

第2章 放射線測定

占部 逸正

1. はじめに

放射線利用施設や原子力施設の事故では、放射線の漏えいや放射性物質が施設内外に多量に放出される場合がある。その結果、施設内作業員や周辺住民に環境汚染による被ばくや体表面汚染あるいは体内汚染による被ばくの可能性が生じる。こうした状況下で適切な医療処置の判断を行いその具体的な方法を決定するためには、被災者の被ばく部位や被ばく線量に関する情報を迅速かつ正確に得る必要がある。被ばく医療における放射線測定は、このような施設の事故時に被災者に対する医療処置の判断や二次汚染を防止するために、体表面汚染や内部、外部放射線による被ばく線量の評価を目的として行われる。

放射線の測定は放射線と物質との相互作用を利用しているため、一般にその方法は放射線の種類や強度によって、またその目的によっても大きく異なる。したがって本来は、被ばく医療の目的のためにその特殊性を考慮した放射線測定器を使用すべきである。しかし、現状では事故時の医療処置を前提とする放射線測定器の入手が困難なことから、しばしば放射線防護用の測定器を用いて必要な情報を得ることが行われている。放射線防護用測定器は感度などの性能や取り扱いの簡便さにおいて被ばく医療の目的に十分応えるものであるが、機器の使用目的を拡張したことにより測定時の機器の取り扱いや測定結果の評価や解釈には注意が必要な場合も少なくない。

ここでは被ばく医療に必要な汚染検査や線量評価のために行われる放射線測定について、特に、サーベイメータ（携帯型簡易放射線測定器）利用の観点から、その基礎的事項と使用に際しての留意事項および線量

評価法について概説する。

2. 放射線測定器の種類と性能

放射線や放射性物質を取り扱う施設では、作業員の放射線防護などのために、随時場所を移動して放射線を測定する必要がある。このような場合に、目的とする精度が確保できるなら、取り扱いの簡便さ（小型、軽量、安定性など）を重視した放射線測定器、すなわちサーベイメータを使用することができる。現在、放射線防護のために使用されているサーベイメータの代表的なものを図1に示す。図に示すようにサーベイメータには多くの種類があり、空間放射線の測定や表面汚染の測定などの使用目的に応じて、また放射線の種類や放射線の強度に応じたものが開発されている。

空間放射線の測定は、主に γ 線（ガンマ線）や中性子線が測定の対象となり、電離箱やNaIシンチレータを使用したものなど多くの方式のものが使用されている。表面汚染の測定では α 線（アルファ線）や β 線（ベータ線）が測定対象であり、それぞれ放射線の種類によって性能や構造の異なるサーベイメータが使用されている。個人被ばく線量の測定は作業員が測定器を衣服に着用して行う必要性から、バッジ式の線量計や電子式線量計が使用されている。被ばく医療では、患者の外部被ばくや内部被ばくによる線量評価のために、電離箱サーベイメータやGMサーベイメータ、シンチレーションサーベイメータを使用する可能性が高い。また、被ばく医療に従事する医療関係者が汚染した患者に接する際の被ばく管理のために個人被ばく線量計の着用は不可欠となっている。

