講座

放射線防護用機器 (III)

サーベイメータの特性と使用法 (2)[†]

中村尚司, 森川尚威*

東京大学原子核研究所 188 東京都田無市緑町 3-2-1

*東京大学アイソトープ総合センター 113 東京都文京区弥生

Key Words: survey meter, neutron, alpha ray, tritium, carbon-14, calibration

1. ま え が き

「サーベイメータの特性と使用法(2)」では、測定対象として中性子、 α 線、エネルギーの低い β 線(^3H および ^{14}C 等の β 線)に対するサーベイメータを取りあげ、その特性と使用法および校正について順に概説する。中性子の場合にはサーベイメータの中にレムカウンタといわれる線量率計があり、その他に計数率のみを与えるサーベイメータといわれるものがあるが、それらを総称してサーベイメータとして扱った。

2. 中性子サーベイメータ

2・1 種類と検出原理

中性子の線量当量 H (単位: レムまたはシーベルト)を測定するには、中性子の線質係数が中性子のエネルギーによって変化するため、そのエネルギー分布を求めて線量当量に変換するか、またはその検出感度特性を線質係数のエネルギー変化に合わせた検出器で直接求めるかのいずれかの方法を用いなければならない。中性子は環境中において高エネルギーから熱エネルギー(0.025eV)に至るまで広いエネルギー範囲にわたって存在し、線量に寄与するので、この広範囲の中性子に対して感度を持ち、しかも中性子の存在する場所には必ず γ 線、X線も存在するので、 γ 線、X線に対しては感度の低い中性子検出器が放射線防護機器として

要求される。この2つの要求を満たし、しかも可搬型として重要な“取扱いの簡便さ”という点から、現在市販されている中性子サーベイメータはほとんどすべて減速材付き中性子検出器である。

減速型検出器は図1にその構造を示すように、ポリエチレン、パラフィン等の含水素減速材の中央に熱中性子検出器をおいて、検出器に入射する高いエネルギーの中性子をおもに水素との弾性散乱により減速させて熱中性子化したものを検出するものである。熱中性子検出器としては LiI(Eu) シンチレータ、 BF_3 カウンタ、 ^3He カウンタを用いたものが市販されているが、これらの特徴はつぎの通りである。

(1) LiI(Eu) シンチレータ—— $^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ 反応により生成された荷電粒子による発光を利用するもので、固体であり小型で高感度のものが得られる。 γ 線感度が高いのでパルス波高による弁別が必要であるが、 γ 線パルスの波高が中性子パルス波高の辺まで分布しているため、この弁別が他の2つのカウンタに比べ難しい。

(2) BF_3 カウンタ—— $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応により生成された荷電粒子による電離を利用する BF_3 ガス封入比例計数管である。ガス圧はふつう0.5気圧ぐらいと低いので他の2つと比べると中性子感度が低い、 γ 線感度も非常に低く、反応の Q 値が2.78MeVと高いので γ 線パルスと中性子パルスの波高差が大きく、 γ 線弁別も簡単で高 γ 線場での使用に耐える。

(3) ^3He カウンタ—— $^3\text{He}(n, p)\text{T}$ 反応を用いる ^3He ガス封入比例計数管で、 Q 値が764keVなので BF_3 カウンタよりは γ 線弁別がやや、やりにくい、 LiI(Eu) よりはずっとやりやすい。この3つの反応のうちでは最も熱中性子断面積が大きく、ガス圧は10気圧ぐらいまで充填しても、印加電圧が2000V以下と低いので中

[†] Equipments and Instruments for Use in Radiological Protection (III). Characteristics and Use for Survey Meters (2). Takashi NAKAMURA and Naotake MORIKAWA*: Institute for Nuclear Study, The University of Tokyo, 2-1, Midori-cho 3-chome, Tanashi-shi, Tokyo 188, * Radioisotope Centre, The University of Tokyo, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113.

