

2019年 8月 6日 日本エネルギー環境教育学会
第14回全国大会 @ 高知工科大学

クルックス管による演示を 行う際の放射線安全管理

○秋吉 優史 (大阪府大)、山口 一郎 (保健医療科学院)、緒方 良至 (名大)、
森 千鶴夫 (名大)、小林 育夫 (長瀬ランダウア)、森山 正樹 (白石中学)、
大西 琢也 (小金井中学)、若松 巧倫 (ケニス)、
宮川 俊晴 (放射線教育フォーラム) ほか 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>



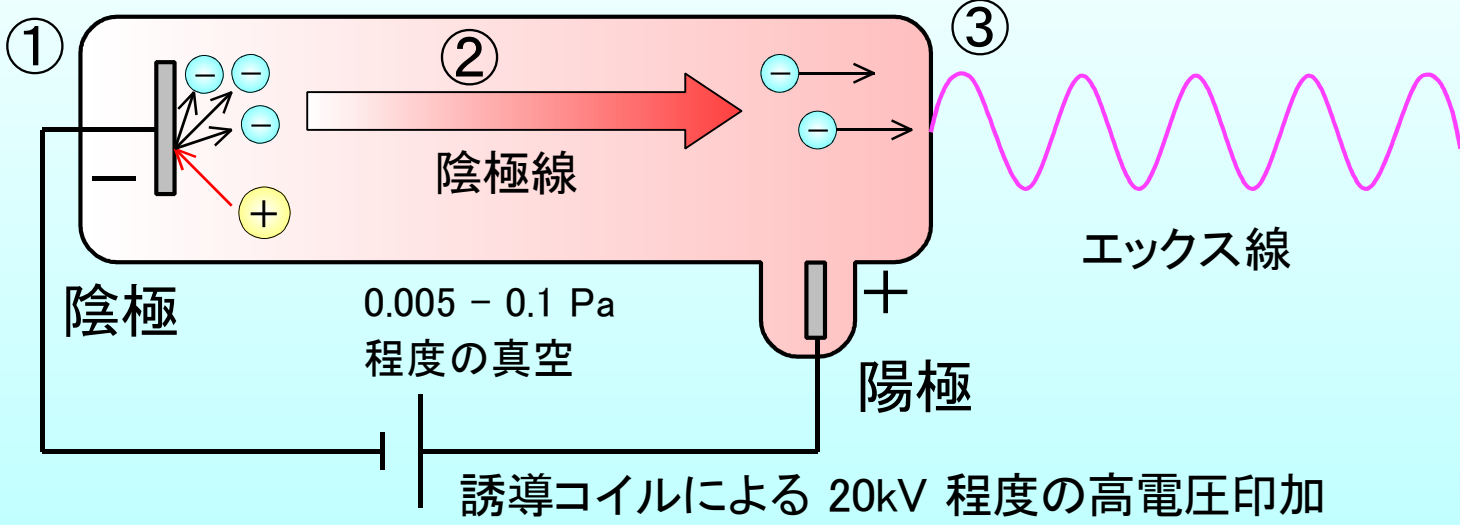
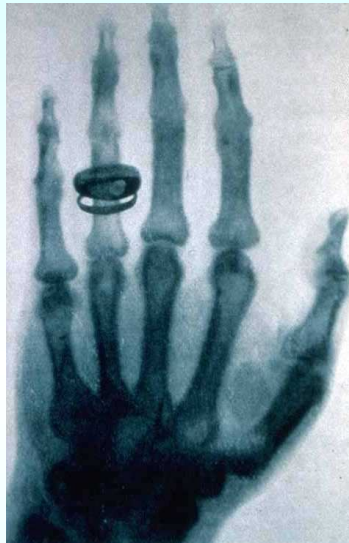
クルックス管とは？

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

？ 考えてみよう

- ① 図39の十字板の影のつき方から、電流のもとなるものはA(-)とB(+)^{のどちら}から出ていると考えられるか。
- ② 図39や図40から、電流のもとなるものはどのような種類の電気をもっていると考えられるか。

