フレキシブルコンテナに入った除染土壌の放射能濃度測定技術の開発

株式会社大林組 正会員 〇山崎 啓三

同上 正会員 高田 尚哉

同上 山下 秀文

同上 正会員 納多 勝 同上 正会員 黒岩 正夫

同上 正会員 日笠山 徹巳

キャンベラジャパン株式会社 鈴木 敦雄

1. はじめに

福島第一原発事故により発生した放射性物質を含む廃棄物および土壌は、除染作業等で回収され、各地に設けられた仮置き場にフレキシブルコンテナ(以下、フレコン)等に入れた状態で保管されている.

環境省が公表している「除染土壌等の中間貯蔵施設の案について」等では、仮置場に保管された除染廃棄物のうち除染土壌は、フレコンの荷姿のまま中間貯蔵施設に輸送し、放射能濃度 8,000Bq/kg 以下は土壌貯蔵施設 (I型)、放射能濃度 8,000 Bq/kg 超過は遮水構造を有する土壌貯蔵施設 (II型) に放射能濃度ごとに保管するとされている 1). したがって、除染土壌の中間貯蔵に当たっては、フレコンごとにその放射能濃度を正確に測定できる技術が必要である.

現在、仮置き場等では、作業員がサーベイメーターで測定した表面線量率から放射能濃度を換算する方法 (以下、簡易法)により放射能濃度を測定している。しかし、この測定方法では、周辺からの放射線の影響 を受けやすいことや換算式に安全率が考慮されているため2~10倍程度の過大評価になる傾向にある。その他 にも、測定に時間を要する、測定のために危険を伴う揚重作業が必要である、測定員が被ばくするなどの多 くの課題がある。

除染土壌の発生量は2,200万m³と推計されており、この大量にあるフレコンに入った除染土壌を精度良く・安全・迅速に測定するシステムが必要と考え、「TRUCKSCANによる放射能濃度測定技術」を開発した。本技術は、車両に積載した状態で複数のフレコンの各々の放射能濃度を約30秒の短時間で高精度に測定できるシステムである。本稿では、TRUCKSCANによる放射能濃度測定技術の概要について紹介するとともに、福島県内で実施中の除染作業で発生した放射性物質を含む除染土壌等が入ったフレコンを対象に行った放射能濃度測定実証試験の結果をもとに、測定精度および測定時間等について報告する。

2. TRUCKSCAN による放射能濃度測定技術

2. 1 技術概要

TRUCKSCANによる測定ヤードの概要図を図1に示す.TRUCKSCANは8台の鉛コリメータ付NaI(ヨウ化ナトリウム)検出器を備えた測定装置である.測定対象は、車両荷台に積載された状態の放射性物質を含む除去土壌等が入ったフレコン等で、破袋することなく、約30秒の測定時間で各々のフレコンの放射能濃度を測定する.放射能濃度は、キャンベラ社特許技術であるISOCS効率計算法を用いて、フレコン一袋ごとの効率を精度良く算出する.測定装置

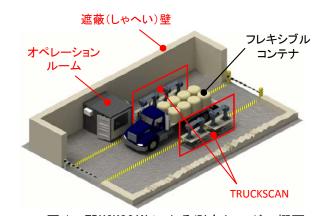


図1 TRUCKSCAN による測定ヤードの概要

キーワード 中間貯蔵施設,放射性物質,除染廃棄物,フレキシブルコンテナ,放射能濃度測定 連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 ㈱大林組 エンジニアリング本部環境技術第二部 TEL03-5769-1057 は、オペレーションルーム内から遠隔操作する. なお、TRUCKSCAN の周囲は、遮蔽壁を設置するなどして、できる限りバックグラウンドの影響を低減する.

2. 2 測定機器

(1) NaI(ヨウ化ナトリウム)検出器ユニット

NaI 検出器ユニットは、放射線を検出する NaI 検出器 (2 台)をテーブルリフトに設置してユニット化しており、設置撤去および移設が容易な構造となっている (写真 1). TRUCKSCAN では、4 台のNaI 検出器ユニットを測定車両の側方に配置することで、最大 8 袋のフレコンの放射能濃度を同時に測定できる. さらに、リフト部を上下稼働させることで荷台高さが異なる積載量 2~20t の車両にも対応可能な設計である. 設置撤去および移設時はテーブル高さを最下部まで下降させることで、安定した状態で揚重することが可能である.

