

2018/07/06 アイソトープ 放射線研究発表会

@ 東大弥生講堂、講演番号 3a-II-04

学校教育現場における 低エネルギーX線の検出



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？

「クルックス管などの真空放電の観察から電子の存在を理解させ」という内容は、完全にクルックス管を用いた実験を前提としている。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。

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

中高の教育現場には、
買い換える資金がない！

株式会社ホリゾンからは 5kV駆動のクルックス管が 22,000円、電源も18,000円で発売されている。

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

何とかしてクルックス管からのX線放出をコントロールしたい。

→ 条件を変えたときのX線放出状況の正確な評価が不可欠

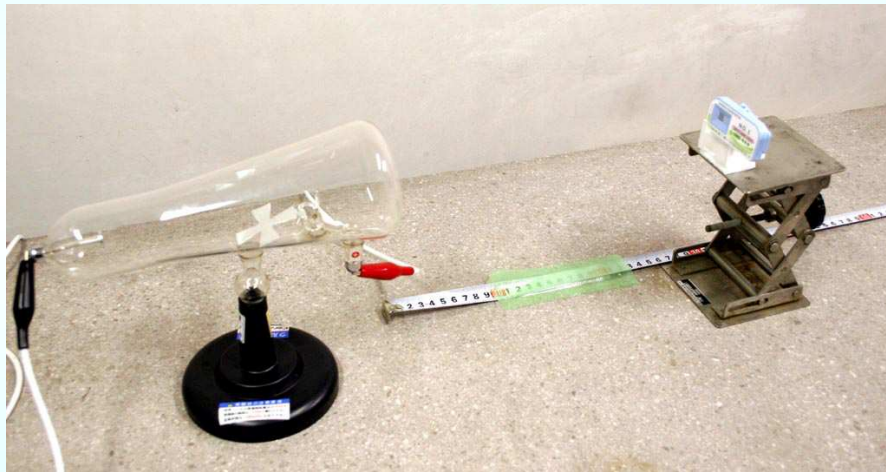
様々な測定装置による測定結果

| | 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 | 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 |

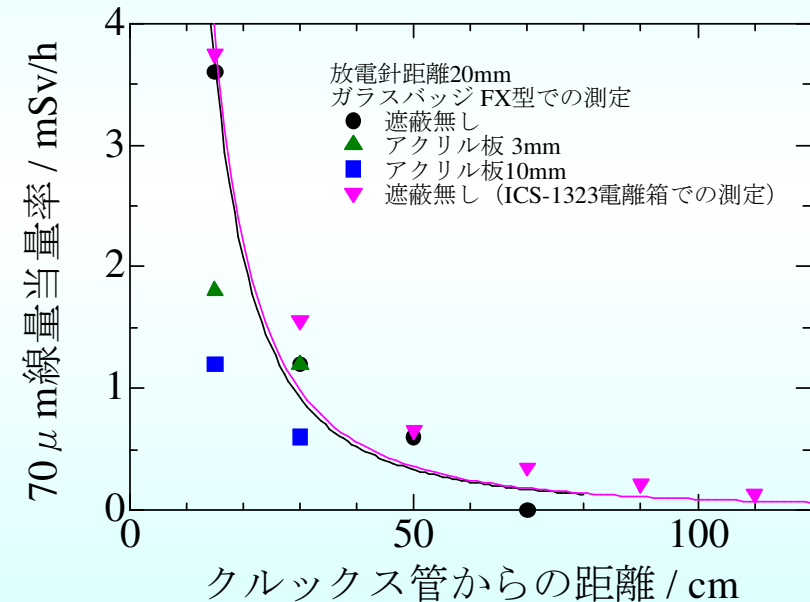
一般向けに出回っている簡易サーベイメーターはもちろん、空間線量測定で信頼されている TCS-172 などでもほぼ全く測定できない。

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)。

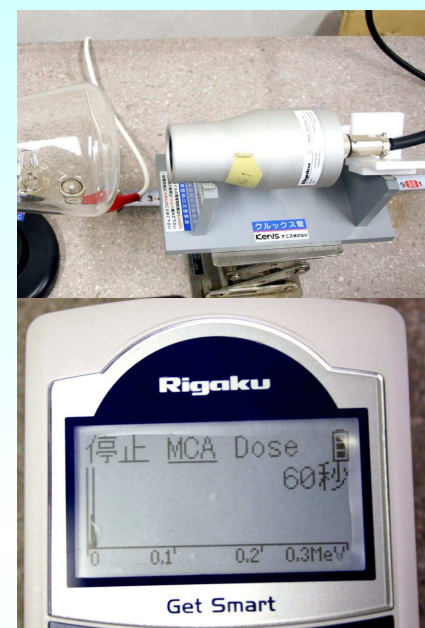
低エネルギー用NaIシンチレーターでの測定



富士電機 NHC6
φ 12.7 × 12.7mm NaI シンチレーター
測定範囲 X線 8 ~ 300keV (~60 μSv/h),
γ線 50 ~ 1500keV (~600 μSv/h)



Rigaku Get Smart XU
NaI シンチレーター
測定範囲 5 ~ 300keV (~10 μSv/h)



