

放射線を測る 線量計測と放射線検出器

■ はじめに

放射線・放射能はいまだに多くの人々から恐れられている。放射線についての知識をほとんど持ち合わせていない人の恐怖感や拒否の態度は拭い難いものがある。

医療に従事する者として一般人の誤解を解くための最低限の知識と無意味な被曝を避けるための最低限の知識は持ちたいものである。特に放射線科医は画像診断・放射線腫瘍学の専攻に関係なく主導的立場に立たなければならない。

線量測定というとアレルギーを起こす人もいるが、画像はもともと検出器（線量計）に到達した X 線量の多寡を表示したものである。したがって画像診断医は画像化した線量分布の解析を生業としていると言っていいただろう。

第 4 回では放射線を知る第 1 歩である放射線測定器について述べる。

【例題】

図 1A はガラスバッジと呼ばれる個人被曝モニタ用の線量計（蛍光ガラス線量計）である。放射線を取り扱う場所（放射線管理区域）に立ち入る医療従事者はこの線量計の携帯が義務付けられている。

ケースのおもて面には半透明の窓がある。中を開けると（開けることは禁じられている）ガラスホルダーが入っている。その内部構造を図 1B に示す。蛍光ガラス線量計は前後をプラスチック、アルミニウム、銅、およびスズのフィルタで挟まれている。

- ・どのような原理で放射線を測るのだろうか？
- ・なぜ、いくつものフィルタで挟まれているのだろうか？

【少なくともこれだけは覚えておこう!】

① 蛍光ガラス線量計 (radiophotoluminescence (RPL) glass dosimeter)

1) ラジオフォトルミネセンス現象 (RPL phenomenon)

蛍光ガラス素子として銀活性リン酸塩ガラスが使用されている。この素子に放射線を照射すると、電離された電子および正孔 (electron hole: 価電子帯の電子が不足した状態) が銀イオンに捕獲されて蛍光中心が形成される。この蛍光中心は安定で、放射線照射から時間が経過してもほとんど減少しない (図 2)。

蛍光中心が形成された素子に 320nm のレーザー光 (紫外線) を照射すると、その刺激で励起しオレンジ色に発光する RPL 現象を生じる。この RPL 発光量は入射した放射線量に比例することから線量計として利用ができる。また、蛍光中心は紫外線の刺激で消失しないため、繰り返し測定できる。

このような特徴を持つ蛍光ガラス線量計は、一カ月の被曝線量を蓄積することができるガラスバッジとして個人被曝線量の計測に広く用いられている。

2) ガラスバッジの内部構造

ガラスホルダー内のガラス素子は 2 つの異なる厚さのプラスチック、アルミニウム、銅、スズの合計 5 種類のフィルタで取り囲まれている。これらのフィルタを通過し減少した放射線量を反映する蛍光量の変化によって、 β 線と X 線・ γ 線、さらにエネルギーを識別して線量等量を算定している。

β 線は物質中での透過力が弱いので金属フィルタ下ではほとんど吸収され、プラスチックフィルタの厚さによっても透過する線量が異なる。この現象から β 線

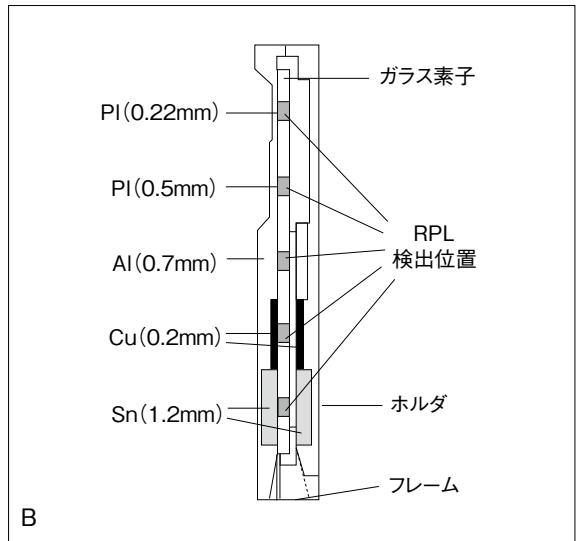
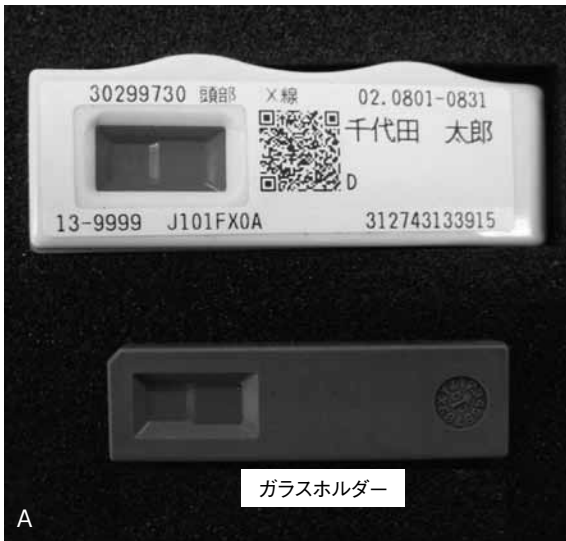


