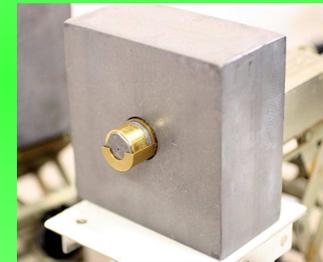


2018/09/05 日本原子力学会学会 秋の大会

@ 岡山大学 講演番号 1A15

# クルックス管からの 低エネルギーX線スペクトル評価



○秋吉 優史<sup>1</sup>, 谷口 良一<sup>1</sup>, 宮丸 広幸<sup>1</sup>, 松浦 寛人<sup>1</sup>, Do Duy Khiem<sup>1</sup>, 安藤 太一<sup>1</sup>,  
神野 郁夫<sup>2</sup>, 濱口 拓<sup>2</sup>, 掛布 智久<sup>3</sup>, 谷口 和史<sup>4</sup>

1) 大阪府立大学 2) 京大原子核 3) 日本科学技術振興財団 4) 千代田テクノル

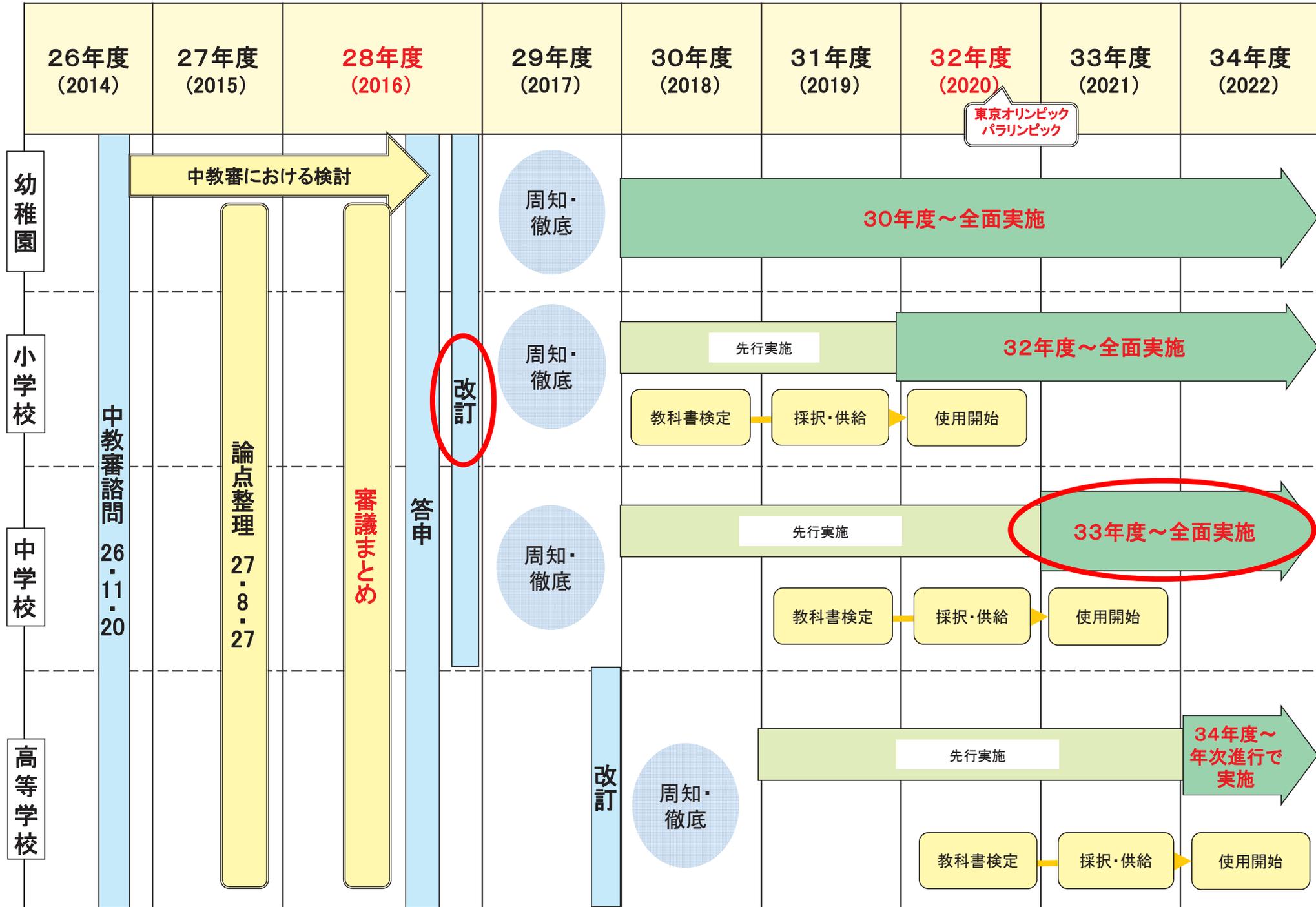
Special Thanks: クルックス管プロジェクトの皆様

秋吉 優史: [akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp](mailto: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）



