

2018年 1月 5日版

クルックス管を用いて 安全に実験を行うには

大阪府立大学 放射線研究センター 秋吉 優史
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>



本発表の背景

2017年3月に改正告示が公示された新・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 については、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。**

H31 教科書検定
H33 全面実施

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。**

放射線に関する記述は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。

クルックス管に関しては2008年版の学習指導要領解説にも記載されていた。

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？

クルックス管は現在既に理科教育現場で用いられているが、場合によっては15cmの距離、 $70\mu\text{m}$ 線量当量で 200mSv/h 以上の低エネルギーのX線が放出されうる。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。

熱陰極を用いた数100V程度で駆動される装置や、冷陰極を用いても5kV程度の低電圧で動作し、外部には一切X線の漏洩のないクルックス管が本体 22,000円、電源も18,000円と手軽な金額で発売されている。



5kV で動作中のクルックス管



9V電池駆動の
5kV CW高圧電源

**中高の教育現場には、
買い換える資金がない！**

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。

本研究の目的

ICRP 放射線防護の基準を決める三つの原則からの検討

正当化: リスクを上回る利益がなければならない

- ・ 演示を行う必要があるのか？ 写真やビデオでの紹介でも良いのではないか？
→ クルックス管を用いた実演は生徒に残る印象が強く、教育的効果が高い。

防護の最適化: できるだけ被ばくを抑える（経済、社会的な要因も考慮）

ALARA(as low as reasonably achievable)の原則

- ・ 低電圧駆動の絶対安全の装置を使うことで被ばくをゼロに出来るためこれを推奨する。
- ・ 経済的要因により直ちに全ての学校に要求するのは困難であるため、印加電圧、距離、時間などの制限により被ばくを最小化する。必要に応じて遮へいも行う。

線量限度: 線量限度を超えてはならない

- ・ どの程度にまで線量を下げれば良いのかという被ばく管理目標値を、国内外の規制状況から議論する（現行法令では一般公衆の線量限度が定められていない）。
- これ以下であればよい、と言うわけではなく、出来る限り下げる努力が必要。

クルックス管からのX線評価に於ける問題点

20keV 程度とエネルギーが低い

一般向けのサーベイメーターは Cs-137 からの γ 線の測定を前提に作成されているため、全く測定できないか、かけ離れた値を示す(何桁も小さい値を示す)。

GMサーベイメーターは低エネルギーX線でも検出自体は可能であるが、1分間に何発、と言う測定であり、そこから被ばく線量(シーベルト)を求めることは非常に困難。遠くなると線量が下がるなどの相対的な評価は可能。

