況重点調査地域では、除染によって福島原発事故由来の放射性物質による年間の追加被ばく線量率を 1 mSv 以下(大地由来の自然放射線 $0.04 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ の影響を加味して $0.23 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ 以下)¹¹⁾にすることを目標とし「除染関係ガイドライン」¹²⁾に基づく除染作業が開始された。

千葉県でも、県民の放射性物質による健康への影響に関する不安を払拭するため、千葉県災害復旧・復興本部を設立し、2012年4月19日に「千葉県放射性物質除染実施プラン」(以下、「県除染プラン」とする。)を策定した¹³⁾。県除染プラン策

定時に $0.23 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ 以上の空間線量率が計測された県管理施設から計77施設を除染対象施設と定め、それらを「A: 子どもの利用が多いもの(46施設)、B: 比較的に子どもの利用が少ないもの(5施設)、C: 行政施設であり、主に県職員が遮へい効果の見込める室内で執務するもの(26施設)」の3つのグループに分類した。Aグループの施設(主に学校や公園)については、子どもが安心して生活できる環境を取り戻すことが重要であることから、2012年度中の除染完了を目標とし、最優先に除染作業が開始された。除染作業は円滑に進められ、2012年度中に県除染プランで予定した計77施設の全てについて、空間線量率が $0.23 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ 以下と確認され、本プランの所期の目標が達成された¹⁴⁾。このように、各関係機関の除染作業に加えて各放射性物質の物理的半減期とウェザリング効果(風雨等の気象要因による増減効果)による環境中の減衰によって、千葉県北西部における ^{134}Cs と ^{137}Cs の合計沈着量は2012年12月28日時点で $10 \sim 60 \text{ kBq/m}^2$ へと減少⁸⁾し、それに伴い空間線量率は低減した。

著者らは、上記の除染対象施設のAグループに分類されていた「千葉県立柏の葉公園」^{15)~19)}、「県営住宅敷地内の児童

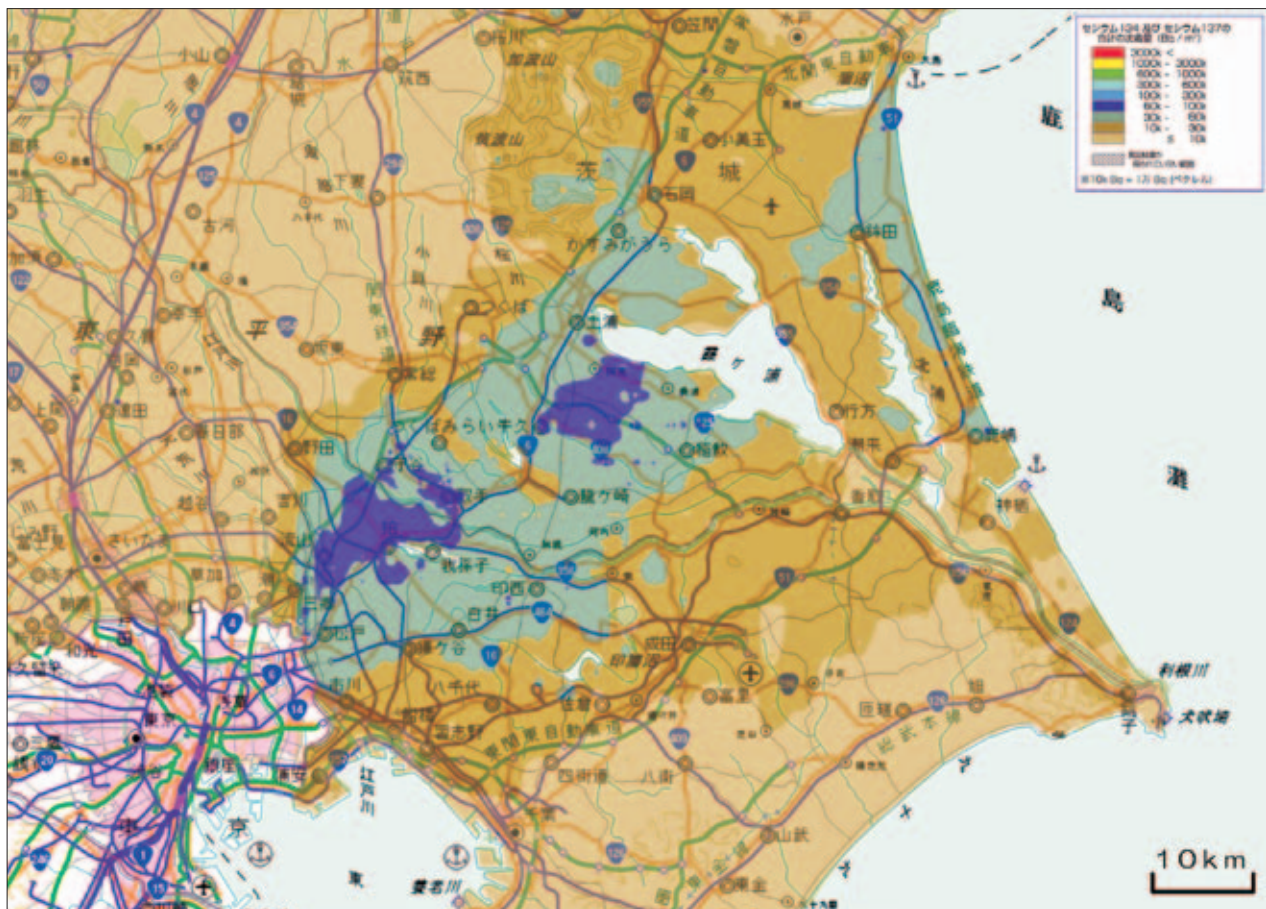


Fig.1 2011年9月12日時点における千葉県北西部の ^{134}Cs と ^{137}Cs の合計沈着量。(放射線量等分布マップを改変)

