

タングステン酸鉛結晶の 蛍光温度特性

広島大学理学部物理科学科

クォーク物理学研究室

成田 拓人 1479050C

主査 杉立徹 教授

副査 高橋徹 助教授

指導教官 杉立徹 教授

要旨

タングステン酸鉛 (PbWO_4) 結晶 (以下PWO) は、透明な無機シンチレータで放射線入射に対し蛍光 (シンチレーション光) を発する。無機シンチレータの中では最も早い5~15nsの減衰時間を持ち、高速応答を特徴とする。また、既存のシンチレーション材と比較して密度が 8.2g/cm^3 と高いため、粒子を狭い範囲に閉じ込めることができる。そのため、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高エネルギー粒子の高精度測定に適しており、将来性のあるシンチレーション材として注目され、近年開発が進んでいる。

PWOは温度を下げることにより発光量が増えるが、減衰時間の遅い成分も増えてしまうため応答性が悪くなる、という性質がある。しかし現在、世界で3社しか製造を行っておらず、その性質はあまり知られていない。そのため本実験では、PWO蛍光の温度特性を調べるために、 ^{60}Co からの γ 線入射における光量および減衰時間を10 ~ -35 の範囲で5刻みに測定し、温度依存性を調べた。その結果、ある温度までは、温度を下げることによって増加する光量は、減衰時間の遅い成分によるものだけでなく、速い成分によるものも光量の増加に寄与していることがわかった。それが、PWOの性能を発揮する最適値である。またその中で、結晶の性質のメーカーによる違いを調べるために、ロシアのNorth Crystal社製、ベラルーシのRI&NC社製、日本の古河機械金属(株)製の3社のPWOについて、同じ方法で測定し結果を比較した。

目次

- 1 序論
- 2 導入
 - 2.1 線の発生
 - 2.2 線と物質との相互作用
 - 2.2.1 光電効果
 - 2.2.2 コンプトン散乱
 - 2.3 シンチレータ
 - 2.3.1 シンチレーション機構
 - 2.3.2 減衰時間
 - 2.3.3 シンチレータの種類
 - 2.3.4 タングステン酸鉛結晶の性質
 - 2.4 光電子増倍管
 - 2.5 モジュール
- 3 実験
 - 3.1 セットアップ
 - 3.2 回路
 - 3.3 解析
 - 3.3.1 光量の温度依存性
 - 3.3.2 減衰時間の温度依存性
- 4 結果
 - 4.1 光量の温度依存性
 - 4.2 減衰時間の温度依存性
- 5 考察
 - 5.1 各減衰時間の成分における光量の温度依存性
 - 5.2 アクシデンタルの見積もり
- 6 結論
- 7 謝辞

8 参考文献

9 付録

1 序論

タンゲステン酸鉛結晶 (PWO) は、透明な無機シンチレータで放射線入射に対し蛍光 (シンチレーション光) を発する。無機シンチレータの中では最も早い 5~15ns の減衰時間を持ち、高速応答を特徴とする。また、既存のシンチレーション材と比較して密度が 8.2g/cm^3 と高い。また、電磁カスケードシャワーの縦への広がりを表す放射長が短く、横への広がりを表すモリエール半径も小さい。そのため粒子を狭い範囲に閉じ込めることができるため、細分化された検出器を作ることができ、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高エネルギー粒子の高精度測定に適している。そのため、CERNで行われる ALICE 実験にも PWO が使用される。

一方 PWO には発光量が少ないという欠点が存在するのだが、温度を下げることにより発光量が増加するという性質があるために、温度を下げた状態で使用すればその欠点を改善することができる。しかし温度を下げることにより同時に、発光の遅い成分も増加するため、応答性が悪くなってしまう。よって、測定したいものにより、発光量と応答性の兼ね合いを正確に求めることが重要となってくる。

PWO は近年になって開発され始めたため、まだあまり大規模な実験で使われたこともなく、現在製造を行っているのは世界に 3 ヶ所しかない (ロシアの North Crystal 社、ベラルーシの RI&NC 社、日本の古河機械金属(株))。また、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。

そのため本実験では、PWO 蛍光の温度特性を調べるために、上で述べた 3 社の結晶において、 ^{60}Co からの線入射における光量および減衰時間を 10 ~ 35 の範囲で 5 刻みに測定し、温度依存性について結果を比較し、考察した。また、結晶の違いによる性質の違いについても考察した。

2 導入

2.1 線の発生

線は原子核の励起のエネルギーが光子として放出されたもので、核の励起状態によって異なるが、そのエネルギー領域は数 keV から数 MeV にわたっている。

今回使用する線源は ^{60}Co であり、崩壊をし ^{60}Ni になる。このときほとんどのもの(99.88%)が ^{60}Ni の第二励起状態(2505.7keV)に落ちる。その後、第一励起状態(1332.5keV)を経て基底状態へ落ちるため、それぞれ

- $2505.7\text{keV} - 1332.5\text{keV} = 1173.2\text{keV}$
- $1332.5\text{keV} - 0\text{keV} = 1332.5\text{keV}$

の2本のエネルギーをもった線が放出されることになる。また、第一励起状態の寿命はピコ秒以下であるため、この2本の線はほぼ同時に放出されると考えてよい。図 2.1 に ^{60}Co における線の模式図を示す。

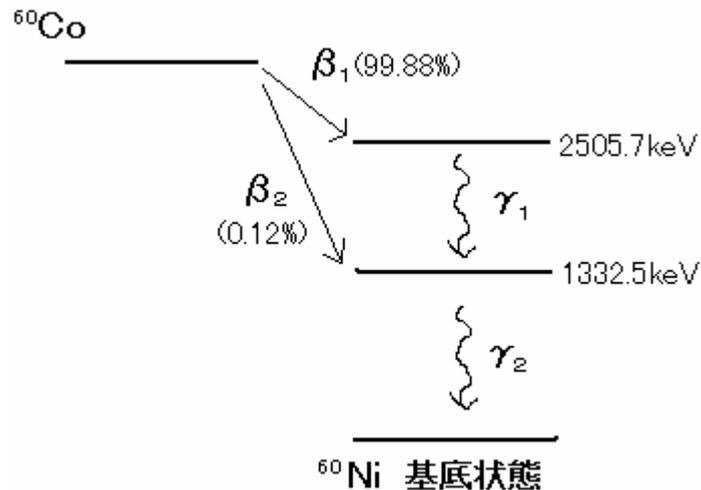


図 2.1 ^{60}Co における線の発生模式図

2.2 線と物質との相互作用

線と物質の相互作用は主として三つの過程がある。それは、光電効果、コンプトン散乱および電子対生成である。もちろんこの他に原子核反応も起こしうるが、これら三過程

と比較し起こる頻度は小さい。本実験で使用する X 線のエネルギーは 1 MeV 程度なので、コンプトン散乱、光電効果が支配的な相互作用となる。そのためこの章では、光電効果及びコンプトン散乱について述べる。

2.2.1 光電効果

光電効果は、光子が原子内に束縛されている電子と相互作用をし、自分の全エネルギーを電子に与える現象である。光電効果は光子エネルギーが電子の電離ポテンシャルより少し上で最も起こりやすく、光子エネルギーが増すと急激に減少する。電子の電離ポテンシャルは eV オーダーであるので、入射光子のエネルギーが低い場合に大きな効果を示す。

2.2.2 コンプトン散乱

コンプトン散乱とは、光子と電子の衝突による散乱である。コンプトン散乱の入射光子のエネルギーによる影響は量子力学的に計算され、Klein-Nishina の式として知られている。これによると、入射光子のエネルギーが上がるとともに、効果が小さくなることが期待される。また、コンプトン散乱は入射光子のエネルギーが数 MeV 程度までのエネルギー領域において主な寄与をしていることが示されている。

2.3 シンチレータ

本実験ではシンチレータとして、PWO 及びプラスチックシンチレータを使用する。この節ではその発光機構、性質について述べる。

2.3.1 シンチレーション機構

線が物質に入射し、相互作用によって生成する一次電子は、価電子帯中に正孔を残しながら、二次電子を伝導帯まで励起する。いくつかの場合、電子に与えられるエネルギーは伝導帯まで励起するには不十分な場合もある。このような場合、電子と正孔は電氣的に互いに引き合い、励起子と呼ばれる状態を形成する。電子のバンド構造モデルから見ると、これは図 2.3.1 に示すように、新たに伝導帯の下に続けて作られる励起レベルの励起子帯に

励起される。この励起された電子が安定な価電子帯まで脱励起されるときに、エネルギーを放出して基底状態に戻る。このとき、紫外から可視光領域の波長の光を発する。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測ることができる。このように線を検出できる物質をシンチレータという。シンチレーション光を物質表面まで透過させなければ検出することができないため、一般にシンチレータは透明である。また、線のエネルギーあたりに生成される電子正孔対の数が少なすぎてもシンチレータにはならない。

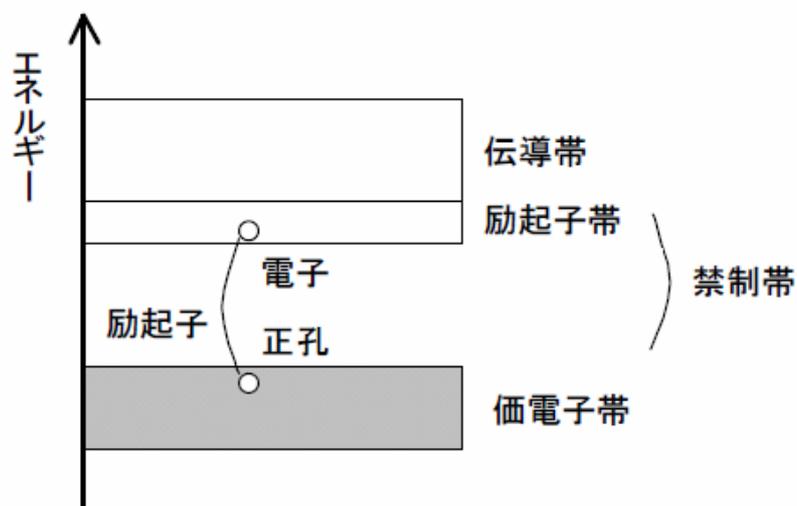


図 2.3.1 シンチレータのバンド構造モデル

2.3.2 減衰時間

一般に、2.3.1で述べた励起子の寿命(脱励起するまでの時間)はひとつではなく、様々な成分のものが存在する。そのため、

$$f(t) = \sum_n \frac{N_n}{n} \exp\left(-\frac{t}{n}\right) \quad (\text{式 2.3.2-1})$$

という関数によって減衰が表される。ここで、 n は成分の数、 n は減衰時間、 N は光子の相対数を表す。そのため、光子の成分ごとの割合は、

$$N_i[\%] = \frac{N_i}{\sum_n N_n} \times 100 \quad (\text{式 2.3.2-2})$$

という式によって与えられる。また、平均減衰時間 τ_{mean} は、

$$\tau_{mean} = \frac{\sum_n N_n \tau_n}{\sum_n N_n} \quad (\text{式 2.3.2-1})$$

という式で与えられる。

2.3.3 シンチレータの種類

固体のシンチレータには無機シンチレータと有機シンチレータがあり、それぞれ特徴を持っている。有機シンチレータにはプラスチックシンチレータなどがあり、減衰時間の速いものが多いため、トリガーなどのタイミングを必要とするものに使用される。無機シンチレータは密度の高いものも多く、入射粒子が起こす電磁シャワーを閉じ込めることができるため、シンチレーション光を測定することにより入射粒子の全エネルギーを知ることができる。また、このような原理に基づく検出器は、電磁カロリメータと呼ばれる。

2.3.4 タングステン酸鉛結晶の性質

タングステン酸鉛結晶は、化学式は PbWO_4 でPWOとも呼ばれる。PWOは無機シンチレータである。特徴としては、現在よく使用されている無機シンチレータの中では最も速い5~15[ns]の減衰時間をもつ。また、既存のシンチレーション材と比較して密度が8.2[g/cm³]と高い。また、入射粒子のエネルギーがはじめの1/eになる物質の厚さ、つまり電磁カスケードシャワーの縦への広がりを表す、放射長が0.89[cm]と短く、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、つまりシャワーの横への広がりを表す、モリエール半径も2.0[cm]と小さい。そのため、入射粒子を小さい範囲に閉じ込めることができるので、優れたカロリメータ材であると考えられている。短所としては発光量が少ないことがあげられるが、近年、イットリウム等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。

また、温度を下げることによって発光量が増えるが、減衰時間の遅い成分のものも増加してしまうため、応答性が悪くなってしまふ。PWO は近年になって開発され始めたため、まだあまり大規模な実験で使われたこともなく、現在製造を行っているのは世界に3ヶ所しかない(ロシアの North Crystal 社、ベラルーシの RI&NC 社、日本の古河機械金属(株))。また、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まだあまり知られていない。

一般によく使用される無機シンチレータの性質について、表 2.3.4 に示す。

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	2.2	5~15	0.01
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 2.3.4 無機シンチレータの性質 (参考文献[1]より)

2.4 光電子増倍管

光電子増倍管 (Photomultiplier Tube、PMT) 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る。シンチレータからの出力は光であるので、これを検出して電気信号に変換しなければならないため、光電子増倍管が使用される。

まず光電面に光が当たると、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、1段目のダイノードに当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当たってさらに多量の電子を生じる。これを繰り返すことによって信号を最終的に $10^6 \sim 10^7$ に増倍する。また、光電子増倍管は真空管内で増幅するためノイズが少ないという特徴をもっており、微弱光の測定に最適な光センサといえる。

2.5 モジュール

本実験の電気回路において使用するモジュールについて、簡単に説明する。

Discriminator

光電子増倍管などからくるアナログ信号を入力すると、その信号がある閾値をこえた場合には、NIM 信号と呼ばれる信号を、指定した幅で出力する。TDC などを使用する場合は、NIM 信号に変換しなければならないため、まず Discriminator を通すことが多い。

Coincidence

NIM 信号を複数入力し、それらが同時にきた場合に、その時間分の幅をもった NIM 信号を出力する。

Gate Generator

NIM 信号を入力すると、その入力信号の幅を指定したものにして出力する。Discriminator によって指定できる幅より大きな幅を指定できるため、通常、ADC の Gate には Gate Generator を通した信号を入力する。

Splitter

入力した信号を 2 等分して、2 本の出力として出すことができる。ただし、2 等分するため、シグナルの大きさも半分となる。今回の実験では ADC、TDC の両方を使うため、Splitter を使って信号を 2 等分した。

