論文

シンチレーション検出器を用いた環境中の線量率測定値の結晶形状依存性

津田 修一^{1,*}, 谷垣 実², 吉田 忠義³, 奥村 良², 斎藤 公明⁴

Dependence of dose rate measurement in the environment on crystal configuration of scintillation detectors

Shuichi TSUDA^{1,*}, Minoru TANIGAKI², Tadayoshi YOSHIDA³, Ryo OKUMURA² and Kimiaki SAITO⁴

¹Research Group for Radiation Transport Analysis, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirane, Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

²Kyoto University Research Reactor Institute, Kyoto University, 2 Asashiro-Nishi, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494, Japan

³Radiation Protection Department, Japan Atomic Energy Agency 4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan

⁴Fukushima Environmental Safety Center, Japan Atomic Energy Agency Fukokuseimei Building 25F, 2-2-2 Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8577, Japan

(Received March 30, 2017; accepted in revised form August 2, 2017; published online January 31, 2018)

Ambient dose equivalent ($H^*(10)$) rates in the environment in Fukushima prefecture were measured by NaI(Tl) and CsI(Tl) scintillation detectors whose crystal shapes are different. The indicated values of $H^*(10)$ measured by a CsI(Tl) scintillation detector with a rectangular parallelepiped crystal ($13 \times 13 \times 20 \text{ mm}^3$) were approximately 40% higher than those of a CsI(Tl) scintillation detector with a rectangular parallelepiped crystal ($38 \times 38 \times 25 \text{ mm}^3$) and 20% higher than those of a NaI(Tl) scintillation detector with a cylindrical crystal (25.4 mm in diameter and height) in the case where $G(E)$ functions were used in parallel irradiation geometry. It was found that cylindrical crystals are more appropriate than rectangular parallelepiped crystals with respect to directional dependence in environmental dose rate monitoring. However, using a spectrum-dose conversion operator determined in a rotational irradiation geometry, the values of $H^*(10)$ agreed within 10% among all the detectors. These results indicate that the directional dependence of scintillation detectors should be carefully considered for $H^*(10)$ dose rate monitoring in the environment.

KEYWORDS: scintillation detector, $H^*(10)$, $G(E)$ function, directional dependence

I. 緒言

2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所(以下, 1F)事故¹⁾によって, 大量の放射性核種が環境中に放出された。この事態を受けて, 国, 福島県, 大学, 研究機関等は様々な放射線モニタリングを開始し, 現在も広範囲における土壌の放射能濃度・核種分析, 空間線量率等の測定・評価が継続され, 放射性核種の分布状況に関するデータが定期的に更新されている²⁾。採取された土壌試料の放射能濃度・核種分析には, 1F事故前から環境試料の

分析に実績のあるGe半導体検出器が用いられる一方で, 空間線量率測定には, 原子力発電所・RI研究機関等の放射線管理に用いられるシンチレーション式サーベイメータ, 電離箱等が事故直後から用いられ, 現在では, 安価で光子に高い感度を有する様々なCsI(Tl)シンチレーション結晶を有する測定器も使用されている。

NaI(Tl), CsI(Tl)等の無機シンチレーション検出器は, 電離箱と比較して, 周辺線量当量(以下, $H^*(10)$)率に対するレスポンスの光子エネルギー依存性が大きい。精度よく $H^*(10)$ 線量率を測定するにはレスポンスを補正する必要がある。エネルギー補償型と呼ばれるNaI(Tl)サーベイメータ³⁾の多くや京都大学原子炉実験所で開発されたGPS連動型放射線自動計測システム(Kyoto University RADIATION MAPPING system, KURAMA-II)^{4,5)}に搭載されたCsI(Tl)シンチレーション検出器^{6,7)}は, 内蔵したスペク

¹⁾ (国研)日本原子力開発機構 放射線挙動解析研究グループ

²⁾ 京都大学原子炉実験所

³⁾ (国研)日本原子力開発機構 線量計測課

⁴⁾ (国研)日本原子力開発機構 福島環境安全センター

* Corresponding author, E-mail: shuichi.tsuda@oecd.org

[†] 現在, 経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)

