

# 放射線検出器の種類と原理

村山 秀雄\*

放射線は直接目で見たり感じたりすることができないため、五感に代わる役目をするのが放射線検出器である。放射線測定器を使用上から分類すると、放射線を検出して直ちに信号を出す直接出力型と、一定時間放射線を照射した後、適当な処理をして結果を出す蓄積型とに大別できる。また、放射線のパルスに関する処理の観点から分類すれば、放射線パルスを個々に取り出すパルス型と、多数の放射線パルスによる効果を電流などの信号により出力する直流型もしくは積分型とに分類される。もとは同じ検出器を利用した測定器でも最終出力信号の状態や信号の処理法により、測定対象が大幅に異なることに注意しよう。ここでは、検出法の違いにより放射線検出器を分類することにして、これらの検出原理や特徴について簡単に説明する。



## 1 電気的な検出器

電離放射線は物質中を通ると直接あるいは間接に原子や分子を電離し、その飛跡に沿って電子と陽イオンの対を多数作る。イオン対生成の数は放射線が物質に付与するエネルギーに比例する。この現象により、物質中に電極を設けて電離電流を測定すると線量の評価が可能となる。使用する物質は気体と半導体が一般的である。

### a. 気体の電離を利用する検出器

気体中に電圧Vをかけた一対の電極を置き、同一強度の放射線照射による電離電流を測定する。電圧Vを上げていくと電離電流の変化が見られ、電極で得られる単位時間当たりのイオン対数は図1のようになる。

最初の再結合領域では電界が弱いために電子とイオンの再結合が起こり、すべてのイオン対を電極に集めることができない。飽和領域(電離箱領域)ではイオン対すべてを電極で得る。比例領域では電圧の増加により、電極に到達する前に電子が加速され、これが気体分子を電離するようになる。電界が強け

ればこの2次電子も加速され、さらに気体分子を電離し電子を増殖する。この現象を電子なだれという。総イオン対数は放射線で生じる最初のイオン対数に比例する。GM領域では総イオン対数がもはや最初のイオン対数に依存しなくなり一定になる。これを越えてさらに電圧を上げると連続放電をする放電領域となり、放射線検出器としては使用できなくなる。

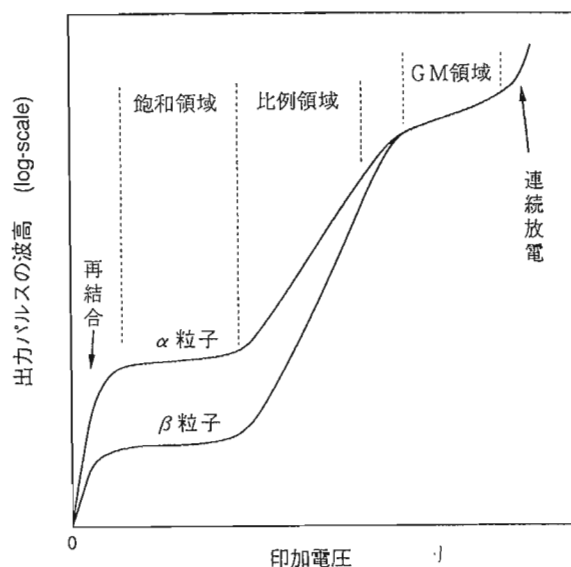


図1 気体の電離を利用した検出器の出力パルス波高—印加電圧特性

Murayama, Hideo/放医研高度診断機能研究ステーション

### i) 電離箱

電離箱は放射線照射により生じた気体中の電離を、ガス増幅が起きない程度の電界によって集め、その電気量により放射線の量を測定する検出器である。平行平板型や円筒型など種々の形状があるが、いずれの型の電離箱でも、電極間の電界の強さが十分でないと電子と陽イオンが再結合し、一部の電荷を損なう。飽和に達する電界の最小限の強さは放射線照射の強度と共に増加するので、余裕のある印加電圧に設定する。

気体には空気を使用することが一般的である。放射線による電荷をコンデンサーに蓄えるか、もしくはあらかじめ充電してあるコンデンサーで放電させるかすれば線量測定器となり、抵抗に流せば電離電流を生じ線量率の測定器となる(図2)。外部回路の静電容量と抵抗を利用して時定数を十分大きくすることにより、電離箱から得られる放射線の電離電流がほぼ一定の直流とみなせるようになる。ただし、電離電流は $10^{-14} \sim 10^{-12}$  A程度であり、この微小電流の測定には外部回路として高感度電流計を要する。電離箱はこのような電流モードの直流型で使用するが多い。

### ii) 比例計数管

比例領域で使用する気体検出器を比例計数管という。一般に陽極は強い電界を得るために細い電線を使用する。計数管の特性は気体の種類や純度に大きく依存する。P-10ガスまたはPRガス(90%アルゴン+10%メタン)が代表的な気体として利用される。気体に三フッ化ボロン( $\text{BF}_3$ )を用いた特殊な比例計数管は $\text{BF}_3$ 計数管と呼ばれており、中性子捕獲核反応型検出器である。気体を封入して使用する場合は通常端窓型や側窓型にする。測定時に管内に気体

を流入させて使用するものはガスフロー型という。これは試料を直接計数管内に挿入できるので、放射線の絶対測定や低エネルギー $\beta$ 線・ $\alpha$ 線の測定に適している。特に、半球形の $2\pi$ ガスフロー計数管と球形の $4\pi$ ガスフロー計数管がよく使用される。

主にパルス型で使用され、パルス幅が数 $\mu\text{s}$ 程度なので比較的高い計数率でも計測ができる。出力パルスは気体に付与されたエネルギーに比例するため、放射線のエネルギー分析が可能である。ガス増幅のため電離箱よりは大きいパルスを得られるが、数mV程度のためパルス増幅器が必要となる。 $\alpha$ 線と $\beta$ 線の比電離の違いにより $\alpha$ 線の方が出力パルスが大きい。このことを利用して $\alpha$ 線と $\beta$ 線の分離測定が可能である。

### iii) GM計数管

GM計数管は陽極近傍で強い電界を得るために、一般に陰極を円筒状にしてその中心軸に細い電線を張り陽極とする。GM領域では電子の増幅度は大きくなるが、比例領域と異なり電子が陽極全域に広がり管内全体で放電を起こす。このため放射線の種類やエネルギーによらず、1個の放射線に対し一定の大きさのパルスを生じる。常にパルス型で使用し、出力信号は波高選別器に通してから計数する数百mV以上の大きい出力パルスを得るため、パルス増幅器の必要がなく、簡便に取り扱うことができる。

計数管の気体は封入型には微量の有機気体などを添加したアルゴン、ネオン等の希ガスを使用し、ガスフロー型にはQガス(98%ヘリウム+2%イソフタン)がよく用いられる。放電を停止させる方法は外部回路に高抵抗をつなげる外部消去法もあるが、一般的には管内にあらかじめ混入してある有機気体などの解離により励起エネルギーを吸収させる内消去法が利用される。その計数管の寿命は $10^{10}$ 程度の計数である。解離によらないハロゲンガスを使用すればこの種の寿命は問題とならないが、化学的活性による管の劣化を起こすのが欠点である。

一旦放射線を計数したGM計数管はしばらく放射線の計数を受け付けない。この不感時間は0.1ms程度である。不感時間を経過しても出力パルスはすでに元の波高に回復しない。完全に元の波高になるまでの時間を回復時間、計数できる波高値まで到達するのに要する時間を分解時間という。このため強い放射線場ではみかけの計数率が減少し、いわゆる飽和現象を引き起こす。

