

卒業論文

Generator の X 線スペクトル解析

東京都立大学 理学部物理学科 宇宙物理実験研究所

0140330 星 理沙

1. 目的
2. 半導体ダイオード検出器
 2. 1. 概要
 2. 2. 半導体の性質
 2. 3. CdTe 検出器
3. Generator (X 線発生装置)
 3. 1. X 線
 3. 1. 1. 高速電子
 3. 1. 2. 特性 X 線
 3. 1. 3. 制動放射
 3. 1. 4. ガンマ線の相互作用
 3. 2. Manson generator
 3. 2. 1. 測定方法
 3. 2. 2. 測定条件
 3. 2. 3. 結果と考察 (target …Ti)
 3. 3. OXFORD
 3. 3. 1. 測定方法
 3. 3. 2. 測定条件
 3. 3. 3. 結果と考察
4. まとめ

図一覧

- 図 2.1 バンドギャップ
- 図 3.1 光電吸収
- 図 3.2 2次ターゲットでの現象
- 図 3.3 manson generator と CdTe 検出器を接続したときの図
- 図 3.4 MnK α と AgK α で linearity 補正をしているグラフ
- 図 3.5 manson、HV 3 kV の時の X 線スペクトル
- 図 3.6 測定した X 線スペクトルを、空気と Be の透過率で補正したもの
- 図 3.7 補正前の全体のカウント数、カウントレート、補正後のカウントレート
- 図 3.8 manson generator の 2 次ターゲットから出ている TiK α のカウントレート(count/s) と、カロリメータで検出されると思われる TiK α のカウントレート(count/s)
- 図 3.9 OXFORD での測定状況
- 図 3.10 MnK α と AgK α で linearity 補正をしているグラフ
- 図 3.11 測定する HV と emission 電流の一覧
- 図 3.12 HV25.0, emission 電流 0.005mA の時の X 線スペクトル
- 図 3.13 測定された X 線スペクトルを、空気と Be の透過率で補正したもの
- 図 3.14 測定したデータの全体のカウント数(count)とそのカウントレート(count/s)、透過率補正後のカウントレート(count/s)
- 図 3.15 HV(kV)と測定される X 線のカウント数(count)の関係
- 図 3.16 透過率補正をしたグラフから読み取った RhK α と RhK β の各 HV に対するカウント(count)とカウントレート(count/s)
- 図 3.17 2次ターゲットから出ていると思われる RhK α と RhK β のカウント(count)とカウントレート(count/s)

参考文献

放射線計測ハンドブック

第1章 目的

実験室にある X 線発生装置 manson generator と OXFORD 製 series5000 について、放出された X 線スペクトルを半導体ダイオード検出器の CdTe 検出器で検出する。得られたスペクトルを解析し、X 線発生装置のターゲットから放出されている X 線の量とカロリメータで測定されるであろう量を計算し、今後、カロリメータでの X 線スペクトル解析するときに役立つことを目的とする。

第2章 半導体ダイオード検出器

2. 1. 概要

X 線が半導体に入射してくると半導体内の原子の電子が電離され、電子正孔対が出来る。検出器中に加えられた印加電圧によりその電子正孔対はそれぞれ逆方向に移動、捕獲され、それが電気信号として検出される。

放射線を検出、測定する場合、固体の検出媒体を使用するのが有利である事が多い。固体の密度はガスの密度に比べて約1000倍大きいので、高エネルギー電子やガンマ線の測定に際して固体の検出器の寸法はそれと等価なガス入り検出器に比べて小さくする事が出来る。また、シンチレーションが1個の情報キャリア(電子)を作り出すのに100 eV またはそれ以上のエネルギーを必要とするのに対し、半導体検出器ではそれよりもずっと小さなエネルギーしか必要としないため、多数のキャリアを得る事が出来る。エネルギー分解能は統計誤差で決まるのでキャリアの数が多ければ多いほどエネルギー分解能はよくなる。

2. 2. 半導体の性質

結晶性物質には格子に周期性があり、その為にその固体内の電子に許容されるエネルギーは帯状になる。高純度物質中のこれらのエネルギー帯は禁止エネルギーギャップだけ離れていて、このエネルギー帯のひとつに電子のエネルギーが規定される。絶縁体あるいは半導体中のバンドの単純化した図を図 2. 1に示す。下側のバンドは価電子帯と呼ばれ、結晶中の特定の格子位置に束縛されている外殻電子に対応する。上側のバンドは伝道帯と呼ばれ結晶中を自由に移動する電子に対応している。このバンド内の電子は物質の電気伝導に寄与する。価電子帯と伝道帯はバンドギャップで分離されており、このバンドギャップの大きさが半導体あるいは絶縁体のいずれにその物質を分類するかを決める。結晶内の電子の数は価電子帯内に存在可能な位置のすべてをちょうど満たす数だけある。したがって熱による励起がない場合、絶縁物および半導体はその価電子帯が完全に電子によって満たされており、伝道帯は完全に空席になっている。この状況では絶縁体も半導体も理論的には全然電気伝導を示さない。電子が伝道帯に到達するには、まずバンドギャップを越えねばならず、したがって電気伝導度は非常に低くなる。絶縁体のバンドギャップは普通5eV あるいはそれ以上であるのに対して半導体のバンドギャップはずっと小さい。

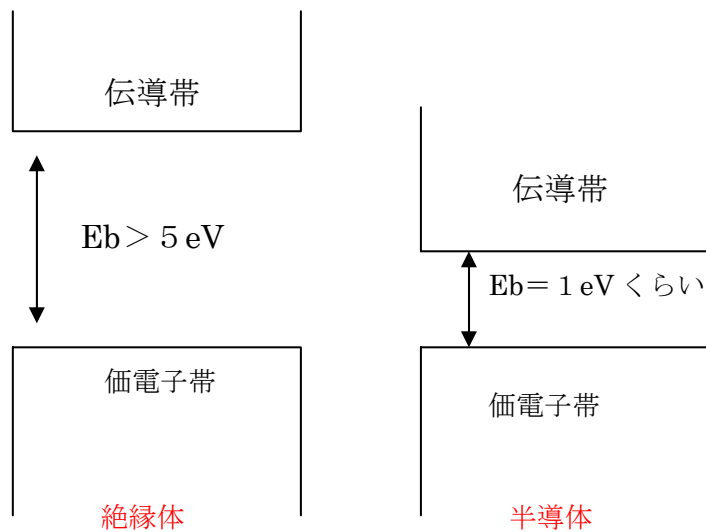


図 2.1 バンドギャップ

2. 3. CdTe 検出器

CdTe 半導体は比較的大きな原子番号 (Cd が 48、Te が 52) と室温動作を可能にするのに十分なバンドギャップエネルギー (1.52eV) を兼ねそろえている。CdTe は単位長当りの光電吸収の確率が大きいので、単位体積当りの大きなガンマ線検出効率が重要な場合に最もよく用いられる。CdTe 検出器は比較的堅牢で野外で使用しても安定であり、30℃までは熱雑音が増えることもなく日常的に使用できる。また、10 k counts/s を超えるとパイルアップの影響が顕著に現れると考えられるのでこれは超えないようにする。

使用するのは Amptek 社製の X-γ 線用 CdTe 半導体検出器で、検出器の大きさは 2mm×2mm、Be 窓の厚さは 12.6 μm である。

CdTe 検出器で測定したデータは PX2T POWER SUPPLY & AMPLIFIER で増幅され、network-mca という A-D converter でデジタル化され、パソコンに取り込まれる。データは縦軸 count、横軸 channel の形で出てくるので、横軸の channel を energy に直さなくてはならない。また、日ごとに gain が変動する可能性もあるので、毎回 X 線を測定する前に、X 線源 Fe55 と Cd109 (この二つをキャリブレーションという) のエネルギーのわかっている X 線 Mn Kα (5.9keV) と Ag Kα (22.1keV) を測定し、channel から energy への補正を行う。X 線源からの X 線を測定するときは CdTe 検出器の Be 窓に線源をぴったりくっつけて測定した。

channel 補正は、MnKα (5.9keV) と AgKα (22.1keV) のピーク channel をそれぞれのエネルギーに当てはめることによって求める。

第3章 Generator (X線発生装置)

3. 1. X線

3. 1. 1. 高速電子

高電圧を generator の filament にかけると、電子が加速されて高速電子となって放出される。これを1次ターゲットにぶつける。

高速電子は吸収物質の中で徐々にエネルギーを失い、制動放射線を発する。また、原子内の電子と相互作用することにより、原子内の電子を励起状態にする。そして、元の場所が電子に埋められることにより特性X線が放射される。

3. 1. 2. 特性X線

原子の軌道電子はX線、電子、アルファ粒子、その他の外部放射線源からの放射線と相互作用することにより正規の状態から外されると、この電子は短時間の間、励起状態になる。通常固体内では、1 ns あるいはそれ以下の時間内に電子は原子の最低エネルギー、すなわち基底状態に戻って再配列する性質を持っている。このように励起状態から基底状態への遷移時に放出されるエネルギーは特性X線となって放出される。特性X線のエネルギーは初期状態と最終状態間のエネルギーの差になる。

原子のK殻に1個の空孔が出来たとすると、その後この空孔が埋められる際にK系列の特性X線が放出される。空孔を埋める電子がL殻から来る場合には、K殻とL殻の結合エネルギーの差に等しいエネルギーを持つ $K\alpha$ 光子が放出される。M殻から電子が来る場合には、少しエネルギーの大きな $K\beta$ 光子が放出される。

K系列X線はそのエネルギーが最大なので、通常これがもっとも重要であり、そのエネルギーは元素の原子番号とともに規則的に増加している。

3. 1. 3. 制動放射線

電子などの荷電粒子が原子核の近傍を通過するときに、その電界によって減速され、その際失ったエネルギーを電磁波(X線)として放出する。このように電子と強い電磁界との相互作用によってX線が放出される現象を制動放射といい、放出される電磁波を制動放射または制動X線という。今回扱う粒子の種類とエネルギー領域では、高速電子のみが制動放射線を発する。

3. 1. 4. ガンマ線(X線)の相互作用

ガンマ線と物質との相互作用として、多くの過程が可能であるが、放射線測定上そのうちの3種類、光電効果、コンプトン散乱および電子対生成だけが重要な役割を果たしている。これらの過程はすべてガンマ線光子のエネルギーの一部または全部を電子のエネルギーに変換するものであり、これらの相互作用はまたガンマ線光子の急激かつ突然の変化をもたらし、光子は完全に消滅したり、大きな角度で散乱

されたりする。このガンマ線光子の振る舞いは、荷電粒子が多数の吸収物質の原子と連続的かつ同時に相互作用をして徐々に減速するのと対照的である。

ガンマ線のエネルギーによって相互作用の種類が以下のように変わる。

ガンマ線のエネルギー範囲	相互作用の種類
～数百 keV	光電吸収
数百 keV～1.02MeV	コンプトン散乱
>1.02MeV	電子対生成

今回扱うガンマ線のエネルギーは数百 keV 以下なので光電効果についてのみ述べる。

光電吸収は入射ガンマ線光子が消失する相互作用である。この場合、入射光子エネルギー $h\nu$ からもとの殻の電子の結合エネルギー E_b を差し引いた値の運動エネルギーを持つ光電子が吸収原子の束縛された殻の一つから放出される。

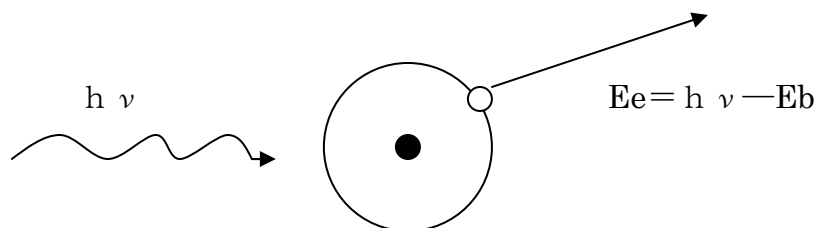


図 3.1 光電吸収

通常エネルギーのガンマ線の場合 K 殻電子を光電子として放出する確率が最も大きい。K 殻の結合エネルギーは Z の低い物質では数 keV であり、大きな Z の物質で数十 keV である。運動量保存則によりこの過程で原子が反跳するが、反跳エネルギーが大変小さいので通常は無視できる。

光電子放出の結果電子殻にできる空孔は電子の再配列によって埋められる。この過程でその殻の結合エネルギーは特性 X 線あるいはオージェ電子の形で放出される。オージェ電子はエネルギーが低いので飛程は極めて短い。特性 X 線は通常 1mm かそれ以下の距離を通過した後、吸収原子内のより弱く結合されている電子殻との光電効果で吸収される。

このようにして光電吸収が起こると、ガンマ線エネルギーの大半を持った光電子 1 個と、この光電子が当初持っていた結合エネルギーを吸収して作られた 1 個ないしそれ以上の低エネルギー電子が放出される。作られた複数個の電子の運動エネルギーの和はガンマ線光子の最初のエネルギーに等しいはずである。電子の全運動エネルギーは入射するガンマ線エネルギーに等しく、単一エネルギーのガンマ線に対しては常に同じ値になる。こうした条件下では、一連の光電吸収事象に対する電子の運動エネルギー分布は簡単

なデルタ関数となり、(縦軸 dN/dE 、横軸 E) 入射ガンマ線のエネルギーに対応した全電子エネルギーのところに単一のピークが現れる。

2次ターゲットにおいては、2次ターゲット表面で放射された特性X線と、2次ターゲットに入射してきた制動放射線と1次ターゲットの特性 X 線が散乱したものが、放射されることになる。このうち、1次ターゲットの特性 X 線が散乱したものはかなり微量なのでスペクトルには見られない。また、表面からは全方向に等方的に X 線が放射される。2次ターゲットの内側のほうに行った X 線は2次ターゲットに吸収される。

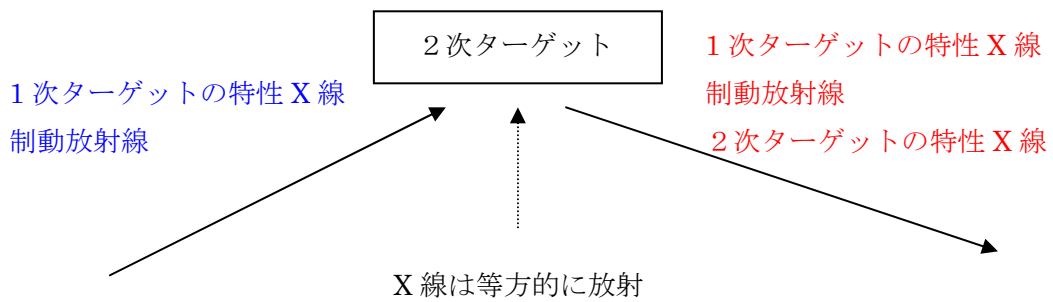


図 3.2 2次ターゲットでの現象

3. 2. Manson generator

Manson X-ray generator を使用した。これは、軟 X 線を出す X 線発生装置である。
特徴は

- ・ HV : 10kV 以下
- ・ emission 電流 : 1mA 以下
- ・ 動作時の最低必要な真空度 : 2×10^{-6} Torr

HV を早くあげたり、真空度が足らなかつたりすると放電するので注意する。
Emission 電流は HV をあげると自然に増加していく。HV をあげていき emission 電流の最大値を超えそうになった時は、cathode heating power で調整する。Filament を温めて熱電子を放出しているので温度を下げると電流も下がる。

3. 2. 1. 測定方法

以下の図のように manson generator と CdTe 検出器をつなぐ。1 次ターゲットはステンレスでできた筒の中心に位置しており、図の灰色の部分には真空にしてある。真空と空気の境にはバルブがついており、それをまわすことによって隔てられる。X 線が通るところには Be 窓 $30 \mu\text{m}$ がついている。図の水色の部分は空気である。CdTe 検出器と 2 次ターゲットの間には空気 169mm と Be 窓 $12.6 \mu\text{m}$ がある。filament は図の manson generator というところに入っている。

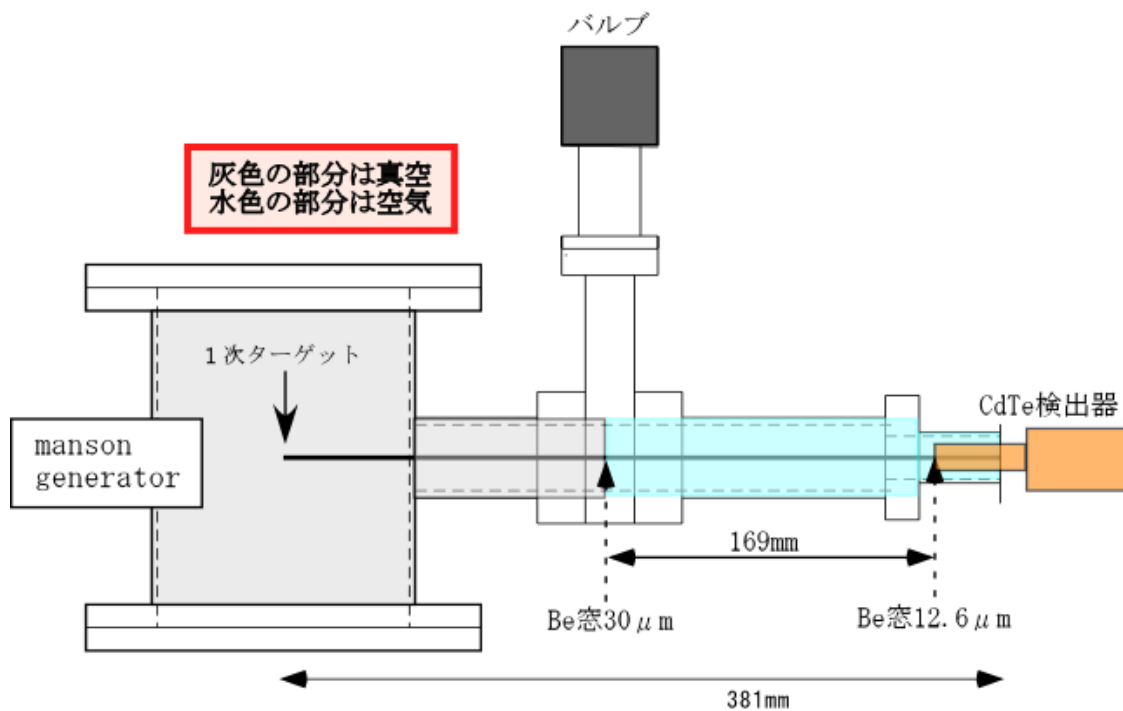


図 3.3 manson generator と CdTe 検出器を接続したときの図

Manson からの X 線を測定する前にキャルソースで測定し、channel から energy への補正を行う。キャルソースのスペクトルは以下ようになる。

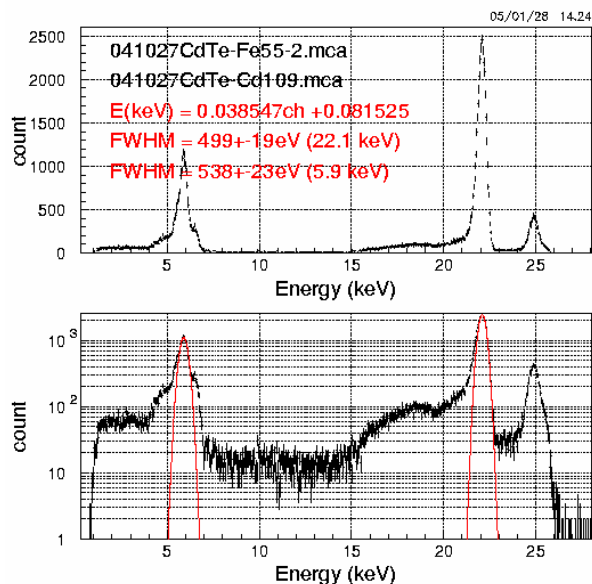


図 3.4 MnK α と AgK α で linearity 補正をしているグラフ

半値幅はそれぞれ、MnK α が 538 ± 23 、AgK α が 499 ± 19 である。このとき使っていたパソコンは、CdTe 検出器に近づけると分解能が著しく悪くなった。OXFORD の時と比べて分解能がよくないのはパソコンのせいだと考えられる。

このスペクトルより、channel と energy の関係は、それぞれを C,E で表すと、

$$E(\text{keV}) = 0.038547 C(\text{channel}) + 0.081525$$

であることがわかる。以下のスペクトルは、この関係に従って channel から energy に補正してある。

3. 3. 2. 測定条件

以下の条件において、X 線スペクトルの測定を行う。

- 測定時間：300 秒
- HV：3, 4, 5, 6, 7 kV
- 1 次ターゲットからの距離：381 mm
- 空気：169 mm
- Be：42.6 μm
- Manson の真空度：7.7~8.2 $\times 10^{-7}$ Torr
- 1 次ターゲット：Ti (TiK α ：4.508keV、TiK β ：4.93keV)
- gain 8

Manson の真空度は HV をかけるとあがる。

3. 3. 3. 結果と考察 (target…Ti)

以下に、HV ごとの X 線スペクトルを示す。いずれも左図が測定されたスペクトルで、上が普通のグラフで下が片対数グラフになっている。右上図の上の線が空気と Be の透過率で左図を割って補正したもので、片対数グラフである。ここまでは横軸が X 線のエネルギー (keV)、縦軸が X 線のカウントである。右下図は空気と Be を合わせた透過率のグラフで、横軸が X 線のエネルギー (keV)、縦軸が透過率となっている。

低エネルギー側では CdTe 検出器の response の問題で taik が入ってくるので、透過率補正後の低エネルギー側は必ずしも正しいとは限らない。そのため、カウント数を出すときには、カウントするエネルギーの範囲を 2.5~100keV にしてある。

①HV 3 kV の時

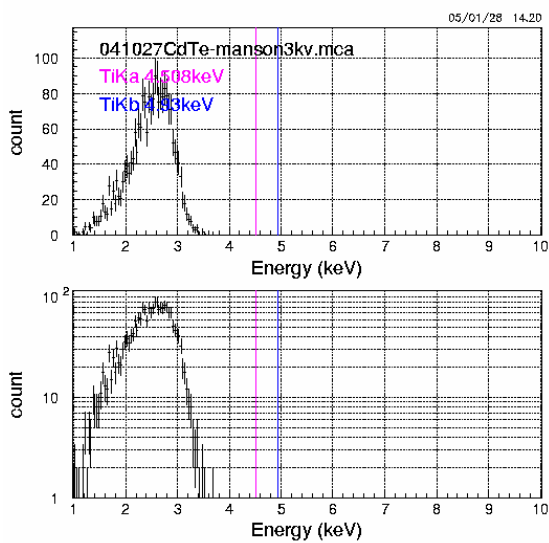


図 3.5 manson、HV 3 kV の時の X 線スペクトル

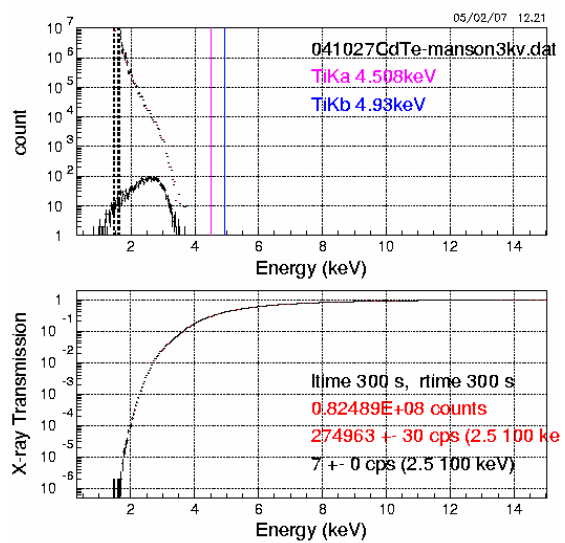
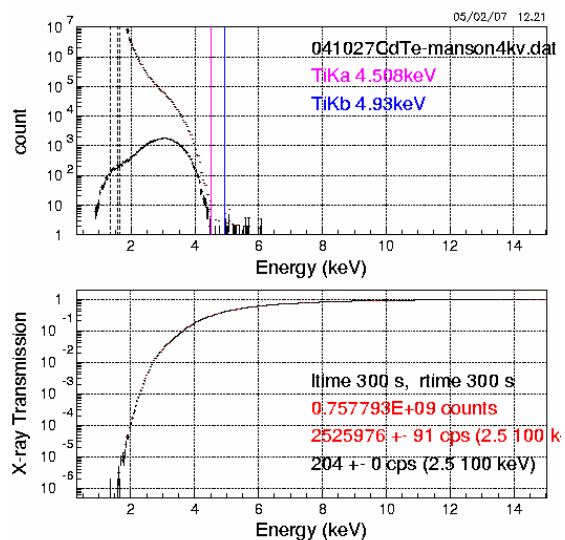
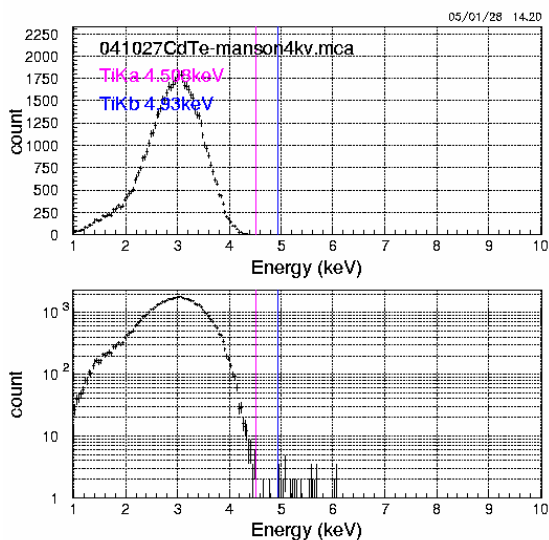
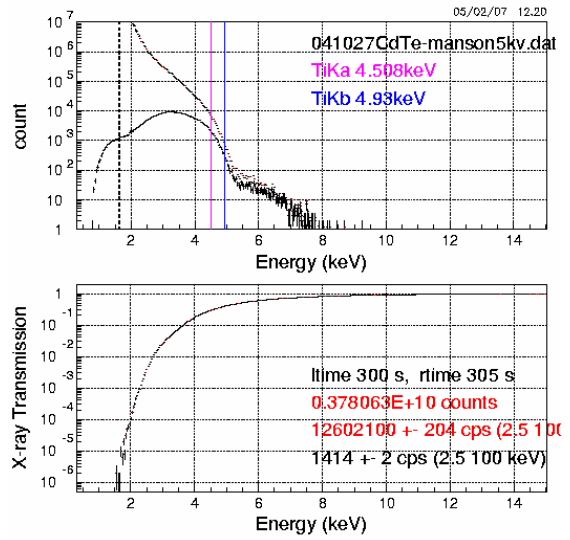
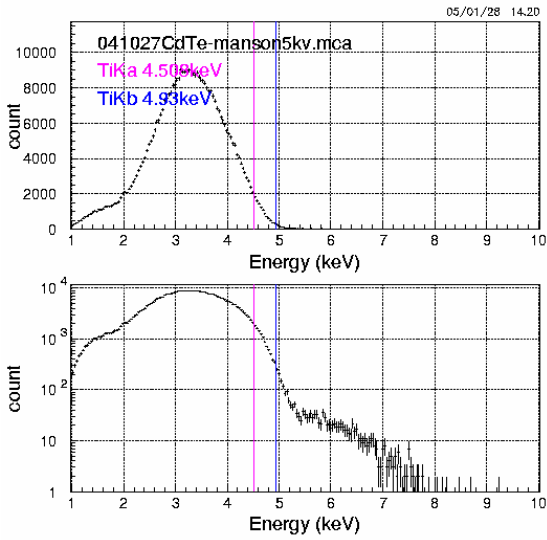


図 3.6 測定した X 線スペクトルを、空気と Be の透過率で補正したもの

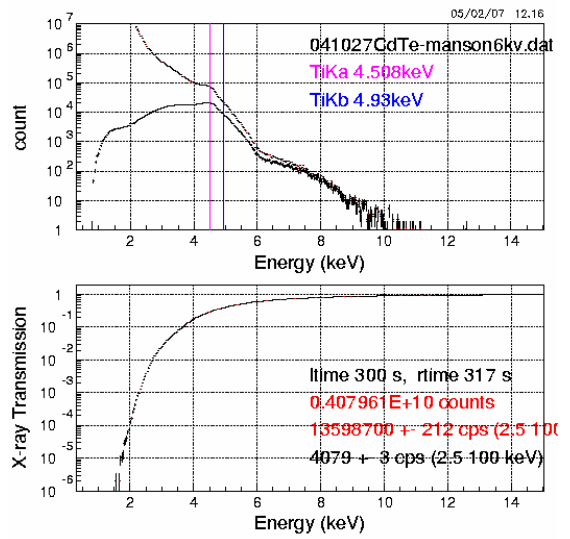
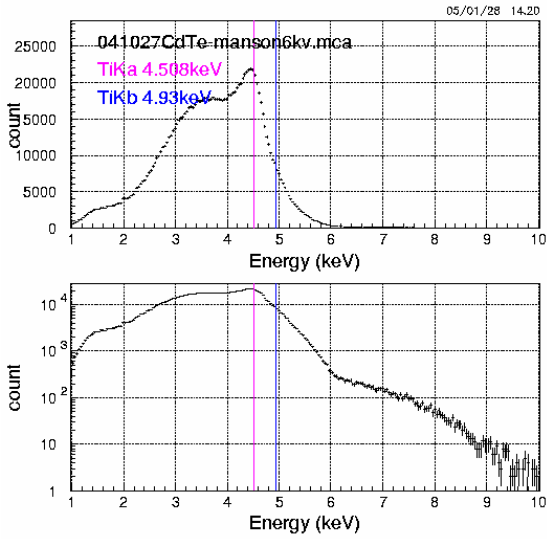
②. HV 4 kV の時



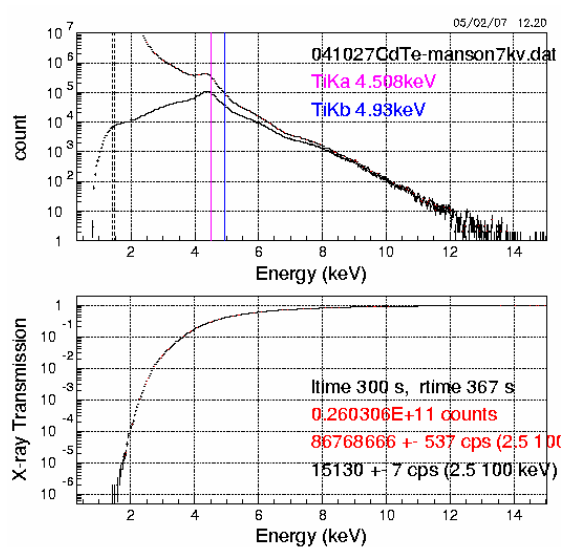
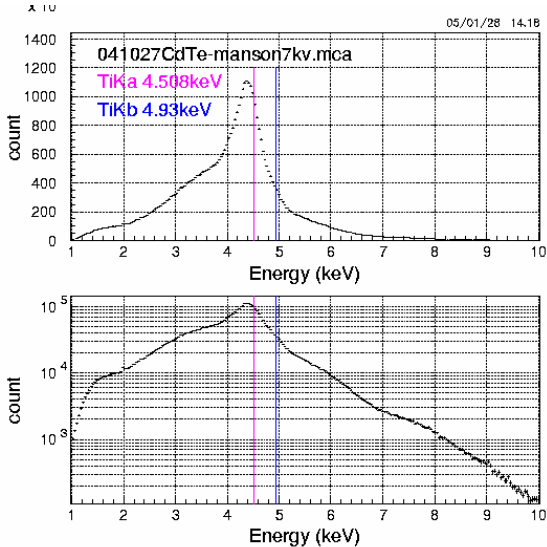
③. HV 5kVの時



④. HV 6kVの時



⑤. HV 7kVの時



以上のデータから補正前の全体のカウント数、カウントレート、補正後のカウントレートを表にまとめる。電流は多少変動したため、平均を取ってある。

	HV (kV)	電流 (mA)	カウント (補正前)	カウントレート (補正前)	カウントレート (補正後) (2.5~100keV)
①	3	0.017	2177	7±0	274963±30
②	4	0.031	61293	204±0	2525976±91
③	5	0.045	424412	1414±2	12602100±204
④	6	0.036	1223932	4079±3	13598700±212
⑤	7	0.061	4539141	15130±7	86768666±537

図 3.7 補正前の全体のカウント数、カウントレート、補正後のカウントレート

Ti の特性 X 線は、 $K\alpha$ が 4.508keV、 $K\beta$ が 4.93keV なので、HV 4 kV 以下では照射されない。また、5 kV でも量が少ないためにその輝線は見られないと考えられる。CdTe 検出器ではあまり分解能が良くないため、このくらいの軟 X 線では制動放射にまぎれてしまってみられないようだ。この範囲の軟 X 線を見る時は CdTe 検出器よりも分解能のいいものを用いたほうが良いようだ。

HV 6、7 kV の時、2 次ターゲットからどのくらいの $TiK\alpha$ 線が出ているかを計算する。ほかの部分は制動放射と見分けがつかないので計算はしない。

立体角は、窓の面積を s 、2 次ターゲットからの距離を r とすると、 $s \ll r$ の場合、 $s/4\pi r^2$ と近似する。

2 次ターゲットが放出する X 線のカウントレートを求める式は以下ようになる。

$$\frac{\text{(測定されたカウントレート)}}{\text{(立体角)} \times \text{(空気の透過率)} \times \text{(Be の透過率)}}$$

上の表の値はすでに、空気と Be の透過率を考慮してあるものなので、求める式は

$$\frac{\text{(測定されたカウントレート)}}{\text{(立体角)}}$$

となる。

今、 $s = 2\text{mm} \times 2\text{mm} = 4\text{mm}^2$ 、 $r = 381\text{mm}$ である。

透過率補正したグラフから、 $K\alpha$ の部分抜き出し、そのカウントから制動放射の部分を引いて、 $K\alpha$ のカウントを出す。そこから上の式を用いて 2 次ターゲットから出ている $TiK\alpha$ のカウントレートを求める。

カロリメータで測定される emission 電流 $1\mu\text{A}$ におけるカウントレートは空気、Be、Al、

polyimide の透過率はすべて無視すると

CdTe 検出器の $s_1 = 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$

$$r_1 = 381\text{ mm}$$

カロリメータの $s_2 = 0.1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm} \times \pi$

$$r_2 = 400\text{ mm}$$

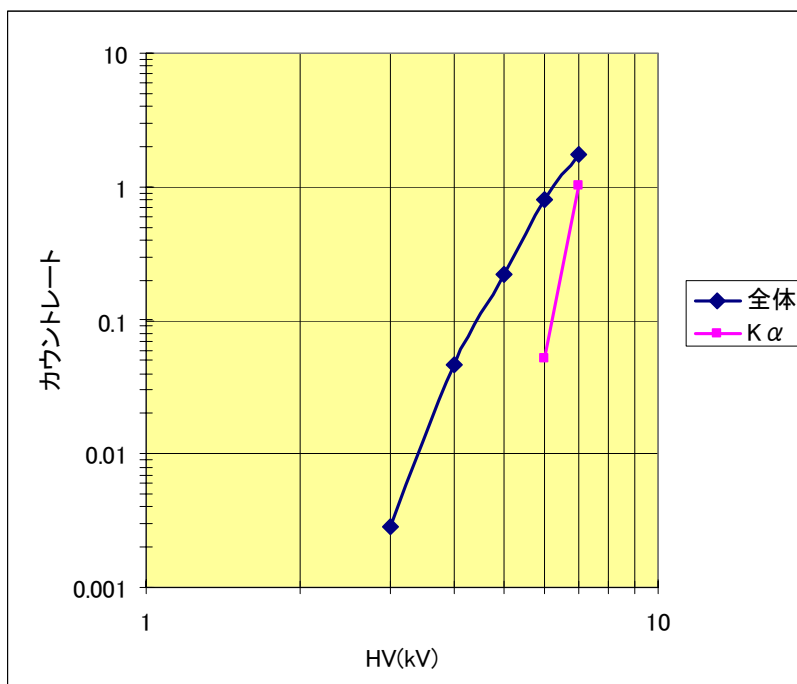
なので求めるカウントレートを C として、測定されたデータの $0 \sim 100\text{ kV}$ のカウントレートを C_2 とすると、

$$C = C_2 \div \frac{S_1}{4\pi \times r_1 \times r_1} \times \frac{s_2}{4\pi \times r_2 \times r_2}$$

$$= C_2 \times 0.007$$

この式より、カロリメータで予測されるカウントレートは、以下のようになる。

	Emission 電流 ($\mu\text{ m}$)	測定値 カウントレート ($0 \sim 100\text{ keV}$)	$1\ \mu\text{ A}$ あたり カウントレート	$1\ \mu\text{ A}$ あたり カロリメータでの カウントレート	$K\alpha$ カウント ($3.9 \sim 4.7\text{ keV}$)	カロリメータでの $K\alpha$ のカウントレート
3	17	7	0.412	0.00288		
4	31	204	6.581	0.046		
5	45	1414	31.422	0.220		
6	36	4079	113.306	0.793	80552	0.05
7	61	15130	248.033	1.736	2681406	1.03



これから $K\alpha$ 線が十分出ていることが分かる。

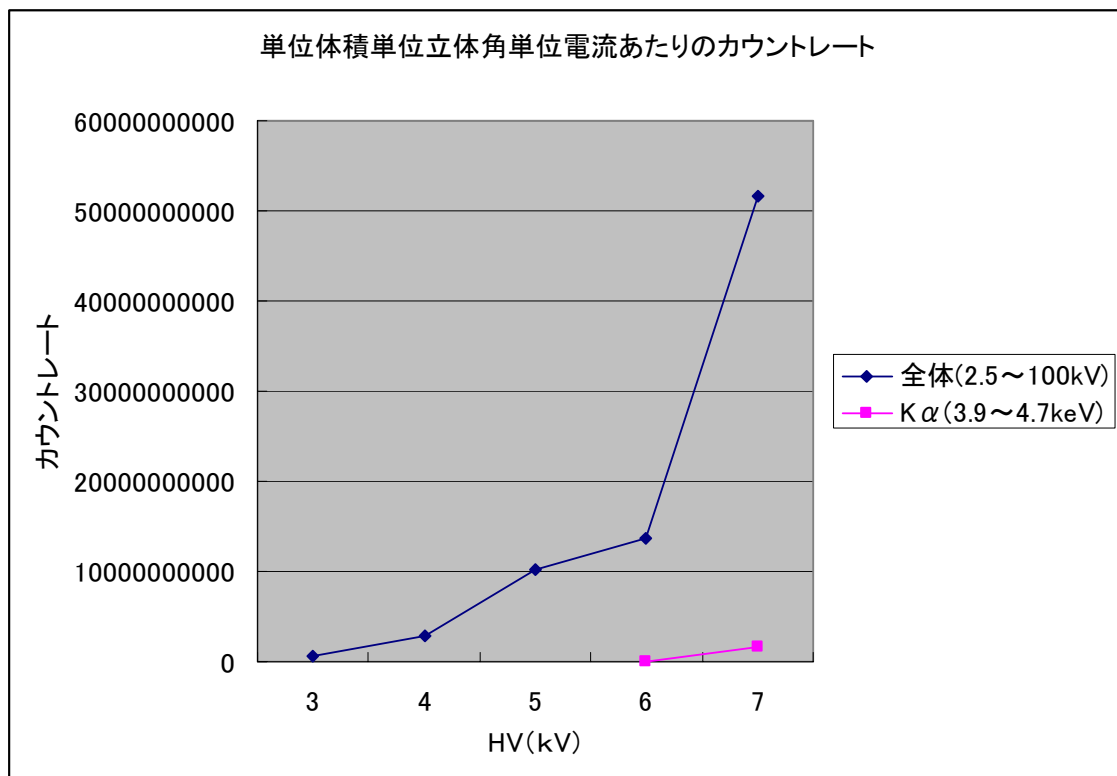
また、カロリメータは 1 カウントを検出するのに 10ms 必要とするのでカウントレートは 100count/s 以下である必要があり、特に 1~10count/s だといいい。この範囲にカウントを抑えるためには、

6 kV の時 emission 電流を 0.007mA(全体かうんと 5.53count/s、 $K\alpha$ カウント 0.53count/s)

7kV の時 emission 電流を 0.003mA(全体かうんと 5.1count/s、 $K\alpha$ カウント 3.09count/s)にするといいい。ただし、距離は 40cm、カロリメータのコリメーターは 0.2mm ϕ である。

また、透過率補正後のデータから単位面積(1mm²)単位立体角単位電流(1mA)あたりのカウントレートを求める。

HV (kV)	カウントレート (補正後) (2.5~100keV)	単位面積単位立体角 単位電流あたりの カウントレート($\times 10^8$)	$K\alpha$ カウント (3.9~4.7keV)	$K\alpha$ の単位面積単位立 体角単位電流あたりの カウントレート
3	274963	5.87		
4	2525976	29.6		
5	12602100	101.6		
6	13598700	137.1	80552	81201450.5
7	86768666	516.2	2681406	1595227772



3. 3. OXFORD

OXFORD 製、series 5000 という X 線発生装置を使う。

特徴は

- emission 電流 0 ~1.0 mA
- HV 4 ~50 kV
- 1次ターゲット Rh (Z=45)
- X 照射立体角 25°
- 出射口 Be 窓 125 μ m

emission 電流は 0.001mA が最小電流なので 0.001mA の場合は電流が安定しないため、照射される X 線の量も安定しないので電流は 0.001mA 以上ながしたほうがいい。

3. 3. 1. 測定方法

OXFORD X 線発生装置と CdTe 検出器を図 3.8 のように接続する。OXFORD X 線発生装置は X 線が大量に出て危険なため、シールドを厳重にしなければならない。そのために、OXFORD と CdTe 検出器の間をステンレスの筒でつないだ。OXFORD と CdTe 検出器の間の距離は 380cm である。CdTe 検出器はあまり大量の X 線を浴びると壊れるので、これだけの距離を離れた。gain8 だと network-MCA のせいで高エネルギー領域が切れてしまうので gain4 でとることにする。

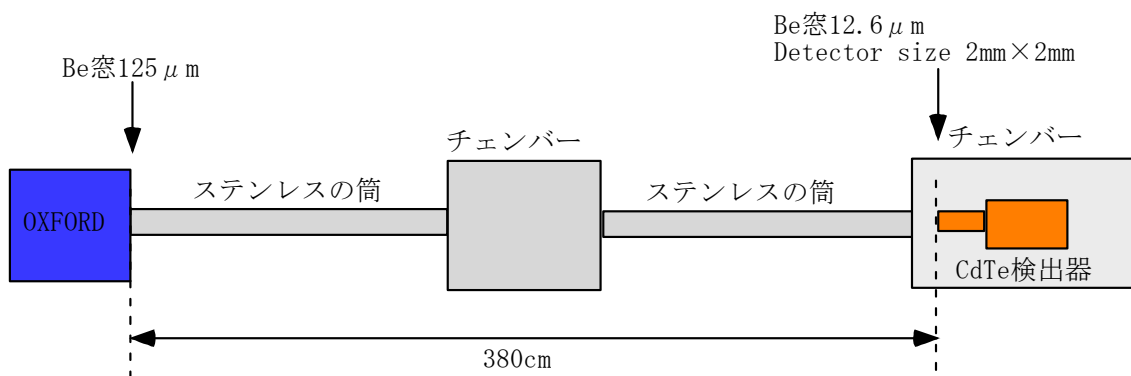


図 3.9 OXFORD での測定状況

以下に、fitting のグラフを示す。

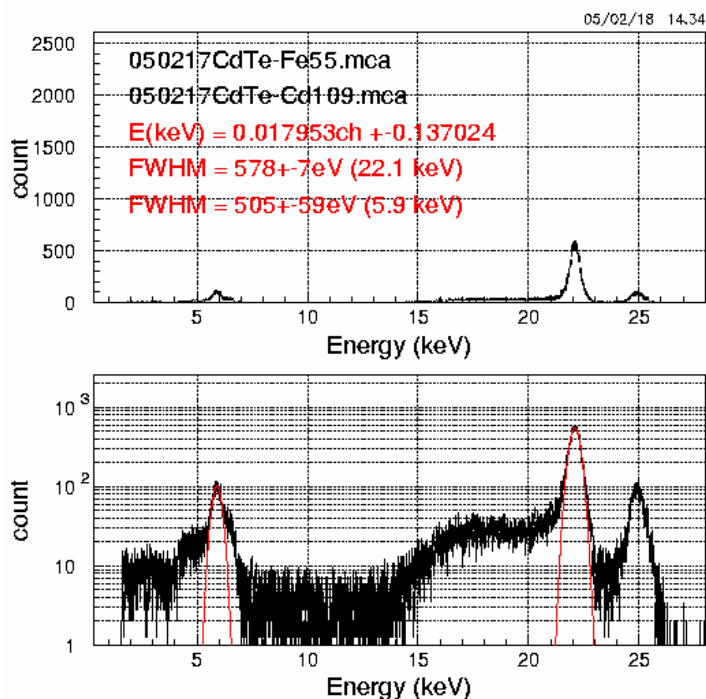


図 3.10 MnK α と AgK α で linearity 補正をしているグラフ

これより、energy を E(keV)、channel を C とすると、補正の式は

$$E(\text{keV}) = 0.017953 C(\text{channel}) + 0.137024$$

となる。以下のスペクトルは、この関係に従って channel から energy に補正してある。

3. 3. 2. 測定条件

測定条件は以下のように行う。

- 測定時間：300s
- 空気：380cm
- Be：12.6 μ m
- gain：4

測定した印加電圧と emission 電流は図 3.11 の通りである。空気が 380cm も間にある為、HV8kV 以下はほとんど X 線が空気に吸収されてしまっていない。

	HV(kv)	emission 電流(mA)
①	10.0	0.1
②	15.0	0.01
③	20.0	0.01
④	25.0	0.01
⑤	30.0	0.01
⑥	35.0	0.01

図 3.11 測定する HV と emission 電流の一覧

⑦	40.0	0.01
⑧	45.0	0.01

HV が 30.0kv の時だけ emission 電流を図のように変化させて測定する。

	HV(kv)	emission 電流(mA)
⑨	30.0	0.005
⑩	30.0	0.01
⑪	30.0	0.015
⑫	30.0	0.02

3. 3. 3. 結果と考察

測定されたスペクトルを以下に示す。

右図は CdTe 検出器が測定した、1 次ターゲットからの X 線のスペクトルである。上がリニア、下が片対数グラフである。横軸が X 線のエネルギー、縦軸がカウント数である。図の中のピンク色の線は RhK α の線で、エネルギーは 20.21keV で、緑と青の線は RhK β の線で、エネルギーは 22.72keV となっている。この線特性 X 線の輝線は一致している。1 次ターゲットと CdTe 検出器の間には、図 3.5 からも分かるように、空気 380cm と Be 12.6 μ m+125 μ m がある。OXFORD 側の Be 窓は、外すことはないので、この透過率は考えずに、この Be 窓から放出される X 線量を考える。したがって、考慮すべき透過率は空気 380cm と Be 12.6 μ m のみによる透過率で、X 線のエネルギーによる透過率の変化を左図の下に示す。横軸がエネルギー、縦軸が透過率である。右図のスペクトルを左下図の透過率のグラフで割って、透過率補正したのが左上図のグラフに赤い線で示されている。このグラフから、高いエネルギーの X 線は遮蔽されにくい事がわかる。

かけた HV よりも、高エネルギー側にスペクトルが出ているのは複数カウントを 1 カウントとして数えたために、エネルギーはその複数個のエネルギーを足したものになり、かけた HV を超えてしまったものと考えられる。これは、カウント数が多いとその分おきやすくなる為、HV が高いスペクトルのほうに顕著に現れる。

①HV 10.0kV、emission 電流 0.1mA

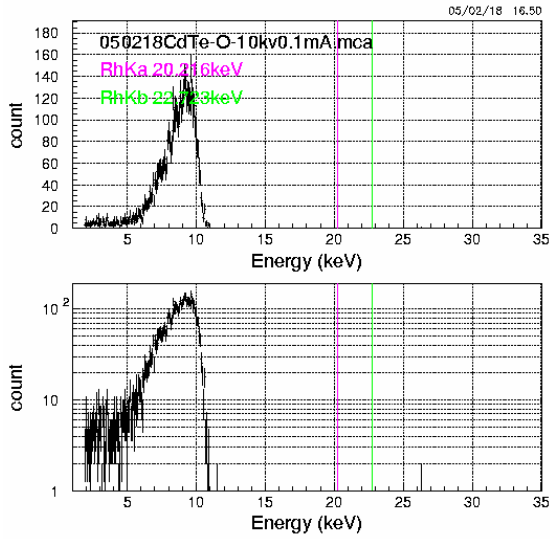


図 3.12 HV10.0,emission 電流 0.01mA の時の X 線スペクトル

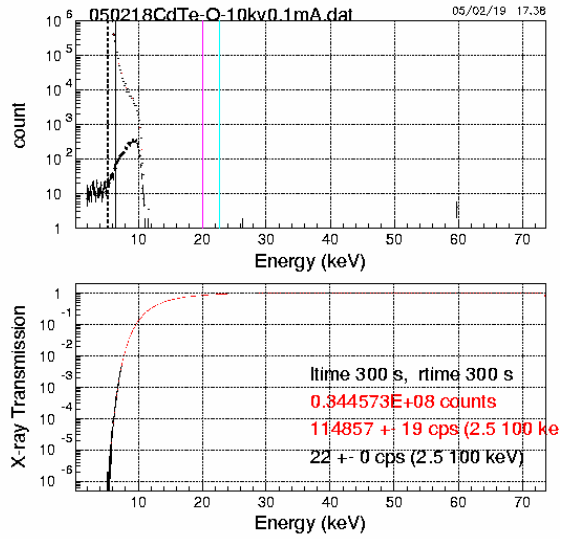
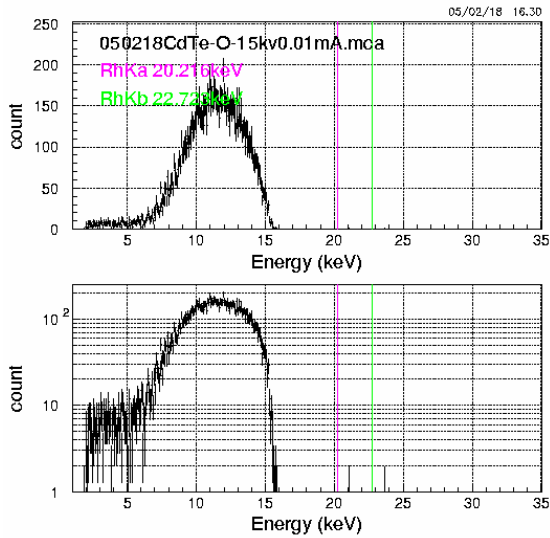
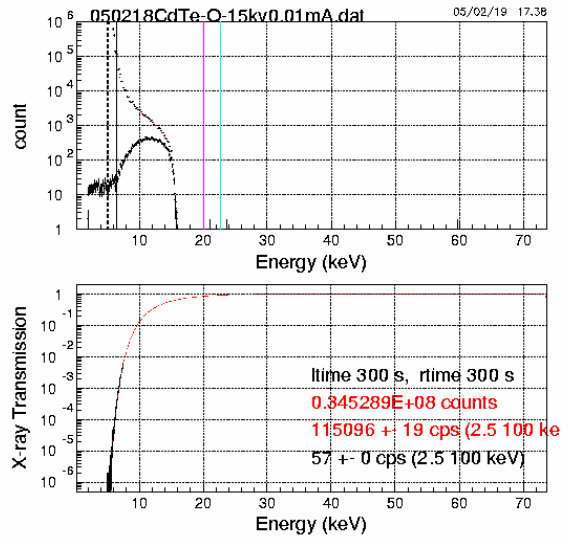


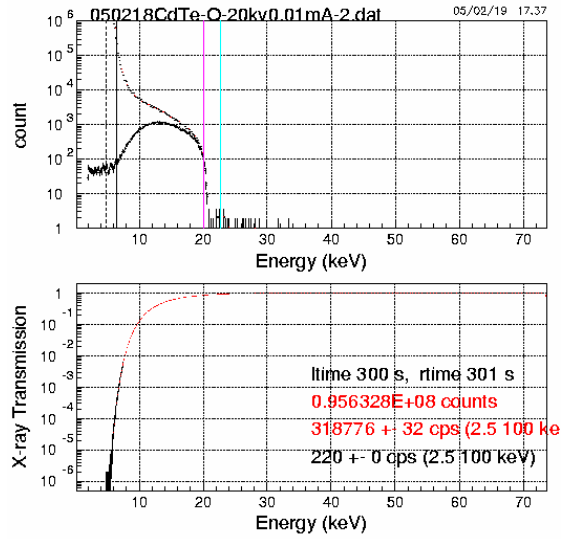
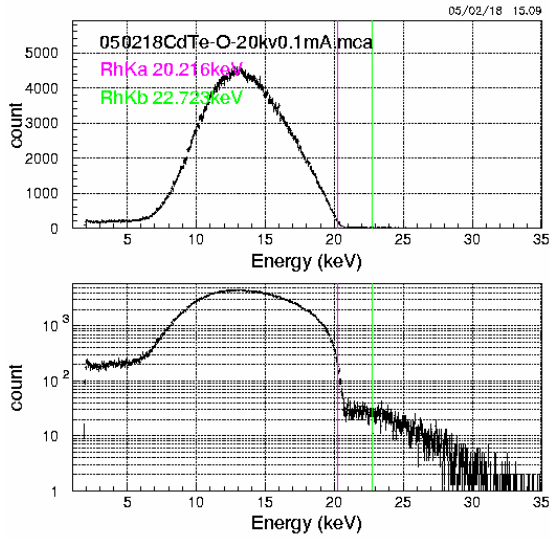
図 3.13 測定された X 線スペクトルを、空気と Be の透過率で補正したもの

②HV 15.0kV、emission 電流 0.01mA

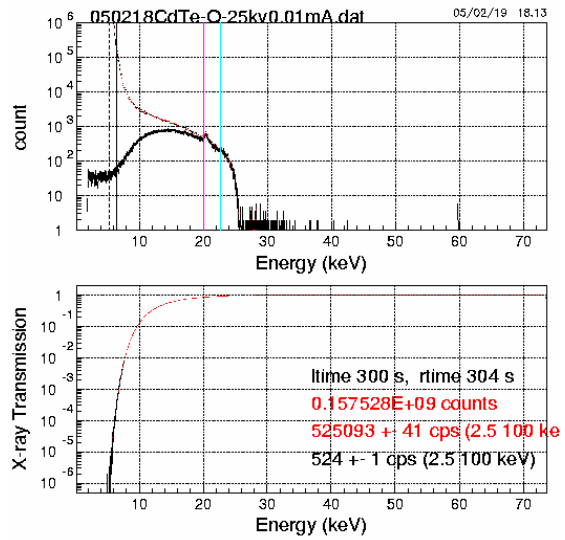
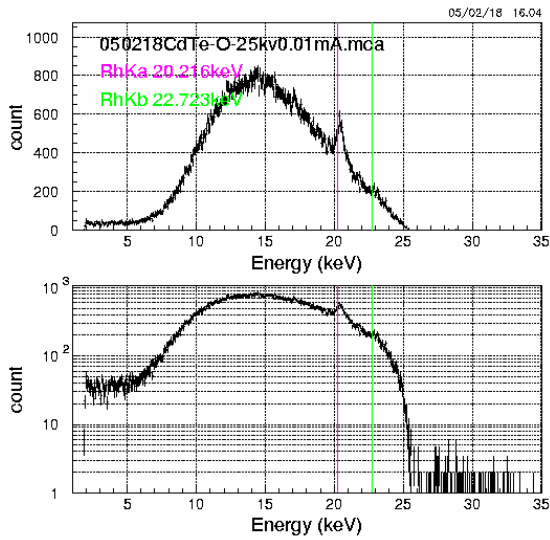


③HV 20.0kV、emission 電流 0.01mA

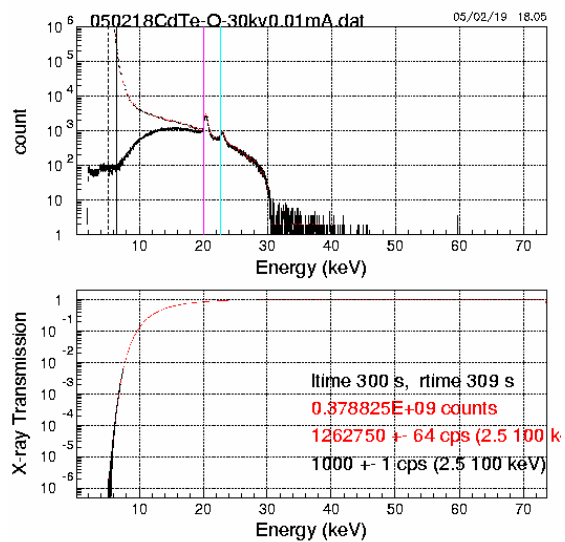
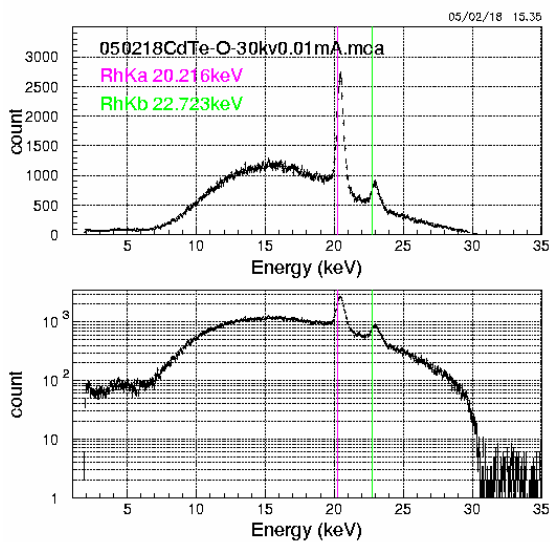




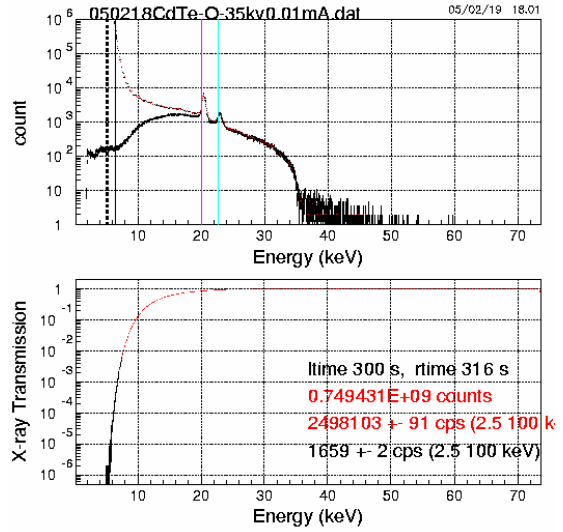
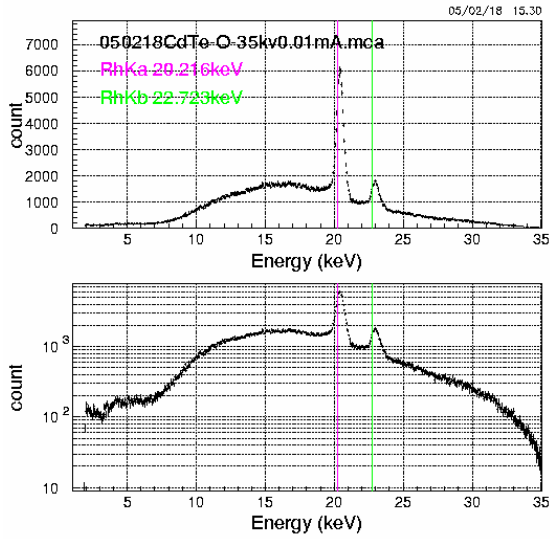
④HV 25.0kV、emission 電流 0.01mA



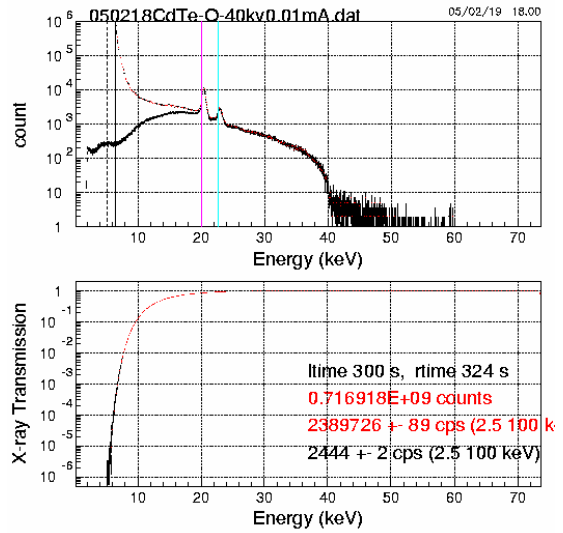
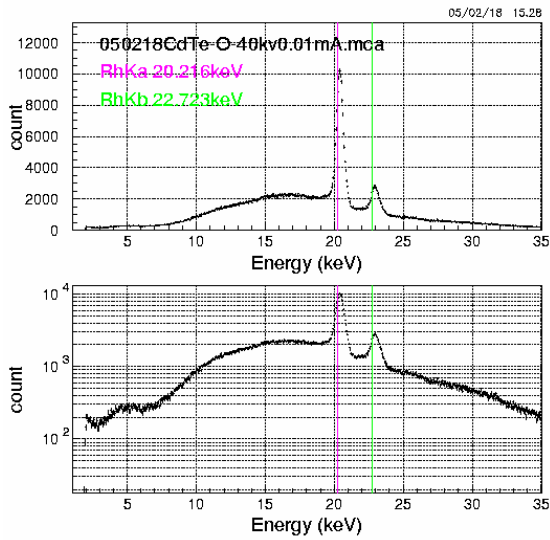
⑤HV 30.0kV、emission 電流 0.01mA



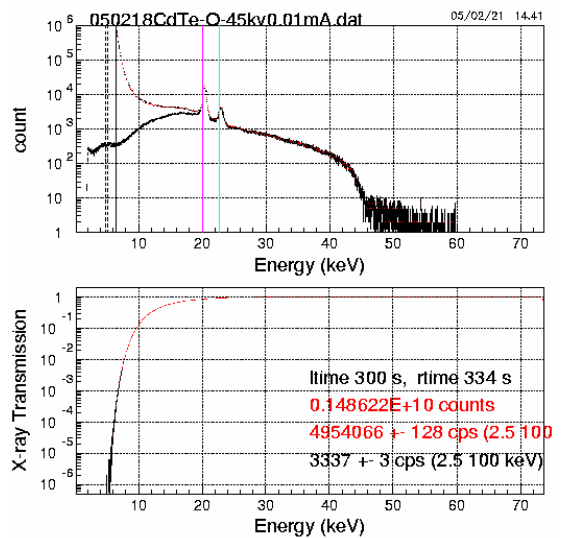
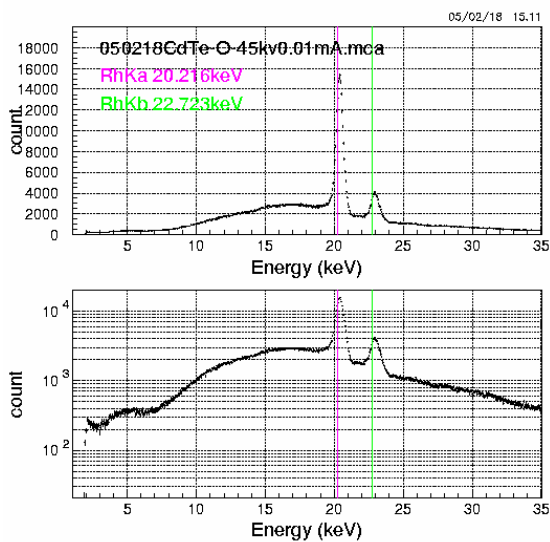
⑥HV 35.0kV、emission 電流 0.01mA



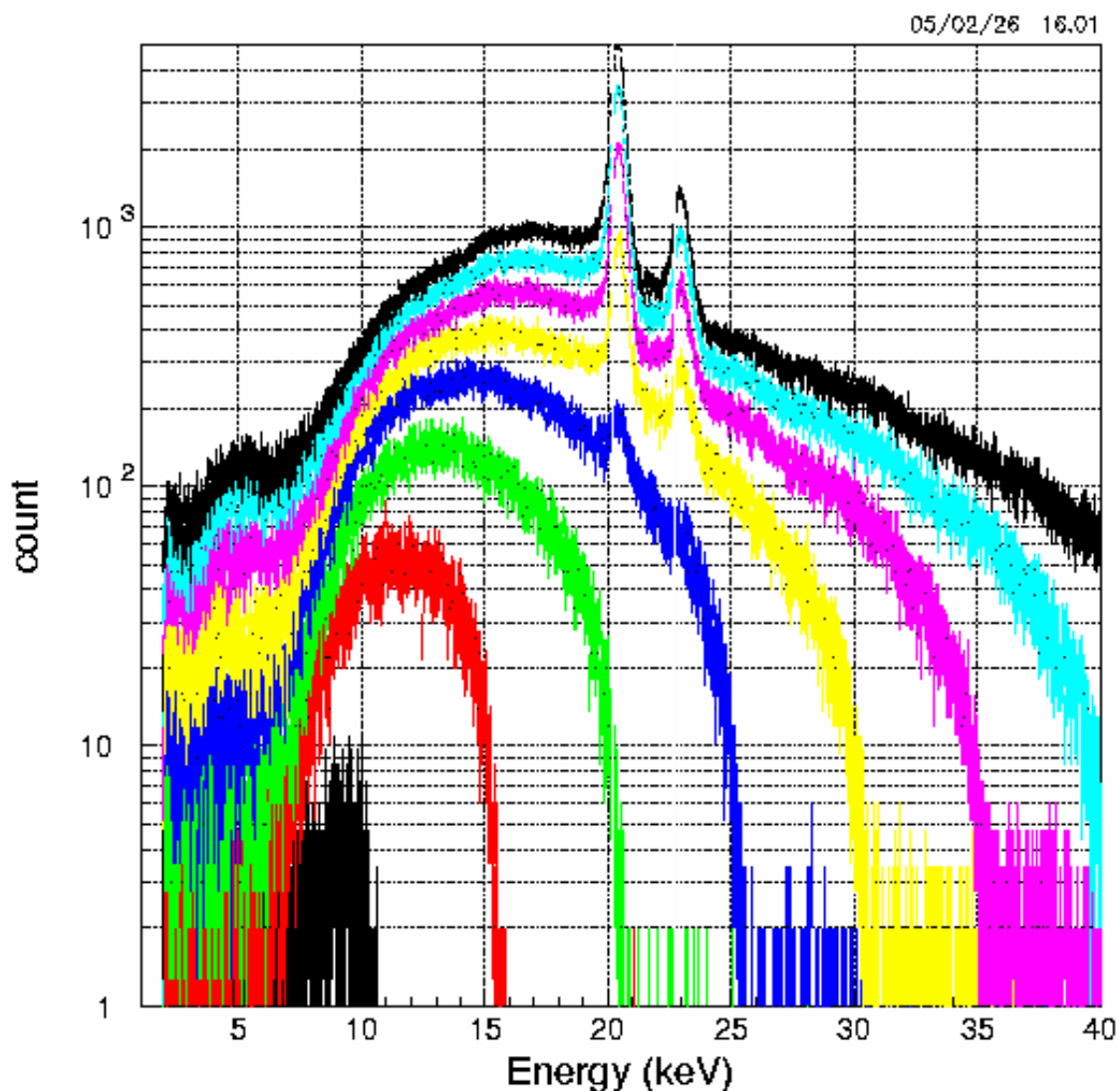
⑦HV 40.0kV、emission 電流 0.01mA



⑧HV 45.0kV、emission 電流 0.01mA



測定されたスペクトルを重ね合わせると以下ようになる。Emission 電流は 0.01mA である。上から、45,40,35,30,25,20,15,10kV となっている。



低エネルギー側のスペクトルが変化しているのは検出器の持つ性質が原因。

以上のスペクトルのカウント数をまとめると以下ようになる。8.0、10.0kV については電流 0.01mA あたりのカウント数に直してある。透過率補正する時、低エネルギー側は発散してしまうので補正後のカウントレートは、Energy が 6~100KeV の範囲の所を取って計算してある。

	HV(kV)	Emission 電流(mA)	全体のカウント数 (補正前)(count)	カウントレート (補正前)(count/s)
①	10.0	0.01	650±25	2.17±0.08
②	15.0	0.01	16806±130	56.02±0.43

③	20.0	0.01	65826±257	219.42±0.86
④	25.0	0.01	157079±396	523.597±1.321
⑤	30.0	0.01	299684±547	998.947±1.825
⑥	35.0	0.01	496955±705	1656.52±2.35
⑦	40.0	0.01	722445±850	2408.15±2.83
⑧	45.0	0.01	965308±983	3217.69±3.28

	全体のカウント (補正後)(10 ³ count)	カウントレート (補正後)(10 ³ count/s)
①	215.18±14.69	0.71727±0.04890
②	1419.5±37.7	4.7317±0.1256
③	3404.8±58.4	11.349±0.195
④	6888.8±83.0	22.963±0.277
⑤	11003±105	36.677±0.350
⑥	21586±147	71.953±0.490
⑦	32087±179	106.96±0.60
⑧	44788±117	45.507±0.390

78

図 3.14 測定したデータの全体のカウント数とそのカウントレート、透過率補正後のカウントレート

透過率補正後のグラフから RhK α (20.216keV) と、RhK β (22.723keV)のカウント、カウントレートを計算する。これらの特性 X 線は、HV20keV 以下では放出されないので HV25keV 以上のグラフについて計算する。

RhK α は 19.6~21.2keV を、RhK β は 22.1keV~23.8keV を抜き出した。

	HV (kV)	emission 電流(mA)	K α の カウント (count)	K α の カウントレート (count/s)	K β のカウン ト(count)	K β のカウン ト レ ー ト (count/s)
⑤	25.0	0.01	2289±48	7.630±0.1595	555±24	1.85±0.08
⑥	30.0	0.01	24893±158	82.977±0.526	3889±62	12.96±0.21
⑦	35.0	0.01	63133±251	210.44±0.84	12692±113	42.307±0.376
⑧	40.0	0.01	103308±321	344.360±1.071	21662±147	72.207±0.491
⑨	45.0	0.01	170788±413	569.293±1.378	36959±192	123.20±0.64

図 3.15 RhK α と RhK β の各 HV に対するカウントとカウントレート

1 次ターゲットが放出する X 線の量を求める。計算は Manson generator の時と同様に行

う。立体角 $s/4\pi r^2$ は $s=2\text{mm}\times 2\text{mm}$ 、 $r=3800\text{mm}$ 。

	HV(kV)	emission 電流 (mA)	K α のカウントレート (10^5count/s)	K β のカウントレート (10^5count/s)
⑤	25.0	0.01	3461 ± 72	839 ± 36
⑥	30.0	0.01	37642 ± 239	5879 ± 95
⑦	35.0	0.01	95465 ± 381	19192 ± 171
⑧	40.0	0.01	156217 ± 486	32756 ± 223
⑨	45.0	0.01	258257 ± 625	55889 ± 290

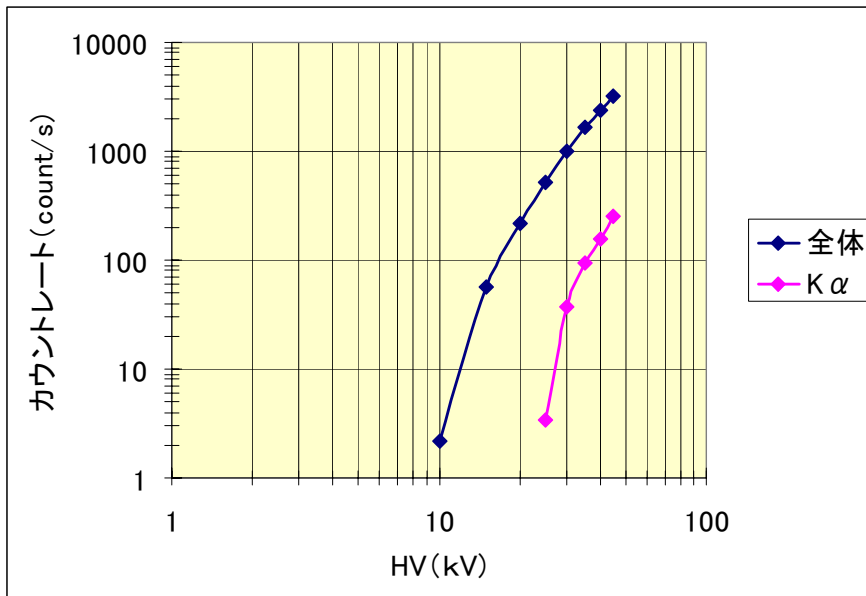
以下の状況においてカロリメータで測定されると予測されるカウントレートをグラフにすると以下ようになる。

カロリメータは

Detector size : $0.3\text{mm}\times 0.3\text{mm}$

コリメーター:直径 0.2mm 円

target との距離: 500mm とする。

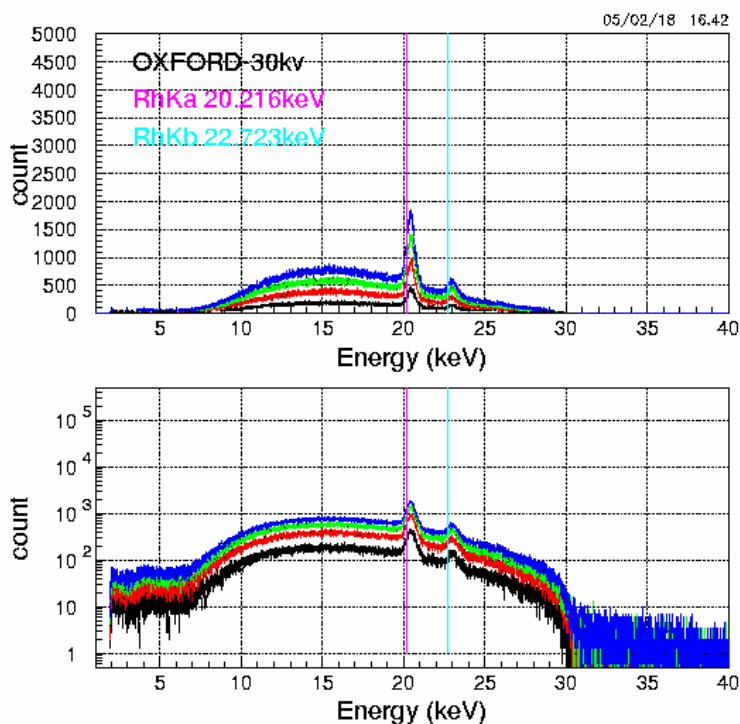


数値は以下のとおり。

HV(keV)	Emission (μm)	測定値カウントレート ($0\sim 100\text{keV}$)	$1\mu\text{m}$ あたりの カウントレート	$1\mu\text{m}$ あたりカロリ メータでのカウン トレート	K α のカロリメ ータでのカウン トレート($3.9\sim$ 4.7keV)
3	17	7	0.412	0.003	
4	31	204	6.581	0.046	
5	45	1414	31.422	0.220	
6	36	4079	113.306	0.793	0.05
7	61	15130	248.033	1.736	1.03

●emission 電流とカウントレートの関係

HV30.0kV で emission 電流を変えて測定したスペクトルを以下に示す。0.005mA の時が黒,0.01mA の時が赤,0.015mA の時が緑,0.02mA の時が青である。

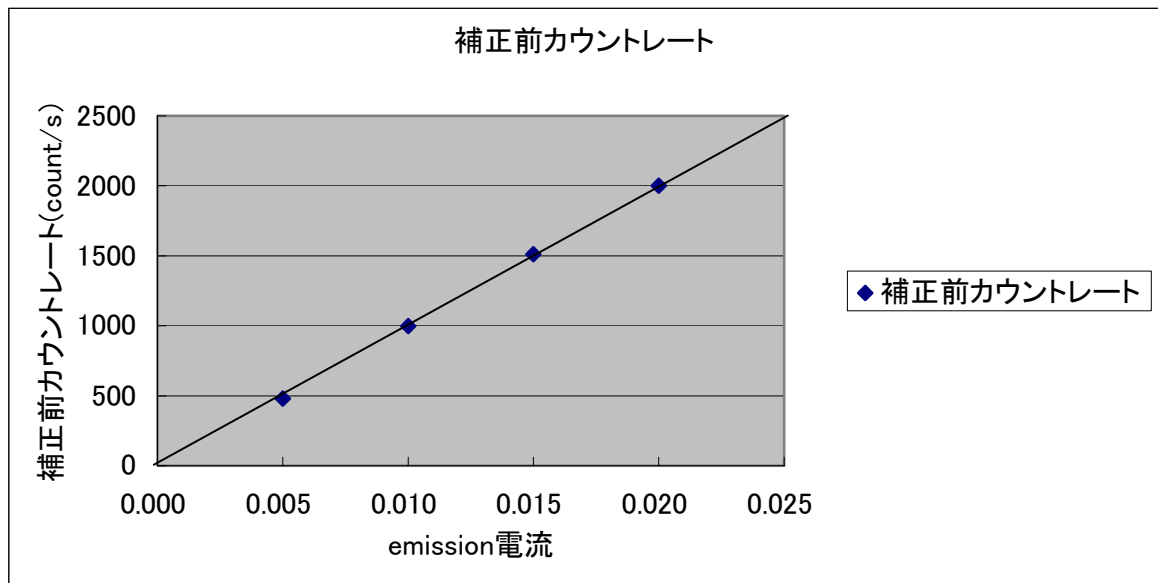


このカウントやカウントレートをまとめると以下のようなになる。

	HV(kV)	emission 電流(mA)	全体のカウント (補正前)(count)	全体のカウントレート (補正前)(count/s)
⑨	30.0	0.005	143786±379	479.287±1.264
⑩	30.0	0.01	299684±547	998.947±1.825
⑪	30.0	0.015	453200±673	1510.67±2.24
⑫	30.0	0.02	600529±775	2001.76±2.58

	6~70keV の カウント (補正後)(10 ³ count)	6~70keV の カウントレート (補正後)(10 ³ count/s)	K α のカウントレ ート(count/s)	K β のカウント レート(count/s)
⑨	5149.3±234.8	17.164±0.783	38.0±0.4	8.93±0.17
⑩	11003±105	36.677±0.350	83.0±0.5	13.0±0.2
⑪	16925±130	56.417±0.434	119±1	24.7±0.3
⑫	21306±146	71.020±0.487	157±1	29.8±0.3

補正前のカウントレートをグラフにすると以下のようなになる。これらのデータから emission 電流に比例してカウント数が増えている事がわかる。



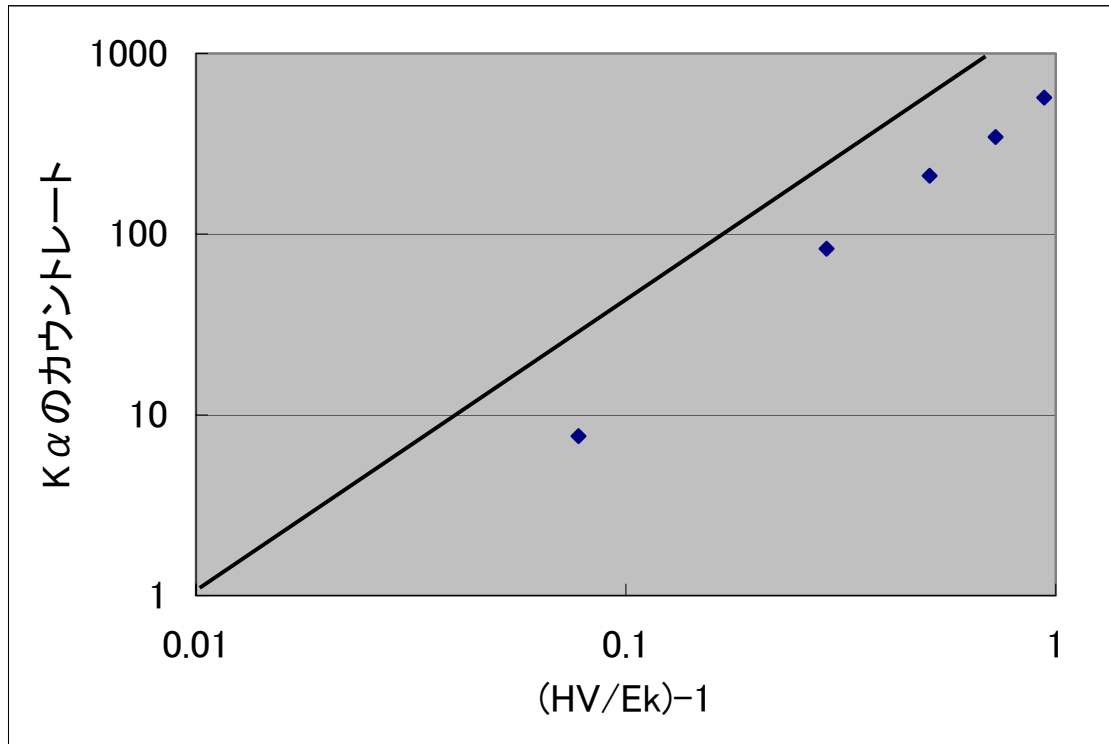
●HV とカウントレートの関係

特性 X 線のカウントレート C は

$$\left(\frac{E}{Ek} - 1 \right)^{\frac{5}{3}} \propto C$$

の関係がある。E は HV で獲得する運動エネルギー(keV)、Ek 軸は K 殻の電子が飛び出するのに必要なエネルギー (keV)。

横軸を E/Ek、縦軸を K α のカウントレートにして両対数グラフにプロットすると以下のようなになる。



黒い線は $5/3$ 乗に比例する線で、プロットした点を結ぶとこれと平行になることが分かる。よって、これが確かめられる。 $K\alpha$ は透過率補正したものを使った。

第4章. まとめ

Manson generator と OXFORD generator とともに、カロリメータのテストに十分な強度の輝線を出すことが分かった。

これらのデータから広いエネルギー範囲の輝線を使って検出の性能を評価することが出来る。