

2019年 3月 3日

放射線教育フォーラム第2回勉強会

@ 東京慈恵医大

# クルックス管プロジェクトの 現状と課題

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](mailto: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**



# 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

# 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  $200\text{mSv/h}$  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

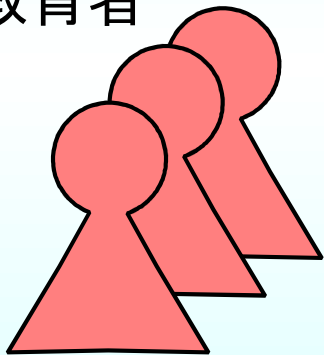
全国の教育現場での  
放射線教育の実施  
(委託)

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

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」には定義が無く、X線作業主任者が必要などということになってしまう。

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>

## 不均等被ばくである

20keV X線 で水での半価層 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、放射線防護上の評価は容易ではない。

# 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

一般向けのサーベイメーターは Cs-137 からの  $\gamma$  線の測定を前提に作成されているため、全く測定できないか、かけ離れた値を示す(何桁も小さい値を示す)。

GMサーベイメーターは低エネルギーX線でも検出自体は可能であるが、1分間に何発、と言う測定であり、そこから被ばく線量(シーベルト)を求めることは非常に困難。遠くなると線量が下がるなどの相対的な評価は可能。

放射線計測で信頼されている NaI シンチレーターなどもエネルギーが低すぎて全く使い物にならない。

パルス状に放出されている

電源装置(誘導コイル)が不安定である

専門家でも正確な評価は非常に困難

# 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

# 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  $\mu$ 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	フタ無し	フタ有り	70 $\mu$ m線量当量	1cm線量当量	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	$\mu$ Sv/h	$\mu$ Sv/h	$\mu$ Sv/h	$\mu$ Sv/h	$\mu$ 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。



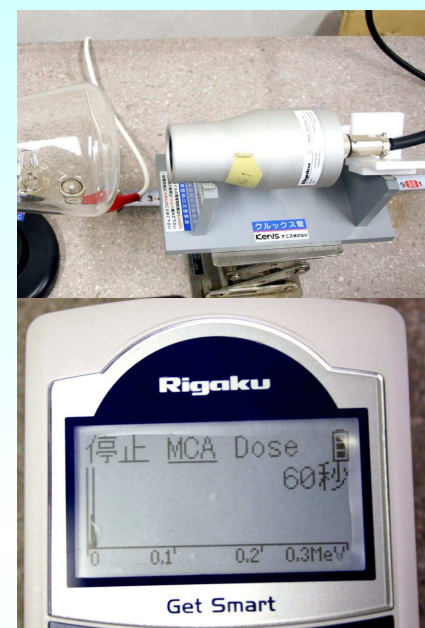
# 低エネルギー用NaIシンチレーターでの測定



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)

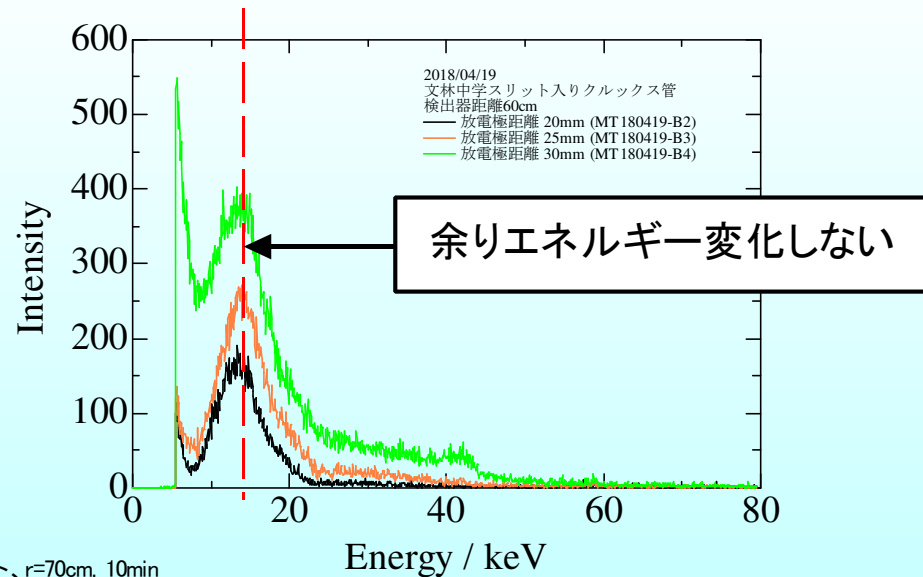
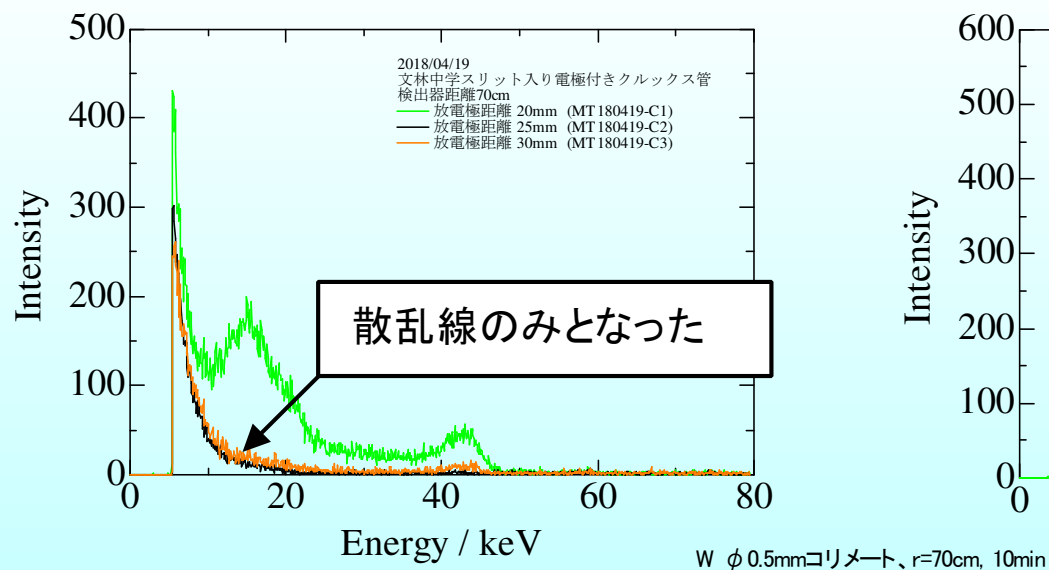
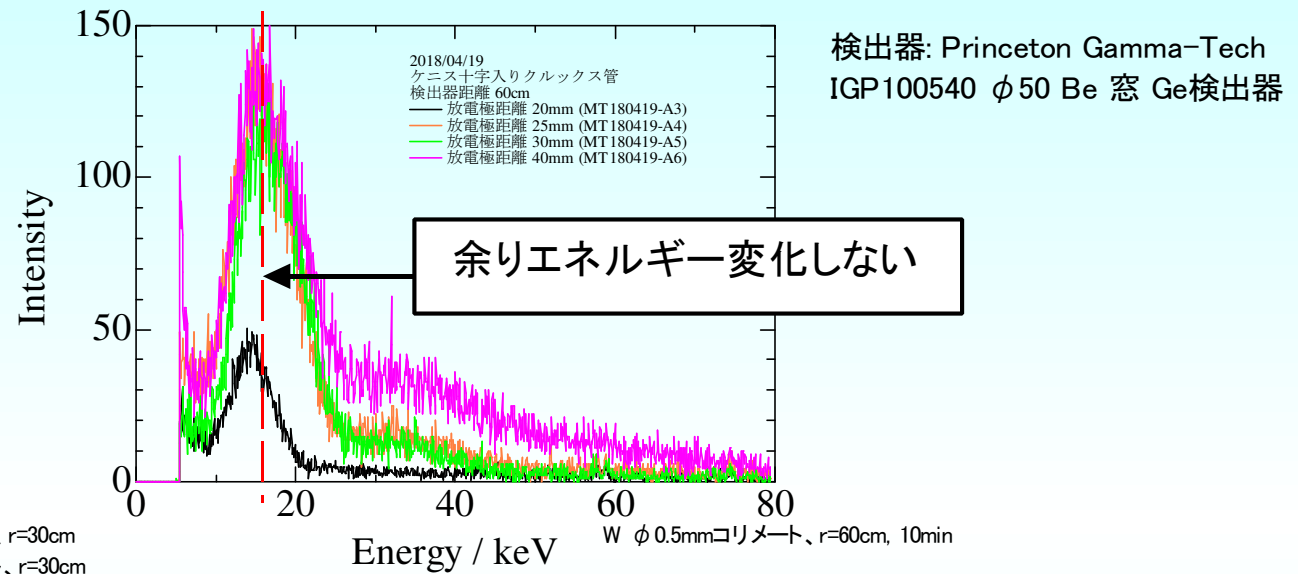
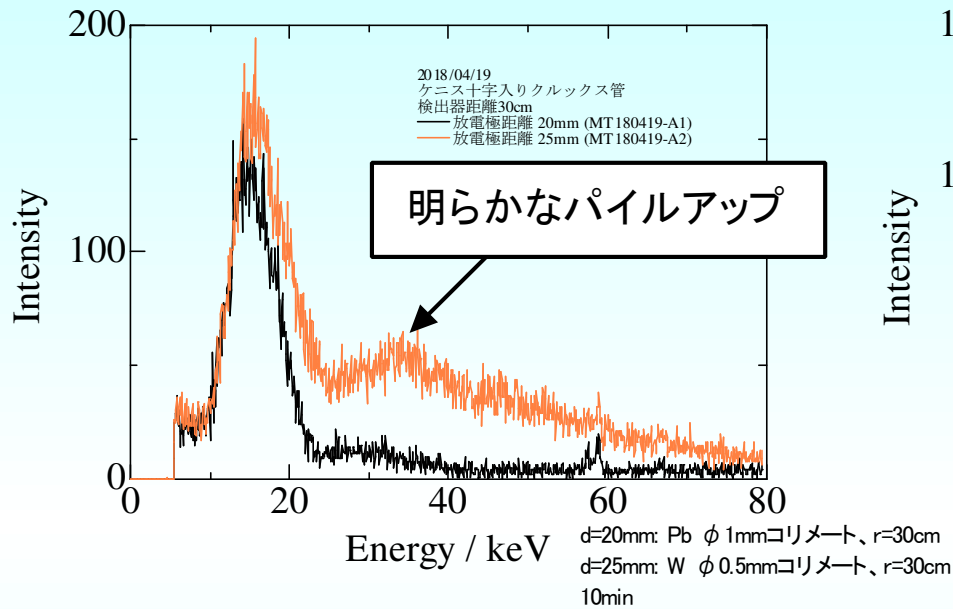


