

**2019年11月20日 大阪府高等学校理科教育研究会
物理研究集会 @ 大阪府立茨木高等学校**

クルックス管を用いた教育 における放射線安全管理

**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>



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 ↓



背景

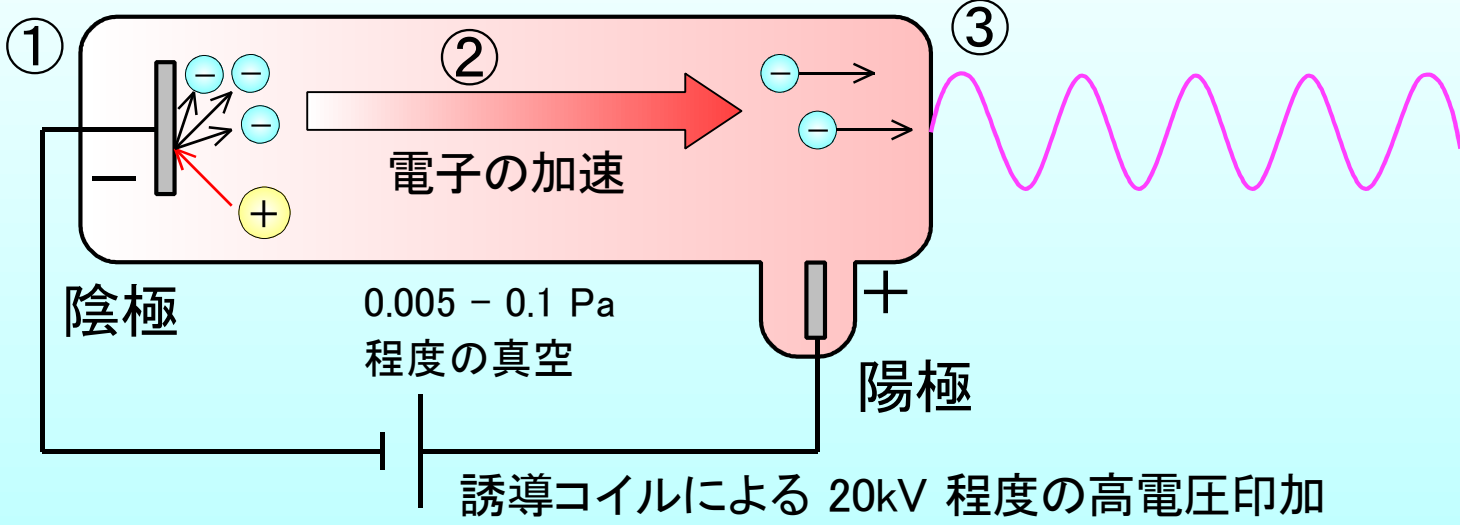
クルックス管とは？

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。

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

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

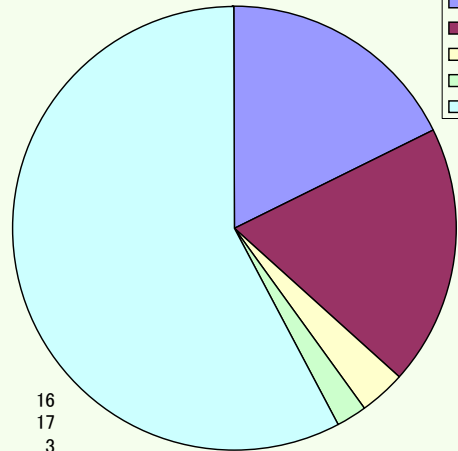
指導書

- ・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

現在の学生に対する授業の実態調査

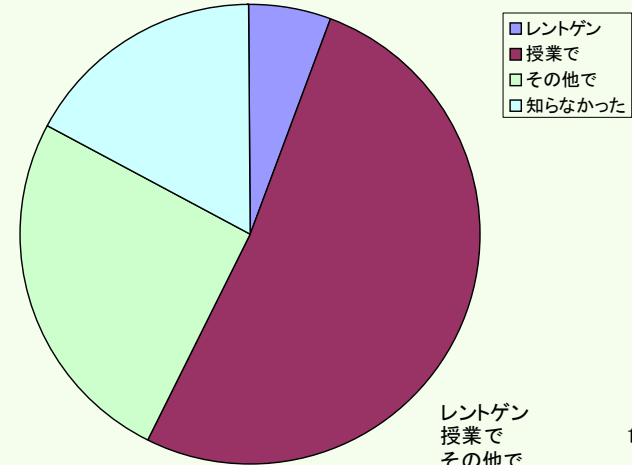
2019年11月に行った大阪府立大学の1回生向け授業でのアンケート。
工学だけでなく、看護や獣医などの学生がまんべんなく受講。回答数 90。

Q1. あなたは今までにクルックス管の実演を見たことがありますか？



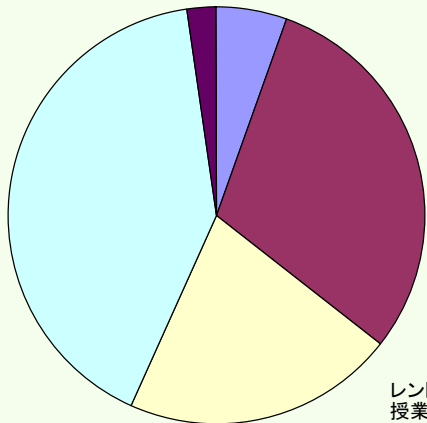
中学 16
高校 17
中学+高校 3
その他 2
なし 52

クルックス管を見たことがある見たことがある35人の中で
Q2. クルックス管からX線が出るということは知っていましたか？



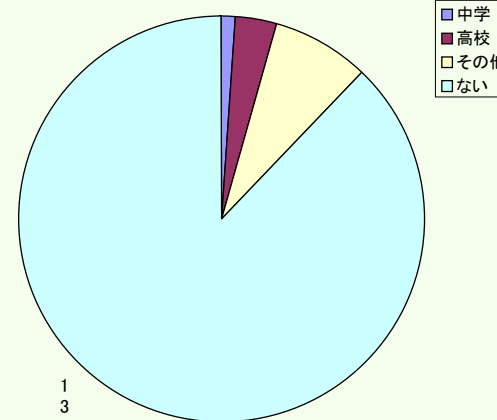
レントゲン 2
授業で 18
その他 9
知らなかった 6

Q2. クルックス管からX線が出るということは知っていましたか？



レントゲン 5
授業で 27
その他 19
知らなかった 37
無回答 2

Q4. あなたは今までに霧箱を見たことがありますか？



中学 1
高校 3
その他 7
なし 79

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

大阪府立大学のつばさ基金制度を 活用した放射線教育振興プロジェクト

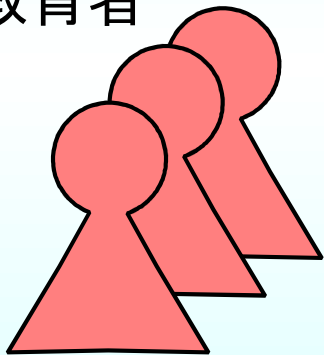
全国の教育現場での
放射線教育の実施
(委託)

寄附金額の半額分程度を上限に貸与
10万円の寄付で、5万円分の物品

放射線教育用の物品

寄付頂いてすぐに物品発注
を行う必要はありません。
必要に応じて、年度繰り越
しも可能です。

教育者



ふるさと納税
(寄付)

放射線教育振興プロジェクト:
1627200700 に寄付する旨連絡

大阪府

プロジェクト
への分配

13%は大学へ

大阪府立大学
放射線研究センター

物品購入

寄付者の地元
自治体

自己負担2000円以外は翌年の税金控除で
全額(*)帰ってきます

*所得により上限金額があり、
独身で年収600万円の場合
¥77,000の寄付が可能です。

「換金性の高い物品」の貸与は
出来かねますので、ご容赦下さい

ペルチェ霧箱を貸与する場合は、客観的で透明な経理
を実現するために、大阪ニュークリアサイエンス協会
(ONSA)を通して、直接公費での会計処理を行います。
それ以外の物品は、公費対応でない通販業者などでも、
立替払いで対応可能です。

ペルチェ冷却霧箱の売上利益から、製作のための
学生アルバイトを雇用して社会還元しています。

府大からも2000円分相当の
府大グッズが進呈されます

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 Justification: リスクを上回る利益がなければならない

→ クルックス管を用いた実演は極めて教育的効果が高く、将来的な放射線教育コンテンツとしても非常に価値が高い。

防護の最適化 Optimization:

できるだけ被ばくを抑える(経済、社会的な要因の考慮)

ALARA(as low as reasonably achievable)の原則

→ 電子線の観察だけであれば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。が、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、コンテンツ毎に必要なX線のエネルギーを把握し、出来る限り電圧を抑えて実験を行い被ばくを最小化する。必要に応じて遮蔽などの防護措置も行う。

線量限度 Dose Limit: 線量限度を超えてはならない

→ 放射線取扱業務従事者ではない教員や、さらに労働者でもない生徒に対する被ばく管理目標値を、国内外の規制状況から議論する。低エネルギーX線による不均等被ばくと水晶体への等価線量についても考慮する。

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(**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。

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:
 $10 \mu\text{Sv}$



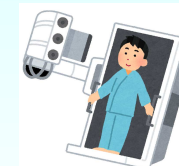
0.01mSv
($10 \mu\text{Sv}$)

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

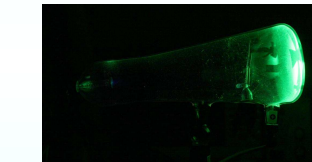
CTスキャン1回:
数mSv



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:
 $100\text{--}200 \mu\text{Sv}$



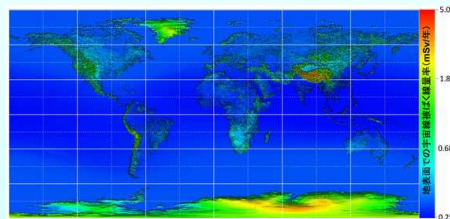
日本人が特有に持っている
 20Bq のポロニウム
 210 による年間被ばく
線量: $800 \mu\text{Sv}$

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:
 $\sim 10\text{mSv}$

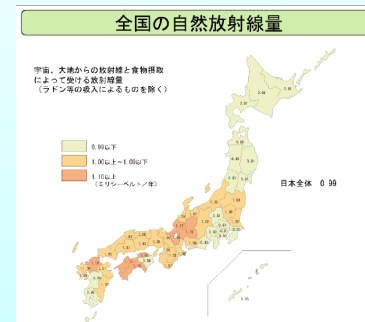


ランタンのマントル*を
1時間体に貼付ける:
Hp(10) $1 \mu\text{Sv}$ (γ 線)
Hp(0.07) $10 \mu\text{Sv}$ (β 線 + γ 線)

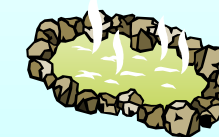
*トリウム使用のサウスフィールド ハイパワーDXマントル



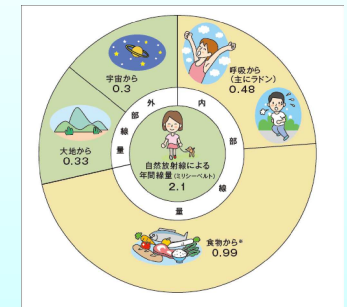
年間の宇宙線量の世界平均と
日本平均の差:
 $50 \mu\text{Sv}$ (日本の方が小さい)



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)



