

2019年4月21日 放射線安全フォーラム 第60回放射線防護研究会
「X線源を考える」 @ 東京大学武田先端知ビル武田ホール

新学習指導要領における クルックス管を用いた 放射線教育と安全管理

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>



クルックス管に関する問題点と現状

- ・中学の教育現場で、電流の単元で用いられているクルックス管は、X線が放出されていることがレントゲンの時代から知られているが、その危険性はほとんど教員の間で認識されていない。
- ・製品と使用法によっては、クルックス管表面から15cmの距離でHp(0.07)が5分で15mSvを超えるほど高い線量のX線が放出されている。しかし20keV程度の低エネルギーかつパルス状の放出のため、一般的なサーベイメーターではまともな測定を行うことが出来ない。
- ・ほぼ全くX線を放出しない低電圧駆動の製品も存在するが、教育現場には余りにも予算がない。
- ・まずは不注意に使用すると高い線量を被ばくする恐れがあることの周知が最重要。
- ・次に、ごく簡単な使い方の基本を守れば安全に取り扱うことが出来ることを周知する。現在はこの安全取扱いのガイドラインを暫定的に策定しており、その実証試験が必要。
- ・さらに、継続的な測定のため教員自身による測定手段の提供が必要。
- ・一般公衆に対する線量限度や線量拘束値の概念が法令に取り入れられておらず、自主的な管理目標値の設定が必要。
- ・原子力規制庁、文科省、厚労省と言った行政の管轄を超えた対応が必要。現在日本保健物理学会の専門研究会を立ち上げる手続を行っており、学会標準化を目指しているが、行政的なオーサライズをどのように行ってもらうかの検討が必要。

より詳しくは、クルックス管プロジェクトのウェブサイト

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



背景

背景

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。**

H31 教科書検定
H33 全面実施

クルックス管自体に関しては2008年版の学習指導要領解説にも記載されていた。

現行の教科書に於いても、理科の教科書を出版している5社全てに於いて、中学2年生の電流の単元でクルックス管による真空放電の実験が記載されており、実際に演示が行われている。

今現在既に問題となっており、さらに今後全国での利用の増加が予想される

教員に対する指導書でも放射線に関する注意が記載されていない会社もある。低エネルギーX線の正確な評価は専門家でも困難であり、教員には安全に関する指針が与えられていない。

クルックス管を用いた実験を行う際の安全指針の策定が必要

2017年3月に告示された新・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。

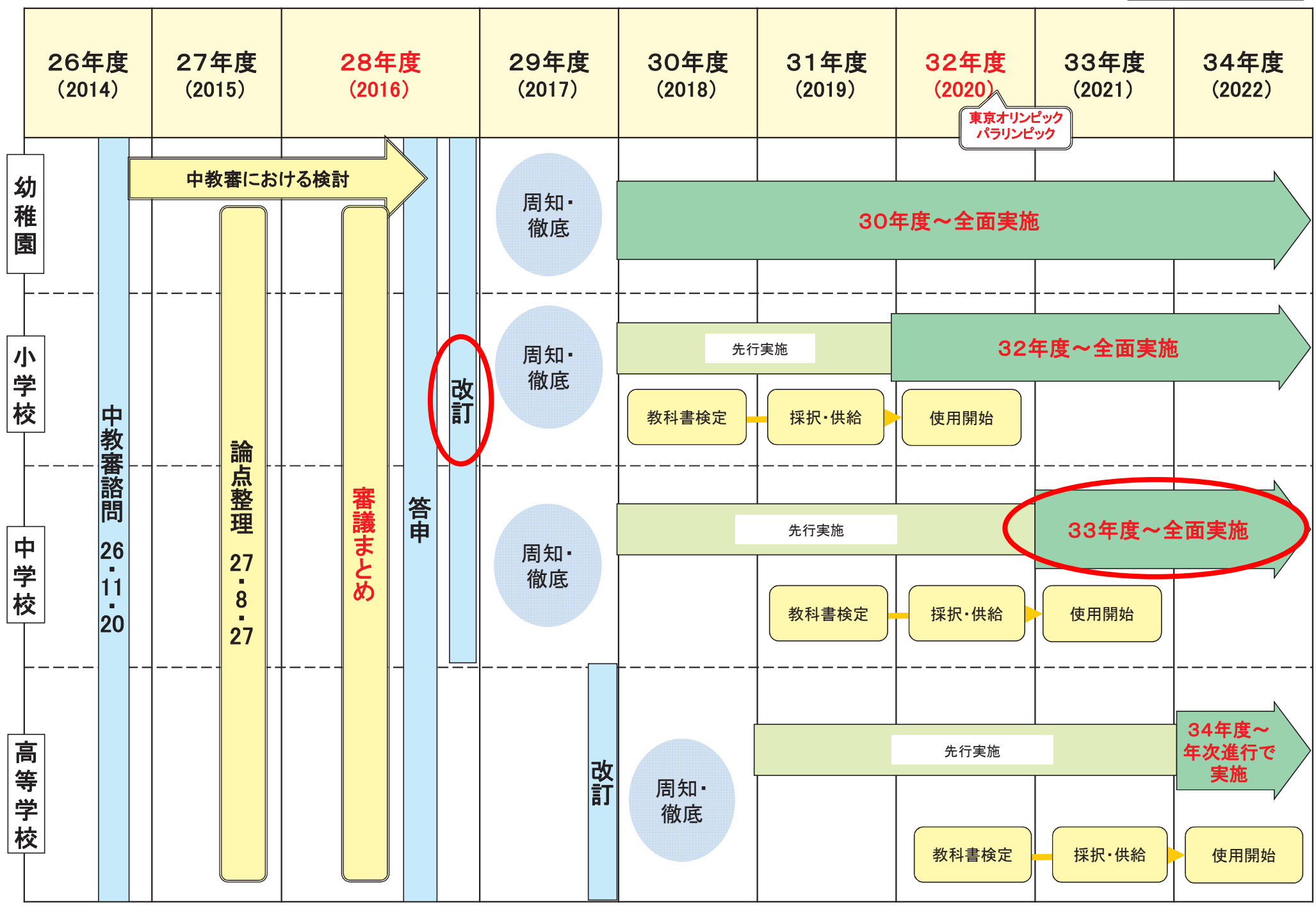
↓「内容の取扱」

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月に告示された旧・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**

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）



東京オリンピック
パラリンピック

改訂

33年度～全面实施

現行の中学理科教科書に於けるクルックス管の取扱

	啓林館	東京書籍	大日本図書	学校図書	教育出版
教科書					
クルックス管自体の取扱い	○	○	○	○	○
クルックス管に関連させた放射線に関する記述	2年	2年	3年	3年	未確認
指導書					
放射線に関する注意	○	○	○	×	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

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。

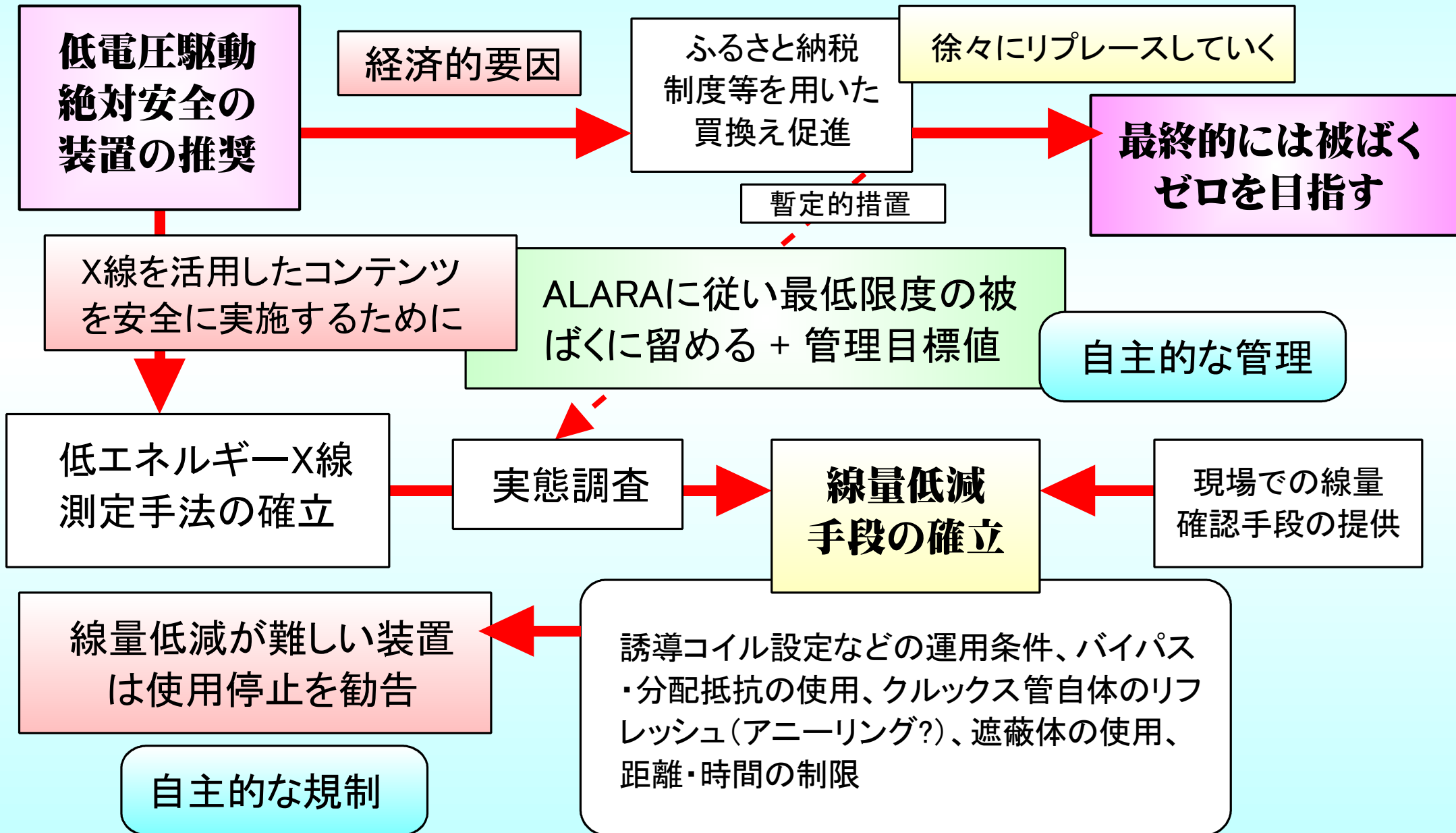
ここで話は完結する

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



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

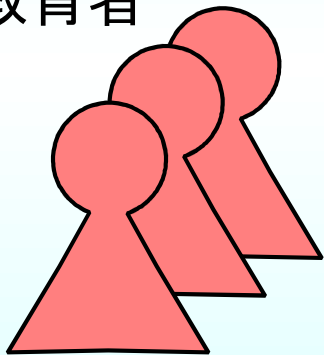
全国の教育現場での
放射線教育の実施
(委託)

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

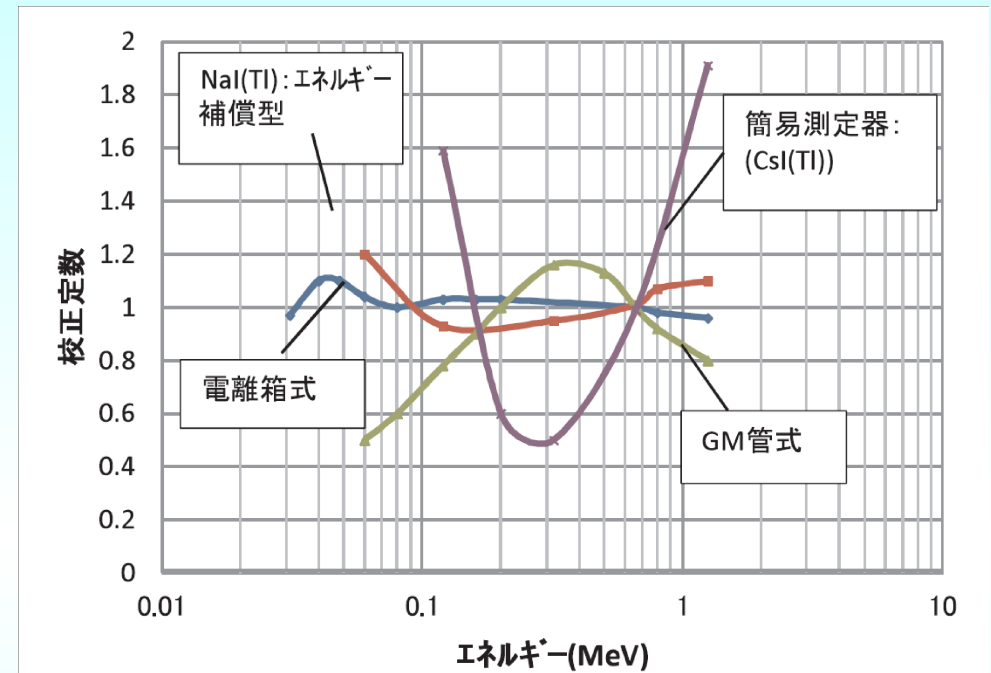
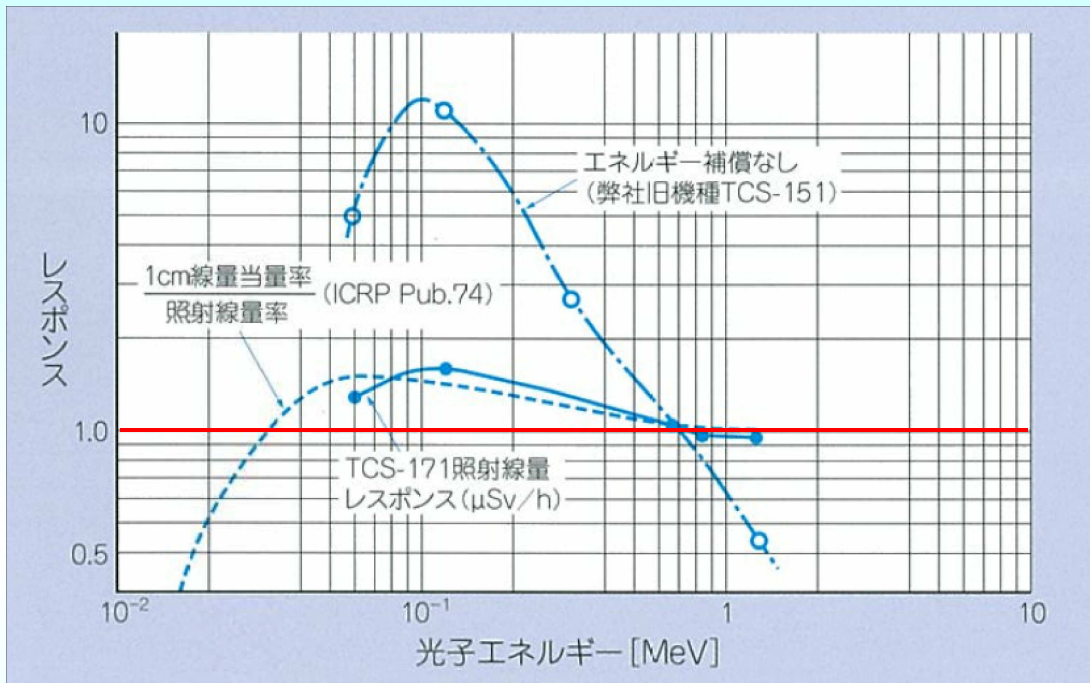
様々な測定装置による測定結果

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。

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

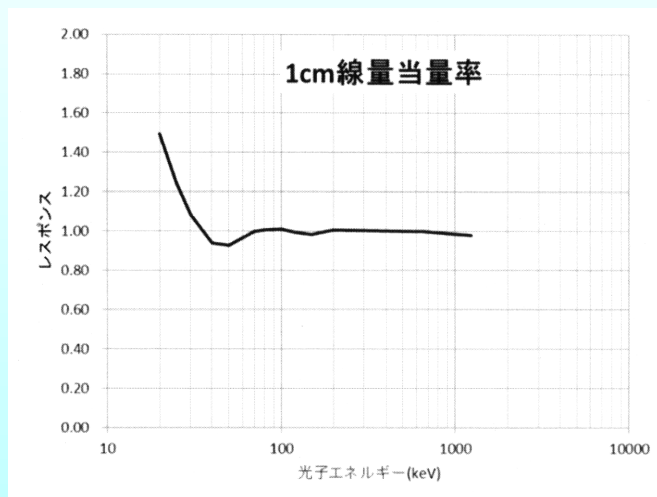
(アロカ TCS-171カタログより)

