

主任者 コーナー

“今こそ復習！” 主任者の基礎知識

第9回 線量測定の実理

— $G(E)$ 関数による線量測定手法—

津田 修一

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災にともなう東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故(以下、東電福島事故)によって、大量の放射性物質が環境中に放出され、福島県及び周辺の都県では現在も主に ^{134}Cs 及び ^{137}Cs によって線量率の高い状況が継続している^{1,2)}。事故後、国及び福島県による線量マッピングデータの作業が開始され、現在、文部科学省が中心となって航空機や車を用いた広域のモニタリングを継続して実施している。車を用いたモニタリングには、京都大学原子炉実験所で開発された KURAMA システム (Kyoto University RAdiation MApping system)³⁾ が用いられている。KURAMA システムは、車に搭載した検出器によって測定される線量率及び GPS による緯度経度データを同時に取得し、インターネットの地図ソフトウェア上で、走行ルートの各点における線量率をリアルタイムに確認できる車走行サーベイシステムである。KURAMA システムには、当初、低線量率用の NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメータと、高線量率用の電離箱式サーベイメータが使用されていたが、現在は CsI(Tl) 結晶を備えたシンチレーション式測定器に置き換えられている。一般にシンチレーション式検出器は、電離箱や GM 計数管と比較して、入射する光子のエネルギー依存性が大きい⁴⁾が、第 2 世代の KURAMA システム (以

下、KURAMA-II という) では、CsI(Tl) シンチレーション式検出器と $G(E)$ 関数⁴⁾ を用いた線量測定手法によって、0.1~100 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の広い線量率範囲における測定が可能になっている。本稿では広域かつ詳細な線量率マッピングの作成に用いられている KURAMA-II 用 CsI(Tl) シンチレーション検出器を例として、エネルギー補償型といわれる $G(E)$ 関数⁴⁾ を用いた線量測定の実理について紹介する。

2. $G(E)$ 関数とは

一般に、ある場の線量は、エネルギースペクトルの情報と国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection, ICRP) 等が勧告しているフルエンス当たりの線量換算係数を掛けあわせて算出するが、エネルギースペクトルの測定は容易ではない。一方 $G(E)$ 関数による線量導出手法では、使用する測定器のレスポンスと線量換算係数から導出される $G(E)$ 関数を用いることによって、場のエネルギースペクトルの解析を行うことなく、測定した波高スペクトルから直接的に高い精度で線量を評価できる。以下、原理について簡単に述べた後、具体的な検出器の応答関数の計算及び周辺線量当量 $H^*(10)$ ⁵⁾ に対する $G(E)$ 関数の計算結果を示す。

(1) 原理

ある単色エネルギー E_0 の γ 線に対して、次

主任者 コーナー

の積分方程式を成立させるような荷重関数 $G(E)$ が存在するならば、フルエンス当たりの線量換算係数 $h(E_0)$ は、フルエンスを $\phi(E_0)$ 、検出器の応答関数を $n(E, E_0)$ とすると以下のように表すことができる。

$$h(E_0) = \int_0^\infty \{n(E, E_0)G(E)\} / \phi(E_0) dE \quad (1)$$

よって、種々のエネルギー E_i の γ 線混在場における全線量 D は、波高スペクトルを $N(E)$ とすると、(1)式を用いて以下のように書ける。

$$\begin{aligned} D &= \sum_i \phi(E_i) h(E_i) \\ &= \sum_i \phi(E_i) \int_0^\infty \{n(E, E_i)G(E)\} / \phi(E_i) dE \\ &= \int_0^\infty \sum_i \phi(E_i) \{n(E, E_i)G(E)\} / \phi(E_i) dE \\ &= \int_0^\infty \sum_i n(E, E_i)G(E) dE \\ &= \int_0^\infty N(E)G(E) dE \end{aligned} \quad (2)$$

このように全線量 D は、場のエネルギースペクトルを解析することなく、測定される波高スペクトルと $G(E)$ 関数から算出することができる。

(2) $G(E)$ 関数の導出

では、具体的に $H^*(10)$ に対する KURAMA-II 用 CsI(Tl) シンチレーション検出器の $G(E)$ 関数の導出手順を示す。

(2)式における単色の光子に対するシンチレーション検出器の応答関数の計算には、中性子及び光子の汎用モンテカルロ輸送計算コード MCNP5⁶⁾ を用いた。MCNP5 は、評価済みの光子断面積データを用いた輸送計算が可能で、応答関数を計算した 40~13,000 keV のエネルギー範囲において、CsI(Tl) 結晶に対する応答を精度よく計算することができる。KURAMA-II 用の測定器に内蔵された結晶の大きさは 13 mm×13 mm×20 mm で、遮光用のアルミニウム等、周囲の構造を可能な限り詳細に再現した。光子ビームを 13 mm×13 mm の面に対して垂直に入射させる条

