

キャンベラ製可搬型フィードロール分析装置の実証試験（和訳版）

鈴木 敦雄\*, フレイザー・ブロンソン\*\*, ガブリエラ・イリー\*\*, 眞鍋 昇, 高橋 友継\*\*\*,  
大島 博文\*\*\*\*

\* キャンベラジャパン株式会社

\*\* キャンベラインダストリーズ

\*\*\* 国立大学法人 東京大学

\*\*\*\* 株式会社日本遮蔽技研

アブストラクト

日本の酪農家は様々な種類の牧草を乳牛に与えている。これらは保存用に丸めてラップによる封をされている。キャンベラ社はこれらのフィードロールのモニタリング用に、フィードロール分析装置「以降、FRASという。」を開発した。FRASは、トラック荷台に遮蔽体が据え付けられ、その内部に超大型のNaI検出器が備えられている。この検出器のサイズは、3×5×16インチで、キャンベラ製ホールボディカウンタ「FASTSCAN」と同じ大きさである。更に、この検出器はLEDスタビライズ機能を有しており、屋外測定のような温度が不安定な状況下においても、ゲインの変動によるスペクトルピークのずれが発生しないようになっている。マルチチャンネルアナライザ(MCA)は、キャンベラ製オスプレイが採用されている。検出器とMCAは、防水ボックスに収納されており、15cm以上の厚みのある遮蔽体内に設置されている。遮蔽体の上部は、上面にセットされたフィードロールを測定するためのコリメータ付の開口部となっており、下から上に向かって測定する。検出器とMCAには、POEハブに挿したLANケーブルを介して電源が供給され、同時にPCに信号の伝達を行っている。効率校正はモンテカルロ計算コードのMCNPを用いて様々なサイズや密度のフィードロールに対して行われている。スペクトルはキャンベラ製Genie分析ソフトを用いて解析され、フィードロールの濃度「Bq/kg」に変換される。

遮蔽厚が十分あるので、バックグラウンドは、周辺の空間線量が $5 \mu\text{Sv/h}$ 環境下において5分、 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ で1時間測定してもCs-134,137のピークは見られなかった。検出限界値の測定は、 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 程度の環境で、汚染されていないフィードロールを用いて、様々な測定時間で実施した。検出限界値は、Cs-137に対し30秒で11.9Bq/kg、60秒で8.2Bq/kg、3600秒で1.1Bq/kgであった。FRASとサンプリング測定、in-situ測定（Ge検出器）の測定結果のばらつきを比較すると、それぞれ、9.4～13%、30～40%、6.0～7.1%であった。FRASによる測定は、サンプリング想定と比較して明らかにばらつきが小さく、in-situ測定と比較して測定時間は明らかに早い。そして、ばらつきは同等であった。

イントロダクション

福島第一原子力発電所事故により、福島県内では、多くの農地が放射性物質によって汚染された。事故から4年経った今日、汚染核種はほとんどCs-137とCs-134であり、Cs-134の半減期は、Cs-137と比較して短いため、Cs-137の濃度は、Cs-134と比較して3倍程度となっている。農地は様々な種類の農作物を生産するために使用されているが、そのうちの一つは、乳牛に与える牧草地である。この材料は、伝統的に刈り取られた後に丸めて保管される。そして、保管のために密封される。これがいわゆるフィードロールである。これらのフィードロールは様々な大きさがあるが、全て円柱形であり概ね直径1m、高さ1m程度である。事故により、福島県の広い地域で地元産のフィードロールを与えることができなくなり、他の地域から輸入せざるを得なくなった。このことは、コストの上昇を意味する。というのも、30Bq/kgという基準値を満たしているかどうかの検査等に費用がかかる上、労働力を検査に回す必要があるからだ。

フィードロール分析システム「FRAS」の要求事項と設計

- 分析要求事項  
30～60秒の測定で検出限界が30Bq/kg、分析値のばらつきは10～15%程度であること。
- 迅速分析  
測定終了数秒以内に結果が得られ、オペレータが仕分けできること。
- 迅速運用  
現場に到着して概ね10～20分で測定を開始可能であること。PCの電源を入れ、性能（汚染がないか、ピークシフトがないか等）の確認が終われば準備完了である。

