

**2018/11/22 放射線プロセスシンポジウム
於 東大弥生講堂**

**学習指導要領改訂による
放射線教育の新展開**

大阪府立大学 放射線研究センター 秋吉 優史

Special Thanks: 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>



本発表の背景

2017年3月に公布された新・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月に公布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？

「クルックス管などの真空放電の観察から電子の存在を理解させ」という内容は、完全にクルックス管を用いた実験を前提としている。クルックス管は従来から放射線教育に用いられているが、低エネルギーX線の被曝線量が想像以上に多い(数10mSv/hに達する)場合があることが明らかになりつつある。

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実験体系を極めて安全に構築可能。

ここで話は完結する

中高の教育現場には、
買い換える資金がない！

株式会社ホリゾンからは 5kV駆動のクルックス管が 22,000円、電源も18,000円で発売されている。

Advanced Plan

古い装置を用いざるを得ない場合や、放出されるX線を活用した発展的な実習実施する場合、印加する電圧を一定以下に抑えることで最低限度のX線量に抑えて、特定方向だけにX線を取り出せる遮蔽体を組み合わせた実験体系を構築する。

本研究の目的

何とかしてクルックス管からのX線放出をコントロールしたい。

→ 条件を変えたときのX線放出状況の正確な評価が不可欠

国際放射線防護委員会 ICRP の勧告

放射線防護の基準を決める三つの原則

正当化 Justification

リスクを上回る利益がなければならない

- 電子線の観察だけであれば5kVの絶対安全な装置の使用を推奨。
X線を活用した効果的な教育コンテンツには利益があり許容される。

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

- 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う。必要に応じて遮蔽も行う。

線量限度 Dose Limit

線量限度を超えてはならない(緊急時と医療を除く)

- 放射線取扱業務従事者でも、労働者でもない生徒に対する被ばく線量限度を、国内外の規制状況から議論する。低エネルギーX線による不均一被ばくと水晶体への等価線量についても考慮する。

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	フタ無し	フタ有り	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	8.15	5.3	4.62	1.62	33.89
30	1.91	1.28	1.26	0.48	31.68
50	0.64	0.465	0.48	0	27.32
	NaI シンチレーター		プラスチック シンチレーター	CsI シンチレーター	半導体検出器
	富士電機 NHC6	アロカ TCS-172	Kind-mini	エアーカウンターEX	エアーカウンターS
距離 r	Be窓	汎用	カバー無し	カバー無し	
cm	μ Sv/h	μ Sv/h	μ Sv/h	μ Sv/h	μ Sv/h
15	1.34	0.17	118	12.6	<9.99
30	10	0.17	64	12.5	0.05点減
50	13.1	0.15	24.5	8.3	<9.99

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

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ーはおろか、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

Be窓を用いた低エネルギーX線用 NaI シンチレーター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。放電極で電圧を制御している誘導コイルから出力される電圧が、天候などの要因で変化しているのではないか？

