

2021年 8月 11日 版

クルックス管プロジェクトの 着地点

**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/CrookesTubeProject.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 ↓



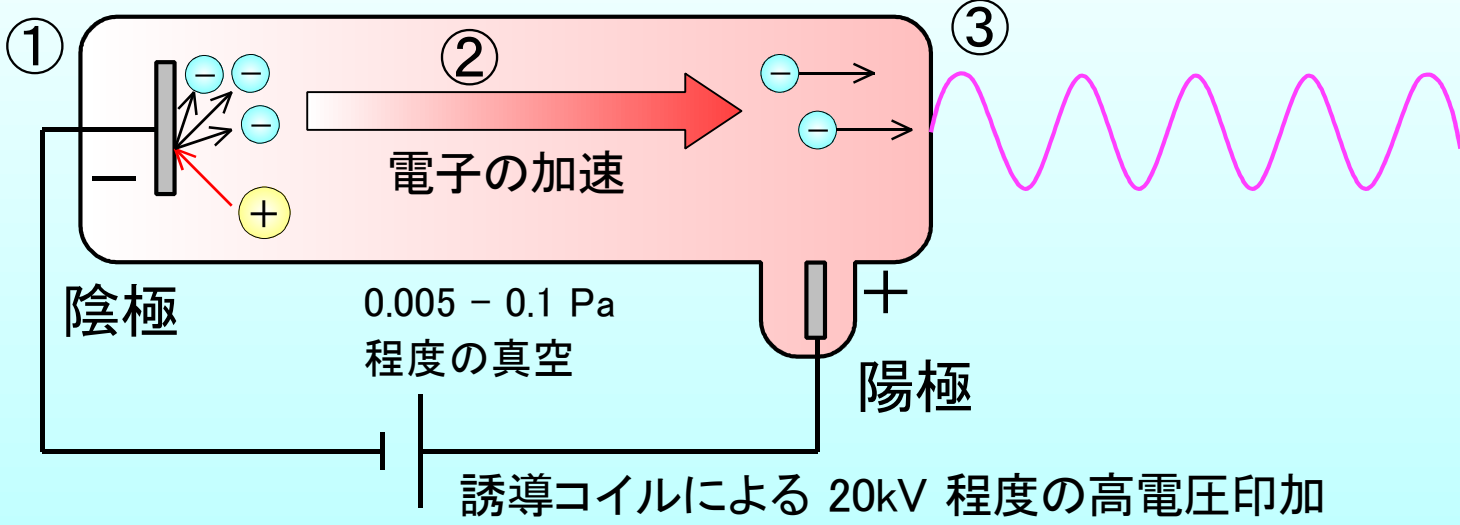
クルックス管とは？

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。

放射線教育を行う上での大転換点

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。**

2019年度 教科書検定
2021年度 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。

放射線の利用、応用が広く認知されると期待される

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

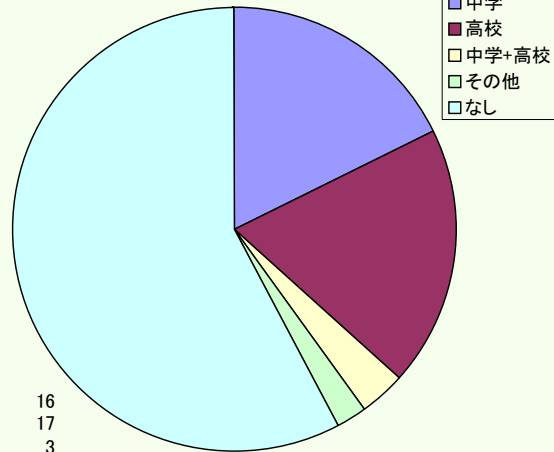
指導書

- ・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

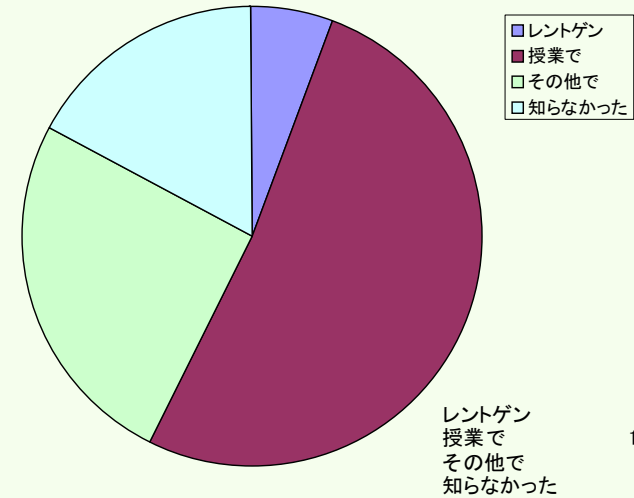
現在の学生に対する授業の実態調査

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。

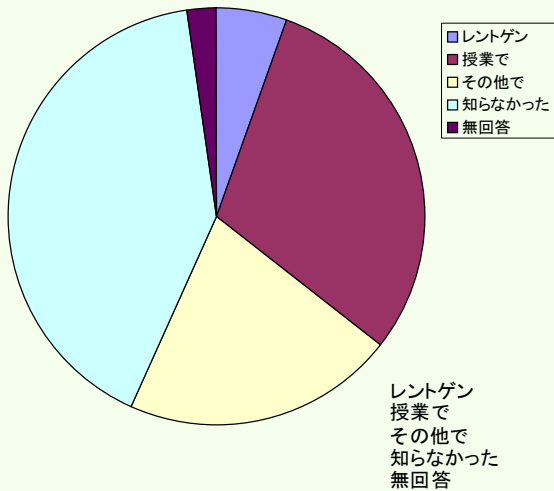
Q1. あなたは今までにクルックス管の実演を見たことがありますか？



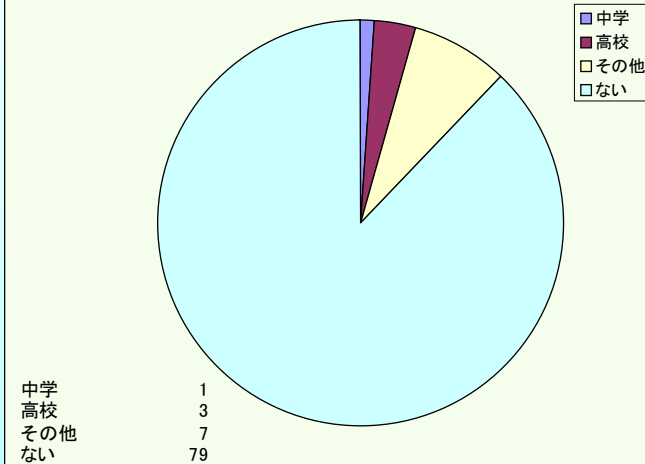
クルックス管を見たことがある見たことがある35人の中で
Q2. クルックス管からX線が出るということは知っていましたか？



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？



Q4. あなたは今までに霧箱を見たことがありますか？



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 5cmの距離では、 $70\mu\text{m}$ 線量当量率が 200mSv/h にも達する低エネルギーの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。

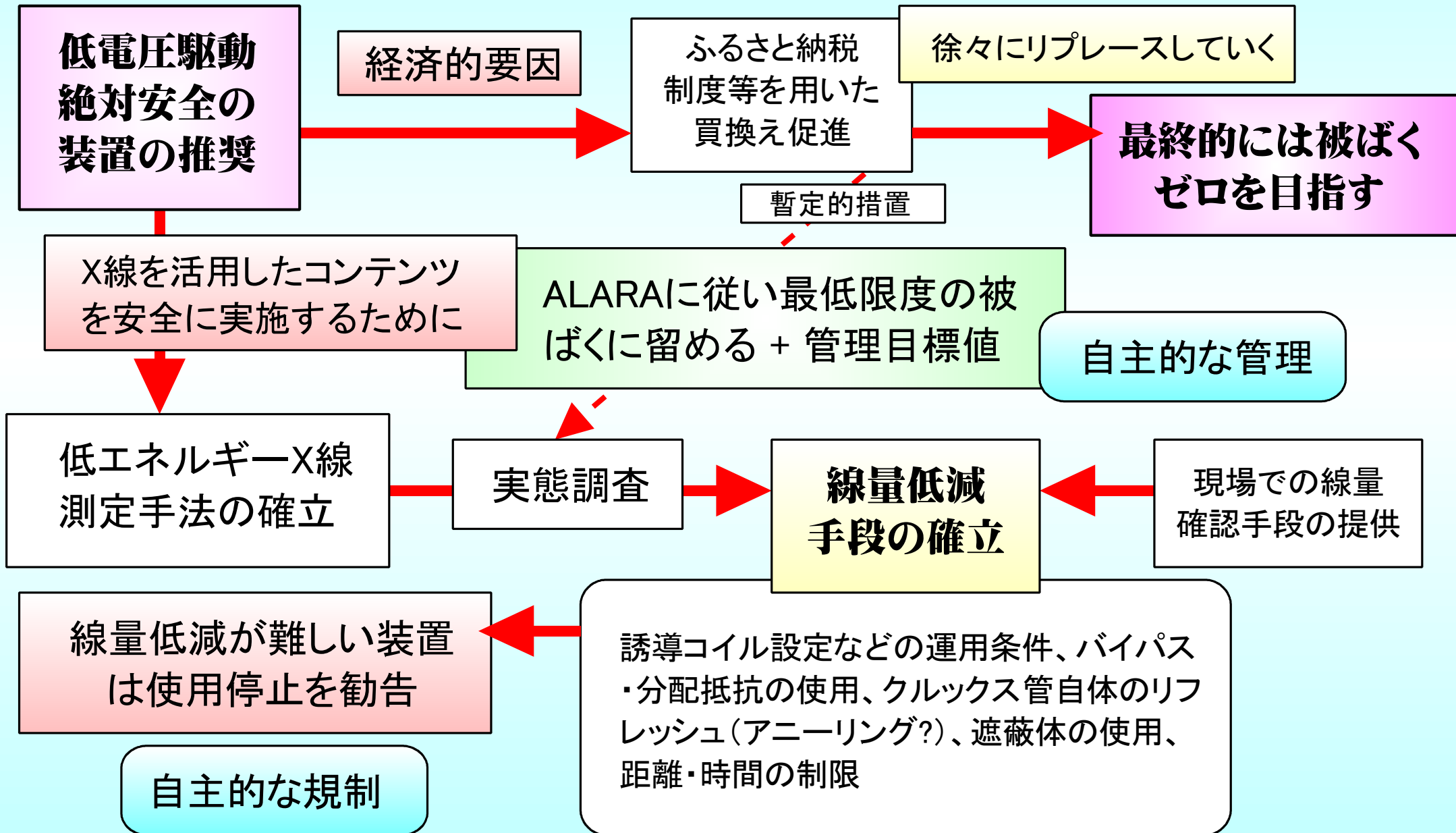
ここで話は完結する

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。

本研究の目的

今そこにあるリスクを低減するために



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。

X線装置の定義が明確ではない

厚労省 全国規模での規制改革要望に対する見解の確認
<http://www8.cao.go.jp/kisei/siryo/030919/09-2.pdf>

RI法では1MeV以下のX線は対象外であり、定義されている放射線発生装置にも該当しない。電離則においては特定X線装置の定義からは外れるが、「X線装置」の免除レベルが規定されておらず、放射線安全を確保するための法令根拠が明確ではない。

不均等被ばくであり実効線量評価が困難

20keV X線 は水での半価層が 1cm程度であるため、体表からの深さによって線量が大きく変化する。またブロードなエネルギースペクトルを持ち運用条件によってピークエネルギーも変わるが、低エネルギーではわずかなエネルギー変動で大きく透過率が変化する。平面的にも一様ではない。このため、防護量である実効線量の評価は容易ではない。

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。

X線装置の定義が明確ではない

放射線障害防止法

1MeV以下のX線は対象外。放射線発生装置も施行令第二条に列記されている物に限る。

電離則

特定 X線装置: 令第十三条第三項第二十二号に、定格管電圧が10kV以下の物もしくは「エックス線又はエックス線装置の研究又は教育のため、使用のつど組み立てるもの」は**対象外**。

X線装置: 定義が存在せず、免除規定も存在しない。

厚労省 全国規模での規制改革要望に対する見解の確認
<http://www8.cao.go.jp/kisei/siryo/030919/09-2.pdf>

「X線装置」とは、「X線を発生することを目的とした装置」であるらしい。

クルックス管がX線装置であると解釈された場合、何が必要か?

クルックス管を「X線の発生を目的に」使用した場合、X線装置ではないと言いきれるか?

管理区域の明示	(電離則第三条)
放射線装置室の設定	(電離則第十五条)
警報装置	(電離則第十七条)
立入禁止	(電離則第十八条)
X線作業主任者の選任	(電離則第四十六条)
計画の届出	(労働安全衛生法第八十八条)

X線装置としての管理が必要な場合

管理項目

除外規定

管理区域の明示

(電離則第三条)

放射線装置室の設定

(電離則第十五条)

警報装置

(電離則第十七条)

立入禁止

(電離則第十八条)

X線作業主任者の選任

(電離則第四十六条)

計画の届出

(労働安全衛生法第八十八条)

実効線量が三月間に付き1.3mSvを超える恐れがない場合。← 管理区域の定義

その外側における外部放射線による1cm線量当量率が $20 \mu\text{Sv/h}$ を超えないように遮へいされた構造の放射線装置を設置する場合又は放射線装置を随時移動させて使用しなければならない場合。

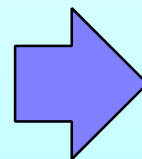
管電圧 150kV 以下の場合。

実効線量が一週間に付き 1mSv 以下の場所。

エックス線装置に例外規定はないが、主任者を選任するのは「管理区域」ごと。管理区域に該当しない場合は必要ない。また、装置内部は管理区域であっても、内部に体の一部が入ることがない場合は必要ない(標識での明示は必要)。

労働安全衛生規則第八十五条 → 別表七 → 電離則第十五条の放射線装置に該当しない場合。

クルックス管の近傍では一回の実験で1.3mSv を超える可能性が十分にある。



ガラスの水槽などで囲えばその表面の線量は距離と遮蔽で大幅に低減される。
X線を活用した実験をする場合は遮蔽体で囲み、中に入れないようにすることが必要か？

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:
 $10 \mu\text{Sv}$



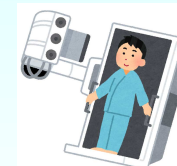
0.01mSv
($10 \mu\text{Sv}$)

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

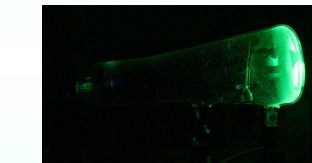
CTスキャン1回:
数mSv



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



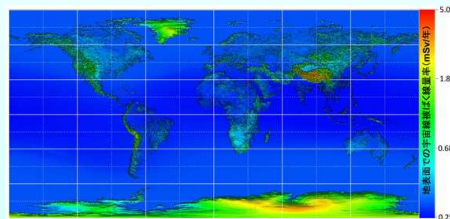
日本人が特有に持っている
 20Bq のポロニウム
 210 による年間被ばく
線量: $800 \mu\text{Sv}$

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:
 $\sim 10\text{mSv}$

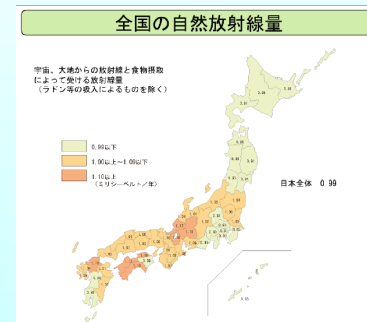


ランタンのマントル*を
1時間体に貼付ける:
Hp(10) $1 \mu\text{Sv}$ (γ 線)
Hp(0.07) $10 \mu\text{Sv}$ (β 線 + γ 線)

*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



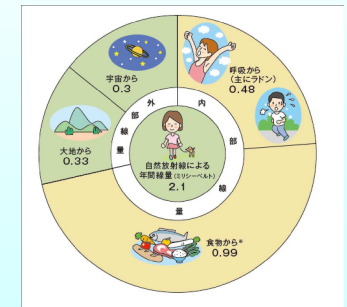
年間の宇宙線量の世界平均と
日本平均の差:
 $50 \mu\text{Sv}$ (日本の方が小さい)



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

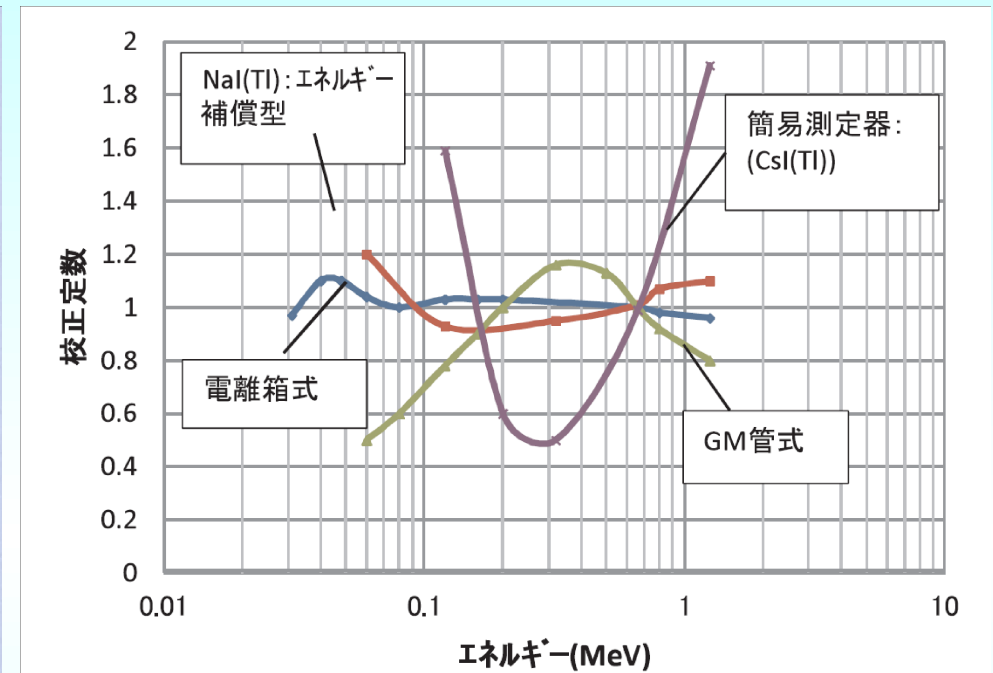
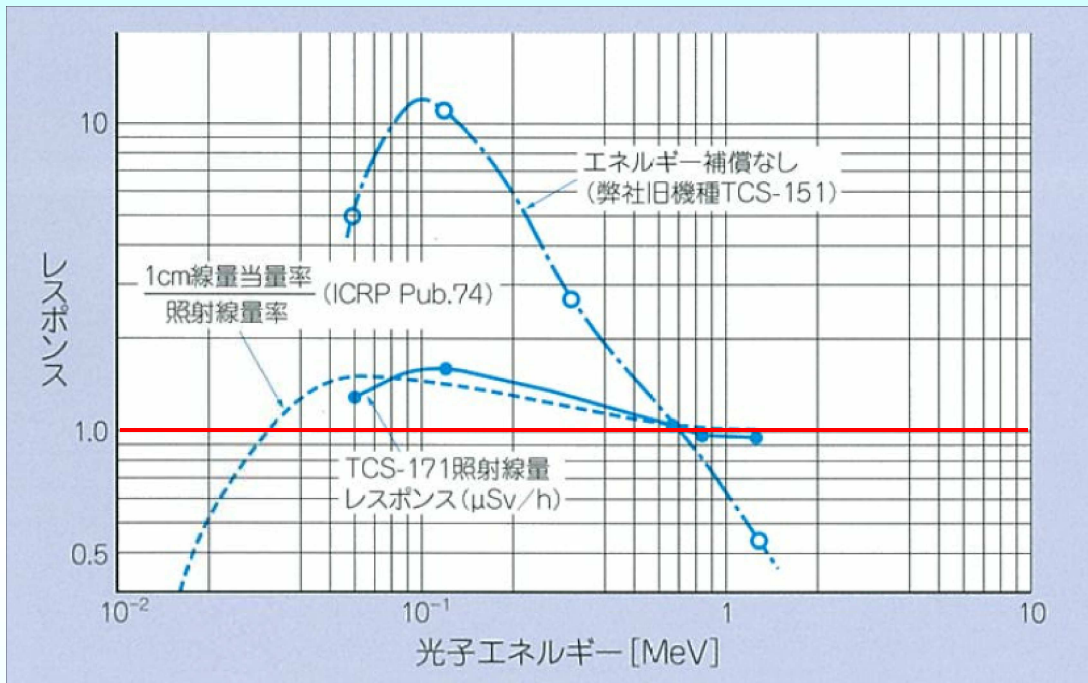
低エネルギーX線の線量測定

