講座

応用放射線エネルギー分析法(9)

Ⅳ. ベータ線のエネルギー分析法とその応用

(2) 固体や気体を利用したベータ線検出器†

川上宏金

東京大学原子核研究所

188 東京都田無市緑町3-2-1

Key Words: silicon-detector, Compton component, scintillator, plastic scintillator, liquid scintillator, sodium iodide (thallium), anthracene, stilbene

1. はじめに

ここでは, (1)で述べた β 線スペクトロメータ以外の固体や気体を利用した β 線(電子線)検出器について簡単に紹介する。本論に入る前にこれらの検出器の原理, 性能に影響を与える β 線(電子)と物質の相互作用についておさらいをしておく。

2. 電子のエネルギー損失機構

電子は質量が陽子の1/1836分の1(511.006 keV/c²)と小さいため, 同じエネルギーの重い粒子に比べてエネルギー損失が小さく, その結果として全エネルギーを失ない停止するまでに走る距離が長くなる。したがって, この過程で多くの散乱を受ける訳である。

電子が物質中を通過する時, その散乱によって原子の励起や電離を起こし, エネルギーを失なうが, エネルギーが増すと原子核の強い電場の影響を受けて光子(電磁波)を放出し, 大きくエネルギーを失なう。

2・1 電離や励起によるエネルギー損失

Bethe¹⁹⁾の計算によると入射電子が原子の励起や電離によって失なうエネルギーは物質1cm当たり次式で与えられる。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi e^4}{mv^2} nZ \left\{ \log \frac{mv^2 E}{2I^2(1-\beta^2)} - (2\sqrt{1-\beta^2}-1+\beta^2) \log 2 + 1 - \beta^2 \right\} \text{ erg/cm}$$

ここで, E は入射電子の運動エネルギー

m, e, v は電子の質量, 電荷, 速度

$\beta=v/c$ (c は光速)である。

また, Z は物質の原子番号

n は1cm³中の原子数

I は原子を電離するために要する平均のエネルギーである。

電子のSiに対する入射エネルギーとエネルギー損失(dE/dx)の関係を図13に示す。図から分かるようにエネルギー損失は電子の静止質量の ~ 2 倍のところで最低の値を示し, それから低いエネルギーになるとエネルギー損失の式の $1/v^2$ が効いて急激に損失が増大する。これによって, 検出器中におけるエネルギー応

図13 Si 中での電子の入射エネルギーとエネルギー損失の関係

† Measurement of Radiation Energy and Its Application. Ⅳ. Measurement of beta-ray energy and its application. (2) Beta-ray detectors using solids and gasses. Hirokane KAWAKAMI: Institute for Nuclear Study, University of Tokyo, Midori-cho, Tanashi-shi, Tokyo 188.

答関数が決められている(3・1・6で説明)。他方、高エネルギーになるとその損失は徐々に増加するだけである。したがって、高エネルギー電子の検出は、一般に dE/dx を利用することが多い。

2・2 輻射過程によるエネルギー損失

古典電磁気理論によると、加速 α を受けた電荷は $(2e^2/3c^3)\alpha^2$ の割合で光子を放出する。これは、電子が原子核の近傍を通過するさい、核の強いCoulomb場によって大きな加速を受けるので電磁波の形でエネルギーを失なうのである。この場合の加速の大きさは核電荷 (Ze) に比例し、質量 (m) に逆比例するから $\alpha \sim Ze/m$ となる。電磁波放出の割合は α^2 に比例するので結局 Z^2/m^2 に比例することになる。Bethe, Heitler²⁰⁾ のくわしい計算によると、高速電子が物質1cm当たり失なう輻射によるエネルギー損失量は次式で与えられる。ただし、 E_0 は入射エネルギー、 N は物質中の原子密度、 r_0 は古典電子半径である。

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{r_0} = -\frac{4r_0^2}{137} Z^2 E_0 N \log \frac{183}{Z^{1/3}}$$

すなわち、輻射過程によるエネルギー損失は電子エネルギー E_0 と、 Z^2 に比例する。

2・3 電子の飛程

飛程とは、粒子が物質中を通過してエネルギーが E_1 から E_2 になるまでに通る長さであるが、それはエネルギー損失の式を積分して得られる。すなわち、

$$R(E_1 - E_2) = \int_{E_2}^{E_1} \frac{dE}{\frac{dE}{dx}}$$

で与えられる。

輻射過程が重要でないエネルギー領域における電子の飛程は、簡単には物質中での吸収曲線によって決められる。図14に単一エネルギーの電子の吸収曲線を示す。物質が厚い場合は、傾斜の部分にほぼ直線的に減少する部分があり、最後は湾曲している。この直線部