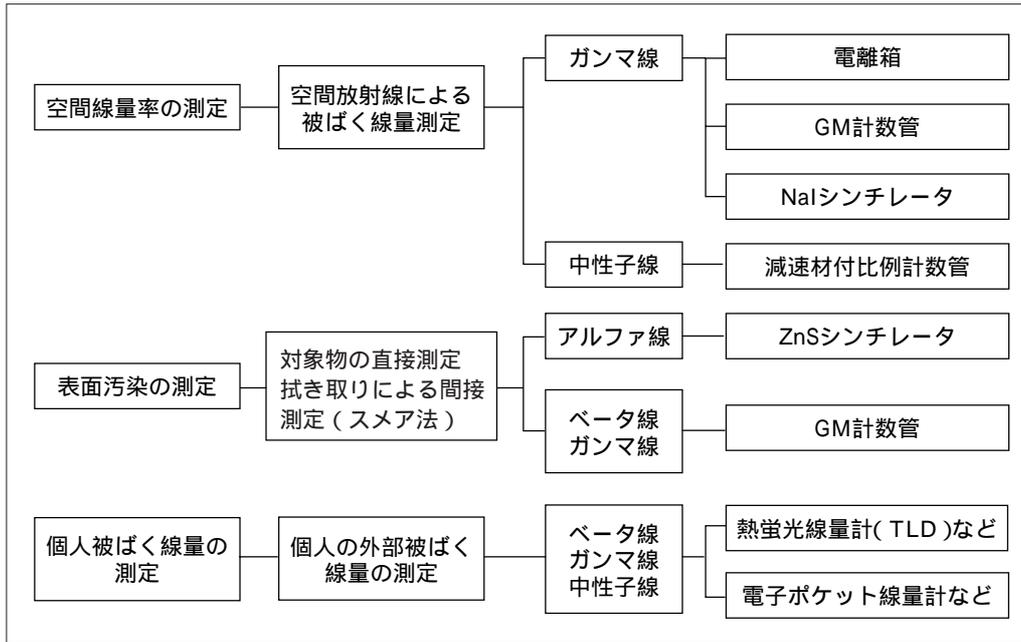


図1 サurveyメータに使用される放射線検出器

3. 放射性物質と放射線

放射線は、放射性物質あるいはX線装置や粒子加速器などによって得られる放射線や宇宙から飛来する宇宙線なども含め、数多くの種類の放射線全般を意味する。これらは大別すると粒子の流れ（電子，陽子，中性子，中間子など）と電磁波（X線，γ線など）に分けられ，さらに物質の原子を電離する能力のあるものやそうでないもの（電離放射線と非電離放射線）に分けられる。被ばく医療では放射性物質から放射されるα線，β線，γ線あるいはX線などを測定する機会が多くなるため，ここではこれらの放射性物質と放射線について基本的な事項を説明する。

1) 放射性物質

元素のなかには，同じ原子番号でも重さなどの物理的な性質の異なるものがある。原子番号（陽子数）が同じで質量数（陽子数と中性子数の和）の異なる元素を同位元素と言い，同位元素のなかで原子核が壊変して他の元素になるものを放射性元素（あるいは放射性核種）と言う。放射性物質はα壊変やβ壊変などの放射性壊変により放射線を放出する物質，言い換える

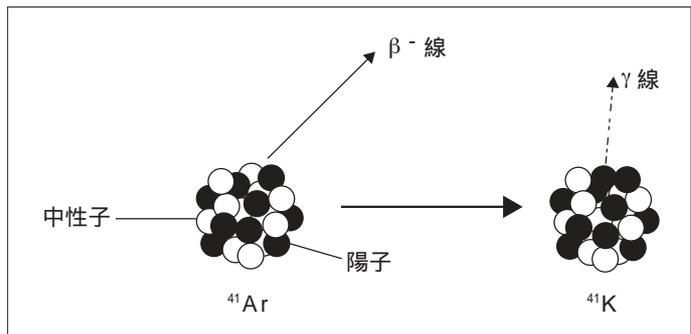


図2 アルゴン41のβ壊変
β線を放出してカリウム41になる。

なら放射性元素を含む物質を意味する。図2にアルゴン41 (^{41}Ar) がβ壊変によりβ線を放出してカリウム41 (^{41}K) になりγ線を放射する様子を示す。

単一種類の放射性元素からなる放射性物質が時間 dt に崩壊する数 dN は，現在ある原子の数を N ， λ を壊変定数とすると，

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \tag{1}$$

の関係で表される。これを N について解くと，

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) = N_0 \exp\left(-\frac{0.693}{T_{1/2}} t\right) \tag{2}$$

