

平成 30 年度 修士論文

国際リニアコライダー用ハドロンカロリメータの最適な精細度に関する研究

Study on Optimal Granularity for Hadron Calorimeter of
International Linear Collider

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻
素粒子物理国際研究センター (ICEPP) 大谷研究室

修士課程 2 年
学籍番号 35-176065

辻 直希

2019 年 2 月 1 日

概要

本研究では、国際リニアコライダー International Linear Collider (ILC) 計画の検出器案 International Large Detector (ILD) における Analogue Hadron CALorimeter (AHCAL) の精細度に関する研究を行なった。

ILC 計画とは重心系エネルギー 250 GeV で電子陽電子を衝突させる線形加速器であり、Higgs 粒子の精密測定や新粒子探索により標準模型を超える新物理を発見することを目的としている。ILC の測定器案の 1 つ ILD では、 $\sigma_E/E = 30\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ という高いジェットエネルギー分解能を実現するために Particle Flow Algorithm (PFA) と呼ばれる再構成法を用いる。PFA では、ジェットに含まれる粒子を全て個別に再構成し、粒子の種類ごとにエネルギーを測定する検出器を分けることにより、検出器全体の性能を向上させる。PFA を実現するためには高い粒子識別能力を持った検出器が必要であり、高精細なハドロンカロリメータの研究開発が重要となる。

AHCAL はサンプリング型のカロリメータで、48 層のシンチレータ検出層と鉄またはタングステンの吸収層をサンドイッチ状に挟んで構成される。検出層は $30 \times 30 \times 3 \text{ mm}^3$ のシンチレータタイルを、有感領域 $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ の SiPM を用いて読み出す構造になっている。

ILC 建設開始に向けて、より現実的な ILD 検出器設計案の作成が必要とされている。AHCAL についても精細度の最適化が行われている。その中で、AHCAL の外側の層に基準設計の 30 mm 角より大きなタイルを用いるという、精細度を混合した設計案が検討されている。この手法により、読み出しチャンネルの数を減らすことができ、さらにコスト削減にもつながる。

本研究の大きな目的は、精細度を混合した AHCAL 設計案について研究を行い、AHCAL の最適な精細度を定めることに貢献することである。そこでまず、これまで調べられてこなかった基準設計より大きいタイルの性能を調べた。具体的には 60 mm 角タイルのプロトタイプでその性能を試験し、光量・応答の位置依存性を実証した。それを元に MPPC やタイルのデザインをアレンジし、60 mm 角タイルを用いた検出層を開発した。完成した検出層は動作試験としてゲインや MIP のキャリブレーションを行った。

AHCAL グループでは、実機スケールでの生産体制の確立・カロリメータとしての性能試験のために、38 層の検出層からなる大型技術試作機を作成した。2018 年 5 月・6-7 月に CERN SPS にてテストビーム実験が行い、実際にミューオン、電子、パイオンのビームを照射し試作機の性能を評価した。パワーパルシングの有無で検出器の応答が異なることが懸念されていたため、パイオンのデータに関してその影響の調査を行った。また、開発した 60 mm 角タイルを用いた検出層をこの大型試作機に挿入し 6-7 月のテストビーム実験に導入することで、60 mm 角タイルを用いた検出層の性能評価を行った。さらに、 2×2 枚の 30 mm 角タイルのヒットを統合して 60 mm 角タイルの応答をシミュレートする *ganging tile* という手法を用いて、内側の層での大型タイルの性能を検証した。

ILD モデルを用いてソフトウェア補償を取り入れたシミュレーションを行った。今まで精細度を混合した設計にソフトウェア補償を取り入れられたことはなかったため、その導入とジェットエネルギー分解能の評価を試みた。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	国際リニアコライダー計画	1
1.2	ILC の検出器	1
1.2.1	International Large Detector (ILD)	1
1.2.2	Particle Flow Algorithm (PFA)	4
第 2 章	Analogue Hadron CALorimeter (AHCAL)	7
2.1	カロリメータ	7
2.1.1	シャワー	7
2.1.2	全吸収型とサンプリング型	7
2.1.3	AHCAL の設計と検出原理	8
2.2	AHCAL 検出層の構造	9
2.2.1	シンチレータ	9
2.2.2	SiPM	10
2.2.3	HCAL Base Unit (HBU)	15
2.2.4	HBU の DAQ	17
2.3	精細度の最適化及び本研究の目的	17
第 3 章	大サイズのシンチレータタイルを用いた検出層 HBU の開発	19
3.1	プラスチックシンチレータの製法	19
3.2	タイルサイズの検出光量への影響の調査	20
3.2.1	測定セットアップ	20
3.2.2	測定方法	23
3.2.3	結果と考察	24
3.3	大サイズシンチレータタイルを用いた検出層 HBU の開発	28
3.3.1	デザイン	28
3.3.2	MPPC	28
3.3.3	シンチレータタイル	29
3.3.4	中心からずれた位置での読出しにおける発光量への影響の調査	30
3.3.5	配置、反射材	32
3.3.6	アラインメント	32
3.4	大サイズシンチレータを用いた検出層 HBU の動作試験	35
3.4.1	セットアップ	35

3.4.2	ゲインキャリブレーション	35
3.4.3	MIP キャリブレーション	38
第 4 章	AHCAL 大型試作機におけるテストビーム実験	41
4.1	AHCAL large technological prototype(AHCAL 大型技術試作機)	41
4.1.1	AHCAL physics prototype(AHCAL 物理試作機)	41
4.1.2	目的	42
4.1.3	構造	43
4.2	CERN SPS におけるテストビーム実験	44
4.2.1	Super Proton Synchrotron(SPS)	44
4.2.2	テストビーム実験セットアップ	46
4.2.3	60 mm 角タイルを用いた HBU の挿入	47
4.3	テストビーム実験内容	47
4.3.1	データ	47
4.3.2	パラメータ	48
4.3.3	イベントディスプレイ	49
4.4	パワーパルシングの ON/OFF による応答の違いの調査	52
4.4.1	キャリブレーション	52
4.4.2	パイオン	53
4.5	大サイズシンチレータタイルを用いた検出層 HBU の性能評価	63
4.5.1	キャリブレーション	63
4.5.2	サチュレーションの影響の調査	66
4.5.3	議論	68
4.6	AHCAL 大型試作機を用いた精細度の評価	70
4.6.1	Ganging tile	70
4.6.2	パイオンデータを用いた 60 mm 角タイルの応答の再現	70
4.6.3	電子データを用いた 60 mm 角タイルの応答の再現	74
4.6.4	議論と今後の展望	76
第 5 章	ILD モデルを用いた AHCAL の最適な精細度の評価	77
5.1	iLCSoft	77
5.1.1	Linear Collider I/O (LCIO)	77
5.1.2	Detector Description Toolkit for High Energy Physics (DD4hep)	77
5.1.3	Modular Analysis and Reconstruction for LINear Collider (Marlin)	78
5.1.4	PandoraPFA	80
5.2	ソフトウェア補償を取り入れたシミュレーション	80
5.2.1	ソフトウェア補償	80
5.2.2	シミュレーション手順	82
5.3	結果と考察	84
第 6 章	結論と今後の展望	87
付録		89

6.1	HBU 固定用の穴を持つタイルの光量	89
6.1.1	穴を持つ 60 mm 角タイル	89
6.1.2	光量への影響の調査	89
	謝辞	91

第 1 章

序論

1.1 国際リニアコライダー計画

現在、素粒子物理学で広く受け入れられている理論の枠組みに標準理論がある。この理論で予言されながら唯一見つかっていなかった Higgs 粒子が、2012 年 7 月 Large Hadron Collider (LHC) の ATLAS、CMS 実験で発見された [1][2]。これにより標準理論は完成となるが、暗黒物質の存在など標準理論では説明できない多くの物理現象が観測されている。宇宙の物理現象を包括的に理解するためには、標準理論を超えた新しい理論を作らなければならない。それらを探索する上で最初に取り組むべき課題が Higgs 粒子の精密測定である。

国際リニアコライダー (International Linear Collider : ILC) 計画 [3] は、電子陽電子衝突型加速器を用いた将来のエネルギーフロンティア実験である。電子と陽電子は内部構造を持たないので、陽子と違って余計な粒子が起こすバックグラウンドとなるような反応が少ない。そのため反応がきれいで本当に見たい反応だけを直接観測することができる。これにより Higgs 粒子の精密測定が可能となる。また、Higgs 粒子だけでなく、暗黒物質、その候補である超対称性粒子の直接測定、暗黒エネルギーの仕組みの解明、トップクォークの精密測定などが期待されている。

ILC は図 1.1 のように電子・陽電子をそれぞれ生成・加速し、重心エネルギー 250 GeV で衝突させることで生じる物理を観測する。線形加速器なので加速部分を拡張して、将来的には TeV スケールで実験をすることも計画されている。

1.2 ILC の検出器

ILC の検出器は International Large Detector (ILD)[4] と Silicon Detector (SiD)[4] の 2 つが計画されている。ここでは日本・ヨーロッパが中心となって開発している ILD について述べる。

1.2.1 International Large Detector (ILD)

図 1.2 は ILD のイメージ図、図 1.3 は ILD の断面図である。ILD は崩壊点検出器、中央飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、クライオスタット、ミュオントラッカーで構成されている。それぞれの構成要素について述べる。

崩壊点検出器

崩壊点検出器は、ビームラインに最も近い位置に置かれるピクセル化された半導体検出器である。カメラの CCD のようなセンサーが敷き詰められており、生成した粒子の飛跡を精度よく測定しその粒子の崩壊点を求めることができる。

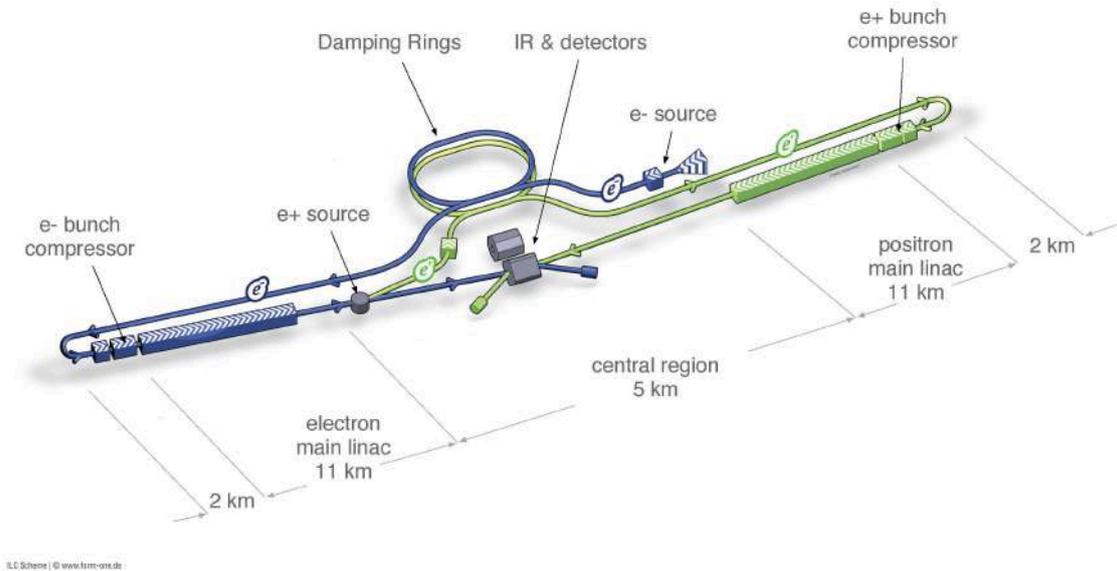


図 1.1 ILC 加速器・測定器の概観

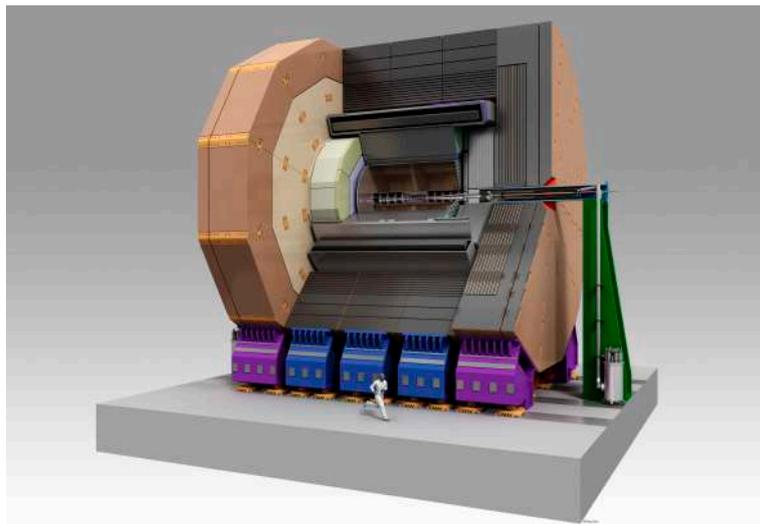


図 1.2 ILD 概観

例えば電子と陽電子の衝突によってヒッグス粒子が生成した場合、ヒッグス粒子は寿命が短いので検出器に届くより前に、他の粒子に崩壊してしまう。そのように生成した粒子が崩壊して中心から枝分かれしていく飛跡を崩壊点検出器で検出し、ヒッグス粒子かどうかを判別することができる。

中央飛跡検出器

中央飛跡検出器は Time Projection Chamber (TPC) とその周囲を囲むシリコン検出器で構成される。荷電粒子の磁場中での飛跡を調べることで荷電粒子の運動量を精度よく測定することができる。SiD ではシリコンセンサーを採用しているが容積が大きくなるとコストが大きくなるため、ILD では安価・低物質質量で大サイズの検出器を建設できる TPC を採用しており、これは ILD の特徴の 1 つである。

TPC 内部は Ar に CF_4 とアイソブタンを混合した T2K ガス [5] が充満しており、荷電粒子が通過した際に生じ

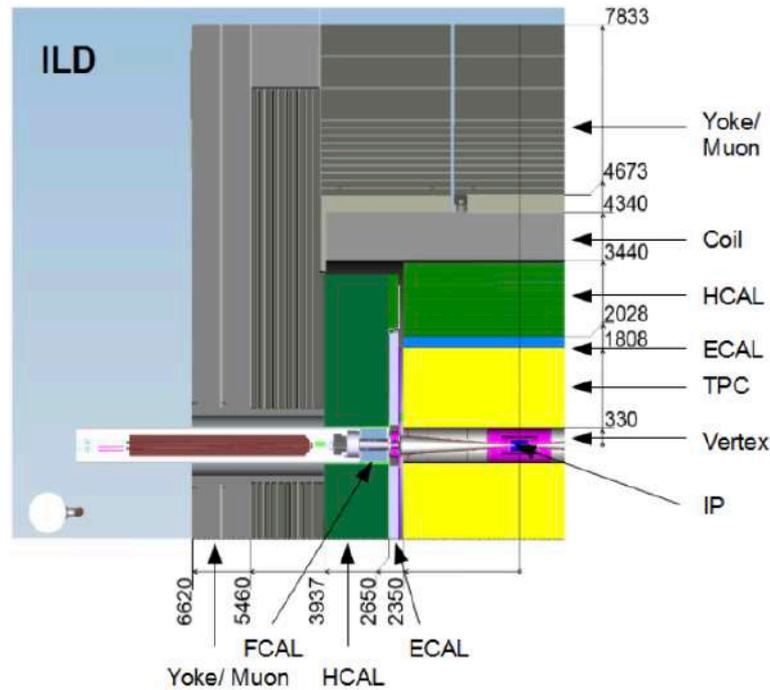


図 1.3 ILC 断面図

る電離電子をビーム軸方向にかけられた電場によりドリフトし、Micro Pattern Gas Detector (MPGD) で信号として検出する。これにより電離電子のドリフト時間と 2 次元の信号により、荷電粒子の飛跡を 3 次元的に再構成することが可能である。さらに信号の大きさから粒子の $\frac{dE}{dx}$ を調べ、粒子の識別を行うことができる。

カロリメータ

カロリメータは粒子のエネルギーを測定するための検出器である。後述する PFA という再構成アルゴリズムを取り入れているため、ILD のカロリメータは光子のエネルギーを測定する電磁カロリメータと、中性ハドロンのエネルギーを測定するハドロンカロリメータに分かれている。どちらもサンプリング型のカロリメータで、シャワーを起こす吸収層と、シャワー中の粒子を検出する検出層が交互に配置される。入射した高エネルギー粒子を吸収層で相互作用させてシャワーを起こし、そのシャワー中の粒子のエネルギーを検出層で測定する。シャワーのエネルギーとその形状から入射粒子のエネルギーを再構成する。光子や電子は電磁相互作用を起こすため相互作用長が短く、長さが短く幅も狭い高密度のシャワーを形作る。一方でハドロンは強い相互作用を起こすため断面積が小さく、反跳によるシャワーの広がりも起こるため、長さが大きく幅も広い低密度のシャワーを作る。

電磁カロリメータでは光子の識別、エネルギー測定を行う。吸収層としてタングステンが考えられている。タングステンは鉄よりも密度が大きく、またモリエール半径が小さいため効率的に電磁シャワーを生成でき、コンパクトなカロリメータを作成することができる。これによりハドロンシャワーへの影響を小さくすることができる。検出層にはいくつかのデザイン案が考案されており、ピクセル状のシリコン半導体検出器を用いるデザイン、ストリップ状のプラスチックシンチレータと SiPM を用いるデザイン、これら 2 つを混合したハイブリッドデザインがある。いずれも高密度の電磁シャワーを測定するために、5 mm×5 mm のセルサイズとなっており、非常に高精細なカロリメータを実現できる。

ハドロンカロリメータでは荷電ハドロンと中性ハドロンを分別し、中性ハドロンのエネルギーの測定を行う。吸収層は鉄を使用し、ハドロンシャワーを捉えるために大サイズのカロリメータとなる。検出層としては 2 つ考えられており、ガス検出器を用いて 10 mm×10 mm のセルを 2bit で読み出すセミデジタル型と、30 mm×30 mm のシンチ

レータタイルを SiPM で読み出すアナログ型がある。我々のグループでは後者の Analogue Hadron CALorimeter (AHCAL) についての研究開発を行っており、詳細は次章にて述べる。

クライオスタット (マグネット)

センサーではないが超伝導電磁石で、3.5 T の磁場を発生させることで生成した素粒子を曲げるために設置される。荷電粒子はその運動量により磁場中での曲率半径が異なり、中性粒子は磁場の影響を受けず直進する。この性質を利用して、中央飛跡検出器にて荷電粒子の運動量の測定を行う。

ミューオン検出器

一番外側に配置されるミューオンを観測するための検出器である。ミューオンはカロリメータまでの検出器は貫通するので、密度の大きい吸収層を用いてミューオンを検出する。またカロリメータの測定域に収まらなかったエネルギーの高いシャワーを測定するためにも活用される。

1.2.2 Particle Flow Algorithm (PFA)

ILC では多くの相互作用過程の末に複数のジェットで構成された終状態を形成する。ジェットの不变質量は粒子の識別と再構成に用いられるため、それを正確に再構成することは精密測定にとってとても重要である。よって ILC では、2 ジェットの不变質量の再構成によって、ヒッグス粒子生成に大きく関わる Z ボソンや W ボソンの崩壊を分別できるよう、ジェットエネルギー分解能 $\sigma_E/E = 30\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ を目標としている。

このジェットエネルギー分解能を実現するために、Particle Flow Algorithm(PFA) という手法が考案された [6]。図 1.4 左のように、従来はジェットのエネルギーは ECAL と HCAL での測定エネルギーの和として求めていた。典型的なジェットでは約 72% のエネルギー (荷電ハドロン 62%、中性ハドロン 10%) を HCAL で測定することになり、HCAL の典型的な分解能 $55\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ では目標の分解能を達成することは難しい。一方で PFA では図 1.4 右のように、ジェット中の 1 つ 1 つの粒子を識別し、それぞれ最も適した検出器でエネルギーと運動量を求める。荷電粒子の運動量は内部トラッカーで正確に求められ、光子のエネルギーは $20\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ という高いエネルギー分解能を持った電磁カロリメータで測定する。HCAL ではジェットエネルギーの約 10% にあたる長寿命の中性ハドロンのみ測定することになる。これによりそれぞれの粒子を最適な分解能を持った検出器で測定することで、ジェットエネルギー分解能を大幅に向上することができる。

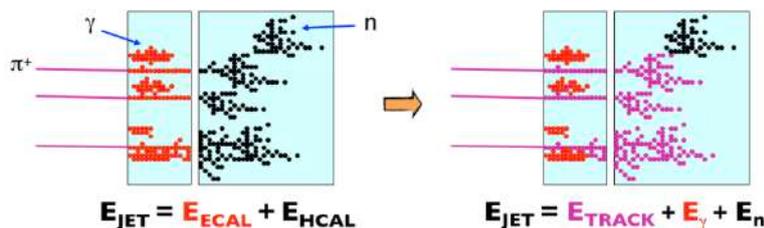


図 1.4 PFA の基本的な考え方。荷電粒子 (紫) は内部トラッカー、光子 (赤) は ECAL、中性ハドロン (黒) は HCAL でそれぞれ再構成、エネルギーの測定を行う。[6]

PFA では飛跡検出器で得られる荷電粒子の飛跡とカロリメータで得られるシャワーの情報からジェット中の粒子の再構成を行う。磁場により曲げられた飛跡を持つ粒子は荷電粒子として内部トラッカーで運動量を再構成し、磁場の影響を受けていない粒子は中性粒子としてカロリメータでエネルギーの再構成を行う。よって荷電粒子由来のシャワーと中性粒子由来のシャワーを精度よく分離することが重要であり、そのためには高精細なカロリメータが必要とされる。

図 1.5 は PFA を用いた再構成の際に起こりうるエラーを示している。左・中央の図のように荷電ハドロンのシャワーと、光子や中性ハドロンのシャワーが近くで発生した場合、後者を荷電ハドロン由来のものとして認識してしまう場合がある。また右の図のように荷電ハドロンのシャワーのテールを別個の中性ハドロンのシャワーとして認識することがある。これらのエラーを無くすために高精細なカロリメータと、飛跡検出器とカロリメータの情報を最適に統合する再構成アルゴリズムが必要となる。

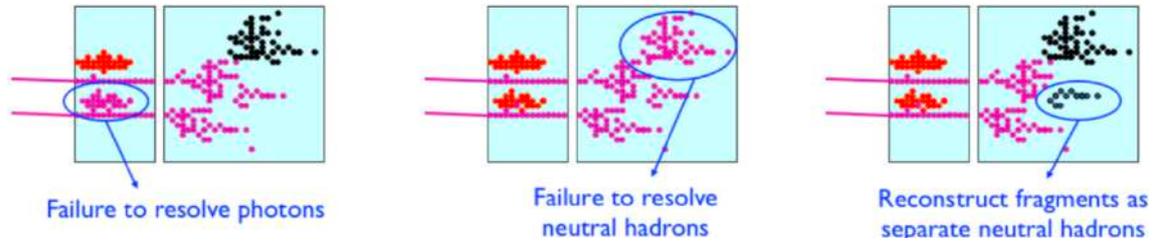


図 1.5 PFA を用いた再構成の際に起こりうるエラー [6]

ILD を基に PFA を取り入れた再構成プログラムの代表的なものに PandoraPFA[6][7] がある。PandoraPFA はモンテカルロシミュレーションを用いてジェットの再構成などを行い、ILD モデルの性能を検証する。図 1.6 はイベントディスプレイである。エネルギー・粒子種別ごとに色分けがされており、飛跡検出器と高精細なカロリメータの情報を統合して荷電粒子と中性粒子を分離できていることが分かる。

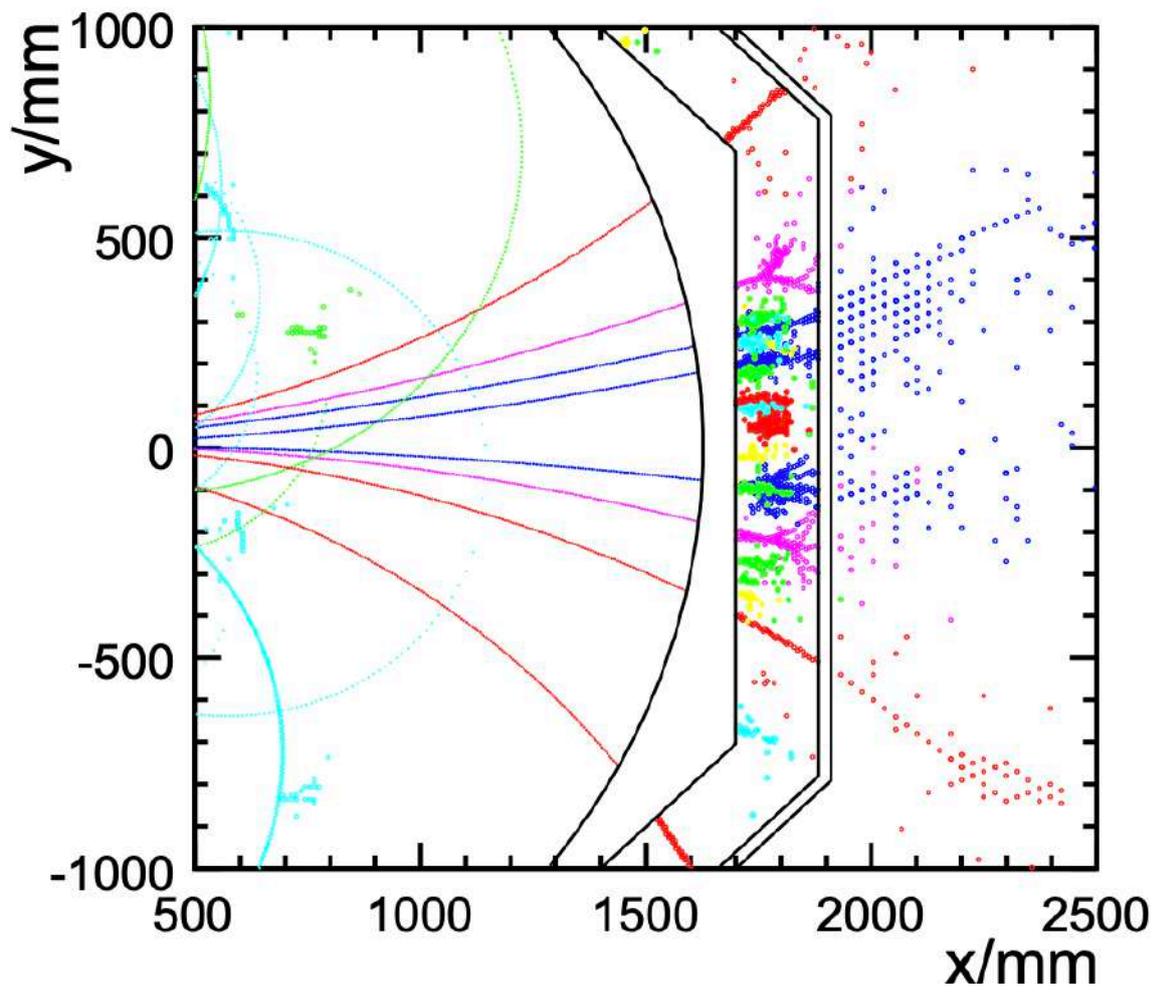


図 1.6 100 GeV ジェットを用いた PandoraPFA シミュレーションのイベントディスプレイ [7]

第 2 章

Analogue Hadron CALorimeter (AHCAL)

Analogue Hadron CALorimeter (AHCAL) はドイツ、ロシア、日本のグループなどで研究開発が行われている国際プロジェクトである。プラスチックシンチレータを SiPM を使って読み出すサンプリング型ハドロンカロリメータである。この章ではハドロンカロリメータの基本事項を述べた後に、AHCAL について述べる。

2.1 カロリメータ

2.1.1 シャワー

高エネルギーの電子が物質に入射すると、制動放射を起こし γ 線を放出する。生成された γ 線は対生成を起こし電子・陽電子対を放出する。この 2 過程が繰り返され、生成粒子のエネルギーが減衰していき新たな粒子が生成できなくなるまで繰り返される。このように入射電子が物質と相互作用し、シャワーのように時間的に発展していく現象を電磁シャワーと呼ぶ。シャワーの入射軸方向の長さは $\log E_0$ (E_0 は入射粒子のエネルギー) に比例し、比較するパラメータとして物質の放射長が用いられる。

一方で高エネルギーのハドロンが物質に入射した場合、核破砕反応を起こしたくさんの粒子が生成する。つまりハドロンは、強い相互作用により非弾性多重粒子生成シャワーを形作る。シャワーのパラメータとしては相互作用長が用いられるが、一般的に相互作用長は放射長よりかなり大きい。そのため全シャワーを捉えるためには高い密度の物質を厚く配置する必要がある。また電磁シャワーに比べ断面積が小さいことやエネルギーの多くが原子核の分解に利用されること、遅い中性子や生成されたニュートリノの測定が難しいことなどから、エネルギー分解能が悪くなってしまう。

2.1.2 全吸収型とサンプリング型

全吸収型カロリメータは吸収体そのものを検出器として使用し、シンチレーション光やチェレンコフ光を用いて粒子を検出する。全シャワーのエネルギーを吸収・検出できるためエネルギー分解能は良いが、特にハドロンシャワーだと全エネルギーを吸収するために大型化する必要があり、コストが高くなってしまう。

サンプリング型カロリメータは吸収体と検出器のサンドイッチ構造になっている。検出層にプラスチックシンチレータやガス検出器を用いてシャワーのエネルギーの一部を測定 (サンプリング) する。シャワーのエネルギーの大部分は吸収層で落ち、検出層では一部のエネルギーしか測定できないため、エネルギー分解能は悪くなる。しかし、全シャワー長をカバーできるような大規模なカロリメータを低コストで作ることができる。また検出層の高精細化がしやすく、PFA を採用した ILD 検出器に適している。したがって、ILD ではサンプリング型のカロリメータを採用しており AHCAL もサンプリング型である。

2.1.3 AHCAL の設計と検出原理

AHCAL はビーム軸を囲む円筒状のバレル部分、バレル部分の両端に蓋をするエンドキャップ部分、バレルとエンドキャップの隙間を埋めるリング部分の 3 つで構成されている。ILD の中心で衝突・生成したほぼ全ての粒子をカバーすることができる。DAQ 機構やケーブリングは全てバレルとエンドキャップの間のスペースにまとめられており、デッドスペースを極力減らした構造になっている。

図 2.1 の緑色の部分が AHCAL のバレル部分である。バレルはビーム軸方向に 2 つのリングがあり、それぞれ方位角方向に 16 分割されている。

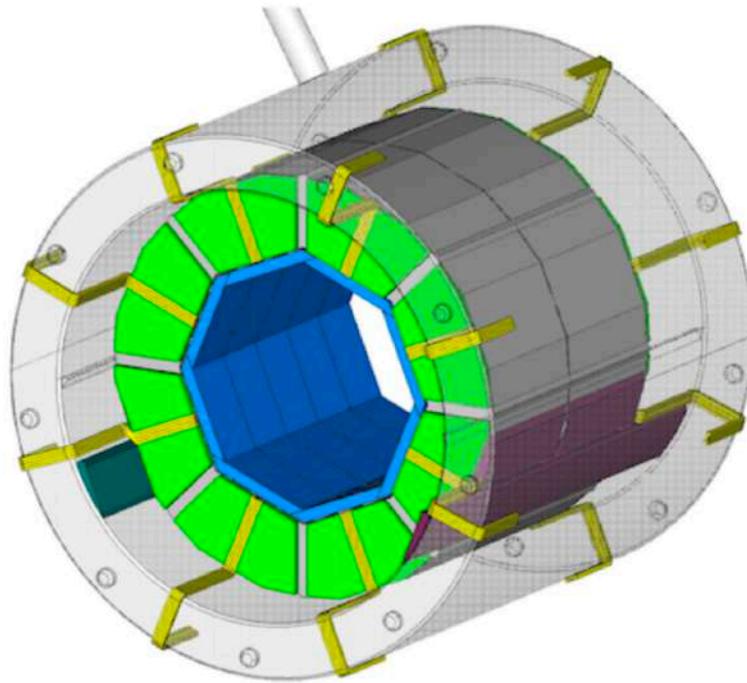


図 2.1 AHCAL のバレル部分 [8]

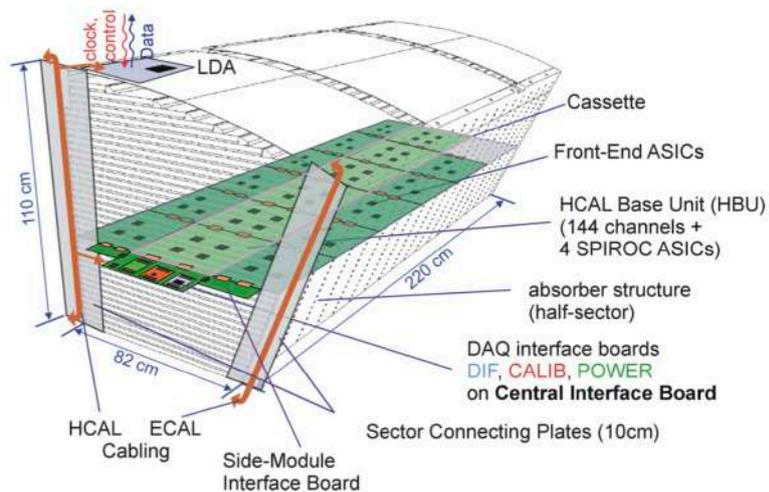


図 2.2 バレル部分の構造 [4]

分割されたブロックの構造を図 2.2 に示す。ハドロンシャワーを捉えるために、48 層の鉄またはタングステンから成る吸収層とシンチレータタイルと SiPM を用いた検出層を交互に配置している。厚さは吸収層が 20 mm、検出層が 5.5 mm で設計されており、全体として約 1 m の厚さがある。大部分のハドロンシャワーを捉えることが可能である。

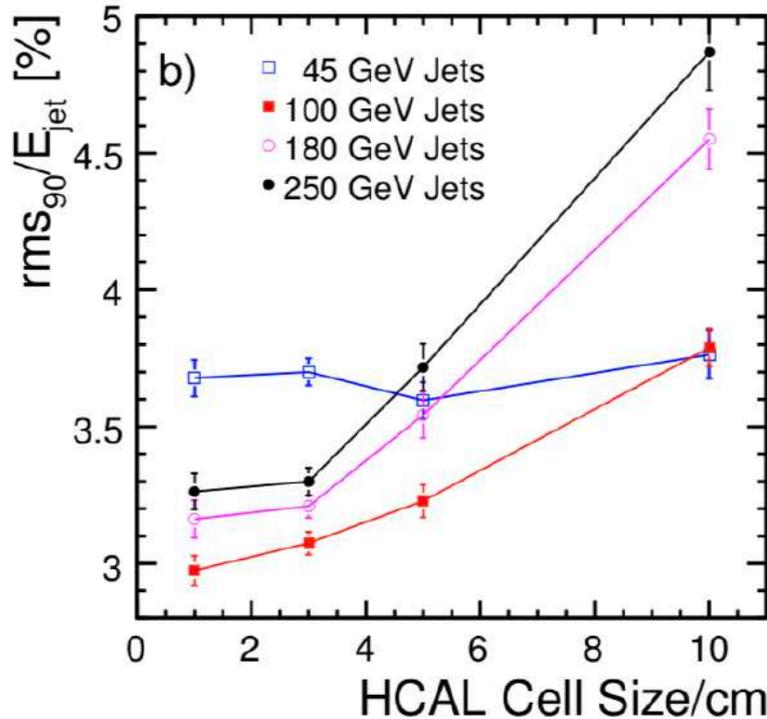


図 2.3 HCAL のジェットエネルギー分解能のセルサイズ依存性 [4]

図 2.3 は全ての ILD 検出器を用いたモデルで、HCAL の読み出しセルサイズ毎のジェットエネルギー分解能をシミュレーションした結果である。この結果から、30 mm 角より小さなサイズでは分解能の向上はほとんどない一方で、30 mm 角より大きいと分解能が悪化することがわかる。よって HCAL の基準セルサイズは 30 mm 角に設定された。

2.2 AHCAL 検出層の構造

AHCAL の検出層は図 2.4 左の HCAL Base Unit (HBU) と呼ばれる光検出器およびその読み出し電気回路搭載の制御・読み出し基板に、図 2.4 右のように 30 mm×30 mm のシンチレータタイルが敷き詰められている。ハドロンシャワー中で発生した荷電粒子がシンチレータタイルを通過する際に発生するシンチレーション光を、HBU に搭載された半導体光検出器 Silicon PhotoMultiplier (SiPM) で検出する。

2.2.1 シンチレータ

AHCAL ではシンチレータとして有機プラスチックシンチレータを採用している。図 2.5、2.6 のように、30 mm×30 mm×厚さ 3 mm のタイルに SiPM を配置するためのディンプルという窪みを作る。ディンプル以外の面は反射材で覆い、HBU 上の SiPM がディンプルに置かれるように配置する。現在は応答の一様性が良く、アラインメントのしやすい中心読み出しが主流となっている。このデザインだと、HBU1 枚あたり 12×12、AHCAL

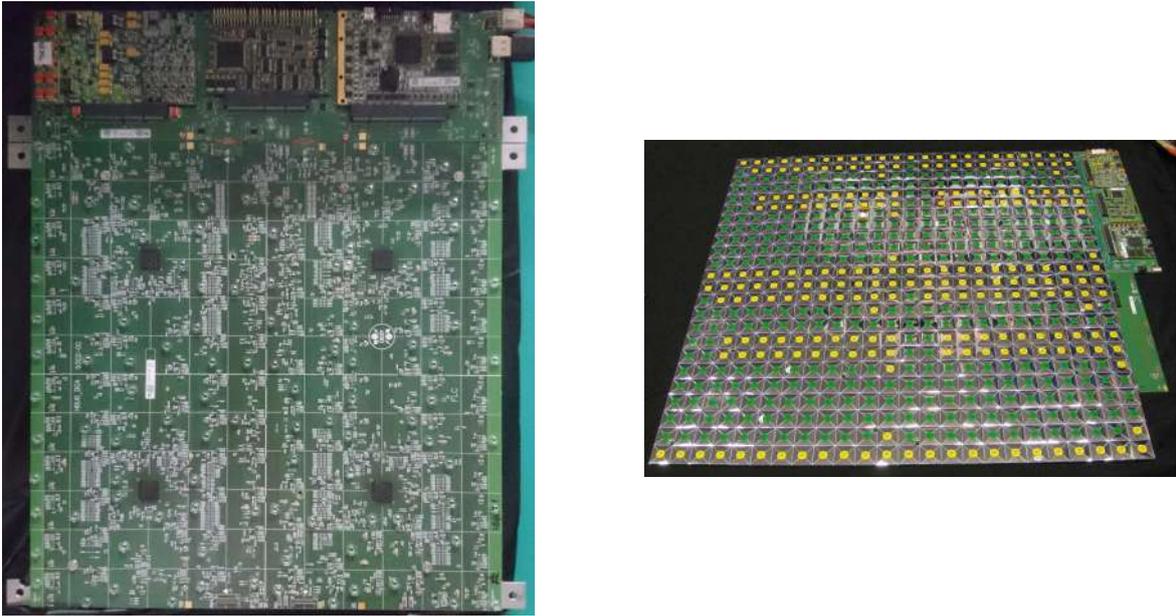


図 2.4 HBU の ASIC 側 (左) とタイル側 (右)

全体で約 800 万のタイル・チャンネルが必要となり、タイルや反射材の製造や反射材の包装、配置の自動化や簡略化が進められている [9][10]。

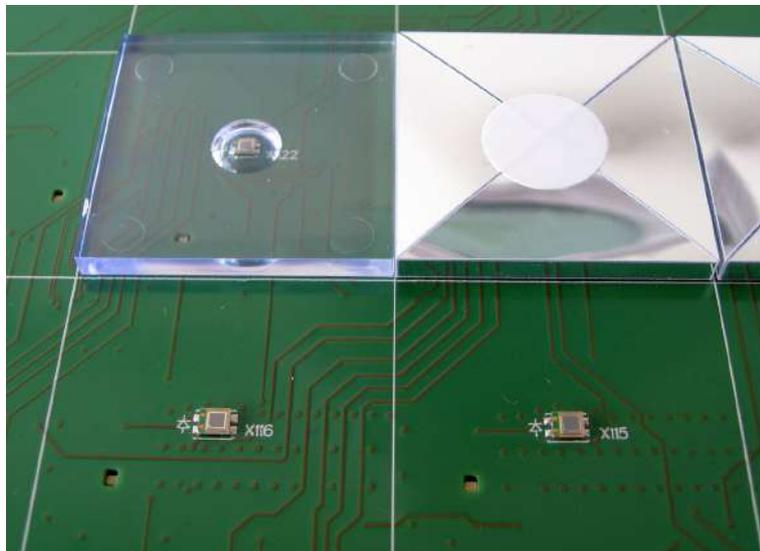


図 2.5 HBU 上のシンチレータタイル

2.2.2 SiPM

前述の通りシンチレーション光を読み出すために用いられる半導体光検出器 SiPM は、Avalanche PhotoDiode (APD) がピクセル上に整列配置されている。従来の PhotoMultiplier Tube (PMT) と比べて SiPM には以下のメリットがある。

