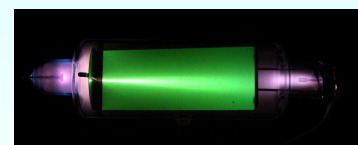


先生、ご存じですか？

理科の授業で使っているクルックス管からは
高い強度のX線が漏洩している場合があります！



現行の教科書にも記載されているクルックス管は、製品によっては 15cmの距離で、 $70\mu\text{m}$ 線量当量率が 200mSv/h にも達する高い線量率の低エネルギーX線が放出されている場合があります。知らないで近付いたりすると非常に危険です。

・20keV程度とエネルギーが低いので普通のサーベイメーターは役に立ちません

でも、心配はいりません！

・ごく基本的な誘導コイルの設定と、距離を取って時間を短くするなどの簡単な運用法の改善で、劇的に線量を小さくすることが出来ます。

本当に大丈夫なのか心配・・・

暫定ガイドラインで本当に問題無いのか、実証試験を行っています。
ガラスバッジを用いた簡単な測定を各学校で行うことが出来ます。詳しくはホームページをご覧ください ↓



教育現場における放射線安全管理の必要性

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。**

2019年度 教科書検定
2021年度 全面実施

放射線が漏洩していることが保護者達にも認識されるようになります。

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。

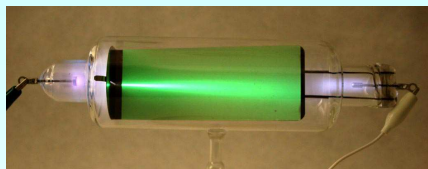
現行の教科書に於いても、理科の教科書を出版している5社全てに於いて、**2年生の電流の単元**でクルックス管による真空放電の実験が記載されています。

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

多くの教員は放射線に関する教育を受けておらず、測定器も持っていません。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に放出されるため、電離箱など一部を除いたほとんどの製品で正しく測定することができません（大幅に小さい線量が表示されます）。

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ます。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、装置固有の安全性で確実に安全を確保出来ます。

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)。

10分間の測定での線量*:

25本で < $50 \mu\text{Sv} @ 1\text{m}$ (外挿により評価)

18本で < $50 \mu\text{Sv} @ 15\text{cm}$ (検出限界以下)

*ここでは全て $70 \mu\text{m}$ 線量当量を示す。

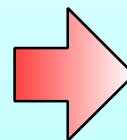
実効線量はさらに 1/10 以下。

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小さな線量計を郵送することにより各教員の手で線量測定を行いました。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で測定しました。

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

放電出力最小でも、距離1m 10分間で $600 \mu\text{Sv}$ になる装置が存在しました。

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、
 $40 \mu\text{Sv/h}$ にまで落ちました。

→ 距離1m、10分間では、 $0.6 \mu\text{Sv}$ に過ぎない

印加電圧を下げるにはどうしたら良いの？



必ず放電極を取り付ける。

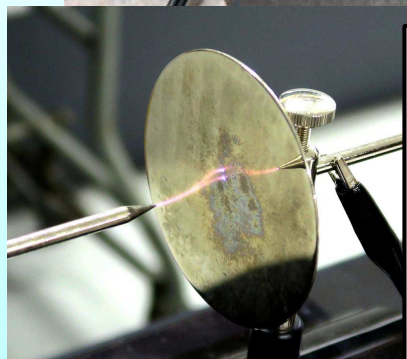
電氣的な安全上も必須です。
単体での販売もされています。

放電極距離は20mm以下にする。

空気中では1kVで約1mm放電します。

放電出力、発振周期を出来る限り下げる。

電子線を観察できる範囲で
下げて下さい。



放電極はクルックス管と並列に接続されており、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、**安全装置です！**