が得られる。ここで， N_0 は $t=0$ における原子数， $T_{1/2}$

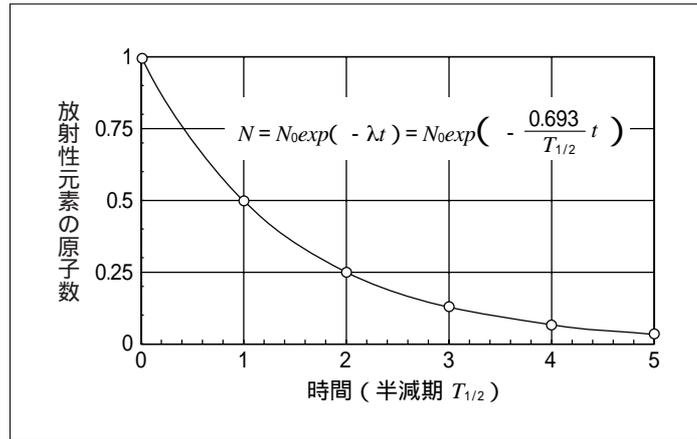


図3 放射性元素の壊変の法則

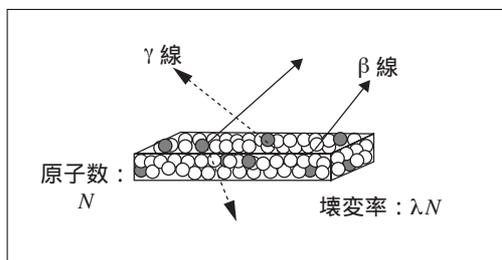


図4 放射性物質の放射能
壊変率は原子数 (N) と壊変定数 (λ) によって決まる。

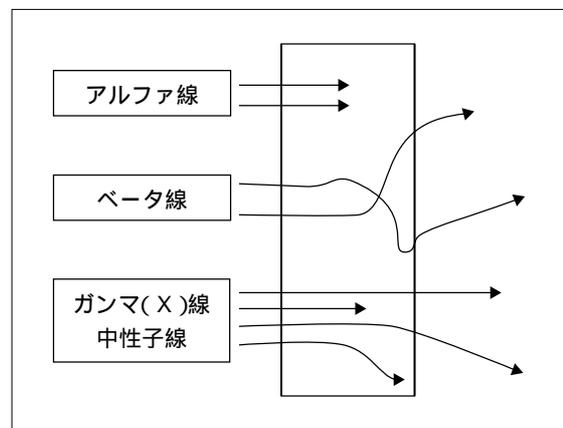


図5 放射線の種類と物質との相互作用

は原子数が半分になるまでの時間で半減期と呼んでいる。図3に示すように、原子数は時間とともに指数関数的に減衰する。放射能は(ここでは壊変率を意味する)、図4に示すように単位時間あたりの壊変数で表され、式(1)により求めることができる。放射性元素は、放射性壊変によってα線やβ線を放射し、多くの場合、引き続いてγ線を放射する。

2) 放射線

a. 線

α壊変によって放出されるヘリウム (He) の原子核である。α線のエネルギーはいくつかの決まった値を有する。例えば、ラジウム226 (^{226}Ra) は2つのα線 [4.78MeV (94%) と4.60MeV (6%)] を放射してラドン222 (^{222}Rn) になる。α線は物質中を通るとき、物質内の電子や原子核と相互作用を行うことによってエネルギーを失う。多くの場合、α線は相対的に軽い

電子との衝突(原子の励起と電離)でエネルギーを失うため、図5に示すように物質中を直線的に進むことができる。数MeV程度のα粒子は水中で数10μm、空气中で数cm程度進むことができる。

b. 線

β壊変によって放出される高速の電子である。β線のエネルギーは一定の値ではなく、連続的な値をとる。通例はβ線の最大エネルギーを指してβ線エネルギーと呼んでいる。β線(電子)は物質に入射すると原子核などによって散乱を受けるため、図5に示すように容易に進行方向が変わる。1MeV程度のエネルギーを有すると、β線(電子)は前方に空气中で数10cm~1m程度、アルミニウムで数mm程度進むことができる。β線(電子)は、鉛などの原子番号の高い物質中では制動X線と呼ばれるX線を放射する機会が増える。

