



汚染土壌の除染領域と線量低減効果の検討

Study on Soil Decontamination and Dose Rate Reduction Effect

岩元 洋介 佐藤 大樹 遠藤 章 坂本 幸夫 呉田 昌俊 久語 輝彦

Yosuke IWAMOTO, Daiki SATOH, Akira ENDO, Yukio SAKAMOTO Masatoshi KURETA and Teruhiko KUGO

> 原子力基礎工学研究部門 Nuclear Science and Engineering Directorate

September 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

汚染土壌の除染領域と線量低減効果の検討

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門

岩元 洋介+1、佐藤 大樹+1、遠藤 章+1、坂本 幸夫+2、呉田 昌俊+2、久語 輝彦+2

(2011年7月20日 受理)

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による環境汚染の回復対策の一環 として、汚染土壌の除染領域と線量低減効果の検討を行うために、長時間人が滞在する住居、 学校等に相当するいくつかの代表的な広さの土地を対象に、粒子・重イオン輸送計算コード PHITS を用いて汚染土壌の除染領域と線量率低減比との関係を詳細に計算した。また、この計 算結果から任意の除染率、除染半径に対する中心位置での線量率低減比を評価する簡易式を提 案した。Cs-137 により汚染された土壌の除染係数 DF=10(除染率 90%)の場合、宅地中心での線 量率は、宅地領域を含み中心から半径 100m までの領域を除染すれば約5分の1に低下するこ とがわかった。また、敷地境界の半径が200m 以内の敷地を対象とすれば、敷地境界内のほぼ 全域にわたって一様な線量率低減比を得るには、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ことがわかった。

原子力科学研究所(駐在):〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+1 環境・放射線科学ユニット +2 核工学・炉工学ユニット

Study on Soil Decontamination and Dose Rate Reduction Effect

Yosuke IWAMOTO⁺¹, Daiki SATOH⁺¹, Akira ENDO⁺¹, Yukio SAKAMOTO⁺², Masatoshi KURETA⁺² and Teruhiko KUGO⁺²

> Nuclear Science and Engineering Directorate, Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

> > (Received July 20, 2011)

The present report discusses the effect of dose rate reduction by soil decontamination in order to make a remediation strategy for contaminated environment by radionuclides discharged by the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. The relation between area of soil decontamination and dose rate reduction for lands considered to be typical residences, public facilities and schools has been analyzed using the particle and heavy ion transport code PHITS, and an analytical model to assess the dose reduction rate with a simple equation was also suggested from the calculation results of PHITS. In the case of DF (Decontamination Factor) = 10 and decontamination radius = 100 m for the soil uniformly contaminated by Cs-137, the dose rate at the center of decontamination area is decreased by a factor of about five compared with the dose rate before decontamination. For the site which has its radius less than 200 m, in order to achieve the uniform dose rate reduction all over the site, it is necessary to expand the decontamination radius by about 30% of the site radius.

Keywords: Soil Decontamination, Dose Rate Reduction Effect, PHITS

⁺¹ Division of Environment and Radiation Sciences

⁺² Division of Nuclear Data and Reactor Engineering

目 次

1.	緒言	1
2.	計算手法	2
3.	計算結果	5
	3.1 本計算	手法の検証5
	3.2 除染領	域と線量率の変化6
	3.2.1	. 線量率の空間分布6
	3.2.2	2 宅地中心における線量率の低減 7
	3.2.3	3 宅地敷地境界内における線量率の低減12
	3.3 覆土に	よる線量率の低減15
	3.4 Cs-134	に対する評価結果の適用15
4.	結言	17
謝	辞	18
参	考文献	18

Contents

1.	Introduction	1
2.	Calculation Method	2
3.	Calculated Results	5
	3.1 Validity of Calculated Results	5
	3.2 Decontamination Area and Change of Dose Rate	6
	3.2.1 Spatial Distribution of Dose Rate	6
	3.2.2 Dose Rate Reduction at Center of Residential Space	7
	3.2.3 Dose Rate Reduction inside Residential Space 1	2
	3.3 Dose Rate Reduction by Covering with a Shielding Layer of Soil 1	5
	3.4 Application of the Present Evaluation to Cs-134 1	5
4.	Concluding Remarks 1	7
Ac	knowledgement 1	8
Re	ferences 1	8

表リスト

表 2-1	計算に用いた空気と土壌の密度と組成	2
表 2-2	単一エネルギー毎の光子のフルエンス率に対する 1cm 線量当量率換算係数と	
	空気カーマ率換算係数	3
表 2-3	除染半径	4
表 3-1	Cs-137により一様に汚染した土壌表面から高さ1mの空気カーマ率の比較	5
表 3-2	PHITS計算による宅地中心における DF=10,20及び完全除染の場合の 1cm線量当量率	と
	線量率低減比	8
表 3-3	式(3-2)を用いた除染半径に対する完全除染時の線量率低減比の PHITS 計算結果の	
	フィッティングパラメータ	11