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)



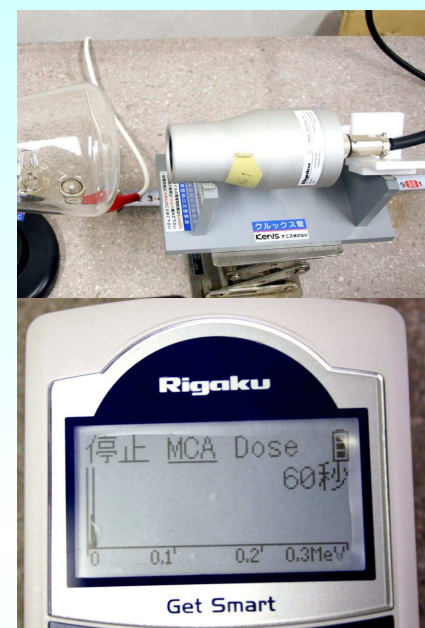
低エネルギー用NaIシンチレーターでの測定



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)



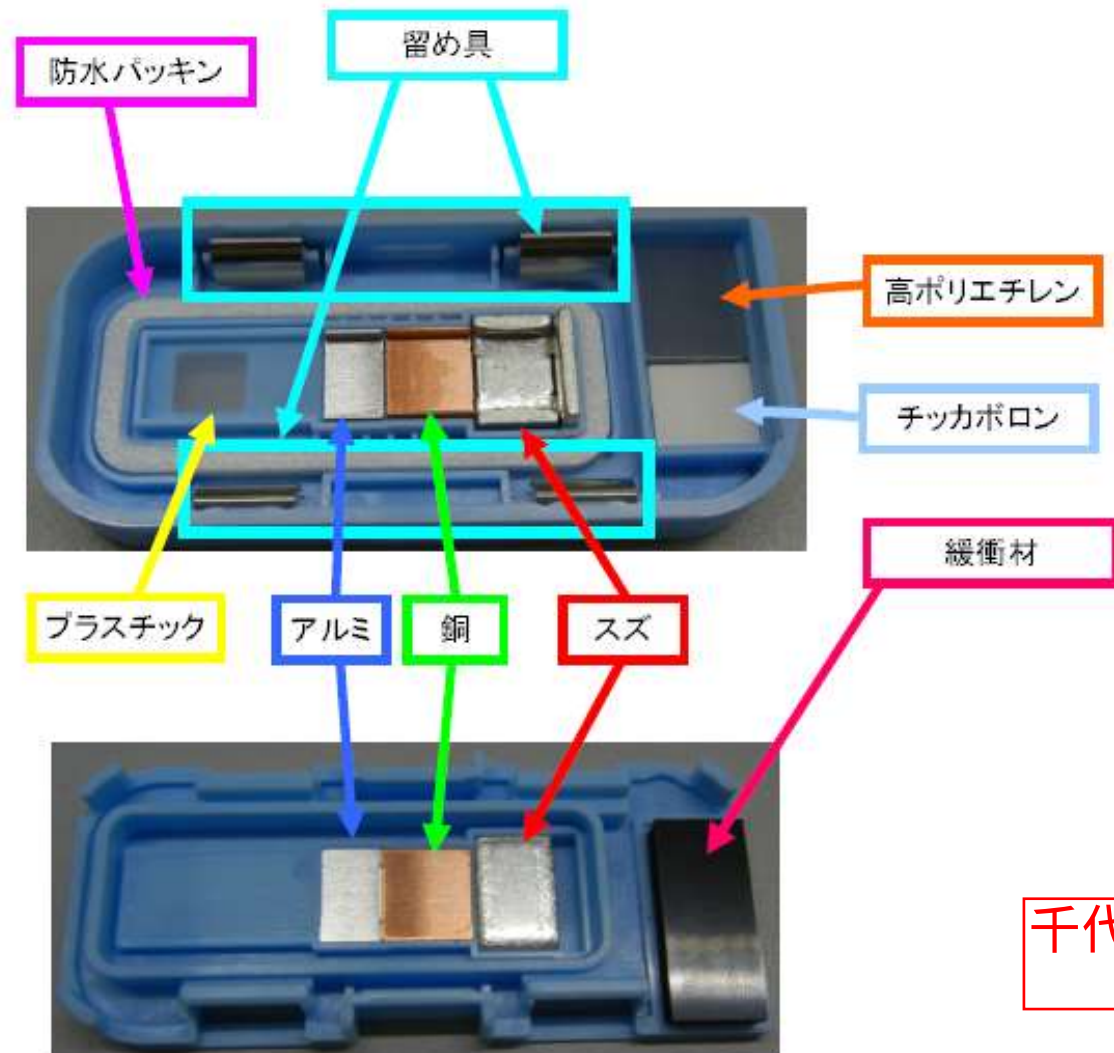
Rigaku Get Smart XU
NaI シンチレーター
測定範囲 5~300keV(～10 μSv/h)



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

ガラスバッジホルダのフィルタ構造



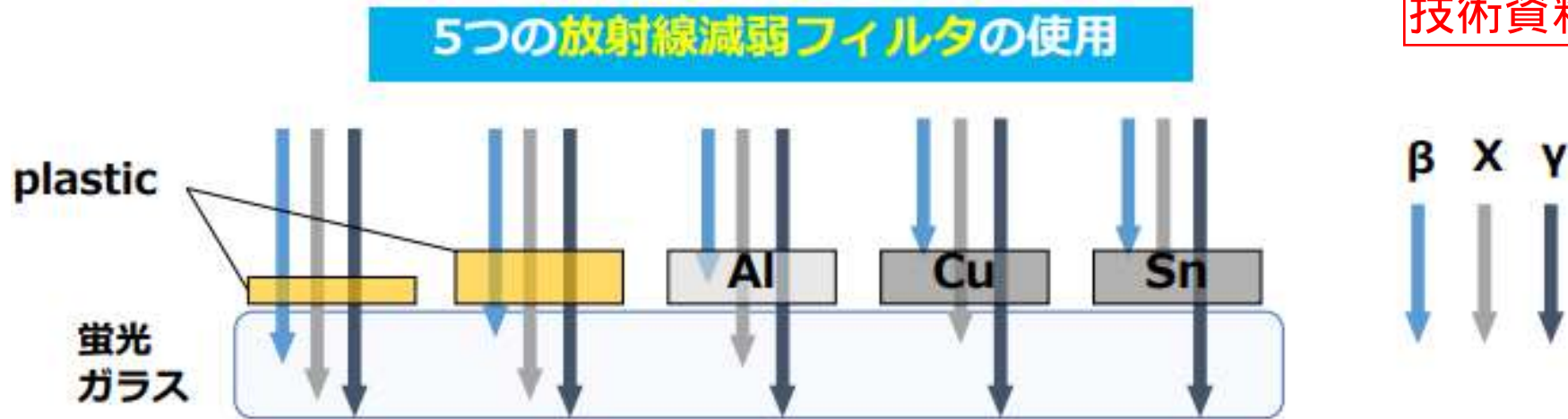
千代田テクノル技術資料より

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

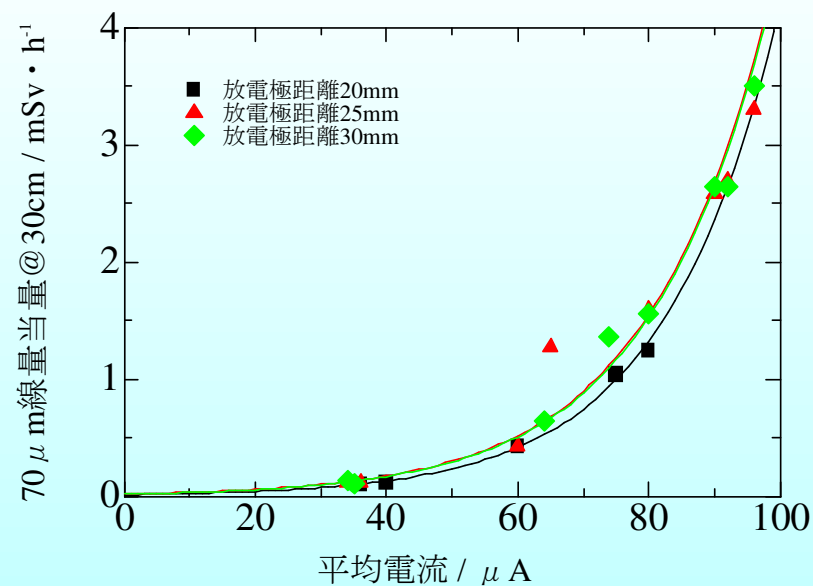
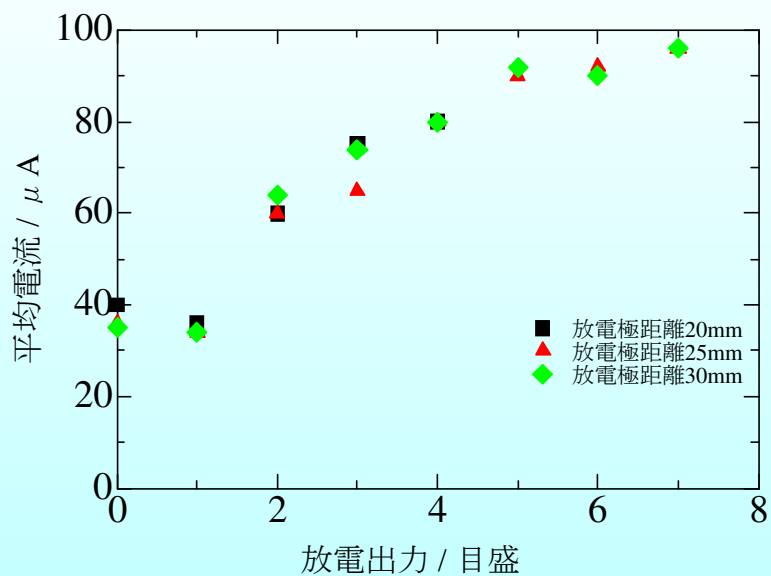
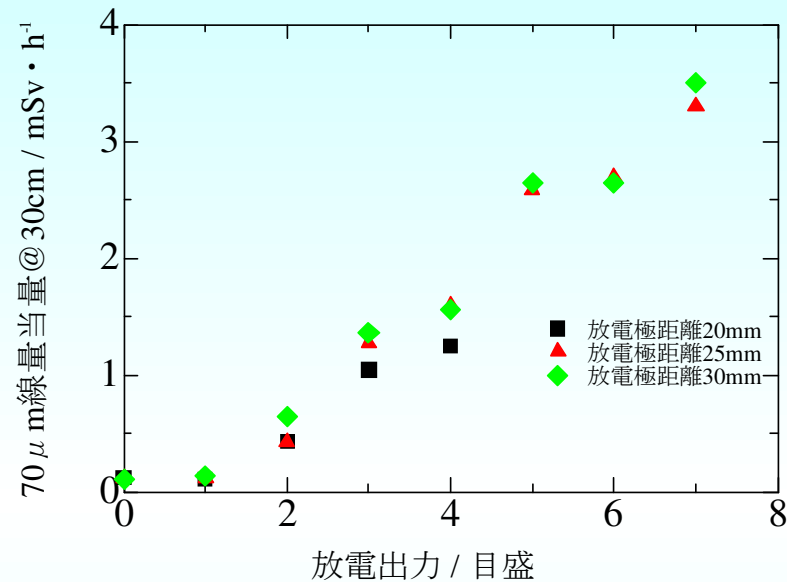
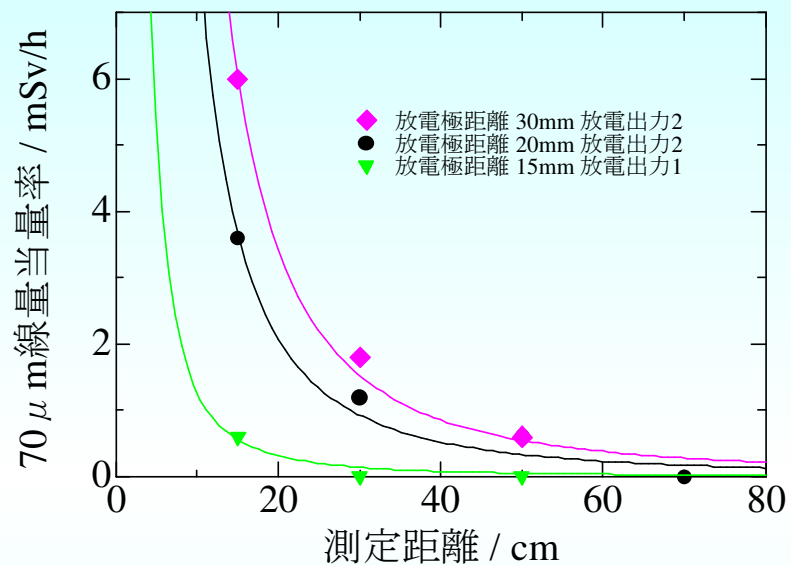
- ⇒ 放射線に対するエネルギーレスポンスの違いを補正する必要がある
- ⇒ そのためには、ガラスバッジにどのような放射線（線種、エネルギー）が入ってきたのか知る必要がある