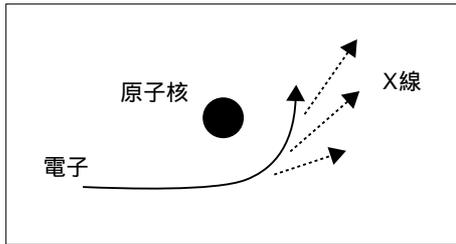


図6 制動X線
電子の進行方向が曲げられ、X線が発生する。

c. 線

放射性壊変後の原子核は、多くの場合、高いエネルギー状態（励起状態）にある。γ線は励起状態にある原子核のエネルギー状態が変化することによって放射される電磁波であり、原子核の壊変でエネルギーの異なる複数個が放射される場合もある。例えば、コバルト60 (^{60}Co) では、β壊変の後、1.17MeVと1.33MeVのγ線が放射される。γ線は物質中で光電効果^{*1}やコンプトン散乱^{*2}あるいは電子対生成の相互作用を行い、その強度は指数法則に従って減弱するが、1MeV程度のγ線は鉛を用いると数cmでほとんど止めることができる。

d. X線

電子が原子核との相互作用により減速すると、図6に示すような制動X線と呼ばれる連続エネルギー分布を有する電磁波を放射する。このX線の最高エネルギーは入射電子のエネルギーによって決まるため、非常に高いものも存在するが、原子核内で発生するγ線と

は区別して呼んでいる。また、なんらかの原因で原子のより内側の軌道電子がはじき出された場合にもX線は発生する。これは物質によって異なったエネルギーを有するため、特性X線と呼ばれて、物質の元素の組成の分析などに利用されている。

e. 中性子

原子核が中性子や他の原子核と反応すると中性子が放出される。中性子は電荷を持たない粒子で、主に構成物質の原子核と直接相互作用をする。相互作用には散乱（弾性、非弾性散乱）のほかに中性子捕獲も生じる。中性子は捕獲された場合は、引き続いてγ線が放射される。物質中ではγ線の場合と同様に指数法則に従って減弱する。中性子の遮へいは衝突の確率や1回の散乱で失うエネルギーの大きさに依存するため、水素原子を多く含む物質（例えば、パラフィンや水）が減弱に効果的とされている。

4. 放射線の量と単位

放射線の量の表現は、図7に示すように基本的にはある場所の放射線の強さ（単位時間あたりの放射線の数）を言う場合と、人や動植物を含め物質にどれだけ吸収されたか（単位質量あたりに吸収されたエネルギー）を言う場合とに大別することができる。放射線防護や被ばく医療では、放射線被ばくによる人体への影響を知ることが目的となるので、放射線の吸収された量、すなわち吸収線量を基礎とする等価線量や実効線

^{*1}光電効果：入射γ線が物質と相互作用をした場合、光子は完全に吸収され、電子が放出される場合がある。この現象を光電効果と言い、原子と最も強く結合している電子、すなわちK殻電子との相互作用で生じる確率が高い。光電効果はγ線エネルギーと物質によって発生確率が異なり、0.51MeV以下のγ線に対して、

$$\tau = kNZ^5(h\nu)^{-3.5}$$

の関係が成り立つと言われている。ここで、 k は定数、 N は単位体積の原子数、 Z は原子番号、 $h\nu$ はγ線のエネルギーである。

^{*2}コンプトン散乱：γ線のエネルギーが高くなると、γ線にとって物質中の電子は軌道電子ではなく自由な電子と見なせるようになる。このような条件下ではγ線と電子の衝突により、入射γ線は進行方向を曲げられ、エネルギーの一部を電子に与え、電子は反跳電子として弾き飛ばされる。こうしたγ線の物質中での衝突現象をコンプトン散乱と言う。コンプトン散乱の発生確率はγ線エネルギーが0.51MeV以上のとき、

$$\sigma = k \frac{NZ}{h\nu} \left(\ln \frac{2h\nu}{m_0c^2} + \frac{1}{2} \right)$$

