

2019年5月17日 日本保健物理学会
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
令和元年度 第一回会合

クルックス管プロジェクトの 現状と問題点の確認

大阪府立大学 放射線研究センター 秋吉 優史

秋吉 優史: akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp

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



クルックス管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、 $70\mu\text{m}$ 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

今そこにあるリスクを低減するために

低電圧駆動
絶対安全の
装置の推奨

経済的要因

ふるさと納税
制度等を用いた
買換え促進

徐々にリプレースしていく

最終的には被ばく
ゼロを目指す

暫定的措置

X線を活用したコンテンツ
を安全に実施するために

ALARAに従い最低限度の被
ばくに留める + 管理目標値

自主的な管理

低エネルギーX線
測定手法の確立

実態調査

線量低減
手段の確立

現場での線量
確認手段の提供

線量低減が難しい装置
は使用停止を勧告

自主的な規制

誘導コイル設定などの運用条件、バイパス・分配抵抗の使用、クルックス管自体のリフレッシュ(アニーリング?)、遮蔽体の使用、距離・時間の制限

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。

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

ケニス十字板入りクルックス管 3C-B と、ニューパワー誘導コイル ID-6 を使用。
放電極距離 25 mm、放電出力 6、平均電流 40 μ A で十字板を下げて正面方向で測定。

	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	70 μ m線量当量	1cm線量当量	70 μ m線量当量	1cm線量当量	1min scaler
cm	mSv/h	mSv/h	mSv/h	mSv/h	kcpm
15	7.34	3.02	4.62	1.62	33.89
30	1.72	0.73	1.26	0.48	31.68
50	0.58	0.27	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

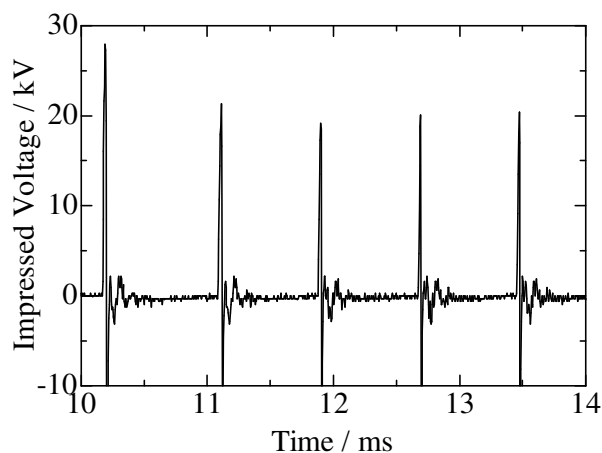
一般向けに出回っている簡易サーベイメーターはもちろん、空間線量測定で信頼されている TCS-172 などでもほぼ全く測定できない。

誘導コイルを用いた高電圧印加について

放電極距離

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。放電電圧以下では、放電出力を変えることで連続的に電圧をコントロール可能。放電電圧以上に出力を上げると無駄に放電が激しくなるので、目的の電圧を出力するためには丁度放電が起こり出す出力程度にコントロールする必要がある。

放電出力



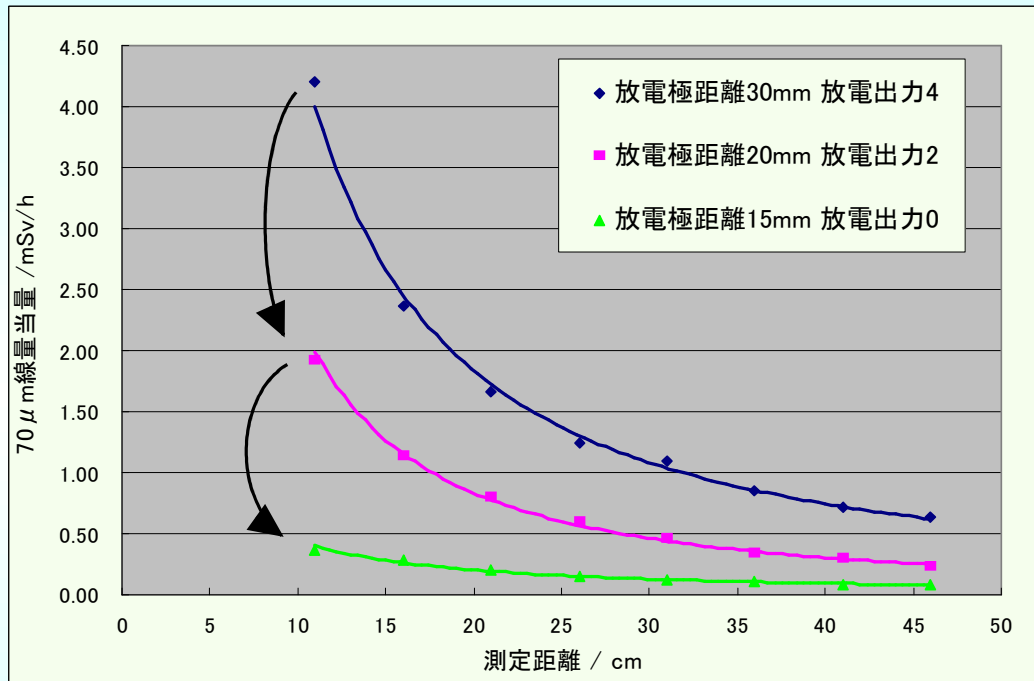
放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流 80 μ A



