

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

H31 教科書検定
H33 全面実施

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、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

ほとんどの教員は放射線に関する教育を受けておらず、測定器も持っていない。測定器を持っていても放出されるX線のエネルギーが20keV程度と低くパルス状であるため、電離箱など一部を除いたほとんどの製品で正しく測定できない。

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

クルックス管からの被ばく線量を下げるには



熱陰極を用いた製品や、冷陰極でも5kV程度の低電圧で駆動する安全な製品が各社から販売されている。5keV程度のX線はクルックス管を構成するガラス管を全く透過できないため、何もしなくても確実に安全を確保出来る。

理科教育等設備整備費等補助金（理振）による補助の対象となっている。また大阪府大のふるさと納税制度により備品提供が可能。

すぐに買い換えが困難な場合は ↓ 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: 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。クルックス管自体が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: 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、軽量型のガラスの水槽を用いるとよい(2mmで1/20~1/50にまで下がる)。
距離を取る: 最も簡単で確実である(距離の二乗に反比例して下がる)。

*ここでは全て70μm線量当量を示す。
実効線量はさらに1/10以下。

10分間の測定での線量*:
25本で $50 \mu\text{Sv @ 1m}$ (外挿により評価)
18本で $50 \mu\text{Sv @ 15cm}$ (検出限界以下)

ほとんどの装置は、1回の実験での実効線量は5μSvにも満たないわずかな量であり、国際的な免除レベル(実効線量10μSv)を下回る。 **その一方で...**

2018年度に、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各教員の手で線量測定を行った。誘導コイルの設定などは普段授業で実験を行っている際の設定とした。

放電出力最小でも、距離1m 10分間で600μSvになる装置が存在した。

最小出力、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、
40μSv/hにまで落ちた。
→ 距離1m、10分間では、0.6μSvに過ぎない

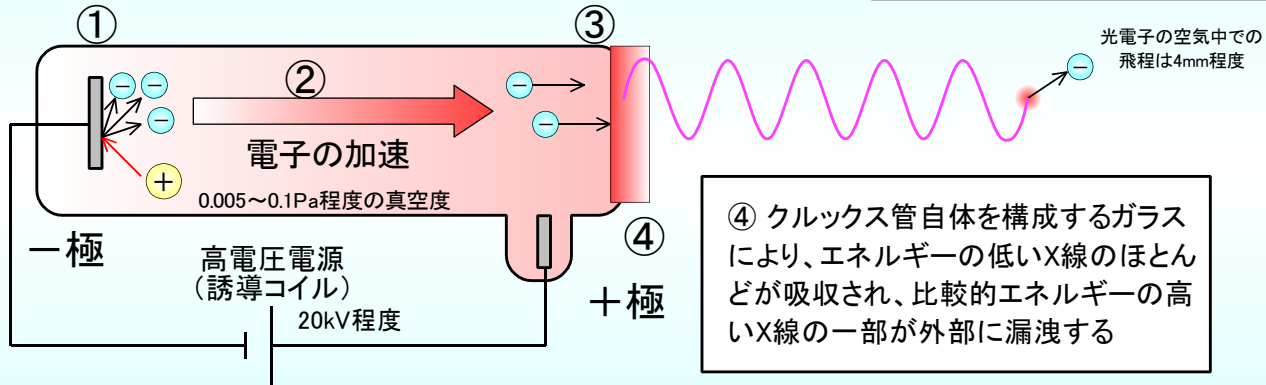
クルックス管からのX線の漏洩

① ガラス管内の空気が電離して出来た+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

電子自体は完全に遮蔽され外に出てきません。

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)、弾き飛ばされた光電子は低エネルギーのβ線と同じように振る舞う。



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う。

放電出力最小でも高い線量が測定されたクルックス管はこの状態だった。放電極距離を20mmに縮めると空中放電が非常に激しい一方、クルックス管に流れる電流は少なく観察が困難であった。