千代田テクノル
技術資料より

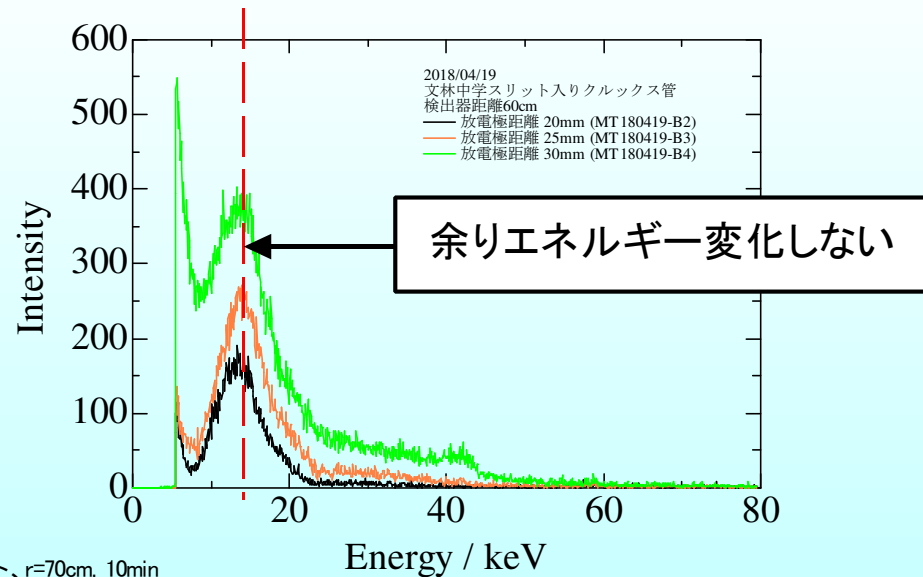
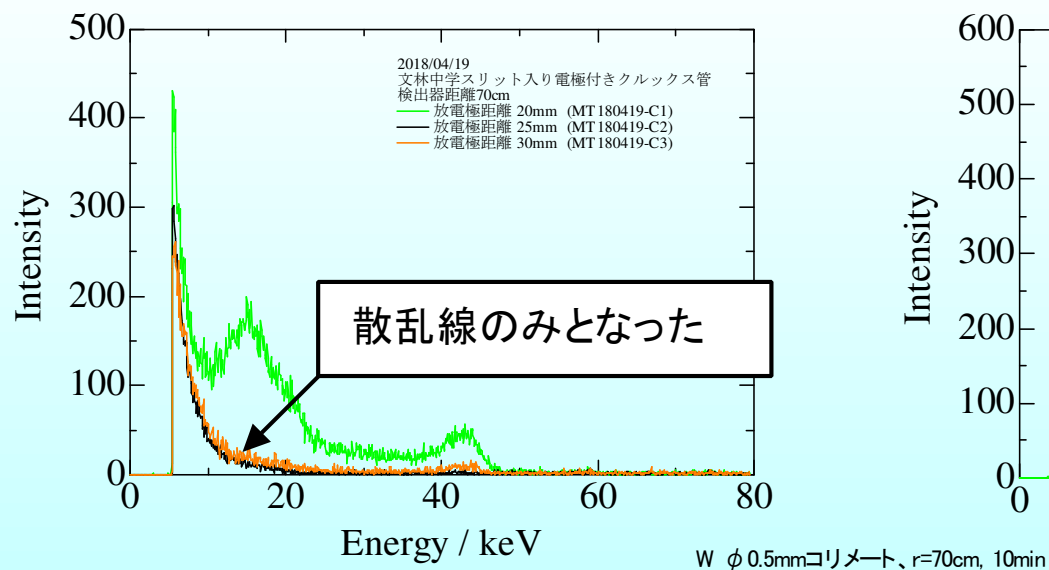
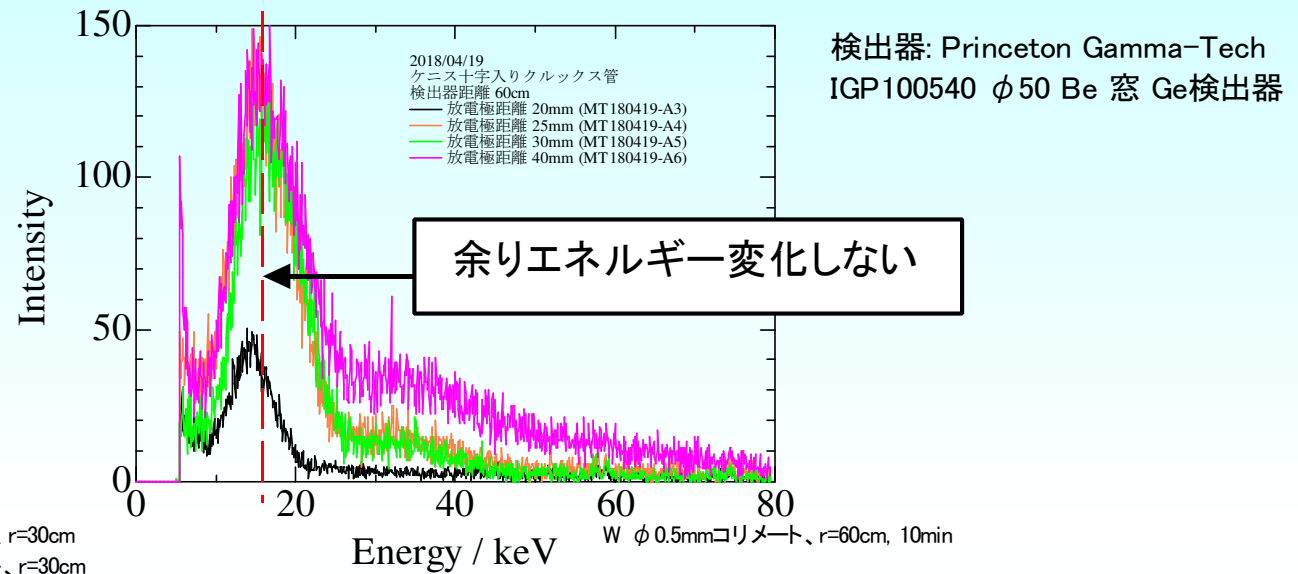
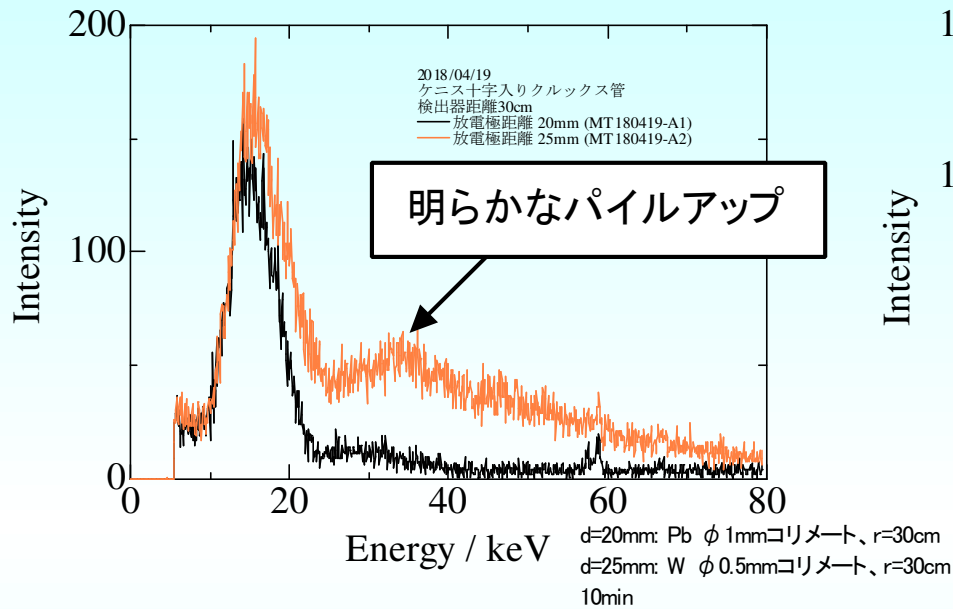


蛍光ガラスの各フィルタ下の発光パターンから、
放射線の種類やエネルギーを知り、レスポンスを補正し線量を求める

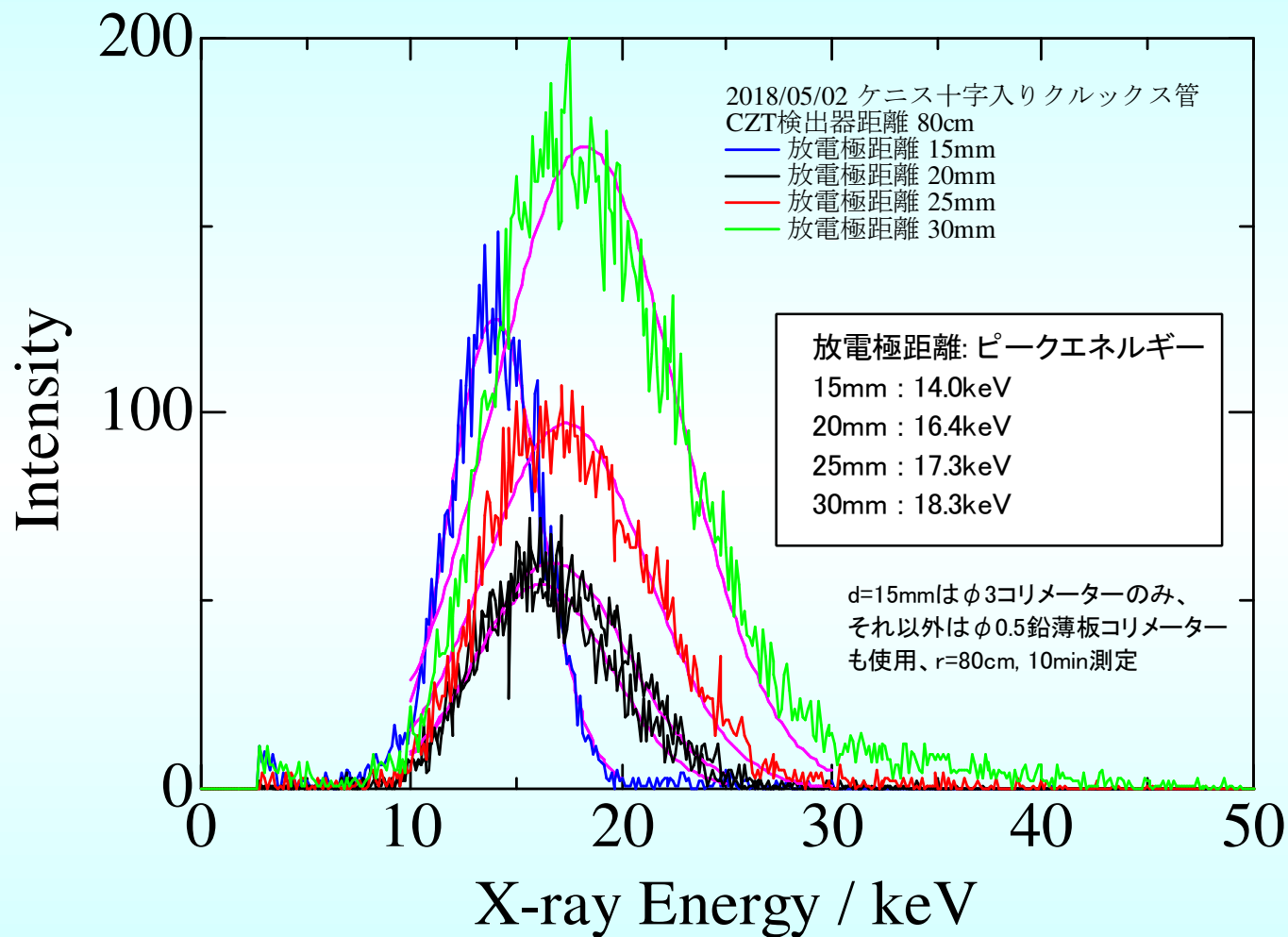
誘導コイルの設定による線量変化



Ge半導体検出器によるスペクトル評価



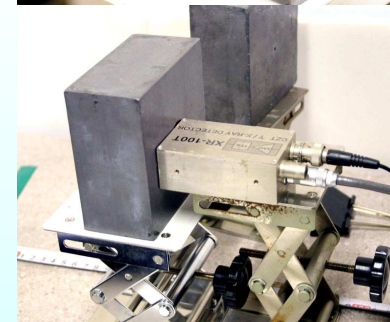
CZT半導体検出器によるスペクトル評価



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

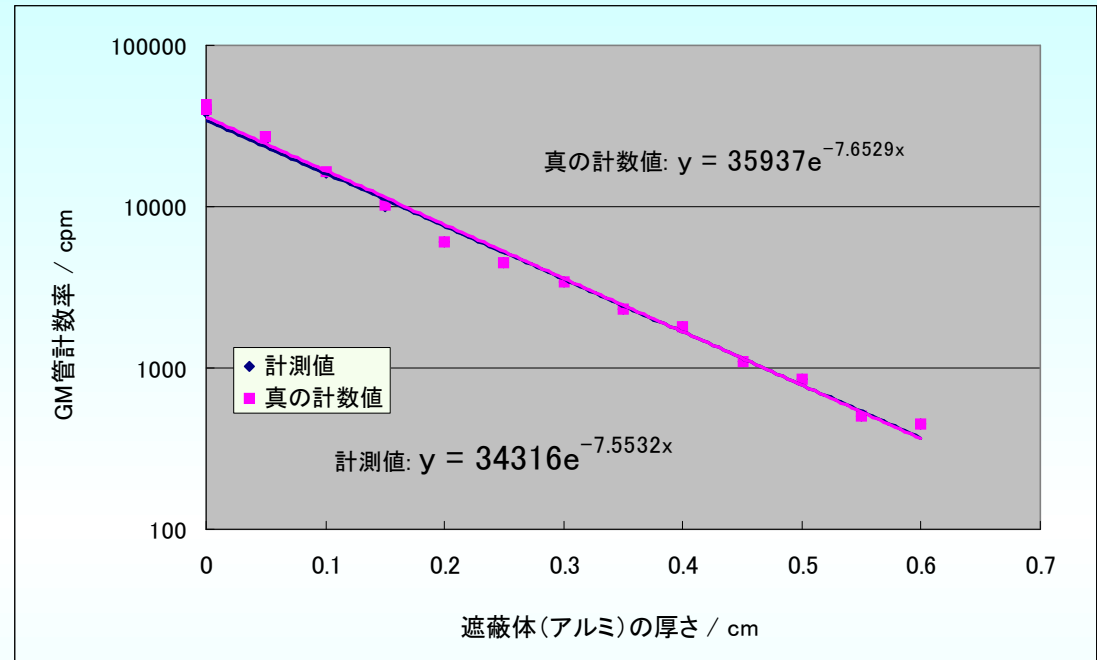


Amptek XR-100T-CZT
CZT(Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te)検出器
Be窓、ペルチェ冷却



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

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**。

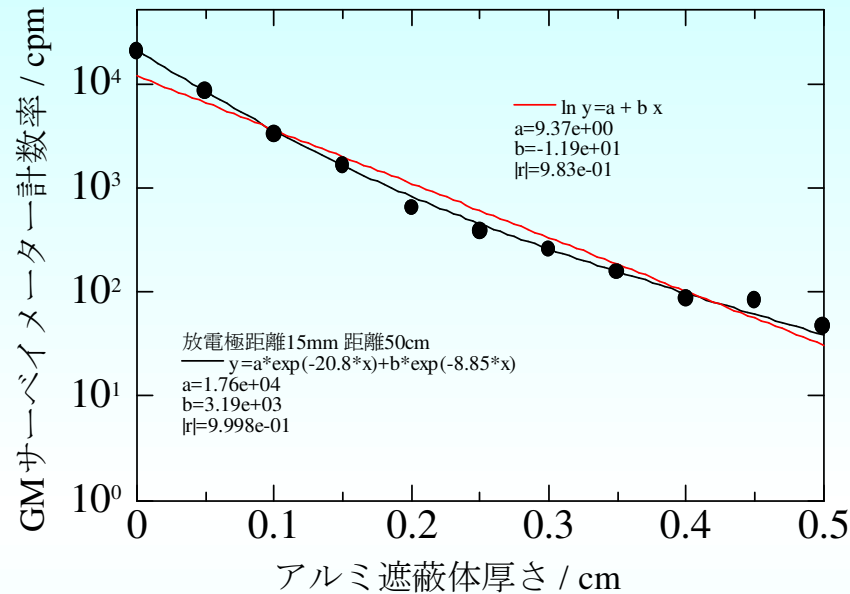
当初低エネルギー側に尾を引いたスペクトルを想定しており、遮蔽が薄い領域で計数率が高くなる事が予想されたが、**単一のエネルギーだけで説明できてしまった**。

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

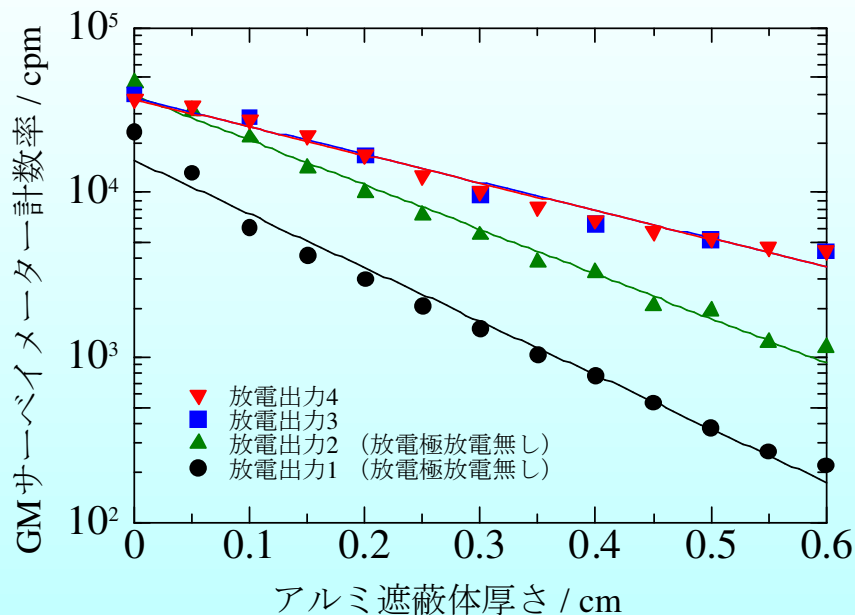
GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価

