

2018/06/30 日本保健物理学会研究発表会
@ ホテルライフオート札幌、講演番号 2A-16

教育現場における低エネルギーX線 評価方法の開発



大阪府立大学 放射線研究センター 秋吉 優史
Special Thanks: クルックス管プロジェクトの皆様

秋吉 優史: akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp

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



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

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ーはおろか、放射線計測で信頼されている NaI シンチレーターなどもエネルギーが低すぎて全く使い物にならない。

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 シンチレーター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。放電極で電圧を制御している誘導コイルから出力される電圧が、天候などの要因で変化しているのではないか？

様々な測定装置による測定結果

クルックス管 ケニス十字板入り
 放電極距離 25 mm
 放電出力 6
 電流 40 μ A

	電離箱		蛍光ガラス線量計		NaIシンチレーター		GM管	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
	日立 ICS-1323		千代田テクノ ガラスバッジ FX型		富士電機 NHC6	アロカ TCS-172	Ranger	Kind-mini	エアーカウンター EX	エアーカウンター S
備考	フタ無し	フタ有り	H*(0.07)	H*(10)	Be窓	汎用	1min scaler	カバー無し	カバー無し	
距離 d (cm)	mSv/h	mSv/h	mSv/h	mSv/h	μ Sv/h	μ Sv/h	kcpm	μ Sv/h	μ Sv/h	μ Sv/h
15	8.15	5.3	4.62	1.62	1.34	0.17	33.9	118	12.6	<9.99
30	1.91	1.28	1.26	0.48	10.0	0.17	31.7	64	12.5	0.05点減
50	0.64	0.47	0.48	0	13.1	0.15	27.3	24.5	8.3	<9.99

電離箱 日立 ICS-1323 は低エネルギー 8.5keV での一点校正により70 μ m線量当量を評価可能。
 フタ有りの状態では1cm線量当量が測定される。1cm線量当量でのレスポンスは40keV程度から上昇し、
 20keV では Cs-137 に対して約1.5倍程度になる。

ガラスバッジは内部で複数のフィルターを介して測定しており、エネルギー評価が可能。
 いずれの測定でも評価エネルギーは18keVであった。

GMサーベイメーターでの測定は可能であるが、測定値から線量への換算を考える必要がある。
 また、パルス状のX線測定であるため、不感時間による数え落としの補正をよく考える必要がある。

