

2026年 6月 5日 @ 幕張メッセ  
日本医療機器学会 第101回大会  
一般演題 医療教育 #40

# 低エネルギー X線の相互作用理解のための 放射線教育コンテンツの紹介

○秋吉 優史  
大阪公立大学・工学研究科 /  
大阪国際感染症研究センター

演題発表に関連し、開示すべきCOI関係にある企業などはありません。ただし、発表に含まれるペルチェ冷却霧箱は発表者個人が製造・販売を行っています。

秋吉 優史: [akiyoshi-masafumi@omu.ac.jp](mailto:akiyoshi-masafumi@omu.ac.jp)  
<https://www.omu.ac.jp/eng/akiyoshi/>



# 先生、ご存じですか？

理科の授業で使っているクルックス管からは  
高い強度のX線が漏洩している場合があります！



現行の教科書にも記載されているクルックス管は、製品によっては 15cmの距離で、 $70\mu\text{m}$ 線量当量率が  $200\text{mSv/h}$  にも達する高い線量率の低エネルギーX線が放出されている場合があります。知らないで近付いたりすると非常に危険です。

・20keV程度とエネルギーが低いので普通のサーベイメーターは役に立ちません

**でも、心配はいりません！**

・ごく基本的な誘導コイルの設定と、距離を取って時間を短くするなどの簡単な運用法の改善で、劇的に線量を小さくすることができます。

本当に大丈夫なのか心配・・・

暫定ガイドラインで本当に問題無いか、実証試験を行っています。ガラスバッジを用いた簡単な測定を各学校で行うことができます。詳しくはホームページをご覧ください ↓

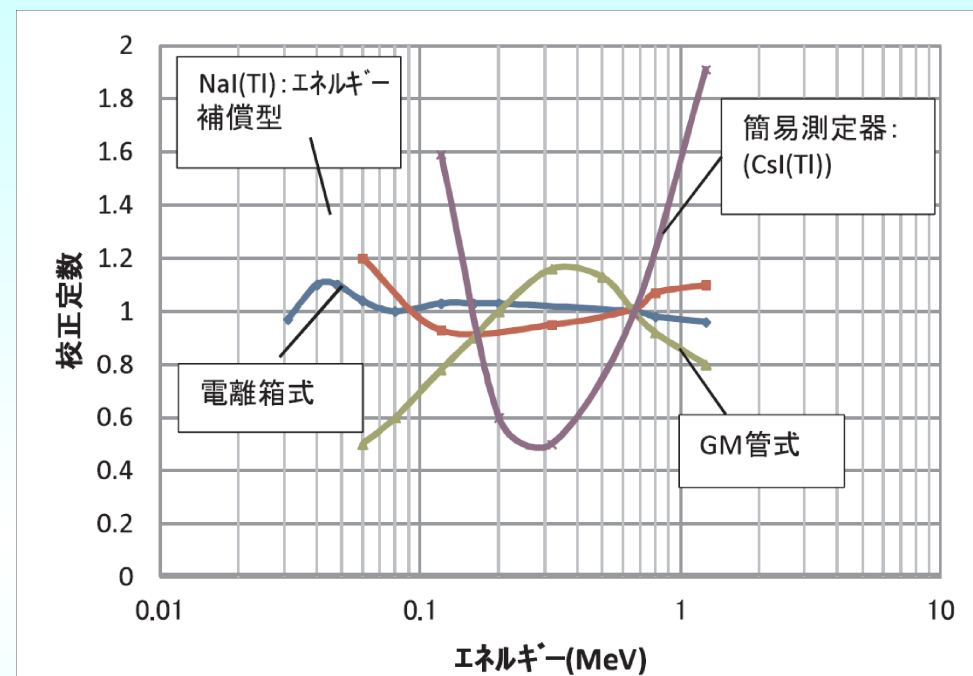
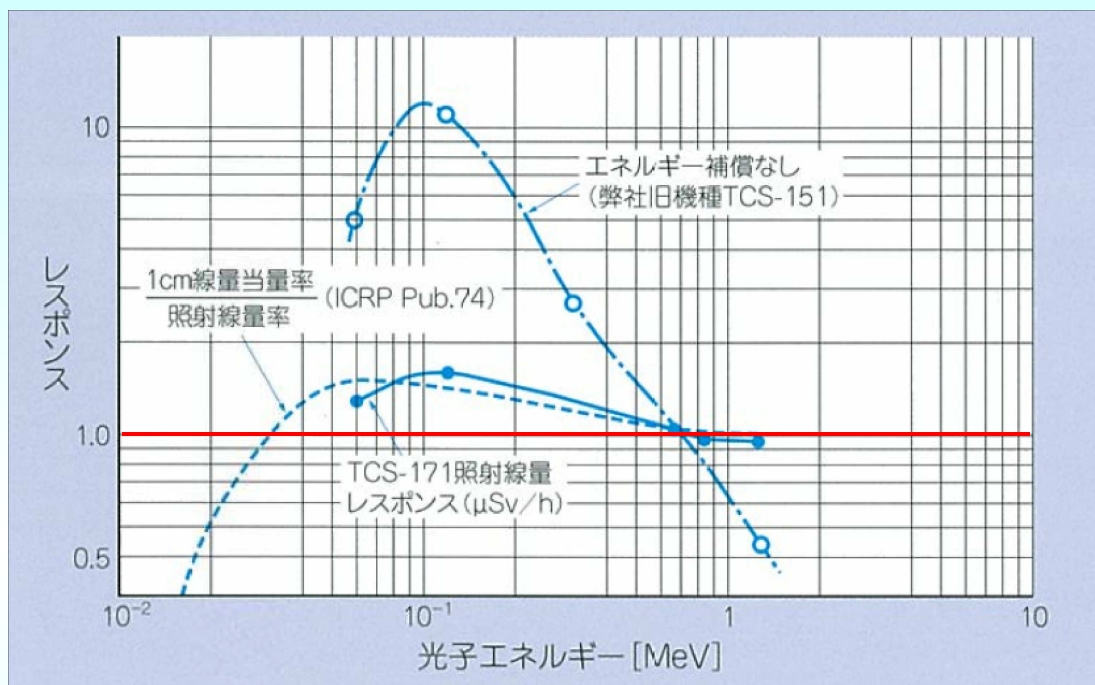