東京オリンピック  
パラリンピック

改訂

33年度～全面实施

34年度～  
年次進行で  
実施

# 現行の中学理科教科書に於けるクルックス管の取扱

## 教科書

5社全てでクルックス管に関する記述有り

- ・啓林館、東京書籍: レントゲンによるX線の発見など、放射線に関する記述がある。
- ・大日本図書、学校図書: クルックス管と併せた放射線に関する記述はないが、3年でクルックス管からX線の説明、放射線の発見の歴史などもあり。
- ・教育出版: 放射線の記述はない。3年での記載は未確認

## 指導書

- ・啓林館: 放射線に関する注意あり。2012年版では、放電管から1mも離れれば漏洩X線の影響はほとんどないとしているが、2016年版では「X線の影響に配慮し、**演示は行わず**、教科書の写真や図のみでの説明にとどめる」と保守的。
- ・東京書籍: 放射線に関する注意あり。誘導コイルの設定(電極間隔は4cm以下)、1m以上はなれた場所から観察をする、観察時間は10秒以下にするなど、**具体的な運用方針が記載**されている。
- ・大日本図書: 放射線に関する注意あり。生徒を1m以内に近づけない。
- ・学校図書: 放射線に関する記述なし(誘導コイルの説明は非常に詳細)
- ・教育出版: 未確認

# 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

# 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。放電極での放電電圧が天候で変化したり、メカニカルな発振回路が温度などで変化すると考えられる。

## パルス状に放出されている

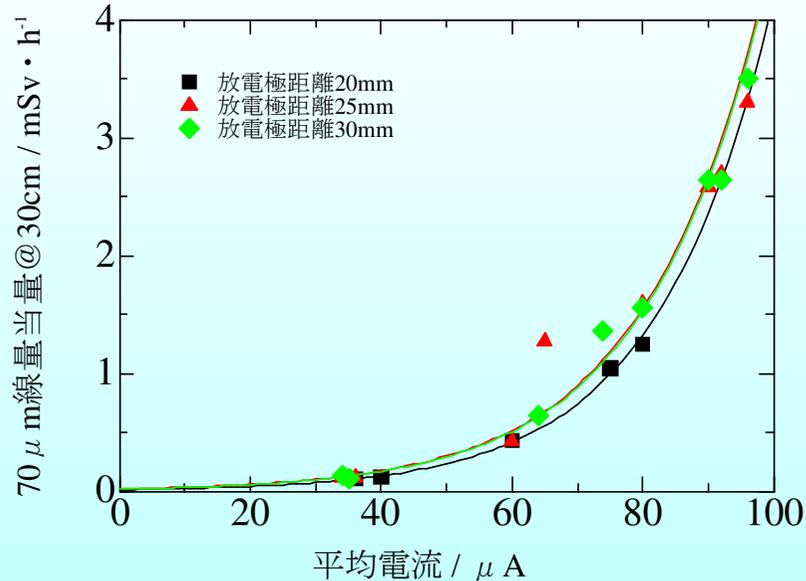
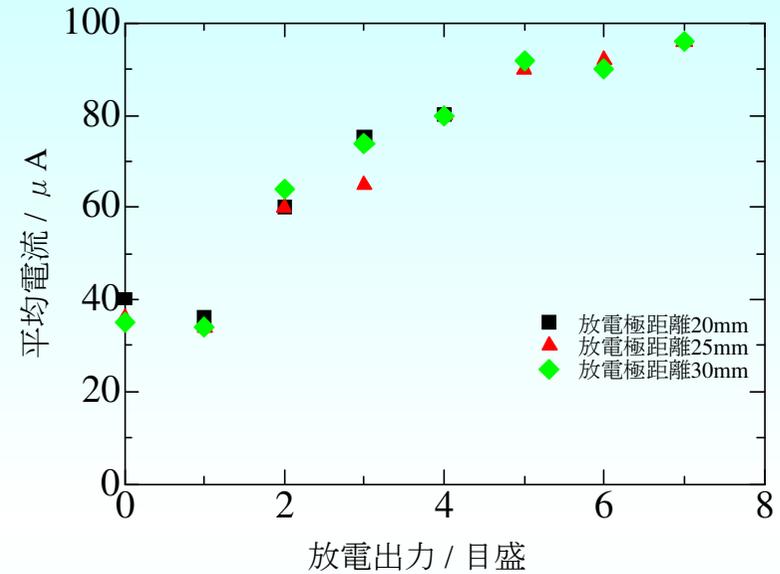
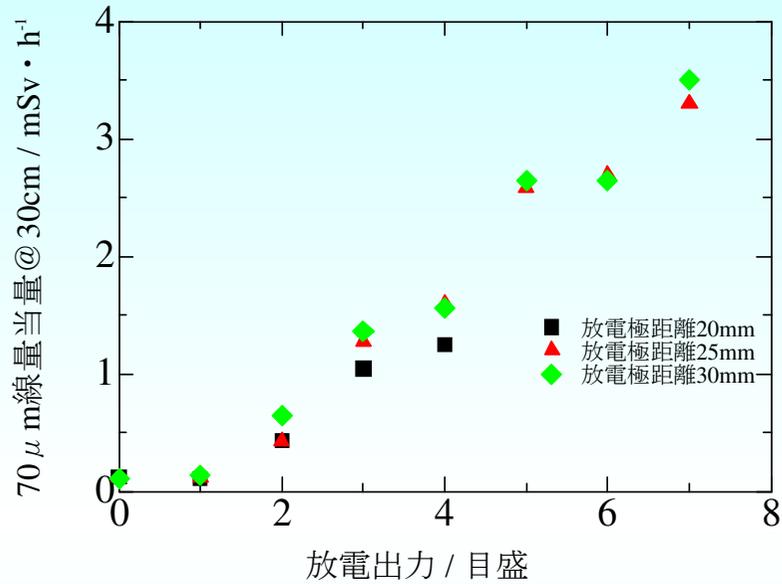
Be窓を用いた低エネルギーX線用 NaI シンチレーターなども販売されているが、パルス場であるためパイルアップしてしまい非常に小さい値しか示さない。Be窓のGe検出器や、CdTe検出器での測定も、非常に小さなコリメーターを使いカウントレートを落とす必要がある。

