



講座 核融合施設における放射線計測の基礎

2. 放射線計測の基礎

2. Fundamentals of Radiation Measurement

飯本 武志¹⁾, 上 叢 義 朋²⁾, 河 野 孝 央³⁾

IIMOTO Takeshi¹⁾, UWAMINO Yoshitomo²⁾ and KAWANO Takao³⁾

¹⁾東京大学, ²⁾理化学研究所, ³⁾核融合科学研究所

(原稿受付: 2013年 8月22日)

放射線計測, 線量計測を実施する上で基礎となる重要な知識, すなわち, さまざまな単位の定義, 放射線計測機器の概要, 代表的な放射線検出器の構造と特徴, 放射線計測における統計について概説した。

Keywords:

becquerel (Bq), electron volt(eV), gray(Gy), sievert(Sv), ionization chamber, GM counter, NaI(Tl)scintillation spectrometer, standard deviation, error propagation, detection limit.

2-1 放射線計測機器の概要

2.1.1 放射線計測機器の分類[1]

(1) 検出原理による分類

放射線による物質の電離作用と励起作用(物質の発光現象, 化学変化, 発熱現象などにつながる)が, 計測機器の放射線検出原理に利用されている。

アルファ線やベータ線などの荷電粒子は, 物質中を通過するだけでまわりを電離して, 電子と陽イオンの対を生成する。ガンマ線や中性子線のような電荷をもたない放射線は, 物質と相互作用して生成する高速の荷電粒子を介して電離を生じる。これらの電荷をうまく集めることができれば, 電気信号として認知することができる。これが放射線の電離作用を検出原理に使った例である。該当する計測機器には, 電離箱, 比例計数管, ガイガーミュラー(GM)計数管, 半導体検出器などがある。

一方, 例えば, 一部の無機物質は, 放射線から物質内部の電子がエネルギーを受けとって, 通常よりも高いエネルギー状態になることがある。この状態を励起状態とよぶ。この電子はすぐに, あるいは外部からのレーザー光や熱などの刺激を受けて, 元の安定したエネルギー状態(基底状態)に戻るが, その際に余ったエネルギーを蛍光として放出することがある。この蛍光の強さが, 入射した放射線の線量に比例する性質などを使って, 放射線計測がなされている。該当する計測機器には, NaI(Tl)シンチレータ, ZnS(Ag)シンチレータ, 熱ルミネッセンス素子, OSL素子, 蛍光ガラス素子などがある。

(2) 計測対象による分類

放射線計測の目的はさまざまである。整理の一例として, 放射線量の平均強度を求める目的と, 個々の光子や粒子に着目して放射線を検出する目的, の2系統に分類する

考え方がある。

前者は, はじめから放射線の個々の情報をとることを断念しており, ある限られた空間での放射線の線量などについて, ある時間にわたる時間的平均値または積分値を知ることが目的としている。該当する計測機器には, 直流型電離箱などがあるが, GM計数管式サーベイメータやNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータなど, 原理的には個々の放射線を測定してはいるものの, 結果として線量等の時間的平均値を表示させるように設計された機器は, この区分に整理されることになる。

個々の放射線に着目する計測器には, 放射線と検出器の相互作用のタイミングを追跡することに主眼をおくもの(計数型の検出器)と, 検出部のなかでの放射線が相互作用した場所, 方向などに主眼をおくもの(飛跡記録型の検出器)がある。計数型の検出器には, パルス型電離箱, GM計数管, 半導体検出器, NaI(Tl)シンチレータ, ZnS(Ag)シンチレータなどがある。情報取得のための信号としては, 電気的パルスが用いられ, 個々の放射線が相互作用したタイミングのみならず, エネルギー, 入射角度, 種類などの情報が得られるものもある。一方, 飛跡記録型の検出器は, 放射線に関する空間分布的な情報を取得することを目的としている。固体飛跡検出器やイメージングプレートが, この種の計測器として利用できる。

