

フッ化セリウム結晶の応答特性の研究

山形大学

クォーク核物性研究グループ 修士2年

山本 正和

平成15年2月7日

目次

第 1 章	序論	4
1.1	研究の目的	4
第 2 章	フッ化セリウム結晶の基本的特性	5
2.1	無機シンチレーター	5
2.2	無機結晶シンチレーターの発光機構	5
2.3	フッ化セリウム結晶の基本的性質	6
2.4	フッ化セリウム結晶の光学的特性	9
2.4.1	励起発光波長	9
2.4.2	透過率	9
2.5	フッ化セリウム結晶の発光原理	12
2.6	フッ化セリウム結晶の開発の経緯	14
第 3 章	ビームテスト	16
3.1	目的	16
3.2	セットアップ	16
3.2.1	ビームライン	16
3.2.2	カウンターの設置	18
3.2.3	トリガー条件	20
3.2.4	フッ化セリウム結晶のセットアップ	24
3.2.5	光電子増倍管の gain 調整	25
第 4 章	データ解析	26
4.1	ビームトラッキング	26
4.1.1	MWPC	26
4.1.2	最小自乗法による fitting 軌跡の決定と位置合わせ	27
4.1.3	MWPC の位置の微調整	28
4.2	ビームを用いたキャリブレーション	31
4.3	電子ビームを入射した RUN の応答	34
4.3.1	エネルギー分解能	39
4.4	獲得光電子数	41
4.4.1	光電子増倍管の gain 測定	41

4.4.2 獲得光電子数の見積もり	44
第 5 章 まとめ	48
5.1 検出器としての評価	48
付 録 A 実験に使用した光電子増倍管について	49

第1章 序論

1.1 研究の目的

カロリメーターは高エネルギー物理学実験で γ 線のエネルギーの測定や hadron と electron の粒子の分別に有用なものであり、最も必要不可欠な測定器の一つである。最近の高エネルギー物理学の実験では稀な事象を追い求め、さらに高いイベントレートな環境での実験が多くなってきた。

そこでさらに高密度で radiation length が短く、蛍光発光時間の短い結晶シンチレーターが望まれてきている。さらに大きな規模の実験にも対応するために大量の結晶が必要になることから安価な結晶であればなお素晴らしいということになる。このような背景の中から、フッ化セリウム結晶の開発は CERN の crystal clear collaboration をはじめ世界各地の研究所などで 1980 年代から盛んに行われてきた。1 インチ程度の大きさの小さな結晶の製作は比較的容易であるのだが、検出器として用いるほどの大型の結晶の製作はまだ極めて難しい状況である

日本でも筑波にある KEK(高エネルギー加速器研究機構)の E391a グループが応用光研工業株式会社との共同研究により開発が行われてきた。最近になってようやく結晶の大型化に成功したのだが、大型のフッ化セリウム結晶はまだ高エネルギーの実験に用いられたことがないため、結晶シンチレーターとしての基本的な性能や実用性をビームテストを通して詳細に調べる必要がある。

この試作品である大型フッ化セリウム結晶のプロトタイプを高エネルギーの電子線やハドロンビームを用いてテスト実験を行ない、本論文ではそのシンチレーターとしての基本的な性能を「直線性」、「エネルギー分解能」、「獲得光電子数」の面から評価してその結果を報告するものである。

第2章 フッ化セリウム結晶の基本的特性

2.1 無機シンチレーター

物質中で発光するシンチレーション光を利用して、電離性放射線を検出する検出器をシンチレーション検出器という。シンチレーション検出器として求められる望ましい性能を以下に示す。[1][4]

- 荷電粒子の運動エネルギーを高い効率で検出可能な光に変換できること。
- その変換が直線的であり、広範囲にわたり光の検出が付加エネルギーに比例すること。
- より多くの光を得るために、発生する光の波長にたいして透明であること。
- 誘起したルミッセンスの減衰時間が短く、高速のパルスを発生できること。
- 実際の実験で検出器として使用するために十分な大きさの結晶の製作が可能であること。
- シンチレーション光を光電子増倍管で効率良く検出するため、結晶シンチレーターの屈折率がガラスに近いこと (約 1.5)。
- シンチレーション光の発光波長領域が光電子増倍管の良い感度領域であること。

が挙げられる。実際にこれらの条件をすべてそろえるようなシンチレーション物質は存在し得ないので用途に応じた選別が必要となる。

シンチレーション検出器には、主にプラスチックシンチレーターや無機結晶が用いられる。無機結晶は原子番号が大きく、密度が大きいため γ 線の検出器としてよく用いられる。プラスチックシンチレーターと比べると一般的には光の減衰時間は長い、電離エネルギーあたりの発光量がプラスチックシンチレーターと比較すると非常に大きい。よってシンチレーション発光による統計的揺らぎが小さいために優れたエネルギー分解能が得ることが出来るのである。ほとんどの無機シンチレーターは蛍光に必要な活性化物質を含む、少量の不純物を含んだアルカリ金属であり、特にヨウ化アルカリの結晶が多い。例を挙げると NaI(Tl), CsI(Tl) などがある。(カッコの中が不純物であり、蛍光に必要な活性化物質である。) しかし、本論文で述べるフッ化セリウムは純粋な無機結晶シンチレーターである。

2.2 無機結晶シンチレーターの発光機構

結晶の電子状態が外部から与えられたエネルギーによって励起されてそのエネルギーが光として発光する現象をルミネッセンス (luminescence) という。また外部からの励起が行なわれている

間の光の発光を蛍光 (fluorescence) といい、外部からの励起が絶たれた後にも続く光の放出を燐光 (phosphorescence) という。[5][11][12]

結晶の発光機構を電子遷移のタイプによって分けると、物質の固有な遷移による intrinsic luminescence と、不純物の混入による格子欠陥の準位が寄与する遷移による extrinsic luminescence とに分けられる。中でも前者は電導帯の電子と価電子帯の正孔の輻射再結合によるものと、光によって生成された電子と正孔がクーロン力によって結合した複合粒子による励起子の自己束縛 (STE) によるものに分けられる。励起子は結晶中を自由自在に動きまわるのだが、アルカリハライド結晶やその他のイオン結晶中では、励起子は結晶格子との相互作用が強いために結晶格子の変形 (格子緩和という) を引き起こし局在化する。この状態を自己束縛励起子と呼び、励起子はその後光を発光して消滅する。

無機結晶シンチレーターに電離性放射線を入射すると電離性放射線による刺激により、伝導帯 (Conduction Band) に励起された自由電子はいくつかの遷移を経て基底状態に戻る際、あるいは別の活性化物質による準基底状態に遷移するときや荷電子帯 (Valence Band) の自由正孔と際結合したときなどに過剰なエネルギーを光として放出する場合がある。

自由電子と自由正孔が直接再結合した場合には、禁制帯幅 (エネルギーギャップ) に相当するエネルギーの光 (おもに紫外領域) を発する。その他にも前述の通り自由励起子にも発光に大きく影響する部分もあり、これが欠陥に捕らえられ自己束縛励起子 (STE) となり消滅して発光する。

結晶が活性化物質などの不純物を含んでいたり、空格子点など格子欠陥がある場合は、それらにより様々なエネルギー準位が禁制帯中に作られる。これらの準位を介して電子と正孔とが再結合することによって光を放出する。(特に可視領域) 不純物が遷移金属や希土類などのような特殊な原子の場合は、原子内配置によるエネルギー準位が禁制帯中に作られ、不純物が高い励起状態から低い励起状態に遷移する際に光を放出するのである。

2.3 フッ化セリウム結晶の基本的性質

純粋な無機シンチレーター結晶であるフッ化セリウムは、1980年代後半ぐらいから盛んに研究が行われるようになった結晶であり、KEKやCERNで性質が明らかにされてきている。フッ化セリウム結晶の基本的な性能は以下の表に示したとおりである。フッ化セリウム結晶は密度が高く、放射長 (radiation length) が短い。

放射長というものは、電子のエネルギーが $1/e$ になる物質の長さを表すもので X_0 で表される。物質の密度を d 、原子番号を Z とすると

$$X_0 = \frac{1}{d \cdot z(z+1)} \quad (2.1)$$

という関係式であたえられる。このフッ化セリウム結晶は密度が大きいために放射長が短くなるのである。この放射長が短いという性質から粒子が入射した際に、相互作用によって起こるシャワーの横のもれだしも小さくなるのである。つまりモリエル半径¹が小さいということから、サイズが小

¹入射エネルギーの90%以上が含まれる円筒の半径

発光量 (NaI=100 として)	4~5
発光時間 (ns)	$5_{fast}, 30_{slow}$
発光波長 (nm)	$310_{fast}, 340_{slow}$
光量の温度依存性 ($\%/C^{\circ}$)	0.05
密度 (g/cm^3)	6.16
放射長 (cm)	1.7
モリエル半径 (cm)	2.8
屈折率	1.68
潮解性	なし
圧縮強度 (dyn/cm_2)	3.1×10^9
ヤング率 (dyn/cm_2)	1.1×10^{12}
熱膨張率 ($/C^{\circ}$)	1.3×10^{-5}

表 2.1: フッ化セリウム結晶のシンチレーターとしての性能

さくても十分検出器としての性能を発揮できるのである。大強度のビームを用い稀な現象の観測をねらう高エネルギー物理学実験では、粒子の空間的密度が高いということもあり、このような環境の中でフッ化セリウム結晶は優れた性能を持っているということがいえるだろう。

シンチレーター結晶として重要な要素である発光波長であるが、この発光波長領域に高感度である光電子増倍管がそれほど高価なものでないということも大きな魅力の一つに挙げられる。その他にも NaI には及ばないが発光量も他の結晶と比べると遜色はない。特筆すべきことは、発光時間が短いということとアルカリハライド結晶によくみられる潮解性がないということである。発光時間が 30(ns) と大変短いということは、高い放射線計数下の実験に向いているということである。また潮解性がないということや光量の温度依存性にも優れているということから、長時間の実験にも適していると言えよう。

また屈折率がガラス (約 1.5) に近いので光電子増倍管へ信号を読み出す際の損失が少ない、圧縮強度やヤング率が通常の貴金属に近い値を持っていることも特徴として挙げられる。特に熱膨張率に関して、アルミ ($2.313 \times 10^{-5}/C^{\circ}$) や鉄 ($1.18 \times 10^{-5}/C^{\circ}$) に近いという点は、カロリメーターとして検出器のセットアップを組み上げる際の大きな長所になるであろう。大量に結晶を使用する大型の実験では結晶が機械工学的に扱いやすい性質かどうかという点も重要になって来る。

これらを踏まえても、フッ化セリウム結晶は非常にすぐれた特徴を持っていると言えるであろう。代表的な無機結晶シンチレーターの性能を次に示す。[2][3]

結晶物質	CeF_3	BaF_2	BGO	CsF	CsI(pure)	PWO	NaI(Tl)	GSO
密度 (g/cm^3)	6.16	4.9	7.13	4.64	4.53	8.2	3.67	6.71
放射長	1.7	2.1	1.1	2.0	1.86	0.92	2.6	
発光時間 (ns)								
早い成分	5	0.6	300	2.8	10or36	10	230	60
遅い成分	30	620		4.4	≥ 1000	40	150[ms]	
発光波長 (nm)								
短い成分	310	220	480	390	300	430	415	430
長い成分	340	310			≥ 400			
屈折率	1.68	1.56	2.15	1.48	1.8	2.2	1.85	1.9
NaI(Tl)を 100とした場合の 発光量	4~5	5	7~10	6	3.7	0.26	100	20
放射線耐性 (rad)	10^{6-7}	10^{6-7}	10^{4-5}		10^{4-5}		10^3	$\geq 10^8$
潮解性	なし	少しあり	なし	非常にある	少しあり	なし	あり	なし
問題点		quartz PMT slow comp	slow	cost	UV-glass PMT slow comp	low light yield	slow	cost

表 2.2: おもな無機結晶シンチレーターの性能比較

2.4 フッ化セリウム結晶の光学的特性

2.4.1 励起発光波長

分光器 (HITACHI F-4500形 分光蛍光光度計) でフッ化セリウム結晶のサンプルの励起発光波長を測定した。10φ×15mmの大きさのサンプルを4つ測定した。各サンプル名は001506d, 001506u, 991501d, 991501uであり、同じNoは同じつぼで生成されたものを表す。dはつぼの下部で生成されたものでuは上部を表す。

使用した分光器の光源はキセノンランプである。キセノンランプからでた光は励起側分光器に入って回折格子によって波長を選択されたのち一部は測定試料に照射され、残りはモニタ検出器に向かう。測定試料からの蛍光は蛍光側の分光器に入り、光電子増倍管にて検出される。各測定は励起波長200nm～300nmの範囲で行なった。結果は図に示す。図のY軸が励起波長、X軸が発光波長を表している。

励起波長では約270nm、発光波長では284nmのところにピークがあるのがわかった。

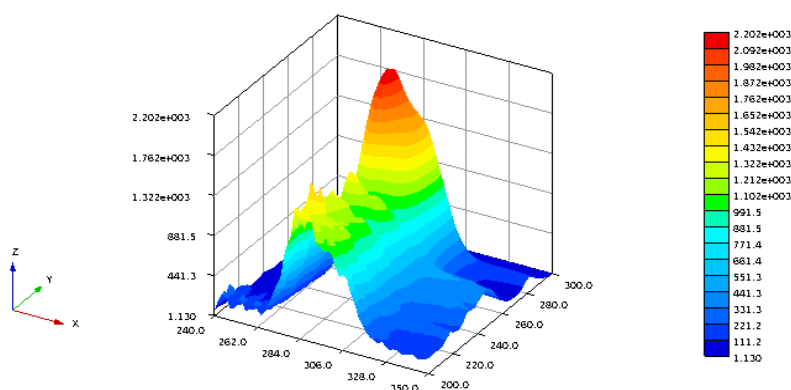


図 2.1: サンプル名 001506d

2.4.2 透過率

サンプルの透過率も測定した。使用した分光器は(日立、U-3210/U-3410形自記分光光度形)光源として、ヨウ素タンゲステンランプと重水素ランプを用いている。光源から出た光は測定試料側と何もないリファレンス側とにわかれており、それらを比較することにより透過率を測定する。測定された光は光電子増倍管を経て、デジタル変換される。変換されたデータはコンピューターに入力されて、対照信号、試料信号、ゼロ信号とに分別されて記憶され、対照信号は予め設定された基準値と比較することにより電圧が制御される。透過率は(試料信号-ゼロ信号)/(対照信号-ゼロ信号)で得られる。²透過率の測定範囲は波長180nm～700nmの範囲である。グラフの横軸は波長(nm)縦軸は透過率を表す。