GM計数管に一定の放射線を照射したまま印加

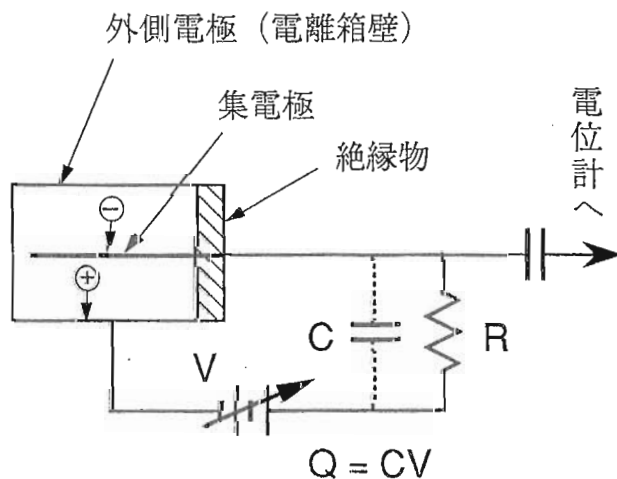


図2 電離箱の原理

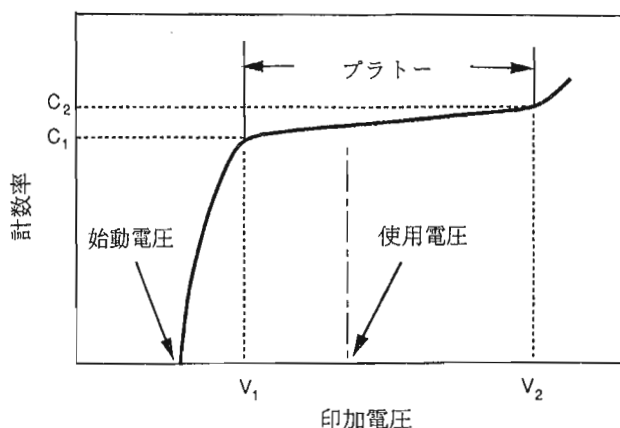


図3 GM計数管のプラトー

圧を変化させると、計数率のふるまいは図3に示したような曲線で示される。計数率がほぼ一定になる領域はプラトーと称する。プラトーの傾斜は100V当たりの計数率変化で表し、計数管の性能を示すが4%以下が良好とされる。使用電圧は高すぎると寿命を損ねるためプラトーの下端より1/3程度の所を動作電圧とする。

#### iv) その他の気体検出器

位置検出用に最近注目されている自己消滅ストリーマモードは、GM領域に相当するが気体に依存して起こる動作モードであり、GM計数管とは異なる動作をする。いわばGM領域と比例領域の両者を兼ね備えたモードであり、電子なだれの発生が局所的に制限される。GM領域のような長い不感時間を要することではなく、40ns程度の立上り時間をもつので良好なタイミング特性が得られる。マルチワイヤ位置感応型検出器にはこの動作モードが使用されている。

#### b. 固体の電離を利用する検出器

気体に比べて密度が高いので、荷電粒子の阻止能が大きい。小型で検出感度の高いのが特徴である。

##### i) 半導体検出器

半導体検出器は、気体の代りに半導体の空乏領域(空乏層)を放射線の検出部に用いたもので、個体電離箱とでもいふべき検出器である。p型とn型を接合した半導体にp型を負、n型を正とする逆バイアスがかかる。このとき接合面付近はキャリアと呼ばれる電子と正孔はそれぞれ正負の電極へ引き付けられるため、キャリアのいない空乏領域となる。この空乏領域で放射線が電離を起こすと、電子と正孔のキャリアが作られ電流が生じる(図4)。気体電離箱では放射線による気体分子の電離作用を利用するが、半

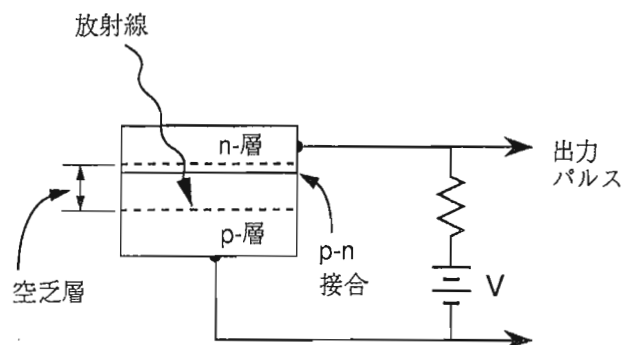


図4 PN接合型半導体検出器の原理

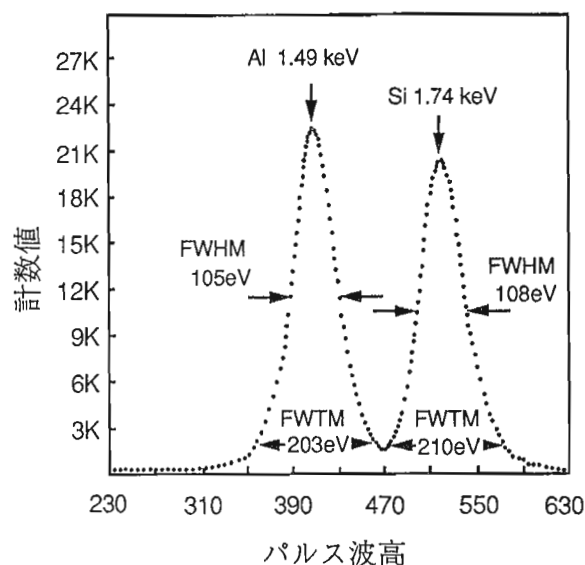


図5 ケイ酸アルミニウムの特性X線のSi(Li)半導体検出器によるパルス波高分布

導体検出器では空乏領域で励起される電子を利用している。その励起エネルギーはシリコンで3.7eV、ゲルマニウムで3.0eVと小さく、気体分子の電離に約30eVが必要であることに比べるとおよそ10倍の数のキャリアが生成できる。このため統計精度が向上し、高いエネルギー分解能を得られる(図5)。

主にシリコンとゲルマニウムが検出器に用いられている。p-n接合型、表面障壁型、Liドリフト型、高純度型などの種々の方式がある。Liドリフト型は空乏領域を大きくできるが、 $-190^{\circ}\text{C}$ 程度の液体窒素温度で検出部を冷却しなければならないのが欠点である。特に、Ge(Li)は常時冷却しておかないとLiの拡散により性能が著しく低下してしまう。高純度Geは使用時のみ冷却すればよいので、現在は高純度Ge検出器がもっぱら利用されている。検出器の出力信号を増幅するための回路が雑音源とならないように、電荷感応型の電界効果トランジスタを用いた前置増幅器が検出器の近くに置かれる。

p-n接合のSi, Geなどは、照射している間に電気伝導度が一時的に変化するので線量率の測定に用いられる。放射線損傷による永久的な電気伝導度の変化は積算線量の測定に使用される。他にCdTe, HgI<sub>2</sub>等の化合物半導体検出器がある。これらは室温で使用できるのが利点であるが、単結晶製造が難しく正孔の易動度が低いため、低エネルギーX線の検出用に一部使われているにすぎない。

