

放射線の測定

放射線と物質が相互作用を起こした結果起こる物理的、あるいは化学的反応を利用して、間接的に放射線を測定する。

物質に放射線が入射すると、物質は電離や励起などを起こし、さらに二次的に発光や化学反応などの現象も引き起こす。放射線の測定には、これら物質と放射線との相互作用が利用されている。いろいろな相互作用による現象が放射線測定に利用されているため、その測定原理も多様なものとなる。

以下に、それぞれ代表的な現象を利用した放射線測定の原理について概説する。

気体の電離を利用した測定法

放射線が気体中を通過すると、気体分子が電離して陽イオンと陰電子という電子イオン対が生成される。ここで生じた電子イオン対がそれぞれ電極に移行し、電気信号に変換されることにより、放射線の数やエネルギーを知ることができる。電離電流から測定する電離箱、電気パルスから測定する比例計数管、GM計数管などがある。

固体の電離を利用した測定法

放射線が固体結晶中を通過すると、電離が起こり、固体結晶が電気伝導性を示すことを利用した方法である。このとき、固体結晶として半導体が用いられる。半導体が電離することにより、電子-正孔対を生成し、そこで生じた電気信号（電気パルス）により、放射線を測定することができる。これを半導体検出器という。

励起作用（蛍光作用）を利用した測定法

放射線が液体または固体中を通過すると、物質中の分子が励起されるが、やがて基底状態に戻る。この過程で、放射線により与えられたエネルギーを蛍光として放出する。この光を電気信号に変換し発光数から放射線数を、蛍光強度からエネルギーを測定することができる。この原理の測定器をシンチレーション検出器という。

写真作用を利用した測定法

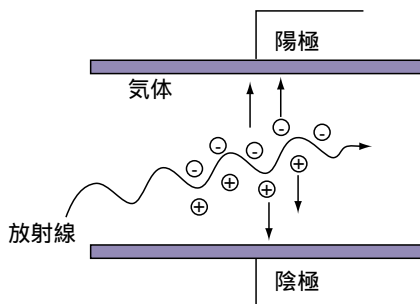
放射線を当てた写真フィルムを現像すると黒化することを利用した方法である。放射線の測定は、あらかじめ校正された線量で露出したフィルムの黒化度との比較により算出する。また、放射性物質を含む薄層試料や切片をX線フィルムに密着させ、その後現像することにより放射性物質の局在を見るオートラジオグラフィ（p.112参照）という方法もある。

放射線測定器にはすべての放射線を効率的に測定できるオールマイティなもの存在しない。したがって、放射線測定の基本原理を知ったうえで、あらかじめ測定したい放射線の種類や測定目的などを考慮し、測定器を選択する必要がある。

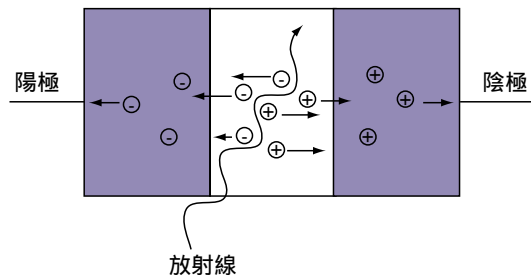
ポイント整理

放射線の作用	検出器	測定原理	
		信号	測定対象
気体の電離作用	電離箱 比例計数管 GM 計数管	電離電流	放射線数, エネルギー
		電気パルス	放射線数, エネルギー
		電気パルス	放射線数
固体の電離作用	半導体検出器	電気パルス	放射線数, エネルギー
励起作用 (蛍光作用)	シンチレーション検出器	発光数 蛍光強度	放射線数 エネルギー
写真作用	写真フィルム	フィルムの黒化度	線量

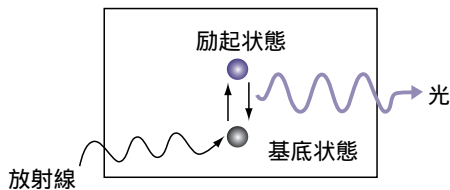
気体の電離作用



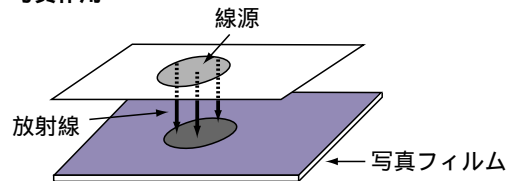
固体の電離作用



励起作用 (蛍光作用)