通常の NaIシンチレーションサーベイメーター TCS-172 だけでなく、  
低エネルギー測定が可能な新製品でも正常な評価が出来ない。

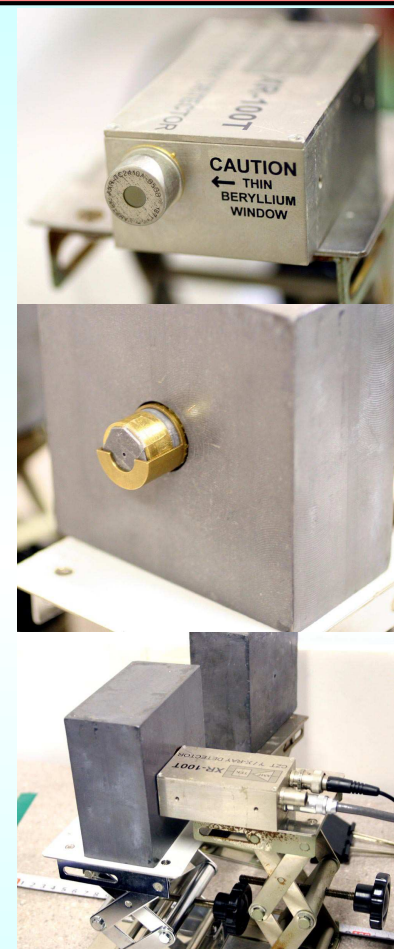
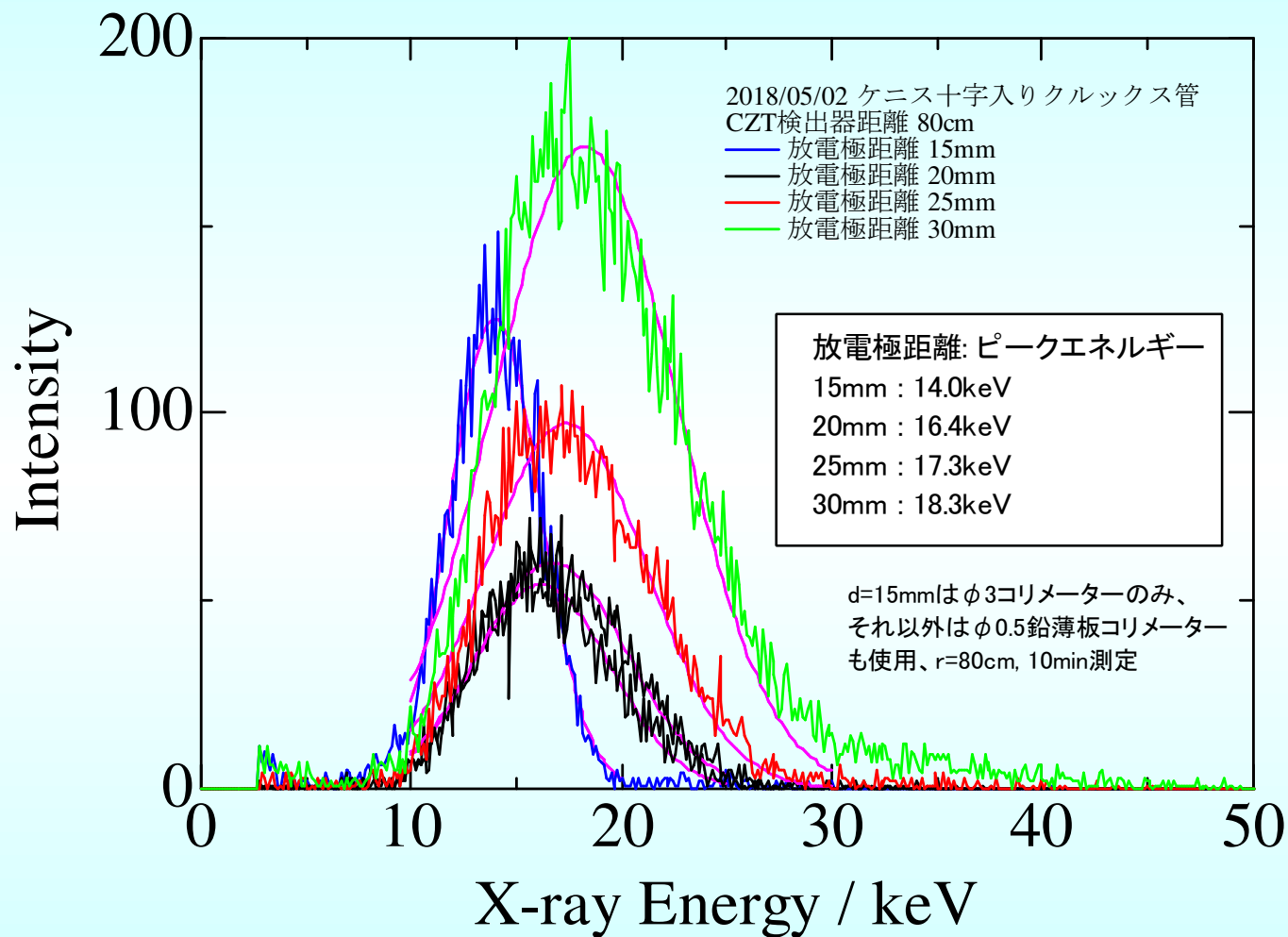
時間的に一様な放射線場ではなく、パルス場であることが原因



# 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



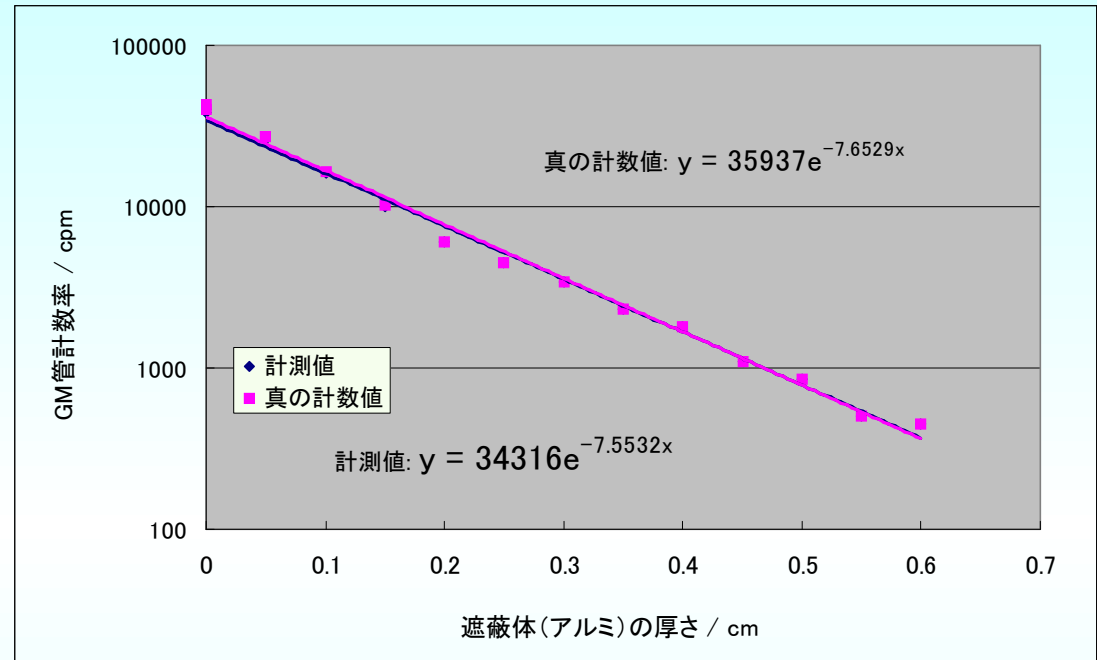
Amptek XR-100T-CZT  
CZT(Cd<sub>0.9</sub>Zn<sub>0.1</sub>Te)検出器  
Be窓、ペルチェ冷却



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、 $7.65\text{cm}^{-1}$  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**。

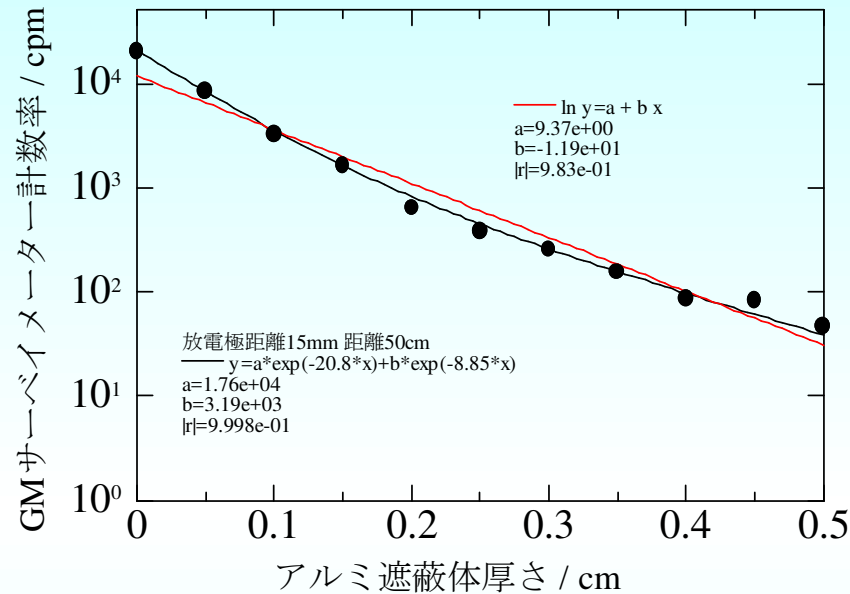
当初低エネルギー側に尾を引いたスペクトルを想定しており、遮蔽が薄い領域で計数率が高くなる事が予想されたが、**単一のエネルギーだけで説明できてしまった**。

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 $\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
10	69.5
15	20.8
<b>20</b>	<b>8.9</b>
30	2.8

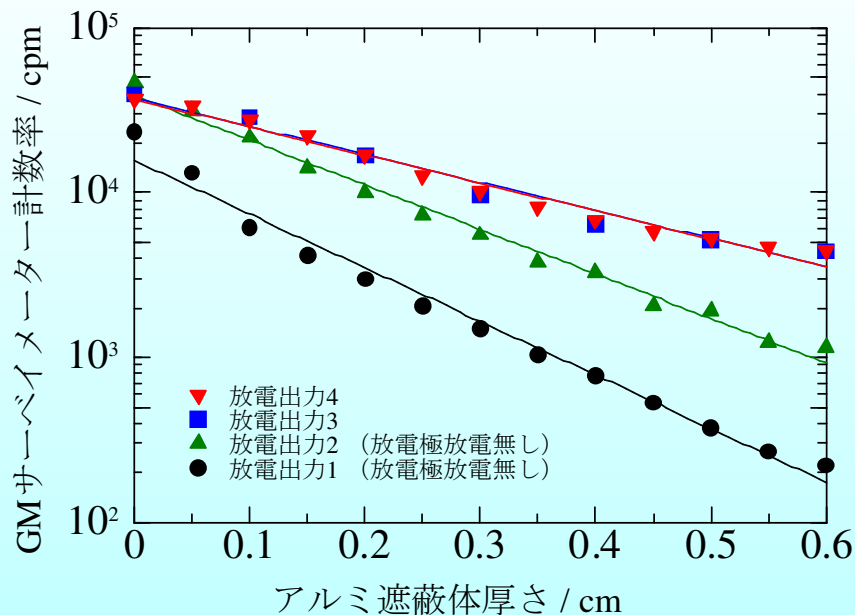
# GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価

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 $\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
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 ( $\text{cm}^{-1}$ )
1	7.50
2	6.05
3	3.92
4	3.89