の関係が成り立つと言われている。ここで、 k は定数、 N は単位体積の原子数、 Z は原子番号、 $h\nu$ はγ線のエネルギーである。

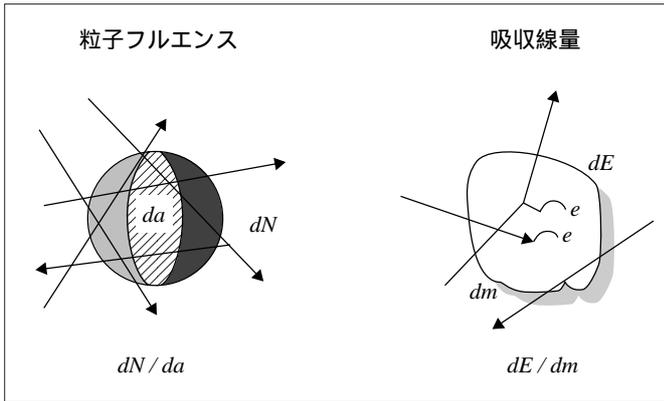


図7 粒子フルエンスと吸収線量

粒子フルエンスは単位面積を大円とする球面を通過する粒子数で放射線の強さを表し、吸収線量は単位質量あたりの物質が吸収した平均エネルギーで、物質の吸収エネルギーを表す。

量が重要になる。こうした放射線の量と単位のうちでここではサーベイメータの取り扱いに必要となる単位の最小限について、すなわちサーベイメータではしばしばμSv/hやBq/cm²あるいはcpmの単位が使用されるので、これらの単位の意味とその背景あるいは他の量との関連について説明する。

1) Sv (シーベルト)

放射線の被ばく線量を表す量として等価線量や実効線量がある。これらはいずれもSvを単位として用い、被ばく線量の比較的低い放射線防護のために使用する量として定義されている。等価線量は臓器・組織に吸収される平均の吸収エネルギー(平均吸収エネルギー)に、放射線による人への確率的影響^{*3}の現れ方の違い(放射線荷重係数)を考慮した量である。実効線量は、被ばくの形態(外部被ばくと内部被ばく)によらず、臓器・組織の等価線量にさらに人体の臓器や組織の発がんの確率の違い(組織・臓器荷重係数)を考慮した量で、発がんなどの確率的影響を防護するために使用する量である。

実効線量 H_E は組織・臓器の平均吸収線量 $D_{T,R}$ 、等価

表1 防護量と測定量の関係

評価すべき量	測定量の名称	特別名称
実効線量	1cm線量当量	} Sv
等価線量 眼	3mm線量当量	
皮膚	70μm線量当量	

線量 H_T と以下の関係にある。

$$H_E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (3)$$

ここで、Tは組織・臓器を表し、 w_T は組織・臓器荷重係数を表し、Rは放射線の種類、 w_R は放射線荷重係数を表している。これらの係数は人の発がんや動物の遺伝的影響に基づいて国際放射線防護委員会が基準となる値を与えている¹⁾。

吸収線量を基礎とする等価線量と実効線量は放射線防護の基準を示すには便利であるが、測定することの困難な量である。したがって、放射線防護ではこれらの量を近似できる測定可能な量を別に定義して測定の目的に使用している。表1に、法令で用いられている防護量と測定量^{*4}の関係を示す。以後の説明では煩雑さを避けるため、1cm線量当量や70μm線量当量の測定結果でもこれらを実効線量や等価線量と呼んで使用している。

2) cpm (counts/minute)

放射線の測定法は、放射線によって得られる不連続な信号を平均して表示する場合(電流モード)と個々の信号を別々に計数して表示する場合(パルスモード)に分けられる。GMサーベイメータやシンチレーションサーベイメータは個々の信号を計数する後者の方式により測定を行っている。したがって、これらのサーベイメータの表示には単位時間あたりに放射線測定器が計数した放射線の個数が示される。単位時間あ