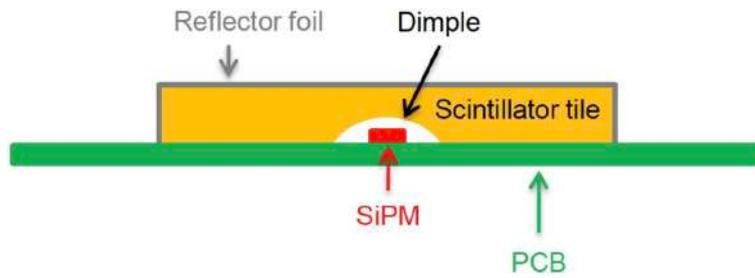


図 2.6 読み出し構造

- コンパクト
- 安価
- 動作電圧が低い
- 磁場の影響を受けない
- 光子を 1 つ 1 つ検出できる

AHCAL では浜松ホトニクス社製の Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) が採用されており、本研究でも MPPC を用いる。現在の基準設計では図 2.7 下段中央の表面実装型の 1.3 mm 角、ピクセルピッチ 25 μm のものが採用されている。MPPC の原理等について述べる。

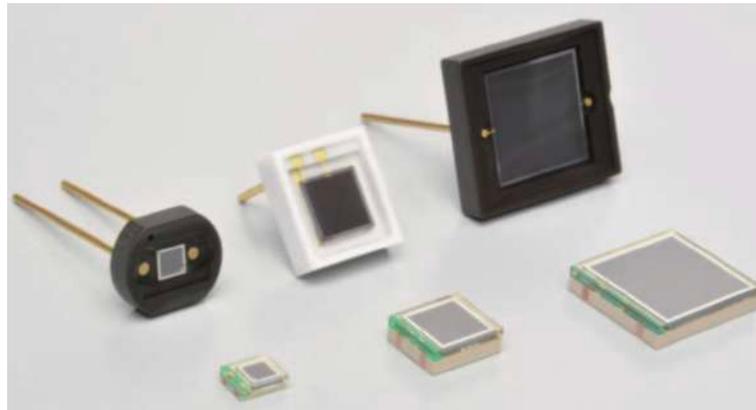


図 2.7 浜松ホトニクス社製 MPPC[11]。ピン型 (上段) と表面実装型 (下段) があり、用途によって選択する。

動作原理

MPPC は、図 2.8 左、図 2.9 のように 1 mm~3 mm 四方のシリコンチップに敷き詰められた多数のガイガーモード APD ピクセルにより構成される。ピクセルの断面は図 2.8 右のようになっている。ピクセル内の PN 接合に APD がガイガーモードで動作するための閾値 (ブレイクダウン電圧) より少し高い逆電圧を印加することで、入射光子により弾き出された光電子が増幅領域内で雪崩増幅される。電子雪崩の発生したピクセルには電流が流れることによりピクセルに接続されたクエンチング抵抗に電圧降下が発生する。このとき 1 ピクセルからの出力電荷 Q_{pix} はピクセルのキャパシタンス C_{pix} とオーバー電圧 ΔV (印加電圧 V とブレイクダウン電圧 V_{bd} の差) に比例する (式 2.1) ので、これらが一定であれば入射光子によらず一定の出力となる。増幅領域にかかる電位差を下げることで雪崩は収束し、次に入射する光子に対応することができる。

$$Q_{pix} = C_{pix}(V - V_{bd}) \quad (2.1)$$

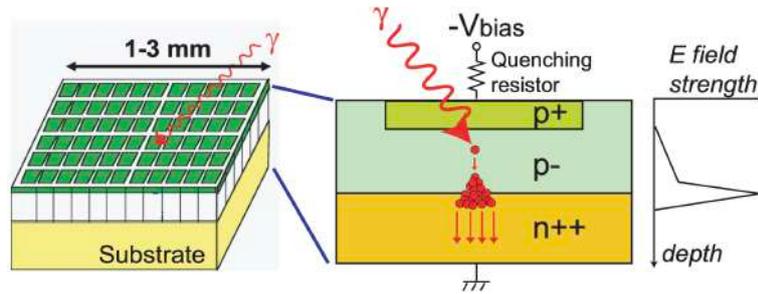


図 2.8 MPPC の構造と動作原理 [12]。赤丸は電子。実際には電子雪崩に伴い生成される正孔も雪崩を起こす。

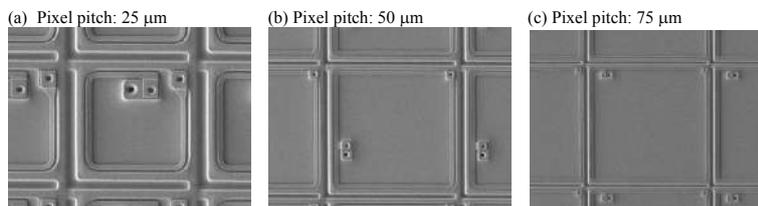


図 2.9 25 μm 、50 μm 、75 μm ピクセルピッチの MPPC の拡大写真 [13]

1 つのピクセルは 1 光電子による電子雪崩で飽和してしまうため 2 つ以上の光電子を観測することができないが、MPPC では受光面を多数の微小ピクセルに分割した上で全ピクセルの出力電荷の和を出力できるため、図 2.10 のように入射した光子を 1 つ 1 つ計測し一度に何個入射したか知ることができる。これが MPPC の大きな特徴の 1 つである。

図 2.11 は MPPC の出力波形の例である。光電子数に対応するピークがはっきりと見られ、また増幅領域が薄いので信号の立ち上がりが早く、時間分解能にも優れていることがわかる。

ゲイン・ブレイクダウン電圧

前述の通り、電圧降下により印加電圧がブレイクダウン電圧以下になると電子雪崩が終息するため、MPPC のゲインは式 2.1 から 1 電子あたりの電荷量 ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$) を割ったものになりオーバー電圧に比例する。よって図 2.12 に示す ADC 分布でのペDESTAL と 1 光電子ピークの電荷量の差から MPPC のゲインを求めることができる。

同様の測定を電圧を変えながら行い、電圧に対するゲインの比を求めゲインが 0 の点まで外挿することでブレイクダウン電圧を求めることができる。ブレイクダウン電圧には温度依存性があることが分かっている。これは様々なピクセルサイズの素子、室温から液体窒素温度までの温度について確認されており、その温度係数はおよそ 50 mV/K と計測されている [15]。

光子検出効率

光検出器の重要な性質の 1 つとして、光子の検出効率 Photon Detection Efficiency (PDE) がある。MPPC の PDE は量子効率 QE、開口率 (受光面積中の有感領域の割合)、電子雪崩を起こす確率の 3 要素で決まる。MPPC は APD の構造により PMT に比べて高い QE を持つ。しかし各ピクセルの周りに不感領域が存在するため、開口率は 50~70% である。また電子雪崩を起こす確率はオーバー電圧 ΔV に依存するため、PDE もオーバー電圧に依存する。

ダークノイズ

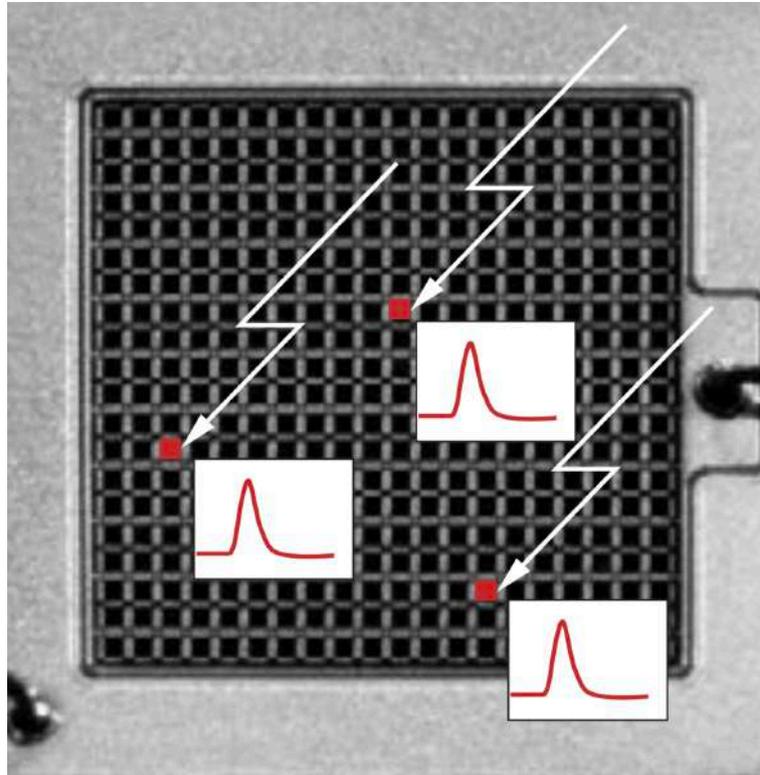


図 2.10 MPPC による光子計測のイメージ [14]

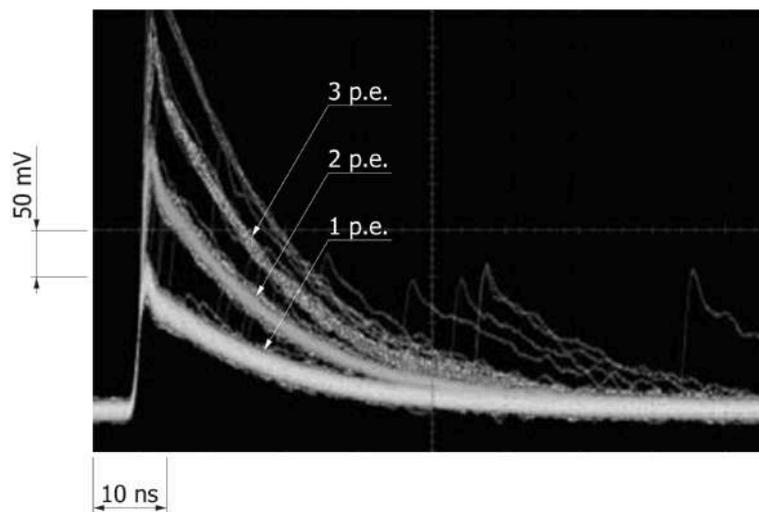


図 2.11 MPPC の波形の例 [14]

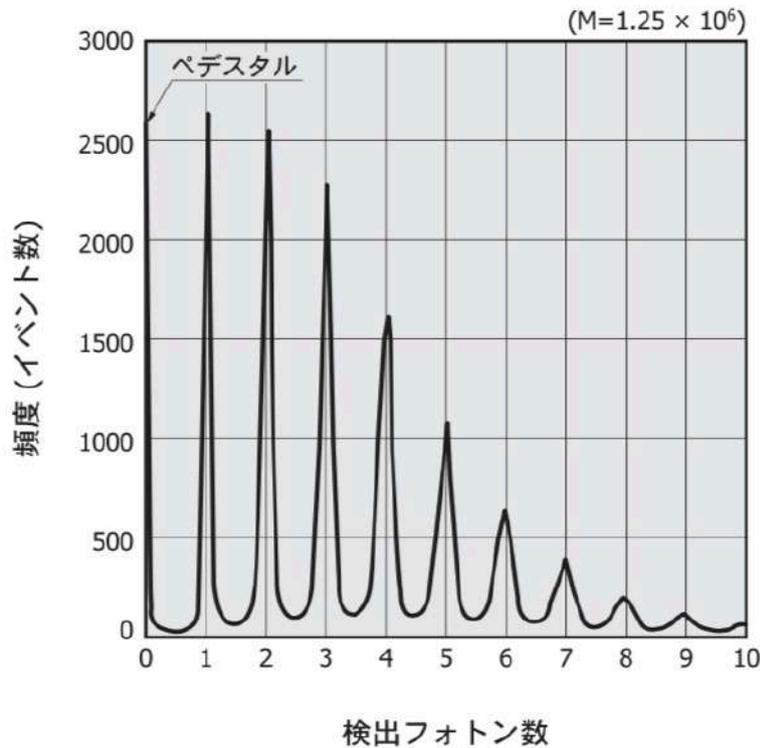


図 2.12 MPPC のパルス波高スペクトル [14]

光子の入射がない場合でも、熱励起による電子が電子雪崩を起こすことによりダークノイズが発生する。ノイズの大きさは 1 光電子相当が主であるが、後述のクロストーク・アフターパルスの影響で 2 光電子相当以上の事象が現れることがある。

クロストーク

あるピクセルで電子雪崩が発生した際赤外波長の光子が発生し、隣接するピクセルに入射して別の電子雪崩を引き起こすことがある。これをピクセル間クロストークと呼ぶ。実際に入射した光電子数より多く計測してしまう。ピクセル間に溝を掘ってタングステンを埋め込み、光学的にそれぞれのピクセルを分離させるなどの対策が考えられている。

アフターパルス

電子雪崩中の電子が増幅領域内の結晶の格子欠陥に捕獲され、一定時間後に再放出されることにより再度雪崩を引き起こすことがある。これをアフターパルスと呼ぶ。格子欠陥のポテンシャルの深さにより電子の捕獲確率や再放出の時定数に変化する。この現象の理解は現在も進行中であるが、結晶の質を向上させるなどの対策が考えられている。

サチュレーション

MPPC に入射する光子数が多くなると、1 ピクセルに 2 個以上の光子が入り始める。しかし 1 ピクセルに 2 個以上の光子が入射しても電子雪崩は 1 度しか起きず、光子入射の可否しか判定できない。そのため図 2.13 のように、入射光子数が多くなると励起ピクセル数 (検出光子数) との線型性が悪くなる。さらにピクセル数を超える光子が入射すると、ピクセル数以上の光子は検出できず一定の出力となる。よって励起ピクセル数は以下の式で表せる。

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{total}} \times \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-N_{\text{photon}} \times PDE}{N_{\text{total}}}\right) \right\} \quad (2.2)$$

これを防ぐためには、同時に入射する光子に対して十分なピクセル数を持った (有感領域が大きい、またはピクセルピッチが小さい)MPPC を使う必要がある。

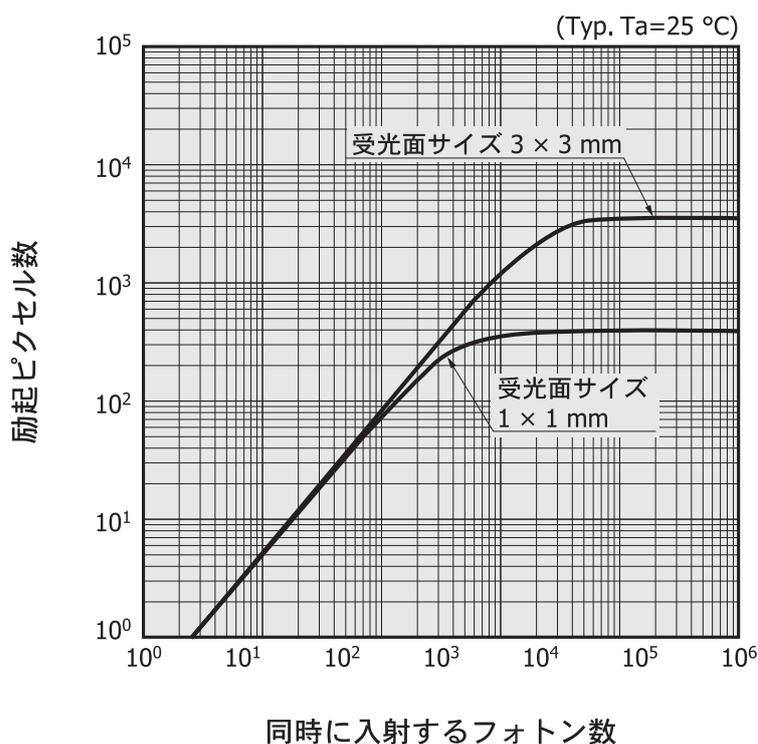


図 2.13 MPPC のサチュレーション [14]

2.2.3 HCAL Base Unit (HBU)

AHCAL の検出層の読み出し基板として、大量の MPPC を処理するための HBU というモジュールがドイツにある研究所 Deutsches Electron-Synchrotron (DESY) にて開発されている。図 2.14(図 2.4 左の下部)にある正方形部分が HBU の本体であり、大きさ $36 \times 36 \text{ cm}^2$ 、また厚さは基板のみで約 0.8 mm に抑えられ、粒子のエネルギー損失を出来るだけ小さくするように設計されている。1 枚の HBU は $144 (12 \times 12)$ 個の MPPC が整列されており、 $36 (6 \times 6)$ 個ずつ Application Specific Integrated Circuit (ASIC) によって制御される。ASIC はオメガグループ製の Silicon Photomultiplier Integrated Chip 2 (SPIROC2)[16] が採用されている。SPIROC2 は 36 の入力チャンネル、16 イベントをアナログ形式でストックするための Switched Capacitor Array (SCA)、12bit の ADC が搭載されている。電荷 (ADC) と時間 (TDC) の情報はチャンネル毎に、設定した閾値を超えた信号のみストックされる。HBU は図 2.14 に見える基板と同等の厚さの接続端子 flexlead(図 2.15) により、最大で 6 枚直列に接続可能で、さらに横方向に 3 列、合計 18 枚の HBU を接続することが可能である。各チャンネル毎に LED が基板に埋め込まれており、MPPC のゲイン構成を行うことができる。

HBU を制御するためのボードについて述べる。図 2.16 に SiPM から ASIC、HBU、制御ボードまでの制御・信号読み出しの流れを示す。

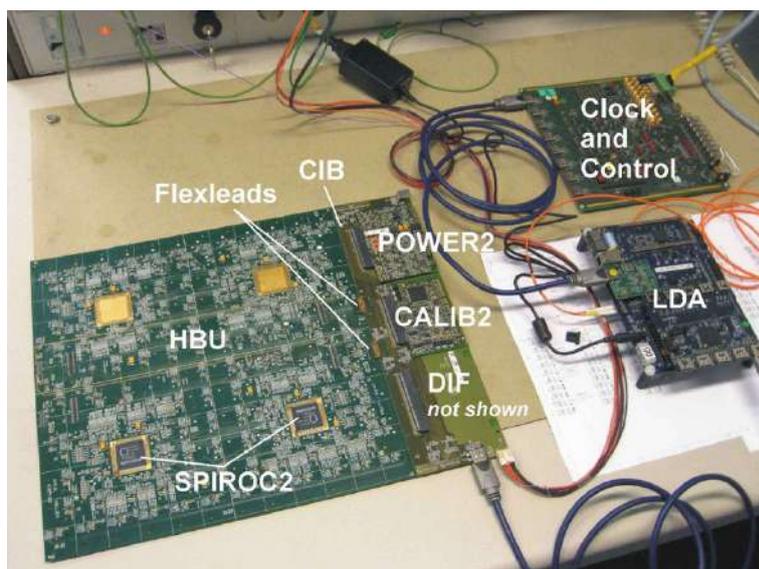


図 2.14 HBU の DAQ

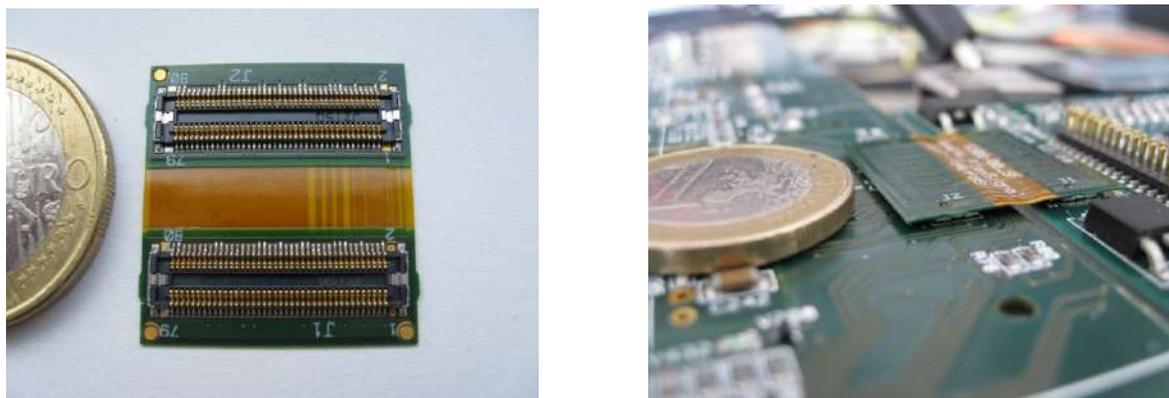


図 2.15 flexlead の接続面(左)と HBU 同士の接続時(右)[17]

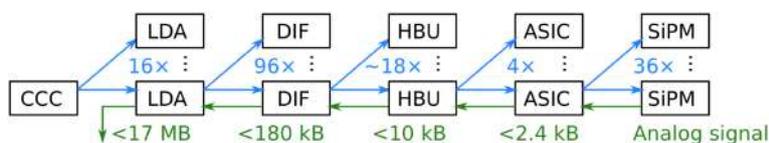


図 2.16 DAQ のフローチャート [18]

Detector Interface (DIF)

DIF には図 2.4 上部のように電源供給用ボード、較正用ボード、データ送信用ボードがまとめられている。flexlead により HBU と接続することで 3 列、最大 18 枚の HBU または 72 個の ASIC を制御できる。データはカスタム信号プロトコルとして HDMI ケーブルを通して送信される。

Link Data Aggregation (LDA)

LDA は 96 の DIF(バレルを 16 分割したウェッジ 2 つ分) に HDMI を通してコマンド送信・データ読み出しが

でき、Gigabit Ethernet (GbE) を通して PC に直接データ送信ができる。

Clock_and_Control_Card (CCC)

CCC は LDA にビームクロックを送信し、DAQ サイクルを開始させる。各検出器間のクロックを同期させる役割も持ち、トリガー信号を送信する。

2.2.4 HBU の DAQ

ILC のビームはバンチ状になっており、1 ms のビームと 199 ms の休止期間を繰り返す。これは超伝導加速空洞を冷却するのに必要な休止時間である。これに対応して SPIROC の DAQ は、Read Out Cycle (ROC) と呼ばれる読み出しサイクルを繰り返して行われる。1 つの ROC で、最大 16 ms のデータ取得を行なった後、約 40 ms かけてデータ読み出しを行う。

AHCAL では 8×10^6 個ものチャンネルが高密度に配置されるため、大きな熱負荷がかかる。MPPC の特性には温度依存性があるが、検出層と吸収層の間にクーリングシステムを入れる隙間は無い。この熱負荷を抑えるために、ビームバンチに対応してチャンネルや読み出し基板への電源供給に供給期間と休止期間を設ける。これを、パワーパルシングという。パワーパルシングにより電源消費も格段に抑えられるが、DAQ の正確な動作も保障する必要がある。そのため現在、ASIC や DAQ の改修や、テストビーム実験における運用試験などが行われている。

2.3 精細度の最適化及び本研究の目的

ILC 建設開始に向けて ILD 検出器設計案を完成させるため、各測定要素の設計の最適化が行われている。その中で AHCAL の最適化として精細度の見直しが行われており、検出層毎にタイルサイズを変え異なる精細度を混合した設計が考えられている。例えば 60 mm 角タイルを採用した場合、読み出しチャンネル数・ASIC の個数を 1/4 に減らすことができ、読み出しの簡略化やコスト削減に貢献できる。

図 2.17 は先行研究における精細度を混合した様々な場合分けをし、ジェットのエネルギー分解能を評価したプロットである。AHCAL の 48 層全てを基準設計の 30 mm 角タイルにした場合 (黒) と、内側 36 層を 30 mm 角で外側 12 層を 60 mm 角にした場合 (青)*¹、内側 24 層を 30 mm 角で外側 24 層を 60 mm 角にした場合 (緑) でほとんどエネルギー分解能は変わらないということが分かる。よって少なくとも外側半分を検出層の 30 mm 角タイルを 60 mm 角タイルに置き換えても、AHCAL 全体の性能を維持できることが分かった。

しかし 30 mm 角より大きなサイズのタイルの性能に関しては十分に実験・検証がされていない。集光効率などの観点から大サイズのシンチレータタイルは技術的に難しい。また図 2.17 の先行研究では、エネルギー再構成を最適化するためのソフトウェア補償 (後述) という手法が取り入れられておらず、混合精細度の性能検証としては不十分と言える。本研究は大きいタイルを用いた検出層のプロトタイプによる性能実証およびシミュレーション研究により混合精細度カロリメータの性能を検証することが目的である。

*¹ 先行研究の時点では 60mm 角タイルの性能はまだ実証されていなかったため、30mm 角タイルと同様の応答 (光量やその一様性) が仮定されている。

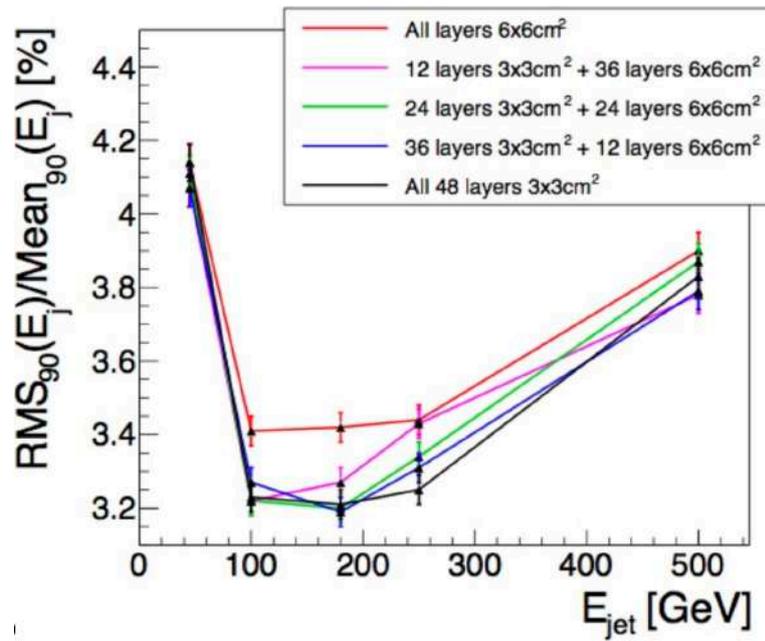


図 2.17 精細度をミックスした場合のシミュレーション結果 [19]。横軸がジェットのエネルギ、縦軸がジェットのエネルギー分解能。

第 3 章

大サイズのシンチレータタイルを用いた検出層 HBU の開発

上述した通り 30 mm 角より大きなタイルの性能は実証されていない。そこでまず 60 mm 角タイルのプロトタイプを作成し光量や応答の一応性を調べた。その結果を元に 60 mm 角タイルを用いた検出層 HBU を開発した。

3.1 プラスチックシンチレータの製法

有機プラスチックシンチレータはベースとなるプラスチック材料にシンチレーション物質 (アトラセンやスチルベン) を混ぜ込んで作成する。有機プラスチックシンチレータの製法は様々なものがあるが、以下では代表的な 2 つの製法について述べる

キャスト成形

材料として常温では液体状態の単量体や初期縮合物を型に流し込み、硬化剤を混合することで重合反応を起こし成形する手法である。鋳型成形とも呼ばれる。ベースとなるプラスチックは主に PVT(Polyvinyl toluene) が用いられる。以下にキャスト成形の利点欠点を挙げる。

1. 利点

- プラスチックシンチレータとしての品質が安定している (透明度と光量に優れている)。
- 30 mm 角タイルでの試験により、AHCAL で用いるのに十分な光量が得られることがわかっている。
- 特殊な設備を必要としないので、少数の生産であれば低コストで行える。

2. 欠点

- 機械加工を行い形を整える必要がある。
- 重合反応・機械加工により製作時間や手間がかかり、大量生産に向いていない。

AHCAL 実機では 800 万枚のタイルが必要でありキャスト成形での製作は現実的ではない。

射出成形

ペレット状にしたプラスチック原材料を約 200 度の高温で溶かし、金型に押し込んで冷却し固めるという手法である。主なプラスチック原材料は Polystyrene(PS) 等が用いられる。以下に射出成形の利点欠点を挙げる。

1. 利点

- 生産性が良い。(短時間・低コストで大量生産が可能)

- 機械加工の必要がない。
- プラスチックの性質や温度、熱、金型設計等をコントロール可能。

2. 欠点

- キャスト成形のシンチレータに比べ光量が小さい。
- 透明度が低く減衰長が短い。

AHCAL 実機でのタイル大量生産に向けて射出成形の採用が考えられているが、光量などの課題もある。

3.2 タイルサイズの検出光量への影響の調査

3.2.1 測定セットアップ

シンチレータタイル

図 3.1 のような 60 mm 角タイルを 5 枚、比較用に 30 mm 角タイルを 1 枚用意した。30 mm 角タイルは他の研究 [20] で使用されたもので、キャスト成形を用いた PVT ベースの EJ212 という型番の市販のシンチレータである。60 mm 角タイルは 30 mm 角タイルと同じ製法で、機械加工の際にサイズを調整した。

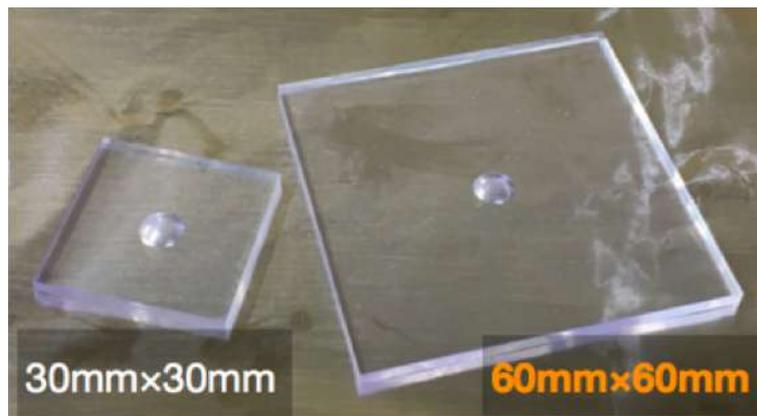


図 3.1 30 mm 角タイル (左) と 60 mm 角タイル (右)

反射材

タイルを覆う反射材は 3M 社製の ESR2 フィルム [21] を使用した。可視光領域で 98% 以上の高い反射率を持つ。AHCAL グループでは反射材のカットからタイルへの巻きつけまで自動化が進んでいる [9] が、今回は図 3.2 の図面を用いて手作業でカット、図 3.3 のように巻きつけを行なった。

基板、SiPM

タイル光量測定用の MPPC 読み出し基板としては図 3.4 を使った。これは先行研究 [22][23] にて使われていた基板を加工したものである。本来はパッド部分に全て MPPC を搭載し対応するソケットから電源供給・読み出し可能だが、60 mm 角タイルを置くのに邪魔になるので、測定用の MPPC 以外は取り外して 1 チャンネルのみ読み出し可能としている。MPPC としては以下のものを使用した。

- 型番：S12571-025P[24](現在は廃番)
- 受光面：1.0 mm×1.0 mm ピクセルピッチ：25 μm ×25 μm 、1600 pixels

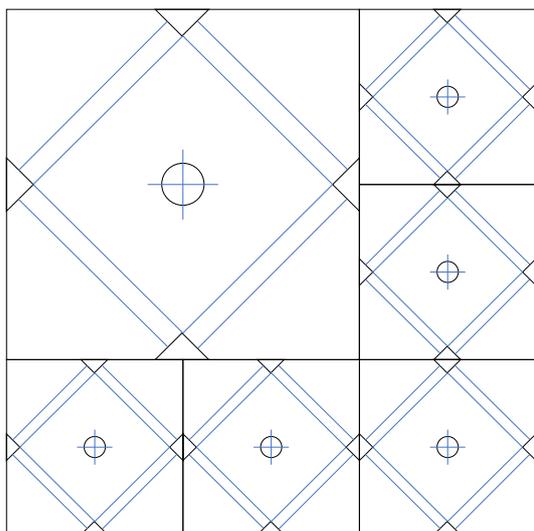


図 3.2 反射材の図面



図 3.3 反射材を巻いた 60 mm 角タイル

- 感度波長領域：320 ~900 nm

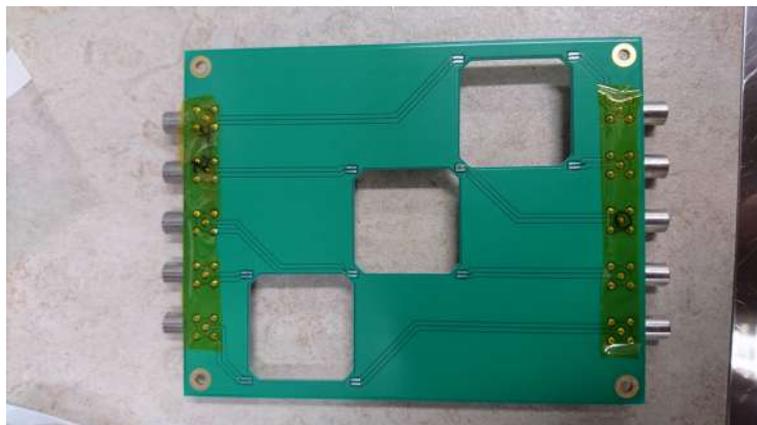


図 3.4 タイル光量測定用 MPPC 基板

DAQ

DAQ として Paul Sherrer Institute (PSI) にて開発された Domino Ring Sampler (DRS4)[25] と呼ばれる高速波形デジタイザを使用した。図 3.5 は DRS の動作原理を簡略化した図である。DRS はドミノ状に並んだ 1024 個のコンデンサーセルを搭載しており、入力されたサンプリング信号はインバーター遅延回路を高速で周回しそれぞれのセルに記憶される。トリガー信号によりセルに蓄えられた電荷がシフトレジスターを通して、ドミノ崩しのよう順々に出力される。最大サンプリング速度は 5 GSPS、200 ps 間隔で波形を出力できる。今回は 1.6 GSPS に設定したので、出力波形の時間幅は 640 ns である。

また MPPC 信号の増幅のため、PSI で開発されたアンプを用いた。図 3.6 は PSI アンプの回路面の写真である。PSI アンプはポールゼロキャンセレーションを行うことができ、MPPC の時間分解能を向上できることが特徴である [26]。しかし今回はポールゼロキャンセレーションは行わず、単に信号増幅のために用いている。

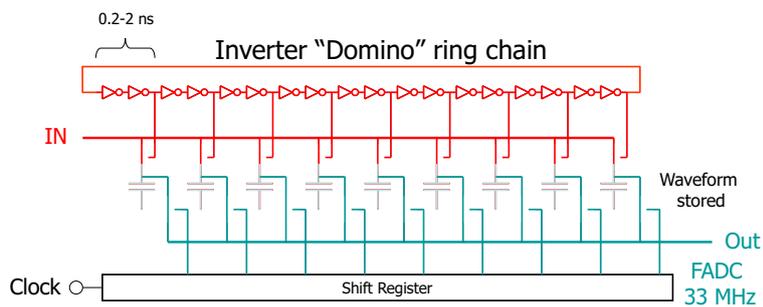


図 3.5 DRS の概要

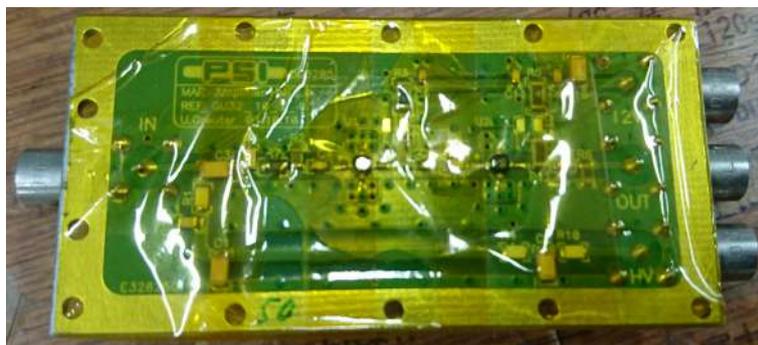


図 3.6 PSI アンプ

セットアップ

図 3.7 のように、基板(左図上)上の MPPC に 60 mm 角タイルが置かれるようにタイル・スペーサーをカセットに配置する。それらを重ね四隅をネジ止めすることで固定する。30 mm 角タイルの場合も同様に MPPC とディンプルが重なるようにタイル・スペーサーを配置する。

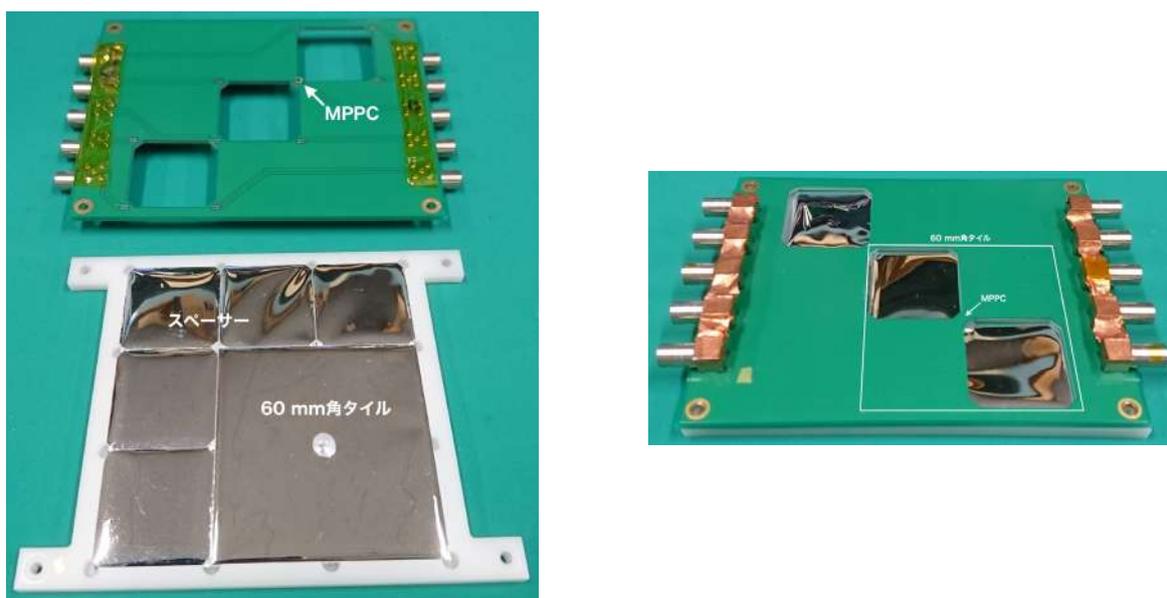


図 3.7 タイルのセッティング

全体のセッティングは図 3.8 のように、コリメータ、トリガーカウンターとともに、基板・タイルを可動式ステージに固定する。 β 線源 ^{90}Sr を直径 1.5 mm のコリメータで絞り、基板の窓部分から見えるタイルの測定点とトリガーカウンターを鉛直に一直線になるように配置する。トリガーカウンターとしては、5 mm×5 mm×5 mm のプラスチックシンチレータ (EJ-212) と有感領域 3 mm×3 mm の MPPC(S12572-025C) をオプティカルセメントで接着し、反射材としてテフロン製のシールテープを巻いたものを用いる。



図 3.8 セットアップの全体写真(左)と横からの写真(右)

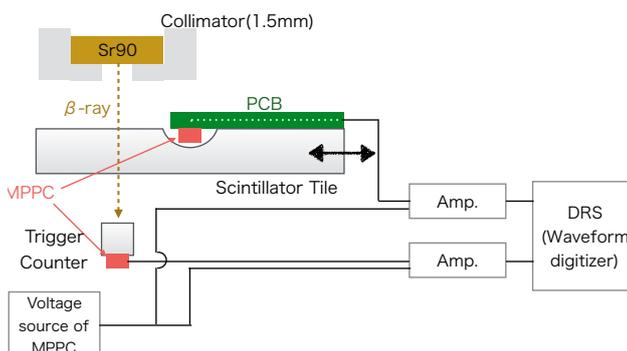


図 3.9 セットアップの概略図

3.2.2 測定方法

配線をしたセットアップの概略図は 3.9 のようになる。PSI アンプ以下のセットアップ全体はアルミ箔で全体を巻いて接地したのち暗幕で遮光を行い、MPPC 特性の温度依存性による影響を防ぐため 24 °C の恒温槽に入れて測定を行なった。

図 3.10 は DRS で得られる信号波形 (上) とトリガー波形 (下) である。トリガーが検出された前後のタイムウィンドウをイベントとして記録する。横軸は時間 [ns]、縦軸は電位差 [mV] であり、この信号を時間積分することで MPPC で検出した総電荷量が得られる。積分範囲はアフターパルスやダークノイズの影響を受けないよう、トリガーされてから信号が立ち下がるまでの特定範囲 (-265~-200 ns) を指定した。

こうして得られる典型的な電荷分布は図 3.11 のようになる。これをランダウ関数にガウス関数を畳み込んだ関数でフィッティングを行い、そのピーク値を MPPC が得た総電荷量の代表値とした。この値を MPPC のゲインで割

