

2019年 7月 5日 @ 東大弥生講堂
アイソトープ 放射線研究発表会 パネル討論2

教育現場における放射線安全管理 体制の確立に向けた活動の紹介

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>



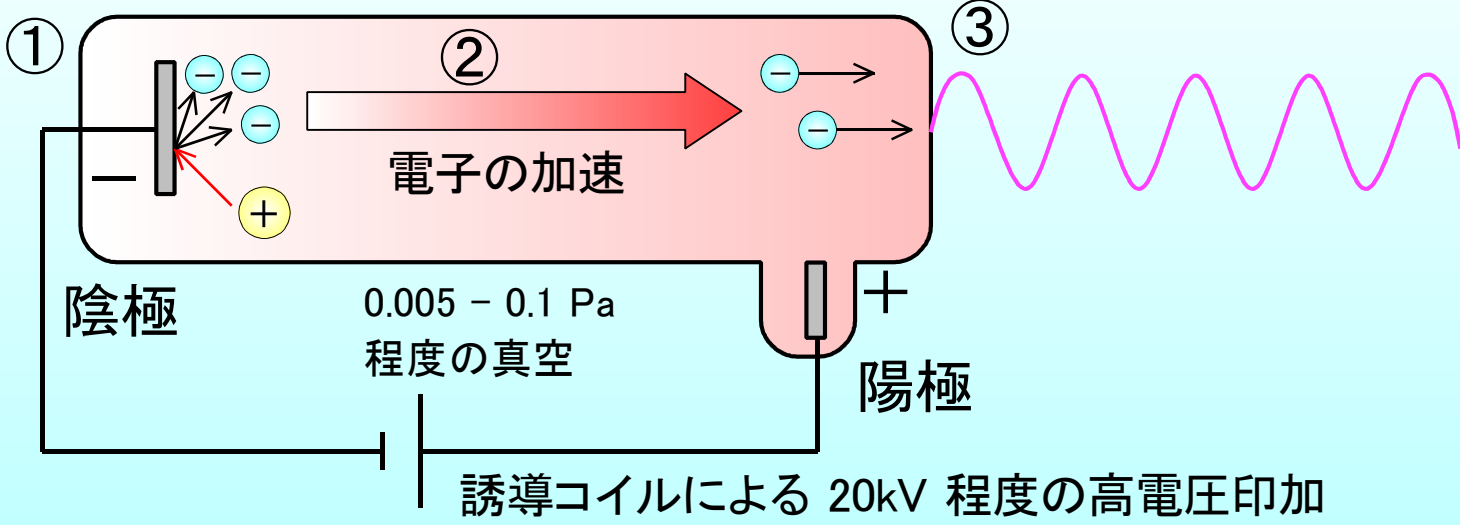
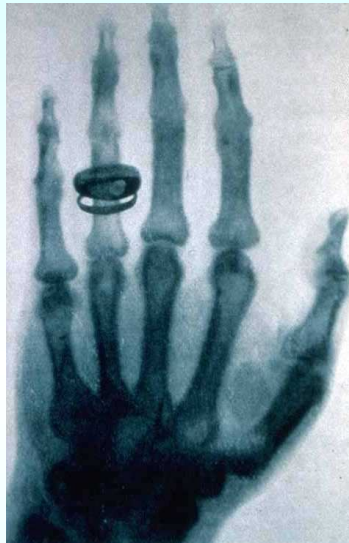
クルックス管とは？

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 管内の気体が電離されて出来た + 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)
- ② 印加電圧に従ったエネルギーに加速される
- ③ ガラス管壁に電子がぶつかり制動放射X線を放出する。20keV程度の電子はガラス管を透過できず、特性X線もエネルギーが低いので遮蔽される。

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

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、中学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おり、実際に演示が行われている。

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

教員に対する指導書でも放射線に関する注意が記載されていない会社もある。低エネルギーX線の正確な評価は専門家でも困難であり、教員には安全に関する指針が与えられていない。

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

現行の中学理科教科書に於けるクルックス管の取扱

出版社	啓林館	東京書籍	大日本図書	学校図書	教育出版
教科書					
クルックス管自体の取扱い	○	○	○	○	○
クルックス管に関連させた放射線に関する記述	2年	2年	3年	3年	×
指導書					
放射線に関する注意	○	○	○	×	未確認

指導書

- ・啓林館: 放射線に関する注意あり。2012年版では、放電管から1mも離れれば漏洩X線の影響はほとんどないとしているが、2016年版では「X線の影響に配慮し、**演示は行わず**、教科書の写真や図のみでの説明にとどめる」と保守的。
- ・東京書籍: 放射線に関する注意あり。誘導コイルの設定(電極間隔は4cm以下)、1m以上はなれた場所から観察をする、観察時間は10秒以下にするなど、**具体的な運用方針が記載**されている。
- ・大日本図書: 放射線に関する注意あり。生徒を1m以内に近づけない。
- ・学校図書: 放射線に関する記述なし(誘導コイルの説明は非常に詳細)
- ・教育出版: 未確認

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 μ 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。

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。

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測定される。

パルス状に放出されている

Be窓を用いた低エネルギーX線用 NaI シンチレーション式サーベイメータなども販売されているが、パルス場であるためパイルアップしてしまい非常に小さい値しか示さない。Be窓のGe検出器や、CdTe(CZT)検出器での測定も、非常に小さなコリメーターを使いカウントレートを落とす必要がある。