公園」²⁰⁾、「千葉県立手賀沼親水広場」²¹⁾において除染前後の空間線量率等の詳細な測定・解析を実施し、汚染実態の把握に併せて除染効果の検証を行った。本稿では、それらの施設において千葉県が実施した複数の除染手法の事例紹介と得られた除染効果について概説を行う。なお、除染手法毎の効果を検証するために実施した詳細な調査内容や解析等については既報を参照していただきたい^{15～21)}。

2. 空間線量率の測定方法

原則的に、調査地点を10 m 四方のメッシュに区切った各メッシュ内で、エネルギー補償型NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメーター（日立アロカメディカル株式会社 TCS-172 B）の検出器ヘッドを地表面と水平方向に向けて1 mと50 cmの高さに固定し、時定数 30 秒の条件で測定した。測定値は30 秒ごと5回の繰り返し測定から算術平均値の小数第3位を四捨五入し、測定器ごとの校正定数を乗じたものを測定値に採用した。

なお、本稿では除染手法とその効果に主眼を置いて記述することを目的としているため、以下の内容で紹介する空間線量率の値は全て地上から50 cm 高さのものとする（ただし、3章5節の高圧洗浄の説明では例外的に地上から高さ1 mの測定値）。また、除染によって得られる空間線量率の低減率の算出については、大地由来の自然放射線量率 $0.04 \mu\text{Sv/h}$ （バックグラウンド値）を差し引いた¹¹⁾。

3. 除染手法とその効果

(1) 汚染土壌表面の覆土による遮へい¹⁵⁾

Fig.2に示したように、汚染されていない土砂（使用前に汚染されていないか確認する）を運搬し、大きな砂利等は取り除きながら人力により厚さ5 cmで覆土し、ローラーや振動プレート等により転圧を行うことで地表面の凹凸を少なくし、汚染土壌由来の放射線を遮へいした。「千葉県立柏の葉公園」の「冒険のトリデ」の多くの箇所でも覆土による遮へいを採用しており、本手法を実施した箇所でも測定した空間線量率の平均低減率は57% ($n=108$)であった。この手法のメリットは、作業が容易であることに加えて汚染土壌や除染廃棄物が発生しないことから、廃棄物の一時保管場の設置が不要であることが挙げられる。しかし、放射性物質が吸着した土壌表面の上に盛られている汚染濃度の低い土壌が締め固められているとはいえ、雨水等により少しずつ浸食され汚染土壌の遮へい効果が低下する可能性も否定できないため、継続的に空間線量率のモニタリングを行う必要がある。

一般的に福島原発事故に由来する放射性物質のうちで、環境に長期的な影響を及ぼしている放射性セシウム (^{134}Cs と ^{137}Cs) は、土壌中の負に帯電した有機物や粘土鉱物と高い親和性を有しており、時間の経過とともに粘土鉱物のフレイド・エッジ・サイト（雲母類の風化により層間が膨潤した鉱物における膨潤層と非膨潤層との境界に位置するくさび形に開いた



5 cm 覆土



地固め

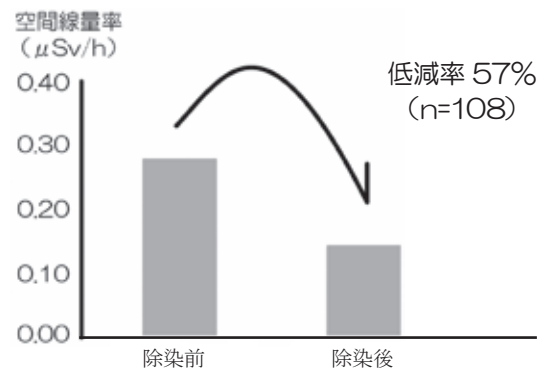


Fig.2 覆土 (5 cm 厚さ) による除染効果

部分) に特異的に吸着され、下層土壌へ浸透が極めて小さくなるという研究報告^{22,23)}から推察して、地下水へ放射性セシウムが行き渡る可能性は低いと考えられる。

(2) 汚染土壌の切削除去^{15,16)}

除染前調査において、斜面の法下やブロック・土留めの際に位置する多くの土壌からは平地の土壌中放射能濃度よりも

高い濃度が検出される傾向が見られ、雨水とともに流出した放射性物質が蓄積しやすい地形構造であると考えられたことから、汚染土壌の切削除去を行った。Ivanov ら²⁴⁾はチェルノブイリ原子力発電所の事故から2年後に土壌中の放射性物質の分析を行い、 ^{137}Cs の99%と ^{90}Sr の92%が土壌表層から5 cm まで堆積していると報告している。また、福島原発事故以降、国内での土壌中放射能濃度について複数の報告^{4-6,25-27)}があり、深度5 cm 程度までに今回の事故由来の放射性物質

の大部分が蓄積されている結果が多く示されていることから、基本的な切削厚さの設計値は地表面から5 cm として、Fig.3 に示したように人力（スコップや鍬）やバックホウ（油圧で作動させるショベル系建設機器で一般的に地表面の掘削に使用）で表土を切削した。汚染土壌の切削を実施した場合の空間線量率の平均低減率は64%(n=6)であった。