図 1 減速型検出器の構造図

性子感度が高くできる。

この他に熱中性子検出器として熱ルミネセンス線量計(^6LiF , ^7LiF のペラになったもの), 固体飛跡検出器(CR 39など), 放射化検出器(金, インジウムなど)を用いたものもある。これらは感度は低い上記パルスカウンタが使用できないパルス状の中性子場, たとえばライナックなどの加速器近傍における中性子サーベイメータとして非常に有用である。しかし, いずれも市販はされていない。

減速型検出器は, 図2に示すように減速材の厚さを変えることにより, 熱エネルギーから MeV 領域に至る広いエネルギー範囲の中性子に対してその検出感度をいろいろ変化させることができる。減速材の厚さを厚くしていくほど, 高いエネルギーの中性子に対する感度が高くなっていくので, 適当な厚さの減速材を選ぶことにより, つぎのような性能をもつ検出器が作られる。

(1) 中性子検出感度曲線が ICRP Publ. 21¹⁾ に与えられるレム応答関数 ($(\text{mrem/h})/(\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}))$) に近い検出器 (レムカウンタ) を作り中性子線量を求める。減速材の厚さを変えるだけではレム応答特性によく一致する感度曲線をもつ検出器は得られないので, ふつうは減速材中に熱中性子吸収材 (ホウ素が一般に用いられる) を入れることによりそれを得ている。図1(b)にその例を示しているが, このレムカウンタの感度特性は図3にレム応答関数と比較して示されている³⁾。

(2) 一般に中性子サーベイメータとして市販されている検出器はレム応答特性を持っていないで単に計数率を与えるだけである。したがって, この場合は線源により校正するか, またはレムカウンタと相互比較するかいずれかの方法により, 測定されたカウント数

図 2 Berthold LB140 の応答関数²⁾ 図 3 Studsvik 2202D の応答関数³⁾

から線量を換算して求める。

(3) 図1(a)に示す減速材の厚さの違う何種類かの検出器を組合わせて, 図2に示すようにその感度特性の違いを利用して中性子のエネルギー分布を求め, それからレム応答関数を用いて線量を得る。これは一般にボナーカウンタといわれ, 情報量が多く得られる。それだけに精度も他の検出器よりも高いが, 一つの場所の線量を得るのに数回 (ふつう 4~5 回) の測定が必要なので管理用には不向きである。

2・2 使用法と使用上の注意事項

これらの減速型中性子サーベイメータ、とくに市販品は取扱いがきわめて簡便であり、電源スイッチを入れさえすればただちに中性子を検出して、計数値(cps, cpm)または線量値(mrem/h)が直読できる。それだけに安易に使用されることが多いので取扱いにさいして注意すべき点をここに列挙しておきたい。

(1) レムカウンタの検出感度曲線はレム応答関数とできるだけ一致するように作られているが、最もよく使用されている市販のレムカウンタ(Studsvik 2202D)でも両者の比は図4に示したように、中性子エネルギーによって1から大きくずれ、熱中性子と10MeV 付近では約0.5と感度が低く、1~10keV 領域では逆に約2~3の高感度となっている。したがって、中性子場のスペクトルが変化すると検出感度が変化し、レムカウンタの計数値から線量値に変換する線量換算係数も変化する。例として、Studsvik 2202D の場合、図5に示す代表的な中性子スペクトル場に対して図4の感度曲線に基づいて著者らの求めた換算値⁴⁾が、メーカーの推奨値³⁾とともに表1に示されている。レムカウンタによる線量値は、メーカーの推奨換算値を用いて計数率から線量率に変換してメータに直接表示されるので、中性子スペクトル場が変化すると、表1から分かるようにレムカウンタの指示線量値は真の線量値(ICRP Publ. 21のレム応答関数に従うもの)からずれてきて、²⁵²Cf, ²⁴¹Am-Be などの放射性同位元素(RI)

メーカーの与える線量換算係数(cps/(mrem/h))を基準にしたときのそれからのずれを表している。
●▲△×◇：西独国立度量衡研究所(PTB)の実験値、○：東京大学原子核研究所の実験値。

図4 ICRP Publ. 21のレムレスポンスとレムカウンタの検出感度との比⁴⁾

表1 図5に示す代表的な中性子場に対するレムカウンタ(2202D)の線量換算係数⁴⁾

中性子場	線量換算係数 (cps/(mrem/h))
²⁵² Cf	3.06
²⁴¹ Am-Be	2.77
Maxwellian + 1/E + ²⁵² Cf(原子炉周辺)	4.30
Maxwellian + 1/E ²	1.67
Maxwellian(熱中性子場)	1.44
1/E + 1/E ² (加速器周辺および自然環境)	4.75
メーカーの推奨値	3.60
(最近では3.30になっている)

