

“今こそ復習！” 主任者の基礎知識

第11回 様々な線量

壽藤 紀道

1. はじめに

放射線の量を表す単位の基本は、カーマ及び吸収線量などの Gy 単位系やフルエンスなどの物理量である。放射線防護を目的とした被ばく線量に係る単位としては、これらの物理量から導出された Sv 単位系の数値が一般的に使用される。この単位系で表される放射線量（以下、線量という）は、防護量である実効線量や等価線量、又は、実用量である周辺線量当量や個人線量当量を表すためなど、様々な目的で使用される。

特に平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災に伴う東京電力(株)福島第一原子力発電所事故以来、Sv 単位系を用いた値は、事故由来放射性物質による汚染地域などにおける線量レベル及び地域住民などの被ばく線量レベルを把握するため、サーベイメータなどによる空間線量率（周辺線量当量）の測定や個人線量計による被ばく線量（個人線量当量）の測定が数多く実施され、広く一般にも知られるところとなった。しかし、これらの線量は、その定義の違いから同じ放射線場であっても放射線エネルギーや入射方向などの状況に応じて互いに数値が異なるのが一般である。

ここでは、防護量と実用量の関係を整理するとともに、測定器の校正に使用する基準校正場と代表的な事故由来放射性物質の 1 つである ^{137}Cs からの γ 線を例にした実際の放射線場に

おける各線量の関係などについて紹介する。

2. 防護量と実用量の定義

2.1 防護量

防護量には、次式で表される等価線量 (H_T) と実効線量 (E) があり、これらは被ばく線量の限度を指定する目的で、ICRP^{1,2)} によって定められた量である。

$$H_T = \sum w_R \times D_{T,R} \quad (1)$$

w_R ：放射線荷(加)重係数

$D_{T,R}$ ：組織・臓器 T について平均された放射線 R に起因する吸収線量

$$E = \sum w_T \times H_T \quad (2)$$

w_T ：組織 T に対する荷重(組織加重)係数

2.2 実用量

防護量は、直接計測することが不可能な量である。実用量は ICRU³⁻⁶⁾ で定義されたものであり、外部放射線による被ばくに対する適切な防護量を十分な近似で容易に計測可能とし、また、一方ではその量を極端な過小評価又は過大評価を避けるように考案され、次のように定められている。

①周辺線量当量 [$H^*(d)$]

ある放射線場の 1 点における周辺線量当量とは、対応する整列・拡張場において、ICRU 球内の整列場に対向する半径上の深さ d における線量当量。

②方向性線量当量 [$H^*(d, \Omega)$]

ある放射線場の1点における方向性線量当量とは、ICRU球内の指定されたある方向の整列場に対向する半径上の深さ d における線量当量。

③個人線量当量 [$H_p(d)$]

個人線量当量とは、人体上のある指定された点における適切な深さ d における線量当量。

※個人線量当量は人体内で定義されており、放射線を受ける対象部位が指定されておらず、基本的に多価量となる。しかし、個人線量計の校正に際しては、統一した基準線量当量の設定が必要となるため、ICRUはその対象としてICRUスラブファントムを定めている。

3. 実用量の測定による防護量の評価

実用量から防護量を評価する方法としては、サーベイメータ等による空間線量(率)測定値に基づき実効線量を評価する方法と、着用された個人線量計の測定値に基づきこれを評価する方法とに大別される。サーベイメータ類及び個人線量計は、信頼できる測定値を得るために基準校正場における校正が必要となる。

空間線量(率)を測定するサーベイメータ類と身体に装着する個人線量計とでは、校正基準となる実用量が周辺線量当量 [$H^*(10)$]、個人線量当量 [$H_p(10)$] とそれぞれ異なると共に、校正条件も in air, on phantom 条件と異なる。基準線量として各測定器に照射される量は、いずれも基準線源 (^{137}Cs γ 線等)からの物理量である空気カーマ (Gy 単位系) が基本であり、これに各線量当量換算係数 (Sv/Gy) を乗じた値が実質的な校正基準線量となる。また、これらの校正時における基準線量の照射は、各測定器の基準方向(正面)に正対した方向とすることが基本となる。

これらの諸点を考慮し、校正条件下における

$H^*(10)$ 、 $H_p(10)$ 及び実効線量の関係と、実際の放射線場における $H^*(10)$ 、 $H_p(10)$ 及び実効線量の関係は、次のように考えることができる。