昨今の計測機器の進歩はめざましく, 上記の区分が必ずしも明確ではなくなってきたのはいるが, 放射線計測の目的を事前に明確にした上で適切な計測機器を選択することがきわめて重要である点是不変である。

また, ここで詳しく触れることはできないが, “場”の線量測定と“人”の線量測定では, たとえ同一の計測機器を用いることができたとしても, ISO等で規定された機器の校

¹⁾Division for Environment, Health and Safety, The University of Tokyo, TOKYO 113-0032, Japan

²⁾RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science, Wako, SAITAMA 351-0198, Japan

³⁾National Institute for Fusion Science, Toki, Gifu 509-5292, Japan

正方法が異なることを特筆し、注意喚起をしておきたい。

2.1.2 主な放射線計測機器

放射線の検出原理別に、代表的な検出器を整理したのが表1である。それぞれに特徴があり、前項で一例として挙げた計測対象の分類（放射線量の平均強度を求める目的と、個々の光子や粒子に着目して放射線を検出する目的）のみならず、放射線の種類、エネルギーの高低、放射線量や放射能レベルの大小、温湿度・気圧などの環境条件、要求される測定精度などによって、検出器、計測機器を適切に使い分ける必要がある。

(飯本武志, 上義義朋)

2.2 代表的な放射線検出器の特徴と原理[3]

2.2.1 電離箱

図1に電離箱の概念を示した。平行に向かい合った2枚の電極に電圧が印加されている。荷電粒子が気体中を走ると、気体分子を電離し、電子とイオンの対を生成する。負の電荷をもつ電子は正の電極に引き寄せられ、正の電荷をもつイオンは負の電極に引き寄せられる。その結果、回路に電流が流れ、放射線が検出される。多数の放射線によって平均的に流れる電流を測定するものを直流型電離箱と呼び、電荷を電圧パルスに変換して測定するものをパルス型電離箱と呼んでいる。気体分子を電離させる荷電粒子は、アルファ線でも、ベータ線でも、ガンマ線によって電極などからたたきだされた2次電子でもよい。電極に印加する電圧が低いと、電子とイオンが電極に集められる前に再び結合（再結合）してしまう。したがって、再結合を起こさないレベルの十分な電圧（電離箱領域の電圧。通常は数10～数100 V）を印加する必要がある。

電離箱を検出器とした1 cm 線量当量測定用のサーベイメータがある。電離箱サーベイメータはエネルギー依存性がよく、ガンマ線やエックス線による放射線場の線量率測定に高い能力を発揮する。一方、測定の感度が比較的lowく、自然放射線レベル（0.05 $\mu\text{Sv/h}$ 程度）の線量率測定はでき

ない。また、湿度に弱く、精密回路の安定のために使用前の準備運転を要するなど、使用上に留意すべき点も多い。

2.2.2 GM 計数管

図1でモデル化される検出器の内部では、気体中で発生した電子、イオンが電極に引き寄せられる途中で気体分子と衝突する現象が起きている。この検出器の印加電圧を上げていくと、衝突の合間に電子が強く加速され、次の衝突の際に気体分子をさらに電離して新しい電子—イオン対を生成することになる。この現象は電子の移動の方向になだれのように拡大していくので、電子なだれと呼んでいる。また、これに伴ってパルス型の検出器で得られる電気信号が大きくなることをガス増幅と呼んでいる。印加電圧をさらに上げると、ガス増幅が極限に達し、得られる電圧パルスの高さが、最初に発生した電子—イオン対数とは全く無関係に、大きく、一様になるレベルに到達する。このときの印加電圧の領域を GM 領域と呼び、この原理を利用した検出器を GM 計数管と呼んでいる。

GM 計数管を検出器としたサーベイメータがある。ベータ線とガンマ線を同時に計測できる端窓型の GM サーベイメータが表面汚染の検査などによく用いられるが、トリチウムなどの軟ベータ核種の放射線は検出器の窓を通過できず、測定できない核種があることに注意が必要である。また計数率が大きくなると、検出器固有の不感時間（100 μs 程度）のため、放射線の数え落としの割合が顕著になったり、完全に計数動作が停止してしまう（窒息現象）状況

