

令和元年度放射線安全規制研究戦略的推進  
事業費（環境モニタリング線量計の現地校  
正に関する研究）事業

成果報告書

令和2年3月

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

## 内容

1	本研究の目的.....	3
1-1	はじめに .....	3
1-2	研究の目的.....	3
2	高線量地域（福島県内）での実証実験地点の選定及びその光子スペクトルについて .....	5
2-1	高線量地域の実証実験のための MP の選定.....	5
2-2	高バックグラウンド地域に設置されているモニタリングポストの選定.....	11
2-3	サーベイメータによるモニタリングポスト周辺の線量率分布.....	11
2-4	スペクトル測定 .....	14
2-5	遮へいの効果について .....	16
3	コリメート照射装置及びモニタリングポスト遮へい体の製作.....	18
3-1	照射装置及び遮へい体の製作 .....	18
3-2	照射装置の線量率の決定.....	20
4	従来手法との比較 .....	21
4-1	日本分析センターによる現地校正結果.....	21

4-2	本研究による現地校正手法.....	23
4-3	校正結果の比較.....	24
5.	高線量地域での実証実験.....	26
5.1.	従来の現地校正手法による校正結果との比較.....	26
5.2	現地に設置されているモニタリングポストの校正結果.....	28
5.3	本校正手法に関する考察.....	30
6	本手法の校正手順及び不確かさの評価例.....	31
6.1	本手法による校正方法.....	31
6.2	不確かさの評価.....	36
7	まとめ.....	38

## 1 本研究の目的

### 1-1 はじめに

現在、我が国では原子力施設を中心に環境の放射線量を連続的に測定するためのモニタリングポストに代表される放射線計測機器（以下「モニタリングポスト」という。）が多数設置・運用されている。連続モニタは、検出器及び演算処理部が建屋等に強固に固定されていることが多く、装置を取り外して校正施設等で校正することが困難である。また、連続測定が義務づけられている場合もあることから、欠測期間を最小限にできる現地校正が行われている。

しかしながら、東京電力福島第一原子力発電所事故以降、福島県内を中心に多くの連続モニタが配置されているが、一部の地域では、校正に用いる照射線量に対して無視できないレベルのバックグラウンド線量が存在し、現地校正を容易に行うことができない状況にある。このため高バックグラウンド線量下における現地校正技術の開発が喫緊の課題となっている。

本研究では、既存の校正手法では不得意な高バックグラウンド線量下においても精度よく校正を行うため、散乱線を低減させるためのコリメータ及び簡易遮へいを組み合わせた現地校正手法を確立し、高バックグラウンド線量下に設置している連続モニタ測定値の品質を適切に維持するための手法を構築することを目的とする。さらに、本校正手法は、コリメータを用いて散乱線を抑制できるため、現行広く行われている既存の校正手法では見積もることができない校正における不確かさを評価できる可能性がある。本研究では、校正における不確かさの評価手法についても合わせて検討する。

### 1-2 研究の目的

現在、我が国では原子力施設を中心に環境の放射線量を連続的に測定するためのモニタリングポストに代表される連続モニタが多数設置・運用されている。

我が国における連続モニタの測定値の品質を保証するための取り組みについては、原子力規制委員会が開催している「環境放射線モニタリング技術検討チーム」の第5回会合において議論され、「平常時モニタリングについて（原子力災害対策指針補足参考資料）」の中に取りまとめられている。当該資料では、「モニタリングポスト等による空間放射線量率の測定に関しては、測定器について定期的な校正又は確認校正により健全性を確認する必要がある。」とされ、連続モニタの測定値の品質の保証には、定期的な校正が必須であることが明記されている。

我が国における連続モニタは、検出器及び演算処理部が建屋等に強固に固定されていることが多く、装置を取り外して校正施設等で校正することが困難である。また、連続測定が義務づけられている場合もあることから、欠測期間を最小限にできる現地校正が行われて

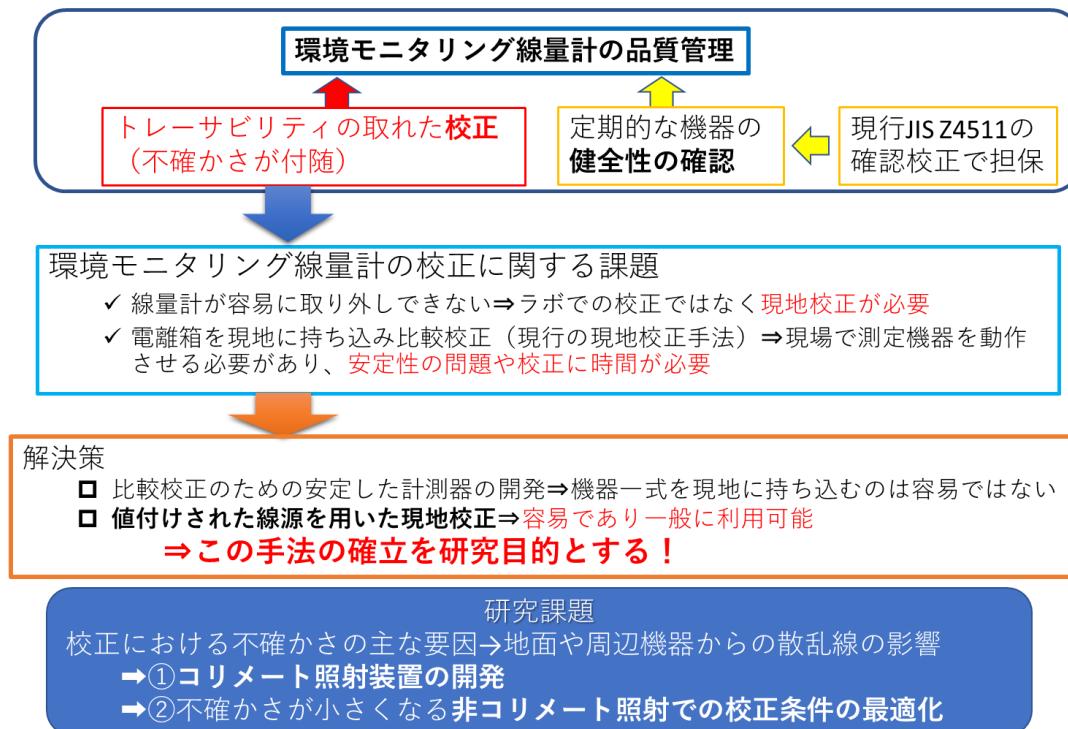
いる。

一方、東京電力福島第一原子力発電所事故以降、福島県内を中心に多くの連続モニタが配置されているが、一部の地域では、校正に用いる照射線量に対して無視できないレベルのバックグラウンド線量が存在し、現地校正を容易に行うことができない状況にある。しかしながら、この課題を解決するための系統的な研究はなされていないのが現状である。このため高バックグラウンド線量下における現地校正技術の開発が喫緊の課題となっている。

本研究では、既存の校正手法では不得意な高バックグラウンド線量下においても精度よく校正を行うため、散乱線を低減させるためのコリメータ及び簡易遮へいを組み合わせた現地校正手法を確立することを目的とする。さらに本校正手法は、コリメート照射による校正となっており、モニタリングポストの周辺機器からの散乱線を無視できる程度に低減することが可能である。線量率が付与された線源を用いる既存の校正手法では、周辺機器からの散乱線の影響があり、またこれらの影響の度合いも周辺機器の配置に大きく依存してしまう。このため、従来手法では校正の不確かさ評価が非常に困難であるが、本手法は周辺機器の配置に依存せず不確かさ評価が可能である。このため、校正における不確かさの評価手法及びその妥当性についても合わせて検討する。

H30 年度では、高バックグラウンド線量下において現地校正できるよう、既存の照射装置を改良し、下方向に向けたコリメート照射装置を開発した。本手法と基準電離箱による現地校正手法との比較を行い、その妥当性を確認した。

## 環境モニタリング線量計の品質管理に関する課題



環境モニタリング線量計の品質管理に関する課題点と本研究の位置づけ

令和元年度では、校正手法の妥当性確認のために、照射装置及び可搬型モニタリングポストを福島県内の高バックグラウンド地域に持ち込み校正を行い、従来手法での校正結果と比較を行う。また現地にすでに設置されているモニタリングポストについて、本手法による校正を行う。

## 2 高線量地域（福島県内）での実証実験地点の選定及びその光子スペクトルについて

（本章は、平成 30 年度調査に対する報告内容である）

### 2-1 高線量地域の実証実験のための MP の選定

福島県内に設置されている約 4000 基の MP について、高線量地域に設置されている線量計の選定（抽出）を行った。また、現地校正が可能な線量計の選定を行った。選定（抽出）は原子力規制委員会ホームページ“放射線モニタリング情報”により検索した。選定（抽出）した結果を表 1 に示す。なお、高線量地域は、 $1\mu\text{Sv/h}$  ( $=1\mu\text{Gy/h}$ ) 以上とした。