↓ 地表面から深さ5 cm を切削除去

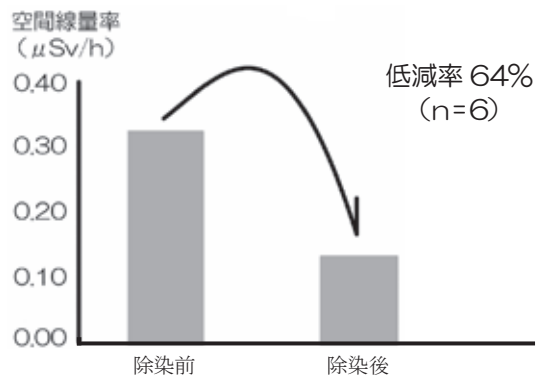


Fig.3 汚染土壌の切削除去（深さ5 cm）による除染効果



↓ 3～5 cm 厚さの切削



↓ 3 cm 覆土地固め

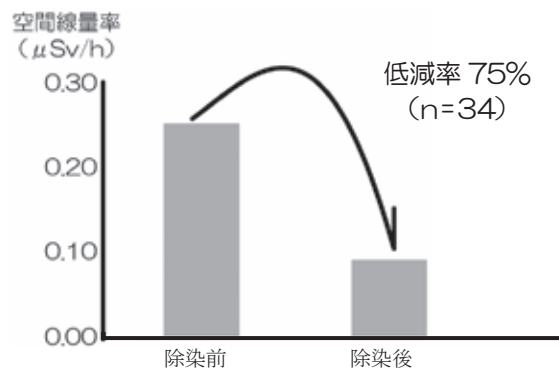


Fig.4 汚染土壌の切削除去（深さ3～5 cm）と覆土（厚さ3 cm）の組み合わせによる除染効果

「千葉県柏の葉公園内」に設置されている「日本庭園」においては、景観を崩さないようにすることを考慮した除染計画が策定された。その結果、庭園に植えられている観賞用植物等については除染作業は加えず、来園者が通行する歩道のみが除染対象となった。当園の歩道面は、土、砂利敷き、石畳の3種類で構成されており、そのうちの土・砂利敷き箇所、表面から1cm厚さでの切削除去を行い、空間線量率の平均低減率は31%(n=15)であった。5cm厚さの切削よりも空間線量率の低減率は低い¹⁵⁾が、当園では全体平均として $0.23\mu\text{Sv/h}$ を下回り、除染対策目標が達成された。

本手法は、汚染土壌を生活圏から取り除ける反面、除染廃棄物が発生する。除染前の空間線量率から求められる低減率と一時保管場の規模等の状況を勘案した上で、切削厚さの設計値を選択するべきである。

(3) 汚染土壌の切削除去と覆土による遮へいの組み合わせ²⁰⁾

除染対象となった「県営住宅敷地内の児童公園」では、Fig.4のとおり全表土を厚さ3～5cmで汚染土壌の切削除去を行った後、削り取られた表土の上に厚さ3cmの覆土と地固めを施し、空間線量率の低減を図った。空間線量率の平均低減率は75%(n=34)となり、2つの工程を組み合わせているので大きな低減率が得られたが、言うまでも無く、作業時間が多くなると同時に作業コストも高くなる。

(4) 砂場における汚染砂の総入れ替え^{15,20)}

「千葉県立柏の葉公園」の「冒険のトリデ」と呼ばれるアスレチックスペースに設置されている砂場は、大型スベリ台や木造の砦などのアスレチック遊具で子どもが動き回る際の衝撃吸収用途として地面に使用されていることが外観から見受けられた。チェルノブイリ原発事故や福島原発事故以降、国内外での研究報告²⁸⁻³¹⁾によると、除染、耕作等の土壌の攪乱が無ければ、土壌中放射能濃度の深度分布は上層から下層に向かって小さくなる傾向にあり、指数関数的な近似が仮定できるとされている。実際に、表層0～1cm、0～5cm、5～20cmの幅で砂を採取しゲルマニウム半導体検出で分析したところ、上層で放射能濃度が高く下層で低い結果となり、下層までの攪乱はほとんど無いと考えられた。しかし、砂場における5～20cmの砂中放射能濃度(640 Bq/kg 乾燥重量)が当該調査場所の赤土である調査地点で採取した5～20cmの土壌中放射能濃度(90 Bq/kg 乾燥重量)よりも高かったことから、砂と赤土の特性の違いによって砂の方が放射性物質の下層への浸透が大きいことが考えられた。この結果を受けて、当該調査場所の砂場の汚染砂については、Fig.5のように表層から15～20cm深さの砂をバックホウと人力(スコップ)で切削除去し、汚染の無い新砂と入れ替えを行い元の厚さとした結果、空間線量率の平均低減率は74%(n=22)であった。なお、作業中に粉塵が舞う可能性が見受けられた場合は、散水等の飛散



15～20 cm 深さ
砂の入れ替え

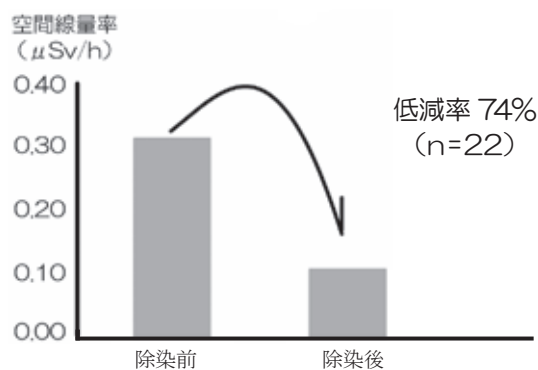


Fig.5 砂場における汚染砂の入れ替えによる除染効果

防止策を講じた。

一方で、「県営住宅敷地内の児童公園」に設置されている砂場については、子どもが砂を掘り下げたり盛り上げたりして遊ぶための一般的な砂場であった。すべての児童公園(4施設)では0～5cm深さで砂場の砂に加えて周囲の地点で赤土を採取して放射能濃度を分析したが、どの施設でも砂中放射能濃度が周囲の地点の赤土中放射能濃度と比べて小さかったことから、砂が攪乱されたことにより表層の放射能濃度が全体的