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

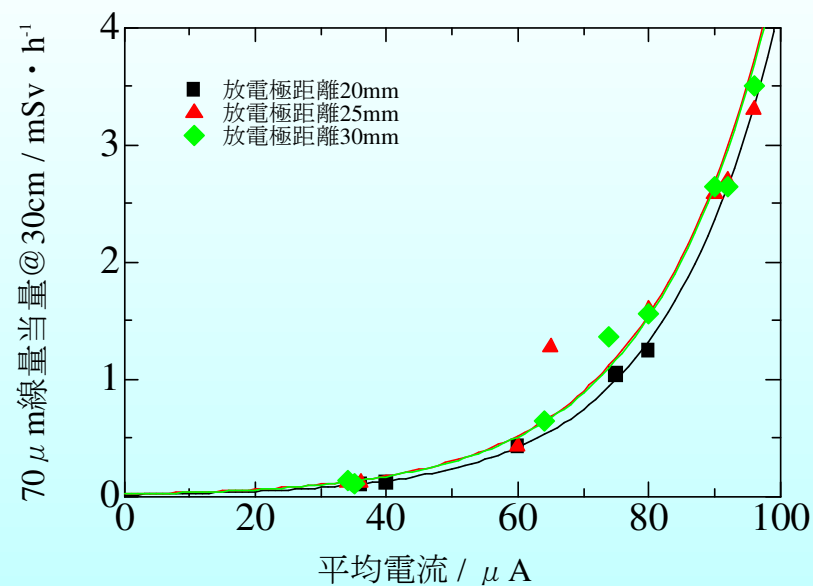
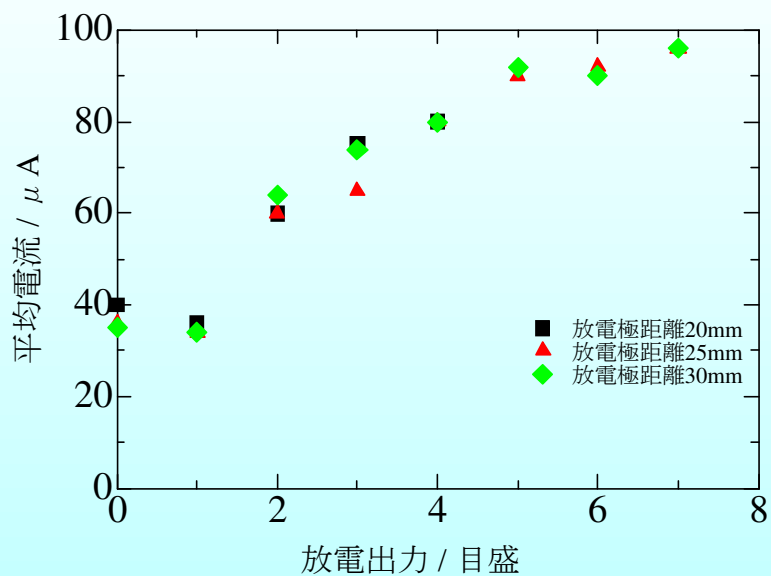
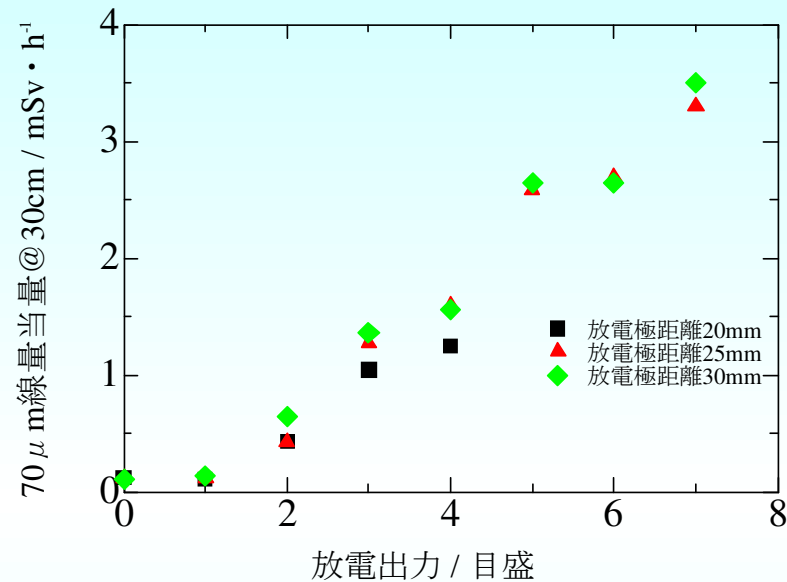
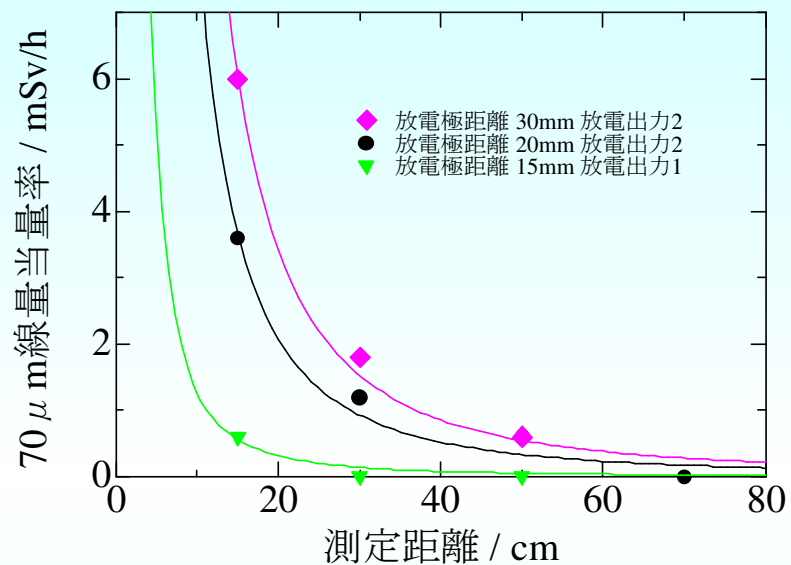
新規放射線教育プログラムの開発

