

2023年度_研究推進機構放射線施設共同利用報告会
2024/9/027 @ オンライン

大学の教育・研究現場における X線装置の管理

大阪公立大学 放射線研究センター
秋吉 優史

E-Mail: akiyoshi-masafumi@omu.ac.jp

学協会に於けるX線安全管理の動き

○日本保健物理学会

教育現場における低エネルギーX線を対象とした放射線安全管理に関する専門研究会

(H31～R2年度)主査・秋吉 優史

中高の教育現場で用いられるクルックス管は、条件によっては 15 cm の距離で Hp(0.07) が 200 mSv/h に達する高い線量の X 線が漏洩していることが明らかとなったが、誘導コイルの放電極距離を20mm以下にするなどの運用上の注意点を遵守することで無視可能な線量(年間 10 μ Sv 以下)に管理可能である事を明らかとした。

理事会直轄 エックス線被ばく事故検討WG

(R3～R4年度)主査・飯本 武志

2021年5月29日、日本製鉄(兵庫)でエックス線被ばく事故が発生し、労働者が年間の被ばく線量限度の数倍から数十倍に及ぶ大量の被ばくをした可能性があることが報道されたことを受けて、この事故の社会的な重大性を考慮し、「エックス線被ばく事故検討WG」を設置した。同WGでは、事故の背景と経緯、線量評価、健康影響などの情報収集を行い、1)安全管理上の対策・課題、2)測定、線量推定に関する課題、3)社会とのコミュニケーション上の課題、等を整理した。

非破壊検査分野等におけるエックス線作業における放射線安全教育に関する専門研究会

(R6～R7年度)主査・古渡 意彦

昨今、エックス線作業主任者が選任され作業管理等がなされている事業場においても、エックス線被ばく事故が発生している。そのためエックス線作業における放射線防護の具体的な措置を調査して、放射線業務従事者の労働安全に係る能力向上と被ばく線量低減に効果のある教育内容等を検討する必要がある。本専門委員会では作業員等への教育内容を実際に事業場に対して展開しその効果を評価することで、特に製造業、非破壊分野における放射線業務従事者への放射線安全文化のさらなる醸成につなげることを目的としている。

○日本放射線安全管理学会

6月シンポジウムセッション「X線利用に関する放射線管理」

2024年6月17日 座長・山口 一郎

- ・エックス線利用にかかる我が国の安全規制と現場管理における論点(飯本 武志)
- ・研究現場におけるX線装置の管理(秋吉 優史)

クルックス管からのX線管理に於ける問題点

一般公衆に対する線量限度が法体系に取込まれていない

ICRP 1990/2007年勧告での一般公衆に対する線量限度は我が国の法体系に取込まれておらず、実効線量 1mSv/年という値も事業所境界での線量限度から導かれた値。

X線装置の定義が明確ではない

厚労省 全国規模での規制改革要望に対する見解の確認
<http://www8.cao.go.jp/kisei/siryo/030919/09-2.pdf>

RI法では1MeV以下のX線は対象外であり、定義されている放射線発生装置にも該当しない。電離則においては特定X線装置の定義からは外れるが、「X線装置」の免除レベルが規定されておらず、放射線安全を確保するための法令根拠が明確ではない。

不均等被ばくであり実効線量評価が困難

20keV X線 は水での半価層が 1cm程度であるため、体表からの深さによって線量が大きく変化する。またブロードなエネルギースペクトルを持ち運用条件によってピークエネルギーも変わるが、低エネルギーではわずかなエネルギー変動で大きく透過率が変化する。平面的にも一様ではない。このため、防護量である実効線量の評価は容易ではない。

一般公衆に対する線量限度が法体系に取込まれていない

IAEA の GSR part3

計画被ばく状況として教育での放射線曝露を明示(3.1(e))

労働者への規制の範疇に16-18歳の**職業訓練**に伴う線量限度を提示(**実効線量** 6mSv/y, 眼の水晶体等価線量 20mSv/y, 末端部等価線量 150mSv/y) クルックス管が使われるのは一般的な理科の授業であり、これらとは切り離されるものとして考える必要がある。

ICRP Pub36 科学の授業に於ける電離放射線に対する防護

1983年の物であり実効線量当量での記載で **0.5mSv/y**、目や皮膚のような単一の臓器・組織の線量当量5mSv/yとなっており、**個々の授業**ではその **1/10** とされている。

ICRP-Pub101a 公衆の防護を目的とした代表的個人の線量評価

教育に伴う放射線曝露での線量評価でも代表的個人の考え方を導入する。

ICRP-Pub64 潜在被ばくの防護: 概念的枠組み 及び IAEA BSS

ICRP 1990年勧告(Pub60)では**免除**の要件として線量が trivial であること、防護が最適化されていることとされており、具体的には個人線量が **10 μ Sv/y** のオーダーとしている。

NCRP Report No.180 “Management of Exposure to Ionizing Radiation: Radiation Protection Guidance for the United States”

無視可能個人線量として線源か行為あたり実効線量で **10 μ Sv/y** を勧告。

X線装置の定義が明確ではない

放射線障害防止法

1MeV以下のX線は対象外。放射線発生装置も施行令第二条に列記されている物に限る。

電離則

特定 X線装置: 令第十三条第三項第二十二号に、定格管電圧が10kV以下の物もしくは「エックス線又はエックス線装置の研究又は教育のため、使用のつど組み立てるもの」は**対象外**。

X線装置: 定義が存在せず、免除規定も存在しない。

厚労省 全国規模での規制改革要望に対する見解の確認
<http://www8.cao.go.jp/kisei/siryo/030919/09-2.pdf>

「X線装置」とは、「X線を発生することを目的とした装置」であるらしい。

X線装置であると解釈された場合、何が必要か?

