

タングステン酸鉛結晶とアバランシェ
フォトダイオードを用いた電磁カロリメーター
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

渡辺 大輔 1079079H

主査 杉立 徹

副査 大川 正典

指導教官 大杉 節

2005年2月10日

要旨

タングステン酸鉛 (PWO) 結晶は、有機シンチレーター並みの速い減衰時間 (数 10ns) を持つ上、現在使用されている無機シンチレーターと比べて短い放射長 (0.89cm)、小さいモリエール半径 (2.0cm) を持つため、高エネルギー重イオン衝突実験のような多粒子環境においてエネルギー数 GeV の光子や電子を測定するのに適したカロリメーター材である。また、アバランシェフォトダイオード (APD) は数 10 倍の増倍率を持ち、強磁場中でも使用可能なことからシンチレーション光の読み出し素子に適しており、PWO + APD を用いた粒子検出器は、欧州原子核研究機構 (CERN) で計画中の ALICE 実験で使用される。

本研究では、ロシアの North Crystal 社製の PWO 結晶について ^{60}Co の γ 線を用いてシンチレーション光の温度特性を測定し、-25℃ において 1 MeV あたりの光電子数 24.1 個、平均減衰時間 23.0ns を得た。結晶の性質のばらつきとメーカーによる個性を調べるため、RI&NC 社 (ベラルーシ) と古河機械金属株式会社製の PWO についても同様の測定を行い、結果を比較考察した。

次に PWO 結晶と APD を用いて電磁カロリメーターを作製し、性能評価実験を行った。その結果、REFE の 150MeV 電子ビームに対して、エネルギー分解能 $\Delta E/E=23.6 \pm 0.2\%$ を得た。

目次

1. 序論	5
2. 導入	6
2.1 電磁粒子と物質の相互作用	6
2.1.1 シンチレーション機構	6
2.1.2 制動放射	6
2.1.3 電磁カスケードシャワー	6
2.1.4 電磁カロリメーター	7
2.2 タングステン酸鉛結晶 (PWO)	7
2.3 アバランシェフォトダイオード (APD)	7
2.4 光電子増倍管 (PMT)	8
2.5 REFER	8
3. 実験	9
3.1 線源 ^{60}Co を用いた PWO 結晶の光量と減衰時間の温度特性	9
3.1.1 測定した PWO 結晶	9
3.1.2 セットアップと読み出し回路	9
3.1.3 解析	10
3.2 150 MeV 電子ビームによる電磁カロリメーターの性能評価	13
3.2.1 セットアップと読み出し回路	13
3.2.2 測定	16
4. 結果	19
4.1 線源 ^{60}Co を用いた PWO 結晶の光量と減衰時間の温度特性	19
4.2 150 MeV 電子ビームによる電磁カロリメーターの性能評価	24
5. 考察	28
5.1 線源 ^{60}Co を用いた PWO 結晶の光量と減衰時間の温度特性	
5.2 150 MeV 電子ビームによる電磁カロリメーターの性能評価	
6. 結論	29
7. 謝辞	30

8 . 参考文献 31

9 . 付録 32

1 . 序論

タングステン酸鉛 (PWO) 結晶は、有機シンチレーター並みの早い減衰時間 (数 10ns) を持つ上、現在使用されている無機シンチレーターと比べて短い放射長 (0.89cm) 、小さいモリエール半径 (2.0cm) を持ち、PWO を用いて優れたカロリメーターが作製できると考えられる。しかし、大型の PWO 結晶を製造できるのは現在世界に 3 ヶ所 (North Crystal 社 (ロシア) 、古河機械金属(株)、RI&NC 社 (ベラルーシ)) しかなく、使用例も少ないため、それぞれで製造される PWO の基礎的な性質はあまりわかっていない。本研究の目的は、PWO が発するシンチレーション光の性質 (光量および減衰時間の温度特性) を 3 社の結晶について同じ方法で測定し、結果を比較考察することと、PWO を用いてカロリメーターを作製し、その性能を評価することである。

カロリメーターを作製するにあたって、欧州原子核研究機構 (CERN) で計画されている ALICE 実験を念頭においた。ALICE 実験は高エネルギーに加速した鉛原子核同士を衝突させ、衝突によって生成される高温、高密度物質を観測することによりクォークの閉じ込めや非摂動 QCD を研究するプロジェクトである。そのため、カロリメーターに用いる PWO は、ALICE 実験の光子検出器に用いられる PWO と同じ North Crystal 社製を使用した。さらに、シンチレーション光の読み出し素子としてアバランシェフォトダイオード (APD) を用いた。その理由は、ALICE 実験の検出器には荷電粒子測定用の磁石が置かれており、光電子増倍管はダイノード間を走る光電子の軌道が磁場によって曲げられてしまうため適さず、また後述するように PWO は発光量が他のシンチレーターに比べて非常に少ないため、信号増幅機能のない PIN フォトダイオードでは微弱な光を読み出すには適していないと考えたからである。加えて、PIN フォトダイオードは有感領域が厚いため荷電粒子に対しても感度があり、このような荷電粒子は光子を精密測定するうえで邪魔になるので、光子検出器としては有感領域の薄い APD を用いるほうがよいという理由がある。これまで、PWO の発光量が少ないことと APD が多量のノイズを発することから PWO と APD の組み合わせでカロリメーターを作るのは難しいという問題があったが、今回の REFER におけるビームテストではカロリメーターの冷却とノイズを落とす努力をした結果、150MeV 電子ビームに対して初めてシグナルを読み出すことに成功した。

2 . 導入

2 . 1 電磁粒子と物質の相互作用

高エネルギー物理実験において粒子を検出する方法は、その粒子と物質との相互作用を通してである。ここでは、荷電粒子および線と物質の相互作用と検出器について述べる。

2 . 1 . 1 シンチレーション機構

物質中に入射された線は、物質中の電子と相互作用して電子を励起し、自身はエネルギーを失う。励起された電子が基底状態に戻るときに紫外から可視光量域の光を発する。これをシンチレーション光と呼び、この光を読み出すことで線が物質中で失ったエネルギーを知ることができる。このようにして線を検出できる物質をシンチレーターという。電子は励起されてから基底状態に戻るまでに時間がかかるので、線が入射してから発光するまでには時間差がある。時間 t 後に発生するシンチレーション光の数 $N(t)$ は、パラメーターを用いて、

$$N(t) = A \exp(-t/\tau) \quad (\text{式 2.1})$$

と表される。 τ を減衰時間という。シンチレーターの多くは2種類の減衰時間を持ち、その場合には、

$$N(t) = A \exp(-t/\tau_1) + B \exp(-t/\tau_2) \quad (\text{式 2.2})$$

と表される。このとき、平均減衰時間 τ_{Mean} は τ_1 、 τ_2 をシンチレーション光子数の全体に占める割合で加重平均して求める。すなわち

$$\tau_{\text{Mean}} = (A \tau_1^2 + B \tau_2^2) / (A \tau_1 + B \tau_2) \quad (\text{式 2.3})$$

となり、減衰時間 τ_1 をもつシンチレーション光子数の割合は $A \tau_1^2 / (A \tau_1 + B \tau_2)$ 、減衰時間 τ_2 をもつシンチレーション光子数の割合は $B \tau_2^2 / (A \tau_1 + B \tau_2)$ と表せる。

2 . 1 . 2 制動放射

荷電粒子が物質中を通過するときは、前述のシンチレーションに加えて、物質中の電磁場により制動を受けてエネルギーを失う。入射荷電粒子のエネルギーがはじめの $1/e$ になる物質の厚さを放射長と呼び、放射長 X_0 は次の近似式で表される。

$$X_0 = 716.4 A / \{ Z(Z+1) \ln (287 / Z) \} \text{ [cm]} \quad (\text{式 2.4})$$

ここで A は物質の質量数、Z は原子番号である。

2.1.3 電磁カスケードシャワー

高エネルギーの電磁粒子は物質中で、光子の電子陽電子対生成と荷電粒子の制動放射を交互に繰り返すことによりエネルギーを失う。この現象を電磁カスケードシャワーと呼ぶ。シャワーにより生成された電子は物質中で多重散乱するため、シャワーは横方向の空間的広がりをもつ。縦方向に 1 放射長入ったところでのシャワーの平均的広がりをモリエール半径といい、 R_M で表す。一般に $3 R_M$ 以内にシャワーの全エネルギーの 99% が含まれる。

2.1.4 電磁カロリメーター

物質が、電磁シャワーをすべて閉じ込めるのに十分な縦横の長さを持っていれば、その物質中で発生したシンチレーション光量を測ることで入射粒子の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ーという。

カロリメーターの性能を表す量としてエネルギー分解能があるが、これは次式のようにパラメーター化される。

$$\Delta E = a \sqrt{E} + b/E + c \quad (\text{式 2.5})$$

ここで、a はカロリメーターの発光量の統計揺らぎ、b は検出器全体のノイズなど、c は入射ビーム運動量の揺らぎにそれぞれ依存するパラメーターである。

2.2 タングステン酸鉛結晶 (PWO)

タングステン酸鉛結晶 (化学組成 $PbWO_4$ 、通称 PWO) は有機シンチレーター並みに短い減衰時間 (数 10ns) を持ち、現在よく使用されている無機シンチレーターと比べて短い放射長 (0.89cm)、小さいモリエール半径 (2.0cm) をもつことから、優れたカロリメーター材であると考えられる。発光量が少ないのが欠点であるが、近年イットリウムなどを微量にドーピングすることで改善がみられることが報告されている。

表 2.1 に PWO と他のシンチレーターとの比較を示す。[参考文献 1]

物質	密度 [g/cm ³]	放射長 [cm]	モリエール 半径 [cm]	減衰時間 [ns]	相対発光量 NaI = 1.00
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 2.1 無機シンチレーターの性質

2.3 アバランシェフォトダイオード (APD)

アバランシェフォトダイオード (通称 APD) は PIN フォトダイオードと異なり、信号増幅作用をもつフォトダイオードである。増幅率は 20 ~ 50 倍と光電子増倍管に劣るが、小型で高い量子効率 (70 ~ 80%) をもち、強磁場中でも使用可能なことが特徴である。欠点としては光電子増倍管に比べ受光面が小さいこと (現在市販されている最大のものでも 5mm × 5mm である) とノイズが大きいことである。

2.4 光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管 (通称 PMT) は、高感度、高速応答な光検出器である。光陰極に光が当たると光電子が放出され、その光電子が 1 つ目のダイノードにあたって多量の二次電子を生じる。ダイノード間には高電圧が印加されており、二次電子は次のダイノードにあたってさらに多量の電子を生じる。このようにして信号を増幅し、その増幅率は $10^5 \sim 10^7$ 倍に達する。そのため微弱な光を検出するのに適している。しかし、ダイノード間を飛ぶ電子の軌道は磁場によって曲げられてしまうため、磁場中での使用には向かない。

2.5 REFER

REFER (Relativistic Electron Facility for Education and Research) は広島大学がもつ超高速電子周回装置である。REFER は 150MeV マイクロトロンから来た電子を周回させる 1 周 13.8m のリングと電子線引出しラインからなっている。今回のビームテストでは、この引出し電子を用いて実験を行った。

3 . 実験方法

3 . 1 線源 ^{60}Co を用いた PWO 結晶の光量と減衰時間の温度特性

3 . 1 . 1 測定した PWO 結晶

測定した PWO 結晶を表 3.1 に示す。North Crystal 社製の結晶のうち、North Crystal(C) はロットが異なる。North Crystal (A)と North Crystal(B)はロットが同じなので違いは少ないと考え測定点を減らした。

PWO 結晶	大きさ	測定した温度
North Crystal (A)	22mm × 22mm × 200mm	10 から - 25 まで 5 刻み
North Crystal (B)	22mm × 22mm × 200mm	10 、 0 、 - 10 、 - 25
North Crystal (C)	22mm × 22mm × 200mm	10 から - 25 まで 5 刻み
古河機械金属株	20mm × 20mm × 200mm	10 から - 25 まで 5 刻み
RI&NC	20mm × 20mm × 200mm	10 から - 25 まで 5 刻み