- ベース車両  
細い道路を走行可能なように車両総重量は8t以内、車両長は7m程度のコンパクトかつ軽量。

- 遮蔽体  
図1は遮蔽体の設計図面である。遮蔽体は低バックグラウンド鉄で重量は2300kg。遮蔽厚は最低15cm、フィードロールの濃度や周辺線量率に応じて6段階に調整可能なコリメータを装備。

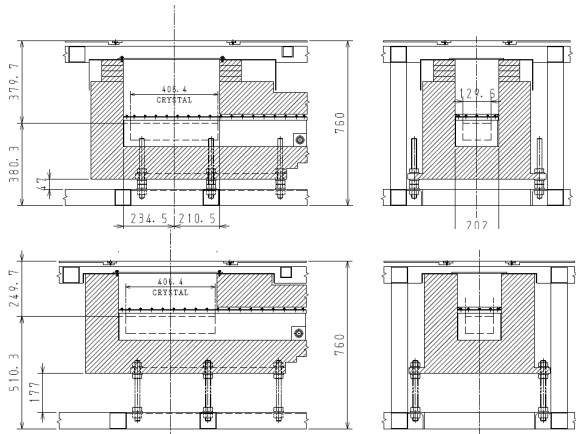


図 1. 遮蔽体の図面

- 検出器  
検出器は大型NaI結晶、大きさは3×5×16インチ長方形である。これは事故後に多く使用されているキャンベラ製ホールボディカウンタ(FASTSCAN)と同じ大きさである。キャンベラ製LED自動校正機能（特許技術）を有しており、-20～+50度の広範囲において安定した性能が得られる。また、分解能は662keVに対し、8%程度と良好である。

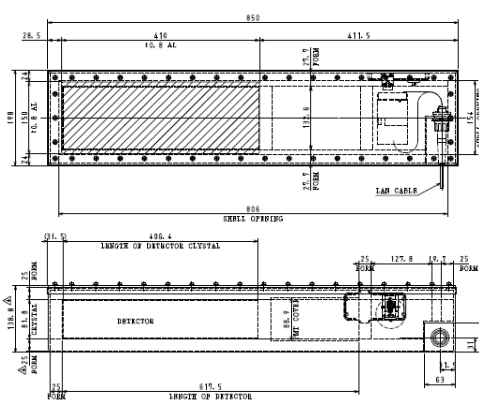


図 2 検出器収納箱の図面

- MCA  
キャンベラ製オスプレイ、デジタルシグナルアナライザが使用されており、コンパクト、かつ省電力設計である。これらは、検出器と共に防水ボックスに収納され、POEハブとPCによって電源供給される。

- 検出器収納箱  
図2に防水ボックスの概要を示す。外装はアルミニウム。フィードロールに面する部分は、0.5mmの薄いアルミニウム窓である。検出器とMCAは急激な熱変動や物理的な振動から守るため、2.5cm厚の緩衝材で覆われ、運用中や輸送の際のリスクを最小限としている。検出器収納箱は14×20×85cmで防水加工がされており、防水LANコネクタで接

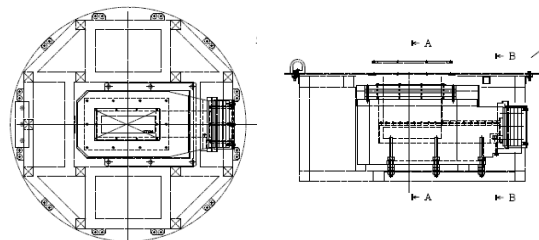


図 3 検出器周りのフレーム図面

続される。図3は検出器と周りを囲む遮蔽体及びフィードロールを支えるフレームである。なお、フレーム下部にも防振ゴムを設置してある。

- ・ 車両

フィードロールが保管されているところに自走できること。それゆえに検出器フレームと遮蔽体は一般的な平ボデー車に固定されている。車両はクレーンを有しており、フィードロールを吊り上げて遮蔽体開口部にセットすることが可能である。図4にテストで用いたフィードロールと車両を示す。