トルー線量変換演算子(以下, $G(E)$ 関数)^{8~10)}によるレスポンス補正済みの指示値が出力される。 $G(E)$ 関数は, 測定した波高スペクトルから, $H^*(10)$ や空気吸収線量率等の任意の線量を精度よく推定するための関数であり, 作成するには, 対象の放射線エネルギー範囲をカバーする複数の応答関数データを必要とする。元来, $G(E)$ 関数は環境中での線量率測定を想定し, 直径と高さが同程度の比較的方向特性のよい円筒形の結晶を有するシンチレーション検出器を対象として開発されたため, モンテカルロシミュレーションコードを用いた応答関数計算と測定器の線量率校正は, 一般に測定器の前面から光子が入射する条件(以下, 前方照射条件)で行われる^{11,12)}。しかし 1F 事故後, 直方体形状の CsI(Tl) 結晶を有する種々のシンチレーション検出器が多数市販され, 環境中での線量率測定に使われるようになった^{6,7,13,14)}。これらの測定器の結晶形状は, 入射方向特性に関して必ずしも優れていない場合があるが, 応答関数計算や測定器の線量率校正は, 前方照射条件で行われるため, 土壤中に沈着した放射性核種から放出される放射線が様々な方向から測定器に入射する環境中において, 線量率を精度よく測定できない可能性があった。そこで, 測定対象の光子の入射方向が前方照射条件と大きく異なる環境中の線量率測定への影響を評価するために, 筆者らはこれまでに放射性核種が土壤に沈着した環境を模擬したシミュレーション計算を行い, CsI(Tl) シンチレーション検出器の入射方向特性を解析した^{15,16)}。その結果, 環境中の測定で得られる指示値は, 使用するシンチレーション検出器の結晶形状に依存することを明らかにした。このシミュレーション計算手法の精度検証には実環境中での測定により得たシンチレーション検出器の波高スペクトルデータが必要であるが, 測定データは特定の目的で測定された空間線量率測定の報告に限られており, 精度検証に使用可能な波高スペクトルデータはなかった^{2,17~19)}。

そこで, 福島県双葉郡内の数カ所において, 異なる形状の結晶を有する CsI(Tl) シンチレーション検出器および円筒形 NaI(Tl) シンチレーション検出器を用いて測定した波高スペクトル測定データに, $G(E)$ 関数を乗じて算出した $H^*(10)$ 指示値の相互比較を行った。

II. 測定および解析方法

1. 測定場所

波高スペクトル測定を実施した場所を Fig. 1 に示す。In-situ 測定には, 周囲からほぼ等方に放射線が検出器に入射する開けた条件での測定が適するため, 比較的开けた 3 地点 (No. 4~6) を選定するとともに, 放射線の入射方向が均等から多少ずれた場合も含めて解析するために, 山や海がやや近い 3 地点 (No. 1~3) を加えた計 6 地点を福島県双葉郡内で選定した。測定の様子を Fig. 2 に示す。また, 数え落としの影響を大きく受けないように, 空間線量率測定の基準高さである地上 1 m における $H^*(10)$ 線量率

Fig. 1 Locations where dose rates were measured in this study

Fig. 2 Detectors' setting in the field

がおよそ NaI(Tl) サーベイメータ³⁾の指示値で 0.2~3 $\mu\text{Sv/h}$ の地点とし, 一地点での測定時間はおおよそ 30 分または 60 分とした。測定器によって感度は大きく異なるため, ^{40}K , ^{214}Bi 等のバックグラウンドとなる天然核種に対する波高ピークに対するカウント数の統計精度が十分でないケースもあったが, 測定対象である ^{134}Cs (796 keV, 802 keV) および ^{137}Cs (662 keV) + ^{134}Cs (605 keV) の各複合ピークに相当するカウントの統計変動はおおよそ 1% 以下であった。また実験日の天候はおおむね良好で, 測定結果に影響を与えうる降雨等の大きな気象の変化はなかった。

2. 使用した測定器

波高スペクトルに基づく空間線量率の相互比較測定に用いた測定器の一覧を Table 1 に示す。

(1) CsI(Tl) シンチレーション検出器

2 種類の異なる結晶形状の CsI(Tl) シンチレーション検出器 (浜松ホトニクス社製 C12137 シリーズ, C12137-00⁶⁾)

Table 1 Radiation detectors used in this study

Name	Crystal types and sizes
C12137-00	CsI(Tl) crystal of $13 \times 13 \times 20 \text{ mm}^3$
C12137-01	CsI(Tl) crystal of $38 \times 38 \times 25 \text{ mm}^3$
TCS-161	NaI(Tl) crystal of $25.4\phi \times 25.4 \text{ mm}^3$

Table 2 Photon sources used for energy calibration

RI sources (or Materials)	Emitted photon energy (keV)
^{241}Am	59.5
^{133}Ba	81, 356
^{57}Co	122
^{137}Cs	662
^{60}Co	1173, 1333
KCl	1461
Uranium rock	609, 1120, 1764, 2204, 2615 ^{a)}

^{a)} For C12137-01.