## 2 光など2次的粒子放出を利用する検出器

### a. 光放出を利用する検出器

#### i) シンチレーション検出器

放射線がある種の物質に照射すると微弱な蛍光を起こす。このような物質をシンチレータ(蛍光体)という。通常シンチレーション検出器はシンチレータと光電子増倍管の光学的結合で構成されている。光電子増倍管は、微弱な蛍光を電子に変換してこれを10<sup>6</sup>倍程度増幅し、大きな電気パルスに変換する(図6)。シンチレーション検出器の利点は時間応答に優れており、入射粒子数やそのエネルギーを測定できることなどである。

主なシンチレータの特性を表1に示す。シンチレータは目的に応じてさまざまな形態で用いられる。固体シンチレータにはNaI(Tl), BGOなどの無機シンチレータとアントラセン, スチルベンなどの有機シンチレータがある。原子番号の小さいプラスチック・シンチレータなどはγ線検出よりもβ線検出に向く。α線検出にはZnS(Ag)やCsI(Tl), 中性子検出にはLiI(Eu)が利用される。NaI(Tl)は発光中心となる活性剤として少量のTlをNaIに混入させたものであり、X・γ線測定用として広く利用される。その特徴は光電ピーク領域における高い計数と良好なエネルギー分解能である。

図7はγ線検出によって生じる出力パルスの波高分布の例である。光電ピークはシンチレータ内でγ線エネルギーがすべて吸収された事象に相当する。ピーク最高値の半分の値となるピークの幅ΔEを半値幅(FWHM)といい、ピーク波高値Eとの比ΔE/Eの百分率をエネルギー分解能とする。

液体シンチレータはトルエンやキシレン等の有機溶媒に液体状の有機シンチレータを溶かして作る。溶質となるシンチレータにはパラターフェニールやPPO(ジフェニールオキサゾール)など多数存在す

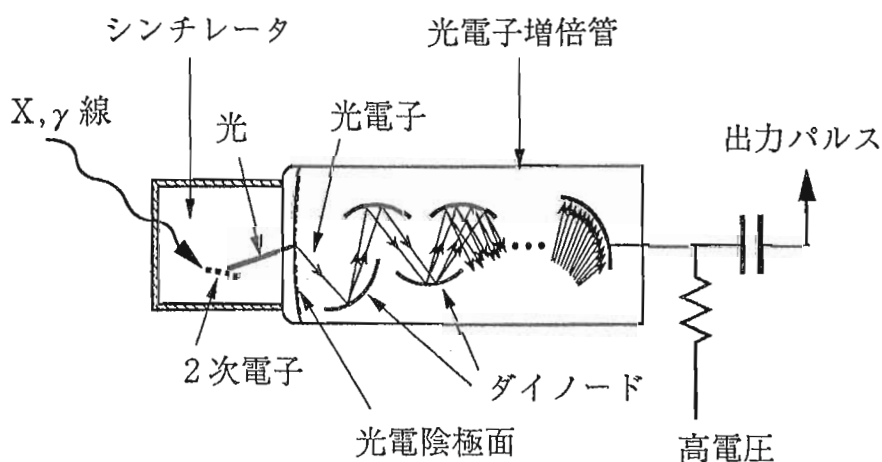


図6 シンチレーション検出器の原理

表1 代表的なシンチレータの特性

| 蛍光体   | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | スペクトル最大波長<br>(nm) | 相対波高値 | 発光減衰時間<br>(μs) |
|---|----------------------------|-------------------|-------|----------------|
| ZnS(Ag)   | 4.10                       | 450               | 270   | 10             |
| NaI(Tl)   | 3.67                       | 410               | 210   | 0.25           |
| CsI(Tl)   | 4.51                       | 565               | 95    | 1.0            |
| BGO(Be <sub>2</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> ) | 7.13                       | 480               | 30    | 0.3            |
| アントラセン  | 1.25                       | 440               | 100   | 0.032          |
| プラスチック  | 1.06                       | 350-450           | 28-48 | 0.003-0.005    |
| 液体シンチレータ  | —                          | 355-450           | 27-49 | 0.002-0.008    |

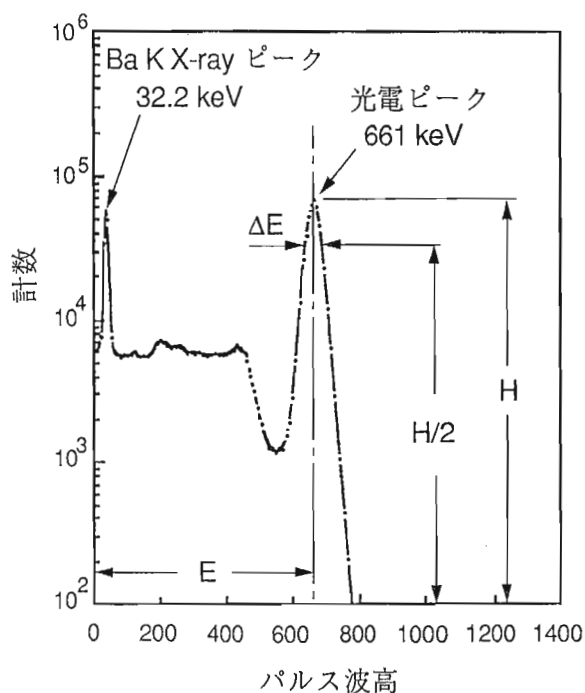


図7 放射線パルス波高分布の例(NaI(Tl)シンチレーション検出器による $^{137}\text{Cs}$ 線源の測定)

る。光電子増倍管の受光感度スペクトルに発光の波長を適合させるため、必要に応じてPOPOP等の波長シフト剤が加えられる。測定したい試料を液体シンチレータ中に均一に混ぜ合わせれば、すべての放射線が自己吸収なしに蛍光体を発光させるので、計数効率をほぼ100%にできる。 $^{14}\text{C}$ や $^3\text{H}$ (トリチウム)のような低エネルギー $\beta$ 線の検出に効果がある。

液体シンチレータを使用する上で注意を要するのは、試料の混入により発光強度が減ずる現象である。これをクエンチング(消光)という。このため測定試料ごとに蛍光効率が異なる可能性があり、内部標準線源法やチャンネル比法などを用いたクエンチング

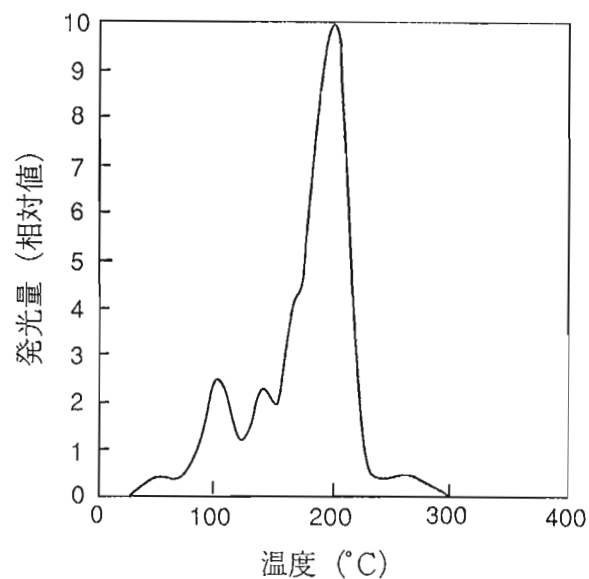


図8 LiFのグロー曲線

補正が不可欠である。

#### ii) 熱ルミネッセンス線量計

放射線を照射した物質を加熱すると、光を発生する現象を熱ルミネッセンスと呼ぶ。放射線をこのような物質に照射すると、励起された電子が捕獲中心に捕えられて、常温ではそのままの状態に保たれる。加熱により電子は捕獲中心から放出され、正孔と再結合すると可視光を出す。温度上昇とともに変化する発光量を温度の関数として表示した曲線はグロー曲線と呼ばれる。図8はLiFのグロー曲線の例である。

