

国際リニアコライダーのためのシンチレーター
電磁カロリメーターの新しいシンチレーション
光読み出しデザインの開発

東京大学大学院 理学系研究科物理学専攻
山下了研究室 修士課程2年

家城 斉

平成27年1月5日

概要

国際リニアコライダー実験は、電子と陽電子を衝突させ、ヒッグス粒子の精密測定や暗黒物質の探索など、標準理論を越える新物理を探索することを目指している。素粒子同士の反応では、背景事象の少ない環境を得ることができ、ジェットエネルギー分解能 $\sigma_E/E = 30\%/\sqrt{E}$ を達成することによって高精度な測定を行うことを目指している。これを実現するためには、高精細なカロリメーターと PFA によって粒子の飛跡を 3 次元的に追跡し、ジェットのエネルギー分解能をあげることが必要であり、電磁カロリメーターには読み出しチャンネルの細分化が求められる。

本研究の目的は、電磁カロリメーターとして実装するためのシンチレーション検出器の開発である。シンチレーション検出器は、大きさ $45\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ のシンチレーターと光検出器によって 1 つのチャンネルを成し、一千万チャンネルを有するサンプリング型電磁カロリメーターを建設する。これまで基準設計とされてきた読み出しデザインは検出される光電子数が多く有用であるが、信号の応答の位置依存性や量産方法、シンチレーターの厚みなど実装と最適化に向けた課題がある。本研究では、基準設計で問題とされる不感領域を排除し、光検出器の実装方法が量産により適した新たな読み出しデザインを提案し、シミュレーションと β 線源を用いた測定によって検出される光電子数を評価した。シミュレーションでは、シンチレーターの形状と MPPC の配置によって光電子数がどのように変わるかを予測し、検出器の最適な構成について検証した。測定では、検出器が目標とする光電子 10 個以上を検出できるかどうかということと、新しい読み出しデザインによって光電子数の位置依存性が改善しているかについて調べた。新しい読み出しデザインでは、シンチレーターの形状によって基準設計の 70~80% の光電子数を獲得した。さらに、先行研究で使用されたものよりも光量の多いシンチレーター材を選ぶことによって、新しい読み出しデザインを実装しながら先行研究と同等の光電子数を獲得することができた。この結果をふまえて新しい読み出しデザインを実装したプロトタイプを製作し、CERN PS にて MIP ビームを用いた性能試験を行った。

目次

第 1 章 序論	4
1.1 国際リニアコライダー実験	4
1.2 ヒッグス粒子の生成反応	5
1.3 PFA と検出器	6
1.3.1 Particle Flow Algorithm (PFA)	6
1.3.2 ILC の検出器	7
1.4 ILD の電磁カロリメーター	10
1.4.1 シリコン検出器 (Silicon ECAL, SiECAL)	10
1.4.2 シンチレーション検出器 (Scintillator ECAL, ScECAL)	10
1.5 本研究の目的	11
第 2 章 シンチレーション検出器の開発	13
2.1 シンチレーション検出器の構成要素	13
2.1.1 シンチレーター	13
2.1.2 光検出器	14
2.1.3 反射材	17
2.2 シンチレーション検出器の基準設計	18
2.3 シンチレーション検出器の新しい読み出しデザインの開発	19
第 3 章 シンチレーション光の伝播についてのシミュレーション	22
3.1 Geant4 を用いたシミュレーション	22
3.2 シンチレーターのデザイン	25
3.3 シミュレーションの結果と考察	27
第 4 章 シンチレーターの光量測定	31
4.1 測定方法	31
4.2 測定結果と考察	35
4.2.1 MPPC の増幅率の較正	35
4.2.2 光電子数の評価	36

第 5 章	下面読み出し型シンチレーション検出器のプロトタイプ製作	39
5.1	カロリメーターのプロトタイプ	39
5.2	基準設計のプロトタイプ EBU	40
5.3	下面読み出し型のプロトタイプ EBU	42
5.3.1	下面読み出し型プロトタイプ的设计	42
5.3.2	中間基板の製作	43
5.3.3	反射材の製作	45
5.3.4	下面読み出し型のプロトタイプ EBU の製作	46
5.3.5	オプティカルグリスの効果	48
5.3.6	プロトタイプ の光量測定	49
第 6 章	プロトタイプ の性能試験	50
6.1	EBU の基本性能	50
6.1.1	検出層の構造	50
6.1.2	SPIROC の性能	52
6.1.3	増幅率の較正	56
6.1.4	MPPC の印加電圧の設定	57
6.2	ビームライン	58
6.3	DAQ システム	63
6.4	ビームテストの統計	64
6.5	EBU1 の性能評価	65
6.5.1	チャンネルの状況と問題点	65
6.5.2	ミューオンビームを用いた MIP のエネルギー損失の較正	66
6.5.3	検出効率の評価	67
第 7 章	結論	69
付 録 A	SSA (Strip Splitting Algorithm)	70
付 録 B	シンチレーターの成形方法	72

目 次

1.1	国際リニアコライダー	4
1.2	ヒッグス粒子生成過程 [1]	5
1.3	ILD の全体図	8
1.4	ILD の模式図 [4]	8
1.5	シンチレーション検出器の層構造。2方向の層のヒットによって5 mm×5 mm の位置分解能で飛跡を検出する	11
2.1	シンチレーターの発光波長スペクトル [8]	14
2.2	MPPC (S10362-11-025P)	15
2.3	MPPC の検出効率の波長依存性 [9]	16
2.4	基準設計の読み出しデザイン	18
2.5	基準設計の配置	18
2.6	くさび形のシンチレーターを用いた下面読み出しデザイン	19
2.7	くさび形のシンチレーターの配置例	19
3.1	シンチレーション光の伝播のシミュレーション	23
3.2	反射の種類 [13]	25
3.3	Baseline design	26
3.4	Simple bottom	26
3.5	Simple wedge	26
3.6	Double tapered wedge	26
3.7	Single tapered wedge	26
3.8	Single tapered wedge 2	26
3.9	電子の入射位置	27
3.10	シンチレーターの形状の違いによる比較	28
3.11	くさびの長さの違いによる比較	28
3.12	MPPC の位置の違いによる比較	29
3.13	シンチレーターの厚さの違いによる比較	30
3.14	Single tapered wedge と Single tapered wedge2 の比較	30
4.1	光量測定の設定アップの模式図	31
4.2	光量測定の設定アップ	32

4.3	シンチレーターと MPPC のセットアップ	32
4.4	DRS の動作原理 [15]	33
4.5	論理回路のセットアップ	34
4.6	Baseline および Simple bottom	34
4.7	Simple wedge	34
4.8	Double tapered wedge	34
4.9	Single tapered wedge	34
4.10	線源の照射位置	35
4.11	波高と電荷の分布。1~3 光子とベデスタルが見えている	35
4.12	増幅率の較正	35
4.13	光電子数の評価	36
4.14	基準設計と下面読み出し (厚さ 2 mm)	37
4.15	くさび形のシンチレーター (厚さ 2 mm)	37
4.16	厚さ 1 mm のシンチレーター	38
5.1	電磁カロリメーターのバレル (青)	39
5.2	バレルの一部拡大図。図のように検出層 (緑) を備えている	39
5.3	EUDET の全体図	40
5.4	検出層の構造	40
5.5	基準設計の EBU。反射材に包まれたシンチレーターが並べられている。写真の下方に見える 1 列に並んだ 36 個の四角は MPPC。橙色の部分はカプトンテープ。	41
5.6	プロトタイプのシンチレーターのデザイン	42
5.7	中間基板。シンチレーターを並べるための治具の上に置いてある状態。MPPC36 個と LED 用の穴がある	43
5.8	中間基板の拡大図	43
5.9	中間基板の模式図。橙色で示すように信号線の配線を変更した	44
5.10	MPPC 用小基板の模式図。小基板を中間基板の裏側からはめ込み、半田付けする	44
5.11	MPPC 用小基板	44
5.12	レーザーカットで製作した反射材	45
5.13	反射材を巻いたシンチレーター	45
5.14	シンチレーターを並べるための治具。治具に中間基板を設置し、シンチレーターを 12 本並べた状態	47
5.15	下面読み出し型プロトタイプ EBU	47
5.16	オプティカルグリッドによる光電子数と位置依存性の変化	48
5.17	プロトタイプの光量測定のセットアップ	49
5.18	中間基板を用いた光量測定の結果	49

6.1	EBU、CIB、DIF、CALIB、POWER	51
6.2	MPPC の印加電圧の設定	53
6.3	信号の経路 [16]	54
6.4	ピクセルサイズ 25 μm の MPPC のスペクトル	56
6.5	ピクセルサイズ 10 μm の MPPC のスペクトル	56
6.6	CERN の加速器 [20]	58
6.7	East Area T9[21]	59
6.8	電磁カロリメーターの構成	62
6.9	ハドロンカロリメーターの構成	62
6.10	DAQ の構造 [23]	64
6.11	EBU1 のチャンネルの状況	65
6.12	ミューオンビームによる ADC 分布	67
6.13	検出効率の評価	68
6.14	検出率を評価するときのイベント選別	68
A.1	SSA による飛跡検出	70
A.2	シンチレーション検出器での飛跡検出におけるゴーストの問題	71

表 目 次

1.1	検出器のエネルギー分解能	6
1.2	ILD と SiD の基本設計	7
2.1	シンチレーターの特性 [8]	14
3.1	シミュレーションのパラメーター [14]	25
6.1	T9 のパラメーター [17]	60
6.2	ビームの極性が負のときの T9 の粒子の割合 [18]	60
6.3	電磁カロリメーターの構成	61
6.4	ビームテストの統計	64

第1章 序論

この章では、国際リニアコライダー実験で探る物理と検出器の概要、および本研究の目的について述べる。

1.1 国際リニアコライダー実験

2012年のヒッグス粒子発見により、標準理論で予言されたすべての粒子が発見された。標準理論は物理現象をよく説明しているが、標準理論では説明できない現象も観測されている。そのため、さらに大きな枠組みでの新たな理論が提唱されており、国際リニアコライダー (International Linear Collider, 以下 ILC) の準備が進められている。

ILC は、全長 31 km の線形加速器によって電子と陽電子を直線的に加速し、衝突させる実験であり、ヒッグス粒子の精密測定、暗黒物質の探索、TeV スケールでの新物理探索を行うことを目指している (図 1.1)。この実験は次のような特徴を持つ。

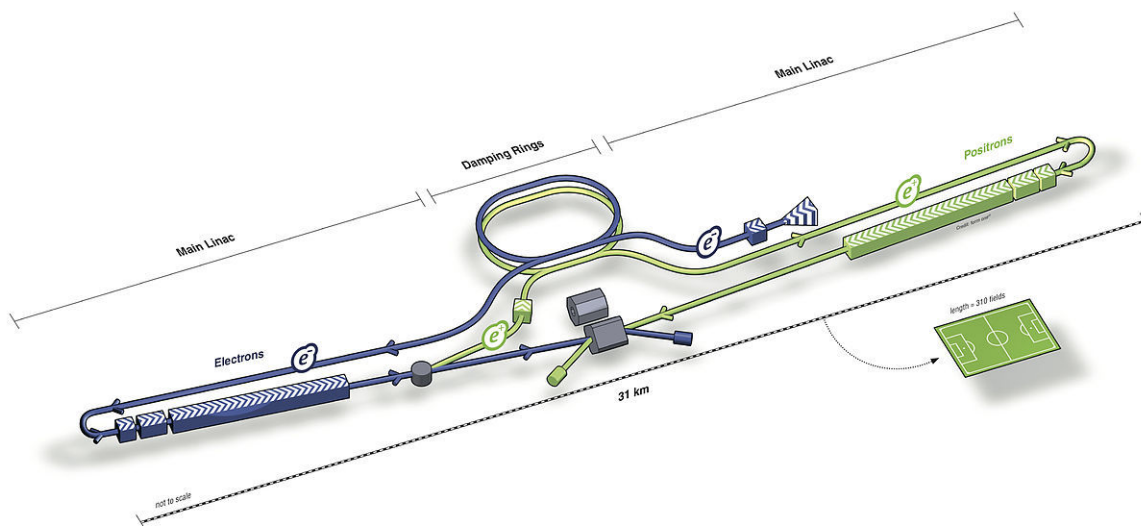


図 1.1: 国際リニアコライダー

第一に、ハドロン衝突型加速器に比べて背景事象が少ない。例えば LHC の場合、陽子はクォークやグルーオンを構成要素とする複合粒子であるため、その重心エネルギーはクォーク同士の衝突のみならず他の構成粒子によって持ち去られ、衝突に関与しない粒子も反応粒子として現れる。そのため背景事象が多く、解析が煩雑になる。一方、ILC は素粒子同士の反応なので、衝突の重心エネルギーは全ての反応の素過程に使用され、衝突に関与しない粒子が現れない。よって、終状態の識別が容易であり、トリガーレスなデータ収集が可能である。

第二に、このような測定環境によって高精細な検出器の利用が可能になる。ILC では、超細分化カロリメーターと PFA を用いて高いエネルギー分解能を獲得する。PFA については節 1.3.1 で説明する。

第三に、線形的に加速距離を伸ばすことで、円形加速器に比べて単純にエネルギーを上げることができる。重心系 250 GeV に始まる実験は、将来的に重心系 1 TeV までアップグレードすることが計画されている。これらの特徴により、ILC ではヒッグス粒子の結合定数の測定や暗黒物質の候補である超対称性粒子の探索などを高い精度で行うことができる。

1.2 ヒッグス粒子の生成反応

ILC 実験における主なヒッグス粒子の生成過程を図 1.2 に示す。

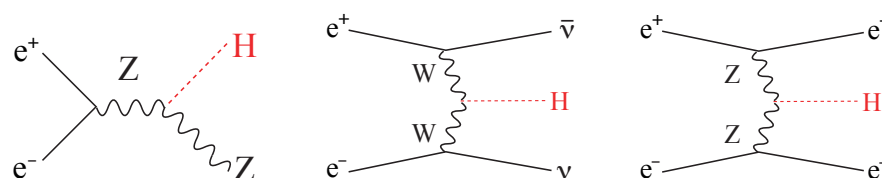


図 1.2: ヒッグス粒子生成過程 [1]

ILC では電子、陽電子ビームのエネルギーと偏極の調節が可能である。重心系 $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$ では $e^+e^- \rightarrow Zh$ が支配的であり、ビームのエネルギーと反跳した Z ボソンのエネルギーを再構成することによって、ヒッグス粒子の崩壊モードによらずにヒッグス粒子のエネルギーを測定することができる。この反応の背景事象は終状態に 2 つのレプトンを持つ反応であり、その中で最も反応断面積が大きい反応が Bhabha 散乱である。また、W ボソンとの結合によってヒッグス粒子を生じる反応 $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ では、ヒッグス粒子の崩壊幅や結合定数の測定を行うことができる。

1.3 PFA と検出器

加速器実験では、衝突によって二次的な粒子が密集して生じ、これをジェットと呼ぶ。電子と陽電子の衝突で発生する粒子の多くはジェットとして観測されるため、ジェットを高いエネルギー分解能で測定することが重要である。ILCはジェットのエネルギー分解能 $\sigma_E/E = 30\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ を達成することを目標としており、これは LEP 実験において達成された過去最高のエネルギー分解能の 2 倍良い値である。これによって Z ボソンと W ボソンのジェットを判別することが可能になる。この分解能を達成を担うのが PFA と検出器である。

1.3.1 Particle Flow Algorithm (PFA)

PFA とは、検出器で検出されたエネルギーから粒子を再構成する解析手法である。従来の加速器実験では、カロリメーターで検出されたエネルギーをもとに粒子の再構成が行われている。しかし、ハドロンカロリメーターの分解能は $\sigma_E/E \sim 60\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ 程度であるので、この方法では ILC が目標とする分解能を達成することができない。ILC の PFA では、分解能を良くするため、粒子の種類によってどの検出器の情報を再構成に使用するのか場合分けをする。検出器のエネルギー分解能と粒子の割合を表 1.1 に示す。ジェット中に多く含まれる荷電粒子はエネルギー分解能の高い飛跡検出器で検出し、中性ハドロンはエネルギー分解能の低いハドロンカロリメーターで検出する。このように検出器ごとに役割を分担することによって、目標とするエネルギー分解能を獲得する。

表 1.1: 検出器のエネルギー分解能

	E_{jet} の割合 [%]	検出器	エネルギー分解能 σ/\sqrt{E}
荷電粒子	60	飛跡検出器	$\leq 1\%$ (30 GeV)
光子	20	電磁カロリメーター	15%
中性ハドロン	10	ハドロンカロリメーター	55%
ニュートリノ	10	検出不可	

PFA の手順を説明する。

1. カロリメーターで検出されたジェット中の粒子の塊 (クラスター) を再構成する。
2. 飛跡検出器で粒子の運動量を測定し、荷電粒子を判別する。

3. カロリメーターで検出したクラスターから飛跡検出器で検出された荷電粒子を取り除く。
4. 電磁カロリメーターでエネルギーを測定し、光子を判別する。
5. 電磁カロリメーターで検出した光子を 3. から取り除く。
6. 5. で残ったクラスターを中性ハドロンとみなす。

クラスターを再構成する過程において、各粒子のエネルギー損失を分離し、粒子を重複して数えないことが重要である。そのためには、カロリメーターを細分化しなければならない。

1.3.2 ILC の検出器

高いエネルギー分解能を達成するためには、PFA の要求を満たす高精細な検出器が必要となる。ILC の検出器には、International Large Detector (ILD) と Silicon Detector (SiD) の 2 つの案があり、これらの構想は、飛跡検出器の技術、カロリメーター、磁場の強さ、検出器の大きさなどに特徴づけられる (表 1.2)。本研究では ILD のみに焦点を当てるものとし、SiD については割愛する。ILD の検出器を衝突点に近い内側の検出器から順に紹介する (図 1.3)。

表 1.2: ILD と SiD の基本設計

	ILD	SiD
電磁カロリメーター	Si/W or Sc/W	Si/W
ハドロンカロリメーター	Sc/Fe or RPC/Fe	RPC/Fe
磁場強度 [T]	3.5	5
飛跡検出器	TPC	Si strip

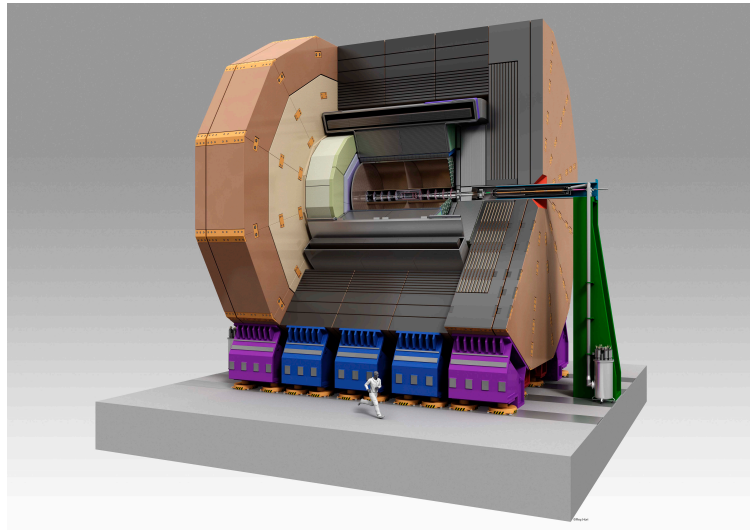


図 1.3: ILD の全体図

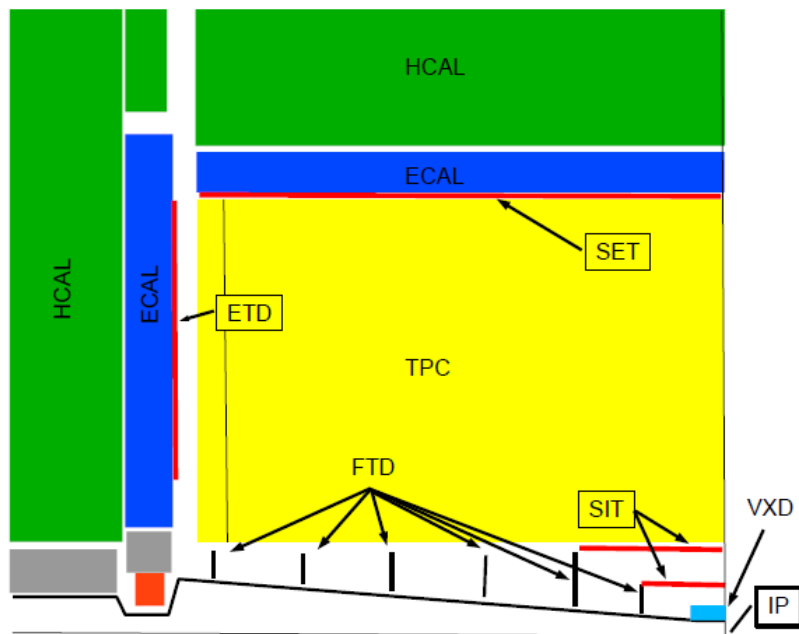


図 1.4: ILD の模式図 [4]

崩壊点検出器

崩壊点検出器の役割は、衝突点にできるだけ近い位置で粒子の飛跡を捉えることであり、そのためビームパイプにできるだけ近い位置に設置される。3 μm の位置分

解能を持ち、崩壊点からの飛跡であるか否かを判断することによって高い分解能でフレーバーの同定を行う。

中央飛跡検出器

中央飛跡検出器では荷電粒子の飛跡と電荷を測定する。ILD の中央飛跡検出器では、シリコン検出器と TPC を合わせて用いる。

- シリコン検出器
2種類のストリップ検出器 Silicon Internal Tracker(SIT)、Silicon External Tracker (SET) と、2種類のピクセル検出器 Forward Tracking Detector (FTD)、End cap Tracking Detector (ETD) から成る。ストリップ検出器は TPC の前後に図 1.4 のように配置され、TPC での運動量の再構成を補う。エンドキャップに向かい TPC 内の飛跡が短くなる荷電粒子は、ECAL の直前にあるピクセル検出器によって高い位置分解能で検出される。このようにしてシリコン検出器は TPC と ECAL の飛跡の整合性を高める。
- Time Projection Chamber (TPC)
ILD の主な飛跡検出器である。荷電粒子が TPC を通過すると、中に封入されているガス分子がイオン化され、その分子が TPC 内の電場によってドリフトし、エンドキャップにて信号として検出される。これによって荷電粒子が通過した位置を測定し、飛跡の曲率半径から粒子の運動量を再構成する。