図リスト

図 2-1	PHITS コードにおける計算体系	4
図 3-1	線量率の空間分布	6
図 3-2	除染半径に対する宅地中心での線量率低減比	9
図 3-3	完全除染 (DF=∞)の場合の、宅地中心におけるγ線最量率換算係数で重みづけされ	た
	エネルギースペクトル	10
図 3-4	完全除染の場合の全線量率低減比における直接成分と散乱成分の寄与	10
図 3-5	除染半径 20m における DF=10 と完全除染の場合の宅地中心からの距離に対する	
	線量率低減比分布	12
図 3-6	除染半径 50m における DF=10 と完全除染の場合の宅地中心からの距離に対する	
	線量率低減比分布	13
図 3-7	除染半径 100m における DF=10 と完全除染の場合の宅地中心からの距離に対する	
	線量率低減比分布	13
図 3-8	除染半径 200m における DF=10 と完全除染の場合の宅地中心からの距離に対する	
	線量率低減比分布	14
図 3-9	覆土の厚さに対する線量率低減比	15

This is a blank page.

	Error			
p.3	エネルギー(MeV)	1cm線量当量率線量換算係数 H*(10) (μSv/h) / (photon/cm ² /sec)	空気カーマ率換算係数 Ka (µGy/h) / (photon/cm ² /sec)	
表 2-2	1.00F-02	1.60E-03	1.95E-02	
	1.50E-02	3.38E-03	8.89E-03	
	2.00E-02	3.35E-03	4.44F-03	
	3.00E-02	2.61E-03	2.12E-03	
	4 00E-02	2 14F-03	1.38E-03	
	5.00E-02	1.91E-03	1 12E-03	
	6.00E-02	1.87E-03	1.08E-03	
	8.00E-02	2.05E-03	1.22E-03	
	1.00E-02	2.052-00	1 755-03	
	1.50E-01	2.76E-03	2.62E-03	
	2.00E.01	5.40E.02	4.02E-03	
	2.00E-01	5.40E-03	4.02E-03	
	3.00E-01	7.52E-03	5.89E-03	
	4.00E-01	9.56E-03	7.69E-03	
	5.00E-01	1.15E-02	9.40E-03	
	6.00E-01	1.41E-02	1.18E-02	
	8.00E-01	1./2E-02	1.4/E-02	
	1.00E+00	2.18E-02	1.91E-02	
	1.50E+00	2.79E-02	2.45E-02	
	2.00E+00	3.55E-02	3.13E-02	
	3.00E+00	4.41E-02	3.94E-02	
	4.00E+00	5.20E-02	4.66E-02	
	5.00E+00	5.96E-02	5.35E-02	
	6.00E+00	7.06E-02	6.35E-02	
	8.00E+00	8.50E-02	7.69E-02	
		Correct		
	エネルギー(MeV) 1cm線量当量率線量換算係数 H ¹ (1 (µSv/h) / (photon/cm ² /sec)	0) 空気カーマ率換算係数 Ka (μGy/h) / (photon/cm ² /sec)	
	1.00E-02	2.20E-04	2.74E-02	
	1.50E-02	2.99E-03	1.16E-02	
	2.00E-02	3.78E-03	6.23E-03	
	3.00E-02	2.92E-03	2.66E-03	
	4.00E-02	<u>2.30E-03</u>	<u>1.58E-03</u>	
	5.00E-02	<u>1.98E-03</u>	<u>1.18E-03</u>	
	6.00E-02	<u>1.84E-03</u>	1.05E-03	
	8.00E-02	<u>1.91E-03</u>	<u>1.11E-03</u>	
	1.00E-01	<u>2.20E-03</u>	<u>1.34E-03</u>	
	1.50E-01	<u>3.20E-03</u>	2.16E-03	
	2.00E-01	<u>4.32E-03</u> 6.48E-03	<u>3.06E-03</u>	
	3.00E-01	8.57E-03	<u>4.37E-03</u> 6.80E-03	
	5 00E-01	1.05E-02	8.57E-03	
	6.00E-01	1.24F-02	1.02E-02	
	8.00E-01	1.58E-02	1.33E-02	
	1.00E+00	1.87E-02	1.61E-02	
	1.50E+00	2.48E-02	2.20E-02	
	2.00E+00	3.10E-02	2.70E-02	
	3.00E+00	4.00E-02	3.56E-02	
	4.00E+00	4.82E-02	4.32E-02	
	5.00E+00	5.58E-02	5.00E-02	
	6.00E+00	6.34E-02	5.69E-02	
	8.00E+00	<u>7.78E-02</u>	7.02E-02	