- ・ ソフトウェア

キャンベラ製Genie分析ソフトがバックグラウンドで動く特注ソフトウェアである。フィードロールのサイズ、重量を入力し、スタートボタンを押すことで、適切な効率ファイルが選択され、自動的に分析がなされる。

- ・ 分析法の概要

効率校正はMCNPを用いて数学的に行われている。日本のフィードロールは、多くが0.12～0.25g/ccの密度範囲であったので、0.01g/cc刻みで効率校正を行った。スペクトル分析は、Genieソフトにより、Cs-134+137の複合ピークからバックグラウンドを差し引き、正味ピーク面積を算出する。なお、遮蔽体が効果的に作用しており、バックグラウンドスペクトルにCs-137,134のピークは見られなかった。



図4. フィードロール測定システム（フレコン濃度測定車）

FRASは、適切な効率校正により、様々な大きさや種類のフィードロールを測定可能である。また、福島県内をはじめとした各地で実施されている除染作業で出たフレコンバックに詰められた除染廃棄物等の測定も可能である。内容物は、土、可燃性廃棄物、米、木材チップ等問わない。

### 実証試験結果

実証試験は、装置の性能が普遍性を持つよう、その分野の権威と共同で実施された。測定の正確さの確認には、低レベルから高レベルのフィードロールに対し、4つの独立した分析方法を用いた。

はじめに、20個のグループのフィードロールをFRASで測定した。測定の条件は、各々のフィードロールに対し、保管時の底面を下にして5回、天面を下にして5回測定とした。各々の平均値を計算し、天面/底面比を算出した。結果を表1に示した。天面/底面比は、天面を下にした測定結果は、底面を下にした測定結果と比較して、10%±9%濃度が高くなることを示していた。そのことは、密封されたフィードロールが保管されている過程において、非放射性的な水分が下方に移動して密度を増大させることにより自己吸収の影響が大きくなり、見かけの濃度を減少させることが推定された。

次に、より詳細な分析を行うため、低汚染レベル、中汚染レベル、高汚染レベルを代表する4つのフィードロールが選ばれた。それぞれ、湿分率測定を行い、4種類の測定、FRAS、ISOCs Ge測定システム、サンプリングGe測定及びサンプリングCsI測定を実施した。表2にその結果を示す。湿分は、乾燥機を用いた乾燥法と電気式湿分計を用いて測定した。フィードロールの天面、側面、底面から複数のサンプリングと測定を行った。湿分の分布は、天面が一番低く、ついで

側面、一番高い数値を示したのは、底面であり、天面と比較すると1.5倍から2倍の値であった。この結果は、天面の濃度が底面と比較して高くなるのかという我々の推定理由（湿分率の違い）と一致した。サンプリングは、フィードロールから複数抽出され、いくつかのサンプルは天面側から、またいくつかは側面から、残りは底面側から採取された。サンプルの数は図2の6列目に記載した。サンプルは、遮蔽体内のCsI検出器とGe検出器によって測定された。CsI検出器は、JCSSの標準試料によって校正がなされ、適切に密度補正がされている。Ge検出器は、ISOCS<sup>(1,2,3)</sup>とJCSSの標準試料によって校正されている。ここで、ISOCSとは、Ge検出器等を用いた測定装置において、効率校正を数学的効率校正ソフトによって実施するものである。CsIとGe検出器による測定は、サンプルの平均濃度と測定結果の標準偏差を示した。

表1 フィードロールの天面、底面側測定結果

試料名	Total-Cs 濃度 Bq/kg			重量(kg)
	底面	天面	天面/底面比	
Sample1	275	315	1.15	220
Sample2	234	271	1.16	240
Sample3	313	292	0.93	200
Sample4	486	607	1.25	260
Sample5	299	318	1.06	180
Sample6	358	404	1.13	240
Sample7	273	305	1.12	240
Sample8	227	216	0.95	220
Sample9	365	409	1.12	260
Sample10	304	328	1.08	260
Sample11	432	426	0.99	240
Sample12	350	392	1.12	220
Sample13	309	278	0.90	240
Sample14	399	464	1.16	200
Sample15	508	551	1.08	220
Sample16	383	425	1.11	180
Sample17	421	519	1.23	220
Sample18	344	404	1.17	200
Sample19	322	356	1.11	220
Sample20	401	438	1.09	220
平均	350	386	1.10 (0.09)	