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

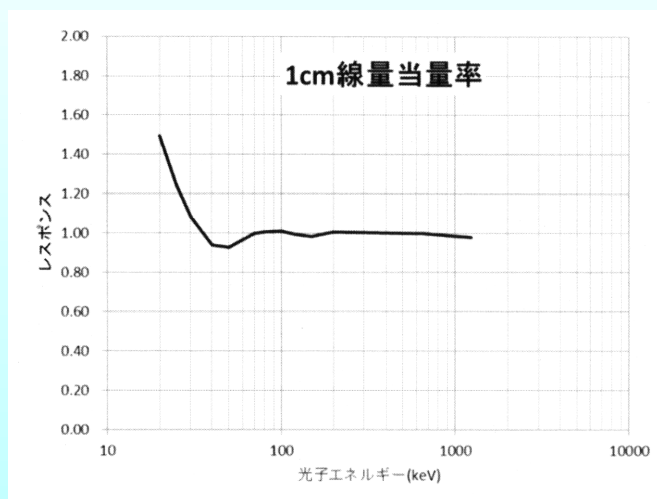
(アロカ TCS-171カタログより)

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)



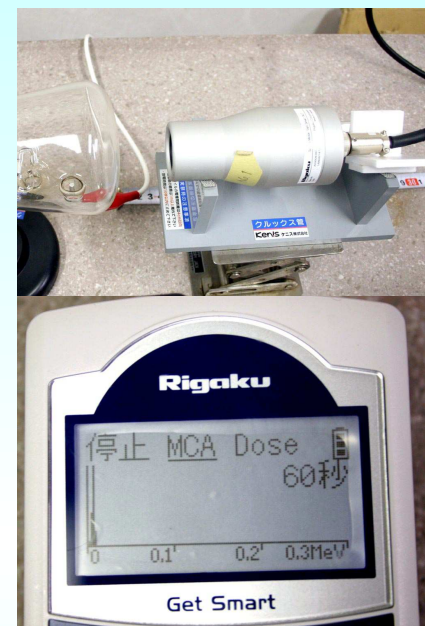
低エネルギー用NaIシンチレーターでの測定



富士電機 NHC6
φ 12.7 × 12.7mm NaI シンチレーター
測定範囲 X線 8 ~ 300keV (~60 μSv/h),
γ線 50 ~ 1500keV (~600 μSv/h)



Rigaku Get Smart XU
NaI シンチレーター
測定範囲 5 ~ 300keV (~10 μSv/h)



通常の NaIシンチレーションサーベイメーター TCS-172 だけでなく、
低エネルギー測定が可能な新製品でも正常な評価が出来ない。

時間的に一様な放射線場ではなく、パルス場であることが原因

蛍光ガラス線量計

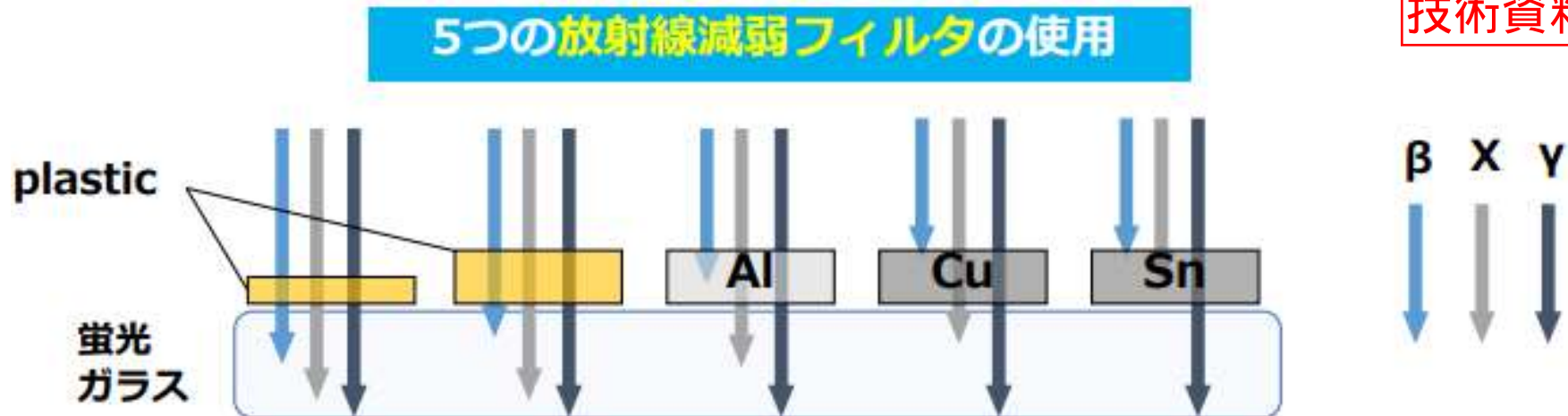
- ・**蛍光ガラス線量計**は**ガラスバッジ**に用いられる固体測定素子であり、銀活性リン酸塩ガラスに放射線を照射した後に生成する**蛍光中心**に**紫外線**を入射すると**オレンジ色**の**蛍光**を発する(ラジオフォトルミネッセンス)。発光量を読み取ることで吸収した放射線の線量を知ることが出来る。
- ・照射した後に時間が経過しても発光量が変わらない(**フェーディングが少ない**)、素子間のばらつきが小さい、エネルギー特性がフラットであるなどの特性を持ち、それまで用いられていたフィルム線量計から置き換わっている。10 μ Svから10 Svまでの幅広い線量で使用が可能である。
- ・**複数のフィルタと組み合わせる**ことでエネルギーの異なる γ ・X線、 β 線の測定が一つのバッジで可能である。
- ・ α -Al₂O₃:C を用いた **OSL線量計**も、同様に**Fセンター(色中心)**に捕獲された電子に**緑色**の光を入射すると**青色**の発光(**光輝尽性発光**)を生じ、**クイクセルバッジ**として利用されている。
- ・同様に、照射後に**数100°Cに加熱**することで**蛍光**を発するLiFやBeOなどの熱蛍光物質を用いた、**熱蛍光線量計**は**TLDバッジ**などで使用されている。上記二つに比べるとややフェーディングが大きい。

蛍光ガラスでの線量測定

人体（組織）が受けた線量を蛍光ガラスで測りますが、
人体とガラスは違います

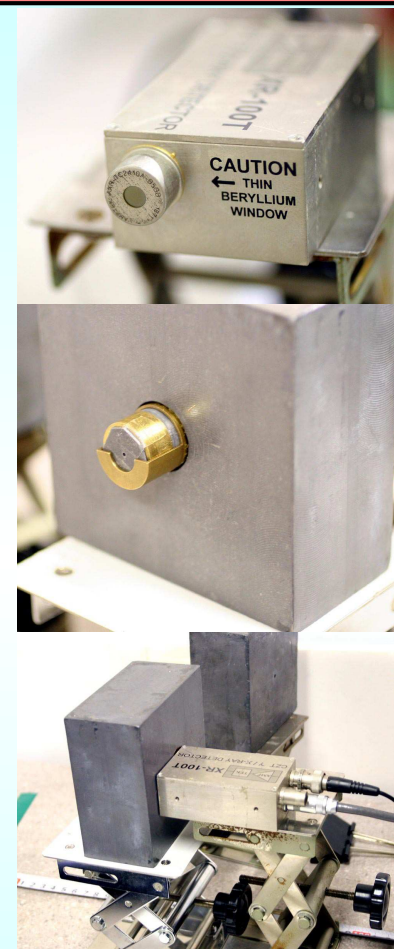
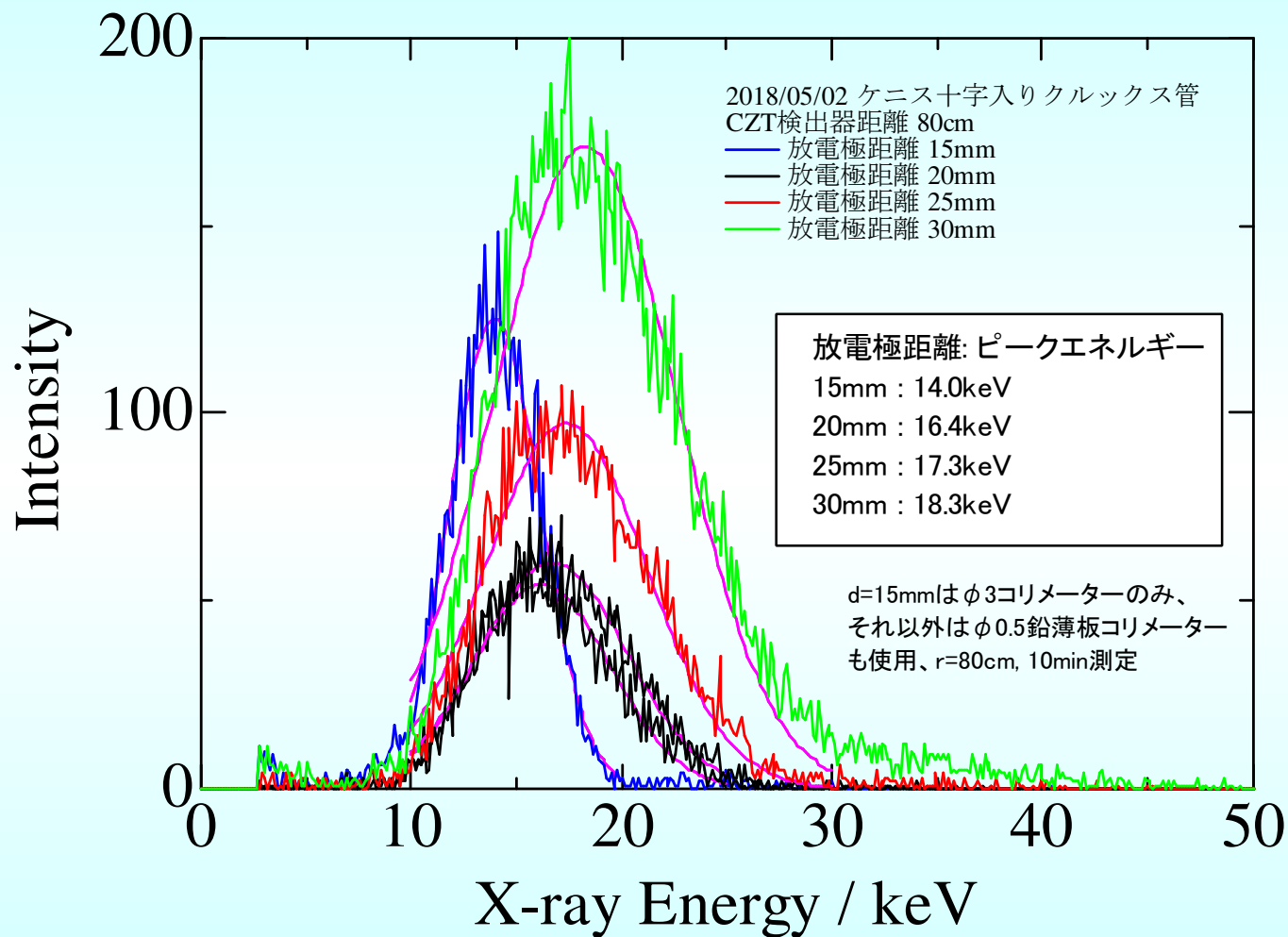
- ⇒ 放射線に対するエネルギーレスポンスの違いを補正する必要がある
- ⇒ そのためには、ガラスバッジにどのような放射線（線種、エネルギー）が入ってきたのか知る必要がある

千代田テクノル
技術資料より



蛍光ガラスの各フィルタ下の発光パターンから、
放射線の種類やエネルギーを知り、レスポンスを補正し線量を求める

CZT半導体検出器によるスペクトル評価



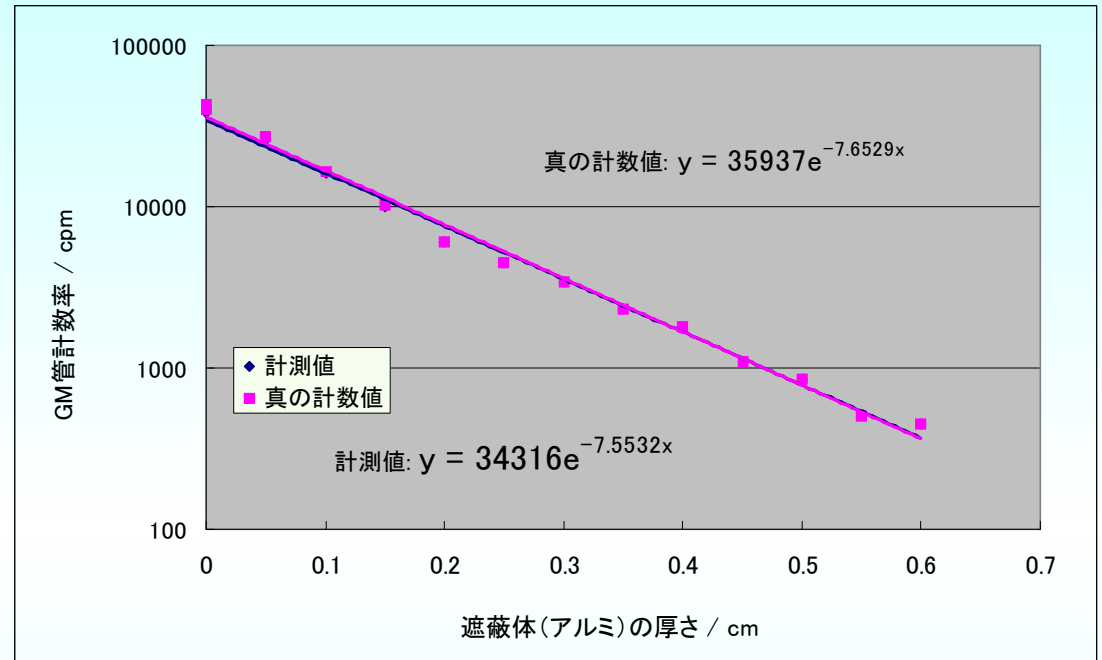
Amptek XR-100T-CZT
CZT(Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te)検出器
Be窓、ペルチエ冷却



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

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

GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価



GMサーベイメーターの前にアルミ遮蔽板を置いていき、透過率を測定した。測定結果から線減衰係数を求めると、 7.65cm^{-1} となり、放電針距離の 20mm から想定されるエネルギー20keV強でのアルミの線減衰係数と**非常に良い一致を示した**。

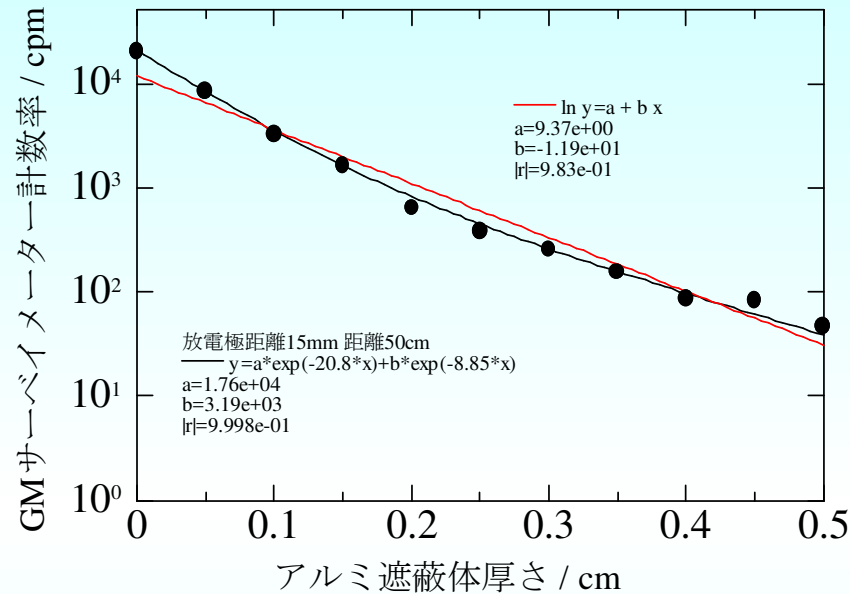
当初低エネルギー側に尾を引いたスペクトルを想定しており、遮蔽が薄い領域で計数率が高くなる事が予想されたが、**単一のエネルギーだけで説明できてしまった**。

遮蔽体を用いた測定前後での遮蔽無しでの測定値はほぼ一致しており安定していた。また、クルックス管から 30cm位置、50cm位置で測定し、評価結果はほぼ同じであった。

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

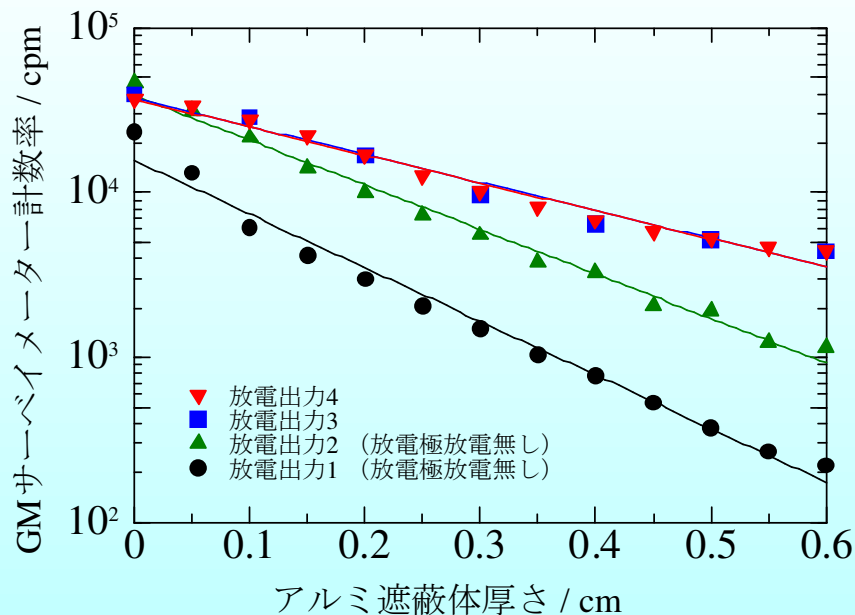
GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価

