

## ■12 群（電子情報通信基礎）- 6 編（測定）

# 5 章 放射線・放射能計測

（執筆者：齋藤則生）[2011 年 4 月 受領]

### ■概要■

放射線は物質を電離させる性質を持った電磁波や粒子線のことをいう。X 線や $\gamma$ 線のような波長の短い電磁波、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、陽子線、重粒子線などの荷電粒子線、そして中性子線など、放射線には多くの種類がある。中性子を除く放射線の計測は共通の技術が基礎となっている。一方、中性子は電氣的に中性であり、中性子の計測は中性子と物質との相互作用を利用して行われる。測定対象とする放射線のエネルギーは、低いエネルギーから 1 MeV を超える非常に高いエネルギーまで広範囲にわたっている。測定する量は、フルエンス、照射線量、吸収線量、線量当量、放出率、エネルギースペクトルなど目的によって様々である。

放射能とは放射線を出す能力のことをいう。放射性物質には様々な核種があり、環境放射能などの非常に微弱な放射能から産業用の非常に強い放射能までを扱う。放射能の測定は放射性物質から放出される放射線により測定が行われ、放出される放射線の種類、エネルギー、強度、放射性物質の性質によって測定方法が異なる。

このように、放射線の種類、エネルギー、測定量、強度、用途によって、放射線・放射能の測定方法が大きく異なっているのが、放射線・放射能計測の特徴である。

### 【本章の構成】

本章では放射線の単位及び定義 (5-1 節)、放射線の計測 (5-2 節)、中性子の計測 (5-3 節)、放射能の計測 (5-4 節) に関して、基礎理論、放射線の検出器、放射線の計測技術について述べる。

## ■12群 - 6編 - 5章

### 5-1 放射線の単位<sup>1)</sup> 及び定義

(執筆者：加藤昌弘，原野英樹，松本哲郎，柚木 彰) [2009年11月 受領]

本節では、放射線に用いられる代表的な単位とその定義について解説する。

#### 5-1-1 エネルギーの単位

$\gamma$ 線，電子線，中性子線など放射線のエネルギーの単位は，電子ボルト [eV] (Electron volt) が使われる。電子ボルトは，1 V の電位差を電子が移動する際に得られるエネルギーとして定義される。

#### 5-1-2 カーマ

カーマ  $K$  は，光子や中性子のような電荷をもたない間接電離放射線によって，物質の単位質量当たりから発生した電子・イオンなど荷電粒子の，発生した時点での運動エネルギー（初期運動エネルギー）の総和に等しい量である。着目している微小領域を占める物質の質量を  $dm$ ，この領域内で発生した荷電粒子の初期運動エネルギーの総和を  $dE_{tr}$  とすると，

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (5 \cdot 1)$$

で定義される。単位は [J/kg] だが，特別の単位記号 [Gy] が与えられている。カーマは放射線が作用する物質に依存する量であるため，「空気カーマ」「組織カーマ」のように，対象とする物質を明記して用いられる。

#### 5-1-3 照射線量

照射線量  $X$  は，X線や $\gamma$ 線が空気と与える電離作用に着目した量である。X線や $\gamma$ 線が質量  $dm$  の空気と相互作用して放出された電子が，全エネルギーを失うまでに，空気中で生じたすべての電荷の，一方の符号の電荷総量  $dQ$  を用いて，以下の式で定義される。

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (5 \cdot 2)$$

照射線量の単位は [C/kg] である。照射線量と空気カーマ  $K_{air}$  は次の関係がある。

$$X = K_{air} \frac{(1-g)}{W/e} \quad (5 \cdot 3)$$

ここで  $W$  は空気の  $W$  値であり，荷電粒子が空気中に一つのイオン対を生成するのに必要な平均のエネルギー，また  $e$  は電気素量 ( $1.602 \times 10^{-19}$  C) である。制動放射によって系外に散逸し，電離に寄与しないエネルギーが存在するが，その割合が  $g$  で表される。 $g$  の値は X線領域ではほぼ 0 と考えてよい。1 MeV の $\gamma$ 線では 0.0025 である。

#### 5-1-4 吸収線量

質量  $dm$  である物質に，放射線によって与えられたエネルギーの平均が  $d\varepsilon$  であった場合に，吸収線量  $D$  [Gy = J/kg] は次式で与えられる。

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (5 \cdot 4)$$

質量  $dm$  を占める領域内で生じた荷電粒子によって、その領域外で生成する電荷量と、領域外から内部に入射してくる荷電粒子によって領域内で生成する電荷量が等しい場合（二次電子平衡という）、空気吸収線量  $D_{\text{air}}$  と照射線量は次のような関係となる。

$$X = \frac{D_{\text{air}}}{W/e} \quad (5 \cdot 5)$$

### 5-1-5 フルエンス

フルエンスは、放射線粒子が多方向からきても対応できるように球形を用いて定義されている。ある点における放射線のフルエンス  $\Phi$  とは、その点を中心とする微小球の赤道断面積を  $da$ 、その微小球に入射した放射線粒子の数の期待値を  $dN$  で表すとき、両者の比  $dN/da$  によって表される量である。したがって単位は  $m^{-2}$  である。

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (5 \cdot 6)$$

中性子の場合、中性子フルエンス（率）が計測の基本量として用いられている。

### 5-1-6 中性子放出率

$^{241}\text{Am}$ -Be 線源や  $^{252}\text{Cf}$  線源のような放射性同位元素による中性子源の強度は、中性子放出率 [ $s^{-1}$ ] (neutron emission rate) が基準として用いられる。単位時間当たり線源から放出される中性子数で定義される。線源形状は理想的な点線源ではなく、有限の大きさを持ち、また形も円柱形のものも多く存在する。そのため、線源からの中性子放出は通常空間的に等方ではない。このことを線源非等方性 (anisotropy) といい、中性子放出率から距離の逆 2 乗則を用いて中性子フルエンス（率）を導出する際に考慮する必要がある。

