

の化合物半導体やダイヤモンドを用いた検出器の開発も進められています。半導体検出器の最大の特長はエネルギー分解能が非常に優れていることであり、Si 半導体検出器はアルファ線や低エネルギー X 線放出核種の、Ge 半導体検出器はガンマ線核種の高精度の核種・定量分析に用いられています。多重波高分析装置（マルチ・チャンネル・アナライザー）と組み合わせて放射線のエネルギー情報を分析して、測定試料の核種の定性・定量を行うことをスペクトロメトリと言います。福島原発事故の影響を受けて食品などに含まれる汚染放射能の高精度測定に広く用いられています。

(2) 励起作用を利用した測定器

荷電粒子が相互作用によって原子の軌道電子を高いエネルギー状態に励起して、その電子が基底状態に戻るときに余分なエネルギーを蛍光として放出する物質があります。この光（蛍光）の情報から放射線を分析することができます。そのような蛍光物質をシンチレータと言いますが、ヨウ化ナトリウム NaI(Tl) シンチレータ、ヨウ化セシウム CsI(Tl) シンチレータ、硫化亜鉛 ZnS(Ag) シンチレータなどが無機のシンチレータとしてよく使われています。また有機物のシンチレータもあり、液体シンチレータやプラスチックシンチレータとして主にベータ線測定に用いられています。

無機シンチレータとして古くから広く使われているのが NaI(Tl) 検出器です。NaI(Tl) 結晶中にガンマ線が入射すると、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成の相互作用によって2次電子が発生します。この2次電子が荷電粒子としてシンチレータを構成する原子の軌道電子を励起してシンチレーションと呼ばれる蛍光を発生するのです。この光の強さが結晶内で2次電子が失ったエネルギーに比例するため、入射放射線のエネルギーに関する情報も得られます。Ge 半導体検出器のエネルギー分解能に比べれば相当劣りますが、Ge 半導体検出器と比べて大型の測定器が安価に製作できますので、食品などの環境試料の汚染放射能の測定にも活用されています。

発生したシンチレーション光は光電面に集光されて電子に変換され、さらに光電子増倍管を用いて増幅します。Tl（タリウム）のようなシンチレータの括弧内に示された原子は光電面で電子に変換できるように光の波長を調整するために添加されているものです。

NaI(Tl) 結晶が感知するのは荷電粒子、すなわちベータ線ですが、通常の NaI(Tl) 検出器はアルミニウム製の金属で保護されているため、ベータ線は検出部まで到達することはできません。大型の結晶を作ることができ、もっぱら高感度のガンマ線線量計や放射能測定器に利用されています。NaI(Tl) の検出器の例を図7に示します。

最近では、NaI(Tl) のほかに CsI(Tl) シンチレータや LaBr₃(Ce) シンチレータなどでもガンマ線測定用として大型の検出器が市販されるようになってきました。

アルファ線を測定するシンチレータとして古くから使われてきたのが ZnS(Ag) シンチレータです。ラザフォードの実験でのアルファ線検出にも使われ、現在でもアル

ファ線検出の主力となっています。

(3) 写真作用を利用した測定器

写真フィルムが放射線によって感光することは一般的にもよく知られていますが、早い時期から多方面にわたって利用されてきました。レントゲン写真は透過した X 線をフィルムに撮像して画像診断するために使われてきましたが、最近の画像処理機器の発達により、フィルムレス化が進んでいます。また、この原理を利用したフィルムバッチと呼ばれる個人被ばく線量計が、長年にわたり広く使われてきましたが、最近は後述する蛍光ガラス線量計や光刺激ルミネセンス線量計（OSL 線量計 Optically Stimulated Luminescence Dosimeter）などの普及により、ほとんど使われなくなりました。

11. 放射線測定器の使用形態

放射線測定器の動作原理とそれがどのように応用されているかについて説明して来ましたが、放射線測定器を何の目的で、どのように使用するかによって、同じ検出器を用いた測定器でもデザインが異なってきます。使用形態からは以下のように分類されます。

(1) サーベイメータ

放射線管理のために行われる放射線測定には、代表的な場における放射線量（率）の測定、施設・設備や物品表面等の放射能汚染測定があります。こうした測定では放射線測定器をその場所に持って行って、必要なら測定器を移動させながら測定しなければなりません。このために軽量小型の携帯可能な測定器で、少々ラフに扱っても安定した性能を維持できるように開発、設計された放射線測定器がサーベイメータと呼ばれるものです。市販のサーベイメータの例を図8に示します。

アルファ線用としては ZnS(Ag) サーベイメータがもっぱら使われています。ベータ線用としては GM 計数管サーベイメータが一番多く使われていますが、低エネルギーのベータ線用にプラスチックシンチレータを検出器とするサーベイメータが、さらに低いベータ線検出用に、ガスフロー形の比例計数管を用いたものもあります。ガンマ線用のサーベイメータは、空間線量（率）の測定を目的にしたものが大半で、比較的高線量率に対しては電離箱サーベイメータが、低線量率用には NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータが利用されます。対象とする線量の種類は圧倒的に 1 cm 線量当量率 (Sv/h) が多いのですが、空気吸収線量率で目盛ったものも市販されています。電離箱サーベイメータのエネルギー特性（ガンマ線のエネルギーによって測定器の感度は変化します）は比較的良好で、1 cm 線量当量に類似していますが、NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータのエネルギー特性は良好ではありません。

そのため、1 cm 線量当量率の測定を目的とする NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータは、電子回路の工夫でエネルギー補償を行い、良好なエネルギー特性を示すものが使われます。

中性子線を対象とするサーベイメータのほとんどに ^3He 比例計数管（ヘリウム比例計数管）が使われています。 ^3He ガスに熱中性子が入射すると核反応が起こって、陽子とトリチウムが発生することを利用した測定器です。広範囲のエネルギーの中性子をカバーする目的で、 ^3He 比例計数管の周囲をポリエチレンなどの厚い中性子減速材で囲むため、サーベイメータとしては大変重いものですが、最近では比例計数管のガスを工夫することで減速材を使わなくてもエネルギー特性を良好にできる軽いサーベイメータも製造されるようになりました。このような中性子サーベイメータを一般的に中性子レムカウンタと呼んでいます。

(2) 固定式放射線測定器

サーベイメータは測定したい場所にいつでも簡単に測定器を持ち運んで測定することができるといった最大の特長を発揮する、放射線管理に必須の放射線測定器ですが、もう少し測定精度を高めたい、より微弱な放射能を測定したいなどの要求に対して、測定室に測定試料を持ちこめる場合には、サーベイメータではなく固定式の放射線測定器が用いられます。一般的に固定式測定器の場合には重量、大きさの制限が比較的少ないので、検出部を厚い鉛などで囲ってバックグラウンド計数率を低減して、検出限界放射能を低くすることができます。サーベイメータと同じ種類の検出器であっても、大型の検出器を使って感度を高めたり、計測電子回路も制限を受けないので高性能の回路を組み込むことができ、またコンピュータ演算処理装置を組み込めるなど、高精度の測定を可能とする利点があります。

食品中の低レベルの放射能濃度を迅速かつ高精度で測定するための測定器や人体の中に取り込まれたごく微量の放射能を人体の外から測定するために開発されたホール・ボディ・カウンターなどがよい例です。いずれも検出器には Ge 半導体検出器や NaI(Tl) シンチレーション検出器などのガンマ線検出器が多く用いられます。図 9 が Ge 半導体検出器を用いた測定装置です。