表 1 福島県内の高線量地域（ $1\mu\text{Sv/h}$  以上）に設置されている MP

市町村	設置場所	線量率	単位	ポスト種類
浪江町	小丸多目的集会所	8.37	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	やすらぎ荘<平成25年12月に新規設置>	7.37	$\mu\text{Sv/h}$	○
浪江町	大柿簡易郵便局（葛尾村営バス停脇）	4.442	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	昼曾根屯所	3.948	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	南津島下冷田 2（環境省設置）	3.708	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	福島県立浪江高等学校津島校	3.587	$\mu\text{Sv/h}$	○
浪江町	大字下津島字大和久地内<平成25年12月に新規設置>	3.43	$\mu\text{Sv/h}$	○
浪江町	陶芸の杜おおぼり	3.43	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	赤字木字白石森地内（環境省設置）	3.243	$\mu\text{Sv/h}$	○
浪江町	手七郎集会所	2.956	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	葛久保集会所	2.928	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	賀老集会所	2.692	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	南津島下冷田 1（環境省設置）	2.595	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	赤字木集会所	2.529	$\mu\text{Sv/h}$	◇

浪江町	室原上組集会所<平成25年12月に新規設置>	2.309	μ Sv/h	○
浪江町	南下コミュニティーセンター	2.12	μ Sv/h	◇
浪江町	南津島上集会所<平成25年12月に新規設置>	1.895	μ Sv/h	○
浪江町	末森集会所<平成25年12月に新規設置>	1.808	μ Sv/h	○
浪江町	下津島集会所<平成25年12月に新規設置>	1.604	μ Sv/h	○
浪江町	室原公民館	1.568	μ Sv/h	◇
浪江町	赤字木字白追地内（環境省設置）	1.547	μ Sv/h	○
浪江町	浪江町立津島小学校	1.492	μ Sv/h	○
浪江町	室原北向集会所<平成25年12月に新規設置>	1.35	μ Sv/h	○
浪江町	酒井集会所	1.288	μ Sv/h	◇
浪江町	南津島広谷地（環境省設置）	1.244	μ Sv/h	◇
浪江町	末森中継ポンプ場<平成25年12月に新規設置>	1.235	μ Sv/h	○
浪江町	南津島局	1.106	μ Sv/h	■
富岡町	国道6号線富岡町新夜ノ森地内	2.066	μ Sv/h	○
富岡町	夜の森つつみ公園<平成25年12月に新規設置>	2.035	μ Sv/h	○
富岡町	小良ヶ浜多目的運動広場<平成25年12月に新規設置>	1.751	μ Sv/h	○
富岡町	桜2丁目公園<平成25年12月に新規設置>	1.732	μ Sv/h	○
富岡町	新田第三なかよし広場（福島県設置）	1.652	μ Sv/h	○
富岡町	小良ヶ浜多目的集会所	1.596	μ Sv/h	◇
富岡町	新田多目的集会所	1.342	μ Sv/h	■
飯館村	長泥字曲田地内（福島県設置）	1.853	μ Sv/h	○
飯館村	村道長泥曲田線（環境省設置）	1.787	μ Sv/h	○
飯館村	比曾字下比曾地内（福島県設置）	1.506	μ Sv/h	○
南相馬市	鉄山ダム	1.129	μ Sv/h	◇
大熊町	夫沢三区地区集会所	8.923	μ Sv/h	◇
大熊町	大熊町 夫沢	7.937	μ Sv/h	■
大熊町	小入野地区公民館	6.324	μ Sv/h	◇
大熊町	大熊町水産振興公社（福島県設置）	5.346	μ Sv/h	○
大熊町	大熊町 南台	5.294	μ Sv/h	■
大熊町	夫沢二区地区集会所	4.498	μ Sv/h	◇
大熊町	熊町小学校	4.329	μ Sv/h	◇
大熊町	小入野東平2（環境省設置）	4.233	μ Sv/h	○
大熊町	小入野東平1（環境省設置）	3.87	μ Sv/h	○

大熊町	下野上一区地区集会所	3.728	$\mu$ Sv/h	◇
大熊町	町区集落センター	3.541	$\mu$ Sv/h	◇
大熊町	大熊町保健センター<平成25年12月に新規設置>	2.92	$\mu$ Sv/h	○
大熊町	大熊町図書館<平成25年12月に新規設置>	2.627	$\mu$ Sv/h	○
大熊町	ふれあいパーク<平成25年12月に新規設置>	2.612	$\mu$ Sv/h	○
大熊町	大熊町スポーツセンター<平成25年12月に新規設置>	2.576	$\mu$ Sv/h	○
大熊町	野馬形地区集会所<平成25年12月に新規設置>	2.484	$\mu$ Sv/h	◇
大熊町	大和久区地区集会所<平成25年12月に新規設置>	2.28	$\mu$ Sv/h	◇
大熊町	国道6号線大熊町西大和久地内	2.203	$\mu$ Sv/h	○
大熊町	駅前地区集会所<平成25年12月に新規設置>	2.084	$\mu$ Sv/h	◇
大熊町	大熊町文化センター<平成25年12月に新規設置>	2.043	$\mu$ Sv/h	○
大熊町	大熊町保育所<平成25年12月に新規設置>	1.911	$\mu$ Sv/h	○
大熊町	旭台公園<平成25年12月に新規設置>	1.848	$\mu$ Sv/h	○
大熊町	下野上二区地区集会所<平成25年12月に新規設置>	1.818	$\mu$ Sv/h	◇
大熊町	大熊町 熊川	1.79	$\mu$ Sv/h	■
大熊町	大熊中学校	1.637	$\mu$ Sv/h	◇
大熊町	夫沢一区地区集会所	1.634	$\mu$ Sv/h	◇
大熊町	小入野東平3 (環境省設置)	1.494	$\mu$ Sv/h	○
大熊町	熊三区地区集会所<平成25年12月に新規設置>	1.4	$\mu$ Sv/h	◇
大熊町	熊川区地区集会所	1.395	$\mu$ Sv/h	◇
大熊町	大熊町 向畑	1.339	$\mu$ Sv/h	■
大熊町	野上二区地区集会所<平成25年12月に新規設置>	1.263	$\mu$ Sv/h	◇
大熊町	大熊町 大野	1.113	$\mu$ Sv/h	■
大熊町	野上一区地区集会所	1.05	$\mu$ Sv/h	◇
双葉町	谷沢町集会所 (福島県設置)	5.402	$\mu$ Sv/h	○
双葉町	JA双葉北部営農センター<平成25年12月に新規設置>	5.333	$\mu$ Sv/h	○
双葉町	双葉町 山田(山田農村広場)	4.578	$\mu$ Sv/h	■



双葉町	石熊公民館	1.95	$\mu$ Sv/h	◇
双葉町	双葉町青年婦人会館<平成25年12月に新規設置>	1.75	$\mu$ Sv/h	○
双葉町	双葉町 新山(双葉町体育館)	1.325	$\mu$ Sv/h	■
双葉町	双葉幼稚園<平成25年12月に新規設置>	1.323	$\mu$ Sv/h	○
葛尾村	木取場入口バス停付近(福島県設置)	3.122	$\mu$ Sv/h	○
葛尾村	野行集会所近傍<平成25年12月に新規設置>	1.789	$\mu$ Sv/h	○
葛尾村	葛尾村柏原地区	1.709	$\mu$ Sv/h	◇

○：リアルタイム線量測定システム    ◇：可搬型モニタリングポスト    ■：固定型モニタリングポスト

注) 原子力規制委員会ホームページ “放射線モニタリング情報”により検索した結果。

検索は平成 30 年 9 月 4 日 0:00 のデータを用いた(富岡町 南津島局は平成 30 年 9 月 5 日 0:00 の測定データ)。

検索した時間において、機器調整等による調整中が行われていた測定地点のデータは含まれていない。

原子力規制委員会ホームページ“放射線モニタリング情報”により検索した結果、 $1\mu$  Sv/h 以上の測定場所は、平成 30 年 9 月 4 日 0:00 現在 81 地点であった。最も高い測定値を示している場所は、大熊町の夫沢三区地区集会所の  $8.9\mu$  Sv/h、次いで浪江町の小丸多目的集会所の  $8.4\mu$  Sv/h であった。市町村別では、浪江町が 27 場所、富岡町が 7 場所、南相馬市が 1 場所、大熊町が 33 場所、双葉町が 7 場所、飯館村が 3 場所、葛尾村が 3 場所であった。ポストの種類別では、固定型モニタリングポストが 9 場所、可搬型モニタリングポストが 34 場所、リアルタイム線量計システムが 38 場所であった。

