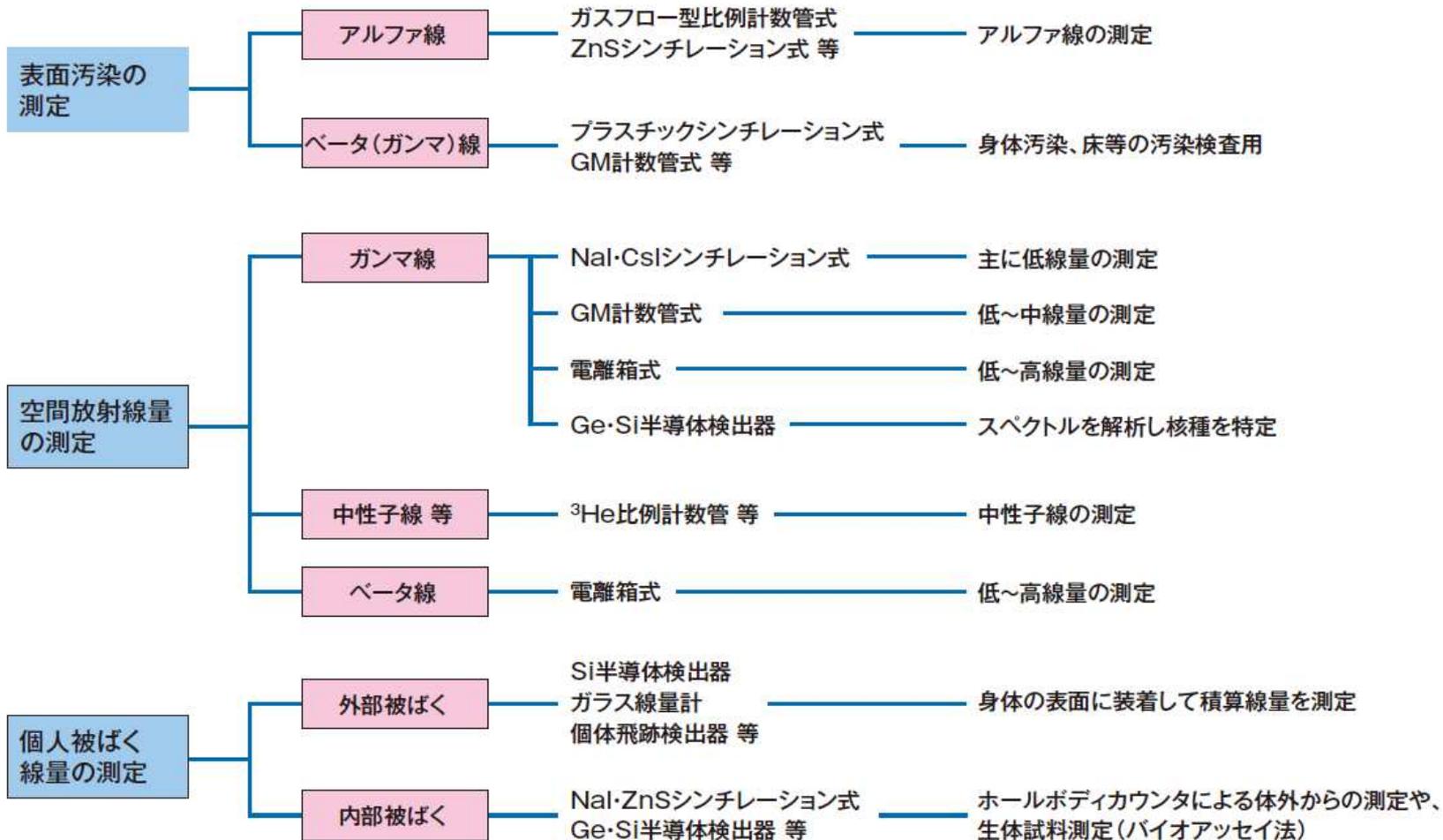


最新放射線安全管理学特論

# 測定技術

秋吉 優史

# 放射線測定の種類



# 個人モニタリング

## 外部被ばく

- ・蛍光ガラス線量計(ガラスバッジ)や半導体式線量計(ポケットメーター)、アラームメーターなどにより1cm線量当量、70 $\mu$ m線量当量をモニタリングする
- ・**体幹部**の測定は男子は胸部、女子は腹部
- ・**末端部**の測定を行う必要がある場合は、体幹部に加えてリングバッジなどにより必要な部位の測定を行う