3.1 校正基準場における $H^*(10)$ 、 $H_p(10)$ 及び実効線量の関係

校正基準場においては、基準線量の照射は各測定器の基準方向(正面)に正対した方向となる。ここで ^{137}Cs γ 線による基準線量(空気カーマ単位)を A (mGy) とすると、この線量を正面 (AP) から受けた際の実効線量 E_{AP} は、ICRP 74⁷⁾ 表 A17 (APの値) から、

$$E_{AP} = 1.017 A \text{ (mSv)} \quad (3)$$

となる。

同様に、この場合における周辺線量当量 ($H^*(10)_{AP}$) と個人線量当量 ($H_p(10)_{AP}$) の値は、ICRP 74 表 A21, A24 の値から、

$$H^*(10)_{AP} = 1.20 A \text{ (mSv)} \quad (4)$$

$$H_p(10)_{AP} = 1.215 A \text{ (mSv)} \quad (5)$$

また、(3)、(4) 及び (5) 式から、

$$H^*(10)_{AP}/E_{AP} = 1.18 \quad (6)$$

$$H_p(10)_{AP}/E_{AP} = 1.19 \quad (7)$$

となる。

これらから、身体の正面 (AP) 方向から ^{137}Cs γ 線を被ばくした場合、この γ 線に対する周辺線量当量若しくは個人線量当量の値をもって実効線量とみなすと、いずれも実効線量を20%程度高く評価することとなる。

3.2 実際の放射線場における $H^*(10)$ 、 $H_p(10)$ 及び実効線量の関係

校正基準場においては、前節に記したように各測定器(及び被ばくを想定する身体)に対する放射線の入射方向は基本的に一方向(正面方向)である。一方、実際の汚染地域などにおける放射線の入射方向を考慮すると、被ばく源となる ^{137}Cs 等は、校庭や道路等の地面(土壌)、公園等の樹木や街路樹、並びに建物の屋根や壁

面等、様々な場所に付着（浸透）しており、いろいろな角度、方向から γ 線が入射することになる。ここで、放射線の種類を ^{137}Cs γ 線とし、この γ 線が回転ジオメトリー（ROT）又は等方ジオメトリー（ISO）で身体に入射したものとすると、 $H^*(10)$ 又は $H_p(10)$ として測定された実用量と実効線量の関係は次のようなる。

^{137}Cs γ 線の線量（空気カーマ単位）を A (mGy) とすると、この線量を ROT 又は ISO 条件で受けた場合の実効線量 (E_{ROT} , E_{ISO}) は、ICRP 74 表 A17 (ROT, ISO の値) から、

$$E_{\text{ROT}} = 0.816 A \quad (\text{mSv}) \quad (8)$$

$$E_{\text{ISO}} = 0.690 A \quad (\text{mSv}) \quad (9)$$

となる。

一方、(ROT) 又は (ISO) の放射線場において、前節の校正基準場で校正されたサーベイメータ等による測定結果である周辺線量当量 ($H^*(10)_{\text{ROT}}$, $H^*(10)_{\text{ISO}}$) と、個人線量計による測定結果である個人線量当量 ($H_p(10)_{\text{ROT}}$, $H_p(10)_{\text{ISO}}$) の値は、それぞれ ICRP 74 表 A21, A24 の値から、

$$H^*(10)_{\text{ROT}} = 1.20 A \times f_{s_{\text{ROT}}} \quad (\text{mSv}) \quad (10)$$

$$H^*(10)_{\text{ISO}} = 1.20 A \times f_{s_{\text{ISO}}} \quad (\text{mSv}) \quad (11)$$

$f_{s_{\text{ROT}}}$: 基準校正場で校正されたサーベイメータ等の (ROT) 場における相対レスポンス

$f_{s_{\text{ISO}}}$: 基準校正場で校正されたサーベイメータ等の (ISO) 場における相対レスポンス

$$H_p(10)_{\text{ROT}} = 1.215 A \times f_{p_{\text{ROT}}} \quad (\text{mSv}) \quad (12)$$

$$H_p(10)_{\text{ISO}} = 1.215 A \times f_{p_{\text{ISO}}} \quad (\text{mSv}) \quad (13)$$

$f_{p_{\text{ROT}}}$: 基準校正場で校正された個人線量計の (ROT) 場における相対レスポンス

$f_{p_{\text{ISO}}}$: 基準校正場で校正された個人線量計の (ISO) 場における相対レスポンス

となることが期待される。

(8), (10) 式及び (9), (11) 式から、周辺

線量当量と実効線量との関係は、

$$H^*(10)_{\text{ROT}}/E_{\text{ROT}} = 1.47 f_{s_{\text{ROT}}} \quad (14)$$

$$H^*(10)_{\text{ISO}}/E_{\text{ISO}} = 1.74 f_{s_{\text{ISO}}} \quad (15)$$

同様に、(8), (12) 式及び (9), (13) 式から、個人線量当量と実効線量との関係は、

$$H_p(10)_{\text{ROT}}/E_{\text{ROT}} = 1.489 f_{p_{\text{ROT}}} \quad (16)$$

$$H_p(10)_{\text{ISO}}/E_{\text{ISO}} = 1.761 f_{p_{\text{ISO}}} \quad (17)$$

となる。

また、(10), (12) 式及び (11), (13) 式から、周辺線量当量と個人線量当量との関係は、

$$H^*(10)_{\text{ROT}}/H_p(10)_{\text{ROT}} = 0.988 (f_{s_{\text{ROT}}}/f_{p_{\text{ROT}}}) \quad (18)$$

$$H^*(10)_{\text{ISO}}/H_p(10)_{\text{ISO}} = 0.988 (f_{s_{\text{ISO}}}/f_{p_{\text{ISO}}}) \quad (19)$$

