

修士論文

MEG 実験における
ガンマ線検出器較正の改良

東京大学理学系研究科 物理学専攻
森 俊則 研究室

106066

千葉 哲平

2012年1月

目次

1	イントロダクション	4
2	MEG実験の概要	4
2.1	背景	4
2.2	バックグラウンド	5
2.3	MEG実験のセットアップ	5
2.3.1	π E5 ビームライン	6
2.3.2	COBRA マグネット	8
2.3.3	ドリフトチェンバー	10
2.3.4	タイミングカウンター	12
3	液体キセノン検出器	13
3.1	液体キセノンの性質	14
3.1.1	液体キセノンの特徴	14
3.1.2	液体キセノンの発光機構	15
3.2	液体キセノン検出器	16
3.2.1	検出器の構造	16
3.2.2	光電子増倍管 (PMT)	16
3.2.3	キセノン純化装置	17
3.2.4	キセノン保管容器	19
4	パイオンの CEX (荷電交換反応) を利用したキャリブレーション	19
4.1	原理	20
4.2	セットアップ	20
4.3	BGO の性質	22
4.4	BGO 検出器のセットアップ	22
4.5	宇宙線を使った HV の見積もり	27
4.6	CEX ランでの試運転	27
4.7	結論	28
5	MPPC の性能試験	33
5.1	概要	33
5.2	MPPC の原理	33
5.3	検出器としての MPPC の特徴	34
5.4	測定項目	35
5.5	セットアップ	36
5.6	測定結果	41
5.7	ゲイン、PDE	47
5.8	アフターパルス	49

5.9 結論 50

1 イントロダクション

標準理論 (SM) は非常に成功した理論であるが、ニュートリノ振動の発見などそれを覆す現象がすでに確認されている。現在標準理論を超える新たな理論の模索が行われている。この MEG 実験はそういった新たな理論の候補を実験の立場から検証しようとしている。LFV を伴う $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は標準理論によるとほとんど起こりえないが新たなモデルには観測可能な分岐比を预言するものがある。MEG 実験は $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の検出を目指している。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は新しい物理の手がかりである。極めて小さい分岐比の $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ を探索するため実験はスイス・ポールシェラー研究所にある世界最高強度の陽子加速器と新たに開発した高性能測定器を用いて行われている。2008年から本格的な測定を始め2011年には2009年、2010年に取得したデータを用いた解析により $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の分岐比に新たな上限を与えた。今後はさらに測定を進め 10^{-13} 程度の分岐比まで探索することを目標としている。本実験において重要な高精度のガンマ線測定を担う液体キセノン検出器のキャリアレーションの効率向上のため、2011年に従来の NaI 結晶を使ったガンマ線検出器から BGO 結晶を使ったものに変更した。その際テストのために BGO 結晶によるガンマ線検出器を試作し、性能評価を行った。試作品は宇宙線の測定と中性パイオンの崩壊から生じるガンマ線 ($\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊で生じる 52.8MeV のガンマ線に近い 55MeV のエネルギーを持つ) の測定を通してテストした。結果は中性パイオンに関しては波形がサチレーションしていたうえ波形が崩れていて予想されたデータは得られず、補正を行っても改善されなかった。本稿ではその結果を報告する。また、液体キセノン検出器のさらなる性能向上を目指し、現在使用している光電子増倍管に代わる新しい光センサーの候補として MPPC (Multi Pixel Photon Counter) の開発を進めている。MPPC のサンプルに関して、液体キセノン中でシンチレーション光 (真空紫外光) に対する測定を通して、基礎特性の調査を行った結果を報告する。

2 MEG 実験の概要

2.1 背景

最小標準理論では厳密にレプトンフレーバーは保存される。ニュートリノが質量を持つように拡張された標準理論では $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は可能となるが、それも実験にかかるような分岐比ではない。しかし超対称性を導入したモデルでは測定可能な分岐比を与えている。MEG 実験は 10^{-13} という極めて高い崩壊分岐比感度での探索を行い、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の発見を目指している。

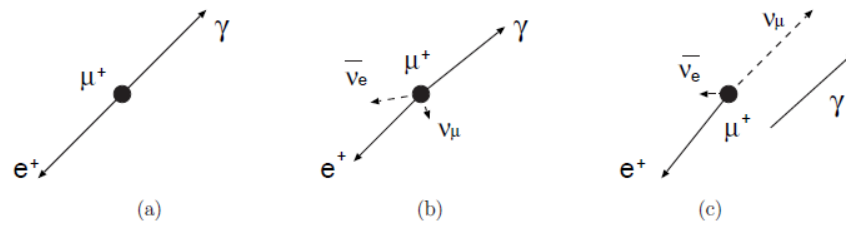


図 2.1: a: シグナル、b: 輻射崩壊によるプロンプトバックグラウンド、c: アクシデンタルバックグラウンド

2.2 バックグラウンド

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の分岐比は $10^{-12} \sim 10^{-15}$ と非常に小さくそれ以外の大量のバックグラウンドから識別する必要がある。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は 52.8MeV のエネルギーを持った陽電子とガンマ線が反対方向に飛ぶ二体崩壊である (図 2.1(a))。これに対して主なバックグラウンドが二種類ある。ひとつはニュートリノを含む 4 体崩壊 (輻射崩壊) である:

$$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma\nu_\mu\bar{\nu}_e$$

(図 2.1(b)) このバックグラウンドに関しては陽電子とガンマ線は正反対の方向に飛ぶとは限らないこと、同時に 52.8MeV のエネルギーを持たないことから放出角とエネルギーを精度よく測れば取り除くことができる。

もうひとつは Michel 崩壊の陽電子が輻射崩壊、飛行中の陽電子対消滅などで発生した高エネルギーガンマ線と偶然同時に検出され、同じイベントとして観測される場合である。これをアクシデンタルバックグラウンドと呼ぶ (図 2.1(c))。このアクシデンタルバックグラウンドは現在の測定器の性能では最も影響の大きなバックグラウンドであり、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ を探す上で問題となる。図 2.2 は実際に液体キセノン検出器で観測されたバックグラウンドガンマ線のエネルギー分布を示している。これが示すとおりシグナルの 52.8MeV 付近ではバックグラウンドの原因となるガンマ線は急激に減少することがわかる。したがって篩い落とすガンマ線の閾値を 52.8MeV になるだけ近づけることはバックグラウンドの減少に非常に効果がある。そのためにガンマ線のエネルギー測定は高精度が求められる。アクシデンタルバックグラウンドを落とすためにはガンマ線のエネルギーだけでなく位置、時間すべて高精度に測る必要がありそれを可能にしたのが液体キセノン検出器である。

2.3 MEG 実験のセットアップ

MEG 実験の検出器は大きく分けてガンマ線測定器とポジトロン測定器で構成されている。ガンマ線はポジトロン測定器を透過して外側に置かれたガ

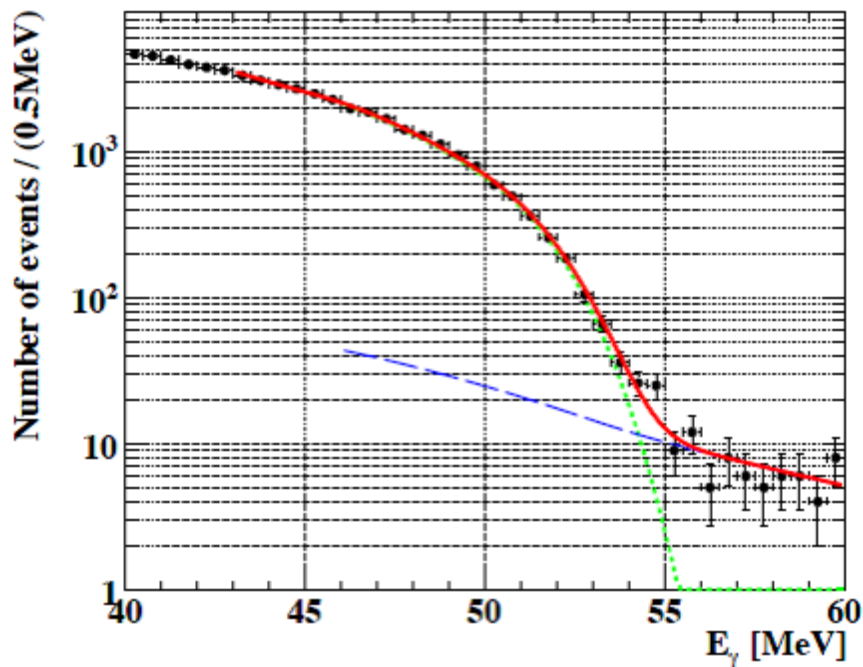


図 2.2: 観測されたガンマ線のエネルギー分布、緑が輻射崩壊イベントとポジトロン対消滅によるもの、青が宇宙線によるバックグラウンドの寄与である。赤がそれらを足し合わせたものである。

ンマ線検出器で検出される。MEG 実験の検出器の概略図を図 2.3 に、検出器の断面図を 2.4 に示す。この章ではポジトロン側について記述する。中心のターゲットで発生した陽電子は飛跡検出器を通ったあと両側に置かれたタイミングカウンターでタイミングが計られる。

2.3.1 $\pi E5$ ビームライン

MEG 実験はスイスアールガウ州にある PSI(Paul Scherrer Institute) で行われている。MEG 実験に使用されるミュオンビームは世界最高強度の陽子サイクロトロンにより生成されるプロトンビーム (590 MeV、50.63MHz、 $\sim 2.2\text{mA}$) がターゲット E (40mm または 60mm 厚の黒鉛ターゲット) に照射したパイオン崩壊から得られる。ターゲット表面近くで静止したパイオンが崩壊して生じた表面ミュオン (運動量 $28\text{MeV}/c$) が使用される。生成したミュオンビームはビームマグネットによって運動量の選別、強度の調整、陽電子の除去などが行われた後、BTS(Beam Transport Solenoid) (図 2.5) を通してターゲットまで運ばれる。ターゲットはポリエチレン・ポリエステル製でビームに対して 22° 傾けて設置され対消滅の低減とミュオン静止

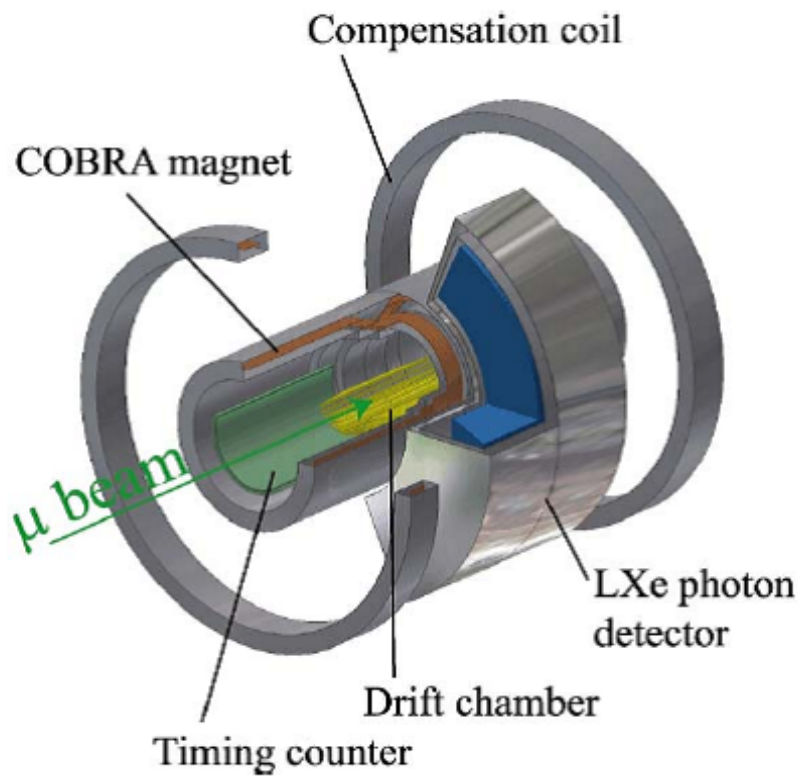


図 2.3: MEG セットアップの概観

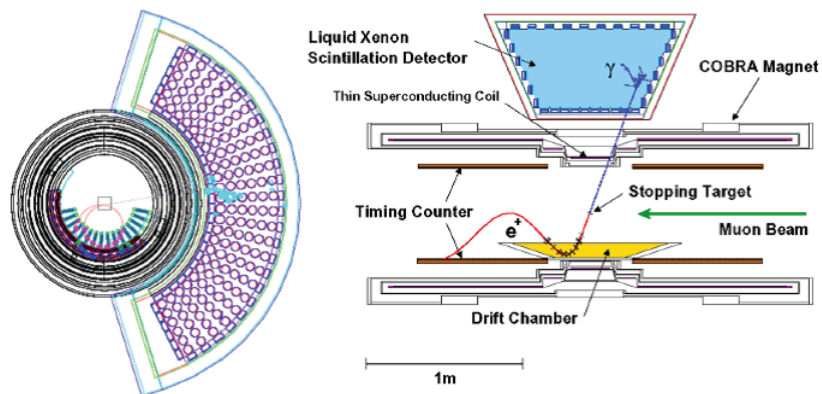


図 2.4: 検出器の断面図

に必要な厚さを同時に実現している。

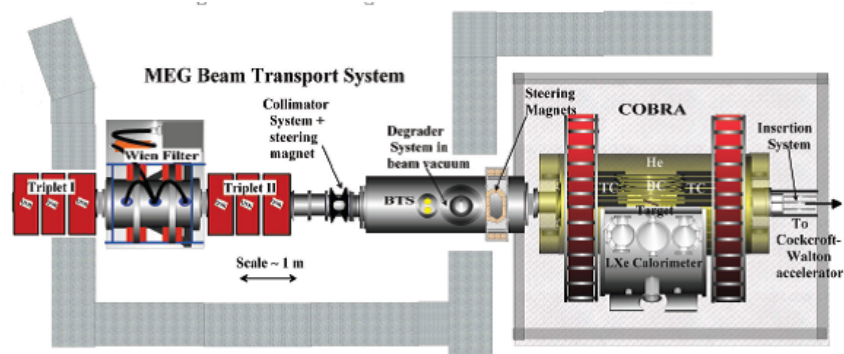


図 2.5: MEG 実験ミューオンビーム輸送システムの概略図。 E5 ビームラインから導かれたミューオンビームは BTS(Beam Transport Solenoid) を通った後、COBRA マグネット内部に導かれ中心に置かれたターゲット上で停止する

2.3.2 COBRA マグネット

MEG 実験用超電導ソレノイド磁石 COBRA(CONstant Bending RADIUS) (図 2.6) が作り出す勾配磁場によって、放出されたポジトロンの z 軸に垂直な面への射影回転半径は放出角によらず運動量の絶対値だけに依存するので、信号に近い運動量を持ったポジトロンだけが測定器に入ってくる。また、速やかに陽電子が掃引されるので飛跡検出器(ドリフトチェンバー)の安定動作を得られる。超電導マグネットの漏れ磁場によるガンマ線検出器の光電子増倍管への影響を抑えるために補償コイルによって漏れ磁場を 50 ガウス程度以下まで抑制している。加えて COBRA 磁石はガンマ線の検出範囲では $0.197X_0$ という低物質質量を実現している。