表 3.1 測定した PWO 結晶

3 . 1 . 2 セットアップと読み出し回路

図 3.1(a)に恒温槽内のセットアップを示す。線源 ^{60}Co の両側に PWO とプラスチックシンチレーターをおき、PWO 側は浜松ホトニクス R7056 光電子増倍管で、プラスチックシンチレーター側は浜松ホトニクス H-2431-02MOD 光電子増倍管で読み出した。ADC は林栄精器 RPC-022 を用い、プラスチックシンチレーターの信号でゲート信号をつかって PWO のシグナルを測定した。TDC は林栄精器 RPC-060 を用い、プラスチックシンチレーターのシグナルをスタート、PWO のシグナルをストップシグナルとしてその時間差を測定した。

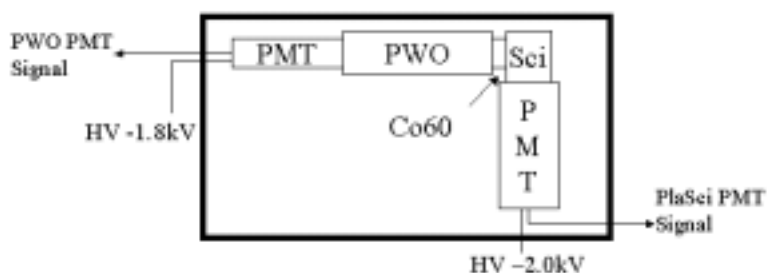


図 3.1(a) 恒温槽内の様子



図 3.1(b) 恒温槽内の写真

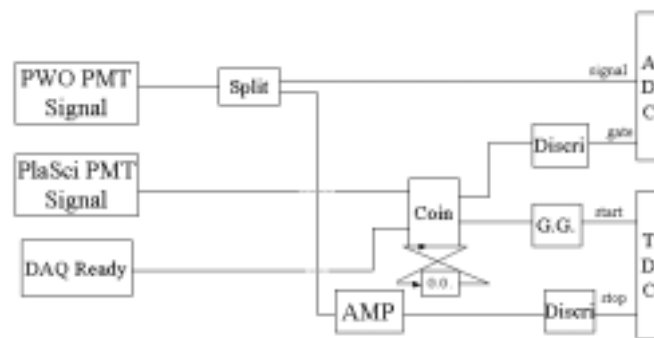


図 3.2 読み出し回路

3.1.3 解析

得られる PWO の ADC スペクトルの典型例を図 3.3 に示す。図 3.3 で一番左に立っているのがベデスタル、その右隣のピークがシングルフォトエレクトロンピークである。PWO で発生したシンチレーション光子が光電子増倍管のカソードに入って光電子を 1 個生成したイベントがシングルフォトエレクトロンピークとして見える。一番右側のなだらかなピークは 1.17MeV と 1.33MeV の線が入射したときの全吸収ピークが重なって 1.2MeV ピークとして見えている。ここで、PWO 結晶に

1MeV のエネルギーが落とされたとき光電子増倍管で発生する光電子の数を光量 LY と定義すると、シングルフォトエレクトロンピーク、1.2MeV ピーク、ペDESTALのADCチャンネルをそれぞれ X_{co} , X_{spe} , X_{ped} として、

$$LY = (X_{co} - X_{ped}) / (X_{spe} - X_{ped}) / 1.2 \quad (\text{式 3.1})$$

と表せる。

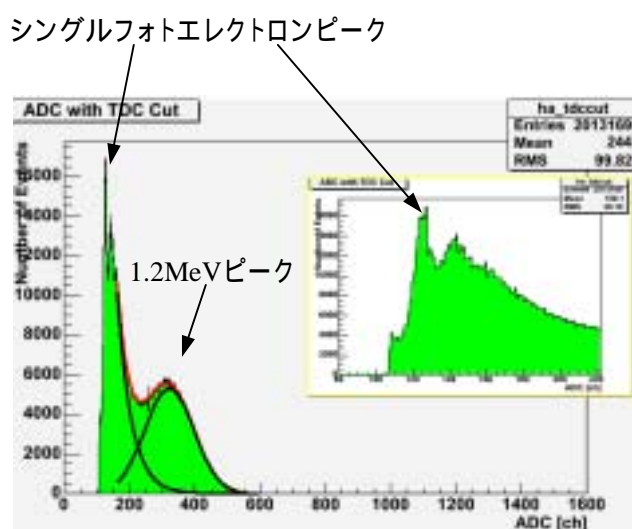


図 3.3 ADC スペクトルの典型例

図は North Crystal(A)の 10 での測定である。
黄色の枠内は 80 ~ 240ch を拡大表示したものである。

一方、減衰時間は TDC スペクトルを解析して求める。得られた TDC スペクトルの典型例を図 3.4(a)に示す。まずこの中からシングルフォトエレクトロンイベントを選び出す必要がある。なぜなら、PWO 結晶で多くのシンチレーション光子が発生したイベントでは、TDC のストップ信号となるのはそのうち最も早く発生した光子だけであり、遅れて発生した光子を測定することができないからである。そこで、ADC スペクトルを用いてシングルフォトエレクトロンイベントを選ぶ。ADC スペクトルと TDC スペクトルの相関図を図 3.4(b)に示す。シングルフォトエレクトロンイベントは ADC チャンネルが 125 付近にあるが、TDC チャンネルが約 2200 以上でイベントがなくなっている。これは、TDC は 200ns まで測定できるように設定したが ADC のゲートを 100ns にしたため、遅く来た光子が作ったシグナルは ADC ゲートの中に入らず、ペDESTALの中にシングルフォトエレクトロンイベントが含まれていると考えられる。そこで、シングルフォトエレクトロンピークをガウス関数

$$F(x) = A \exp[-0.5\{(x - m)/\sigma\}^2] \quad (\text{式 3.2})$$

でフィッティングし、

$$0 < \text{ADC}[\text{ch}] < m +$$

のときのイベントを選んだ。選び出した後のスペクトルを図 3.2(c)に示す。このスペクトルの横軸を時間に変換するには、4000ch が 200ns に相当するので、

$$\text{時間 } t = 0.05 * \text{TDC}[\text{ch}] \quad (\text{式 3.3})$$

とした。次にスペクトルの横軸が 16ns 以上を関数

$$F(t) = A \exp(-(t-16)/\tau_1) + B \exp(-(t-16)/\tau_2) + C \quad (\text{式 3.4})$$

でフィッティングし、減衰時間 τ_1 、 τ_2 を求めた。多くの結晶では式 3.3 のように 2 つの指数関数を含んでいたが、1 つの指数関数 + 定数項でフィッティングできる場合もあった。その場合には

$$F(t) = A \exp(-(t-16)/\tau_1) + C \quad (\text{式 3.5})$$

でフィッティングした。

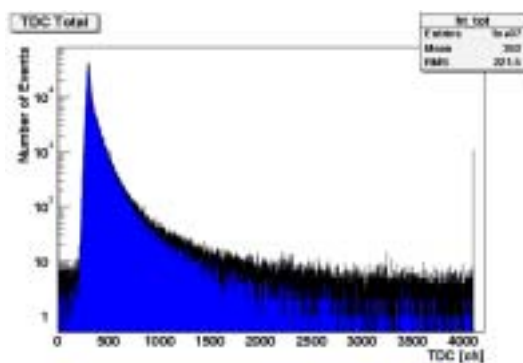


図 3.4(a) TDC スペクトルの典型例
(North Crystal(A) - 25)

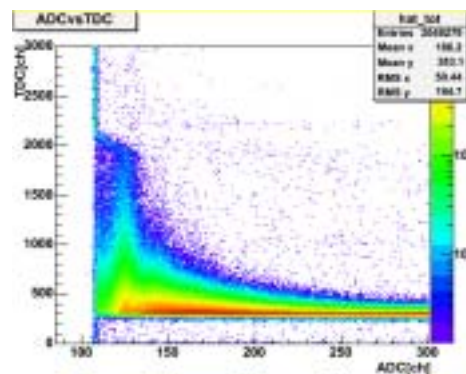


図 3.4(b) ADC と TDC の相関
(North Crystal(A) - 25)

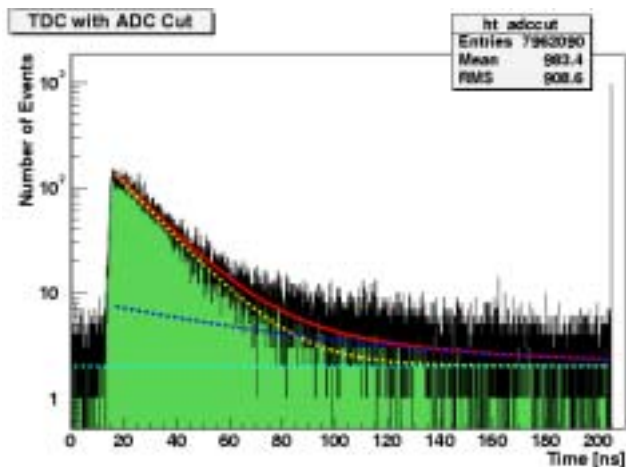


図 3.4(c) シングルフォトエレクトロンを選び出した TDC (North Crystal(A) - 25)
 フィッティング結果を赤線で示す。
 黄、青線はそれぞれ速い成分、遅い成分を示し、
 水色の線が定数項を示す。

3.2 150 MeV 電子ビームによる電磁カロリメーターの性能評価

North Crystal 社の PWO に浜松ホトニクス社の APD (S8148-1468) を接着剤で接着したものを 9 本用意し、 3×3 の正方配置に並べて電磁カロリメーターを作製し、REFER の 150MeV 電子ビームを用いて性能評価実験を行った。

3.2.1 セットアップと読み出し回路

図 3.5(a)に実験のセットアップの図を、図 3.5(b)にセットアップの写真を示す。REFER のビームのフォーカスポイントはビーム出口から 80cm の距離にあり、それより離れるにしたがってビームは広がってしまう。高い測定レートを考えればカロリメーターはフォーカスポイントに置くのがよいが、フォーカスポイントのすぐ横に電磁石の電源があり、これがノイズ源となること考えられたので、そこを避けてビーム出口から 215cm のところにカロリメーターを置いた。カロリメーターのすぐ前にフィンガーカウンターを置いた。これは直径 2mm の筒状のファイバーシンチレーター 2 本を十字に配置し、それぞれ PMT でシグナルを読み出すものである。これによって、十字の交点を通過した電子だけを選び出すことができる。ノイズを減らす対策として、ビームパイプやビーム出口で発生するフォトンがカロリメーターに入らないよう遮蔽するためにビーム出口のすぐ下流に直径 5mm、長さ 10cm のコリメーターを置き、そのすぐ隣に厚さ 20cm の鉛ブロックの壁を作った。鉛ブロックの壁にビームの通り口として横 1cm、縦 5cm の隙間をあけた。加えて暗

箱全体をアルミホイルで包み遮蔽した。

PWO はシンチレーション光を外へ漏らさないように 1 本ずつアルミホイルで包み、それを 3×3 の正方配置にして暗箱の中にセットした。APD はそれぞれの PWO に 1 個ずつ接着剤で接着した。暗箱の左右側面にペルチェ素子を 1 個ずつ取り付けて箱内を冷却できるようにした。この方法で -11 まで冷やすことができた。暗箱内の写真を図 3.6 に示す。読み出し回路を図 3.7 に示す。