通常の NaIシンチレーションサーベイメーター TCS-172 だけでなく、
低エネルギー測定が可能な新製品でも正常な評価が出来ない。

時間的に一様な放射線場ではなく、パルス場であることが原因

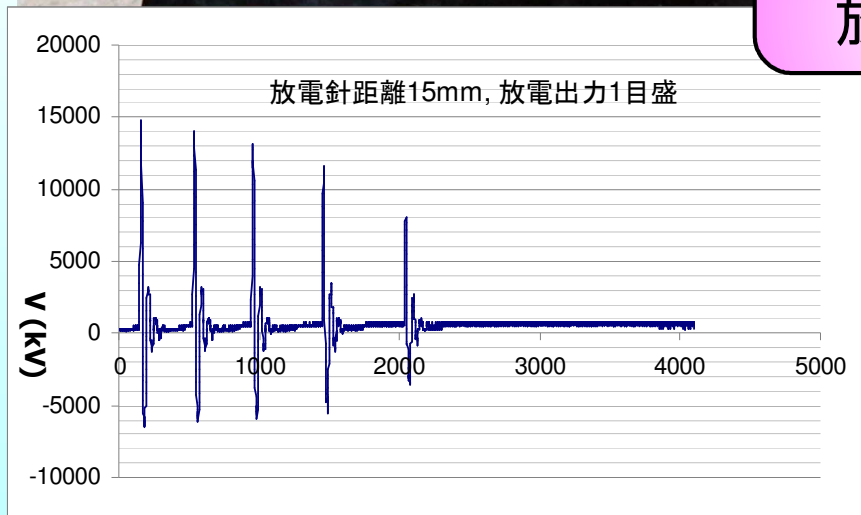
誘導コイルを用いた高圧印加について



放電極距離

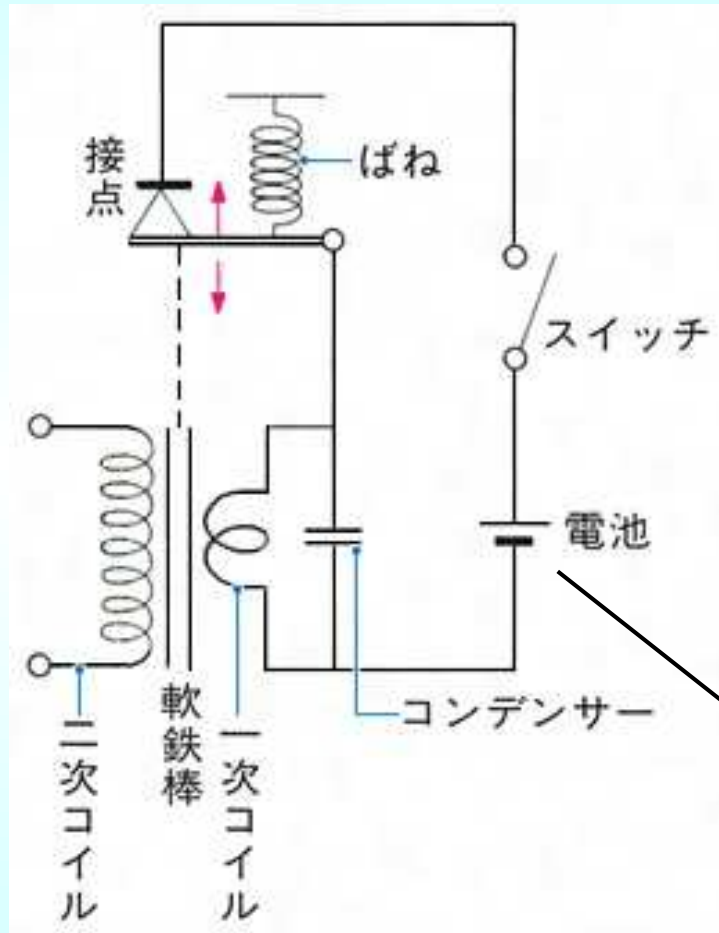
放電出力

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)。

誘導コイルを用いた高電圧生成について

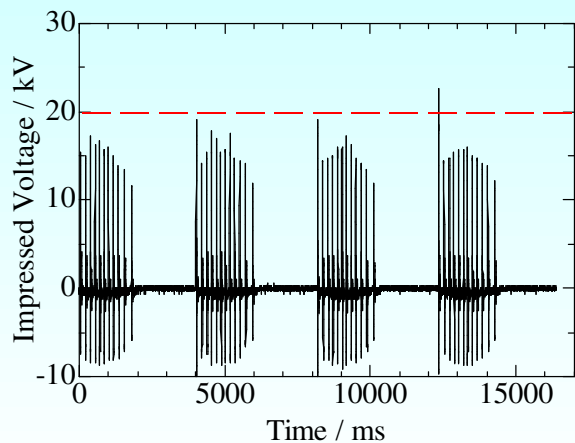


誘導コイル(Induction Coil)は、極端に巻き線の数の異なるトランス(実際には同軸上に巻かれている)の一次側の電流を、ベルやブザーなどと同様の機械的な接点を含めた回路で連続的にON/OFFすることでパルス状に変化させて、二次側に大きな電圧のパルスを生成する。

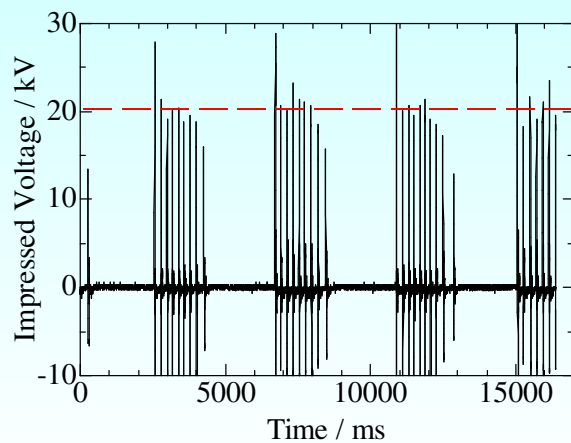
プラス側だけでなくマイナス側にもパルスが出るが、接点切断時の一番最初のプラス側のパルスの方が大きい。