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

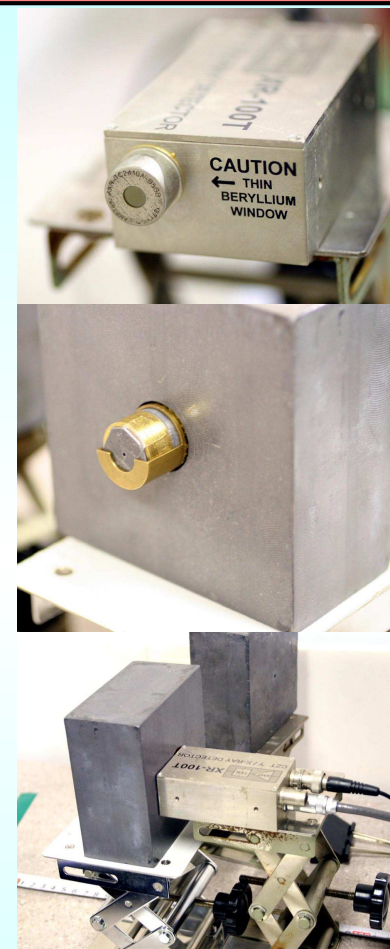
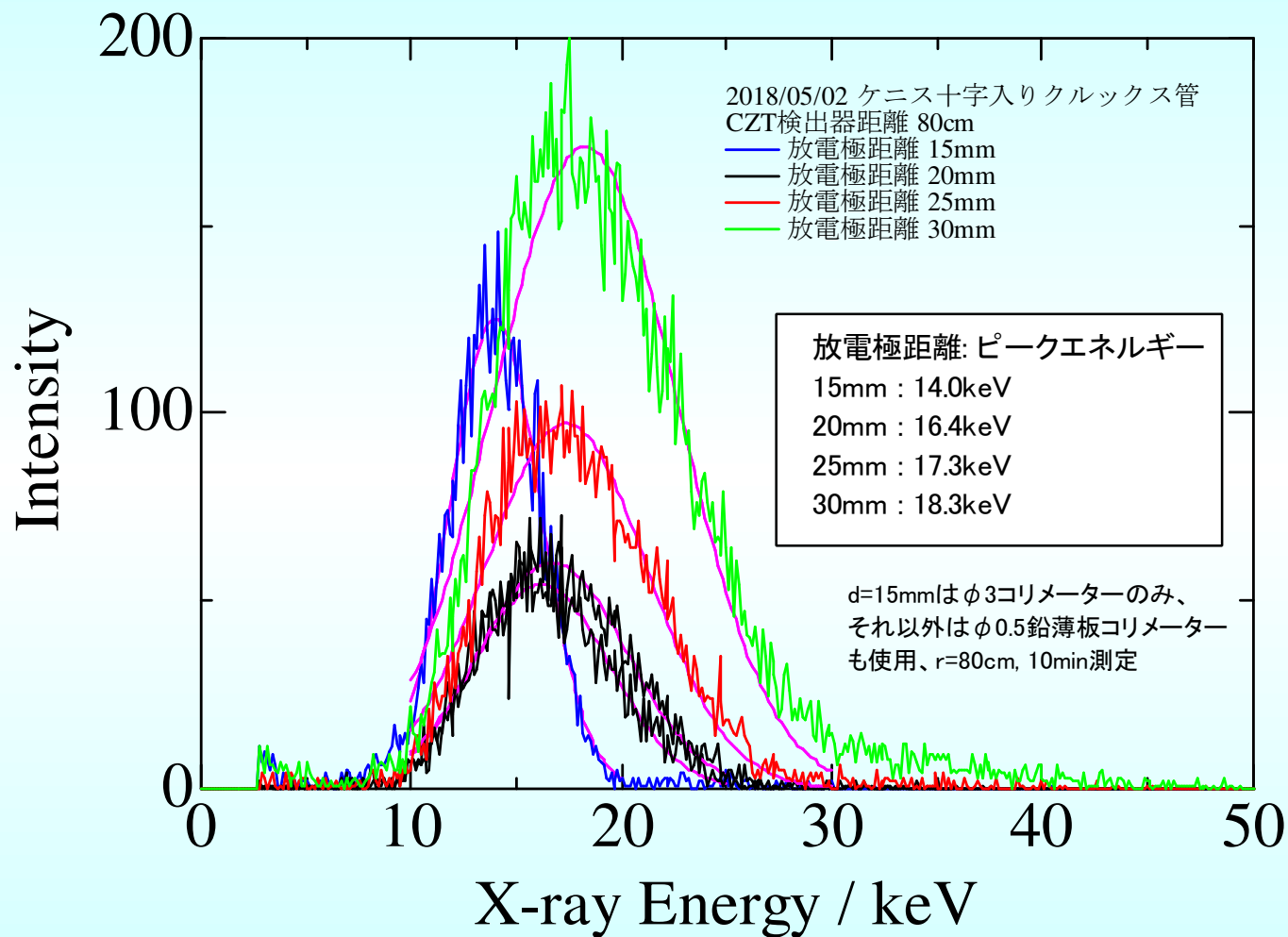
小中高大民国 オールジャパンの
放射線教育ネットワークの形成