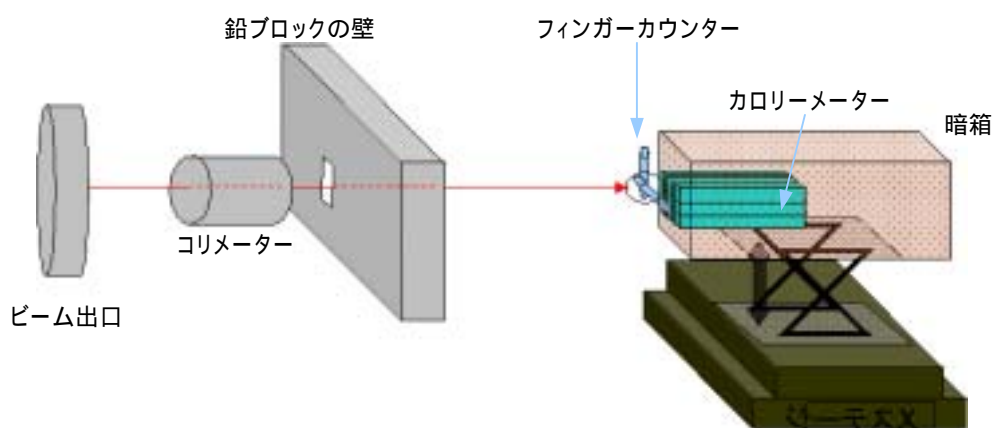


図 3.5(a) セットアップ



図 3.5(b) セットアップの実際の写真



図 3.6 暗箱内の写真

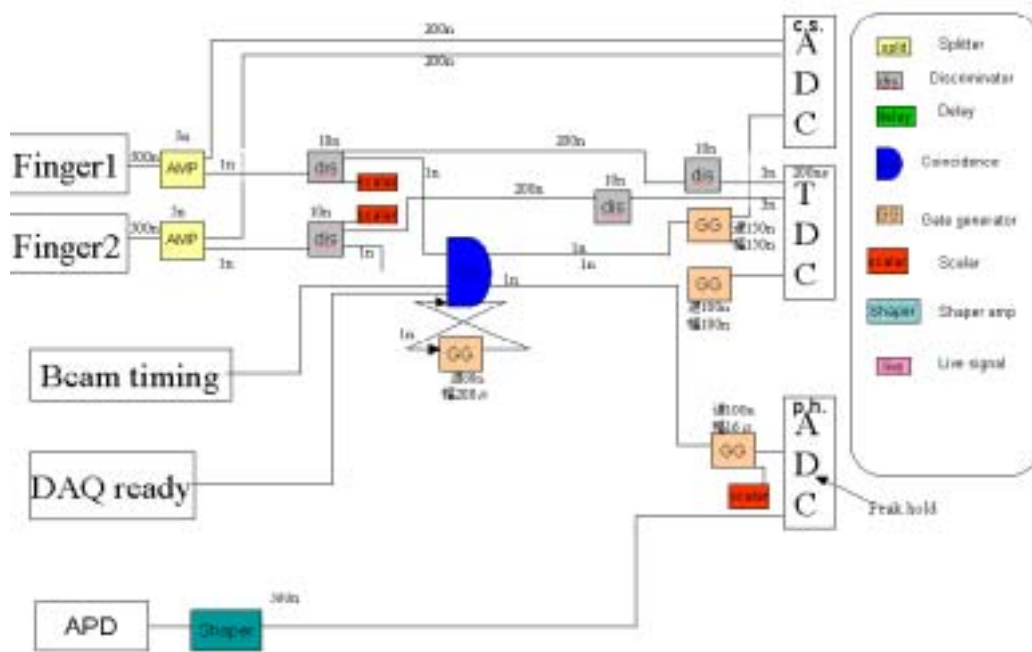


図 3.7 読み出し回路

3.2.2 測定

以下では図 3.8 に示すように 9 本組カロリメーターの各 PWO 結晶にビーム入射方向から見て左上から順に番号をつけ、PWO # 1、PWO#2 というように呼ぶ。

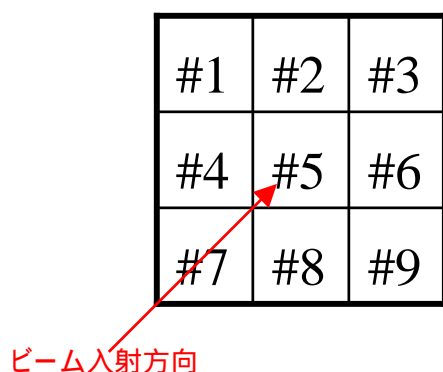


図 3.8 PWO 結晶につけた番号

次にこの実験で行った測定について述べる。

印加電圧のスキャン

このビームテストでは 9 本組カロリメーターのエネルギー分解能が最も良くなると考えられる温度と APD の印加電圧に対して測定を行った。温度については、PWO は冷やすほど光量が増すことがわかっているので、冷却装置の限界である - 11 で測定することにした。APD の印加電圧については、高いほど APD の増幅率が増すことがわかっている。ただし、作製したカロリメーターは、許容印加電圧の最大値が 9 個の APD で異なるけれども、9 個に同じ電圧をかけるようなセットアップになっている。そのため、まず印加電圧の最大値を 400 ~ 410V の間で探した。具体的には、それぞれの印加電圧において 3 × 3 のうち真中の PWO (PWO#5) にビームを入射し、9 本すべての PWO が読み出せることを確認した上で、PWO # 5 のスペクトルのエネルギー分解能を比較して最も良い分解能になる印加電圧を求めた。

エネルギー較正

測定値は ADC チャンネルなので、物理量であるエネルギーに直すため、それぞれの結晶の変換係数とベダスタルを求めた。図 3.9 に PWO # 5 に 150MeV 電子ビームを入射したときに得られた 9 本組カロリメーター ADC スペクトルを示す。まず、PWO # 5 のスペクトルの一番左端のピークをベダスタルと考え、ピークをガウス関数

$$F(x) = A \exp[-0.5\{(x - m)/\sigma\}^2] \quad (\text{式 3.2})$$

でフィッティングし、 m と σ の値を求めた。また、1本の PWO 結晶に 150MeV の電子が入射したとき電子は平均 117MeV のエネルギーを結晶中で失うことが Geant 4 によるシミュレーションによってわかったので [参考文献 2]、PWO # 5 のスペクトルで右側のピークが 117MeV に相当するとして変換係数を求めた。変換係数 C 、117MeV ピークの ADC チャンネル X_{117} 、ペDESTALのチャンネル X_{ped} とすると、 C は

$$C = 117 / (X_{117} - X_{ped}) \quad (\text{式 3.6})$$

と表せる。

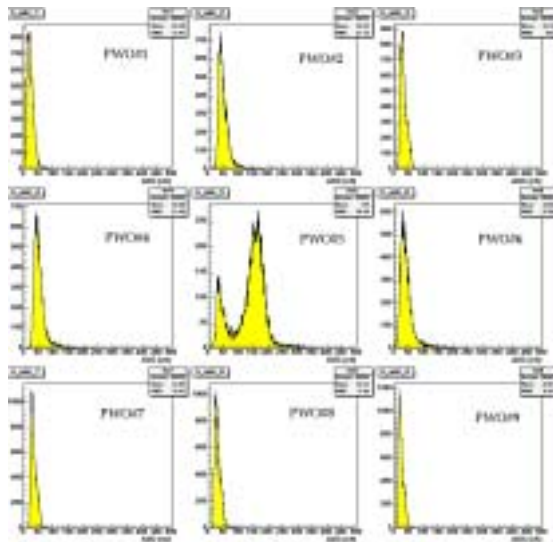


図 3.9 PWO#5 に 150MeV 電子ビームを入射したときの
9 本組カロリメーターの ADC スペクトル
(- 11 印加電圧 405V)

エネルギー分解能測定

エネルギー分解能を求めるため、PWO # 5 にビームを入射し、スペクトルを取得した。これと で求めた変換係数、ペDESTALの値を用いて 9 個の PWO スペクトルを足しあわせ、9 本組カロリメーターとしてのスペクトルを求めた。今、PWO の番号を n (n は 1 ~ 9)、それぞれの PWO 素子のペDESTALの平均チャンネル P_n 、変換係数 C_n とする。電子が PWO

5 に入射して 9 本の PWO にあるエネルギーを与え、それぞれの PWO で X_n というチャンネルで測定されたとすると、この電子が 9 本の PWO に与えたエネルギーの合計 E は、

$$E = \sum_{n=1}^9 C_n (X_n - P_n) \quad (\text{式 3.7})$$

で表される。したがって、9 本組カロリメーターのスペクトルを求めるには全イベントについて式 3.7 を用いて E を計算しその度数分布を作ればよい。ただし、図 3.9 を見てわかるようにペDESTALには幅があるため $X_n - P_n$ が負の値になる場合がある。そのようなイベントを除外するために、ペDESTALをガウス関数でフィッティングしたときの標準偏差を P_n として $X_n > P_n + P_n$ となるような X_n に対してだけ式 3.7 の計算を実行し、 E の度数分布を求めた。

4 . 結果

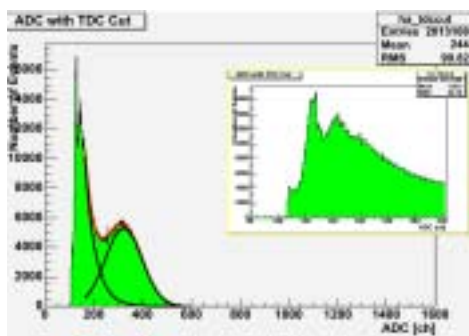
4 . 1 線源 ^{60}Co を用いた PWO 結晶の光量と減衰時間の温度特性

North Crystal (A)の測定で得た ADC および TDC 分布を温度ごとについて図 4.1 に示す。ADC 分布の赤線は 1.2MeV のピークを関数

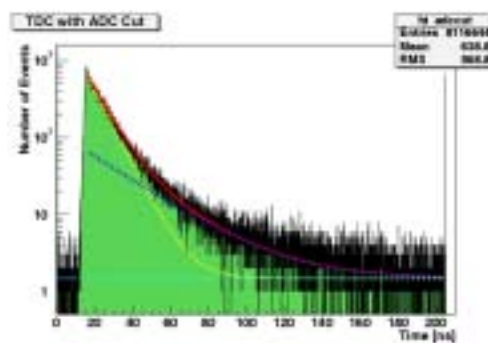
$$F(x) = A \exp[-0.5\{(x - m)/\sigma\}^2] + B \exp(-x) \quad (\text{式 4.1})$$

でフィッティングした線を示し、黒い 2 本の線は $F(x)$ の第一項 (ガウス関数部分) と第二項 (指数関数部分) を示す。黄色の枠内は 80 ~ 240ch を拡大表示したもので 125ch 付近のピークがシングルフォトエレクトロンピークである。

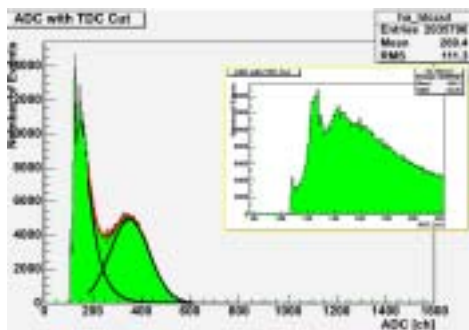
TDC 分布のフィッティング関数は 3 . 1 . 3 で述べたとおり 2 つの指数関数 + 定数項である。



