

除去土壌フレコン中の放射性 Cs 濃度の推定

羽根 幸司^{1*}、新保 弘¹、平野 裕之²、井関 泰文³

¹ 鹿島建設株式会社土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

² 鹿島建設株式会社技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

³ 鹿島建設株式会社土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11)

Validation Study on the Measurement of Radio-Cesium Activity in Enclosed Flexible Bag

Koji HANE^{1*}, Hiroshi SHIMBO¹, Hiroyuki HIRANO², and Yasuhumi ISEKI³

¹Civil Engineering Design Division, KAJIMA Corporation

(5-30 Akasaka 6-chome, Minato-ku, Tokyo 107-8502, Japan)

²Kajima Technical Research Institute, KAJIMA Corporation

(19-1 Tobitakyu 2-chome, Chofu-shi, Tokyo 182-0036, Japan)

³Civil Engineering Management Division, KAJIMA Corporation

(5-11 Akasaka 6-chome, Minato-ku, Tokyo 107-8348, Japan)

Summary

This study discusses validity of estimated activity of the removed soil in flexible container bags. As for the estimation method using the equation defined by Ministry of Health, Labor and Welfare, it is confirmed that the equation is not necessarily appropriate for the use of accurate estimation of the soil activity, since the conversion factor, which converts surface dose rate [$\mu\text{Sv/h}$] to activity [Bq/kg], is considered to set by using the soil density that is higher than the actual one. Then, in order to study on the validity of estimated activity of heterogeneously-contaminated soil in flexible container bags, surface dose rates of both several simulated sample bags and randomly-selected bags arose from decontamination work, were measured. Then average activity of each bag was estimated by the conversion equation defined by the actual measurement data as well as by the equation by the Ministry. The estimated activity of each bag by the Ministry was always higher than analysis value by Germanium (Ge) detector, and the estimated activity by the conversion equation based on the measurement was nearly equal to the Ge analysis value.

Key Words: Radioactive contamination, Activity estimation, Contaminated soil, Radioactive cesium, Flexible container bag

1. はじめに

福島県内の除染作業に伴って発生する土壌や草木(以下、「除染土壌等」)は、フレキシブルコンテナバッグ(以下、「フレコン」)に収納され、2015年3月にその搬出作業が開始されたが、現時点においてはその大部分が各自治体の仮置場に保管されている。

除染土壌等の発生総量は環境省¹⁾によると1600万~2200万 m^3 と推計されており、それらの処理・処分や減容・再生利用等を効率的に進めるためには、フレコンごとの放射能濃度

を簡易に推定することが望まれる。その方法は簡便であることに加え、出来るだけ精度の高いものでなければならない。この点をふまえ、本報告ではまず、フレコンの濃度推定方法として作業従事者の放射線安全の観点から従来用いられている厚労省ガイドライン²⁾の式(以下、「厚労省の式」)に関する考察を加える。厚労省の式は、フレコン内部の除染土壌等の濃度が均質であるとの仮定に基づくものであるが、実際の現地のフレコンの内部は異なる性状と放射能濃度を有する除染廃棄物の混合物であるため、容器内に濃度差(不均質性)を有している。

*Corresponding author: TEL: 03-6229-6724, Fax: 03-5561-2156, E-mail: hane@kajima.com

そこで筆者らは、フレコンの濃度推定に際して不均質性の取扱い方について検討する必要があると考え、人為的な濃度のばらつきをもたせるよう人工的に作製したフレコン、および除染現場から無作為抽出した通常の除去土壌フレコンを準備して、これらの表面線量率の計測試験を実施した。さらに、得られた線量率を用いて別途検討した換算式により放射能濃度を推定した。

以下、これらの検討結果について報告する。

2. 厚労省の濃度推定式に関する考察

従来、フレコンに収納された除染土壌等の放射能濃度の推定にあたっては、厚労省による式1が用いられている。

$$D = \frac{A \times X}{C} \dots\dots\dots (式1)$$

ここに、

- D: 除去土壌等を収納したフレコンの放射能濃度推定値[Bq/kg]
- A: フレコン表面の放射線量率の測定値のうち最も大きい値 [μSv/h]
- X: 測定日に応じて定められた係数[Bq/(μSv/h)]
- C: 除去土壌等を収納したフレコンの重量[kg]

上式は、除染等作業従事者の労働安全衛生の観点から事業者が放射線防護措置を決定するために設定されたものである。筆者らは、後述する通り、複数のフレコンの表面線量率を計測し、上式に基づいて濃度を推定した結果が常に高めの値であることを確認した。フレコンの濃度の推定値が十分安全側であることは、作業者の被ばく線量低減の観点からは適切であるといえるが、その一方で、除染土壌の再生利用の区分等に適用するために濃度を推定する目的においては、可能な限り推定精度を向上させることが合理的であると考えられる。

そこで、厚労省の式に基づくフレコンの濃度推定値が安全側となる要因とその程度について、以下の通り考察した。

厚労省の式における係数Xは、下式となる。

$$X = \frac{D' \times C'}{A'} \dots\dots\dots (式2)$$

ここで、式2の右辺のA'は計算コードによって求められる1

cm線量当量率[μSv/h]であり、D'は計算条件としてのフレコンの放射能濃度[Bq/kg]、C'はフレコンの重量[kg]である。既往文献の記述によれば、1 cm線量当量率A'は以下の条件に基づいて算定されたものと考えられる。なお、フレコンの内部は均質であると仮定されている。

- フレコン寸法:直径φ=1,000 [mm]³⁾、高さh=1,060 [mm]³⁾
- 重量密度: ρ=3.0 [g/cm³]³⁾
- 測定点:フレコン側面中央高さ⁴⁾、表面から3 [cm]³⁾

上記条件のうち、フレコンの重量密度の設定値(ρ=3.0 [g/cm³])は実際よりも大きく、係数Xへの影響が大きいと推定されるため、フレコンの重量密度ρを変化させて係数Xを計算コードにより試算した。

計算条件であるフレコン重量C'は上記フレコン寸法と重量密度から設定し、放射能濃度D'は、全Cs濃度として1[Bq/g]=1,000[Bq/kg]と設定した。1 cm線量当量率A'は、厚労省の式の係数Xの設定に際して適用されたものと同様の評価コード:QAD-CGGP2R(以下、「QAD」)を用いて算定した。解析における空気および土壌の元素構成比はJAEA(2011)⁵⁾の設定値を用いた。