【JAEA-Technology 2011-026 表 2-2 の訂正の内容について】

本研究では、以下の手順により線量計算を行っている。

・PHITS コードによる放射線輸送計算で、光子フルエンスを計算。

・計算したフルエンスに線量換算係数(1cm線量当量率換算係数、空気カーマ率換算係数) を乗じて、1cm線量当量率及び空気カーマ率を導出。

⇒ 1cm線量当量率またはカーマ率 = 光子フルエンス × 換算係数

ここで、下図に示す通り、換算係数は文献「ICRP Publication 74 "外部放射線に対する 放射線防護に用いるための換算係数",社団法人 日本アイソトープ協会」において、光子エ ネルギーに応じて与えられている。



例えば、光子エネルギーが e1 から e2 の範囲のフルエンスが PHITS により計算された場合、この値に乗じる換算係数は文献で与えられている e1 及び e2 に対応する換算係数 b1 及び b2 の内挿値 b1'とした。

JAEA-Technology 2011-026 の表 2-2 (訂正前) では、文献で与えられている各エネルギ ーに対応する換算係数に、内挿値(上の図で、b1'、b2'、b3'・・・)を記していた。

エネルギー (MeV)	換算係数
e1	b1' (b1 と b2 の内挿値)
e2	b2' (b2 と b3 の内挿値)
e3	b3' (b3 と b4 の内挿値)

しかし、以下の通り、文献で与えられている各エネルギーに対応する換算係数(b1、b2、 b3・・・)が正しい値であるため、この訂正を行った。

エネルギー (MeV)	換算係数
e1	b1
e2	b2
e3	b3

今回の訂正は、<u>表 2-2 におけるデータの転載で誤りが生じたことに起因するものであり、</u> 他の線量率の数値は正しいプロセス、換算係数を用いて計算された結果である。よって、 他の訂正は必要としない。

1. 緒言

2011 年 3 月 11 日に太平洋三陸沖で発生したマグニチュード 9.0 の東北地方太平洋沖地震と、 地震により発生した津波により、東京電力福島第一原子力発電所(福島第一原発)が被災した ¹⁾。これにより、原子炉及び使用済み燃料プールの冷却機能の維持に必要な全ての交流電源を 失った施設では、炉心溶融、原子炉圧力容器の損傷、原子炉建屋での水素爆発が生じ、大量の 放射性物質が環境中に放出された。これらの一部は、広範囲にわたって土壌の表面に沈着し、 地表面近傍における空間線量を上昇させている。

国の原子力災害対策本部長は、事故発生以降、事態の進展に応じて、避難区域、屋内退避区 域を設定したほか、環境モニタリングのデータに基づき、避難区域以外でも放射性物質が高い レベルで蓄積されてきている場所については、計画的避難区域として、住民の避難を求めるに 至っている。そのため、今後、原子炉の状況が安定化し、放射性物質の環境への放出が制御さ れた後に、避難住民の居住地域における生活環境を回復するためには、土壌に沈着した放射性 物質に起因する被ばく線量を低減する必要がある。

土壌汚染に起因する被ばくには、①地表面に沈着した放射性物質による外部被ばく、②地表 面から再浮遊した放射性物質の吸入あるいは経口摂取による内部被ばく、③農作物、家畜等が 放射性物質を取り込み、その食物連鎖を介した内部被ばくが考えられる。このうち、②の再浮 遊による内部被ばくの寄与は一般的に小さく、また、③の食物連鎖を介した内部被ばくは、農 作物等に対する放射線モニタリングを実施し、出荷や摂取を適切に管理することにより防護が 可能である。そのため、①の地表面に沈着した放射性物質による外部被ばくが、今後の住民の 被ばくに最も大きく寄与することが予想される。この外部被ばく線量を低減するためには、被 ばく源となる汚染土壌に対し、除去、あるいは遮へい等の対策を施す必要がある。これらの対 策を効果的に行うには、汚染土壌の除染領域や除染率、覆土の厚さが、線量の低減に及ぼす効 果を明らかにしておくことが必要である。

そこで本研究では、汚染土壌に起因する外部被ばくの低減を図るための除染効果の予測を目 的として、汚染土壌の除染領域と宅地領域での線量率低減比との関係を計算によって検討した。 本検討では、空気中や土壌中の放射線の吸収や散乱現象を高精度かつ詳細に計算できる3次元 粒子・重イオン輸送計算コード PHITS²⁾を用いて、土壌の除去範囲を検討するための基本的な 幾何形状モデルを対象として、除染半径、除染率等を系統的に変化させた場合の地上における 線量率を計算し、除染効果を整理した。