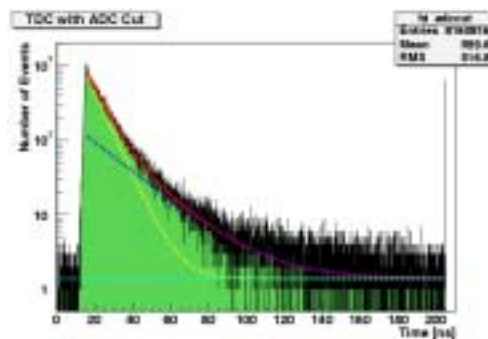
(a)10 °C での ADC 分布



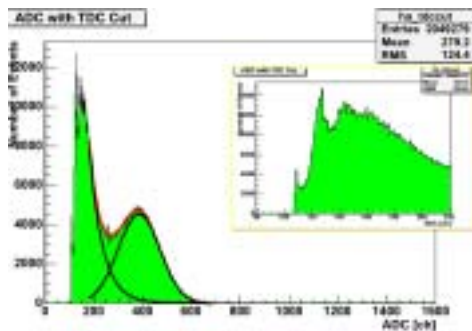
(b)10 °C での TDC 分布



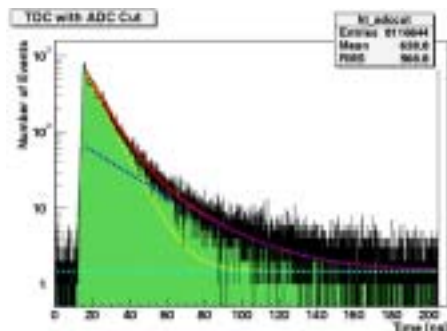
(c)5 °C での ADC 分布



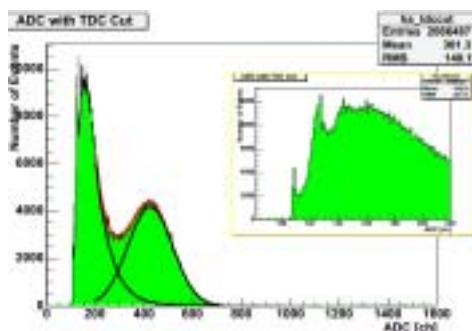
(d)5 °C での TDC 分布



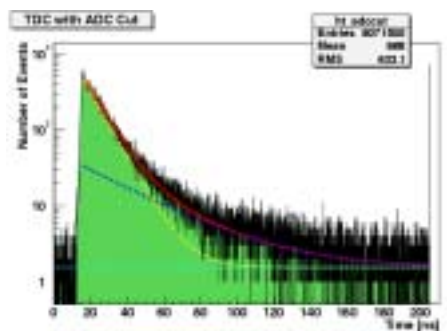
(e)0 での ADC 分布



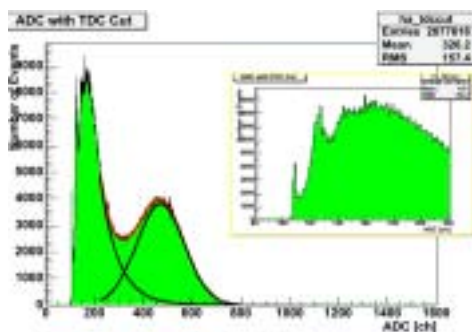
(f)0 での TDC 分布



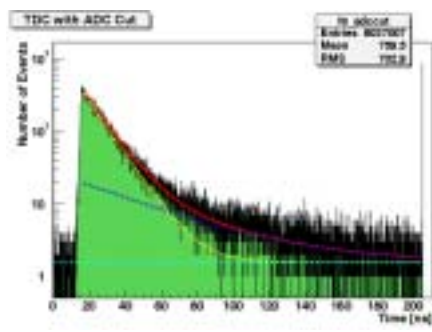
(g) - 5 での ADC 分布



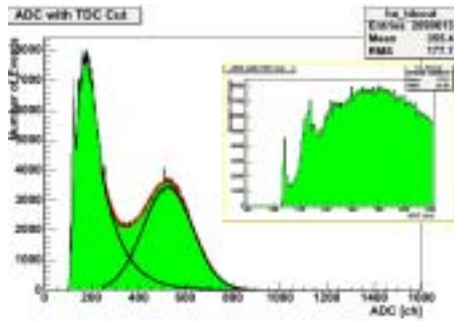
(h) - 5 での TDC 分布



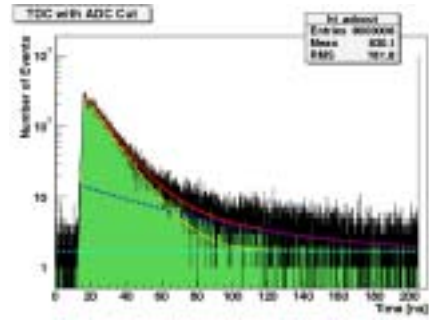
(j) - 10 での ADC 分布



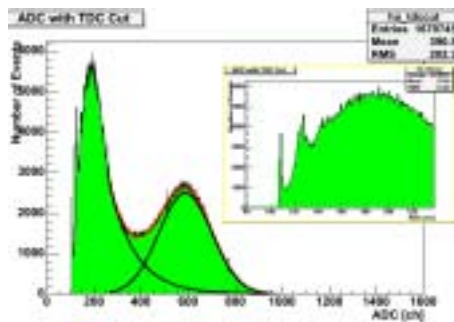
(i) - 10 での TDC 分布



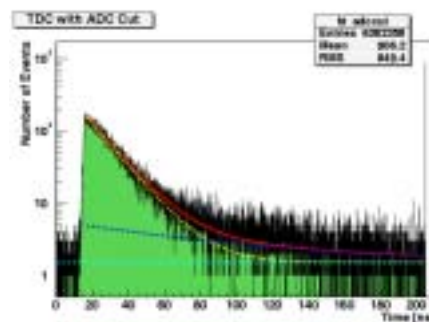
(k) - 15 での ADC 分布



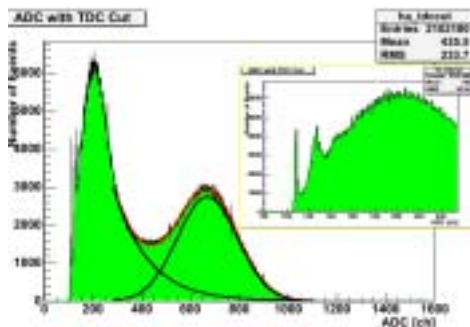
(l) - 15 での TDC 分布



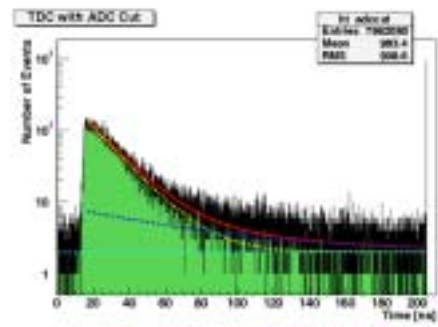
(m) - 20 での ADC 分布



(n) - 20 での TDC 分布



(o) - 25 での ADC 分布

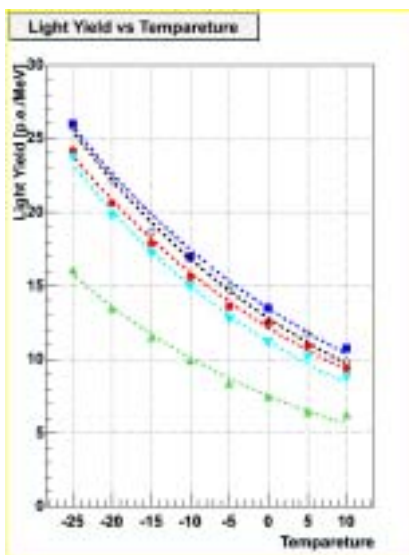


(p) - 25 での TDC 分布

図 4.1 ^{60}Co 線に対する North Crystal(A)のスペクトル

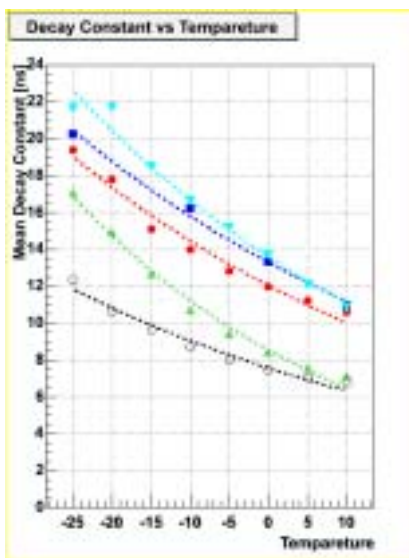
他の結晶のスペクトルは付録に載せた。

光量の温度特性の結果を図 4.2(a)に、平均減衰時間の温度特性の結果を図 4.2(b)に示す。
 点線は関数 $F(T) = A \exp(-T)$ でフィッティングした曲線である。



赤：North Crystal (A)
 青：North Crystal (B)
 水色：North Crystal (C)
 緑：古河機械金属株
 黒：RI&NC

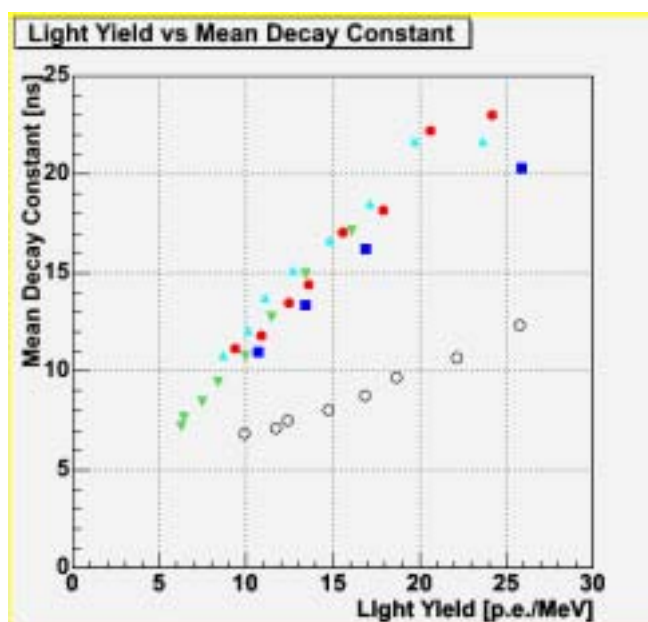
図 4.2(a) PWO の光量の温度特性



赤：North Crystal (A)
 青：North Crystal (B)
 水色：North Crystal (C)
 緑：古河機械金属株
 黒：RI&NC

図 4.2 (b)PWO の平均減衰時間の温度特性

図 4.3 に光量と平均減衰時間の関係を示す。



赤：North Crystal (A)
 青：North Crystal (B)
 水色：North Crystal (C)
 緑：古河機械金属株
 黒：RI&NC

図 4.3 PWO の光量 vs 平均減衰時間

表 4.4 に各結晶の減衰時間の成分ごとの値と割合を示す。

温度	Mean [ns]	τ_1 [ns] (割合)	τ_2 [ns] (割合)
10	11.1 ± 0.00	$6.67 \pm 0.01(55.6\%)$	$16.7 \pm 0.00(44.4\%)$
5	11.8 ± 0.01	$7.88 \pm 0.00(71.4\%)$	$21.6 \pm 0.00(28.6\%)$
0	13.5 ± 0.01	$9.06 \pm 0.02(76.0\%)$	$27.4 \pm 0.00(24.0\%)$
- 5	14.4 ± 0.00	$10.1 \pm 0.01(82.0\%)$	$34.1 \pm 0.01(18.0\%)$
- 10	17.0 ± 0.00	$11.7 \pm 0.01(84.1\%)$	$45.2 \pm 0.01(18.0\%)$
- 15	18.1 ± 0.01	$12.3 \pm 0.00(84.4\%)$	$50.0 \pm 0.01(15.6\%)$
- 20	22.2 ± 0.01	$14.7 \pm 0.00(89.3\%)$	$84.3 \pm 0.01(10.7\%)$
- 25	23.0 ± 0.01	$16.2 \pm 0.00(86.2\%)$	$65.5 \pm 0.01(13.8\%)$

表 4.4 North Crystal (A)の減衰時間の各成分

4.2 150 MeV 電子ビームによる電磁カロリメーターの性能評価

印加電圧のスキャン

図 4.5 に PWO # 5 のエネルギー分解能と印加電圧の測定結果を示す。図 4.6(a),(b),(c),(d) にそれぞれ印加電圧が 405V、406V、407V、408V のときの PWO # 1 から PWO # 9 までの ADC スペクトルを示す。図 4.5 から、印加電圧を上げることでエネルギー分解能の向上が望めることが確かめられた。今、ビームは PWO # 5 に入射しているから PWO # 5 最も大きなエネルギーを落とし、周りの 8 本に少しずつエネルギーを落とすと考えれば図 4.6(a)は正しいスペクトルの形だと考えられる。しかし、印加電圧を上げすぎると図 4.6(d)のように APD が正しい出力を出さなくなる。図 4.6(c)を見ると、407V は PWO # 4 と # 6 にとって高すぎるのがわかる。図 4.6(b)より、406V も PWO # 6 にとって高すぎるのがわかる。よって 405V を -11 での最も良い印加電圧と決め、エネルギー較正、エネルギー分解能測定をこの条件で行った。

エネルギー較正

測定によって求めた各 PWO の変換係数とペDESTAL、ペDESTALの標準偏差を表 4.7 に示す。

エネルギー分解能測定

9 本の PWO の ADC 分布を図 4.8(a)に、足し合わせた結果を図 4.8(b)に示す。ピークをガウス関数(式 3.2)でフィッティングし、ピークのエネルギー $E = 123.5 \pm 0.02 \text{ MeV}$ 、 $\sigma = 29.19 \pm 0.25 \text{ MeV}$ 、エネルギー分解能 $\sigma/E = 23.6 \pm 0.2\%$ を得た。