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。

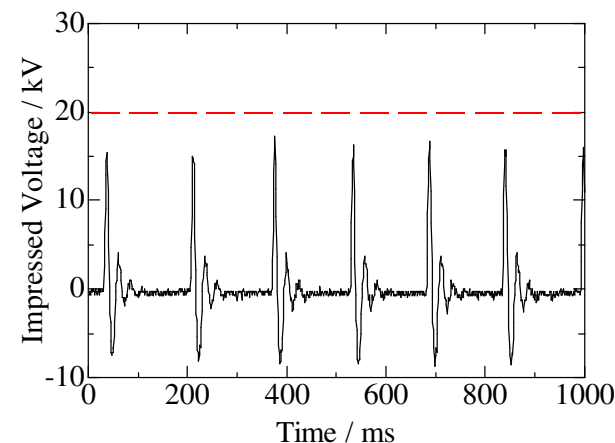
誘導コイル設定による出力パルスの変化



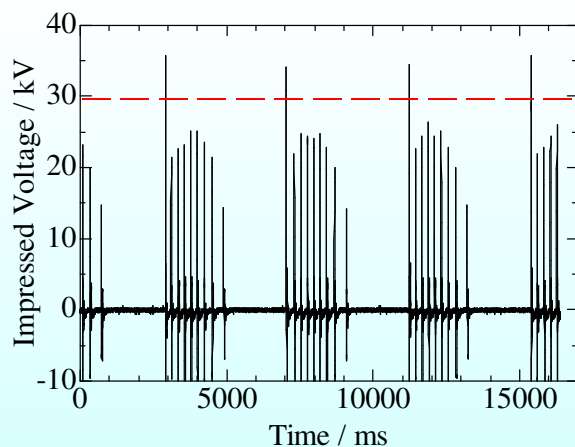
d=20mm, PW0, 40 μ A, 120 μ Sv/h



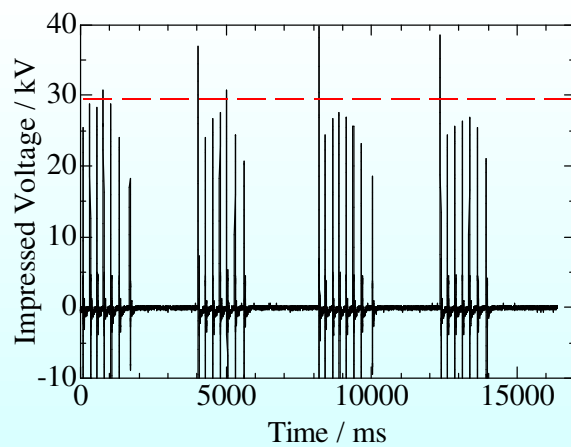
d=20mm, PW4, 80 μ A, 1.25mSv/h



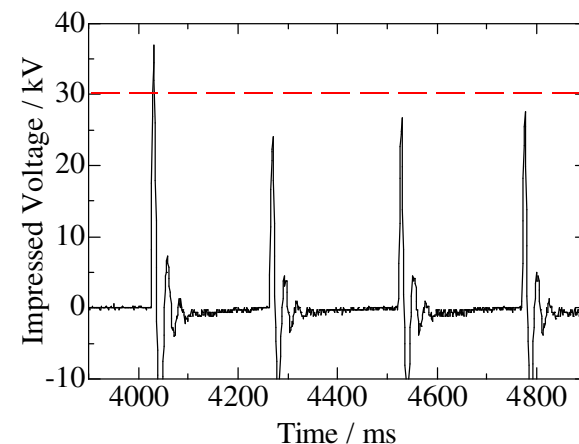
d=20mm, PW0 (拡大)