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

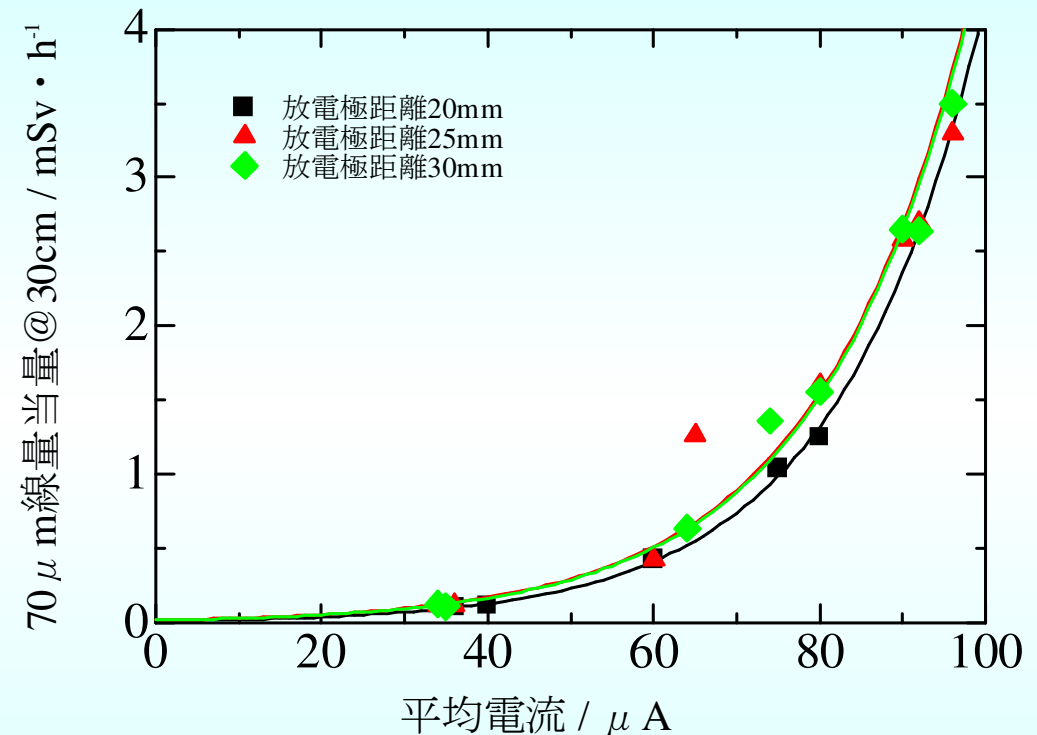
印加電圧、電流、距離依存性

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



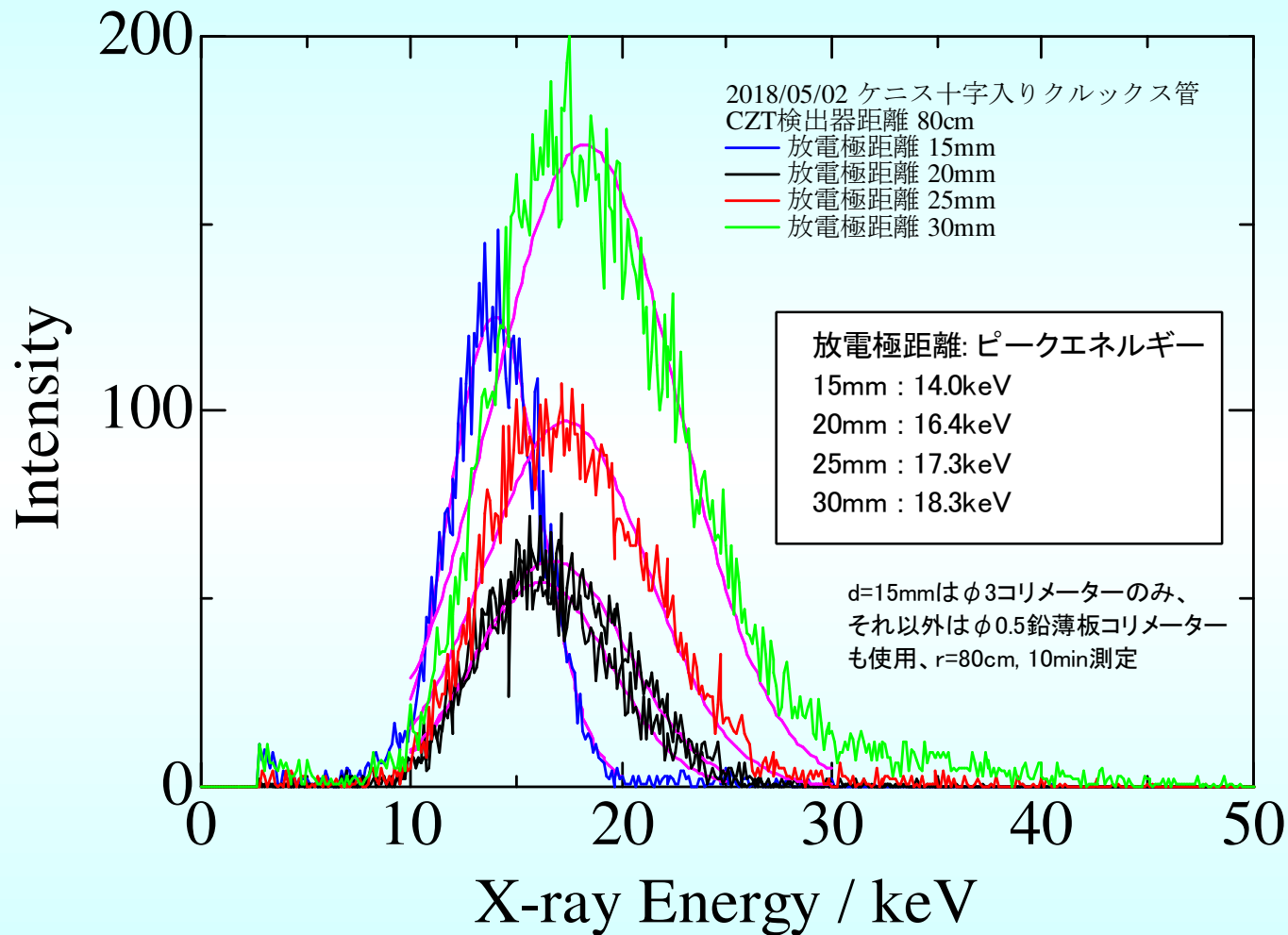
- **電圧を低く抑えると極端に線量は小さくなる**
放電極距離は20mm以下に留める
- **距離の二乗に反比例して線量は小さくなる**
1mの距離では10cmの距離での1/100になる
1mから50cmに近付いただけで4倍になる。

