修士学位論文

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

Development of HCAL scintillator cell unit for ILC detector

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻

大谷航研究室

146039 **柴田 直哉**

2016年1月

概要

本研究では国際リニアコライダー実験の検出器におけるハドロンカロリメータの候補である AH-CAL(Analog Hadronic Calorimeter)の粒子検出部分シンチレータセルユニットの開発を行なった。

国際リニアコライダー実験 (ILC: International Linear Collider) は全長約 31 km の線形加速器を用い 電子陽電子衝突実験を行い、Higgs 粒子の精密測定や新粒子の探索などを目的としている。国際リニアコ ライダー実験で目的とする物理現象を探索するイベントでは終状態に複数のジェットを含む。そのため ジェットの精密な測定が重要であり、ジェットエネルギー分解能 $\sigma_E/E=30\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ を実現するこ とにより物理現象の精密測定を行なう。

ILC 測定器では、このジェットエネルギー分解能を実現するために PFA(Particle Flow Agorithm) と いう事象再構成法を用いる。PFA ではジェットに含まれる全ての粒子の再構成を行う。また、PFA では 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での性能を向上させる。荷 電粒子は飛跡検出器、光子は電磁カロリメータ、中性ハドロンはハドロンカロリメータでエネルギー測定 を行なう。PFA では検出器中で粒子を分離するために検出器の高精細化が重要である。

ハドロンカロリメータの役割は中性ハドロンのエネルギーの測定であるが、荷電ハドロン等もハドロン カロリメータにおいてカスケードシャワーを起こす。よって荷電ハドロン等の他の測定器でより精度良く 測れる粒子の寄与を効率良く分離することが求められる。ハドロンカロリメータでのエネルギー付与はか なり大きいのでハドロンカロリメータの研究開発は優れたジェットエネルギー分解能を実現するために重 要である。

AHCAL はサンプリング型のハドロンカロリメータで、吸収層は鉄が考えられている。検出層はピクセル化された高精細な構造になっており、多数のシンチレータセルユニットと読み出し基板から構成される。シンチレータセルユニットは大きさ 30 mm² 厚さ 3 mm のプラスチックシンチレータタイルと半導体光検出器 SiPM(Silicon PhotoMultiplier)を組み合わせた粒子検出部分である。AHCAL のデザインは決定しておらず複数のデザイン案が存在する状況である。

本研究ではプラスチックシンチレータの大量生産の観点から、射出成形プラスチックシンチレータの性 能評価を行なった。また、ハドロンカロリメータの長期的な安定稼働に重要な SiPM の放射線耐性の比較 評価を行なった。さらに、1 枚のプラスチックシンチレータタイルに対し 4 個の SiPM でシンチレーショ ン光を読み出す新しいデザインのシンチレータセルユニットの開発を行なった。

シンチレータセルユニットの構成要素であるプラスチックシンチレータタイルと SiPM それぞれの研 究開発、新しい読み出し方法を用いるシンチレータセルユニット自体の研究開発を通し、シンチレータセ ルユニット全体としてのデザインの提案を行なった。

目次

概要		i
第1章	序論	1
1.1	ILC の検出器	1
	1.1.1 ILD(International Large Detector)	1
	1.1.2 PFA(Particle Flow Algorithm)	3
第2章	AHCAL (Analog Hadronic Calorimeter)	6
2.1	カロリメータ	6
	2.1.1 カスケードシャワー	6
	2.1.2 補償型カロリメータ	6
	2.1.3 サンプリング型カロリメータ	$\overline{7}$
2.2	AHCAL の構造と粒子検出原理	7
2.3	シンチレータセルユニット..................................	9
	2.3.1 SiPM	10
2.4	シンチレータセルユニットの研究開発及び本研究の目的	13
第3章	シンチレータマテリアルの比較	14
3.1	有機プラスチックシンチレータの製法と材料	14
3.2	発光量の比較	15
	3.2.1 測定セットアップ	15
	3.2.2 測定方法	19
	3.2.3 結果と考察	21
第4章	MPPC の放射線耐性の評価	23
4.1	背景	23
	4.1.1 放射線による SiPM の損傷	23
4.2	$^{60}\mathrm{Co}$ 線源を用いた MPPC のガンマ線照射試験....................................	25
	4.2.1 ガンマ線照射試験の目的及び使用したサンプル MPPC	25
	4.2.2 ガンマ線照射セットアップ	26
	4.2.3 ガンマ線照射条件	27
	4.2.4 測定結果と考察	28
4.3	神戸大学タンデム加速器をもちいた MPPC 中性子照射試験	31

