

**2017/11/30 日本放射線安全管理学会  
12月シンポジウム ポスターセッション P-08**

# **クルックス管を用いた放射線教育と 放射線安全管理**

**大阪府立大学 放射線研究センター 秋吉 優史  
日本科学技術振興財団 掛布 智久  
千代田テクノル 谷口 和史  
全中理支援センター 高畠 勇二  
放射線教育フォーラム 宮川 俊晴**

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>



# 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 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。**

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内容

## 2017年6月に公布された新・中学校学習指導要領解説 理科編

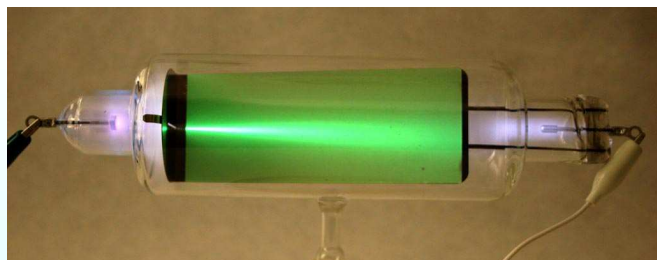
雷も静電気の放電現象の一種であることを取り上げ、高電圧発生装置（誘導コイルなど）の放電や**クルックス管などの真空放電の観察**から電子の存在を理解させ、電子の流れが電流に関係していることを理解させる。その際、真空放電と関連させて**X線にも触れる**とともに、**X線と同じように透過性などの性質をもつ放射線が存在し、医療や製造業などで利用されていることにも触れる。**

**クルックス管を用いた実験を行う際の安全評価が必要**

# クルックス管を安全に使用出来ないか？

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。(\*1-3)

株式会社ホリゾンからは、冷陰極を用いて低電圧で被ばく線量を抑えての陰極線観察を可能としたクルックス管が 22,000円、電源も18,000円と手軽な金額で発売されている(\*4)。低電圧動作が可能であり、専用の電源での 5kV 程度での動作では全くX線の放出が観測されなかった。さらに、20kV程度と同じ電圧で駆動させても他社製品より X線放出量は少ない。



5kV で動作中のクルックス管



9V電池駆動の  
5kV 高圧電源

- (\*1) 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.
- (\*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) 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, 神奈川児立教育センター研究集録\_13 (1994) 21-24.
- (\*4) [http://www.horizon21.co.jp/products\\_detail1\\_4.html](http://www.horizon21.co.jp/products_detail1_4.html)

## 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

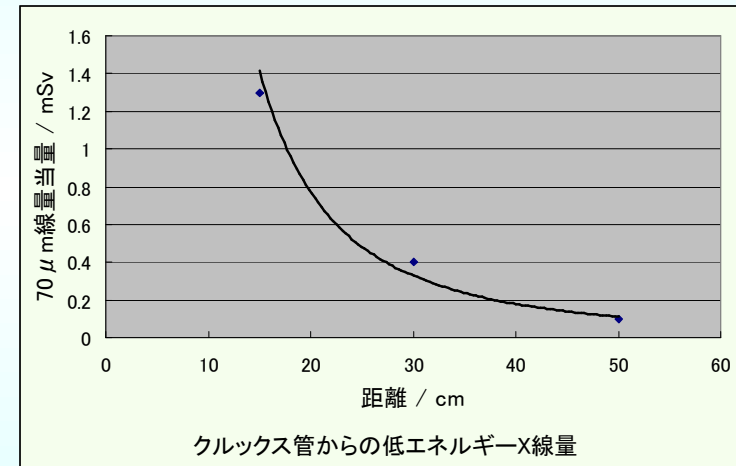
## Advanced Plan

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

# ガラスバッジを用いた線量測定

20keV 程度の低エネルギーX線は、透過力が低く一般的なNaIシンチレーターや電離箱では測定する事が出来ない。



低エネルギーのX線でも測定可能な信頼できる測定手段として、蛍光ガラス線量計を用いた、千代田テクノルのガラスバッジによる環境線量測定サービスを利用した。

日立製作所の電離箱 ICS-1323 には 8.5keV の低エネルギー X線で校正したモデルが存在し、これを使用することでも正確な評価が可能であると考えられるが、入手できていない。

ケニスの誘導コイルの放電針距離20mm(20kV強に相当)、十字板付きクルックス管の十字板を下げた状態で測定。

照射時間は10分間。1cm線量当量は0であったが、70 μm線量当量は有意な値を示した(ES型のガラスバッジではβ線として評価されていた)。



# 測定結果の不安定性

クルックス管からのX線量は様々な測定結果が報告されているが、低エネルギーX線の性質を理解しておらず測定手段が不適切であったり、印加電圧が極端に高かったりすることもあり、報告により値がバラバラである。