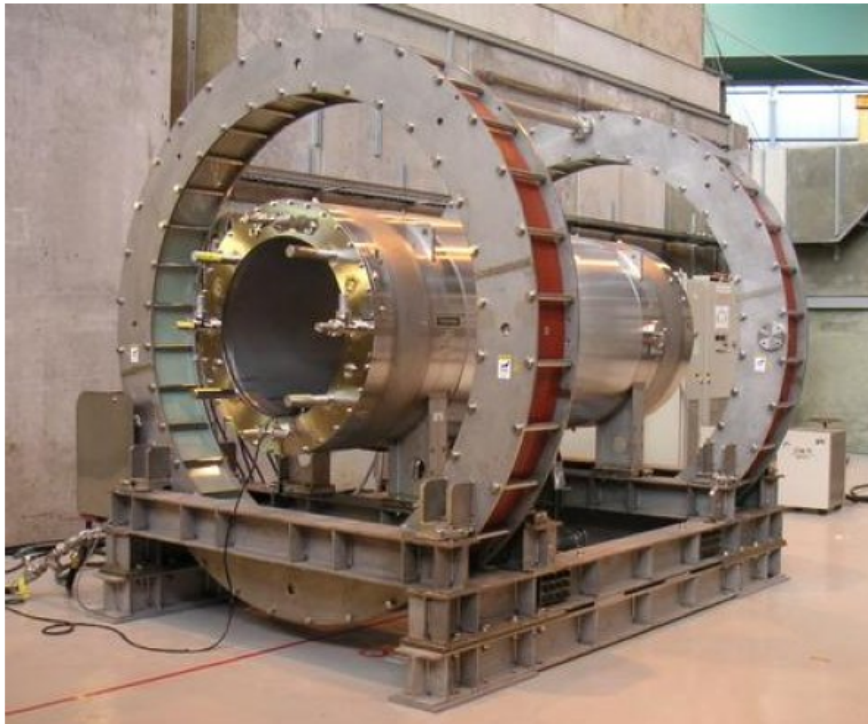


図 2.6: COBRA マグネット

2.3.3 ドリフトチェンバー

ドリフトチェンバーは台形板状のモジュールを 10.5° の間隔で 16 枚並べてある (図 2.7、図 2.8)。それぞれのモジュールは半セル分だけずれた 2 つの層を組み合わせて出来ていて、内部はヘリウムとエタンが等量混合されたガスで満たされている。測定領域は半径 19.3cm から 27.0cm で 40MeV 以

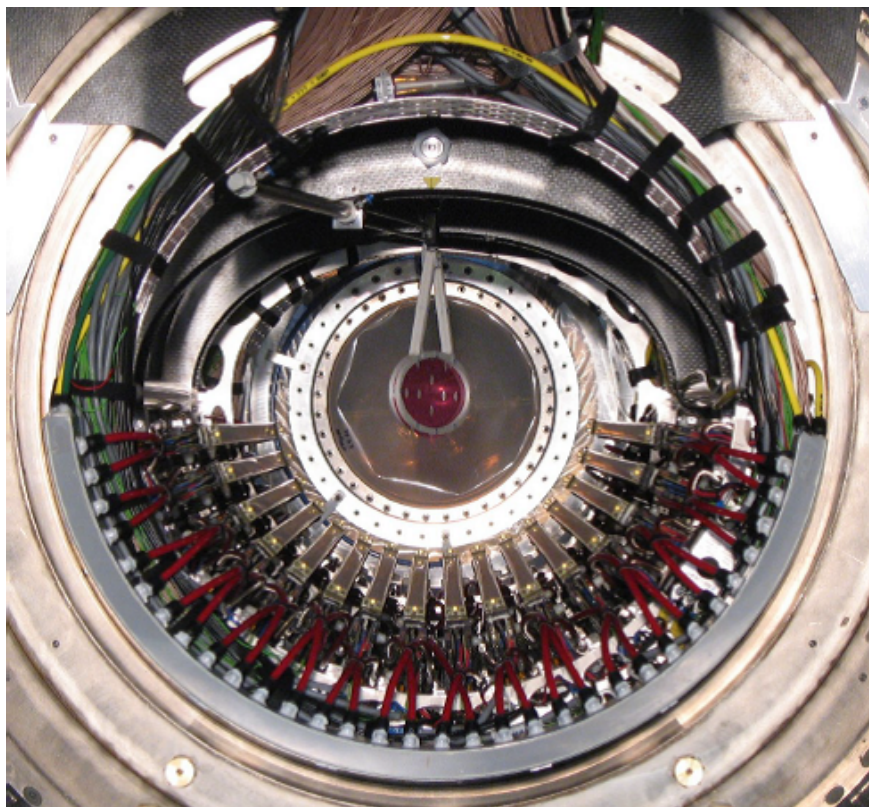


図 2.7: COBRA マグネットの内部とドリフトチェンバー

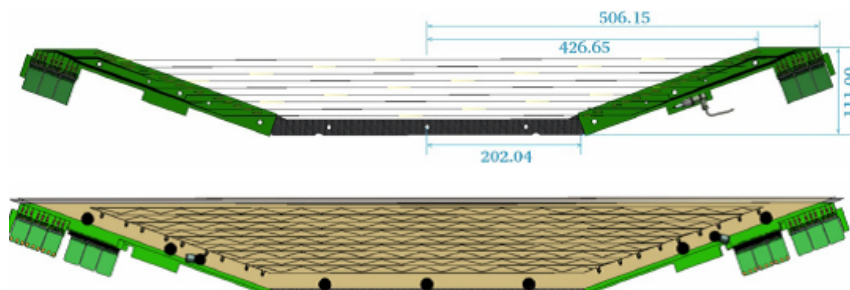


図 2.8: ドリフトチェンバーモジュール

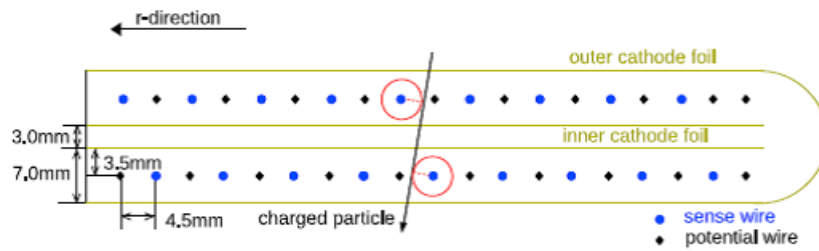


図 2.9: セル構造の断面図

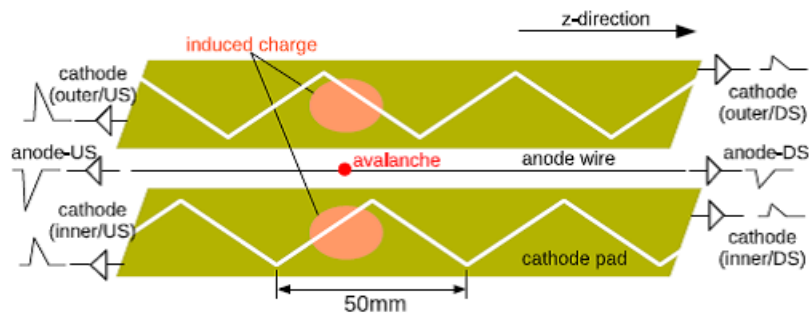


図 2.10: ヴァーニャパッドの概念図

上の高エネルギーを持つ陽電子のみを測定する。ビーム軸方向（ z 軸）の長さは内側が $\pm 50\text{cm}$ 、外側が $\pm 21.9\text{cm}$ である。アノードワイヤーとセンスワイヤーが 4.5mm 間隔で交互に張られていて、上流と下流における信号の電荷の比で 1cm の精度で z 軸方向の位置がわかる（図 2.9）。カソードには厚さ $12.5\mu\text{m}$ のポリイミドにアルミを蒸着したヴァーニャパッドを採用している（図 2.10）。ヴァーニャパッドは周期的にカソードの形状が変化し、電荷が誘起された位置により幾何的な要因で信号の大きさが変わることアノードの情報と合わせ z 軸方向の位置を精密に測定する。粒子との相互作用を減らすためできるだけ低物質質量で設計されており、ポジトロンの軌道にあるすべてのチェンバーおよび COBRA マグネット内部のヘリウムガスをあわせて $2.0 \times 10^{-3} X_0$ という低物質質量を実現している。

2.3.4 タイミングカウンター

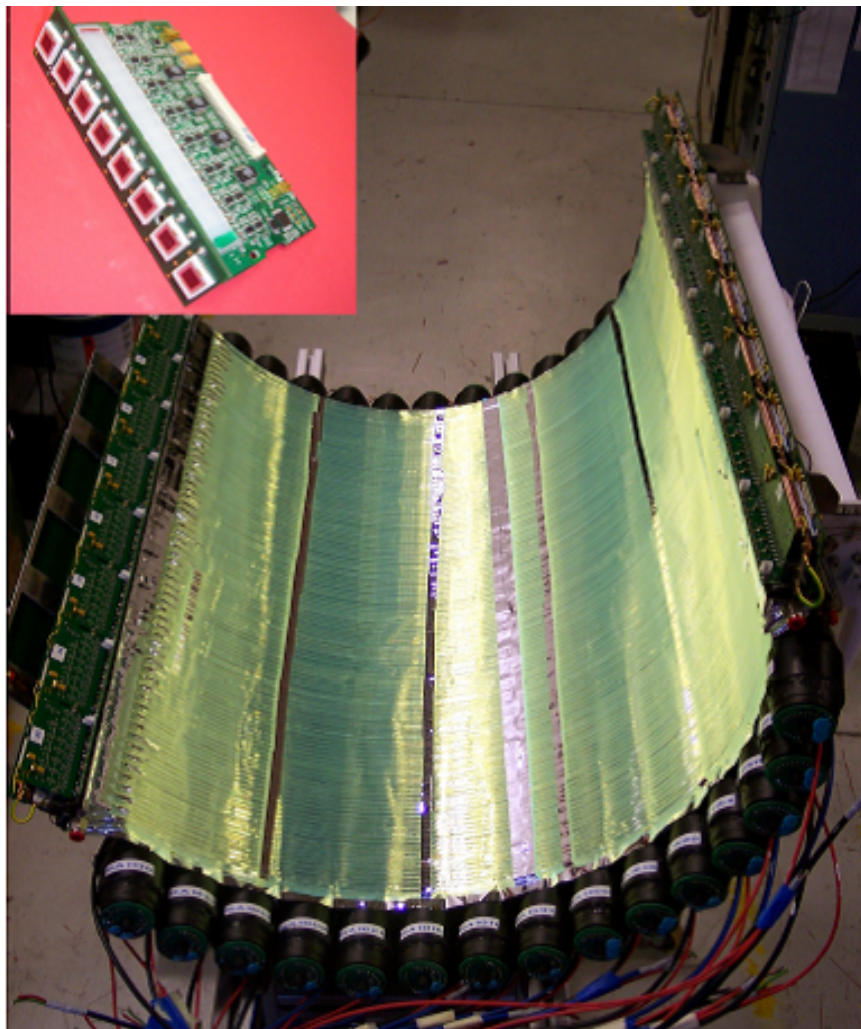


図 2.11: シンチレーションファイバー用 1cm 角 APD とタイミングカウンター。図の上下方向が z 軸方向で、シンチレーションバーと両端に PMT が取り付けられている。それと直行する角度 方向にシンチレーションファイバーと両端に APD が取り付けられている。

ターゲットから放出された陽電子はドリフトチェンバーを通過したあとタイミングカウンターに入射する。タイミングカウンターはビームに垂直方向にシンチレーションファイバー + APD、ビームと平行にシンチレーションバー + PMT が設置されている。シンチレーションの両端に信号が到達した時刻を τ_a 、 τ_b とすると位置と時間はそれぞれ $\tau_a - \tau_b$ 、 $(\tau_a + \tau_b)/2$ から求められる。測定した飛跡の長さによる補正などを行うことにより、ターゲットでの陽電子の放

出時刻を 100psec(σ) の精度で測定する。

3 液体キセノン検出器

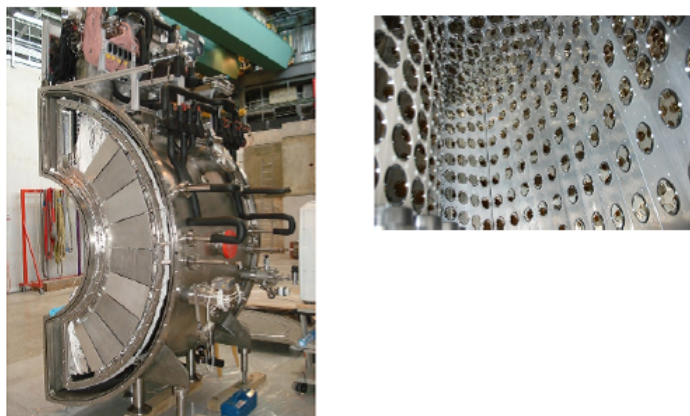


図 3.1: 液体キセノン検出器。右の丸が PMT

大量のバックグラウンドから $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ イベントを識別するためにガンマ線の時間、エネルギー、位置に関して高精度の測定能力が求められる。MEG 実験ではガンマ線の測定に液体キセノン検出器を採用している。液体キセノンは

- シンチレーション発光量が多い (NaI の 80%)
- シンチレーション光の減衰が早い
- 密度が高い
- 一様
- シンチレーション光の自己吸収がない

など優れた性質を持つ。

MEG 実験のために開発された液体キセノン検出器は容量約 9 0 0 L の液体キセノンを用いた世界最大のシンチレーション検出器である。図 3.1 はその概観と内部の写真である。COBRA 磁石を囲うように C 形をしており立体角で 1 0 % をカバーする。特別に開発されたパルス管冷凍機を備え、キセノン液体のまま使用する。ターゲットから放出されたガンマ線はマグネット、クライオスタット、PMT を貫通して液体キセノンに入射する。多くのガンマ線は液体キセノンに入って数 cm の位置で対生成反応を起こしそこから出るシンチレーション光を直径 2 インチの光電子増倍管で測定する (図 3.2)。ガ

表 3.1: 液体キセノンの性質

$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.98
$\lambda(\text{nm})$	178
沸点 (K)	167.1
dE/dx (MeV/cm)	3.89
Moliere radius (cm)	4.1
X_0 (cm)	2.77
発光時定数 (ns)	4/22/45

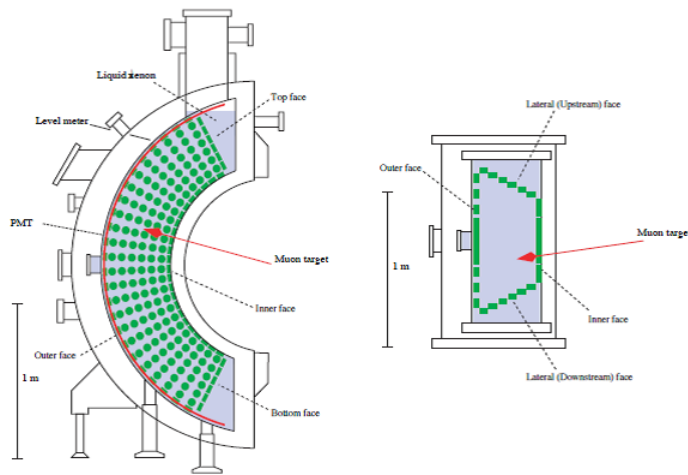


図 3.2: 液体キセノン検出器断面図

ンマ線が最初に反応した位置は内側の PMT の信号の強度の分布から算出する。各 PMT の信号時間を平均してその時刻も算出できる。すべての光量の和を取ることによってエネルギーも計算できる。こうして入射したガンマ線の位置、時刻、エネルギーの測定を同時にかつ高精度に行えるという特長が図 2.2 のように高エネルギーのガンマ線を落としアクシデンタルパイルアップを除去するために要求される性能を満たしているのである [1]。