$1\mu$  Sv/h 以上の高線量地域の 34 場所に設置されている主な可搬型モニタリングポストについて、特徴を表 2 に示す。また、設置場所で採寸した可搬型モニタリングポストを図 1 及び 2 に示す。

表 2 高線量地域に設置されている主な可搬型モニタリングポストの特徴

設置場所		線量率 ( $\mu$ Sv/h)	特徴			
			A	B	C	D
浪江町	小丸多目的集会所	8.37	無	有 約 1m	上	NaI/ 半導体型
大熊町	夫沢二区地区集会所	4.50				
浪江町	大柿簡易郵便局	4.44				

	(葛尾村営バス停脇)					
大熊町	熊町小学校	4.33				
浪江町	昼曾根屯所	3.95				
浪江町	手七郎集会所	2.96				
浪江町	賀老集会所	2.69				
浪江町	赤宇木集会所	2.53				
双葉町	石熊公民館	1.95	有	※	横	半導体型
葛尾村	葛尾村柏原地区	1.71		無		
大熊町	野上一区地区集会所	1.05	無	有 約 1m	上	NaI/ 半導体型

A：フェンスの設置

B：ソーラーパネル等、線源照射に影響の可能性がある検出器上部の付属物の有無  
(表中の数字は検出器と付属物の距離)

※双葉町石熊公民館は検出器の横方向に線源を設置する際に、線源の設置位置によりフェンスが影響

C：校正時の検出器に対する線源設置方向

上：検出器の軸に対して垂直方向

横：検出器の軸に対して水平方向

D：検出器（富士電機製（原子力規制庁所有））

注）線量率は原子力規制委員会ホームページ“放射線モニタリング情報”により検索した結果である。検索は平成30年9月4日0:00のデータを用いた。

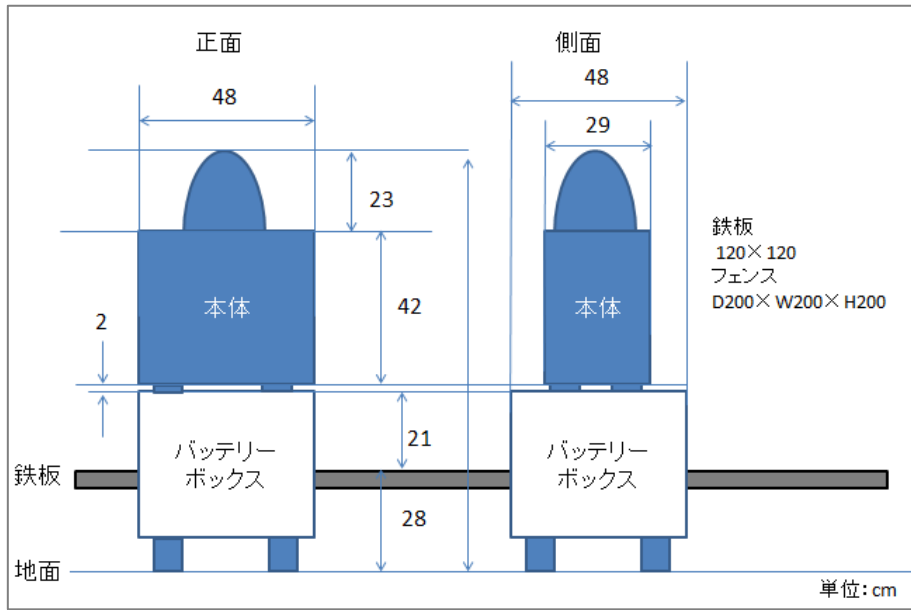


図1 設置場所で採寸した可搬型モニタリングポストの寸法(富士電機製 半導体型)

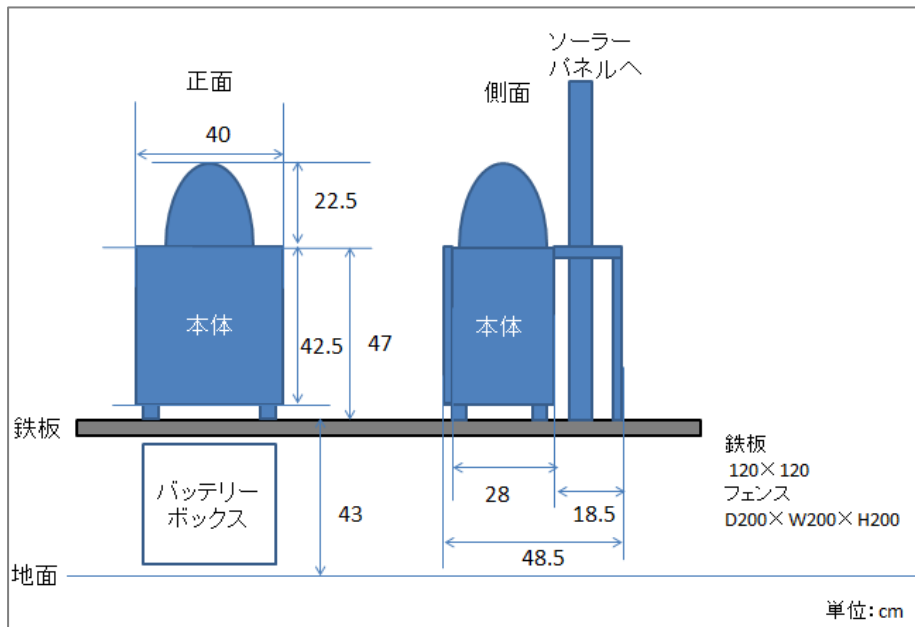


図2 設置場所で採寸した可搬型モニタリングポストの寸法

(富士電機製 NaI/半導体型)

## 2-2 高バックグラウンド地域に設置されているモニタリングポストの選定

1  $\mu\text{Sv/h}$  以上の線量率となっているモニタリングポストを2か所選定し、線量率測定、スペクトル測定、遮へい効果の検証を行った。調査を行った地点は以下の通りである。

- ・福島県双葉郡双葉町

同町内の石熊公民館敷地内に設置されている可搬型モニタリングポスト（図3）

- ・福島県双葉郡大熊町

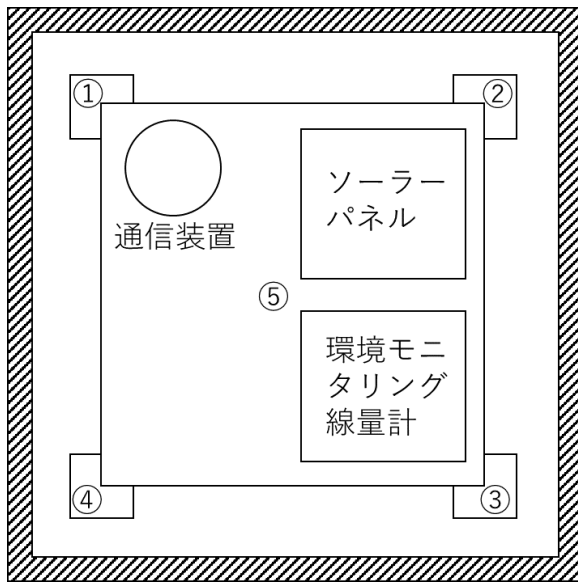
同町内の夫沢二区地区集会所敷地内に設置されている可搬型モニタリングポスト（図4）

## 2-3 サーベイメータによるモニタリングポスト周辺の線量率分布

### （1）双葉町モニタリングポスト



図3 調査を行った双葉町に設置されている可搬型モニタリングポスト



※斜線部はフェンス

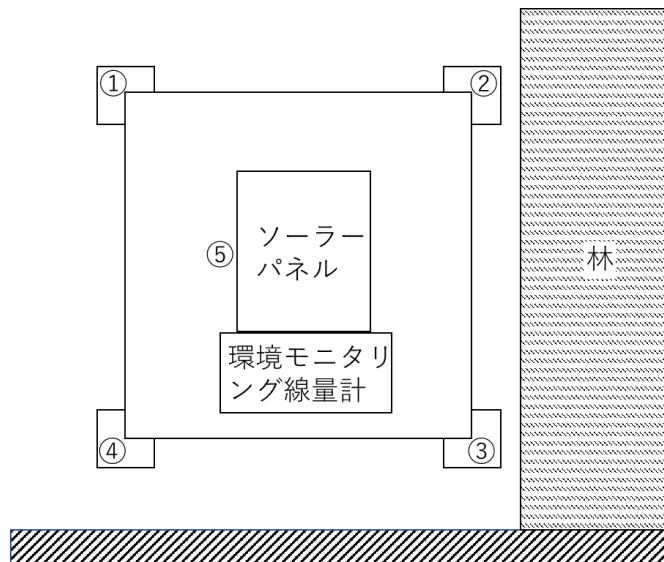
- ① 2.28  $\mu\text{Sv/h}$
- ② 2.24  $\mu\text{Sv/h}$
- ③ 2.28  $\mu\text{Sv/h}$
- ④ 2.37  $\mu\text{Sv/h}$
- ⑤ 1.97  $\mu\text{Sv/h}$