グロー曲線下の総光子数は線量に比例する。この原理を利用して熱ルミネッセンス素子を加熱し、光電子増倍管で光量を測定するのが熱ルミネッセンス線量計である。TLD(thermoluminescent

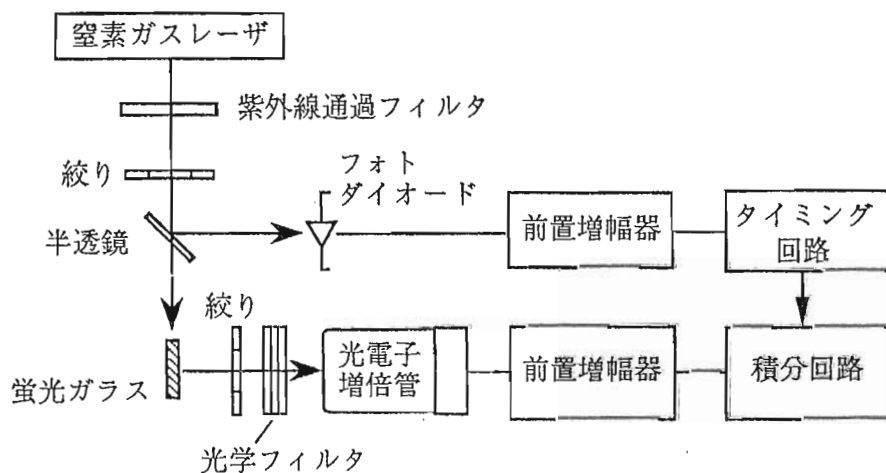


図9 蛍光ガラス線量計の蛍光測定装置

dosimeter)とも呼ばれる。LiF, CaF<sub>2</sub>, BeO, CaSO<sub>4</sub>など種々のTLD素子がさまざまな形状で使用されている。Dy, Tb, Tmなどの希土類元素やMnは活性体(アクチベータ)と呼ばれており、微量添加するとTLDの特性が向上する。粉末、結晶、ガラス封入、テフロン封入など、小型化が容易である。封入するのは、摩擦や空気中の酸素によりTLD素子が熱発光を起こす現象を回避するためである。ただし、同じ素子でも線量によってエネルギー依存性が異なるので、実際の使用にあたっては注意を要する。

一度使用したTLD素子は熱処理(アニール)により元の状態に復帰するため、繰返して使用できる。強い光を受けるとフェーディングを起こし易いことから、照射後は遮光して保管する。

### iii) 蛍光ガラス線量計

銀活性リン酸塩ガラスに放射線を照射するとガラス中に着色(蛍光)中心が生じる。このガラスに紫外線(320nm)を照射すると着色中心がだいたい色の光(約600nm)を放出するラジオフォトルミネッセンス現象を起こす。この現象を利用して蛍光量の測定により線量を評価するのが蛍光ガラス線量計である。

現在では、連続パルス発振をする窒素ガスレーザを紫外線の代わりに用いる新しいリーダーが開発されて、10 $\mu$ Sv以下の低線量の測定が可能となり、再現性が向上している。測定線量範囲が1 $\mu$ Gy~10 Gyと広い。また一度線量を読み取った後でも蛍光中心は消滅せず反復して読み取ることができるため、集積線量計に適する(図9)。

### b. チェレンコフ検出器

屈折率 $n$ の透明な物質中では光の速度が $c/n$ となる。荷電粒子が物質中を通過するとき、その速度 $v$ が光の速度 $c/n$ よりも大きい場合に光を放射する。この現象をチェレンコフ放射という。水( $n=1.34$ )の場合この現象を起こす最小エネルギーは電子線で250keV、陽子線で460MeVである。水中での高速電子による発光量は飛程1cm当たり250光子と微弱のため、光電子増倍管などの素子が必要となる。

### c. エキゾ電子放射を利用する検出器

放射線照射を受けた後に過熱や露光により線量に比例した電子を放射する物質がある。この放出電子はエキゾ電子と呼ばれる。TLD素子の大方はエキゾ電子線量計としても使用できると考えられるが、エキゾ電子放射はTLD発光と比べると周囲の影響を受け易く、大きなフェーディングが生じるため、製

品化はされていない。

## 3 飛跡による検出器

### a. 電離現象を利用する飛跡検出器

過飽和状態の気体中を荷電粒子が通過すると、その飛程に沿って生じるイオンを核にして蒸気が凝結し、飛行機雲のように飛跡を残すことができる。この原理を用いたのが霧箱である。

減圧により過熱液の状態になった液相内において、荷電粒子の飛程に沿って生じる気泡を利用して放射線の検出をするのが泡箱である。取り扱いの容易な気泡損傷型泡箱検出器(バブルディテクタ)が実用化されている。これは、透明な弾性ポリマーに低沸点の液体を微細な液滴として均一に分散させて過熱液の状態としたもので、いわば無数の小さな泡箱をポリマー内に形成している。

電極間に高電圧パルスをかけて、荷電粒子の飛程に沿って放電を起こさせる。その放電の位置により飛跡を残すことができる。この原理を用いたのが放電箱やスパーク箱である。

### b. 化学作用を利用する飛跡検出器

#### i) 原子核乾板

写真乳剤中を通過する荷電粒子の飛程に沿ってハロゲン化銀が還元され潜像を生じる。現像により飛跡に沿ってならぶ銀粒子が観察できる。これが原子核乾板の原理である。速中性子の線量測定に利用される。Kodak社のNTAフィルム(Nuclear Track film A)などが個人モニタ用に使用されている。

#### ii) 固体飛跡検出器

結晶やプラスチックなどの絶縁性固体に荷電粒子を照射すると、その飛程に沿って放射線損傷が引き起こされる。この損傷を苛性ソーダ等の試薬によりエッチング処理をして数百倍の大きさの孔(ピット)に拡大し、観察し易くする。ピットは0.1~1 $\mu$ m程度の大きさなので、光学顕微鏡で観察が可能になる。これをエッチピット法という。エッチピット法を用いた重荷電粒子検出器を固体飛跡検出器という。エネルギー損失が一定以上でないと検出されず、 $\beta$ 線や $\gamma$ 線には感じない。原子核乾板と同様に飛跡の計数が面倒となる。

検出素子としてポリカーボネート、ポリエステルCR-39などの高分子材料や、雲母などの無機固体が使用されている。飛跡検出器に一定時間放射性試料を密着するラジオグラフィ法を利用して、中性子や $\alpha$ 線の局所的な放射性濃度分布をえることができる



## 4 化学変化を利用する検出器

### a. 感光作用を利用する検出器

フィルムは感光作用を利用した検出器として、個人被曝線量の測定のためフィルムバッチに広く利用されている。線量分布の測定にもよく用いられており、特に電子線の場合に有用である。ただし、その特性は線種やエネルギーに依存し、方向依存性も強いので精密測定には使用できない。速中性子はフィルム乳剤中で生成される反跳陽子の飛跡を調べることと検出できる。