3.1 液体キセノンの性質

3.1.1 液体キセノンの特徴

液体キセノンは発光、減衰が早い(図 3.3)ので MEG 実験のような高計数の実験にも有効である。発光量も大きいので高い分解能が得られる。このように液体キセノンはシンチレータとしてとても優れた性質を持つ。しかしな

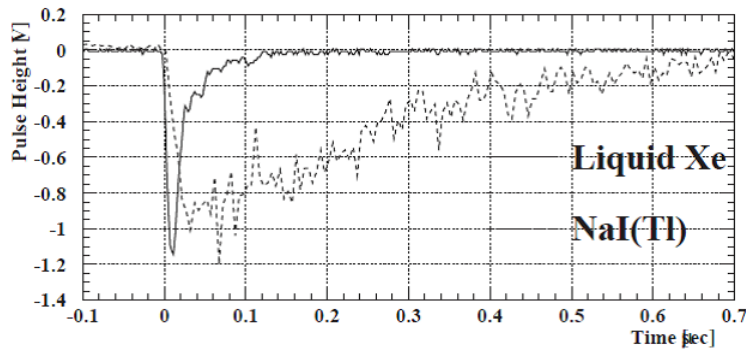


図 3.3: NaI と液体キセノンの発光時間特性

からキセノンは液体でいる温度領域が狭く、性能を維持するためには適切な温度管理が必要となる。また、わずかな不純物によってシンチレーション光の吸収が起こって性能が落ちてしまうため、必要に応じて純化装置を用いて液体キセノンの純度を維持しなければならない。

3.1.2 液体キセノンの発光機構

液体キセノンのシンチレーション光には励起光と再結合光の二種類の過程がある。励起過程は以下。



イオンと電子が再結合する過程は以下。



励起分子 Xe_2^* には異なる 2 つの状態があり、それぞれシンチレーション光の 4.2ns と 22ns の成分に対応する。ガンマ線によるシンチレーションの際再結合のプロセスでは 45ns の時間を要する。ともに生じる光子のエネルギーは等しい。また励起に必要なエネルギーと異なるために液体キセノンによっ

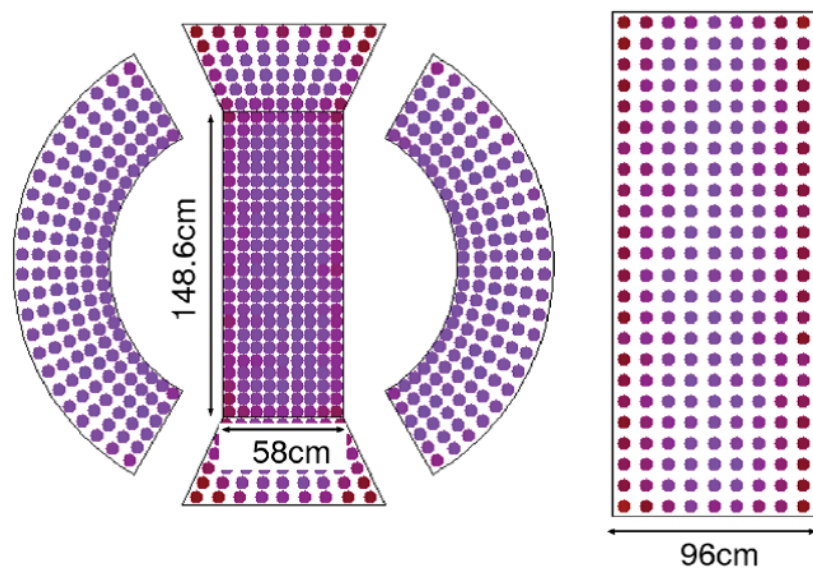


図 3.4: キセノン検出器の PMT 配置図

て再吸収されない。ガンマ線によるシンチレーションは 45ns の過程が主となる。

3.2 液体キセノン検出器

3.2.1 検出器の構造

COBRA 磁石に近い内側、外側、底面、天板、側面の部分に分けられる(図 3.4)。ガンマ線の通過する内壁の PMT 台は低物質化のためにプラスチック(PEEK)で出来ている。側面には青色 LED が取り付けられていて異なる明るさの光で照らし PMT 利得のキャリブレーションを行う。金メッキのタングステンワイヤーが 5 本張られておりキャリブレーションのためのアルファ線ソース ^{241}Am が各線 5 箇所埋め込まれている。波形解析でアルファ線ソース由来の発光をガンマ線のそれと区別できる。

3.2.2 光電子増倍管 (PMT)

検出器に使用されている PMT は MEG 実験のために開発されたものである(浜松ホトニクス製 R9869)(図 3.6,3.7)。磁場にやや耐性のあるメタルチャンネルダイオード PMT であり液体キセノンで動作するように低温でも量子効率の落ちにくい真空紫外光に感度がある光電面が採用されている。この PMT が内壁に 846 個並べられている。磁場中での性能は図 3.8 に示さ

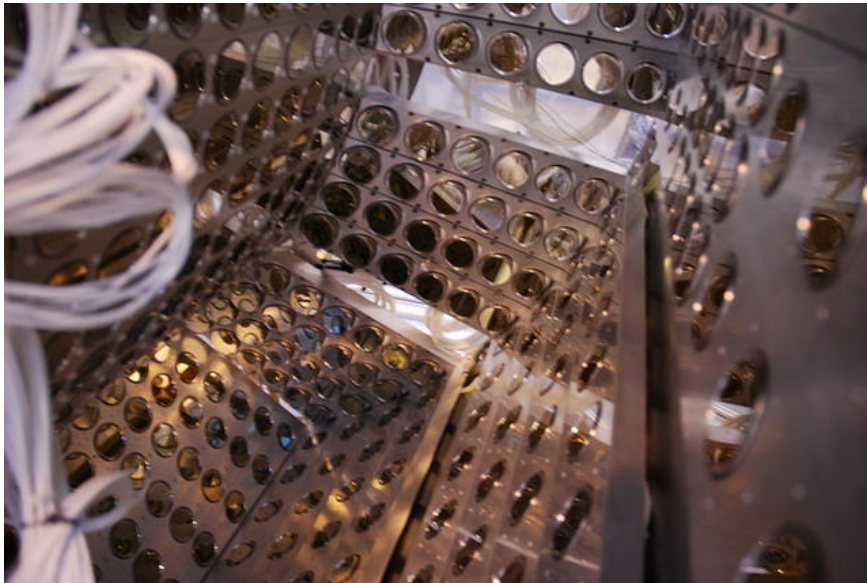


図 3.5: キセノン検出器の内部

れている。キセノン検出器周辺の磁場は補償コイルにより 50 ガウス程度以下に抑えられている。

3.2.3 キセノン純化装置

液体キセノンのシステムは検出器、純化装置、保管容器で構成されている(図 3.9)。キセノンのシンチレーション光は真空紫外光(VUV)で酸素や水に容易に吸収されてしまう。そういった物質が不純物として ppm 以下の量含まれていても測定に影響があるので実験中の継続的な純化が必要である。そのために液体用と気体用の二種類の純化装置が用意されている。気体用純化装置は加熱された金属を通すゲッターで希ガス以外のほとんどの不純物を取り除くことができる。キセノンを一旦気化させ純化装置を通し、再び液化させて検出器に戻すのだが、この方式では純化速度は冷凍能力によって制限されてしまい、0.06 L(liquid)/h の速度しかない。液体純化装置はそれよりは速く 70 L/h の速度で純化できる。この純化装置は 2 つのカートリッジから構成されており、メインのカートリッジは純銅の酸化により主に酸素を取り除く。もうひとつのカートリッジは分子の濾過装置で水分子を取り除くことができる。内部に設置された ^{241}Am からの一定のエネルギーのアルファ線からのシンチレーション光の吸収を測定することでキセノンの純度を監視している。検出器はキセノンを液体で保存するクライオスタットである。このために開発された冷凍機は 200 W の冷凍能力でキセノンを液化することができる。また補助的な冷却のために液体窒素冷却管が冷凍機の周りとき



図 3.6: PMT (R9869)

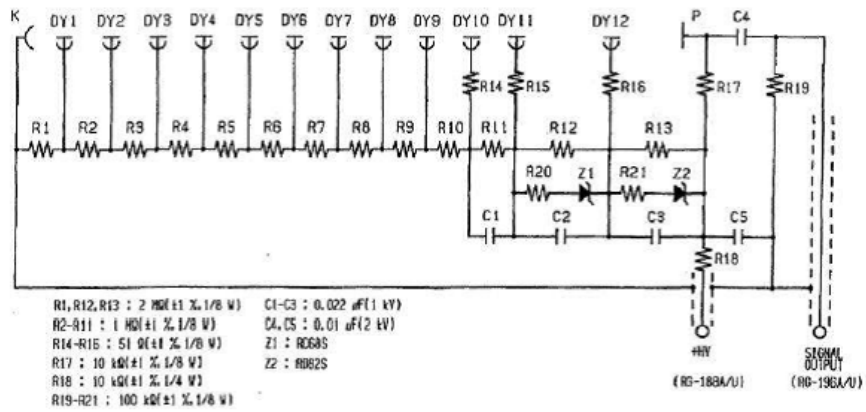


図 3.7: プリーダーの回路図

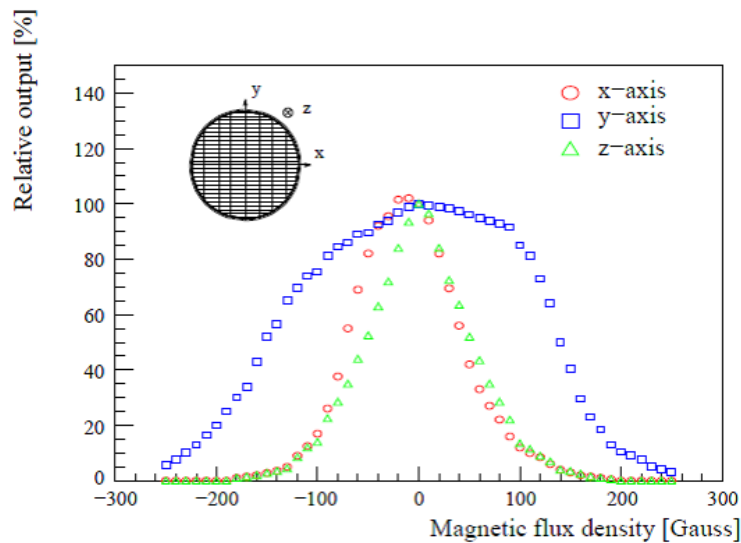


図 3.8: 磁場中での PMT のゲイン

セノン容器の 2 重壁の内側に、外側の壁面と側面に設置されている。キセノン容器内部は測定中は 1 . 2 気圧、1 6 5 K に保たれている。[2]。

3.2.4 キセノン保管容器

実験中検出器のメンテナンスなどで一時的にキセノンを避難させなければならない場合がある。そのために液体キセノン用 1 1 0 0 L タンクが設置されている。このタンクは 0 . 6 MPa の圧力に耐えられるので冷却が 1 0 0 時間途絶えても安全に保管することができる。またまれに使われる保管用タンクが他に 8 つあり長期の保管や 1 1 0 0 L タンクのメンテナンスなどの際に使用され、キセノンを 1 7 、5 . 8 MPa の高圧で保管する（臨界点）。ひとつのタンクで 3 6 0 k g 液体体積にして 1 2 0 L のキセノンを保管できる（図 3.9）。

4 パイオンの CEX (荷電交換反応) を利用したキャリブレーション

PMT に届くシンチレーション光はキセノン中のごく微量の不純物の存在によって阻害される。長期に実験の最中にその測定能力を維持するために定期的なキャリブレーションを必要とする。MEG 実験ではアルファ線源、LED、RMD(Radiative Muon Decay)、週 3 回の CW (専用の Cockcroft-Walton 型陽子加速器から作られる陽子と Li 標的との反応により生成する 17.6MeV ガン

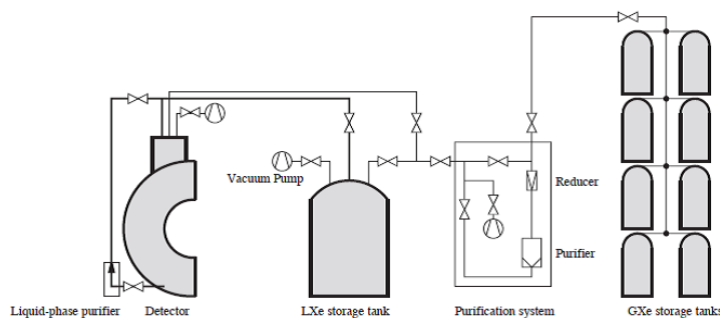


図 3.9: Xe 純化および貯蔵装置

マ線を利用する)などで物理測定期間中も絶えずキャリブレーションを行なっている。それらはキセノンの発光量や PMT のゲインをモニタしたりガンマ線の相対的なエネルギースケールの場所依存性を較正したりする目的で行われる。CEX によるキャリブレーションはそれらとは目的が異なり $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ による 52.8MeV のガンマ線に対する入射位置ごとの位置分解能時間分解能などを求め、エネルギースケールの絶対値を較正するために行われる。

4.1 原理

CEX キャリブレーションは π^- ビームを液体水素ターゲットに照射して起こる荷電交換反応 $\pi^- + p \rightarrow n + \pi^0$ を利用する。中性パイオンは 98.8% の割合で $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ のように 2 つのガンマ線に崩壊する。このとき放出されるガンマ線は図 4.1 のような放出角に依存したエネルギーを持つ。片方は液体キセノン検出器に入射し、もうひとつは反対側に設置された NaI 検出器によって捉える。それらの検出器で得られた物理量から放出角を絞ることで BackToBack のイベントを選び、ほぼ単一のエネルギーのガンマ線を得ることができる。図 4.2 のように 55MeV と 83MeV のガンマ線が得られる。これは $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊で観測される 52.8MeV のガンマ線と近いエネルギーのためキャリブレーションに有用である。

4.2 セットアップ

NaI 単結晶の背後に APD を取り付けたものを 3×3 に組んで検出器とする。液体キセノン検出器の反対側でガンマ線の測定をするために図 4.3、4.4 にあるような駆動装置に設置する。ビーム方向を Z 軸とするとこの駆動装置は Z 軸に平行に ± 60 cm 動き、Z 軸周りに $\pm 60^\circ$ 回転でき、鉛直方向の周りに 35° 回転できる。ターゲットと対照となる位置の液体キセノン検出器の感度の測定を全体にわたって行うことができる。CEX ランでは物理測定