ガラスバッジ



ガラスリング

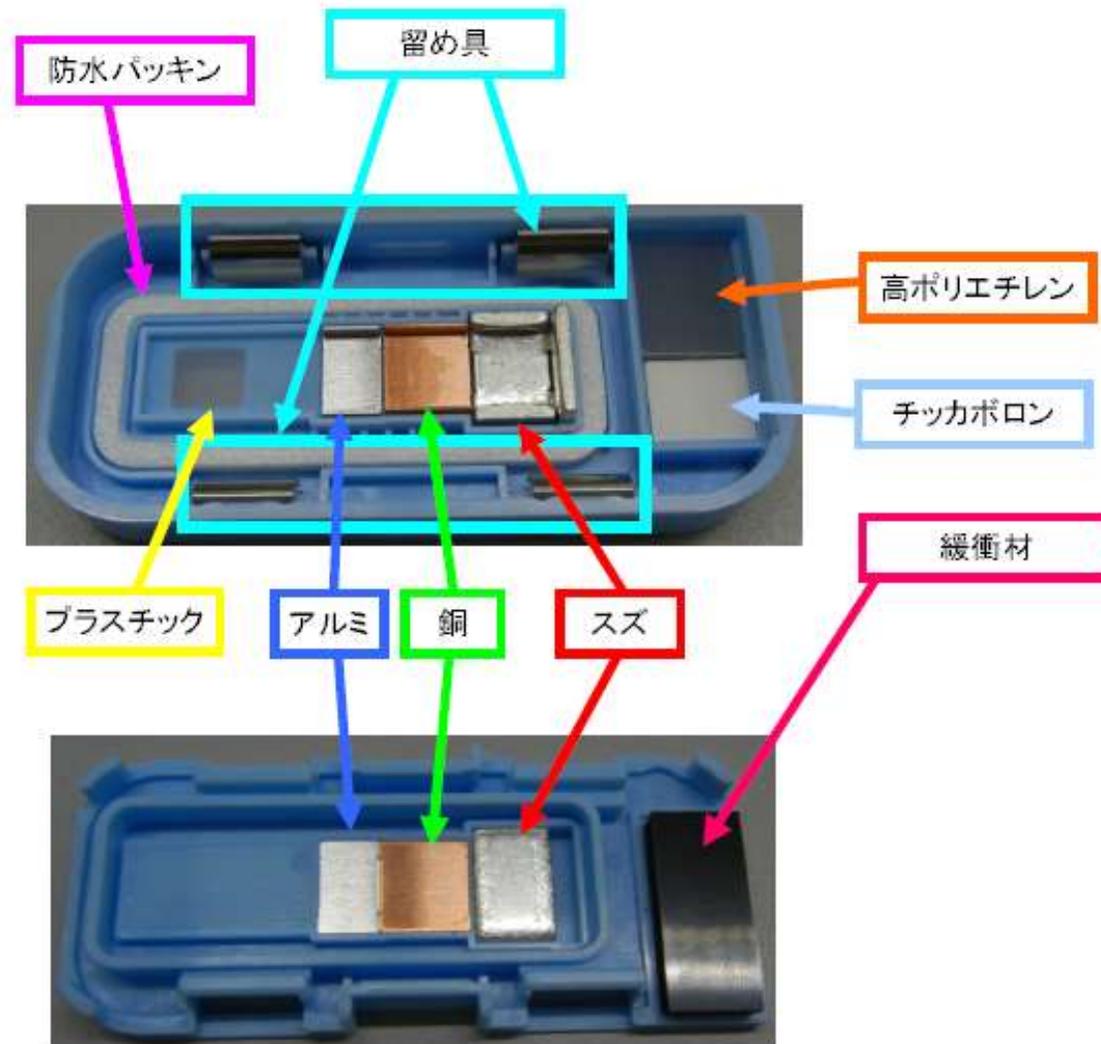
## 内部被ばく

- ・ホールボディカウンタによる体外からの測定
- ・バイオアッセイによる排泄物からの摂取量の評価
- ・空气中濃度からの摂取量の評価 → 計算による評価

# 蛍光ガラス線量計

- ・**蛍光ガラス線量計**は**ガラスバッジ**に用いられる固体測定素子であり、銀活性リン酸塩ガラスに放射線を照射した後に生成する**蛍光中心**に**紫外線**を入射すると**オレンジ色**の**蛍光**を発する(ラジオフォトルミネッセンス)。発光量を読み取ることで吸収した放射線の線量を知ることが出来る。
- ・照射した後に時間が経過しても発光量が変化しない(**フェーディングが少ない**)、素子間のばらつきが小さい、エネルギー特性がフラットであるなどの特性を持ち、それまで用いられていたフィルム線量計から置き換わっている。10  $\mu$  Svから10 Svまでの幅広い線量で使用が可能である。
- ・**複数のフィルタと組み合わせる**ことでエネルギーの異なる  $\gamma$ ・X線、 $\beta$  線の測定が一つのバッジで可能である。
- ・ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C を用いた **OSL線量計**も、同様に**Fセンター(色中心)**に捕獲された電子に**緑色**の光を入射すると**青色**の発光(**光輝尽性発光**)を生じ、**クイクセルバッジ**として利用されている。
- ・同様に、照射後に**数100°Cに加熱**することで**蛍光**を発するLiFやBeOなどの熱蛍光物質を用いた、**熱蛍光線量計**は**TLDバッジ**などで使用されている。上記二つに比べるとややフェーディングが大きい。

# ガラスバッジホルダのフィルタ構造

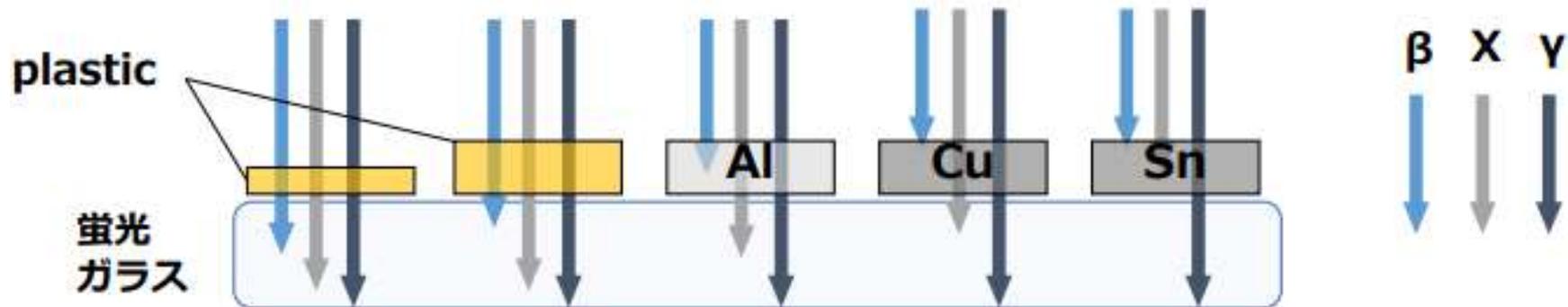


# 蛍光ガラスでの線量測定

人体（組織）が受けた線量を蛍光ガラスで測りますが、  
人体とガラスは違います

- ⇒ 放射線に対するエネルギーレスポンスの違いを補正する必要がある
- ⇒ そのためには、ガラスバッジにどのような放射線（線種、エネルギー）が入ってきたのか知る必要がある

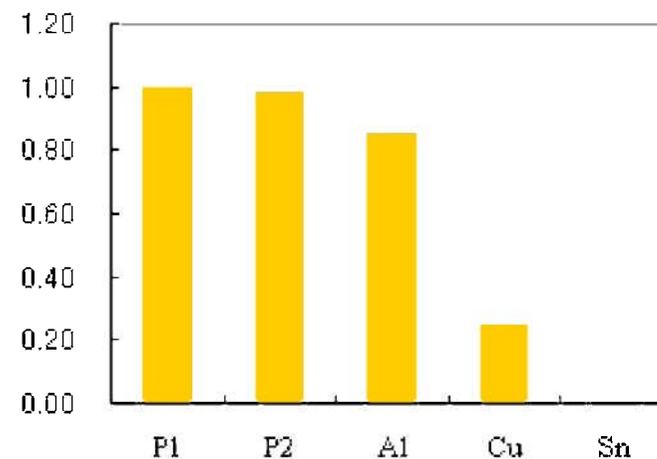
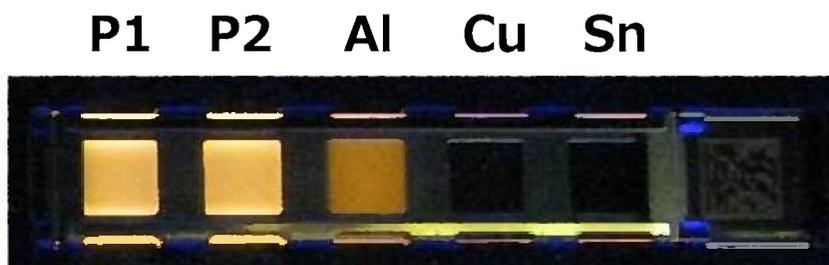
## 5つの放射線減弱フィルタの使用



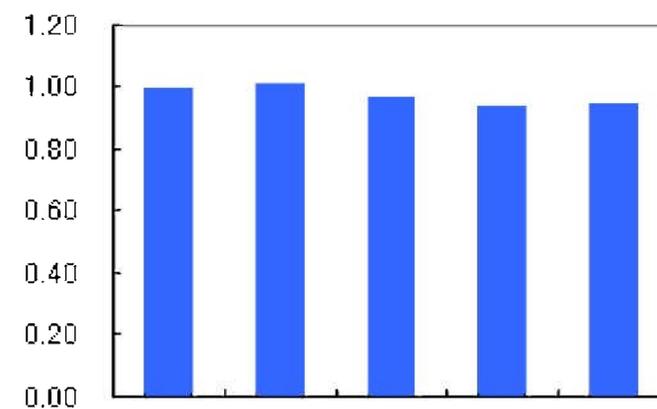
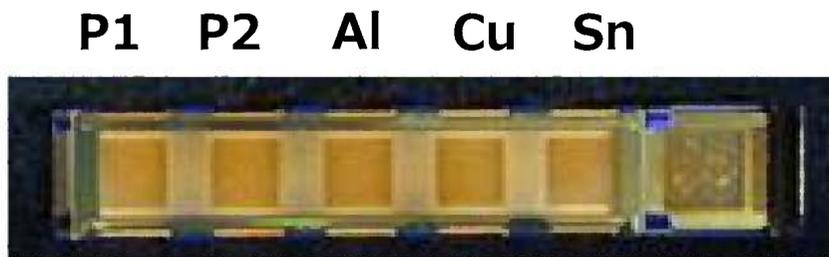
蛍光ガラスの各フィルタ下の発光パターンから、  
放射線の種類やエネルギーを知り、レスポンスを補正し線量を求める