Amplifier

入力した信号を、増幅することができる。今回の実験では、約 10 倍に増幅できるものを使用した。

ADC

CAMAC という規格のもので、コンピュータにつなぐことでデータ処理が可能。NIM 信号の Gate、それに加えてアナログ信号を入力すると、Gate 幅の間に入力された信号の電荷量を積分して、デジタル量に変換する。つまり、シンチレータから発せられた光を光電子増倍管により電気信号に変換し、それを ADC でデジタル化することにより、シンチレーション光を測定することができる。

TDC

これも CAMAC 規格のものであり、NIM 信号をスタートとストップに入力すると、スタートからストップまでの時間を数値としてデータにすることができる。

3 実験

3.1 セットアップ

線源の ^{60}Co を用い、4本のPWO結晶について、光量及び減衰時間を、10 から-35 の範囲で5 刻みに測定した。使用した結晶は、

- ・ ロシアのNorth Crystal社(A)、North Crystal社(B) 大きさは共に $22 \times 22 \times 180[\text{mm}]$
- ・ ベラルーシのRI&NC社 大きさは $20 \times 20 \times 200[\text{mm}]$
- ・ 日本の古河機械金属(株) 大きさは $20 \times 20 \times 200[\text{mm}]$

の3社、計4本のものである。

恒温槽内のセットアップを図 3.1 に示した。 ^{60}Co の両側にプラスチックシンチレータとPWOを置いた。一度の測定で2本のPWO、つまり2本を重ねて置いた。光電子増倍管はPWOには浜松ホトニクスH7416、プラスチックシンチレータには浜松ホトニクスH2431-02MODを、光学グリスで接着した。

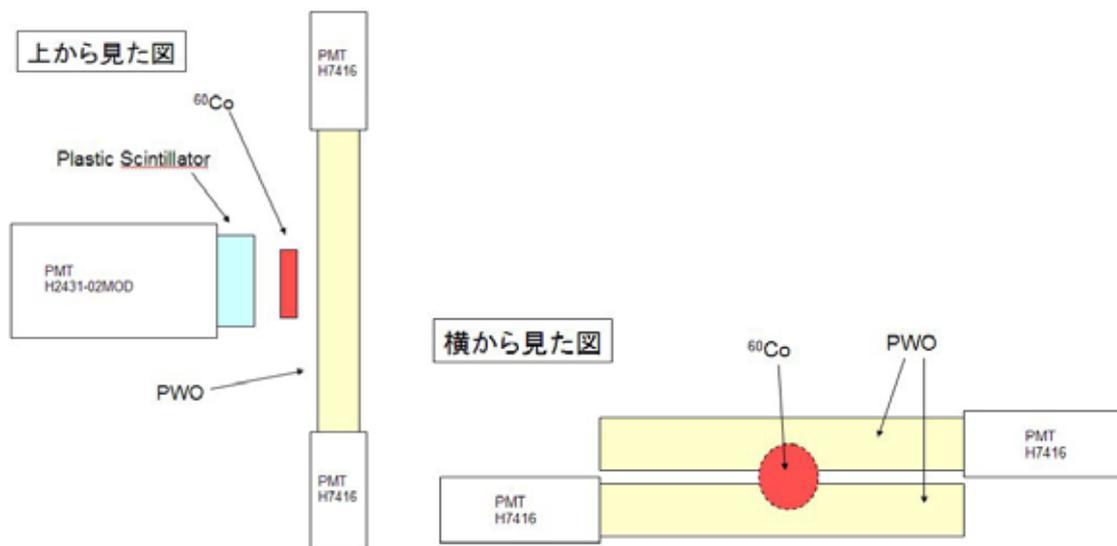


図 3.1 恒温槽内のセットアップ

3.2 回路

回路図は、図 3.2 に示した。回路図において、Discri は Discriminator、Coin は Coincidence、G.G は Gate Generator、Split は Splitter、Amp は Amplifier の略である。ADC (林栄製

器 RPC-022) を用いて、プラスチックシンチレータからのシグナルを Gate (280[ns]) と
 して PWO からのシグナルを測定した。また、TDC (RPC-061) を用いて、プラスチック
 シンチレータからのシグナルをスタートとし、PWO からのシグナルをストップとし、その
 時間差を測定した (TDC のフルスケール 200ns)。Amplifier を使用しているのは、シング
 ルフォトエレクトロンイベントという微弱光を測定する必要があるためである。DAQ
 Ready とはデータ収集系がビジーなときには信号を出さない、というものであるため、ト
 リガーと Coincidence をかけておけばデータ収集系がビジーな間はトリガーがかからなく
 なる。念のため、さらに 1[ms]の幅をもった Gate の Veto と Coincidence することにより、
 一度信号が入ったら 1[ms]の間は次の信号が入らないようにした。

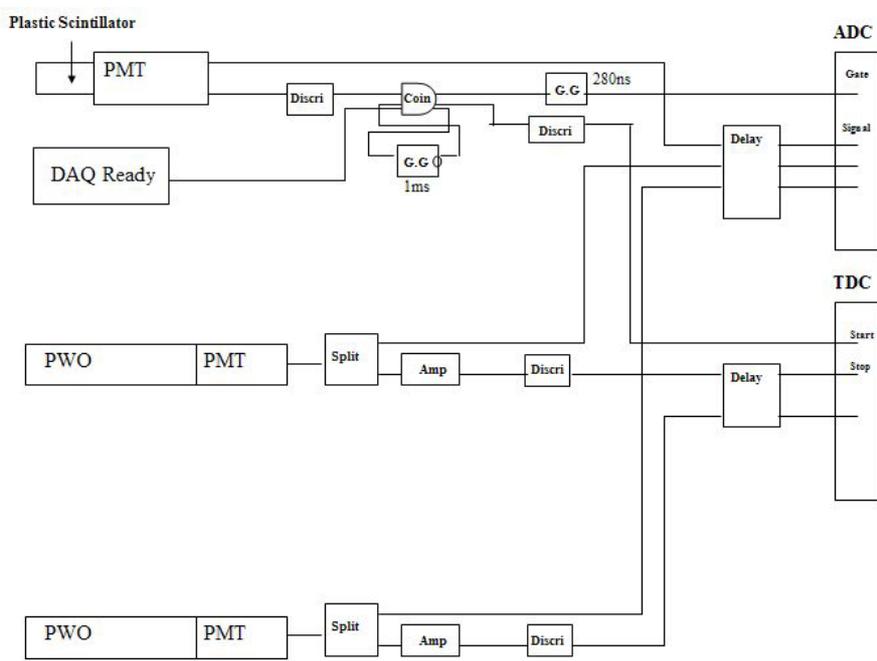


図 3.2 回路図

3.3 解析

3.1のセットアップで3.2の回路を使い、測定した。その結果の、光量、減衰時間、それぞれの温度依存性についての解析方法について述べる。

3.3.1 光量の温度依存性

TDCがオーバーフローしたイベントのみを選び出すことにより、ADCのペDESTALを差し引くことができる。その選別を行ったADC分布の典型例を図3.3.1-1に示す。

一番左に緑色の線で示してある位置がペDESTALの位置で、そのすぐ右にあるピークがシングルフォトエレクトロンピークである。シングルフォトエレクトロイベントとは、PWOで発生したシンチレーション光が光電子増倍管のカソードに入って、光電子を一個生成したイベントである。これは、PWOの発光量が少ないためにピークとして見える。

シングルフォトエレクトロンピークとその右の山は、コンプトン散乱によるもので、一番右のピークが、光電効果により線が全エネルギーを落としたものである。ピークがひとつしかないのは、 ^{60}Co から放出される2本の線のエネルギーが1.17[MeV]、1.33[MeV]と近いために、重なって見えているからであると考えられる。

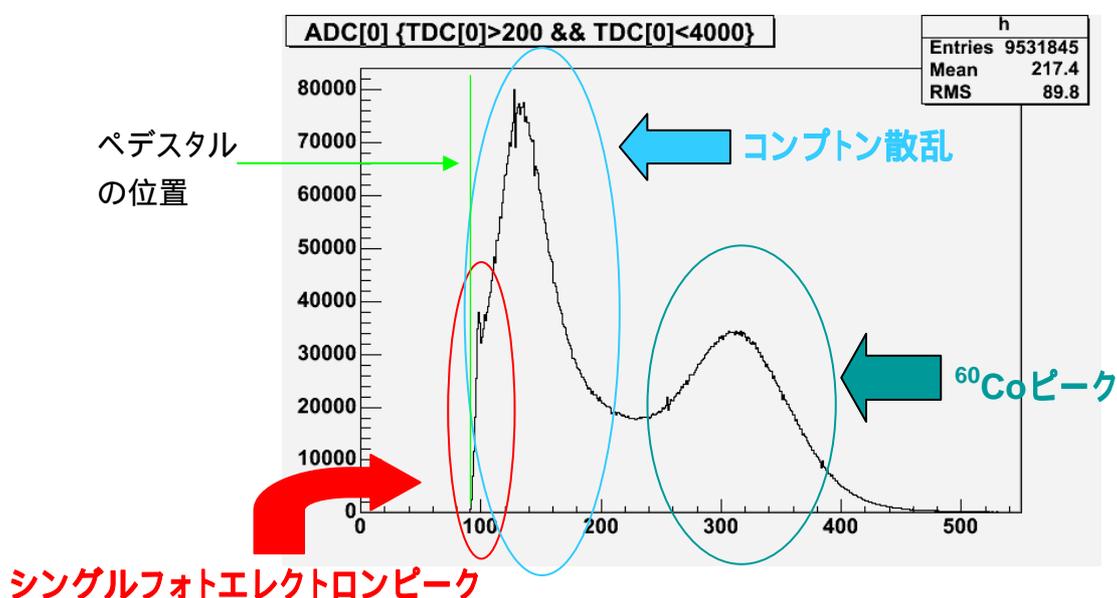


図 3.3.1-1 ADC 分布の典型例

ADC分布において、コンプトン散乱の右下がりになる部分から、 ^{60}Co ピークの山までを、

$$f(x) = A \exp(-x) + B \exp\left[-0.5 \times \left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (\text{式 3.3.1-1})$$

という関数でフィットした。これを図 3.3.1-2 に示す。青線がエクスポネンシャルの部分で、緑線がガウス関数の部分である。そのふたつを加えた式の関数が赤線を書いてある。このフィッティングによって求められるガウス関数の中心のチャンネルを Ch_{60Co} 、ペDESTALのチャンネルを Ch_{ped} 、シングルフォトエレクトロンピークのチャンネルを Ch_{spp} とし、

$$LY = \frac{Ch_{60Co} - Ch_{ped}}{Ch_{spp} - Ch_{ped}} \quad (\text{式 3.3.1-2})$$

のように光量 LY を定義する。

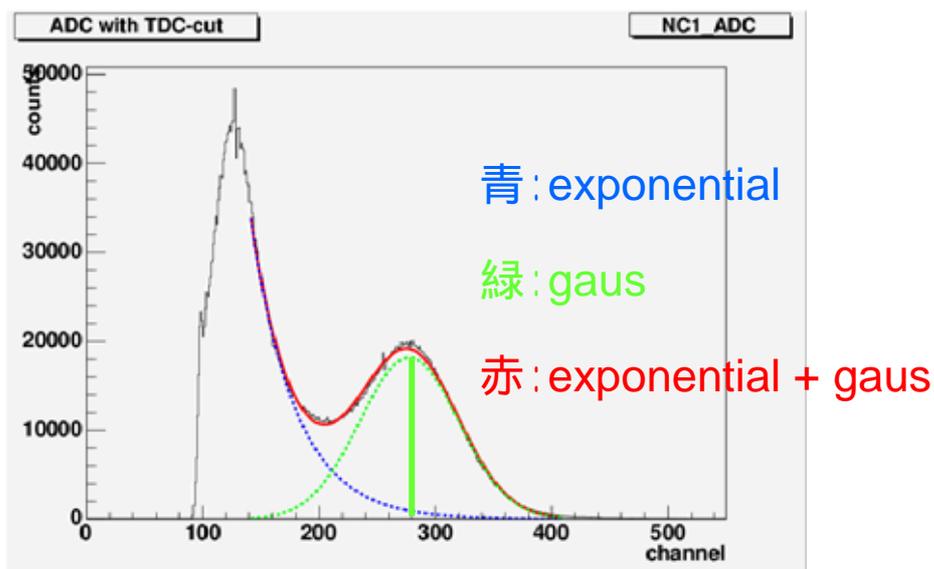


図 3.3.1-2 フィットを行った ADC 分布

3.3.2 減衰時間の温度依存性

TDC 分布の典型例を図 3.3.2-1 に示す。これは、線が入射しプラスチックシンチレータが光ったときをスタートとし、そこから PWO が光るまでの時間を測定したものである。

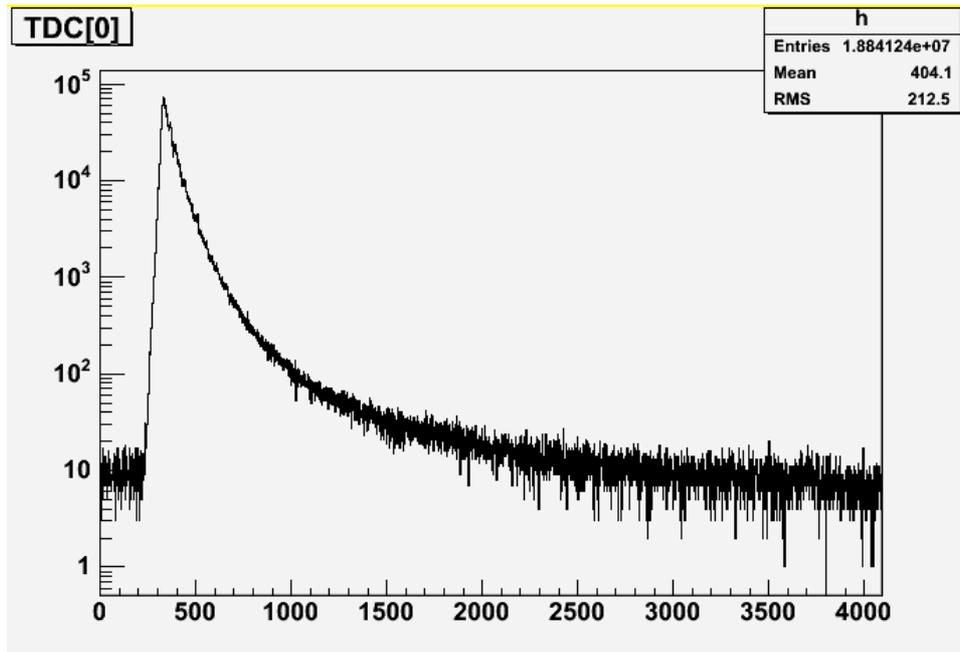


図 3.3.2-1 TDC 分布の典型例

ここで、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ことによってより正確な減衰時間を求めることができる。その理由は、TDC ではストップ信号が多数ある場合、初めのものでストップがかかってしまうため、速い成分のものをとってしまう。そこで、シングルフォトエレクトロンイベントを選び出すことによって、遅い成分のものもストップ信号として機能することになるからである。シングルフォトエレクトロンピークをガウス関数、

$$f(x) = A \exp \left[-0.5 \times \left(\frac{x-m}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (\text{式 3.3.2-1})$$

