

2019年 6月 27日

JRSM 6月シンポジウム @ 東大弥生講堂

# 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

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](mailto:akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp)

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



# 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。



# 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**

# 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  $\mu$ 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**

# 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。  
福島での事故後の線量限度は原子力災害対策特別措置法により定められる(現存被ばく状況)。

## 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  $\mu$  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  $\mu$  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。

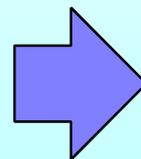
管電圧 150kV 以下の場合。

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？

# 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

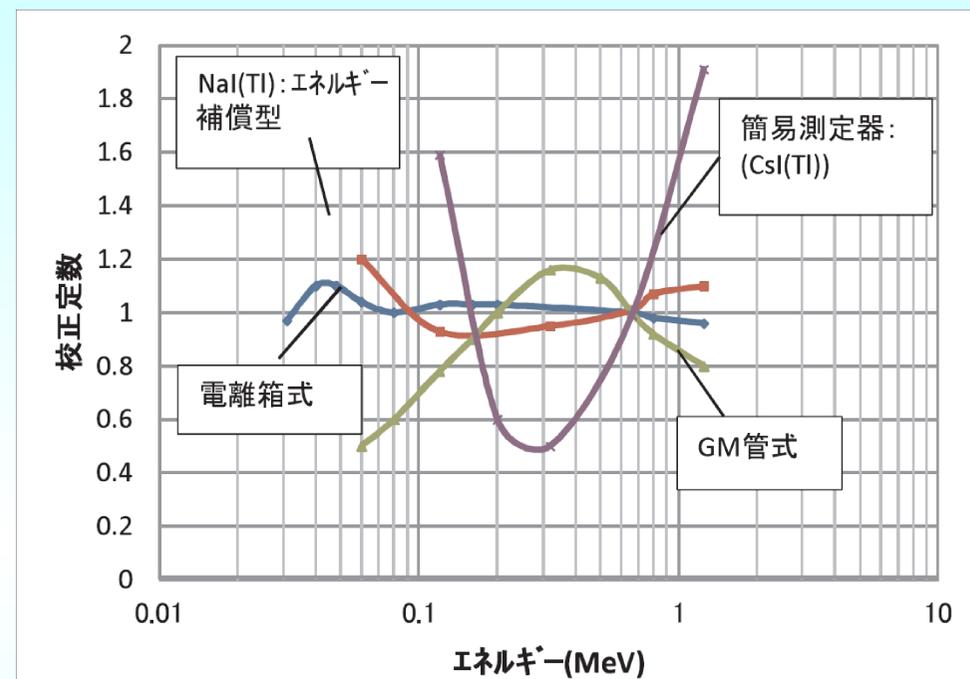
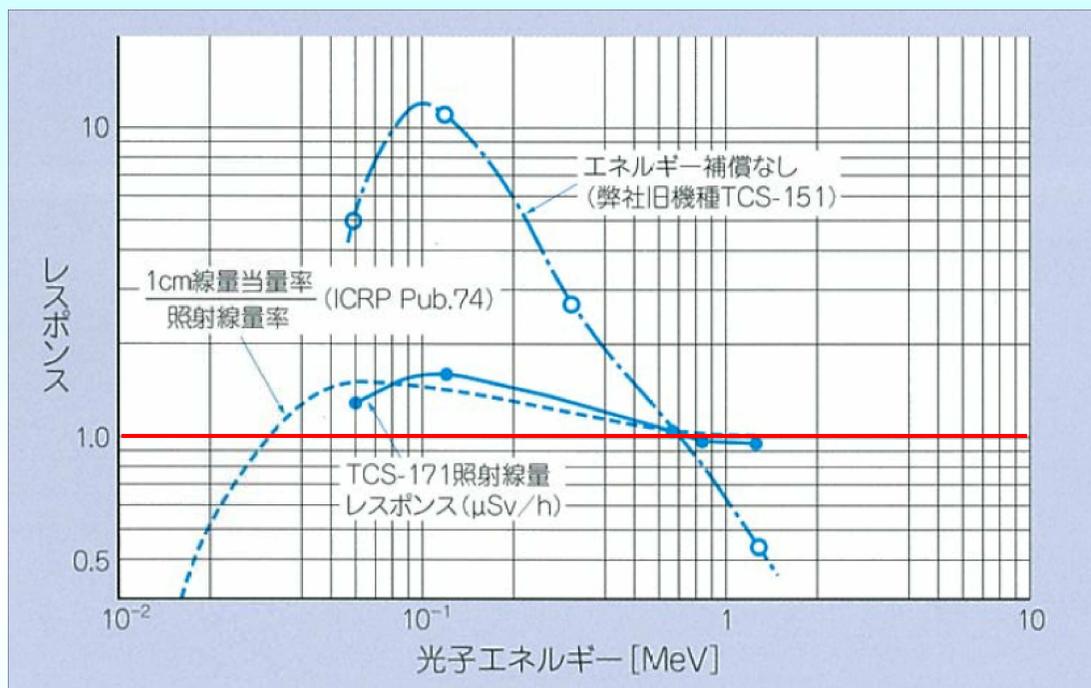
同じ装置を同じ設定で動作させても測定結果が大きく異なる事がある。機械的な動作を含む誘導コイルはその日、その時の状況で出力電圧が変動するため、系統的な比較を行うには何らかの方法でモニタしながらの測定が必要。