図5 代表的な中性子場のエネルギースペクトル⁴⁾

中性子源場では約20%過小評価、完全熱中性子場では約60%も過小評価、原子炉周辺によくみられる核分裂スペクトル+1/E減速場+熱中性子場、および加速器周辺や自然環境(宇宙中性子による)中によくみられる1/E+1/E²場では逆に約30%の過大評価を与えることが明らかである。このことからごく一般的にいって、レムカウンタにより得られる線量値は30%程度の誤差を原理的に含む。

(2) レムカウンタにも種々の形式のものがあり、その検出感度特性が互いに少しずつ異なっている。各種の中性子レムカウンタを²⁴¹Am-Be線源で校正しておいても、図6に示すようにそれと異なった場(この図ではライナックの近傍の場)で測定すると、その場所により2~3倍、最大で5倍もの値のバラツキがある⁵⁾。したがって、できるだけレム応答関数によく一致した検出感度特性をもつレムカウンタを用いることが精度よい測定には必要である。

(3) 一方、同じレムカウンタ同士においても、経時変化や使用状況により検出感度が違ったり、変化したりすることもある。図7に著者らが²⁵²Cf, ²⁴¹Am-Be 標

中性子源

0: $^{241}\text{Am-Be}$ 中性子源

1~8: リニアック近傍の中性子場

1. リニアック飛行管 2

2. リニアック飛行管 4

3. リニアック飛行管 6

4. BR2 R2管 45°

5. BR2 R2管 0°

6. BR2 R3管 0°

7. BR2 R1管

8. BR2 R2管上

中性子レムカウンタ

○A: 多減速材型

●B: 内部吸収材なし球型

△C: 内部吸収材付円筒型

□D: 内部吸収材付球型

(55mm φ カドミウム球)

×E: 内部吸収材付球型

(59mm φ カドミウム球)

比=他の検出器/A型の検出器

図6 ライナック近傍における種々のレムカウンタによる中性子線量値の違い

準中性子源を用いて行った⁴⁾ 国内7機関計9台の同型の中性子レムカウンタに対する検出感度の測定を相対値の形で例として示しておこう。図は検出器の製造番号を横軸にとっていて、全体として古い番号のものほど検出感度が低くなる傾向を示す。互いのバラツキは10~15%程度であるが、とくに使用頻度が多かったと思われる1台は30%も感度が低くなっている。時々には後に述べるようにRI中性子源(^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$)を用いて感度校正をして、使用に伴う経時変化のチェックを行う必要がある。

(4) 線量ではなく計数値のみを与えるサーベイメータの場合、校正のなされたレムカウンタと同時測定することによって、計数値から線量値への換算係数を求め、その係数を使用する方法が一般に用いられる。図

○: 電総研での実験

●: 高エネルギー研での実験

INS: 東大原子核研究所 Ser. No. 7017

KEK: 高エネルギー物理学研究所

Ser. No. 7060, 9027

YAYOI: 東大工学部原子力工学研究施設

Ser. No. 5474, 9747

ETL: 電子技術総合研究所 Ser. No. 6326

KUR: 京大原子炉実験所 Ser. No. 6494

LNS: 東北大学核物理研究施設 Ser. No. 9083

KYOTO: 京大工学部原子核工学科 Ser. No. 6061

実験は ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$ 標準中性子源を用いて行われた。

図7 同一レムカウンタ(2202D)の感度の相互比較⁴⁾

2 (減速型検出器でふつうのサーベイメータは一般にこれに属する)と図3 (レムカウンタ)の検出感度曲線が違っていることから、この換算係数の決定は測定対象の場合またはそれに近い場において行われるのが望ましい。よく $^{241}\text{Am-Be}$, ^{252}Cf などのRI線源を用いる同時測定によって換算係数を決める方法が行われるが、これらは平均エネルギーが4.5MeV($^{241}\text{Am-Be}$), 2.3MeV(^{252}Cf)と高いので、原子炉や加速器などの周辺環境で一般によくみられるkeV領域の中性子の多い場(図5参照)での線量測定にこの係数を使用すると大きな誤差を生じ、場合によっては10倍も違ってくることもあり、とくに注意が必要である。ただ、図2, 図3からも分かるように、サーベイメータのkeV領域のMeV領域に対する検出感度の比は、レムカウンタのその比に比べて一般に大きい(レムカウンタは内部吸収材によってkeV領域の検出感度を低くしてレム応答特性を持つようにしている)ので、RI線源によりMeV領域で値づけされた線量換算係数を用いると、サーベイメータの与える線量値はレムカウンタのそれに比べて過大評価を与えるので、安全側の評価にはなっている。