電源装置（誘導コイル）が不安定である

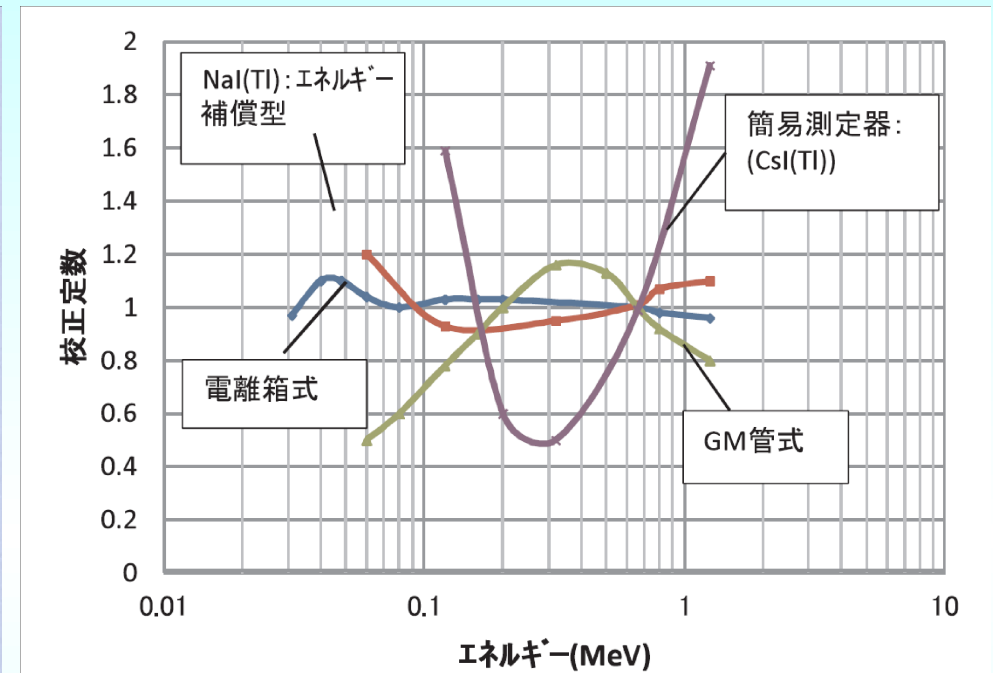
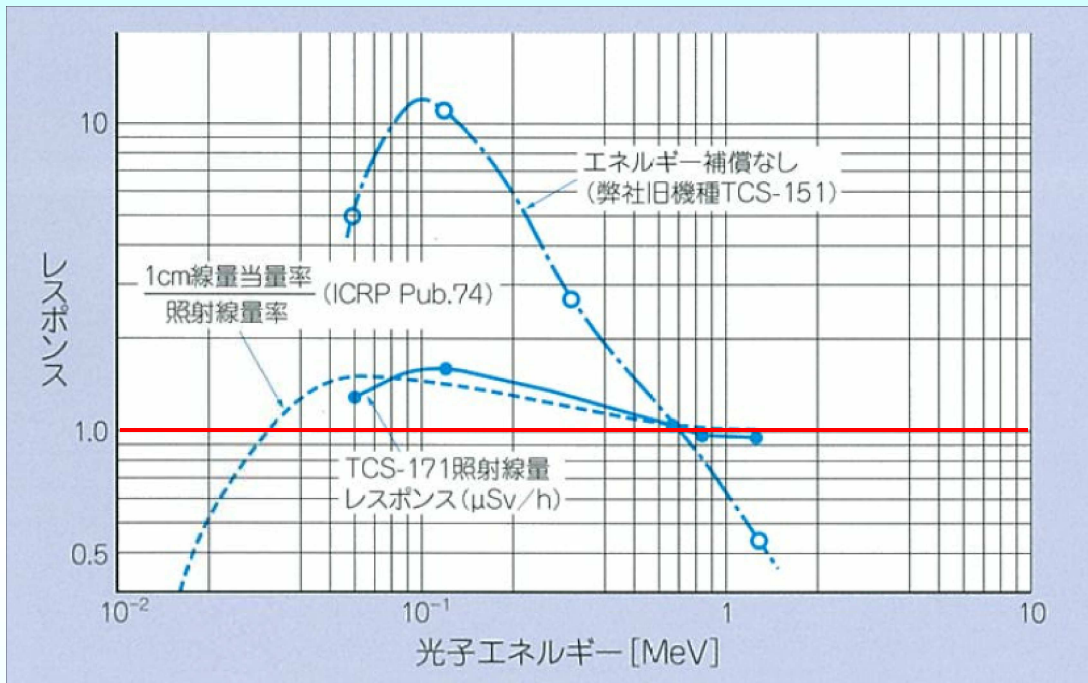
同じ装置を同じ設定で動作させても測定結果が大きく異なる事がある。機械的な動作を含む誘導コイルはその日、その時の状況で出力電圧が変動するため、系統的な比較を行うには何らかの方法でモニタしながらの測定が必要。

様々な測定装置による測定結果

	電離箱		蛍光ガラス線量計		GM管
	日立 ICS-1323		千代田テクノル ガラスバッジ FX型		Ranger
距離 r	H*(0.07)	H*(10)	H*(0.07)	H*(10)	1min scaler
cm	mSv/h	mSv/h	mSv/h	mSv/h	kcpm
15	8.15	5.3	4.62	1.62	33.89
30	1.91	1.28	1.26	0.48	31.68
50	0.64	0.465	0.48	0	27.32
	NaI シンチレーター		プラスチック シンチレーター	CsI シンチレーター	半導体検出器
	富士電機 NHC6	アロカ TCS-172	Kind-mini	エアーカーンターEX	エアーカーンターS
距離 r	Be窓	汎用	カバー無し	カバー無し	
cm	μ Sv/h	μ Sv/h	μ Sv/h	μ Sv/h	μ Sv/h
15	1.34	0.17	118	12.6	<9.99
30	10	0.17	64	12.5	0.05点減
50	13.1	0.15	24.5	8.3	<9.99

一般向けに出回っている簡易サーベイメーターはもちろん、空間線量測定で信頼されている TCS-172 などでもほぼ全く測定できない。

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

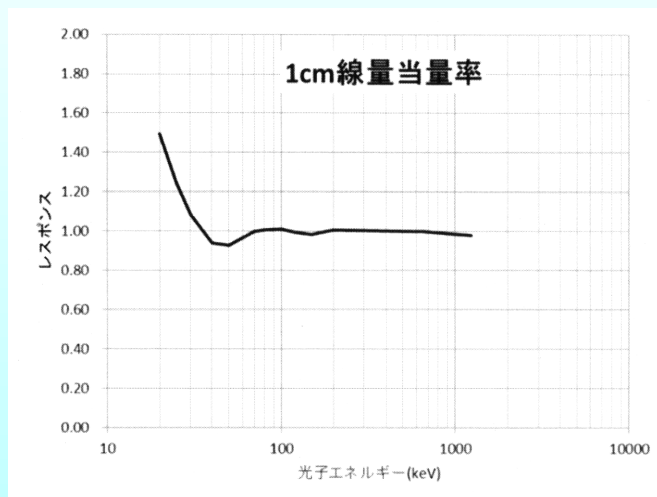
(アロカ TCS-171カタログより)

様々なサーベイメータのエネルギー特性

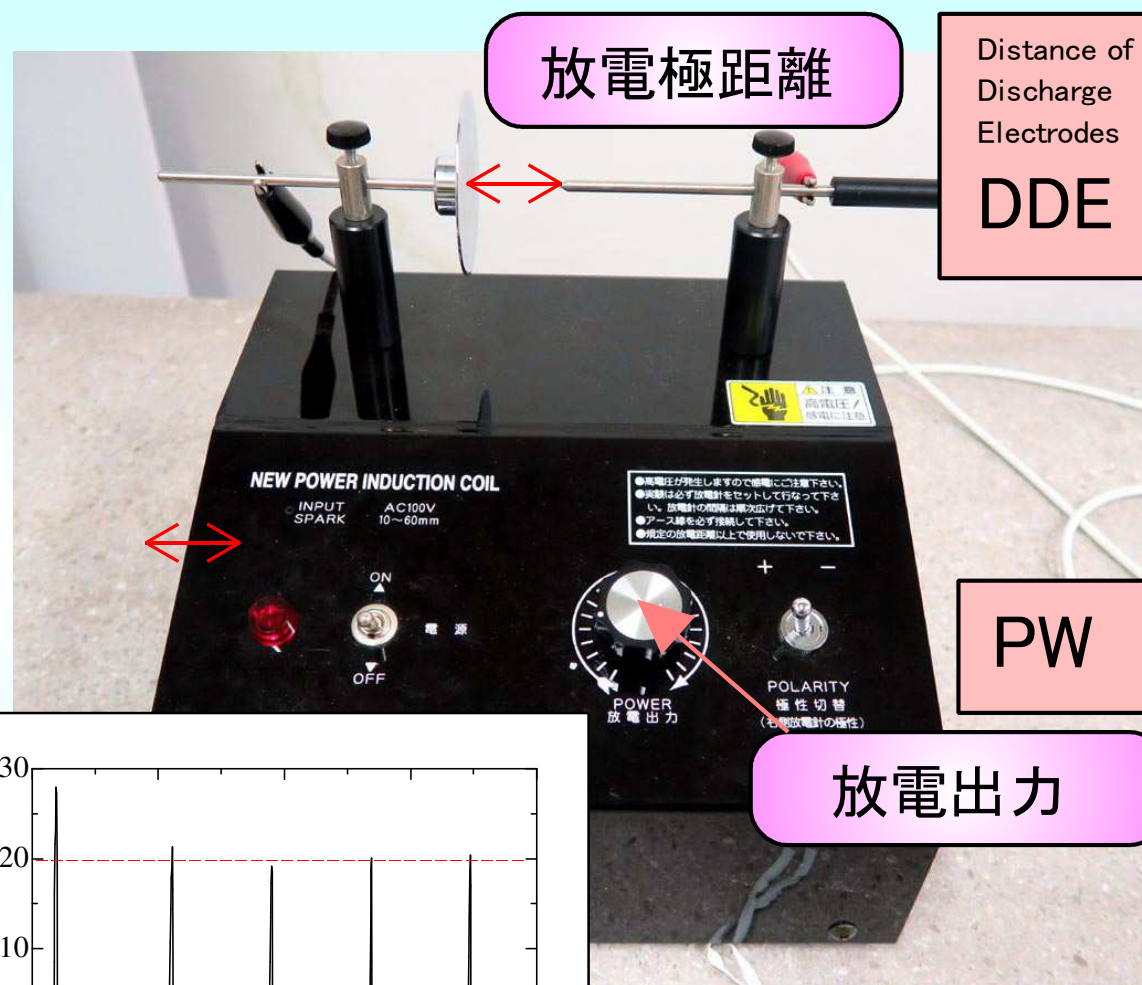
(放射線計測協会 放計協ニュース No.48, 2011, p6)

