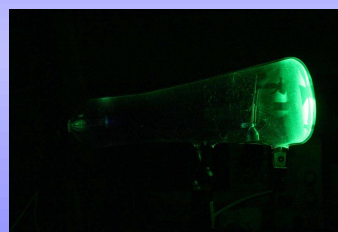


2018/03/27 日本原子力学会 春の年会 2H03

クルックス管からの低エネルギー X線の測定、評価手法の開発



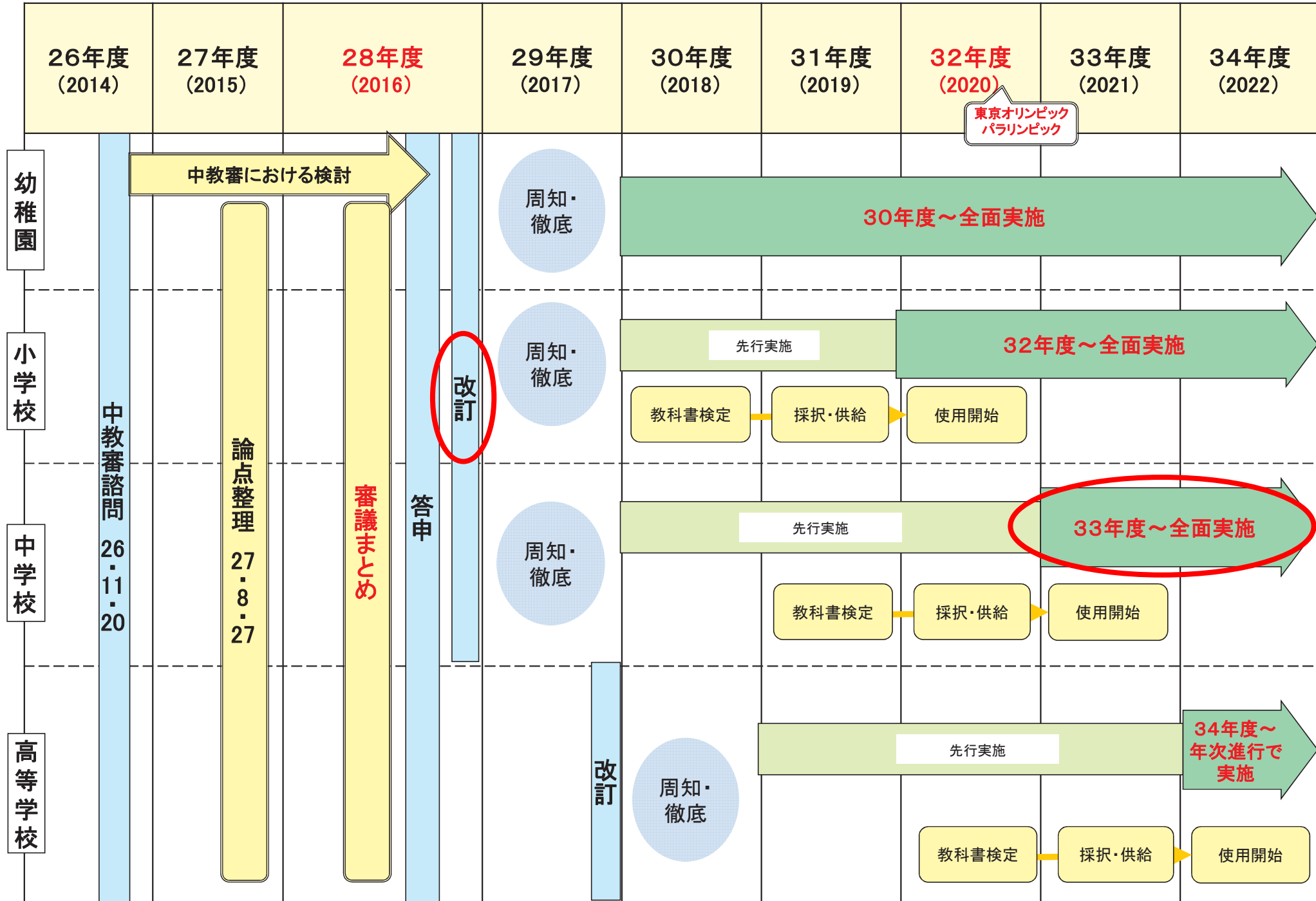
大阪府立大学 放射線研究センター 秋吉 優史
日本科学技術振興財団 掛布 智久
手代田テクノル 谷口 和史