放射線計測で信頼されている NaI シンチレーターなどもエネルギーが低すぎて全く使い物にならない。

パルス状に放出されている

電源装置(誘導コイル)が不安定である

専門家でも正確な評価は非常に困難

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

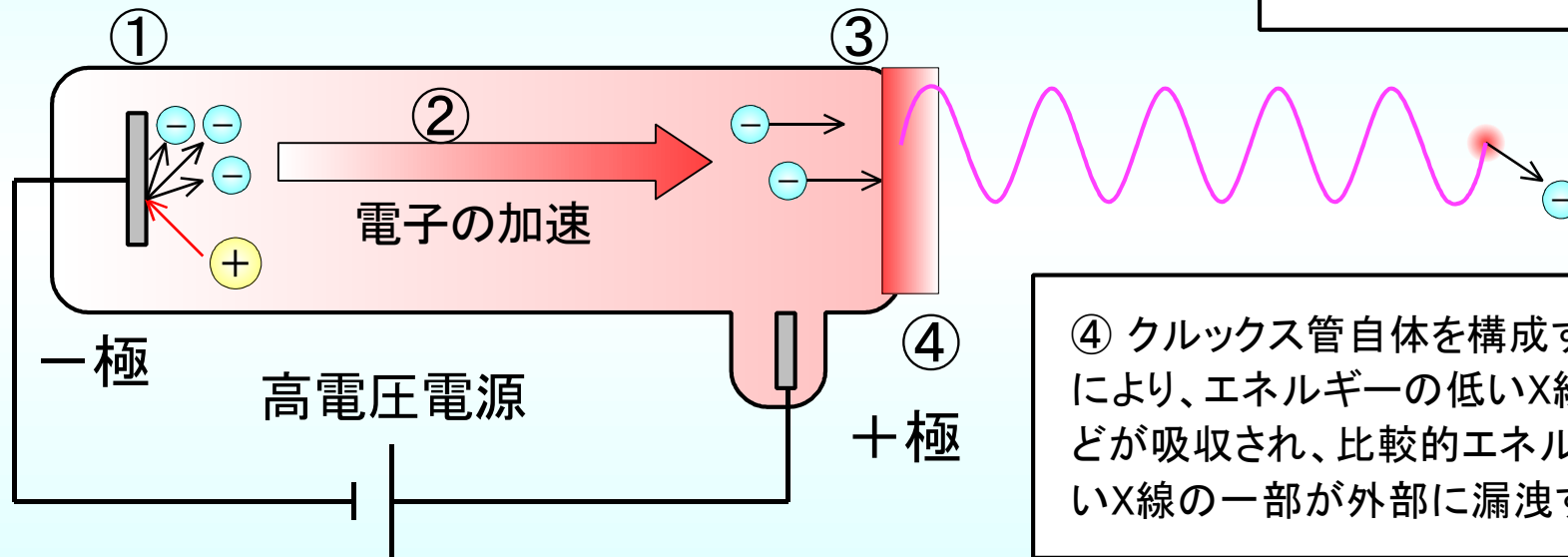
放射線防護の
三原則

クルックス管からのX線の発生

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

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の光電子はβ線と同じように振る舞う。



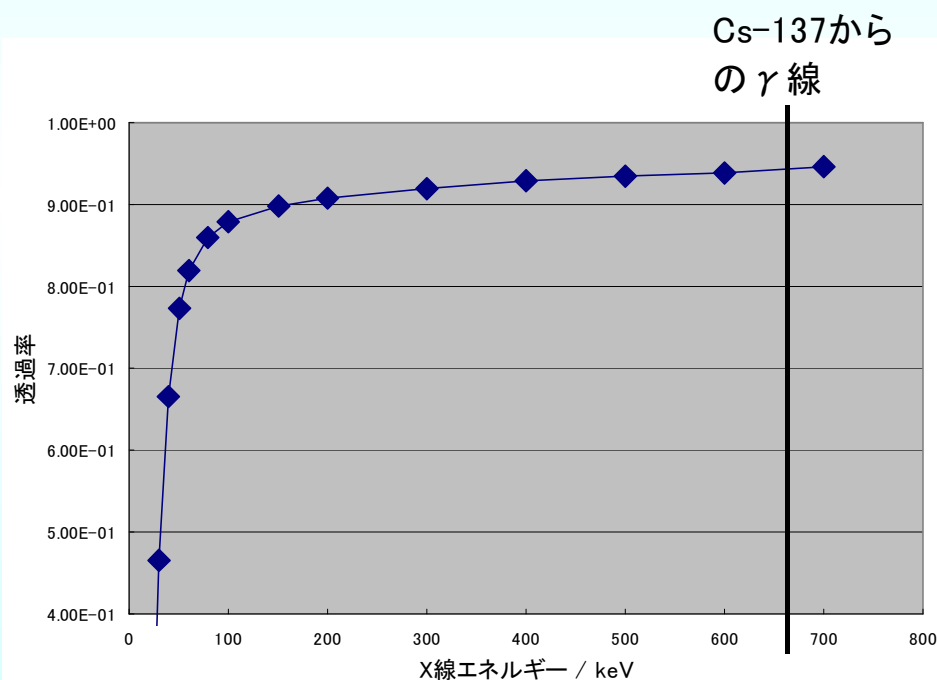
④ クルックス管自体を構成するガラスにより、エネルギーの低いX線のほとんどが吸収され、比較的エネルギーの高いX線の一部が外部に漏洩する