(2) オペレーションルーム

TRUCKSCAN は、オペレーションルームの作業員 1 名で操作が可能である. オペレーションルームは、測定エリアから隔離されており、作業員の被ばく線量を低減することができる. 写真 2 にオペレーションルーム内の TRUCKSCAN 操作用システムを示す.



写真1 NaI 検出器ユニット

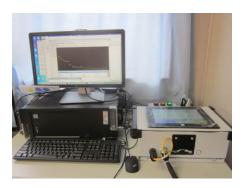


写真 2 TRUCKSCAN 操作用システム

(3) フレコン情報入力システム(タブレット)

フレコンの積込み時にタブレット端末を使用してフレコン情報の入力を行う.これは、トラックに積載するフレコンの識別番号等の情報と放射能濃度の測定結果を関連付けるためである.入力したフレコン情報や放射能濃度の測定結果は、輸送管理システムに自動更新することも可能である.写真 3 に使用するタブレット端末、図 2 に入力画面例を示す.



写真3 フレコン情報入力用タブレット端末

車種 車両番号	電動天蓋ダンブ車 品川 100 あ 9999	運転 所属会		山田三(株)大森	
設置位置番号	管理番号	高さ	重量(kg)	直径(m)	フレコン積載パターン
1	f0270270252	高	112	1.1	ノレコン領戦パター.
2	f0270303046	高	115	1.3	5 000
3	f0270303213	低	98	1.1	0000
4	f0270274136	中	102	1.1	
5	f0270304631	Ф	105	1.3	前面面へ戻る
6	f0270271589	ф	101	1.1	
Z	f0270300525	低	96	1.1	送信

図2 タブレット端末入力画面例

2. 3 技術の特徴

本技術では、放射線の検出装置として NaI 検出器を採用している.この理由は、高感度であり測定時間が短いこと、放射性セシウムの検出には十分な性能を持つこと等がある. なお、食品等の放射能濃度測定で採用されている Ge (ゲルマニウム) 半導体検出器は高精度であるが、液体窒素による常時冷却が必要である等、屋外での連続使用が困難である. TRUCKSCAN は、運搬車両に積載した状態でフレコンごとの放射能濃度を約30 秒で測定できるため、危険を伴う揚重作業を削減できるとともに測定時間を短縮でき、測定作業に従事する作業員の被ばく線量の低減や測定コストの低減が期待される. また、TRUCKSCAN によるフレコンの放射能濃度測定精度 (相対合成標準不確かさ) は±20%程度と高精度での測定が可能である 2). 高い測定精度により、2~10 倍程度過大評価となる簡易法と比較して 8,000Bq/kg 超過の除去土壌等を保管する建設費が高い

土壌貯蔵施設Ⅱ型への搬入量の削減が期待される.

3. フレコンの放射能濃度測定実証試験

3. 1 試験概要

実証試験では、福島県内の除染作業で発生した放射性物質を含む除去土壌等が入ったフレコンの放射能濃度を測定し、TRUCKSCANによる放射能濃度測定精度を検証した。また、測定時間および測定に従事する作業員の被ばく線量を測定し、表面線量率から放射能濃度を換算する簡易法に対する測定時間の短縮効果や測定に従事する作業員の被ばく線量の低減効果等を検証した。

3. 2 試験方法

(1) 測定試料

測定試料の種類は、土壌が入ったフレコンと可燃物が入ったフレコンである。表 1 に測定試料の種類と数量を示す。

測定試料の種類	数量	備考
土壌	51 袋	住宅地等における表土の剥ぎ取り土壌
可燃物	16 袋	農地に分布する草木(ロールベーラーで成型)

表1 測定試料の種類

(2)フレコンの単体測定とサンプリング測定

実証試験に使用するフレコンは、屋外用 Ge 半導体検出器を用いて単体測定し濃度を決定した. 測定は、フレコンの周囲 4 方向から行い、その平均値をフレコンの放射能濃度の基準値とした. 写真 4 にフレコンの単体測定状況を示す.