フィルムはプラスチックのベースの両面もしくは片面に乳剤が塗布されている。乳剤は20~50 $\mu$ m程度の厚さのゼラチン層にAgBrなどのハロゲン化銀の結晶粒子をゾル化して埋め込んだものである。結晶粒子は0.1~1 $\mu$ m程度の大きさで、大きい方が感度は高い。フィルム中を通過する荷電粒子によりハロゲン化銀が還元され潜像を生じる。現像の結果フィルムに残る銀粒子の黒化度を測定して線量を評価する。現像処理は通常の写真フィルムと同じで、現像、停止、定着、水洗および乾燥の工程からなる。

フィルムの潜像は、銀原子の酸化により時間が経過するに従い消滅する傾向がある。この現象はフェーディング(潜像退行)と呼ばれる。特に高温と湿気がその原因となるので注意が必要である。

### b. 着色・脱色作用を利用する検出器

プラスチックおよびガラスに大線量を照射すると着色が生じる。たとえば赤色プラスチックは電子線により黒化するが、その着色の度合により線量評価をすることができる。アクリル樹脂や三酢酸セルローズ、コバルトガラス線量計などがこの種に属する。また、種々の染料を含むフィルムに大線量を照射して、脱色の度合から線量評価を行う。

### c. 化学線量計

放射化学の起きる度合を測定して放射線の線量を評価するのが化学線量計である。よく利用されるフリッケ線量計は鉄線量計とも呼ばれる。硫酸第一鉄水溶液の $\text{Fe}^{2+}$ が放射線の照射により酸化されて、放射線の照射により $\text{Fe}^{3+}$ になることを利用した化学線量計である。304nmの紫外線をこのフリッケ線量計に当てると、イオン価の変化した量に比例して紫外線の吸収の度合が変わり、放射線の吸収線量を絶対測定できる。しかし、30Gy以上の大線量しか測定できないのが欠点である。100eVのエネルギー吸収

当たりに変化した分子数をG値と呼ぶ。例えば $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線に対するフリッケ線量計のG値は15.5である。

セリウム線量計は硫酸第二セリウムなどを放射線で還元させ、 $\text{Ce}^{4+}$ が $\text{Ce}^{3+}$ になることを利用した化学線量計である。フリッケ線量計ほどは利用されないが、G値は2.6でより大線量まで使える。

### d. ESR線量計

固体中に放射線の吸収線量に比例して安定なフリーラジカルまたは不対電子をもつ格子欠陥ができる。不対電子の量を電子スピン共鳴(ESR)法で測定するのがESR線量計である。ESR信号の測定により不対電子の量を損なうことがないため線量の読取は繰り返して行える。大線量(1~10<sup>5</sup>Gy)での測定範囲が広く、アラニンESR線量計が開発されている。多くの物質でESR信号の検出が可能のため、事故被曝評価への応用が期待される。

## 5 その他の検出器

### a. 核反応や反跳粒子を利用する検出器

中性子は電荷をもたないので物質中で直接電離・励起をおこすことはないが、核反応生成粒子や反跳粒子により2次的に電離・励起作用を引き起こす。この現象を積極的に利用してさまざまなエネルギーの中性子に対応する検出器が考案されている。

#### i) 中性子捕獲核反応型検出器

(n,  $\alpha$ ), (n, p), (n,  $\gamma$ )などの中性子捕獲核反応により生成される2次粒子を検出する。特に $^{10}\text{B}$  (n,  $\alpha$ ) $^7\text{Li}$ は熱中性子に対して選択的に起こる核反応である。BF<sub>3</sub>計数管は気体に三フッ化ボロン(BF<sub>3</sub>)を用いた比例計数管であり、この核反応により生成された $\alpha$ 粒子を検出することにより間接的に熱中性子を測定する。その出力パルスは $\gamma$ 線によるパルスより大きいので、 $\gamma$ 線に不感な熱中性子検出器としてよく利用される。速中性子を測定する場合はBF<sub>3</sub>計数管をパラフィン等の減速剤で包み、一旦速中性子を熱中性子に変換して検出する。広いエネルギー範囲(10keV~5 MeV)の中性子に対して一様な感度をもつように工夫されたロングカウンタは中性子のフルエンス率測定に使われる。

$^3\text{He}$ カウンタは $^3\text{He}$ ガスを封入した比例計数管であり、 $^3\text{He}$ (n, p) $^3\text{H}$ の核反応により熱中性子を測定する。ガス圧を10気圧程度にして使用できるため、BF<sub>3</sub>計数管より感度が高い。

#### ii) 放射化検出器

放射線が核反応を起こし易い物質と相互作用して生成される2次放射線を測定して、間接的にその誘導放射線の検出をするのが放射化検出器である。特に、中性子捕獲物質を放射線検出器に直接結合した測定系を放射化カウンタといい、中性子捕獲物質から飛び出す誘導放射線をリアルタイムで測定する。たとえばInは熱中性子により放射化され半減期51.4分の放射性核種 $^{116}\text{In}$ となるので、これから放出する $\beta$ 線もしくは $\gamma$ 線を半導体検出器やシンチレーション検出器により測定する。

核反応があるしきい値以上でなければ起こらない吸熱反応現象や共鳴現象を利用して、入射粒子の検出やそのエネルギースペクトルなどを測定できる。これをしきい検出器といい、速中性子検出器に使用される。また、核分裂計数管は、中性子による核分裂性物質の核分裂反応を検出する中性子測定器である。

### iii) 反跳粒子検出器

弾性衝突により速中性子の運動エネルギーを奪い、水素原子などの軽い原子の反跳を起こさせるパラフ

イン等の物質をラジエータという。ラジエータによる高速反跳粒子を検出することにより、速中性子の測定を行うのが反跳粒子検出器である。

### b. 発熱現象を利用する検出器

放射線が物質に吸収されて生じる温度上昇を測定して、放射線の検出を行うのが熱量計(カロリメータ)である。特に、水カロリメータが吸収線量の絶対測定用に使われるが、日常的に利用されるものではない。電離放射線の照射による温度上昇は非常に小さく、これを直接測定する直接型カロリメータの使用は強い放射線場に限定される。

### 参考文献

- 1) G. F. Knoll(木村逸郎, 坂井英次訳):「放射線計測ハンドブック」日刊工業新聞社 東京(1991)
- 2) W. J. Price(西野始, 関口晃訳):「放射線計測」コロナ社 東京(1976)
- 3) 日本アイソトープ協会編:「アイソトープ便覧改訂3版」丸善 東京(1984)

刊行図書案内

## 放医研環境セミナーシリーズ No.18 地球環境の汚染と保全

放射線医学総合研究所 監修  
小柳 卓 編

### 特別講演—1

ジャーナリストから見た地球環境問題／竹内 謙・地球環境問題の現状／不破敬一郎・温室効果の環境への影響／岡本和人・酸性雨の化学と環境への影響／一國雅巳・農薬の環境中の動態／山田忠男・放射線による環境汚染と人体への影響評価／松平寛通・最近の水質汚染問題／松崎芳夫・フロンによるオゾン層の破壊／富永 健・重金属による環境汚染／野見山一生／野見山紘子・施設従業者の被曝とそのリスク——医療被曝と職業被曝を中心に／丸山隆司・環境汚染の人為的低減方法と内部被曝線量の軽減効果の評価／内山正史・地球とヘルストランジション／松原純子。小さな生き物から見た自然／宮下 衛

●B5判並製120頁 ●定価 本体 3,884円(税別)送料365円

株式会社 実業公報社





# 緊急時の被曝医療



## 放射線モニタリング

### 個人モニタの概要

村山 秀雄\*

放射線管理用の測定器のうち、個人被ばく線量を測定するのに使用されるのが個人モニタである。種々の測定器が作業環境に応じて開発されているが、ここでは一般的に使用されている機器について概略を述べる。