表2 4つのフィードロールの精密測定

試料名	湿分率 (wet%)			検出器	測定回数	濃度と標準偏差 (1SD) (Bq/kg)			1SD
	天面	側面	底面			Cs134	Cs137	Total-Cs	
低汚染 フィード ロール (Sample 21)	15.7 <sup>#2</sup> 1回	19.2 1回	32.2 1回	Ge	16 試料	9.7 (4.1)	28.5 (13.0)	38.3 (17.0)	45%
				CsI	16 試料	- <sup>#6</sup>	-	34.4 (15.1)	46%
				FRAS	5 回 <sup>#5</sup>	9.2 (2.2)	24.2 (2.7)	33.4 (3.7)	13%
中汚染 フィード ロール 1 (Sample 22)	34.3 <sup>#1</sup> (1.2) 3 試料	46.4 (7.8) 4 試料	62.1 (6.3) 3 試料	Ge	10 試料	152 (46)	427 (132)	578 (184)	40%
				CsI	10 試料	144 (50)	387 (134)	553 (178)	31%
				FRAS	52 回 <sup>#4</sup>	126 (11)	326 (44)	452 (51)	13%
				ISOCS	4 方向	134 (8)	358 (5)	492 (5)	6.0%
高汚染 フィード ロール (Sample 23)	43.1 <sup>#1</sup> (5.4) 5 試料	36.5 (5.8) 6 試料	58.7 (8.2) 5 試料	Ge	16 試料	227 (60)	584 (145)	811 (204)	30%
				CsI	16 試料	227 (64)	637 (178)	864 (240)	28%
				FRAS	40 回 <sup>#3</sup>	186 (18)	483 (43)	668 (53)	9.4%
				ISOCS	4 方向	212 (13)	489 (14)	701 (18)	6.5%
中汚染 フィード ロール 2 (Sample 24)	—	—	—	FRAS	6 回	192 (22)	443 (20)	635 (37)	7.0%
				ISOCS	4 方向	178 (16)	448 (17)	626 (28)	7.1%

#1 sample 21 と 22 の湿分率は、乾燥法によって算出された

#2 sample 23 の湿分率は、電気式湿分計で測定した

#3 天面、底面の測定回数はそれぞれ 20 回である

#4 天面は 32 回、底面は 20 回測定である

#5 底面のみの測定である

#6 セシウム濃度が低かったため、Total-Cs 濃度のみ測定した

次に、キャンベラ製ISOCS測定システムによってフィードロールを測定した。ISOCS測定システムはコリメータ付Ge検出器を装備しており、効率校正は、ISOCS数核的効率校正ソフトウェアで行われている。図5は、ISOCS測定システムを用いたフィードロールの測定風景である。測定は、フィードロールの4方向（90、180、270、360度）から行った。測定時間は各々の測定で30分である。フィードロールの濃度は、4方向測定の平均値とした。

4種類の測定方法によるフィードロール測定の結果は、統計的に±1標準偏差の範囲で一致していた。

ISOCS測定装置を用いて測定した4方向測定の結果は、統計的に最も小さい不確かさ（6.0～7.0%）であった。このことは、側面から測定する場合のジオメトリは、比較的天面/底面の密度変化に対して誤差が小さい測定法であるからである。それと比較して、サンプリング測定は、最も不確かさが大きく、その値は（28～46%）に及んでいた。これらのばらつきは、Ge検出器とCsI検出器を比較すると、ほぼ同様の値であった。このことは、同じフィードロールからサンプリングされたサンプル間に、非常に大きなばらつきがあることを示しており、その大きさは、測定の統計的なばらつきを大きく超えるものであった。これは、フィードロール中の放射性物質の分布がかなり不均一であるがゆえに、大きなフィードロールからサンプリングされた小さい資料の測定によって、給仕の適正を判断することは、必ずしもベストの方法ではないことを示している。