### 5-1-7 線量当量

人体に対する放射線の影響は、吸収線量が等しくても、放射線の種類、エネルギー及び照射条件によって異なる。そこで、放射線防護のために、被曝の影響をすべての放射線に対して共通の尺度で評価するために定めたものが線量当量  $H$  であり、次式で定義される。

$$H = QD \quad (5 \cdot 7)$$

ここで  $D$  は組織に対する吸収線量、 $Q$  は線質係数である。線質係数は、X線・ $\gamma$ 線・ $\beta$ 線の場合には 1 であるが、中性子の場合にはエネルギーに依存する。線量当量の単位は、シーベルト [ $Sv$  ( $= J/kg$ )] を用いる。線量当量は、X線・ $\gamma$ 線の場合は空気カーマ、中性子の場合には中性子フルエンスから変換係数を用いて求められる。

### 5-1-8 放射能

放射能は単位時間当たりの放射性壊変の数と定義され、その単位にはベクレル [ $Bq$ ] が用いられる。 $Bq$  を SI 単位系の基本単位で表すと  $s^{-1}$  であり、1  $Bq$  は 1 秒当たり 1 壊変に相当する。

## ■12群 - 6編 - 5章

### 5-2 放射線の計測<sup>2,3)</sup>

(執筆著：加藤昌弘) [2009年11月受領]

X線， $\gamma$ 線， $\beta$ 線の計測について，検出器の測定原理と構造を中心に説明する。

#### 5-2-1 気体電離型検出器

放射線が気体を通過すると，軌跡に沿って気体構成分子には電離や励起が引き起こされる。電離によって生成した電子イオン対は，適切な電極に電場を印加することで，外部回路に電流や電荷として取り出すことができ，これらに基づいて放射線の測定を行う。

一般的に，単位時間当たりの収集電荷量を検出器の電極間の印加電圧の関数として測定すると，図5・1のようになる。再結合領域では電界強度が小さいため生じた電子イオン対が電極に到達する前に再結合する割合が大きい。電離領域では再結合の寄与が非常に小さく，入射放射線によって生じた電荷がほぼ収集される。また収集電荷量は印加電圧にほとんど依存しない。後述する電離箱はこの領域で用いる。比例領域では，入射放射線によって生じた電子は二次電離を引き起こし，電荷量は増幅される。GM領域では電界が非常に強く，一つの電子イオン対でも電子なだれが起きる。連続放電領域では一つでも電離が生ずると連続放電を持続するようになり，検出器としての機能を得ることはできない。

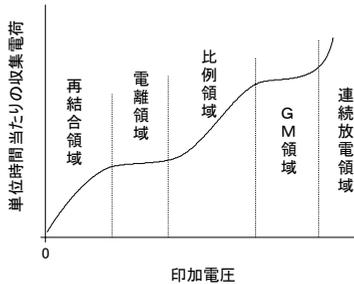


図5・1 印加電圧と収集電荷量の関係

#### 5-2-2 電離箱

電離箱は比較的高い線量の測定に適しており，エネルギー依存性が小さいという点で優れている。そのため標準場の線量測定にも用いられる。電離箱には直流電離箱とパルス電離箱がある。直流電離箱では入射放射線で作られる電離電荷の平均値または積算値が得られ，通常はこの直流電離箱がよく使用される。以下に，標準の設定に用いられる3種類の電離箱と，一般に用いられる電離箱（指頭型・平行平板型・球型）のうち指頭型電離箱について説明する。

##### (1) 平行平板型自由空気電離箱

平行平板型自由空気電離箱はX線の標準場の空気カーマ及び照射線量の測定に用いられる。

X線発生装置からのX線は、入射窓を通り電離箱内の空気に照射される。X線によって生成された空気構成分子のイオンは電界によって集電極に集められ、電流として測定される。一方、入射X線と相互作用する空気の種類は、入射窓の面積と集電極の長さから求められる空気の体積から得られる。以上のようにして求められた電流と空気質量の比に様々な補正を施し、照射線量率を導出する(式(5・2)参照)。補正には空気によるX線の減衰、イオンと電子の再結合、散乱線の寄与などに関するものがある。空気カーマは照射線量と式(5・3)から求める。X線のエネルギースペクトルは管電圧と付加フィルターに依存するので、線質を特定するために、管電圧・半価層厚及びQI値(quality index, 線質指標)で表現する。半価層厚とは、用いているX線の空気カーマの値が半分になるAl(アルミニウム)またはCu(銅)の厚さのことをいう。AlまたはCuの吸収係数から、その厚さでの空気カーマの値が半分になる単色のX線のエネルギーを求め、このエネルギーを実効エネルギーという。QI値は実効エネルギーを最大エネルギーで割ったものである。