²正確にいうと試料なしで100%のキャリブレーションを行なっている。

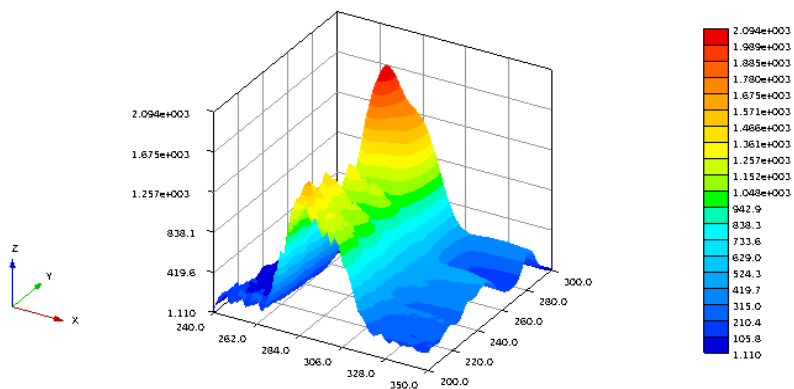


図 2.2: サンプル名 001506u

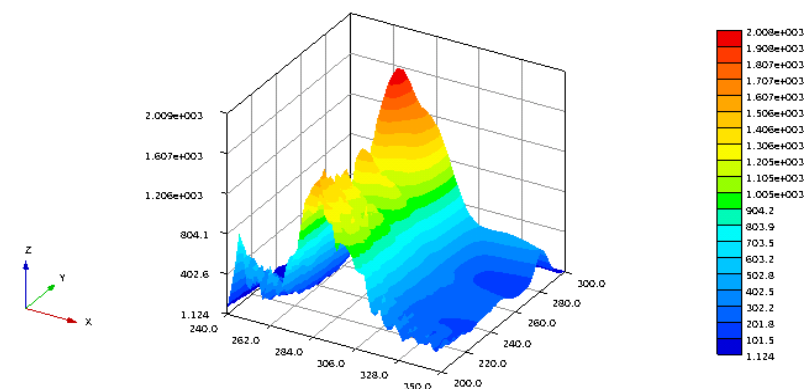


図 2.3: サンプル名 991501d

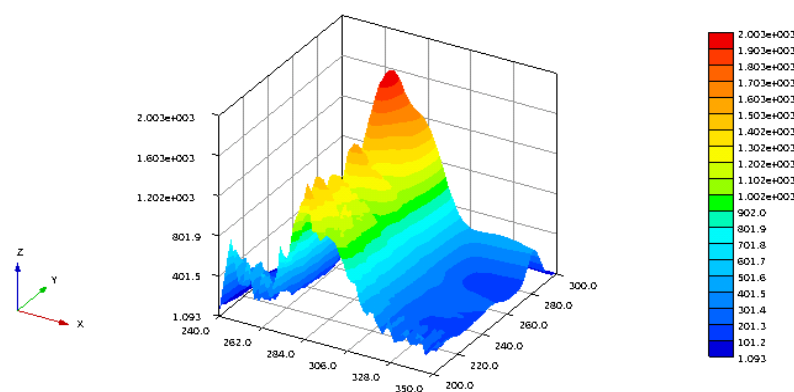
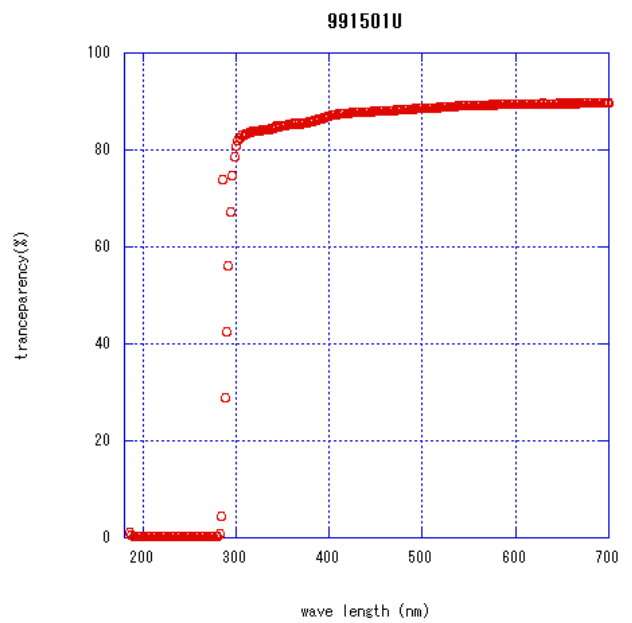
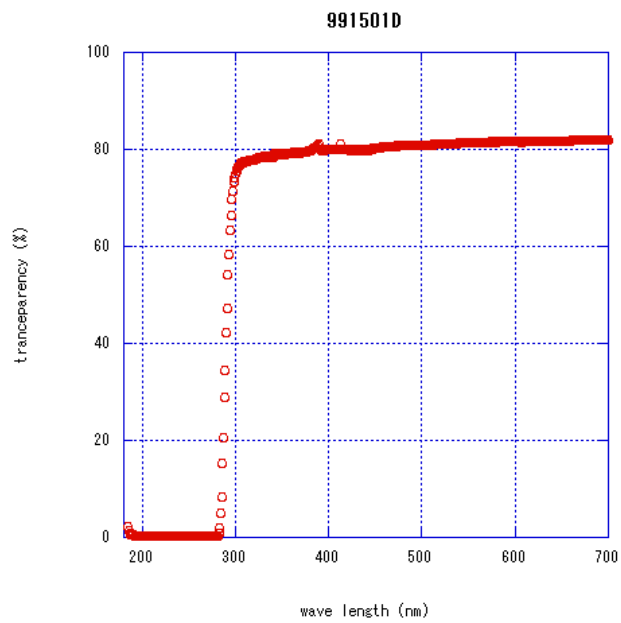
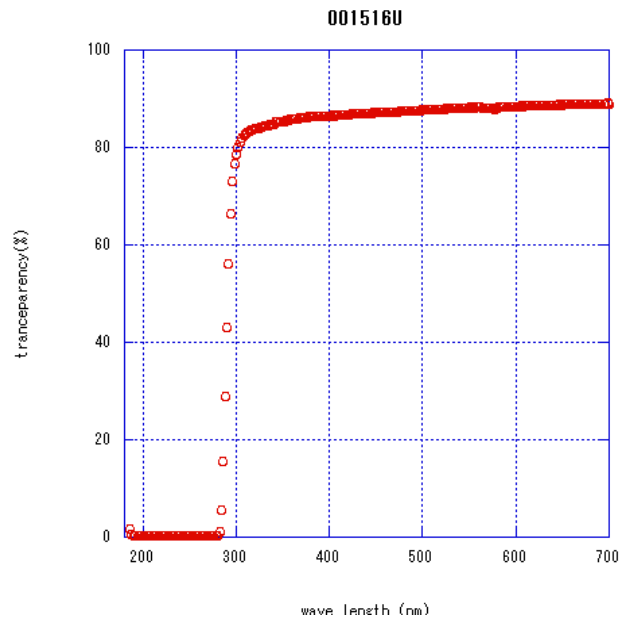
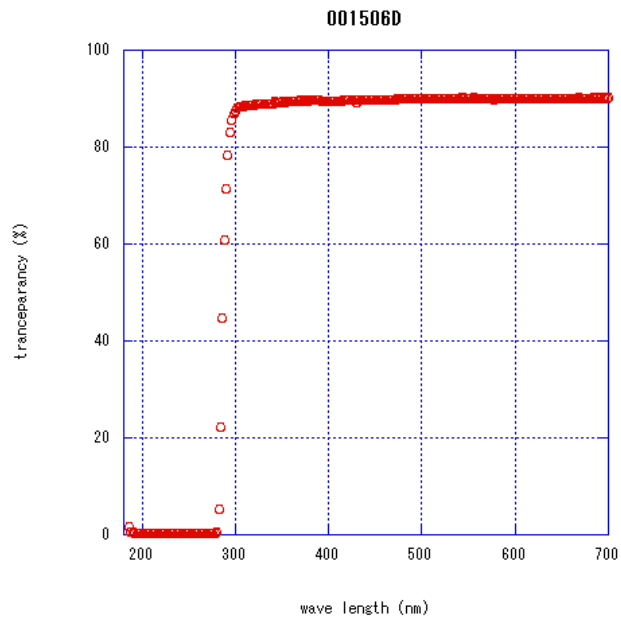


図 2.4: サンプル名 991501u



どのサンプルも約 300nm のところから急激に透過率が下がり、280nm を下回るとほぼ透過率が 0 になっていることが見受けられ、また発光領域で吸収が無いことがわかる。これは、結晶が励起するので、300nm 以下の光は結晶に吸収されてしまっているからだと思われる。

2.5 フッ化セリウム結晶の発光原理

フッ化セリウム結晶は、原子番号 57~71 のランタノイド (希土類) に属する Ce 原子を含む結晶である。おもな発光原理は $5d \rightarrow 4f$ の電子軌道のエネルギー準位間の電子遷移による発光である。純粋な結晶の発光過程には主なものとして自由励起子の崩壊による発光、格子欠陥、空格子等による色中心からの発光などである。実際はこれらは温度や共存する不純物によって失活されやすい特徴があり、光の強度が弱い。このため、安定で再現性のある光を放出するために、刺激エネルギーを発光エネルギーに効率良く変換するための仲介役をする発光中心が必要になる。フッ化セリウム結晶では発光中心となるものは Ce^{3+} イオンである。光や γ 線などにより励起されて生成された電子、正孔対を効率良く再結合することにより光を発する。また、発光中心が自由励起子を束縛することで、自己束縛励起子 (STE) をつくることで、この再結合により光を発光するのである。

フッ化セリウムの発光機構を図に示す。

図中の過程は結晶に光を照射した結果生成される電子や正孔、または励起子によって励起された Ce^{3+} イオンの遷移による発光を示したものである。(1)(2)

(3) の過程は、このエネルギー準位間で励起子が遷移するときの発光である。[4][5]

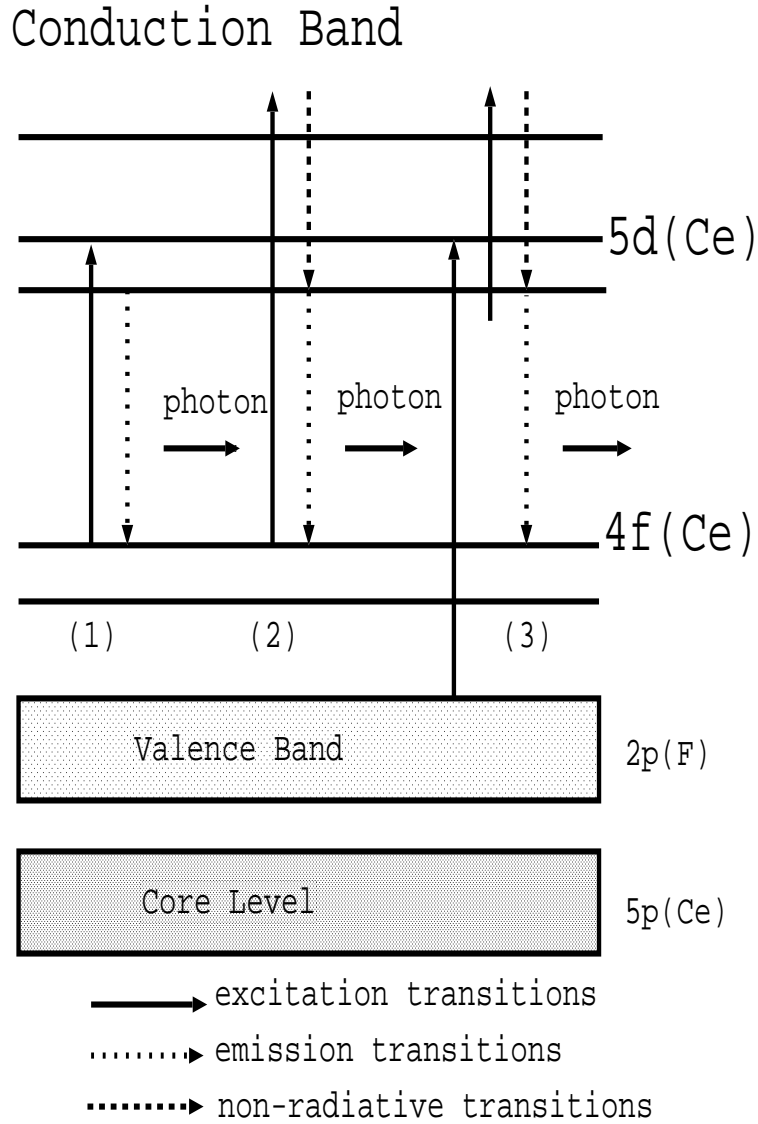


図 2.5: フッ化セリウム結晶の遷移の図

2.6 フッ化セリウム結晶の開発の経緯

1990年代以降フッ化セリウムの結晶の開発が着々と進められてきている。1インチ程度の大きさの結晶の作製は容易なものとなってきたが、検出器として十分使用出来るほどの大きさ(長さが10倍ぐらい、つまり容積にして100倍程度の大きさのもの)では、困難をきわめている。その大きな二つの要因が KEK の E391a collaboration による研究開発で分かった。その二つとは

- 熱膨張率に異方性があり、均質でないこと。
- 結晶を大型化すると小型の性能に比べて性能が落ちる。(透過率等の悪化)

