

2019年 3月 28日

クルックス管プロジェクトの 進捗状況まとめ

大阪府立大学 放射線研究センター 秋吉 優史
クルックス管プロジェクト有志各位

秋吉 優史: akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp

<http://bigbird.riast.osakafu-u.ac.jp/~akiyoshi/Works/index.htm>



背景

本発表の背景

2017年3月に改正告示が公示された新・中学校学習指導要領

p65 (3) 電流とその利用 ア(ア)電流 ○エ 静電気と電流

「異なる物質同士をこすり合わせると静電気が起こり、帯電した物体間では空間を隔てて力が働くこと及び静電気と電流には関係があることを見いだして理解すること。」

↓「内容の取扱」

p71 アの(ア)の ○エ については、電流が電子の流れに関係していることを扱うこと。また、**真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れること。**

H31 教科書検定
H33 全面実施

2017年6月に告示された中学校学習指導要領解説 理科編

雷も静電気の放電現象の一種であることを取り上げ、高電圧発生装置（誘導コイルなど）の放電や**クルックス管などの真空放電の観察**から電子の存在を理解させ、電子の流れが電流に関係していることを理解させる。

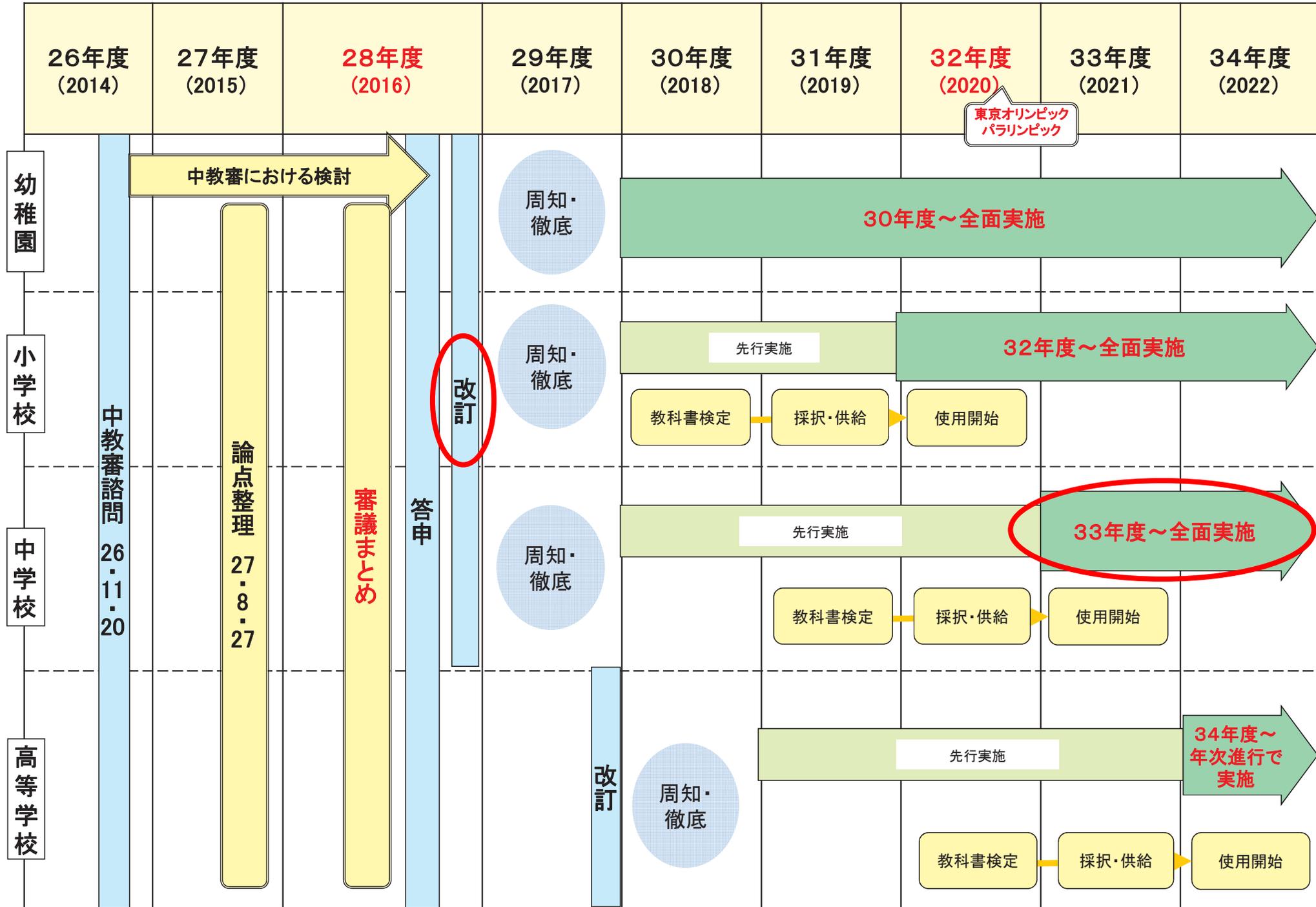
その際、真空放電と関連させて**X線にも触れる**とともに、**X線と同じように透過性などの性質をもつ放射線が存在し、医療や製造業などで利用されていることにも触れる。**

放射線に関する記述は2008年3月に公布された旧・中学校学習指導要領には記載がなかった。

クルックス管に関しては2008年版の学習指導要領解説にも記載されていた。

クルックス管を用いた実験を行う際の安全評価が必要

今後の学習指導要領改訂スケジュール（現時点の進捗を元にしたイメージ）



現行教科書に於けるクルックス管の取扱

教科書

5社全てでクルックス管に関する記述有り

- ・啓林館、東京書籍: レントゲンによるX線の発見など、放射線に関する記述がある。
- ・大日本図書、学校図書: クルックス管と併せた放射線に関する記述はないが、3年でクルックス管からX線の説明、放射線の発見の歴史などもあり。
- ・教育出版: 放射線の記述はない。3年での記載は未確認

指導書

- ・啓林館: 放射線に関する注意あり。2012年版では、放電管から1mも離れれば漏洩X線の影響はほとんどないとしているが、2016年版では「X線の影響に配慮し、演示は行わず、教科書の写真や図のみでの説明にとどめる」と保守的。
- ・東京書籍: 放射線に関する注意あり。誘導コイルの設定(電極間隔は4cm以下)、1m以上はなれた場所から観察をする、観察時間は10秒以下にするなど、具体的な運用方針が記載されている。
- ・大日本図書: 放射線に関する注意あり。生徒を1m以内に近づけない。
- ・学校図書: 放射線に関する記述なし(誘導コイルの説明は非常に詳細)
- ・教育出版: 未確認

2017年3月に公布された新・中学校学習指導要領

p69 (7) 科学技術と人間 (ア) エネルギーと物質

○ア エネルギーとエネルギー資源様々なエネルギーとその変換に関する観察, 実験などを通して, 日常生活や社会では様々なエネルギーの変換を利用していることを見いだして理解すること。また, 人間は, 水力, 火力, **原子力**, 太陽光などからエネルギーを得ていることを知るとともに, エネルギー資源の有効な利用が大切であることを認識すること。

↓「内容の取扱」

p72 アの(ア)の○アについては, 熱の伝わり方, **放射線にも触れること**。また, 「エネルギーの変換」については, その総量が保存されること及びエネルギーを利用する際の効率も扱うこと。

2008年3月に公布された旧・中学校学習指導要領にも同様の内容

**依然としてこの内容も効果的に学習できる
コンテンツの開発を行う必要がある**

クルックス管を安全に使用出来ないか？

クルックス管は現在既に理科教育現場で用いられているが、場合によっては 5cmの距離では、 $70\mu\text{m}$ 線量当量率が 200mSv/h にも達する低エネルギーのX線が放出される。しかし、放射線が出ていることを知らずに使用している教員も居る。

熱陰極を用いた数100V程度で駆動される装置や、冷陰極を用いても5kV程度の低電圧で動作し、外部には一切X線の漏洩のないクルックス管が本体 22,000円、電源も18,000円と手軽な金額で発売されている。



5kV で動作中のクルックス管



9V電池駆動の
5kV CW高圧電源

**中高の教育現場には、
買い換える資金がない！**

Basic Plan

5kV程度の低電圧駆動クルックス管を用いることで、X線の放出は全く考慮せずに済み、学習指導要領の要求を満たす安全な実験体系を極めて簡単に構築可能。

ここで話は完結する

Advanced Plan

- 1) 経済的理由により古い装置を用いざるを得ない
 - 2) 放出されるX線を活用した発展的な実習を実施
- いずれの場合も最低限度のX線量に抑えて、安全に実験を行える実験体系を構築する必要がある。

本研究の目的

今そこにあるリスクを低減するために

低電圧駆動
絶対安全の
装置の推奨

経済的要因

ふるさと納税
制度等を用いた
買換え促進

徐々にリプレースしていく

最終的には被ばく
ゼロを目指す

暫定的措置

X線を活用したコンテンツ
を安全に実施するために

ALARAに従い最低限度の被
ばくに留める + 管理目標値

自主的な管理

低エネルギーX線
測定手法の確立

実態調査

線量低減
手段の確立

現場での線量
確認手段の提供

線量低減が難しい装置
は使用停止を勧告

自主的な規制

誘導コイル設定などの運用条件、バイパス・分配抵抗の使用、クルックス管自体のリフレッシュ(アニーリング?)、遮蔽体の使用、距離・時間の制限

ICRP 放射線防護の基準を決める三つの原則からの検討

正当化 Justification: リスクを上回る利益がなければならない

→ クルックス管を用いた実演は極めて教育的効果が高く、将来的な放射線教育コンテンツとしても非常に価値が高い。

防護の最適化 Optimization:

できるだけ被ばくを抑える(経済、社会的な要因の考慮)

ALARA(as low as reasonably achievable)の原則

→ 電子線の観察だけであれば低電圧駆動の絶対安全の装置を使うことで被ばくをゼロに出来るためこれを推奨する。が、経済的要因により直ちに全ての学校に要求するのは困難であるため、コンテンツ毎に必要なX線のエネルギーを把握し、出来る限り電圧を抑えて実験を行い被ばくを最小化する。必要に応じて遮蔽などの防護措置も行う。

線量限度 Dose Limit: 線量限度を超えてはならない

→ 放射線取扱業務従事者ではない教員や、さらに労働者でもない生徒に対する被ばく管理目標値を、国内外の規制状況から議論する。低エネルギーX線による不均等被ばくと水晶体への等価線量についても考慮する。

大阪府立大学のつばさ基金制度を 活用した放射線教育振興プロジェクト

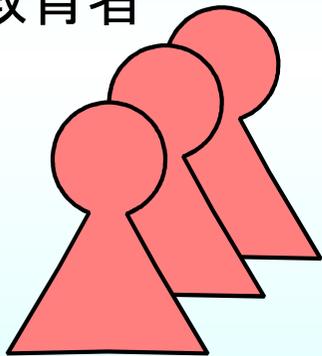
全国の教育現場での
放射線教育の実施
(委託)

寄附金額の半額分程度を上限に貸与
10万円の寄付で、5万円分の物品

放射線教育用の物品

寄付頂いてすぐに物品発注
を行う必要はありません。
必要に応じて、年度繰り越
しも可能です。

教育者



ふるさと納税
(寄付)

放射線教育振興プロジェクト:
1627200700 に寄付する旨連絡

大阪府

プロジェクト
への分配

13%は大学へ

大阪府立大学
放射線研究センター

物品購入

寄付者の地元
自治体

自己負担2000円以外は翌年の税金控除で
全額(*)帰ってきます

*所得により上限金額があり、
独身で年収600万円の場合
¥77,000の寄付が可能です。

「換金性の高い物品」の貸与は
出来かねますので、ご容赦下さい

ペルチェ霧箱を貸与する場合は、客観的で透明な経理
を実現するために、大阪ニュークリアサイエンス協会
(ONSA)を通して、直接公費での会計処理を行います。
それ以外の物品は、公費対応でない通販業者などでも、
立替払いで対応可能です。

ペルチェ冷却霧箱の売上利益から、製作のための
学生アルバイトを雇用して社会還元しています。

府大からも2000円分相当の
府大グッズが進呈されます

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(d))

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年間 0.5mSv、目や皮膚のような単一の臓器・組織の線量当量年間5mSv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。

国内外の規制状況について議論を行うため、保健物理学会専門研究会の「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」を申請中であり、承認されればH31年4月から活動を行う。

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。

低エネルギーX線の線量測定

様々な測定装置による測定結果

ケニス十字板入りクルックス管 3C-B と、ニューパワー誘導コイル ID-6 を使用。
放電極距離 25 mm、放電出力 6、平均電流 40 μ A で十字板を下げて正面方向で測定。

	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	70 μ m線量当量	1cm線量当量	70 μ m線量当量	1cm線量当量	1min scaler
cm	mSv/h	mSv/h	mSv/h	mSv/h	kcpm
15	7.34	3.02	4.62	1.62	33.89
30	1.72	0.73	1.26	0.48	31.68
50	0.58	0.27	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	エアーカーンターEX	エアーカーンター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。

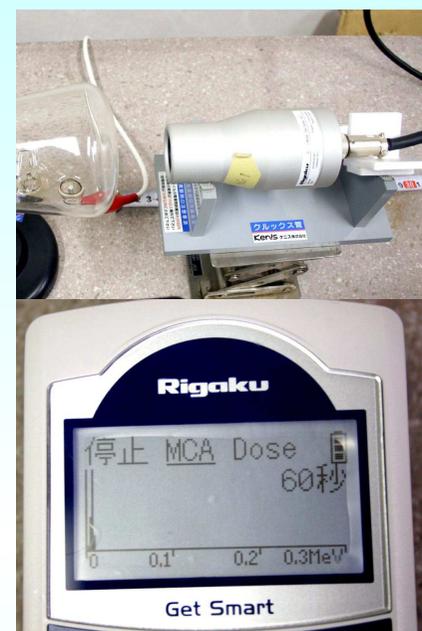
低エネルギー用NaIシンチレーターでの測定



富士電機 NHC6
φ12.7×12.7mm 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

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。

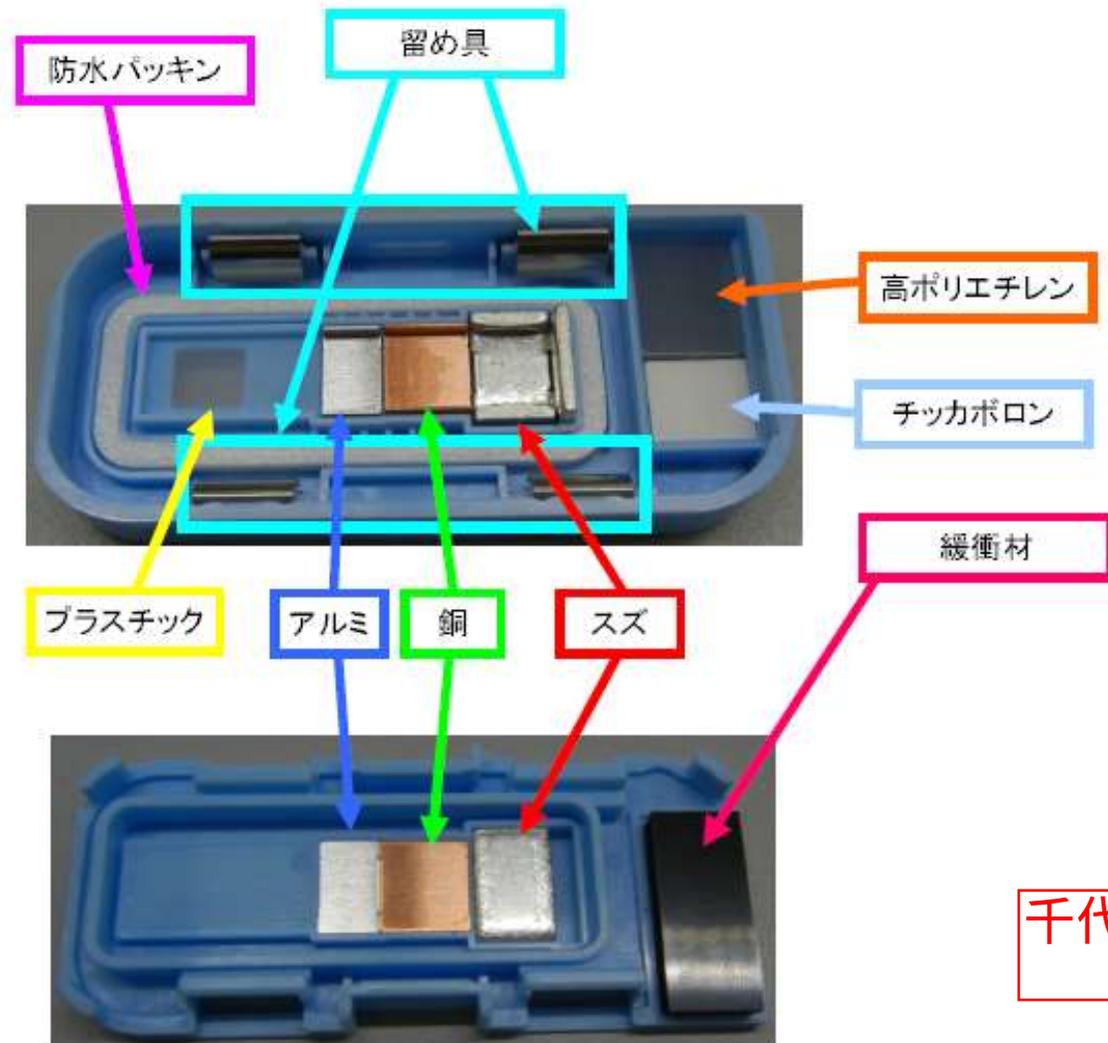
線種やエネルギーの違いによる検出器の応答の違いを理解していないと、正しく評価できなかつたり、全く測定することが出来ない場合がある。

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 μ 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)。

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 μ Svから10Sv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 γ ・X線、 β 線の測定が一つのバッジで可能である。
- ・ α -Al₂O₃: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



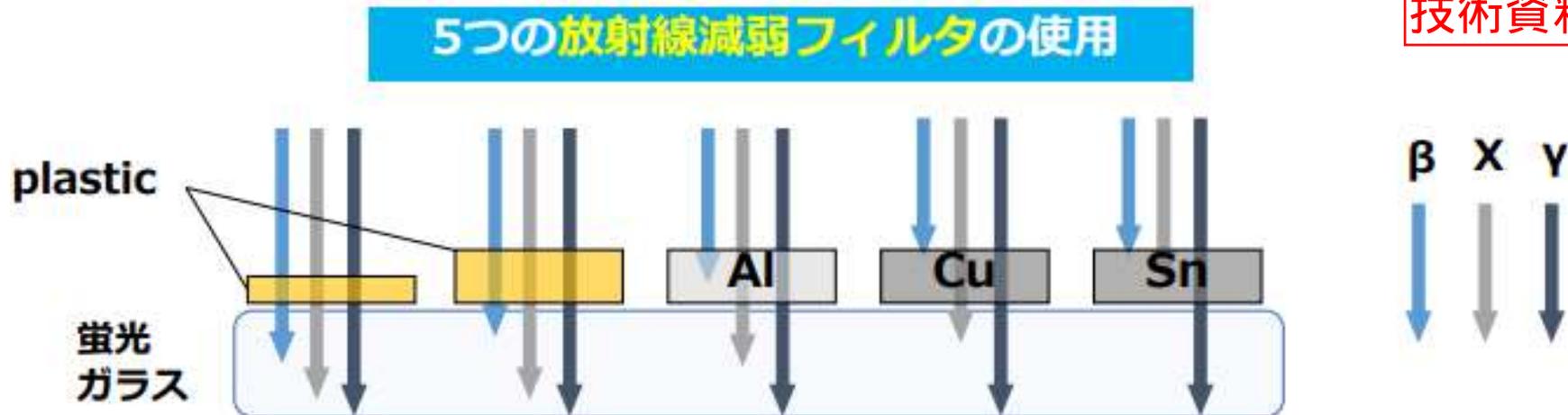
千代田テクノル技術資料より

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

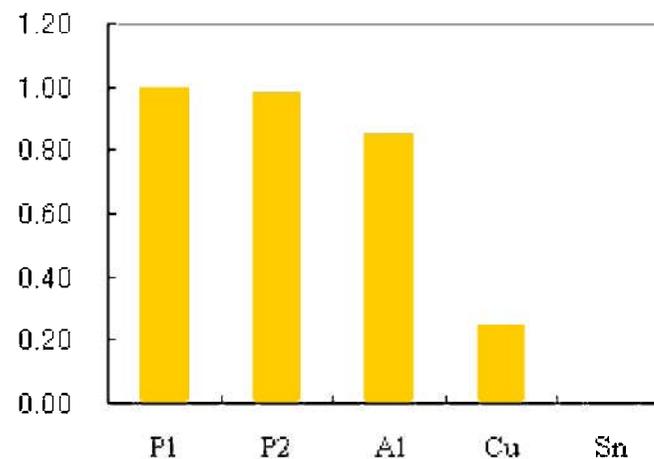
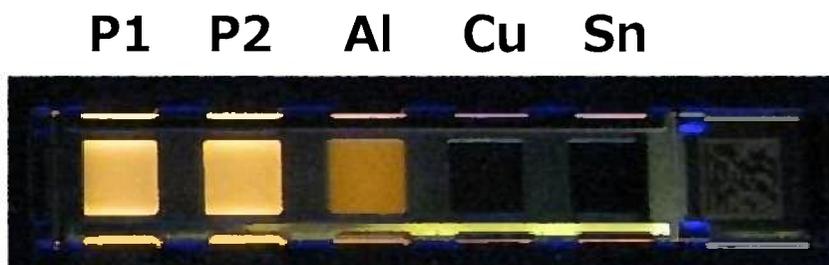
千代田テクノル
技術資料より