2. 計算手法

表面が一様に汚染された土壌を対象に、除染領域を拡大することによる線量率低減効果について、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 を用いて解析を行った。 計算体系を図 2-1 に示す。計算体系は、深さ 1m の土壌、半径 800m、高さ 600m の空気層から 成り、土壌表面に Cs-137(γ線 662keV、放出率 85.1%)が、1,000(kBq/m²)で一様に分布すると仮 定した。計算に用いた空気と土壌の組成と密度を表 2-1 に示す³⁾。空気層の半径及び高さは Cs-137 のγ線の空気中平均自由行程(108m)の約 5 倍以上に相当し、これは空気及び土壌による 散乱、吸収を考慮した無限の一様汚染を模擬する条件を満たしている。PHITS によるγ線の輸 送計算の断面積データには、評価済み核データ ENDF/B-VI.8 を処理した mcplib04(γ線)⁴⁾を用い た。

線量率を評価するための領域は、人の体幹部に相当する領域として、地表面から高さ 1m を 中心とする円柱領域(半径 0.5m、高さ 1m)とした。また、径方向に関する評価位置として、体系 中心位置(宅地または学校等公共施設の中心位置)の他、中心から半径 400m 以内から数地点 の位置を選んだ。各評価位置は、中心位置からの距離として、半径 10m 及び 20m は、住宅及 び宅地敷地境界を、半径 50m、100m 及び 200m は、公共施設、学校等の敷地境界を想定したも のである。評価する線量率を、放射線測定器を用いて測定される 1cm 線量当量率(周辺線量当 量率)、空気カーマ率とし、PHITS により計算された各評価位置における γ線のフルエンスに、 表 2-2 に示す 1cm 線量当量率換算係数⁵⁾、空気カーマ率換算係数⁵⁾を乗じて求めた。

空気	密度 g/cm ³	土壌	密度 g/cm ³
	1.20E-03		1.60E+00
組成	重量比	組成	重量比
H-1	6.40E-04	H-1	2.10E-02
C-12	1.40E-04	C-12	1.60E-02
N-14	7.51E-01	O-16	5.77E-01
O-16	2.36E-01	AI-27	5.00E-02
Ar-40	1.28E-02	Si-28	2.71E-01
		K-39	1.30E-02
		Ca-40	4.10E-02
		Fe-56	1.10E-02

表 2-1 計算に用いた空気と土壌の密度と組成

表 2-2	単一エネルギー毎の光子のフルエンス率に対する	1cm線量当量率換算係数5	⁵⁾ と
	空気カーマ率換算係数 ⁵⁾		

エネルギー(MeV)	1cm 線量当量率換算係数 H*(10)	空気カーマ率換算係数 Ka
	(µSv/h) / (photon/cm²/sec)	(µGy/h) / (photon/cm²/sec)
1.00E-02	1.60E-03	1.95E-02
1.50E-02	3.38E-03	8.89E-03
2.00E-02	3.35E-03	4.44E-03
3.00E-02	2.61E-03	2.12E-03
4.00E-02	2.14E-03	1.38E-03
5.00E-02	1.91E-03	1.12E-03
6.00E-02	1.87E-03	1.08E-03
8.00E-02	2.05E-03	1.22E-03
1.00E-01	2.70E-03	1.75E-03
1.50E-01	3.76E-03	2.62E-03
2.00E-01	5.40E-03	4.02E-03
3.00E-01	7.52E-03	5.89E-03
4.00E-01	9.56E-03	7.69E-03
5.00E-01	1.15E-02	9.40E-03
6.00E-01	1.41E-02	1.18E-02
8.00E-01	1.72E-02	1.47E-02
1.00E+00	2.18E-02	1.91E-02
1.50E+00	2.79E-02	2.45E-02
2.00E+00	3.55E-02	3.13E-02
3.00E+00	4.41E-02	3.94E-02
4.00E+00	5.20E-02	4.66E-02
5.00E+00	5.96E-02	5.35E-02
6.00E+00	7.06E-02	6.35E-02
8.00E+00	8.50E-02	7.69E-02