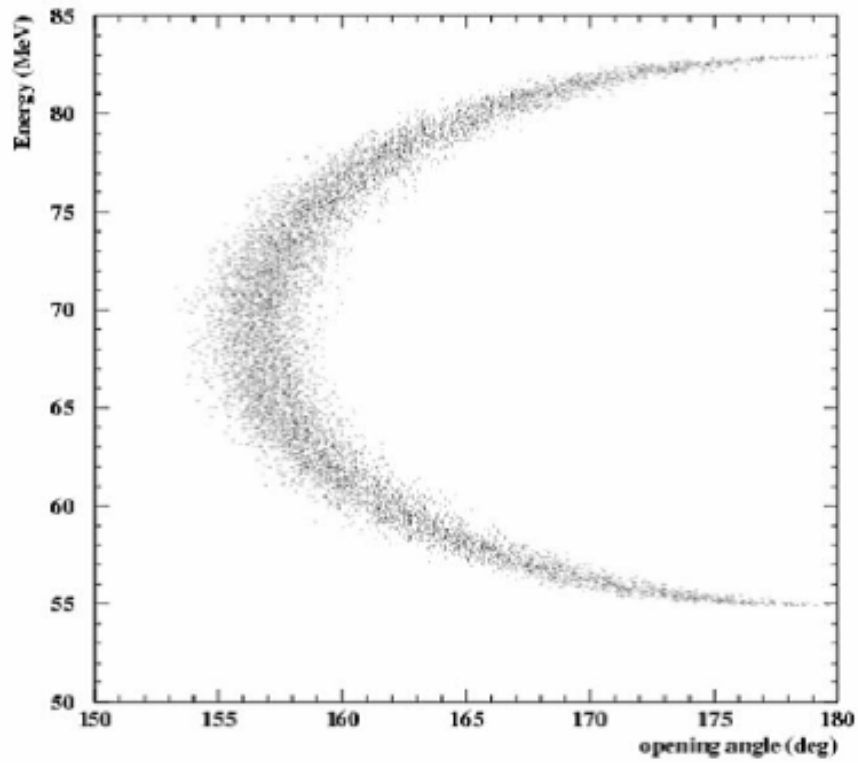


図 4.1: 5 cmの広がりを持ったターゲットからの CEX ガンマ線のエネルギー (シミュレーション)

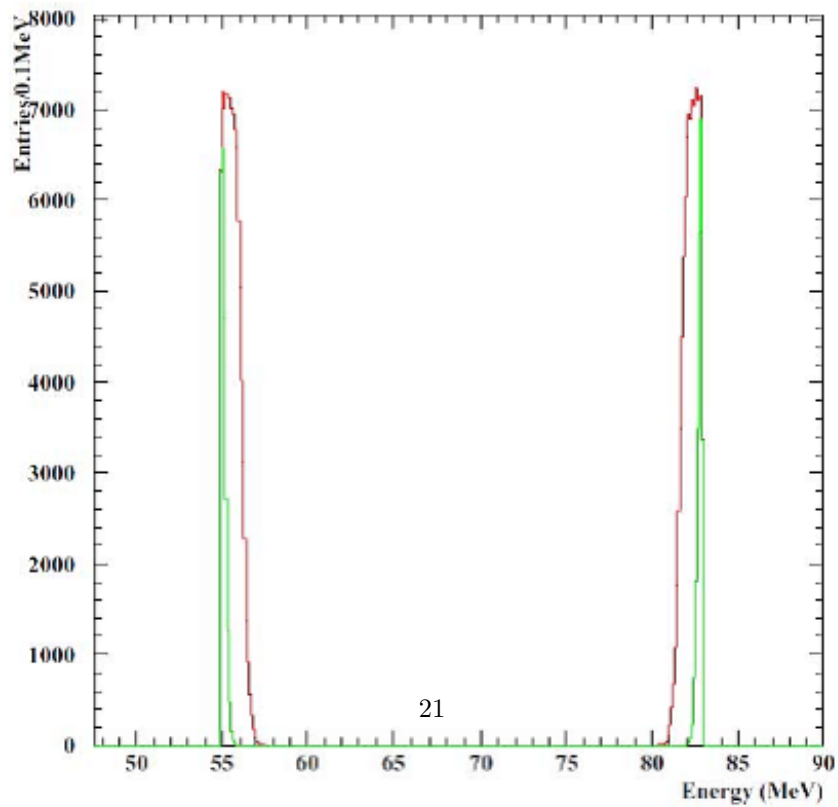


図 4.2: 放出角 $\phi > 175^\circ$ (緑) と $\phi > 170^\circ$ (赤) のエネルギー分布 (シミュレーション)

表 4.1: BGO と NaI の比較

	NaI	BGO
Radiation length(cm)	2.59	1.12
Mollier radius(cm)	4.13	2.23
dE/dx(MeV/cm)	4.8	9
Density(g/cm ³)	3.667	7.13
Decay time(ns)	230	300
d(LY)/dT(%/°C)	-0.2	-0.9

とは異なり π^- ビームと液体水素ターゲットを用いる。大掛かりなセットアップが必要なため CEX による検出器の較正は 1 年に一度だけ行なわれる。図 4.5 はキセノン側と NaI 側でのエネルギーの相関を示している。キセノン側に 5.5 MeV のガンマ線が入った場合、反対側の NaI では 83MeV のガンマ線が検出される。その逆の場合と合わせ 2 つのピークがあるのがわかる。

4.3 BGO の性質

表 4.1 に液体キセノンの物性を示す。NaI は比較的安価ではあるが潮解性があり、密度が低いので検出器のサイズが大きくなってしまふ欠点がある。実験場のスペースの制限により PMT を取り付けることができない。しかし密度の高い BGO を代わりに使うことで APD の代わりに PMT を取り付けることができる。Moliere 半径が小さいために結晶の数を 4×4 に増やすことができる。図 4.6 のようにエネルギー分解能の向上が予想された。また BGO はやや高価で NaI に比べて温度係数が高いという欠点があるが NaI と異なり潮解性がなく使いやすい。

4.4 BGO 検出器のセットアップ

今回製作したのは試験用の BGO 検出器であり、BGO による効率の向上がどの程度であるか見積もる目的で製作された。BGO 検出器は NaI の場合と同じく結晶の後ろに光検出器を取り付ける。NaI の場合と違い結晶が小さくて済むので APD の代わりに PMT が使われる。PMT のゲインは磁場に依存し、BGO の発光量は温度に依存性があるため、較正する必要がある。磁場依存性を較正するために青色 LED、温度依存性を較正するために温度計として白金抵抗 (Pt100) を図 4.7 のように取り付けた。LED はそのままでは光が強すぎるのでテフロンテープを巻いて弱めた。PMT と結晶はオプティカルグリスで接着し、全体を黒いビニールテープで巻いて遮光した。

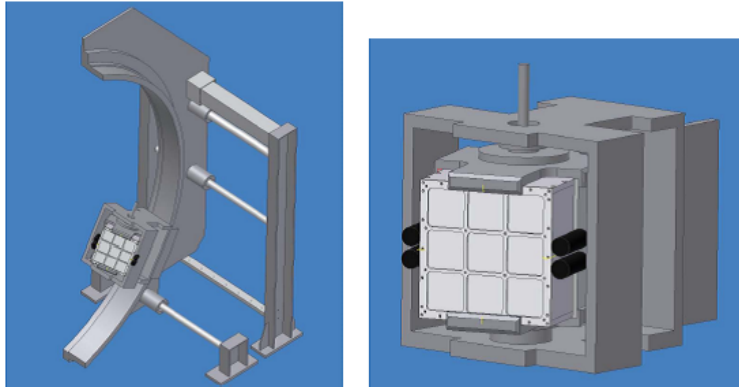


図 4.3: NaI 駆動装置の設計図



図 4.4: NaI 駆動装置と NaI 検出器

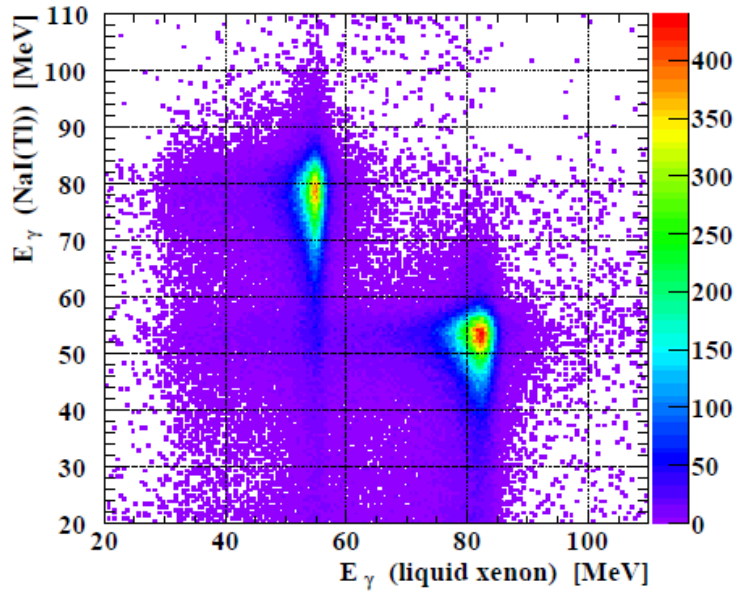


図 4.5: NaI と液体キセノンの CEX エネルギー相関図

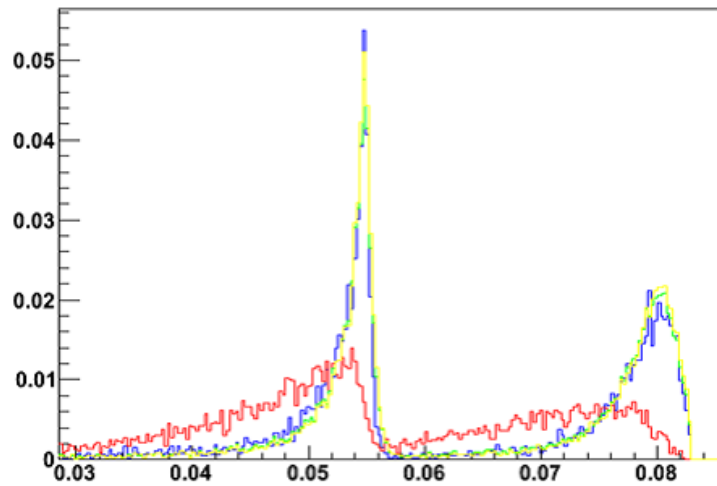


図 4.6: BGO と NaI のエネルギーデポジットシュミレーション結果。横軸の単位は GeV。赤は NaI 3×3 の中央の結晶に全体の 17% 以上の電荷が落ちたイベントでトリガー、青は BGO 3×3 の中央に 10% 以上の電荷でトリガー、緑は BGO 4×4 の中央 4 つに落ちた電荷の和が全体の 60% 以上でトリガー、黄は BGO 4×4 の中央 4 つのうちの 1 つに落ちた電荷が全体の 60% 以上でトリガー

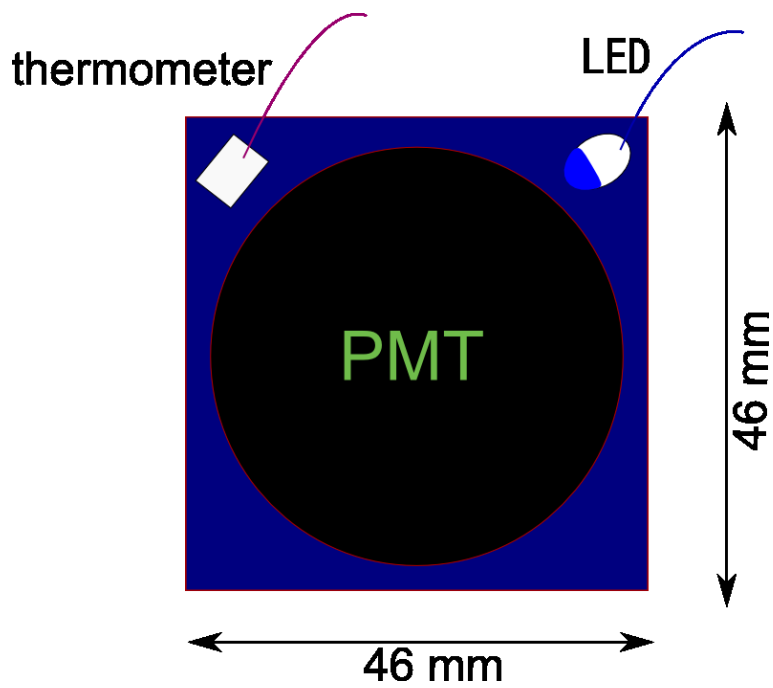


図 4.7: PMT 側から見た BGO 検出器の設計図

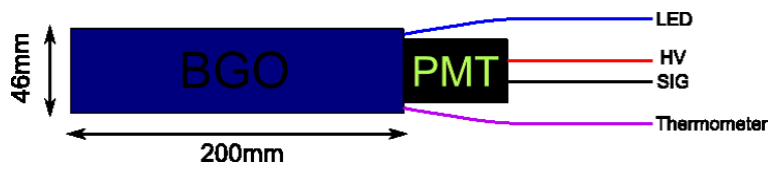


図 4.8: 上から見た BGO 検出器の設計図

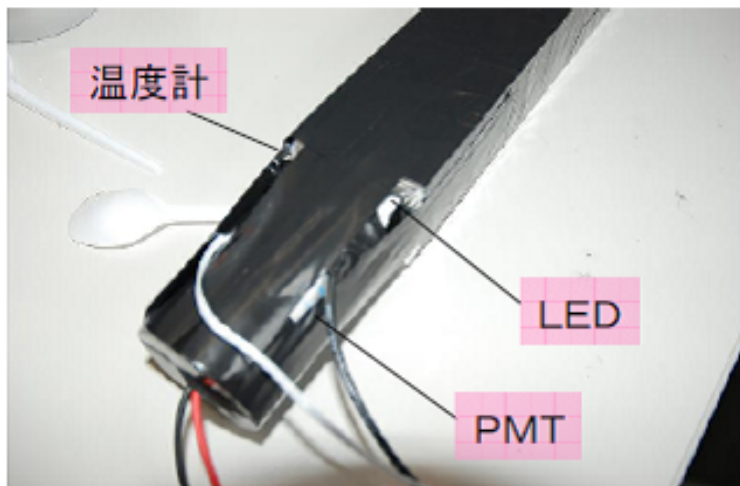


図 4.9: 製作途中の BGO 検出器

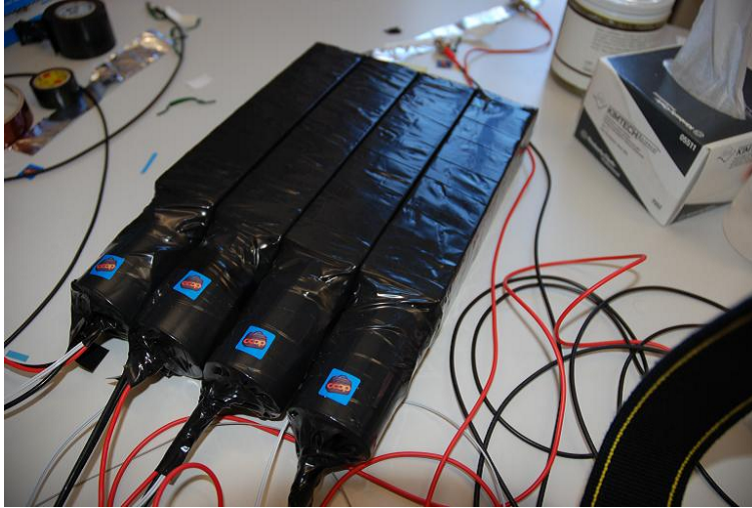


図 4.10: BGO 検出器を 4 つ並べた図



図 4.11: BGO 検出器を 4 × 4 に積んだ図

4.5 宇宙線を使ったHVの見積もり

BGO 検出器を駆動装置に設置し CEX のセットアップでテストする前に PMT に印加する HV の見積もりをつけるため、CEX テスト前に宇宙線の測定をした。BGO 検出器を縦に 4 つ積んですべての検出器で信号があるという条件でトリガーをかけた。測定はオシロスコープで行った。結果の一例が図 4.12 である。PMT の電荷のヒストグラムのピーク位置から必要な HV の比を求めた。