ることで光量を算出する。

図 3.10 上の -360 ns あたりの信号はトリガーにかかった信号ではなくダークノイズ由来の信号であり、そのようなイベントをシンチレーション光由来のイベントの前の時間範囲 ($-600 \sim -265$ ns) で解析した電荷分布が図 3.12 である。それぞれのピークがペDESTAL、1 光電子、2 光電子を表しており、マルチガウシアンでフィッティングすることでそれらの間隔を求める。その値が測定に使った MPPC における 1 光電子相当の電荷量、ゲインである。

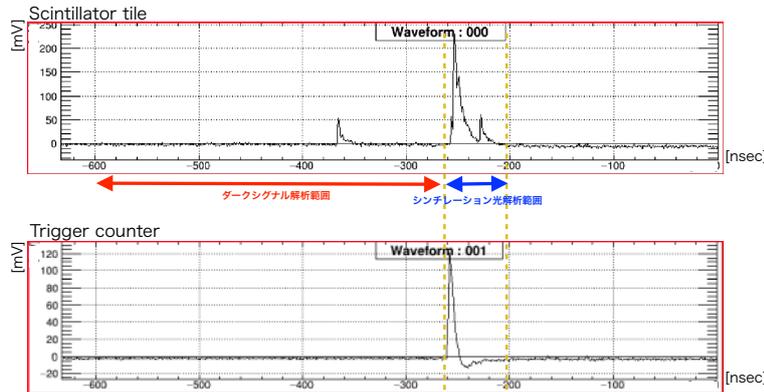


図 3.10 DRS で得られる波形の例

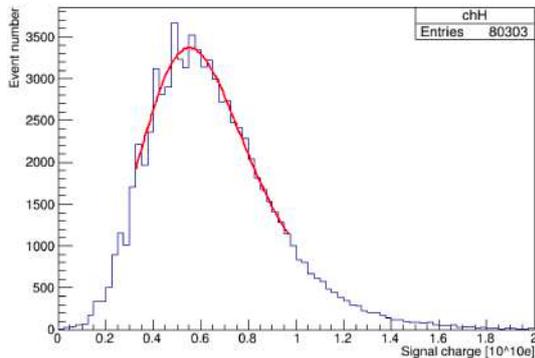


図 3.11 典型的な電荷分布の例

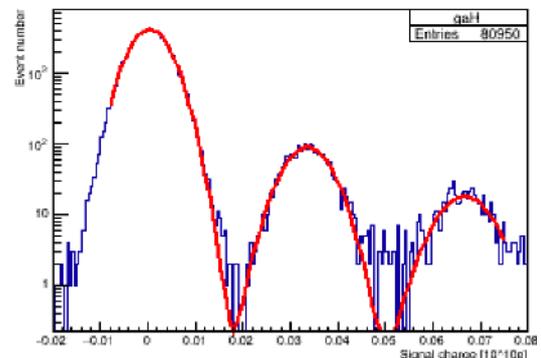


図 3.12 ダーク信号の電荷分布の例

3.2.3 結果と考察

今回、他の測定 [20] との比較用の 30 mm 角タイル一つと、サイズによる直接的比較をするために、 60 mm 角で測定した後に 30 mm 角に再成型したサンプルで測定をした。

タイルの光量の位置依存性を調べるために、比較用の 30 mm 角タイルと 60 mm 角タイルそれぞれ図 3.13、3.14 の赤点の位置に β 線を照射して測定を行なった。それぞれの測定結果は図 3.15、3.16 である。図中の x 、 y は測定点と対応しており、 $x = 0$ 、 $y = 0$ の部分に MPPC が配置されている。結果を表 3.1 にまとめた。ここで一様性とは、サンプル内での場所による一様性 (RMS) のことであり、タイルサイズごとに平均したものである。また 60 mm 角タイルのサンプル間の平均光量のばらつきは 9.7% である。セットアップは恒温槽に入れているため MPPC の特性の変化はなく、反射材やその他のセッティングも同様に行っているため、セットアップによる不定性はほぼ無い。

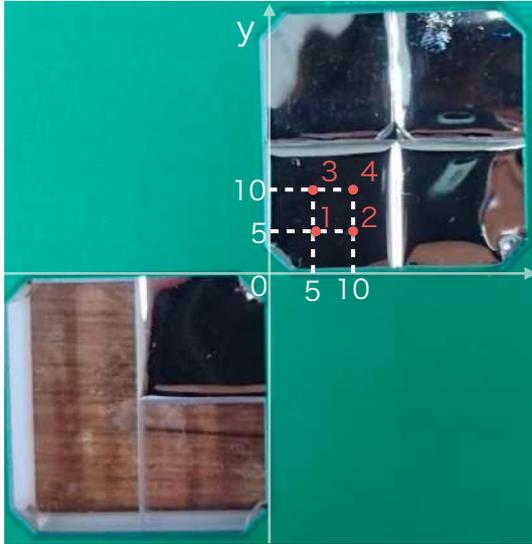


図 3.13 30 mm 角タイルの測定点

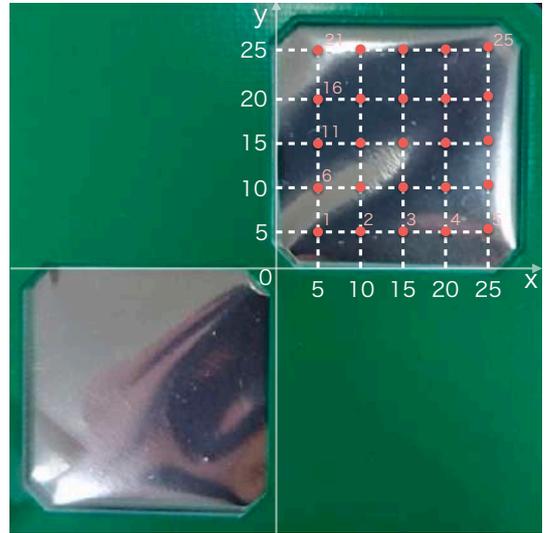


図 3.14 60 mm 角タイルの測定点

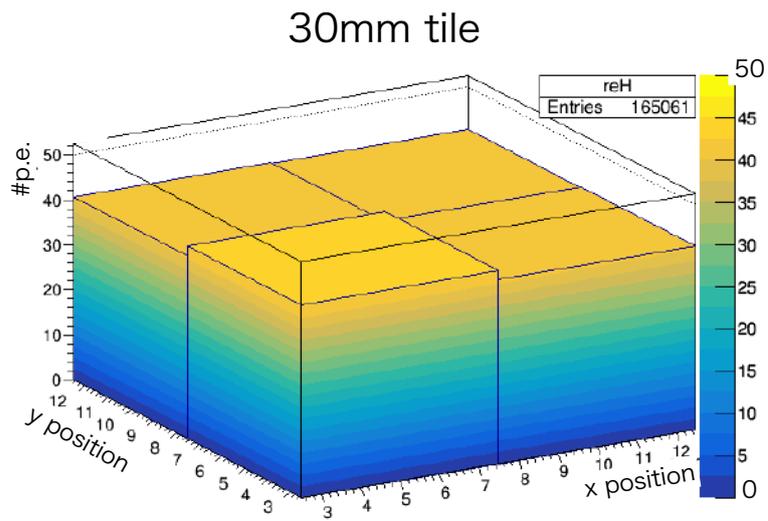


図 3.15 30 mm 角タイルの測定結果

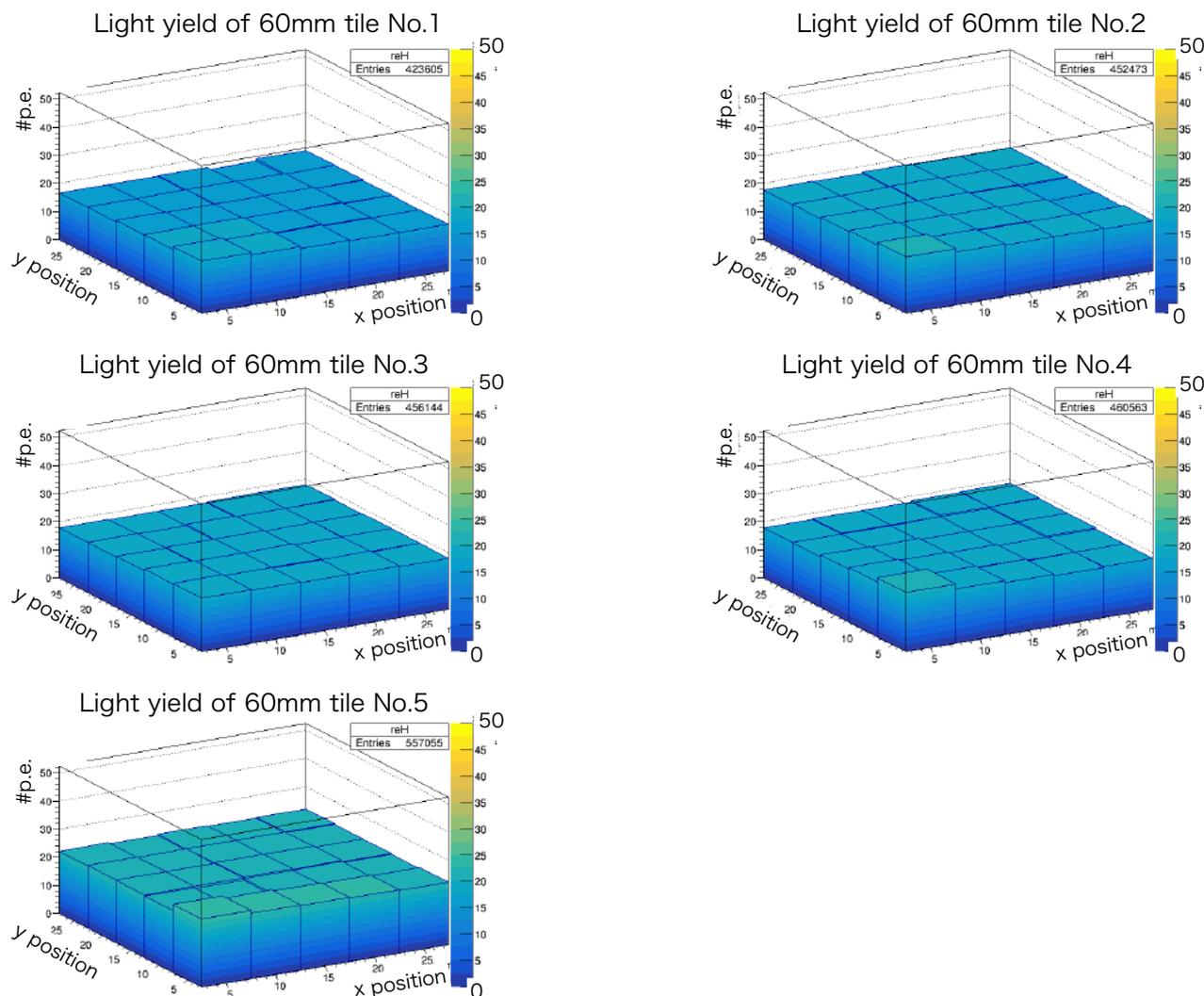


図 3.16 60 mm 角タイルの測定結果

表 3.1 比較用 30 mm 角タイル、60 mm 角タイルの光量測定結果

	平均光量	一様性 (RMS)
比較用 30 mm 角タイル (1 枚)	41.3 p.e.	2.3%
60 mm 角タイル (5 枚)	18.8 p.e.	2.9%

60 mm 角タイルの光量は 30 mm 角タイルに比べてほぼ半分に減少しているのが分かる。この減少は生産ロットの違いが影響している可能性がある。というのも、使用された 30 mm 角タイルは他の研究で使用されていたもので、60 mm 角タイルとは完全に別のロットで作られたものであるからだ。

次にサイズによる直接的比較をするために、光量測定に使用した 60 mm 角タイル 2 枚を追加加工して 30 mm 角タイルの大きさにカットした。そして図 3.17 に示すように、60 mm 角タイルからカットした 30 mm 角タイルと、60 mm 角タイルに関して測定点を取り、より詳細な光量測定を行なった。

図 3.18 が 60 mm 角タイルからカットした 30 mm 角タイルの光量測定結果、図 3.19 が 60 mm 角タイルの光量測定結果である。結果を表 3.2 にまとめた。同じ生産ロットで製作したシンチレータタイルに関しても、60 mm 角タイルの光量は 30 mm 角タイルに比べて約 52% 減少しているのが分かる。また表 3.1 の結果を誤差 10% 以内で



図 3.17 タイルの測定点 (左 30 mm 角タイル、右 60 mm 角タイル)

再現している。

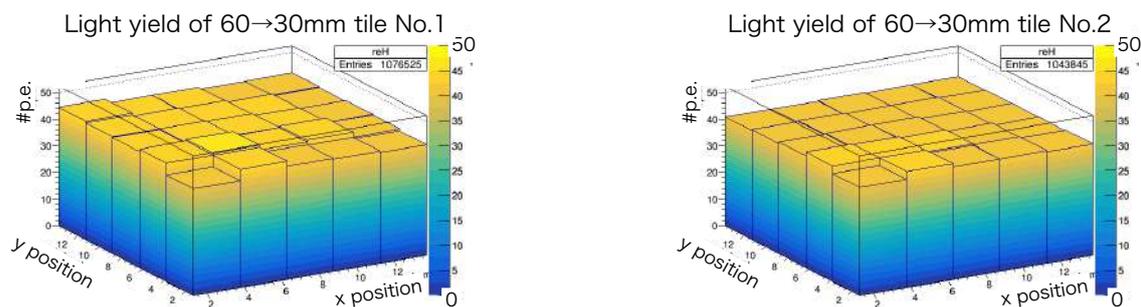


図 3.18 60mm 角タイルからカットした 30 mm 角タイルの光量測定結果

表 3.2 カットした 30 mm 角タイル、60 mm 角タイルの光量測定結果

	平均光量	一様性 (RMS)
カットした 30 mm 角タイル (2 枚)	42.4 p.e.	2.3%
60 mm 角タイル (3 枚)	20.4 p.e.	4.2%

よって光量の減少に関して、生産ロットの違いは影響しておらず、タイルサイズが大きくなったことでシンチレーション光が発生してから MPPC に入射するまでの距離が伸び、タイルやリフレクタに吸収される割合が大きくなったことが原因だと思われる。一方で 60 mm 角タイルの検出光量の位置によるばらつき (RMS) は 30 mm 角タイルと比べても十分に小さく、非常に良いタイル応答の一様性を持っていることが分かる。

この光量の減少は、MPPC の有感領域を大きくするなど集光率を高めることで改善が可能である。したがって 30 mm 角タイルと同様に十分な光量・一様性が得られたため、60 mm 角タイルの性能は十分に実証されたと言える。

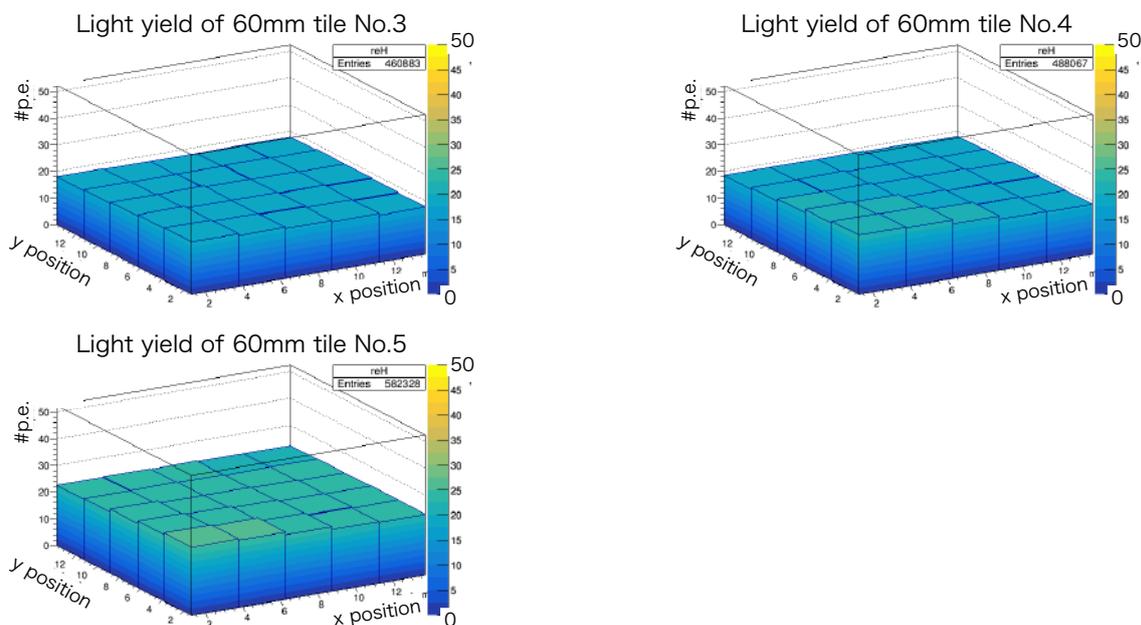


図 3.19 60 mm 角タイルの光量測定結果

3.3 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層 HBU の開発

60 mm 角タイルの性能が実証できたので、60 mm 角タイルを用いた検出層 HBU を製作した。以下ではそのデザインについて述べる。

3.3.1 デザイン

HBU は標準の 30 mm 角タイル用 HBU6 を使用した。タイル中心で MPPC の読み出しを行うとすると、60 mm 角タイルを並べた際に HBU からみ出る部分ができる。現在 HBU は 2 枚ずつ繋げて固定・運搬のためにケースに収納されるが、タイルがはみ出るとケースに収納することができない。そこで図 3.20 のように 30 mm 角タイル 4 枚分のスペースに 60 mm 角タイルを置き、タイル中心からずれた位置に置いた MPPC で読み出す設計を採用した。ただし、今回だけの暫定的な措置で、次回以降専用の基板を製作することになる。またタイルサイズによる光量減少を抑えるために MPPC の有感領域を通常の 1.3 mm 角から 2 mm 角のものに変更した。

3.3.2 MPPC

有感領域 2 mm 角、ピクセルピッチ 25 μm の MPPC が標準品として販売されてなかったため、浜松ホトニクスにカスタム品の製作を依頼した。図 3.21 が 2 mm 角 MPPC の図面、図 3.22 右が完成品の写真で比較のため標準の 1.3 mm 角 MPPC (S13360-1325PE) も載せている。有感領域 1 mm 角、ピクセルピッチ 25 μm の MPPC (S13615-1025) を 4 つ並列接続することで、有感領域 2 mm 角の MPPC を再現した。PDE、ゲイン、ブレイクダウン電圧などの MPPC 特性は S13360-1325PE と同じになっている。

S13615-1025 は Si 貫通電極 Through Silicon Via(TSV) 技術を用いて作られている。TSV とは、シリコン製の半導体チップの内部を垂直に貫通する電極のことであり、従来はワイヤーボンディングで行われる上下のチップ同士の接続を行う。これにより複数のチップを隙間なく敷き詰められ、基板上の占有面積を小さくすることができる。



図 3.20 60 mm 角タイルを用いた HBU のデザイン

作成した 2 mm 角 MPPC はこの技術により、S13360-1325PE のパッケージより縦幅は同じで横幅が少し大きいサイズに収まっている。HBU 上のパッドにそのまま配置することが可能であり、タイルのディンプルを大きくする必要もない。

この 2 mm 角 MPPC を用いることで通常の 1.3 mm 角 MPPC より 2.4 倍の光量増加が期待される。

3.3.3 シンチレータタイル

60 mm 角シンチレータタイルは射出成形を用いて作成された。図 3.23 が 60 mm 角タイルの図面、図 3.24 が完成品の写真である。60 mm 角タイル用の鋳型がなかったため、まず 3 mm 厚の大きなプレートを作成し、それをカット、側面を研磨、ディンプルを削ることで成形を行なった。射出成形の発光材の配合は、先行研究 [20] にて最適だとされる p-Terphenyl (p-TP) を 3%、1,4-Bis (5-phenyl-2-oxazolyl) benzene(POPOP) を 0.1% という混合割合を採用した。

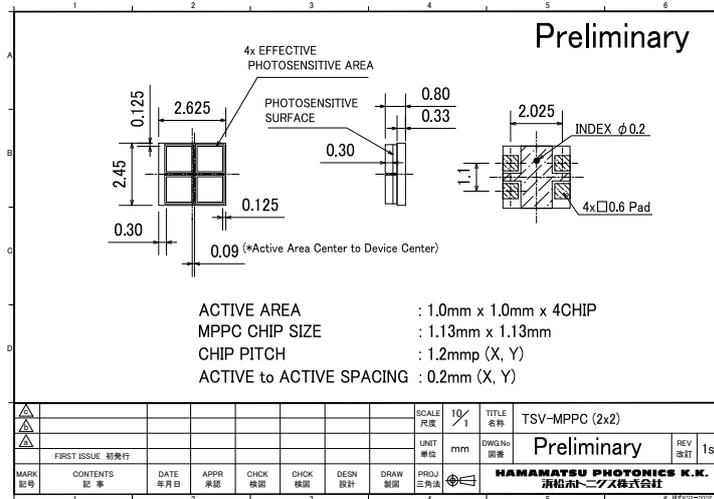


図 3.21 2 mm 角 MPPC の図面

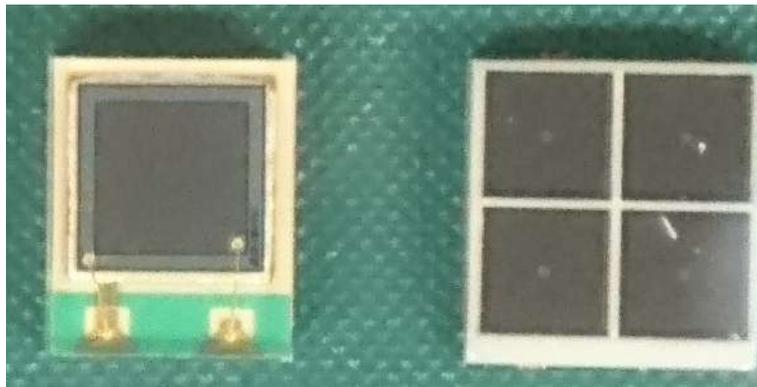


図 3.22 標準の 1.3 mm 角 MPPC(左)と 2 mm 角 MPPC(右)

この PS ベースのシンチレータの光量は市販の PVT シンチレータ (EJ-212) と比べて約 70% になることがわかっている [20]。

3.3.4 中心からずれた位置での読み出しにおける発光量への影響の調査

中心からずれた位置で MPPC の読み出しを行うと、また新たに応答の位置依存性が問題になる可能性がある。そこで節 3.2 と同様の実験を行なった。今回は通常の HBU との整合性を考慮して、MPPC を 1.3 mm 角の S13360-1325PE に付け替えて実験を行なった。また基板による β 線のエネルギー損失を防ぐため、基板の不要部分を切り抜いた。そして図 3.25 のように測定点を取り、測定結果は図 3.26 である。

表 3.3 に示すように、光量は 2 mm 角 MPPC を想定すると十分な光量が得られ、また様な応答も得られている。よって、ずれた位置での MPPC 読み出しは実用上問題ないことが言える。

表 3.3 中心からずれた読み出しの 60 mm 角タイルの光量

	平均光量 1.3 mm 角 MPPC	平均光量 2 mm 角 MPPC の場合の予想	一様性 (RMS)
60mm 角タイル	11.8 p.e.	27.9 p.e.	9.8%

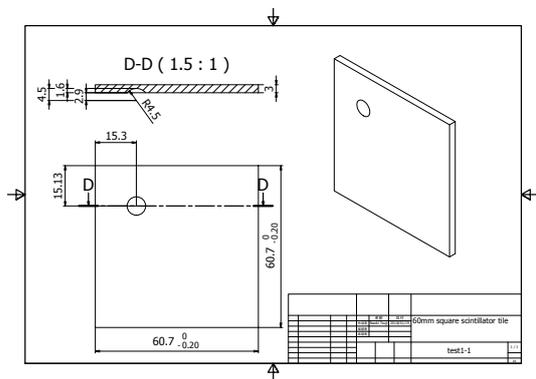


図 3.23 60 mm 角タイルの図面

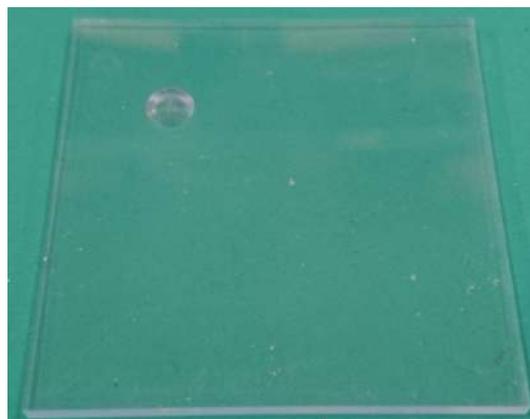


図 3.24 60 mm 角タイル

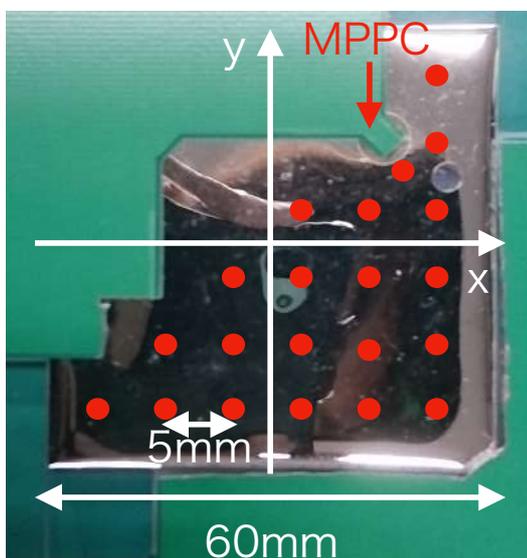


図 3.25 60 mm 角タイルの測定点

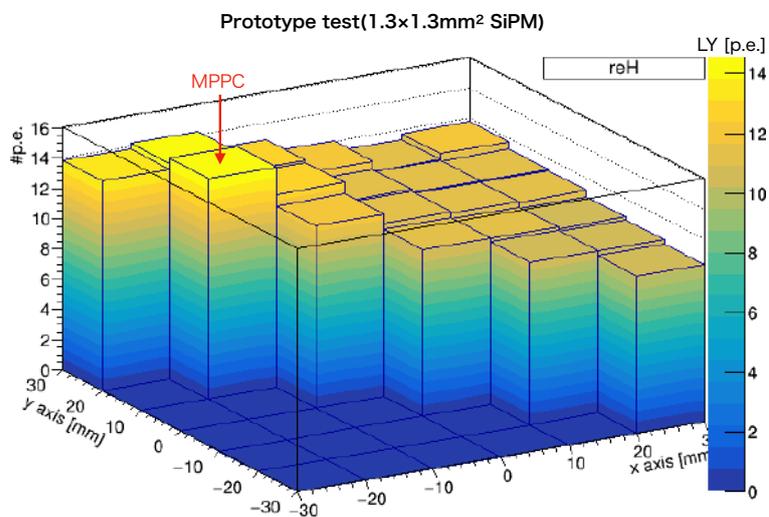


図 3.26 60 mm 角タイルの測定結果

3.3.5 配置、反射材

MPPC は図 3.27 のように隣接する 4 箇所うちの 1 つを用いた。またチャンネル毎に 1 つずつキャリアブレーション用の LED が HBU に埋め込まれているが、使用する MPPC に最も近いものを使う。

反射材としては標準の 30 mm 角タイルに巻かれているものと同じ 3M 社の ESR フィルム [21] を用いた。図 3.28 のように 30 mm 角タイルと同様の構造にし、LED 用の穴も開けている。レーザー加工で裁断し、折り曲げる部分はハーフカットの処理を行なっている。

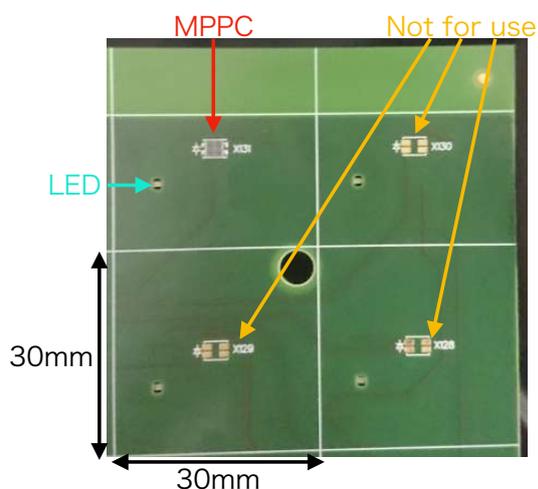


図 3.27 MPPC と LED の配置

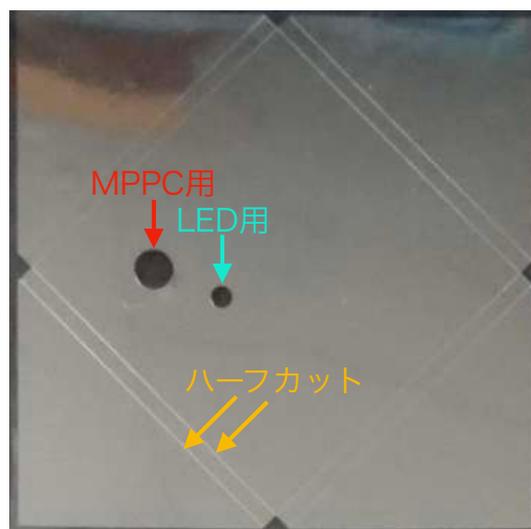


図 3.28 60 mm 角タイル用反射材

3.3.6 アラインメント

HBU の大きさに合わせてアクリル製のフレームを作成し、タイルの配置・整列、HBU との接着を行なった。まず大判のアクリル板を用意し、その上に HBU の大きさに合わせて細長いアクリル棒を固定する。作った枠の中に 60 mm 角タイルを並べる。ディンプルや LED 用の穴を避けてタイル (リフレクタ) 上にドット状に接着剤を塗る。接着剤は通常の HBU 製作時にも用いられる Araldite 2011[27] を使用した。その上に HBU を置く訳だが、HBU には基板の損傷防止と接着時に基板を均等の圧力で整列したタイルに押し付けるためにスペーサーとしてナットを、1 チャンネルに 1 つずつ置いた。その上に大判のアクリル板を置き、重しをして接着剤が固まるまで時間を置いた。完成した 60 mm 角タイルを用いた HBU が図 3.30、3.31 である。

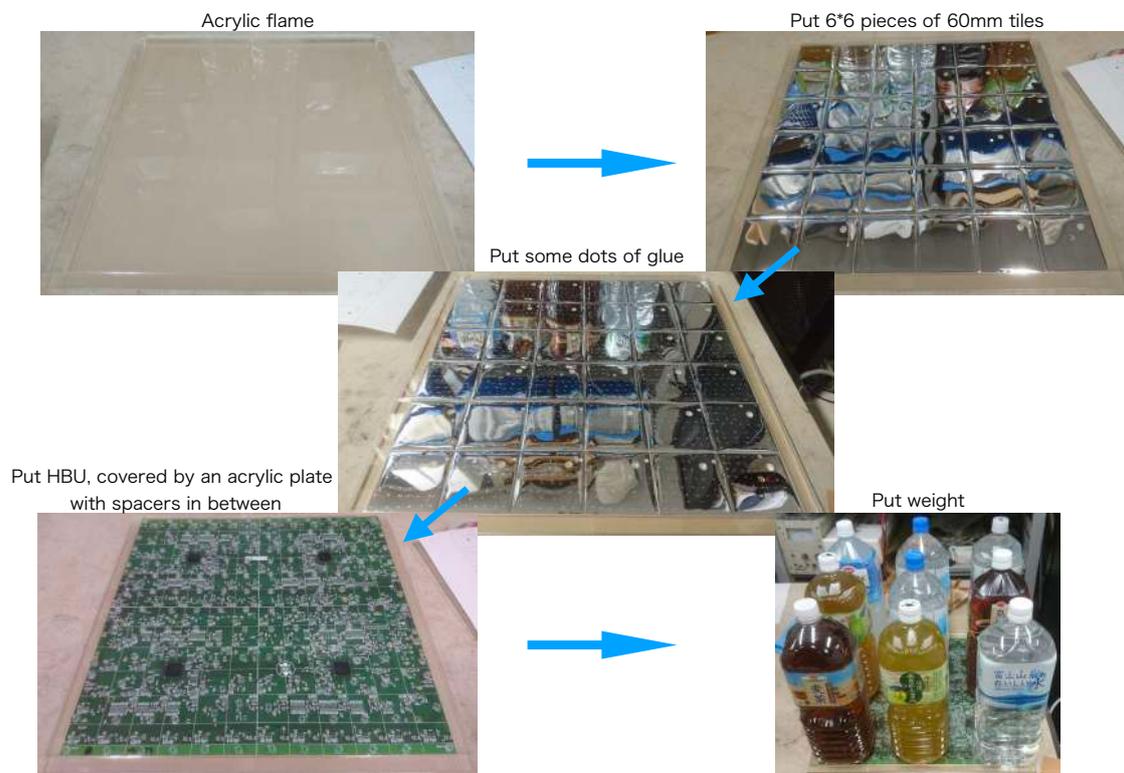


図 3.29 HBU 作成手順



図 3.30 完成した 60 mm 角タイルを用いた HBU の表面

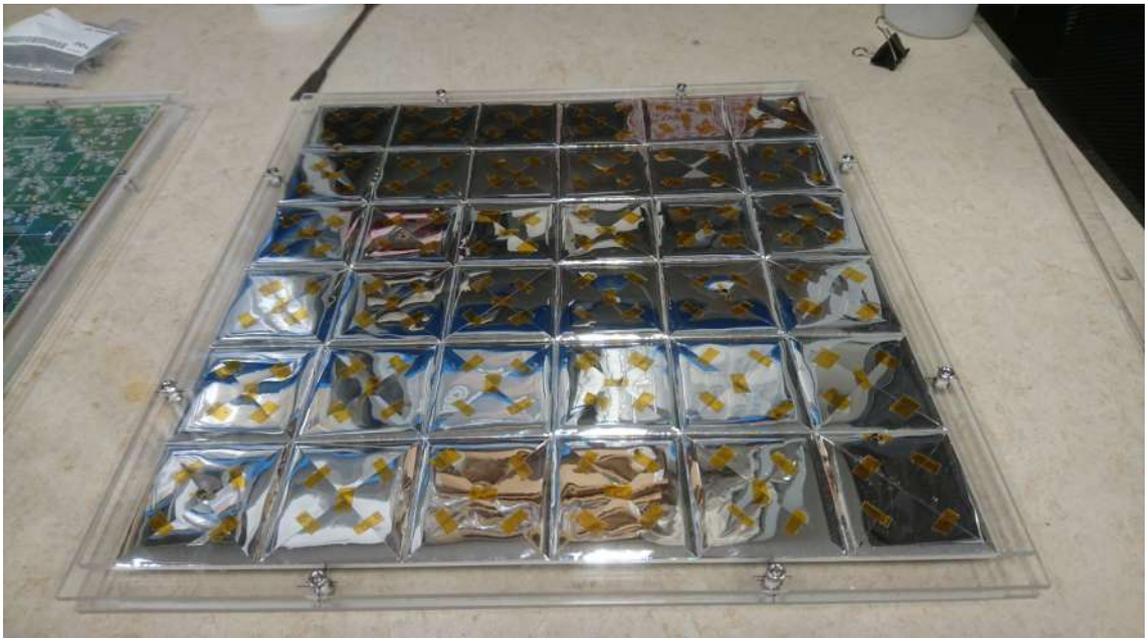


図 3.31 完成した 60 mm 角タイルを用いた HBU の裏面

3.4 大サイズシンチレータを用いた検出層 HBU の動作試験

完成した HBU の動作試験としてゲインと MIP のキャリブレーションを行なった。このとき、MPPC にかけるオーバー電圧は 5 V になるように設定した。

3.4.1 セットアップ

図 3.32 のように完成した HBU に DIF ボードを接続し、DIF ボードに MPPC・ボード用の電源、LDA、CCC を接続した。HBU からのデータは DIF、LDA を介して PC に送信される。



図 3.32 キャリブレーション用セットアップ

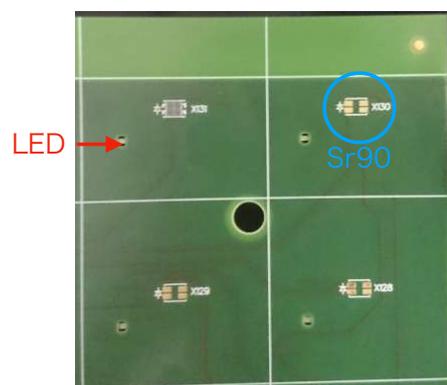


図 3.33 LED と ^{90}Sr の位置

3.4.2 ゲインキャリブレーション

ゲインのキャリブレーションは HBU に搭載されている LED を用いて行なった。LED の電圧を 20 mV ずつ上げていき、適切な電圧値で図 3.34 のようにペDESTALから数光電子分のピークが見られるため、それをマルチガウシアンでフィットすることでゲインを求める。HBU のトリガー機構として外部トリガーと自動トリガーの 2 種類あり、ゲイン測定には外部トリガーを用いた。外部トリガーでは、LED 点灯をトリガーとして全チャンネル DAQ を行う。

図 3.35 が全チャンネルのゲイン測定結果であり、図 3.36 がその分布である。15–20 ADC counts の範囲で分布しており、平均は 16.9 ADC counts である。通常の 30 mm 角 HBU でのゲインが 15 ADC counts ほどなので、十分良い値が得られている。

全チャンネル同一の MPPC を用いており、同一の電圧をかけるように設定している。しかし ASIC ごとに MPPC にかける電圧に差異が見られることがわかっており、そのため HBU のゲインは ASIC 毎に個性がある。図 3.37 は ASIC 毎のゲインの分布であり、ASIC ごとではチャンネル毎のばらつきが小さいことが分かる。一方で全チャンネルを見ると、図 3.35 のように ASIC 毎の個性が見られ、図 3.36 のように幅の広い分布をしている。