# 様々な測定装置による測定結果

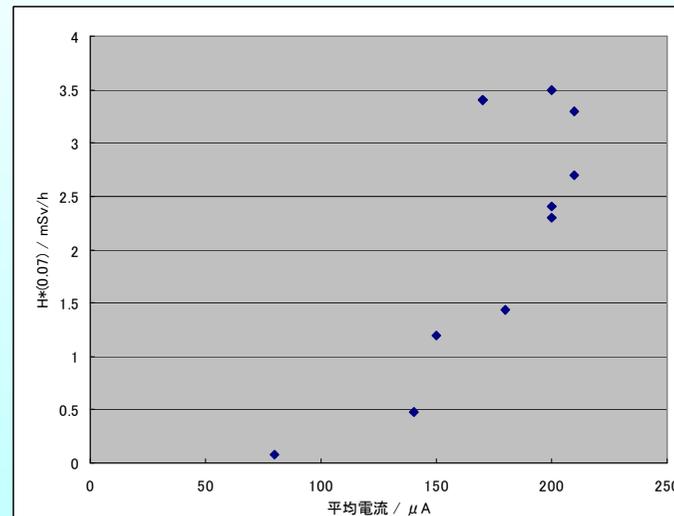
	電離箱		蛍光ガラス線量計		GM管
	日立 ICS-1323		千代田テクノル ガラスバッジ FX型		Ranger
距離 r	H*(0.07)	H*(10)	H*(0.07)	H*(10)	1min scaler
cm	mSv/h	mSv/h	mSv/h	mSv/h	kcpm
15	8.15	5.3	4.62	1.62	33.89
30	1.91	1.28	1.26	0.48	31.68
50	0.64	0.465	0.48	0	27.32
	NaI シンチレーター		プラスチック シンチレーター	CsI シンチレーター	半導体検出器
	富士電機 NHC6	アロカ TCS-172	Kind-mini	エアーカウンターEX	エアーカウンターS
距離 r	Be窓	汎用	カバー無し	カバー無し	
cm	$\mu$ Sv/h	$\mu$ Sv/h	$\mu$ Sv/h	$\mu$ Sv/h	$\mu$ 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。