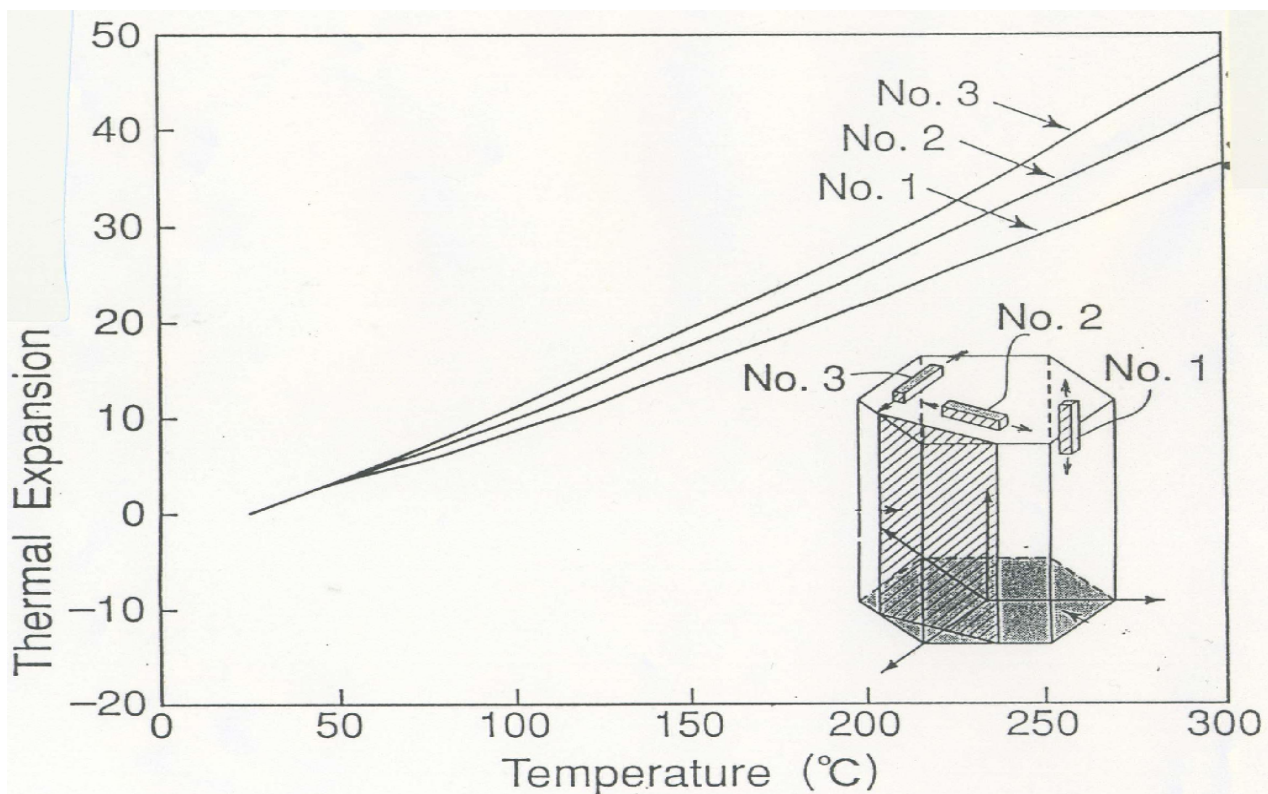


図 2.6: 熱膨張率の異方性 No1 は結晶面 (004)、No2 は No1, No2 に垂直な方向、No3 は結晶面 (300) である。横軸は温度 ($^{\circ}\text{C}$)、縦軸は熱膨張率である。

フッ化セリウム結晶は六法晶形の単純立方格子の結晶構造を持つ。各結晶面に対する異方性は上の図に示した通りである。最大にして No.1 と No.3 では約 13%もの違いが見られてしまうために育成された結晶が多結晶であると、結晶冷却の際にひびがはいて割れてしまう場合がある。結晶が割れてしまうのを防ぐために、完全な単結晶としてフッ化セリウム結晶を育成しなくてはならない。

これをふまえ KEK E391a グループと応用光研工業株式会社と共同で、フッ化セリウム結晶を大量に低コストで製作出来る方法を模索してきた。現在ではブリッジマン法(引き下げ法)をしっかりと

まもることで効率よくフッ化セリウム結晶の製作する方法が確立したのである。ブリッジマン法は、種結晶の長さ、炉内の温度分布や引下げの速度(これを結晶成長速度という)などの最適化をおこなうことにより、直径2インチ、長さ30(17.6 X_0)センチまでという結晶の製作に成功した。

この製法に用いている新型のるつぼを図に示す。このるつぼは先が非常に細くなっており、その構造が独特の温度勾配を生み出す。さらに同時に7本の結晶を引き上げることが出来るという画期的なるつぼで特許を取得した。このるつぼで製作した結晶には引下げの前半に比べ、後半の部分が透過率の悪化がみられるのは否めない。これは CERN の crystal clear collaboration でも KEK E391a グループでも同じ結果がみられており、理由としては不純物の混入、あるいは高温の状態で不安定な状態ができてしまったためと思われる。[2][6]

現在のフッ化セリウム単結晶の開発状況としては、大型化は可能になったが均質性にムラがあるといったところである。しかし、品質としては着実に向上しており無機結晶シンチレーターとしての十分な性能をもつ結晶の完成は遠くないことと思われる。



図 2.7: 新型のるつぼの様子

第3章 ビームテスト

3.1 目的

現段階では大型のフッ化セリウム結晶はまだ試作状況である。よってビームテストによる性能の報告は稀である。この大型フッ化セリウム結晶が実際にカロリメーターとして使用されるにはまだまだ性能が未知の部分が多いので、使用される高エネルギーの電子やハドロンを当て、その応答をみることによりカロリメーターとしての性能を評価する必要があるのである。

高エネルギー加速器研究機構で実験を行った。ここのビームラインでは最高 $4\text{GeV}/c$ までの運動量を持ったハドロンと電子をサンプルに照射することができる。そこでフッ化セリウム結晶にハドロンと電子のビームを入射し、高エネルギー粒子に対する応答特性について調べた。

3.2 セットアップ

3.2.1 ビームライン

ビームテストを行なった π^2 ビームラインの様子を図 3.1 に示す。 π^2 ビームラインでは、陽子シンクロトロンにて 12GeV まで加速された陽子がリング内に設置された内部標的を叩くことにより発生する二次ビームを使用している。

内部標的で発生した二次ビームは 10° 方向に取り出され、四重極マグネットや双極マグネットによって、 π^2 ビームラインに導かれる。ビームには電子や π^- 、陽子や陽電子、 π^+ などが含まれ、最高運動量 $4.0\text{GeV}/c$ である。

今回のビームテストでは運動量 $1.0\text{GeV}/c \sim 4.0\text{GeV}/c$ のビームを $0.5\text{GeV}/c$ ステップで使用した。

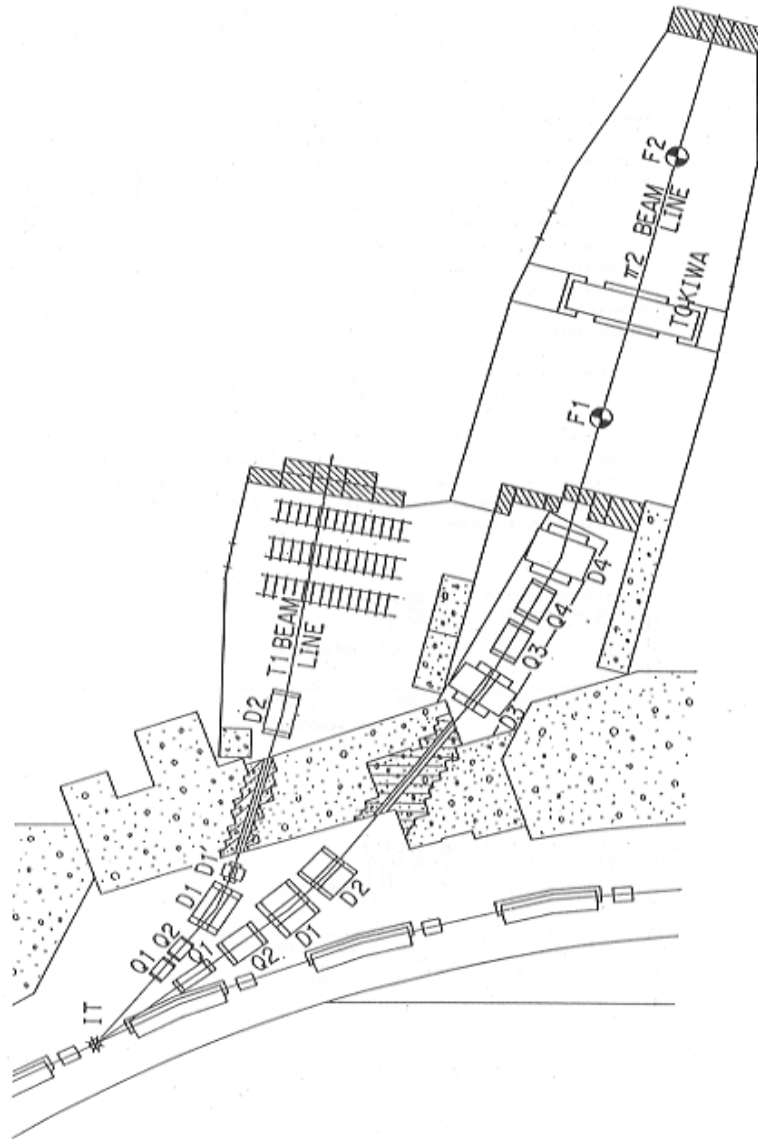


図 3.1: ビームライン

3.2.2 カウンターの設置

カウンターの設置の様子を次項に示す。プラスチックシンチレーションカウンターを S1~S5 まで 5 台設置し、粒子識別の為にチェレンコフカウンターを 2 台。粒子の軌跡を決定するために、MWPC(multi wire propotional chamber) を 3 台設置してある。

2 台のチェレンコフカウンター (C1,C2) には radiator として CO_2 ガスが 1 atm で封入されている。radiator として 1atm の CO_2 を用いたのは、気温 $20C^\circ$ で事前の計算では $\beta > 0.99959$ となりチェレンコフ光を発光する運動量のしきい値は e^- では $P_{th} > 17.84MeV/c$ 、であり π では運動量 $P_{th} > 4.87GeV/c$ となることから、今回のビームテストの運動量の範囲は $1.0GeV/c \sim 4.0GeV/c$ なので十分粒子の識別ができると判断したからである。

S1~S5 までの 5 台のプラスチックシンチレーションカウンターのうち S1 と S3 は TOF(Time of Flight) カウンターとして使用した。TOF カウンターとは粒子の飛行時間によって粒子を識別するものである。S3 カウンターのシグナルを TDC(Time to Digital Converter) のスタートカウンターとし、S1 カウンターをストップカウンターとした。この TOF を測定する際には 1 本の光電子増倍管でシグナルを読み込むと粒子の通過位置によって時間のブレが生じてしまうため、S1 と S3 は両方ともにプラスチックシンチレーターを両側から 2 本の光電子増倍管でシグナルを読み出しシグナルの平均時間 (Mean Time) をとることにより入射粒子の位置による時間のブレを極力少なくしている。S1,S3 カウンターの距離は 9.0125m であり、運動量が $1GeV/c$ の領域の π と陽子の時間差は約 10.86ns、 π と重陽子の時間差は約 33.51ns であり e^- と π では約 0.29ns である。

結晶の直前に置かれている S4 カウンターは大きさが $6mm \times 10mm \times 10mm$ という非常に小さいプラスチックシンチレーターをとりつけてあり、結晶の中心に入射したビームのイベントを取り出せるように設置している。結晶の後方に設置した S5 カウンターはオフラインの解析の際にハドロンの突き抜けのイベントをセレクトできるようにした。

3 台の MWPC はワイヤーの間隔が 2mm で x 方向、y 方向ともに 48 本のワイヤーにより粒子の通過位置の特定を行う。3 つの MWPC のヒットの位置からさらに詳細な粒子の軌道を導くことにより、入射ビームの位置が特定出来る。封入しているガスは Ar と CO_2 ガスの混合気体ガス (65%-35%) を用いている。

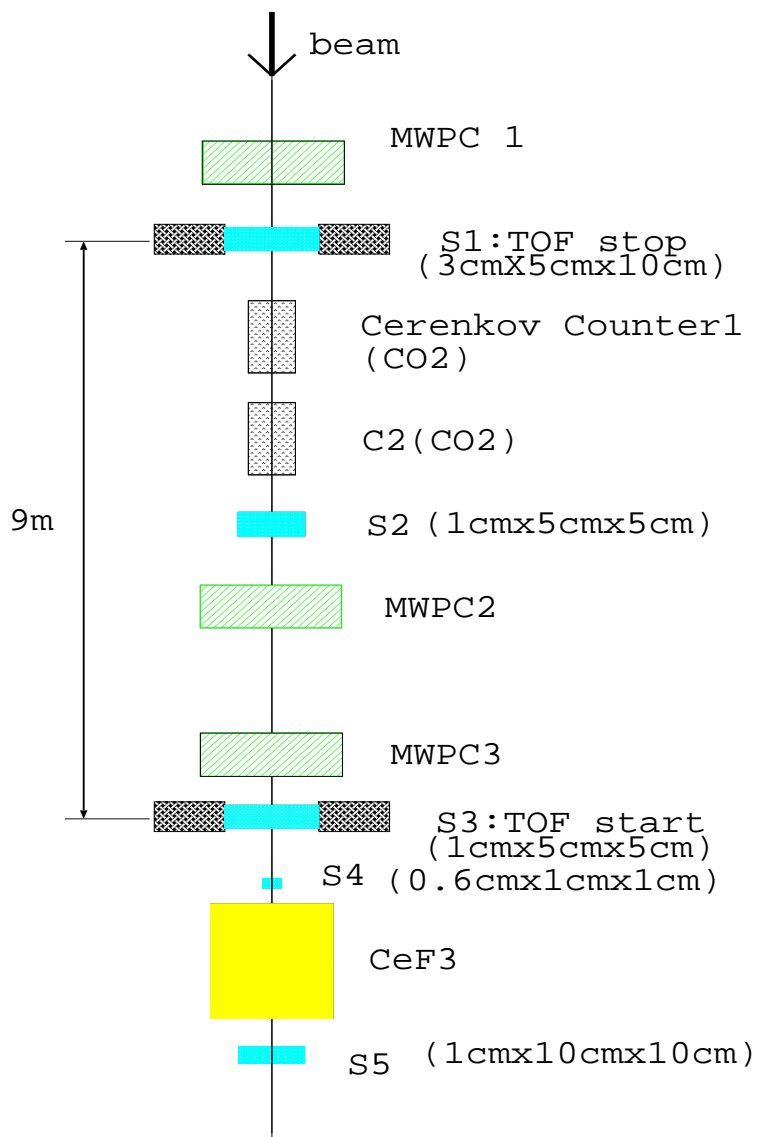


図 3.2: カウンターのセットアップ

3.2.3 トリガー条件

図 3.2 のセットアップ図と図 3.3 のロジック図における対応は以下のとおりである。

図 3.2 におけるカウンター名	回路図
TOF stop counter (right)	S1R
TOF stop counter (left)	S1L
trigger s2	S2
TOF start counter (right)	S3R
TOF start counter (left)	S3L
trigger s4	S4
trigger s5	S5
Cerenkov counter 1	C1
Cerenkov counter 2	C2

入射粒子の条件は S1、S2、S3 すべてのカウンターを通過することを条件とし、この中のトリガーカウンターの組合せにより粒子識別を行っている。

e^- のトリガー条件は $(C1 * C2) * (S1 * S2 * S3)$ である。前述のチェレンコフ光の発光の閾値運動量から、Cerenkov counter が光ったら通過粒子は e^- だと断定出来るからである。さらに、C1、C2 を両方光らすことを条件にしたのは、ビームに含まれる π などの他の粒子がチェレンコフカウンターなどを叩いて e^- 粒子を叩きだし、それによるチェレンコフ光の発光などの可能性があるからである。そのようなアクシデンタルなイベントをできるだけ排除するようという理由からである。