写真作用



知識を広げる

放射線と物質との相互作用を利用した測定器には、酸化・還元反応などの化学反応を利用した化学線量計というものもある。化学線量計は低線量レベルは検出できないが、大線量の場合でも飽和せず再現性良く定量的に測定できる利点がある。代表的なものとして、フリック線量計やセリウム線量計などがある。

1) フリック線量計

二価の鉄イオン (Fe^{2+}) が放射線の入射により三価の鉄イオン (Fe^{3+}) になる酸化反応を利用したもので、鉄線量計とも呼ばれる。

2) セリウム線量計

四価のセリウムイオン (Ce^{4+}) が放射線の入射により三価のセリウムイオン (Ce^{3+}) になる還元反応を利用したものである。フリック線量計よりも感度は劣る。

気体の電離作用を利用した測定器

放射線が気体を電離したときに生じる電子イオン対により電気信号が伝わり、放射線の数やエネルギーを測定できる。

放射線による気体の電離作用で生じた電子イオン対は、電極間に印加電圧をかけることにより電極に移行する。ここで得られるパルス波高と電圧強度には、以下の関係がある（右頁上図参照）。電圧の強度が低い場合、電子イオン対が生成してもクーロン引力などにより再結合してしまう（**再結合領域**）。印加電圧を徐々に強めていくと、イオン対の再結合は無視できるようになり、生成したイオン対はほぼ電極に集まるようになる。このときの電離電流は電圧の強度を増しても一定であり、この領域を**電離箱領域**という。さらに電圧を強めていくと、生じた一次イオン対が十分に加速されるために近隣の気体分子を電離して二次イオン対の生成を誘発し、イオン対が増幅される（**ガス増幅**）。このとき生じる二次イオン対の数は一次イオン対の数に比例することから**比例計数領域**と呼ばれる。電圧をさらに強めていくと、一对の電子イオン対でもネズミ算的にイオン対が生成されてしまう**電子なだれ**を誘発するようになる。この領域を**ガイガー・ミュラー（GM）計数領域**という。これ以上、電圧を強めると連続放電するようになり、放射線が検出できなくなる（**連続放電領域**）。

電離箱

電離箱領域（数 10 ~ 200V）の印加電圧を利用する放射線測定器である。ガス増幅されないため感度が悪く、自然放射線レベルの測定には向かない。電離箱は一次イオン対の数が正確にわかるため、一对のイオン対をつくるのに必要な放射線エネルギーを表す **W 値** を用いて、放射線のエネルギーを測定することができる。線や線の検出に用いられる。

比例計数管

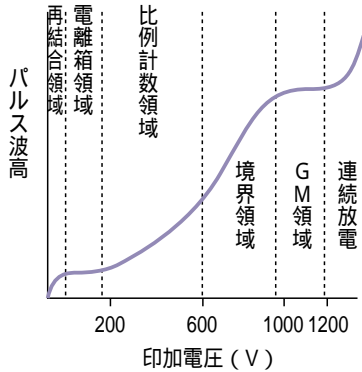
比例計数領域（300 ~ 600V）の印加電圧を利用する計数装置である。ガス増幅により生成される二次イオン対の数は、一次イオン対の数に比例するので、放射線のエネルギーを測定することができる。アルゴン 90% とメタン 10% の混合ガス（PR ガス）を流通させながら使用するガスフロー型計数管では、放射線の絶対測定をすることができ、線や線の検出に用いられる。また、 BF_3 ガスを使用した BF_3 計数管では、 $^{10}\text{B}(n, \gamma)^7\text{Li}$ の核反応を利用して熱中性子の検出に用いられている。

GM 計数管

GM 計数領域（1000V ~ ）の印加電圧を用いる放射線検出装置である。充填するガスには、アルゴンなどの希ガスに 10% の割合でアルコールなどの有機気体を混合したものが使用されている。ガス増幅により生じる二次イオン対の数は、電子なだれのため一次イオン対の数とは無関係となる。そのため、入射した放射線のエネルギーを測定することはできない。GM 計数管は、非常に感度良く線や線といった放射線の数を測定することができるが、電子なだれにより生じた大量の陽イオンが GM 管の陽極線にさや状に残存し（**イオンシース**という）、一過性に電流パルスが低下してカウントされなくなることがある。これを**数え落とし**といい、放射線が入射してイオン対を生成しても装置が応答しない時間を**不感時間**、計測できるようになるまでの時間を**分解時間**という。印加電圧や計数管の形状にもよるが、GM 計数管の分解時間はおよそ 100 μs である。

