

空間線量率指向性モニタリング装置の開発と測定評価

鈴木 智、小林 紀彦*、鏡淵 英紀、小藪 健、武藤 昭一

東京電力ホールディングス株式会社 福島復興本社福島本部除染推進室
(〒960-8041 福島県福島市大町 7-11 三共福島ビル 4 階)

Development and Performance Evaluation of Directional Monitoring Device on Air Dose Rate Measurement

Satoshi SUZUKI, Norihiko KOBAYASHI*, Hidenori KAGAMIFUCHI,
Ken KOYABU, and Shoichi MUTO

Decontamination Promotion Office, Fukushima Revitalization Headquarters, Tokyo Electric Power Company Holdings
(Sankyo Fukushima Bldg., 7-11 Ohmachi, Fukushima 960-8041, Japan)

Summary

The directional monitoring device for radiation was developed to ensure the effective implementation of decontamination in high air dose rate areas. This device can identify the direction of radiation which is substantially contributing to high air dose rates at monitoring points. This paper includes the results of the following evaluations making use of this device: (1) Evaluation of directional contribution of radiation to air dose rate before and after decontamination of a reinforced concrete building, (2) Evaluation of directional contribution of radiation to air dose rate before and after decontamination of a wooden building and (3) Evaluation of radiation shielding performance of sandbags in temporary storage sites for contaminated waste. These results have proved the reliability of this device in quantitative evaluations of the effectiveness of decontamination and radiation shielding.

Key Words: Directional monitoring device, Air dose rate, Effects of decontamination and radiation shielding

1. はじめに

除染を効果・効率的に行うためには、事前モニタリングで空間線量率に影響の大きい方向(対象物)を定量的に評価することが重要である。しかしながら、通常の空間線量率モニタリングに用いられるNaIシンチレーション検出器では、全方向からの線量率影響をほぼ一括で検出するため、測定箇所において線量率影響が大きい方向を評価することはできない。線量率の方向を評価する装置には、ガンマカメラやコンプトンカメラなどがあるが、これらは特殊で高価な装置である。また、川西らによる遮蔽箱を用いた装置¹⁾は水平方向の評価であり、スカイシャイン等の影響を評価するのは困難である。これらの課題に対応するために、既存のNaIシンチレーション検出器とコリメーターおよび鉛遮蔽板を組み合わせ、安価にスカイシャイン成分も含めて空間線量率影響を評価できる指向性を有するモニタリング装置(以下、指向性モニタリング装置という)を開発した。本装置を用いることで、特定方向

のみの線量率影響を定量的に評価できるとともに、装置を固定し、水平方向、上下方向の向きを変えて測定することにより、測定箇所における空間を26方向に分割して測定し、その場の空間線量率に影響を与える方向別の線量率を定量的に評価することが可能となった²⁻⁶⁾。

本論文では、指向性モニタリング装置の測定原理と照射試験結果および現地測定結果に基づく装置の有用性評価について記す。

2. 指向性モニタリング装置の概要および測定原理

(1) 指向性モニタリング装置の概要

図1に指向性モニタリング装置全体の外観を示す。装置は、水平、垂直方向の角度調整機能付きの支持架台(三脚)と1 cm厚の鉛製の円筒型のコリメーター(鉛保護のため表面はステンレス鋼で覆われている)、そしてコリメーターの内部にプローブ部分を差し込むNaIシンチレーション検出器で構成し

*Corresponding author: TEL: 080-9862-2758, E-mail: kobayashi.norihiko@tepco.co.jp



図1 指向性モニタリング装置の外観

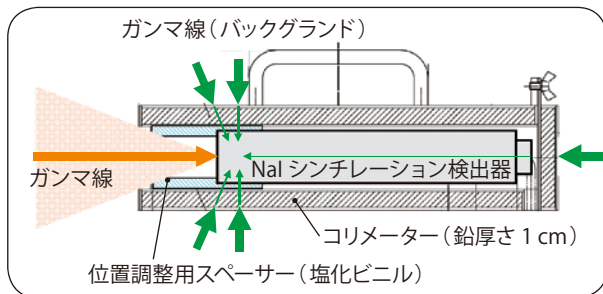


図2 1回目測定時の状態

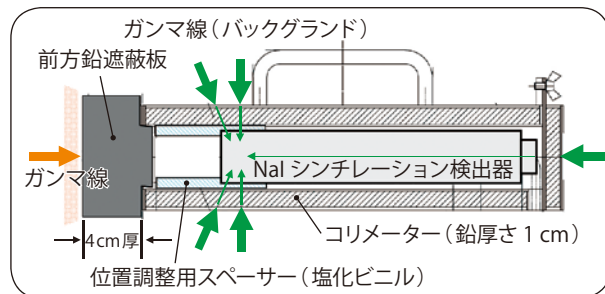


図3 2回目測定時の状態

ている。支持架台は、足を広げて設置した際に、除染現場の測定基準となる測定高さ1 mとなるように構成している。また、コリメーターについては、装置前方は筒抜け状に開放されているが、装置後方は1 cm厚の鉛製の遮蔽材で閉じられるようになっている。なお、NaIシンチレーション検出器のプロープ部分には、前方測定画角が約45度となるように、コリメーター表面から45 mm後方となる位置に固定させるための位置調整用スペーサー（塩化ビニル製）が取り付けられている。

(2) 測定原理

前方のみの線量率測定を精度良く行うためには、前方以外の方向の線量率影響を極力小さくする、またはゼロにする必要があり、それ故にコリメーターが用いられる。一般に、鉛で ^{137}Cs のガンマ線をほぼ遮蔽するためには4 cm以上（遮蔽率99%）の厚さが必要となるが、この場合、コリメーターの総重量は40 kg程度となり、現場で機動的に運用するには適さない。

そこで、指向性モニタリング装置では、過度に装置が重くならない範囲で周辺からの線量率影響を出来るだけ低減し、前方の線量率計測を容易にする方策とした。具体的には、重量（7.5 kg）である鉛1 cm厚のコリメーターを使用し、以下に記