秋吉 優史: akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp

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



今後の学習指導要領改訂スケジュール（現時点の進捗を元にしたイメージ）



本発表の背景

2017年3月に公布された新・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 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。**

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内容

2017年6月に公布された新・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。**

クルックス管を用いた実験を行う際の安全評価が必要

クルックス管からのX線の発生

①

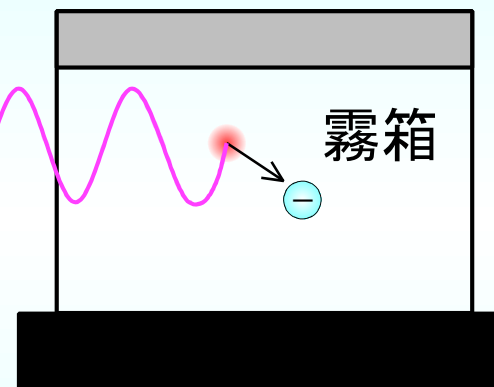
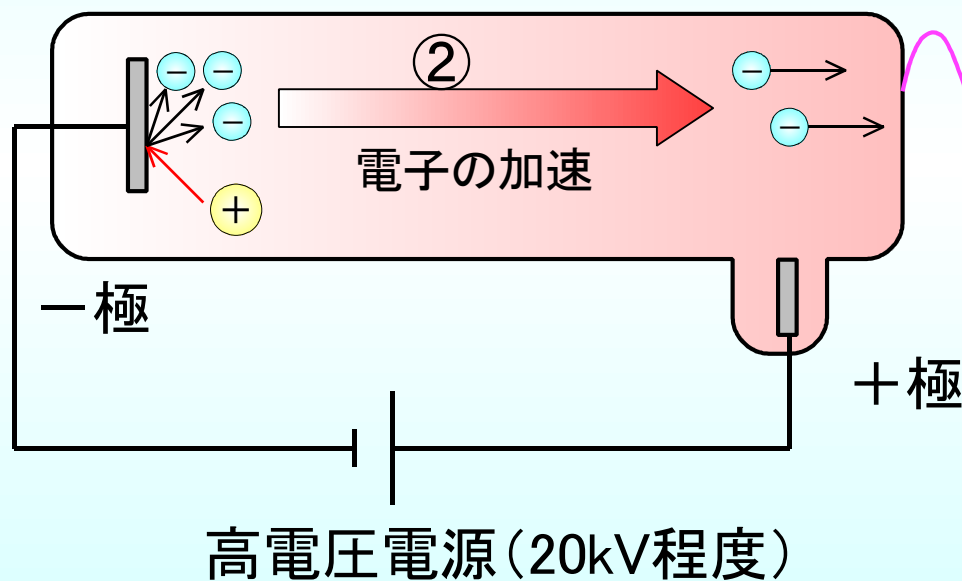
＋のイオンが一極に引きつけられて電子を叩き出す
(二次電子放出)

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

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半分程度。

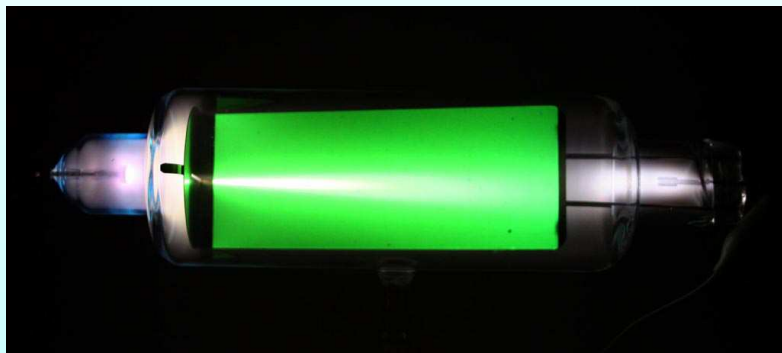
極めて簡単な構造の冷陰極により電子ビームの発生が可能であるが、比較的高い電圧が必要。