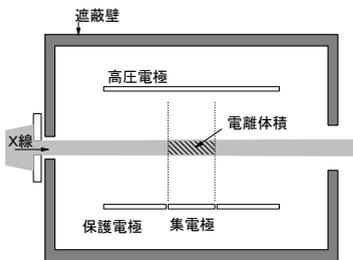


図 5・2 自由空気電離箱

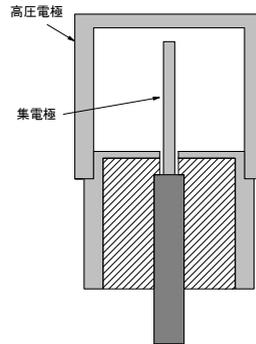


図 5・3 グラファイト壁空洞電離箱

## (2) グラファイト壁空洞電離箱

$\gamma$ 線標準場の空気カーマ及び照射線量の測定に用いられる。一般的に標準場の $\gamma$ 線のエネルギーはX線のエネルギーよりはるかに大きい。そのため物質との相互作用により放出される電子のエネルギーは、より高いエネルギーまで分布する。したがって電子の最大飛程が長く(1 MeVの電子に対して最大飛程は約3.3 m)、通常の自由空気電離箱では荷電粒子平衡が成り立たない。そこで図5・3に示したグラファイト壁空洞電離箱を用いる。照射線量及び空気カーマは、平行平板型自由空気電離箱と同様に、検出した電荷量と空気質量との比に基づいて求める。グラファイトと空気の違いは、補正係数として考慮する。 $\gamma$ 線の標準場としては $^{60}\text{Co}$ (1.17, 1.33 MeV)線源及び $^{137}\text{Cs}$ (0.66 MeV)線源からの $\gamma$ 線が用いられる。

## (3) 外挿電離箱

吸収線量は通常、ブラッグ・グレイ(Bragg-Gray)の空洞理論に基づいて空洞電離箱を用いて測定するが、 $\beta$ 線やエネルギーの低いX線のように透過力が弱い放射線の場合、空洞理論の成り立つ条件を現実的につくりにくい。この問題を解決するために外挿電離箱を用いる。

電荷収集領域の空気の体積を変化させて電離電流の測定を行い、空洞理論の成立する空気の体積が 0 の極限下での電流値の増加量と体積の増加量の比を、測定結果から外挿法により推定する。入射窓が高压電極を兼ね、集電極及び保護電極を動かすことで、空気の体積を変化させる構造のものが一般的である。β線の場合、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 、 $^{85}\text{Kr}$ 、 $^{147}\text{Pm}$  などのβ線源が標準場の生成に用いられる。

#### (4) 指頭型電離箱

円筒型電離箱とも呼ばれ、放射線治療用の線量計としてよく用いられている。図 5・4 に示すように外側電極と中心電極をもち、中心電極の周りはガードリングで囲う。極性効果が小さいため極性を指定する必要はないが、一般的に外側電極に負電圧を印加することが多い。

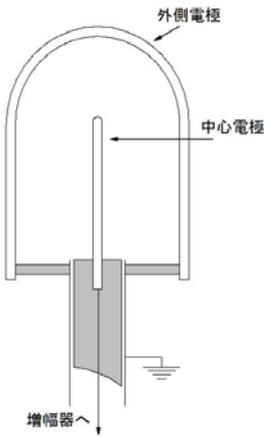


図 5・4 指頭型電離箱

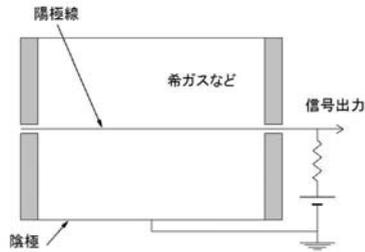


図 5・5 円筒型気体検出器

### 5-2-3 比例計数管

比例計数管は比例領域で動作させる。比例計数管と後述する GM 計数管の一般的構造は、内径数 cm 程度の中空円筒電極（陰極）の中心軸に陽極線を張り、電極間にヘリウム、アルゴン、メタンなどの気体を充填したものである（図 5・5 参照）。電荷の増幅に必要な電界は 1 気圧の通常気体でせいぜい  $10^6$  V/m 程度である。封じ切り型のもので気体を流しながら使うガスフロー型がある。比例計数管では増幅率は印加電圧と気体の種類に依存するので、同一気体で印加電圧が決まれば、収集電荷量は一次電荷量に比例する。また出力波高がエネルギーに比例するため、エネルギー測定が可能である。

### 5-2-4 GM 計数管

GM 計数管の場合、信号は一次電荷量や放射線の種類によらず、検出器の電子回路のみで決まる。一度生じた放電を終結させるために、アルコールなどの多原子分子ガスを若干添付する。GM 計数管の測定では生じたイオン対の個数情報が得られるに留まるが、放射線の強

度が弱くても大きな出力波高を得られるので、GM 式サーベイメータとして環境放射線の測定にしばしば用いられる。GM 計数管は、一度計数すると数百 $\mu\text{s}$ の間、次の放射線が入射しても応答しない。この時間を不感時間という。GM 計数管は比例計数管などに比較してこの不感時間が長く、高計数率の測定に不利である。

### 5-2-5 半導体検出器

半導体検出器に放射線が入射すると電子正孔対が生成される。半導体検出器は空乏層あるいはその近傍に生成された電子正孔対からの電気信号を取り出すもので、動作原理は電離箱と類似している。半導体検出器では、1 個の電子正孔対をつくるのに必要なエネルギーが数 eV と電離箱に比べ小さく（空気の場合は約 34 eV である）、エネルギーに対して生ずる電子正孔対の数が大きい。そのためエネルギー分解能に優れ、エネルギースペクトル測定に威力を発揮する。

半導体検出器は、半導体の材料・空乏層厚・入射窓や不感層の厚さが様々なものがあり、測定する放射線の種類やエネルギーによって適切に選ぶ必要がある。例えば荷電粒子線に対しては、入射窓の薄い検出器を選ぶ。また $\gamma$ 線に対しては、原子番号が大きいゲルマニウム半導体検出器がしばしば用いられる。半導体検出器は放射線損傷の影響を受けやすいので、線量の大きい放射線を測定する場合には注意が必要である。