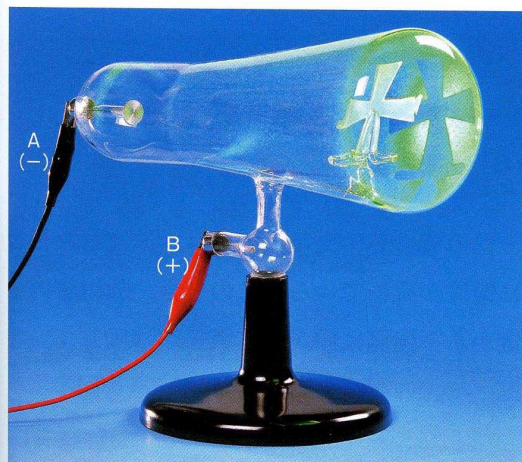


図39 電流のもとなるものを調べる実験①
 図36)の誘導コイルを使って、AB間に電圧を加える。なお、放電管内の気圧は、図37)の放電管Fと同じぐらいである。



図39)も(図40)も、電気の流れは+のほうに引かれているようだ。

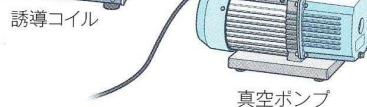
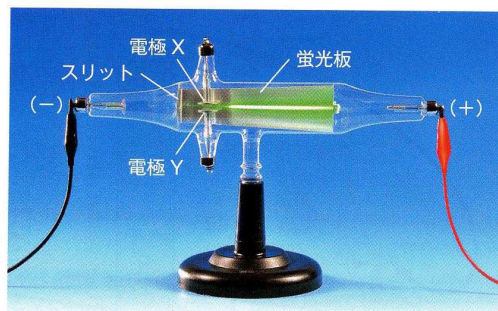
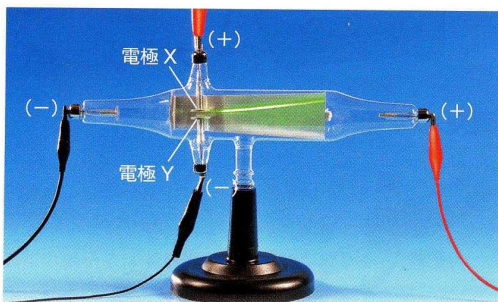


図38 真空ポンプを使って放電のようすを調べる装置



(a) X, Yに電圧を加えないとき



(b) Xを+, Yを-にして電圧を加えたとき

図40 電流のもとなるものを調べる実験②
 スリットを通りぬけた電流のもとなるものが蛍光板に当たると、まわりよりも明るいすが蛍光板上に現れる。

エネルギー

2章 電流の正体

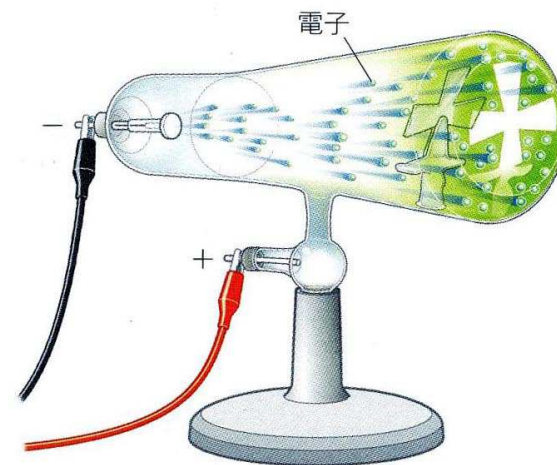


図41 十字板入り放電管と電子のモデル
 一極側から出た電子が十字板に当たり、そのうしろに影をつくる。ガラス壁に衝突した電子は、+極側に移動していく。

- ① 電池や電源装置の一極と接続した電極を陰極^{いんきょく}といい、電流のもとなるものを、はじめは陰極線とよんだ。陰極線は1876年に発見されたが、1897年にその正体が電子であることがわかったので、現在は陰極線のことを電子線とよぶことが多い。

