

2019年 9月 12日
日本原子力学会秋の大会 @ 富山大学

高い漏洩線量を示すクルックス管 に対する放射線安全管理

○秋吉 優史 (大阪府立大学 放射線研究センター)
及び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>



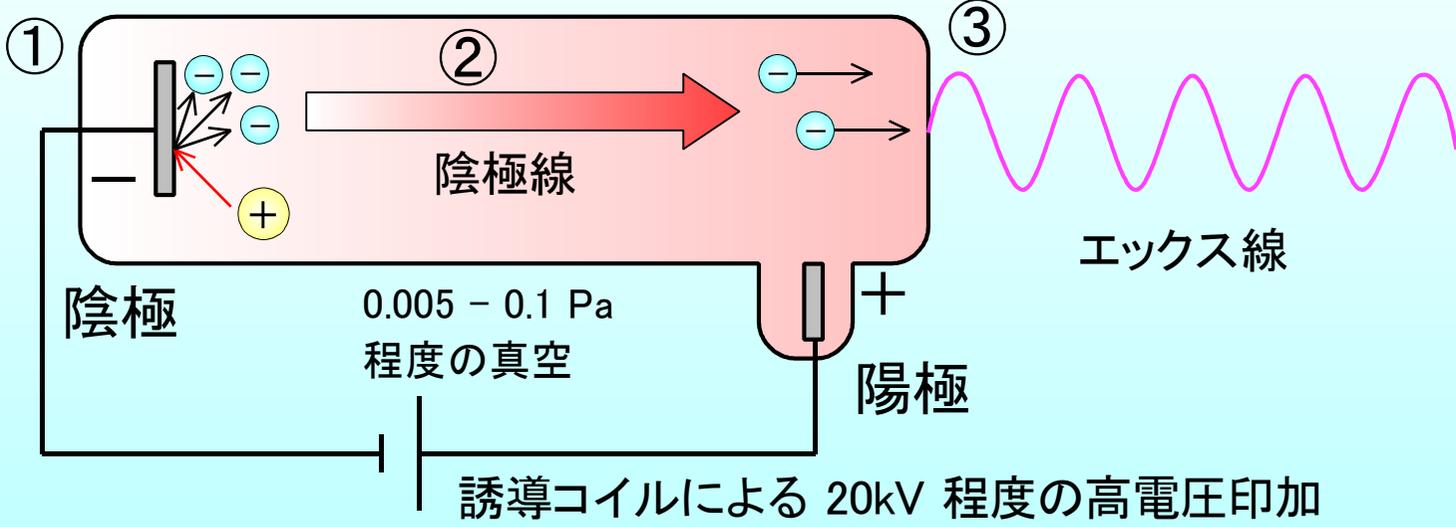
クルックス管とは？

Wilhelm Konrad Rontgen
1895, 真空放電管の研究中にX線を発見
1901, 第一回ノーベル物理学賞を受賞

その後の放射線研究の先駆けとなった歴史的に極めて重要な装置



William Crookes



- ① 陰極から電子が放出される
- ② 加速されて20keV程度のエネルギーの電子ビームになる
- ③ ガラス管壁に電子がぶつかりエックス線を放出する

中高の先生、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できます。

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できます。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。**