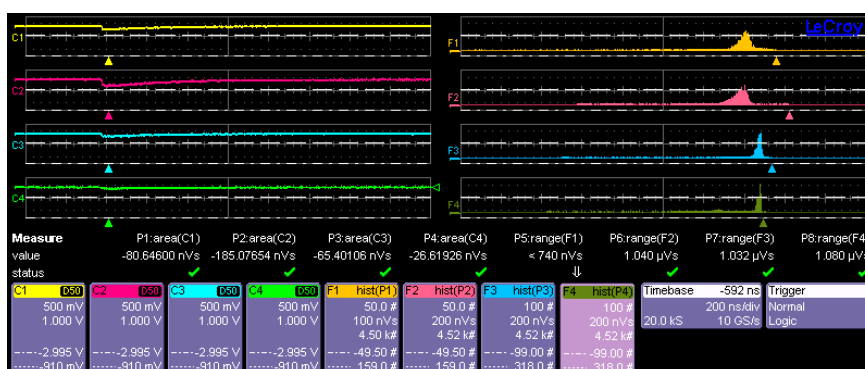


図 4.12: 宇宙線による信号。左が信号波形、右が電荷分布

4.6 CEX ランでの試運転

宇宙線テストで見積もった HV をかけて CEX ランで動作テストをした。2010年の CEX では正式なキャリブレーションデータは NaI を使って取られたが、その後テストとして5時間弱 BGO でもテストデータを取った。図 4.13 はキセノン側と BGO 側の相関である。図 4.5 の NaI の相関図にあったような 2 つのピークが見られない。

その結果を受け、CEX と同じ HV をかけてもう一度宇宙線を測定したがピークは見られなかった。

波形を調べたところ、HV が大きすぎたためにサチレーションを起こしていることが分かった。失われた電荷を復元することでピークが見えるようになるのではないかと考え、データに補正をかけた。シンチレーション光の波形の QA 比が一定であることを利用して飽和した高さで失われた電荷の全体に対する割合の関係を求めた。具体的には、サチレーションしていない典型的と思われる波形を選んで波の頂点のからの高さで電荷の損失の関係から必要な補正係数を求め (図 4.14) 実際のデータに補正をかけた。

図 4.15 はその結果を示したものである。補正をかけたあとも予想された結果が得られなかった。

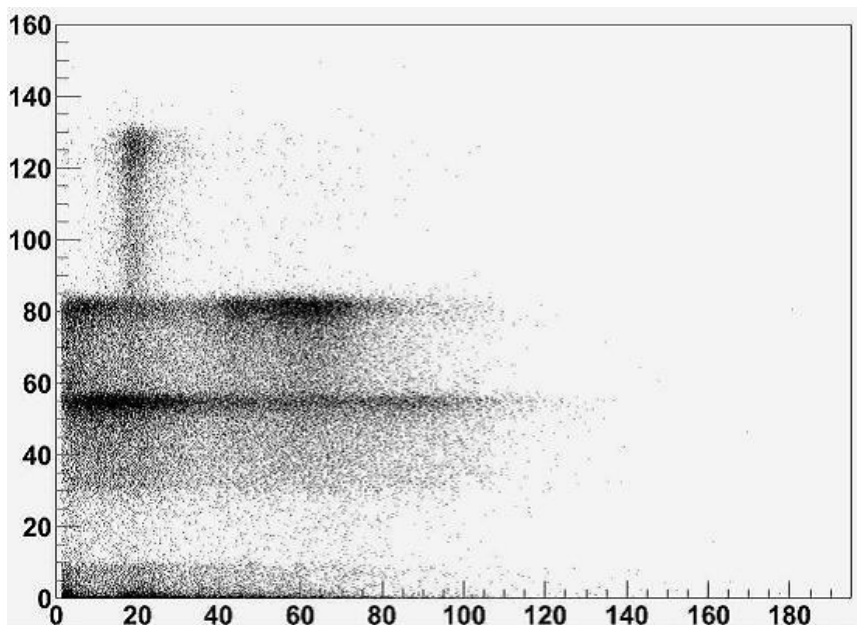


図 4.13: CEX で得られた BGO とキセノンのエネルギー相関。縦軸キセノン検出器、横軸 BGO 検出器、単位 [MeV]

HV が高すぎて、サチレーションするだけでなく波形自体が崩れているようだった。完成した BGO 検出器は COBRA 磁場の影響下で使用されることになる。使用された PMT は磁場に強いファインメッシュ PMT で、COBRA 磁石から漏れ出す磁場を打ち消すための補償コイルがあるとはいえ、キセノン検出器の PMT にかかる数十ガウスと同じかそれ以上の磁場を想定しなければならなかった。磁場によるゲイン低下を補うため、高い HV をかけて測定が行われていた。

磁場による増倍能力の低下を調べるために HV を下げ再び宇宙線の測定によってゲイン合わせが行われた。その結果が図 4.16 である。またゲインの磁場依存性を調べるために磁場のあるなしで宇宙線を測定した。その結果が図 4.17 である。以上の結果から磁場中でもゲインの低下が少ないことがわかった。

4.7 結論

これまで NaI で行なってきた CEX の、キャリアレーション性能改善、検出効率の向上を目指して BGO 検出器の導入が検討された。BGO 検出器を準備して宇宙線による較正を行った。2010年の CEX の最後、実験場所に持ち込んでテストを行った。しかしこのとき使用した電圧値が高すぎてゲイ

ンの調整が難しいことがわかった。磁場中でのゲイン低下を見越して設定した電圧が高すぎた。その結果をふまえ磁場のありなしの違いを測定し、BGO が実際に CEX に使用可能であることが確認され、2011年の CEX ランで BGO 検出器が本格的に導入された。図 4.18、4.19 が 2011年の CEX ランで正式に BGO がキャリブレーション使用された結果である。

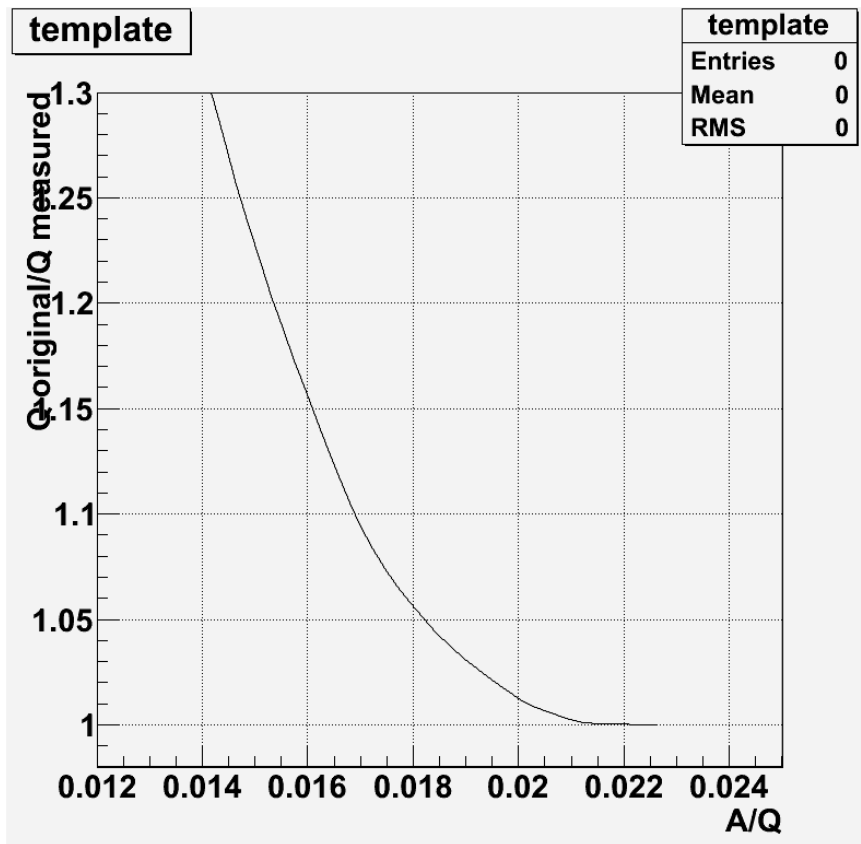


図 4.14: サチレーションによる損失、縦軸が必要な補正係数、横軸が飽和後の QA 比

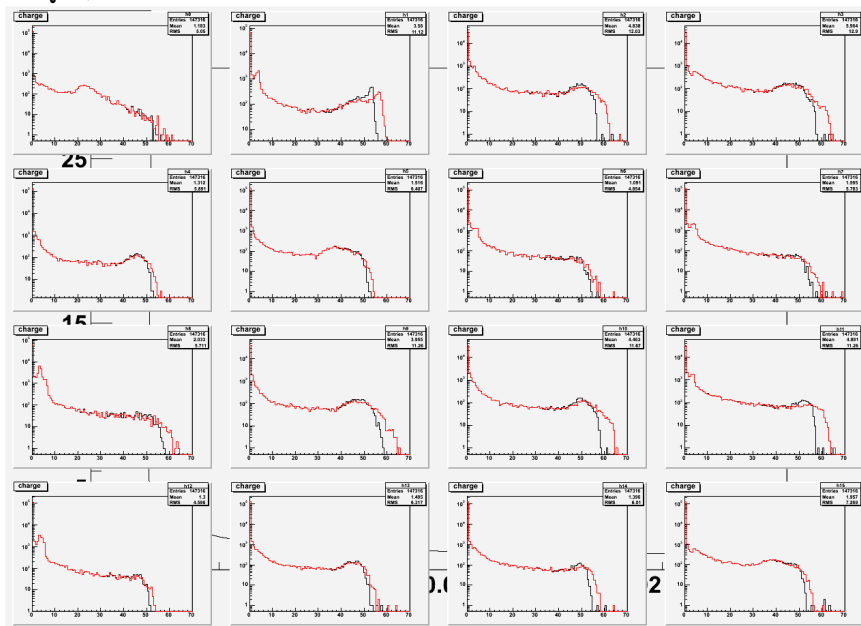


図 4.15: 宇宙線による電荷のヒストグラム黒が補正前、赤が補正後

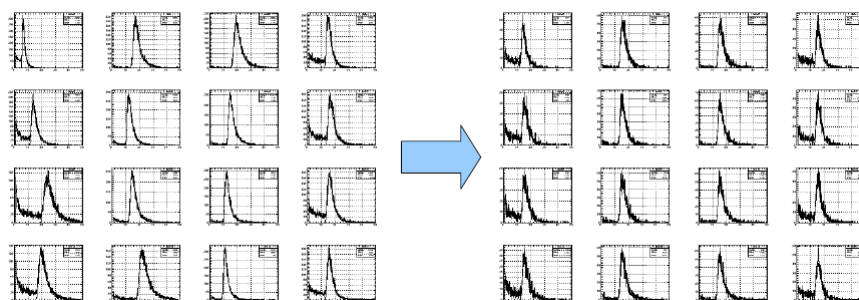


図 4.16: 磁場なし、HV を下げて宇宙線を測定し、ゲインを合わせた

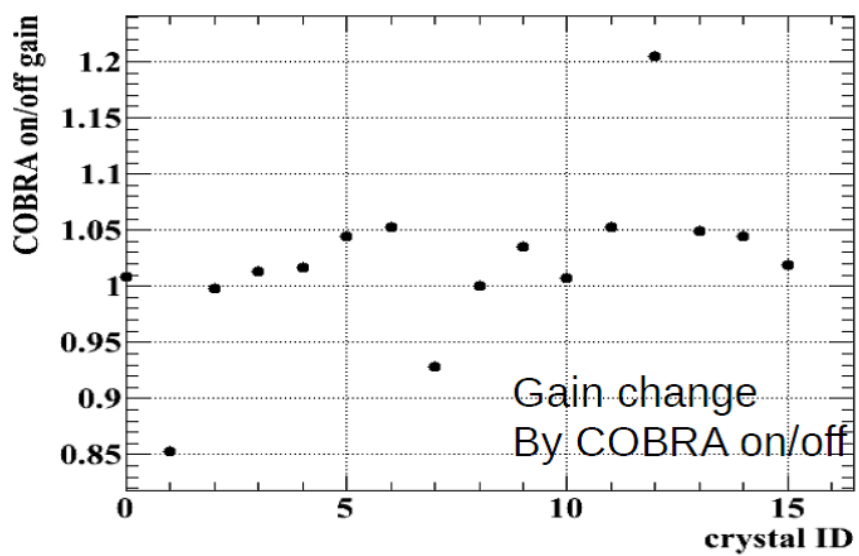


図 4.17: 磁場のある場合と無い場合の比較

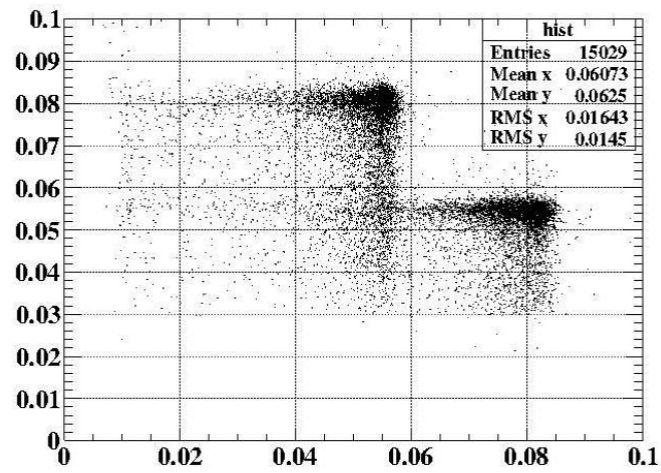


図 4.18: 2011 年の CEX ランでの液体キセノンと BGO 検出器のエネルギー相関図

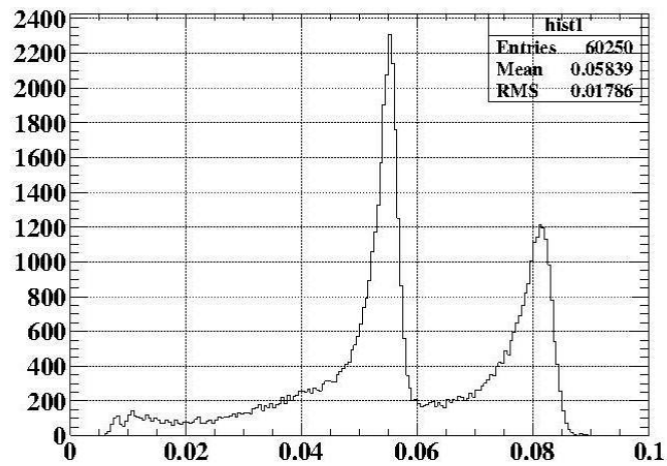


図 4.19: 2011 年の CEX ランでの BGO のエネルギー分布

5 MPPC の性能試験

5.1 概要

MPPC (Multi Pixeled Photon Counter) は数十 μm 四方の APD (Avalanche photo diode) を多数並べアバランシェを利用して光子 1 個からの検出を可能とするものである。現在 MEG 実験ではキセノン検出器には PMT が使われているが、検出器の性能向上のために新しい光センサーの導入を検討しているが、その候補の一つが MPPC である。検出器のターゲット側の壁面では、放出されたガンマ線の透過を阻害しないため、検出器の物質量をなるべく低く抑える必要がある。MPPC は非常に薄く PMT に比べガンマ線透過の向上が見込まれる。他にも磁場に強いなど MPPC には利点があり、MEG 実験の次のアップグレードの候補である。その導入のために真空紫外光に感度がある MPPC の開発を浜松ホトニクスと共同で進めている。今回特別に作成された 3 つのサンプルと市販の MPPC、近赤外線に感度があると言われる SensL 製 MPPC など幾つかのサンプルについて、液体キセノンシンチレーション光に対する感度など液体キセノン中での基礎特性を測定した。この章ではその結果を報告する。