放電出力変化に伴う平均電流を
アナログ電流計で測定

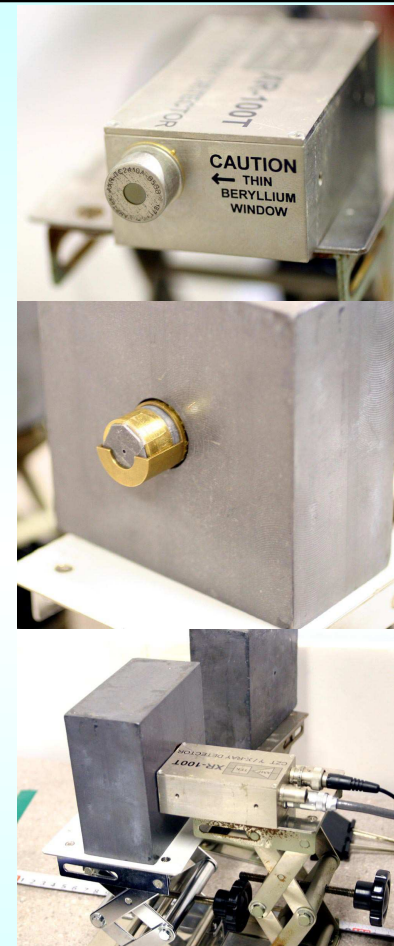


- **電流上昇に従い指数関数的に線量が上昇**
放電出力上昇で電圧も電流も同時に上昇するため、電子線が観察できる必要最小限の出力に留める。
放電極は、一定以上に電圧を上げないための安全弁の役割。

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



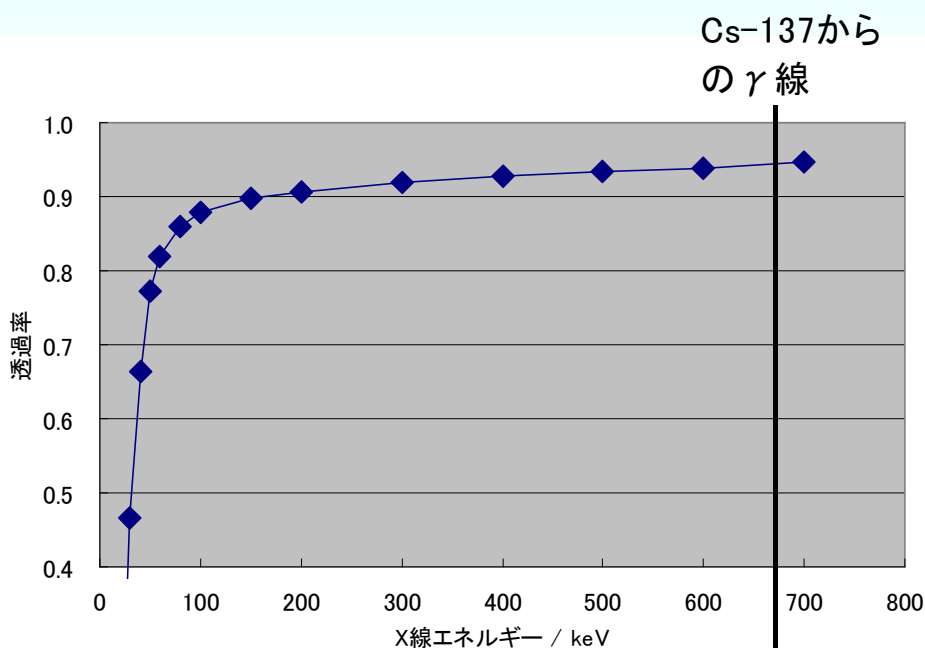
Amptek XR-100T-CZT
CZT(Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te)検出器
Be窓、ペルチェ冷却