に希釈されていたと考えられた。畑や水田では耕作により攪乱されていない土壌であれば5 cm 程度の深さまでに事故由来の放射性物質をほぼ100 % 回収できる一方で、耕作され攪乱されている土壌においては、放射性物質が表層から20 cm 程度の深さまで降下するという報告もある³²⁾。また、上述のとおり砂は放射性物質の下層への浸透も大きいことが考えられるため、児童公園の砂場においても安全側を考慮して、表層から20 cm 深さまでの砂を総入れ替えした。児童公園の砂場での空間線量率の平均低減率は65%(n=8)であった。

(5) 舗装道路の高圧洗浄¹⁸⁾

「千葉県立柏の葉公園」内の舗装された歩道や駐車場で大規模な高圧洗浄による除染が実施された。除染対象となった舗装道路の総面積は約113,000 m²と広範囲に渡ったため空間線量率は定点測定ではなく、舗装道路全体の面的な分布を把握する目的で、5秒間隔で空間線量率の瞬時値を測定するCsI (TI) シンチレーション式サーベイメーター (MGP Instruments HDS-101) を地上から1 m の高さで自転車に搭載し舗装道路を走行サーベイした。本装置は、(独)放射線医学総合研究所が開発した放射線モニタリングシステム「ラジブロープ」³³⁾により、GPS 機能を接続したパソコンに走行サーベイした空間線量率の測定値と位置情報が合わせて記録される。

舗装道路はFig.6 に示したように高圧水 (圧力は15 MPa 程度、水量は20 L/m² 程度) で洗浄し、必要に応じてブラシによる拭き取りも実施した。洗浄効果を得るために、被洗浄物に噴射口を近づけた(20 cm 程度)。作業中は、洗浄水の飛散・流出防止策として、周縁部から内側、水勾配の上流から下流に向かって行い、建物等が隣接している場合は2次汚染を防ぐために周囲をブルーシート等で養生した。走行サーベイで計測された高圧洗浄前後の舗装道路全体の平均空間線量率から高圧洗浄による低減率を算出したところ33%(除染前:0.17 μ Sv/h(n=353)、除染後:0.13 μ Sv/h(n=654))であった。

高圧洗浄によって発生した洗浄水は集水枡に一時的にたまり、自然沈降によって洗浄水中の土砂等の堆積物と上澄み液(排水)は分離される。排水中の放射能濃度は、環境省の放射能濃度等測定法ガイドライン(平成23年12月第1版)³⁴⁾中に定められている公共の水域の濃度限度(¹³⁴Cs:60 Bq/L, ¹³⁷Cs:90 Bq/L)と比べて低い値であった。集水枡の排水は園内に設置された調整池へと流出する構造となっているが、高圧洗浄中は安全側を考慮して排水を吸引回収し凝集沈澱法等の排水処理をした。また、集水枡に蓄積された堆積物については、スコップ等を用いて人力により除去、清掃した。

「千葉県立柏の葉公園」のその他の施設では除染直前期において0.23 μ Sv/hを超過する場所^{15-17,19)}が多く見受けられたが、舗装道路では除染直前期の空間線量率(平均値)は0.23 μ Sv/hを下回っていたことから、園内のその他の場所と比較し



圧力 15 MPa 程度
水量 20 L/m² 程度

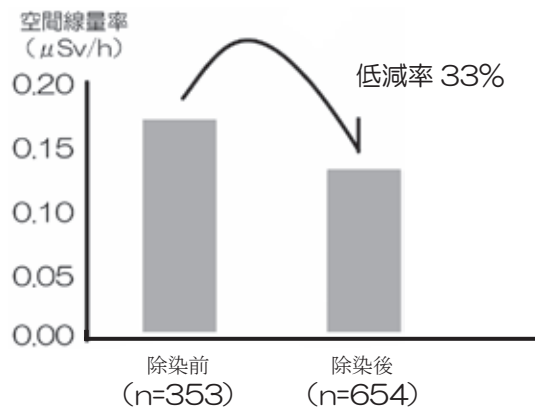


Fig.6 舗装道路の高圧洗浄による除染効果

て空間線量率の低減が早かったと考えられた。これまでに、道路上の放射性セシウムはウェザリング効果や車などの走行による影響で除去され易く、空間線量率の低減も放射性セシウムの物理的半減期以上の減衰率を示していることが知られており⁵⁾、本調査結果においても同様な原因で舗装道路の線量率の減衰が早かったと考えられる。また、千葉県内の我孫子市で津崎ら³⁵⁾が土地利用形態別に空間線量率の時間変化を解析したところ、芝地、林地、裸地と比較してアスファルトでは空間線量率の低減が早かったという報告もある。

(6) 庭球場での除染¹⁷⁾

「千葉県立柏の葉公園」内の「庭球場」は珪砂入りの人工芝コートとなっており、約5,700 m²が除染対象となった。庭球場で使用されている珪砂は、摩擦防止策として庭球場内に均一に敷かれており、庭球場の使用頻度や風による飛散状況等を踏まえて、随時、新珪砂が追加されている。原発事故後、放射性物質に汚染された珪砂の抜き取りは一切行われておらず、継続的に新珪砂の追加が行われてきた。珪砂を取り集め、ゲルマニウム半導体検出器で分析したところ、庭球場の空間線量率に珪砂中放射能濃度が大きく関与していることが示唆された。その結果を受けて、除染工程として珪砂の抜き取りと