# 誘導コイルの設定による線量変化

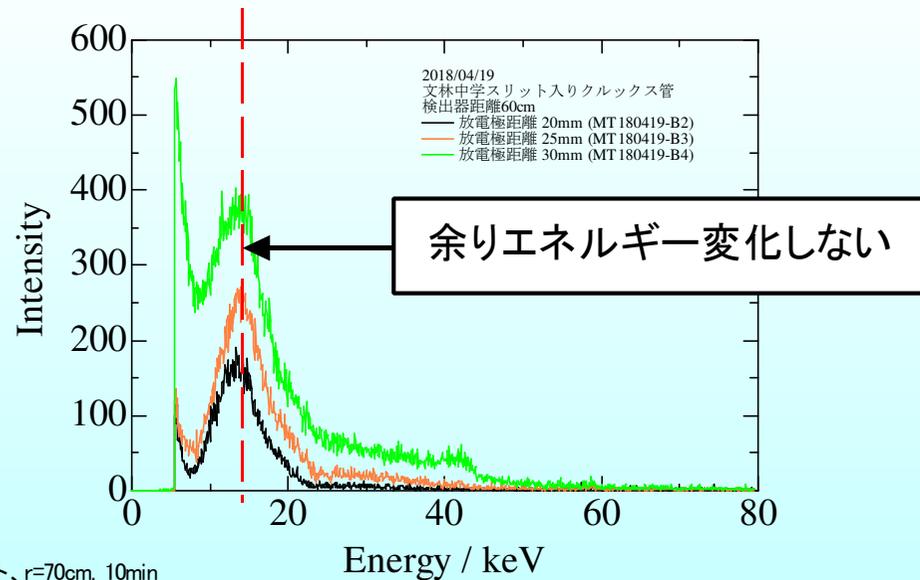
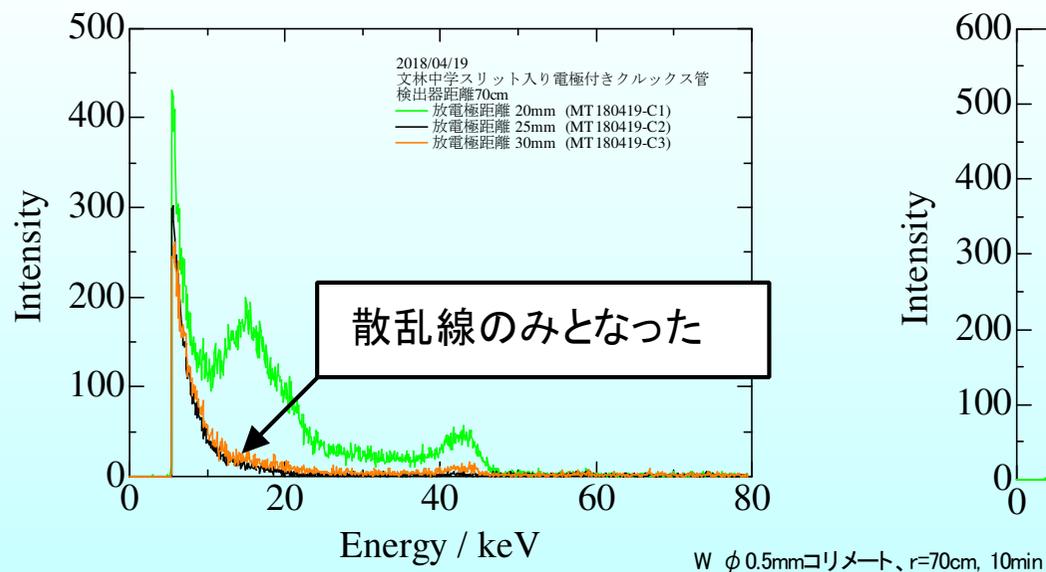