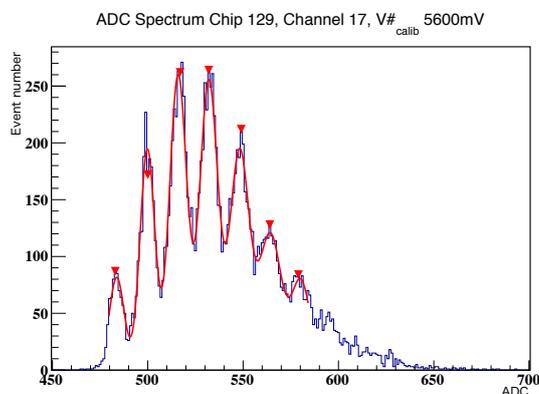


図 3.34 ゲイン測定用の LED データの電荷分布の例

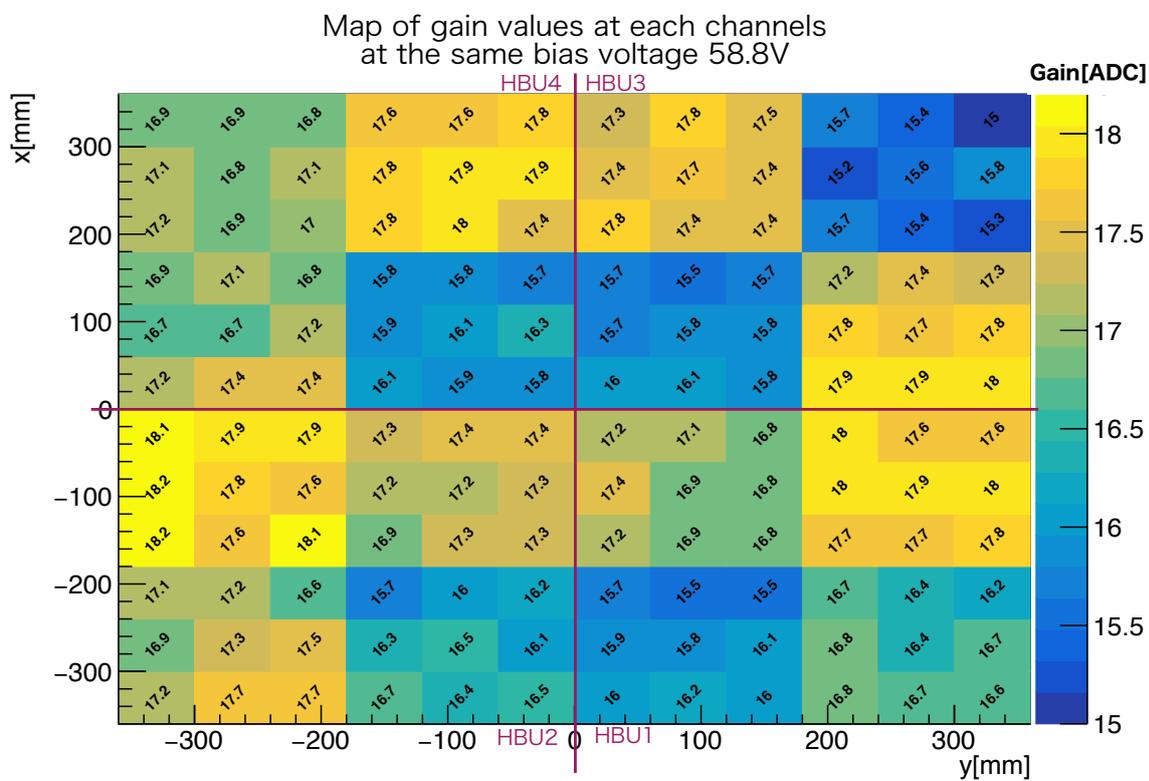


図 3.35 HBU のゲイン測定結果

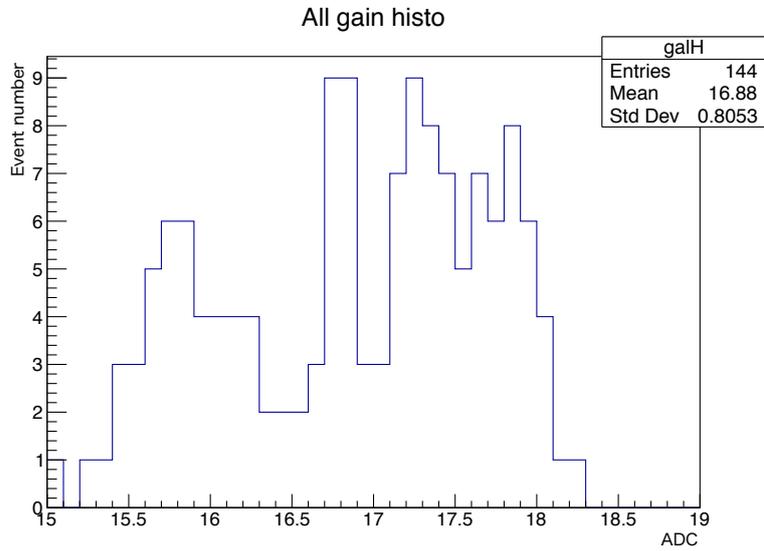


図 3.36 HBU のゲイン分布

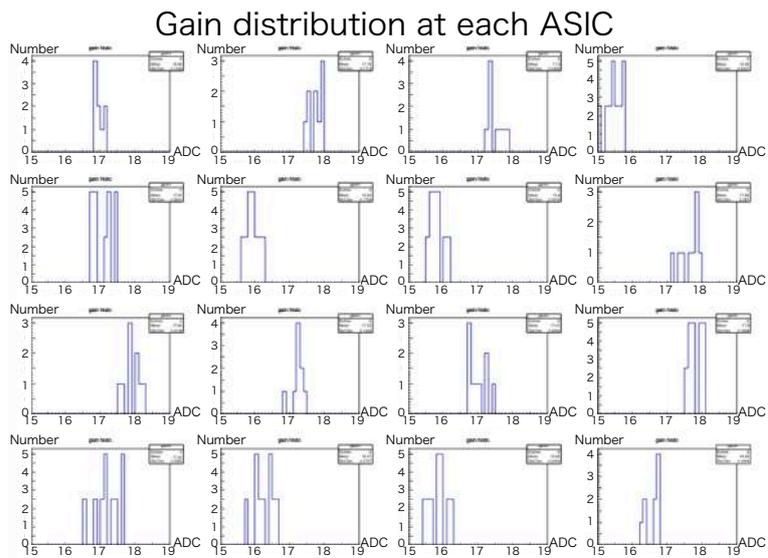


図 3.37 ASIC 毎ののゲイン分布

3.4.3 MIP キャリブレーション

高エネルギーの荷電粒子が物質中を通過すると、物質中の原子とのクーロン相互作用により一定のエネルギーを落とす。このような粒子を最小電離粒子 Minimum Ionizing Particle(MIP) と呼び、シンチレータを扱う実験では 1 MIP 相当の光量を基準として、測定されたエネルギーから荷電粒子の入射数を算出したり、落としたエネルギーとの相関から入射粒子のエネルギーを再構成したりする。

今回光量のキャリブレーションとして放射線源 ^{90}Sr を用いた。 ^{90}Sr 由来の β 線は低エネルギーのものも含んでいるため MIP とは異なる。 ^{90}Sr 由来の β 線と MIP 光量の違いを研究したシミュレーション [20] から、 ^{90}Sr のピークの値を 83% したものが MIP 光量に当たる。また MIP 測定には自動トリガーを用いた。自動トリガーでは、あるチャンネルで閾値 (0.5 MIP ほど) を超えた信号が検出されたら、対応する ASIC がホールドされて信号を読み出しメモリに書き込む。ASIC に蓄積されたデータは定期的に PC に送られる。

^{90}Sr は MPPC の直上から 30 mm 離れた位置 (通常の 30 mm 角タイル用 HBU で言うところの隣のチャンネル) に置き、測定を行なった。図 3.38 のような分布が得られ、600 ADC 付近のカットは HBU のトリガー閾値 (0.5 MIP 相当) によるカットである。ランダウ関数にガウス関数を畳み込んだ関数でフィッティングを行い、そのピーク値をゲインで割ったものをタイルの光量とした。ここで光量は、各チャンネル前節 3.4.2 で測定したゲインを使って算出しているため、ゲインのばらつきの影響は受けない。

図 3.39 が MIP に換算した全チャンネルの光量測定結果、図 3.40 がその分布である。MIP 換算光量は 16–23 p.e. の範囲で分布しており、平均は 19.4 p.e. である。通常の 30mm 角タイルの光量が 15 p.e. ほどなので、十分良い光量が得られていることがわかる。またばらつきも 7% ほどで、十分小さいと言える。

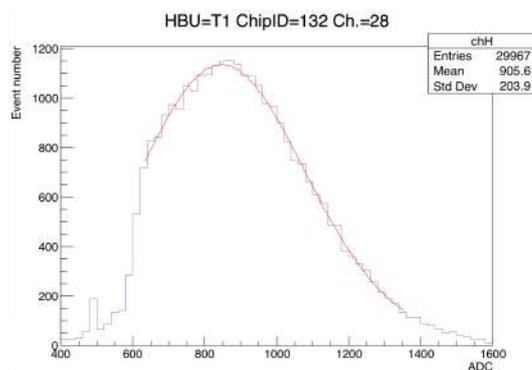


図 3.38 ^{90}Sr 照射時の電荷分布の例

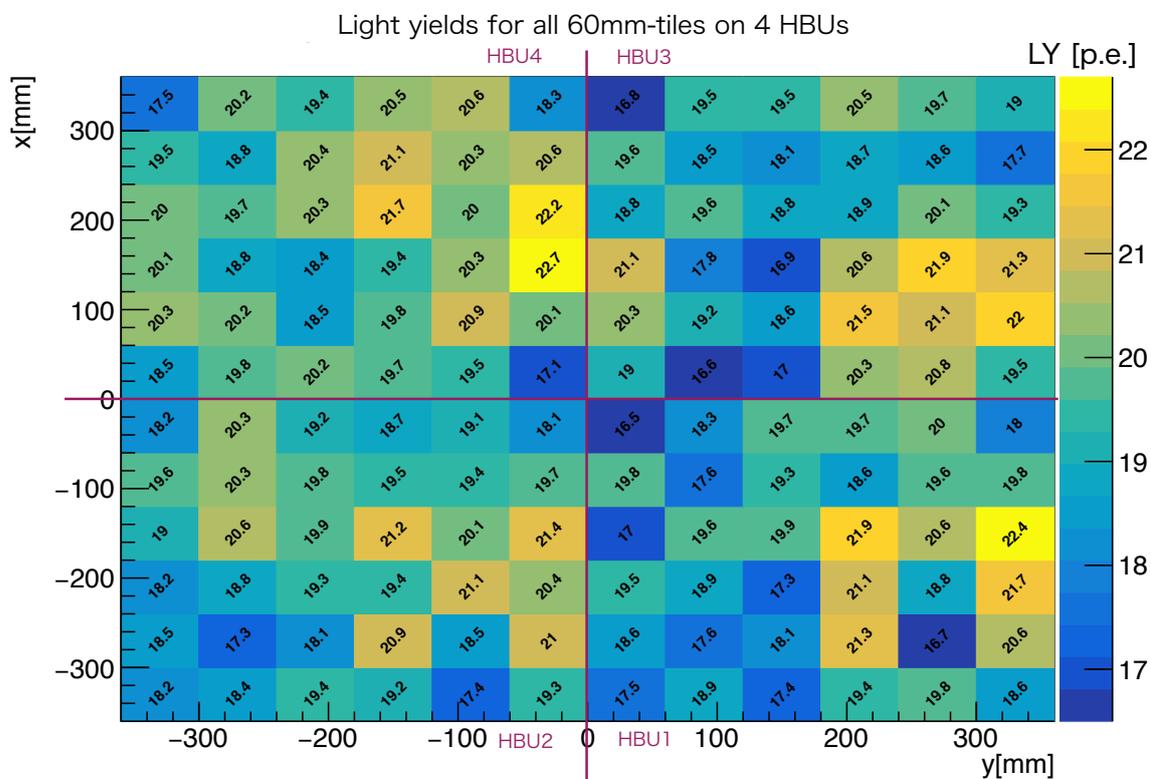


図 3.39 HBU の光量測定結果 (MIP 換算)

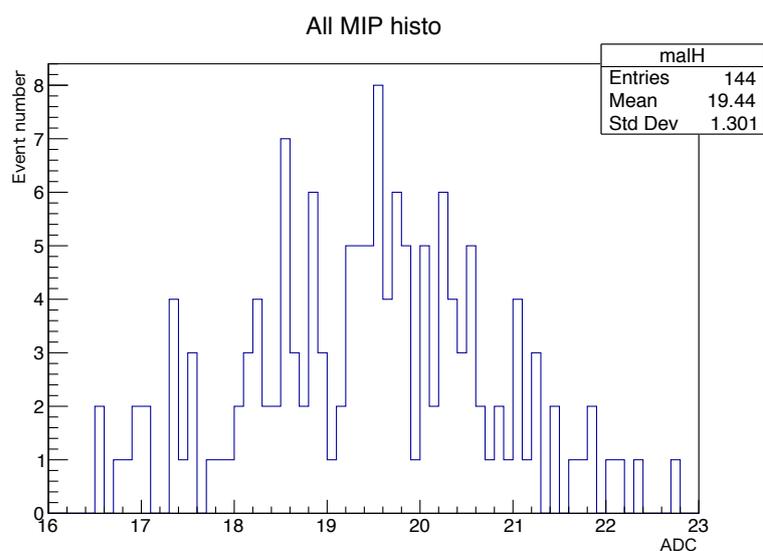


図 3.40 HBU の光量分布 (MIP 換算)

第 4 章

AHCAL 大型試作機におけるテストビーム実験

AHCAL グループでは AHCAL 大型技術試作機を製作し、CERN SPS にてミューオン、電子、パイオンを用いたテストビーム実験を行なった。前章まで 60 mm 角タイトルの議論を続けてきたので、この章では 60mm 角タイトルを用いた検出層の性能評価についても述べる。

4.1 AHCAL large technological prototype(AHCAL 大型技術試作機)

吸収層として鉄とタングステンを用いた物理試作機が開発され、テストビーム実験において、PFA を導入した AHCAL としてのコンセプトが実証された [28]。AHCAL グループでは現在、実機での使用を想定して開発した技術を全て搭載した、実機サイズに拡張可能な大型技術試作機の研究開発を進めている。

4.1.1 AHCAL physics prototype(AHCAL 物理試作機)

まず大型技術試作機の前身である物理試作機について述べる。物理試作機の大きさは約 1 m^3 である。読み出しエレキは検出層に組み込まれておらず、図 4.1 のように、キャスト成形により製作されたシンチレータタイトルの波長変換ファイバー WaveLength Shifting (WLS) fiber と SiPM で読み出している。2006 年から 2012 年にかけて、DESY、CERN、Fermilab にて電子、ミューオン、ハドロンのビームを用いたテストビーム実験が行われた。主な目的は電子 [29] とハドロン [30] のエネルギー分解能を測定することである。物理試作機の持つ高い精細度と優れたエネルギー分解能により、ハドロンシャワーの詳細な研究が可能となり [31]、特に GEometry ANd Tracking(Geant4) を用いたハドロンシャワーのシミュレーションの検証に貢献した。図 4.2 はテストビーム実験結果から得たビーム軸方向のシャワープロファイルを Geant4 シミュレーションと比較したものである [32]。図 4.3 では、ビーム実験で観測されたパイオンシャワーとの比較から、PandoraPFA の性能評価を行なっている [33]。どちらも実験データを Geant4 シミュレーションで上手く再現できていることがわかる。よって、FTFP_BERT や QGSP_BERT といった物理リスト^{*1}を用いた Geant4 シミュレーションでテストビーム実験データの正当性・再現性を確認し、AHCAL のコンセプトとして十分な性能が実証された。

^{*1} 物理リストとは Geant4 シミュレーションに必要な、粒子の種類やそれぞれの粒子が持つ物理プロセス、エネルギー範囲などのユーザー設定のことである。FTFP_BERT、QGSP_BERT はどちらもハドロンプロセスを設定し、FTFP_BERT は Eritof モデルを [34]、QGSP_BERT はクォーク・グルーオン弦模型を使用した物理リストである [35]。

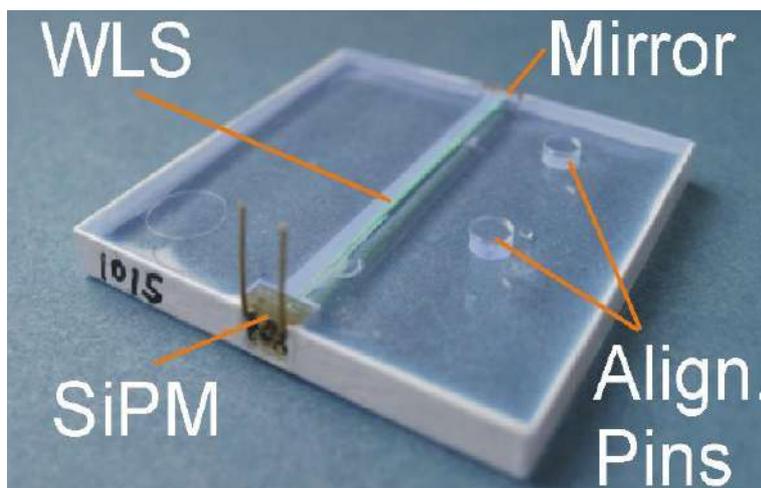


図 4.1 WLS ファイバーと SiPM で読み出す構造のシンチレータタイル [28]

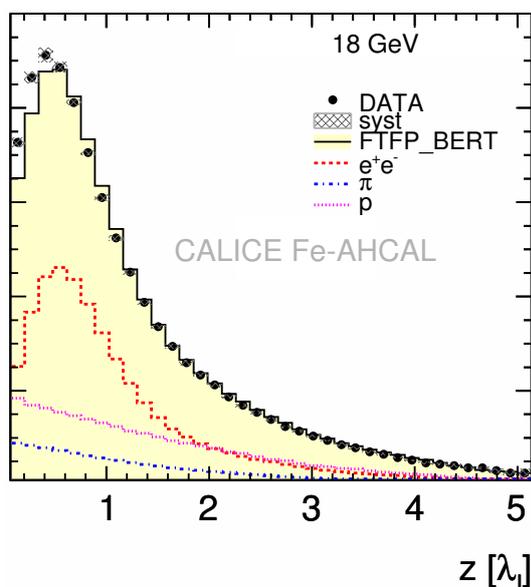


図 4.2 ビーム軸方向のシャワープロファイル [32]。18 GeV パイオンのテストビームデータと、FTFP_BERT の物理リストを用いた GEANT4 のシミュレーションデータ。

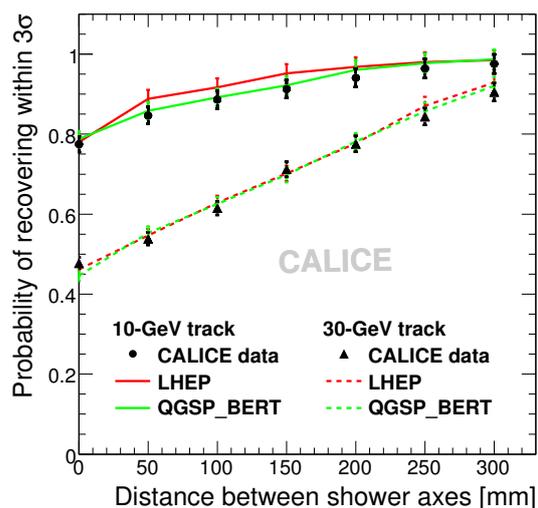


図 4.3 3σ 以内での中性ハドロンエネルギーの再現率 [33]。テストビームデータと、2つの物理リストを用いた GEANT4 シミュレーションデータ。

4.1.2 目的

AHCAL 大型技術試作機の大きな目的の 1 つは、物理試作機において実証された AHCAL のコンセプトを元に ILD 検出器の実機サイズへと拡張可能な形の検出器設計を完成させることである。AHCAL は MPPC を用いた検出器としては最大規模のものとなり、また PFA の要求する高い精細度を実現しなければならない。そのため MPPC を用いた検出層の生産性を大型試作機にて確認する。

さらに大型試作機では大量のチャンネルや DAQ を制御することも想定している。AHCAL では 1000 channel/m² という大量・高密度のチャンネルを制御する必要がある。さらに温度による MPPC の特

性的変化を補正する能動的な温度補償、データ取得時のみ電源供給を行うパワーパルシングなどの機能も採用されている。これらの実機レベルの制御・運用も大型試作機にて検証する。

物理的な観点としては、シャワーの大部分を捉えられる大きさであるため、シャワーの 5 次元 (空間、エネルギー、時間) 的な発展を調べることができる。このように物理試作機をさらに実機スケールに拡張した大型技術試作機を用いて、PFA を採用したカロリメータとしての性能を実証する。

4.1.3 構造

図 4.4 は大型試作機の概観図、図 4.5 は製作工程と担当する研究機関を示している。DESY を中心として、ドイツ、ロシア、日本の各研究機関で研究された技術を統合して建設が進められた。HBU の製作、回路や MPPC の半田付けは DESY で行われ、計 160 枚の HBU、40 セットの DIF インターフェース、120 の flexlead が製造された。シンチレータタイルの製造はモスクワ (ロシア) で射出成形を用いて計 28,000 枚作成された。PS ベースのシンチレータであり、発光材としては 1,4-Bis (5-phenyl-2-oxazolyl) benzene(POPOP) のみを用いている。反射材のタイルへのラッピングはハンブルク (ドイツ)、タイルのアセンブリ・HBU への貼り付けはマインツ (ドイツ) で行われた。こうして製作された HBU は LED でのゲイン測定や、東京大学が開発した宇宙線テストスタンド [23] を用いて宇宙線の観測などの動作試験が行われた。

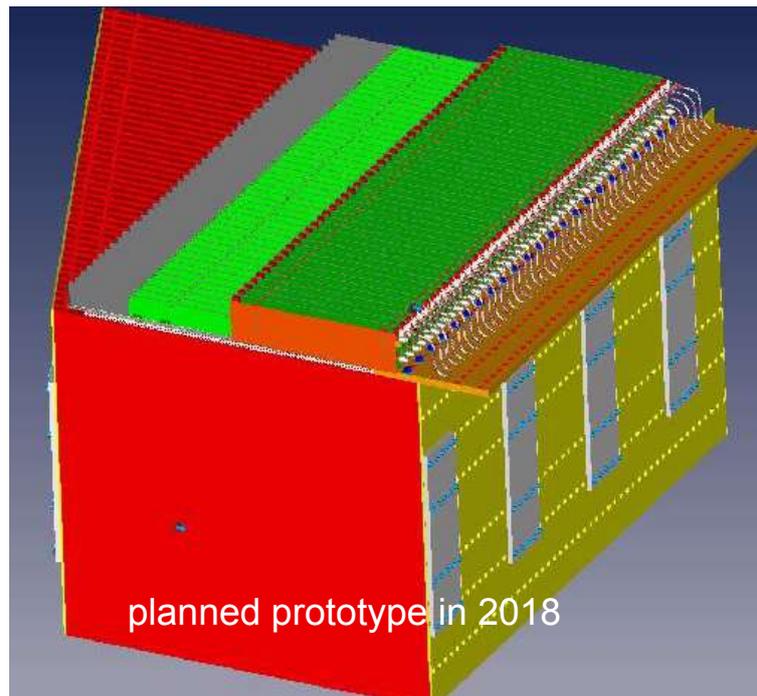


図 4.4 大型技術試作機の概観図

製造・動作試験の後、2×2 枚の HBU を 1 層として 38 層の検出層を鉄製のスタックに差し込んで完成となる。検出層と並行して読出しエレキの開発も進められており、38 層の検出層を制御・DAQ を行うためのボードが開発された。図 4.6 が完成した大型試作機の写真であり、鉄の吸収層と検出層 HBU のサンドイッチ構造が分かり、下部には読出しエレキが写っている。

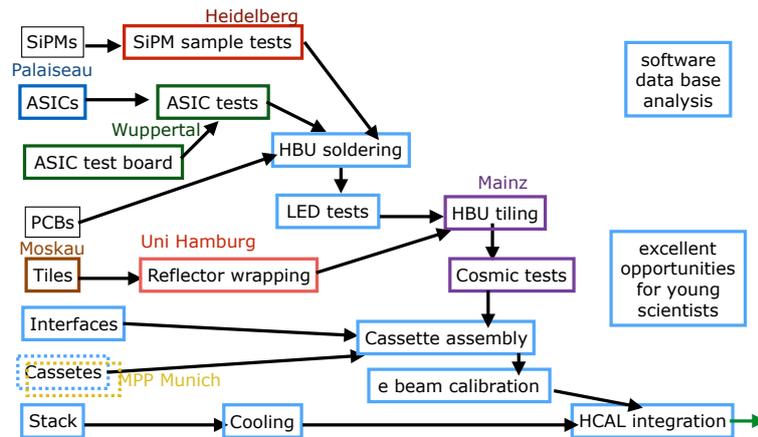


図 4.5 大型試作機の製作工程



図 4.6 完成した大型試作機。検出層の HBU と鉄の吸収層がサンドイッチ状に配置されている。

4.2 CERN SPS におけるテストビーム実験

AHCAL 大型技術試作機は 5 月の 2 週間、6 月から 7 月にかかる 1 週間、CERN の SPS にてテストビーム実験が行われた。ミュオン、電子、ハドロン of ビームを照射し、その応答を確かめた。本章では各テストビーム実験の概要から、その解析結果、特に我々が開発した 60 mm 角タイルを用いた HBU について述べる。

4.2.1 Super Proton Synchrotron(SPS)

SPS は図 4.7 にあるように、CERN の加速器群の中で 2 番目に大きな加速器である。円周は 7 km で、上流の Proton Synchrotron(PS) から加速粒子を引き継ぎ、下流の Large Hadron Collider(LHC) にビームを提供する。SPS は 744 個のダイポールマグネットを含む 1317 個の常温電磁石が配置されており、450 GeV まで加速可能である。また電子や陽電子、陽子や反陽子など様々な種類の粒子を扱うことができる。

今回のテストビームには CERN 北エリアの EHN1/SPS にある H2 ビームライン (図 4.8) を用いた。北エリアでは SPS のビームそのものはもちろん、上流でターゲットに当てて生成した二次粒子のビームを使用することができる。ビームの最大運動量は 400 GeV/c、二次粒子ビームの運動量は 10~400 GeV/c である。このように様々な粒子種やエネルギーを扱うことができる。

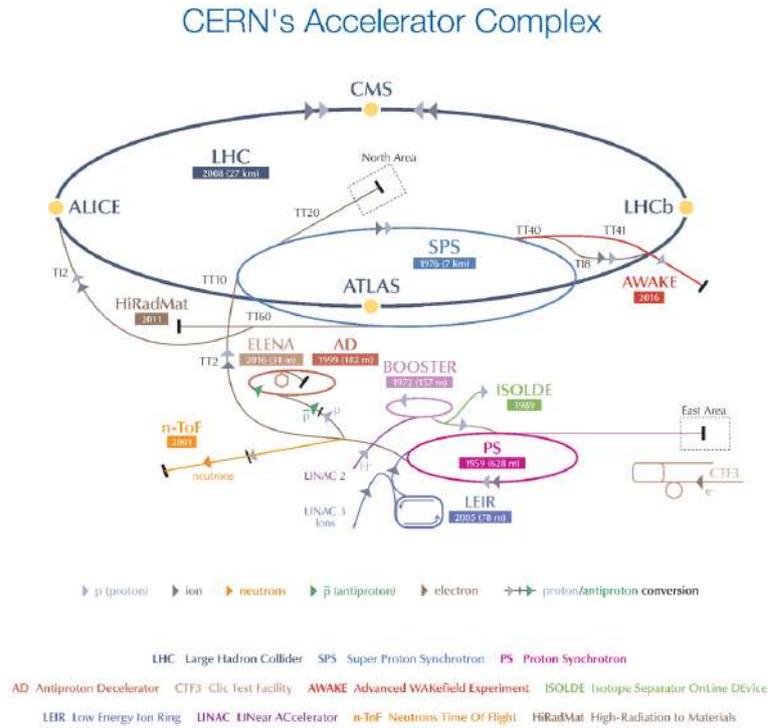


図 4.7 CERN の加速器の概要 [36]

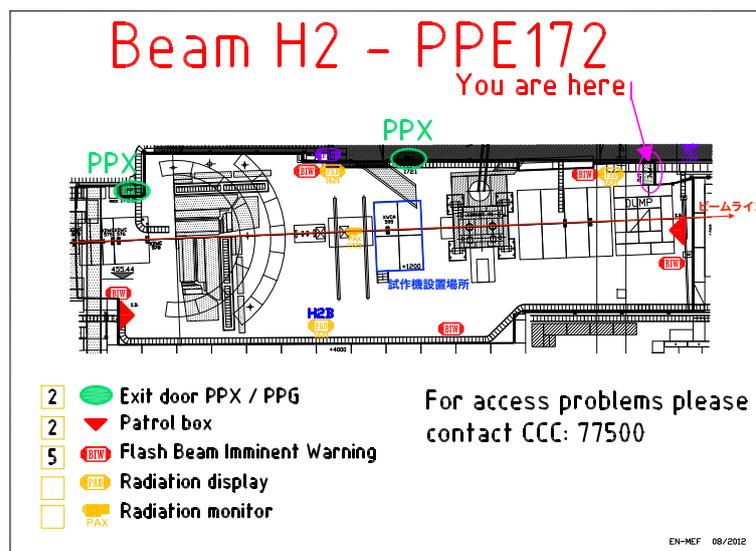


図 4.8 EHN1/SPS の H2 ビームライン [36]。赤矢印がビームラインで、青枠が大型試作機を設置した可動ステージ。

4.2.2 テストビーム実験セットアップ

図 4.9 は 5 月のテストビーム実験のセットアップである。可動ステージの上に大型試作機が置かれ、右側からビームが入射する。2×2 枚の HBU、72×72 cm² の検出層 38 層が、1.7 cm の鉄の吸収層の間に挿入されている。またエレキの冷却のために水冷によるクーリングシステムが取り付けられている。ビームの上流にはビームの位置や角度を測定するためのワイヤーチャンバー、トリガーシンチレータ、チェレンコフディテクターが置かれている。

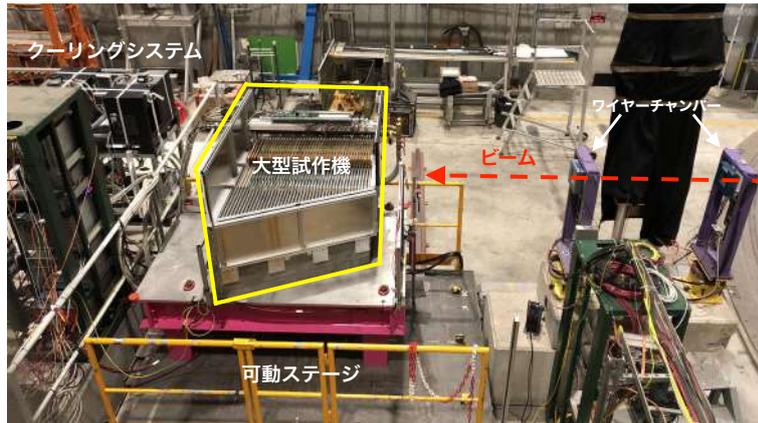


図 4.9 テストビーム実験セットアップ (5 月)。大型試作機 (黄枠) が可動ステージの上に置かれている。ビームは右側から入射し、紫色の検出器は備付のワイヤーチャンバーである。

図 4.10 は 6-7 月のテストビーム実験のセットアップである。5 月のセットアップに加え、ビーム上流側にプリシャワーディテクター (図 4.11)、下流側にテイルキャッチャー (4.12) が取り付けられた。プリシャワーディテクターは、試作機に入射する前にシャワーになったイベントを除くため、試作機の前面に HBU1 枚が貼り付けられている。テイルキャッチャーは 1 枚の HBU を検出層として 12 層、7.4 cm の鉄の吸収層の間に挿入されている。

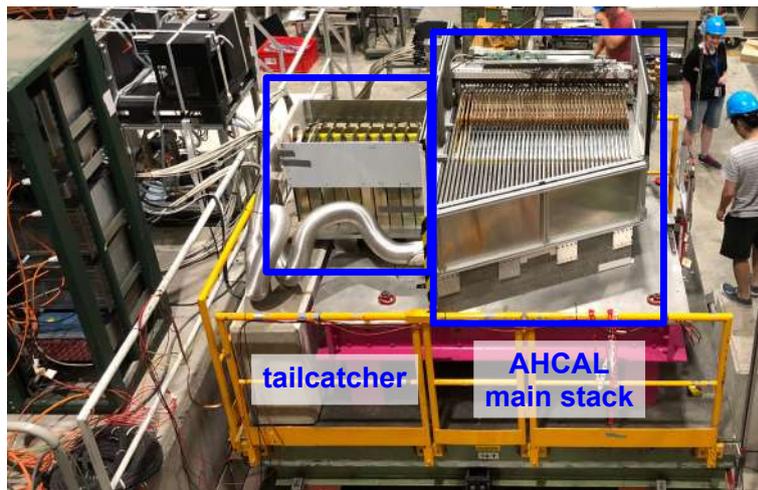


図 4.10 テストビーム実験セットアップ (6-7 月)[37]

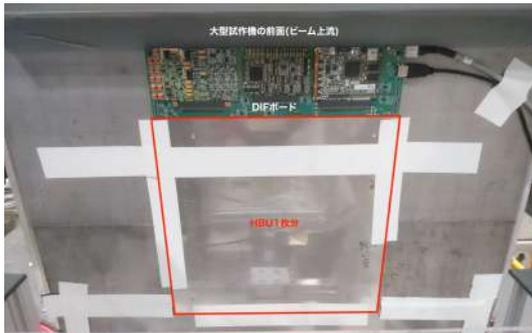


図 4.11 プリシャワーカウンター。HBU1 枚が試作機の前面 (ビーム上流) に貼り付けられている。



図 4.12 テイルキャッチャー。HBU1 枚を検出層、7.4 cm の鉄を吸収層として、12 層からなる。

4.2.3 60 mm 角タイルを用いた HBU の挿入

6-7月のセットアップにおいて、図 4.13 のように 60 mm 角タイルを用いた 2×2 枚の HBU が、試作機の 38 層目に挿入された。この HBU は東京モジュールと呼ばれ、以下本論文でもこの名称を使用する。



図 4.13 中央の Tokyo Module と書かれているのが、挿入された 60 mm 角タイルを用いた HBU(東京モジュール)

使用されない 4 分の 3 のチャンネルには電圧がかからないように設定している。今回はサチュレーションを起こしにくくするために、東京モジュールの MPPC にかかるオーバー電圧は節 3.4 の時より低い 4 V に設定した。それ以外の設定は標準の 30 mm 角タイル用 HBU と同じとなっている。

4.3 テストビーム実験内容

4.3.1 データ

5月、6-7月のテストビーム実験にて取得したデータを以下にまとめる。

1. ミューオン

- エネルギー：40, 120 GeV
- パワーパルシング：ON/OFF

- ポジションスキャン
- ポジションあたり 300,000 イベント

2. 電子

- エネルギー：10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 GeV
- パワーパルシング：ON/OFF
- エネルギーあたり 200,000-400,000 イベント

3. 負パイオン

- エネルギー：10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 160, 200 GeV
- パワーパルシング：ON/OFF
- エネルギーあたり 400,000-600,000 イベント

ミューオンに関しては、全チャンネルのキャリブレーションを行うために、ステージを動かしてビーム軸をずらしながらポジションスキャンを行った。パイオンに関しては、2粒子分離の研究のために、ビーム軸を中心からずらした位置でのデータ取得も行なっている。またビーム使用不可の時間帯に、ゲインキャリブレーション用の LED でのデータ取得を行った。これらを合計して 5,000 万イベント以上のデータを取得した。

またトリガーとしては、テストビームによるデータ取得の際は自動トリガー、LED でのデータ取得の際は外部トリガーを用いている。多層構造の際の自動トリガーは基本的には節 3.4.3 と同じだが、ASIC に蓄積されたデータは定期的に全層まとめて PC に送られる。

4.3.2 パラメータ

測定した ADC から MIP 数に換算するためには様々なキャリブレーション定数が必要となる。キャリブレーション後の MIP 換算のエネルギー E_{hit} は以下の式で計算される。

$$E_{hit} = f_{sat}(pixel) \cdot \frac{(ADC - Pedestal) \cdot IC}{Gain[ADC]} \quad (4.1)$$

$$pixel = \frac{(ADC - Pedestal) \cdot IC}{Gain[ADC]} \quad (4.2)$$

$$f_{sat}(pixel) = 1 \text{ for } pixel \ll N_{max,pixel} \quad (4.3)$$

$f_{sat}(pixel)$ は MPPC のサチュレーションの関数、ADC は測定した ADC の値、Pedestal はペDESTAL の ADC 値、IC はインターキャリブレーションの値*2、MIP は 1 MIP 分の ADC 値である。

次に再構成後のパラメータとして、本研究で主に使用するもの説明する。hitEnergy は式 4.1 で表される、タイル 1 ヒットあたりの MIP 換算エネルギー E_{hit} である。energySum は hitEnergy を検出器全体で足し上げた合計値である。nHits は検出器全体での総ヒット数である。cogZ はビーム軸 (Z 軸) 方向での重心 center of gravity(cog) で、

$$cogZ = \frac{\sum_{i=1}^{nHits} z_i \cdot E_{hit,i}}{\sum_{i=1}^{nHits} E_{hit,i}} = \frac{\sum_{i=1}^{nHits} z_i \cdot E_{hit,i}}{energySum} \quad (4.4)$$

と計算される。

*2 SPIROC2E は低ゲイン用と高ゲイン用の 2 つの増幅器が存在し、ADC が低い場合は増幅率の大きいロウゲイン用で、ADC が高い場合は増幅率が小さいハイゲイン用で扱う。インターキャリブレーションはその補正を行うためのパラメータである。

4.3.3 イベントディスプレイ

図 4.14 は 6-7 月のテストビーム実験で取得した 100 GeV 電子の、 cogZ 対 nHits の分布を示したもので有る。またプリシャワーカウンターとテイルキャッチャーのヒットは除外し、大型試作機本体のヒットのみカウントしている。電子ビーム中にもパイオンやミュオンが混合しており、それぞれの分布が見て取れる。

図 4.15 はミュオンのイベントディスプレイである。ミュオンは MIP として試作機を貫通する。イベントディスプレイにはプリシャワーカウンターとテイルキャッチャー、東京モジュールも適用されている。各層 1 チャンネルずつのヒットが見られるが、東京モジュールはヒットしたタイルの大きさが $60 \times 60\text{mm}^2$ ($30 \times 30\text{mm}^2$ の 4 倍) となっているのが分かる。図 4.14 中下の赤円のように、ヒット数が試作機の層数 (~ 40) ほどであり、試作機の中央付近に重心がある ($400\sim 700\text{mm}$)。

図 4.16 は電子のイベントディスプレイである。電子のシャワーはシャワー長が短くシャワー径が小さい、密なシャワーとなる。よって図 4.14 中左の赤円のように、ヒット数はある程度あり (~ 300)、試作機の前半 ($\sim 300\text{mm}$) に重心がある。

図 4.17 はパイオンのイベントディスプレイである。パイオンのシャワーはシャワー長が長くシャワー径が大きい、疎なシャワーとなる。よって図 4.14 中上の赤円のように、ヒット数は多く ($400\sim 700$)、試作機全体に渡って重心が位置している。また図 4.18 のようにシャワーが発生するのが遅く、試作機の後半でシャワーを作ったり貫通してテイルキャッチャーでシャワーを作るパイオンも存在する。そのため図 4.14 のパイオンの分布は cogZ の大きい方にテイルを形作る。

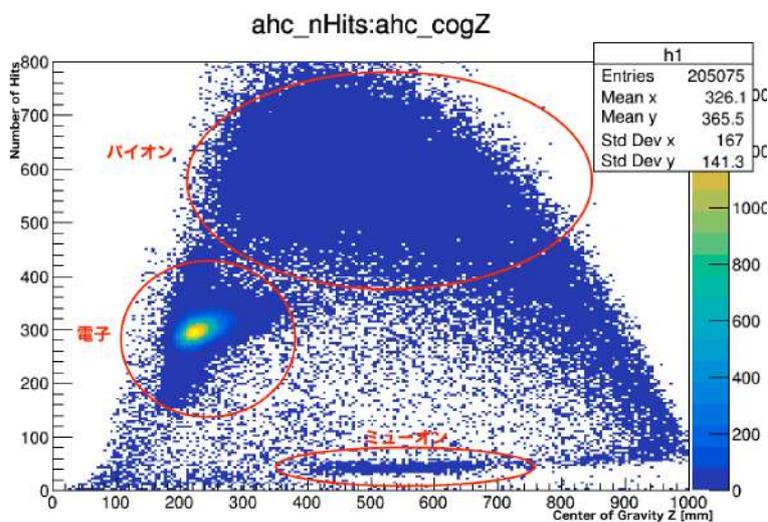


図 4.14 cogZ 対 nHits の分布。100 GeV 電子 (6-7 月)、大型試作機本体のみのヒット (プリシャワーカウンターとテイルキャッチャーのヒットは除外)。

