

2019年 3月 11日

平成31年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業費）
新規研究課題提案 ヒアリング 於 原子力規制庁

学校教育現場での放射線利用の 実態を踏まえた安全管理の体系化

主任研究者:

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>



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、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

教師に対する指導書では、放射線に関する注意が記載されていない会社もある。教科書会社側では具体的な安全に関する指針を持っておらず、教員に対する指導は極めて不十分である。

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、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

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。

Task 1: 線量計測

1-a 低エネルギーX線の線量評価

放射線計測の専門家

大阪府大、大阪府大高専、
京都大学、福井大学、福岡大学

線量、スペクトルの
電圧、電流依存性評価、
空間線量分布

1-c 低エネルギーX線の線量測定品質の確認

品質保証に向けて

産業技術総合研究所

分担研究者

Fast SSD 検出器、Qグレードの TLD バッジなどの導入を行い、印加電圧、電流、使用するクルックス管、運用履歴など様々な条件によって変化するクルックス管からの低エネルギーX線をより高精度で迅速に測定し、律速条件を検討する。

産総研の標準場及び標準測定機を用いて、測定器の校正及び不確かさの評価を含む線量率測定を行う。

1-b 低エネルギーX線の簡易な評価方法の開発

箔検電器によるスクリーニング

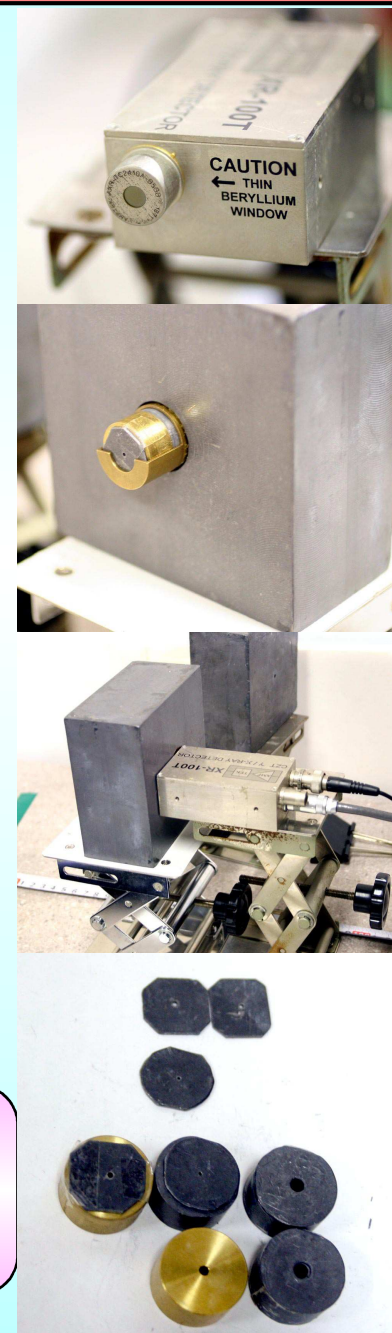
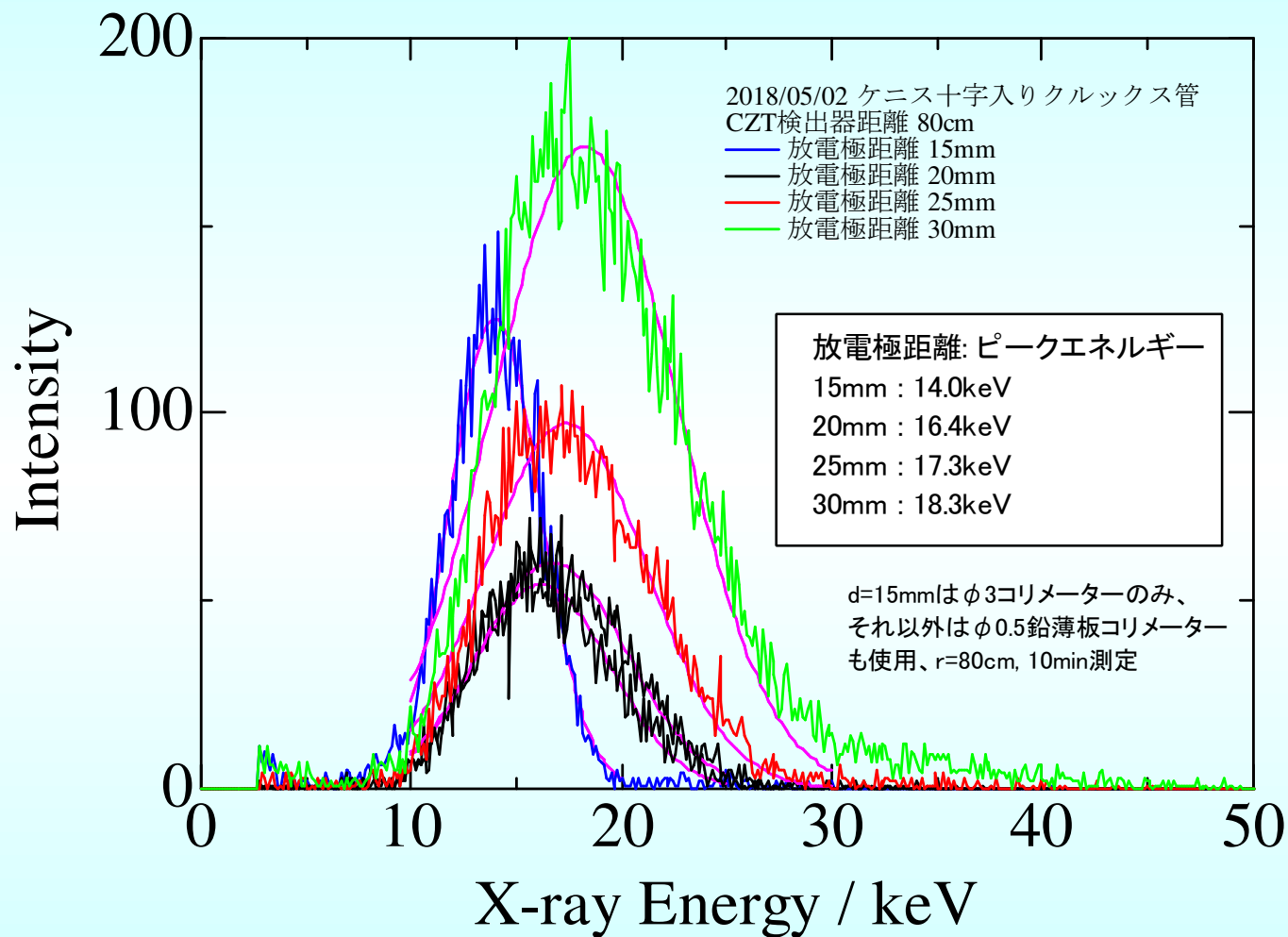
名古屋大学