および C12137-01⁷⁾ を搭載した KURAMA-II^{4,5)} を使用し、 $H^*(10)$ 指示値、波高スペクトル等のデータを、KURAMA-II の通信回線を介して 3 秒間隔で取得した。

(2) NaI(Tl)シンチレーション検出器

日立製作所製 TCS-161 に用いられている 1×1 インチの正円筒形状 NaI(Tl) 結晶を組み込んだプローブ部分からの出力端を、多重波高分析器(Radiation Safety Associates 社製 URSA II)²⁰⁾ に接続し、ノートパソコン上の専用ソフトウェアによる処理を介して波高スペクトルを取得した。プローブ部分の仕様は、後継機 TCS-172B³⁾ と同等である。

(3) エネルギー校正

福島県内の環境土壌中には、主な測定対象である ^{137}Cs および ^{134}Cs 以外に、 ^{40}K 、 ^{238}U 系列核種、 ^{232}Th 系列核種等のバックグラウンドとなる天然放射性核種が存在する。そこで、種々の単色光子線源、ウラン残土製レンガ²¹⁾、KCl 粉末を用いて、対象エネルギー範囲である 40~3,000 keV においてエネルギー校正を行った。使用した光子線源の一覧を **Table 2** に示す。C12137-00 および TCS-161 については、 ^{241}Am の 59.5 keV から、ウラン残土製レンガに含まれる ^{214}Bi からの 2,204 keV の間の 7 つの線源から放出される光子に対する波高スペクトルのピーク位置のチャンネルデータに基づいて、2 次近似曲線によるエネルギー校正を行った。C12137-00 と比較して結晶サイズが約 10 倍大きく、感度の高い C12137-01 については、ウラン残土製レンガに含まれる ^{208}Tl からの 2,615 keV によるデータを含めて、2 次近似曲線によるエネルギー校正を行った。

(4) 線量率校正

各測定器の線量率校正は、日本アイソトープ協会製の照射線量率基準 γ 線源(型番 461, 公称放射能 3.7 MBq)を

Fig. 3 Irradiation geometries of scintillation detectors listed in Table 1.

Only the crystals and their sizes in mm are shown. The figure shows irradiation parallel to the base of TCS-161, $13 \times 13 \text{ mm}^2$ surface of C12137-00, and $38 \times 38 \text{ mm}^2$ surface of C12137-01. The arrows above the crystals indicate the rotational direction of rotational irradiation (ROT)

使用し、鉛ブロックを用いたシャドーシールド法による線量率の差分から、散乱線成分を差し引いた一次線のみによる指示値を求め、基準線量率を指示値で除して校正定数を求めた。各測定器の照射条件は前方照射条件、すなわち C12137-00 については $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ の面、C12137-01 については $38 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}$ の面、TCS-161 については直径 $25.4 \text{ mm} \times$ 高さ 25.4 mm の円筒結晶の前面(光電子増倍管のない側)、に対して照射する条件とした。

(5) 線量算出に用いたスペクトルー線量変換演算子:

$G(E)$ 関数

測定した波高スペクトルから $H^*(10)$ 線量率を導出するために必要な各測定器の $G(E)$ 関数には、津田らのデータ^{10,15,16)} を使用し、すべての測定器について、(4)の線量率校正と同様の前方照射条件で計算した応答関数による $G(E)$ 関数を用いた。**Fig. 3** に各測定器の照射条件を示す。各測定器の結晶形状および結晶配置を考慮し、線量率校正時の条件と同様に、 $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ (C12137-00)、 $38 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}$ (C12137-01)、円柱底面(TCS-161)の各面を、前方照射条件における照射面として選択した。また、環境中の光子入射方向特性を模擬した回転照射条件(以下、ROT)に対する $G(E)$ 関数^{15,16)} を用いた検討も行った。

(6) 測定器の設置向きを検討

測定器への光子入射方向による指示値への影響を調べるために、正円筒形状の結晶を有する TCS-161 については、 90° 向きの異なる条件、すなわち円筒形結晶の中心軸が地面に対して水平な条件および地面に対して円筒形結晶とその中心軸が垂直となる下向きの 2 つの条件で線量率を測定した。