(5) 減速型中性子検出器は内部に用いる熱中性子検出器の形に依存して円筒型または球型のいずれかであるが、とくに円筒型の場合は方向依存性について考慮する必要がある。環境中性子測定の場合は、中性子はあらゆる方向からほぼ一様に飛んでくると考えられる

図8 円筒型レムカウンタ(2202D)の感度の方向依存性³⁾

ので、方向依存性の大きい検出器に対しては角度による感度変化を平均化した換算係数を用いて線量を評価しなければならない。図8に円筒型レムカウンタに対する方向依存性のデータ³⁾を例示するが、最大感度と最小感度の違いは60%近くにもなっている。

(6) 一般に減速型中性子サーベイメータは感度があまり高くなく、市販されているレムカウンタの最低検出限界は10 $\mu\text{Sv/h}$ (0.1 mrem/h) である。したがって放射線施設周辺の環境中性子測定の場合のように低線量の測定に用いるときは、メータで指示を読みとることができないので、パルス計数も行なって計数率 (cps, cpm) を求め、換算係数を用いて線量率を算出する。この測定の精度を上げるためには、低線量の場合では長時間のパルス計数が必要になる。メータにより線量値

が直接指示されるため、統計精度についての考慮がなされ難いが、最近この点を考慮して、ある計数値に達したときに線量値を指示するようにしたレムカウンタもある。最近著者らは市販のレムカウンタより感度が10倍ほど高い新しいレムカウンタを開発し、まもなく市販される予定である。

(7) ライナックやベータトロンのようにパルス状にビームが加速され、しかもX線が中性子に比べて圧倒的に多い(1000倍以上)場の近くにおいては、このモニタはX線のバーストによるパルスを感じるため使用できない。X線バーストを感じないようにビーム強度を下げるか、距離を遠ざけるとしても、中性子バーストによるパルスの重なりによる数え落しもあるので、このような場の測定には十分な注意が必要である。

2・3 校正

中性子モニタの校正は、 γ 線のように単色 γ 線源がなく、線量を求めるには今までに述べてきたような種々の問題点があるので面倒である。標準校正場を持っているか、またはそれが簡単に利用できる場合は別として、ふつう行われる方法は $^{241}\text{Am-Be}$ および ^{252}Cf 中性子源を用いる校正法である(表2にその特性を示す)。中性子放出率の分かった標準線源を用いて、図9に示す配置で行う。表2より線源からの距離の関数として中性子束密度 ($n/\text{cm}^2\cdot\text{s}$) や線量率 (mrem/h) が分かる

表2 ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$ 中性子源の特性

		²⁵² Cf		²⁴¹ Am-Be	
壊変形式	α崩壊	96.9	%	}	⁹ Be+α→ ¹² C+n+5.71 MeV
	自発核分裂	3.1	%		
半減期	α崩壊	2.731±0.007	年	}	432年
	自発核分裂	85.5±0.5	年		
	実効半減期	2.646±0.004	年		
比放射能	α崩壊	5.405×10 ²	μCi/μg		—
		1.850×10 ⁻³	μg/μCi		—
	自発核分裂	1.675×10 ¹	μCi/μg		—
		5.972×10 ⁻²	μg/μCi		—
中性子放出率		2.34×10 ⁶	n/(s・μg)	}	~2.2×10 ⁶ n/(s・Ci)
		4.33×10 ³	n/(s・μCi)		
	$\bar{\nu}$	3.76	n/SF		
γ線放出率		1.3 ×10 ⁷	γ/(s・μg)		—
α線エネルギー		6.118 (81%)	MeV	}	5.486 MeV (86%)
		6.075 (15%)	MeV		5.443 MeV (13%)
中性子平均エネルギー		2.35	MeV		~4.5 MeV
1 m距離での線量率	中性子	1.86*	mrem/(h・μg)		2.2 mrem/(h・Ci)
	γ線	0.16	mrem/(h・μg)		~2.5mR/(h・Ci)

* ICRP Publ. 21 の中性子線量換算係数¹⁾より求めた

(1 Bq = 27.0 pCi, 1 Gy = 100 rad)