通常の放射線防護に使われる検出器はこれまで説明したサーベイメータ類と大きな違いはありませんが、サーベイメータにはなく、固定式測定器にしかないものの一つに液体シンチレーション検出器が挙げられます。トルエンやキシレンなどをベースに調整された液体状のシンチレータ・カクテルと呼ばれる有機シンチレータに測定試料を溶かし込んで、発せられる蛍光を光電子増倍管で検出するものです。バックグラウンドを下げるために検出部を鉛で覆ったり、複雑な回路で演算処理するために、一般に大型で重い測定器です。 ^3H や ^{14}C などのきわめて低いエネルギーのベータ線を測定するために開発されたもので、アルファ線にも高感度を示します。図 10 に液体シ

ンチレーション検出器の例を示します。

(3) 個人線量計

主として放射線を業として取り扱う人の外部放射線被ばく量を測定するための測定器が個人線量計と呼ばれるものです。個人線量計には直接被ばく線量を表示するもの（アクティブ形）と一定期間装着の後に読み取り装置で被ばく線量を算定するもの（パッシブ形）に分けられ、適切に使い分けられます。

アクティブ形のはポケットなどに入れて測定するので、直読式ポケット線量計などとも言われ、最近ではSiなどの半導体を利用したものが多く使われています。パッシブ形線量計はつい最近まではフィルムバッジが主流でしたが、今は蛍光ガラス線量計や光刺激ルミネセンス線量計などに代わっています。図 11 にパッシブ形の個人線量計を、図 12 にアクティブ形の直読式ポケット線量計を示します。

いずれの個人線量計も一定期間の積算線量を記録するものです。アクティブ形線量計は、比較的短期間の、例えばある一連の作業時間とか1日ごとに集計して記録を取るのが一般的ですが、作業者がいつでもそれまでに被ばくした線量を確認できることに特徴があります。パッシブ形線量計は作業者が数値をみて線量を確認することはできず、通常はサービス会社に線量の読み取りを依頼しますので、短期間の測定には不向きで、普通は1カ月程度の積算線量を対象とします。パッシブ形線量計には精密な電子回路などはなく、蛍光物質が容器に封じ込められているだけのものですから、耐衝撃性にすぐれています。作業中に誤って落としても、その衝撃で線量計が破損してそれまでの被ばく線量のデータが消失してしまうといったことはほとんどないことに最大の長があります。

12. 放射線測定器の校正

放射線測定器の指示誤差、直線性、エネルギー特性、温度特性、目的としないほかの放射線に対する感度、耐衝撃性、などの測定器の性能に関することは、機器メーカーまたは販売者が設計し、出荷時に確認して一定の保証が担保されます。しかしながら、それだけでは放射線測定器は単に適当な目盛による表示がされただけのものです。適切な標準量を基準として、基準値と測定器の指示値との関係（校正定数）を求める必要があります。この行為が測定器の「校正」と言われるものであり、精度、信頼性の高い測定を実施するには不可欠のもので、基本的には測定実施者に課せられるものです。

測定器は標準器によって校正しますが、その標準器はより上位の標準器によって校正されていなければなりません。このように何段階かの連鎖をもって国家標準にまで辿り着ける校正の道筋が確保されている場合、その測定器で測定された値は国家標準にトレーサブルである、あるいは国家標準へのトレーサビリティが確保されている

る、と言います。放射線・放射能の標準は国家標準機関が維持します。わが国の国家標準機関は、長さ、質量、電気などの多くの計量標準と同じで、独立行政法人産業技術総合研究所計量標準総合センター（NMIJ）です。放射線・放射能に関して国際標準（世界標準）といったものはなく、例えば米国では NIST、英国は NPL、ドイツは PTB といった各国の国家標準機関がそれぞれの国の計量標準を維持しています。国際相互承認協定に基づいてお互いの標準を比較することにより、各国の計量標準が国際的に同等であることを確認していますが、その要となって活動しているのが国際度量衡委員会（CIPM）で、その事務局である国際度量衡局（BIPM）が具体的推進を担っています。

計量法で定められた計量標準の維持と供給に関する制度が計量法校正事業者登録制度（JCSS: Japan Calibration Service System）と呼ばれるものです。JCSS の放射線・放射能分野では、産業技術総合研究所が経済産業大臣が指定する国家計量標準（一次標準：特定標準器等）を標準の源として、登録校正事業者に対して計量標準の供給（校正等）を行います。登録校正事業者は特定標準器等で校正された特定二次標準器等を用いてユーザーに実用に供される測定器の校正、放射能標準線源等の標準供給を担います。

放射線測定器の校正は、その測定器が測定対象とする計量の種類に応じて適切に校正された標準器を用いて校正しなければなりません。例えば、1 cm 線量当量を測定する測定器ならば、1 cm 線量当量で校正された上位の基準器と比較して校正定数を求めます。ガンマ線（X線）測定器の線量校正の具体的方法については、日本工業規格の JIS Z 4511（照射線量測定器、空気カーマ測定器、空気吸収線量測定器および線量当量測定器の校正方法）に詳しく規定されています。また、NaI(Tl) シンチレーション測定器や Ge 半導体測定器などを用いて食品や環境試料中の放射能の数量を測定する測定器の場合は、測定試料容器と同一、または材質、形状が同等とみなせる容器に放射能標準を充填した適切な放射能標準体積線源を用いて、計数率と放射能の関係を求めることとなります。

参考文献

- 1) Glenn F. Knoll(著) 木村逸郎, 阪井英次(訳): 放射線計測ハンドブック第3版 Radiation Detection and Measurement, 日刊工業新聞社, 2001
- 2) 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 ―, (公社)日本アイソトープ協会(編), 丸善出版, 2012
- 3) ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60, 1991
- 4) ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 103, 2007
- 5) アイソトープ手帳 11 版, 公益社団法人日本アイソトープ協会(編), 丸善, 2011