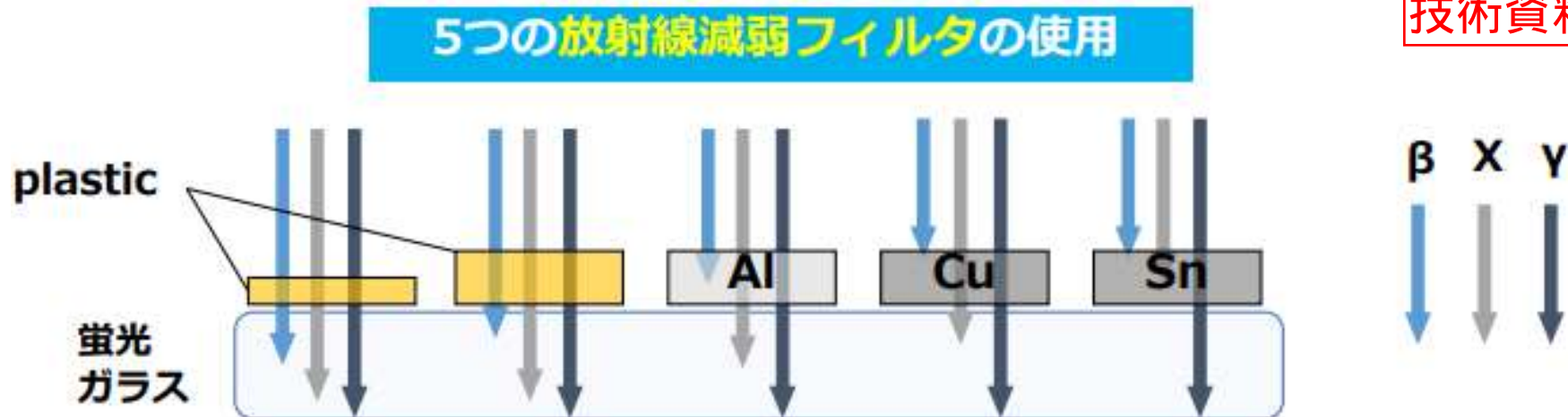


# 蛍光ガラスでの線量測定

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

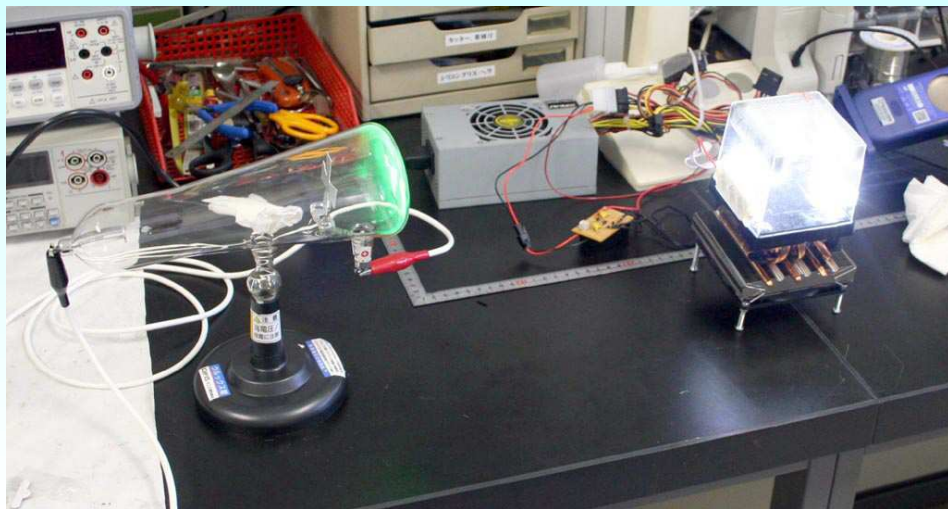
- ⇒ 放射線に対するエネルギーレスポンスの違いを補正する必要がある
- ⇒ そのためには、ガラスバッジにどのような放射線（線種、エネルギー）が入ってきたのか知る必要がある

千代田テクノル  
技術資料より

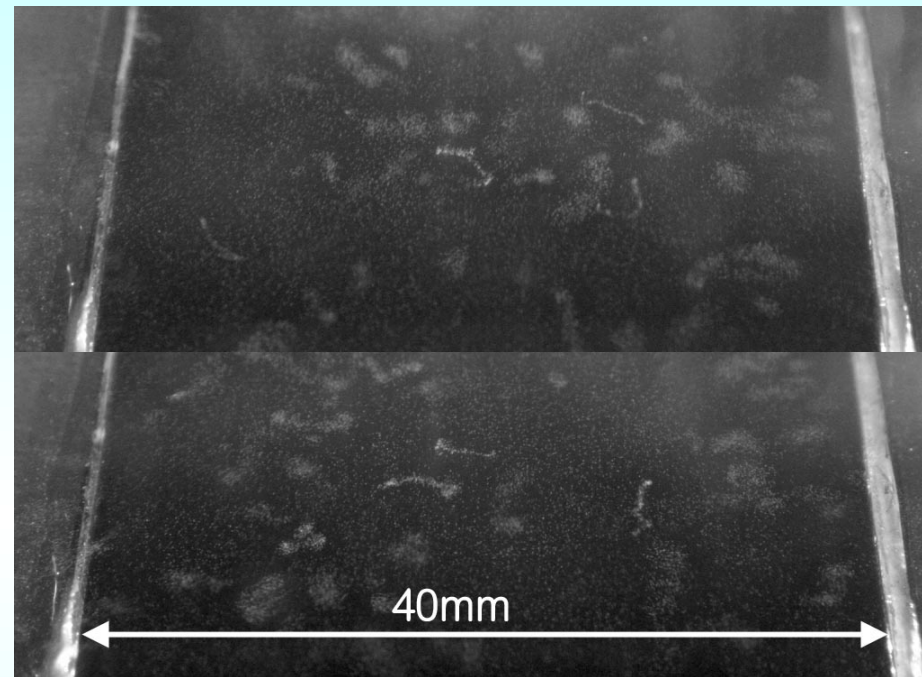


蛍光ガラスの各フィルタ下の発光パターンから、  
放射線の種類やエネルギーを知り、レスポンスを補正し線量を求める

# 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。

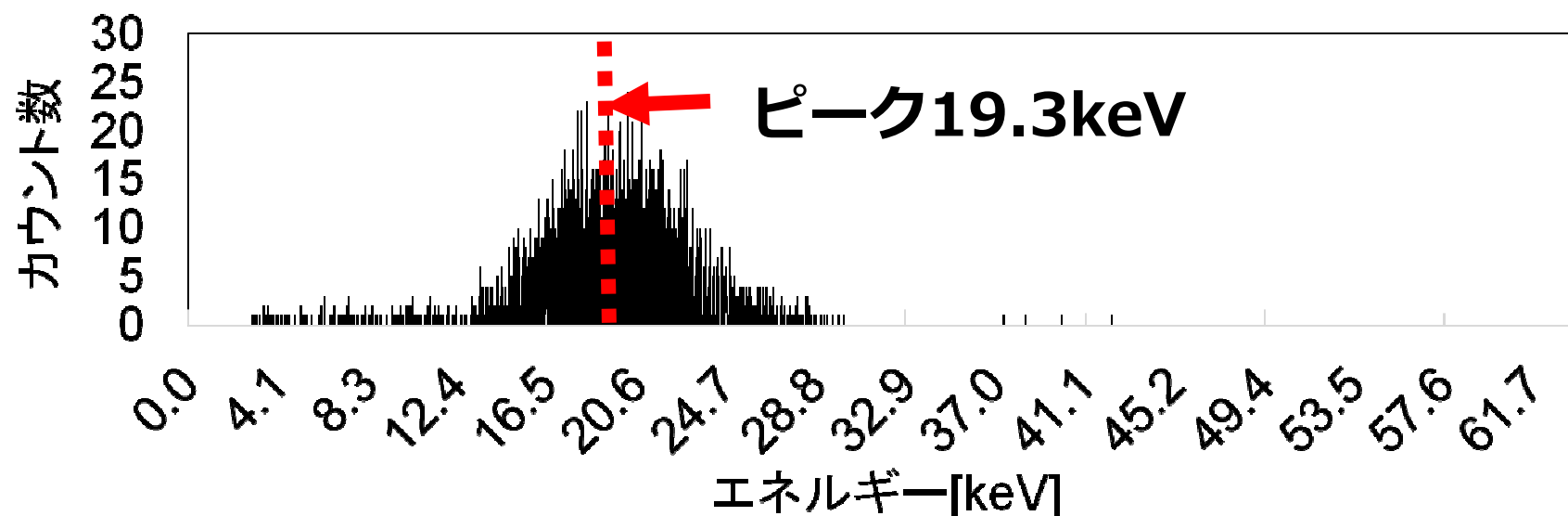


クルックス管からのX線によって弾き出された光電子の霧箱観察結果(放電針距離20mm)。

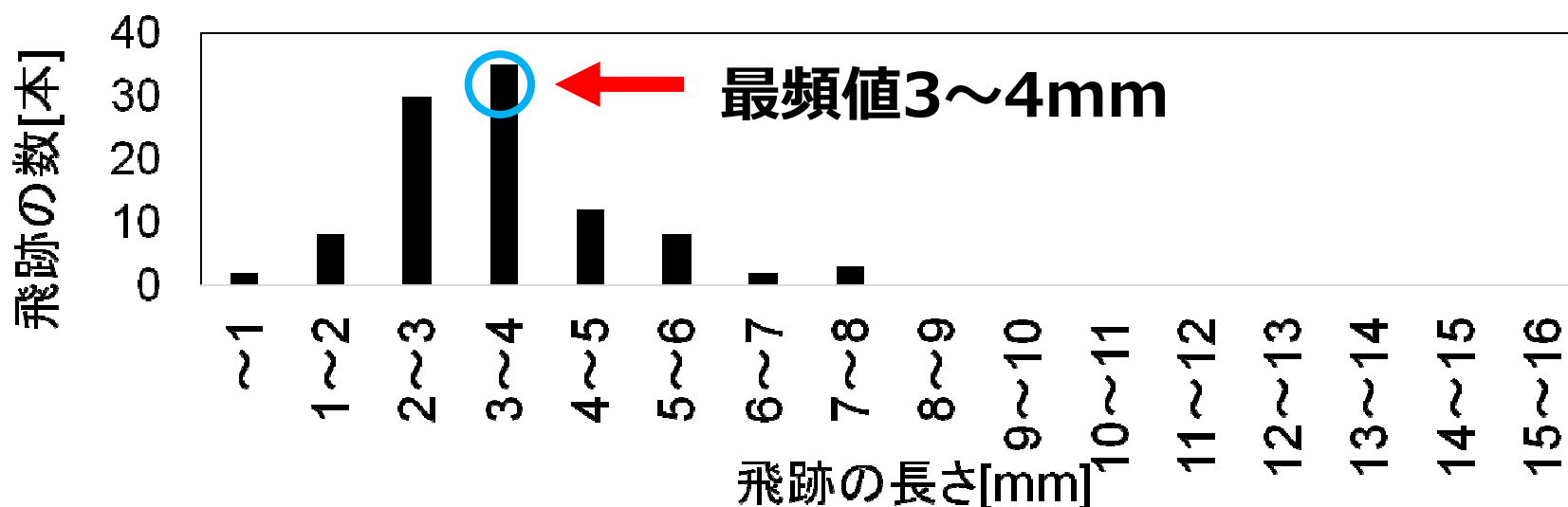
エネルギー既知のX線を入射して飛跡の長さのヒストグラムを作成し、エネルギーに拡がりを持つX線のスペクトルが評価できないか？