自然放射線による
年間の被ばく線量
日本平均 2.1mSv
世界平均 2.4mSv

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。

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。

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

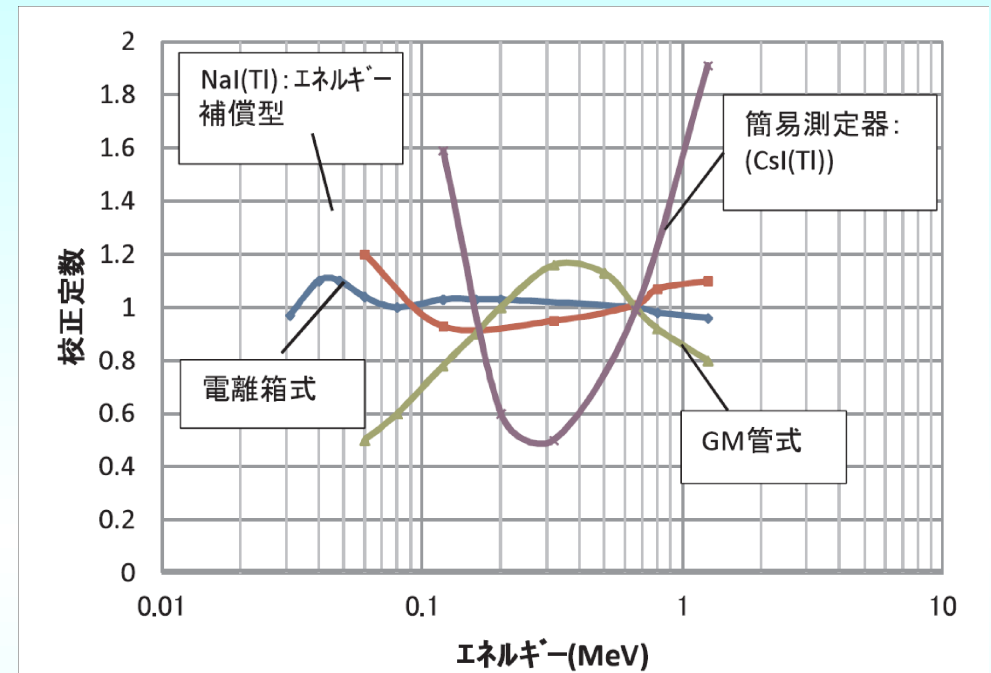
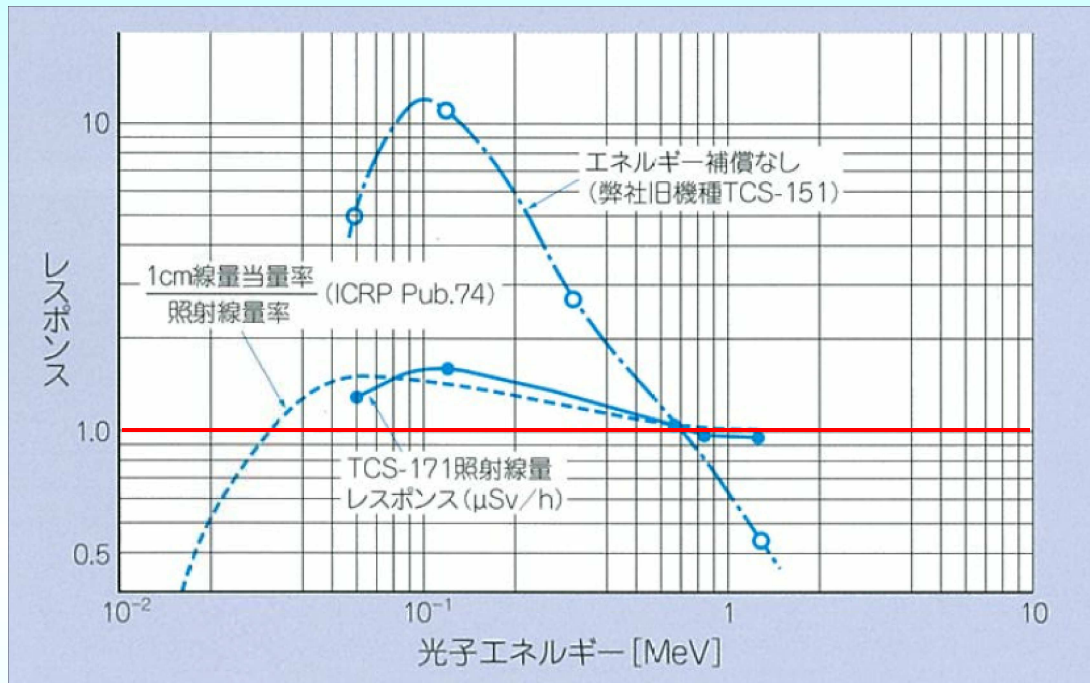
低エネルギーX線の線量測定

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

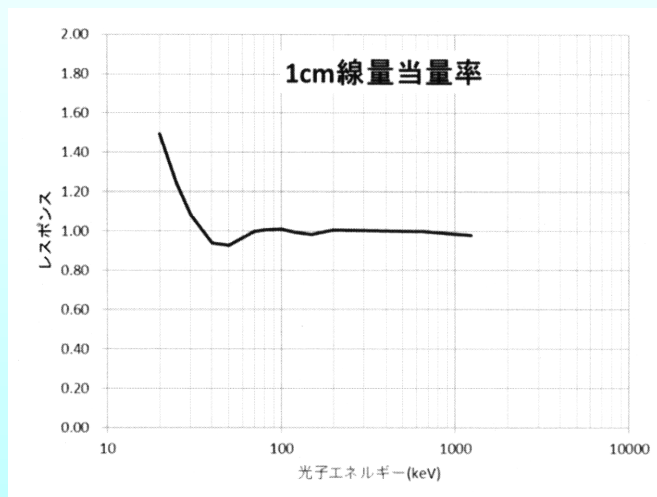
(アロカ TCS-171カタログより)

様々なサーベイメータのエネルギー特性

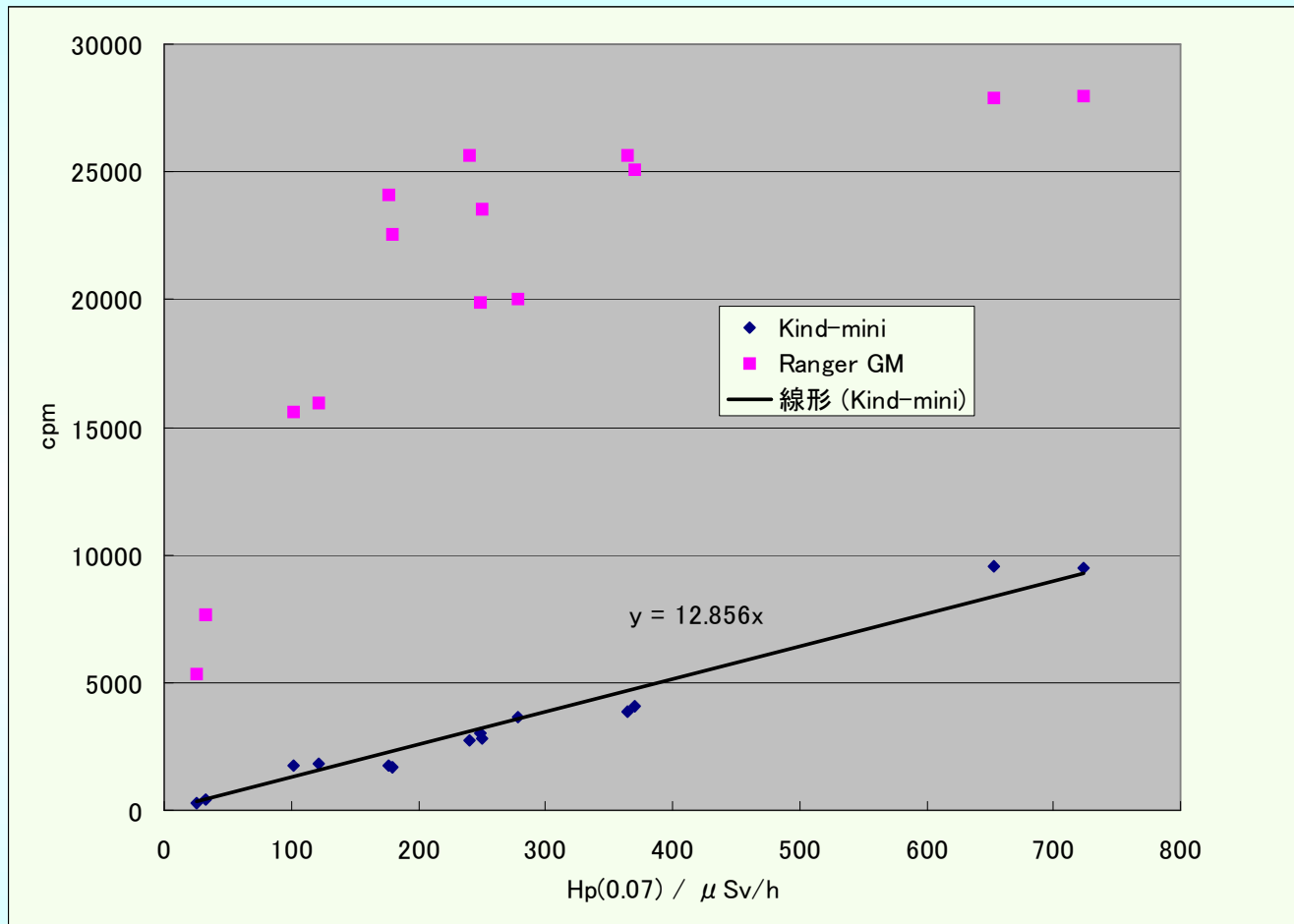
(放射線計測協会 放計協ニュース No.48, 2011, p6)

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)



簡易なサーベイメーターによるスクリーニングの可能性



横軸は低エネルギー測定対応の電離箱 日立 ICS-1323 で測定した70 μm線量当量。時間変動があるため、簡易測定器での測定の前後で測定し、平均を取った。



Kind-mini

プラスチックシンチレーターを用いた簡易測定機。放射線教育支援サイト「らでい」から借りることが出来る。



Ranger

米国 S.E.International 社製のパンケーキ型広窓GMサーベイメーター。Inspector USB の後継機。不感時間100 μs程度であり、理論上の計数率の上限は、600kcpm。

誘導コイルを用いた高電圧印加について



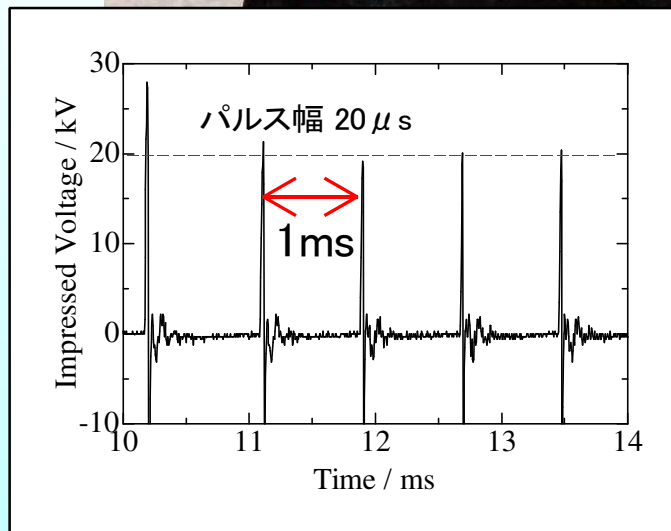
Distance of Discharge Electrodes
DDE

PW

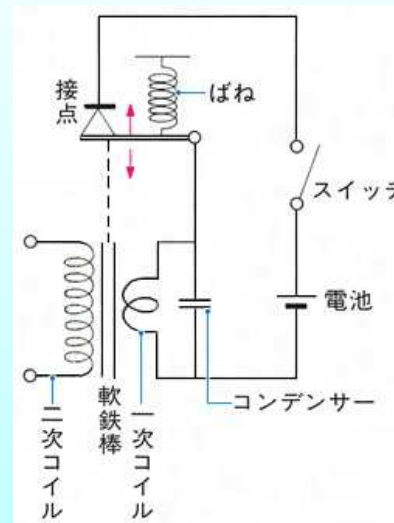
放電出力

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 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。