現行の教科書において
 既に取り上げられている。
 (2016年啓林館中学2年理科)

現在の学習指導要領では、電流の正体は電子の流れであることの説明に使われている。

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、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

クルックス管を安全に使用出来ないか？

クルックス管は現在既に理科教育現場で用いられているが、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線が放出される。しかし、放射線が出ていることを知らずに使用している教員も居る。

5kV程度の低電圧で動作し、外部には一切X線の漏洩のない絶対的に安全なクルックス管が教材メーカーから1種類につき5万円程度で販売されている。



5kV で動作中のクルックス管



9V電池駆動の
5kV CW高圧電源

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を活用した「つばさ基金」でのプロジェクトにより機材提供が可能。

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安全な実験体系を極めて簡単に構築可能。

ここで話は完結する

Advanced Plan

- 1) 経済的理由により古い装置を用いざるを得ない
 - 2) 放出されるX線を活用した発展的な実習を実施
- いずれの場合も最低限度のX線量に抑えて、安全に実験を行える実験体系を構築する必要がある。

クルックス管プロジェクトの目的

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。

原発事故など以外での一般公衆の被ばくは想定されておらず、規制もされていないため、子供達の安全を確保するための規準が無い状態。どの程度の線量であればよいと教員が判断できない。

20keV 程度とエネルギーが低く測定が困難

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はおろか、放射線計測で信頼されている NaI シンチレーション式サーベイメータもエネルギーが低すぎて実態とかけ離れた値が表示される。→ 詳しい教員は手持ちの線量計で測定して、小さい線量を見て安心してしまう

装置によって大きく線量が異なる

戦後すぐの頃の装置が問題無く使える場合もある一方で、ごく最近購入した装置でも高い線量を漏洩している場合がある。メーカーでも状態を完全にコントロールできていない。

→ 測定を行わないと自分の使っている装置が危険な物かどうか判別できない

進捗状況

Task 1: 線量計測

研究室では低エネルギーで校正された電離箱を用いて、また教育現場においてはガラスバッジを郵送しての測定により、正確な測定が可能。
印加電圧と電流、線量の相関を現在評価中。
箔検電器による教員自身による測定法の開発中。

Task 2: 運用方法の検討

2018年夏に実際の教育現場における漏洩線量の実態調査を実施した。ほとんどの学校での安全が確認される一方でかなり高い線量を漏洩する装置が発見された。追加の検証により電源装置の設定で安全に使えるようになることが明らかとなった。

暫定ガイドラインの策定

暫定ガイドラインを遵守した場合の安全性の検証(第二期実態調査)

Now!

Task 3: 線量評価とガイドライン

日本保健物理学会において、専門研究会を設立(2019-2020年度)。法令上の問題点やエネルギーが低く透過力の小さい低エネルギーX線の実効線量評価を行う。研究会終了後2021年度に、学会標準として運用ガイドライン、測定法、Q&A等を取りまとめる。

原子力規制委員会

2019年度放射線安全規制研究戦略的推進事業に応募し、面接まで進み高い関心を得たが「管轄外」とのトップの判断。

文科省

- ・2018-2020年度科研費基盤C「新学習指導要領に準拠した総合的放射線教育コンテンツの開発」(3年合計442万円)採択。
- ・クルックス管を用いた実験自体を文科省としては推奨しているわけではないとの立場。
- ・学会標準化までまとめ上げた内容は、周知を行って貰える