分担研究者

教員自身の手で継続的な低線量率・低エネルギーX線の測定を可能とするために、箔検電器を用いた測定手法の開発を行う。

低エネルギーX線
測定技術の確立

CZT半導体検出器によるスペクトル評価



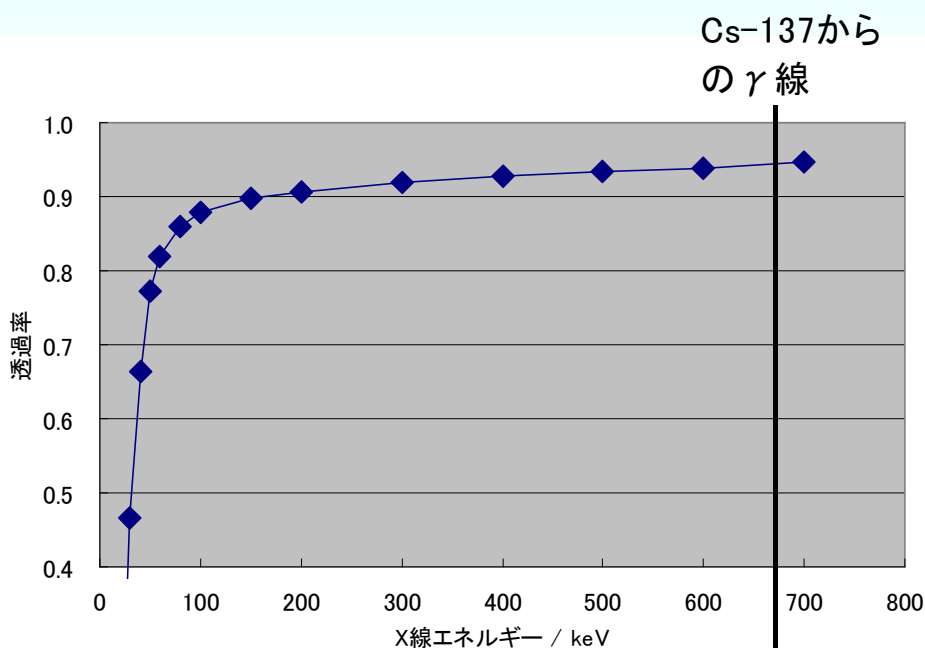
Amptek XR-100T-CZT
CZT(Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te)検出器
Be窓、ペルチェ冷却