ある作業計画において個人被曝線量を計算により推定する場合は、場所のモニタリングが重要な役割をする。しかし、個人被曝線量のモニタリングには、個人に線量計を着用させる方法が実証的であり原則であることに変わりはない。

#### 1 個人線量計

個人線量計として使用される測定器にはフィルム

バッジ、熱ルミネッセンス線量計(TLD)、蛍光ガラス線量計、ポケット線量計などがある。作業者の体に装着するため、測定精度や感度を優先するよりも

表1 代表的な個人線量計の特徴

| 個人線量計         | フィルムバッジ   | TLD                               | 蛍光ガラス線量計                                     | ポケット線量計                      |
|---------------|---|-----------------------------------|--|------------------------------|
| 測定期間<br>(参考例) | 長期(1ヶ月)   | 長期(1ヶ月)<br>短期(1日)                 | 長期(1ヶ月)<br>短期(1日)                            | 短期(1日以内)                     |
| 使用上の特徴        | 定期的なフィルム交換  | 素子を熱処理して繰返し使用                     | 素子の繰返し使用が長期間可能                               | 使用前にリセット操作                   |
| 線量の読取         | フィルム現像を業者委託   | 作業者でもリーダーにより読取可能だが、正確な線量評価には業者委託  | 作業者でもリーダーにより読取可能だが、正確な線量評価には業者委託             | 作業中でも読取可能。年1回は校正に出す。         |
| 測定放射線<br>(感度) | X・ $\gamma$ (中)<br>$\beta$ 線(中)<br>熱中性子(中)<br>速中性子(中) | X・ $\gamma$ (中・高)<br>$\beta$ 線(中) | X・ $\gamma$ (中・高)<br>$\beta$ 線(中)<br>熱中性子(中) | X・ $\gamma$ (中・高)<br>熱中性子(中) |

表2 蓄積型個人線量計の測定線量の範囲

| 個人線量計        | 放射線                        | エネルギー範囲       | 測定線量の範囲 (mSv) |
|--------------|----------------------------|---------------|---------------|
| フィルムバッジ      | X・ $\gamma$ 線              | 10keV-3MeV    | 0.1-8000      |
|              | $\beta$ 線                  | 0.5MeV-3MeV   | 0.2-600       |
|              | 熱中性子                       | 0.025eV-0.5eV | 0.1-2         |
|              | 速中性子                       | 0.5eV-15MeV   | 0.2-60        |
| TLD          | X・ $\gamma$ 線<br>$\beta$ 線 | 20keV-3MeV    | 0.1-1000      |
| 蛍光ガラス<br>線量計 | X・ $\gamma$ 線              | 24keV-1.25MeV | 0.01-10000    |
|              | $\beta$ 線                  | 0.15MeV-2MeV  | 0.1-10000     |
|              | 熱中性子                       | 0.025eV-0.5eV | 0.01-10000    |

小型で軽く丈夫であることが必要とされる測定器である。

個人線量計は、防護衣着用のときは防護衣の下に、背後から被曝するときは背後に装着する。個人被曝線量は短期間と比較的長期間の蓄積線量が、互いに補い合う形で測定されることが望ましい。主な個人線量計の特徴を表1に示す。その中で個人線量計のかなめとなる蓄積型の個人線量計に関する測定線量範囲を表2に示す。

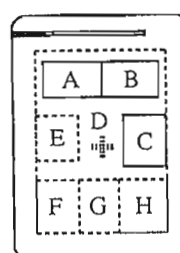
個人線量計の一般的な特性項目を挙げると、エネルギー依存性、線量直線性、方向依存性、パルス状放射線曝射特性、線量率依存性、バックグラウンド特性、フェーディング(退行)特性、指示値の再現性、指示値のばらつきなどがある。また、測定器の指示値から最終的な評価値を求めるには、各種の補正や校正作業が必要となることもある。個人線量計を選択する際は、経済性や業者のサービス、記録・保管のしやすさなども重要な判断材料である。

#### a フィルムバッジ

フィルムバッジは、3～3枚のバッジ用フィルムを検出器として、これらを数種のフィルタ付ケースに入れた個人線量計である(図1)。X・ $\gamma$ 線や中性子の線量測定が主目的であるが、 $\beta$ 線の測定も行うのが一般的である。

$\beta$ 線とX・ $\gamma$ 線の分離測定は、プラスチックフィルタによって行う。 $\beta$ 線はプラスチックの存在により減衰するが、20keV以上のX・ $\gamma$ 線では減衰を無視できる。熱中性子とX・ $\gamma$ 線の分離測定は、CdフィルタとSnフィルタの組み合わせにより行う。CdとSnは原子番号が近く、X・ $\gamma$ 線の場合は減衰の差は無視できる。しかし、熱中性子はCdで著しく吸収される。

X・ $\gamma$ 線のフィルムは1ヶ月で10%程度の退行なので余り問題はないが、中性子フィルムの場合は退



| 記号 | フィルタの材質と厚さ (mm)  |
|----|------------------|
| A  | なし (開放窓)         |
| B  | プラスチック (0.5)     |
| C  | プラスチック (1.5)     |
| D  | プラスチック (3.0)     |
| E  | Al + プラスチック      |
| F  | Cu + プラスチック      |
| G  | Sn + Pb + プラスチック |
| H  | Cd + Pb + プラスチック |

図1 フィルムバッジとフィルタの構成例

行がかなり大きく、1ヶ月以上の使用はさけるべきである。事故発生時には、使用期間の途中であってもすぐに現像に出し被曝線量を評価しなければならない。

#### b TLDと蛍光ガラス線量計

検出器の測定原理については1.A節に示してある。TLDは0.1～1000mSvの広い範囲で測定が可能であるが、エネルギー依存性が高い。そのためエネルギー補償用フィルタが使用される。小型なのでX・ $\gamma$ 線用指リング線量計や $\beta$ ・ $\gamma$ 線用指リング線量計のような局所被曝線量測定器に利用される。X・ $\gamma$ 線、 $\beta$ 線、中性子の測定にはTLDバッジを使用する。これは、フィルムバッジのように種々のフィルタを備えたバッジケースに複数のTLD素子を入れたものである。

TLDバッジの一種にアルベド線量計がある。人体に入射した速中性子の一部が、減速され後方散乱されて体外に飛び出す熱中性子をアルベド中性子という。アルベド線量計はこのアルベド中性子を検出する測定器である。熱中性子と $\gamma$ 線に感度をもつTLD素子と、熱中性子に感じないTLD素子を組み合わせ、 $\gamma$ 線の寄与を除外するのがこの線量計の特徴である。しかも熱中性子を遮へいするCdフィルタ(厚さ

0.4~1.5mm)を用いることで、熱中性子と速中性子を分離測定できる。中性子エネルギー分布はわからないが、分布自体に変化のない場合は特に有効な線量計である。

蛍光ガラス線量計もTLDと同じようにフィルタ付ケースに入れて使用する。TLDは再読取ができないのに対して、蛍光ガラス線量計は再読取できるのが利点である。測定線量範囲が広いのも大きな特徴である。フィルムバッジに比べてTLDと蛍光ガラス線量計はともに退行が非常に小さく、数ヶ月以上の使用に適する。