す一方向につき合計2回の測定を行い、前方の線量率を算出する方法としている。

a) 1回目の測定

図2に1回目の測定時におけるコリメーター内部の状態を示す。1回目の測定では、NaIシンチレーション検出器をコリメーターに挿入した状態で測定すると、開放されている前方からの線量率は鉛遮蔽等により減衰することなく測定することができる。一方、前方以外からの線量率影響は1 cm厚の鉛遮蔽では完全に遮蔽することができないために、鉛遮蔽を通過してくる線量、漏れ込み線量を検出器にて測定することになる。つまり、1回目の測定値は、「前方からの線量率影響」と「前方以外のコリメーターを通して漏れ込んでくる線量率影響」の和となる。しかしながら、実際に得たい測定値は「前方からの線量率影響」のみであるため、「前方以外のコリメーターを通して漏れ込んでくる線量率影響」を差し引く必要がある。

b) 2回目の測定

図3に2回目の測定時におけるコリメーター内部の状態を示す。2回目の測定では、前方からの線量率影響をほぼ遮蔽可能な鉛遮蔽板をコリメーター前方に装着して測定を行う。これにより、前方からの線量率影響はほぼ検出されなくなるためNaIシンチレーション検出器で測定される測定値は、前



図4 全方位指向性モニタリングのイメージ(球体中央が測定点)

方以外から漏れ込んでくる線量率影響となる。

c) 減算

1回目の測定値から2回目の測定値を減算することにより、「前方以外のコリメーターを通して漏れ込んでくる線量率影響」を差し引いて、「前方からの線量率影響」のみを算出する。これにより、全体の空間線量に比較して小さな前方空間線量率影響を識別しやすくし、測定可能としている。

前方約45度からの線量率のみを測定することによって、測定点における空間線量率を26分割した全方位指向性モニタリングのイメージが図4である。図4においては、球体中央が測定点にあたり、中央から広がる1つ1つの円が1方向毎の線量率、そして全体の球体が測定点における空間線量率を

表現している。球体や円の表面積で比較した場合、全球の表面積に対して、1方向毎の円の面積の総和(26方向分)は、全方位を分割しているため測定範囲の重複や漏れが多少あるが、面積比で全球の表面積の98.8%をカバーしている。これまで測定した300箇所以上の測定結果では、1方向毎の線量率の総和は測定点における空間線量率と比較すると差異率 $\pm 10\%$ 以内が7割以上と一致性が良く、且つ、分割することの有用性を示していると言える。

(3) ガンマ線照射試験による指向特性評価

指向性モニタリング装置に対してガンマ線照射試験を行い、前節の測定原理の正当性を評価した。

a) 試験方法

1回目の測定(前方鉛遮蔽板未装着時)と2回目の測定(前方鉛遮蔽板装着時)において、低レベルコリメートガンマ線(^{137}Cs)照射装置でガンマ線照射試験を実施した。ガンマ線照射方向とコリメーターの角度 θ を検出器の実効中心を中心として0度~180度まで10度毎に変化させ、線量率を測定することにより評価を行った。なお、角度毎の測定値は、10回測定した測定値を平均することにより算出している。また、1回目と2回目の線量率の測定の変動係数は、0.01~0.03であった。

b) 試験結果

図5および図6は、前方鉛遮蔽板未装着時(1回目の測定)と装着時(2回目の測定)のガンマ線照射試験の測定結果を示したものである。図5(a)や図5(b)より、1 cm厚の鉛では、周りからの線量率影響が残っていることが分かる。なお、90度、270度方向からの線量率影響が多い原因は、検出器の実

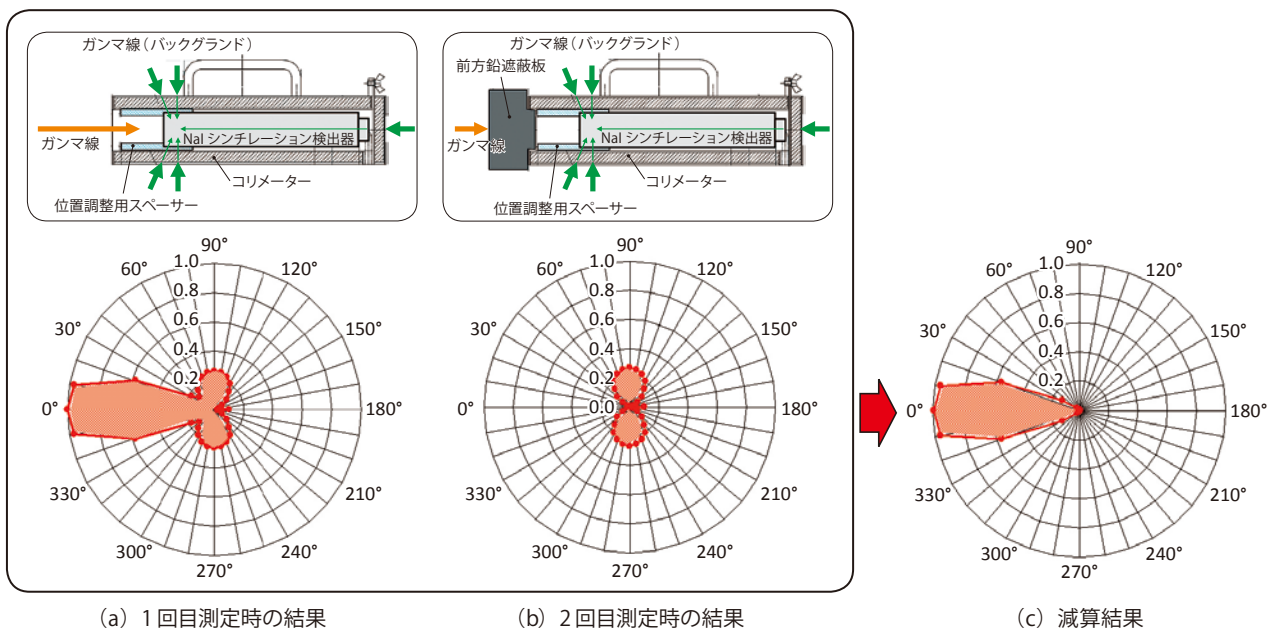


図5 ガンマ線照射試験測定結果(その1)