実際にはクルックス管自体を構成するガラス管により発生したX線が減衰するため、漏洩するX線はエネルギーの高い成分が中心。

クルックス管を安全に使用出来ないか？

クルックス管は従来から放射線教育に用いられているが、低エネルギーX線の被曝線量が想像以上に多い(数10mSv/hに達する)場合があることが明らかになりつつある。

株式会社ホリゾンからは、冷陰極を用いて低電圧で被ばく線量を抑えての陰極線観察を可能としたクルックス管が 22,000円、電源も18,000円と手軽な金額で発売されている。低電圧動作が可能であり、専用の電源での 5kV 程度での動作では全くX線の放出が観測されなかった。さらに、20kV程度と同じ電圧で駆動させても全くX線の放出が見られなかった(電圧がドロップしていると考えられる)。



5kV で動作中のクルックス管



9V電池駆動の
5kV 高圧電源
(CW回路)

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実験体系を極めて安全に構築可能。

ここで話は完結する

Advanced Plan

古い装置を用いざるを得ない場合や、放出されるX線を活用した発展的な実習実施する場合、印加する電圧を一定以下に抑えることで最低限度のX線量に抑えて、特定方向だけにX線を取り出せる遮蔽体を組み合わせた実験体系を構築する。

本研究の目的

国際放射線防護委員会 ICRP の勧告 放射線防護の基準を決める三つの原則

正当化 Justification

リスクを上回る利益がなければならない

- 電子線の観察だけであれば5kVの絶対安全な装置の使用を推奨。
X線を活用した効果的な教育コンテンツには利益があり許容される。

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

- 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う。必要に応じて遮蔽も行う。

線量限度 Dose Limit

線量限度を超えてはならない(緊急時と医療を除く)

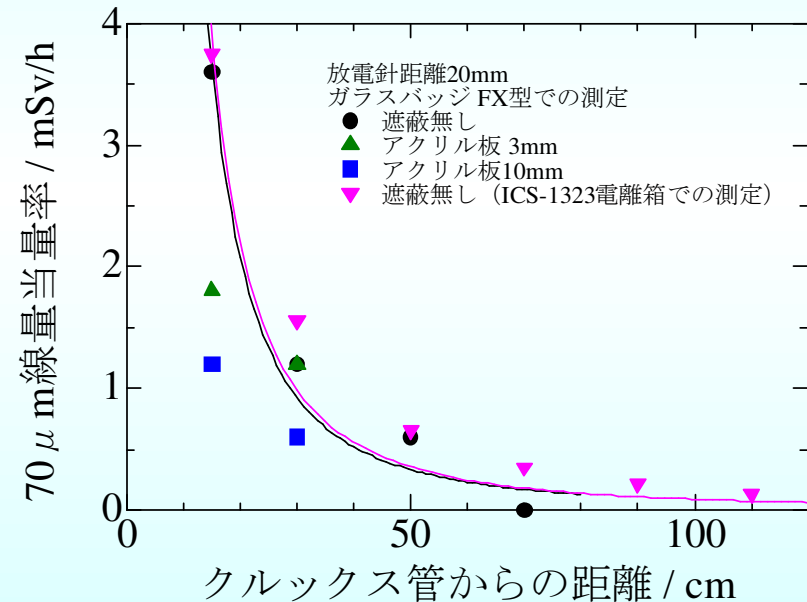
- 放射線取扱業務従事者でも、労働者でもない生徒に対する被ばく線量限度を、国内外の規制状況から議論する。低エネルギーX線による不均一被ばくと水晶体への等価線量についても考慮する。

ガラスバッジを用いた線量測定

20keV 程度の低エネルギーX線は、透過力が低く一般的なNaIシンチレーターや、半導体検出器を用いた普及型のサーベイメーターでは測定する事が出来ない。



低エネルギーのX線でも測定可能な信頼できる測定手段として、蛍光ガラス線量計を用いた、千代田テクノルのガラスバッジによる環境線量測定サービスを利用した。また、日立の最新の電離箱 ICS-1323もテストした。