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。

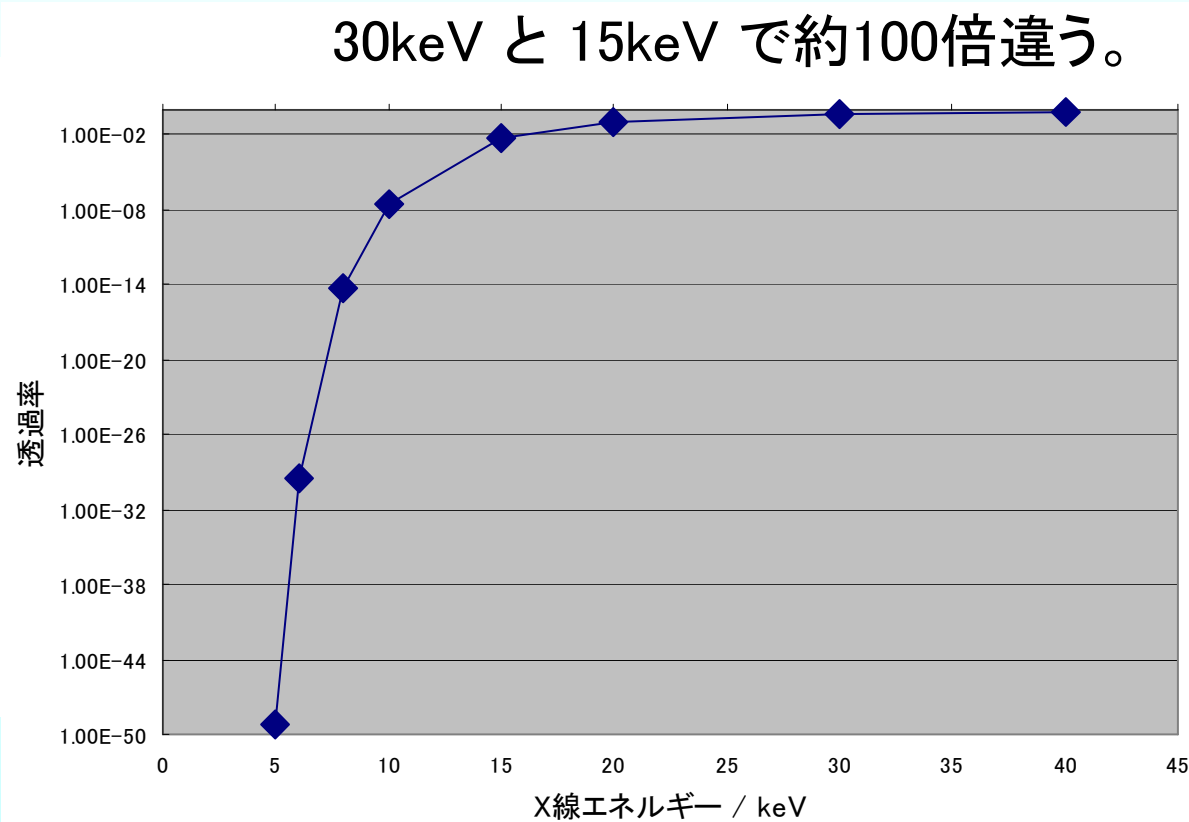
その結果高い電圧が印加され、④で漏洩する線量が大きくなってしまふ。

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。

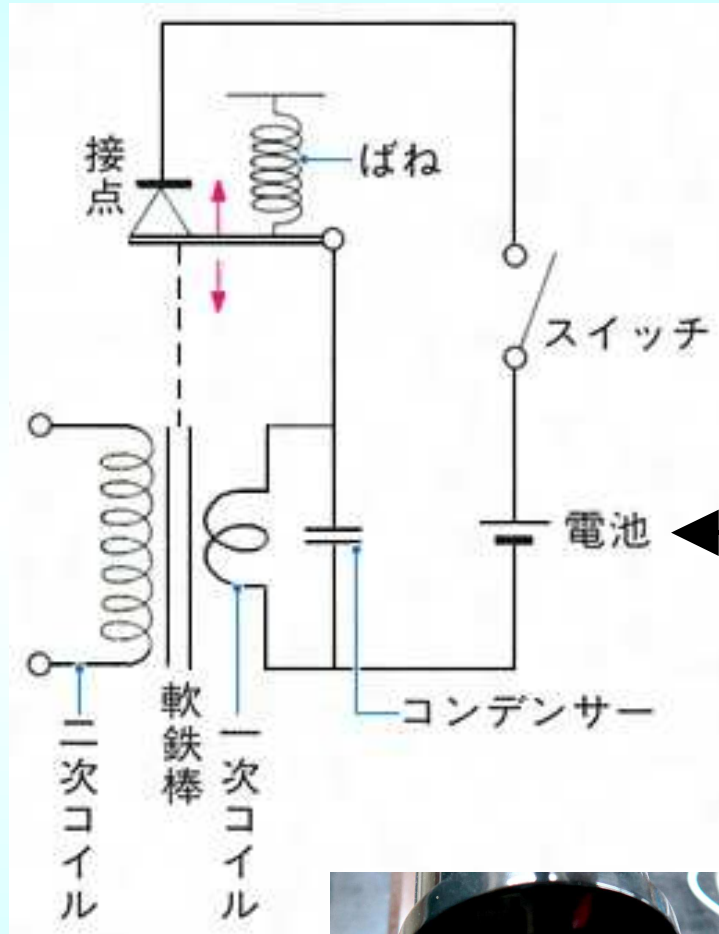


100keV 以上のエネルギーでは
余り大きく変わらない



X線・ γ 線の3mmのガラス透過率

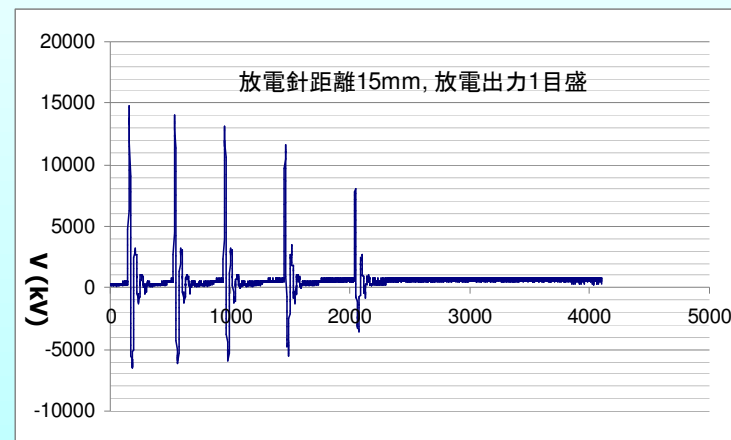
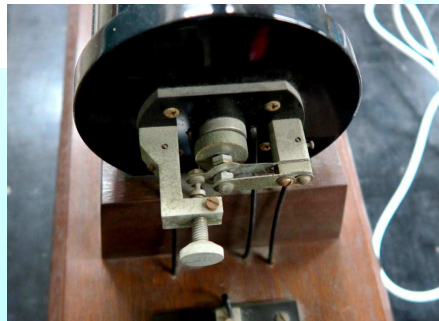
誘導コイルを用いた高電圧生成について



誘導コイル(Induction Coil)は、極端に巻き線の数の異なるトランスの一次側の電流を、ベルやブザーなどと同様に機械的に接点を連続的にON/OFFすることでパルス状に変化させて、二次側に大きな電圧のパルスを生成する。