件において、24 点のエネルギーについて波高スペクトルを計算した。100 keV 及び 800 keV の単色エネルギーの光子を入射させた場合の計算結果を図 1 に示す。それぞれの入射エネルギーの位置にピークが見られ、800 keV 入射の場合、コンプトン端、後方散乱ピーク等も確認できる。

(3) 計算結果

離散化した(2)式の逆行列を解く手法によっ

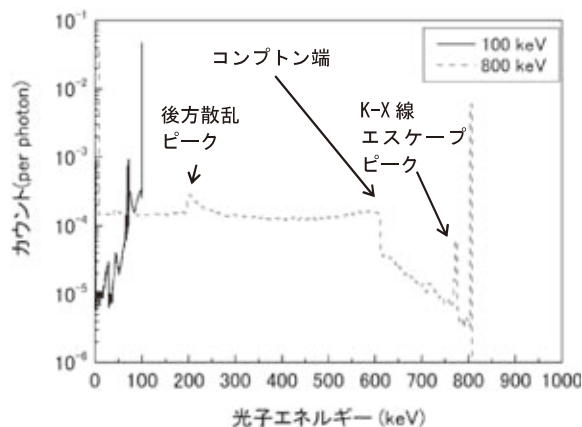


図 1 MCNP5 で計算した KURAMA-II 用 CsI(Tl) シンチレーション検出器の応答関数

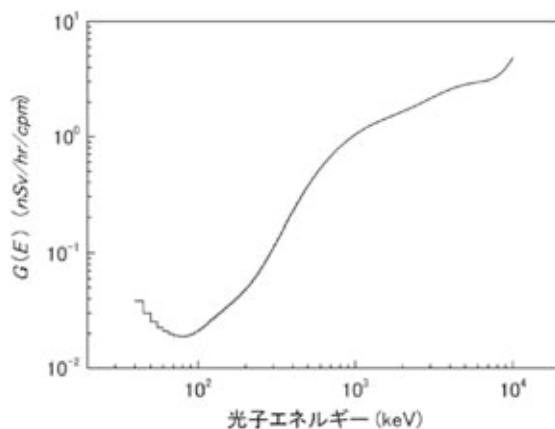


図 2 KURAMA-II 用に用いられている CsI(Tl) シンチレーション検出器の $H^*(10)$ 導出用の $G(E)$ 関数

て、高次多項式によって表される $H^*(10)$ 導出用の $G(E)$ 関数を決定した。計算結果を図 2 に示す。全体的に光子エネルギーにはほぼ比例して $G(E)$ 関数は増加することが分かる。100 keV 以下の低エネルギー光子は、結晶周辺の構造材によって吸収や散乱の影響を大きく受ける。それらの影響を補償するように、 $G(E)$ 関数が大きく現れている。

3. 導出される線量の検証

$G(E)$ 関数を用いて導出する線量の信頼性を検証するために、日本原子力研究開発機構の放射線標準施設棟 (The Facility of Radiation Standards, 以下 FRS) において線量測定実験を行った。実験の様子を図 3 に示す。計算で設定した平行ビーム入射条件を再現するように、線源と測定器の距離を 200~300 cm とし、数え落としの影響の小さい約 1~5 $\mu\text{Sv/h}$ の線量率範囲において測定した。使用した線源は、 ^{137}Cs (662 keV)、 ^{226}Ra (830 keV[†]) 及び ^{60}Co (1,117 keV 及び 1,333 keV) 線源の 3 種類である。

測定した線量率と、各線源の照射位置で与えられた基準線量率の比を表 1 に示す。鉛ブロックを用いたシャドウコーン法によって、直接線及び散乱線を含んだ線量率から、散乱線の寄与を差し引いた結果を示している。実際の検出器の形状と計算で模擬した形状とのわずかな違いや、鉛ブロックによるオーバーシャドウのために、測定値は基準値よりやや小さい値を示していると考えられるが、測定値は 7% 以内で基準線量率と一致している。詳細については文献 4) に示されているが、この結果から計算した $G(E)$ 関数を用いると、精度よく線量を測定できることが分かった。