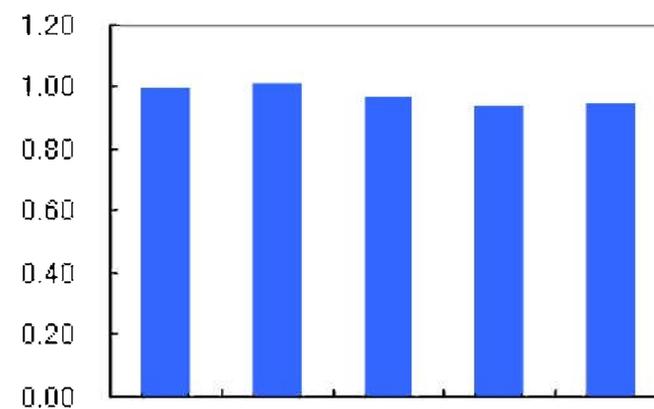
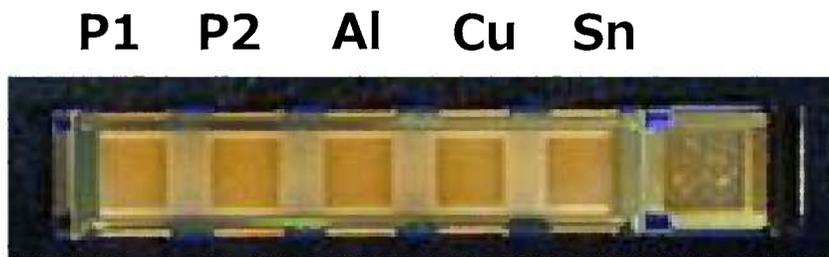
蛍光ガラスの各フィルタ下の発光パターンから、
放射線の種類やエネルギーを知り、レスポンスを補正し線量を求める

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

千代田テクノル技術資料より

千代田テクノルガラスバッジカタログより

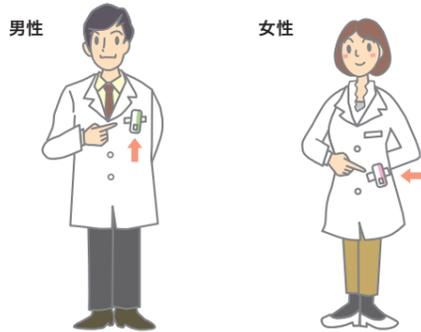
ご存じでしたか？ 被ばく線量の測定は 法律で定められています

X線装置、RI等を取扱う放射線業務従事者は、個人被ばく線量の測定およびその結果の記録・保管が各種法令等により定められています。

※放射線障害防止法(施行規則) 第4章 第20条(原子力規制委員会)
※医療法施行規則 第30条18・第30条27および
電離放射線障害防止規則 第8条・第9条(厚生労働省)

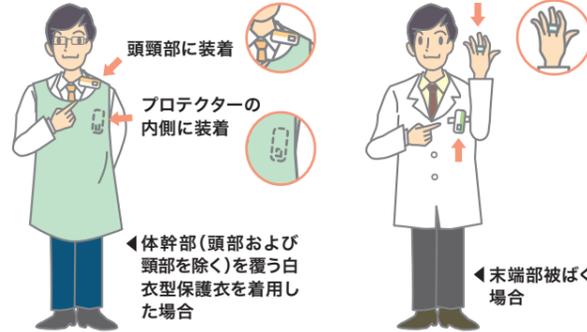
均等被ばくの場合のモニタ装着部位

男性は胸部、女性は腹部に装着します。



不均等被ばくの場合のモニタ装着部位

プロテクタ等を使用して不均等に放射線を受ける場合は、左の均等被ばくの場合に加え、他に被ばくする部位(頭や指等)にも装着します。



※モニタとは、ガラスバッジ・ガラスリングを意味します。

弊社のモニタリングサービスによりお客様にお届けする 各種報告書

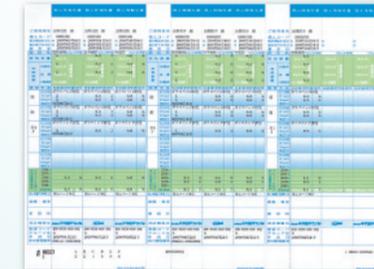
個人線量報告書



ご使用期間に対する各個人の実効線量および等価線量の算定値を報告します。

※お客様から測定依頼をいただいたモニタは、各測定線種に対応して1cm線量当量・70μm線量当量を算出、実効線量と等価線量を算定いたします。
※ご使用者が複数のモニタを装着されたときは、モニタ毎に別途報告書を作成いたします。

個人用報告書



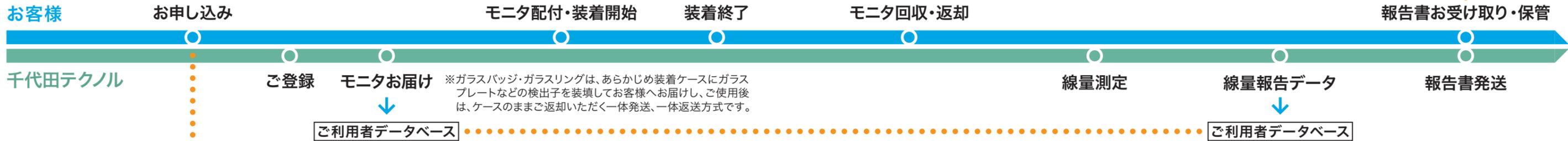
モニタご使用者へ報告値を通知するときに配付する個人用の報告書です。

個人線量管理票



法令で定められている項目を網羅している報告書です。(通常3ヵ月毎出力)

モニタリングサービスフロー



お客様の広範な用途に対応します

モニタリングサービスで使用されるモニタは、測定精度・測定範囲に優れたネームプレート型のガラスバッジです。

ガラスバッジ・ガラスリング仕様

モニタ商品名	モニタの種類	測定線種・エネルギー範囲	測定線量範囲
X線用ガラスバッジ	FX	X線: 10 keV~80 keV	0.1 mSv~2 Sv
広範囲用ガラスバッジ	FS	X・γ線: 10 keV~10 MeV β線: 130 keV~3 MeV	0.1 mSv~10 Sv *1*2
中性子広範囲用ガラスバッジ	NS	X・γ線: 10 keV~10 MeV β線: 130 keV~3 MeV 中性子: 0.025 eV~15 MeV	0.1 mSv~10 Sv *1*2 0.1 mSv~60 mSv *2 *3*4
X・γ線用ガラスリング	JK・JP	X・γ線: 25 keV~3 MeV	0.1 mSv~1 Sv
β線用ガラスリング	JL・JB	β線: 1.5 MeV~3 MeV	0.2 mSv~1 Sv
広範囲用ガラスバッジ環境タイプ	ES	X・γ線: 10 keV~10 MeV β線: 130 keV~3 MeV	0.1 mSv~10 Sv *1*2 0.1 mSv~10 Sv *2 *5
中性子広範囲用ガラスバッジ環境タイプ	EN	X・γ線: 10 keV~10 MeV β線: 130 keV~3 MeV 熱中性子: 0.025 eV~ 速中性子: 140 keV~15 MeV	0.1 mSv~10 Sv *1*2 0.1 mSv~10 Sv *2 *5 0.1 mSv~8 mSv *6 0.1 mSv~60 mSv *4

*1 表示の測定線種は、¹³⁷Cs γ線に対する線量範囲です。
*2 単独照射の場合の線量範囲です。
*3 熱中性子の測定線量範囲は、8mSvが上限となります。

*4 表示の測定線量範囲は、²⁴¹Am-Be 中性子に対する線量範囲です。
*5 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y β線の70μm線量当量です。
*6 報告は、熱中性子と速中性子の合計です。

オプション

オプションとして次のようなサービスを用意しております。
オプションサービスをご希望される場合は、最寄の弊社営業所へご連絡をお願いします。

個人線量管理システム「ACE GEAR V4」

お手持ちのパソコンを利用して、弊社からご報告する個人線量の管理を行える便利なパッケージソフトです。
・ACE GEAR V4を利用することにより、放射線管理情報を画面にて参照できます。
・「電離放射線健康診断結果報告書」や統計資料・教育記録・健康診断などの記録・帳票が作成できます。

速報サービス

個人線量をFAXでご報告します。
放射線予防規定などで、スクリーニングレベルを設定されているとき、放射線業務従業者の受けた線量を早く知りたいときに便利です。

24時間報告

測定センターにモニタが届いてから24時間以内に個人線量をご報告します。※緊急に線量の値が必要なときにご利用ください。

0.01mSv単位報告

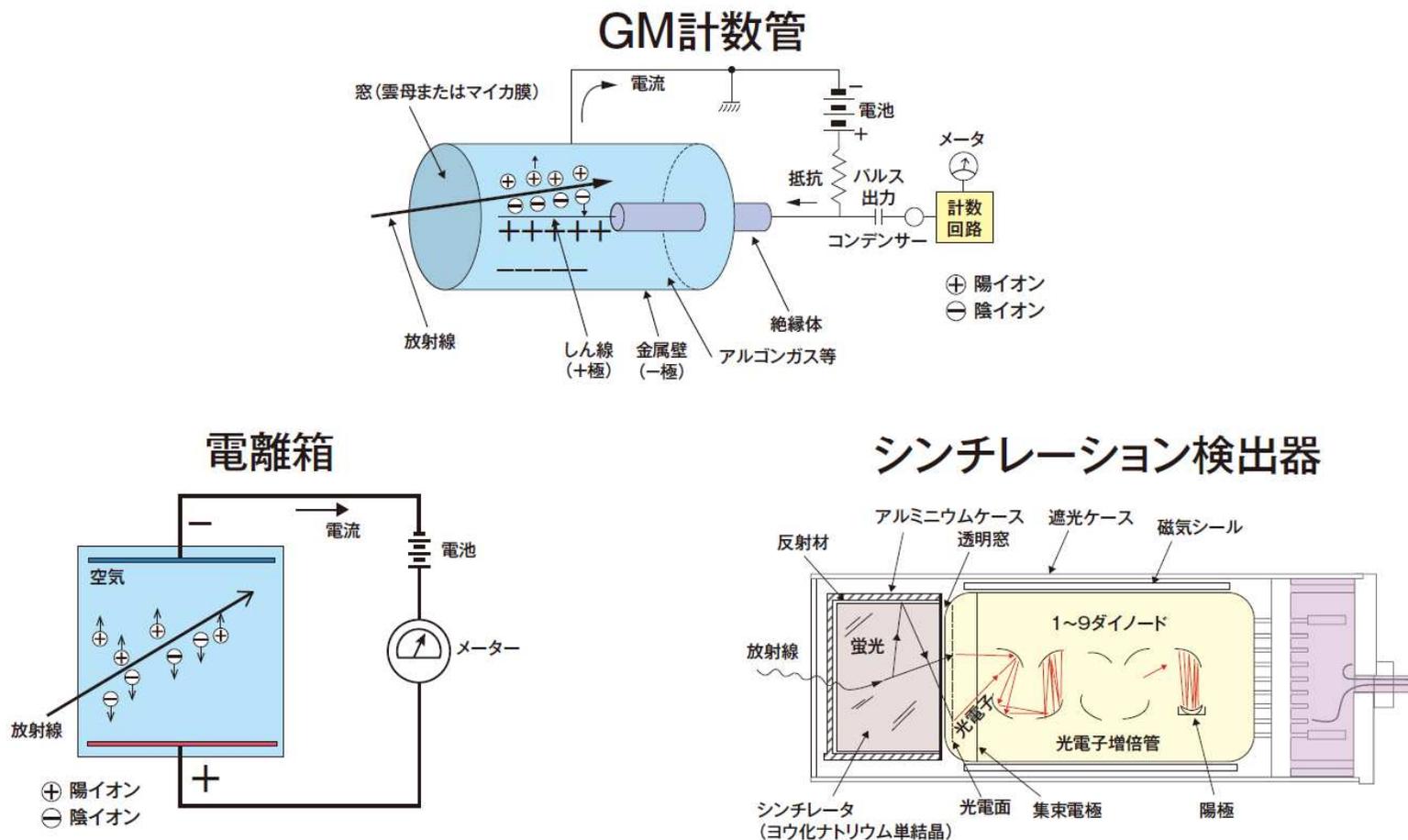
X・γ線で有意線量を検出したとき、参考値として0.01mSv単位(0.05mSv以上)でご報告いたします。

その他

ガラスバッジWebサービス

インターネットでガラスバッジの追加登録、変更などができます。ご利用にはユーザー登録が必要です(無料)。

放射線計測器の測定原理



(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

GMサーベイメーター



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。 β 線と γ 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 β 線や α 線は検出することが出来ない。さらに、50keV以下の γ /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。 μ 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}Cs) とあり、目盛値は ^{137}Cs からの662keV γ 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こり、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。

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 μ Sv/h 程度)でも測定可能である。

出力波高から検出した γ 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るため、ステンレスハウジングを β 線は通過できず、また 50keV 以下の γ 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)。

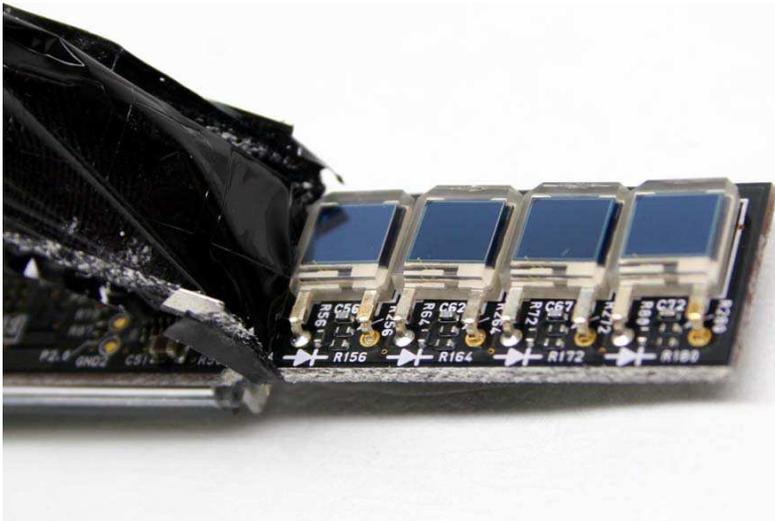


一般人向けのサーベイメーター

・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。

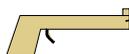


高エネルギーの放射線

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?

α 線や β 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。 γ 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できます。一部の製品は、Cs-137の661keVの γ 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。

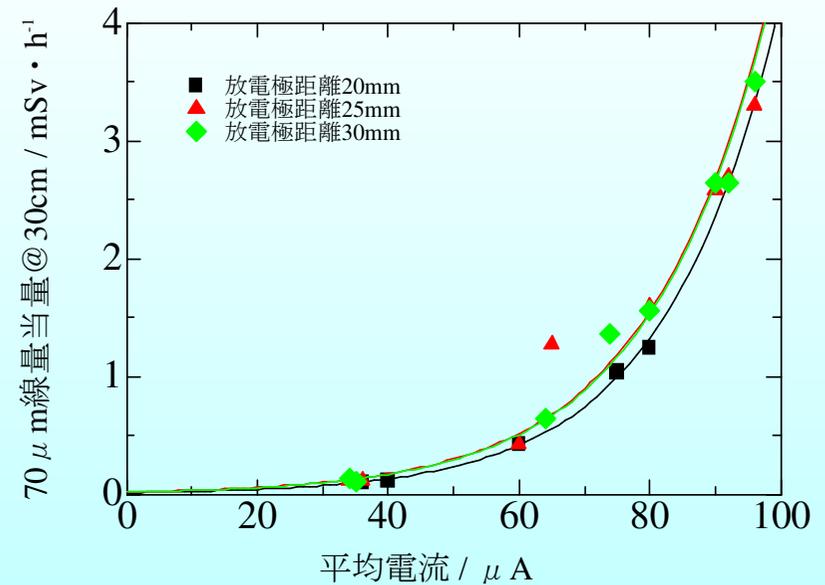
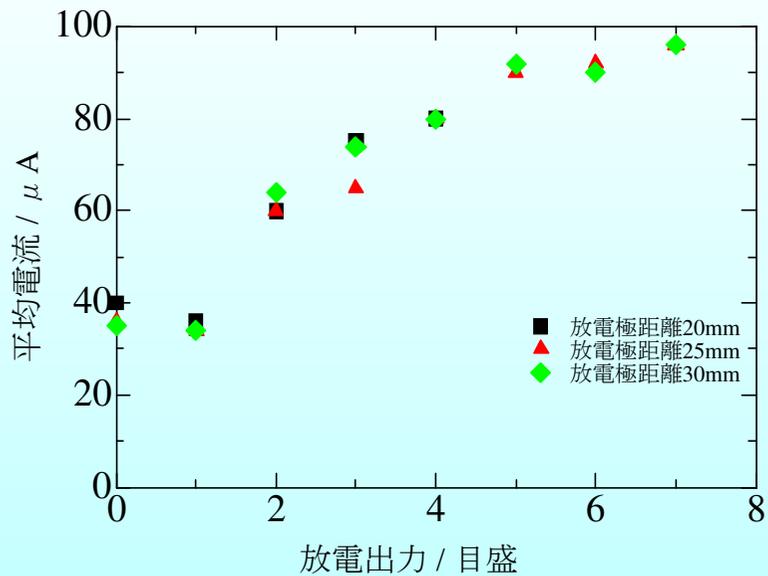
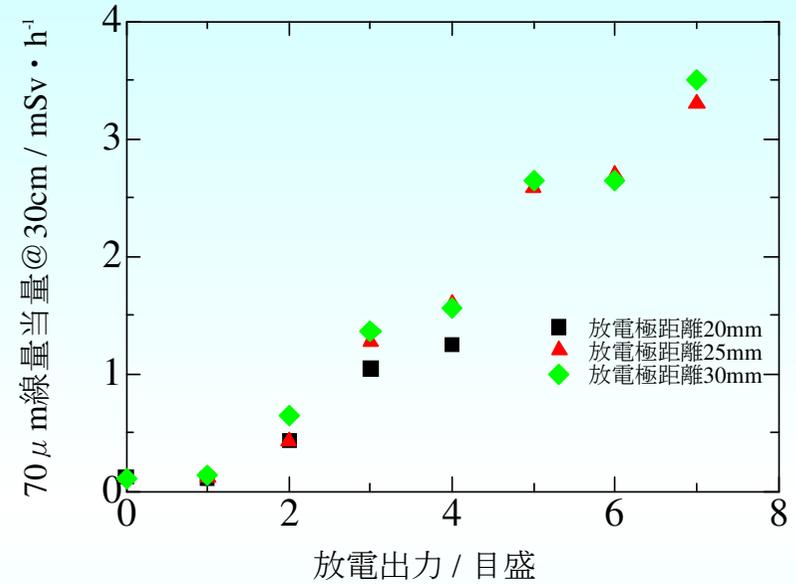
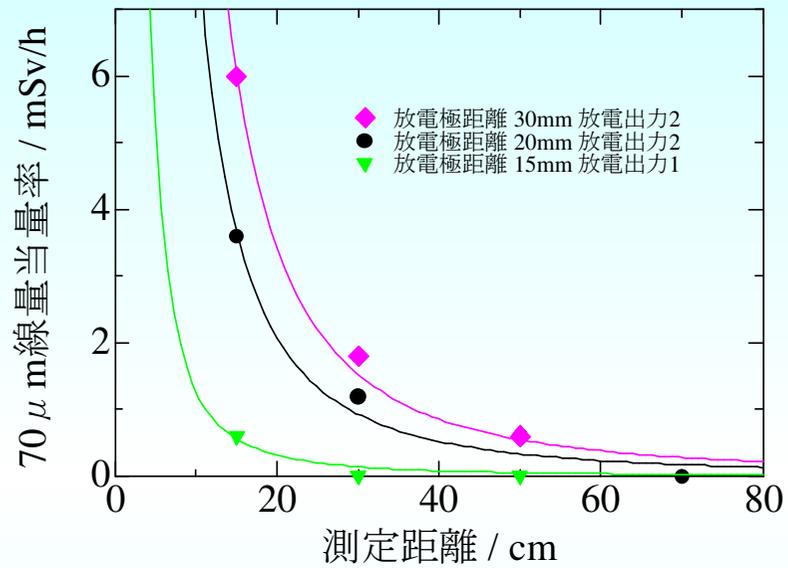