ハドロンのトリガー条件は $(C1 * \bar{C2}) * (S1 * S2 * S3)$ である。もちろんチェレンコフカウンター C1、C2 が光るようなイベントは e^- のイベントだとみなして排除してある。理想的には S5 カウンターも参加させて突き抜け条件も入れられればいいのだが、イベント数と日程の関係によりすこしでも多くのイベントを稼ぎ出そうということで参加させなかった。

pedestal チャンネルの安定性を見るために、各 run のたびに pedestal run をいれてある。

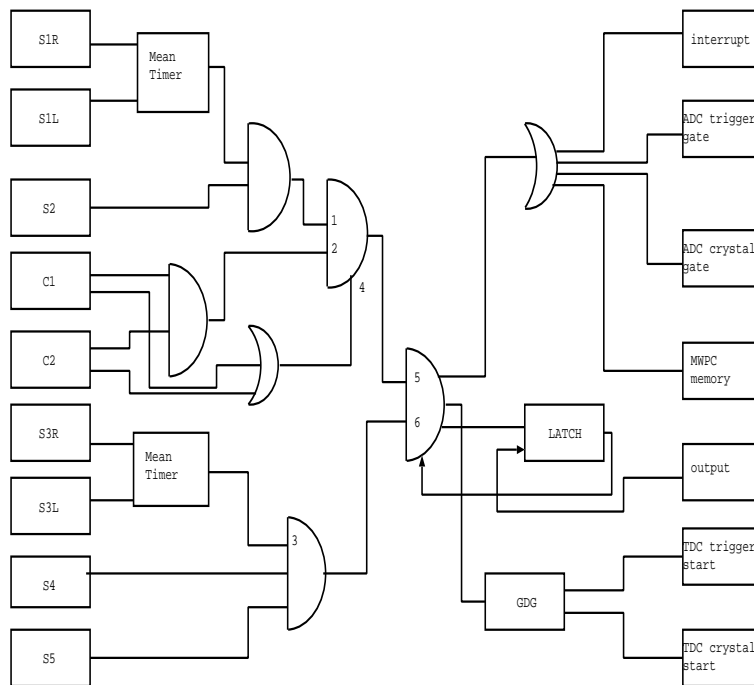


図 3.3: ロジック図

回路図の TDC のスタートのタイミングは S3 カウンターの Mean Timer のタイミングで決めてある。またフッ化セリウム結晶に取り付けられた光電子増倍管の ADC の gate width は 300ns となっている。

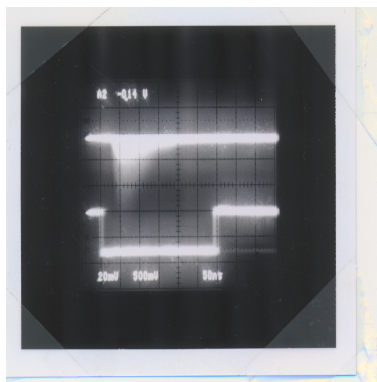


図 3.4: オシロスコープでみた ADC crystal のシグナルとゲートのタイミング

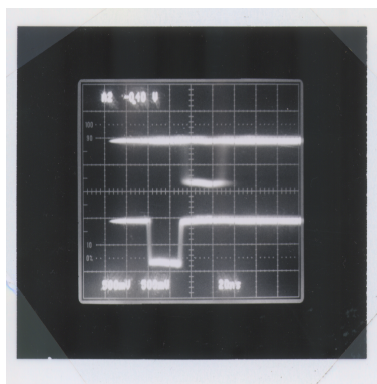


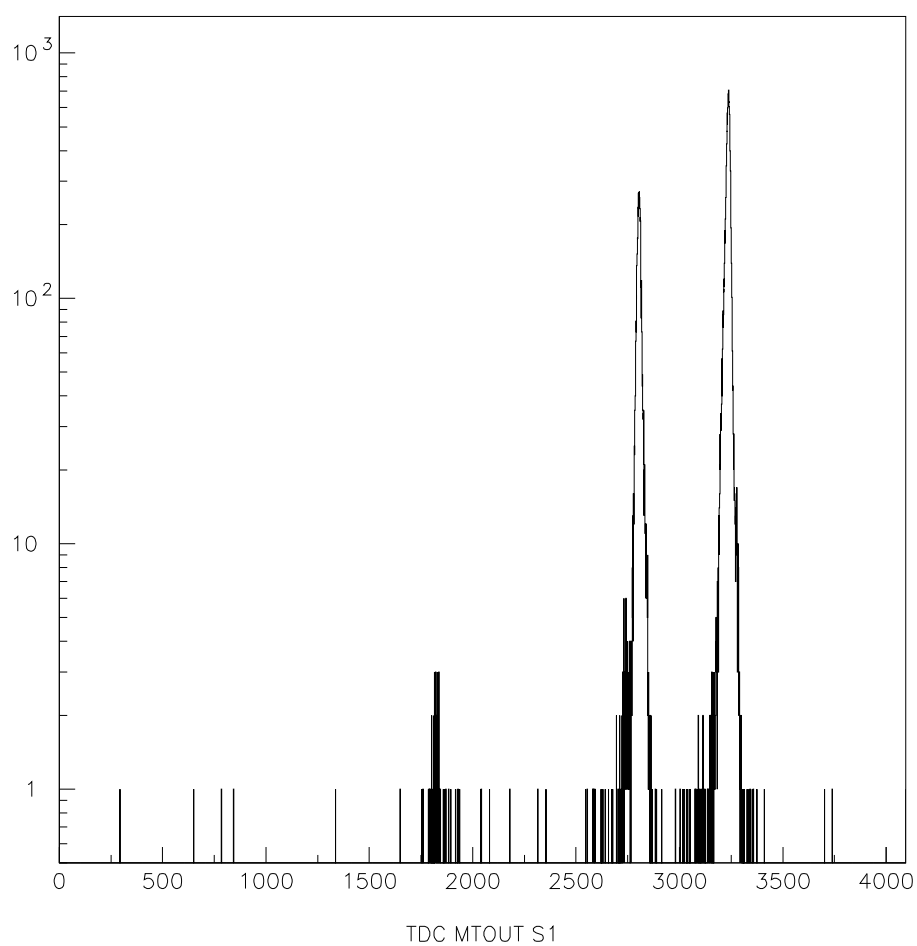
図 3.5: オシロスコープでみた TDC crystal のスタートとストップのタイミング

また各トリガーモードのイベント数は以下のようにになっている。

次の図は 1.0Gev/c の時の TOF カウンターのヒストグラムである。左から重陽子、陽子、 π^+ となっており、粒子が識別できている。

trigger mode	イベント数/sec
e^-	2~7
hadron	50~100

表 3.1: 各トリガーモードのイベント数

図 3.6: 各運動量ごとの TDC の分布の様子。左が proton、右が π_+ である。

3.2.4 フッ化セリウム結晶のセットアップ

フッ化セリウム結晶のセットアップを図に示す。

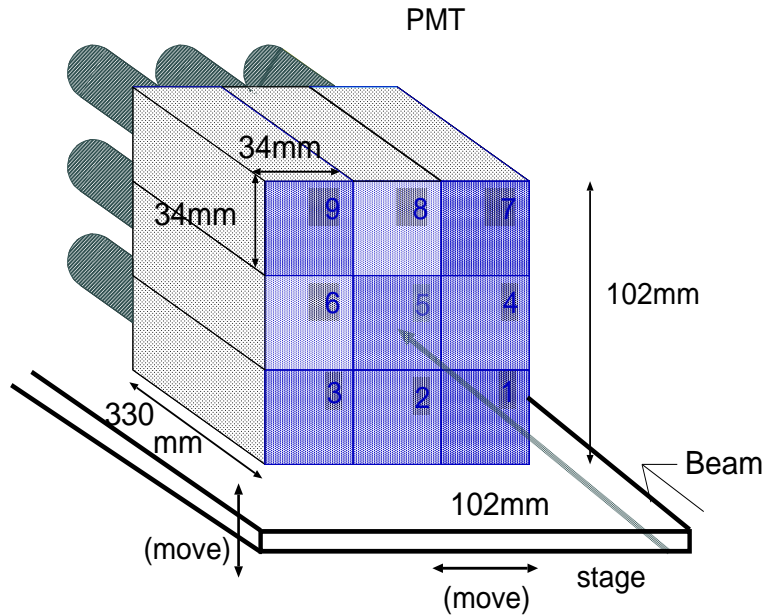


図 3.7: フッ化セリウム結晶のセットアップこれはビーム上流側からみた図である。

図のようにフッ化セリウム結晶は 3×3 のマトリクス状に重ねられており、その各結晶の後方に光電子増倍管が取り付けられている。今回使用した光電子増倍管は PHOTONIS 社製の品番 XP2978(1 1/8inch) である。この光電子増倍管の光電面には fused silica という材質を用いている。この fused silica は約 200nm までの紫外光を透過できる性質をもっている。このフッ化セリウム結晶の発光波長は 310nm~340nm であるからフッ化セリウム結晶の発光波長を十分に拾い出せる。光電子増倍管とフッ化セリウム結晶は OKEN6262A のシリコングリースで接着してある。

各結晶は大きさ $34\text{mm} \times 34\text{mm} \times 330\text{mm}(19.5X_0)$ となるように 2本または 3本つなぎ合わせて構成されている。この長さではほぼ 100%の電磁シャワーを吸収出来る長さである。1本の結晶同士の接着には TSE3033(東芝)という温度 80C° で硬化する接着材を用いている¹。各結晶は反射材及び遮光材としてテフロンテープでくずれないようにしっかりまいてあり、これらと光電子増倍管を暗箱の中に固定して、さらに上から遮光用の黒いタフニールシートで被い遮光を施した。

また、キャリブレーションのために各 9本の結晶の中心にビームを入射するため可動式の台の上にこれらのセットアップを組んだ。

¹しかし、 3×3 に積まれている結晶同士は接着されてない。

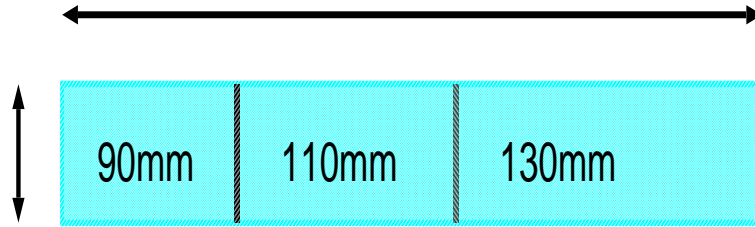


図 3.8: フッ化セリウム結晶の接着の一例 これは中心 (No5) の結晶の場合である。

3.2.5 光電子増倍管の gain 調整

それぞれの結晶に取り付けられている光電子増倍管にはそれぞれの gain があり同じ電圧をかけても同じ gain が得られるわけではない。よって各光電子増倍管の特性に見合った、印加電圧を設定する必要がある。実験の前に各結晶に同一のビームを当て、ADC(Analog to Digital Converter) チャンネルのピークがオーバーフローしないように各光電子増倍管の印加電圧の設定を行った。具体的な方法としては ADC ヒストグラムのピークが同じ位置に立つように微妙な電圧の調整を行ない各光電子増倍管の gain をそろえるというものである。

ビームテスト時の各光電子増倍管の印加電圧を以下に示す。

crystal no	印加電圧 (V)
1	1100
2	1020
3	1040
4	1030
5	970
6	1080
7	1140
8	1040
9	1050

第4章 データ解析

4.1 ビームトラッキング

4.1.1 MWPC

粒子の軌跡を求めるために MWPC(Multi Wire Proportional Chamber)3 台を用いた。この MWPC では Wire が X 軸 (水平) 方向に合計 80 本、Y 軸 (垂直) 方向には合計 48 本それぞれ 2mm 間隔で張りめぐらされており各 Wire は等電位に保たれている。粒子が通過すると、内部に封入されているガスが電離して電子が Wire に引き付けられる。それを信号として取り出し信号を取り出した Wire の位置により粒子の通過位置を特定するのである。

今回の実験では X 軸方向 48 本、Y 軸方向 48 本を使用した。MWPC の大まかな構造を下の図に示す。

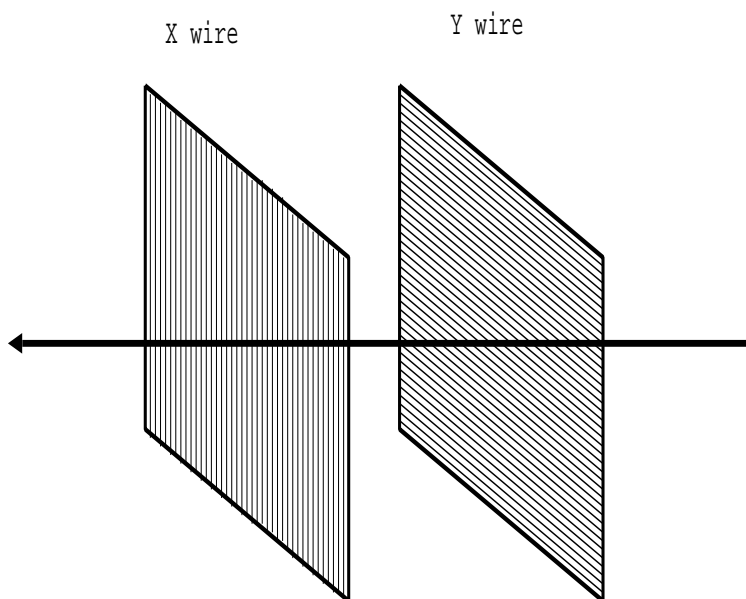


図 4.1: MWPC 内部の Wire の様子

4.1.2 最小自乗法による fitting 軌跡の決定と位置合わせ

解析では結晶への粒子の入射位置を正確に知ることは重要である。今回の解析では X 座標、Z 座標はビームエリアの床に書いてあるビームラインを基準として決定した。X 座標のゼロ点はそのビームライン上であり、Z 座標のゼロ点はビームラインに記してあるゼロ点にとった。また、Y 座標はエリアの床をゼロ点とした。粒子の軌跡はこの座標軸によって表わされ、MWPC 3 台それぞれの X ワイヤ、Y ワイヤより求めることが出来る。粒子が通過したことにより信号をだしたワイヤの位置を X 座標、Y 座標に変換する。各 MWPC 上で複数の点で信号が得られた場合、それらを最小二乗法によって直線 fitting をあてることにより粒子の最も信用できる軌跡を選択した。

最小二乗法による直線フィッティングとは測定値 x_i と y_i の間に $y(x_i)=Ax_i+B$ という関係式が成り立つ時、いくつかの測定値 x_1, x_2, \dots, x_N と y_1, y_2, \dots, y_N から最も確からしい A と B を求める事を言う。y の誤差はどの測定点でも等しいとし、x の誤差は無視できるほど小さいとすると、このとき A と B は

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - A - Bx_i)^2}{\sigma_y^2} \quad (4.1)$$