d=30mm, PW4, 80 μ A, 1.56mSv/h



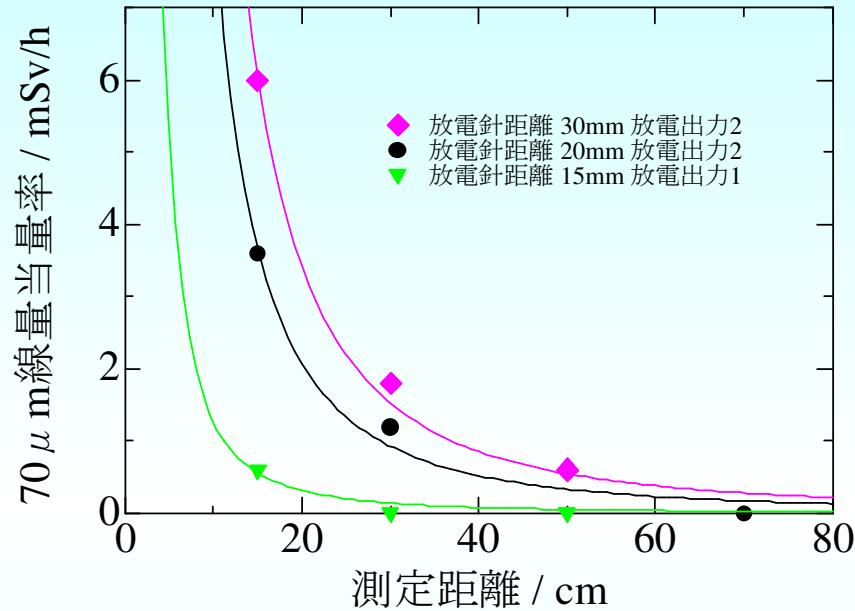
d=30mm, PW7, 96 μ A, 3.50mSv/h



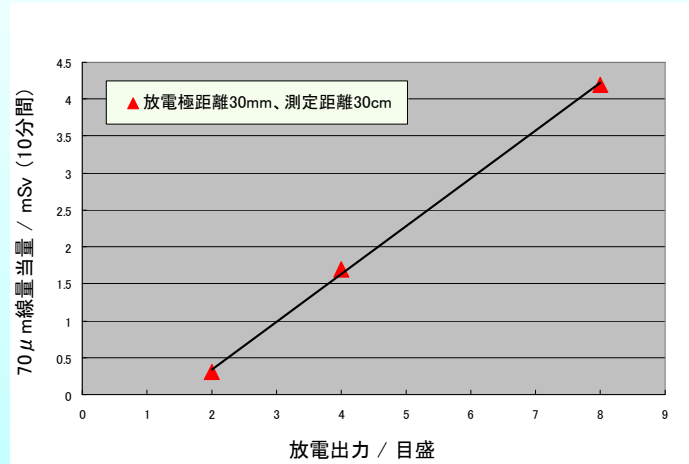
d=30mm, PW7 (拡大)

放電出力上昇と共に電圧の上昇が見られたが、PW4以降余り明確ではなかった。逆にパルスの数は低下していった。

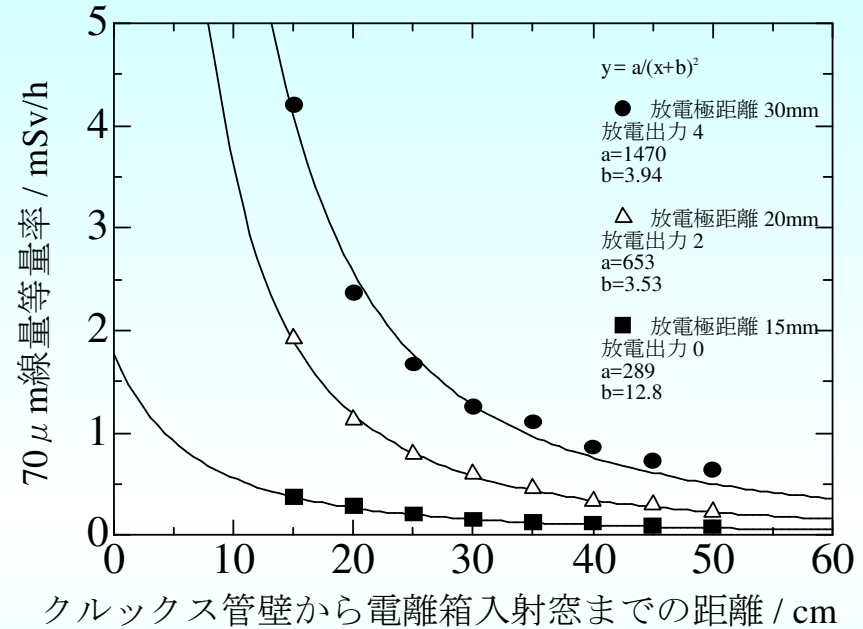
誘導コイル設定による線量変化



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



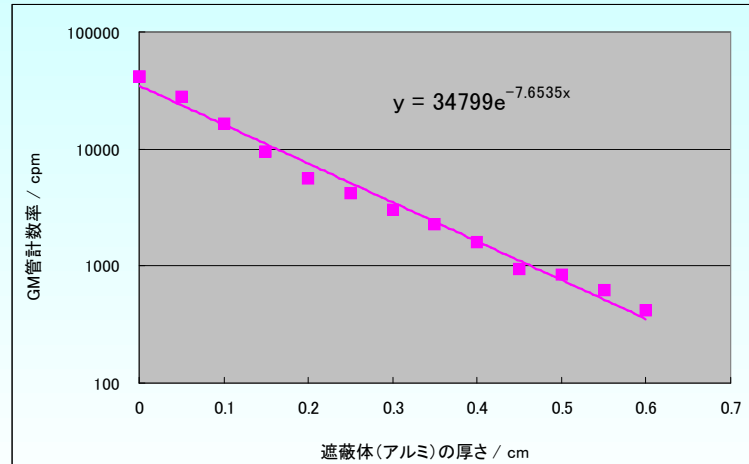
文京区立文林中学校から借用したスリット入りクルックス管での、
放電極距離依存性評価(電離箱による測定)

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



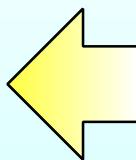
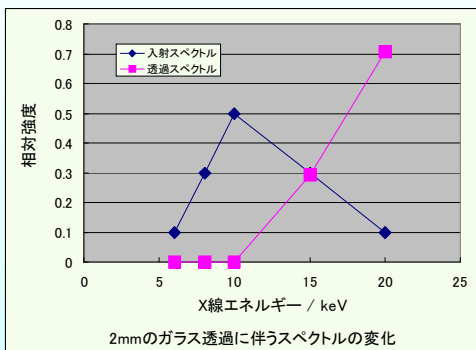
| X線エネルギー (keV) | アルミ中の線減衰係数 μ (cm^{-1}) |
|---------------|---------------------------------------|
| 10 | 69.5 |
| 15 | 20.8 |
| 20 | 8.9 |
| 30 | 2.8 |