シンチレーターや、Ge半導体検出器

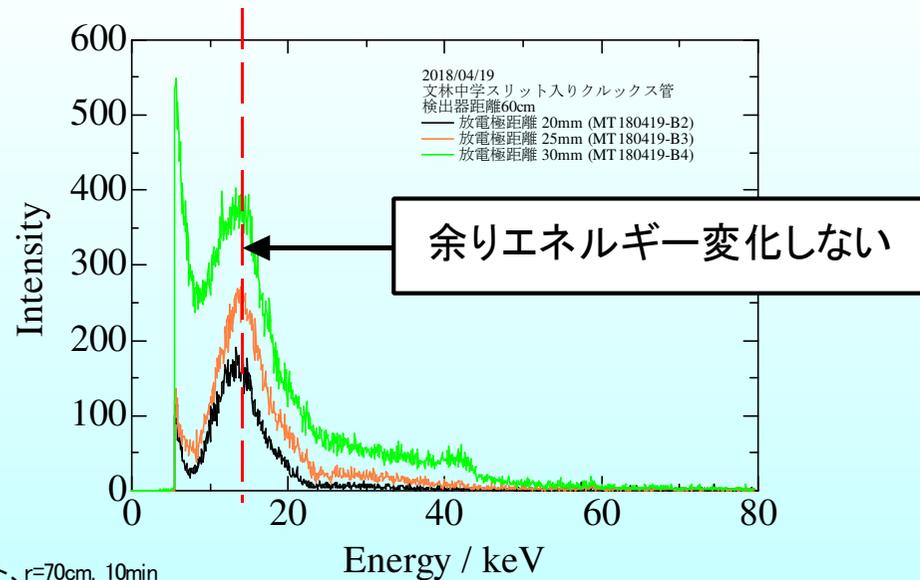
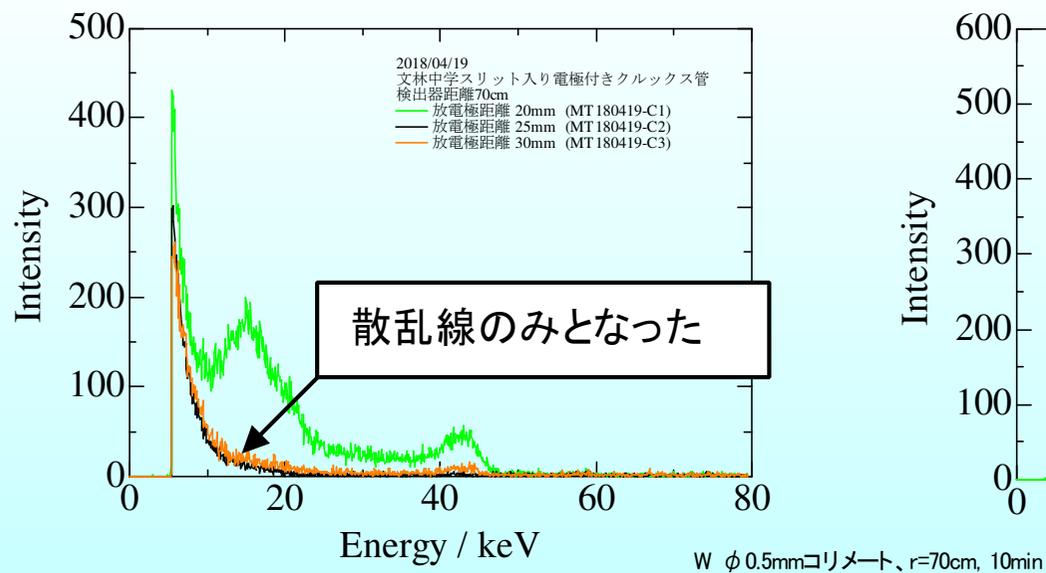
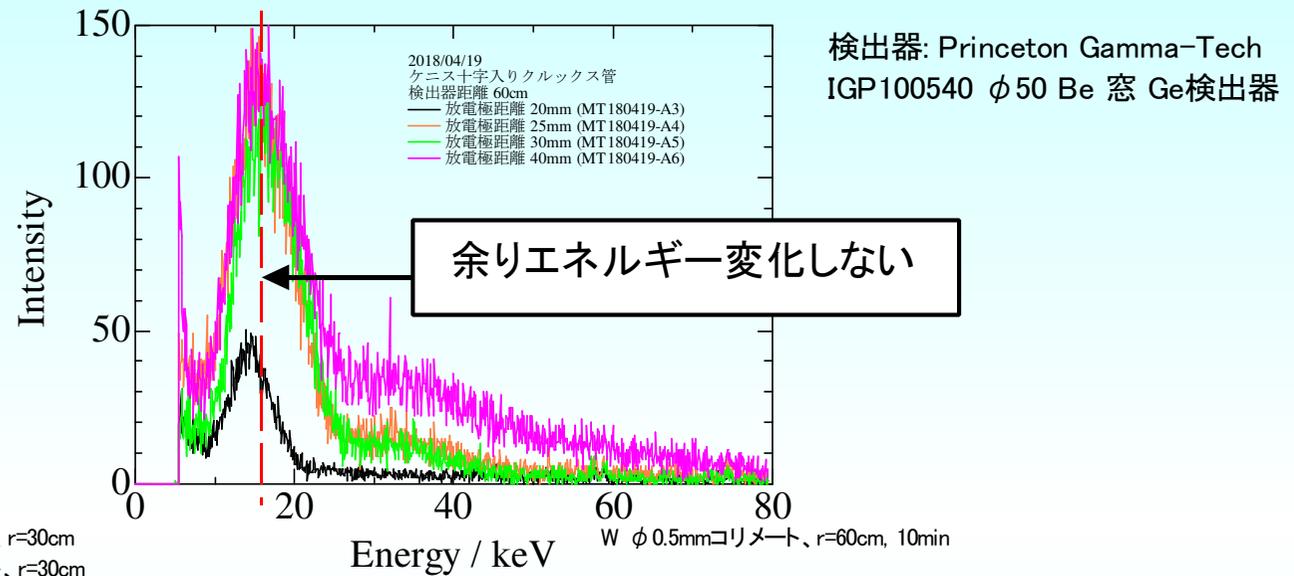
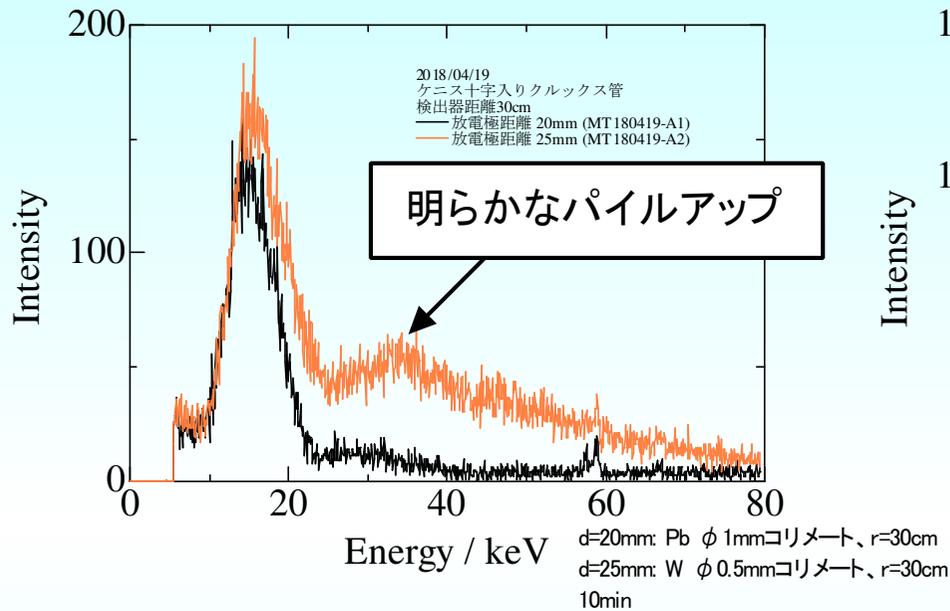
きちんとエネルギーを区別

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。

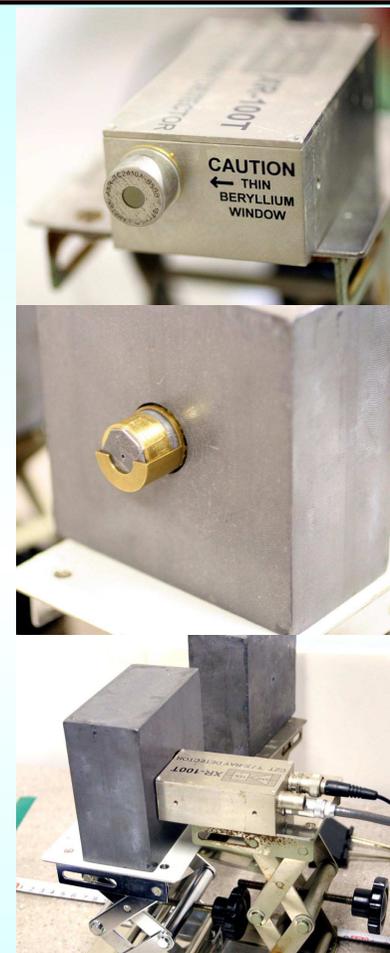
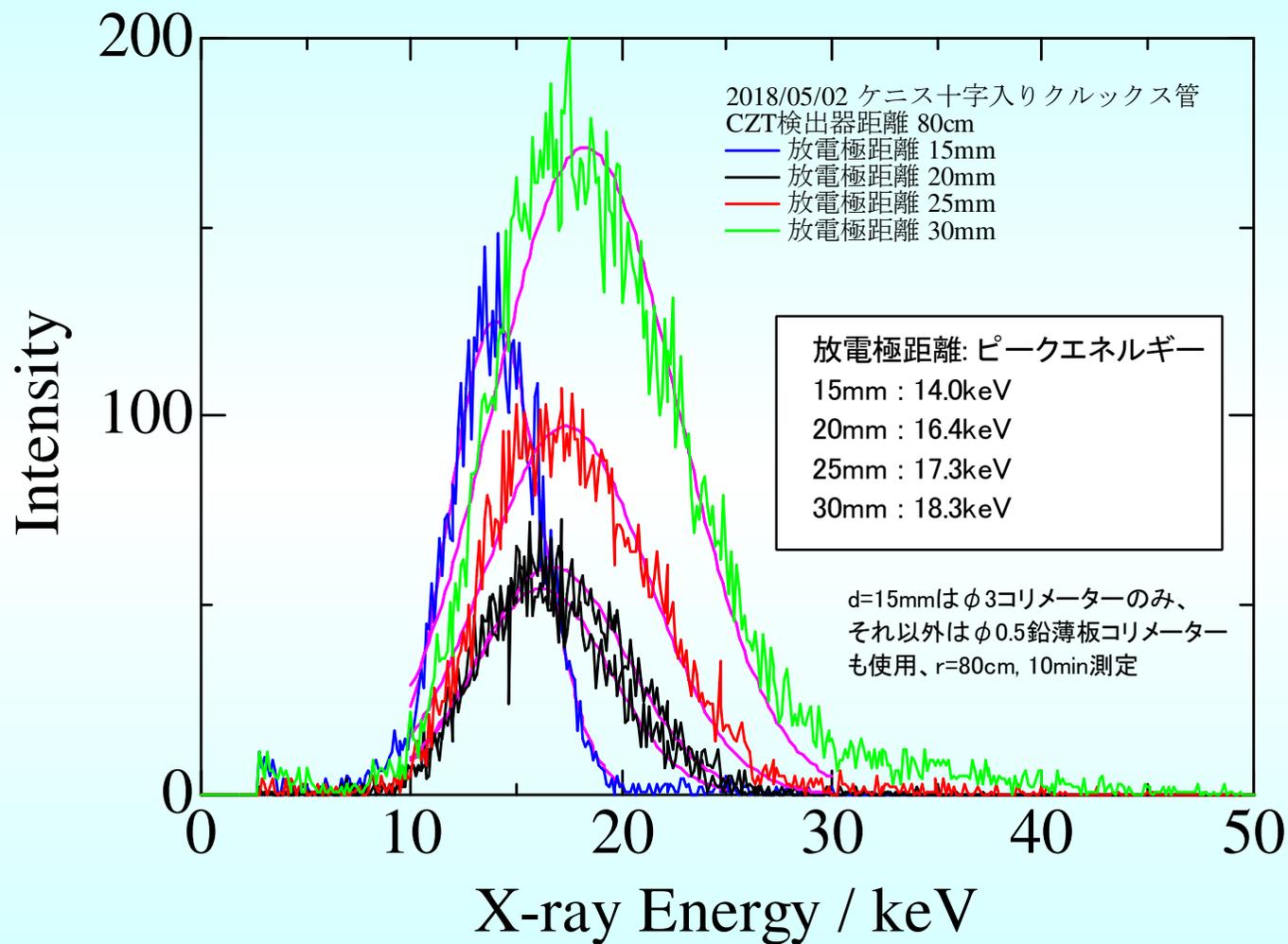
誘導コイルの設定による線量変化



Ge半導体検出器によるスペクトル評価



CZT半導体検出器によるスペクトル評価



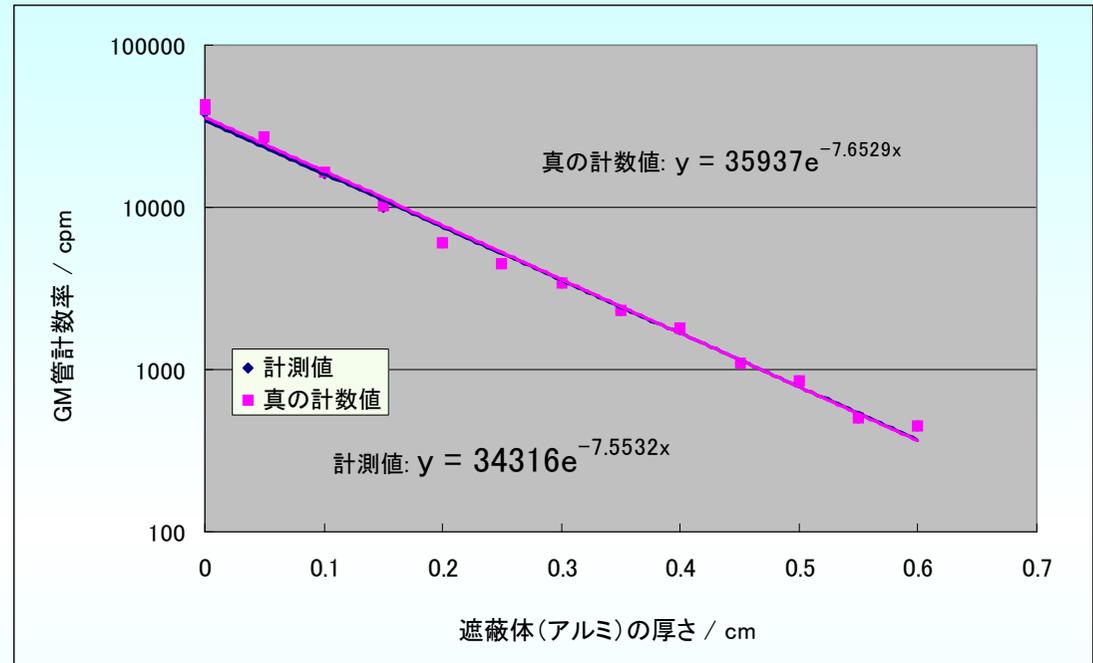
Amptek XR-100T-CZT
CZT(Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te)検出器
Be窓、ペルチェ冷却



φ3同軸鉛コリメーター
φ2同軸黄銅コリメーター
φ1.0鉛薄板コリメーター
φ0.5鉛薄板コリメーター

φ0.5mm鉛コリメーターにより数cps程度まで下げること、
ようやくパイルアップせずに測定できるようになった

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**。

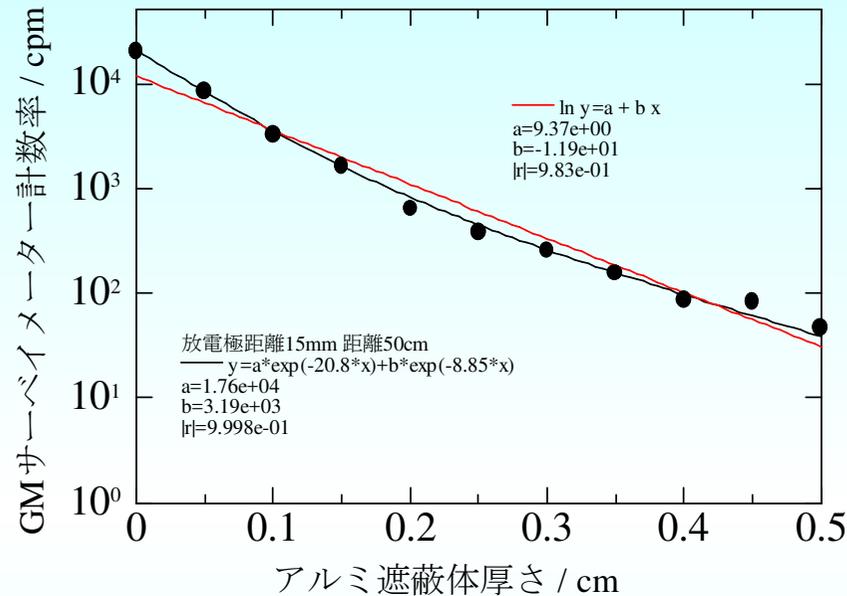
当初低エネルギー側に尾を引いたスペクトルを想定しており、遮蔽が薄い領域で計数率が高くなる事が予想されたが、**単一のエネルギーだけで説明できてしまった**。

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

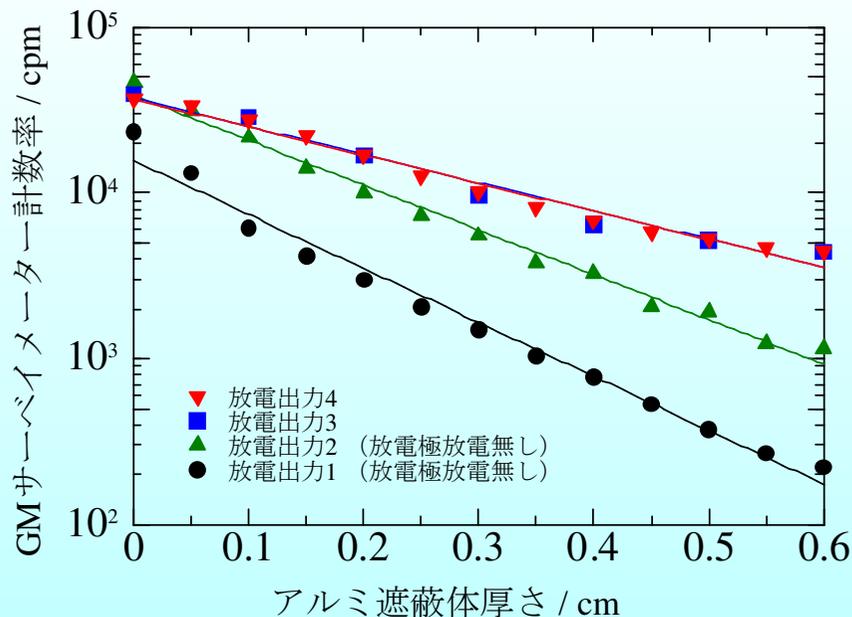
GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価

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

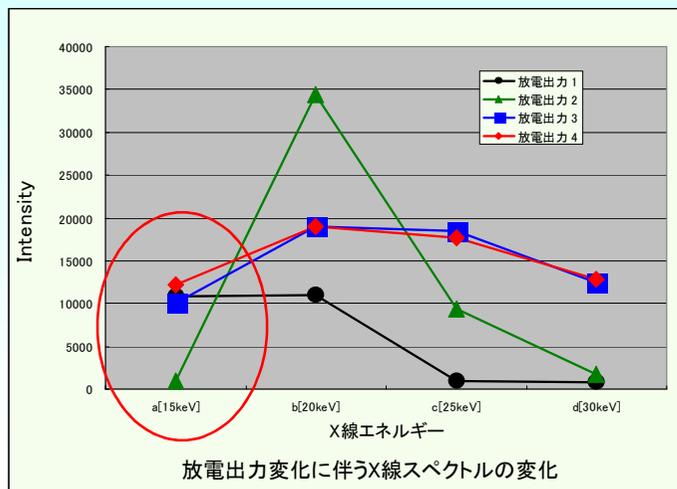
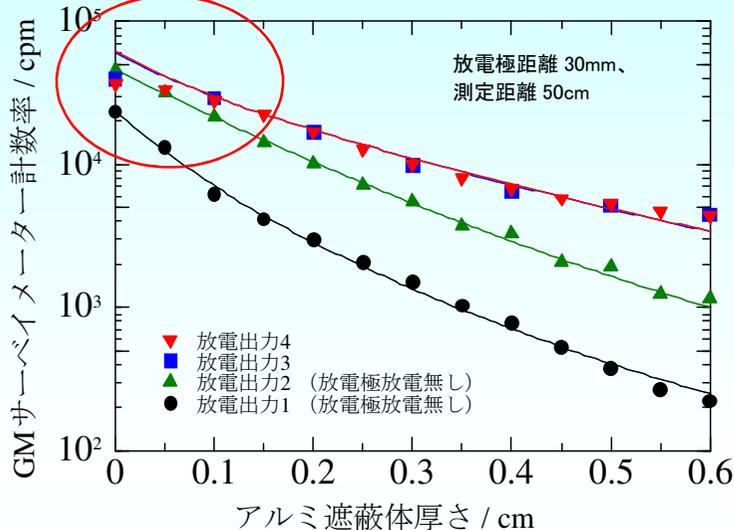
放電極距離は30mmで一定で、放電出力を変化させると線減衰係数が変化していき、放電極で放電が起こる出力3目盛以上で一定となった。



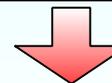
放電出力 (目盛)	線減衰係数 (cm^{-1})
1	7.50
2	6.05
3	3.92
4	3.89

GMサーベイメーターの数え落としの補正

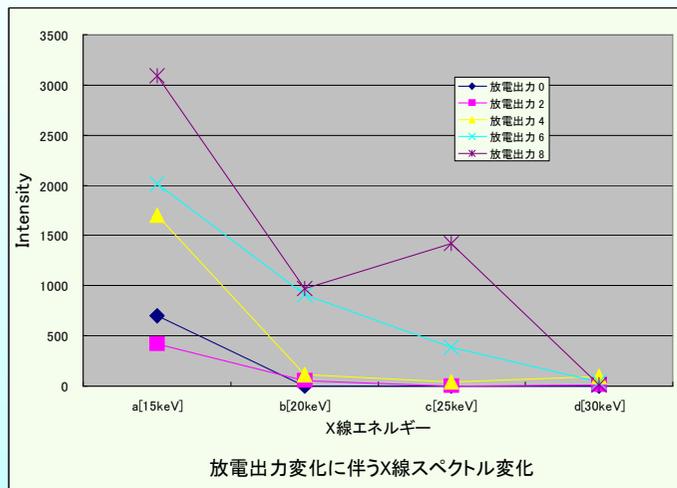
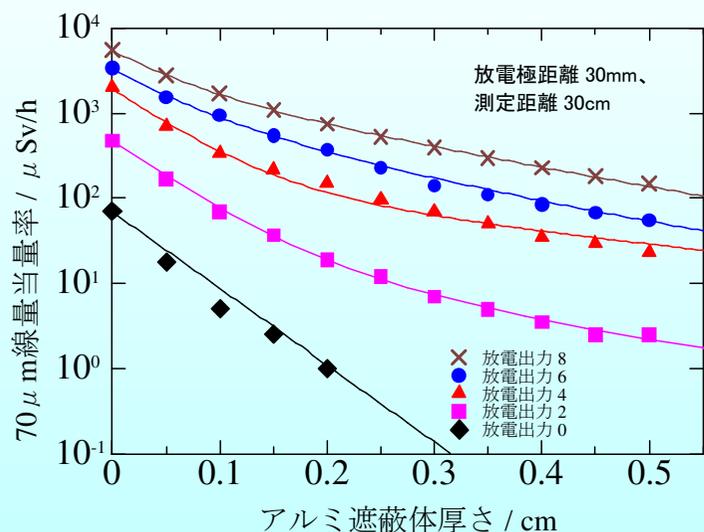
$y = a \cdot \exp(-20.8x) + b \cdot \exp(-8.85x) + c \cdot \exp(-4.9x) + d \cdot \exp(-2.8x)$ の4成分でフィッティング
 15keV 20keV 25keV 30keV