- ・ 中心では鉄板の影響のせいか、線量率が減少。地面付近で線量率が高い。
- ・ モニタリング装置とソーラーパネル間の距離は約 50 cm

(2) 大熊町モニタリングポスト



図4 調査を行った大熊町に設置されている可搬型モニタリングポスト



- ① 4.72  $\mu\text{Sv/h}$
- ② 5.57  $\mu\text{Sv/h}$
- ③ 5.32  $\mu\text{Sv/h}$
- ④ 4.24  $\mu\text{Sv/h}$
- ⑤ 4.50  $\mu\text{Sv/h}$

- ・ 駐車場（アスファルト上）に設置されたモニタリングポスト
- ・ 土の多い林に近いほど線量率が上昇

2か所のモニタリングポスト周辺はまだ除染が行われておらず、周辺の地形や設置されている地面の状況により、線量率に大きな分布があることが分かった。

#### 2-4 スペクトル測定

それぞれのモニタリングポストそばで、CdZnTe 検出器によるスペクトル測定を行った。測定された波高分布データと応答関数をもとに、アンフォールディングにより光子スペクトルを求めた。(図 5、6)

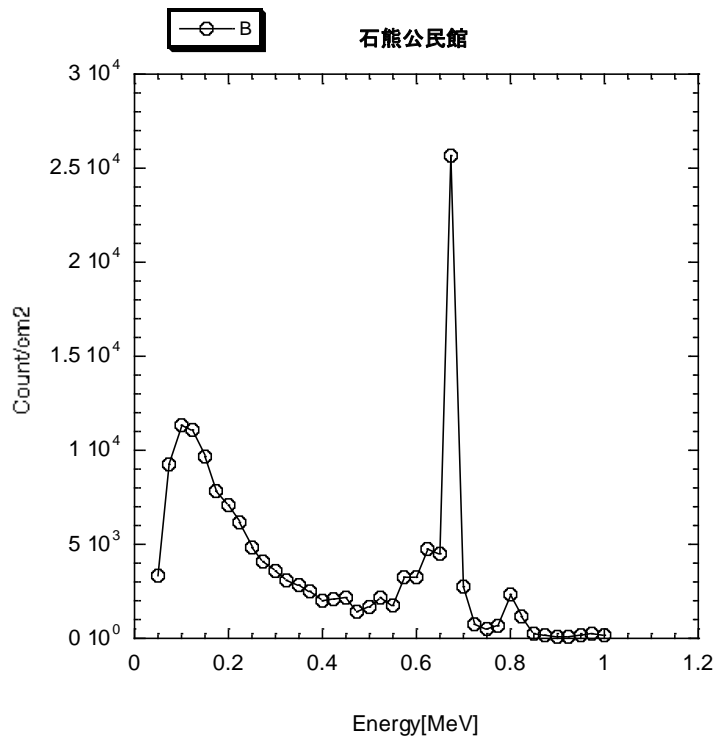


図 5 双葉町に設置されている可搬型モニタリングポスト付近の光子スペクトル

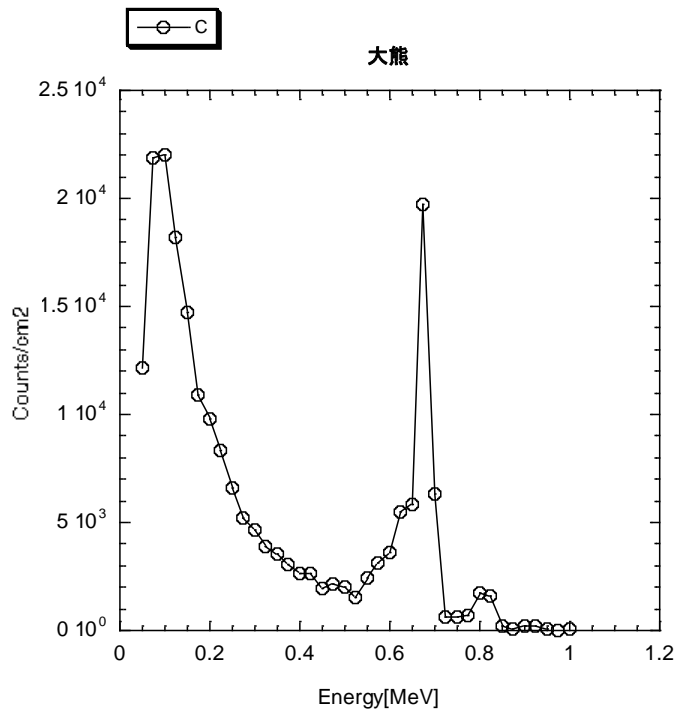


図6 大熊町に設置されている可搬型モニタリングポスト付近の光子スペクトル

両者のスペクトルを見て明らかなように、Cs-137からの0.6 MeVガンマ線のピークが確認された。また0.8 MeV付近にも小さなピークが確認され、Cs-134が存在していることが分かった。研究代表者が以前から行っている福島県内のスペクトル測定の結果からも同様のスペクトルデータが得られており、これは未除染で測定位置のすぐそばに放射性物質が沈着していることを意味している。また双葉町と大熊町のスペクトルを比較すると、大熊町の散乱線成分が多いことが分かった。双葉町のモニタリングポストは広い平地に設置されていたが、大熊町はモニタリングポストのすぐ脇に林があり、サーベイメータの計測でも林の中の線量が大きく、放射性物質が多く沈着していることが確認できた。大熊町でのこの散乱線成分が多いのは、この隣接する林から飛来しているためだと推測される。



## 2-5 遮へいの効果について

CdZnTe 検出器の周りに銅板を配置し、どれくらい線量率が減少するか検討を行った。以下に測定時の写真を示す。

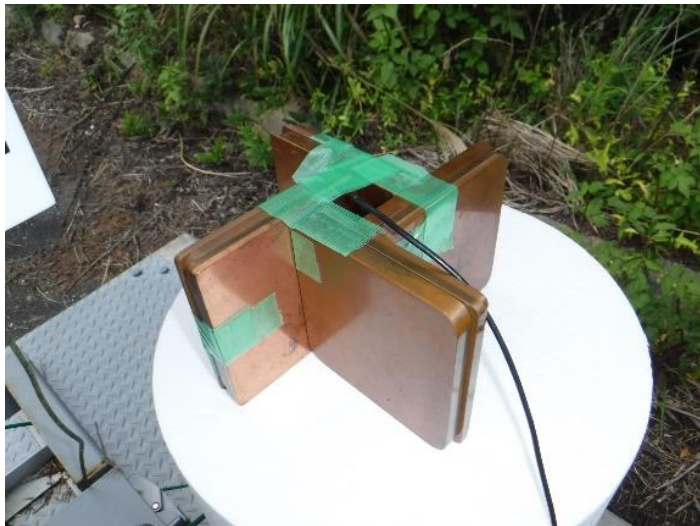


図7 側面4方向を遮へいした場合



図8 下方向及び屋根による側面2方向、上方方向を遮へいした場合



図9 下方方向のみを遮へいした場合

以下に測定された線量率及び減少率を表3,4に示す。

表3 石熊公民館での測定結果

遮へいなし	下のみ Cu19mm	屋根のみ 19mm	屋根+下 19mm	側面 19mm
1.88 $\mu\text{Sv/h}$	1.01 $\mu\text{Sv/h}$	1.30 $\mu\text{Sv/h}$	0.7 $\mu\text{Sv/h}$	0.59 $\mu\text{Sv/h}$
減少率	0.54	0.69	0.37	0.31

表4 大熊町での測定結果

遮へいなし	下のみ Cu19mm	屋根のみ 19mm	屋根+下 19mm	側面 19mm
3.85 $\mu\text{Sv/h}$	3.16 $\mu\text{Sv/h}$	3.33 $\mu\text{Sv/h}$	1.92 $\mu\text{Sv/h}$	1.49 $\mu\text{Sv/h}$
減少率	0.82	0.86	0.50	0.39