### 5-2-6 シンチレーション計数管

シンチレーション計数管とは、放射線によって蛍光を発するシンチレータと、その光を光電子に変換した後増倍して電気信号を得るための光電子増倍管とを組み合わせ、全体を遮光ケースに収めたものである。光電子増倍管は可視光を $10^6$ 倍以上に増幅することができる。 $\gamma$ 線スペクトルの測定には原子番号の大きいシンチレータが望まれ、特に NaI(Tl)がよく用いられる（本章 5-4-2～5-4-6 を参照）。

### 5-2-7 フリッケ線量計・セリウム線量計

$\gamma$ 線などの放射線の吸収による化学反応を利用した線量計である。フリッケ線量計では硫酸第 1 鉄を主成分とする水溶液を用いる。放射線照射による酸化で第 1 鉄イオン ( $\text{Fe}^{2+}$ ) が第 2 鉄イオン ( $\text{Fe}^{3+}$ ) になる量を分光光度計で計測し、吸光度から線量を求める。第 2 鉄イオンの吸収ピークがある 304 nm で測定を行い、20～400 Gy<sup>4)</sup>の範囲で用いられる。セリウム線量計は還元反応 ( $\text{Ce}^{4+} \rightarrow \text{Ce}^{3+}$ ) を利用する。第 2 セリウムイオンの 320 nm における吸収ピークを分光光度計により測定する。用いられる線量の範囲は 500 Gy ～ 100 kGy<sup>4)</sup>である。

### 5-2-8 アラニン線量計

アラニン ( $\text{CH}_3\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$ ) の粉末結晶に放射線を照射すると、常温で安定なラジカルが生成する。このラジカルの量を電子スピン共鳴 (ESR) 装置で測定し吸収線量を求める。利用できる線量の範囲は 1～ $10^5$ Gy と広い<sup>4)</sup>。アラニン線量計は医療器具滅菌、食品照射などの放射線加工分野において、国際的に基準線量計として活用されている。

### 5-2-9 カロリメータ (熱量計)

カロリメータは物質に吸収された放射線のエネルギーを直接測定する方法である。グラファイトなどの吸収体に放射線が照射されると、吸収エネルギーの大部分は熱エネルギーに変わり、温度上昇に寄与する。温度上昇は吸収エネルギー量にほぼ比例するので、温度上昇を測定することで物質の吸収線量またはエネルギーフルエンスを求める。

エネルギーフルエンスを測定する場合は、熱量計は放射線が吸収体にほぼ完全に吸収されるように設計される。吸収体には温度測定用のサーミスターと校正用電気ヒーターが組み込まれている。吸収体の温度上昇と入射放射線の断面積からエネルギーフルエンスを導出する。吸収エネルギーの校正は、吸収体の温度上昇をヒーターの入力パワーの関数として測定することで行う。

吸収線量を求める場合の例として、グラファイトカロリメータを図 5・6 に示す。コア・ジャケット・シールドはグラファイトでできており、真空の間隙によって断熱されている。コア・ジャケット・シールド共に、温度測定用のサーミスターと、温度調整用のヒーターが内蔵されている。通常放射線エネルギー吸収による温度上昇は $\mu\text{K}$  のオーダーであり、非常に小さい。そのためサーミスターの微小な抵抗の変化を測定する必要があり、ブリッジ回路が用いられる。

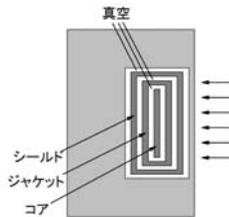


図 5・6 グラファイトカロリメータ

### 5-2-10 蛍光ガラス線量計・蛍光体を利用する線量計

蛍光体を利用する線量計は、放射線のエネルギーを吸収してできた安定な状態の不純物が、熱や光の刺激を受けて発光する現象を利用している。熱ルミネセンス線量計 (TLD)、蛍光ガラス線量計、OSL (Optically Stimulated Luminescence) 線量計などが使われているが、このうち蛍光ガラス線量計<sup>3)</sup>について説明する。

銀活性化リン酸塩ガラスに放射線を照射すると、電子及び正孔が生ずる。これらはガラス組成中の  $\text{Ag}^+$  に捕獲され  $\text{Ag}^0$  及び  $\text{Ag}^{2+}$  に変化し、蛍光中心となって長期間安定に保持される。これに 337 nm の紫外線を照射すると  $\text{Ag}^0$  及び  $\text{Ag}^{2+}$  が励起され、電子・正孔を放出して蛍光が発生する。放出された電子・正孔は放射線照射前の状態には戻らずに、蛍光中心に戻る。この蛍光が照射した放射線の量に比例するために線量測定に利用することができる。紫外線を照射した後も、放射線照射によって生じた蛍光中心が失われなため、繰り返して読み取ることができるのが大きな特徴である。また約 400°C で加熱すると蛍光中心が消滅し、累積線量が 0 の状態から測定を始めることもできる。蛍光ガラス線量計は、個人被曝線量測定や長期環境モニタリングに用いられている。ランニングコストが低く性能が優れているので、TLD やフィルムバッジに代わって広く使われている。

## ■12群 - 6編 - 5章

### 5-3 中性子の計測

(執筆著：原野英樹，松本哲郎) [2009年11月受領]