以上の条件で、重量密度ρの値として、3.0、2.0、1.5、1.0とした場合を例に、係数Xを試算した(表1)。ここでは厚労省ガイドラインの別表における計測日のうち、2014年10月、2015年4月、2015年10月、2016年4月を例にとりて算定した。計測日に応じた¹³⁴Cs(半減期2.06年)と¹³⁷Cs(半減期30.17年)の濃度比は2011年3月時点で1:1と仮定し、これに基づき減衰を考慮して2014年10月では¹³⁴Cs:¹³⁷Cs=1:3.066、2015年4月では¹³⁴Cs:¹³⁷Cs=1:3.585、2015年10月では¹³⁴Cs:¹³⁷Cs=1:4.192、2016年4月では¹³⁴Cs:¹³⁷Cs=1:4.901と設定した。

表1より、ρ=3.0の場合における係数Xの試算結果は、厚労省ガイドラインの記載値とほぼ合っており、概ね再現できた妥当な解析結果と考えられる。若干数値が異なる理由は、解析上のメッシュ分割の違い等によるものと考えられる。同表より、試算された係数Xは重量密度ρに応じて有意に変化し、

表1 係数Xの設定におけるフレコンの重量密度ρの影響

計測日	試算した係数 X				厚労省ガイドライン 記載値 (ρ=3.0)
	ρ=3.0	ρ=2.0	ρ=1.5	ρ=1.0	
2014年10月	1.16E+07	7.84E+06	5.98E+06	4.18E+06	1.1E+07
2015年4月	1.20E+07	8.10E+06	6.18E+06	4.32E+06	1.1E+07
2015年10月	1.24E+07	8.36E+06	6.38E+06	4.46E+06	1.2E+07
2016年4月	1.28E+07	8.62E+06	6.57E+06	4.60E+06	1.2E+07

厚労省の係数 X に対して $\rho=2.0$ の場合の試算結果は計測日によらず約 0.7 倍、 $\rho=1.5$ の場合は約 0.55 倍、 $\rho=1.0$ の場合は約 0.4 倍となっている。

フレコンの放射能濃度の推定にあたって表面線量率 A に乗じる比例係数は、式 1 より「 X/C 」であり、この分子 X は、本来は分母の重量 C から定まる重量密度 ρ に対応した値を用いるのが適切と考えられる。厚労省の式では、これを一律に $\rho=3.0$ と仮定して係数 X が設定されており、実際のフレコンの ρ が 1.0 ~ 1.5 程度であるとすれば、この設定は、表 1 の試算結果に照らして高めの濃度推定値を与える要因になっていると考えられる。

ここでさらに、解析コードから得られる線量評価結果の特徴について注意を払う必要がある。解析コード QAD は、点減衰核を用いて非散乱線を計算し、それにビルドアップ係数を乗ずることによって評価点における γ 線の線量を評価する簡易計算手法である⁶⁾。QAD で採用されているビルドアップ係数は、遮へい計算において安全側の評価値を与えるように実際の値より大きめの値が使用されている⁵⁾。例えば、後述する通り、具体的なフレコンを対象にした線量率についての筆者らの試算によれば、QAD による評価結果はモンテカルロ輸送計算コード PHITS⁷⁾ による結果のおよそ 1.3 倍であった。このことは、式 2 の右辺における 1 cm 線量当量率 A' が、QAD で算定した場合には実際よりも高く評価されること、したがって係数 X の値は実際よりも小さく算出されることを意味する。

つまり、厚労省の式の係数 X は、その設定に際して評価コード QAD が用いられていることにより推定濃度を低く評価するが、一方で評価パラメータの重量密度の設定により推定濃度を高く評価し、トータルとして高めの濃度推定値を与えるものとなっていると考えられる。例えば、QAD によるフレコンの表面線量率の解析値が実際の 1.3 倍であると仮定すれば、厚労

省の式は、フレコンの重量密度が $\rho=1.5$ の場合は概算でおよそ 1.4 倍 ($\approx 1/0.55 \times 1/1.3$)、 $\rho=1.0$ の場合はおよそ 1.9 倍 ($\approx 1/0.4 \times 1/1.3$)、実際よりも高い濃度推定値を与えるものと推定される。

以上の考察から、フレコン廃棄物中の放射能濃度を精度よく推定するために厚労省の式を使用する場合は、係数 X の設定に関わる実フレコンのパラメータについて検証することが必要であると考えられる。

3. フレコン計測試験に基づく濃度推定

(1) 計測試験の概要

「H25年度 富岡町除染等工事 (その 1)」の現場の協力を得て、富岡町内のフレコン仮置場のヤードにて、人工的に作製した汚染土壌フレコン (以下「A フレコン」) および周辺地域の除染で発生した汚染土壌を詰めたフレコン (以下「B フレコン」) を用いて、フレコンの表面線量率の計測試験を実施した。A フレコン、B フレコンはサンプルを採取して Ge 計測結果により全 Cs 濃度を分析し、これを表面線量率に基づく濃度推定値と比較した。なお、A フレコンは 2015 年 3 月 2 日 ~ 5 日に作製して 3 月 6 日 ~ 12 日に Ge 計測を実施した。2015 年 3 月 24 日に A フレコンおよび B フレコンの表面線量率の計測試験を実施し、その後 B フレコンの Ge 計測を同 4 月 6 日 ~ 16 日に実施した。

A フレコンは、予め濃度が既知で分布が異なる土壌をフレコン内部で人工的に配置したものであり、その仕様は、表 2 に示す濃度分布を有するものとした。A フレコンの作製にあたっては、汚染土壌をミキサーで攪拌し、排出された土壌のサンプルを分析後その Cs 濃度と均質性を確認し、これを非汚染土壌と一定の比率で混合して濃度を調整し、さらにこの土壌を再度分析して Cs 濃度を確認して均質性を確かめた上でフレコンに封入した。フレコン封入前の土壌はサンプルを Ge 分析

表 2 A フレコンの濃度分布概略図

フレコン	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
目的	標準線源 (濃度高)	標準線源 (濃度低)	濃度偏在の確認 (側面)	濃度偏在の確認 (中心)	濃度偏在の確認 (側面)	濃度偏在の確認 (高さ方向)	密度の影響確認
上面図							
AA 断面図							
側 / 断面図							