ケニスの誘導コイルの放電針距離20mm(20kV強に相当)、放電出力2目盛、十字板付きクルックス管の十字板を下げた状態で測定。照射時間は10分間で1時間あたりに換算(0.1mSv単位の測定のため結果は離散的)。

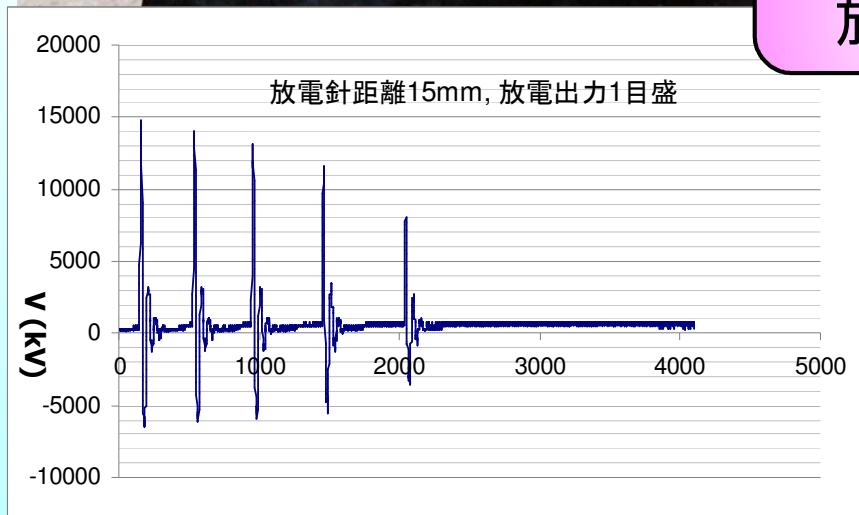
誘導コイルを用いた高圧印加について



放電極距離

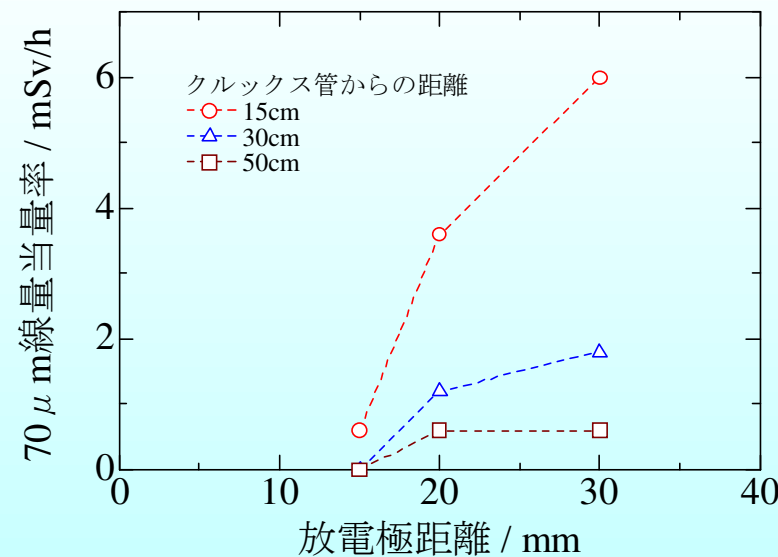
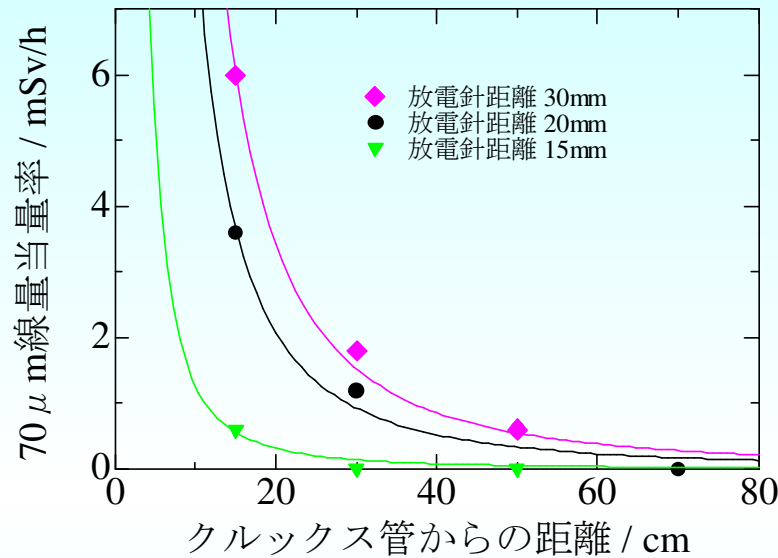
放電出力