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

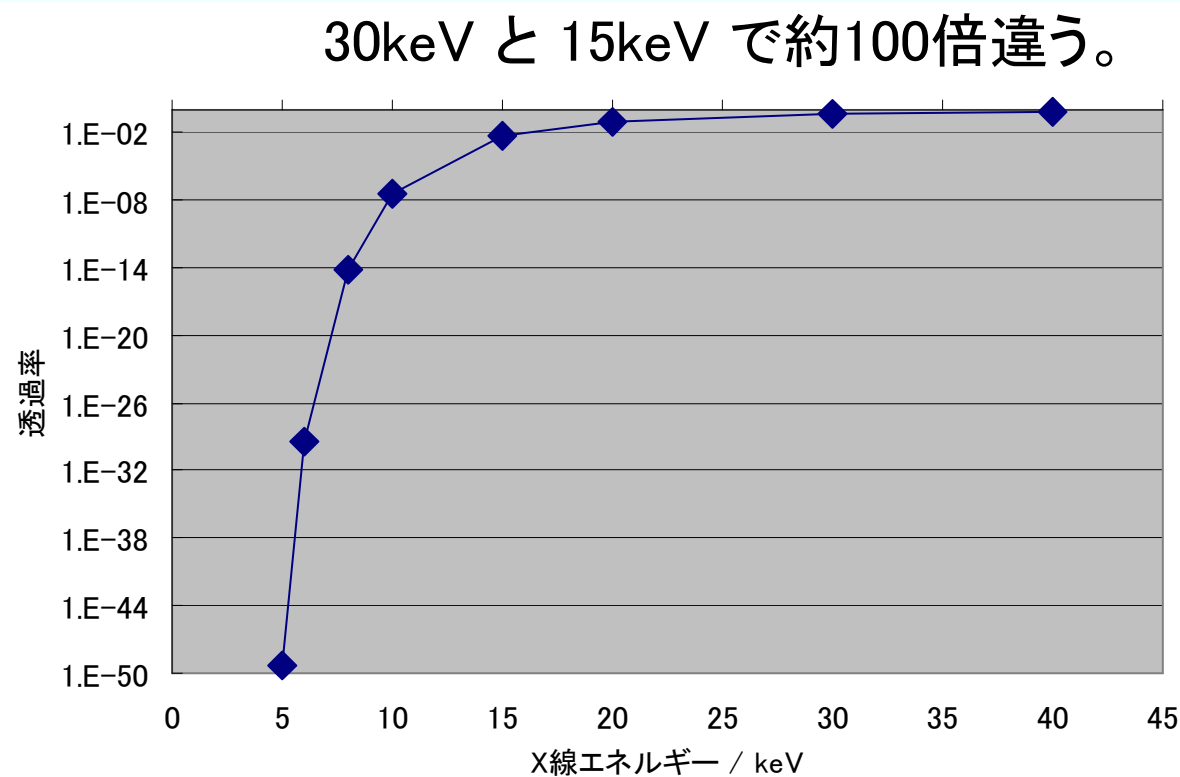
φ0.5mm鉛コリメーターにより数cps程度まで下げること、
ようやくパイルアップせずに測定できるようになった