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。



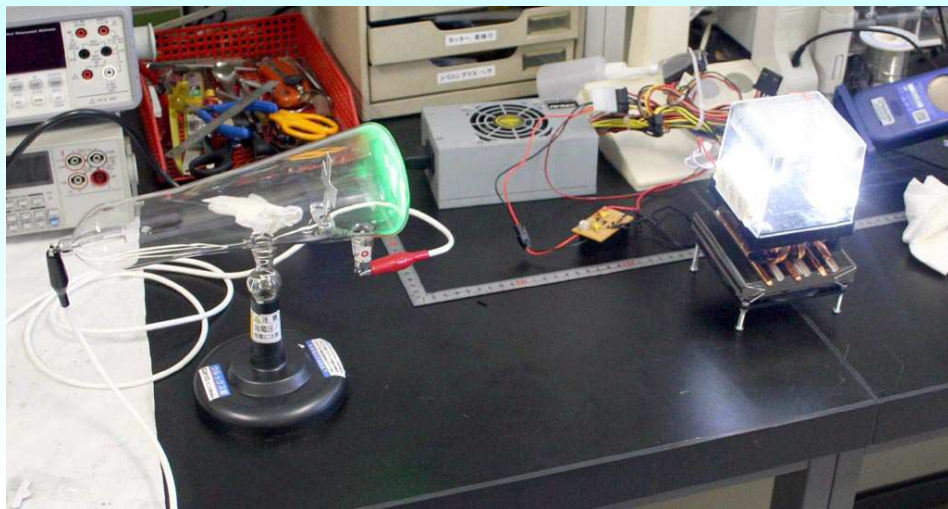
X線エネルギー (keV)	アルミ中の 線減衰係数 μ (cm^{-1})
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

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。

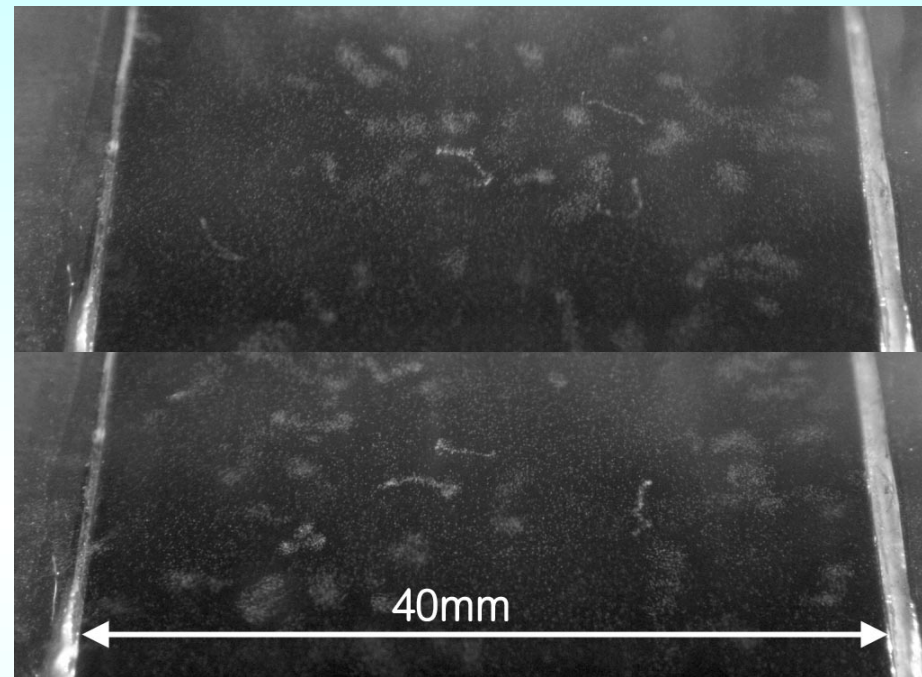


放電出力 (目盛)	線減衰係数 (cm^{-1})
1	7.50
2	6.05
3	3.92
4	3.89

クルックス管を利用したX線のエネルギー評価



飛跡の長さは4mm程度であり、空気中での20keV電子線の飛程6mm程度より若干短い
→制動放射X線のピークは入射電子線エネルギーの $\frac{2}{3}$ で、良く一致。



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(放電針距離20mm)。

エネルギー既知のX線を入射して飛跡の長さのヒストグラムを作成し、エネルギーに拡がりを持つX線のスペクトルが評価できないか？

**霧箱を用いた低エネルギーX線の
エネルギースペクトル評価の可能性**

霧箱によるクルックス管からのX線の観察

①

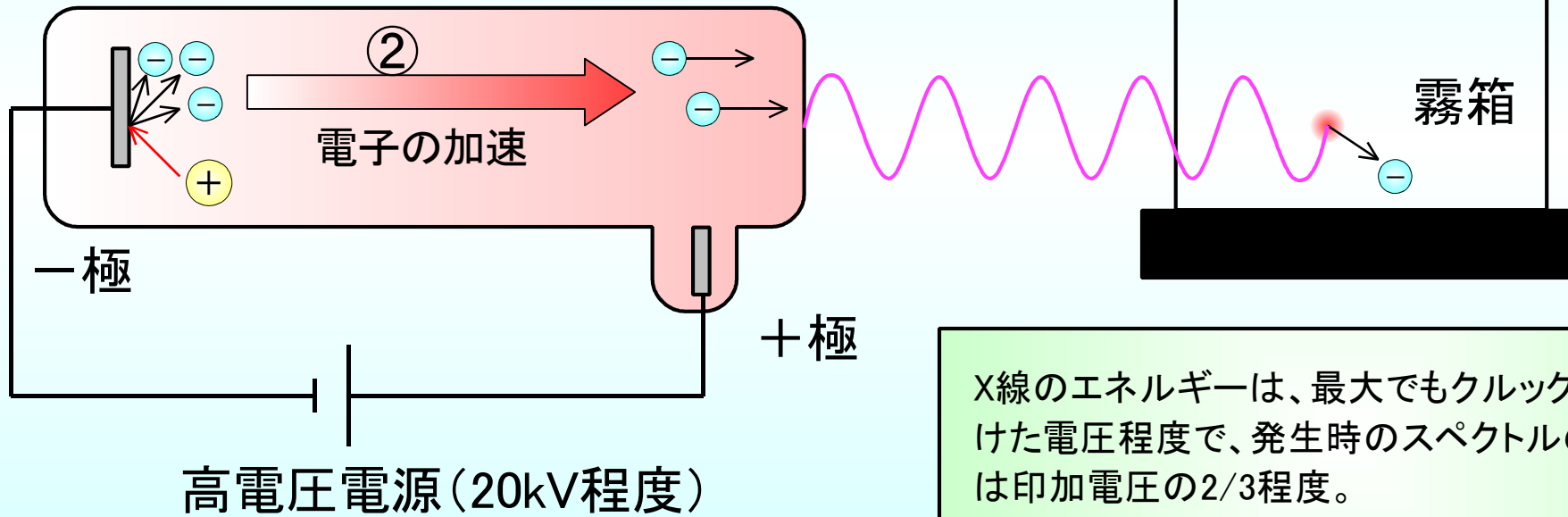
＋のイオンが－極に引きつけられて電子を叩き出す
(二次電子放出)

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

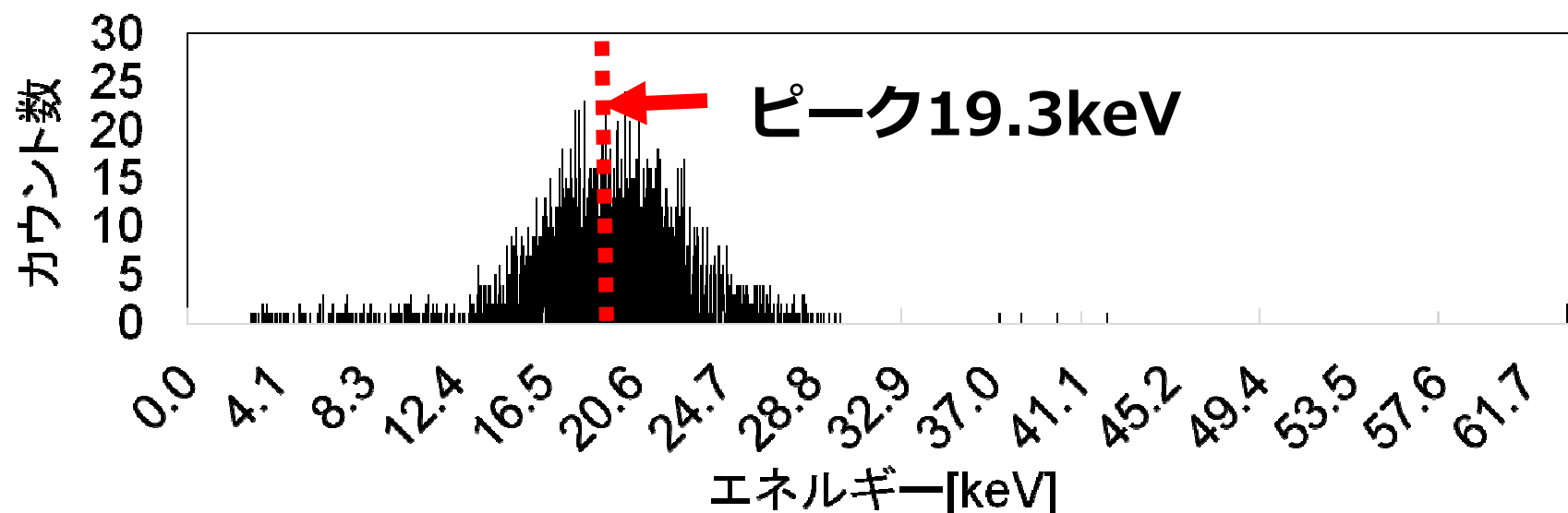
X線は最終的に原子の周りを回る電子を光電効果などで弾き飛ばして(電離作用)、弾き飛ばされた高速の光電子はβ線と同じように振る舞う。



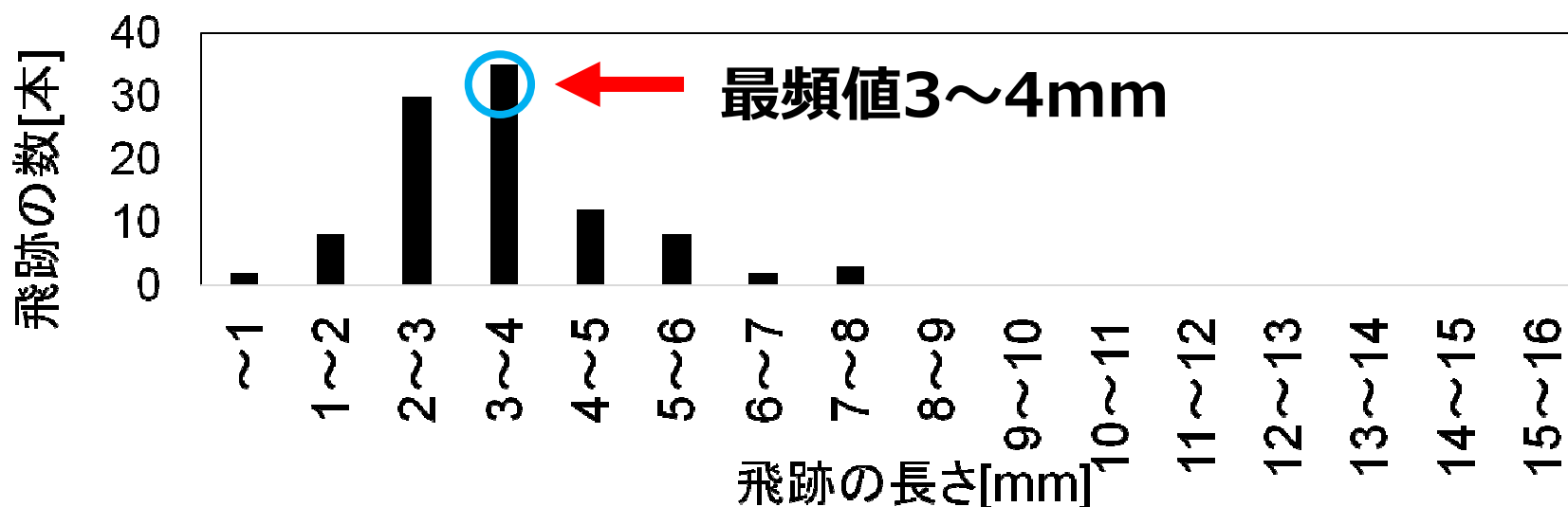
X線のエネルギーは、最大でもクルックス管にかけた電圧程度で、発生時のスペクトルのピークは印加電圧の2/3程度。

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。

クルックス管からのX線の測定結果

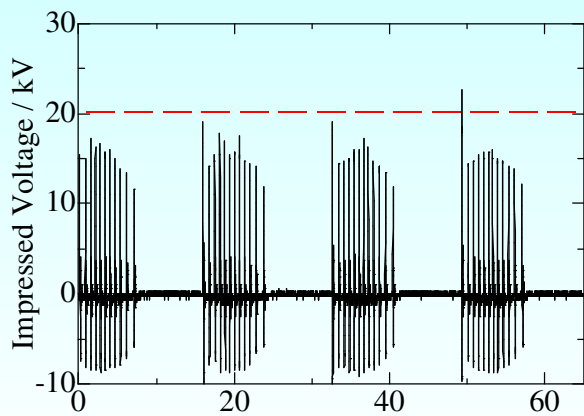


CZT検出器スペクトル測定結果

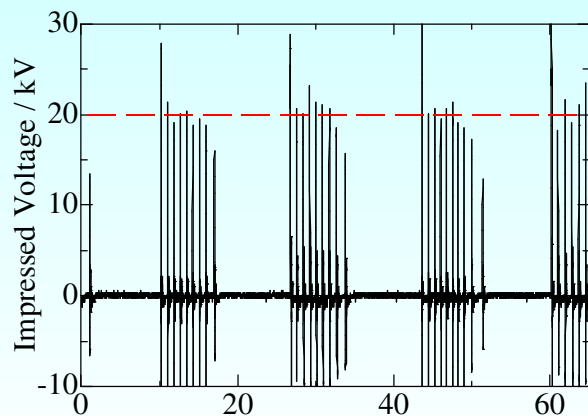


ペルチェ冷却式高性能霧箱での測定結果

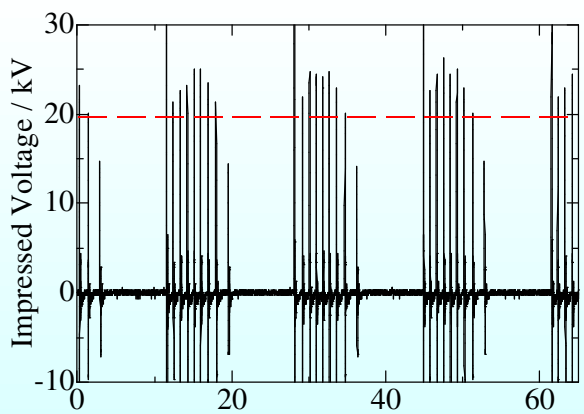
誘導コイル設定による出力パルスの変化



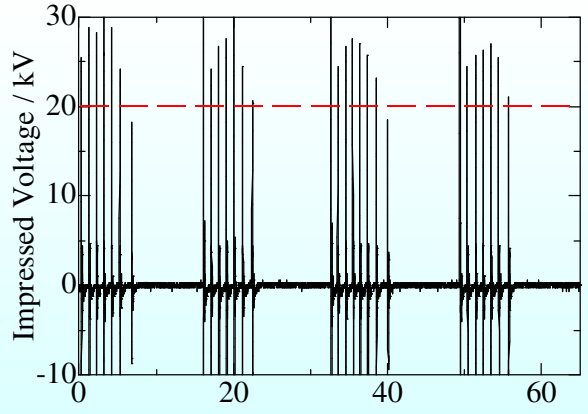
DDE=20mm, PW0, 40 μ A, 120 μ Sv/h



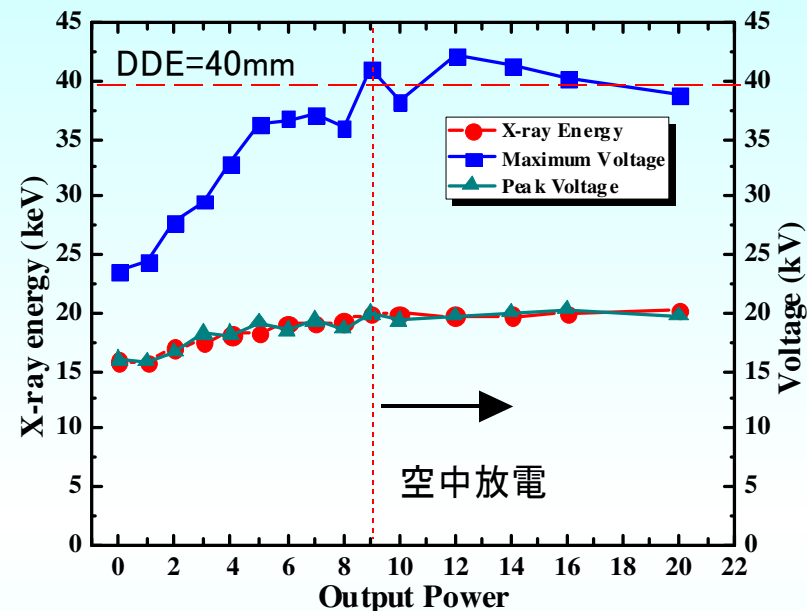
DDE=20mm, PW4, 80 μ A, 1.25mSv/h



DDE=30mm, PW4, 80 μ A, 1.56mSv/h



DDE=30mm, PW7, 96 μ A, 3.50mSv/h

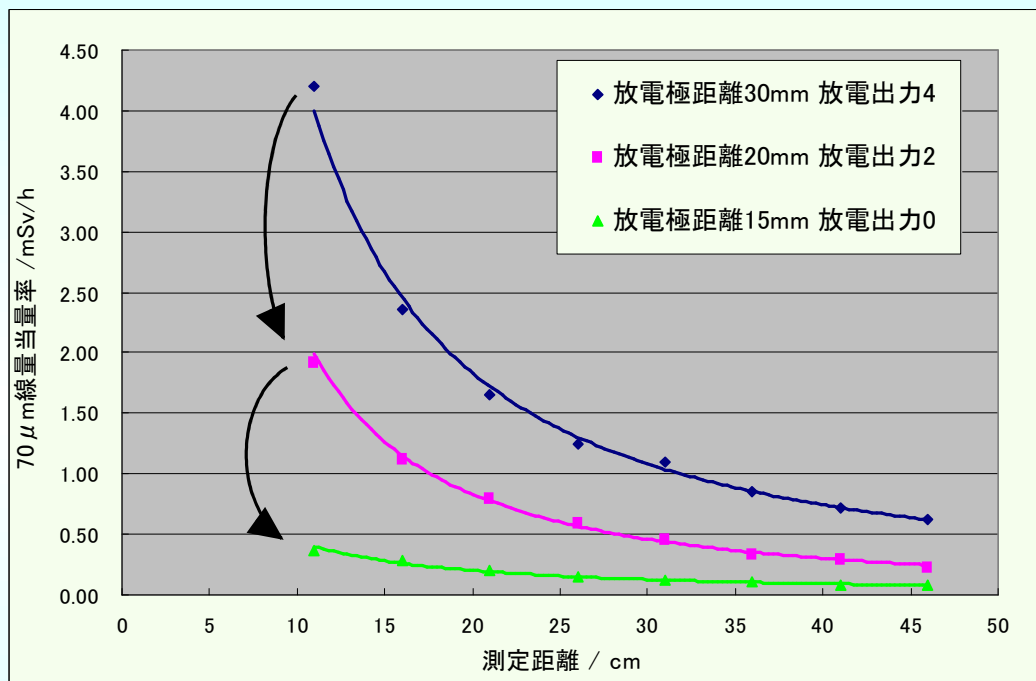


・放電出力を上げていくと次第に出力電圧が上昇し、電圧のヒストグラムのピークと、X線エネルギースペクトルのピークは良い一致を示した。

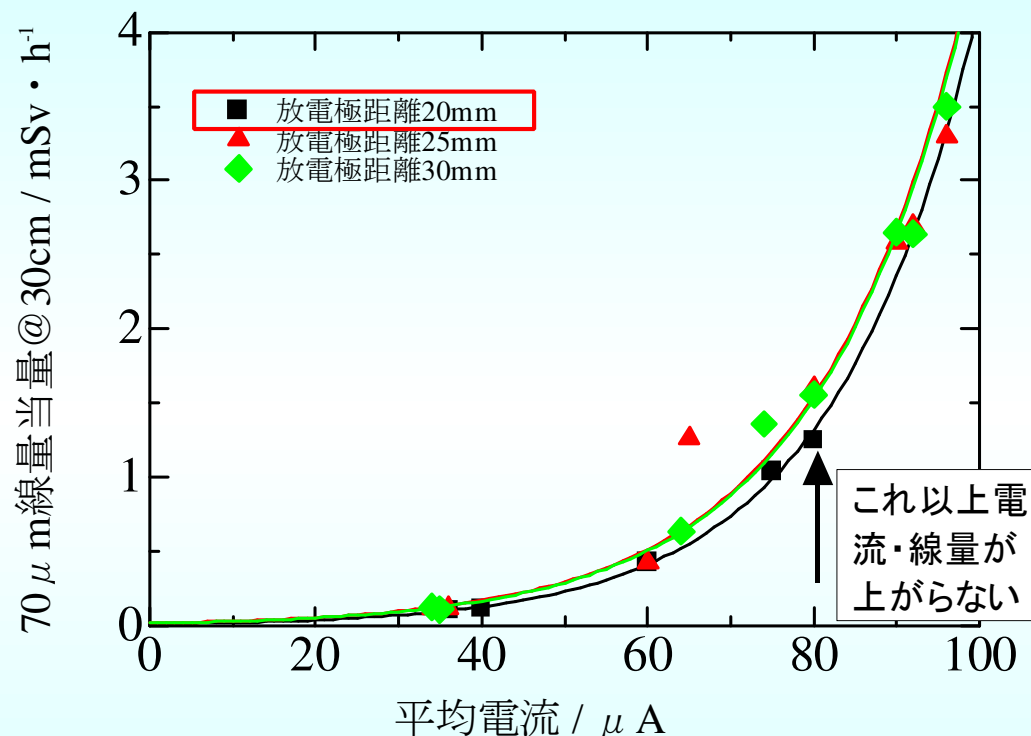
・放電極距離によって規定される以上の電圧に上げようと放電出力を上げても、空中放電によって電流が流れて電圧がドロップし、それ以上クルックス管に印加される電圧が上がらなくなる。