	4.3.1 中性子照射試験の目的及び使用したサンプル MPPC	31
	4.3.2 中性子照射セットアップ及び中性子照射条件	32
	4.3.3 中性子フラックスのとガンマ線照射量の測定	33
	4.3.4 結果と考察	38
4.4	放射線照射試験まとめ	40
第5章	新しいシンチレーション光読み出し方法の開発	41
5.1	4 点読み出し法	41
	5.1.1 シンチレータセルユニットデザイン	44
5.2	新デザインのプロトタイプを用いた測定............................	45
	5.2.1 セットアップ	45
	5.2.2 測定方法	49
5.3	測定結果と考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	49
	5.3.1 光量の一様性	50
	5.3.2 Hit 判定の inefficiency	52
	5.3.3 光漏れによる fake hit の評価	53
	5.3.4 測定結果まとめ	57
5.4	シミュレーションを用いた新しい読み出し方法の評価	59
	5.4.1 目的	59
	5.4.2 ILCsoft を用いた検出器シミュレーション	59
	5.4.3 4 点読み出し方法の Digitization コードへの実装	60
	5.4.4 今後の展望	63
第6章	結論と今後の展望	64
謝辞		66
参考文献		68

図目次

1.1	ILD 外観 [5]	1
1.2	ILD 断面図 [5]	2
1.3	TPC 及びその周辺の検出器 [5]	3
1.4	従来型の検出器(左図)と PFA を用いる検出器(右図)の概念図. PFA では飛跡検出器	
	で荷電ハドロンのエネルギー測定を行なう.(p^\pm :荷電ハドロン、 γ :光子、 h^0 :中性ハ	
	ドロン)[2]	4
1.5	イベントディスプレイ [3]	5
2.1	AHCAL 模式図(断面図)[6]	8
2.2	AHCAL のバレル部分 [2]	8
2.3	AHCAL のバレルを構成するブロック [5]	8
2.4	HBU(HCAL Base Unit)[2].	9
2.5	HBU 背面. 30 mm×30 mm に細分化されたシンチレータセルユニットがしきつめられ	
	นาง $[2]$	9
2.6	様々なシンチレータセルユニット案 [5][7]	10
2.7	表面実装型 MPPC[10]	10
2.8	ピン型 MPPC[10]	10
2.9	SiPM 断面の模式図 [13]	11
2.10	SiPM の波形. [12]	12
2.11	MPPC のリーク電流の印加電圧依存性 (IV 曲線) [14]. ブレークダウン電圧 ($65.5~\mathrm{V}$ 付	
	近)を超えるとリーク電流が増大する.................................	12
3.1	射出成形(左)とキャスト成形(右)のプラスチックシンチレータタイル (30 mm×30	
	mm×3 mm). 目視では透明度の違いは確認できない	16
3.2	リフレクターを巻いたプラスチックシンチレータタイル.MPPC が接する面以外をリフ	
	レクターで覆った	16
3.3	MPPC の光子検出効率 (PDE) の波長依存性 [11]	16
3.4	${ m EJ-212}$ の発光波長分布 $[16]$. MPPC の検出効率が最大になる波長付近にピークがある.	16
3.5	MPPC マウント回路	17
3.6	DRS 概念図 [17]	17
3.7	ジグ全体図	18
3.8	シンチレータ・ MPPC 固定部	18
3.9	トリガーカウンター (テフロンテープ無し)	18