電磁カロリメーター (Electromagnetic CALorimeter, ECAL)

カロリメーターでは粒子のエネルギー損失を測定する。ILD はサンプリング型のカロリメーターを採用しており、これは吸収層と検出器層という2種類の層を交互に積み重ねた構造をしている。粒子のエネルギーを検出器内で全て検出するため、エネルギーの高い粒子は、吸収層でシャワーを起こすことによってエネルギーの低いたくさんの粒子に変換し、検出層で検出する。電磁カロリメーターの場合は吸収層で電子、陽電子、光子のシャワーを起こし、これらのエネルギーを検出器層で検出する。このようにして検出器の厚さを抑え、粒子のエネルギーを測定する。さらに、ILC のカロリメーターでは、チャンネルを細分化することによって高い位置分解能で粒子の飛跡を追う。電磁カロリメーターのチャンネル数は一千万にも及び、3次元的に粒子の飛跡を再構成してジェット中の粒子を分離する。

ハドロンカロリメーター (Hadron CALorimeter, HCAL)

ハドロンカロリメーターは、電磁カロリメーターと同じく吸収層と検出層によって構成されるが、ハドロンシャワーの検出を目的とする。ハドロンは、原子核の近くを通るだけではなかなか相互作用しないため、シャワーはより遠くまで到達することができ、多くの二次粒子を生じる。そのため、ハドロンカロリメーターは電磁カロリメーターの外側に位置し、チャンネルの大きさは $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ と電磁カロリメーターよりも粗い。

1.4 ILDの電磁カロリメーター

本研究の対象はILDの電磁カロリメーターの開発である。ILDの電磁カロリメーターの候補として、シリコン検出器とシンチレーション検出器の2つがある。本研究ではシンチレーション検出器を扱う。

1.4.1 シリコン検出器 (Silicon ECAL, SiECAL)

ピクセル化された半導体検出器であり、ピクセルサイズは $5.5\text{ mm} \times 5.5\text{ mm}$ 、厚さは $320\text{ }\mu\text{m}$ である。シリコン検出器は分解能が高い一方、高価であり、読み出しチャンネル数は1億に及ぶ。CMS実験の電磁カロリメーターは約7万6千チャンネルであり、ILC実験ではその千倍近いチャンネル数が必要とされる。

1.4.2 シンチレーション検出器 (Scintillator ECAL, ScECAL)

シンチレーション検出器はシンチレーターと光検出器から成る。シンチレーターは、粒子が入射すると物質内の電子が励起状態となり、それが基底状態に戻る際に2つの状態の差分のエネルギーを蛍光として放出する物質である。この光をシンチレーターに取り付けた光検出器で捉えることによってエネルギーを測定する。

ILDの電磁カロリメーターの基準設計では、 $45\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ の直方体のシンチレーターを用い、その $5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ の面の一方に 1 mm^2 の受光面を持つ光検出器を設置したユニットを1つのチャンネルとする。このようなユニットを図1.5のように並べ、層によってシンチレーターの向きを直交させることで $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ の擬似的なセルを構成する¹。これによって、PFAの求める位置分解能を達成すると同時に、ピクセル化されたシリコン検出器よりもチャンネル数を十分の一に抑えることができる。このようにして、シンチレーション検出器では、安価でありながらシリコン検出器に匹敵するエネルギー分解能を獲得する。

¹このようにして粒子の位置とエネルギーを再構成する方法をStrip Splitting Algorithm (SSA) という。SSAについては付録Aを参照。

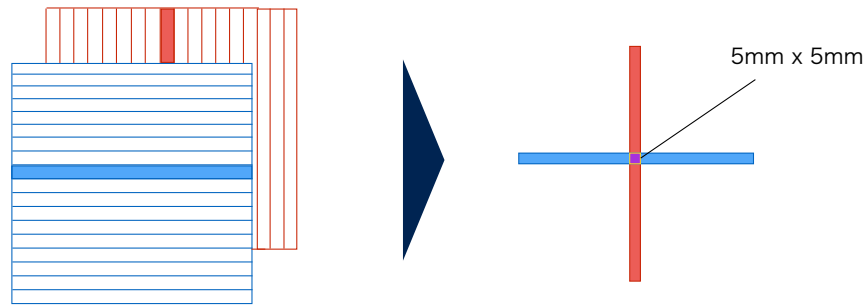


図 1.5: シンチレーション検出器の層構造。2方向の層のヒットによって5mm×5mmの位置分解能で飛跡を検出する

1.5 本研究の目的

本研究の目的は、ILC に用いるためのシンチレーター電磁カロリメーターの開発であり、シンチレーション検出器の基準設計が抱える問題点を解決することを目指す。本研究では以下の4点を考慮する。

1. 光量と光電子数

これ以降、粒子のエネルギー損失によって生じたシンチレーション光の発光量を光量と呼び、そのうち検出器で検出される分を光電子数と呼んで区別する。検出器として動作するためには、十分な光電子数を検出できなければならない。このためには発光量を増やすことと、検出器に至るまでの光の損失を抑えることが重要となる。光量を増やすための単純な解決策は2つ考えられる。1つは光量の多いシンチレーター材料を使用することである。しかし、本研究では比較的光量の多いシンチレーターを使用しており、材料の最適化については追求しない。2つめの方法はシンチレーターの厚さを厚くすることであるが、検出器は小型であることが望ましいため、この方法は適当ではない。本研究ではこれらと異なる方法で十分な光電子数を得ることを目指した。

2. 光電子数の位置依存性

光電子数は、粒子がシンチレーターに当たった位置に依存するべきではない。基準設計では、同じ発光量であっても、粒子がシンチレーターに入射した位置から光検出器までの距離によって光電子数が異なってしまうという問題がある。

3. 不感領域の存在

基準設計では、光検出器の配置位置の都合上、シンチレーターとシンチレーターの間に光検出器の厚み分の隙間を生じる。この部分は不感となってしまいうため、不感領域のない配置に変更する。

4. 量産性

シンチレーター電磁カロリメーターの必要チャンネル数は一千万に及ぶため、検出器は量産可能な設計でなければならない。

これらを考慮したシンチレーション検出器の新しい読み出しデザインを考案し、その性能について評価する。

第2章 シンチレーション検出器の開発

この章では、シンチレーション検出器の性質と基準設計の概要を説明し、新しいシンチレーション検出器の読み出しデザインを提案する。

2.1 シンチレーション検出器の構成要素

シンチレーション検出器の構成要素とその特性について説明する。

2.1.1 シンチレーター

本研究では ELJEN 社のプラスチックシンチレーター (EJ-204) を使用する。シンチレーターは以下のような性質によって特徴づけられる。

- 発光効率
単位量当たりのエネルギー損失に対して生じる光子数。
- 発光波長
シンチレーション光は波長の広がりを持つスペクトルとなる。スペクトルはプラスチックシンチレーターを構成する有機物の割合に依存する。
- 減衰長
シンチレーション光がシンチレーター内を伝播する間に原子と相互作用し、光量が失われる。光量が $1/e$ になるまでに進む距離を減衰長と呼ぶ。本研究で使用するシンチレーターの特性は SAINT-GOBAIN 社の BC-404 に相当し、BC-404 の減衰長は 140 cm である。
- 立ち上がり時間
シンチレーターは立ち上がり時間がナノ秒程度と短く、信号の応答が速い。

使用するシンチレーターの特性を表 2.1 および図 2.1 に示す。このシンチレーター EJ-204 は発光量が多く、減衰長もシンチレーターの大きさに比べて十分長い。また、有機シンチレーターは紫外領域の光を発するが、光検出器の検出効率を考慮して波長 400 ~ 430 nm にピークを持つようなシンチレーターを選んだ。

表 2.1: シンチレーターの特性 [8]

	EJ-204
光量 (アントラセン比)	68%
発光効率 [photons/MeV e ⁻]	10400
立ち上がり時間 [ns]	0.7
屈折率	1.58

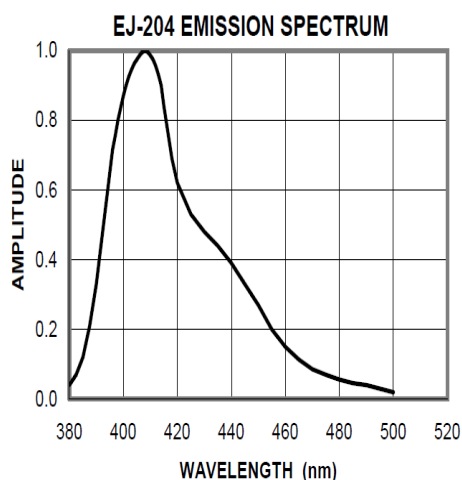


図 2.1: シンチレーターの発光波長スペクトル [8]

2.1.2 光検出器

本研究では、光検出器として浜松ホトニクス社製の半導体検出器 Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を使用している (図 2.2)。MPPC は、ガイガーモードで動作する APD ピクセルを 2次元に並列接続した半導体光検出器であり、光子 1 個を高い精度で検出することができる¹。受光面に光子が入射すると、同時に光子を検出したピクセルの数に比例した大きさの信号を出力する。ピクセルサイズが細かいほど、1つのピクセル内に複数の光子が同時に入射する確率は低くなり、入射した光子の数をより正確に数えることが可能になる。Bhabha 散乱のように大量の光子を検出する場合には、ピクセルサイズを小さくし、かつ広い面積を補えるようピクセル数を多くすることによって、検出可能な光子数が MPPC の上限に達することを防ぐ必要がある。MPPC は以下のような特徴を持つ。

¹Avalanche Photo Diode (APD)

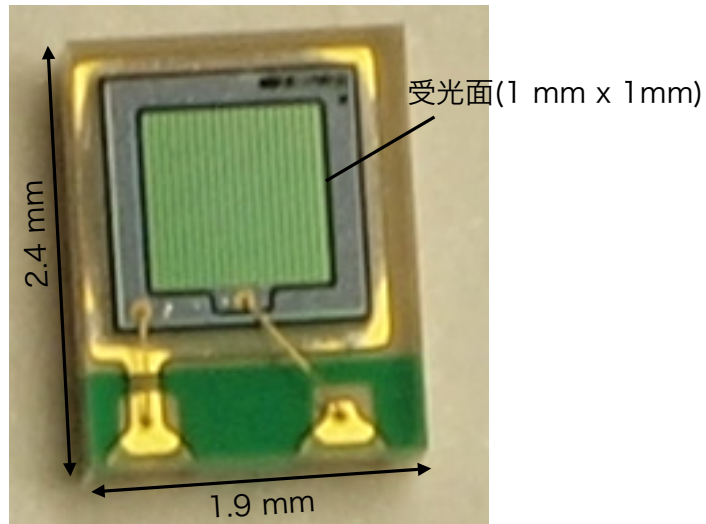


図 2.2: MPPC (S10362-11-025P)

- 増倍率
 $10^5 \sim 10^6$ 倍の信号増倍率を持つ。光電子増倍管の増倍率は $10^6 \sim 10^7$ 倍であるのでこれには及ばないが、匹敵する増倍率を示す。増倍率は印加電圧に依存する。
- 検出効率
MPPC の検出効率 (PDE) は式 2.1 のように表される²。

$$PDE = QE \times \epsilon \times P_{trigger} \quad (2.1)$$

QE は量子効率であり、光子が入射したときに電子・ホール対が生成される確率である。 QE は最大 80~90% 程度であり、波長に依存するため、シンチレーション光の波長と MPPC の検出効率に対応していなければならない。本研究で使用する MPPC の感度波長領域は 320 ~ 900 nm であり、シンチレーターの発光波長領域に対応している。使用している MPPC とピクセルサイズのみ異なるものの検出効率の波長依存性を図 2.3 に示す。 ϵ は受光面に占める感度領域の割合である。各ピクセルを絶縁するための部分が不感領域になる。ピクセル数が多くなると、絶縁部分の割合が増えるため、 ϵ は小さくなる。 $P_{trigger}$ は生成された電子・ホール対がガイガー放電を起こす確率であり、印加電圧に依存する。

²Photon Detection Efficiency (PDE)

- 小型性
本研究で用いる MPPC の大きさは約 $2\text{ mm} \times 2.5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 、受光面は $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ と非常に小型である。ピクセルサイズ $25\text{ }\mu\text{m}$ の MPPC (S10362-11-025P) と $10\text{ }\mu\text{m}$ の MPPC (S12571-010P) の 2 種類を使用した。
- 磁場耐性
電磁カロリメーターは磁場領域の内側に設置されるため、磁場耐性が必要である。MPPC は光電子増倍管よりもはるかに高い磁場耐性を持つ。

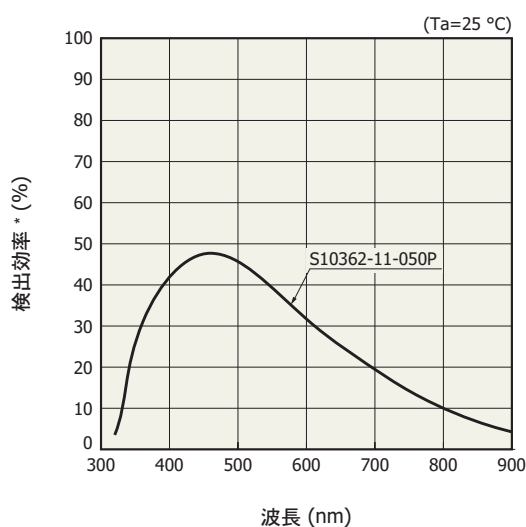


図 2.3: MPPC の検出効率の波長依存性 [9]

MPPC の増倍率とカロリメーターとしての性能

MPPC のピクセルあたりの増倍率 A_i は、動作電圧 V_{op} と降伏電圧 V_{bk} の差に比例し、ピクセルの電気容量 C を用いて式 (2.2) のように表すことができる。また、 ΔV を式 (2.3) のように定義する。

$$A_i \sim C(V_{op} - V_{bk}) \quad (2.2)$$

$$\Delta V \equiv V_{op} - V_{bk} \quad (2.3)$$

MPPC の出力信号 A は、光子が同時に入射したピクセルの出力信号の和になる。

$$A = \Sigma A_i \quad (2.4)$$

MPPCの降伏電圧は温度依存性を持ち、温度が1K下がると降伏電圧は約50mV下がる。カロリメーターの性能として重要なことは、式(2.2)に現れる増幅率と ΔV の線形性である。式(2.2)の線形性は、全ピクセル数に占めるヒットがあったピクセル数の割合が十分小さい場合に満たされる。このため、線形性から外れることを防ぐためには、ピクセル数が多いことが重要になる(式(2.5))。

$$A \approx N_{\text{firedcells}} = N_{\text{total}} \left(1 - e^{-\frac{N_{\text{photon}} PDE}{N_{\text{total}}}} \right) \quad (2.5)$$

ノイズ

MPPCには次のような3種類のノイズがある。これらは本来検出したい信号と区別することができない。

- 熱励起ノイズ

半導体内で熱励起によって生成、再結合を繰り返している自由電子がアバランシェ増幅を起こし、出力信号として検出される。

- クロストーク

あるピクセルのアバランシェ増幅中に二次的光子が発生し、隣接するピクセルにもアバランシェ増幅を誘起する現象。これによって、複数のピクセルにヒットがあったときのように出力信号は大きくなる。

- アフターパルス

信号事象から一定時間(～数百ns)遅れてアバランシェ増幅を生じる現象。この現象の理解は現在も進められており、その起源には諸説ある。電子が半導体内の格子欠陥に捉えられ、一定時間の後に放出されて再度アバランシェ増幅を引き起こすという理解が一般に知られる。あるいは、アバランシェ増幅中に発生した二次的光子が基盤層で正孔を生じ、これが基盤層でゆっくりと拡散して空乏層に至り、アバランシェ増幅を生じると理解される。

ΔV が大きいとき、クロストークやアフターパルスの増加によって、ヒットのあったピクセル数が増加し、線形性が悪くなる。

2.1.3 反射材

シンチレーション光を損なうことなく検出器まで輸送するために、シンチレーターには反射材を巻く。反射材の反射率には波長依存性がある。本研究で使用する3M社の反射材ESRは波長400nm～1000nmの領域において98%以上の反射率を持つ[10]。反射材の厚さは65 μm である。

2.2 シンチレーション検出器の基準設計

基準設計の開発

シンチレーション検出器の基準設計は、信州大学を主導として研究開発が進められている。基準設計では $45\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ のシンチレーターに反射材を巻き、 $5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ の面の一方に MPPC を設置する (図 2.4)。このような配置によって、少ない反射回数で MPPC まで到達できるようなシンチレーション光を検出することができ、光の損失が少ないという利点を持つ。

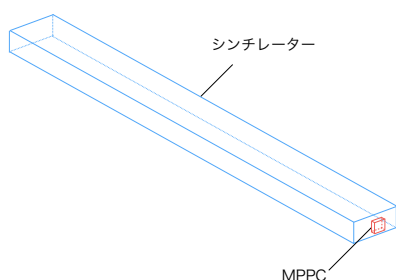


図 2.4: 基準設計の読み出しデザイン

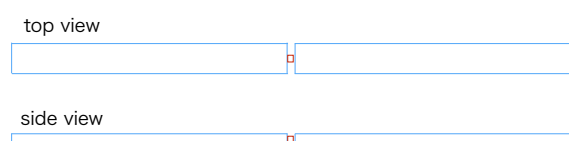


図 2.5: 基準設計の配置

基準設計の課題

基準設計は以下のような課題を持つ。

1. 光電子数の位置依存性
粒子が MPPC から離れた位置に入射すると、MPPC に至るまでに透過や減衰によって光が失われる。一方、MPPC に近い位置に入射した場合はこのような損失が少ない。あるいは、反射せずに直接 MPPC へ入射する確率も高くなる。したがって、同じエネルギー損失であっても、MPPC に近い位置に入射したときの方が光電子数が多くなる。
2. 不感領域の存在
シンチレーターと MPPC を図 2.5 のように並べるため、MPPC を設置する場所が不感領域となる。
3. 量産に向けた課題
MPPC を実装する際、MPPC を読み出し基板に対して垂直に立てて半田付けしなければならない。この方法は量産には不向きである。反射材をシンチレーターに実装する方法についてもまだ確立されていない。

4. MPPC のピクセルサイズとピクセル数

ILCでの主な背景事象である Bhabha 散乱を取り除くためには、ピクセルサイズが小さく、かつピクセル数の多い MPPC が必要である。しかし、MPPC の開発は本研究の主旨ではない。

本研究では、基準設計が抱えるこれらの課題を解決すべく、新しい読み出しデザインの開発を行った。

2.3 シンチレーション検出器の新しい読み出しデザインの開発

節 2.2 に挙げた課題を解決するため、図 2.6 のようなくさび形のシンチレーターを用い、MPPC をシンチレータの下面に置くような読み出しデザインを考案した。以降、シンチレーターの下側に MPPC を設置して読み出すデザインを下面読み出しデザインと呼ぶ。このデザインは次のような利点と欠点を持つ。

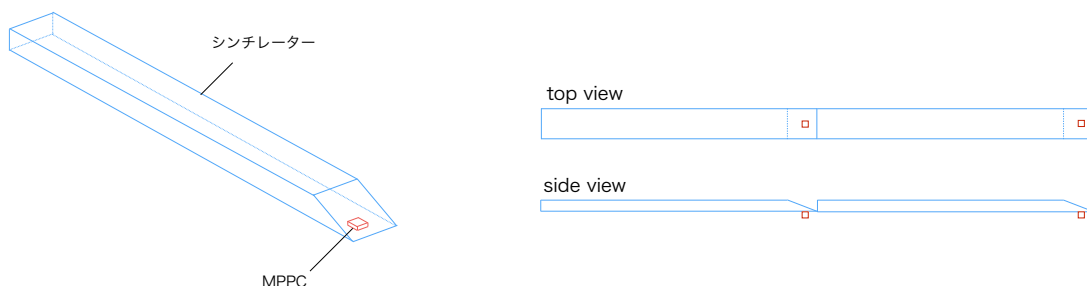


図 2.6: くさび形のシンチレーターを用い 図 2.7: くさび形のシンチレーターの配置例
た下面読み出しデザイン

1. 光電子数の位置依存性の改善

MPPC に近い領域では、粒子がシンチレーターを通過する距離が短くなるため発光量が減少する。これによって、基準設計で問題となっていた光電子数のピークを抑制する。

2. 不感領域の排除

例として図 2.7 のようにシンチレーターと MPPC を並べることを想定している。このような配列は不感領域を必要としない。

3. MPPC の実装方法の改善

MPPC をシンチレーターの下面に横たえて設置することができ、実装が比較的

容易になるため、量産に適している。具体的には、MPPCを読み出し基板に埋め込むことを想定している。

4. 光電子数の減少

MPPCをシンチレーターの下面に設置すると、光電子数が減少してしまう。これは、反射回数の多い経路をたどってMPPCに至る光が増えるためと考えられる。しかし、シンチレーターをくさび形に加工することによって、くさびの斜面で光をMPPCの方向へ反射し、光電子数の減少を抑える効果を期待している。

5. シンチレーターの成形方法の問題

シンチレーターの形状が複雑になり、量産方法に課題がある。本研究では鋳型成形によってシンチレーターを加工したが、射出成形という量産に適した方法を取ることを検討している³。

6. 反射材の製作および実装方法の問題

複雑な形状の反射材を製作し、シンチレーターに巻く作業が必要となり、量産の障害となる。反射材の製作における課題はレーザーを使用することによって解決すること考えている。

シンチレーション検出器の光電子数

シンチレーション検出器に必要なとされる光電子数について考える。先行研究から以下のようなことが考えられている。

- 各チャンネルのダークノイズの確率は 10^{-4} 以下にならなければならない。
- $\sqrt{s} = 500$ GeVでのBhabha散乱における1チャンネルの最大エネルギーは2500 MIPとなる。

また、ピクセルサイズ $10\ \mu\text{m}$ のMPPCについて次のことが調べられている。

- $\Delta V = 6\sim 7$ Vにおいてエネルギー分解能が最も高くなる。
- このとき、ダークノイズは約100 kHz、クロストークの起こる割合は0.10である。

先行研究では、ピクセルサイズ $25\ \mu\text{m}$ のMPPC、クラレ社のシンチレーター(SCSN38)、KIMOTO社の反射材(REF-WHITE)を用いて7 p.e./MIPが得られている。また、 β 線源を照射したときの獲得光電子数は14 p.e.であった⁴。これを参照し、シンチレー