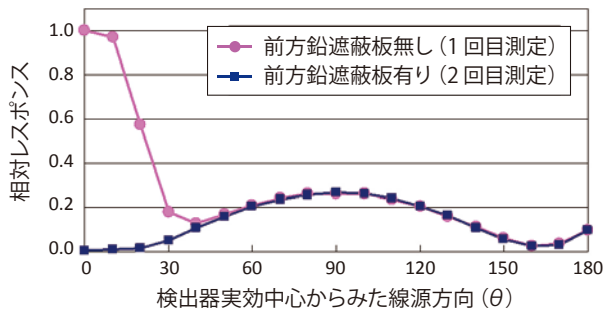


図6 ガンマ線照射試験測定結果 (その2)

効中心とガンマ線照射装置との角度により、他方向に比較して鉛の厚さが見かけ上薄くなることにより、遮蔽効果が小さくなるためである。

図6は、図5の円グラフを折れ線グラフに置き換えたものである。指向性モニタリングにて測定される前方のみの空間線量率は斜線で塗りつぶされている面積にあたり、検出器実効中心からみた線源方向(θ)について、45度以上は1回目と2回目の相対レスポンスの差は0～0.02と小さく、1回目と2回目の測定プロットの一致性を示している。

3. 指向性モニタリング装置を用いた測定

(1) 鉄筋コンクリート建造物における

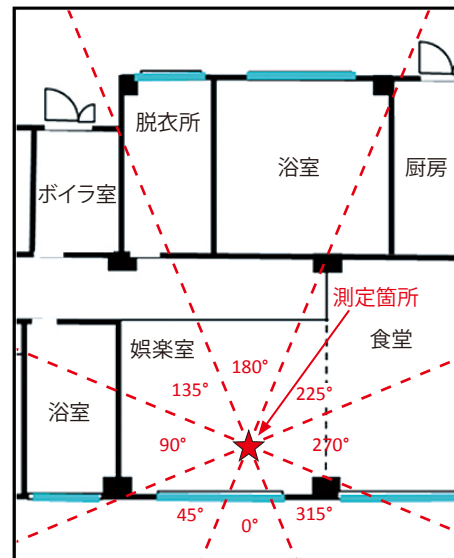
除染前後の空間線量率方向影響評価

a) 測定状況

図7に、測定対象建物と測定箇所を示す。鉄筋コンクリート製の建物(4階建て)の1階において、指向性モニタリング装置を室内南側の窓方向を水平方向角度0度として設置して測



出典: 地理院地図 (電子国土 Web) をもとに
東京電力ホールディングス株式会社にて作成



全方位指向性モニタリングにおける水平方向設定角度

図7 測定対象建物(左)と測定箇所(右)(鉄筋コンクリート建造物)



(a) 除染前



(b) 除染後

図8 鉄筋コンクリート製建造物1階室内の設置状況

定を行った。図 8 に、指向性モニタリング装置を設置したときの状況を示す。装置は、窓から 2 m 離れた位置に設置しており、除染前後において同じ位置にて測定を行っている。除染前後において室内の状況は変化していない。なお、測定箇所の空間線量率 (1 m 高さ) は、除染前で 0.67 $\mu\text{Sv/h}$ 、除染後で 0.16 $\mu\text{Sv/h}$ であった。ただし、空間線量率の低減値には、除染前 (測定日: 2013 年 11 月 13 日) と除染後 (測定日: 2015 年 7 月 16 日) の期間における ^{134}Cs と ^{137}Cs の物理減衰による減衰率 17 % を含む。

b) 除染範囲

本建物に対する除染は、屋外に対して行われており、屋内は行われていない。敷地内・駐車場のアスファルト部分については高圧水洗浄が行われ、敷地内の庭など土壌の部分については、削り取りおよび覆土がされている。また、南側の空き地に対しても、除染として土壌の削り取りおよび覆土がされている。

c) 測定結果および考察

図 9 および図 10 は、それぞれ 1 階室内における除染前と除染後の全方位指向性モニタリング結果を示した図である。

図 9 より、除染前の 1 階室内は窓が見える方向 (水平方向角度 0, 45, 315 度、上下方向角度 90 度) からの線量率が高く、測定箇所における空間線量率の約 50 % の影響を占めていることがわかる。これは、ガラス窓が当該建物の材質であるコンクリートと比較して遮蔽効果が小さいためである。この部屋の場合、1 階室内の空間線量率は、窓方向からの γ 線影響を強く受けていると言える。一方、1 階室内の床面 (上下方向角度 0 度および 45 度) や天井 (上下方向角度 135 度および 180 度) については、線量率は非常に小さい。これらの結果より、散乱線の影響はあるものの、床面や天井は汚染されていないこと、および、コンクリートによる遮蔽の効果がわかる。

対して、図 10 より、除染後においては除染前には高かった窓が見える方向からの線量率も小さくなり、床などの方向の線量率とほぼ変わらない値となっている。即ち、敷地内や空き地などの屋外除染による線量率低減効果が方向性の面から定量的に確認することができる。

(2) 木造住宅における除染前後の空間線量率方向影響評価

a) 測定状況

図 11 に測定対象建物と測定箇所を示す。ここでは、スカイシャイン等の影響も確認するために 2 階で測定した例を示す。この木造住宅の 2 階洋室において、指向性モニタリング装置を設置して測定を行った。測定箇所 1 では全方位指向性モニタリングを行い、測定箇所 2 および測定箇所 3 では洋室の中央および窓際にて西側方向をスポット的に測定した。図 12 には、測定箇所 1 で指向性モニタリング装置を設置したときの状況を示す。