使用する装置による差異は、クルックス管の内部に封入したガスがガラス管に吸着されて枯れてしまい、高電圧を印加せざるを得なくなった事などが原因と考えられる。  
しかしながら、同一の装置で同一の設定を用いても測定する度に測定結果が大幅に変化する。

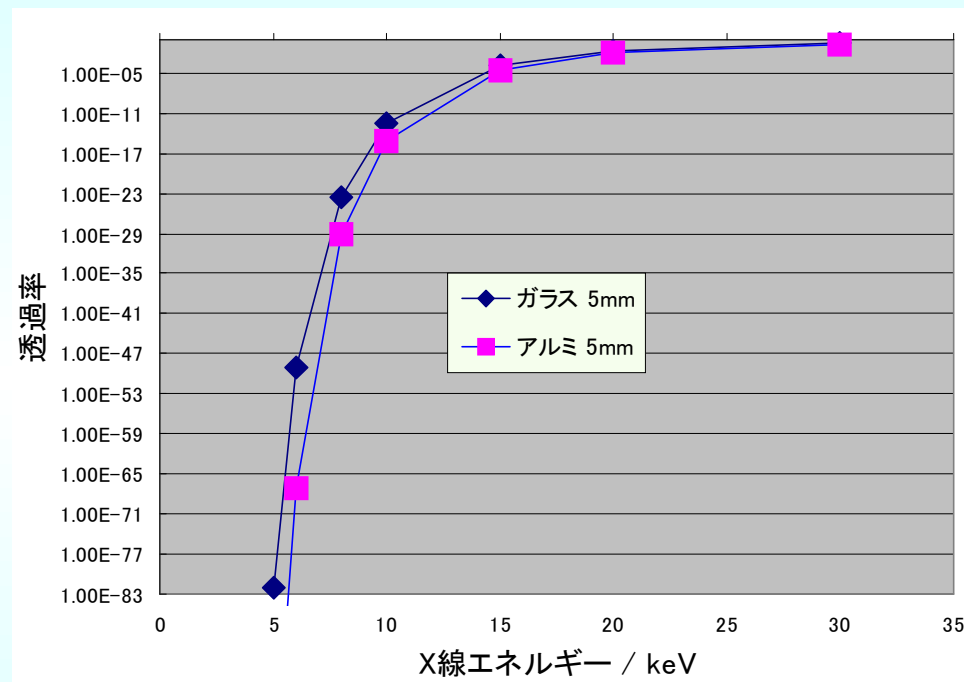
**10-20keV 程度のX線は僅かなエネルギー変動により何桁も透過率が変わるためであると考えられる。**

様々な装置が全国に存在するため、使用する都度教員が測定を行い線量を確認する必要があるが、10-20keV程度の低エネルギーX線の評価は非常に困難である。

GM管での計数率測定と、霧箱による飛程の観察などの簡易な方法でスペクトル評価を行い、線量当量を求められないか？

# 低エネルギーX線の透過率

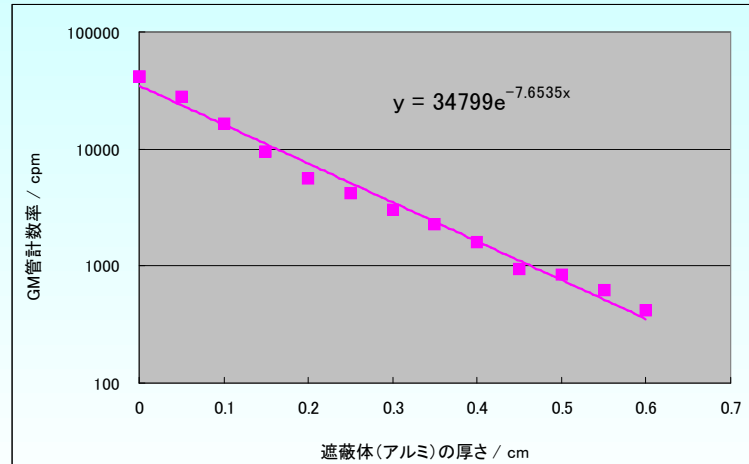
エネルギー (keV)	質量減衰係数 (cm <sup>2</sup> /g)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	厚さ(cm)	透過率	遮蔽体
5	41.5	1.00	1.0	9.48E-19	水
6	23.85			4.39E-11	
8	9.94			4.82E-05	
10	5.051			6.40E-03	
15	1.546			2.13E-01	
20	0.7505			4.72E-01	
30	0.3455			7.08E-01	
5	146	2.59	0.2	1.43E-33	ガラス (コンクリート 等価として計算)
6	87.29			2.31E-20	
8	42.13			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。

# GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価



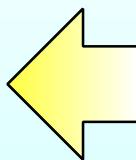
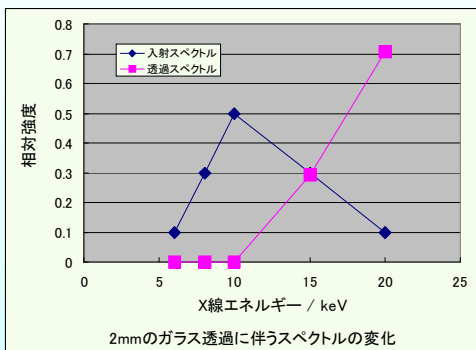
X線エネルギー (keV)	アルミ中の線減衰係数 $\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

ケニス No.121-122 十字入りクルックス管 3C-B  
 ケニス No.120-150 ニューパワー誘導コイル ID-6  
 放電極距離 20mm、十字板は倒しての測定  
 測定は Ranger GMサーベイメーターで、  
 不感時間100  $\mu\text{s}$  として数え落としを補正した

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の前後で、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位置での評価結果線減衰係数は6.51と若干高いエネルギーを示した。



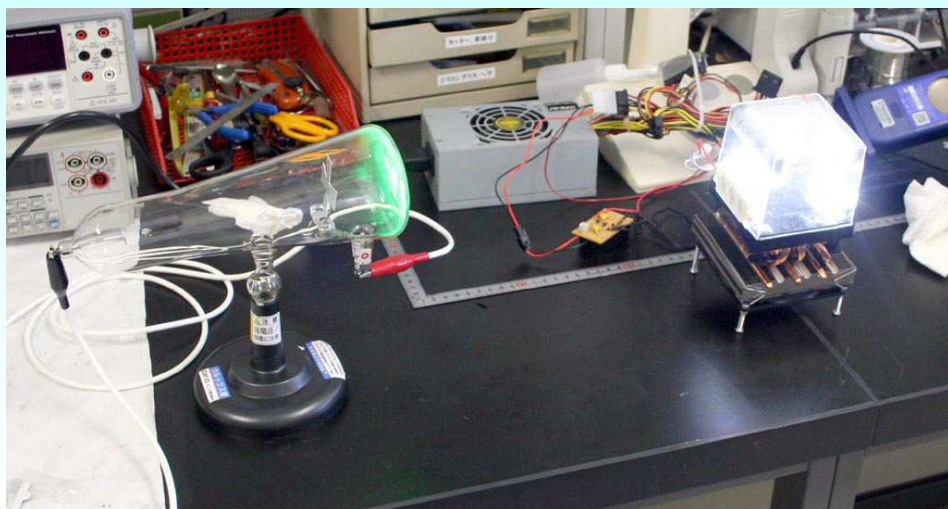
ガラス管を透過する前のX線のエネルギースペクトル(最大エネルギー20keVでその半分の位置にピークを持つ)を適当に決め、2mmのガラスで遮蔽された後の強度を透過率から求めた後、全体の強度が1となるように規格化した。

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。

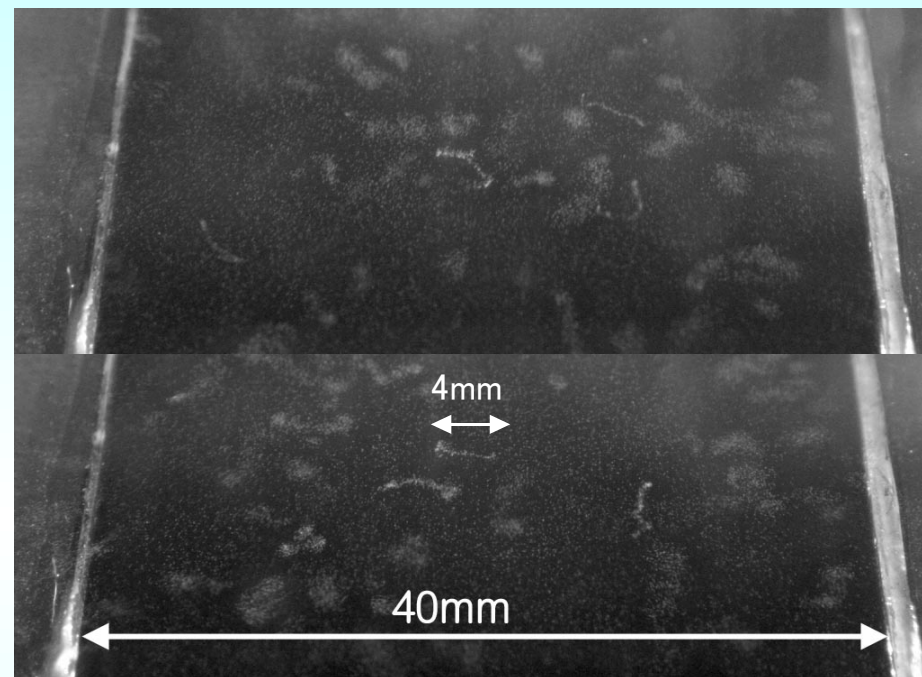
より高エネルギー側では透過率の変化は緩やかとなるため元のスペクトルや、蛍光体の特性X線のエネルギーに左右されると考えられる。