図1 ガラスバッチの外観と内部構造 (千代田テクノル社 GD-450)

A 外観 ガラスバッチと内部のガラスホルダー B ガラスホルダー内の構造 PI:プラスチック, Al:アルミニウム, Cu:銅, Sn:スズ, RPL:蛍光ガラス線量計 C 金属フィルタ (千代田テクノル社, FB News No.309, p5, 2002)

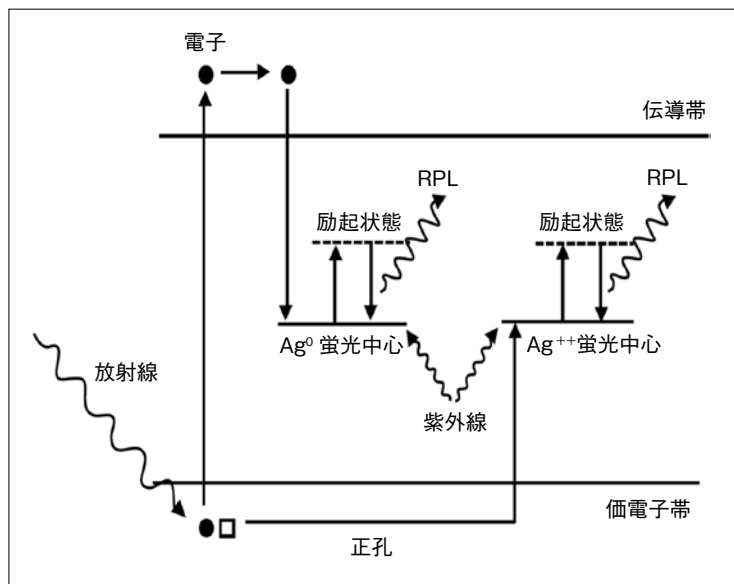
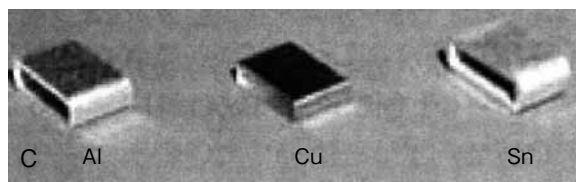


図2 ラジオフォトルミネセンス (RPL) 現象

照射により生じた電離電子および正孔が銀イオンに捕獲されて蛍光中心が形成される。これに紫外線を照射すると励起しオレンジ色に発光するRPL現象を生じる (千代田テクノル社, FB News No.309, p5, 2002)。

ご使用者名		殿	
個人コード		58403647	
集計開始年月日		自 2008年12月01日	
集計終了年月日		至 2008年12月31日	
算定日		2009年02月04日	
項目名		使用期間(mSv)×件数	
実効線量		50mSv/年 0.1	
等価線量	水晶体	150mSv/年	0.1 線量限度
	皮膚	500mSv/年	
	女子胸部表層	2mSv/妊娠期間	
測定方法		放射線測定器使用	
胸	モニタ名	ガラスバッチRS型	
	H1cm	0.1	
	H70μm	0.1	
手1 J	モニタ名	ガラスリングIP型	
	H1cm	X	
	H70μm	X	
	モニタ名		
	H1cm		
	H70μm		

図3 個人線量報告書

実効線量 (1cm 線量当量), 水晶体の等価線量 (70μm 線量当量と1cm 線量当量いずれか大きい方の値), 皮膚の等価線量 (70μm 線量当量) が記されている。