装置は、洋室の中央に設置しており、除染前後において同

じ位置にて測定を行っている。除染前後において室内の状況は変化していない。これは、測定箇所 2 および測定箇所 3 においても同様である。なお、測定箇所 1 の空間線量率 (1 m 高さ) は、除染前で 1.23 $\mu\text{Sv/h}$ 、除染後で 0.34 $\mu\text{Sv/h}$ であった。ただし、空間線量率の低減値には、除染前 (測定日: 2013 年 11 月 12 日) と除染後 (測定日: 2015 年 11 月 13 日) の期間における ^{134}Cs と ^{137}Cs の物理減衰による減衰率 19 % を含む。

b) 除染範囲

本住宅に対する除染は、敷地内の植栽の伐採、砂利部分の土壌 5cm 剥ぎ取り・覆土、駐車場などのコンクリート部分や周辺道路、雨樋などへの高圧水洗浄、屋根のふき取りなどが行われ、屋内については行われていない。また、周辺道路を越えた周囲の空き地についても広い範囲で同様な砂利剥ぎ取り・覆土などの除染が行われている。

c) 測定結果および考察

図 13 および図 14 は、それぞれ測定箇所 1 における除染前と除染後の全方位指向性モニタリング結果を示した図である。図 13 より、除染前では窓が見える方向 (水平方向角度 90 度、上下方向角度 90 度) からの線量率が高く、これは前節の鉄筋コンクリート建物と同様に、ガラス窓の遮蔽効果が小さいためである。しかし、窓方向以外に、水平方向角度 135, 180, 225 度の壁面 (上下方向角度 90 度) および床面 (上下方向角度 45 度) は線量率が高い傾向にある。一方、水平方向角度 0, 270, 315 度の壁面や床面は線量率が低い傾向にある。これらの測定結果と図 11 における水平方向角度の設定を照らし合わせると、測定箇所 1 から見て屋外に近い方向は線量率が高く、逆に住宅内部方向は低いことになる。壁面や床面そのものは汚染されていないことから、両面の空間線量率が高い理由として、屋外からのガンマ線が壁や床を透過して線量率が高くなったものと推察される。このことは、木造住宅は、外壁の遮蔽効果が鉄筋コンクリート建物に比較して小さく、外壁のある方向においても、屋外からの線量率の影響を比較的反映する傾向にあると推定できる。図 14 より、除染前には高かった方向の線量率も除染後は小さくなり、線量率の範囲は 0 ~ 0.03 $\mu\text{Sv/h}$ となっている。これは、測定箇所 1 における敷地内や周辺道路などの除染による線量率低減効果によるものと推定できる。

図 15 は、測定箇所 2 および測定箇所 3 において、西側方向へ指向性モニタリング装置を向けて、上下方向角度 90 度と 135 度を除染前後において測定した結果である。測定箇所 2 における上下方向角度 90 度は、木造住宅の壁を通して室内の中央に届く屋外からの γ 線の影響を示しており、135 度は屋根を通して室内に届くスカイシャイン等の散乱線と、屋根汚染による γ 線の影響を示していると考えることができる。対して、測定箇所 3 における上下方向角度 90 度は、屋外からの γ 線が寄与しており、135 度は上空のみの測定であるためスカイシャイン等の散乱線が寄与していると考えることができる。