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。



電圧測定時にはガラス抵抗体などの物理的もサイズの大きい、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)。

ガラスバッジを用いた線量測定



- ・アクリルでの遮蔽は、20keVでの半価層は約10mmの計算だがそれよりもやや遮蔽能が高かった。低エネルギー成分の影響が考えられる。

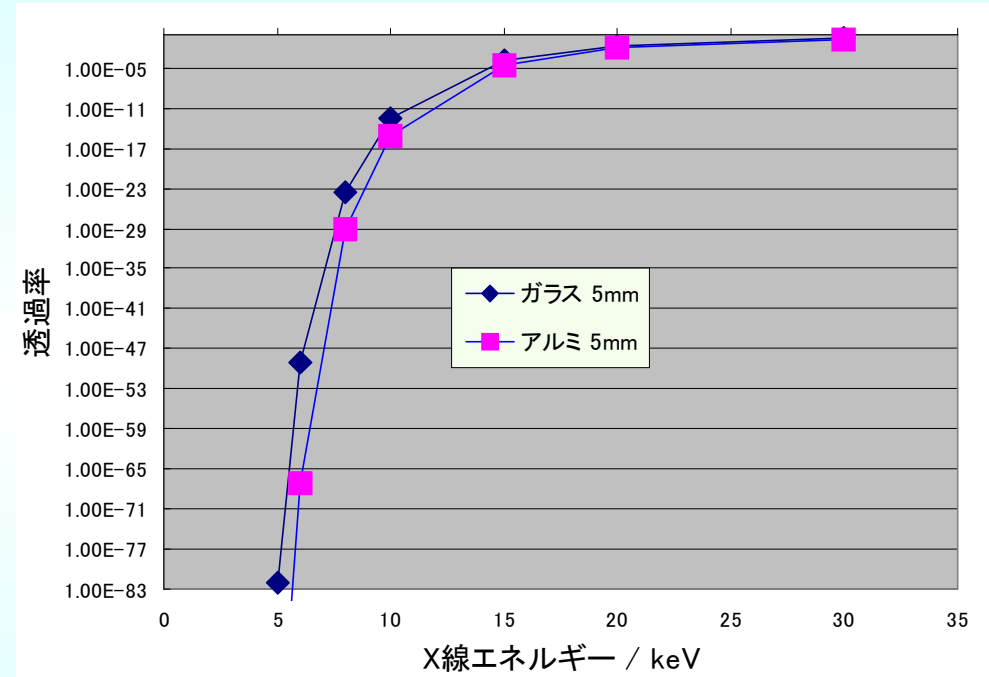
- ・放電極距離を変えて印加電圧を上昇させると、ガラスバッジで測定される線量が明らかに増加した。