でフィットし、 $0 < \text{ADC}[\text{ch}] < m + \sigma$ のイベントを選び出した。
そして、TDC 分布の横軸を、チャンネルから時間に変換するため、

$$t[\text{ns}] = \text{TDC}[\text{ch}] \times 0.05[\text{ns}/\text{ch}] \quad (\text{式 3.3.2.-2})$$

という式を用いた。そして、ヒストグラムのピーク値以降を、式 2.3.2-1 より、

$$f(t) = \frac{N_1}{1} \exp\left[-\frac{t}{1}\right] + \frac{N_2}{2} \exp\left[-\frac{t}{2}\right] + \frac{N_3}{3} \exp\left[-\frac{t}{3}\right] + C \quad (\text{式 3.3.2-3})$$

という、エクスポネンシャル3つと定数項による関数でフィットした。 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 は減衰時間、 N_1 、 N_2 、 N_3 は、それぞれの減衰時間の成分の光子数の相対数であり、 C が定数項である。ここで、 τ_1 を7[ns]、 τ_2 を20[ns]、 τ_3 を80[ns]と固定することにより、その3つの成分の温度による変化を見た。フィッティングの様子を図に示す。青線、水色線、緑線はそれぞれ3つの減衰時間の成分であり、桃色線が定数項を現している。そして、それら全てを加えた式の関数を赤線で表している。

青: exponential(7[ns]の成分)

水色: exponential(20[ns]の成分)

緑: exponential(80[ns]の成分)

桃色: constant

赤: exponential × 3 + constant

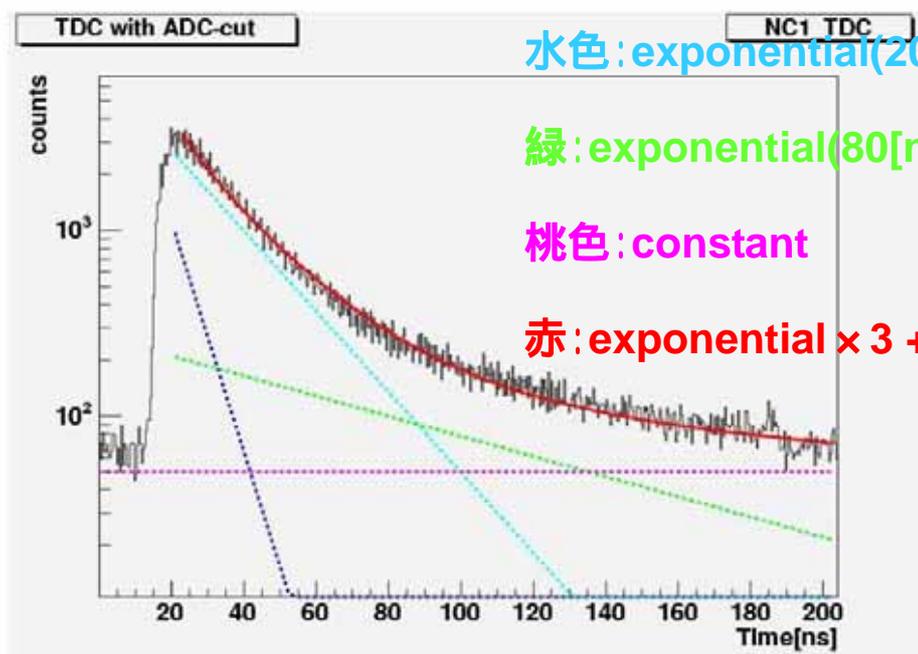
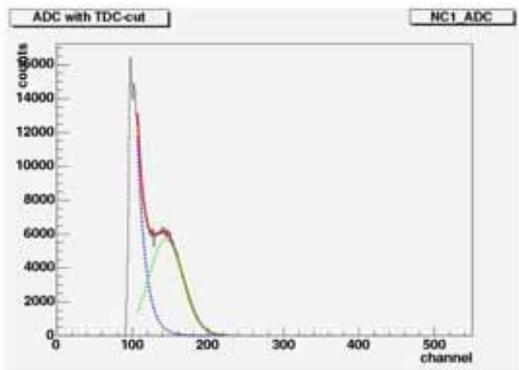


図 3.3.2-2 フィットを行った TDC 分布

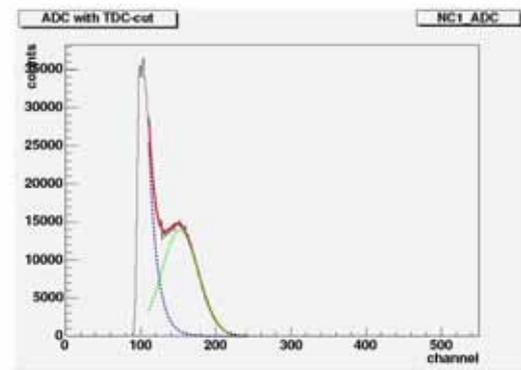
4 結果

4.1 光量の温度依存性

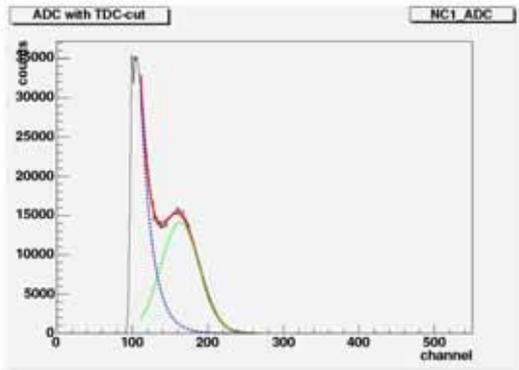
代表例として、ここでは North Crystal(A)について、式 3.3.1-1 でフィッティングを行った ADC 分布の様子を、測定した全ての温度 (10 から -35 まで 5 刻み、計 10 点) で示した (図 4.1-1)。他の結晶の ADC 分布については、最後の付録に掲載した。



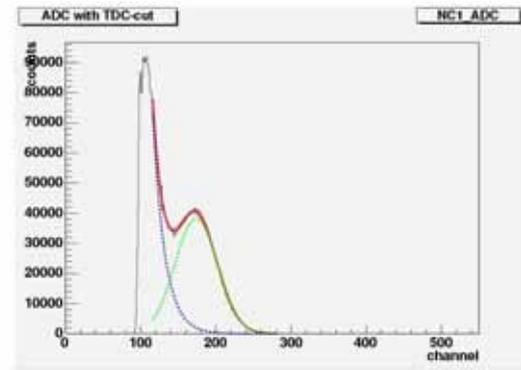
10



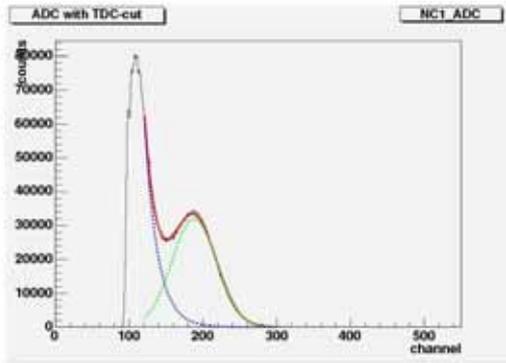
5



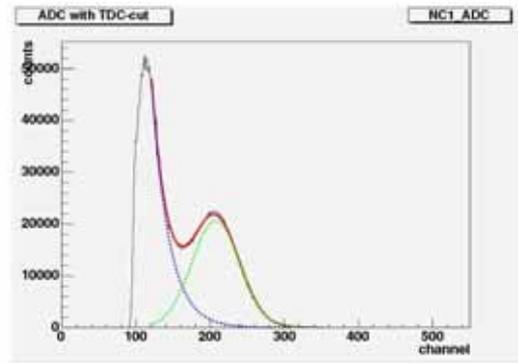
0



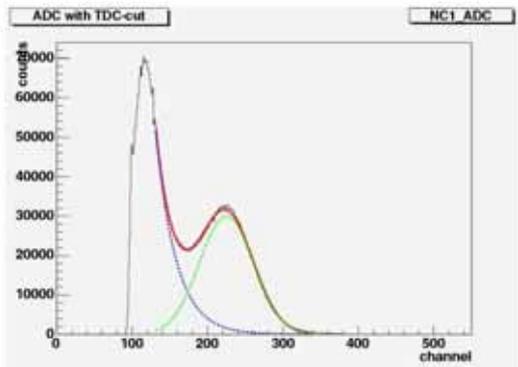
-5



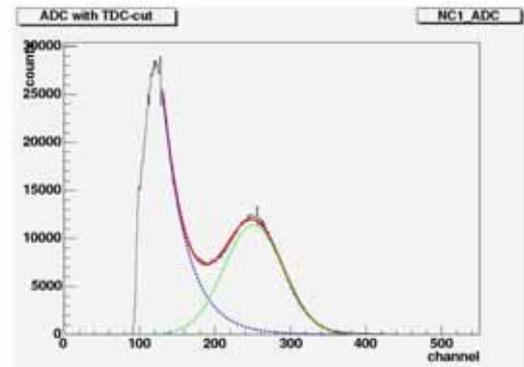
-10



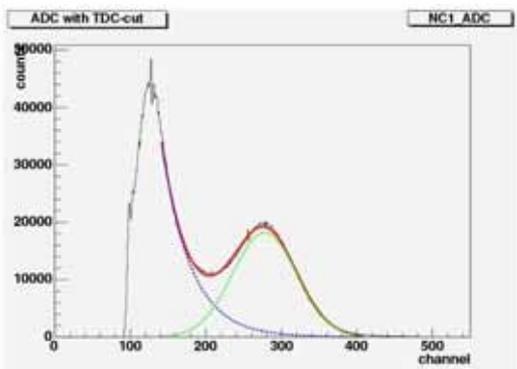
-15



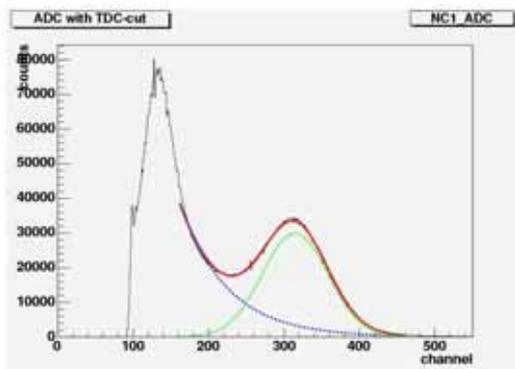
-20



-25



-30



-35

図 4.1-1 10 から-35 までの10点でのフィットを行った ADC 分布(North Crystal(A))

ADC 分布のフィットの結果より、式 3.3.1-2 で定義した光量 LY を縦軸に、温度を横軸に

して、測定した4つの結晶についてのグラフを同じキャンバスに描いたものを図に示す。赤がNorth Crystal(A)、青がNorth Crystal(B)、緑が古河機械金属、桃がRI&NCを表している。

どの結晶も全体的に、温度が下がるにつれて光量が上がるという性質は同じようである。その中でもNorth Crystal(A)が最も光量が多く、-35 においては40.4[photo electron/⁶⁰Co peak]を示した。同じメーカーであっても、North Crystal(B)はNorth Crystal(B)と比べて、-35 においては約3/4程度の光量しかない。また、古河機械金属、RI&NCは共にほぼ同程度の光量であり、-35 においてはNorth Crystal(A)の半分程度の光量しかない。

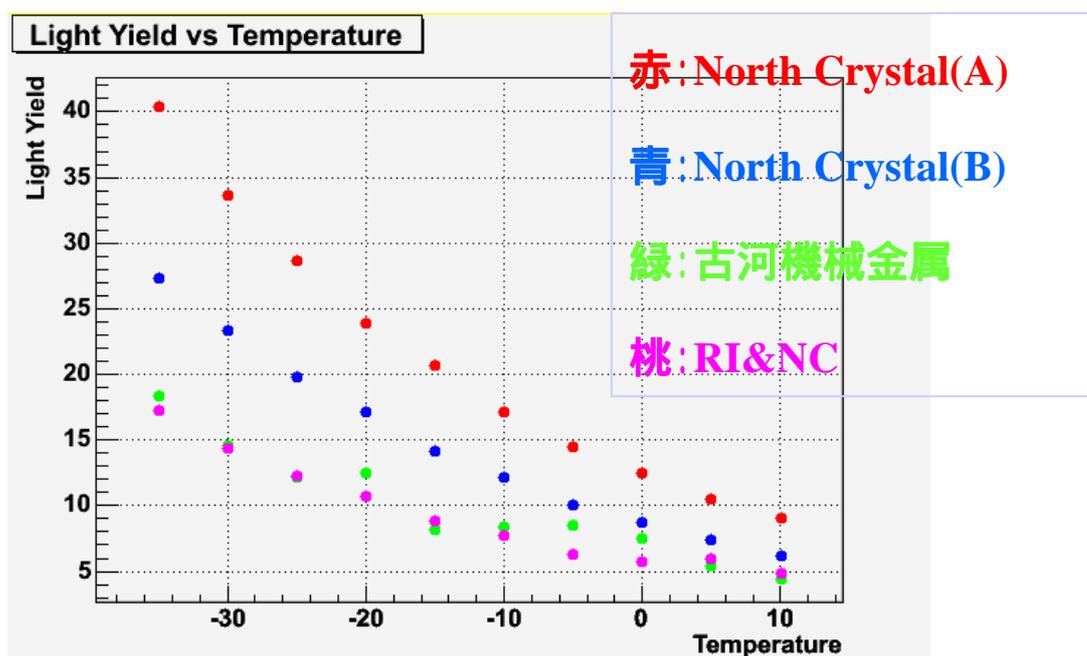
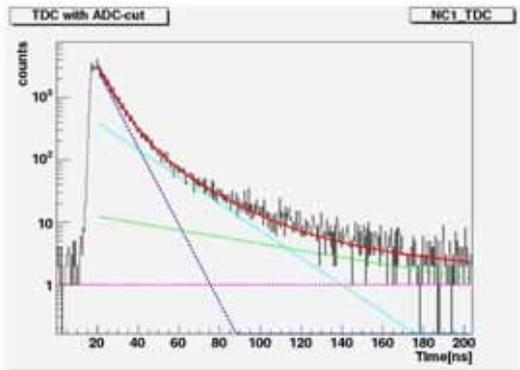