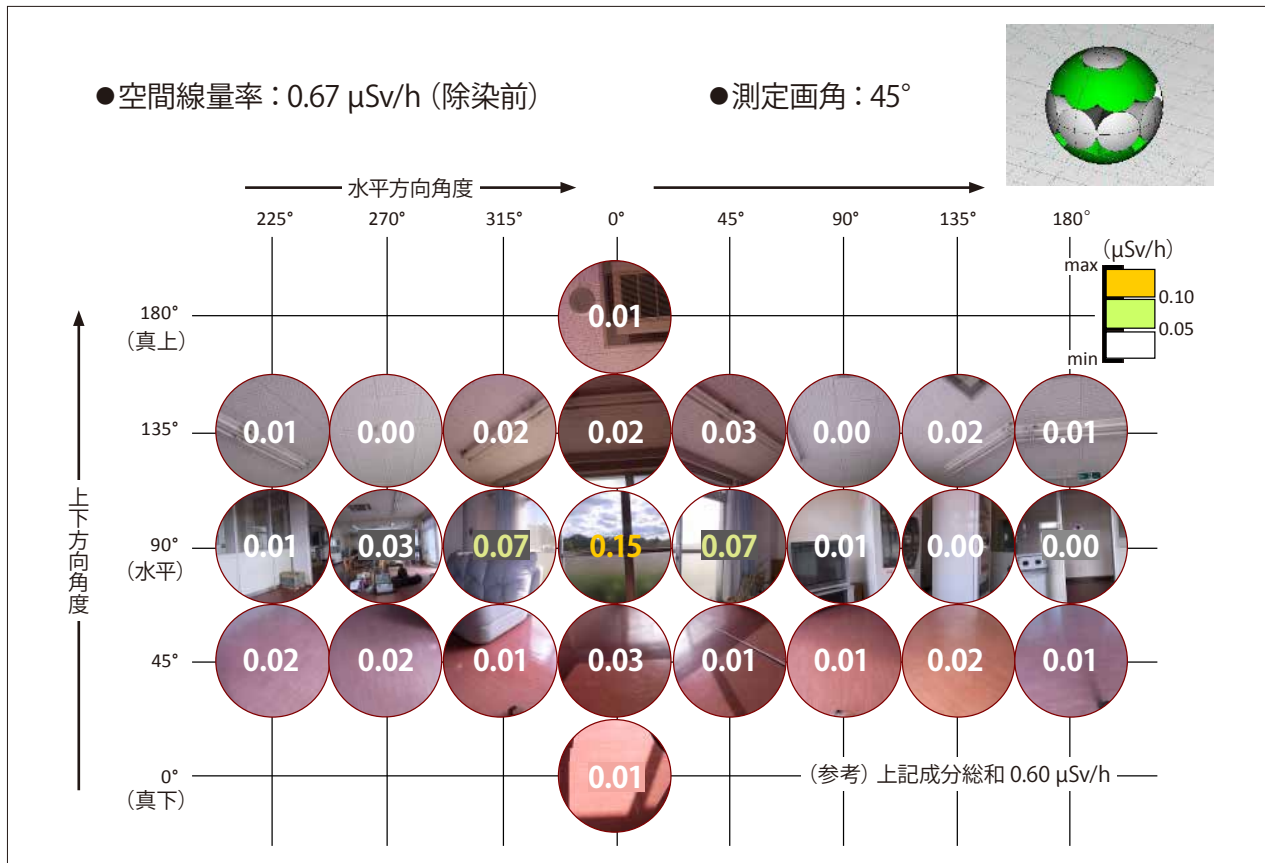


図9 全方位指向性モニタリング結果(1階室内、除染前)

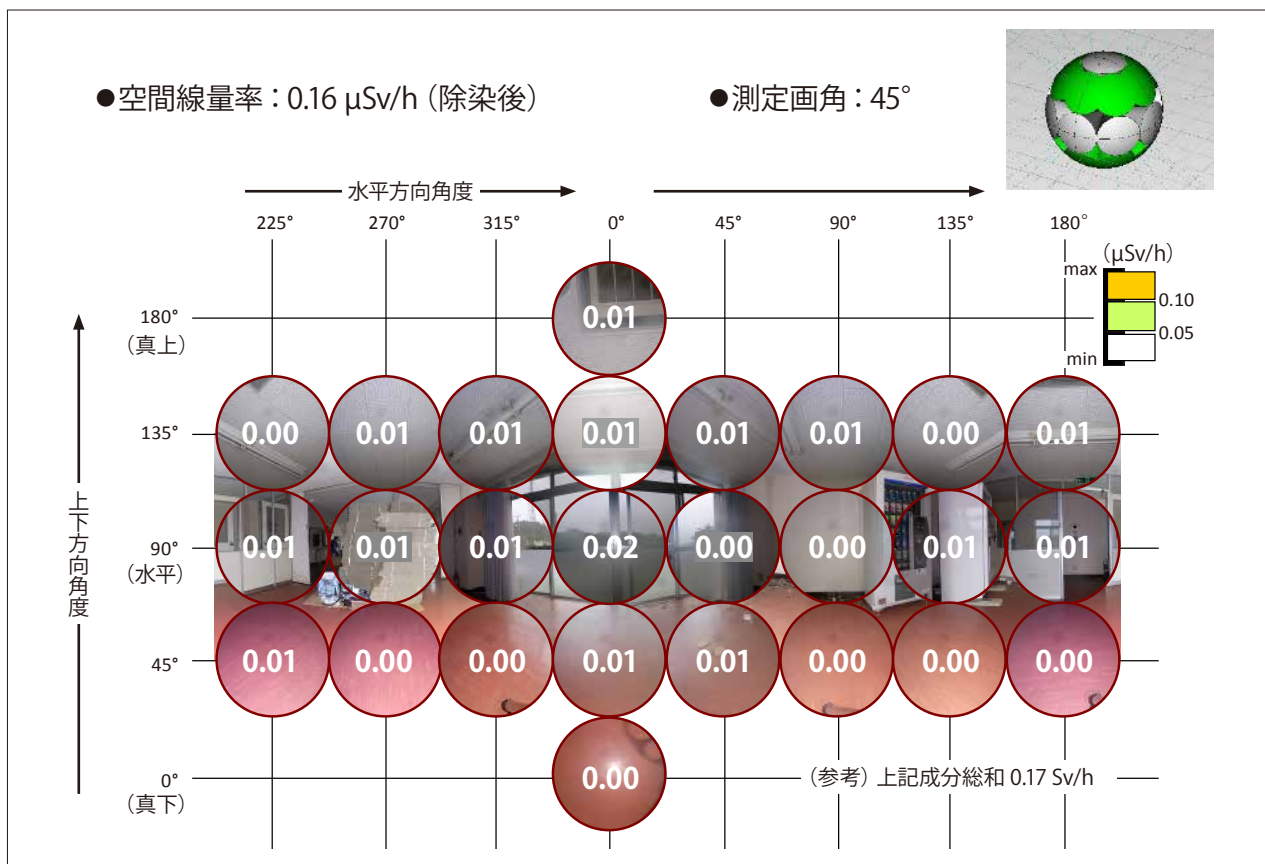


図10 全方位指向性モニタリング結果(1階室内、除染後)