- ・放電極距離15mmでは30cmの距離で測定下限(0.1mSv)を下回り、かなり安全性が高まることが確認された。

- ・現在依頼しているガラスバッジの測定精度が0.1mSv単位であるため、より高精度での測定オプションを利用する予定。

低エネルギーX線の透過率

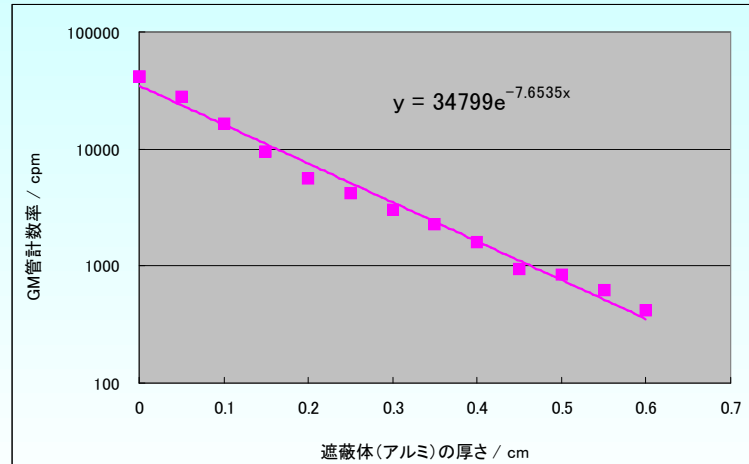
エネルギー (keV)	質量減衰係数 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	厚さ(cm)	透過率	遮蔽体
5	41.5	1.00	1.0	9.48E-19	水
6	23.85			4.39E-11	
8	9.94			4.82E-05	
10	5.051			6.40E-03	
15	1.546			2.13E-01	
20	0.7505			4.72E-01	
30	0.3455			7.08E-01	
5	146	2.59	0.2	1.43E-33	ガラス (コンクリート 等価として計算)
6	87.29			2.31E-20	
8	42.13			3.33E-10	
10	22.16			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。

GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価



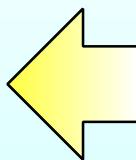
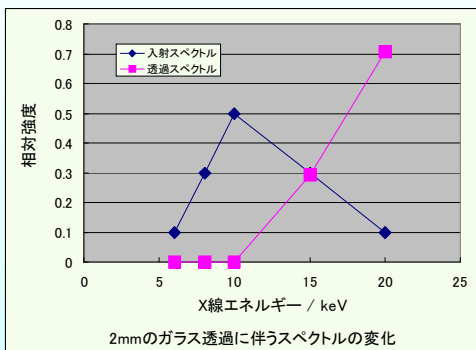
X線エネルギー (keV)	アルミ中の線減衰係数 μ (cm^{-1})
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

ケニス No.121-122 十字入りクルックス管 3C-B
 ケニス No.120-150 ニューパワー誘導コイル ID-6
 放電極距離 20mm、十字板は倒しての測定
 測定は Ranger GMサーベイメーターで、
 不感時間100 μs として数え落としを補正した

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の前後で、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位置での評価結果線減衰係数は6.51と若干高いエネルギーを示した。



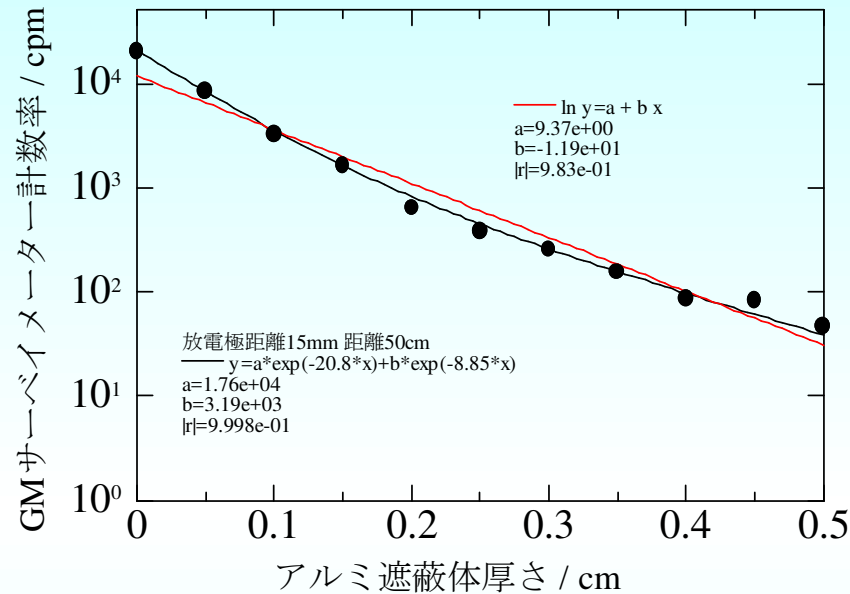
ガラス管を透過する前のX線のエネルギースペクトル(最大エネルギー20keVでその半分の位置にピークを持つ)を適当に決め、2mmのガラスで遮蔽された後の強度を透過率から求めた後、全体の強度が1となるように規格化した。