III. 結果および考察

1. 波高スペクトル

各測定器で取得した波高スペクトルの例を **Fig. 4** に示す。線量率の比較的低い地点 No. 1 および比較的高い地点 No. 2 の2つの例を示した。C12137-00 の場合 (Fig. 4(a)), 600~700 keV の複合ピーク (^{134}Cs : 605, ^{137}Cs : 662 keV) および ^{134}Cs から放出される 796 keV と 802 keV の複合ピークを確認できる。2,400 keV 付近のピーク

は、ADC 出力の最大値を越えたカウントの合計値である。Fig. 4(b) に示した C12137-01 に対する波高スペクトルには、 ^{40}K や ^{208}Tl 等の 1,000 keV 以上の範囲における天然放射性核種によるピークをより明瞭に確認できる。C12137-01 の No. 2 のデータには、 ^{134}Cs から放出される 1,365 keV のピークが ^{40}K のピークと弁別してみられる。 ^{208}Tl のピークがみられることから、環境中の天然放射性核種の寄与するおよそ 3,000 keV 以下の範囲をカバーできていることがわかる。2,700 keV 付近のピークは、C12137-00 の場合と同様に、ADC 出力の最大値を越えたカウントの合計値である。Fig. 4(c) に示した横向きに設置した TCS-161 の場合、C12137-00 と同様に天然放射性核種の寄与を明瞭に判別できないが、600~700 keV の ^{134}Cs と ^{137}Cs による複合ピークおよび ^{134}Cs から放出される 796 keV と 802 keV の複合ピークを確認できる。

このようにして得られた波高スペクトルにそれぞれの測定器の $G(E)$ 関数を掛け合わせて、 $H^*(10)$ 線量率の指示値を求めた。TCS-161 の場合、3,000 keV までの計数に対して、指示値を算出した。

2. $H^*(10)$ 指示値の比較

KURAMA-II および NaI(Tl) サーベイメータの各波高スペクトルから算出した $H^*(10)$ 指示値を **Table 3** および **Table 4** に示す。 $H^*(10)$ 指示値に対する不確かさの評価には、各場所で測定した波高スペクトルの統計誤差 (0.03~0.3%), 線量率校正に起因する統計誤差 (0.1~1.4%), 測定したスペクトルのチャンネル番号を波高に変換するエネルギー校正に起因する系統誤差 (1~2%), 不感時間を考慮した数え落とし補正に関する系統誤差 (1~3%), 使用した $G(E)$ 関数による系統誤差 (1~2%), を考慮した。 $G(E)$ 関数による系統誤差は、 $G(E)$ 関数を作成する際に用いた 40~3,000 keV の 16 点の単色光子に対する波高スペクトルに、算出した $G(E)$ 関数を掛け合わせたフォールディング計算のずれ幅を意味する。これらに加えて、測定位置のセッティング等、実験条件に関する系統的な誤差 (5~10%) があると仮定し、各不確かさの自乗和から算出

Fig. 4 Pulse-height distributions measured in the field by: (a) C12137-00, (b) C12137-01, (c) TCS-161 (Lateral)

Table 3 Ambient dose equivalent rates in $\mu\text{Sv/h}$ measured in Fukushima prefecture by C12137-00, C12137-01 incorporated in KURAMA-II

Places	C12137-00 ($\mu\text{Sv/h}$)	C12137-01 ($\mu\text{Sv/h}$)	C12137-00/ C12137-01
No. 1	0.264	0.205	1.29
No. 2	2.74	1.90	1.45
No. 3	0.233	0.168	1.38
No. 4	0.709	0.517	1.37
No. 5	3.06	2.05	1.50
No. 6	0.241	0.189	1.28
Average	—	—	1.38

Table 4 Ambient dose equivalent rates in $\mu\text{Sv/h}$ measured in Fukushima prefecture by the NaI(Tl) scintillation detectors located laterally and downward

Places	TCS ($\mu\text{Sv/h}$)			C12137-00 /TCS (Lateral)	C12137-01 /TCS (Lateral)
	Lateral	Downward	Lateral/ Downward		
No. 1	0.235	0.230	1.02	1.12	0.87
No. 2	2.15	2.18	0.99	1.28	0.88
No. 3	0.204	0.211	0.96	1.14	0.83
No. 4	0.597	0.611	0.98	1.19	0.87
No. 5	2.31	2.39	0.97	1.32	0.88
No. 6	0.238	0.244	0.98	1.01	0.79
Average	—	—	0.98	1.18	0.85