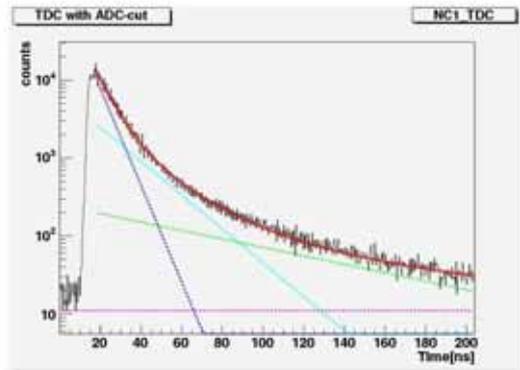
図 4.1-2 光量の温度依存性

4.2 減衰時間の温度依存性

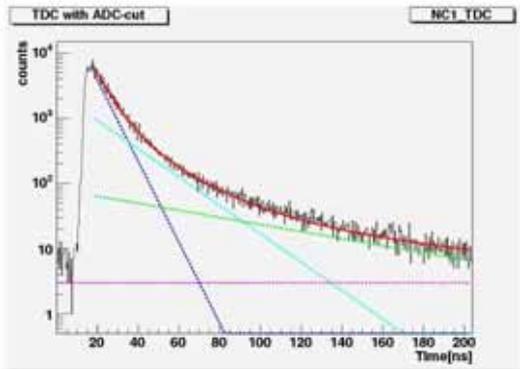
ADC 分布と同様にして、代表例としてここでは North Crystal(A)について、式 3.3.2-3 でフィッティングを行った TDC 分布の様子を、測定した全ての温度 (10 から -35 まで 5 刻み、計 10 点) で示した。もちろんこの TDC 分布は、シングルフォトエレクトロンを選び出している。他の結晶の TDC 分布については、最後の付録に掲載した。



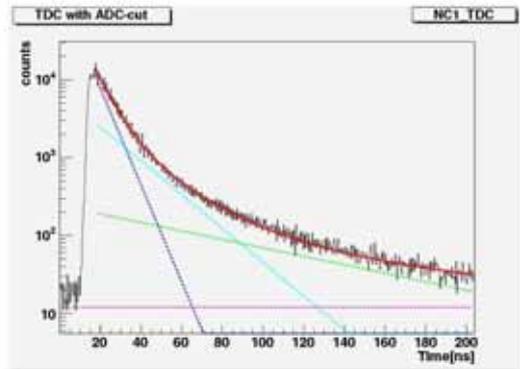
10



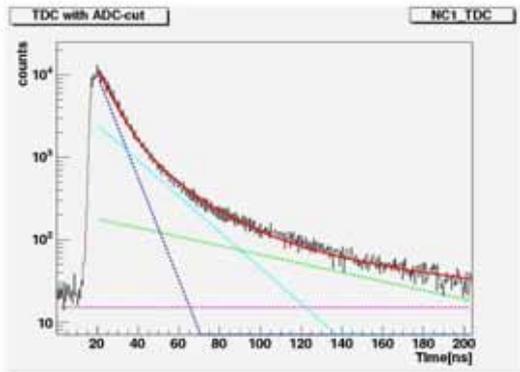
5



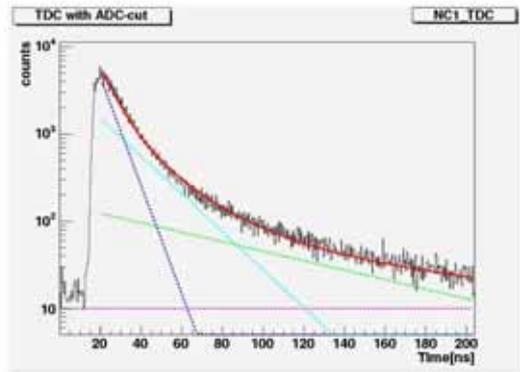
0



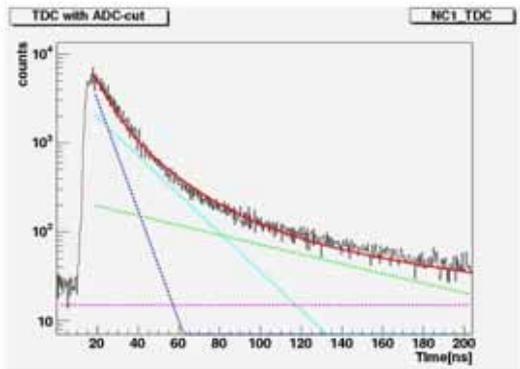
-5



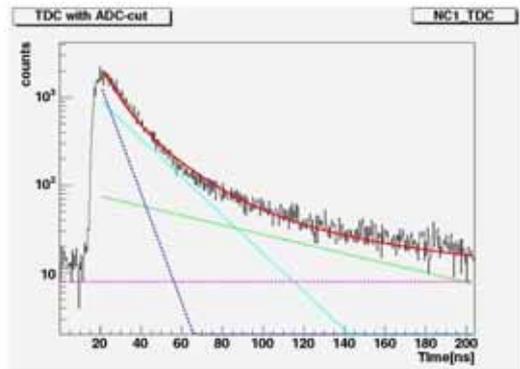
-10



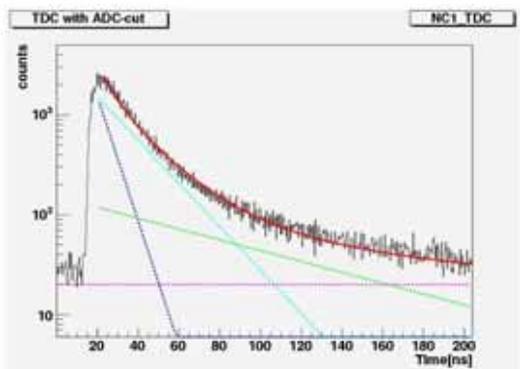
-15



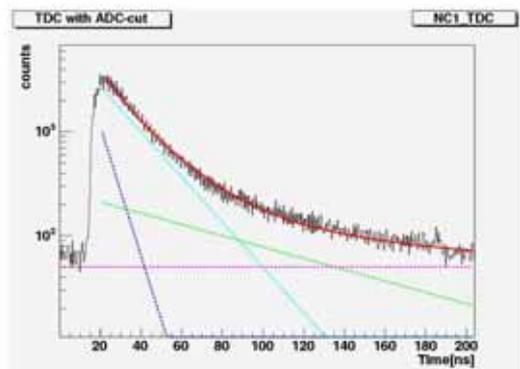
-20



-25



-30



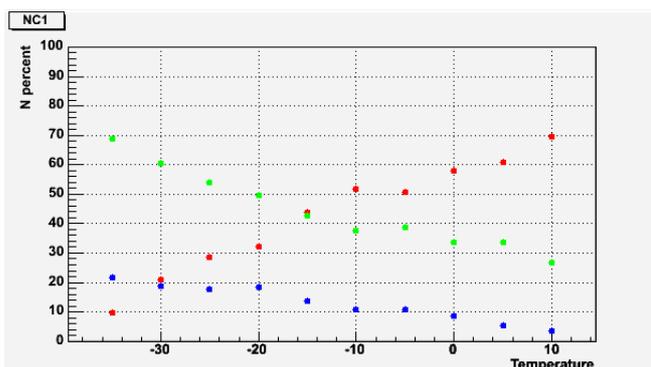
-35

図 4.2-1 10 から-35 までの 10 点でのフィットを行った TDC 分布(North Crystal(A))

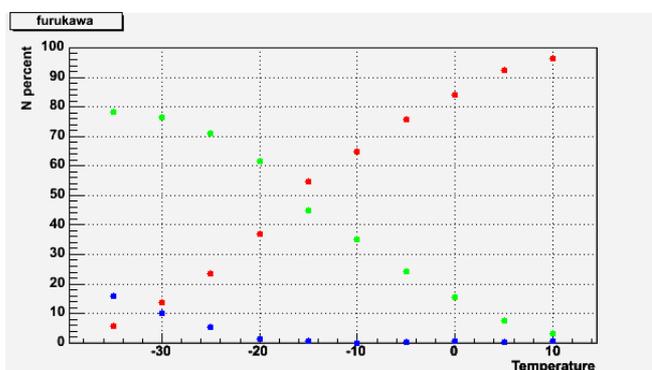
TDC 分布のフィットの結果より、式 2.3.2-2 を用いて各結晶についてそれぞれ、ある減

衰時間の成分をもつ光子数の全体に対する割合を縦軸に、温度を横軸にとり、図 4.2-2 に示した。赤が 7[ns]の成分の光子数の割合、緑が 20[ns]の成分の光子数の割合、青が 80[ns]成分の光子数の割合を表している。

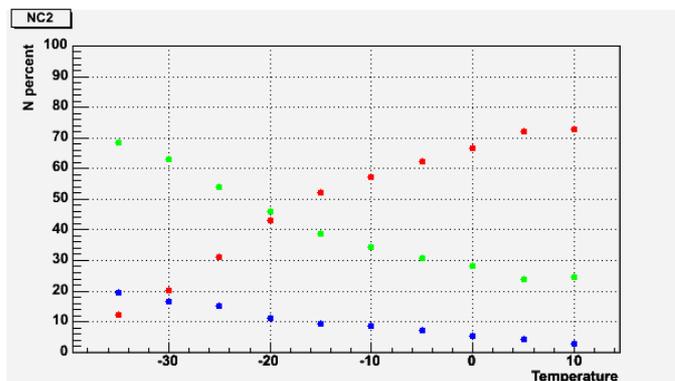
温度が下がるにつれて、減衰時間が 7[ns]の成分の割合が少なくなっていき、どの結晶でも-35 においては 10[%]程度まで減っている。代わりに 20[ns]の成分の割合が多くなっていき、-35 では、70~80[%]程度を占めている。80[ns]の成分については、多少増加しているようである。



North Crystal(A)



古河機械金属

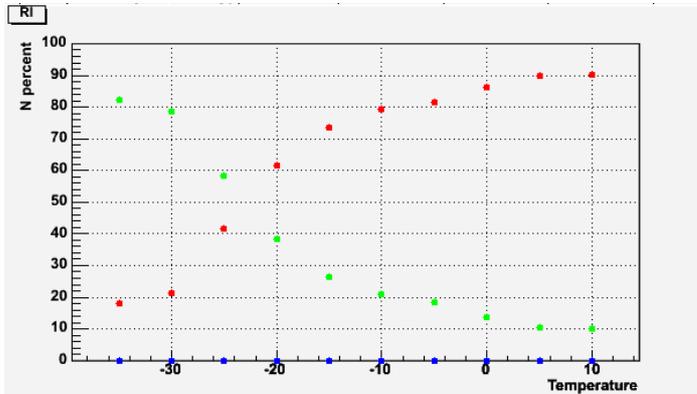


赤: 7[ns]の成分の
光子数の割合

緑: 20[ns]の成分の
光子数の割合

青: 80[ns]の成分の
光子数の割合

North Crystal(B)

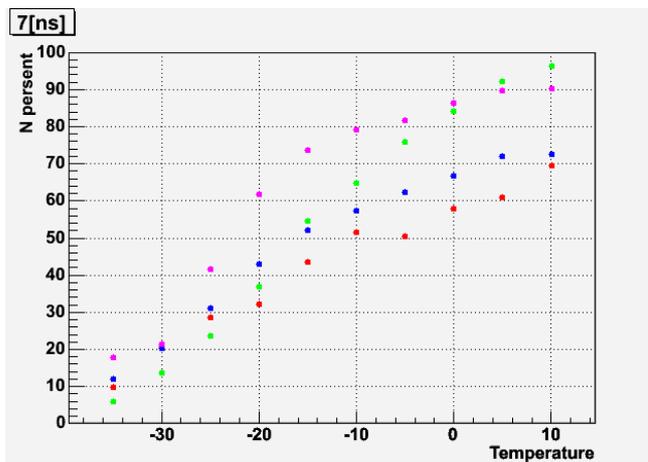


RI&NC

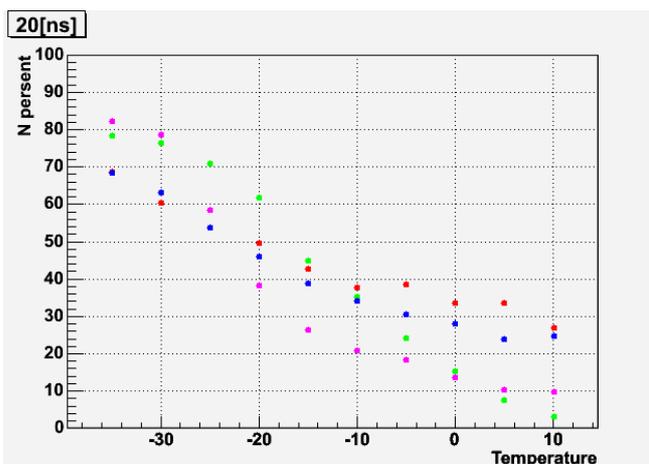
図 4.2-2 ある減衰時間の成分をもつ光子数の全体に対する割合の温度依存性（結晶ごと）

続いて、図 4.2-2 を結晶ごとではなく、同じ減衰時間の成分の結晶による違いを見るために、ある減衰時間の成分をもつ光子数の全体に対する割合を縦軸とし、温度を横軸とし、それぞれ 3 つの成分について図 4.2-3 に示した。赤が North Crystal(A)、青が North Crystal(B)、緑が古河機械金属、桃が RI&NC を表している。

成分ごとに見ると、7[ns]の成分は高温部においては若干 RI&NC と古河機械金属が多いようである。20[ns]の成分においては、高温部では North Crystal(A)、(B)の方が若干高いが、低温部では RI&NC と古河機械金属の方が高くなっている。それは、North Crystal(A)、(B)80[ns]の成分が、低温部で高くなっているからであると思われる。