# 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	$\mu$ Sv/h	$\mu$ Sv/h	$\mu$ Sv/h	$\mu$ Sv/h	$\mu$ 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

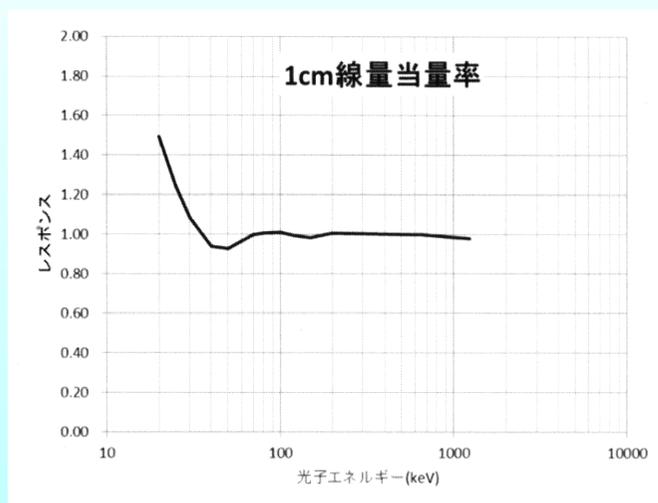
(アロカ TCS-171カタログより)