図9 中性子サーベイメータのRI 中性子源による感度校正の実験配置図

電総研(筑波): 室の大きさ $11.3 \times 11.3 \text{ m}^2$,
ピットの深さ 4.2 m , 天井高 7.2 m ,
検出器の高さ 1.5 m

電総研(田無): 室の大きさ $11 \times 10 \text{ m}^2$,
ピットの深さ 1.5 m , 天井高 8 m ,
検出器の高さ 1.5 m

東大核研: 室の大きさ $8.3 \times 17.0 \text{ m}^2$,
コンクリート床, 天井高 7.7 m ,
検出器の高さ 1.25 m

図10 レムカウンタに対する散乱中性子成分の寄与の割合の線源からの距離による変化⁴⁾

ので、それと比較して校正定数(換算係数)が得られる。中性子放出率の分かった線源がないときは、すでに標準校正がなされ検出感度が分かった標準検出器による測定と相互比較することにより校正ができる。いずれにしても、標準線源が標準検出器のどちらかは必要である。この校正のさいに特に注意すべき点を述べる。

減速型中性子検出器は熱中性子に至るまでの低いエネルギーの中性子に感度をもっているため、周辺の物質により散乱された低いエネルギーの中性子の影響をきわめて受けやすい。図10に著者らが行った $^{241}\text{Am-Be}$ 中性子源を用いたレムカウンタに対する散乱中性子成

分の割合の線源からの距離による変化の実測値を示した⁴⁾。これによれば、実験室の床に特別の工夫がない場合は、床からの高さ 1.25 m 、線源から 1 m の位置で散乱成分は 15% 程度であり、地下ピットが設けられている場合はそれが 5% 程度に減少することが分かる。したがって、ふつうの実験室で行った校正値には 10% 以上の誤差を含むことが予想される。この誤差を減らすのにはつぎの2つの方法が用いられる。1つは図9に示したようにシャドーコーン(電総研で使用されているのは鉄 20 cm + ホウ素 10% 入りポリエチレン 30 cm のものである)を利用して直接線を遮蔽することによって散乱中性子成分を評価し、シャドーコーンのないときとあるときの2回の測定値の差を求めて直接線だけを評価する方法である。もう1つは測定を距離を変えて行い、逆二乗法則にのるかどうかを判定して直接線を評価する方法である。散乱線は線源からの距離にほとんど依存せず空間中にだいたい一様に分布するので、測定値を逆二乗則にフィットさせると直接線が得られる。線源からの距離が大きくなるほど、散乱線の寄与が増えるので校正は線源に近い場所で行うのがよいが、一方では減速型検出器の場合その実効中心を精度よく求めるのが難しく(一般に実効中心は幾何学的中心より前にずれる)、線源近傍ではこの実効中心の誤差が大ききいてくるので、校正をある一点での測定で行う方法の場合、その位置(線源からの距離)を決めるのは一般的には難しい。

3. α 線サーベイメータ

3.1 種類と検出原理

放射性物質から放出される α 線は $5 \sim 6 \text{ MeV}$ のエネルギーを持っている場合がほとんどであり、その空中での飛程は $3.5 \sim 5 \text{ cm}$ なので、 α 線モニタリングとしては空間線量のモニタリングは必要でなく、表面汚染や空気中放射能濃度のモニタリングだけが必要となる。したがって、 α 線を放出する放射性物質を非密封で取扱うような施設においてのみ α 線サーベイメータが必要である。

α 線サーベイメータとして市販されているものはガスフローカウンタと ZnS(Ag) シンチレーションカウンタであり、いずれも検出器の中に入射した α 線の固有検出効率ほとんど 100% である。

ガスフローカウンタは図11にその外観を示す。これはガスの電離により生じた正イオンと負イオンの対を電極間の電場によりガス増幅して集め電流として検出する比例計数管である。図12に示したように電極にか

図11 ガスフローカウンタの外観図

図12 ガスフロー計数管の印加電圧対計数率の関係 (NBS の Ra-D-E-F 線源使用)

ける電圧を変えると比電離（単位距離当たり生成されるイオン対数）の違いによりαプラトーとβプラトーの2つの領域が現れる。このことを利用して、電圧をαプラトー領域の値に設定してβ線パルスをディスクリミネータで弁別してα線だけを検出することができる。ガスフローカウンタは大口径のものを作ることができるので表面汚染検出の用途に適しているが、空気を用いるものは別としてガスを用いるものはガスポンプを装備しているのでサーベイメータといってもかなり重いのが難点である。