³シンチレーターの成形方法については付録Bを参照。

⁴ただし、光電子数はADC値の平均値から算出された。

ターの光量を 7 p.e./MIP、信号の閾値を 0.5 MIP と仮定する。ILC 実験のバンチの間隔は 200 ms であるので、事象の頻度を 5 Hz とすると、各チャンネルのノイズの割合は 10^{-4} 程度と予想され、先の要求を満たす。本研究では、下面読み出しデザインを用いて先行研究と同等の光電子数を獲得することを目標とし、下面読み出しの有用性についてシミュレーションと測定を行って評価する。

第3章 シンチレーション光の伝播についてのシミュレーション

シンチレーション光の伝播をシミュレートし、シンチレーターの形状とMPPCの配置によって検出される光電子の違いを予測することができるシミュレーションツールを構築した。これを用いて、光電子数の位置依存性と最適なシンチレーターの形状とMPPCの配置について検証した。

3.1 Geant4を用いたシミュレーション

Geant4を用いたシミュレーションを行った。Geant4は、粒子が物質を通過する際に生じる相互作用過程を正確にシミュレーションするソフトウェア・パッケージであり、高エネルギー物理にとどまらず、加速器、宇宙、医療などの分野で世界的に利用されている。

シンチレーション光の伝播について、図 3.1 のような物理過程を考慮したシミュレーションモデルを組み立てた。電子がシンチレーターに入射すると、シンチレーション光を生じる。この光は次の1, 2のような反応を繰り返してMPPCのパッケージに至り、薄い空気層を通過した後、MPPCの受光面に入射する。あるいは、その過程で3, 4, 5のような反応によって失われると考える。

1. シンチレーターと反射材の間の空気層の間で全反射される。
2. シンチレーターから空気層へ透過し、反射材で反射され、シンチレーター内に入る。
3. シンチレーターから空気層へ透過した後、反射材で反射されない。
4. シンチレーターから空気層へ透過した後、反射材で反射され、さらにシンチレーターの表面で反射材に向かって反射される。
5. シンチレーター内で減衰する。

このような過程をシミュレーションするために、Geant4のOpticalPhotonというクラスを使用した。Optical photonは、シンチレーション光のシミュレーションに

適しており、原子核空間に比べて十分長い波長の光の電磁相互作用を扱う。以下のように物質ごとに屈折率や表面状態、吸収長などの光学特性を設定してシミュレーションを行った。

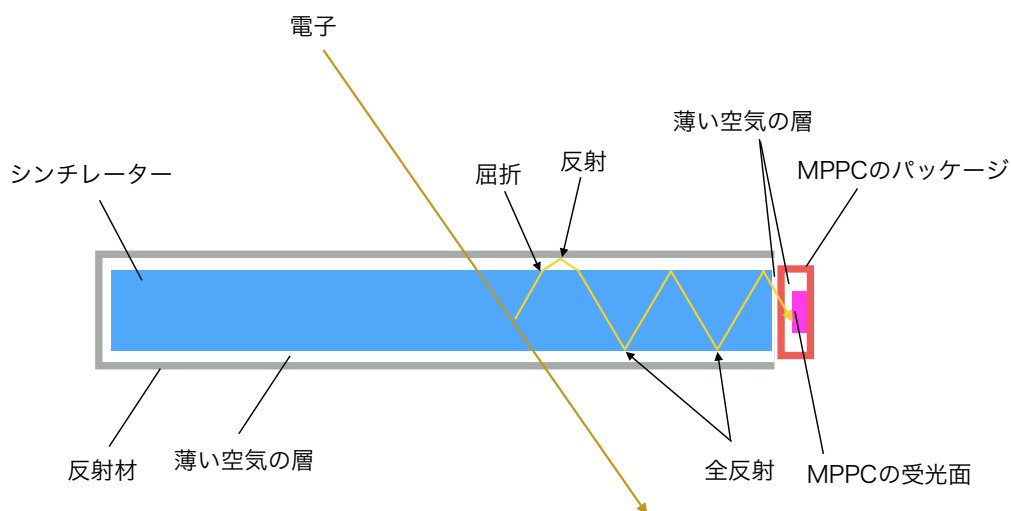


図 3.1: シンチレーション光の伝播のシミュレーション

シンチレーション光の生成

シンチレーターに入射した粒子は、エネルギー損失に比例した数の光子を生じる。シミュレーションでは電子を入射してシンチレーション光を発生させた。発光スペクトルと発光量はシンチレーターのデータシート [8] をもとに設定した。

反射と屈折

光子が物質の境界面に至ると、2つの物質の特性に応じて反射と屈折が起こる。まず、物質の表面の媒質を定義するによって境界面で起こる現象を設定し、さらに、4種類の反射の割合を境界面に設定した。

- 物質の表面の媒質
検出器表面の物質の属性 (G4SurfaceType) には、以下のような変数がある。

dielectric_metal 不導体と導体の境界面。光子は金属に吸収、または反射される。

dielectric_dielectric 不導体と不導体の境界面。光子の反射、屈折、吸収が起こる。

検出器の感度領域には **dielectric_metal** を指定し、シンチレーターと MPPC のパッケージの表面には **dielectric_dielectric** を指定した。

- 反射の種類

反射の種類を図 3.2 に示す。

Specular spike(鏡面反射) 光の進行方向に向かう鋭い反射。

Specular lobe Specular spike の周囲に広がりを持つ反射。

Diffuse lobe 境界面でのランバート反射。

Back scattering(後方散乱) 入射と同じ経路を逆方向に折り返す反射。

シンチレーターの表面に、これらの反射を表 3.1 のような割合で設定した。

- 物質の表面状態

シンチレーターの研磨状態や反射材の有無について以下のような変数を設定することができる (**G4OpticalSurfaceFinish**)。シンチレーターの表面は **polished-backpainted** を指定した。すなわち、反射材を物質として定義するのではなく、シンチレーター表面に **polishedbackpainted** の特性を付加することによって、反射材とシンチレーターの間での反射を再現している。

polished 表面が完璧に研磨された状態。全反射が起こる。

ground 表面が荒く、研磨されていない状態。

polishedfrontpainted 表面が研磨されており、反射塗料が塗られた状態。

polishedbackpainted 表面が研磨されており、反射材で覆われた状態。物質表面に無限に薄い空気層のようなものを考え、その屈折率が計算に使用される。

さらに、シンチレーターの表面の荒さを σ_α (**SigmaAlpha**) という変数で設定することができる。 σ_α のガウス分布に比例した角度分布が微細な表面に設定される。

吸収

吸収が起こると、その光子の飛跡の追跡を終了する。シミュレーションでは、吸収長として設定した距離が吸収されるまでに媒質中を進むことのできる平均の距離となる。

MPPC の検出効率

MPPC のデータシート [9] に基づいて、波長依存な検出効率を設定した。

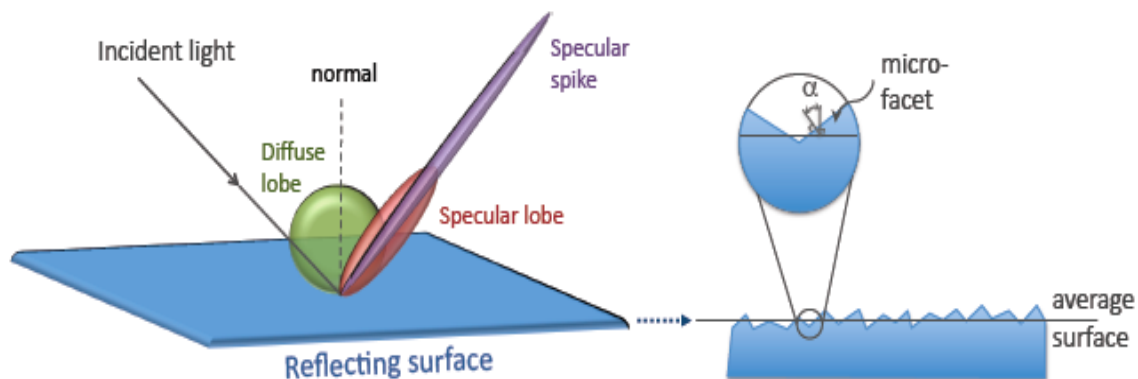


図 3.2: 反射の種類 [13]

表 3.1: シミュレーションのパラメーター [14]

	設定値
発光効率 [photon/MeV e ⁻]	10000 (EJ-204)
屈折率	1.57
Specular spike	0
Specular lobe	0.9
Diffuse lobe	0.1
Back scattering	0
吸収長 [cm]	80
反射率	0.95
σ_α [rad]	0.1

3.2 シンチレーターのデザイン

図 3.3~3.8 に示す 6 種類のデザインのシミュレーションを行った (各図の上が top view、下が side view である)。それぞれのデザインの意図を説明する。

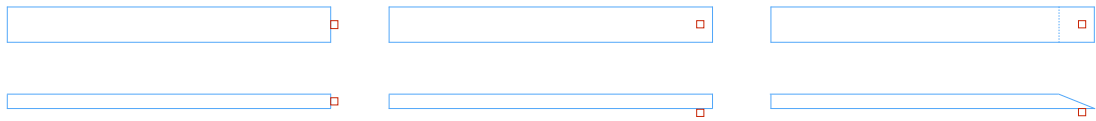


図 3.3: Baseline design

図 3.4: Simple bottom

図 3.5: Simple wedge

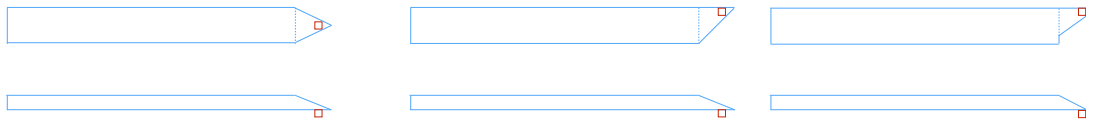


図 3.6: Double tapered wedge

図 3.7: Single tapered wedge

図 3.8: Single tapered wedge 2

- **Baseline design** (基準設計) MPPC に至るまでの反射回数が少ない光子を検出することができ、光量が多い。
- **Simple bottom** 直方体のシンチレーターを用いた下面読み出し。不感領域を必要としないが、光量は基準設計に比べて著しく減少する。
- **Simple wedge** 直方体の一部をくさび形にし、下面読み出しを行う。くさびの斜面で MPPC の方向へ光を反射し、基準設計から Simple bottom にすることによって減少した光電子数を回復することを期待した。
- **Double tapered wedge** Simple wedge にさらにくさびを加えたもの。2次元の方向にくさびを持つことで光の収集効率をさらに向上することを期待した。ただし、くさび部分の噛み合わせから2本のシンチレーターを一直線に並べることができない。
- **Single tapered wedge** Double tapered wedge と同様の効果を期待した。くさびを非対称な形にすることによって、シンチレーターの配置が互い違いにならない利点がある。
- **Single tapered wedge2** Single tapered wedge のくさびの先端の三角形の部分を削ったような形状。これは、この部分に光が入り込んでしまうと、その後反射を繰り返して MPPC に入射する確率は小さいと予想するためである。Single tapered wedge と同様の効果と、多少光電子数が回復されることを見込んだ。

3.3 シミュレーションの結果と考察

図3.9に示す位置に電子を入射し、シンチレーション光の伝播をシミュレートした。くさびの先端からMPPCの中心までの距離をMPPCの位置とし、くさびの先端からくさびの斜面が終わる地点までのシンチレーター長手方向の距離をくさびの長さとする。シンチレーターの形状とMPPCの配置によって検出される光電子数の違いについて、以下のような比較を行った。

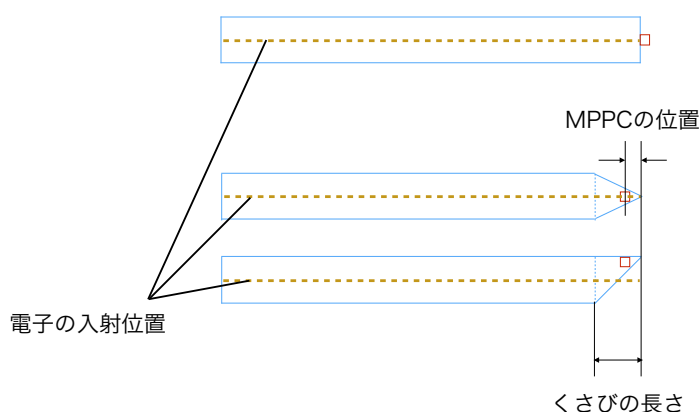


図 3.9: 電子の入射位置

1. シンチレーターの形状

5種類の形状について、くさびの長さ5 mm、MPPCの位置0.5 mmに設定し、光電子数を比較した。結果を図3.10に示す。横軸はMPPCの中心から電子の入射位置までの距離である。光電子数はBaseline designが一番多く、また、Simple bottomのようにMPPCの配置を変更することによって著しく減少することがわかる。さらに、電子の入射位置がMPPCに近づくにつれて光電子数が増加し、位置依存性が悪化が見られる。シンチレーターをくさび形にすると、光電子数の減少を抑えることができ、位置依存性も改善されている。ただし、Single tapered wedgeの光電子数が原点に近づくにつれて急激に減少しているのは、図3.9のような電子の入射位置によるものである。Double tapered wedgeに至っては、Baseline designの70~80%の光電子数を示している。

2. くさびの長さ

厚さ1.5 mmのSimple wedgeのシンチレーターについて、くさびの長さが3, 5, 7 mmのときの光電子数を比較した(図3.11)。くさびの長さが短いほど、くさびの斜面の勾配は急になり、反射によってMPPCに至る光子が多くなっているのだと考えられる。

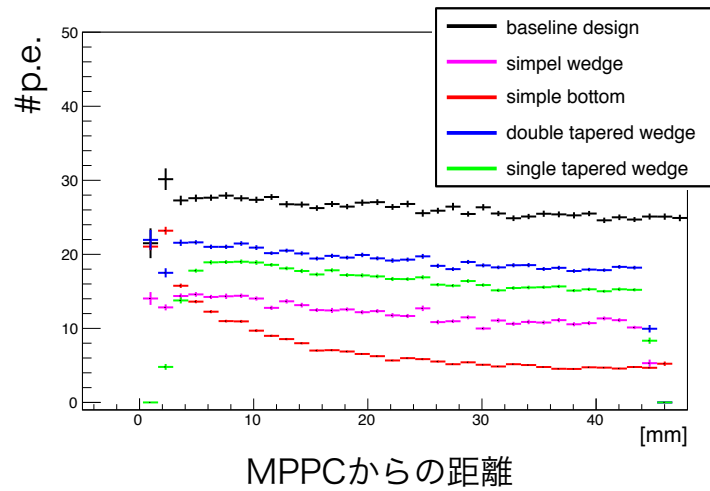


図 3.10: シンチレーターの形状の違いによる比較

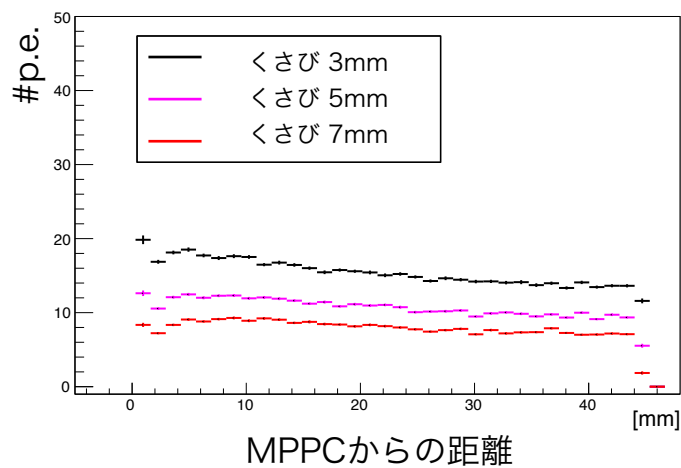


図 3.11: くさびの長さの違いによる比較

3. MPPC の位置

くさびの長さ 5 mm、厚さ 2 mm の Simple wedge のシンチレーターについて、MPPC の位置が 0.5, 1.0, 1.5 mm のときの光電子数を比較した結果、MPPC はできるだけくさびの先端に近い位置に置いた方が光電子数が多いことがわかった (図 3.12)。この結果から、くさびの先端に至るほど反射回数が増え、MPPC よりもくさびの先端に近い位置に至った光を検出する確率は低いと考えられる。

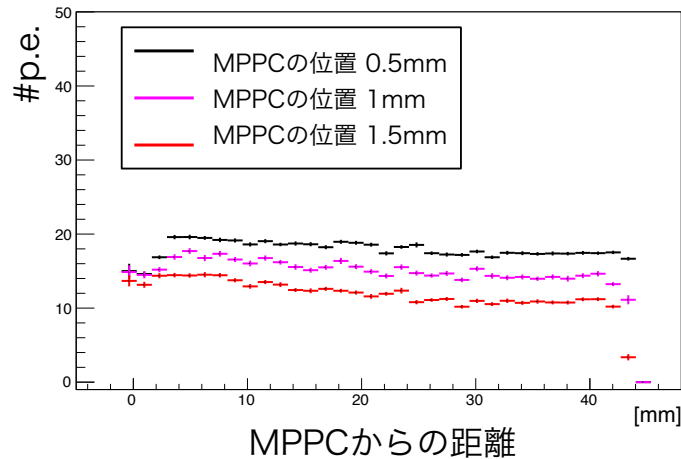


図 3.12: MPPC の位置の違いによる比較

4. シンチレーターの厚さ

シンチレーターを薄くすることによって、検出器の小型化に貢献することができる。ILD ではカロリメーターまでが超伝導磁石の内側に位置するため、大きな検出器はコストを圧迫する。検出器として十分な光量を確保しつつ、シンチレーターをどの程度まで薄くできるのか検証するため、厚さ 1, 1.5, 2 mm のシンチレーターの光電子数を比較した。シンチレーターのデザインはくさびの長さ 5 mm の Simple wedge である。図 3.13 より、厚さを半分にすると光電子数は 3 割に減少してしまうことがわかる。これは、電子のエネルギー損失が半減し、反射回数は反比例に増加することが原因である。仮に、厚さ 2 mm のときの MPPC に至るまでの反射回数を 8 回、反射率を 0.95 として、厚さ 2 mm のときに対する厚さ 1 mm と 1.5 mm のシンチレーターの相対的な光電子数を計算する。厚さ 1 mm の場合、発光量は厚さ 2 mm のときの半分になり、反射回数は 16 回となる。

$$\frac{1}{2} \times \frac{0.95^{16}}{0.95^8} \sim 33\% \quad (\text{厚さ 1 mm}) \quad (3.1)$$

$$\frac{1.5}{2} \times \frac{0.95^{8 \times (2/1.5)}}{0.95^8} \sim 65\% \quad (\text{厚さ 1.5 mm}) \quad (3.2)$$

となり、シミュレーション結果と合致する。

5. Single tapered wedge と Single tapered wedge2 の比較

2 種類のくさび形について比較を行った結果、期待したとおり Single tapered wedge2 のようにくさびの先端を削った方が光電子数が多いことがわかった。

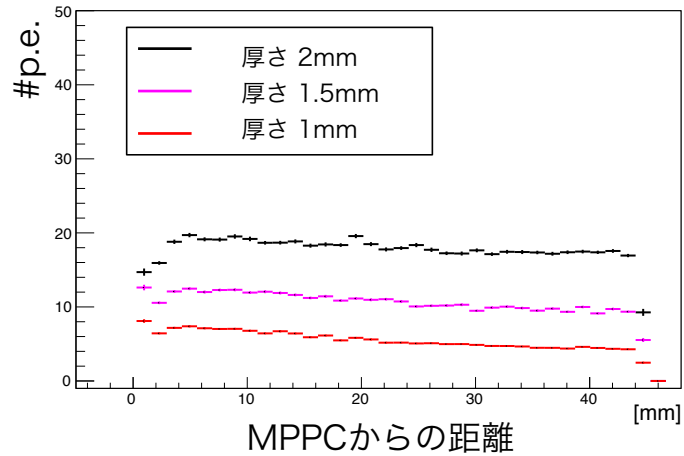


図 3.13: シンチレーターの厚さの違いによる比較

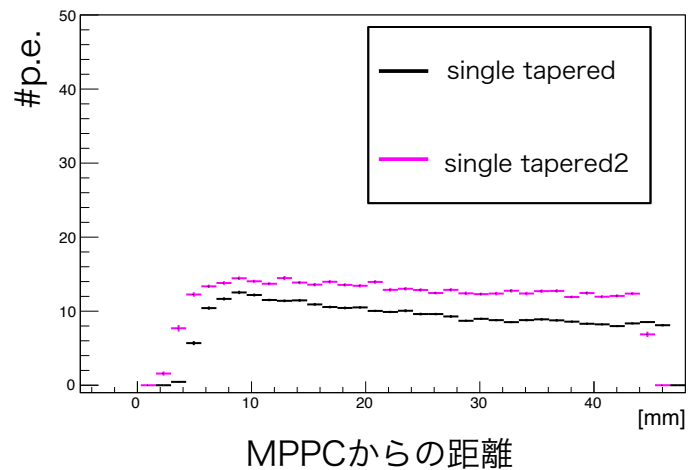


図 3.14: Single tapered wedge と Single tapered wedge2 の比較

シミュレーションの結果についてまとめる。くさび形のシンチレーターを用いた場合、くさびのデザインによっては Baseline design の約 80% の光電子数を期待することができ、かつ位置依存性の改善が見込まれる。くさびの長さは短く、MPPC はくさびの先端に寄せた方が光電子数は多い。厚さを 1.5 mm 以下にすると光電子数が 10 p.e. を下回り、光量が不十分になり得る。

第4章 シンチレーターの光量測定

実際にシンチレーターの光量測定を行い、シンチレーターをくさび形にすることによって光電子数の位置依存性が改善しているか、先行研究と同等の光電子数を検出することができるかについて調べた。

4.1 測定方法

セットアップ

光量測定のセットアップを図4.1に示す。測定には β 線源であるストロンチウム90を用い、 $\phi 0.5\text{ mm}$ のコリメーターでコリメートした後、光量を測定するシンチレーターストリップとトリガー用シンチレーター(大きさ $5\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 5\text{ mm}$)に照射した。以下、シンチレーターストリップに設置した 1 mm 角、ピクセルサイズ $25\text{ }\mu\text{m}$ のMPPCをストリップカウンター、トリガー用シンチレーターに設置した 3 mm 角のMPPCをトリガーカウンターと呼ぶ。