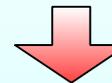
計数率が高いところで飽和しかかかっており、低エネルギー成分が低く評価されてしまっている。
 (一応不感時間100μsで、数え落としの補正は行っているがほとんど変わらない)



GMサーベイメーター(Ranger)による線減衰係数評価実験



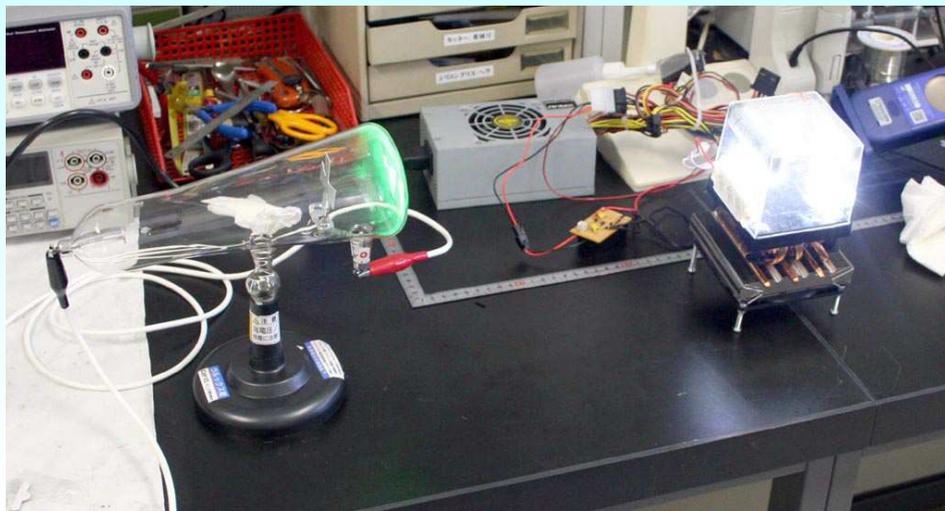
パルス場での測定であるため、実際にX線が放出されている時間に対する計数率に補正したうえで、数え落としの補正を行う必要がある。



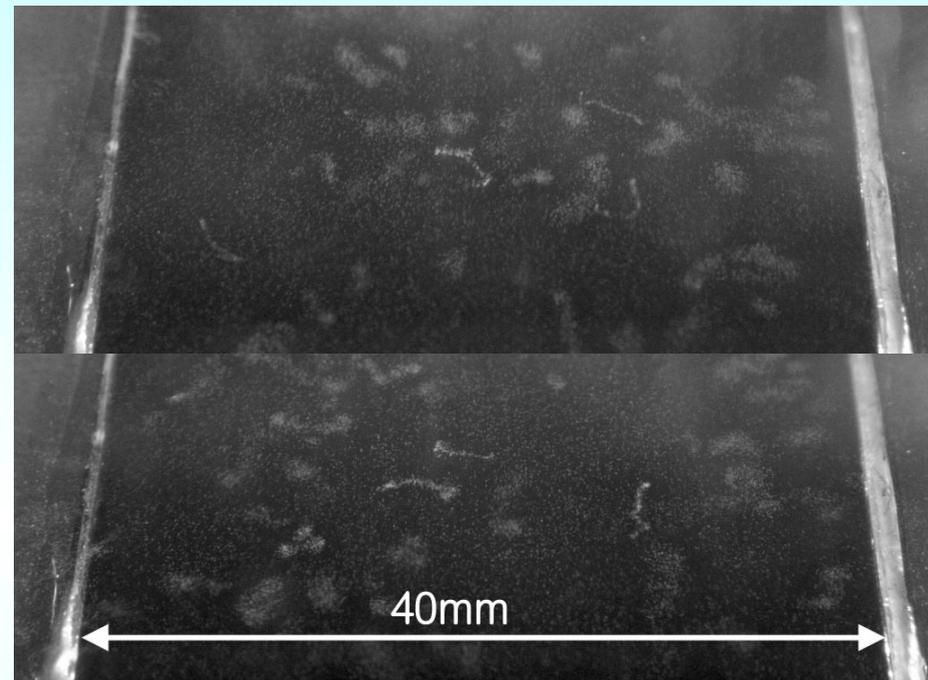
電離箱(ICS-1323)による線減衰係数評価実験

不感時間100μsの場合理論上の上限は、 $10^4 \text{ cps} = 600 \text{ kcpm}$ であるが、実時間の4%程度の時間しかX線が放出されていないとして計数率の補正を行うと800kcpm程度になってしまい、数え落としの補正が不可能となる。

クルックス管を利用したX線のエネルギー評価



飛跡の長さは4mm程度であり、空気中での20keV電子線の飛程6mm程度より若干短い
→制動放射X線のピークは入射電子線エネルギーの $\frac{2}{3}$ で、良く一致。



クルックス管からのX線によって弾き出された光電子の霧箱観察結果(放電針距離20mm)。

エネルギー既知のX線を入射して飛跡の長さのヒストグラムを作成し、エネルギーに拡がりを持つX線のスペクトルが評価できないか？

**霧箱を用いた低エネルギーX線の
エネルギースペクトル評価の可能性**

霧箱によるクルックス管からのX線の観察

①

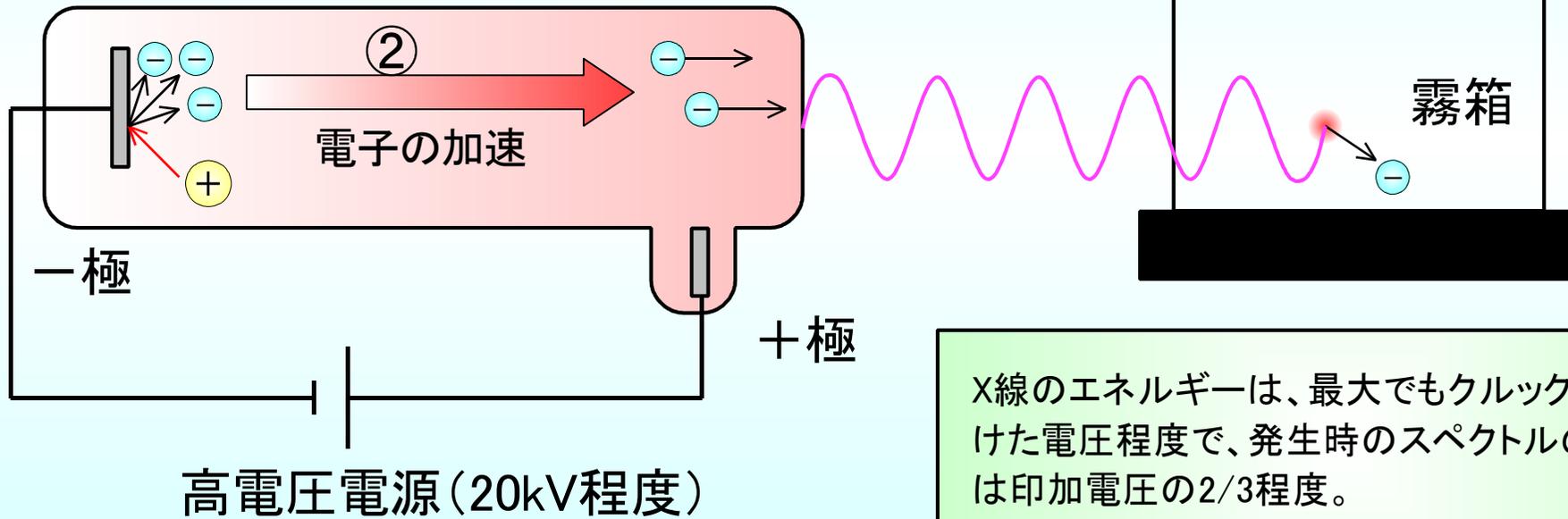
＋のイオンが－極に引きつけられて電子を叩き出す
(二次電子放出)

③

電子がガラス管の壁に衝突するときに、制動放射X線を放出する

④

X線は最終的に原子の周りを回る電子を光電効果などで弾き飛ばして(電離作用)、弾き飛ばされた高速の光電子はβ線と同じように振る舞う。



X線のエネルギーは、最大でもクルックス管にかけた電圧程度で、発生時のスペクトルのピークは印加電圧の2/3程度。

電子を弾き出すという放射線の本質を直感的に理解できる。また、エネルギーの違いを弾き出された電子の飛跡の長さという形で理解できる。

クルックス管に印加される 電圧の制御

クルックス管に印加する電圧

クルックス管の内部には**わずかに気体分子が封入されており**、陰極に高電圧を印加すると、自然放射線などにより電離した**わずかなイオン**が加速されて陰極に衝突する。その際に多数の二次電子を放出し、この二次電子が加速されて電子ビームとして観察される(蛍光体により観察しやすくしてある)。

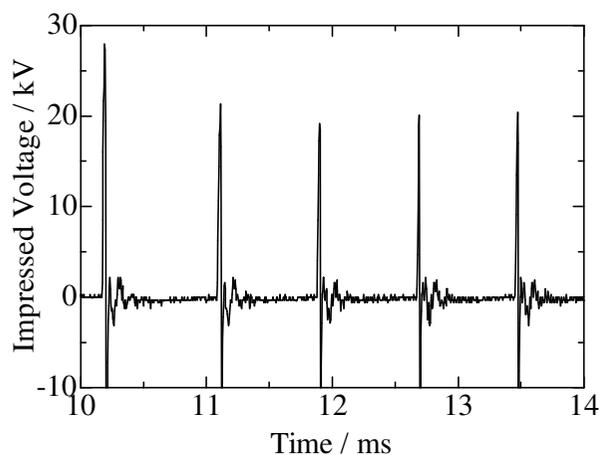
このような動作原理であるため、電子線の観察には管内に**わずかなガスが必要であるが**、**古い製品ではガラス管に吸着されるなどして残存するガスの量が少なくなり**、**より高電圧を印加しないと電子線を観察できなくなる**。実際の教育現場にはこのような古い製品が多数残されており、高電圧を印加することにより**発生する制動放射 X 線のエネルギーが高くなり**、**ガラス管壁に対する透過率が高くなるため**、**放出される線量が高くなる**。

誘導コイルを用いた高電圧印加について

放電極距離

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

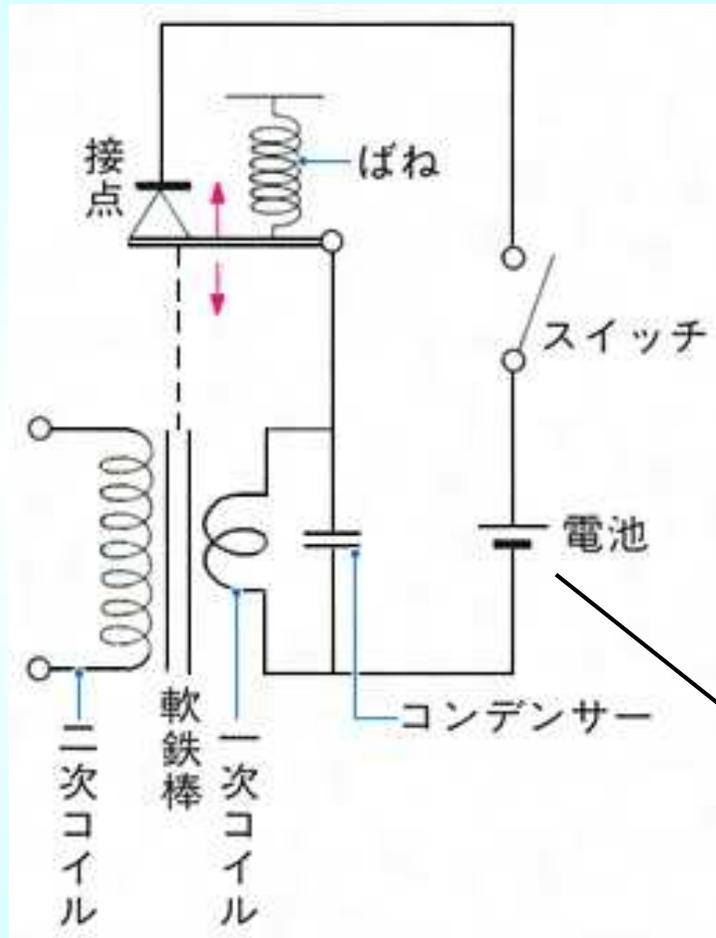


放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流 80 μ A



電圧測定時にはガラス抵抗体などの物理的にもサイズの大きい、100M Ω 以上の抵抗と、100k Ω 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)。

誘導コイルを用いた高電圧生成について

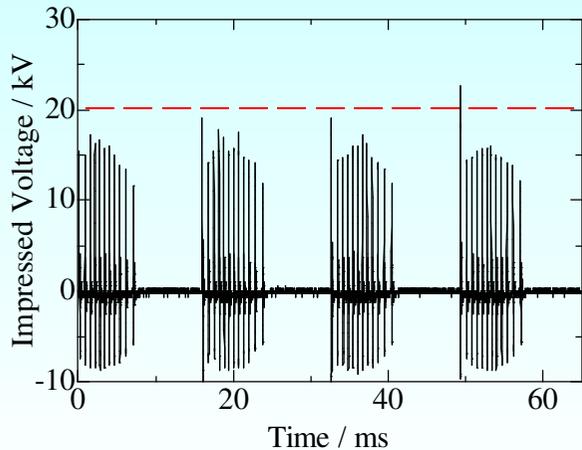


誘導コイル(Induction Coil)は、極端に巻き線の数の異なるトランス(実際には同軸上に巻かれている)の一次側の電流を、ベルやブザーなどと同様の機械的な接点を含めた回路で連続的にON/OFFすることでパルス状に変化させて、二次側に大きな電圧のパルスを生成する。

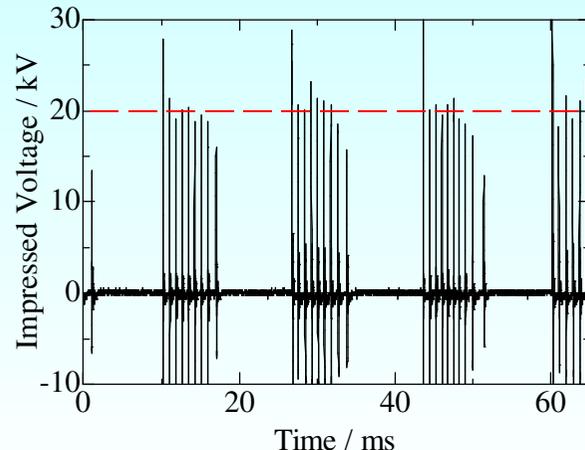
プラス側だけでなくマイナス側にもパルスが出るが、接点切断時の一番最初のプラス側のパルスの方が大きい。

放電出力などと書かれている調整用のダイヤルは、可変抵抗などで一次側に印加する電圧を変化させている。

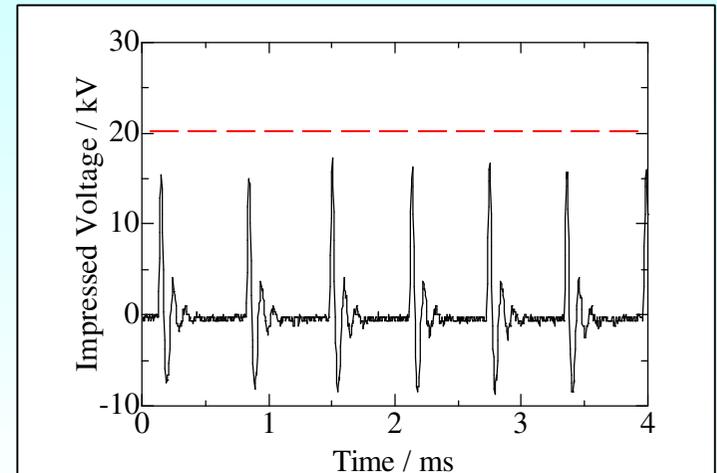
誘導コイル設定による出力パルスの変化



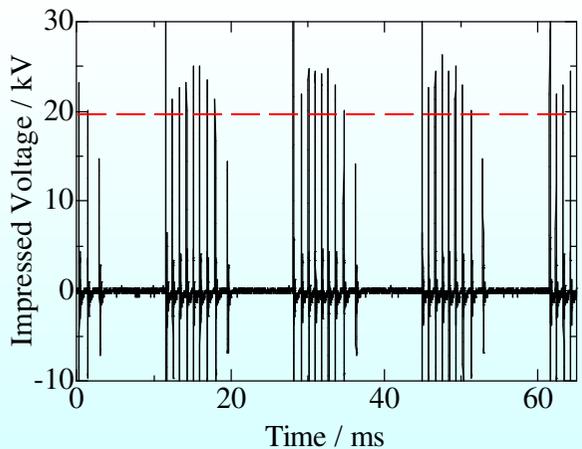
d=20mm, PW0, 40 μ A, 120 μ Sv/h



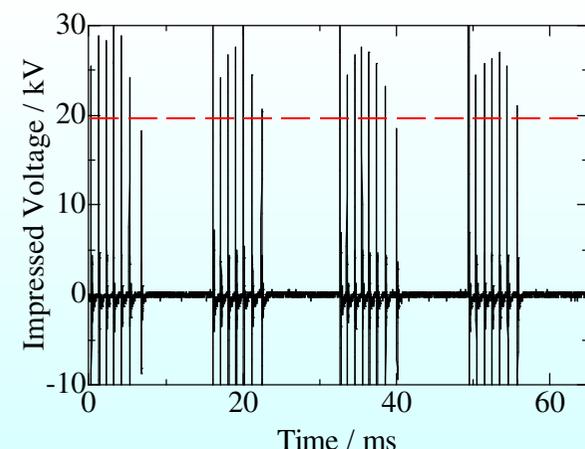
d=20mm, PW4, 80 μ A, 1.25mSv/h



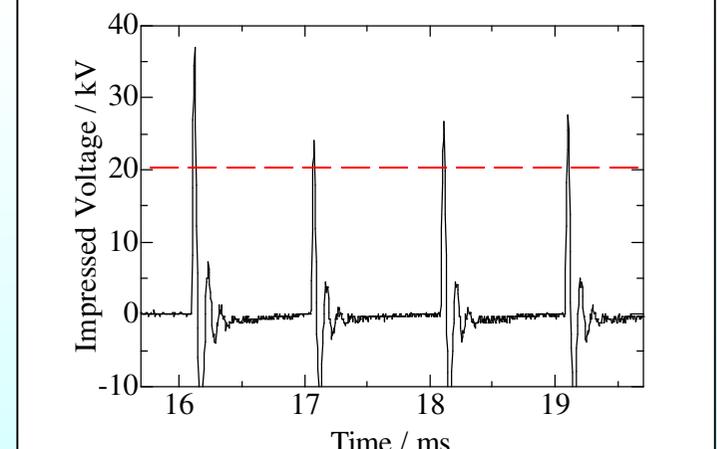
d=20mm, PW0 (拡大)



d=30mm, PW4, 80 μ A, 1.56mSv/h



d=30mm, PW7, 96 μ A, 3.50mSv/h

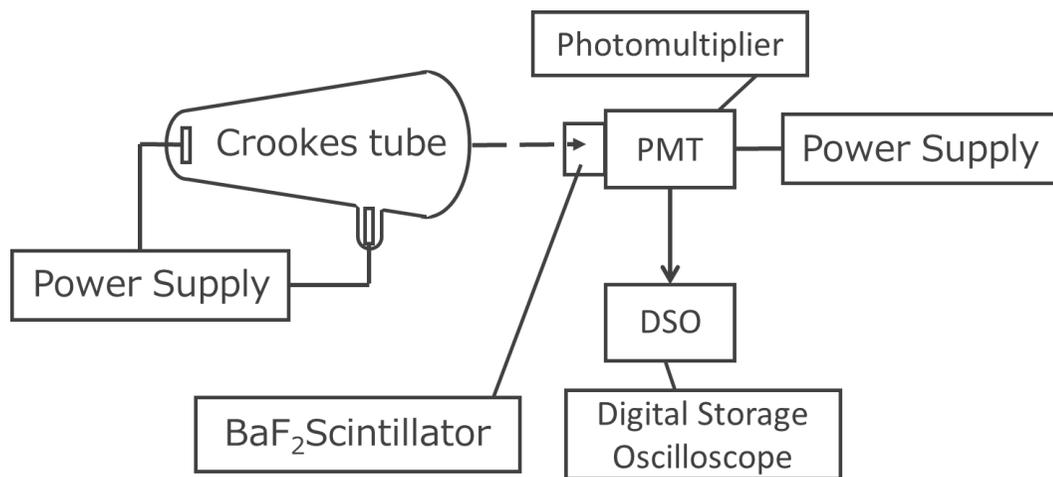


d=30mm, PW7 (拡大)

放電出力上昇と共に電圧の上昇が見られたが、PW4以降余り明確ではなかった。逆にパルスの数は低下していった。

パルス場計測システムの構築

- BaF₂シンチレータ ⇒ 反応速度が速い
- 紫外光を検出可能なPMT
(浜松ホトニクス H33778-51)
- 高時間分解能で測定が可能なDSO (2.5GS/s 200MHz)
(TELEDYNE LECROY HDO 4024A-MS)
- システムを構築し,30cm地点の線量の計測を行った



パルス場計測システム構成図

NaIとBaF₂シンチレータとの性能比較

シンチレータ	NaI	プラシン	BaF ₂
密度(g/cm ³)	3.67	1	4.88
発光減衰時間(ns)	230	1.6	0.8
発光出力(NaI比)	100	25	4