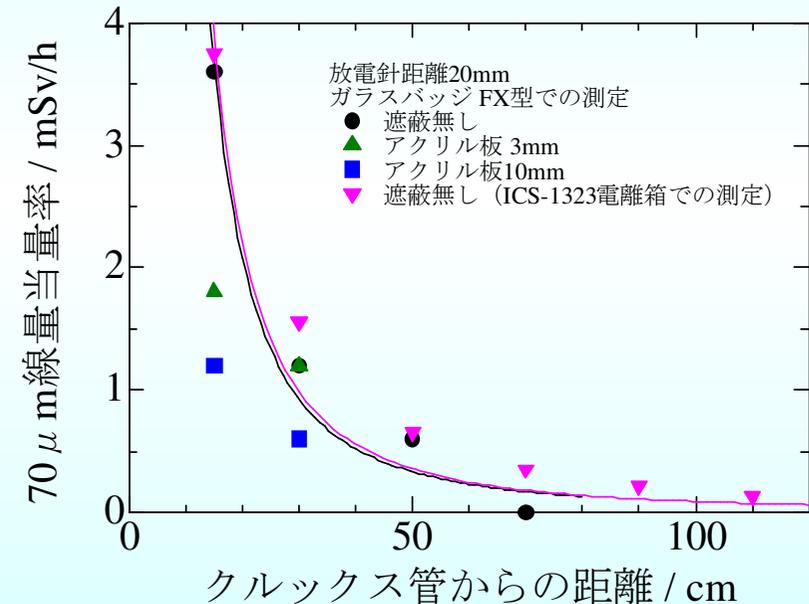
プラスチックシンチレーターは校正の仕方によっては使える可能性もある。

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)。

クルックス管からのX線の発生

①

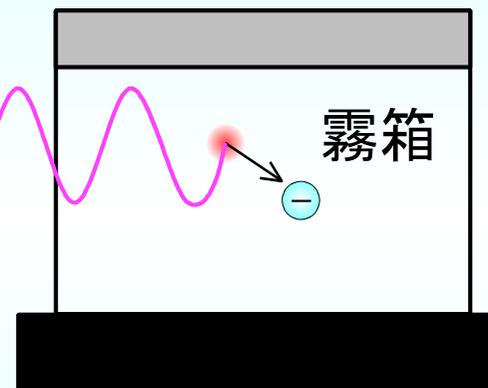
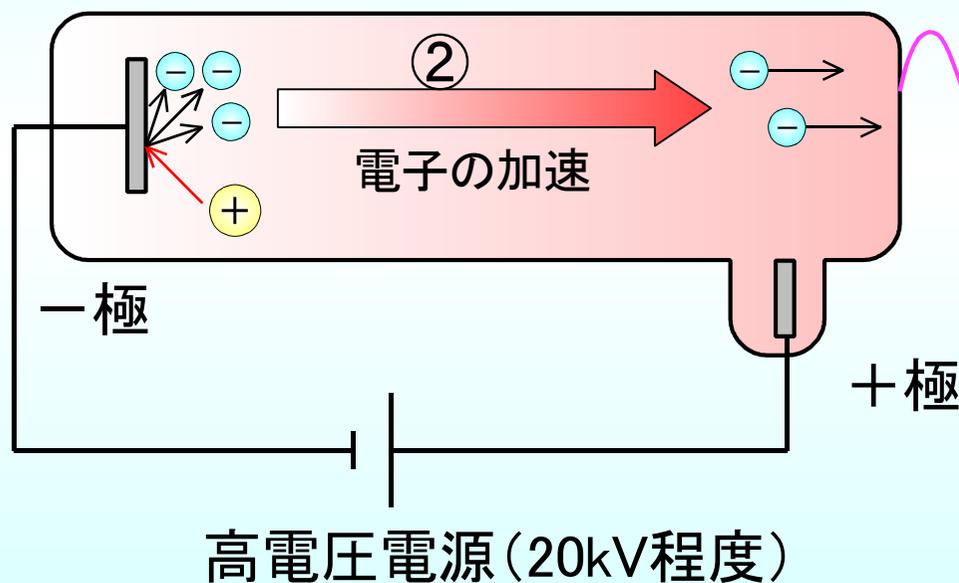
＋のイオンが一極に引きつけられて電子を叩き出す
(二次電子放出)

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。

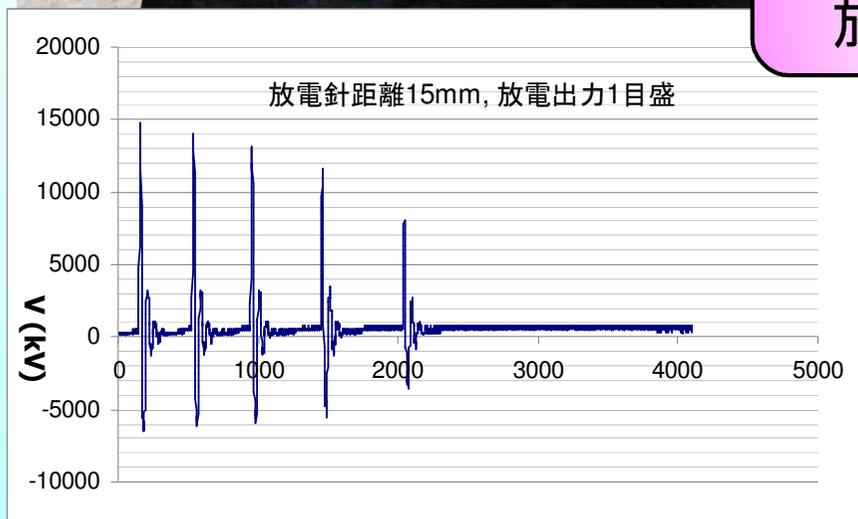
**極めて簡単な構造の冷陰極により
電子ビームの発生が可能であるが、
比較的高い電圧が必要。**