H31 教科書検定
H33 全面実施

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。

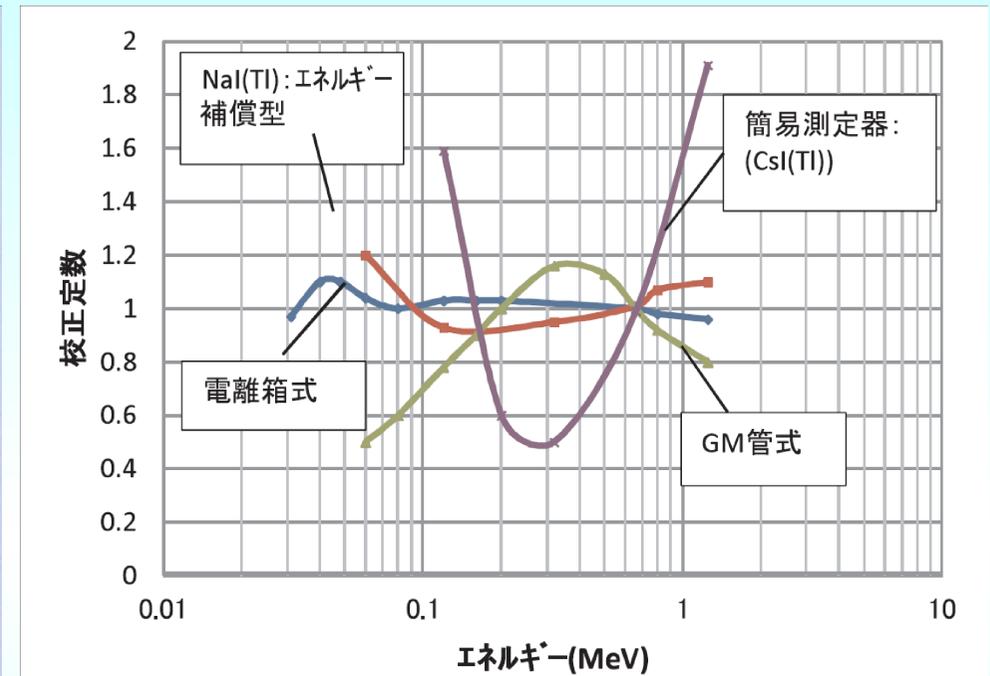
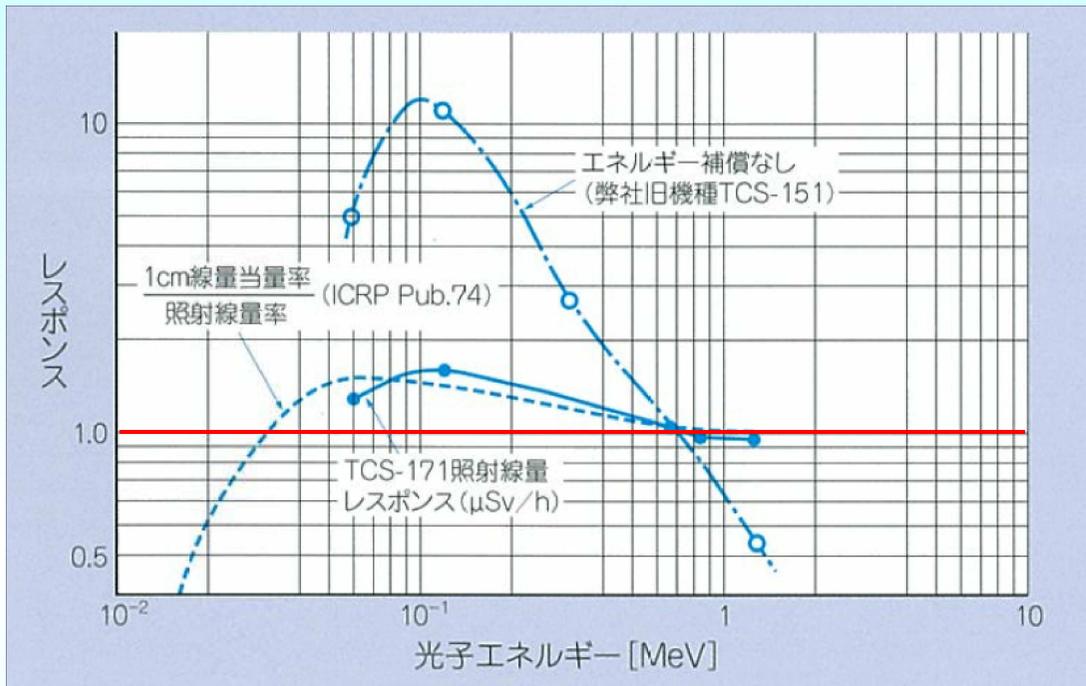
現行の教科書に於いても、理科の教科書を出版している5社全てに於いて、2年生の電流の単元でクルックス管による真空放電の実験が記載されている。

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

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

サーベイメータのエネルギー特性



NaIシンチレーションサーベイメータのエネルギー特性

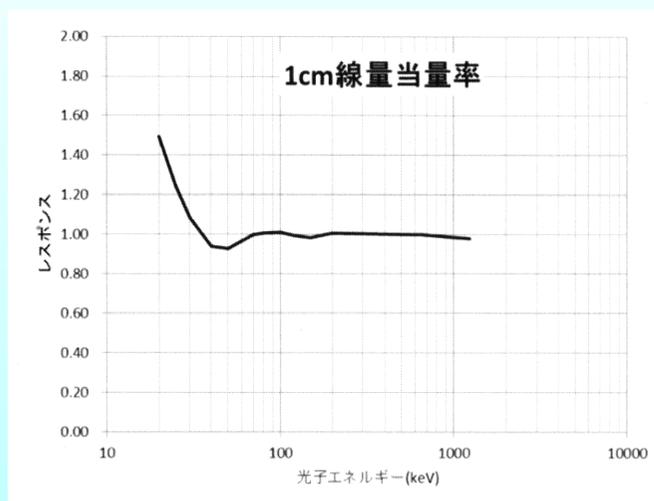
(アロカ TCS-171カタログより)