**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

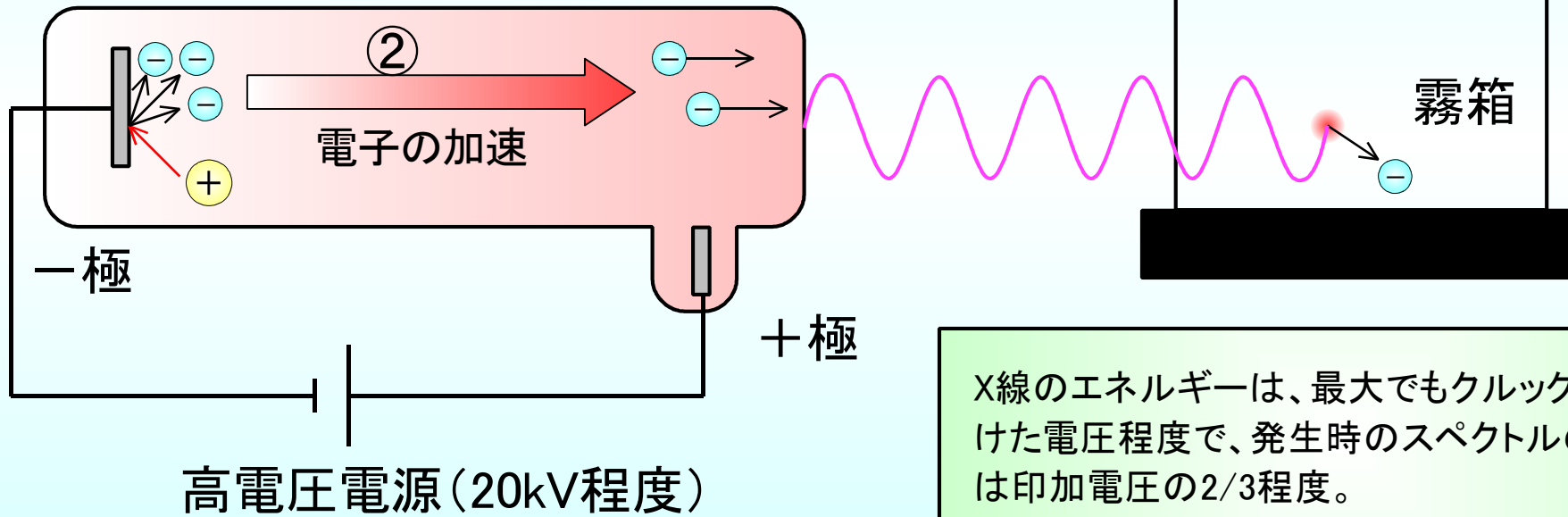
＋のイオンが－極に引きつけられて電子を叩き出す  
(二次電子放出)

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)。

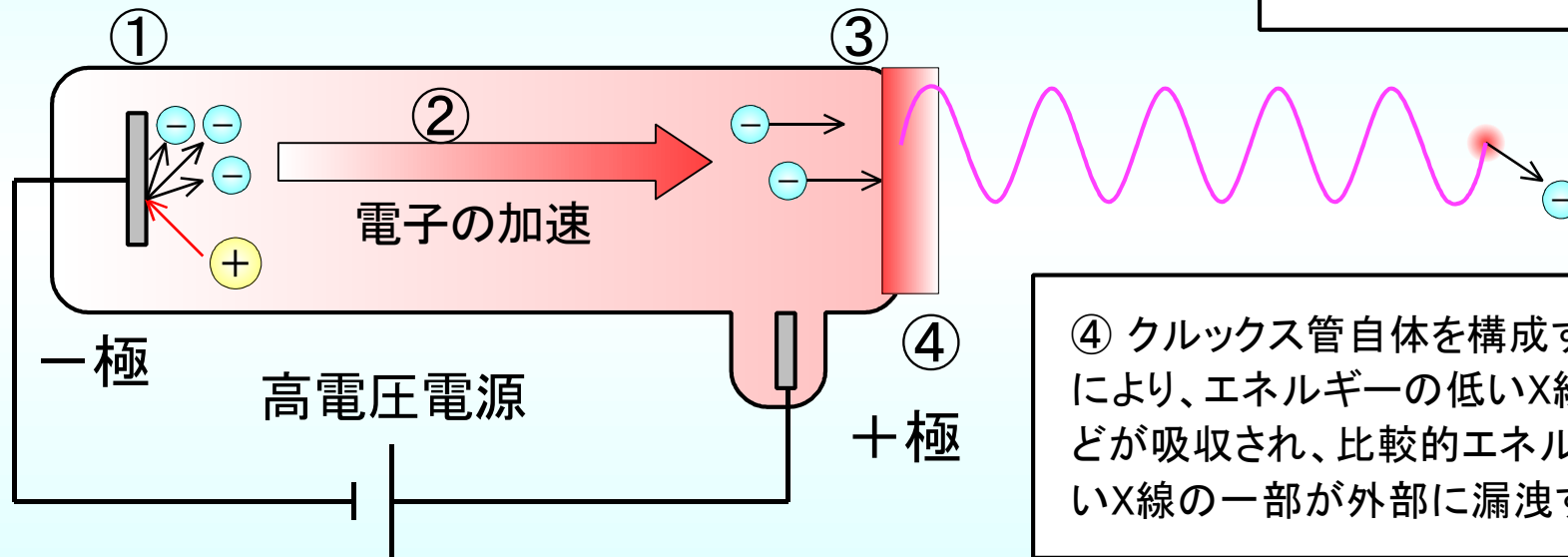
このような動作原理であるため、電子線の観察には管内に**わずかなガスが必要であるが**、**古い製品ではガラス管に吸着されるなどして残存するガスの量が少なくなり**、**より高電圧を印加しないと電子線を観察できなくなる**。実際の教育現場にはこのような古い製品が多数残されており、高電圧を印加することにより**発生する制動放射 X 線のエネルギーが高くなり**、**ガラス管壁に対する透過率が高くなるため**、**放出される線量が高くなる**。

# クルックス管からのX線の発生

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。



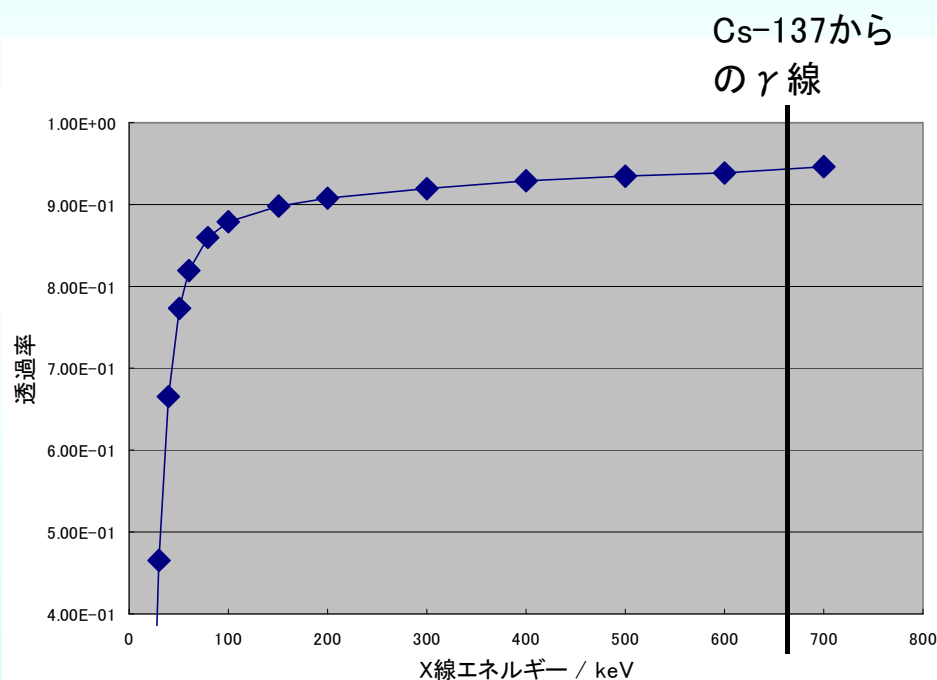
④ クルックス管自体を構成するガラスにより、エネルギーの低いX線のほとんどが吸収され、比較的エネルギーの高いX線の一部が外部に漏洩する