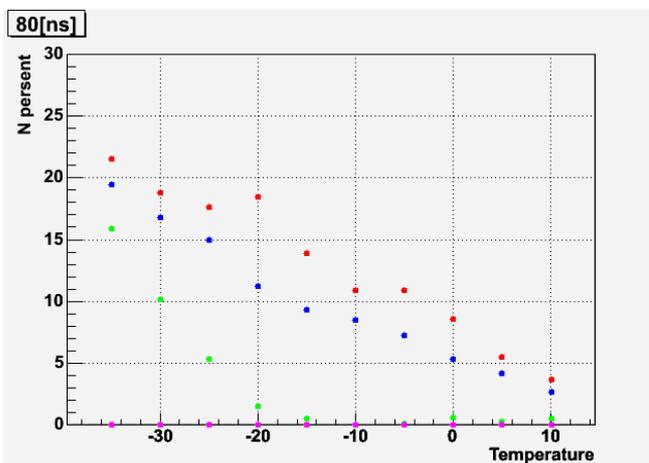


7[ns]の成分の光子数の割合



20[ns]の成分の光子数の割合

赤: North Crystal(A)
 青: North Crystal(B)
 緑: 古河機械金属
 桃: RI&NC



80[ns]の成分の光子数の割合

図 4.2-3 ある減衰時間の成分をもつ光子数の全体に対する割合の温度依存性 (成分ごと)

また、平均減衰時間については、式 2.3.2-1 を用いて図 4.2-4 に示した。赤が North Crystal(A)、青が North Crystal(B)、緑が古河機械金属、桃が RI&NC を表している。

結果はやはり、温度が下がるにつれて平均減衰時間は増加する傾向が見られた。ただ、古河機械金属は、高温部に比べて低温部で急激に平均減衰時間が遅くなっているため、低温で使う場合は応答性は悪くなるようである。

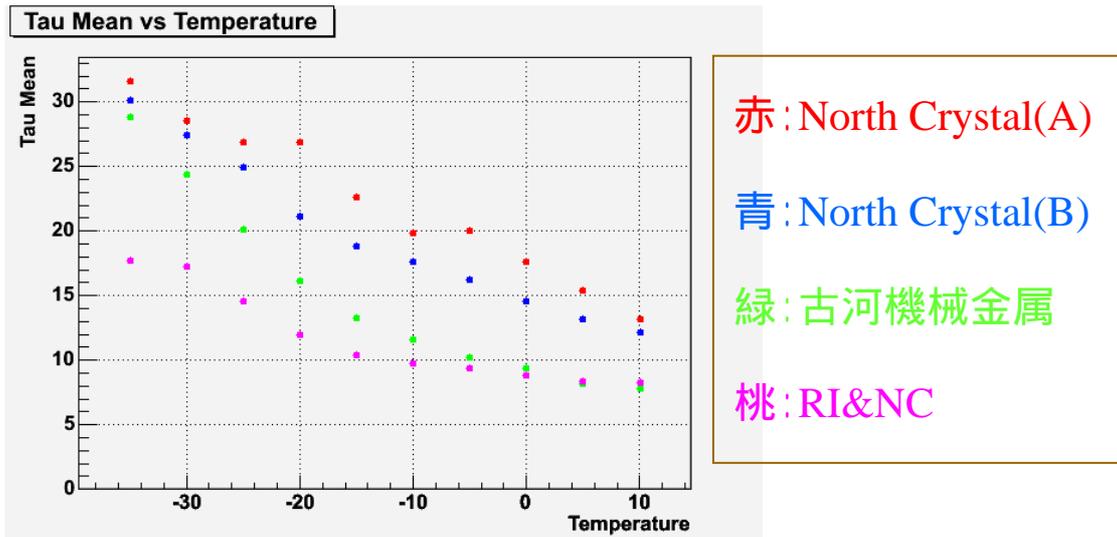


図 4.2-4 平均減衰時間の温度依存性

5 考察

5.1 各減衰時間の成分における光量の温度依存性

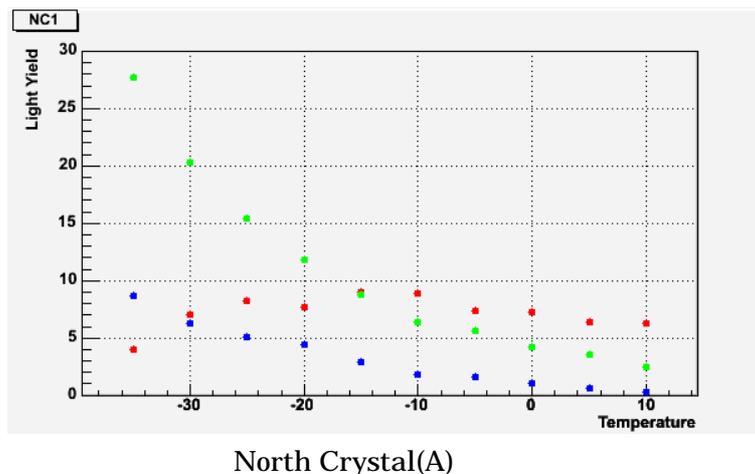
結果から、

- ・ 温度を下げることにより光量が増加していく。その中でも特に光量が多い結晶は NorthCrystal(A)である。ただし、平均減衰時間は最も遅い。
- ・ 温度を下げることにより平均減衰時間が遅くなっている。その中でも最も速いものは RI&NC であるが、光量は少ない。
- ・ North Crystal(B)は、North Crystal(B)と似た傾向を示しているが、減衰時間がやや速く、光量が少ない。
- ・ 古河機械金属は、高温部の減衰時間及び光量の性能については RI&NC に近い性能を示している。しかし低温部では、光量の性能はほぼ同じであるにもかかわらず、減衰時間は遅い成分が急激に増えている。

などのことがいえる。

ここで 4.1 と 4.2 の結果より、各結晶において、3つの減衰時間の成分についての絶対的な光量をグラフにした。それを図 5-1 に示す。赤が 7[ns]の成分の光子数、緑が 20[ns]の成分の光子数、青が 80[ns]成分の光子数を表している。

20[ns]、80[ns]の成分は温度の低下とともに増加している。これは、それぞれの成分の割合も増加しているため、妥当な結果である。7[ns]の成分のものは温度の低下とともに割合が減少する傾向があるので、光量も下がっていくものと思われたが、高温部においては予想に反し、光量がわずかに増えている。



赤:7[ns]の成分の

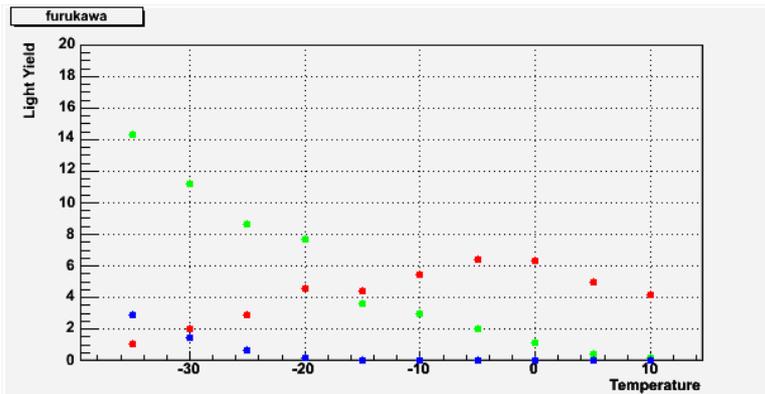
光子数

緑:20[ns]の成分の

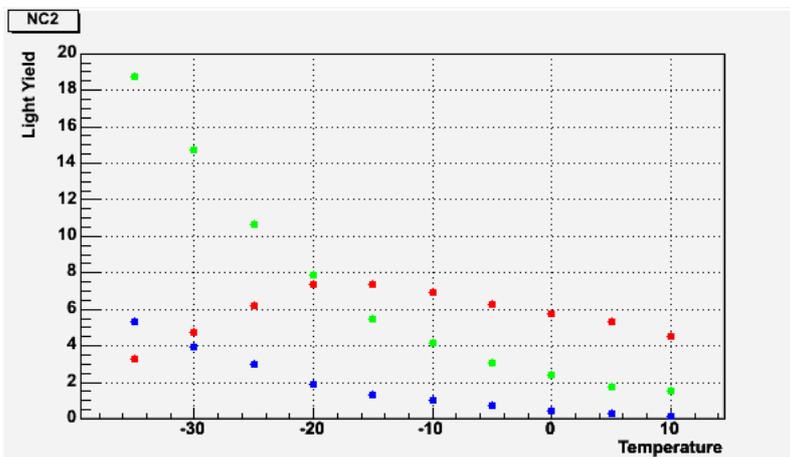
光子数

青:80[ns]の成分の

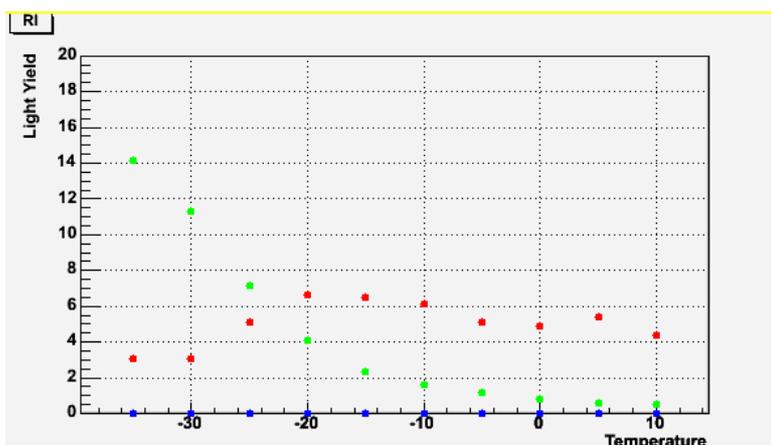
光子数



古河機械金属



North Crystal(B)



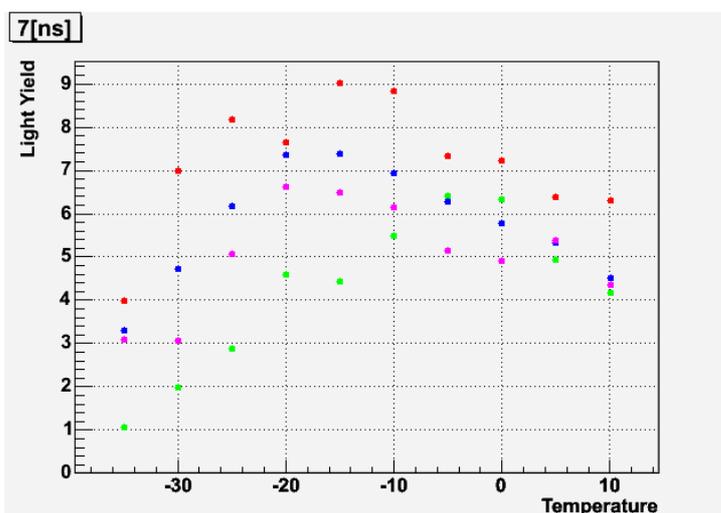
RI & NC

図 5-1 ある成分の光子数の温度依存性 (結晶ごと)

続いて、図 5-1 を結晶ごとではなく、同じ減衰時間の成分の結晶による違いを見るために、ある減衰時間の成分をもつ光子数を縦軸とし、温度を横軸とし、それぞれ3つの成分について図 5-2 に示した。赤が North Crystal(A)、青が North Crystal(B)、緑が古河機械金属、桃が RI&NC を表している。

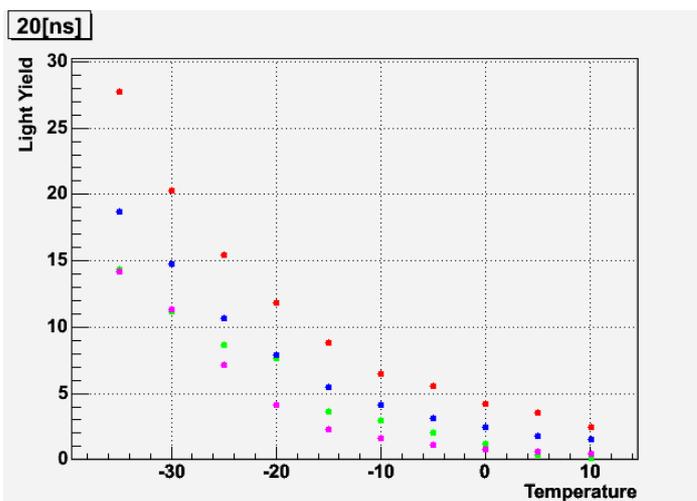
このことより、どの結晶においても、温度を下げることにより減衰時間の遅い成分が相対的に増加していくが、速い成分は単純になくなったわけではなく増加している部分がある、ということがわかった。

そのため、温度を下げていってもある温度までは速い成分が減らないということになる。その点を正確に求めることができれば、PWO の性能を発揮できる温度が求められる。そのためには、その点付近をより細かく測定することが必要である。ちなみに、結晶によりその点は多少違って見えるように見える。

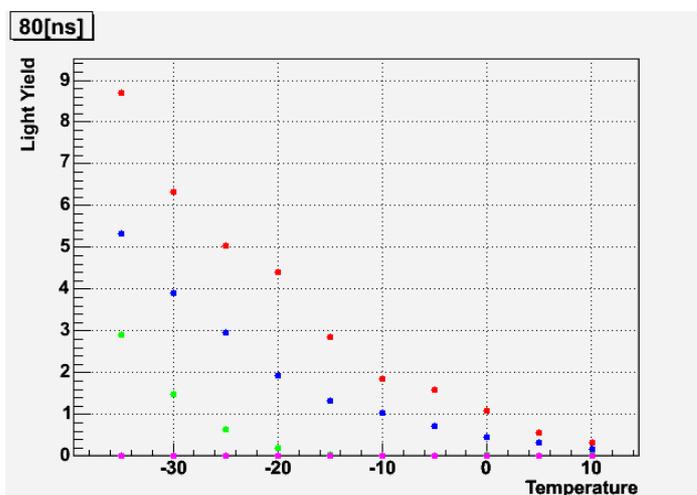


赤 : North Crystal(A)
 青 : North Crystal(B)
 緑 : 古河機械金属
 桃 : RI&NC

7[ns]の成分の光子数



20[ns]の成分の光子数



80[ns]の成分の光子数

図 5-2 ある成分の光子数の温度依存性 (成分ごと)

5.2 アクシデンタルの見積もり

また、今後の改善点として考えられることがひとつある。今回 TDC 分布をフィッティングする際に図 5-3 に赤丸で示した部分をアクシデンタルなものであると思い、定数項を入れてフィットを行った。しかしこの値は、目で見えて与えたものである上に、実際にアクシデンタルなものによって作られているのであれば、エクスポネンシャルとなるはずである。