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)

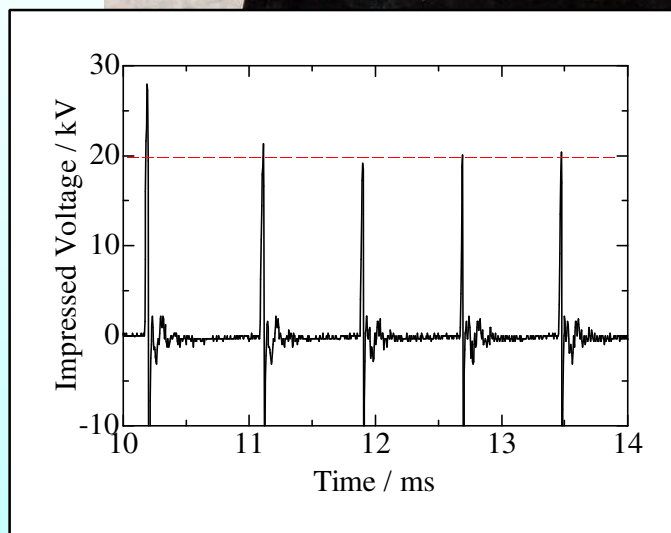


誘導コイルを用いた高電圧印加について



放電出力ダイヤルによりトランスの一次側に印加する電圧を変えることで連続的に出力電圧をコントロール可能。空気中での絶縁破壊電圧が 1kV で 1 mm 程度であることから、放電極の距離を変えることで印加する最大電圧を規定できる。

→ 20mm にしておくと 20kV 以上かけようとしても空中放電で電流が流れるためそれ以上電圧が上がらない、安全装置となる。

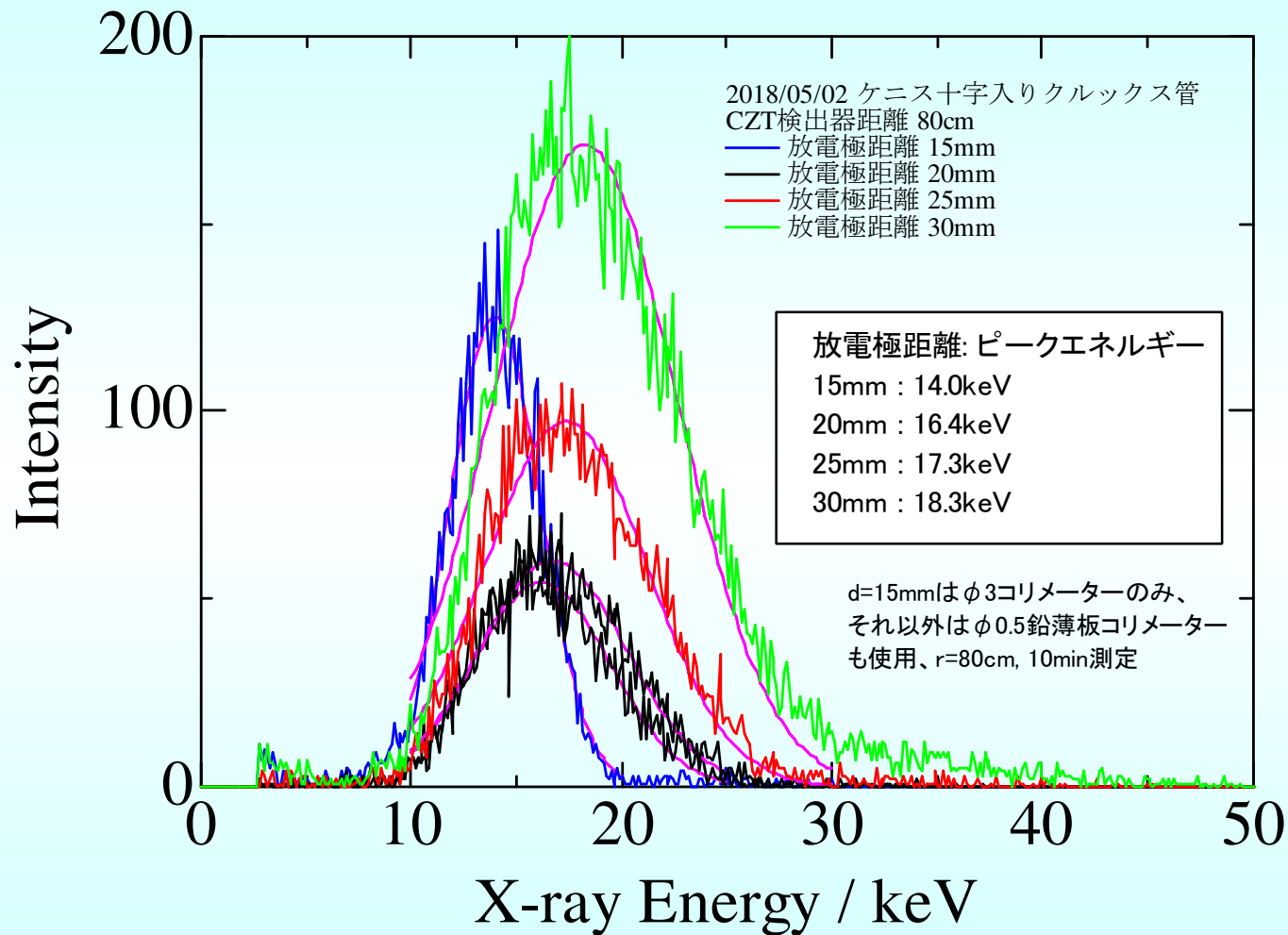


放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流 80 μ A

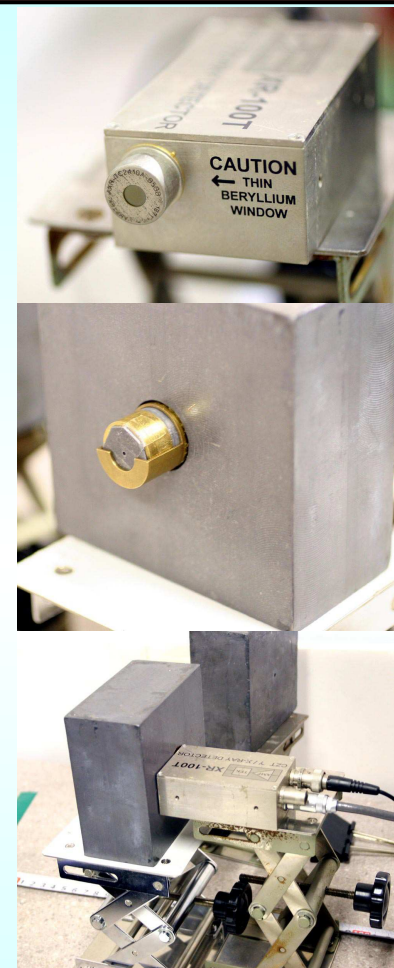


電圧測定時にはガラス抵抗体などの物理的にもサイズの大きい、100M Ω 以上の抵抗と、100k Ω 程度の抵抗を組み合わせた分配器を用いて測定するが、アースを取っていないとカソード側も高電圧をパルス的に出しているため、2chのオシロスコープでアノード側との差分を取る必要がある(フローティング測定)。