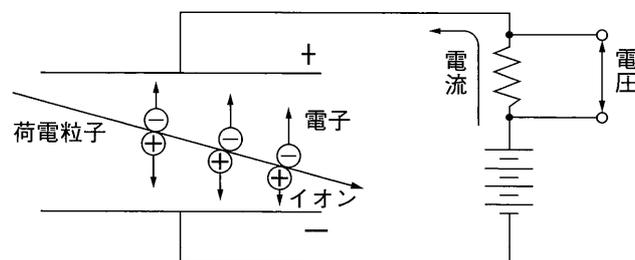


図1 電離箱の基本原理。

表1 放射線の検出原理と検出器[2].

検出原理 (信号)		検出器
電離現象 (電荷→電流, 電圧)	一時電離	電離箱 (気体), 半導体検出器 (固体)
	電子なだれ	比例係数管, GM 計数管
発光現象 (光子→電荷→電圧)	蛍光放出	シンチレーション検出器
	チェレンコフ放射	チェレンコフ検出器 (液シン)
	蓄積誘電放射	イメージングプレート 熱ルミネセンス線量計 OSL 線量計 蛍光ガラス線量計
化学変化	写真作用	写真乳剤, X線フィルム
	酸化・還元反応	化学線量計
	ラジカル形成	アラニン線量計
	着色	高分子線量計, カラーインジケータ
飛跡現象	放射線損傷	固体飛跡検出器
	液滴形成	霧箱
	気泡形成	泡箱, バブルディテクタ
発熱現象	熱発生	カロリメータ
放射化	核反応	放射化検出器

に陥ったりするので、高線量環境での測定には十分な注意が必要である。

2.2.3 NaI(Tl)シンチレータ

NaI (Tl) シンチレータは、タリウムを少量添加したヨウ化ナトリウムの結晶を、ガラス窓がついた金属のケースに封入したものである。ヨウ化ナトリウムは潮解性があるため、このようなケースに密封された構造をもつ。このケースを通過することのできないアルファ線を測定することは、原理的に不可能である。ベータ線もケースの影響を受けるが、それ以上にヨウ化ナトリウムが高原子番号であるため、後方散乱の影響が大きく、入射したベータ線が再びシンチレータから逃れてしまう確率が高いため、ベータ線の測定にも本質的に向かない。

シンチレータに入射するガンマ線やエックス線によってたたき出された電子は、結晶の中で電離や励起を起こす。これらが元に戻る過程で、シンチレータは吸収したエネルギーに比例した強度の光（シンチレーション光）を発する。添加されたタリウムは活性化物質（アクチベータ）と呼ばれ、吸収したエネルギーが光として放出されやすいように、かつ測定しやすい波長の可視光が放出されやすいようにする働きがある。

NaI (Tl) シンチレータを用いて、電離箱やGM計数管と比較して、非常に高い検出効率をもつガンマ線用サーベイメータをつくることができ、自然放射線レベルを測定することができる。エネルギー補償型のサーベイメータによれば、電離箱サーベイメータと遜色のないエネルギー特性が得られ、空間線量率を正しく測定することができる。

(飯本武志, 上義義朋)

2.3 放射線計測の統計

使用する検出器、計測時間、放射線源、その他、全ての測定条件が同じであっても、測定を繰り返して得られる計数は、かならずしも同じではなく、むしろ異なる。放射線は、決まった時間間隔で規則正しく検出されるわけではない。ランダムである。しかしながら、このランダム現象を数多く集めると、一定の規則性が見えてくる。これが放射線計測の統計的性質である。この統計的性質は、放射線検出がバイナリー過程の一種であることから、数学的に分布関数の形で表現することができる。またこうして得られた計数に対する有意性の評価には、誤差の伝搬式から導かれる検出限界の式がよく使われる。以下、分布関数、誤差の伝搬式、そして検出限界の式の概要をまとめる。