減少率から、Cs-137 の 662keV ガンマ線の減弱係数とほぼ同じであることが分かった。Pbを遮へい体とした場合、厚さ 10mm で Cu20mm と同等の遮へい効果となり、Pb20mmであれば、減弱率が0.3から0.1となる。ただしこれは理想的に検出器周りを覆った場合で、実際のモニタリングポストを考えると、検出器の上部に保護用のケースがあることから、検出器と遮へい体の間に空間が生じ、遮へい効果が低下することが想定される。

この測定結果から、鉛の遮へい体を 20 mm 厚とすることとした。

### 3 コリメート照射装置及びモニタリングポスト遮へい体の製作

高バックグラウンド地域に多く設置されているモニタリングポストは、可搬型モニタリングポストを固定して使用されている。これらのモニタリングポストを製作している主要なメーカーに問い合わせしたところ、顧客からの特段の要請がない限り、上方からの照射による校正を行っているという回答を得た。そこで本研究でも、上方から照射する方法で校正が行える装置の開発を行った。

#### 3-1 照射装置及び遮へい体の製作

図 10 に、設計した照射装置及び遮へい体の設計図を示す。地上に広範囲に放射性物質が沈着している状況では横方向から来る直接線や散乱線が多いことが推測できたことから、遮へい体をなるべく検出器周りに近い位置に配置できるように設計している。これにより、遮へい体の容積を最小とすることができ軽量化を図っている。鉛のリングを重ねる形となっており、リングの厚さは 20 mm である。リングの重量は 1 個約 2 kg となっており、リングを 5 個重ねて使用する。線源部分は、下方向に照射できるよう、コリメータ付きの照射装置となっている。また線源周りも周囲からの散乱線低減のため線源部分を遮へいしている。コリメータ部分の重量は、約 10 kg である。このコリメータ部分は、レーザー距離計と入れ替えることが可能となっており、これにより線源からモニタリングポストまでの距離を精度よく計測することが可能となっている。

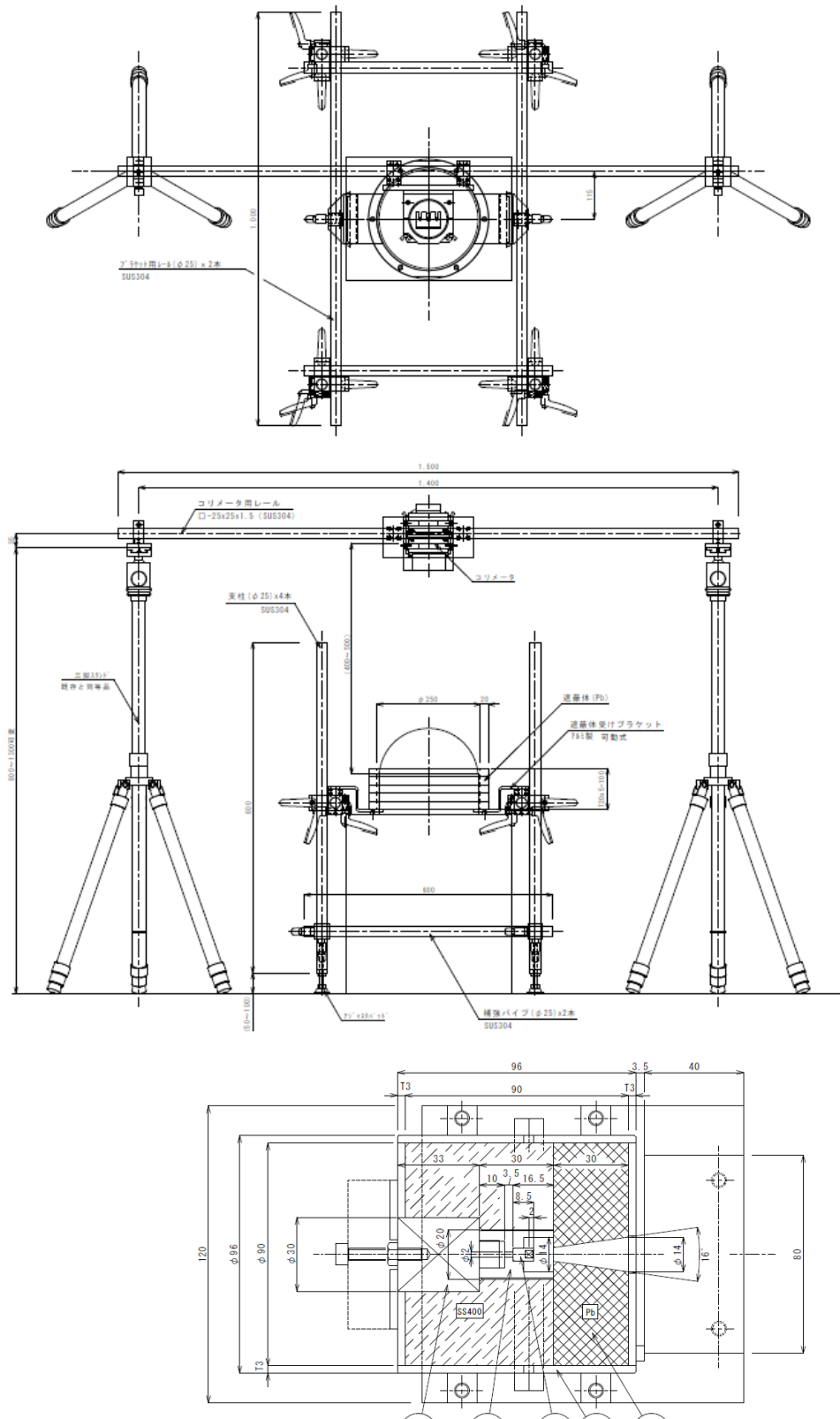


図 10 下方向照射装置及びモニタリングポスト遮へい体の設計図 (上、中) と、コリメータ照射部の設計図 (下)

### 3-2 照射装置の線量率の決定

現地校正において、線源と検出器の距離合わせが最も時間を要する作業となる。そこで本研究では、実験室内において複数の線源間距離における線量率を実測により求め、この値を内挿することにより、任意の距離における線量率を求められる方法を採用した。これにより、任意の距離で校正が行えることから、セットアップの時間を大幅に短縮することが可能となった。図 11 に測定した各距離における線量率を示す。

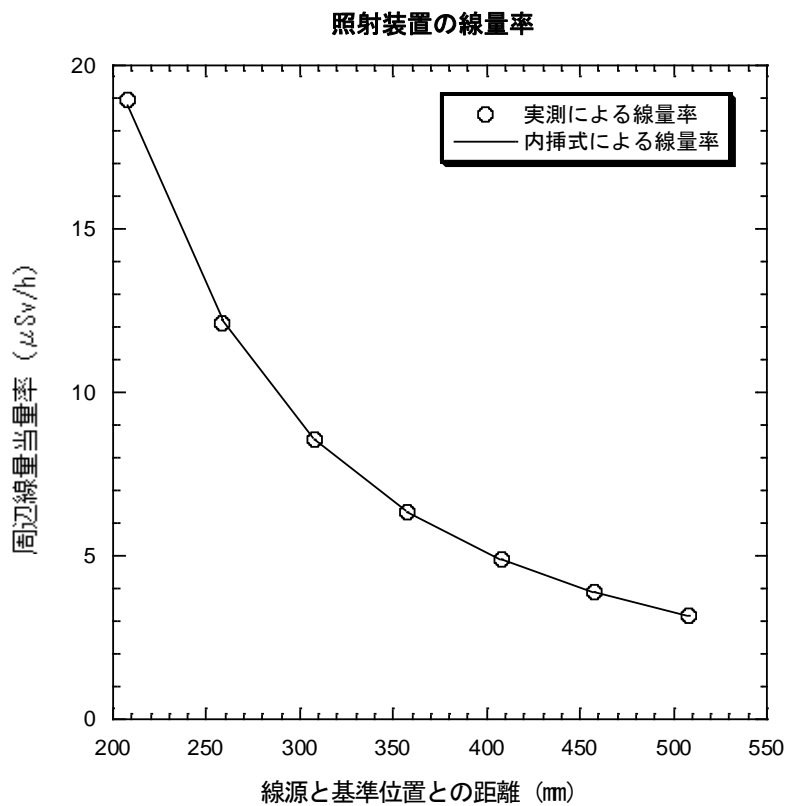


図 11 線源と各評価点における線量率の変化と、逆二乗によるフィッティングの結果。内挿式により任意の距離の線量率を決定することができることから、照射装置のセットアップの大幅な時間短縮が可能となった。