クルックス管からの被ばく線量を下げするには

- 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

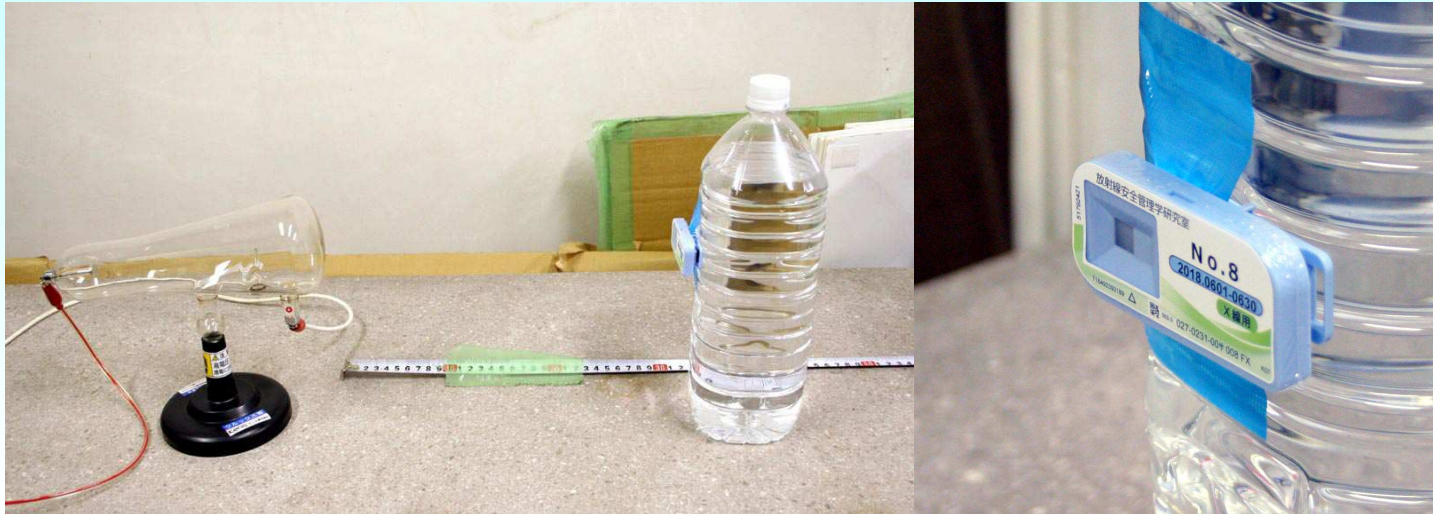
放射線防護の
三原則

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。

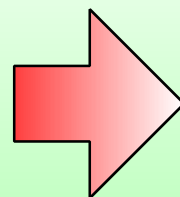
ほとんどの装置は、1回の実験での実効線量は5 μ Svにも満たないわずかな量であり、国際的な免除レベル(年間の実効線量10 μ Sv)を下回る。