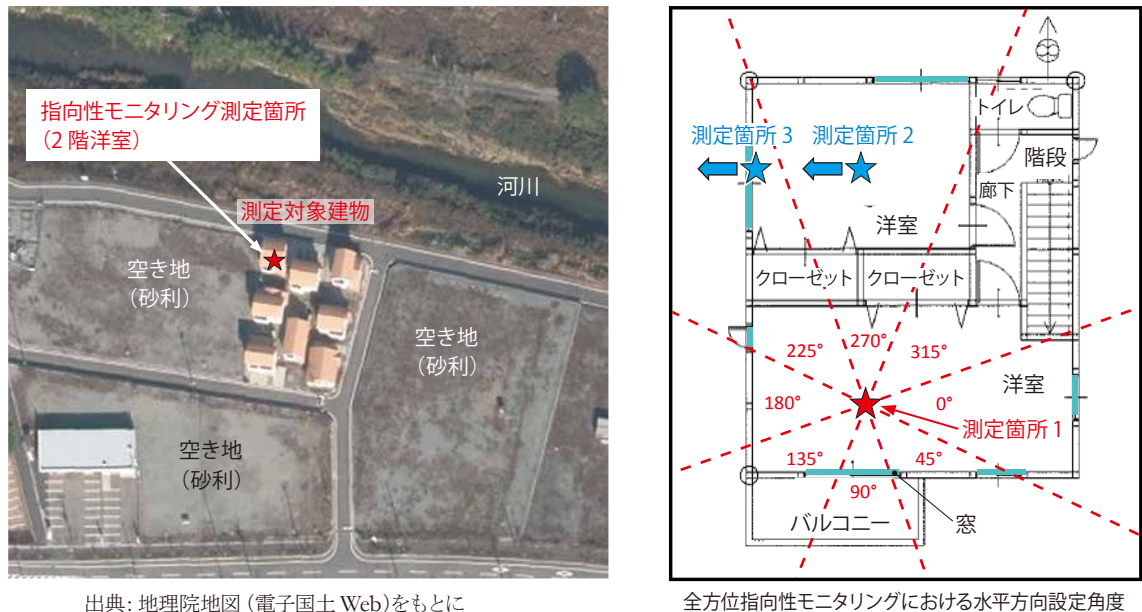


図 11 測定対象建物(左)と測定箇所(右)(木造住宅)



図 12 木造住宅 2 階洋室の設置状況

上下方向角度 90 度の測定結果から、除染前と除染後のいずれにおいても、測定箇所 2 の線量率は測定箇所 3 の線量率より低くなっている。これは、測定箇所の屋外からの距離の差によるものと考えられる。また、除染前後で比較をすると、測定箇所 2 と測定箇所 3 のいずれにおいても線量率低減が顕著であり、周囲の空き地や道路などの除染効果が大きいことが見て取れる。

一方、上下方向角度 135 度の測定結果は、上下方向角度 90 度の測定結果とは反対に、除染前と除染後のいずれにおいても、測定箇所 2 の線量率が測定箇所 3 の線量率より高くなっている。特に、除染前においては差が大きく、屋根によるスカイシャイン等の散乱線の遮蔽効果より、本住宅の場合、屋根そのものの汚染による影響が大きいことが推察される。除染後においては、ほとんど差がないため、除染により屋根

汚染も低減したことが伺える。また、除染前後で比較をすると、測定箇所 2 と測定箇所 3 のいずれにおいても線量率が低減しており、測定箇所 2 からは屋根の除染による屋根汚染の低減効果が大きく、測定箇所 3 からは周囲の空き地や道路などの除染によるスカイシャイン等の散乱線の低減効果があることがわかる。

(3) 廃棄物一時保管場における遮蔽土嚢の効果

a) 測定状況

廃棄物一時保管場において、廃棄物の入った土嚢がそのまま置かれている状況と、その周りに遮蔽用の土嚢が設置された場合の状況において、同じ位置にて指向性モニタリング装置を用いて測定を行うことで、遮蔽土嚢の遮蔽効果について評価を行った。図 16 に遮蔽土嚢設置前後の測定状況を示す。

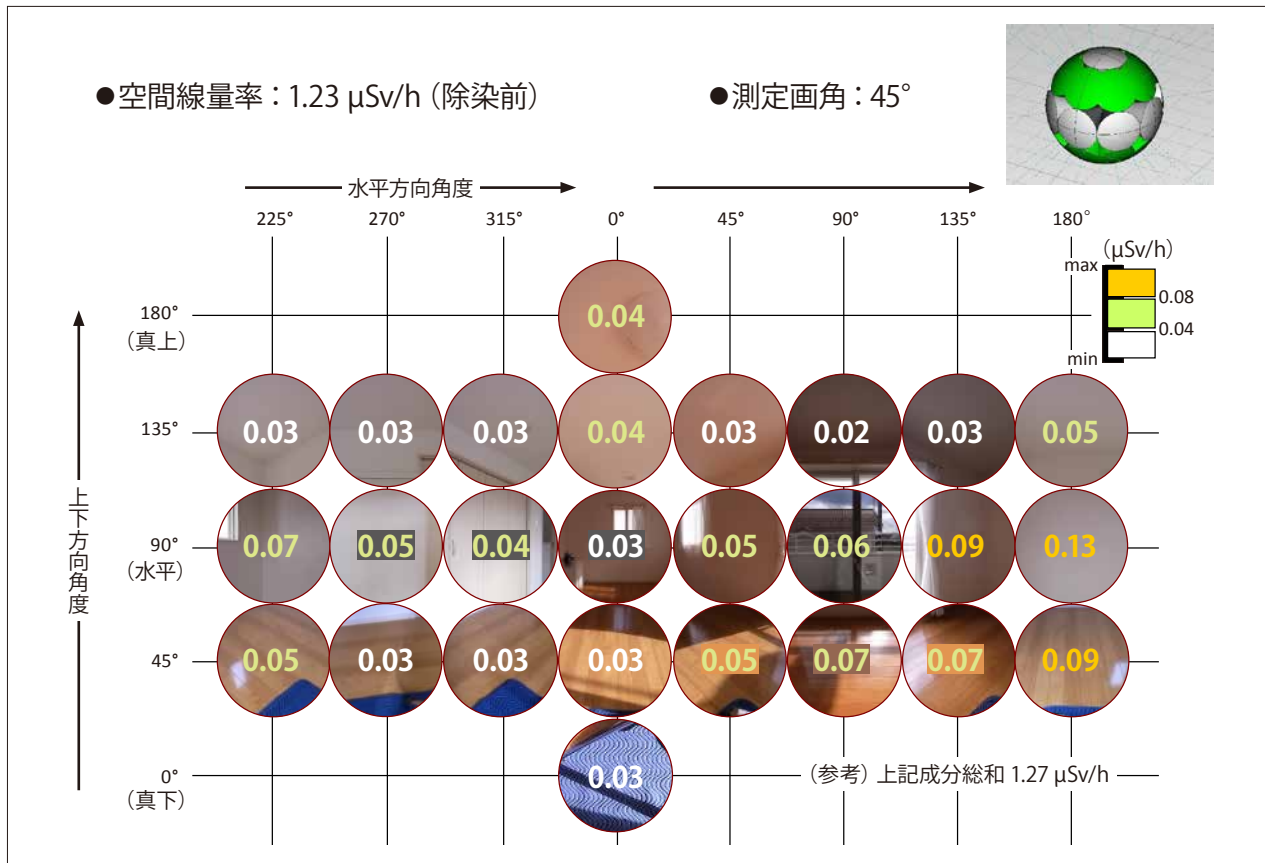


図 13 全方位指向性モニタリング結果(リビング、除染前)