図 1 水素の同位元素

日本アイソトープ協会「やさしい放射線とアイソトープ4版」より転載

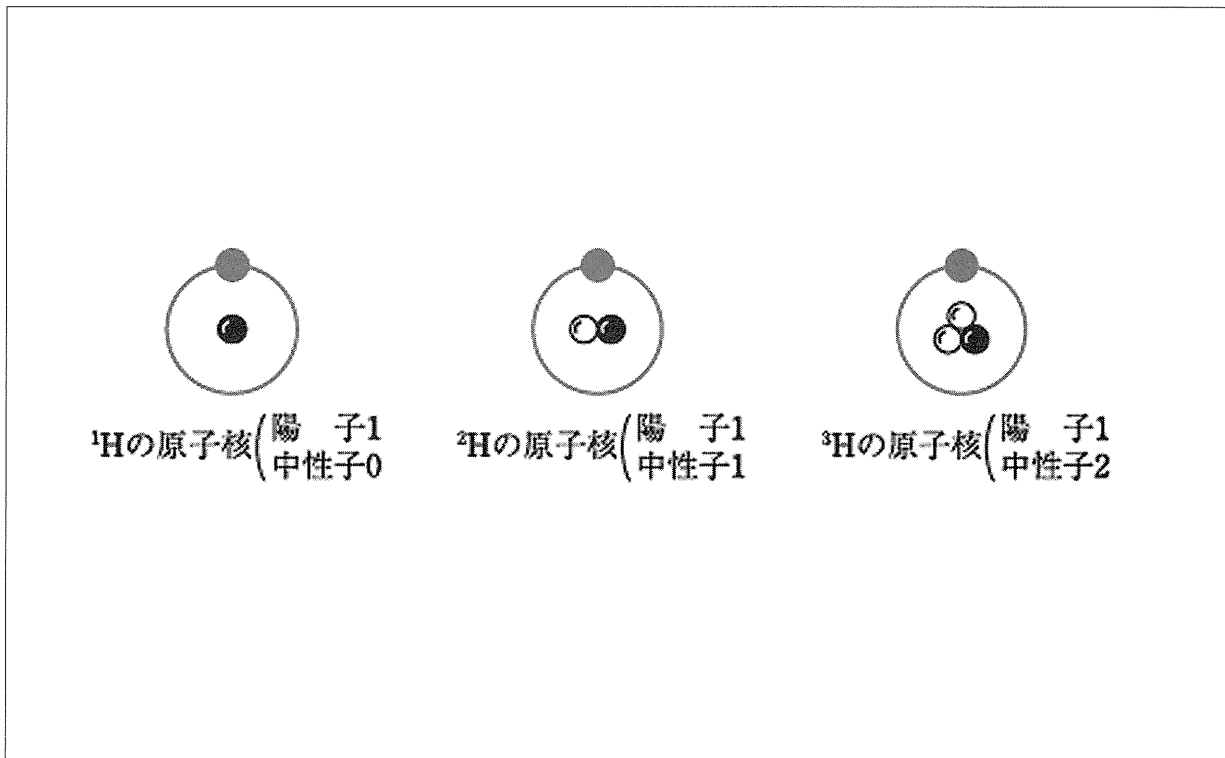


図 2 ^{137}Cs の壊変図式

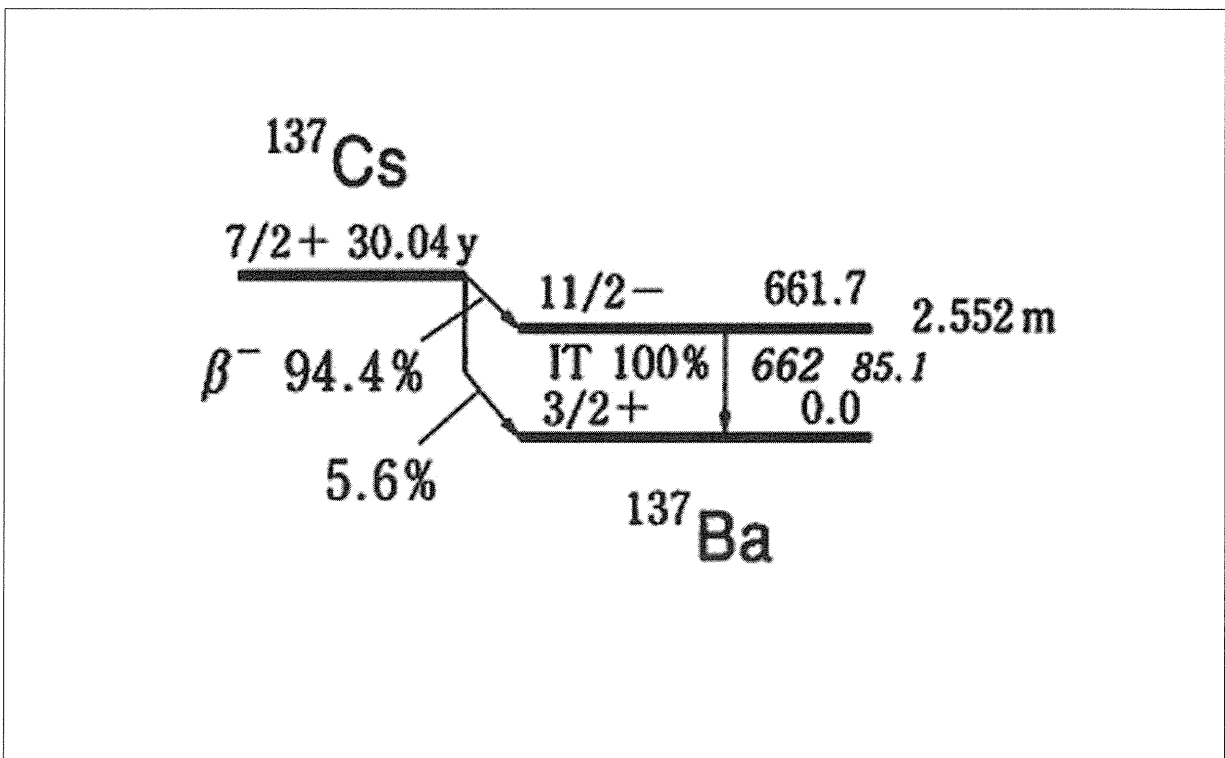


図3 半減期による放射能の減衰

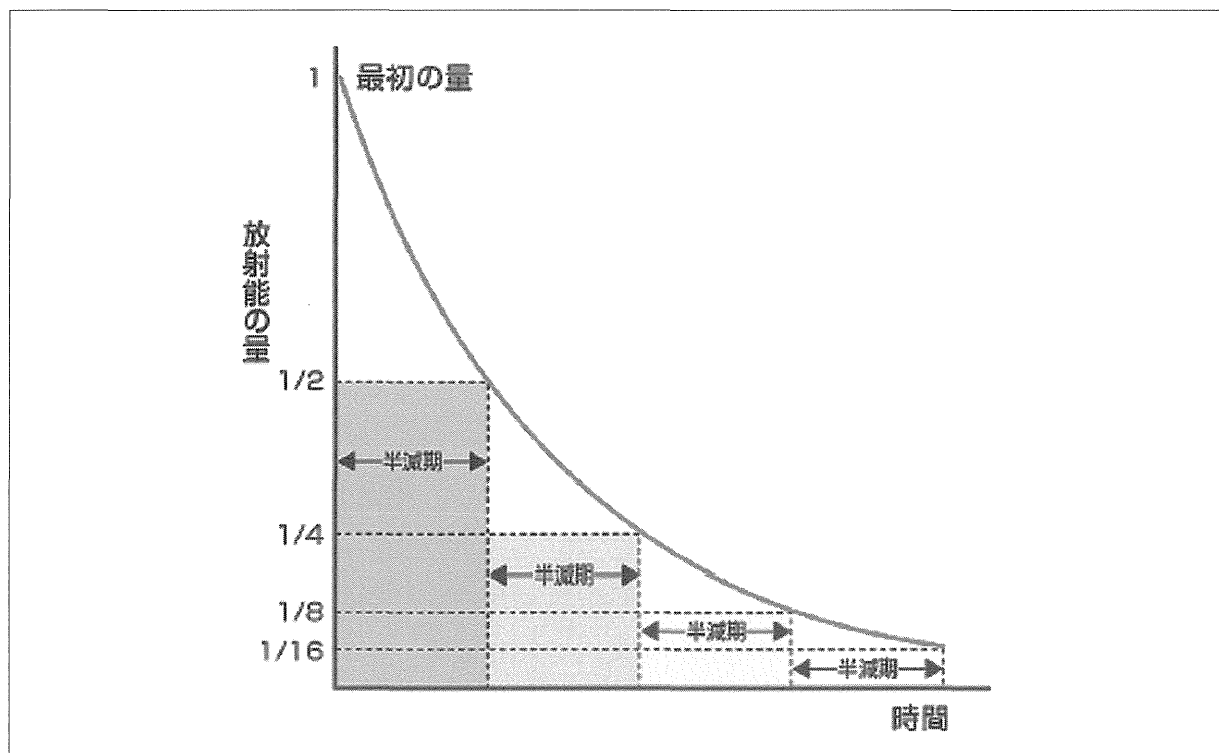


図4 放射線の物質中の透過力

