

2019年12月5日 @ 東北大学

日本放射線安全管理学会 - 日本保健物理学会 合同大会

企画セッション「教育現場での低エネルギーX線に対する安全管理」-(1)

「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」活動報告

○秋吉 優史, DO Duy Khiem¹⁾, 藤淵 俊王²⁾, 橋本 周³⁾, 古田 琢哉³⁾, 松田 尚樹⁴⁾, 榎本 敦⁵⁾, 大谷 浩樹⁶⁾, 伊藤 照生⁷⁾, 飯本 武志⁸⁾, 加藤 昌弘⁹⁾, 山口 一郎¹⁰⁾

大阪府大・量子¹⁾, 九大医²⁾, 原子力機構³⁾, 長崎大⁴⁾, 東大医⁵⁾, 帝京大医⁶⁾, 東邦大医⁷⁾, 東大・環安本部⁸⁾, 産総研⁹⁾, 保健医療科学院¹⁰⁾

クルックス管プロジェクトの有志の皆様

秋吉 優史: akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp

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



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 ↓



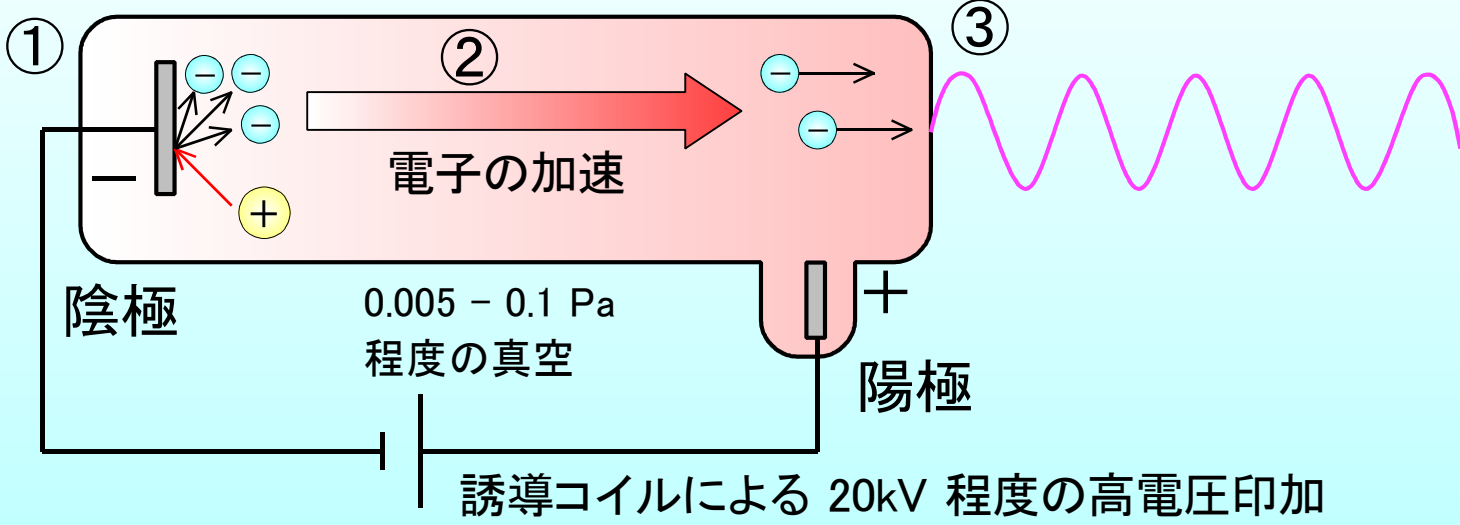
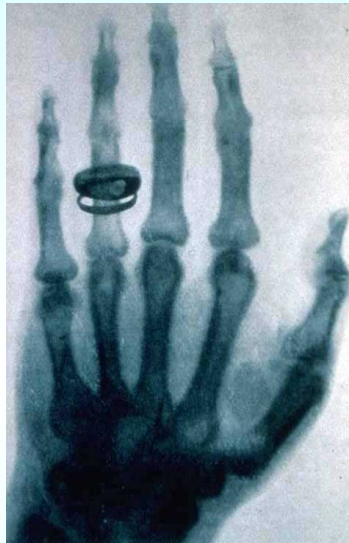
クルックス管とは？

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。

？ 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。

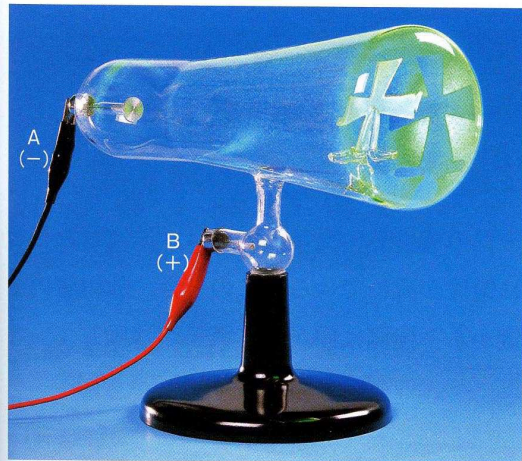
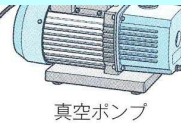


