

### γ線

#### 1 はじめに

γ線は、α線、β線に次いで、より透過力の高い放射線としてフランス人 Paul Villard が発見し、Ernest Rutherford が命名したとされる。γ線は、励起状態の原子核が他の励起状態を経るなどして基底状態に遷移する過程で放出される電磁波と定義され、原子核のα壊変、β壊変、自発核分裂、中性子捕獲<sup>1)</sup>などの原子核反応によって励起された原子核を起源とする。元素から放出される電磁波には、他に軌道電子のエネルギー遷移を起源とするX線があり、起源により区別されるが、検出・測定の対象としては、どちらも高エネルギー電磁波（以後、光子と呼ぶ）であり区別できない。一方、γ線の持つ比較的高いエネルギー0.1 MeV から100 MeVを指摘してX線と区別する場合があるが、X線のエネルギー範囲と重複し、またこの範囲を超えるγ線も存在する。上記のほか、陽電子が対消滅を起こしたとき放出される2個の光子もγ線と呼ばれる。また、宇宙線の一種として観測される高エネルギーの光子は、その起源が必ずしも明らかではないが、γ線と呼ばれる。

#### 2 γ線計測の目的

一般には混同されがちであるが、γ線などの“放射線”と、それを放出する物質の性質または放射性物質の量を表す“放射能”とは、区別して理解する必要がある。放射線を計測する目的は、照射される放射線のエネルギー分布と放射線量を把握することと、放射能の存在を検知し定性・定量することに大別される。原子力施設の内部や周辺で空間の放射線量を常時監視するための測定は、前者の一例であり、排気、廃液、土壌、動植物などから採取した物質中に含まれる放射性物質の特定や定量分析のために行われる測定は、後者の例である。

#### 3 γ線の検出

γ線は、電荷を持たないので物質を直接電離せず透過力が高い。γ線は、主として次にあげる3種類の相互作用を介してそのエネルギーを電子の運動エネルギーに転換し、この高速の電子が検出器物質中で電離を生じさせ、その結果得られる電気的信号を使って検知される。光電効果、コンプトン散乱、電子対生成がγ線と物質との主な相互作用として取り上げるべきものであるが、その解説は教科書に譲る<sup>2)</sup>。検出器に入射したγ線は相互作用を繰り返しながらそのエネルギーを失い、最終的にすべてのエネルギーを検出器物質の電離に費やした場合に全吸収ピークをスペクトル上に作る（図1）。エネルギー吸収の過程で一部の高速電子、X線、消滅γ線などが検出器有感領域から逸脱した場合、検出器出力パルス波高は欠損を生じ、スペクトル上の連続成分やエスケープピークを構成する。

#### 4 検出器の種類

γ線検出器には、使用している原理や測定しようとする量によって色々な種類があり、単に放射線の存在を検知し警報を発する目的のものから、γ線のエネルギー分布を詳細に測定し定量分析を行うものまで様々である。また、対象とするγ線のエネルギー範囲や強さによっても選択する必要がある。ここでは、機器分析装置として微量の放射能の定量測定<sup>3)</sup>に使われるGe半導体検出器にフォーカスして、その特徴と使用方法を解説する。

#### 5 Ge半導体放射線検出器

試料から放出されるγ線を捕らえて、エネルギー・スペクトルを作成し、これを分析して試料中の放射能を定性・定量することを可視光周辺での分光分析になぞらえて、γ線スペクトロメトリーという。Ge半導体検出器がこの目的に使用されるのは、次の理由による：1. 検