した指示値の標準偏差は、5.3~10.9%であると推定した。以下、項目をわけて、検討した結果を示す。

(1) C12137-00 と C12137-01 の違い

各地点における C12137-00 と C12137-01 の指示値の比 (Table 3) をみると、相対的に線量率の高い地点 (No. 2 および No. 5) の比が大きい傾向がみられるが、各地点の比は測定データの不確かさの範囲内で全 6 地点における比の平均値 (1.38) と一致する。この結果から、各測定値の不確かさ (約 10%) を考慮しても、前方入射を仮定した $G(E)$ 関数を用いた C12137-00 の指示値は測定地点によらず C12137-01 より高いといえる。

(2) 設置方向の違い

TCS-161 の測定データ (Table 4) において、横向きで測定した場合 (Lateral) と下向きに設置した場合 (Downward) の指示値の比は、全地点の平均で 0.98 である。これは設置向きの影響は小さいことを示唆する結果であり、これまでにも定性的に指摘されていたように、正円筒形状は比較的、球形に近い等方的な入射方向特性を有することを意味する。

(3) 測定器間の指示値の比較

前方入射条件の $G(E)$ 関数を使用した C12137-00, C12137-01 および TCS-161 の指示値を比較した結果を Fig. 5(a) および Table 4 に示す。各地点において、横向きに設置した TCS-161 の指示値に対する C12137-00 および C12137-01 の指示値の比について平均値を算出した結果、C12137-00 の場合は 18% 高い一方で、C12137-01 の場合は 15% 低い値が示された (Table 4)。以上の結果から、同一の地点において測定した空間線量率の平均値は、数値の高い順に、C12137-00, TCS-161, C12137-01 となった。この結果は、各測定器の光子入射方向特性を反映していると考えられる。

そこで、各測定器について、環境中の光子入射方向のよい近似²²⁾とされている回転照射条件で計算した応答関数による $G(E)$ 関数を、測定した波高スペクトルに掛け合わせ

Fig. 5 Ambient dose equivalent rates: (a) based on the $G(E)$ function determined in anterior-posterior irradiation geometry (AP), (b) based on the $G(E)$ function determined in rotational irradiation geometry (ROT), (c) ratios of each $H^*(10)$ in AP to the averaged $H^*(10)$ in ROT

て算出した指示値の比較を Fig. 5(b) に示す。横向きに設置した場合の TCS-161 の指示値に対する C12137-00 および C12137-01 の各指示値の比を Table 5 に、前方照射条件で算出した線量率と、回転照射条件における各測定器の線量率の平均値の比を Fig. 5(c) に示す。また、前方照射条件および回転照射条件における各測定器の $G(E)$ 関数

Table 5 Ambient dose equivalent rates in $\mu\text{Sv/h}$ measured in Fukushima prefecture by the NaI(Tl) scintillation detectors located laterally, using the $G(E)$ functions for ROT geometry

Places	C12137-00	C12137-01	TCS (Lateral)	TCS (Lateral) AP/ROT	C12137-00/TCS (Lateral)	C12137-01/TCS (Lateral)
No. 1	0.237	0.231	0.224	1.05	1.06	1.03
No. 2	2.50	2.15	2.19	0.98	1.15	0.98
No. 3	0.212	0.191	0.198	1.03	1.07	0.96
No. 4	0.646	0.587	0.599	1.00	1.08	0.98
No. 5	2.82	2.32	2.36	0.98	1.19	0.98
No. 6	0.215	0.215	0.228	1.04	0.94	0.94
Average	—	—	—	1.01	1.08	0.98

Fig. 6 Ratios of the $G(E)$ functions terminated in anterior-posterior irradiation geometry (AP) to those in rotational irradiation geometry (ROT)