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。

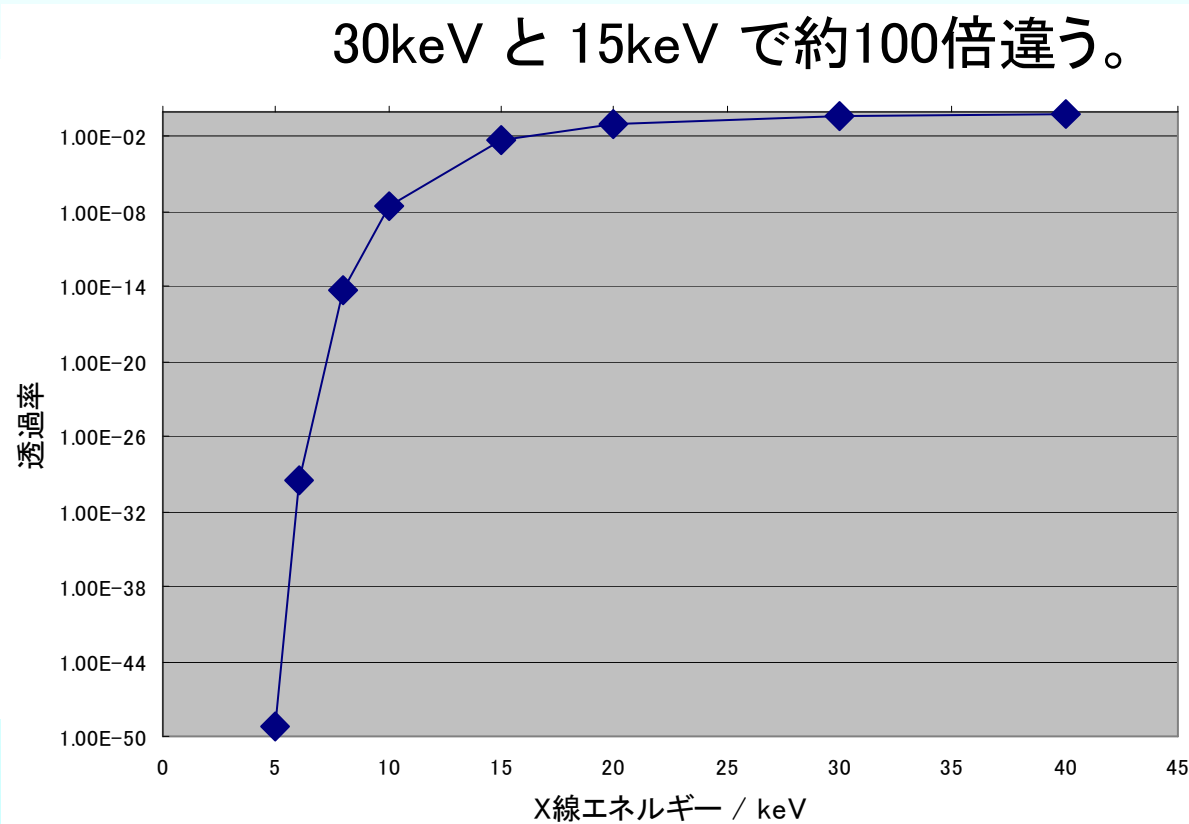
その結果高い電圧が印加され、④で漏洩する線量が大きくなってしまふ。

# 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。

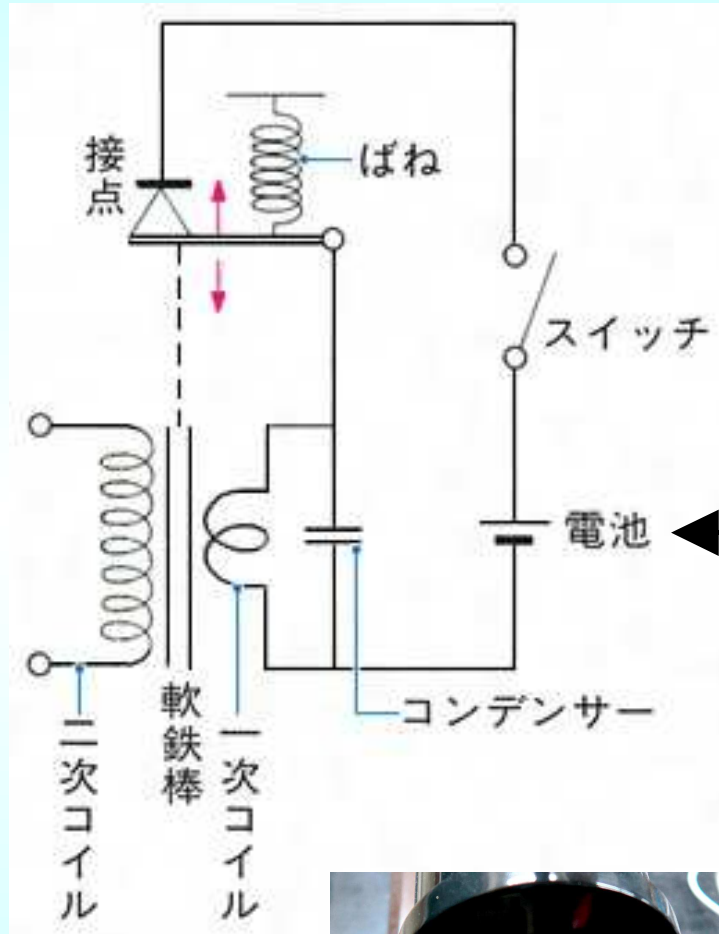


100keV 以上のエネルギーでは  
余り大きく変わらない



X線・ $\gamma$ 線の3mmのガラス透過率

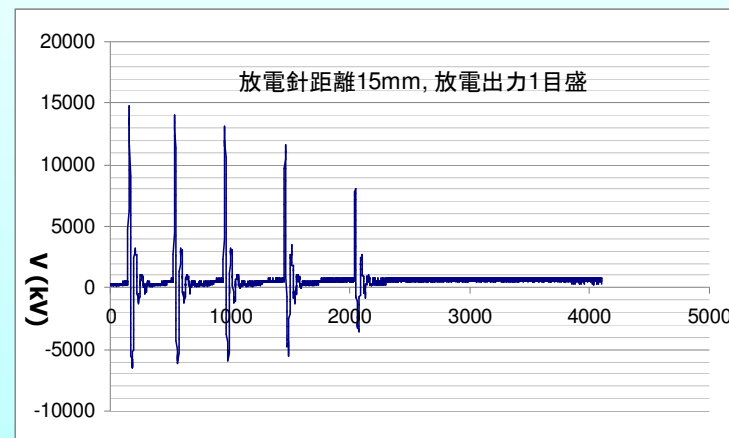
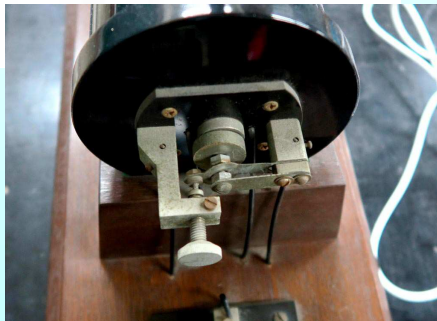
# 誘導コイルを用いた高電圧生成について



誘導コイル(Induction Coil)は、極端に巻き線の数の異なるトランスの一次側の電流を、ベルやブザーなどと同様に機械的に接点を連続的に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。

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。

外部電源で直接一次側の電圧をコントロールする製品も存在する。



1ms程度のパルス  
を間欠的に出力



# 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。**

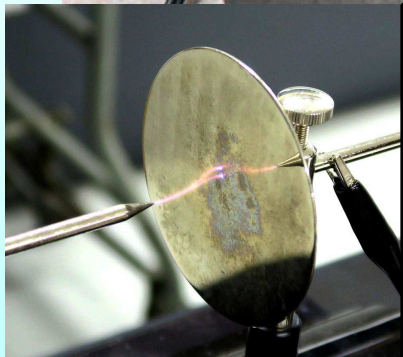
電氣的な安全上も必須。

**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。**

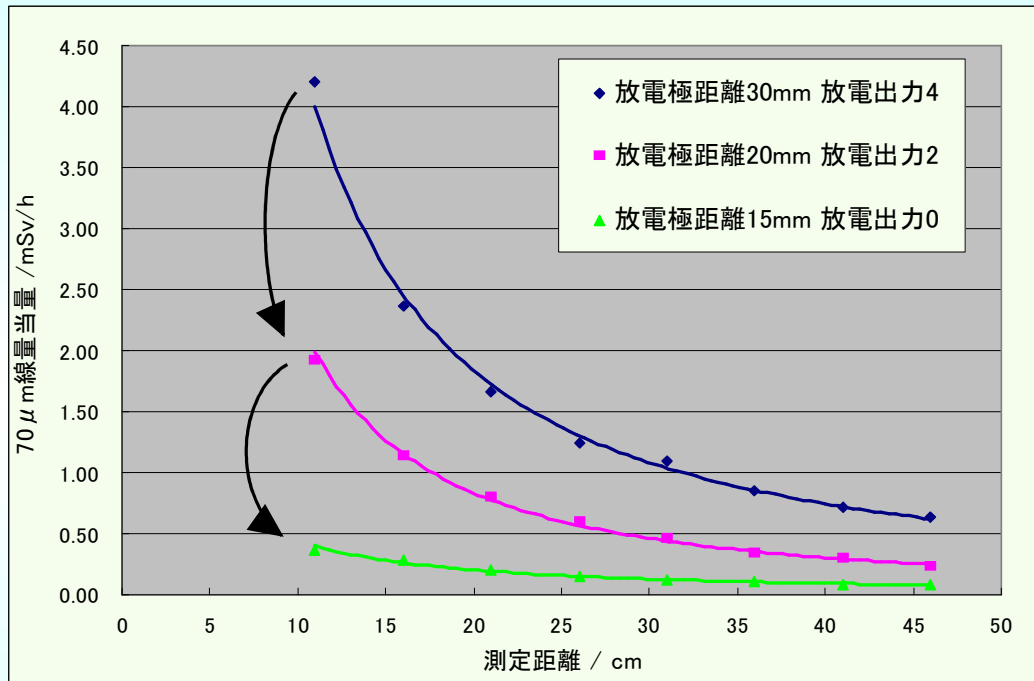
電子線を観察できる範囲で下げる



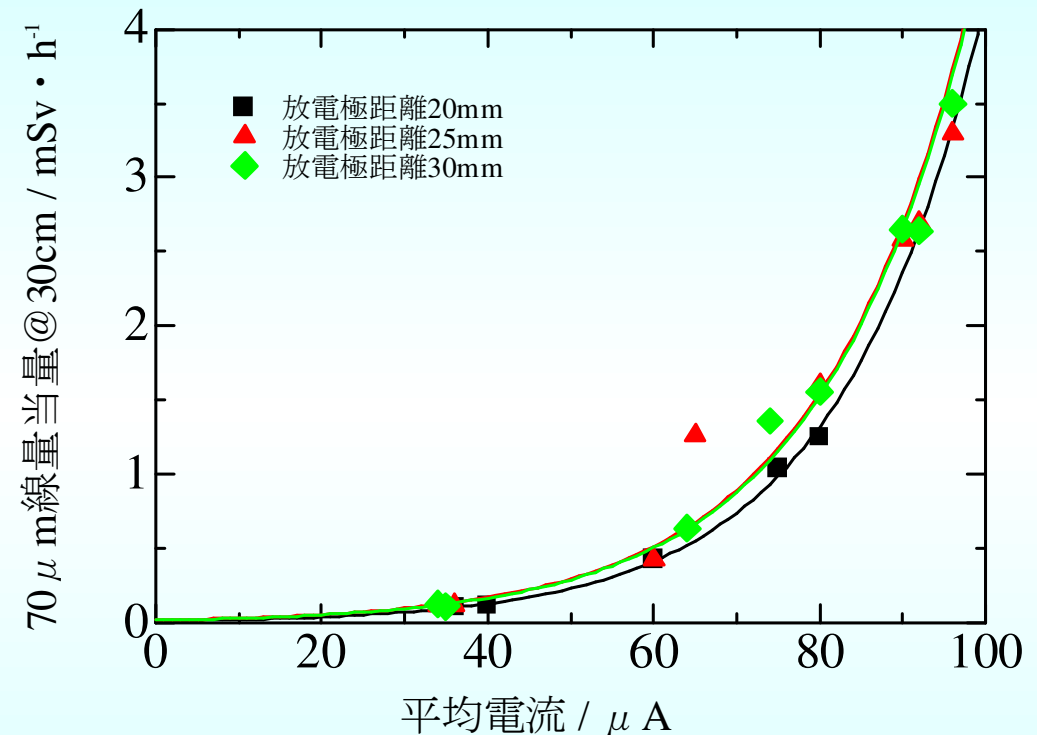
放電極は、一定以上の電圧がかかると放電してそれ以上電圧が上がらないようにする、**安全装置**

# 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



放電出力変化に伴う平均電流を  
アナログ電流計で測定



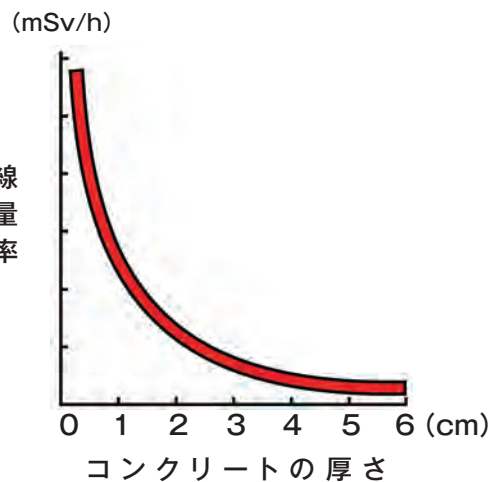
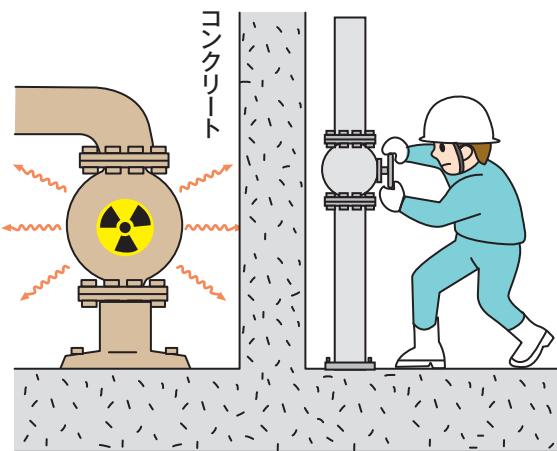
- ・電圧を低く抑えると極端に線量は小さくなる  
放電極距離は20mm以下に留める
- ・距離の二乗に反比例して線量は小さくなる  
1mの距離では10cmの距離での1/100になる  
1mから50cmに近付いただけで4倍になる。