# 様々な測定装置による測定結果

	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	$\mu$ 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。

# サーベイメータのエネルギー特性



## NaIシンチレーションサーベイメータのエネルギー特性

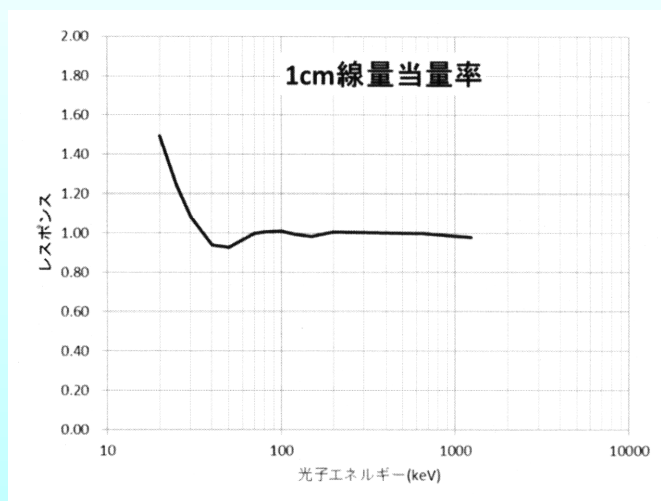
(アロカ TCS-171カタログより)