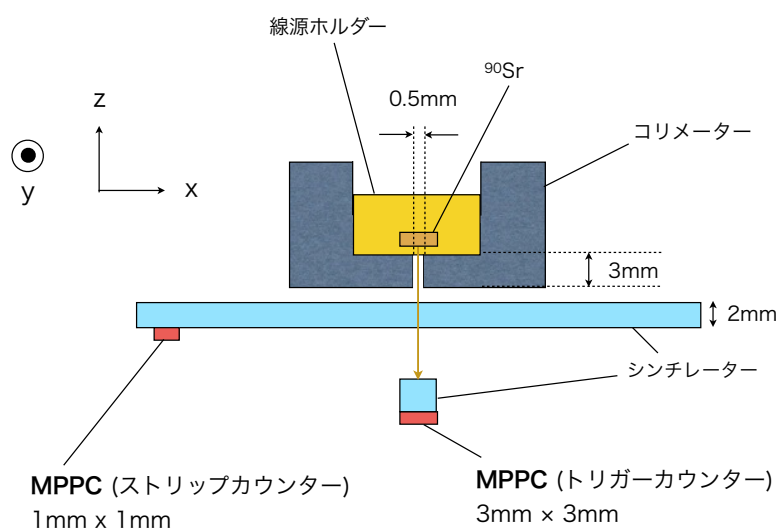


図 4.1: 光量測定のセットアップの模式図

図 4.3 に示すように、シンチレーターストリップと 1 mm 角の MPPC はアクリルのケースとプリント基板 (PCB) を使って相対的な位置を固定しており、これらを一体化して x、y 方向に移動する¹。MPPC の降伏電圧は温度依存性を持つため、これらの装置は恒温槽の中に設置して測定を行った。

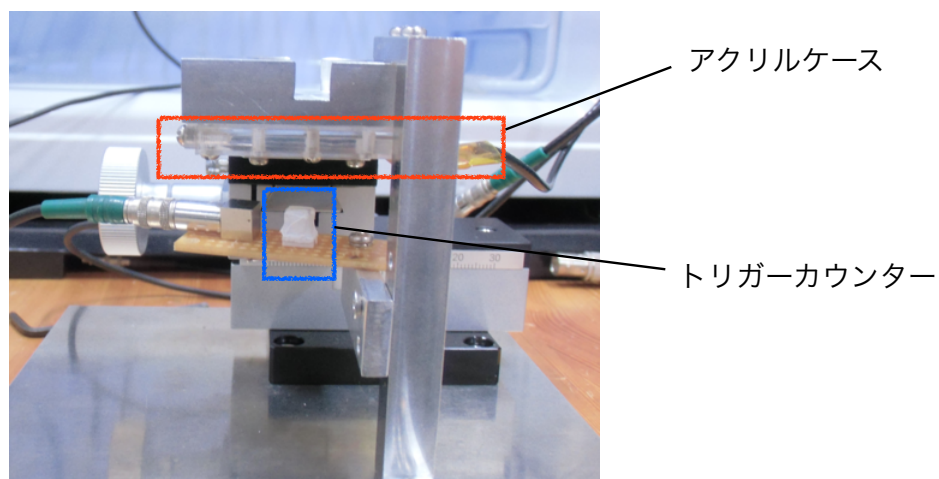


図 4.2: 光量測定のセットアップ

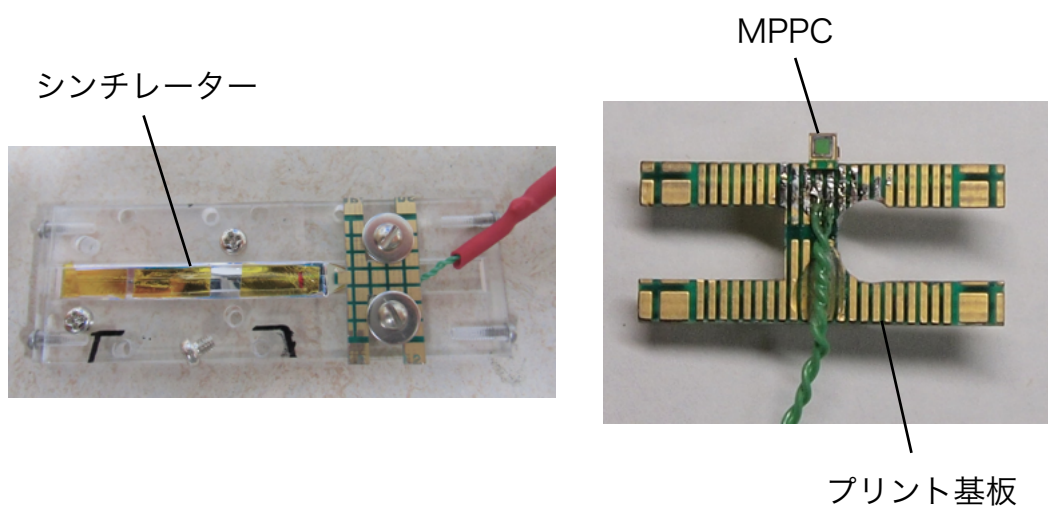


図 4.3: シチレーターと MPPC のセットアップ

¹Printed Circuit Board (PCB)

DAQ

DAQ には、DRS という高速波形デジタイザーを用いた²。DRS は Paul Scherrer Institute (PSI) で開発され、MEG 実験など様々な実験で使用されているものである [15]。DRS には電圧をサンプルするセルが 1024 個内蔵されており、入力された信号は、インバータ遅延鎖を周回し、コンデンサーに電荷が蓄積される。トリガー信号が入力されると、蓄積されていた電荷はシフトレジスタを通して順番に出力される。サンプリング周波数は 5 GHz まで可能であり、2 GHz でサンプルすると 512 ns の時間幅で波形を記録することができる。このようにして DRS では波形データから電荷や波高、時間情報などをオフラインで解析的に得る。

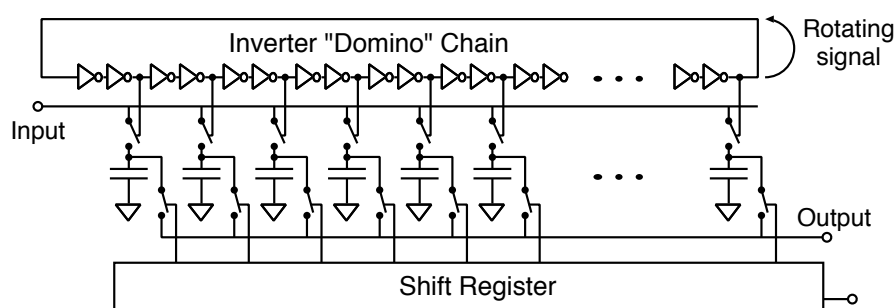


図 4.4: DRS の動作原理 [15]

論理回路のセットアップを図 4.5 に示す。シンチレーション光の測定と同時に、各測定点で毎回増幅率の較正を行った。CH1 はストリップカウンターの波形信号、CH2 はトリガー信号、CH3 はトリガーカウンターの波形信号である。トリガー信号は 3 つの信号に由来する。1 つはトリガーカウンター、他 2 つはストリップカウンターの 1 光子と 2 光子である。DISCR.①、②の閾値はそれぞれ 1 光子、2 光子が捉えられるように設定した。CLOCK①、②は、1 光子、2 光子の信号とランダムに同時事象をとる。このようにすることで、1 光子、2 光子によるトリガー信号の頻度が多くなりすぎないように調整した。DRS は波形データを記録するので、トリガー信号が来たときに CH3 の信号の有無をオフラインで調べることによって、シンチレーション光のイベントを判別することができる。

²Domino Ring Sampling chip (DRS)

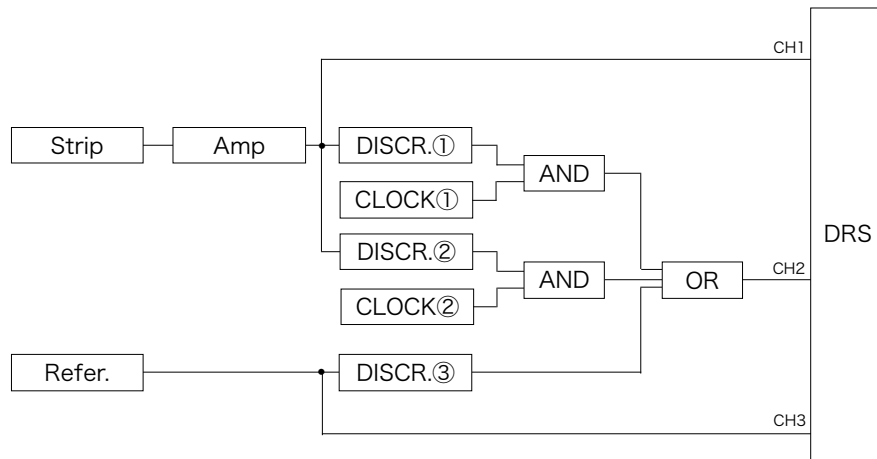


図 4.5: 論理回路のセットアップ

シンチレーター

図 4.6~4.9 の 5 種類のシンチレーターの光量を測定した。線源を照射した位置を図 4.10 に示す。Single tapered wedge のみシミュレーションの場合とくさびの部分における入射位置が異なる。

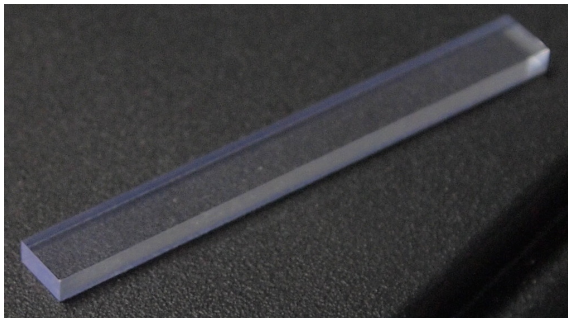


図 4.6: Baseline および Simple bottom

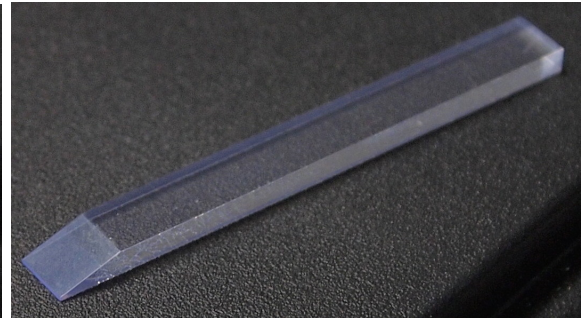


図 4.7: Simple wedge

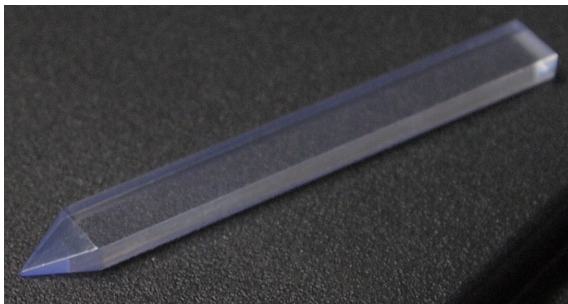


図 4.8: Double tapered wedge

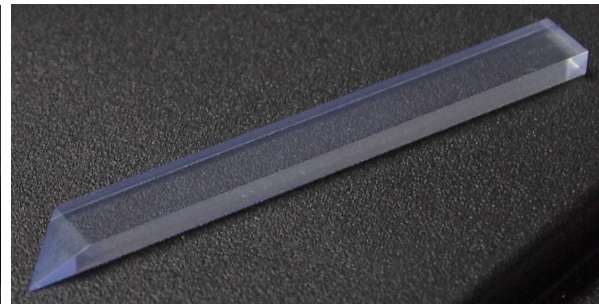


図 4.9: Single tapered wedge

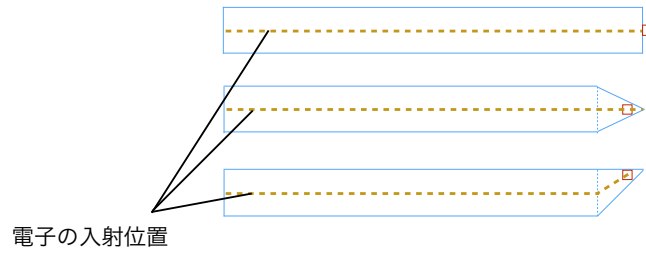


図 4.10: 線源の照射位置

4.2 測定結果と考察

4.2.1 MPPC の増幅率の較正

シンチレーターの1点に線源を照射したときの電荷と波高の分布を図4.11に示す。エネルギー損失を正確に測るためには、波高ではなく電荷量によって増幅率を較正すべきである。しかし、電荷量はピークの分離が悪かったため、以下のようにして1光子の電荷量を算出した。

1. 図4.12のように1光子と2光子の波高のピークをガウス分布でフィットしてピークを分離した。
2. 1光子、2光子のピークの電荷量の平均値を求めた。
3. 2. で求めた各ピークの電荷量の差を1光子の電荷量とした。

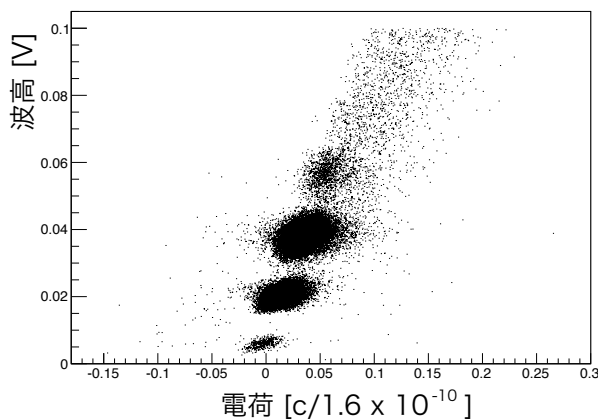


図 4.11: 波高と電荷の分布。1~3 光子とベデスタルが見えている

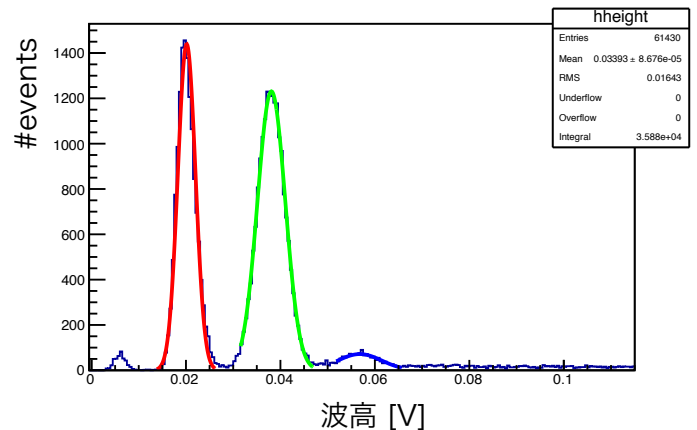


図 4.12: 増幅率の較正

検出される光電子数はランダウ分布に従い、検出器の分解能によってぼかされた分布になる。得られた分布をランダウ分布とガウス分布の畳み込み関数でフィットし、フィットの最確値によって光電子数を評価した。

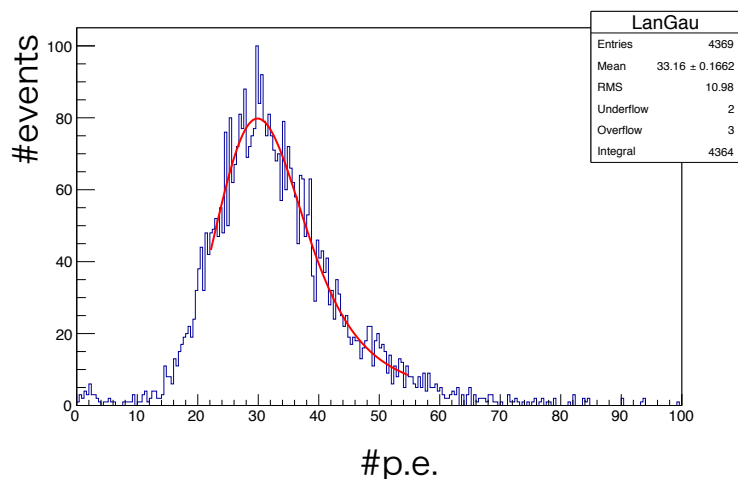


図 4.13: 光電子数の評価

4.2.2 光電子数の評価

1. 基準設計と下面読み出し

直方体のシンチレーターを用いた場合、下面読み出しでは基準設計の5分の1程度の光電子数しか検出することができず、位置依存性も悪くなっている。本研究では、基準設計において先行研究よりも6割ほど多い光電子数を得ることができた。これは使用しているシンチレーター材と反射材が異なるためである。本研究で使用したシンチレーター EJ-204 は先行研究で使用された SCSN38 よりも光量が多く、反射材についても ESR の方が KIMOTO よりもシンチレーターの発光波長に適しているようであることが測定によって確かめられている。

2. くさび形のシンチレーター

3種類の形状を比較した。位置依存性についてはどの形状でも直方体のシンチレーターに比べて改善がみられた。光電子数は Double tapered wedge が最も多く、Baseline design の約70~80%であった。Single tapered wedge はシミュレーションで期待されたほどの光電子数が得られず、Simple wedge と同程度であった。MPPC の位置や、シンチレーターと MPPC の結合状態は光電子数に大きく寄与する要因であり、位置の調整がうまくいっていなかった可能性があ

る。また、シンチレーターは切り出してきたシンチレーター材のロットによって個体差があることが知られており、このばらつきの大きさについては調査が必要である。

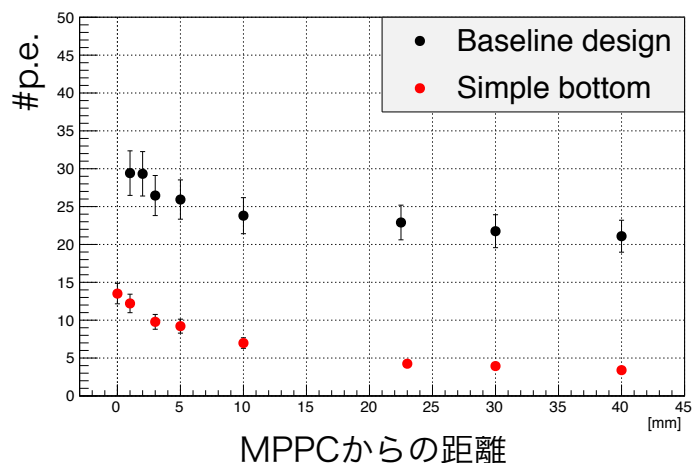


図 4.14: 基準設計と下面読み出し (厚さ 2 mm)

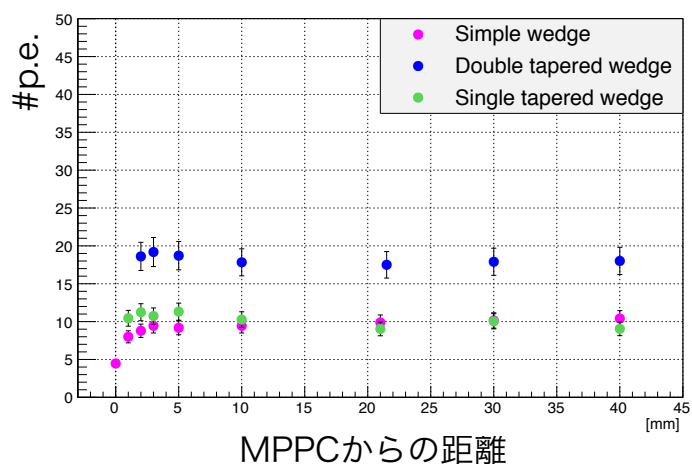


図 4.15: くさび形のシンチレーター (厚さ 2 mm)

3. 厚さ 1 mm のシンチレーター

厚さが 1 mm になると、発光量と反射回数の増減によって光電子数は厚さ 2 mm のときの約 3 割になると予想される (式 (3.1))。さらに、開口部分の寄与を考える。開口部分とは、MPPC を設置する面の反射材がない部分である。Baseline

design の場合、厚さが半分になると開口部分の面積が半減し、そこから外部に逃げる光が少なくなる。そのため、厚さ 2 mm のときの 6 割程度の光量を得ることができた。下面読み出しの場合は開口部分の面積は変化しないため、先述のように光電子数の減少がより著しく、厚さ 1 mm のシンチレーターでは下面読み出しを行うことは難しい。

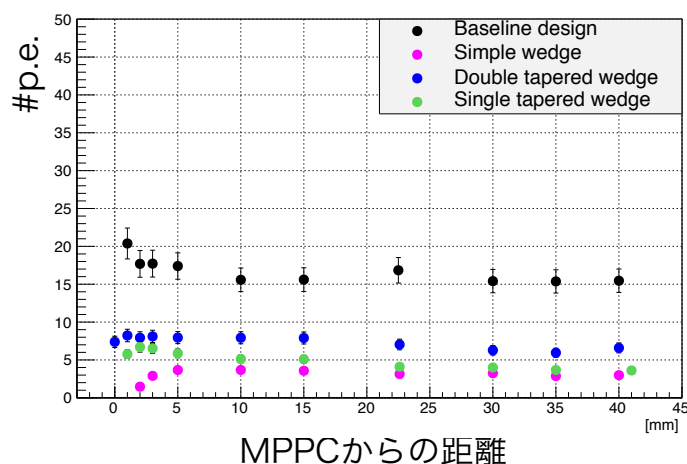


図 4.16: 厚さ 1 mm のシンチレーター

測定の結果についてまとめる。測定の結果はシミュレーションの傾向を良く再現しており、シンチレーターをくさび形にすることによって、Simple bottom に比べて光電子数と位置依存性に改善が見られた。Double tapered wedge については基準設計の 70~80% の光電子数を示しており、より最適なシンチレーター材と反射材を選ぶことによって先行研究よりも多い光電子数を得ることができた。また、Single tapered wedge と Simple wedge の光電子数は約 10 p.e. であった。検出された光電子数の評価は最確値と平均値によって約 1 割異なるため、先行研究で得られた光電子数は最確値で 12 p.e. 程度と見積もることができ、くさび形の 3 種類のシンチレーターでは十分な光電子数を得られることがわかった。厚さ 1 mm のシンチレーターでは光電子数の減少が著しく、下面読み出しを行うためにはシンチレーターの厚さが不十分である。

第5章 下面読み出し型シンチレーション検出器のプロトタイプ製作

シミュレーション及び光量測定の結果に基づき、下面読み出しデザインのプロトタイプを製作した。プロトタイプ製作においては、検出器製作における課題とその解決策を検討し、製作したプロトタイプの動作確認を行った。