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。



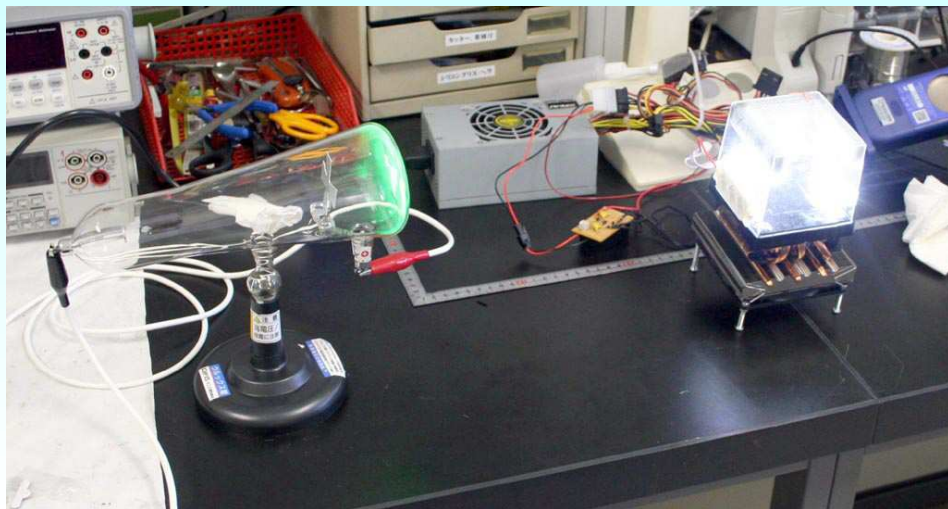
X線エネルギー (keV)	アルミ中の 線減衰係数 μ (cm^{-1})
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

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。

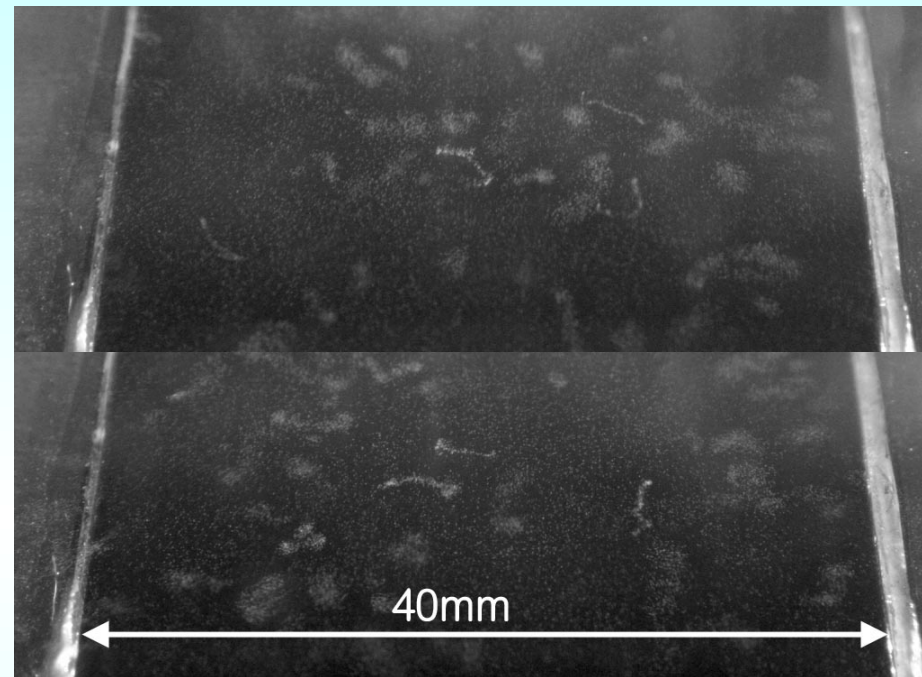


放電出力 (目盛)	線減衰係数 (cm^{-1})
1	7.50
2	6.05
3	3.92
4	3.89

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。

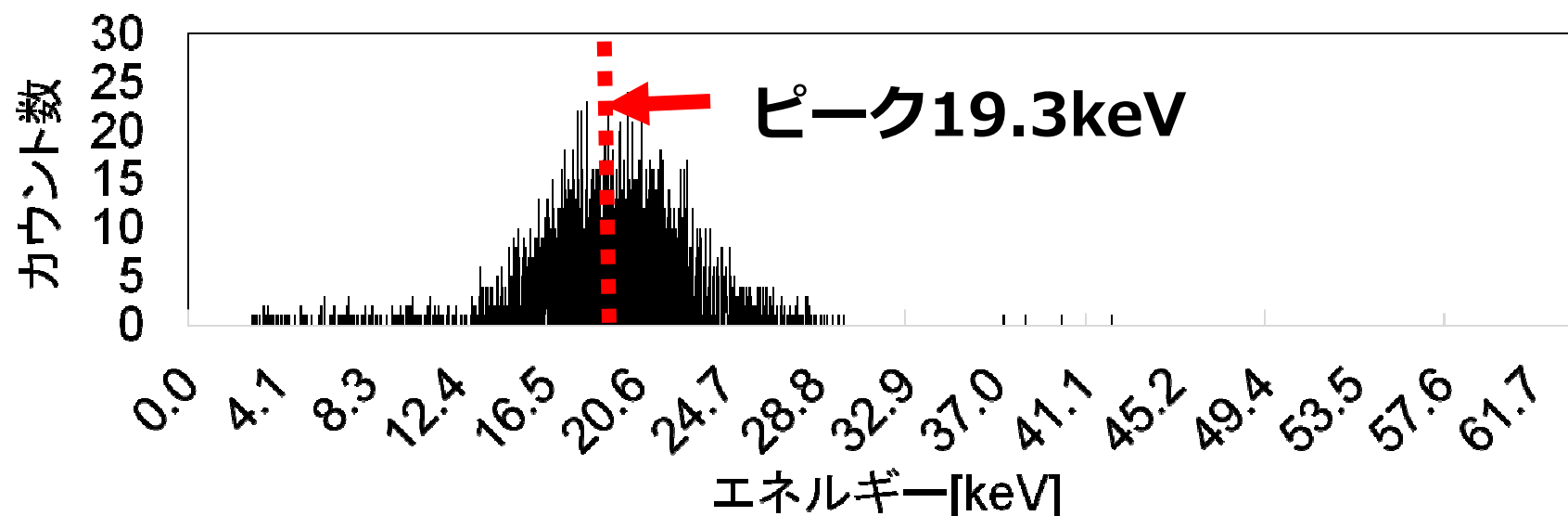


クルックス管からのX線によって弾き出された光電子の霧箱観察結果(放電針距離20mm)。

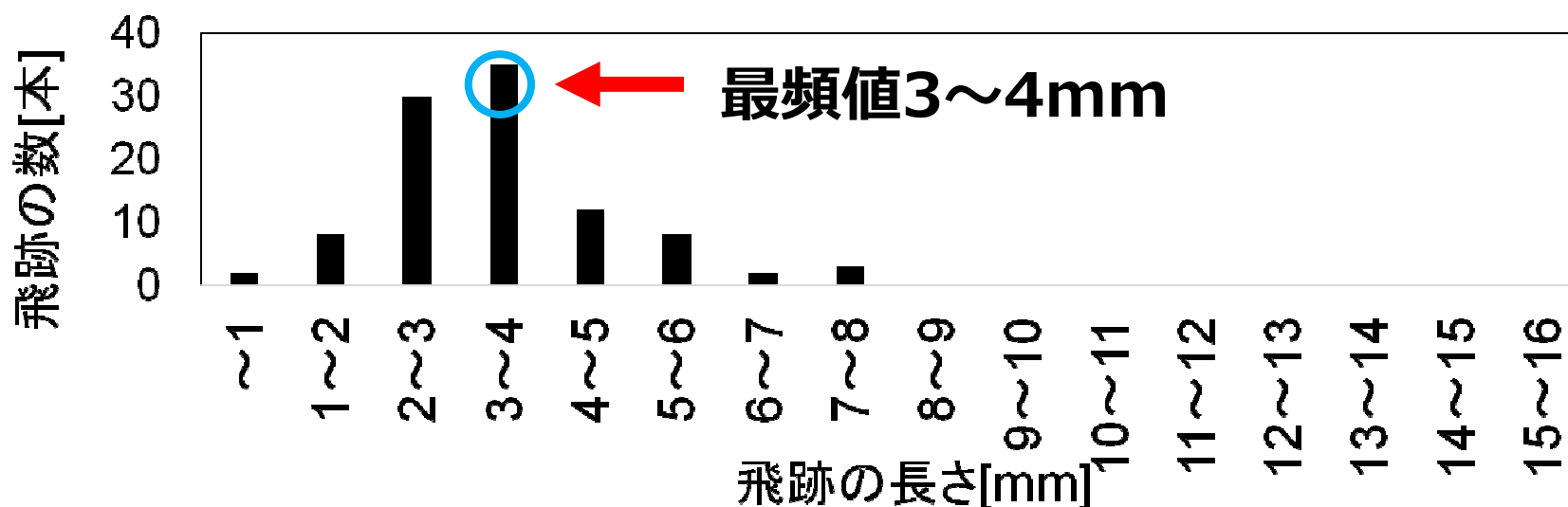
エネルギー既知のX線を入射して飛跡の長さのヒストグラムを作成し、エネルギーに拡がりを持つX線のスペクトルが評価できないか？

**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**

クルックス管からのX線の測定結果



CZT検出器スペクトル測定結果



ペルチェ冷却式高性能霧箱での測定結果

霧箱によるクルックス管からのX線の観察

①

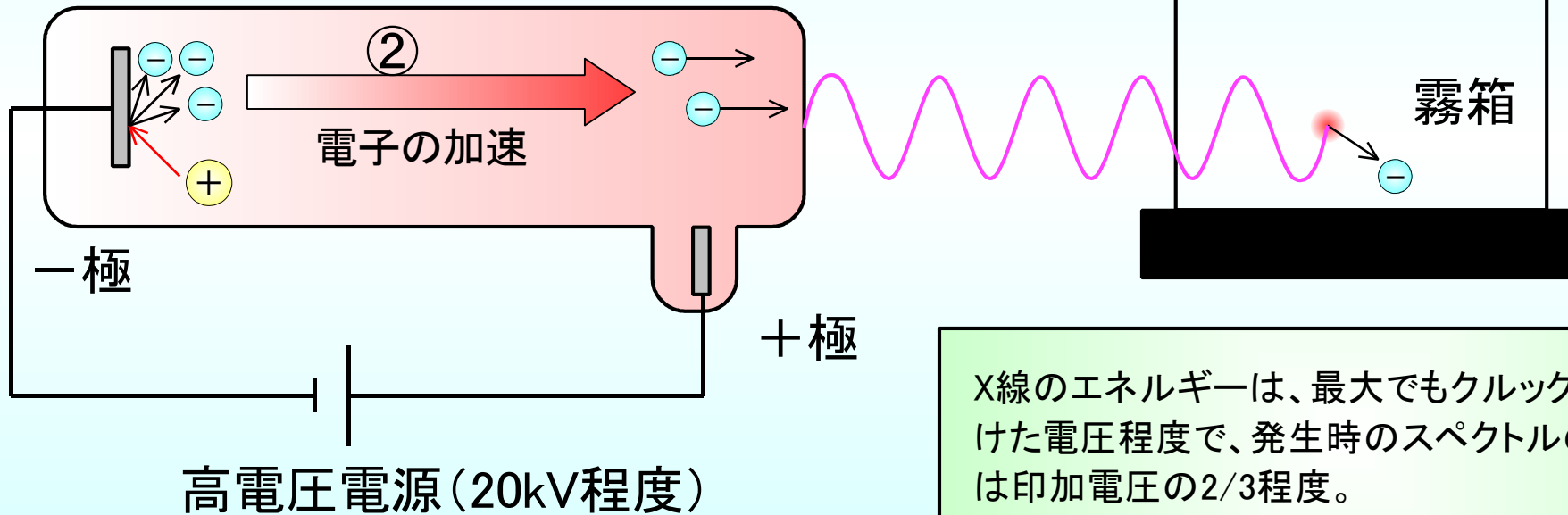
＋のイオンが－極に引きつけられて電子を叩き出す
(二次電子放出)

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。

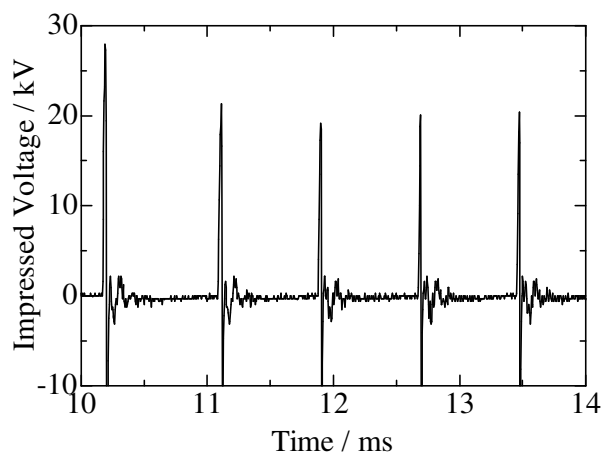
クルックス管に印加される 電圧の制御

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

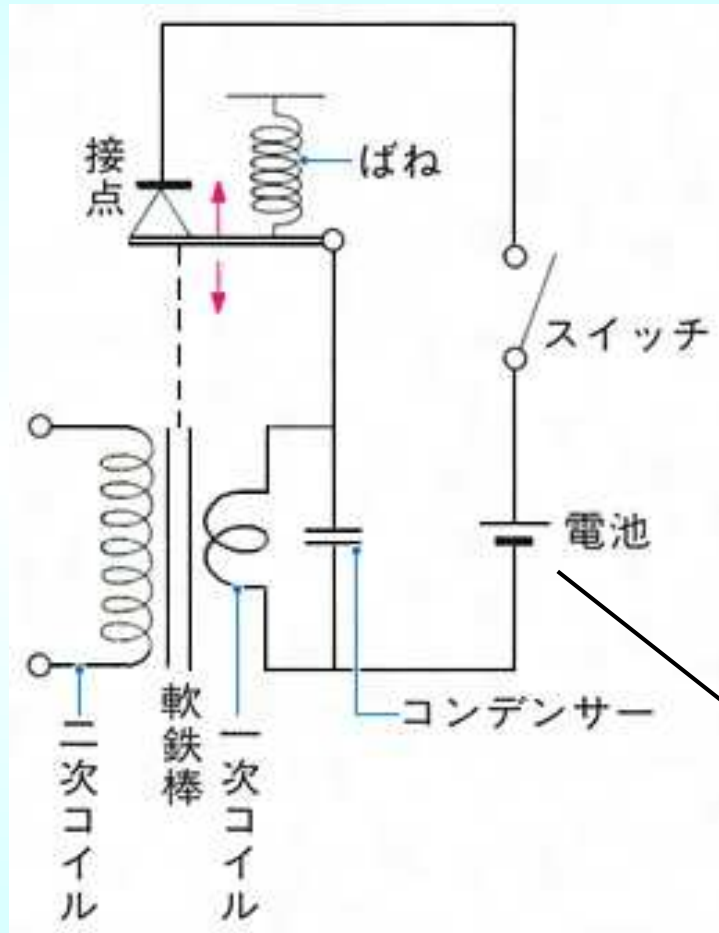


放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流 80 μ A



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

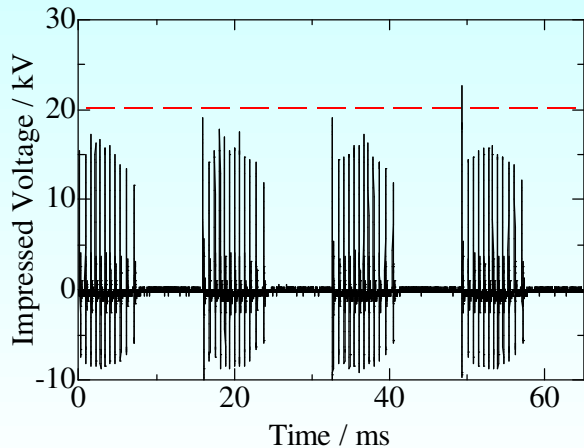


誘導コイル(Induction Coil)は、極端に巻き線の数の異なるトランス(実際には同軸上に巻かれている)の一次側の電流を、ベルやブザーなどと同様の機械的な接点を含めた回路で連続的にON/OFFすることでパルス状に変化させて、二次側に大きな電圧のパルスを生成する。

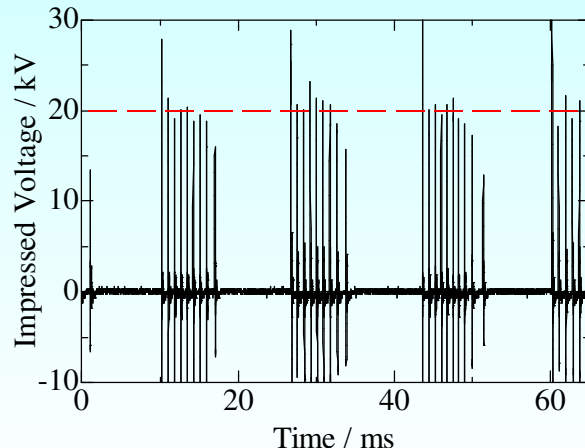
プラス側だけでなくマイナス側にもパルスが出るが、接点切断時の一番最初のプラス側のパルスの方が大きい。