となる。

3.3 放射線場のジオメトリーに対する線量計の応答と各線量との関係

周辺線量当量を測定するサーベイメータ等は、基本的に in air 状態の照射条件で校正するが、個人線量当量を測定する個人線量計は、on phantom 条件で校正される。そのため、基準校正場で校正されたサーベイメータ等の ROT 及び ISO 場における相対レスポンスは、概ね基準校正場におけるレスポンスと同様であるとみなすことができる。しかし、個人線量計は on phantom 条件で校正されているため、ROT 及び ISO ジオメトリーのように phantom の背面から照射された際は、phantom 自身の遮蔽効果により相対レスポンスが基準校正場のレスポンスに比べ、30%程度^{注)} 低くなることを見込まれる。

ここで、

$$f_{s_{\text{ROT}}} \doteq f_{s_{\text{ISO}}} \doteq 1 \quad (20)$$

$$f_{p_{\text{ROT}}} \doteq f_{p_{\text{ISO}}} \doteq 0.7 \quad (21)$$

^{注)} 個人線量計 (FB, TLD) を人体型ファントムに装着し、仰角を 0° , $+45^\circ$ 及び -45° , 方位角を 0° から 360° まで (30° 刻み) の各角度から ^{137}Cs γ 線で照射した際の、正面照射時のレスポンスに対する各角度におけるレスポンスの平均値として得られた値 (1979 年に実施した試験⁸⁾ による参考値)。

と仮定すると、(14)、(15)式から、

$$H^*(10)_{\text{ROT}}/E_{\text{ROT}}=1.47 \quad (22)$$

$$H^*(10)_{\text{ISO}}/E_{\text{ISO}}=1.74 \quad (23)$$

同様に、(16)、(17)式から、

$$H_p(10)_{\text{ROT}}/E_{\text{ROT}}=1.04 \quad (24)$$

$$H_p(10)_{\text{ISO}}/E_{\text{ISO}}=1.23 \quad (25)$$

また、(18)、(19)式から、

$$H^*(10)_{\text{ROT}}/H_p(10)_{\text{ROT}}=1.41 \quad (26)$$

$$H^*(10)_{\text{ISO}}/H_p(10)_{\text{ISO}}=1.41 \quad (27)$$

となる。

これらから、ROT、ISO ジオメトリーの放射線場においてサーベイメータ等の測定結果を実効線量とみなした場合には、50~70%程度のプラス側の評価となるとともに、個人線量計の測定結果を実効線量とみなした場合には、5~20%程度のプラス側の評価となることが見込まれる。

4. まとめ

一般的に、放射線作業や地域住民などの被ばく線量は、防護量である実効線量（及び等価線量）として管理され、各放射線防護関連法令においても、これらの防護量を対象とした線量限度などを定めている。防護量は実測不能な量であることから、実務的には各測定器から得られる実用量に基づきこれらの値を評価するが、これらはすべて Sv 単位系で表される線量であるとともに、それぞれの定義の違いから実際の放射線場の状況により各値（の比率）は大きく異なる。今回は ^{137}Cs の γ 線を対象とした場合の違いについて紹介したが、放射線のエネルギーや入射方向、及び使用する測定器の諸特性に

よっても、異なる関係を示すことになる。特に、サーベイメータなどによる値と個人線量計による値の比較などに際しては、これらの違いについて注意することが必要である。

ここに記述した基本概念などをまとめるに当たっては、日本原子力研究開発機構（JAEA）吉澤道夫氏から多大な協力をいただいております。深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) ICRP Publication 60, 国際放射線防護委員会の1990年勧告, 日本アイソトープ協会
- 2) ICRP Publication 103, 国際放射線防護委員会の2007年勧告, 日本アイソトープ協会
- 3) ICRU (1985), Determination of dose equivalents resulting from external sources. ICRU Report 39. International commission on Radiation Units and Measurements.
- 4) ICRU (1988), Determination of dose equivalents resulting from external sources part 2. ICRU Report 43. International commission on Radiation Units and Measurements.
- 5) ICRU (1992a), Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiations. ICRU Report 47. International commission on Radiation Units and Measurements.
- 6) ICRU (1993b), Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report 51. International commission on Radiation Units and Measurements.
- 7) ICRP Publication 74 外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数, 日本アイソトープ協会
- 8) 委託研究報告書（非公開）, 放射線被ばく登録管理を目的とした被ばく線量当量評価に関する試験研究 [II], 日本保安用品協会 (1979)

（長瀬ランダウア(株)技術室）