サンプリング測定は、単体測定と比較することにより、フレコン内の不均一性の影響を確認するために行った。対象試料は、土壌試料のうち単体測定において放射能濃度のばらつきの大きいもの(No.45)と小さいもの(No.15)を 1 袋ずつ選定した。サンプリング測定では、フレコン 1 袋当たり合計 20 点の試料をサンプリングし、それぞれ Ge 半導体検出器で放射能濃度の測定を行った。図 3 にサンプリング位置を、写真 5 に試料採取状況等を示す。



写真 4 フレコンの単体測定状況

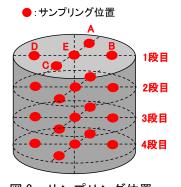


図3 サンプリング位置



写真5 (左)試料採取状況、(右)サンプリング試料



(3) TRUCKSCAN と簡易法の比較試験

TRUCKSCAN による放射能濃度測定試験では、10t ダンプトラックに 6 袋および 7 袋のフレコンを積載して様々な積載パターンで放射能濃度、測定時間を測定した。TRUCKSCAN による放射能濃度測定では、積込み作業時にタブレット端末を用いたフレコン情報入力システムを使って、識別番号(QR コードの読取)、高さ、重量等のデータを入力した後、TRUCKSCAN でフレコンの放射能濃度を測定した。また、簡易法による測定試験では、フレコンの周囲 4 方向の表面線量率を測定して放射能濃度を換算する簡易法による測定を実

施した. 写真 6 に TRUCKSCAN によるフレコンの放射能濃度測定状況,写真 7 に簡易法によるフレコンの表面線量率測定状況を示す. なお,TRUCKSCAN による測定ヤードの周囲は,3 段の遮蔽土のうと敷鉄板を設置し、周辺のバックグラウンド空間線量の影響を低減した.



写真 6 TRUCKSCAN による測定状況



写真7 簡易法による測定状況

(4) 荷台の高さが異なる車両への適用性確認試験

TRUCKSCAN は、荷台の高さが異なる車両に積載したフレコンの測定も可能である。このことを確認するため、4t ダンプトラックの荷台にフレコンを積載して放射能濃度の測定を行い、フレコンの放射能濃度測定精度を検証した.4t ダンプトラックの荷台高さは約104cm(積載時)と10t ダンプトラックの荷台高さ約155cm (積載時)と比較して約50cm 低い、そのため、NaI 検出器ユニットを50cm ジャッキダウンして放射能濃度測定を行った。10t および4t ダンプトラックの測定状況を写真8に示す。





写真 8 (左) 10t ダンプトラック測定状況、(右) 4t ダンプトラック測定状況

(5) TRUCKSCAN の移設作業時間確認試験

TRUCKSCAN の測定装置は、可搬性を高めるため、ユニット化(NaI 検出器ユニット 4 台、オペレーションルーム 1 棟)されている. 本試験では、TRUCKSCAN を移設した際の作業性を確認することを目的として、測定装置を他の場所へ移設し、移設開始から移設先での試運転作業完了までの所要時間を測定した.

3.3 試験結果と性能評価

(1)フレコンの単体測定とサンプリング測定結果

屋外用 Ge 検出器で測定した土壌および可燃物フレコン 1 袋ごとの放射能濃度測定結果と密度の関係を図4 に示す. 土壌試料は,放射能濃度 3,000~6,000Bq/kg の低濃度試料と放射能濃度 10,000~25,000Bq/kg の中濃度試料であった. 可燃物試料は 300~4,000Bq/kg と極端に濃度の低い試料を含む低濃度試料であった. また,土壌試料の密度 (1.1~1.8t/m³) に対して,可燃物試料の密度は 0.1~0.3t/m³ と密度が低い試料であった.

放射能濃度のばらつきの大きい土壌試料(No.45)と

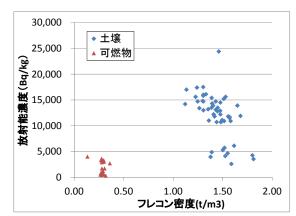


図 4 フレコンの単体測定結果(屋外用 Ge 検出器)

ばらつきの小さい土壌試料 (No.15) の単体測定結果およびサンプリング測定結果を表 2, 図 5 に示す. 単体測定とサンプリング測定による放射能濃度測定結果は、No.15, No.45 ともにばらつき 1σ で一致した. サンプリング測定の結果は、単体測定結果に比べてばらつき1σ が大きい結果となった. この理由は、サンプリング測定は、フレコン内の不均一の影響を大きく受けるが、屋外用 Ge 検出器による単体測定ではフレコン全体をマクロに測定するため、不均一の影響が緩和されるためと考えられる.