放射線知識の
国民的普及

誘導コイルの設定による線量変化



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

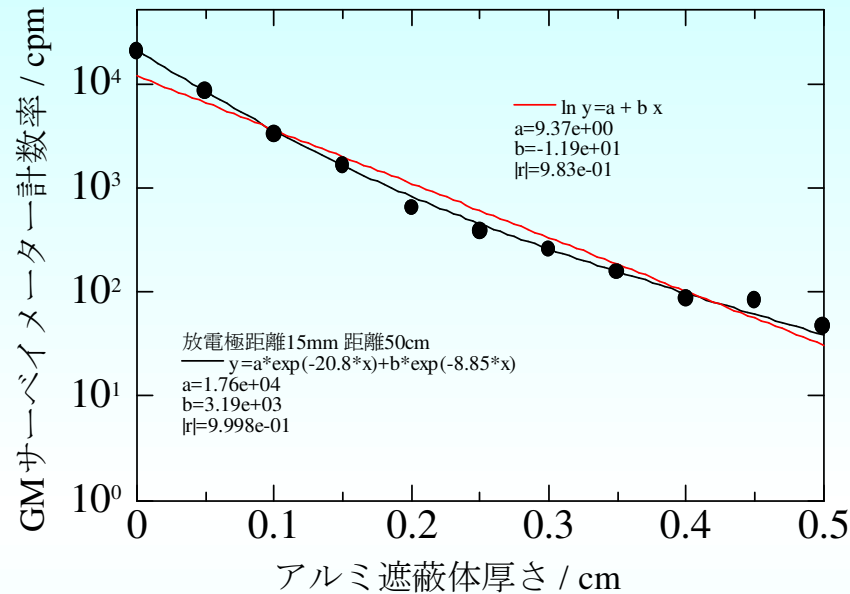


φ3同軸鉛コリメーター
φ2同軸黄銅コリメーター
φ1.0鉛薄板コリメーター
φ0.5鉛薄板コリメーター

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

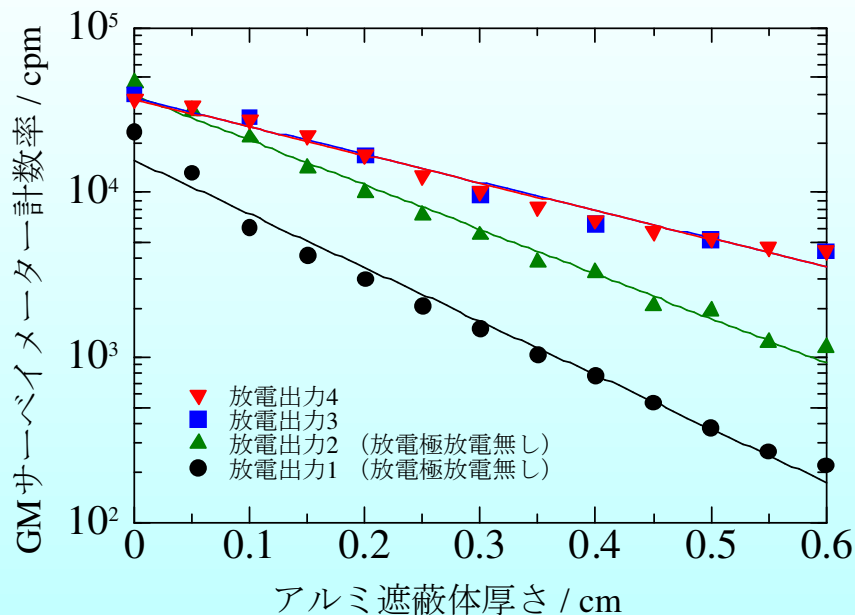
GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価

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。



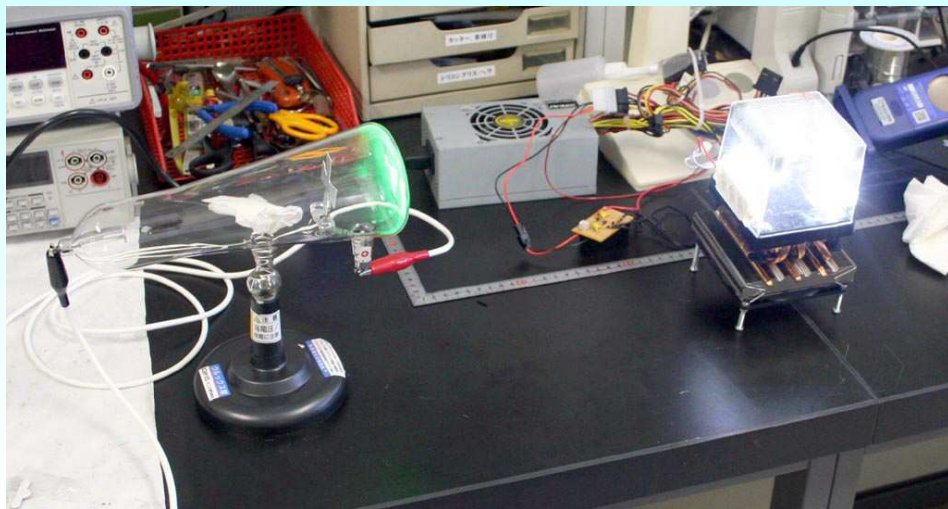
X線エネルギー (keV)	アルミ中の 線減衰係数 μ (cm^{-1})
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