図 2-1 PHITS コードにおける計算体系

除染領域を体系中心から表 2-3 に示す 8 つの半径の領域まで順次拡大した場合の各評価位置 における線量率を評価した。また、除染領域においては、種々の除染係数 DF(Decontamination Factor)で除染した場合を考慮した。ここで DF とは、除染前後における対象表面の汚染濃度の 比である。本検討では、土壌表面の Cs-137 を完全に取り除いた場合(完全除染)、DF=10(除 染後に 10%の Cs-137 が残存している場合)、DF=20(除染後に 5%の Cs-137 が残存している場 合)の3 種類の条件を選定した。これらの除染の条件は、チェルノブイリ原子力発電所事故後 の環境復旧において、土壌の除去から実際に得られた結果⁷⁾(DF=4~10)を参考に選定した。 すなわち、DF=10 はチェルノブイリ事故の環境復旧において達成された値として、また、今後、 より高度な除染技術が開発された場合を想定し、その効果を評価するために DF=20 を選定した。 各評価位置において、除染しない場合の線量率に対し、各 DF による除染後の線量率の比を求 めた。この比を線量率低減比と定義する。この線量率低減比は、除染によって表面の線量率が どれくらい減少したかを示す係数 DRRF(Dose Rate Reduction Factor)の逆数に相当する。線源と して発生させた Cs-137 からの総γ線数は $1.0 \times 10^9 \sim 1.0 \times 10^{10}$ 個とし、評価する領域の統計精度 は 5%以下とした。

表 2-3 除染半径

3. 計算結果

3.1 本計算手法の検証

本計算手法の妥当性を検証するために、Cs-137 により一様に汚染した土壌表面から高さ 1m の空気カーマ率について、 γ 線ビルドアップ係数を用いる点減衰核積分コード QAD に基づく 簡易計算手法⁶⁾及び一次元 S_N輸送計算コードもしくはモンテカルロ輸送計算コードで得られた 他の文献値 ^{3,7,8)}と、本計算手法で計算した値を比較した。結果を表 3-1 に示す。

表 3-1 Cs-137 により一様に汚染した土壌表面から高さ 1m の空気カーマ率の比較

本計算	表面汚染密度あたりの空気カーマ率 (nGy/h) per (kBq/m ²)
詳細計算(PHITS) ¹⁾	2.55
簡易計算(QAD) ⁶⁾	3.66
文献值	
IAEA TECDOC-1162 ⁷⁾	2.37
EPA-402-R-93-081 ³⁾	2.45
ICRU Report 538)	2.53

表 3-1 に示すように、PHITS による計算値は文献値とほぼ一致することを確認した。QAD を 用いた簡易計算による計算結果は、PHITS による計算値及び 3 つの文献値に比べて、約 1.4 倍 高い値である。この原因として、以下の 2 点が挙げられる。

1) QAD では面線源の下側 2π方向に放出されるγ線の空気中の散乱を含む。

2) QAD に含まれるビルドアップ係数は、遮へい計算等において安全側の評価値を与えるよう、 実際の値より大きめな値が使用されている。 3.2 除染領域と線量率の変化

3.2.1 線量率の空間分布

除染をしない状態と、中心から半径 200m を完全除染した状態での 1cm 線量当量率の空間分 布を図 3-1 に示す。除染をしない場合は、半径 400mのほぼ全域にわたり、地表面付近の線量 率は 2~3 µ Sv/h である。これに対し、半径 200m を完全除染すると、除染領域境界の 200m 付 近で線量率は大きく変化し、中心の地表面付近では 0.1~0.5 µ Sv/h まで減少する。一方、高さ 300m 付近での線量率の変化は、地表面近傍における変化に比べて小さい。その理由は、半径 200m 以上に存在する線源からの寄与が相対的に大きいためである。また、その高さにおいて、 中心部の線量が低くなる理由は、半径 200m 以内の線源からの寄与がないためである。





3.2.2 宅地中心における線量率の低減

除染半径 R の領域が除染率 x%で除染された場合の中心位置での線量率 $H_{x\%}(R)$ は、下式に示すように、除染なしの場合の中心位置での線量率 H_0 と除染半径 R の領域が完全に除染された場合の中心位置での線量率 $H_{100\%}(R)$ の直線内挿で求まるとした。

$$H_{x\%}(R) = H_0 - (H_0 - H_{100\%}(R)) \times x \times 0.01$$
(3-1)