で χ^2 を最小にするように決められ、

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial A} = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial B} = 0 \quad (4.3)$$

とすることから

$$A = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.4)$$

$$B = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.5)$$

となる。

最小二乗法を使用する際、X ワイヤ、Y ワイヤから得られる信号は独立したものとして扱った。従って一つの粒子の最良だと思われる結晶前面でのビームポジションは、3 台の MWPC の X ワイヤのみから得られる最良の X 座標と Y ワイヤのみから得られる最良の Y 座標で決定される。

次におおまかなイベントの選び出しについて説明する。

粒子が通過すると、3 台の MWPC がそれぞれ X ワイヤ、Y ワイヤともに信号をだすと考えられるのだが他のワイヤは鳴ってないのにある 1Wire だけ鳴るといったような事態も多々ある。これはワイヤの発振によるものだと考えて、3 台の MWPC の X 方向、Y 方向がすべて鳴ったときに粒子が通過したものとしてイベントを数えるようにした。

それらの中でも、ワイヤが 1 本だけ鳴った時と複数本鳴ったときとで場合分けした。

ワイヤが1本だけ鳴ったとき

ワイヤが1本だけ鳴った場合は簡単で単純にその鳴ったワイヤの位置を座標に変換して、最小自乗法の fitting にあてはめればよいということになる。

ワイヤが複数本鳴ったとき

ワイヤが複数本鳴ったときは、場合分けが必要である。複数本鳴った場合にはそのワイヤの配置に注目して考えることにする。となりあった2本または3本のワイヤが鳴った場合にはイベントとして取り出し、あさっての方向でのランダムな複数本の Wire が鳴ったイベントは発振イベントとして捨てる。座標の位置の取り方は隣り合った2本のイベントの場合にはその中間の位置をとり、隣り合った3本のイベントについては3本の真ん中のワイヤを使用した。

4.1.3 MWPC の位置の微調整

MWPC の位置や結晶の位置は測量によって割出されているものの、計算の誤りや読み取りの誤差などの系統誤差は否めない。よって MWPC と結晶との相対的な位置関係を再検証した。検証は各々の MWPC に対して以下のように行なった。具体例として MWPC1 の X 軸に関して誤差を求めた方法を記す。

- MWPC2 の X 軸と MWPC3 の X 軸のワイヤヒット位置 2 点を直線で結ぶ。
- ビームは直線的に進むので、MWPC1 のワイヤヒットの位置はその直線上にあると思われる。これにより求められた MWPC1 のワイヤヒットの位置を計算上のワイヤヒット位置とする。
- (計算上のワイヤヒットの位置) - (実際の MWPC1 ワイヤヒットの位置) = 位置の誤差とする。

MWPC2 に関しては MWPC1 と MWPC3 で、MWPC3 に関しては MWPC1 と MWPC2 で計算上のワイヤヒットの位置を求めた。Y 軸についても同様に行ない、求めた位置の誤差の距離だけプログラム上で MWPC の位置をずらした。修正前と修正後の MWPC の直線上のヒット Wire のずれの様子を図に示す。上から順番に MWPC1,2,3。左が x 軸で右が y 軸である。

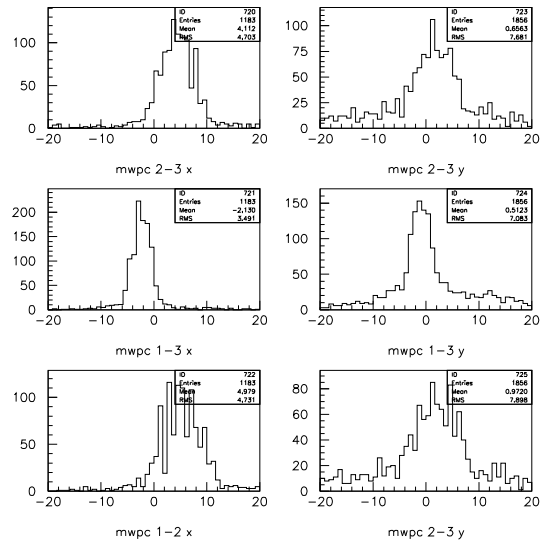


図 4.2: 修正前のずれの様子。縦軸はイベント数横軸はずれである。単位はミリメートル

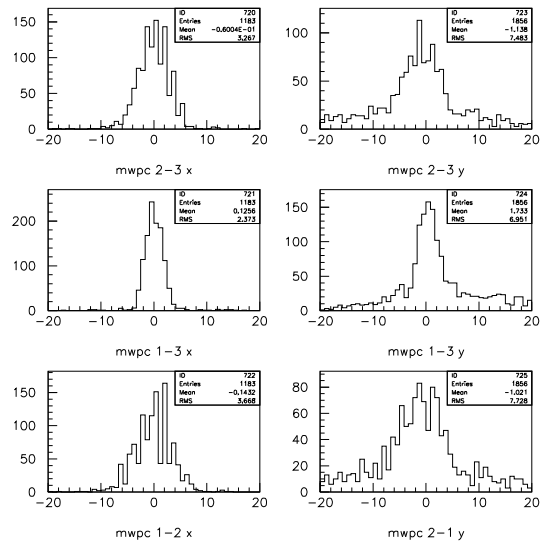


図 4.3: 修正後

このようにして求めた軌跡で解析を進める。MWPCによるイベントセレクトを行なう前と行なった後での ADC ヒストグラムの様子を以下に示す。

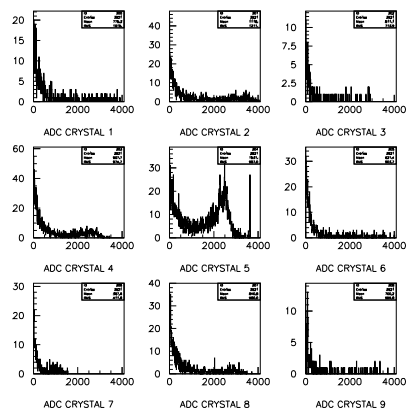


図 4.4: MWPCによる cut を行なう前の ADC ヒストグラム。3GeV electron のデータである。

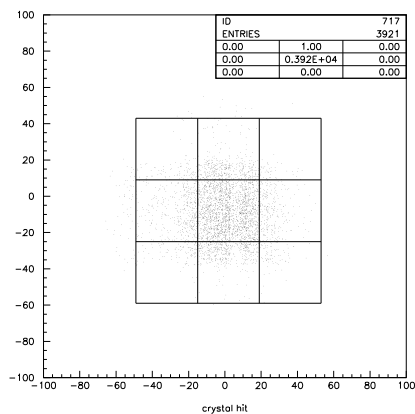


図 4.5: 同様に MWPCによる cut を行なう前の結晶へのビーム分布の様子。枠は結晶を表している。

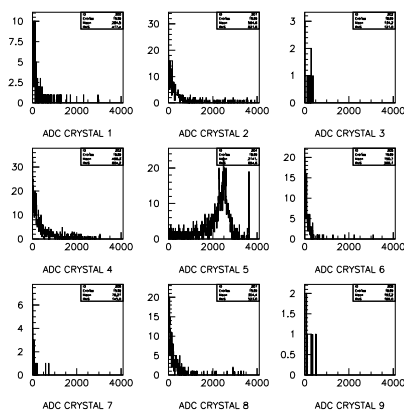


図 4.6: 中心の結晶にビームを絞ったときの ADC の様子。

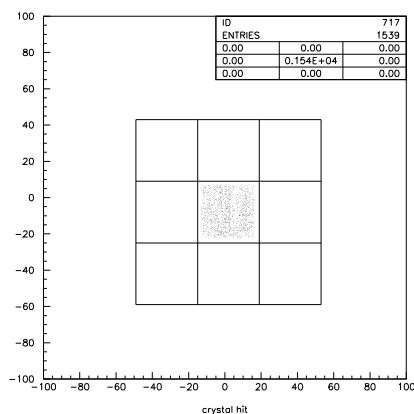


図 4.7: 同様の条件のときのビームの分布の様子。結晶の大きさより少し小さめに 30mm × 30mm に絞った。

4.2 ビームを用いたキャリブレーション

キャリブレーションは各結晶の中心に π^- の 3.0Gev/c のビームを入射することで行なった。このとき ADC スペクトル中に見える MIP (Minimum Ionizing Particle) のピークを用いた。各 9 本の結晶の ADC には同じエネルギーを deposit している様子が見えるはずである。最終的な解析で 3 × 3 の結晶に deposit したエネルギーを足し合わせて評価するので 9 本の結晶のレスポンスを相対的にそろえなくてはならない。実験前の gain 合わせでおおよそ電圧を調整してはあるが、ここで正確な factor を求める。

まず各 MIP のピークに半値幅の範囲で gaussian fit を行ない、peak の中心値 mean を求める。そ

の値から各 pedestal の値を引いた値をそれぞれ true mean とし、中心の結晶 (no5) true mean と合うように残り 8 本の結晶 mean を合うように factor を求めた。

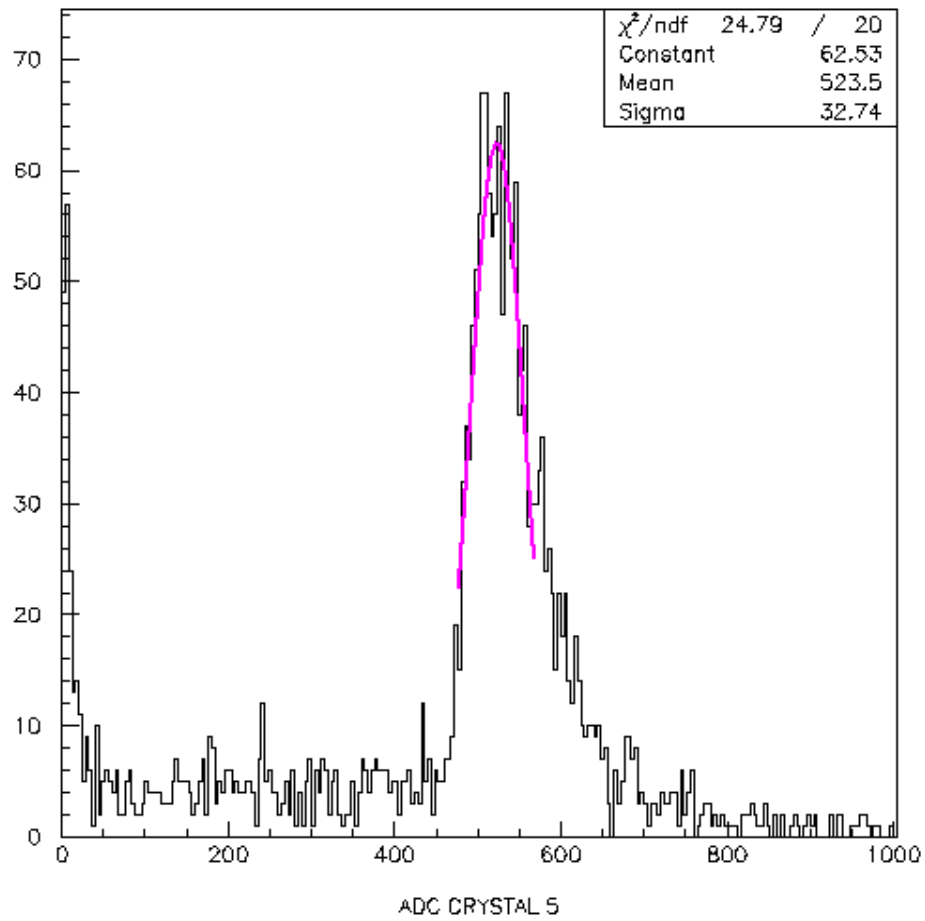


図 4.8: fitting の一例。これは、中心の結晶

crystal no	factor
1	0,8504
2	0.8793
3	0.9984
4	0.9500
5	1.0000
6	0.8623
7	1.2645
8	0.9581
9	0.8722