放電極で最大電圧を抑えることが重要

1)2) 印加電圧を下げる、電流を下げる



必ず放電極を取り付ける。

電気的な安全上も必須。

放電極距離は20mm以下にする。

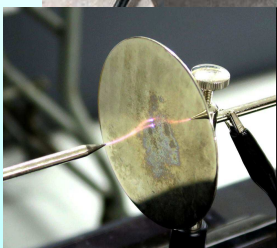
空気中では 1kV で約 1mm 放電

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

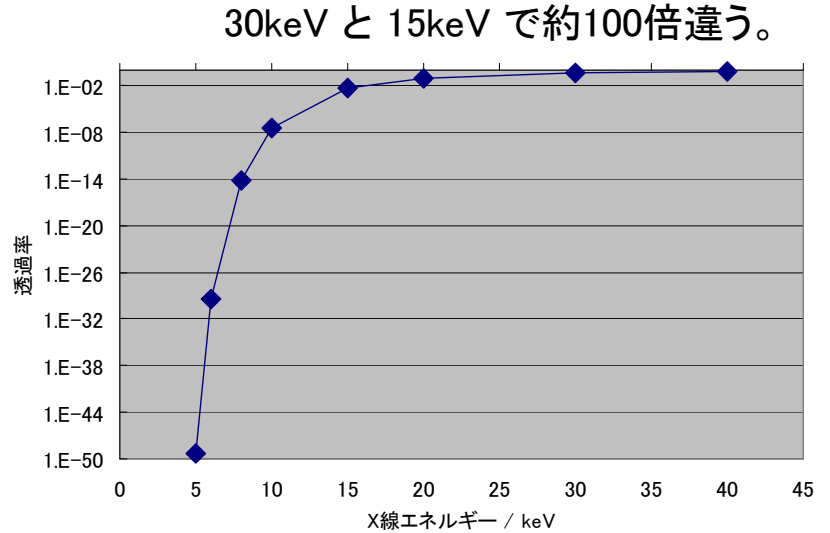
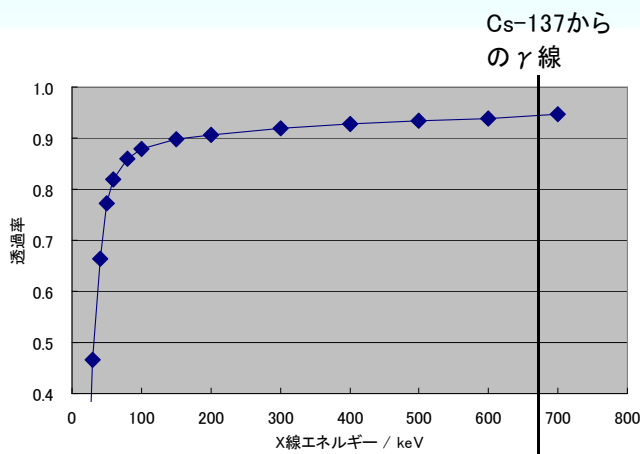
放電極は、一定以上の電圧がかかると空中放電してそれ以上電圧が上がらないようにする、