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。

誘導コイルを用いた高圧印加について

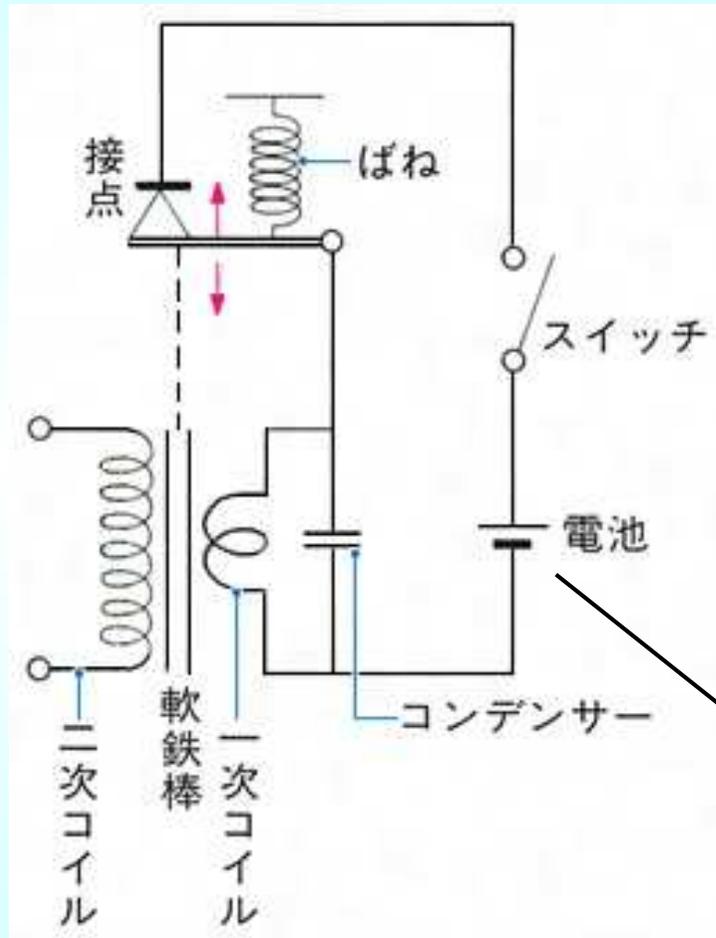


空気中での絶縁破壊電圧が 1kV で 1mm 程度であることから、放電極の距離を変えることで印加する最大電圧を規定できる。放電電圧以下では、放電出力を変えることで連続的に電圧をコントロール可能。放電電圧以上に出力を上げると無駄に放電が激しくなるので、目的の電圧を出力するためには丁度放電が起こり出す出力程度にコントロールする必要がある。