図39 電流のもとなるものを調べる実験①
 図36)の誘導コイルを使って、AB間に電圧を加える。なお、放電管内の気圧は、図37)の放電管Fと同じぐらいである。



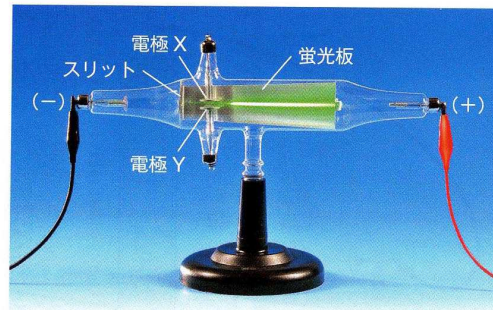
図39)も(図40)も、電気の流れは+のほうに引かれているようだ。

誘導コイル

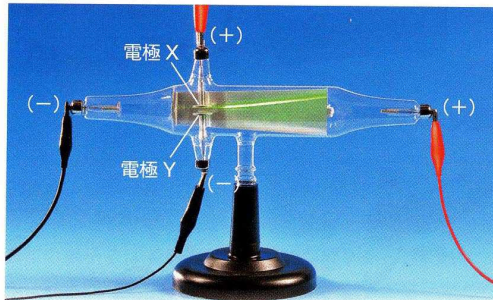


真空ポンプ

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

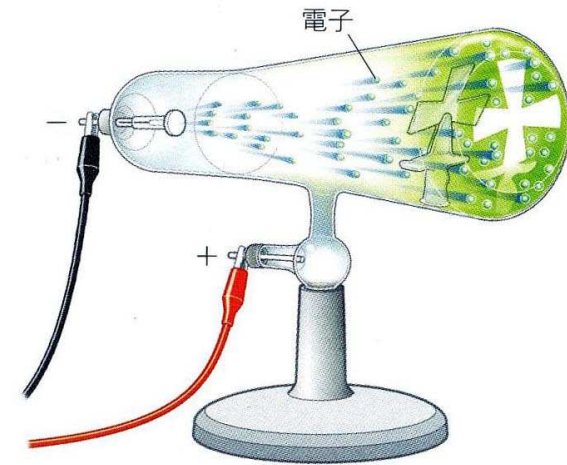


図41 十字板入り放電管と電子のモデル
 一極側から出た電子が十字板に当たり、そのうしろに影をつくる。ガラス壁に衝突した電子は、+極側に移動していく。

- 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。

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

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している(**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-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。

保健物理学会「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」において国内外の規制状況について議論を行っている。

クルックス管プロジェクトについて

Task 1: 線量計測

放射線計測の専門家

大学・国研

ユーザーとしての学校教員

中・高

教材・測定手段の提供者

民間企業

実際に現場で使えるシステムの開発

低エネルギーX線
測定技術の標準化

Task 2: 運用方法の検討

学校教育現場の教員

Task1 で開発した評価手法

様々な製品の評価

教材メーカー

大学研究者、OB

開発した教育コンテンツの評価

実態評価に伴う問題点の抽出

遮蔽体など
解決策の提示

Task 3: 線量評価とガイドライン

保健物理・放射線防護の専門家

低エネルギーX線による
(実効・等価)線量評価モデルの構築

Task1で測定
した線量・
スペクトル情報

国内外の規制実態を踏まえた
上限線量の検討

Task2で検討
した運用方法

教育現場における放射線安全管理
ガイドラインの作成

学会標準化

Task 4: 放射線教育プログラム普及

放射線教育の専門家

新規放射線教育プログラムの開発

全国の拠点でのシンポジウム、オープンスクール、
モデル校での授業、教育学部での講義など
での放射線教育プログラム普及

小中高大民国 オールジャパンの
放射線教育ネットワークの形成

放射線知識の
国民的普及

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。

本当に暫定ガイドラインの遵守のみで安全管理体制を確立できるのか?

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

固有安全性を持ち
何も対策する必要がない

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

専門研究会としての活動

第一回会合

2019年 5月 17日(金) 10:00~12:00

東京都千代田区内神田3-16-10 金剛ビル4F 貸し会議室

委員 秋吉 優史、伊藤 照生、榎本 敦、橋本 周
 スカ이프参加委員 大谷 浩樹、藤淵 俊王、古田 琢哉
 オブザーバー 加藤 昌弘、山口 一郎、増子 寛
 スカ이프参加オブザーバー 松浦 寛人

- ・全員の自己紹介、専門分野の確認
- ・研究会趣旨、現状の説明と研究会で達成すべきタスクの確認(秋吉)
- ・役割分担確認

第二回会合

2019年 6月 28日(金) 16:30~18:30

東大病院・管理研究棟2階第3会議室

委員 秋吉 優史、伊藤 照生、榎本 敦、古田 琢哉、
 スカ이프参加委員 大谷 浩樹
 オブザーバー 山口 一郎
 スカ이프参加オブザーバー 加藤 昌弘、松浦 寛人、松本 亮(M1)

- ・測定関連での現状の説明(秋吉)
- ・PHITSコードを用いた防護量計算に関する解説(古田)
- ・電離則など法令適用に関する検討(山口)
- ・実態調査プロトコルの決定など、今後の方針検討

第三回会合

2019年 10月 21日(月) 17:00~19:00

東大医学部セミナー室

委員 秋吉 優史、榎本 敦、古田 琢哉
 オブザーバー 山口 一郎、古田 雅一
 スカ이프参加オブザーバー 加藤 昌弘、松本 亮(M1)

- ・第二期実態測定8月期結果説明(秋吉)
- ・シミュレーションの進捗状況報告(秋吉)
- ・JRSM-JHPS 合同大会での企画セッションについて

氏名	現在の専門	所属	職名
秋吉 優史	放射線安全管理、照射損傷評価(材料)	大阪府立大学 放射線研究センター	准教授
藤淵 俊王	放射線防護	九州大学 医学研究院保健学部門	教授
橋本 周	放射線安全管理	JAEA 大洗研究所放射線管理部 環境監視線量	課長
松田 尚樹	放射線安全管理	長崎大学 原爆後障害医療研究所	教授
榎本 敦	放射線生物学	東京大学 医学系研究科 疾患生命工学センター 放射線分子医学部門	講師
大谷 浩樹	物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理、内科系臨床医学 放射線科学	帝京大学 医療技術学部 診療放射線学科	教授
古田 琢哉	線量評価(PHITSコード)	JAEA 原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター 放射線挙動解析グループ	研究副主幹
伊藤 照生	放射線治療技術学、放射線管理理学、放射線教育学	東邦大学 医療センター佐倉病院 中央放射線部	医学物理士