### c ポケット線量計

ポケット線量計は、衣服につける簡便な線量計であり、検出部と読取り部が結合しているため作業中でも直読可能である。読取り部が別に用意されているものはポケットチェンバというが、国内ではほと

んど利用されていない。

検出部の違いより電離箱式、半導体式などがある。半導体式は電離箱式より高感度である。しかし、短時間に大量線を被曝する可能性がある場合は、電離箱式のほうが数え落しが少ない。電離箱式ポケット線量計は万年筆大で、図3のような構造である。使用前に充電器を用いる。リークがあるので、1日を越える使用は避けた方がよい。半導体式の場合は電池の消耗に気をつける必要がある。

中性子測定用の半導体式ポケット線量計として100mSv/hまでの $\gamma$ 線に不感で、熱中性子から5 MeVまでの速中性子に対して0.01~99.99mSvの測定範囲をもつものが市販されている。一方、電離箱内面にホウ素が塗布してあり、ホウ素による熱中性子捕獲の結果生じる $\alpha$ 線を検出する熱中性子測定用ポケット線量計もある。これも $\gamma$ 線に対する感度を抑えて熱中性子を選択的に測定する。

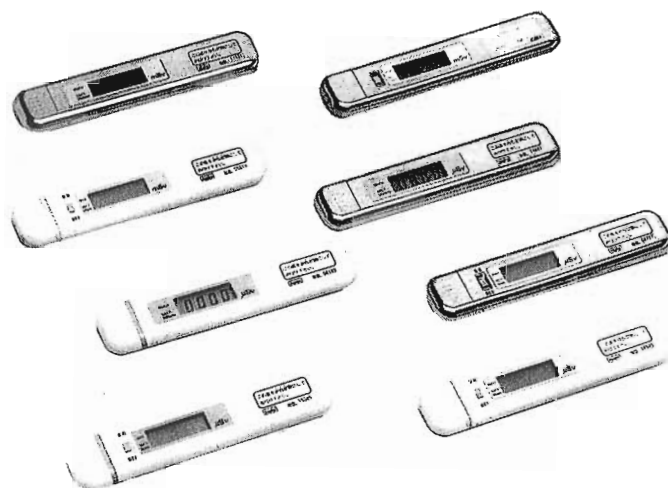


図2 半導体式ポケット線量計

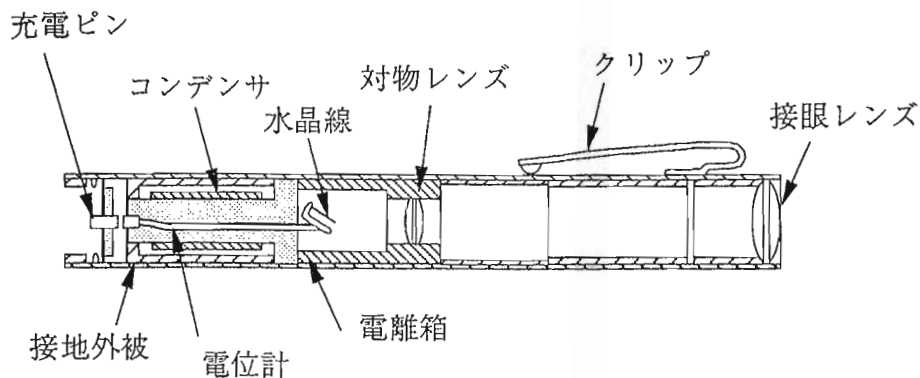


図3 電離箱式ポケット線量計

#### d アラームメータ

アラームメータ(警報付線量計)は、小型の検出器に警報(アラーム)機能を付け加えた測定器であり、一定の線量もしくは線量率のレベルを越えると、すぐさま作業者に音響や発光、震動等で警告する。検出部には電離箱やGM計数管、半導体検出器が主に利用される。半導体式アラームメータが作業中に警報を発した場合は、使用後電池を交換した方がよい。

#### e 飛跡検出器

エッチピット法を用いた検出器は、高速中性子用や低速中性子用の蓄積型個人線量計として利用される。 $\beta$ 線、 $X \cdot \gamma$ 線に影響されず、中性子のみの線量測定ができるのが特徴である。業者委託によるCR-39を使用すれば、0.17~15MeVの速中性子を中程度の感度で検出できる。一方、バブルディテクタは作業中に速中性子の線量を直読できる点が便利である。

## 2 汚染と汚染サーベイ

表面汚染の測定対象は、人体の各部位特に手足や衣服、それに床や壁の表面などである。測定法はサーベイメータによる方法、汚染の種類別に用意された専用モニタによる方法、ろ紙に付着させた汚染の放射能を測定するスミヤ法などがある。体内に摂取された汚染に対しては体外計測のみでなく、排泄物をバイオアッセイ法で分析する方法なども利用される。

スミヤ法及びバイオアッセイ法は、放射能測定用機器で汚染の評価を行うが、試料作成が必要となる。汚染検査の第一段階では、以下のような各種の汚染モニタを利用することが多い。

#### a 表面汚染モニタ

身体表面汚染検査装置としてサーベイメータやハンドフットクロズモニタなどがある。床の汚染測定には床モニタを使用する。表面汚染は、体内被曝との関連を知るために $\alpha$ 線と $\beta$ 線の測定をまず優先する。

##### i) 汚染検査用サーベイメータ

サーベイメータは一般に直読式で、作業環境の空間線量率の測定を目的とする。このうち汚染検査を目的としたサーベイメータは作業者の身近に置かれ、作業の区切りごとにすぐ汚染検査を行えることを主眼としている。

$\alpha$ 線の測定にはZnS(Ag)シンチレータ(厚さ5

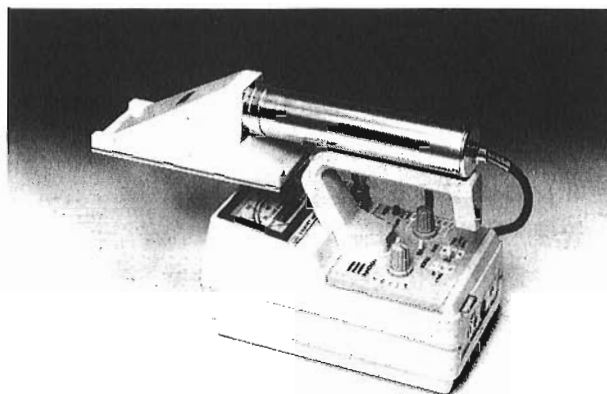


図4 汚染検査用サーベイメータ

~10mg/cm<sup>3</sup>)を使用したシンチレーション検出器がよく利用される。<sup>125</sup>Iが出す30keV程度の低エネルギー $X \cdot \gamma$ 線は通常のサーベイメータではカットオフエネルギーが高いため検出できない。このような場合は薄い検出窓をもちシンチレータ厚3mmのNaI(Tl)シンチレーション検出器を使用する。

$\gamma$ 線か $\beta$ 線か不明のときは、GM計数管のヘッドにつけたキャップをはずして計数率値が急に上がるかどうかにより大まかな判定ができる。 $\beta$ 線が混在すれば計数率が増す。広範囲の空間にわたり計数率がある場合は $\gamma$ 線か中性子であるとみなせる。