5.1 カロリメーターのプロトタイプ

ILDの建設に向けて、プロトタイプの製作と性能試験を行う必要がある。本研究では、DESY FLCグループと信州大学高エネルギー研究室と協力し、カロリメーターのプロトタイプの製作に取り組んだ。電磁カロリメーターは図5.1のような8角形、ハドロンカロリメーターは16角形のパレル構造をしている。プロトタイプの構造は、ハドロンカロリメーターのパレルの1区画に相当し、以降これをEUNETと呼ぶ。

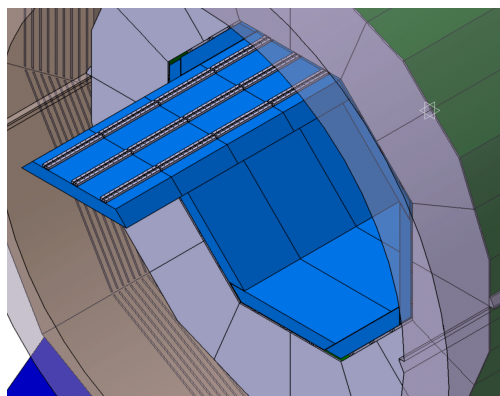


図 5.1: 電磁カロリメーターのパレル (青)

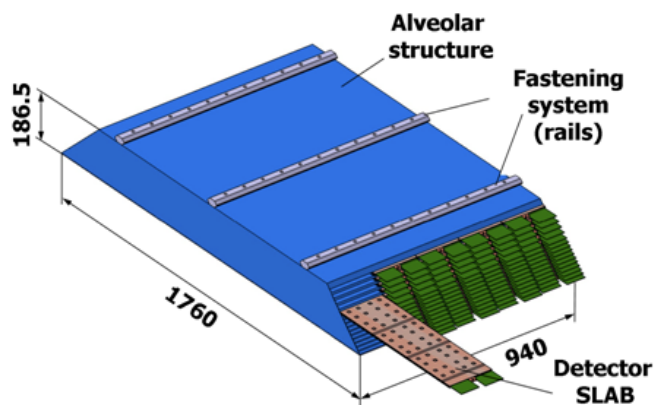


図 5.2: バレルの一部拡大図。図のように検出層 (緑) を備えている

EUNETの模式図を図5.3に示す。これは、鋼の吸収層の間に図5.4のような検出

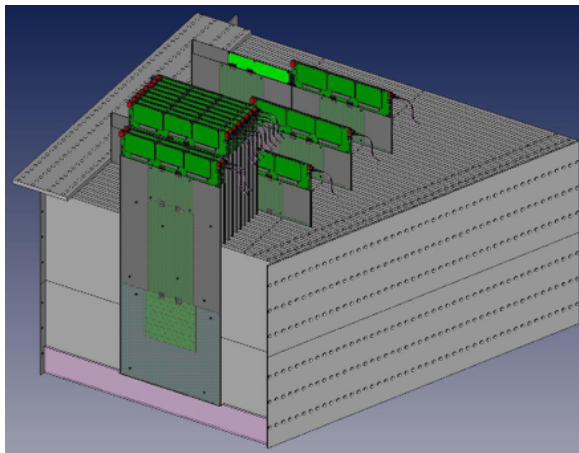


図 5.3: EUDET の全体図

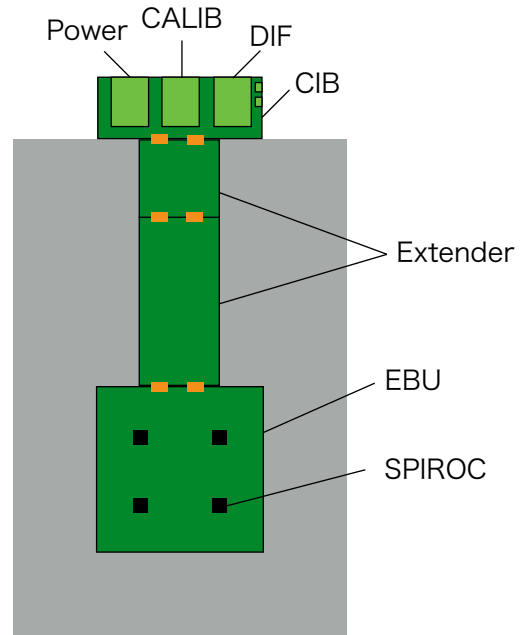


図 5.4: 検出層の構造

層を上から挿入するような構造になっている。ピンクのプレートのある面がバレルの内側を向いていることを想定し、ビームテストではこの面からビームを入射する。

電磁カロリメーターの検出層では EBU、ハドロンカロリメーターでは HBU と呼ばれる信号読み出し基板を用いる¹。シンチレーターは EBU の背面に並べられている。EBU については次節で説明する。EBU に接続されている 2 枚の Extender board は、ビームの中心位置と EBU の中心を合わせるためのものであり、EBU の制御は、POWER、CALIB、DIF と呼ばれる 3 枚の基板を用いて行う。これらの詳細については節 6.1 にまとめる。

今回製作する EUDET は、15 層の検出層と鋼の吸収層を備えており、3 層が電磁カロリメーター、12 層がハドロンカロリメーターである。本研究では電磁カロリメーターの 1 層を製作した²。

5.2 基準設計のプロトタイプ EBU

まず、基準設計に基づいた EBU について説明する。EBU は大きさ 18 cm×18 cm、厚さ約 1 mm の信号読み出し基板であり、EBU 1 枚には、144 個のシンチレーターストリップと MPPC が、36 個ずつ 4 列に並べられている。その信号は EBU に備えられた SPIROC と呼ばれる読み出しチップによって読み出される³。SPIROC は、ILC

¹Ecal Base Unit (EBU)、Hcal Base Unit (HBU)。

²プロトタイプでは EBU 1 枚を検出層 1 層としているが、ILD では EBU を複数枚連ねて 1 層を構成する。

³Silicon Photomultiplier Intergrated ReadOut Chip (SPIROC)

のカロリメーターに用いる光検出器の信号読み出しのため、フランス LLR の Omega グループによって開発された ASIC と呼ばれる集積回路の 1 種であり、1 つのチップは 36 個のチャンネルを制御することができる⁴。さらに、EBU には LED 144 個と温度計 6 個が内蔵されている。LED は、EBU にあけられた約 1 mm × 2 mm の穴から各ストリップに光を当てることができるようになっており、MPPC の増幅率の較正に使用する。

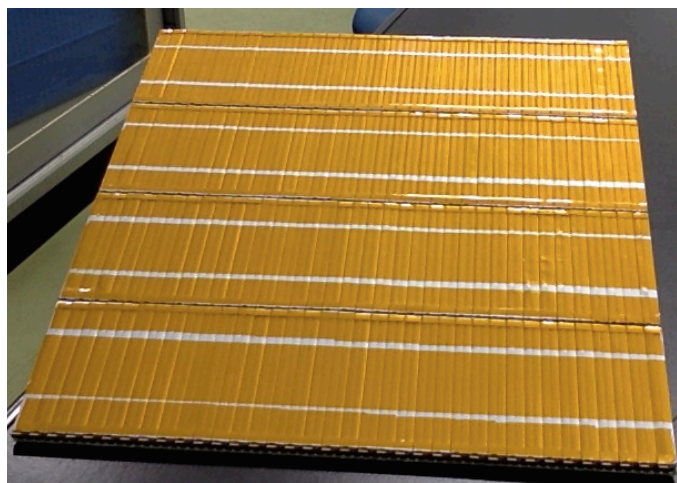


図 5.5: 基準設計の EBU。反射材に包まれたシンチレーターが並べられている。写真の下方に見える 1 列に並んだ 36 個の四角は MPPC。橙色の部分はカプトンテープ。

シンチレーション検出器では、直交する 2 方向にシンチレーターを並べるため、2 種類の EBU が必要である。2013 年までの信州大学の研究では、1 種類の EBU が開発された段階であり、ピクセルサイズ 25 μm の MPPC を用いたプロトタイプの製作と性能試験が行われた。以降、直交する 2 方向の EBU を vertical EBU と horizontal EBU と呼ぶ。2013 年に製作されたのは vertical EBU であり、2014 年の研究では新たに horizontal EBU とピクセルサイズ 10 μm の MPPC を用いたプロトタイプが製作された。ただし、horizontal EBU は LED が 72 個しか搭載されておらず、1 つの LED を 2 つのストリップで共有するような配置をしている。

⁴Application Specific Integrated Circuit (ASIC)

5.3 下面読み出し型のプロトタイプEBU

5.3.1 下面読み出し型プロトタイプの設計

3、4章に基づき、図 5.6 のようなシンチレーターを用いた下面読み出し型のプロトタイプの製作を行った。Double tapered wedge は光電子数や位置依存性において優れているが、シンチレーターを配置する際に既存の EBU 上に納めることができないため、次に光電子数の多い Single tapered wedge² を選択した。EUDET の検出層の厚さの上限は 4mm であり、EBU と後述する中間基板の厚さを考慮するとシンチレーターの厚さは 2mm 以内に抑えなければならない。下面読み出し型のプロトタイプを製作することは初めての試みであり、シンチレーターの配列など、なんらかの原因で光電子数が少なくなる懸念があったため、シンチレーターの厚さはできるだけ厚くした。シンチレーターの形状は、反射材の厚みを加味して EBU 上に丁度納まるように設計した。MPPC はピクセルサイズ 10 μm のものを使用した。

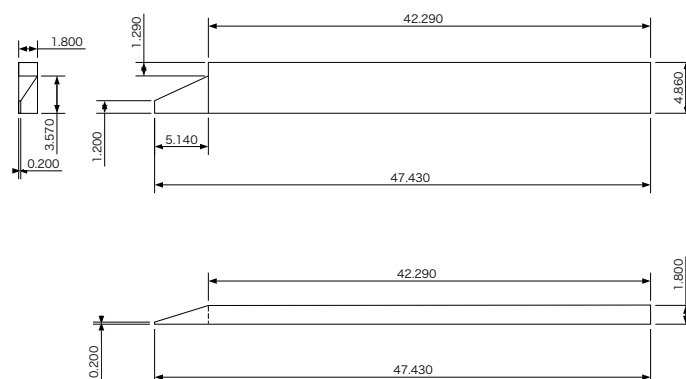


図 5.6: プロトタイプのスチレーターのデザイン

このような下面読み出し型のプロトタイプを製作するためには、解決しなければならない課題が3つある。

1. MPPC の配置の変更に伴い、EBU の信号線の配線の変更と、MPPC の厚み分のスペーサーが必要である。
2. 反射材の量産方法を確立しなければならない。2013年の信州大学のプロトタイプ製作では反射材は手作業で製作されたが、下面読み出し型のスチレーターに用いる反射材は形状が複雑であるため、手作業で量産することは厳しく、将来的な検出器建設に向けても量産方法の確立が必要である。
3. スチレーターを基板上に配置する方法を確立しなければならない。

これらの課題解決について、節 5.3.2 ~ 5.3.4 で一つずつ説明する。

5.3.2 中間基板の製作

これまでに開発された EBU は、基準設計に合わせて製作されたものであり、MPPC の配置が異なる下面読み出しデザインには対応していない。本来ならば、下面読み出し用の EBU を製作すべきだが、今回のプロトタイプ製作は 2014 年 10 月～12 月に行われるビームテストに間に合わせるため、既存の EBU を活かすことのできる、MPPC を埋め込んだ基板を製作することで対応した。中間基板の製作は林栄精機株式会社に依頼した。

中間基板の写真を図 5.7 に示す。中間基板の大きさは約 9 cm × 9 cm、厚さは約 1.1 mm であり、EBU の 4 分の 1 の大きさに相当する。このような基板を 4 つ製作した。中間基板を製作する意図は、MPPC を埋め込んだ形式の基板を試験することであるが、今回の試験においては、MPPC の配置の変更に伴う配線の変更と、下面読み出しを行うための MPPC の厚さ分のスペーサーという役割も担っている (図 5.9)。将来的には MPPC を EBU に埋め込んだ新しい EBU の開発を目指す。

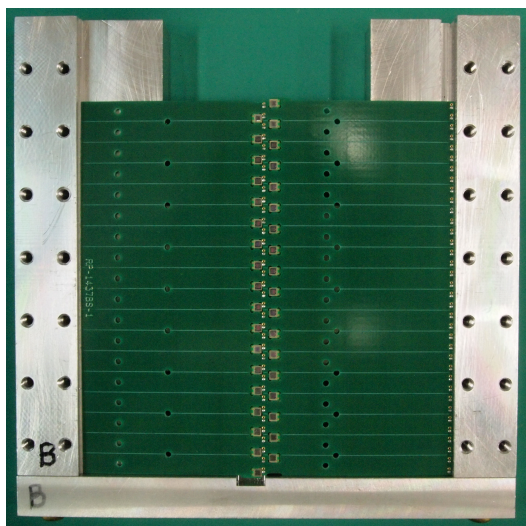


図 5.7: 中間基板。シンチレーターを並べるための治具の上に置いてある状態。MPPC36 個と LED 用の穴がある

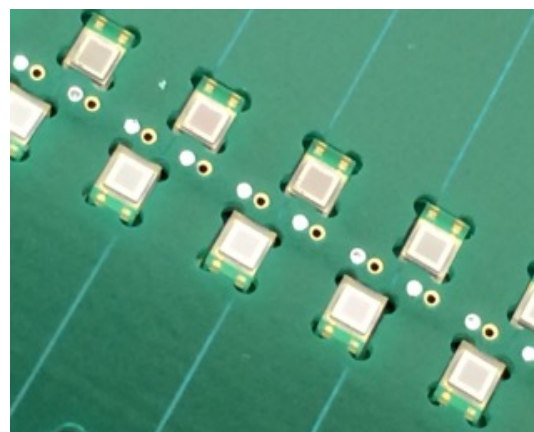


図 5.8: 中間基板の拡大図

MPPC は次のような方法で中間基板に設置した。まず、図 5.11 のような小基板に MPPC を半田付けする。中間基板には、MPPC を配置する位置に約 2 mm × 2.5 mm の穴をあけており、その穴に MPPC をはめ、小基板を中間基板に半田付けしている (図 5.10)。すなわち、中間基板にあけられた穴によって MPPC の位置を決定しており、位置精度は 100 μ m 程度である。また、保護皮膜を抜くことによって中間基板上に 5 mm おきに線を引き、シンチレーターを並べる際の補助線とした。

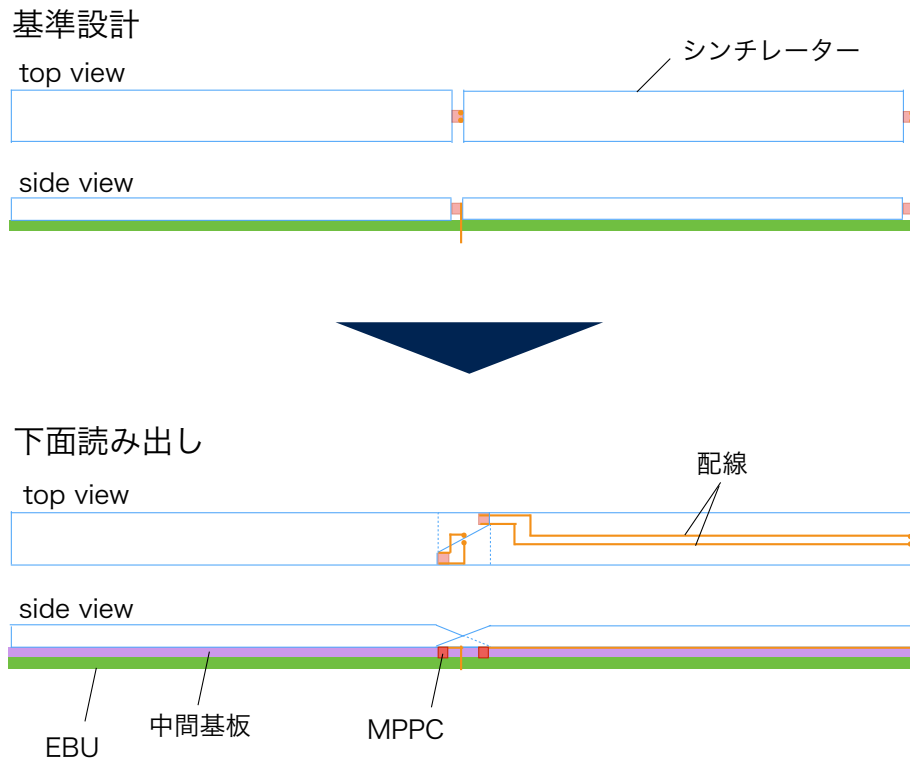


図 5.9: 中間基板の模式図。橙色で示すように信号線の配線を変更した

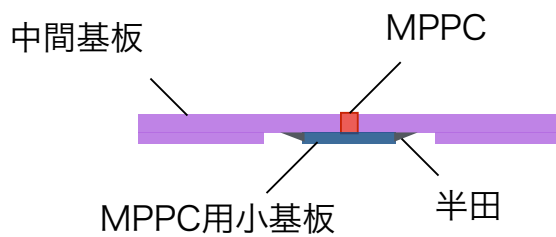


図 5.10: MPPC 用小基板の模式図。小基板を中間基板の裏側からはめ込み、半田付けする

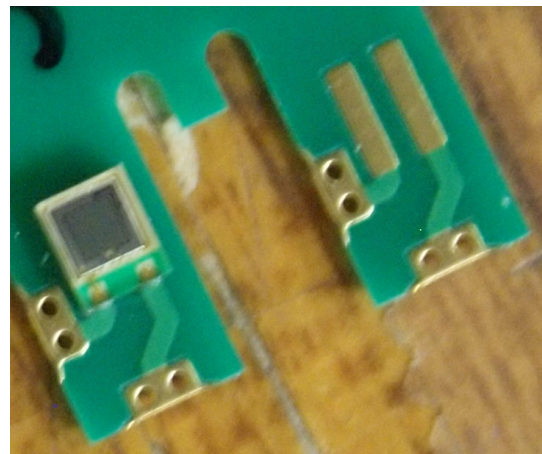


図 5.11: MPPC 用小基板

5.3.3 反射材の製作

反射材の製作において、次の2点が重要となる。1つは、反射材を正確に裁断すること、2つめは、シンチレーターに巻き付けるための折り目をつけることである。量産が可能な手段で反射材を製作するため、レーザーを用いて反射材を加工する方法を検討した。レーザーカットはシーエステック社に依頼した。

加工は、反射材の反射面に保護フィルムを貼り、非反射面から口径 200 μm のレーザーを入射して行った。反射材の外縁は強い出力で断ち切り、折り目の部分は出力を抑えてハーフカットする。折り目を調整するため、レーザーの出力を 5.5% から 10% まで変化させた 8 種類の試作品を製作し、反射材が破れない、かつ折り目をつけることができる出力 7% にレーザーを設定した。製作した反射材の写真を図 5.12 に示す。反射材には LED 光を当てるための穴をあけている。ストリップを並べる列によって

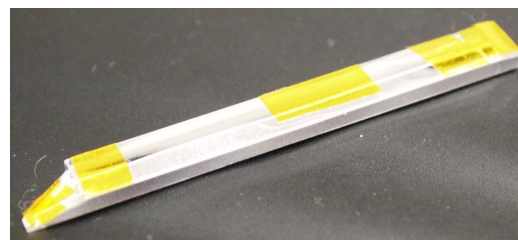
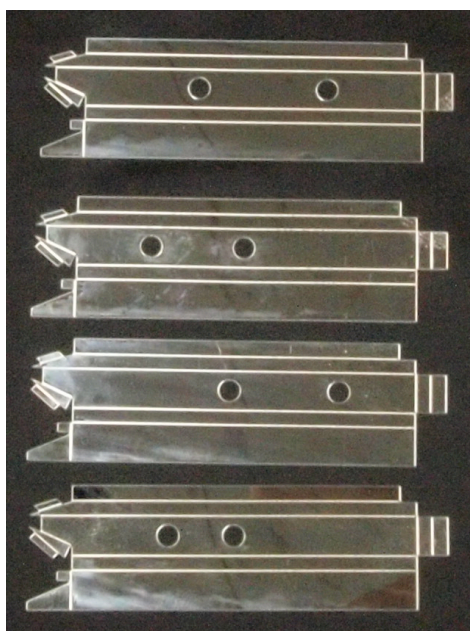


図 5.12: レーザーカットで製作した反射材 図 5.13: 反射材を巻いたシンチレーター

LED の位置が異なるため、穴の位置が異なる 4 種類の反射材を用意した。LED の位置は EBU のタイプによっても異なるため、2 種類の EBU いずれにも対応できるように、反射材 1 枚につき 2カ所に穴をあけている。

反射材の形状は、シンチレーターに巻きつけたときに、厚みが二重になる部分がシンチレーターの厚さ方向 (約 2mm の方向) のみになるよう設計した。このようにすることで、シンチレーターと MPPC の配置は厚みが 2 重になる部分の影響を受けない。

5.3.4 下面読み出し型のプロトタイプ EBU の製作

下面読み出し型の EBU の製作手順を説明する。

1. シンチレーターと反射材の製作

シンチレーターは鋳型成形法を用い、成形は G-tech 社に依頼した。反射材は節 5.3.3 で述べたようにレーザーカットで製作した。

2. シンチレーターに反射材を巻く

反射面が内側になるよう折り目をつける。折り目に合わせてシンチレーターに巻きつけ、反射材が二重になる部分をカプトンテープで固定する。テープを貼る箇所は必要最小限に留め、図 5.13 に見える 4カ所で固定した。製作はシンチレーター 1 本につき約 30 分を要した。

3. 中間基板上にシンチレーターを並べる

基板を固定し、シンチレーターを並べるための治具を製作した (図 5.14)。まず、治具に中間基板を設置し、厚さ 12 μm の両面テープを貼る。その上にシンチレーターを 6 本ずつ並べ、アクリルの部品とテープでシンチレーターを固定する。この作業を繰り返し、36 本のシンチレーターを並べた中間基板を 4 枚製作した。シンチレーターと中間基板は、厚さ 30 μm のカプトンテープを使って固定した。シンチレーターが中間基板内におさまるよう並べると、反射材の窓が MPPC 上に位置するようになり、シンチレーターと MPPC が接するように配置される設計になっている。今回このような方法でシンチレーターを並べ、EBU を製作することは初めての試みであり、かつ手作業で行わなければならなかった。シンチレーターと MPPC の配置が合わない等の問題が生じると、光電子数が著しく損なわれる恐れがある。これを可能な限り避けるため、MPPC の受光面にオプティカルグリスを塗り、シンチレーターを並べた。グリスの効果については節 5.3.5 で説明する。さらに、くさびの部分が浮き上がって MPPC との間に隙間ができることを避けるため、ポリ塩化ビニルでできた V 字型の治具を用いて押しえつけ、カプトンテープで固定した。また、この時点で線源を用いて光量の測定を行った (節 5.3.6)。