^{*3} 確定的影響と確率的影響：放射線影響の放射線防護上の分類。確定的影響は生殖腺の一時的不妊や皮膚や眼の水晶体などに現れる影響で、しきい値以上で重篤度が線量とともに増加する影響を言う。確率的影響は発がんや遺伝的影響のように発生確率が線量とともに増加し、しきい値がないと仮定されている影響を言う。

^{*4} 測定量：表1に示すように実効線量は1センチメートル(1cm)線量当量が、眼と皮膚の等価線量は3ミリメートル(3mm)と線量当量と70マイクロメートル(70μm)線量当量がそれぞれ対応する測定量とされている。電離箱サーベイメータなどに表示されたSv/hの単位は1cm線量当量の測定値であるが、これは防護量である実効線量の測定を意味するものである。

表2 接頭語とその意味

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁵	ペタ (peta)	P
10 ¹²	テラ (tera)	T
10 ⁹	ギガ (giga)	G
10 ⁶	メガ (mega)	M
10 ³	キロ (kilo)	k
10 ⁻³	ミリ (milli)	m
10 ⁻⁶	マイクロ (micro)	μ
10 ⁻⁹	ナノ (nano)	n
10 ⁻¹²	ピコ (pico)	p
10 ⁻¹⁵	フェムト (femto)	f

表3 原子力発電所の事故時に放出される放射能の例²⁾

核分裂生成物	燃料溶融時の放出割合 (%)	被ばくの形態
⁸⁵ Kr, ⁸⁸ Kr	100	外部被ばく 内部被ばく (甲状腺), 外部被ばく 内部被ばく (全身), 外部被ばく 内部被ばく (骨), 外部被ばく
¹³³ Xe	100	
¹³¹ I, ¹³³ I	25	
¹³⁷ Cs	15	
¹³² Te	15	

たりの計数の表示には、1分間の計数を意味するcpm (counts per minute) が、また場合によっては1秒間の計数を意味するcps (counts per second) の単位が使用される。

cpmなどの単位は放射線測定器によって計数された放射線の数を示すが、一般的には検出器外の放射能や検出部に入射した放射線の数とは異なる。この入射放射線に対する計数された信号の比を検出効率と呼んでいるが、これは放射線の種類やエネルギー、さらには検出器の構造などに依存する。例えば、表面汚染検査にしばしば用いられるGMサーベイメータでは、通常γ線に対しては数%、β線に対しては数10%~100%に近い効率を有している。こうしたことから、cpmで表示されたサーベイメータではcpmから空間の線量率や表面汚染の放射能への換算が必要になる。これらの換算係数は本来個々のサーベイメータに与えられるものであるが、同一の機種であればそのバラツキは小さく、ある程度の誤差を許容すれば共通の換算係数を使用することができる。

3) Bq (ベクレル)

Bqは放射能の単位で、単位時間あたりの原子核の崩壊数を表す。放射能は式で与えたように放射性物質の量と崩壊の確率によって決まる。μBq/cm²は、単位平面(1cm²)あたりの放射能(Bq)を表し、表面汚染の程度(表面汚染密度)を表す場合に使用する。μはマイクロと呼び10⁻⁶を意味する接頭語である。接頭語とその意味の代表的なものを表2に示す。表の接頭語ではμ(マイクロ)のほかM(メガ), k(キロ),

m(ミリ)などは特に有名である。GMサーベイメータで表面汚染を測定する際には、事前に強度のよくわかった線源を使用して、計数率であるcpmと表面汚染密度であるμBq/cm²の関連づけを行っておく必要がある。こうした関連づけのことを、線源校正と呼んでいる。