オブザーバ

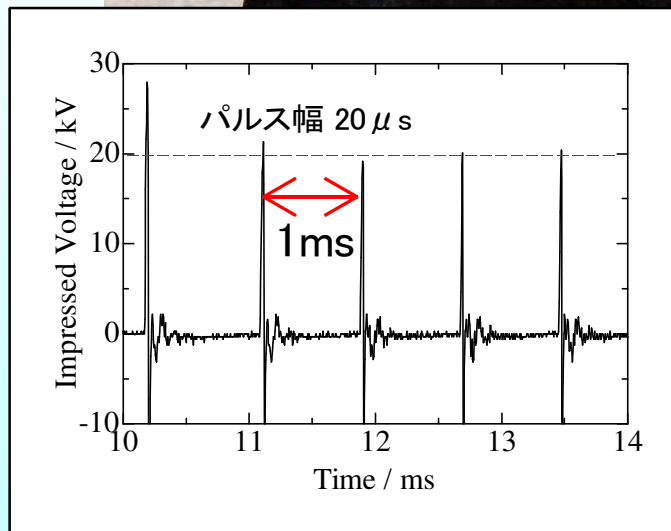
飯本 武志	放射線防護	東京大学 環境安全本部	教授
加藤 昌弘	放射線防護	産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門 放射線標準研究グループ	主任研究員
山口 一郎	放射線防護、線量評価	国立保健医療科学院 生活環境研究部	上席主任研究官
下 道國	放射線防護	藤田医科大学	客員教授
占部 逸正	放射線防護、環境放射線計測	福山大学 工学部 情報工学科	教授

誘導コイルを用いた高電圧印加について

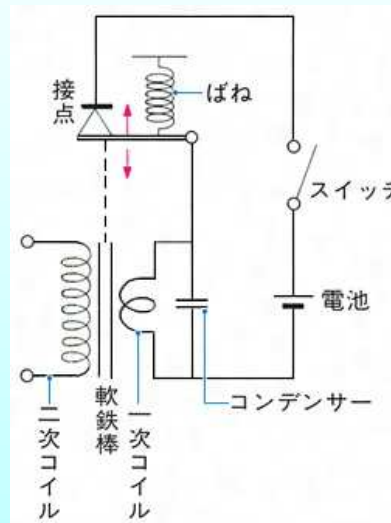
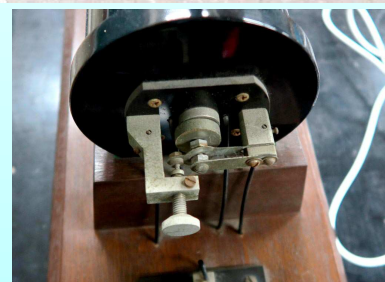


放電出力ダイヤルによりトランスの一次側に印加する電圧を変えることで連続的に出力電圧をコントロール可能。空気中での絶縁破壊電圧が 1kV で 1mm 程度であることから、放電極の距離を変えることで印加する最大電圧を規定できる。