ZnS(Ag)シンチレータを用いたα線サーベイメータの概略図を図13に示す。ZnS(Ag)は白色の粉末状固体で、光の透過度は低いが発光量が非常に大きいので、α線のような飛程の短い粒子の検出には最適である。α線入射による ZnS(Ag) シンチレータからの光を光電子増倍管で電流にかえて電気信号として検出するが、シンチレータの透明度が低いので薄く作られており、したがって、飛程の長いβ線、γ線にはほとんど不感のα線検出器である。これは小型軽量なのでサー

図13 ZnS(Ag)シンチレーションサーベイメータの構造図

ベイメータとして取扱いが容易である。

3.2 使用法と使用上の注意事項

ガスフローカウンタ方式のサーベイメータはα線の吸収を減らすためにカウンタの窓は通常マイラー等の薄い膜でつくられているため破れやすい。とくに表面汚染サーベイ時においては突起物等に注意しなければならない。

ZnS(Ag)シンチレータを用いたα線サーベイメータではシンチレータは遮光の目的で薄いアルミニウムはくなどでカバーされているが、これもα線の吸収を減らすために薄いので、非常に破れやすい。ほんの少しのピンホールがあるだけで光に感じてα線の検出ができなくなるので、表面膜の取扱いに注意し、穴のあいたときは貼り変えるか黒いペイントで穴をふさぐかする必要がある。

α線の飛程は空気中で約4 cm なので、表面汚染の測定には突起物等に注意しながら、窓厚をも含めて測定対象物の表面との距離をその飛程より決して大きくならないようにして測ることが大切である。サーベイメータ自身の汚染を防ぐためにカバーをかけて使用する場合は、そのカバーもα線の飛程を考えて薄いものを使う必要がある。

3.3 校正

α線サーベイメータの点検校正はα線源 (U_3O_8 や ^{241}Am などがよく用いられる) を用いて行われる。検出器の有感部に入射したα線固有検出効率は100%と

考えてよいので、有感部に入射する幾何学的効率 G が分かれば測定した計数率 C (cps) と α 線の強度 S (dps, Bq) との間には $C = S \cdot G$ の関係が成り立ち、これから α 線の強度を算出することができる。線源強度 S の分かった標準 α 線源を用いれば線源と検出器の距離 d の関数として G が得られる。

4. トリチウムサーベイメータ

低エネルギーの β 放出体である ^3H や ^{14}C は広い分野でさかんにトレーサ利用されているが、取り扱い標識化合物の比放射能が一般に低く、また数量(放射能)も比較的少ないため、そのモニタリングには特別の配慮が必要である。 ^3H や ^{14}C は気体状になりやすく、とくに ^3H は周囲の物質に吸着し、また物質を構成する水素等との交換反応を起こしやすいので、作業環境の空気汚染、水汚染および固体表面の汚染に留意しなければならない。このためには可搬型のガスモニタや各種サンブラが必要に応じて随時使用され、また、ふきとり試験(スミア法)による表面汚染の監視が定期的にまた随時実施される。したがって非密封の ^3H 、 ^{14}C など低エネルギー β 放出体の使用にさいしては、液体シンチレーションカウンタ、 2π ガスフローカウンタ、ガスモニタなどが放射線防護用機器の主力として使用され、サーベイメータの活躍する場は少ない。しかし、 ^3H による表面汚染を測定するためのサーベイメータとして市販されているものもあり、また、実際に低エネルギー β 放出体による表面汚染の測定にサーベイメータが利用できる場合もあるので、とくに使用上の注意に重点をおいて、そのあらましを以下に記述する。

4.1 種類と検出原理

^3H の β 線のエネルギーは18.6keVときわめて低いので、通常のGMサーベイメータでは窓の材料に吸収され、 ^3H の β 線は検出できない。トリチウムサーベイメータとして実用または試用されている検出器はつぎの3種類である。

- (1) 薄窓型比例計数管
- (2) 窓なし型比例計数管
- (3) 排気型プラスチックシンチレータ

薄窓型比例計数管はガスフロー型比例計数管の検出器側窓に $0.15\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 程度の薄膜を張り、計数管内にPRガス等の計数ガスを流しながら、薄窓の部分に固体表面に近づけ、薄窓を通して入射した β 線を測定するものである。市販されているAloka TPS-301Bで