表 4.1: 各光電子増倍管のキャリブレーション factor

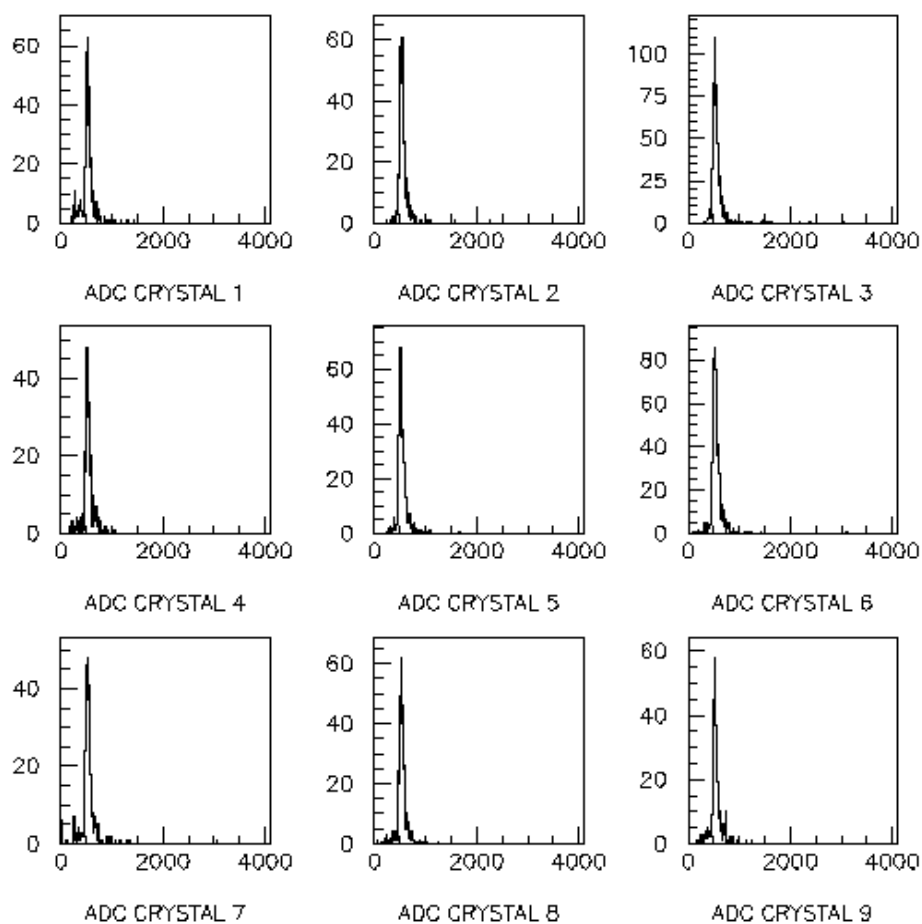


図 4.9: キャリブレーション後の ADC、gain がそろえられたことが見受けられる

4.3 電子ビームを入射したRUNの応答

フッ化セリウム結晶に、1.5GeV/cから4.0GeV/cまでの電子ビームを入射した際の応答について調べた。今回行ったことは

- 入射エネルギーに対する response の直線性
- エネルギー分解能
- 獲得光電子数

である。

まず、2.5GeV/cのビームを入射した際の各結晶のADCの様子を示す。

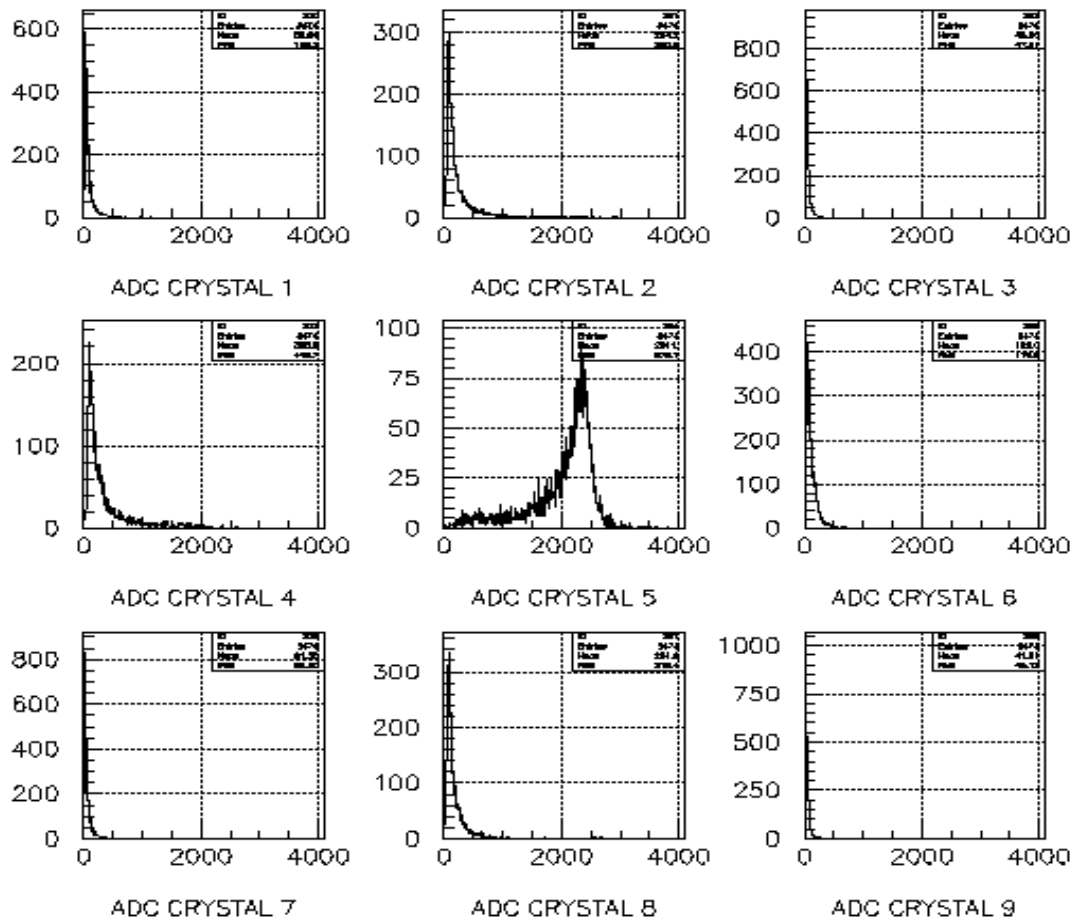


図 4.10: 2.5Gev の e^- run の 9本の結晶の ADCヒストグラム

no5 は中心の結晶なので多くのエネルギーが吸収されているのが良く分かる。まわりの 8 本の結晶はほとんどエネルギーを吸収していないのだが、no4 と no6 の二つの結晶の ADC スペクトルを見比べると no4 のほうがより多くのエネルギーを吸収している。これの原因としては結晶が僅かに曲がっておかれていた、または MWPC の配置がまがっており、ビームトラッキングが斜めになってしまっていた、などが原因として考えられる。

入射エネルギーに対する response の直線性

次に 3×3 の結晶として、9 本全体の ADC について考える。全体の結晶は各結晶の和として表すことにする。よってイベント一つ一つの deposit エネルギーに関しては

$$E = \sum_{n=1}^9 C_n \cdot (ADC_n - Pedestal_n)$$

ここで C_n は、キャリブレーションの際に決めた factor でありこの各 factor によって光電子増倍管の gain をあわせている。この factor は表 4.1 に記載されている。 ADC_n は、各結晶のピークチャンネルそして $Pedestal_n$ はペDESTALチャンネルである。MIP のピークチャンネルからペDESTALチャンネルを引くことにより、9 本の結晶の ADC 原点を合わせた。

この ADC をプロットしたものが次のものである

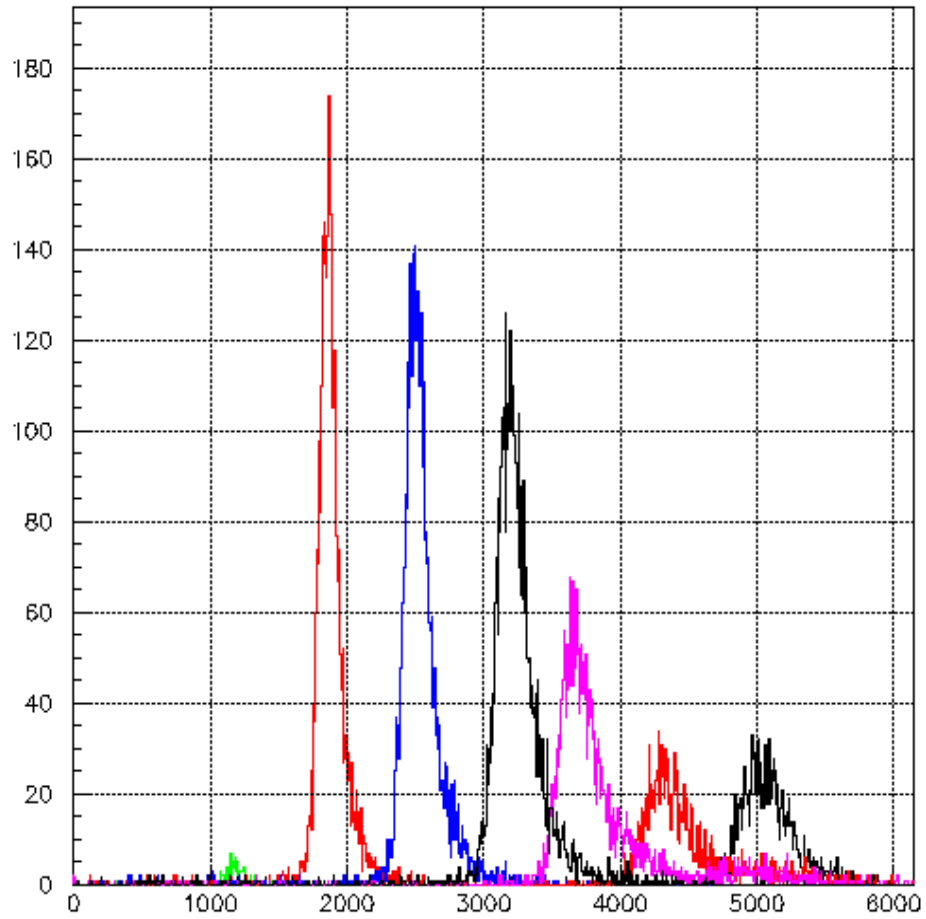


図 4.11: 左から入射エネルギー 1.0GeV から 4.0GeV の電子を入射したときの吸収エネルギーのスペクトル。横軸が ADC のチャンネル、縦軸がイベント数

ここで全吸収エネルギーはガウス分布してるものだと仮定して、各 ADC のピークに半値幅の範囲で gaussian fit を行なった。平均を m 、分散を σ とするとガウス分布は以下の式で表すことができる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(\frac{-(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)$$

そのときに得られた peak の値を e^- の入射エネルギーごとにプロットしていった。

第2章での無機シンチレーターのところでも述べているが、高エネルギー物理学実験に用いられる無機結晶シンチレーターにとってシンチレーション光は結晶に deposit したエネルギーと入射エネルギーとが比例していることが最も求められる性能である。以下に示すプロットからこのフッ化セリウム結晶には入射エネルギーに対する応答特性は非常に良い直線性があるということが言い切れるであろう。

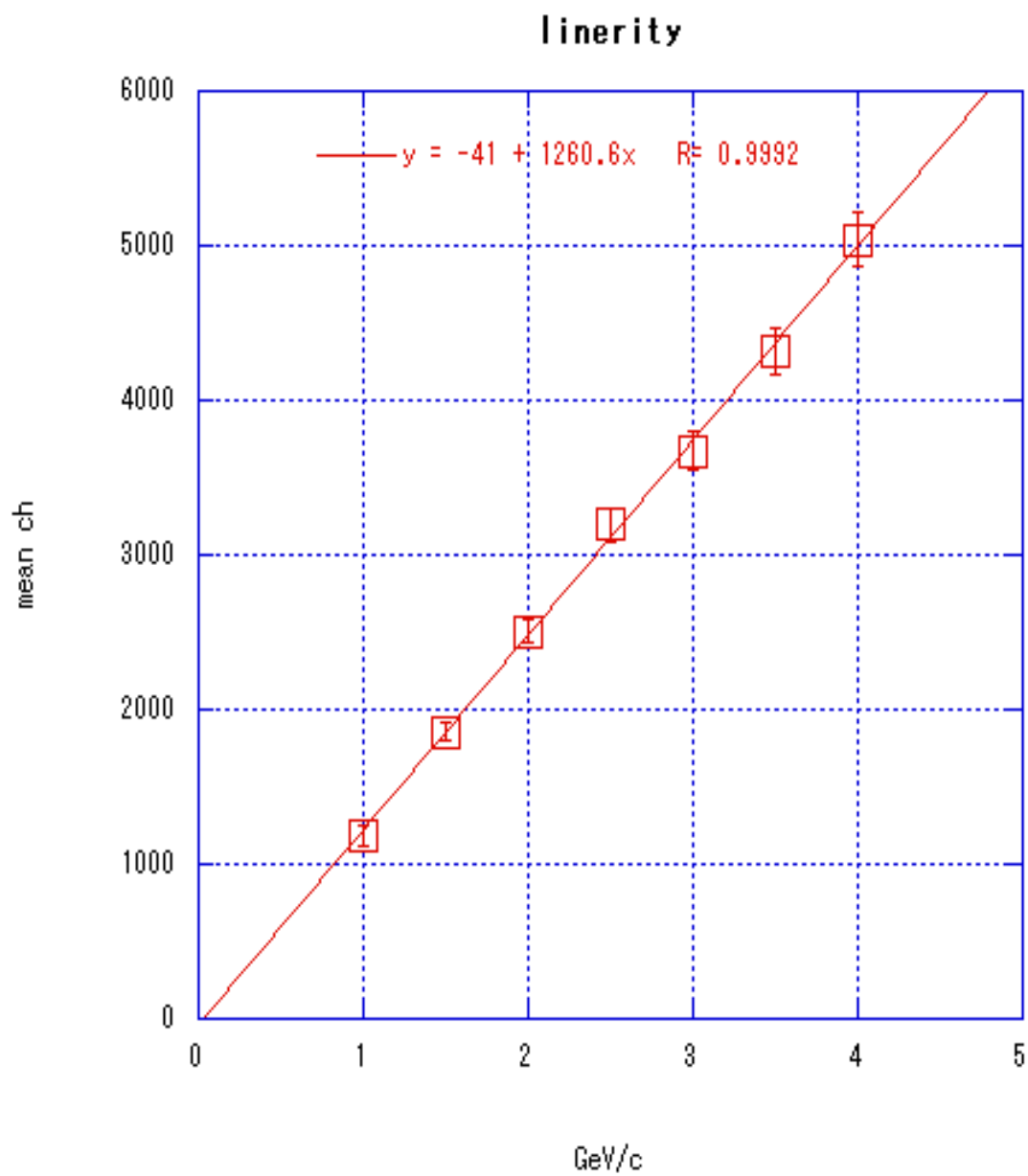


図 4.12: 電子入射時のフッ化セリウム結晶の応答の直線性。横軸は入射エネルギー縦軸は ADC チャンネルに対応している

4.3.1 エネルギー分解能

エネルギー分解能というものは検出器の性能を表すもので、どれだけのエネルギーを細かく検出出来るかという指標である。一般的には得られたエネルギー分布の σ をエネルギー分布の peak の値 E_{peak} で割ったものつまり、 σ/E_{peak} で表すことが出来る。

入射エネルギー E とエネルギー分解能の関係は

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_0}{E}\right)^2 + \left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + b^2 \quad (4.6)$$

で表すことが出来る。

σ_0 はノイズ項と呼ばれるものであり、特に低エネルギーの領域で主に ADC のペDESTAL の太さに大きく依存してくるものである。今回の実験では特に低エネルギーということでもないこの項は無視して考える。a は統計項、b は定数項とよばれる。統計項は入射粒子による結晶に deposit するエネルギーの揺らぎ、光電面から放出される光電子数の揺らぎによるものが大きい。ADC スペクトルに寄与する情報数が最も小さくなるのが、光電面に到達する光子であるからである。よって光子数が少ないことにより不確定さが増す。定数項はキャリブレーションのエラーや結晶からの入射エネルギー粒子の洩れだし等が大きく依存する。

今回 fitting を行なった式はノイズ項を除いた

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + b^2} \quad (4.7)$$

である。

またエラーバーはイベント数を N とした

$$\left(\Delta\left(\frac{\sigma}{E_i}\right)\right)^2 = \left(\frac{\Delta E_i}{E_i^2} \sigma\right)^2 \quad (4.8)$$

$$= \left(\frac{\Delta E_i}{E_i} \frac{\sigma}{E_i}\right)^2 \quad (4.9)$$

$$= \left(\frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\sigma}{E_i}\right)^2 \quad (4.10)$$

で与えた。この fitting の結果からエネルギー分解能は

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\left(\frac{3.65 \pm 0.40}{\sqrt{E}}\right)^2 + (2.13 \pm 0.33)^2}$$