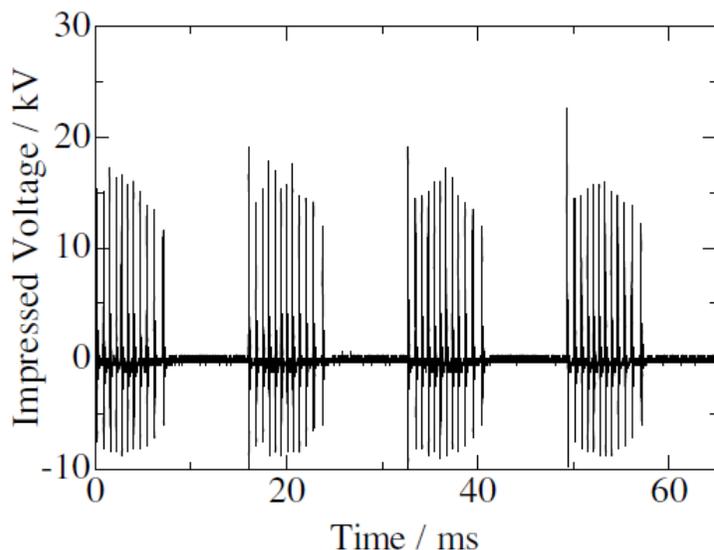
※GM管の不感時間は100 μs程で数え落としが発生する



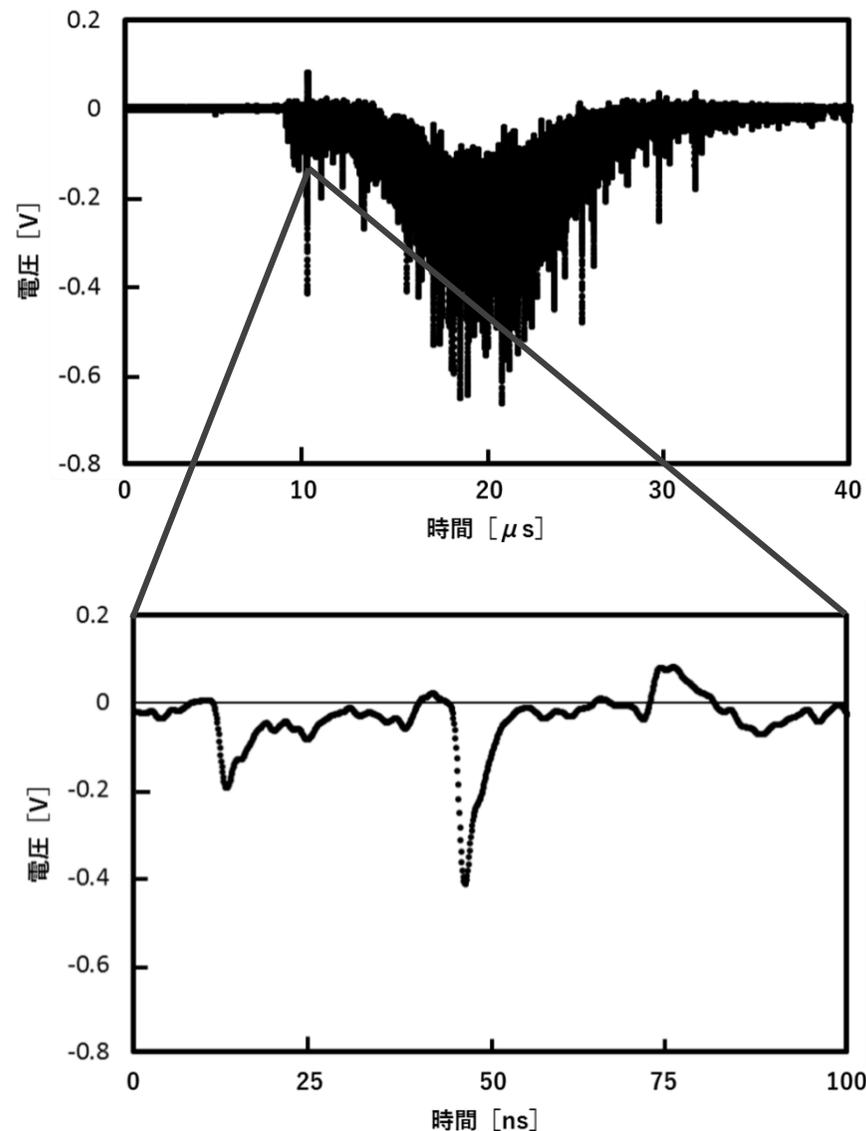
計測の様子

計測結果

- ・多くの信号が重なりパイルアップした信号が確認できた
 - ・信号は約 1 msおきに出力されていた
→高電圧パルスの間隔と概ね一致
 - ・511keVの γ 線を計測した場合と同程度の波高を有していた
- ⇒新たな実効線量算出手法の検討が必要



誘導コイルから出力される高電圧パルス



クルックス管由来のX線を計測した結果

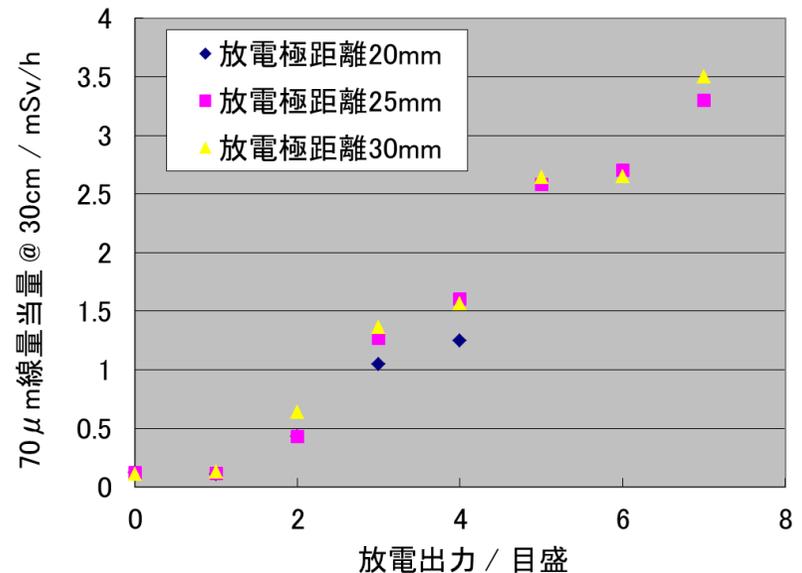
パルス型X線の実効線量の検討

- 計測された波高から何本のX線が重なり、パイルアップしたものかを計算
⇒1パルスあたり 5.7×10^3 本の20keV X線が重なっていた
- 1 msおきで間欠的にパルス型X線が放出される
⇒ 1時間当たりの20keV X線の本数： 2.1×10^{10} [/h]
- BaF₂シンチレータの直径Φ40mm
⇒Φ40mm に入射するX線のエネルギーフラックス： 6.7×10^{-5} [J/h]
- 水厚さ1cmに50%エネルギーが吸収されるとして吸収線量率を算出
⇒30cm地点での 吸収線量率： 2.7 [mGy/h]

電離箱30cm地点での70μm線量当量
0.3~3.5 [mGy/h] の範囲



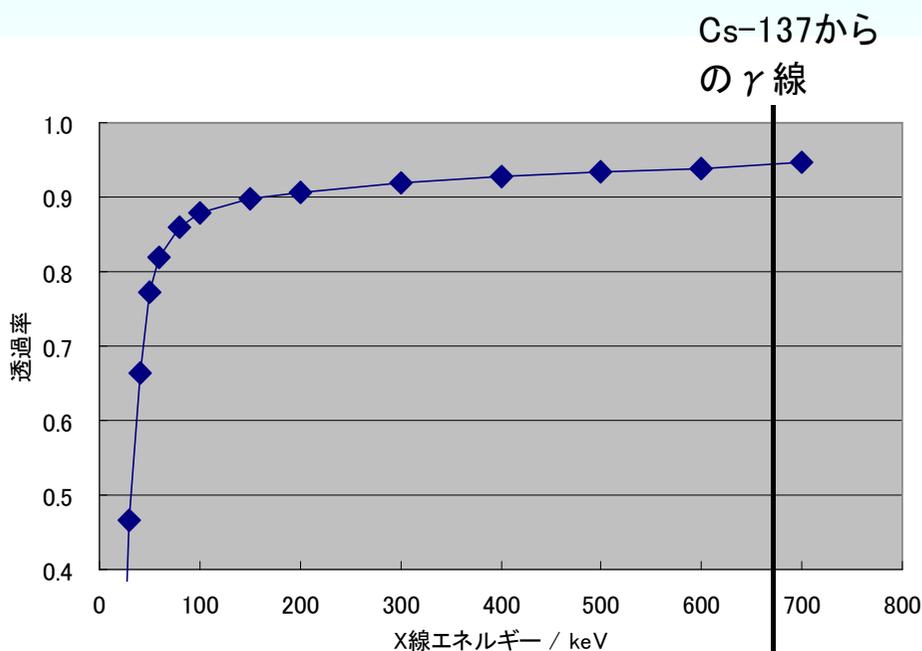
2つの結果は概ね一致し、
測定方法の有用性が検証できた



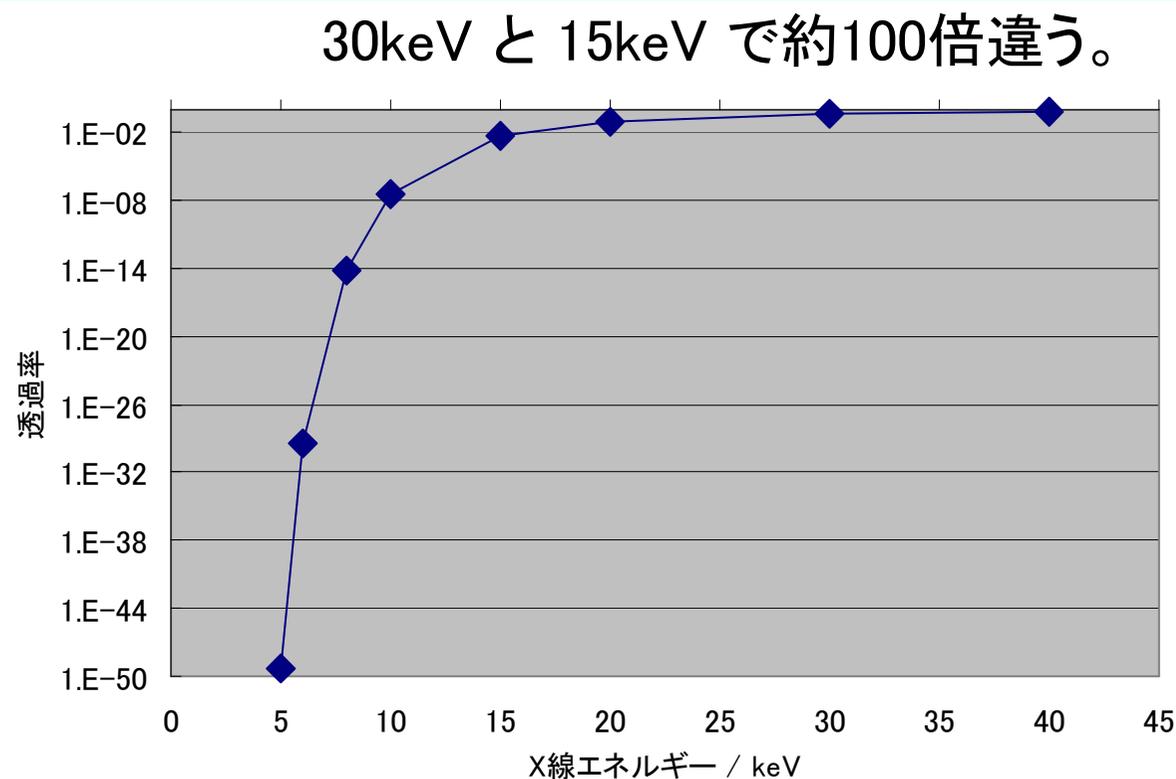
放電出力と70 μm線量当量 30cmの相関

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。



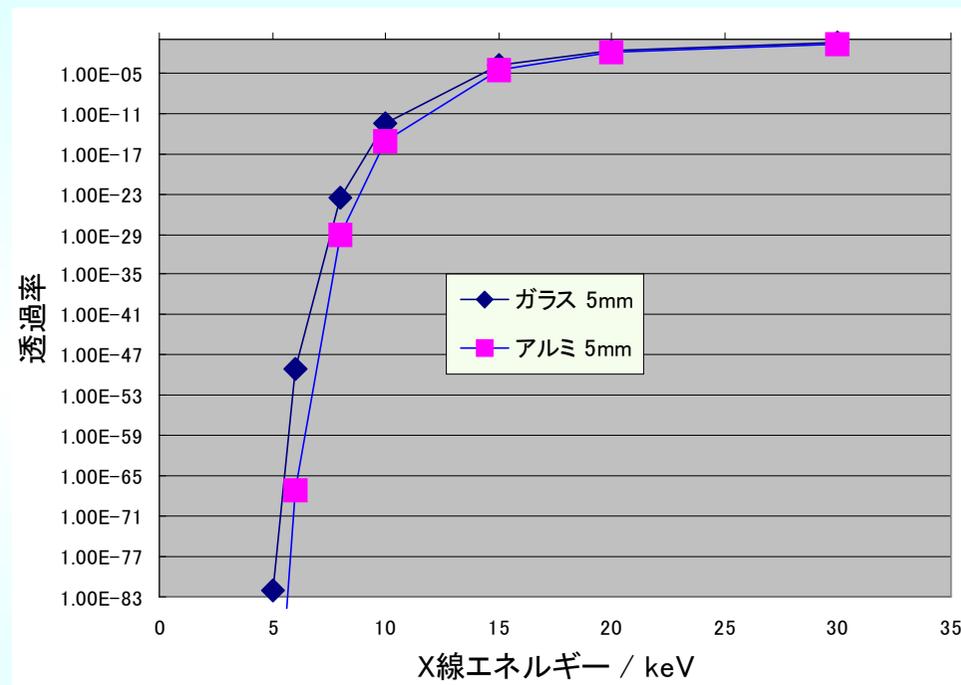
100keV 以上のエネルギーでは
余り大きく変わらない



3mmのガラスに対するX線の透過率

低エネルギーX線の透過率

エネルギー (keV)	質量減衰係数 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	厚さ(cm)	透過率	遮蔽体
5	41.5	1.00	1.0	9.48E-19	水
6	23.85			4.39E-11	
8	9.94			4.82E-05	
10	5.051			6.40E-03	
15	1.546			2.13E-01	
20	0.7505			4.72E-01	
30	0.3455			7.08E-01	
5	146	2.59	0.2	1.43E-33	ガラス (コンクリート 等価として計算)
6	87.29			2.31E-20	
8	42.13			3.33E-10	
10	22.16			1.03E-05	
15	6.809			2.94E-02	
20	2.973			2.14E-01	
30	0.983			6.01E-01	
5	192.4	2.70	0.5	1.57E-113	アルミ
6	114.4			8.46E-68	
8	49.7			7.26E-30	
10	25.75			8.00E-16	
15	7.697			3.07E-05	
20	3.279			1.20E-02	
30	1.045			2.44E-01	



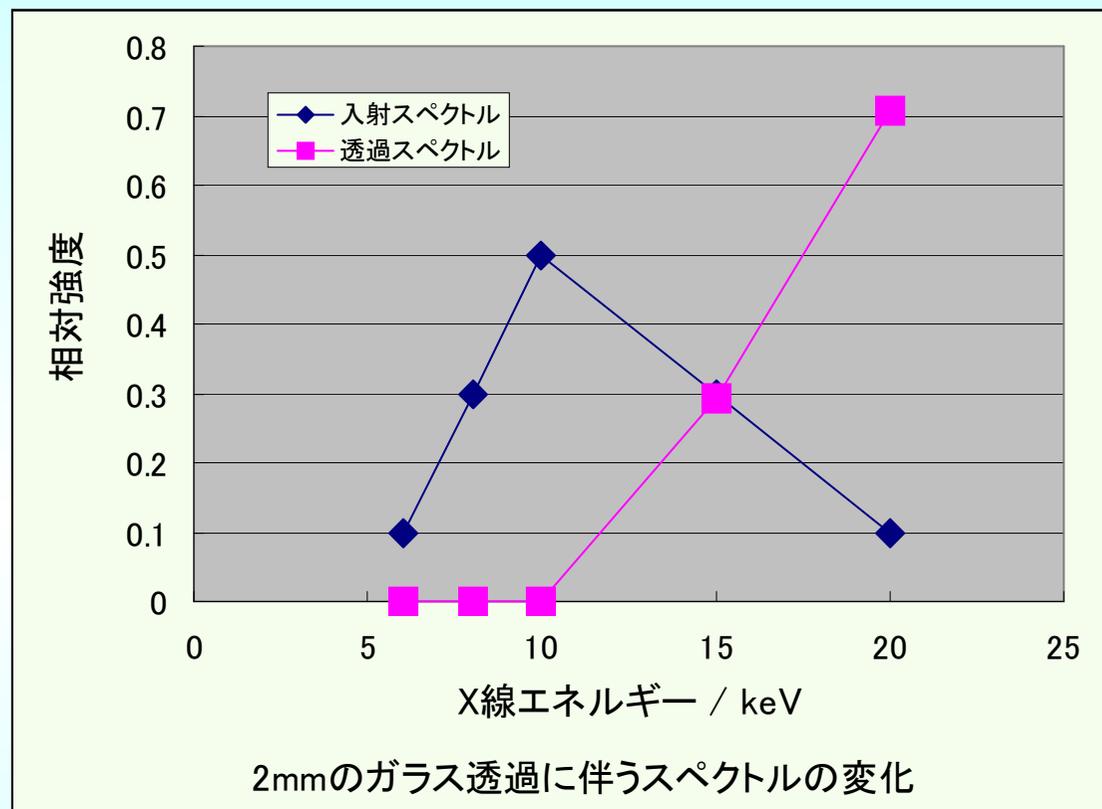
アイントープ手帳 第11版, p154-155

- ・水1cmで遮蔽できるのであれば、1cm線量当量については気にする必要はないが、10keV以上ではそれなりに透過する。
- ・クルックス管を構成するガラス壁によって 10keV 以下のX線はほとんど遮蔽される
- ・15keV 程度から急激に遮蔽率が変化し、わずかな印加電圧の違いにより大きく透過率が異なるため、放出されるX線のフラックスが安定しない。

クルックス管のガラスによるスペクトル変化

エネルギー (keV)	質量減衰係数 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	厚さ(cm)	透過率
6	87.29	2.59	0.2	2.31E-20
8	42.13			3.33E-10
10	22.16			1.03E-05
15	6.809			2.94E-02
20	2.973			2.14E-01

ガラス管を透過する前のX線のエネルギー Spektrum (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。



入射スペクトル	透過スペクトル	規格化
0.1	2.31E-21	7.62E-20
0.3	9.99E-11	3.30E-09
0.5	5.17E-06	1.71E-04
0.3	8.82E-03	2.91E-01
0.1	2.14E-02	7.08E-01

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。

クルックス管の安全取扱に向けて

クルックス管からの被ばく線量を下げるには

- 1) 印加する電圧を下げる
- 2) 流れる電流を下げる
- 3) 距離を取る
- 4) 遮蔽をする
- 5) 時間を短くする

発生するX線量
自体を下げる

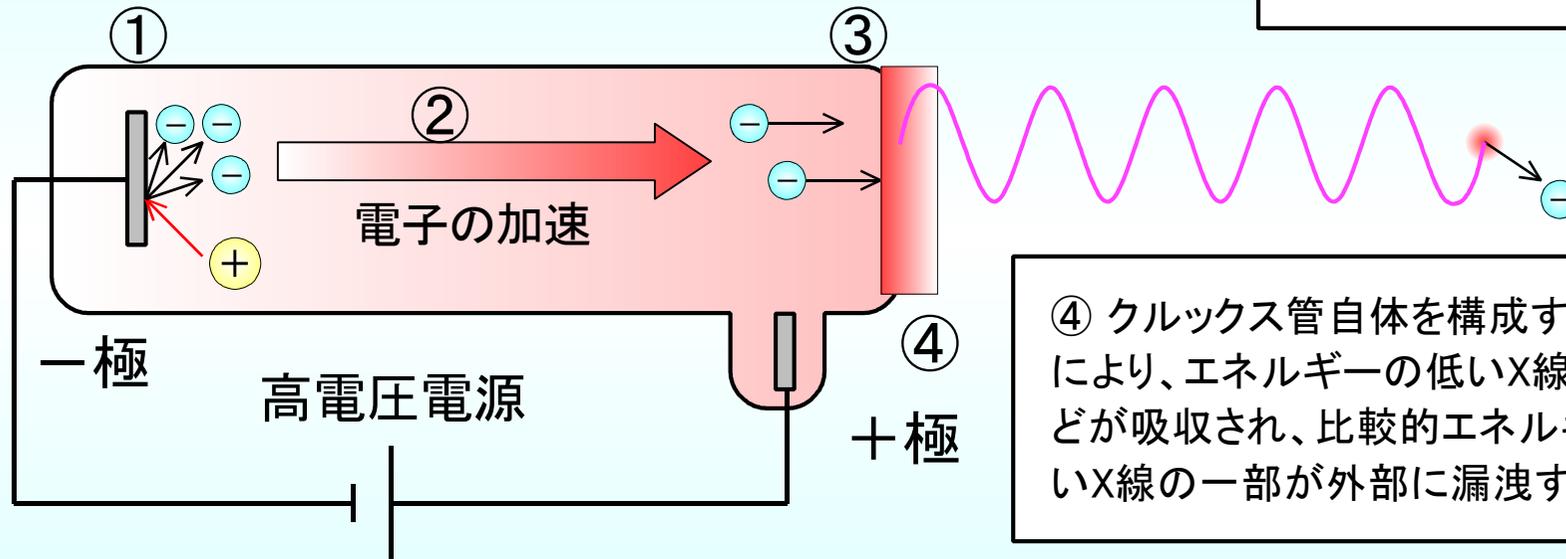
放射線防護の
三原則

クルックス管からのX線の漏洩

① +のイオンが一極に引きつけられて電子を叩き出す
(二次電子放出)