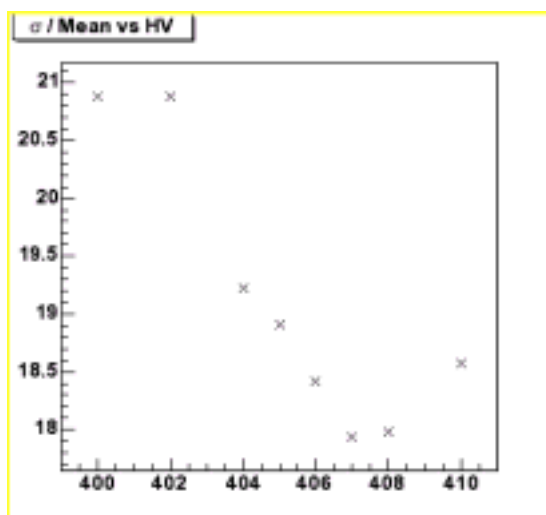
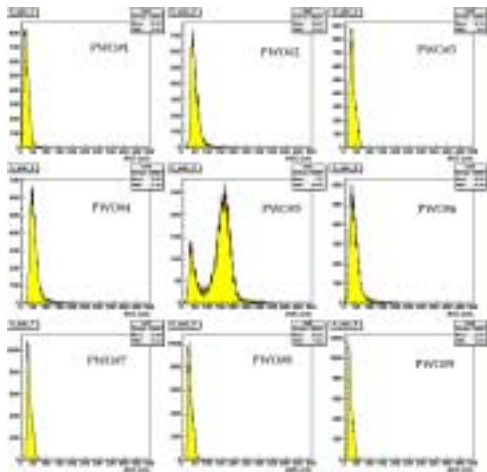
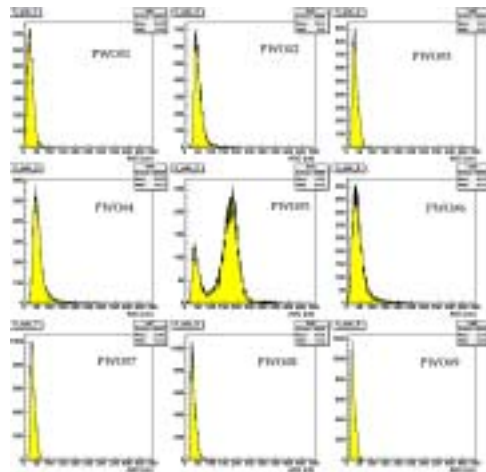


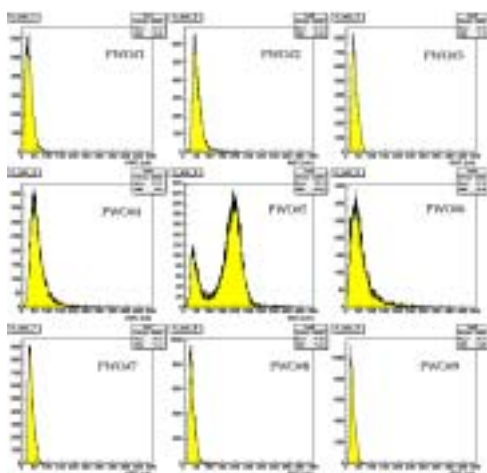
図 4.5 エネルギー分解能 (縦軸) vs 印加電圧 (横軸)



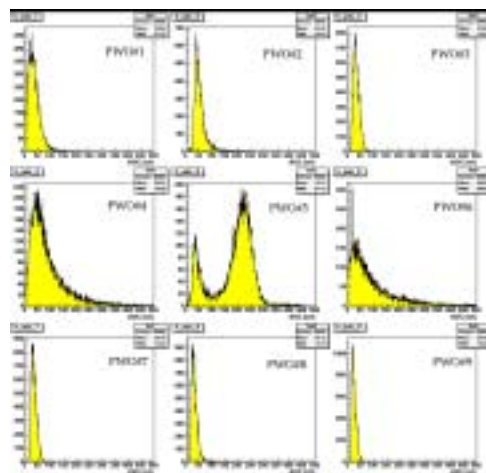
(a) - 11 405V



(b) - 11 406V



(c) - 11 407V



(d) - 11 408V

図 4.6 (a) ~ (d) 印加電圧を変えたときの各 PWO 素子の ADC スペクトル

- 11 、 APD の印加電圧 405V のとき、PWO# 1 から PWO# 9 の各素子のペDESTALの平均値、標準偏差と変換係数は表 4.7 のようになった。

素子	ペDESTALの平均値	ペDESTALの標準偏差	変換係数
# 1	22.7	13.9	0.593
# 2	42.6	11.6	0.808
# 3	33.2	12.3	2.36
# 4	45.5	17.5	0.423
# 5	34.1	8.08	0.891
# 6	33.7	16.8	1.15
# 7	32.8	9.94	0.865
# 8	29.7	13.3	0.964
# 9	23.0	12.3	1.16

表 4.7 - 11 印加電圧 405V での各素子のペDESTALおよびペDESTALの標準偏差、変換係数

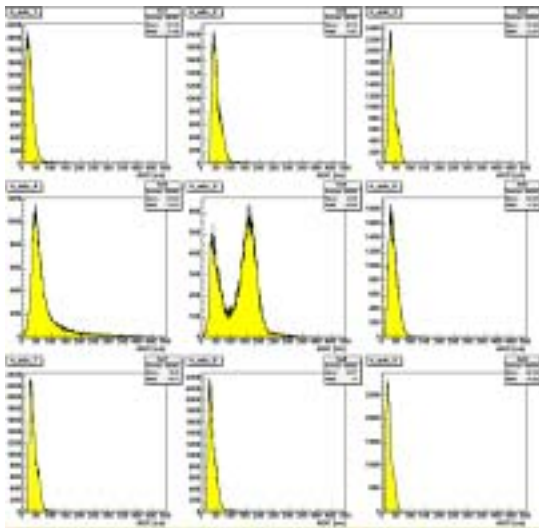


図 4.8(a)エネルギー分解能測定

温度-11 、印加電圧 405V のときの各 PWO 結晶の ADC スペクトル

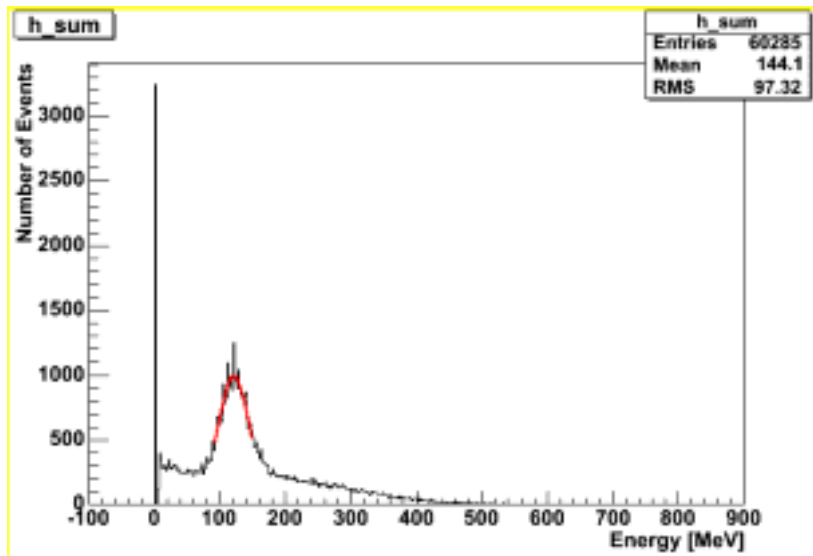


図 4.8(b) 9 本組カロリメーターのスペクトル

5 . 考察

5 . 1 線源 ^{60}Co を用いた PWO 結晶の光量と減衰時間の温度特性

光量の温度特性は、関数 $f(T) = A \exp(-T)$ できれいにフィッティングできた。

減衰時間については、図 4.3 の結果を見ると、遅い成分が一般に言われている PWO の減衰時間と比べてかなり遅い。遅い成分がフィット関数の定数項に敏感であり、3 . 1 . 3 で述べたように ADC のゲート幅と TDC の測定可能な範囲の不一致のため、シングルフォトエレクトロンイベントを選んだ後のスペクトルに多量のノイズイベントが入ってしまっているために実際よりも遅い結果が出てしまったと考えられる。また、プラスチックシンチ側で発生するノイズについては、プラスチックシンチの ADC にあるチャンネル以上のヒットがあった時、と言うような条件でカットをかければ、さらにノイズを落とすことができたと考えられる。

すべての測定した PWO について、温度を下げると光量が増えること、光量が増えると減衰時間は遅くなることがわかった。

5 . 2 150 MeV 電子ビームによる電磁カロリメーターの性能評価

今回のビームテストでは North Crystal 社の PWO を用いて APD 読み出しの 9 本組カロリメーターのエネルギー分解能を測定し $\sigma/E = 23.6 \pm 0.2\%$ を得た。仮に式 2.5 の b と c を無視し、 $\sigma/E = a/E$ と考えると $a = 9.14 \pm 0.08\%$ となり、過去の PMT 読み出しのカロリメーターと比べて悪い数字である。さらに、入射電子のエネルギー 150 MeV に対して 9 本組カロリメーターで測ったエネルギーは $123.5 \pm 0.02 \text{ MeV}$ となり、電子ビームが中央以外の 8 本の素子に与えた小さなエネルギーが測定できていなかった。改善すべき点としては、APD の受光面積 (5mm × 5mm) が PWO の断面積 (22mm × 22mm) に比べて小さすぎるので、ライトガイドをつけてシンチレーション光の収率をあげること、さらに温度が下げられるように冷却装置を工夫することがあげられる。低温では温度が変化することによる PWO の光量の変化も大きくなるため、温度を一定に保つことも重要である。

6 . 結論

異なるメーカーの PWO 結晶について、結晶が発するシンチレーション光量と減衰時間を同じ方法で測定した。その結果、古河機械金属(株)社製の結晶は他の結晶と比べて光量が少ないことがわかった。減衰時間の短さでは、RI & NC 社の結晶が最も優れていた。North Crystal 社の結晶 3 本は光量、減衰時間ともに違いは少なかった。

PWO と APD を用いたカロリメーターを作製し、150 MeV 電子ビームに対してシグナルを読み出すことができ、 -11 でエネルギー分解能 $\Delta E/E = 23.6 \pm 0.2\%$ 、 $E[\text{GeV}]$ にスケールリングして $9.14 \pm 0.08\%$ $E[\text{GeV}]$ を得たが、まだカロリメーターとして十分な性能ではなく今後改良が必要である。

7 . 謝辞

本研究を行うにあたって多くの指導と助言をいただいた杉立先生、志垣先生、本間先生に感謝します。クォーク物理学研究室の皆様にも大変お世話になりました。特に小原さん、平下さんには実験および解析を進める上で数多くの助言をいただきました。REFER のチームテストでは豊田さん、細川さん、中宮さん、坂田さん、原田さんに協力していただきました。ここでお礼を述べたいと思います。ありがとうございました。

8 . 参考文献

[1] Particle Data Group “ The European Physical Journal C “

[2] 広島大学クォーク物理学研究室ホームページ

<https://www.hepl.hiroshima-u.ac.jp/hadron/group/resjp.html>

[3]横山一博 2003 年度広島大学卒業論文「タングステン酸鉛結晶電磁カロリメータの性能評価」

その他、本研究を進める上で非常に役に立った文献

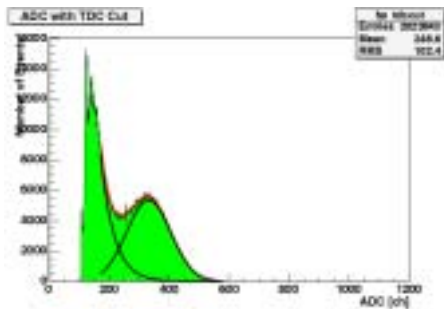
小原亮太 2001 年度広島大学修士論文「高性能カロリメータのためのタングステン酸鉛結晶」

W.R.Leo “ Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments ”