新珪砂の充填が行われた。

Fig.7に示した人工芝等の充填材(珪砂やゴムチップ)を抜き取るために開発されたレノマチックという人工芝再生とゴミ除去の専用機により、庭球場内の汚染珪砂の抜き取り作業をむら無く実施した。レノマチックによる走行が困難である庭球場内のフェンス等の境界部については、スコップによる人力での汚染珪砂の除去を行った。汚染珪砂の抜き取り作業が完了したら、サンドスプレッダー(砂充填機)を用いて新珪砂を庭球場内に散布し、コートブラシにより敷均した。

汚染珪砂の抜き取り作業による空間線量率の低減率は52%($n=30$)であり、汚染珪砂の抜き取り作業のみで調査地点の空間線量率は $0.23 \mu\text{Sv/h}$ を下回った。また、新珪砂を散布することによって人工芝に若干残っている放射性物質由来のガンマ線に対する遮へい効果が働き、空間線量率は更に31%の低減率が得られた。汚染珪砂の抜き取りと新珪砂の敷均しの両方を組み合わせた空間線量率の最終的な低減率は67%であった。

作業中に発生する汚染珪砂は、容積が 1 m^3 のフレキシブルコンテナバッグ(フレコンバッグ)と呼ばれる大型土のう袋に詰め込み庭球場内に珪砂抜き取り作業が完了するまで一時的に保管していた。この汚染珪砂が封入されたフレコンバッグの一時保管場の周辺では空間線量率が高くなる傾向があったため、運搬及び保管作業を実施する作業者の不必要な被ばく防止に対する配慮は大切である。また、珪砂は容易に風によって巻き上がることから、作業中の吸入被ばくを避けるためにもマスク等の防護策は必要である。

(7) 芝地での除染^{15,19,21)}

芝地では、除染前にホールカッターと呼ばれる手動式の穴あけ装置を用いて、円筒形に芝(葉部と根が一体)と土壤をいくつかの調査地点でくり抜き採取した。採取した芝と土壤は、円筒形のかたちを崩さずカッターナイフで上部から高さ5cmで切り分けた部位を前処理し、芝と土壤をピンセットで分離し、別々にゲルマニウム半導体検出器で測定したところ、すべての調査地点で芝中放射能濃度はその下層部に位置する土壤中放射濃度より高い値を示した。水庭ら³⁶⁾は芝地の放射性物質の分布について、深度別(10mmごとに切り分けた)にイメージング・プレートを用いた調査を行い、芝生の刈りかすや枯れた芝生の堆積物(サッチ)を中心に放射性物質が蓄積していることを報告していることから、著者らが採取した芝の放射能濃度が高かった理由はサッチに蓄積された放射性物質による影響と考えられた。

除染は、放射性物質が蓄積されていると考えられる芝のサッチ層を取り除くことを主眼とし、地表面から2cm深さの設計値で芝の深刈りを行った。Fig.8に示したように「千葉県立柏の葉公園」の「冒険のトリデ」では肩掛け型刈払機を使用し、「千葉県立手賀沼親水広場」ではソードカッターと呼ばれる装

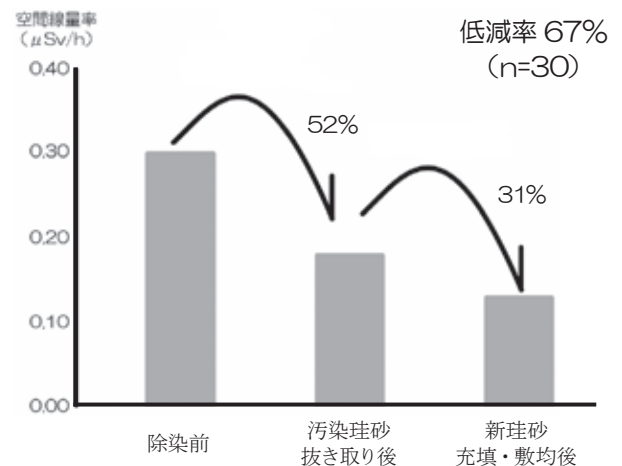
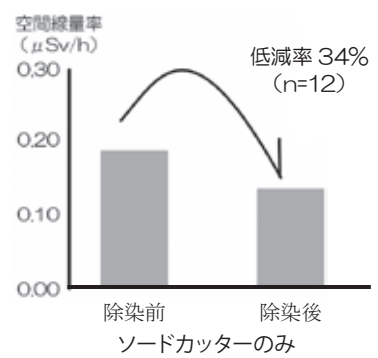
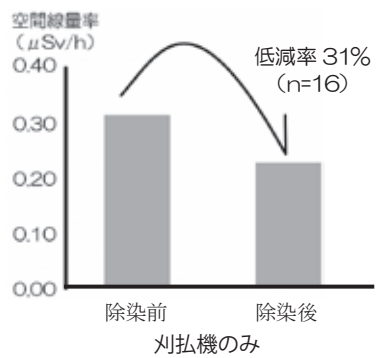


Fig.7 庭球場における汚染珪砂の抜き取りと新珪砂の充填によって得られた除染効果

置による芝の深刈りが行われた。しかし、それぞれの手法で得られた空間線量率の低減率は、前者が31%($n=16$)、後者では34%($n=12$)と大きな効果は得られなかった。これらの結果を検証したところ、地点間における空間線量率の低減率の変動係数が前者で48%、後者で27%であり、深刈りの深さむらによって、除染効果にばらつきが生じたことが原因の1