による線量を判別することができる。

一方, 数十 keV の X 線・γ 線では, プラスチックの厚さが異なっても透過線量にほとんど差はない。しかし, 金属フィルタ部分では主に光電吸収が生じるため, 単位面積当たりの質量が同じでもフィルタの原子番号によって透過線量に差が生じる。

さらに X 線, γ 線のエネルギーが高い領域では金属フィルタとの相互作用は主にコンプトン散乱であるため, フィルタの原子番号の違いでは透過線量に差は生じない。

このようにフィルタの厚さおよび原子番号と透過線量を反映する発光蛍光量の差を組み合わせると, β 線と X 線・γ 線の識別とエネルギーを分類して, 70μm 線量当量 (皮膚), 1cm 線量当量 (実効線量) が計算され, 個人の被曝線量として報告されている

表1 主な放射線検出器の検出原理と用途

種類	原理	用途
電離箱	気体の電離	線量測定 放射能測定 環境放射線の線量当量測定
比例計数管	気体の電離	α 線, β 線の放射能測定
GM 計数管	気体の電離	β 線の放射能測定
シンチレータ	発光現象	シンチカメラ 放射能測定 エネルギースペクトル測定 環境放射線の線量当量測定
半導体検出器	固体の電離	線量測定 放射能測定 エネルギースペクトル測定 個人被曝線量計
ルミネセンス線量計	紫外線, 可視光, 熱, などの刺激による発光現象	イメージングプレート 線量測定 個人被曝線量計
写真乳剤	ハロゲン化銀の化学反応	X 線写真 オートラジオグラフィ 線量分布測定

(図3)。

【ここまでできれば……】

① 放射線計測機器

放射線を計測することは診療において重要である。しかし, すべての種類の放射線に対応する検出器はない。このため, 放射線の種類の特定, エネルギー計測, 放射線の計数, そして放射線による吸収線量計測など, 目的に応じて様々な測定器が開発されている。

主な放射線計測機器である電離箱・比例計数管・GM 計数管・シンチレータ・半導体検出器・ルミネセンス線量計・写真乳剤について測定原理と用途を

表 2 ガス入り検出器に印加する電圧と出力パルス波高（収集電荷）の関係

領域	I	II	III	IV	V	VI
領域名	再結合領域	電離箱領域	比例計数領域	境界領域	GM 計数領域	連続放電領域
利用	なし	照射線量, 空気カーマの計測	放射線のエネルギー分析	なし		なし
装置	なし	電離箱	比例計数管	なし	サーバイメータ	なし
印加電圧	低	—————→				高

図 4 電離箱線量計の種類

- A 電離箱線量計の測定回路 B 平行平板形電離箱
C 円筒形電離箱 D 円筒形電離箱の検出部

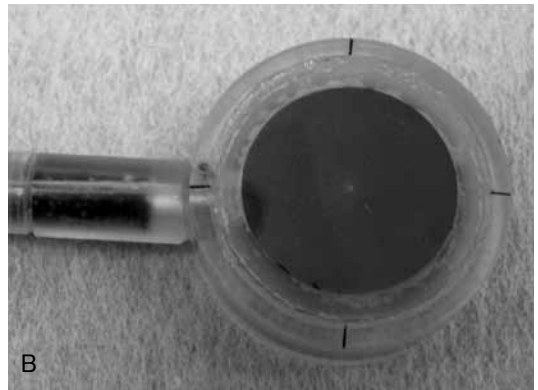
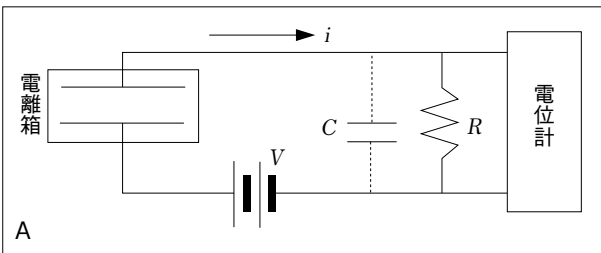


表 1 にまとめた。

② 気体の電離を利用した検出器 (ガス入り検出器)

放射線の入射によって気体中の中性の原子または分子が電離し、陰イオン（電子）と陽イオンが生成される。このイオンを、電圧を印加して電極に移動させ、その電流あるいは電荷を測定することによって放射線検出を行うのが、ガス入り検出器である。強度一定の放射線源を測定した場合の印加電圧と出力パルス波高（収集電荷）の関係は、表 2 に示したように 6 つの領域に分類されている。