→ 20mm にしておくとも 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。

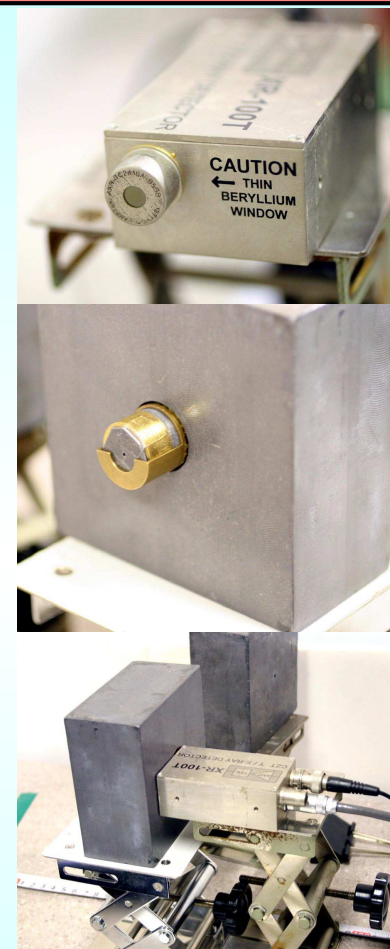
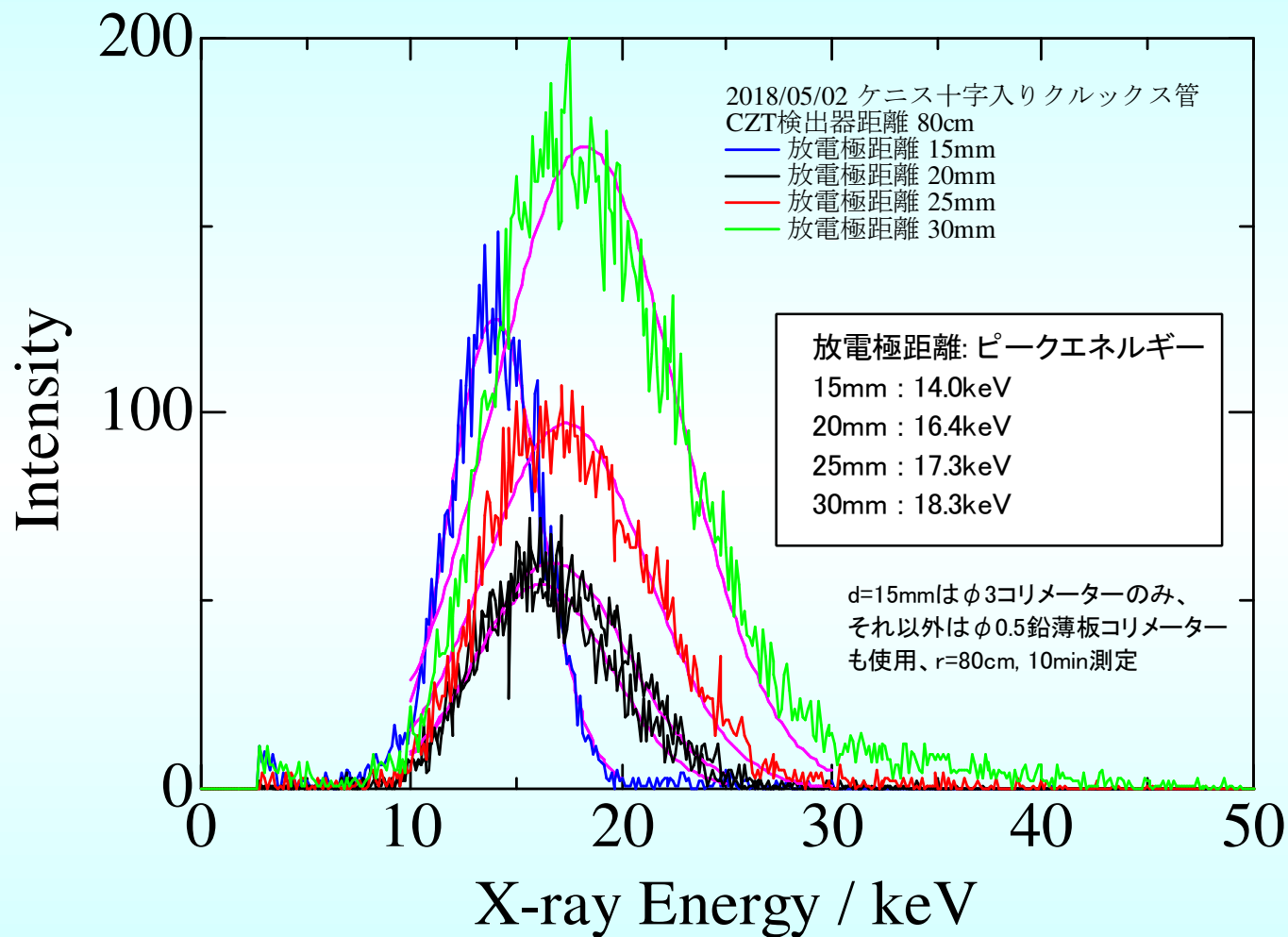


放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流 $80\mu A$



ブザーの回路で、一次側に断続的な電圧のパルスが発生させ、トランスで二次側に高圧を出力する。一次側の電圧を変化させると二次側の電圧も変化する。半導体回路で一次側のパルスが発生している装置もある。

CZT半導体検出器によるスペクトル評価



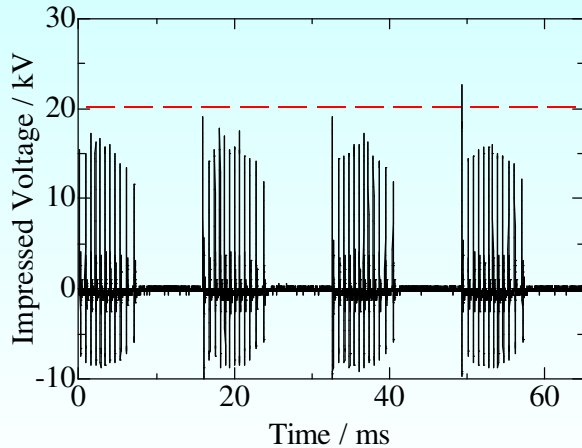
Amptek XR-100T-CZT
CZT(Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te)検出器
Be窓、ペルチェ冷却



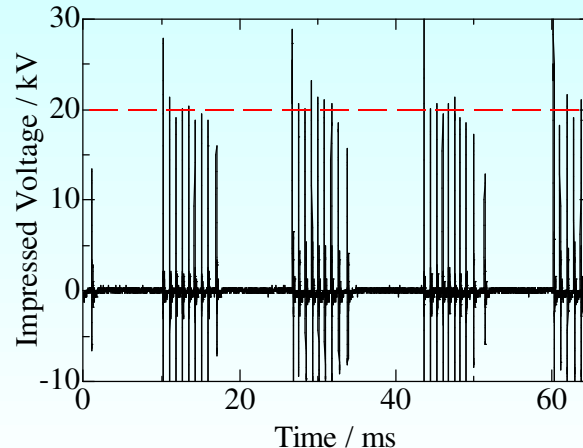
φ3同軸鉛コリメーター
φ2同軸黄銅コリメーター
φ1.0鉛薄板コリメーター
φ0.5鉛薄板コリメーター