ここで、線量率 H_0 及び $H_{100\%}(R)$ について、PHITS による計算結果を用いることによって、除 染半径Rの領域が除染率x%で除染された場合の中心位置での線量率 $H_{x\%}(R)$ を評価した。式(3-1) により評価した線量率の、除染なしの場合の線量率に対する比により、線量率低減比を求めた。 表 3-2 に各除染率における除染半径に対する線量率及び線量率低減比を示す。完全除染の場合、 宅地中心での線量率は、除染領域(宅地領域を含む)が半径 100mの場合で約 10 分の 1 に、400m の場合で約 100 分の 1 以下に低下する。しかし、現実的な DF=10 の場合、宅地中心での線量率 は、除染領域が半径 100m の場合に約 5 分の 1 まで低下するが、半径 100m 以上は除染の効果 が低くなる。この除染の効果が低くなる原因として、除染領域における残存 Cs-137 からの寄与 及び除染領域外からの γ 線の空気中での散乱による寄与が考えられる。図 3-2 に、除染領域で 汚染物質が完全に除去された場合(完全除染)、5%の汚染物質が残存した場合(DF=20,除染率 95%)、10%の汚染物質が残存した場合(DF=10,除染率 90%)について、除染半径に対する宅 地中心における線量率低減比を図示した。

図 3-3 に、除染なしの場合と、完全除染の場合(DF=∞)で、除染半径を変えた場合の宅地中心 における γ線の線量率換算係数で重みづけされたエネルギースペクトルを示す。除染なしの場 合、Cs-137 から直接放出される 662keV の γ線が主であり、除染半径が大きくなるにつれて、 低エネルギー側の裾部に現れる空気による散乱(スカイシャイン)成分は相対的に増大する。図 3-4 に完全除染の場合における、除染半径に対する全線量率低減比、さらに低減比における直 接成分と散乱成分の寄与を示す。除染半径 50m 以内では、Cs-137 の直接成分の低減による寄与 が全線量率の低減比の 50%以上を占める。このため、直接成分の低減による効果により、全線 量率の低減比が除染半径 50m 以内で急激に低下する。一方、除染半径を広げるにつれて直接成 分である 662keV γ線の寄与が減少し、散乱成分である低エネルギー成分の寄与が支配的になる。 このため、除染半径を広げても、全線量率の低減比の低下は緩やかになる。

除染	完全除	染の時	除染係数 DF=20 の時		除染係数 DF=10 の時	
半径	線量率	線量率低減	線量率	線量率低	線量率	線量率低減
(m)	(µSv/h)	比	(µSv/h)	減比	(µSv/h)	比
0	3.08E+00	1.00E+00	3.08E+00	1.00E+00	3.08E+00	1.00E+00
10	1.60E+00	5.19E-01	1.67E+00	5.43E-01	1.74E+00	5.67E-01
20	1.09E+00	3.53E-01	1.18E+00	3.85E-01	1.28E+00	4.17E-01
50	6.82E-01	2.22E-01	8.02E-01	2.61E-01	9.22E-01	3.00E-01
80	4.54E-01	1.47E-01	5.85E-01	1.90E-01	7.16E-01	2.33E-01
100	3.41E-01	1.11E-01	4.77E-01	1.55E-01	6.14E-01	2.00E-01
150	2.01E-01	6.54E-02	3.45E-01	1.12E-01	4.89E-01	1.59E-01
200	1.18E-01	3.83E-02	2.66E-01	8.64E-02	4.14E-01	1.35E-01
400	1.78E-02	5.80E-03	1.71E-01	5.55E-02	3.24E-01	1.05E-01

表 3-2 PHITS 計算による宅地中心における DF=10,20 及び完全除染の場合の 1cm 線量当量率と 線量率低減比



図 3-2 除染半径に対する宅地中心での線量率低減比

除染範囲で汚染物質が完全に除去された場合(完全除染)、5%の汚染物質が残存した場合(DF=20)、10%の汚染物質が残存した場合(DF=10)をそれぞれ示す。 図中の点は PHITS による計算結果を示し、線は式(3-3)により導出された結果 を示す。



図 3-3 完全除染 (DF=∞)の場合の、宅地中心におけるγ線線量率換算係数 で重みづけされたエネルギースペクトル

(上から除染なし、除染半径 50,100,200,400m のスペクトルを示す。)



図 3-4 完全除染の場合の全線量率低減比における直接成分と散乱成分の寄与

上記の計算結果を一般的に適用可能とするために、まず、図 3-2 に示す除染率 100%、除染 半径 *R* に対する線量率低減比 *D*_{100%}(*R*)を以下の 3 つの指数項からなる式でフィッティングした。

$$D_{100\%}(R) = D_1 \exp\left(-\frac{R}{a_1}\right) + D_2 \exp\left(-\frac{R}{a_2}\right) + D_3 \exp\left(-\frac{R}{a_3}\right) - (3-2)$$