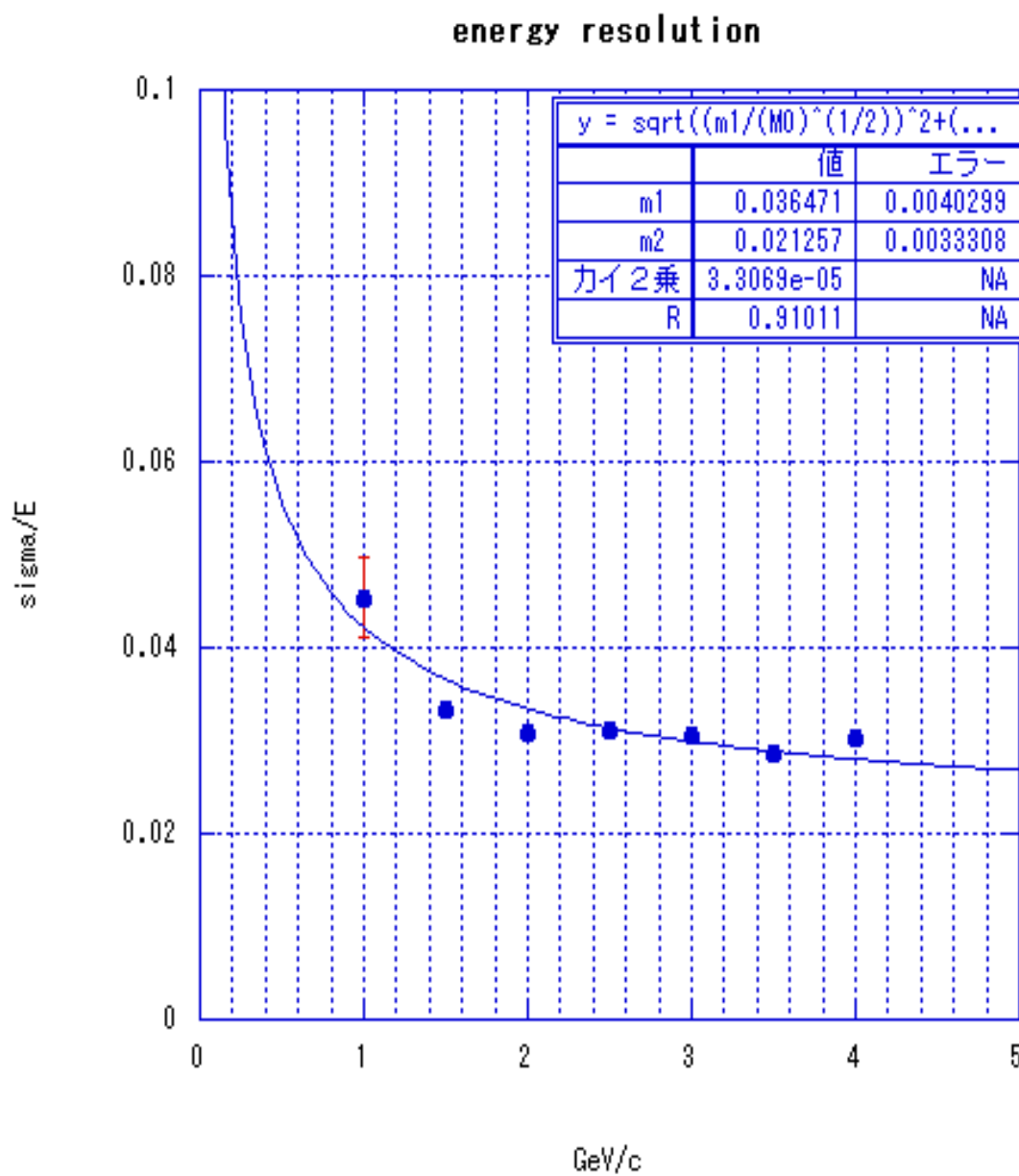


図 4.13: フッ化セリウム結晶のエネルギー分解能。横軸は入射エネルギー縦軸は分解能をあらわしている

4.4 獲得光電子数

4.4.1 光電子増倍管の gain 測定

獲得光電子数を求めるため以下の方法で9本の光電子増倍管の gain を求める。プラスチックシンチレーター (BC408) に WLS fiber (Kuraray Y11) をシリコングリース (OKEN 6262A) で埋め込み、光電子増倍管まで WLS fiber を通して光を導く。チェックソースには ^{106}Ru を用いて、 β 線に突き抜けにより、trigger をかけている。使用した QVT モジュールは予めキャリブレーションをおこなっており、1チャンネルあたり 0.263pC という結果がでている。

gain 測定は 1photo-electron のピークが見えるように調節した光量を、光電子増倍管に入れる。それを行なうためには光電子増倍管が photon counting 用で無くてはならない。そして得られたヒストグラムから 1photo-electron のピークインターバルを見積もる。シンチレーション光のうち、最終的に光電子として計測される確率は 0.001 と 1 に比べて非常に小さいものである。このようにシンチレーション光という母集団は多いもののそれに比べて、現象が起こる確率のほう非常に小さい場合には確率分布はポアソン統計に従う。よって見積もる方法は以下に述べる fitting 関数から導出する。

$$R(x) = A \sum_{N=1}^{N_{max}} \frac{\exp^{-\bar{N}} \bar{N}^N}{N!} \frac{1}{\sqrt{2\pi N}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x - pN - q)^2}{2N\sigma^2}\right\} \quad (4.11)$$

- x : ADC channel
- A(p1) : Normalization Factor
- \bar{N} (p2) : 平均光電子数
- σ (p3) : 標準偏差
- p(p4) : 各ピーク間隔
- q(p5) : ペDESTALピークの channel

この関数によって fitting した様子 of 例を図にしめす。このようにして、光電子増倍管に印加する電圧を変えて行く毎に、印加電圧に対する 1photo-electron のピーク間隔を fitting 関数によって求める。QVT モジュールのキャリブレーションは行なっているので、0.263pC/ch という関係から 1photo-electron のピーク間隔に相当する電荷量が計算できる。

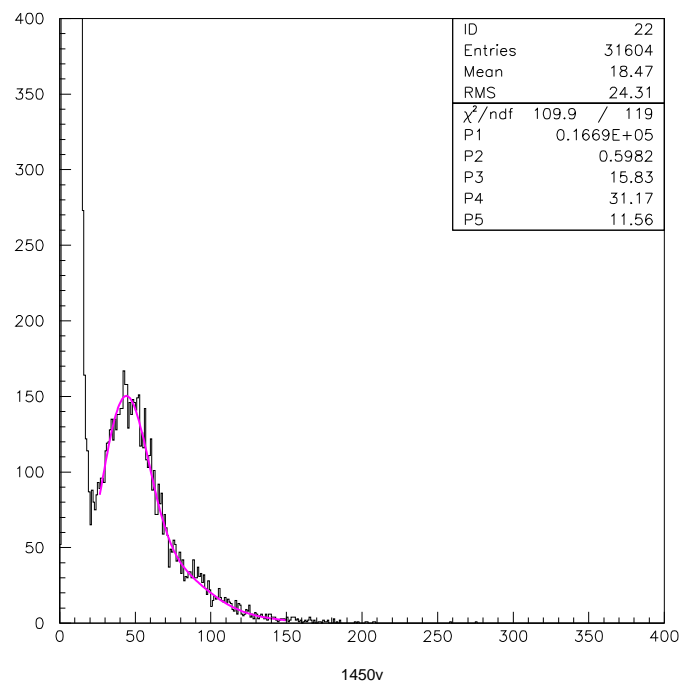


図 4.14: fitting した様子。例としてこれは真ん中の結晶に用いられた光電子増倍管の 1450V での ADC ヒストグラムである。縦軸はイベント数、横軸は ADC チャンネル。

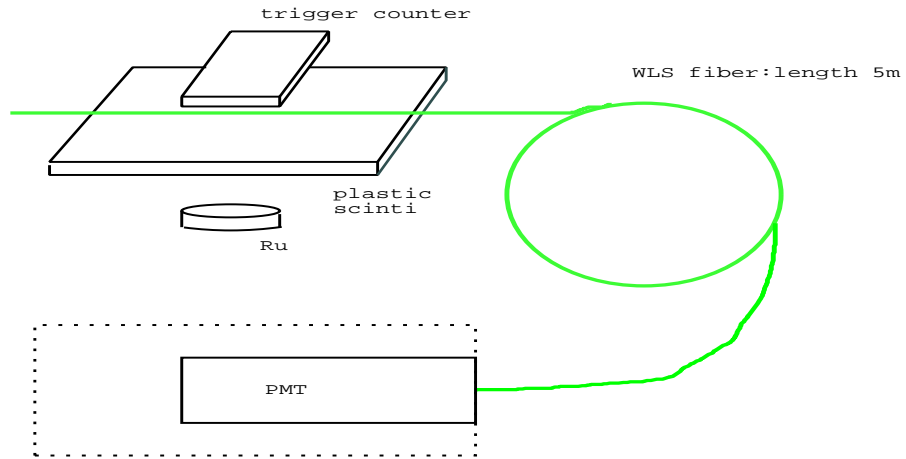


図 4.15: gain 測定の設定アップ

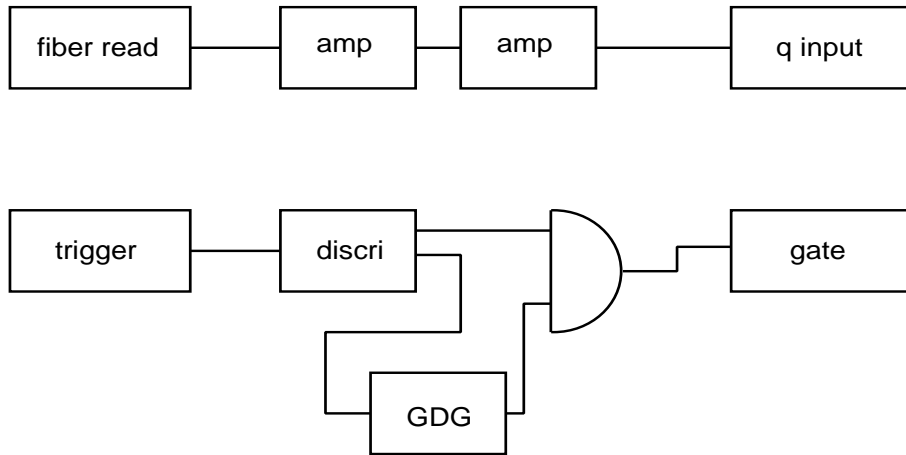


図 4.16: gain 測定のリジック図

これにより、1photo-electronが光電子増倍管によって増幅された電荷量がわかるのでその増幅後の電荷量を電気素量 e でわることにより光電子増倍管の gain が見積もられる。例として真ん中の結晶 (no5) の光電子増倍管の gain curve の様子を示す。

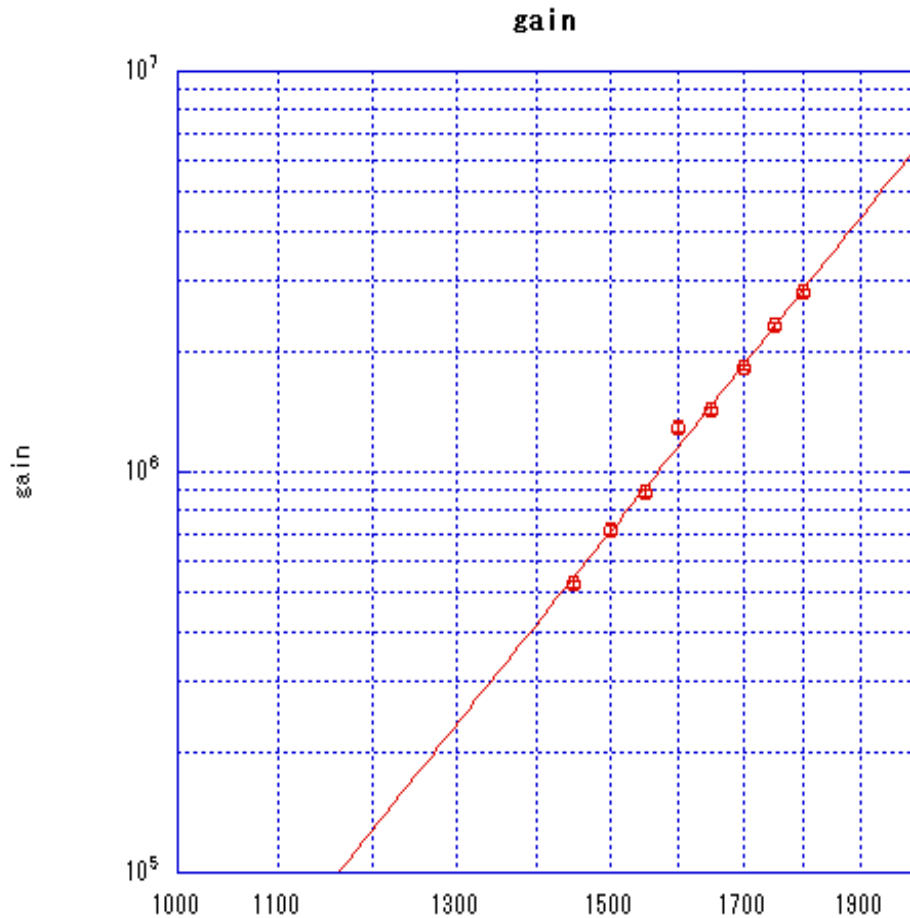


図 4.17: no5 の結晶に取り付けられた光電子増倍管の gain curve の様子。縦軸が gain 横軸が印加電圧である。

4.4.2 獲得光電子数の見積もり

フッ化セリウム結晶の獲得光電子数はつぎのような手順で見積もった。

- 9本の光電子増倍管 (PHOTONIS社製 XP2978) の gain を求める
- ADCチャンネルのキャリブレーションを行なう。これはすでに行なわれており 0.25178pC/ch である。

crystal no	gain
1	49202
2	28159
3	40652
4	37047
5	30435
6	34594
7	31042
8	52921
9	61382

表 4.2: 各光電子増倍管の gain

- 9本の結晶の ADC スペクトルの各イベントを以下の式で電荷量に変換する。

$$E = \sum_{n=1}^9 \frac{ADC_n \cdot factor}{gain \cdot e}$$

ADC_n : ADC channel
 factor : キャリブレーション factor
 gain : 光電子増倍管の gain
 e : 電気素量

- 得られたクーロン数を光電子増倍管の gain で割り、増幅前のクーロン数を求める
- 増幅前のクーロン数を電気素量 e で割ったものが結晶 1 本当りの獲得光電子数となる。
- その 1 本当りの結晶の獲得光電子数の和を取り、divider の補正を加えたものを結晶 9 本の獲得光電子数とした。

次のページに獲得光電子数の分布の様子とエネルギーと獲得光電子数の関係を示す。入射エネルギーと獲得光電子数の関係は一次関数で fitting した。これによると fit の結果は

$$N_{p.e.} = 1.2126 \times 10^5 x (GeV)$$

となり、電子の入射エネルギー 1MeV あたり 120 個の光を得るという結果になった。また、この獲得光電子数の確からしさは光電子増倍管の gain を求める際の single photon peak を求めたときの fitting のエラーなどが主として寄与すると思われる。これから考えると光量の確からしさは 120 個 ± 5 個程度だと思われる。