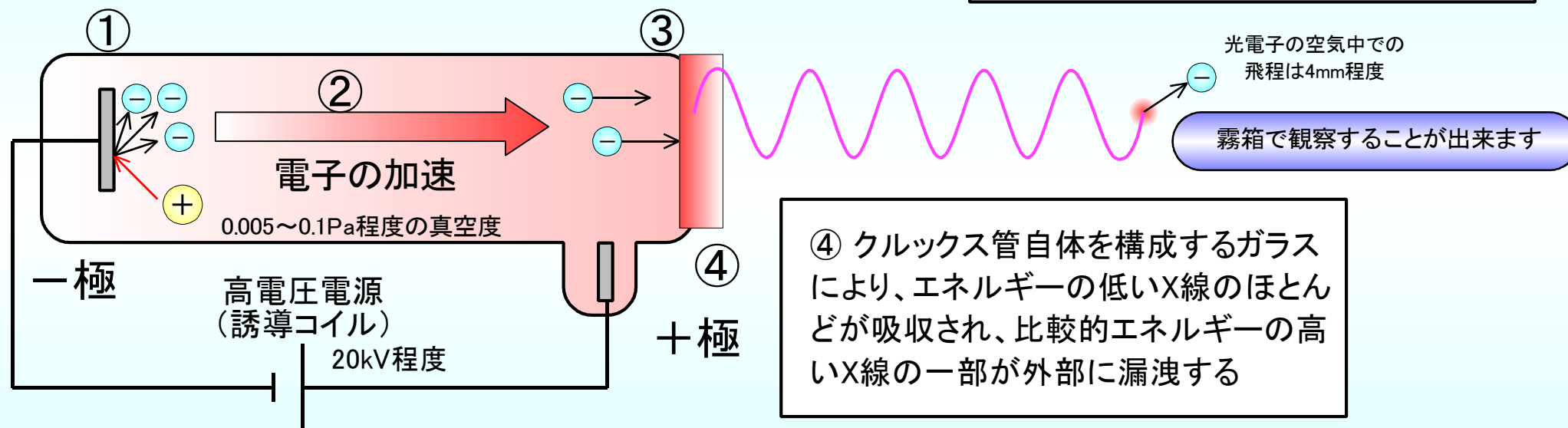
クルックス管からのX線の漏洩

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。



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ります。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います。

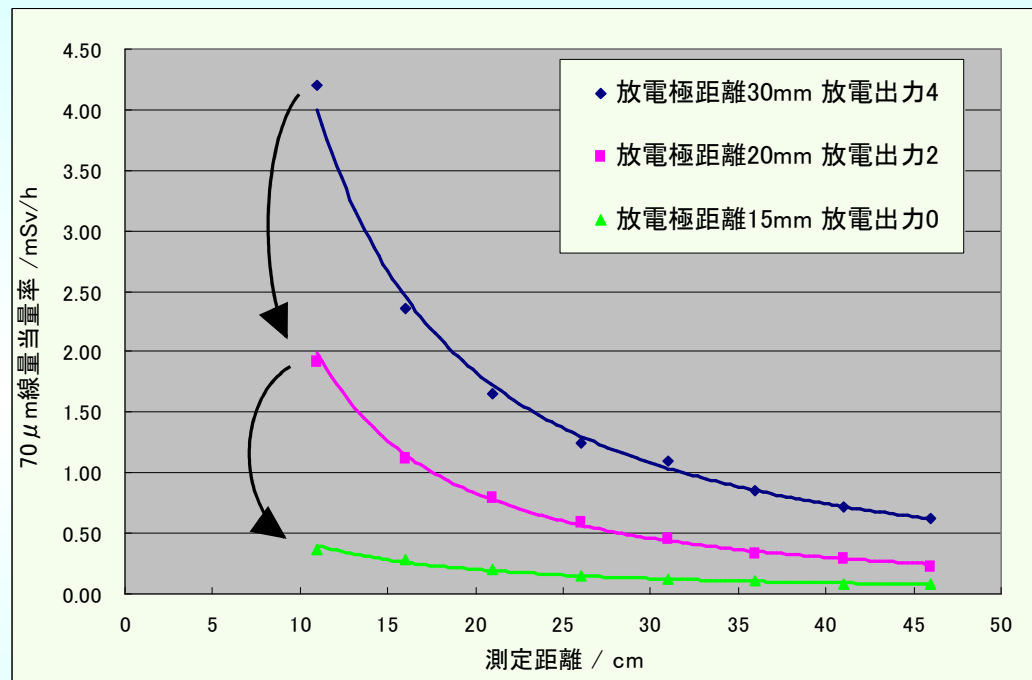
(低エネルギーではわずかなエネルギーの違いで透過率が大きく異なる(15keV→30keVで100倍違う)ため)

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でした。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した。こうなってしまった製品は、買い換えが推奨されます。