図14 電子の単一エネルギーの吸収曲線

図15 Si中の電子の飛程とエネルギーの関係

分を延長して横軸と交わる点 R を電子の飛程と定義する。Si中の飛程とエネルギーの関係を図15に示す。これに関して、Glendenin はつぎの実験式²¹⁾を導出した。

$$R = 0.407 E^{1.38} \quad 0.15 \text{ MeV} < E < 0.8 \text{ MeV}$$

$$R = 0.542 E - 0.133 \quad 0.8 \text{ MeV} < E < 3 \text{ MeV}$$

ここで、 R は g/cm^2 で測った飛程、 E は MeV 単位で測った値である。

3. 検出器の種類とその利用法

さて、 β 線のエネルギー分析に使われる検出器としては、それ自身がある程度のエネルギー分解能を持っているのでそのまま、または他の検出器と併用して使われるSi半導体検出器と、既述の磁気、電場等のスペクトロメータで運動量やエネルギーを分析した後の計数管として使われる気体検出器や、最近開発されたマイクロチャンネルプレートのようにその入射位置を同定することにより位置感応型検出器として利用されているものがある。

この章では、Si半導体検出器、シンチレータ、位置感応型検出器について説明する。

3・1 Si半導体検出器

この講座ですでにその動作原理等について詳細に述べられているので²²⁾、ここでは応用面からみてどんな利用の仕方があるかを紹介する。

まず、この検出器の利点としては以下の点が挙げられる。

(1) エネルギー分解能がよい。

市販されているプレーナ型検出器でも小型になると $\sim 5 \text{ keV}$ の分解能(以下、分解能とは断りのない限り半値幅をいう)を保証している。また個々の例

では検出器のみならず前置増幅器初段のFETも冷却して2-3 keVの高分解能のデータも報告されている。

(2) 磁気、電場の分析器に比べてはるかに広いエネルギー領域を一度に測定できる。

(3) 固体であるため電子の飛程が短くて小型である。

(4) 薄い検出器ですむため信号の立ち上がり時間が比較的速い。とくに、プレーン型では数nsのものもある。したがって、同時計測用検出器として利用される。

(5) 取り扱いが比較的簡単である。

以上の利点がある反面、線源が γ 線も放出している場合は、 γ 線によるコンプトン成分(γ 線の物質による吸収には光電効果、コンプトン効果、電子対生成の三つの過程があり、その物質の原子番号(Z)依存性はそれぞれ Z^3 , Z^1 , Z^2 に比例している。したがって、 $\text{Si}(Z=14)$ は $\text{Ge}(Z=32)$ に比べて Z が低いため、光電効果によるピークは観測されずコンプトン成分が観測される)がバックグラウンドとして観測される。それを抑制する手法として以下に述べるいくつかの方法が開発された。

3・1・1 比例計数管+Si検出器の同時計測法によるコンプトン成分の抑制

これは比例計数管(PC)が気体を使っているため、 γ 線に対して感度が低いこと、他方 β 線は電荷を持った粒子であるので感度が高いことを利用している。PCとSiの信号の同時計測をとることによって、Si信号中の γ 線のコンプトン信号を抑制し S/N を改善している。図16にその構成を示す²³⁾。PCで使っているガスは1気圧の純メタンである。^{206,207}Biの線源による結果ではコンプトン成分は $\sim 1/1000$ に抑制された。スペクトルを図17に示す。Si(Li)検出器自身の分解能は4 keVであった。この検出器系の検出効率は300 keV以上の電子に対して80%で一定であった。200 keV以下の電子は比例計数管の膜やガス中で散乱されSi検出器に入射しにくくなり、同時計数率が急速に低下するので使えない。

3・1・2 マグネット+Si検出器によるコンプトン成分抑制と内部転換電子測定

この方法は、とくに γ 線や低エネルギー電子線放出の多いインビーム β 線分光で開発されよく利用された。世界的にもよく製作された。図18にその典型的な例²⁴⁾を示す。マグネットは小型の5個のCo-Smの合金による永久磁石で構成され、中心にある γ 線遮蔽用