③ 電子がガラス管の壁に衝突するときに、制動放射X線を放出する

X線は最終的に原子の周りを回る電子を光電効果などで弾き飛ばして(電離作用)、弾き飛ばされた高速の光電子はβ線と同じように振る舞う。

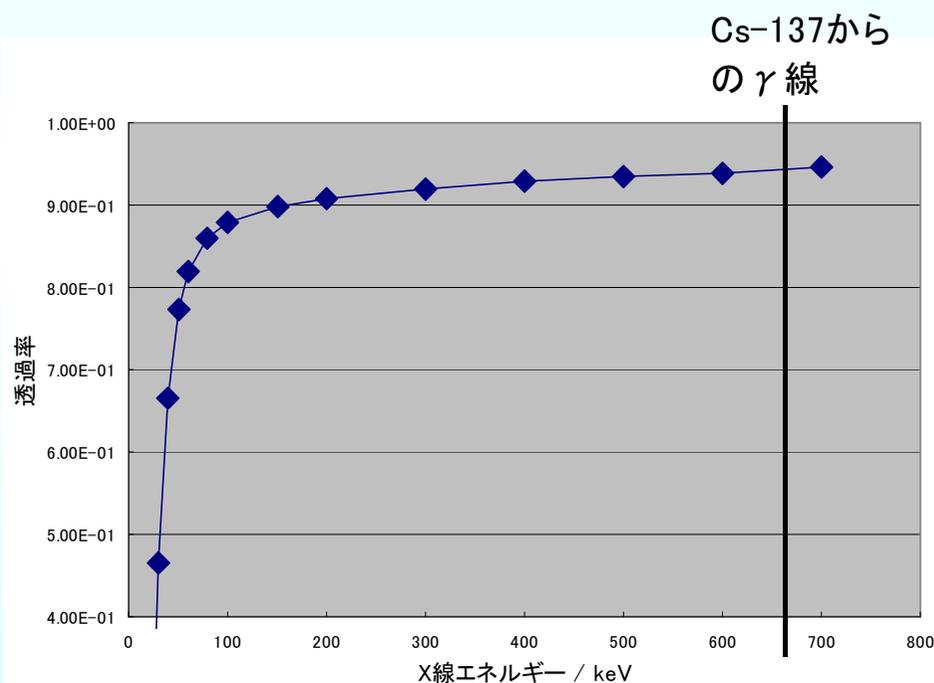


④ クルックス管自体を構成するガラスにより、エネルギーの低いX線のほとんどが吸収され、比較的エネルギーの高いX線の一部が外部に漏洩する

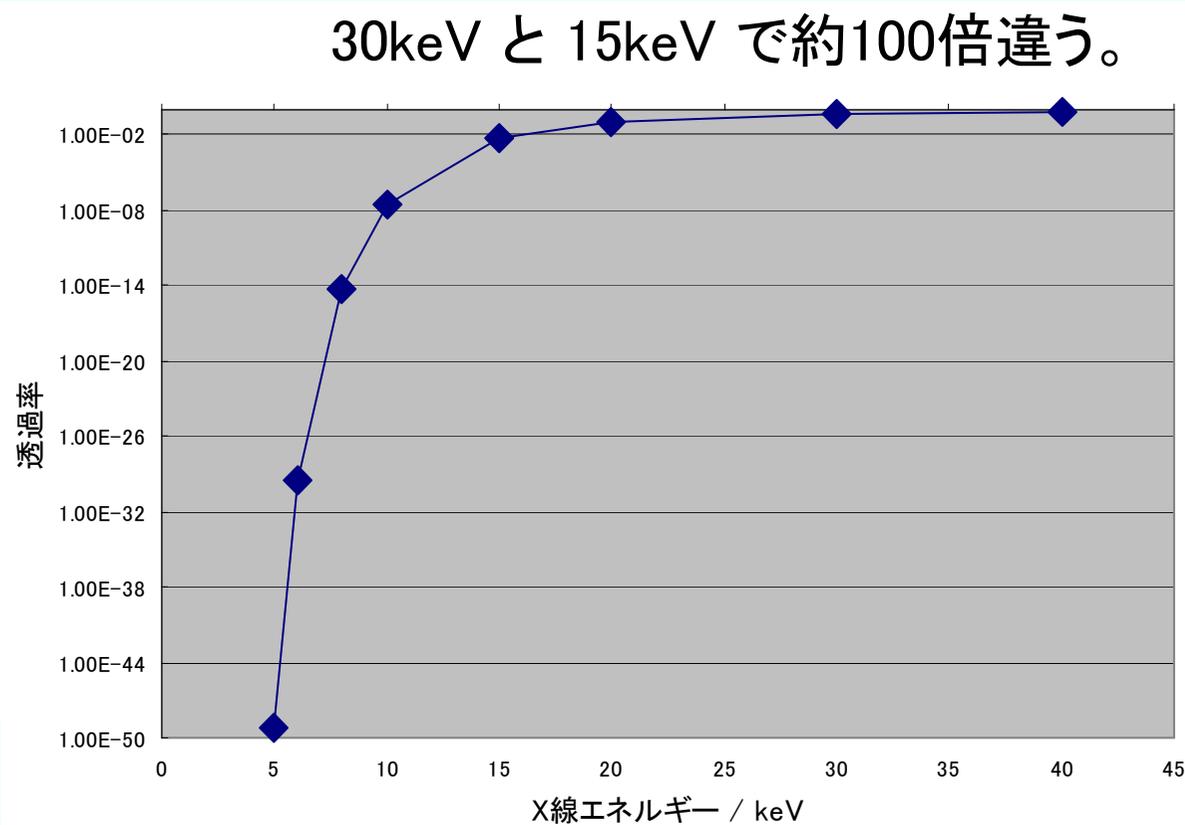
クルックス管に封入されているガスの量が少ない(ガラスに吸着するなどして少なくなる)と、①で陰極を叩くイオンが少なくなるため、電子が飛び出しにくくなり、電流が流れにくくなる。その結果誘導コイルに電磁エネルギーが蓄積され高い電圧が印加されてしまい、電流は小さいが④で漏洩する線量が大きくなってしまふ。

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



X線・ γ 線の3mmのガラス透過率

1) 2) 印加電圧を下げる、電流を下げる



放電極距離

放電出力

**絶対に放電極を
取り付ける。**

電氣的な安全上も必須。

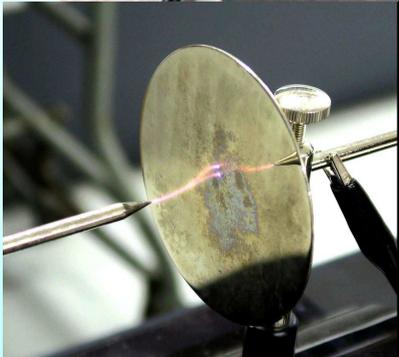
**放電極距離は20mm
以下にする。**

空気中では 1kV で約 1mm 放電

**放電出力を出来る限り
下げる。**

電子線を観察できる範囲で下げる

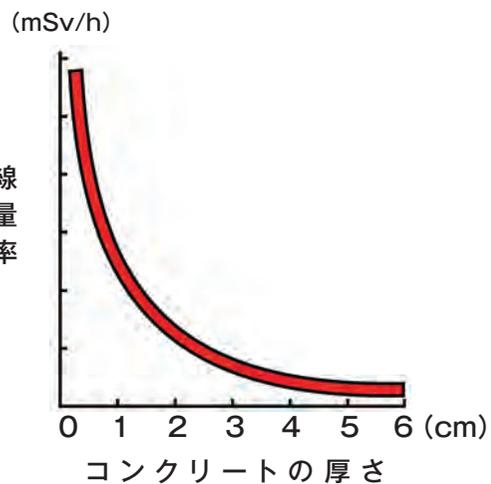
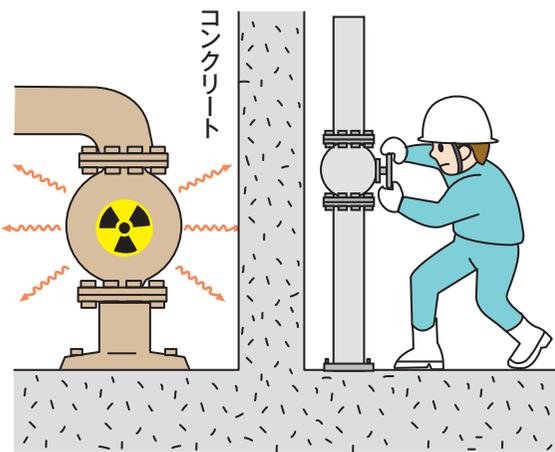
放電極は、一定以上の電圧がかかると放電してそれ以上電圧が上がらないようにする、**安全装置**



放射線防護の基本

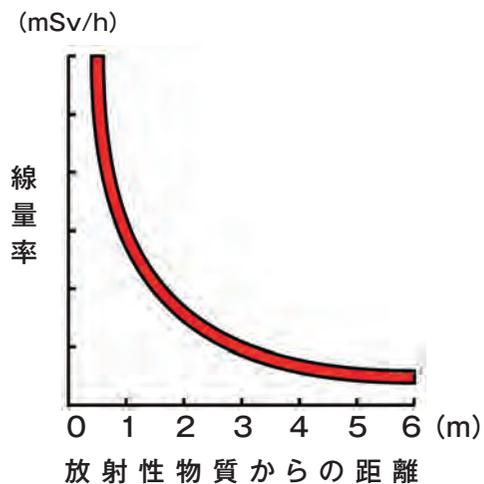
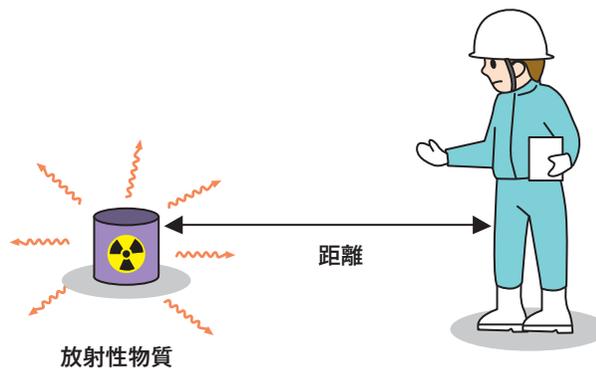
1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下



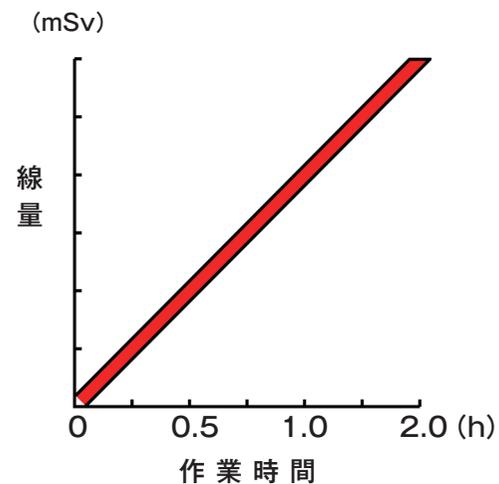
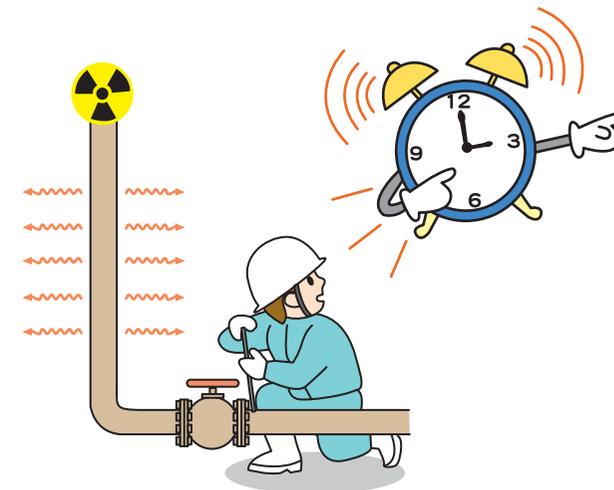
2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例



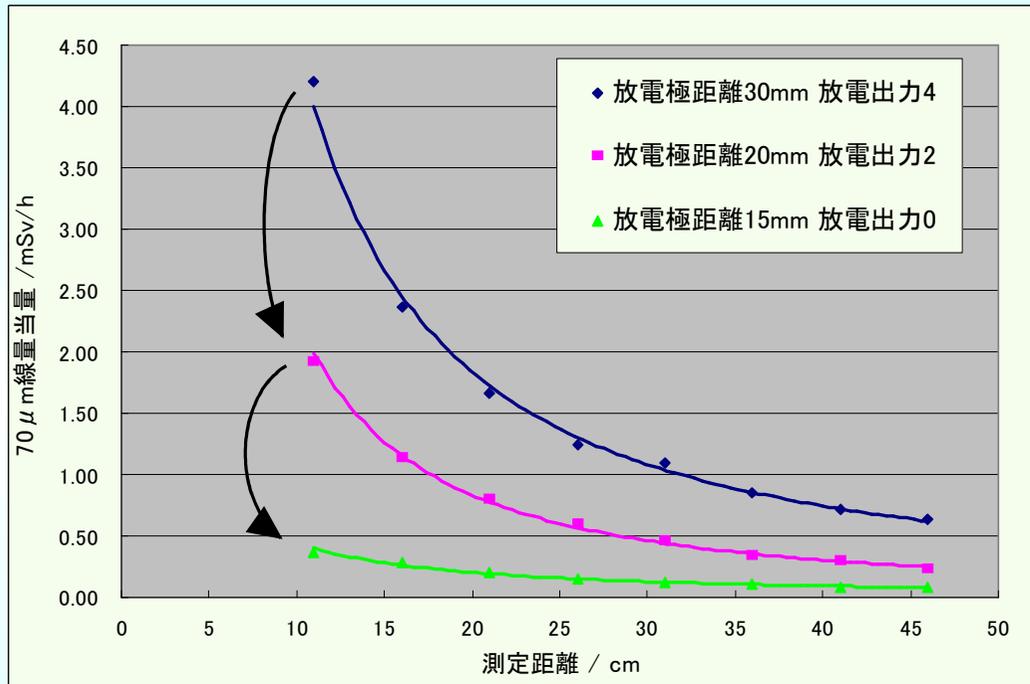
3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)



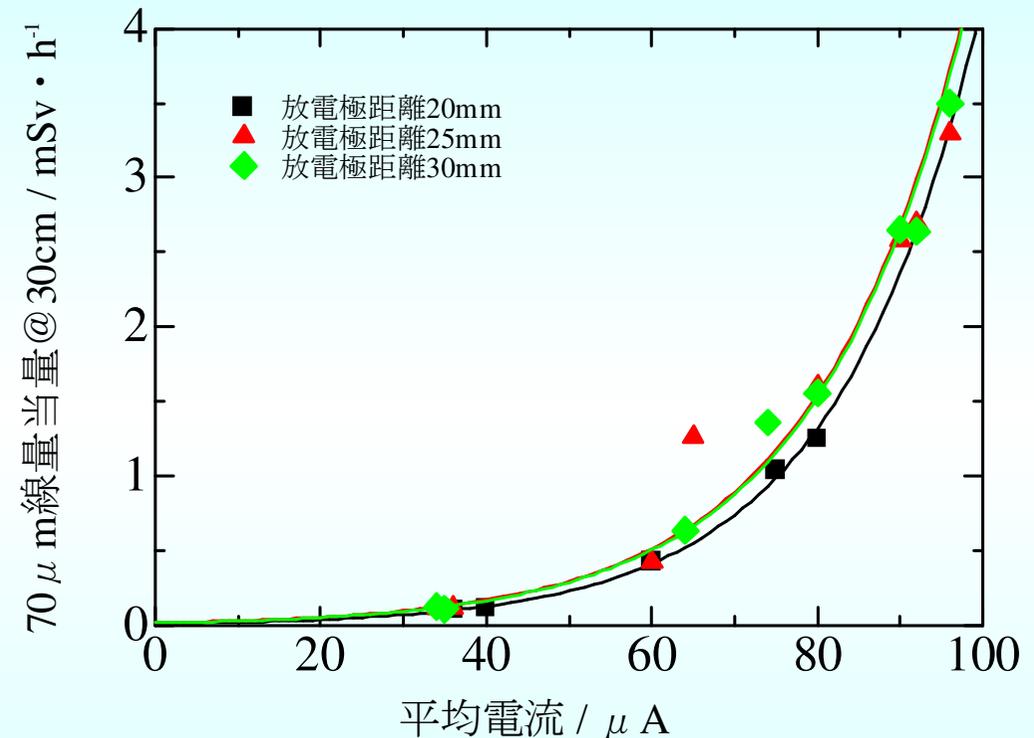
印加電圧、電流、距離依存性

放電極距離 30, 20, 15mm でギリギリ
放電が起こる出力に合わせて測定



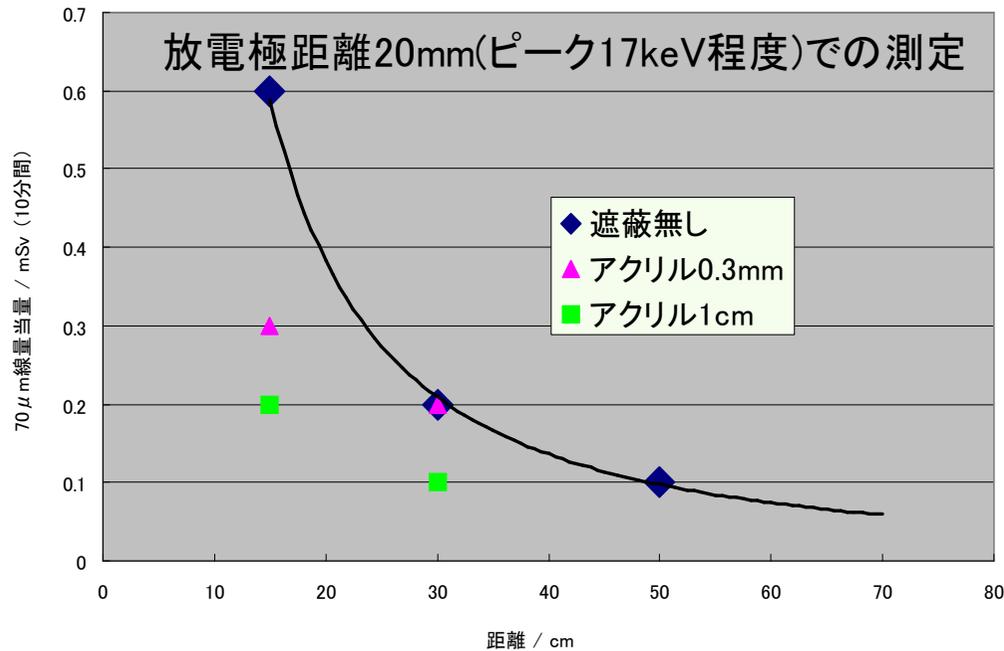
- **電圧を低く抑えると極端に線量は小さくなる**
放電極距離は20mm以下に留める
- **距離の二乗に反比例して線量は小さくなる**
1mの距離では10cmの距離での1/100になる
1mから50cmに近付いただけで4倍になる。

放電出力変化に伴う平均電流を
アナログ電流計で測定



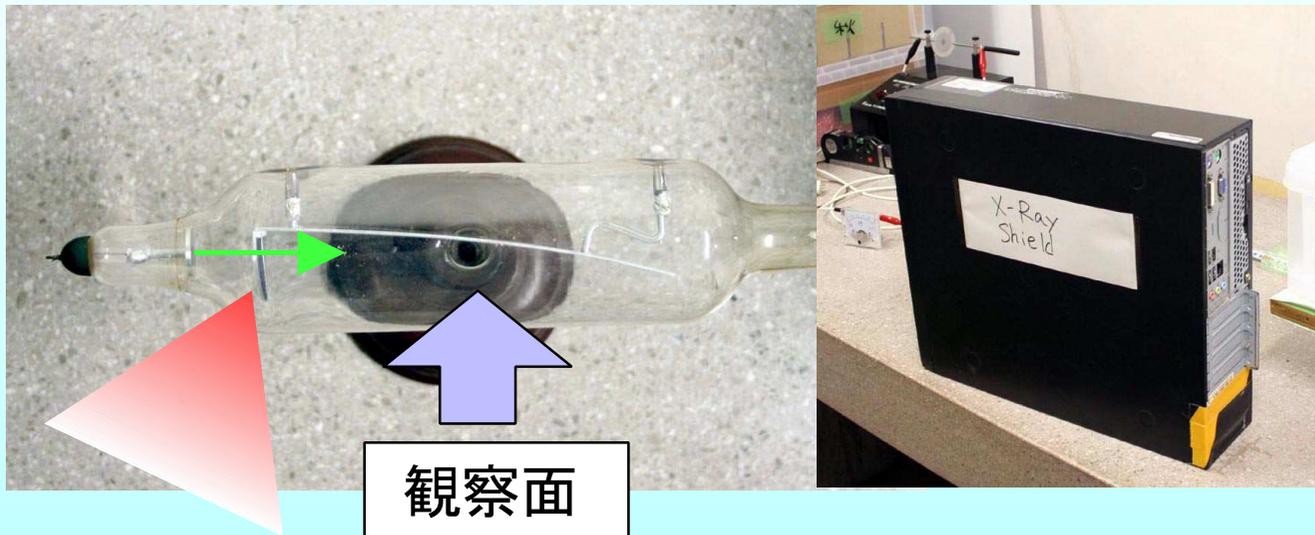
- **電流上昇に従い指数関数的に線量が上昇**
放電出力上昇で電圧も電流も同時に上昇するため、電子線が観察できる必要最小限の出力に留める。
放電極は、一定以上に電圧を上げないための安全弁の役割。

有効な遮蔽



20keV ではアクリル1cmで半分に減衰する。実際はもう少しエネルギーが低いため、3mmで約半分、1cmで1/3に減衰する。ガラスははるかに遮蔽能が高く、5mmのガラスで20keVでも1/50程度に減衰する。

しかし、実際には分厚いアクリルやガラスの遮蔽体は取扱が困難。



スリット入りのクルックス管は、観察を行わないスリットより陰極側(ビームの上流側)が最も線量が高いため、この部分を適当な物で遮蔽すると効果的。古くなったデスクトップPCが、自立するので使いやすい。