2.3.1 分布関数

(1) 二項分布関数

今、計測時間を N 個の区間に分ける。どの区間も等間隔である。 N が十分に大きくと、それぞれの区間では、放射線が1本検出されるか、されないかのいずれかになる[4]。これが放射線検出のバイナリー過程である。ここで測定を無限回繰り返して得られる結果の平均計数が m であったとすると、 N 個の各区間で放射線が検出される確率 p は m/N 、検出されない確率は $(1-p)=q$ である。また N 個の区間のうち、 n 個 ($N > n$) の区間で放射線が検出さ

れる場合の数 $E(n)$ は

$$E(n) = \frac{N!}{(N-n)!n!} = {}_N C_n, \quad (1)$$

であるから、1回の測定で計数 n が得られる確率 $P_b(n)$ は

$$P_b(n) = {}_N C_n p^n q^{(N-n)}. \quad (2)$$

これは $(p+q)^N = 1$ の展開式に等しい。すなわち N 個の区間のうち n 個で放射線が検出される確率は、二項分布関数 $P_b(n)$ で表すことができる。また平均値と分散は次式で定義されるから

$$\text{平均値 } m = \sum_{n=0}^N n P_b(n), \quad (3)$$

$$\text{分散 } \sigma^2 = \sum_{n=0}^N (n-m)^2 P_b(n). \quad (4)$$

(2)の関係式を用いると、 $m = pN$ 、 $\sigma^2 = pqN$ を導くことができる[5, 6]。

(2) 3種の分布関数

二項分布関数は、放射線計測の統計的な性質を説明するには都合がよい。しかしながら理論的な取り扱いでは、二項分布関数の近似式であるポアソン分布関数か、ガウス分布関数（正規分布関数）が用いられる。ポアソン分布関数は放射線検出確率 p が非常に小さい場合に、またガウス分布関数は放射線検出確率 p が非常に小さくかつ平均値 m が非常に大きいという条件を加えると、それぞれ二項分布関数から導くことができる。ポアソン分布関数とガウス分布関数が成り立つ場合に得られる重要な結論は、平均値 m と分散 σ^2 が等しいということである。分散の平方根が標準偏差であるが、これは放射線計測現場では日常的に使用される重要な関係式である。3種の分布関数の関係を図2にまとめる[6]。

2.3.2 誤差の伝搬

(1) 誤差の伝搬式[7]

今、ある物理量 f_i が、測定で得られる独立変数 x_i, y_i, z_i, \dots を用いて間接的に求められるとすると、 $f_i = f(x_i, y_i, z_i, \dots)$ である。この微分をとる。

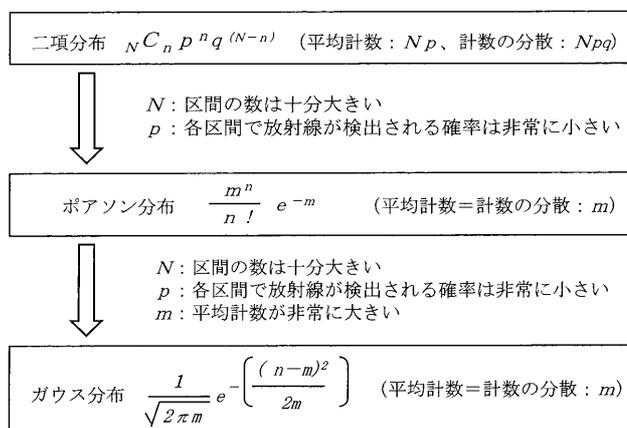


図2 3種の分布関数の関係と特徴。

$$df_i(x_i, y_i, z_i, \dots) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right) dx_i + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right) dy_i + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right) dz_i + \dots, \quad (5)$$

式(5)は、誤差 df_i が、測定できる物理量の平均値からのズレ dx_i, dy_i, dz_i, \dots に、偏微分で表される変化率で重み付けした合計であることを示している。式(5)を2乗して次式を得る。

$$\begin{aligned} df_i(x_i, y_i, z_i, \dots)^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 dx_i^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 dy_i^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 dz_i^2 + \dots \\ &+ 2\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right) dx_i dy_i + 2\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right) dy_i dz_i \\ &+ 2\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right) dz_i dx_i + \dots. \end{aligned} \quad (6)$$