## 様々なサーベイメータのエネルギー特性

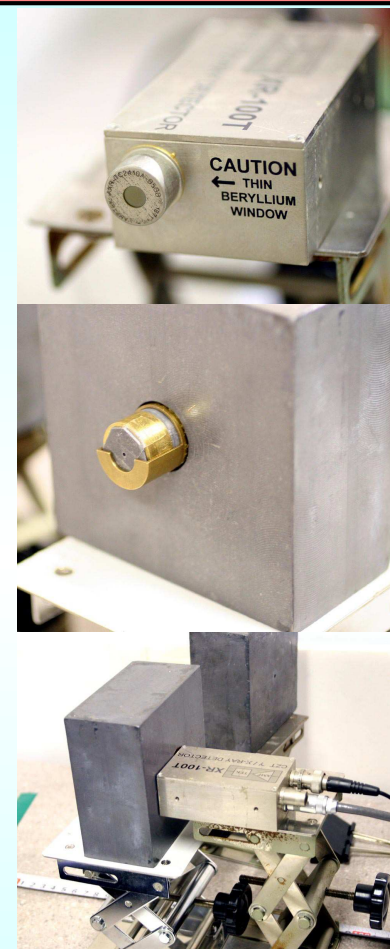
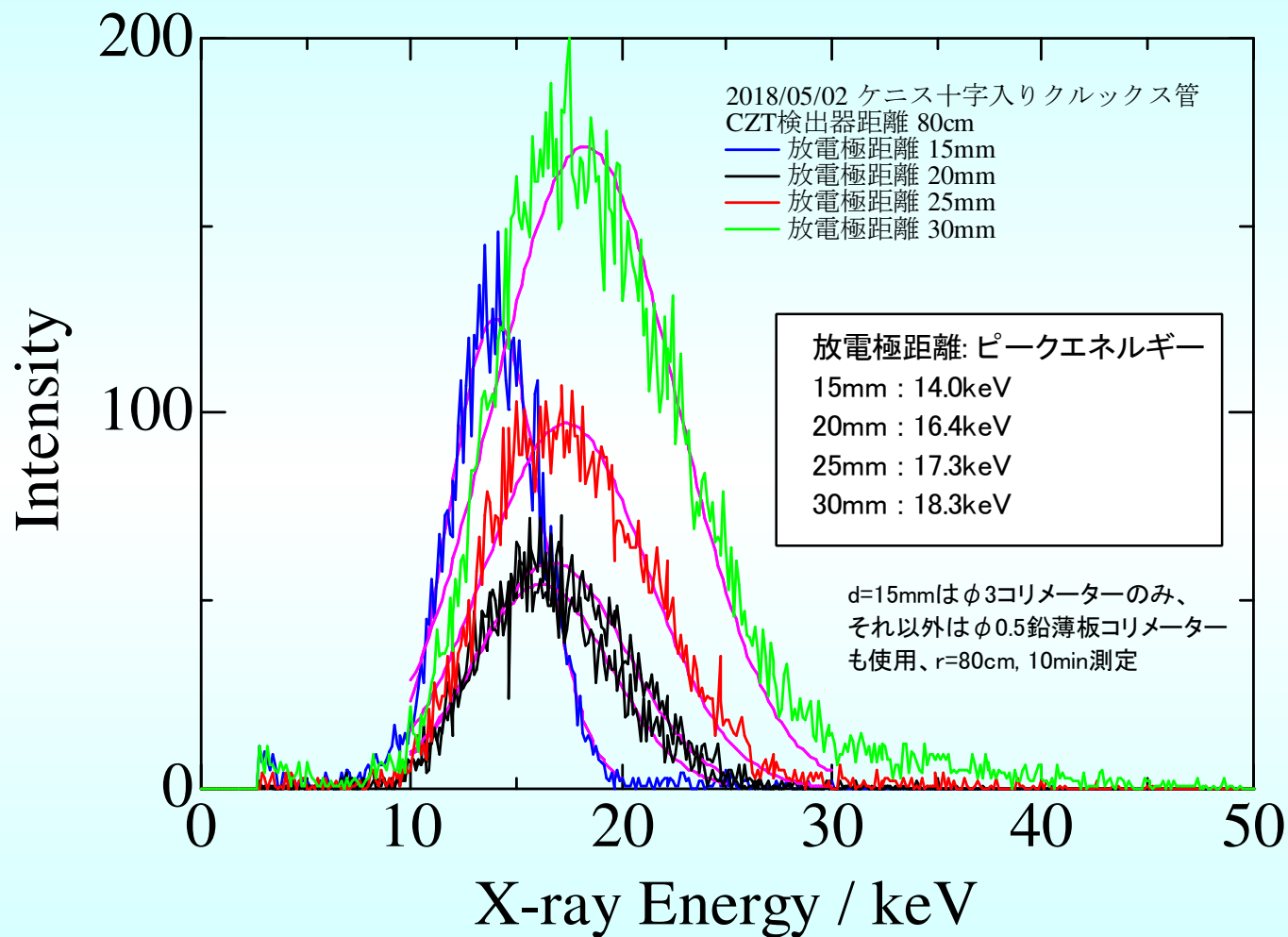
(放射線計測協会 放計協ニュース No.48, 2011, p6)

## 電離箱サーベイメータのエネルギー特性

(日立 ICS-1323マニュアルより)



# CZT半導体検出器によるスペクトル評価



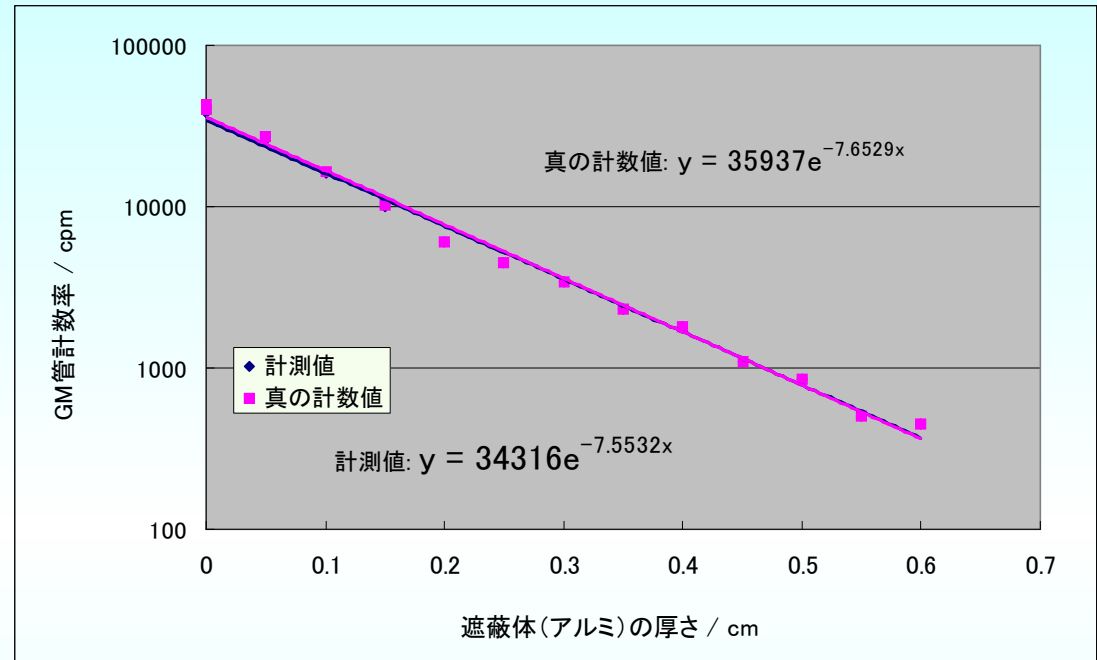
Amptek XR-100T-CZT  
CZT(Cd<sub>0.9</sub>Zn<sub>0.1</sub>Te)検出器  
Be窓、ペルチエ冷却