現在、公的な検査方法は、フィードロール生産圃場1000m<sup>2</sup>中、5つのサンプルを抽出して一つのサンプルとして測定するものである。この方法は、一つ一つのフィードロールを測定するのと比較して、信頼性に劣ることが示された。それ以上に、サンプルの抽出と分析には多くの労力と検査結果が出るまでに長い時間がかかる。さらに、サンプリング法は、保管中のフィードロールにも悪影響がある。と言うのも、サンプルを採取する際には、密封されたフィードロールを破る必要があり、破って酸素が混入するとフィードロール中の牧草は傷み始めてしまうからである。我々はFRASによる検査方法が、サンプリング法よりも優れていると考えている。と言うのも、コストが安く、測定時間は短く、結果を迅速に報告可能であるし、結果の不確かさは小さく、何より密封したフィードロールのラップを破ることなく非破壊で測定が可能であるからである。

フィードロールサンプル23は、天面から5箇所、側面から6箇所、底面~5箇所の合計16箇所からサンプリングされた。湿分率は、東京大学によって注意深く測定がなされ、そこから導き出された密度は、天面で平均0.158g/cc、底面で平均0.183g/ccであった。このことは、FRASによる測定結果の天面/底面比は、天面と底面の密度の差（湿分率の差）効率の違いと良く一致していた。

それゆえに、実際の運用においては、底面からだけ測定する場合には、天面/底面比の結果の半分を計数として加える等の操作が必要となるかも知れない。（または天面側から測定することで、安全側評価となる。）各々の測定場所において、少数のフィードロールを用いて、天面と底面の両側から測定し、確認することが必要かもしれない。と言うのも、この報告における値（天面/底面比）が適当であるかあるいは、場所特有のものであるか確認することがより望ましいからだ。（大玉村の結果などからも天面/底面比はほぼ同様であることが確認されている。）



図 5 ISOCS 測定システムによる測定風景

続いて、要求されるMDA（検出限界値）が適切な短い時間で満足可能であることを確認する測定を行った。はじめに、バックグラウンド線量率が $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 程度の環境において、1時間のバックグラウンド測定を行った。測定条件は、直径120cm、高さ120cm、重さ220kgの汚染されていないフィードロールを用いて様々な測定時間において実施した。結果として、セシウムのピークは見られなかった。表4と図6に、Genieソフトを用いて解析した実際のMDAを示す。ここで使用したMDAは、キュリー法と呼ばれるもので最大4.65SDであり、日本で一般的に使用されているMDA法(3SD)よりも大きくなる。MDAは、Cs-137に対し30秒測定で11.9Bq/kg、60秒測定で8.2Bq/kg、1時間測定で1.1Bq/kgであった。給仕規制値は30Bq/kgであるので、このレベルで高い信頼性を持たせるための測定時間は約60秒であると結論することができる。

現在、公的な検査方法<sup>(4,5)</sup>では、ラボに設置したGe検出器やNaI検出器を用いて行い、容器はマリネリ2Lなどを用いて、定量下限10Bq/kgを満たす時間（例えば2000秒程度）測定することとなっている。この条件において、MDAは、Cs-134,137に対し各々数Bq/kg程度である。これはFRASによる60秒測定とほぼ同等といえるが、サンプリング法の場合の不確かさ（今回の試験で28～46%程度）が適切にフィードロールの濃度の代表性を表しているかどうかを考慮する必要がある。