測定を N 回行って、 N 個の(6)式を求め、全体を合計する。ここで dx_i, dy_i, dz_i の平均値から大きい方へのズレと小さい方へのズレの数は同じであると仮定して整理し、 N で割ると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N df^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dx_i^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dy_i^2 \\ &+ \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dz_i^2 + \dots, \end{aligned} \quad (7)$$

したがって

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots. \quad (8)$$

これが、複数の独立変数で表される物理量の分散を求めるときに使用される誤差の伝搬式である。この式において $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \dots$ の値は、計数がガウス分布関数に従うならば、平均計数に等しいとすればよい。

(2) 検出下限計数率

試料測定とバックグラウンド(BKG)測定で得られた N_s と N_b を用いて、正味の放射線計数率を求める場合を考える。このとき正味計数率は以下の式で表される。

$$n_n = \frac{N_s}{t_s} - \frac{N_b}{t_b} = f(N_s, N_b) \quad (9)$$

試料測定計数： N_s , BKG 測定計数： N_b
試料測定時間： t_s , BKG 測定時間： t_b
試料測定計数率： $n_s = N_s/t_s$, BKG 測定計数率： $n_b = N_b/t_b$
試料の正味計数率： $n_n = n_s - n_b$

(8), (9)式と、分散の平方根が標準偏差であることから、次式が導かれる。

$$\text{標準偏差 } \sigma = \sqrt{\frac{N_s}{t_s^2} + \frac{N_b}{t_b^2}} = \sqrt{\frac{n_s}{t_s} + \frac{n_b}{t_b}} \quad (10)$$

この式をもとに、正味計数率 n_n が標準偏差の K 倍を超えるときに有意であると仮定して、検出下限計数率の式を導く。すなわち、以下の不等式が成り立つときに、正味計数

率 n_n は有意である。

$$n_n > K \sqrt{\frac{n_s}{t_s} + \frac{n_b}{t_b}}, \quad (11)$$

両辺を二乗し、 $n_s = n_n + n_b$ を代入して整理すると、最終的に次式が得られる。

$$n_n > \frac{K}{2} \left(\left(\frac{K}{t_s}\right) + \sqrt{\left(\frac{K}{t_s}\right)^2 + 4n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b}\right)} \right). \quad (12)$$

これが、バックグラウンド計数と測定時間から、検出限界計数を求める式である。なお、多くの場合、バックグラウンド以外の放射線が検出されたかどうかを判断するための下限計数率(検出下限値)には $K=3$ が、また定量的な評価の結果が有意であるかどうかを判断する下限計数率(定量下限値)には、 $K=10$ が用いられる[8]。

(河野孝央)

Appendix

1. 放射線計測における単位の定義[1-3,9]

1.1 放射線の強さを表す単位 ベクレル(Bq)

放射線の強さを表す単位として、古くは、1グラム(g)のラジウムの放射能に由来するキュリー(Ci)が用いられていた。現在は、原子核が1秒間に放射性壊変する数によって放射線の強さを規定する、SI単位系のベクレル(Bq)を用いる。基本単位の組み合わせで単位ベクレルを表現すると、 $Bq = \text{sec}^{-1}$ となる。単位キュリーと単位ベクレルの関係は、 $1(\text{Ci}) \approx 3.7 \times 10^{10}(\text{Bq})$ である。

1.2 放射線のエネルギーを表す単位 電子ボルト(eV)

1電子ボルト(eV)とは、真空中で1ボルト(V)の電位差で電子を加速した時に、電子が最終的に獲得する運動エネルギーと等価なエネルギーを表す単位である。SI単位系のジュール(J)との関係は、 $1(\text{eV}) \approx 1.6 \times 10^{-19}(\text{J})$ である。放射線のエネルギーを表現する場合には、キロ電子ボルト(keV)、メガ電子ボルト(MeV)、ギガ電子ボルト(GeV)などがよく用いられる。