様々なサーベイメータのエネルギー特性

(放射線計測協会 放計協ニュース No.48, 2011, p6)

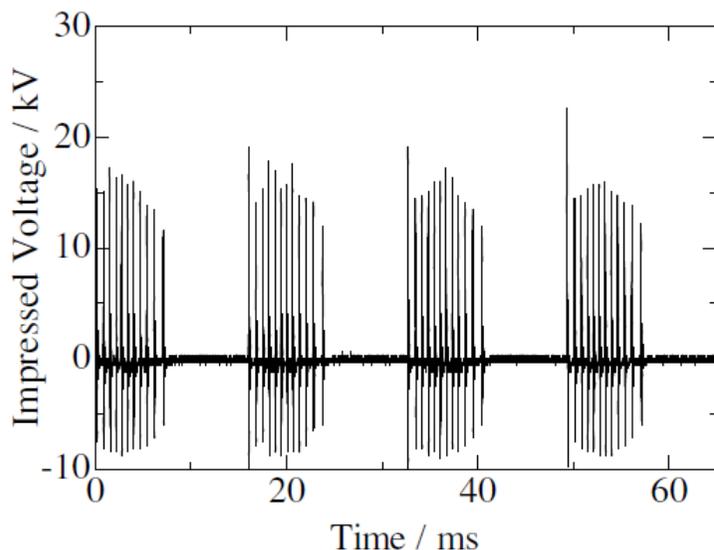
電離箱サーベイメータのエネルギー特性

(日立 ICS-1323マニュアルより)