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。

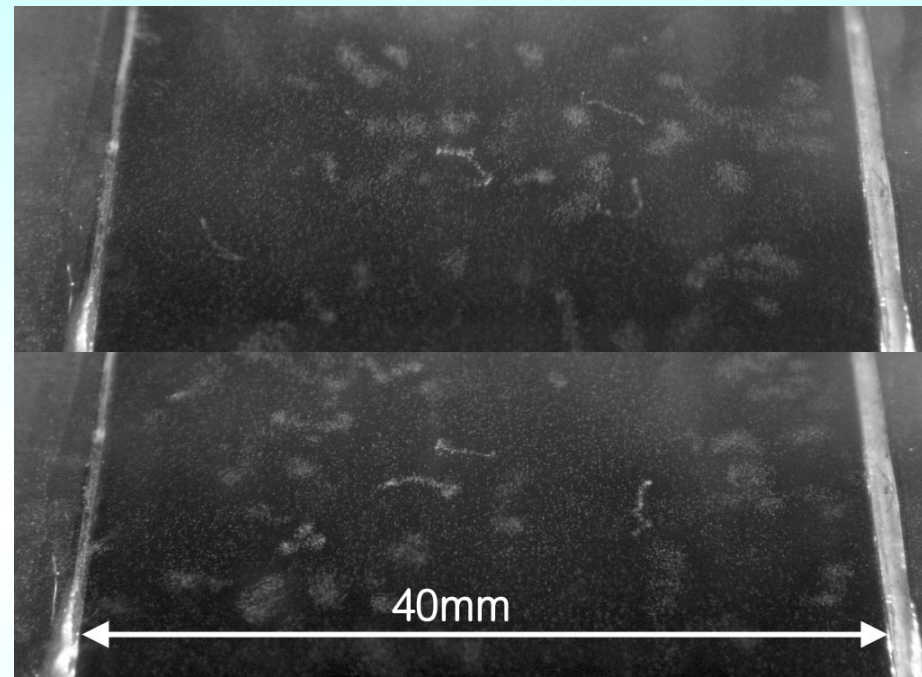


放電出力 (目盛)	線減衰係数 (cm^{-1})
1	7.50
2	6.05
3	3.92
4	3.89

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**

霧箱によるクルックス管からのX線の観察

①

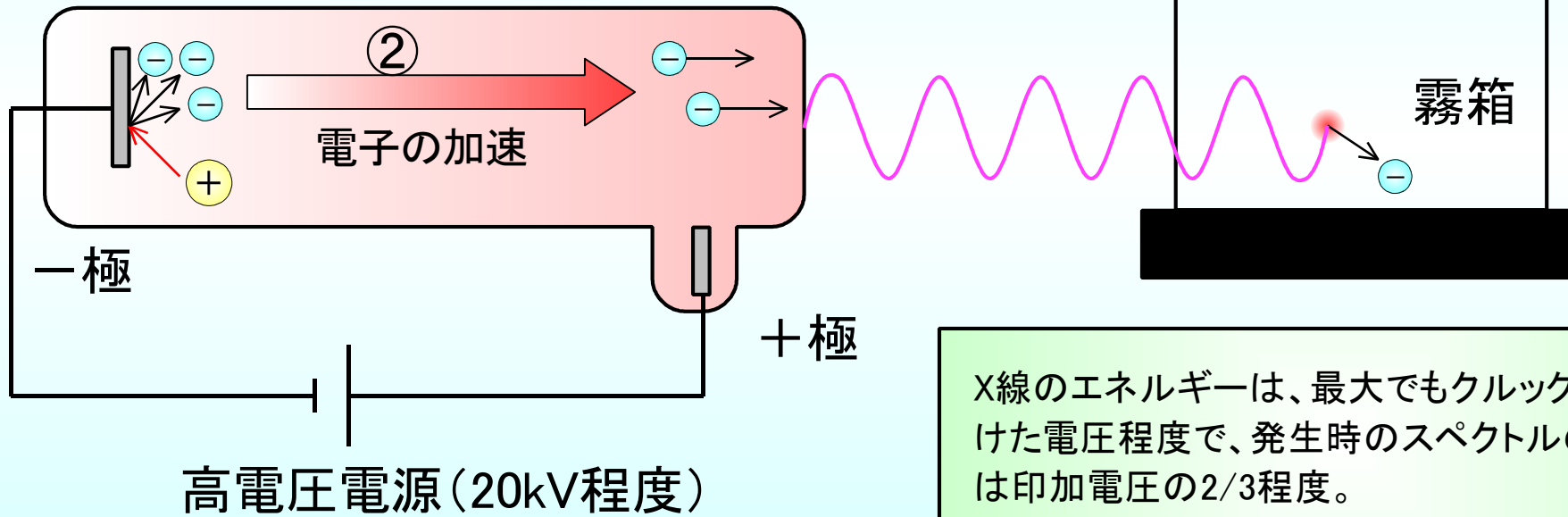
＋のイオンが－極に引きつけられて電子を叩き出す
(二次電子放出)