中性子は電氣的に中性であるため、電荷を信号として利用する直接的方法では測定できない。中性子計測では、中性子が様々な物質と確率的に相互作用（原子核反応）を起こすことを利用して行われる。そのため、中性子検出器の検出効率は中性子と物質との原子核反応の反応断面積（原子核物理学，原子炉物理学などの分野において、反応の起こりやすさを示す量で単位は通常バーン [b] ( $=10^{24} \text{ cm}^2$ ) が使われる) に大きく依存する。反応断面積は中性子エネルギーの関数として与えられ、原子核反応ごとに中性子計測に利用可能なエネルギー領域は異なる。そのため、熱中性子領域\*から数 100 MeV以上の広範囲のエネルギー領域を対象とした検出器は少ない。また、中性子が存在する場所では、中性子と周辺物質の相互作用によって発生する $\gamma$ 線が必ず存在するため、中性子計測では中性子と $\gamma$ 線が弁別できることが重要である。中性子計測を行うための検出器<sup>5)</sup>は、主に次の3種類の方法を利用している：(1) 中性子との相互作用によって核変換されて生じた放射性同位体を利用する放射化法 (activation method)，(2) 中性子との相互作用によって即時に生ずる $\alpha$ 線， $\beta$ 線などの二次粒子を用いる二次粒子検出法，(3) 加速器を利用して中性子を生成する際に、中性子と同時に生ずる随伴粒子 (associated particle) を利用する随伴粒子検出法。これらの中性子計測方法は、原子力・核融合分野，医療，分析，人体や環境に対する放射線防護などのために応用されている。

#### 5-3-1 放射化法

中性子との相互作用によって生成される放射性同位体の原子核数から、入射中性子フルエンス (率) を逆算して求める方法である。生成された放射性同位体の原子核数は、放射性同位体から放出される $\alpha$ 線， $\beta$ 線や $\gamma$ 線の測定とその半減期 (原子核数が半分になる時間) から求められる。熱中性子領域では金 ( $^{197}\text{Au}$ ) の放射化法が用いられることが多い。 $^{197}\text{Au}$  は、中性子との相互作用によって質量数が一つ多い  $^{198}\text{Au}$  に核変換され、その後 $\beta^-$ 崩壊によって  $^{198}\text{Hg}$  に壊変する。このとき壊変に伴い放出される 411.8 keV の $\beta$ 線が利用される。

その他、エネルギー領域に応じて、多くの核種が利用される。また、(n,p)反応や(n, $\alpha$ )反応のしきい反応 (あるエネルギー以上で起こる原子核反応のこと) を利用することによって、中性子フルエンス (率) のみではなくエネルギースペクトルを評価することも可能である。中性子放出率の絶対測定法として、マンガンバス法 (Manganese bath method) がある。これは  $^{55}\text{Mn}$  の放射化法に基づいた方法である。

#### 5-3-2 二次粒子検出法

二次粒子検出法とは、中性子と物質との相互作用によって即時に生成される $\alpha$ 線や $\beta$ 線などの二次粒子を測定することによって中性子フルエンス (率) を導出する方法である。二次粒

\*中性子が、周辺物質内の原子の熱運動と熱平衡状態にあるとき、熱中性子と呼ばれる。周辺物質の温度が 300 K のとき、0.0253 eV であり、通常 0.5 eV 以下のエネルギー領域を熱中性子領域として扱われ、0.5 eV 以上は熱外中性子領域と呼ばれる。また、温度が液体窒素温度 (77 K) 以下のときには、特に冷中性子と呼ばれる。

子検出法の中で、ポリエチレン膜やメタンガスなど水素を含有した物質を用い、中性子と物質中の水素原子核との弾性散乱反応 ( $^1\text{H}(n,n)$ 反応) によって生成される反跳陽子を利用する方法がある。この方法は特に反跳陽子法 (recoil proton method) とも呼ばれる。水素原子核との弾性散乱反応は、広いエネルギー領域で反応断面積が知られており、反跳陽子法は keV エネルギー領域以上の高速中性子精密測定の際に多く適しており、中性子個人線量当量にも多く採用されている。反跳陽子を測定する検出器としては、比例計数管、液体シンチレータ、プラスチックシンチレータ、シリコン半導体検出器や固体飛跡検出器 (例えば、CR-39 というプラスチックがある) が用いられる。特に、液体シンチレータやプラスチックシンチレータは自身に水素が含まれるため、シンチレータ内部で反跳陽子を生成し、測定することができる。

一方、熱・熱外中性子領域では、反跳陽子法ではなくリチウム-6、ヘリウム-3、ボロン-10 やガドリウムなどと中性子による  $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ ,  $^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)^7\text{Li}$ ,  $\text{Gd}(n, \gamma)$  反応からの二次粒子を利用した比例計数管やシンチレータが多く利用されている。例として、 $^3\text{He}$  ガスや  $\text{BF}_3$  ガスを充填した  $^3\text{He}$  比例計数管や  $\text{BF}_3$  比例計数管がある。これらの反応の特徴は、熱・熱外中性子領域で大きな断面積をもつことであるので、高い検出効率を実現することができる。これらを応用したものとして、高エネルギー中性子の計測まで可能な減速材付検出器がある。中性子は、物質 (減速材) との散乱反応によって減速する。すなわち、もっているエネルギーが小さくなり熱中性子に近づく。中性子は、水素原子核すなわち陽子とほぼ同じ質量であるから、水素を含有する物質と反応することによってより効率よく減速する。比例計数管を数 cm~数十 cm 厚のポリエチレンを減速材として覆ったボナー球やロングカウンタが代表的なものである。

また、中性子とウラン-235 やウラン-238 などとの中性子誘起核分裂反応で生成される核分裂片を利用した核分裂電離箱がある。核分裂反応は、大きなエネルギーを放出するので、競合する原子核反応と比較して極めて大きな波高を得ることができるため、低バックグラウンド測定が可能になる。

### 5-3-3 随伴粒子検出法

随伴粒子検出法は加速器を利用した中性子場で利用される方法である。加速器で加速したイオンをターゲットに衝突させたときに起きる中性子生成反応において、中性子と同時に生成される随伴粒子を測定することによって、発生中性子量を求める方法である (図 5・7)。この方法によって得られる結果は、中性子生成反応の反応断面積に依存しないため、中性子フルエンス (率) の理想的な絶対測定法である。実際には、 $\text{T}(d,n)^4\text{He}$ ,  $\text{D}(d,n)^3\text{He}$  反応に対して利用されることが多い。また、20 MeV 以上の高エネルギー領域において、中性子生成に用いる  $^7\text{Li}(p, n\gamma)^7\text{Be}$  反応からの  $\gamma$  線を測定することによって中性子生成量を評価することも試みられている。