・領域 I（再結合領域）：印加電圧が低いため、電離されたイオンが電極方向に移動する間に再結合し、

気体中での電離によって生じた電荷より収集電荷が小さい値となる領域。測定には利用されない。

・領域 II（電離箱領域または飽和電離領域）：入射放射線によって気体中で電離されたイオンのほとんどが電極に到達して、得られるパルス波高がほぼ一定（飽和値）となる領域。原理的に空気中での電離電荷やカーマの直接的な測定が可能であり、照射線量、空気カーマ、吸収線量などの計測に利用される。

・領域 III（比例計数領域）：入射放射線によって電離された電子が電極間の電界でさらに 2 次電離を生じさせるほど加速され多数の 2 次電離を引き起こし、増幅された出力パルス波高が得られる領域。この領域では、入射放射線による電離電荷と二次電離によって生じた電離電荷の比例関係が保たれているため、



図5 β線・γ線用 GM サーベイメータ (TGS-131, アロカ社)

放射線のエネルギー分析が可能である。

- ・領域 IV (境界領域または制限比例領域) : 放射線による電離電荷と出力パルスの直線性が失われる領域。測定には利用されない。

- ・領域 V (GM 計数領域) : 入射放射線によって電離されたイオン対数とは無関係に、ほぼ一定の出力パルス波高が得られる領域。入射放射線の種類、エネルギーに関する情報は得られないが、出力が大きく電子回路を簡単にできるためサーベイメータとして利用されることが多い。

- ・領域 VI (連続放電領域) : 一つの電離が連続放電を起こす領域。測定には利用されない。

1) 電離箱 (ionization chamber)

電離箱線量計では入射放射線によって作られた全電荷を集めることができる (図 4)。空気を電離気体として電離電荷を積算した場合は、照射線量、空気カーマ、空気の吸収線量を測定することができる。また、人体の吸収線量を計測したい場合は、体内で気体の吸収線量を測定し、気体に対する体内組織の阻止能比 (エネルギー付与の違い) を乗ずることによってその組織の吸収線量を計測することができる。

電離箱線量計は吸収線量の測定に利用されている。放射線治療装置の出力の測定には、国家標準である産業技術総合研究所の一次標準線量計に至る切れ目のない校正の経路が明らかならなければならぬ。

2) 比例計数管 (proportional counter)

比例計数領域の印加電圧で動作させる比例計数管では、入射放射線による電離電荷と二次電離によって生じた電離電荷の比例関係が保たれているため、放射線の線質、エネルギーの分析が可能である。たとえば、α線とβ線では単位距離あたりに生成されるイオン対数 (比電離) が異なるので、α線とβ線が混在している場合でも波高分析回路によってα線とβ線を分離して計数することができる。

3) GM 計数管 (Geiger-Mueller counter)

GM 計数領域では、電子が高い印加電圧で加速され電子なだれ現象を生じて、入射放射線によって電離されたイオン対数とは無関係にほぼ一定の出力パルス波高が得られる。このため、電子回路を簡単にできるサーベイメータとして利用されることが多い (図 5)。

一つのパルスが得られた直後のおよそ百 μ 秒間は、次の放射線が入射してもパルスが得られない分解時間が存在する。このため、計数率が高い場合には数え落しを補正する必要がある。

③ 発光現象を利用した検出器

放射線が物質中を通過すると、それらの原子や分子は電離・励起されるが、蛍光物質の場合は励起状態から基底状態に戻る際に余分なエネルギーを微弱な可視光として放出する。この光をシンチレーション (蛍光, scintillation), また蛍光より減衰が遅く長く光る発光を一般に燐光 (phosphorescence) と呼んでいる。この微弱な光を光電子倍增管で増幅し電気信号として検出することによって放射線を検出することができる。

1) シンチレーションカメラ (scintillation camera)

核医学で用いられるシンチレーションカメラ (シンチカメラ) は、直径 40cm 程度の丸形や 58cm×41cm 程度の角形の NaI (Tl) の結晶と多数の光電子増倍管で構成されていて、人体から放出される γ 線の 2 次元的な強度分布を画像化することができる。

³H や ¹⁴C などの低エネルギー β 線放出 RI で標識された試料のインビトロ検査では、液体シンチレーションカウンタが不可欠である。液体シンチレーションカウンタでは、PPO, butyl-PBD などの蛍光体が含まれ