- ・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。

# 放射線防護の基本

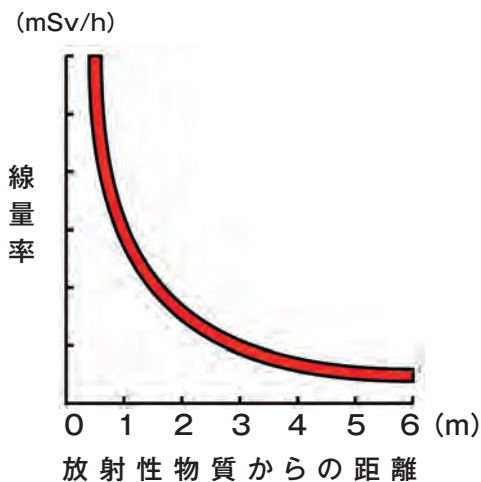
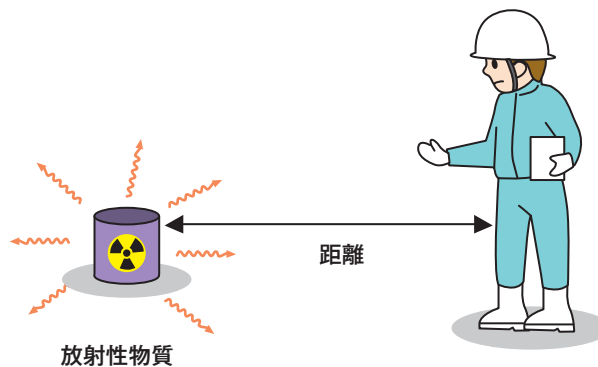
## 1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下



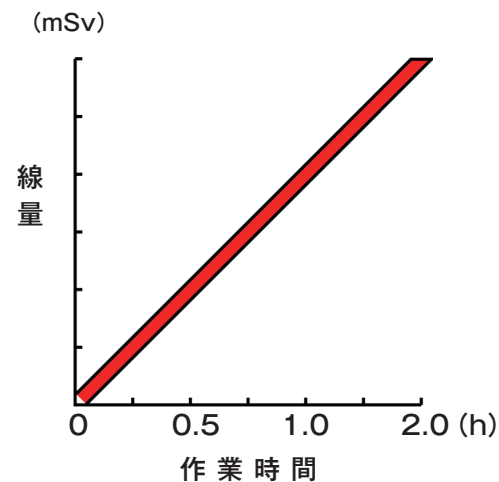
## 2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例

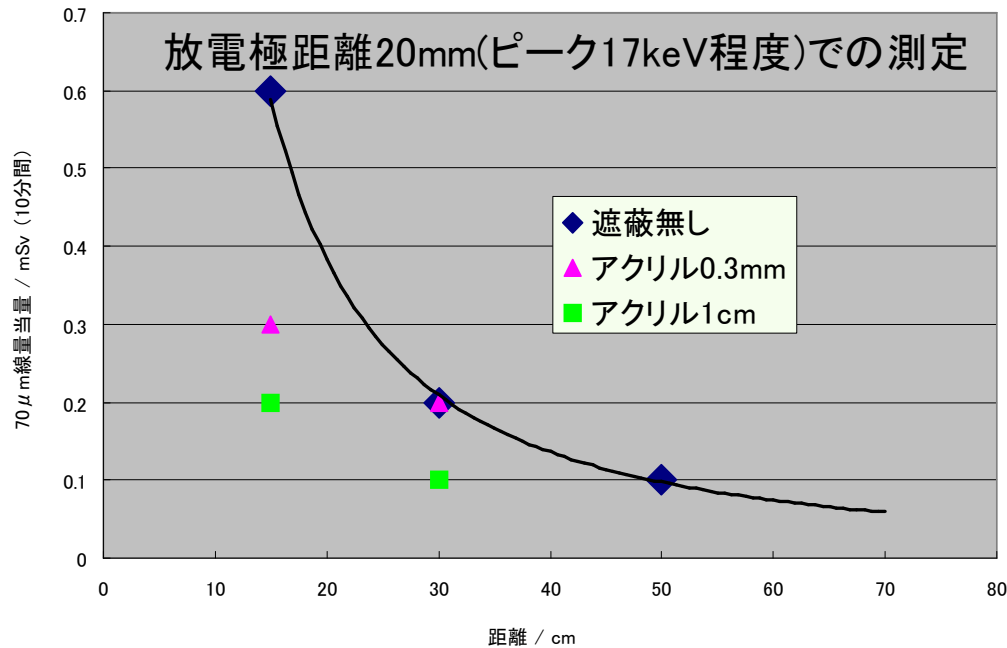


## 3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)

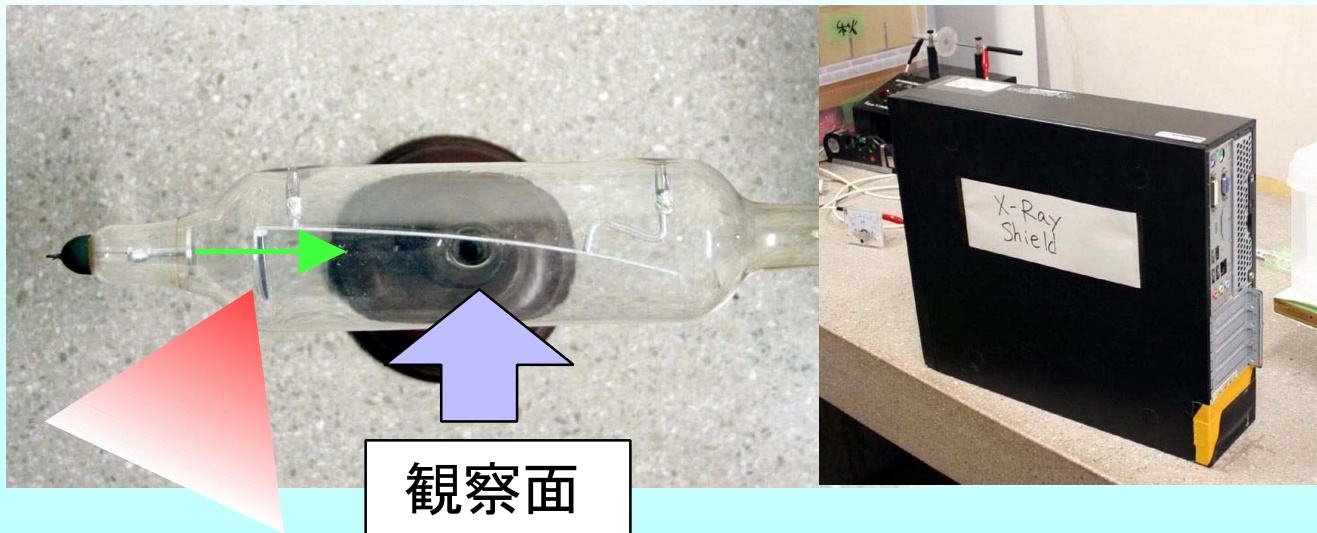


# 有効な遮蔽



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。

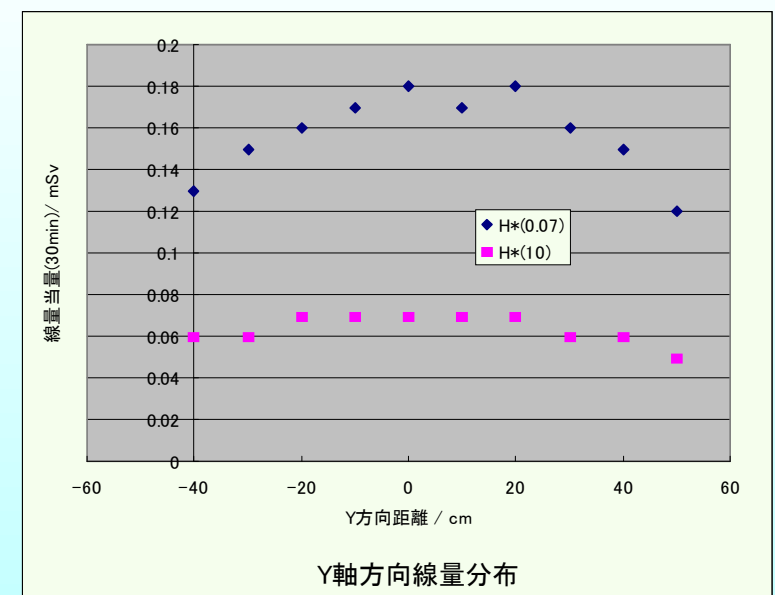
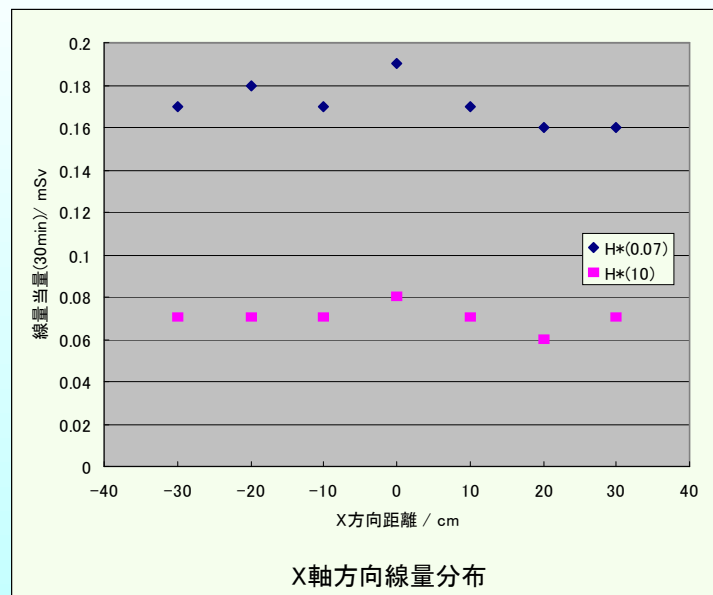