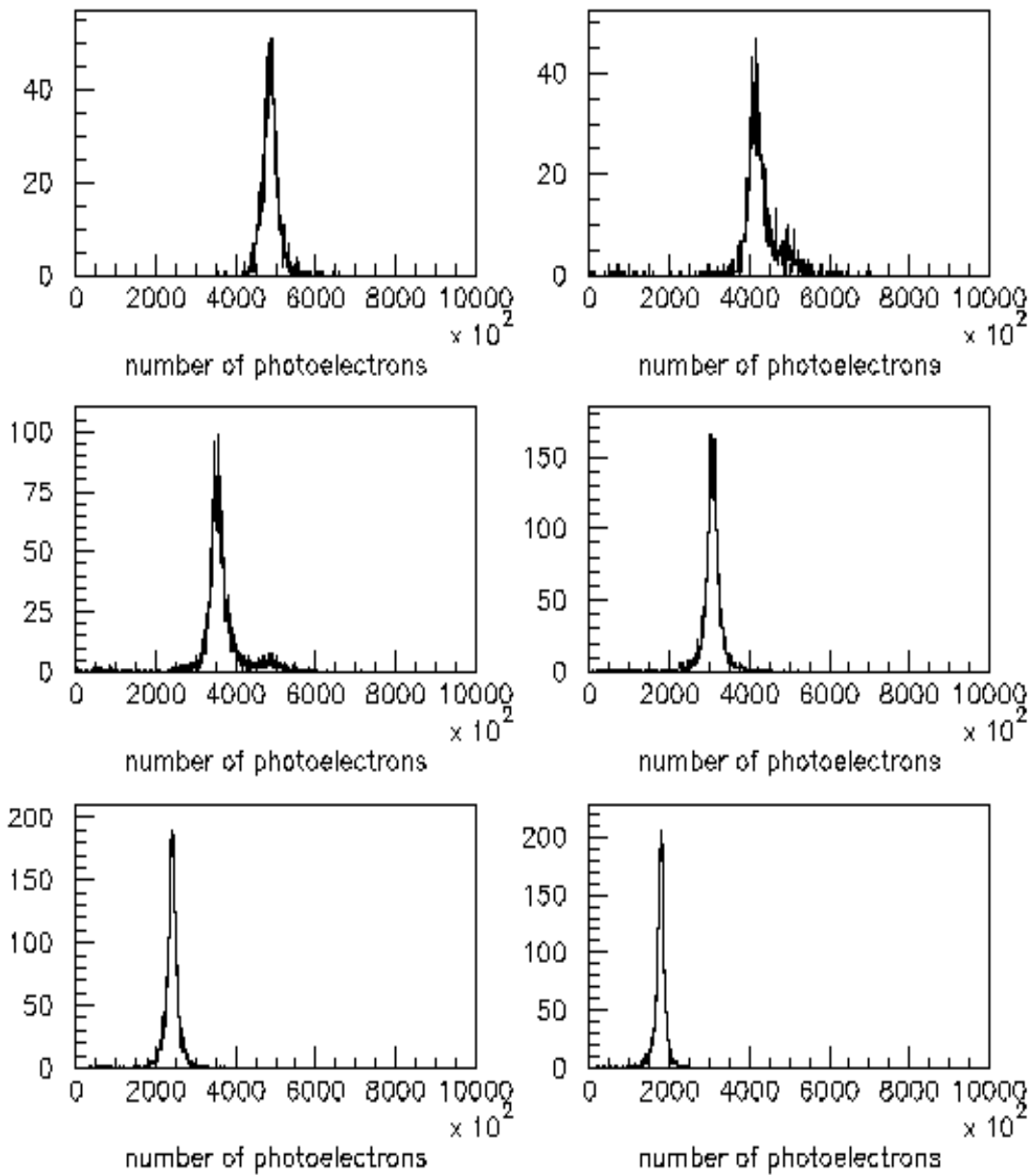


図 4.18: 各入射エネルギーと光量分布の様子。左上が $4\text{GeV}/c$ 右下が $1.5\text{GeV}/c$ となるように、 $0.5\text{GeV}/c$ step でならべたものである。縦軸がイベント数で横軸は獲得光電子数である。

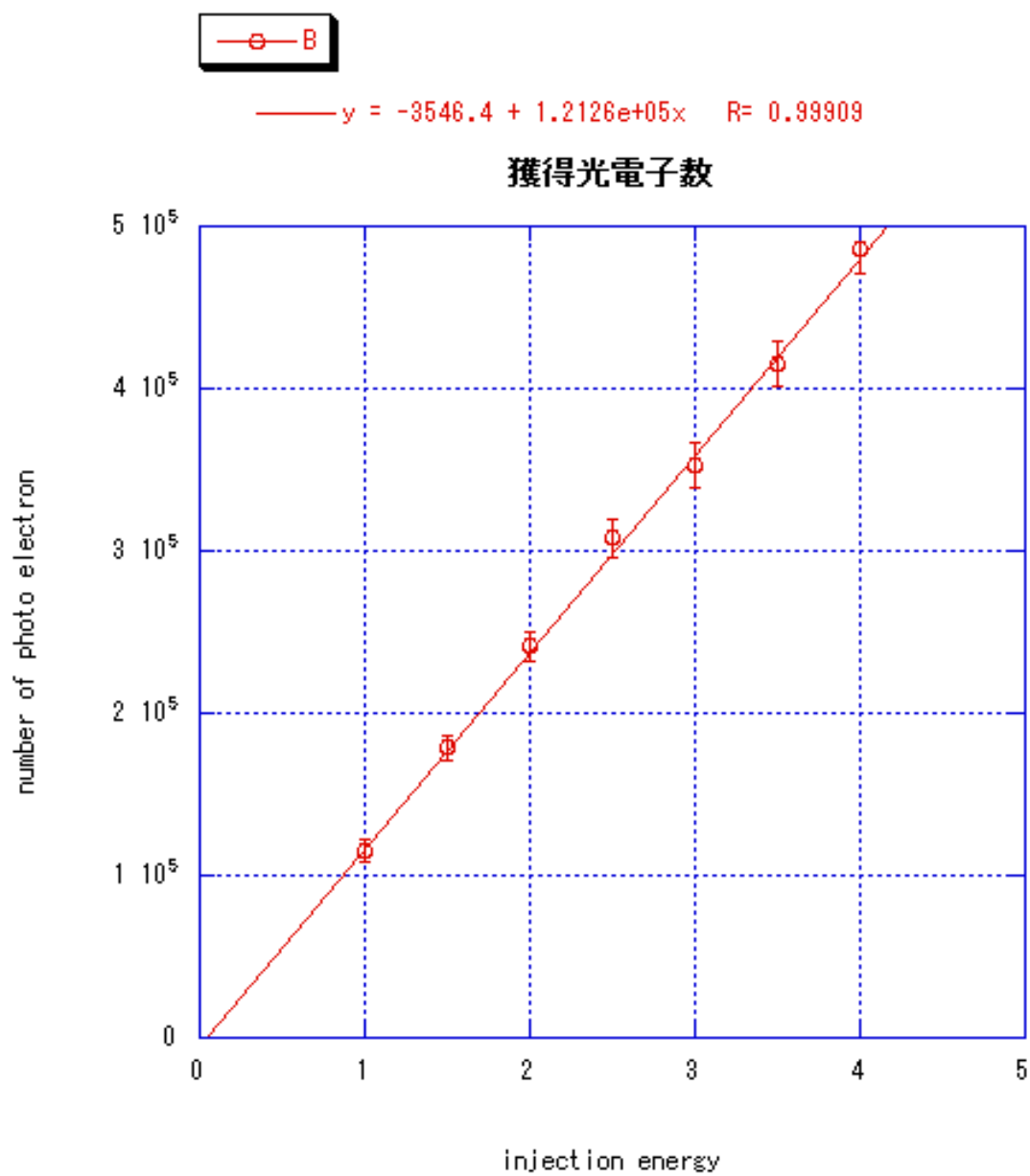


図 4.19: 入射エネルギーと獲得光電子数の関係。横軸が入射エネルギーで縦軸が獲得光電子数である。

第5章 まとめ

5.1 検出器としての評価

E391aグループと応用光研工業株式会社とのつぼの共同開発により、直径2インチ長さ30cm(17.6 X_0)までのフッ化セリウム結晶の製造のめどがたった。そしてフッ化セリウム結晶検出器のプロトタイプ(34mm×34mm×330mm)に1.0GeV/c~4.0GeV/cの運動量を持つelectron,hadronビームを入射して性能評価を行なった。

その結果入射エネルギーと deposit エネルギーの間には非常に良い直線性が見られた。また獲得光電子数についても1MeVあたり、120個という非常に良好な結果を得た。エネルギー分解能については

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\left(\frac{3.65 \pm 0.40}{\sqrt{E}}\right)^2 + (2.13 \pm 0.33)^2}$$

という結果だった。獲得光電子数は多いので、エネルギー分解能がもっと良くなるはずだが、思ったような結果を得ることは出来なかった。主な理由の一つとしてはビーム運動量の幅がみえてしまったのではないかというのが考えられる。

エネルギー分解能は決して良いということが出来ないが、入射ビームのエネルギーとレスポンスの良い直線性や獲得光電子数の多さから十分検出器としての性能を秘めているということが出来るであろう。

付録 A 実験に使用した光電子増倍管について

PHOTONIS 社製の光電子増倍管 (XP2978) について少し述べる。この光電子増倍管は通常品にくらべて、増幅率は一桁落ちるものであるが光電面に fused silica という材質のものを持ちており、200nm までの紫外光を通過できる性質をもっている。主な特徴を以下に示す。

- 光電面の直径 1 1/8 inch
- 光電面の素材 バイアルカリ金属
- 入射窓の材質 fused silica
- 最大印加電圧 1800V
- 立上り時間 1.8ns

である。分光感度特性の図を以下に示す。量子効率はフッ化セリウム結晶の発光波長領域 310nm

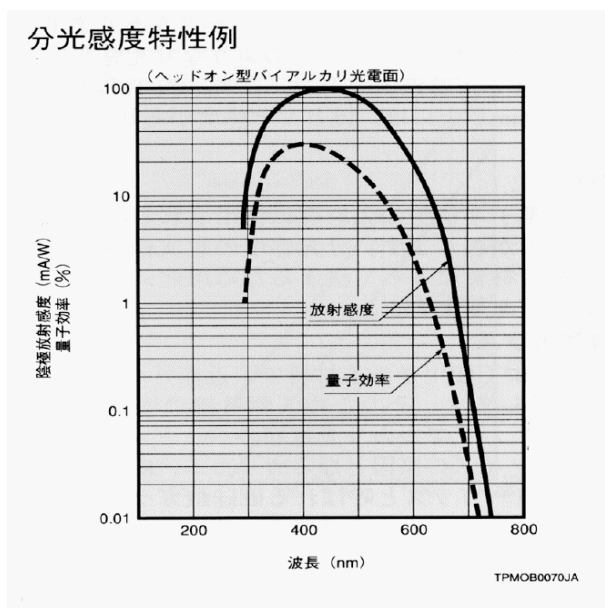


図 A.1: 分光感度特性

～340nm では以下の表から 20%～22%と見積もられるので光を獲得するには十分な性能を保持して

いるということができる。量子効率の求め方は以下の式と光電面放射感度のグラフをよみとることで求めることができる。[10]

$$\text{量子効率 (\%)} = \frac{124}{\text{波長 (nm)}} \times \text{放射感度 (mA/W)}$$

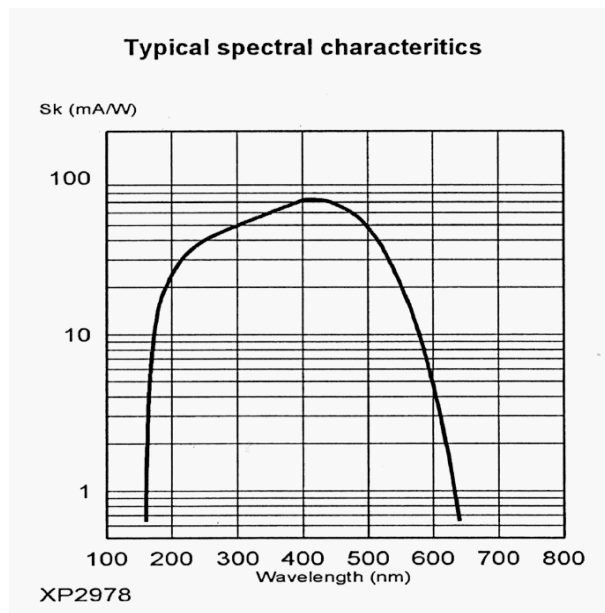


図 A.2: 光電面放射感度

謝辞

これまで3年間、色々な形で色々な方に大変お世話になりました。この場を借りて感謝の言葉を述べたいと思います。

加藤静吾先生、清水肇先生、吉田浩司先生には物理の基礎から加速器の実験に至るまでゼミ等を通して大変多くのものを教えて頂きました。ありがとうございます。岩田高広先生には学会発表の際に数々の助言を頂きありがとうございます。田島靖久先生には計算機等の基礎知識を懇切丁寧に教えて頂き不慣れな計算機の扱いにもある程度慣れることができました。

また KEK の稲垣隆雄氏、吉村嘉男氏には研究の機会を与えて頂きありがとうございました。また同じ研究室の方々にはお世話になりました。ありがとうございました。

また大学院まで進学させていただいた両親にも感謝したいと思います。

関連図書

- [1] グレン F ノル 著 木村 逸郎、阪井 英次 訳 「放射線計測ハンドブック (第 2 版)」 (日刊工業新聞社、1991)
- [2] Proceedings of the Workshop on Scintillating Crystals (KEK 1997)
- [3] D.F.Anderson, Nucl. and Meth A287 (1990) 606-612
- [4] 駒路真吾、修士論文 「 CeF_3 結晶の各種励起粒子に対する応答と低温におけるシンチレーション光の温度特性の研究」、佐賀大学 (2000)
- [5] E.Auffray, et al., Nucl. Instr. and Meth A383 (1996) 367-390
- [6] 千葉竜一、修士論文 「電磁シャワー検出器への実用化に向けた CeF_3 結晶の基本性能の研究」、山形大学 (2001)
- [7] 三浦明夫、修士論文 「K 粒子稀崩壊実験の VETO 用カウンターの試作と性能評価」、山形大学 (2001)
- [8] 乃万智洋、修士論文 「PWO(KEK) の性能評価」、山形大学 (2001)
- [9] 飯嶋晶子、修士論文 「BSO の電子線に対する応答特性」、山形大学 (2001)
- [10] PHOTONIS PMT Catalogue(1999) ,Photomultiplier tubes
- [11] 徳丸克己、共立ライブラリー蛍光現象、共立出版株式会社
- [12] 日本化学学会、化学総説 無機光化学、株式会社学会出版センター