CZT半導体検出器によるスペクトル評価



φ0.5mm鉛コリメーターにより数cps程度まで下げること、
ようやくパイルアップせずに測定できるようになった

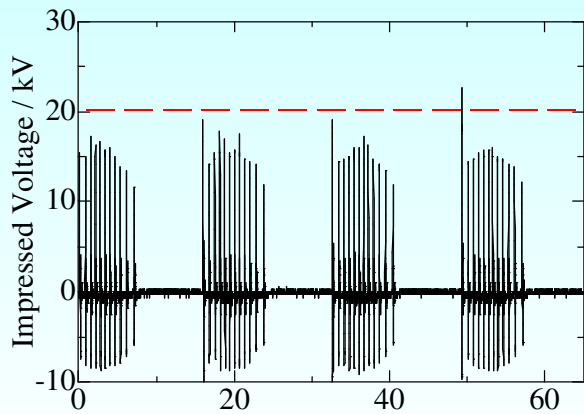


Amptek XR-100T-CZT
CZT(Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te)検出器
Be窓、ペルチエ冷却

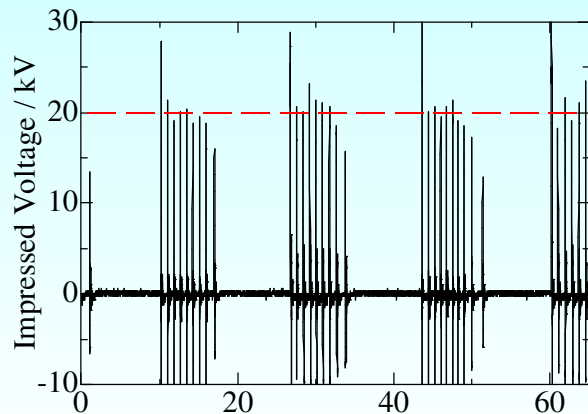


φ3同軸鉛コリメーター
φ2同軸黄銅コリメーター
φ1.0鉛薄板コリメーター
φ0.5鉛薄板コリメーター

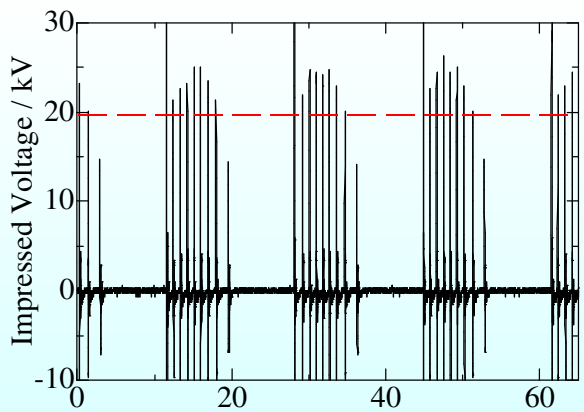
誘導コイル設定による出力パルスの変化



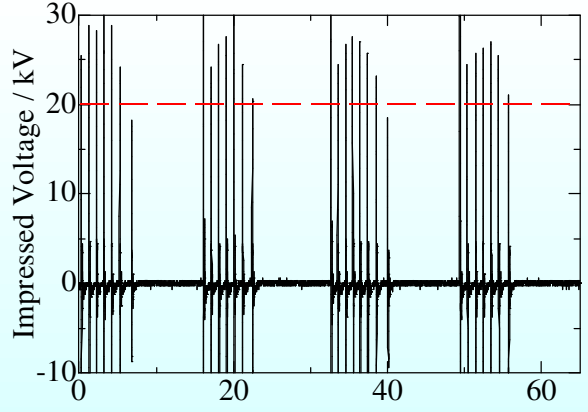
DDE=20mm, PW0, 40 μ A, 120 μ Sv/h



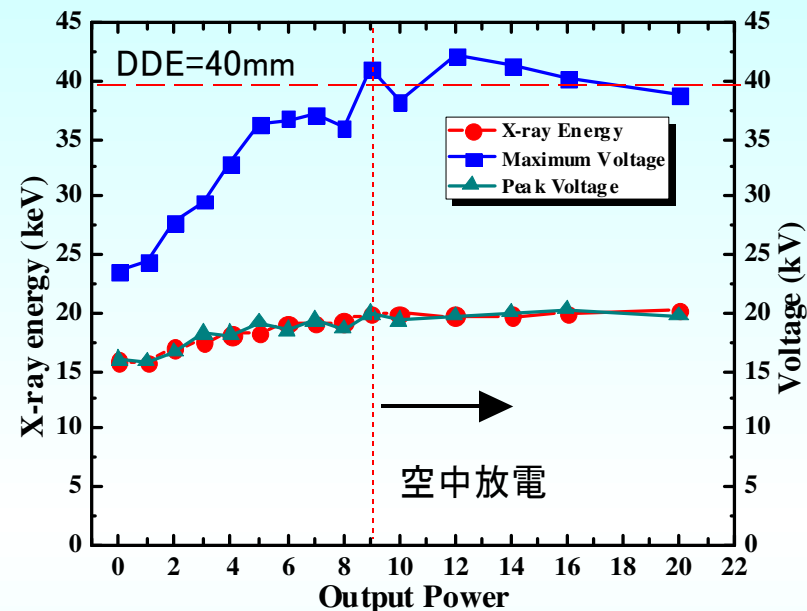
DDE=20mm, PW4, 80 μ A, 1.25mSv/h