安全装置



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。

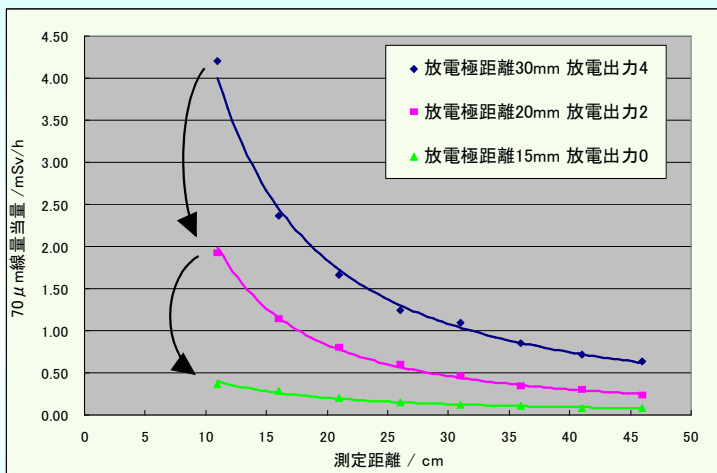


100keV 以上のエネルギーでは
余り大きく変わらない

3mmのガラスに対するX線の透過率

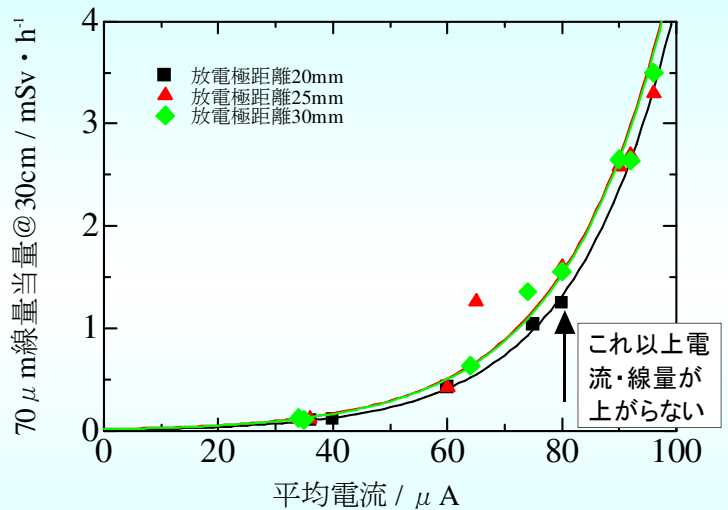
印加電圧、電流、距離依存性

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



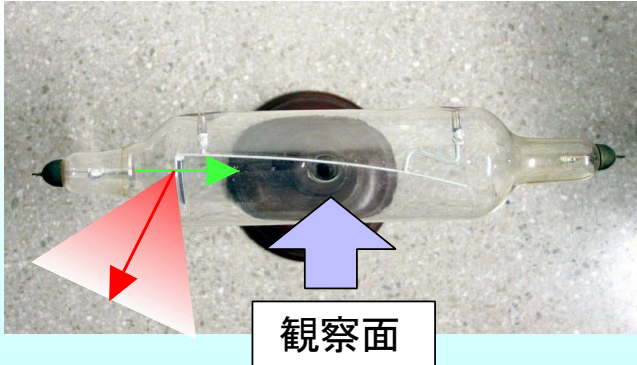
- ・電圧を低く抑えると極端に線量は小さくなる
放電極距離は20mm以下に留める
- ・距離の二乗に反比例して線量は小さくなる
1mの距離では10cmの距離での1/100になる
1mから50cmに近付いただけで4倍になる。

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。

遮への有効性



○計算上20keVではアクリル1cmで半分に減衰し、5mmのガラスで1/50程度に減衰するが、重くて安全な運用が困難である。

○実際はもう少しエネルギーが低いため、アクリル3mmで約半分、1cmで1/3に減衰した。

厚さ1.9mm程度の軽量(1.5kg)のガラスの水槽でも、1/20 ~ 1/50程度に減衰した。軽くて取り回しが良く、持った感じがガラスとは思えないほどであったため、実際の教育現場でも十分実用的に運用可能であると考えられる。

暫定ガイドラインの遵守で十分安全であるが、さらに少しでも線量を下げたい場合のオプションとして非常に有効。

放電出力	Hp(0.07) (μ Sv/h)		透過率 (%)
	遮へい前	遮へい後	
0	600	11	1.8
1	620	12	1.9
2	1300	60	4.6
3	3000	160	5.3

測定距離 15cm, 放電極距離 20mm

厚さ1.9mm ガラス製水槽で遮へい。わずか1356円だった。

<https://www.amazon.co.jp/gp/product/B00W5DSU0C>

スリット入りのクルックス管は、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、この部分を適当な金属板などで遮蔽すると効果的(ここは観察しない)。

クルックス管安全取扱のガイドライン(暫定)

最も確実なのは

・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

このガイドラインの遵守により1回の実験で実効線量 10μ Sv以下に抑えることが可能であると考えられるが、本当に大丈夫か検証が必要 → 2019年度実態調査への御協力を宜しくお願い致します。

ガラスの水槽などの遮蔽体を用いれば、さらに線量を低く下げることが可能。

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。