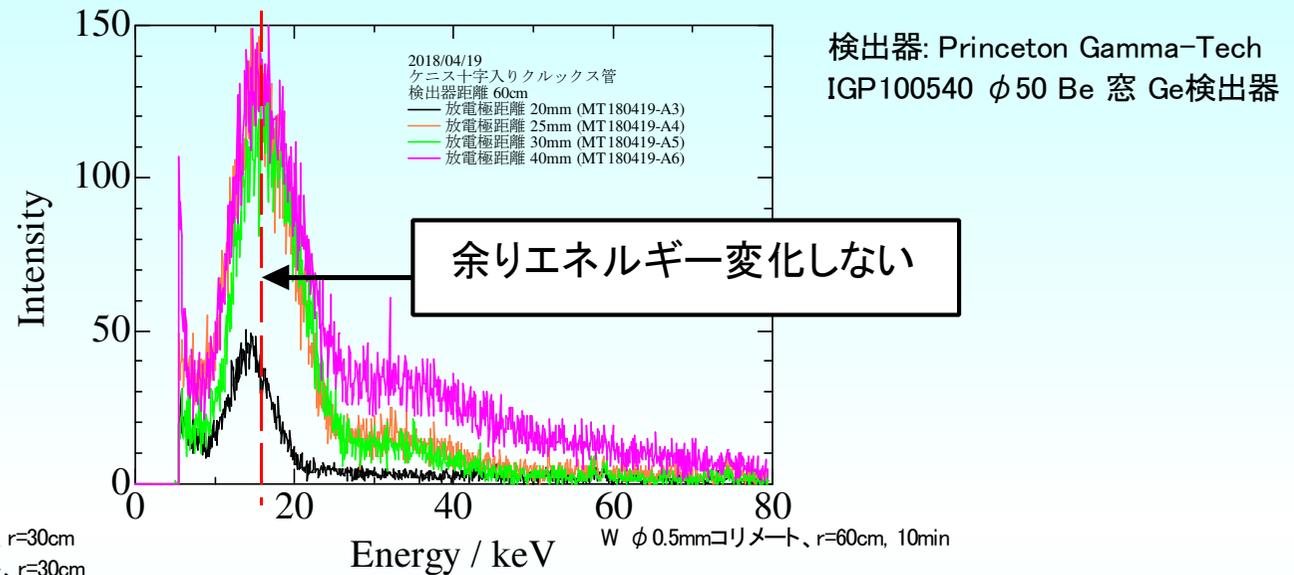
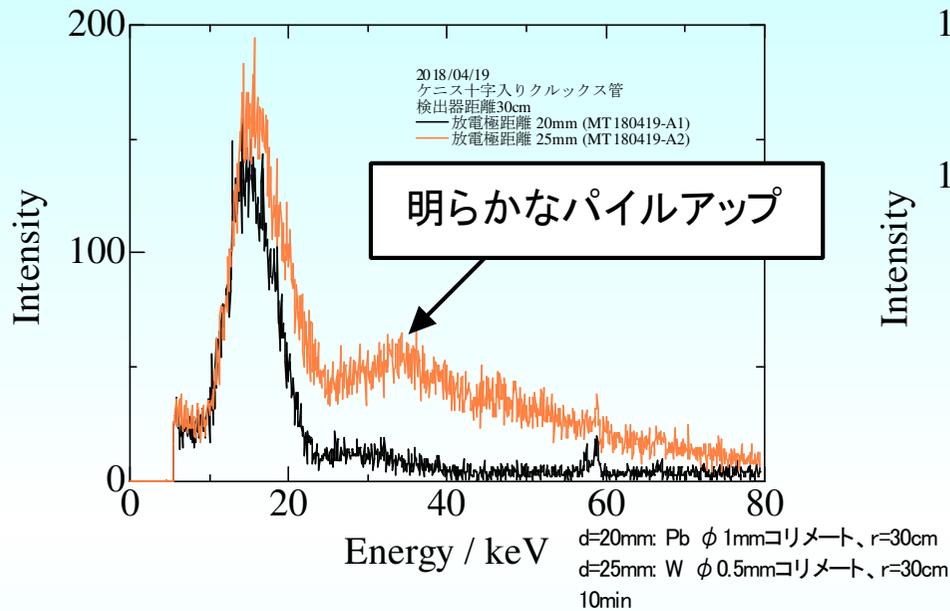