注) ■ : 高濃度の部位、□ : 低濃度の部位、□ : A-7 フレコンに混入した軽石 (放射能濃度 0)

にかけてその濃度を測定した。なお、Aフレコンのうち2袋 (A-1、A-2)は均質に作製し、後述する濃度推定の際に適用する「標準フレコン」とした。

一方、Bフレコンは、周辺地域の除染で発生した汚染土壌として、異なる発生源(玉石、土壌、畑土、田土)から9袋をランダムに抽出したものである。Bフレコンについては計測試験後にそれぞれ破袋し、内部10箇所から試料を採取して試料ごとにGe検出器でCs濃度を分析した。後述の濃度推定値の検討においては、このGe分析値10個の算術平均を指標として用いた。

なお、内部の濃度が不均質なフレコン1袋の濃度について議論する場合、本検討では重量で平均した「平均濃度」を想定し、下式で示される濃度を扱うこととする。

$$\text{平均濃度 [Bq/kg]} = \frac{\sum_n (C_n \times W_n)}{\sum_n W_n} \dots\dots\dots (式3)$$

ここに、

C_n : フレコン内部で部分的に均質とみなせる領域(区分n)の

濃度 [Bq/kg]

W_n : 上記区分nの重量 [kg]

表3および表4に、Aフレコン7袋およびBフレコン9袋の寸法、重量、全Cs放射能濃度(Ge計測日における¹³⁴Csおよび¹³⁷Csの単位重量当たりの放射能 [Bq/kg]の合算値)を示す。フレコンの高さはおよそ80~100cmの範囲にあり、重量密度はBフレコンにおいて1,000~1,500 kg/m³の範囲でばらつきがみられる。Aフレコンの放射能濃度は、高濃度部・低濃度部それぞれ人工的に攪拌したためその変動係数は極端に小さく、均一に作製できたものといえる。Bフレコンの放射能濃度の変動係数は最大で28%であるが、3袋では変動係数が10%以下であった。

なお、各フレコンから採取したサンプルにおける¹³⁴Csの濃度/¹³⁷Csの濃度の値の範囲は0.27~0.31であった(例として、A-1フレコンでは10サンプルの算術平均が¹³⁴Cs: 1,780 [Bq/kg]、¹³⁷Cs: 6,220 [Bq/kg]であり、A-2フレコンでは10サンプルの算術平均が¹³⁴Cs: 520 [Bq/kg]、¹³⁷Cs: 1,820 [Bq/kg])

表3 Aフレコンの仕様

フレコン番号	寸法		重量			密度 (kg/m ³)	高濃度部の放射能濃度			低濃度部の放射能濃度			平均濃度 (Bq/kg)
	高さ (cm)	直径 (cm)	高濃度 (kg)	低濃度 (kg)	合計 (kg)		平均 (Bq/kg)	標準偏差 (Bq/kg)	変動係数 (-)	平均 (Bq/kg)	標準偏差 (Bq/kg)	変動係数 (-)	
A-1	86	110	1,140	-	1,140	1,395	8,000	303	4%	-	-	-	8,000
A-2	84	110	-	1,157	1,157	1,449	-	-	-	2,340	381	16%	2,340
A-3	85	110	161	908	1,069	1,323	12,160	320	3%	3,184	258	8%	4,536
A-4	83	110	161	918	1,079	1,368	12,160	320	3%	3,066	192	6%	4,423
A-5	84	110	265	791	1,056	1,323	12,480	412	3%	2,935	95	3%	5,330
A-6	91	110	600	596	1,196	1,383	10,640	855	8%	2,900	245	8%	6,783
A-7	90	110	740	302	1,042	1,218	10,950	450	4%	0	0	-	7,776

※放射能濃度は¹³⁴Csと¹³⁷Csの単位重量当たりの放射能の合算値であり、2015年3月6日~12日に実施したGe計測による
 ※各フレコンの高濃度部および低濃度部の放射能濃度の変動係数はそれぞれ10サンプルによる

表4 Bフレコンの仕様

フレコン番号	地域	発生源	寸法		重量 (kg)	密度 (kg/m ³)	放射能濃度		
			高さ (cm)	直径 (cm)			平均 (Bq/kg)	標準偏差 (Bq/kg)	変動係数
B-1	小浜地区	玉石	81	110	1,090	1,416	9,299	497	5%
B-2	大膳町	土壌	98	110	1,069	1,148	7,149	1,253	18%
B-3	大膳町	土壌	94	110	1,332	1,491	3,956	928	23%
B-4	下郡山	畑土	96	110	1,091	1,196	8,010	386	5%
B-5	清水	畑土	102	110	975	1,006	5,737	1,434	25%
B-6	上本町	畑土	89	110	1,160	1,371	14,540	1,485	10%
B-7	本岡赤木	畑土	96	110	1,363	1,494	3,753	605	16%
B-8	本岡赤木	田土	91	110	1,140	1,318	12,033	411	3%
B-9	関名古	田土	90	110	1,140	1,333	5,288	1,498	28%

※放射能濃度は¹³⁴Csと¹³⁷Csの単位重量当たりの放射能の合算値であり、2015年4月6日~16日に実施したGe計測による
 ※各フレコンの放射能濃度の変動係数はそれぞれ10サンプルによる



写真1 測定の様子

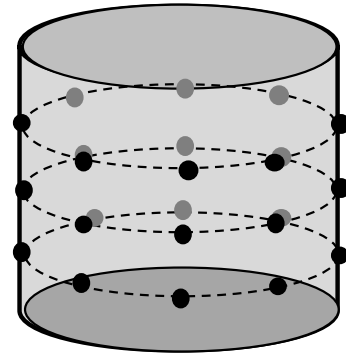


図1 フレコンの表面線量率計測点

であった)。

表面線量率の計測にあたり、2 インチ CsI (Tl) シンチレーション検出器であるミリオンテクノロジー社(現ミリオンテクノロジー・キャンベラ社)製のHDS-101Gを用いた。計測は、周囲を遮蔽用の土のうで囲まれた敷地内に約 7.5 m×12 mの面積の鉄板を敷いた環境中で行い、計測対象のフレコン1個を敷鉄板の中央付近に設置して計測を行った。敷鉄板の中央付近の空間線量率はほぼ均一で、約 0.15 [μSv/h]であった。計測では装置先端をフレコンに押し付けたため(写真1)、検出器の結晶中心はフレコン表面から約 4 cmの位置となる。フレコンの測定箇所は図1に示す通り、高さ方向には地表から 20 cm(下段)、45 cm(中段)、70 cm(上段)の3段、周方向には等分割で8点(A、B、C、D、E、F、G、Hと呼称する)をとり、1袋あたり計 24点とした。計測においては、鉛コリメータ(厚さ 40 mm、幅 80 mm)でセンサ有感部を覆って周辺環境の影響を低減させた場合と、コリメータを使わない場合の両者で実施した。なお、今回は汚染の無い土壌フレコンを用意し、これに対して試験対象のフレコンと同じ条件で表面線量率を計測し、これをバックグラウンド(以下「BG」)の線量率とした。