5.2 MPPC の原理

n 型半導体と p 型半導体を接続するとそれぞれの格子欠陥に由来する自由電子と空孔が行き来して接続面付近に空乏層と呼ばれるキャリアのいない層が生じる。空乏層には電界が生じ、キャリアはポテンシャルに束縛される。電界と逆方向に電圧をかけるとポテンシャル障壁が無くなり電流が流れるようになる。逆に電位差を増大させる方向に電圧をかけるとポテンシャル障壁は大きくなるが、熱励起やトンネル効果などでポテンシャルを乗り越えてしまったキャリアが非常に大きな電圧勾配によって加速され格子の電子を弾き出しその電子がさらに電子をはじき出すというように雪崩的にキャリアが増大し、電流が流れるようになるこれを雪崩電流またはアバランシェといい、アバランシェが起こる電圧を降伏電圧またはブレイクダウン電圧という。APD はこれを利用したもので光子によって電子を励起し、信号を増倍させる。通常雪崩電流を起こすのは自由電子であるが空孔が雪崩を起こす場合がある。空孔は電子に比べ有効質量が大きく通常は雪崩には増倍には寄与しないが印加電圧を上げることで空孔が雪崩的に増幅されるようになる。この状態をガイガーモードという。ガイガーモードでは雪崩電子によって生じた空孔がさらに雪崩を引き起こし、暴走状態になる。この状態では電子の増倍率は 10^5 にも達する。MPPC ではガイガーモードで大きな増倍率を得ている。MPPC の素子表面は多数の APD が並列に並んだ構造をしている。半導体と導線をつなぐ部分はクエンチ抵抗であり、ガイガーモードで暴走状態になったとき

電流が流れ、電圧を下げる役割を持つ、パッシブな制御機構である。ひとつの APD をコンデンサとして見たとき、雪崩から充電状態までの時間推移は静電容量と抵抗値に依存することになる、そのためクエンチ抵抗の抵抗値は素子の性質を決める重要なパラメータとなる。光子はこれらのうちひとつのセルに入射し、ある確率 (QE) で電子を励起しある増倍率で増幅され信号となる。信号は共通の導線を通り、すべてのセルの信号の和が出力される。

5.3 検出器としての MPPC の特徴

このような仕組みを持つ MPPC は

- 磁場に強い
- 光子 1 個からの計測が可能
- 薄くて小さい

というように磁場下での計測となる MEG 実験に有効でありサイズが小さいのでガンマ線のコンバージョンポイントが浅いイベントに対する分解能が向上するなど有用な特長があるが、問題点も多い。

- 紫外線に感度がない
- 現状ひとつの素子に 1 本のケーブルが必要
- ランダムノイズ
- クロストーク
- アフターパルス
- クエンチ抵抗の温度依存性

第一に従来の MPPC は紫外線に対してほとんど感度がない。キセノンのシンチレーション光は真空紫外線なので MEG 実験をはじめとするキセノンを使った実験にそのままでは利用できない。サイズの小ささも問題で、現在使用されている PMT の代わりに MPPC を並べて同じ面積をカバーするためには大量の素子が必要となり、信号を外に出すためのケーブルも数多く必要となる。ケーブルは外部から熱が検出器に侵入する原因となるため、本数には制限がある。素子数を減らすためにひとつひとつの大きさも大きくする必要はあるしかし素子を大きくするとダークカウント、アフターパルスが増えてしまう。また、波形の時定数が長くなる。実用には 1 cm 角程度のサイズが必要と見込まれている。液体キセノン温度という条件について考察する。低温では熱励起による雪崩の自然発生が減るのでダークカウントが常温に比べて $1/10^5$ 程度になることが予想されるため、液体キセノン中で使用する場

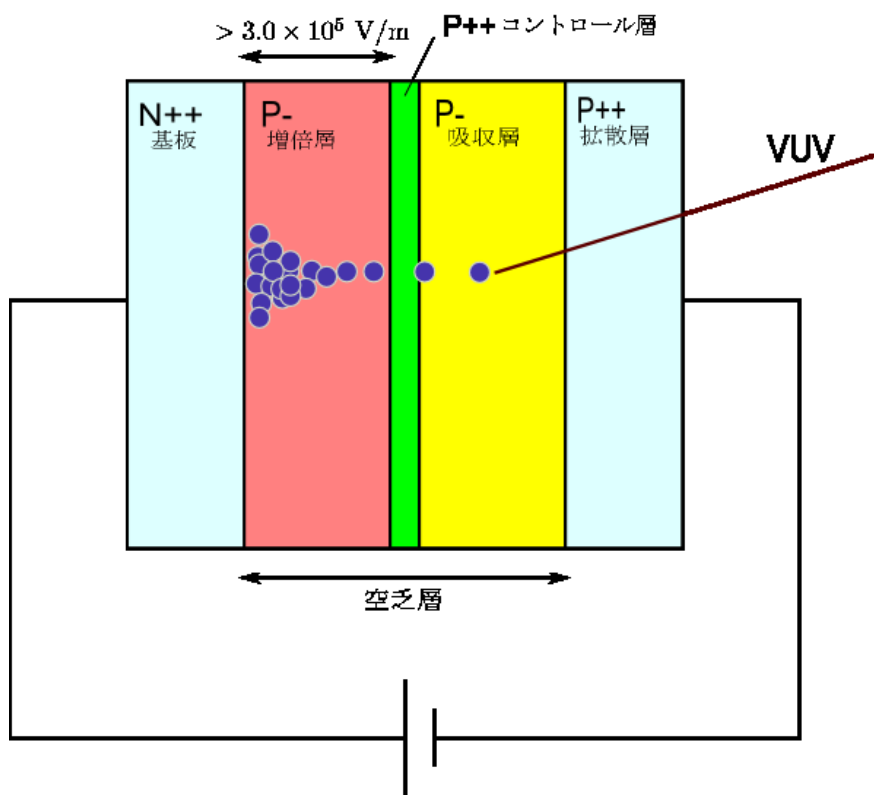


図 5.1: MPPC の構造の一例。ひとつのセルの概念図

合ダークカウントは問題にはならない。低温では、クエンチ抵抗値が増大し回復時間と波形のテールが長くなると予想される。MEG 実験のような高計数の環境ではテールが長くなるとパイルアップが増加すると懸念される。低温でのゲインと PDE がどうなるかということも本稿で議論する問題である。MPPC 特有の問題にクロストークとアフターパルスがある。クロストークとは雪崩状態で自由電子と空孔が対消滅際放出された二次光子が隣接するセルの雪崩を引き起こす現象で、1 個の光子が 2 個として検出される。アフターパルスとは雪崩が収束したあとに残された格子欠陥に電子がトラップされ、時間差で開放されて再び雪崩を引き起こす現象である。アフターパルスに関しては東大の音野氏の論文 [3] で詳しく研究されている。

5.4 測定項目

MPPC に真空紫外光に対する感度を持たせるため、素子表面の不感層を薄くしたサンプル、真空紫外光用に反射防止膜を調整したサンプルなど、幾つかの特別なサンプルを浜松ホトニクスに製作してもらい試験を行った。

- オシロスコープを用いた波形とスペクトラム測定

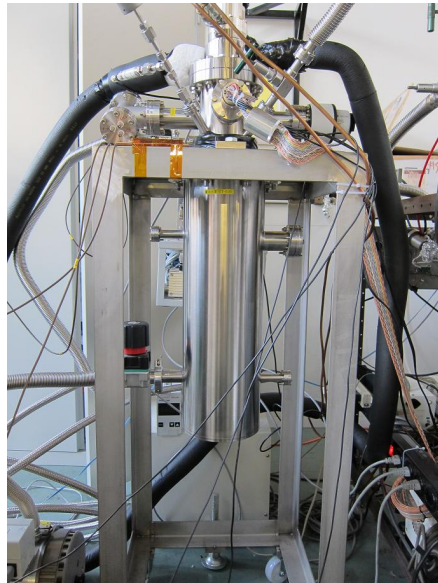


図 5.2: 液体キセノンクライオスタット

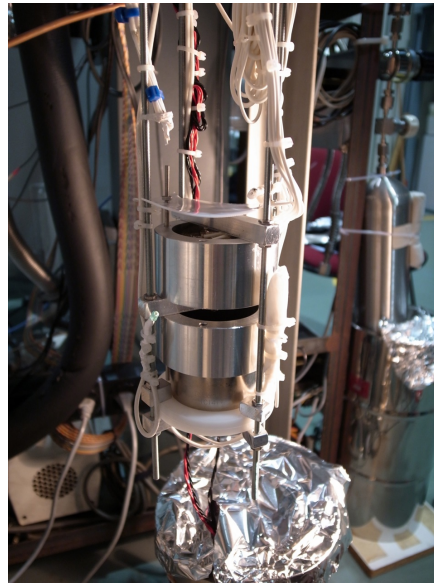


図 5.3: スモールチェンバーの内部の写真

- DRS を用いた波形とスペクトラム測定、ゲインおよび光子検出効率 (PDE) の測定
- MEG 実験では検出器から長いケーブルを通す必要があるが、その際波形が変化したり減衰するの、長いケーブルをつけ加えて測定した。

5.5 セットアップ

試験は液体キセノン中で行われた。チェンバーの全体図は図 5.2 に示した。チェンバーの内部は図 5.3 に示した。チェンバー内部の写真は図 5.3 に示した。チェンバーに密封された約 2 リットルの液体キセノンはパルス管冷凍機と液体窒素によって温度管理されている。ゲッターで純化を行う。アルファ線ソースは ^{241}Am 円形の台の上に固定され、MPPC の放射線による劣化を防ぐために石英の薄板をその上に被せてある (図 5.4)。側壁の内側は反射を防ぐ加工が施されている。MPPC 基板の上に反射用テフロン板、ソースの下にトリガー用 PMT を設置した。

MPPC は図 5.5 のように基板にマウントされている。サイズは 3mm × 3mm 素子のパラメータの詳細は企業秘密として浜松から知らされていない。

- CH0: 保護膜ありの市販品、保護膜 (シリコンゴム) で真空紫外光は止まるので液体キセノンシンチレーション光の赤外成分の見積りのために



図 5.4: アルファ線ソース ^{241}Am の写真

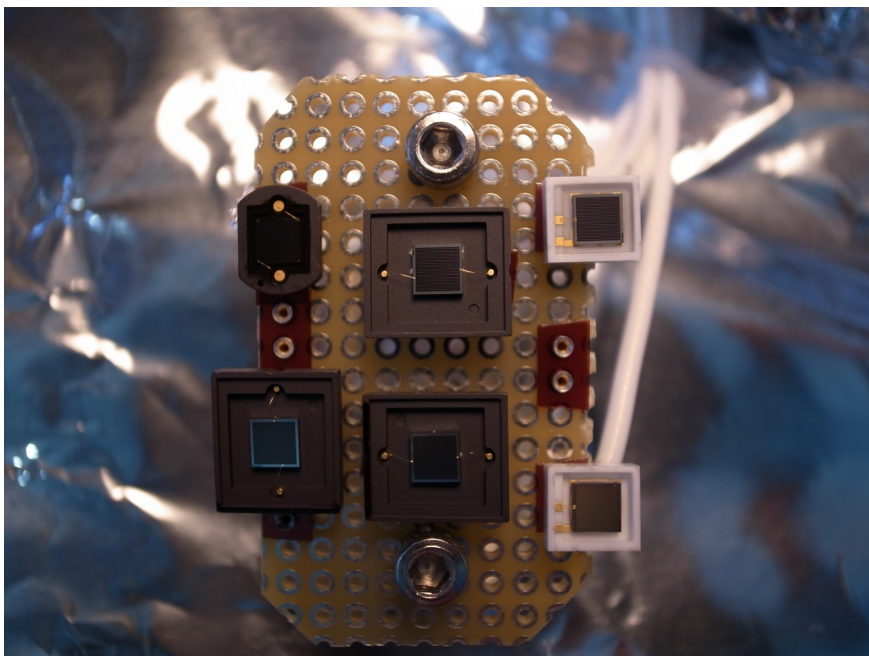


図 5.5: MPPC を基板に取り付けた様子。上段左から CH5,CH3,CH0。下段左から CH1,CH4,CH2

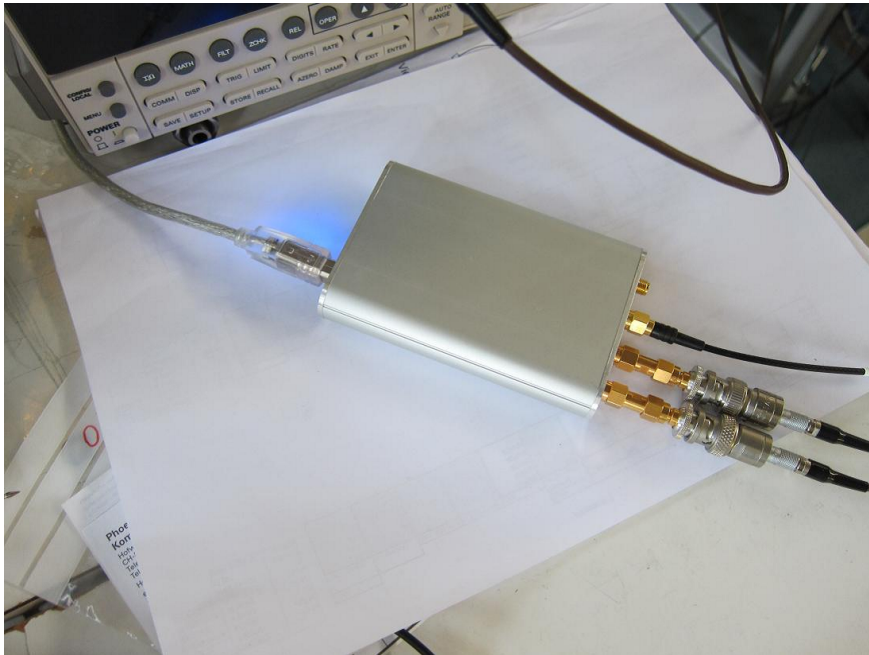


図 5.6: DRS ボード

いれてある。

- CH1: 保護膜なし。不感層は薄くしていない。表面の反射防止膜は 175nm の反射が少なくなるように調整。
- CH2: 保護幕なし。不感層を 20-30% 程度薄くしたもの。反射防止膜については CH1 と同じ。プロセスが最適化されていないためクエンチ抵抗が小さくなりすぎていて大きいバイアス電圧がかけられない。
- CH3, CH4 はまったく異なるプロセスによる素子。詳細は知らされていない。
- CH5: 浜松とは別のメーカーの素子。浜松が p-on-n 構造なのに対し、こちらは n-on-p 構造。赤外により感度がある可能性があるためテストしてみた