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

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

# GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価



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、 $7.65\text{cm}^{-1}$  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**。

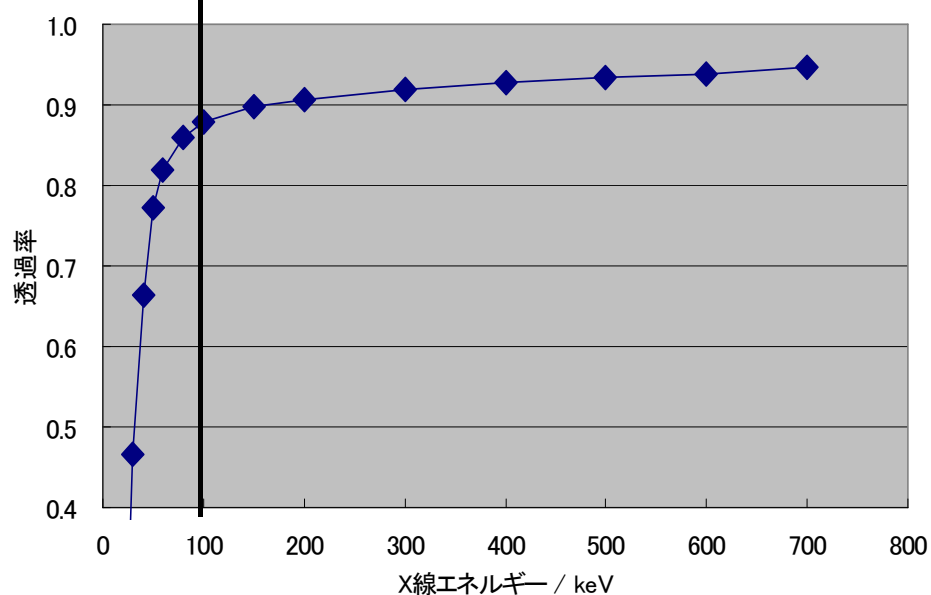
遮蔽体を用いた測定前後での遮蔽無しでの測定値はほぼ一致しており安定していた。また、クルックス管から 30cm位置、50cm位置で測定し、評価結果はほぼ同じであった。

X線エネルギー (keV)	アルミ中の 線減衰係数 $\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
10	69.5
15	20.8
<b>20</b>	<b>8.9</b>
30	2.8