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。



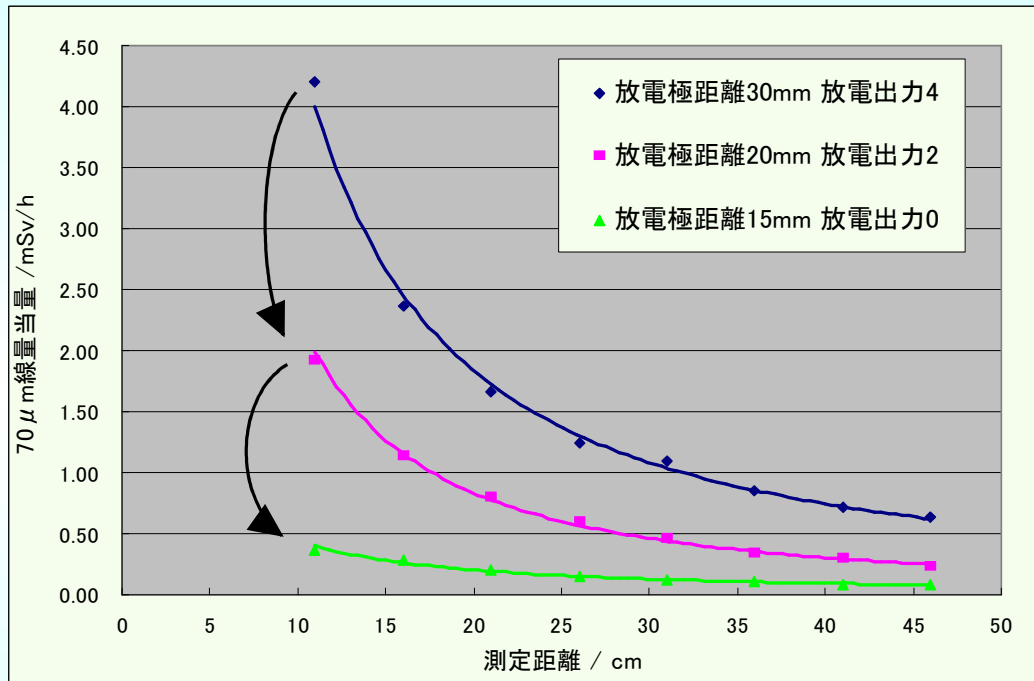
100keV 以上のエネルギーでは
余り大きく変わらない



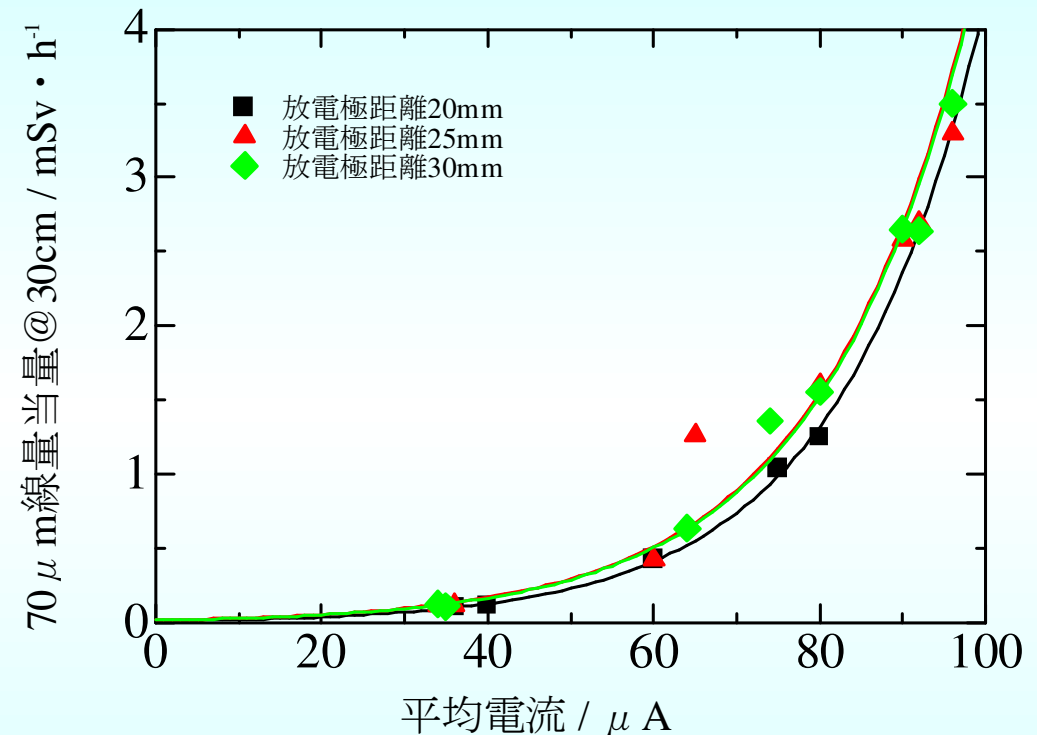
3mmのガラスに対するX線の透過率

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



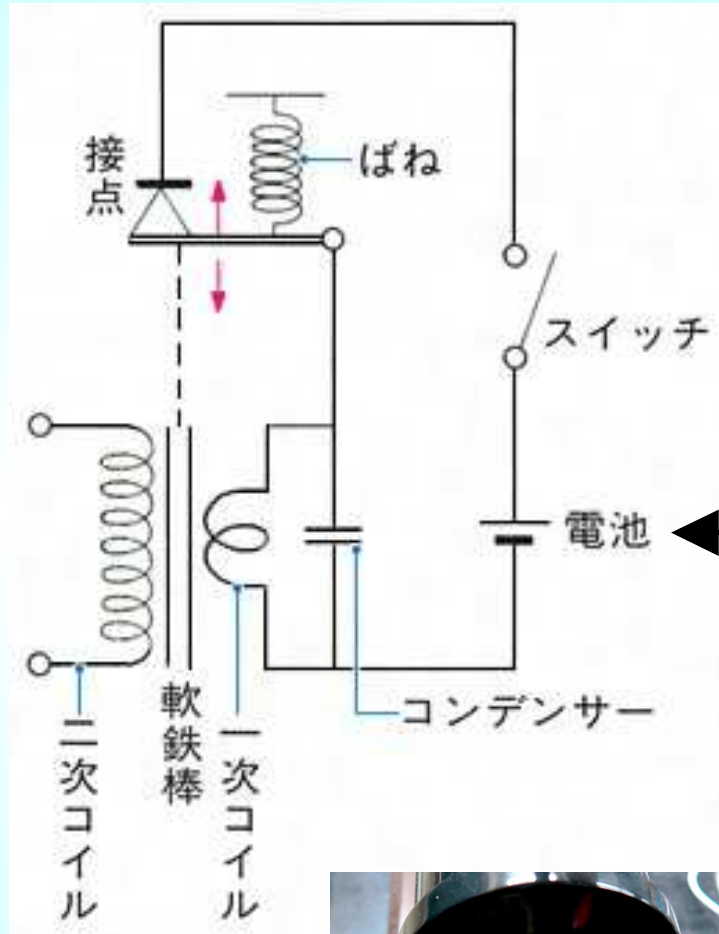
放電出力変化に伴う平均電流を
アナログ電流計で測定