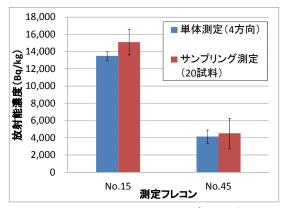


図 5 フレコンの単体測定、サンプリング測定結果

(2) 測定精度に関する簡易法との比較結果

図6にTRUCKSCANと屋外用 Ge 検出器による単体測定の比較結果を、図7に簡易法と屋外用 Ge 検出器による単体測定の比較結果を示す.ここで、TRUCKS CANの結果は、10t ダンプ

表 2 フレコンの単体測定、サンプリング測定結果

試料名	測定方法	放射能濃度	測定結果のばらつき1 σ		備考
武 介 十七		Bq/kg	数值	%	1佣 石
No.15	サンプリング法	15,100	1,500	9.93	サンプリング数20
(ばらつき小)	単体測定	13,500	500	3.89	4方向測定
No.45	サンプリング法	4,520	1,740	38.5	サンプリング数20
(ばらつき大)	単体測定	4,130	760	18.5	4方向測定

トラックに積載した土壌試料フレコンの測定結果である. TRUCKSCAN/屋外用 Ge 検出器の相関式は y=1.02x で相関係数は $R^2=0.949$,簡易法/屋外用 Ge 検出器は y=2.05x で $R^2=0.797$ であり,TRUCKSCAN による放射 能濃度測定は簡易測定法と比較して高い精度で測定できた. なお,可燃物試料は,周辺の空間線量から算出 される測定下限値より低い放射能濃度の試料が多かったため,測定精度の評価は省略した.

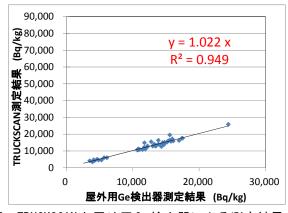


図 6 TRUCKSCAN と屋外用 Ge 検出器による測定結果

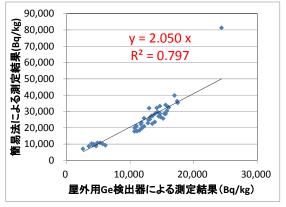


図 7 簡易法と屋外用 Ge 検出器による測定結果

(3) 測定時間に関する簡易法との比較結果

表 3, 4 に, 10t ダンプトラックに 6 袋のフレコンを積載し, TRUCKSCAN および簡易法で放射能濃度測定を行った際の測定時間を示す. フレコン 1 袋当たりの測定時間の平均値を比較すると簡易法の 2 分 53 秒 (173 秒) に対して TRUCKSCAN は 15 秒となり, TRUCKSCAN による測定時間は簡易法の約 1/12 となった.

表 3 TRUCKSCAN による放射能濃度測定時間

表で 1/100/100/11 である成別に厳反為定時間					
試験 回数	積込作業時間 (①)	TRUCKSCAN 測定時間(②)	測定作業所要時間(①+②)	フレコン1袋当たりの放射能 濃度測定時間(②÷6袋)	
1	14分29秒	1分21秒	15分50秒	14秒	
2	13分50秒	1分30秒	15分20秒	15秒	
3	12分28秒	1分36秒	14分04秒	16秒	
4	12分15秒	1分01秒	13分16秒	12秒	

試験 回数	積込作業時間 (①)	TRUCKSCAN 測定時間(②)	測定作業所要時間(①+②)	フレコン1袋当たりの放射能 濃度測定時間(②÷6袋)
5	12分02秒	2分03秒	14分05秒	21秒
6	12分53秒	1分06秒	13分59秒	11秒
平均	13分00秒	1分26秒	14分26秒	15秒

表 4 簡易法による放射能濃度測定時間

試験 回数	積込作業時間 (①)	表面線量率 測定時間(②)	測定作業所要時間(①+②)	フレコン1袋当たりの表面線 量率測定時間(②÷6袋)
1	16分00秒	16分47秒	32分47秒	2分48秒
2	17分14秒	21分06秒	38分20秒	3分41秒
3	18分19秒	17分09秒	35分28秒	2分51秒
4	17分50秒	17分51秒	35分41秒	2分58秒
5	18分00秒	17分54秒	35分54秒	2分59秒
6	16分20秒	13分09秒	29分29秒	2分11秒
平均	17分17秒	17分19秒	34分37秒	2分53秒

(4) 測定作業に従事する作業員の被ばく線量に関する簡易法との比較結果

表 5, 6 に、10t ダンプトラックに 6 袋のフレコンを積載し、TRUCKSCAN および簡易法で放射能濃度測定を行った際の測定に従事する作業員 1 人当たりの被ばく線量を示す。TRUCKSCAN における測定作業員の被ばく線量は、オペレーションルーム内での空間線量率の測定結果と測定時間の積とし、簡易法での被ばく線量は、測定したフレコンの表面線量率の平均値と測定時間の積として評価した。フレコン 6 袋を測定する際の被ばく線量の平均値を比較すると簡易法の $0.756\mu Sv$ に対して TRUCKSCAN は $0.0096\mu Sv$ となり、TRUCKSCAN による測定時の被ばく線量は簡易法の約 1/80 となった。