フィッティングの結果決定されたパラメータ D₁, D₂, D₃, a₁, a₂, a₃の数値データを表 3-3 に示す。

完全除染時の線量率低減比のフィッティング式と式(3-1)を用いると、除染率x%、除染半径Rに対する線量率低減比 $D_{x*}(R)$ は以下の式で表すことができる。

$$D_{x\%}(R) = \frac{H_{x\%}(R)}{H_{0}} = \frac{H_{0} - (H_{0} - H_{100\%}(R)) \times x \times 0.01}{H_{0}}$$
$$= 1 - \frac{H_{0} - H_{100\%}(R)}{H_{0}} \times x \times 0.01$$
$$= 1 - \left(1 - \frac{H_{100\%}(R)}{H_{0}}\right) \times x \times 0.01$$
$$= 1 - \left(1 - \frac{H_{100\%}(R)}{H_{0}}\right) \times x \times 0.01$$
$$= 1 - \left(1 - D_{100\%}(R)\right) \times x \times 0.01$$

フィッティングした線を図 3-2 に併せて示す。図に示すように、フィッティング式は、PHITS を用いて計算した値をほぼ再現している。したがって、この式を用いれば、任意の除染率、除 染半径に対して、中心位置での線量率低減比を簡単に評価することができる。

表 3-3 式(3-2)を用いた除染半径に対する完全除染時の線量率低減比の PHITS 計算結果のフィッティングパラメータ

	D ₁	D ₂	D ₃	a ₁	a ₂	a ₃
完全除染	0.552	0.234	0.217	6.75	46	110

3.2.3 宅地敷地境界内における線量率の低減

除染半径 20,50,100,200m の場合について、宅地中心からの距離に対する線量率低減比を図 3-5~3-8 に示す。いずれの除染半径の場合においても、中心付近における低減比は、ほぼ一定で あるが、除染領域境界付近になると、低減比が急激に上昇する。すなわち、除染後の宅地境界 付近での線量率の低減は、中心位置付近に対して小さい。その理由は、宅地中心からの距離が 離れるにつれて、除染領域外の地表面にある線源からの寄与が増加するためである。したがっ て、宅地や学校等の公共施設の敷地境界内のほぼ全域にわたって一様な線量率低減比を得るに は、敷地領域からさらに外側の当初除染半径に対して約 30%大きな範囲まで同様の除染率で除 染する必要がある。



図 3-5 除染半径 20m における DF=10 と完全除染の場合の宅地中心 からの距離に対する線量率低減比分布



図 3-7 除染半径 100m における DF=10 と完全除染の場合の宅地中心からの距離に対する線量率低減比分布



からの距離に対する線量率低減比分布

3.3 覆土による線量率の低減

除染のみでは十分に線量率の低減効果が期待できない場合、除染領域に遮へい等の対策を施 すことが考えられる。そこで、除染領域の地表面に土を被せること(覆土)による、地表面高 さ1mでの線量率の低減効果を計算した。図 3-9 に覆土の厚さと線量率低減比の関係を示す。



図 3-9 覆土の厚さに対する線量率低減比

この結果から、例えば 10cm の覆土により線量率は約 10 分の 1 に低減することが分かる。すなわち、除染と覆土を効果的に組み合わせることで、線量率の大幅な低減が可能となる。

3.4 Cs-134 に対する評価結果の適用

本検討は、福島第一原発周辺で採取された土壌試料のγ線スペクトル分析に基づき¹、主要 な核種で、かつ半減期が長く、今後の外部被ばく線量に最も寄与すると考えられる Cs-137(半減 期 30.1671 年)を対象に行った。一方、γ線スペクトル分析から、2011 年 6 月の時点で Cs-137 とほぼ同じオーダーの濃度で Cs-134(半減期 2.0648 年)も存在している。Cs-134 から放出される 主要なγ線は、605keV(放出率 97.6%)、796keV(85.5%)、569keV(15.4%)である。これらのγ線

¹ http://www.mext.go.jp/a_menu/saigaijohou/index.htm

の空気中平均自由行程は、Cs-137 の 662keV の γ 線と大きくは変わらない。そのため、Cs-137 に対して評価された、除染半径と線量率低減比の関係は、Cs-134 にもそのまま適用できると考えられる。

4. 結言

広範囲にわたって汚染された土壌の除染方法を立案するための指標を提供することを目的に、 最も基本的な幾何形状モデルを用いて、Cs-137 で汚染された土壌における除染領域に対する宅 地領域での線量率低減比について PHITS を用いて検討した。また、任意の除染率、除染半径 に対する中心位置での線量率低減比を簡便に評価する式を与えた。