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)。

誘導コイルを用いた高電圧生成について

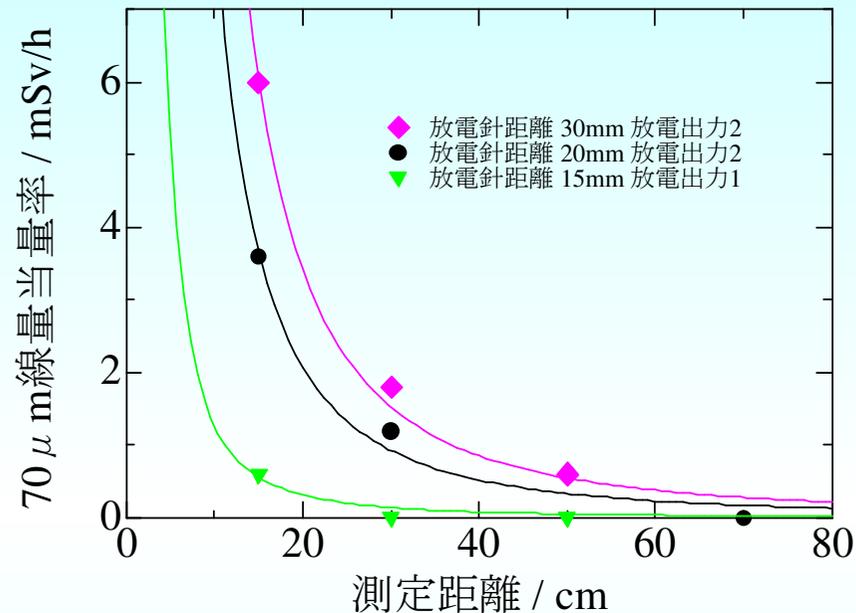


誘導コイル(Induction Coil)は、極端に巻き線の数の異なるトランス(実際には同軸上に巻かれている)の一次側の電流を、ベルやブザーなどと同様の機械的な接点を含めた回路で連続的にON/OFFすることでパルス状に変化させて、二次側に大きな電圧のパルスを生成する。

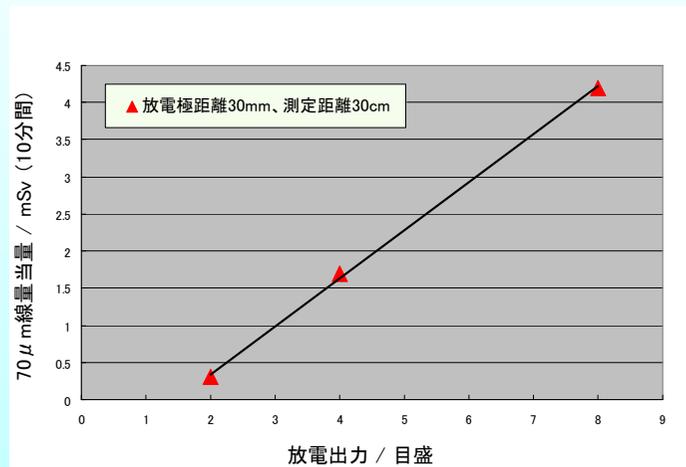
プラス側だけでなくマイナス側にもパルスが出るが、接点切断時の一番最初のプラス側のパルスの方が大きい。

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。

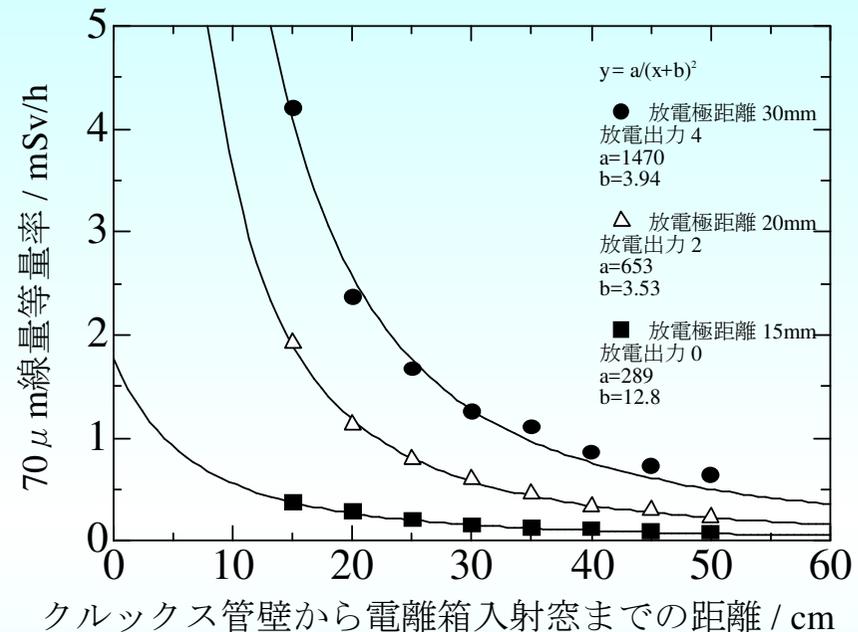
誘導コイル設定による線量変化



ケニス十字入りクルックス管での放電極距離依存性
(ガラスバッジによる測定結果)