放電出力などと書かれている調整用のダイヤルは、可変抵抗などで一次側に印加する電圧を変化させている。

外部電源で直接一次側の電圧をコントロールする製品も存在する。



1ms程度のパルス
を間欠的に出力

1) 2) 印加電圧を下げる、電流を下げる



放電極距離

放電出力

**絶対に放電極を
取り付ける。**

電氣的な安全上も必須。

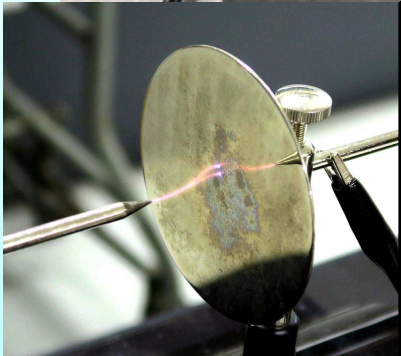
**放電極距離は20mm
以下にする。**

空気中では 1kV で約 1mm 放電

**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

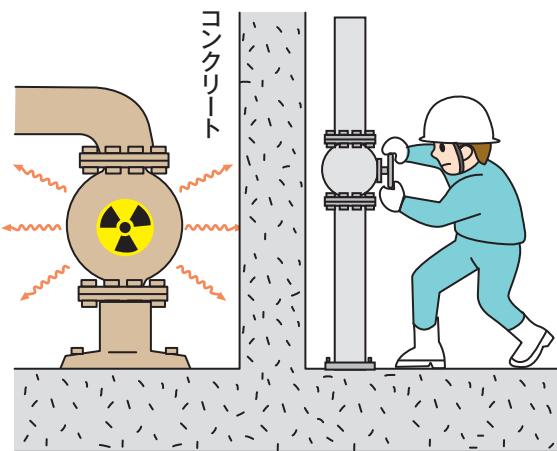
放電極は、一定以上の電圧がかかると放電してそれ以上電圧が上がらないようにする、**安全装置**