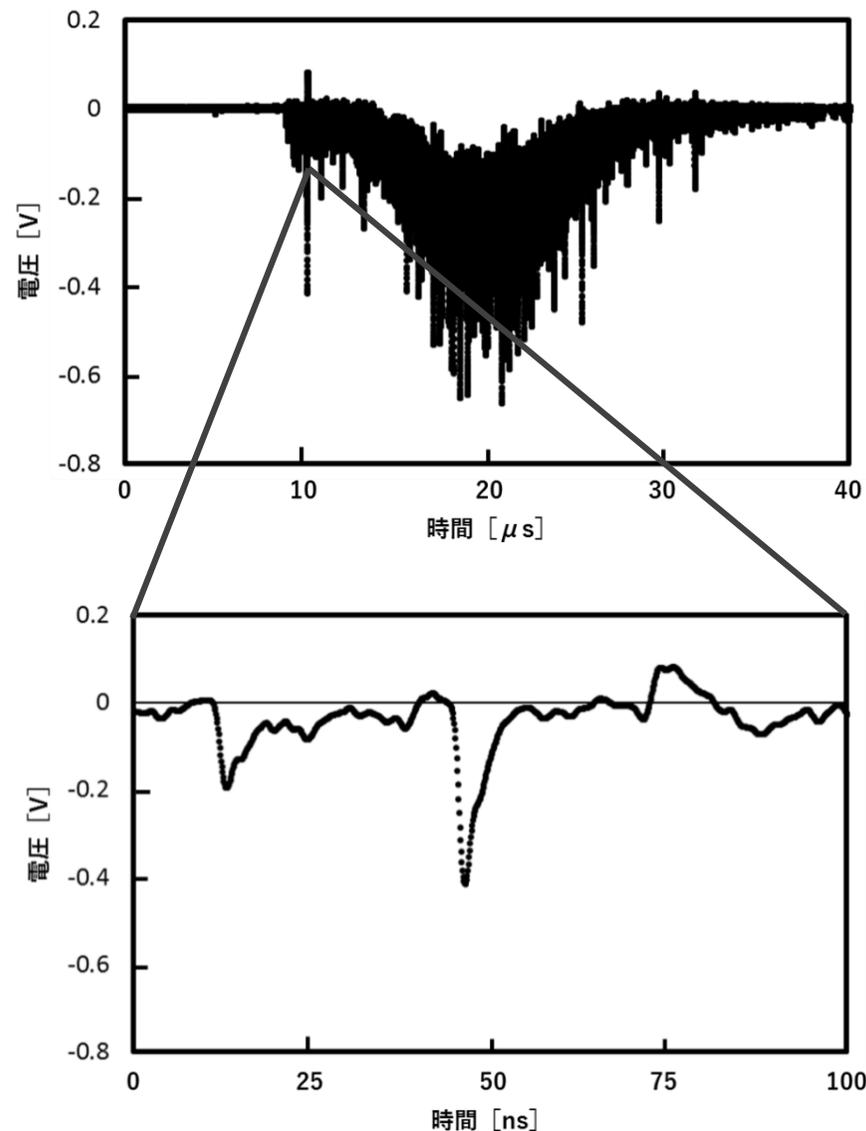


計測結果

- ・多くの信号が重なりパイルアップした信号が確認できた
 - ・信号は約 1 msおきに出力されていた
→高電圧パルスの間隔と概ね一致
 - ・511keVの γ 線を計測した場合と同程度の波高を有していた
- ⇒新たな実効線量算出手法の検討が必要



誘導コイルから出力される高電圧パルス



クルックス管由来のX線を計測した結果

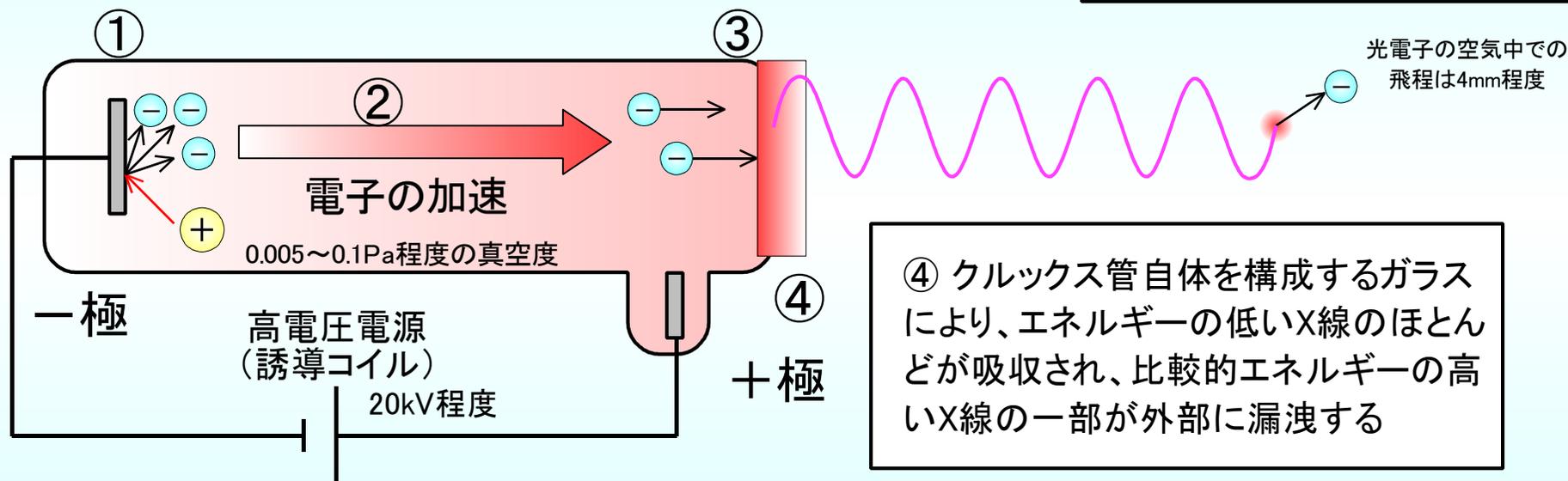
クルックス管からのX線の漏洩

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电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