MPPC からの信号はプリアンプの出力を測定した。電流はプリアンプに流れる電流を測定した。信号の測定はオシロスコープと DRS4 (波形デジタイザ、図 5.6) で行った。DRS(domino ring sampling chip) は PSI で開発された波形デジタイザで MEG 実験で使用されている。今回の測定では 700 MHz のサンプリング周波数で測定を行った。

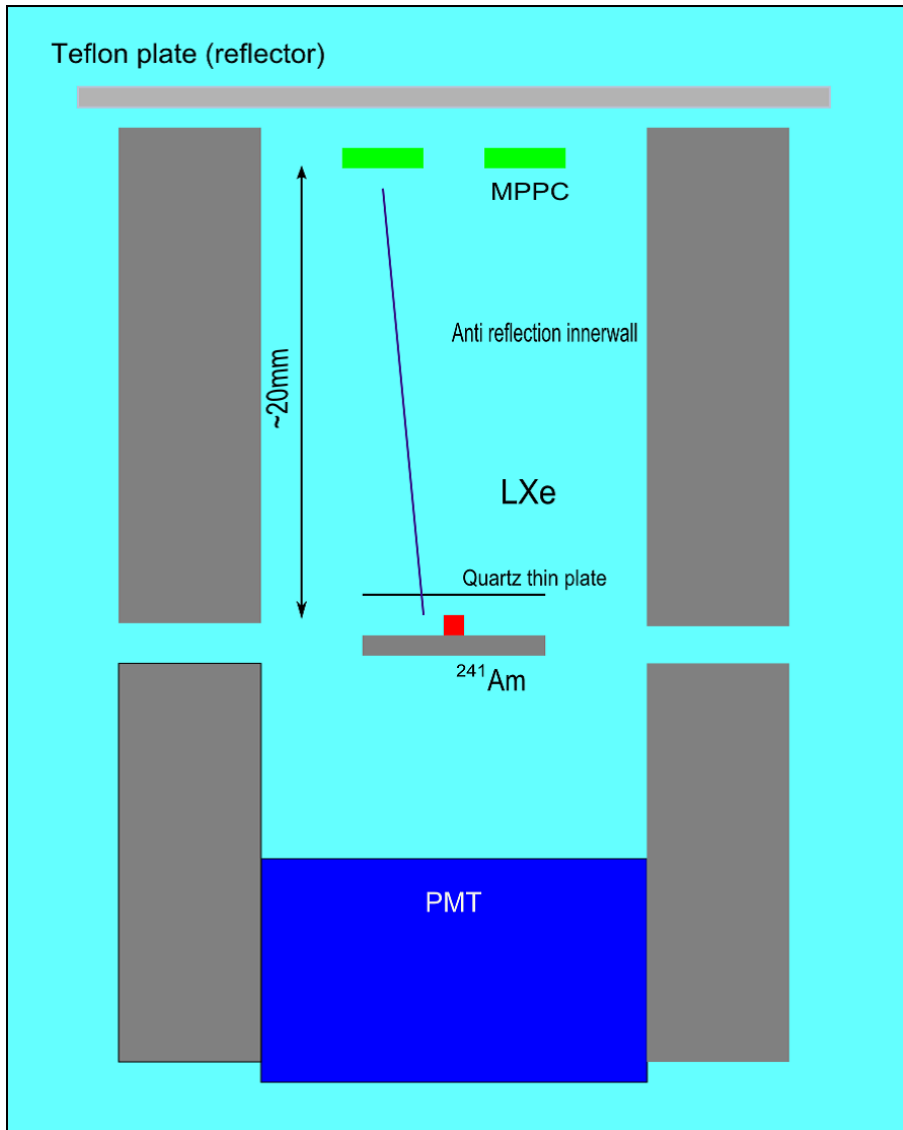


図 5.7: 今回の測定のセットアップ

表 5.1: 各素子の説明。pitch はピクセルサイズ、fill factor は素子面積に対する有感面積の割合

	Description	pitch μm	fill factor
CH0	Protection coat	100	0.785
CH1	AR coat2	50	0.61
CH2	Sample A	100	0.785
CH3	Sample B	50	0.61
CH4	Sample C	50	0.61
CH5	SensL	35	0.65

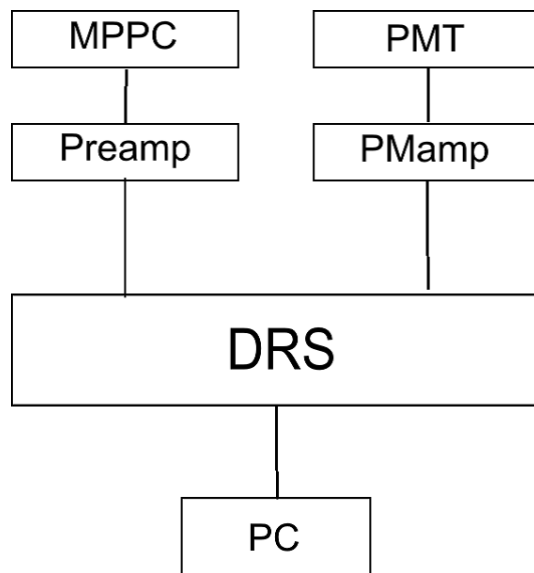


図 5.8: 接続

5.6 測定結果

単一光子の波形を以下に示す。素子ごとに波形の時定数が異なることがわかる。CH0のテイルが長いのは素子のピクセルサイズが100 μm と大きいためである。CH2もピクセルサイズが100 μm であるが、クエンチ抵抗が小さいためにテイルは長くない。

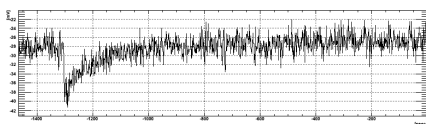


図 5.9: CH0

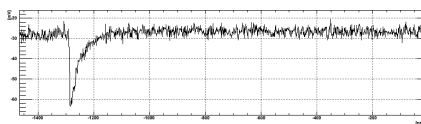


図 5.12: CH1

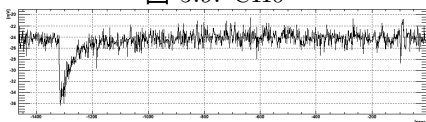


図 5.10: CH2

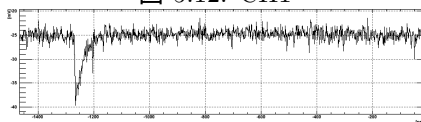


図 5.13: CH3

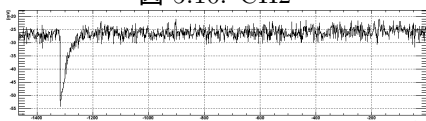


図 5.11: CH4

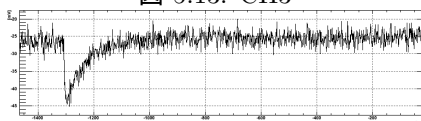


図 5.14: CH5

電荷のヒストグラム (図 5.15 ~ 5.20) の横軸の単位は電子 10^9 個である。0の一番近くのピークが単一光子のイベントである電荷分布のオフセットがなくなるように積分範囲を選んでいるので最初のピーク位置が一つの光子が増倍された電荷となり素子のゲインとした。単一光子の電荷を単位として入射光子の個数を測った。アルファイベントのヒストグラムはポアソン分布と考えられるのでCH1,4,5のヒストグラムはトリガーが空振りした事象が非常に多かったと言える。また、CH0,2,3は十数個の光子が検出されている。それらの素子は他の3つよりも検出効率が高いことがわかる。実験の幾何条件からいくつの光子が素子に到達するか予想できる。測定された電荷の平均から検出効率 (PDE) を計算した。

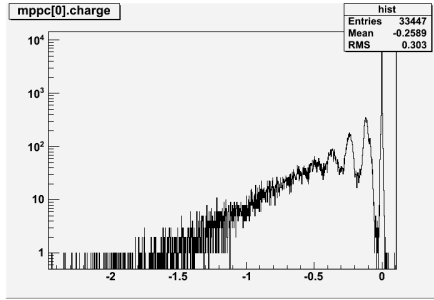
図 5.21 はオシロスコープと波形を比較した図である。

MEG 実験に使用するには長いケーブルを通す必要がある。長いケーブルによるアテネーションや波形の変化があるかを調べるためにケーブルを長くして比較した。

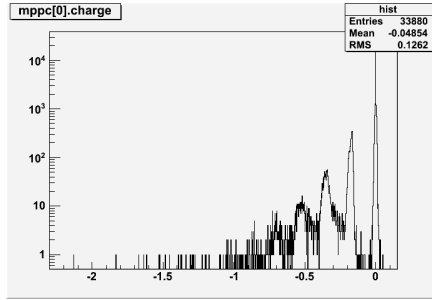
比較はCH0で1.49Vのオーバーボルテージを印加して行った。波形をひとつ選んで比較した。

現在PMTに使用しているテフロン製の3m同軸ケーブルを追加した場合はあまり元の電荷分布と変化していないように見える。さらに6mの同軸ケー

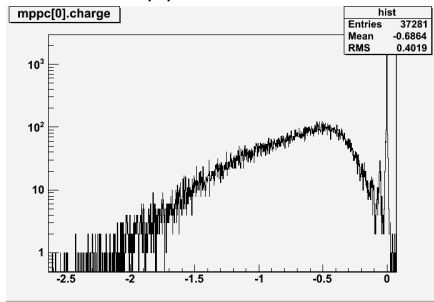
ブル (RG178、32ns) を追加した場合やアテネーションがかかっているように見える単純に長さの問題かどうか今後さらなる調査が必要である。これにより、長いケーブルの使用の影響は大きくないことがわかった。