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。

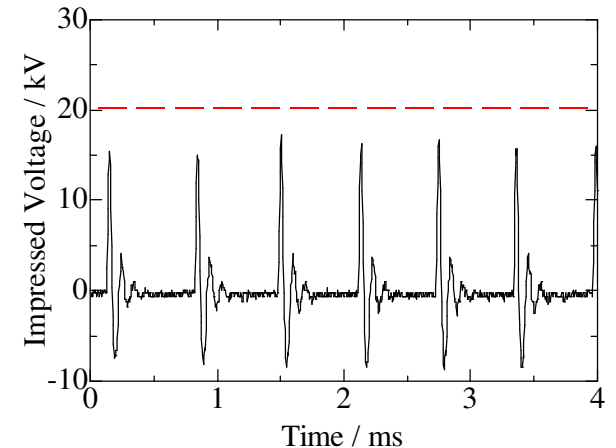
誘導コイル設定による出力パルスの変化



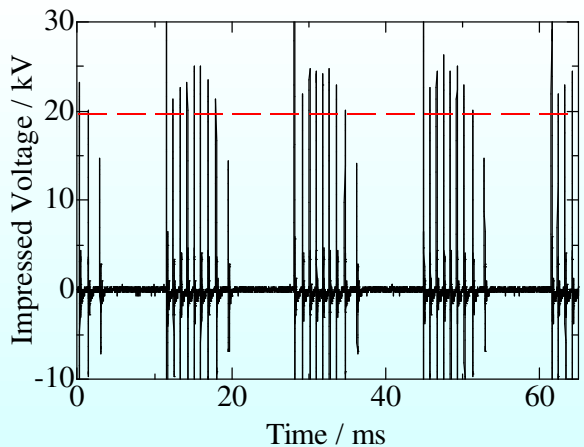
d=20mm, PW0, 40 μ A, 120 μ Sv/h



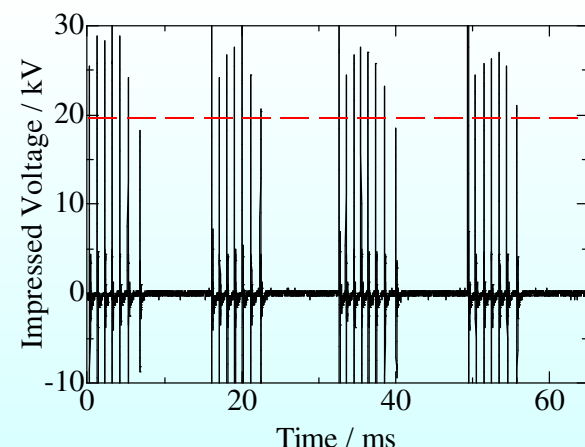
d=20mm, PW4, 80 μ A, 1.25mSv/h



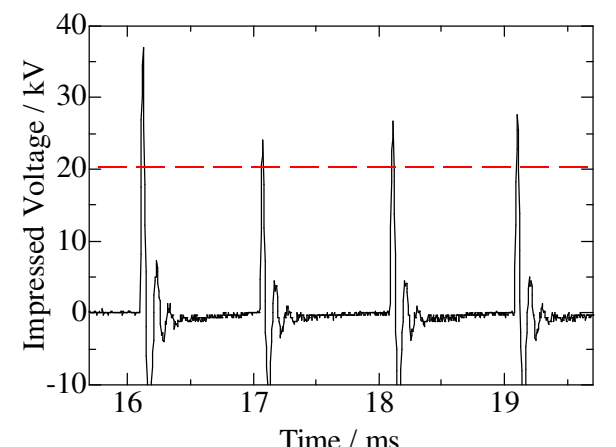
d=20mm, PW0 (拡大)



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。

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、**わずかな正イオン**が加速されて陰極に衝突する。その際に放出された多数の二次電子を電子ビームとして観察している(冷陰極)。

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**。



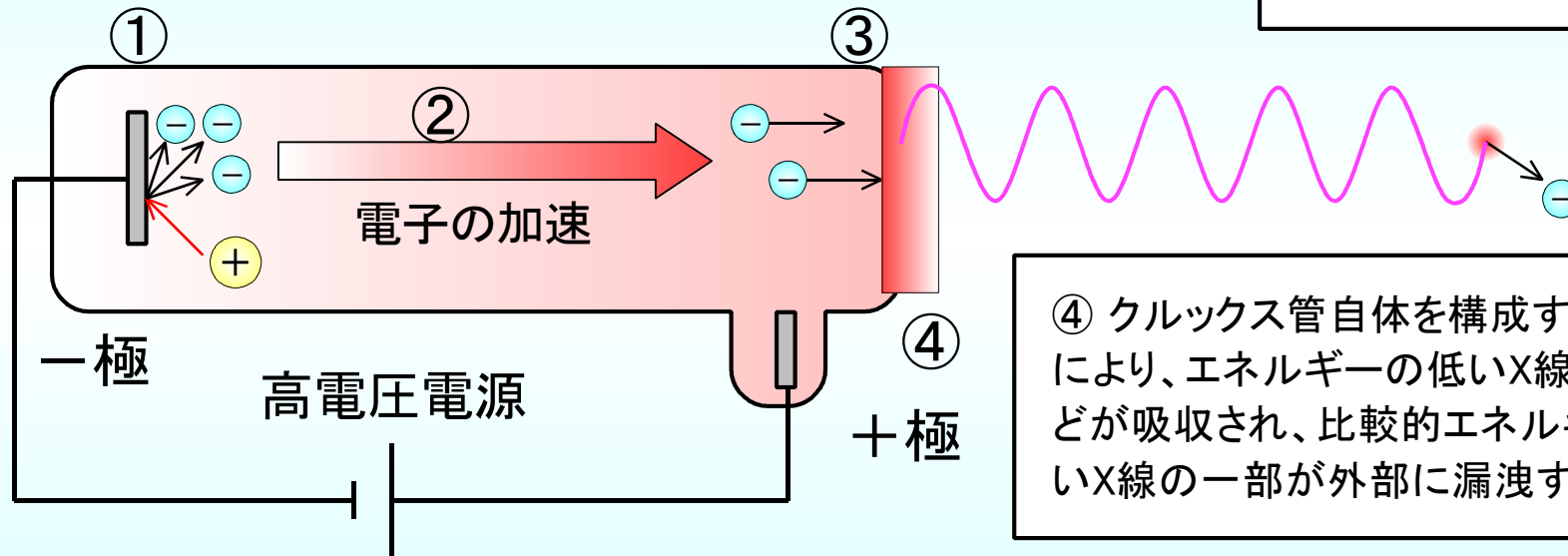
ガス圧調整の必要性はレントゲンの時代から知られており、ガス調整器が使われていた。写真は大阪府大高専にあった島津製の「教育用エックス線装置」

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。

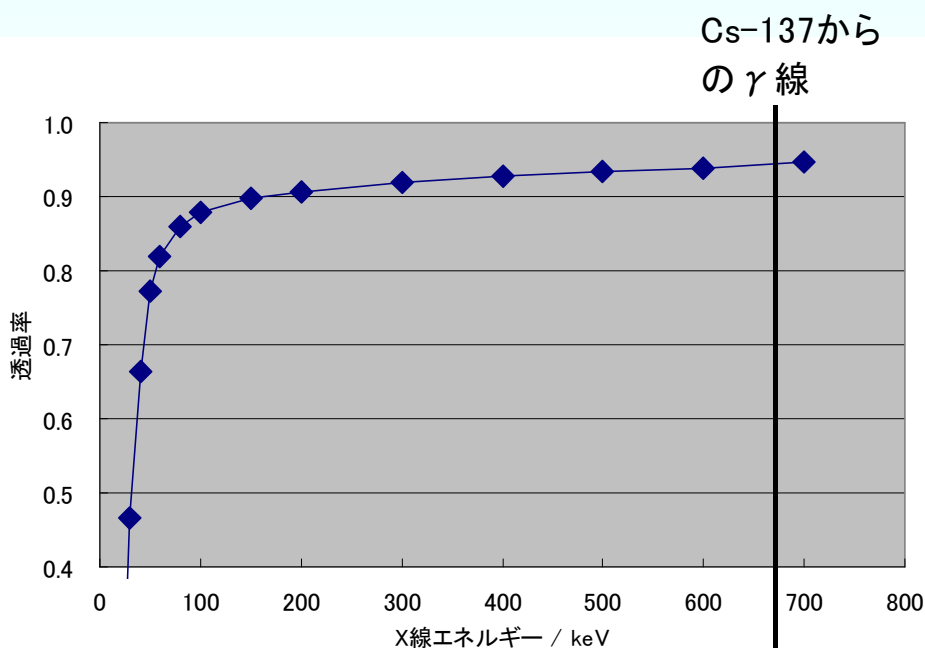


④ クルックス管自体を構成するガラスにより、エネルギーの低いX線のほとんどが吸収され、比較的エネルギーの高いX線の一部が外部に漏洩する

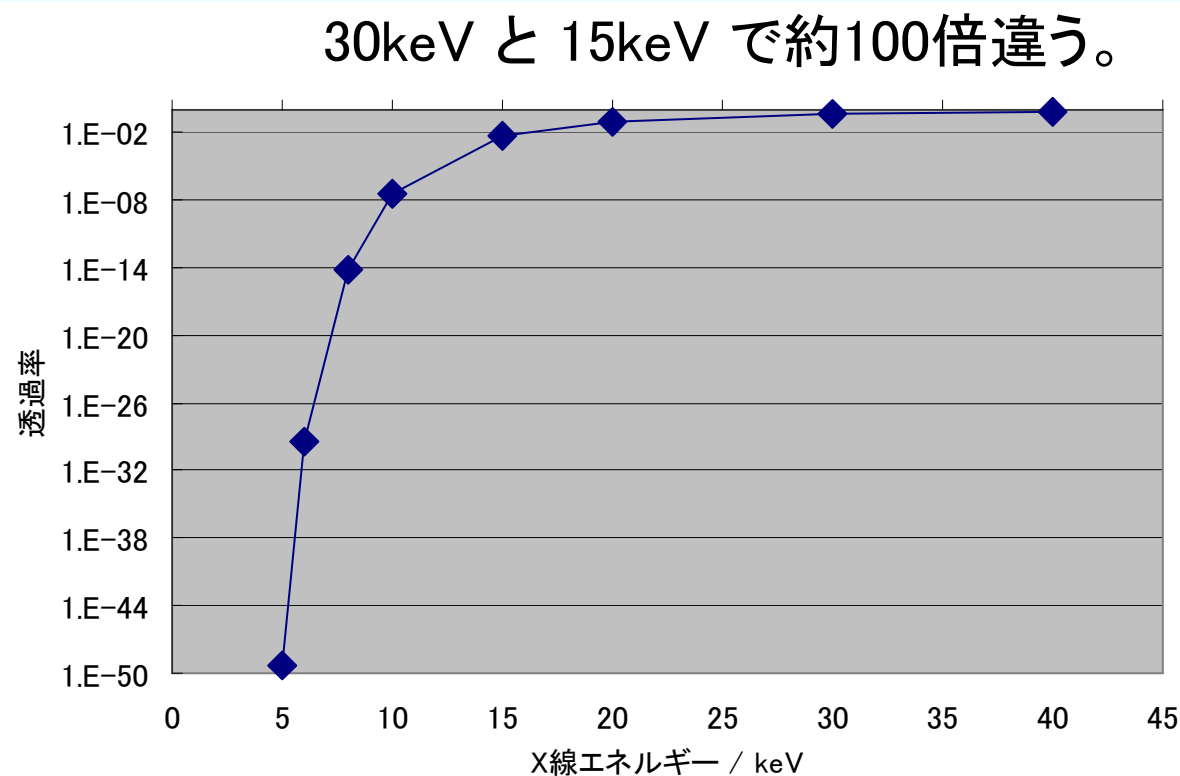
クルックス管に封入されているガスの量が少ない(ガラスに吸着するなどして少なくなる)と、①で陰極を叩くイオンが少なくなるため、電子が飛び出しにくくなり、電流が流れにくくなる。その結果誘導コイルに電磁エネルギーが蓄積され高い電圧が印加されてしまい、電流は小さいが④で漏洩する線量が大きくなってしまふ。

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。



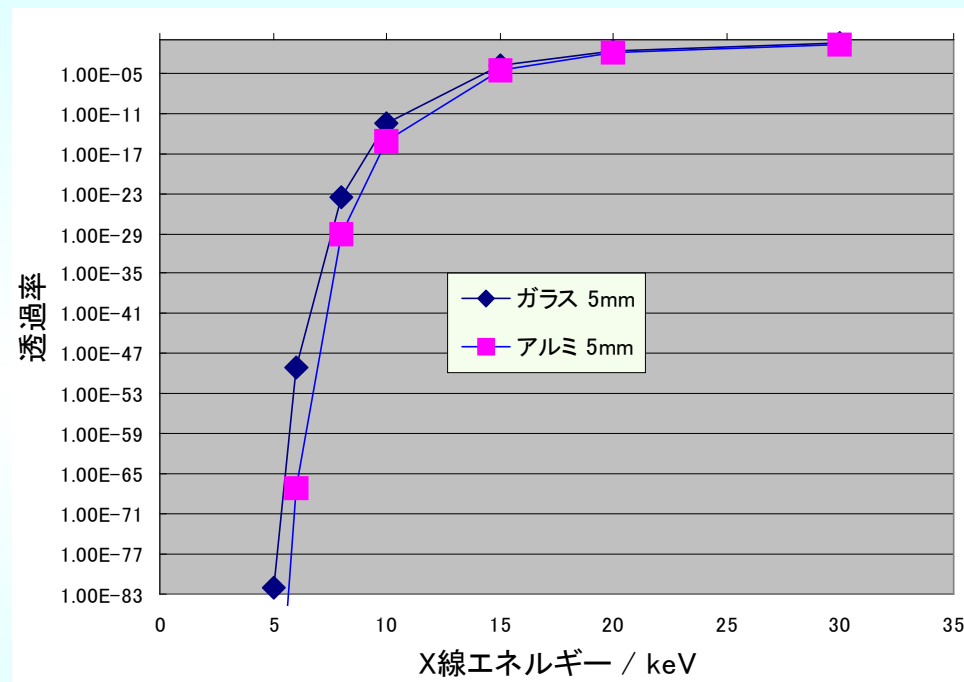
100keV 以上のエネルギーでは
余り大きく変わらない



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	



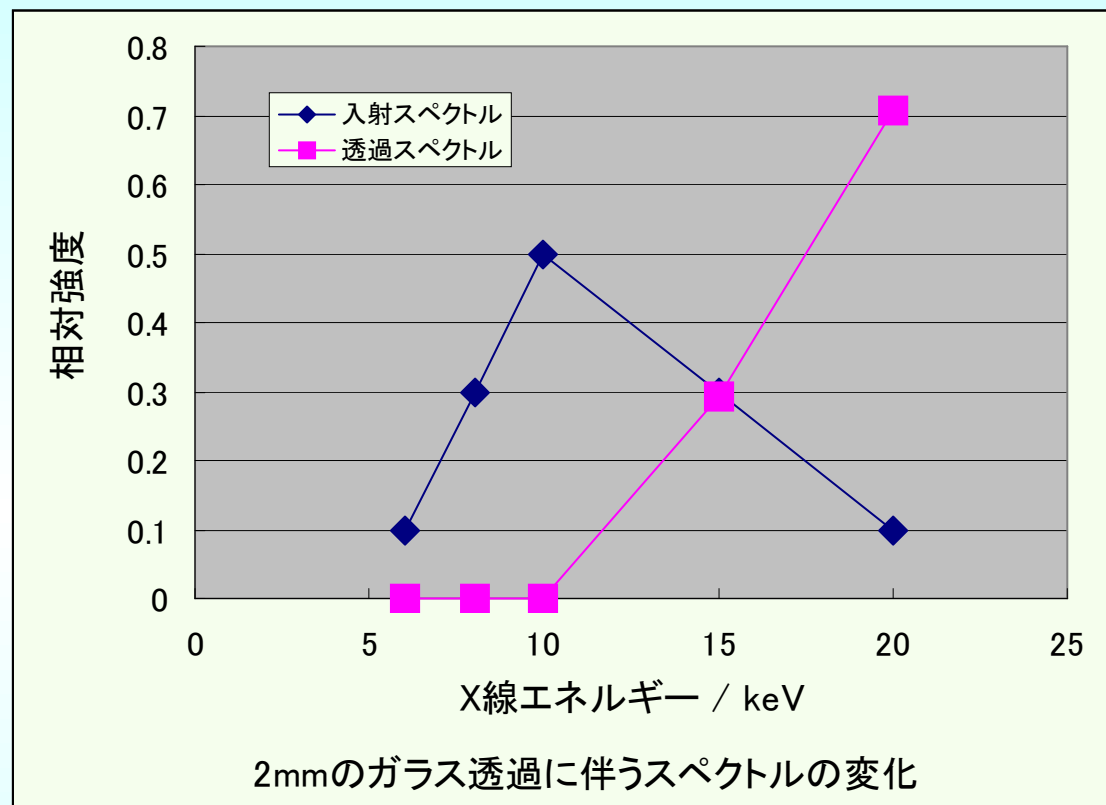
アイントープ手帳 第11版, p154-155

- ・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。



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

・低電圧駆動の製品に買い換える

全国1万校 x 4万円 = 4億円の予算措置が必要。
さらに高校でも使われている。

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

- 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

印加電圧を下げることによりX線のエネルギーが下がり、劇的に漏洩するX線量を下げることが出来る。クルックス管はガラスで出来ており、このガラスに対する透過率が15keVと30keVでは100倍程度異なるためである。遮蔽に関しては、アクリルでは1cmの厚さでも半分程度にしかならないため、ガラスの水槽を用いるか(2mmで1/5以下に下がる)、距離を取る方が簡単である(距離の二乗に反比例する)。