3.10	セットアップ略図	.9
3.11	PSI アンプ	9
3.12	線照射位置	.9
3.13	シンチレーション光の波形と解析範囲 2	20
3.14	ダークシグナルの波形と解析範囲2	20
3.15	シンチレーション光の charge 分布(横軸の単位: C/1.6×10 ⁻¹⁰)	21
3.16	MPPC1 の光量	!1
3.17	MPPC2 の光量	!1
3.18	PVT の光量に対する比 (MPPC1)	22
3.19	PVT の光量に対する比 (MPPC2)	22
4.1	中性子のはじき出し効果によるバルク損傷の模式図	24
4.2	バンドギャップ中に新たに生成される準位2	24
4.3	先行研究における中性子照射量に対する MPPC のダークシグナル波形の変化 [21] 2	24
4.4	先行研究におけるガンマ線照射中のリーク電流の急激な増加 [20]	25
4.5	S12572-025C[11]	25
4.6	VUV MPPC. 2	25
4.7	セットアップ模式図 1	26
4.8	セットアップ写真2	26
4.9	セットアップ模式図 2	27
4.10	照射試験中の温度変化2	28
4.11	ガンマ線照射中のリーク電流 (New type 3 mm MPPC) 2	28
4.12	ガンマ線照射中のリーク電流 (new type VUV MPPC)	28
4.13	ガンマ線照射後の New type 3 mm MPPC の IV 曲線	60
4.14	ガンマ線照射後の new type VUV MPPC の IV 曲線	60
4.15	S10362-11-025C[12]. (S12571-025C も外観に違いは無い.) 3	31
4.16	VUV MPPC. 3	1
4.17	神戸大学タンデム加速器	32
4.18	中性子照射セットアップ模式図3	3
4.19	中性子照射セットアップ写真3	3
4.20	ELMA ダイオード拡大写真 [24] 3	4
4.21	アミノグレイ [25]	4
4.22	ELMA ダイオード及びアミノグレイ中性子照射セットアップ3	\$4
4.23	ELMA ダイオード IV 測定セットアップ模式図	5
4.24	ELMA ダイオード IV 測定セットアップ	6
4.25	プローブと ELMA ダイオード拡大図	6
4.26	ELMA ダイオード IV 曲線	6
4.27	中性子照射量ごとのダークシグナル3	8
4.28	IV 曲線 (New type 1 mm 角 MPPC)	;9
4.29	IV 曲線 (Old type 1 mm 角 MPPC) 3	;9
4.30	IV 曲線 (New type VUV MPPC) 3	\$9