## 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

放電極距離

Distance of  
Discharge  
Electrodes

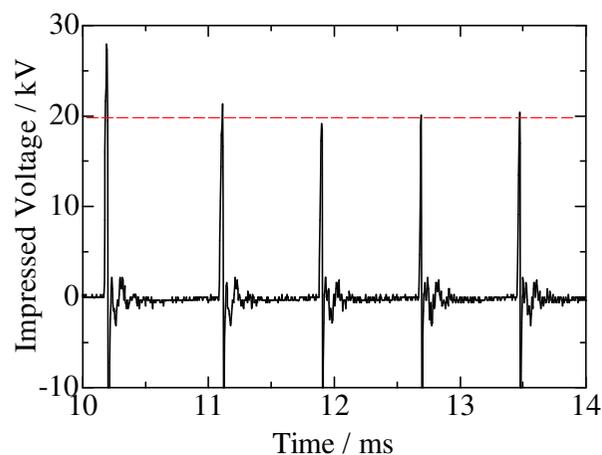
DDE

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。

PW

放電出力

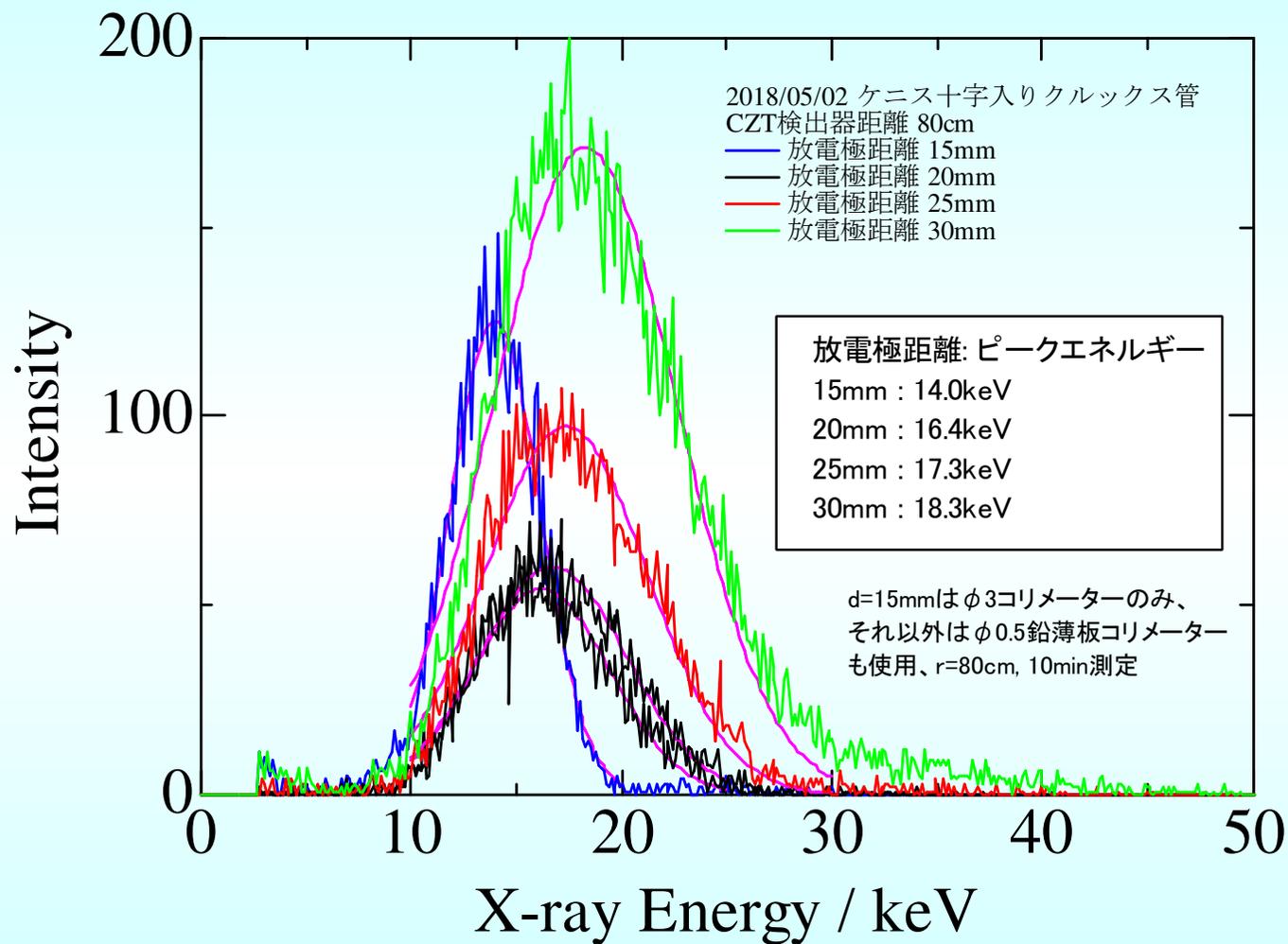


放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流 80  $\mu$ A

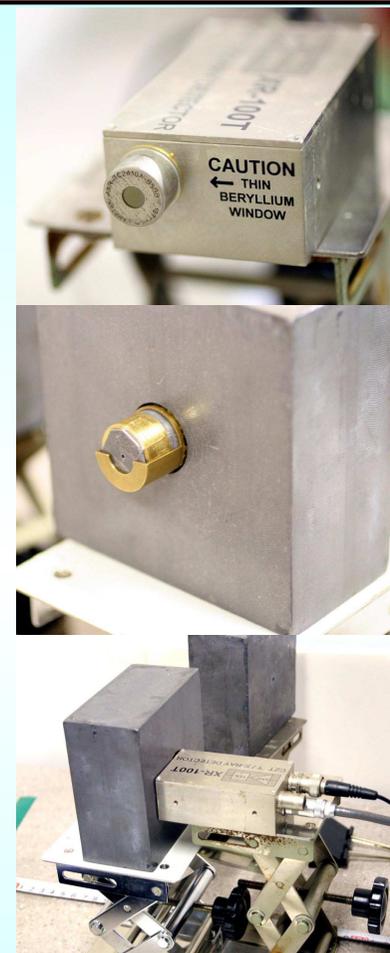