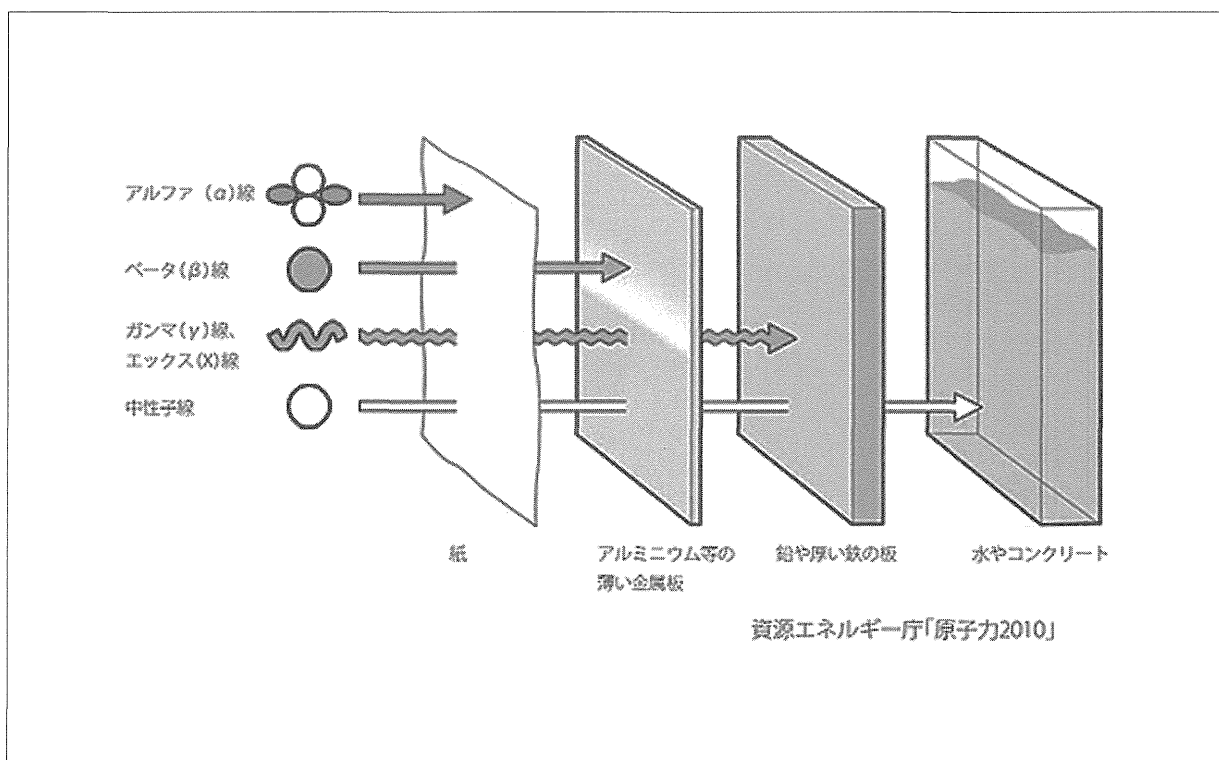


図5 電離箱による測定原理

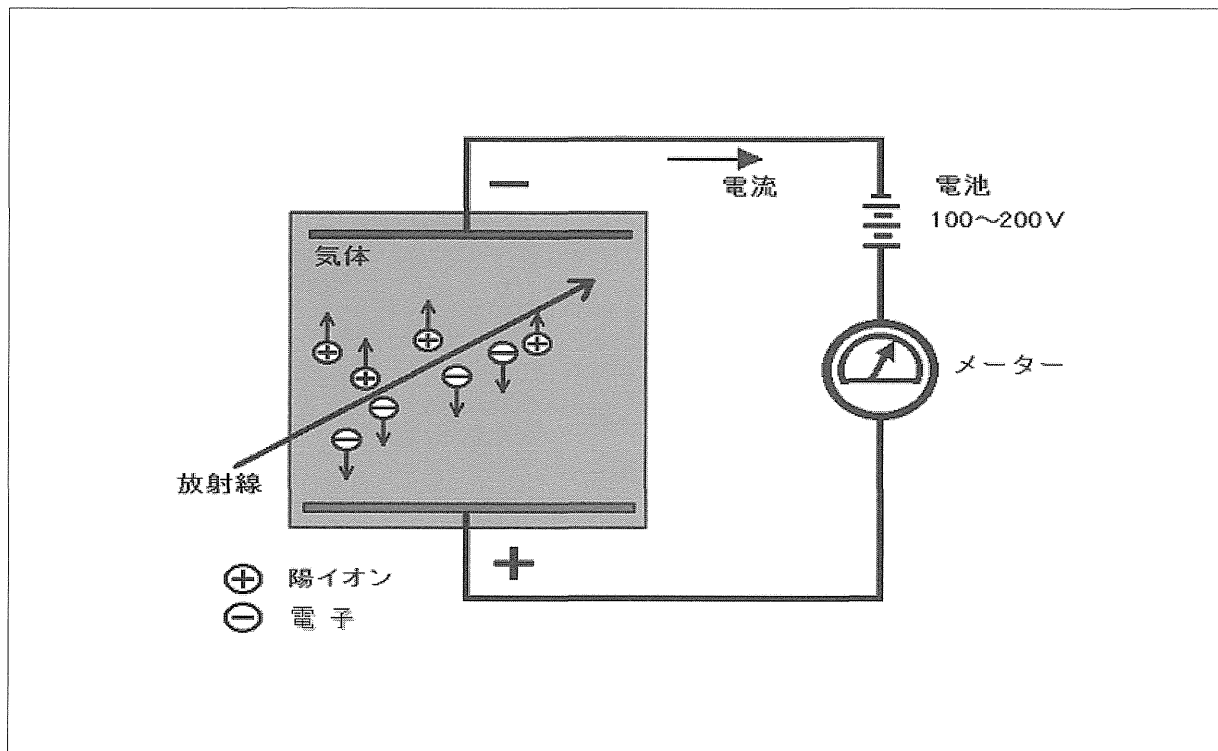


図6 端窓形 GM 計数管



図7 NaI(Tl) シンチレーション検出器

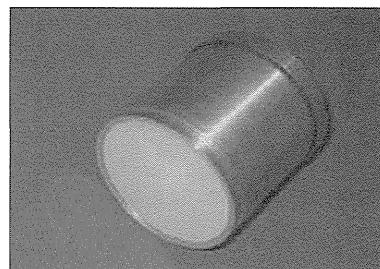
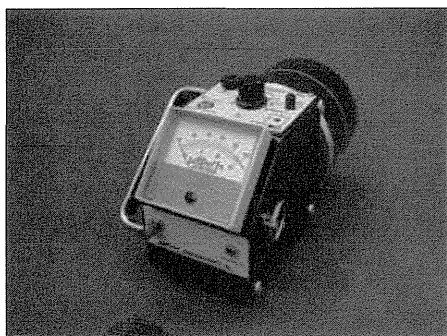