- ・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。

- ・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。

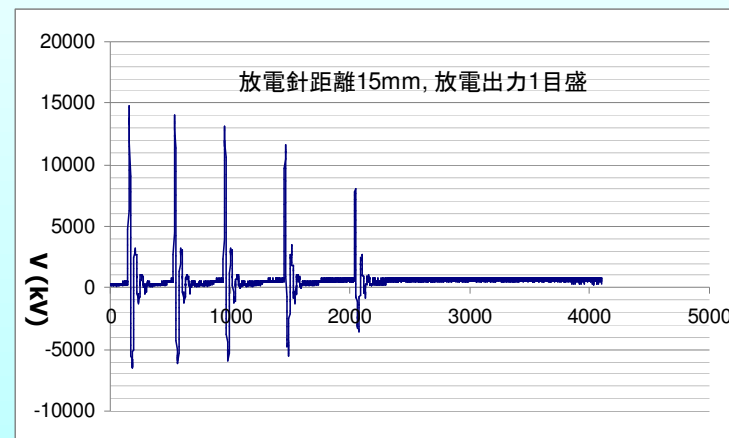
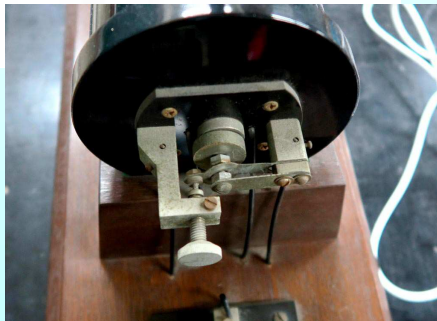
誘導コイルを用いた高電圧生成について



誘導コイル(Induction Coil)は、極端に巻き線の数の異なるトランスの一次側の電流を、ベルやブザーなどと同様に機械的に接点を連続的にON/OFFすることでパルス状に変化させて、二次側に大きな電圧のパルスを生成する。