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

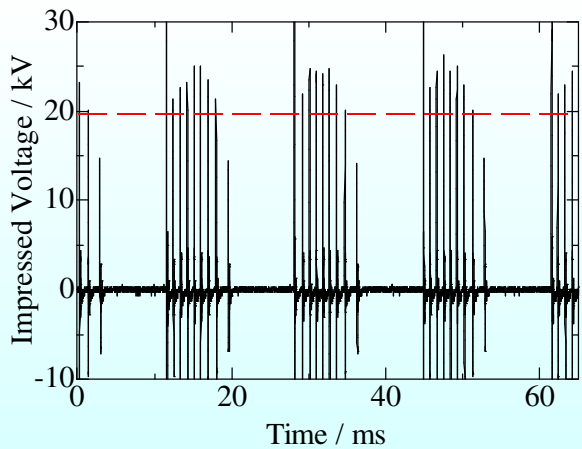
誘導コイル設定による出力パルスの変化



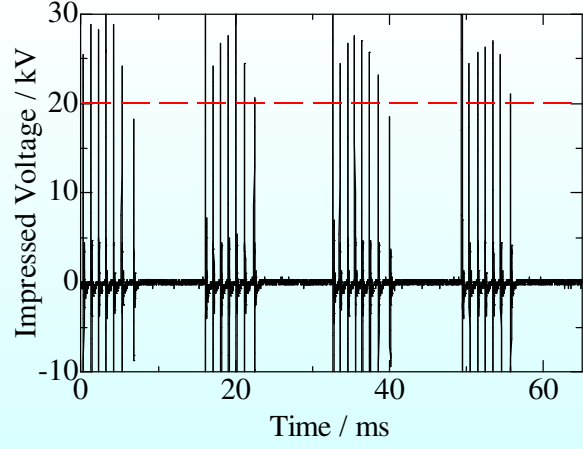
DDE=20mm, PW0, 40 μ A, 120 μ Sv/h



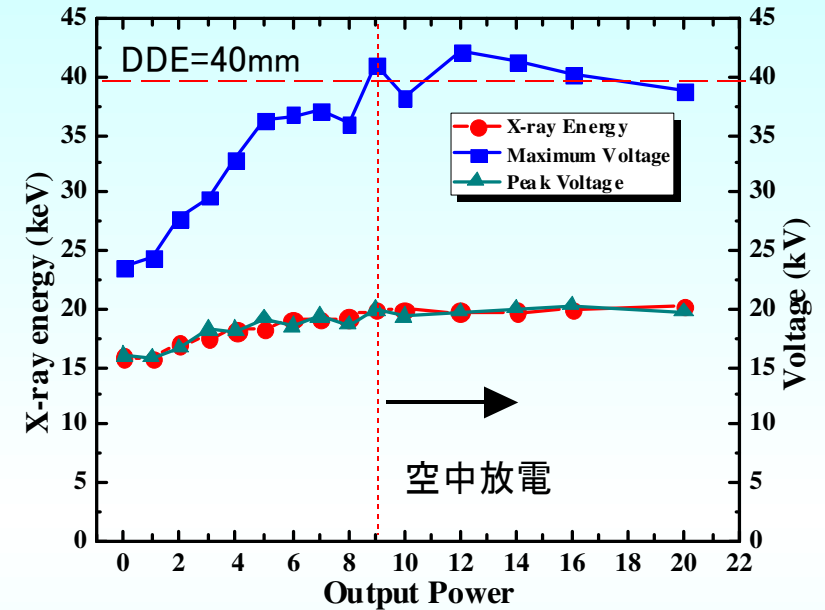
DDE=20mm, PW4, 80 μ A, 1.25mSv/h



DDE=30mm, PW4, 80 μ A, 1.56mSv/h



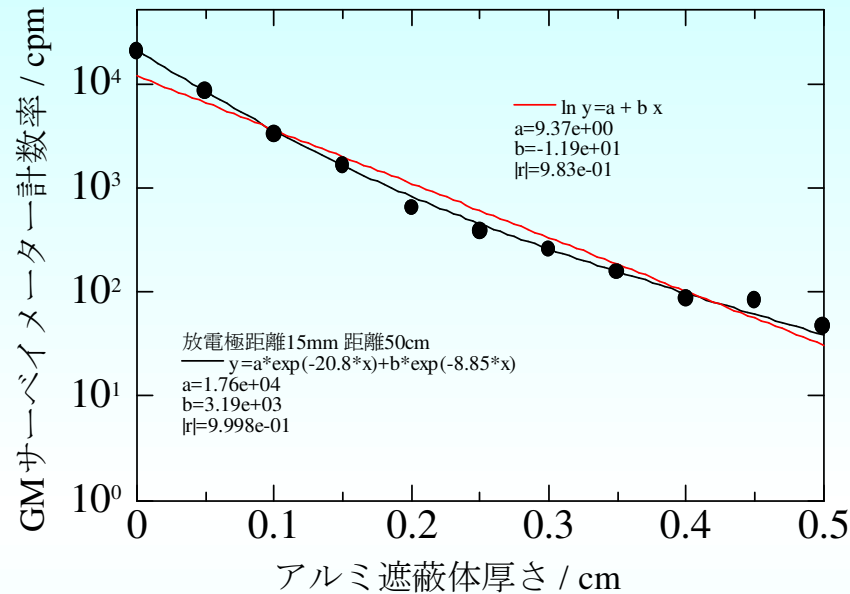
DDE=30mm, PW7, 96 μ A, 3.50mSv/h



- ・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。

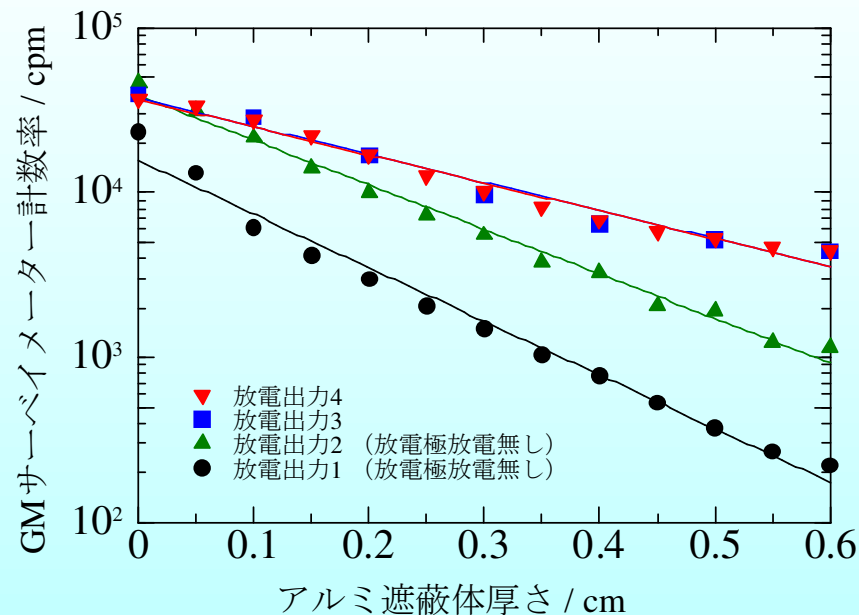
GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価