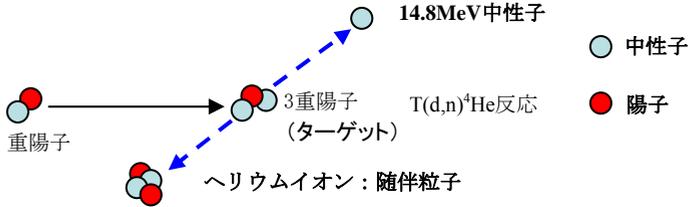


図 5・7 随伴粒子検出法の概念図

### 5-3-4 エネルギースペクトル

中性子計測において、エネルギースペクトルは最も重要な情報である。主なエネルギースペクトル測定方法<sup>5)</sup>として、(1) 中性子飛行時間法 (time-of-flight method)、(2) 反跳陽子法 (recoil proton method)、(3) アンフォールディング法 (unfolding method)、がある。

中性子飛行時間法とは、あらかじめ分かっている距離  $L$  を中性子が飛行する時間  $T$  を測定することにより、中性子エネルギー  $E_n$  を運動エネルギーの方程式  $E_n = (1/2)M_n v^2 = (1/2)M_n (L/T)^2$  から導出するものである。ただし、中性子飛行時間法は中性子がパルス状に発生されている場合にのみ適用可能である。エネルギー分解能は、検出器の時間分解能に大きく依存する。

反跳陽子法は、通常水素を含有したポリエチレンなどの薄膜を中性子と相互作用する物質として使い、生成した反跳陽子のエネルギー ( $E_p$ ) を測定することによって中性子エネルギーを  $E_n = E_p / \cos^2 \theta$  から求めるものである。ここで  $\theta$  は反跳角である。この方法で良いエネルギー分解能を得るためには、中性子の入射方向を固定する必要があり、中性子用のコリメータを利用した検出器も開発されている。薄膜内での反跳陽子のエネルギー損失と反跳角の精度が、エネルギー分解能に大きく影響する。

アンフォールディング法は、液体シンチレータやボナー球によって得られた波高スペクトルを、それらの応答関数行列を用いた逆変換によりエネルギースペクトルを導出するものである。環境中のスペクトル測定など様々な場所において適用できる簡便な方法であるが、中性子飛行時間法や反跳陽子法ほど良いエネルギー分解能は得られない。

## ■12 群 - 6 編 - 5 章

### 5-4 放射能の計測<sup>5,6)</sup>

(執筆著者: 柚木 彰) [2009 年 11 月 受領]

放射能の計測とは、壊変に伴い少なくとも 1 個以上放出される放射線を検出し、単位時間当たりの壊変数を求めることである。その方法には、(1) 端窓形検出器の前面に測定試料を置いて計数する方法、(2) 試料内蔵形のガスフロー計数管や液体シンチレーション計数管のように容器に測定試料を入れ、線源より全立体角 ( $4\pi$ ) 方向に放出する放射線を計数する方法 ( $4\pi$ 計数法)、(3)  $\beta$ 線検出器と $\gamma$ 線検出器を組み合わせて、直接放射能を求める方法 (同時計数法)、がある。

以下、それぞれの測定法について代表的な検出器を挙げ、放射能の求め方を説明する。

#### 5-4-1 端窓形ガイガーミュラー (GM) 計数管

放射能汚染の検査等、現場の放射能測定では $\beta$ 線の測定から放射能を求める機会が多い。この場合、端窓形 GM 計数管の前面に試料を置いて測定する方法が一般的である。得られた正味の計数率を  $N$  とすると、試料の放射能  $A$  は次に示す式(5・8)で表すことができる。

$$A = \frac{N}{E_i \cdot E_e} \quad (5 \cdot 8)$$

ここで、機器効率  $E_i$  は線源に対して、決められた幾何学的条件で測定したときの測定器の正味計数率と線源から放出される放射線の表面放出率との比であり、検出器と測定試料の大きさや配置で決まる立体角、検出器固有の検出効率、検出器の入射窓における吸収、空気の吸収及びその他の構造物による散乱などの影響をすべて含む。また  $E_e$  は 1 崩壊あたり試料の表面から測定対象とする放射線が放出される割合 (線源効率) である。発生した $\beta$ 線のうちの半数が線源の検出器側表面から放出されるとした場合の線源効率は 0.5 である。

機器効率  $E_i$  は計算で求めることも可能であるが、正確に求めることが困難な場合が多いので、粒子の表面放出率が正確に分かった標準線源を用いて、試料の測定と同じ条件で測定して求めることが多い。線源効率については同じ放射性核種の汚染であっても試料の材質や汚染の性状によって異なるため、個別の評価が必要である。

なお、GM 計数管は 1 回の計数に引き続いて 200  $\mu$ s 程度の不感時間がある。真の計数率を  $n$  [ $s^{-1}$ ]、得られた計数率を  $m$  [ $s^{-1}$ ]、不感時間を  $\tau$  [s] とすると、真の計数率は次に示す式(5・9)で表すことができる。

$$n = \frac{m}{1 - m\tau} \quad (5 \cdot 9)$$

例えば不感時間が 200  $\mu$ s の測定系で毎秒 1000 カウントの計数率が得られた場合、真の計数率は毎秒 1250 カウントになる。この補正を不感時間補正という。GM 計数管の場合、入射窓を通過できない低エネルギーの $\beta$ 線を除き、 $\beta$ 線には非常に大きな感度をもつ。しかし、この非常に長い不感時間のため、高計数率の測定の場合、数え落としが多くなる。また極端に高計数率になると窒息状態に陥り計数不能となることに留意しなければならない。