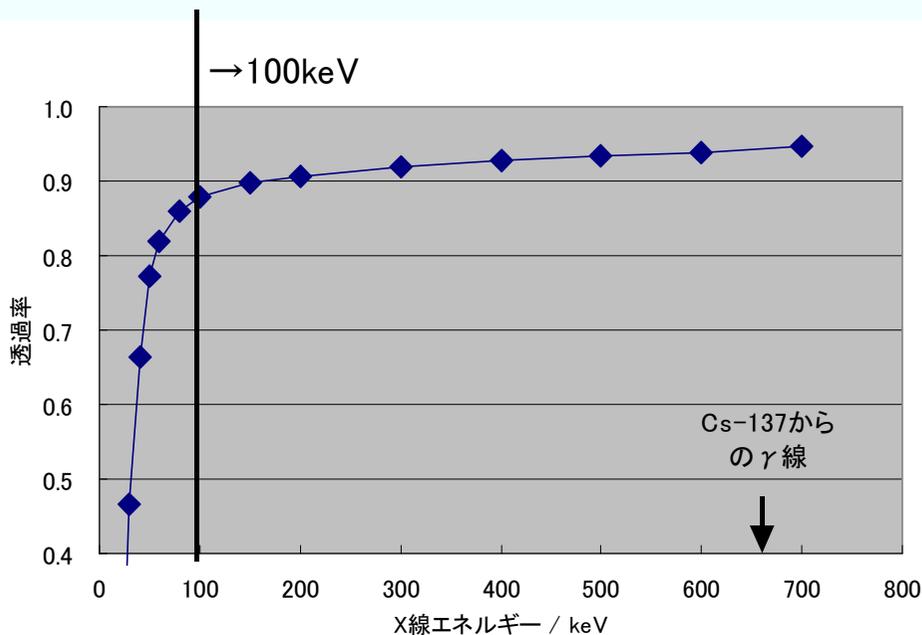
クルックス管に封入されているガスの量が少ない(ガラスに吸着するなどして少なくなる)と、①で陰極を叩くイオンが少なくなるため、電子が飛び出しにくくなり、電流が流れにくくなる。その結果誘導コイルに電磁エネルギーが蓄積され高い電圧が印加されてしまい、電流は小さいが④で漏洩する線量が大きくなってしまふ。

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。

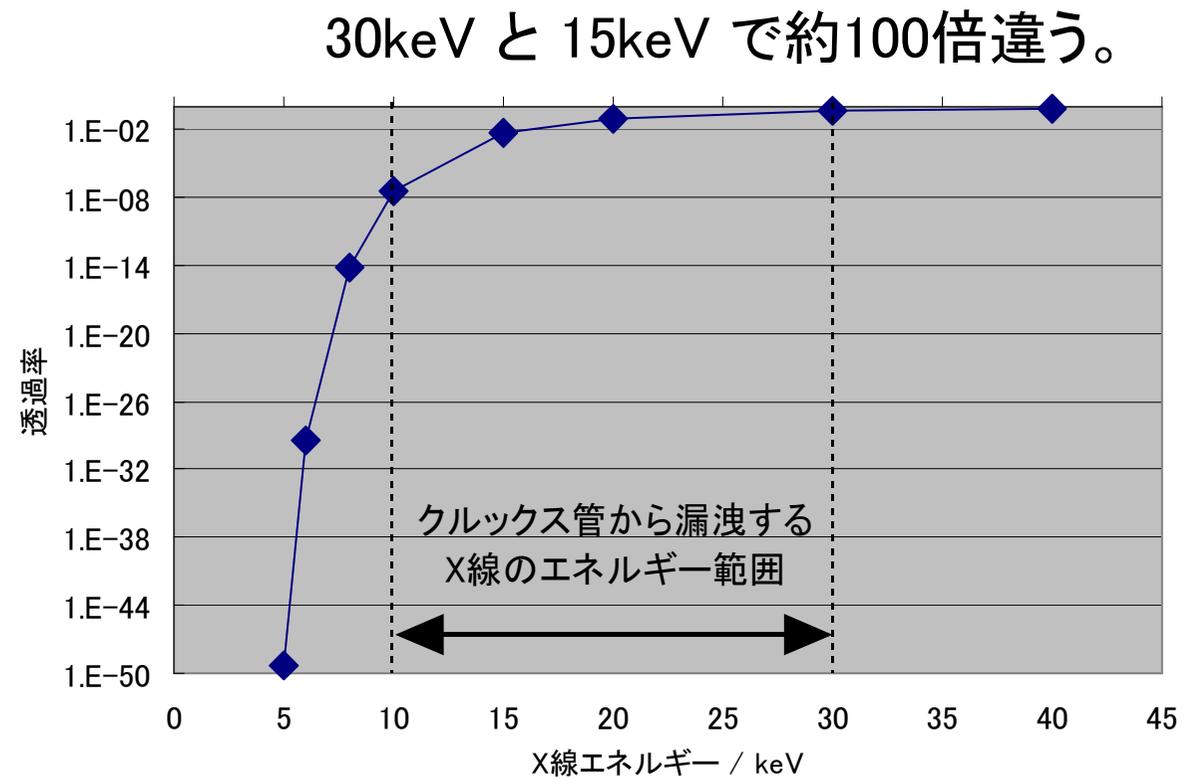
放電極で最大電圧を抑えることが重要

わずかな印加電圧変化での大きな漏洩線量の変化

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

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

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)。

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本を測定した。10分間の測定での70 μ m線量当量*:

25本で < 50 μ Sv @ 1m (外挿により評価)

18本で < 50 μ Sv @ 15cm (検出限界以下)

*実効線量はさらに1/10以下。

ほとんどの装置は、1回の実験での実効線量は5 μ 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 μ Sv)を下回る。

その一方で高い線量を示した装置も存在した

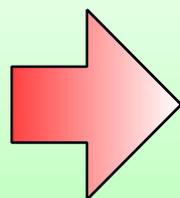
放電出力最低で距離1mでも600 μ Sv以上が検出された装置を現地調査。

(全て70 μ m線量当量)

最低出力、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 μ Sv/h にまで落ちた。

距離1m、10分間では、0.6 μ Svに過ぎない

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。

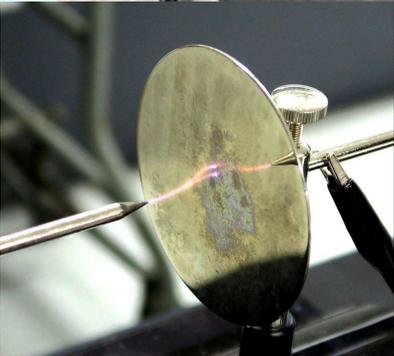
電気的な安全上も必須。

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

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回の実験での実効線量は $10\mu\text{Sv}$ より十分小さくできると考えています。しかしながら、本当に大丈夫か検証が必要のため、2019年度実態調査を実施します。これにより、1mの距離 10分で $2\mu\text{Sv}$ 以上の線量が漏洩していれば評価が可能です。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。

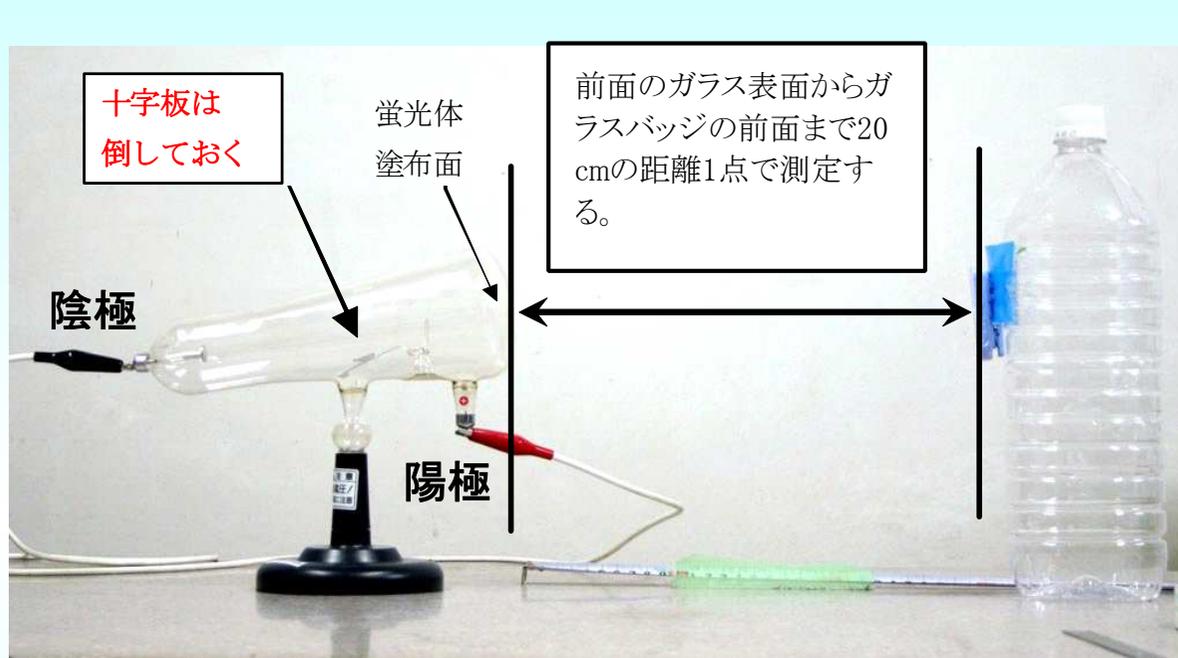
実態調査に御協力頂ける方、ご質問のある方は、大阪府立大学放射線研究センター 准教授 秋吉 優史 (akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp) までご連絡願います。