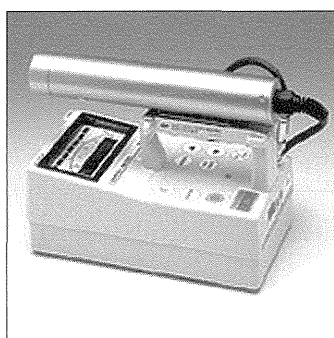
図8 サーベイメータの例



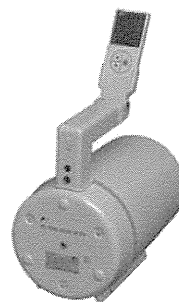
電離箱サーベイメータ



GM 計数管サーベイメータ



NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータ



中性子サーベイメータ

図 9 Ge 半導体検出装置

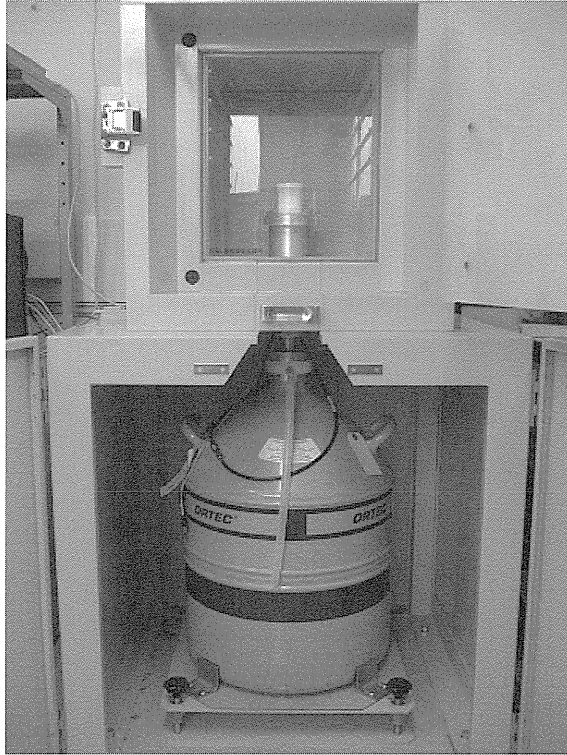


図 10 液体シンチレーション検出器

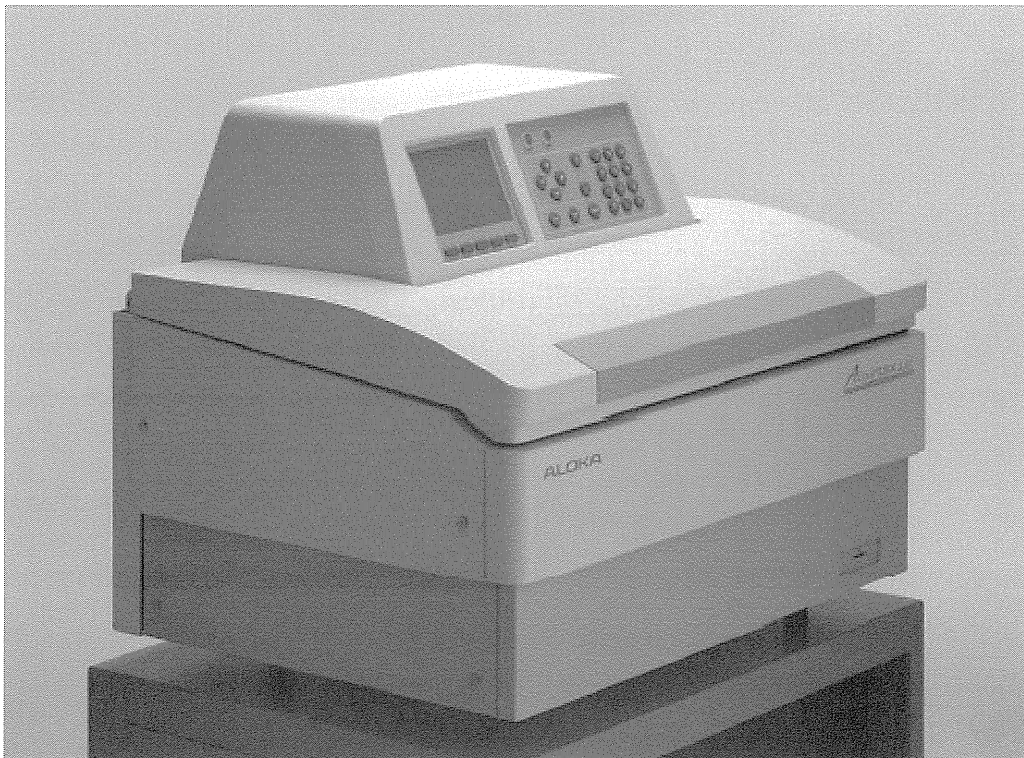


図 11 パッシブ形個人線量計

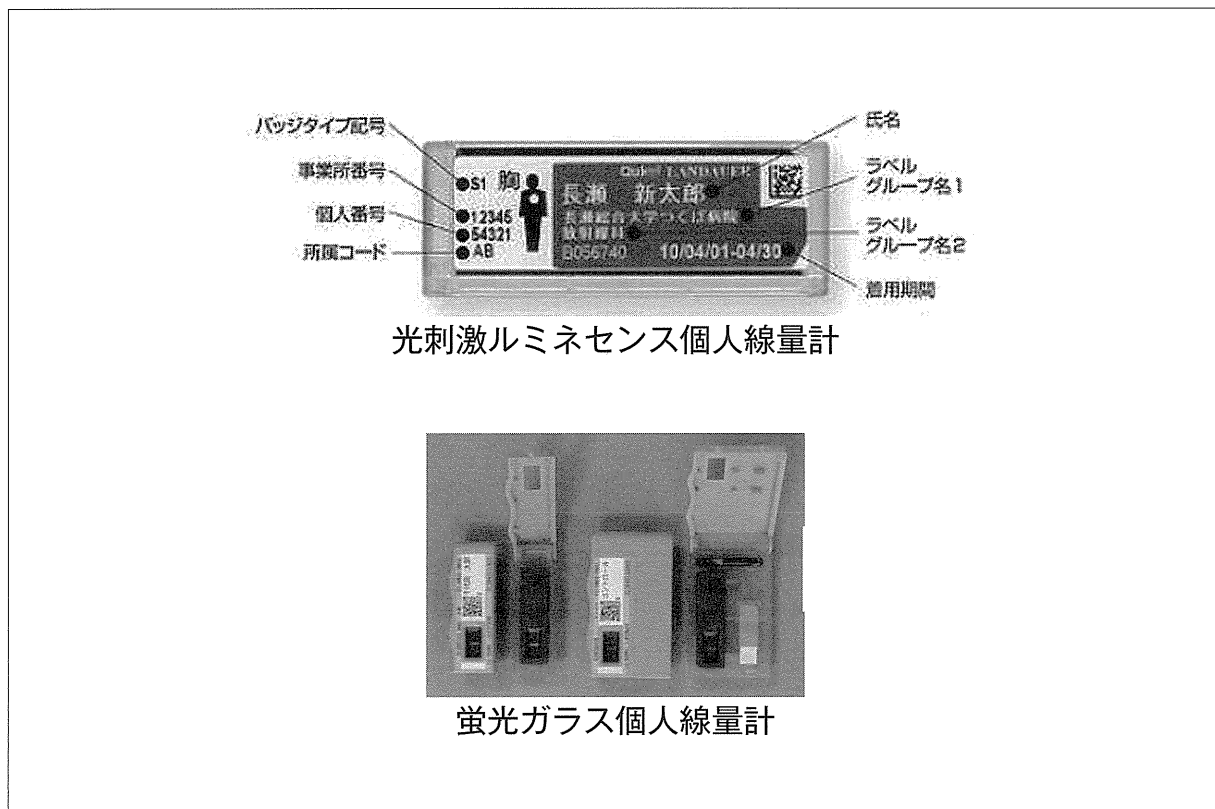


図 12 アクティブ形直読式ポケット線量計



(2) 放射線防護に係る計測と量

担当：中村 吉秀

要約

放射線・放射能発見の当初から放射線測定器を用いて計測し、放射線の強さ（放射線量、または単に線量）を定量化する試みが行われてきました。放射線そのものを測定することは難しいので、照射された物質が受ける作用の大きさを放射線量を定義する方法が一般的です。荷電粒子が空気中に生成した電荷量で放射線量を表す「照射線量」や物質が単位質量当たり吸収したエネルギーで量づける「吸収線量」などの物理量がその例です。一方、放射線防護で重視するのは放射線による人体への影響ですから、防護の観点からは、放射線による人体に生じる影響度を尺度として、放射線の強さを表す方が便利です。