# ペルチェ冷却式霧箱を利用した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  
4mm程度と良く一致している。



クルックス管からのX線によって弾き出された  
光電子のペルチェ冷却式高性能霧箱による  
観察結果(放電針距離20mm)。

エネルギー既知のX線・ $\gamma$ 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線による光電子放出

①

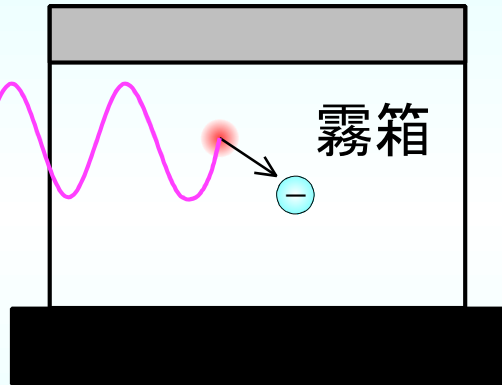
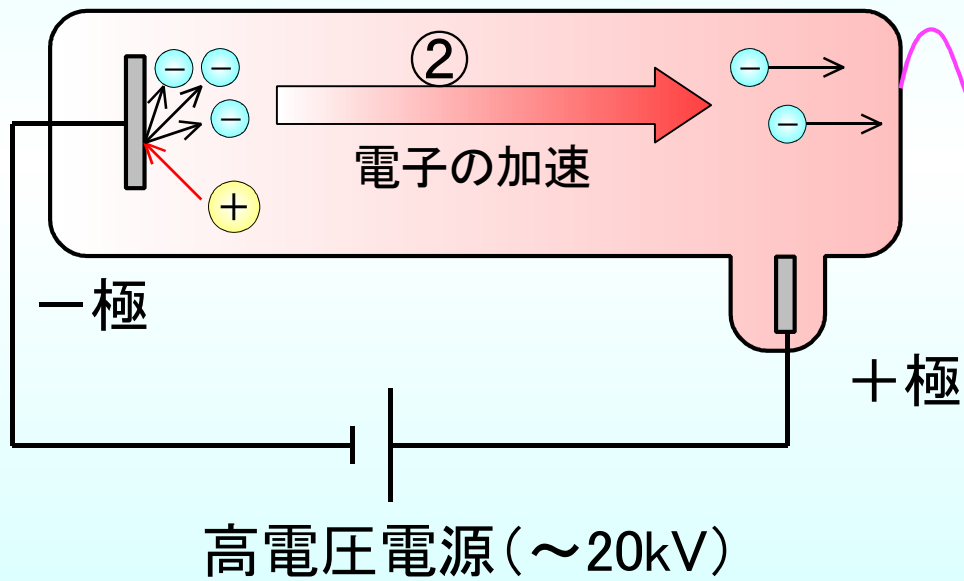
＋のイオンが一極に引きつけられて電子を叩き出す  
(二次電子放出)

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

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電子はβ線と同じように振る舞う。



単色のX線でも飛跡の長さは有限の幅のスペクトルを持つ。

弾き出された光電子のエネルギーは、最大でもクルックス管にかけた電圧程度。実際には、放出されるX線スペクトルのピークは印加電圧の半分程度だがガラスの吸収により大きく変化する。光電子のエネルギーはX線のエネルギーから軌道電子の結合エネルギーの分だけ低くなる。コンプトン電子では角度によってさらにエネルギーは低くなる。

# 今後の課題

## ・GMサーベイメーターの計数値から線量当量の算出

- ・個体差のある GMサーベイメーターの計数値をどのように取り扱うか？  
ガラスバッジで校正は可能であるが、個体毎に実施する事は困難である。
- ・透過率の小さい低エネルギーX線被ばくの考え方  
皮膚近傍の局所的な被ばくとなり、従来のX線の取扱とは大きく異なり $\beta$ 線とX線の間性の性質。  
特に、目の水晶体への等価線量が近年注目されており、非常に重要である。  
→ 保健物理学会などの専門家に確認する必要がある

## ・どの程度の線量まで落とす必要があるのか？

- 2002/05 学校におけるエックス線装置を使用した実験等について: 文部科学省  
においても明確なガイドラインを示していない。

## ・どの程度の電圧まで下げれば、許容できる範囲内に線量を落とせるか

- 装置により大きく放出量が異なる事を加味して十分な安全度を取る。  
必要に応じて遮蔽体の使用も検討する。  
5keVで駆動する装置であれば絶対的に安全であり、ビデオなどの教材を併用した  
授業を実施するののも一つの手段(Basic Plan)である。