(2) 計測結果

計測結果の例として、標準フレコンのA-1、A-2フレコンの表面線量率の計測結果からBG値を差引いた値を表5～表6に示す。なお、汚染の無い土壌フレコンの中段の周囲4点の計測値が、コリメータを用いない場合(「コリメータ無し」)では全て 0.12 μSv/h、コリメータを用いた場合(「コリメータ有り」)では全て 0.05 μSv/hであったことから、それぞれのBG値を 0.12 μSv/hおよび 0.05 μSv/hとした(BG値はAフレコン、Bフレコン共通)。また、除染土壌の計測結果の例として、Bフレコンの「コリメータ無し」の計測結果(BG差引前)を図2に示す。多くのフレコンにおいて、上段、中段、下段のなかで中

段の線量率が最も高い結果であった。この理由は、上段・下段に比べて、中段に検出器をあてた場合がフレコンの最も広い範囲からの放射線を検知するためと推察される。

なお、今回の計測の妥当性を確認する目的で、濃度が既知のAフレコンで半径方向にほぼ均質なA-1、A-2、A-4フレコンを対象として、モンテカルロ輸送計算コードPHITS⁷⁾(Ve2.64)による線量評価を実施した。PHITSによるフレコン中段、表面から 4 cmの位置における 1 cm線量当量率と、計測値(中段8点の平均値、BG差引後)の比較を表7に示す。計測値と解析値がほぼ整合していることから、計測データの妥当性が確認できたと考える。また、参考としてA-1、A-2フレコンのコリメータ無しのケースに対し、QADを用いて同様に線量を評価した結果を表7に併記する。この結果から、QADによる評価値はPHITSの約 1.3倍となっていることがわかる。

Bフレコン9袋の計測位置による計測結果のばらつきに着目し、中段の計測点について、それぞれの表面線量率(BG差引前)を中段8点の平均値で除した値を表8～表9に示す。これらの表より、各計測点の表面線量率に多少のばらつきがみられ、標準偏差はおおむね 10%程度である。

作業効率の観点からは、フレコン1袋につき1点の計測とすることが望ましいが、図2および表8～表9に示されるばらつきは、1点の計測値からフレコン1袋の濃度を推定することには一定の不確かさが存在することを示している。

(3) 表面線量率からの濃度推定式の検討

AフレコンおよびBフレコンに対し、計測した表面線量率から下記のそれぞれにより放射能濃度を推定した。

- ・厚労省の式
- ・実測データに基づいて設定した式

後者の式(以下「換算式」)は、厚労省の式と同様、フレコンの放射能濃度が表面線量率に比例するとの前提に立ち、実測

表5 標準フレコンの表面線量率の測定結果(コリメータ無し、BG 差引後)

フレコン		A	B	C	D	E	F	G	H	平均値
A-1	上段	1.18	0.92	1.13	1.00	1.18	1.09	1.27	1.11	1.11
	中段	1.39	1.32	1.32	1.26	1.31	1.31	1.33	1.32	1.32
	下段	1.23	1.20	1.21	1.20	1.20	1.11	1.20	1.21	1.20
A-2	上段	0.30	0.28	0.35	0.24	0.37	0.27	0.34	0.21	0.30
	中段	0.37	0.36	0.38	0.33	0.39	0.34	0.41	0.34	0.37
	下段	0.32	0.32	0.34	0.35	0.34	0.36	0.39	0.35	0.35

※測定日: 2015年3月24日

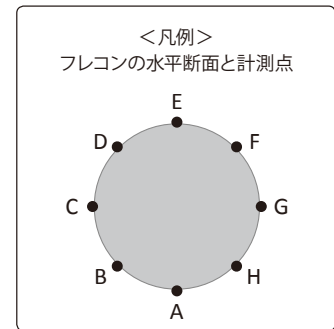
表6 標準フレコンの表面線量率の測定結果(コリメータ有り、BG 差引後)

フレコン		A	B	C	D	E	F	G	H	平均値
A-1	上段	0.91	0.74	0.71	0.79	0.82	0.80	0.93	0.80	0.81
	中段	1.01	1.01	0.92	0.95	0.90	0.96	0.95	0.93	0.95
	下段	0.85	0.83	0.81	0.83	0.81	0.75	0.92	0.90	0.84
A-2	上段	0.24	0.20	0.24	0.20	0.27	0.22	0.26	0.19	0.23
	中段	0.22	0.26	0.25	0.21	0.25	0.24	0.24	0.26	0.24
	下段	0.22	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.25	0.23

※測定日: 2015年3月24日

表7 代表フレコンに対する1 cm 線量率の計測結果と解析結果

対象フレコン および計測方法	1 cm 線量当量率 [$\mu\text{Sv/h}$]			
	計測値 (中段の平均、BG 差引後)	PHITS 解析結果	QAD 解析結果 (参考)	
A-1	コリメータ無し	1.32	1.20	1.54
	コリメータ有り	0.95	0.78	(未実施)
A-2	コリメータ無し	0.37	0.35	0.45
	コリメータ有り	0.24	0.23	(未実施)
A-4*	コリメータ無し	0.51	0.48	(未実施)
	コリメータ有り	0.34	0.32	(未実施)



※ A-4 フレコン中央の高濃度部の水平断面は、解析において矩形断面を面積等価な円形に換算した

表8 B フレコン(「コリメータ無し」) の中段の計測値(BG 差引前、平均値で正規化)