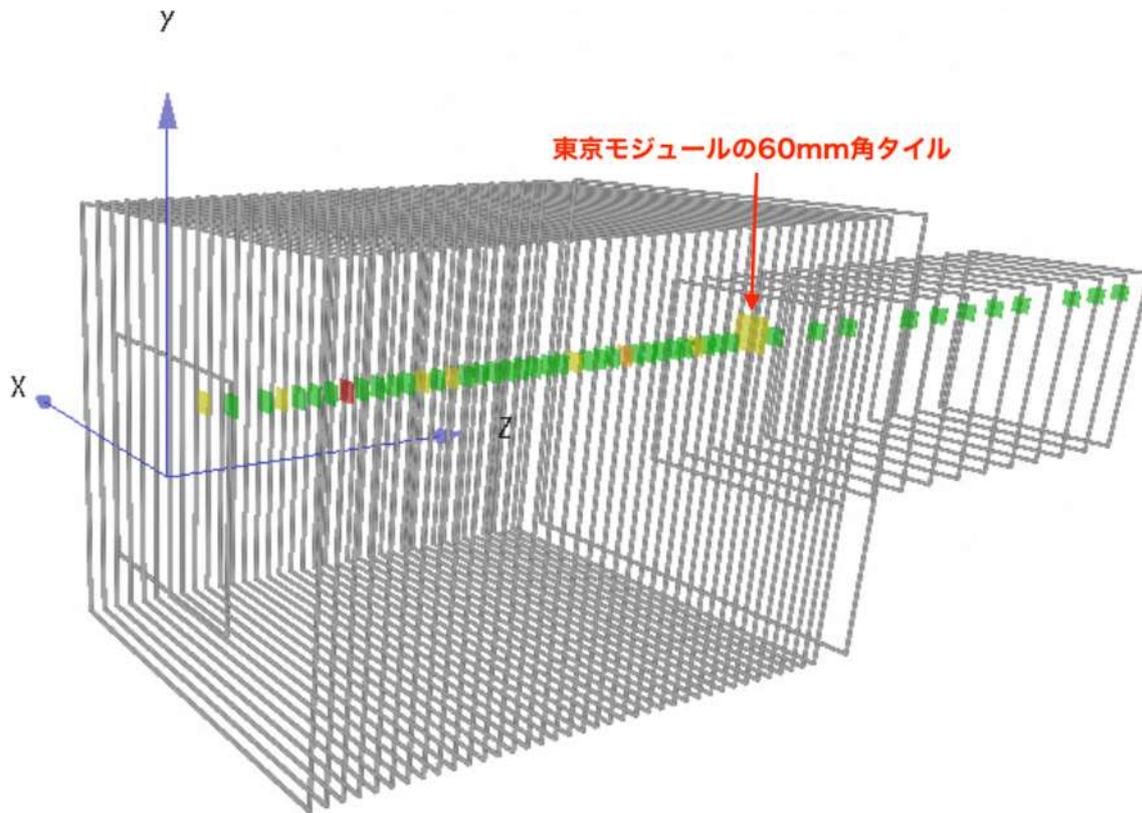


図 4.15 ミューオンのイベントディスプレイ

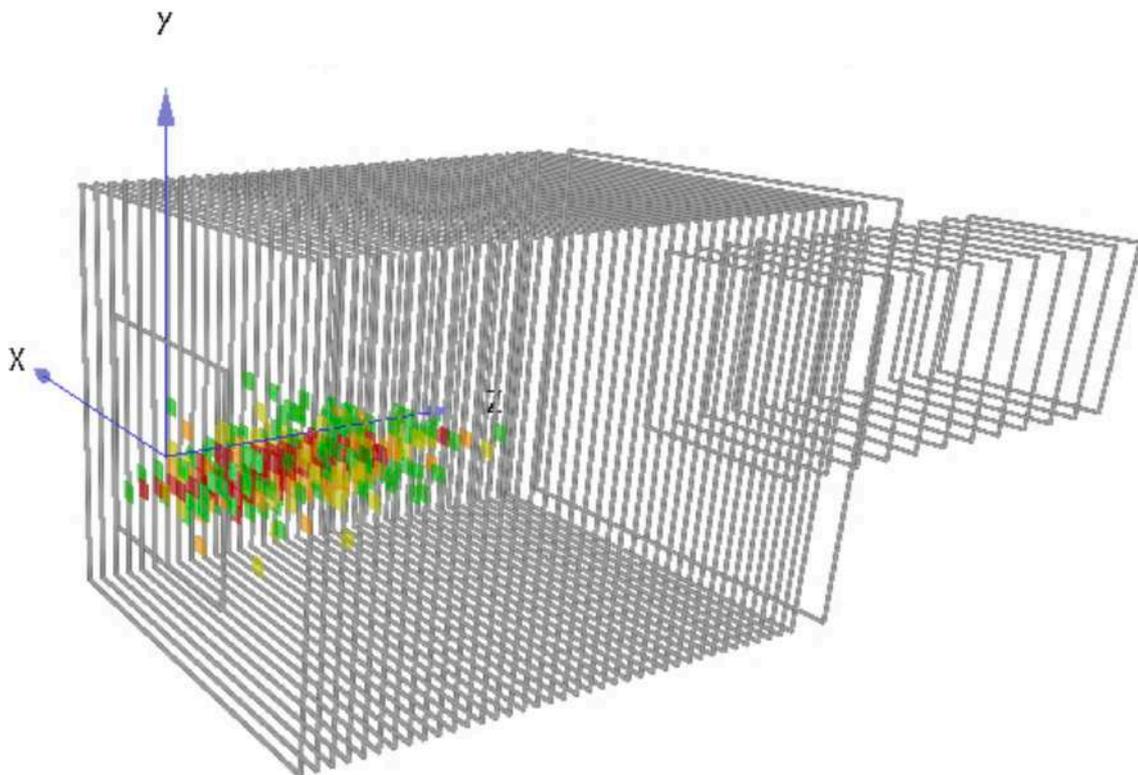


図 4.16 電子のイベントディスプレイ

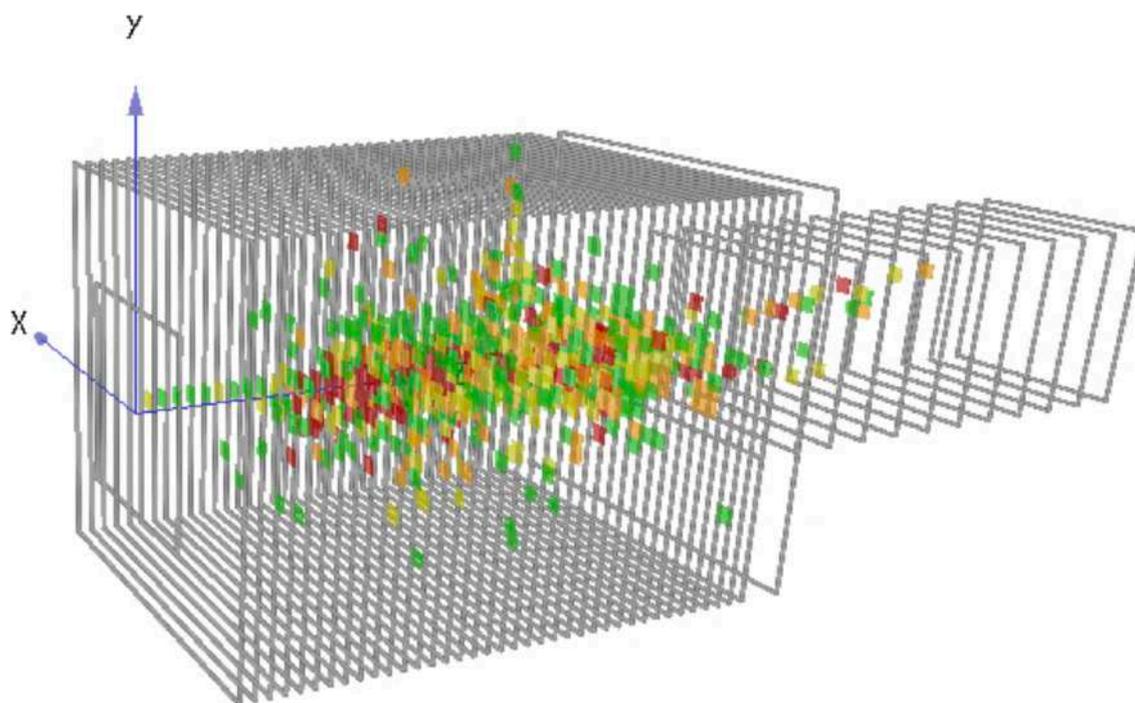


図 4.17 パイオンのイベントディスプレイ

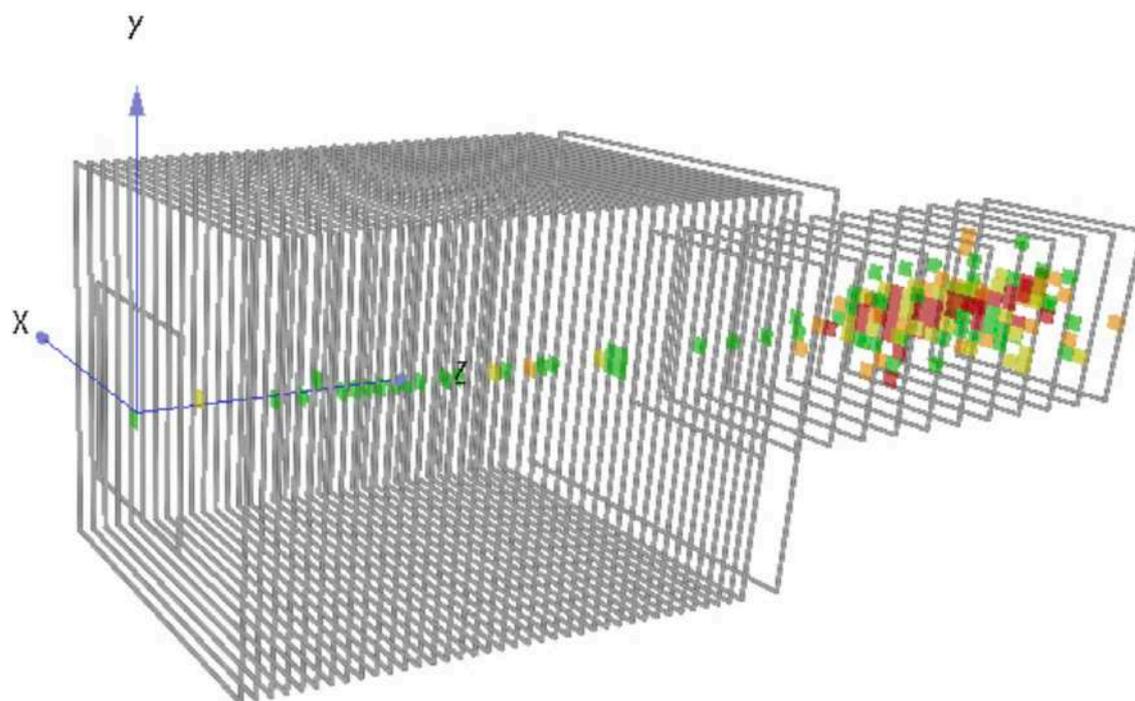


図 4.18 試作機を貫通してテイルキャッチャーでシャワーを作るパイオンのイベントディスプレイ

4.4 パワーパルシングの ON/OFF による応答の違いの調査

5月のテストビーム実験では、パワーパルシング ON/OFF それぞれの設定でミューオン、電子、パイオンのデータを取得した。パワーパルシングが ON の場合はデータ取得時以外 DAQ に電源供給がされないため、検出器の温度は低くなる。一方でパワーパルシングが OFF の場合は常時電源供給がされているので検出器は排熱により熱せられたままである。MPPC の特性には温度依存性があるので、パワーパルシング ON/OFF でブレークダウン電圧などの特性が変わってしまう。また温度の変動とは別に、読み出しエレキの挙動に違いが生じる可能性がある。よってパワーパルシングの影響、挙動について調査・検証する必要がある。

本節では5月のデータの解析結果から、パワーパルシング ON/OFF での応答の違いについて報告する。

4.4.1 キャリブレーション [38]

パワーパルシングによる温度変化や読み出しエレキの挙動の変化により、ゲイン、ペDESTAL、MIP の値に影響が生じる。ゲインはビームテストではなく LED を用いてパワーパルシング OFF の状態でしか取得していないので、今回はペDESTALと MIP のキャリブレーションについて報告する。キャリブレーションは主に 40 GeV のミューオンのデータを用いて行う。5月のテストビーム実験ではパワーパルシング ON/OFF それぞれで、6-7月には ON にしてミューオンのデータを取得した。それぞれ全チャンネルでキャリブレーションができるように可動ステージを動かして、18ヶ所を 500,000 イベントずつ走査した。

ペDESTALキャリブレーション

ペDESTALキャリブレーションは図 4.19 のように、ミューオンが入射しなかったチャンネルの ADC の平均値をそのチャンネルのペDESTAL定数に設定する。図 4.20 では、パワーパルシング ON/OFF それぞれでキャリブレーションを行い、それぞれのチャンネルに関してその差 (No PP - PP) を取ったものである。平均して 1.4 ADC だけパワーパルシング OFF 時の方がペDESTAL定数が大きいことがわかる。よって、パワーパルシング ON/OFF で使用するペDESTAL定数を変える必要がある。

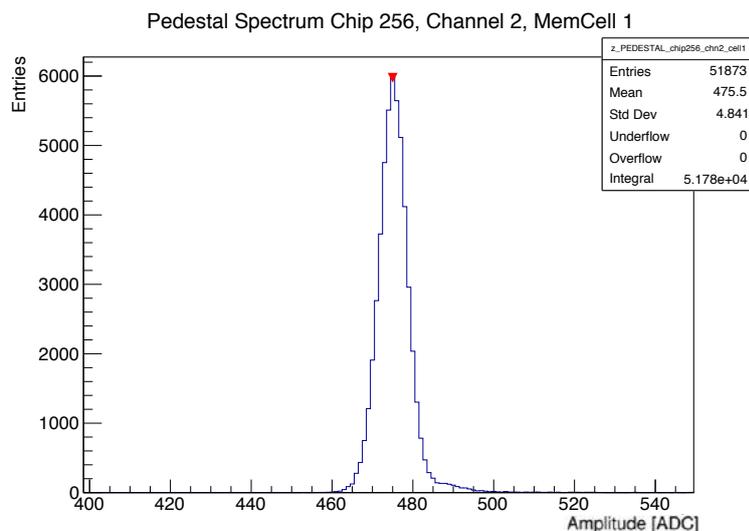


図 4.19 ペDESTALキャリブレーションの例 [38]。ここでのペDESTAL定数 (平均値) は 475.5 ADC となる。

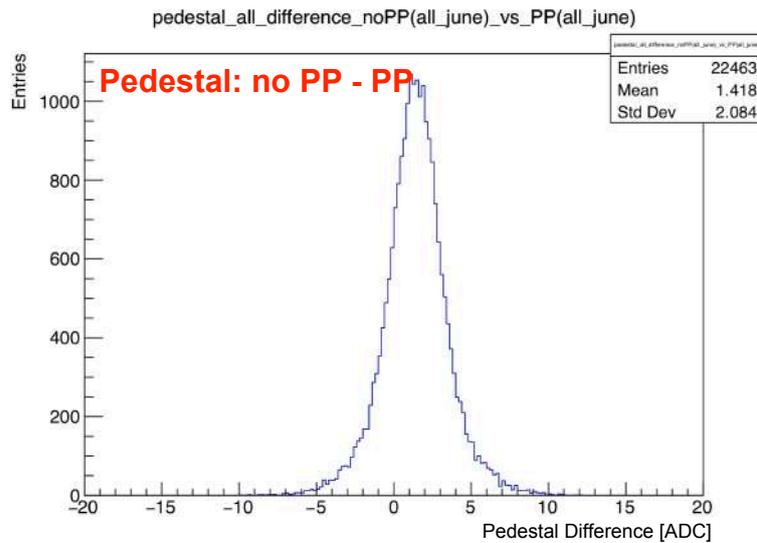


図 4.20 ペDESTALのPOWERパルシング ON/OFF 比較 [38]

MIP キャリブレーション

MIP キャリブレーションは図 4.21 のように、ミューオンが入射したチャンネルの ADC からペDESTALを引いた値の分布を作る。これをランダウ関数にガウス関数を畳み込んだ関数でフィッティングを行い、そのピーク値を MIP 定数に設定する。図 4.22 はPOWERパルシング ON/OFF でそれぞれ MIP キャリブレーションを行い、それぞれのチャンネルに関してその比 (No PP / PP) を取ったものである。平均して 4.3% ほどPOWERパルシング OFF の場合は MIP 定数が大きいことがわかる。よってペDESTALと同様に、それぞれで MIP 定数を変える必要がある。

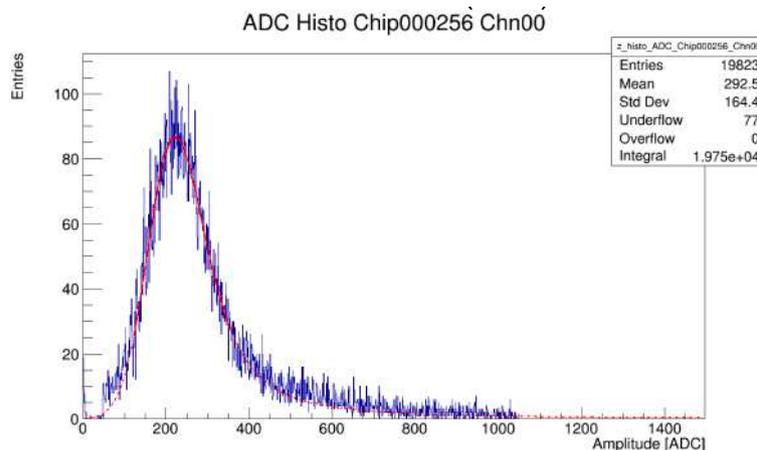


図 4.21 MIP キャリブレーションの例 [38]。ここでの MIP 定数は 225 ADC である。

4.4.2 パイオン

5月のテストビーム実験では 10、15、20、30、40、50、60、80、100、120、160 GeV のパイオンを照射した。その中でPOWERパルシング ON/OFF それぞれでデータを取得した 10、20、40、80、120、160 GeV のデータを使った。まずはPOWERパルシング ON/OFF 関係なく 5月のミューオンデータ全てを用いてキャリブレーションを行ったペDESTAL・MIP 定数を用いて再構成を行い、POWERパルシング ON/OFF による種々のパラメータについての

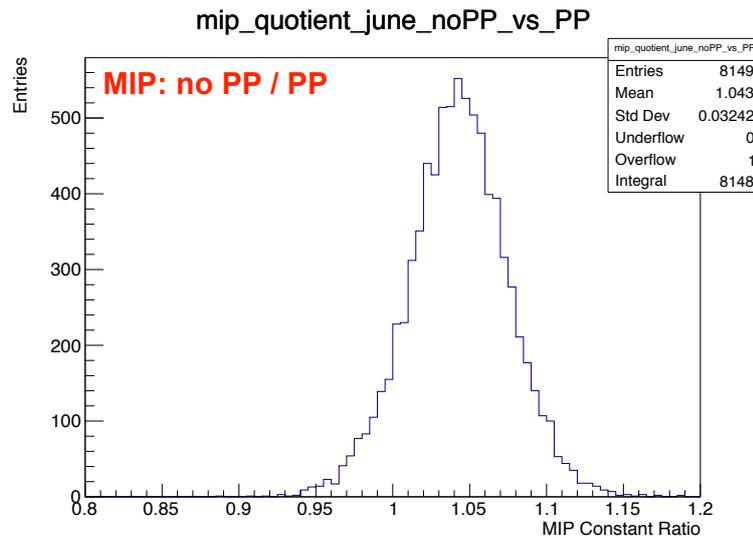


図 4.22 MIP のパワーパルシング ON/OFF 比較 [38]

影響を調べる。次に定数を ON/OFF それぞれで最適化したものを用いて、ON/OFF の補正が上手くいっていることを確かめる。

図 4.23 から図 4.28 まだが、同じ定数を用いて再構成した時の各パラメータの比較である。cogZ や nHits などペDESTAL・MIP 定数が寄与しないものはパワーパルシング ON/OFF でほとんど違いが見られない。一方で hitEnergy に関してはパワーパルシング ON の時の方が低エネルギーのヒットが多く、energySum はパワーパルシング ON の分布が低エネルギーの方にシフトしている。特にエネルギーが大きくなるにつれてパワーパルシング ON/OFF の分布のズレが大きくなっていることがわかる。図 4.29 左は層ごとの hitEnergy の和をプロットしたものであり、右はそれらの比を取ったものである。エネルギーが低い時は重なって見えるものの、エネルギーが高くなると、各層でパワーパルシング ON のエネルギーが低くシフトしているのが分かる。比にかんしてもほとんどの層、エネルギーで 1 以上となっている。層ごとのばらつきが大きい、これはキャリブレーション定数が補正されておらずばらつきがあるためである。図 4.30 は energySum のピーク値をエネルギー毎にプロットし、線形近似したものである。それぞれでは良い線型性が得られた一方、傾きが異なっており、やはりパワーパルシング ON/OFF で再構成エネルギーに差異が生まれ、エネルギーが上がるとそれが大きくなっていくことがわかる。

図 4.31 から図 4.36 まだが、パワーパルシング ON/OFF それぞれで最適化された定数を用いて再構成した結果である。全てのパラメータ、エネルギーでほぼ同じ分布をしているのがわかる。図 4.37 は同様に層ごとのエネルギーとそれらの比であるが、やはり各層、各エネルギーでほぼ同じ値を示しており、比も 1 付近に位置していることがわかる。図 4.38 も同様に energySum のピークのプロットであるが、どちらも良い線型性を持っており、さらに上手く重なっていることがわかる。

以上により、パワーパルシング ON/OFF ではペDESTAL と MIP の値に影響が生じ、主にエネルギーの再構成に影響を与えることがわかった。パワーパルシング ON の時がペDESTAL・MIP とともに小さく、再構成したエネルギーはそのエネルギーが高いほど差異が大きくなる。しかしこれはパワーパルシング ON/OFF それぞれで定数を変えて最適化された定数で再構成を行うことで、その差異を是正し同じ結果を得ることができる。またパイオンに関して、ビームエネルギーと再構成エネルギーとの線型性が良いということも分かった。

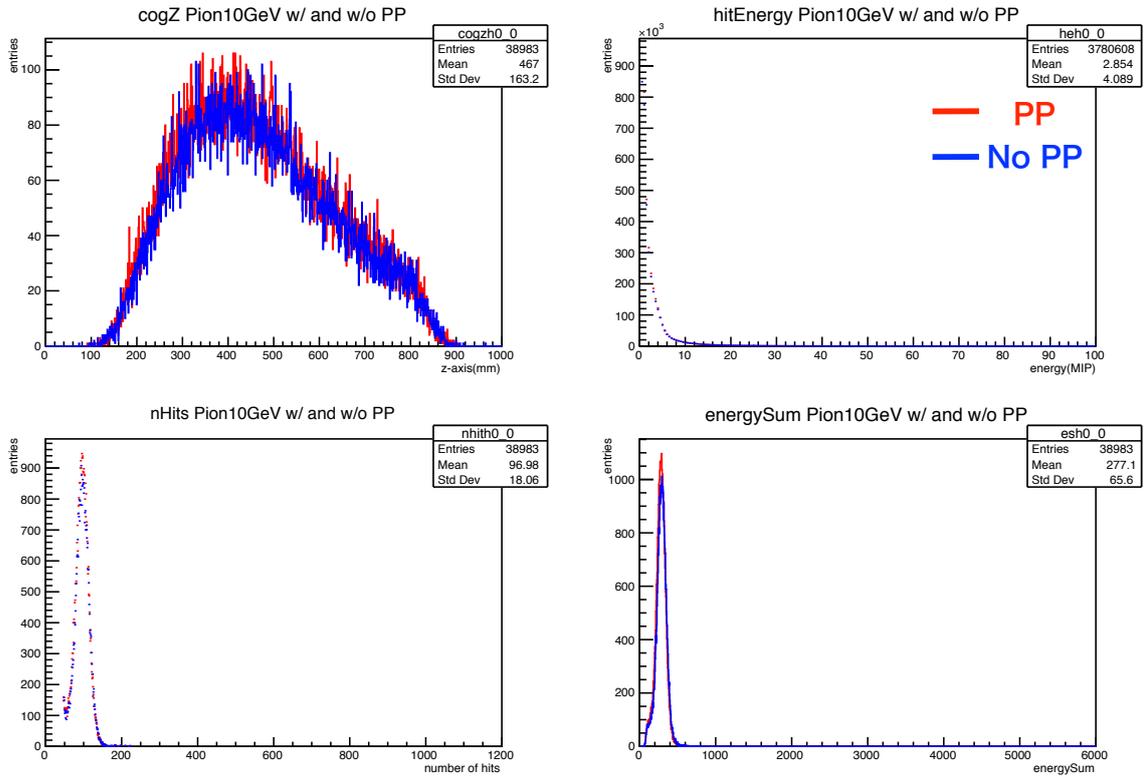


図 4.23 10 GeV パイオン (同じ定数を使った場合)

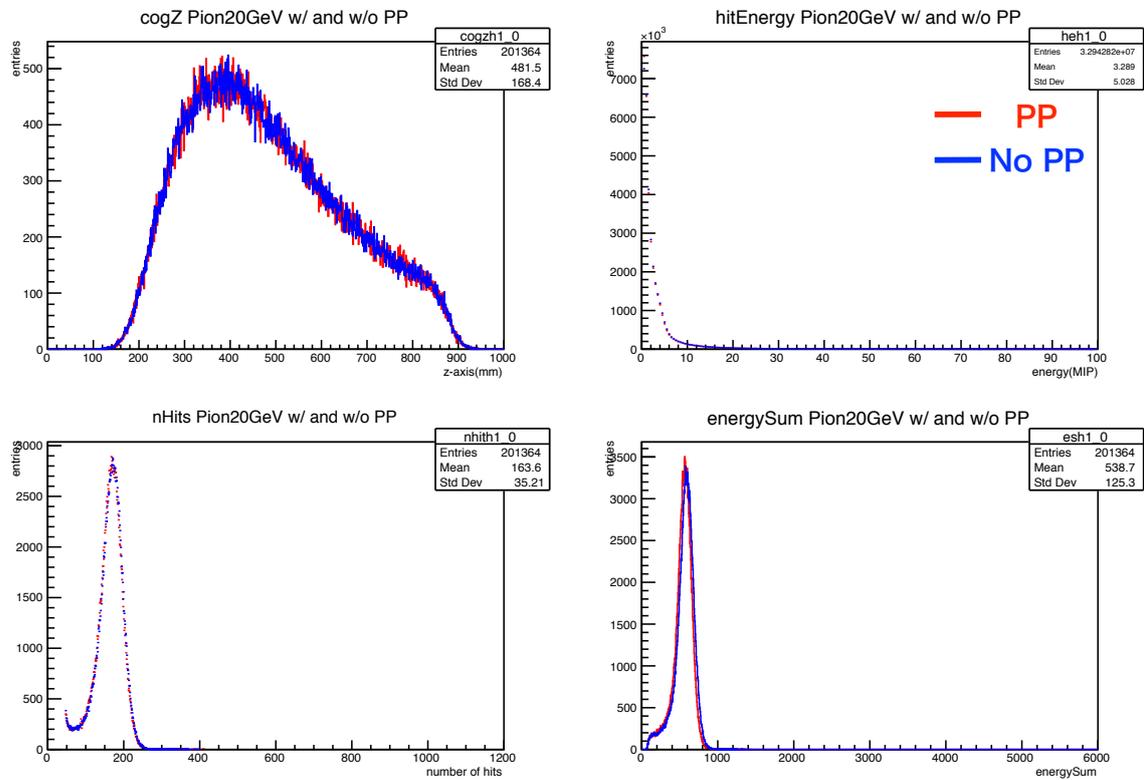


図 4.24 20 GeV パイオン (同じ定数を使った場合)

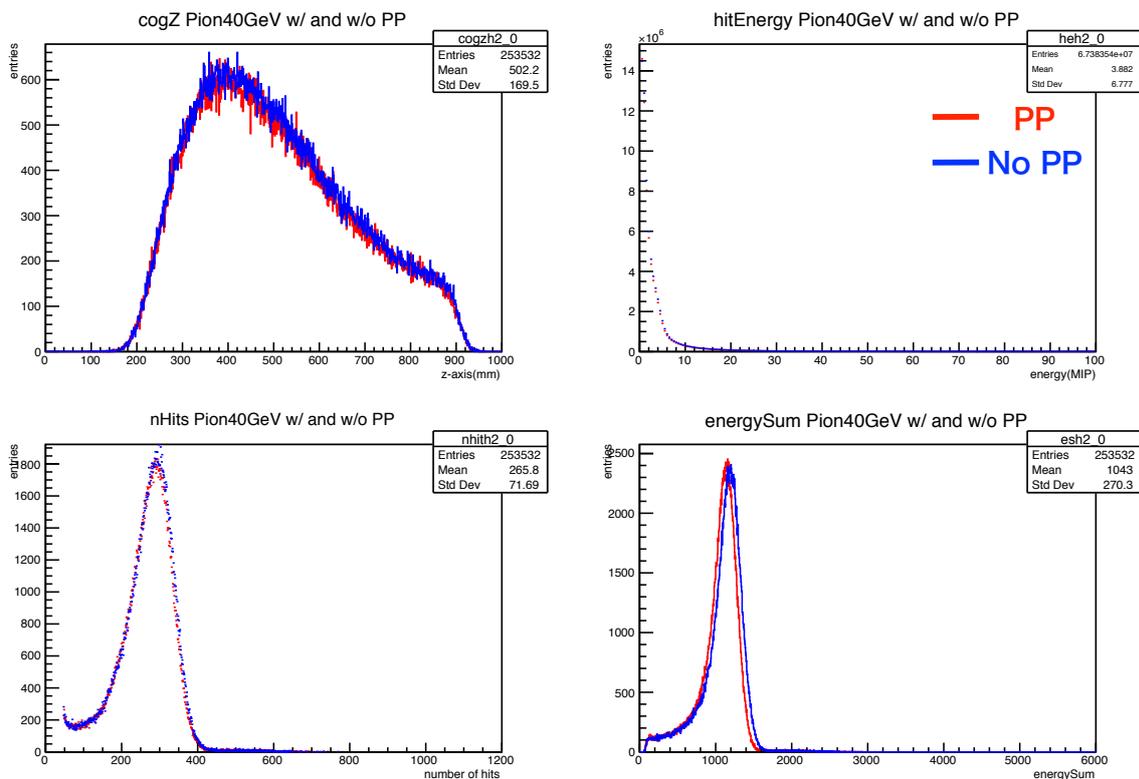


図 4.25 40 GeV パイオン (同じ定数を使った場合)

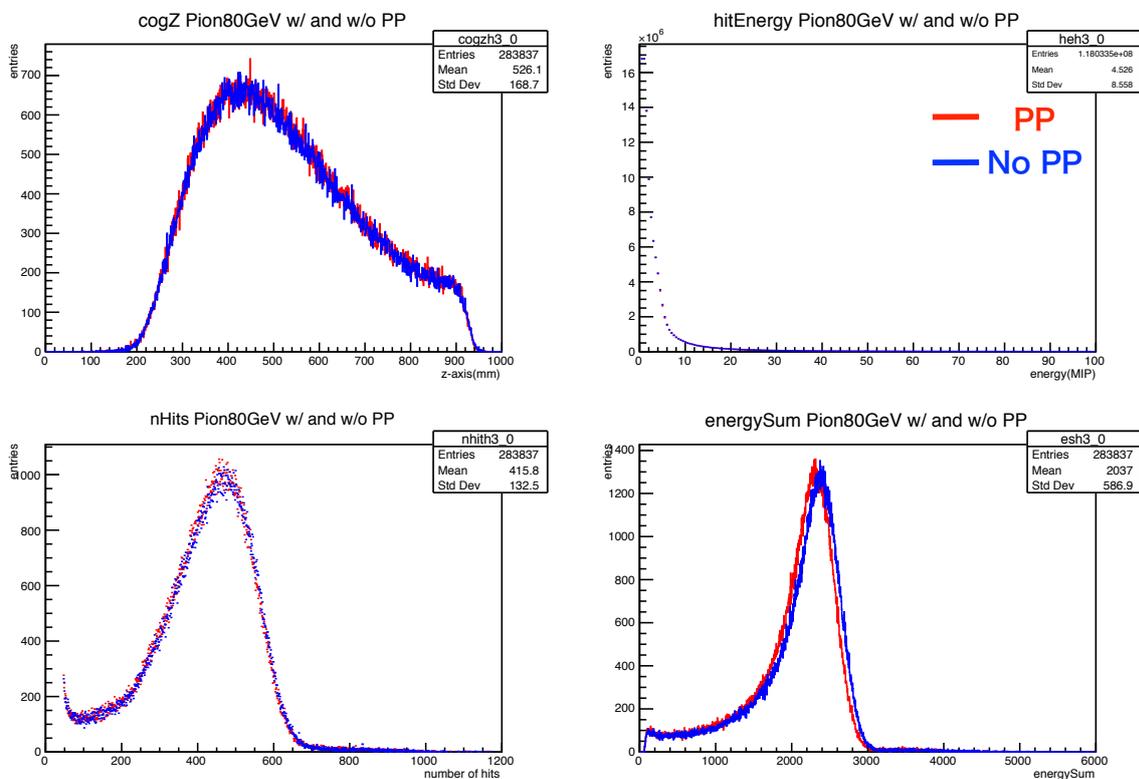


図 4.26 80 GeV パイオン (同じ定数を使った場合)

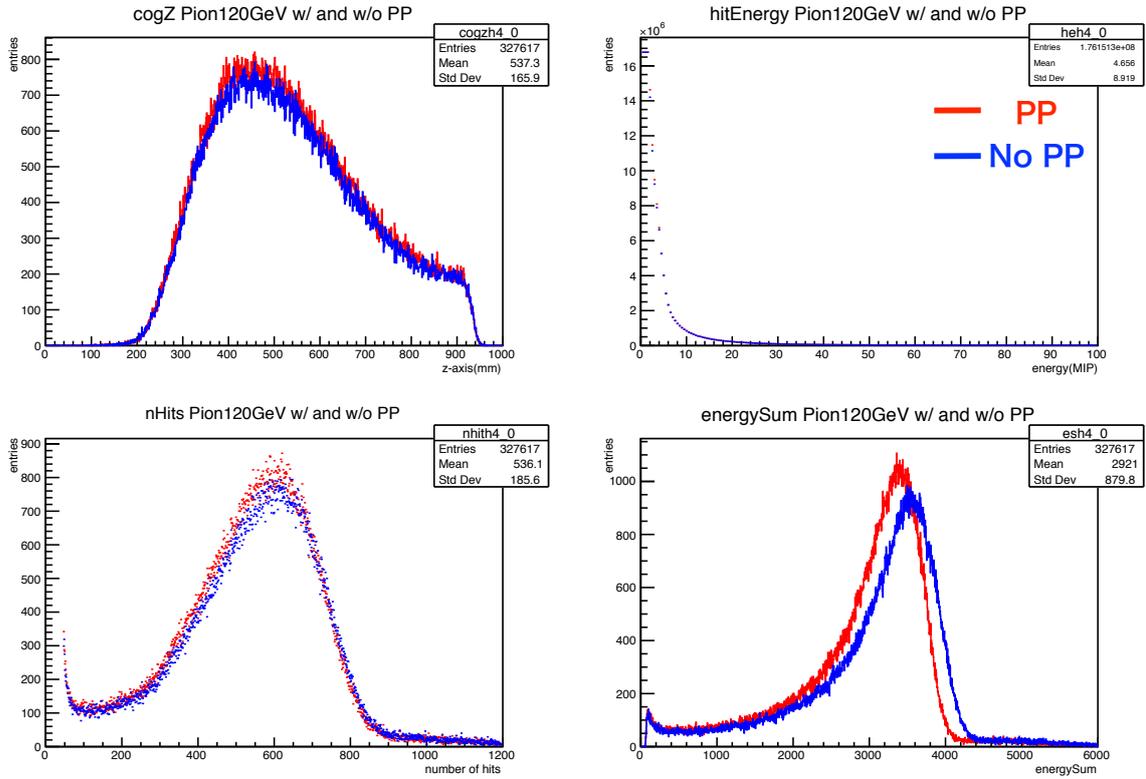


図 4.27 120 GeV パイオン (同じ定数を使った場合)

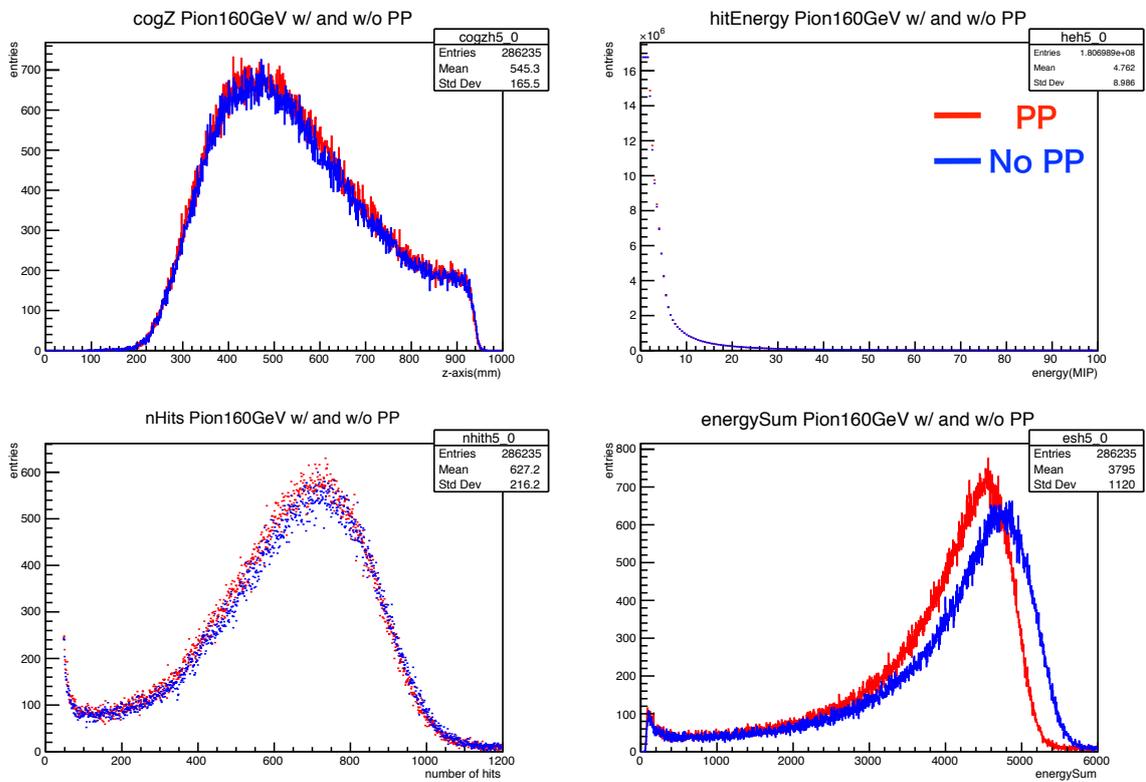


図 4.28 160 GeV パイオン (同じ定数を使った場合)

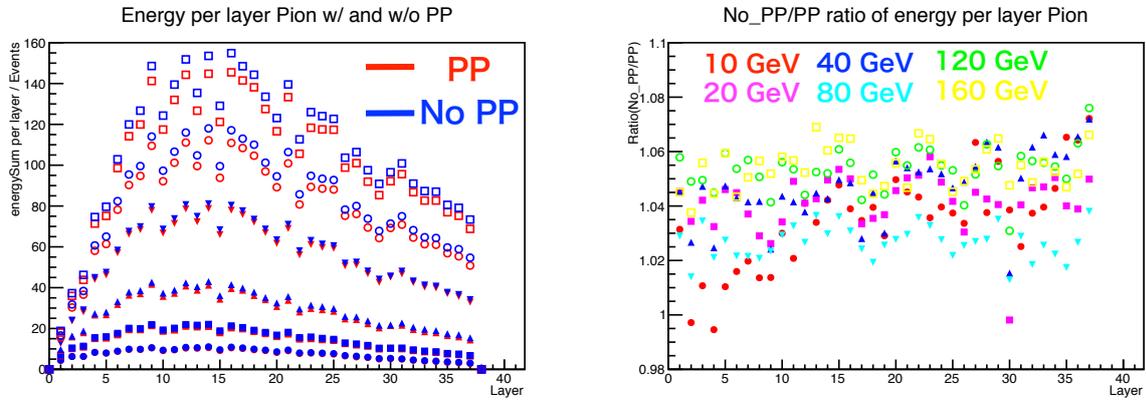


図 4.29 シャワーのプロフィール (同じ定数を使った場合)

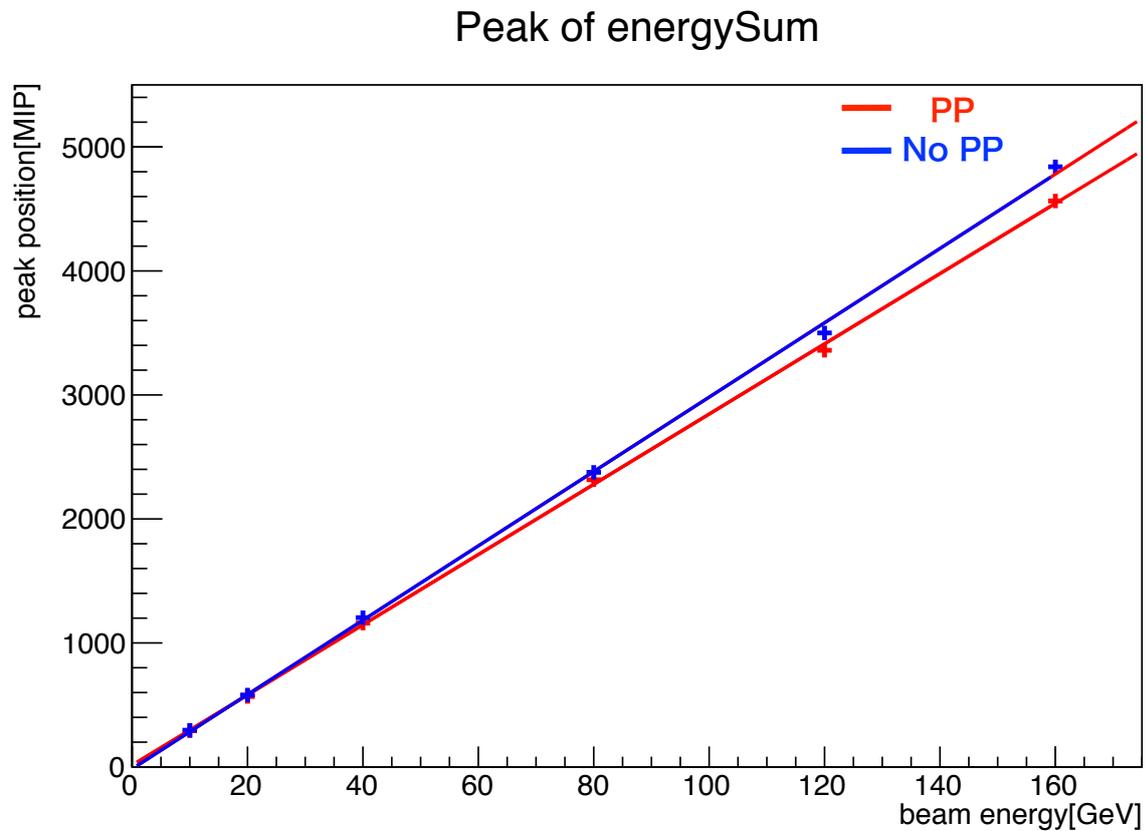


図 4.30 エネルギーの線型性 (同じ定数を使った場合)