# 蛍光ガラスの発光パターン例

✓ 30 keV X線



✓  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線(662 keV)



目次へ

# 様々な放射線検出器による測定

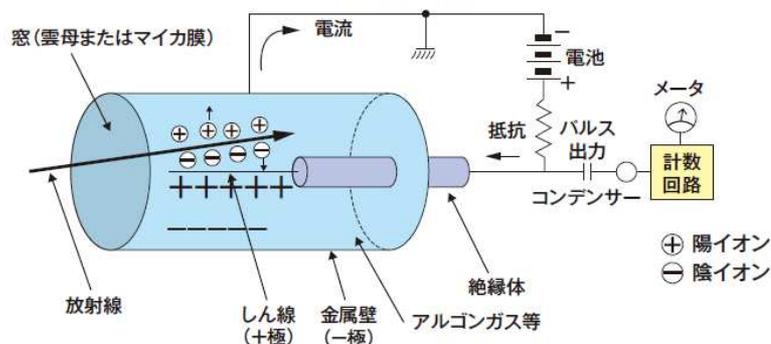
放射性同位元素を利用する上で、施設の安全管理上、また利用者自身の安全を確保するために、使用する核種に合わせた測定器を用いて、空間線量と汚染の測定を行う必要がある。

線種やエネルギーの違いによる検出器の応答の違いを理解していないと、正しく評価できなかつたり、全く測定することが出来ない場合がある。

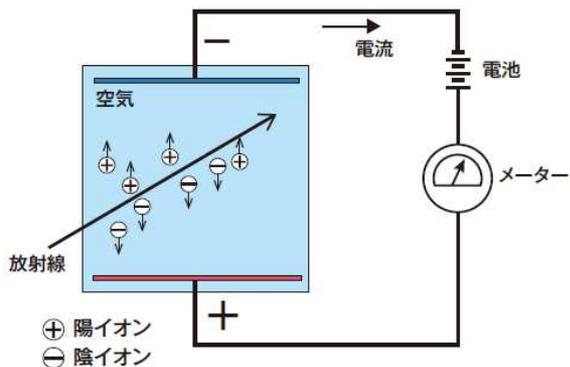
また、空間線量測定の際に測定機で測定されるのは様々な物理量に基づいて評価される実用量(線量当量)であり、防護量である実効線量ではない。エネルギーによって換算係数は変化するが一般に表示値は換算後の値である。また、線量当量として70  $\mu$ m線量当量か、1cm線量当量かを区別する必要がある(ほとんどは1cm線量当量)。

# 放射線計測器の測定原理

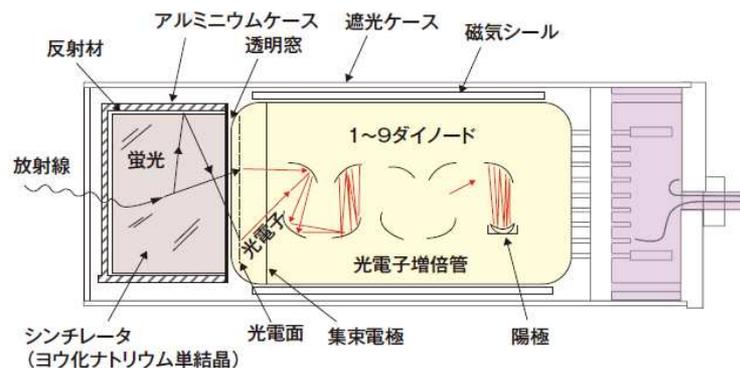
## GM計数管



## 電離箱



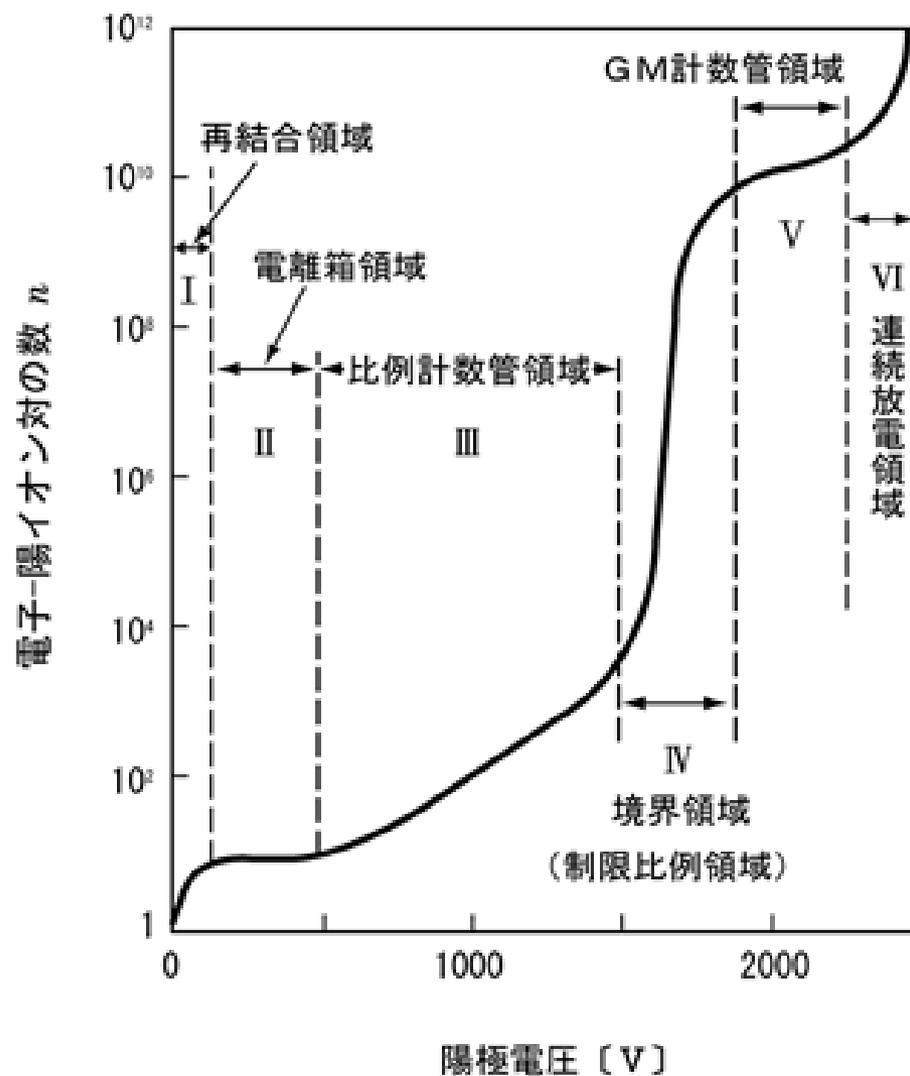
## シンチレーション検出器



(注) 電離箱では、 $10^{-9}$ ~ $10^{-14}$ A程度の微電流を測定する必要がある

シンチレーション検出器では、蛍光が光電面に当たると光電子が飛び出し、これがダイノード(増倍電極)で増倍されて、大きな電気信号が得られる

# 印加電圧とイオン電流の関係



# GMサーベイメーター

最も一般的に用いられるサーベイメーターであり、GM管からの出力パルスをものまま計数する。 $\beta$ 線と $\gamma$ 線の両方に対して用いることが出来るが、検出器の前面を覆っている雲母の膜を透過することが出来ないような低エネルギーの $\beta$ 線や $\alpha$ 線は検出することが出来ない。さらに、50keV以下の $\gamma$ /X線に関しては急激に感度が落ちる。