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

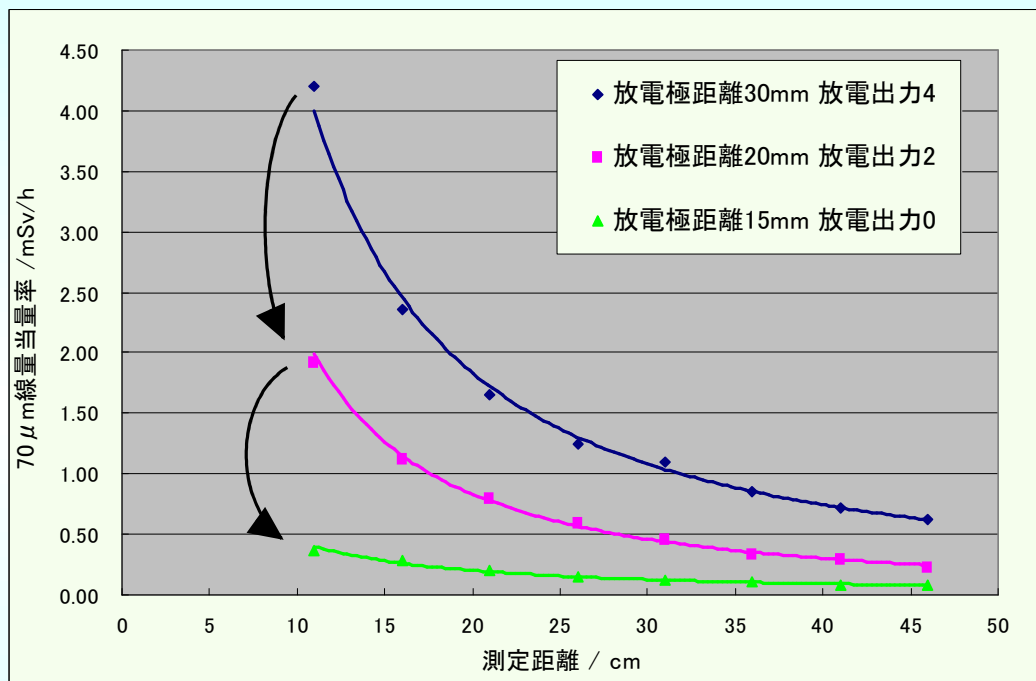
放電極距離は30mmで一定で、放電出力を変化させると線減衰係数が変化していき、放電極で放電が起こる出力3目盛以上で一定となった。



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

漏洩線量の印加電圧、電流、距離依存性

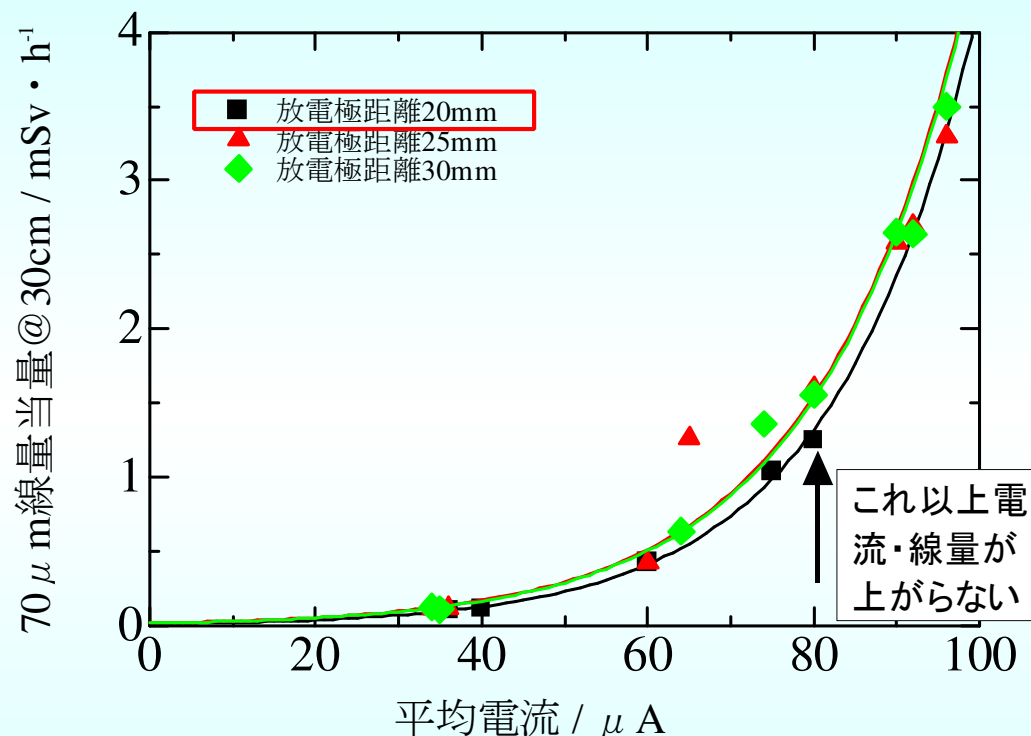
放電極距離 30, 20, 15mm でギリギリ
放電が起こる出力に合わせて測定