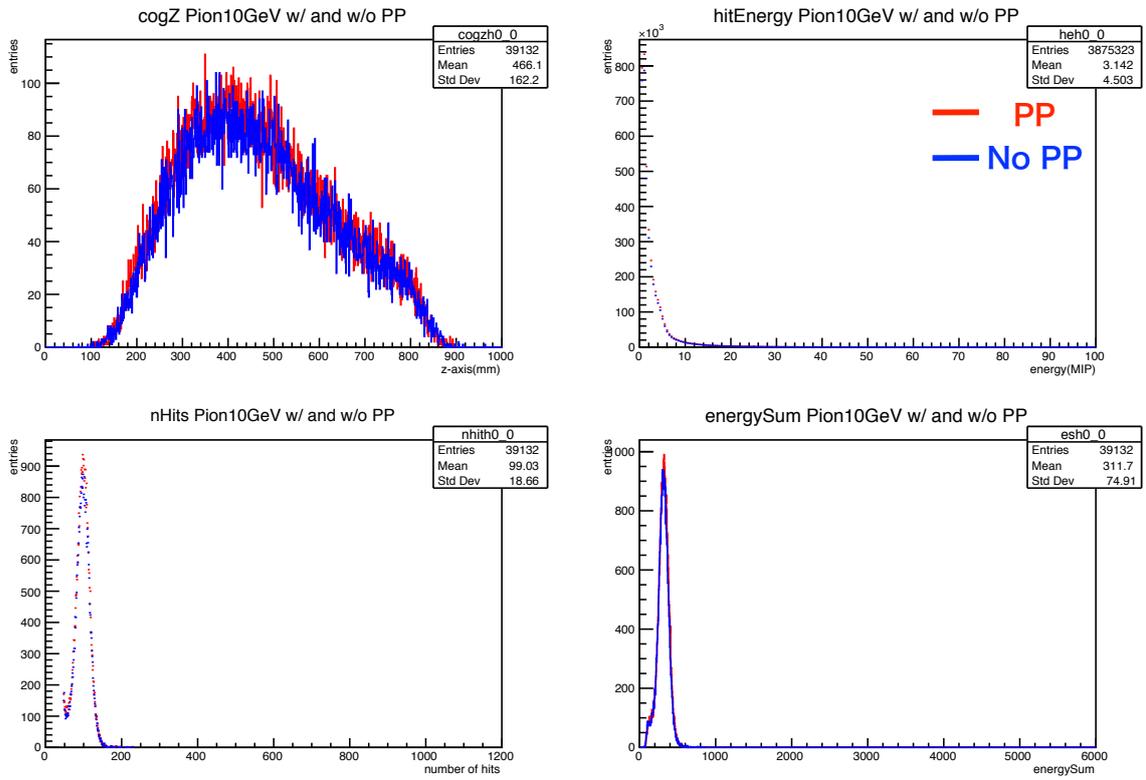


図 4.31 10 GeV パイオン (定数を最適化した場合)

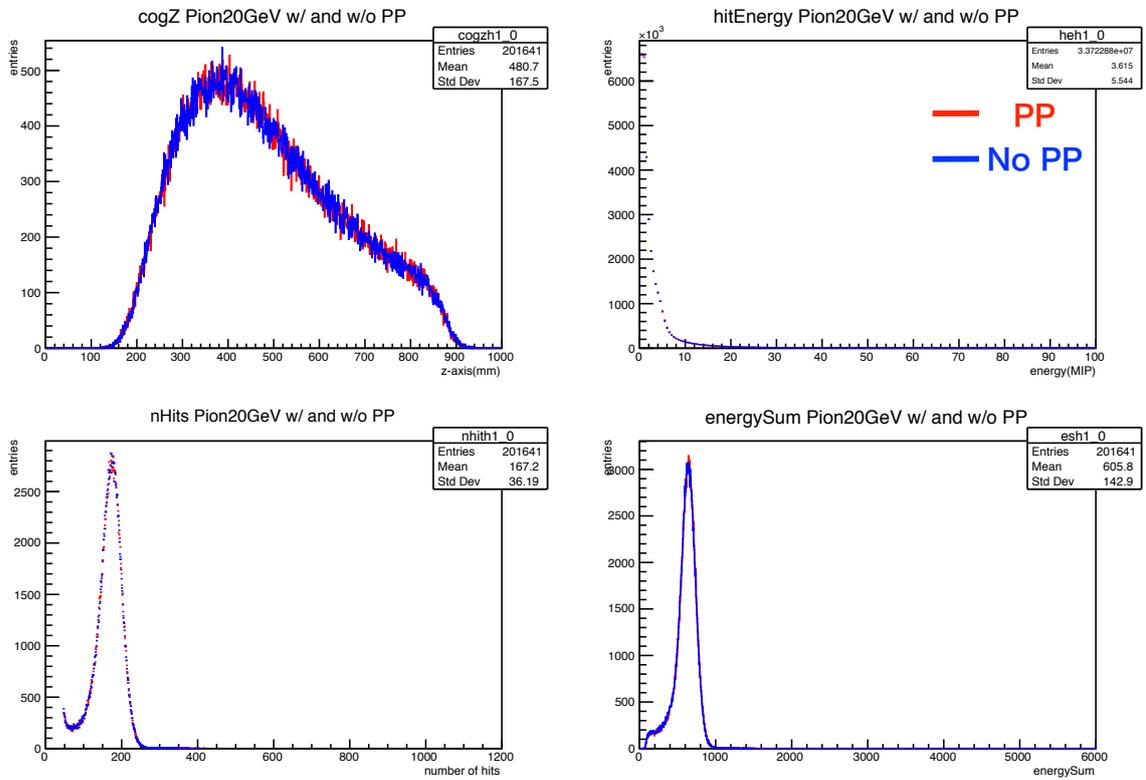


図 4.32 20 GeV パイオン (定数を最適化した場合)

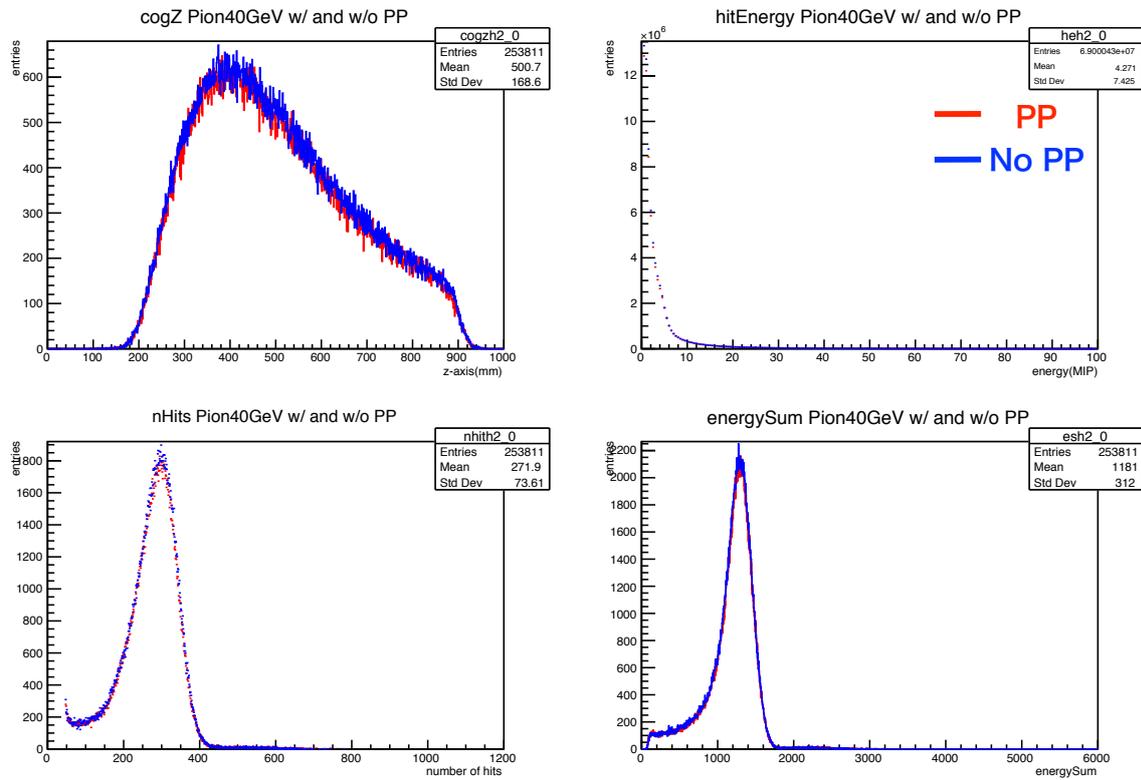


図 4.33 40 GeV パイオン (定数を最適化した場合)

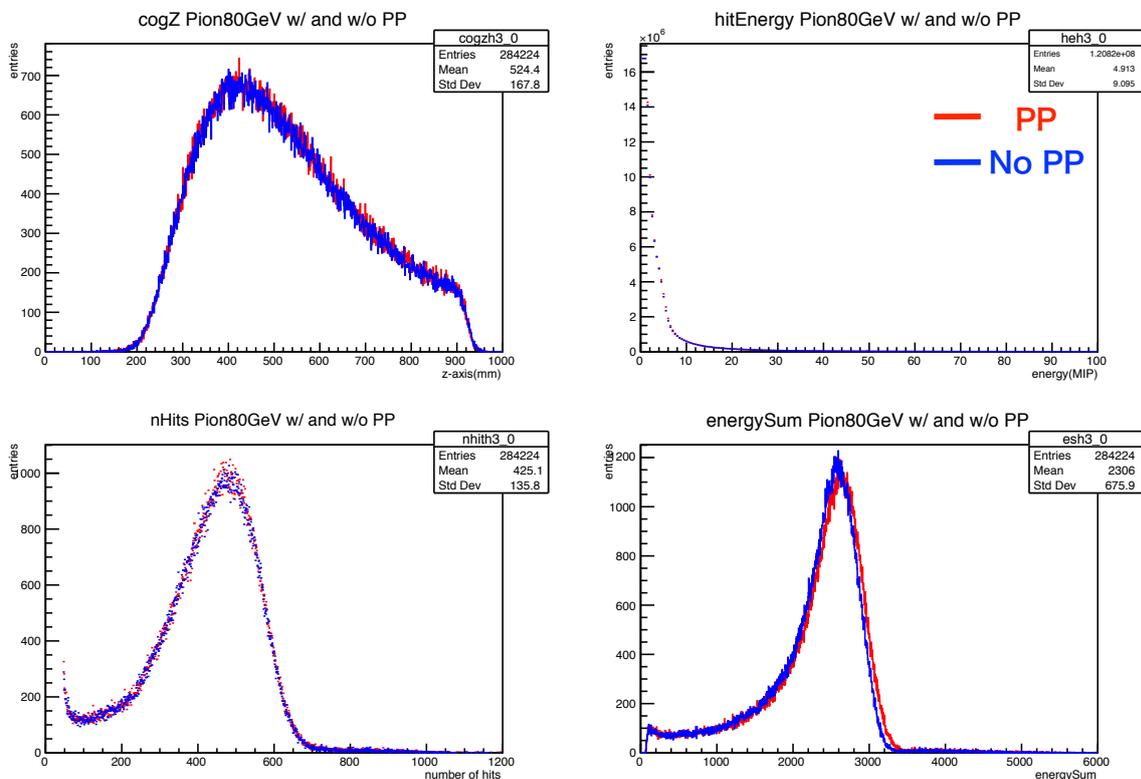


図 4.34 80 GeV パイオン (定数を最適化した場合)

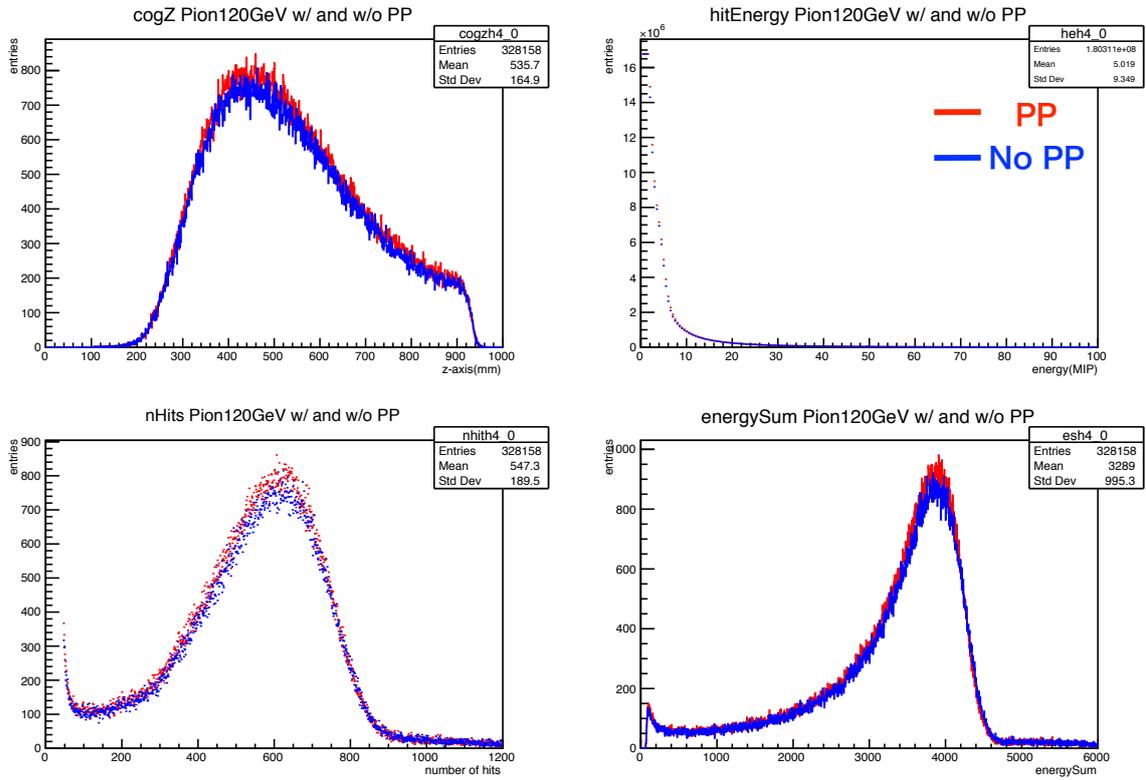


図 4.35 120 GeV パイオン (定数を最適化した場合)

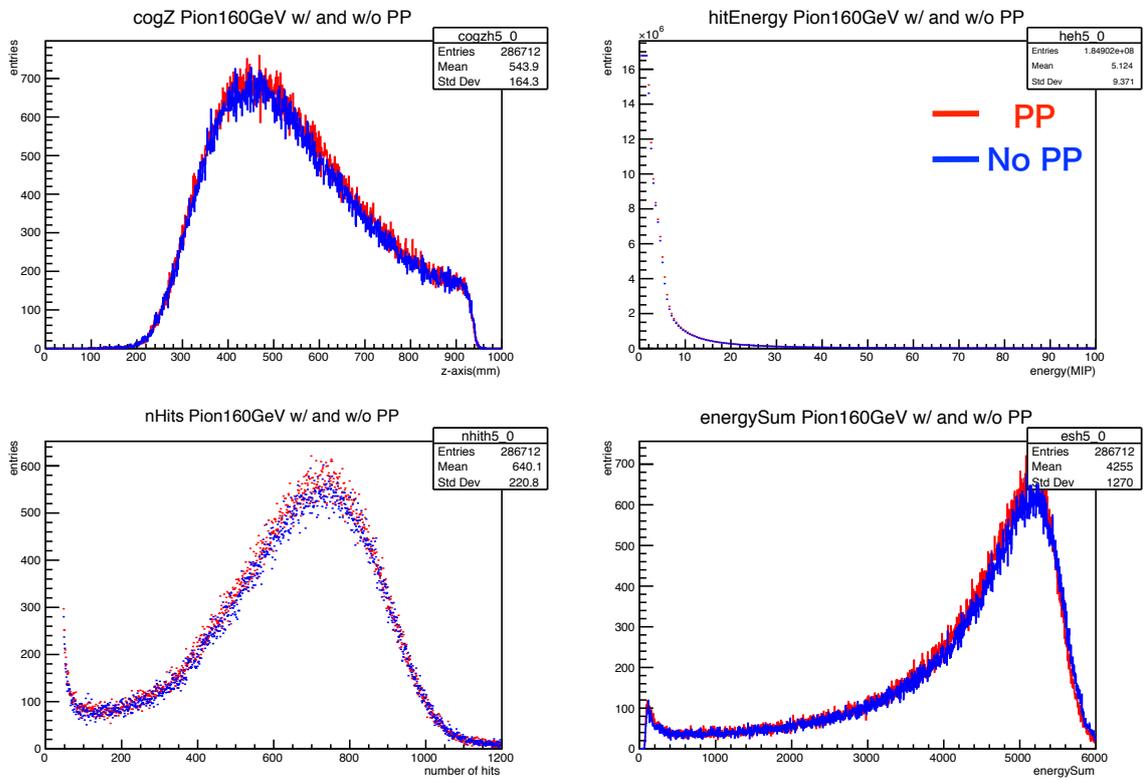


図 4.36 160 GeV パイオン (定数を最適化した場合)

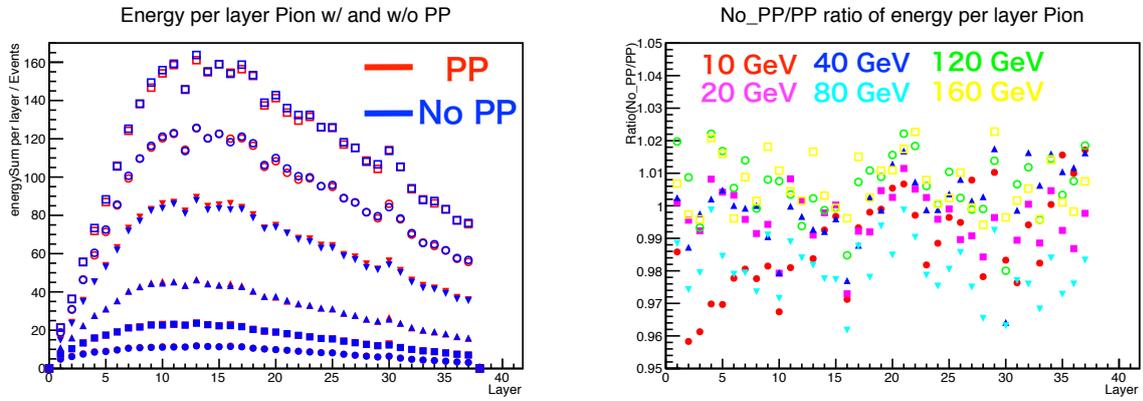


図 4.37 シャワーのプロフィール (定数を最適化した場合)

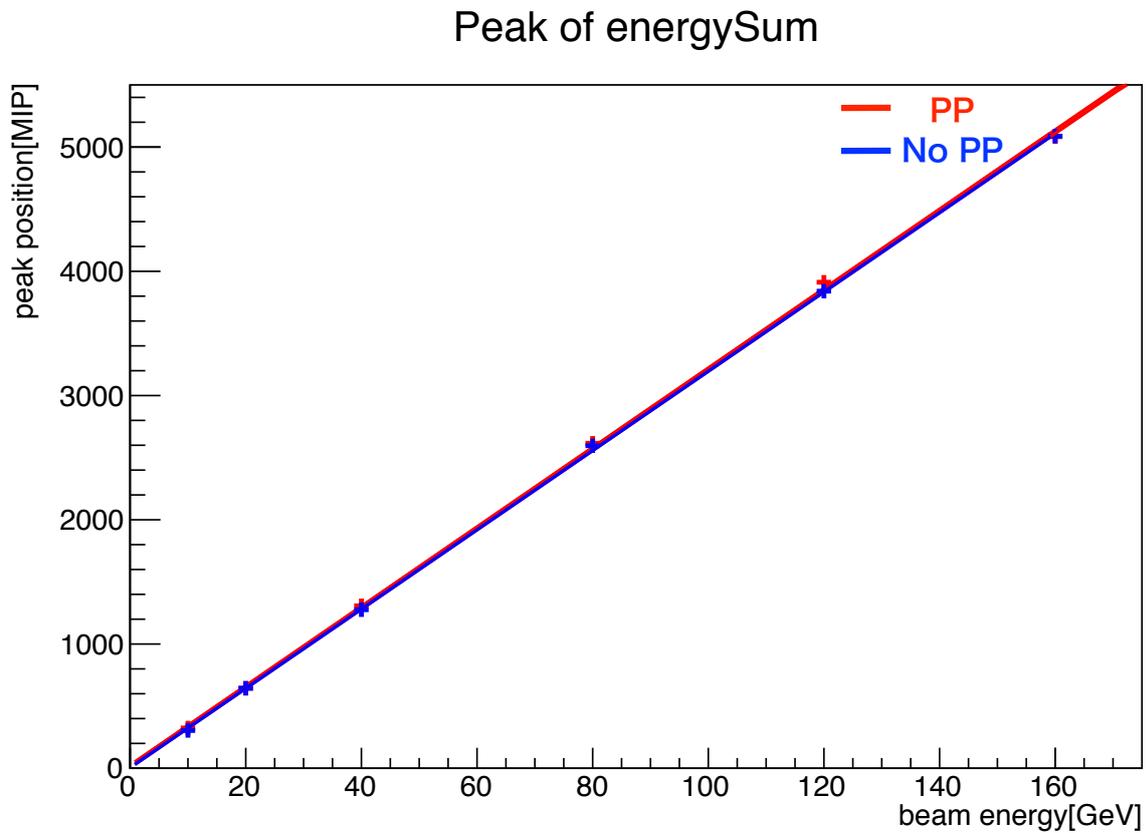


図 4.38 エネルギーの線型性 (定数を最適化した場合)

4.5 大サイズシンチレータタイルを用いた検出層 HBU の性能評価

本節では、大型試作機に挿入した 60 mm 角タイルを用いた HBU の性能評価として、キャリブレーションの結果とサチュレーションの調査について述べる。

4.5.1 キャリブレーション

60 mm 角タイルを用いた HBU は 6-7 月のテストビーム実験にのみ投入されており、6-7 月はほとんどパワーパルシング ON の状態でデータを取得しているため、前節のパワーパルシング ON/OFF による影響は無い。

ペDESTALキャリブレーション [38]

節 4.4.1 と同様の方法で、東京モジュールに関してもペDESTAL定数を求めた。図 4.39 が大型試作機の全チャンネルのペDESTALの分布で、図 4.40 が東京モジュールの全チャンネルのペDESTALの分布である。試作機全体の平均値が 531.1 ADC であるのに対し、東京モジュールの平均値は 507.9 ADC である。東京モジュールの方が少し低い値となっているが、MPPC のオーバー電圧が低いことに起因していると思われ、何れにしても較正されるため特に問題にはならない。

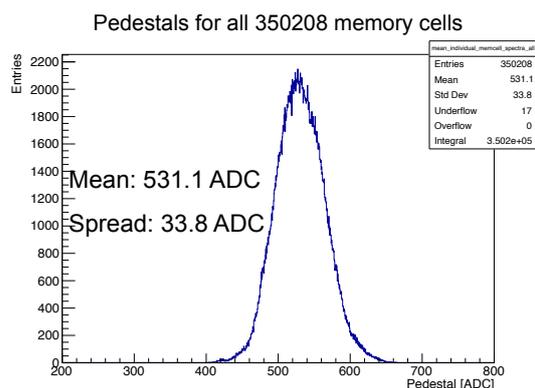


図 4.39 大型試作機全体のペDESTAL分布 (6-7 月)[38]

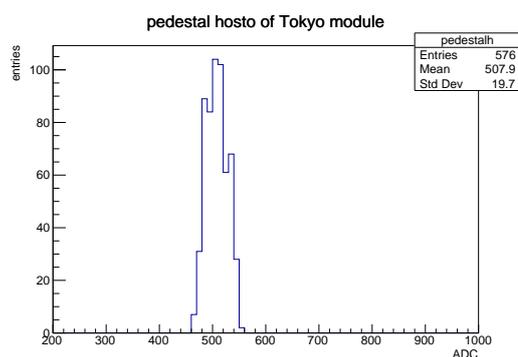


図 4.40 東京モジュールのペDESTAL分布 (6-7 月)

MIP キャリブレーション [38]

節 4.4.1 と同様の方法で、東京モジュールに関しても MIP 定数を求めた。図 4.41 が大型試作機の全チャンネルの MIP の分布で、図 4.42 が東京モジュールの全チャンネルの MIP の分布である。試作機全体の平均値が 217.8 ADC であるのに対し、東京モジュールの平均値は 235.6 ADC である。東京モジュールの方が少し大きくなっているが、この考察は後の光量の比較で行う。

ゲインキャリブレーション [39]

ゲインのキャリブレーションは、テストビーム実験中に LED を用いたデータ取得を行なったため、節 3.4.2 のように適正な電圧値で見られる数光電子分のピークをマルチガウシアンでフィッティングを行い、そのピーク間の差からゲインを求める。図 4.43 が大型試作機の全チャンネルのペDESTALの分布で、図 4.44 が東京モジュールの全チャンネルのペDESTALの分布である。試作機全体の平均値が 16.6 ADC であるのに対し、東京モジュールの平均値は 14.2 ADC である。東京モジュールの方が低くなっており、これは MPPC のオーバー電圧を下げたためである。

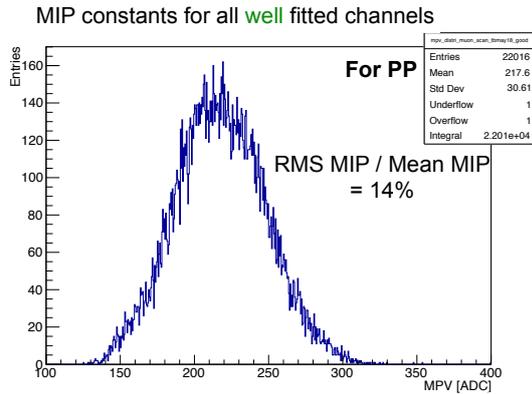


図 4.41 大型試作機全体の MIP 分布 (6-7 月)[38]

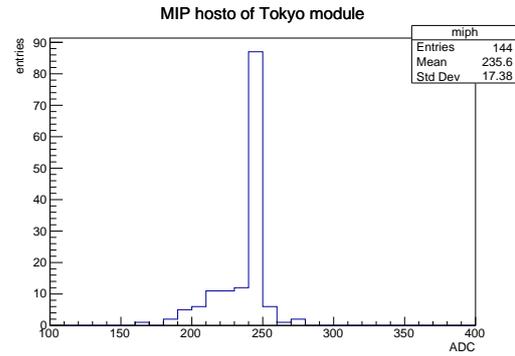


図 4.42 東京モジュールの MIP 分布 (6-7 月)

るが、較正されるので問題では無い。

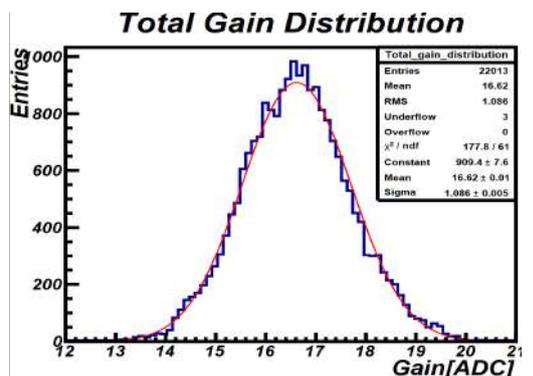


図 4.43 大型試作機全体のゲイン分布 (6-7 月)[39]

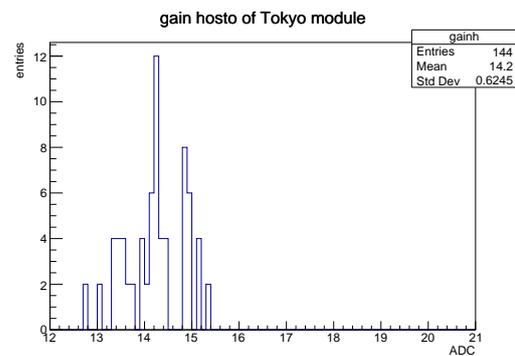


図 4.44 東京モジュールのゲイン分布 (6-7 月)

光量の比較

キャリブレーションの結果を元に標準 HBU と東京モジュールとの MIP 光量の比較を行う。図 4.45 が大型試作機全体の全チャンネルの光量の分布で、図 4.46 が東京モジュールの全チャンネルの光量の分布である。図 4.47 は標準の 30 mm 角タイル用 HBU と比較した相対的な東京モジュールの各チャンネルの光量マップである。試作機全体の平均値が 13.5 p.e. であるのに対し、東京モジュールの平均値は 16.6 p.e. である。約 20% 光量が増加している。

節 3.2 で 60 mm 角タイルの集光率は 48% になり、MPPC の有感領域を $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ から $2 \times 2 \text{ mm}^2$ にしているため、見込まれる集光率は

$$0.48 \times \frac{2^2}{1.3^2} = 1.1 \quad (4.5)$$

となる。さらに東京モジュールの $2 \times 2 \text{ mm}^2$ MPPC のオーバー電圧は標準 HBU の $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ MPPC より 20% 低く設定しているため、PDE が低くなっている。よって、東京モジュールの 60 mm 角タイルの検出光量は標準 HBU の 30 mm 角タイルの検出光量とほぼ同等となる。またタイルの材質に関して、60 mm 角タイルと 30 mm 角タイルどちらも射出成形による PS ベースのシンチレータだが、60 mm 角タイルは最適な発光材の配合 [20] を適用している。20% の光量増加はタイルの材質の違いにより発光量が増えたためであると考えられる。

上記のように、東京モジュールのキャリブレーションは標準の HBU と同様に行われ、定数値としても標準の値

と外れておらず、理にかなった値を得られている。さらに MIP 光量としては標準の HBU よりも高い、検出器として十分な光量が得られている。というのも 15 p.e. 程度の光量だと、0.5 MIP の閾値でカットするシンチレーション光由来のシグナルの割合は 5% 以下であり、ダークノイズやクロストークの影響を無視でき、検出器としての影響はない。

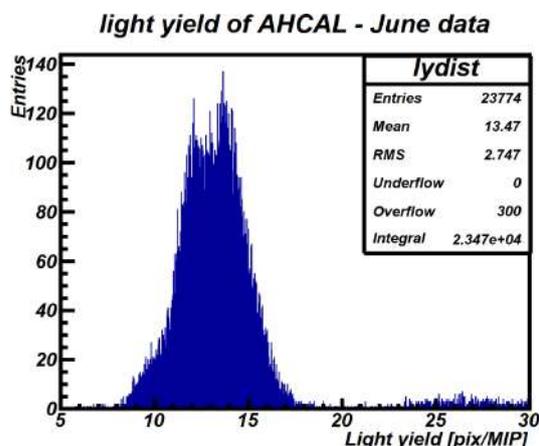


図 4.45 大型試作機全体の光量分布 (6-7 月)[39]

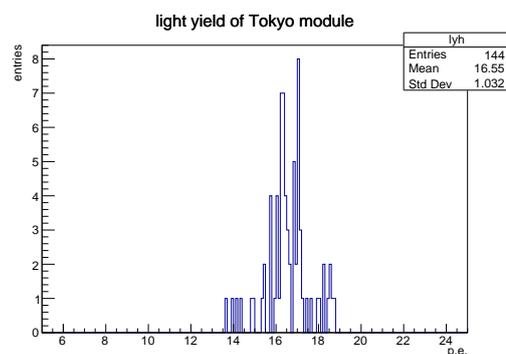


図 4.46 東京モジュールの光量分布 (6-7 月)

MIP map of Tokyo module

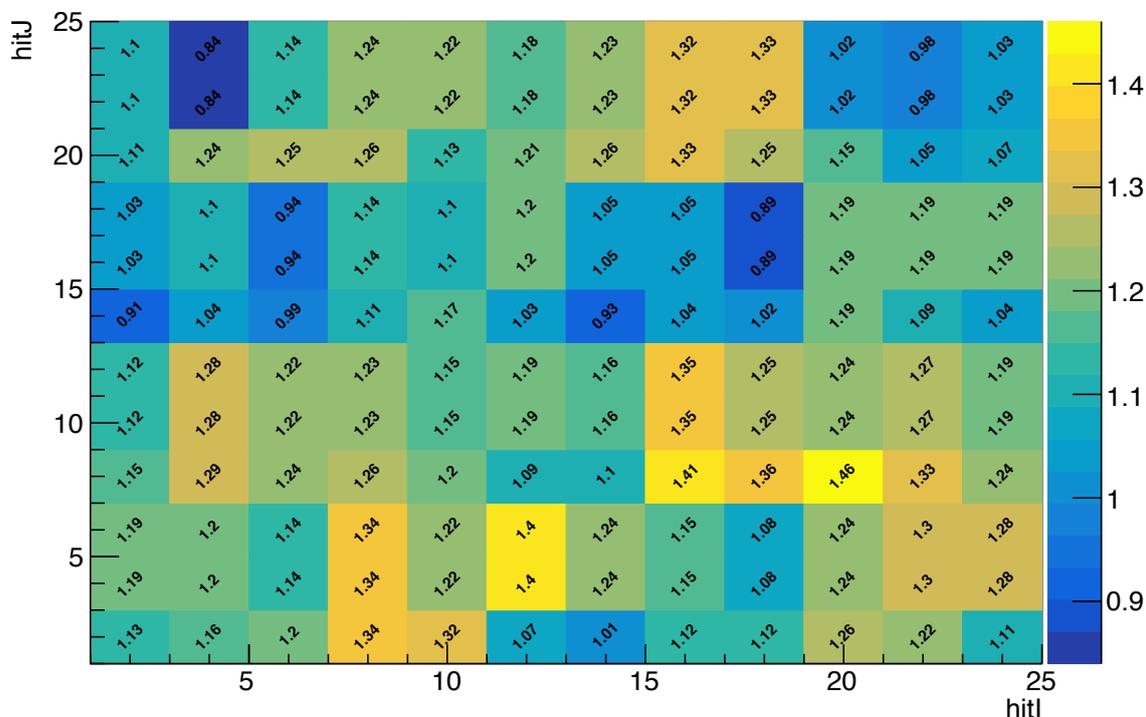


図 4.47 標準 HBU と東京モジュールの光量比較

4.5.2 サチュレーションの影響の調査

標準の HBU や周辺のエレキは、30 mm 角タイル・ $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ MPPC に最適化されているため、それとは異なる 60 mm 角タイル・ $2 \times 2 \text{ mm}^2$ MPPC を使うと各種サチュレーションを起こす可能性がある。以下では想定されるサチュレーションについて説明する。

MPPC サチュレーション

標準の 30 mm 角タイル用 $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ MPPC のピクセル数は 2700 個であるのに対し、東京モジュールに搭載されている 60 mm 角タイル用 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ MPPC ピクセル数は 6400 個である。東京モジュールに関して、1 MIP あたりの光電子数 (光量) は標準の HBU とほぼ同じであるが、タイルの大きさが 4 倍になったため 1 イベントあたりのタイルへのヒット数も 4 倍となる。よって多数の粒子が生成・入射した場合、東京モジュールの方が早い段階でサチュレーションが起きる可能性がある。

ADC サチュレーション

図 4.48 にあるように、SPIROC2E は低ゲインと高ゲインの二つの増幅器があり、低ゲインは増幅率が小さく、高ゲインは大きく設定されている。図 4.49 にあるように、小さい信号は高ゲインの方で増幅され、閾値を超えた大きな信号は低ゲインの方で増幅される。このゲインのスイッチングがうまく行われてないと、ADC の分布が変わってしまう。

SPIROC2E には 12 bit の ADC が搭載されており、4095 ADC まで測定することが可能である。4095 ADC を超えてサチュレーションが起こった場合、出力は 0 となる。

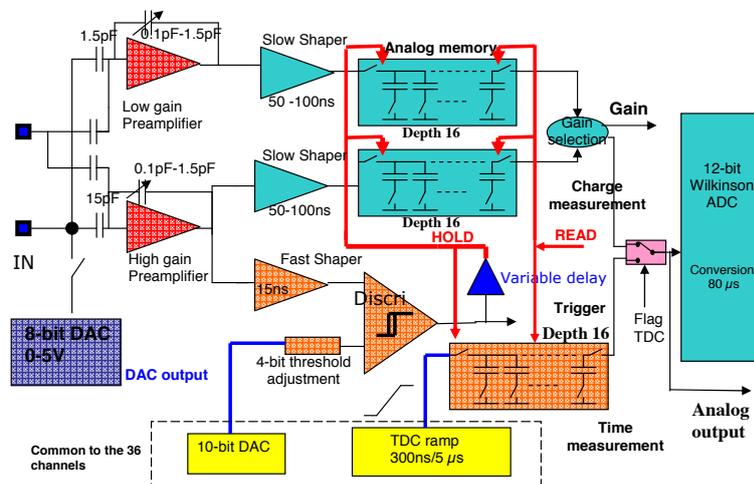


図 4.48 SPIROC の DAQ 模式図 [16]

結果と考察

サチュレーションの調査のために、高エネルギーのパイオンイベントの ADC 分布を見た。東京モジュールの直前に位置している、37 層目の標準の HBU との比較も行う。

初めにパイオン 200 GeV のビームを当てた時のランについて調査する。図 4.50 は 37 層目の標準 HBU の ADC

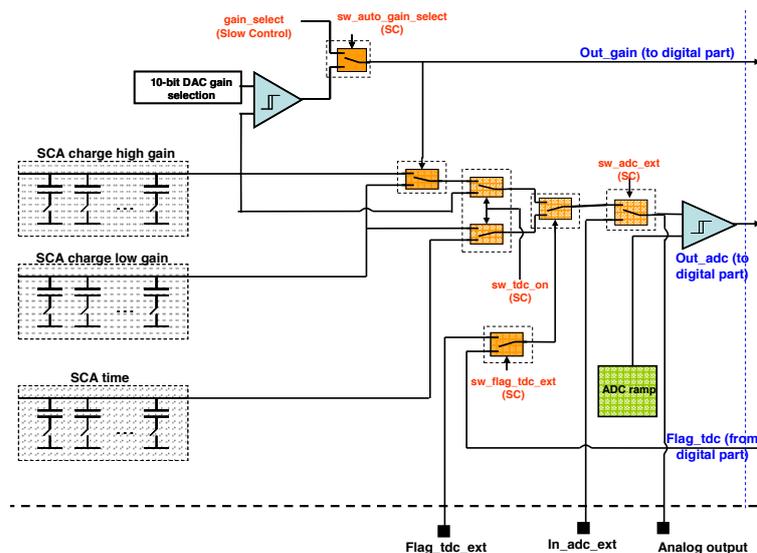


図 4.49 ゲインスイッチングの流れ [16]

分布、図 4.51 が東京モジュールの ADC 分布である*3。どちらも赤線が高ゲイン、青線が低ゲインを表している。*4 やはり東京モジュールの方が 1 タイルあたりのヒット数が多いために高い ADC 値を持ったイベントが多い。しかし ADC の最大値 4095 を超えるイベントは無く、サチュレーションは起こっていない。

また低ゲインの閾値 (400~500 ADC あたり) より低い値にエントリーが見られる。これはエレキのノイズや、ゲインのスイッチングが上手くいかず、本来高ゲインにあるはずの小さな信号が低ゲインで増幅されてしまったことが原因である。しかしごく少数なので問題ではない。

次にパイオン 360 GeV のランについて調査する。図 4.52 は 37 層目の標準 HBU の ADC 分布、図 4.53 が東京モジュールの ADC 分布である。やはり東京モジュールの方が高い ADC 値のイベントが多く、また ADC の最大値 4095 で分布が切れて 0 にエントリーがある。これにより ADC のサチュレーションが起こっていることがわかる。しかし最大値を超えた割合は高々 0.08% であり、ADC サチュレーションを起こしているのはごく少数である。

また 3500~4000 ADC あたりは滑らかに減衰しておらず、バンプがあるのがわかる。これは MPPC のサチュレーションによるものである。MPPC に入射する光電子の数が増えると、実際に入射した光電子数より励起するピクセル数が小さくなる。これにより高エネルギーのヒットが実際より低い値で測定される。MPPC のサチュレーションは再構成の際に補正されているが、 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ MPPC に最適化されておらず、バンプのように盛り上がりができる。

以上より東京モジュールにおいて、パイオン 200 GeV のランにおいてはサチュレーションは見られず、パイオン 350 GeV のランにのみ、ADC と MPPC のサチュレーションが起きることが分かった。しかし実際の ILC 実験においては重心系エネルギー $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$ 程度までなら 350 GeV のパイオンが生成することはないため、今回観測されたサチュレーションは問題にはならない。