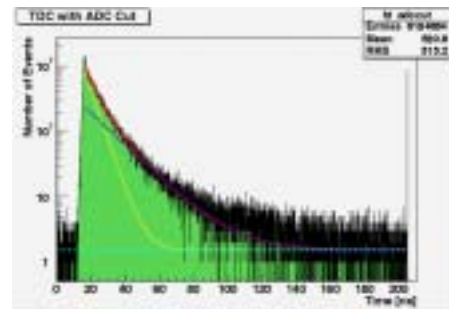
9 . 付録

本文中に示さなかったADCおよびTDC分布とそのフィッティング結果をここで示す。

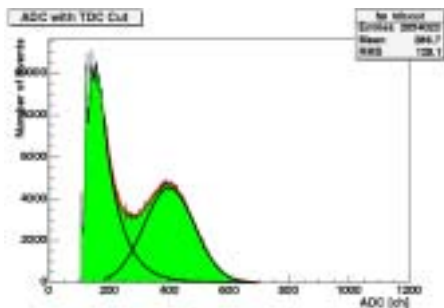
North Crystal(B) のADC および TDC 分布



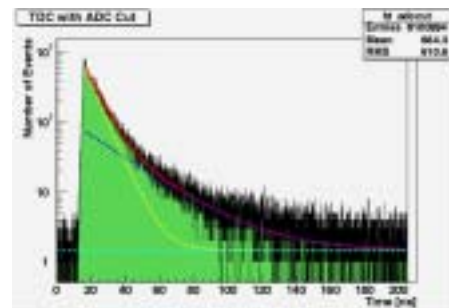
(a)10 でのADC分布



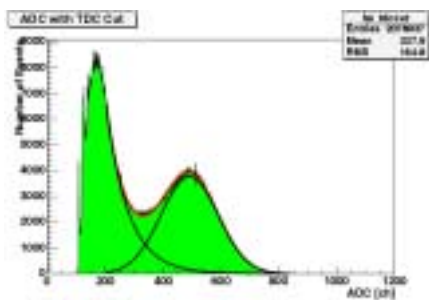
(b)10 でのTDC分布



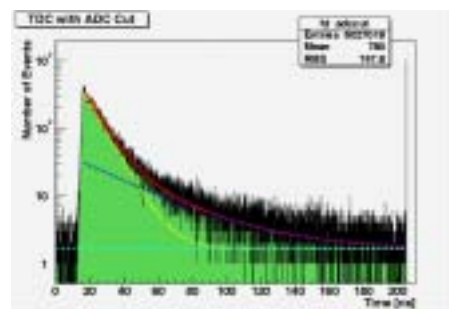
(c)0 でのADC分布



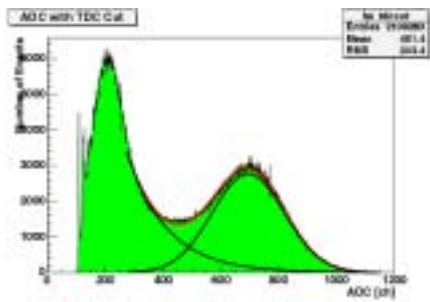
(d)0 でのTDC分布



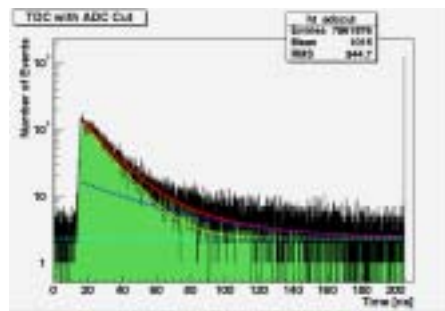
(e) - 10 でのADC分布



(f) - 10 でのTDC分布

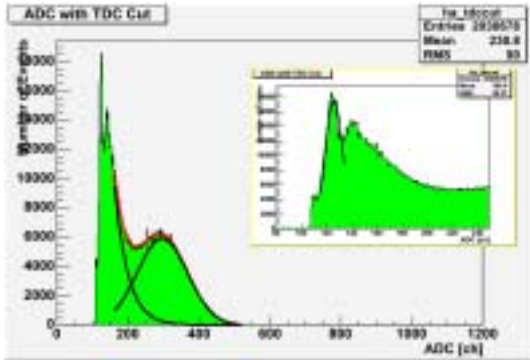


(g) - 25 での ADC 分布

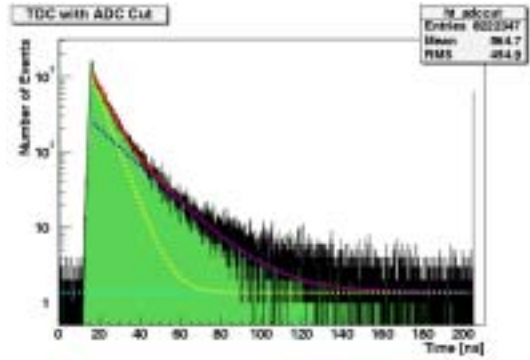


(h) - 25 での TDC 分布

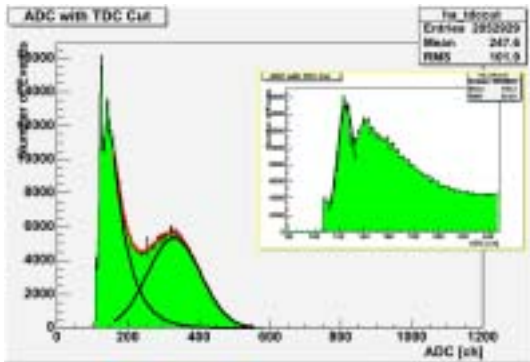
North Crystal (C)の ADC および TDC 分布



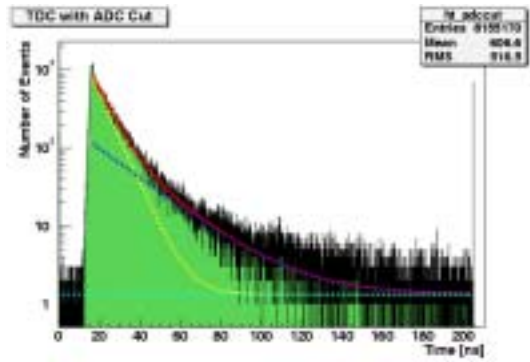
(a)10 での ADC 分布



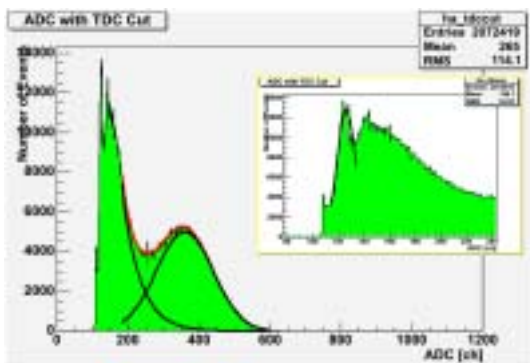
(b)10 での TDC 分布



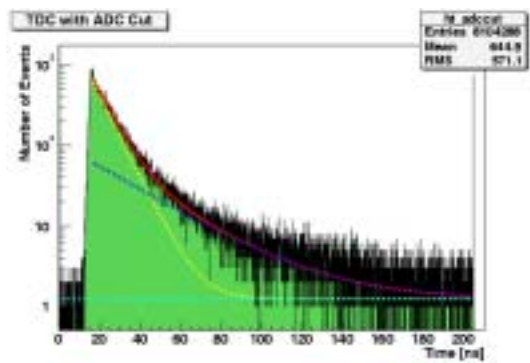
(c)5 での ADC 分布



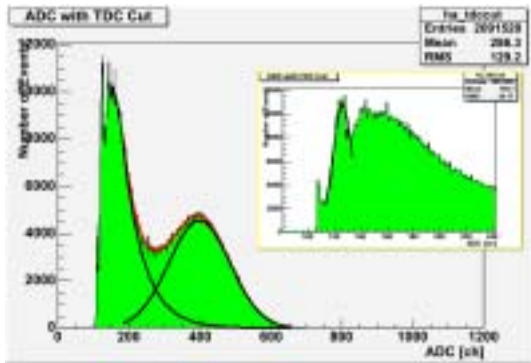
(d)5 での TDC 分布



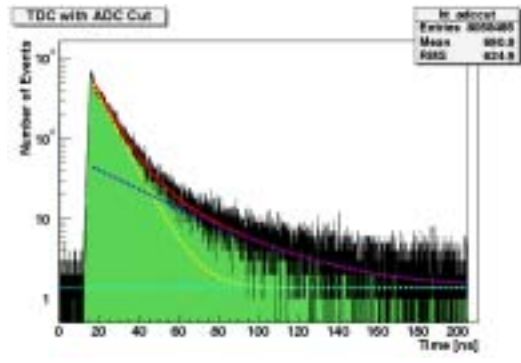
(e)0 での ADC 分布



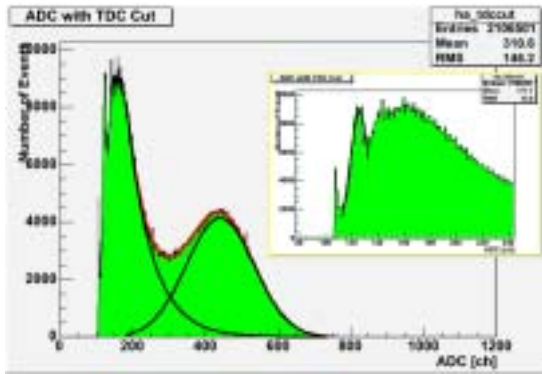
(f)0 での TDC 分布



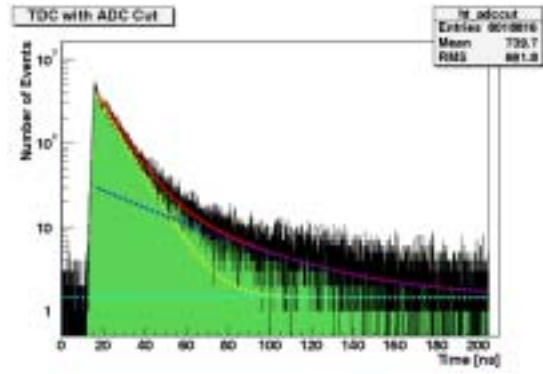
(g) - 5 での ADC 分布



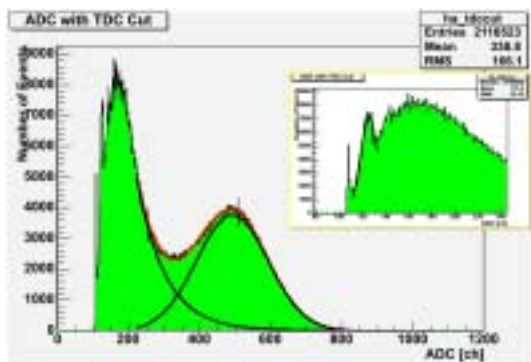
(h) - 5 での TDC 分布



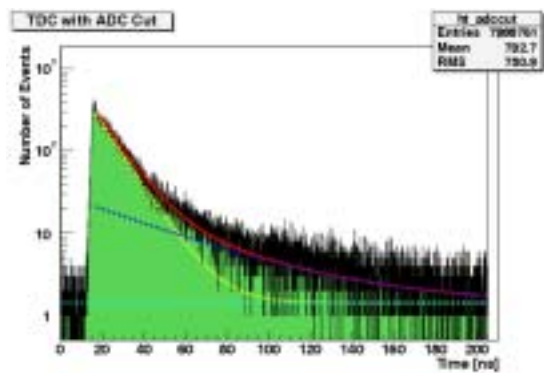