以前は、物理量である「吸収線量」(ラド)を基に、放射線の種類ごとに影響度を示す係数の生物学的効果比を乗じて「線量当量」(レム)として防護に係る線量に用いていましたが、近年、放射線防護には人体に及ぼす影響の度合いだけに着目して考案された、「等価線量」や「実効線量」と呼ばれる「防護量」を防護の基本的線量と考えるようになりました。「防護量」は測定で求めることができないため、実際に測定して放射線管理に用いる量として考えられたのが「実用量」と呼ばれる線量です。

このように一口に放射線量と言っても、防護の世界では概念(定義)の異なるものが混在して使われているなど、少々複雑な量となっています。この項では、防護関連を理解する上で必要な放射線防護に係る計測と量について簡単な解説をしたいと思います。

1. はじめに

放射線量を表現するには、それ自体の強さを適切な量で言い表すことができればそれが一番分かりやすいのですが、放射線と一口に言っても、アルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子線など多くの種類があり、さらに同じ種類の放射線であっても、もっているエネルギーが非常に低いエネルギーのものから高エネルギーのものまで多岐にわたります。そのため放射線量を単純な量で簡単に定義することは難しいことなのです。エネルギー・フルエンス(エネルギー束)とか粒子フルエンス(粒子束)といった量を用いて放射線自体の強さを表すことができますが、これらは物理や放射線計測の専門的分野において使われるもので、放射線防護関連ではあまり使われません。

放射線それ自体の量を表すのではなく、放射線で照射された物質が放射線によって受ける作用の大きさを放射線量を定義する方法が一般的です。荷電粒子と物質との相互作用である電離作用によって、放射線照射を受けた空気にどれだけの電荷が生じた

か、その電荷量で放射線の量を表すことができます。これが「照射線量」と呼ばれるもので、長いこと放射線の量を定量化する中心的線量として使用されてきました。

しかしながら、照射線量はガンマ線などの間接電離放射線が空気に対して作用する大きさを定義したものであり、荷電粒子や空気以外の物質には適用されず、広く一般的に使えるものではありません。このため放射線の種類や物質の種類によらず、放射線が照射された物質への作用量を、その物質が単位質量当たりに吸収したエネルギー量として表す、「吸収線量」と呼ばれる量の方が放射線防護には使われるようになりました。物質が空気の場合は空気吸収線量、水ならば水吸収線量、人体ならば組織吸収線量などと呼ばれます。

さらに被ばくした放射線によって、人にどのような、どの程度の、健康的影響が生じるかを物差しとして放射線の強さを表すために考案されたものが、防護量と呼ばれる「等価線量」や「実効線量」です。等価線量や実効線量は、放射線の種類やエネルギーによる違いを考慮に入れた上で、人体に及ぼす影響の度合いだけに着目して定義されたものですから、被ばく量の限度や作業環境の線量基準などを決めるときに大変便利な量（防護量）であると言えます。

2. 照射線量

放射線の物質への作用量を表すものとして、空気がガンマ線、X線などの光子によって照射された場合について定義されたものが照射線量です。光子の相互作用によって微少な空気中に生じた二次電子が、電離によって生成する電子-イオン対のいずれか一方の電荷量で表します。微少空気の質量を dm とし、生成する電荷量（プラスまたはマイナス）を dQ とすると照射線量 X は、

$$X = dQ / dm \text{ (C/kg)}$$

で定義され、そのSI（国際単位系）単位はC/kg（クーロン毎キログラム）です。微少空気の質量の単位にkgが使われますが、質量を表すSI単位がkgであって、決して空気1kg（約0.8 m³）を対象物体と考えるわけではありません。

単位時間当たりの照射線量を照射線量率と言います。SI単位系では時間の単位は1秒とすることが望ましく、この場合の単位はC/kg・s（クーロン毎キログラム毎秒）となりますが、放射線量の単位時間には慣例的に1時間が使われ（「そこに1秒間居ると…」では非現実的で、「1時間居ると…」の方が現実的で体感しやすいからです）、C/kg・h（クーロン毎キログラム毎時）が通常用いられます。

放射線測定では、放射線の電離作用によって生成された電荷量を測定することが通常の手段で、古くから放射線測定の中心でした。照射線量の定義はこうした測定にまさに則したものであり、空間線量の基本的概念として照射線量が長いあいだ使われてきました。しかしながら、照射線量は基本的にはガンマ線などの間接電離放射線につ

いて、対象物質を空気に限定して適用されるものであり、放射線防護の単位としては、照射線量はあまり使われなくなりました。

ここで、SI 単位系とは The International System of Units の略称で、7つの SI 基本単位（時間(s)、長さ(m)、質量(kg)、電流(A)、熱力学温度(K)、物質量(mol)、光度(cd)）およびその組み合わせ（SI 組立単位）を単位とする単位系のことで、国際度量衡総会（CGPM）で決められた国際単位です。SI 単位系では、異なる量に対して同一の組立単位が使われることがよくあるのですが、ほかの量との混同を避けるために、よく使われる量については、SI 組立単位に固有の名称と記号が与えられています。例えば、実効線量は単位質量当たりの吸収エネルギーで定義されますから、その SI 組立単位は J/kg（ジュール毎キログラム）ですが、これではほかの吸収エネルギーと区別がつかないため、実効線量には Sv（シーベルト）という固有の名称が与えられています。それに対して、照射線量には固有の名称は与えられてなく、C/kg という組立単位をそのまま使わざるを得ません。

3. 吸収線量

放射線の物質への作用量を表すものとして、放射線の種類や物質の種類によらず、微小領域の物質が放射線から受けたエネルギーの量で表したものが吸収線量と呼ばれるもので、放射線防護に係る基本となる物理量です。質量 dm の微小な物質が放射線から受けるエネルギーを dE とすると、吸収線量 D は、

$$D = dE / dm \text{ (J/kg)}$$

で定義され、その SI 単位は J/kg（ジュール毎キログラム）です。吸収線量は放射線防護に係る物理量としてよく使われますから、ほかの量と明確に区別できるように、Gy（グレイ）という固有の名称が与えられています。単位時間当たりの吸収線量を吸収線量率と言います。吸収線量でも単位時間には慣例的に 1 時間が使われ、Gy/h（グレイ毎時）が通常用いられます。