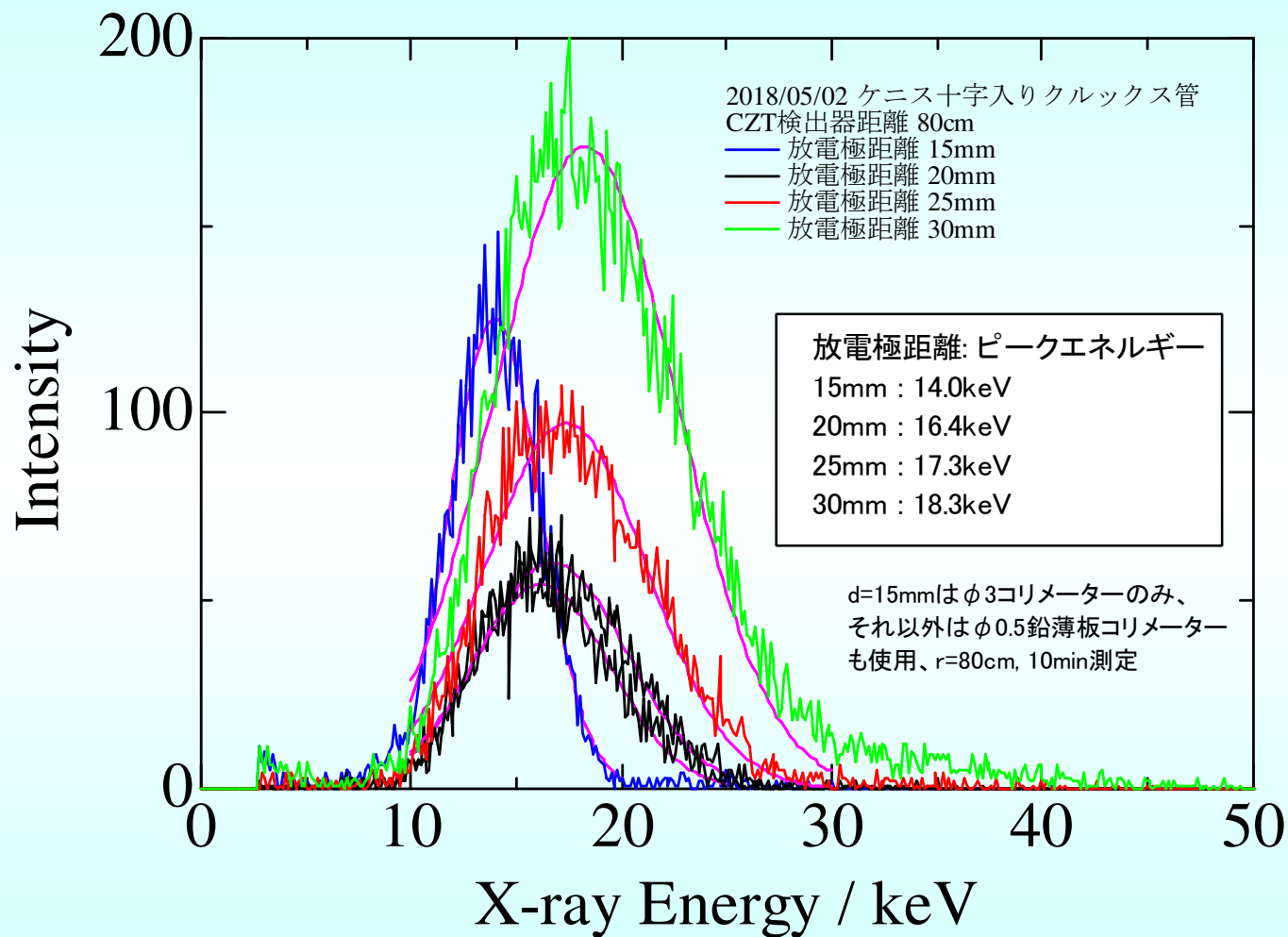
放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流 80 μA



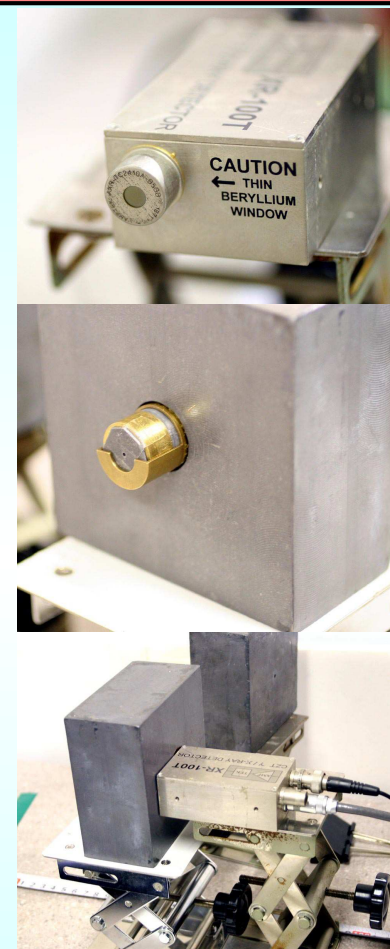
ブザーの回路で、一次側に断続的な電圧のパルスが発生させ、トランスで二次側に高圧を出力する。一次側の電圧を変化させると二次側の電圧も変化する。半導体回路で一次側のパルスが発生している装置もある。



CZT半導体検出器によるスペクトル評価



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



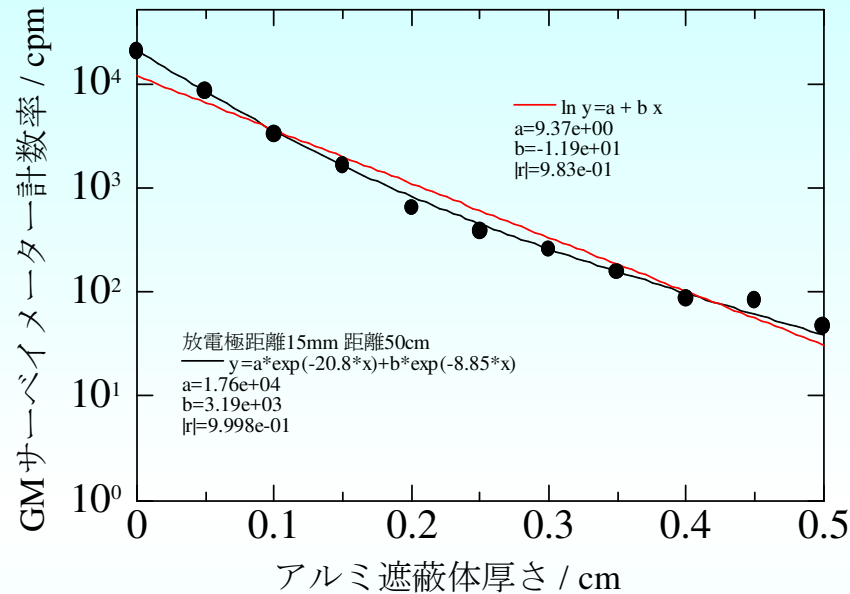
Amptek XR-100T-CZT
CZT(Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te)検出器
Be窓、ペルチエ冷却



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

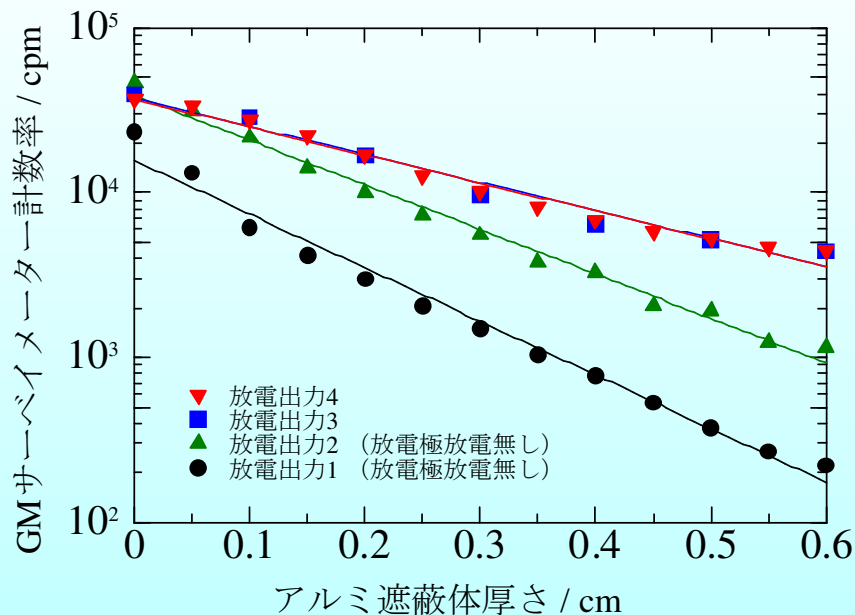
GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価

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。



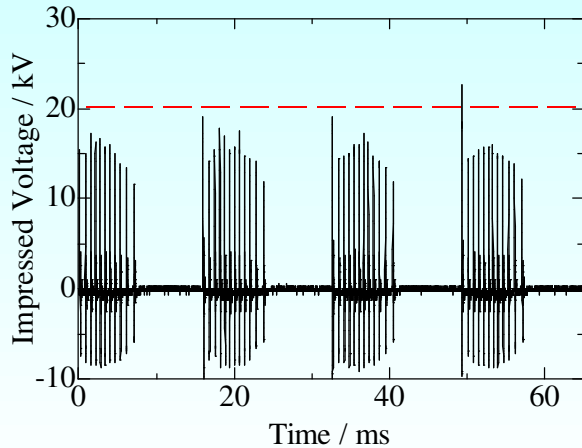
X線エネルギー (keV)	アルミ中の 線減衰係数 μ (cm^{-1})
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