## 4 従来手法との比較

日本分析センターでは、基準電離箱を現地に持ち込み、比較測定を行うことによりモニタリングポストの現地校正を行っている。そこでこの従来の手法と、今回開発した手法との比較を行った。なお、現在の環境放射線モニタリングは「周辺線量当量 (Sv)」で評価することとなっているが、一部測定器では「空気吸収線量 (Gy)」で測定されている機器もある。4章以降では空気吸収線量を示す機器を対象としていることから、空気吸収線量の表記である Gy で示している。

### 4-1 日本分析センターによる現地校正結果

#### (1) 比較正器

屋外(受託事業者敷地内)に受託者が所有する被校正器を設置し、検出器の中心位置から1.5mの距離でCs-137の $\gamma$ 線源を約 $1\mu\text{Gy/h}$ の線量率で照射し、1分間隔で10回の繰り返し測定を行った。 $\gamma$ 線源を撤去し、バックグラウンドの測定を $\gamma$ 線源と同様の時間及び回数で行った。10回の測定値から平均値を求め、 $\gamma$ 線源の平均値からバックグラウンドの平均値を差し引き正味の値を求めて被校正器の値とした。被校正器の仕様を表5に示す。

表5 被校正器の仕様

品名	可搬型モニタリングポスト
メーカー	富士電機株式会社
型式	NAJ51001-01 型
検出器	2inch $\phi$ $\times$ 2inch NaI(Tl)検出器 ワイドレンジタイプ
測定線量率範囲	10nGy/h $\sim$ 100mGy/h

#### (2) 実用標準

被校正器の近傍に国家標準とトレーサビリティのとれた実用標準(基準電離箱線量計)を設置し、被校正器と同一に検出器中心位置から1.5mの距離でCs-137の $\gamma$ 線源を約 $1\mu\text{Gy/h}$ の線量率で照射し、200秒間隔で5回の繰り返し測定を行った。 $\gamma$ 線源を撤去し、バックグラウンドの測定を $\gamma$ 線源と同様の時間及び回数で行った。繰り返しの測定値から平均値を求め、 $\gamma$ 線源の平均値からバックグラウンドの平均値を差し引き正味の値を求めて校正定数(二次標準から供給)を乗じ、空気密度補正を行い、基準の値とした。実用標準(基準電離箱線量計)の仕様を表6に示す。

表 6 実用標準（基準電離箱線量計）の仕様

品名	空気等価電離箱線量計
メーカー	株式会社ネスコ
型式	808-MR20 STD/V 型
検出器	フェノール樹脂製 21L 円筒形
測定線量率範囲	バックグラウンド～200 $\mu$ Gy/h

現地校正の様子を図 10 及び図 11 に示す。



図 10 比較正器への照射風景



図 11 基準電離箱への照射風景

#### 4-2 本研究による現地校正手法

現地校正手法による校正を行った場所において同じ被校正器（受託者所有）を用いて、産総研開発手法による校正が行われた。産総研により行われた校正の概要を以下に示す。

検出器上方にコリメート照射装置をセットし、検出器の中心が照射軸上になるよう位置調整を行った。コリメート照射装置に Cs-137 の  $\gamma$  線源を取り付け、検出器の中心位置から約 0.4m の距離（距離は任意で設定）で約  $4\mu\text{Gy/h}$  の線量率で照射し、1 分間隔で 10 回の繰り返し測定を行った。 $\gamma$  線源を撤去し、バックグラウンドの測定を  $\gamma$  線源と同様の時間及び回数で行った。10 回の測定値から平均値を求め、 $\gamma$  線源の平均値からバックグラウンドの平均値を差し引き正味の値を求めて被校正器の値とした。

照射時の線量率は、図 10 に示したように予め実測から求めた逆二乗のフィッティング式により今回校正を行った距離における線量率を算出して基準値とした。

なお、コリメート照射装置及び  $\gamma$  線源は産総研が持参したものである。校正の様子を図 12 に示す。





図 12 本研究で開発した照射装置による校正風景

#### 4-3 校正結果の比較

##### (1) 日本分析センターによる基準電離箱線量計を用いた校正結果

日本分析センターによる基準電離箱を用いた現地校正手法による校正結果を表 7 に示す。

表 7 日本分析センターによる基準電離箱を用いた現地校正手法による校正の結果

核種	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	校正距離 (m)	線量率 ( $\mu$ Gy/h)	校正定数	不確かさ* (%)
Cs-137	660	1.5	0.84	1.03	6.7

\*校正の不確かさは、拡張不確かさ(k=2)を表す。

拡張不確かさは、ISO 国際文書”Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (1995)” (「計測における不確かさの表現ガイド」)に基づき、合成標準不確かさと包含係数 k=2 とから決定されたもので、約 95%の信頼の水準を持つと推定される区間を定めたものである。

##### (2) 本研究手法による校正結果

産総研開発手法による校正の結果を表 8 に示す。なお日本分析センターの校正では、モニタリングポスト周辺を遮へいすることは行っていないため、本研究による校正もモニタリングポストの検出器周りの遮へい体はない状態とした。

表 8 産総研開発手法による校正の結果

核種	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	校正距離 (m)	線量率 ( $\mu$ Gy/h)	校正定数
Cs-137	660	0.43	3.5	1.01

日本分析センターの現地校正手法による校正定数は 1.03、同じ被校正器に対して校正を行った産総研開発手法による校正定数は 1.01 であった。日本分析センターの現地校正手法による校正定数を基準にして産総研開発手法による校正定数を比較した結果は、0.98(−2%) であり±3%以内で一致した結果であった。

また本手法によるモニタリングポストの検出器周りの遮へい体の有無による校正結果の影響についても検証を行った。結果を表 9 に示す。

表 9 遮へい体の有無による校正結果の比較

校正手法	本研究での校正結果 (遮へい体なし)	本研究での校正結果 (遮へい体あり)
校正定数 (空気吸収線量)	1.01	1.03

2%程度の違いが見られたが、本校正手法の相対標準不確かさはおよそ 3%程度あると考えられることから、不確かさの範囲内で一致していることが確認できた。

## 5. 高線量地域での実証実験

### 5.1. 従来の現地校正手法による校正結果との比較

高線量域で本研究による校正の妥当性確認のため、従来手法による校正結果との比較を行った。比較のため、事前に日本分析センターにおいて基準電離箱を用いた従来手法による校正を行った。

#### 1) 被校正器

屋外に被校正器を設置し、令和元年9月24日(火)に従来の現地校正手法による校正試験を実施した。被校正器の仕様を表10に示した。検出器の中心位置から鉛直方向に1.5mの距離でCs-137の $\gamma$ 線源を約 $1\mu\text{Gy/h}$ の線量率で照射し、測定時間1分間で10回の繰り返し測定を行った。 $\gamma$ 線源を撤去し、バックグラウンドの測定を同条件で行った。 $\gamma$ 線源の10回の測定値から平均値を求め、バックグラウンドの平均値を差し引いた正味値を、被校正器の測定値とした。

表10 被校正器の仕様

品名	可搬型モニタリングポスト
メーカー	富士電機株式会社
型式	NAJ51001-01 型
検出器	2inch $\phi$ $\times$ 2inch NaI(Tl)検出器 ワイドレンジタイプ
測定線量率範囲	10nGy/h $\sim$ 100mGy/h

#### 2) 実用標準

被校正器の近傍に国家標準とトレーサビリティのとれた実用標準(基準電離箱線量計)を設置し、校正試験を実施した。実用標準の仕様を表11に示した。被校正器と同条件の検出器の中心から1.5mの距離でCs-137の $\gamma$ 線源で照射し、測定時間200秒間で5回の繰り返し測定を行った。 $\gamma$ 線源を撤去し、バックグラウンドの測定を同条件で行った。 $\gamma$ 線源の5回の測定値から平均値を求め、バックグラウンドの平均値を差し引いた正味値に校正定数(二次標準から供給)を乗じ、空気密度補正を行って基準の値とした。

表 11 実用標準の仕様

品名	空気等価電離箱線量計
メーカー	株式会社ネスコ
型式	808-MR20 STD/V 型
検出器	フェノール樹脂製 21L 円筒形
測定線量率範囲	バックグラウンド～200 $\mu$ Gy/h

3) 従来の現地校正手法による校正試験

従来の現地校正手法による校正試験結果を表 12 に示した。

表 12 従来の現地校正手法による校正試験結果

核種	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	校正距離 (m)	線量率 ( $\mu$ Gy/h)	校正定数	不確かさ* (%)
Cs-137	660	1.5	0.83	1.06	7.5

\*校正の不確かさは、拡張不確かさ(k=2)を表す。

拡張不確かさは、ISO 国際文書“Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (1995)”（「計測における不確かさの表現ガイド」）に基づき、合成標準不確かさと包含係数 k=2 から決定されたもので、約 95%の信頼の水準を持つと推定される区間を定めたものである。