空間線量率の減少を確認しながら、
必要に応じて刈払機でさらに深刈り

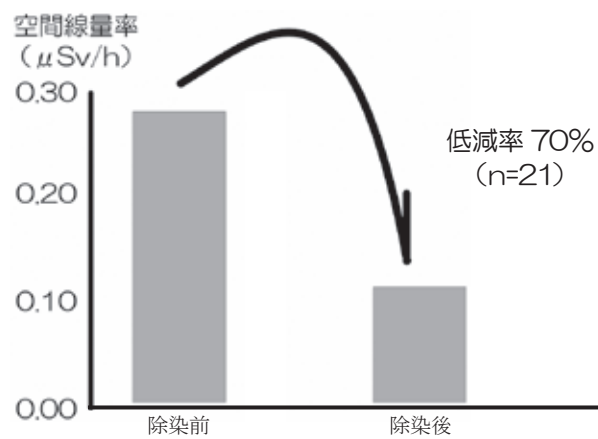


Fig.8 芝の深刈りによる除染効果

つと考えられた。この知見を教訓として、「千葉県立柏の葉公園」の「野球場」では芝の深刈り作業中に随時、空間線量率の測定を行い低減の有無を確認しながら作業を進め、必要に応じて肩掛け型刈払機で更に部分的な深刈りを行った結果、低減率は70%(n=21)となり、より大きな除染効果が得られた。よって、芝の深刈りを深さむらが生じないようにサッチを取り除けば、一定の除染効果が期待されることが示された。ただし、地表面の凹凸が少ない平坦地であれば、芝の深刈りを均一にしやすい環境であるが、凹凸の多い芝地での深刈りではより注意深く作業をする必要がある。また、深刈りの深さは浅ければサッチを十分に取除けず大きな除染効果を期待することはできないが、逆に深くし過ぎた場合は、芝が再生不能となることが危惧されるため深刈り深さの設計値は、慎重に決定すべきである。

4. 汚染土壌等の除染廃棄物の一時保管

除染作業で発生した汚染土壌や除染廃棄物については、全体を流出防止策としてフレコンバッグ等に封入し、除染を実施した施設内の一区画に掘削した穴の中に埋設（仮置き保管）した。埋設穴の大きさについては、除染対象施設で発生する汚染土壌や除染廃棄物を事前に見積もった規模に設計されており、穴内にも遮水シートを敷き流出防止策を講じた。使用した遮水シートは厚さ1.5 mm以上の軟質塩化ビニルシートで耐久性・耐候性・遮水・防水性・耐寒性を有し、日本遮水工協会の認定品である。埋設作業後は、転圧機により十分に締め固め、放射性物質に汚染されていない土砂により30～45 cm(施設によって幅がある)の覆土を行い、除染廃棄物由来の放射線を遮へいした。覆土による遮へい効果については、30 cm厚さで空間線量率を40分の1程度まで遮へいされることが報告されている³⁷⁾。

5. 結言

本報では「千葉県放射性物質除染実施プラン」¹³⁾で除染対象と指定された県管理施設のうちで特に子どもの利用の多い施設を中心に、千葉県が実施した除染事例の一部を紹介するとともに除染手法別に得られた効果について説明してきた。除染手法によって、作業量、作業に必要な人員、除染廃棄物の発生の有無、一時保管場の確保、コストなど作業環境が大きく異なるため、事前に除染対象施設の空間線量率の目標値を勘案し、除染手法・面積等を効果的に設計することが除染作業を効率的に進める上で重要である。著者らが検証した除染手法は以下の7つである。1) 汚染土壌表面の覆土による遮へい、2) 汚染土壌の切削除去、3) 汚染土壌の切削除去と覆土による遮へいの組み合わせ、4) 砂場における汚染砂の入れ替え、5) 舗装道路の高圧洗浄、6) 人工芝庭球場の汚染珪砂の入れ替え、7) 芝の深刈り。それぞれの除染手法で得られた空間線量率の低減率は、57%、64%（日本庭園では31%）、

75%、65～74%、33%、67%、70%であり、すべての施設で除染対策目標値の0.23 $\mu\text{Sv/h}$ を下回り除染の成果が得られた。

しかし新聞などで報道³⁸⁾されたが、千葉県松戸市が汚染土壌の削り取りなどにより除染作業を実施した公園312か所のうち28か所で再び0.23 $\mu\text{Sv/h}$ (大地からの線量率0.04 $\mu\text{Sv/h}$ を含む)を上回る空間線量率(最大で0.41 $\mu\text{Sv/h}$)が計測され再度除染を行った事例がある。再び空間線量率が上昇した原因として、ウェザリング効果による放射性物質の移動や汚染土壌を覆土した土壌の浸食等が考えられる。除染完了後においても空間線量率の定期的なモニタリングを行い、新たに措置が必要となった場合には、適切に対応していくことが行政機関には求められる。また、作業中に一時的に保管している除染廃棄物の直近で空間線量率が高くなる傾向が確認されたことから、人に影響を与えないように除染廃棄物を生活空間から遠ざけたり、遮へい等の放射線防護策を講じることが必要である。