# X線放射方向垂直平面内での二次元線量分布

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。

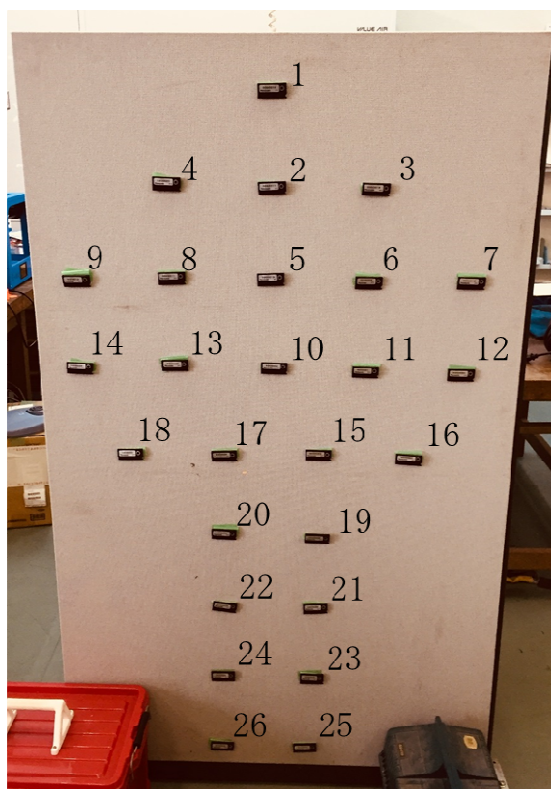


線源から 1m 離れると、点線源だとして中心から水平に 30cm 離れても、 $\sqrt{100^2 + 30^2} = 104$  cm 線源から離れただけになり、ほとんど変わらない。

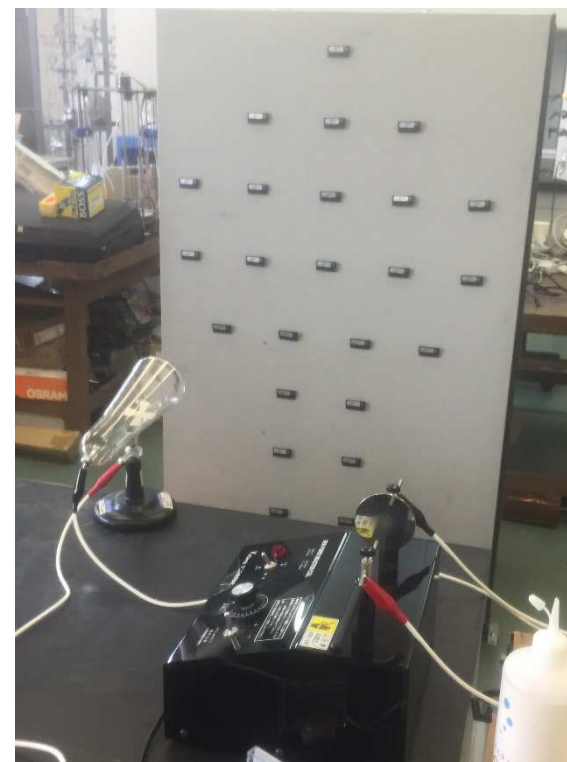
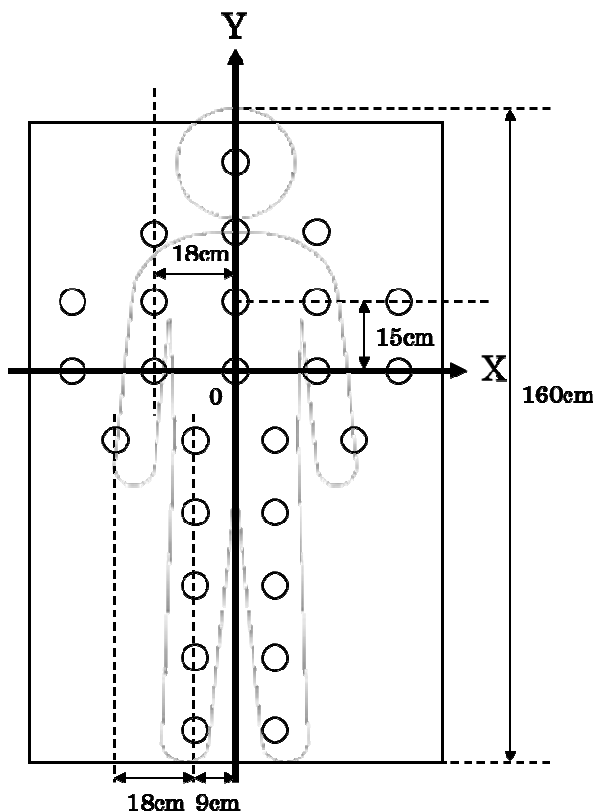


# 人体周辺の線量分布

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



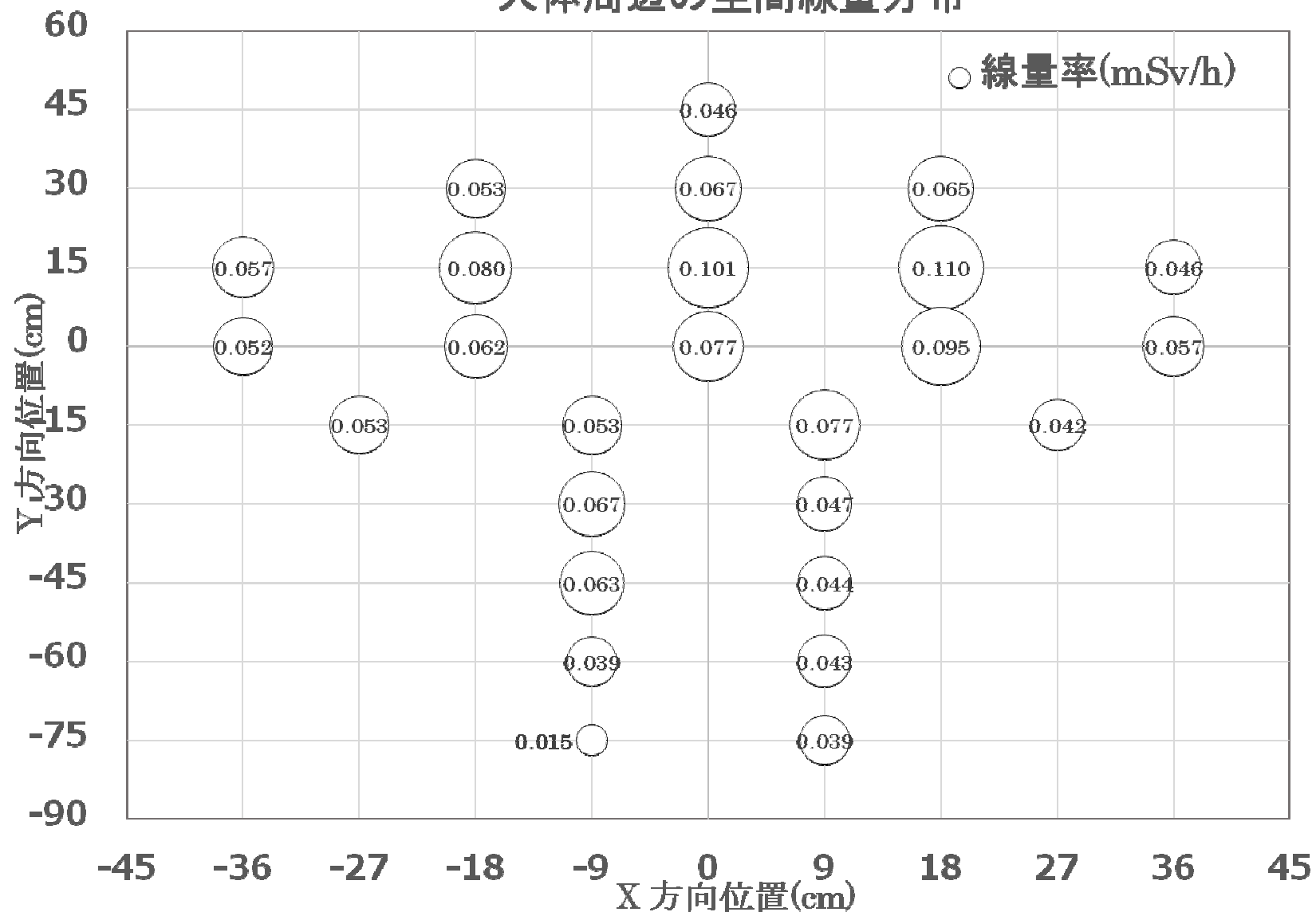
実験風景

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)

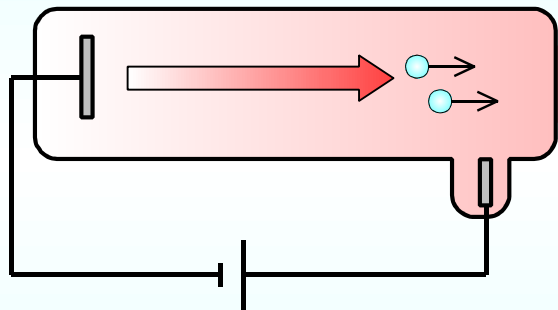
## 人体周辺の空間線量分布



# クルックス管からのX線の不均一性

\*体表面での線量 =  
70  $\mu$ m線量当量

正面中心、15cm位置で  
体表面での線量\* が  
150mSv/hあったとしても



線量計

① 1m 位置では 1/44 以下の  
線量になります

③ 平面的にも周辺の線量は小さくなり  
中心位置で測定した線量計の値よりも  
小さくなります。  
(50cmずれると2/3程度に低下)

④ 演示時間を短くすることで、  
トータルの被ばく線量は  
時間に比例して減らせます。

⑤ 20keV では 2mmのガラスで  
1/5 程度にまで遮へいできます。  
(アクリルでは1cmで半分)

眼の水晶体への等価線量  
は体表面での線量に近い値  
となります。

② 20keVのX線は体内で1cmで半分に  
減衰していき、体表面での線量と  
全身への線量とは一致しません。  
(実効線量と10倍程度の差が出ます。  
正確には現在評価中)

10分の演示で遮蔽無しでも、  
全身への実効線量は50  $\mu$ Sv  
にも満たないと考えられます。

# 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 $70 \mu\text{m}$ 線量当量\* が $50 \mu\text{Sv}$ 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( $50 \mu\text{Sv}$ )未満であった。\*実効線量はさらに1/5以下。

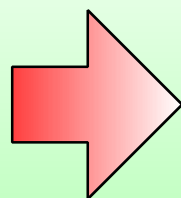
ペットボトルに貼付けたガラスバッジに15, 30, 50cmの距離で10分間X線照射して返送してもらい、線量評価を行った。X線計測専用タイプの物で、同時にエネルギー評価も出来る。

放電出力最低で距離1mでも $600 \mu\text{Sv}$ 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

放電極距離30mmで  
 $2\text{mSv/h}$  @ 30cmだった

放電極距離50mmでは $30\text{mSv/h}$ 以上



放電極距離を20mmに縮めると、  
 $40 \mu\text{Sv/h}$  にまで落ちた。

距離1m、10分間では、 $0.6 \mu\text{Sv}$ に過ぎない

## 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  $\mu$  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  $\mu$  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  $\mu$  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。

- ・演示時間は10分程度に抑える

全部守らなくても十分線量は低く抑えられている場合がほとんどであるが、非常に高い線量を放出する装置ではこれらを遵守する必要がある。一般的に行える測定では判別できないため、各自の装置がそういった物に該当するかどうかは、ガラスバッジによる測定などを行って確認する必要がある。（箔検電器による簡易スクリーニング手法を開発中。）