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> を参照下さい。



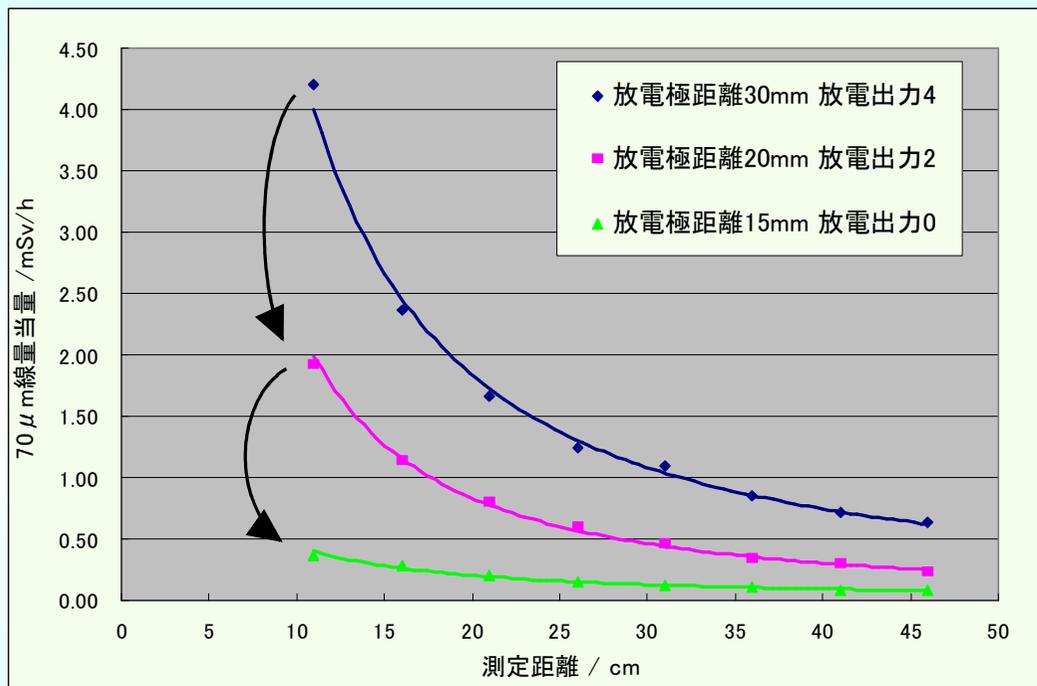
暫定ガイドラインの検証



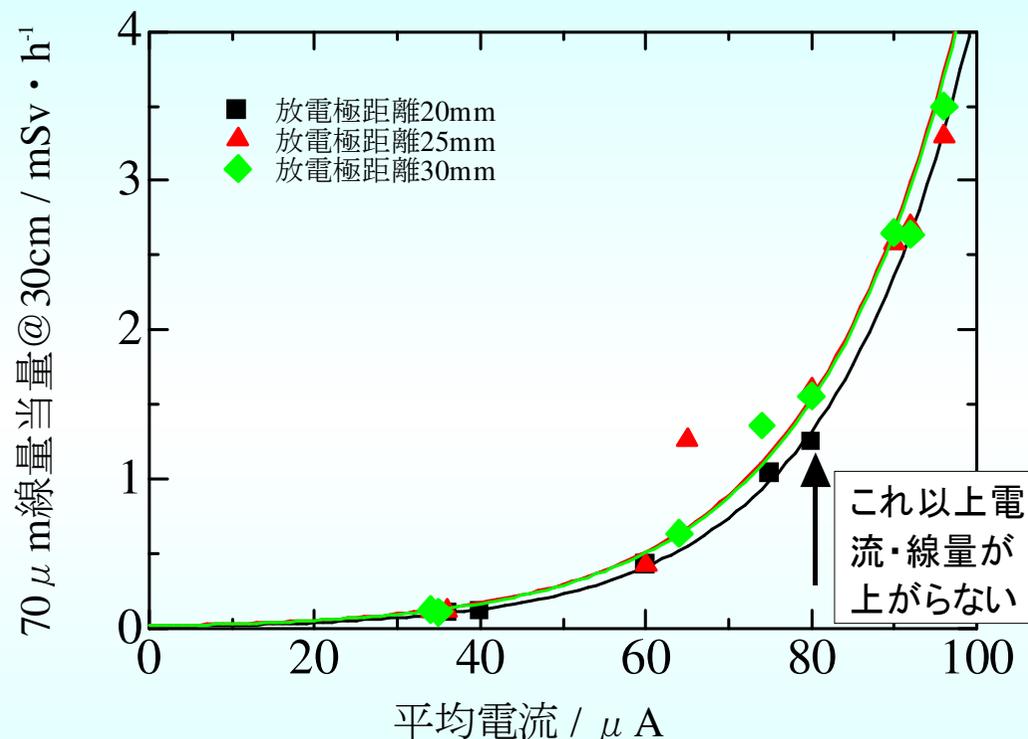
- ・低エネルギーX線の線量とエネルギーを評価可能なガラス線量計を使用。
- ・クルックス管から 20cm の位置で、放電極距離 20mm、放電出力は観察できる範囲で最小、十字板を倒して正面方向で、照射時間 10 分という暫定ガイドラインに準拠した統一したプロトコルを作成し、現場の先生自身の手で測定。
- ・ガラスバッジの発送などは大阪府大から行い、1月ごとに取りまとめて測定を行う。
- ・BGの評価は、Snフィルターで遮蔽された素子により行う。
- ・測定下限が $50 \mu\text{Sv}$ であるが、1m 位置 10分で $10 \mu\text{Sv}$ になる場合、20cm 位置では $250 \mu\text{Sv}$ になるため、十分な検出力と言える。