(i) - 10 での ADC 分布



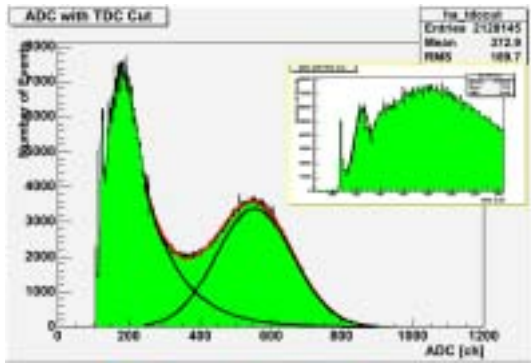
(j) - 10 での TDC 分布



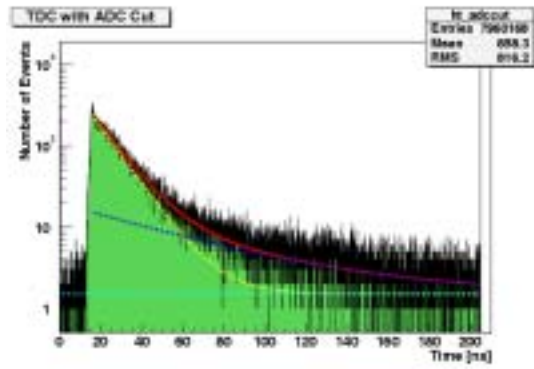
(k) - 15 での ADC 分布



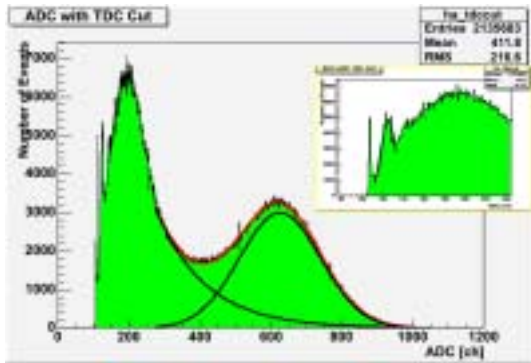
(l) - 15 での TDC 分布



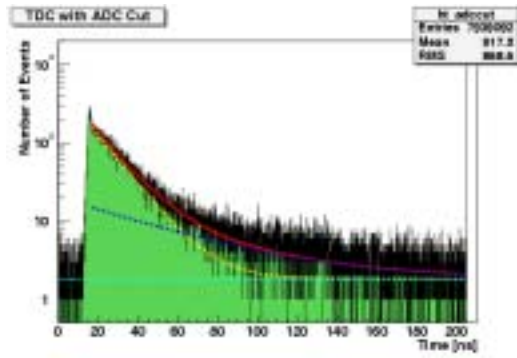
(m) - 20 での ADC 分布



(n) - 20 での TDC 分布

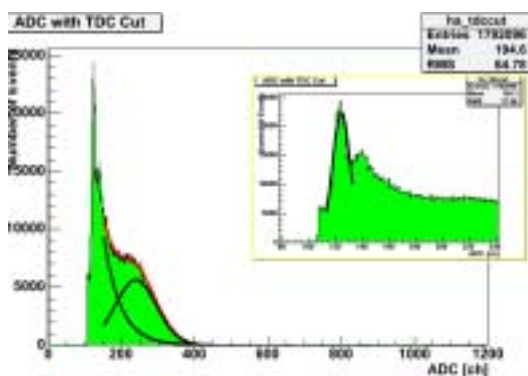


(o) - 25 での ADC 分布

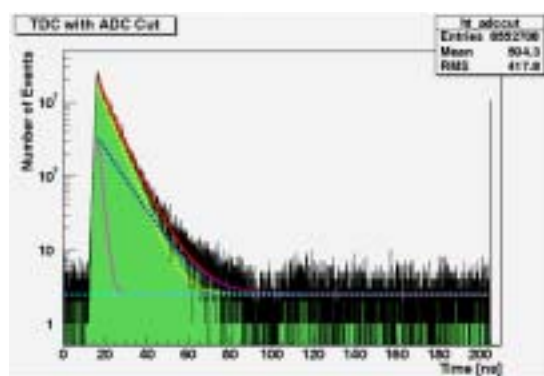


(p) - 25 での TDC 分布

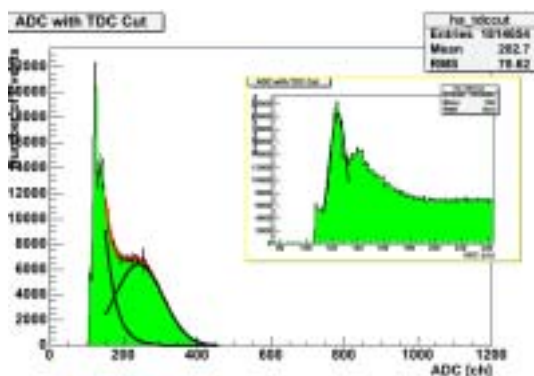
古河機械金属株のPWOのADCおよびTDC分布



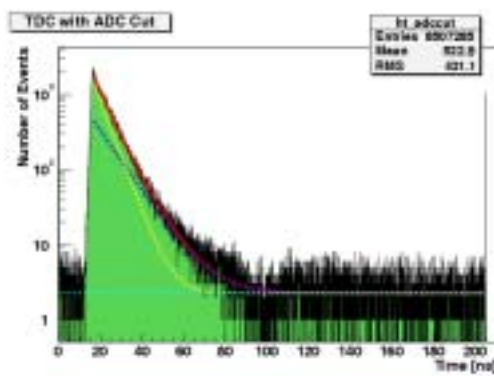
(a)10 でのADC分布



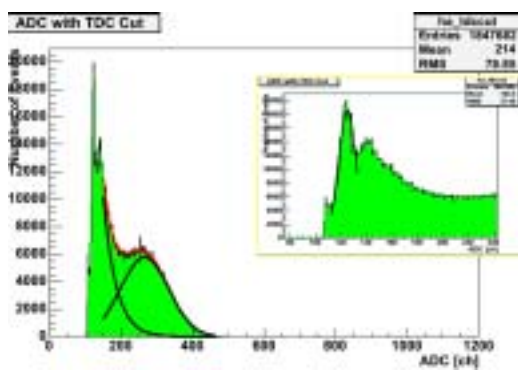
(b)10 でのTDC分布



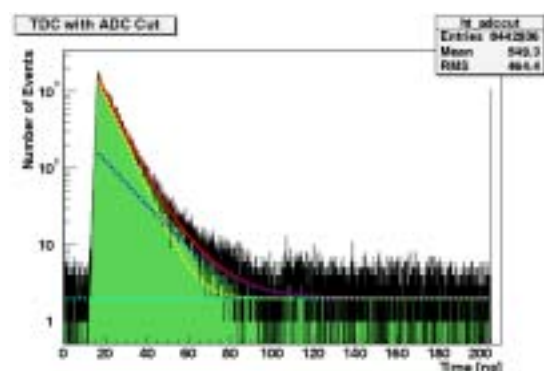
(c)5 でのADC分布



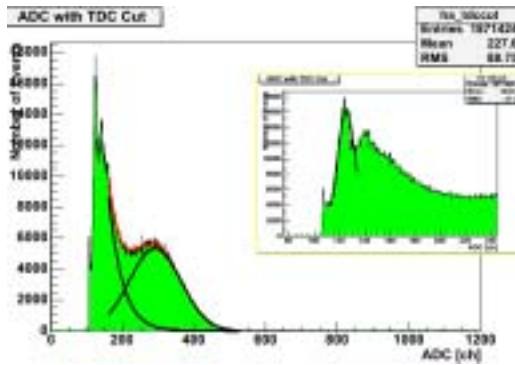
(d)5 でのTDC分布



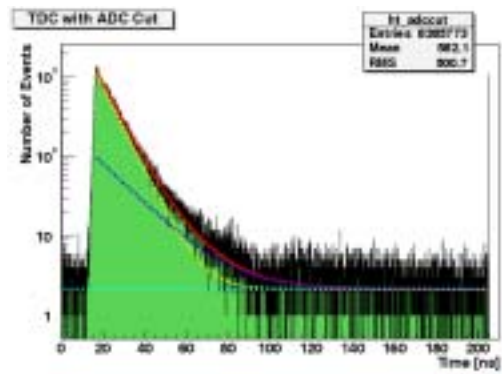
(e)0 でのADC分布



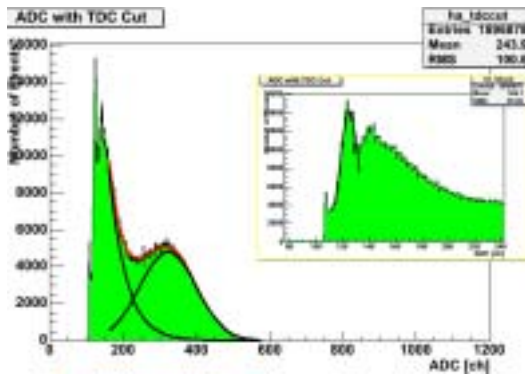
(f)0 でのTDC分布



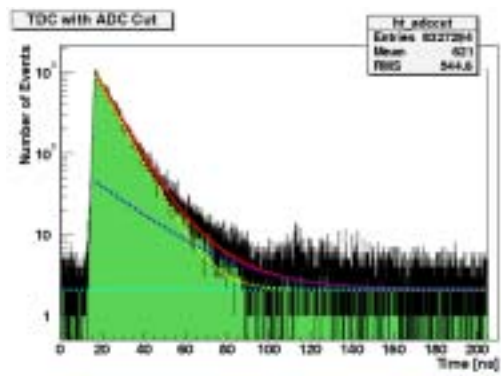
(g) - 5 での ADC 分布



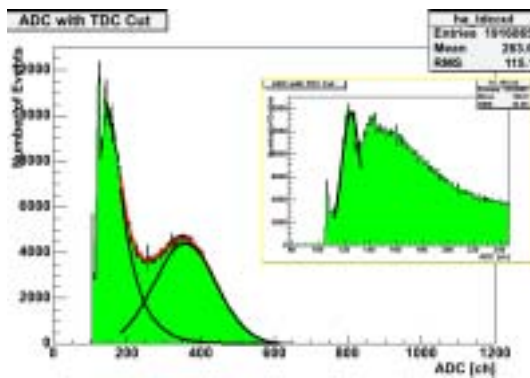
(h) - 5 での TDC 分布



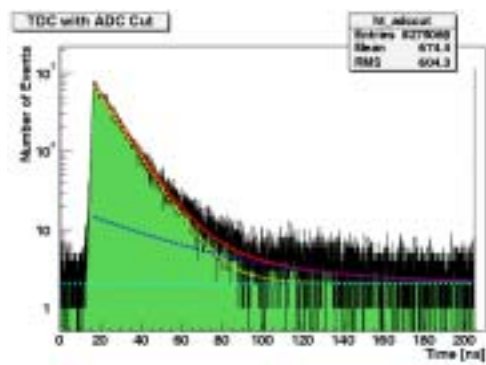
(i) - 10 での ADC 分布



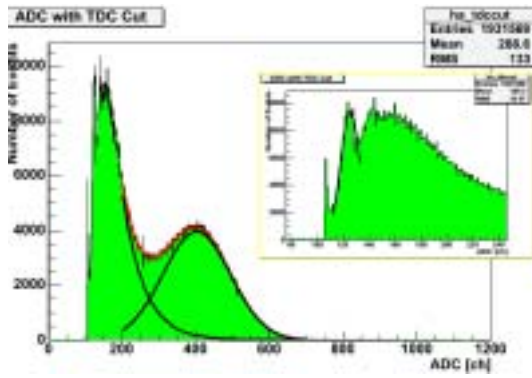
(j) - 10 での TDC 分布



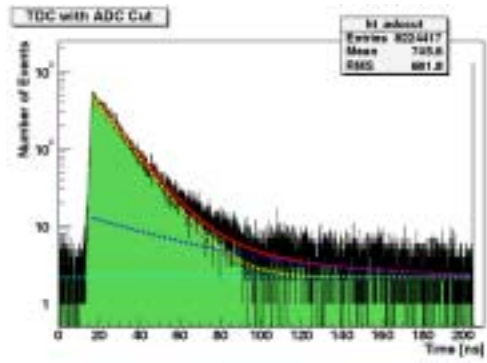
(k) - 15 での ADC 分布