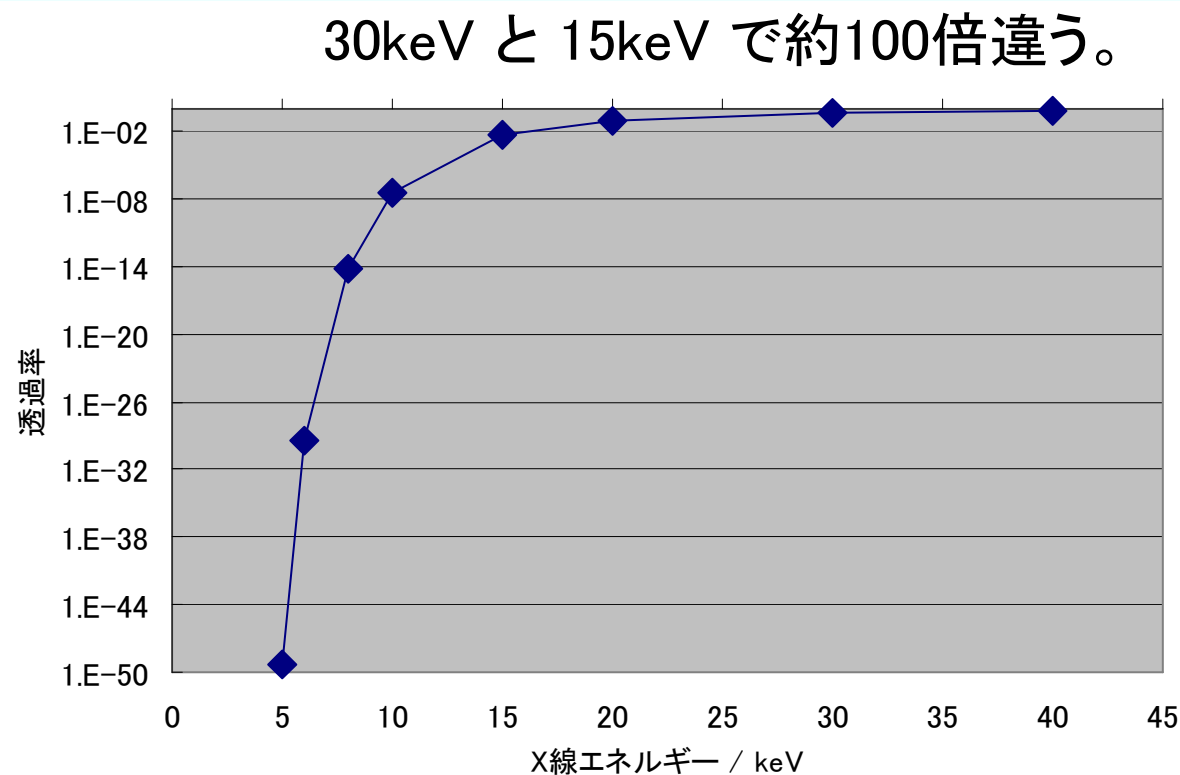
φ3同軸鉛コリメーター
φ2同軸黄銅コリメーター
φ1.0鉛薄板コリメーター
φ0.5鉛薄板コリメーター

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



3mmのガラスに対するX線の透過率

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

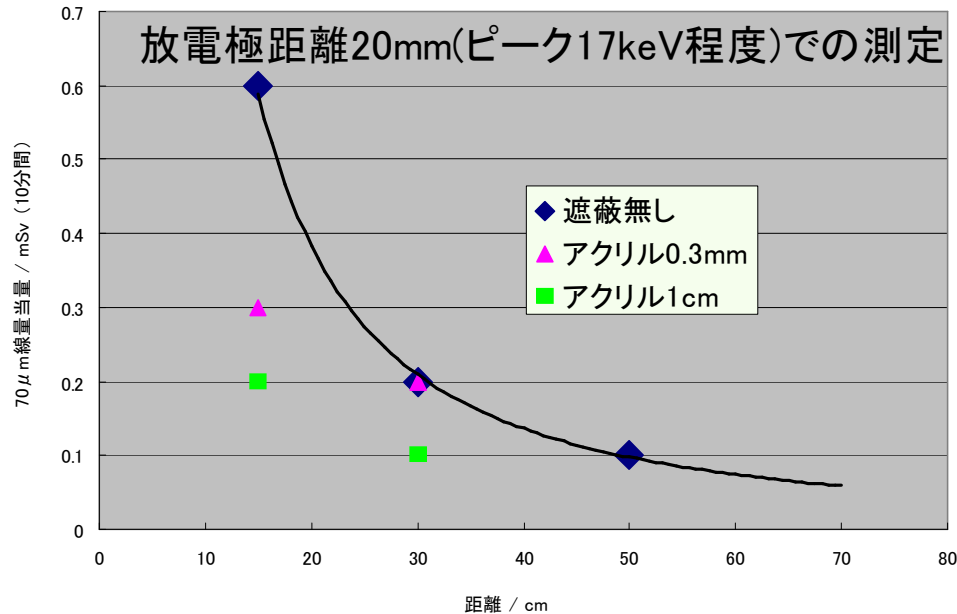
印加電圧を下げることによりX線のエネルギーが下がり、劇的に漏洩するX線量を下げることが出来る。クルックス管はガラスで出来ており、このガラスに対する透過率が15keVと30keVでは100倍程度異なるためである。遮蔽に関しては、アクリルでは1cmの厚さでも半分程度にしかならないため、ガラスの水槽を用いるか(2mmで1/5以下に下がる)、距離を取る方が簡単である(距離の二乗に反比例する)。