放電出力などと書かれている調整用のダイヤルは、可変抵抗などで一次側に印加する電圧を変化させている。

外部電源で直接一次側の電圧をコントロールする製品も存在する。



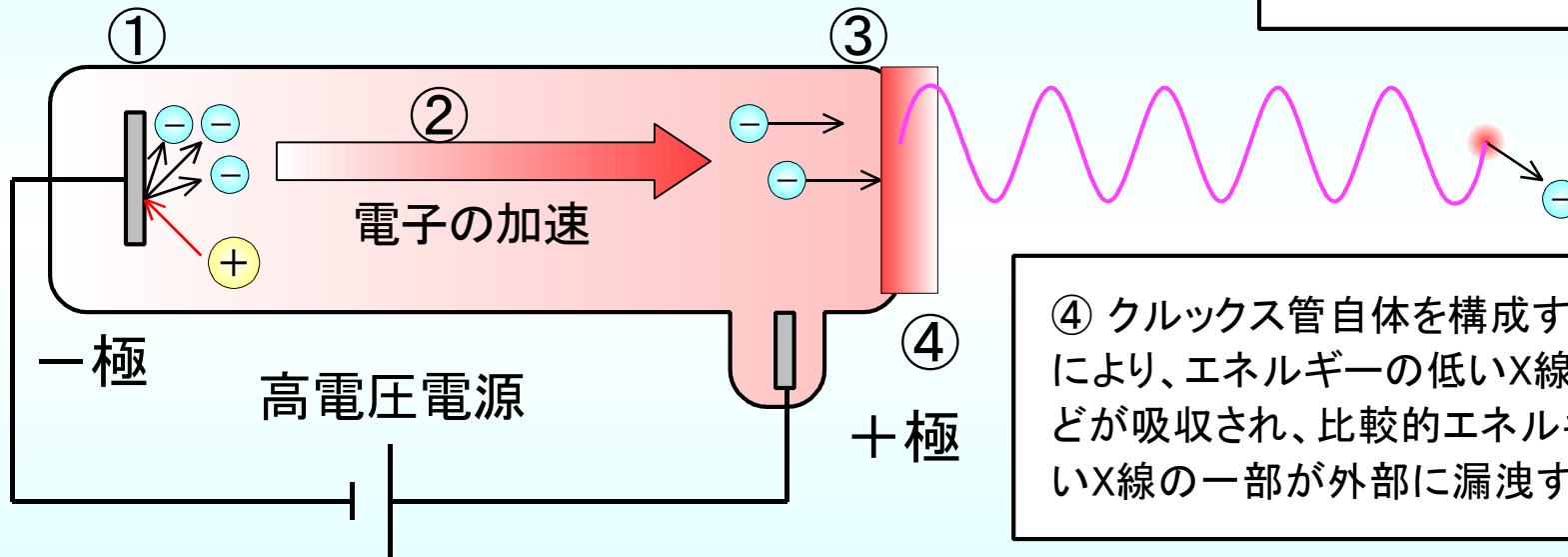
1ms程度のパルス
を間欠的に出力

クルックス管からのX線の発生

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。

その結果高い電圧が印加され、④で漏洩する線量が大きくなってしまふ。

Task 1-b 低エネルギーX線の簡易な評価方法の開発

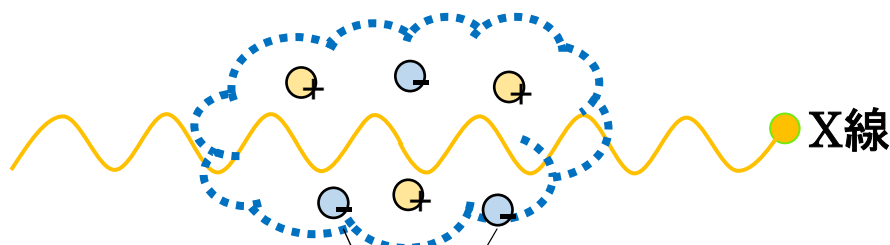
➤ 箔検電器について

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。

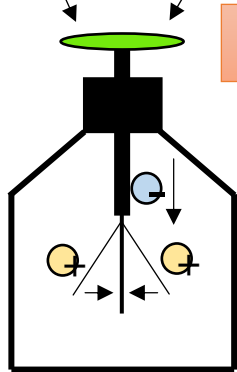


使用した箔検電器
(はく検電器EA)

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



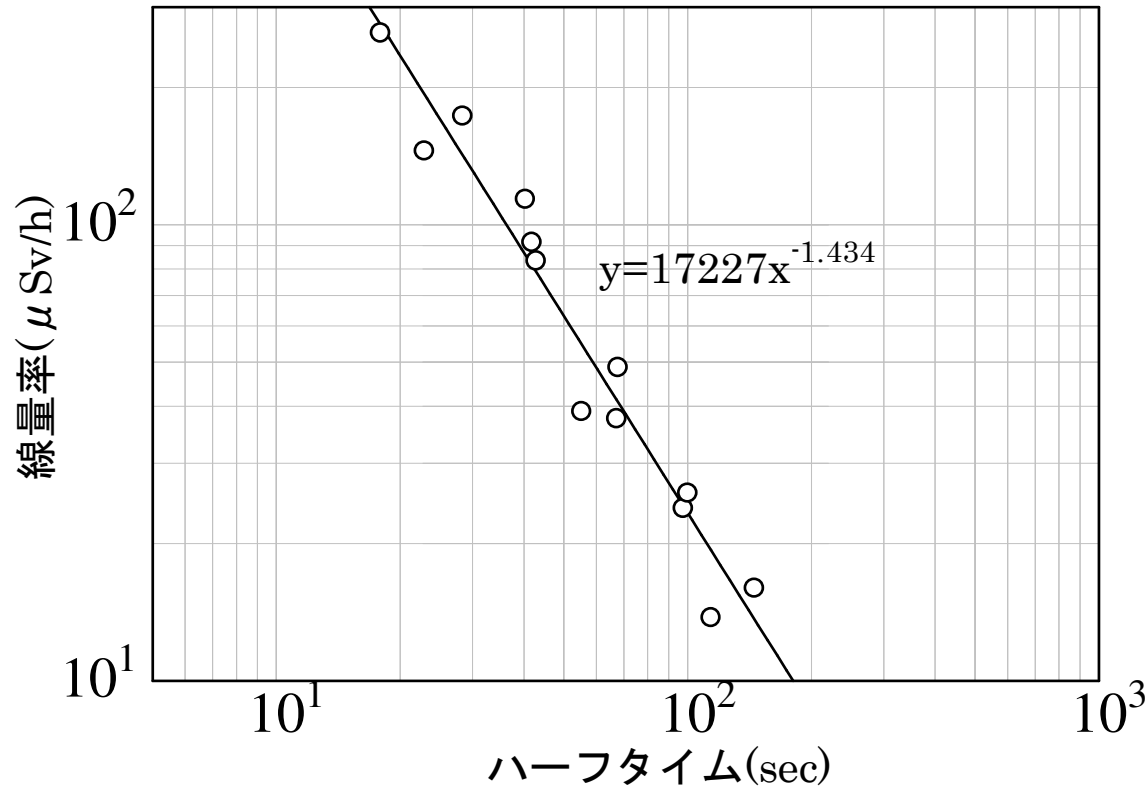
箔が中和して閉じていく



※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きた

X線の線量率の推定

電場の影響を低減すると両者に相関性が見られた。



- ・ ハーフタイムは正と負の幾何平均値を使用した。
- ・ 先行研究では線量率が60 μSv/hのとき、ハーフタイムが約100秒であるが、本研究では同線量率のとき、約50秒となった。