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。

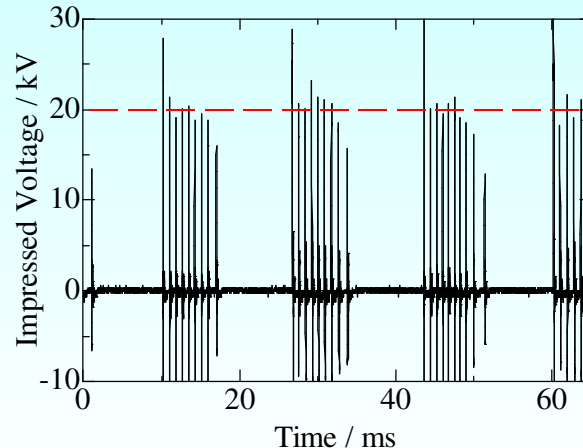


放電出力 (目盛)	線減衰係数 (cm^{-1})
1	7.50
2	6.05
3	3.92
4	3.89

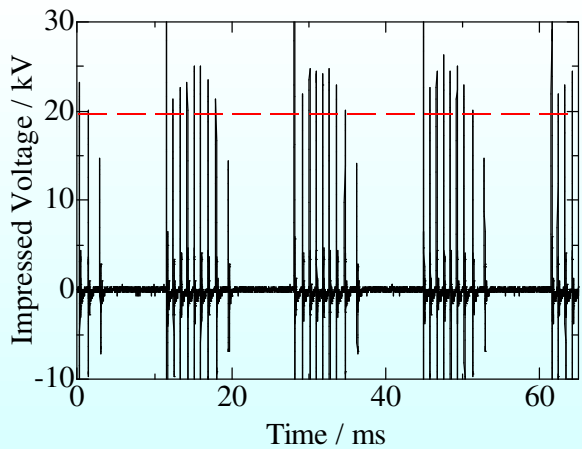
誘導コイル設定による出力パルスの変化



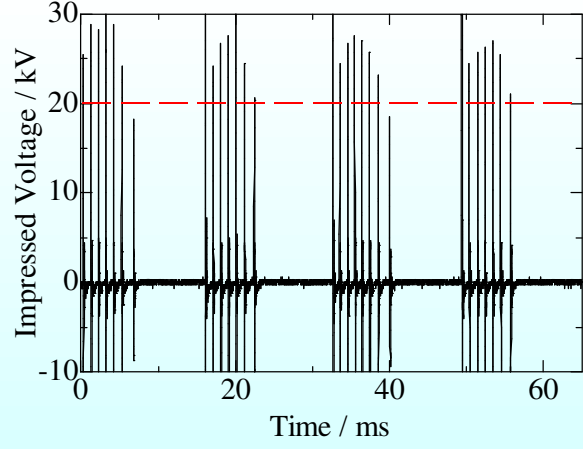
DDE=20mm, PW0, 40 μ A, 120 μ Sv/h



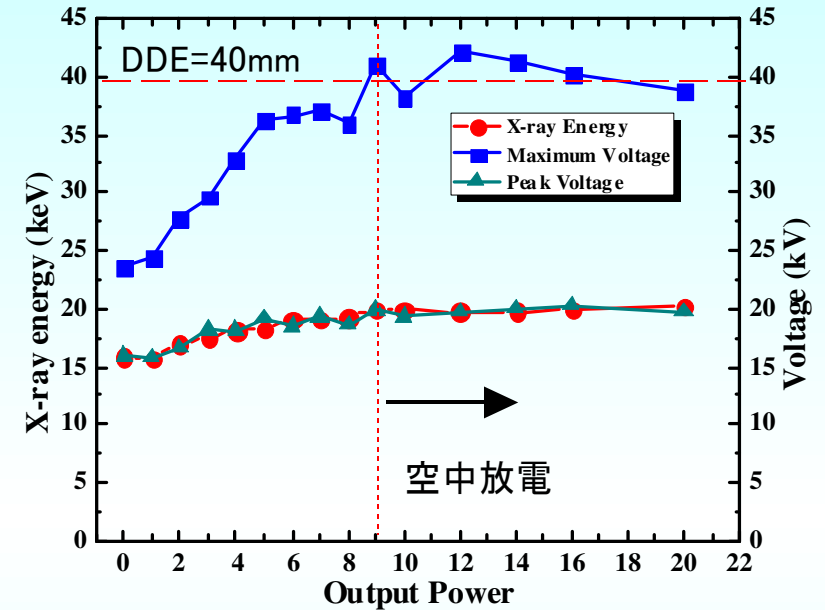
DDE=20mm, PW4, 80 μ A, 1.25mSv/h



DDE=30mm, PW4, 80 μ A, 1.56mSv/h



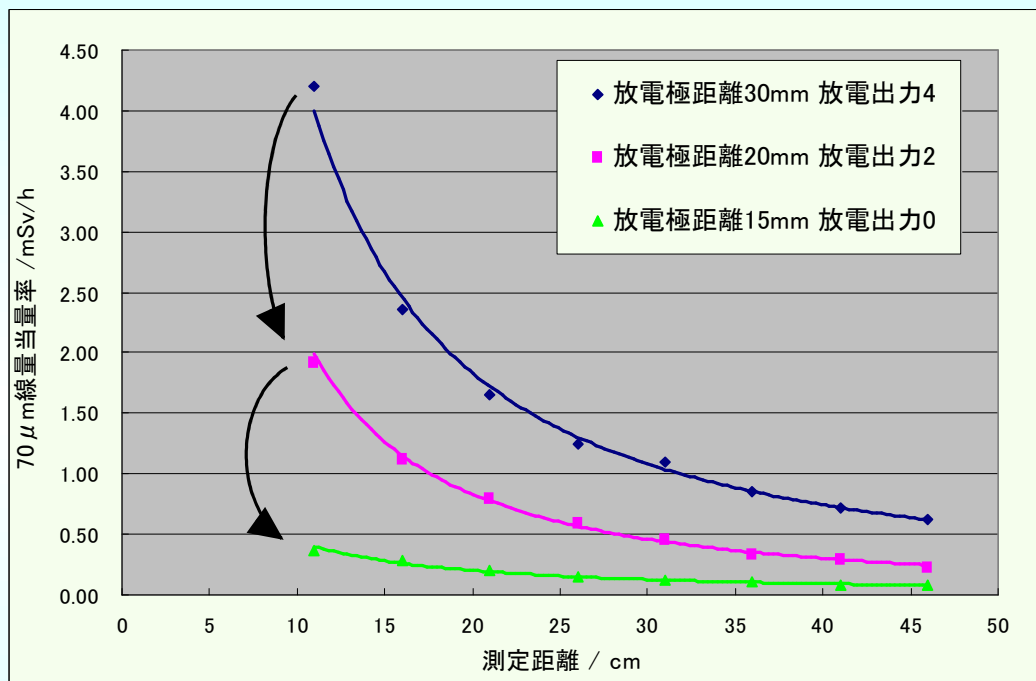
DDE=30mm, PW7, 96 μ A, 3.50mSv/h



- ・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。

漏洩線量の印加電圧、電流、距離依存性

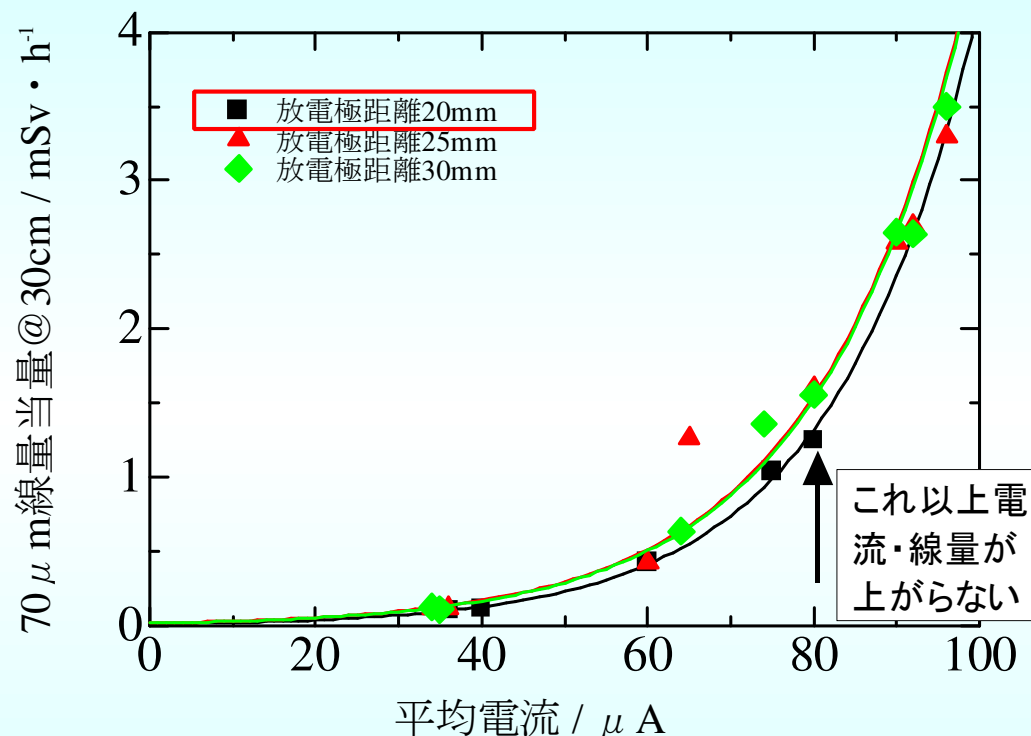
放電極距離 30, 20, 15mm でギリギリ
放電が起こる出力に合わせて測定



・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

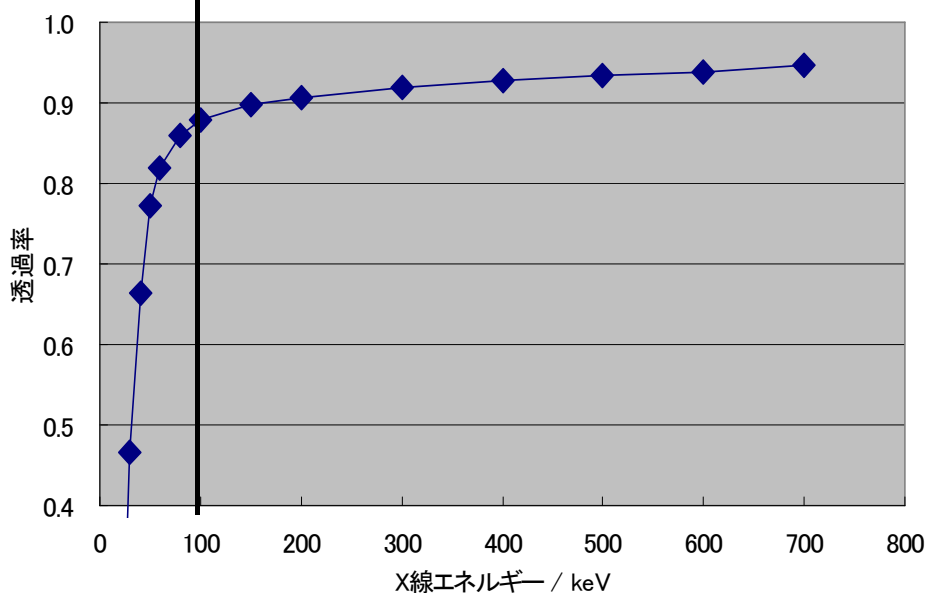


・電流上昇に従い指数関数的に線量が上昇
放電出力上昇で電圧も電流も同時に上昇するため、
電子線が観察できる必要最小限の出力に留めて下さい。
その上で、放電極は一定以上に電圧を上げないための
安全弁の役割を果たしています。