電圧測定時にはガラス抵抗体などの物理的にもサイズの大きい、100M $\Omega$ 以上の抵抗と、100k $\Omega$ 程度の抵抗を組み合わせた分配器を用いて測定するが、アースを取っていないとカソード側も高電圧をパルス的に出しているため、2chのオシロスコープでアノード側との差分を取る必要がある(フローティング測定)。

# 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



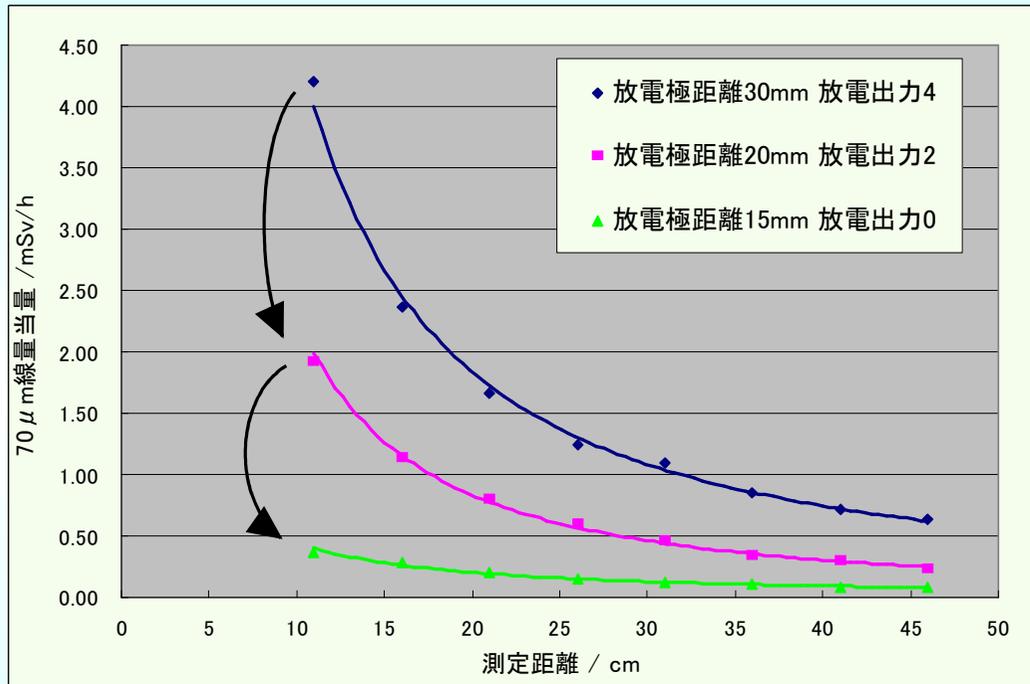
Amptek XR-100T-CZT  
CZT(Cd<sub>0.9</sub>Zn<sub>0.1</sub>Te)検出器  
Be窓、ペルチェ冷却