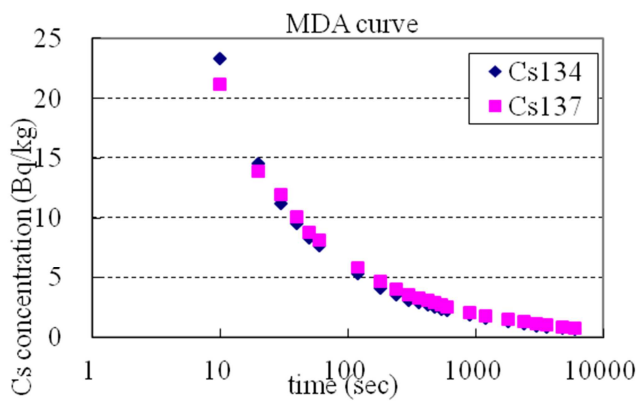


図 6 FRAS の検出限界曲線

表 4 各測定時間における検出限界値

測定時間(秒)	Cs-134	Cs-137
10	23.3	21.2
20	14.5	13.9
30	11.2	11.9
40	9.5	10.1
50	8.4	8.8
60	7.7	8.2
120	5.3	5.8
180	4.1	4.6
240	3.5	4.0
300	3.1	3.6
600	2.2	2.6
1200	1.6	1.8
3600	0.90	1.1

図 7 に、周辺線量率が  $0.2 \mu\text{Sv/h}$  と  $5 \mu\text{Sv/h}$  時のバックグラウンドスペクトルを示す。赤色の領域は、Cs-134 と Cs-137 のピーク領域を示し、もしそれらが検出されれば、ピークとして現れる。中心やや右よりの白線は Cs-137 のピークである  $662\text{keV}$  を表している。各々のスペクトルにおいて、Cs-134,137 のピークは見られず、宇宙線の消滅  $\gamma$  線の  $511\text{keV}$  が見られるのみである。FRAS のバックグラウンドは非常に低いことが確認できた。というのも、15cm 以上の厚みを持つ遮蔽体にサンプルを測定するための開口部は空を向いているためである。

最後の試験は、実際の運用において課題となる可能性がある、フィードロールを測定台に非常に正確にセットした場合と、そうでない場合の間に違いがあるかどうかを確認した。これらの試験は、遮蔽体の近くで正確にフィードロールが測定台の中心に設置できるかガイドするために人工が必要かどうかを確認するものである。通常の実験では、ガイドする人を配置せず実施する予定である。このテストでは、5つの異なるフィードロールを用いて、各々8回の測定を実施した。なお、周辺線量率は  $0.2 \mu\text{Sv/h}$  程度である。測定スキームは、各々の測定後、フィードロールを移動、地面において、再び吊り上げ、測定台に置き次の測定するものである。表

## WM2015 Conference, March 15 – 19, 2015, Phoenix, Arizona, USA

5にこれらの結果を示した。不確かさの範囲は、6.8～15%であった。これは、表2に示した正確な配置による測定の不確かさの範囲、7.0～13%と比較して同等であった。それ故に、遮蔽体そばにガイドする人の配置は必要ないと思われる。