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



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。

・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。

クルックス管に印加される 電圧の制御

2018年度 第一段実態調査



全国の 38 本のクルックス管について、ガラスバッジを郵送することにより、教員自身の手で**普段の授業の設定**で線量測定を行ってもらった。

38本を測定した。10分間の測定での $70 \mu\text{m}$ 線量当量*:
31本で $< 100 \mu\text{Sv} @ 1\text{m}$ (外挿により評価) *実効線量はさらに1/10以下。
うち、18本で15cmの距離でも検出限界($50 \mu\text{Sv}$)以下

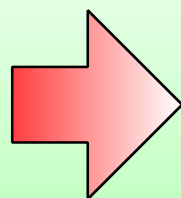
ペットボトルに貼付けたガラスバッジに15, 30, 50cmの距離で10分間X線照射して返送してもらい、線量評価を行った。X線計測専用のタイプFXでは同時にエネルギー評価も出来る。

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 $600 \mu\text{Sv}$ 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、
 $40 \mu\text{Sv/h}$ にまで落ちた。

距離1m、10分間では、 $0.6 \mu\text{Sv}$ に過ぎない

クルックス管に印加する電圧

クルックス管の内部には**わずかに気体分子が封入されており**、陰極に高電圧を印加すると、**わずかな正イオン**が加速されて陰極に衝突する。その際に放出された多数の二次電子を電子ビームとして観察している(冷陰極)。

このような動作原理であるため、電子線の観察には管内に**わずかなガスが必要であるが**、**古い製品ではガラス管に吸着されるなどして残存するガスの量が少なくなり**、**より高電圧を印加しないと電子線を観察できなくなる**。実際の教育現場にはこのような古い製品が多数残されており、高電圧を印加することにより**発生する制動放射 X 線のエネルギーが高くなり**、**ガラス管壁に対する透過率が高くなるため**、**放出される線量が高くなる**。



ガス圧調整の必要性はレントゲンの時代から知られており、ガス調整器が使われていた。写真は大阪府大高専にあった島津製の「教育用エックス線装置」

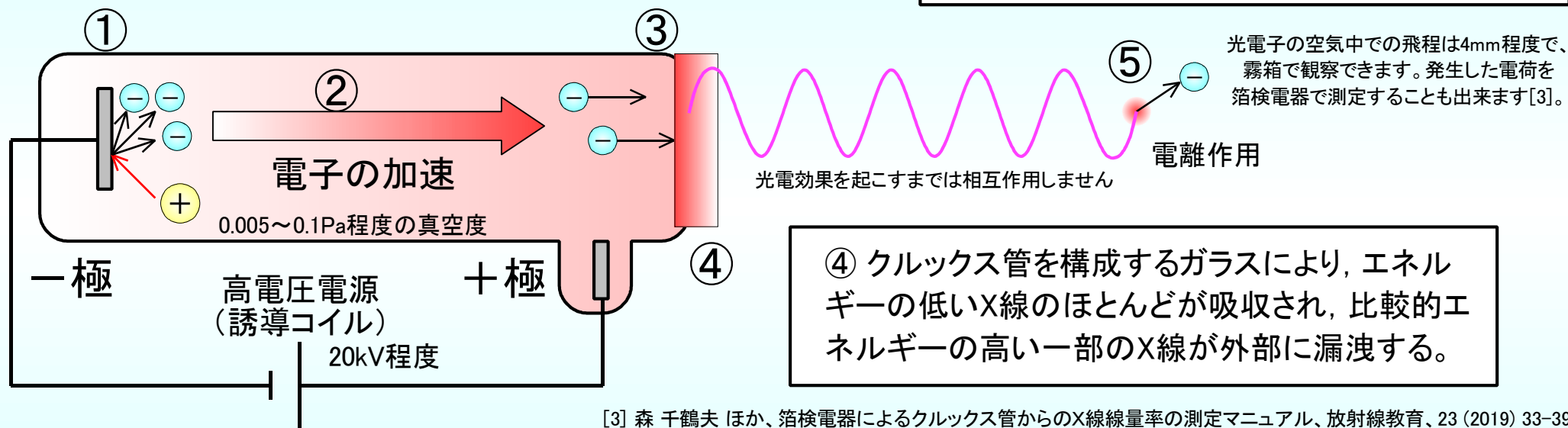
クルックス管のしくみ

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。

電子自体は完全に遮蔽され外に出てきません。

⑤ X線は最終的に原子の周りを回る電子を光電効果で弾き飛ばす(電離作用)。弾き飛ばされた光電子は β 線と同様であり、体内ではラジカルの生成、DNA鎖の直接切断などにより放射線障害の原因となりうる。



④ クルックス管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一部のX線が外部に漏洩する。

[3] 森 千鶴夫 ほか、箔検電器によるクルックス管からのX線線量率の測定マニュアル、放射線教育、23 (2019) 33-39.

クルックス管に封入されているガスの量がガラスに吸着するなどして少なくなると、①で陰極に衝突するイオンが少なくなるため、二次電子の量が少なくなり、電流が流れにくくなります。その結果十分な二次電子が出てくるまで意図せずして高い電圧が印加されてしまい、④で漏洩する線量が大きくなってしまいます。

→ 20keV前後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ためです (15keV→30keVで100倍大きくなる)

この状態となったクルックス管は、放電極距離を20mmにすると空中放電が激しい一方で、クルックス管に流れる電流は少なく観察が困難です。放電極距離を広げると高い線量が漏洩するため、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

誘導コイルを用いた高電圧印加について



放電極距離

DDE

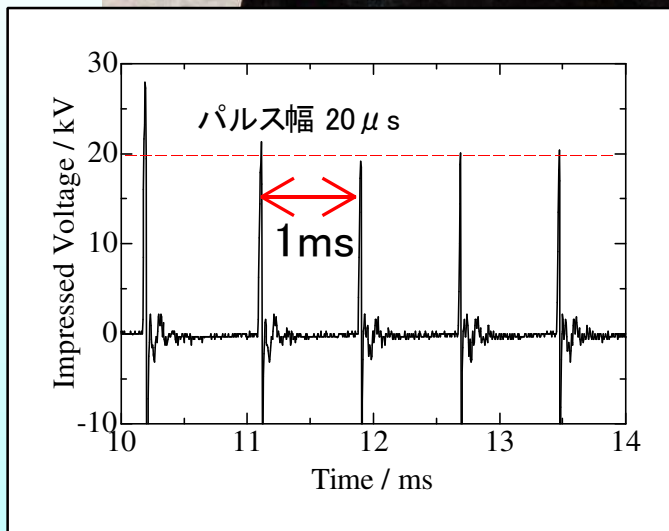
PW

放電出力

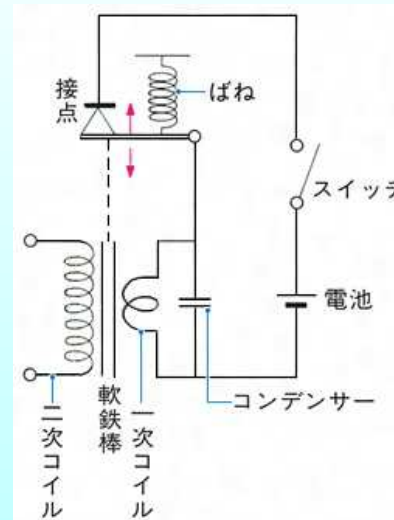
放電出力ダイヤルによりトランスの一次側に印加する電圧を変えることで連続的に出力電圧を変化させることができるが、**特定の電圧に設定出来るわけではない。**

空気中での絶縁破壊電圧が1kVで1mm程度であることから、放電極間の距離を変えることで印加する**最大電圧を規定できる。**

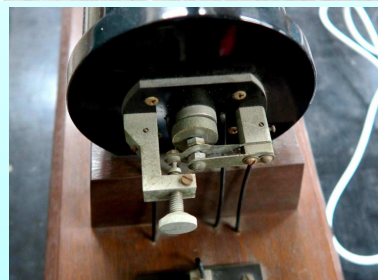
→ 20mm にしておくと20kV以上かけようとしても空中放電で電流がクルックス管をバイパスして流れるためそれ以上電圧が上がらない、**安全装置**となる。



放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流 $80 \mu A$



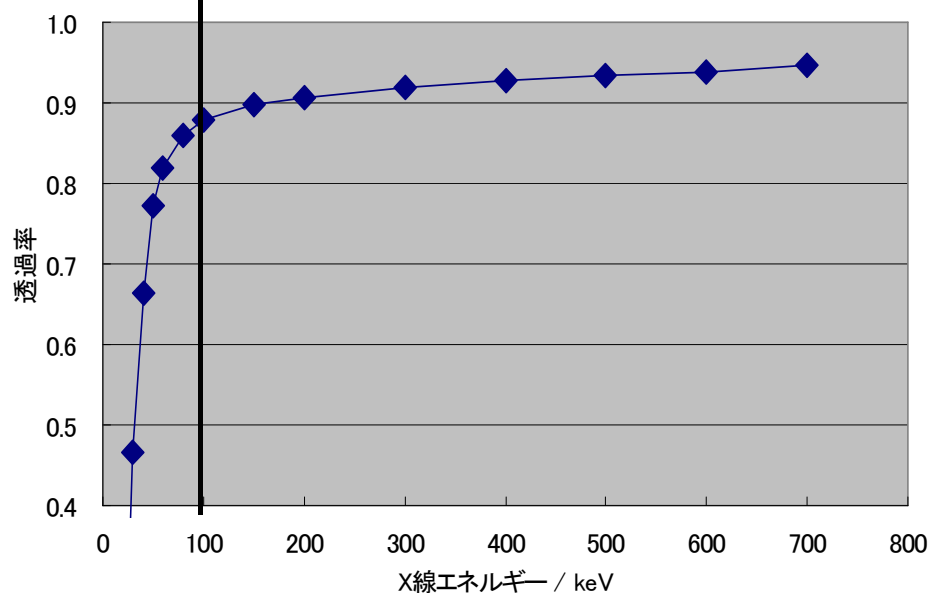
ブザーの回路で、一次側に断続的な電圧のパルスが発生させ、トランスで二次側に高圧を出力する。一次側の電圧を変化させると二次側の電圧も変化する。半導体回路で一次側のパルスが発生している装置もある。



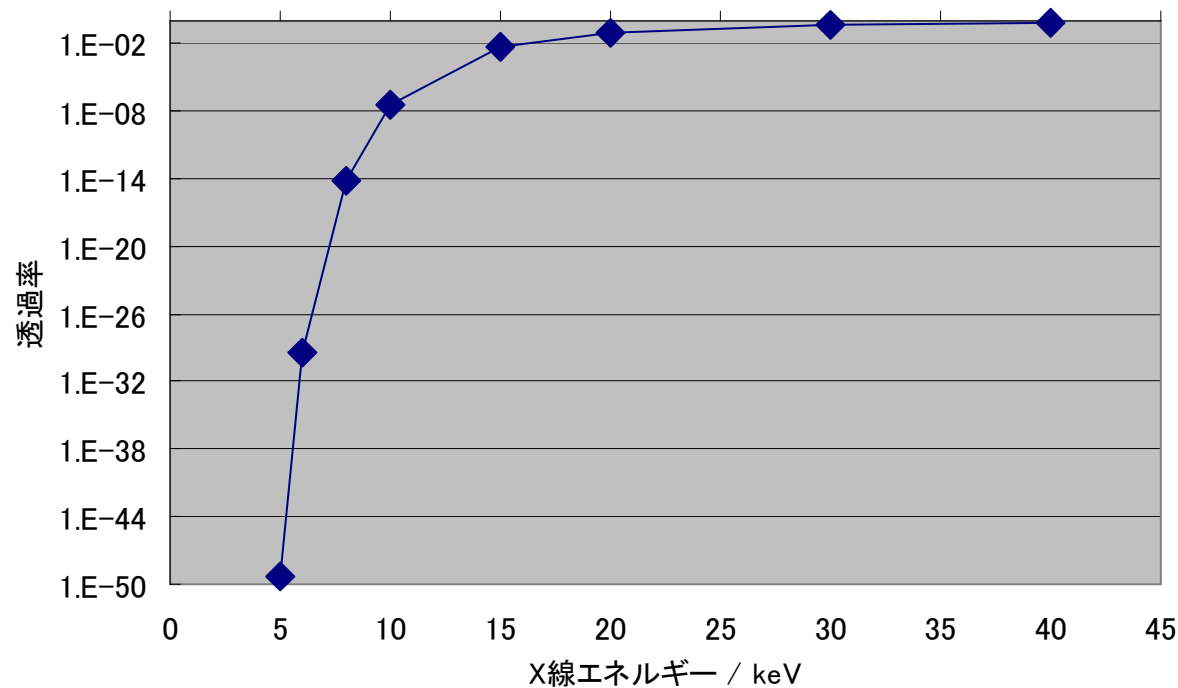
わずかな印加電圧低下での大きな線量の変化

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



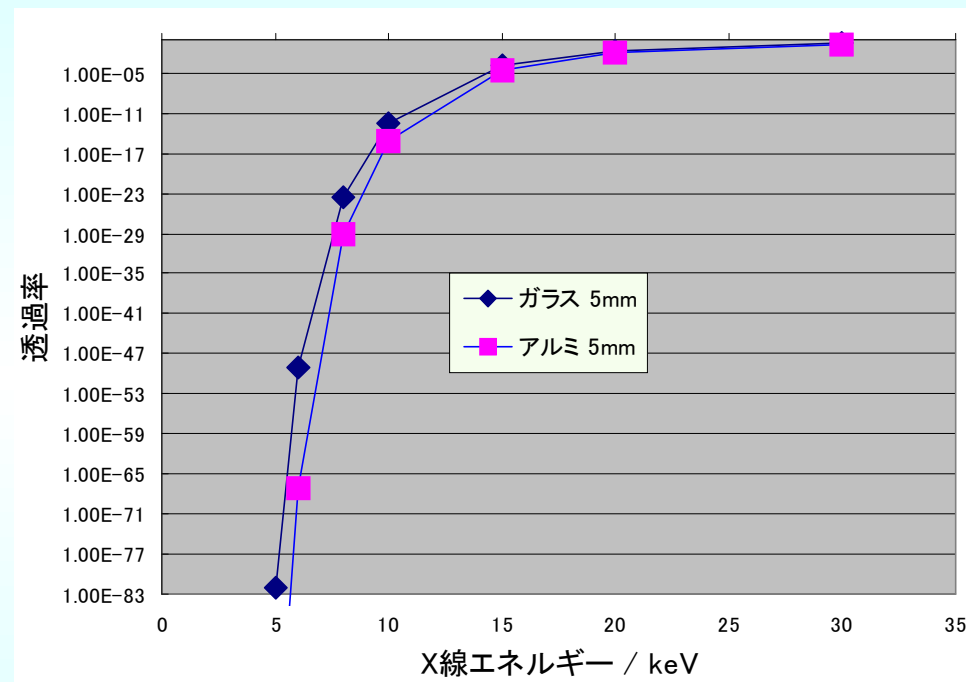
30keV と 15keV で約100倍違う。



3mmのガラスに対するX線の透過率

低エネルギーX線の透過率

エネルギー (keV)	質量減衰係数 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	厚さ(cm)	透過率	遮蔽体
5	41.5	1.00	1.0	9.48E-19	水
6	23.85			4.39E-11	
8	9.94			4.82E-05	
10	5.051			6.40E-03	
15	1.546			2.13E-01	
20	0.7505			4.72E-01	
30	0.3455			7.08E-01	
5	146	2.59	0.2	1.43E-33	ガラス (コンクリート 等価として計算)
6	87.29			2.31E-20	
8	42.13			3.33E-10	
10	22.16			1.03E-05	
15	6.809			2.94E-02	
20	2.973			2.14E-01	
30	0.983			6.01E-01	
5	192.4	2.70	0.5	1.57E-113	アルミ
6	114.4			8.46E-68	
8	49.7			7.26E-30	
10	25.75			8.00E-16	
15	7.697			3.07E-05	
20	3.279			1.20E-02	
30	1.045			2.44E-01	