過去の研究から策定した暫定ガイドライン

本当にこれで安全か
全国規模の実証試験が必要

- ・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。
- ・演示時間は10分程度に抑える

1) 2) 印加電圧を下げる、電流を下げる



絶対に放電極を取り付ける。

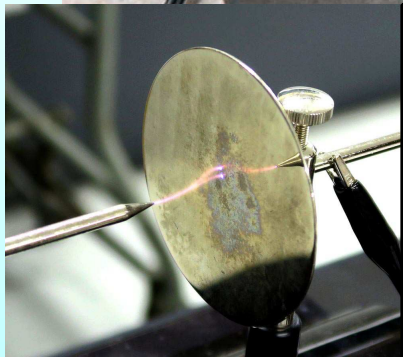
電氣的な安全上も必須。

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

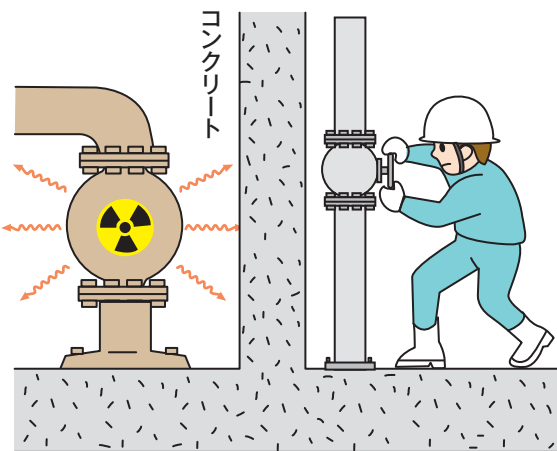


放電極は、一定以上の電圧がかかると放電してそれ以上電圧が上がらないようにする、**安全装置**

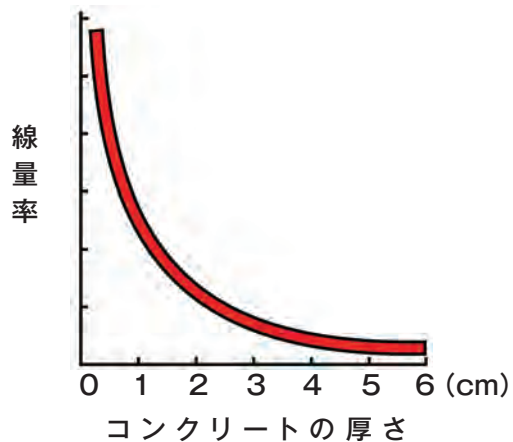
放射線防護の基本

1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下

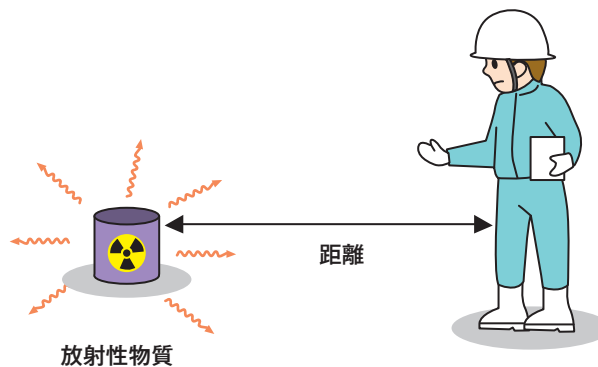


(mSv/h)

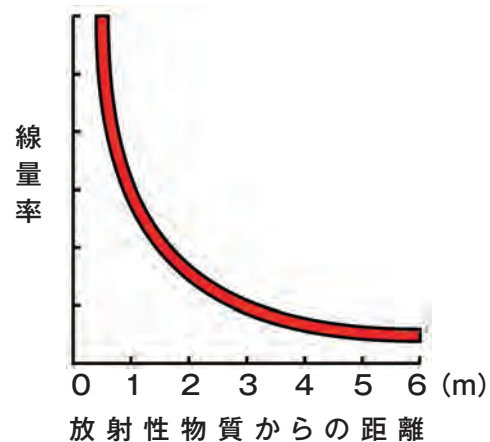


2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例

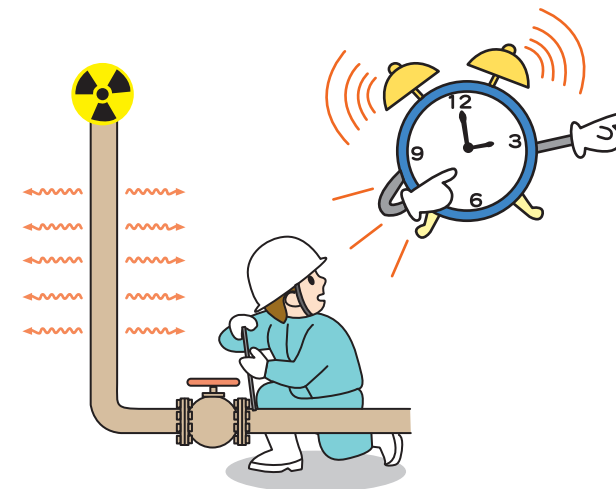


(mSv/h)

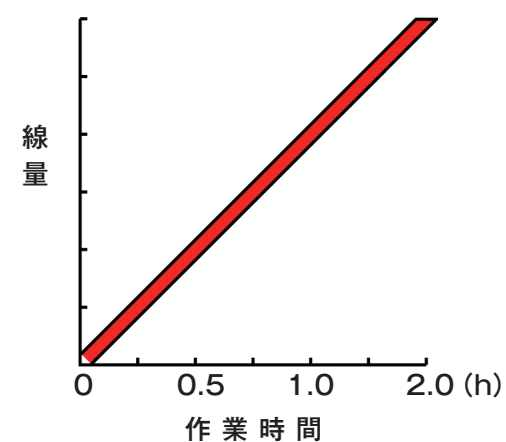


3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)

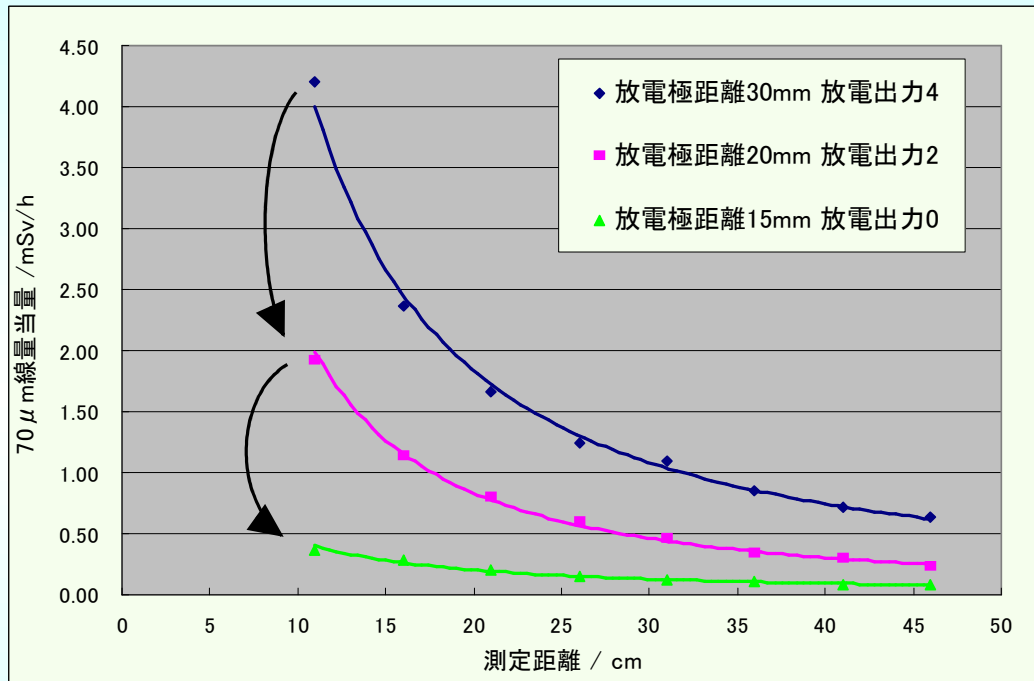


(mSv)



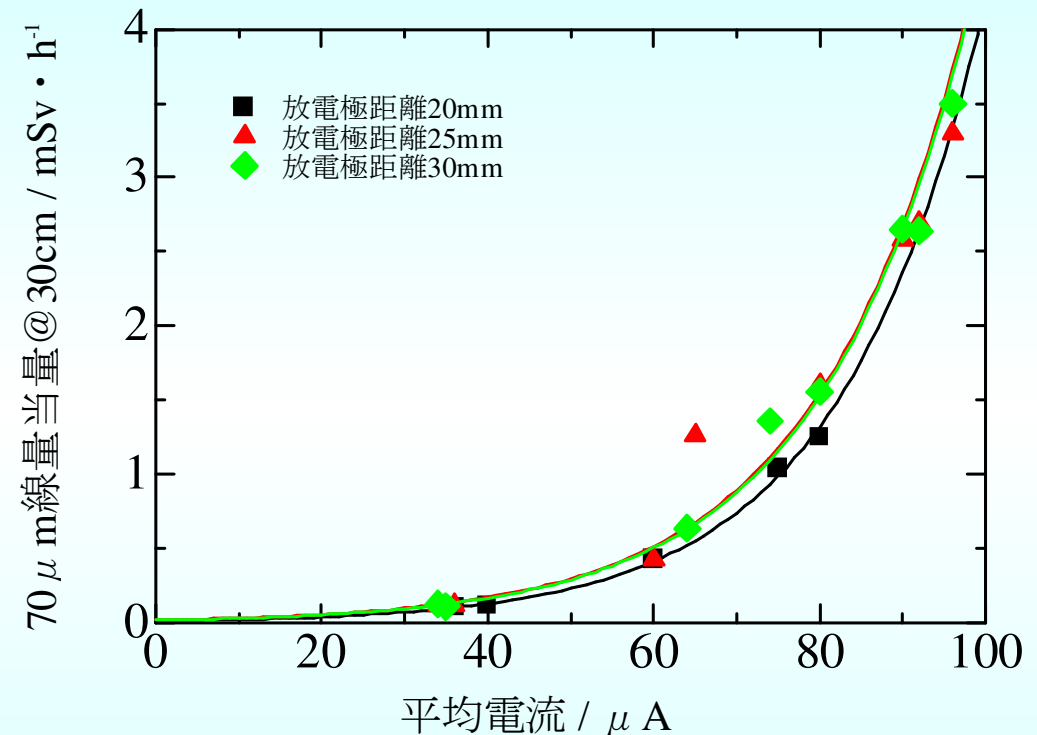
印加電圧、電流、距離依存性

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



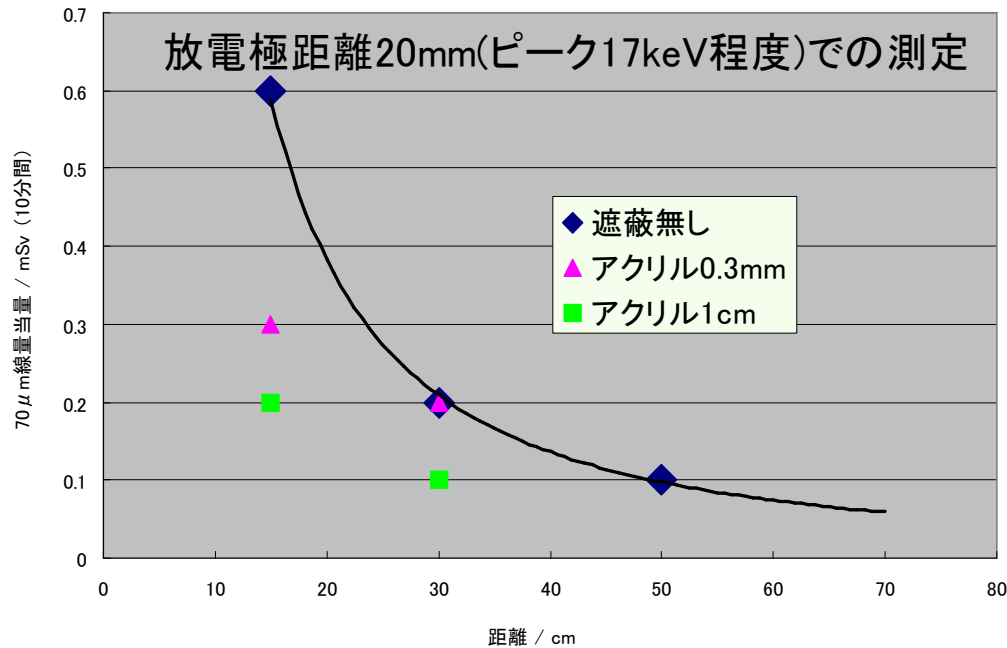
- **電圧を低く抑えると極端に線量は小さくなる**
放電極距離は20mm以下に留める
- **距離の二乗に反比例して線量は小さくなる**
1mの距離では10cmの距離での1/100になる
1mから50cmに近付いただけで4倍になる。

放電出力変化に伴う平均電流を
アナログ電流計で測定



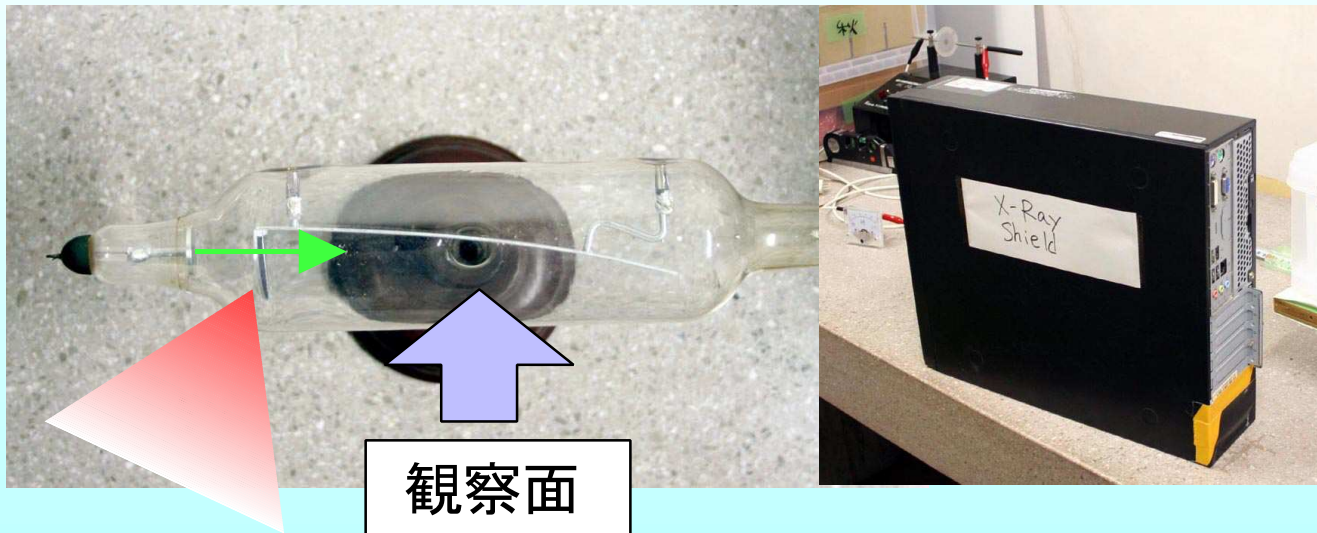
- **電流上昇に従い指数関数的に線量が上昇**
放電出力上昇で電圧も電流も同時に上昇するため、電子線が観察できる必要最小限の出力に留める。
放電極は、一定以上に電圧を上げないための安全弁の役割。