管理区域の明示	(電離則第三条)
放射線装置室の設定	(電離則第十五条)
警報装置	(電離則第十七条)
立入禁止	(電離則第十八条)
X線作業主任者の選任	(電離則第四十六条)
計画の届出	(労働安全衛生法第八十八条)

放射線の定義

原子力基本法 第三条

五 「放射線」とは、電磁波又は粒子線のうち、直接又は間接に空気を電離する能力をもつもので、政令で定めるものをいう。

放射線障害防止法

第二条 この法律において「放射線」とは、原子力基本法第三条第五号に規定する放射線をいう。

核燃料物質、核原料物質、原子炉及び放射線の定義に関する政令

第四条 原子力基本法第三条第五号の放射線は、次に掲げる電磁波又は粒子線とする。

- 一 アルファ線、重陽子線、陽子線その他の重荷電粒子線及びベータ線
- 二 中性子線
- 三 ガンマ線及び特性エックス線（軌道電子捕獲に伴って発生する特性エックス線に限る。）
- 四 **一メガ電子ボルト以上**のエネルギーを有する電子線及びエックス線

電子線及びX線

放射線障害防止法においては、1MeV以上の電子線及びX線を放射線としている。

→ 1MeV未満の電子線及びX線は、放射線障害防止法上は放射線ではない。

ただし、

○人の被ばくに関係する事柄については、1MeV未満の電子線及びX線による被ばくも含めるとされている → 電離則

・放射線業務従事者

放射性同位元素等又は放射線発生装置の取扱い、管理又はそれに付随する**業務**(→**取扱等業務**)に従事する者であって、**管理区域に立入る者**。

健康診断及び教育訓練を受けた後に放射線業務従事者として登録を行い、1年を超えない期間ごとに再教育訓練、健康診断を受ける必要がある。また、各個人に対して被曝線量の測定を行う必要がある。

→ 見学、掃除、機器の修理等のため取扱等業務を行わずに一時的に立入る者は、**一時的立入者**として区別される。

逆に、放射性物質の帳簿上の管理を行うなど取扱**等**業務を行っていても、管理区域に立ち入らない事務員などは放射線業務従事者ではない。

管理区域とは

放射線を放出する同位元素の数量等を定める件 第四条

(1) 外部線量 1.3 mSv/3月以上

(2) 空気中のRIの3月間平均濃度が空気中濃度限度の10分の1以上

(3) RIの表面密度が表面密度限度の10分の1

を超えるおそれのある場所

(1)、(2)が複合する場合は、それぞれの割合の和が1を超えるおそれのある場所

X線装置としての管理が必要な場合

管理項目

除外規定

管理区域の明示

(電離則第三条)

放射線装置室の設定

(電離則第十五条)

警報装置

(電離則第十七条)

立入禁止

(電離則第十八条)

X線作業主任者の選任

(電離則第四十六条)

計画の届出

(労働安全衛生法第八十八条)

実効線量が三月間に付き1.3mSvを超える恐れがない場合。← 管理区域の定義

その外側における外部放射線による1cm線量当量率が $20 \mu\text{Sv/h}$ を超えないように遮へいされた構造の放射線装置を設置する場合又は放射線装置を随時移動させて使用しなければならない場合。

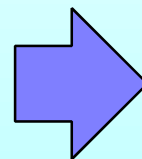
管電圧 150kV 以下の場合。

実効線量が一週間に付き 1mSv 以下の場所。

エックス線装置に例外規定はないが、主任者を選任するのは「管理区域」ごと。管理区域に該当しない場合は必要ない。また、装置内部は管理区域であっても、内部に体の一部が入ることがない場合は必要ない(標識での明示は必要)。

労働安全衛生規則第八十五条 → 別表七 → 電離則第十五条の放射線装置に該当しない場合。

クルックス管の近傍では一回の実験で1.3mSv を超える可能性が十分にある。



ガラスの水槽などで囲えばその表面の線量は距離と遮蔽で大幅に低減される。
X線を活用した実験をする場合は遮蔽体で囲み、中に入れないようにすることが必要か？

エックス線装置の使用について

[平成7年4月1日委員会制定]

注：用語・手続き等については、**大学における放射線障害の防止に関する規程及び各部局の放射線障害予防規定による。

1. エックス線装置（本体あるいはその付近に標識を掲示、見本を参照のこと）

- (1) **1メガ電子ボルト未満で定格管電圧が10キロボルト以上のエックス線発生装置**（例：XRF、ソフテックス、X線回折装置等）又は付随的にこれと同等のエックス線を発生する装置
- (2) 定格加速電圧が100キロボルト以上の電子顕微鏡

2. 設置から廃止まで

(1) 人事院への届出

エックス線装置（電子顕微鏡を除く）を設置・変更・廃止した場合は人事院規則10-5（職員の放射線障害の防止）第12条により人事課を通じ、人事院へ届け出なければならない。

① 設置

- (イ) 所定の様式による届出に構造図及び設置に係る検査記録の写しを添付すること。
- (ロ) 届出は設置に係る検査を終了した日から30日以内に行うこと。

エックス線装置等の使用者の安全管理について

1 MeV 未満のエネルギーを有する電子線及びエックス線を発生させる装置等（エックス線装置等）は、放射性同位元素等規制法の対象外となり、労働安全衛生法（安衛法）－電離放射線障害防止規則（電離則）のみの規制を受けます。

エックス線装置等については、

「エックス線照射ボックス付きエックス線装置であって、**外側での実効線量が3月間につき1.3ミリシーベルトを超えないように遮へいされた照射ボックスの扉が閉じられた状態でなければエックス線が照射されないようなインターロックを有し、当該インターロックを労働者が容易に解除することができないような構造のもの**」については、「**当該装置の外側には管理区域が存在しないものとして取り扱って差し支えない**」こと。（平成13年3月30日付厚生労働省労働基準局長発都道府県労働局長宛通知基発第253号（以下、「基発第253号」という。）

という規定が通知されています。

したがって、このような装置を使用する者は、管理区域に立ち入ることがないため、

- (1) **管理区域内において放射線業務に従事する労働者**（以下「放射線業務従事者」という。）
（電離則第4条第1項）

には該当せず、

- (2) 管理区域内において受ける外部被ばくによる線量及び内部被ばくによる **線量の測定**
（電離則第8条第1項）

- (3) 管理区域に立ち入るものに対して行う医師による **健康診断**（電離則第56条第1項）
の対象外です。尚、必要な安全管理として

- (4) これらの装置を使用する場合であっても、労働者に対しては、**安全衛生教育等において、放射線の人体への影響、及び被ばくを防止するための装置の安全な取扱い等について周知させること。**」（基発第253号）

- (5) 事業者は、**当該装置の適正な使用のため、必要な知識を有する者を当該装置の管理責任者として選任し、当該装置の安全装置等を有効に保持し、労働者の手指等が装置の中に入らないよう必要な措置を講じさせることが望ましいこと。**（基発第253号）

が定められています。

また、「(上記枠内の規定に該当する)装置に該当するエックス線装置については、その外側に管理区域が存在しないので、(上記枠内で規定する)状態を保持した上で当該装置を使用する場合は、エックス線作業主任者の選任は要しないこと。」（基発第253号を元に項目番号を修正）とされていますので、**対象となる装置にエックス線作業主任者免許を有する者がエックス線作業主任者に選任されている場合は放射線業務従事者としての管理が必要ですので研究推進課までお知らせ下さい。**

クルックス管からのX線評価に於ける問題点

20keV 程度とエネルギーが低い

一般向けに普及している半導体素子を用いた簡易サーベイメータはおろか、放射線計測で信頼されている NaI シンチレーション式サーベイメータもエネルギーが低すぎて実態とかけ離れた値が測定される。