4) 高線量地域における本手法による校正結果

図 13 に示したように、双葉町及び大熊町において持ち込んだ可搬型モニタリングポストに対して校正を行った。校正結果を表 13 に示す。



図 13 双葉町（左）及び大熊町（右）での可搬型モニタリングポストに対する校正風景

表 13 可搬型モニタリングポストの福島県内における校正結果。照射時正味指示値は、バックグラウンドを差し引いた値である。

校正実施 地点	遮へいなし BG ( $\mu\text{Gy/h}$ )	遮へいあり BG ( $\mu\text{Gy/h}$ )	遮へい効 果(%)	照射時正味指示 値( $\mu\text{Gy/h}$ )	照射線量 ( $\mu\text{Gy/h}$ )	校正定 数
双葉町	2.81	1.50	53	3.93	4.18	1.06
大熊町	3.74	1.72	46	6.93	7.43	1.07

事前の校正結果と比較して1%以内で一致しており、高バックグラウンド環境下においても本校正手法が妥当であることを確認することができた。

## 5.2 現地に設置されているモニタリングポストの校正結果

前述した2か所に設置されているモニタリングポストに対して、本手法による校正を行った。(図 14) 校正結果を表 14 に示す。



図 14 双葉町（左）及び大熊町（右）における設置されているモニタリングポストに対する校正風景

表 14 双葉町及び大熊町に設置されているモニタリングポストの校正結果。照射時正味指示値は、バックグラウンドを差し引いた値である。

校正実施地点	遮へいなし BG ( $\mu\text{Gy/h}$ )	遮へいあり BG ( $\mu\text{Gy/h}$ )	遮へい効果 (%)	照射時正味指示 値 ( $\mu\text{Gy/h}$ )	照射線量 ( $\mu\text{Gy/h}$ )	校正定数
双葉町	1.61	0.72	45	2.24	2.44	1.09
大熊町	3.45	1.55	45	5.59	4.75	0.85

検出器部分を覆うように鉛のリングを遮へい体として設置しているが、バックグラウンドを約 55 %低減することが確認できた。また校正結果については、2 地点における傾向が異なることが確認できた。

実証実験を行った後まもなくメーカーによる点検が行われ、その結果を表 15 に示す。

表 15 メーカー点検による基準線量率との違い

設置場所	点検実施日	核種	線量率 ( $\mu\text{Gy/h}$ )	誤差 (%)
双葉町	令和元年 10 月 10 日	Cs-137	2.7	-8.1
大熊町	令和元年 10 月 16 日		2.7	+6.7

上記の表で示している値は、基準となる線量を照射した際に、基準値に対して指示値が示すずれの割合を示している。すなわち、双葉町では基準値よりも小さい値を、大熊町では基準値よりも大きな値を示していたことになる。本研究での校正結果についても、同様の傾向を示していることが分かった。この点検では、照射している線量率が  $2.7 \mu\text{Sv/h}$  と、通常のバックグラウンドである  $3.45 \mu\text{Sv/h}$  よりも小さな線量で行っており、バックグラウンドのばらつきが大きく影響することが想定できる。それと比較して本手法では、検出器周りを遮へいしバックグラウンドを低減させていることから、照射時の線量率がバックグラウンドに対して大きく、安定した校正が行えると考えられる。

今回の現地校正の結果に対する不確かさを評価した。その結果を表 16 に示す。

表 16 本校正結果に対する不確かさ

不確かさの要因	相対標準不確かさ (%)
基準線量計校正	1.4
内挿による線量率の不確かさ	1.6
照射位置設定	1.9
不均一照射	0.6
BG および照射時のばらつき	0.4
相対標準不確かさ	2.9
相対拡張不確かさ ( $k=2$ )	5.9

相対拡張不確かさとして、6%という結果となった。日本分析センターで行っている現地校正の不確かさは 7.5% (表 12) であったことから、本手法によりより高精度の校正が実現可能であることが分かった。

### 5.3 本校正手法に関する考察

本手法では、モニタリングポストの検出器周辺を鉛リングで遮へいしバックグラウンドを低減することにより、より高精度の校正が可能となっている。遮へい効果であるが、バックグラウンドを約 55%低減できることが分かった。当初の見込みよりも遮へい効果が少なかったが、これはモニタリングポスト下の地面に沈着している放射性物質からの  $\gamma$  線に対して遮へいされていないことに起因していると考えられる。よって、追加的にバックグラウンドを低減させる必要がある場合は、モニタリングポスト下部に鉄板等の遮へい物を設置す

ることが有効であると考えられる。

本手法による校正が適応できると考えられるバックグラウンドのレベルであるが、バックグラウンド増加による校正時の指示値のばらつきに影響を与えることになる。本手法で用いている遮へい体によるバックグラウンドの低減効果を55%、最終的な校正の不確かさの許容範囲を現在実施されている日本分析センターでの校正の拡張不確かさである7.5%と仮定する。この不確かさを実現するためには、遮へい時のバックグラウンド及び照射時の指示値に対する合成不確かさを2.4%程度に抑える必要がある。モニタリングポストに用いられている検出器の種類にも起因するが、ばらつきが大きいと考えられる半導体検出器で遮へいなしのバックグラウンド線量率が16  $\mu\text{Sv/h}$  程度まで適応できることが分かった。NaI(Tl)検出器は、指示値のばらつきが小さく検出可能な上限である10  $\mu\text{Sv/h}$  や30  $\mu\text{Sv/h}$  の遮へいなしのバックグラウンド線量率まで適応可能である。半導体検出器に対しては、校正定数の拡張不確かさを10%とした場合、遮へいなしのバックグラウンド線量率30  $\mu\text{Sv/h}$  まで適応できる。

本手法はコリメート照射となっており、モニタリングポストの周辺機器等からの散乱線の影響、またその不確かさを評価する必要がないことから、より容易に校正が行える手法となっている。非コリメートの線源を用いた際の散乱線の影響をシミュレーションによって評価したが、照射時の線源強度や距離にも起因するが2%~10%程度影響があることが分かった。この影響を評価するにはシミュレーション技術や時間や手間がかかる実測が必要であることから、本校正手法が非常に有用であると考えられる。

## 6 本手法の校正手順及び不確かさの評価例

### 6.1 本手法による校正方法

#### (1) 照射システムの線量率の決定

校正に用いる前に、基準器による照射システムの線量率を実験室等で評価を行う。用いる基準器は、エネルギー特性が良く、また国家標準にトレーサブルな線量計を用いる。20 cm~60 cmの間で、異なる距離4点以上で線量率を測定し、距離の逆二乗でフィッティングを行い、以下の式の定数  $A(\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^2)$  を求める。

$$H = \frac{A}{d^2} \quad (1)$$

ここで  $H$  は距離  $d$  cm における線量率 ( $\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ ) である。

これにより、校正時において任意の距離における線量率を求めることができる。(図 11)

または、1 m 位置等の離れた距離において国家標準にトレーサブルな線量計で線量率を決定し、(1) 式の逆二乗則で外挿を行うことも可能である。その際には、適応する距離内 (20



cm～60 cm) で線量計等を用いた実測を行い、(1) 式で評価した線量率と±5 %以内で一致していることを確認する。

## (2) 現地での照射システムの設置

### (a) 遮へいリングの設置

モニタリングポストのバックグラウンド低減のためのリング型の遮へい体を設置する。遮へい体は鉛で出来ており、そのままモニタリングポストに乗せるとポスト自体に負荷をかけ破損する恐れがあることから、遮へい体を乗せるための支持具を事前に設置する。(図 15) その上に遮へいのための鉛リングを重ねる。検出器部分を効率よく遮へいするために、モニタリングポストの検出器部分を覆う半円状のカバーの最も下の位置から遮へい体を積み重ねる。リングの厚さは 2 cm であり、6 個程度積み重ねて検出器部分の側面を遮へいする。