先行研究では60° ⇒ 30° をハーフタイムとしているため、ちょうど2倍ほど差が生じたと考えられる。

異なる箔検電器においても同じ結果が得られる可能性

本研究で使用した箔検電器は、線量率13~277(μSv/h)の範囲において、±30%の誤差でハーフタイムからX線の線量率が推定できる。

Task 1-C 低エネルギーX線の線量測定品質の確認

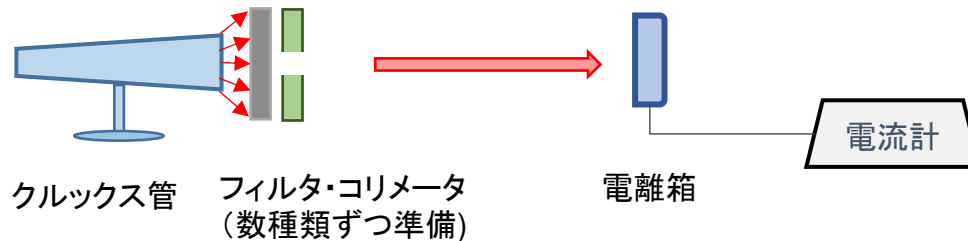
低エネルギーX線の線量当量測定における校正および不確かさの評価

◎クルックス管からの漏洩X線を複数の測定器で測定

・薄膜電離箱および電離箱式サーベイメータで線量率を測定
 $H(0.07)$, $H(3)$, $H(10)$ を不確かさを含めて評価し、結果を比較する。

・クルックス管からのX線の実効エネルギーの測定

※空気カーマや空気吸収線量から線量当量($H(0.07)$, $H(3)$, $H(10)$)を求める際に利用



薄膜電離箱



電離箱式サーベイメータ

◎Task1で用いる測定器を軟X線標準場において線量当量の単位で校正

- ・産総研軟X線標準場において、サーベイメータや積算型線量計を校正
- ・校正を行う標準場はISO4037に規定されているN-10・N-20・N-30*。
- ・校正の有無で測定結果に与える影響を検証する。

*管電圧10 kV~30kVで、エネルギー特性の調査などで利用されるX線場



軟X線標準場

- ・Task1の結果の定量性を強化し、ガイドラインの策定に寄与
- ・教員・生徒の安心・安全に寄与
- ・低エネルギーX線の3mm線量当量測定モデルスタディ

Task 2: 運用方法の検討

2-a 学校教育現場での実態調査

学校教育現場の教員

大阪府大高専、福井県志比小、長崎大学教育学部附属中、東京学芸大学附属小金井中、札幌市立白石中、名古屋経済大学市邨高・中、世田谷区立千歳中、文京区立文林中、札幌市北栄中、名古屋市教育センター、神戸学院大

暫定ガイドラインの検証

実態評価に伴う問題点の抽出

サポート

放射線教育フォーラム、全国中学校理科教育研究会支援センター、日本科学技術振興財団、日本理科教育振興協会

2-b 運用法改善による被ばく低減措置

実際の実験機器に精通

大阪府立大学、大阪府大高専、福井県志比小学校、長崎大学教育学部附属中学校、東京学芸大学附属小金井中学校

千代田テクノルのガラスバッジを用いた測定サービス(外注)により、全国の教育現場にガラスバッジを郵送し、教員自身の手で「暫定ガイドライン」に準拠した測定を行う。測定を終えたガラスバッジは千代田テクノルに返送し、線量評価結果を大阪府大で集計して各教員に伝える。必要に応じて、電離箱などの測定機材を別途郵送して測定を依頼する。暫定ガイドラインの妥当性の検証を行うと共に、更なる線量低減のための運用方法改善を図る。

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。

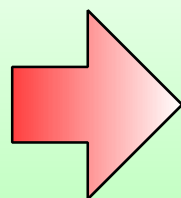
37本中、1mの距離、10分間の実演で70 μ m線量当量* が50 μ Svを超える物は12本だけであり、うち2本は意図的に最大電圧での測定。18本のクルックス管で、距離15cmでも検出限界(50 μ Sv)未満であった。*実効線量はさらに1/5以下。

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

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

3-a 防護量評価

低エネルギーX線による防護量
(実効・等価線量)評価モデルの構築

Task1, 2で
測定した線量・
スペクトル情報

3-b 管理目標値の検討

国内外の規制実態を踏まえた
管理目標値の検討

日本保健物理学会 専門研究会

2019-2020
年度

九州大、藤田医科大、国立保健医療
科学院、JAEA、東京大、首都大東京、
東北大、京都大、長崎大

3-c ガイドライン策定、学会標準化

教育現場における放射線安全管理
ガイドラインの作成

放射線業務従事者ではない教員、さらに労働者でもない若年層の「生徒」に対する放射線安全管理体制の体系化を行う。

特に近年、眼の水晶体に対する被ばくが問題になっており、線源を見つめる必要があるクルックス管の特性上、詳細な検討を行う(円滑な規制運用のための水晶体の放射線防護にかかるガイドラインの作成にも連携)。