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。



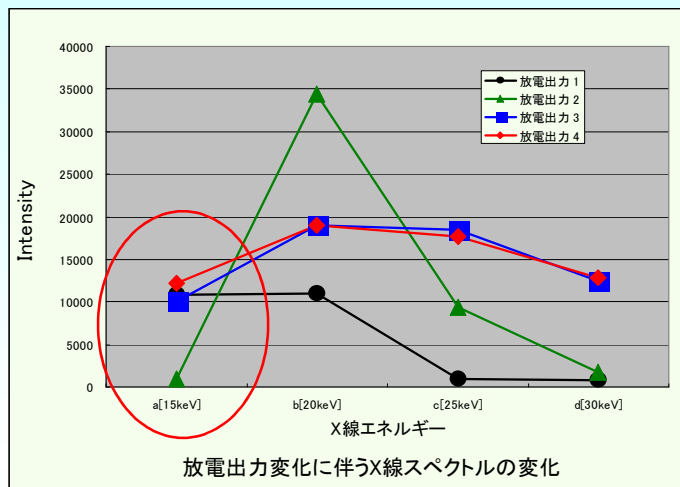
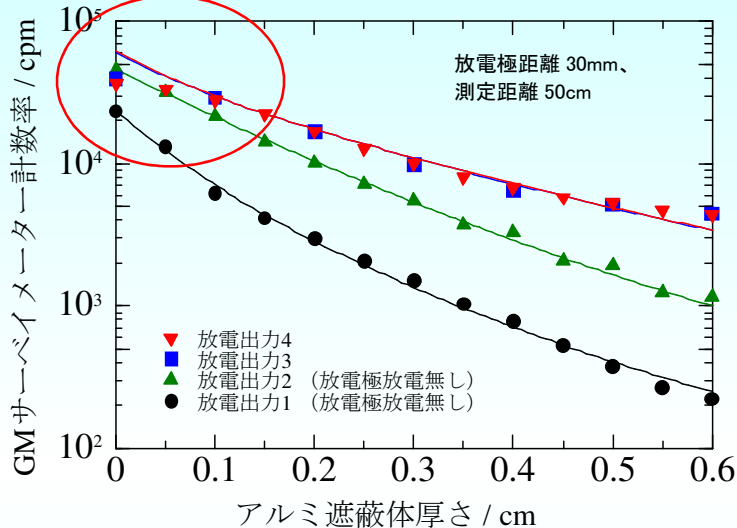
ガラス管を透過する前のX線のエネルギースペクトル(最大エネルギー20keVでその半分の位置にピークを持つ)を適当に決め、2mmのガラスで遮蔽された後の強度を透過率から求めた後、全体の強度が1となるように規格化した。

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。

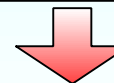
より高エネルギー側では透過率の変化は緩やかとなるため元のスペクトルや、蛍光体の特性X線のエネルギーに左右されると考えられる。

GMサーベイメーターの数え落としの補正

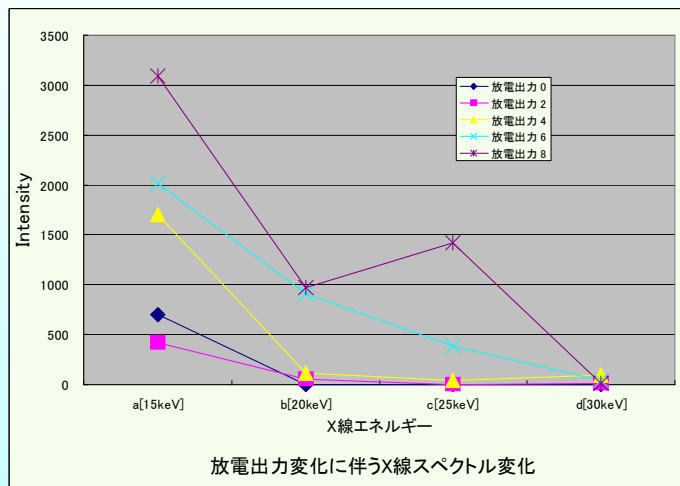
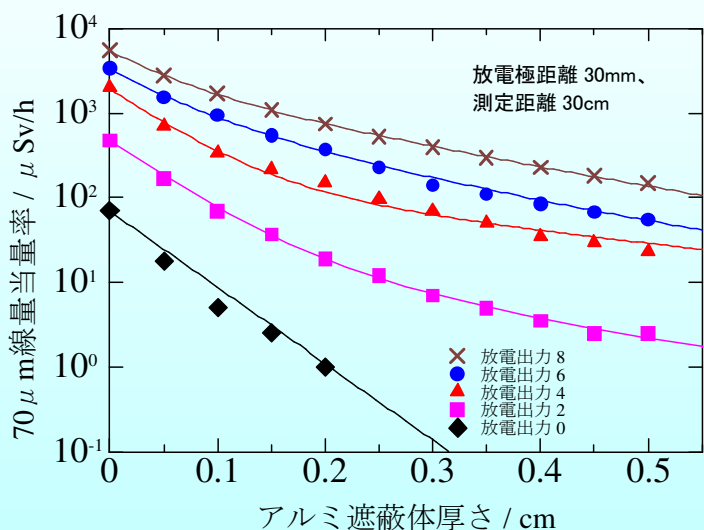
$y = a \cdot \exp(-20.8x) + b \cdot \exp(-8.85x) + c \cdot \exp(-4.9x) + d \cdot \exp(-2.8x)$ の4成分でフィッティング
 15keV 20keV 25keV 30keV



計数率が高いところで飽和しかかかっており、低エネルギー成分が低く評価されてしまっている。
 (一応不感時間100 μ sで、数え落としの補正は行っているがほとんど変わらない)