ガンマ線や中性子線のように直接電離作用を行わない放射線では一次放射線の物質との相互作用によって生成された二次荷電粒子の電離作用でエネルギーが与えられます。

4. カーマ

吸収線量に似た量としてカーマ（Kerma: kinetic energy released in material）と呼ばれる放射線量があります。ガンマ線や中性子線などの間接電離放射線について定義されたもので、間接電離放射線が物質内で相互作用を起こすと、電子などの荷電粒子が生成されます。この荷電粒子は 2 次荷電粒子と呼ばれ、ベータ線などと同様に電離能力をもったもので、その飛跡に沿って多くの電離、励起を引き起こしてエネルギー

を失っていきます。間接電離放射線によって生成した荷電粒子のすべての初期運動エネルギーの総和を、その物質の質量で割ったものがカーマと呼ばれるものです。質量 dm の微小な物質が間接電離放射線によって生成した荷電粒子のすべての初期運動エネルギーの合計を dEk とするとカーマ K は、

$$K = dEk / dm \text{ (J/kg)}$$

で定義され、その SI 単位は J/kg (ジュール毎キログラム) で、Gy (グレイ) という固有の名称が与えられています。微小物質の中で荷電粒子平衡 (領域内で生成した荷電粒子が領域外に出てしまう量と、領域外で生成した荷電粒子が領域内に入ってくる量が等しいときに、荷電粒子平衡が成立していると言います) が成り立ち、かつ制動放射の影響が無視できる場合には、カーマ K と吸収線量 D とは等しくなります。対象とする物質が空気の場合は空気カーマ、水の場合は水カーマなどと呼ばれます。

放射線障害防止法でガンマ線や X 線の実効線量への換算係数がこの空気カーマで与えられているなど、空気カーマはよく使われる放射線量です。また、最近まで線量測定の中心的存在であった照射線量は、制動放射を無視できる場合、単に単位変換だけで空気カーマに換えることができます。このことを言い換えれば、放射線測定の観点からは、ガンマ線・X 線については基本的には照射線量概念に基づいて測定し、空気吸収線量や空気カーマに換算することができるのです。

5. 等価線量

これまでに述べてきました照射線量、吸収線量、カーマは、それぞれ放射線量を物理量として定義し、それぞれに合った尺度で放射線量を測定して評価するためのものです。以前は、これらの測定量から被ばく線量を評価して放射線管理に用いる方法が取られていましたが、防護の観点からは、人体が被ばくによってどのくらいのエネルギーを吸収したかで管理するよりも、受ける障害の程度に基づいた基準で管理する方が直接的かつ実用的だと言えます。そこで、放射線の種類やエネルギーによる違いを補正して、放射線の種類やエネルギーをいちいち区別しないで、人体に及ぼす影響の度合いを線量評価の尺度として考案されたのが防護量と呼ばれるものです。

人体に及ぼす影響の度合い (放射線障害の大きさ) は、被ばくした放射線量に依存しますが、放射線の種類・エネルギーや被ばくした部位などによっても異なってきます。急性障害が発生しないような低レベル被ばくでは、がんおよび遺伝的影響の二つが問題となります (確率的影響)。低レベル被ばくの中でも 200 mSv 以下の特に低レベルの領域では、これまでの調査では発がん率の増加があるかどうかは分かっていませんが、「低レベルの被ばくであっても受けた放射線量に比例してがんは発生する」と仮定します。これは、発がんに放射線量の閾 (しきい) 値 (これ以下の値では発がんはしないということを意味します) はなく、発がんの確率は線量の増加とともに比

例して増加する、というもので、直線閾値なし（LNT：Linear non threshold）仮説と呼ばれています。等価線量、実効線量の防護量が物理的に定められた量でなくても、特定の数量を表現する尺度ですから、防護量という量に対して示される数値（がん発生率）との間に比例性がなければ尺度には使えません。ある部分は目盛が詰まっていたり、あるいは間延びしているような物差しは、計量に供することができないのと同じです。

ある臓器・組織に着目して、その臓器・組織全体での平均の吸収線量（Gy）に放射線の線質（放射線の種類・エネルギー）ごとに影響の度合いを示す係数を乗じたものがその臓器・組織についての等価線量となります。影響の度合いを示す係数を放射線加重係数と呼びます。ある臓器・組織が複数の線質の放射線を被ばくする場合には、それぞれの放射線の吸収線量にそれぞれの放射線加重係数を乗じた線量を合計したものが、その臓器・組織の等価線量となります。ICRPの2007年勧告に示されている放射線加重係数を表1および図1に示します。

ある臓器 T がある線質の放射線 R によって受ける吸収線量を $D_{T,R}$ (Gy) とし、放射線 R の放射線加重係数を W_R とします。多種の放射線を被ばくしたときの臓器 T における等価線量 H_T は、それぞれの放射線についての等価線量を合計したものになり、

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \text{ (Sv)}$$

で表されます。

等価線量の SI 単位は J/kg (ジュール毎キログラム) ですが、固有の名称の Sv (シーベルト) が与えられています。等価線量は吸収線量に無次元の係数である放射線加重係数 W_R を乗じただけですから、等価線量の固有の名称も吸収線量と同じ Gy が妥当であると思われませんが、吸収線量を放射線加重係数 W_R によって重みづけしたことが区別できるように、固有の名称を Gy ではなく、Sv としています。ガンマ線やベータ線の放射線加重係数 W_R は 1 ですから、ガンマ線やベータ線で被ばくした場合には、臓器・組織の等価線量はその吸収線量と等しい値 (Gy に対して Sv と、単位は異なります) ということになります。

なお、閾線量があって急性障害 (確定的影響) が問題となるような高レベル被ばくにおいては、人体への影響の大きさを表す線量はまだ設定されてなく、吸収線量を用いることが推奨されています。

6. 実効線量

ある特定の臓器・組織の被ばく線量は等価線量をもって数値化することができますが、実際に起こりうる放射線被ばくでは、身体の一部または全身の臓器・組織が均等

に被ばくするとは限りません。また、同じ等価線量を受けても、臓器・組織によって放射線に対する感受性は異なり、臓器ごとの影響の度合いは一定ではありません。このような実際の被ばく状況に対しても、被ばくした放射線量を定量化できる手法として考案されたのが実効線量です。個々の臓器・組織がそれぞれ等価線量 H_T を被ばくしたときに受ける健康への影響の大きさが、ある放射線量を全身に均一に被ばくしたとき（このようなことはガンマ線のような強透過性の放射線に限られます）の影響の大きさと等しくなるような仮想的線量を考えるのです。具体的には、被ばくした臓器・組織の等価線量にその臓器・組織の放射線感受性を表す係数、すなわち組織加重係数 W_T を乗じて求めた線量を全臓器・組織について積算した線量で、実効線量と呼ばれます。すなわち、全身が均等に被ばくした場合の影響の大きさを表す線量に換算したものが実効線量です。実効線量 E は、身体のすべての臓器・組織について加重された等価線量 H_T の和であり、

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \text{ (Sv)}$$

で表されます。

実効線量の SI 単位は J/kg（ジュール毎キログラム）ですが、固有の名称として等価線量と同じ Sv（シーベルト）が与えられています。ICRP の 2007 年勧告では、組織加重係数 W_T は放射線誘発がんについての疫学研究に基づいて、14 プラスその他の臓器・組織を 4 種類に分類して、それぞれに 0.12、0.08、0.04、0.01 の値が割り振られています。組織加重係数 W_T を全臓器・組織について合計すれば 1.00 となります。