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

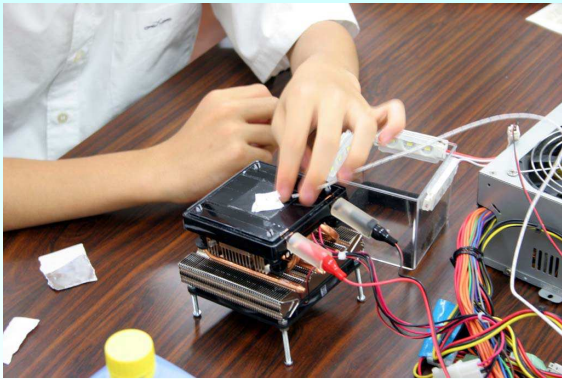
X線は最終的に原子の周りを回る電子を光電効果などで弾き飛ばして(電離作用)、弾き飛ばされた高速の光電子はβ線と同じように振る舞う。



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。

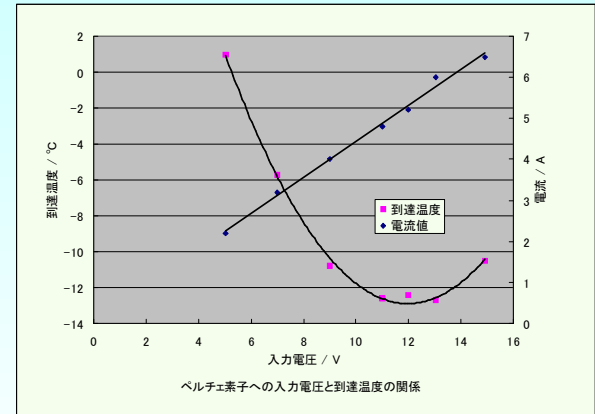
「(7) (ア) エネルギーと物質」単元に即した放射線教育



アルミテープによる熱電対の素子表面への貼付け

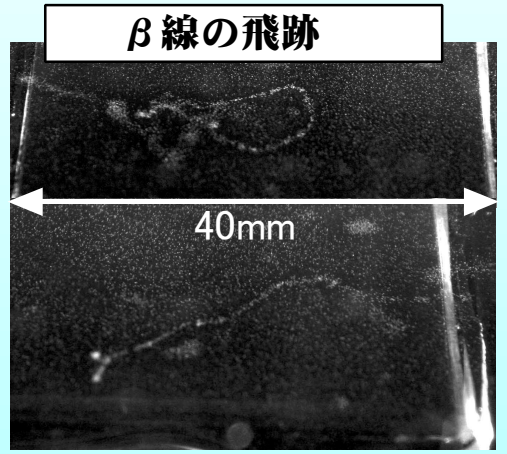
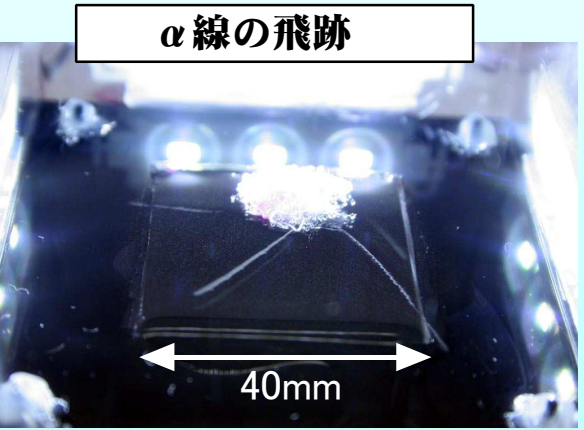
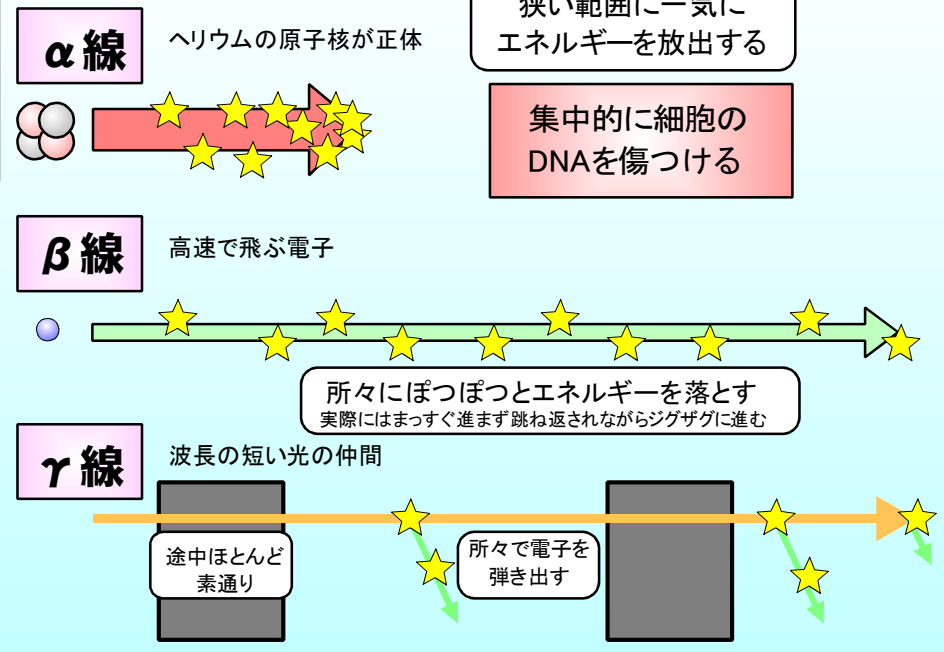