上図と同じ時に測定した放電出力依存性



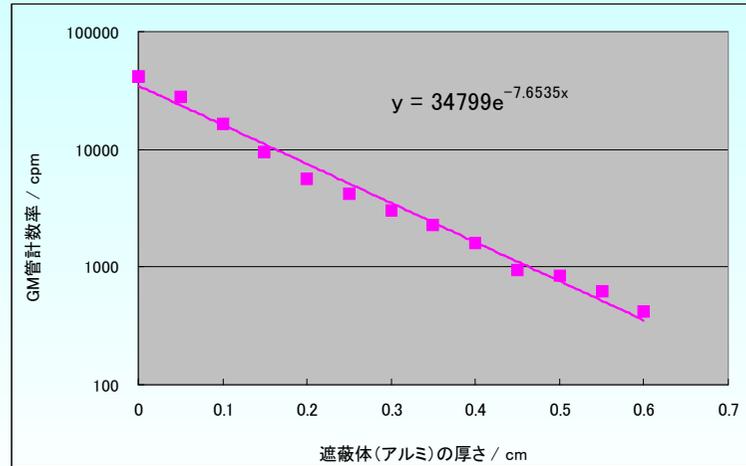
文京区立文林中学校から借用したスリット入りクルックス管での、
放電極距離依存性評価(電離箱による測定)

誘導コイルの設定によって、大きく線量が異なる。

- ・エネルギーが異なり透過率が高くなる?
- ・ビーム電流が大きくなる?

いずれにしても放電極距離15mm以下に抑えれば
かなり線量は小さくできる

GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価



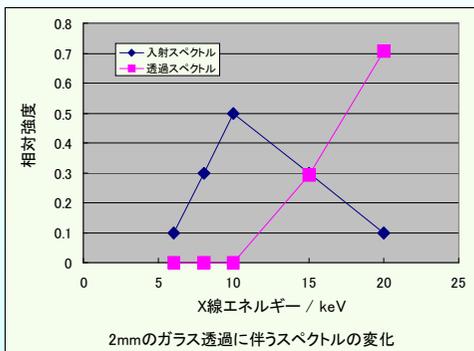
X線エネルギー (keV)	アルミ中の線減衰係数 μ (cm^{-1})
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

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。



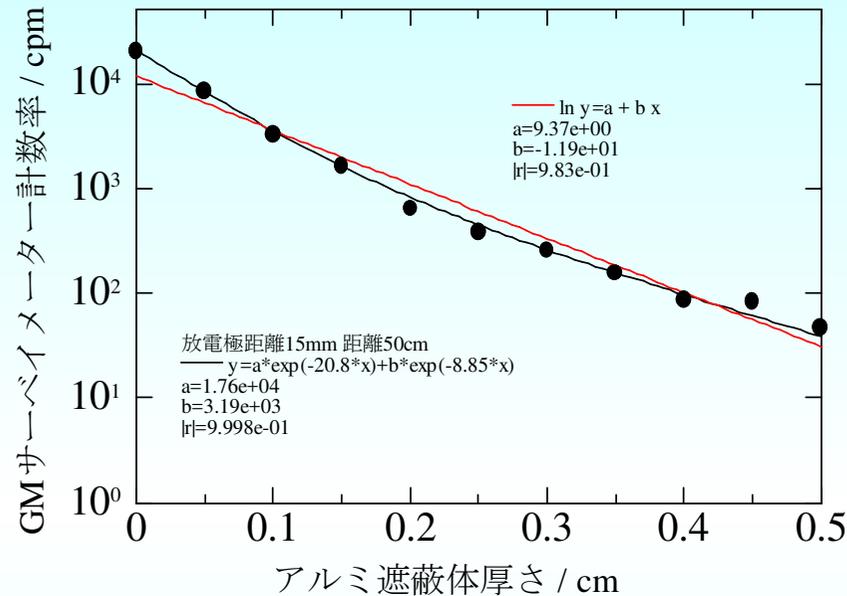
ガラス管を透過する前のX線のエネルギースペクトル(最大エネルギー20keVでその半分の位置にピークを持つ)を適当に決め、2mmのガラスで遮蔽された後の強度を透過率から求めた後、全体の強度が1となるように規格化した。