*3 1000~1500 ADC 付近に見られるピークは、ペダスタルが飛んで本来の値より高く測定されたイベントである。この現象については DAQ の誤作動などが原因と考えられているが、現在調査中である。

*4 高ゲインではゲインスイッチングにより ADC サチュレーションは起こり得ない。ADC サチュレーションが起こるような大きな信号は低ゲインで見られる。

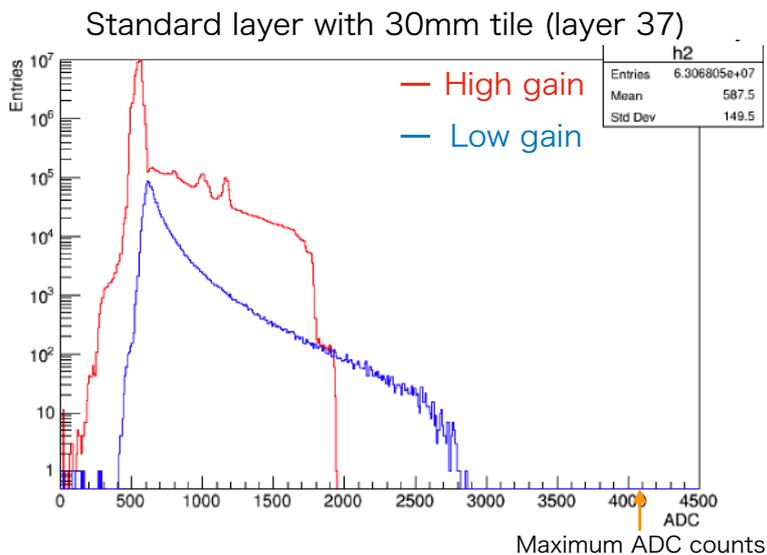


図 4.50 37 層目の標準 HBU の ADC 分布 (パイオン 200 GeV)

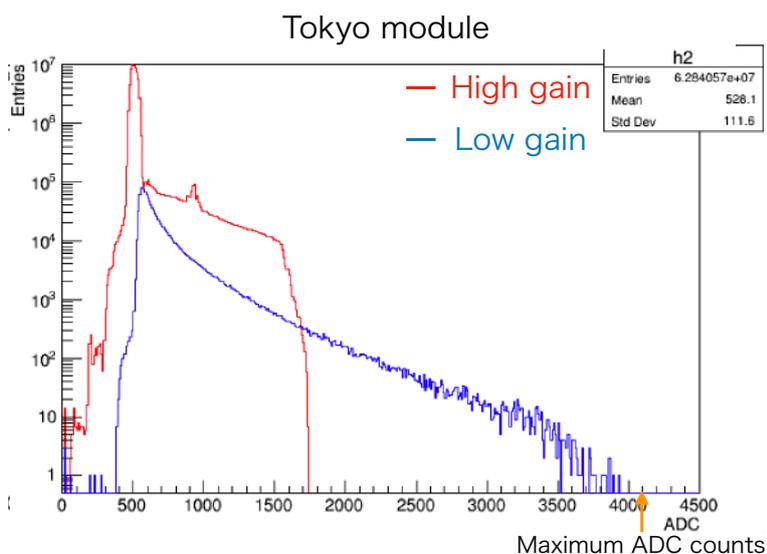


図 4.51 東京モジュールの ADC 分布 (パイオン 200 GeV)

4.5.3 議論

本節 4.5 の結果により、東京モジュールは標準の HBU と同様にキャリブレーションを行うことができ、ペDESTアル、MIP、ゲインといった値も標準の HBU と近い値が得られることが分かった。また光量についても標準の HBU より大きい、検出器として粒子を検出するために十分な値を得られている。さらに ADC や MPPC のサチュレーションは高エネルギーのイベントのごく一部で見られるのみで、それは ILC 実験では生成され得ないエネルギーの粒子なので問題にはならない。以上により、標準より大きな 60 mm 角タイルを用いた HBU、東京モジュールは AHCAL の検出層として十分な性能を持っていると言える。

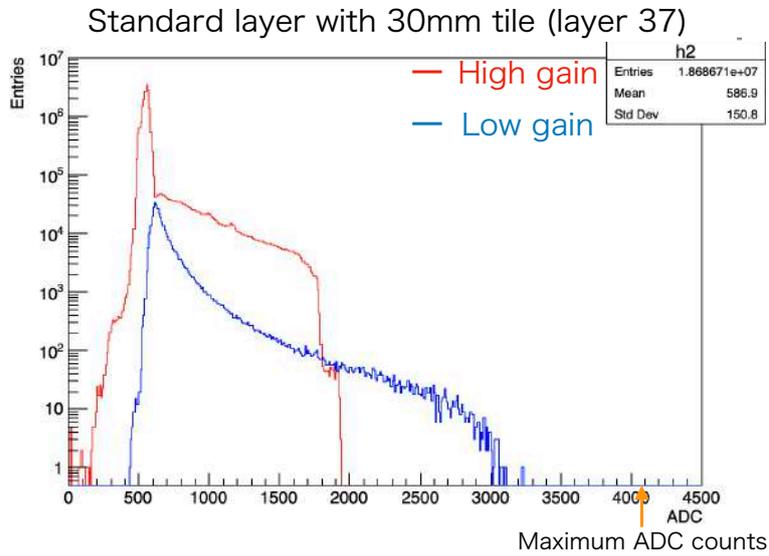


図 4.52 37 層目の標準 HBU の ADC 分布 (パイオン 360 GeV)

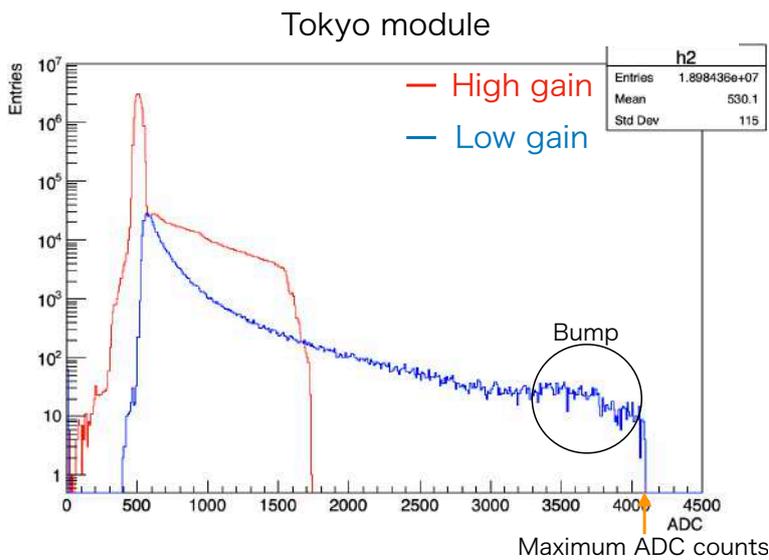


図 4.53 東京モジュールの ADC 分布 (パイオン 360 GeV)

4.6 AHCAL 大型試作機を用いた精細度の評価

AHCAL の精細度を混合した設計では、全 48 層中の後半 24 層を 60 mm 角タイルに置き換えるなど様々な案が考えられている。またシャワーは層ごとにエネルギーデポジットが異なる。大型試作機には最後方に 1 枚のみしか 60 mm 角タイルを用いた HBU が導入されていないため、これでは他のエネルギーデポジットの層での 60 mm 角タイルの応答が見られず、テストビーム実験データを使って精細度を混合した設計の評価をすることができない。そこで ganging tile という手法により、30 mm 角タイル用 HBU から 60 mm 角タイルの応答を再現することで、実験データを使った混合精細度の性能評価を行った。

4.6.1 Ganging tile

Ganging tile とは、 2×2 枚の 30 mm 角タイルで測定したヒットをまとめて、60 mm 角タイルの応答をシミュレートするものである。これを異なる粒子種・エネルギーや、シャワーデポジットの異なる層で ganging tile を作成し、その応答を調査する。ここでは hitEnergy において ganging tile を適用し、60 mm 角タイルの応答の再現性、エネルギーデポジットの高い層でのサチュレーションの調査などを行う。

ここで節 4.5.1 で述べたように、各種パラメータに関して東京モジュールと標準 HBU で差異が見られる。厳密に ganging tile を行うのであれば、これらを補正する必要がある。しかしいずれも 10% ほどの差異であり、補正の有無で大きな影響はないと考えられる。よって今回は各種パラメータの補正は行わず、標準 HBU の 30mm 角タイルの応答を単純に足し合わせて ganging tile を生成している。

また ADC サチュレーションの調査を行うために、ADC の上限値 4095 が hitEnergy で何 MIP に相当するか把握する必要がある。キャリブレーションにより求めた各値を式 4.1 に当てはめると、4095 ADC は約 450 MIP に相当する。

4.6.2 パイオンデータを用いた 60 mm 角タイルの応答の再現

図 4.54 はパイオン 80 GeV の時のシャワープロファイル、層ごとの hitEnergy の和である。ここで最もシャワーが落としたエネルギーが高い層、東京モジュールの直前の層を含めたいくつかの層について ganging tile を生成し、その分布を出したのが図 4.55 である。比較のため東京モジュールの分布も載せている。赤色の東京モジュールと、ピンク色の東京モジュールの直前の 37 層目の標準の HBU の ganging tile は、シャワープロファイルがほぼ同じため、ほぼ同じ分布を示している。これにより東京モジュールの 60 mm 角タイルの応答を ganging tile で再現できていることが分かる。シャワープロファイルの異なる深さにあるいずれの層でもサチュレーションは見られない。

図 4.56 はパイオン 200 GeV のシャワープロファイル、図 4.57 は ganging tile と東京モジュールの hitEnergy の分布である。こちらもやはり 37 層目の ganging tile で東京モジュールの応答を再現できている。また、その他の層のシャワープロファイルの大きい層ではサチュレーションが始まっており、シャワーマキシマムにおける層では 0.16% のイベントが ADC の最大値を超えている。

図 4.56、4.57 は同様に、パイオン 360 GeV の結果である。ここでも ganging tile で 60 mm 角タイルの応答が再現できている。しかし全ての層で ganging tile の hitEnergy が ADC の最大値を超えており、シャワーマキシマムにおける層では 7.3%、東京モジュールの 37 層目では 1.3% のイベントがサチュレーションを起こし得る。また、hitEnergy の分布からも東京モジュールの ADC と MPPC のサチュレーションが見て取れる。

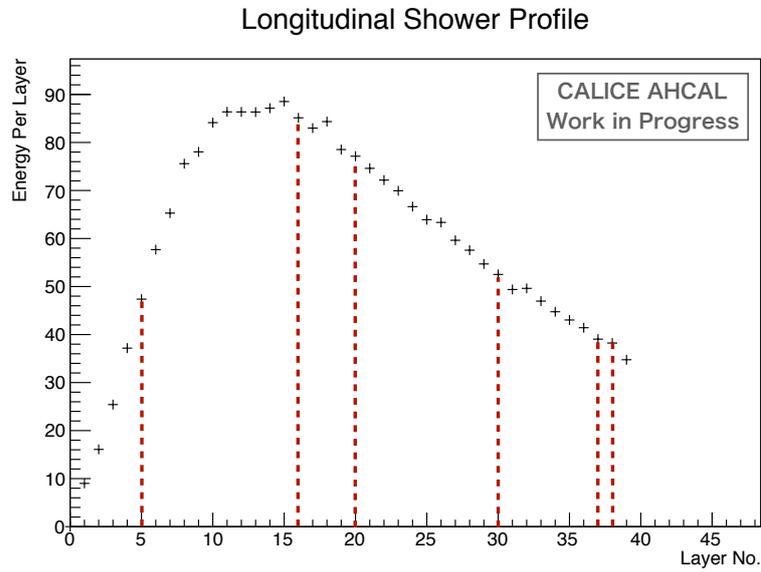


図 4.54 シャワーのプロファイル (パイオン 80 GeV)

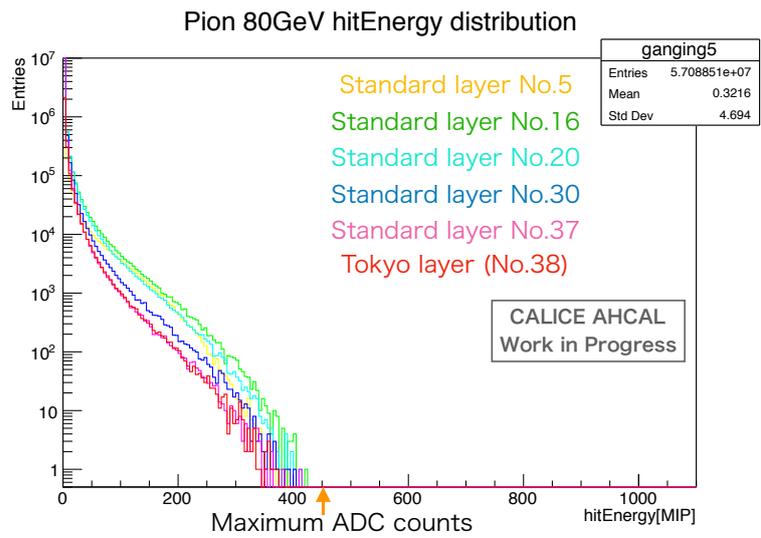


図 4.55 ganging tile の hitEnergy 分布 (パイオン 80 GeV)

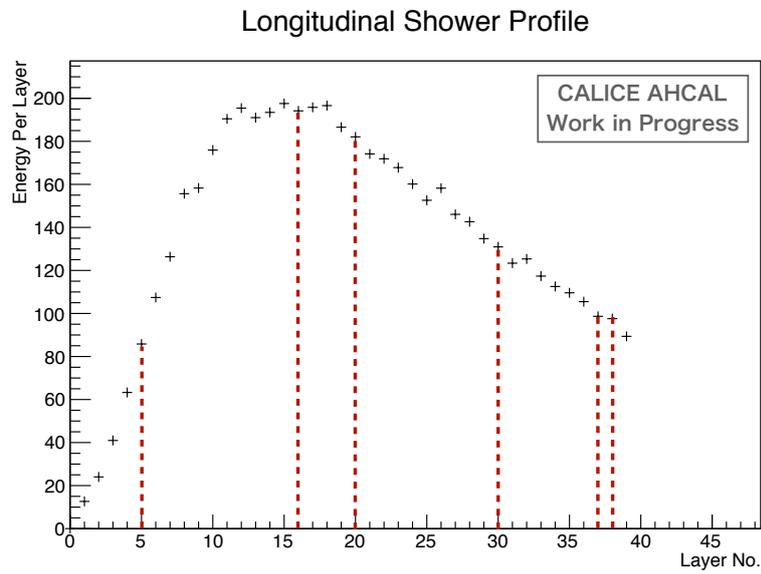


図 4.56 シャワーのプロファイル (パイオン 200 GeV)

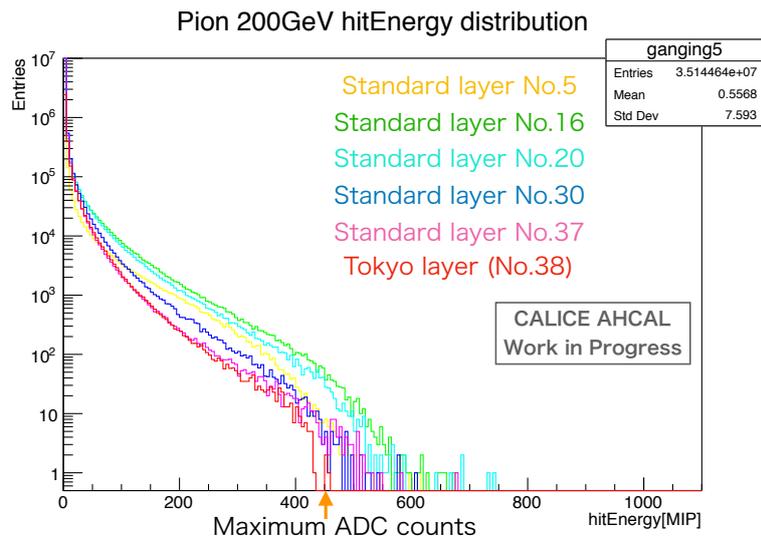


図 4.57 ganging tile の hitEnergy 分布 (パイオン 200 GeV)

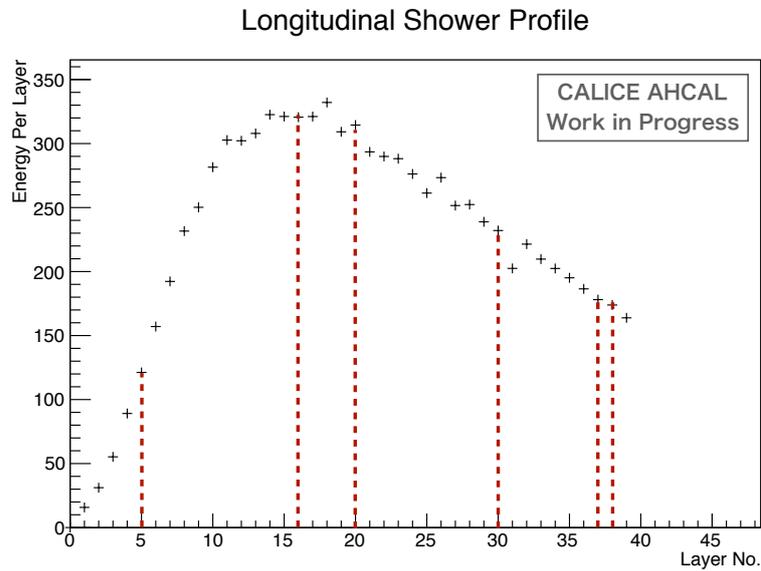


図 4.58 シャワーのプロファイル (パイオン 360 GeV)

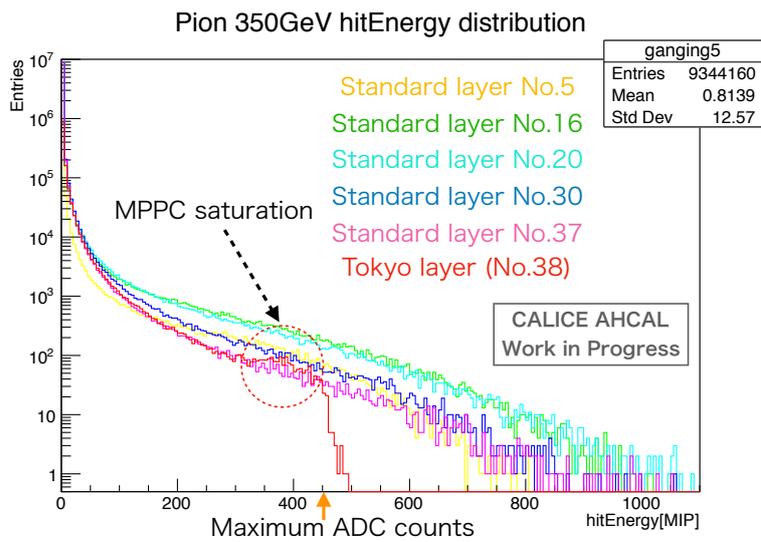


図 4.59 ganging tile の hitEnergy 分布 (パイオン 360 GeV)

4.6.3 電子データを用いた 60 mm 角タイルの応答の再現

電子の作るシャワーは短く 15–20 層目で終わってしまい、東京モジュールのある 38 層目には届かない。よって電子のシャワーに関して 60 mm 角タイルの応答とサチュレーションの調査をするには ganging tile を用いる必要がある。

図 4.60 は電子 80 GeV のシャワープロファイル、図 4.61 は ganging tile と東京モジュールの hitEnergy の分布である。パイオンと同様に、シャワーマキシマムにおける層を含めたいくつかの層について ganging tile を生成し、分布を出している。比較のために東京モジュールの結果も示しているが、やはりシャワーが届いておらずエネルギーを持つイベントが無いことが分かる。ここでシャワーマキシマムにおける層ではサチュレーションが始まっており、0.03% のイベントが ADC の最大値を超えている。

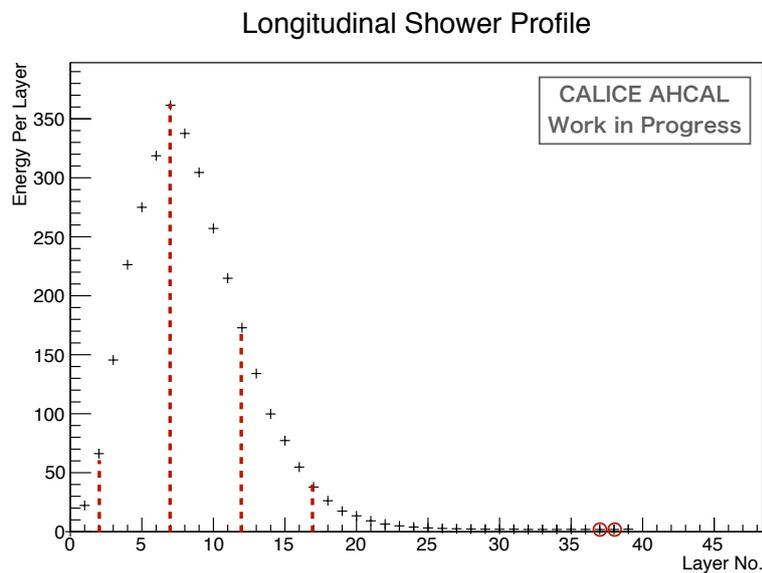


図 4.60 シャワーのプロファイル (電子 80 GeV)

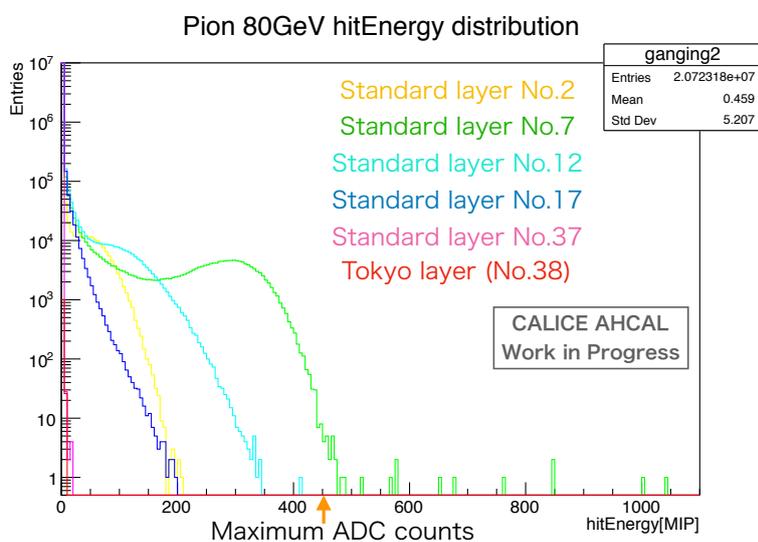


図 4.61 ganging tile の hitEnergy 分布 (電子 80 GeV)

図 4.62、4.63 は同様に、電子 100 GeV の結果である。プロファイルの大きい層でサチュレーションが起こっており、最も大きい層で 5.5% のイベントが ADC の最大値を超えている。

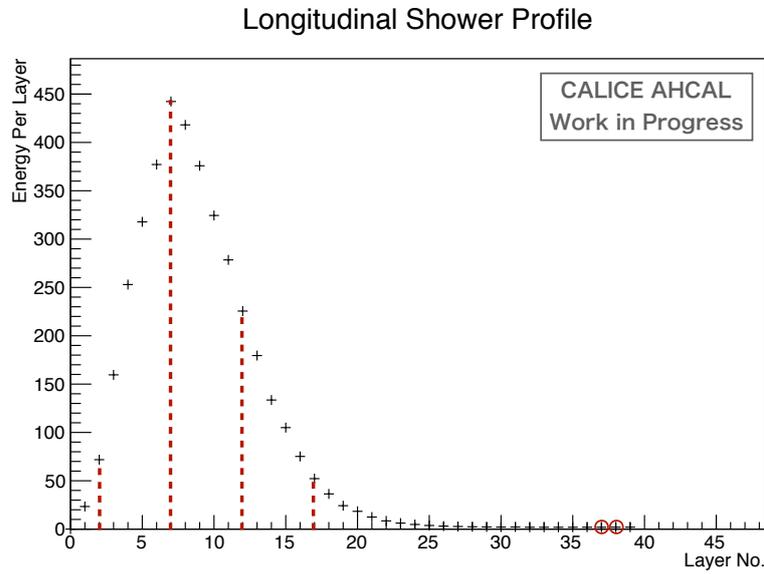


図 4.62 シャワーのプロファイル (電子 100 GeV)

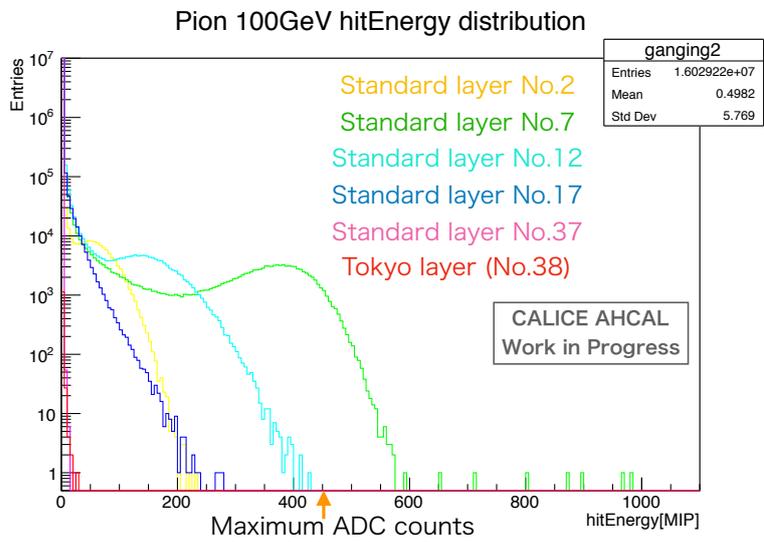


図 4.63 ganging tile の hitEnergy 分布 (電子 100 GeV)

4.6.4 議論と今後の展望

以上の結果から、 2×2 枚の 30 mm 角タイルを合わせた ganging tile によって、東京モジュールの 60 mm 角タイルの応答が上手く再現できていることが分かった。これにより ganging tile を用いて様々なパターンの精細度の混合を行うことができる。例えば、ganging tile を生成して仮想的に 30 mm 角タイルと 60 mm 角タイルが半々の場合や全て 60 mm 角タイルの場合を作り出し、テストビーム実験のデータ解析を行うことができる。今後はそのように様々な精細度で、粒子種の分別や 2 粒子のシャワーの分離、エネルギー分解能などに取り組むことを考えている。

またシャワーが落としたエネルギーの大きい層ではサチュレーションが起こりやすいことが分かった。このサチュレーションの情報を元にエレキや MPPC のダイナミックレンジを調整し、60 mm 角タイル用に最適化した HBU の開発に活用することができる。さらに検出器性能に対するサチュレーションの影響も評価することができる。

第 5 章

ILD モデルを用いた AHCAL の最適な精細度の評価

節 2.3 にて先行研究 [19] について述べたが、ここでは精細度を混合したジオメトリに関してはソフトウェア補償が取り入れられていない。ソフトウェア補償を取り入れることでジェットのエネルギー分解能の改善が見込まれる。本研究ではソフトウェア補償を精細度を混合したジオメトリに適用し、到達可能なエネルギー分解能についての評価を試みる。本章ではシミュレーションソフトの概要から、ソフトウェア補償の説明、暫定的な結果を報告する。

5.1 iLCSoft

iLCSoft は線形加速器の検出器に関するシミュレーションや解析に広く用いられているソフトウェア群である。ILC や CLIC など線形加速器の将来プロジェクトの準備のために用いられている。iLCSoft は検出器モデルの性能評価や物理研究を行うソフトウェアである。検出器の実際のレイアウトを元に、全ての構成要素とその反応を Geant4 やパターン認識アルゴリズムを用いて詳細なシミュレーションを行うことができる。こうして実際の線形加速器の検出器で見られるものに非常に近いモンテカルロデータを作り出すことができる。このデータを用いて物理解析を行うことで検出器の性能を推定したり、物理研究についての性能を予測することができる。

iLCSoft の主要な構成要素は図 5.2 のように、イベントデータモデル LCIO、検出器のジオメトリを記述するツールキット DD4hep、アプリケーションフレームワーク Marlin に分けられる。以下ではこれらに加えて、再構成アルゴリズム PandoraPFA について説明する。

5.1.1 Linear Collider I/O (LCIO)

LCIO はモンテカルロの情報からトラッカーやカロリメータのヒット、再構成した粒子の情報からトラックやクラスター、バーテックスといったように、階層性を持ったデータモデルである。LCIO のイベントデータモデルは線形加速器のコミュニティー全体を通して、また検出器のテストビーム実験においても使用可能な共通のデータフォーマットである。言わば線形加速器のソフトウェア群の共通言語となっている。

5.1.2 Detector Description Toolkit for High Energy Physics (DD4hep)

高エネルギー実験において、検出器のジオメトリやその構成物質の性質を詳細かつリアルに記述することは必要不可欠である。これは、モンテカルロシミュレーションにおいて各検出器構成要素の位置や形、物質組成に関する情報が、検出器の応答や基礎となる物理を正確に知るために必要であることから明らかである。デジタル化や再構成のプロセスに関しても検出器のジオメトリを正確に記述することは同じく重要であり、それは矛盾を避ける

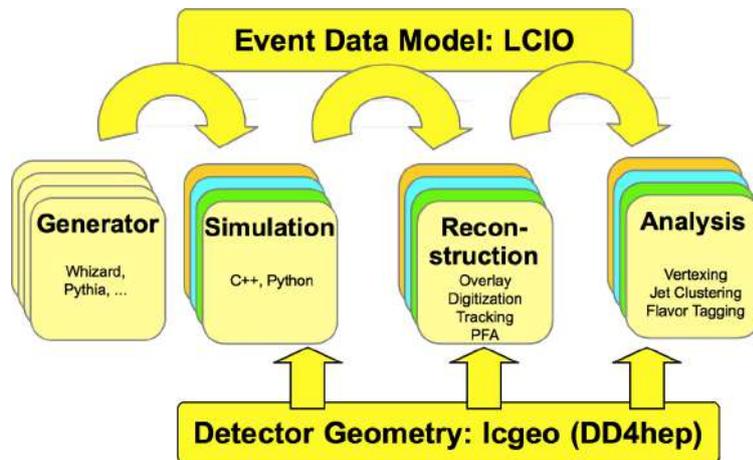


図 5.1 iLCSoft の主要構成要素とその流れ [40]

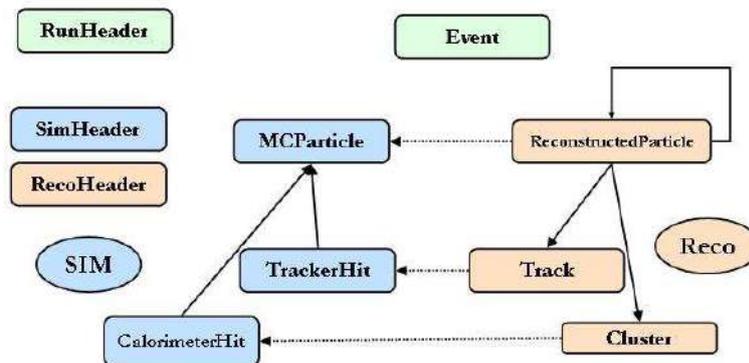


図 5.2 LCIO で定義されるデータモデルの概要 [41]。図中の四角はそれぞれ別のデータのエントリーまたはクラスに、矢印はそれらの関係に対応している。また追加情報としてオブジェクトを書き足すことも可能である。

ために同じソースから作成されるのが理想的である。

それらの要求を実現するために開発されたのが DD4hep である。DD4hep ではシミュレーション、再構成、可視化、解析まで全て同じジオメトリの検出器モデルが使用される。検出器は C++ のコンストラクターを通して記述され、詳細なパラメータは xml で設定できる。線形加速器用の検出器モデルのサブパッケージである lcgeo や、フルシミュレーションを走らせるためのパイソンプログラムである ddsim などのパッケージも搭載されている。

DD4hep は高エネルギー実験で広く使用されている ROOT、Geant4 の 2 つのパッケージを元に作られた一般的なジオメトリツールキットである。DD4hep は主に線形加速器プロジェクトのために開発されたものであるが、実験を始めから終わりまでサポートできるように作成されている。つまり実験の準備段階から、現在走っている実験にまで適用可能である。

5.1.3 Modular Analysis and Reconstruction for LINear Collider (Marlin)

Marlin は基準言語として C++ を用いたアプリケーションフレームワークで、iLCSoft 全体を通して使用される。デジタル化や再構成、解析までのプロセスがプロセッサとして実装されており、それらを統括して実行することができる。

Digitization (デジタル化)

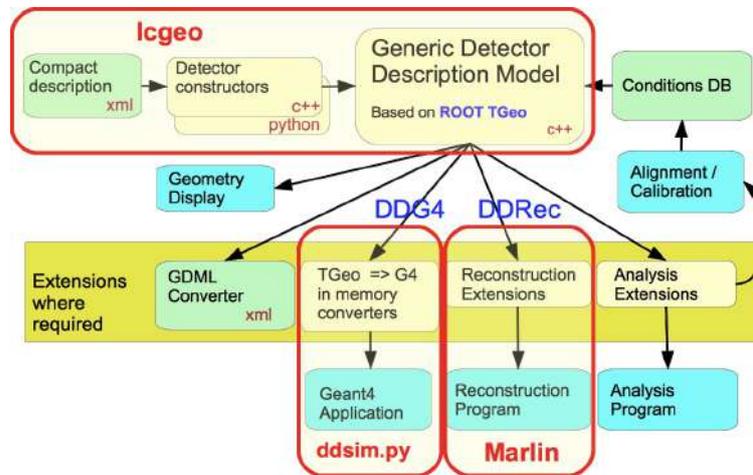


図 5.3 DD4hep の構成要素とその流れ [40]

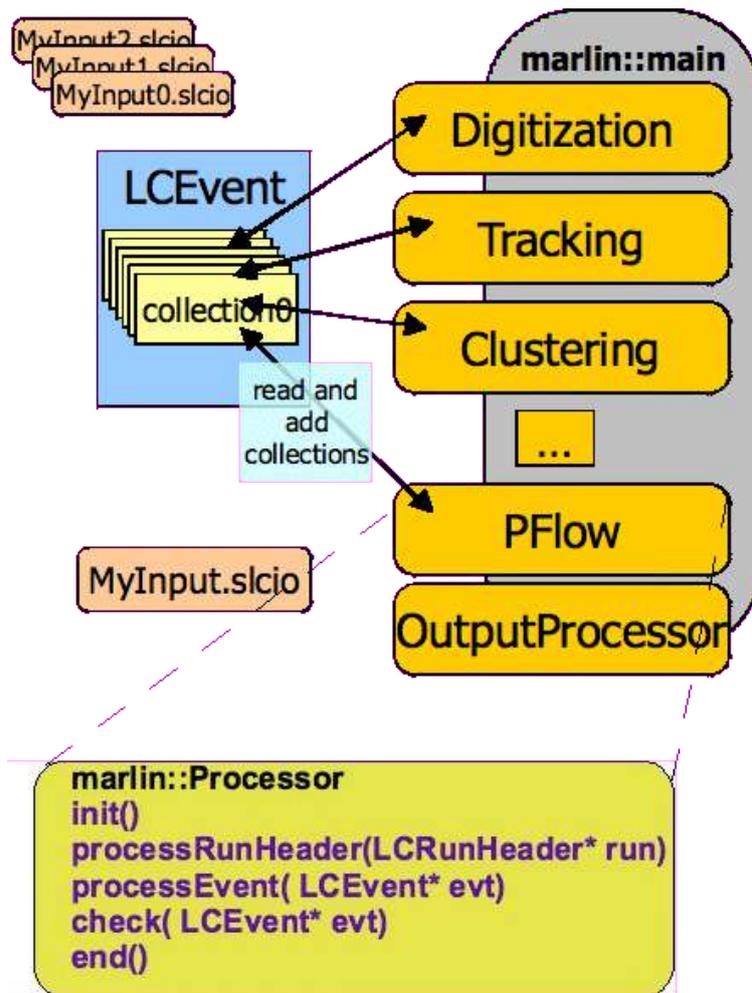


図 5.4 Marlin の構成要素 [40]

DD4hep シミュレーションにより得られたヒット情報は、各粒子がそれぞれの検出器に落としたエネルギーデポジットで与えられる。このヒット情報を検出器からの信号にデジタル化するのが、Digitization である。Digitization はノイズやサチュレーションの影響なども含めて、実験データと同じ形式で出力される。よってシミュレーションと実験データの互換性を得ることができ、それらを比較・検証することができる。カロリメータの Digitization では、"検出器中のエネルギーデポジットのうち検出層でのエネルギーの割合"、"検出器の MIP に対する応答"などのパラメータがあり、これらは特定のエネルギーの γ 線、 K_L^0 、 μ 粒子を用いてキャリブレーションを行う。

Reconstruction (再構成)

実験データまたは Digitization を経たシミュレーションデータのヒット情報からイベントの再構成を行うのが、Reconstruction である。カロリメータにおいては、信号の大きさから粒子が落としたエネルギーを再構成し、これらを PFA を用いて再構成する。

5.1.4 PandoraPFA

PandoraPFA は PFA を用いたイベント再構成アルゴリズムである。トラックやカロリメータのヒットを選別しクラスタリングを行い、Particle Flow Objects (PFOs) と呼ばれる再構成した粒子のリストを作成する。これと飛跡検出器の情報を合わせて、PFA を用いた高精度の粒子識別、エネルギーの推定が可能となる。PandoraPFA では、"検出されたエネルギーと MIP 数の相関"、"MIP と GeV の相関"、"ソフトウェア補償によるシャワーの応答の補正"などがパラメータとして存在する。これらも特定のエネルギーの γ 線、 K_L^0 、 μ 粒子を用いてキャリブレーションを行う。

5.2 ソフトウェア補償を取り入れたシミュレーション

5.2.1 ソフトウェア補償

PFA を取り入れることで全体のジェットエネルギー分解能に対するカロリメータのエネルギー分解能の影響を減らすことができるとはいえ、カロリメータの分解能も未だ重要な役割を持っている。中性ハドロンのエネルギー測定に対して直接的な寄与があり、カロリメータのクラスターと再構成したトラックとのマッチングにも関係しているからだ。よってカロリメータのハドロンのエネルギー分解能の最適化は、PFA を採用した検出器として大きく関係がある。

ほとんどの実験ではカロリメータは補正されておらず、電磁シャワーによる応答が典型的にハドロンのシャワーによる応答よりも高くなっている ($e/h < 1$)。これはハドロンのシャワーの複雑さ、つまり電磁成分とハドロンの成分を含んでいることに起因する。電磁要素はハドロンのシャワー中の中性パイオンなどが光子対に崩壊して電磁カスケードシャワーを起こすことに起因する。一方ハドロンの要素は吸収層で核破壊を起こして検出層に届かなかつたり、ニュートリノを生成する反応が起きたりと検出不可能なプロセスを含んでいる。これによりハドロンのシャワーの測定エネルギーはイベントごとにばらつきが生じ、電磁シャワーの測定エネルギーより低くなってしまふ。電磁要素の割合もイベントごとに異なるため、結果的にエネルギー分解能は悪化する。

補正されたカロリメータ ($e/h \approx 1$) は良いハドロンのエネルギー分解能を持つ。これは鉄の吸収層と一定の割合で水素を含有した検出層を用いた特定の検出器デザインで実証済みである [42]。しかしこのデザインはジオメトリとカロリメータの一意性に強い制約がある。一方で、補正なしのカロリメータの信号に重み付けを行うことで、検出器の応答の補正を行うことができる。これをソフトウェア補償と呼ぶ。この技術は電磁要素はハドロンの要素と比べて高いエネルギー密度を持っていることを利用する。細分化されたカロリメータの個々の読み出しチャンネルからの信号をそれぞれ重み付けすることで、シャワーごとのエネルギーのばらつきを少なくしエネルギー分解能を改

善する。

先行研究では、CALICE グループが高い精細度を持ったカロリメータにローカルソフトウェア補償を適用しエネルギー分解能を改善することに成功している [43]。ここではセルごとに重み付けを行っており、そのウェイトはローカルエネルギー密度 ρ の関数となっている。ここで ρ は 1000 cm^3 の体積のセルに分けた、GeV 換算のヒットエネルギーである。セルにはシンチレータ、吸収体、その他の構成物質も含有している。

図 5.5 は典型的なヒットエネルギー密度の分布を示している。ここでは MIP がおおよそ $1 \text{ GeV}/1000 \text{ cm}^3$ に対応しており、最初のビンはセルあたり 2 MIP のところまでである。もしあるヒットが高いエネルギー密度を持っている場合、それはシャワーの電磁成分由来のものだと推定される。逆にエネルギー密度が低いヒットはハドロン要素が由来だと推定できる。補正を行う (e/h を 1 に近づける) ために、異なるエネルギー密度を持った異なるヒットは、高いエネルギー密度では低い密度のものより小さくウェイトを設定するといったように、それぞれのヒットで重み付けを行う。