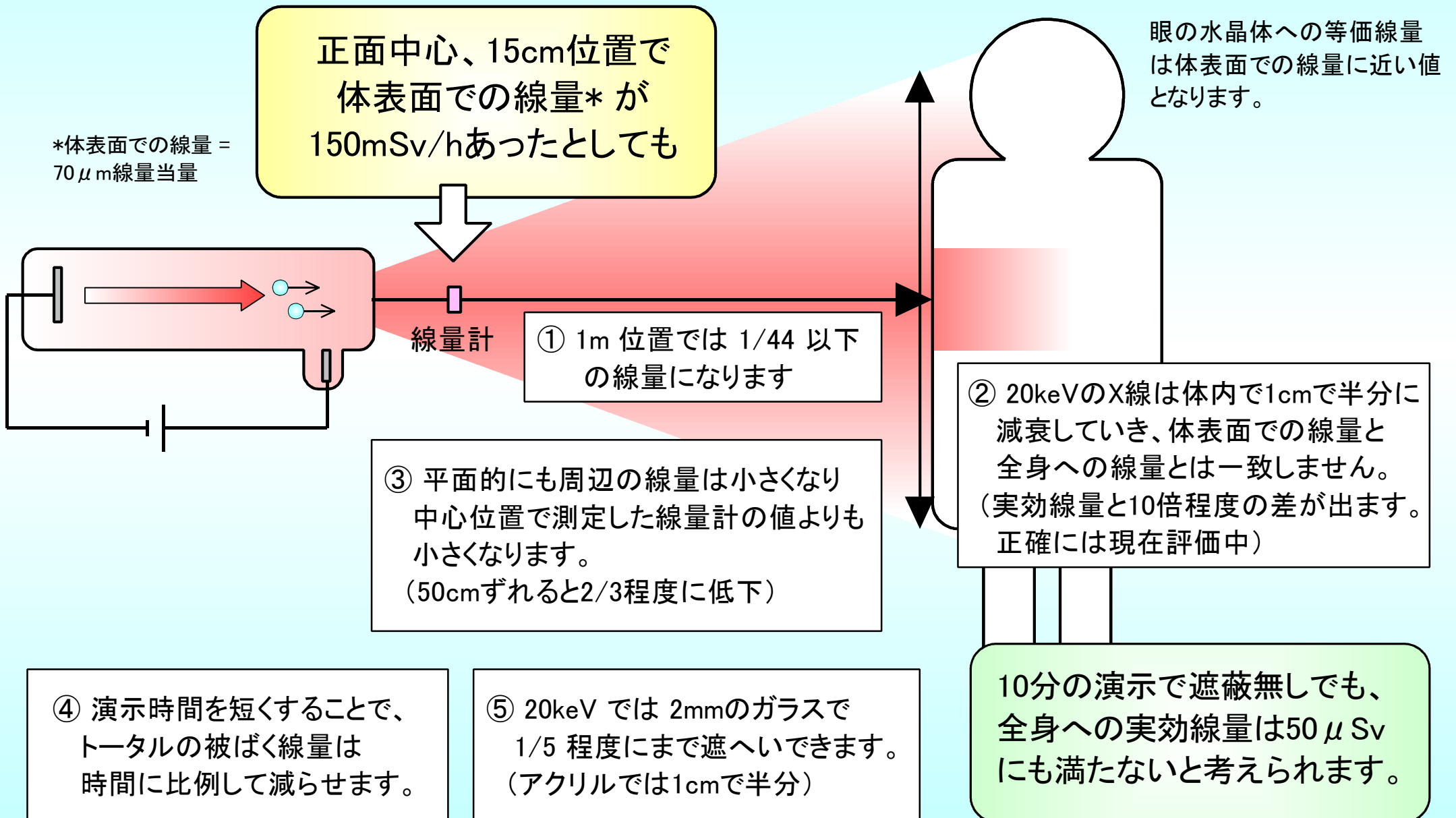
日本保健物理学会標準化委員会
において専門部会を立ち上げる。

日本放射線安全管理学会からも協力(H31年度放射線安全規制研究の重点テーマとして提案)

2021年度

学会標準化

クルックス管からのX線の不均一性



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(d))

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年間 0.5mSv、目や皮膚のような単一の臓器・組織の線量当量年間5mSv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。

国内外の規制状況について議論を行うため、保健物理学会専門研究会の「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」を申請中であり、承認されればH31年4月から活動を行う。

本研究の目的

本プロジェクトの目的は**学校現場での放射線利用の実態を踏まえた安全管理の体系化**である。

クルックス管を用いた実演は現在既に行われており、教育的価値の高い実験を安心して実施できるように自主的な安全管理体制の確立を目指している。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への説明に耐えうるガイドライン**を策定する。

今そこにあるリスクを低減するために