そのため、バックグラウンドランを行い差し引くことができれば、特に遅い成分についての値が、より正確なものになると考えられる。

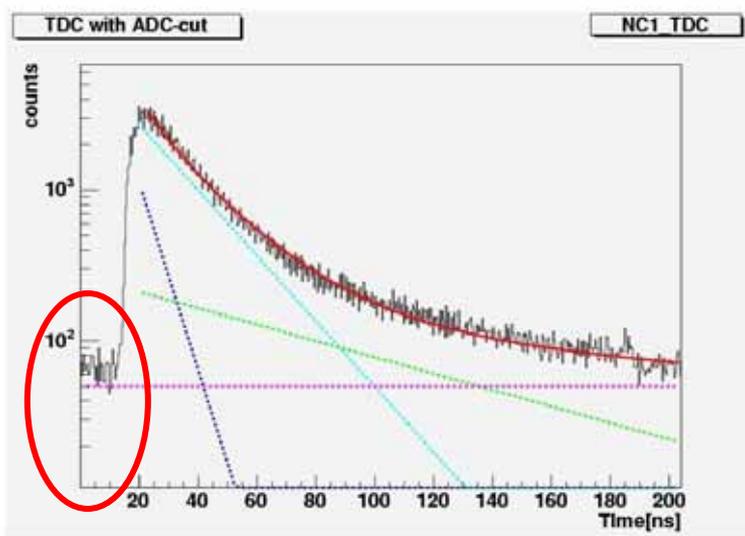


図 5-3 TDC 分布におけるアクシデンタルなストップが現れていると考えられる部分

6 結論

PWO 結晶は、温度を下げることにより、光量が増加する。また、減衰時間の遅い成分が占める割合も高くなっていくが、速い成分は単純に減少するわけではなく、ある点までは増加しているということがわかった。その点は North Crystal(A)は-15 付近、North Crystal(B)、RI&NC は-17 付近、古河機械金属は-5 付近である。この点が、PWO の性能を発揮する最適値である。この点のより正確な値を求めるためには、より精密な測定、解析が必要である。

また、平均減衰時間では、RI & NC の結晶が最も速く、North Crystal(A)の結晶が最も遅いという結果が出たが、North Crystal(A)の結晶は光量が多いため、速い成分の絶対数では RI&NC 社のものより多い。それ故、実際に PWO を使う場合、短い時間間隔(例えば 50[ns])で連続してデータを取る場合を除いては、North Crystal(A)の結晶が、光量及び応答性において優秀であることがわかった。

7 謝辞

本研究を行うにあたり、多数ご指導ご指摘をいただいた、杉立先生、志垣先生、本間先生に感謝致します。また、クオーク物理学研究室の皆様にも、実験や解析を行ううえで大変お世話になりました。忙しい中、いろいろご指導いただき有難うございます。特に、槌本さん、春名さんには多くのアドバイスをいただき、研究を進める上で大変助かりました。

多くの方々のお陰で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。

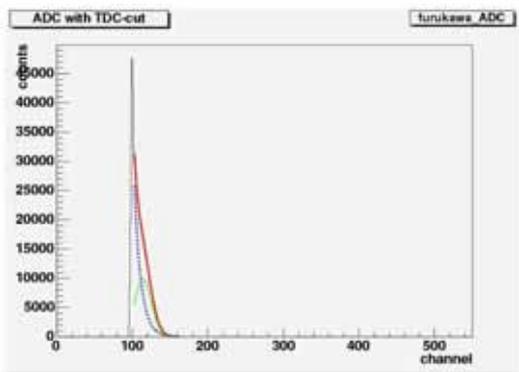
8 参考文献

- [1] Particle Data Group “ The European Physical Journal C ”
- [2] Masaaki Kobayashi, et al., “ Scintillation characteristics of PbWO₄ single crystals at room temperature ” Nucl. Instr. Meth. A333(1993)429
- [3] 小原亮太 2001 年度広島大学修士論文「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」
- [4] 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」
- [5] 渡辺大輔 2004 年度広島大学卒業論文「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の性能評価」
- [6] 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」
- [7] 三浦巧 「放射線計測学」 裳華房
- [8] 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/quark/>」
- [9] 浜松ホトニクス社ホームページ
「http://jp.hamamatsu.com/index_f.html?dir=/&lang=ja&ext=xml」