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。

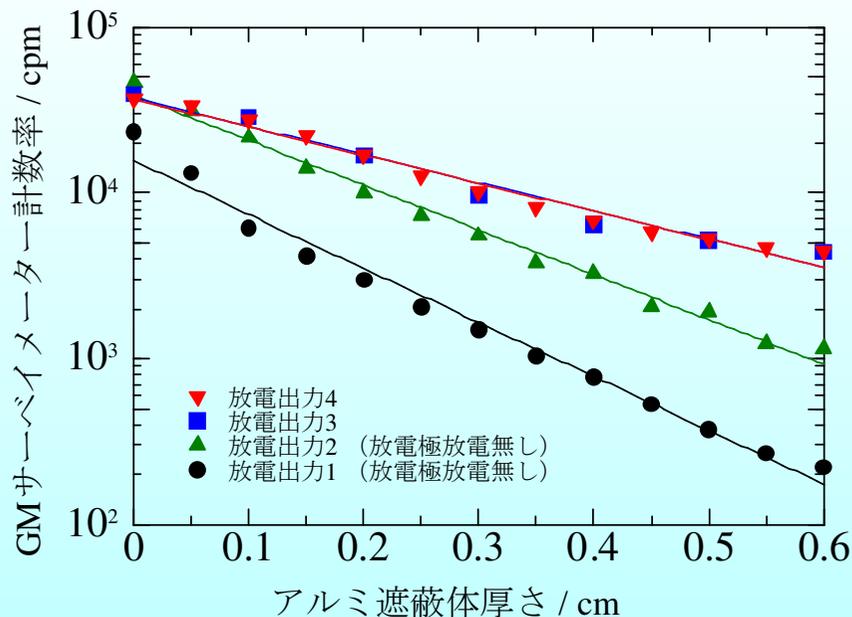
GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価

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。



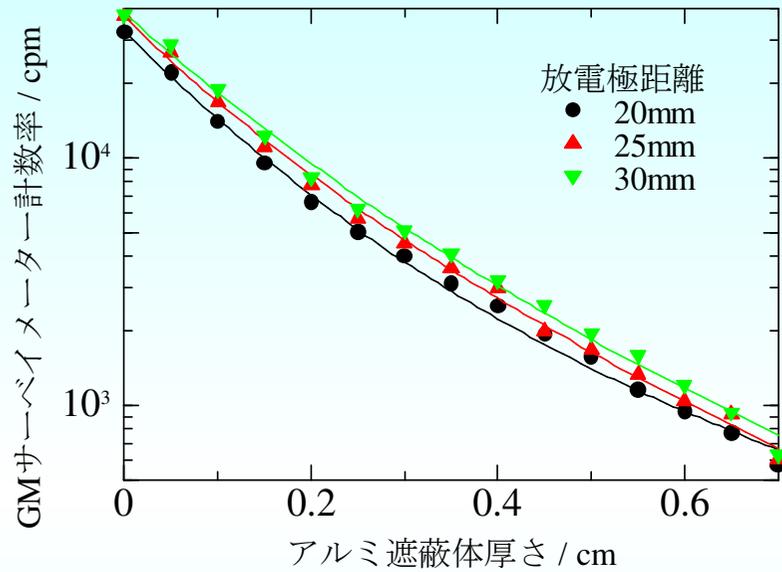
X線エネルギー (keV)	アルミ中の 線減衰係数 μ (cm^{-1})
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