計測を行う単位は、放射線を何発検出したかを示す count であり、機器により count/s (CPS) の場合と、count/m (CPM) の場合がある。放射線がどれだけエネルギーを持っていたのかにはほとんど関係が無く、検出器が何発検出したか、だけの計測であるため、空間線量などの定量的な測定には向いていない。 $\mu$ Sv/h の単位が書いてあるサーベイメーターも存在するが、良く見ると ( $^{137}\text{Cs}$ ) とあり、目盛値は $^{137}\text{Cs}$ からの662keV  $\gamma$ 線を使った校正値であるため、それ以外の場合では目安程度にしかならない点に注意する必要がある。

また、検出を行った後の不感時間が  $100\mu\text{s}$  程度有るため、比較的低い計数率でも数え落としが起り、せいぜい数100cps 程度までしか正しく計数出来ない。さらに強い放射線場では GM 管の中の芯線の周りに発生したイオンのさやが取り除かれる暇が無くなり、計数率が逆に下がってしまうという窒息現象を起こすため、注意を要する。

# GMサーベイメーター



# 電離箱サーベイメーター

原理的には最も単純な、気体電離箱式のサーベイメーターは、放射線により気体が電離した量を電流としてそのまま取り出すため、良好なエネルギー特性と、均一な方向特性、各種サーベイメーターのうちで**最も強い放射線場でも用いることが出来る**という特徴を持つ。

しかし、一般的に感度が比較的低く、 $1 \mu\text{Sv/h}$  程度が測定限界であるため、バックグラウンドレベル ( $0.05 \mu\text{Sv/h}$  程度) の測定は困難。

また、回路が安定するまでやや時間を要し、使用する10分程度前には電源を入れる必要がある。



# NaI シンチレーションサーベイメーター

NaI(Tl) シンチレーターに光電子増倍管(フォトマル)を組み込んで、その出力パルスを計数するサーベイメーターで、**感度が高く、エネルギー特性がよい**ことが特徴としてあげられる。比較的軽元素のヨウ素を含んでおり感度が高く、バックグラウンドレベル (0.05  $\mu$  Sv/h 程度)でも測定可能である。

出力波高から検出した  $\gamma$  線のエネルギーを求められるため、電子回路を用いて**エネルギー補償をした線量等量率**を求めることができる。しかし、NaI 結晶は吸湿性があるため密閉する必要があり、ステンレスハウジングを  $\beta$  線は通過できず、また 50keV 以下の  $\gamma$  線も補償回路によりカットされてしまうため測定することは出来ない。このため、強度が強くても**エネルギーの低い X 線**や、遮蔽体による散乱線は**測定することが出来ない**ため、注意を要する(そのような場合は電離箱を用いる)。

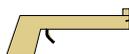


# 高エネルギーの放射線

ズバッ!



ひよろひよろ~



低エネルギーの放射線

## 放射線のエネルギーって何?

$\alpha$ 線や $\beta$ 線など、粒子が飛んでくる放射線の場合はその粒子のスピードと思って頂ければ理解しやすいと思います。もちろんスピードが速いほどエネルギーは高くなります。 $\gamma$ 線、X線は光の仲間で、エネルギーはその光の波長と言うことができます。赤外線、可視光線、紫外線とだんだん波長が短くなるに従ってエネルギーが高くなります。ここで光の強さ(明るさ)と、エネルギーの大きさは違います。光の強さは放射線の本数に相当します。低いエネルギーの光が何本集まっても、高いエネルギーの光になることはありません。高いエネルギーの放射線ほど、物質を突き抜ける透過力が強くなります。



GM管や、シリコン半導体検出器  
(フォトダイオード)

**一発は一発!**

入射する放射線のエネルギーによらず、同じ大きさのパルスを出します。一定時間内に何発放射線が飛んできたか、という情報だけを知ることが出来ます。一部の製品は、Cs-137の661keVの $\gamma$ 線が飛んできた、ということにして線量を評価しています。

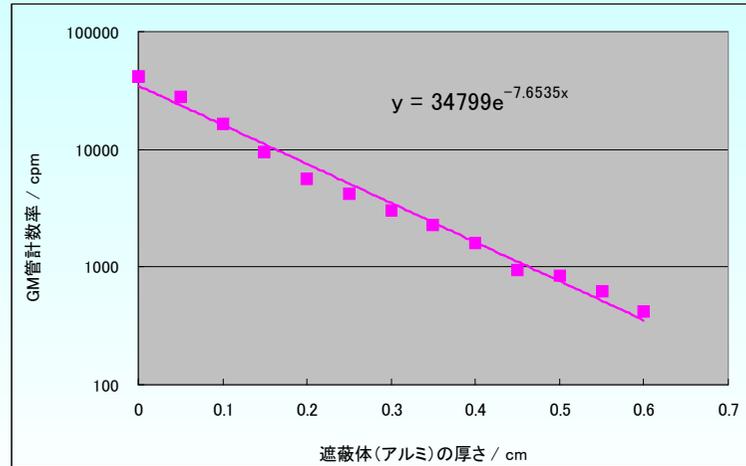


シンチレーターや、Ge半導体検出器

**きちんとエネルギーを区別**

入射する放射線のエネルギーによって、出力するパルスの大きさが異なります。どのぐらいのエネルギーの放射線が何発来たかという情報を合わせて、線量を評価します。

# GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価



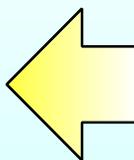
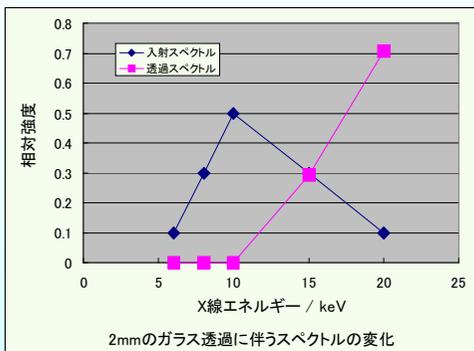
X線エネルギー (keV)	アルミ中の線減衰係数 $\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

ケニス No.121-122 十字入りクルックス管 3C-B  
 ケニス No.120-150 ニューパワー誘導コイル ID-6  
 放電極距離 20mm、十字板は倒しての測定  
 測定は Ranger GMサーベイメーターで、  
 不感時間100  $\mu\text{s}$  として数え落としを補正した

GMサーベイメーターの前にアルミ遮蔽板を置いていき、透過率を測定した。測定結果から線減衰係数を求めると、 $7.65\text{cm}^{-1}$  となり、放電針距離の20mm から想定されるエネルギー20keV強でのアルミの線減衰係数と**非常に良い一致を示した**。

当初低エネルギー側に尾を引いたスペクトルを想定しており、遮蔽が薄い領域で計数率が高くなる事が予想されたが、**単一のエネルギーだけで説明できてしまった**。

遮蔽体を用いた測定の前後で、遮蔽無しでの測定値はほぼ一致しており安定していた。また、クルックス管から 30cm位置での評価結果線減衰係数は6.51と若干高いエネルギーを示した。