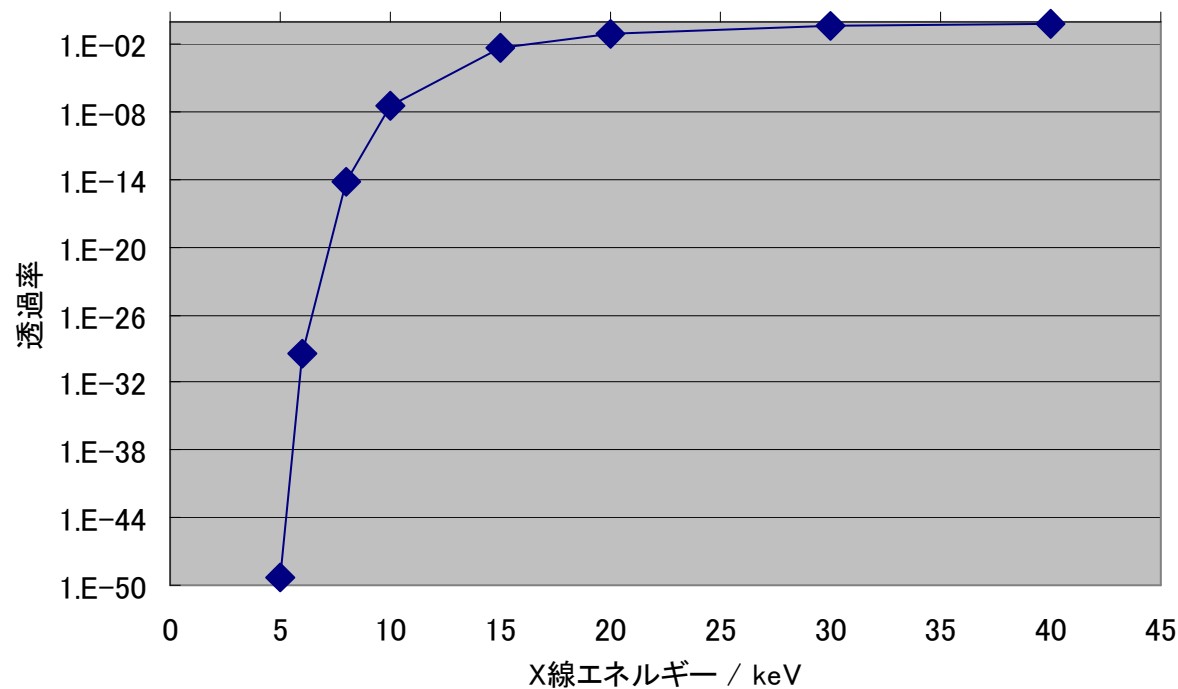
# わずかな印加電圧低下での大きな線量の変化

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



30keV と 15keV で約100倍違う。



3mmのガラスに対するX線の透過率

# γ線・X線の減衰

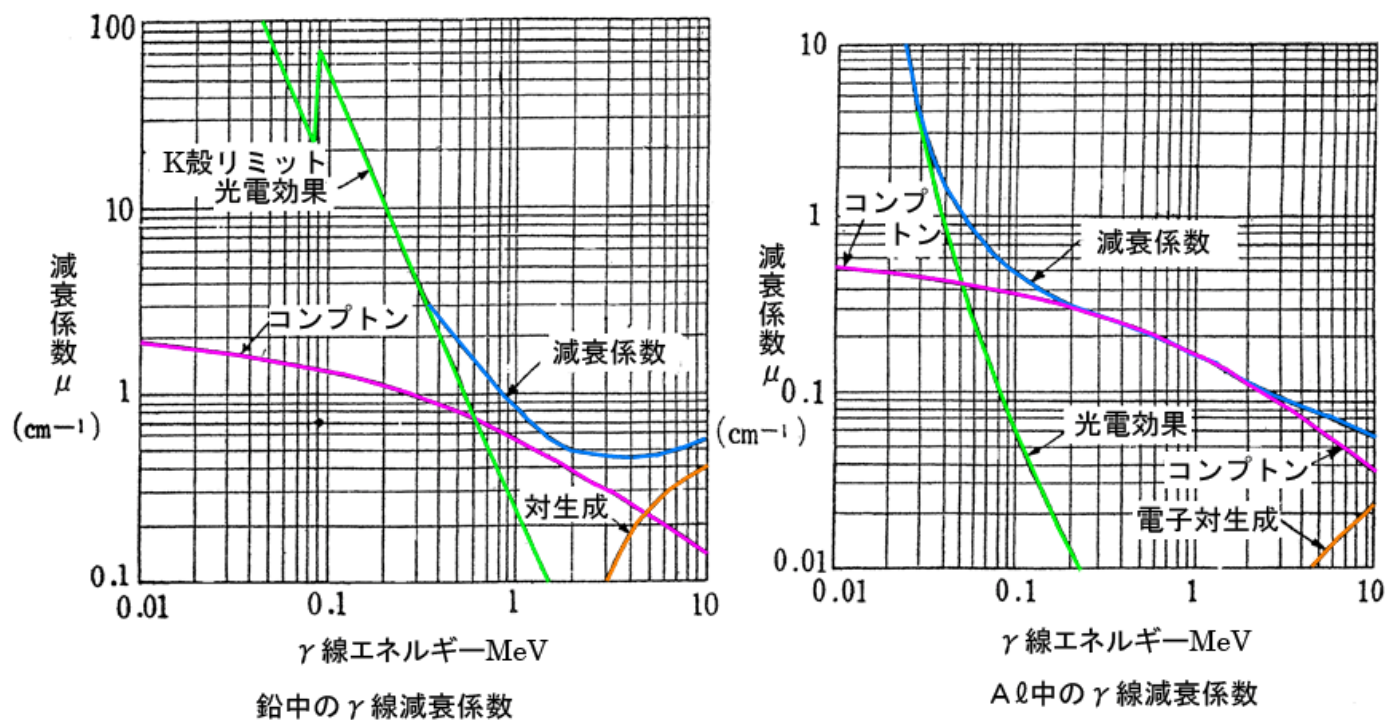


図3 γ線のコンプトン効果

[出典] 三浦 功、菅 浩一、俣野恒夫:「放射線計測学」、裳華房、p.21

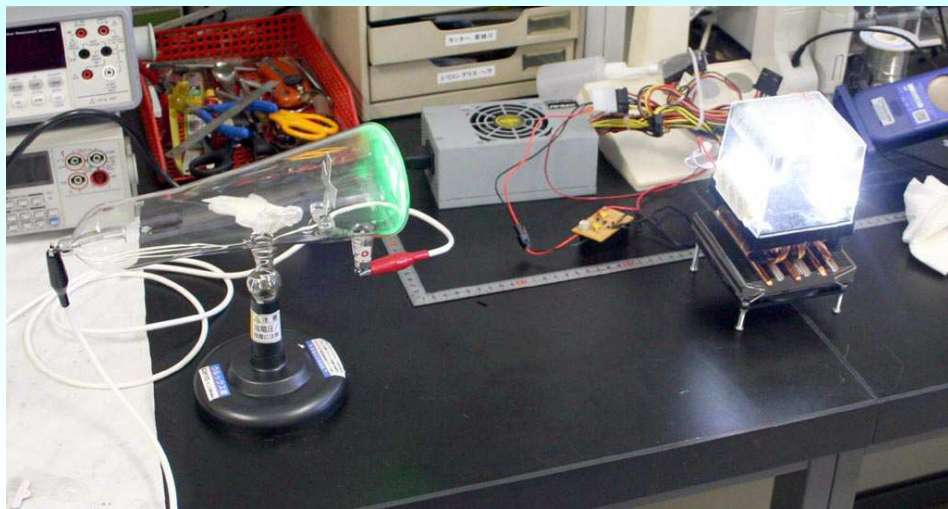
ターゲットとなる物質の原子番号  $Z$  の増加と共に、線源弱係数は

光電効果  $Z^4 \sim 5$  に比例  