表 5 測定作業員の被ばく線量 (TRUCKSCAN)

試験回数	①計測室内の空間線 量率の平均値	②測定時間	測定作業員の被ばく線量 (①×②)
凹奴	(<i>μ</i> Sv/h)		(μSv/人)
1	0.4	1分21秒	0.009
2	0.4	1分30秒	0.01
3	0.4	1分36秒	0.011
4	0.4	1分01秒	0.0068
5	0.4	2分03秒	0.014
6	0.4	1分06秒	0.0073
平均	0.4	1分26秒	0.0096

表 6 測定作業員の被ばく線量(簡易法)

試験回数	①表面線量率の 平均値 (<i>μ</i> Sv/h)	②表面線量率 測定時間	測定作業員の被ばく線量 (①×②) (<i>μ</i> Sv/人)
1	2.74	16分47秒	0.77
2	2.9	21分06秒	1.02
3	2.48	17分09秒	0.71
4	2.26	17分51秒	0.67
5	2.63	17分54秒	0.78
6	2.71	13分09秒	0.59
平均	2.62	17分19秒	0.756

(5) 荷台の高さが異なる車両に対する適用性の評価

図 8 に、4t ダンプトラックに積載したフレコンのTRUCKSCANによる放射能濃度測定結果を示す。その結果、屋外用 Ge 検出器による単体測定結果の約 0.98倍となっており、前述した 10t ダンプトラックに積載したフレコン測定時(1.02倍)と同等の高い精度であることを検証した.

(6) TRUCKSCAN の移設時間

TRUCKSCAN の測定装置を移設した際の所要時間を表7に、移設作業状況を写真9、10に示す.移設作業の開始から移設後の試運転完了までの所要時間は約4時間と、比較的迅速な移設が可能であることが確認できた.

測定装置のうち重量物となる NaI 検出器ユニット (約 2.5t) は、移設の際の最下部までジャッキダウン することで安定した揚重作業が可能であることが確認 できた.

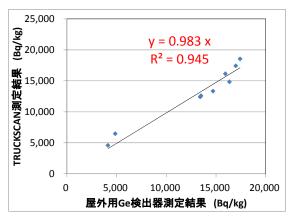


図8 4t ダンプトラックの測定結果

表 7 TRUCKSCAN 移設作業所要時間

作業順序	作業内容	所要時間 (h)
1	測定装置解体	0.5
2	積込み	1.5
3	輸送	0.5
4	荷卸し	0.5
5	測定装置組立	0.5
6	試運転	0.5
計		4



写真 9 NaI 検出器ユニット揚重状況



写真 10 移設後の放射能濃度測定状況

4. おわりに

TRUCKSCAN による放射能濃度測定技術を開発し、実証試験において、除染現場で発生した放射性物質を含む除去土壌等が入ったフレコンに対するTRUCKSCANの測定精度と実際のオペレーションへの適用性を評価し、従来法である簡易法と比較した、その結果、次項を確認した。

- 1)簡易法による放射能濃度測定結果が、屋外用 Ge 検出器による単体測定の平均約 2 倍程度の高い値を示すのに対して、TRUCKSCAN は 0.98~1.02 倍であり、高い精度で測定できる.
- 2) TRUCKSCAN による測定において、ダンプトラックの荷台高さの違いによる測定精度の差はない.
- 3)TRUCKSCAN は,フレコン 1 袋当たりの測定時間を簡易法の約 1/12 に,測定作業員 1 人当たりの被ばく線量を約 1/80 に低減できる.

今後は、実施工での本技術の適用に向けて、フレコンの放射能濃度測定実績を蓄積するとともに、遮蔽設備等の周辺設備の最適化を進めていく予定である.

参考文献

1) 環境省(2014): 「除去土壌等の中間貯蔵施設の案について」, http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/acceptance_request/pdf/aggregate_draft.pdf (参照 2016.6)

2)A.Suzuki, F.Bronson, M.Noda,et.al (2016)."Validation Testing of Canberra-Obayashi Mobile type TruckScan Pre-production Unit", Proceeding of 14th International Congress of the International Radiation Protection Association, Cape Town, South Africa, May 9.