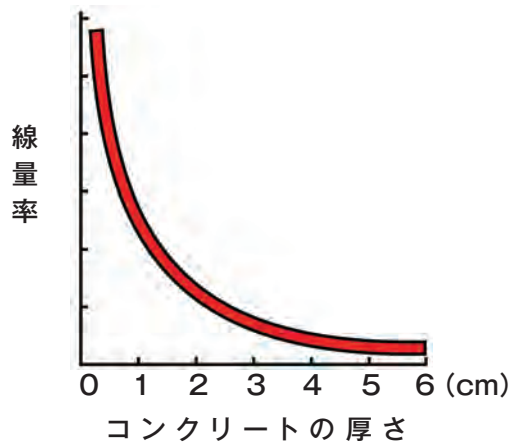
放射線防護の基本

1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下

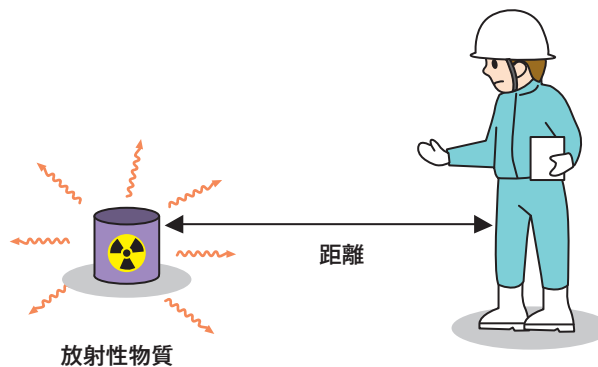


(mSv/h)

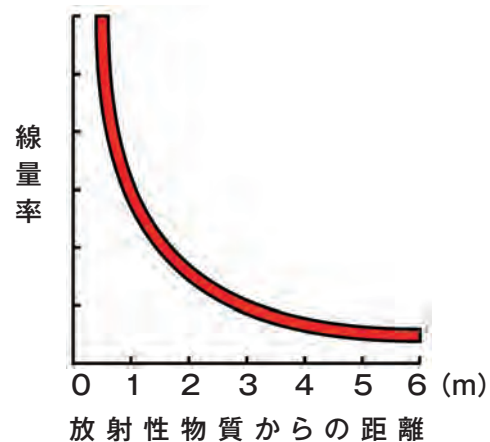


2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例

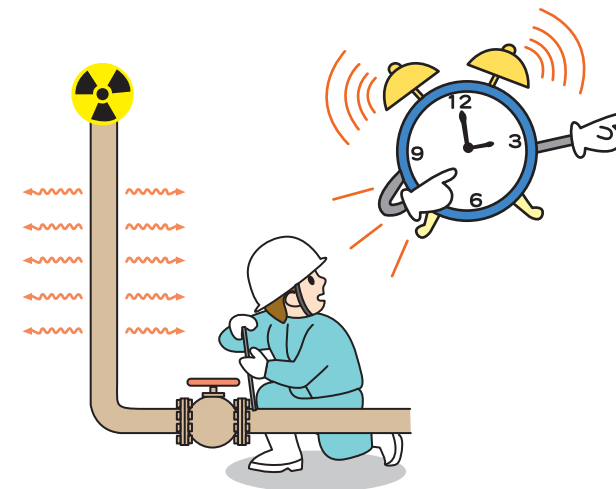


(mSv/h)

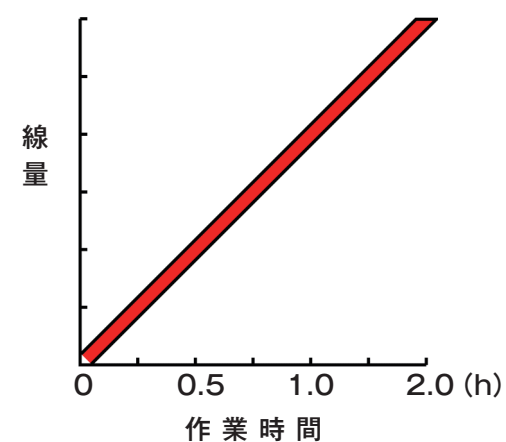


3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)