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

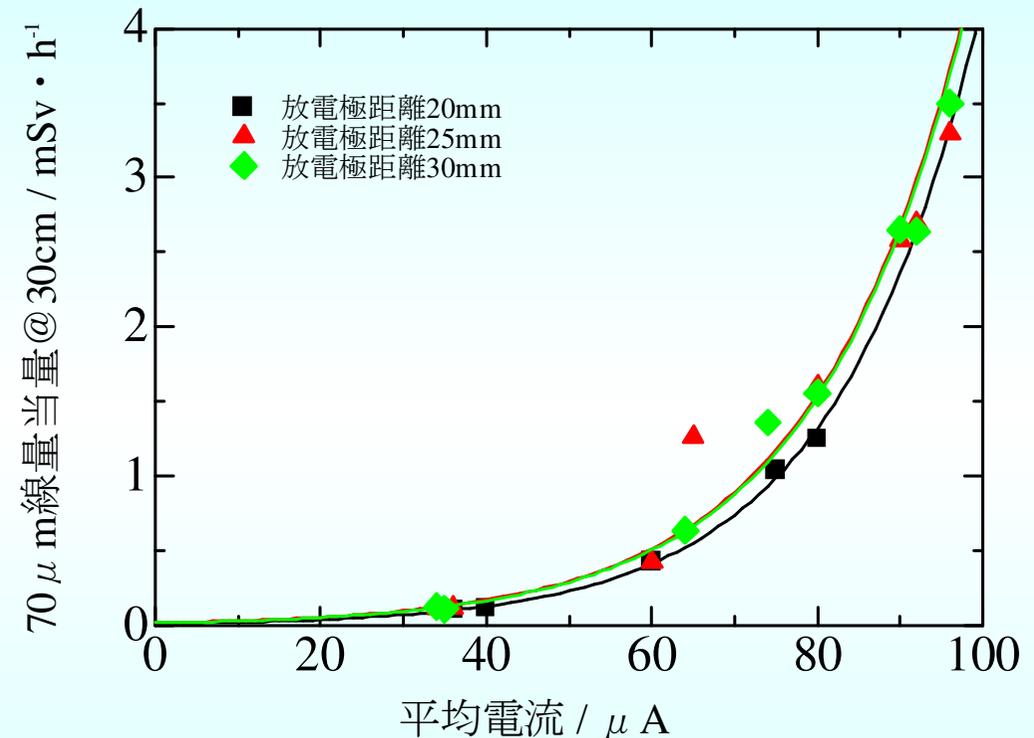
# 印加電圧、電流、距離依存性

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



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

放電出力変化に伴う平均電流を  
アナログ電流計で測定

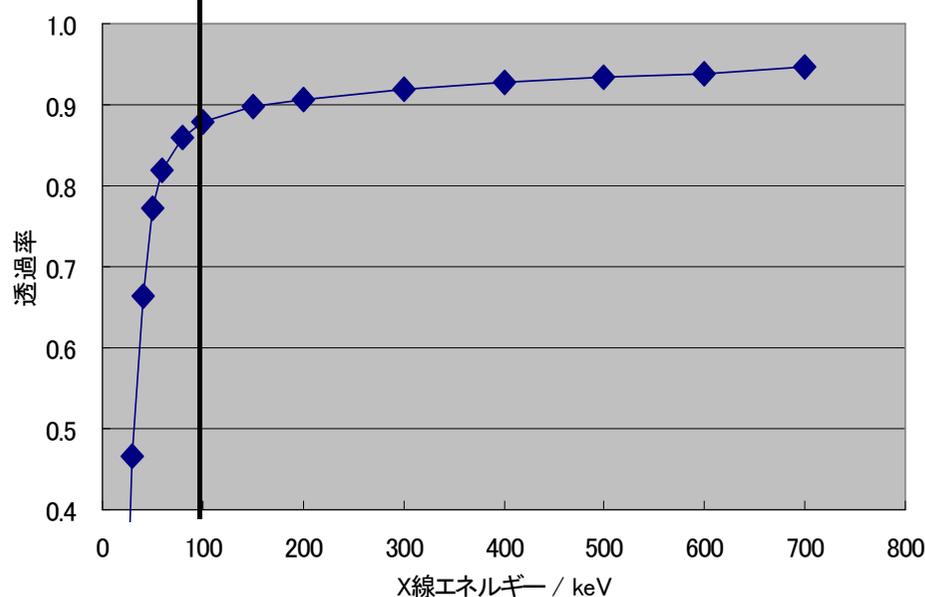


- **電流上昇に従い指数関数的に線量が上昇**  
放電出力上昇で電圧も電流も同時に上昇するため、電子線が観察できる必要最小限の出力に留める。  
放電極は、一定以上に電圧を上げないための安全弁の役割。