素子上面が冷やされる半面、裏面に放熱しているのを体感

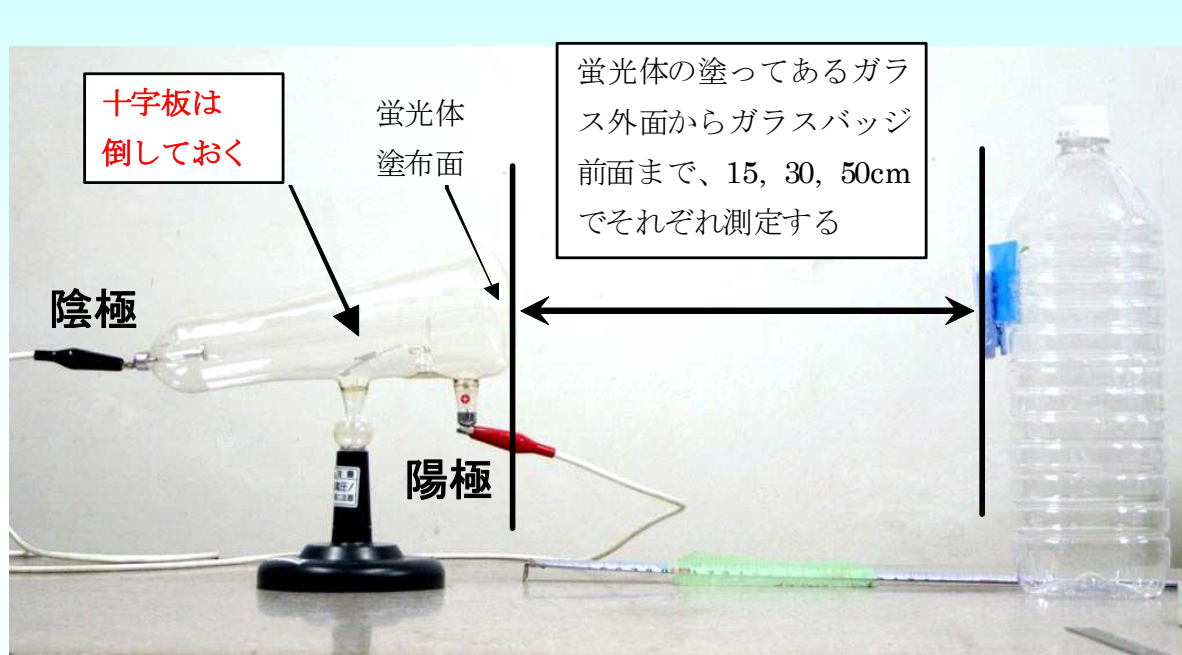


ペルチェ効果は電流に比例し、ジュール発熱は電流の二乗に比例する。

ペルチェ素子は従来からエネルギー教育に於いては多用されており、熱輸送により投入したエネルギー以上の熱を発生する(エネルギー変換効率 COP が1を超える)などの説明が可能。また熱電対と絡めて熱電変換素子としての利用も可能。もちろん、レベルに応じた放射線教育に使用可能である。



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20校からの協力を得て41本のクルックス管について測定を行った。