図16 γ 線フリーのSi(Li)検出器系²³⁾
比例計数管(PC)とSi(Li)検出器でカウンター
テレスコープを形成している

図17 PC+Si検出系による²⁰⁷Biのスペクトル²³⁾
Si検出器によるシングルスpectルを
比較のために示してある

のPbシールドの周りにオレンジのように配置されている(このためこのマグネットをミニオレンジとも呼ぶ)。この永久磁石の作る磁場によって電子線の運動量をだまかに分析、輸送し、Si検出器でエネルギー分析を行う。したがって、分解能は使用するSi検出器の性能によって決まる。この検出器系で測定した²⁰⁷Biの内部転換電子スペクトルを図19に示す。シングルスpectルで観測されたコンプトン成分がほとんど観測されていない。その抑制ファクタは500 keVエネルギーで1/300, 1000 keVで1/25であった。この系の検出効率は図20に示す。この場合磁場の値が決まっているので高いエネルギーの電子線の効率は徐々に低下している。実用的なエネルギー範囲は200 keV以上であ

図18 マグネット+Si検出器系の構成図²⁴⁾
磁石はCo-Smの合金による永久磁石である

図19 マグネット+Si検出器系による²⁰⁷Biのスペクトル²⁴⁾

(A): Siのシングルススペクトル
(B): マグネット+Si検出器系によるスペクトル

図20 マグネット+Si検出器系の検出効率²⁴⁾

る。

ミオレンジ+Si系は磁場の値が一定のため、たとえば、もっと低いエネルギーの電子線を効率よく測定しようとする、マグネットの交換が必要であるが、それを避けるためにソレノイド電磁石で磁場を発生させている例もある。図21にその断面図²⁵⁾を示す。3個のソレノイドを使用し、線源とSi(Au)検出器の距離は40 cmと、かなり離れているので、 γ 線やX線が検出器を見込む立体角はかなり小さい。これにより γ 線のコンプトン成分を抑制している。他方、電子線は螺旋運動して輸送されるので立体角はそれほど低下しない。ただ、コイルの内径は26 mmと小さいので、一度に測定できるエネルギー領域が狭いのを補うため、コイルに流す電流を1分間の周期で増減させている。その増減の幅は最大電流の15%である。使用した検出器は表面障壁型Si(Au)で印加バイアスは530 Vで、その時の空乏層の厚さは1.65 mmであった。図15によると

図21 ソレノイド+Si検出器系の構成図²⁵⁾
下の図は電流300 Aのときの磁場分布である

図22 ソレノイド+Si 検出器系の検出効率²⁵⁾
最大電流300 Aと500 Aの結果を示す

この飛程は950 keVの電子線に相当する。分解能は630 keV電子に対して2.9 keVであった。図22にこの系の検出効率を示す。磁場を換えることにより100 keV以下の電子線でもよい効率で測定できる。このタイプとしては、他に超伝導電磁石を使用した例²⁶⁾もある。

3・1・3 ΔE - E カウンタテレスコープによるコンプトン抑制と内部転換電子測定

コンプトン抑制の他の方法として、大矢ら²⁷⁾の開発した方法を紹介する。 ΔE カウンタとして市販の厚さ150 μm 、表面積100 mm^2 のSi(Sb) 検出器を、200 Kに冷却して使用した。エネルギー分解能は482 keVに対して4.2 keVであった。 E カウンタとしては厚さ4 mm、表面積300 mm^2 のSi(Li) 検出器を自作し、

図23 ΔE - E カウンタテレスコープの構成図²⁷⁾

図24 ΔE - E 検出器系で測定された²⁰⁷Biのスペクトル²⁷⁾

(a): 単なる和スペクトル
(b): 新しい系で測定されたスペクトル

図25 ΔE - E 検出器系の相対検出効率²⁷⁾

液体窒素で冷却して2.6 keVのエネルギー分解能を得た。その構成は図23のようである。 γ 線は ΔE 検出器では感度が低いので ΔE と E 検出器の信号の同時計測をとるとコンプトン成分の抑制されたスペクトルが得られる。²⁰⁷Biのスペクトルの例を図24に示す。(a)の単なる和ではコンプトン成分は落ちないが、(b)の同時計測和ではきれいに落ちているのが分かる。この系の相対検出効率を図25に示す。効率のよいのは300 keV以上である。