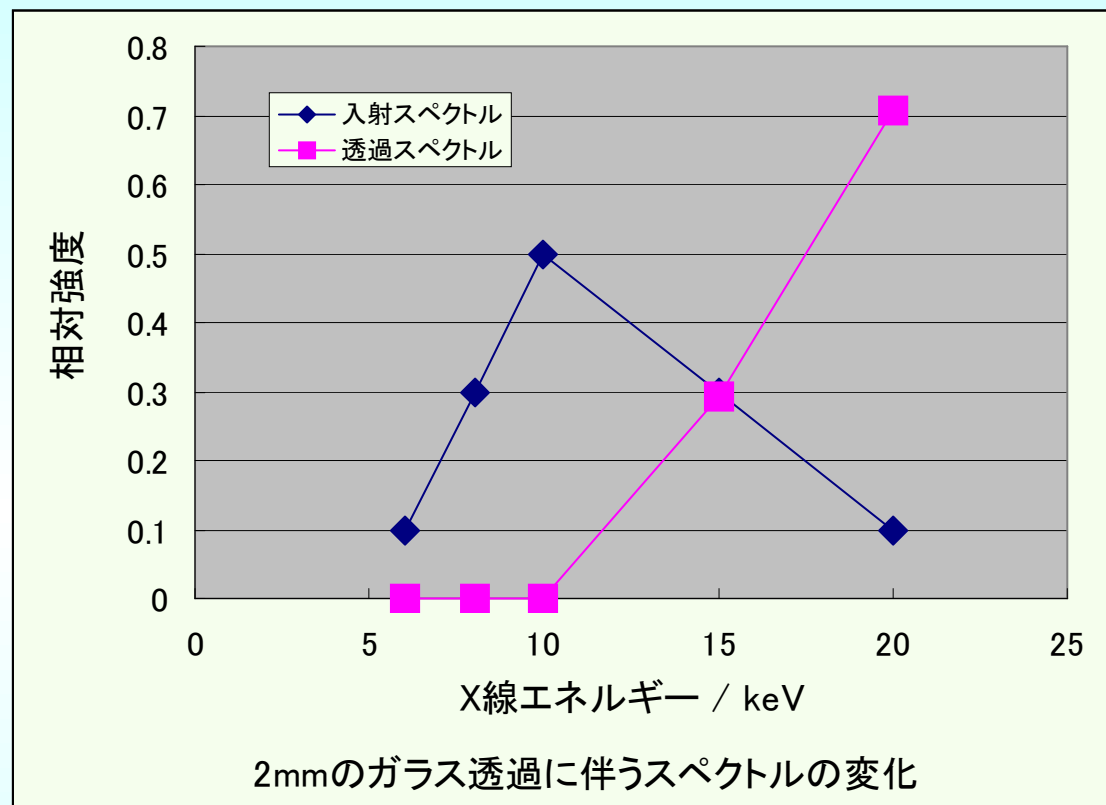
アイントープ手帳 第11版, p154-155

- ・水1cmで遮蔽できるのであれば、1cm線量当量については気にする必要はないが、10keV以上ではそれなりに透過する。
- ・クルックス管を構成するガラス壁によって 10keV 以下のX線はほとんど遮蔽される
- ・15keV 程度から急激に遮蔽率が変化し、わずかな印加電圧の違いにより大きく透過率が異なるため、放出されるX線のフラックスが安定しない。

クルックス管のガラスによるスペクトル変化

エネルギー (keV)	質量減衰係数 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	厚さ(cm)	透過率
6	87.29	2.59	0.2	2.31E-20
8	42.13			3.33E-10
10	22.16			1.03E-05
15	6.809			2.94E-02
20	2.973			2.14E-01

ガラス管を透過する前のX線のエネルギースペクトル(最大エネルギー20keVでその半分の位置にピークを持つ)を適当に決め、2mmのガラスで遮蔽された後の強度を透過率から求めた後、全体の強度が1となるように規格化した。

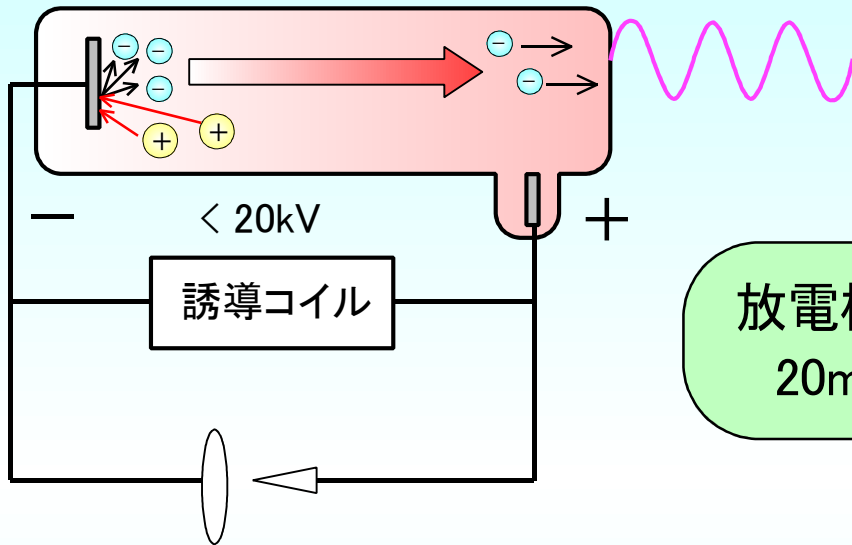


入射スペクトル	透過スペクトル	規格化
0.1	2.31E-21	7.62E-20
0.3	9.99E-11	3.30E-09
0.5	5.17E-06	1.71E-04
0.3	8.82E-03	2.91E-01
0.1	2.14E-02	7.08E-01

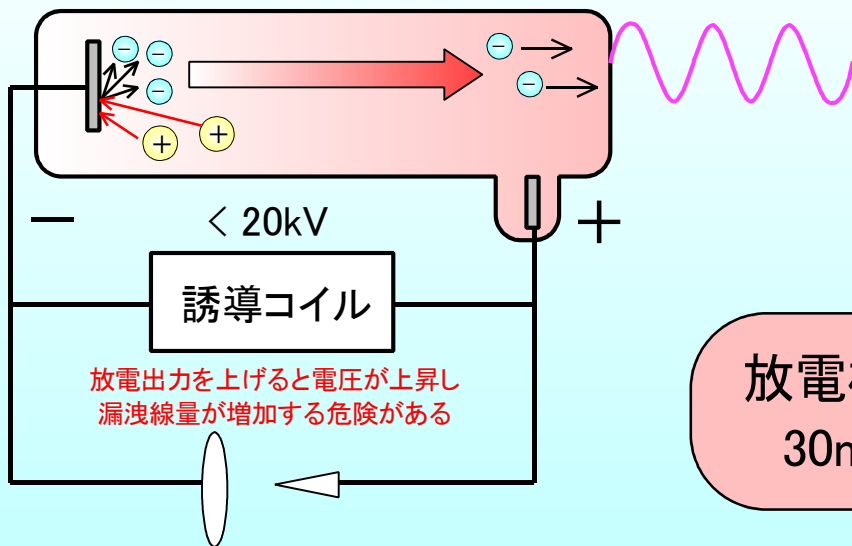
元のスペクトルよりも透過率が支配的となり、最大エネルギーである20keVがほとんどを占めるスペクトルとなった。

放電極の働き

正常なクルックス管



クルックス管に正常に電流が流れて電圧が20kVより低ければ、放電極間には電流は流れない

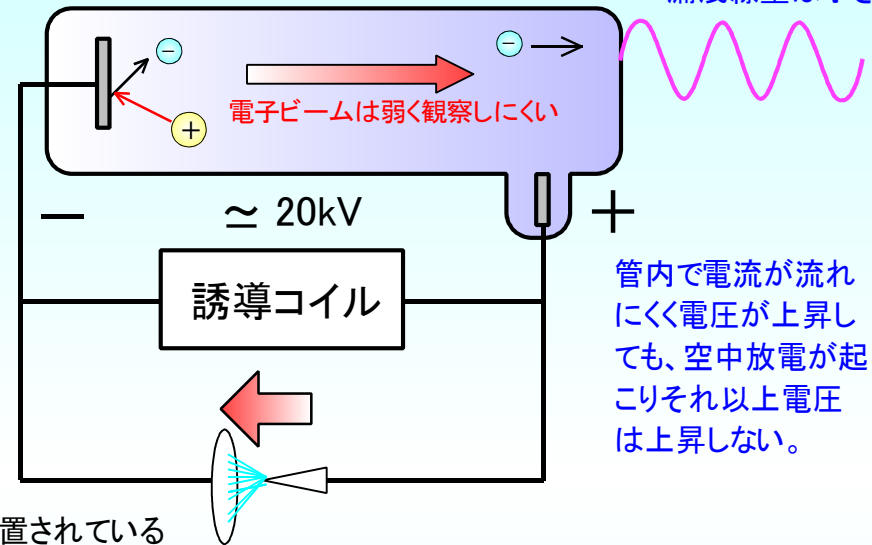


放電出力を上げると電圧が上昇し漏洩線量が増加する危険がある

放電極間距離が長くなっても変化はない

放電極間距離が20mmの場合

内部のガスが少ないクルックス管



ビームが弱いため漏洩線量は小さい

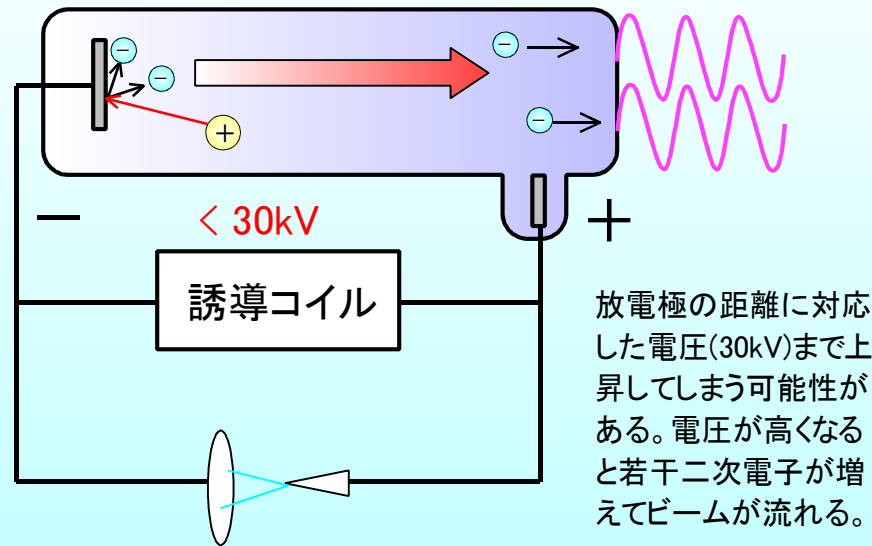
電子ビームは弱く観察しにくい

管内で電流が流れにくく電圧が上昇しても、空中放電が起こりそれ以上電圧は上昇しない。

並列に設置されている放電極間に電流が流れる

エネルギーが高いと透過率が高くなり、漏洩線量が増加する

放電極間距離が30mmの場合



放電極の距離に対応した電圧(30kV)まで上昇してしまう可能性がある。電圧が高くなると若干二次電子が増えてビームが流れる。

実際の教育現場での測定

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

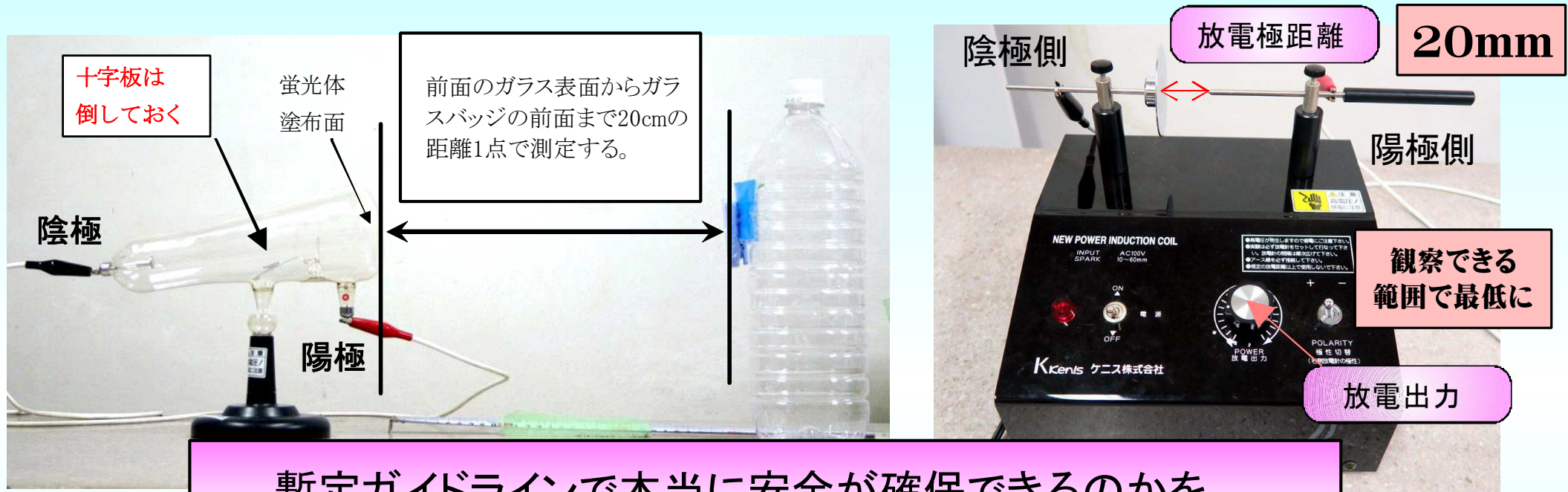
- ・放電極を必ず使用し、放電極距離は20mm以下とする。
- ・放電極表面は清浄にした上で、円板電極側を-極にする
- ・誘導コイルの放電出力は、電子線の観察ができる範囲で最低に設定する。
- ・できる限り距離を取る。生徒への距離は 1m以上とする。
- ・演示時間は年間10分程度に抑える。

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。



暫定ガイドラインの検証



暫定ガイドラインで本当に安全が確保できるのかを、全国の教育現場の実際に使われる様々な装置で検証。

・放電極距離 20mm、放電出力は観察できる範囲で最小という暫定ガイドライン準拠の条件で線量測定を行ってもらう。

- ・クルックス管から 20cm の位置で、測定は10分間など統一したプロトコルで測定。
- ・ガラスバジは大阪府大と各学校とを郵送でやりとりし、現場の先生の手により測定。BGの影響を抑えるために1月ごとに取りまとめて評価を行う。

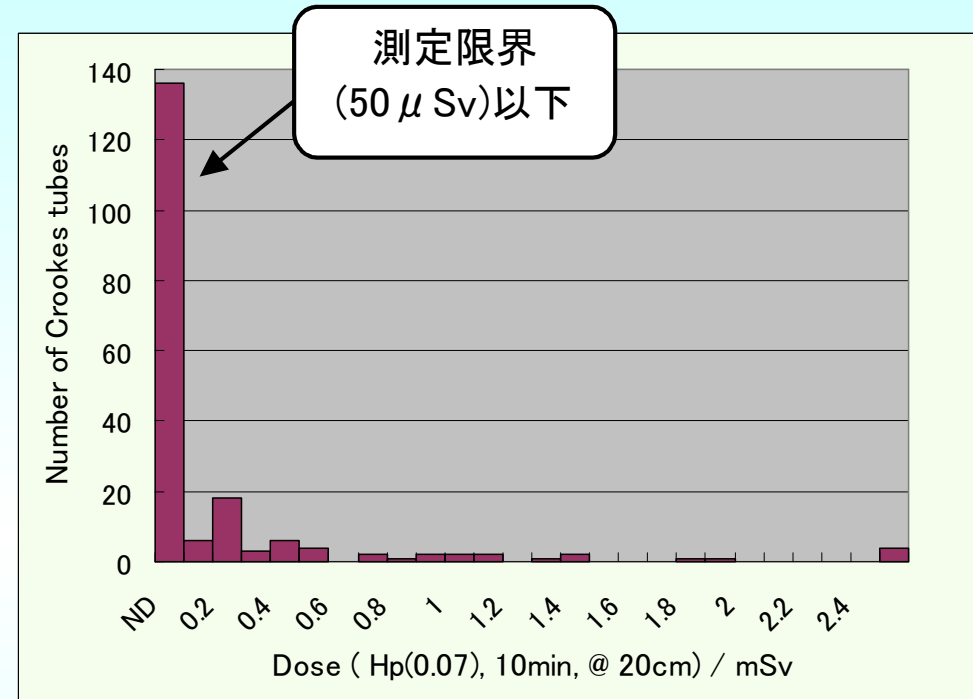
大阪府立大学倫理委員会の承認を得て実験を行っています。

第二期実態調査結果（最終版）

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～11月に第二期の実態調査を行った。

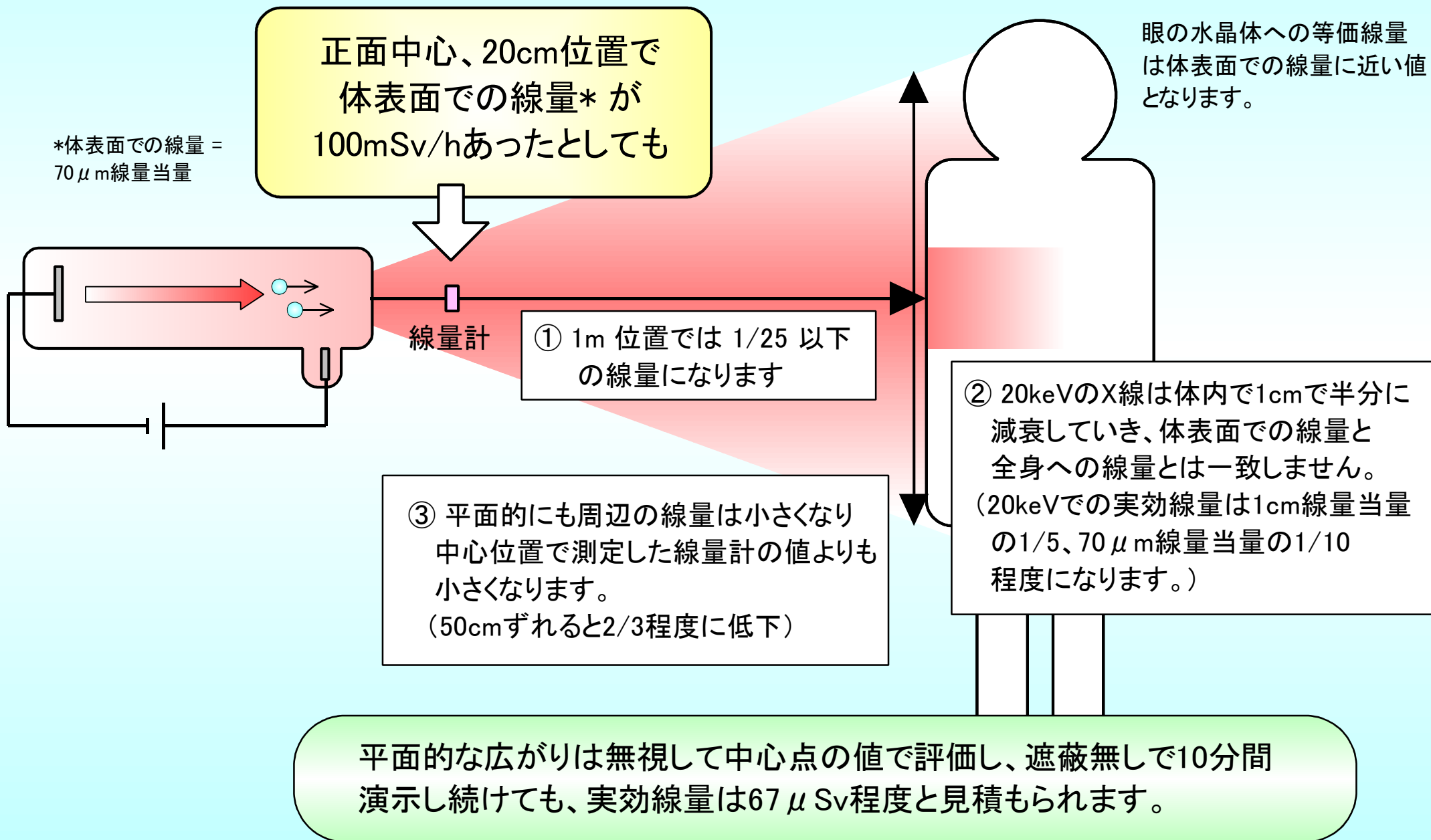
8月期は、27校からの95本、9月期は8校からの18本、10月期は18校からの67本、11月期は4校からの11本、合計191本のクルックス管について「暫定ガイドライン準拠」での測定を行った。

191本中 136本に於いては、距離 20cm 10分の測定で Hp(0.07) が検出限界である $50 \mu\text{Sv}$ を下回っていた。有意な値が出た 55本の装置についても、暫定ガイドライン適用前に比べて低い線量に抑えられているが、最大で 10.4mSv を示した装置も存在した。