ガラス管を透過する前のX線のエネルギースペクトル(最大エネルギー20keVでその半分の位置にピークを持つ)を適当に決め、2mmのガラスで遮蔽された後の強度を透過率から求めた後、全体の強度が1となるように規格化した。

元のスペクトルよりも透過率が支配的となり、最大エネルギーである 20keV がほとんどを占めるスペクトルとなった。

より高エネルギー側では透過率の変化は緩やかとなるため元のスペクトルや、蛍光体の特性X線のエネルギーに左右されると考えられる。

# ZnSシンチレーションサーベイメーター

ZnSシンチレーターは透過型電子顕微鏡やイオンビーム加速器で蛍光板として多用されているが、多結晶の粉末としてしか利用できず、透明度が低く、薄い圧粉体の膜としてしか利用できない。しかし、高い検出効率を持ち、バックグラウンド計数が殆ど無いなどの特徴から、 **$\alpha$ 線用のサーベイメーター**として用いられている。計測はCPS等のカウント数で行われる。

シンチレーター表面は薄いアルミ箔で覆われており、**光を通さないようにしているが、容易に破れる**ため、突起物等に注意して使用する必要がある。

なお、ZnS粉末をシート状に形成しているため、線エネルギー付与(LET)の低い $\beta$ 線や、 $\gamma$ 線はほとんど素通りして発光しないため検出することが出来ない。(弱く発光したとしても内部のパルス波高弁別回路によりカットされる)  
→このためバックグラウンドが殆ど無い。



# 一般人向けのサーベイメーター

福島第一原子力発電所の事故以降、一般人がサーベイメーターを用いて周辺線量や汚染検査を行う機会が増えており、様々な検出器が販売されている。

そのほとんどは、検出効率が低く、正確な値を評価するためには**長時間の測定を行い、統計的に処理する**必要がある。

実効線量率を評価するためには、センサーの検出効率に合わせて校正を行う必要があるが、**基本的にエネルギー弁別が出来ない**ため、Cs-137からの661keVの $\gamma$ 線を検出した、として**検出したパルス数のみから実効線量率( $\mu\text{Sv/h}$ )を評価している**。線量率によって検出効率が変わる場合などは電子回路による補正が必要である。なお、 $100\mu\text{Sv/h}$ を超えるような高線量率では使用できない機種が多い。

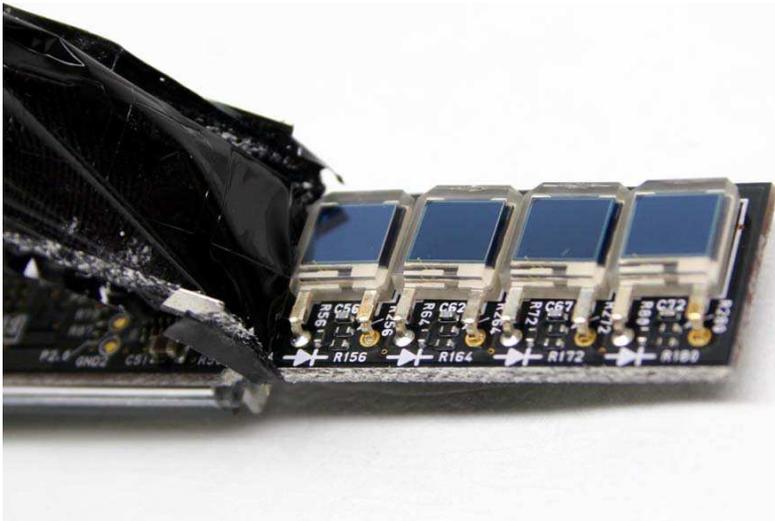
また、 $\beta$ 線を測定可能な機種は、本来表面汚染を評価するための物で、最終的に $\text{Bq/cm}^2$ で評価されるべきであるが、通常はcounts/s (cps) 等で表示して、窓面積と検出効率から計算で求める必要がある。さらには、検出数から実効線量を $\gamma$ 線検出時と同様に求めてしまい、**本来評価する必要のない $\beta$ 線によって過大な評価**を行っていることがあるため注意を要する。

# 一般人向けのサーベイメーター

## ・シリコン半導体センサー(フォトダイオード)を用いた計測器

フォトダイオードは、本来逆電圧をかけると電流が流れないダイオードに、光が当たると電流が流れるという、太陽電池と同様の効果を利用してフォトンを検出するセンサーである。これを光を通さない膜で包み、放射線を検出するようにしたもので、安価なサーベイメーターはほとんどこれを使用している。

エステーが発売しているエアカウンターSはその代表格で、3000円程度と非常に安価であるが、複数の核種を用いた実験で、理論値及びNaIシンチレーションサーベイメーターと比較してほぼ同じ値を示しており、かなり優秀である。ただし、正確な測定には数分を要する。



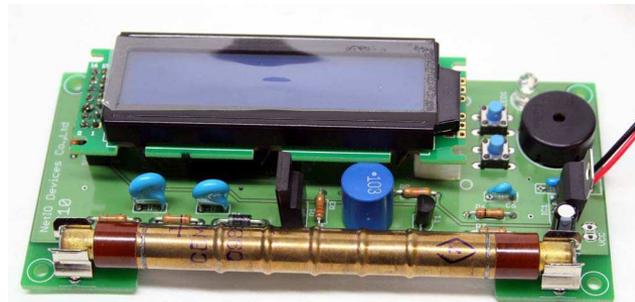
# 一般人向けのサーベイメーター

## ・金属円筒GM管を用いた計測器

チューブの片方を雲母の膜で覆った「端窓形」GM管と異なり、金属管で密閉されているGM管という物がフォトダイオードを使った製品の次に良く使用されている。雲母の膜に比べると金属管は $\beta$ 線を遮蔽してしまう確率がずっと高いため、検出効率は落ちるが、一応 $\beta$ 線の測定が可能である。10万円程度する高級機ではパンケーキ型の、端窓形GM管を使用した物もある。

当然、GM管であるため、エネルギー弁別は出来ず、検出したパルスの数のみからフォトダイオードを使用した製品同様に実効線量を算出している。この時、 $\beta$ 線は $\gamma$ 線よりもはるかに検出効率がよく、これを計数してしまうと計数値に意味が無くなるため、 $\beta$ 線を遮蔽した状態で校正を行っている。

表面汚染を測定する際は $\beta$ 線を測定することで効率よく評価可能であるが、この際はケースの一部を外してGM管を露出させて測定を行う。



# 中性子サーベイメーター

熱中性子検出器には  $^3\text{He}$  比例計数管、 $^{10}\text{BF}_3$  比例計数管、LiI シンチレータなどが存在する。それぞれ、 $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ 、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 、 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$  などの中性子を吸収する核反応により放出される高速荷電粒子が検出される。

厚さ10cm程度のポリエチレン製減速材で覆い、検出器の感度を線量当量換算係数に合わせてあるため、熱中性子から約 15MeVまでのエネルギー範囲で正確な中性子による線量当量を指示することが可能である。(白い減速材で丸く覆われて、重さを支える足が四本付いていることから、白豚と呼ばれることが多い)

$\gamma$  線のパルスも検出されるが、中性子線によるパルスの方が大きいため内部の波高弁別値の設定によって計数しないようになっており、中性子だけを検出することができる。



# Ge半導体検出器

放射性物質はそれぞれの核種に固有のエネルギーを持った  $\gamma$  線を放出するため、その  $\gamma$  線のエネルギーを測定することにより未知試料中に含まれる核種を同定することが可能である