の比を、波高の関数として表した結果を **Fig. 6** に示す。まず TCS-161 の前方照射条件 (Table 4) と回転照射条件 (Table 5) における線量率は、5% 以内で一致している。これは、Fig. 5(c) および Fig. 6 に示すように、正円筒形状の結晶を有する TCS-161 は光子入射方向の依存性が小さいことを意味する。また C12137-00 の場合、散乱線として寄与割合が相対的に高い約 300 keV 以下において、前方照射条件の $G(E)$ 関数は回転照射条件の場合より大きい。そのため、回転照射条件の $G(E)$ 関数を用いて算出した線量率は、前方照射条件の $G(E)$ 関数を用いた線量率より小さく、TCS-161 の結果に近くなっている。一方、C12137-01 の場合、40~3,000 keV の全範囲において、回転照射条件の $G(E)$ 関数の方が大きい。そのため、回転照射条件における線量率は、前方照射条件の場合より大きい。その結果、回転照射条件の $G(E)$ 関数を用いた場合、C12137-00 および C12137-01 に対する平均値はいずれも、横向きに設置した場合の TCS-161 の線量率に近く、10% 以内で一致する。これは、回転照射条件は実際の環境中の光子入射方向に近いことを意味し、回転照射条件の $G(E)$ 関数を用いて得られる指示値は、測定器に依存する前方照射条件の $G(E)$ 関数を用いた場合の指示値と比較して、より環境

中の線量率の真値に近いといえる。

よって環境中において、より信頼性の高い線量率測定を行うには、使用する測定器の光子入射方向特性を考慮する必要がある。回転照射条件で算出した $G(E)$ 関数を用いた線量率測定は有効であることがわかった。

IV. 結 論

異なる形状のシンチレーション結晶を有する測定器を用いて、福島県内の複数の地点において波高スペクトル測定を行い、 $H^*(10)$ 指示値の相互比較を行った。その結果、前方入射条件の $G(E)$ 関数を使用した C12137-00 の指示値は、C12137-01 より約 40%、TCS-161 より約 20% 高いことが示された。このことから、光子入射方向に対する依存性の大きい直方体形状の結晶は、様々な方向から光子がやってくる環境中の線量率測定では前方入射条件における指示値に対して系統的な差異が生じることがわかった。また 1×1 インチサイズの正円筒形状の NaI(Tl) 結晶を有する NaI(Tl) サーベイメータについて、光子入射方向によるレスポンスの違いは小さいことがわかった。

一方で、回転照射条件で計算した応答関数に基づいて算出した各測定器の $G(E)$ 関数を、測定した波高スペクトルに掛け合わせて算出した $H^*(10)$ 指示値を比較すると、いずれの値も 10% 以内で一致した。この結果から、より信頼性の高い環境中の線量率測定には、使用するシンチレーション測定器の結晶形状、その光子入射方向特性および校正方法を考慮することが重要であるといえる。

シンチレーション検出器のエネルギー校正において、(公財)放射線計測協会の江幡芳昭氏、佐藤義高氏、(株)日立製作所の吉田 晃氏、(国研)日本原子力研究開発機構の阿部琢也氏、仁平 敦氏、星 勝也氏、福島での測定に関して、(国研)日本原子力研究開発機構の安藤真樹氏、谷村嘉彦氏、三上 智氏、山本英明氏および安全管理・放射線計測グループの方々にご協力を頂きました。ここに感謝いたします。なお本研究は、原子力規制庁からの委託事業(原規放発第 16040167 号)の成果の一部である。