 コンプトン効果  $Z$  に比例  
 電子対生成  $Z(Z+1)$  に比例

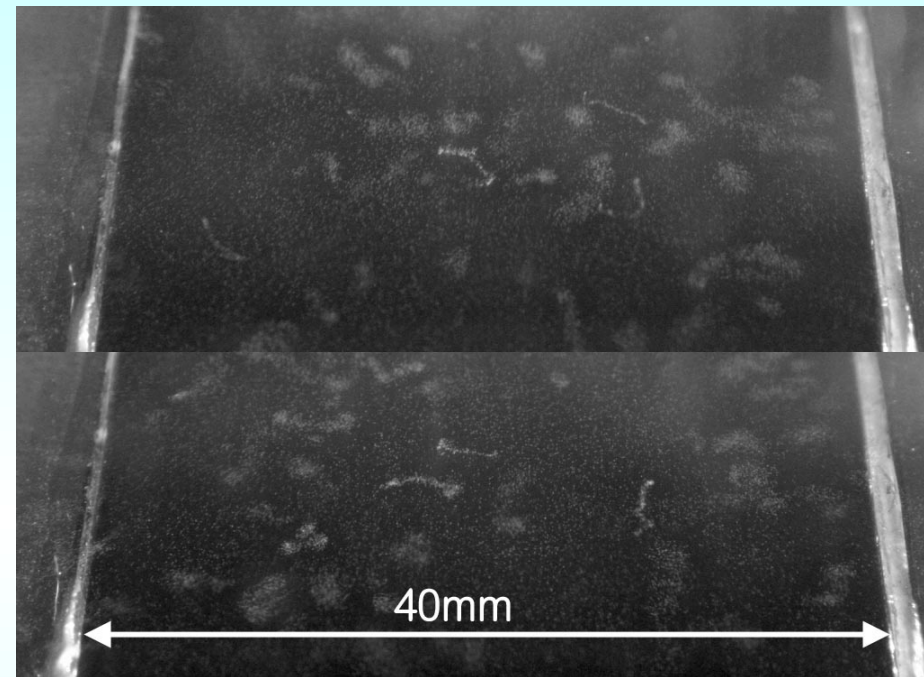
となって  $Z$  が大きくなると急激に遮蔽能力が高くなる。

入射光子のエネルギー増加と共に、物質との相互作用を起こす効果が変わっていく。比較的低エネルギーではレイリー散乱、光電効果が主であり、次第にコンプトン散乱が支配的となる。高エネルギーでは電子対生成が主となる。光核反応は12-24MeV 付近で最大断面積となるが  $\mu$  への寄与は5%程度である。また、低エネルギーではK殻電子やL殻電子の電離エネルギー以上になると光電効果を起こせるがそれ以下では起こせないため、光電効果の効率が不連続に変化する。これをK吸収端、L吸収端と呼ぶ。

# 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**

# 霧箱によるクルックス管からのX線の観察

①

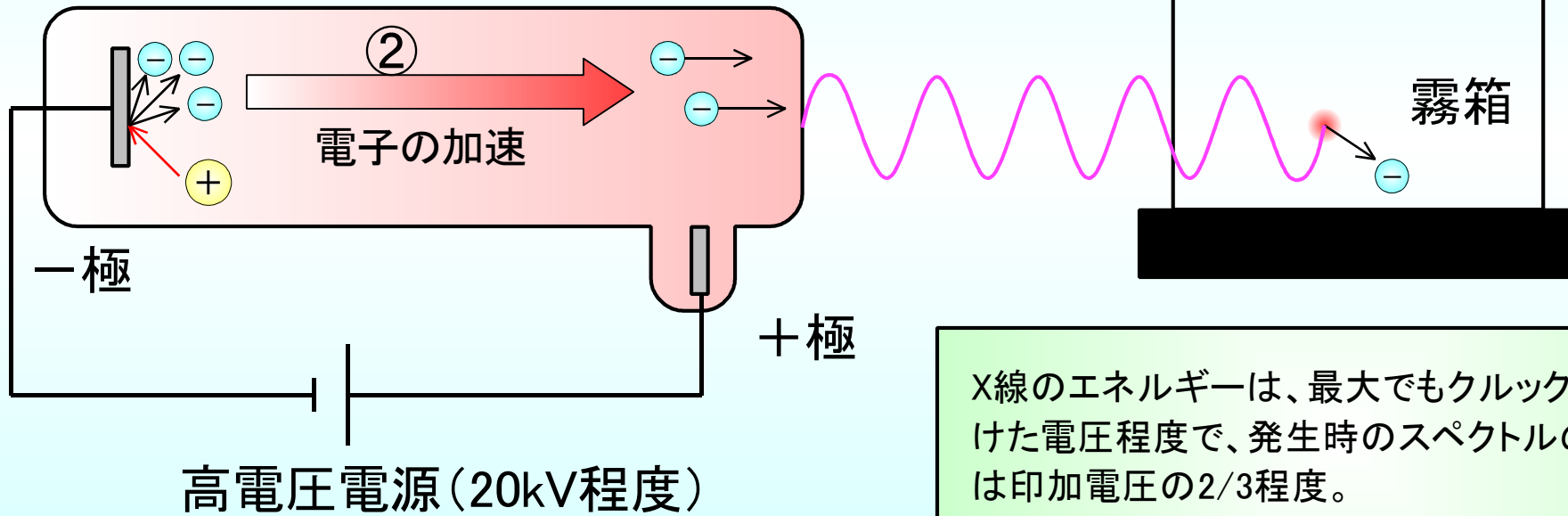
＋のイオンが－極に引きつけられて電子を叩き出す  
(二次電子放出)

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2/3程度。

電子を弾き出すという放射線の本質を直感的に理解できる。また、エネルギーの違いを弾き出された電子の飛跡の長さという形で理解できる。

# ペルチェ冷却式高性能霧箱

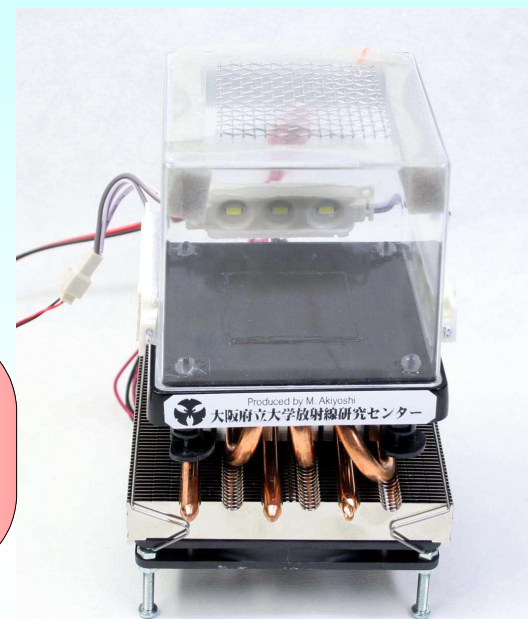
## 従来型の霧箱の問題点

- ドライアイスの準備、補給が必要で、長時間の連続展示が困難
- アルコールの補給などでチャンバーを開けると復帰まで数分かかる
- 高温型の霧箱は起動に時間がかかり、子供向けにはヤケドの危険
- 市販のペルチェ冷却型は非常に高価
- 天候などにより飛跡が観察できないことも
- $\alpha$  線の飛跡が見えた、だけに留まっていた

## 本製品の特徴

- ドライアイス不要で長時間安定してクリアな飛跡の観察が可能
- $\alpha$  線の飛跡の観察に加えて、 $\beta$  線の飛跡の観察も可能で、さらには  $\gamma$  線により弾き出された光電子なども観察可能
- 放射線の種類による物質との相互作用の違いを直感的に学習出来る
- 市販品を使用して安価に押さえており、複数ユニット購入が容易

台風の日でも、ストーブを使っても確実に観察が可能です。



SD型の本体ユニット

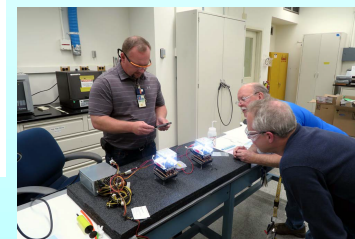
これまでに全国の大学、高校、中学、放射線関係の研究所、病院などに、累計 500台 以上を出荷しています。