Ge半導体検出器はp層/空乏層/n層から構成されており、p-n 接合部の空乏層に電荷のキャリアがほとんど存在しないため、逆電圧を印加してもほとんど電流が流れないが、空乏層結晶中に高速の荷電粒子が入射すると、価電子帯にある電子は伝導帯におしあげられ、多数の電子-正孔対が生成される。

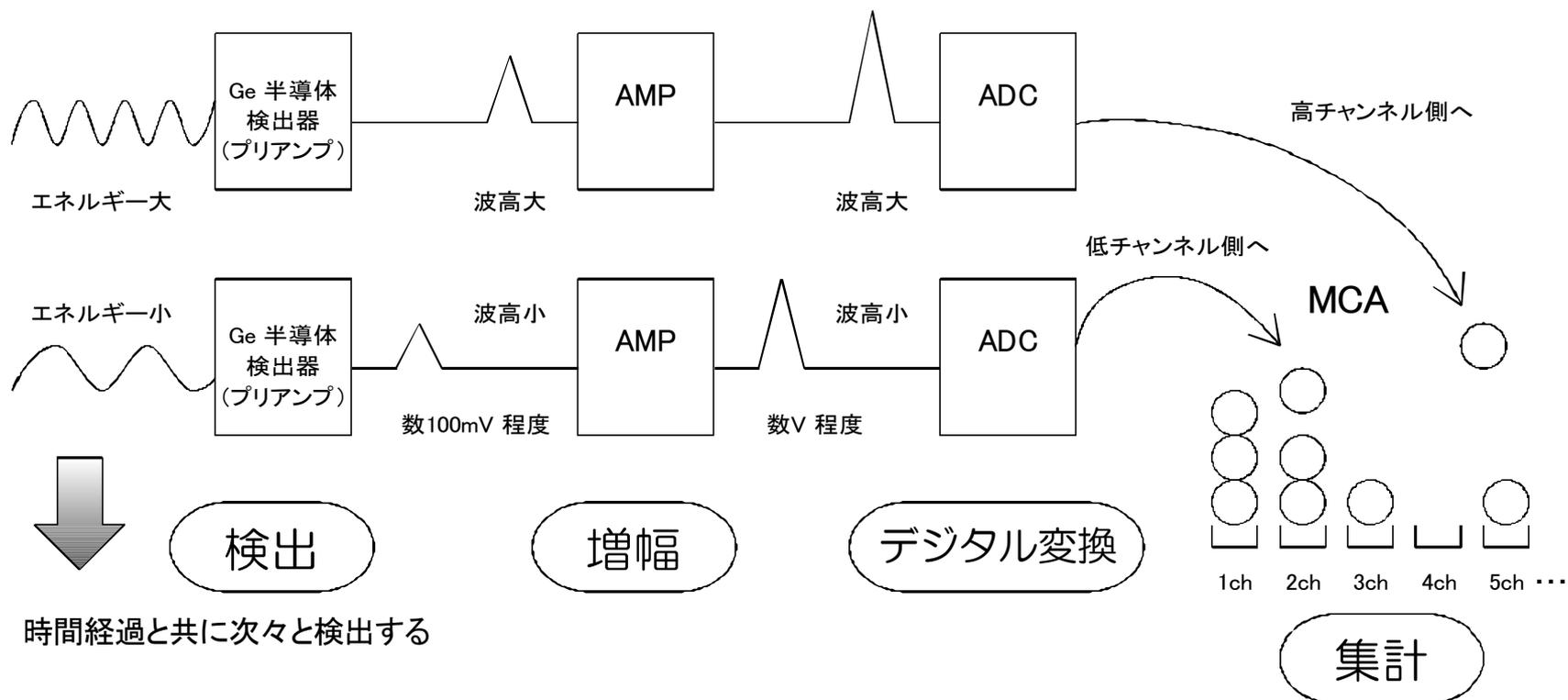
ただし、 $\beta$  線は(もちろん  $\alpha$  線も)検出器を覆うステンレス製のハウジングを透過できないため、検出することは出来ない →  $\gamma$  線が結晶中に入射後に発生する光電子などを検出する。