10分間、20cm の距離でのガラスバッジによる Hp(0.07) での評価結果で有り、ここから実際の生徒の被ばく量を見積る必要がある。

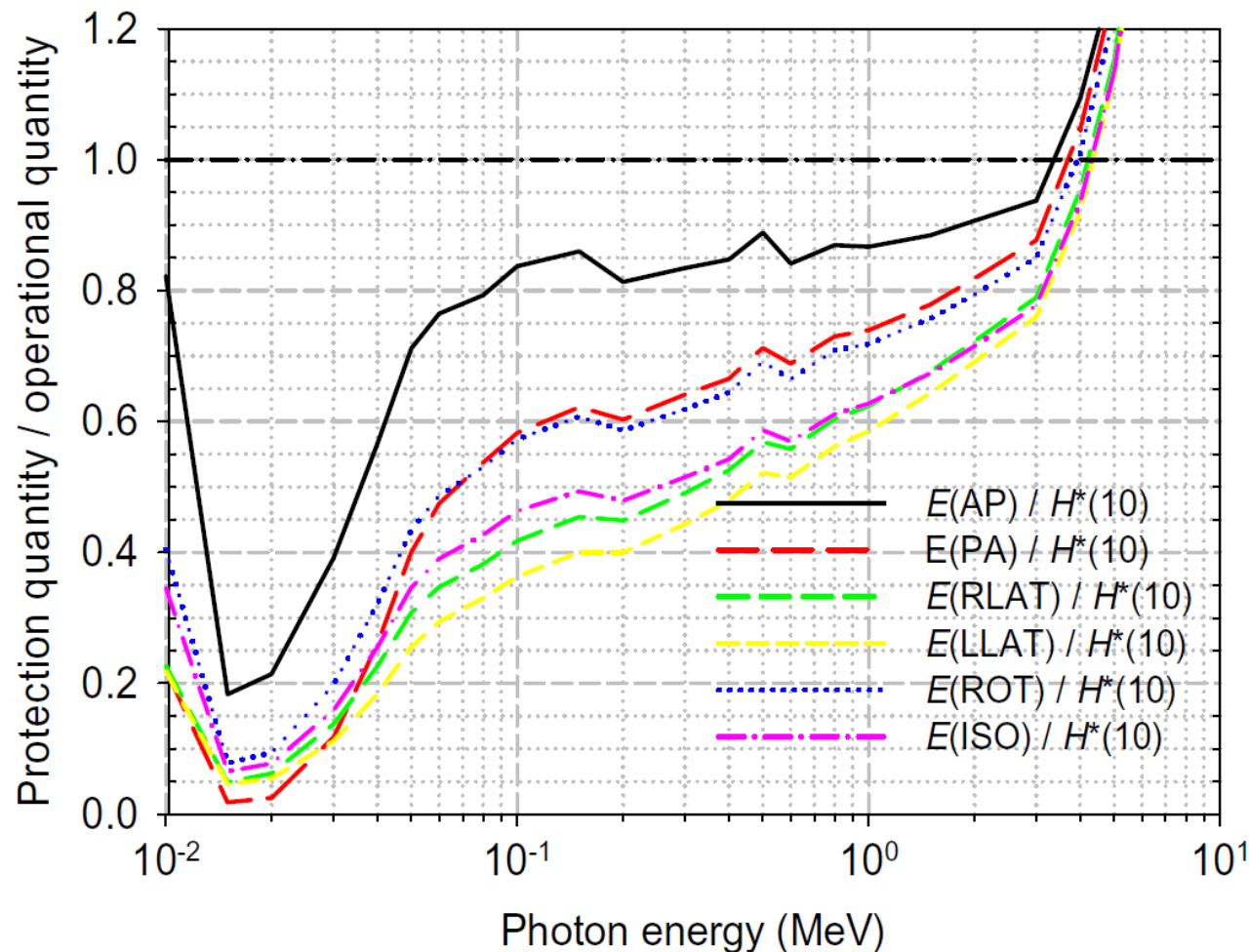
クルックス管からのX線測定値からの実効線量の評価



放射線量について

- ・放射線を被ばくしたときの全身への影響を、ICRP等が定めたしきたりに従って評価したのが、「実効線量」。普通、線量と言えばこの実効線量のことを指す。
- ・ベータ線など、透過力の弱い放射線を被ばくした場合、皮膚表面だけが被ばくしていることになる。この時皮膚だけに対する影響を評価するのが、「皮膚等価線量」。最近では、眼の水晶体に対する「水晶体等価線量」も問題となっている。
- ・実効線量の評価は非常に複雑である。このため、体の表面から1cmの深さの一点での吸収線量が全身の線量を代表するという、簡易的な「1cm線量当量」をサーベイメーターは測定している。同様に、皮膚の等価線量は深さ70 μ mの深さの一点での吸収線量である、「70 μ m線量当量」で測定する。
- ・クルックス管からのX線は透過力が中途半端で、皮膚だけ、と言うわけではない一方で、1cm進むと半分程度に減衰するため、「1cm線量当量」では5倍以上の過大評価となり、慎重な評価が必要。現在は表面での線量としての70 μ m線量当量での測定を行っている(あとで実効線量への換算が容易)。20keVでの実効線量はおおよそ70 μ m線量当量の1/10。

防護量と実用量の違い



ICRP Pub116
Fig.5.2

測定に際しては荷電粒子平衡は取られていない。平衡を取ってやれば高エネルギーでも安全側に評価となる。

AP, PA 等は放射線の入射方向に対する人体の向きを表わし、APは正面、PAは背面、RLAT・LLATは右・左側面、ROTは立位で水平回転、ISOは等方からの入射を表わしている。

実効線量 $E / 1\text{cm}$ 線量当量 $H^*(10)$ のエネルギーによる変化。1cm線量当量は20keVでは5倍程度の過大評価となる。100keV-3MeV程度までは変化は小さく、常に若干の過大評価となっている(安全側に評価)。

X線放射方向垂直平面内での空間線量分布

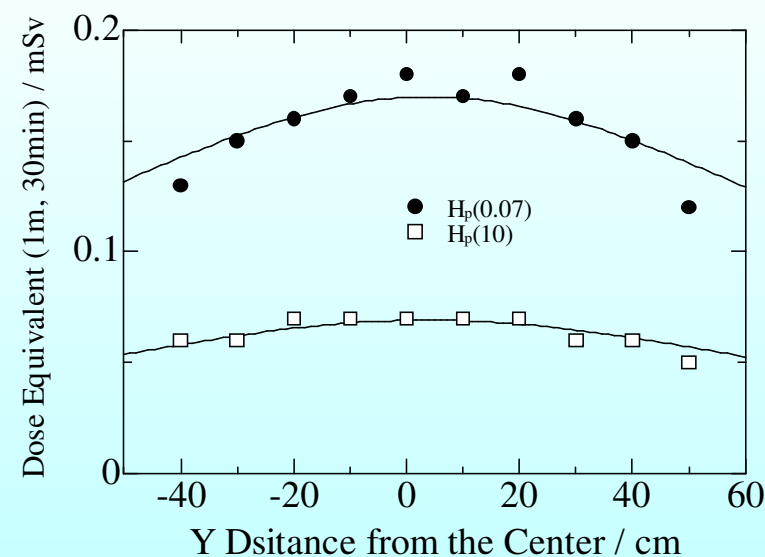
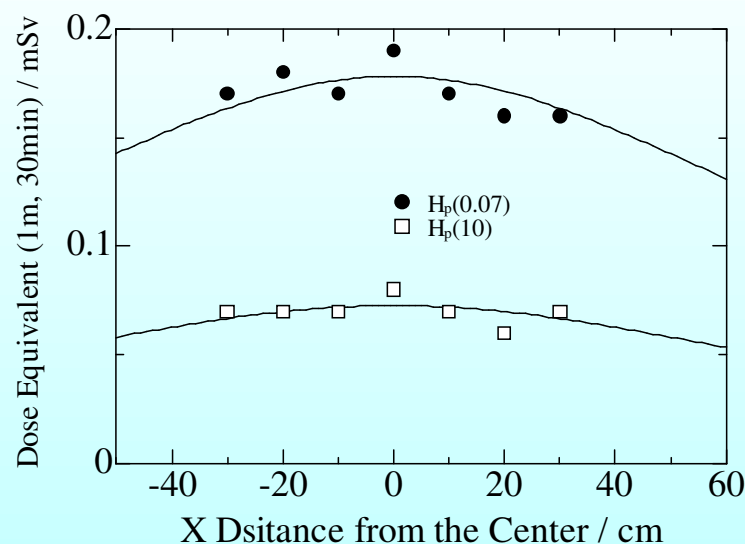
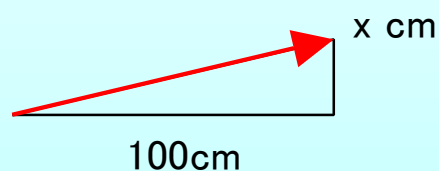
生徒位置(z=1m)での全身への線量を評価するために、平面内での線量分布を測定した。中心から y 方向 60cm 離れた位置でも 70% 程度の線量とかなりブロードな分布となっており、1.5 倍以内の範囲に収まっていた。



以下の式で空間分布を表わすことが出来る

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

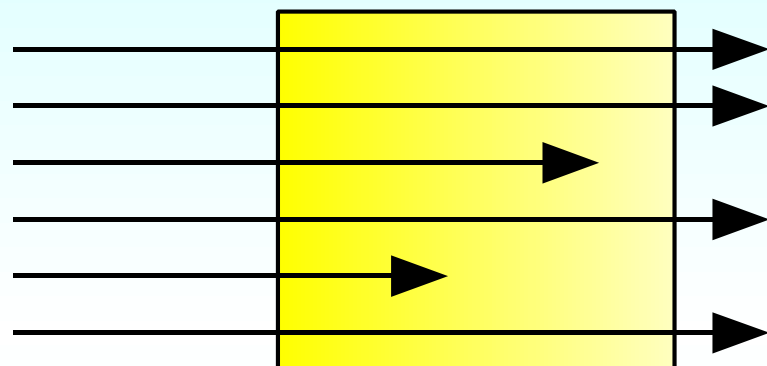
平面方向の変位を含めた直線距離の二乗に反比例



エネルギー吸収の違い

強透過性放射線

$$H_p(0.07) \leq 10 H_p(10)$$



整列拡張場

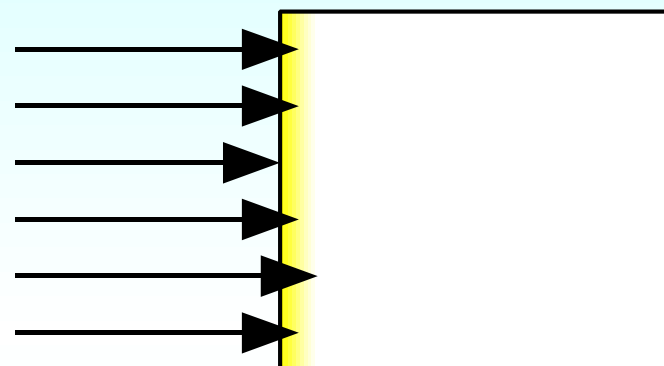
高エネルギーガンマ線などの場合透過力が高く、ほぼ均等にエネルギーを与える。

人体の場合、荷電粒子平衡を考慮して深さ1cmでの点での吸収線量(1cm線量当量)が全体を代表する。対象の厚さが大きいと、指数関数的に徐々に線量は下がっていく。

クルックス管からの20keVの低エネルギー엑스線の場合、 $H_p(0.07) = 2 H_p(10)$ 程度であり、弱透過性と言うほどでは無いが、1cmの深さでの吸収線量は体全体を代表せず、減衰を考慮する必要がある。

弱透過性放射線

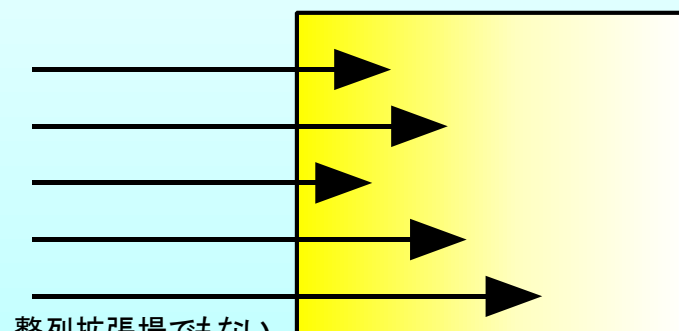
$$H_p(0.07) > 10 H_p(10)$$



整列拡張場

α 線、 β 線などの場合透過力が低く、表面近傍にのみ局所的にエネルギーを与える。

人体の場合、深さ70 μ mでの点での吸収線量(70 μ m線量当量)が皮膚の等価線量を代表する。

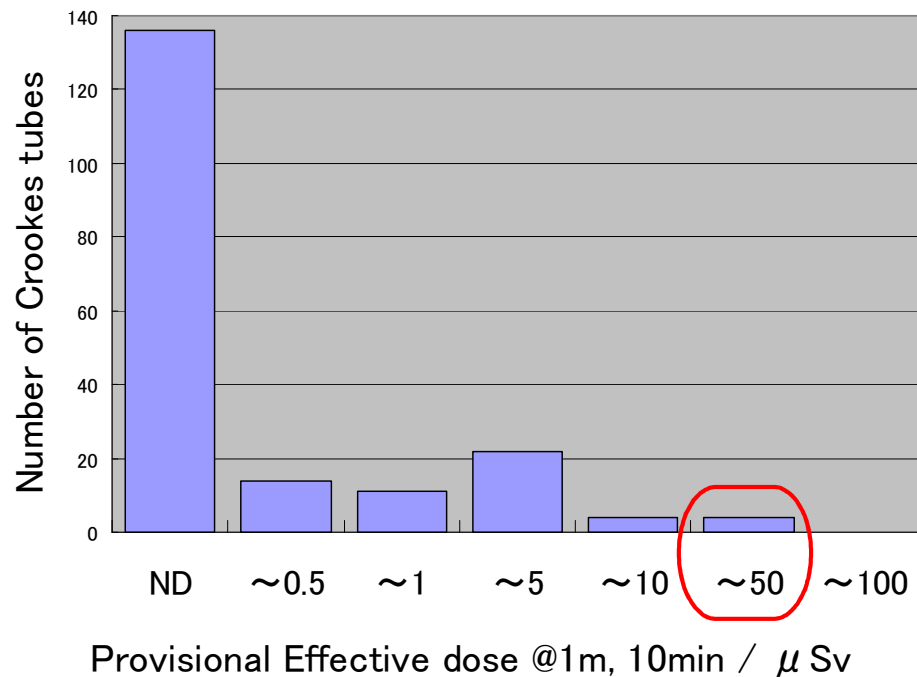


整列拡張場でもない

第二期実態調査結果（最終版）

GBでの測定
生データ

- 測定を行った距離 20cm → 実際の生徒は 1m 以上離れるため 1/25 に減衰,
- Hp(0.07) @ 20keV → 実効線量への換算は暫定値で 1/10
- 観察時間は年間で10分としているためそのまま



測定を行った 191本中 187本の装置については 1m 距離、10分間の実効線量が国際的な免除レベルである 10μ Sv (IAEA BSS など) 以下に抑制されていることが確認された。4本だけ 10μ Sv を超えると評価されたが、3本は 20μ Sv 以下、1本だけ 42μ Sv に相当すると評価された。

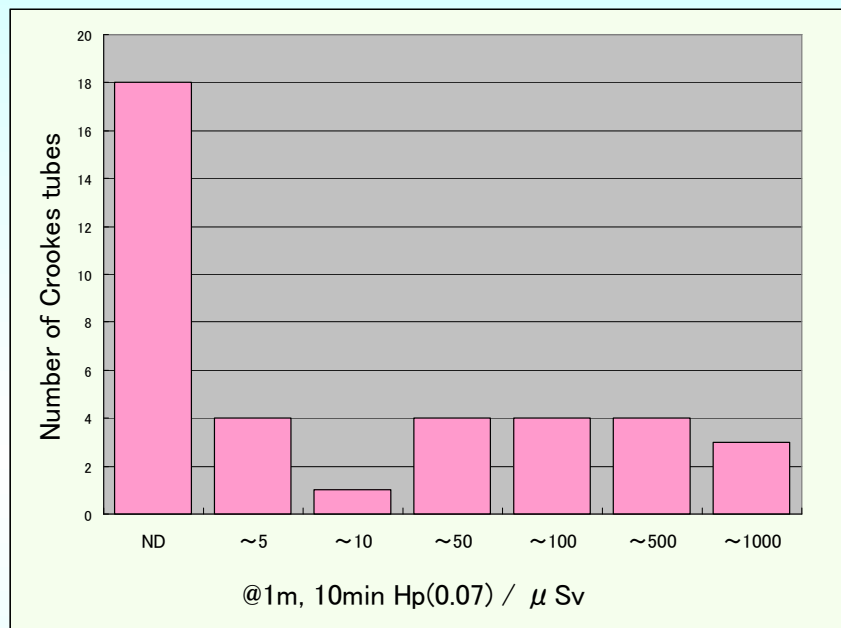
2018年の暫定ガイドライン適用前の実態調査では、37本中6本が距離 1m、10分間での実効線量が 10μ Sv を超える可能性があり、 93μ Sv と評価された装置もあった。

やや高い値を示した装置については、何故高くなったのかの調査を行うため実機を借用中。
高くなると分かれば、観察時間や距離、ガラスの水槽での遮蔽などで十分防護が可能。

ICRP Pub36「科学の授業に於ける電離放射線に対する防護」では、古い単位である実効線量当量での記載であるが年間の線量限度を0.5 mSv、個々の授業ではその 1/10 (50μ Sv) としており、観察時間の考え方から最も線量の高かった装置についても十分にこの指標を下回っていると言える。