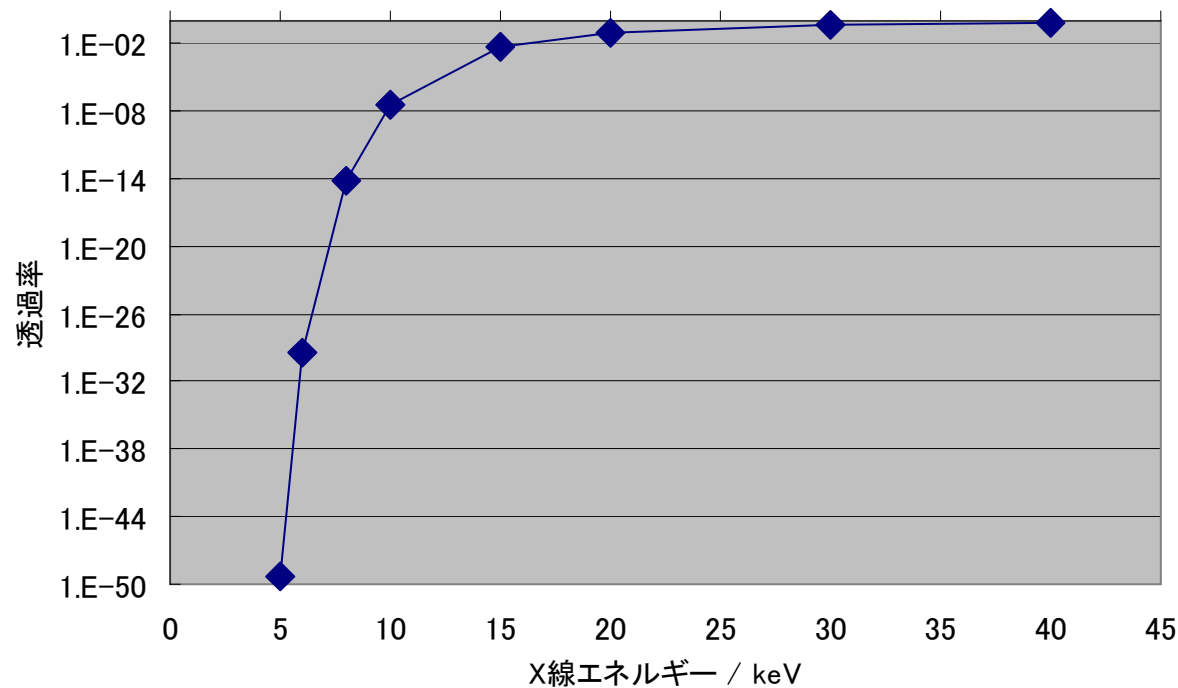
わずかな印加電圧低下での大きな線量の変化

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

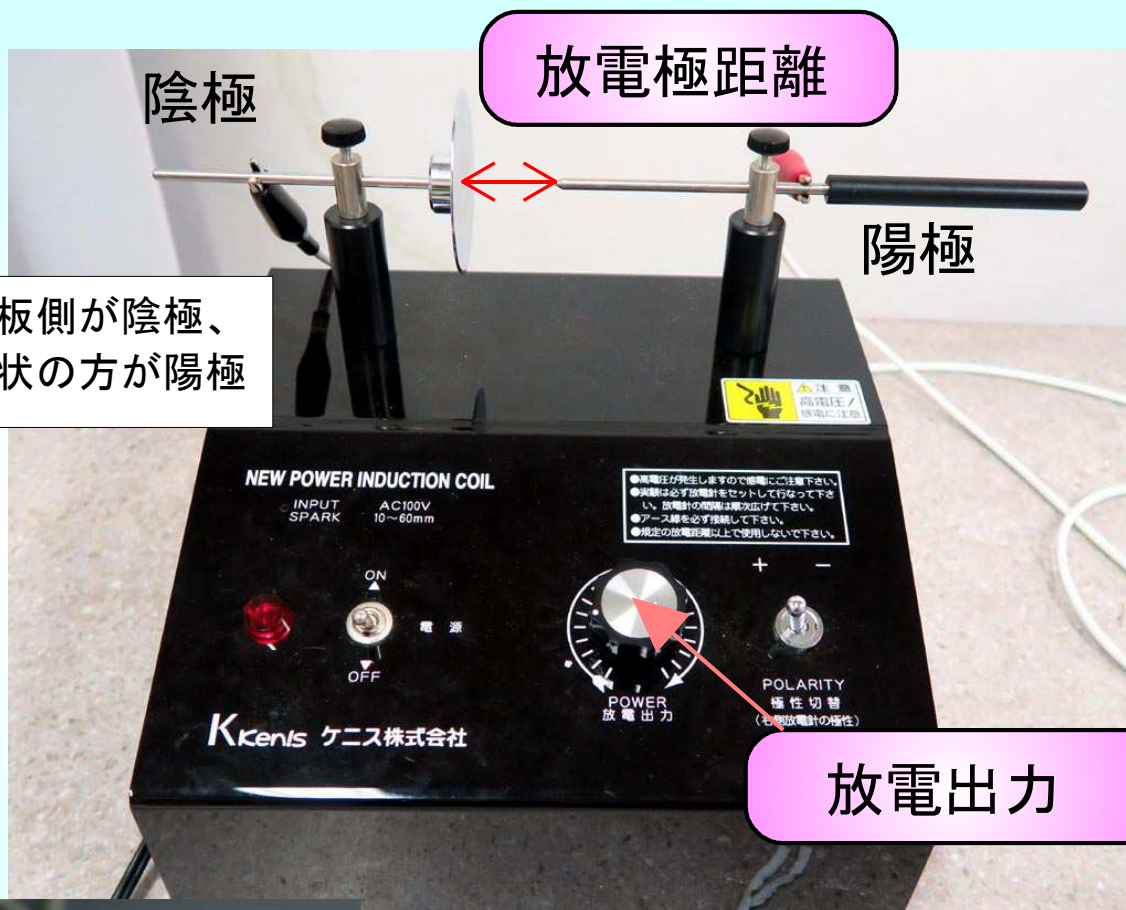


30keV と 15keV で約100倍違う。



3mmのガラスに対するX線の透過率

印加電圧を下げるにはどうしたら良いの？



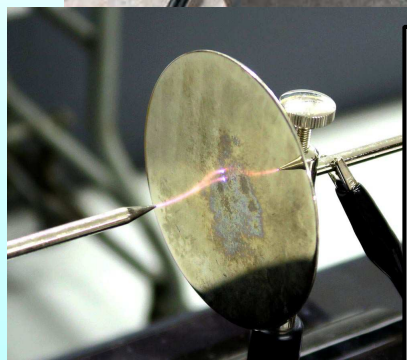
陰極

放電極距離

陽極

円板側が陰極、
針状の方が陽極

放電出力



放電極はクルックス管と並列に接続されており、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、**安全装置です！**

**必ず放電極を
取り付ける。**

電気的な安全上も必須です。
単体での販売もされています。

**放電極距離は20mm
以下にする。**

空気中では1kVで約1mm放電します。

**放電出力、発振周期を
出来る限り下げる。**

電子線を観察できる範囲で
下げて下さい。

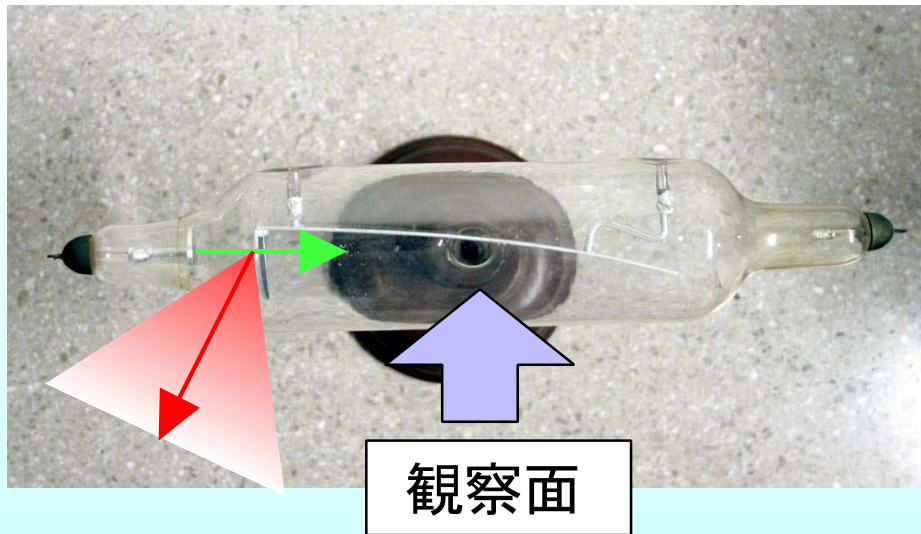
遮へいの有効性



○計算上20keVではアクリル1cmで半分に、5mmのガラスで1/50程度に減衰しますが、重くて安全な運用が困難と考えていました。

○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に減衰しました。

厚さ1.9mm程度の軽量(1.5kg)のガラスの水槽でも、1/20 ~ 1/50程度に減衰しました。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ます。



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です(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だと考えていますが、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です。

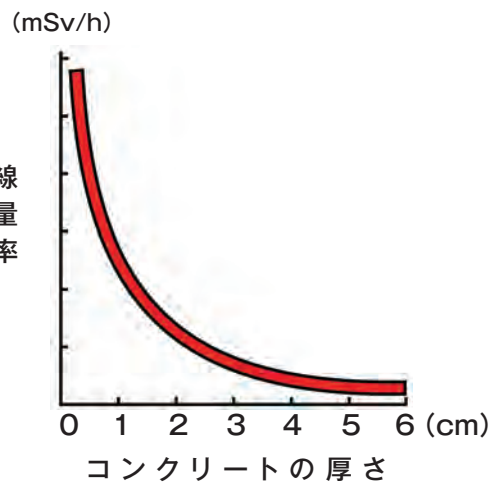
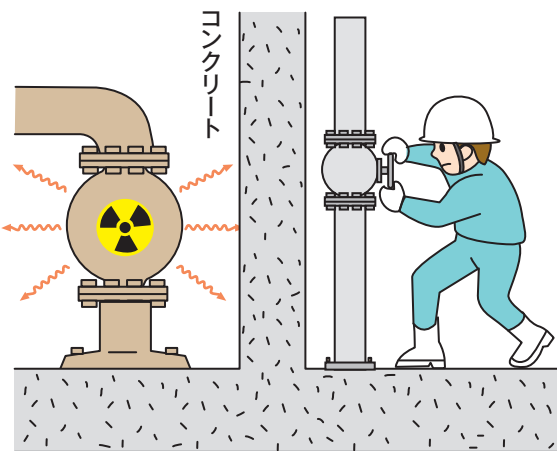
放電出力	Hp(0.07) (μ Sv/h)		透過率 (%)
	遮へい前	遮へい後	
0	600	11	1.8
1	620	12	1.9
2	1300	60	4.6
3	3000	160	5.3

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円でした。
<https://www.amazon.co.jp/gp/product/B00W5DSU0C>

放射線防護の基本

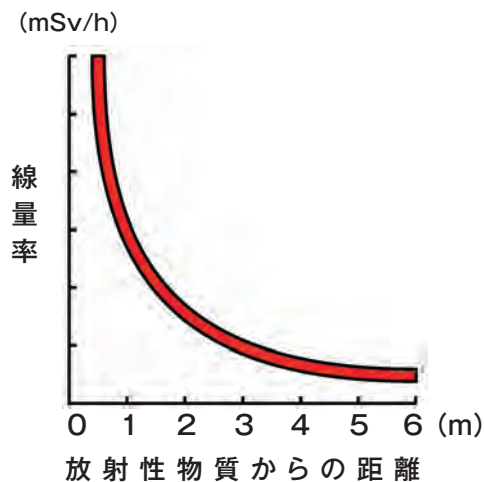
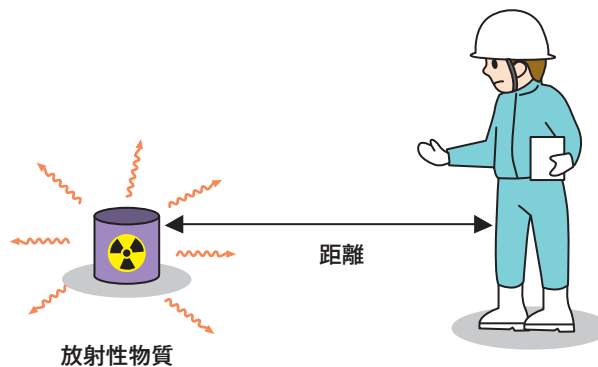
1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下



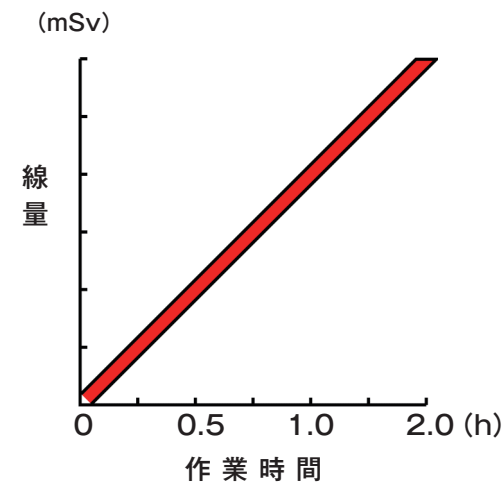
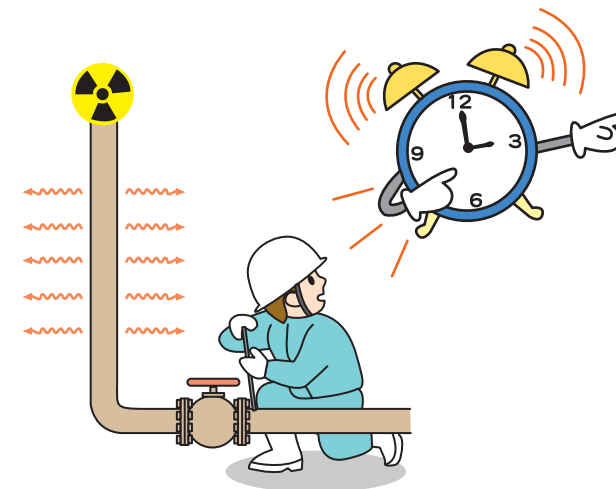
2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例



3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)



実際の教育現場での測定

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1/10以下。
18本で < 50 μ Sv @ 15cm (検出限界以下)

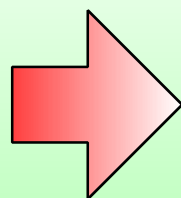
ペットボトルに貼付けたガラスバッジに15, 30, 50cmの距離で10分間X線照射して返送してもらい、線量評価を行った。X線計測専用タイプの物で、同時にエネルギー評価も出来る。