4. EBU に中間基板を半田付けする

中間基板から出ている 144 \times 2 本の MPPC の配線を EBU の電極に挿し、EBU と中間基板の間に隙間ができないよう、基板を押しえつけながら半田付けをした。EBU は vertical EBU である。完成した EBU の写真を図 5.15 に示す。

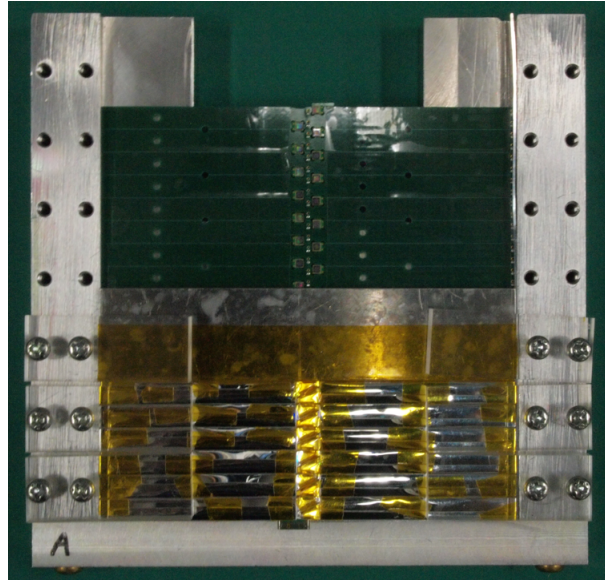


図 5.14: シンチレーターを並べるための治具。治具に中間基板を設置し、シンチレーターを 12 本並べた状態

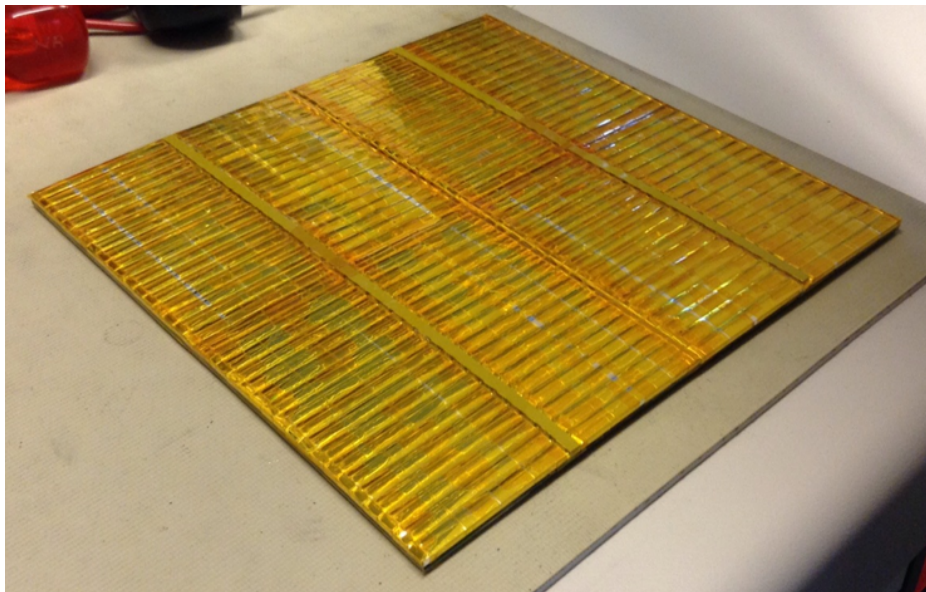


図 5.15: 下面読み出し型プロトタイプ EBU

5.3.5 オプティカルグリスの効果

シンチレーターにMPPCを抑えつけるだけの単純な固定では、シンチレーターとMPPCの間に空気の層が介在し、わずかにシンチレーション光を損う。また、シンチレーターとMPPCの受光面の配置がずれることによっても光を損失する。これらによる損失を最小限に抑えるため、MPPCのパッケージにオプティカルグリスを塗った。オプティカルグリスはシンチレーターに近い屈折率を持つため、シンチレーターからMPPCの受光面に至る過程でシンチレーション光が外部に逃げることを抑制する。一方で、光学的な結合の変化に伴い、光電子数の位置依存性が変わり得るという懸念がある。MPPCの受光面にオプティカルグリスを塗った場合と塗らない場合の光量を測定し、その効果を検証した。

測定は中間基板を使用せず、4章と同じセットアップで行った。そのため、MPPCはピクセルサイズ25 μm のものである。また、シンチレーターは厚さ1.5 mmのSingle tapered wedge2であり、図5.6のプロトタイプのシンチレーターと若干デザインが異なる。測定結果を図5.16に示す。

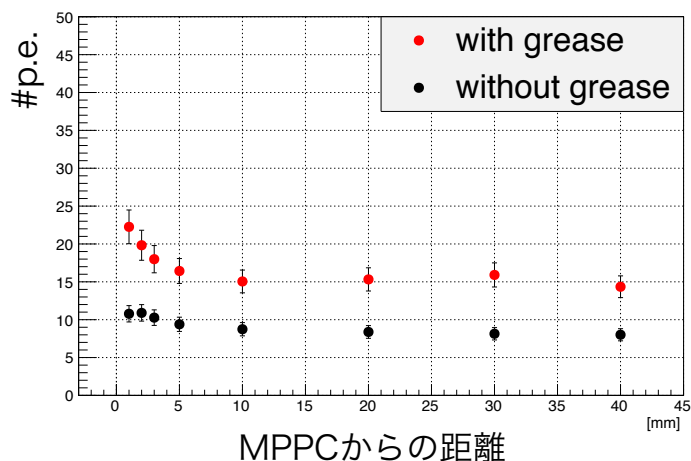


図 5.16: オプティカルグリスによる光電子数と位置依存性の変化

位置依存性はMPPCに近い位置でのふるまいが少し異なり、グリスを塗らない方が位置依存性がないが、光電子数についてはグリスを塗ったときの方が約40%も良い。ただし、同様の測定を厚さ1 mmのBaseline designのシンチレーターを用いて行ったが、光電子数の変化は20%ほどであり、シンチレーターのデザインによって光電子数の増え方に差異があった。本研究では、位置依存性の変化よりも、シンチレーターの並べ方によって光電子数が少なくなることを回避することを重視し、グリスを塗った方が良いと判断した。

5.3.6 プロトタイプの光量測定

シンチレーターと MPPC の結合を確認するため、中間基板にシンチレーターを並べた時点で線源を用いて光量の測定を行った。測定のセットアップを図 5.17 に示す。2 枚の中間基板重ね合わせ、一方をストリップカウンター、他方をトリガーカウンターとした。そのほかのセットアップは 4 章で述べたとおりである。

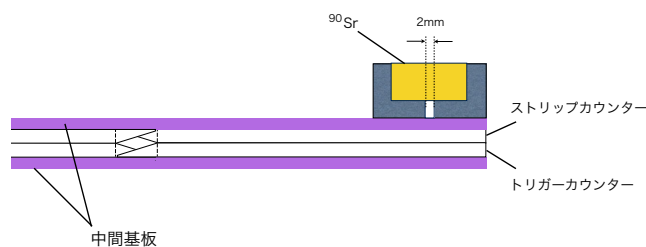


図 5.17: プロトタイプの光量測定のセットアップ

測定結果を図 5.18 に示す。ペDESTAL と 1~4 光子による鋭いピークと、シンチレーション光による幅広いピークが見えており、光電子数は 11.4 p.e. であった。図 5.16 の赤で示す測定結果よりも光電子数が低いのは、プロトタイプで使用している MPPC がピクセルサイズ 10 μm のものであり、検出効率が低いためだと考えられる。4 枚の中間基板から無作為に 2~3 本ずつ選んで測定を行った結果、いずれも 10~12 p.e. 程度の光電子数を得ることができ、シンチレーターの配列と中間基板の動作に問題がないことを確認した。

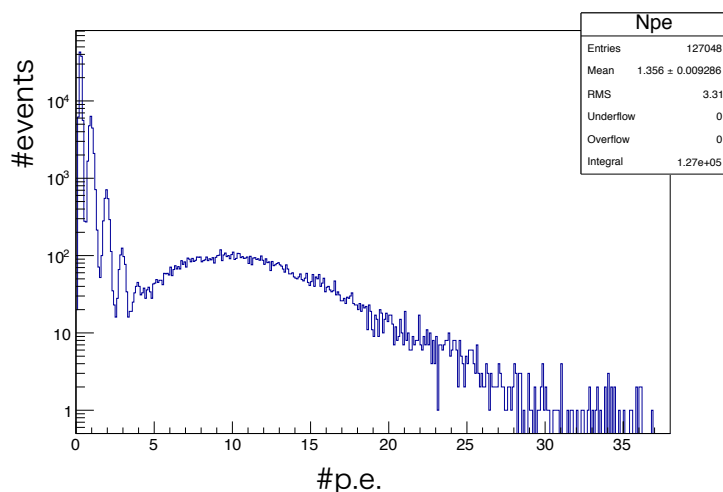


図 5.18: 中間基板を用いた光量測定の結果

第6章 プロトタイプの性能試験

プロトタイプの性能を試験するため、2014年10月8日から10月22日までと、11月26日から12月8日までの2期間に渡り、CERN PSにてビームテストを行った¹。電磁カロリメーターの開発における本試験の目的は、次の4点を評価することである。

1. 3層のEBUを用いた精細なカロリメーターとしての機能
2. 下面読み出し型プロトタイプの性能
3. horizontal EBUの性能
4. 1万ピクセルのMPPCの性能

一方、ハドロンカロリメーターの開発においては以下のようなことを評価する。

1. ピクセル数の多い半導体検出器やシンチレータースタイルを新たに導入し、ミュオンビームを用いたMIPのエネルギー損失を較正する。
2. ハドロンビームのシャワープロファイルを行う。

さらにカロリメーター全体としては、15層からなる大きなシステムの動作、水冷システム、新しいDAQシステムの実装を目的とし、電磁カロリメーターはシャワーの開始位置を検出する役割を担う。

以下では、まずEBUの性能について説明した後、ビームテストについてまとめる。

6.1 EBUの基本性能

6.1.1 検出層の構造

EBUまたはHBUは、CIBという基板を介してDIF board、CALIB board、POWER boardと接続している(図6.1)。それぞれの基板は以下のような役割を果たす。

- Central Interface Board (CIB)
DIF、CALIB、POWERとEBUを接続する。

¹欧州原子核研究機構(CERN)、Proton Synchrotron(PS)

- Detector InterFace board (DIF)
SPIROC、POWER board、CALIB board の間のやりとりを取りまとめており、PC と SPIROC の間でコマンドとデータの送受信を担う。
- CALIB
増幅率の較正をする際に LED の制御を行う。トリガーは LED が光るタイミングに同期され、DIF を介して SPIROC に送られる。
- POWER
EBU の制御に必要な電源の供給を担う。すなわち、SPIROC のための 6V 電源、LED のための 12V 電源、MPPC の電源の供給を制御する。POWER board には global bias voltage が設けられおり、各 MPPC の印加電圧は、これを上限とした 4.5V 以内の範囲で個別に設定することができる。

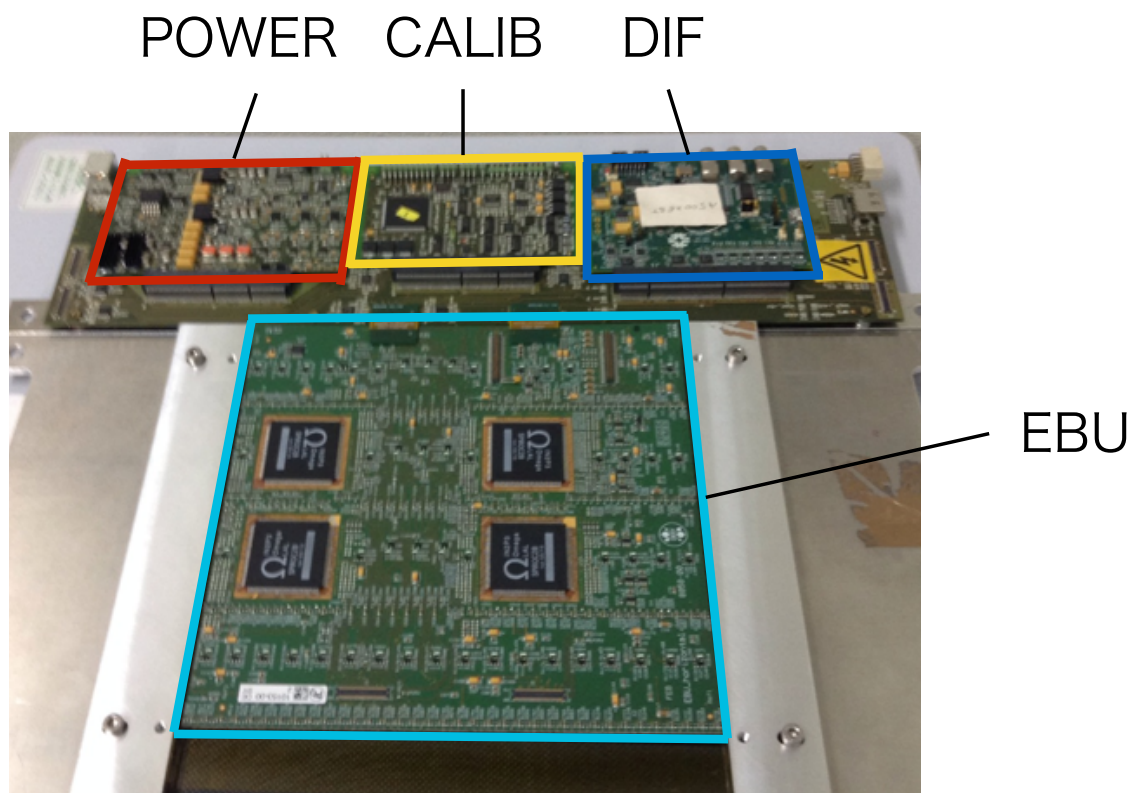


図 6.1: EBU、CIB、DIF、CALIB、POWER

6.1.2 SPIROC の性能

Slow control

SPIROC の制御は、PC から Slow control というコマンドを送ることによって行う。Slow control の内容について説明する。

- トリガー
トリガーには Auto trigger と External trigger の 2 種類がある。External trigger モードは、例えば LED を使用する際に使用し、LED のタイミングと同期したトリガーをかけることができる。Auto trigger モードでは、チップごとに閾値を設定し、信号が閾値を越えるとトリガーがかかる²。現在の SPIROC の仕様ではチャンネルごとに閾値を設定することはできない。
- ゲイン
High gain と Low gain の 2 種類がある。High gain モードは信号が小さい場合に使用し、信号が大きい場合は、ADC 値が飽和しないよう Low gain モードを使用する。High gain と Low gain の増幅率の比は約 10 である³。また、Auto gain モードを使用すると、信号の大きさによって High gain または Low gain が選択されるように設定することができる。
- 印加電圧
MPPC や LED の印加電圧は DAC という値を用いて設定する。例えば MPPC に電圧をかける場合、DAC 値は 0~255 までの整数値を設定する。1 DAC カウントは約 14 mV に対応し、DAC 値に比例した印加電圧 V_{bias} を設定することができる (式 (6.1))。

$$V_{bias} = V_{global} - 4.5 + 0.014 \times \text{DAC} \quad [\text{V}] \quad (6.1)$$

V_{global} は POWER board の global bias voltage である。降伏電圧よりも 5~6 V 程度高い印加電圧を設定できるように、下面読み出しのプロトタイプでは、 $V_{global} = 75.57 \text{ V}$ に設定した。特定のチャンネルに印加電圧をかけないように設定することはできない。

- プリアンプ
チャンネルごとにプリアンプの増幅率を調節することができる。ノイズが多いチャンネルは、プリアンプを切ることによって対応した。

²Auto trigger の閾値の設定については [22] を参照。

³High gain と Low gain の比を inter calib. と呼ぶ。本試験においては Low gain モードは使用しなかった。

- Mask

チャンネルごとに設定可能なパラメーターであり、MaskされたチャンネルはHit bitを立てない。Hit bitについては後述する。

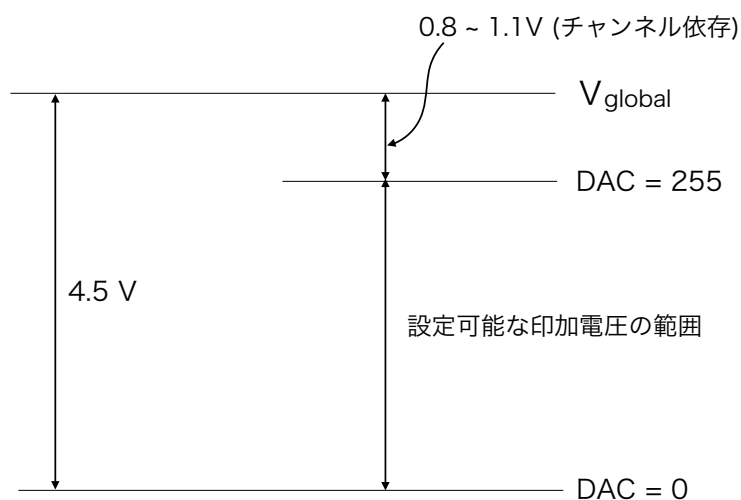


図 6.2: MPPC の印加電圧の設定

信号の経路を図 6.3 に示す。信号はまず 2 つに分岐され、High gain あるいは Low gain のプリアンプに入ったのち、Slow shaper に入る。High gain の信号からは Auto trigger が作られ、Fast shaper に入り、設定した閾値を越えると High gain の信号が抽出される。読み出し用の信号線は 2 つあり、”High gain の ADC と Low gain の ADC” または ”High gain の ADC と TDC” という 2 択から選んで読み出すようになっている。

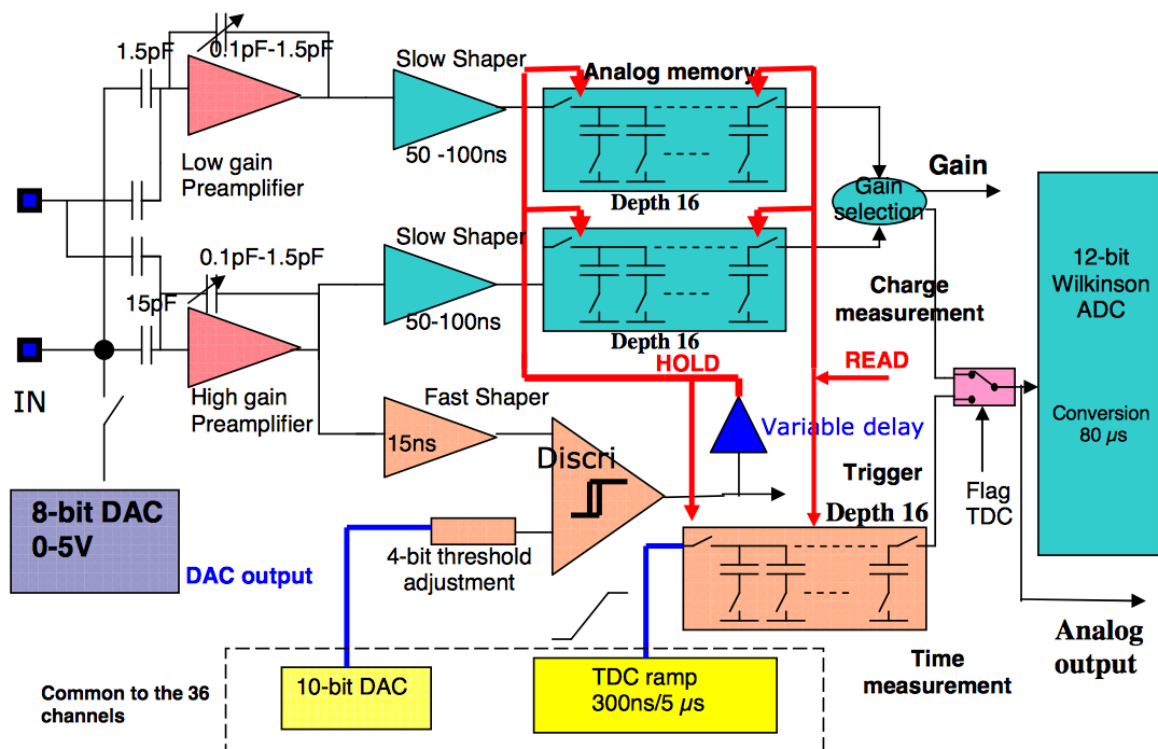


図 6.3: 信号の経路 [16]

信号の読み出し

SPIROC からは以下のデータを読み出す。

- Chip ID
SPIROC の ID 番号。Chip ID と channel ID によって、何層のどのチャンネルであるか特定する。
- Channel ID
チャンネルの ID 番号。0~35 の値を取る。
- Hit bit
Auto trigger モードで信号が閾値を越えたとき、Hit bit は 1 となる。External trigger モードのときは Hit bit は常に 1 である。
- Gain bit
High gain モードのときは 1、low gain モードのときは 0 となる。
- Event number
各チャンネルは 16 個のメモリーセルを備えており、16 イベント分のデータを格

納することができる。信号のデジタル化と読み出しが行われるまでの間、データはセルに蓄えられる。Event numberはメモリーセルの番号であり、0~15までの値をとる。ただし、Event number=0のデータは常に0になってしまうというSPIOCの問題が知られており、このセルのデータは解析に使用することはできない。ビームテストでは、偽のトリガー信号を使ってEvent number=0のデータを埋めることより、信号のイベントを損なわないようにした。