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。

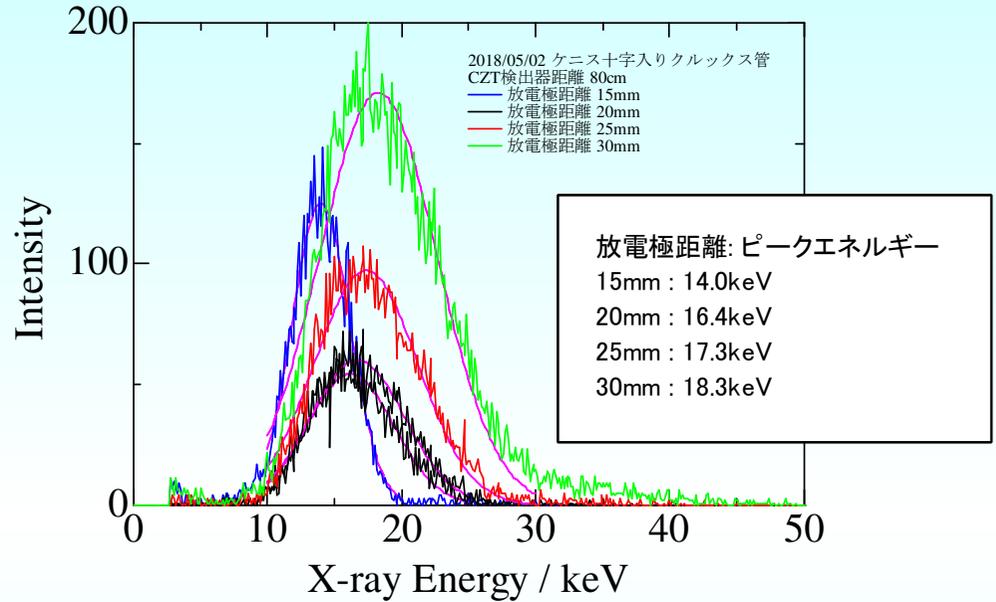


放電出力 (目盛)	線減衰係数 (cm^{-1})
1	7.50
2	6.05
3	3.92
4	3.89

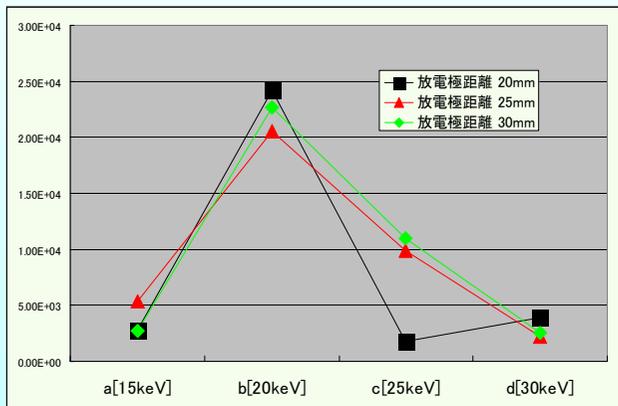
放出エネルギーの不安定性



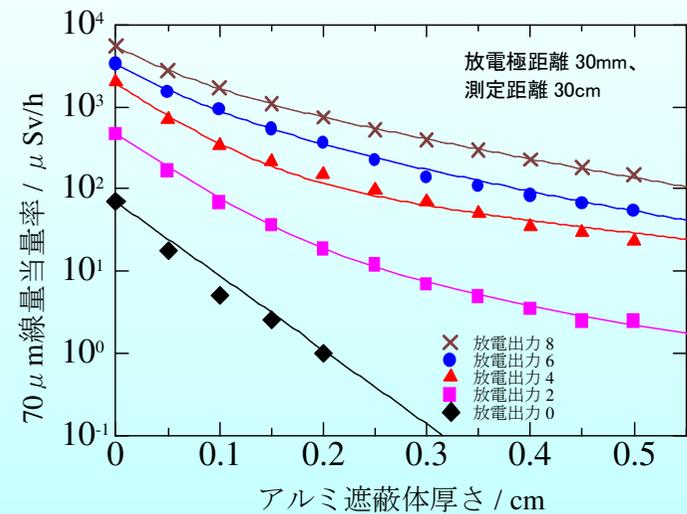
2018/4/27 GM サーベイメーターによる線減衰係数評価実験