1.3 吸収線量およびカーマを表す単位 グレイ(Gy)

ある物質が放射線から受けるエネルギーの量で規定される線量に「吸収線量」がある。吸収線量は放射線の種類や対象となる物質を問わず、すべてのケースで使用できる。単位としてはSI単位系のグレイ(Gy)が用いられ、基本単位の組み合わせで表現すると、 J kg^{-1} となる。微小領域内のエネルギー収支(核反応や素粒子反応が起きない場合、その領域に放射線が運び込むエネルギーとその領域から運び出すエネルギーの差になる)に着目しているのが、この吸収線量である。一方、微小な質量の物質中で、電荷をもたない放射線(光子線、中性子線)によってたたき出されたすべての二次荷電粒子のもつ運動エネルギーの和として規定される線量を、「カーマ(kerma)」と呼ぶ。これは kinetic energy released in material の略である。カーマの単位もグレイ(Gy)である。

1.4 人の被ばく線量を表す単位 シーベルト (Sv)

(1) 防護量と実用量 (計測量) の整理 [10]

シーベルト (Sv) は、放射線被ばくによる人体影響の程度を数値で示すための指標、被ばく線量の単位として用いられる (表1)。同一の吸収線量であっても、アルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子など、放射線の種類によって人体への影響の程度は異なるが、この単位シーベルトを使えば、どのような放射線の被ばく (漢字では「被曝」) でも、同じものさしで人体影響の程度を数値化できることに利点がある。

シーベルト (Sv) を単位とする線量には、等価線量、実効線量、周辺線量当量、個人線量当量、預託実効線量などがある。ひとつの単位で人体影響に関連のあるさまざまな線量を表現できる利点がある半面、表現された数値がどの線量を示すシーベルトなのか、注意が必要となる。これらシーベルトを単位として用いる線量群は、大きく2つの系統に区分することができる。ひとつは「防護量」、もうひとつは「実用量 (計測量)」である。

(2) 防護量

放射線防護の目的は、がんや遺伝性影響の発生を容認できないレベルよりも低くして、かつ、脱毛や白内障など、発生のしきい線量が明確になっている影響を防止することにある。その目的を達成するためのひとつの手段として、法令などでは、たとえば、子どもを含む公衆や仕事上で放射線を扱う作業員 (成人) に対して、それぞれに被ばく線量に関する管理上の上限値 (線量限度) が定められている。このときに使用されるのが「防護量」、つまり等価線量や実効線量である。

等価線量は、胃や肺などの臓器・組織が放射線によって受けた吸収線量に、放射線の種類の違いによる人体影響の効果に関する係数を乗じて計算される。胃の等価線量、肺の等価線量というように、臓器・組織ごとの局所的な線量を表現するために使用される。

一方、実効線量は、臓器・組織別に求められた等価線量に、被ばくした部位の放射線に対する感受性を考慮した係数 (人体中の臓器・組織を比較し、相対的に放射線に強い

か、弱い) を乗じて、全身の和をとることで計算される。実効線量は、放射線の全身被ばくがあったときのがんの発生確率を考慮して、人体影響の程度を数値化したもの、と説明できる。

(3) 実用量 (計測量)

防護量 (等価線量、実効線量) を直接測定することはできない。防護量を求める際に必要となる臓器・組織別の平均吸収線量を放射線計測装置で測ることができないからである。その代替として、計測のための量として用意されたのが「実用量」である。つまり、実際に被ばくした個人や集団、あるいはこれから現実の問題として被ばくしそうな個人や集団が特定できる場合に、その被ばく線量を個別に測定、評価しようとするときに用いられるのが、この実用量である (表2)。

たとえば適切なサーベイメータを使えば、空間の放射線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) をその場で直読することができる。この場合、実用量のうち、外部被ばくに関係のある、周辺線量当量率を測ったことになる。極めて稀な例外を除けば、個人線量計やサーベイメータなどで測定できる実用量は法令で定められる線量限度などの防護量と同じか、またはそれより若干高い値を表示するように計測機器は設計、設定されている。内部被ばくの線量を評価するときには、預託実効線量の考え方をを用いるが、ここではその解説を割愛する。