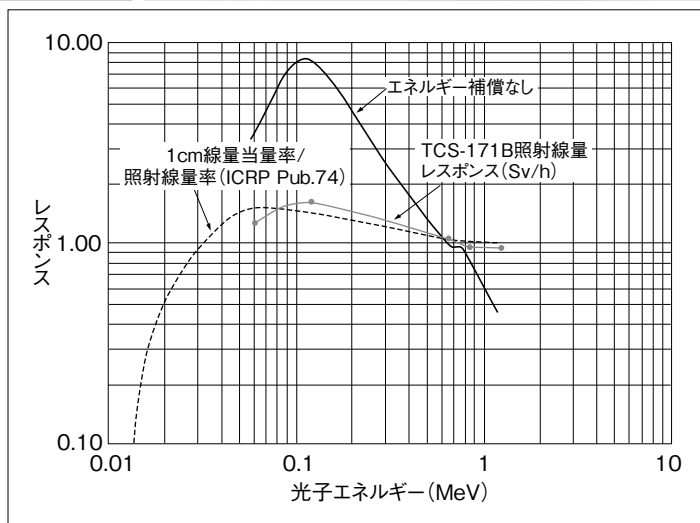
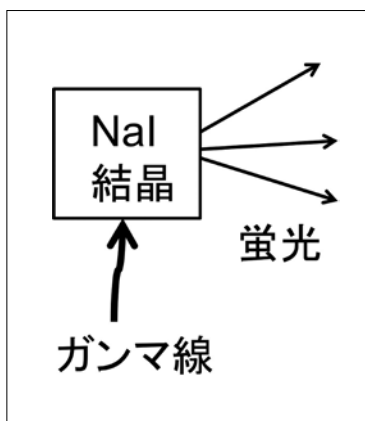


図6 シンチレーションサーベイメータ (TCS-171B, アロカ社) このサーベイメータではエネルギー補償回路によって線量当量(率)を1cm線量等量を直読できるような工夫がなされている。

たキシレン有機溶剤にRI 試料を混合して、試料中に含まれる放射能を定量する。

2) シンチレーション式サーベイメータ (scintillation survey meter)

X(γ)線の環境放射線のモニタリングにはNaI(Tl)シンチレータと光電子増倍管を組み合わせたシンチレーション式サーベイメータが使用される(図6)。シンチレーションサーベイメータのX(γ)線に対する検出効率は、電離箱式、GM計数管式に比べて高いが、エネルギー特性は劣るので線量当量(率)の測定ではエネルギー補正を行って評価する必要がある。

3) 蛍光増感紙 (intensifying screen)

X線フィルム撮影で使用された蛍光増感紙もまた発光現象を利用した放射線検出器といえる。X線フィルム撮影では、フィルムを蛍光増感紙でサンドイッチし

てX線の吸収効率を高めると同時に発光による光でフィルムを感光させ、フィルム単独での撮影に比べて大幅な被曝線量低減を実現させていた。

④ 半導体検出器 (semiconductor detector)

p型とn型の半導体を接合すると接合面を中心に空乏層(電子や正孔のほとんど存在しない領域)が形成される。放射線による電離によって空乏層で生じた電子正孔対(electron-hole pair)は、それぞれn側、p側に移動し、電気信号を生じることになる。この電気信号を利用するのが半導体検出器である。原子番号が高いこと、密度が大きいことからX(γ)線の検出効率が高い。また、電子正孔対をつくるために必要なエネルギーが小さいこと、電子正孔が容

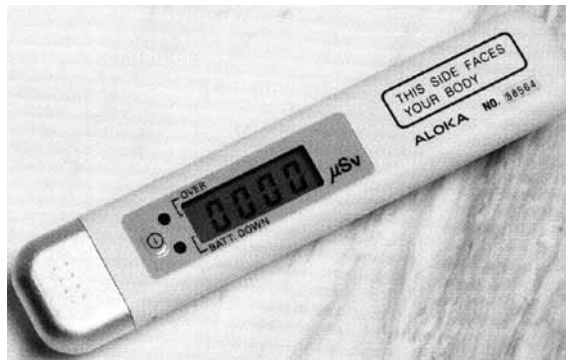


図7 電子ポケット線量計 (PDM-117, アロカ社)
X線用で、測定範囲は $1\mu\text{Sv}$ から 10mSv まで、 20keV から 200keV までのエネルギーに対応している。