・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

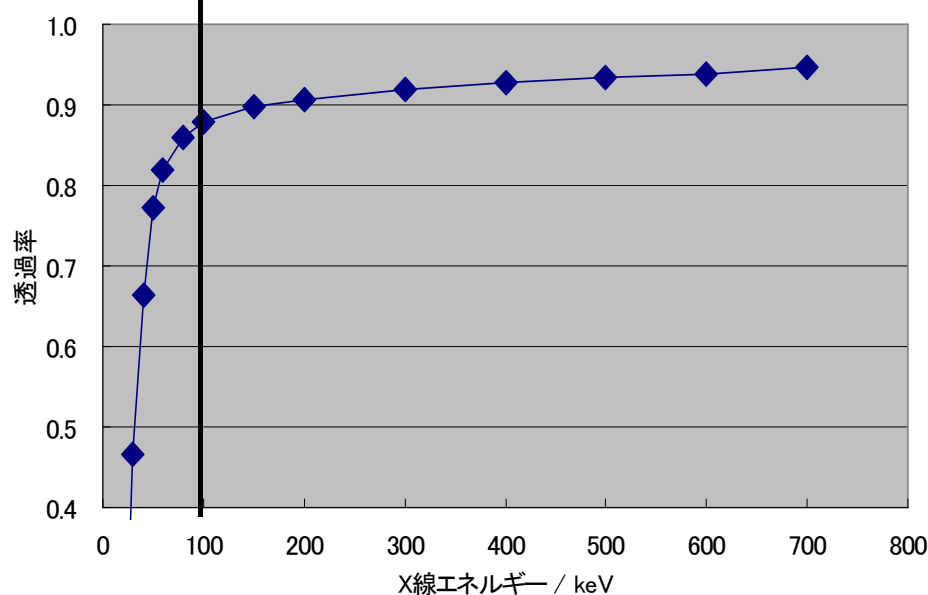


・電流上昇に従い指数関数的に線量が上昇
放電出力上昇で電圧も電流も同時に上昇するため、
電子線が観察できる必要最小限の出力に留めて下さい。
その上で、放電極は一定以上に電圧を上げないための
安全弁の役割を果たしています。