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

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) (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。

<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。

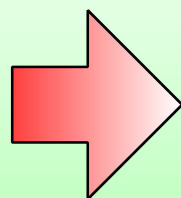
37本中、1mの距離、10分間の実演で70 μ m線量当量* が50 μ Svを超える物は12本だけであり、うち2本は意図的に最大電圧での測定。18本のクルックス管で、距離15cmでも検出限界(50 μ Sv)未満であった。 *実効線量はさらに1/5以下。

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 μ Sv以上が検出された装置を現地調査。

管内のガスが枯れていて電流が流れにくい個体であった

最低出力、30cmの距離で
放電極距離30mm: 2mSv/h
放電極距離50mm: 30mSv/h



放電極距離を20mmに縮めると、
40 μ Sv/h にまで落ちた。

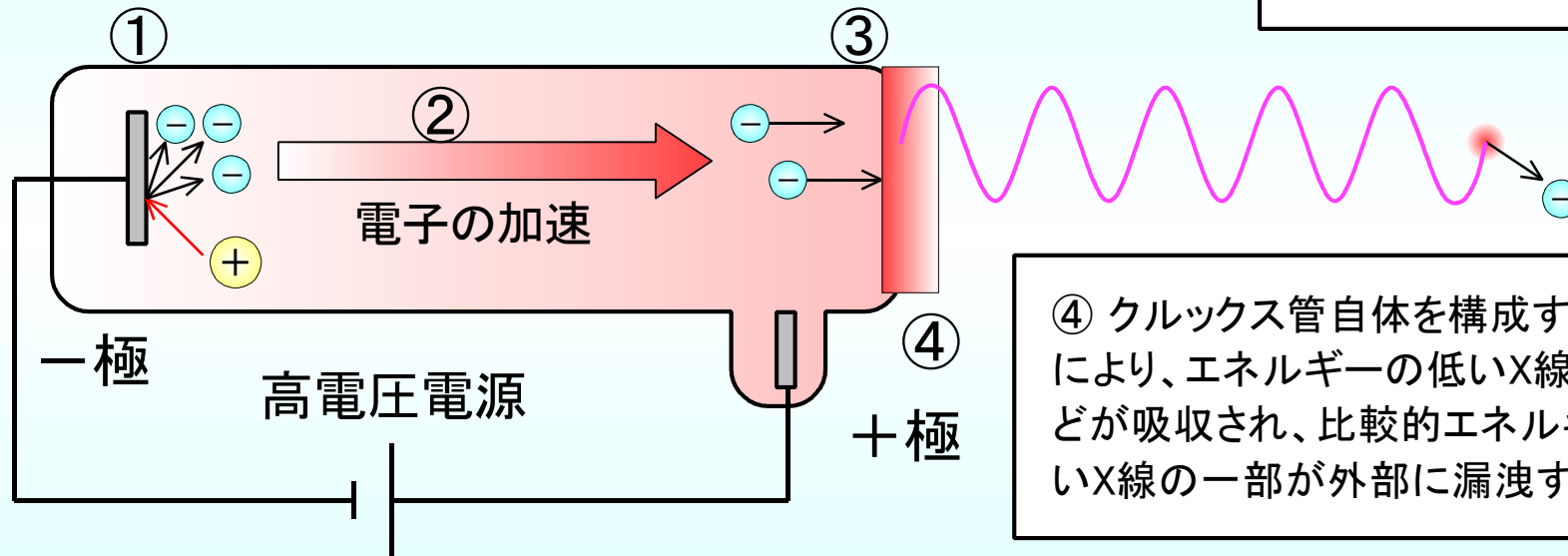
距離1m、10分間では、0.6 μ Svに過ぎない

クルックス管からのX線の漏洩

① +のイオンが一極に引きつけられて電子を叩き出す
(二次電子放出)

③ 電子がガラス管の壁に衝突するときに、制動放射X線を放出する

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



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

クルックス管に封入されているガスの量が少ない(ガラスに吸着するなどして少なくなる)と、①で陰極を叩くイオンが少なくなるため、電子が飛び出しにくくなり、電流が流れにくくなる。その結果誘導コイルに電磁エネルギーが蓄積され高い電圧が印加されてしまい、電流は小さいが④で漏洩する線量が大きくなってしまふ。