DDE=30mm, PW4, 80 μ A, 1.56mSv/h



DDE=30mm, PW7, 96 μ A, 3.50mSv/h

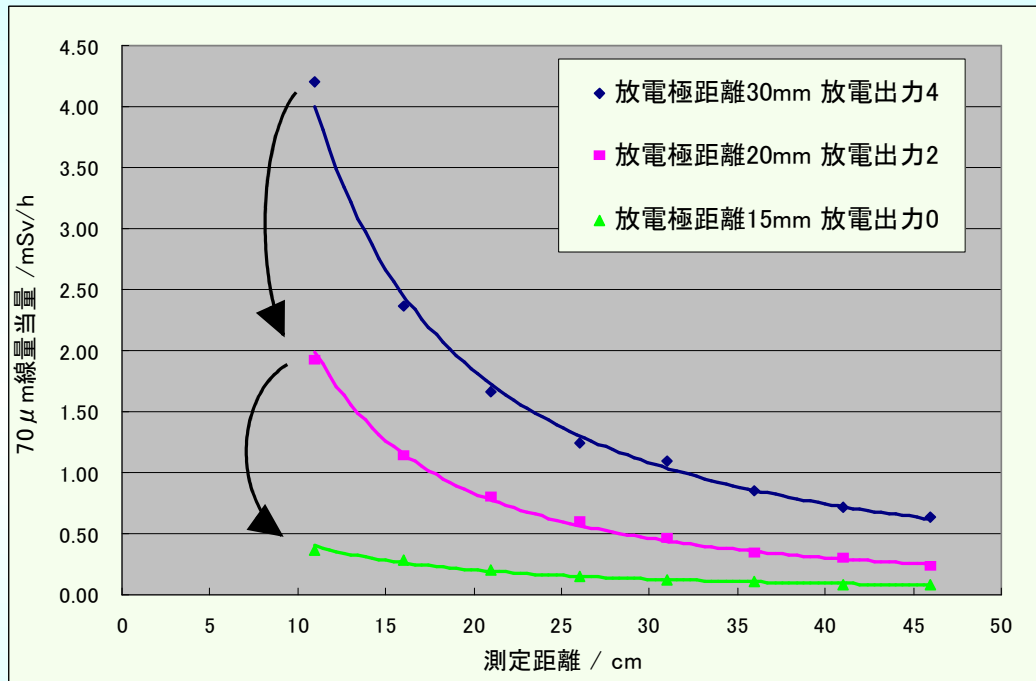


・放電出力を上げていくと次第に出力電圧が上昇し、電圧のヒストグラムのピークと、X線エネルギースペクトルのピークは良い一致を示した。

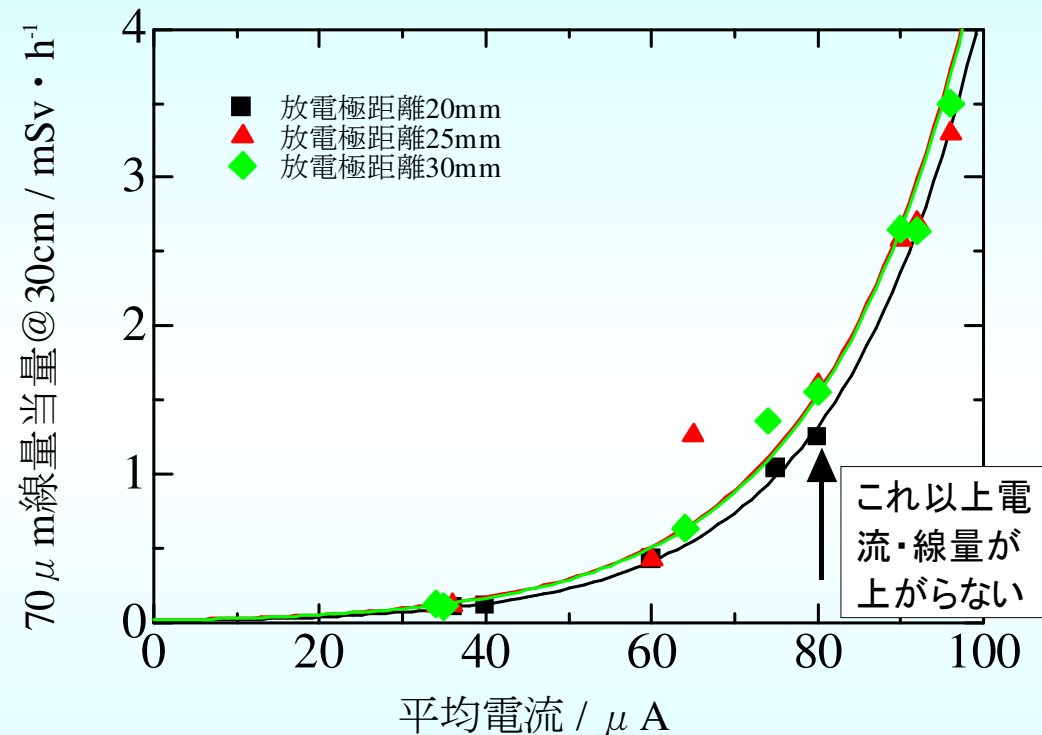
・放電極距離によって規定される以上の電圧に上げようと放電出力を上げても、空中放電によって電流が流れて電圧がドロップし、それ以上クルックス管に印加される電圧が上がらなくなる。

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



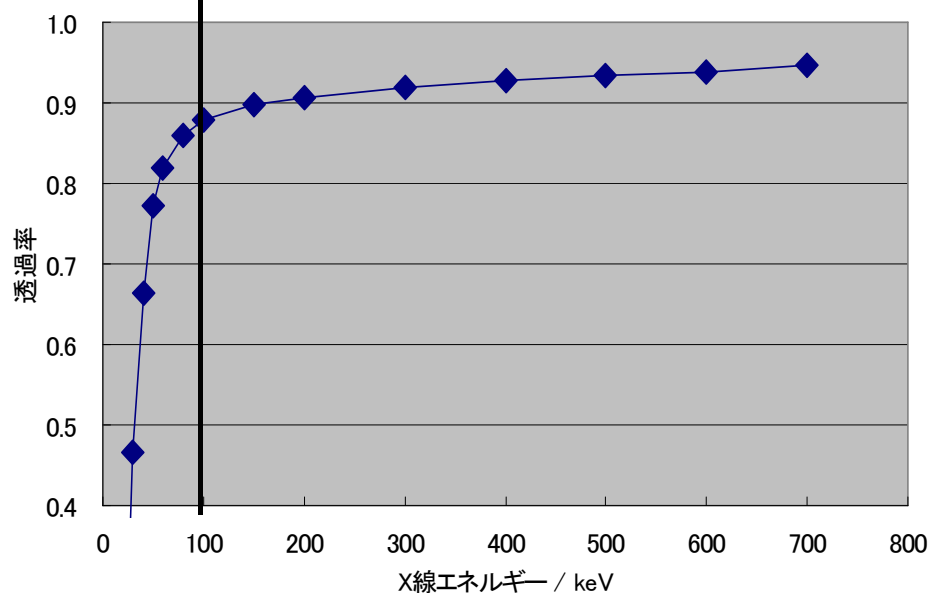
- ・電圧を低く抑えると極端に線量は小さくなる
放電極距離は20mm以下に留める
- ・距離の二乗に反比例して線量は小さくなる
1mの距離では10cmの距離での1/100になる
1mから50cmに近付いただけで4倍になる。