3・1・4 β -e, β - γ 同時計測法による β 線バックグラウンドの抑制と内部転換電子測定

線源から強い β 線が放出されている環境で内部転換電子スペクトルを測定する場合、どうしてもその β 線によってS/Nの悪いデータしか得られないケースが

図26 β -e, β - γ 同時計数装置の構成図²⁸⁾ 図27 β -e, β - γ 同時計数系で測定された内部転換電子と γ 線スペクトル²⁸⁾

多い。これを改善するために開発された装置が図26に示されている²⁸⁾ (ここでは S/N のよい γ 線も測定できるようになっている)。 β 線をプラスチックシンチレータで、内部転換電子線を Si(Li) 検出器で、 γ 線を Ge(Li) 検出器で検出している。冷却 FET に結合された Si(Li) 検出器を液体窒素で 77 K に冷却して 624 keV 電子で 2.1 keV の高分解能を達成した。プラスチックシンチレータの信号と Si(Li) と Ge(Li) の信号を同時計測して図27に示したような S/N の改善されたデータを得た。 ^{124}Sb の β^- 放出核の場合で β 線のバックグラウンドを 1/20 に抑制した。

3・1・5 X線との同時計測による β 線とコンプトン成分の抑制と内部転換電子測定

内部転換電子放出過程は引き続き、その軌道電子の空孔を埋めるために X 線を放出する確率が高い。ところが、 γ 線は X 線放出を伴わない。そこで、この X 線と同時計測することにより

β 線と γ 線のコンプトン成分を抑制することができる。2 個の Si(Li) 検出器の 1 個で X 線を、他方で内部転換電子を検出する。FET を冷却して 629 keV 電子線に対して 2.1 keV の高エネルギー分解能を得た。X 線検出器の分解能は 59.5 keV について 0.78 keV であった。線源を間に 2 個の Si(Li) 検出器をできるだけ接近させて配置し立体角を大きくとる。この系で測定した ^{124}Sb のスペクトルを図28に示す²⁹⁾。KX 線でゲートをしているため K-内部転換電子のピークしか観測されていない。 β 線とコンプトンの抑制ファクタは 1/80 であった。

3・1・6 β 線スペクトロメータ + Si(Li) 検出器系の自然計数率の抑制法

スペクトロメータで分析された β 線を計数する計数管として Si 検出器を使用する場合、 γ 線がないので S/N のよいデータを得られるが、入射した β 線の一部は表面での後方散乱によって観測スペクトルの全エネルギー損失ピークの下の方低エネルギー領域に長い平坦なスペクトルを示す。他方、自然計数スペクトルもピークをもたず比較的平らな形を示す。したがって、 S/N のよいデータを得るためには、全エネルギー損失ピークの領域のみを計数すればよい。東京大学原子核

図28 X-e⁻同時計測スペクトル²⁹⁾

(a): シングル

(b): KX 線との同時計測スペクトル

研究所 (INS) の空芯 β 線分析器での結果³⁰⁾を紹介する。

使用した検出器は真性領域 2 mm, 直径 16 mm の Si (Li) 検出器で, エネルギー分解能は ^{207}Bi の 1 063 keV-K で 25 keV であった (室温で使用)。 ^{90}Sr の連続 β 線をスペクトロメータで分析し, 200-2 200 keV に対する Si (Li) 検出器での応答関数を測定した (図 29)。2 mm 厚さの飛程に相当する電子のエネルギーは図 15 で分かるように 1 100 keV である。このエネルギーを超えた 1 200 keV の入射電子のスペクトルから突き抜けによる成分 (ピークの下のかぶ, あるいは台形) が現れている。エネルギーが低い時は, Si 中に入射した電子のエネルギーはすべて検出器内で消費されるから全エネルギー損失のピークを示すが, エネルギーが高くなっ

図29 真性領域 2 mm の Si (Li) 検出器の応答関数³⁰⁾
横線はゲートの位置と幅を示す

て突き抜けるようになると、その分だけ低いエネルギー消費しかしないし、その未消費の割合は多重散乱によって変わるので台形のようなスペクトルを示す。しかし、その場合でも電子は軽いため散乱によってだんだんエネルギーを失ない低いエネルギーになる。すると、図14の dE/dx の曲線が示すように、低いエネルギーではエネルギー損失がますます増大し、結局全エネルギーを失なう確率が比較的高くなり、ピークも観測されるのである。