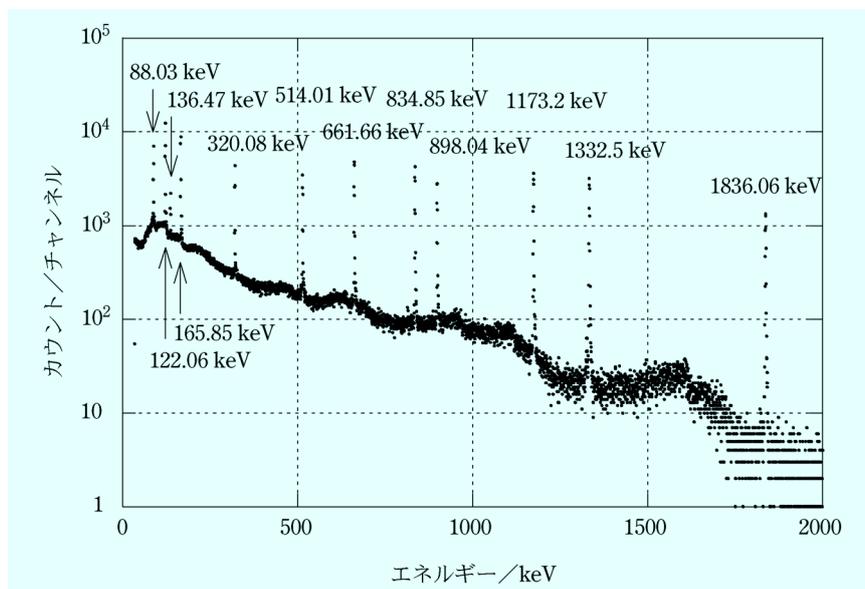


図1 Ge検出器で測定した校正用放射線源のγ線スペクトル

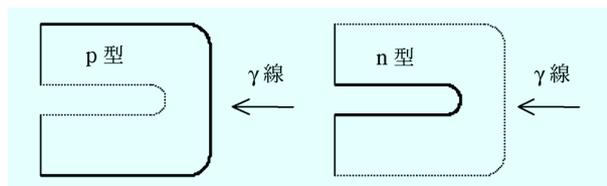


図2 p型, n型の高純度結晶を使用した同軸形検出器

出器出力のエネルギー直線性が良い, 2. エネルギー分解能が特に優れている, 3. 検出器物質 Ge の原子番号, 密度が大きく検出効率が高い, 4. 安定性, 再現性が優れている。

### 5.1 Ge 半導体検出器の構造

高純度の p または n 型 Ge 単結晶を素材とし, 円筒形の片方の端面から貫通しない穴を開けて電極を作り, 円筒外皮に設けた電極との間で片端面の閉じた同軸構造を作る (図2)。加工された Ge 単結晶では, 電極との間でダイオード接合を形成しており, この接合に 2000 から 5000 V 程度の逆バイアス高電圧を印加することによって空乏層が拡張され, Ge 結晶のほぼ全域に広がっている。この拡張された空乏層が  $\gamma$  線に対して有感領域となる。検出器有感領域に入射した  $\gamma$  線は, 先に述べた主な相互作用を介して Ge 原子を電離し電子とホール対を作る。これらは, 電場に従ってそれぞれ電極に移動し信号を出力する。このとき, 一对の電子ホール対を生成するのに必要な入射  $\gamma$  線の平均のエネルギーは  $\varepsilon$  で表すのが習慣で, Ge の場合 2.96 eV, Si の場合 3.62 eV である。電子ホール対の生成は確率過程とされており, この  $\varepsilon$  値が小さいほど多数の電子ホール対を生成し, 生成数の統計変動を小さくする。その結果, 良好なエネルギー分解能を得ることができる。なお, Ge 結晶のバンドギャップは 0.67 eV と小さく, 熱励起電子による漏れ電流を減少させるため, 液体窒素温度に冷却して使用することが不可欠である。

### 5.2 エネルギー分解能

放射線検出器のエネルギー分解能は, 単色の  $\gamma$  線が入射したときに作られるスペクトル上の全吸収ピークの半値幅 (FWHM : full width at half maximum)<sup>1)</sup> で定義される。Ge 検出器に対しては, Co60 放射線源から放出される 1332.5 keV の  $\gamma$  線を測定して決定する方法が JIS その他の規定で決まっている<sup>4)5)</sup>。検出器内部で生成される電子ホール対の数の揺らぎは, 単純にポアソン分布に従わず, FWHM は, 検出器の物質ごとに実験値として得られるファノファクター  $F$  を使って  $FWHM = 2.355 \times (F \times E \times \varepsilon)^{1/2}$  と表される。 $F$  は, Ge の場合 0.058 とされる<sup>6)</sup>。以上により, Ge 検出器自体のエネルギー分解能は入射  $\gamma$  線のエネルギーのルートに比例する。実際には, これにプリアンプ初段に使われる電界効果トランジスタ (FET : field effect transistor) を主な起源とする電気回路のノイズが加わり, 1332.5 keV の  $\gamma$  線に対して 1.7 keV 程度のエネルギー分解能が得られている。