クルックス管安全取扱のガイドライン（暫定）

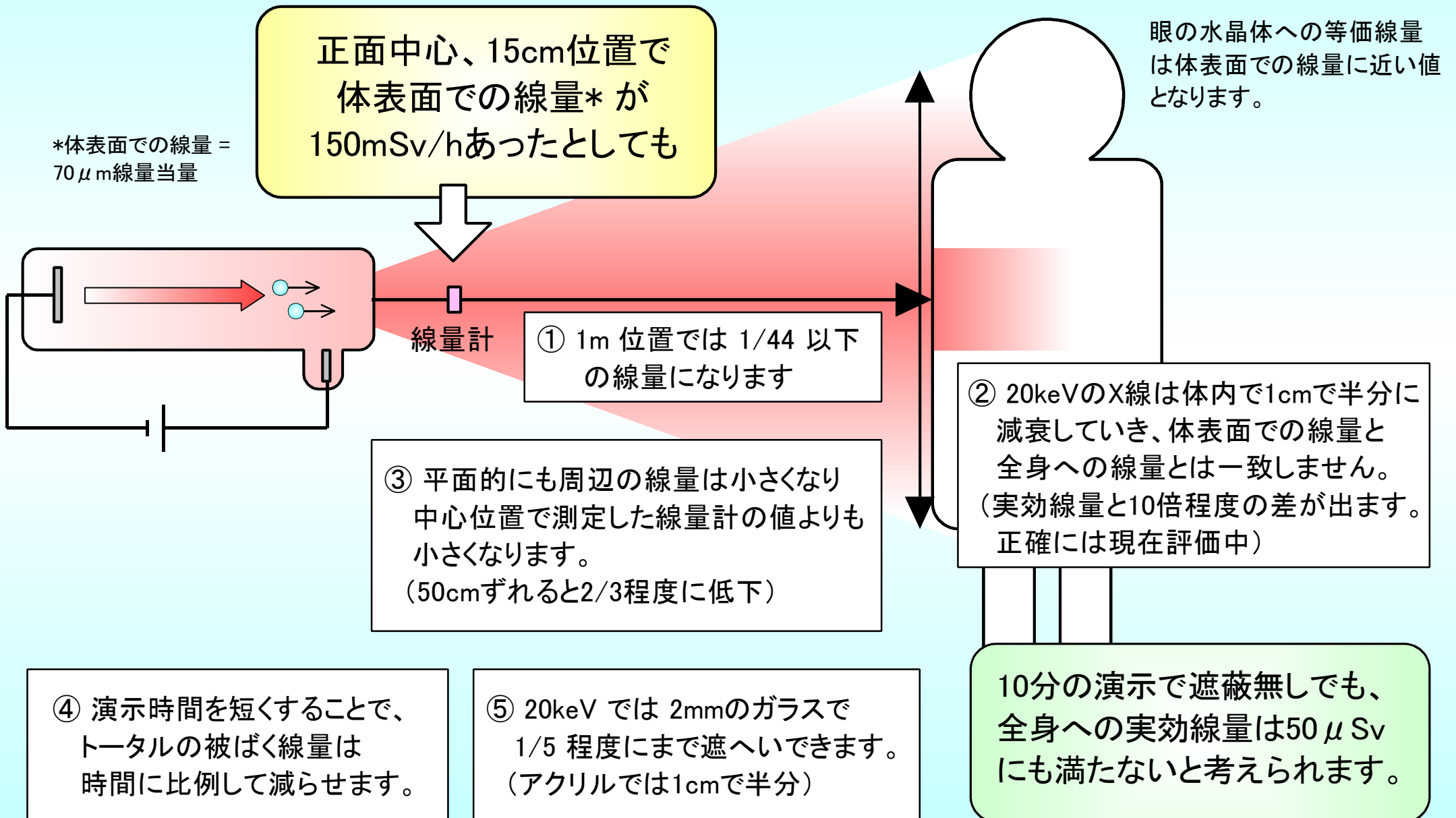
・低電圧駆動の製品に買い換える

絶対安全なので
何も考えなくても良い

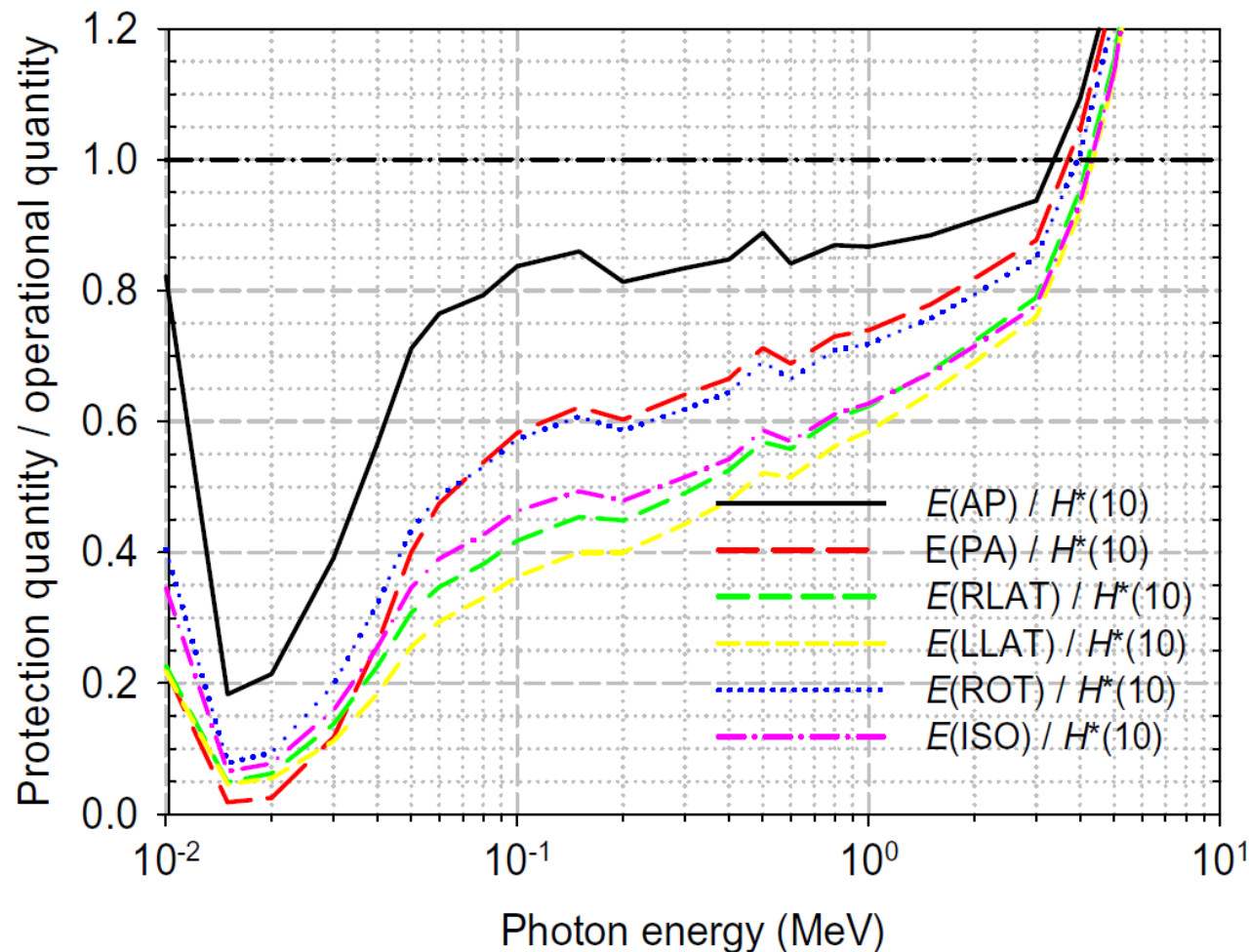
経済的理由などで困難な場合は ↓ 以下の点に注意を払う必要がある

- ・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。
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