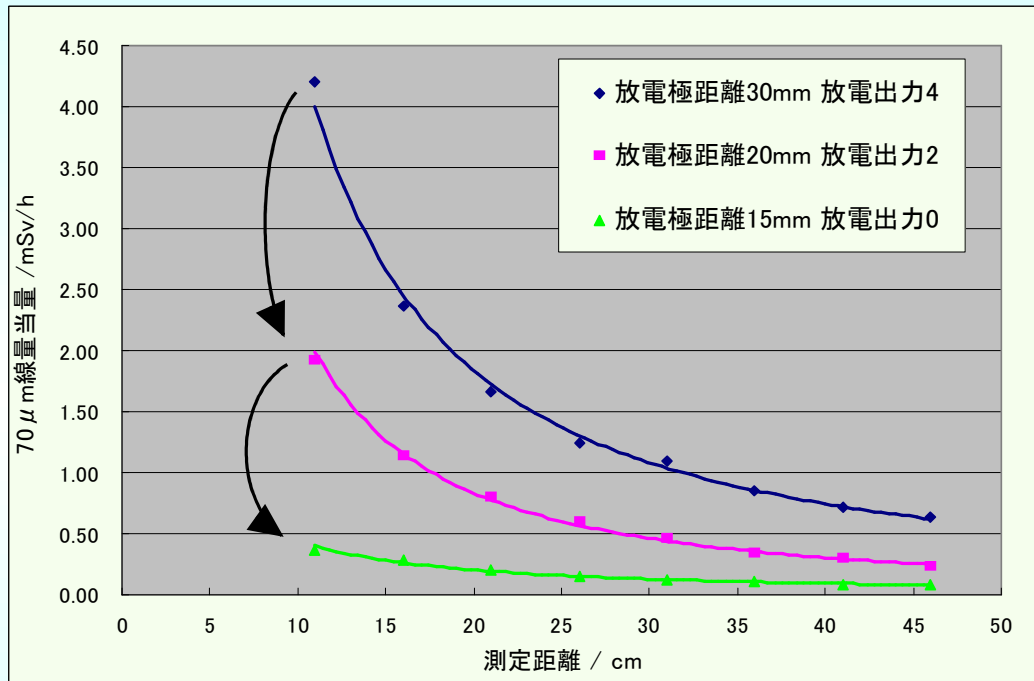


(mSv)