スペクトロメータのコイル電源の出力を利用して、このピークにゲートを自動的に設定できるように掃引回路を製作した。これを計数回路系のシングルチャンネル弁別器の低レベル設定に利用した（図29の横棒の場所と長さにゲートを設定した）。この系での検出効率を図30に示す。効率のよい使用領域は150–1000 keVである。それまで数カウントであった自然計数が1 cpm以下に落ちた。

図30 自動掃引回路を使って測定したSi(Li)検出器の検出効率³⁰⁾

図31に²⁰⁷Biの569.6 keV-L内部の転換電子スペクトルに対して、これまでのGM管による測定と新しい系での測定結果の比較を示す。S/Nが格段に改善されているのが分かる。

3・1・7 Si 半導体検出器のまとめ

すでに紹介したように、この検出器を使ってS/Nのよいデータ収集の方法が開発されてきた。とくに、内部転換電子測定については、 γ 線を大幅に抑制した方法がいくつも考案され、威力を発揮している。

市販の検出器としてはエネルギー分解能は5 keVのものがあるが、もっとよい分解能のものは自作してFETも冷却して得られる。そうして得た最高の分解能は ~ 2 keVである。この値は電子のエネルギーが1000 keVとしても、 β 線スペクトロメータの分解能の0.1%

図31 ²⁰⁷Biの569.6 keV-L内部転換電子スペクトル³⁰⁾

(a): GM管によるこれまでのスペクトル
(b): 新しい系で測定したスペクトル

の運動量分解能にしか相当しない。スペクトロメータの分解能0.01%には及ばない。やはり、一度に測定できる領域が大きいというメリットを生かして使用すべきであろう。とは言っても、高分解能を得るために液体窒素で冷却するというのは、それなりに煩わしいものである。そこで、室温で使える半導体検出器の開発が進められてきた。それについては、Sakai³¹⁾によるレビューがあるので詳細はそれを参照されたい。

素材としては、高いピーク/コンプトン比を与える高い原子番号(Z)で、リーク電流を低くする高いエネルギーバンドギャップのものがもっぱら調べられた。それらの中でよい分解能を得ている半導体検出器としてはGaAs, CdTe, HgI₂結晶がある。検出器の大きさは、まだ、断面が数mm×数mm、厚さが2mm以下と小さいが、60 keVの γ 線に対するエネルギー分解能は、それぞれ0.64, 1.5, 1.2 keVと報告されている(電子線についてのテストはされていない)。このうち、CdTeとHgI₂は市販されている。このレビューから8年が経過したが、未だ有力な室温半導体検出器が

出現しないというように、なかなか難しい問題があるのであろうが、いずれ開発され、電子線に対しても手軽に使える検出器が実現されることを期待したい。

また、測定エネルギー領域については、50 keV 以下になると雑音等の問題がありかなり困難であったが、最近ではSiではないが、高純度Ge検出器(200 mm²×7 mm厚さ)に、~14 MeVに加速したトリチウム線源をおよそ0.3 mmの深さにインプラントして、受けた放射線損傷をアニールすることにより補修して、トリチウムのエネルギースペクトルを1 keVまで測定したというデータもある³²⁾。もちろん、検出器は液体窒素で冷却し、エネルギー分解能として310-405 eVを得ている。このように測定領域が低エネルギーに広がると、またその応用分野も広がることが期待される。

3.2 シンチレーション検出器

この検出器はエネルギー分解能が悪いかわりに、立体角を大きくできることから、むかしから β 線のエネルギー分析によく使用されてきた。しかし、Si半導体検出器の開発により、最近ではその利用は低エネルギー β 線か、特殊な実験での利用に限られてきた傾向にある。

β 線測定によく使われるシンチレータとしてはNaI(Tl)、アントラセン、スチルベン、液体シンチレータ、プラスチックシンチレータがある。

この検出器の原理は、高速荷電粒子が物質中でエネルギーを失なうさいにその経路に沿って多数のイオン、電子、励起原子を発生させる。これらのイオンが電子と再結合するときとか、励起原子が基底状態にもどるさいに、余分なエネルギーの一部を光(シンチレーション)として放出する。この光を光電子増倍管の光電面に当て、その時発生する光電子を二次電子増倍部で増幅し、光電子の数に比例した大きさの電気的パルスとして取り出すわけである。