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。

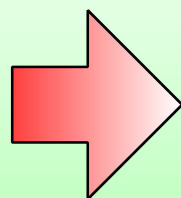
37本中、1mの距離、10分間の実演で70 μ m線量当量* が50 μ Svを超える物は12本だけであり、うち2本は意図的に最大電圧での測定。18本のクルックス管で、距離15cmでも検出限界(50 μ Sv)未満であった。*実効線量はさらに1/5以下。

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

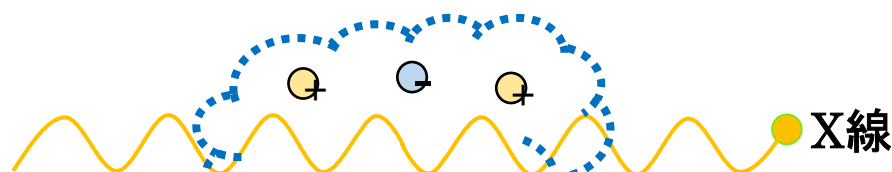
➤ 箔検電器について

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。

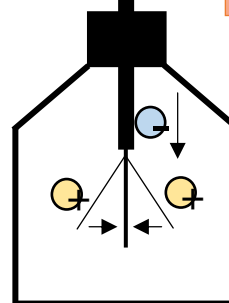


使用した箔検電器
(はく検電器EA)

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。

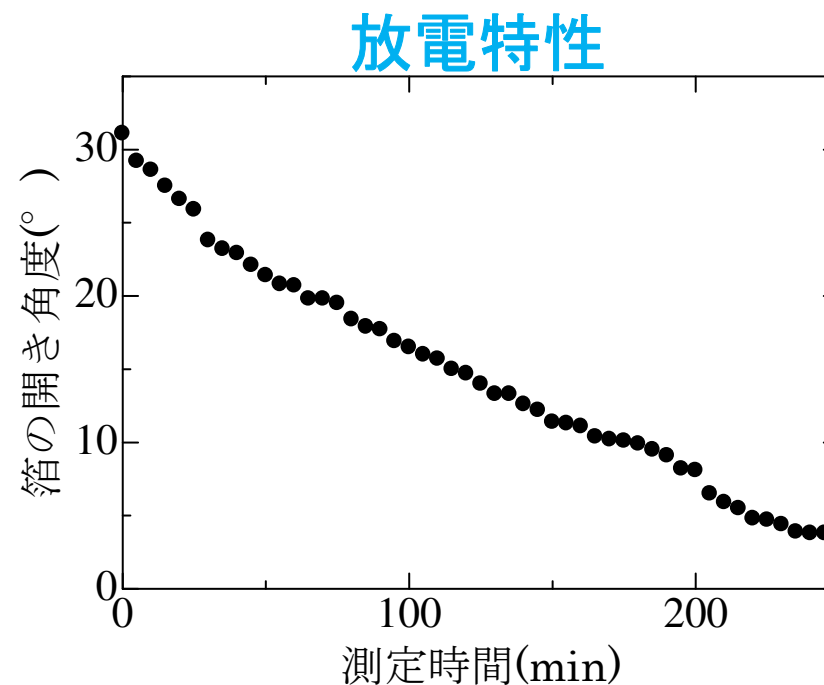
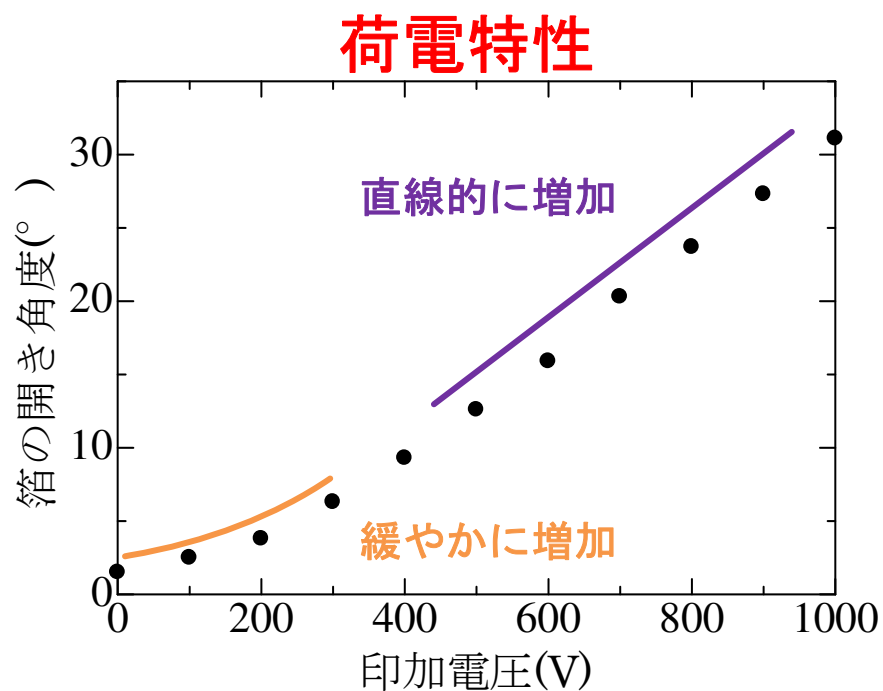
※箔検電器を用いた定量的な線量測定は既に、同じクルックス管プロジェクト内で先行研究が行われている^[1]が、平行して、我々の研究グループも測定手法の開発を行った。

**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

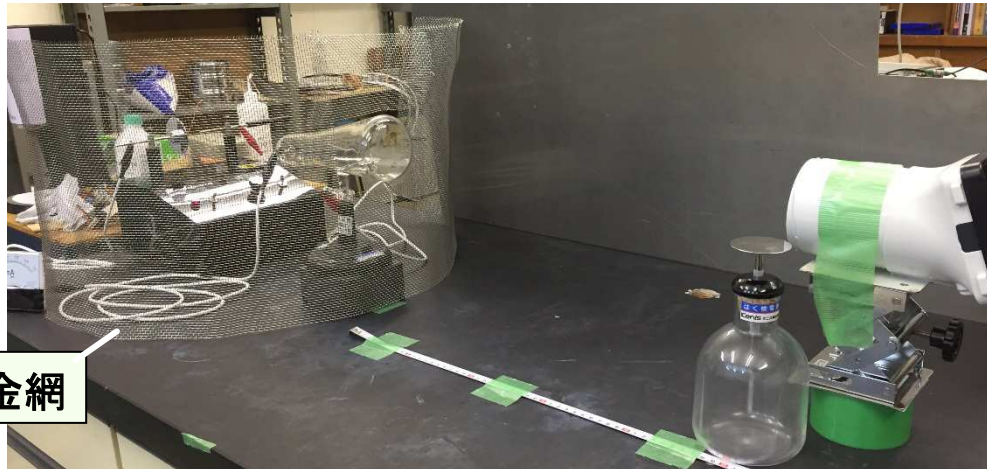
- ・ 印加電圧が増加すると徐々に角度が増加する. (1000V \Rightarrow 31.1°)
- ・ 1000Vで印加を中止し, そのまま放置すると角度がゆっくりと減少した.



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



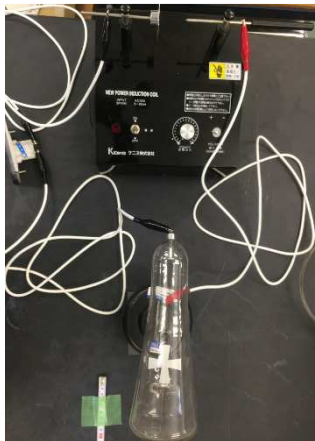
金網

金網の有無における測定結果

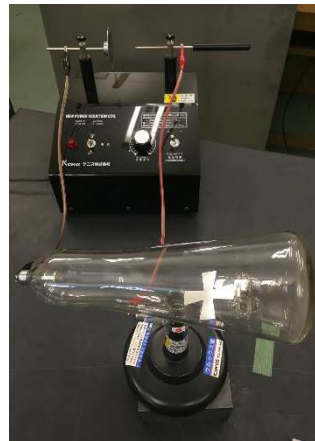
測定距離(cm)	正と負のハーフタイムの差 (sec)	
	金網なし	金網あり
40	669	84
60	173	10
70	132	9

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

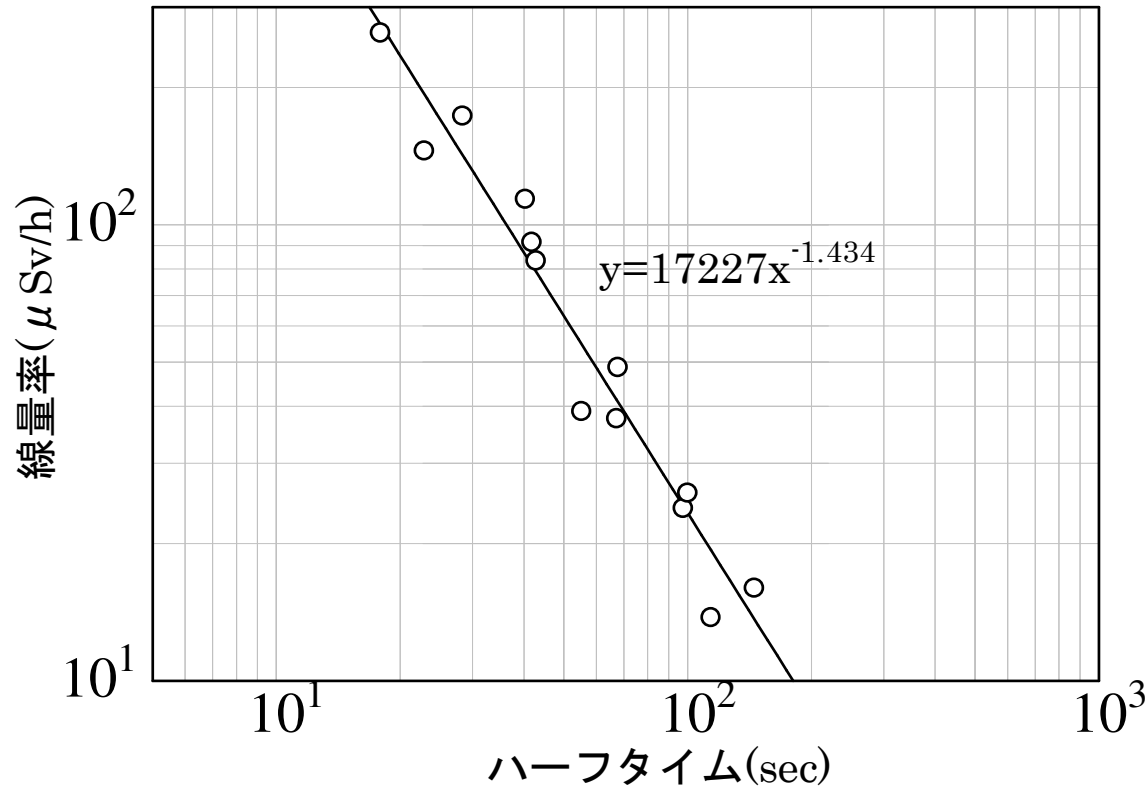
測定距離 (cm)	正と負のハーフタイムの差 (sec)
30	60
40	74
50	18
60	11
70	10

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。

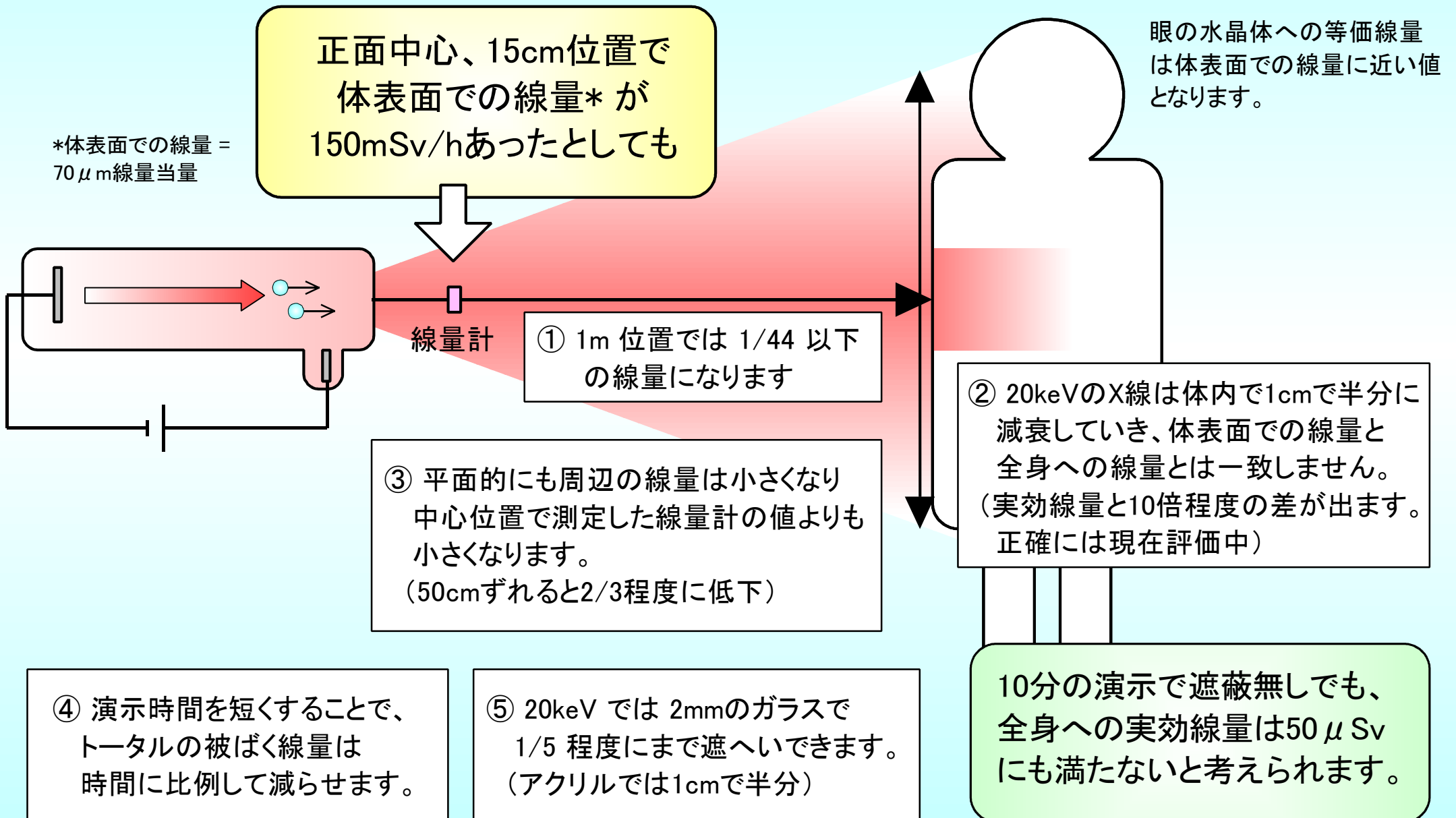
先行研究では $60^\circ \Rightarrow 30^\circ$ をハーフタイムとしているため、ちょうど2倍ほど差が生じたと考えられる。