- ・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。

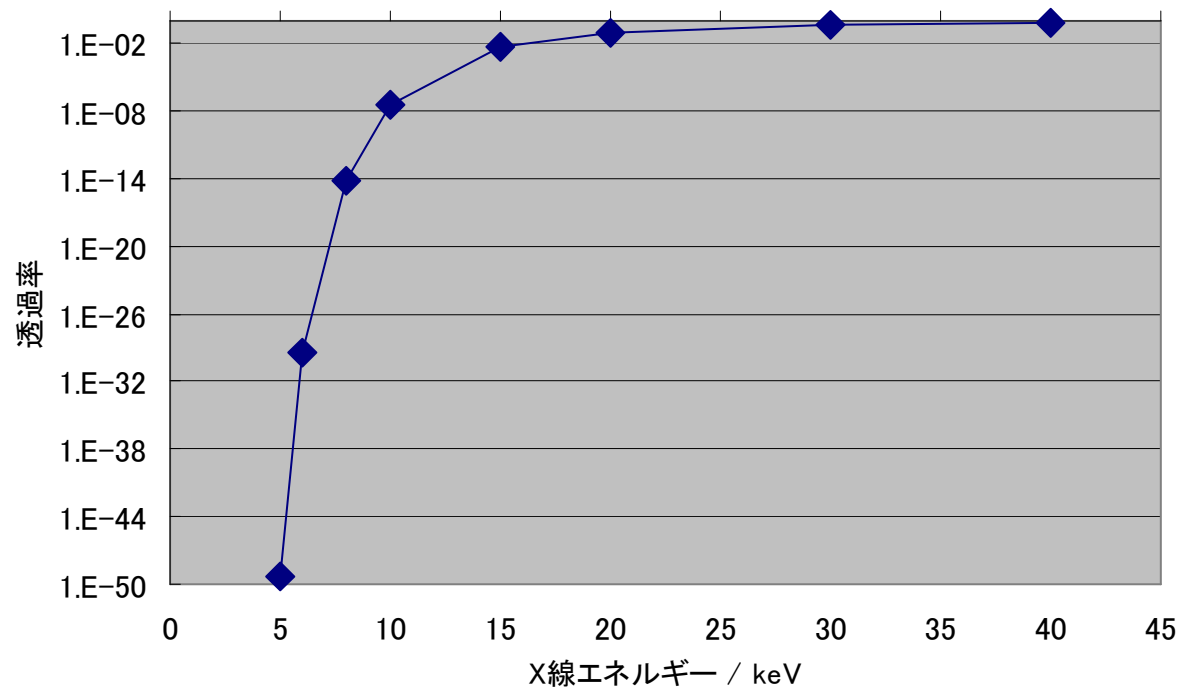
わずかな印加電圧低下での大きな線量の変化

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



30keV と 15keV で約100倍違う。



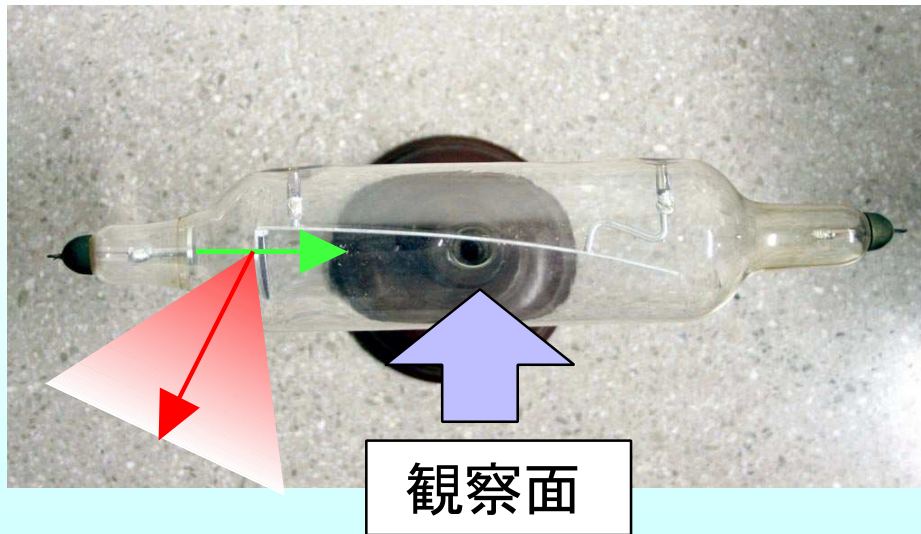
3mmのガラスに対するX線の透過率

遮へいの有効性



○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。軽くて取り回しがよ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。



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)。

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>

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) *実効線量はさらに1/5以下。
18本で < 50 μ Sv @ 15cm (検出限界以下)

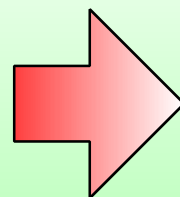
ペットボトルに貼付けたガラスバッジに15, 30, 50cmの距離で10分間X線照射して返送してもらい、線量評価を行った。X線計測専用タイプの物で、同時にエネルギー評価も出来る。

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。

管内のガスが枯れていて電流が流れにくい個体であった

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。

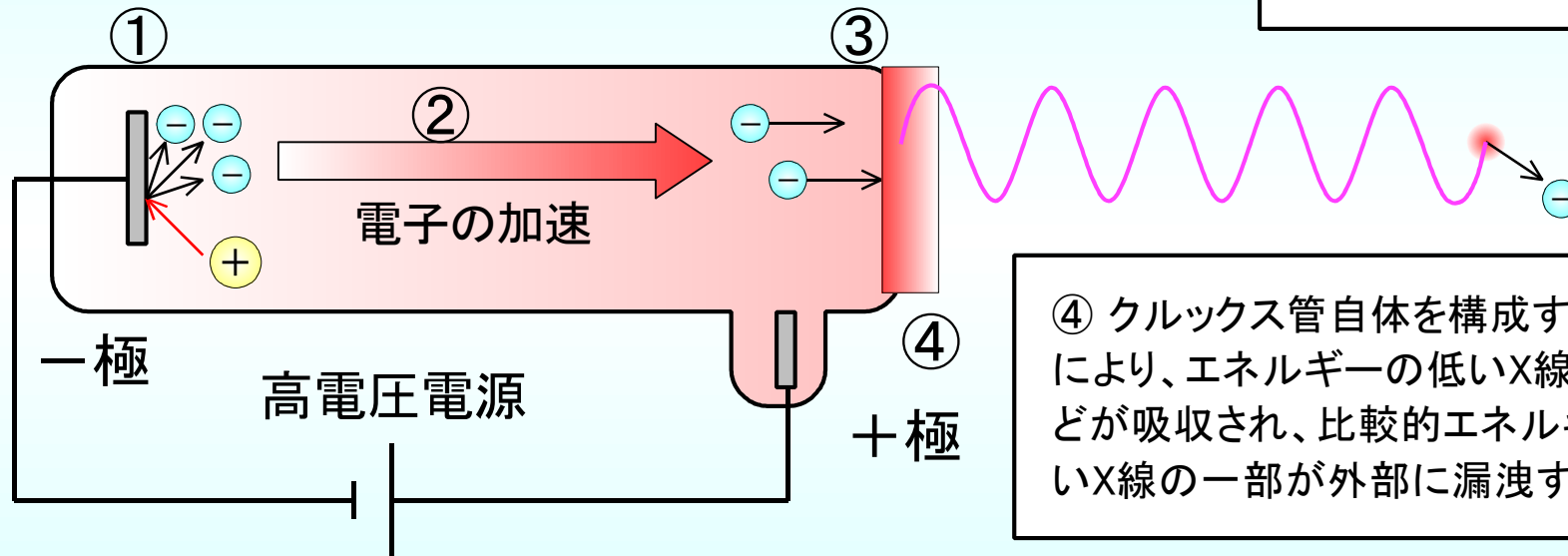
距離1m、10分間では、0.6 μ Svに過ぎない

クルックス管からのX線の漏洩

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。

クルックス管からの被ばく線量を下げるには

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

- 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)。

過去の研究から策定
した暫定ガイドライン

- ・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
- ・放電極を必ず使用し、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