パルス状に放出されている

Be窓を用いた低エネルギーX線用 NaI シンチレーション式サーベイメータなども販売されているが、パルス場であるためパイルアップしてしまい非常に小さい値しか示さない。Be窓のGe検出器や、CdTe(CZT)検出器での測定も、非常に小さなコリメーターを使いカウントレートを落とす必要がある。

電源装置（誘導コイル）が不安定である

同じ装置を同じ設定で動作させても測定結果が大きく異なる事がある。機械的な動作を含む誘導コイルはその日、その時の状況で出力電圧が変動するため、系統的な比較を行うには何らかの方法でモニタしながらの測定が必要。

様々な測定装置による測定結果

	電離箱		蛍光ガラス線量計		GM管
	日立 ICS-1323		千代田テクノル ガラスバッジ FX型		Ranger
距離 r	H*(0.07)	H*(10)	H*(0.07)	H*(10)	1min scaler
cm	mSv/h	mSv/h	mSv/h	mSv/h	kcpm
15	8.15	5.3	4.62	1.62	33.89
30	1.91	1.28	1.26	0.48	31.68
50	0.64	0.465	0.48	0	27.32
	NaI シンチレーター		プラスチック シンチレーター	CsI シンチレーター	半導体検出器
	富士電機 NHC6	アロカ TCS-172	Kind-mini	エアーカウンターEX	エアーカウンターS
距離 r	Be窓	汎用	カバー無し	カバー無し	
cm	μ Sv/h	μ Sv/h	μ Sv/h	μ Sv/h	μ Sv/h
15	1.34	0.17	118	12.6	<9.99
30	10	0.17	64	12.5	0.05点減
50	13.1	0.15	24.5	8.3	<9.99

一般向けに出回っている簡易サーベイメーターはもちろん、空間線量測定で信頼されている TCS-172 などでもほぼ全く測定できない。

低エネルギー用NaIシンチレーターでの測定



富士電機 NHC6
φ 12.7 × 12.7mm NaI シンチレーター
測定範囲 X線 8~300keV (~60 μSv/h),
γ線 50~1500keV (~600 μSv/h)

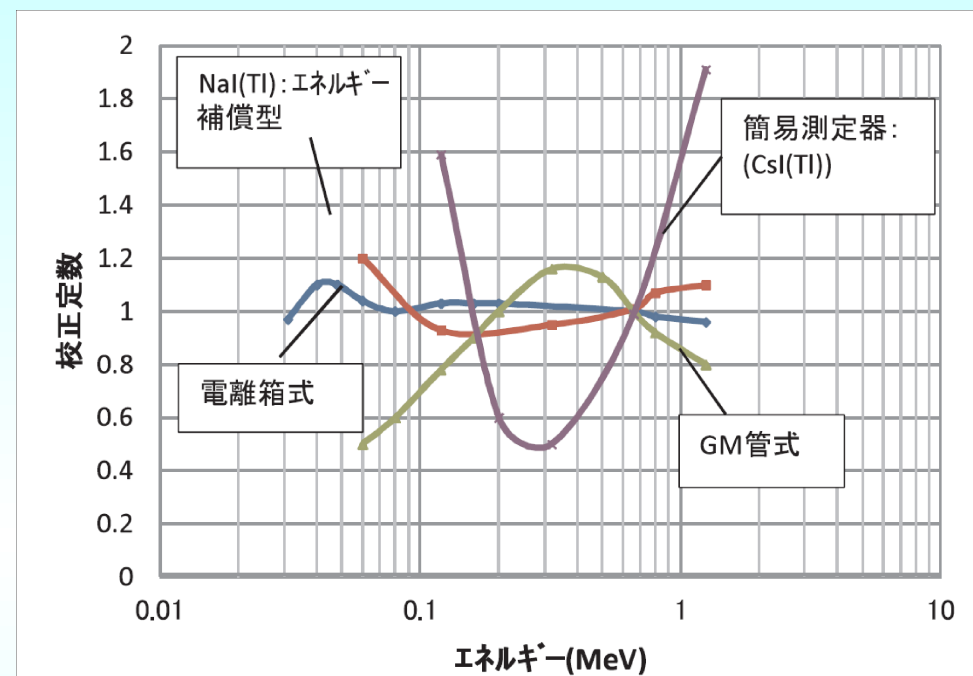
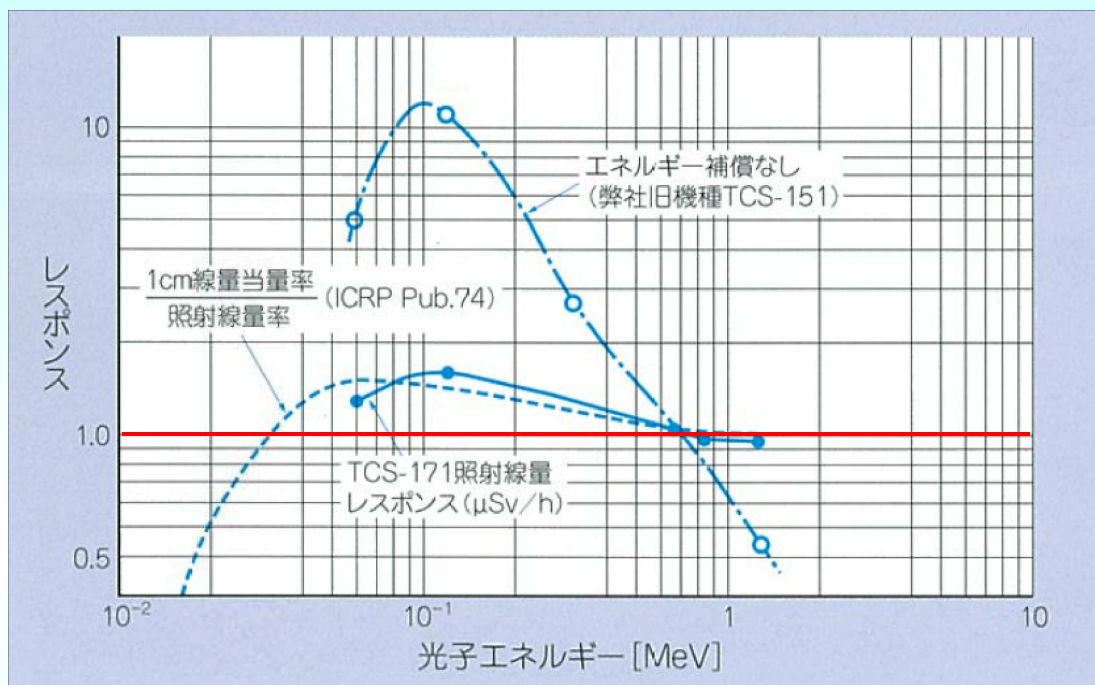