この検出器の利点として以下の点が挙げられる。

- (1) パルスの分解時間が数ナノ秒と非常に短く、計数率の高い場合に有効である。
- (2) 大容量の検出器ができるので検出効率が高く、かなり高エネルギーの β 線にも使える。
- (3) 実験に合った形に製作、加工でき、さらに種類に応じてその性能を換えることができるものもある。
- (4) シンチレータによっては、たとえば、スチルベン等では荷電粒子の種類によって発光波形が異なるので、これを利用して入射粒子の識別が可能である。

図32 シンチレータの入射エネルギーとパルス波高の関係³³⁾

逆に欠点としては、

- (1) 入射荷電粒子のエネルギーと出力パルス波高値との間にそれほど充分な比例関係がないものがある。とくに、低エネルギーにおいて直線からのずれが見られる(図32)。
- (2) 光電子増倍管における光電変換効率が低いいため、光電子数のゆらぎが大きくエネルギー分解能が悪い。
- (3) 光を利用しているので、検出器の入射面を光遮蔽する必要があり、このため低エネルギーの電子線の測定ができない場合がある。

なお、光を電気パルスに変換するための光電子増倍管については文献^{34), 35)}を参照されたい。

つぎに、各シンチレータについて、簡単に説明する。

3.2.1 NaI(Tl)

ヨウ化ナトリウム(NaI)は純粋なままでは蛍光効率が悪いので、これにタリウムを微量に入れて結晶にすると蛍光効率が大きくなる。この結晶がNaI(Tl)検出器である。入射荷電粒子のエネルギーと出力パルスの比例関係は1 keV-650 keVに対しては、完全に満たされている。その絶対効率はおおよそ10%である。

この結晶は吸湿潮解性があるので取扱いに注意しなければならない。蛍光減衰時間は0.25 μ sとシンチレータのなかでは長い。サイズとしては12.7 cm ϕ ×10.16 cm³の大きいものも入手できるが、自分で任意の形に加工できないのが難点である。Tl(Z=81)という原子番号の大きな元素のため、 γ 線に対しても検出効率が大きいので、 γ 線のある環境下での β 線の測定はS/Nが悪く非常に難しい。

3.2.2 有機シンチレータ(アントラセン、スチルベン)

有機シンチレータの大きな特長は無機結晶に比べ

て、蛍光減衰時間が短いということである。アントラセンは ~ 30 ns, スチルベンは3-8 nsである。構成原子がCとHであるため、 γ 線に対する感度が低いことは β 線測定にとっては有利な点である。

大きな結晶は製造が難しく、アントラセンで2.54 cm ϕ ×1.27 cm厚さ以上のものは入手が困難である。また、不純物によって蛍光効率が大きく減少する。一般に、加工性が悪く、とくに、スチルベンは脆く、熱にも弱いので取扱いに注意が必要である。

3・2・3 液体シンチレータ

結晶有機シンチレータは大型のものを造るのに適当ではない。また、適当な形に加工することも難しい。

この欠点を補うのが液体シンチレータである。p-テルフェニルのような有機シンチレータをトルエンやキシレンなどの有機溶媒にとかしたものである。第二溶質として POPOP (Pi, Di-(5-フェニル-2-オキサゾル)-ベンゼンの略号)を加えることによって発光波長を変換して、光電子増倍管の感度波長に合わせてパルス波高を大きくすることも可能である(この第二溶質をウェーブレンジシフタともいう)。有機シンチレータに比べて蛍光効率は落ちるが、減衰時間は2-3 nsとさらに短い。

ものによっては、相当引火性が強いので取扱いには注意が必要である。また、溶媒の純度が悪いとパルス波高が半減することもある。さらに、酸素が溶けていると蛍光効率が低下するので、必要に応じて窒素を通じて酸素を除く。

このシンチレータは ^3H のような低いエネルギー(^3H の β^- の最大エネルギーは18.6 keVである)の β 線測定によく使われる。それはシンチレータのなかに ^3H 線源を混入させて測定できるので、立体角が $\sim 100\%$ と高く、非常に検出効率がよい。微弱放射線の測定や、汚染のスミア検査でもよく使われている。