別の日に測定した結果  
(放電出力を最大の20まで上げた)

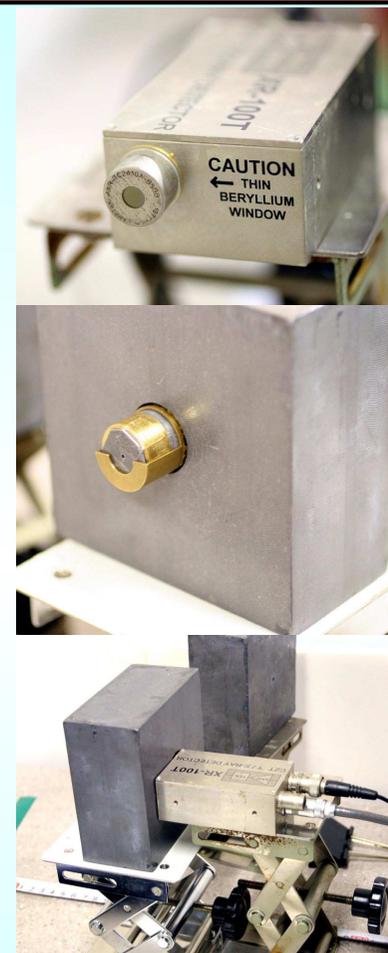
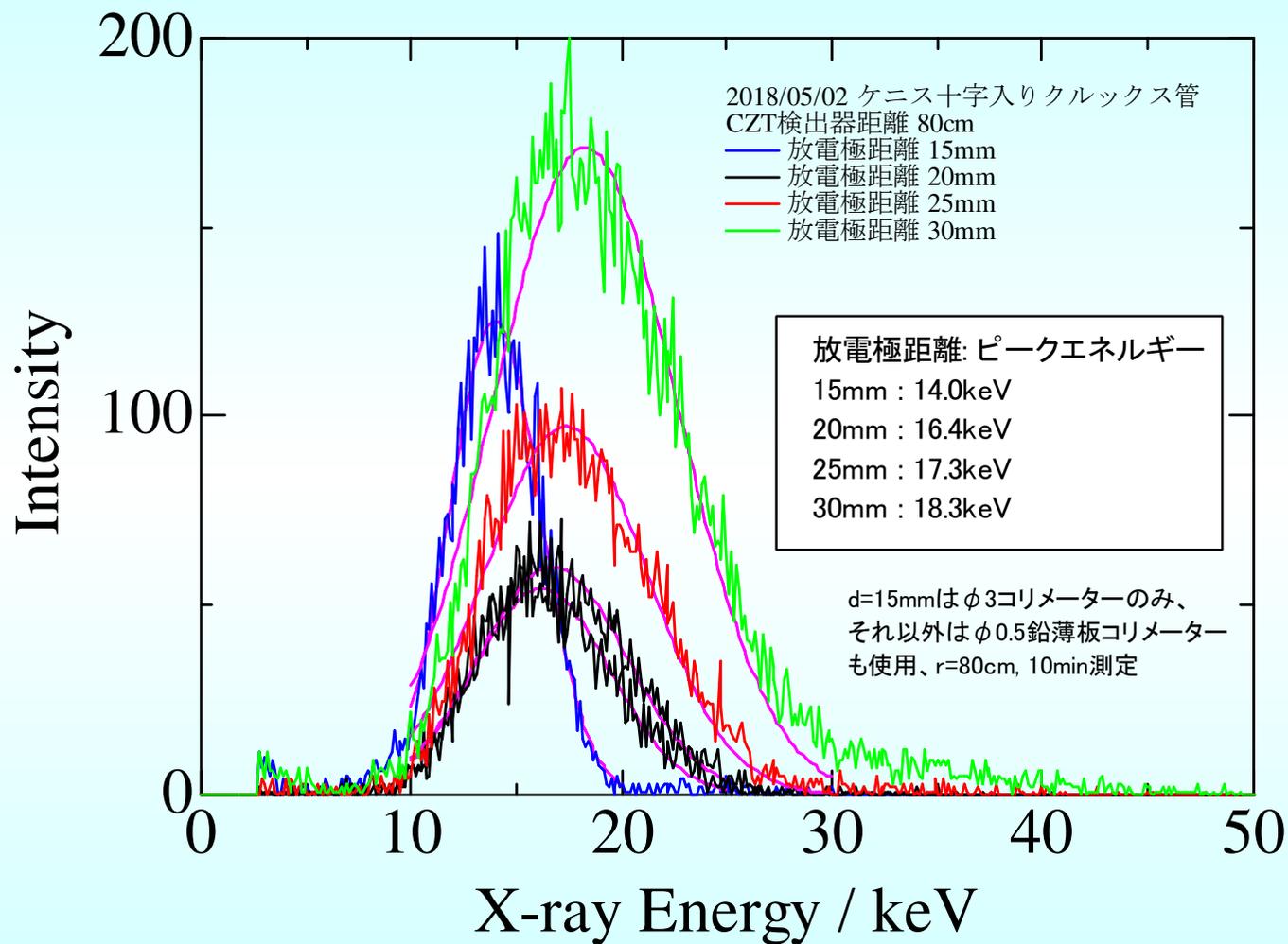


クルックス管のコンダクタンスが変化してしまっている。CTコイルによる電流の時間変化を測定し、電圧測定結果と併せたコンダクタンスの評価、ビームパワーの評価が必要。誘導コイルの出力限界である一定以上は線量率が上がらないようである。

# 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



Amptek XR-100T-CZT  
CZT(Cd<sub>0.9</sub>Zn<sub>0.1</sub>Te)検出器  
Be窓、ペルチェ冷却

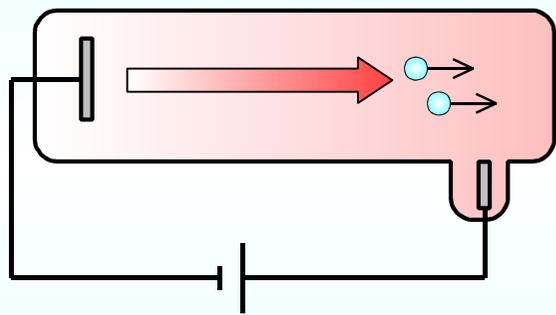


φ3同軸鉛コリメーター  
φ2同軸黄銅コリメーター  
φ1.0鉛薄板コリメーター  
φ0.5鉛薄板コリメーター

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

# クルックス管からのX線の不均一性

正面中心、5cm位置で  
1cm線量当量が 100mSv/h  
あったとしても...



線量計

① 1m 位置では 1/400  
の線量になります

③ 平面的にも周辺の線量は小さくなり  
中心位置で測定した線量計の値よりも  
小さくなります。  
(具体的には現在検証中)

④ 演示時間を短くすることで、  
トータルの被ばく線量は  
時間に比例して減らせます。

⑤ 20keV では 2mmのガラスで  
1/5 程度にまで遮へいできます。  
(アクリルでは1cmで半分)

眼の水晶体への等価線量  
の評価は別途行う必要があ  
ります

② 20keV のX線は体内で1cmで  
半分に減衰して1cm線量当量は  
全身への線量を代表しません。  
(実効線量と5倍程度の差が出ます)