Rigaku Get Smart XU
NaI シンチレーター
測定範囲 5~300keV (~10 μSv/h)

通常の NaIシンチレーションサーベイメーター TCS-172 だけでなく、
低エネルギー測定が可能な新製品でも正常な評価が出来ない。

時間的に一様な放射線場ではなく、パルス場であることが原因

サーベイメータのエネルギー特性



NaIシンチレーションサーベイメータのエネルギー特性

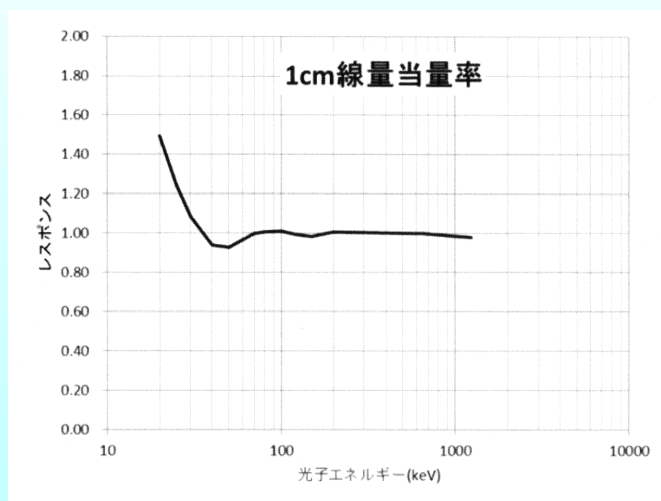
(アロカ TCS-171カタログより)

様々なサーベイメータのエネルギー特性

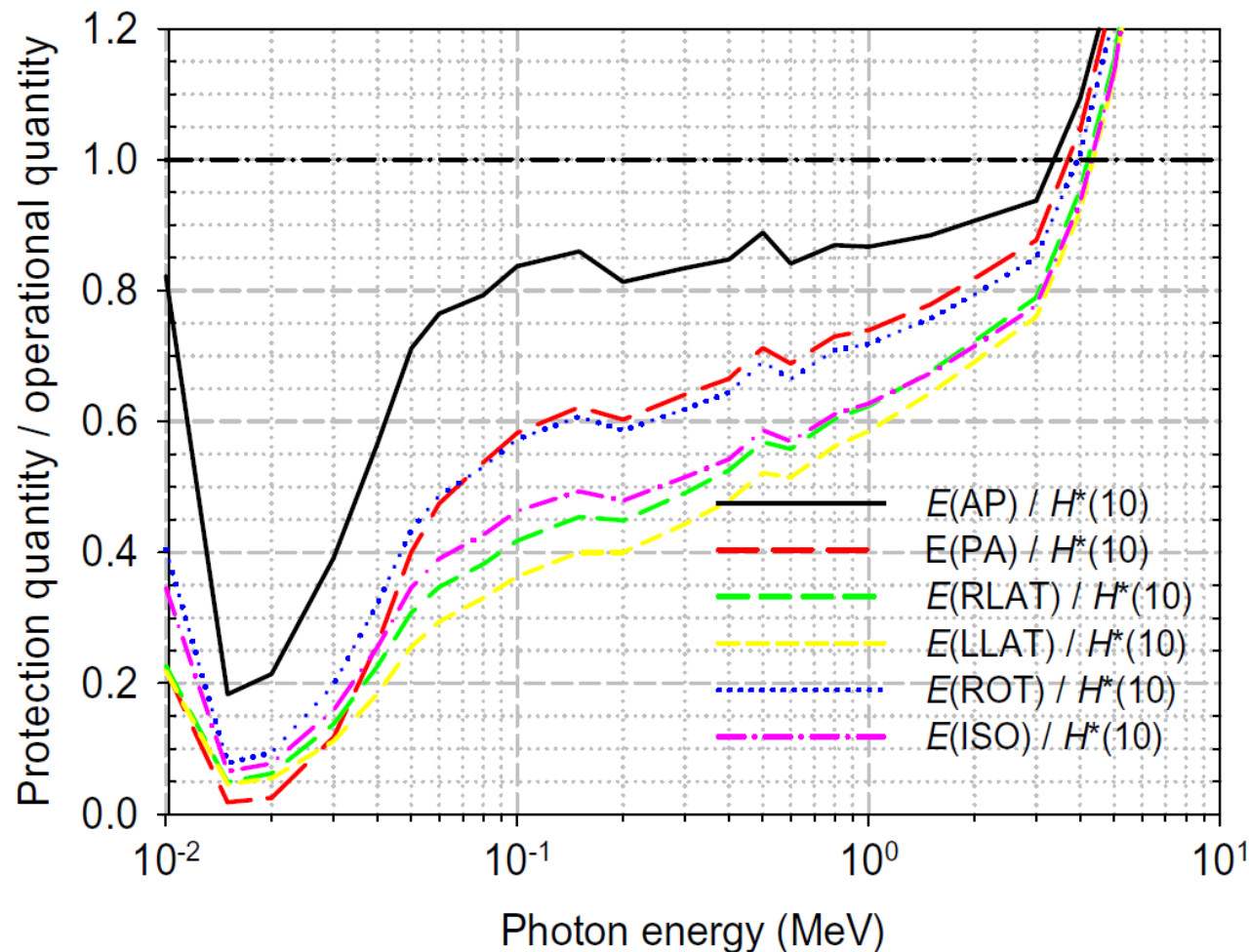
(放射線計測協会 放計協ニュース No.48, 2011, p6)

電離箱サーベイメータのエネルギー特性

(日立 ICS-1323マニュアルより)