一組の電子-正孔対を作るのに要するエネルギーはGe の場合  $2.96\text{eV}$  であり、これがエネルギー分解能となる。



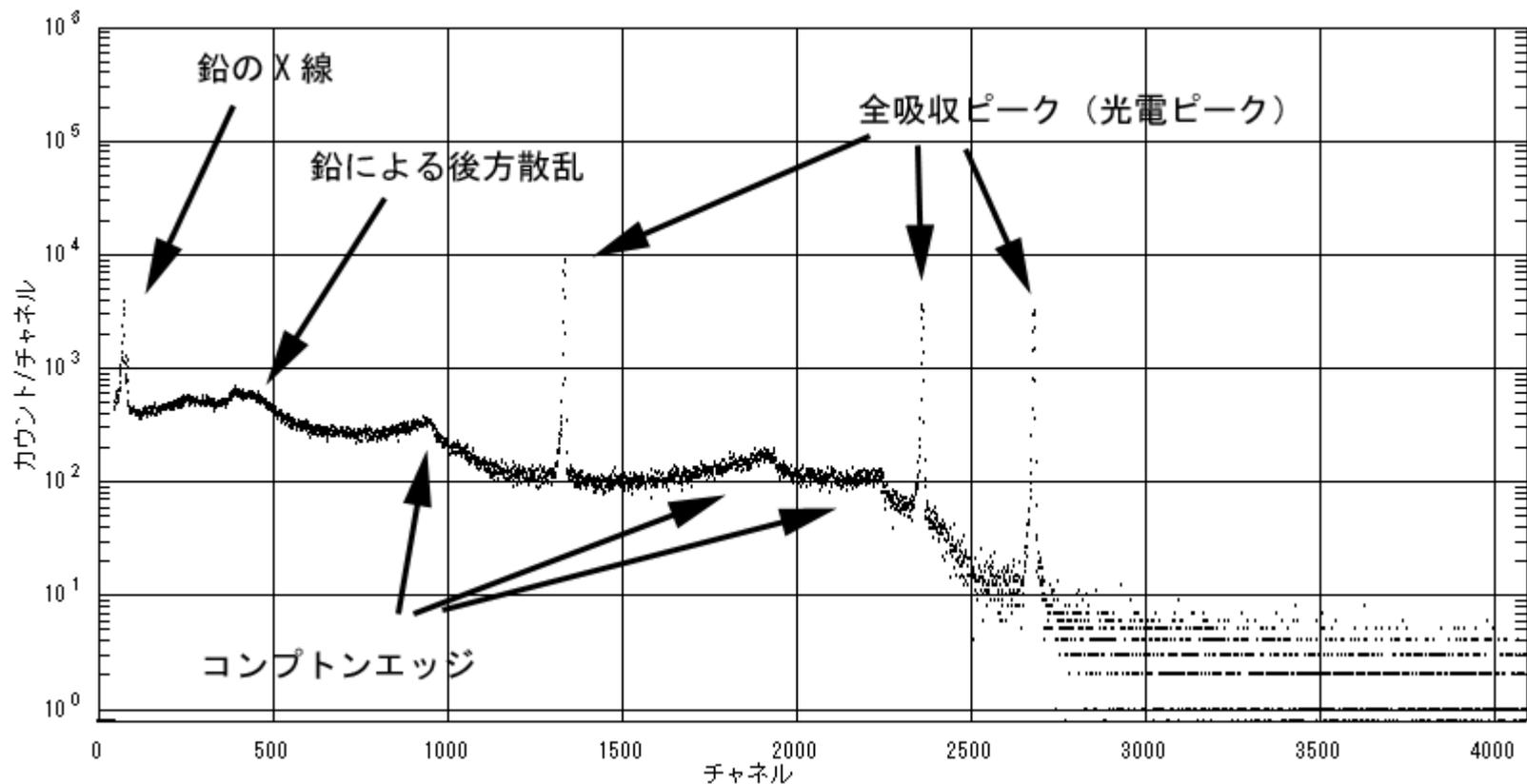
**非常に高価だが詳細なスペクトルを得ることが出来る**

# ガンマ線スペクトルの見方(1)



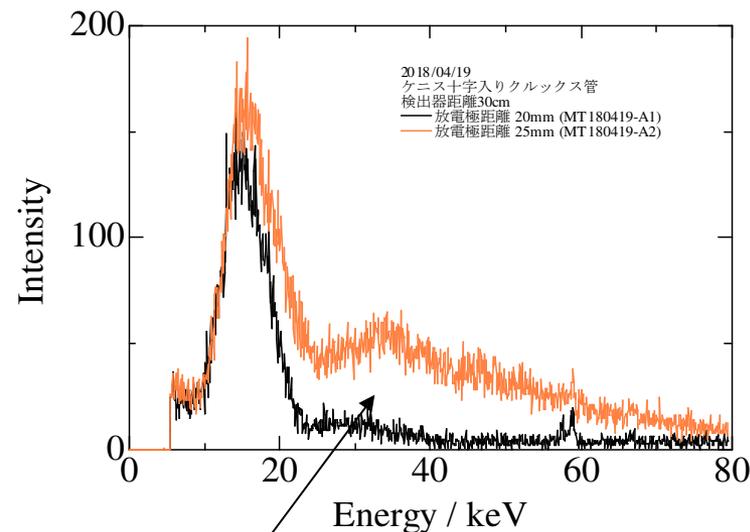
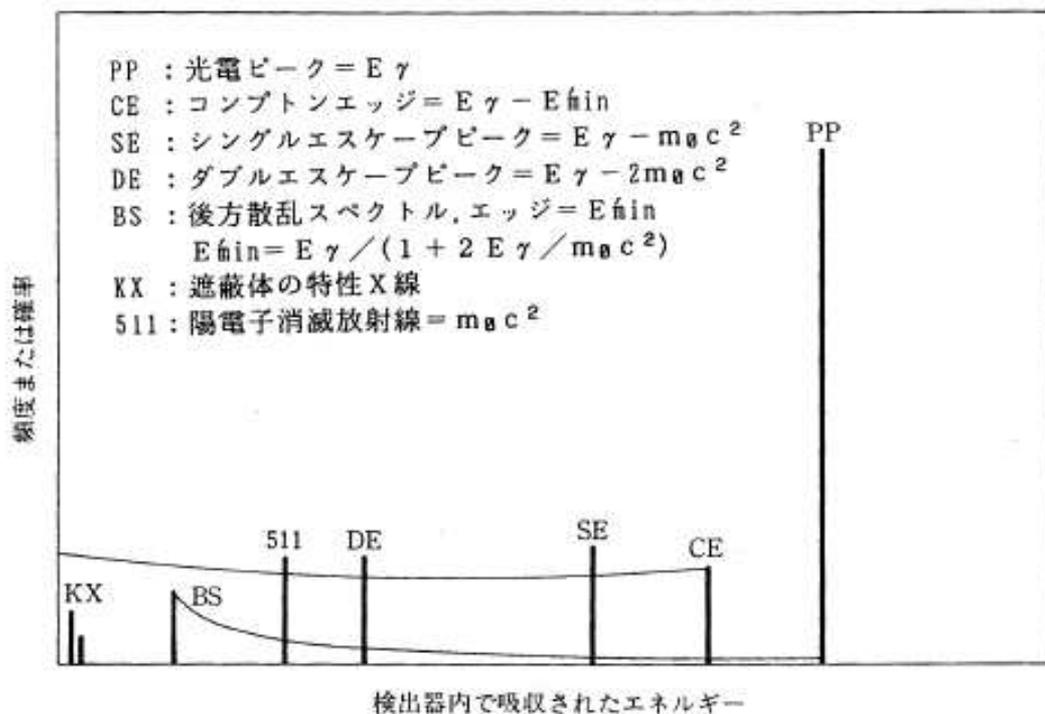
MCA(マルチチャンネルアナライザー)で得られるスペクトルは、有限の幅のエネルギーの大きさごとに分類した、小さな棒グラフの集合で出来ている。

# ガンマ線スペクトルの見方(2)



$\gamma$ 線のエネルギーが検出器の中で全て吸収される場合、全吸収ピーク(光電ピーク)としてシャープなピークを作り、コンプトン散乱により一部のエネルギーを与える場合、コンプトンエッジより低エネルギー側にブロードなスペクトルを示す。

# ガンマ線スペクトルの見方(3)

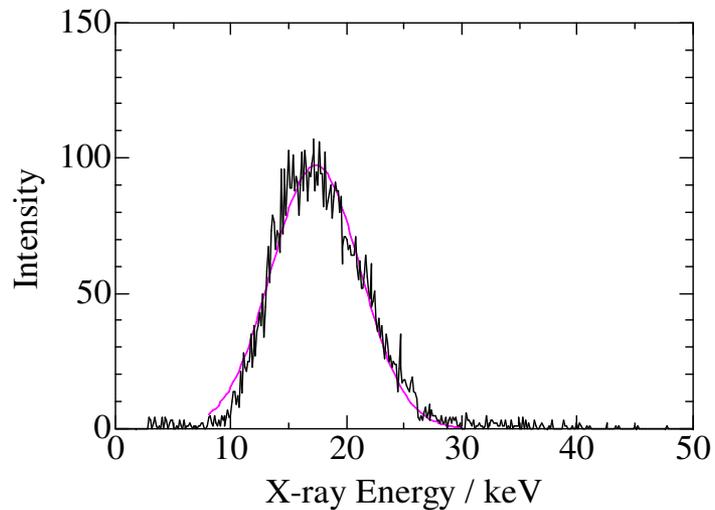
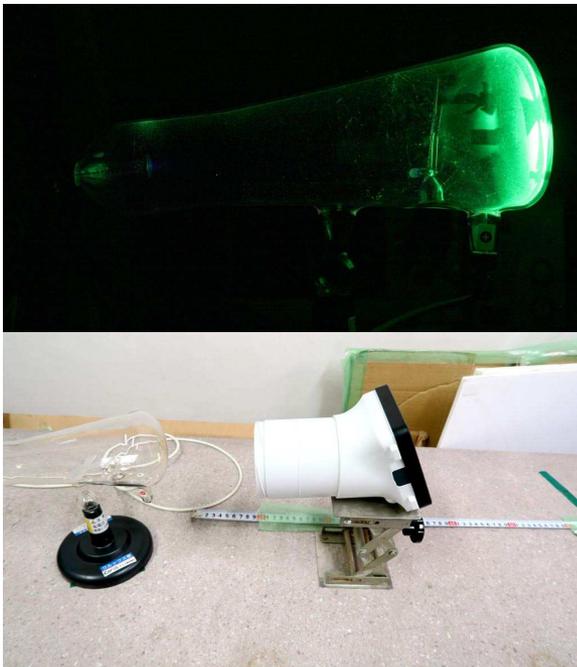