GMサーベイメーター(Ranger)による線減衰係数評価実験



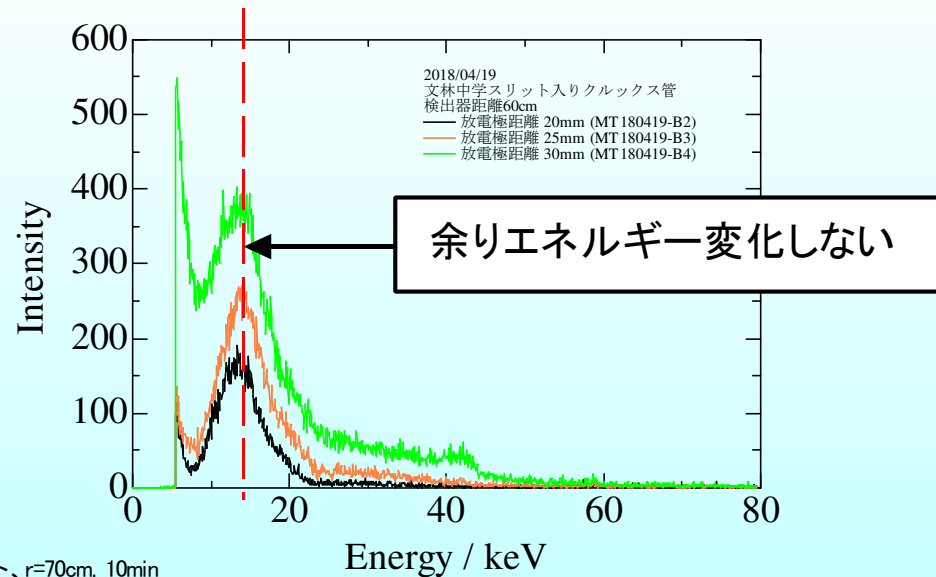
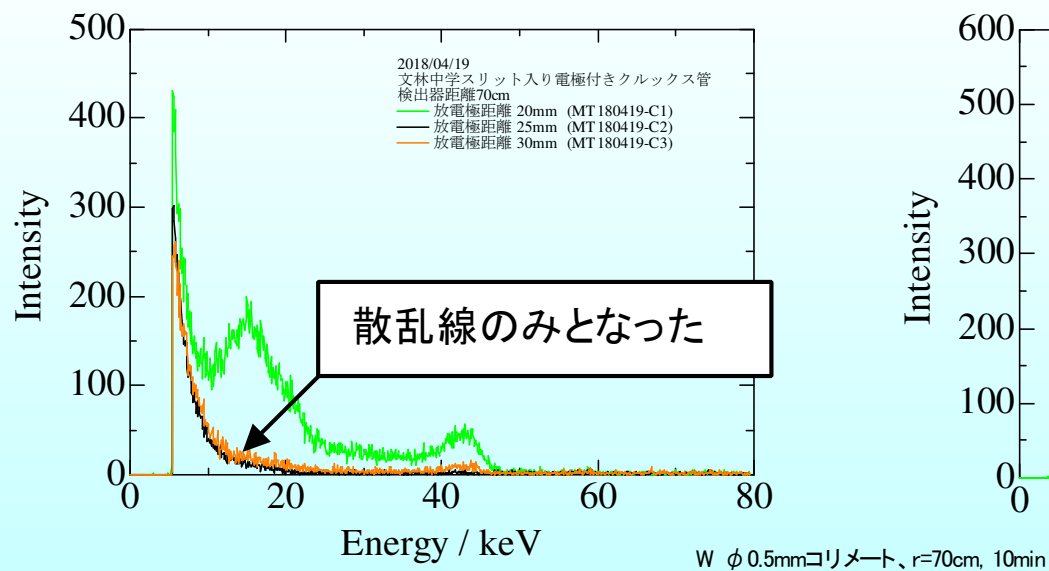
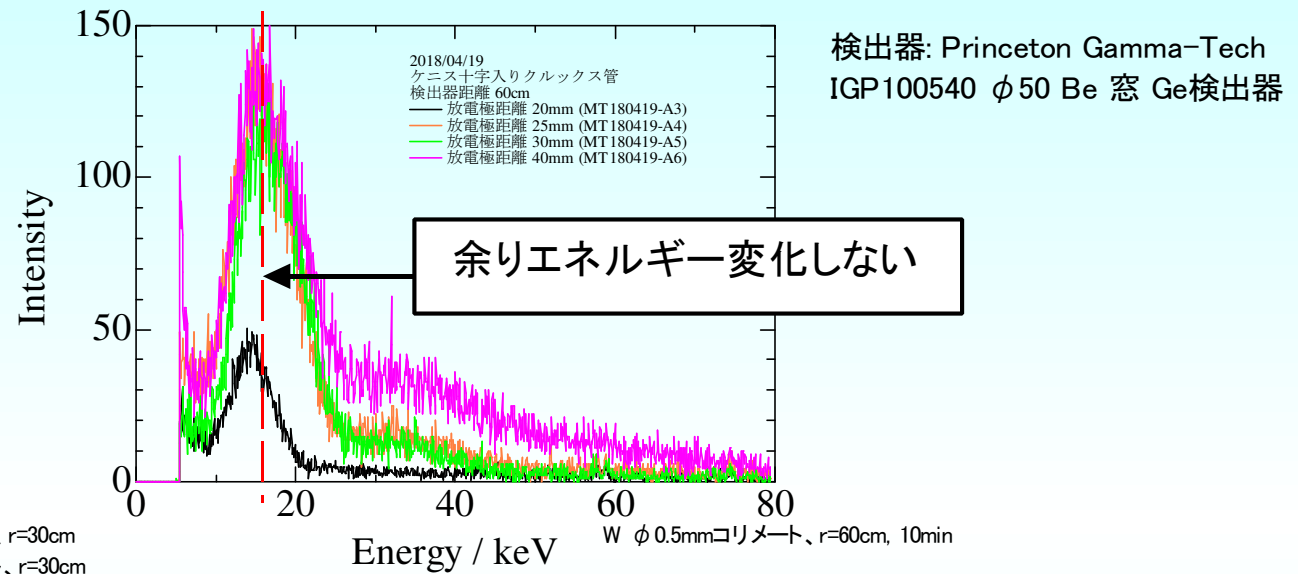
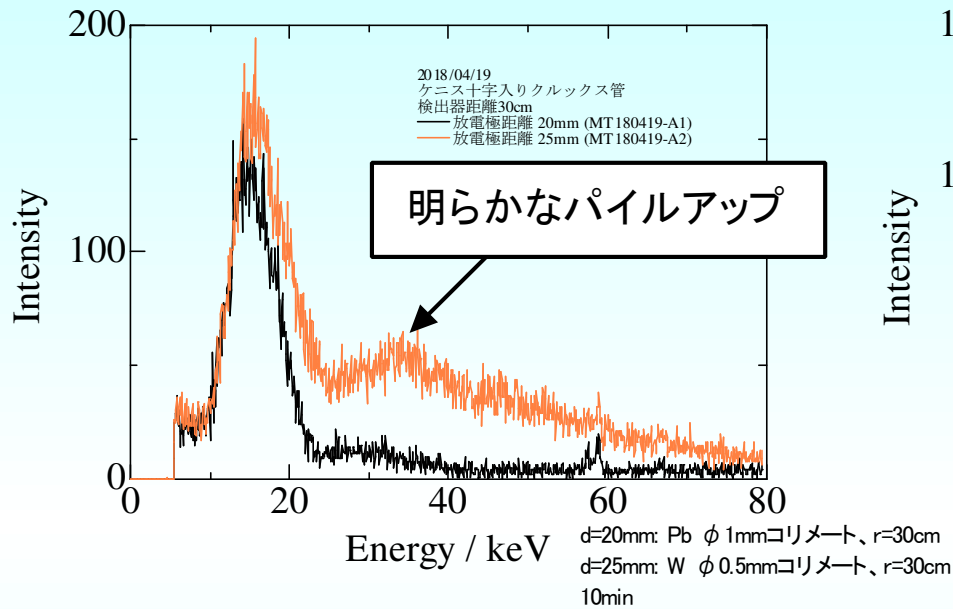
パルス場での測定であるため、実際にX線が放出されている時間に対する計数率に補正したうえで、数え落としの補正を行う必要がある。