防護量と実用量の違い



ICRP Pub116
Fig.5.2

測定に際しては荷電粒子平衡は取られていない。平衡を取ってやれば高エネルギーでも安全側に評価となる。

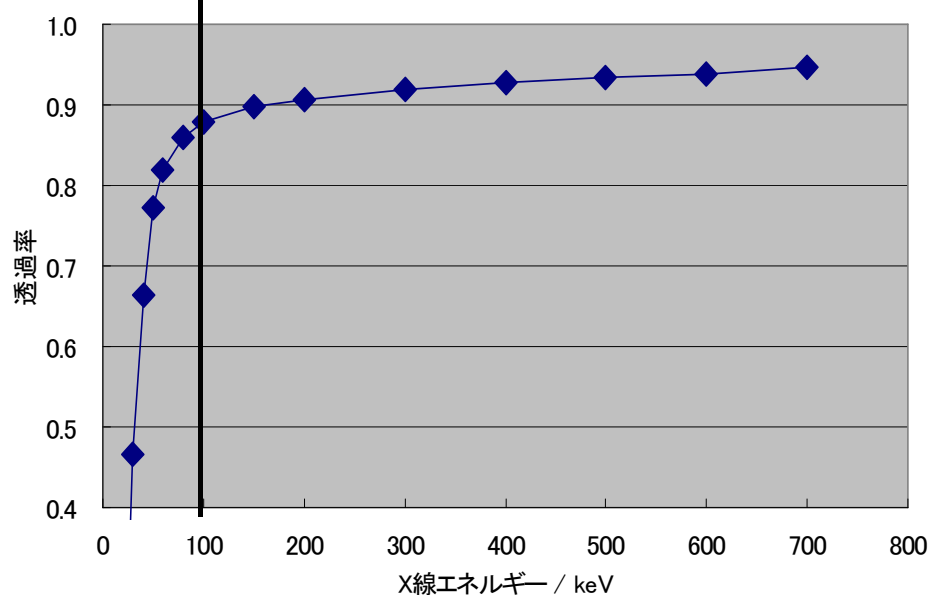
AP, PA 等は放射線の入射方向に対する人体の向きを表わし、APは正面、PAは背面、RLAT・LLATは右・左側面、ROTは立位で水平回転、ISOは等方からの入射を表わしている。

実効線量 $E / 1\text{cm}$ 線量当量 $H^*(10)$ のエネルギーによる変化。1cm線量当量は20keVでは5倍程度の過大評価となる。100keV-3MeV程度までは変化は小さく、常に若干の過大評価となっている(安全側に評価)。

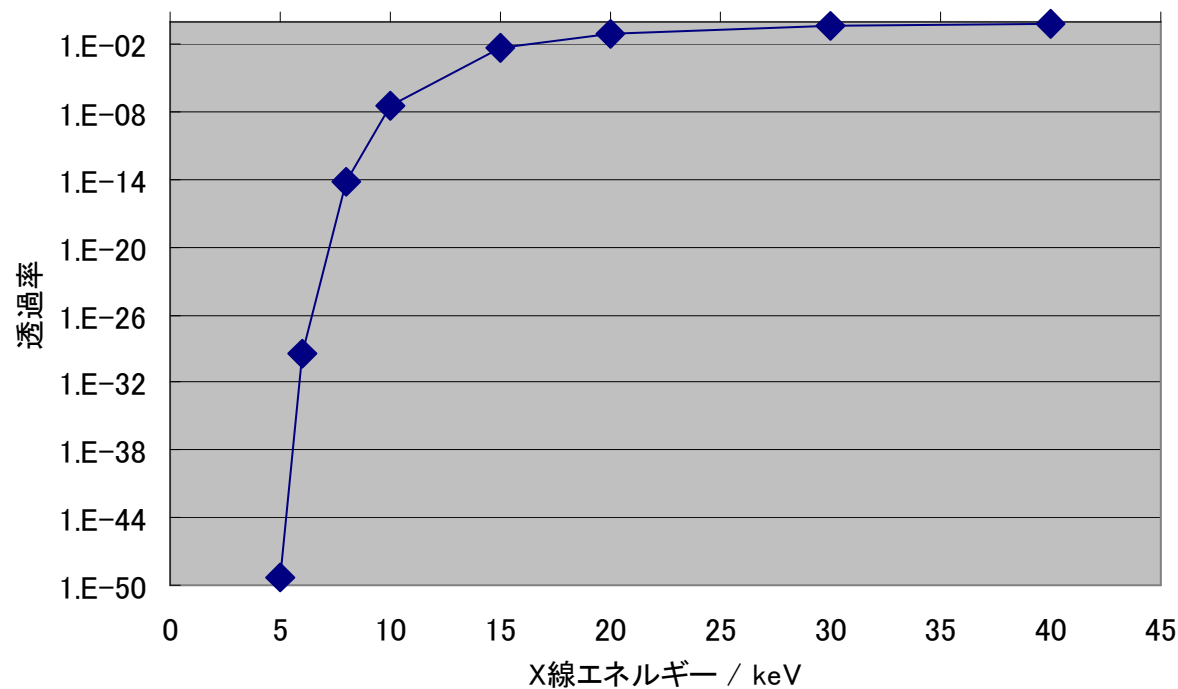
わずかな印加電圧低下での大きな線量の変化

20keV 前後のX線は僅かなエネルギー変動により、クルックス管自体を構成するガラス管の透過率が何桁も変わる。

100keV 以上のエネルギーでは
余り大きく変わらない



30keV と 15keV で約100倍違う。



3mmのガラスに対するX線の透過率

誘導コイルを用いた高電圧印加について



Distance of Discharge Electrodes
DDE

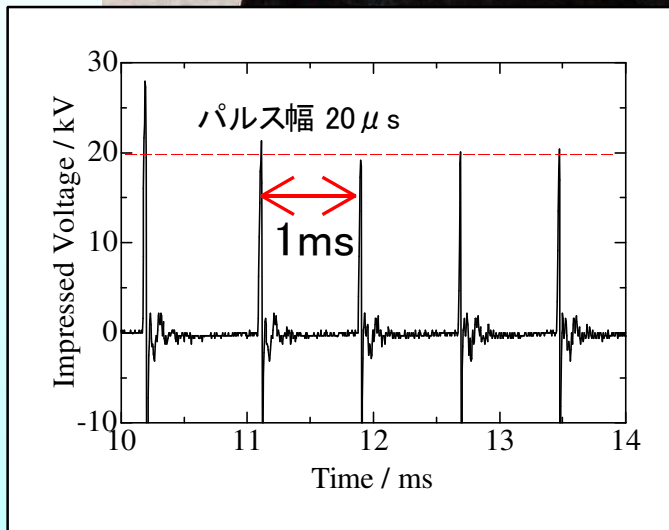
PW

放電出力

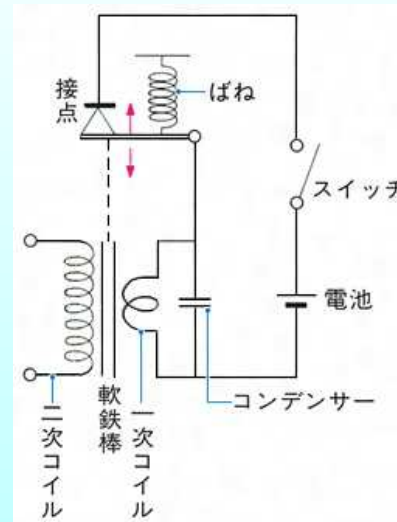
放電出力ダイヤルによりトランスの一次側に印加する電圧を変えることで連続的に出力電圧を変化させることができるが、**特定の電圧に設定出来るわけではない。**