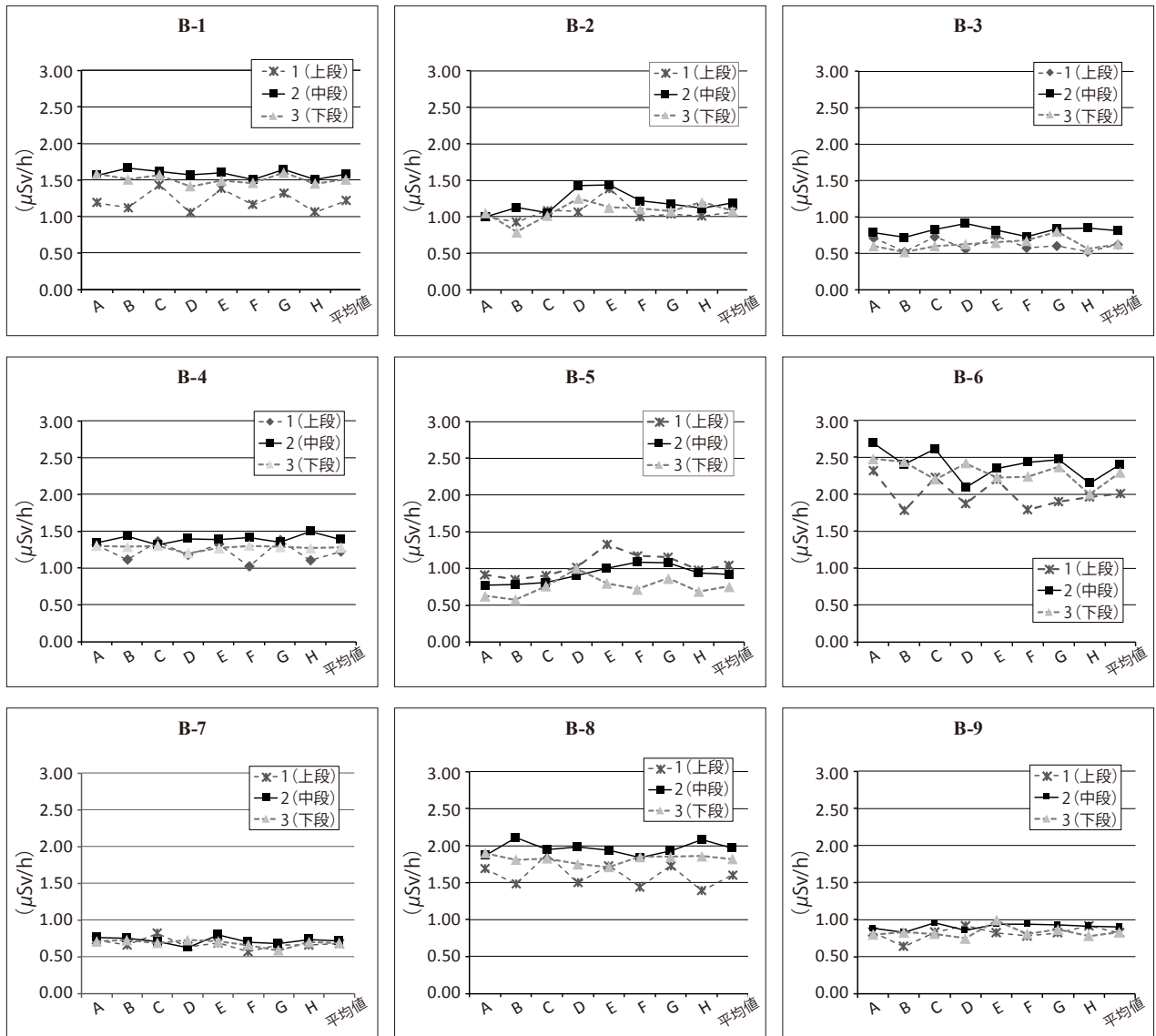
フレコン番号	A	B	C	D	E	F	G	H	最小	最大	標準偏差
B-1	0.99	1.05	1.02	0.99	1.01	0.95	1.04	0.95	0.95	1.05	0.03
B-2	0.84	0.95	0.88	1.20	1.21	1.02	0.98	0.94	0.84	1.21	0.13
B-3	0.96	0.89	1.02	1.12	1.01	0.90	1.04	1.05	0.89	1.12	0.07
B-4	0.96	1.03	0.94	1.01	1.00	1.01	0.97	1.08	0.94	1.08	0.04
B-5	0.84	0.85	0.88	0.98	1.09	1.18	1.17	1.02	0.84	1.18	0.13
B-6	1.13	1.00	1.09	0.87	0.98	1.01	1.03	0.90	0.87	1.13	0.08
B-7	1.05	1.04	0.98	0.87	1.11	0.97	0.94	1.03	0.87	1.11	0.07
B-8	0.95	1.08	0.99	1.01	0.99	0.94	0.98	1.06	0.94	1.08	0.04
B-9	0.97	0.92	1.06	0.95	1.04	1.04	1.03	1.00	0.92	1.06	0.05

※測定日: 2015年3月24日

表9 B フレコン(「コリメータ有り」) の中段の計測値(BG 差引前、平均値で正規化)

フレコン番号	A	B	C	D	E	F	G	H	最小	最大	標準偏差
B-1	0.96	1.07	1.07	0.91	1.06	0.96	0.94	1.03	0.91	1.07	0.06
B-2	0.75	0.96	0.90	1.21	1.34	0.94	1.06	0.84	0.75	1.34	0.18
B-3	1.07	0.96	1.02	1.30	1.00	0.79	0.82	1.04	0.79	1.30	0.15
B-4	0.86	1.03	0.87	1.10	1.06	1.09	0.95	1.04	0.86	1.10	0.09
B-5	0.92	0.82	0.97	0.84	1.07	1.25	1.11	1.02	0.82	1.25	0.13
B-6	1.10	1.04	1.04	0.92	0.90	1.08	0.98	0.95	0.90	1.10	0.07
B-7	1.08	1.10	0.94	0.80	1.10	1.08	0.85	1.05	0.80	1.10	0.11
B-8	0.94	1.05	0.92	0.97	0.98	0.95	0.98	1.20	0.92	1.20	0.08
B-9	0.96	0.92	0.99	0.84	1.11	1.12	0.97	1.09	0.84	1.12	0.09

※測定日: 2015年3月24日



※測定日：2015年3月24日

図2 Bフレコン(コリメータ無し)の表面線量率の計測結果(BG差引前)