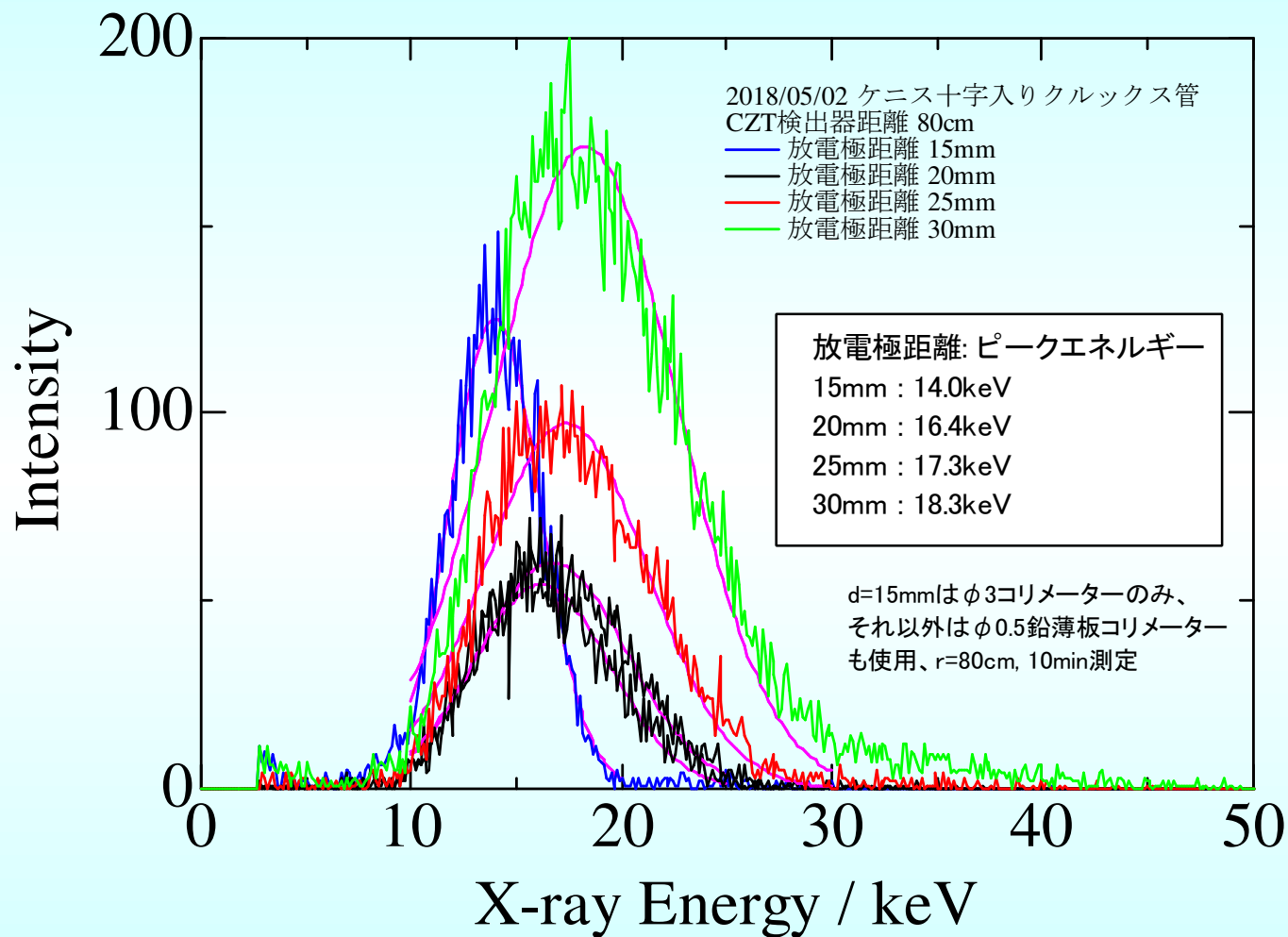
電離箱(ICS-1323)による線減衰係数評価実験

不感時間100 μ sの場合理論上の上限は、 10^4 cps = 600kcpm であるが、実時間の4%程度の時間しかX線が放出されていないとして計数率の補正を行うと800kcpm程度になってしまい、数え落としの補正が不可能となる。