実際の教育現場での測定

実際の現場での事例



全国の37本のクルックス管について、ガラスバッジという線量計を配布することにより教員の手で線量測定を行ってもらった。

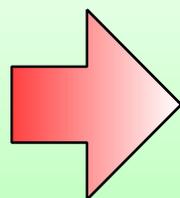
37本中、1mの距離、10分間の実演で70 μ m線量当量* が50 μ Svを超える物は12本だけであり、うち2本は意図的に最大電圧での測定。18本のクルックス管で、距離15cmでも検出限界(50 μ Sv)未満であった。*実効線量はさらに1/5以下。

ペットボトルに貼付けたガラスバッジに15, 30, 50cmの距離で10分間X線照射して返送してもらい、線量評価を行った。X線計測専用タイプの物で、同時にエネルギー評価も出来る。

放電出力最低で距離1mでも600 μ Sv以上が検出された装置を現地調査。

管内のガスが枯れていて電流が流れにくい個体であった

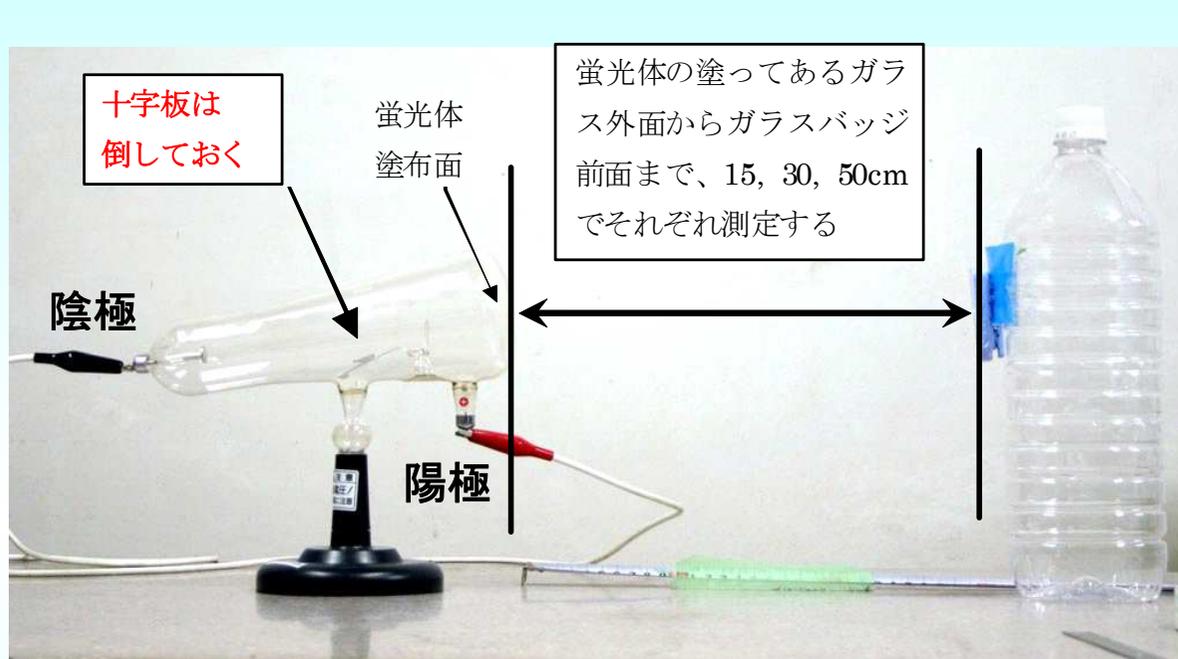
最低出力、30cmの距離で
放電極距離30mm: 2mSv/h
放電極距離50mm: 30mSv/h



放電極距離を20mmに縮めると、
40 μ Sv/h にまで落ちた。

距離1m、10分間では、0.6 μ Svに過ぎない

統一プロトコルによる全国教育現場での線量測定



- ・ガラスバッジFX型を用いて低エネルギーX線の線量とエネルギーを評価。
- ・クルックス管からの距離、中心軸合わせ、照射時間などを統一したプロトコルを作成し、現場の先生自身の手で測定。
- ・系統的に距離を変えて測定し、実際に生徒の居る位置での評価を行う。
- ・誘導コイルの設定は「普段授業を行っている設定」で依頼し、実態を評価。
- ・全国16校からの協力を得て37本のクルックス管について測定を行った。

統一プロトコルによる線量測定の意味

- ・現場の多数の先生方自身が、低エネルギーのX線に対しても校正された測定器を使用して自分の手で測定を行っている
(電離箱などでは現実問題として不可能)
- ・実際に生徒が観察を行う 1m 位置での評価を行っている
(過去に例がない)
- ・線量の評価と同時に低エネルギーのX線のエネルギーの評価も行っている
(CZT検出器などで評価可能であるが、現実問題として現場での測定は不可能)
- ・それぞれの測定で評価されたエネルギーから、 $70 \mu\text{m}$ 線量当量から実効線量の換算が可能である
(最終的に実効線量(Sv)での評価を必ず一度は行った上で、安全管理を検討する)

全国教育現場での線量測定結果

18/37本のクルックス管について、15cm距離でも**検出限界(50 μ Sv)未満**であった。

距離の二乗に反比例するとして**フィッティング**を行い、1m距離、10分間の実演で、Hp(0.07)で**50 μ Sv**を超えるのものが12本存在した。

もっとも強い学校では、15cm距離では**10分間での Hp(0.07) = 32.6mSv**にも達し、**1m位置に於いても 0.93mSv**となった。(ただし、この学校では意図的に最大出力で今回の測定を行っており、普段からこの数値を出しているわけではない。)

一方、**最大出力で実験**をしている学校でも、1m位置で**4.3 μ Sv**に留まっていたり、逆に**最小出力にも関わらず 15cm位置で 23.5mSv, 1m位置で 0.62mSv**にもなるクルックス管が存在した。

ただし、あくまでも Hp(0.07) での値であり、**20keV前後の低エネルギーX線**は水中で1cmの遮蔽により**1/2~1/3まで減衰**し、しかも空間的線量分布を考慮するとさらに**実際の線量は小さくなる**ため、**実効線量はこれらの値よりもはるかに少なくなる**。水晶体の等価線量についてはこれらの値を用いるのが妥当である。

クルックス管安全取扱のガイドライン（暫定）

・低電圧駆動の製品に買い換える

絶対安全なので
何も考えなくても良い

経済的理由などで困難な場合は ↓ 以下の点に注意を払う必要がある

- ・誘導コイルの放電出力は電子線の観察が出来る範囲で最低に設定する
- ・放電極を絶対に使用し、放電極距離は20mm以下とする。
- ・出来る限り距離を取る。生徒への距離は 1m以上とする。
教員が磁石で電子線を曲げるときは指し棒などを使用する。
- ・演示時間は10分程度に抑える

スクリーニングのための簡易測定

箔検電器を用いたX線の線量測定手法の開発

12

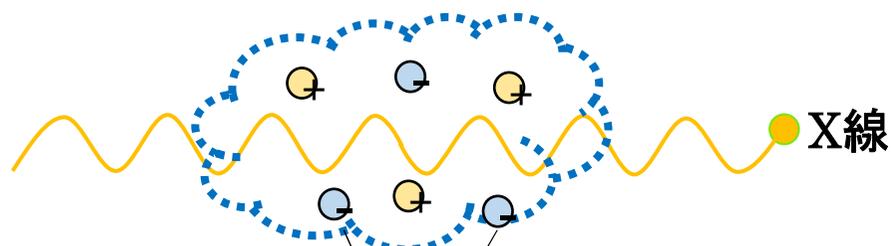
➤ 箔検電器について

箔検電器の箔の閉じる時間は、放射線が空気を電離することによって生成されるイオンの量に依存する。

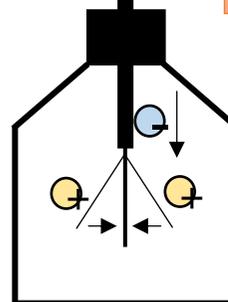


使用した箔検電器
(はく検電器EA)

X線が空気を電離してイオンを生成



逆極性のイオンを収集



箔が中和して閉じていく



※箔検電器と同様の原理を用いた線量計として、ポケットチェンバーという携帯型の線量計が

古くから使われていた。

箔検電器を用いる理由

- 箔検電器はクルックス管と同様に多くの中学校に置かれている。
 - ➡ 中学校の環境においても簡単に取り扱える。
- 箔の閉じる時間は、放射線が空気を電離することで生成されるイオンの量に依存する。
 - ➡ 印加電圧と箔の開き角度の関係、静電容量から微小なイオン電流が求められるため、一種の開放型の電離箱として利用できる。

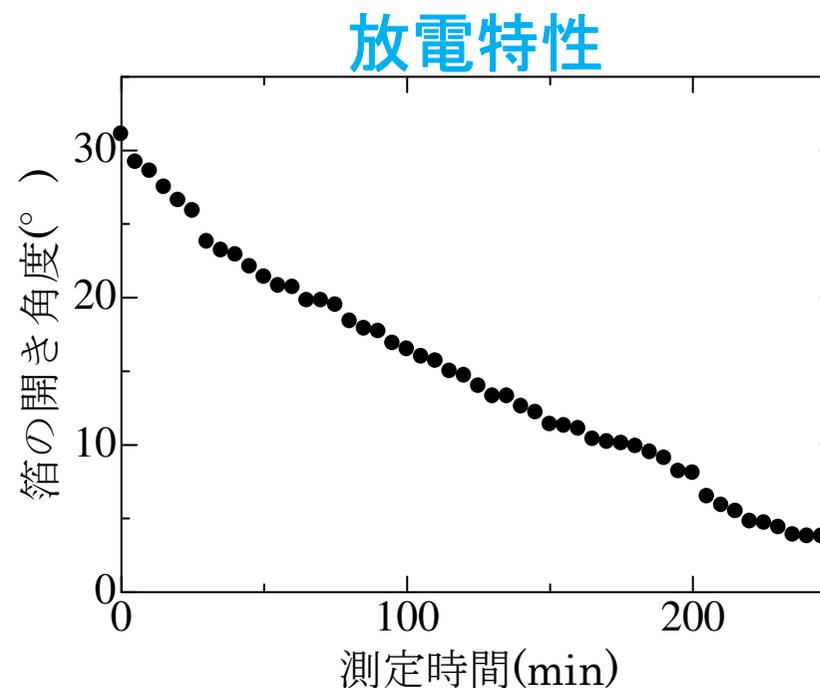
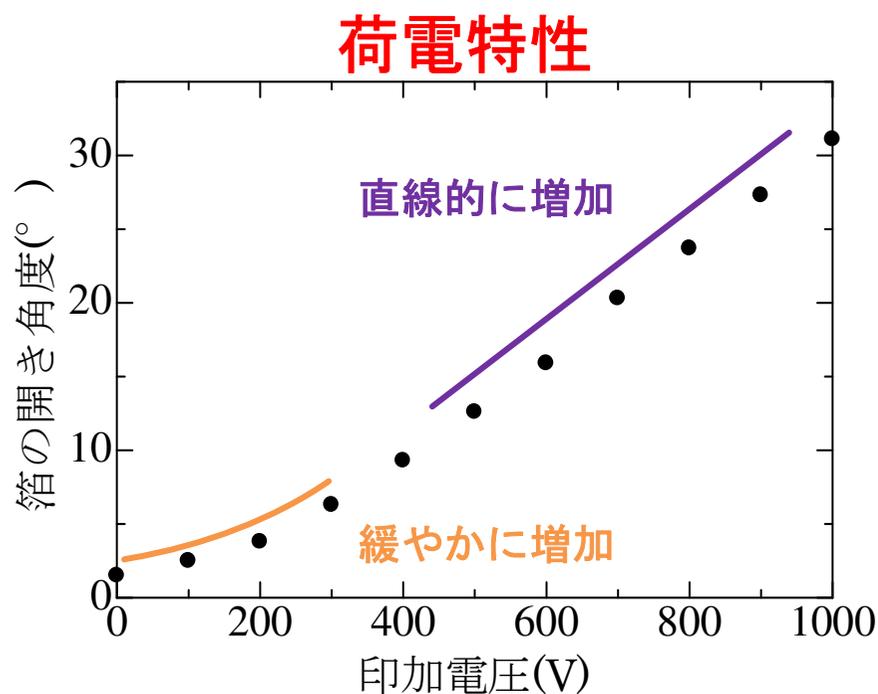
※箔検電器を用いた定量的な線量測定は既に、同じクルックス管プロジェクト内で先行研究が行われている^[1]が、平行して、我々の研究グループも測定手法の開発を行った。

**箔検電器を用いたX線の線量測定手法を開発すれば、
中学校の先生自身でもX線の測定が可能となり、
スクリーニングを実現できる。**

[1] 森 千鶴夫, 緒方 良至, 箔検電器の特性と放射線の測定, 愛知工業大学研究報告 第53号 (2018)

荷電特性と放電特性

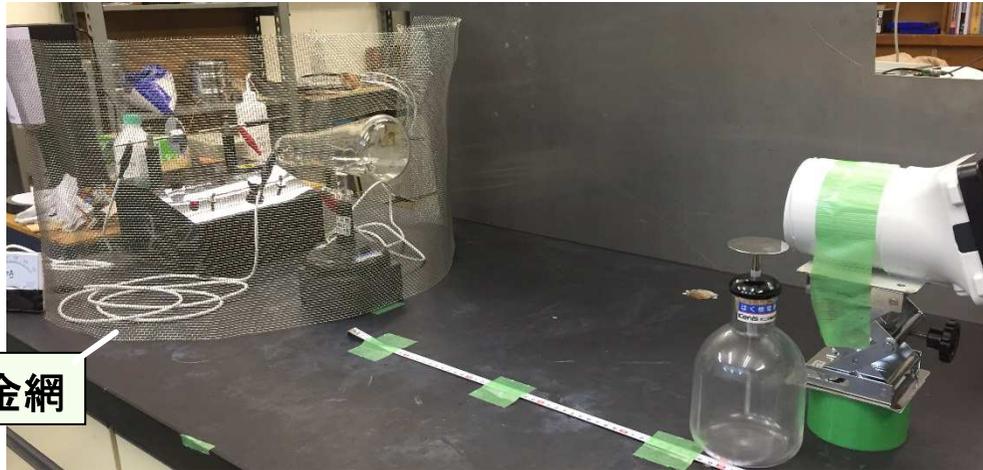
- ・ 印加電圧が増加すると徐々に角度が増加する. (1000V \Rightarrow 31.1°)
- ・ 1000Vで印加を中止し, そのまま放置すると角度がゆっくりと減少した.



荷電特性と放電特性には, グラフの対称性が見られた.
本研究では, 両者の間で直線性が見られた箱の角度30° \Rightarrow 15°
になるまでの時間をハーフタイムとする.

電場の影響の対策

① 金網による電場の遮蔽



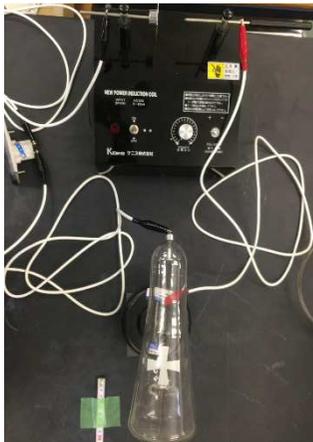
金網

金網の有無における測定結果

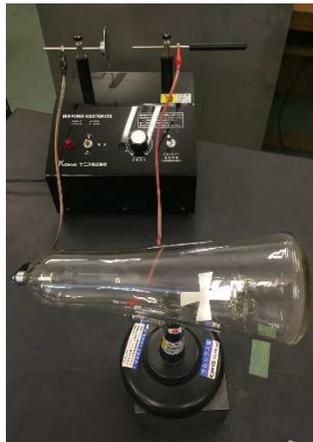
測定距離(cm)	正と負のハーフタイムの差 (sec)	
	金網なし	金網あり
40	669	84
60	173	10
70	132	9

金網で遮蔽すると明らかにハーフタイムの差が小さくなった(電子が引き寄せられにくくなった)

② 導線の繋ぎ方の変更



複雑で長い導線



短く平行にまとめた

金網使用時の測定結果

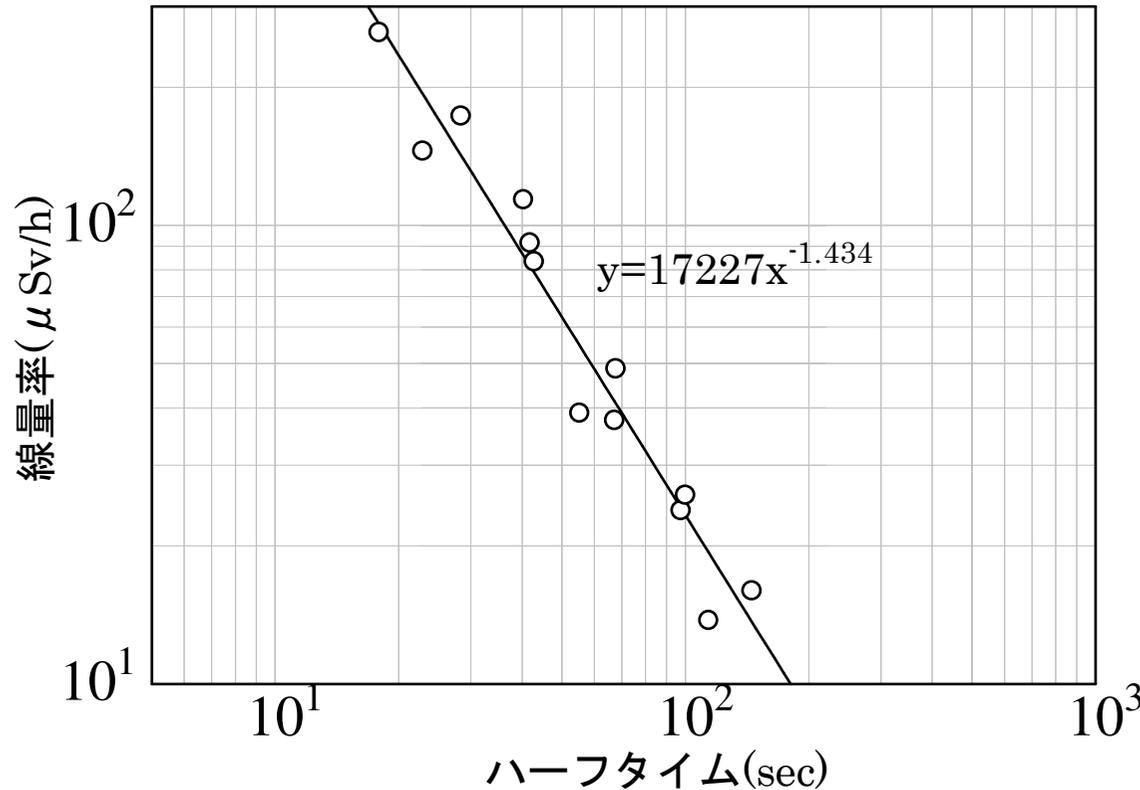
測定距離 (cm)	正と負のハーフタイムの差 (sec)
30	60
40	74
50	18
60	11
70	10

70cm離すとかなり小さくできる

これらの対策を実施してハーフタイムと線量率の相関性を見直した。

X線の線量率の推定

電場の影響を低減すると両者に相関性が見られた。



- ・ ハーフタイムは正と負の幾何平均値を使用した。
- ・ 先行研究では線量率が $60\mu\text{Sv/h}$ のとき、ハーフタイムが約100秒であるが、本研究では同線量率のとき、約50秒となった。

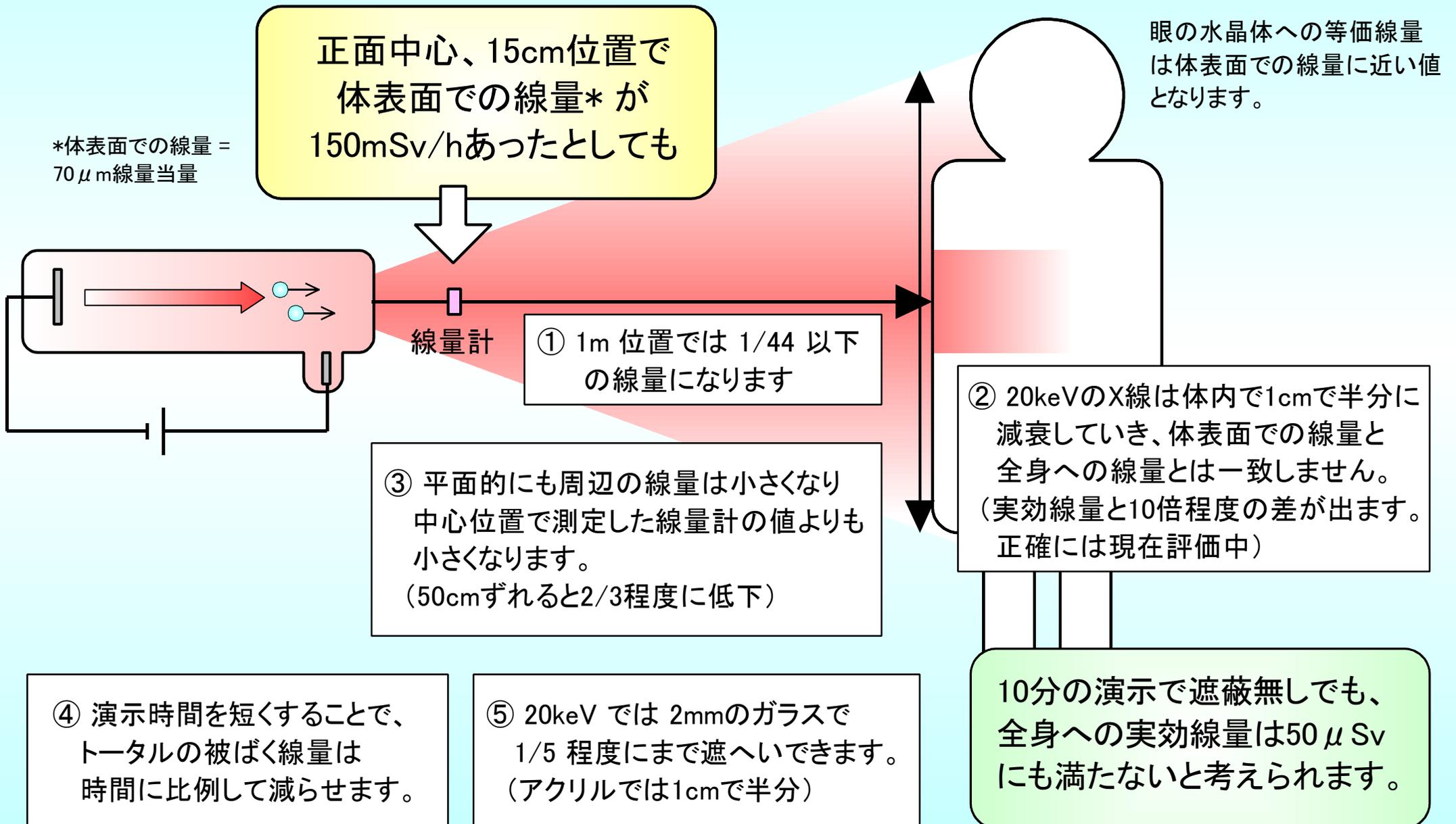
先行研究では $60^\circ \Rightarrow 30^\circ$ をハーフタイムとしているため、ちょうど2倍ほど差が生じたと考えられる。