5. 被ばくの形態と測定法

放射線被ばく事故は、外部環境からの放射線による被ばくと体表面汚染による被ばく、あるいは体内汚染による被ばくに大別することができる。被ばくの原因となった放射線源が周りの環境にあった場合、遮へいをしたり汚染場所から移動することでそれ以上の被ばくを防止することができる。この場合には、被ばく線量を知るために空間放射線の強さを知る必要がある。体表面に付着した放射性物質は、除染や線量評価のためにその汚染の程度を知る必要がある。また、体内に取り込まれた放射性物質はその後の処置を検討するために体内に残留する放射能を知る必要がある。

放射線被ばくを伴う事故は原子力施設のみならずX線や放射性同位元素使用施設でも生じる可能性があり、被ばくの様態は施設の種類によってまた同じ種類の施設であっても事故の程度によって大きく異なる。一例として、原子力発電所の事故時に放出される放射性核種の種類と被ばくの形態を表3に示す。この場合は、被ばくの形態として内部被ばくと外部被ばくの両方が考えられ、外部被ばくの評価では電離箱サーベイメータなどを用いた空間放射線の測定やGMサーベイ

表4 空間放射線の測定に使用されるサーベイメータ

種 類	検出器	測定範囲
電離箱サーベイメータ	電離箱	1 μ Sv/h ~ 1Sv/h
GMサーベイメータ	GM計数管	0.1 μ Sv/h ~ 300 μ Sv/h
NaIサーベイメータ	NaIシンチレーション検出器	B.G. ~ 30 μ Sv/h
中性子サーベイメータ	3 He比例計数管	0.01 μ Sv/h ~ 10mSv/h



図8 電離箱サーベイメータ



図9 GMサーベイメータ

メータによる体表面汚染の測定が必要になり、また、内部被ばくの評価にはホールボディカウンタによる体外計測法や、便、尿などの排泄物を分析するバイオアッセイ法が必要になる。適切な医療処置を実施するためには、どのような事故（施設の種類や放射性核種の種類と強度など）でどのような被ばくの形態なのかの情報に基づいて適切な放射線測定法を選択することが重要である。

1) 空間放射線の測定

外部被ばくの線量評価の観点から、作業環境や汚染環境の空間放射線の測定が必要になる場合がある。こうした環境で γ 線や中性子線の測定に使用されるサーベイメータの一覧を表4に示す。

電離箱サーベイメータは、図8に示すように電離箱と読み取り装置が一体となっており、空間 γ 線により得られた微弱な電離電流を実効線量率(μ Sv/h)表示したものである。このサーベイメータは、 γ 線による実効線量率が比較的高い場所の測定に適している。このサーベイメータは、感度が γ 線のエネルギーによって変化すること(感度のエネルギー依存性)が少なく、数10keV ~ 2MeV程度のひろいエネルギー範囲の γ 線を比較的正確に測定することができる。ただし、

このサーベイメータは湿気などの影響によりメータの零点移動が起こるため使用前に零点の確認と調整が必要になる場合がある。

GMサーベイメータは、図9に示すようにGM計数管とパルス計数装置で構成され、GM計数管で検出された出力パルスの単位時間あたりの計数をメータまたはデジタル表示する構造となっている。このサーベイメータは γ 線により得られる計数率がおよそ実効線量率(μ Sv/h)に比例することから、 $\sim 300\mu$ Sv/h($\sim 10^3$ cps)程度の空間 γ 線の測定に使用することができる。このサーベイメータはバックグラウンド放射線に対しても感度を有するが、感度のエネルギー依存性が比較的大きく、測定値は200keV以上の γ 線に対して $\pm 20\%$ 程度の誤差を有している。また、このサーベイメータのGM計数管は横方向からの γ 線の入射に対して1.5倍程度の感度を有しているので、 γ 線測定時の検出器の方向に注意が必要である。

NaIシンチレーションサーベイメータは、図10に示すようにシンチレーション検出器とパルス計数装置で構成され、検出器からの出力パルスの単位時間あたりの計数をメータまたはデジタル表示する構造となっている。このサーベイメータは計数率(cpmまたはcps)と実効線量率(μ Sv/h)の2種類の表示形式のものが