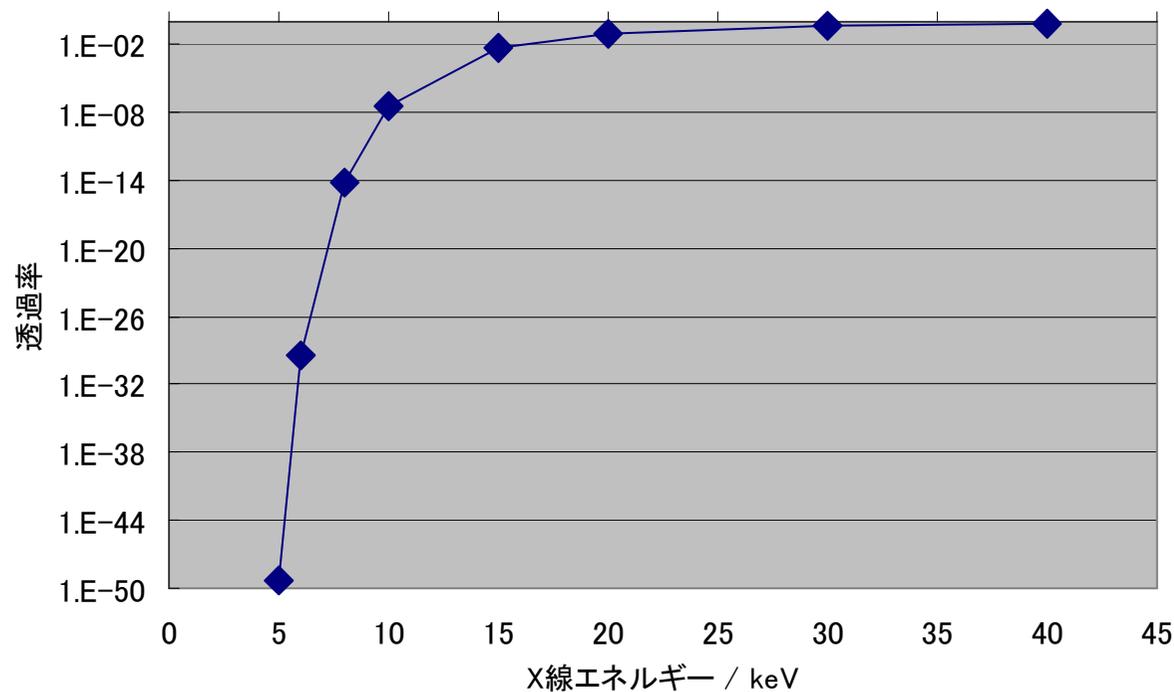
# わずかな印加電圧低下での大きな線量の変化

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

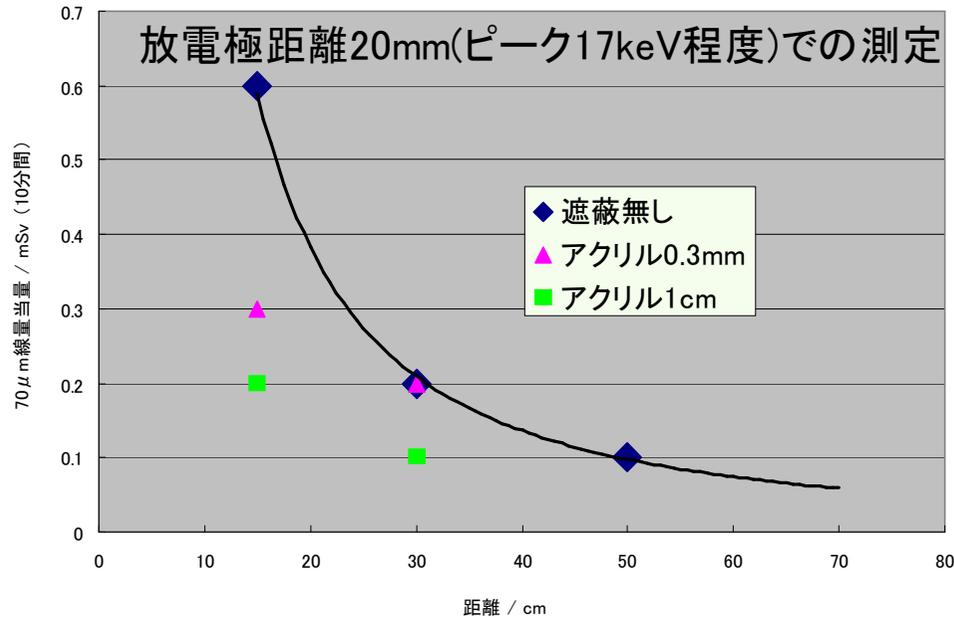


30keV と 15keV で約100倍違う。



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。

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。



放電出力	Hp(0.07) (μSv/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。

<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。

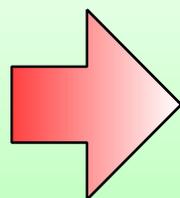
37本中、1mの距離、10分間の実演で70  $\mu$  m線量当量\* が50  $\mu$  Svを超える物は12本だけであり、うち2本は意図的に最大電圧での測定。18本のクルックス管で、距離15cmでも検出限界(50  $\mu$  Sv)未満であった。\*実効線量はさらに1/5以下。

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。

放電出力最低で距離1mでも600  $\mu$  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  $\mu$  Sv/h にまで落ちた。

距離1m、10分間では、0.6  $\mu$  Svに過ぎない



# 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

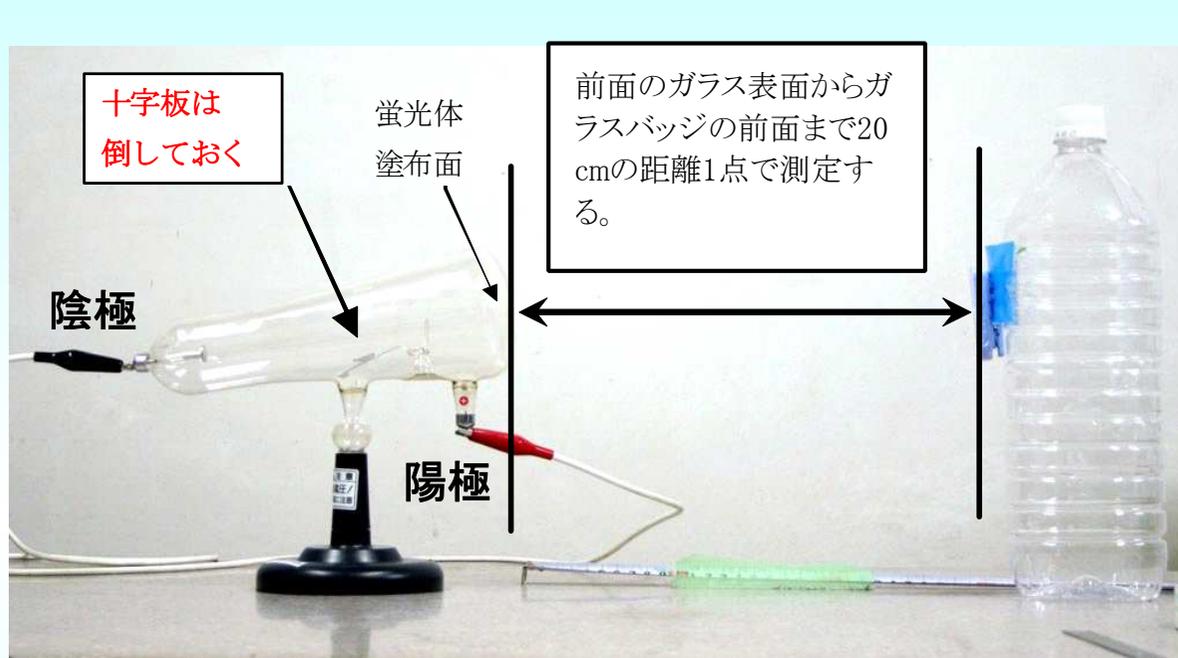
印加電圧を下げることによりX線のエネルギーが下がり、劇的に漏洩するX線量を下げることが出来る。クルックス管はガラスで出来ており、このガラスに対する透過率が15keVと30keVでは100倍程度異なるためである。遮蔽に関しては、アクリルでは1cmの厚さでも半分程度にしかならないため、ガラスの水槽を用いるか(2mmで1/5以下に下がる)、距離を取る方が簡単である(距離の二乗に反比例する)。