異なる箔検電器においても同じ結果が得られる可能性

本研究で使用した箔検電器は、線量率 $13\sim 277(\mu\text{Sv/h})$ の範囲において、 $\pm 30\%$ の誤差でハーフタイムからX線の線量率が推定できる。

実効線量評価に向けて

クルックス管からのX線の不均一性

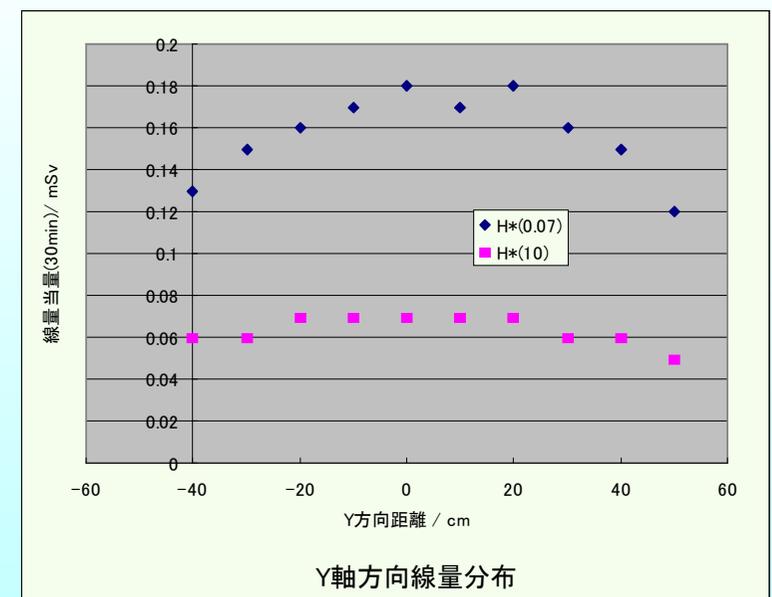
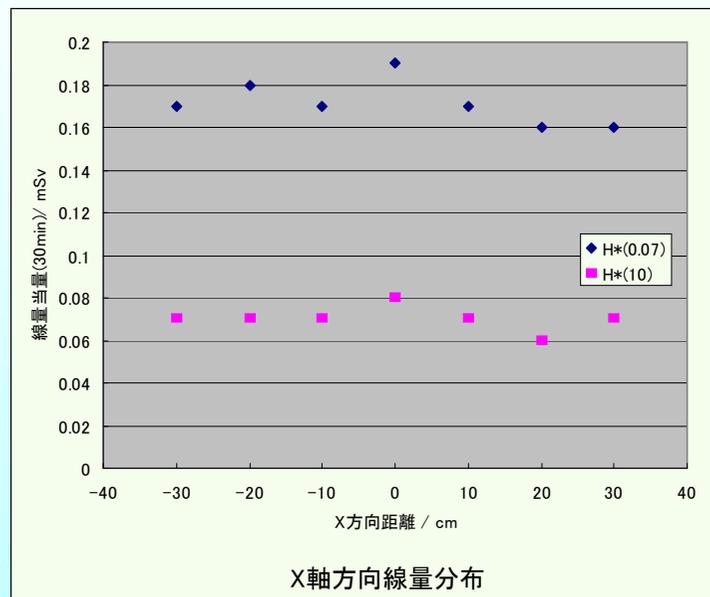


X線放射方向垂直平面内での二次元線量分布

生徒位置(z=1m)での全身への線量を評価するために、平面内での線量分布を測定した。
中心から y 方向 60cm 離れた位置でも 70% 程度の線量となっており、かなりブロードな分布となっていた。

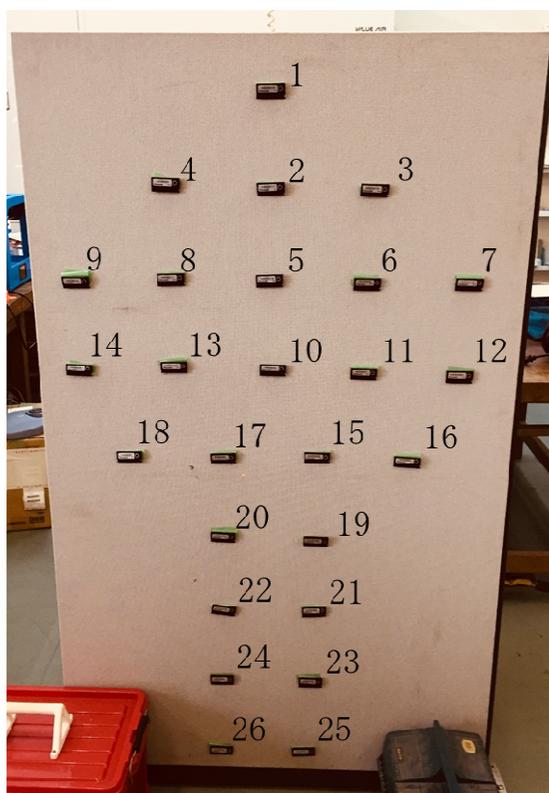


線源から 1m 離れると、点線源だとして中心から水平に 30cm 離れても、 $\sqrt{100^2 + 30^2} = 104$ cm 線源から離れただけになり、ほとんど変わらない。

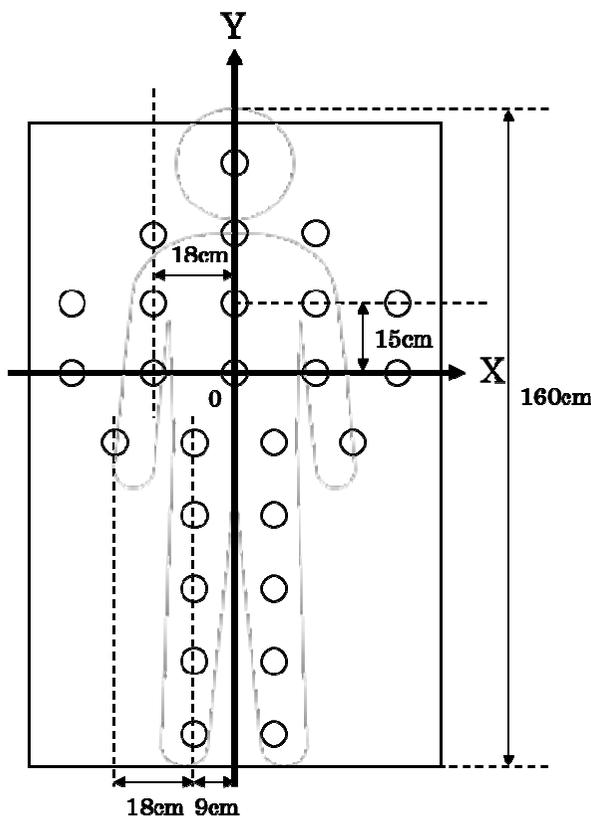


人体周辺の線量分布

平均的な男子中学生(身長:160cm)をモデルに, TLDバッジを計26個用いて, 人体周辺の線量分布の測定を行った. ※測定距離⇒1m, 測定時間⇒1時間



バッジの配置

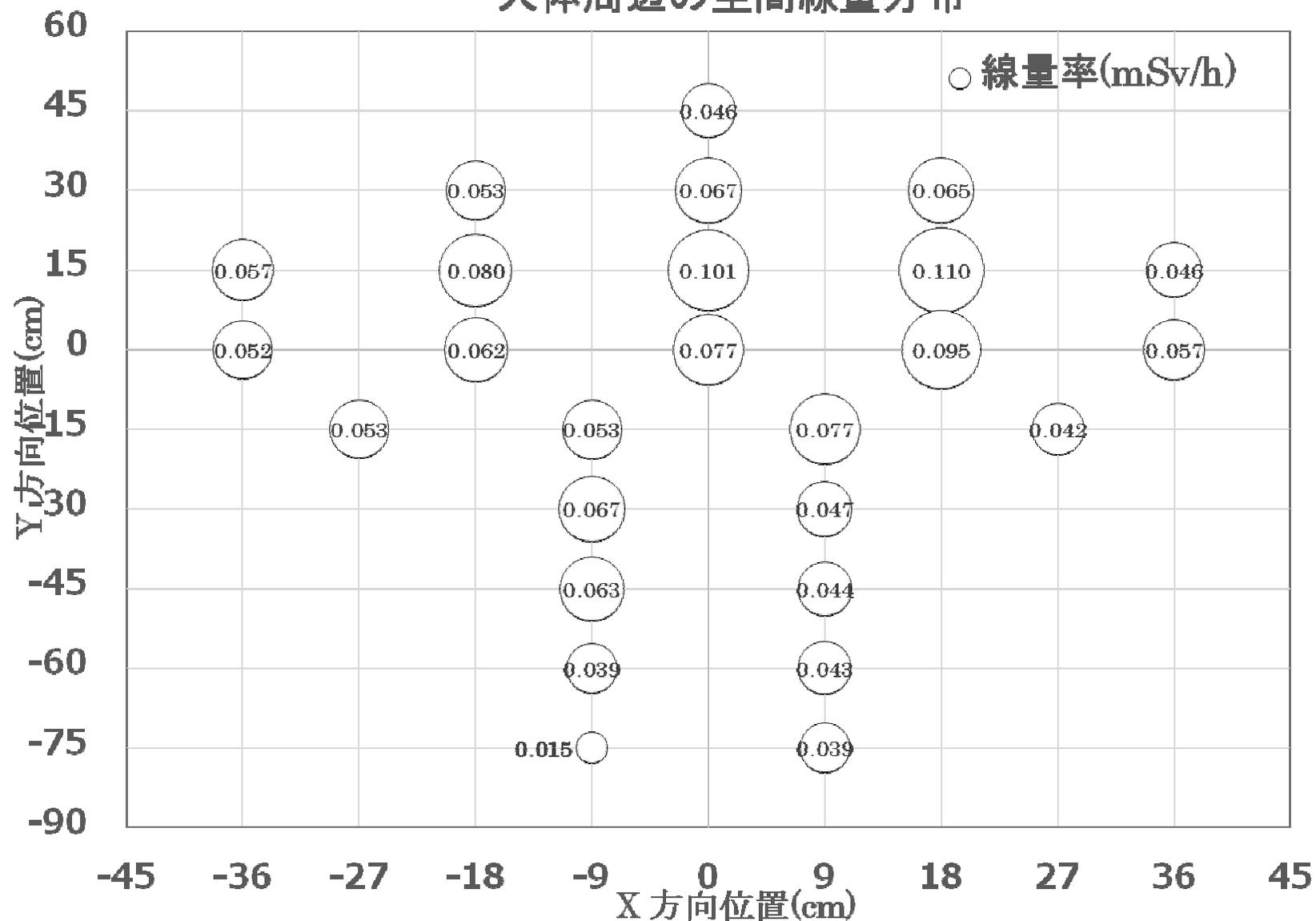


実験風景

以降の空間線量分布の測定結果はTLDバッジの補正後の値のみを示す.

人体周辺の線量分布(測定結果)

人体周辺の空間線量分布



クルックス管プロジェクトについて

本プロジェクトの目的

本プロジェクトの目的は**学校現場での放射線安全管理ガイドラインの策定**である。

教育的価値の高い実験を放射線安全も確保したうえで安心して実施できるように環境を整備することを目指している。

関係する様々な立場の方の理解を得るためには、**必要な情報を提供するのみならず**、立場を超えた議論が必要であり、技術的問題点の解決だけでなく、放射線防護の根本から進むべき方向を検討する必要がある。

本プロジェクトは、線量などの計測の専門家と、線量評価、放射線防護の専門家のみならず、実際の学校教育現場の教員、放射線教育関係者、教材メーカー、教科書会社等が関わっているが、**今後より多くの立場の方の意見**や諸外国の管理体制を取込んでいくことにより**実際の生徒や保護者**に対しても納得して貰えるガイドラインを策定する。

クルックス管プロジェクトについて

Task 1: 線量計測

放射線計測の専門家

大学・国研

ユーザーとしての学校教員

中・高

教材・測定手段の提供者

民間企業

実際に現場で使えるシステムの開発

低エネルギーX線
測定技術の標準化

Task 2: 運用方法の検討

学校教育現場の教員

Task1 で開発した評価手法

様々な製品の評価

教材メーカー

大学研究者、OB

開発した教育コンテンツの評価

実態評価に伴う問題点の抽出

遮蔽体など
解決策の提示

Task 3: 線量評価とガイドライン

保健物理・放射線防護の専門家

低エネルギーX線による
(実効・等価)線量評価モデルの構築

Task1で測定
した線量・
スペクトル情報

国内外の規制実態を踏まえた
上限線量の検討

Task2で検討
した運用方法

教育現場における放射線安全管理
ガイドラインの作成

学会標準化

Task 4: 放射線教育プログラム普及

放射線教育の専門家

新規放射線教育プログラムの開発

全国の拠点でのシンポジウム、オープンスクール、
モデル校での授業、教育学部での講義など
での放射線教育プログラム普及

小中高大民国 オールジャパンの
放射線教育ネットワークの形成

放射線知識の
国民的普及

背景

平成29年3月に公布された中学校学習指導要領の改訂に伴い、「電流とその利用」単元の静電気と電流に関する内容の取扱に於いて「**真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れること**」と言う内容が新しく追加されており、従来から用いられてきたクルックス管の活用が不可欠である。ところが古い製品の一部には**エネルギーは低いが高強度のX線を放出する**製品が存在する。クルックス管から漏洩するX線についてはこれまでに複数の教育者、研究者が報告を行っているが[1-3]、エネルギーが非常に低く透過率が低いX線という観点からの評価が必要である。

★20keV以下の低エネルギーのX線は一般的なサーベイメーターでは実効線量を評価する事が困難であるため、信頼できる測定方法での評価を行った後に、学校教育現場でも実施可能な安全確認のための**測定手法を開発**する。これらの測定・評価を行うための研究を **Task1** として位置づける。

★使用する装置や印加電圧などの運用条件によって、ガラス管外部へ漏洩するX線量が大きく変動する。このため、全国の教育現場での実態を調査する。さらに低エネルギーX線を活用した教育コンテンツの開発を行い、様々なコンテンツ毎に必要な印加電圧の検証、安全に使用するための遮蔽体の検証などの、**実際の教育現場での運用方法の検討を行う**研究を **Task2** として位置づける。

★低エネルギーX線は β 線と γ 線の間程度の性質を持ち、不均一被曝をもたらすため、このエネルギー領域の放射線による実効線量評価を行う必要がある。目の水晶体に対する等価線量評価も重要である。実態調査結果を踏まえた上で教育現場での被曝線量の上限の検討と、それを達成するための運用方法、測定方法などを「**教育現場における放射線安全管理ガイドライン**」としてまとめ、**学会標準として制定する**。これらの内容を、**Task3** で実施する。

★低エネルギーX線を活用した教育コンテンツの開発を行い、ガイドラインを反映した線量測定手段と新規コンテンツを**教育現場に提供**する。これにより、実際の現場からの意見を取り入れ、**ガイドラインにフィードバック**する。これらの内容を **Task4** として実施する。

[1] クルックス管から漏洩するX線の実態とその対策, 大森 儀郎, 神奈川県立教育センター研究集録, 13 (1994) 21-24.

[2] イメージングプレートを用いたクルックス管からの漏洩線量分布測定, 藤淵 俊王ら, 放射線安全管理学会誌, 10 (2011) 40-45.

[3] 教育現場における冷陰極管の漏洩X線について, 宇藤茂憲, 福岡教育大学紀要, 66 (2017) 第3分冊, 1-11.

Task 1: 線量計測

1-a: クルックス管からの低エネルギーX線線量評価

カラスバッジ、低エネルギー用電離箱、CdTe 検出器などの信頼できる計測器による線量やスペクトル評価をまず実施する。大阪府大で既に測定を行っている。

1-b: 低エネルギーX線の簡易な線量評価方法の開発

学校教育現場においては高価な線用の検出器を用いた測定は現実的に不可能である。汎用の広窓GMや霧箱の活用などによりエネルギー評価が可能であることが明らかになっており、これによる線量評価を検討する。大阪府大で既に一部の測定が完了しているが、測定値から実効線量への換算について検討する必要がある。先行研究[3,4]の関係者などに協力を要請する。

1-c: より簡易な安全評価法開発

実際の教育現場においては、一定以上の線量率になっていないことが分かれば良いため、より簡便な判定法を用いることで安全確保を行う事が望ましい。既に箔検電器を用いた研究が実施しているためこれらの知見を取り入れる。

1-d: 散乱線を含む照射場での低エネルギー成分評価

廃炉現場や医療用のX線照射の現場など、高エネルギーの成分が存在する照射場に於いて低エネルギーの散乱線の評価するための簡易な測定手法の開発を行い、実際の現場での実態調査を実施する。

[4] エックス線発生装置管理のための低線量評価法, 大久保 徹ら, 日本放射線安全管理学会誌, 15 (2016) 66-73.

Task 2: 運用方法の検討

2-a: 教育現場での実態調査

実際の教育現場で用いられている放射線教育機材について、製造時期や構造の違いなどによる線量の違いを、実態調査するために、希望者を取りまとめた上で、サーベイメーターの貸出しや、ガラスバッジの送付、回収、測定依頼などの業務を行う。この実態調査結果を受けて線量の上限值内に収まるように余裕を持った運用条件設定を行う必要がある。これには全国各地の中学校などの教育現場の協力と、教材メーカーの協力が不可欠である。

2-b: 様々な教育コンテンツ実施に必要な運用条件の検証

ホリゾン社のクルックス管による電子線の放出挙動を観察するだけであれば5Kvで十分であり、絶対安全と言える。しかし従来からの一般的なクルックス管での電子線観察や、霧箱による光電子観察、さらに透過像観察などの直感的に放射線の本質を理解できる効果的な放射線教育コンテンツのために必要な印加電圧・電流を検証する必要がある。これにより必要最低限の電圧・電流での運用を行い、漏洩線量を低下させる。また、ある程度高エネルギーのX線が必要なことが明らかになった場合、遮蔽体の利用を義務づける必要がある。これは既に様々な教育コンテンツを開発している現場の協力が必要である。

2-c: 遮蔽体の検討

コンテンツによって遮蔽が必要となった場合、20kV印加で1cmのアクリルでは線量が半分にしか落ちないため、取扱が簡便で実効性のある遮蔽体の開発を行う必要がある。古い装置で電子線を観察するためには鉛含有アクリルなどを検討する。必要な印加電圧や目標とする線量によっても要求される仕様が異なってくるため、他の検討の進捗と合わせて必要に応じて遮蔽体の使用を検討する。

Task 3: 線量評価とガイドライン策定

3-a: 低エネルギーX線被ばくによる実効線量評価、水晶体等価線量評価

10-20keV 程度の領域の中途半端な透過率を持つX線を全身へ被曝した際の実効線量評価と、発生源を注視するというクルックス管の特性上目の水晶体等価線量の評価を行う。ICRP Pub 116「外部被ばくに対する放射線防護量のための換算係数」に加えて最新の水晶体に対する知見を取込み、実際のスペクトルをもとに実効線量・等価線量を評価する。

3-b: 線量上限の検討

ICRP での様々なガイドラインや国内法令などを検討し、線量上限の設定を行う。放射線防護の専門家の先生方に検討して頂く。

3-c: ガイドラインの策定、学会標準化

線量上限の検討結果と、Task1, 2 での検討結果を受けて、最終的に安全な実験を実施するための運用条件(印加電圧、遮蔽条件、距離、時間など)の提示と、各教育現場に於いて安全確認を行うための測定手法なども織り込んだ、「**教育現場における放射線安全管理ガイドライン**」の策定を行う。主な参加者全ての関与が必要である。放射線防護の専門家だけでなく、放射線教育関係者に広く議論を行って頂く。

Task 4: 放射線教育プログラムの普及

4-a: 低エネルギーX線を活用した放射線教育プログラムの開発

クルックス管からのX線を活用して、遮蔽実験や、霧箱による可視化、さらには透過像観察などにより直感的に放射線の本質を理解できる、新規の放射線教育プログラムを開発する。Task3で策定したガイドラインに準拠する必要がある。

4-b: ガイドラインに沿った測定手段の教育現場への提供

ガイドライン策定後に、実際の教育現場での安全確認のための測定手段を提供する。希望者を取りまとめた上で、サーベイメーターの貸出しや、ガラスバッジの送付、回収、測定依頼などの業務を行い、現場からのフィードバックを得る。外部委託により実施を行う。

4-c: 新規教育プログラムの普及

開発した低エネルギーX線を活用した放射線教育プログラムを勉強会、シンポジウム、教員研修、教育大学などの教員教育課程を通じて広く普及させる。全中理、各地の教育委員会、教育大学関係者などに協力を依頼する。また、HATOプロジェクトなど既存の教育プログラムも積極的に取り入れ、幅広いニーズに対応する。現場での実施報告を受けてガイドラインにフィードバックを行う。