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



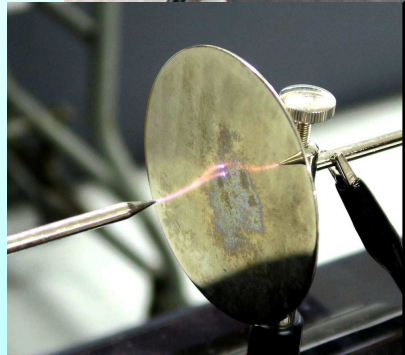
陰極

放電極距離

陽極

円板側が陰極、
針状の方が陽極

放電出力



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

**必ず放電極を
取り付ける。**

電氣的な安全上も必須

**放電極距離は20mm以下
にする。**

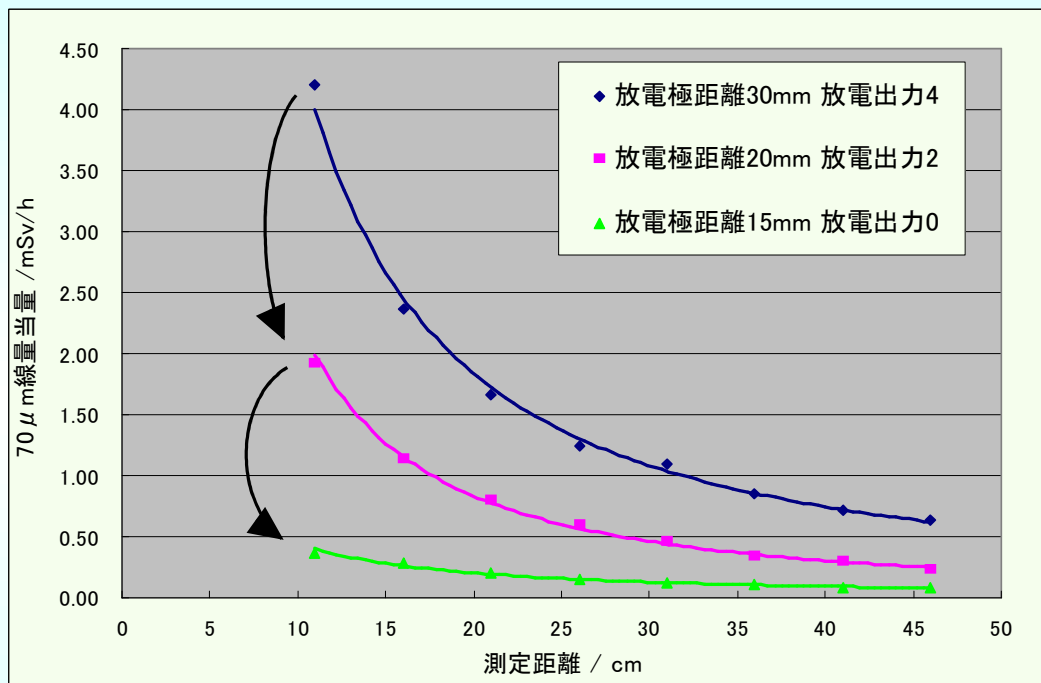
空気中では 1kV で約 1mm 放電
するため20kV以上に上がらない

**放電出力を出来る限り
下げる。**

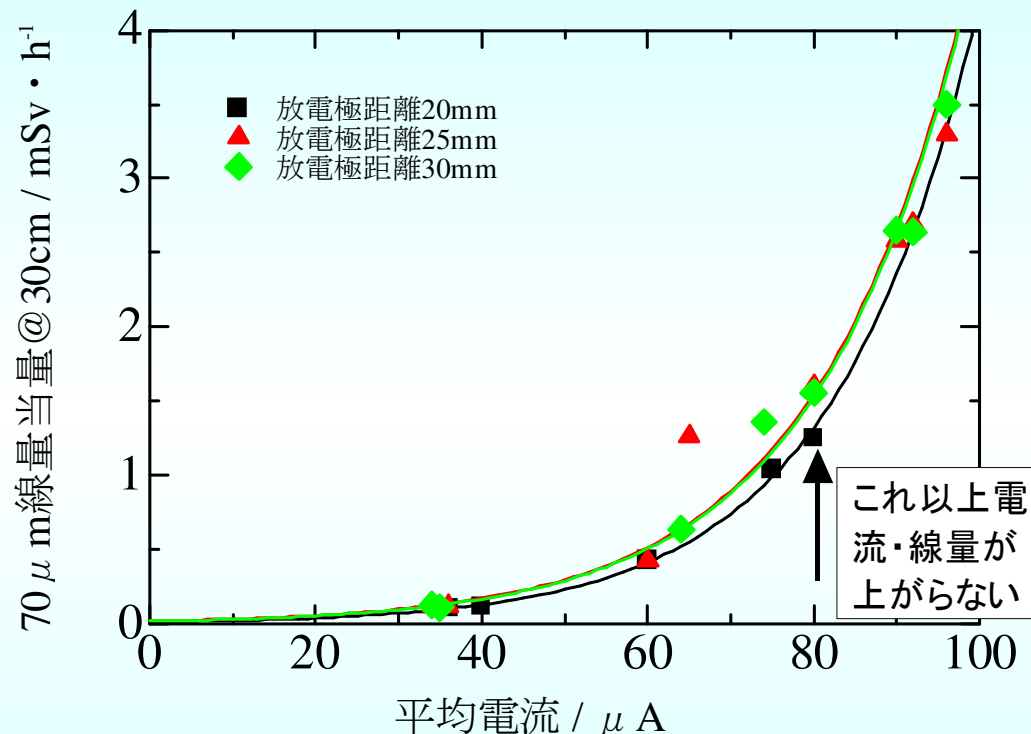
電子線を観察できる範囲で下げる

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。

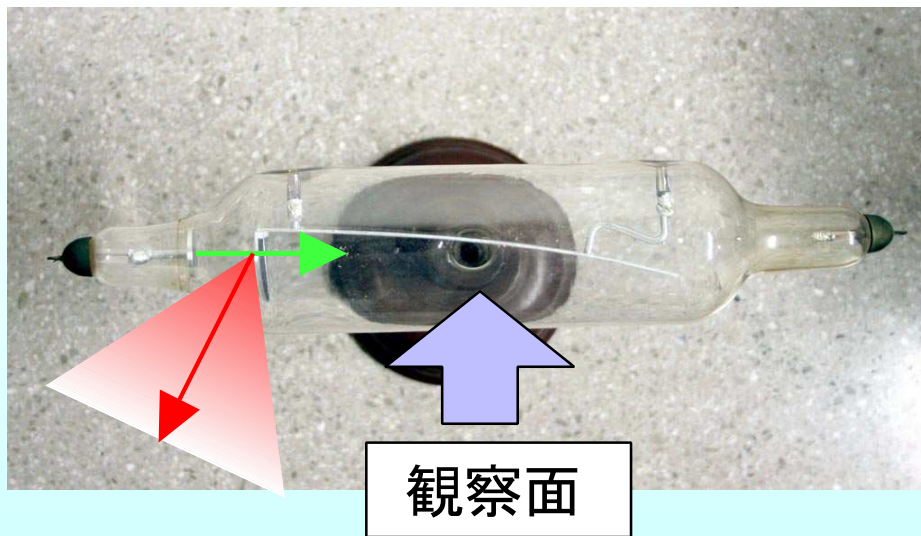
遮への有効性



○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(ここは観察しないため)。

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>