ポイント整理

パルス波高と印加電圧の関係



放射線測定器のまとめ

検出器	印加電圧	用途
電離箱	電離箱領域 (数10 ~ 200V)	線, 線
比例計数管	比例計数領域 (300 ~ 600V)	PRガス: 線, 線 BF ₃ : 中性子線
GM計数管	GM領域	線, 線



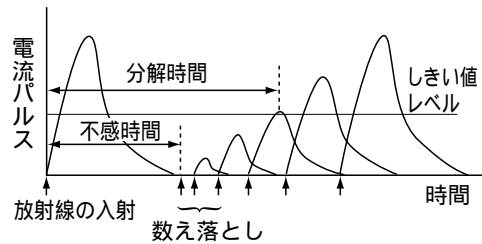
GM計数装置の外観

数え落とし, 不感時間, 分解時間のまとめ

数え落とし: 放射線が入射し, 一次イオン対が生成してもカウントされないこと。

不感時間: 放射線が入射し, 一次電離を生じても検出装置がまったく応答を示さない時間のこと。

分解時間: 電流パルスとして認識され, カウントされるまでの時間のこと。



知識を広げる

GM計数管の数え落としの原理

- 1) 入射放射線は気体分子を電離し, 生成した陽イオンと陰電子がそれぞれ陰極, 陽極へ結合することにより電離電流が流れる (図1)。
- 2) しかし, 放射線が大量に入射してくるとイオン対が非常に多く生成され, 陽イオンが陽極の周りを取り囲むことによってイオンシースを形成する (図2)。
- 3) その結果, 次に入射してきた放射線により生成されたイオン対はそれぞれの電極に移行できずに, 再結合する。

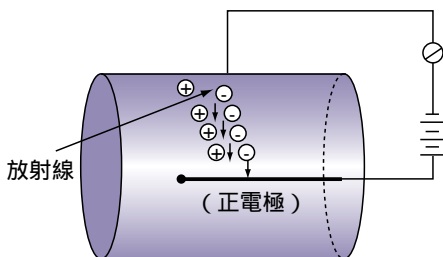


図1

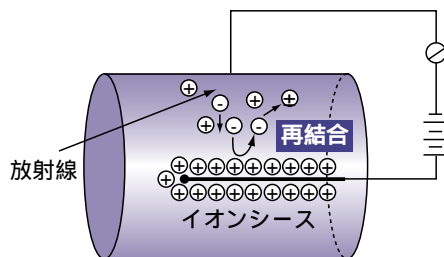


図2

固体の電離作用を利用した測定器

ある固体結晶中に放射線が入射したとき、固体が電離する現象を利用した測定器である。

原理

固体結晶中の電子は、自由なエネルギーを持つことができず、許容されるエネルギーはバンド状（エネルギーバンド）となる。**価電子帯**と呼ばれるエネルギーレベルに存在する電子は、結晶格子に束縛され自由に動くことはできないが、**禁止帯（バンドギャップ）**を超えて**伝導帯**と呼ばれるエネルギーレベルに到達することができれば、その電子は自由に原子間を移動することができ、電気伝導に寄与できる。このとき、価電子帯の電子が抜けた空席を**正孔**と呼ぶ。バンドギャップのエネルギー幅が大きい場合、伝導帯に到達できる電子もほとんどなく絶縁性を示すが、バンドギャップのエネルギー幅が小さいか、あるいは存在しない場合、導電体として働くようになる。特にバンドギャップが1 eV程度の物質を**半導体**と呼ぶ。電子によって電気伝導が増大する半導体を**n型**、正孔によって増大するものを**p型**という。このn型、p型半導体を接合し、電気が流れない方向に電圧（**逆バイアス電圧**）をかけると電子も正孔も電極側に移行することにより、p-n接合部付近にはほとんど電子も正孔も存在しない**空乏領域（空乏層）**ができる。この空乏領域に放射線が入射すると、放射線の電離作用によって**電子 - 正孔対**ができ、それぞれ電極側に移行することによって電離電流が流れ、電気信号が伝わるようになる。このとき電子 - 正孔対の移動速度はイオンに比較して非常に速いため、応答性は良い。また、電荷の増幅はない。半導体を利用した放射線検出器では、空乏領域が検出部となり、この空乏領域の製造方法の違いによって主に表面障壁型、リチウムドリフト型、高純度型に分類することができる。