空気中での絶縁破壊電圧が 1kV で 1mm 程度であることから、放電極間の距離を変えることで印加する**最大電圧を規定できる。**

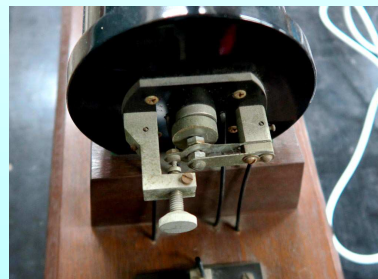
→ 20mm にしておくと 20kV 以上かけようとしても空中放電で電流がクルックス管をバイパスして流れるためそれ以上電圧が上がらない、**安全装置**となる。



放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流 80 μA

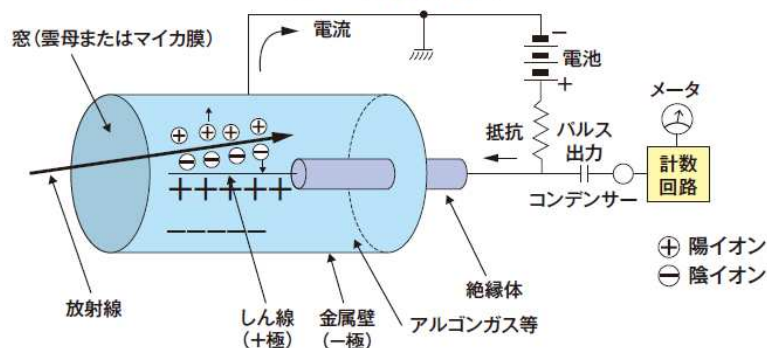


ブザーの回路で、一次側に断続的な電圧のパルスが発生させ、トランスで二次側に高圧を出力する。一次側の電圧を変化させると二次側の電圧も変化する。半導体回路で一次側のパルスが発生している装置もある。

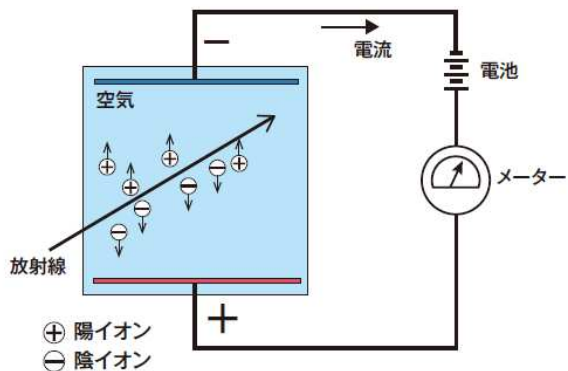


放射線計測器の測定原理

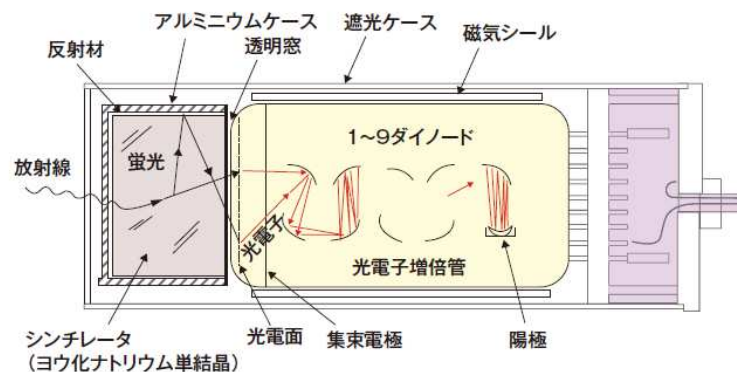
GM計数管



電離箱



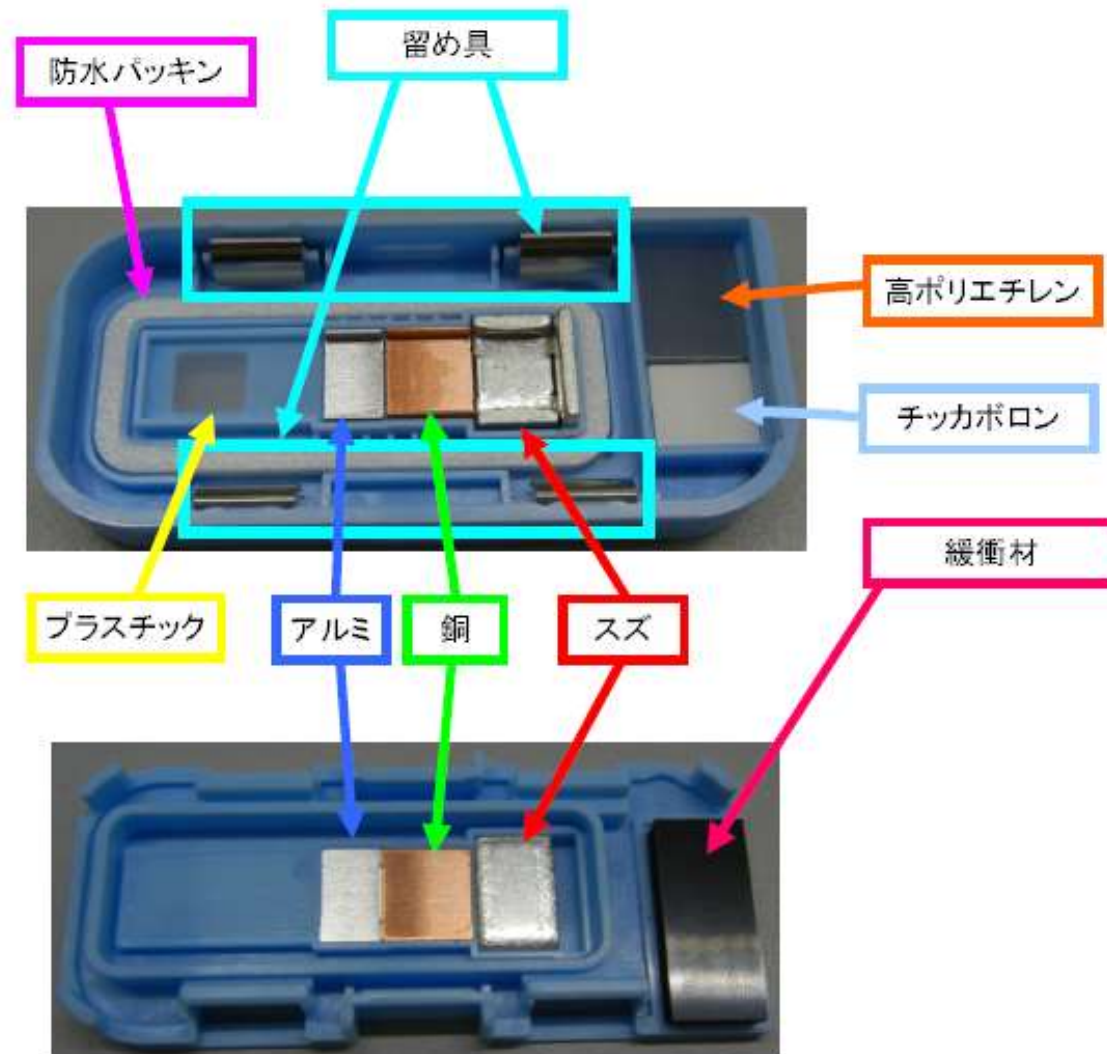
シンチレーション検出器



(注) 電離箱では、 $10^{-9} \sim 10^{-14}$ 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