本当にこれで安全か
全国規模の実証試験
が必要

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

**必ず放電極を
取り付ける。**

電氣的な安全上も必須。

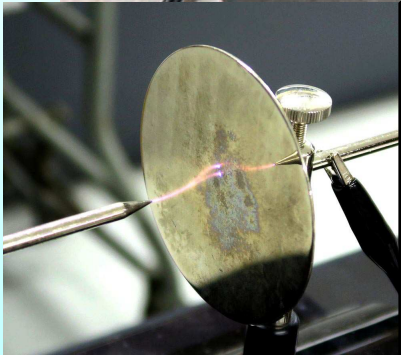
**放電極距離は20mm
以下にする。**

空気中では 1kV で約 1mm 放電

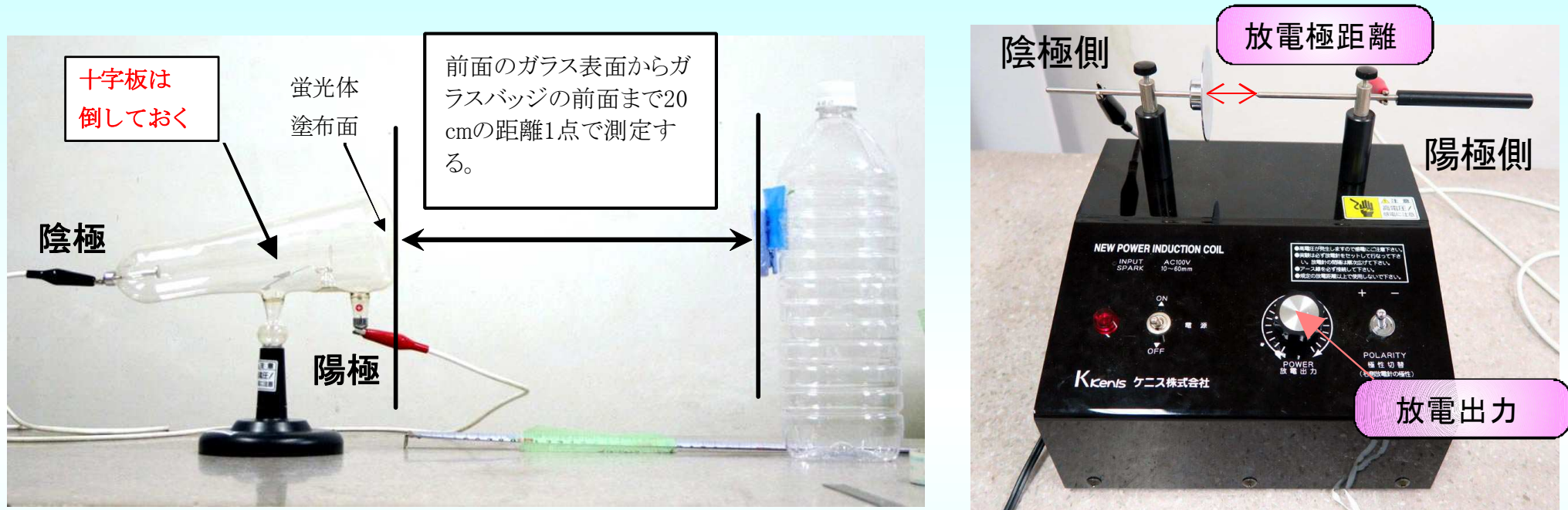
**放電出力を出来る限り
下げる。**

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**

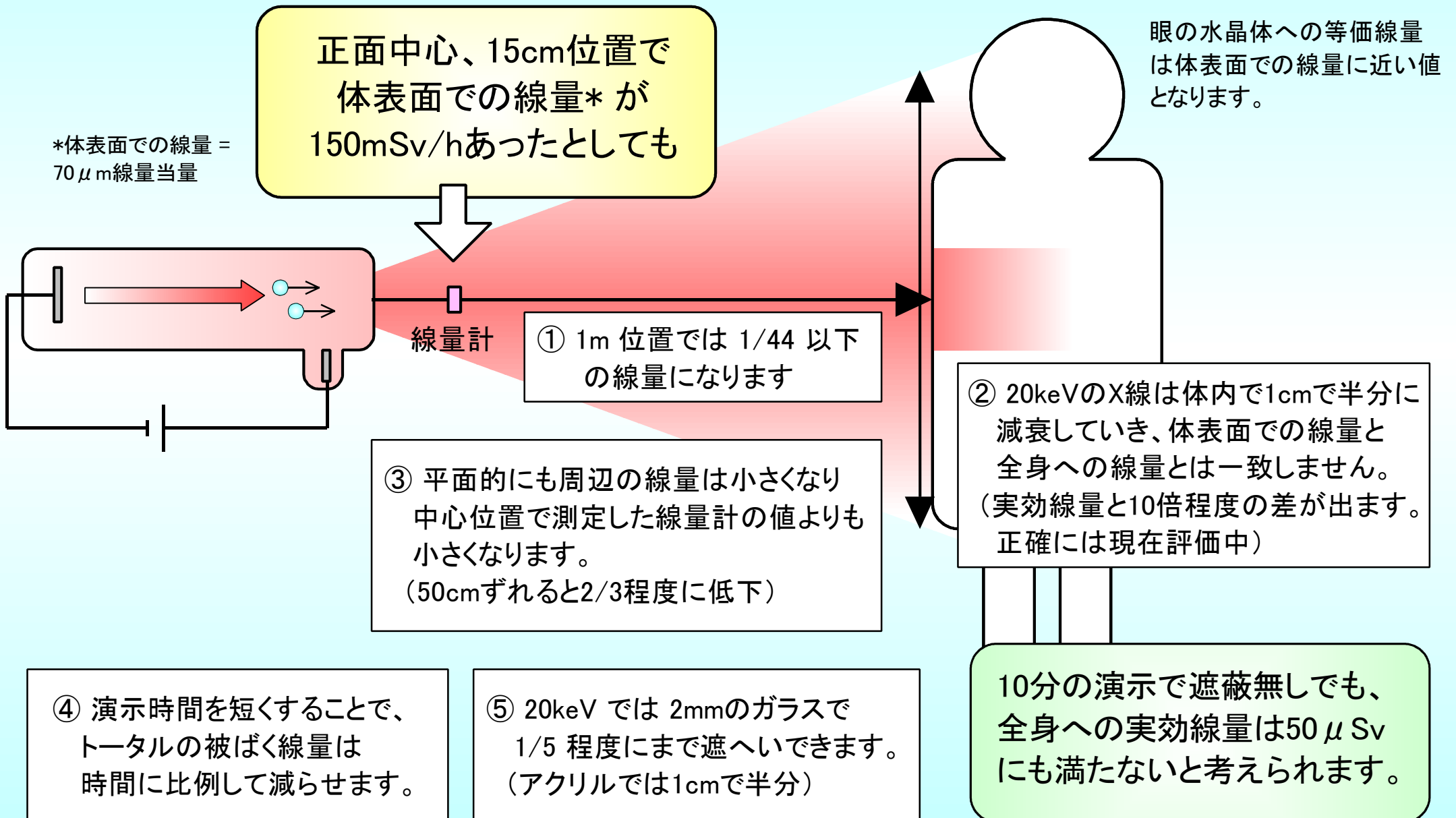


暫定ガイドラインの検証



- ・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。

クルックス管からのX線の不均一性



クルックス管に関する問題点と現状

- ・中学の教育現場で、電流の単元で用いられているクルックス管は、X線が放出されていることがレントゲンの時代から知られているが、その危険性はほとんど教員の間で認識されていない。
- ・製品と使用法によっては、クルックス管表面から15cmの距離でHp(0.07)が10分で33mSvを超えるほど高い線量のX線が放出されている。しかし20keV程度の低エネルギーかつパルス状の放出のため、一般的なサーベイメーターではまともな測定を行うことが出来ない。
- ・ほぼ全くX線を放出しない低電圧駆動の製品も存在するが、教育現場には余りにも予算がない。
- ・まずは不注意に使用すると高い線量を被ばくする恐れがあることの周知が最重要。
- ・次に、ごく簡単な使い方の基本を守れば安全に取り扱うことが出来ることを周知する。現在はこの安全取扱いのガイドラインを暫定的に策定しており、その実証試験が必要。
- ・さらに、継続的な測定のため教員自身による測定手段の提供が必要。
- ・一般公衆に対する線量限度や線量拘束値の概念が法令に取り入れられておらず、自主的な管理目標値の設定が必要。
- ・現在日本保健物理学会の専門研究会において、防護量の評価と管理目標値の検討を行っており、測定法や運用マニュアルと合わせた学会標準化を目指している。出来上がった学会標準をどのように全国の教員に周知するか検討が必要。