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

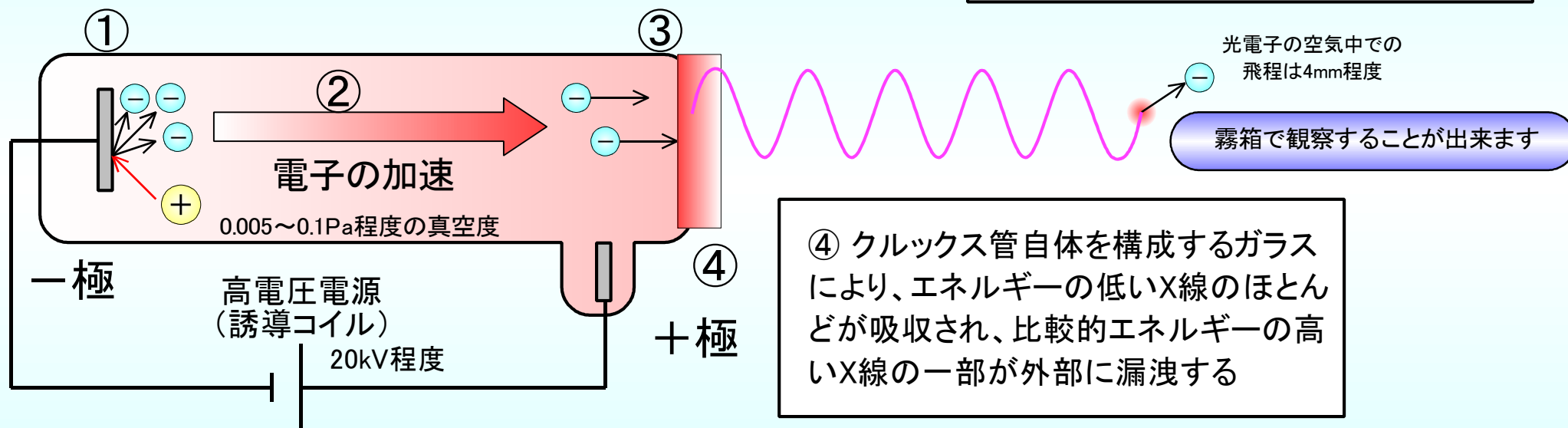
クルックス管からのX線の漏洩

① 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被ばく線量を下げるには

・低電圧駆動の製品に買い換える

全国1万校 x 4万円 = 4億円の予算措置が必要。
さらに高校でも使われている。

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

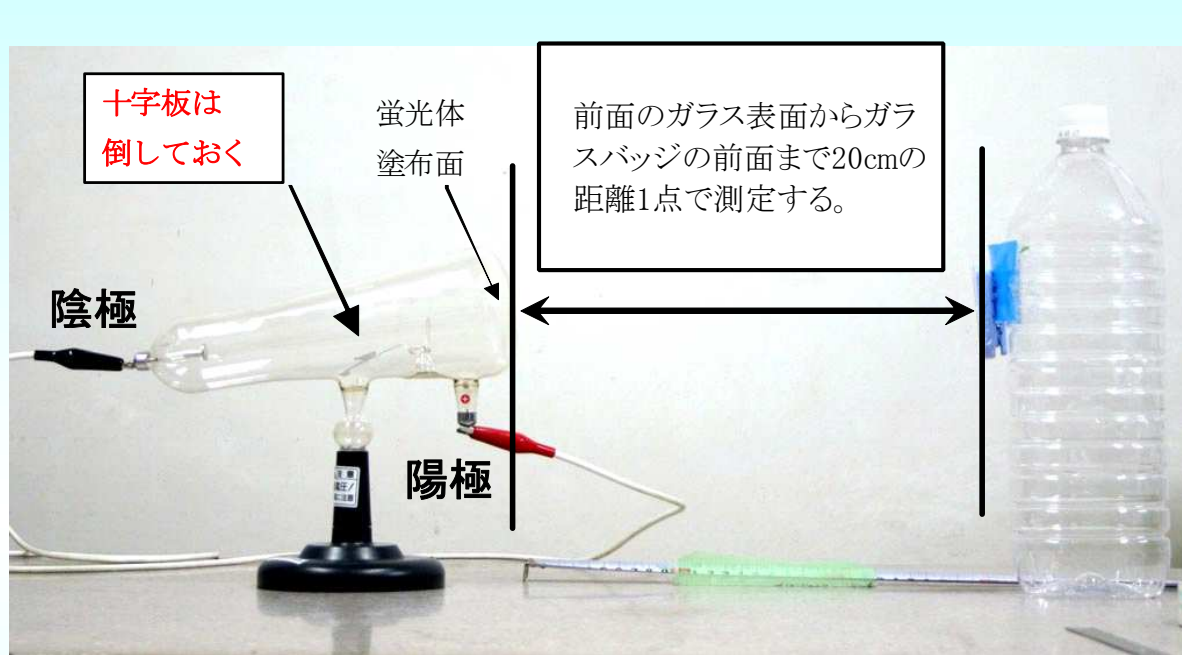
印加電圧を下げることによりX線のエネルギーが下がり、劇的に漏洩するX線量を下げることが出来る。クルックス管はガラスで出来ており、このガラスに対する透過率が15keVと30keVでは100倍程度異なるためである。遮蔽に関しては、アクリルでは1cmの厚さでも半分程度にしかならないため、ガラスの水槽を用いるか(2mmで1/5以下に下がる)、距離を取る方が簡単である(距離の二乗に反比例する)。

過去の研究から策定した暫定ガイドライン

本当にこれで安全か
全国規模の実証試験が必要

- ・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

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(千代田テクノル FX型)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。
- ・ガラスバッジは大阪府大と各学校で郵送でやりとりし、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。

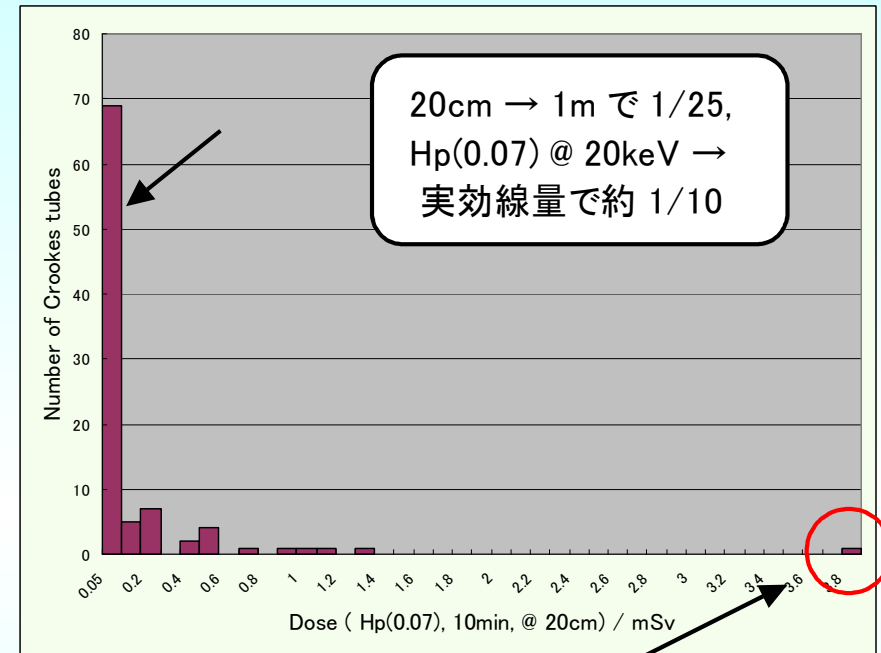
第二期実態調査結果（速報）

暫定ガイドラインを遵守することでどこまで線量を下げることが出来たのかを検証するために、2019年8月～10月に第二期の実態調査を行った。

8月期は、27校の92本のクルックス管について暫定ガイドライン準拠での測定を行った。

69本に於いて20cm距離10分の測定で、Hp(0.07)が測定限界である $50 \mu\text{Sv}$ を下回っており、有意な値が出た23本の装置の中での平均でも、1m位置10分間での実効線量は $2 \mu\text{Sv}$ にしか過ぎず、暫定ガイドライン適用前に比べて極めて低い線量に抑えられている。

2018年の暫定ガイドライン適用前の実態調査では、37本中12本が距離1m、10分間での実効線量が $5 \mu\text{Sv}$ を超えており、 $93 \mu\text{Sv}$ に達した装置もあった。

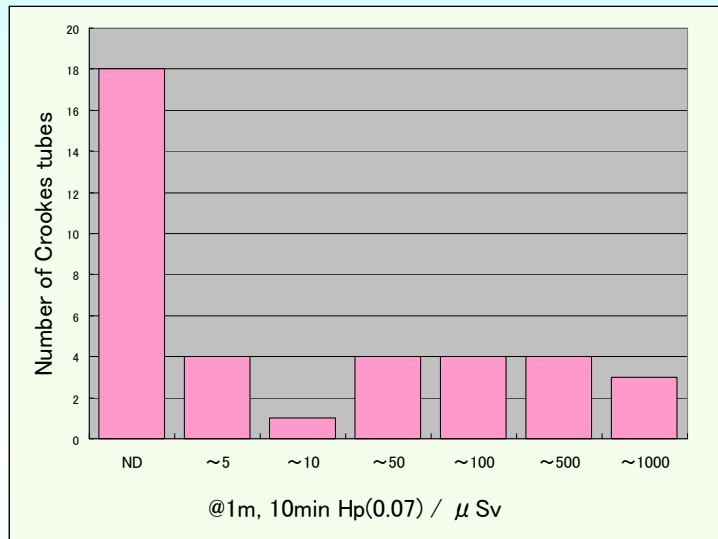


1本だけ 1m 位置で10分間観察を行った場合、ICRP Pub-64 やIAEA BSS などで示されている国際的な免除レベルである実効線量 $10 \mu\text{Sv}$ をわずかに上回り、 $15 \mu\text{Sv}$ と評価された。