易に移動できることから、優れたエネルギー分解能と時間分解能をもっている。

半導体検出器は、低い線量レベルからの測定が可能で、線量が直読でき、かつ小型の個人外部被曝モニタ用として利用されている(図7)。また、高いエネルギー分解能と時間分解能をもっていることから、エネルギースペクトルの計測器として利用されている。

5 その他の検出器

1) 熱ルミネセンス線量計 (TLD: thermoluminescent dosimeter)

蛍光ガラス線量計と同様に、熱蛍光物質では放射線照射によって蛍光中心が形成される。この蛍光中心は放射線照射から時間が経過しても準安定である。熱蛍光物質は加熱によって放射線量に比例した発光量が得られるため線量計として利用されている。ただし、蛍光ガラス線量計と違い、一度加熱すると蛍光中心はほとんど消失するため、1回の照射での読み取りは1回だけである。焼き戻し処理(アニーリング)することにより、蛍光中心はすべて消去されるため、繰り返しの利用が可能である。

形状は、粉状、押し固めたロッド状、ガラス管に封入などで小形であり、ファントム内に挿入して線量分布測定に用いられる。

2) 輝尽性発光 (PSL: photostimulated luminescence)

フッ化臭化バリウムなどの輝尽性発光体は、放射線で励起された後、発光波長よりも長い赤色レーザ光

を照射すると減衰していた発光が一時的に強くなる輝尽性発光現象を示す。

蓄積された情報に比例した発光量が得られること、従来の銀塩フィルムよりもダイナミックレンジが広いこと、空間分解能が高いこと、感度が高く少ない線量で撮像できることから、CRシステムのイメージングプレート(imaging plate: IP)に応用されている。

3) 化学反応を用いた検出器

写真乳剤中にはハロゲン化銀(AgBr , AgI など)の微結晶が分散されている。写真乳剤中を放射線が通過すると乳剤中のハロゲン化銀の結晶を電離し、潜像が形成される。この写真乳剤を現像し銀粒子を固定することによって、放射線量に応じた黒化が生じる。かつてのX線診断ではレントゲンフィルムのこのような化学反応を利用して画像化していた。

RIを投与された生体試料をフィルム上に置き撮影するオートラジオグラフィ、産業用では金属溶接部等の欠陥検査等に利用されてきたが、現在は前述のIPが利用されている。

化学反応を用いた2次元の放射線分布測定にはガフクロミック(GafChromic)フィルムが使用されることが多い。このフィルム中にはジアゾ系の物質が分散されていて、放射線によりジアゾ系物質が破壊されることによって青色色素が沈着する現象を利用している。