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

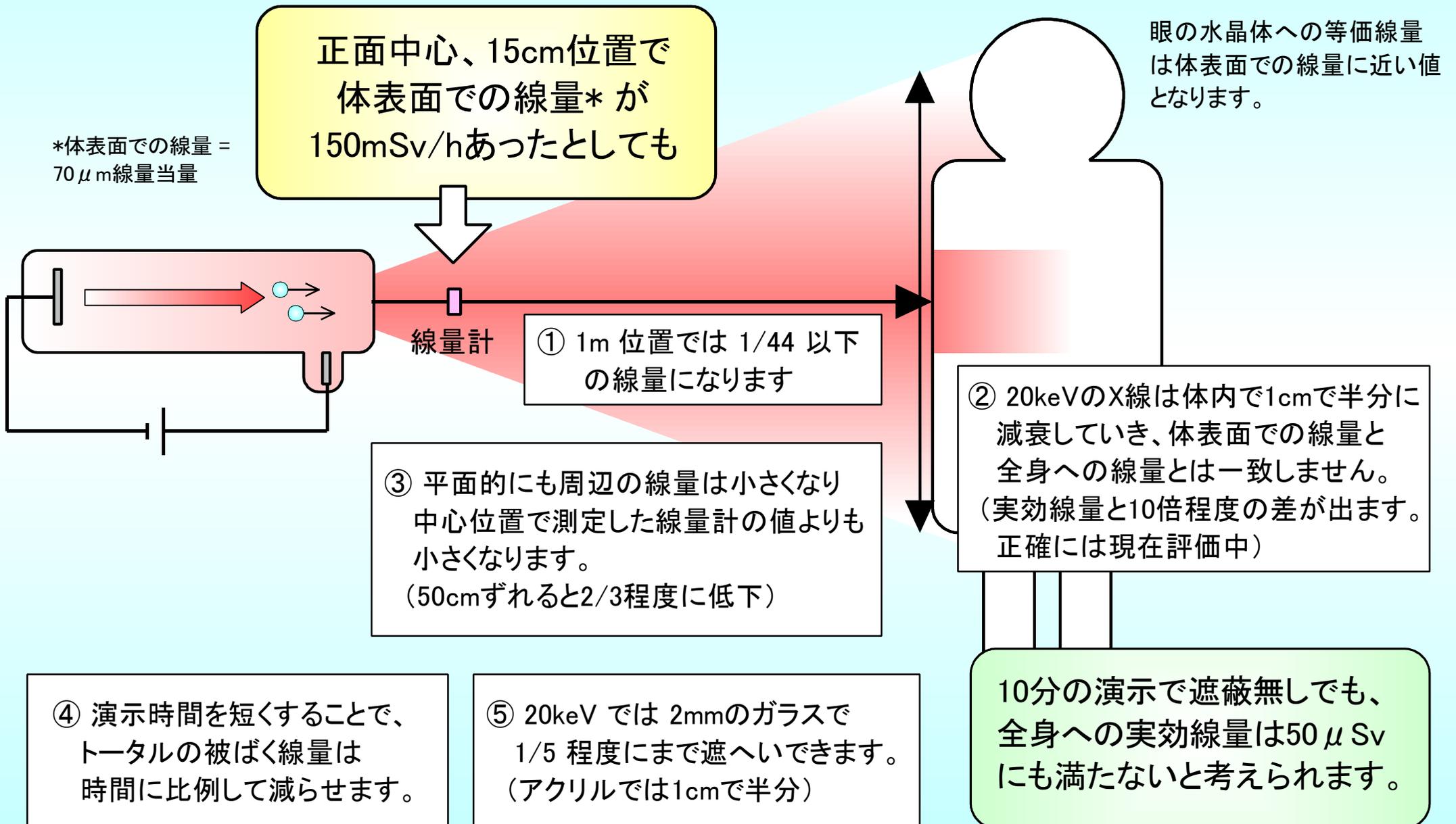
- ・誘導コイルの放電出力は電子線の観察が出来る範囲で最低に設定する
- ・放電極を絶対に使用し、放電極距離は20mm以下とする。
- ・出来る限り距離を取る。生徒への距離は1m以上とする。
- ・演示時間は10分程度に抑える