免除レベルの $10 \mu\text{Sv}$ はどれぐらいの値なのか

歯科レントゲン撮影1回:
 $10 \mu\text{Sv}$



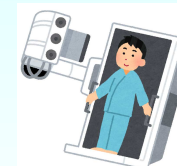
0.01mSv
($10 \mu\text{Sv}$)

胸部レントゲン撮影1回:
 $50 \mu\text{Sv}$



0.1mSv
($100 \mu\text{Sv}$)

胃がん検診1回:
 $600 \mu\text{Sv}$



ICRP 1990/2007年勧告
一般公衆への追加線量限度
年間 1mSv

CTスキャン1回:
数mSv

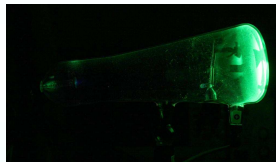


1mSv



国内線の飛行機1回:
 $3 \mu\text{Sv}$ 程度

クルックス管プロジェクトの
到達目標: $10 \mu\text{Sv}/\text{年}$



1ヶ月のBG線量:
 $50 \mu\text{Sv}$
($0.07 \mu\text{Sv}/\text{h}$ の場合)



国際線の飛行機での
欧米への旅行1回:
 $100\text{--}200 \mu\text{Sv}$



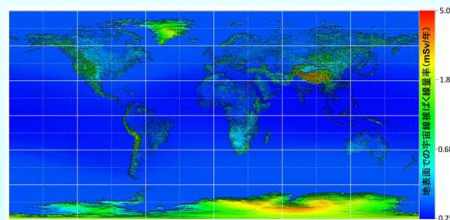
日本人が特有に持っている
 20Bq のポロニウム
210による年間被ばく
線量: $800 \mu\text{Sv}$