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。

より高エネルギー側では透過率の変化は緩やかとなるため元のスペクトルや、蛍光体の特性X線のエネルギーに左右されると考えられる。

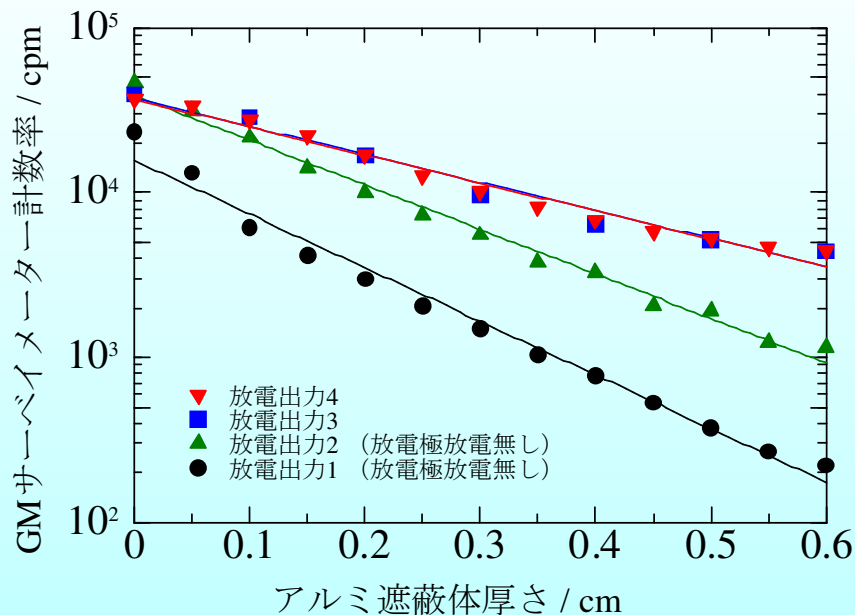
GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価

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。



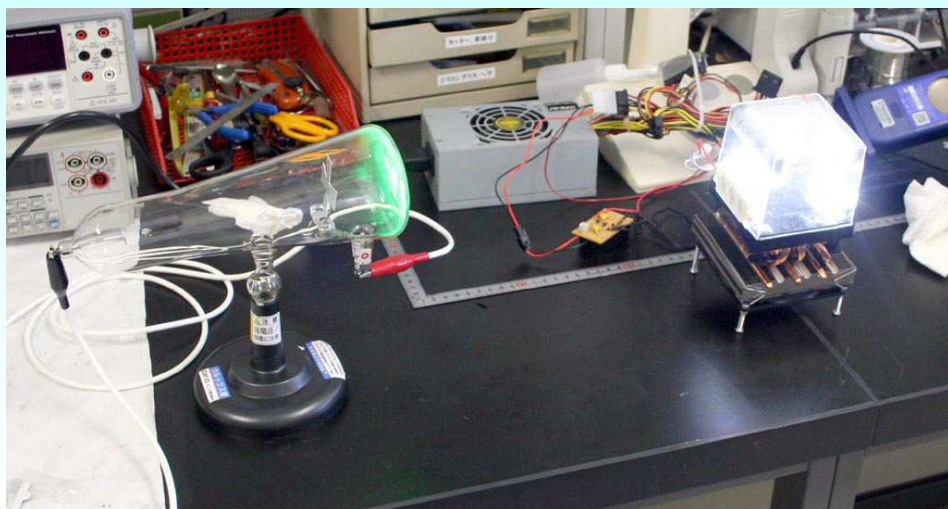
X線エネルギー (keV)	アルミ中の 線減衰係数 μ (cm^{-1})
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