#### 5-4-2 プラスチックシンチレーション検出器

前述端窓形 GM 計数管と同様、現場の放射能測定で広く用いられており、検出器の前面に試料を置いて測定する。プラスチックシンチレータはポリスチレンやポリビニルトルエンの基材に、有機シンチレータが含まれており、放射線の入射によりパルス状に発光する。一般に発光の減衰時間が数ナノ秒と短いこと及び自由な形状に製作できることが特徴である。また、プラスチックの主成分が水素や炭素など原子番号が小さい元素であるため、 $\gamma$ 線バックグラウンドの影響を比較的受けにくい。

検出器は図 5・8 に示す構造をもつ。放射線はアルミ蒸着フィルムなどの薄い遮光膜による入射窓を通り、プラスチックシンチレータを発光させる。そのシンチレーション光を光電子増倍管を用いて電気信号に変換し増幅した後、計数する。端窓形 GM 計数管と同様に式(5・8)により、計数結果から放射能を得ることができる。

検出器に用いられるプラスチックシンチレータの大きさは様々で、可搬形のサーベイメータでは数 cm 角、据置型の汚染検査装置では 30 cm $\sim$ 1 m 角のものもある。

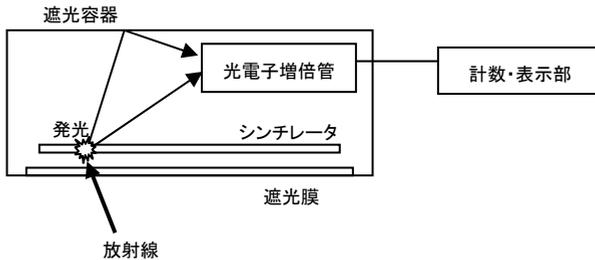


図 5・8 プラスチックシンチレーション検出器の構造

#### 5-4-3 ZnS(Ag) シンチレーション検出器

前述の検出器と同様、検出器の前面に試料を置いて測定する。銀活性化硫化亜鉛 (ZnS(Ag)) は、代表的な無機結晶シンチレータであるタリウム活性化ヨウ化ナトリウム (NaI(Tl)) と同等の高い発光効率を有するが、多結晶の粉末であるため薄膜状のシンチレータしか製作できない。そこで飛跡に沿った単位長さ当たりのエネルギー付与率が大きい $\alpha$ 粒子などの検出に用いられる。端窓形 GM 計数管と同様に計数結果から放射能を求めることができる。また、ZnS(Ag)シンチレータは発光の減衰時間が約 0.2  $\mu$ s と長いので、発光の減衰時間に注目すると、前述のプラスチックシンチレータの発光による信号から弁別できる。そこで入射窓に近い方から ZnS(Ag)シンチレータ、プラスチックシンチレータの順に並べ、同一の光電子増倍管で検出することにより、1 台の検出器で $\alpha$ 線と $\beta$ 線の弁別計数が可能となる。このような検出器をホスウィッチ形検出器と称している。

#### 5-4-4 半導体検出器

一般環境中に存在する低レベル放射能を測定する場合には、 $\gamma$ 線のエネルギースペクトル測定を行い、放射性同位元素の種類と放射能を求める場合が多い。そのような測定では一般に高純度ゲルマニウム半導体検出器が用いられる。 $\gamma$ 線のエネルギーによって検出効率が大きく

異なるため、あらかじめ定められた位置に標準線源を用いて、対象とするエネルギー領域における検出効率を求めておく必要がある。また、計数結果を検出効率で除した数値は、線源からのガンマ線放出率であり、更に当該放射性同位元素の1壊変当たりのガンマ線放出割合で除することによって目的とする放射能が得られる。 $\gamma$ 線の測定に基づく放射能計測の目的のためにはNaI(Tl)など、比較的原子番号が大きい無機結晶を用いたシンチレーション検出器を用いることもある。

その他、半導体検出器を利用して放射能を求める方法として、Si(Li)半導体検出器を用いた低エネルギーX線の測定に基づくものや、表面障壁形シリコン検出器を用いた $\alpha$ 線の測定に基づくものがある。

#### 5-4-5 4 $\pi$ ガスフロー計数管

4 $\pi$ ガスフロー計数管は、線源より全立体角(4 $\pi$ )方向に放出する放射線をすべて計数する場合に用いられる。図5・9に代表的な4 $\pi$ ガスフロー計数管の構造を示す。薄いフィルム上に作製した試料を計数管内部のほぼ中心にセットし、試料をはさんで有感領域を設け各々比例計数管として動作させ、試料の上下両面から放出される放射線を検出する構造としており、幾何効率ほぼ100%となる。また、検出器の有効領域内に試料を入れるため、試料の自己吸収以外の補正は多くの場合必要ない。 $\alpha$ 線の測定による実用的な放射能計測にも利用できるが、その場合は試料支持材による吸収の考慮が必要になる。 $^{55}\text{Fe}$ から放出されるような低エネルギーX線の計数の場合には、検出用ガスの圧力を高くすることで、有効体積中でほぼすべてのX線を吸収することができる。