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

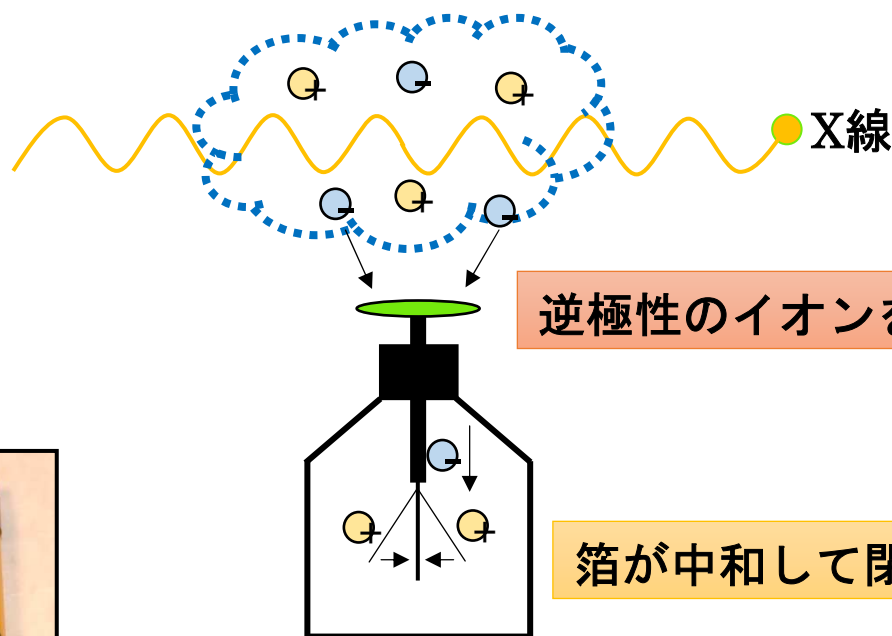
## ➤ 箔検電器について

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



※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。

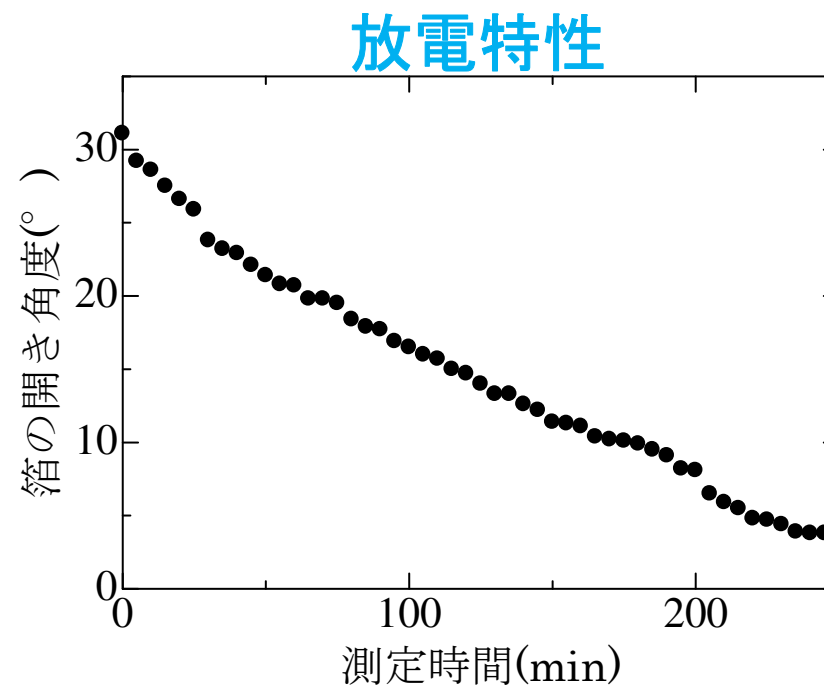
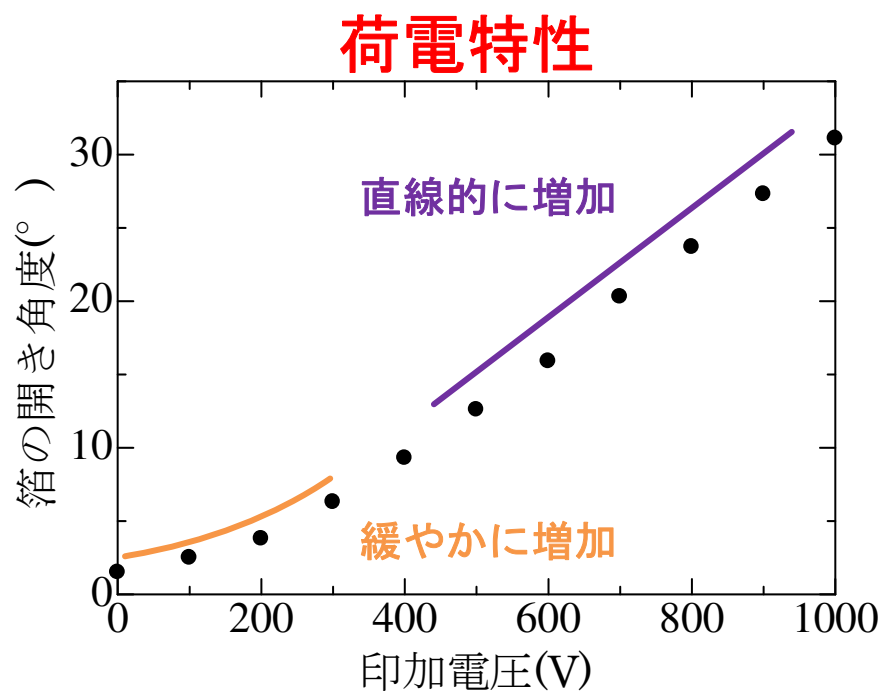
※箔検電器を用いた定量的な線量測定は既に、同じクルックス管プロジェクト内で先行研究が行われている<sup>[1]</sup>が、平行して、我々の研究グループも測定手法の開発を行った。

**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

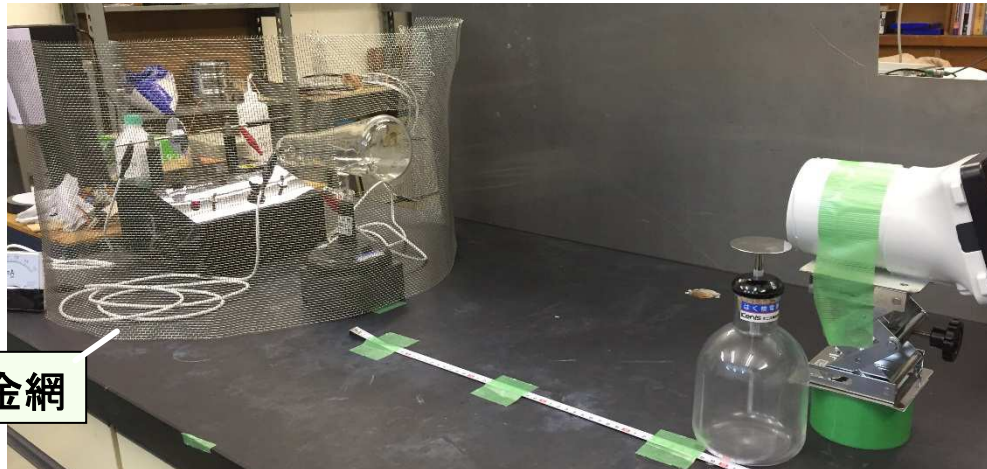
- ・ 印加電圧が増加すると徐々に角度が増加する. (1000V $\Rightarrow$ 31.1°)
- ・ 1000Vで印加を中止し, そのまま放置すると角度がゆっくりと減少した.



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



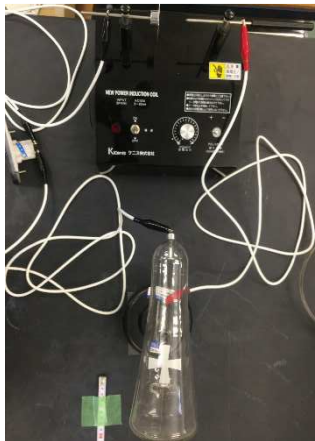
金網

金網の有無における測定結果

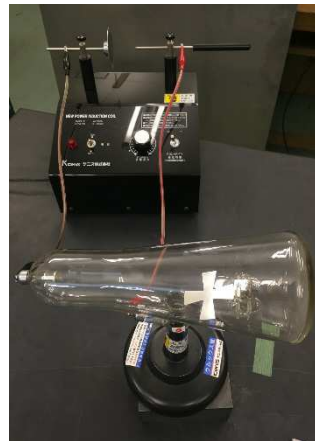
測定距離(cm)	正と負のハーフタイムの差 (sec)	
	金網なし	金網あり
40	669	84
60	173	10
70	132	9

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

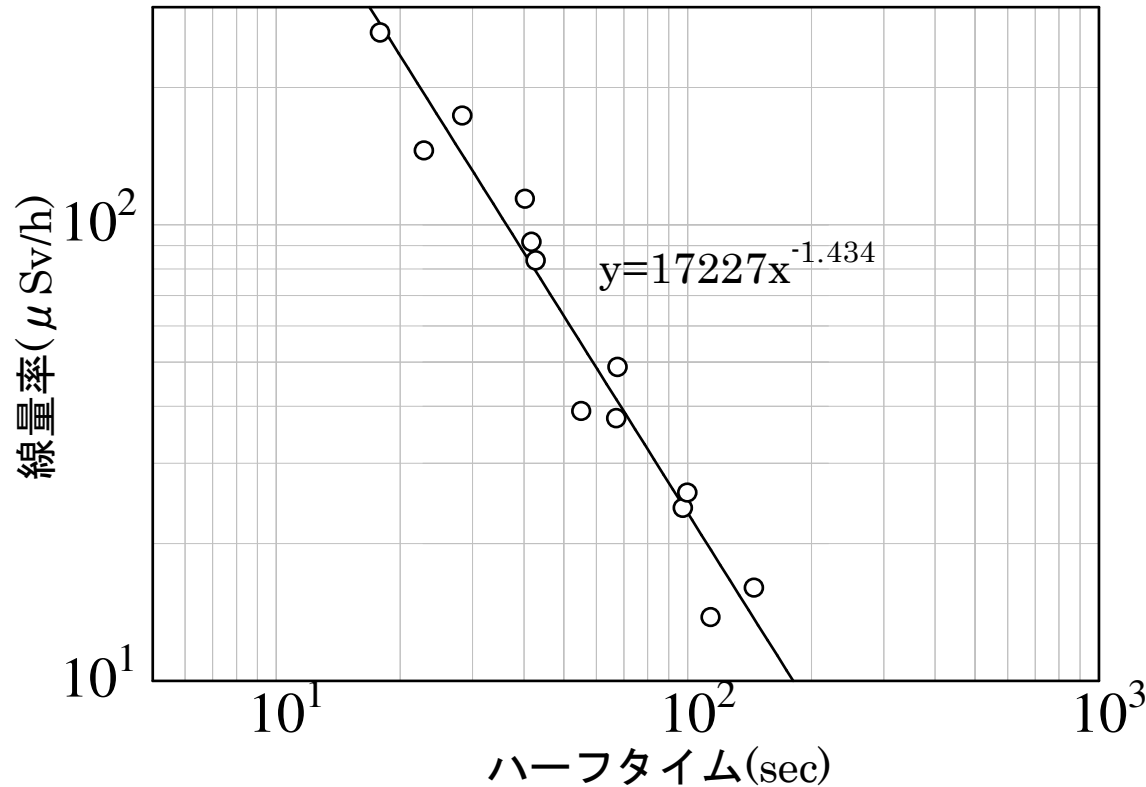
70cm離すとかなり小さくできる

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。

## 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。