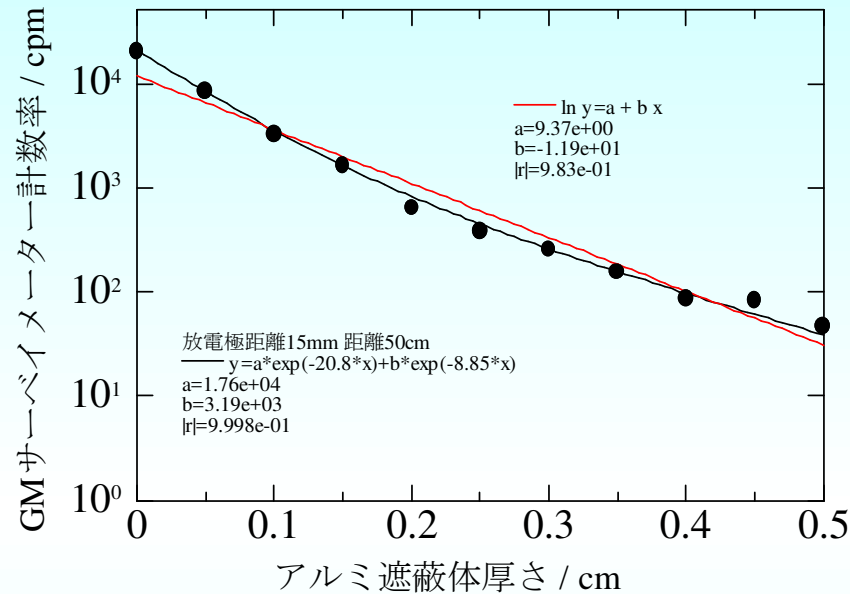
より詳しくは、クルックス管プロジェクトのウェブサイト

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



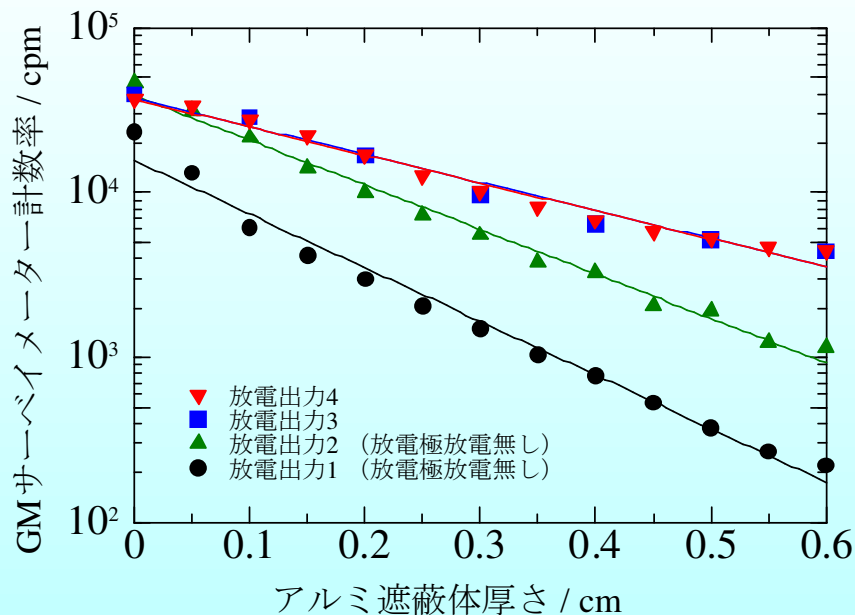
GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価

放電極距離15mmでの測定では、15keVの成分だけでは説明できず、20keVの成分との足し合わせで説明された。



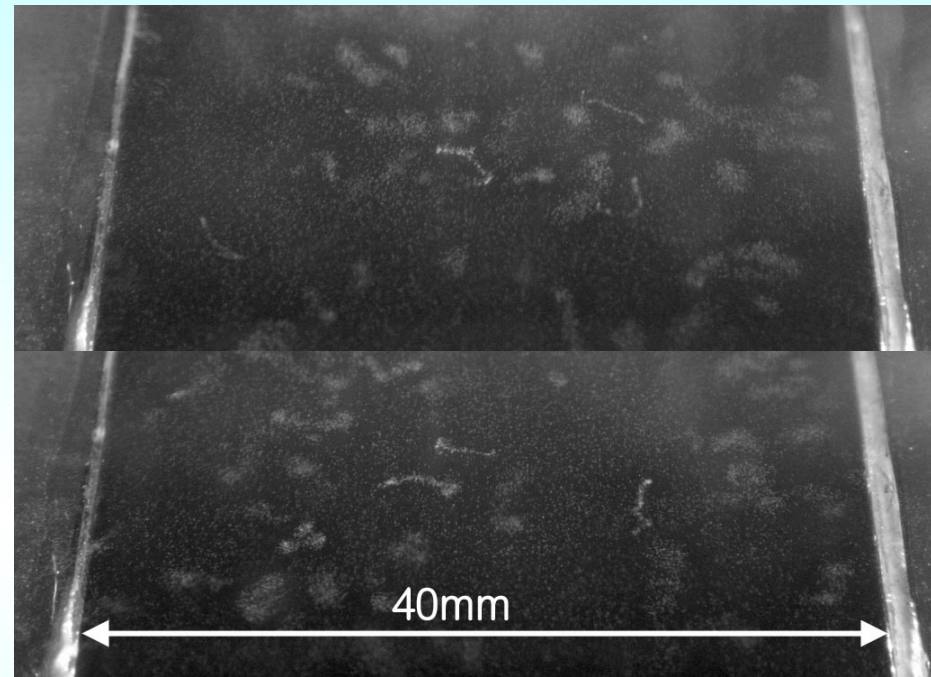
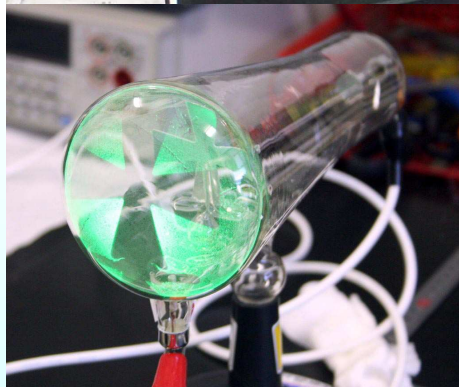
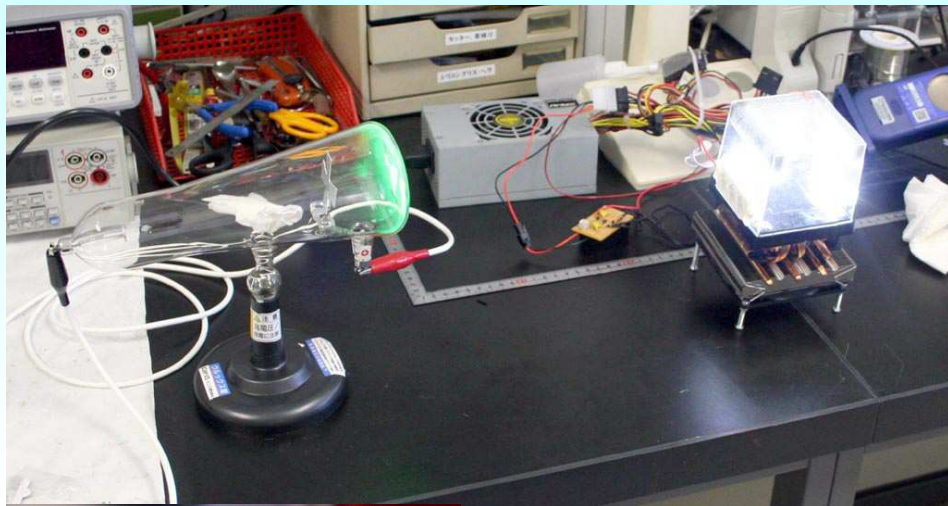
X線エネルギー (keV)	アルミ中の 線減衰係数 μ (cm^{-1})
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

放電極距離は30mmで一定で、放電出力を変化させると線減衰係数が変化していき、放電極で放電が起こる出力3目盛以上で一定となった。



放電出力 (目盛)	線減衰係数 (cm^{-1})
1	7.50
2	6.05
3	3.92
4	3.89

クルックス管を利用したX線の可視化



クルックス管からのX線によって弾き出された光電子の霧箱観察結果。同じような見え方の β 線、 γ 線からの光電子に比べて非常に飛程が短く、「エネルギー」が低いという事が分かる。

電子を弾き飛ばす「電離」と言う現象

放射線と物質の相互作用の本質