3・2・4 プラスチックシンチレータ

液体シンチレータの長所を活かして、しかもその欠点を除いたものがプラスチックシンチレータである。溶質を溶かした固溶体で、基幹となる物質はスチレン、ビニルトルエンなどである。安定で加工も容易である。1 m以上の大きなものもある。また、厚さ0.03 mmという薄いシート状のものもある。実験の必要に応じて自作もできる。蛍光減衰時間は3-5 nsであり、他の検出器との同時計測でよく使われる。

また、構成元素の原子番号が低いので、 γ 線の光電効果によるピークは観測されないがコンプトン成分が効率よく検出されるので、 γ 線の強い環境下での β 線

表2 各種シンチレータの比較³⁵⁾

物質	相対蛍光効率 (ϵ)	蛍光減衰時間 (τ ns)	Figure of merit (ϵ/τ)
NaI(Tl)	200	250	0.80
アントラセン	100	$\sim 30^*$	3.3
スチルベン	~ 50	$\sim 6^*$	~ 8.0
トルエン +TP +POPOP	60	2-3	20-30
ポリスチレン +TP +POPOP	40	2-4	10-20

* 早い成分の値(遅い成分は370 nsに及ぶ)

の測定には、Si検出器のような工夫が必要である。また、熱的に弱く夏期には自重で次第に変形することもある。

以上のシンチレータの比較を表2に示した。早い計数には液体シンチレータ(トルエン+TP+POPOP)とプラスチックシンチレータ(ポリスチレン+TP+POPOP)が有効である。相対蛍光効率(ϵ)を蛍光減衰時間(τ)で割ったものをfigure of meritとして比較した。

最後に、応用面で一つの例を紹介する。シンチレータで低いエネルギーの β 線を測定する場合には、光電子増倍管の雑音等が邪魔をする場合がある。その場合は図33に示すようなセッティングの同時計測法を採用すると有効である。これは、雑音は主に増倍管から発

図33 シンチレータで低エネルギー β 線をS/Nよく測定する場合の方法例

生しているが、二つの増倍管の雑音信号は同時計数しないが、 β 線の信号は同時計数するから、雑音をかなり抑制できるからである。

雑音レベルを抑制する他の方法として考えられることは、光電子増倍管を冷却して発生している熱雑音を抑制することである。こうすることによって、エネルギーの低い β 線の測定も可能になり、それによって応用範囲が広がることが期待される。

文 献

- 19) Bethe, H.A.: *Handbuch der Phys.*, **24**, 519 (1933); *Zeit. für Phys.*, **76**, 293 (1934)
- 20) Bethe, H.A. and Heitler, W.: *Proc. Roy. Soc.*, **A146**, 83 (1934)
- 21) Glendenin, L.E.: *Nucleonics*, **2**, 12 (1948)
- 22) 渡辺 鏝: *Radioisotopes*, **38**, 485 (1989)
- 23) Toriyama, T., Nishio, T., Kanbe, M. and Hisatake, K.: Proc. of the International Conf. on Future Directions in Studies of Nuclei Far from Stability, Nashville, Tennessee, September 10-13, p.97-102 (1979)
- 24) Ishii, M.: *Nucl. Instr. & Meth.*, **127**, 53 (1975)
- 25) 高木 望, 黒柳登喜太: 原子核研究, **21**, 495-508 (1976)
- 26) Anderson, V. and Christensen, C.J.: *Nucl. Instr. & Meth.*, **61**, 77 (1968)
- 27) Ohya, S., Muturo, N. and Furusawa, A.: *ibid.*, **196**, 169 (1982)
- 28) Ohya, S. Tamura, T. and Matumoto, Z. *ibid.*, **101**, 121 (1972)
- 29) Ishi, M.: *ibid.*, **93**, 271 (1971)
- 30) 藤田雄三, 川上宏金, 大矢 進: 原子核研究, **21**, 466-482 (1976)
- 31) Sakai, E.: *Nucl. Instr. & Meth.*, **196**, 121 (1982)
- 32) Hime, A. and Simpson, J.J.: *Phys. Rev.*, **39D**, 1837 (1989)
- 33) Taylor, C.J., Jentschke, W.K., Remley, M.E., Eby, F.S. and Kruger, P.G.: *ibid.*, **84**, 1034 (1951)
- 34) 窪田信三 (近角聡信等編集): “放射線”, p.237 共立出版, 東京 (1973)
- 35) 三浦 功, 菅 浩一, 俣野恒夫: “放射線計測学”, p.75, 裳華房, 東京 (1976)