10分の演示で遮蔽無しでも、  
全身への実効線量は $10\mu\text{Sv}$   
にも満たないと考えられます。

# 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

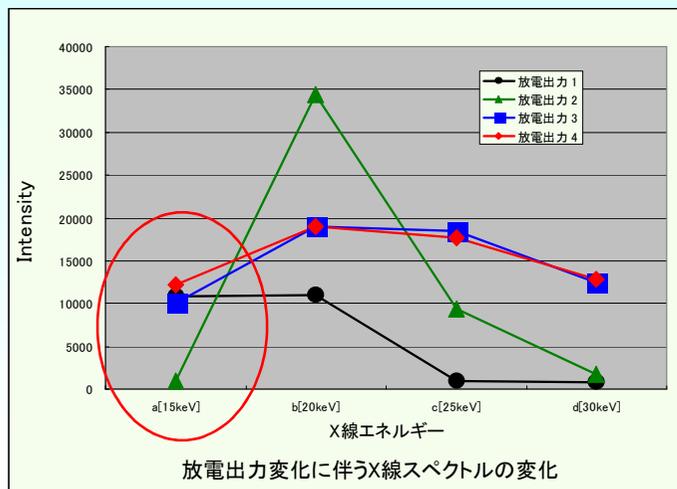
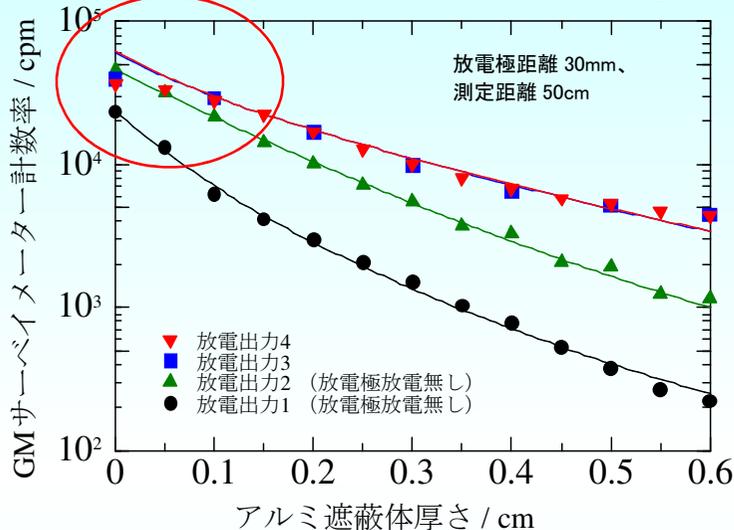
全国の拠点でのシンポジウム、オープンスクール、  
モデル校での授業、教育学部での講義など  
での放射線教育プログラム普及

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

# GMサーベイメーターの数え落としの補正

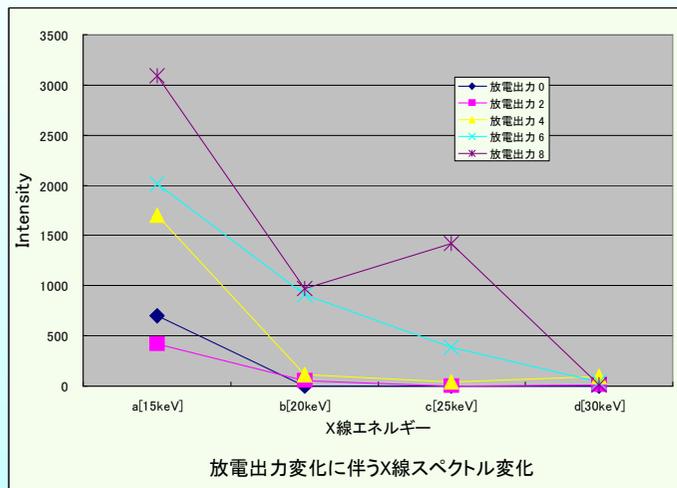
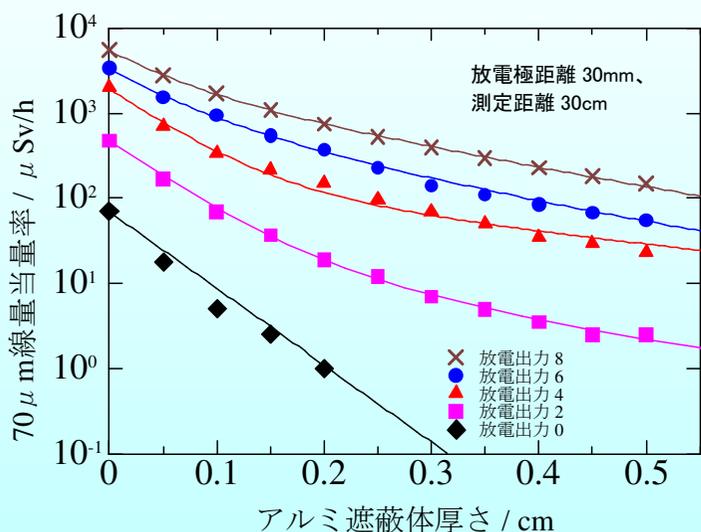
$y = a \cdot \exp(-20.8x) + b \cdot \exp(-8.85x) + c \cdot \exp(-4.9x) + d \cdot \exp(-2.8x)$  の4成分でフィッティング  
 15keV      20keV      25keV      30keV