- Cycle number
いずれかのチャンネルの16番目のメモリーセルが埋まると、全てセルのデータが読み出される。Cycle numberは、その読み出しの回数を示す。
- BunchX ID
BunchX IDは0~4096までの整数値を取る。プロトタイプの試験では、BunchX IDは250 kHzのDIFクロックと同期しており、クロックの立ち上がりと共にBunchX IDの値は1カウント増加する。Cycle numberが更新されるとBunchX IDはリセットされる。複数のチャンネルについて、Cycle numberとBunchX IDがそれぞれ一致した場合、それらを同時刻に起こったイベントであると判断する。
- ADC
あるチャンネルに大きな信号が入ったとき、ペDESTALが低い値に移動することがあるという問題が報告されている。
- TDC
T0をTDCの開始信号として使用する。今回のビームテストではT0の動作を調整している段階であり、本研究ではTDCの評価は行わない。

信号の読み出しはチップごとに行われる。あるチップ内の1チャンネル以上がHit bit=1となると、そのチップが制御する36チャンネルのデータがメモリーセルに記録される。読み出しはタイミングはHit bitの有無によって異なり、Hit bit=0のチャンネルはHit bit=1のチャンネルよりも後に記録される。あるチャンネルの全てのメモリーセルにデータがつめられると、全てのチップのデータが読み出される。ただし、全てのチップとは全検出層のチップを指す。ノイズによるヒットの頻度が高いチャンネルが存在すると、ノイズのデータの読み出しばかりに時間が割かれてしまう恐れがある。

また、ビームテストにおいては、200回の読み出しごとにEBU、HBUに内蔵された6つの温度計の温度を記録した。

6.1.3 増幅率の較正

LEDを用いた増幅率の較正について説明する。増幅率の較正には、External triggerモードと High gain モードを使用し、1光子のピークを検出する。LEDの印加電圧は個別に調整することができない。また、個々のMPPCによって光子のピークが見られるMPPCの印加電圧とLEDの印加電圧が異なる。そのため、次のような手順で各チャンネルに適切なMPPCとLEDの印加電圧を探した。

1. MPPCの印加電圧は一定のもと、LEDの印加電圧を少しずつ変化させて測定を繰り返す。
2. MPPCの印加電圧を変化させたのち、1.と同様の測定を繰り返す。

ピクセルサイズ $25\ \mu\text{m}$ のMPPCを用いて得られる典型的なスペクトルと、下面読み出し型プロトタイプに用いたピクセルサイズ $10\ \mu\text{m}$ のMPPCのスペクトルをそれぞれ図6.4、図6.5に示す。

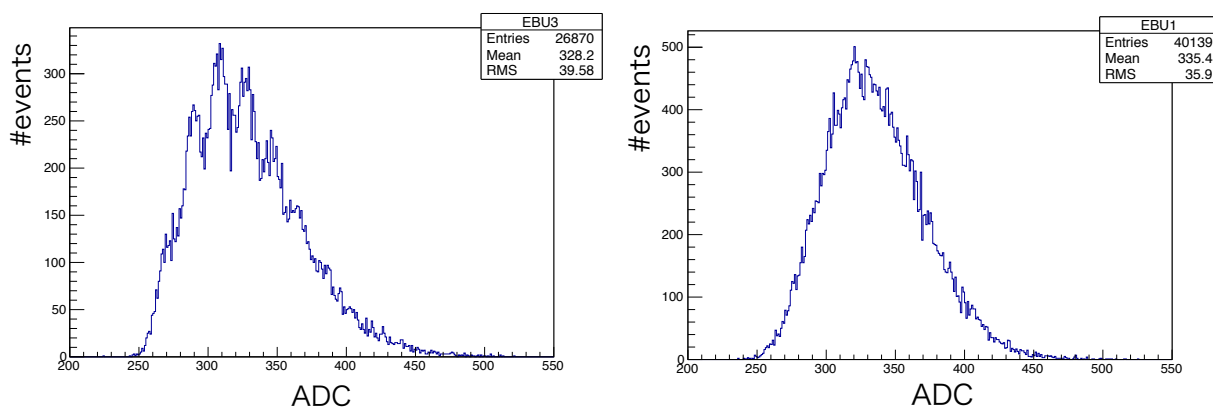


図 6.4: ピクセルサイズ $25\ \mu\text{m}$ のMPPCのスペクトル
図 6.5: ピクセルサイズ $10\ \mu\text{m}$ のMPPCのスペクトル

$25\ \mu\text{m}$ のMPPCでは複数の光子のピークが分離することができ、このチャンネルの1光子当たりのADCカウントは約20であることがわかる。一方、 $10\ \mu\text{m}$ のMPPCでは信号に対するノイズの割合が多く、1光子のピークを分離することができなかった。 $25\ \mu\text{m}$ のMPPCではノイズの問題は生じなかったことと、図5.18のようにEBUを用いる以前では光子のピークが見られたことから、ノイズはSPIROCと $10\ \mu\text{m}$ のMPPCを合わせて用いることに起因するとわかった。この問題を解決するには、SPIROCに内蔵されているプリアンプの増幅率を上げることが1つの方法である。今回のビームテストにおいては、この問題を解決することはできなかった。

6.1.4 MPPC の印加電圧の設定

MPPC の印加電圧は、各チャンネルの増幅率が同じになるように設定する。また、ADC は 4096 カウントを上限とするので、ビームテストで測定される光量がこの範囲に納まるように MPPC の印加電圧とプリアンプによって調整しなければならない。しかし、先述のようにピクセルサイズ $10\ \mu\text{m}$ の MPPC を実装した EBU では増幅率を測ることができなかった。下面読み出し型の EBU においては、LED を用いて測定した ADC の平均値と浜松社のデータシートで与えられている推奨動作電圧を参考に、以下のように決定した。

1. 全チャンネルに一定の印加電圧 V_{temp} をかけて LED 光の応答を調べ、ピークの分離が比較的良いチャンネルのスペクトルから 1 光子当たりの ADC カウントを約 10~20 と見積もった。シンチレーション光の光電子数は β 線源で 10p.e. 程度であり、200 カウントに対応するので ADC の仕様に十分納まる。
2. MPPC の推奨電圧は 1 V 以内に納まるばらつきがある。この分布を印加電圧に反映した。すなわち、推奨電圧が平均よりも高い MPPC はその分だけ印加電圧を V_{temp} より高くした。全チャンネルの印加電圧の平均は V_{temp} になるように設定した。

6.2 ビームライン

CERN の PS の East Area のビームライン T9 にてビームテストを行った (図 6.6)。East Area では、24 GeV/c の一次陽子ビームが T7~11 のビームラインに供給される (図 6.7)。T9 では 0.5~10 GeV/c の二次ビームを使用することができ、正と負の両方の極性のビームを輸送することが可能である。ビームラインのパラメーターについて表 6.1 に示す。

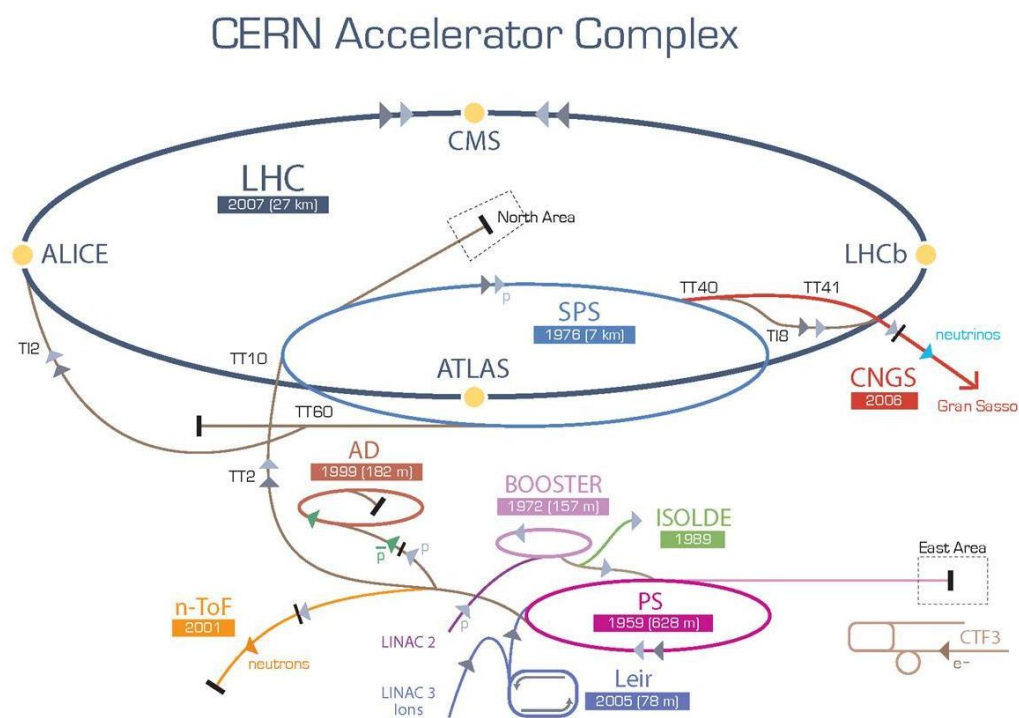


図 6.6: CERN の加速器 [20]

供給されるのはミュオン、パイオン、電子を含む粒子が混合されたビームであり、粒子の割合はビームの運動量とビームの極性に依存する (表 6.2)。運動量の調整は上流のコリメーターによって行う。Spill は 1 分間に約 6~8 回供給され、1 回の spill 400 ms の間に $10^3 \sim 10^4$ の粒子が得られる。

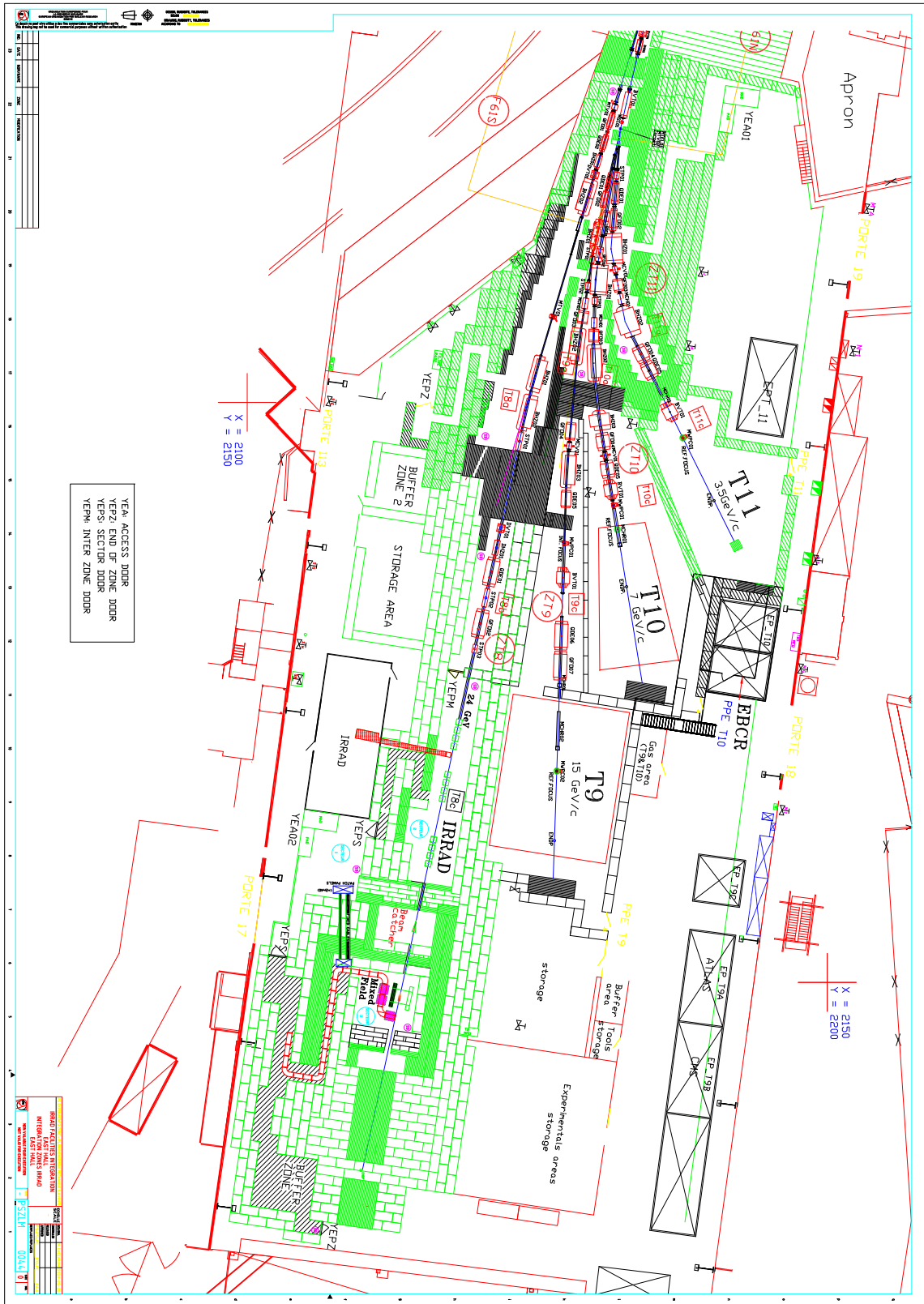


图 6.7: East Area T9[21]

表 6.1: T9 のパラメーター [17]

Parameter	T9
Maximum Momentum [GeV/c]	15
Production angle [mrad]	0
Distance target- reference focus [m]	55.8
Beam height above floor [m]	2.5
Angular acceptance Horizontal [mr]	± 4.8
Vertical [mr]	± 5.8
Acceptance solid angle [μ sterad]	87
Theoretical momentum resolution [%]	0.24
Maximum momentum band [%]	± 10
Magnification at ref. focus(X, Y)	1.0, 1.2
Protons on North target per spill	15×10^{11}
Maximum flux (depending on p, Q, ..)	10^6

表 6.2: ビームの極性が負のときの T9 の粒子の割合 [18]

P_{beam} [GeV]	Fraction in beam[%]	
	e^-	$\mu^+ + \pi^-$
-1	85	15
-2	40	60
-3	16	84
-4	6	94
-5	4	99
-6	2	98
-7	1	99
-8	1	99
-9	1	99
-10	1	99

DAQの構成要素をビームの上流から順に説明する。

ガスチェレンコフ検出器

粒子の同定に用いる。検出器は2つあり、ミューオン、パイオン、電子の検出に合わせて、検出器に封入されたCO₂のガス圧を調整する。ガスチェレンコフ検出器からの信号は、第5層のHBUのある2チャンネルに入力される。

トリガー用シンチレーター

パイオンビームおよび電子ビームの際に使用する約10 cm×10 cmのシンチレーター2枚と、ミューオンビームの際に使用する約50 cm×50 cmのシンチレーター2枚の計4枚のシンチレーターがある。ミューオン用のシンチレーターは、EUDETの前後に1枚ずつ設置されている。シンチレーター2枚によって作られたトリガー信号は、Validation signalとT0 signalとして分岐され、DAQシステムに入力される(節6.3)。

EUDET

第1~3層は電磁カロリメーターである。第1層は下面読み出しを実装したvertical EBU、第2層は基準設計のhorizontal EBU、第3層は信州大学で2013年に製作された基準設計のvertical EBUであり、以下ではこれらを順にEBU1、EBU2、EBU3と呼ぶ。3層の検出器の構成要素を表6.3にまとめる。EBU2は、SPIROCおよびMPPCの問題により、図6.8の最下列の36チャンネルのレジスタを外し、信号を検出しないようにした。

第4~15層はハドロンカロリメーターである。第4~11層はHBUを1枚ずつ使用し、第12~15層の各層ではHBUを4枚ずつ使用している(図6.9)。各層の検出領域の中心は、ビームの中心と一致するように配置されており、EUDETの設計上の各層の位置精度は5 mm程度である。

表 6.3: 電磁カロリメーターの構成

	MPPCのピクセルサイズ	シンチレーター	反射材
EBU1 (bottom)	10 μ m	EJ-204	ESR
EBU2 (horizontal)	10 μ m	SCSN38	REF-WHITE
EBU3 (old)	25 μ m	SCSN38	REF-WHITE

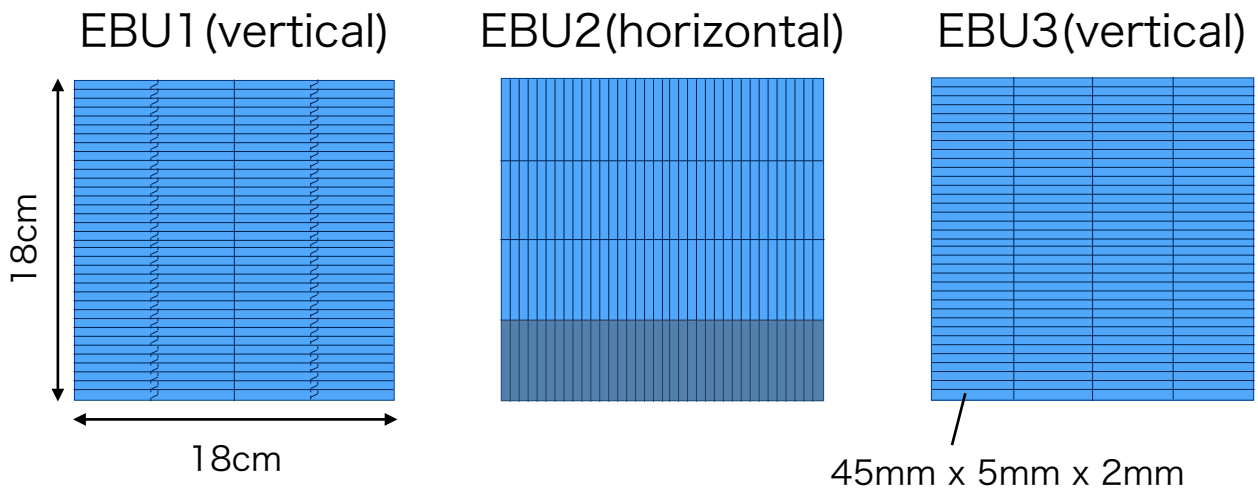


図 6.8: 電磁カロリメーターの構成

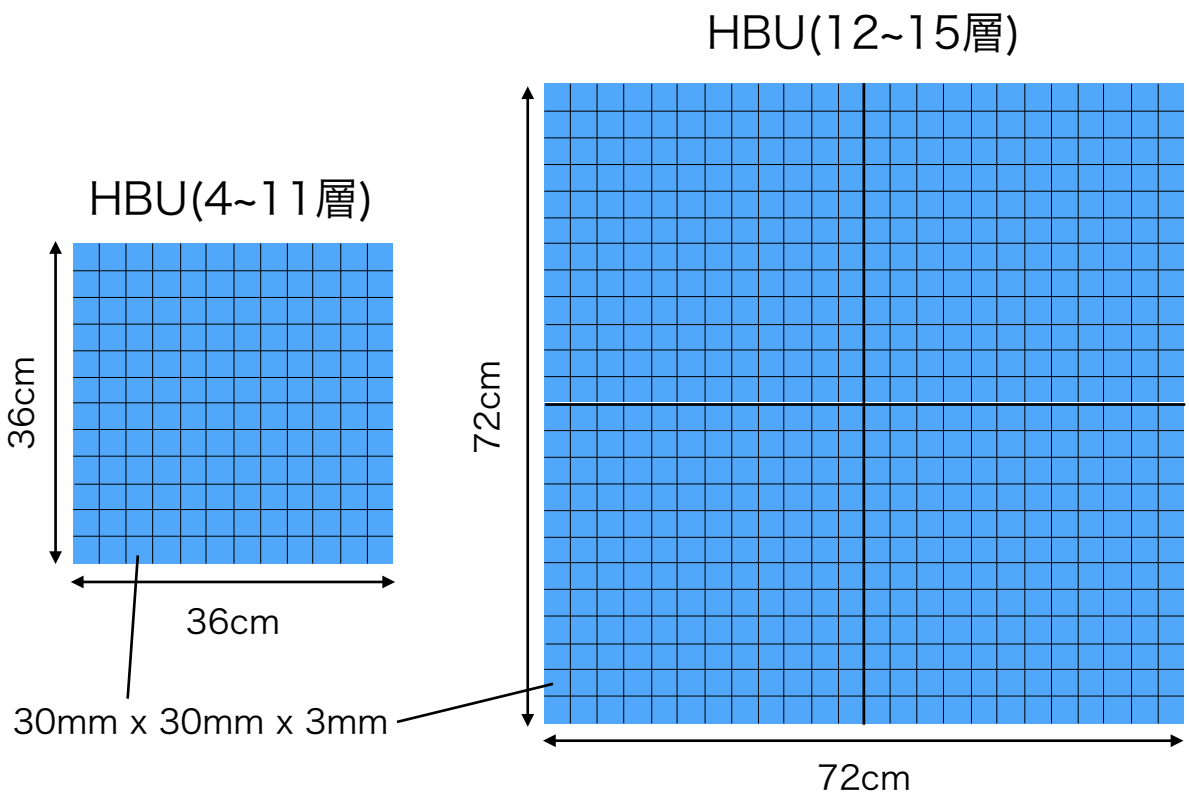


図 6.9: ハドロンカロリメーターの構成

6.3 DAQシステム

DAQシステムの構造を図 6.10 に示す。DAQは CCC、LDA、DIF の3種類の基板を介して制御されている。

Clock Control Card (CCC)

各層のクロックの同期を行う。CCCとDAQ PCはイーサネットケーブルによって接続され、PCから送信されたコマンドは、CCCを介して2つのMini-LDAに送られる。CCCには、LEMOコネクタが搭載されており、ここに入力されたSpill signalとValidation signalをトリガーとして使用する。

Link Data Aggregator (LDA)

データとコマンドの送受信を媒介する役割を担う、Mini-LDA というものを2つ使用する。1つのMini-LDAは10個のHDMIケーブルのポートを持ち、各層のDIF boardに接続している。今回、EUDETは15層の検出層を持つので、2つのMini-LDAを使用した。CCCから送られてきたコマンドはHDMIを使って各層のDIFへ送信され、DIFから送られてきたデータはイーサネットケーブルを使ってPCへ送信される。

DAQには3つの信号が接続されている。

- **Spill** ビームが来ていることを知らせる。加速器の制御システムから伝えられる信号であり、CCCに入力される。約400msの時間幅を持つ信号であり、この間DAQのゲートが開かれる。
- **Validation** トリガー用シンチレータ2枚から作られる信号であり、CCCに入力される。ビームテストではAuto triggerモードを使用し、Validation signalが来ていることと、チャンネルの信号が閾値を越えることの両方をもってHit bitがたてられる。
- **T0** トリガー用シンチレータ2枚から作られ、TDCの開始信号として使用される。信号はハドロンカロリメータの複数のチャンネルに入力される。