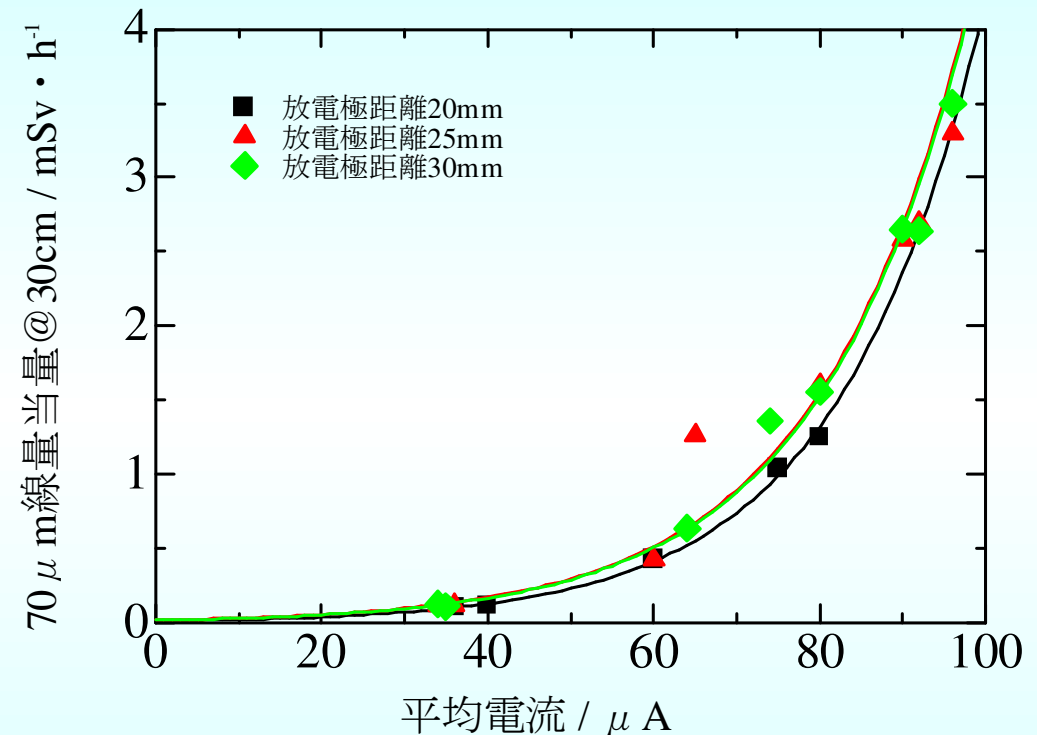
印加電圧、電流、距離依存性

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



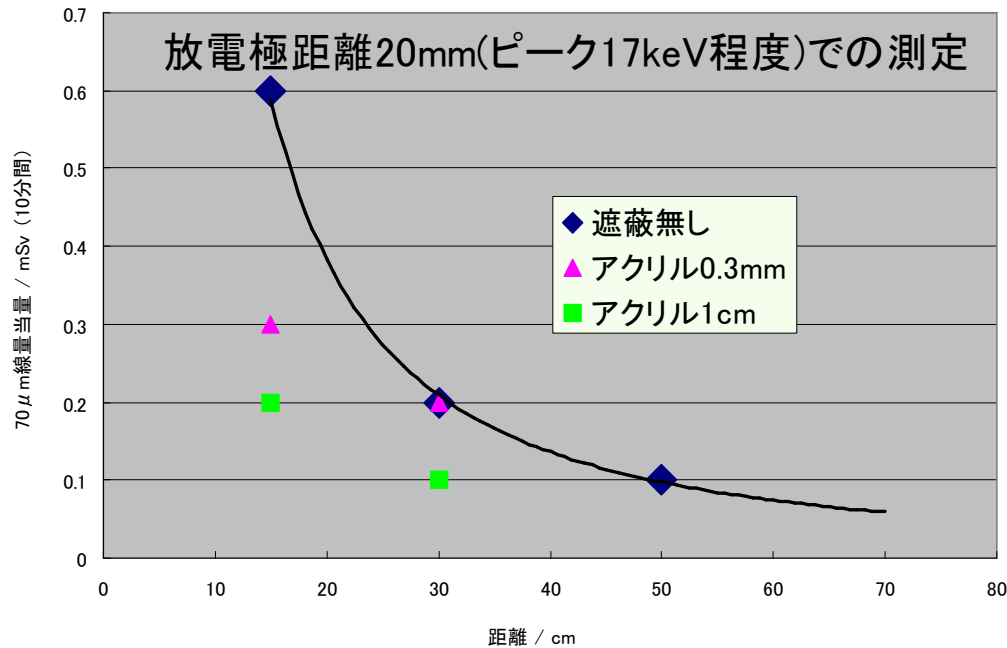
- **電圧を低く抑えると極端に線量は小さくなる**
放電極距離は20mm以下に留める
- **距離の二乗に反比例して線量は小さくなる**
1mの距離では10cmの距離での1/100になる
1mから50cmに近付いただけで4倍になる。