表面障壁型検出器

n型半導体のシリコン結晶の表面を酸化させるとp型領域が形成され、ここに金やアルミニウムを蒸着させると、表面付近に空乏領域が形成されることを利用した半導体検出器である。空乏領域が狭いので、飛程の短い線や重荷電粒子、あるいは低エネルギー線などの検出に用いられる。

リチウムドリフト型検出器

p型半導体の結晶表面にn型であるリチウムを蒸着させ、逆バイアス電圧をかけるとリチウムイオンがドリフトし、p-n接合が形成されることによって、厚い空乏領域が形成される。シリコンSi(Li)やゲルマニウムGe(Li)を用いた検出器があり、低エネルギーの線やX線などの検出に用いられる。ドリフト後のリチウムの状態を保つために、常時液体窒素などで冷却しておく必要がある。最近では、以下に説明する高純度型のゲルマニウム検出器に取って代わっている。

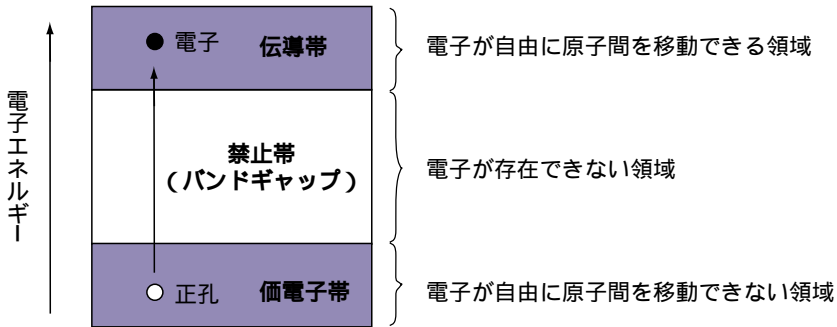
高純度ゲルマニウム検出器

高純度のGe結晶を用いた検出器で、上記のGe(Li)検出器と異なりリチウムを含まないので、使用時のみ冷却すればよい。Geは常温ではバンドギャップ幅が小さく、簡単に電子が伝導帯に移行し検出器としては使えないが、冷却することによってバンドギャップを超える電子はほとんどなくなる。

線の検出に用いられ、線スペクトロメータとしてエネルギー測定や未知核種の同定などに使われる。後述するNaI(Tl)検出器と比較してエネルギー分解能は約50倍高いが、検出効率は数10倍低い。

ポイント整理

半導体のイメージ



半導体検出器の測定原理

- 1) 半導体結晶に逆バイアス電圧をかけると、伝導帯に電子の存在しない空乏領域（空乏層）が形成される。
- 2) この空乏領域に放射線が入射すると、価電子帯の電子が伝導帯に持ち上がることにより電子 - 正孔対が形成される。
- 3) 電子 - 正孔対がそれぞれの電極側に移行することにより、電離電流が流れ電気信号が伝わる。

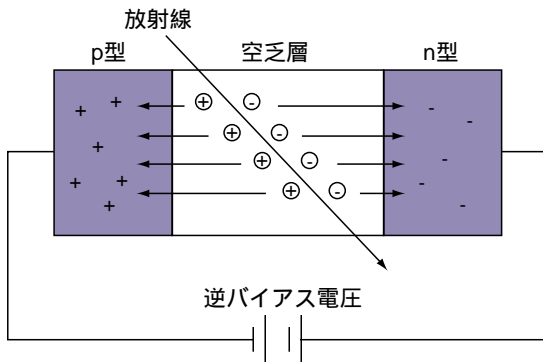


図 高純度ゲルマニウム検出器

主な半導体検出器

検出器	測定対象	特徴
表面障壁型	線, 重荷電粒子 低エネルギー線	空乏領域が非常に狭いので, 飛程の短い放射線の測定に用いられる
リチウムドリフト型	線, X線	厚い空乏領域を有するため, 透過性の高い線, X線を測定できるが, 常時液体窒素で冷却しておく必要がある
高純度型	線	線スペクトロメータとして未知核種の同定に使用される。使用時のみ冷却すればよい

半導体検出器の特徴

- 1) エネルギー分解能が非常に良いため, 未知核種の同定の精度が高い。
- 2) 電荷の増幅はない。
- 3) 電子 - 正孔対の移動速度がイオンに比較して非常に速いため, 応答が速い。