データから比例係数を設定したものである。具体的には、ほぼ均質で濃度既知の標準フレコンとして、前述のA-1フレコン(全Cs濃度=8,000[Bq/kg]、重量密度=1,395[kg/m³])およびA-2フレコン(全Cs濃度=2,340[Bq/kg]、重量密度=1,449[kg/m³])を用い、これらの表面線量率の計測値(中段8点の平均値)とGe分析値の関係をプロットし、2点を結ぶ直線の式を換算式とした(図3参照)。

換算式は以下の通りである。

- ・コリメータ無し:

$$D = A \times 5900 + 180 \quad \dots \dots \dots (式4)$$

- ・コリメータ有り:

$$D = A \times 7900 + 420 \quad \dots \dots \dots (式5)$$

ここに、

D: 除去土壌等を収納したフレコンの放射能濃度[Bq/kg]

A: フレコンの表面線量率の測定値からBG値を差引いた値
[μSv/h]

式4と式5において比例係数が異なるのは、コリメータの使用の有無でBG値が異なることに起因している。また、両式とも切片が0でないのはA-1、A-2フレコンの形状・重量の違いやばらつき、BG値の不確かさの影響等によるものであり、仮にフレコンの形状寸法が等しく均質一様であればこれらの切片は0(正比例関係)になると考えられる。すなわち、フレコンの寸法形状等の仕様が大きく異ならなければフレコン1袋の計測結果から換算式を作成することは可能と思われる。

ここに、参考までA-1フレコンの測定結果(コリメータ無し)と原点を結ぶと、換算式は式6で表される。また、厚労省の式(式1)に、計測試験日に対応した係数X(=1.1E+7)とA-1

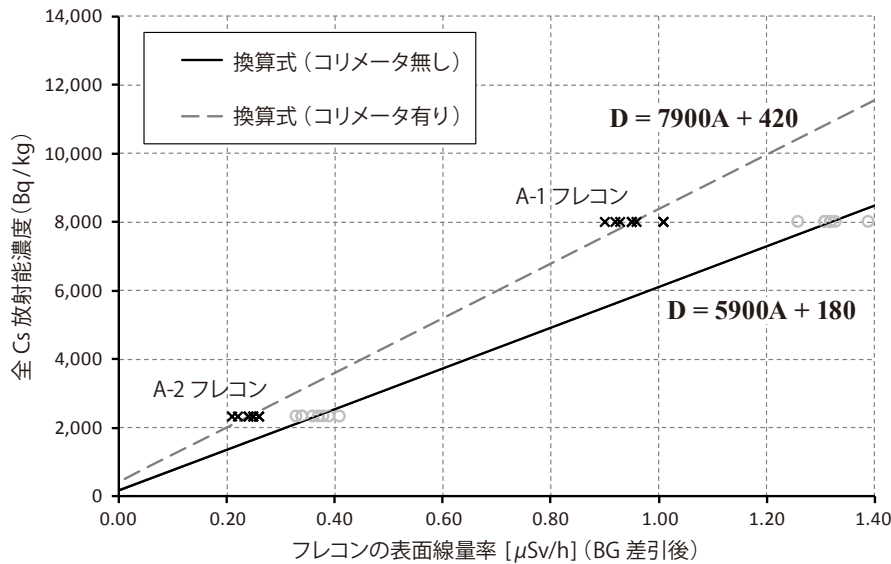


図3 実測データ(2点近似)に基づくフレコンの表面線量率と放射能濃度の関係
 ※測定日: 2015年3月24日における関係

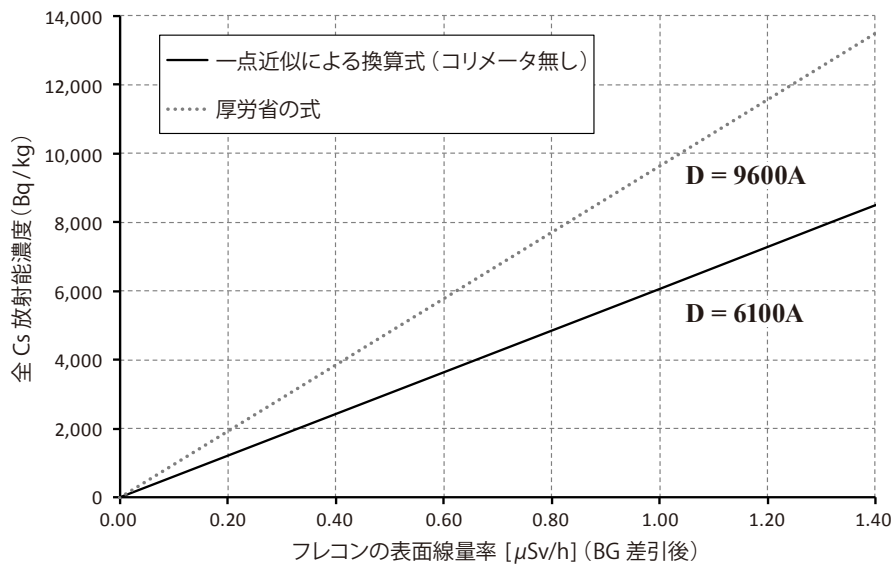


図4 実測データ(1点近似)および厚労省式に基づくフレコンの表面線量率と放射能濃度の関係
 ※測定日: 2015年3月24日における関係

フレコンの重量 (C=1,140[kg]) を適用すると、式7の通りとなる。これらの関係を図4に示す。

$$D = A \times 6100 \quad \dots\dots\dots \text{(式6)}$$

$$D = A \times 9600 \quad \dots\dots\dots \text{(式7)}$$

式6と式7の係数(以下「換算係数」)の比較により、厚労省の式は、今回設定した換算式のおよそ1.6倍の評価値を与えることがわかる。前項の考察もふまえると、厚労省の式と換算式において換算係数が異なる理由は、解析条件として設定したフ

レコンの重量密度(厚労省の式)と、実際に計測した重量密度(換算式)の値が異なること、および厚労省の式ではQADが用いられていることによると考えられる。

(4) 濃度推定式による不均質なフレコンの濃度推定および考察

表面線量率としてフレコン中段8点の算術平均を用いてAフレコン、Bフレコンの全Cs濃度を推定し、各フレコンのGe分析値に基づく平均濃度(以下単に「Ge分析値」と比較した。Aフレコンの濃度推定結果として、Ge分析値に対する相対誤