表 3 測定対象の表面材料によるバックグラウンド計数率の変動例

表 面 材 料	計数率の増加 (cpm)
コンクリート	50~100
コンクリートに張ったロンリューム	20~ 50
ステンレス製流し	10~ 50
陶器製流し	200~300
スチール製机	10~ 30
木製机	20~ 50
ガラス板	30~ 60

は窓面積(有効検出面積)が $30\times 150\text{mm}$ と広く、広範囲の汚染に対する検出感度を高めている。 ^3H に対する計数効率率は約1%であり、 ^{14}C に対しては約20%である。計数効率は薄窓面の位置により若干相違する。計数ガスの導入部付近は計数効率がやや高く、導入部と離れた他端の位置ではかなり低く、 ^{14}C に対して12%程度になる。比例計数管の容積が大きいので、バックグラウンドの計数率が高く、120~200cpmである。計数効率および検出感度を向上させたため、測定対象の固体表面の材料によって、バックグラウンドの計数率が増加する。表面材料の種類による計数率変動の例を表3に示す。検出限界は ^3H で、 $2.22\text{Bq}(6\times 10^{-5}\mu\text{Ci})/\text{cm}^2$ 、 ^{14}C で $185\text{mBq}(5\times 10^{-6}\mu\text{Ci})/\text{cm}^2$ と計算されている。測定レンジは300~100kcpmの6段切換えで、精度は $\pm 5\%$ である。時定数は1, 3, 10, 30秒に切換えられ、その精度は $+50\%$ 、 -30% 以内とされている。サーベイメータの使用温度範囲は $+5\sim +35^\circ\text{C}$ である。

窓なし型比例計数管は窓の材料による β 線の吸収を除くため、膜を張らずに計数ガスを吹き出させるようにした検出器である。計数管内の計数ガスの組成を一定にするため、かなりの流量の計数ガスが必要になり、検出部の有効開口面積は薄窓型に比べて狭くしなければならない。 $15\times 150\text{mm}$ ぐらいの有効面積 22cm^2 のものが市販されている。また、測定対象に応じて開口部の形状、面積を狭くして実用性を増すことも行われている。検出限界は薄窓型より向上する。 ^3H について時定数2秒のとき、自己吸収のない点線源では約 $3.7\text{Bq}(0.1\text{nCi})$ 、検出器の有効面積より広い面線源では約 $185\text{mBq}(5\times 10^{-6}\mu\text{Ci})/\text{cm}^2$ 、比放射能としては約 $5.55\text{kBq}(0.15\mu\text{Ci})/\text{g}$ であり、時定数20秒のときはそれぞれ約 $1.11\text{Bq}(0.03\text{nCi})$ 、約 $7.4\text{mBq}(2\times 10^{-7}\mu\text{Ci})/\text{cm}^2$ 、約 $1.85\text{kBq}(0.05\mu\text{Ci})/\text{g}$ であると報告されている。

図14 大面積端窓型 GM 計数管の断面図の例

排気型プラスチックシンチレータサーベイメータは検出器の開口部100×100mmを測定対象の平面に密着させ、特殊プラスチックシンチレータと平面との間の空気を減圧に排気してβ線を測定するものである。気密にするために、開口部には使い捨てにできるゴム製のシールを取り付ける。 ^3H の検出感度は $3.7\text{Bq}(10^{-4}\mu\text{Ci})/\text{cm}^2$ で、測定のエネルギレンジは2～20keV (^3H), 2 keV～∞ (^3H , ^{14}C , ^{32}P), 20 keV～∞ (^{14}C , ^{32}P), 200 keV～∞ (^{32}P)に切換えられ、 ^3H , ^{14}C , ^{32}P の混合汚染に対しても分別できるように工夫されている。測定時間は1, 10, 100秒の3段切換で、総計数値をデジタル表示する。

以上の3種類のサーベイメータは ^3H も検出できることに特長があるが、 ^{14}C (β線エネルギー: 0.156 MeV) や ^{35}S (β線エネルギー: 0.167 MeV) による表面汚染の測定には広窓GMサーベイメータも利用できる。大面積端窓型 GM 計数管の断面図の一例を図14に示す。有効面積が広いので検出感度が高く、広範囲の汚染検査に有力である。計数効率窓厚によるが $2\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度のものであれば ^{14}C について約2%で、バックグラウンド計数率は約60cpmである。