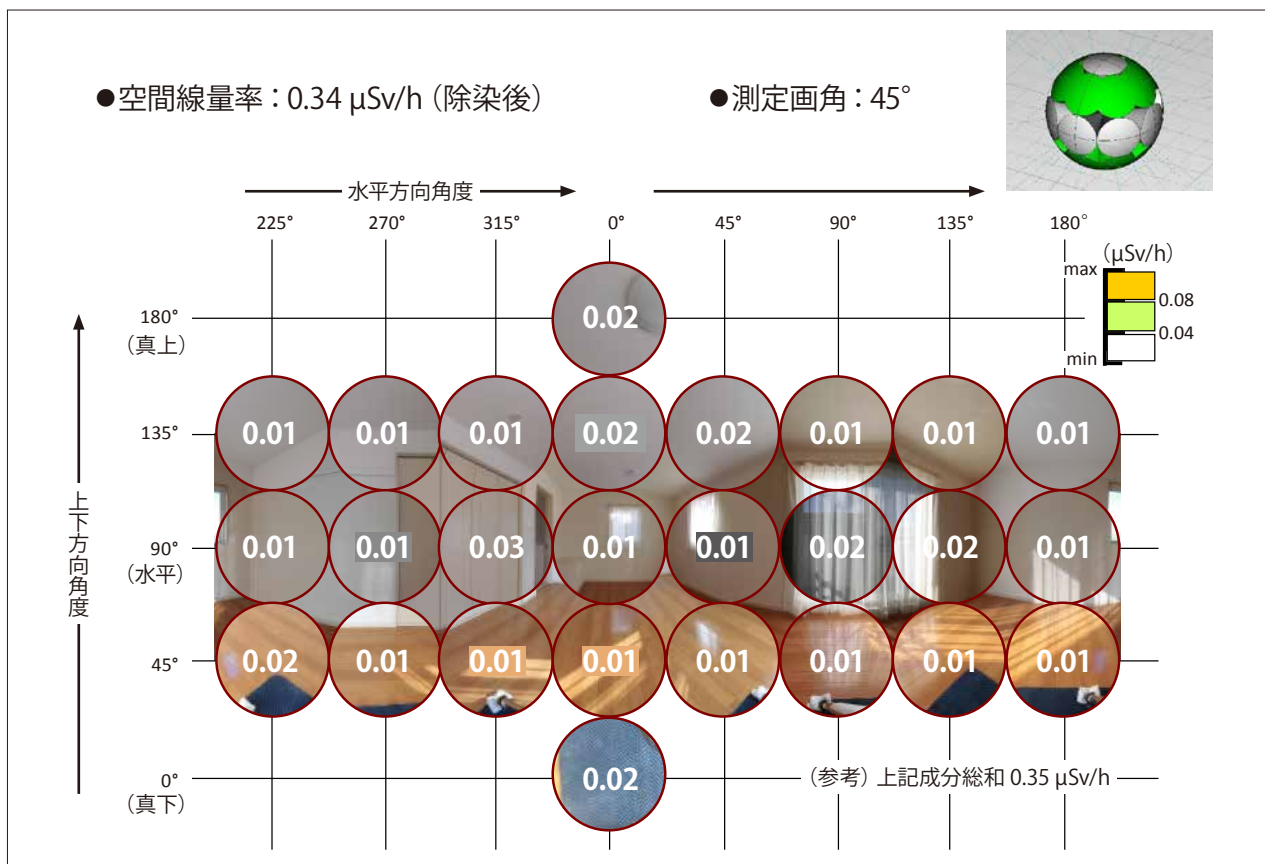


図 14 全方位指向性モニタリング結果(リビング、除染後)

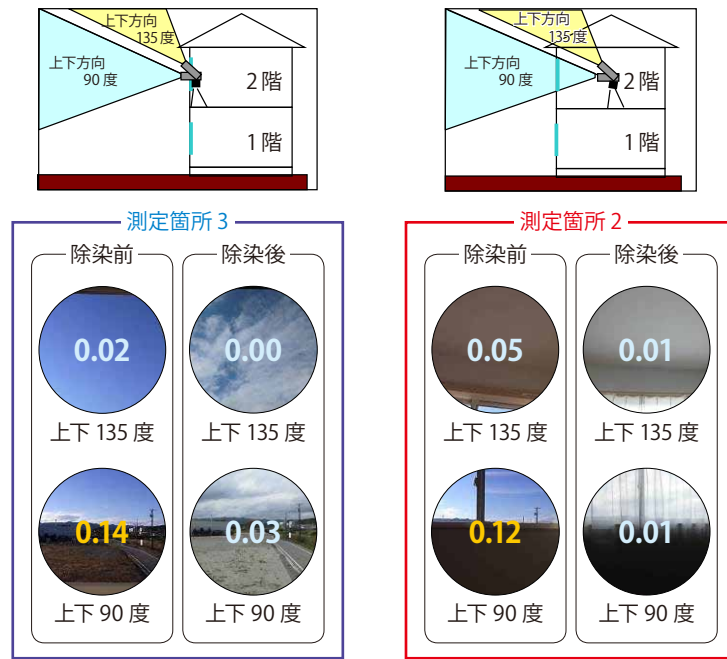


図 15 指向性モニタリング結果(2階洋室)