異なる箔検電器においても同じ結果が得られる可能性

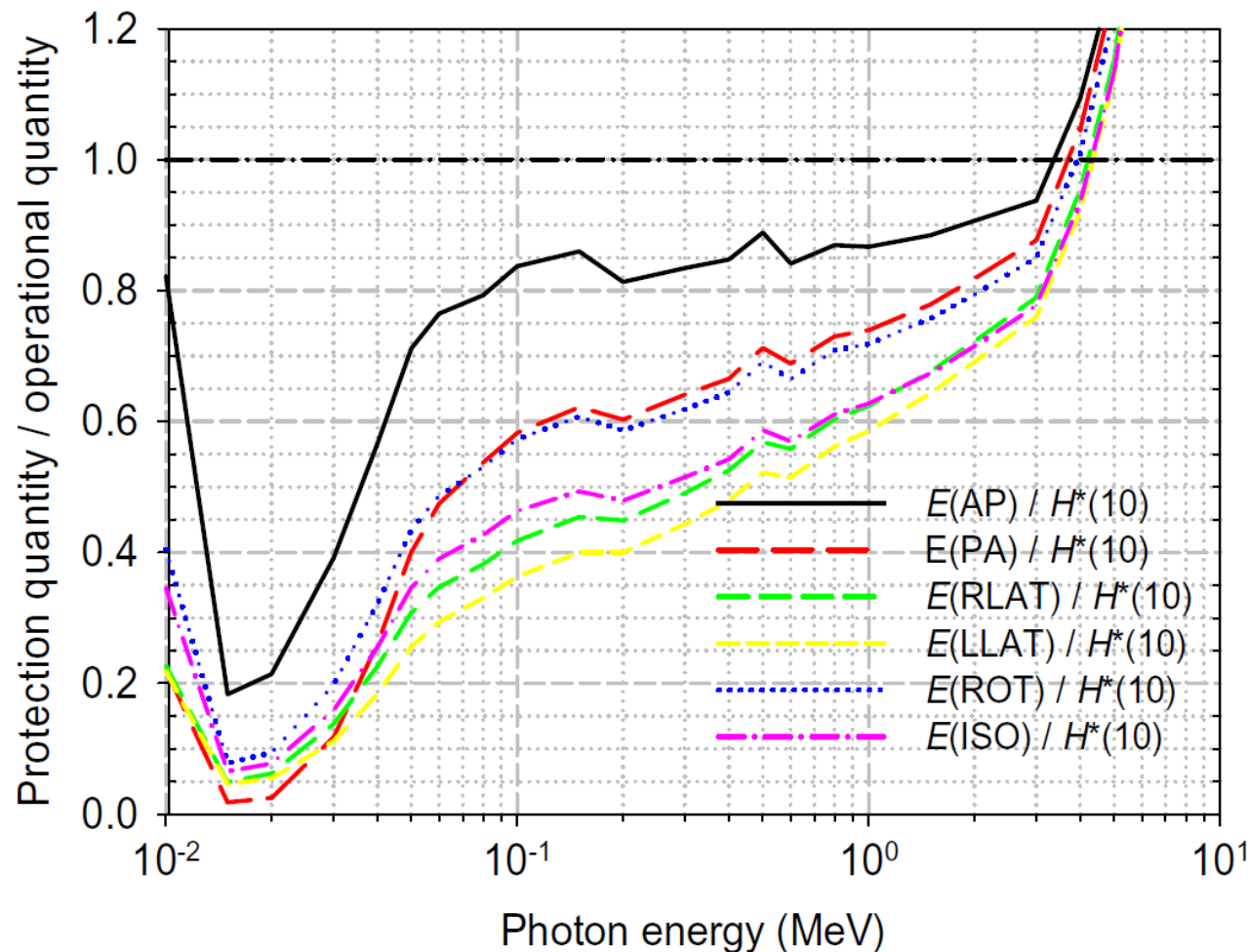
本研究で使用した箔検電器は、線量率 $13 \sim 277 (\mu\text{Sv/h})$ の範囲において、 $\pm 30\%$ の誤差でハーフタイムからX線の線量率が推定できる。

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



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)。

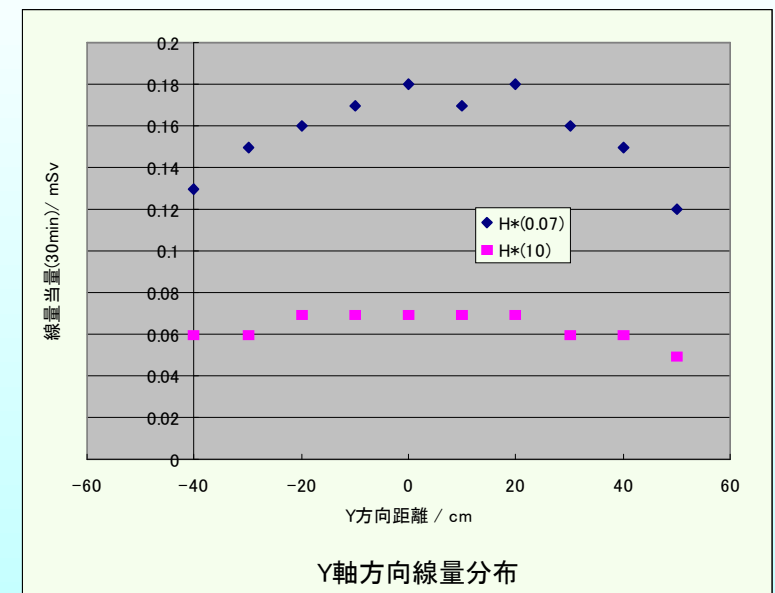
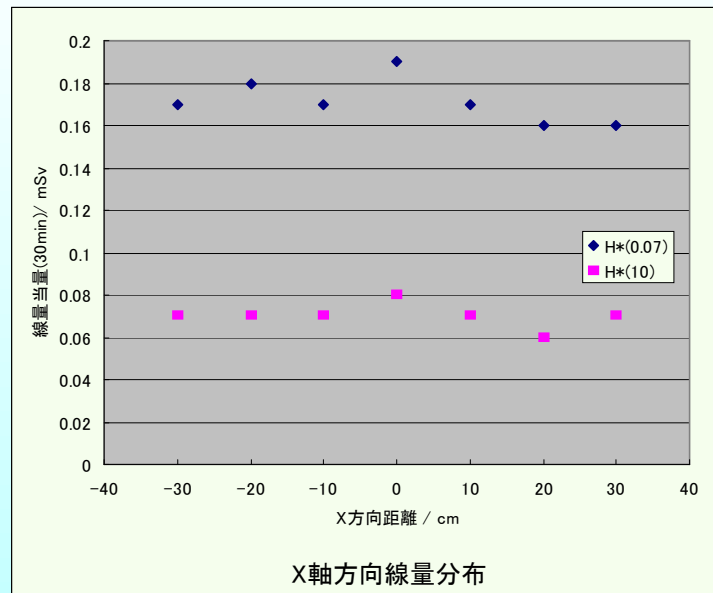
X線放射方向垂直平面内での二次元線量分布

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。

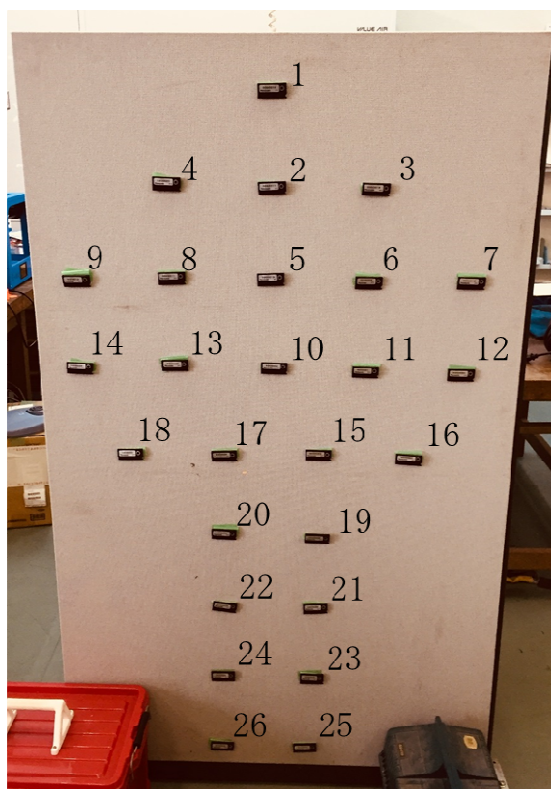


線源から 1m 離れると、点線源だとして中心から水平に 30cm 離れても、 $\sqrt{100^2 + 30^2} = 104$ cm 線源から離れただけになり、ほとんど変わらない。

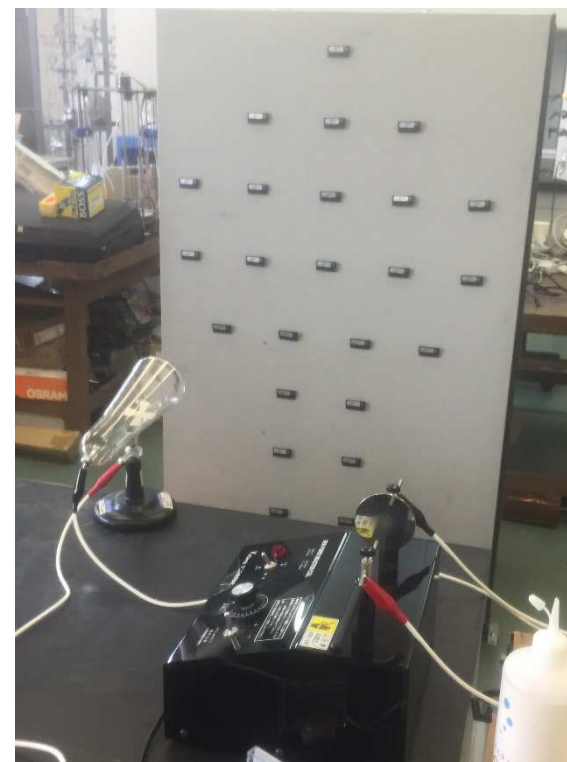
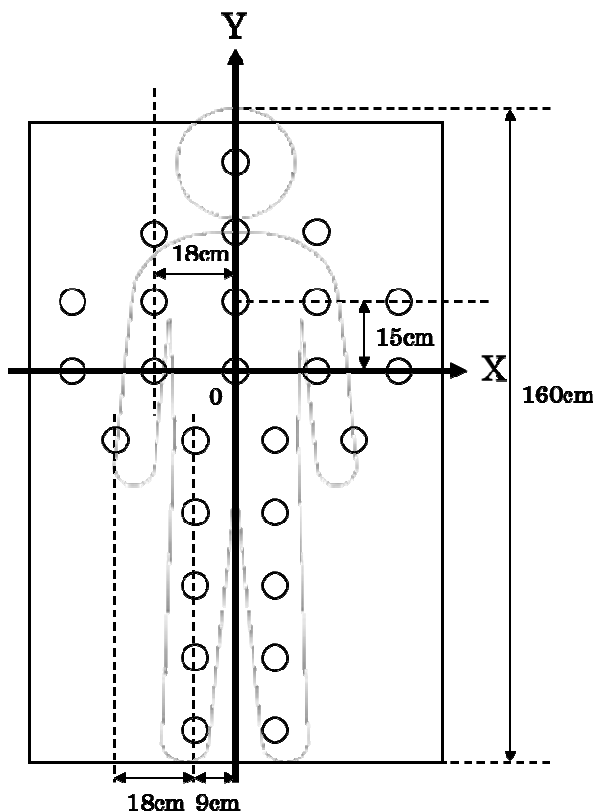


人体周辺の線量分布

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

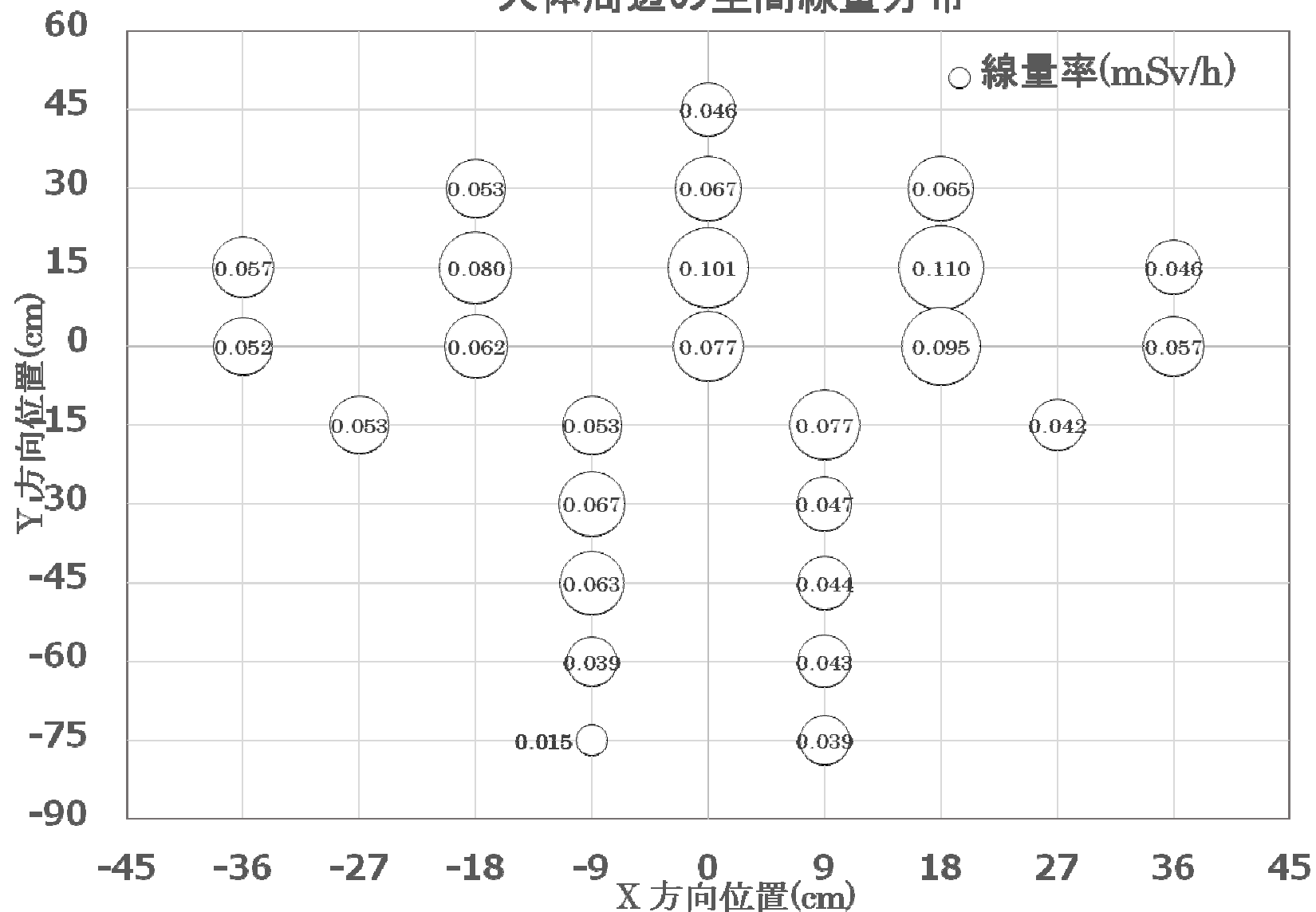


実験風景

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

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

保健物理学会における専門研究会

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



クルックス管プロジェクトから申請した専門研究会が、日本保健物理学会より 4/10 付けでアナウンスされており、現在委員の募集を行なっております。クルックス管プロジェクトの最終目標としている「教育現場における放射線安全管理ガイドライン」の中身として、以下のパッケージを考えていますが、当専門研究会ではこのうち以下の内容を取り扱います。是非御協力よろしくお願い致します。

- ・低エネルギーでは僅かなエネルギーの違いにより大きく透過率が異なってくるため、放射線防護を行なうための防護量を求めるためには実際のクルックス管からのX線スペクトルに合わせた実効線量・等価線量の評価が不可欠となります。測定量としてどのような量を選択し、どのようにして防護量を求めるのかの手順を、線量換算係数の計算などを踏まえて策定します。
- ・現在日本では様々な線源ごとの線量拘束値という概念が導入されておらず、ある個人に対して年間や5年間での総量規制(それも放射線業務従事者に対してのみ)が行われていますが、本研究では自主的な管理基準を策定しているため、教育現場での被ばくに限った「管理目標値」という呼び方で、社会的に許容される線量に関して検討を行います。

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。