クルックス管からのX線の不均一性



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。

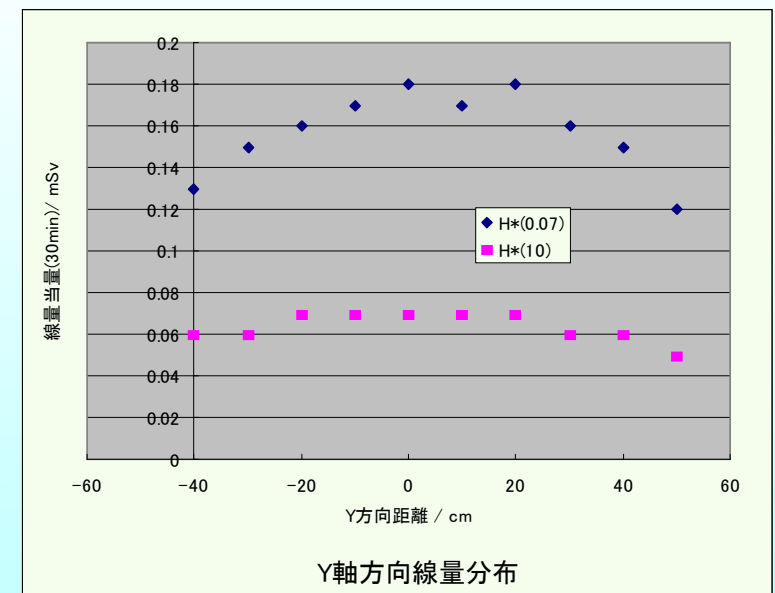
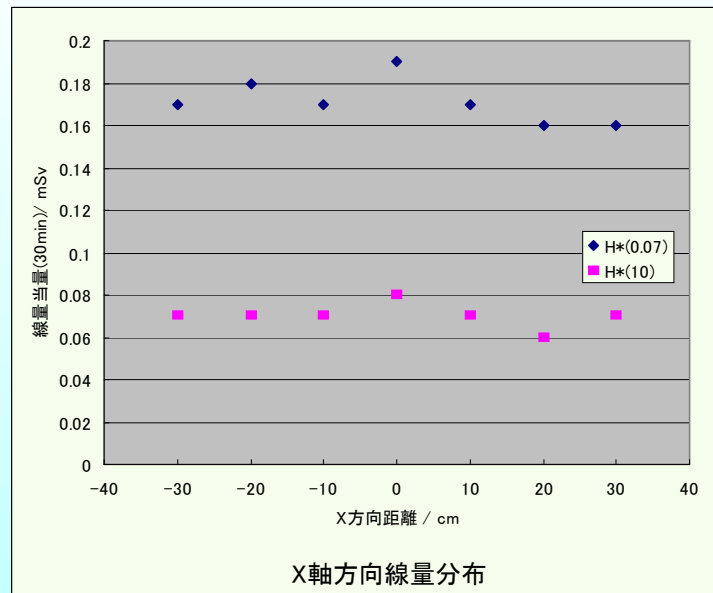
実効線量 $E / 1\text{cm}$ 線量当量 $H^*(10)$ のエネルギーによる変化。1cm線量当量は20keVでは5倍程度の過大評価となる。100keV-3MeV程度までは変化は小さく、常に若干の過大評価となっている(安全側に評価)。