ガラスバッジホルダのフィルタ構造

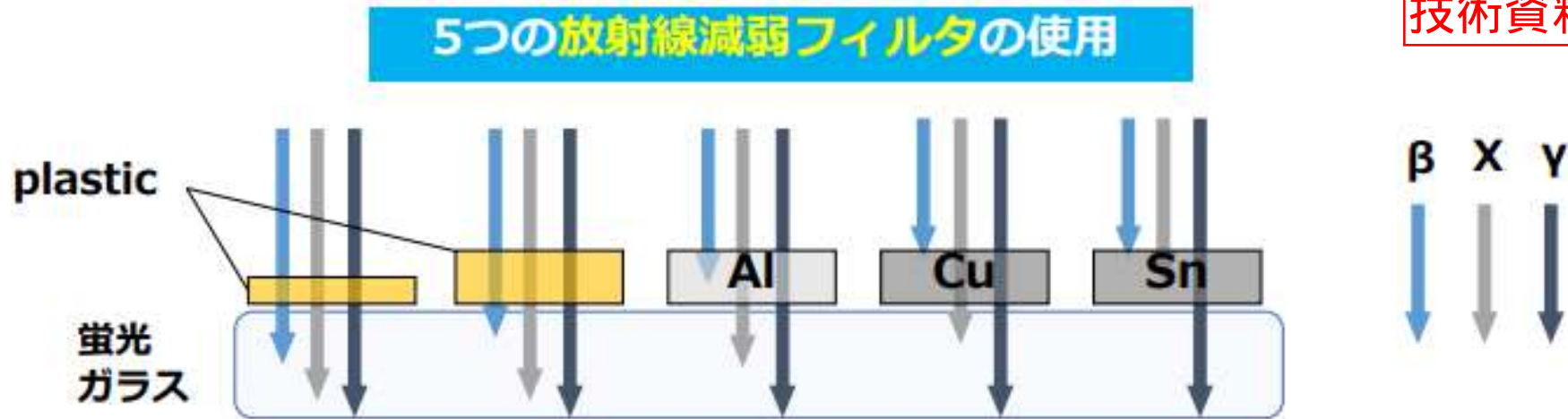


蛍光ガラスでの線量測定

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

千代田テクノル
技術資料より

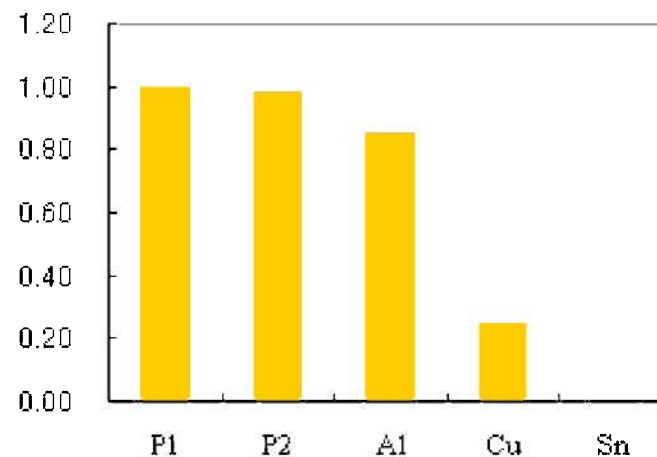
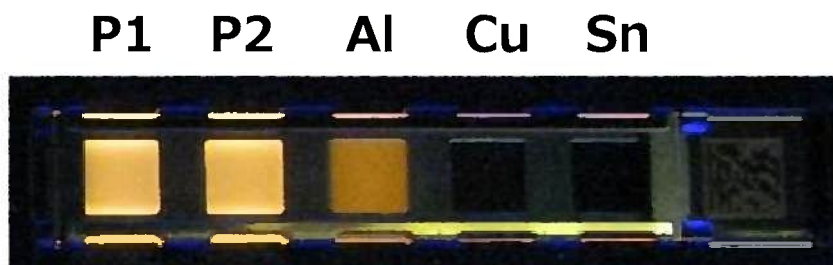


蛍光ガラスの各フィルタ下の発光パターンから、
放射線の種類やエネルギーを知り、レスポンスを補正し線量を求める

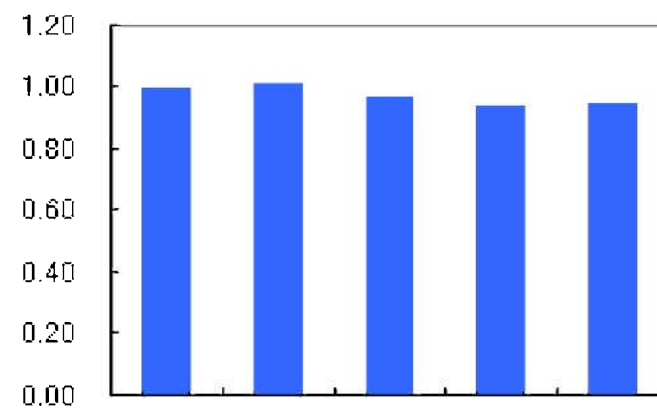
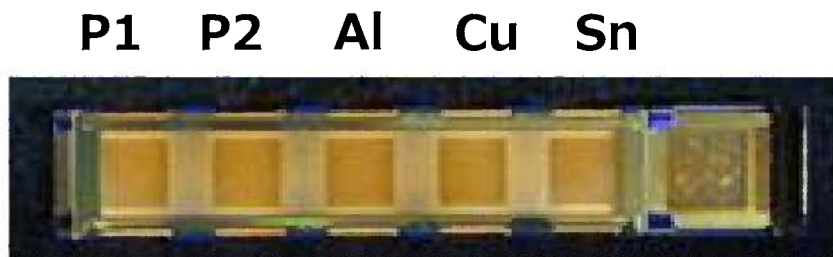
目次へ