線量を評価する現場では、測定、あるいは計算された実用量のシーベルトが、別に定められている線量限度や参考レベル (防護量) より低ければ、線量として法令を十分に担保している、あるいは線量の目安や目標をクリアしているとの判断が可能となる。

(飯本武志, 上養義朋)

参考文献

- [1] 小川岩雄 著:放射線 (改訂版) (コロナ社, 1973)。
- [2] 日本アイソトープ協会編:放射線取扱の基礎 (7版) 【第1種放射線取扱主任者試験の要点】 (2012)。
- [3] 柴田徳思編:放射線概論 第1種放射線試験受験用テキスト (第8版) (2013)。

表1 Sv単位を用いる防護量と実用量 (計測量) の分類。

【防護量】	【実用量 (計測量)】
線量限度や参考レベルなど、放射線防護を目的として、線量の数値基準、目標値などを表現するためのもの	実際に起こった (あるいは起きそうな) 被ばくを、個人や集団のある程度特定して、線量を個別に評価するためのもの
等価線量, 実効線量	周辺線量当量, 個人線量当量, 預託実効線量など

表2 Sv単位を用いる防護量, 実用量, 実用量の法令上の名称 (外部被ばくについて)。

対象	防護量	実用量 (計測量)	実用量の法令上の名称
環境	実効線量	周辺線量当量 $H^*(10)$	1 cm 線量当量 —注)
	眼の水晶体の等価線量	方向性線量当量 $H'(3, \alpha)$	70 μm 線量当量
	皮膚の等価線量	方向性線量当量 $H''(0.07, \alpha)$	
人	実効線量	個人線量当量 $H_p(10)$	1 cm 線量当量 —注)
	眼の水晶体の等価線量	個人線量当量 $H_p(3)$	70 μm 線量当量
	皮膚の等価線量	個人線量当量 $H_p(0.07)$	1 cm 線量当量
	腹部表面の等価線量 (妊娠中の女性)	個人線量当量 $H_p(10)$	

注) 現法令では、測定は義務づけられていない

- [4] 三浦 功, 管 浩一, 俣野恒夫共著: 放射線計測学(1974, 裳華房).
- [5] 吉澤康和: 新しい誤差論-実験データ解析法(2009, 共立出版)
- [6] 木村逸郎/阪井英次訳: Knoll, 放射線計測ハンドブック第3版(2001, 日刊工業新聞社)
- [7] P.R. Bevington, *DATA REDUCTION AND ERROR ANALYSIS FOR THE PHYSICAL SCIENCE* (1969, McGRAW-HILL).
- [8] G. Gilmore, J.D. Heminbway, 米沢中四郎他6名共訳: 実用ガンマ線測定ハンドブック(2002, 日刊工業新聞社).
- [9] 多田順一郎著: わかりやすい放射線物理学(オーム社, 2001).
- [10] 日本アイソトープ協会編: はじめての放射線測定 — 正しく理解し, 正しく測ろう放射線— (2012).



いいもと たけし
飯本 武志

東京大学環境安全本部 准教授. 早稲田大学大学院理工学研究科(物・応物) 博士後期課程修了. 博士(工学). 専門は「放射線防護」「放射線計測」「環境放射線(能)」

「放射線管理」. 安全管理分野の専門家育成のみならず, 広く, 環境・安全・リスクをキーワードに, 学校教員育成, 児童生徒への教育にも力を入れている.



うわみの よしとも
上 蓑 義 朋

理研仁科加速器研究センター 安全業務室長. 研究分野は放射線遮へいと放射線防護など. 生まれは金沢市. 学生時代からずっと加速器の放射線防護研究に関わっており, 東大核研と理研では実験も行った2台のサイクロトロンを看取り, 解体・廃棄を担当した. 趣味は酒の当て料理.