义	目	次
---	---	---

4.31	中性子照射済み MPPC の種類ごとの電流値の比較	40
5.1	読み出し基板にマウントされたシンチレータセルユニット	41
5.2	新読み出しデザイン....................................	42
5.3	新デザインの動作原理	43
5.4		43
5.5	Dimple 式概念図	44
5.6	WLS 式概念図	44
5.7	WLS EJ-280 の吸収・発光波長分布 [26]	45
5.8	ジグ模式図	46
5.9	プラスチックシンチレータタイル Dimple 式	46
5.10	プラスチックシンチレータタイル WLS 式..............................	46
5.11	プラスチックシンチレータタイル Dimple 式	47
5.12	プラスチックシンチレータタイル WLS 式	47
5.13	WLS EJ-280	47
5.14	プロトタイプセットアップ Dimple 式	47
5.15	プロトタイプセットアップ WLS 式	47
5.16	MPPC 読み出し基板	48
5.17	プラスチックシンチレータ固定用デルリンフレーム...............	48
5.18	9 枚並べたシンチレータタイル (Dimple 式)	48
5.19	固定済みシンチレータタイルと基板	48
5.20	数珠つなぎにした 2 個の $DRS($ チャンネル数 $8)$	48
5.21	複数チャンネル HV 源(HV カード)を搭載した SCS2000	48
5.22	測定セットアップ上面模式図...................................	49
5.23	メインタイル A 内の 線照射位置	49
5.24	メインタイルの MPPC の charge 分布	50
5.25	隣接タイルの MPPC での charge 分布	50
5.26	メインタイル A のそれぞれの MPPC で得られた光電子数の分布(Dimple 式)	50
5.27	メインタイル A の 4 個の MPPC を使用した場合に得られる光電子数の分布 ($Dimple$ 式).	51
5.28	MPPC1 個のみを使用したときのメインタイルで得られる光量 (Dimple 式)	51
5.29	$\mathrm{MPPC1}$ 個のみを使用したときのメインタイルで得られる光量 $(\mathrm{WLS}\ \mathtt{d})$	51
5.30	4 個の MPPC を使用したときのメインタイル光量 (Dimple 式)	52
5.31	4 個の MPPC を使用したときのメインタイル光量 $(WLS র)$	52
5.32	4 個の MPPC を使用したときの光量分布 (Dimple 式)	52
5.33	4 個の MPPC を使用したときの光量分布 (WLS 式)	52
5.34	4 個の MPPC を使用したときの Inefficiency (Dimple 式)	53
5.35	4 個の MPPC を使用したときの Inefficiency (WLS 式)	53
5.36	隣接タイルの 3 個の MPPC を使用した場合に得られる光電子数の分布	54
5.37	光漏れ模式図	54
5.38	光漏れの量 (Dimple 式)	55
5.39	光漏れの量(WLS 式)	55

5.40	シンチレーション光の伝播模式図 (WLS 式)	56
5.41	光漏れにより起こる fake hit 確率 (Dimple 式)	56
5.42	光漏れにより起こる fake hit 確率 (WLS 式)	56
5.43	隣接タイル D 光漏れ模式図	57
5.44	現行デザインの光量の一様性 [9]	58
5.45	ILC Soft を用いたシミュレーションの一般的な流れ	60
5.46	読み出し基板にマウントされたシンチレータセルユニット	61
5.47	現状の AHCAL シンチレータセルユニットデザインでの digitization の流れ (概念図).	62
5.48	4 点読み出し法を用いた digitization の流れ(概念図)	63

第1章

序論

国際リニアコライダー実験(ILC: International Linear Collider)は最大全長約31kmの電子陽電子衝突型線形加速器を用いる次世代エネルギーフロンティア実験である。ILCでは内部構造をもたない電子と 陽電子を衝突させるため、ハドロンコライダーを用いる実験に比べてバックグラウンドの小さいクリーン な環境で実験・解析が可能であり、より物理現象の精密測定が可能である。

1.1 ILC の検出器

1.1.1 ILD(International Large Detector)

検出器は現在 ILD(International Large Detector: 日本・ヨーロッパ中心) と SiD(Silicon Detector: ア メリカ中心) の 2 つが考えられている。ここでは ILD の主な subdetector について述べる。

図 1.1 は ILD の外観図(CG) 図 1.2 は ILD の断面図である。ILD は主に崩壊点検出器、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で構成されている。カロリメータの外側にはソレノイド コイルがあり、コイル内部に 3.5T のビーム軸に並行な磁場を発生させる。以下ではそれぞれの検出器に ついて述べる。



図 1.1 ILD 外観 [5].



図 1.2 ILD 断面図 [5].