カロリメータのクラスターのエネルギーは以下のように表される。

$$E_{SC} = \sum_{hits} E_{ECAL} + \sum_{i-th \text{ bin}} (E_{HCAL}^i \times \omega(\rho_i)) \quad (5.1)$$

$$E_{HCAL}^i = \sum_{hits \in i-th \text{ bin}} E_{hit} \quad (5.2)$$

ここで $\omega(\rho)$ はあるエネルギー密度 ρ の関数で与えられる、あるヒットのウェイトである。

このウェイト関数は指数関数とオフセットの定数で表される。

$$\omega(\rho) = p_1 \exp(p_2 \rho) + p_3 \quad (5.3)$$

ここで p_1 、 p_2 、 p_3 は粒子のエネルギーに依存する。 p_2 は負で他の 2 つは正の値の場合、高いヒットエネルギーに小さいウェイトをかけることになる。このウェイト関数を適用するためにエネルギー密度を、図 5.5 で色分けして表されるように 10 のビンに分ける。それぞれのヒットエネルギーの和を $\omega(\rho)$ により重み付けをする。ここで ρ はビンの中央の値であり、あるビンのヒットはそれぞれ同じウェイトで重み付けされる。ビン分けはそれぞれのビンが全エネルギーに対して同じだけ寄与するように選ばれる。しかし一般的には解析アルゴリズムの性能はビンの選択や数にそれほど依存しない。

ローカルエネルギー密度に依存するウェイトの指数関数によるパラメータ化により、ハドロン由来だと思われる低密度のヒットには大きいウェイトを、電磁要素由来だと思われる高密度のヒットには小さいウェイトをかけることになる。電磁成分の揺らぎやハドロンシャワーの密度は入射ハドロンのエネルギーによって変化することから、ウェイトは入射粒子のエネルギーにも依存する。よって p_1 、 p_2 、 p_3 のパラメータはこの依存性を考慮に入れなければならない。これらは重み付けされていないクラスターのエネルギー和の関数として表される。エネルギー依存性を取り入れた関数の形は、実際に測定したウェイトパラメータのエネルギー依存性を元に、現象論的に以下のように表せられる。

$$p_1 = p_{10} + p_{11} \times E_{sum} + p_{12} \times E_{sum}^2 \quad (5.4)$$

$$p_2 = p_{20} + p_{21} \times E_{sum} + p_{22} \times E_{sum}^2 \quad (5.5)$$

$$p_3 = \frac{p_{30}}{p_{31} + e^{p_{32} \times E_{sum}}} \quad (5.6)$$

ここで p_{i0} 、 p_{i1} 、 p_{i2} は、パラメータ p_i を決定する定数である。

ソフトウェア補償のウェイトは、専用のキャリブレーション手順を用いて、以下の χ^2 関数の最小を取ることで求められる。

$$\chi^2 = \sum_{events} \frac{(E_{hadron} - E_{SC})^2}{(0.5)^2 E_{hadron} \text{ GeV}} \quad (5.7)$$

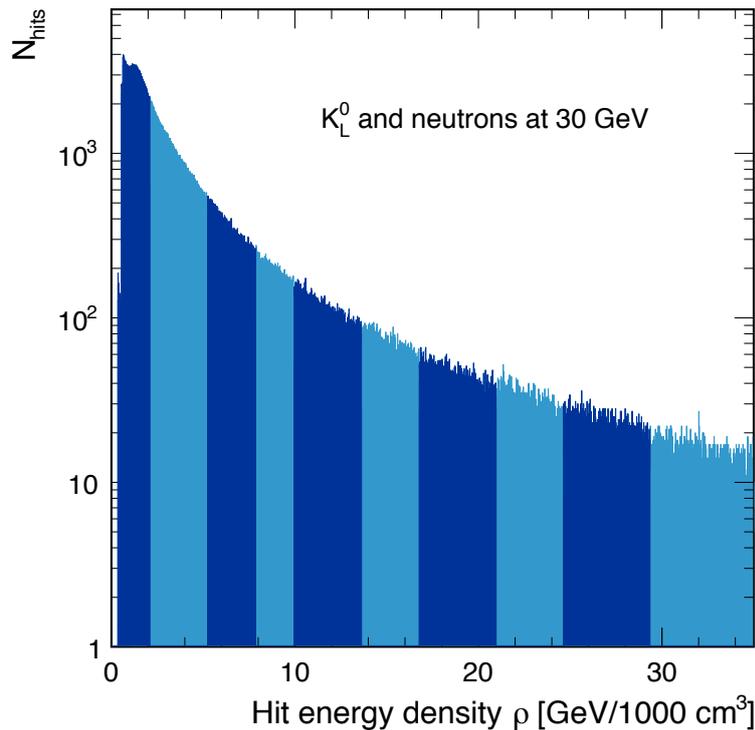


図 5.5 30 GeV の K_L^0 と中性子のヒットエネルギー密度の分布 [19]。セルごとの 1 MIP はおよそ $1 \text{ GeV}/1000 \text{ cm}^3$ に相当する。ソフトウェア補償に用いるためにエネルギー密度のビンを分けて、色分けして示している。

ウェイトのエネルギー依存性は様々なエネルギーでシミュレーションをした中性ハドロンイベントのキャリブレーションを用いて、 χ^2 関数の最小化を行うことで求められる。

キャリブレーションでは、10 GeV から 100 GeV の中性ハドロン (中性子や K_L^0) が用いられる。ビームの衝突点で生成し、ECAL と HCAL の中にクラスターが全て内包されているイベントを抽出する。図 5.6 は、様々なハドロンのエネルギーにおけるヒットエネルギー密度の関数 (式 5.3) を元に得た、ウェイトの値を示している。ここで式 5.4、5.5、5.6 は、キャリブレーションにより得られたウェイトのエネルギー依存性を低エネルギーの方に外挿することで求めている。図で見られる特性は、様々なエネルギーの粒子を含むジェットを解析するアルゴリズムにとって重要なものである。

5.2.2 シミュレーション手順

iLCSoft には既存のソフトウェア補償用のプロセッサが導入されているため、今回はそれを用いた。このシミュレーションでは iLCSoft のバージョンは v02-00-01、ILD モデルのバージョンは ILD_15_v02、Geant4 のバージョンは 10.03.p02 を用いた。既存のソフトウェア補償用プロセッサは、基準設計の 30 mm 角タイルを元に、ヒットエネルギー密度のビン分け、パラメータのキャリブレーションが行われている。今回の研究では既存のプロセッサを精細度を混合したジオメトリに適用し、またソフトウェア補償無しの結果と比較して、ソフトウェア補償が上手く働くか調査する。

まず AHCAL のジオメトリが記述してある xml ファイルのタイルサイズの部分を変更することで、基準設計の全 48 層 30 mm 角タイルのジオメトリ、前半 24 層を 30 mm 角タイル・後半 24 層を 60 mm 角タイルにした精細度を混合したジオメトリ、全 48 層 60 mm 角タイルにしたジオメトリの 3 通り作成した。図 5.7、5.8、5.9 はそれ

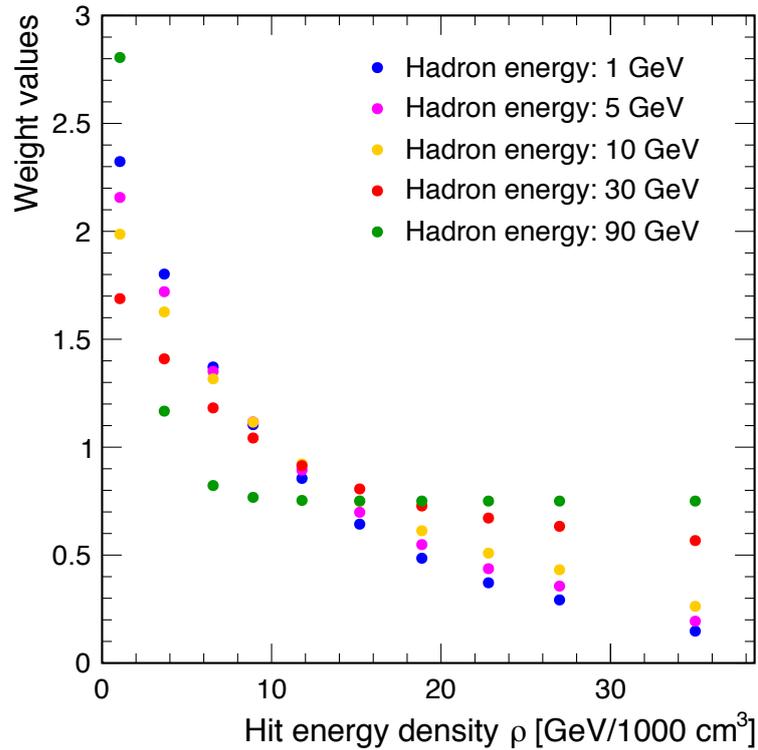


図 5.6 様々なエネルギーのハドロンに関する、ヒットエネルギー密度の重み付け関数 [19]

それぞれのジオメトリのヒットマップである。ビーム軸を z 軸として、 xy 軸はそれに垂直な平面上の軸であり、マップは AHCAL のバレルを 16 等分した 1 つ分のウェッジについて表示している。60 mm 角タイルを適用した層は 30 mm 角タイルよりもヒットのあるチャンネルが疎になっていることから、60 mm 角タイルを含む混合精細度が正しくジオメトリに実装されていることがわかる。

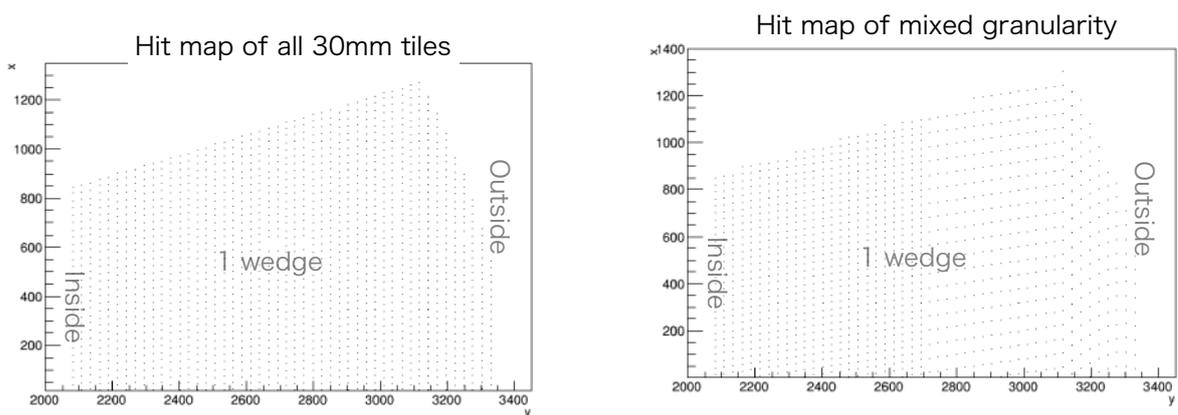


図 5.7 全て 30 mm 角タイルのジオメトリ

図 5.8 前半 24 層が 30 mm 角、後半 24 層が 60 mm 角タイルのジオメトリ

次に iLCSOFT の既存のキャリブレーション用パッケージを用いて、10 GeV の μ と γ 線、20 GeV の K_L^0 のデータから Digitization や PandoraPFA のキャリブレーションを行う。ECAL と HCAL それぞれパラメータが存在するため、どちらもここでキャリブレーションを行う。またソフトウェア補償のトレーニング用のパッケージを用いて、

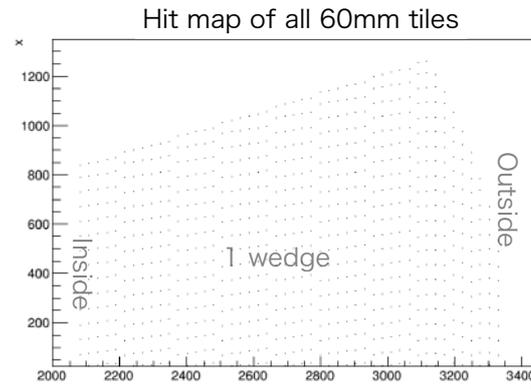


図 5.9 全て 60 mm 角タイルのジオメトリ

10 GeV 刻みの 10–100 GeV の K_L^0 のデータから、ソフトウェア補償のパラメータのキャリブレーションを行う。

そして ddsim を用いて、衝突点から 91 GeV、200 GeV、360 GeV、500 GeV のクォークペア (u, d, s) を生成し、ILD モデルに入射させた。このイベントを再構成してジェットのエネルギー分解能を評価する。この再構成の際に xml ファイルからソフトウェア補償のプロセッサを記述する部分を除外することで、ソフトウェア補償無しでの再構成が可能となる。

また、2 ジェットイベントのため、ジェット 1 つ分のエネルギーはクォークペアのエネルギーの半分である。分解能の評価は、AHCAL のバレル部分のみ ($|\cos \theta| < 0.7$) を用いて行い、その計算には RMS90 という手法を用いた。この手法では全体の 90% のイベントのみを用い、外れ値を除いて標準偏差を計算することで、余分なテール部分のイベントを除外してコアの分解能を評価する。

5.3 結果と考察

まず、ソフトウェア補償無しの場合に関して、先行研究の結果を再現しているか確かめる。図 5.10 左が先行研究の結果、右がソフトウェア補償無しの各ジオメトリの 45.5、100、180、250 GeV ジェットのエネルギー分解能である。全層 30 mm 角タイルと全層 60 mm 角タイルの場合は先行研究より良い分解能を示しているが、分解能の相対的な比は先行研究と同様である。一方で前半 30 mm 角・後半 60 mm 角タイルの場合は逆に分解能が悪化している。この詳細な原因は分かっていないが、先行研究とは使っている iLCSoft と ILD モデルのバージョンが違うこと、精細度を混合するために multi segmentation という機能を用いているが、それによりキャリブレーションや再構成の段階で不具合が起こっていることなどが原因として考えられる。

図 5.11 が再構成されたジェットのエネルギー分解能のプロットである。全層 30 mm 角タイルの場合、前半 30 mm 角・後半 60 mm 角タイルの場合に関してはソフトウェア補償を適用することでジェットエネルギー分解能の改善が見られる。しかし全層 60 mm 角タイルの場合はソフトウェア補償を適用することで分解能が悪化してしまっている。これにより現在のソフトウェア補償のパッケージでは、パラメータが 60 mm 角タイルに最適化されていないことがわかる。

今後の課題と展望として、まず精細度を混合したジオメトリに関して先行研究の結果を再現できるように、その適用方法を再検討しなければならない。また、60 mm 角タイルに関してソフトウェア補償が上手く動作していないので、そのパラメータを最適化すること、さらに精細度の混合したジオメトリの導入のために層ごとに違うパラメータを適用することが改善策として考えられる。

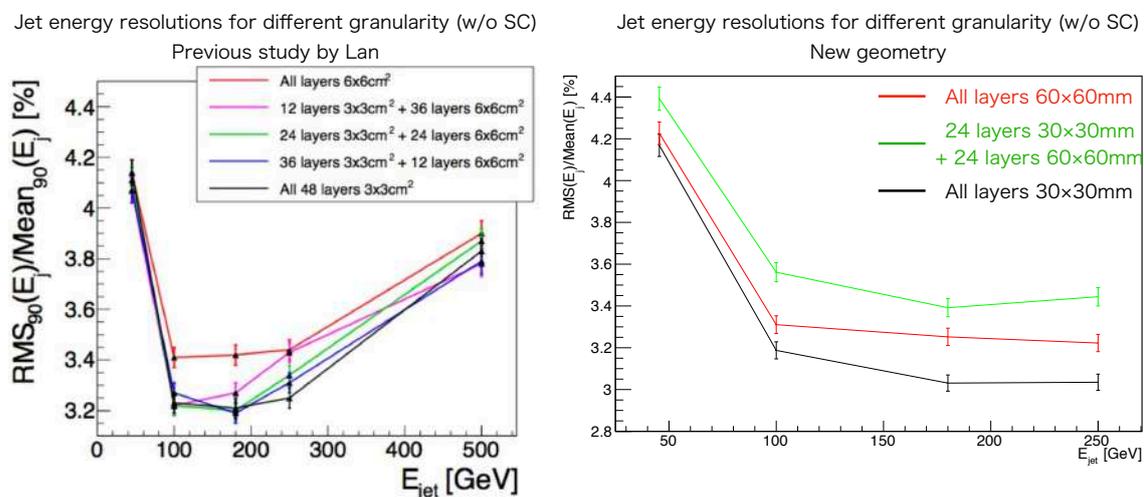


図 5.10 ソフトウェア補償無しの場合のジェットエネルギー分解能の比較

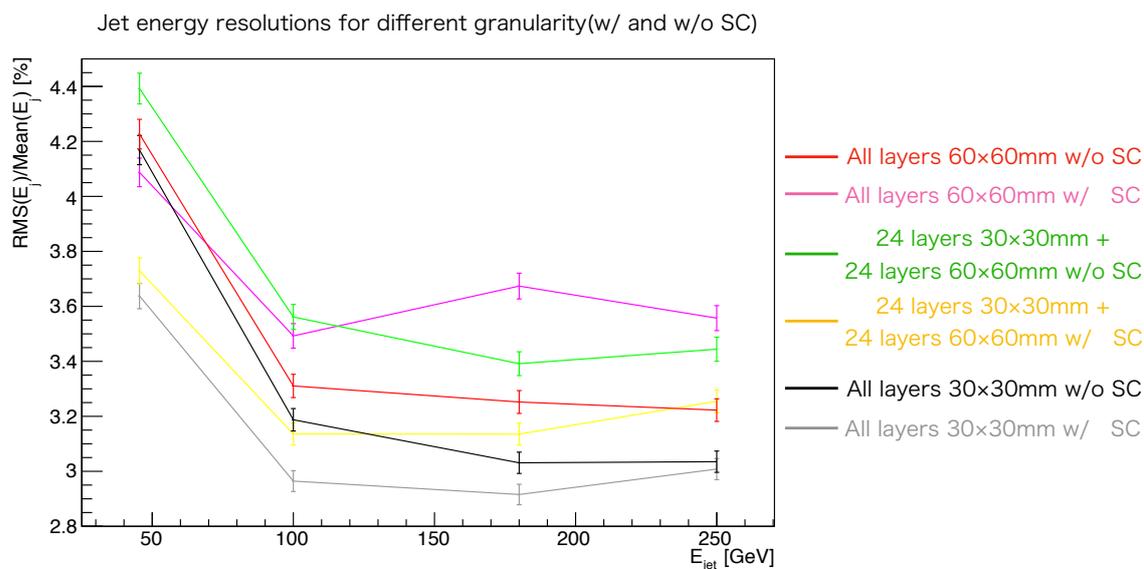


図 5.11 異なる精細度のジオメトリのジェットエネルギー分解能の評価とソフトウェア補償の有無による比較

第 6 章

結論と今後の展望

本研究の主題

ILC 建設開始に向けて、AHCAL の精細度の最適化が行われている。その中で、AHCAL の外側の層を基準設計の 30 mm 角シンチレータタイルより大きなタイルを用いた、精細度を混合した設計が検討されている。この手法により、読み出しチャンネルや ASIC の数を減らすことができ、検出器の建設作業の簡略化、コストの削減に繋がる。

本研究では AHCAL の最適な精細度を決定することに貢献することを目的に、60 mm 角タイルを用いた検出層 HBU の開発、テストビーム実験の解析、ILD モデルを用いたシミュレーションに取り組み、その研究成果を報告した。

60 mm 角シンチレータタイルを用いた検出層 HBU の開発

これまで 30 mm 角より大きなタイルの性能については研究されてこなかったもので、まず 60 mm 角タイルのプロトタイプを作成し、光量・応答の位置依存性を試験した。60 mm 角タイルの検出光量は 30 mm 角タイルに比べて約半分となったが、これは MPPC の有感領域を大きくすることで容易に改善することができる。位置依存性は見られず一様な応答を示すことがわかった。

60 mm 角タイルの性能を実証できたので、60 mm 角タイルを用いた検出層 HBU の製作に取り掛かった。HBU 基板としては標準の 30 mm 角タイル用のものを用いた。光量を補正するために有感領域 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ の専用 MPPC を開発した。また 30 mm 角タイル 4 枚分のスペースに 60 mm 角タイルを置くため、中心からずれた位置での MPPC 読み出しとなる。こちらも光量試験の結果、光量・位置依存性ともに問題ないことが分かったため、このようなデザインで 60 mm 角タイルを用いた HBU を製作した。製作した HBU は備え付けの LED でゲインのチェック、放射線源 ^{90}Sr を用いて光量の測定を行い、通常の 30 mm 角タイル用 HBU と比べて十分なゲイン・光量の値を得ることができた。

テストビーム実験

CERN SPS にて 5 月と 6-7 月にテストビーム実験を行った。AHCAL ではビームのバンチごとに電源供給の ON/OFF を切り替えるパワーパルシングが採用されているが、そのパワーパルシングの ON/OFF で検出器の応答が変化されることが懸念されていた。5 月テストビーム実験のデータを解析し、パイオンに関してその影響を調査した。その結果、パワーパルシング ON/OFF それぞれでキャリブレーションを行い適するパラメータで再構成を行うことで、パワーパルシング ON/OFF で同等の反応を得ることができることがわかった。

6-7 月のテストビーム実験では、38 層目に 60 mm 角タイルを用いた HBU が挿入され東京モジュールと呼ばれる。東京モジュールの各チャンネルは、通常の 30 mm 角タイル用 HBU と同様にベDESTAL、MIP、ゲインなどのキャリブレーションが行われ、それぞれ通常の HBU と同等の結果が得られた。さらにサチレーションの

チェックを行い、350 GeV のパイオンで一部に ADC と MPPC のサチュレーションが見られた。しかし ILC 計画で想定されるハドロンのエネルギーでは、最外層ではサチュレーションは起こらないことがわかった。

内側の層での大型タイルの性能を評価するために ganging tile という手法で、2×2 枚の 30 mm 角タイルの応答を統合して 60 mm 角タイルの応答を再現することに成功した。シャワープロファイルの大きい層では一部サチュレーションが起きているが、エレキや MPPC での対処方法や検出器の性能に対する影響についての検証は今後の課題である。

ILD モデルを用いたシミュレーション

iLCSoft・ILD モデルを用いて、精細度を混合した設計にソフトウェア補償を適用しジェットエネルギー分解能を評価した。全 48 層 30 mm 角タイル、前半 24 層 30 mm 角・後半 24 層 60 mm 角タイル、全層 60 mm 角タイルの 3 つのジオメトリを用意し、それぞれキャリブレーションを行なった後、ジェットイベントをシミュレートしエネルギー分解能を測定した。ソフトウェア補償を適用することで、全層 30 mm 角タイル、前半 30 mm 角・後半 60 mm 角タイルのジオメトリでは分解能の改善がみられるものの、全層 60 mm 角タイルのジオメトリでは分解能が悪化した。これにより現在の iLCSoft のソフトウェア補償のパラメータは 30 mm 角タイル用に最適化されたものであり、60 mm 角タイルを用いると上手く動作しないということが分かった。

展望

以上の研究開発を通して、検出層の開発・テストビーム実験・シミュレーション研究の両面から、AHCAL の精細度を混合した設計について新しい知見を得ることができ、今後の更なる研究に活かすことができる。

60mm 角タイル採用に向けて、ハードウェアの改良を行う。MPPC の位置を調整してタイル中心での読み出しを行ったり、HBU1 枚あたり ASIC の数を 1 個に減らして制御・読み出しを行ったりすることができるような、60mm 角タイル専用の HBU を作成する。また ganging tile による調査から得られたサチュレーションの情報から、SPIROC のダイナミックレンジを変える、MPPC のピクセルピッチを小さくする等の、サチュレーションを抑制するよう改良を行う。

テストビーム実験データに ganging tile を適用し精細度を混合した設計を再現し、その性能を評価する。30 mm 角タイルと ganging tile の層の割合を変えて様々なパターンで精細度を混合した設計を再現することができる。そして粒子識別、複数粒子のシャワーの分離、エネルギー分解能などの解析を行い、もとの実験データによる結果と比較することで、精細度を混合した設計の性能について評価する。

シミュレーションに関しては、ソフトウェア補償を精細度を混合した設計でも動作するよう改修を行う。60 mm 角タイルに最適化したパラメータの作成し、層ごとに異なるパラメータを適用できるよう、プロセッサの開発やキャリブレーションを行う。

このようにして検出層の開発により混合精細度の実現に向けた準備を進めるとともに、テストビーム実験データ、シミュレーションの双方から、AHCAL の最適な精細度を求める。

付録

6.1 HBU 固定用の穴を持つタイルの光量

大型技術試作機に挿入される flexlead で繋げた HBU2 枚をスタックと呼ばれる鉄のケースに収納され、2 組分を 1 層として挿入される。そのスタックと HBU を固定するために、スタック、HBU、タイルを貫通してネジ止めするための穴が開けられている。HBU1 枚毎に 6 個の穴が存在し、30 mm 角タイルの場合は光量への影響が無いよう、ちょうどタイルの角が 1 部欠けるように設計されている。

6.1.1 穴を持つ 60 mm 角タイル

図 6.1 のように、60 mm 角タイルは 30 mm 角タイル 4 枚分のスペースに置かれるため、ネジ止め用の穴が側面にあるものもあれば、中央付近にあるものもある。特に中央付近にあるものに関しては光量への影響が懸念される。

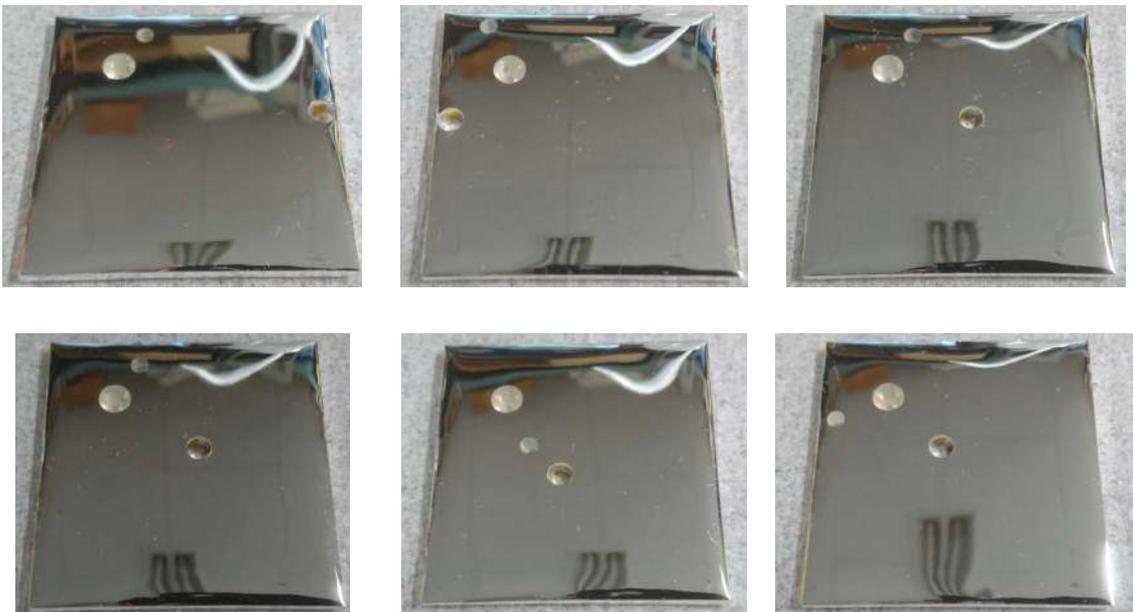


図 6.1 穴を持つ 60 mm 角タイル

6.1.2 光量への影響の調査

図 6.2 は、節 3.4.3 の結果中で穴あきタイルのチャンネルを示したものであり、図 6.3 は穴あきタイルの光量ヒストグラム (赤) と穴なしタイルの光量ヒストグラム (青) である。穴あきタイルの光量は平均 18.6 p.e.、穴なしタイルの平均は 19.6 p.e. である。やはり穴あきタイルの方が光量が低くなっているが、穴なしタイルに比べて 5% の

減少と軽微なので、運用上問題はない。

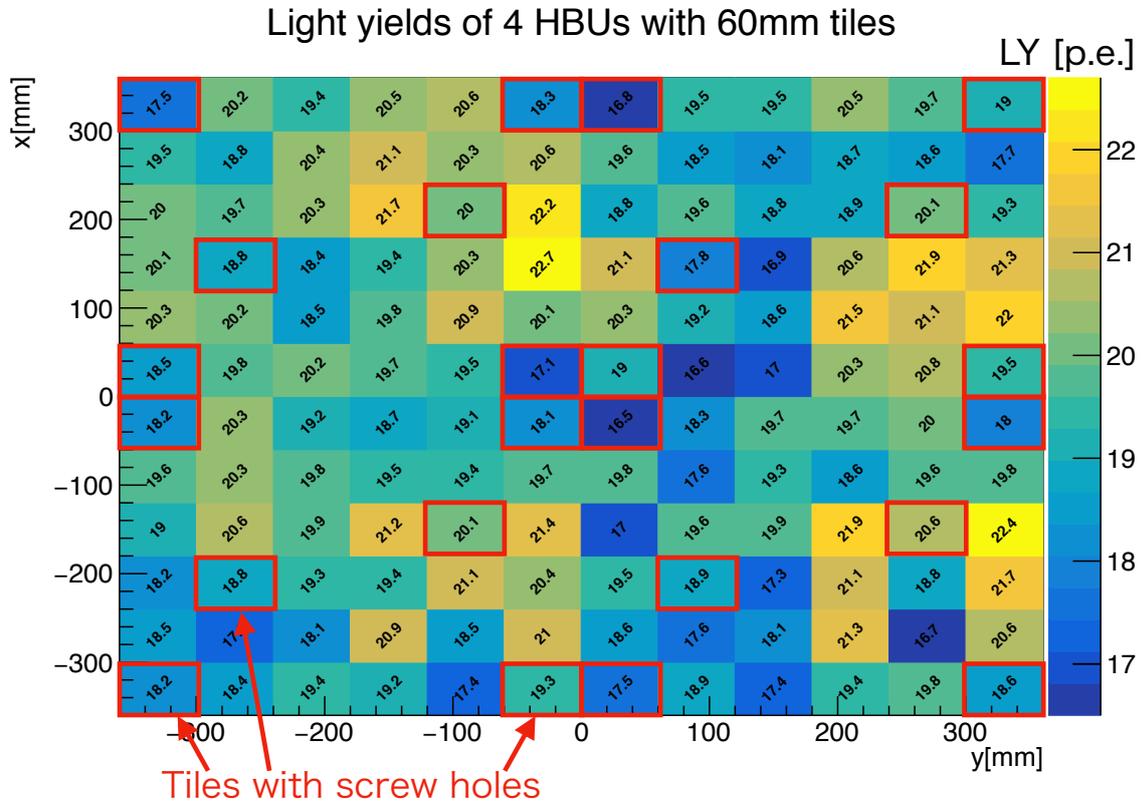


図 6.2 穴あきタイルのチャンネル

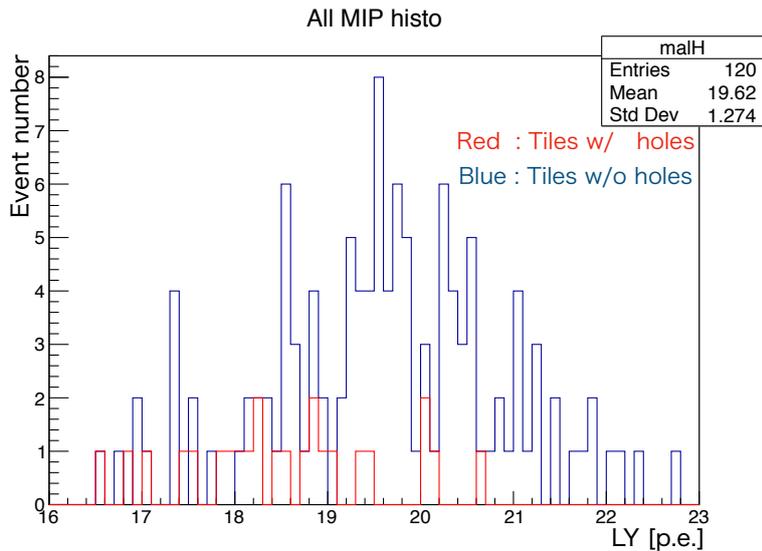


図 6.3 穴の有無で分けた光量ヒストグラム

謝辞

本研究や大学院生活において、非常に多くの方にお世話になり、支えていただきました。まず皆様にお礼の言葉を申し上げます。ありがとうございました。

初めに、指導教員の 大谷航准教授には基礎から丁寧に教えていただいたこと、また発表資料や書類などを非常に親身になってチェックしていただいたこと、深く感謝いたします。森俊則教授には、ゼミやミーティングで鋭いコメントをいただき、新しい気づきや知見を得ることができました。

劉靈輝さんには入学当初から大変お世話になり、装置の使い方から解析に到るまで多くのことを教えていただきありがとうございます。また今回の HBU 製作にも力を貸していただきました。鳥丸達郎くんには、大学時代からの仲ですが大学院でも同期として共に研究に励むことができました。

DESY の研究者の方々にも HBU に関する指導やテストビーム実験の運営など多岐に渡り協力していただきました。Jiri Kvasnika には HBU や DAQ に関してご指導いただきました。Mathias Reinecke には HBU を提供していただきました。須藤裕司さんには解析についての知識や手順を教えていただきました。Felix Sefkow、Katja Kruger には大型試作機への開発した HBU の挿入からテストビーム実験など多岐に渡りサポートいただきました。また Amine Elkhali, Anna Rosmanitz、Christian Graf、Daniel Heuchel、Erik Buhmann、Lorenz Emberger、Olin Pinto、Saiva Huck、Vladimir Bocharnikov にはテストビーム実験からその後の解析まで協力して研究を行うことができました。感謝を申し上げます。

また、岩本俊幸助教には PSI の諸々の手続きをしていただきました。内山雄祐特任助教には PSI での研究に関して MEG・TC に関する知識など様々なアドバイスをいただきました。家城佳特任研究員には SCS のファームウェアに関してサポートをいただきました。中尾光孝さんには PSI での研究に関して大変お世話になり、基本知識から研究の手順、装置の使い方、実装に至るまで広くに渡りご指導をいただきました。宇佐見正志さんには装置設置を手伝っていただきました。西村美紀さんには私の研究状況について気にかけてくださり、様々なアドバイスをいただきました。小川真治さんにはソフトウェアに関する知識を教えていただきました。恩田理奈さんとは初年時ゼミカウンターの開発を共に行い、その後も協力して研究を行うことができました。小林暁さんとは入学当初から共に研究を行ったり疑問に答えていただいたり、様々なことでサポートをしていただきました。大矢淳史くん、豊田和輝くん、野内康介くんには実験を手伝ってもらいました。

ICEPP の同期とは時に笑い合い、時に切磋琢磨して、共に研究を進めました。さらに出張や会議の準備など種々の手続きをサポートしていただいた ICEPP 秘書の皆様にも大変お世話になりました。

最後になりますが、ここまで支えてくださった家族、教え導いてくださった皆様に、厚く御礼と感謝を申し上げます。ありがとうございます。

参考文献

- [1] ATLAS Collaboration, “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC,” *Phys. Lett. B*, 716, 1, 2012.
- [2] CMS Collaboration, “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC,” *Phys. Lett. B*, 716, 30, 2013.
- [3] Linear Collider Collaboration, “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary,” 2013a.
- [4] Linear Collider Collaboration, “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 4: Detectors,” 2013b.
- [5] M. Kobayashi et al., “Cosmic ray tests of a GEM-based TPC prototype operated in Ar-CF₄-isobutane gas mixtures,” *Nucl. Instrum. Meth.*, A641, 37–47, 2011.
- [6] J.S. Marshall et al., “Pandora Particle Flow Algorithm,” arXiv, 1308.4357v1, 2013.
- [7] M.A. Thomson, “Particle Flow Calorimetry and the PandoraPFA Algorithm,” *Nucl. Instrum. Meth.*, A611:25-40, 2009.
- [8] Benjamin Hermberg for the CALICE Collaboration, “Commissioning of the testbeam prototype of the calice tile hadron calorimeter,” 2012.
- [9] Stephan Marten, “Tile reflector wrapping,” presentation at CALICE AHCAL main meeting 2017, 2017.
- [10] Phi Chau, “HBU tile assembly & integrated performance test setup,” presentation at CALICE AHCAL main meeting 2017, 2017.
- [11] 浜松ホトニクス社, “MPPC S13360 シリーズ 製品カタログ,”.
- [12] al. 横山将志, “Multi Pixel Photon Counter の研究開発,” *高エネルギーニュース*, 26-3, 216, 2007.
- [13] A. Ghassemi et al, “MPPC / Technical note,” 2017.
- [14] 浜松ホトニクス社, “光半導体素子ハンドブック 第 03 章 Si APD、MPPC,”.
- [15] 音野瑛俊, “Study of MPPC at liquid nitrogen temperatures,” presentation at PD07, 2007.
- [16] Omega, “SPIROC2 データシート,” 2009.
- [17] Mathias Reinecke, “AHCAL Series Production,” Presentation at CALICE main meeting, 2017.
- [18] J. Kvasnicka on behalf of the CALICE collaboration, “Data Acquisition System for the CALICE AHCAL Calorimeter,” TXEPP2016, 2016.
- [19] Houn Lan Tran for the CALICE Collaboration, “Software compensation in Particle Flow reconstruction,” *Eur. Phys. J. C*, 77, 697, 2017.
- [20] 鳥丸達郎, “ILC ハドロンカロリメータ用検出層の性能向上に関する研究と大型技術試作機のビーム試験,” 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 修士論文, 2018.
- [21] 3M 社, “仕様一覧、ESR シリーズ,” URL : <http://www.mmm.co.jp/display/spec/>.
- [22] 柴田直也, “ILC 測定器用ハドロンカロリメータにおけるシンチレータセルユニットの研究開発,” 東京大学大

- 学院理学系研究科物理学専攻 修士論文, 2015.
- [23] 劉靈輝, “ILC 測定器用ハドロンカロリメータ検出層の性能向上に関する研究および宇宙線試験装置の開発,” 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 修士論文, 2017.
- [24] 浜松ホトニクス社, “S12571-010, -015C/P 製品カタログ,”.
- [25] Paul Sherrer Institut (PSI), “DRS チップホームページ,” URL : <https://www.psi.ch/drs/drs-chip>.
- [26] P.W. Cattaneo et al., “Development of High Precision Timing Counter Based on Plastic Scintillator with SiPM Readout,” IEEE Trans. Nucl. Sci., 61, 2657-2666, 2014.
- [27] Araldite, URL: <http://www.go-araldite.com/>.
- [28] K Kruger, the CALICE collaboration, “Prototype tests for a highly granular scintillator- based hadron calorimeter,” J. Phys.: Conf. Ser., 587, 012033, 2015.
- [29] CALICE Collaboration (Adloff C et al.), “Electromagnetic response of a highly granular hadronic calorimeter,” JINST, 6, 4003, 2011a.
- [30] CALICE Collaboration (Adloff C et al.), “Hadronic energy resolution of a highly granular scintillator-steel hadron calorimeter using software compensation techniques,” JINST, 7, 9017, 2012.
- [31] CALICE Collaboration (Adloff C et al.), “Track segments in hadronic showers in a highly granular scintillator-steel hadron calorimeter,” JINST, 8, 9001, 2013a.
- [32] CALICE Collaboration (Adloff C et al.), “Validation of GEANT4 Monte Carlo models with a highly granular scintillator-steel hadron calorimeter,” JINST, 8, 7005, 2013b.
- [33] CALICE Collaboration (Adloff C et al.), “Tests of a particle flow algorithm with CALICE test beam data,” JINST, 6, 7005, 2011b.
- [34] V. V. Uzhinsky, “The Fritiof (FTF) Model in Geant4,” Proceedings of CHEF 2013, 2013.
- [35] Geant4 Collaboration, “Geant4 Physics reference manual,” Release 10.4, 2017.
- [36] CERN ホームページ, URL : <https://home.cern/>.
- [37] Katja Kruger, “First Look into Test Beam Data Taken with the CALICE SiPM-on-Tile AHCAL Prototype,” 2018.
- [38] Daniel Heuchel, “Pedestals and MIP constants,” Presentation at AHCAL Main Meeting, 2018.
- [39] Olin Pinto, “AHCAL Calibration and SiPM Saturation,” Presentation at AHCAL main meeting, 2018.
- [40] F. Gaede, Presentation at ILD SW Meeting, iLCSoft Tutorial, 2017.
- [41] F. Gaede, “LCIO - A persistency framework for linear collider simulation studies,” arXiv, physics/0306114v1, 2003.
- [42] R. Wigmans, Nucl. Instrum. Meth., A259, 389, 1987.
- [43] C Adloff, “Hadronic energy resolution of a highly granular scintillator-steel hadron calorimeter using software compensation techniques,” JINST, 7, 9017, 2012.