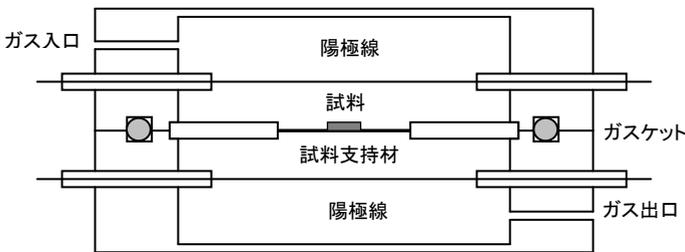


図5・9 4 $\pi$ ガスフロー計数管の構造

#### 5-4-6 液体シンチレーション検出器

液体シンチレーション検出器は、測定試料を液体シンチレータ溶媒に溶かして透明容器に入れ、発生するシンチレーション光を光電子増倍管で計数する構造となっている。幾何効率は4 $\pi$ ガスフロー計数管と同様にほぼ100%となり、更に試料支持材がないためその吸収の考慮も不要になる。そのため $\beta$ 線、 $\alpha$ 線から放射能を求める際に有効である。液体シンチレーション検出器で得られる信号は微弱であるため、光電子増倍管の光陰極から発生する熱電子による雑音に埋もれてしまう。そこで図5・10に示すように、2本の光電子増倍管を、透明容器をはさんで対向させて置き、これら2本の光電子増倍管から同時に信号が得られたときの

み、シンチレーションによる信号と判断して計数し、熱雑音の影響を除去する方法が一般的である。また、低エネルギーのβ線や X 線を測定する場合の機器効率は数十%であり、標準線源との比較測定などにより、機器効率を評価する必要がある。

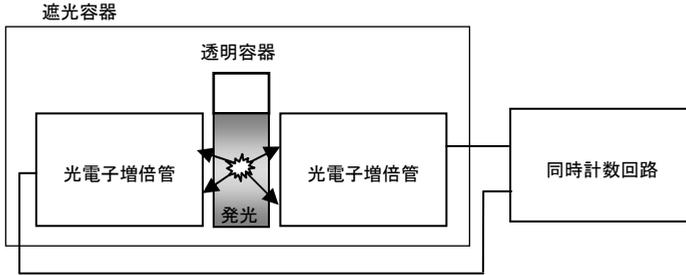


図 5・10 液体シンチレーション検出器の構造

### 5-4-7 同時計数法による測定

代表的な放射性同位元素である  $^{60}\text{Co}$  のように、壊変に伴いβ線とγ線の両方をほぼ同時に放出する核種については、標準線源との比較を必要としない、絶対測定が可能である。その原理を簡単に述べる。β検出器とγ線検出器によって、それぞれβ線計数率 ( $N_\beta$ ) とγ線計数率 ( $N_\gamma$ ) を測定し、かつβ線検出器とγ線検出器の出力が同時に得られた場合の計数率 ( $N_c$ ) を求める。真の放射能  $A$  に対するγ線計数率の割合をγ線検出効率  $\varepsilon_\gamma$  ( $N_\gamma = A\varepsilon_\gamma$ ) β線計数率の割合をβ線検出効率  $\varepsilon_\beta$  ( $N_\beta = A\varepsilon_\beta$ ) とする。その際、同時計数はγ線とβ線が同時に計数される場合に得られるので、β線とγ線の放出角度に相関がない場合、同時計数の効率は  $\varepsilon_\gamma\varepsilon_\beta$  となる。そこで、γ線計数率とβ線検出率の積を同時計数率で割ることにより、次に示す式(5・10)により放射能を求めることができる。

$$\frac{N_\beta \cdot N_\gamma}{N_c} = \frac{A\varepsilon_\beta \cdot A\varepsilon_\gamma}{A\varepsilon_\gamma\varepsilon_\beta} = A \quad (5 \cdot 10)$$

実際は、γ線の一部が直接β線検出器で計数され、内部転換電子、オーজে電子、特性 X 線がβ線検出器で計数されることがある。そこで、これらの妨害条件の影響を次に示す式(5・11)を用い補正する必要がある。

$$\frac{N_\beta \cdot N_\gamma}{N_c} = A + A \frac{1 - \varepsilon_\beta}{\varepsilon_\beta} \frac{\alpha\varepsilon_{ec} + \varepsilon_{\beta\gamma}}{1 + \alpha} \quad (5 \cdot 11)$$

ここで、 $\alpha$  は内部転換係数、 $\varepsilon_{ec}$  は内部転換電子及びその際に発生するオーজে電子または特性 X 線がβ線検出器で検出される確率、 $\varepsilon_{\beta\gamma}$  はγ線が直接β線検出器で検出される確率とする。 $\varepsilon_\beta \rightarrow 1$  とすると右辺の第 2 項は消え、 $A = N_\beta \times N_\gamma / N_c$  となる。ガスフロー式  $4\pi\beta$  比例計数管など高効率のβ線検出器と NaI(Tl)シンチレーション検出器などのγ線検出器を用いた  $4\pi\beta\text{-}\gamma$  同時測定装置を用い、試料にアルミ箔の吸収板を載せるなどして、β線に対する検出効率を変化させ  $\varepsilon_\beta \rightarrow 1$  とすることによって、 $N_\beta \times N_\gamma / N_c$  から真の放射能を求める。

$4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時測定装置は、正確な絶対測定ができることから、放射能計量標準の国家標準を定める代表的な装置として用いられている。

■参考文献

- 1) ICRU, "Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation," ICRU Report 60, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD, 1998.
- 2) N. Tsoulfanidis 著, 阪井英次 訳, "放射線計測の理論と演習," 現代工学社, 1986.
- 3) 日本放射線技術学会, "放射線計測学," オーム社, 2003.
- 4) 日本放射線化学会編, "放射線化学のすすめ," 学会出版センター, 2006.
- 5) G.F. Knoll 著, 木村逸郎, 阪井英次 訳, "放射線計測ハンドブック," 日刊工業新聞社, 2001.
- 6) "A HANDBOOK OF RADIOACTIVITY MEASUREMENTS PROCEDURES," National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP REPORT No.58, 1985.