4.2 使用法と使用上の注意

4.2.1 薄窓型トリチウムサーベイメータ

市販されている装置の例を写真1に示す。検出器内のガス置換を流量 $60\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$ で10分間程度行ったのち、電源電圧のチェック、高圧のチェックを行い、使用の状態に設定する。時定数30秒にし、バックグラウンドを測定したのち、チェックソースによる校正を行う。使用にさいしては検出器の薄窓の面に目皿状の保護カバーを装着し、測定対象物の表面に密着させて測定する。測定終了後は電源を切り、計数ガスの流れを止める。

使用上の注意事項の主要なものをつぎに列挙する。

(a) 窓材は薄いので測定対象物の突起等による破損に注意する。

写真1 薄窓型トリチウムサーベイメータの一例

(b) 温度、湿度、光(直射日光、紫外線)などの使用環境に注意する。

(c) 測定にさいして留意しなければならないことは、バックグラウンド計数率およびその変動である。あらかじめ、それに関するデータを集積し、測定値の評価が正しくできるようにしておくが必要である。とくに ^3H の測定においては計算上求められた検出限界との関係を十分認識しておくことが大切である。

(d) 線源と検出器との位置関係により検出効率が変動する。測定ごとに少し位置を移動させることも有効である。測定対象が作業台の上面や床面などのように広い平滑な面の場合には測定しやすいが、測定対象の種類や形状によっては測定は著しく不正確になる。あらかじめ測定方法を検討する必要がある。

(e) 表面汚染密度の測定にさいしては、あらかじめ測定の手法を定め、放射能既知の試料を用いて、点状汚染、広い面の汚染、自己吸収、後方散乱等についての実測データを集積し、それに基づいて評価するようにする。法令上の表面汚染の最大許容密度が ^3H について検出できる場合は必ずしも多くないと思われる。

(f) 検出器の汚染防止に十分注意する。汚染源物質の飛散，吸着等による計数管の汚染も起こりやすい。薄窓のため，汚染除去は至難の場合が多い。

4・2・2 窓なし型比例計数管

計数ガスを所定量流したのち，電源をチェックし，使用電圧を設定して使用することは薄窓型比例計数管の場合と原則的には変わるところがない。

このサーベイメータの場合にも測定対象物の種類や形状が標準的な測定条件を満たす場合，たとえば広い平滑な面の汚染検査や検出器の開口部に測定対象物を近づけることができ，計数ガスの雰囲気中で測定できる場合にはきわめて有効なサーベイメータと考えられる。しかし，計数ガスの消費量，作業環境への放出など実用上気になることが少なくない。

4・2・3 排気型プラスチックシンチレータ

このサーベイメータも測定対象が平面であることが前二者以上に必要である。気密に保たなければ測定できないからである。簡便さ，エネルギーの弁別などの特色を生かせる使用ができる場合は実用性があると考えられる。使用上注意しなければならないことの1つにサーベイメータの汚染防止がある。ゴム製のシールは使い捨てればよいが，検出器内の汚染除去対策はどのようにするのがよいか，十分検討し，方法を確立しておく必要があろう。

4・3 校正

市販のトリチウムサーベイメータにはチェックン

ソースが備え付けられているものもある。検出器の架台に ^{63}Ni 線源($\beta:65.9\text{ keV}$ ，半減期100年)が内蔵されている機種では，検出器を架台上の所定の位置に置き，バックグラウンドの計数率を測定したのち，固定されている ^{63}Ni 線源の遮蔽板を取りはずして，チェックンソースによる計数率を測定し，正味の計数値とチェックンソースの表示値($x\text{ cpm}\pm 10\%$)とを比較することにより，サーベイメータの動作が正常であることを確認できるようになっている。

文 献

- 1) ICRP Publ. 21(1971):「体外線源からの電離放射線に対する防護のためのデータ」(ICRP Publ. 15の補遺)，日本アイソトープ協会・仁科記念財団共訳(1974)
- 2) 関口 晃編：「微弱線量中性子測定の標準化に関する実験的研究」，昭和54，55年度科学研究費補助金研究成果報告書，昭和56年3月
- 3) Studsvik 2202D の取扱説明書
- 4) 小佐古敏荘，他：原子力学会誌，**24**，139(1982)
- 5) Patterson, H.W. and Thomas, R.H.: "Accelerator Health Physics", Academic Press, New York (1973)

参 考 文 献

森 厚文，他：Radioisotopes, **27**，602(1978)