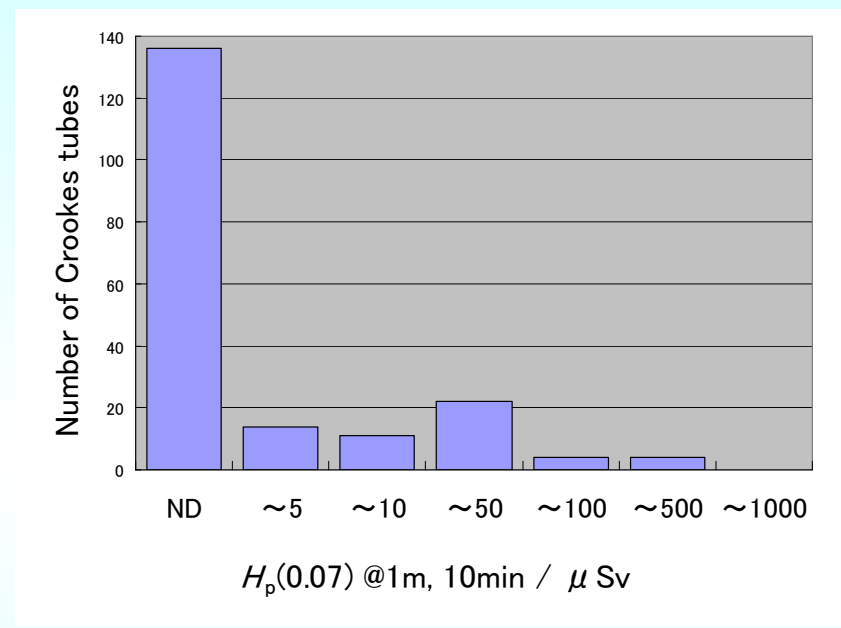
第二期実態調査結果（最終版）

2018年第一期実態調査



これまでの授業での設定

2019年第二期実態調査

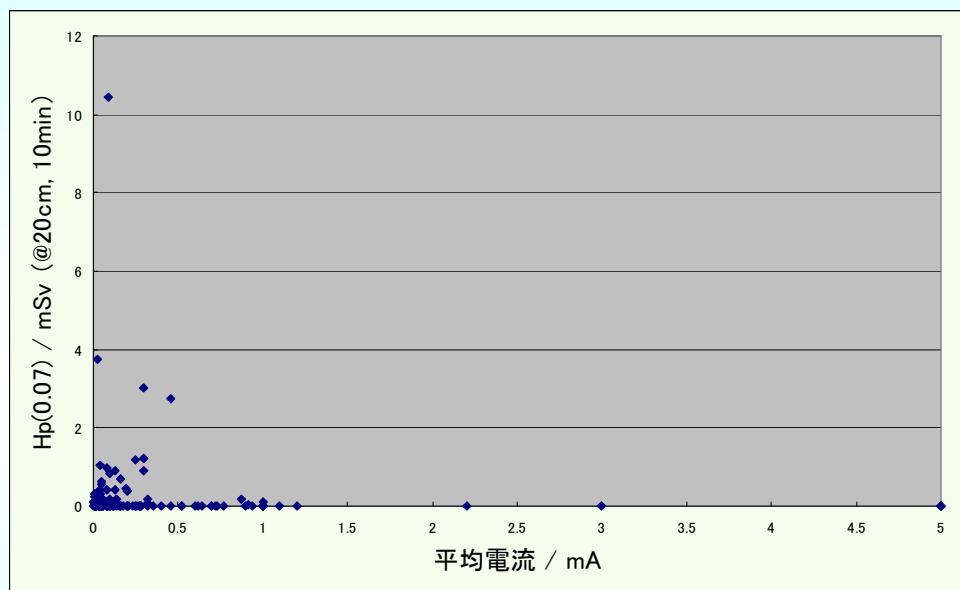


暫定ガイドライン準拠

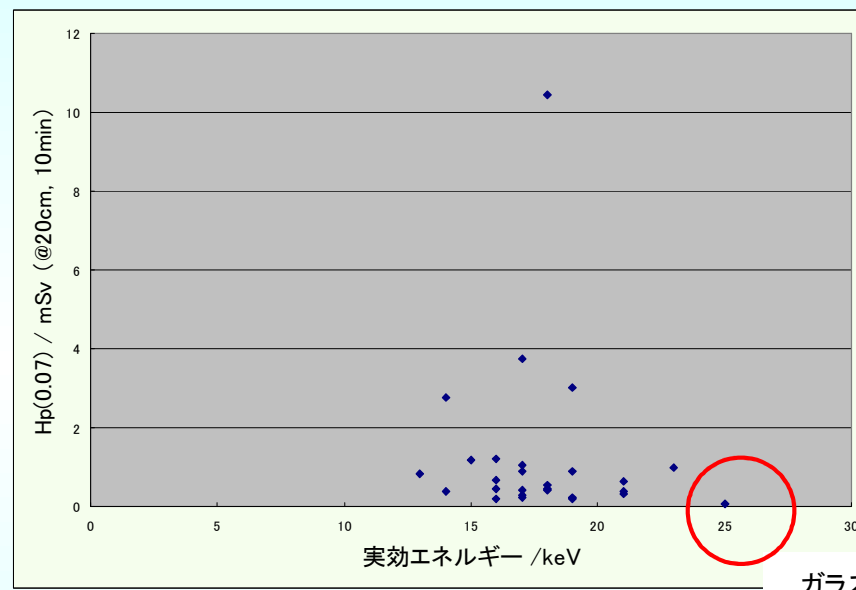
暫定ガイドラインの適用により、これまで授業で行っていた誘導コイルの設定での線量よりも低線量側に分布がシフトしている。
また、従来は装置と生徒の距離が1mよりも近かったという学校も多かったため、実際の被ばく線量の差はさらに大きい。

電流、電圧から危険な装置をスクリーニングできないか？

2019年第二期実態調査(全測定データ)



電流が小さくても安全な装置もあるが、
線量の高い装置は電流が流れにくいとは言えそう。



ガラスの水槽で
フィルタリングされたため

実効エネルギーと線量の関係からは、
あまり明確な傾向は得られていない。

学校の理科室にある程度の測定器ではスクリーニングは困難。
何らかの方法で線量評価を行う手段を提供する必要がある。

クルックス管の安全取扱に向けて

印加電圧を下げるにはどうしたら良いの？

**必ず放電極を
取り付ける。**

ケーブルが外れた場合などの電氣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。表面が汚れていると放電しにくくなるので、サビなど無いように清浄に保ちます。

**放電出力、発振周期を
出来る限り下げる。**

トランスの一次側に印加する電圧、周期を変化させることで、二次側の出力電圧、電流をコントロールします。調節できる装置では、電子線を観察できる範囲で下げて下さい。

陰極

放電極距離

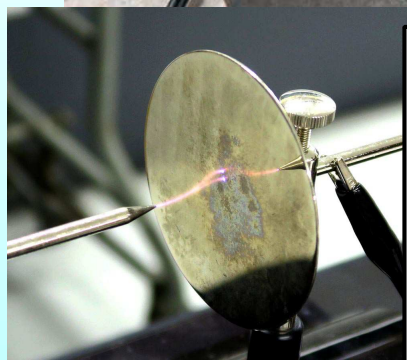
陽極

円板側が陰極、
針状の方が陽極
とした方が火花放電が
起こりやすくなります。

極性切替スイッチ

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！**



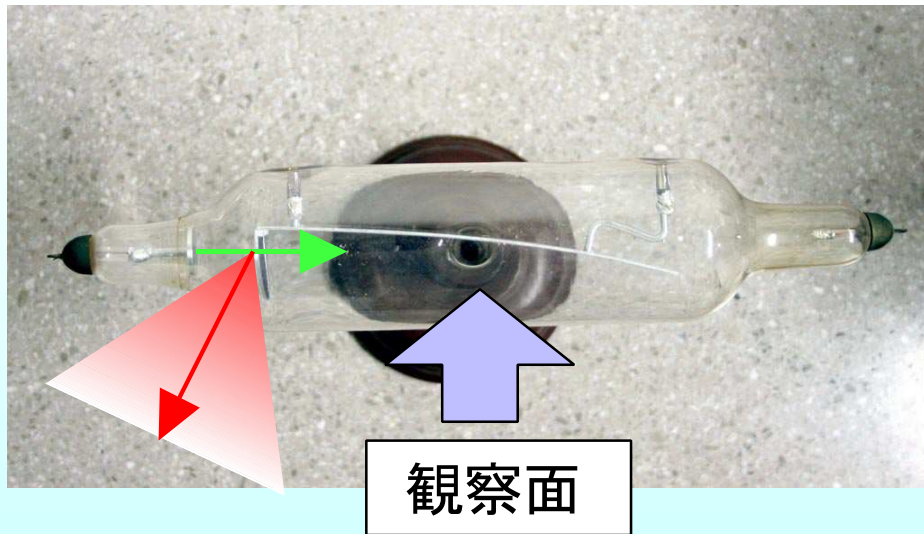
遮へいの有効性



○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) ($\mu\text{Sv/h}$)		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>

クルックス管からの被ばく線量を下げするには

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
対策を行う必要がない

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)。

暫定ガイドライン

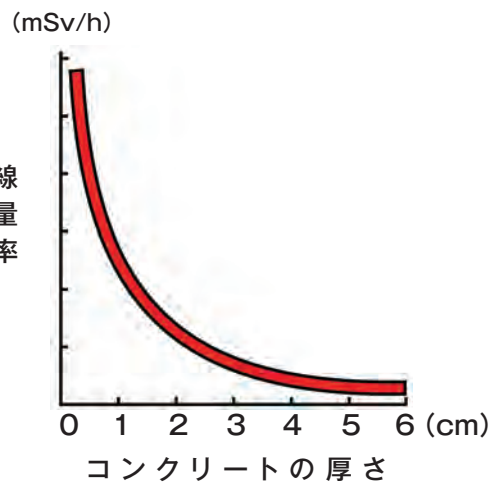
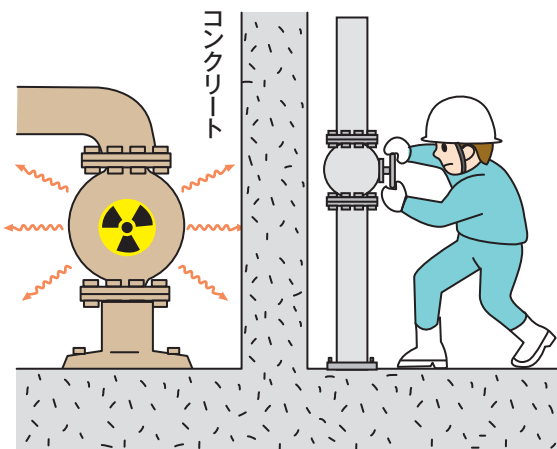
保健物理学会標準化委員会に於いて、学会標準とする事を目標としている。

- ・放電極を必ず使用し、放電極距離は20mm以下とする。
- ・放電極表面は清浄にした上で、円板電極側を-極にする
- ・誘導コイルの放電出力は、電子線の観察ができる範囲で最低に設定する。
- ・できる限り距離を取る。生徒への距離は1m以上とする。
- ・演示時間は年間10分程度に抑える。

放射線防護の基本

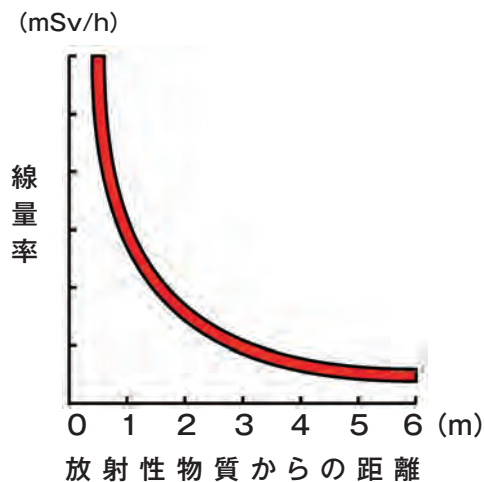
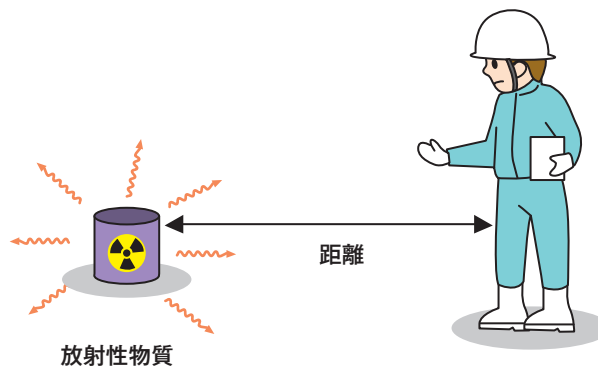
1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下



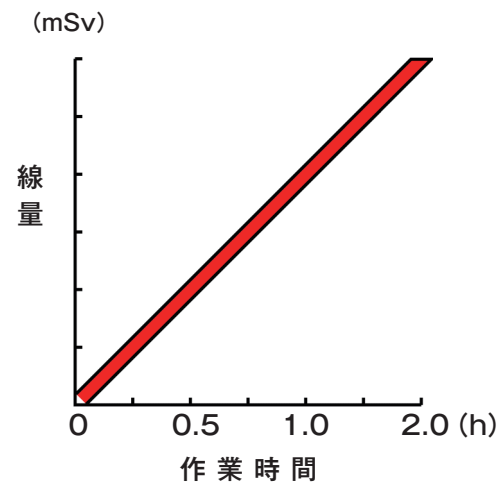
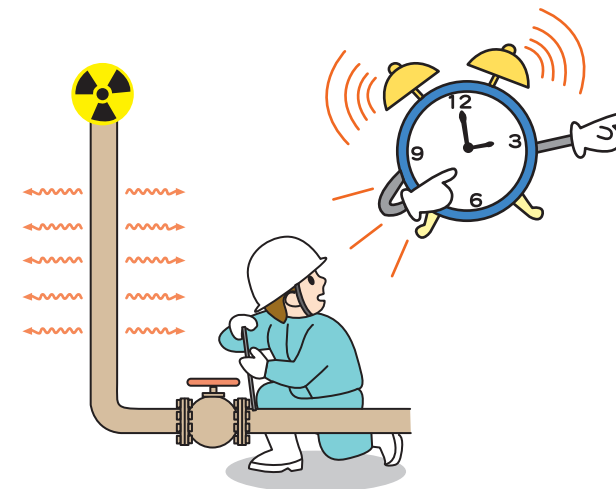
2. 距離による防護

(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)



箔検電器を用いたX線の線量測定手法の開発

12

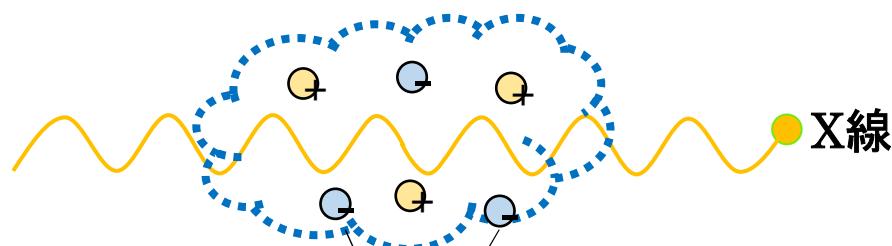
➤ 箔検電器について

箔検電器の箔の閉じる時間は、放射線が空気を電離することによって生成されるイオンの量に依存する。

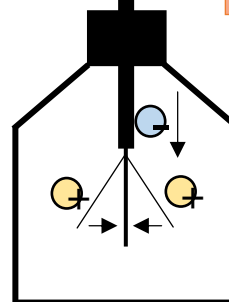


使用した箔検電器
(はく検電器EA)

X線が空気を電離してイオンを生成



逆極性のイオンを収集



箔が中和して閉じていく



※箔検電器と同様の原理を用いた線量計として、ポケットチェンバーという携帯型の線量計が

古くから使われていた。

箔検電器に

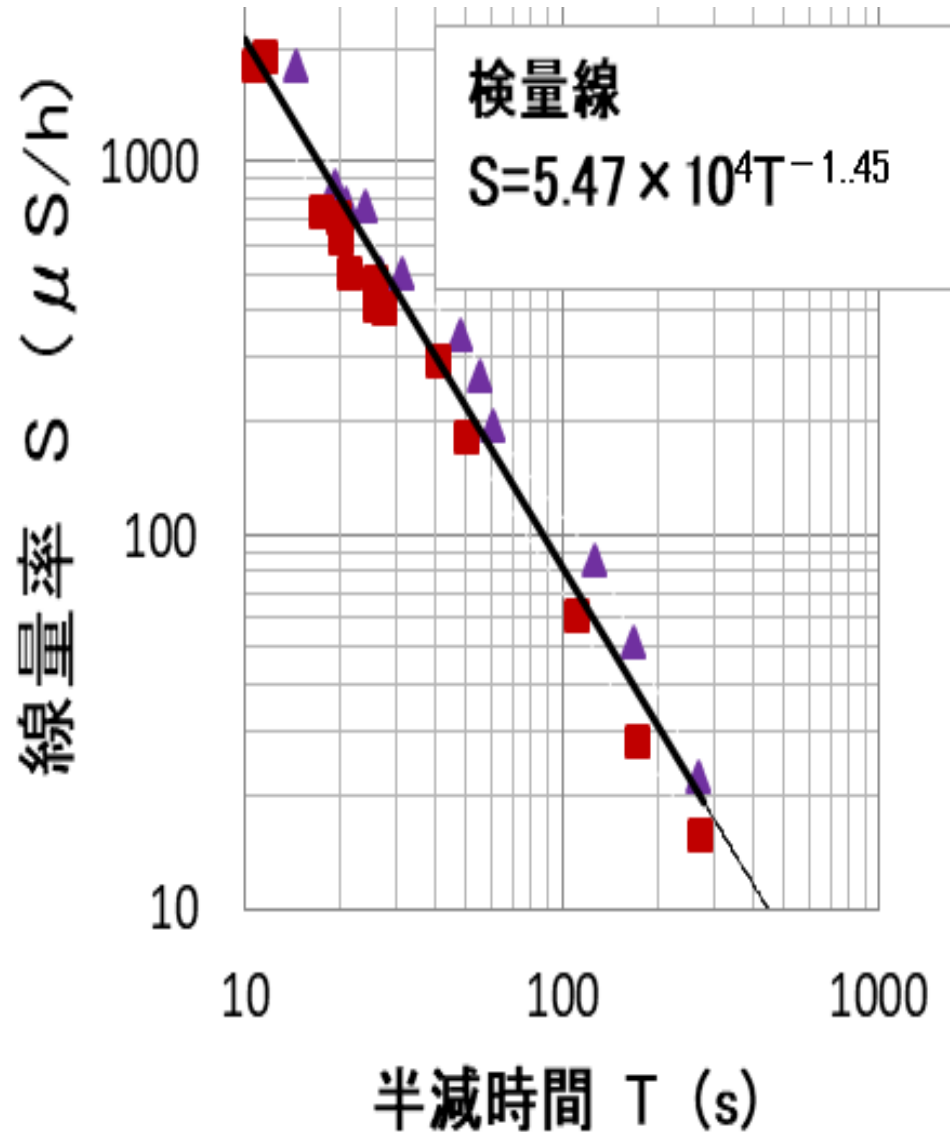
正の電荷を荷電した場合の半減時間(箔の開き角が60度から30度になる時間) T_+ と