入手方法など、より詳しく知りたい方は以下のウェブサイトをご覧ください。

<https://bigbird.stars.ne.jp/Works/CloudChamber.htm>

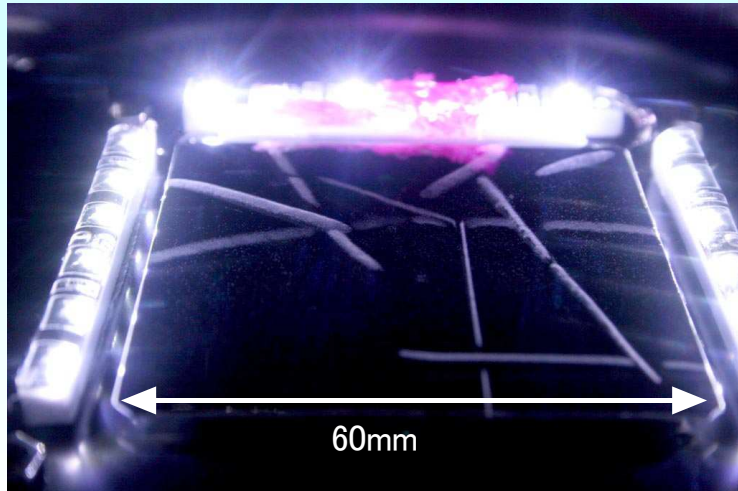


ウェブサイト QRコード

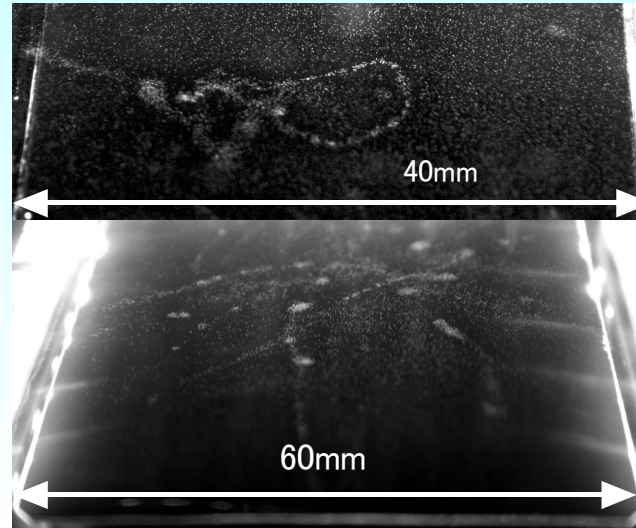


Oak Ridge National Lab. での RCT(放管員)への実演会。  
2台を寄贈し教育に役立っています。

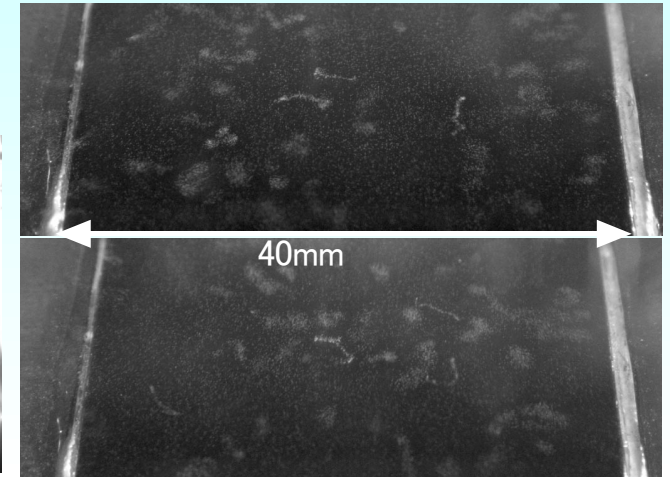
# 放射線の種類による相互作用の違い



$\alpha$ 線による力強く直線的な飛跡



$\beta$ 線及び、 $\gamma$ 線からの光電子/コンプトン電子のうっすらして曲がりくねった飛跡



クルックス管からの20keV程度の低エネルギーX線による、飛跡が数mm程度の光電子

SD型はチャンバーが小さいため、チャンバーを開けて線源を入れ替えても10秒程度で再び観察可能となります。掃除機で空気中の埃をガーゼに捕集し、ラドン娘核種からの $\alpha$ 線の観察を行う事も容易に可能です。

種類の異なる放射線の飛跡を観察して比較することにより、相互作用の違いを理解することが出来る、放射線の「標本箱」として御使用頂けます。

EX型はチャンバーを開けると復帰に1分程度を要しますが、チャンバーの上に線源を載せての $\beta$ 線の観察と、5mm程度のアルミ板を入れて $\gamma$ 線のみを入射した際の比較などがSD型よりも観察しやすくなります。

遮蔽体を透過する $\gamma$ 線の観察は、外部被ばくの理解に繋がります。