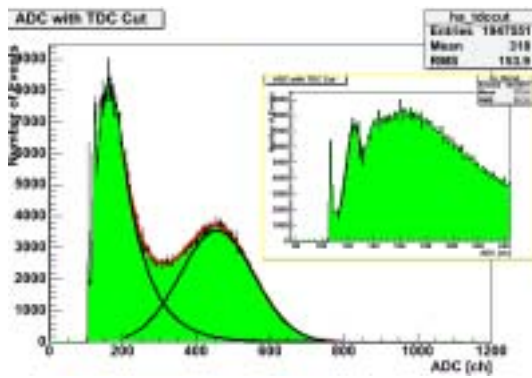
(l) - 15 での TDC 分布



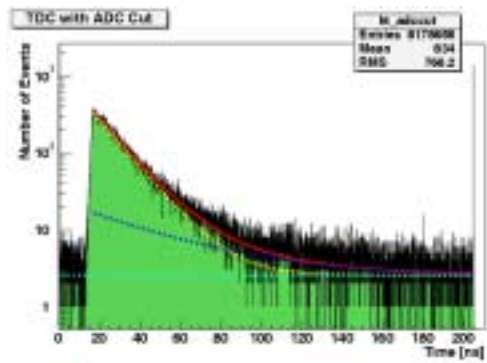
(m) - 20 での ADC 分布



(n) - 20 での TDC 分布

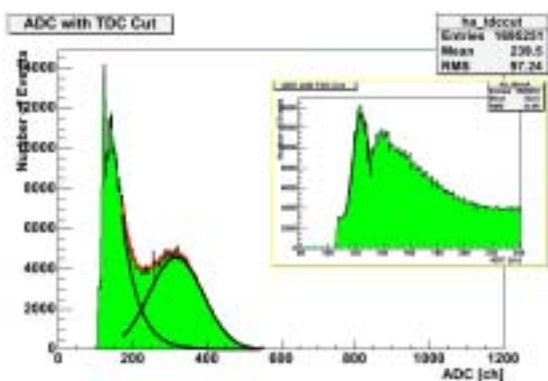


(o) - 25 での ADC 分布

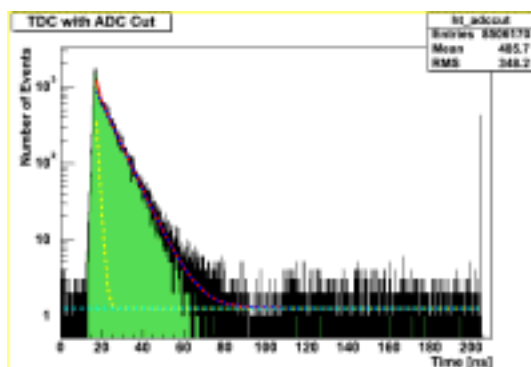


(p) - 25 での TDC 分布

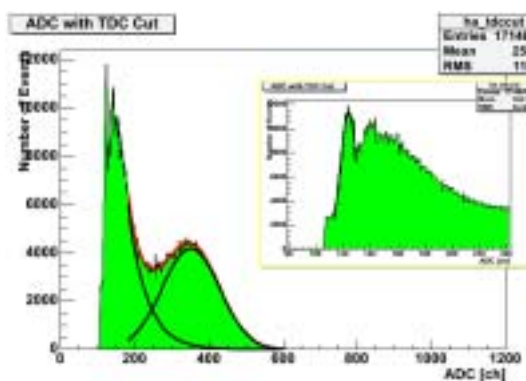
RI&NC 社 PWO の ADC 分布および TDC 分布



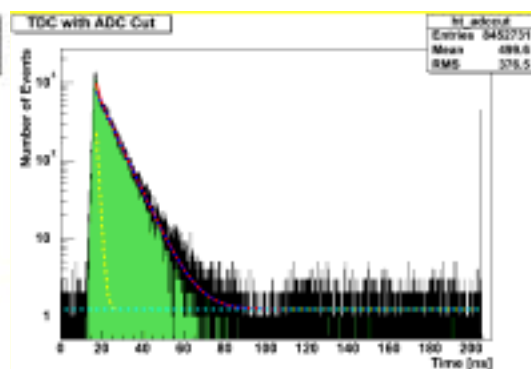
(a)10 での ADC 分布



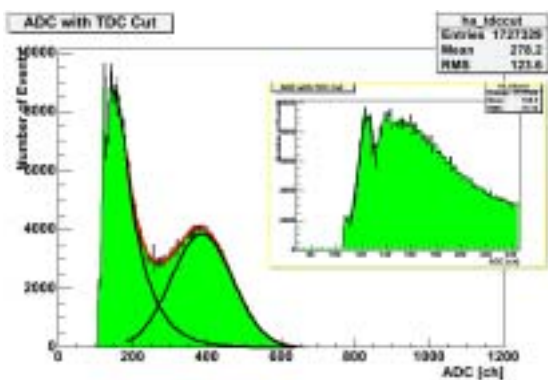
(b)10 での TDC 分布



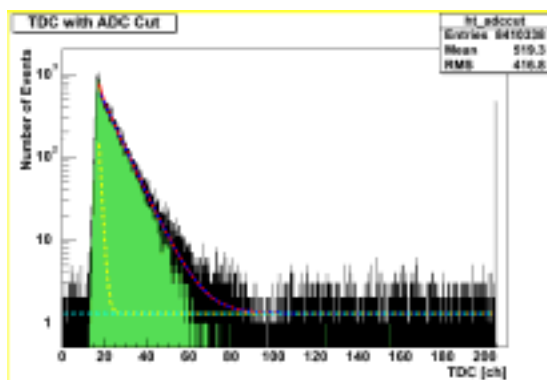
(c)5 での ADC 分布



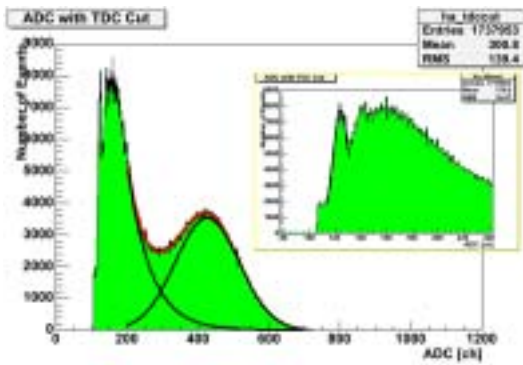
(d)5 での TDC 分布



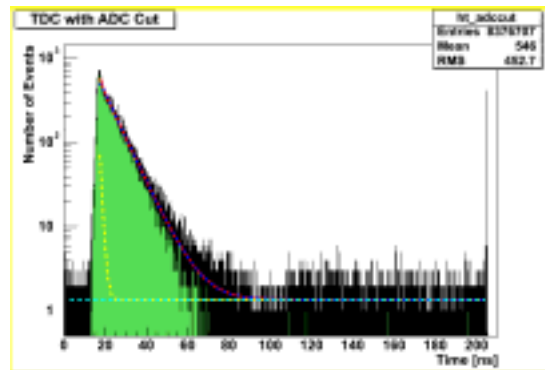
(e)0 での ADC 分布



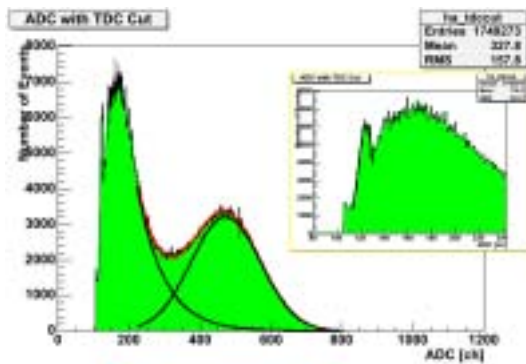
(f)0 での TDC 分布



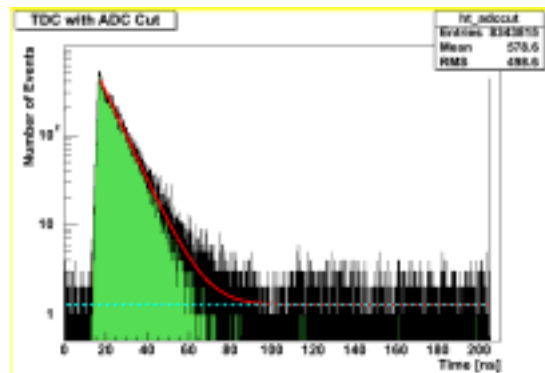
(g) - 5 での ADC 分布



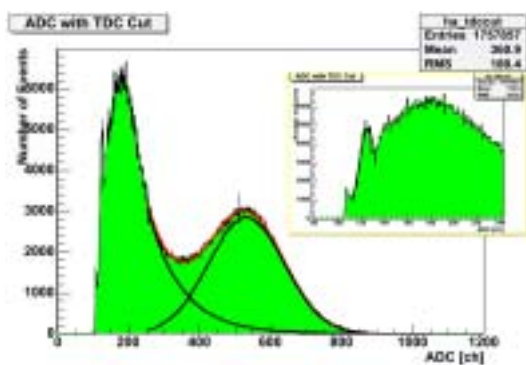
(h) - 5 での TDC 分布



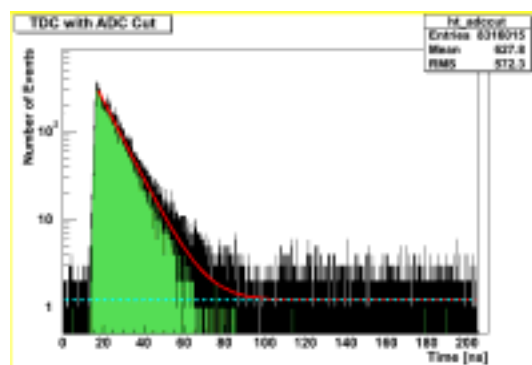
(i) - 10 での ADC 分布



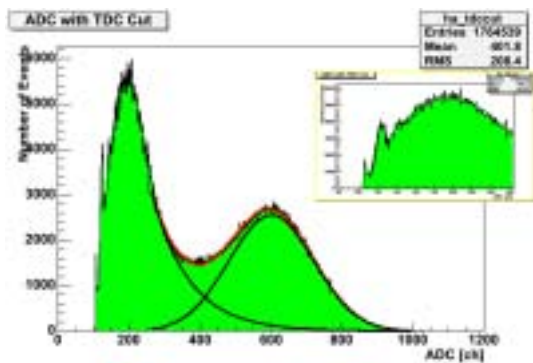
(j) - 10 での TDC 分布



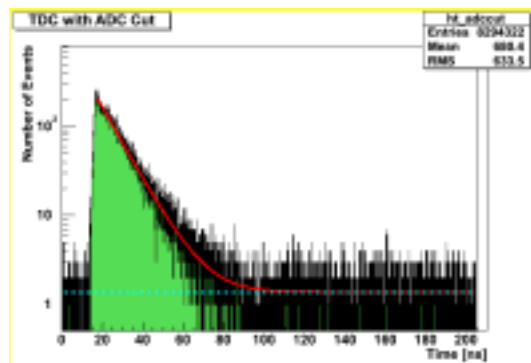
(k) - 15 での ADC 分布



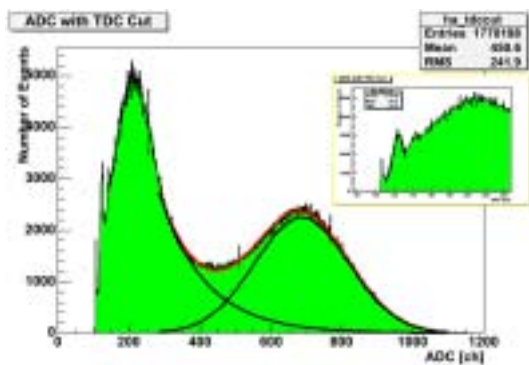
(l) - 15 での TDC 分布



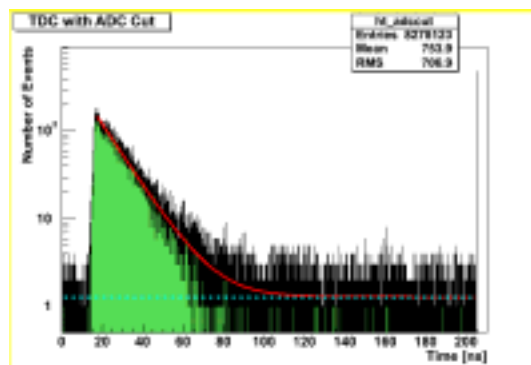
(m) - 20 での ADC 分布



(n) - 20 での TDC 分布



(o) - 25 での ADC 分布



(p) - 25 での TDC 分布