放電出力変化に伴う平均電流を
アナログ電流計で測定



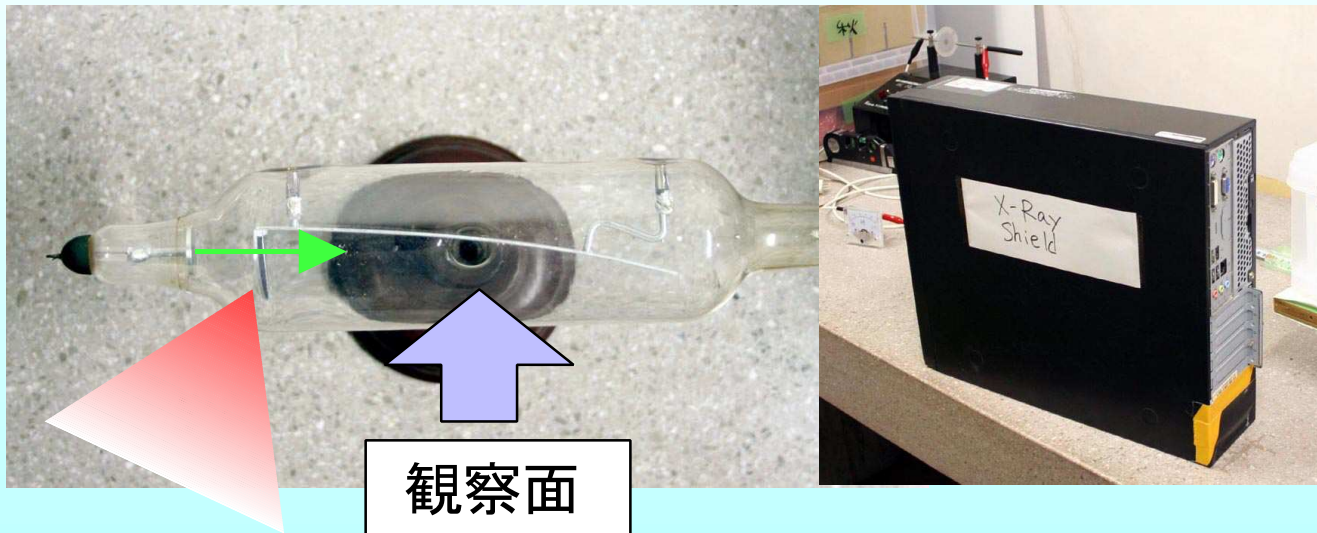
- **電流上昇に従い指数関数的に線量が上昇**
放電出力上昇で電圧も電流も同時に上昇するため、電子線が観察できる必要最小限の出力に留める。
放電極は、一定以上に電圧を上げないための安全弁の役割。

有効な遮蔽



20keV ではアクリル1cmで半分に減衰する。実際はもう少しエネルギーが低いため、3mmで約半分、1cmで1/3に減衰する。ガラスははるかに遮蔽能が高く、5mmのガラスで20keVでも1/50程度に減衰する。

しかし、実際には分厚いアクリルやガラスの遮蔽体は取扱が困難。

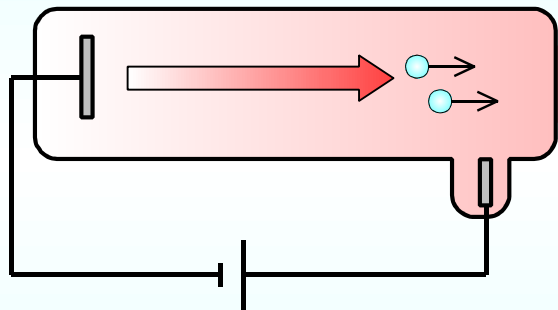


スリット入りのクルックス管は、観察を行わないスリットより陰極側(ビームの上流側)が最も線量が高いため、この部分を適当な物で遮蔽すると効果的。古くなったデスクトップPCが、自立するので使いやすい。

クルックス管からのX線の不均一性

*体表面での線量 =
70 μ m線量当量

正面中心、15cm位置で
体表面での線量* が
150mSv/hあったとしても



線量計

① 1m 位置では 1/44 以下の
線量になります

③ 平面的にも周辺の線量は小さくなり
中心位置で測定した線量計の値よりも
小さくなります。
(50cmずれると67%程度に低下)

④ 演示時間を短くすることで、
トータルの被ばく線量は
時間に比例して減らせます。

⑤ 20keV では 2mmのガラスで
1/5 程度にまで遮へいできます。
(アクリルでは1cmで半分)

眼の水晶体への等価線量
は体表面での線量に近い値
となります。

② 20keVのX線は体内で1cmで半分に
減衰していき、体表面での線量と
全身への線量とは一致しません。
(実効線量と10倍程度の差が出ます。
正確には現在評価中)

10分の演示で遮蔽無しでも、
全身への実効線量は50 μ Sv
にも満たないと考えられます。

クルックス管安全取扱のガイドライン（暫定）

- ・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。

- ・演示時間は10分程度に抑える

全部守らなくても十分線量は低く抑えられている場合がほとんどであるが、非常に高い線量を放出する装置ではこれらを遵守する必要がある。一般的に行える測定では判別できないため、各自の装置がそういった物に該当するかどうかは、ガラスバッジによる測定などを行って確認する必要がある。（箔検電器による簡易スクリーニング手法を開発中。）