↑  
 パイルアップによる本来存在しないエネルギーのピーク

2本同時に入射した場合にはパイルアップによるサムピークが、電子対生成を伴う場合には511keVの消滅 $\gamma$ と、光電ピークから511keV低いシングルエスケープピーク、1022keV低いダブルエスケープピークが見られる場合がある。

# 低エネルギーX線に対する サーベイメーター挙動の比較

	電離箱		NaIシンチレーター		GM管	プラスチックシンチレーター	CsIシンチレーター
	日立 ICS-1323		富士電機 NHC6	アロカ TCS-172	Ranger	Kind-mini	エアーカーンターEX
距離 d	70 $\mu$ m線量当量	1cm線量当量	Be窓	汎用	1min scaler	カバー無し	カバー無し
(cm)	mSv/h	mSv/h	$\mu$ Sv/h	$\mu$ Sv/h	kcpm	$\mu$ Sv/h	$\mu$ Sv/h
15	8.15	5.3	1.34		33.89	118	12.6
30	1.91	1.28	10		31.68	64	12.5
50	0.64	0.465	13.1	0.15	27.32	24.5	8.3



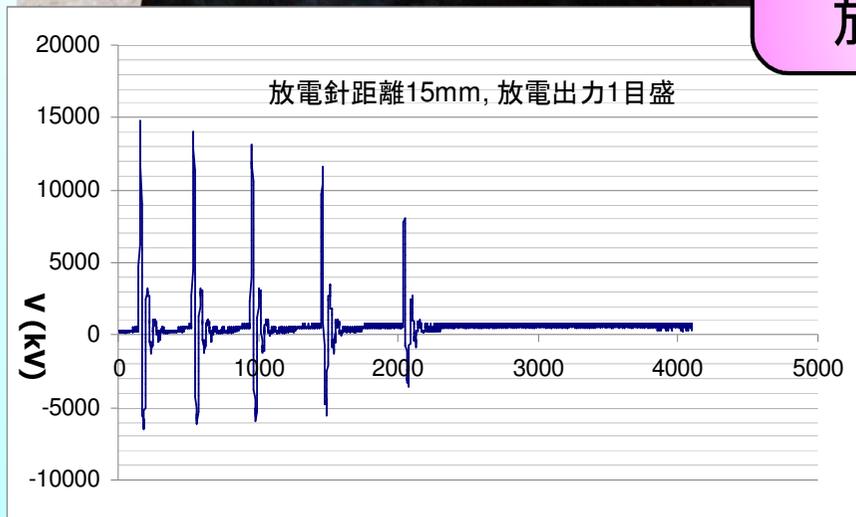
CZT(CdZnTe)検出器によるクルックス管からの  
エネルギースペクトル

# 誘導コイルを用いた高圧印加について



空気中での絶縁破壊電圧が 1kV で 1mm 程度であることから、放電極の距離を変えることで印加する最大電圧を規定できる。放電電圧以下では、放電出力を変えることで連続的に電圧をコントロール可能。放電電圧以上に出力を上げると無駄に放電が激しくなるので、目的の電圧を出力するためには丁度放電が起こり出す出力程度にコントロールする必要がある。

放電出力



電圧測定時にはガラス抵抗体などの物理的もサイズの大きい、100M $\Omega$ 以上の抵抗と、100k $\Omega$ 程度の抵抗を組み合わせた分配器を用いて測定するが、アースを取っていないとカソード側も高電圧をパルス的に出しているため、2chのオシロスコープでアノード側との差分を取る必要がある(フローティング測定)。

# 直接測定法とスミヤ法

汚染検査を行いたい場所の空間線量率が高かったり、通常のサーベイメーターでは測定できないトリチウムなどを測定したい場合、その場で対象物を測定する直接測定ではなく、スミヤろ紙で表面をぬぐって、バックグラウンドの低い場所で測定を行う、スミヤ法が用いられる。

対象物の表面汚染密度を求める場合には、拭き取る面積と、どの程度の効率で表面の汚染を拭き取ることが出来るかという拭き取り効率を知る必要がある。



# 液体シンチレーションカウンター

シンチレーターとは放射線が入射すると発光する性質を持った物質の総称であり、固体の物と液体の物があり、後者は液体シンチレーションカウンターとして使用される。

試料をシンチレーターに浸して測定するため、非常にエネルギーの低い $\beta$ 線( $^3\text{H}$ からの18.6keVの $\beta$ 線など)も検出可能である。

液体シンチレーターは一種の有機溶媒であり、測定毎に捨て、バイアルを洗浄する必要があるため、手間と費用がかかるが、 $^3\text{H}$  や、 $^{14}\text{C}$  による汚染の恐れがある場合、この液体シンチレーションカウンターか、後述のガスフローカウンターを用いて検査する必要がある。

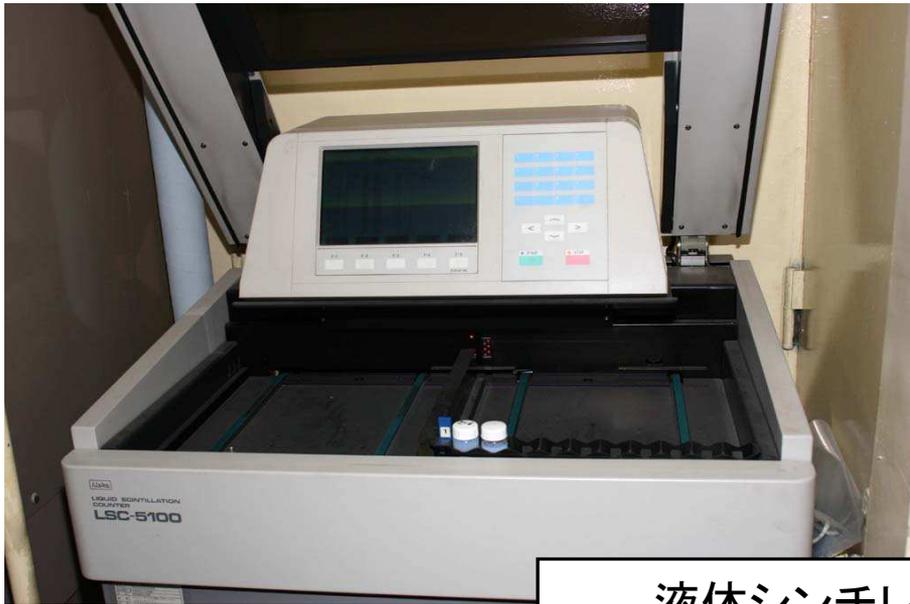
シンチレーターであるため、発光強度からエネルギーを評価できる。このため、ある程度の核種同定が可能である。

# ガスフローカウンター

原理はGMサーベイメーターと同じであり、放射線による気体分子の電離に伴う電子雪崩をパルスとして測定するが、クエンチガスを雲母の膜などで密封したGM管と異なり、試料を入れたチャンバーの中に流し込んで測定を行うため、液体シンチレーションカウンター同様、非常にエネルギーの低い $\beta$ 線( $^3\text{H}$ からの18.6keVの $\beta$ 線など)も検出可能である。

据置のチャンバーに試料を回転台などを用いて挿入する、 $2\pi$ ガスフローカウンターと、ハンディタイプのプローブに小型のガスボンベからクエンチガスを供給し、プローブ表面のメッシュから垂れ流し続けるサーベイメーターが存在する。

GMサーベイメーター同様にエネルギー評価はできず、countだけが出力される。



液体シンチレーションカウンター



2π ガスフローカウンター