蛍光ガラスの発光パターン例

✓ 30 keV X線

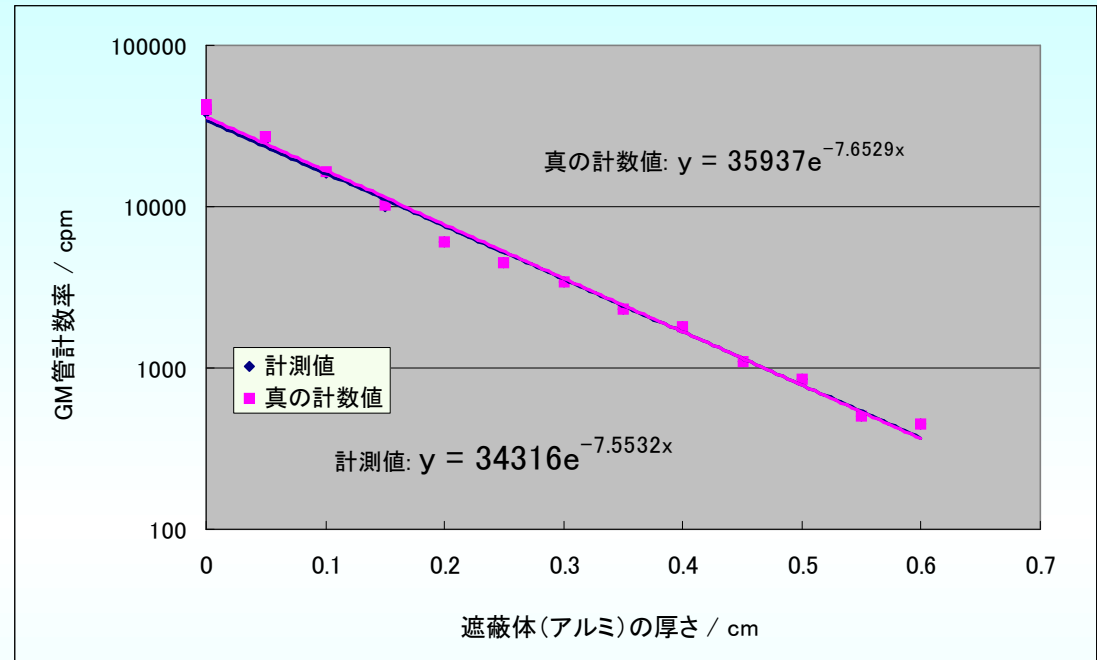


✓ ^{137}Cs γ 線(662 keV)



目次へ

GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価



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、 7.65cm^{-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**。

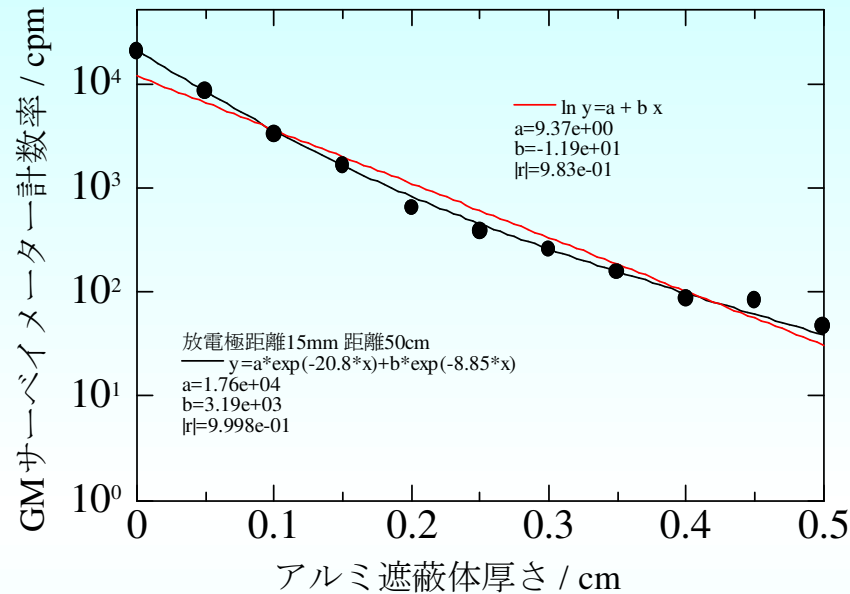
当初低エネルギー側に尾を引いたスペクトルを想定しており、遮蔽が薄い領域で計数率が高くなる事が予想されたが、**単一のエネルギーだけで説明できてしまった**。

遮蔽体を用いた測定前後での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、50cm位置で測定し、評価結果はほぼ同じであった。

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

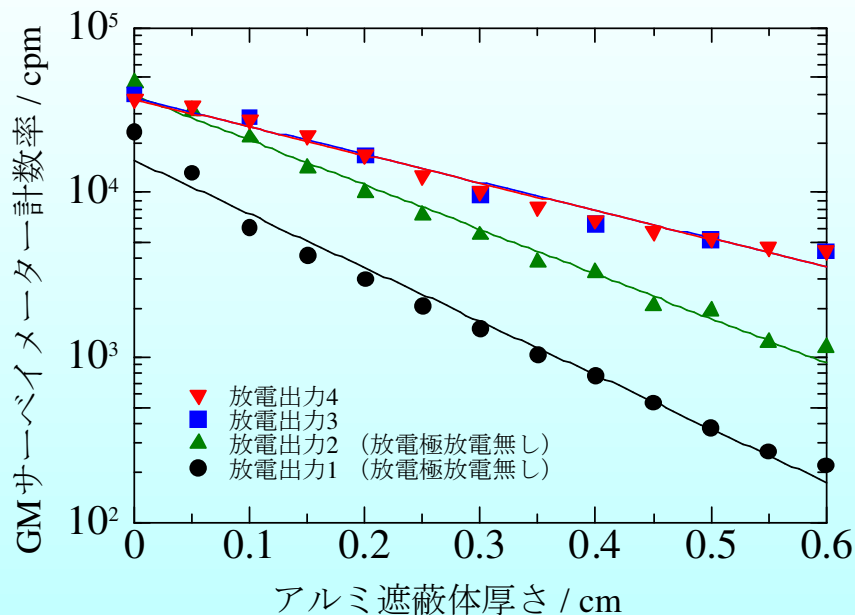
GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価

放電極距離15mmでの測定では、15keVの成分だけでは説明できず、20keVの成分との足し合わせで説明された。



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

放電極距離は30mmで一定で、放電出力を変化させると線減衰係数が変化していき、放電極で放電が起こる出力3目盛以上で一定となった。



放電出力 (目盛)	線減衰係数 (cm^{-1})
1	7.50
2	6.05
3	3.92
4	3.89