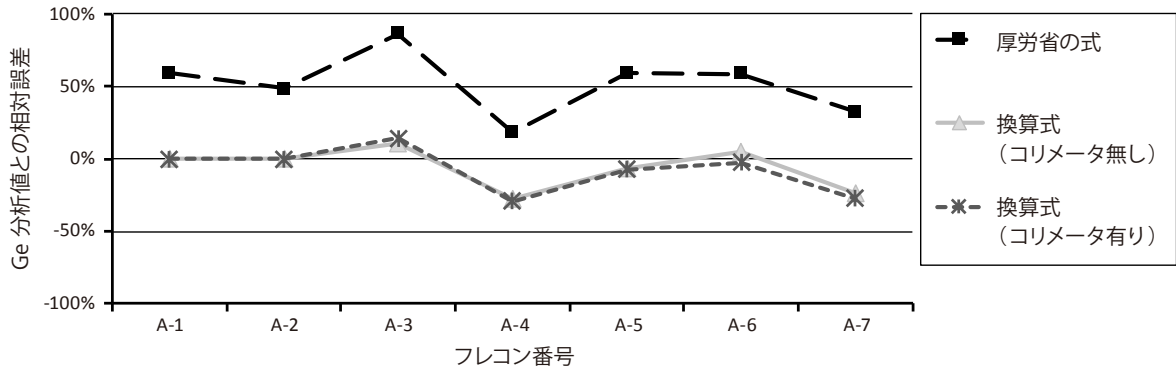


図5 AフレコンのGe計測値に対する相対誤差

差をフレコンごとに図5に示す。

図5より、厚労省の式による推定値は、フレコン内部の空間的濃度分布の違いによってGe分析値に対する相対誤差が変化するが、常にGe分析値より大きめとなっている。換算式による推定結果において、コリメータの使用の有無による推定濃度の精度に大きな違いはなかった。この理由としては、今回の計測試験ではフレコン周辺の線量が小さい条件で測定したことが一因として考えられる。換算式による推定結果は、標準フレコンのためGe分析値と一致するA-1、A-2以外においても概ねGe分析値に近いものとなっている。A-3フレコンおよびA-5フレコンでは、高濃度の部位がフレコンの側面の近くに配置されており、フレコンの側面8点の表面線量率を計測することにより、高濃度および低濃度の部位のそれぞれが測定結果に反映され、それらの平均値を換算式に適用することによって、Ge分析値に比較的近い濃度推定値が得られたものと考えられる。これに対し、A-4フレコンでは内部中央に高濃

度の部位が存在し、その周囲の低濃度土壌による自己遮蔽効果によって、フレコン側面での計測結果に高濃度部の存在が反映されず、このため推定濃度がGe分析値を大きく下回ったものと考えられる。A-6フレコンは、上半を高濃度、下半を低濃度としたものであり、中段8点の計測結果は、これらの平均的な濃度に対応するものであったため、Ge分析値とよく合う結果になったと考えられる。A-6フレコンにおいて、上段あるいは下段の計測点における表面線量率を用いて濃度を推定すれば、Ge分析値よりもそれぞれ高い/低い推定結果が得られると考えられる。A-7フレコンは、高濃度の汚染土壌に非汚染の軽石を混ぜたものであり、軽石の攪拌の不均質さの影響によりGe分析値より濃度推定値が低くなったものと推定される。

Bフレコン9袋の濃度推定結果として、Ge分析値と濃度推定値の関係のプロットを図6に示す。図の直線の傾きが示す通り、厚労省の式による推定値は、Ge分析値のおよそ1.5倍であった。この結果は、Bフレコンの重量密度が1,000～

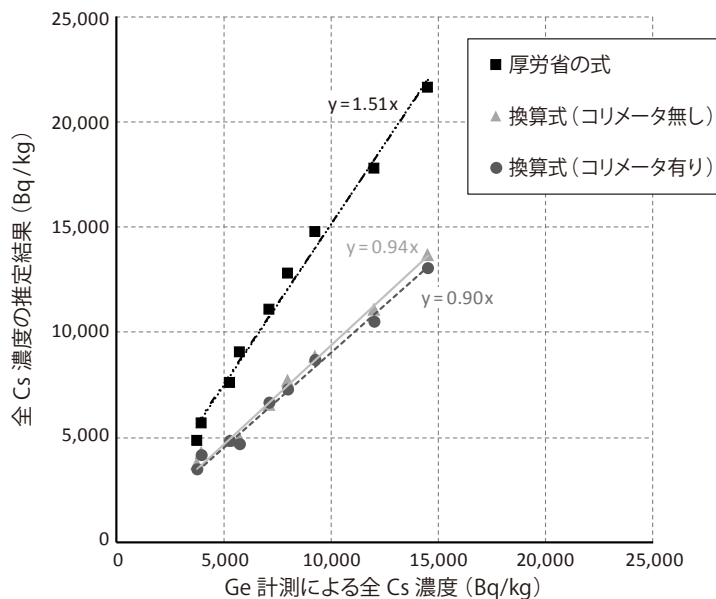


図6 Bフレコン Ge 分析値と推定濃度の比較

1,500 [kg/m³]の範囲であることを考慮すると、前章 2. における厚労省の式に関する考察において濃度推定値がおよそ 1.4 ~ 1.9 倍になると想定されたことと整合する。一方、換算式による濃度推定値は、コリメータ無しの場合で 0.94 倍、コリメータ有りの場合で 0.90 倍であった。これらの結果がいずれも Ge 分析値に比較的近いものとなった理由は、標準フレコンとして用いた A-1、A-2 フレコンの重量密度が B フレコンのそれに近いものであったことが一因と考えられる。ただし濃度推定値が Ge 分析値よりやや低い傾向を示した理由は明らかではなく、フレコン内部の空間的不均質性、形状寸法・重量密度の違いや計測誤差等が要因として考えられる。

(5) 作業効率向上に向けた考察

以上、フレコン 1 袋の平均濃度の推定精度について検討した。フレコンの不均質性を考慮すれば、フレコン周囲の複数の点で表面線量率を計測し、その結果に基づいて評価することが推定精度の観点からは望ましいと考えられる。その意味で筆者らは今回、フレコン側面の 24 点で表面線量率を計測し、そのうち中段 8 点の算術平均を用いて濃度を推定し、結果として Ge 分析値と比較的よく合うことを確認した。これに対して、作業の効率性を重視してフレコン 1 袋につき 1 点の計測で平均濃度を推定する場合は、濃度推定値の不確かさは避けられず、その程度を定量的に把握することも難しい。