6 計測装置の比較

検出したい放射線の種類と測定の目的に応じて、

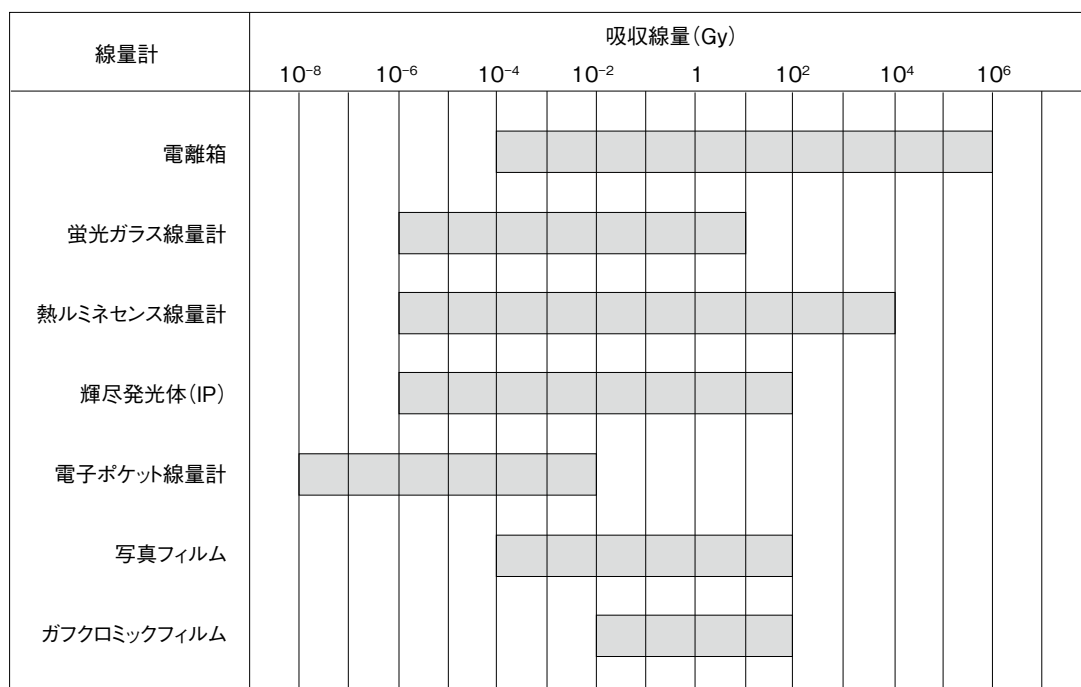


図 8 各種線量計の測定可能なおよその吸収線量の範囲

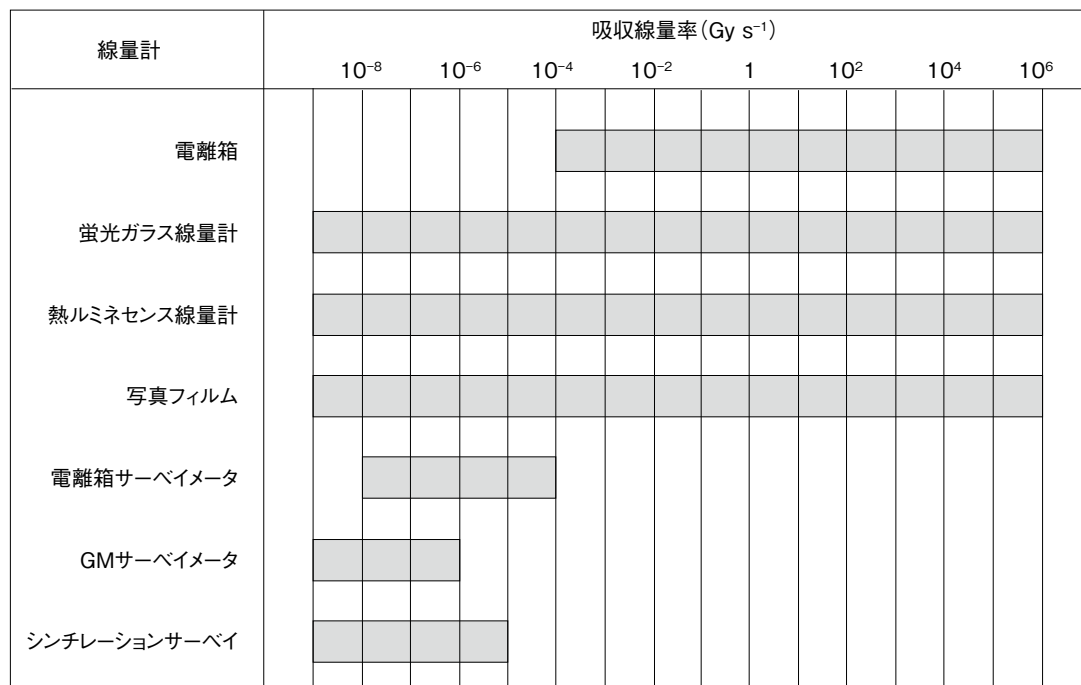


図 9 各種線量計の測定可能なおよその吸収線量率の範囲

適した放射線検出器を使用しなければならない。吸収線量を測定することを目的として、図8では測定可能な吸収線量の範囲を、また図9では検出可能な吸収線量率の範囲を線量計ごとに示した。

環境放射線のモニタとして低線量率の放射線を検出するGMおよびシンチレーションサーベイメータは、原理的に高線量率の放射線を検出することはできないので注意する必要がある。

【さらに進んで……】

① 中性子の測定

1) 中性子 neutron の種類と特徴

中性子は原子核内に陽子とともに存在するが電気的には中性である。核分裂により核外に単独で放出されると10分ほどの半減期で β 壊変し、陽子、電子およびニュートリノとなる。

中性子はエネルギー（速度）により物質との相互作用が異なるため、(高)速中性子 (fast neutron)、熱外中性子 (epithermal neutron, 0.5eV-100eV)、熱中性子 (thermal neutron, 約0.025eV) に分類される。

物質に入射した中性子は電荷をもたないため軌道電子や電子核のクーロン力に影響されず、直接に核との弾性散乱、非弾性散乱によりエネルギーを失っていき、エネルギーが小さくなると原子核に捕獲され、核反応、核分裂を起こす。