7. 実用量

放射線の人体影響の指標となる等価線量と実効線量は、男女標準人模型と生理学的動態モデルを用いて計算された防護のための量であり、通常行われる放射線管理でそのものを測定で求めることはできません。一方、実際の被ばく状況を管理するためには、放射線測定に基づいた被ばく線量を的確に把握できなければなりません。そこで放射線防護の基準値として用いられる等価線量や実効線量といった防護量に対して、放射線測定によって評価できる線量が考えられていて、実用量と呼ばれています。実用量は国際放射線単位測定委員会（ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurement）によって考案されたもので、実際の放射線測定に当たり、等価線量や実効線量を近似し、かつ防護上安全側になるように、常に等価線量や実効線量よりも高い値を示すように定義づけられたものです。具体的には、外部被ばくに対して、作業環境モニタリングのための空間線量と個人モニタリングのための個人線量について、それぞれ実用量が導入されています。

ICRU は、密度 1 g/cm^3 で、酸素 76.2%、炭素 11.1%、水素 10.1%、窒素 2.6% の質量組成からなる直径 30 cm の人体軟部組織の密度をもつ球形ファントム（ICRU 球と

呼ばれます) を用いて表面から半径方向に 10 mm、0.3 mm、0.07 mm の深さにおける線量を計算によって推定し、実効線量の安全側の近似値として実用量を定めています。実用量の SI 単位は J/kg (ジュール毎キログラム) ですが、固有の名称としては実効線量と同じ Sv (シーベルト) が与えられています。さらに次に示すような測定のための条件を決めてやれば、サーベイメータなどの放射線測定器に、例えば 1 cm (センチメートル) 線量当量での値を指示するような目盛を付けることが可能となります。実際の放射線管理では、サーベイメータで得られた 1 cm (センチメートル) 線量当量を実効線量として管理に用いることができます。

(1) 外部被ばくに対する実用量

外部被ばくに関する実用量を定めるために、「拡張場」と「整列場」という二つの条件を前提とします。測定は通常、空間の一点について評価しますが、その測定値が、例えば人体のような対象物全体にわたって均一の強度分布で広がっていると仮定します。この仮定が 1 点を拡張するという意味で、拡張場と呼ばれるものです。また、実際の環境中における放射線は様々な方向から飛来しますが、それらのすべての放射線が一方向から揃って飛来するものと仮定するのが整列場です。これらの二つの条件を併せた放射線場を「整列・拡張場」といいますが、この概念は実際の放射線場における測定値を実効線量に結びつけるために必要な仮定となっています。

(1-1) 作業環境モニタリングに対する実用量

作業環境モニタリング、すなわち場の放射線量を示す実用量にはさらに次の二つの概念が導入されています。

周辺線量当量： 主としてガンマ線や X 線のような透過性の強い放射線の測定に用いられます。整列・拡張場に ICRU 球を置いたときの整列場の方向、半径上の深さ d における線量を周辺線量当量と言います。深さ d を 10 mm とした時の周辺線量当量を 1 cm (センチメートル) 線量当量と呼びますが、後述の個人線量当量でも同じ呼び方をしますので注意が必要です。 $H^*(d)$ と表記して他の実用量と区別します。

方向性線量当量： ベータ線のような透過性の弱い放射線の測定に用います。方向性線量当量では、整列場は考えずに実際の放射線場の方向性はそのままとし、拡張場だけを考慮して ICRU 球を置き、ICRU 球の基準となる角度 0° における半径上の深さ d における線量を表します。 d としては一般に 0.07 mm が使われ、70 μm (マイクロメートルまたはミクロン) 線量当量と呼びます。角度 0° に対する放射線の入射方向を a として、 $H'(d, a)$ と表記します。 d と a の関

係を図2に示します。

(1-2) 個人モニタリングに対する実用量

個人線量計を装着した部位の近傍の照射状況を反映するのが個人線量当量です。「個人線量当量」は人体上の指定された点（個人線量計装着部位）の深さ d における軟組織での線量です。強透過性放射線に対する実効線量の評価には d として 10 mm が、弱透過性放射線に対する皮膚や手足の等価線量の評価には 0.07 mm が勧告されています。

前述の通り、個人モニタリングの実用量は作業環境モニタリングと同様に 1 cm 線量当量とか 70 μm 線量当量と呼ばれますが、表記は $H_p(10)$ 、 $H_p(0.07)$ として区別されます。環境モニタリングでは周辺線量当量や方向性線量当量といった放射線場を仮定して定義されましたが、個人線量ではそのような仮定はしません。個人線量計を適確に校正することで基準を満たすことが求められ、通常、ICRU が定めた組織等価物質からなる 30 cm \times 30 cm \times 15 cm のスラブ（平板）ファントムに個人線量計を付けて校正されます。図3に個人線量計の校正図を示します。

環境モニタリング用測定器（サーベイメータなど）で直接測定する計測値は、NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータや GM 計数管サーベイメータなどの場合は、単位時間当たり何個の放射線を検出したかを示す計数率であり、電離箱サーベイメータの場合には電離によって生じた電流値（アンペア A）となります。計数率の SI 単位は s^{-1} （毎秒）ですが、計測時間が 1 秒というのは短すぎるので、一般的には 1 分間当たりの計数率として、cpm（counts per minute）といった単位が慣例としてよく使われます。しかしながら、計数率にしても電離電流値にしても、放射線量が強いのか、弱いかわるいは判断できても、それだけでは放射線量を定量的に評価することはできません。そこで、計数率や電離電流値を外部被ばくに係る実用量、例えば周辺線量当量の 1 cm 線量当量に換算した数量で目盛ったサーベイメータが一般的に使われています。測定者は、サーベイメータの針またはデジタル表示が示す値を読むだけで、この例では、周辺線量当量の 1 cm 線量当量を直接読みとることができるのです。ただし、環境モニタリングに対する実用量にしても個人モニタリングの実用量にしても、すべての実用量の単位には通常、共通の $\mu\text{Sv/h}$ （マイクロシーベルト毎時）が使われるため、そのサーベイメータの示す $\mu\text{Sv/h}$ が、どの実用量を指しているのかを確認しておく必要があります。

(2) 内部被ばくに対する実用量

内部被ばくのための実用量は特に定義されていません。内部被ばくの原因となる放射線源（放射性物質）の摂取量を推定する方法はいくつかあります。口から取り込ん

だ場合（経口摂取）、呼吸で吸い込んだ場合（吸入）に応じて、体内動態モデルを適用して、摂取推定量に対する実効線量と等価線量が算定できます。ICRP は吸入摂取と経口摂取による、特定の核種について単位摂取量（Bq：ベクレル）当たりの臓器線量（等価線量）および預託実効線量を計算する換算係数（mSv/Bq）を提供しています。

なお、Bq は放射能の数量に使われる単位で、放射能の数量はその放射性物質が単位時間に何個の放射性壊変を起こすかで表されます。放射能の数量のSI 単位は s^{-1} （毎秒）となりますが、固有の名称としてこの Bq（ベクレル）が与えられています。放射性物質の単位質量当たりの放射能、すなわち放射能濃度は Bq/kg または Bq/g の単位が通常使われます。

参考文献

- 1) ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60, 1991
- 2) ICRP, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, Publication 74, 1996
- 3) ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 103, 2007
- 4) 被ばく線量の測定・評価マニュアル, (公財)原子力安全技術センター, 2000
- 5) 平山英夫, 空気カーマ、空気衝突カーマ、空気吸収線量、照射線量と実効線量, 2001
<http://rcwww.kek.jp/research/shield/kerma.pdf>
- 6) 多田順一郎, 線量 — 第1回～第4回 —, *Isotope News*, 2012～2013