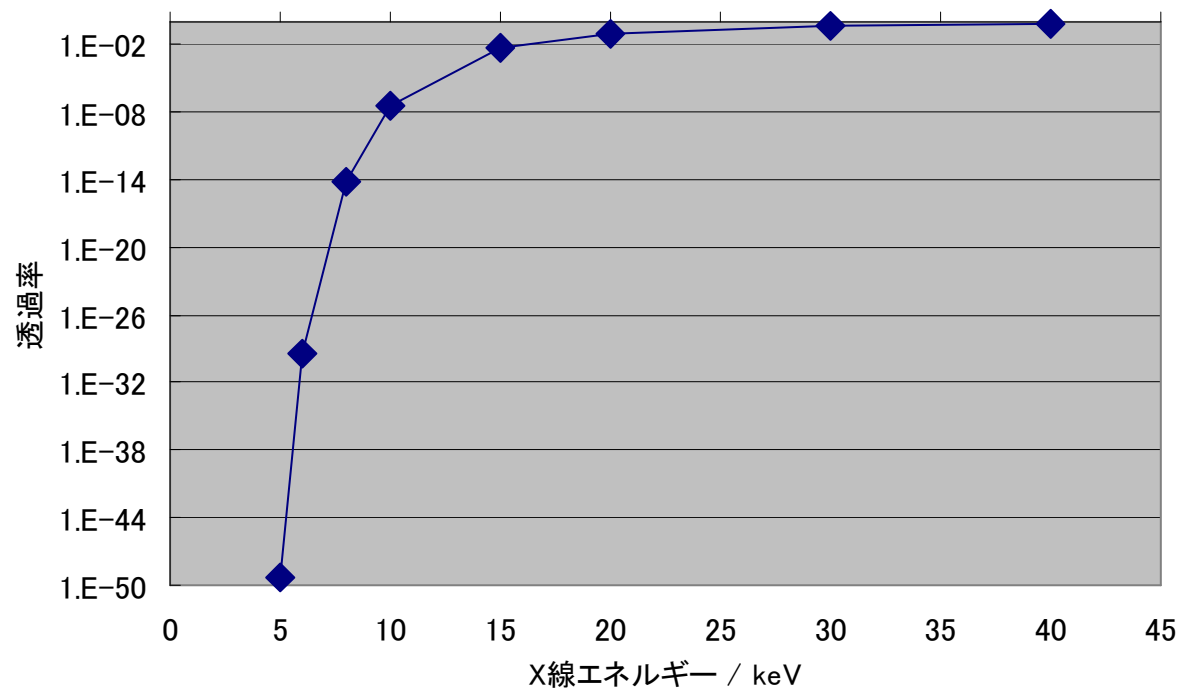
わずかな印加電圧低下での大きな線量の変化

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

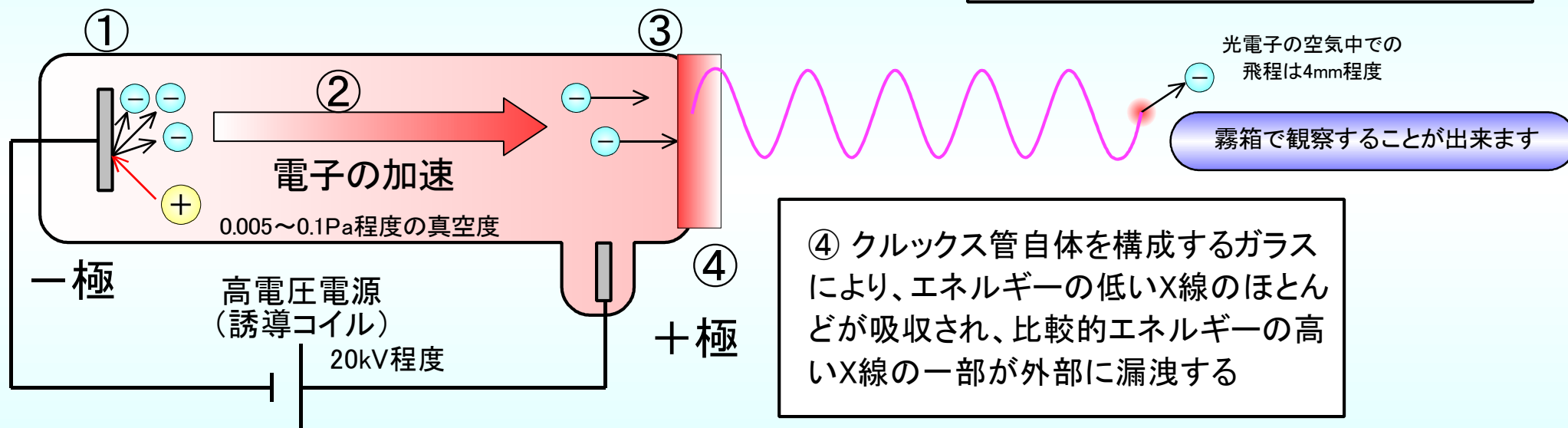
クルックス管からのX線の漏洩

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。



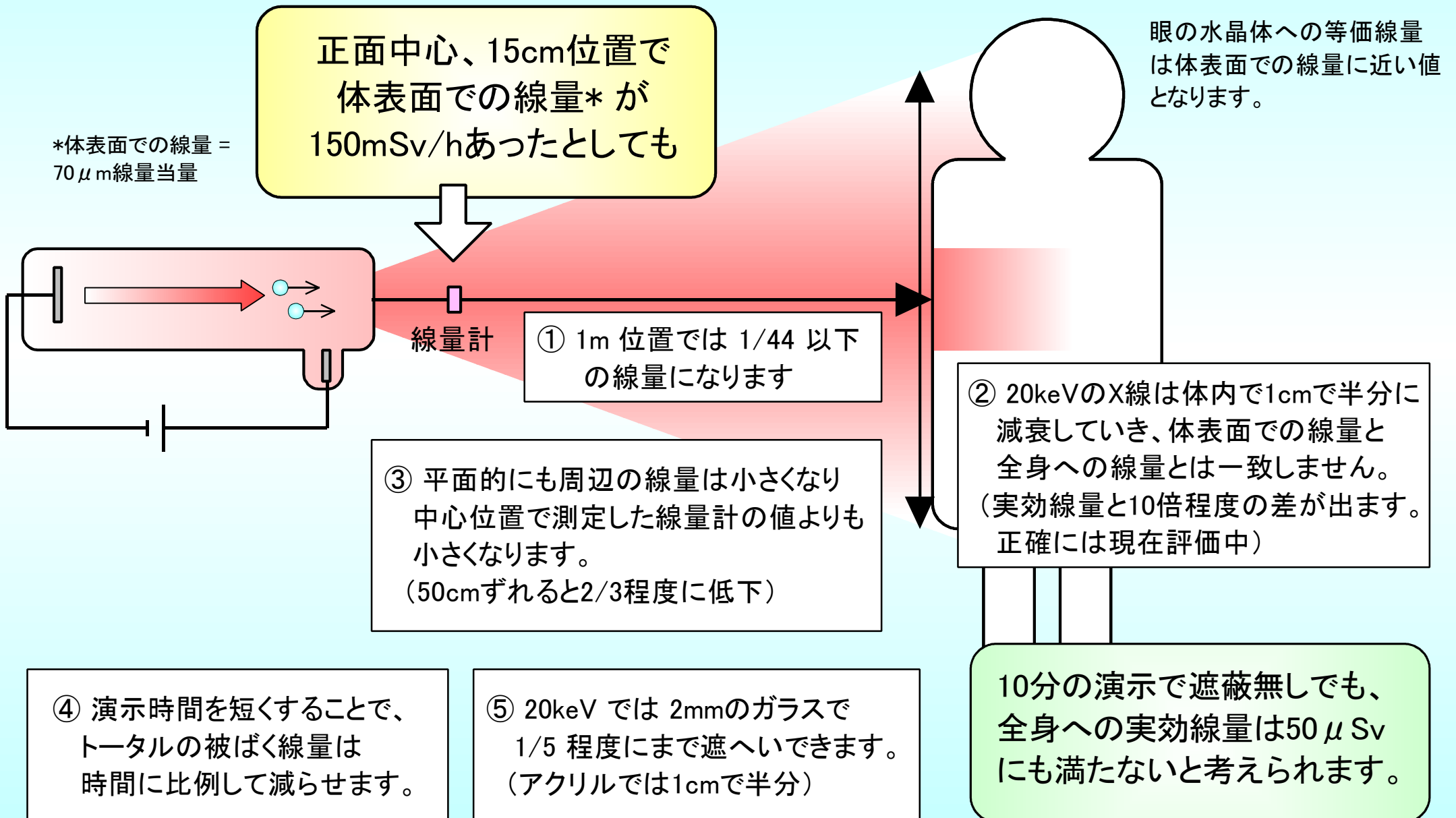
④ クルックス管自体を構成するガラスにより、エネルギーの低いX線のほとんどが吸収され、比較的エネルギーの高いX線の一部が外部に漏洩する

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

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を検討が必要。

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。