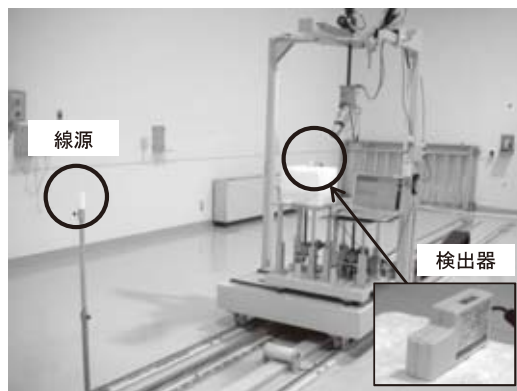


図 3 日本原子力研究開発機構 FRS の校正場における線量測定の様子

表 1 測定した線量率と基準線量率の比 (一次線のみと比較)

線 源	比 (測定値/基準値)
^{137}Cs	0.93
^{226}Ra	0.95
^{60}Co	0.94

4. まとめ

東電福島事故後、線量マッピング事業に利用されている KURAMA システムを例に、CsI(Tl) シンチレーション検出器に対する $G(E)$ 関数の計算手法及び実験に基づく精度検証実験について紹介した。 $G(E)$ 関数にあまりなじみのない方も多いかもしれないが、広く利用されているエネルギー補償型の NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメータには、 $G(E)$ 関数による演算処理回路が組み込まれているものもある。シンチレーション検出器の例を示したが、 $G(E)$ 関数は原理的に、波高スペクトルを取得できる測定器に対して適用可能であり、半導体検出器に応用された例もある⁷⁾。

線量という専門用語は、東電福島事故以後、一般的に使われるようになったが、保健物理や

[†] 実効的な平均エネルギー

主任者 コーナー

放射線計測の専門家には、線量また線量の測定方法等についても一般の方に分かりやすく説明することが求められていると思う。この報告が“今こそ復習！”の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 原子力災害対策本部，原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について—(2011)
- 2) 原子力災害対策本部，国際原子力機関に対する日本国政府の追加報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について—(第2報)(2011)
- 3) GPS連動型放射線自動計測システムKURAMA，京都大学原子炉実験所 福島原子力災害対策支援グループホームページ
- 4) 津田修一，堤正博，種々の大きさのCsI(Tl)シ

ンチレーション検出器の γ 線に対するスペクトル—線量変換演算子($G(E)$ 関数)の計算と評価，保健物理，**47**(4)，260–265(2012)

- 5) The International Commission on Radiological Protection; Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publ.74, Annals of the ICRP, **26**(3/4), Elsevier, UK (1996)
- 6) X-5 Monte Carlo Team, MCNP—A general Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory (2003)
- 7) 長岡鋭，坂本隆一，森内茂，野外測定用純Ge半導体検出器のスペクトル—線量変換演算子の決定，JAERI-M-84-003(1984)

(日本原子力研究開発機構 福島技術本部
福島環境安全センター)

2012年版 アイソトープ法令集I

—放射線障害防止法関係法令—

編集・発行 公益社団法人 日本アイソトープ協会【2012年8月発行】
B5判・513頁 定価3,570円 会員割引価格3,150円(消費税込)

2012年4月施行の法令改正により，放射線汚染物の確認制度が導入され，放射化物が放射線障害防止法の規制対象に追加されました。2012年版はこの改正に対応し，2012年4月11日現在の放射線障害防止法関係法令(法律・施行令・施行規則・告示)，文部科学省の通知・事務連絡等まで収載。また「原子力基本法」や「外国為替及び外国貿易法」等の関係法令も抄録しています。法令の各条文から関係する細則を参照できるように，索引を付して利用の便宜を図っている点が本法令集の特色となっています。

公益社団法人
 **日本アイソトープ協会**
Japan Radioisotope Association
〒113-8941 東京都文京区本駒込 2-28-45
TEL (03) 5395-8082 FAX (03) 5395-8053

- ◆ご注文はインターネットまたはFAXにてお願いいたします。
JRIA Book Shop : <http://www.bookpark.ne.jp/jria>
BookPark サービス : FAX (03) 5227-2060
- ◆書店でご注文の際は「発売所 丸善出版」とお申し付け下さい。