全国教育現場での線量測定結果

20校で測定した41本のクルックス管について、18本については15cm距離に於いてもHp(0.07)で**検出限界(50 μ Sv)未満**であった。

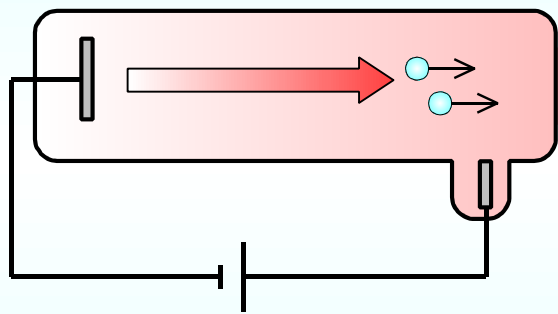
距離の二乗に反比例するとして**フィッティング**を行い、中心のもっとも強い点での線量が均一に広がる整列拡張場を仮定すると、1m距離、10分間の実演で、Hp(0.07)で**50 μ Sv を超えるのは 12本**となった。

もっとも強い学校では、15cm **10分間での Hp(0.07) = 32.58mSv** にも達し、**1m位置に於いても 931 μ Sv** 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 23.46mSv, 1m 位置で 619 μ Sv** にもなるクルックス管が存在した。

クルックス管からのX線の不均一性

正面中心、5cm位置で
1cm線量当量が 100mSv/h
あったとしても...



線量計

① 1m 位置では 1/400
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。
(具体的には現在検証中)

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
の評価は別途行う必要があ
ります

② 20keV のX線は体内で1cmで
半分に減衰して1cm線量当量は
全身への線量を代表しません。
(実効線量と5倍程度の差が出ます)

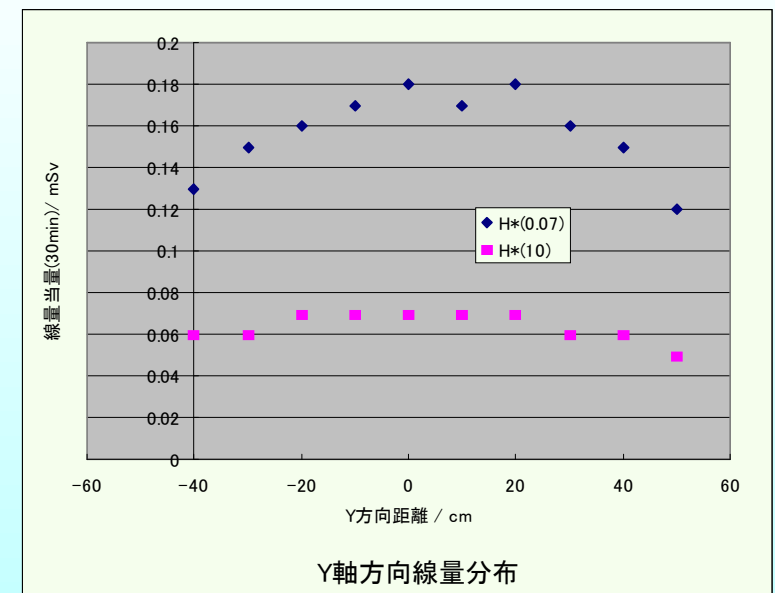
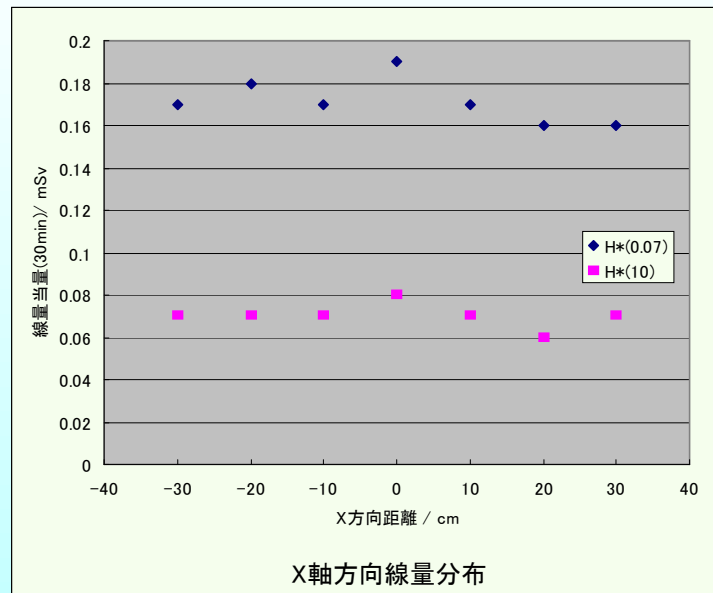
10分の演示で遮蔽無しでも、
全身への実効線量は $10\mu\text{Sv}$
にも満たないと考えられます。

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。



最後に

本プロジェクトの目的は放射線安全管理ガイドラインの策定ですが、趣旨としては、放射線教育を抑制、規制するためのものではなく、安心して実験、教育を行ってもらうためのお墨付き、であると考えております。

またこれにより、全国の放射線教育者の相互ネットワーク形成を目指しております。

**出来る限り沢山の皆様の御協力を
よろしくお願い致します。**