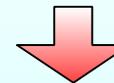
計数率が高いところで飽和しかかかっており、低エネルギー成分が低く評価されてしまっている。  
 (一応不感時間100μsで、数え落としの補正は行っているがほとんど変わらない)



GMサーベイメーター(Ranger)による線減衰係数評価実験



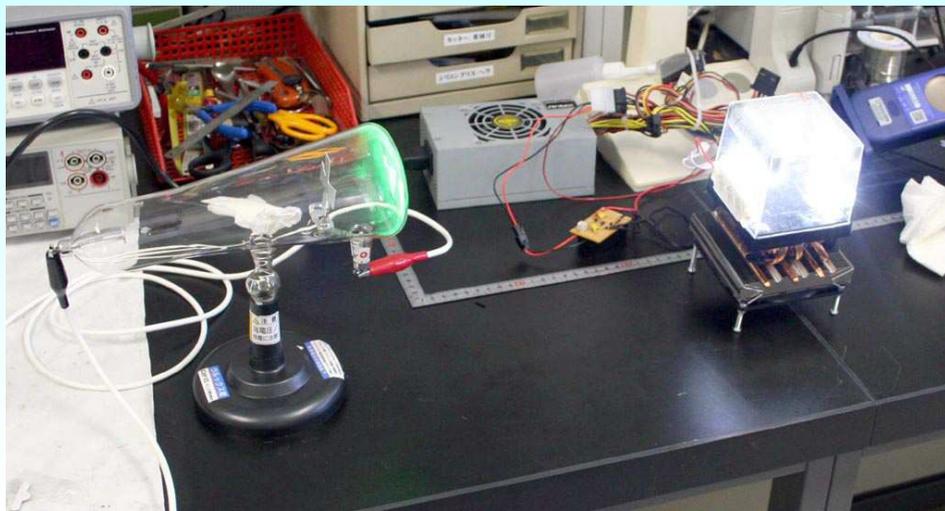
パルス場での測定であるため、実際にX線が放出されている時間に対する計数率に補正したうえで、数え落としの補正を行う必要がある。



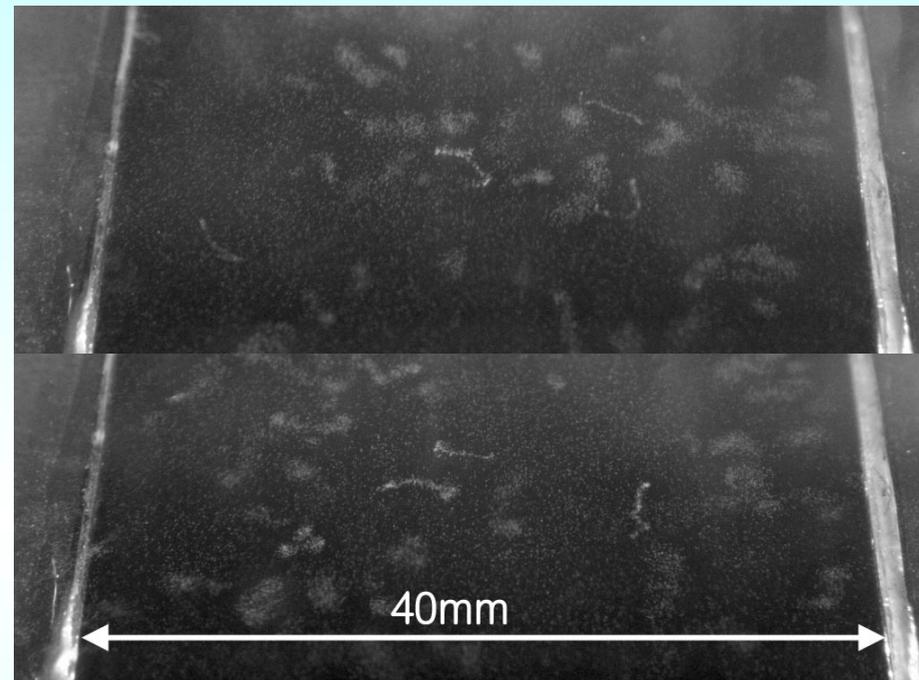
電離箱(ICS-1323)による線減衰係数評価実験

不感時間100μsの場合理論上の上限は、 $10^4 \text{ cps} = 600 \text{ kcpm}$  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。

# 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**