一連の結果から、土壌の除染方法を立案するための指標として以下の結果を得た。 現実的な除染率である 90%(DF=10)で汚染土壌の線量を低下させた場合、

- ① 宅地中心での線量率は、除染領域(宅地領域を含む)の半径を100mとした場合約5分の1 に低下する。
- ② 敷地境界の半径が200m以内の敷地を対象とすれば、敷地境界内のほぼ全域にわたって一様な線量率低減比を得るには、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。
- ③ 10cm の覆土により線量率を、さらに約 10 分の1 に低減することができる。

謝 辞

PHITS コードを用いた計算に、原子力科学研究所に設置されている並列計算機 PRIMERGY BX900 システムを使用しました。並列計算機を管理されている JAEA システム計算科学セン ターに深く感謝いたします。

参考文献

- 1)原子力災害対策本部「原子力安全に関する IAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書」 平成23年6月
- 2)K. Niita, N. Matsuda, Y. Iwamoto, H. Iwase, T. Sato, H. Nakashima, Y. Sakamoto and L.Sihver : "PHITS : Particle and Heavy Ion Transport Code System, Version 2.23", JAEA-Data/Code2010-022(2010).
- K. F. Eckerman and J. C. Ryman, "External exposure to radionuclides in air, water, and soil", EPA-402-R-93-081 (1993).
- 4) M. C. White, "Photoatomic Data Library MCPLIB04: A New Photoatomic Library Based On Data From ENDF/B-VI Release 8," LANL internal memorandum X-5:MCW-02-111 and LA-UR-03-1019 (2002).
- 5)ICRP Publication 74 "外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数",社団法人 日本アイソトープ協会
- 6)Y. Sakamoto and Shun-ichi Tanaka,"QAD-CGGP2 and G33-GP2 : Revised Versions of QAD-CGGP and G33-GP", JAERI-M 90-110 (1990).
- 7)"Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency", IAEA-TECDOC-1162 (2000).
- 8)"Gamma ray spectrometry in the environment", ICRU report 53 (1994).
- 9)"Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation," IAEA, Vinna (2006).

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本ì	単位		
盔半里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	А		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光度	カンデラ	cd		

表2. 基本甲位を用	いて表されるSI組立単位	立の例		
和辛雪	SI 基本単位			
和立里	名称	記号		
面 積平	方メートル	m^2		
体 積立	法メートル	m^3		
速さ,速度メ	ートル毎秒	m/s		
加速度メ	ートル毎秒毎秒	m/s^2		
波 数每	メートル	m ⁻¹		
密度,質量密度キ	ログラム毎立方メートル	kg/m ³		
面積密度キ	ログラム毎平方メートル	kg/m ²		
比 体 積立	方メートル毎キログラム	m ³ /kg		
電流密度ア	ンペア毎平方メートル	A/m^2		
磁界の強さア	ンペア毎メートル	A/m		
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モ	ル毎立方メートル	mol/m ³		
質量濃度キ	ログラム毎立法メートル	kg/m ³		
輝 度力	ンデラ毎平方メートル	cd/m^2		
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1		
比透磁率(b)	数字の) 1	1		
(a) 量濃度 (amount concentra	ation)は臨床化学の分野では	物質濃度		
(substance concentration)	とも上げれる			

(substance concentration)ともよばれる。
 (b)これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
亚	5.37 v (b)	red	1 (b)	m/m
	() / / / / / / (b)	(c)	1 1 (b)	2/ 2
		sr II-	1	m m -1
同 仮 多		пг		S .
カ	ニュートン	N		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量 比エネルギー分与				
カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ²
線量当量,周辺線量当量,方向	2 × 2 2 (g)	C	T/la a	2 -2
性線量当量,個人線量当量		SV	J/Kg	ms
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹mol]
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや ュヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (d)かりたきさは同一である。したがって、温度度差やす数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量,エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ e ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語							
乗数	接頭語 記号		乗数	接頭語	記号		
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d		
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с		
10^{18}	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m		
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ		
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n		
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р		
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f		
10^{3}	+ 1	k	10 ⁻¹⁸	アト	а		
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z		
10^{1}	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	v		

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60s			
時	h	1h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	٥	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1t=10^{3}$ kg			

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣される奴値が実験的に待られるもの						
名称 記号				記号	SI 単位で表される数値	
電	子 >	ボル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダ	N	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da	
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m	

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

	名称		記号	SI 単位で表される数値
バ	-	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	ン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	CI単位しの粉ば的な間接け
ベ		N	В	対数量の定義に依存。
デ	ジベ	ル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$			
スチルブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ^{·1}			
(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 △ 」					

は対応関係を示すものである。

		表	(10.	SIに 尾	禹さないその他の単位の例
	名称			記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ	:	\sim	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	II.	N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートルネ	系カラ:	ット		1メートル系カラット=200 mg=2×10-4kg
ŀ			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています