

# タングステン酸鉛単結晶 電磁カロリメータの性能評価

広島大学理学部物理科学科

クォーク物理学研究室

横山 一博 1279067C

主査 杉立 徹

副査 田中 健一郎

指導教官 杉立 徹

## 要旨

タングステン酸鉛単結晶( $\text{PbWO}_4$ )は透明で比重が $8.28\text{g}/\text{cm}^3$ と大きく、イットリウムなどを微量に混入することにより、放射線照射に対し蛍光(シンチレーション光)を発する。既存のシンチレーション材に比較して、放射長が $0.89\text{cm}$ と短く、モリエール半径も $2.0\text{cm}$ と小さいため、より細分化された検出器を構成できると考えられており、将来性あるシンチレーション材として注目されている。そのため、素粒子・原子核実験分野では高エネルギー粒子の高精度測定、核医学分野では人体の生理・生化学的機能の測定法のひとつであるポジトロン断層画像法への応用研究が始まっている。しかし、本結晶を製造できるのは、現時点で、世界に3カ国(日本、中国、ロシア)4製造所しかなく、それぞれで精製される結晶の物性や品質はあまり知られていない。そこで、本研究は、ロシアのRI&NC社製結晶を入手し、シンチレーション特性の測定、次いで電磁カロリメータとしての性能評価を行った。そして平成14年、本研究室で測定された古河機械金属(株)製結晶との比較検討を行った。

$20 \times 20 \times 200\text{mm}^3$ の結晶について、 $^{60}\text{Co}$ からの線照射における光量、および蛍光減衰時定数の温度依存性の測定を光電子増倍管(浜松ホトニクス社製R1450)を用いて行った。20における光量は $2.4$ 光電子/MeV、蛍光減衰時間は2成分あり、 $0.6\text{ns}$ (8%)、 $7.9\text{ns}$ (92%)となった。温度係数に関しては、それぞれ、 $-2.4 \sim -3.3[\%/ ]$ 、 $-1.5 \sim -1.8[\%/ ]$ であった。次に、結晶9本を $3 \times 3$ 配列に並べた電磁カロリメータを作製し、広島大学の超高速電子周回装置(REFER)において $150\text{MeV}$ の電子ビームを用い、性能評価を行った。その結果、エネルギー分解能と位置分解能はそれぞれ、 $2.6\%/ E$ 、 $1.6\text{mm}/ E$ となった。Eは入射粒子のエネルギーで単位はGeVである。古河製の結晶と比較すると、光量および平均蛍光減衰時間は同程度であった。また、9本組みのカロリメータの性能についても同様の精度が得られた。

# 目次

1. 序論
2. 導入
  - 2.1 シンチレーション機構
  - 2.2 電子や光子の高エネルギー (100 MeV ~ GeV) 物理過程
    - 2.2.1 荷電粒子の電離損失
    - 2.2.2 電磁カスケードシャワー
  - 2.3 電磁カロリメータ
    - 2.3.1 エネルギー分解能
    - 2.3.2 位置分解能
  - 2.4 PWO 結晶の特徴
  - 2.5 光電子増倍管
  - 2.6 REFER
3. 実験
  - 3.1 放射線源によるシンチレーション光の測定
    - 3.1.1 光量の温度依存性
    - 3.1.2 蛍光減衰時定数の温度依存性
  - 3.2 150 MeV 電子ビームによるカロリメータの性能評価
    - 3.2.1 PMT 読み出し PWO カロリメータのキャリブレーション
    - 3.2.2 9 本組みのエネルギー分解能
    - 3.2.3 9 本組みの位置分解能
  - 3.3 アフターグローの測定
4. 結果
  - 4.1 温度依存性
    - 4.1.1 光量の温度依存性
    - 4.1.2 蛍光減衰時定数の温度依存性
  - 4.2 カロリメータの性能評価
    - 4.2.1 PMT 読み出し PWO カロリメータのキャリブレーション
    - 4.2.2 9 本組みのエネルギー分解能
    - 4.2.3 9 本組みの位置分解能
  - 4.3 アフターグロー

5. 考察
  - 5.1 温度依存性の比較
  - 5.2 カロリーメータの性能評価比較
  - 5.3 アフターグロー
6. 結論
7. 謝辞
8. 参考文献

付録

## 1. 序論

タングステン酸鉛単結晶( $\text{PbWO}_4$ , PWO)は、透明で比重が8.28と大きく、イットリウムなどを微量に混入することにより、放射線に対し蛍光(シンチレーション光)を発する。既存のシンチレーション材に比較して、光子や電子が物質に入射したときに起こる物質中での電磁カスケードシャワーの入射方向の広がりを表す量である輻射距離が0.89cmと短く、入射方向に対して垂直方向の広がりを表す量のモリエール半径も2.0cmと小さいため、より細分化された検出器を構成できると考えられており、将来性あるシンチレーション材として注目されている。そのため、素粒子・原子核実験分野では高エネルギー粒子の高精度測定、核医学分野では人体の生理・生化学的機能の測定法のひとつであるポジトロン断層画像法への応用研究が始まっている。

ポジトロン断層画像法は、最新の核医学検査法の1つで、すでにガンの診断では実用化されている。CT、MRI検査など従来の殆どの検査は、形態画像による診断で、正常構造と異なる腫瘍をいかに精密に画像化するかということが検査の役割である。ポジトロン断層画像法ではガンによる代謝異常を画像化するのが役割であり、正確なガン診断や早期発見という面で画期的な検査法である。

素粒子実験や重イオン衝突実験では、単位立体角あたりの粒子生成量が電子陽電子や陽子反陽子などの衝突実験と比較して多い。このような高粒子多重度環境の中で電磁粒子を精度良く測定することは衝突の初期状態や衝突によって作られるであろう高温高密度相の内部構造を知ることに繋がる。なぜなら、電磁粒子は衝突後(数 fm/c)の系において支配的な強い相互作用の影響をほとんど受けずに検出器まで到達するため、発生時の情報を保持しているためである。

しかし、タングステン酸鉛単結晶を製造できるのは、現時点で、世界に3カ国(日本、中国、ロシア)4製造所しかなく、製造時の条件、環境が微妙に異なるだけで物性や品質が異なるため、それぞれで精製される結晶の物性や品質はあまり知られていない。そこで、本研究は、ロシアのRI & NC社製結晶を入手し、シンチレーション特性の測定、次いで電磁カロリメータとしての性能評価を行った。そして平成14年、本研究室で測定された古河機械金属(株)製結晶との比較検討を行った。まず $20 \times 20 \times 200$  [mm]の結晶について $^{60}\text{Co}$ からの線照射における蛍光特性(光量と蛍光減衰時定数)の温度依存性を調べた。また結晶9本を $3 \times 3$ に配置し試作器をくみ上げ、広島大学の超高速電子周回装置(REFER)で150 MeVの電子ビームを用いてエネルギー分解能と位置分解能を評価した。加えて、PWO結晶のアフターグロー現象についても述べる。

## 2. 導入

粒子検出器を用いて粒子を検出するには、粒子が検出器を構成している物質となんらかの相互作用をして、その結果、生じる現象を検出できねばならない。したがって、粒子検出のためには粒子と物質の相互作用によって起こる現象を理解することが不可欠である。本章ではまず電磁粒子と物質の相互作用について述べる。つぎに粒子検出器の1つである電磁カロリメータ、そして当検出器を構成するシンチレータ(特にPWO結晶)と光電子増倍管について述べる。最後に本研究で使用した150 MeV電子発生装置であるREFERについても触れる。

### 2.1 シンチレーションの機構

ガンマ線や宇宙線などの高いエネルギーを持った粒子が物質中の原子や分子などにぶつかると、原子や分子を基底状態から励起させる。原子や分子は励起された状態では不安定であるので余分なエネルギーを放出して基底状態に落ちる。このとき放出されるエネルギーが可視光である場合、この可視光をシンチレーション光といい、またこのような光を物質表面まで透過させる性質を持つ物質をシンチレータという。ゆえに一般にシンチレータは透明である。

シンチレータには有機シンチレータと無機シンチレータがある。

### 2.2 電子や光子の高エネルギー (100 MeV ~ GeV) 物理過程

#### 2.2.1 荷電粒子の電離損失

荷電粒子が物質中を通過するときは、電磁相互作用により荷電粒子と物質はお互いに影響を及ぼし合う。高エネルギーの入射荷電粒子は、物質を形成している分子の電子を弾き飛ばしその分子をイオン化したり、高いエネルギー状態に励起させたりする。その結果荷電粒子自身は持っていたエネルギーを失う。この過程を電離損失という。これらの反応は、気体のイオン化やシンチレーション光の放出として観測される。

#### 2.2.2 荷電粒子の放射損失

荷電粒子は電離損失によるエネルギー損失に加え、原子核のクーロン場による制動を受けて光を放出してエネルギーを失う。これを制動放射といい、この過程を放射損失という。特に電子は質量が軽いいため質量が軽いため放射損失の程度が激しい。

### 2.2.3 電磁カスケードシャワー

物質に入射した電子のエネルギーが放射損失により入射時の1/eになる物質の厚さを放射長という。放射長 $X_0$ は式2.2.2の近似で計算される(文献[5])。

$$X_0 = 716.4 \text{ g cm}^{-2} A \{ Z(Z+1) \ln(28/Z) \} \quad \text{式(22.1)}$$

ここで $A$ 、 $Z$ はそれぞれ物質の原子質量、原子番号である。高エネルギーの電子や光子を扱うときに物質の厚さは放射長を単位に測ると便利である。

電子のエネルギーが高くなると、放射損失によるエネルギー損失が、電離損失によるエネルギー損失より大きくなる。また、放射損失によるエネルギー損失と電離損失によるエネルギー損失の大きさが等しくなる時の入射電子のエネルギーを臨界エネルギーという。

臨界エネルギーより十分高いエネルギーの電子が入射すると、制動放射により高エネルギーの光子が生成される。またこの光子が対生成により電子と陽電子を生成する。対生成によりつくられた電子と陽電子がまた制動放射により高エネルギーの光子を生成する。このように、電子の制動放射の過程と光子が対生成により電子と陽電子を生成する過程が交互にくりかえされ、電子、陽電子、光子が増殖される。この現象を電磁カスケードシャワーという。

シャワーの発達是对生成によってなされ、入射エネルギー $E$ の粒子が物質中を $n$ 放射長通過する発生粒子数は $2^n$ 個になり、各粒子の持つエネルギーは $E/2^n$ となる。このエネルギーが臨界エネルギーと等しくなるとシャワーの増殖がとまり、シャワーが最大となる。

また、シャワーはシャワー中に生成されたエネルギーの低い電子が多重散乱をすることによって、横方向への広がりをもつ。縦方向に1放射長入ったところのシャワーの広がり

$$R_M = X_0 E_s / E_c \quad \text{式(22.2)}$$

2)

となる。 $R_M$ はモリエール半径という。ここで $X_0$ は放射長、 $E_c$ は臨界エネルギーであり、 $E_s$ はスケールエネルギーというもので、 $E_s = 21.2 \text{ MeV}$ として、定義される。 $3R_M$ 以内にシャワー全エネルギーの99%が含まれる。

### 2.3 電磁カロリメータ

高エネルギーの光子や電子が物質に入射すると、電磁カスケードシャワーを引き起こしてエネルギーを失う。電磁カスケードシャワーが発達しきった場合には、シャワーにより生成された

電子と陽電子による電離や分子励起の総量が、平均として入射粒子のエネルギーに比例する。したがって、シャワーをすべて閉じ込めることができる物質を用いて電離損失やシンチレーション光を測定すれば入射粒子の全エネルギーを測定することができる。このような原理に基づく検出器を電磁カロリメータという。

### 2.3.1 エネルギー分解能

電磁カロリメータのエネルギー分解能は入射粒子のエネルギーに依存しており、

$$\begin{aligned} \frac{\Delta E}{E} &= \{ (a/E)^2 + b^2 \} \\ &\equiv \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \end{aligned} \quad \text{式(2.2.3)}$$

式(2.2.3)のようにパラメータ化される。ここで、 $a$ は電磁カスケードシャワーの発展やシンチレーション光の統計的なゆらぎを反映する項で、 $b$ は電磁カスケードシャワーのもれやキャリアブレーションの誤差、計測器の非線形性などを反映する項である。また、 $E$ は入射粒子のエネルギーで単位は[GeV]である。 $\oplus$ は2乗和の平方根をとることを意味する。表2.3.1に代表的なシンチレータのエネルギー分解能を示す。

物質	エネルギー分解能
NaI 結晶	$2.7\% / E^{1/4}$
鉛ガラス	$5\% / \sqrt{E}$
鉛とシンチレータ (サンドイッチ)	$9\% / \sqrt{E}$
鉛と液体アルゴン	$7.5\% \sqrt{E}$

表2.3.1 代表的なシンチレータのエネルギー分解能 文献[5]より

### 2.3.2 位置分解能

カロリメータの位置分解能もまた入射粒子のエネルギーに依存しており

$$\frac{\Delta x, y}{E} = \{ (g/E)^2 + f^2 \}$$



$$\equiv \frac{g}{\sqrt{E}} \oplus f \quad \text{式(22 8)}$$

としてパラメータ化される。ここで上記と同様にgは電磁カスケードシャワーの発展やシンチレーション光の統計的なゆらぎを反映する項で、fは電磁カスケードシャワーのもれやキャリブレーションの誤差、計測器の非線形性などを反映する項である。また、Eは入射粒子のエネルギーで単位は[GeV]で、カロリメータでの入射位置の決定は各素子で測定されるエネルギーに基づくため位置分解能もエネルギー分解能と同様の依存性を示す。⊕は2乗和の平方根をとることを意味する。

#### 2.4 タングステン酸鉛（PWO）結晶の特徴

タングステン酸鉛結晶は化学式  $\text{PbWO}_4$  で PWO とも呼ばれる。PWO 結晶は無機シンチレータであり、表2.4に示すようにPWO結晶は他の無機シンチレータと比較して、電磁カロリメータ材として優れた性質を持っている。短所としては発光量が少ない点があげられるが、近年モリブデン等を添加することで改善が見られることが報告されている。長所としては密度が  $8.28[\text{g}/\text{cm}^3]$  と高く、放射長も  $0.89[\text{cm}]$  と短い。さらにモリエール半径も  $2.0[\text{cm}]$  と小さく、シンチレーション光の減衰時間も  $5 \sim 15[\text{ns}]$  と極端に速い。このような性質からPWO結晶を用いれば、非常に細分化された高いエネルギーおよび位置分解能をもつ電磁カロリメータを構成できることが期待される。

しばしば、無機シンチレータは放射線を照射後しばらくして蛍光を発する現象がある。これをアフターグロー現象という。PWO結晶についてもこの現象があることが報告されている。（文献[10]）。粒子検出器として使用する際にこのアフターグロー現象はバックグラウンドになりうる。

物質	密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	放射長 [cm]	モリエール半径 [cm]	減衰時間 [ns]	相対発光量 [1/NaI]
PWO	8.28	0.89	2.0	5 ~ 15	0.001
BGO	7.13	1.12	2.4	300	0.15
NaI(Tl)	3.67	2.59	4.5	250	1.00
CsI(Tl)	4.53	1.85	3.8	565	0.40

表 2.4 無機シンチレータの性質

文献[11]より

## 2.5 光電子増倍管

光電子増倍管は光センサの中でも極めて高感度、高速応答な光検出器であり、光を電子に変換する陰極(光電面)、集束電極、電子増倍部、電子を集める陽極を真空の容器に収めたものである。光が光電面に入射すると、光電面から真空中に光電子が放出され、その光電子は集束電極によって電子増倍部に導かれ、電子増倍部では二次電子放出によって増倍されていく。増倍された電子は、出力信号として陽極に集収される。

この二次電子放出効果による増倍のため、光電子増倍管は、紫外光、可視光、近赤外光の測定に使われる受光素子の中では際立った感度と低ノイズ性を有している。また、高速時間応答特性、受光面の大きなものができるなどの特長がある(文献[6])。

## 2.6 REFER

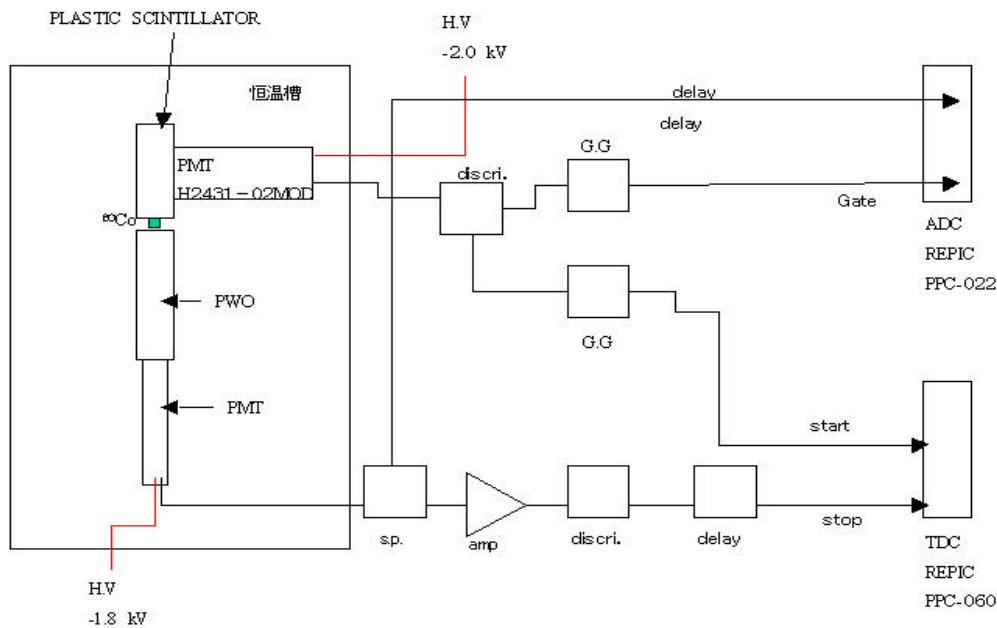
REFERとは広島大学における超高速電子周回装置のことである。REFERは150MeVマイクロトロンからの電子を周回させる周長約13.8mの電子リングであり、10Hzまたは20Hzで電子を入射することができる。付随する装置として、内部標的などを挿入するための真空容器、主にレーザーを入射する目的で設置したビームラインがある。また電子線引出しラインも持っており、引き出し電子を用いた実験をすることも可能になっている(文献[7])。

### 3. 実験

まず、放射線源によるシンチレーション光の測定を光量の温度依存性、蛍光減衰時定数の温度依存性の順に述べ、つぎに150 MeV電子ビームによるカロリメータの性能評価についてエネルギー分解能、位置分解能の順に述べる。最後にアフターグローについての測定について述べる。

#### 3.1 放射線源によるシンチレーション光の測定

20 × 20 × 200[mm<sup>3</sup>]の PWO 結晶について 線源 <sup>60</sup>Co を用い、図 3.1 のような回路で光量、蛍光減衰時定数の温度依存性を測定した。<sup>60</sup>Co をアルミ箔で巻いた PWO 結晶とプラスチックシンチレータの間に配置した。PWO 結晶にアルミ箔を巻くのは集光率を上げるためである。結晶の 20 × 20mm<sup>2</sup>の面に接着剤で光電子増倍管(浜松ホトニクス R1450PXASSY 光電面の大きさ15 )と接着した。またトリガーとして使用したプラスチックシンチレータは光学グリスで光電子増倍管(浜松ホトニクス H2431)と接着した。以上を恒温槽内に設置した。PWO 側のアナログシグナルはスプリッターを使用し2つに分けた。1つは、光量を測るためにディレイケーブルを通してADC(REPIC RPC-022)でデジタル量に変換した。もう1つは、減衰時間を測るためにアンプ(×10)をかけ、ディスクリミネータで論理波形に変換し TDC (REPIC RPC-060)のストップシグナルとした。プラスチックシンチレータからのシグナルはディスクリミネータで論理波形に変換し ADC のゲート(シグナル幅 200ns)、TDC のスタートシグナル(シグナル幅 4 ns )とした。



キャプション G.G:ゲートジェネレータ, PMT:光電子増倍管, S.P.:スプリッター  
discr.:ディスクリミネータ, amp:アンプ  
図 3.1 光量、蛍光減衰時間の温度依存性測定回路図

### 3.1.1 光量の温度依存性

5つの試料(PWO138、PWO136、PWO163、PWO161、PWO035、すべてRI&NC社製)の光量の温度依存性の測定を、周囲温度 -40 から0 まで5 おきに、そして10、および20 の合計11点を測定した。図3.1.1-1の左図(生のADC分布)からオフセットをひいて、単一光電子ピークに対応するチャンネル数でADCのチャンネルを割り、横軸をフォトエレクトロン数にしたものが右図( $^{60}\text{C}_0$ スペクトル)である。また、ADC分布を次のフィット関数

$$f(x) = A_1 \exp[-(x-m_x)^2/2] + A_2 \exp(\beta x) \quad \text{式(3.1.1)}$$

1)

でフィットする(図3.1.1-2左)。結晶035(他4本は付録に示す)で行ったものを図3.1.1-3に示す。

フィットにより $^{60}\text{C}_0$ の光電ピークを求め、それを式(3.1.1-2)に代入する。ここで、LYは光量

$Ch_{60Co}$ は $^{60}Co$ の光電ピーク、 $Ch_{ped}$ はペDESTAL、 $Ch_{sp}$ は1光電子ピークを示している。1.2 [MeV]は $^{60}Co$ の線の平均エネルギーである。

$$LY = \{ (Ch_{60Co} - Ch_{ped}) / (Ch_{sp} - Ch_{ped}) \} / 1.2 [MeV]$$

式(3.1.1 2)

この式から、各温度での光量が求められる。そうして得られた値を、縦軸光量、横軸温度でプロットし光量の温度依存性を求める(図3.1.1-2右)。

光量の温度依存性は式(3.1.1 3)の様に求められる。

$$LY(T) = LY_0 \exp(\alpha T [^\circ C])$$

式(311 3)

ここでTは温度[ $^\circ C$ ]、 $\alpha$ は温度係数である。

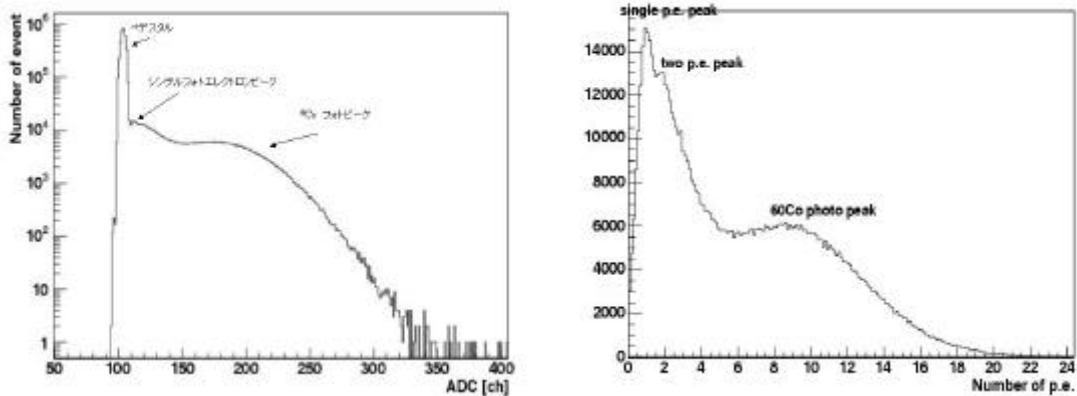


図 3.1.1-1 PWO138 の温度 - 30  $^\circ C$  での ADC スペクトルと光電子スペクトル

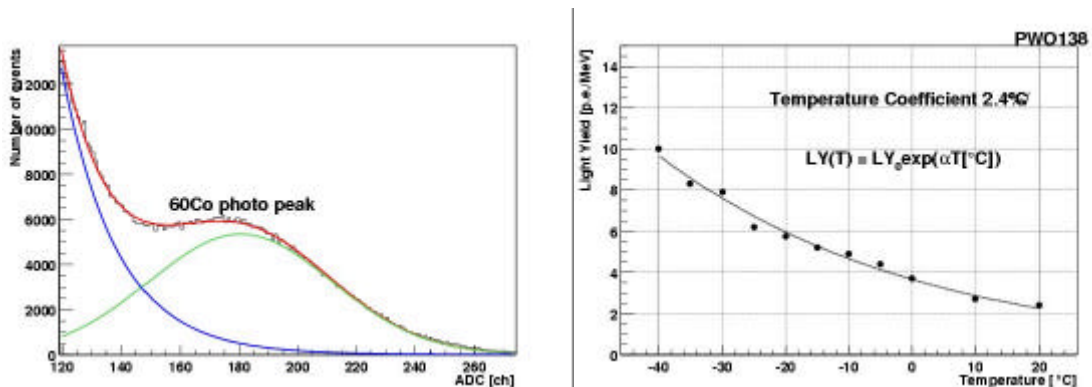
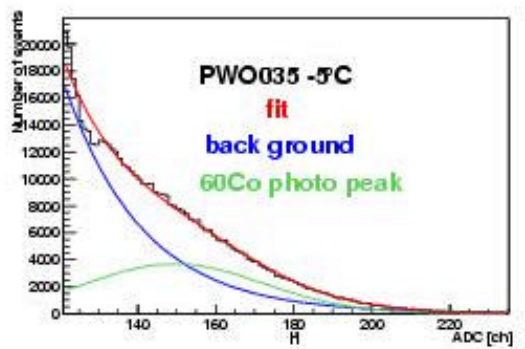
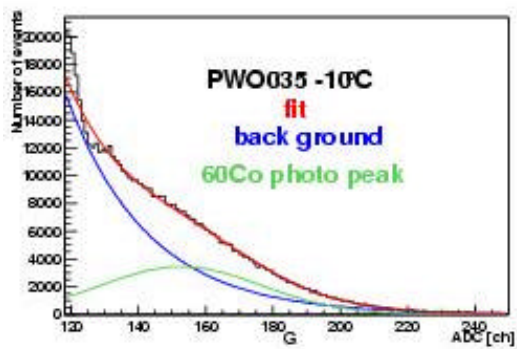
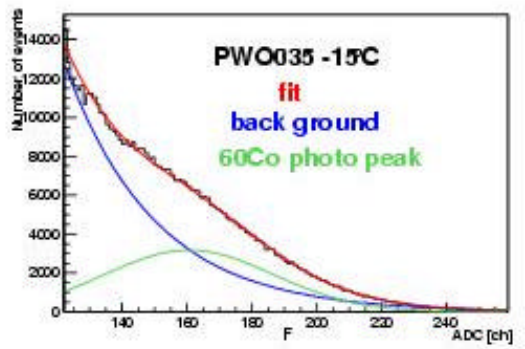
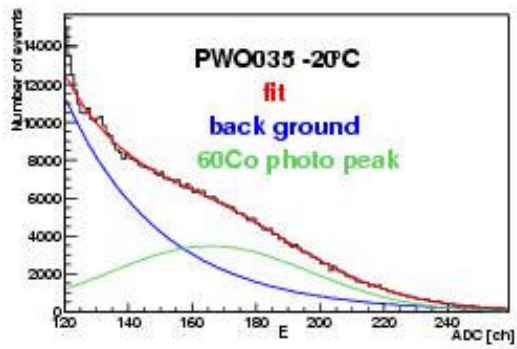
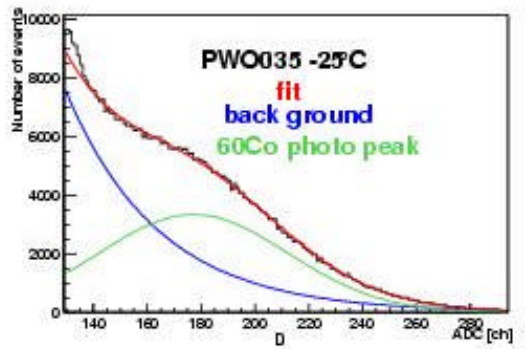
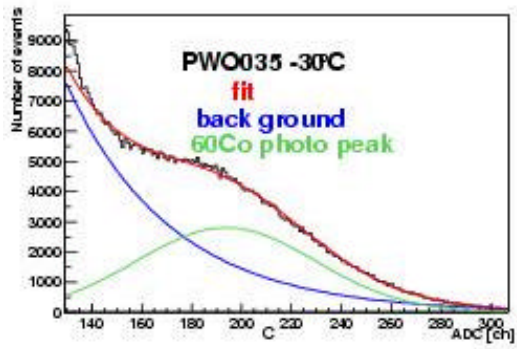
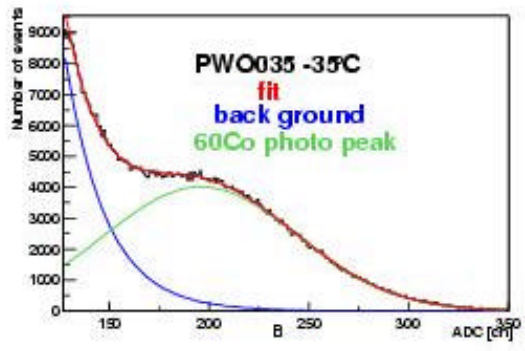
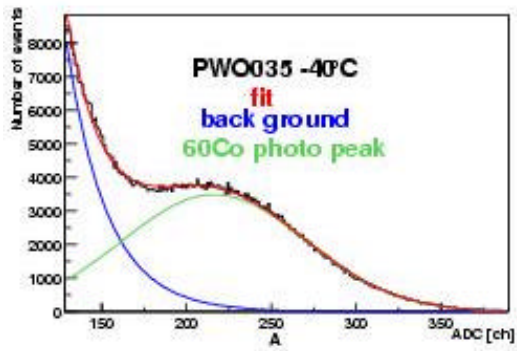
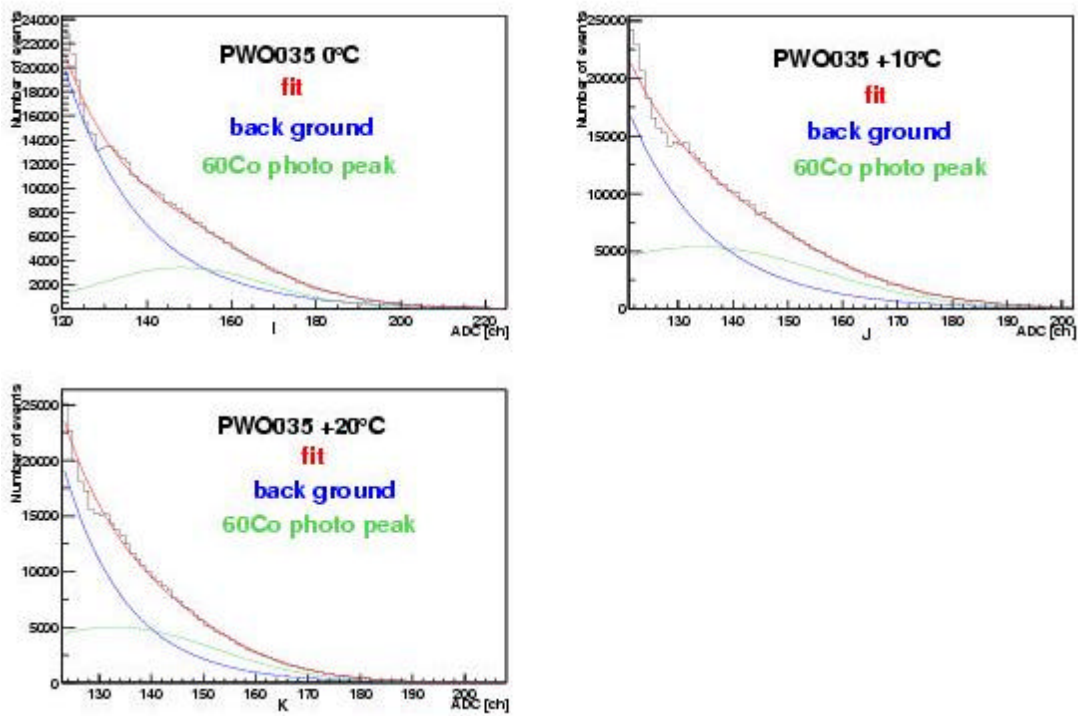


図 3.1.1-2 フィット図と光量の温度依存性グラフ





A~K はそれぞれ-40、-35、-30、-25、-20、-15、-10、-5、 $\pm 0$ 、+10、+20 でのフィットの図である。

図 3.1.1-3 結晶 0 3 5 各温度での ADC フィット

### 3.1.2 蛍光減衰時定数の温度依存性

光量の温度依存性を測定と同時に蛍光減衰時定数の温度依存性の測定を単一光電子法を用いて行った。この方法は普通光電子増倍管に到達するシンチレーション光の量を減らし測定を行うが、今回は光量と蛍光減衰時定数を同時に計測して、データ収集後、光量スペクトルについて解析的に単一光電子を要求した。これはPWO結晶の光量が少ないため可能である。生の TDC 分布(図3.1.2-1の右の黒)を単一光電子の減衰時定数を求めるために ADC 分布の単一光電子ピークの幅でカットをかけ、図3.1.2-1右の青線の分布を得る。結晶035の各温度で ADC 分布の単一光電子ピークの幅でカットをかけたものを図3.1.2-3に示す。

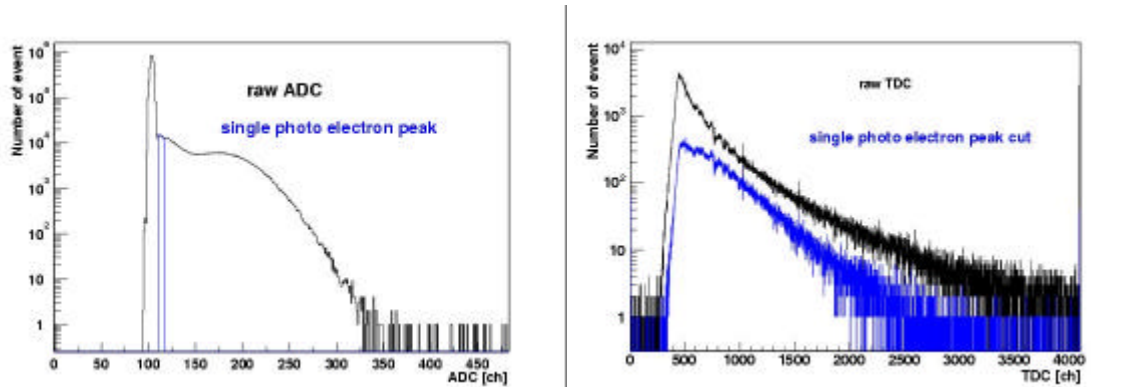


図3.1.2-1 TDCカット

このようにして得られた、ヒストグラムは横軸が TDC チャンネルなので

$$t = \text{TDC}[\text{ch}] \times 0.025 \quad t_0 \quad \text{式(312-1)}$$

を用いて横軸を時間[ns]、ヒストグラムのピークを 0[ns]に調整した。ここで 0.025 はTDCの変換値[ch/ns]、 $t_0$ はヒストグラムのピーク値である。このようにしてえられた蛍光減衰時のスペクトル(図3.1.2-2左)を

$$f(t) = (N_f / \tau_f) \exp[-t / \tau_f] + (N_s / \tau_s) \exp[-t / \tau_s] \quad \text{式(3.12-2)}$$

式3.1.2-2でフィットし、減衰定数を求めた。結晶035の各温度での蛍光減衰時間の分布のフィットを図3.1.2-4に示す(他4本は付録に示す)。ここで、 $N_f$ 、 $N_s$ は測定時間(ADCゲ



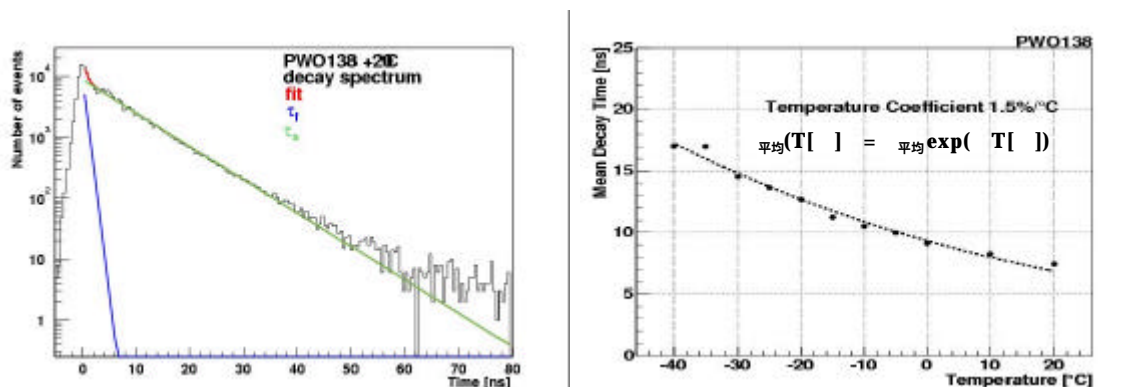
ト) 内に光電子増倍管に到達した光(電)子数  $N_f$ 、 $N_s$  は減衰時定数  $\tau_f$ 、 $\tau_s$  は早い成分と遅い成分を表している。ここで得られた  $N_f$ 、 $N_s$  と  $\tau_f$ 、 $\tau_s$  を用いて平均蛍光減衰時定数を式 3.1.2-3 で求めた。

$$\tau_{平均} = (N_f \tau_f + N_s \tau_s) / (N_f + N_s) \quad \text{式312-3}$$

このようにして得られた平均蛍光減衰時定数を、縦軸平均減衰時定数、横軸温度でプロットし蛍光減衰時定数の温度依存性を

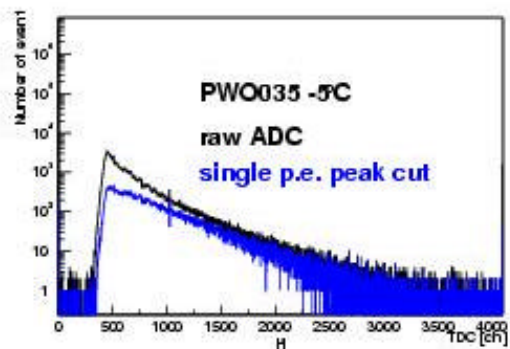
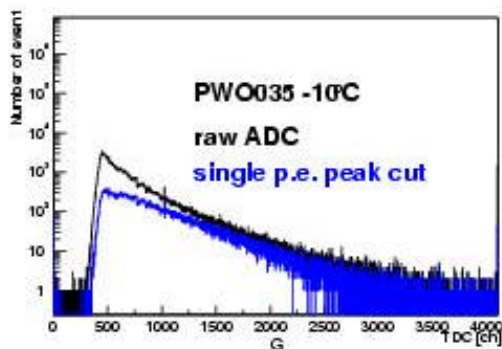
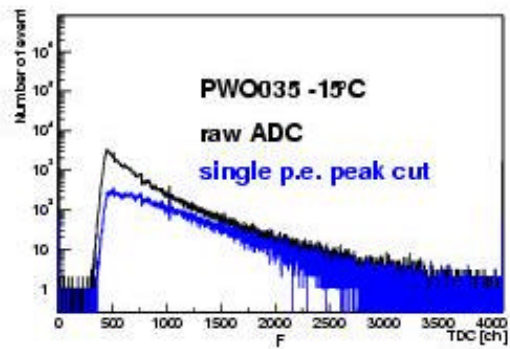
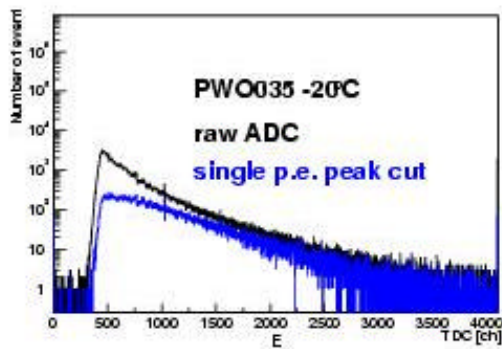
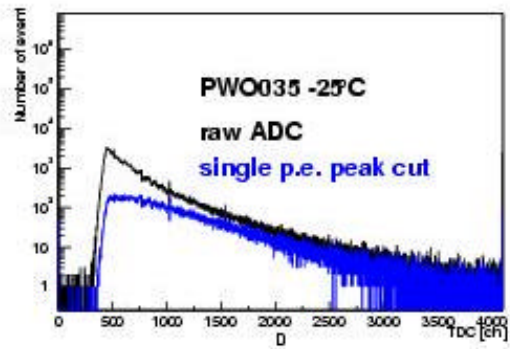
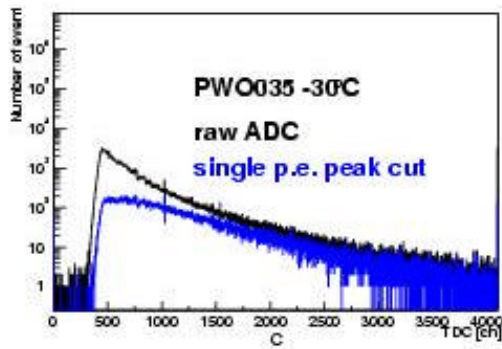
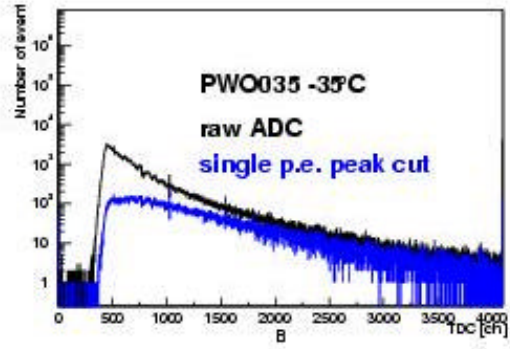
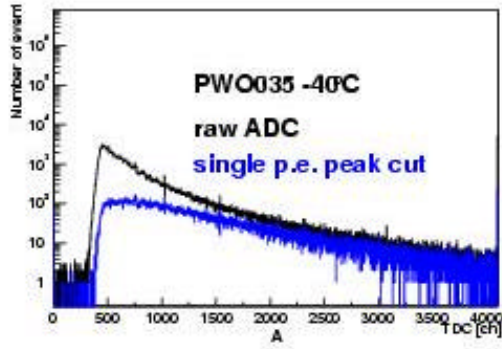
$$\tau_{平均}(T [^\circ\text{C}]) = \tau_{平均} \exp(-T [^\circ\text{C}]) \quad \text{式(324)}$$

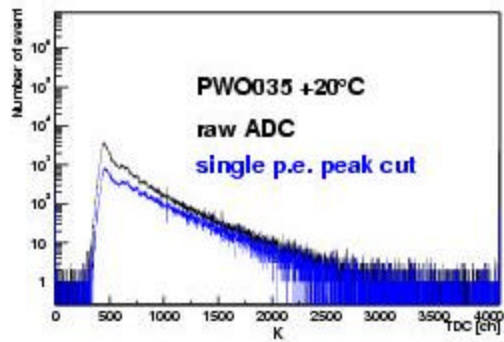
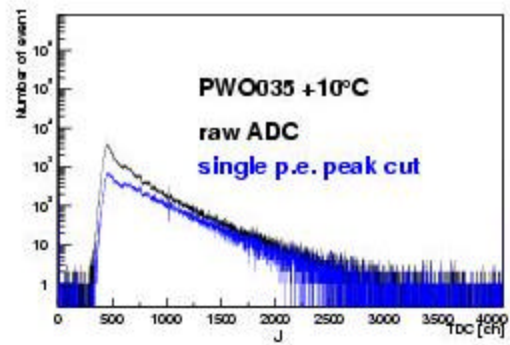
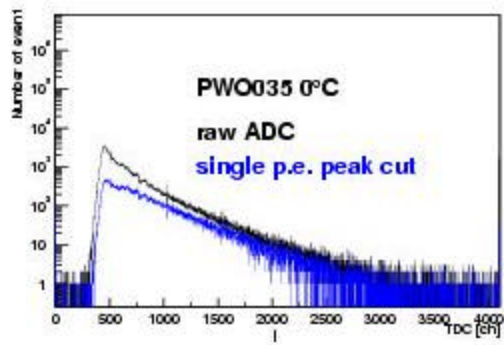
を求めた(図 3.1.2 - 2 右)。



左図は単一光電子ピーク TDC カットで得られた分布を式(3.1.2-1)を用いて横軸を時間にしたものである。

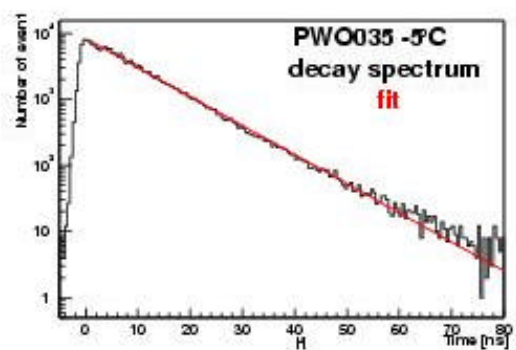
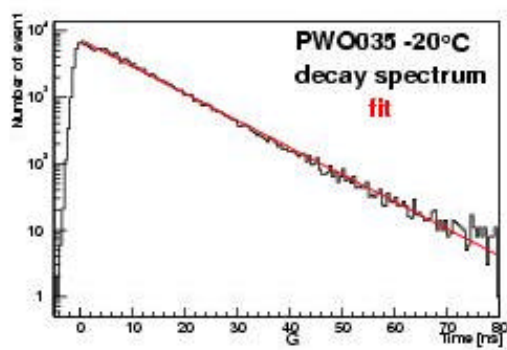
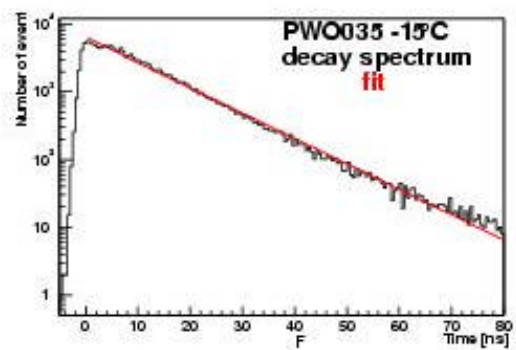
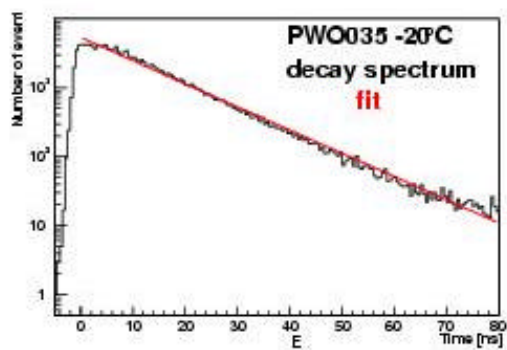
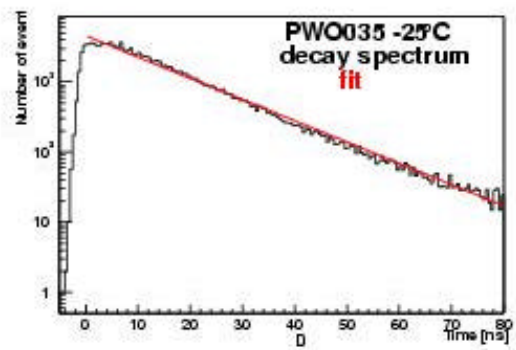
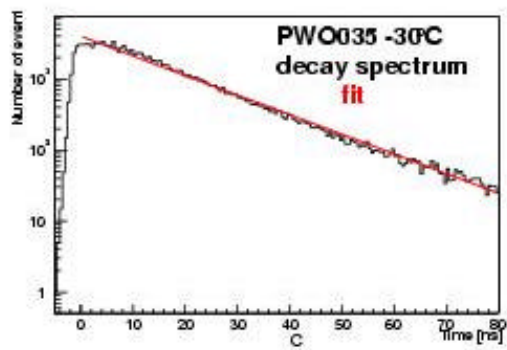
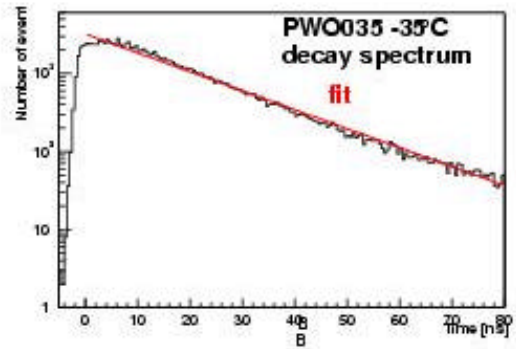
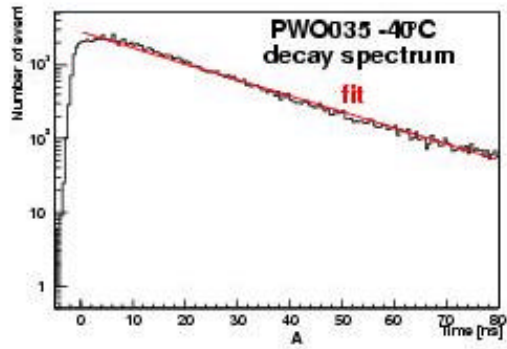
図 3.1.2 - 2 蛍光減衰時間の分布(左)と蛍光減衰時定数の温度依存性(右)

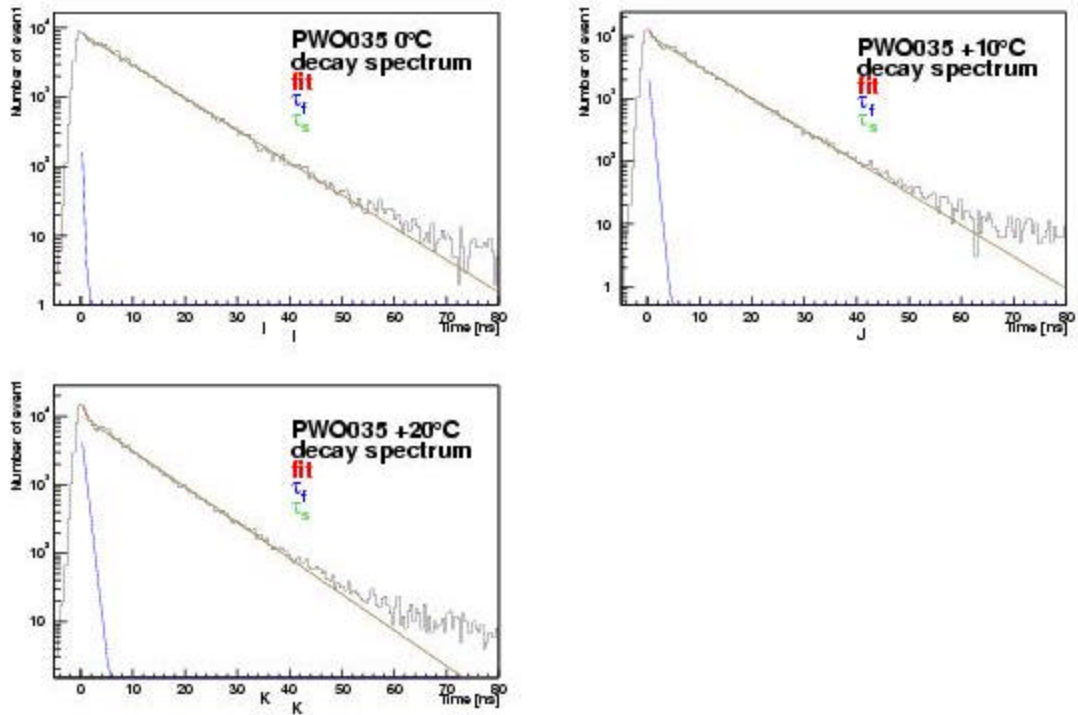




A~K はそれぞれ -40 、 -35 、 -30 、 -25 、 -20 、 -15 、 -10 、 -5 、 ±0 、 +10 、 +20 の図である。

図 3.1.2-3 結晶 0 3 5 生の TDC 分布と単一光電子ピーク TDC カット



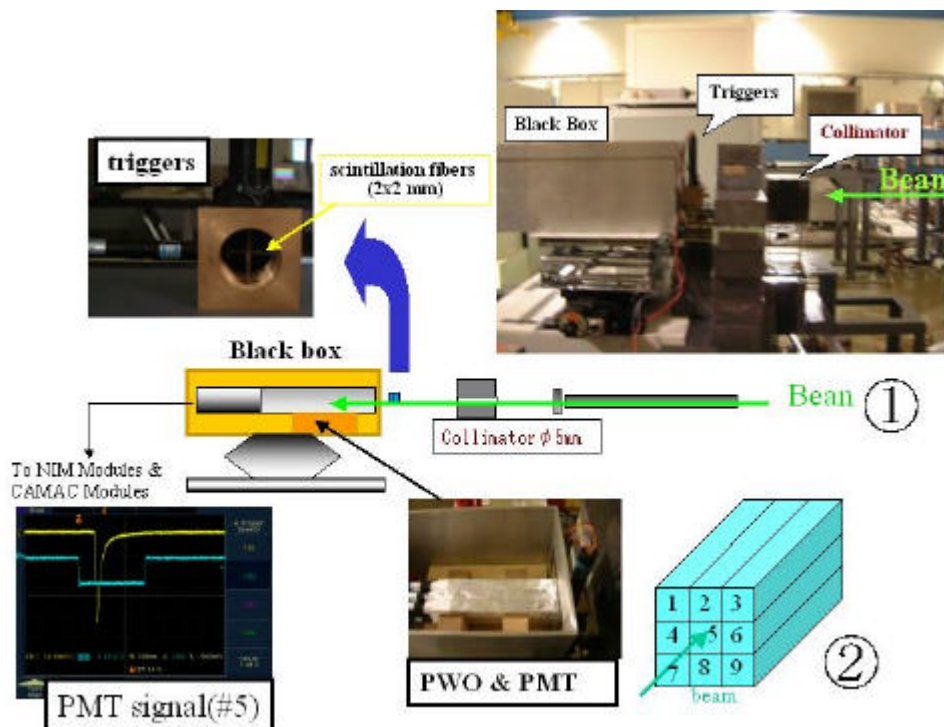


A ~ K はそれぞれ -40、-35、-30、-25、-20、-15、-10、-5、 $\pm 0$ 、+10、+20 の図である。また、この分布は 図3.1.2-3の単一光電子ピークTDCカットで得られた分布を式(3.1.2-1)を用いて横軸を時間にしたものである。

図 3.1.2-4 結晶 0 3 5 蛍光減衰時間分布

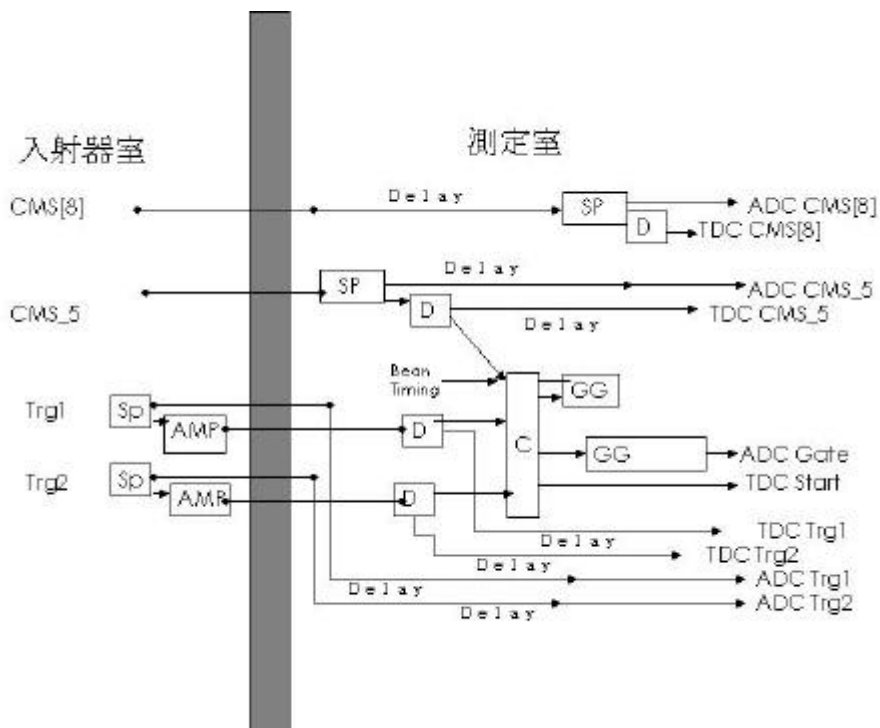
### 3.2 150 MeV 電子ビームによるカロリメータの性能評価

PWO 結晶に光電子増倍管 (浜松ホトニクス R1450PXASSY) を接着剤で接着したものを9組準備し3×3配列に並べて、電磁カロリメータを作成した。用いた9本の結晶はすべてR&NC 社製である。REFERで150 MeV電子ビームによるカロリメータの性能評価実験を図3.2-1のようなセットアップ図3.2-2のような回路で行った。



写真は引き出し線におけるセットアップの写真である。  
 は引き出し線におけるセットアップをイラストにしたものである。  
 はカロリメータの3×3の配置図である。

図 3.2-1 カロリメータ性能評価実験におけるセットアップ



S.P: スプリッター, D: ディスクリミネータ, AMP: アンプ, GG: ゲートジェネレータ,  
 C: コインシデンス, CMS[8]: 中心カロリメータ以外, CMS\_5: 中心のカロリメータ  
 Trg1, Trg 2: それぞれトリガー1, 2

図 3.2-2 カロリメータ性能評価実験における読み出し回路

カロリメータ9本からのシグナルはそれぞれディレイケーブルを通して入射器室からX線端末室まで送り、スプリッターで2つに分けた。1つはエネルギーを測るためにADC(REPIC RPC-022)に入れ、もう1つは、ディスクリミネータを通して時間を測るためにTDC(REPIC RPC-060)にストップシグナルとして入れた。中心のカロリメータのディスクリミネータからのアウトプットシグナルはTDCのストップシグナル以外にイベントのコインシデンスをとるためにコインシデンスに入れた。トリガーには2x2mmのフィンガーカウンターを使用し、2つのトリガーからのシグナルはそれぞれスプリッターで2つに分けた。1つは、ディレイケーブルを通して入射器室からX線端末室まで送り、エネルギーを測るためにADC(REPIC RPC-022)に入れた。もう1つはアンプをかけ、ディレイケーブルを通して入射器室からX線端末室まで送り、ディスクリミネータを通し、TDC(REPIC RPC-060)にストップシグナルとして入れた。またそれ以外にディスクリミネータからのアウトプットシグナルをコインシデンスにそれぞれ入れた。また、ビームタイミングもコインシデンスに入れた。コインシデンスからのアウトプットシグナルはゲートジ

エネルギーを通し、ADCゲートとしてADC(REPIC RPC-022)に入れ、また、TDCのスタートシグナルとしてTDC(REPIC RPC-060)に入れた。

### 3.2.1 光電子増倍管読み出しPWOカロリメータのエネルギー較正

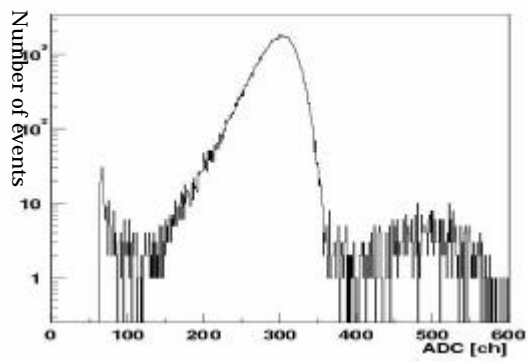
作製した9本組電磁カロリメータのエネルギー較正のために、図3.2-2の回路でそれぞれの結晶の中心に150MeVの電子ビームを入射し、10万イベントのデータをとった。9本それぞれについて得られたADC分布のピーク値から変換係数Cを

$$C = 117 [\text{MeV}] / (\text{ADC}_{\text{peak}} - \text{ADC}_{\text{Ped}}) \quad \text{式(3.2.1-1)}$$

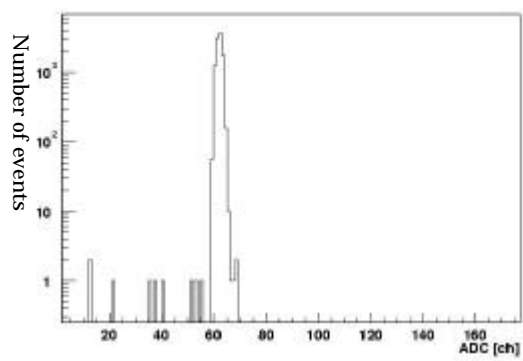
$$E[\text{MeV}] = (\text{ADC} - \text{ADC}_{\text{Ped}}) \times C \quad \text{式(3.2.1-2)}$$

で求めた。ここで文献[3]のシミュレーション結果(図3.2.1-E)から大きさ $20 \times 20 \times 200 \text{mm}^3$ のPWO結晶の中心に長軸方向に150MeVの電子ビームを入射させるとエネルギーのとり込み率が78%、測定エネルギーが117MeVであることを用いた。図3.2.1-AがADC分布である。その分布からペDESTAL(図3.2.1-B)をひいたものが図3.2.1-Cである。またその分布に変換係数を掛け、エネルギー分布にしたものが図3.2.1-Dである。このような手順でエネルギー較正を行った。ここでエネルギー較正に使用した $3 \times 3$ のデータを図3.2.1-2に示す。

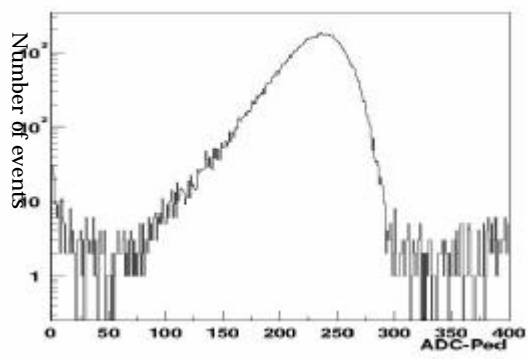




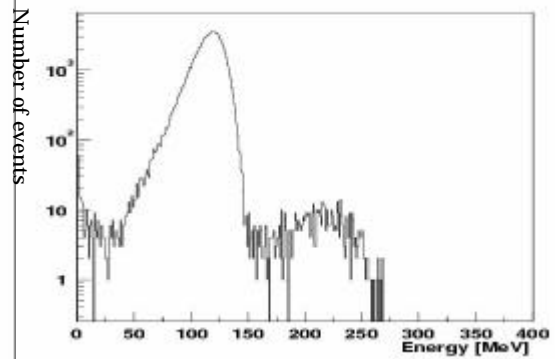
A



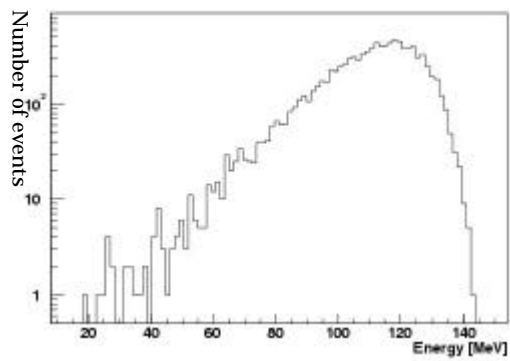
B



C



D



E

図 3 . 2 . 1 エネルギー較正手順

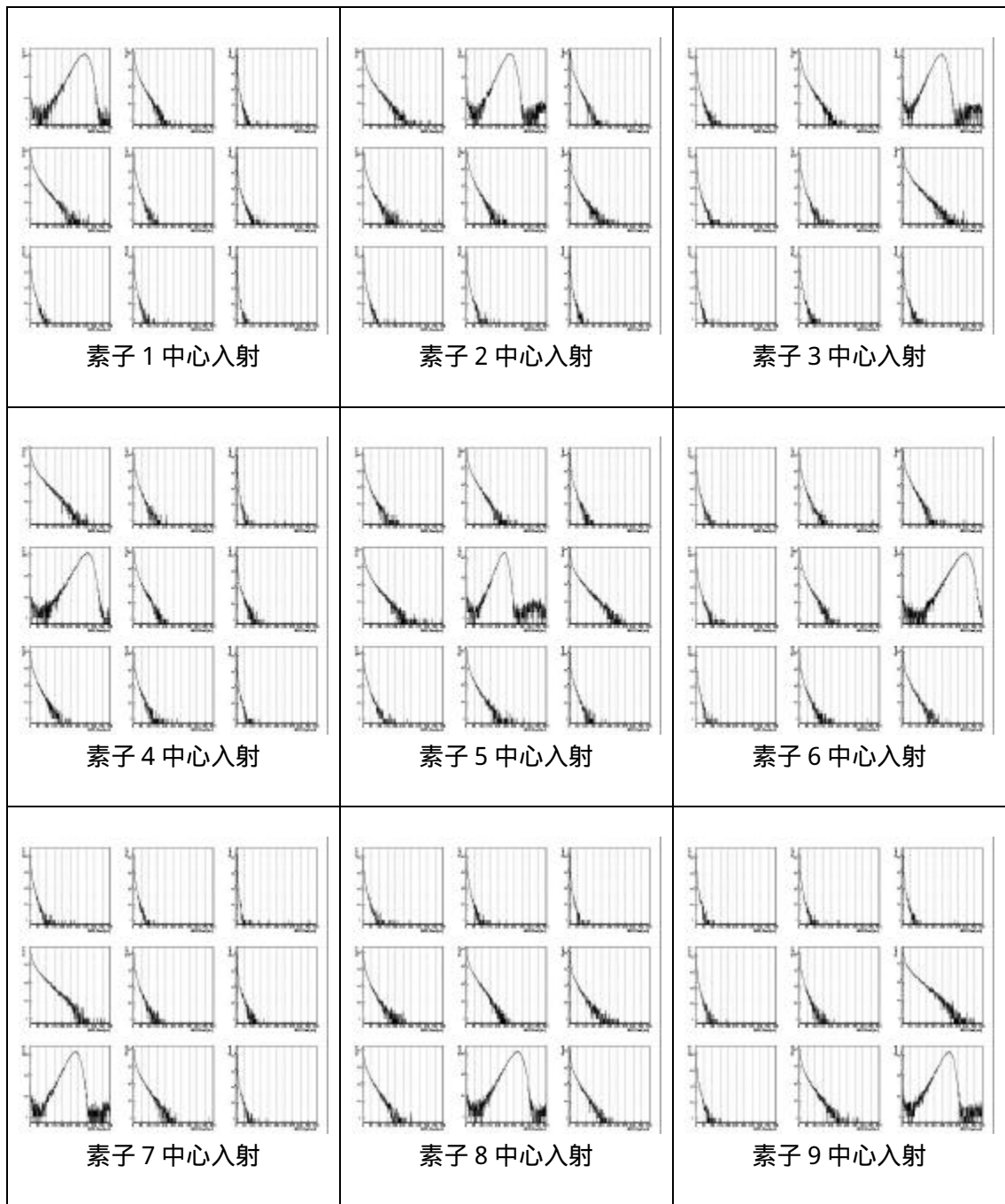


図 3 . 2 . 1 - 2 エネルギー較正使用データ

### 3.2.2 9本組みカロリメータのエネルギー分解能

9本組みのエネルギー分解能を求めるために、図3.2-2の回路で9本組みの中心に150MeVの電子ビームを入射し、100万イベントのデータをとった。このデータから得られた9本それぞれのADC分布に各々の変換係数を掛けエネルギー分布に戻した。そうして得られたエネルギー分布(図3.2.2左)をイベント選択し、それぞれを足し合わせ9本組みのエネルギー分布を求めた(図3.2.2右)。イベント選択の条件はペDESTALのゆらぎを考慮して、9本それぞれに0.5MeV以上のエネルギーが落とされていること、またイベントの同期が取れていることを保証するために、トリガー1とトリガー2のTDCの差1を条件とした。

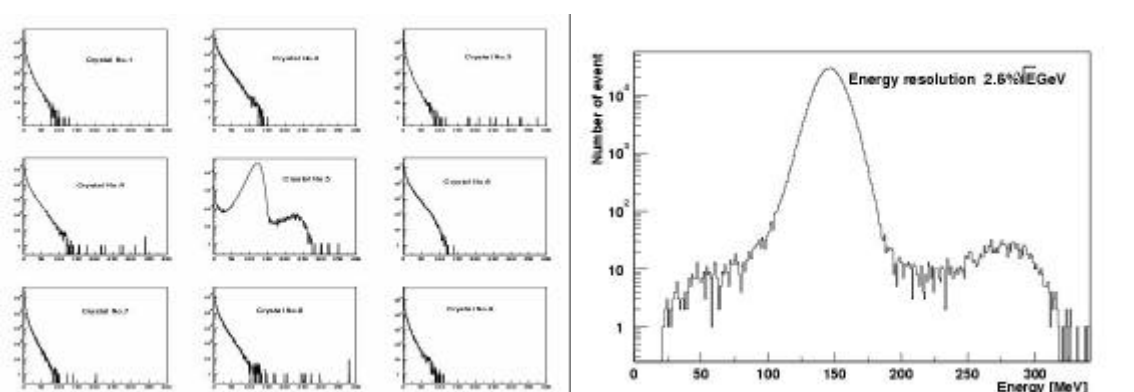


図3.2.2 各素子で測定されたエネルギーとそれらの和

このようにカロリメータ9本組みから得られたエネルギー分布のピークをガウス分布で評価し、平均値( $E_{\text{Mean}}$ )と分散( $\sigma$ )を求めた。その値から  $\sigma/E_{\text{Mean}}$  を求める。そうして求められた値に  $E = 0.15[\text{GeV}]$  をかけ、エネルギー分解能の統計的係数Aを算出した。ここで、Eは入射粒子のエネルギーである。

### 3.2.3 カロリメータ9本組みの位置分解能

9本組みの位置分解能を求めるために、図3.2-2の回路で9本組みの中心の座標を(0, 0)としてX方向に5mmずらした位置を(5, 0)というように、(0, 0)、(5, 0)、(5, 5)、(10, 10)、(0, 10)の位置でデータを10万イベントずつとった。得られたデータと素子の中心入射のデータを図3.2.3に示す。

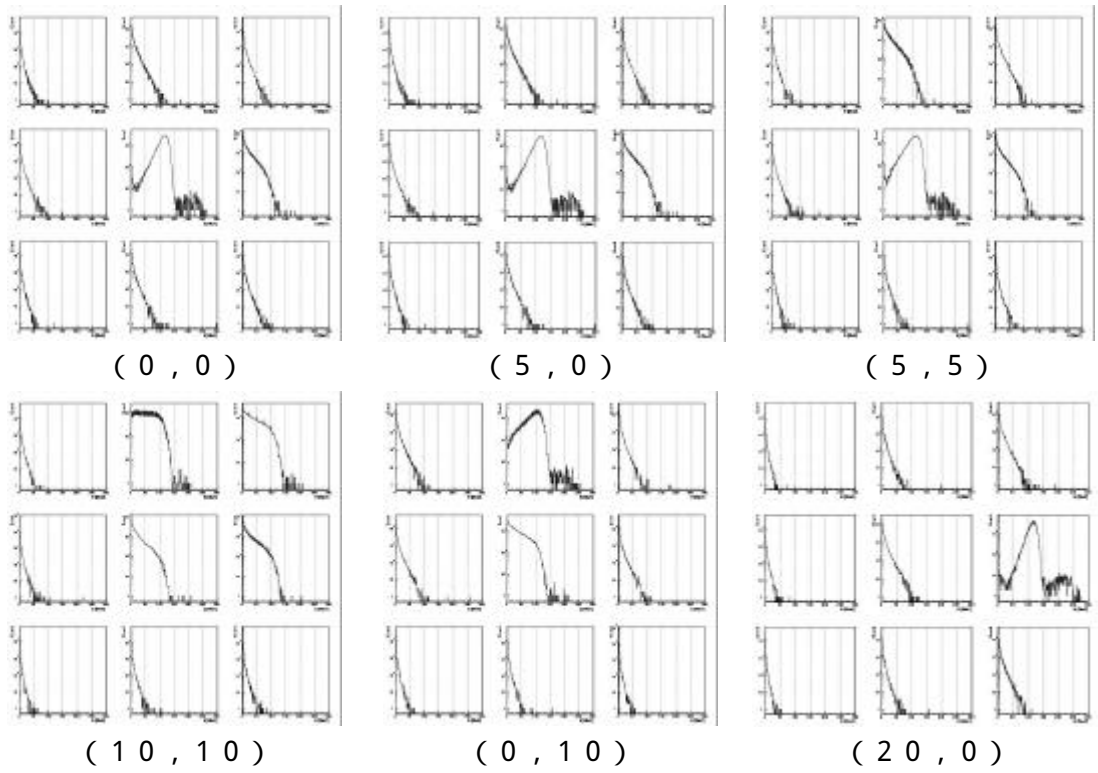


図 3.2.3 位置分解能データ

### 3.3 アフターグローの測定

アルミ箔で覆った大きさ  $20 \times 20 \times 200[\text{mm}^3]$  の PWO 結晶と光電子増倍管 (Hamamastu R1450PXASSY) とを接着剤で接着し、アフターグローの測定を行った(図3.3参照)。ここで使用した結晶はロシア・RI & NC 社製の試料035である。光電子増倍管からのシグナルをスプリッターで2つに分けた。シグナルの1つは、光量を測定するため、ゲートシグナルとのタイミングを合わせ ADC (LeCroy 2249A) でデジタル量に変換した。もう1つはディスクリミネータで論理波形に変換しADCのゲートシグナル(シグナル幅500ns)とした。また、光量の多いものと少ないの分布の違いを調べるためにディスクリミネータの閾値を50mV(4MeV 相当, 図3.3-2A)、200mV(8MeV 相当, 図3.3 - 2B)で測定した。その際の測定頻度はそれぞれ600Hzと30Hzであった。またそれらの測定で得られた ADC 分布とアフターグローの典型的な出力波形(図3.3 - 2C)を示す。

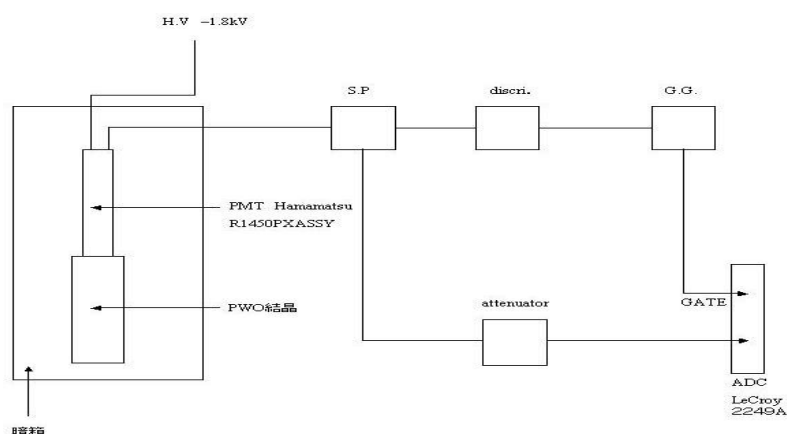
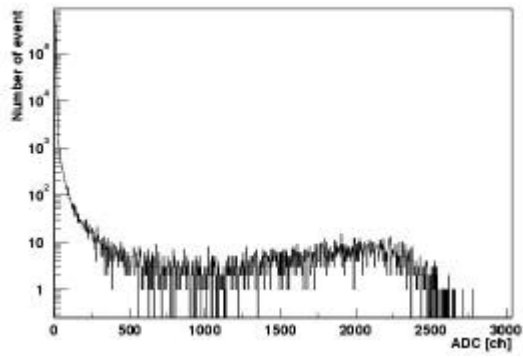
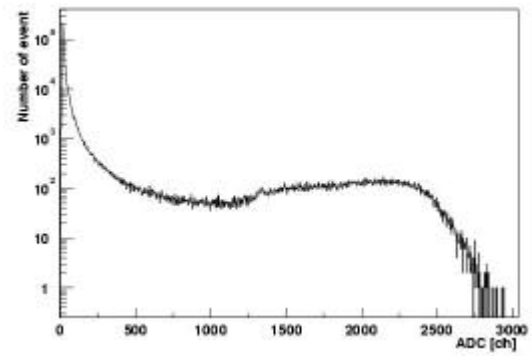


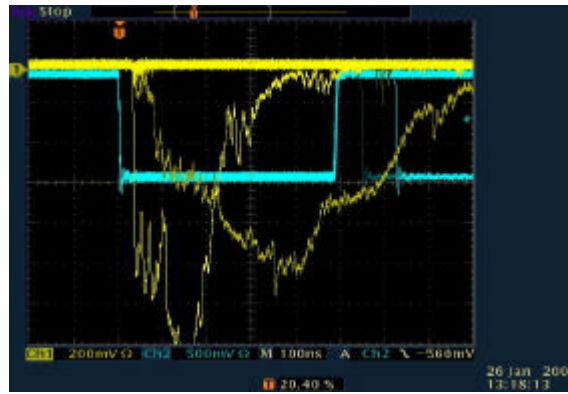
図3.3 アフターグロー測定回路



A



B



C 黄色のパルスがアフターグローのパルスである。

図 3 . 3 - 2 測定された ADC とアフターグローパルス

## 4. 結果

### 4.1 放射線源によるシンチレーション光の測定

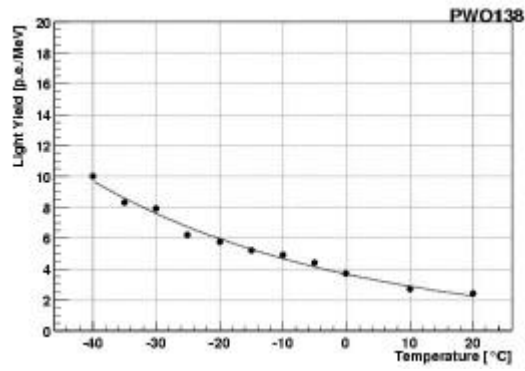
#### 4.1.1 光量の温度依存性

測定した5つのPWO試料について20における光量と光量の温度依存性についての測定結果は表4.1.1のようになった。

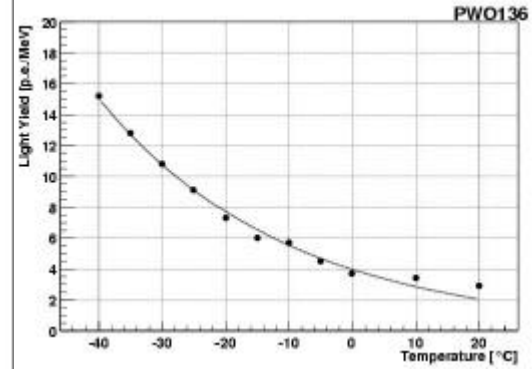
	結晶138	結晶136	結晶163	結晶035	結晶161
光量 [光電子/MeV]	2.46 ± 0.12	3.08 ± 0.22	2.61 ± 0.29	1.77 ± 0.23	2.60 ± 0.20
温度係数[%/ ]	-2.50 ± 0.04	-3.22 ± 0.34	-2.55 ± 0.42	-2.46 ± 0.21	-3.06 ± 0.28
<sup>2</sup> 自由度	2.969 9	1.687 9	3.088 9	0.587 9	2.393 9
<sup>2</sup> /自由度	0.329	0.187	0.343	0.065	0.265
グラフ	4.1.1-A	4.1.1-B	4.1.1-C	4.1.1-D	4.1.1-E

表4.1.1 20における光量と光量の温度依存性についての測定結果

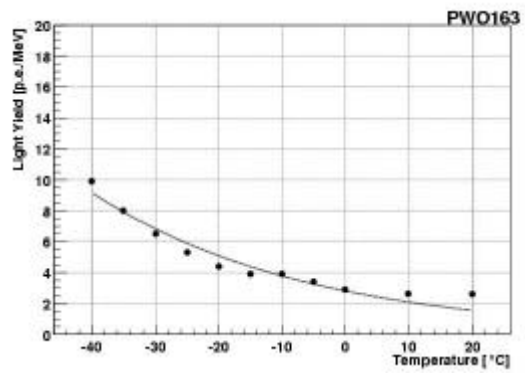
各結晶について光量の温度依存性のグラフを図4.1.1に示す。グラフの信頼度は<sup>2</sup>検定よりいずれも95%以上である。



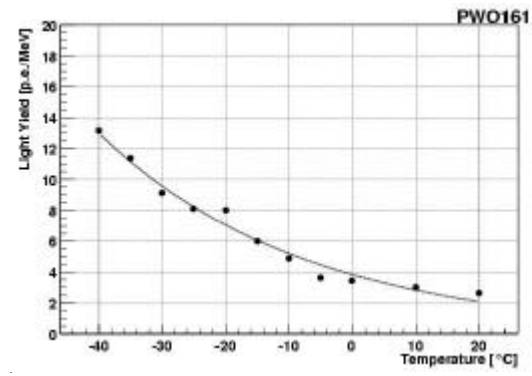
A



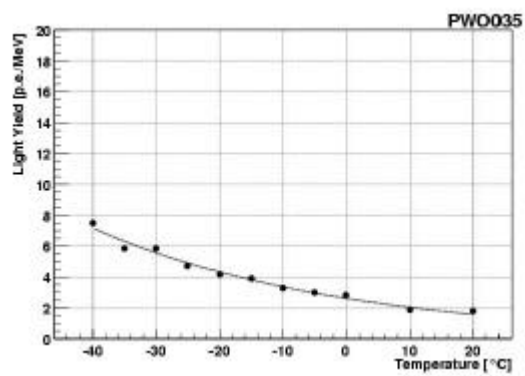
B



C



D



E

図 4 . 1 . 1 光量の温度依存性



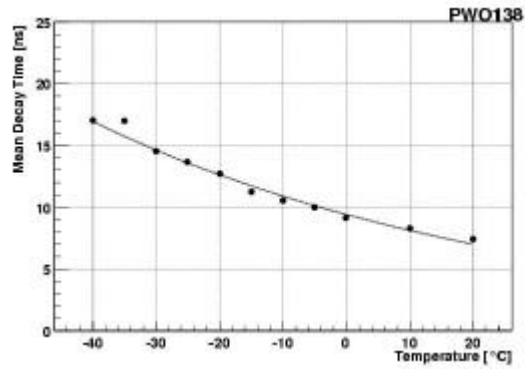
#### 4.1.2 蛍光減衰時間の温度依存性

同様に測定した5つの PWO 試料について 20 における平均蛍光減衰時間と平均蛍光減衰時間の温度依存性についての測定結果は表 4.1.2 のようになった。

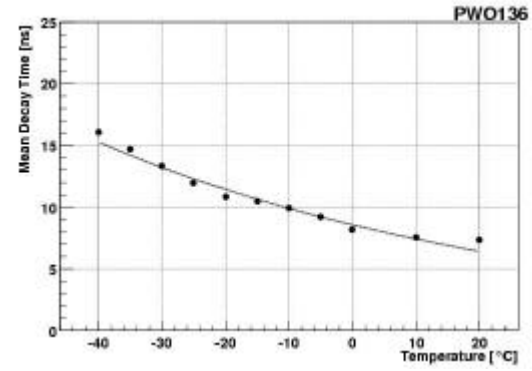
	結晶 1 3 8	結晶 1 3 6	結晶 1 6 3	結晶 0 3 5	結晶 1 6 1
平均減衰時間	7.40 ± 0.03	7.34 ± 0.00	7.75 ± 0.04	7.75 ± 0.00	6.96 ± 0.00
成分 1 (割合)	0.61 ± 0.047 (8%)	0.80 ± 0.027 (9%)	0.73 ± 0.054 (8%)	0.65 ± 0.054 (7%)	0.74 ± 0.024 (10%)
成分 2 (割合) [n s]	7.94 ± 0.00 (92%)	8.02 ± 0.00 (91%)	8.34 ± 0.00 (92%)	8.29 ± 0.00 (93%)	7.60 ± 0.00 (90%)
温度係数[%/°C]	-1.47 ± 0.12	-1.46 ± 0.17	-1.41 ± 0.14	-1.73 ± 0.20	-1.54 ± 0.22
<sup>2</sup> 自由度	9	9	9	9	9
<sup>2</sup> /自由度	0.328	0.302	0.325	0.308	0.291
グラフ	4.1.2-A	4.1.2-B	4.1.2-C	4.1.2-D	4.1.2-E

表4.1.2 20 における平均蛍光減衰時間と平均蛍光減衰時間の温度依存性についての測定結果

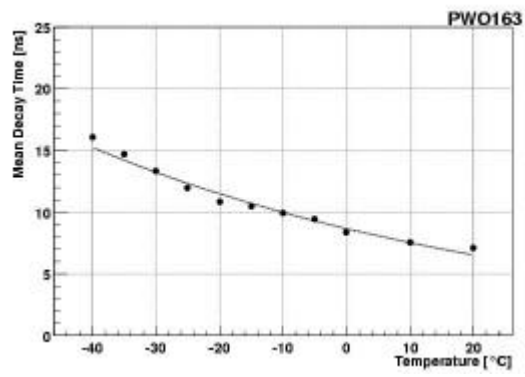
各結晶について蛍光減衰時間の温度依存性のグラフを 4.1.2 に示す。グラフの信頼度は<sup>2</sup>検定よりいずれも 95% 以上である。



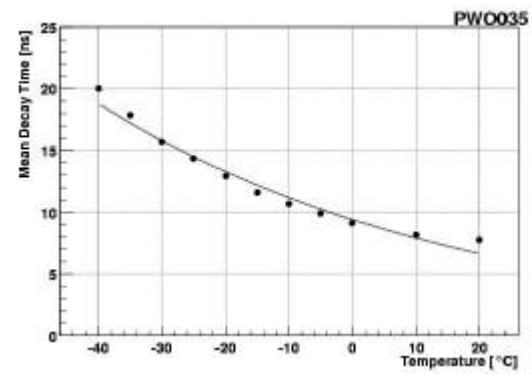
A



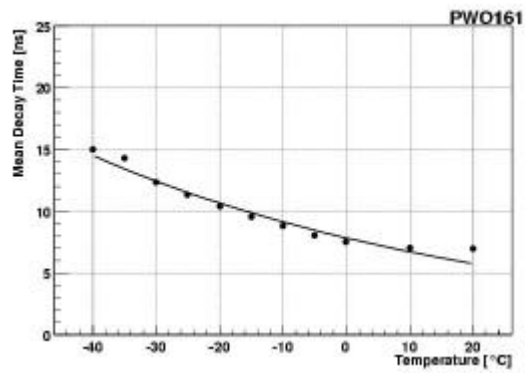
B



C



D



E

図 4 . 1 . 2 蛍光減衰時間の温度依存性

## 4.2 カロリーメータの性能評価

### 4.2.1 光電子増倍管読み出しPWOカロリーメータのエネルギー較正

光電子増倍管読み出しPWOカロリーメータのエネルギー較正を行った結果、表4.2.1のような変換係数（ADCチャンネルからエネルギーに変換するための値）を得た。

カロリーメータ (PWO結晶+光電子増倍管)	変換係数
素子 161 + CA7025	0.35
素子 134 + CA7026	0.43
素子 035 + CA7027	0.49
素子 136 + CA7046	0.33
素子 173 + CA7018	0.50
素子 163 + CA7052	0.30
素子 168 + CA7049	0.41
素子 133 + CA7053	0.37
素子 167 + CA7019	0.40

表4.2.1 光電子増倍管読み出しPWOカロリーメータのエネルギー較正を行った結果

### 4.2.2 9本組みカロリーメータのエネルギー分解能

9本組みカロリーメータのエネルギー分解能を求めた結果150MeVでは  $\sigma_E/E = 6.9 \pm 0.08\%$ 、 $1/E$ でスケールすると仮定すると  $\sigma_E/E = 2.60 \pm 0.003\%/E$ となった。ここでEは入射粒子のエネルギーで単位はGeVである。

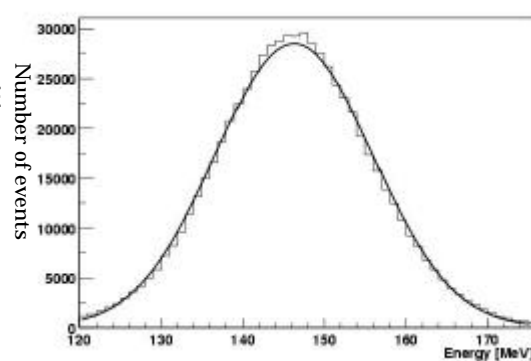


図4.2.2 エネルギー分解能フィット

#### 4.2.3 カロリーメータ9本組みの位置分解能

得られたデータから9本それぞれの ADC 分布に各々の変換係数を掛けエネルギー分布に戻した。これを用い、電磁カロリーメータの各素子で測定されたエネルギーを重みとして、重心 ( $x_{\text{barycenter}}$ ) を計算する。いろいろな重み付けの方法があるが、最も単純には、

$$x_{\text{barycenter}} = \frac{\sum_i [i \times E_i] / \sum_i [E_i]}{2} \quad \text{式(4.2.3-1)}$$

ここで、 $i$  は  $i$  番目の素子 (結晶) の規格化した座標、 $E_i$  は  $i$  番目の各素子 (結晶) で測定されたエネルギーである。また本実験では  $\Delta = 1.0 \text{ cm}$  である。

このようにして求めた重心と実際の入射位置 ( $x_{\text{impact}}$ ) との関係式を求める。

$$X_{\text{impact}} = f(x_{\text{barycenter}}) \quad \text{式(4.2.3-2)}$$

$f$  は適当なフィット関数で、またイベント毎に

$$X = X_{\text{impact}} - f(x_{\text{barycenter}}) \quad \text{式(4.2.3-3)}$$

を計算する。これにより求めた  $x$  を評価し位置分解能を得る。

しかし、今回の実験データは中心入射以外のデータが上記の評価方法で評価するには適してなかったため以下のような手順で評価を行った。

まず入射位置と重心の関係を求める。文献[9]によると、電磁シャワーの横方向への広がりが、指数関数的に減衰して

$$E(x) = E_0 \exp(-x/\Delta) \quad \text{式(4.2.3-4)}$$

である場合、式(4.2.3-1)は式(4.2.3-4)より

$$X_{\text{impact}} = \frac{\Delta}{\sinh(\Delta/\Delta)} \text{arcsinh}\left[\frac{x_{\text{barycenter}}}{\Delta} \times \sinh\left(\frac{\Delta}{\Delta}\right)\right], \quad |X_{\text{impact}}| \ll \Delta \quad \text{式(4.2.3-5)}$$

と表される。ここで  $\Delta$  は電磁シャワーの幅である。本実験では  $\Delta = 0.57$  であり、4 点の

実験データを図 4.2.3-A のように指数関数でフィットして求めた。

このように求めた値と実際にビームを入射した位置の差  $x$  をヒストグラムにする(図 4.2.3-B)。

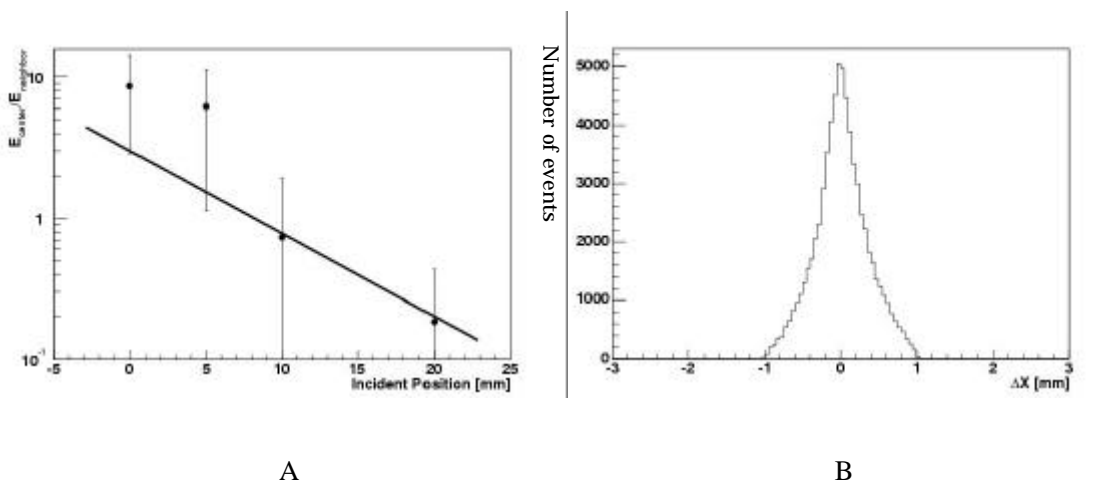
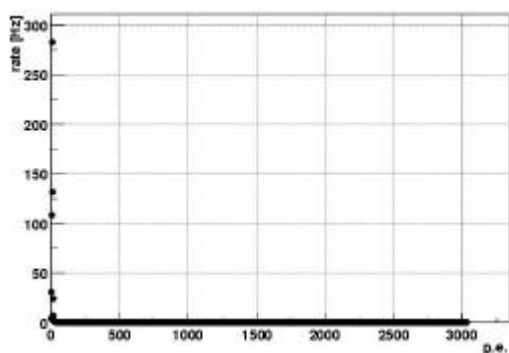


図 4.2.3 算出関数 (A) と中心入射の  $x$  の分布 (B)

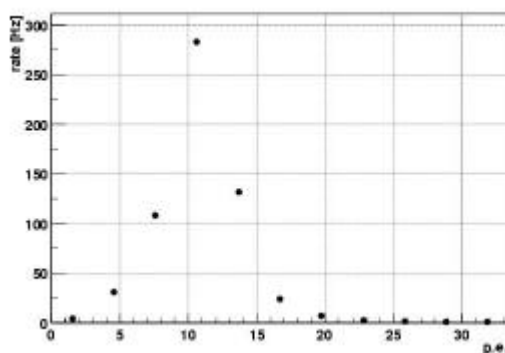
今回は位置分解能を  $x$  の半値幅で評価した。150MeV の電子が中心に入射した場合に、カロリメータ9本組みの位置分解能を評価し求めた結果  $4 \pm 1$  mmであり、 $1/E$  でスケールすると仮定すると  $\sigma_p = 1.6 \pm 0.4$  mm/ E となった。ここで E は入射粒子のエネルギーで単位は GeV である。

### 4.3 アフターグロー

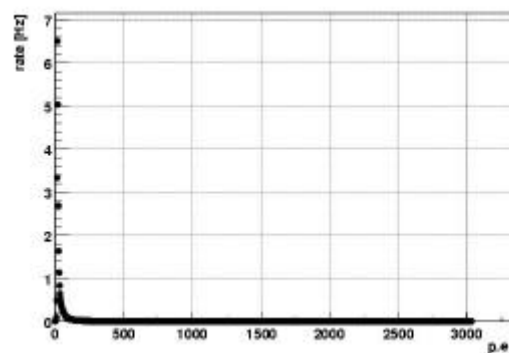
結晶035のアフターグローの測定を行い図4.3のような結果が得られた。グラフの横軸を光電子数に変換する際放射線源によるシンチレーション光の測定によってえられた結晶035についてのADCチャンネルと光電子数の関係を用いた。



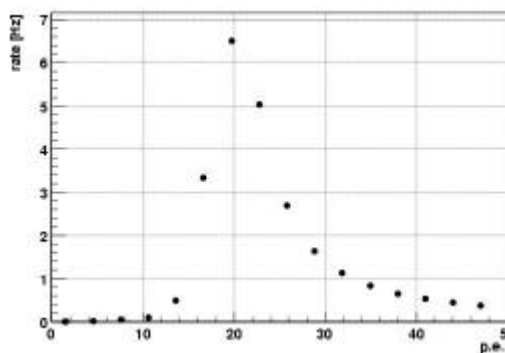
A



B



C



D

図4.3 アフターグローの発光量と周波数

図4.3 - A が閾値50mV(4MeV)、図4.3 - Bは図4.3 - Aのピークの部分をズームアップしたものである。閾値200mV(8MeV)に関しても同様に図4.3 - Cと図4.3 - Dである。また図A,Cともに100光電子以上の発光は0.1Hz以下である。これから5MeV程度のエネルギーと等価な光が約300Hz出ている。MeV換算は結晶035の20の光量の1.8光電子/MeVを用いた。

## 5. 考察

まず、今回測定したロシア・RI&NC 社製結晶と過去に測定された古河機械金属(株)製結晶との温度依存性の比較・考察を行い、つぎに両結晶のカロリーメータとしての性能評価比較をする。ついでアフターグローについての考察を行う。最後にロシア製結晶と日本製結晶を比較した結果を述べる。

### 5.1 温度依存性の比較

今回測定したロシア・RI&NC 社製結晶( $20 \times 20 \times 200 \text{ mm}^3$ )と過去に本研究室で測定された古河機械金属(株)製結晶( $20 \times 20 \times 200 \text{ mm}^3$ )を比較した。

光量については、過去に行われた古河機械金属(株)製結晶を使つての測定(文献[3])と今回行ったロシア・RI&NC 社製結晶を使つての測定では、使用した光電子増倍管が異なっている。過去の測定で使用された光電子増倍管は浜松ホトニクス R7056である。そのため、光電面の面積に差があり、過去に行われた測定では $20 \times 20 \text{ mm}$ をすべて覆っていたのに対し、今回の測定では、約44%しか覆っていなかった。RI&NC 社製結晶、古河機械金属(株)製結晶の20 における光量がそれぞれ、2.4光電子/MeV、5.6光電子/MeVと差があるが、光電面の面積の差を考慮すると同程度であるといえる。

また、光量の温度係数についても今回測定した RI&NC 社製結晶5本の結果が $-2.4 \sim -3.3\%$  となり、古河機械金属(株)製結晶の結果の $-3.6\%$  とほぼ同程度であるといえる。

蛍光減衰時定数については、RI&NC 社製結晶、古河機械金属(株)製結晶の20 における平均蛍光減衰時定数がそれぞれ、 $7.4 \sim 7.8 \text{ ns}$ 、 $6.1 \text{ ns}$ とほぼ同程度であるといえる。しかし、蛍光減衰時定数の温度係数については今回測定した RI&NC 社製結晶5本の結果が $-1.4 \sim -1.7\%$  となり、古河機械金属(株)製結晶の結果の $-3.4\%$  と違いが見られ、RI&NC 社製結晶の方が古河機械金属(株)製結晶と比較して温度依存性が小さいといえる。

### 5.2 カロリーメータの性能評価比較

今回測定したロシア・RI&NC 社製結晶( $20 \times 20 \times 200 \text{ mm}^3$ )と平成14年度に本研究室で測定された古河機械金属(株)製結晶( $20 \times 20 \times 200 \text{ mm}^3$ )とを比較する。

エネルギー分解能については、RI&NC 社製結晶9本で作製したカロリーメータで得られた結果  $\epsilon/E = 2.60 \pm 0.003\%$  / E と過去に測定した古河機械金属(株)製結晶9本で

作製したカロリメータで得られた結果の  $\sigma_E/E = 2.7\%/E$  と良く一致している。そのため、エネルギー分解能については同程度の精度であるといえる。

位置分解能については、今回半値幅で評価し  $\rho_p = 4 \pm 1 \text{ mm}$ 、エネルギー依存性があると考え、 $E$  でスケールすると  $1.6 \pm 0.4 \text{ mm}/E$  となった。これに関しては古河機械金属(株)製結晶9本で作製したカロリメータでの測定のデータはないが、過去に本研究室の小原亮太氏によってなされたシミュレーション結果(文献[4])の  $\rho_p = 2.05 \pm 1.07 \text{ mm}/E$  と誤差の範囲で一致している。

ロシア・RI&NC 社製結晶と日本・古河機械金属(株)製結晶を比較した結果同様の蛍光特性であり、同精度の電磁カロリメータを構成できることがわかった。またタングステン酸鉛単結晶電磁カロリメータは高エネルギー粒子の測定においては十分な性能を持っているといえる。しかし、エネルギーの低い粒子の測定の場合では、アフターグローによるノイズの問題や、光量が少ないために十分な分解能が得られないことが考えられあまり適していないといえる。

### 5.3 アフターグロー

アフターグローの測定からPWO結晶は5MeVに相当する光が約300Hz、10MeVに相当する光が約10Hzの出ていることがわかった。このことから、閾値が5MeV以上で測定を行う場合はバックグラウンドとしての寄与はほとんどないと考えられる。ただし、文献[10]によるとアフターグローは結晶の精製条件に強く影響している所以他の試料についても測定すべきである。

また、ここで今回我々が測定したPWOのアフターグローについて少し述べておく。アフターグローという現象は結晶それぞれで起こる過程は異なっている。文献[10]によると、PWO結晶の場合は2つの過程があり、1つは熱誘導発光(TSL)によるものと、もう1つは結晶精製の際に結晶構造に欠陥ができるためであると考えられている。



## 6. 結論

今回の研究でロシア・RI&NC 社製タングステン酸鉛結晶の 20 における光量、蛍光減衰時間は以下ようになった。

	結晶 1 3 8	結晶 1 3 6	結晶 1 6 3	結晶 0 3 5	結晶 1 6 1
光量 [光電子/MeV]	2 . 4 6 ± 0 . 1 2	3 . 0 8 ± 0 . 2 2	2 . 6 1 ± 0 . 2 9	1 . 7 7 ± 0 . 2 3	2 . 6 0 ± 0 . 2 0
平均減衰時間	7 . 4 0 ±0.03	7 . 3 4 ±0.00	7 . 7 5 ±0.04	7 . 7 5 ±0.00	6 . 9 6 ±0.00
成分1 (割合)	0 . 6 1 ± 0.047 ( 8 %)	0 . 8 0 ± 0.027 ( 9 %)	0 . 7 3 ± 0.054 ( 8 %)	0 . 6 5 ± 0.054 ( 7 %)	0 . 7 4 ± 0.024 ( 1 0 %)
成分2 (割合) [ n s ]	7 . 9 4 ±0.00 ( 9 2 %)	8 . 0 2 ±0.00 ( 9 1 %)	8 . 3 4 ±0.00 ( 9 2 %)	8 . 2 9 ±0.00 ( 9 3 %)	7 . 6 0 ±0.00 ( 9 0 %)

温度係数に関しては、光量、平均蛍光減衰時定数について以下ようになった。

	結晶 1 3 8	結晶 1 3 6	結晶 1 6 3	結晶 0 3 5	結晶 1 6 1
光量 [%/ ]	- 2 . 5 0 ± 0 . 0 4	- 3 . 2 2 ± 0 . 3 4	- 2 . 5 5 ± 0 . 4 2	- 2 . 4 6 ± 0 . 2 1	- 3 . 0 6 ± 0 . 2 8
平均蛍光減衰時定数 [%/ ]	- 1 . 4 7 ± 0 . 1 2	- 1 . 4 6 ± 0 . 1 7	- 1 . 4 1 ± 0 . 1 4	- 1 . 7 3 ± 0 . 2 0	- 1 . 5 4 ± 0 . 2 2

カロリメータ9本組みのエネルギー分解能、位置分解能はそれぞれ、 $\sigma_E/E = 2.60 \pm 0.003\%/E$ 、 $\sigma_p/E = 1.6 \pm 0.4\text{mm}/E$  となった。ここでEは入射粒子のエネルギーで単位はGeVである。

この結果は、過去に本研究室で測定された古河機械金属(株)製タングステン酸鉛結晶で得られた結果と比較し、20 における光量、平均減衰時定数、光量の温度係数、カロリメータ9本組みのエネルギー分解能は同程度の結果であるといえる。しかし、平均蛍光減衰時定数に関してはロシア・RI&NC 社製タングステン酸鉛結晶の方が温度依存性は小さいといえる。また、カロリメータ9本組みの位置分解能については、古河機械金属(株)製のデータはないがシミュレーション結果の  $\sigma_p = 2.05 \pm 1.07\text{mm}/E$  とほぼ一致している。アフターグロー

に関しては 5 MeV 相当の光が約300Hz、10 MeV 相当の光が約10Hz の出ていることがわかった。

## 謝辞

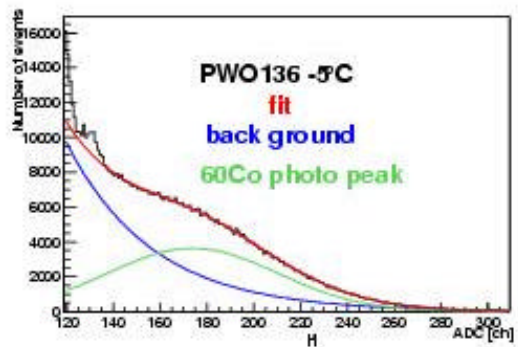
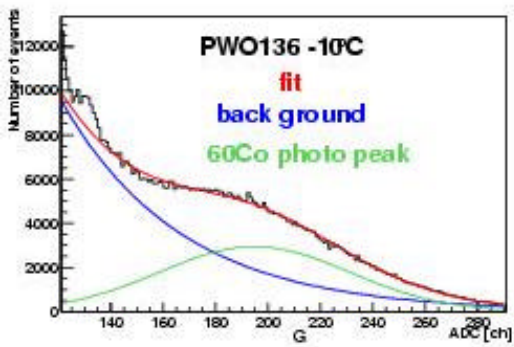
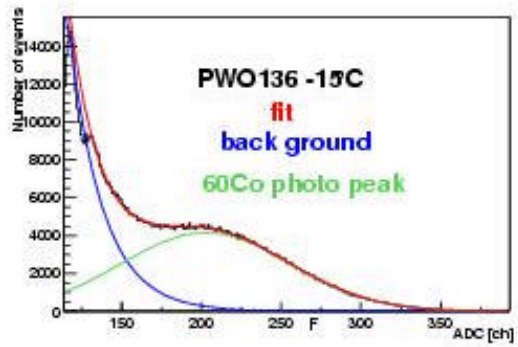
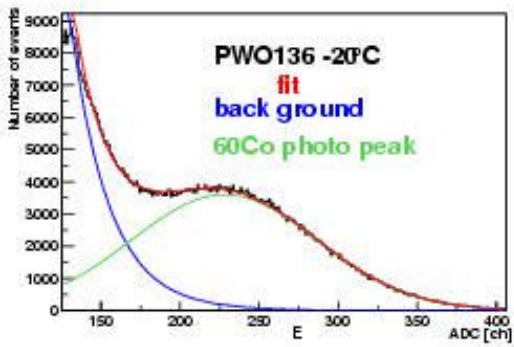
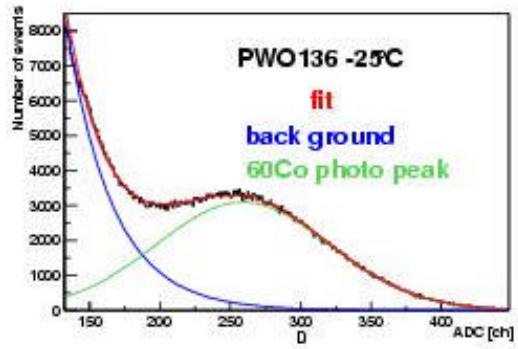
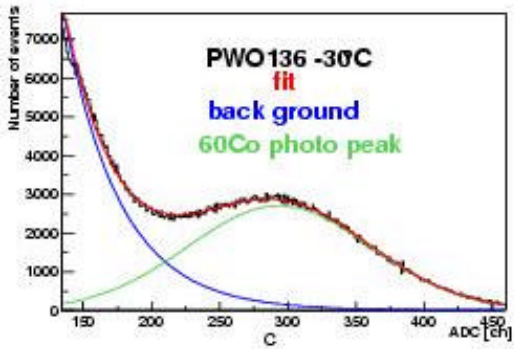
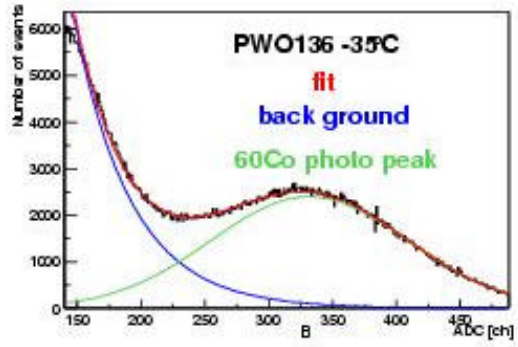
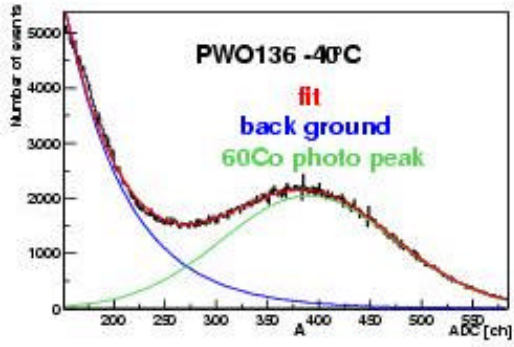
杉立先生、志垣先生、本間先生、多数ご指導いただき有難うございました。また、諸先輩方には様々なことを教えていただき有難うございました。特に、平下さん、豊田さんには共同実験者として大変お世話になりました。また、小原さん、平下さんには実験から解析にわたって多数のアドバイスをいただきました。また、高エネルギー加速器研究機構の小林先生にも感謝します。

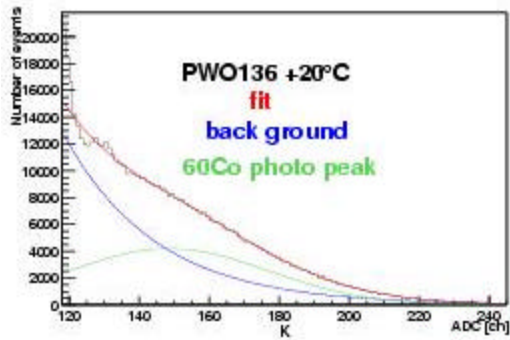
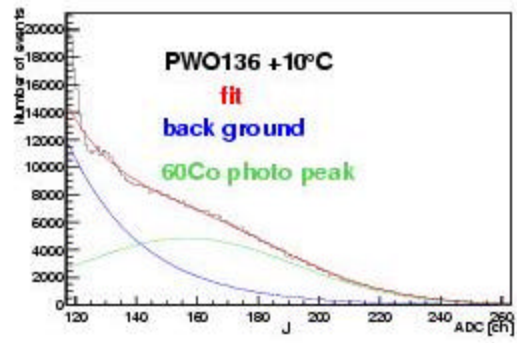
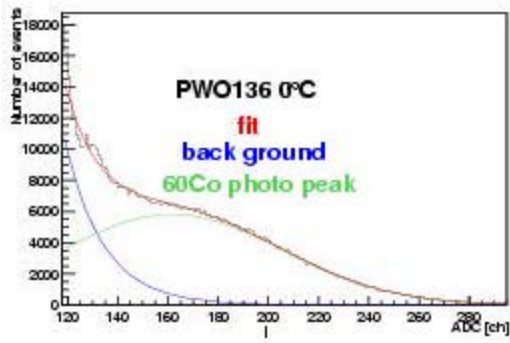
多くの方々に支えられ本研究を進めることができ本稿を書き上げることができました。本当に有難うございました。

## 参考文献

- [1] 古橋 良重 研究室報告書 「2001年度 鉛タングステン結晶に関する実験の報告書」 広島大学大学院理学研究科物理科学クォーク物理学研究室 2001年度
- [2] 真木 昌弘 「パリティ物理学コース 高エネルギー物理学実験」 1997年3月30日
- [3] 小原 亮太 修士論文 「高性能電磁カロリメータのためのタングステン酸鉛結晶」 広島大学大学院理学研究科物理科学クォーク物理学研究室 2002年3月
- [4] 小原 亮太 卒業論文 「鉛タングステン結晶を用いた光子検出器の研究および開発」 広島大学理学部物理学科 2001年3月
- [5] 豊田 大介氏 卒業論文 「GeV領域光子ビームによるYドーブ鉛タングステン酸 (PWO) 結晶電磁カロリメータ試作器の性能評価」 広島大学理学部物理学科 2003年3月
- [6] 浜松ホトニクス社ホームページ光電子増倍管ホトマルPMT高感度光センサ高速応答光センサ「<http://www.hpk.co.jp/Jpn/products/etd/pmtj/pmtj.htm>」
- [7] 高橋 徹 「広島大学電子周回装置における教育研究」 広島大学大学院先端物質科学研究科 2002年5月1日
- [8] THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY “ PHYSICAL REVIEW D PARTICLES AND FIELDS ”
- [9] G.A.AKOPDJANOV, et.al., “ DETERMINATION OF PHOTON COORDINATES IN A HODOSCOPE CHERENKOV SPECTROMETER ” Nucl.Instr.Meth. 140 . 441 ( 1997 )
- [10] A.N.Annenkov, et.al., “ Slow components and afterglow in PWO crystal scintillations ” Nucl.Instr.Meth. 403 ( 1998 )
- [11] 小林 正明 高エネルギー加速器研究機構

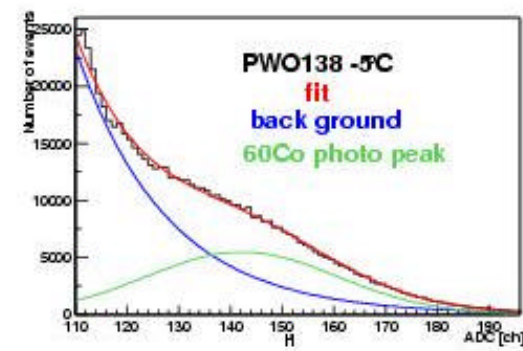
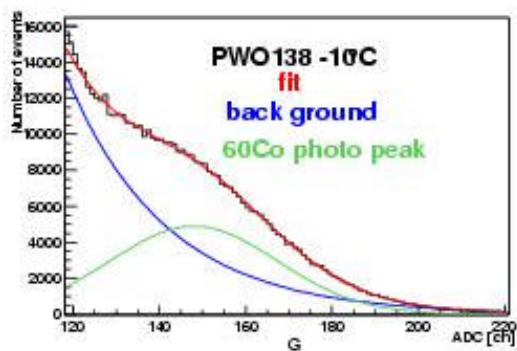
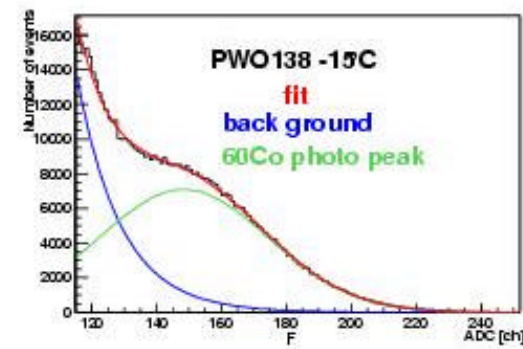
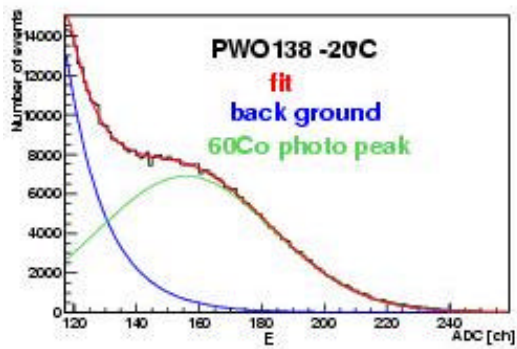
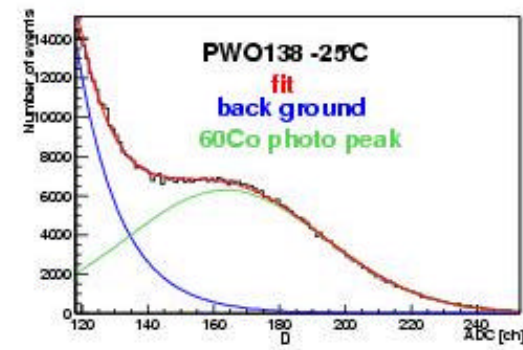
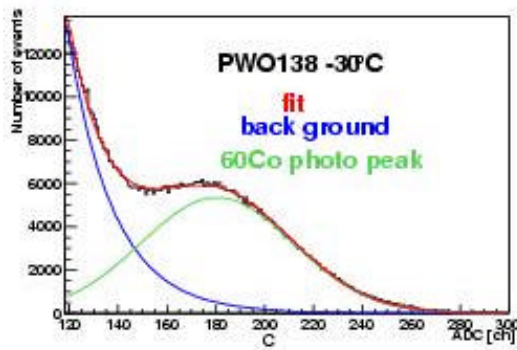
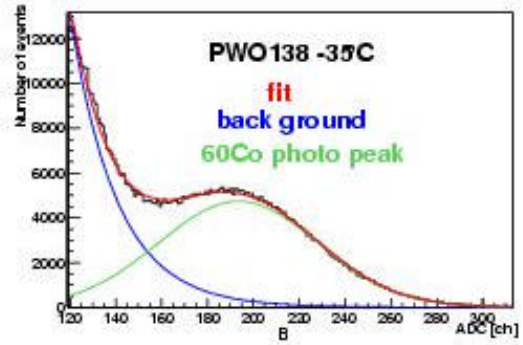
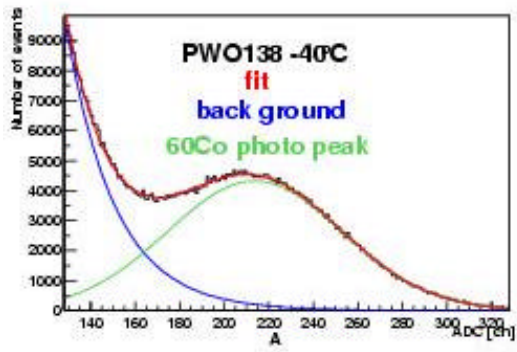
付録

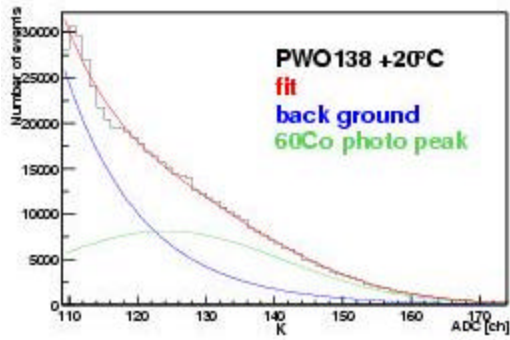
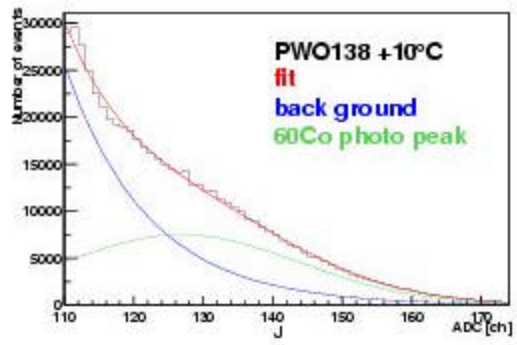
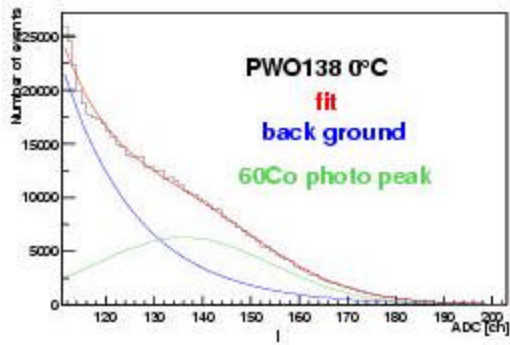




A ~ K はそれぞれ -40 、 -35 、 -30 、 -25 、 -20 、 -15 、 -10 、 -5 、  $\pm 0$  、 +10 、 +20 でのフィットの図である。

結晶 1 3 6 各温度での ADC フィット

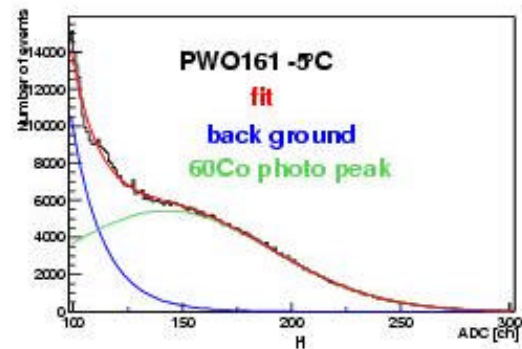
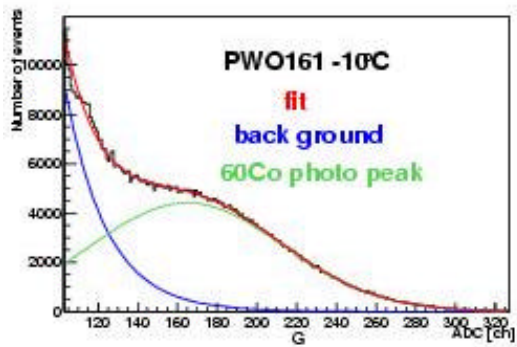
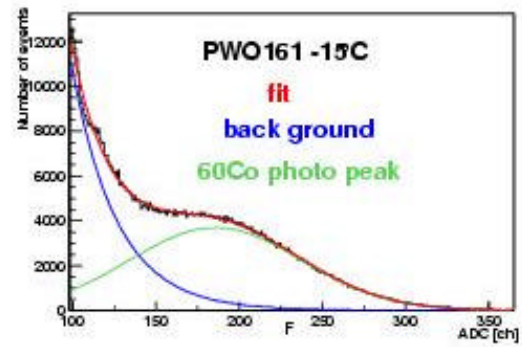
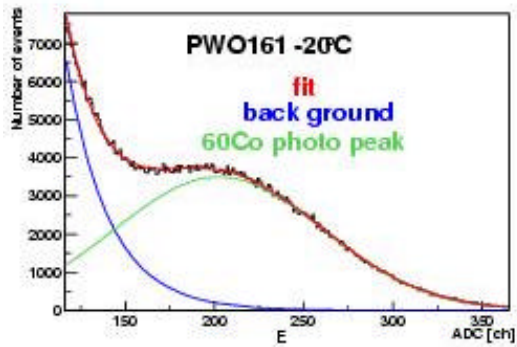
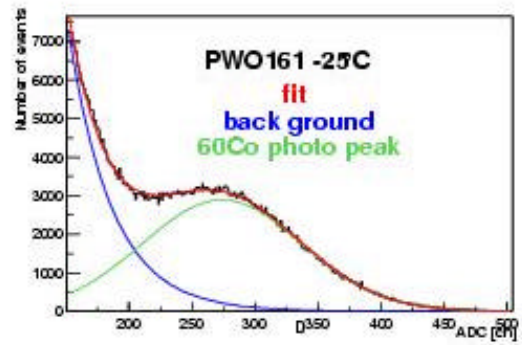
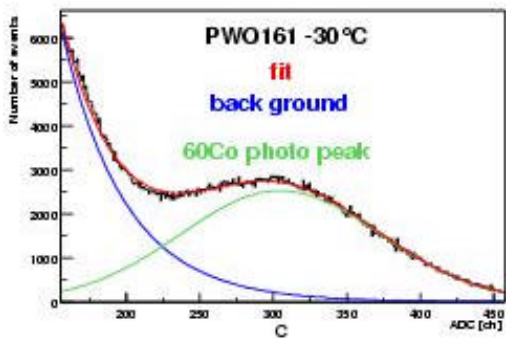
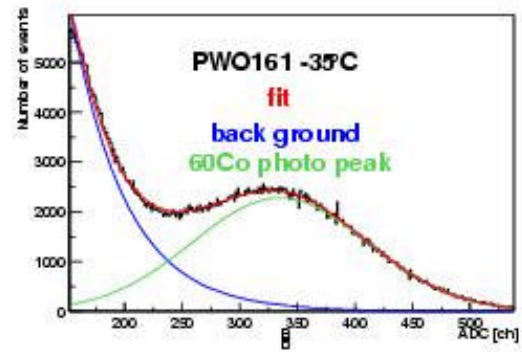
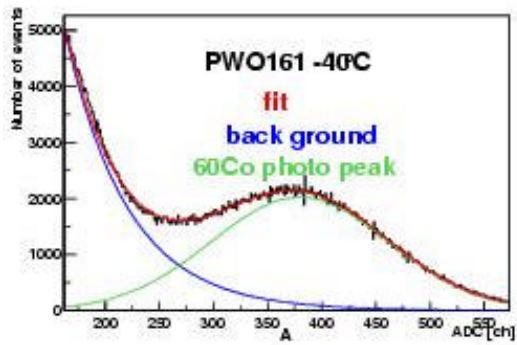


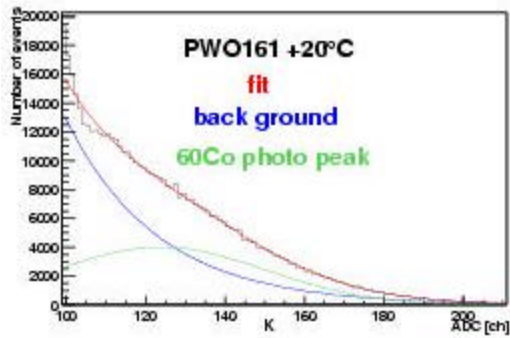
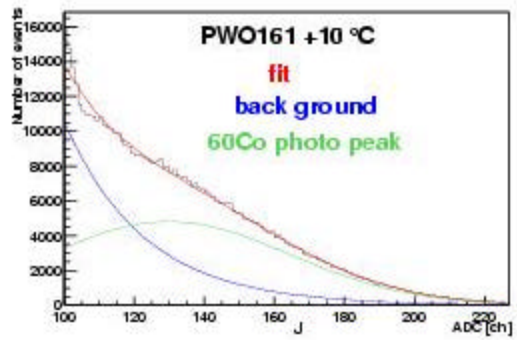
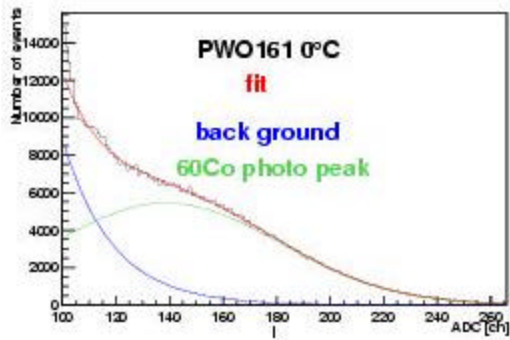


A ~ K はそれぞれ -40 、 -35 、 -30 、 -25 、 -20 、 -15 、 -10 、 -5 、  $\pm 0$  、 +10 、 +20 でのフィットの図である。

結晶 1 3 8 各温度での ADC フィット

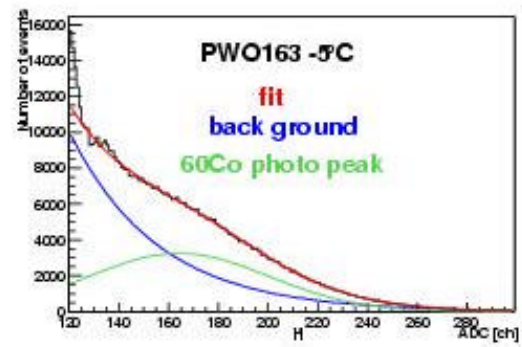
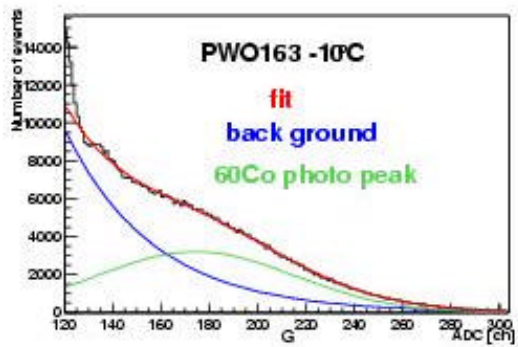
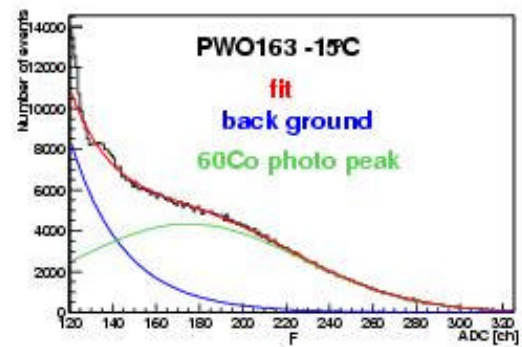
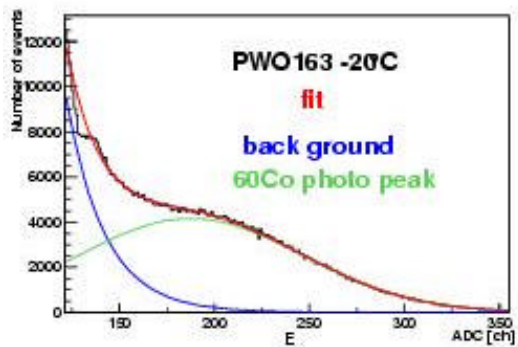
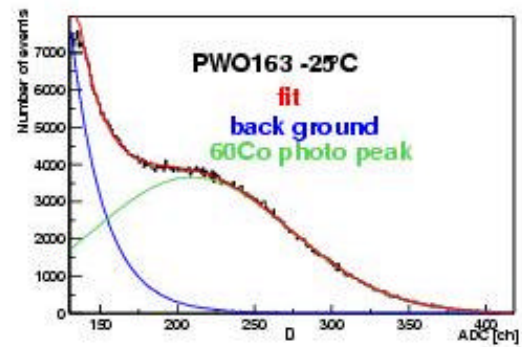
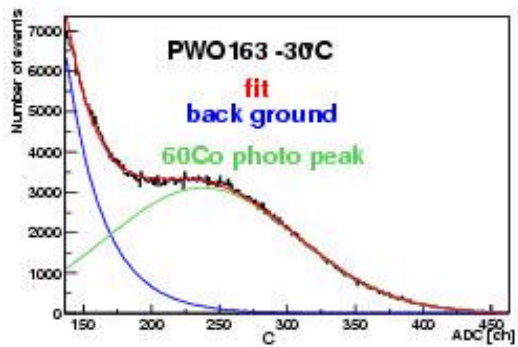
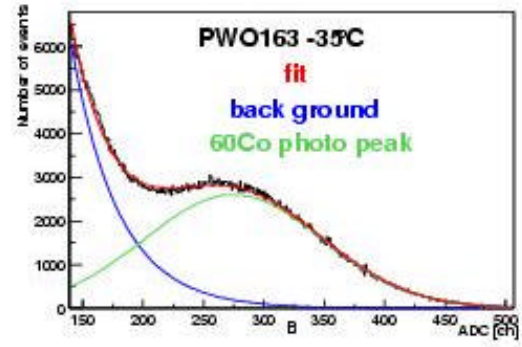
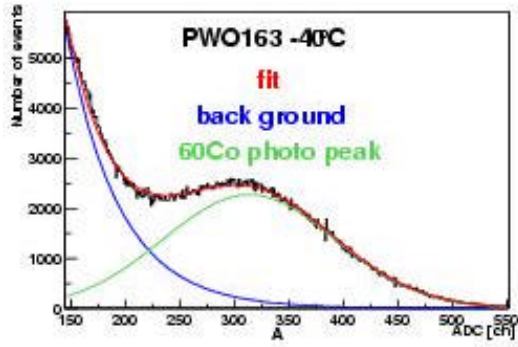


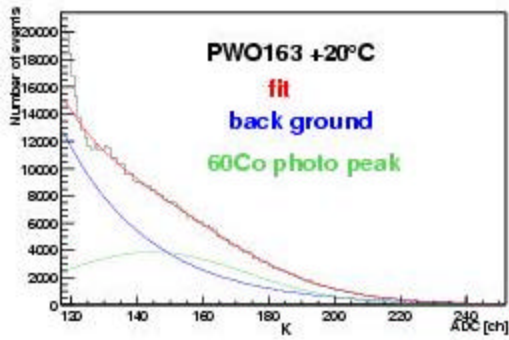
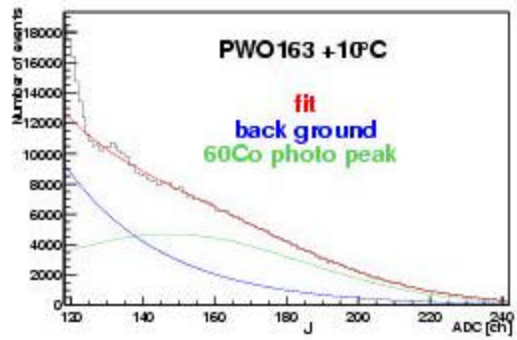
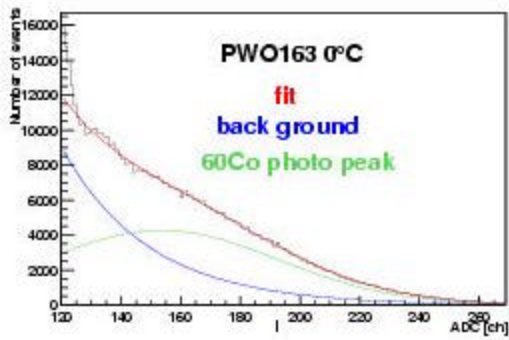




A~K はそれぞれ-40、-35、-30、-25、-20、-15、-10、-5、±0、+10、+20 でのフィットの図である。

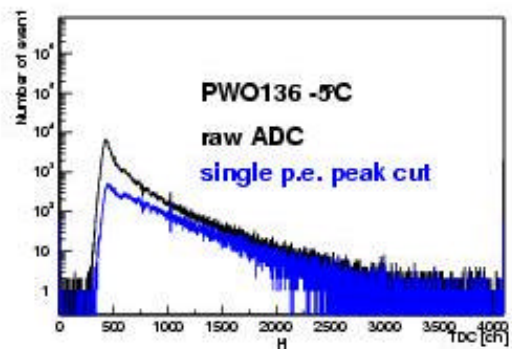
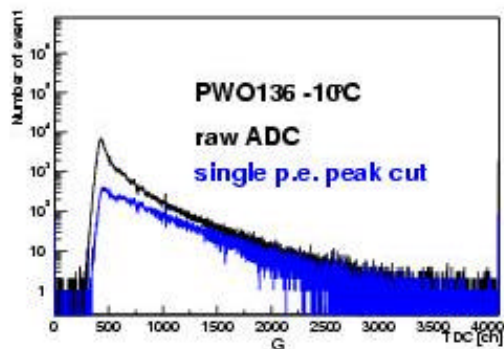
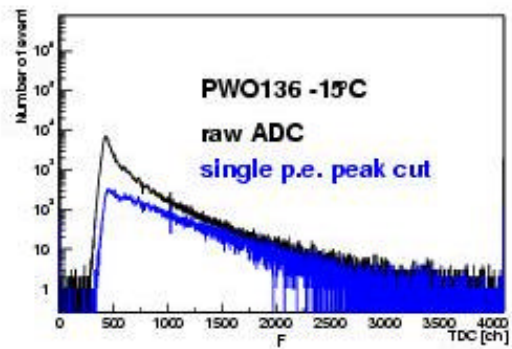
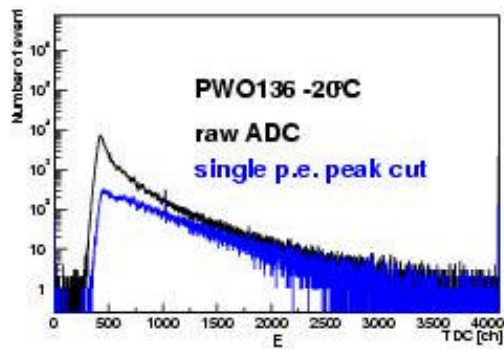
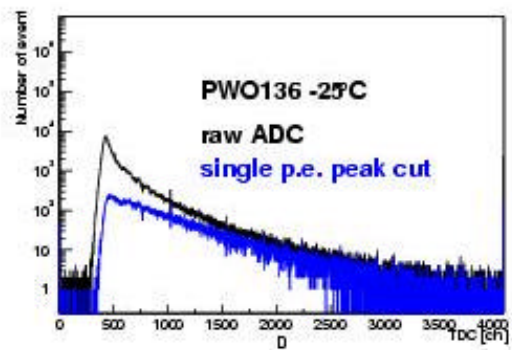
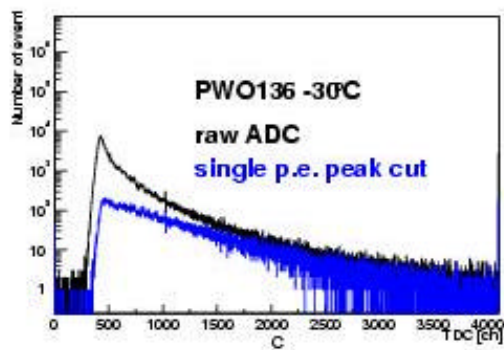
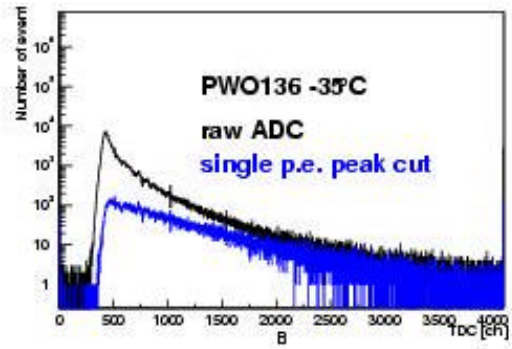
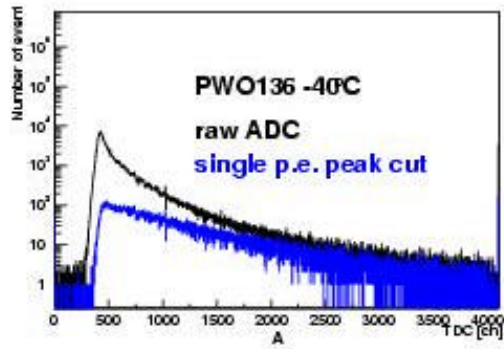
結晶 1 6 1 各温度での ADC フィット

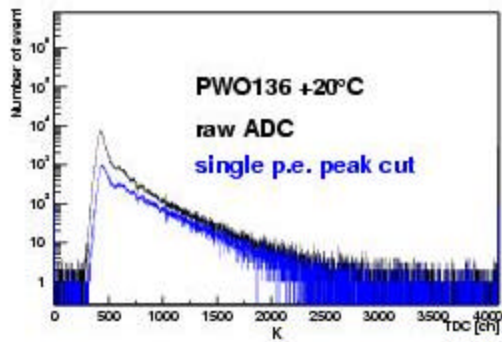
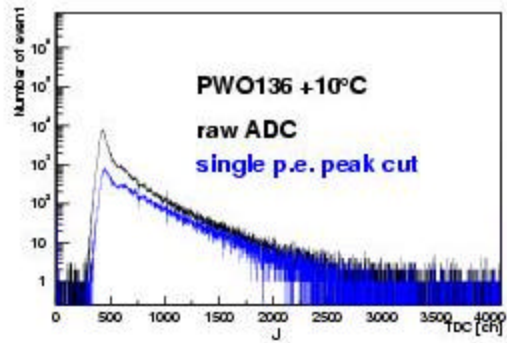
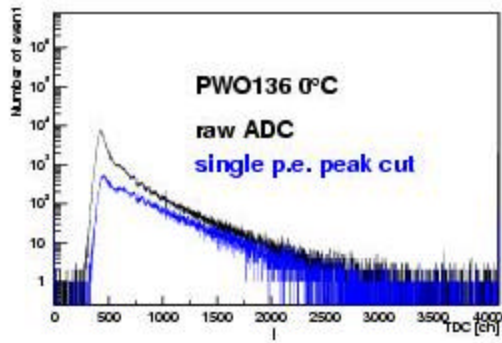




A~K はそれぞれ-40 、 -35 、 -30 、 -25 、 -20 、 -15 、 -10 、 -5 、 ±0 、 +10 、 +20 でのフィットの図である。

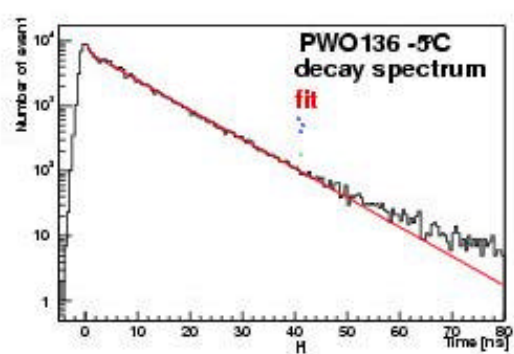
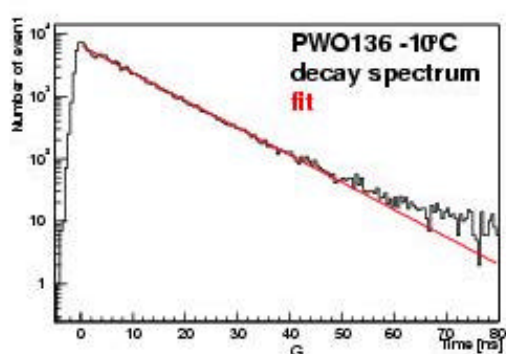
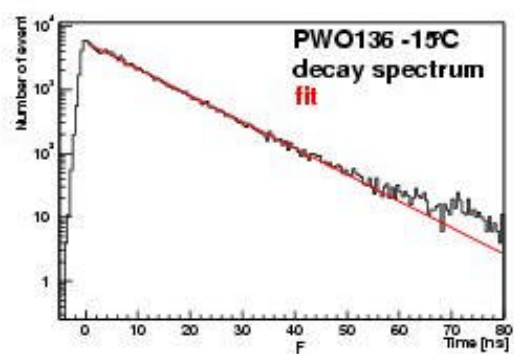
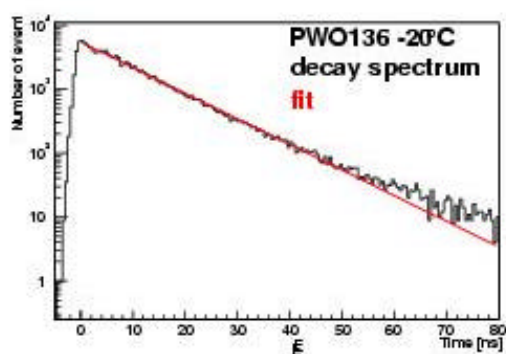
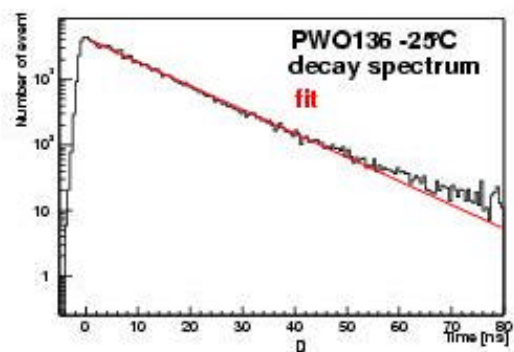
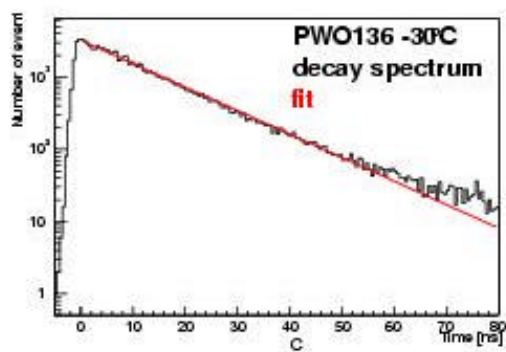
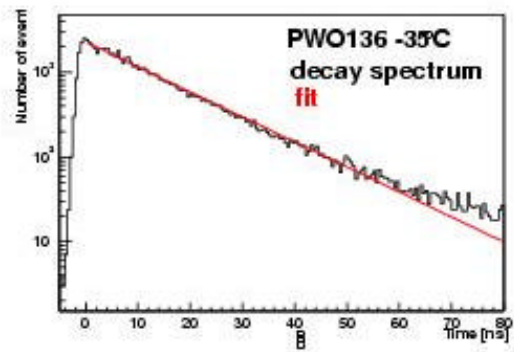
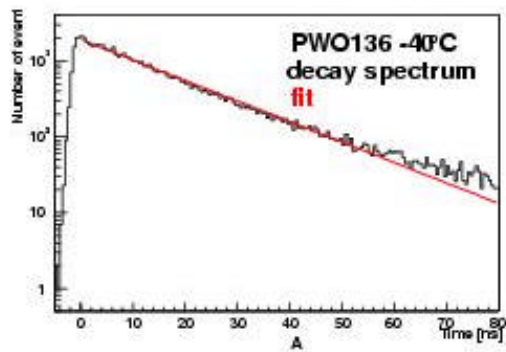
結晶 1 6 3 各温度での ADC フィット

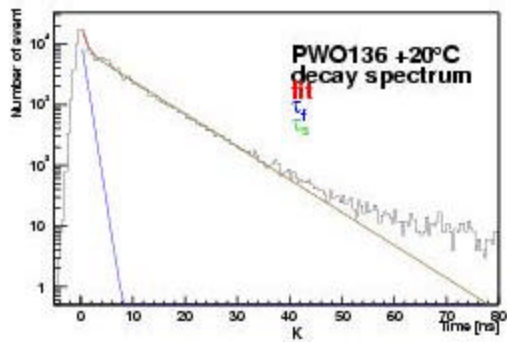
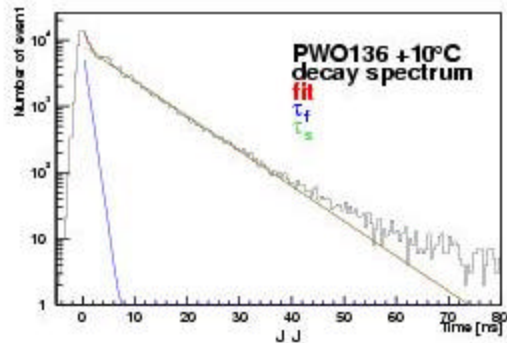
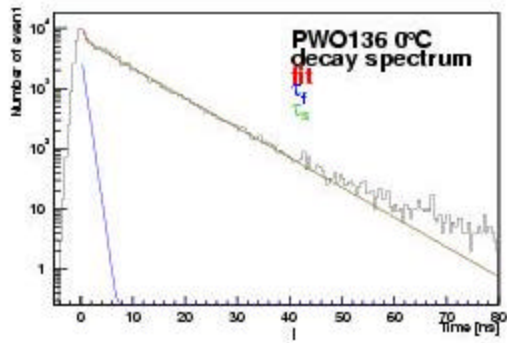




A ~ K はそれぞれ -40 、 -35 、 -30 、 -25 、 -20 、 -15 、 -10 、 -5 、 ±0 、 +10 、 +20 の図である。

結晶 1 3 6 生の TDC と単一光電子ピーク TDC カット

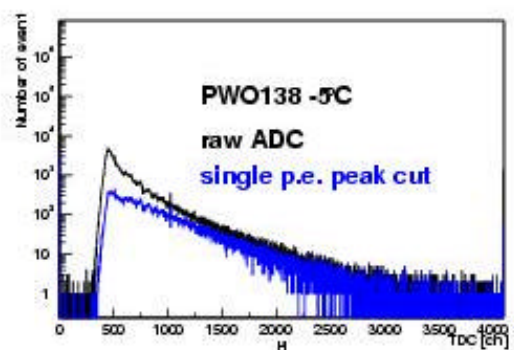
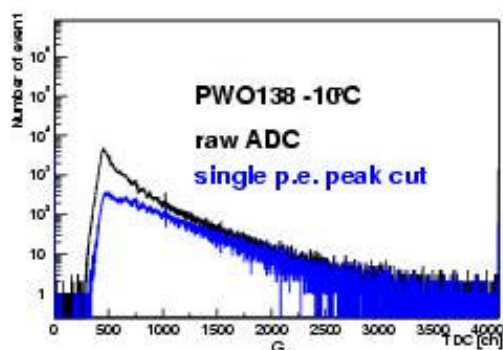
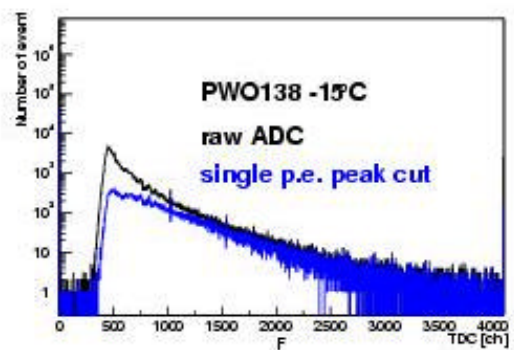
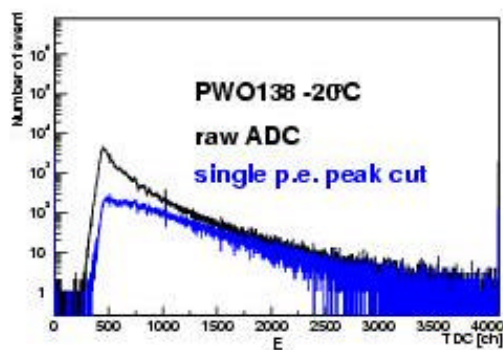
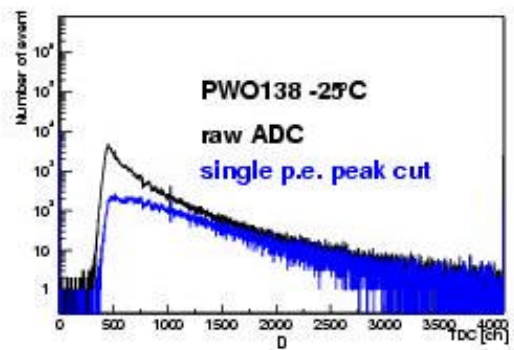
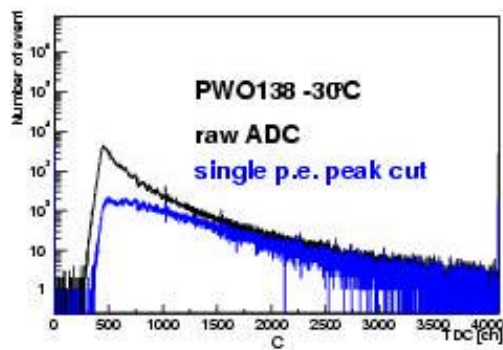
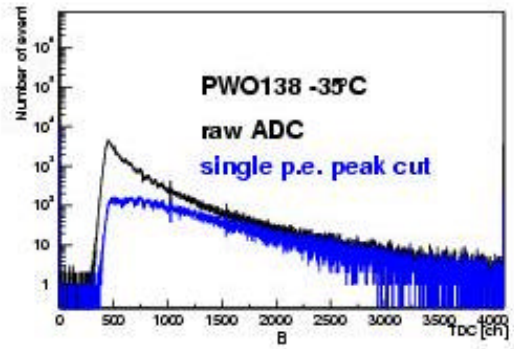
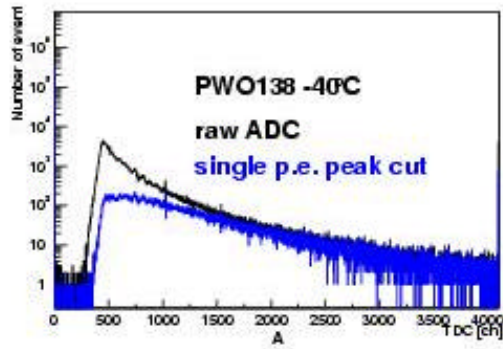


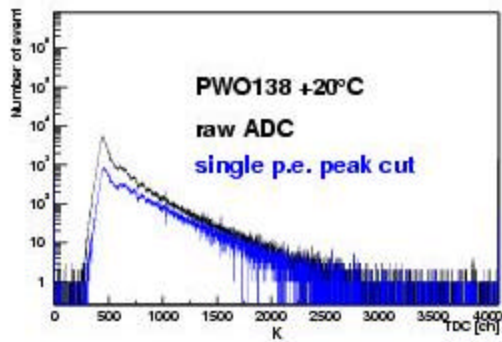
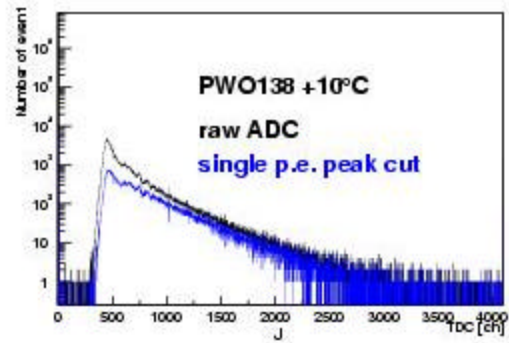
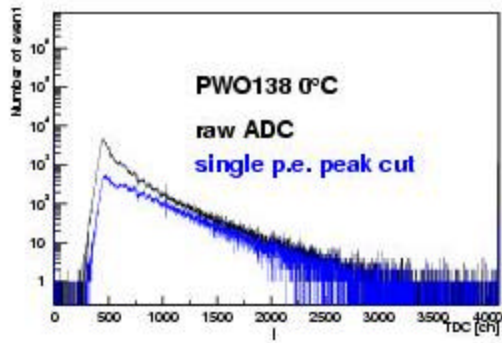


A ~ K はそれぞれ -40 、 -35 、 -30 、 -25 、 -20 、 -15 、 -10 、 -5 、 ±0 、 +10 、 +20 の図である。また、この分布は 結晶136の生のTDCを単一光電子ピークでTDCカットをし得られた分布を式(3.2.2-1)を用いて横軸を時間にしたものである。

結晶 1 3 6 蛍光減衰時間分布

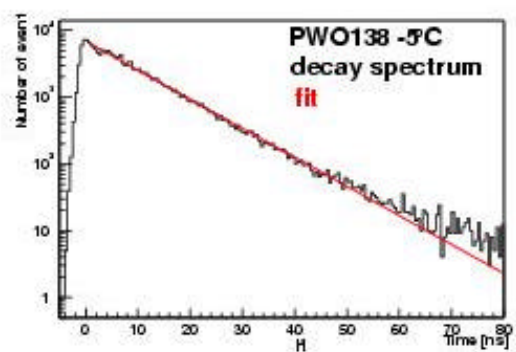
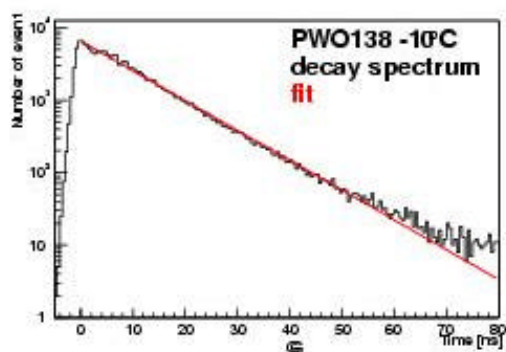
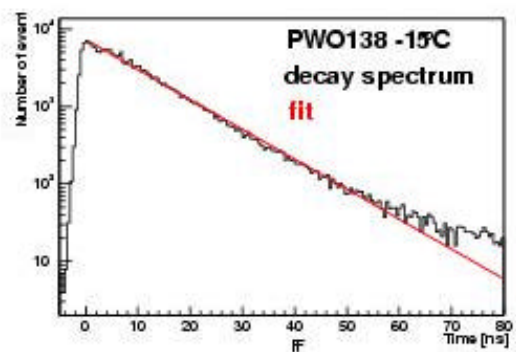
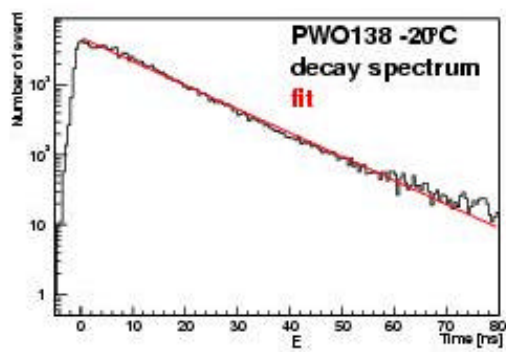
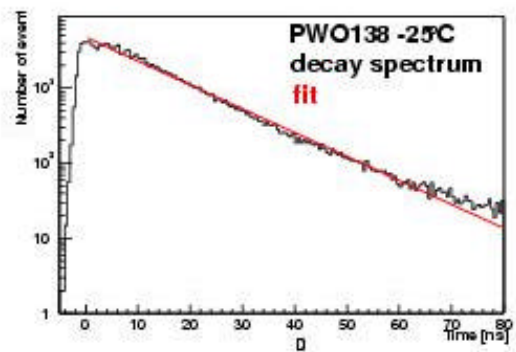
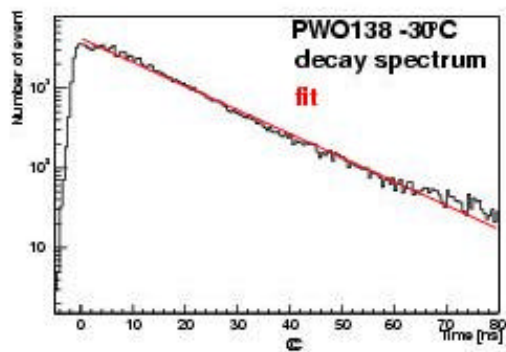
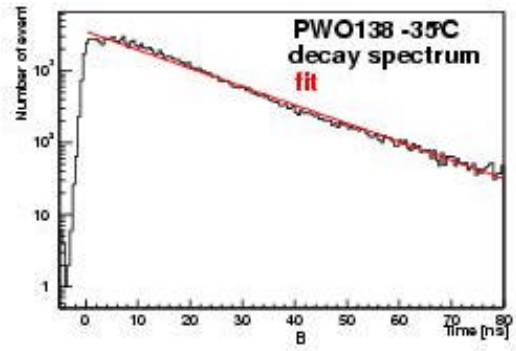
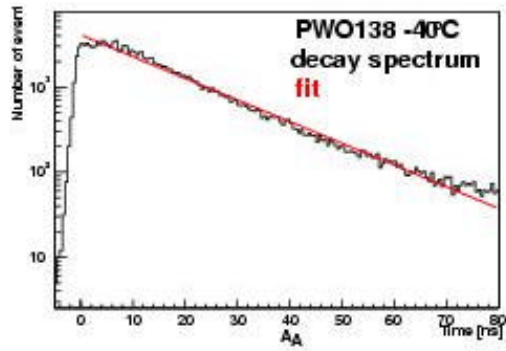


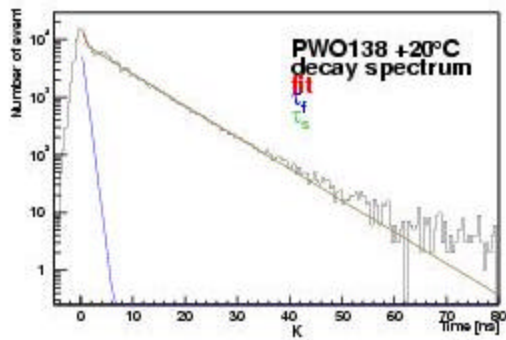
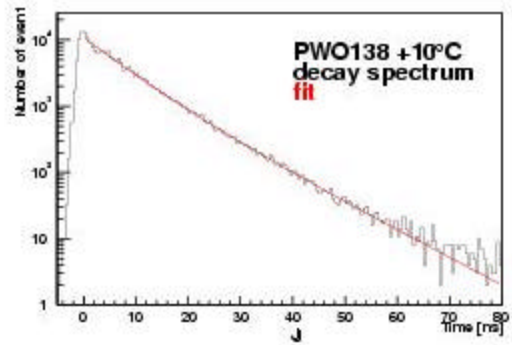
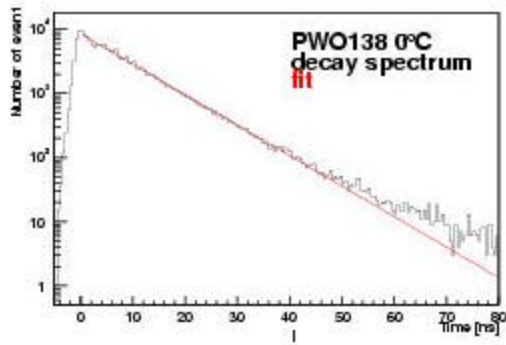




A ~ K はそれぞれ -40 、 -35 、 -30 、 -25 、 -20 、 -15 、 -10 、 -5 、 ±0 、 +10 、 +20 の図である。

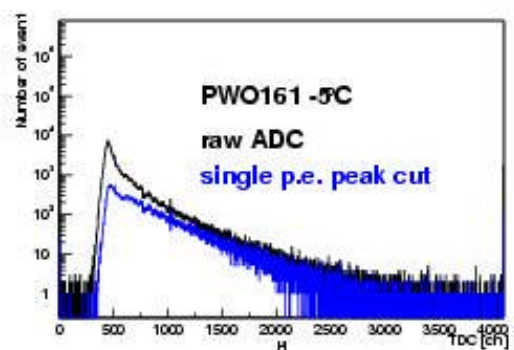
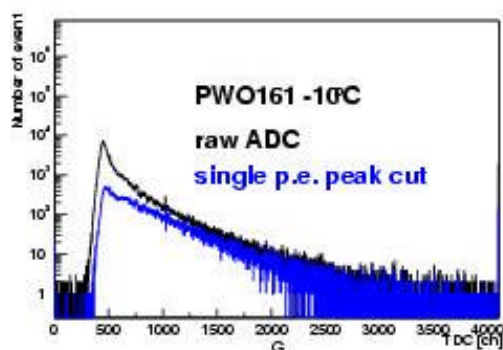
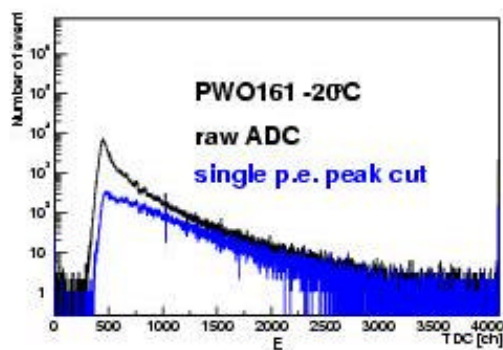
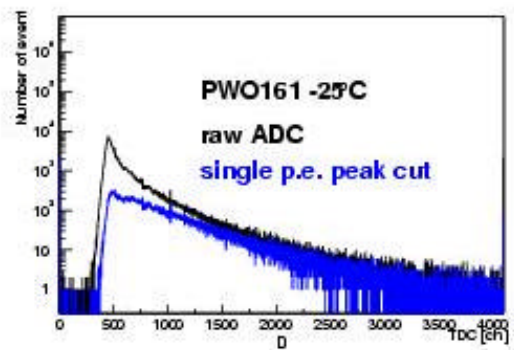
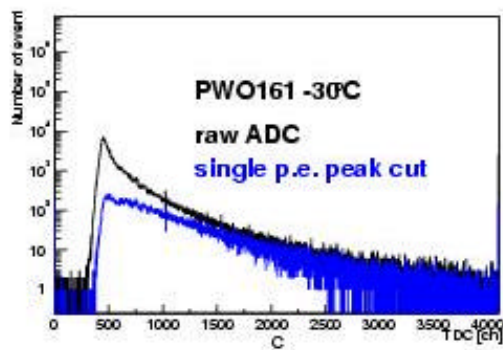
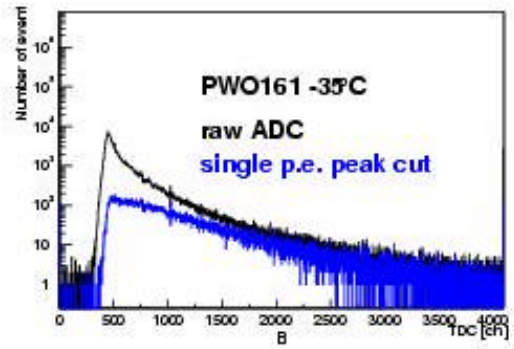
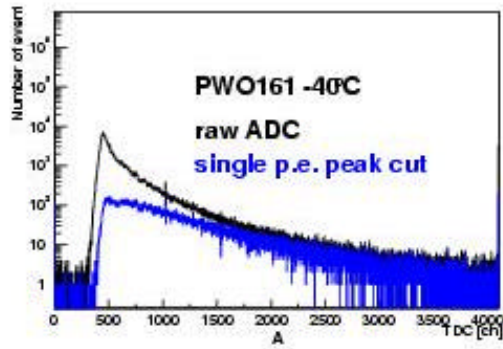
結晶 1 3 8 生の TDC と単一光電子ピーク TDC カット