負の電荷を荷電した場合の半減時間 T_- の幾何平均値 T を求める。

$$T = (T_+ \times T_-)^{0.5}$$

右図の検量線から線量率を求める。

検量線は電離箱で校正している。



箔検電器によるX線の線量率測定の実差

導線の配置や測定ごとによる誤差

約11%

メーカー別や測定ごとによる誤差

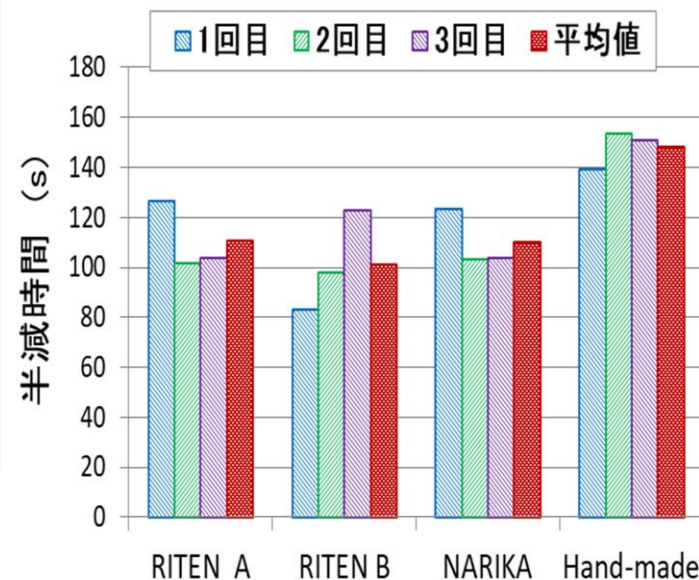
約13%

測定の不慣れさによる誤差

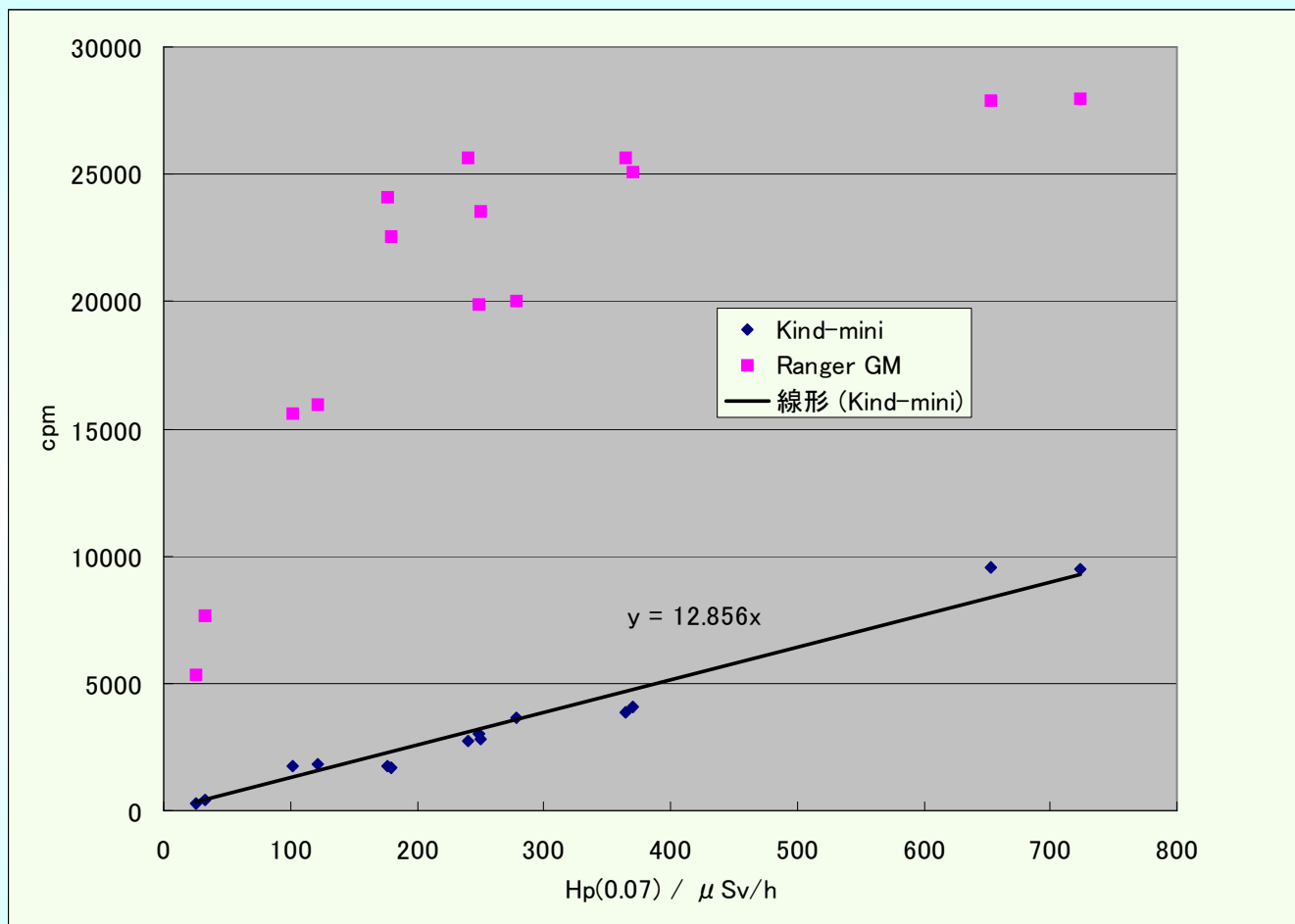
約20%

全誤差 = $(11^2 + 13^2 + 20^2)^{0.5} =$

±26% 約±30%



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。



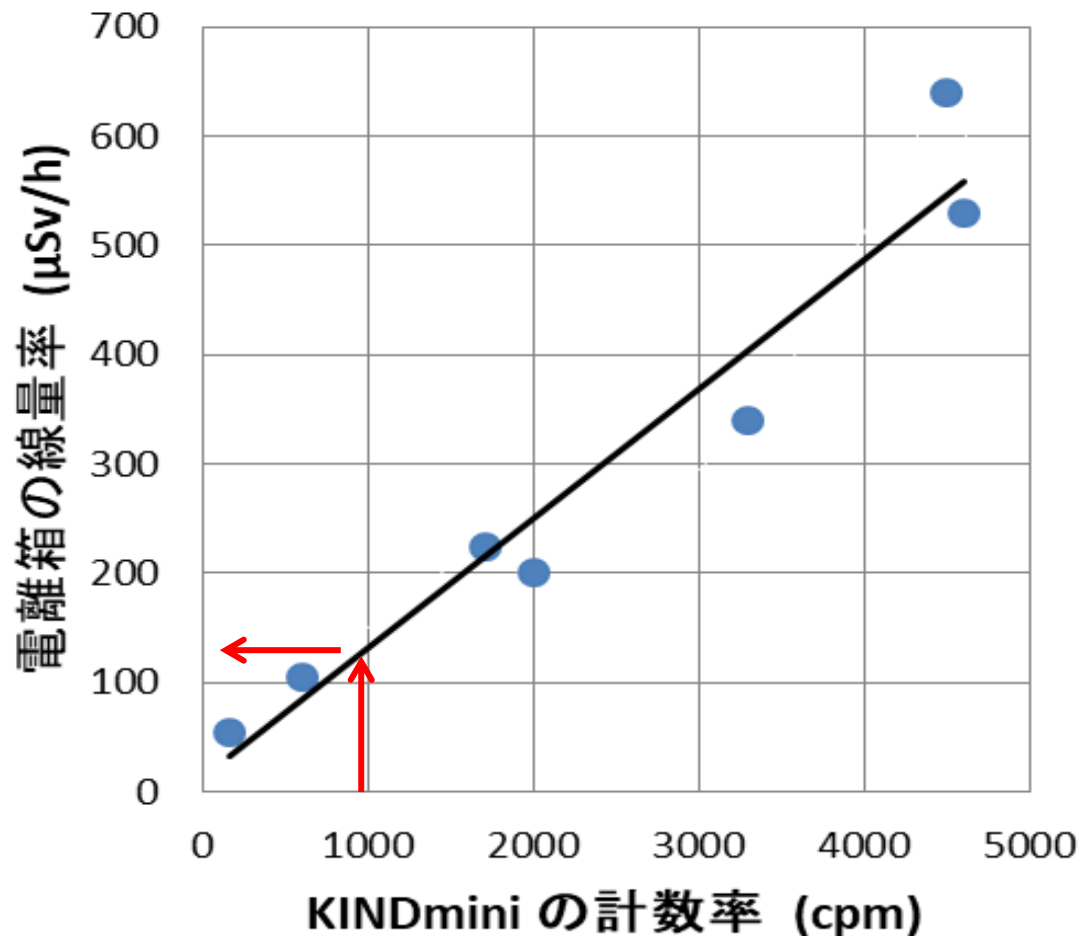
Ranger

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。

KINDmini の計数率を読み取り、
下図の検量線から線量率を求める
今のところ5000cpm以下(70 μ m線量当量率600 μ Sv/h以下)
で利用できる



スクリーニングに必要な測定感度

免除レベルである年間 $10 \mu\text{Sv}$ (実効線量) 以下に抑える事を目標とする。
(生徒については年間1回の実験、先生方は授業の回数分)

1回の実験: 10min \rightarrow 線量率に直すと $60 \mu\text{Sv/h}$

電離箱やガラスバッジでの評価は $70 \mu\text{m}$ 線量当量で評価しているため、ICRP Pub116 の表A.1 と、水 1cm に対する透過率から、20keV では実効線量と $70 \mu\text{m}$ 線量当量の比はおよそ10程度となる。

★ $\text{Hp}(0.07) < 600 \mu\text{Sv}$ である事が確認できれば良い。

さらに、これは実際に生徒が観察を行う 1m 距離での数値であり、測定可能なレンジから外れている場合は、距離を変えて測定する事で、適切な測定を行う事が可能である。

プロジェクトの着地点

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。
箔検電器及び Kind-Mini の貸出しによる教員自身によるスクリーニング法を開発。

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、かなり高い線量を漏洩する装置が発見された。追加の検証により暫定ガイドラインを策定し、2019年度の実態調査でほとんどの装置で安全な事を確認できた。

暫定ガイドラインの策定

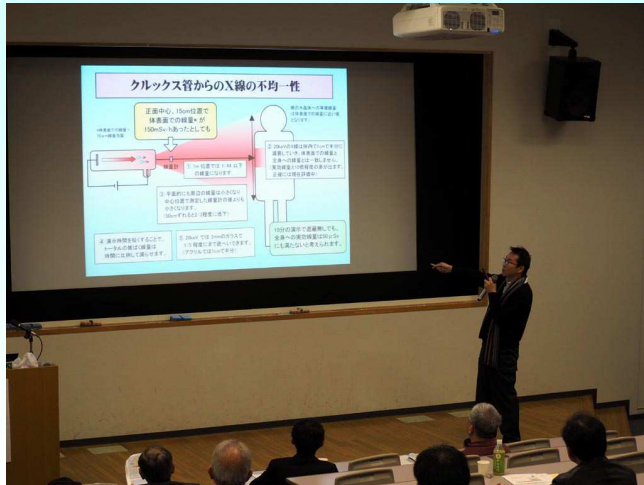
暫定ガイドラインを遵守した場合の安全性の更なる検証(今後も継続)

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。

電圧、電流などの測定だけでは単純に危険性を判断できなかった。このためスクリーニング手法の開発を行い、ある程度高い線量が漏洩している恐れがある場合はガラスバッジ、nanoDot 線量計などによる信頼できる測定を行える体制を確立する。

周知活動（2018年度）



●放射線教育フォーラム第2回勉強会
(2019年3月3日、慈恵医大)



・日本放射線安全管理学会 第17回学術大会
(2018年12月5日-7日、名古屋大学)
セッションタイトル「クルックス管」口頭 5件
+ ポスター1件

●静岡大学 放射線業務従事者教育訓練(2018年04月20日、静岡大学)

●日本アイソトープ協会 放射線業務従事者のための教育訓練講習会(2018年05月11日、名古屋商工会議所)

・日本保健物理学会 第51回研究発表会(2018年6月29-30日、ホテルライフオー札幌)

・日本アイソトープ協会 第55回アイソトープ・放射線研究発表会(2018年07月04-06日、東京大学 弥生講堂)

・平成30年度「中学理科で使える高校理科の技術」講座(2018年7月30日、名古屋経済大学市邨中学校)

・日本エネルギー環境教育学会 第13回全国大会(2018年08月08-10日、山形大学)
日本原子力学会秋の大会(2018年09月05-7日、岡山大学)

●放射線プロセスシンポジウム(2018年11月21-22日、東京大学 弥生講堂)

・大阪府立大学 放射線研究センター 共同利用報告会(2018年11月27日、大阪府立大学)

・放射線教育フォーラム 愛知・岐阜・三重地区 新年勉強会(2019年1月5日、名古屋大学)

・「放射線に関する教職員セミナー及び出前授業実施事業」第2ワーキンググループ会議
(2019年3月12-13日、科学技術館)

周知活動 (2019年度)



アイソトープ・放射線研究会
公開パネル討論
(2019年7月5日、東京大学)



全国中学校理科教育研究会
(2019年8月8-9日、秋田 アトリオン)



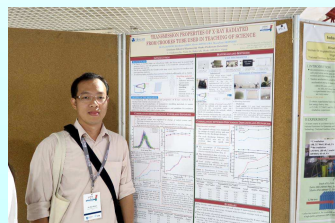
大阪府立大学 友好祭 オープンラボ
(2019年5月25日、大阪府立大学)



●中学理科で使える高校理科の技術講座講師
(2019年8月29日、名古屋経済大学市邨中学校・高等学校)



19th International Conference
on Solid State Dosimetry
(SSD-19)(Hiroshima,
Sep. 15-20, 2019)



3rd International Conference on Dosimetry and its
Applications(ICDA-3)(Lisbon, Portugal, 27-31 May 2019)



- 放射線安全フォーラム第60回放射線防護研究会「X線源を考える」(2019年4月21日、東京大学)
- 日本放射線安全管理学会 6月シンポジウム(2019年6月27-28、東京大学)
- ☆中学理科の教科書を出版する全5社への要領書への暫定ガイドライン掲載依頼(2019年7月2日、大阪、7月5日 東京)
- ☆大阪府知事秘書長及び教育総務企画課長へ、教育現場における放射線安全管理について説明(2019年7月26日、大阪府庁本館知事室)
- 中部原子力懇談会 エネルギー・環境研究会 セミナー(2019年7月27日、名古屋商工会議所)
- 近畿大学原子炉実験・研修会 放射線教育の実践例照会・意見交換(2019年7月30日、近畿大学)
- ・日本エネルギー環境教育学会 第14回全国大会(2019年8月5-7日、高知工科大学)
- ・日本原子力学会 2019年秋の大会(2019年9月11-13日、富山大学)
- ・大阪府立大学 放射線研究センター 共同利用報告会(2019年11月5日、大阪府立大学)
- 大阪府高等学校理化教育研究会 物理研究集会(2019年11月20日、大阪府立茨木高等学校)
- 放射線教育フォーラム第2回勉強会(2019年11月24日、東京慈恵会医科大学)
- ☆日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会(2019年12月5-7日、東北大学) 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
- 高校物理基本実験講習会(兵庫会場)(2019年12月15日、兵庫県立神戸高等学校)
- 教員研修(2019年12月26日、島根県出雲科学館)

周知活動（2020年度）

- ・日本保健物理学会大会（2020年6月29-30日、WEB開催）
秋吉優史、松本 亮の2件
- 福井理科教育研究会（2020年7月22日、WEB開催）
- ・ 第37回みんなのくらしと放射線展オンライン講演会（2020年11月18日、12月10日、Web開催）
- 放射線教育フォーラム 勉強会（2020年11月29日、Web開催）
- 保物セミナー（2020年12月1日～20日、Web開催）
- 福井県高等学校教科教育研究会 理科部会 物理化学分科会 嶺南地区 学習会（2021年2月16日、Web開催）
- ・日本放射線安全管理学会 第19回学術大会（2020年12月9日～11日、Web開催）
秋吉優史、松本 亮、山口 一郎のポスター三件と Do Duy Khiem氏 研究奨励賞受賞講演

論文

・ Transmission properties of X-ray radiated from the Crookes tube through shielding materials, Do Duy Khiem, Hiroto Matsuura, Masafumi Akiyoshi, Japanese Journal of Health Physics, 投稿中

・ Measurement of low energy X-rays in pulse from crook tube using BaF2 scintillator, Hirokazu Ando, Do Duy Khiem, Masafumi Akiyoshi, RADIATION DETECTORS AND THEIR USES – Proceedings of the 34th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses in KEK, In Press.

・ クルックス管からの低エネルギーX線に対する安全管理の必要性, 秋吉 優史, 放計協ニュース, 放射線計測協会、No. 65, p2-5, 2020年4月.

☆ 中学理科教科書への教師向け指導書5社中4社でクルックス管安全管理について執筆済

令和2年11月26日（木） 電気新聞（5面）

エックス線の歴史解説 関原 慈がウェブで講演会

関西電力労働者は、放射線教育関係者など約30人が参加。エックス線の歴史について、関原のくらしと放射線展の一環でオンライン講演会を開催した。大阪府立大学放射線研究センターの秋吉優史氏も講演した。

講演会は、関原が解説した。エックス線の歴史について、関原は、エックス線の発見から、エックス線の用途や医療や産業での利用まで、詳しく解説した。クルックス管は、真空管で、主に中学校や高校などの理科の授業で使われている。秋吉准教授はエックス線の歴史について説明した後、クルックス管を用いた実験を行い、管の仕組みや取り扱い方法をわかりやすく解説した。クルックス管は、真空管で、主に中学校や高校などの理科の授業で使われている。秋吉准教授は、エックス線の歴史について説明した後、クルックス管を用いた実験を行い、管の仕組みや取り扱い方法をわかりやすく解説した。クルックス管は、真空管で、主に中学校や高校などの理科の授業で使われている。秋吉准教授は、エックス線の歴史について説明した後、クルックス管を用いた実験を行い、管の仕組みや取り扱い方法をわかりやすく解説した。

クルックス管とは？
Wilhelm Conrad Roentgen
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 歴史的に重要な発見

秋吉准教授が放射線について分かりやすく解説したオンライン講演会

や高校などの理科の授業で使われている。秋吉准教授は、エックス線の歴史について説明した後、クルックス管を用いた実験を行い、管の仕組みや取り扱い方法をわかりやすく解説した。クルックス管は、真空管で、主に中学校や高校などの理科の授業で使われている。秋吉准教授は、エックス線の歴史について説明した後、クルックス管を用いた実験を行い、管の仕組みや取り扱い方法をわかりやすく解説した。

成果

☆令和 3 年度の中学理科教科書教師向け指導書において、5 社中 4 社に特集記事が掲載された

- ・未来へひろがるサイエンス 別冊安全ハンドブック, 巻頭特集 クルックス管の安全管理, 新興出版社啓林館 (2021) 8-11.
- ・新しい科学 中 2, クルックス管の安全な取扱いについて, 東京書籍 (2021) 454-457.
- ・理科の世界 2 指導・解説編, 参考 クルックス管の安全な取扱いについて, 大日本図書 (2021) 342-343.
- ・中学理科 2 学習指導編 (学習評価/観察・実験), クルックス管を用いた実験の注意点, 教育出版 (2021) 150-151.

査読付き論文

- ・ Radiation Safety Exploration Using RPL Dosimeter for Crookes Tubes in Junior and Senior High School in Japan, Masafumi Akiyoshi, Duy Khiem Do, Ichiro Yamaguchi, Tomohisa Kakefu, Toshiharu Miyakawa, **Journal of Radiation Protection and Research**, In Press.
- ・ Measurement of low energy X-rays in pulse from crook tube using BaF₂ scintillator, Hirokazu Ando, Do Duy Khiem, Masafumi Akiyoshi, RADIATION DETECTORS AND THEIR USES - Proceedings of the 34th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses in KEK, (2020) 65-74.
- ・ 箔検電器によるクルックス管からの X 線の測定, 森 千鶴夫, 緒方良至, 秋吉優史, 臼井俊哉, 村上浩介, 羽澄大介, 中村嘉行, 渡辺賢一, 瓜谷 章, 神谷 均, 宮川俊晴, 田中隆一, 掛布智久, **Radioisotopes**, 69 (2020) 1-12.

・ Investigation of Low-energy X-ray Radiated from the Crookes Tube Used in Radiological Education, Do Duy KHIEM, Hirokazu ANDO, Hiroto MATSUURA, Masafumi AKIYOSHI, **Radiation safety management**, 18 (2019) 9-15. (日本放射線安全管理学会 研究奨励賞受賞)

・ Measurement of dose distribution from a Crookes tube using thermoluminescent dosimeter, Duy Khiem DO, Hiroto MATSUURA, Masafumi AKIYOSHI, **Radiation Measurements**, 134 (2020) 106312.

・ クルックス管からの低エネルギー X 線評価手法の開発, 秋吉 優史, 谷口 良一, 松浦 寛人, 宮丸 広幸, Do Duy Khiem, 神野 郁夫, 濱口拓, 野村 貴美, 谷口 和史, 小林 育夫, 川島 紀子, 佐藤 深, 森山 正樹, 宮川 俊晴, **放射線化学**, 106 (2018) 31-38.

査読無し総説等

- ・ クルックス管からの低エネルギー X 線に対する安全管理の必要性, 秋吉 優史, **放計協ニュース**、放射線計測協会、No. 65, p2-5, 2020 年 4 月.
- ・ 学校教育現場におけるクルックス管の安全管理とその活用, 秋吉 優史, **放射線教育**, 23 (2019) 23-32.
- ・ 箔検電器によるクルックス管からの X 線線量率の測定マニュアル, 森 千鶴夫, 緒方良至, 秋吉優史, **放射線教育**, 23 (2019) 33-39.
- ・ 低エネルギー X 線の放射線安全管理-線量測定と線量拘束値-, 秋吉 優史, **日本放射線安全管理学会誌**, 18 (2019) 46-48.
- ・ クルックス管プロジェクト第二期実態調査による暫定ガイドライン実効性の検証結果報告 ~生徒、教員の安全確保に向けて~, 秋吉 優史, **放射線教育フォーラムニュースレター**, No.76, 2020 年 3 月, p4-5.
- ・ クルックス管の安全な取扱いとその課題, 秋吉 優史, **放射線教育フォーラムニュースレター**, No.71 (2018) 10-11.