10月のビームテストでは、DAQの信号読み出しに問題があったため、Mini-LDAとDIFの間はHDMIの代わりにUSBを用いてデータの読み出しを行った。

1回のSpillにつき3~4回メモリーセルの読み出しが行われ、すなわち45~60イベント得ることができた。

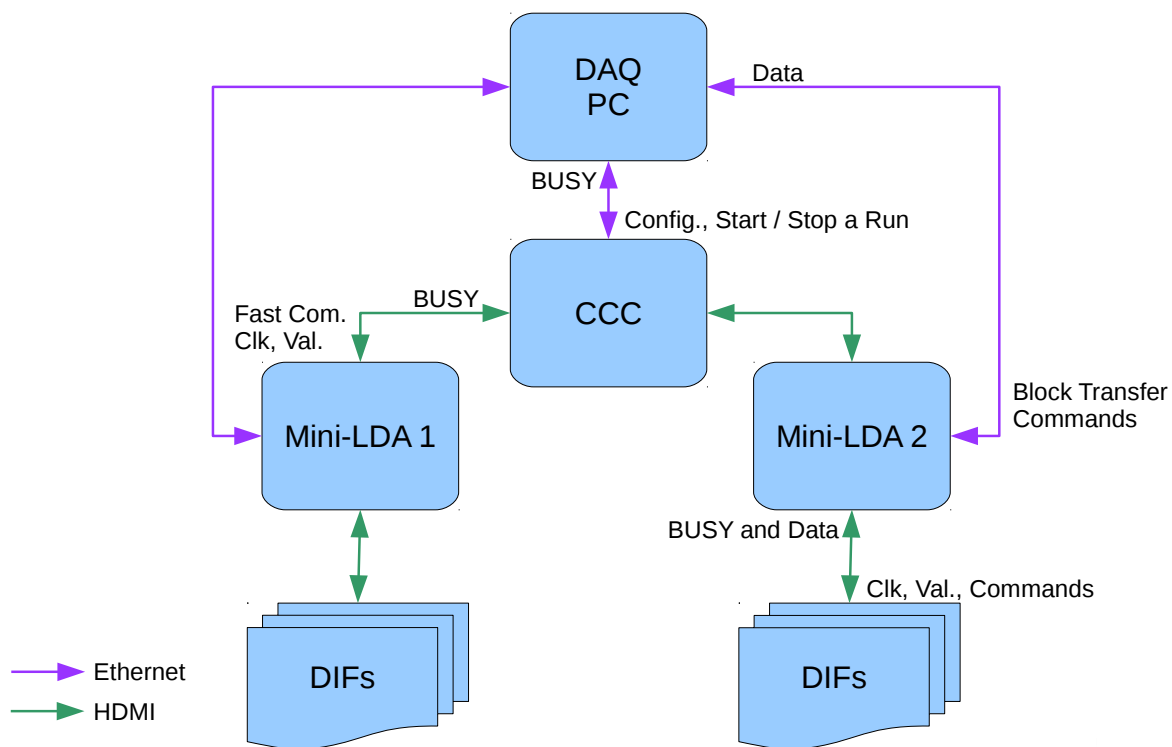


図 6.10: DAQ の構造 [23]

6.4 ビームテストの統計

ビームの運動量を調整することにより、ミューオン、パイオン、電子の割合を調整し、測定を行った。測定の統計を表 6.4 にまとめる。

表 6.4: ビームテストの統計

10/8~22	運動量 [GeV/c]	イベント数
ミューオン	7	480000
電子	1~7	150000
11/26~12/8	運動量 [GeV/c]	イベント数
ミューオン	7	824835000
パイオン、電子	2~10	1713300000

6.5 EBU1の性能評価

EBU1の状況と問題点についてまとめた後、MIPと検出効率について説明する。

6.5.1 チャンネルの状況と問題点

チャンネルの状況

各チャンネルの特徴を3つに分類する。

- デッドチャンネル
LEDの点灯の有無によらずADC値に変化がなく、ペDESTALしか検出されないようなチャンネルをデッドチャンネルと呼ぶ。EBU1についてはこのようなチャンネルはなかった。
- プリアンプを切ったチャンネル
図6.11の灰色で示す4つのチャンネルは、ノイズの検出頻度が高いためにプリアンプを切った。各検出層は図5.4の灰色で示されるカセットに納められており、ノイズの原因はカセットの下部から光漏れであった。
- ヒットの頻度が低いチャンネル
ビームを当てたとき、Hit bitが立ったイベント数が周囲のチャンネルに比べて半分以下だったチャンネルを図6.11の紺色で示す。このようなチャンネルは8つあり、EBU1の上部に位置する4つはビームが当たりにくかったためと考えられる。

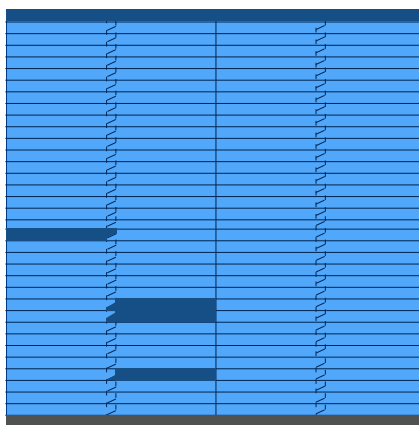


図 6.11: EBU1のチャンネルの状況

EBUの問題点

今回の試験において、EBUのノイズに由来する以下のような問題が生じた。

- データの読み出し頻度
ノイズによって特定のチャンネルが頻繁に Hit bit を立てると、他のチャンネルの memory cell はほとんど埋まっていないにもかかわらず、全ての検出層のデータが読み出される。これによって、必要以上にデータの読み出しに時間が費やされ、有意なデータを取ることができなくなってしまう。EBUではこのようなチャンネルが多数を占めたため、Hit bit を立てるための閾値の設定を厳しくせざるを得なかった。
- イベント選別
EBUおよびHBUの本来の仕様では、各チャンネルの Hit bit をもってビームのイベントを判別するが、ノイズによって Hit bit が立てられる頻度が高かったため、EBUについては Hit bit 以外にもビームのイベントを選別するための条件を設ける必要が生じた。
- Hit bit=0のデータ
Hit bit=0のデータは、メモリーセルに記録されるまでの間にノイズの影響を受けてADC値が変化するという問題がしばしば起こることがわかった。このような場合、Hit bit=0であるにもかかわらず、Hit bit=1のときに相当する大きなADC値が記録される。そのため、ある程度よりもADC値の高いHit bit=0のデータは参照することができない。この問題は、事前の調整の段階では生じていなかった。

6.5.2 ミューオンビームを用いたMIPのエネルギー損失の較正

ミューオンビームを用いてMIPのエネルギー損失があったときのADC値を較正した。先述した問題に対処するため、イベントの選別にはハドロンカロリメーターの Hit bit の情報を参照した。同じ位置に対応するハドロンカロリメーターのチャンネルを参照し、3層以上のチャンネルに Hit bit が立っていた場合、そのチャンネルの位置をミューオンの飛跡であると判定した。そのチャンネルの位置と交わるEBU1のチャンネルに Hit bit が立てられていた場合に、そのADC値を評価した。結果を図6.12に示す。

このようなADC分布がEBU1のほぼ全てのチャンネルで見られ、ピークが途中で切られているためMIPを評価することはできなかった。この問題は閾値の設定を高くせざるを得なかったことが原因であり、ノイズの原因究明と抑制が今後の課題である。

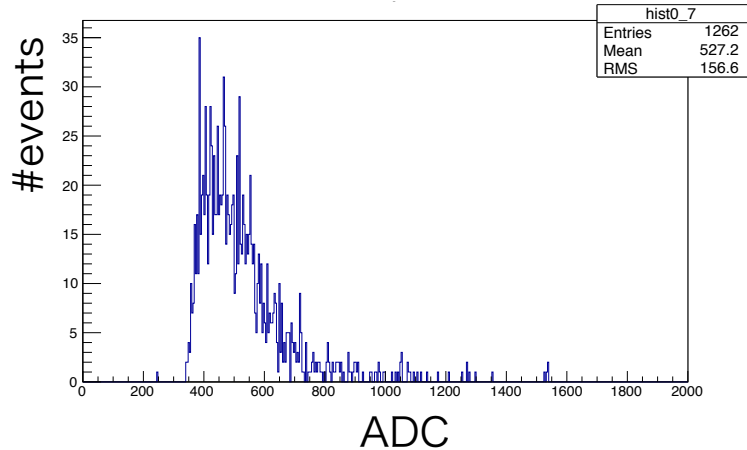


図 6.12: ミューオンビームによる ADC 分布

6.5.3 検出効率の評価

EBU1 の検出効率を評価するに際しては、ハドロンカロリメーターと EBU3 の Hit bit の情報を参照した。ミュオンの飛跡の判定は MIP の較正の場合と同様である。ミュオンが通ったハドロンカロリメーターのチャンネルの位置と重なる EBU3 のチャンネルに Hit bit が立てられていた場合に、EBU3 のチャンネルと重なる EBU1 のチャンネルを評価した。このとき、EBU1 のチャンネルの Hit bit の有無は参照しない。

図 6.13 はある 1 チャンネルの ADC 分布である。分布の全イベント数は、EBU3 を通ったミュオンの数であり、幅のある 2 つのピークは信号とペDESTAL である。また、EBU1 のチャンネルに Hit bit が立たなかったため、EBU1 に何のデータも記録されない場合がある。ADC=100 の位置のピークは、そのようなイベントの数を表す。EBU1 にデータが記録されなかった理由として、検出効率によって不感となった場合と閾値の設定が厳しかったために Hit bit が立たなかった場合がある。後者の寄与は大きいであろう。

ADC ≥ 330 を閾値として検出効率を算出する。

全イベントを図 6.14 の①のような飛跡と仮定すると、検出効率は式 (6.2) のようになる。

$$\frac{\text{①を検出}}{\text{全イベント}} \sim 65\% \quad (6.2)$$

しかし、ビームの角度にはわずかに分布があることと、シンチレーターの配置の精度によって、②、③のような場合が考えられ、全イベント数を過大評価してしまっている。そこで、EBU1 が不感だった場合は EBU1 の上下のチャンネルを参照し、②、③のようなイベントを判別する。さらに、各チャンネルの検出効率は等しいと仮定

すると、

$$\frac{\text{①、②、③を検出}}{\text{全イベント}} \sim 74\% \quad (6.3)$$

したがって、検出効率は65～75%程度であると評価した。ノイズを抑え、閾値の設定を適当に設定することができれば、ADC=100のピークは減少し、もっと高い検出効率が得られると期待される。

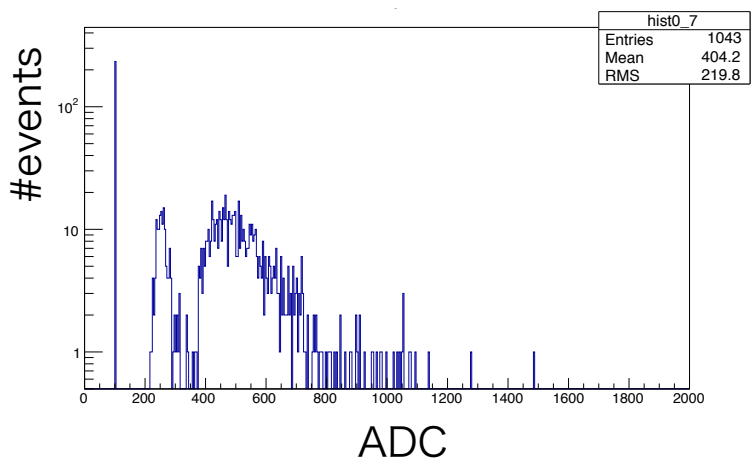


図 6.13: 検出効率の評価

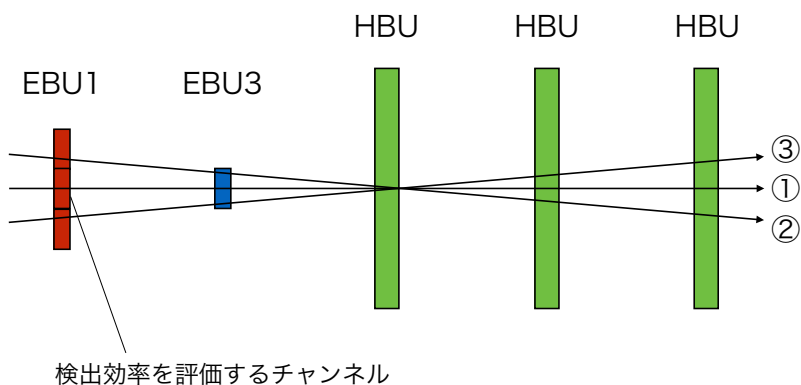


図 6.14: 検出率を評価するときのイベント選別

第7章 結論

本研究では、ILCの電磁カロリターとして用いるためのシンチレーション検出器について研究開発を行い、新しい信号読み出しデザインを提案した。新しい信号読み出しデザインでは、シンチレーターをくさび形に加工することによって、先行研究が課題とした光電子数の位置依存性を改善し、不感領域についても排除する。シンチレーターの形状とMPPCの配置によって検出される光電子数を予測することができるようなシミュレーションを構築し、これを用いてシンチレーション検出器の最適な構成について検証した。シミュレーションによって、くさび形のシンチレーターでは光電子数の位置依存性が改善することを示し、さらに、測定によって十分な光電子数を得られることを確認した。

そして、下面読み出しを実装したプロトタイプ製作を行った。検出器の建設に向けた課題とその解決策について検討し、反射材の量産方法を確立したほか、中間基板を製作し、MPPCを基板に埋め込む方法が有効であることを示した。製作したプロトタイプは、ノイズの問題によってMIPの評価を行うことができなかったが、各チャンネルからはシンチレーション光による応答が見られ、正常に動作していることを確認した。

付録A SSA (Strip Splitting Algorithm)

SSA の原理

SSA の原理について説明する。ILD のシンチレーション検出器では、直交する向きにシンチレーターストリップを並べる。仮に奇数番目の検出層のストリップを x 方向に平行に並べるとき、偶数番目の層は y 方向に並べる。ただし、x,y 方向は直交しているものとする。図 A.1 のように、n 層目のストリップのエネルギー損失を評価するとき、SSA では以下のようにして粒子のエネルギー損失を評価する。

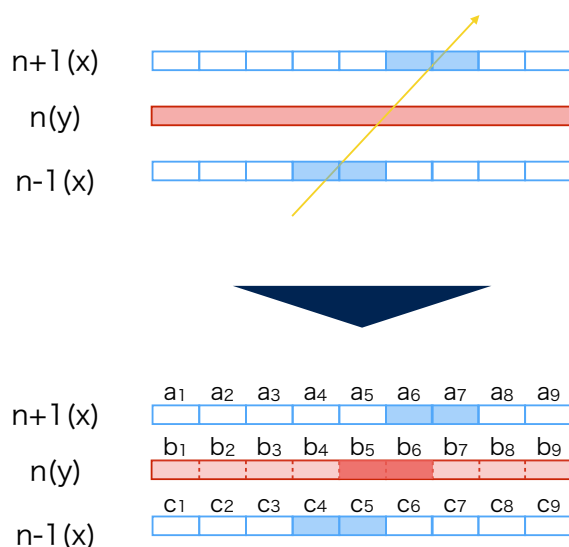


図 A.1: SSA による飛跡検出

1. $n \pm 1$ 層目のエネルギー損失を測る。
2. n 層目のストリップを $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ の擬似的なセルに分割する。

3. 上下の層のエネルギー損失の分布によって重みをつけ、 n 層目のストリップのエネルギー損失を疑似セルに割り当てる。

$$b_i = \sum b_i \times \frac{a_i + c_i}{\sum a_i + \sum c_i} \quad (\text{A.1})$$

シリコン検出器とシンチレーション検出器の併用

ILDの電磁カロリメーターとして、シリコン検出器とシンチレーション検出器が候補に挙げられており、これらを併用することも提案されている。この案では、シリコン検出器の高い分解能とシンチレーション検出器の低コスト性を活かし、安価で分解能の良い検出器を実現することを目指している。シンチレーション検出器では、飛跡検出においてゴーストと呼ばれる問題がある。シンチレーション検出器に複数の粒子が同時に入射すると、図 A.2 のようにヒットと偽のヒット(ゴースト)を再構成してしまい、これを区別することができない。この問題はシリコン検出器のようなピクセル検出器を併用することによって解決することができる。

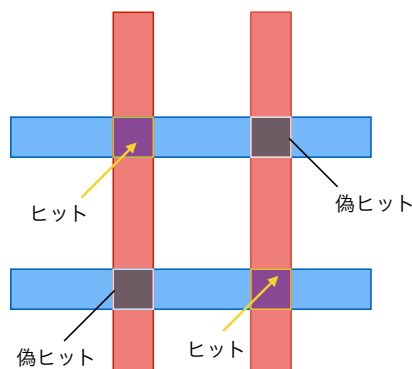


図 A.2: シンチレーション検出器での飛跡検出におけるゴーストの問題

付録B シンチレーターの成形方法

シンチレーターの成形方法は主に3つある。

1. 鋳型(キャスト)成形

型に入れ、低温下で時間をかけてモノマーを重合する。これにより材料の光学的特性、品質を良好に保つことができるが、高価である。仕上がりは平坦な形状になるため、機械で切削加工を施す必要がある。

2. 射出成形

ペレットと呼ばれるプラスチックをビーズ状に加工したものを加熱した型に流し込んで成形する。型の設計によって押出成形よりも自由な形状の成形が可能であり、量産に適している。一般に減衰長が短いため、広面積のシンチレーターの読み出しに不向きであり、波長変換ファイバー等と併用されることがある。この方法が実践できるシンチレーターは、ポリスチレンベースのプラスチックシンチレーターなどに種類が限られている。

3. 押出成形

ペレットを加熱した容器に入れて溶かし、型穴から枠を通して圧力で押し出すことによって成形する。断面積は一定の形状に仕上がり、長い形状の成形が可能である。量産に適している。

射出成形と押出成形はプラスチックの熱可塑性を利用した方法であり、高温下での処理によって光量や透明度が低下することが知られる。

本研究では、ポリビニルトルエンを基盤としたシンチレーターを用いて鋳型成形を行い、加工精度の高いシンチレーターを製作することができた。しかし、安価というシンチレーション検出器の利点を活かすためにはこの方法は最適ではないため、形状の自由度が高く、量産に適した射出成形を検討している。

謝辞

本論文の執筆に至るまでに、たくさんの方々のご助力をいただきましたことを心より感謝申し上げます。

山下了准教授には、充実した研究環境と機会を与えていただき、研究が思うように進まなかったり迷ったときには、いつも鋭いご指摘をもってご指導していただきました。本当にありがとうございました。

大谷航准教授には、装置の使い方から解析の相談や発表の練習に至るまで、お忙しい中多大なお時間を割いてご指導していただきました。おかげで繰り返しの多い作業なども前向きに取り組むことができました。

CALICE-Asia グループのみなさまには、ミーティングで研究のヒントをいただいたほか、みなさまの研究を通して興味関心を広げることができました。信州大学の竹下先生、小寺先生には MPPC やシンチレーターに関する知識や、解析、CERN での滞在のサポートなど、たくさんのご支援をいただきました。都築拓也さんと Lloyd Teh Tzer Tong さんにはシミュレーションや EBU について教えてもらい、議論を通してシンチレーション検出器の理解を深めることができました。

山下研究室のみなさまには、解析の議論につきあっていただいたり、物理やプログラミングのアドバイスをいただき、日頃から大変お世話になりました。ICEPP の後輩のみなさんには、忙しい合間をぬってプロトタイプの製作を手伝っていただき、本当にありがとうございました。

最後に、学生生活を支えてくれた両親に感謝します。

参考文献

- [1] INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER Technical Design Report - Volume 1 Physics at the International Linear Collider, (2012)
- [2] M. A. Thomson, Particle Flow Calorimetry at the ILC, (2011)
- [3] the ILD Concept Group, The International Large Detector Letter of Intent, (2010)
- [4] <http://agenda.linearcollider.org/event/6000/session/13/contribution/15/material/slides/0.pdf>
- [5] 生出秀行, 半導体光検出器 PPD の基本特性の解明と, 実践的開発に向けた研究, 修士論文, (2009)
- [6] D.Renker, Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems, (2006)
- [7] 信原岳, 新型 MPPC の開発, 修士論文, (2006)
- [8] <http://www.eljentechnology.com/index.php/products/plastic-scintillators/60-product-template>
- [9] <http://www.datasheetlib.com/datasheet/263674/s10362-11-025p-hamamatsu-photonics.html>
- [10] <http://www.mmm.co.jp/display/spec/index.html#esr>
- [11] <http://geant4.slac.stanford.edu/UsersWorkshop/PDF/Peter/OpticalPhoton.pdf>
- [12] 井本昭子, 結晶シンチレーター内での光伝播の研究, 卒業論文, (2002)
- [13] http://wiki.opengatecollaboration.org/index.php/Users_Guide_V6.2:Generating_and_tracking_optical_photons

- [14] シミュレーションのパラメーターの調整は、信州大学高エネルギー研究室の都築拓也氏の協力を得た。
- [15] 西村美紀, MEG 実験アップグレードに向けた分解能 30 ピコ秒の陽電子タイミングカウンターの研究開発, 修士論文, (2014)
- [16] Oskar Hartbrich, Commissioning and LED System Tests of the Engineering Prototype of the Analog Hadronic Calorimeter of the CALICE Collaboration, Master-Thesis, (2012)
- [17] <https://education.web.cern.ch/education/Objects/BeamlineFirstFlyer.pdf>
- [18] <http://cds.cern.ch/record/1443491>
- [19] L. Durieu, M. Martini and A.-S. Muller, CERN, OPTICS STUDIES FOR THE T9 BEAM LINE IN THE CERN PS EAST AREA SECONDARY BEAM FACILITY, (2001)
- [20] <http://science.portalhispanos.com/wordpress/2009/02/10/segun-la-web-oficial-del-cern-el-lhc-no-volvera-a-funcionar-hasta-septiembre/>
- [21] <http://sba.web.cern.ch/sba/BeamsAndAreas/East/EAlayout2014-draft.jpg>
- [22] Lloyd Teh Tzer Tong, Trigger Threshold Verification for the Hadronic Calorimeter Prototype for the ILC, (2014)
- [23] <https://agenda.linearcollider.org/event/6580/session/0/contribution/43/material/slides/0.pdf>