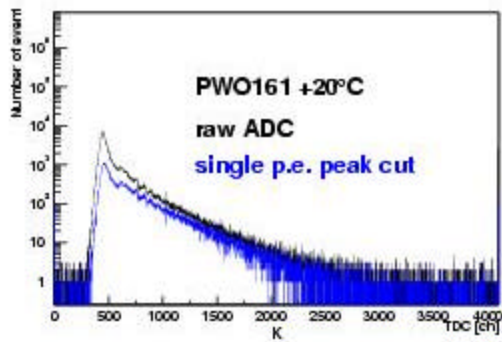
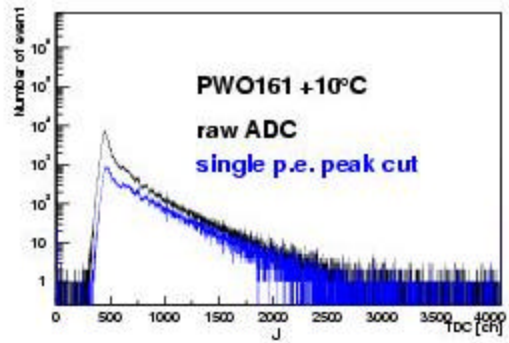
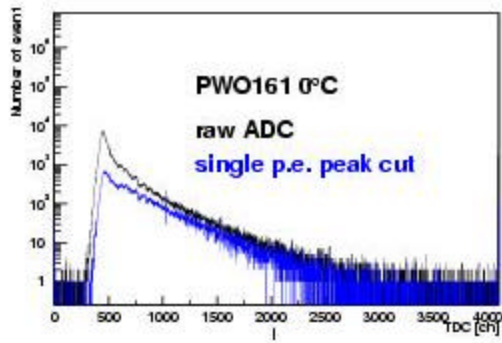




A ~ K はそれぞれ -40 、 -35 、 -30 、 -25 、 -20 、 -15 、 -10 、 -5 、  $\pm 0$  、 +10 、 +20 の図である。また、この分布は結晶138の生のTDCを単一光電子ピークでTDCカットをし得られた分布を式(3.2.2-1)を用いて横軸を時間にしたものである。

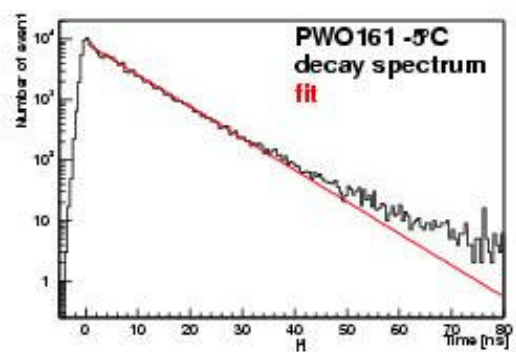
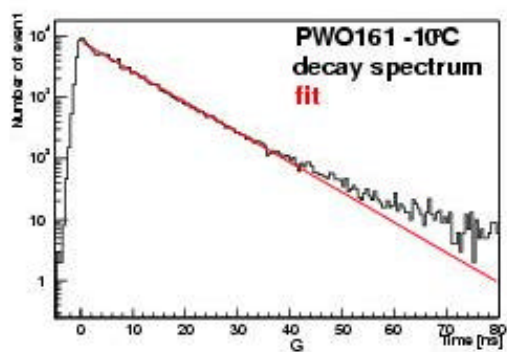
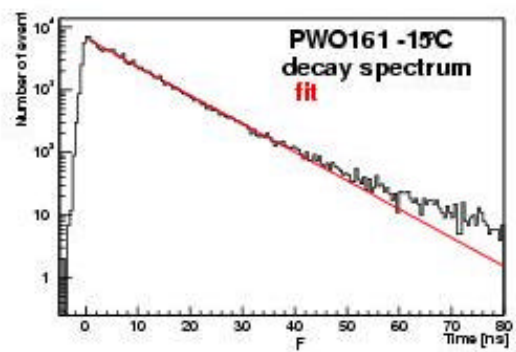
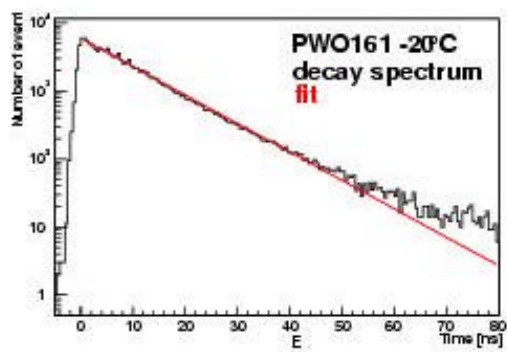
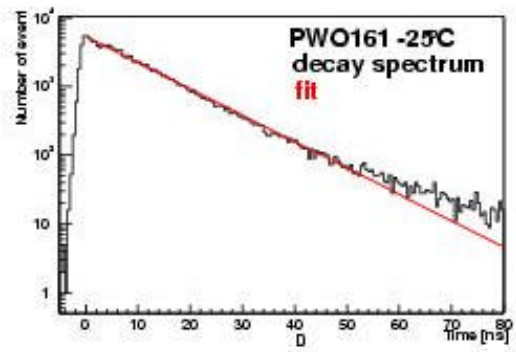
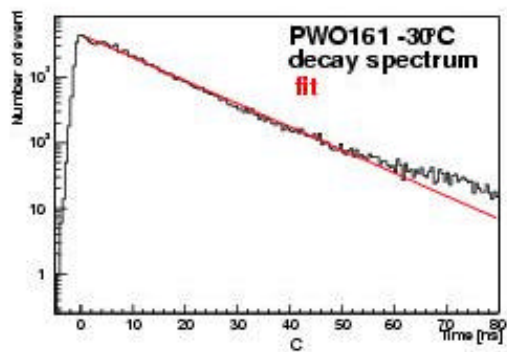
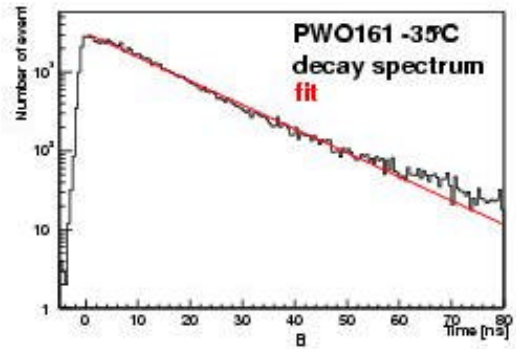
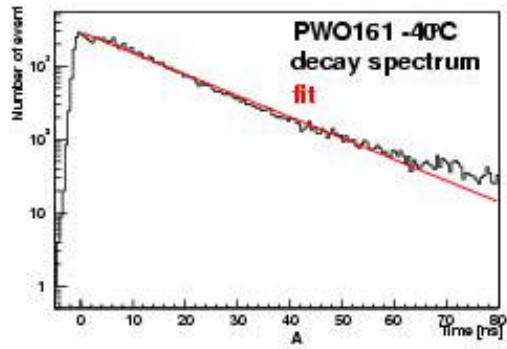
結晶138 蛍光減衰時間分布

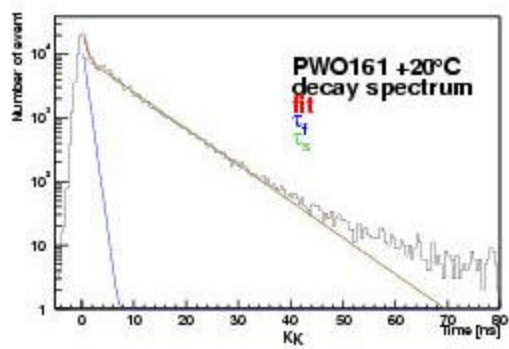
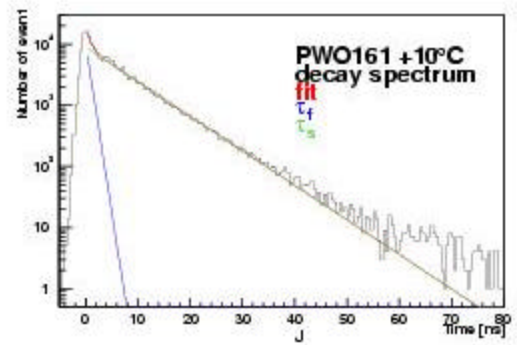
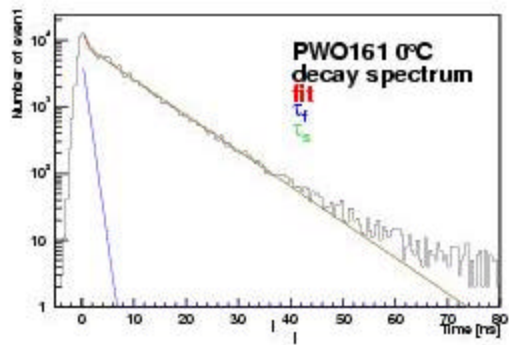




A ~ K はそれぞれ -40 、 -35 、 -30 、 -25 、 -20 、 -15 、 -10 、 -5 、 ±0 、 +10 、 +20 の図である。

結晶 1 6 1 生の TDC と単一光電子ピーク TDC カット

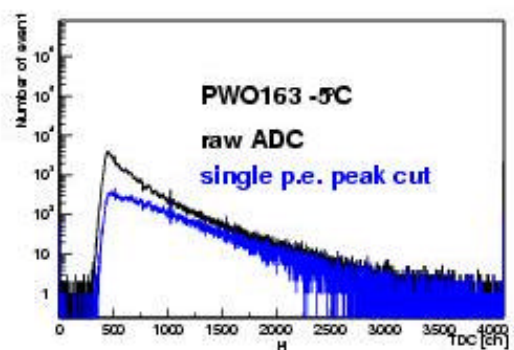
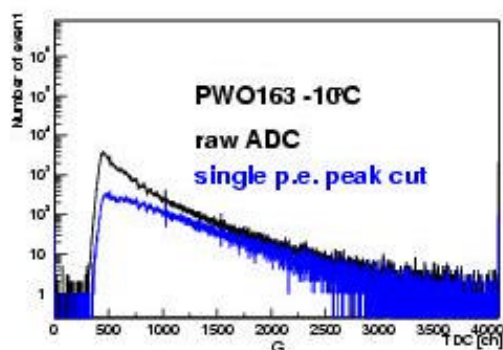
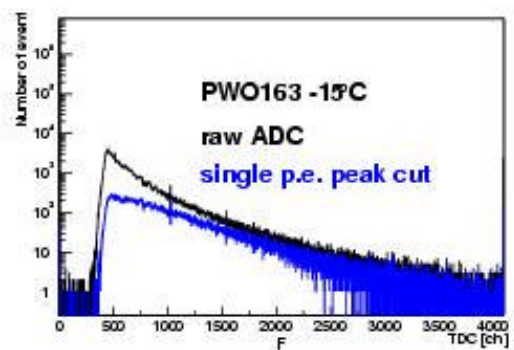
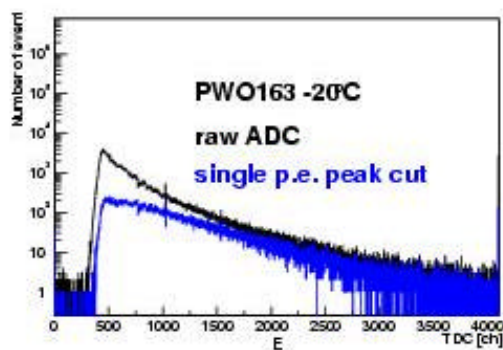
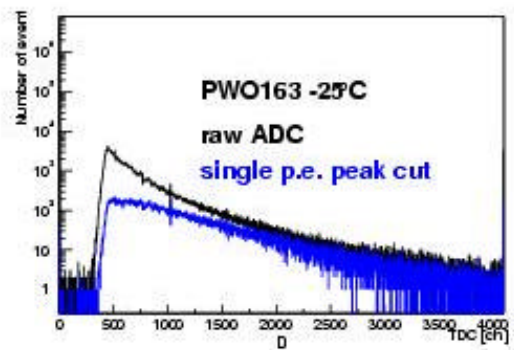
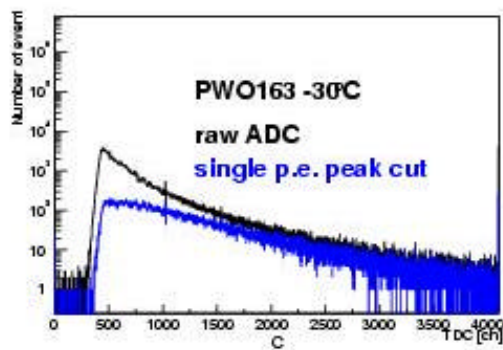
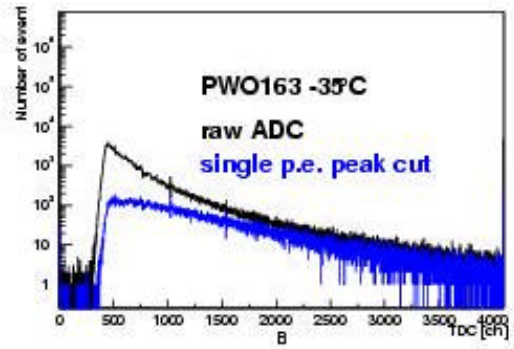
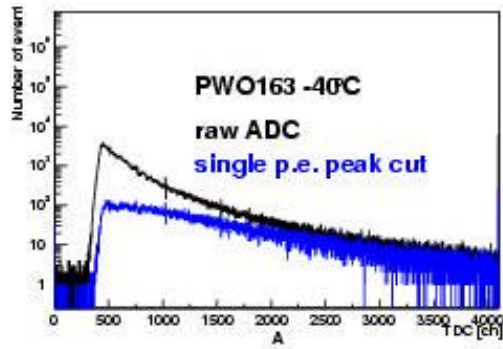


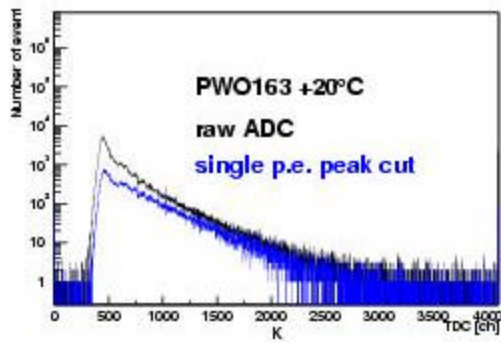
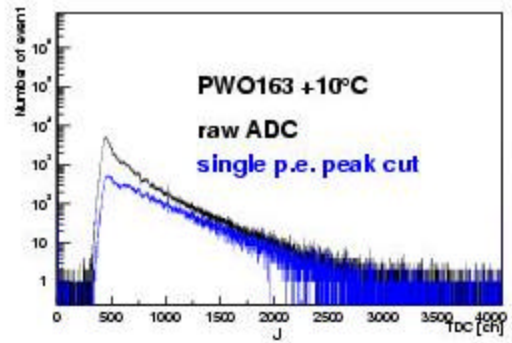
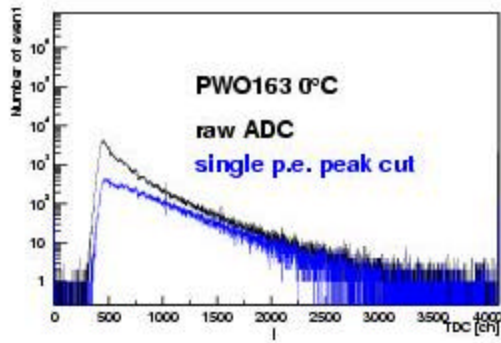


A ~ K はそれぞれ -40 、 -35 、 -30 、 -25 、 -20 、 -15 、 -10 、 -5 、 ±0 、 +10 、 +20 の図である。また、この分布は 結晶161の生のTDCを単一光電子ピークでTDCカットをし得られた分布を式(3.2.2-1)を用いて横軸を時間にしたものである。

結晶 1 6 1 蛍光減衰時間分布

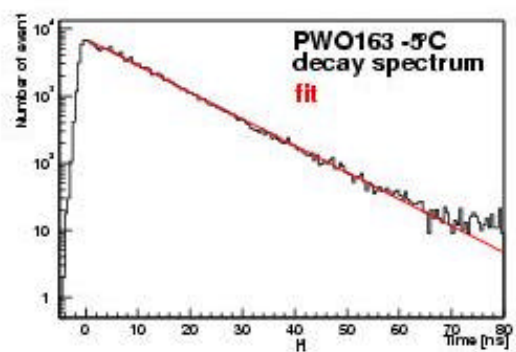
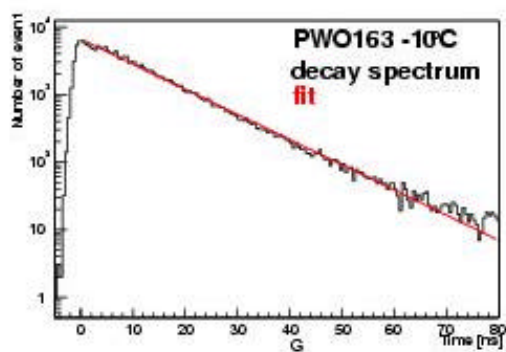
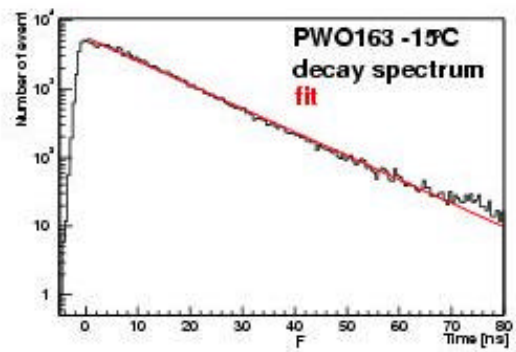
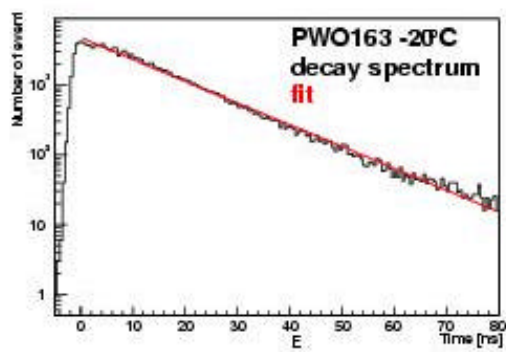
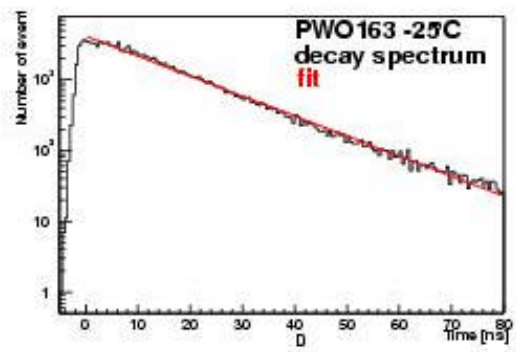
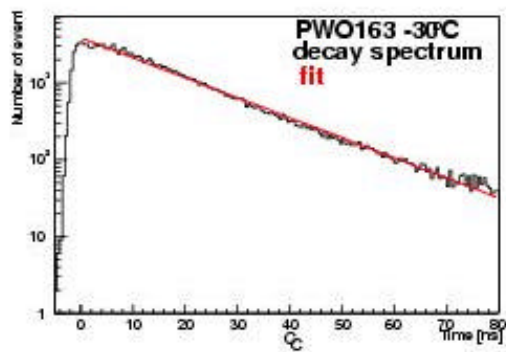
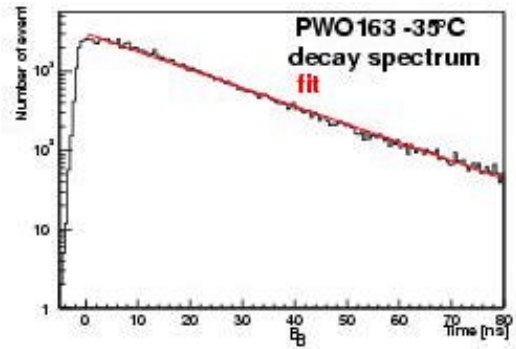
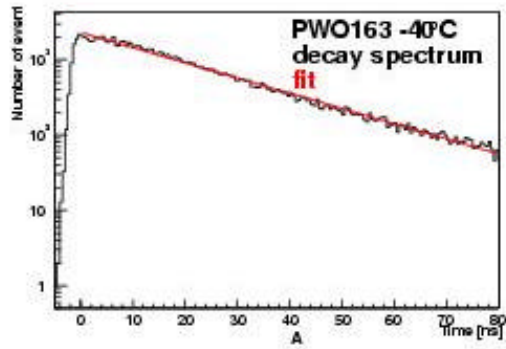


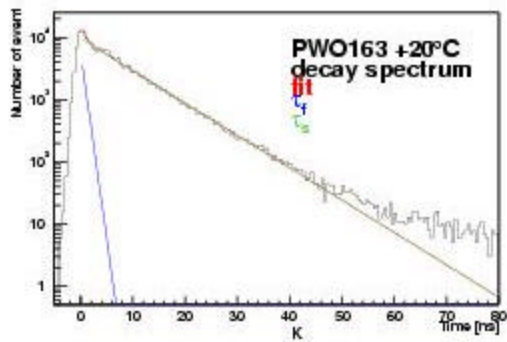
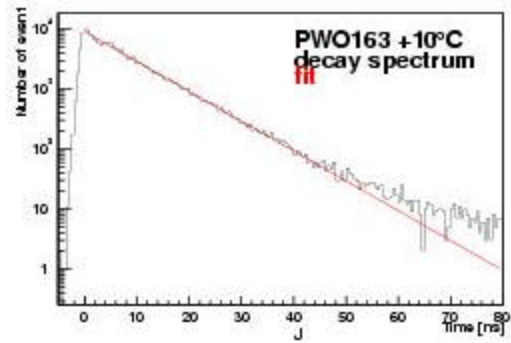
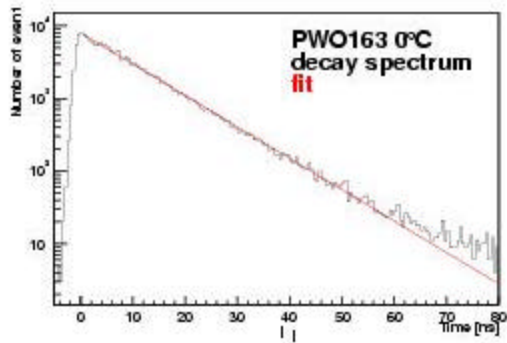




A ~ K はそれぞれ -40 、 -35 、 -30 、 -25 、 -20 、 -15 、 -10 、 -5 、 ±0 、 +10 、 +20 の図である。

結晶 1 6 3 生の TDC と単一光電子ピーク TDC カット





A ~ K はそれぞれ -40 、 -35 、 -30 、 -25 、 -20 、 -15 、 -10 、 -5 、  $\pm 0$  、 +10 、 +20 の図である。また、この分布は 結晶163の生の TDC を単一光電子ピークで TDC カットをし得られた分布を式 (3.2.2-1) を用いて横軸を時間にしたものである。

結晶 1 6 3 蛍光減衰時間分布