放電極で最大電圧を抑えることが重要

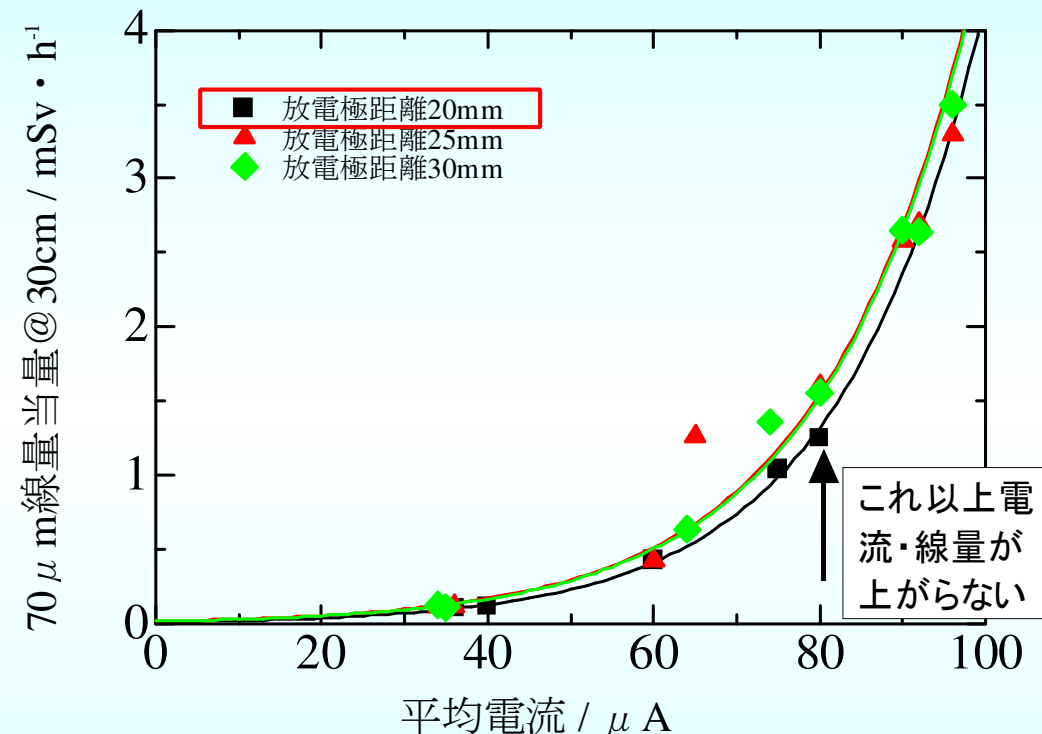
漏洩線量の印加電圧、電流、距離依存性

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以下に留めて下さい。
- ・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の距離での線量の1/100になります。
逆に、1mから50cmに近付いただけで線量は4倍になります。

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て下さい。
その上で、放電極は一定以上に電圧を上げないための
安全弁の役割を果たしています。

遮へいの有効性

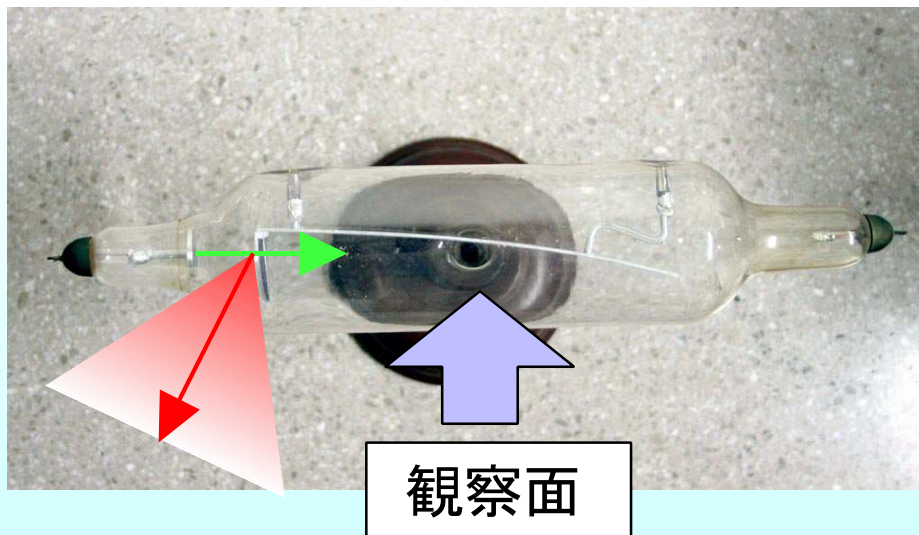


○計算上20keVではアクリル1cmで半分に、5mmのガラスで1/50程度に減衰しますが、重くて安全な運用が困難と考えていました。

○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に減衰しました。

厚さ1.9mm程度の軽量(1.5kg)のガラスの水槽でも、1/20 ~ 1/50 程度に減衰しました。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ます。

暫定ガイドラインの遵守で十分安全だと考えていますが、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です。



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です(ここは観察しないため)。

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円でした。

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

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こと

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

固有安全性を持ち
何も対策する必要がない

- ・誘導コイルの放電出力、発振周期は電子線の観察が可能な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回の実験での実効線量は $10\mu\text{Sv}$ より十分小さく出来ると考えています。しかし、本当に大丈夫か検証が必要のため、継続的な実態調査を実施しています。1mの距離で10分間の実効線量が $0.2\mu\text{Sv}$ 以上であれば評価することが可能です。皆様の御協力を宜しくお願い致します。

繰り返し実演する場合は1回の実演時間を短くすることでその分線量を下げることが出来ますし、ガラスの水槽などの遮蔽体を用いれば、大幅に線量を低く下げることが可能です。

実態調査に御協力頂ける方、ご質問のある方は、大阪府立大学放射線研究センター
准教授 秋吉 優史 (akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp) までご連絡願います。

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

なお本プロジェクトは 2019-2020年度の期間で、日本保健物理学会において「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」として公的に活動しており、2021年度には同学会の放射線防護標準化委員会において、学会標準として取りまとめることを目指しています。