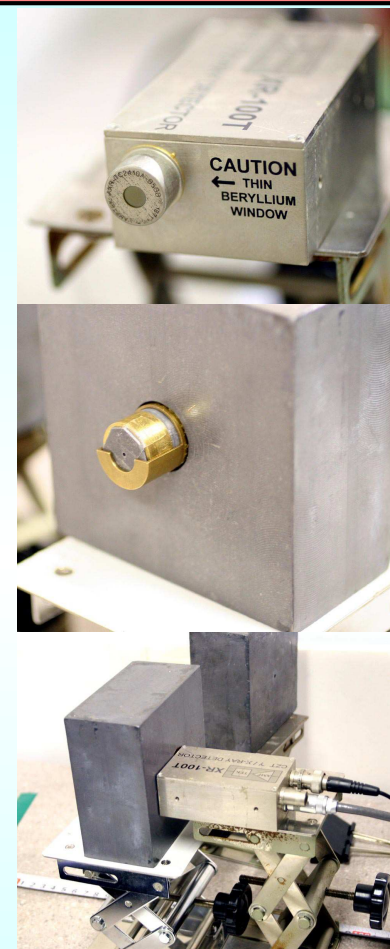
Ge半導体検出器によるスペクトル評価



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、ペルチエ冷却



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

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。

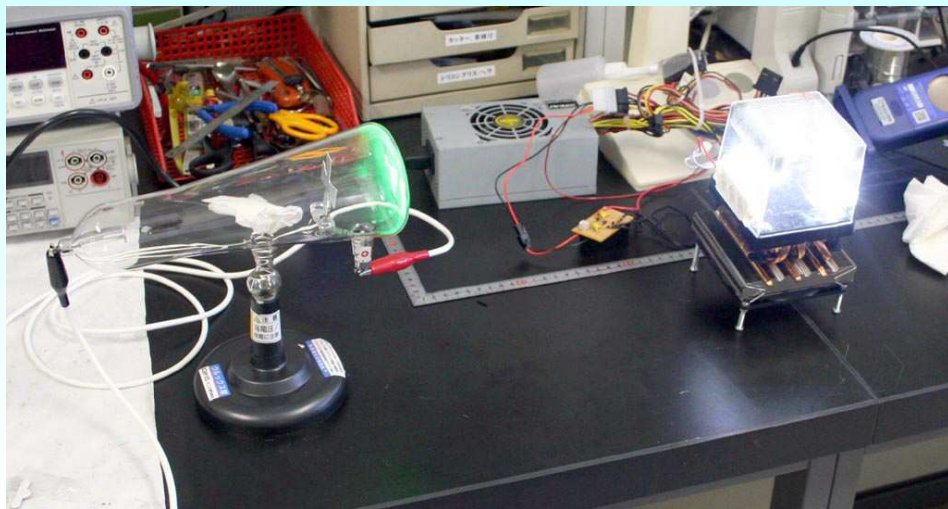
電源装置（誘導コイル）が不安定である

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？

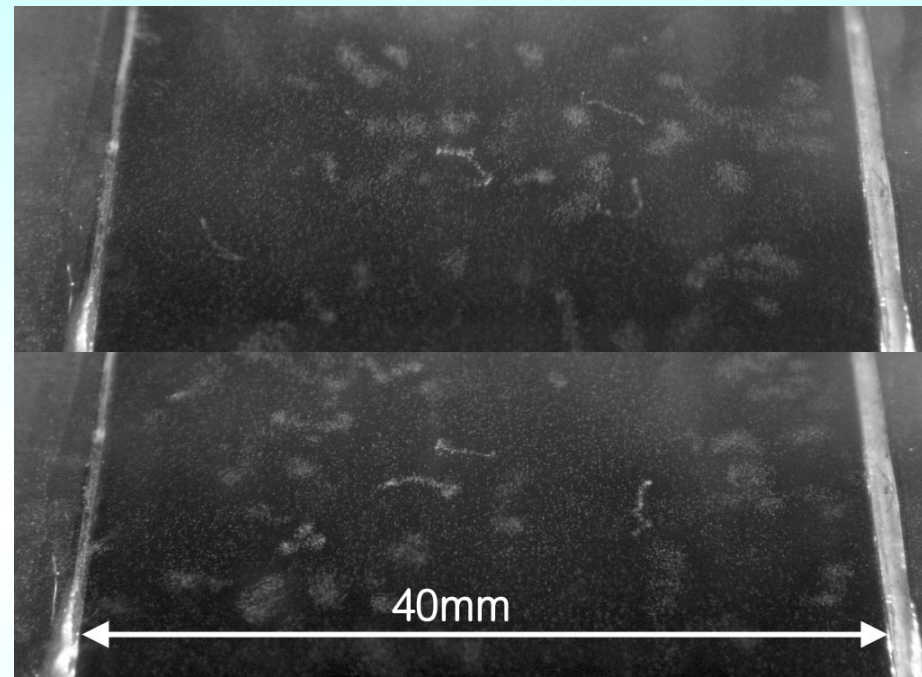
パルス状に放出されている

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。

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。