

共同利用報告会

霧箱を用いた
低エネルギーX線スペクトル評価

阪府大院工 量子放射線分野

*山本 堅士、Do Duy Khiem、秋吉 優史

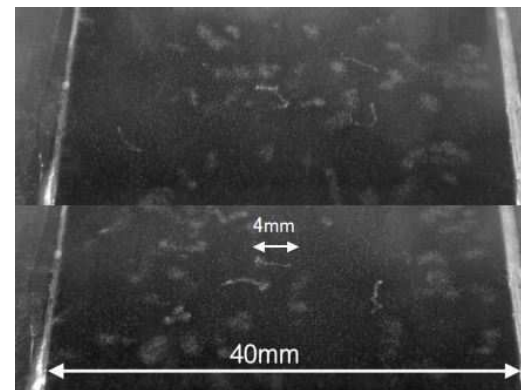
メールmb106005@edu.osakafu-u.ac.jp

背景

クルックス管は低エネルギーX線の**放出量が想像以上に多い**場合があることが明らかになりつつある。

➡ **低エネルギーX線のスペクトルを測定**する必要がある。

CZT (CdZnTe)検出器、Be窓のGe半導体検出器などで評価可能であるが、学校教育現場などでも簡易に実施できる霧箱によるエネルギースペクトル評価手法の開発を行っている。

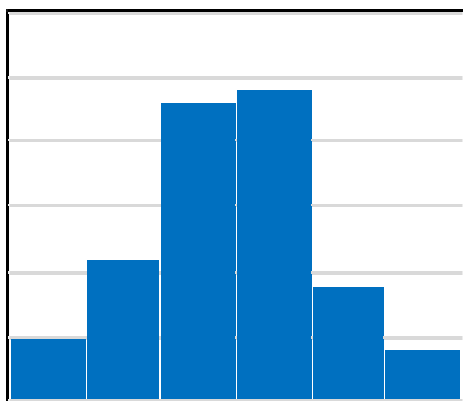


霧箱による光電子の観察の様子
飛跡の長さがX線のエネルギーと対応

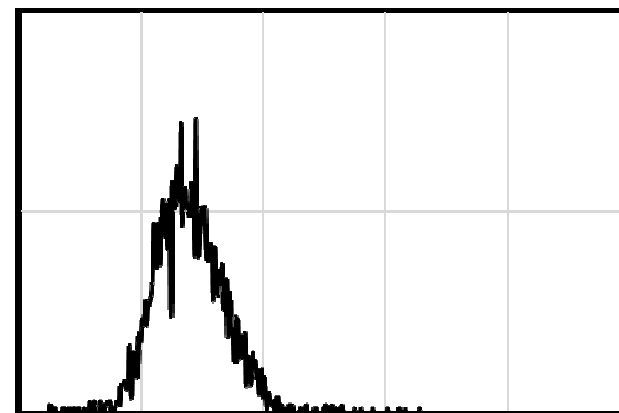
目的

霧箱で観察した多数の光電子の飛跡の長さからヒストグラムを作成することで、**低エネルギーX線スペクトルを評価**できないか検討する。

そのためにも既知のエネルギーのX線を用いて、飛跡の長さとエネルギーの関係を調べる。



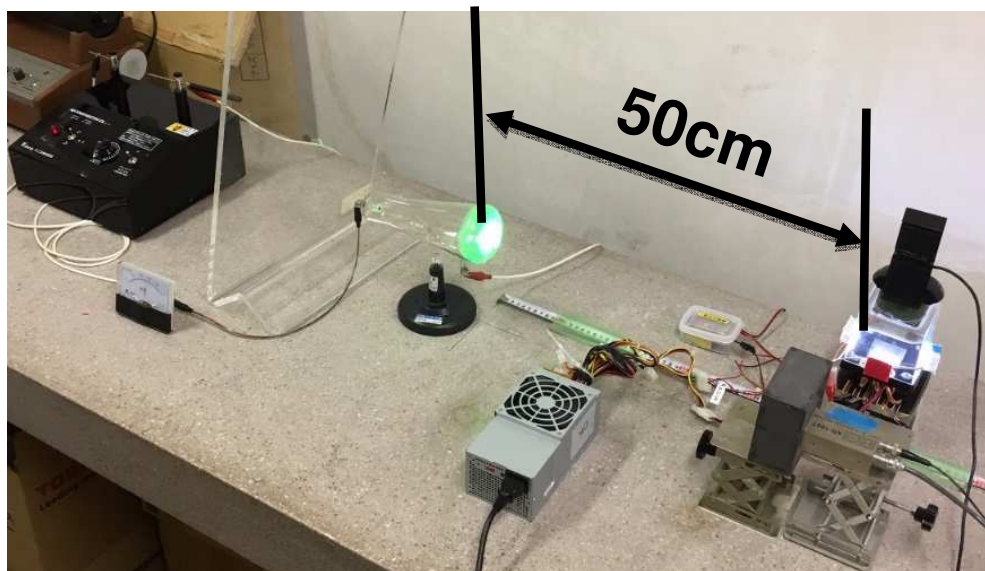
霧箱の飛跡長さヒストグラム



低エネルギーX線スペクトル

(イメージ図)

クルックス管 X線評価の実験方法



実験の様子



CZT検出器
エネルギースペクトル



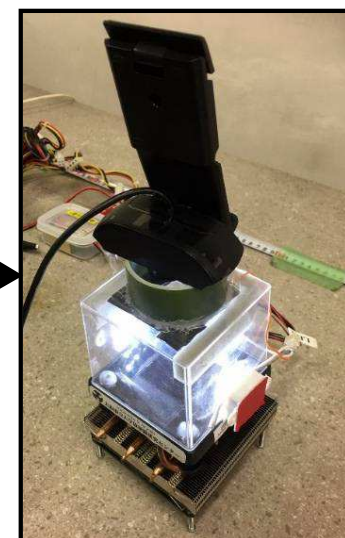
誘導コイル
(放電針距離40mm)

(30kV程)



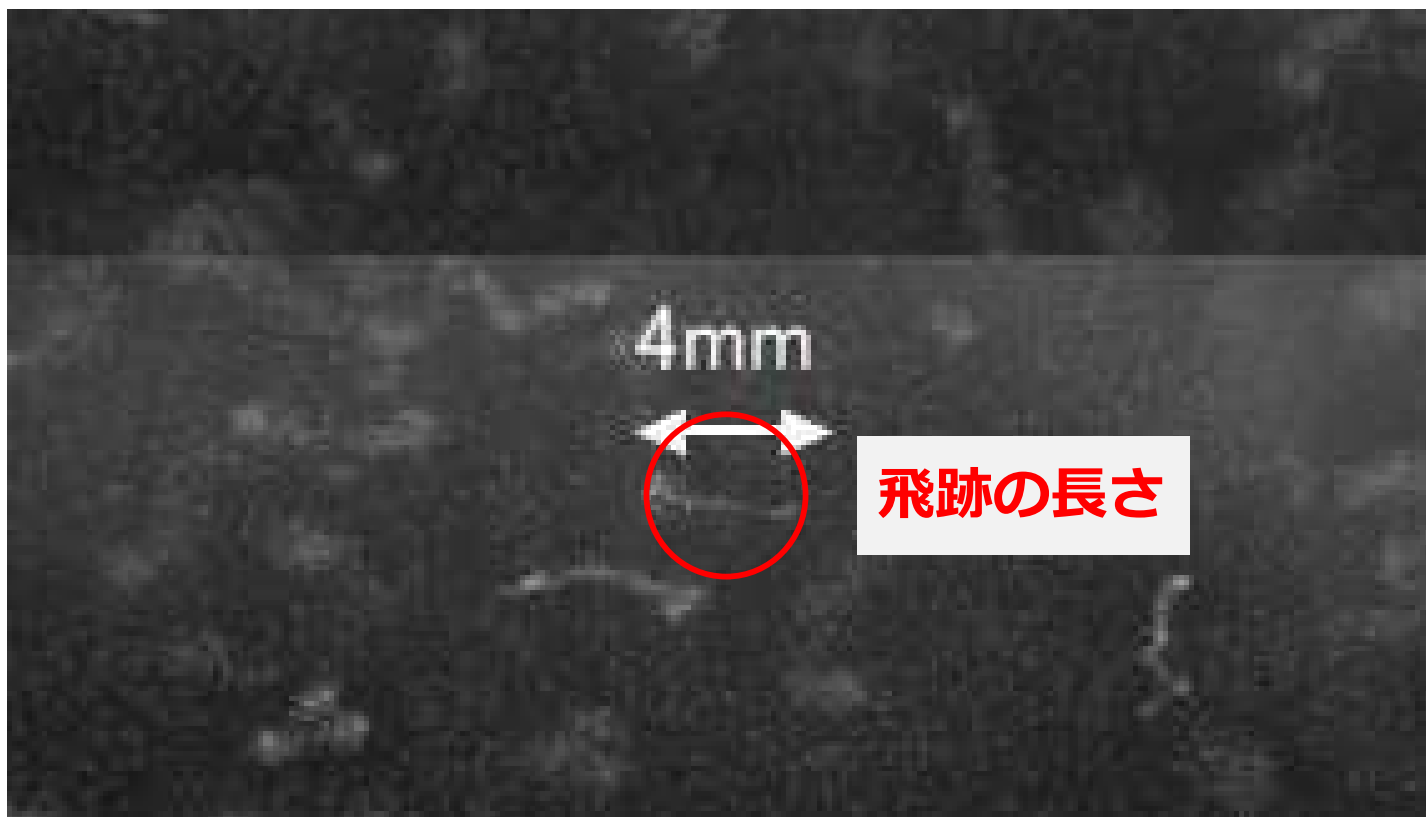
クルックス管
(ケニス十字入り)

X線



ペルチエ高性能霧箱
飛跡の長さ 4

飛跡の長さ 測定方法



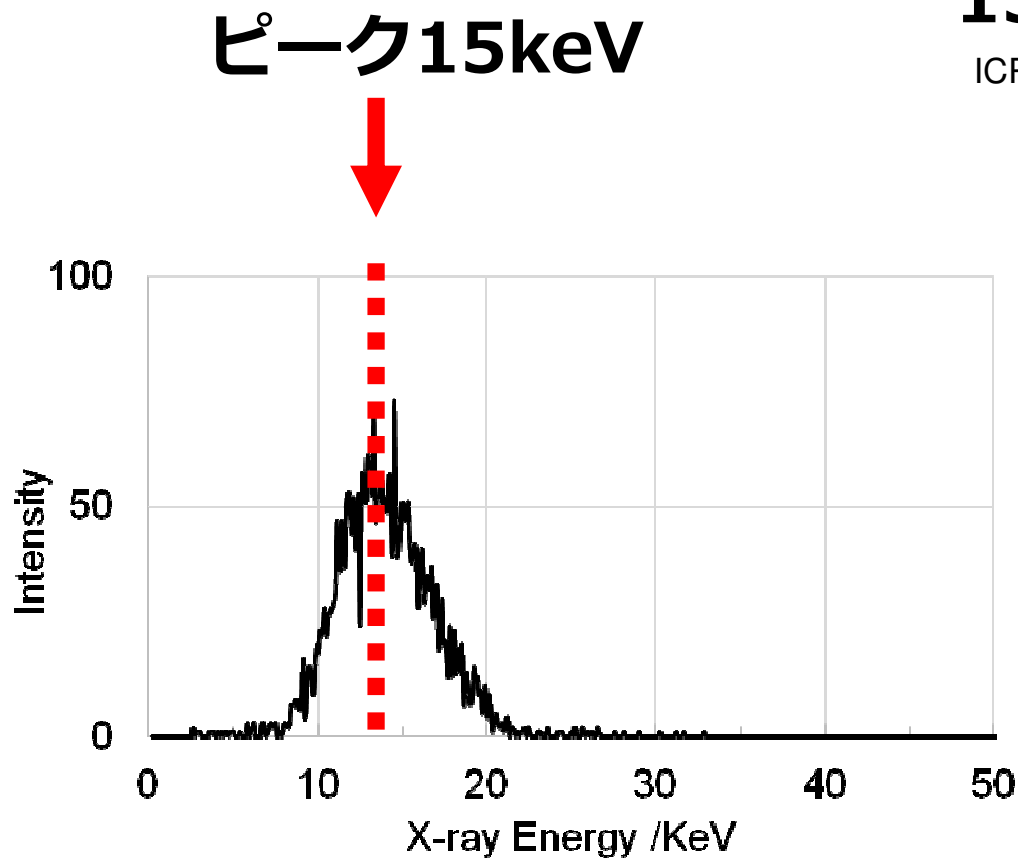
飛跡を手動で囲んで直径の長さを計測

- 動画をスロー再生して飛跡の長さが最大のときの長さを計測
- 算出した理論値は直線で飛んだときの最大値のため計測値より大

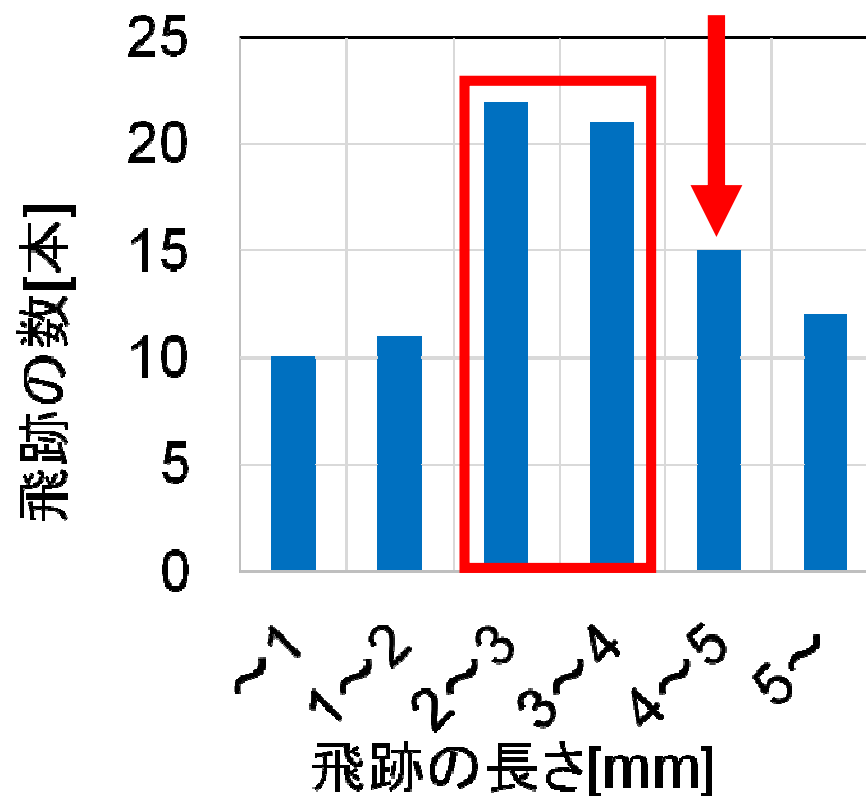
CZT検出器と霧箱による測定結果

15keV相当の電子の飛程(4.55mm)

ICRU : Report 37 (1984) Stopping powers for Electrons and Positrons より



CZT検出器スペクトル測定結果



ペルチエ霧箱での測定結果

➡ エネルギースペクトルと飛跡の長さヒストグラムの関係を確認

検量線の作成

クルックス管から放出されるX線

エネルギーがブロードである。エネルギーピーク的位置をあまり大きく変更できない。誘導コイルからの電圧が一定せず放出されるX線の出力エネルギーに変動がある。



検量線の作成

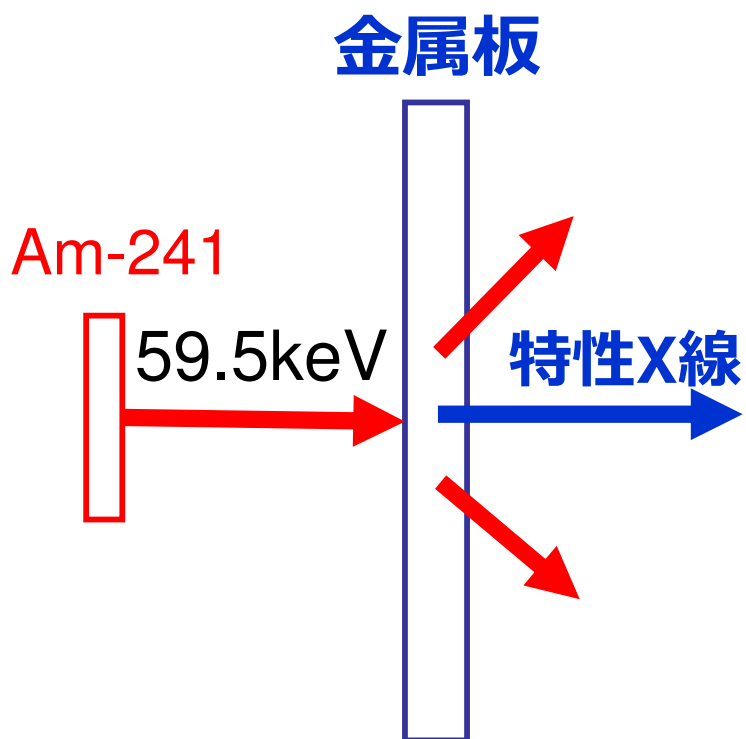
密封線源Am-241とCuやNbを利用した**特性X線**
(**Fixされたエネルギー**) を霧箱に入射する。



Am-241

入射X線エネルギーに対する飛跡長さの**検量線を作成**
出来ないか検討する。

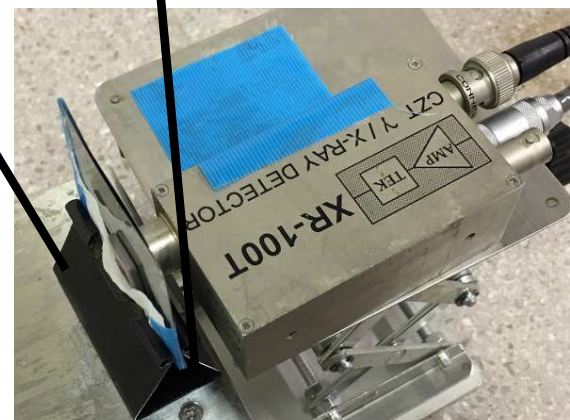
検量線からの特性X線評価 実験方法



線源を金属板で覆い
特性X線を発生



Am-241



CZT検出器で測定

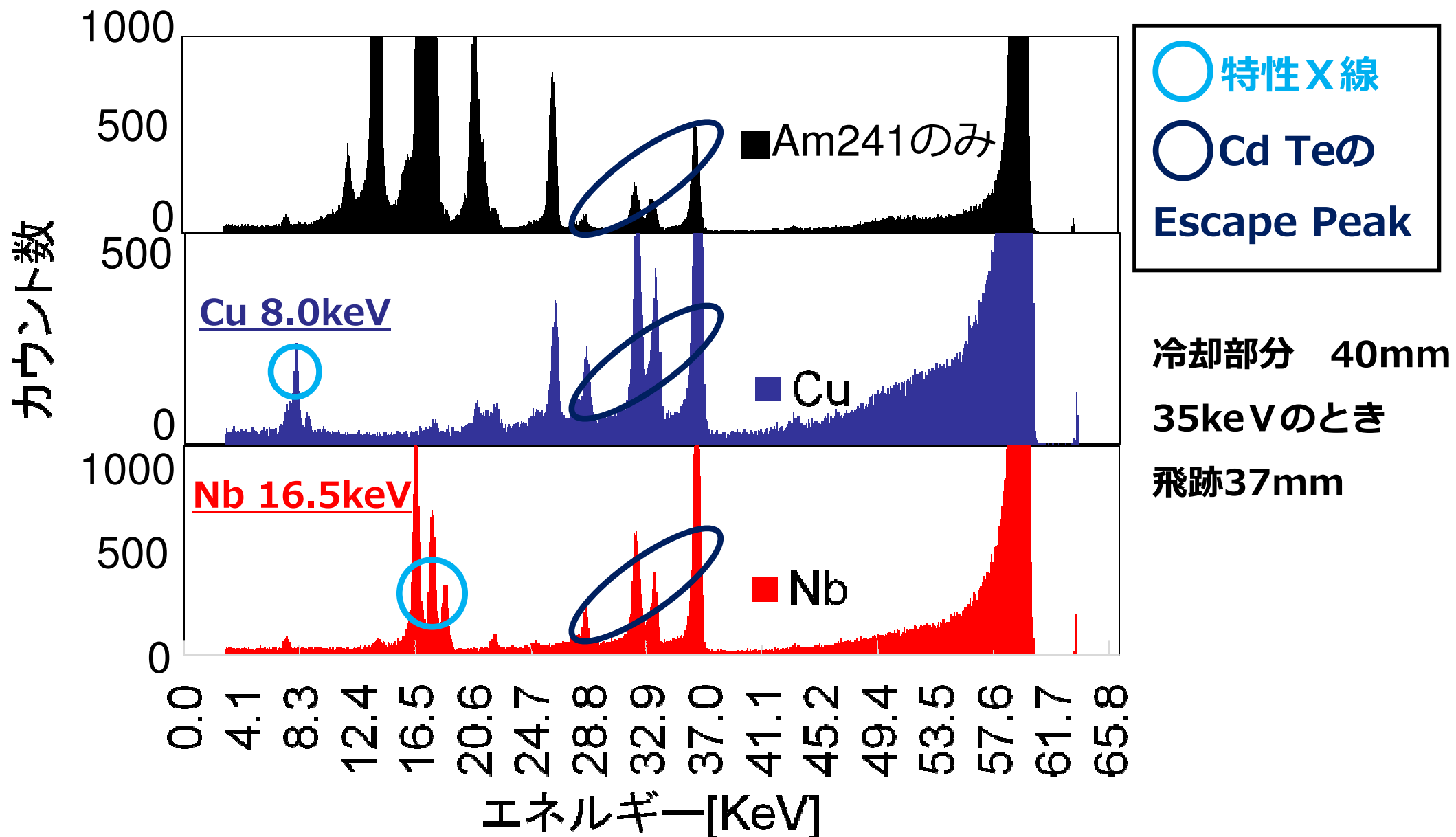


霧箱で測定

Cuの特性Ka線8.0keV、光電子の飛程理論値1.8mm

Nbの特性Ka線16.5keV、光電子の飛程理論値5.2mm

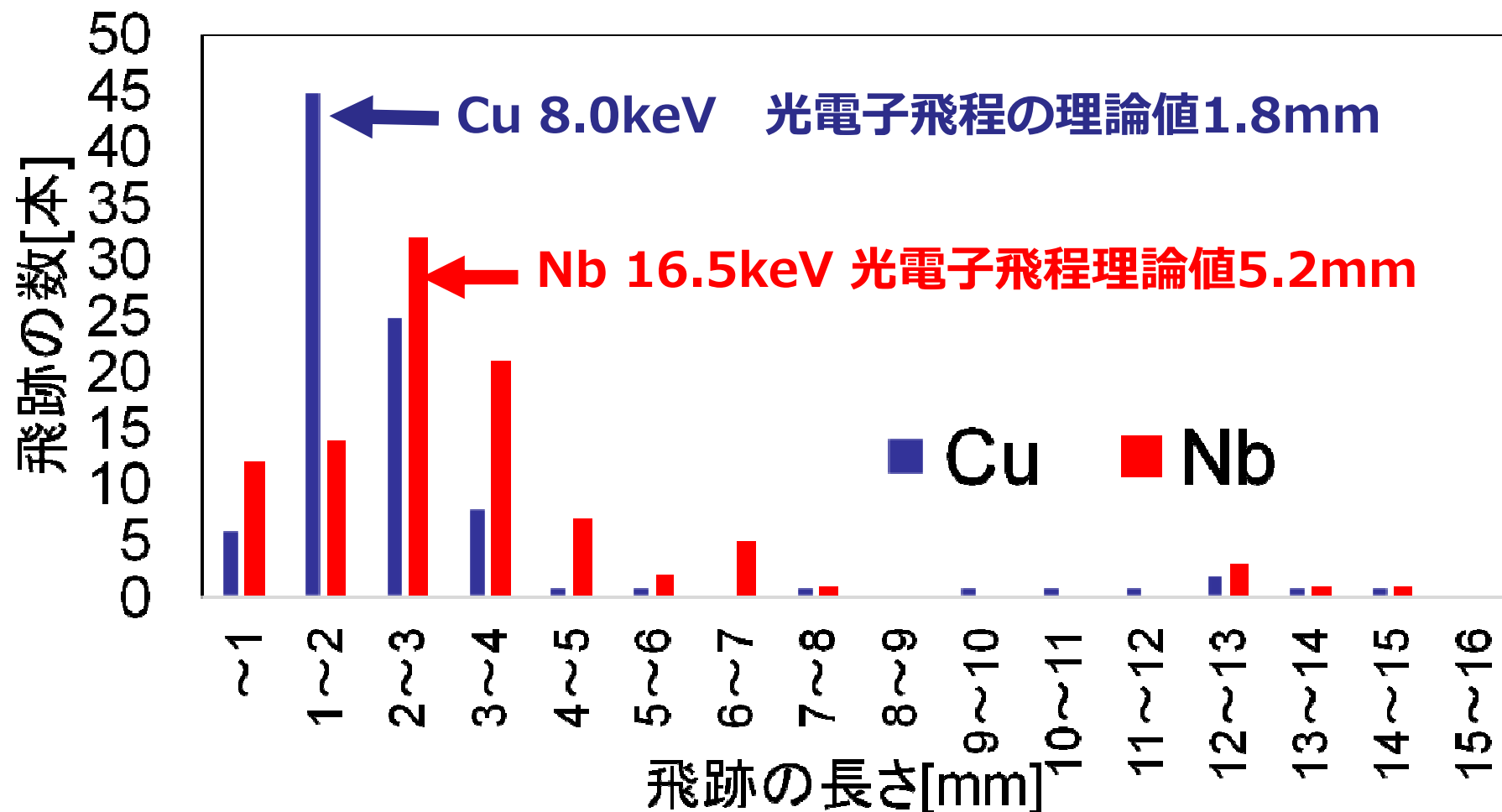
CZT検出器でのエネルギースペクトル測定結果



➡ Cu(8.0KeV)とNb(16.5KeV)の特性X線のエネルギーピークを確認。 9

霧箱での飛跡の長さ 測定結果

Cu 最頻値1~2mm、Nb最頻値2~3mm



CuよりNbの方が飛跡のピークは長い。

エネルギーの増加に応じて飛跡のピークも増加。

考察

- **0°Cの乾燥空気で光電子飛程の理論値を算出**

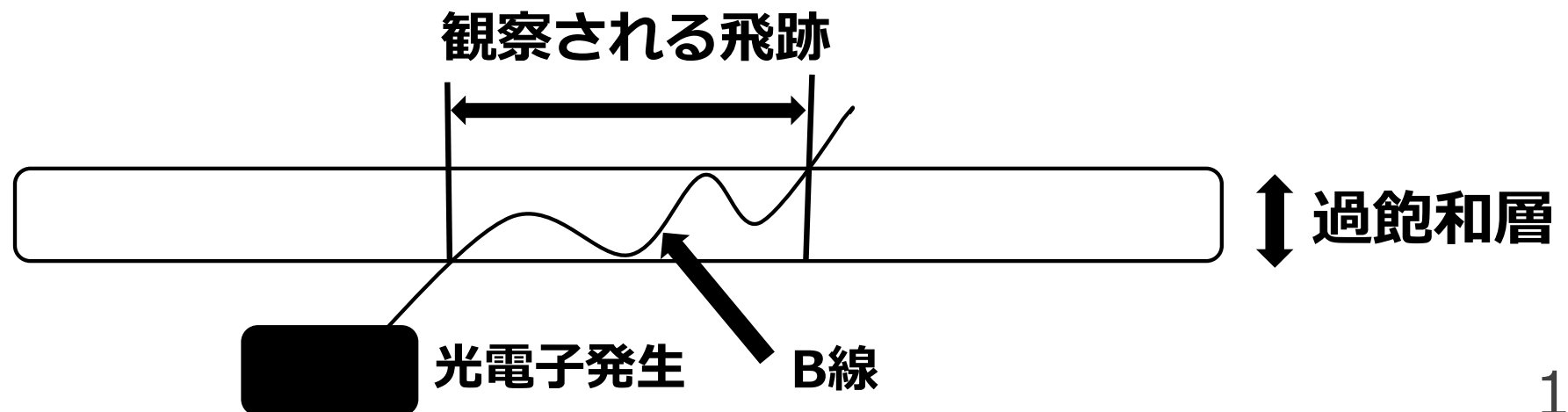
実際はエタノールの蒸気や液滴が含まれており密度が高いため実測値は理論値より短い。

- **電子と物質の相互作用**

低エネルギーになればなるほど、衝突阻止能が大きくなり飛跡の数が増加した。
(放射線概論 第7版、p91、図7.2電子の質量阻止能より)

- **β 線は電子のため飛跡が折れ曲がる**

立体的にも平面的にも飛跡は折れ曲がり、平行に飛んだ飛跡のみ観測できる。
長い飛跡ほど折れ曲がった誤差が蓄積され理論値より短くなった。



まとめ

霧箱で光電子の飛跡の長さからヒストグラムを作成することで**低エネルギーX線スペクトルを評価**できないか検討した。

そのためにも**検量線の作成**を検討した。

実験

①クルックス管からのX線を霧箱とCZT検出器により計測したところ**飛跡の長さヒストグラムとエネルギースペクトルの対応を確認した。**

②Am-241とCu、Nbを利用して**検量線の作成**を検討した。

特性X線エネルギーの違いに応じて飛跡のピークも変化した。



ペルチエ高性能霧箱中での光電子の飛程が低エネルギーX線スペクトルに対して校正可能であることが示唆された。

今後の展望

・ 密封線源Sr-90を用いて実験

Am241からの γ 線が遮へいされずに透過している。 β 線源の透過する γ 線を利用し任意の金属で特性X線を作成できないか検討する。

・ 適切なエネルギー範囲や線量範囲の検証

どのエネルギーの範囲まで飛跡が多く観察されるのか検討する。

線量が高くなると飛跡の数が増加して霧箱内部の過飽和蒸気圧力が下がり、本来観察したい飛程より飛跡が短くなると考える。

・ 画像解析により精度の向上

現在手動で飛跡の長さを計測しているが、画像解析により計測することで精度の向上を図る。

背景

2017年 学習指導要領にクルックス管に関して追記

- **2008年 3月公布：新・中学校学習指導要領**

『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』

- **2017年 6月公布：新・中学校学習指導要領解説 理科編**

『**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。』



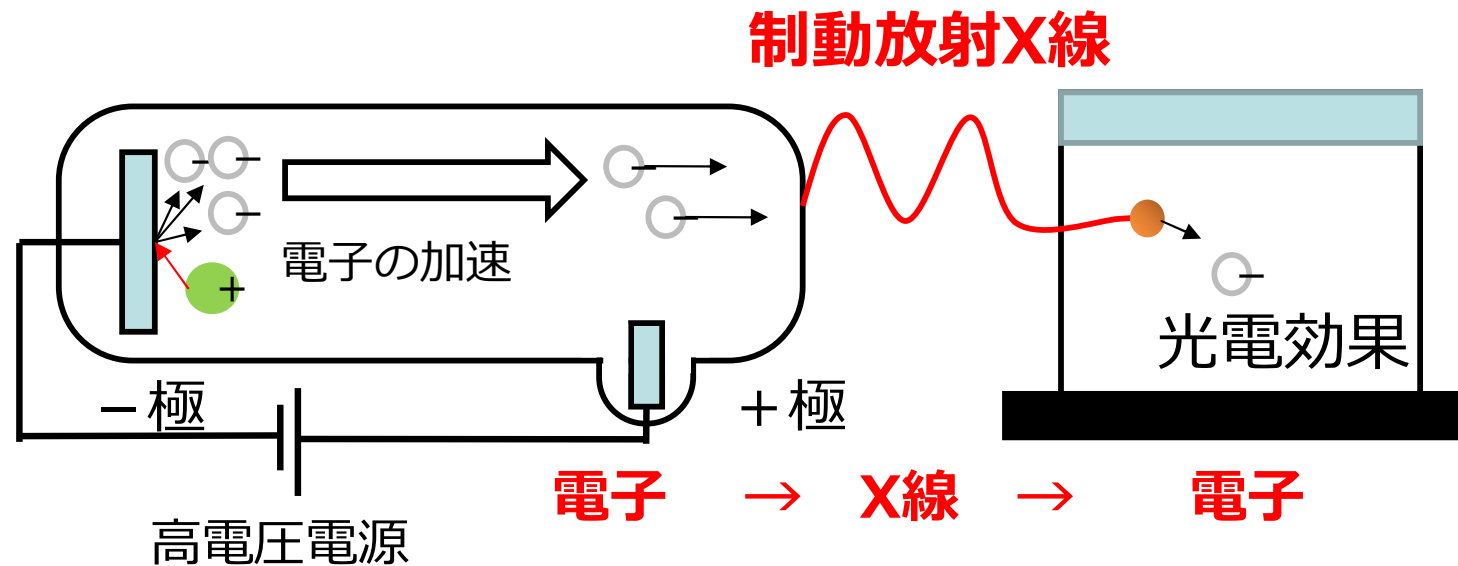
クルックス管を用いた実験を前提にしており、
中学校教育の現場で**使用する必要がある**



クルックス管

クルックス管とは真空中で陰極線を観察する装置

霧箱とクルックス管による放射線教育プログラム

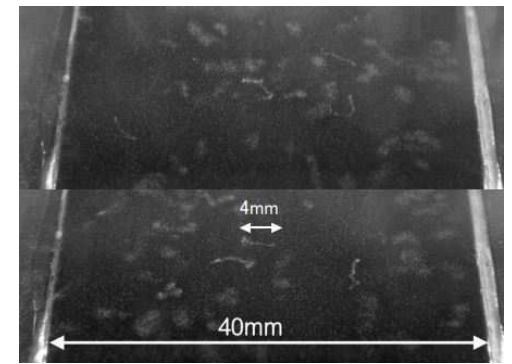


放射線と物質の相互作用の本質を直感的に理解

光電子はβ線と同様に高性能な霧箱であれば観察可能であり飛跡の長さがX線のエネルギーと対応している。

金属の選定条件

- ・ 加工、入手の容易性
- ・ 5KeV~35keV(37mm)の特性X線を放出



ペルチエ素子 (40mm)

kx- α 線の表

元素名	K α [KeV]	K β [KeV]	L α [KeV]	飛跡の長さ[mm]
Cu	8.048	8.905	0.929	1.8
Nb	16.615	18.623	2.166	5.2

※アイソトープ手帳 p110 X線放射エネルギーと吸収端より

- ・ ICRU : Report 37 (1984) Stopping powers for Electrons and Positrons より

飛跡の長さのピークが右にシフトすれば飛跡の長さに対応している

光電子飛程の理論値 算出

ICRU : Report 37 (1984) Stopping powers for Electrons and Positrons, p120 , ELECTRONS IN AIR, DRYより

ENERGYが0.15MeVのとき、RANGEは0.5886mg/cm²である。
0°Cの乾燥空気の密度は1.293mg/cm³より、

β線の空気中での飛程は

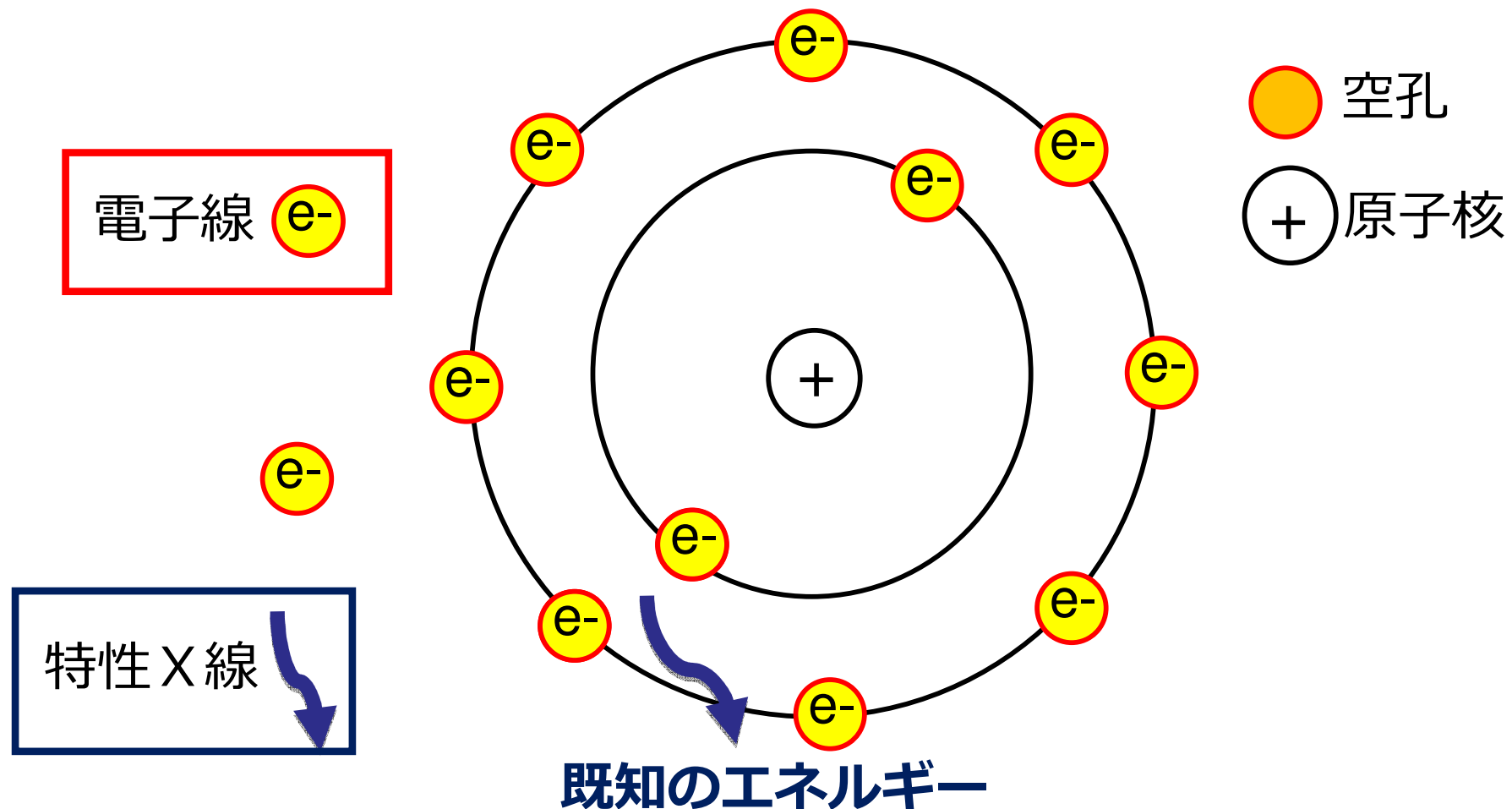
$$0.5886/1.293=0.455$$

となる。

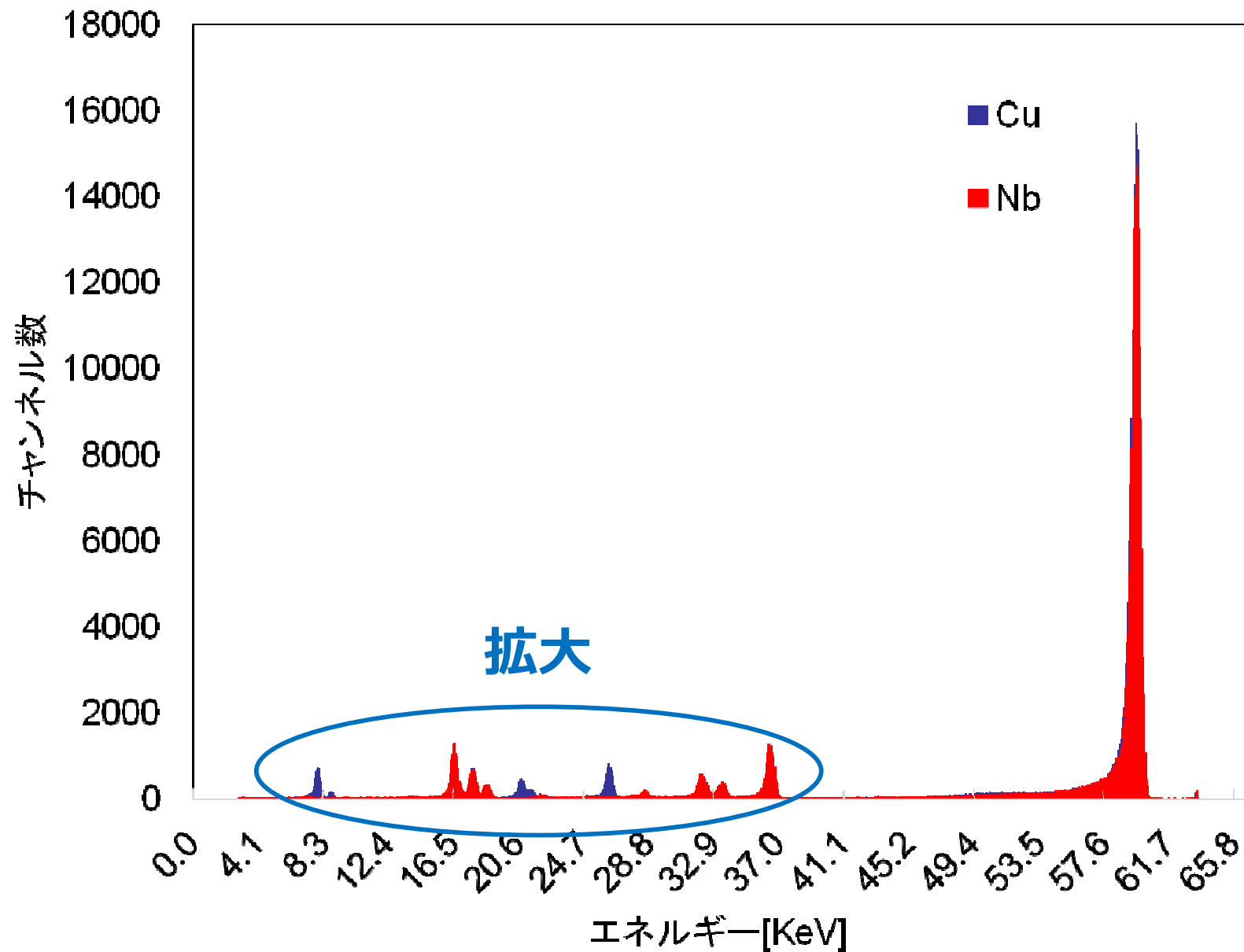
よって、β線の空気中での飛程は4.55mmとなる。

特性X線 発生原理

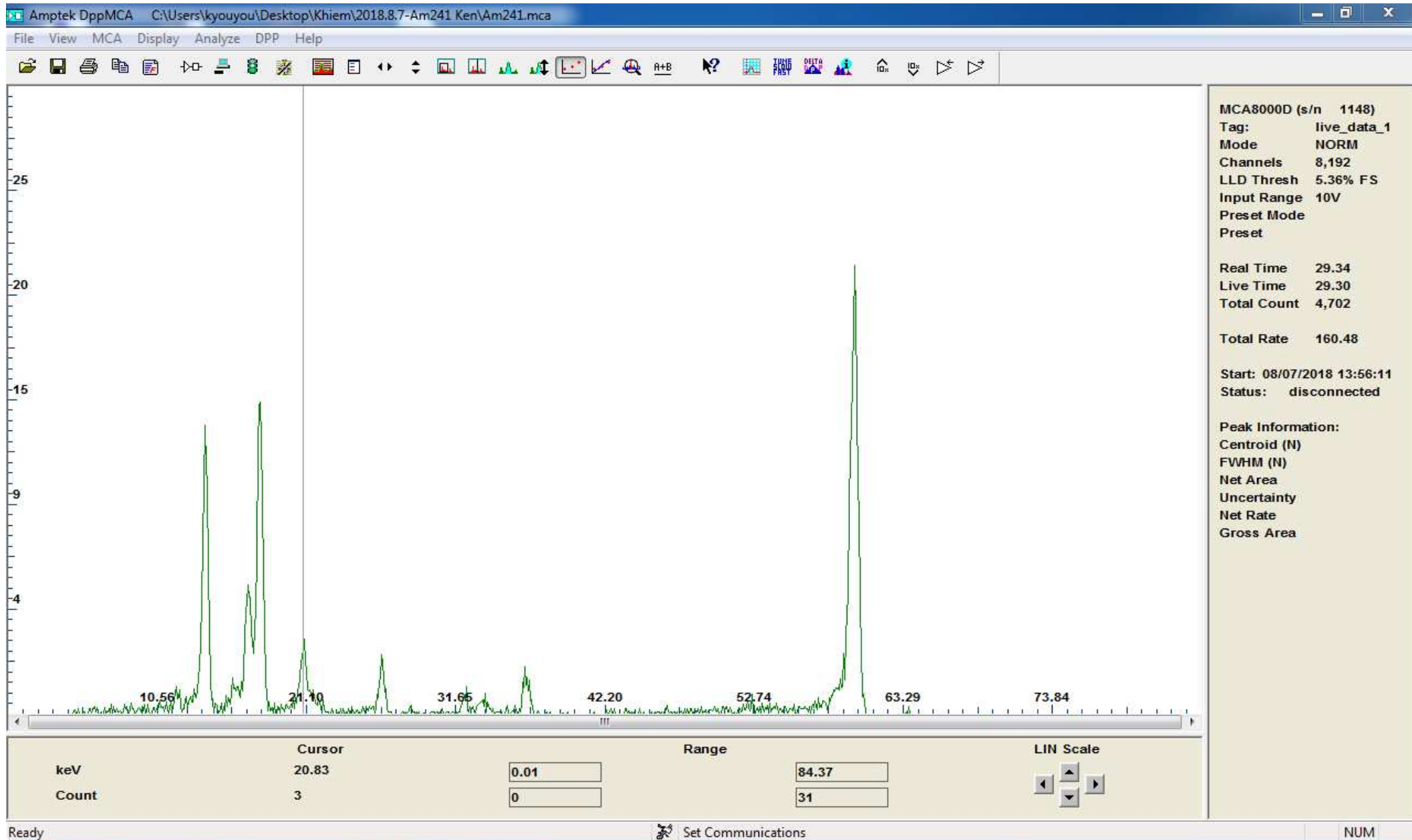
- 飛来電子によって内殻電子が弾き飛ばされると、その後の空孔に向かって外殻電子が遷移する。この時に、電子軌道のエネルギー差に等しいエネルギーのX線が放出される。これを特性X線と呼び、通常は離散スペクトルとなる。



CZT検出器 特性X線エネルギースペクトル



Am 241 CZT検出器測定結果



考察

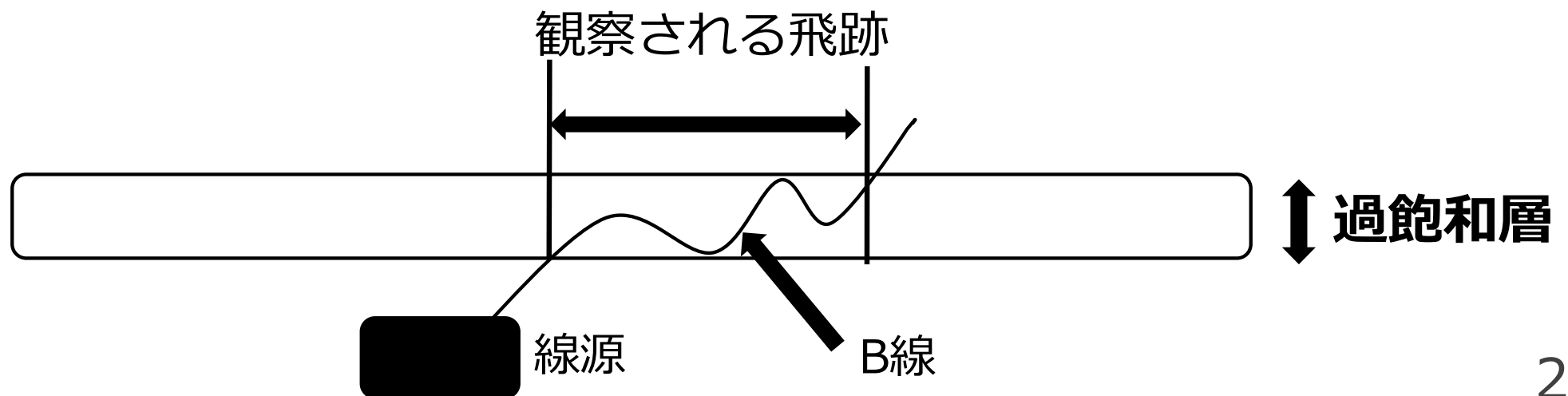
・電子と物質の相互作用

低エネルギーになればなるほど、衝突阻止能が大きくなり飛跡の数が増加していると考ええる。

※放射線概論 第7版、p91、図7.2 電子の質量阻止能より

・β線は電子のため飛跡が折れ曲がる

長い飛跡ほど折れ曲がったことによる、誤差が蓄積され光電子飛程の理論値より短くなった。電子は散乱されやすく、飛程を直線距離で計測するとばらつきが大きい。



Am241 線源強度

理論値

Activity 11.23 μ Ci

Accuracy 5.0%

$11.23 \times 3.7 \times 10^{10} = 41.5 \times 10^4$ [Bq]

よって、415 [kBq]

実効線量は0.000576 μ Sv

距離30cm

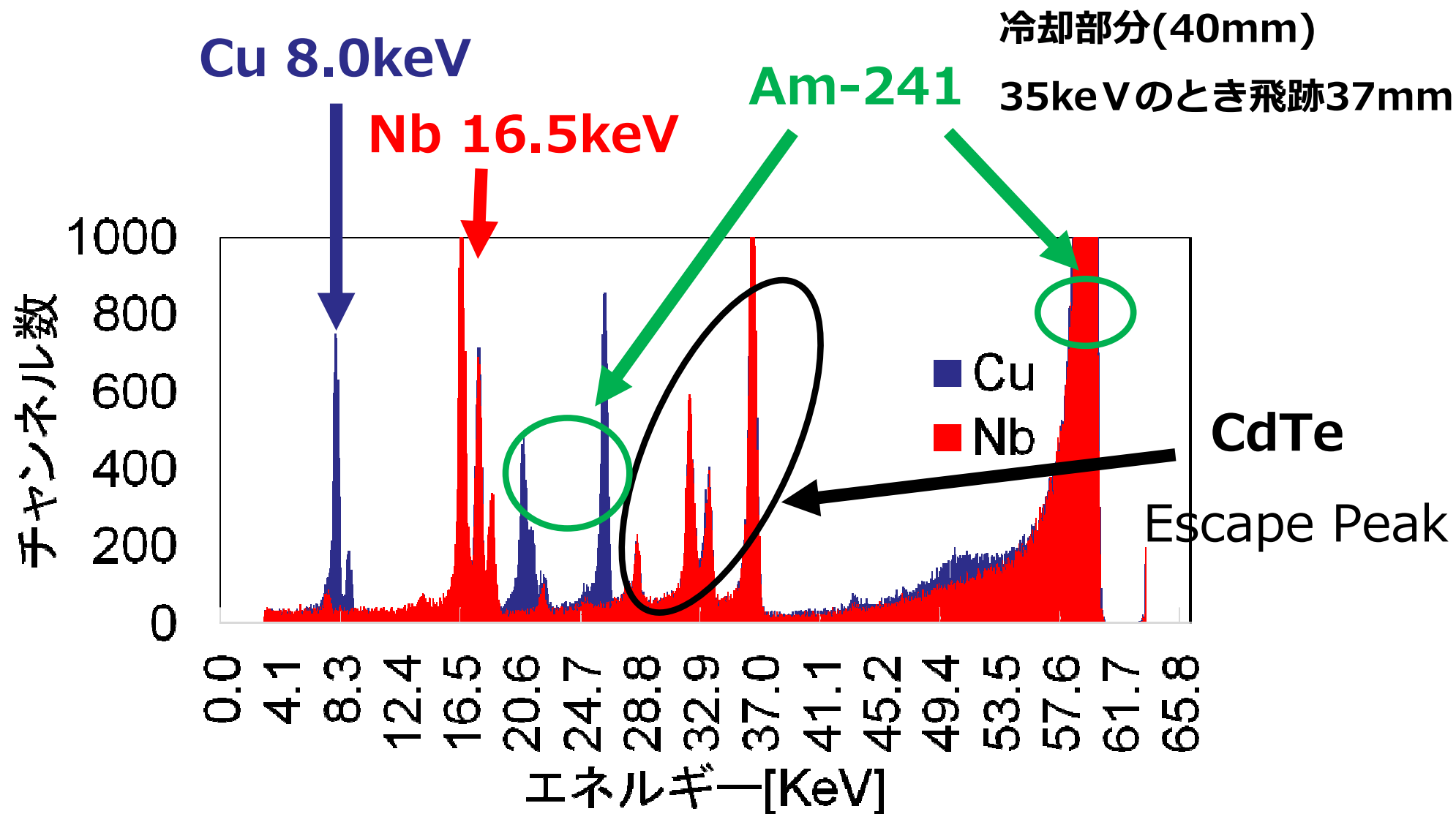
$0.00576 \times 0.415 \times 1/0.3^2 = 0.0266$ [μ Sv/h]

計測値では

直近で8 μ Sv/h(0cm)

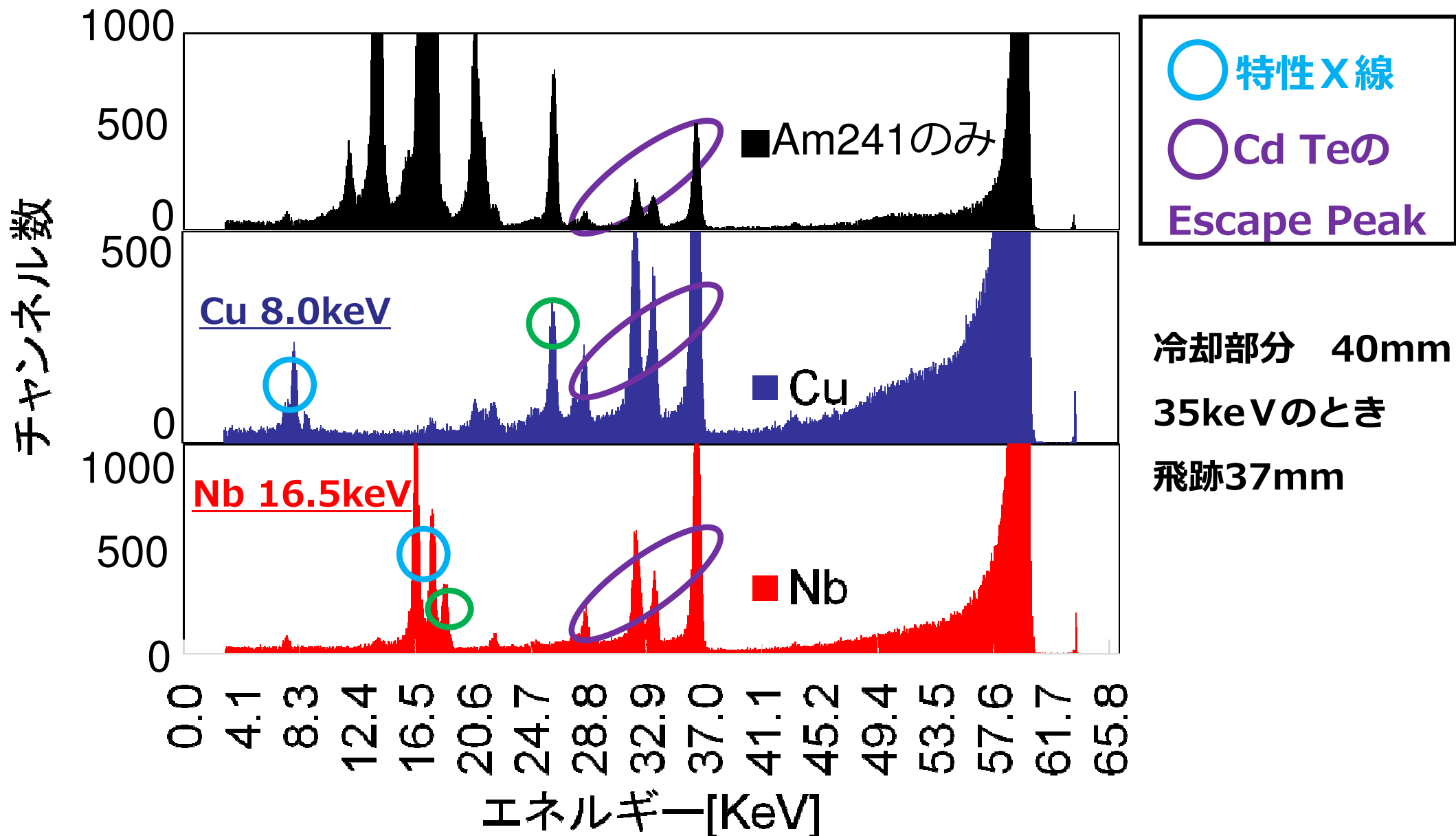
10cmで2 μ Sv/h

CZT検出器でのエネルギースペクトル測定結果



➡ Cu(8.0KeV)とNb(16.5KeV)の特性X線のエネルギーピークを確認

CZT検出器でのエネルギースペクトル測定結果



➡ Cu(8.0KeV)とNb(16.5KeV)の特性X線のエネルギーピークを確認 24