2018/05/02 CdTe 検出器によるスペクトル評価

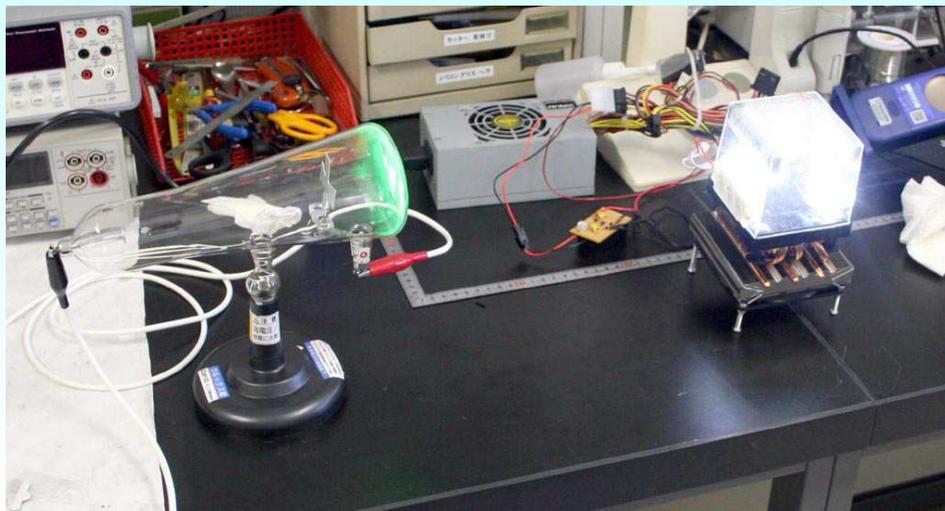


15keV, 20keV, 25keV, 30keV の4成分でフィッティングを行った際のフィッティングパラメーター変化

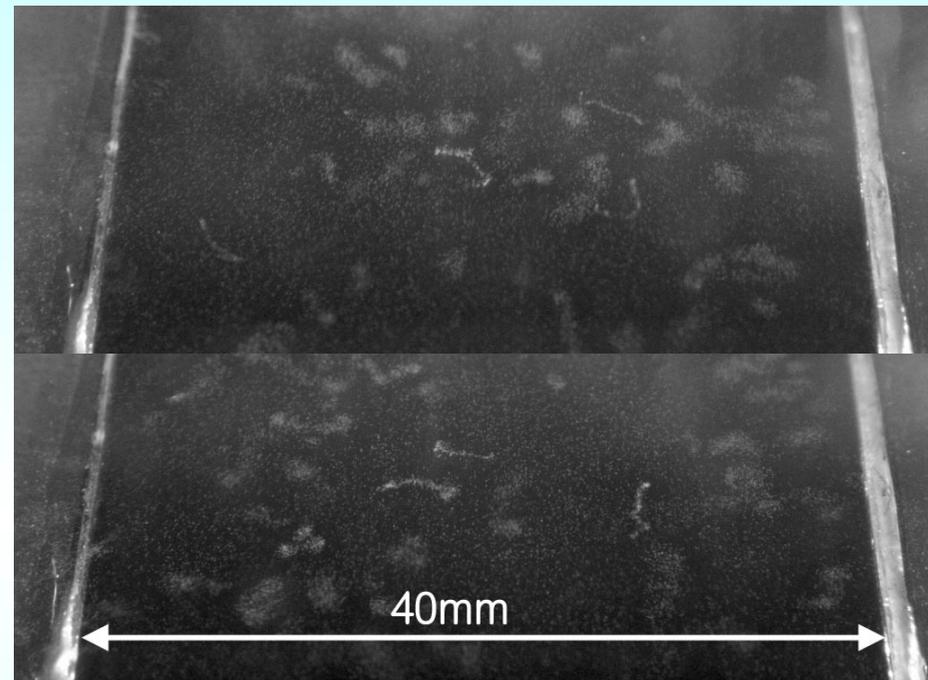


2018/06/01 電離箱による線減衰係数評価実験

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**

「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。