除染によって得られる空間線量率の低減は、測定箇所直下の除染が有効であるという報告³⁹⁾がある。しかし、ガンマ線による空間線量率は測定地点周辺のみでなく、除染を行っていない周りのかなり広い範囲(除染領域外)からの影響を受けていることが考えられる。実際に、ガンマ線は空气中を百メートル以上も飛来することが知られており、地上から高さ1 mにサーバイメーターを設置すると、数十メートル四方の地面から飛んできたガンマ線も検知される⁴⁰⁾。そのため、除染作業が完了した空間での線量率においても周辺環境に存在するガンマ線放出核種からのガンマ線の寄与を無視できない。岩元ら⁴¹⁾は、半球形状モデルを用いた3次元体系のモンテカルロ輸送シミュレーションコードPHITSにより、表面が一様に汚染された土壌(^{137}Cs が1,000 kBq/m^2)の除染半径等を変化させた場合の地上における空間線量率を計算した。除染効果として10%の ^{137}Cs が残存していることを想定し、除染半径を100 mとした半球中心での線量(地上から高さ1 m)は除染前の約5分の1になると予想した。また、除染領域境界内の半径が200 m以内の敷地を対象とした場合、敷地境界内のほぼ全域にわたって一様な線量の低減率を得るには、除染敷地領域からさらに外側約30%大きな範囲まで除染する必要があると述べている。現実的に、除染領域外からの空間線量率への寄与を完全に取り除くことは困難を伴う。著者らが実施した調査においても、測定地点の直下ならびにその数十メートル周辺の範囲を中心に除染が行われたため、除染領域外の空間線量率の寄与を完全に取り除けていないが、除染対策目標の0.23 $\mu\text{Sv/h}$ をすべての除染対象施設で下回ったことから、千葉県が実施した除染の目標は達せられた。今後、除染作業が予定されている場所において効率的な除染作業推進のための情報や資料として本報の内容が活用されれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) K. Nagaoka, S. Sato, S. Araki, Y. Ohta, Y. Ikeuchi: Changes of radionuclides in the environment in Chiba, Japan, after the Fukushima Nuclear Power Plant accident. *Health Phys.*, **102**, 437-442 (2012)
- 2) H. Amano, M. Akiyama, B. Chunlei, T. Kawamura, T. Kishimoto, T. Kuroda, T. Muroi, T. Odaira, Y. Ohta, K. Takeda, Y. Watanabe, T. Morimoto: Radiation measurements in the Chiba Metropolitan Area and radiological aspects of fallout from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants accident. *J. Environ. Radioactiv.*, **111**, 42-52 (2012)
- 3) 独立行政法人日本原子力研究開発機構：広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査報告書 (2012)
- 4) 独立行政法人日本原子力研究開発機構：平成 24 年度放射能測定調査委託事業「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 (2013)
- 5) 独立行政法人日本原子力研究開発機構：平成 23 年度放射能測定調査委託事業「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 (2013)
- 6) 文部科学省：東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の分布状況等に関する調査研究結果 (2012)
- 7) 独立行政法人日本原子力研究開発機構：新たに開発した航空機モニタリング解析手法を用いて福島第一原子力発電所事故により放出されたヨウ素 131 の地表面沈着量を導出－米国エネルギー省が事故後初期に測定した結果を日米共同研究により解析－プレス発表 (2013)
- 8) 「放射線量等分布マップ拡大サイト」(<http://ramap.jaea.go.jp/map/>)、2014 年 7 月閲覧
- 9) 環境省：放射性物質汚染対処特措法に基づく汚染廃棄物対策地域、除染特別地域及び汚染状況重点調査地域の指定について (お知らせ) (2011)
- 10) 「全国都道府県市区町村別面積調」(<http://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/MENCHO-title.htm>)、2014 年 7 月閲覧
- 11) 環境省：追加被ばく線量年間 1 ミリシーベルトの考え方。平成 23 年 10 月 10 日災害廃棄物安全 評価検討会・環境回復検討会第 1 回合同検討会資料 (2011)
- 12) 環境省：除染関係ガイドライン、第 1 編汚染状況重点調査地域内における環境の汚染の状況の調査測定方法のガイドライン (2011)
- 13) 千葉県災害復旧・復興本部：千葉県放射性物質除染実施プラン (2012)
- 14) 千葉県災害復旧・復興本部：千葉県放射性物質除染実施プランの実施結果について (2013)
- 15) 市川 有二郎、井上 智博、石井 栄勇、内藤 季和、高橋 良彦、矢沢 裕：千葉県立柏の葉公園内のアスレチックスペース「冒険のトリデ」における除染効果の検証。 *RADIOISOTOPES*, **63**, 13-30 (2014)
- 16) 市川 有二郎、井上 智博、内藤 季和、高橋 良彦：千葉県立柏の葉公園内の「日本庭園」における除染効果の検証。 *RADIOISOTOPES*, **63**, 45-55 (2014)
- 17) 市川 有二郎、井上 智博、内藤 季和、高橋 良彦：千葉県立柏の葉公園内の庭球場における除染効果の検証。環境放射能除染学会誌、**1**, 129-137 (2013)
- 18) 市川 有二郎、井上 智博、内藤 季和、高橋 良彦：千葉県立柏の葉公園内の舗装道路で実施した高圧洗浄の除染効果の検証。環境放射能除染学会誌、**1**, 205-211 (2013)
- 19) 井上 智博、市川 有二郎、内藤 季和、高橋 良彦：芝地における放射性セシウムの蓄積状況と経時変化。 *RADIOISOTOPES*, 印刷中
- 20) 市川 有二郎、井上 智博、内藤 季和、高橋 良彦：千葉県営住宅敷地内の児童公園における除染効果の検証。 *RADIOISOTOPES*, **63**, 31-43 (2014)
- 21) 市川 有二郎、井上 智博、木村 賢文、内藤 季和、高橋 良彦、矢沢 裕：千葉県立手賀沼親水広場で実施した除染効果の検証。環境放射能除染学会誌、**2**, 19-27 (2014)
- 22) 塚田 祥文、鳥山 和伸、山口 紀子、武田 晃、中尾 淳、原田 久富美、高橋 知之、山上 睦、小林 大輔、吉田 聡、杉山 英男、柴田 尚：土壌－作物系における放射性核種の挙動。日本土壌肥科学雑誌、**82**, 408-418 (2011)
- 23) 山口 紀子、高田 祐介、林 健太郎、石川 寛、倉俣 正人、江口 定夫、吉川 省子、坂口 敦、朝田 景、和穎 朗太、牧野 和之、赤羽 幾子、平舘 俊太郎：土壌－植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因。農業環境技術研究所報告、**31**, 75-129 (2012)
- 24) Y. A. Ivanov, N. Lewyckyj, S. E. Levchuk, B. S. Prister, S. K. Firsakova, N. P. Arkhipov, A. N. Arkhipov, S. V. Kruglov, R. M. Alexakhin, J. Sandalls, S. Askbrant: Migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr from Chernobyl fallout in Ukrainian, Belarusian and Russian soils. *J. Environ. Radioactiv.*, **35**, 1-21 (1997)
- 25) 塩沢 昌：水田の放射能汚染と稲への移行。農業農村工学会誌、**80**, 539-542 (2012)
- 26) 塩沢昌、田野井 慶太郎、根本 圭介、吉田 修一郎、西田 和弘、橋本 健、桜井 健太、中西 友子、二瓶 直登、