# 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



# X線放射方向垂直平面内での空間線量分布

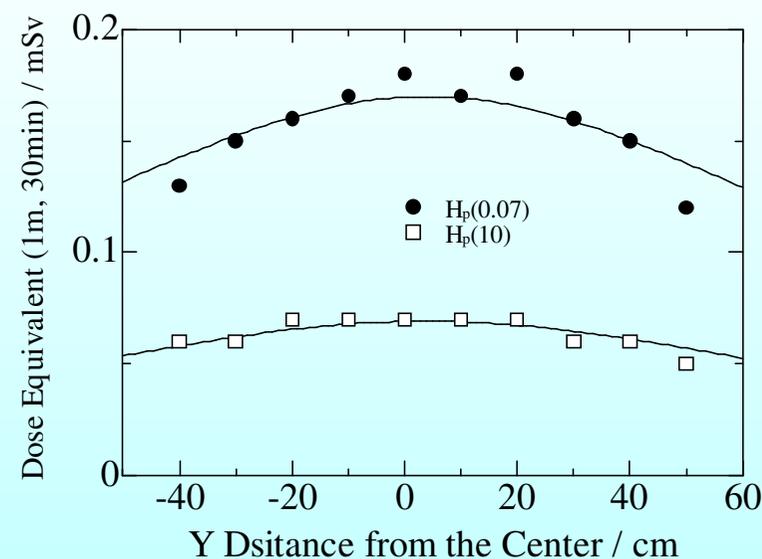
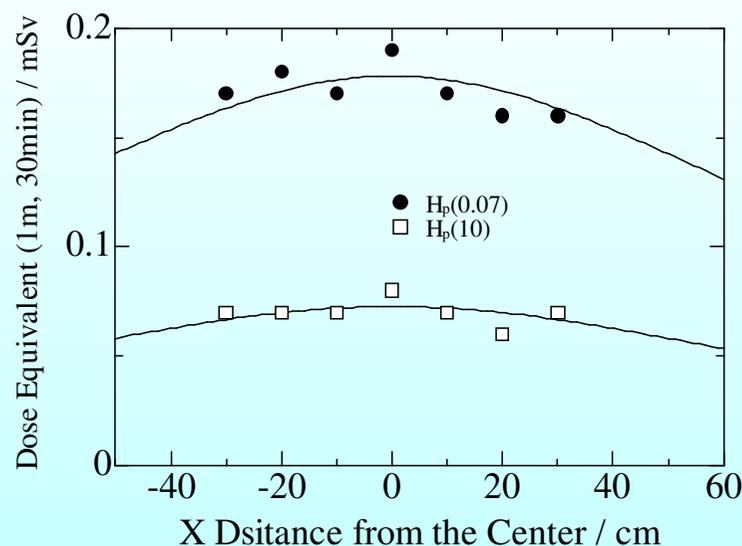
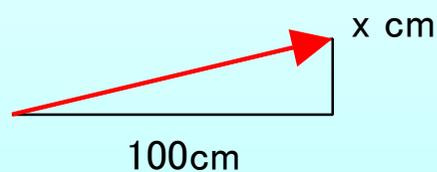
生徒位置(z=1m)での全身への線量を評価するために、平面内での線量分布を測定した。中心から y 方向 60cm 離れた位置でも 70% 程度の線量とかなりブロードな分布となっており、1.5 倍以内の範囲に収まっていた。



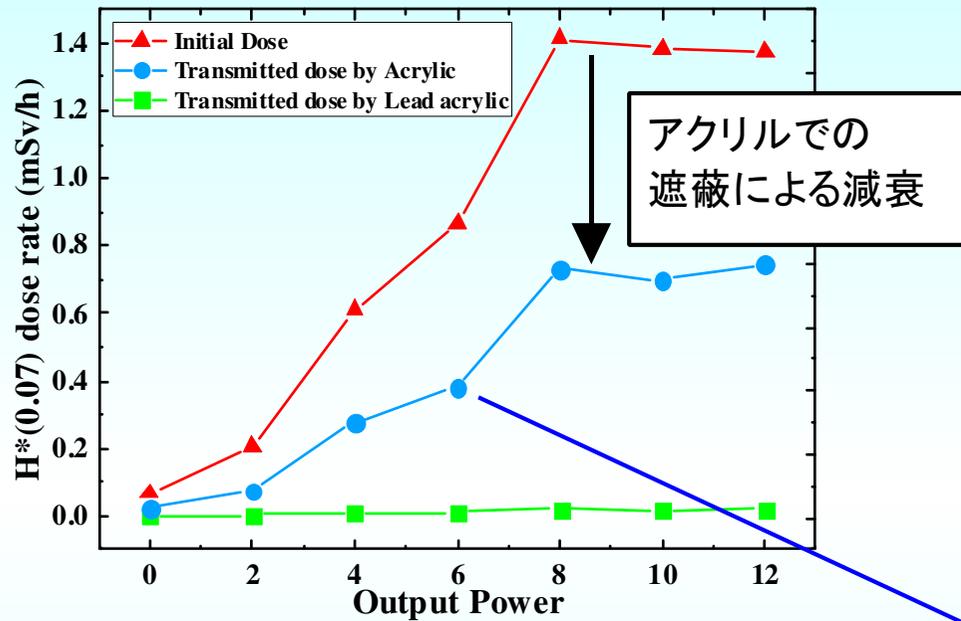
以下の式で空間分布を表わすことが出来る

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

平面方向の変位を含めた直線距離の二乗に反比例



# 透過率と実効エネルギー



9.3mmのアクリル板で遮蔽を行う前後の Hp(0.07) を電離箱で測定した。CZT検出器で測定したエネルギースペクトルからピークエネルギーを評価し、線減衰係数のテーブルから透過率を求めた。遮蔽前の線量率から求めた遮蔽後の線量率計算値は実測値と非常に良く一致した。