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。

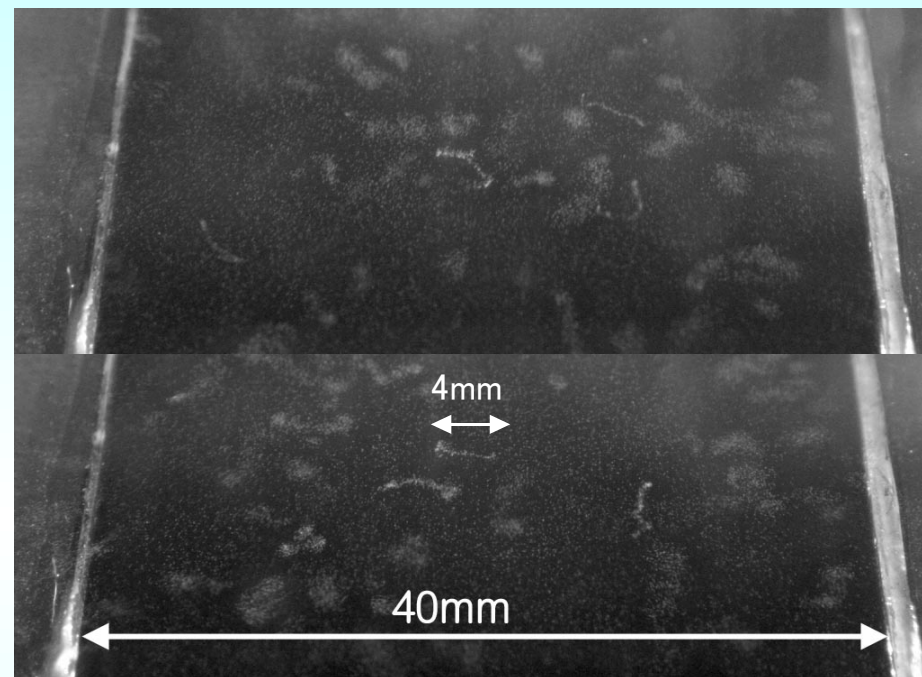


放電出力 (目盛)	線減衰係数 (cm^{-1})
1	7.50
2	6.05
3	3.92
4	3.89

ペルチェ冷却式霧箱を利用した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
4mm程度と良く一致している。



クルックス管からのX線によって弾き出された
光電子のペルチェ冷却式高性能霧箱による
観察結果(放電針距離20mm)。

エネルギー既知のX線・ γ 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**

「教育現場など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体制の確立」

これらの諸問題を解決するため、線量計測、線量評価、そして広く普及するための放射線教育者によるオールジャパン体制でのプロジェクトを立ち上げている。

本プロジェクトの内容は平成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)公募における重点テーマとして、日本放射線安全管理学会から選出されている。

しかしながら中学学習指導要領の全面実施を H33 に控えて、出来る限り早く動き出す必要があることから、既に一部のタスクについては動き出しており、日本保健物理学会、日本放射線安全管理学会双方合同での標準化専門部会立ち上げを行っている最中であり、出来る限り早期のガイドライン策定を目指す。

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)

大阪府大 放射線研究センター
大阪府大高専、名大、愛知工大、九大、福岡教大、首都大、市邨中、放射線教育F、JSF、千代田テクノル、JAEA、QST

サポート依頼: 線量計メーカー、教材メーカー

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

低エネルギー散乱線の実測情報
→ 放射線審議会 眼の水晶体の放射線防護検討部会

Task2,3 に成果提供 ↓

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)
教材メーカー (様々な製品の評価)
大学研究者、OB (開発した教育コンテンツの評価)

放射線教育フォーラム
福島県教育庁、名古屋市教育センター、各地の小中高教育現場
大阪府大、JSF、千代田テクノル

サポート依頼: 日本理科教育振興協会

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

水晶体に関する評価情報
→ 放射線審議会 眼の水晶体の
放射線防護検討部会

新教科書指導書への反映

ガイドライン
を反映
↓

日本保健物理学会・
日本放射線安全管理学会
合同標準化委員会

東大、藤田保健衛生大、長崎大、
弘前大、九大、首都大、大阪府大、
福岡教育大、静岡大、東北大、
放射線教育F、JAEA、千代田Tc

サポート依頼: (一社)教科書協会

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

放射線防護分野の人材育成

大阪府大
放射線研究センター

京大、名大、JSF、学芸大、京都教育大、市邨中、JSF、放射線教育F、福島県教育庁、全中理SC、各地方毎の全国の拠点大学

サポート依頼: 全国中学校理科教育研究会、大阪ニュークリアサイエンス協会、かんさいアトムサイエンス倶楽部、みんなのくらしと放射線展実行委員会、大阪府立大学つばさ基金「放射線教育振興プロジェクト」