ここで、フレコン濃度推定の目的が、ある濃度を閾値として 2 種類(「高濃度」/「低濃度」)に分類することである場合には、以下のような考え方でフレコンの測定点によるばらつきに対処する方法も考えられる。

- 最初の 1 点の測定結果が閾値に対して非常に低い場合は「低濃度」に分類する。
- 最初の 1 点の測定結果が閾値に対して少しでも高い場合は「高濃度」に分類する。
- 最初の 1 点の測定結果が閾値以下の値を示すが閾値に近い場合は、追加で複数の点について測定する。複数点の全てにおいて閾値を下回れば「低濃度」に分類し、1 点でも閾値を上回る結果が出た場合は「高濃度」に分類する。

一方、フレコン濃度測定の目的によっては、必ずしもその濃度をフレコン 1 袋ずつ高精度に把握する必要はなく、より大きな“まとまり”でとらえれば良いとする考え方もある。この方針にたてば、大きな“まとまり”の平均濃度として、フレコン 1 袋ごとに 1 点の計測で推定した平均濃度の算術平均をとることににより、フレコン 1 袋ごとの濃度推定における不確かさの影響は“まとまり”の平均濃度の推定に対しては小さくなるものと考えられる。ただし、この“まとまり”をどのように考えるかは現時点では定量的検討には至っていない。

4. おわりに

フレコン土壤中の放射性 Cs 濃度の推定精度について検討した。均質なフレコンを想定した簡易な濃度推定方法として従来用いられている厚労省の式は、実際よりも高めの濃度推定値を与えるものであることを確認した。具体的には、フレコンの重量密度が例えば $\rho = 1.5$ の場合、厚労省の式による濃度推定値は実際のおよそ 1.4 倍となることがわかった。したがって、除染土壌の濃度別分類を目的に、厚労省の式を用いてフレコン濃度を推定する場合には、その換算係数をフレコンの重量密度に応じて割り戻すこと(例えば $\rho = 1.5$ の場合は $1/1.4$ 倍にするなど)によって推定精度が向上すると考えられる。

不均質なフレコンの平均濃度の推定に関して、人工的に作製したフレコンと除染現場から無作為に抽出したフレコンを準備し、1 袋につき複数点の表面線量率を計測した。除染現場から抽出した 9 袋のフレコンにおいて、それぞれの表面線量率の計測値は計測点の位置によってばらつきが見られ、フレコンの平均濃度を 1 点の計測結果から推定することは不確かさをともなうことが示された。本検討では、フレコンの中段 8 点の表面線量率の計測値の算術平均(BG 差引後)を用いて、厚労省の式および実測データに基づく換算式を適用してフレコンの平均濃度を推定した。各フレコンに対して Ge 分析による平均濃度(Ge 分析値)を指標として濃度推定値と比較したところ、厚労省の式による推定値は Ge 分析値より常に高めであり、作成した換算式による推定値は Ge 分析値に近いものであった。ただし、高濃度の部位がフレコンの内部に存在し、それが自己遮蔽によって計測値に反映されない場合には、平均濃度を低めに推定することがわかった。そのような特殊な場合を除けば、不均質なフレコンであっても、フレコン周囲の複数点で計測することにより、比較的精度の良くフレコン 1 袋の平均濃度を推定ができる見通しを得た。

ただし、作業効率向上の観点からは、フレコンの計測点数を減らすことが望まれる。例えばフレコン 1 袋につき 1 点の計測とするなど、計測点数を減らせばフレコンの濃度推定値に含まれる不確かさは大きくなる。これに対しては、ある濃度の閾値で分類する場合には、1 点の測定値と閾値の関係から、必要に応じて追加の多点計測を実施することにより不確かさを低減することが実務的には考えられる。また、複数のフレコンの“まとまり”の平均濃度の推定を目的とすることにより、1 つのフレコンの推定誤差の問題を緩和することが考えられる。これらを踏まえ、今後の大量輸送等に向けて、より合理的かつ現実的な除去土壌の Cs 濃度推定のための測定法を確立することが必要である。

謝 辞

本検討では人工フレコンの作製および Ge 検出器による分析に際して日揮株式会社の皆様にご協力を頂いた。また、計測試験は環境省が管轄するフレコン仮置き場のヤードにて

実施した。この場を借りて関係各位に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 「中間貯蔵施設の概要」, 環境省 HP (<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/about/>), 2017年2月閲覧.
- 2) 厚生労働省:「除染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」, 厚労基発 1118 第6号, 2014.
- 3) 内閣府原子力災害対策本部 原子力被災者生活支援チーム, (独) 日本原子力研究開発機構:「除染等作業者の放射線障害防止のための簡易濃度測定方法(案)」, 2011年12月9日.
- 4) 菅谷敏克, 阿部大智, 武部慎一, 中谷隆良, 坂井章浩: フレキシブルコンテナに収納した汚染土壌等の単位濃度あたりの1 cm 線量当量率の算出. JAEA-Technology-2016-018, 全20ページ(2016).
- 5) 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討. JAEA-Technology-2011-26, 全18ページ(2011).
- 6) 小佐古敏荘, 笹本宣雄:「原子力教科書 放射線遮蔽」, p.73, オーム社(2010).
- 7) T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver: Particle and heavy ion transport code system PHITS, Version 2.52. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **50**, 913-923 (2013).

2017年4月26日受付

2017年8月4日受理

和 文 要 約

除去土壌フレコン中の放射性Cs濃度の推定精度について検討した。除染業務従事者の被ばく低減を目的として用意された厚労省の濃度推定式について考察し、その換算係数の設定において除染廃棄物の嵩密度が保守的に大きい値として設定されていると推察されたことから、再生利用の区分等に適用する濃度推定では、より高い推定精度の換算係数を検討する余地があると指摘した。不均質なフレコンの平均濃度の推定に関し、人工的に作製したフレコンと除染現場から無作為に抽出したフレコンを準備し、1袋につき複数点の表面線量率を計測した。表面線量率から放射性Cs濃度を推定する方法として、厚労省の式のほか、実測データに基づく換算式を作成し適用した。フレコン濃度の推定精度の議論にあたってはGe分析値を指標とした。フレコン中段8点の表面線量率の平均値(BG差引後)を用いて濃度推定を行ったところ、厚労省の式による推定値はGe分析値より常に高めであり、作成した換算式による推定値はGe分析値に近いものであった。