誘導コイルの発振周期を最大としていたため？

第二期実態調査結果（速報）

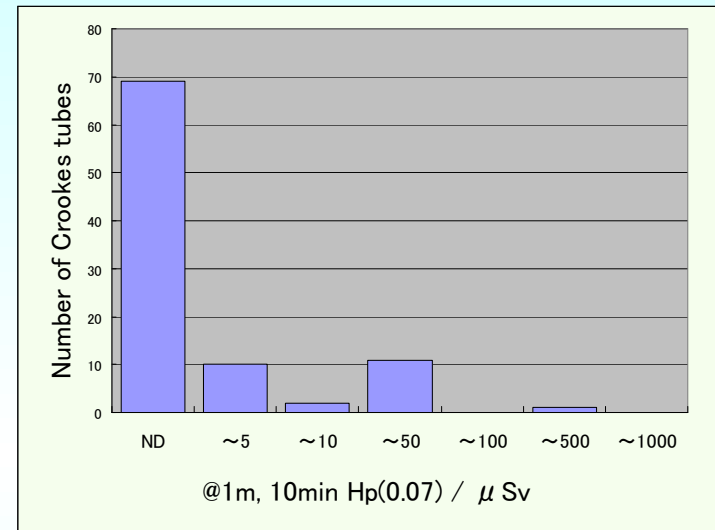
2018年第一期実態調査



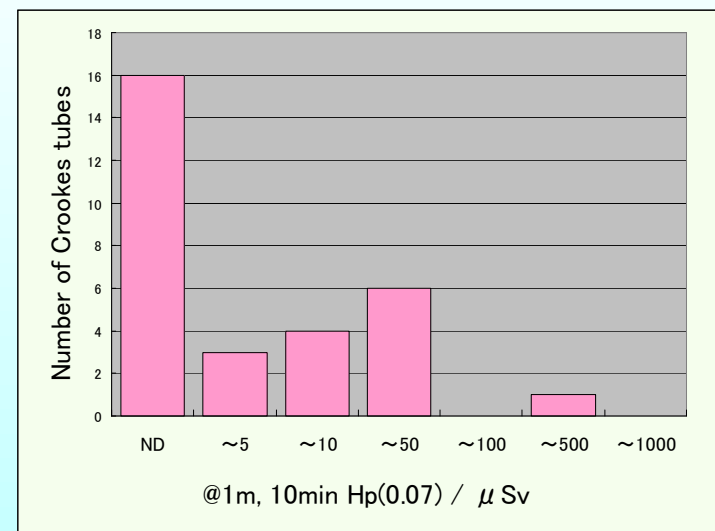
これまでの授業での設定

暫定ガイドラインの適用により、これまで授業で行っていた誘導コイルの設定

2019年第二期実態調査

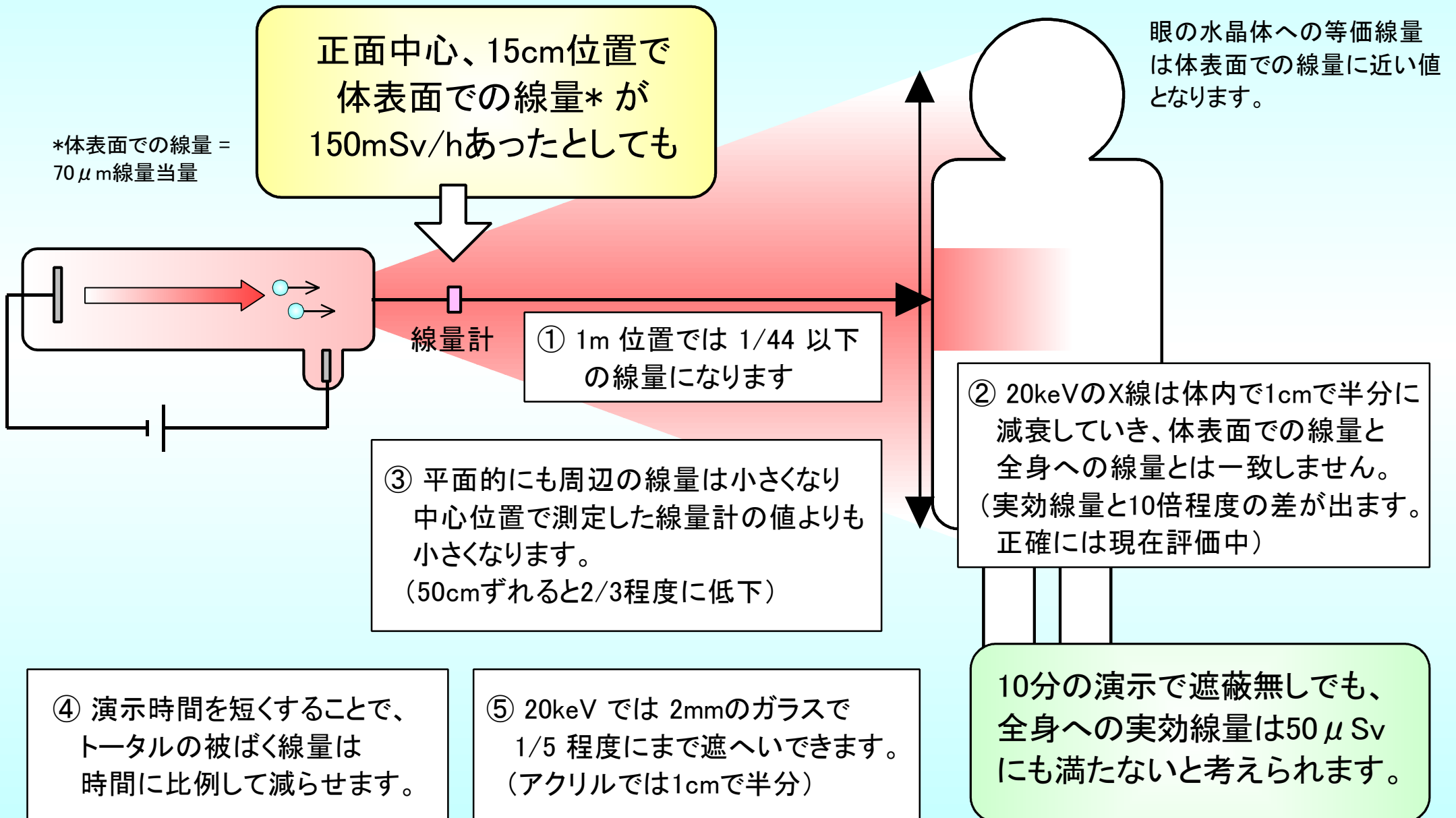


暫定ガイドライン準拠



これまでの授業での設定

クルックス管からのX線の不均一性



X線放射方向垂直平面内での空間線量分布

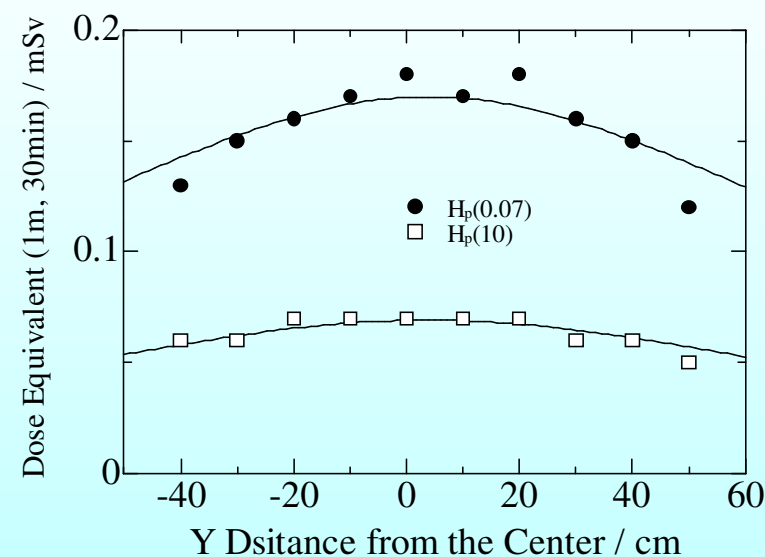
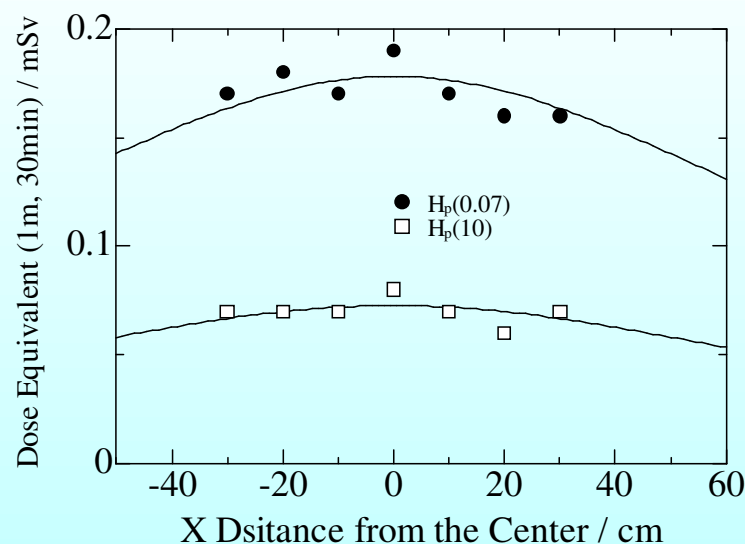
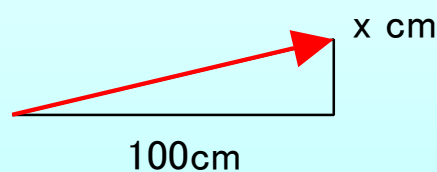
生徒位置(z=1m)での全身への線量を評価するために、平面内での線量分布を測定した。中心から y 方向 60cm 離れた位置でも 70% 程度の線量とかなりブロードな分布となっており、1.5 倍以内の範囲に収まっていた。



以下の式で空間分布を表わすことが出来る

$$H_p = a / (100^2 + x^2 + y^2)$$

平面方向の変位を含めた直線距離の二乗に反比例



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。



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こと

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

固有安全性を持ち
何も対策する必要がない

- ・誘導コイルの放電出力、発振周期は電子線の観察が可能な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 $10\mu\text{Sv}$ より十分小さく出来ると考えています。しかし、本当に大丈夫か検証が必要のため、継続的な実態調査を実施しています。1mの距離で10分間の実効線量が $0.2\mu\text{Sv}$ 以上であれば評価することが可能です。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。

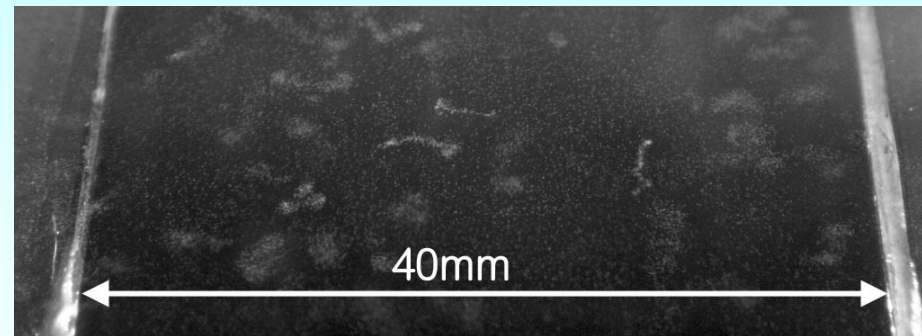
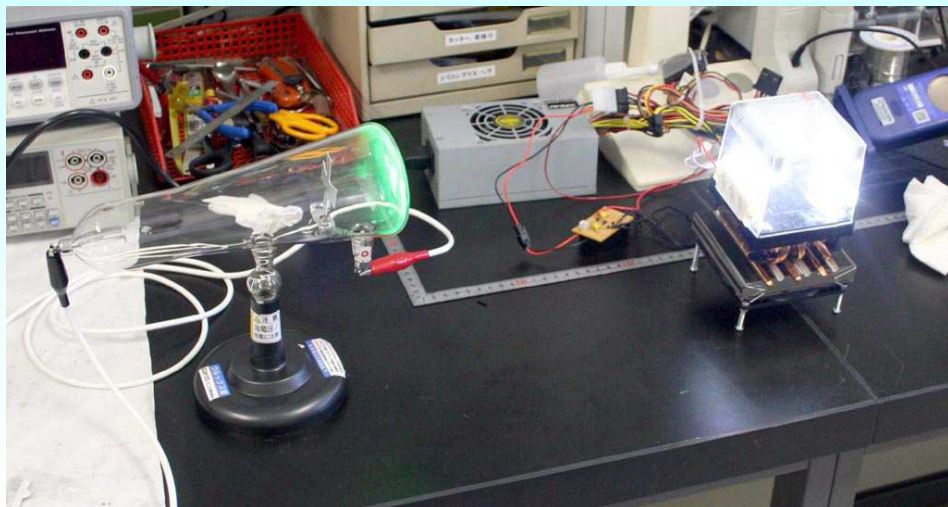
実態調査に御協力頂ける方、ご質問のある方は、大阪府立大学放射線研究センター
准教授 秋吉 優史 (akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp) までご連絡願います。

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

なお本プロジェクトは2019-2020年度の期間で、日本保健物理学会において「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」として公的に活動しており、2021年度には同学会の放射線防護標準化委員会において、学会標準として取りまとめることを目指しています。



霧箱を利用した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ります。

中学校の理科教育における学習指導要領で「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」と定められています。