2) 測定法

中性子は電気的に中性であるため、それ自体は直接の電離作用をもっていない。したがって中性子を検出するためには、中性子と物質の衝突による反跳や核反応の過程で生じる荷電粒子を利用して間接的に中性子を検出する。

高速中性子は物質との衝突で軽い原子を反跳させるため、メタンやエチレンなど水素を多く含むガスを封入した比例計数管で検出することができる。また、BF₃を充填ガスとした比例計数管では(n, α)反応を利用して中性子の計数を行うことができる。さらに中性子による放射化の閾エネルギーのちがいを利用して、種々の箔による大ざっぱな中性子スペクトルを決定する方法がある。

■ 第4回 放射線を測る（線量計測と放射線検出器）のまとめ

【少なくともこれだけは覚えておこう】

- * 放射線管理区域に立ち入る医療従事者は個人被曝モニタ用の線量計の携帯が義務付けられており、蛍光ガラス線量計（ガラスバッジ）が用いられている
- * 蛍光ガラス素子内で放射線で電離された電子と正孔が銀イオンに捕獲されて蛍光中心が形成される
- * 蛍光中心はレーザー光を照射すると励起し、オレンジ色に発光する（RPL現象）
- * ガラスバッジ内にはガラス素子があり、5種類のフィルタで取り囲まれている
- * 吸収される放射線量がフィルタ毎に異なることから β 線とX線・ γ 線とそのエネルギーを識別できる
- * 70 μ m線量当量（皮膚）、1 cm線量当量（実効線量）が計算され、個人の被曝線量として報告されている

【ここまでできれば……】

- * すべての種類の放射線に対応する検出器はなく目的に応じて様々な測定器が開発されている
- * 主な放射線計測機器には電離箱・比例計数管・GM計数管・シンチレータ・半導体検出器・ルミネセンス線量計がある
- * ガス入り検出器は放射線の入射によって電離した陰・陽イオンを、電圧を印加して電極に移動させ電流あるいは電荷を測定し放射線検出を行う
- * ガス入り検出器には電離箱・比例計数管・GM計数管等がある
- * 電離箱線量計は照射線量、空気カーマ、空気の吸収線量が測定できる
- * 人体の吸収線量を計測する場合は、気体に対する体内組織の阻止能比を乗じて計測する
- * 放射線治療装置の出力の測定にはトレーサビリティが担保されたリファレンス線量計を用いなければならない
- * 比例計数管は放射線の線質、エネルギーの分析が可能である
- * GM計数管はサーベイメータとして利用される
- * 蛍光物質は励起状態から基底状態に戻る際に余分なエネルギーを微弱な可視光として放出する。この

光をシンチレーション（蛍光）や燐光（蛍光より長い発光）と呼ぶ

- * シンチレーションカメラは核医学で用いられ、NaIの結晶と多数の光電子増倍管で構成されている
- * X (γ) 線の環境放射線のモニタリングに用いられるシンチレーション式サーベイメータは検出効率が高いが、エネルギー特性が劣る
- * 半導体検出器は X (γ) 線の検出効率が高く、優れたエネルギー分解能と時間分解能をもち、個人外部被曝モニタ用にも利用されている
- * フッ化臭化バリウムは放射線で励起された後、赤色レーザー光照射で発光が一時的に強くなる輝尽性発光現象を示す。CR システムのイメージングプレートに応用されている
- * 放射線は写真乳剤中のハロゲン化銀の結晶を電離し、潜像を形成する。この写真乳剤を現像し銀粒子を固定する X 線撮影が行われていた

【さらに進んで……】

- * 中性子は電氣的に中性で核外に単独で放出されると 10 分ほどの半減期で β 壊変する
- * エネルギー（速度）により高速中性子、熱外中性子、熱中性子に分類される
- * 物質に入射した中性子は核との弾性散乱、非弾性散乱によりエネルギーを失い、原子核に捕獲され、核反応、核分裂を起こす
- * 中性子は電氣的に中性で、それ自体は直接の電離作用をもたないため間接的に検出する
- * 高速中性子は水素を多く含むガスを封入した比例計数管で検出する

齋藤 勉*¹、齋藤秀敏*² (*¹ 日本大学医学部放射線医学系、*² 首都大学東京健康福祉学部)

[索引用語：線量計測，放射線検出器]