- 小野 勇治：福島県の水田土壌における放射性セシウムの深度別濃度と移流速度。RADIOISOTOPES, **60**, 323-328 (2011)
- 27) 島田 洋子、米田 稔、松井 康人、佐藤 昌哉：市街地における放射能土壌汚染による空間線量の今後の変化予測。環境放射能除染研究発表会要旨集、**1**, 54 (2012)
- 28) H. Kato, Y. Onda, M. Teramaga: Depth distribution of ^{137}Cs , ^{134}Cs , and ^{131}I in soil profile after Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident. *J. Environ. Radioactiv.*, **111**, 59-64 (2012)
- 29) J. Koarashi, M. Atarashi-Andoh, T. Matsunaga, T. Sato, S. Nagao, H. Nagai: Factors affecting vertical distribution of Fukushima accident-derived radiocesium in soil under different land-use conditions. *Sci. Total Environ.*, **431**, 392-401 (2012)
- 30) T. Matsunaga, J. Koarashi, M. Atarashi-Andoh, S. Nagao, T. Sato, H. Nagai: Comparison of the vertical distributions of Fukushima nuclear accident radiocesium in soil before and after the first rainy season, with physicochemical and mineralogical interpretations. *Sci. Total Environ.*, **447**, 301-314 (2013)
- 31) M. Isaksson, B. Erlandsson: Experimental determination of the vertical and horizontal distribution of ^{137}Cs in the ground. *J. Environ. Radioactiv.*, **27**, 141-160 (1995)
- 32) 齊藤 敬：土壌における放射性物質の動態と計測。ぶんせき、**2011**, 393-396 (2011)
- 33) 四野宮 貴幸、宮後 法博、高島 良生：放射線モニタリングシステム「ラジプローブ」。月刊資源環境対策、**48**, 58-61 (2012)
- 34) 環境省：放射能濃度等測定法ガイドライン、2011年12月第1版 (2011)
- 35) 津崎 昌東、佐藤 歩、長岡 亨、若松 孝志、吉原 利一：福島第一原子力発電所事故後の千葉県北西部における土地利用形態別空間線量率の特徴と時間変化。環境放射能除染学会誌、**1**, 197-204 (2013)
- 36) 水庭 千鶴子、茂木 道教、赤堀 勉、近藤 三雄：放射性物質で汚染された家庭の芝生の除染について－造園芝生除染・更新工法の検証の試み－。芝草研究、**40**, 43-46 (2011)
- 37) 環境省：福島県内の災害廃棄物の処理における一時保管。平成23年7月28日 (2011)
- 38) 産経新聞(千葉版)：松戸の公園28か所で除染後再び基準越え。2013年1月17日、朝刊、23面 (2013)
- 39) 田川 明広：平面除染による空間放射線量率の評価－公園における除染試験結果－。日本原子力学会論文誌、**11**, 111-117 (2012)
- 40) 田崎 晴明：「やつかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識」、朝日出版社 (2012)
- 41) 岩元 洋介、佐藤 大樹、遠藤 章、坂本 幸夫、呉田 昌俊、久語 輝彦：汚染土壌の除染領域と線量低減効果の検証。JAEA-Technology, **2011-26** (2011)

2014年7月9日受付

2014年8月4日受理

和 文 要 約

本報では、これまで著者らが報告してきた既報に基づいて、千葉県が実施した除染の事例を一部紹介するとともに除染手法別に得られた効果について概説した。除染手法別の効果については、除染前後で得られた空間線量率から低減率を算出して評価した(低減率はバックグラウンド値を差し引いて算出)。除染効果の検証を行った除染手法は以下の7つである。1) 汚染土壌表面の覆土による遮へい、2) 汚染土壌の切削除去、3) 汚染土壌の切削除去と覆土による遮へいの組み合わせ、4) 砂場における汚染砂の入れ替え、5) 舗装道路の高圧洗浄、6) 人工芝庭球場の汚染珪砂の入れ替え、7) 芝の深刈り。それぞれの除染手法で得られた空間線量率の低減率は、57%、64%(日本庭園では31%)、75%、65～74%、33%、67%、70%であった。放射性物質はウェザリング効果により環境媒体中を移動することから、空間放射線量率は増減する。そのため、除染が完了したとしても、空間線量率のモニタリングを継続的に行い、新たに措置が必要となった場合には、適切に対応していくことが重要である。