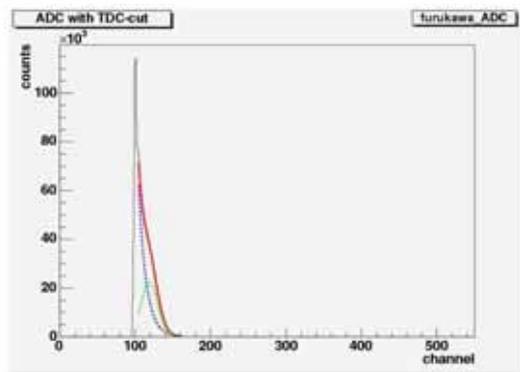
9 付録

本文中に示さなかった図を、以下に記載する。

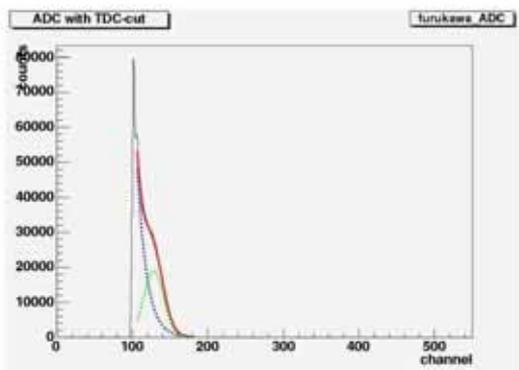
古河機械金属の ADC 分布



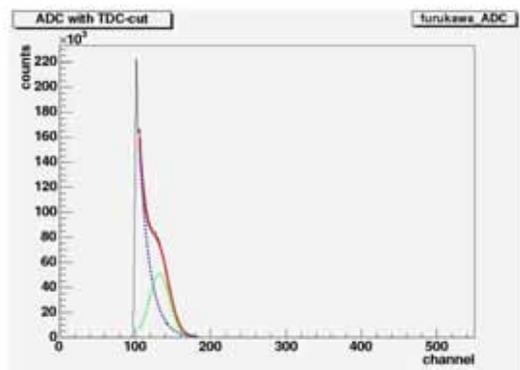
10



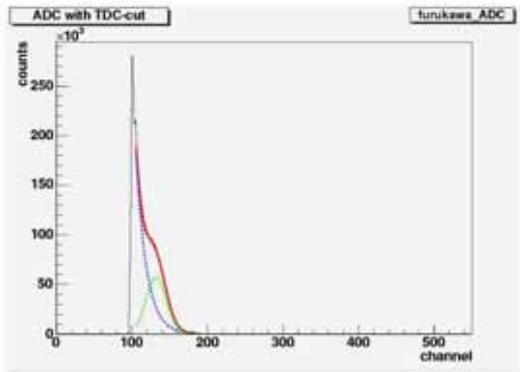
5



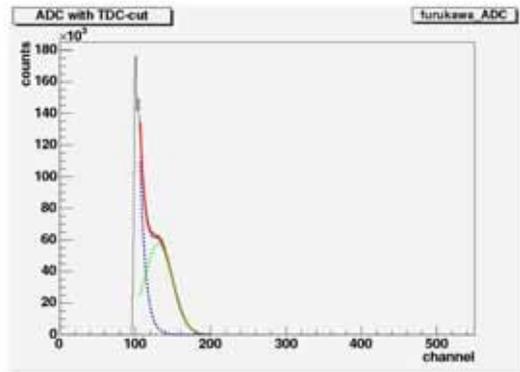
0



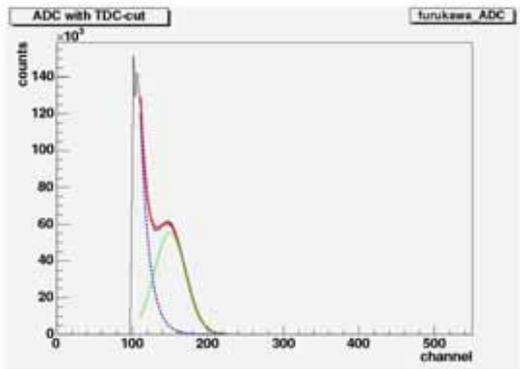
-5



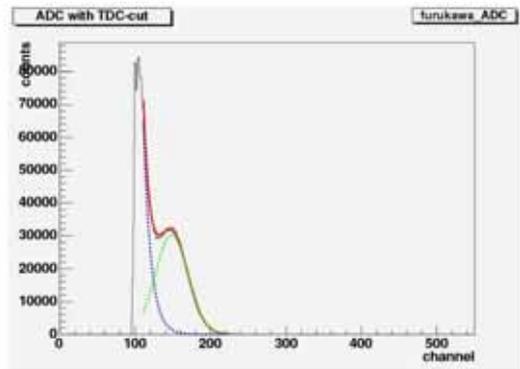
-10



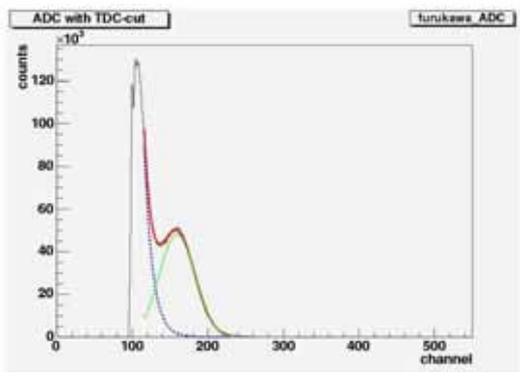
-15



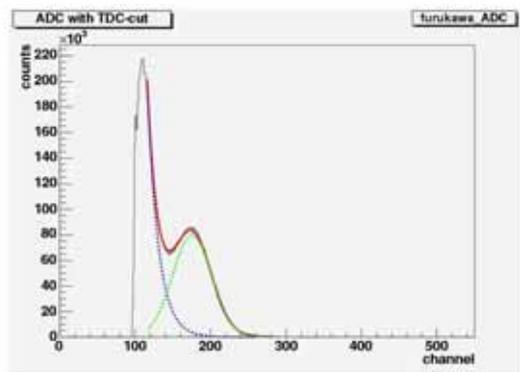
-20



-25

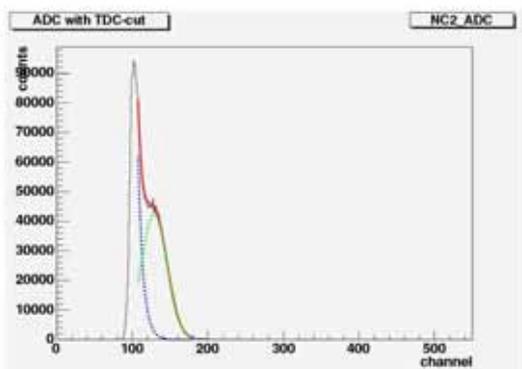


-30

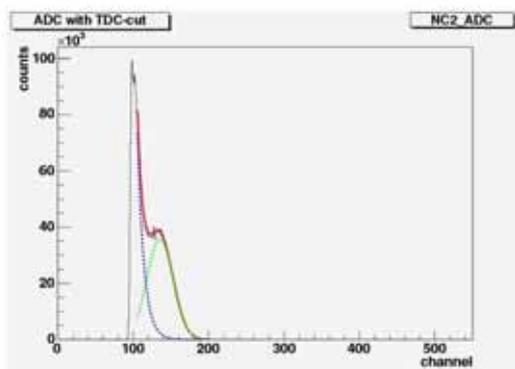


-35

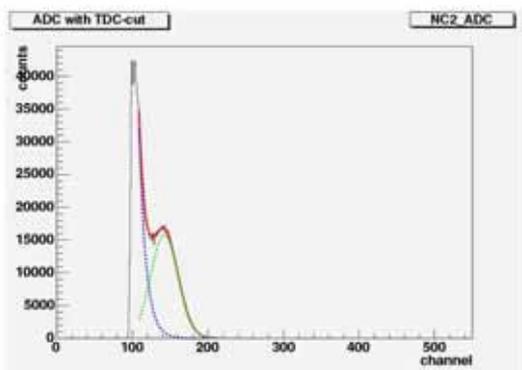
North Crystal(B)の ADC 分布



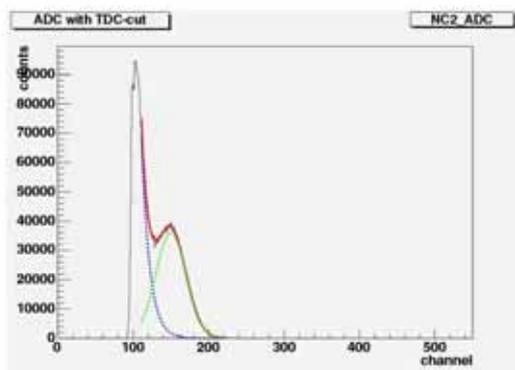
10



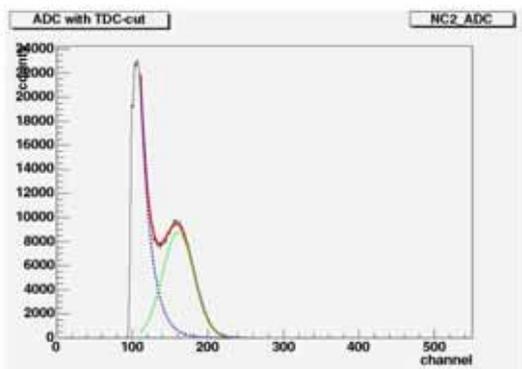
5



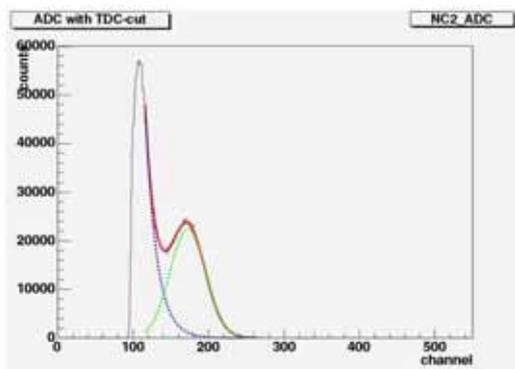
0



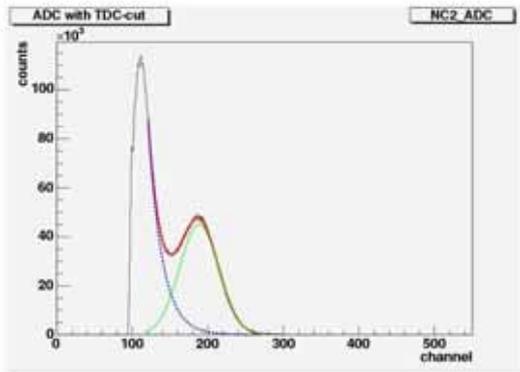
-5



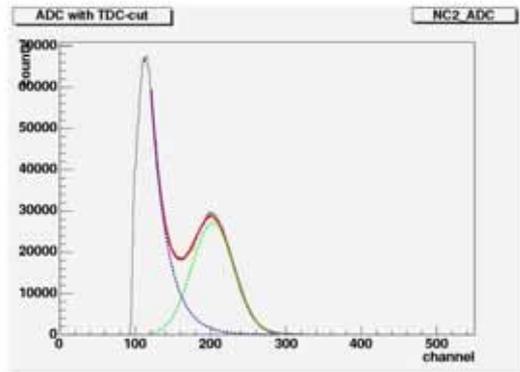
-10



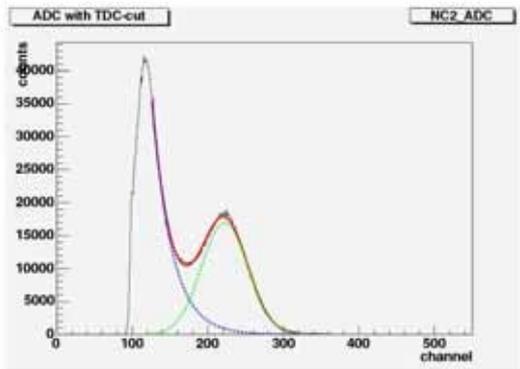
-15



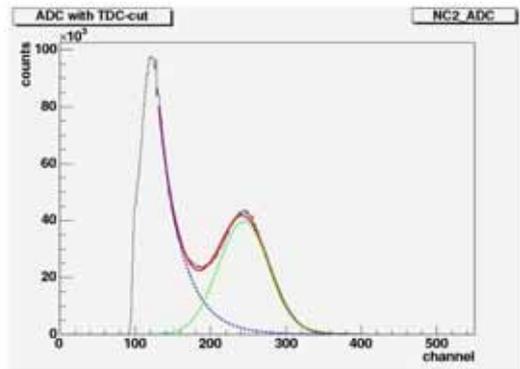
-20



-25

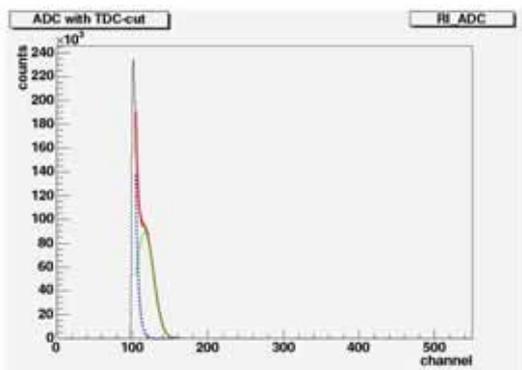


-30

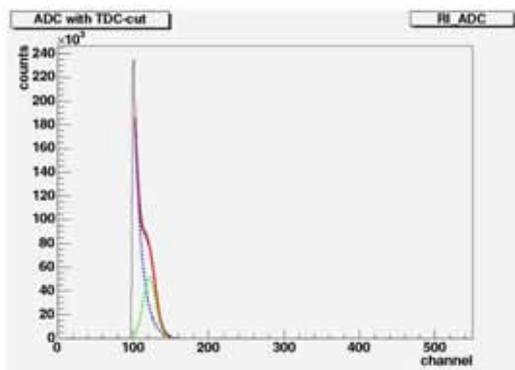


-35

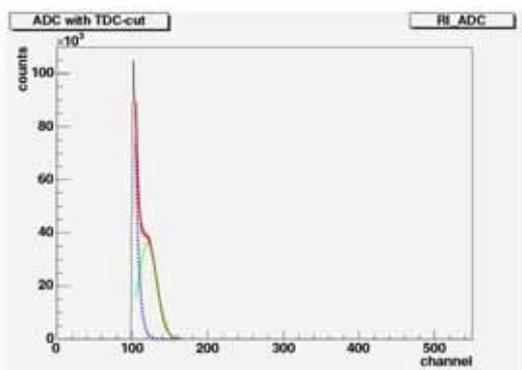
RI&NC の ADC 分布



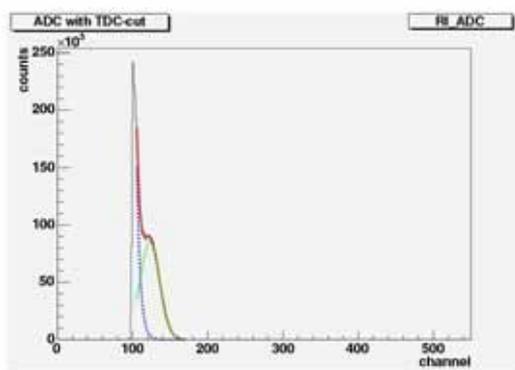
10



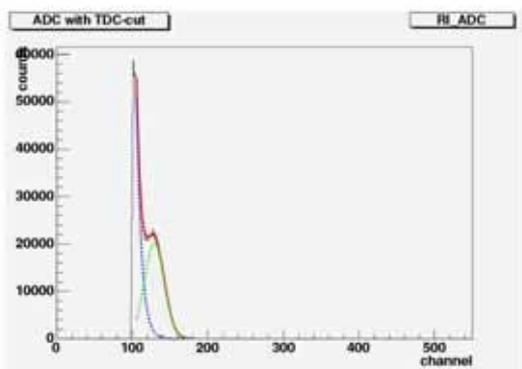
5



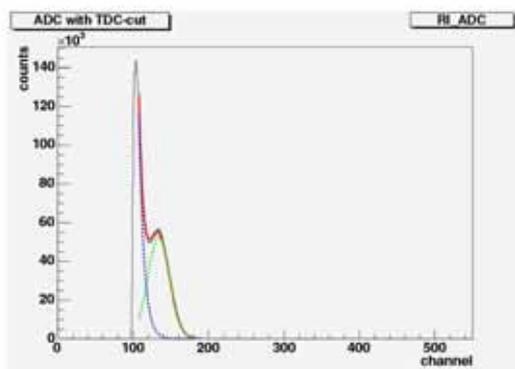
0



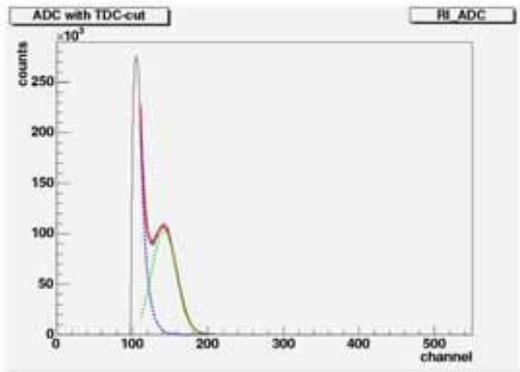
-5



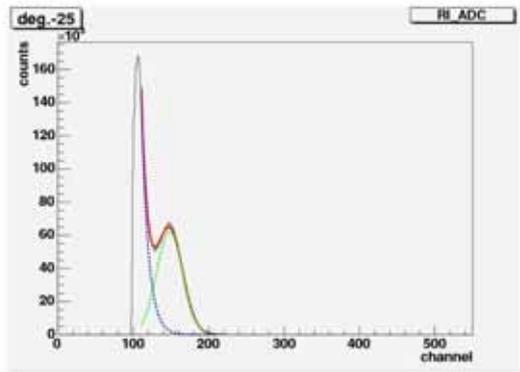
-10



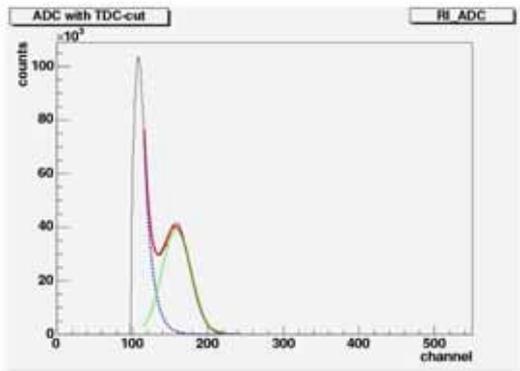
-15



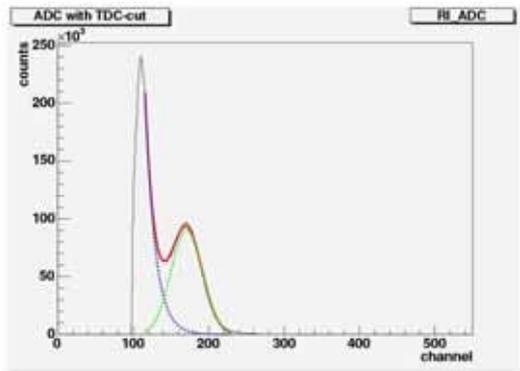
-20



-25