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

霧箱によるクルックス管からのX線の観察

①

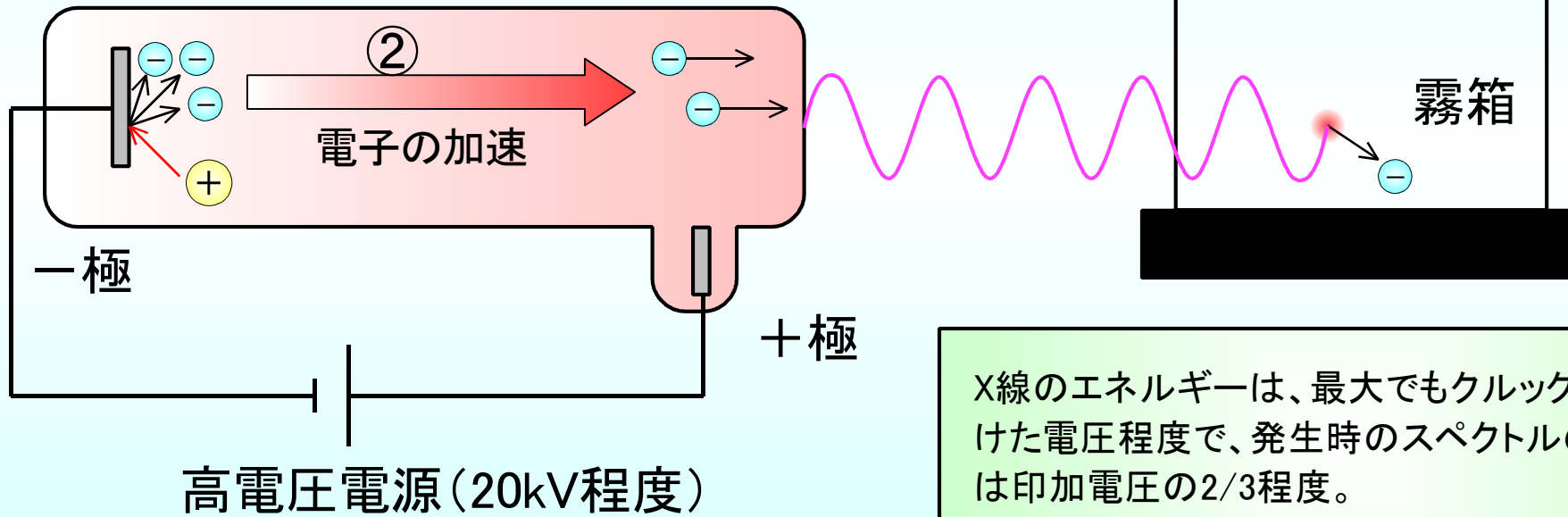
＋のイオンが－極に引きつけられて電子を叩き出す
(二次電子放出)

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

④

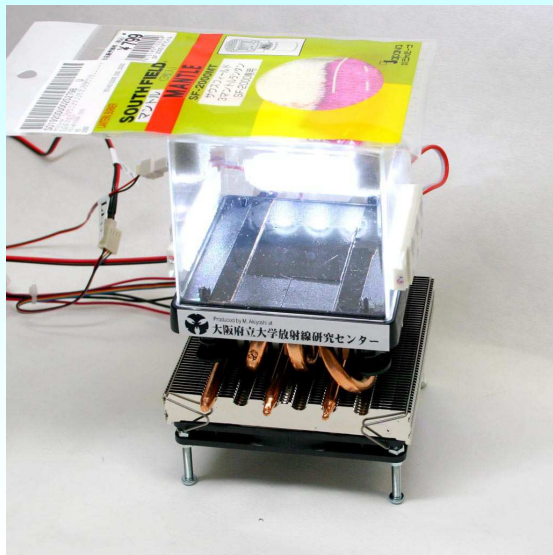
X線は最終的に原子の周りを回る電子を光電効果などで弾き飛ばして(電離作用)、弾き飛ばされた高速の光電子はβ線と同じように振る舞う。



X線のエネルギーは、最大でもクルックス管にかけた電圧程度で、発生時のスペクトルのピークは印加電圧の2/3程度。

電子を弾き出すという放射線の本質を直感的に理解できる。また、エネルギーの違いを弾き出された電子の飛跡の長さという形で理解できる。

高性能霧箱を用いた異なる放射線種の観察

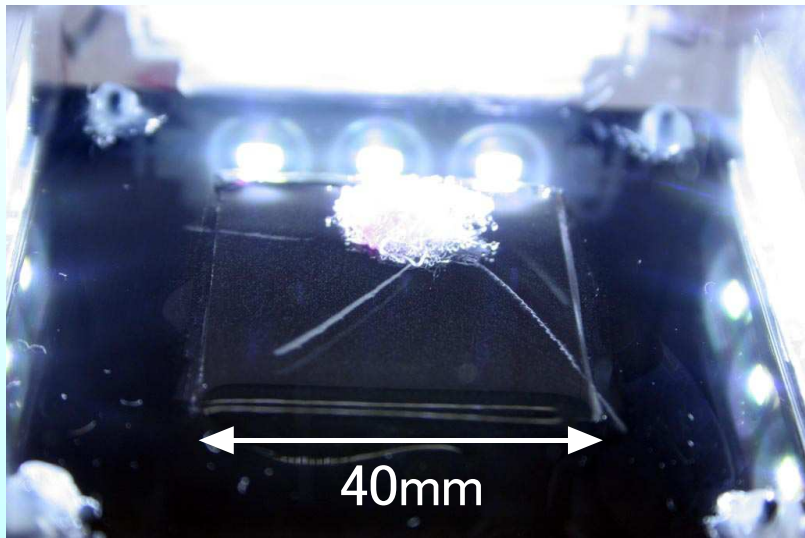


α 線の観察: **ポリパックに入れた状態**と、取りだしてチャンバーに入れた状態との比較

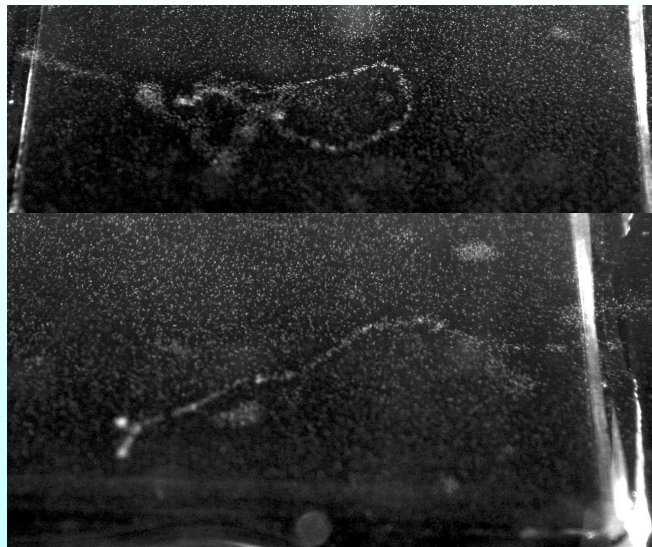
β 線の観察: チャンバーの天板の「上」にマントル線源を配置 → **天板のプラスチック板で α 線は遮蔽される**

γ 線の観察: チャンバーの上に5mm程度の**アルミ板**を設置してその上にマントル線源を配置

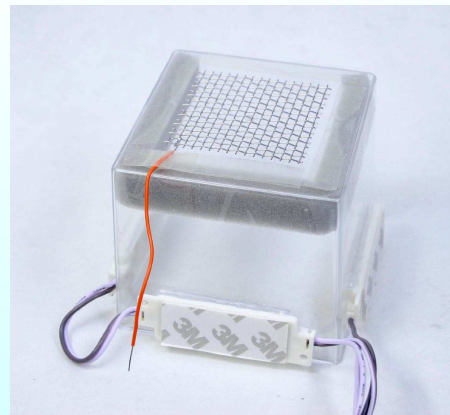
→ **光電子の観察**



α 線の飛跡

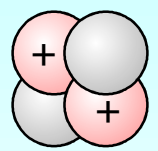


β 線の飛跡

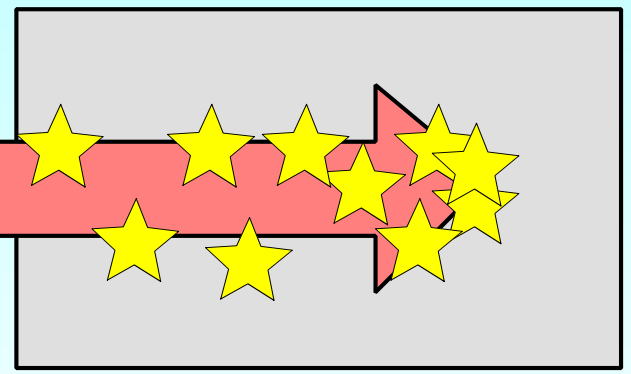


2017/05 出荷分より、高電圧印加方法を改良し、大幅な高性能化を達成。僅かな光電子観察も可能とした。

アルファ
α線



ヘリウムの
原子核



狭い範囲に一気に
エネルギーを放出します

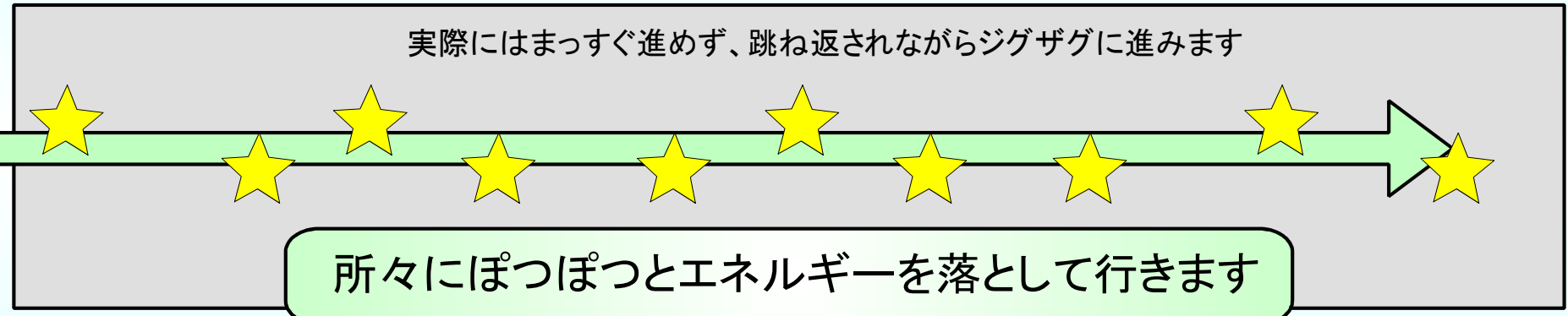
★
放射線がエネルギーを
物質に与えたところ
(電離、励起など)

水の中では数十μm程度、空気の中でも数cmしか飛ばず、紙一枚で止まってしまいますが、その範囲に一気にエネルギーを放出します。

ベータ
β線



電子
ヘリウムの原子核の7000分の1の重さしか有りません



実際にはまっすぐ進めず、跳ね返されながらジグザグに進みます

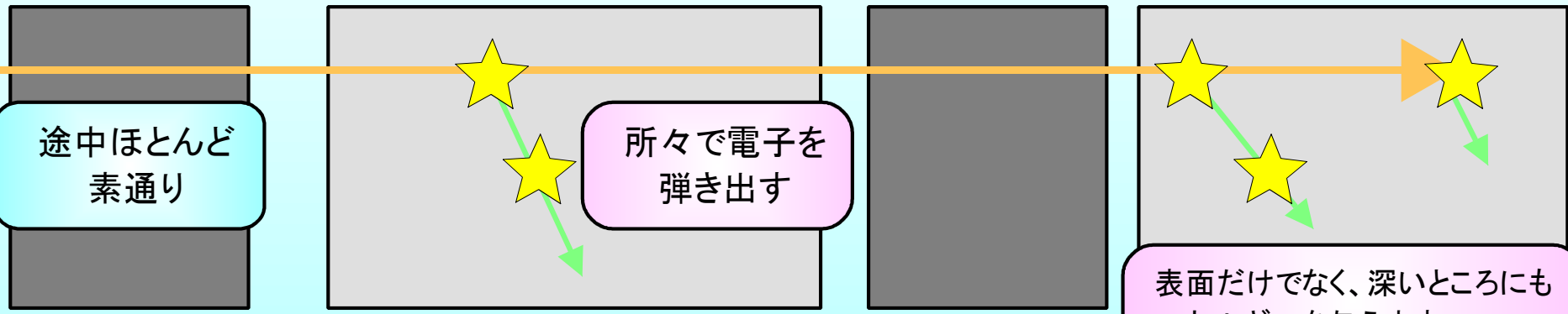
所々にぽつぽつとエネルギーを落として行きます

水の中でも1cm程度、空気の中では数m飛んでいき、少しずつしかエネルギーを落としません。

ガンマ
γ線

波長の短い
光の仲間

プラスやマイナスの電気を
持っていないため、ほとんど
素通りしていきます



途中ほとんど
素通り

所々で電子を
弾き出す

表面だけでなく、深いところにも
エネルギーを与えます。

弾き出された電子は、β線と同じように振る舞います