X線放射方向垂直平面内での二次元線量分布

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% 程度の線量となっており、かなりブロードな分布となっていた。

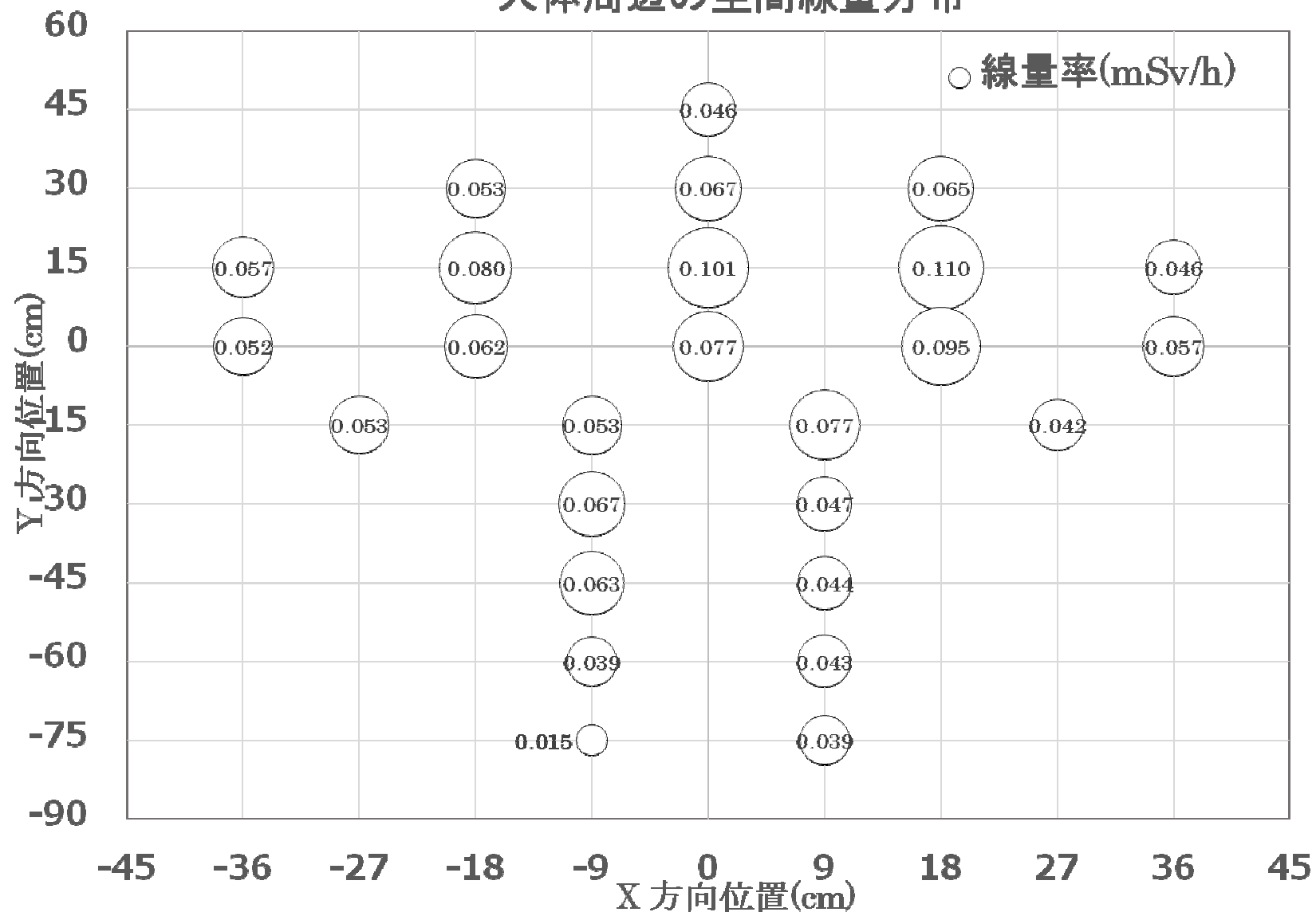


線源から 1m 離れると、点線源だとして中心から水平に 30cm 離れても、 $\sqrt{100^2 + 30^2} = 104$ cm 線源から離れただけになり、ほとんど変わらない。



人体周辺の線量分布(測定結果)

人体周辺の空間線量分布



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

本プロジェクトの目的

本プロジェクトの目的は**学校現場での放射線安全管理ガイドラインの策定**である。

教育的価値の高い実験を放射線安全も確保したうえで安心して実施できるように環境を整備することを目指している。

関係する様々な立場の方の理解を得るためには、**必要な情報を提供するのみならず**、立場を超えた議論が必要であり、技術的問題点の解決だけでなく、放射線防護の根本から進むべき方向を検討する必要がある。

本プロジェクトは、線量などの計測の専門家と、線量評価、放射線防護の専門家のみならず、実際の学校教育現場の教員、放射線教育関係者、教材メーカー、教科書会社等が関わっているが、**今後より多くの立場の方の意見**や諸外国の管理体制を取込んでいくことにより**実際の生徒や保護者**に対しても納得して貰えるガイドラインを策定する。