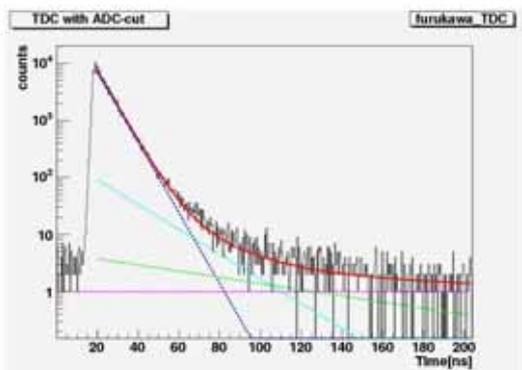


-30

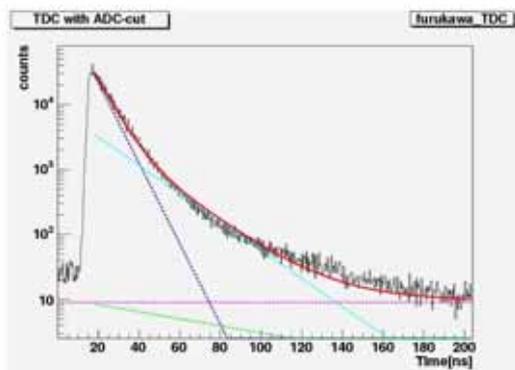


-35

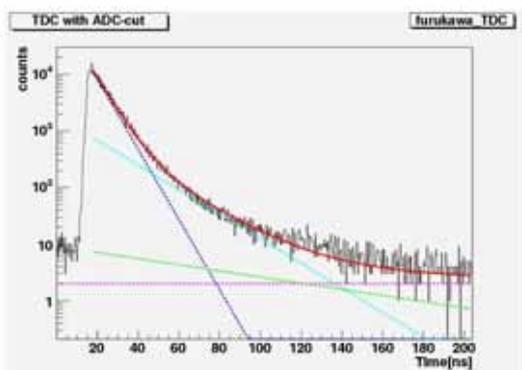
古河機械金属の TDC 分布



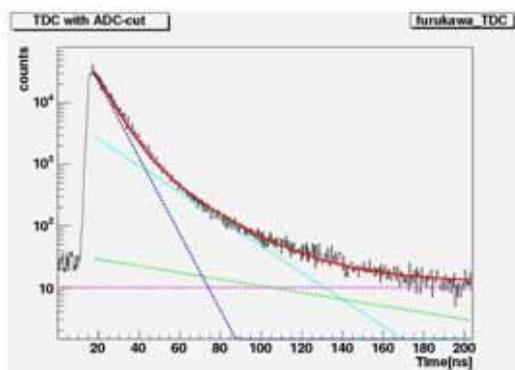
10



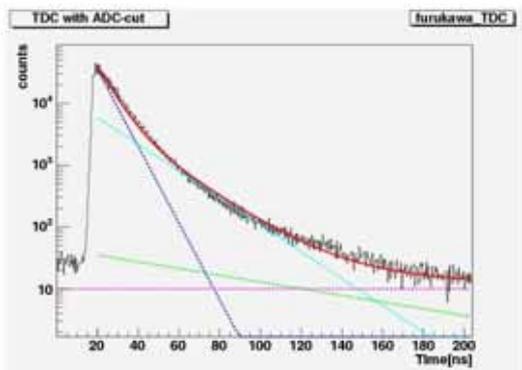
5



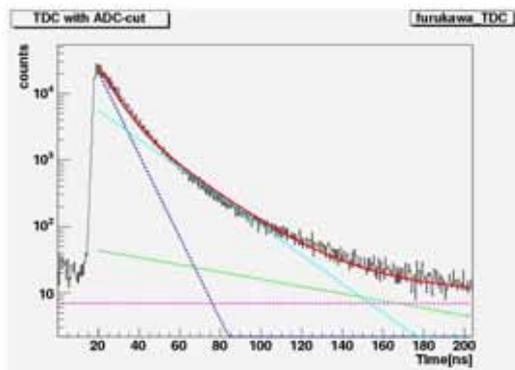
0



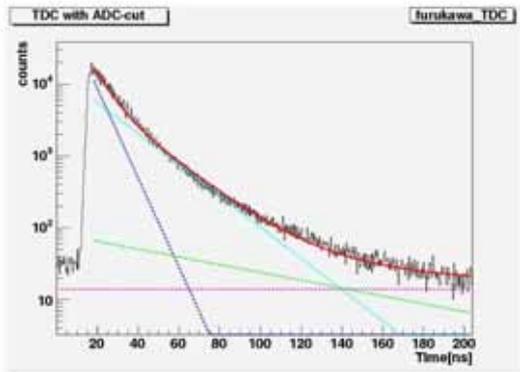
-5



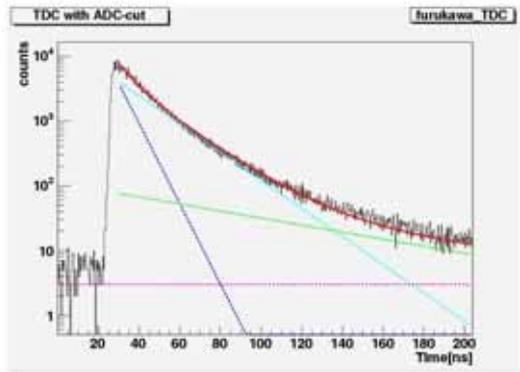
-10



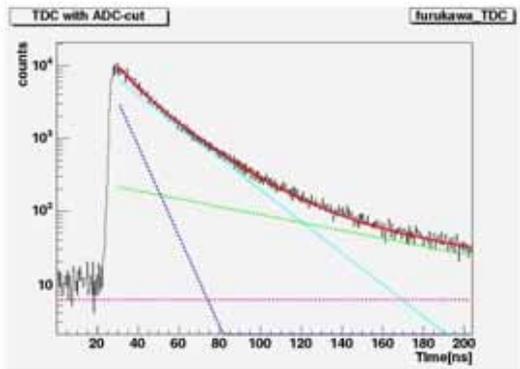
-15



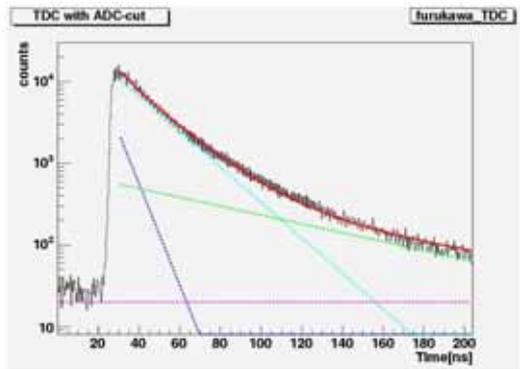
-20



-25

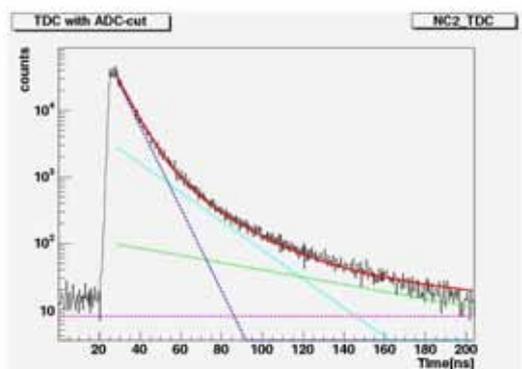


-30

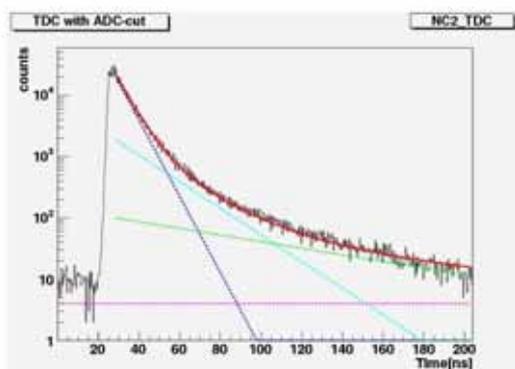


-35

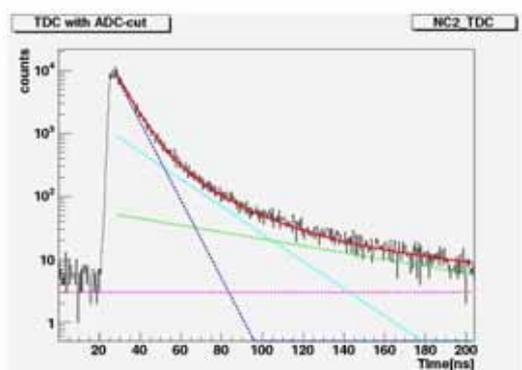
North Crystal(B)の TDC 分布



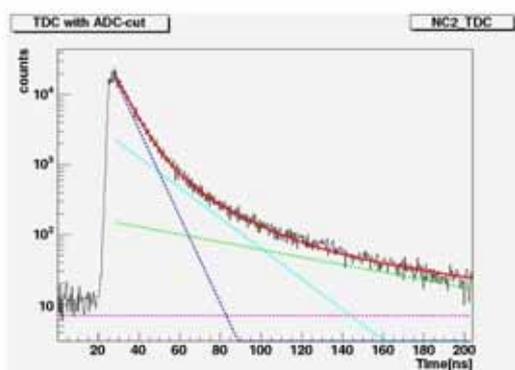
10



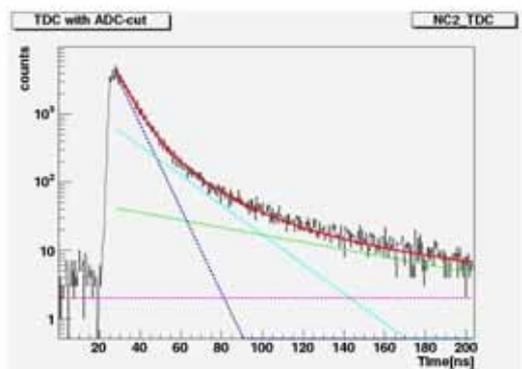
5



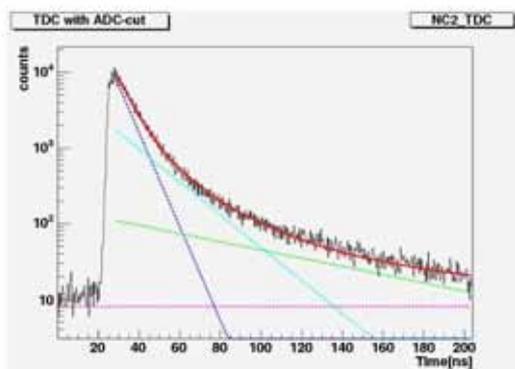
0



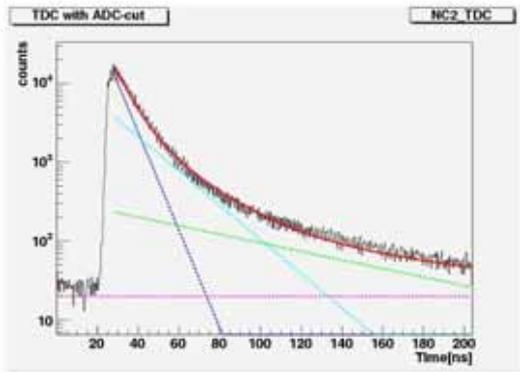
-5



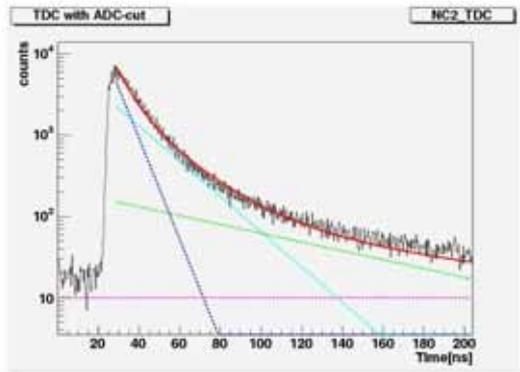
-10



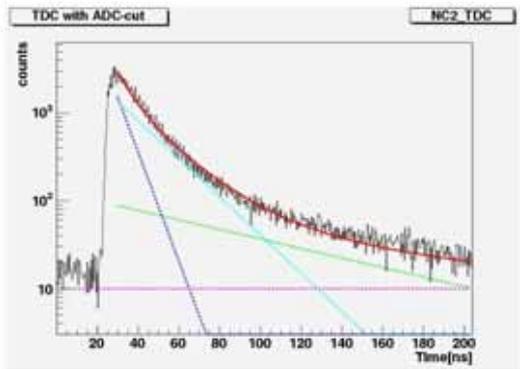
-15



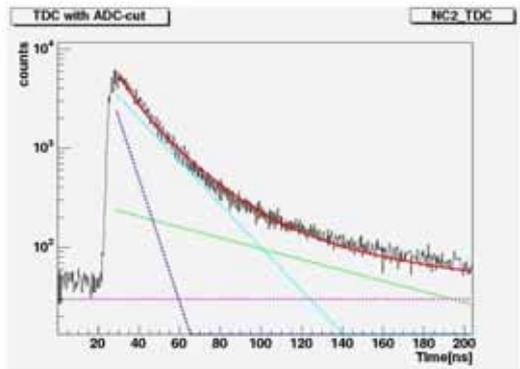
-20



-25

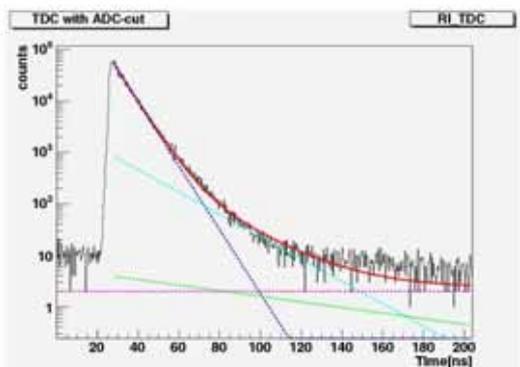


-30

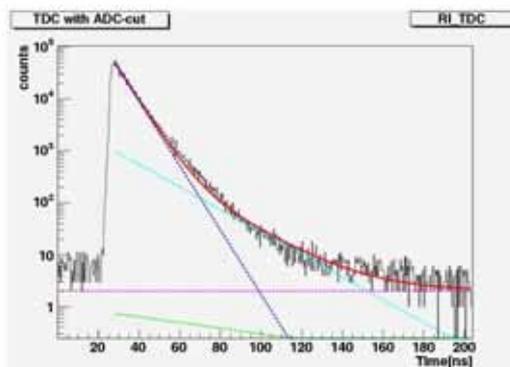


-35

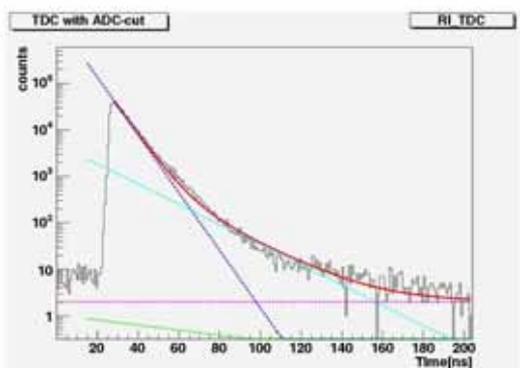
RI&NC の TDC 分布



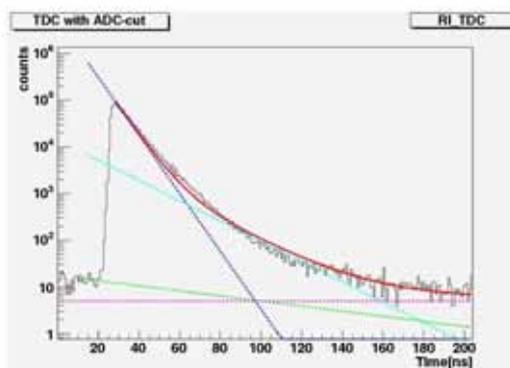
10



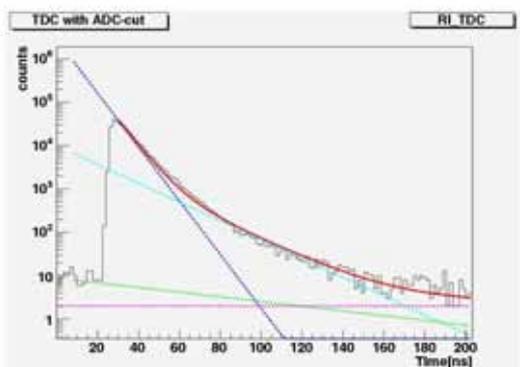
5



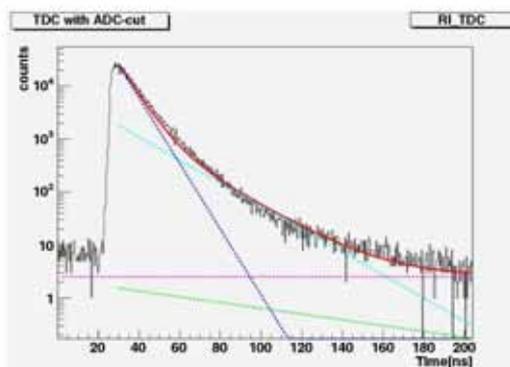
0



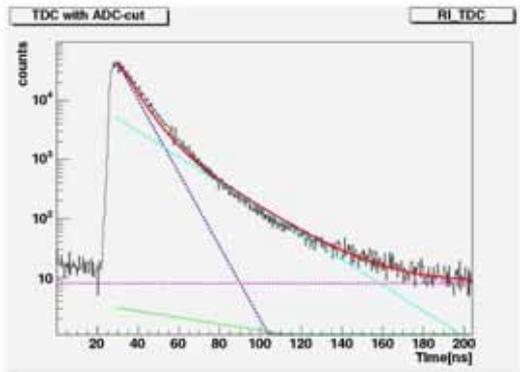
-5



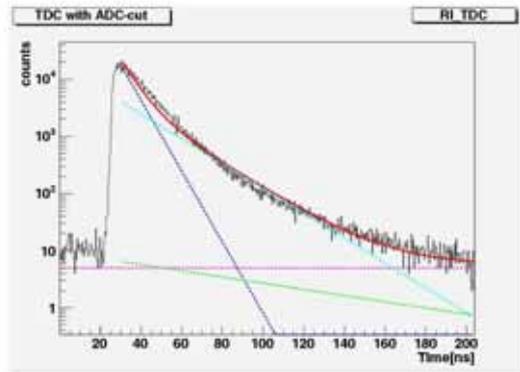
-10



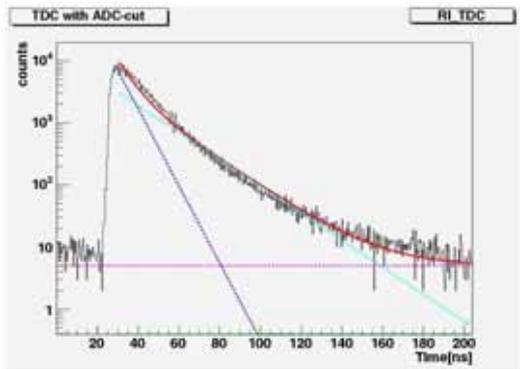
-15



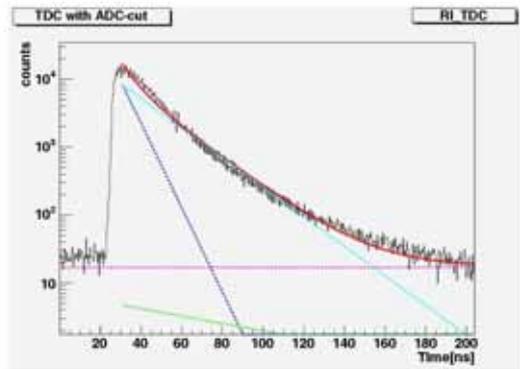
-20



-25



-30



-35