— 参考文献 —

- 1) Cabinet Secretariat, *Final Report of the Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company*, Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company, 2013 Feb. 26 (Japanese) (Internet), <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/> (cited 2017 Jan 30).
- 2) Japan Atomic Energy Agency, *Database for Radioactive Substance Monitoring Data*, Japan Atomic Energy Agency, 2017 Jan. 19 (Japanese) (Internet) <http://emdb.jaea.go.jp/emdb/> (cited 2017 Jan 30).
- 3) Hitachi Healthcare Company Ltd., *Scintillation Survey Meter TCS-171B & 172B*, Hitachi Healthcare Company Ltd., 2017 Jan. 26 (Japanese) (Internet), <http://www.hitachi.co.jp/products/healthcare/products-support/radiation/surveymeter/tcs171b172b/> (cited 2017 Jan. 30).
- 4) M. Tanigaki, R. Okumura, K. Takamiya *et al.*, “Development of KURAMA-II and its operation in Fukushima,” *Nucl. Instr. Meth.* **A781**, 57–64 (2015).
- 5) S. Tsuda, T. Yoshida, Y. Nakahara *et al.*, *Construction of a Car-borne Survey System for Measurement of Dose Rates in Air: KURAMA-II, and Its Application*, JAEA Technol. 2013-037, Japan Atomic Energy Agency (2013), [in Japanese].
- 6) Hamamatsu Photonics K. K., *Radiation Detection Module C12137*, Hamamatsu Photonics K. K., 2016 Nov. 17 (Japanese) (Internet), <http://www.hamamatsu.com/jp/ja/C12137.html> (cited 2017 Jan. 30).
- 7) Hamamatsu Photonics K. K., *Radiation Detection Module C12137-01*, Hamamatsu Photonics K. K., 2016 Nov. 17 (Japanese) (Internet), <http://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/category/3100/4012/4134/C12137-01/index.html> (cited 2017 Jan. 30).
- 8) S. Moriuchi, *A New Method of Dose Evaluation by Spectrum Dose Conversion Operator and Determination of the Operator*, JAERI 1209 (1970), [in Japanese].
- 9) M. Tsutsumi, K. Saito, S. Moriuchi, *Spectrum-dose Conversion Operators, G(E) Functions of NaI(Tl) Scintillators Adapted for Effective Dose Equivalent Quantities*, JAERI-M 91-204 (1991), [in Japanese].
- 10) S. Tsuda, M. Tsutsumi, “Calculation and verification of the spectrum dose conversion operator of various CsI(Tl) scintillation counters for gamma-ray,” *Jpn. J. Health Phys.*, **47**[4], 260–265 (2012), [in Japanese].
- 11) K. Saito, S. Moriuchi, “Monte Carlo calculation of accurate response functions for a NaI(Tl) detector for gamma rays,” *Nucl. Instr. Meth.*, **185**, 299–308 (1981).
- 12) K. Saito, S. Moriuchi, *Data Catalog of Gamma Ray Response Function for NaI(Tl) Scintillation Detectors by The Monte Carlo Calculation*, JAERI-1306 (1987).
- 13) Horiba Ltd., 環境放射線モニタ PA-1000 Radi(ラディ), Horiba Ltd., 2017 Mar. 21 (Japanese) (Internet), <http://www.horiba.com/jp/process-environmental/products-jp/environmental-radiation-monitor/details/pa-1000-environmental-radiation-monitor-radi-3124/> (cited 2017 Mar 21).
- 14) Sekiya Rika Co., Ltd, 環境放射線モニター Mr.Gamma(ミスター・ガンマ)A2700 型, Hamamatsu Photonics K. K., 2014 Feb. 18 (Japanese) (Internet), http://www.sekiyarika.com/labo-ware/chemical-apparatus/products/A2700/Gamma_A2700.html (cited 2017 Mar 21).
- 15) S. Tsuda, K. Saito, “Issue of air dose rate measurement using survey-meters,” 第4回 京都大学原子炉実験所 原子力安全基盤科学研究シンポジウム報告書, 30–33 (2015), [in Japanese].
- 16) S. Tsuda, K. Saito, “Spectrum-dose conversion operator of NaI(Tl) and CsI(Tl) scintillation detectors for air dose rate measurements in contaminated environments,” *J. Environ. Radioact.*, **166**, 419–426 (2017).
- 17) S. Terashima, A. Abe, Y. Kasai *et al.*, “A Comparison Study of Commercially Available Survey Meters for Measurement of Gamma-rays,” *Radiat. Emerg. Med.*, **4**, 29–34 (2015).
- 18) T. Kurosawa, H. Iwase, N. Saito, “Field photon energy spectra in Fukushima after the nuclear accident,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **51**, 730–734 (2014).
- 19) 古渡意彦, 窪田卓見, 芝原雄司, 他, CZT 検出器を用いた高線量率地域における *in-situ* 環境放射能測定, 第4回京都大学原子炉実験所 原子力安全基盤科学研究シンポジウム報告書, 26–29 (2015), [in Japanese].
- 20) Radiation Safety Associates, *URSA II* (English), 2016 Dec. 25 (Internet), <http://www.radpro.com/product/ursa-ii/> (cited 2016 Dec 25).
- 21) Japan Atomic Energy Agency, *Ningyo-toge Environmental Engineering Center*, Japan Atomic Energy Agency, 2015 Jan. 27 (Japanese) (Internet), <https://www.jaea.go.jp/04/zningyo/4-1/20110701-01.html> (cited 2017 Jan. 30).
- 22) K. Saito, A. Endo, “Characteristics of environmental gamma rays and the exposure doses,” *RADIOISOTOPES*, **63**(12), 585–602 (2014).