検出感度向上のためサーベイメータは測定部位に近づける。ただし、サーベイメータの先端の保護膜

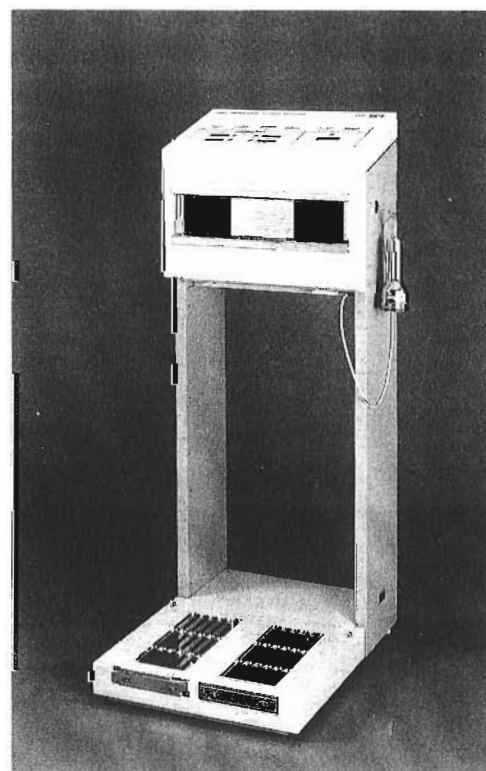


図5 ハンドフットクロズモニタ

は薄いので損傷させないように十分注意する。一般に、低い線量率レンジでは精度を保つため時定数が長く設定されており、最終指示値に達する時間が長くなる。

#### ii) ハンドフットクロスモニタ

管理区域の出入口等に設けられ、作業者の手、足、衣服などの汚染検査に使用する。作業者の入退記録管理の機能と併用したものはゲートモニタと呼ばれる。一般には複数の検出器が組み込まれており、 $\alpha$ 線用に比例計数管、 $\beta \cdot \gamma$ 線用にGM計数管を使用している。シンチレーション検出器のみを利用してその出力パルスの波形弁別により放射線を区別する方式もある。

#### iii) 床モニタ

トリチウムの $\beta$ 線最大エネルギーは18.6keVと極めて低く、通常のサーベイメータでは窓材に吸収されて検出できない。このため、 $0.15\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度の検出器窓をもつ専用のガスフロー計数管を使用した $^3\text{H}$ 床(フロア)モニタが市販されている。窓面積を大きくすることで $^3\text{H}$ 汚染に対する検出感度が高く、検出限界は約 $1\text{Bq}/\text{cm}^3$ である。小型PRガスボンベとともに移動式台車に搭載して使用する。

#### b 体内汚染モニタ

体内に取り込まれた放射性物質を測定するためのモニタとして、全身モニタ、臓器カウンタ、傷モニタなどがある。

##### i) 全身モニタ

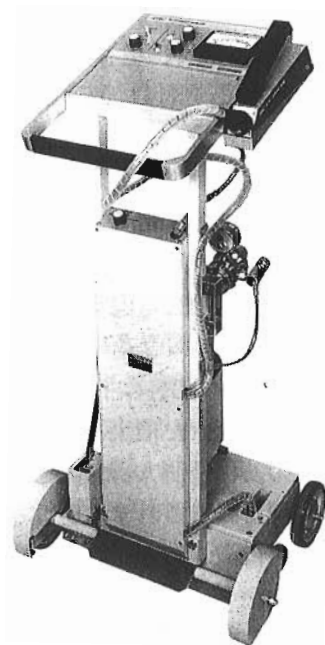


図6 床モニタ

放射性物質に関する体内吸入の有無、取込み量や分布の測定に使用する。 $\gamma$ 線放出核種の場合に有効となる。検出器はプラスチック・シンチレーション検出器式、NaI(Tl)シンチレーション検出器式、半導体検出器式などがある。体内の放射線分布を測定するために検出器を一定速度で移動するスキャン方式と、数個の検出器を配列して同時に異なる部位を測定する多検出器方式とがある。椅子型かベッド型の身体支持台を使用し、いずれもバックグラウンドを減らすために鉄や鉛の箱もしくは衝立てで遮へ



図7 全身モニタ

い体とする。モニタの検出器や遮へい体等に汚染を移さないように心がける必要がある。

核医学用に使用される全身走査型のガンマカメラを利用すれば、臓器ごとの放射能分布を絶対値で求められる。時間変化を測定することにより内部被曝線量の評価に役立つ。

## ii)臓器カウンタ

肺モニタや甲状腺モニタなどがある。肺モニタは、吸入した $^{241}\text{Am}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ などの100keV以下の低エネルギーX・ $\gamma$ 線放出核種を測定する。検出器にはガスフロー式比例計数管や薄型NaI(Tl)/Cs(Tl)ホスウィッチ式シンチレーション検出器を使用することが多い。窓材にBeを用い、肺面を覆う大きさの検出視野をもつ。甲状腺モニタは甲状腺に沈着した $^{131}\text{I}$ を測定する。

## iii)ファントム

全身モニタや臓器カウンタの校正は人体模型(ファントム)を使うのが一般的であり、ファントムの精密さが校正定数の正確度を左右する。ファントムの形状は必要とする精度の順に、直方体ブロック、人体形状直方体ブロック、人体形状ファントムの3つに大別される。ファントム用に開発された組織等価材が素材としてよく使用されている。

高エネルギー $\gamma$ 線の場合はファントム素材や形状の影響が小さい。しかし低エネルギーX・ $\gamma$ 線では、わずかの密度や形状の差が測定値に大きく影響するため、精密ファントムが不可欠である。実際の人体測定時には校正時のファントムと幾何学的位置を一致させることが重要である。

## iv)傷モニタ

傷部の汚染に関して $\alpha$ 線・ $\beta$ 線のチェックを行う。放出核種および汚染の深さや範囲を確認し、外科的処理のための有効な資料を得る。傷部位のみの放射能を測定するために、端窓型GM計数管式サーベイメータや電離箱式サーベイメータなどにコリメータ

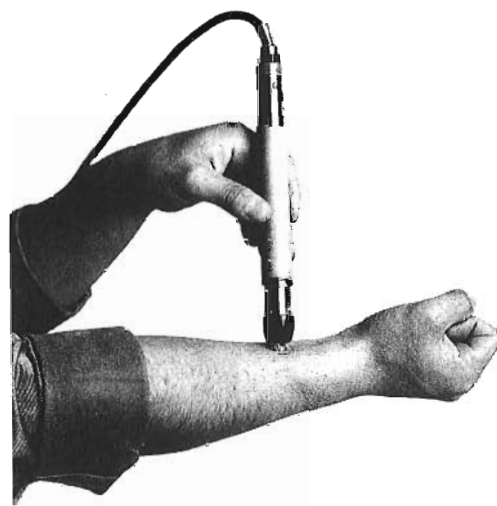


図8 傷モニタ

を装着している。放射性物質が傷口から体内に入ると、体液とともに移動することがあるので早急な測定および処置が重要である。校正は汚染核種および汚染形状を似せた標準溶液を用いて行う。

## 文献

- 1) 日本アイソトープ協会編：「外部被ばくモニタリング」丸善 東京(1986)
- 2) 中尾忠編：「放射線事故の緊急医療」ソフトサイエンス社 東京(1986)
- 3) 油井多丸：放射線防護用機器(I)個人モニタの特性と使用法 *RADIOISOTOPES*, **33**, 180-189, 1984
- 4) 中田啓：放射線防護用機器(IV)身体表面および体内放射能モニタの特性と使用法, *RADIO-ISOTOPES*, **35**, 224-233, 1986
- 5) 深田重男, 他：放射線防護用機器(XIV)放射線の測定とモニタリング, *RADIOISOTOPES*, **41**, 172-184, 1992