### 5.3 検出効率

一般に  $\gamma$  線検出器の検出効率は, 検出器物質の密度と原子番号によるほか, 検出器の有感領域のサイズと形状によって決まる。Ge 検出器は大きな原子番号と密度を持ち, 高エネルギーの  $\gamma$  線を検出するのに向いている。

Ge 半導体検出器の検出効率は, Co60 点状線源を検出器の前方軸上 25 cm の位置に置き, エネルギー 1332.5 keV の  $\gamma$  線の全吸収ピークを測定し, 直径 3 インチ長さ 3 インチの円筒形 NaI (Tl) シンチレーション検出器の検出効率に対する相対効率として計算され, 相対効率 35.3% などと表記される。実際の測定では, 上記の位置関係にある NaI (Tl) シンチレーターの絶対効率は,  $1.2 \times 10^{-3}$  として計算することになっているので, 比較測定を行う必要はない。大きな検出効率を持つ Ge 検出器は長く製造が困難であったが, 最近では相対検出効率 200% 超など大型の Ge 検出器が入手可能である。

### 5.4 検出効率の校正

検出器の検出効率は, 様々な測定対象の形状, 密度に合わせ, さらに  $\gamma$  線のエネルギーごとに定めなくてはならない。このために測定対象の形状に合わせて既知の放射能を持つ校正用放射線源を作成し, これを測定して形状ごと, エネルギーごとの検出効率をあらかじめ測定しておく。使用する放射能は, スペクトル分析が行いやすいように, 測定対象エネルギー全域に単純な全吸収ピークを持ち, 実用的な半減期を持たなくてはならない (図1)。このような放射性核種の組み合わせを得ることは難しく, 場合により数十日程度の比較的短い半減期の放射性核種を使用するため, 常時校正用放射線源を保有することには困難がある。また, 最近の社会情勢を反映して, 一部の放射線源は, 入手, 使用, 廃棄が規制され管理が難しくなっており, これらに変わる校正方法としてモンテカルロ計算を主体としたシミュレーション技術が盛んに開発されている。

### 5.5 検出器の周辺装置など

Ge 半導体検出器を使用するためには, 様々な周辺装置などが必要であるが, ここでは名称を列挙すると定める: 1. 遮蔽体, 2. 冷却装置, 3. エレクトロニクス, 4. ソフトウェア。

## 6 最後に

本稿では, 最も基本的な形状の Ge 検出器を解説したが, 用途により様々な形状の検出器が入手可能である。Ge 半導体検出器に関する JIS 規格<sup>4)</sup> と関連の IEC 規格<sup>5)</sup> を参照文献に挙げた。IEC では, 次期規格 IEC60973Ed.2.0 を準備中である。 $\gamma$  線測定のアプリケーションには, 本稿で取り上げたもののほかに様々な応用があり, それぞれに適した検出器がある。医療用の PET 装置への応用や, 年代測定や食品の放射線照射検認に使用されるルミネセンス分析などが最近注目を集めている。

### 文 献

- 1) 文中使用した用語は, 次の Web サイトに用語集があるので参照されたい。http://www.atomin.gr.jp/atomica/index.html (2008 年 1 月 16 日確認)
  - 2) G. F. Knoll: "Radiation Detection and Measurement, Third edition", (1999), (John Wiley & Sons, New York).
  - 3) 文部科学省: "ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー", (1992).
  - 4) JIS Z 4520, ゲルマニウム  $\gamma$  線検出器の試験方法 (2007).
  - 5) IEC 60973 Ed. 1.0: 1989 (b) Test procedures for germanium gamma-ray detectors.
  - 6) 米沢伸四郎訳: "実用ガンマ線測定ハンドブック", p. 241 (2002), (日刊工業新聞社).
- [セイコー・イージーアンドジー(株)技術部 齋藤正喜]