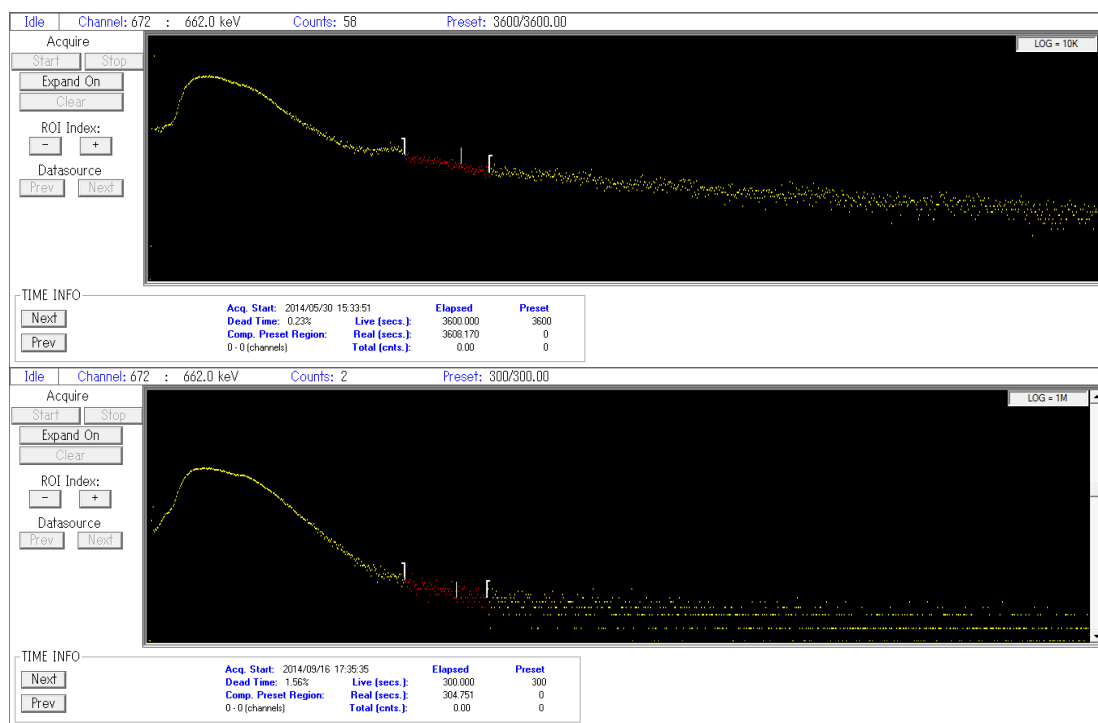


図7 バックグラウンドスペクトル（上：0.2 μSv/h、3600秒、下：5 μSv/h、300秒測定）

表5 ルーチン測定における結果: 測定 → 吊り上げ → 地面 → 吊り上げ → 設置 → 測定

単位: Bq/kg

試料名	Time (sec)	Cs134	1SD	Cs137	1SD	Total-Cs	1SD	1SD
Sample25	60	72	5	177	10	248	13	8.5%
Sample26	60	104	6	278	12	382	13	6.8%
Sample27	60	43	4	97	14	140	17	15%
Sample28	60	67	7	173	20	240	27	13%
Sample29	60	79	3	202	12	280	13	8.2%
Careful operation								7.0 to 13%

### 結論

我々はこれらの試験を通して、FRASがフィードロールを正確に測定可能であることを示した。測定時間60秒で、典型的な不確かさは概ね15%以下の測定が可能である。また、フィードロールから1箇所サンプリングする場合の不確かさは概ね30～50%であることを確認した。また、FRASによる測定は、他の方法：フィードロールからのサンプリング等、と比較して技術的に優れているだけでなく、測定のための労力が少なく、結果はすぐに得られるためメリットが多いと考えられる。

**WM2015 Conference, March 15 – 19, 2015, Phoenix, Arizona, USA**

引用文献

1. R. VENKATARAMAN, F. BRONSON, V. ATRASHKEVICH, B. YOUNG and M. FIELD, “Validation of In-Situ Object Counting System (ISOCS) Mathematical Efficiency Calibration Software,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (A), 422 (1999)
2. Model S573 ISOCS Calibration Software, Canberra Industries, 800 Research Parkway, Meriden CT, USA, [www.canberra.com](http://www.canberra.com)
3. F. BRONSON and B. YOUNG, “Mathematical Calibrations of Ge Detectors and the Instruments that Use Them,” Proceedings of 5<sup>th</sup> Annual NDA/NDE Waste Characterization Conference, Salt Lake City, UT, Jan 11 (1997)
4. The Ministry of Health, Labour and Welfare, Radioactivity measurement manual for food in emergency (in Japanese), pp. 9-12, MHLW Medicine bureau, Dept. of food and health, Inspection and Safety Division, Mar, 2001, [www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001558e-img/2r98520000015cfn.pdf](http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001558e-img/2r98520000015cfn.pdf)
5. The Ministry of Health, Labour and Welfare, pp. 2-4, MHLW Medicine and Food bureau, Dept. of Food safety, Inspection and Safety Division, Radioactive cesium screening method for food (in Japanese), Mar, 2012, [www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r985200000246ev-att/2r985200000246iu.pdf](http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r985200000246ev-att/2r985200000246iu.pdf)