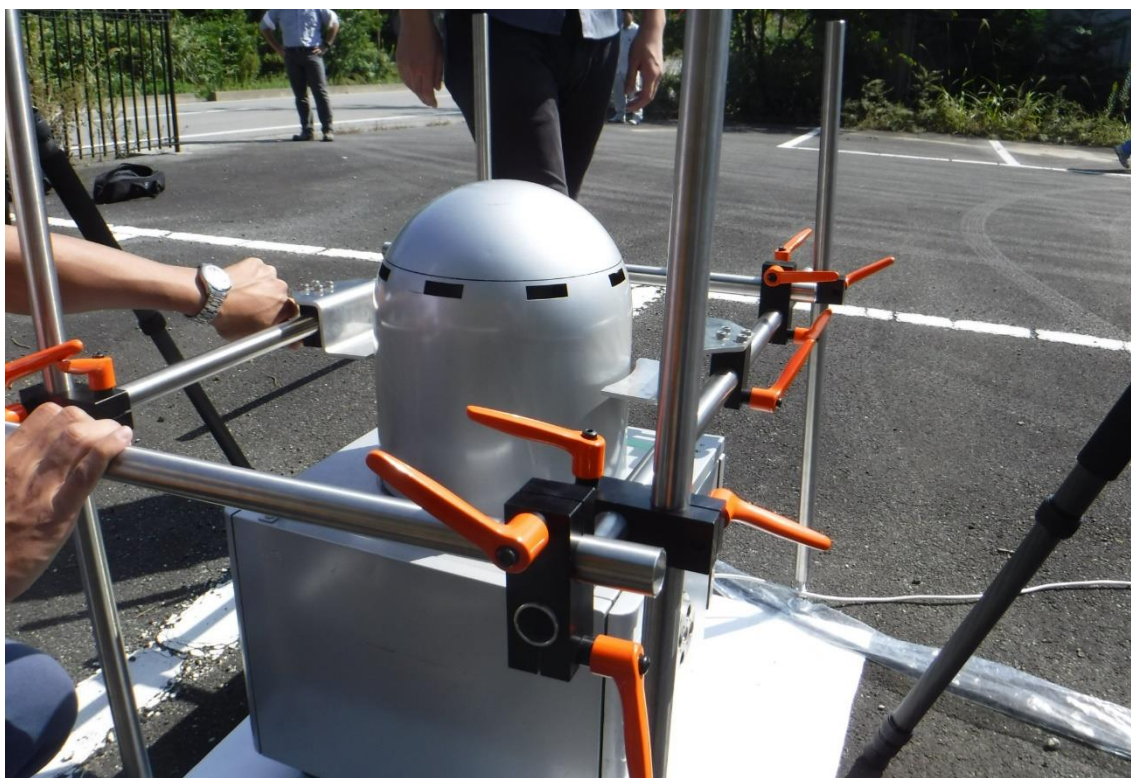


図 15 遮へい体設置のための支持具

### (b) 照射部の設置

校正のための照射部をモニタリングポストの上部に設置する。(図 16) 照射距離を正確に合わせる必要はないが、大よそ 30 cm～50 cm の距離に入るよう照射部を支える三脚の高さを調整する。真下に照射することが重要であることから、水平器を用いて照射部の指示棒が水平となるよう調節する。



図 16 モニタリングポスト中心上に照射部を配置した写真

(c) 検出器への位置合わせ及び距離の測定

照射部にレーザー距離計をセットし、レーザーをモニタリングポストへ照射する。(図 17) レーザーのポイントがモニタリングポストの検出器中心に来るように、照射部の三脚等を調整する。中心に設置できたら、その時のレーザー距離計が示す距離を記録する。



図 17 レーザー距離計による照射位置の調整風景

(d) 線源コリメータのセット

レーザー距離計を外し、照射を行うための線源コリメータを照射部にセットする。(図 18)



図 18 線源コリメータ及び遮へい体を配置した風景

### (3) バックグラウンド及び照射時の指示値の計測

校正用の線源をセットする前に、バックグラウンド線量率の計測を行う。10 回以上計測するのが望ましい。照射のための線源をセットし、同様に 10 回以上計測することが望ましい。またバックグラウンドや照射時において、モニタリングポスト周辺での人の作業も影響することから、バックグラウンド及び照射時の人の配置に変化がないように注意する。

### (4) 校正定数の算出

レーザー距離計での距離  $d_{\text{aser}}$  にモニタリングポストカバー表面から検出器の実効中心までの距離を加えて、校正時の線源—検出器間距離  $d_{\text{scd}}$  を求める。カバーから検出器実効中心までは、現地での実測やメーカーからの設計図を参考に求める。この距離と基準の線量率を求めた日からの半減期補正を行うことによって、校正時における線量率を式(1)から求める。得られた線量率を指示値で除することによって、校正定数が求められる。

## 6.2 不確かさの評価

本手法による校正の不確かさは、以下の要因が考えられる。それぞれの要因に対する不確かさの評価例を示す。

### (1) 基準線量計校正

基準線量率を求める際に用いる測定器の校正の不確かさを考慮する必要がある。校正証明書から、1.4%と見積もる。

$$u_{sta}=1.4 (\%)$$

### (2) 内挿式の不確かさ

基準線量率は、距離の異なる複数点での線量率から、フィッティングによって得られた逆二乗則の式(1)から求めることになる。この式による線量率と、フィッティングの際に用いた測定値を比較し、最も大きくずれている点を最大幅として矩形分布として評価する。

実測値とのずれが最も大きい距離でのずれの割合が2.7%であった。そこで矩形分布を仮定して次式のように見積もる。

$$u_{int}=2.7/\sqrt{3}=1.6 (\%)$$

### (3) 設定位置

レーザー距離計による距離の読み取りのばらつきと、モニタリングポストカバーから検出器実効中心までの距離のばらつきがある。いくつかのモニタリングポストを校正した経験で図面と実測との違いが最大で5mmずれがあったことから、最大5mmのずれがあると推定し、矩形分布を仮定して以下の式で評価した。距離の逆2乗で影響するので感度係数を2とし、最も距離が近い場合を想定して30cmを想定して次式のように見積もる。

$$u_{dis}=5 \times 2/300/\sqrt{3} \times 100=1.9 (\%)$$

### (4) 不均一照射

検出器のサイズに依存するが、本研究で想定したモニタリングポストでは、2inch直径×2inch長のNaI(Tl)シンチレータが最大であった。EGS5によるシミュレーションにより、平行入射と距離30cm入射での応答の違いが1%であったことから、これをばらつきの最大幅とし、矩形分布を仮定して次式のように見積もる。

$$u_{nonuni}=1.0/\sqrt{3}=0.6 (\%)$$

(5) BG 及び照射時のばらつき

BG 及び照射時の繰り返し測定から 0.4 %と見積もる。

不確かさのバジェット表を表 17 に示す。

表 17 本測定手法での校正定数の不確かさバジェット表

不確かさの要因	値 (%)	タイプ	確立分布	除数	相対標準不確かさ (%)
基準線量計校正	1.4	B	正規	1	1.4
内挿不確かさ	2.7	B	矩形	$\sqrt{3}$	1.6
設定位置	3.3	B	矩形	$\sqrt{3}$	1.0
不均一照射	1.0	B	矩形	$\sqrt{3}$	0.6
BG 及び照射時のばらつき	0.4	A	正規	1	0.4
合成相対標準不確かさ					2.9
相対拡張不確かさ ( $k=2$ )					5.9

## 7 まとめ

本研究では、既存の校正手法では不得意な高バックグラウンド線量下においても精度よく校正を行うため、散乱線を低減させるためのコリメータ及び簡易遮へいを組み合わせた現地校正手法を確立した。H30年度では、高バックグラウンド地域のモニタリングポストの設置状況調査、それを踏まえた高バックグラウンド線量下において現地校正できるよう、既存の照射装置を改良し、下方向に向けたコリメート照射装置を開発した。本手法と基準電離箱による現地校正手法との比較を行い、その妥当性を確認した。

R元年では高バックグラウンド環境下での校正手法の妥当性確認のために、照射装置及び可搬型モニタリングポストを福島県内の高バックグラウンド地域に持ち込み校正を行い、従来手法での校正結果と比較を行った。事前に従来手法で行った校正結果と1%以内で一致しており、本手法の妥当性を確認することができた。また現地にすでに設置されているモニタリングポストについて、本手法による校正を実施した。バックグラウンド線量率が $30 \mu\text{Sv/h}$ 程度でも、拡張不確かさ10% ( $k=2$ ) で校正できることが分かった。

本研究で開発された校正手法は、基準電離箱といった電氣的な機器を屋外で使用する必要がないことから、ウォーミングアップ等の時間が不要となっている。バックグラウンドが高い場所では重量物である遮へい体を用いる必要があるが、位置合わせも線源からモニタリングポストの距離を正確に合わせる必要がなく任意の距離で校正が行えるため、セットアップの作業が容易となり大幅な時間短縮となっている。従来の基準電離箱を用いた校正は、約5時間程度必要となるが、本手法であれば1時間程度で校正が行える。また現地に設置されているモニタリングポスト周辺には、通信機器や電源供給のためのソーラーパネル、蓄電池などが配置されてるが、コリメート照射による校正のため、周辺機器からの散乱線の影響を非常に小さくすることが可能となった。線量率が付与された線源を用いる従来手法では、周辺機器の配置により散乱線による影響を評価することが非常に困難であるが、本手法では容易に不確かさ評価を行うことが可能である。