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



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。

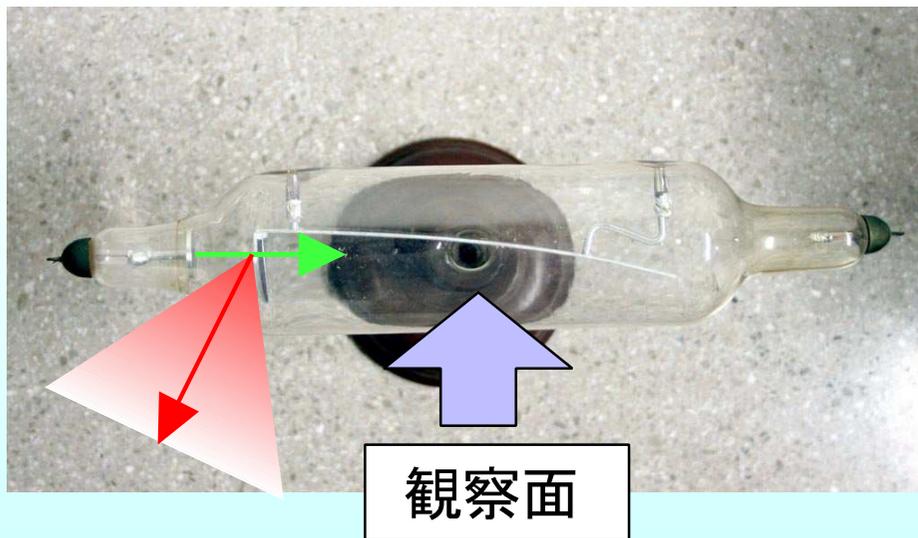
遮への有効性



○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。



観察面

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)。

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>

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。
福島での事故後の線量限度は原子力災害対策特別措置法により定められる(現存被ばく状況)。

X線装置の定義が明確ではない

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>

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」の免除レベルが規定されておらず、放射線安全を確保するための法令根拠が明確ではない。

不均等被ばくであり実効線量評価が困難

20keV X線 は水での半価層が 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、防護量である実効線量の評価は容易ではない。

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

IAEA の GSR part3

計画被ばく状況として教育での放射線曝露を明示(3.1(e))

労働者への規制の範疇に16-18歳の**職業訓練**に伴う線量限度を提示(**実効線量** 6mSv/y, 眼の水晶体等価線量 20mSv/y, 末端部等価線量 150mSv/y) クルックス管が使われるのは一般的な理科の授業であり、これらとは切り離されるものとして考える必要がある。

ICRP Pub36 科学の授業に於ける電離放射線に対する防護

1983年の物であり実効線量当量での記載で **0.5mSv/y**、目や皮膚のような単一の臓器・組織の線量当量5mSv/yとなっており、**個々の授業**ではその **1/10** とされている。

ICRP-Pub101a 公衆の防護を目的とした代表的個人の線量評価

教育に伴う放射線曝露での線量評価でも代表的個人の考え方を導入する。

ICRP-Pub64 潜在被ばくの防護: 概念的枠組み 及び IAEA BSS

ICRP 1990年勧告(Pub60)では**免除**の要件として線量が trivial であること、防護が最適化されていることとされており、具体的には個人線量が **10 μ Sv/y** のオーダーとしている。

NCRP Report No.180 “Management of Exposure to Ionizing Radiation: Radiation Protection Guidance for the United States”

無視可能個人線量として線源か行為あたり実効線量で **10 μ Sv/y** を勧告。