イランのラムサール地方や
インドのケララ地方などでの
大地からの年間被ばく線量:
 $\sim 10\text{mSv}$

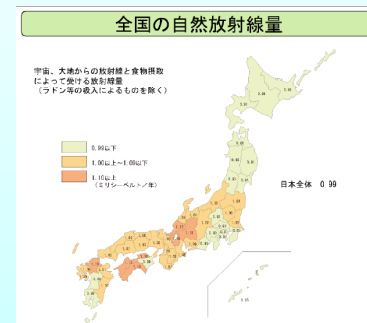


ランタンのマントル*を
1時間体に貼付ける:
 $\text{Hp}(10) 1 \mu\text{Sv}$ (γ 線)
 $\text{Hp}(0.07) 10 \mu\text{Sv}$ (β 線 + γ 線)

*トリウム使用のサウスフィールド ハイパワーDXマントル



年間の宇宙線量の世界平均と
日本平均の差:
 $50 \mu\text{Sv}$ (日本の方が小さい)



年間の平均外部線量が最も
高い岐阜県と最も低い神奈
川県の差: $400 \mu\text{Sv}$



世界平均と日本平均
でのラドンによる年間
被ばく量の差:
 $800 \mu\text{Sv}$
(日本の方が小さい)

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。

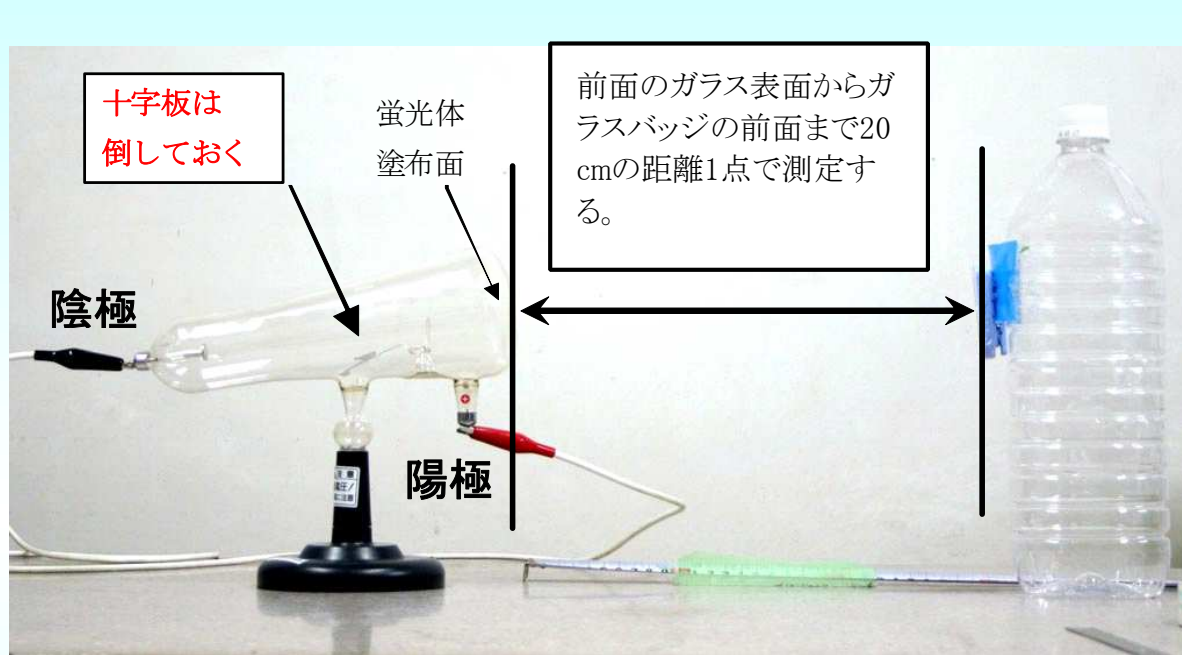
実態調査に御協力頂ける方、ご質問のある方は、大阪府立大学放射線研究センター 准教授 秋吉 優史 (akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp) までご連絡願います。

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。
- ・測定限界が $50 \mu\text{Sv}$ であるが、1m 位置 10分で実効線量が $10 \mu\text{Sv}$ になる場合、20cm 位置では実効線量で $250 \mu\text{Sv}$ 、70 μm 線量当量はその10倍程度になるため、十分な検出力と言える。