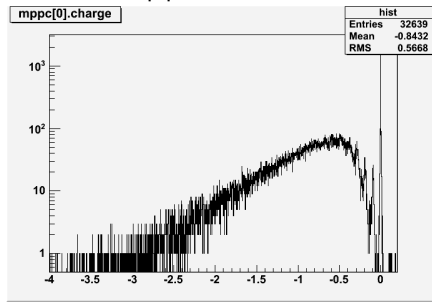
☒ 5.15: CH0



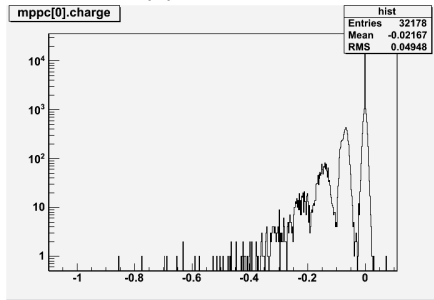
☒ 5.18: CH1



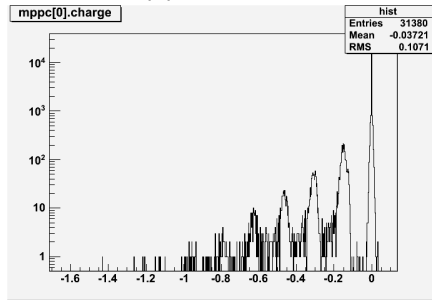
☒ 5.16: CH2



☒ 5.19: CH3



☒ 5.17: CH4



☒ 5.20: CH5

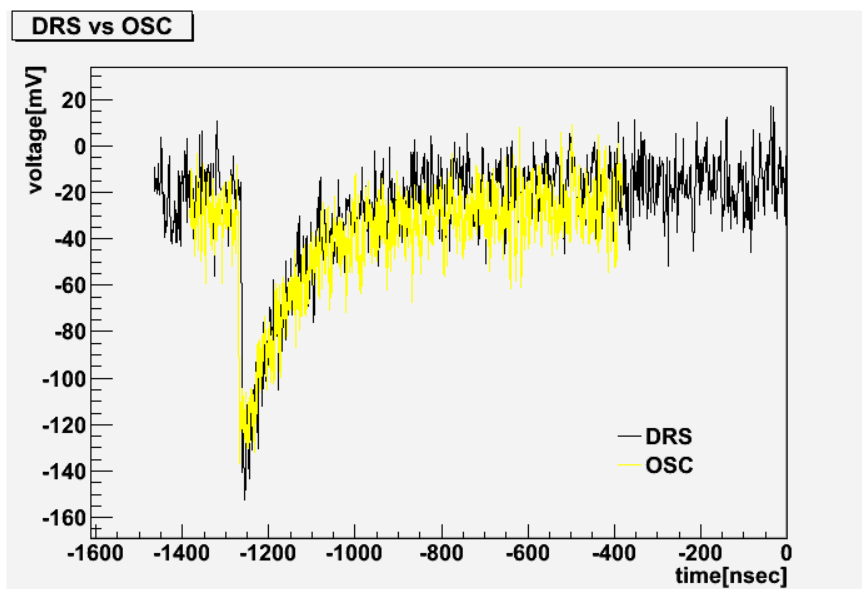


図 5.21: オシロスコープと DRS の波形比較

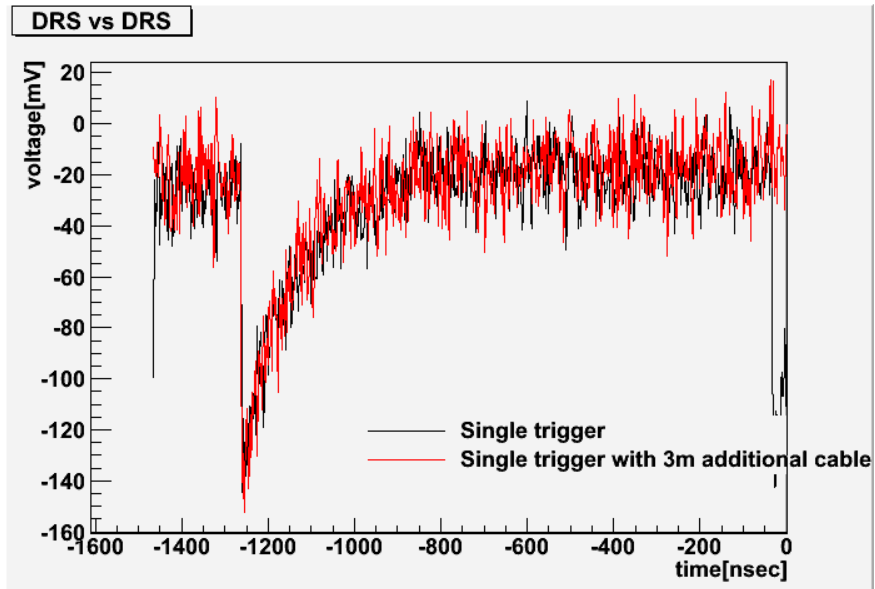


図 5.22: 3m 延長ケーブル付きの場合との波形比較

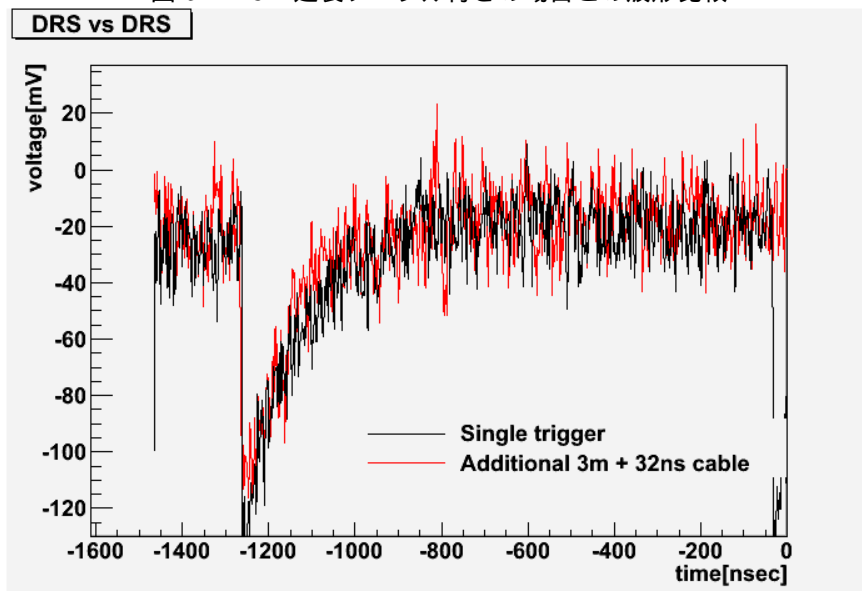


図 5.23: 3m+32sec 延長ケーブル付きの場合との波形比較

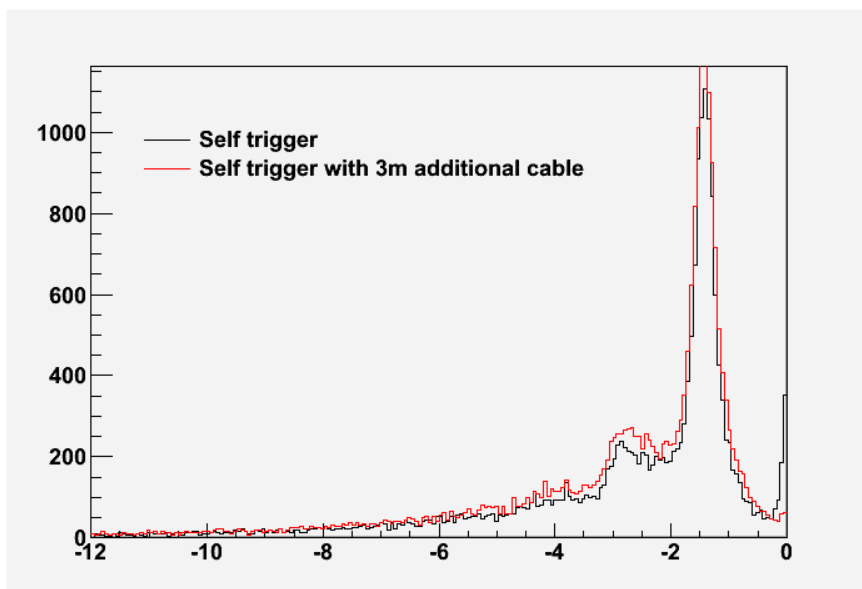


図 5.24: 3m 延長ケーブル付きの場合との電荷比較

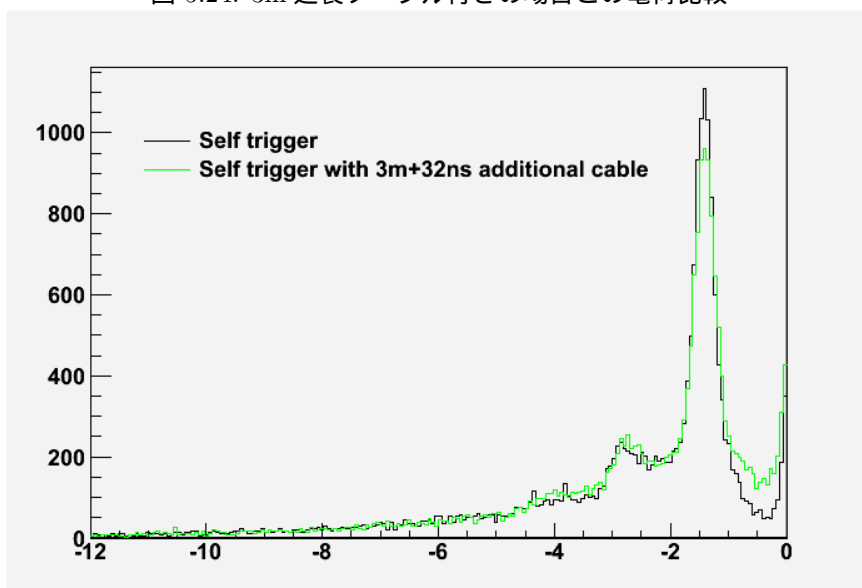


図 5.25: 3m+32sec 延長ケーブル付きの場合との電荷比較

5.7 ゲイン、PDE

得られた電荷のヒストグラムから光電子一つの電荷がどれだけ増倍されたかということから素子の持つ増倍率をオーバーボルテージに対してプロットしたのが図 5.26 である。

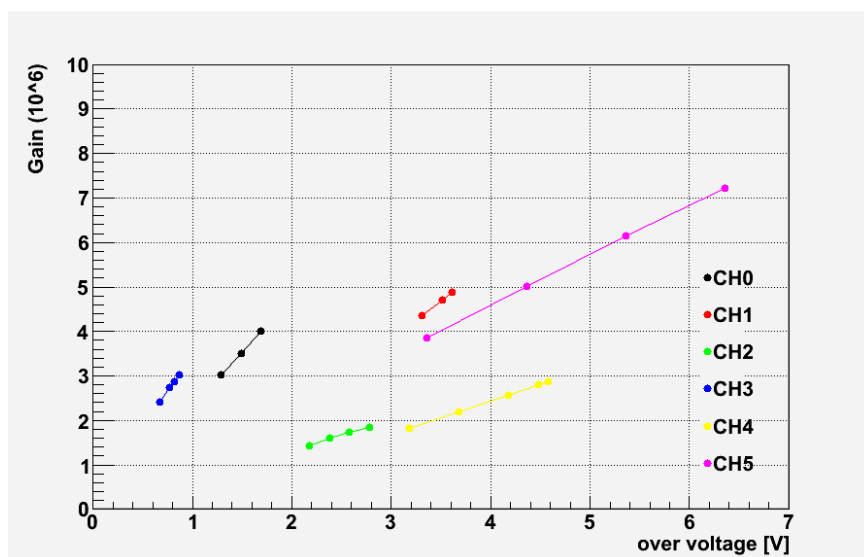


図 5.26: 各チャンネルのゲイン比較

MPPC の検出効率は PMT に比べて低いのが問題である。次に PDE を調べた。

6つのうち検出効率が高かったものは AR2 と sampleA であった。現在使用している PMT の QE (~ 15%) に比べて若干低いものの、真空紫外光に対して一定の感度があることがわかった。図 5.27 を見ると3つのチャンネルは液体キセノン中での検出能力は無いという結果となった。

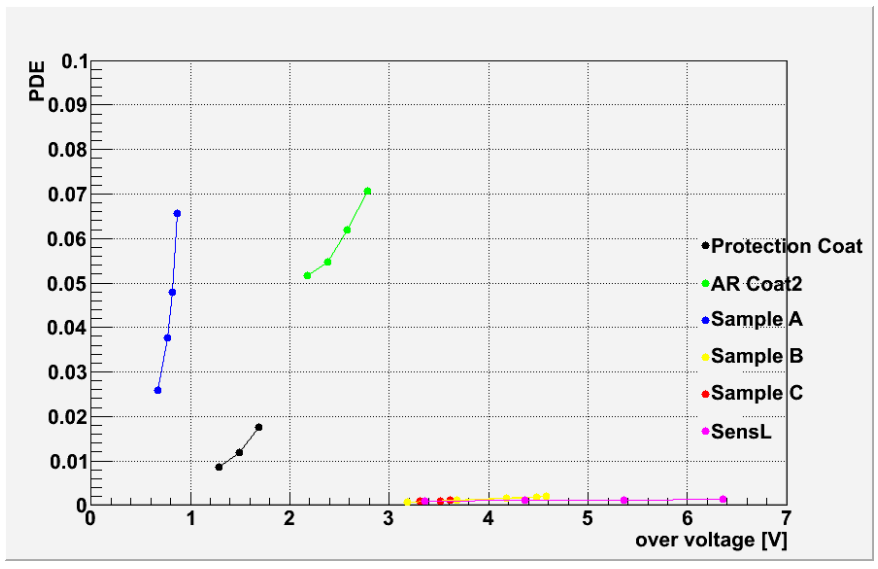


図 5.27: 各チャンネルの PDE 比較

5.8 アフターパルス

MPPC のアフターパルスが素子にかかる電圧をあげると増えていく様子を調べた。

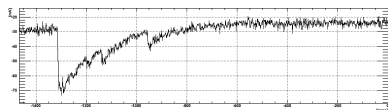


図 5.28: CH0 63.5V

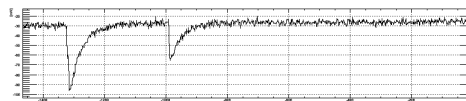


図 5.31: CH1 62.3V

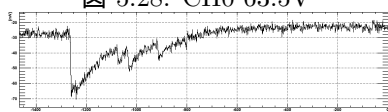


図 5.29: CH0 63.7V

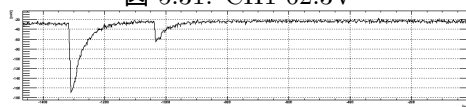


図 5.32: CH1 62.5V

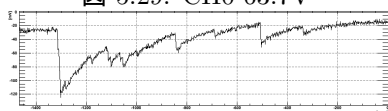


図 5.30: CH0 63.9V

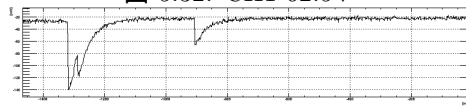


図 5.33: CH1 62.6V

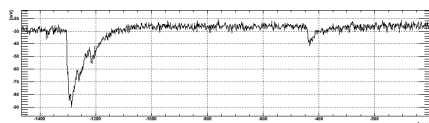


図 5.34: CH2 64.9V

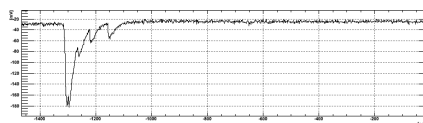


図 5.37: CH3 64.0V

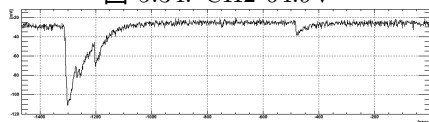


図 5.35: CH2 65.1V

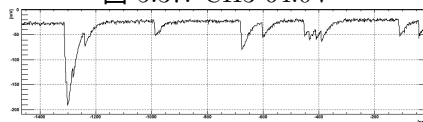


図 5.38: CH3 64.1V

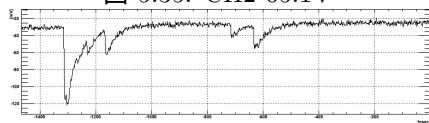


図 5.36: CH2 65.5V

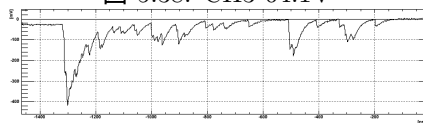


図 5.39: CH3 64.2V

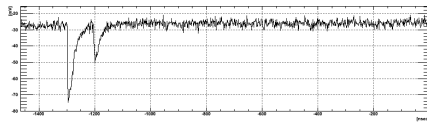


図 5.40: CH4 62.0V

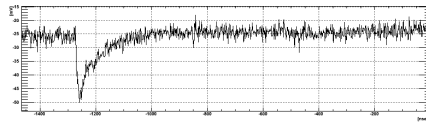


図 5.43: CH5 29.3V

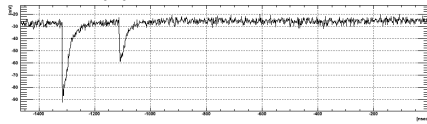


図 5.41: CH4 63.0V

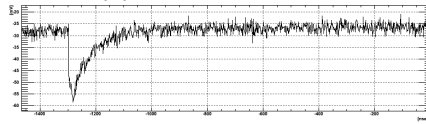


図 5.44: CH5 30.3V

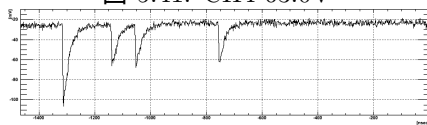


図 5.42: CH4 63.4V

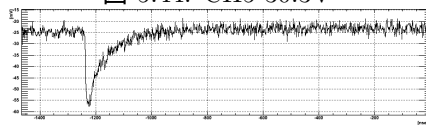


図 5.45: CH5 31.3V

予想通り、バイアス電圧を大きくするとアフターパルスが増える傾向にあることがわかる。

5.9 結論

- 今回の測定サンプルではないが、これまで不感層を薄肉化したサンプルの中でベストなもので、PDE 10% を達成している。PMT の QE よりやや劣るものの、実用レベルのものができはじめている。
- 現在素子のパラメータの最適化が完全ではないので、ここで測定した素子どうしの PDE の比較は簡単ではない。
- ピクセルサイズについて言えることの一つは、ピクセルサイズが大きいと、クロストークが多い、アフターパルスが多い、波形の時定数が長いなどの問題があるので実用的には 50 μm 程度が望ましい。
- 不感層を薄くする効果については、以前のサンプルの測定などから確認されているが、今回の sampleA についてはクエンチ抵抗が低いために高いバイアス電圧がかけられないため、PDE が AR2 より低く測定されていると考えられる。
- 現在素子作製プロセスの最適化を行っており、正常なクエンチ抵抗値を持った不感層薄肉化サンプルがもうすぐ出来上がる予定。今後最適化した素子プロセスで、不感層の薄さ、反射防止膜、ピクセルサイズなどの素子パラメータを最適化していく予定。

参考文献

- [1] T.Mori et al. Search for $\mu \rightarrow e\gamma$ down to 10^{-14} branching ratio. Research Proposal to PSI, May 1999.
- [2] S.Mihara. MEG liquid xenon detector. GLA2010, 2010.
- [3] 音野瑛俊. 修士学位論文 (2008).

謝辞

先ず、実験の主導者であり、研究の場を提供して下さった指導教官である森俊則教授に心より感謝いたします。本論文の執筆にあたり、丁寧な指導のみならず生活のことなどについても親身になって相談に乗って頂きました。

また、ポールシェラー研究所に常駐しておられる大谷航氏、岩本敏幸氏には現地での研究活動において暖かで懇切丁寧な指導していただきました。また、本論文に関して多くの助言をいただきました。両氏に感謝いたします。

KEK の三原智氏、西口創氏には PSI や KEK での研究に関して貴重なご意見をくださいました。田内利明氏には KEK での研究で暖かく指導していただきました。同研究室の澤田龍氏、内山雄祐氏、名取寛顕氏、白雪氏は私の質問にいつも丁寧に答えていただきました。その研究に対する考え方は常に新鮮な驚きを与えてくれました。西村康宏氏には初めて PSI を訪れた際研究から生活に至るまで手取り足取り手助けをして頂きました。金子大輔氏には MPPC の研究に関して不案内な私に実験道具の使い方から丁寧に教えていただきました。藤井祐樹氏には入学当初から ICEPP での生活や勉強の方法まで教えていただき大変お世話になりました。

皆様の助けがあって研究をすることが出来ました。ここに感謝の意を示します。

最後に、私を育て支えてくれた家族に感謝いたします。