(a) 遮蔽土嚢設置前



(b) 遮蔽土嚢設置後

図 16 廃棄物施設の設置状況

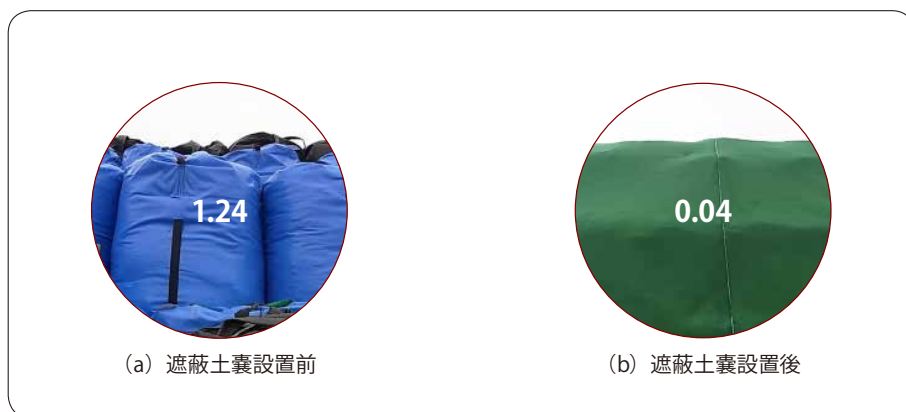


図 17 指向性モニタリング結果(廃棄物施設)

単位: $\mu\text{Sv/h}$

指向性モニタリング装置は、廃棄物土嚢の表面から 2.5 m 離れた位置に設置し、遮蔽土嚢設置前において、廃棄物土嚢のみを測定できるように角度調整を行った。遮蔽土嚢は、図 16 (a)では最下段にのみ置かれていたが、最終的には図 16 (b)のように廃棄物土嚢が周囲から見えなくなるように側面および上面にも設置され、防水シートを被せられた状態となっている。なお、遮蔽土嚢は、内部に土を入れると約 1 m の厚さとなる容器である。

b) 測定結果および考察

図 17 (a) および図 17 (b) は、それぞれ、遮蔽土嚢を設置する前後で、廃棄物土嚢に対して指向性モニタリングを行った結果である。図 17 (a) より、遮蔽土嚢が無い場合、廃棄物土嚢から 2.5 m 離れた測定箇所では、廃棄物土嚢からの線量率影響は $1.24 \mu\text{Sv/h}$ であった。対して、図 17 (b)より、遮蔽土嚢設置後は、廃棄物土嚢からの影響は $0.04 \mu\text{Sv/h}$ となり、遮蔽土嚢設置前と比較して非常に小さい値となった。従って、測定箇所における遮蔽土嚢は、単純な差引による計算で $1.20 \mu\text{Sv/h}$ 程度の遮蔽効果があり、約 95% もの放射線を遮蔽できる非常に効果的なものであることがわかる。

5. まとめ

指向性モニタリング装置を利用して 2018 年 3 月までに 300 箇所以上（空間線量率 $0.09 \sim 170 \mu\text{Sv/h}$ ）の測定を行ってきたが、本装置を用いることで、測定箇所の空間線量率に影響の大きい方向を特定することができた。また、除染前後において同じ場所で測定を行うことによる除染の効果や建物の材質による遮蔽効果を定量的に評価できることを確認できた。その他、全方位の測定だけでなく、スポット的に使用することでも対象物を評価可能であることを確認することができた。

謝 辞

本装置の開発にあたりましては、株式会社千代田テクノル様には、ガンマ線照射試験などについてご協力を賜りました。ここに、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 川西 利昌, 大塚 文和: 周辺及び指向性を持つ線量計によるふなばし三番海浜の線量率測定. 日本建築学会環境系論文集, **79**, No.695, 117-122 (2014).
- 2) 根岸 公一郎, 土屋 敦史, 草尾 豊, 小藪 健: NaI シンチレーション検出器用コリメーターの放射線指向特性. 第 1 回環境放射能除染学会研究発表会要旨集, 63 (2012).
- 3) 鏡淵 英紀, 小藪 健, 鈴木 智, 武藤 昭一: 指向性を有する空間線量率モニタリング装置の開発. 第 3 回環境放射能除染学会研究発表会要旨集, 29 (2014).
- 4) 鏡淵 英紀, 小藪 健, 鈴木 智, 武藤 昭一: 空間線量率指向性モニタリング装置の現場適用について. 原子力学会 秋の大会 (2014).
- 5) 鈴木 智, 鏡淵 英紀, 小藪 健, 武藤 昭一: 指向性を有するモニタリング装置を利用した除染前後の空間線量率方向影響評価. 第 4 回環境放射能除染学会研究発表会要旨集, 55 (2015).
- 6) 鈴木 智, 樋山 悟志, 鏡淵 英紀: 高線量地点 ($150 \mu\text{Sv/h}$ 超) における指向性モニタリング装置の活用. 第 5 回環境放射能除染学会研究発表会要旨集, 53 (2016).

2017 年 12 月 21 日受付

2018 年 3 月 28 日受理

(第 4 回研究発表会 座長推薦論文)

和 文 要 約

空間線量率が高い地域において、効果的に除染を行うために指向性モニタリング装置を開発した。本装置を使用することで、測定箇所における空間線量率に影響を与える方向を特定することができる。本論文では、この装置を用いて以下の評価を行った。(1) 鉄筋コンクリート建造物における除染前後の空間線量率方向影響評価、(2) 木造住宅における除染前後の空間線量率方向影響評価、(3) 廃棄物一時保管場における遮蔽土嚢の効果。これらの結果より、指向性モニタリング装置を用いることによって、除染の効果や遮蔽物の遮蔽効果などが定量的に評価できることが確認できた。