崩壊点検出器

衝突点に最も近い位置に設置されるピクセル化された半導体検出器である。崩壊点検出器は荷電粒子の 飛跡とその粒子の崩壊点を再構成するために用いられる。

中央飛跡検出器

中央飛跡検出器は TPC(Time Projection Chamber) とシリコン検出器で構成される。主飛跡検出器と して TPC(Time Projection Chamber) を使用する事は ILD の特徴の1つである。図1.3 は中央飛跡検出 器周辺の検出器の図である。シリコン検出器は主飛跡検出器(TPC) と他の検出器の間を補完し飛跡検出 器全体の性能を向上させるために設置される。崩壊点検出器と主飛跡検出器の間の部分には SIT(Silicon Internal Tracker) と FTD(Forward Tracking Detector) が配置される。電磁カロリメータと TPC の間 の領域には、バレル部分には SET(Silicon External Detector)、エンドキャップ部分には ETD(Endcap Tracking Detector) が設置される。主飛跡検出器である TPC はガス検出器であり、荷電粒子の飛跡を3 次元的に再構成する事ができる。TPC 内部はガスで満たされており、荷電粒子が通過した際に生じる電 離電子はビーム軸方向にかけられた電場によりエンドプレート方向にドリフトされる。ドリフトしてきた 電離電子はエンドプレート部に設置されている MPGD(Micro Patern Gas Detector) により信号として 検出される。電離電子のドリフト時間と MPGD での2 次元的な信号パターンより3 次元的に荷電粒子の 運動量の劣化を小さくしカロリメータのでの粒子のエネルギー測定への影響を小さくしている。



図 1.3 TPC 及びその周辺の検出器 [5].

カロリメータ

カロリメータ役割は中性粒子のエネルギーの測定である。ILD のカロリメータは電磁カロリメータと ハドロンカロリメータの2個があり、どちらもサンプリング型のカロリメータである。サンプリング型の カロリメータは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ための検出層が交互にサンド イッチ状に並べられた構造をしている。カロリメータではシャワーのエネルギーとその形状から入射され た中性粒子のエネルギーを再構成する。PFA ではジェット中の全ての粒子を再構成するのでジェット中 のクラスターが分離されていることが重要である。よって、PFA に最適化するために ILD のカロリメー タの検出層は ピクセル状に細分化された高精細なデザインが考えられている。

電磁カロリメータの役割は光子のエネルギーの測定である。光子が電磁カロリメータに入射された際に 発生する電磁シャワーのエネルギーを測定する。電磁カロリメータの吸収層はタングステンが考えられて いる。吸収層は複数のデザイン案があり、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、ピクセル型シリコン半導体検出器を用いるデザイン、さらにこれら 2 種のデザインを統合した ハイブリッドデザインである。いずれも検出層は 5 mm×5 mm のセルに分けられ、高精細なデザインに なっている。

ハドロンカロリメータでは中性ハドロンのエネルギーの測定を行う。ハドロンカロリメータは 10 mm×10 mm のセルに細分化したガス検出器であるデジタル式と、30 mm×30 mm のプラスチックシン チレータタイルと SiPM からなるシンチレータセルユニットから構成されるアナログ式のデザインが候 補として考えられている。東京大学ではアナログ式の AHCAL(Analog Hadronic Calorimeter) につい ての研究を行っている。ハドロンカロリメータについては次章において述べる。

1.1.2 PFA(Particle Flow Algorithm)

ILC 実験の e^+e^- 衝突実験において、目標とする物理に重要なイベントの終状態は複数のジェットを含む。よってジェットの精密な測定が重要である。ILC ではジェットエネルギー分解能 $\sigma_E/E=30\%/\sqrt{E(GeV)}$ を目標としている。この目標を達成するためには検出器の性能を向上させることのみでは難しく、PFA(Particle Flow Algorithm)という事象再構成方法を用いる。PFA はジェット中の粒子のエネルギー測定において、粒子の種類ごとに最も精度よく測定できる検出器を使い分けて全体の ジェットエネルギー分解能を向上させる手法である。荷電粒子は飛跡検出器、光子は電磁カロリメータ、 中性ハドロンはハドロンカロリメータを用いてエネルギー測定を行なう。

表 1.1 に示したように、典型的なジェットのエネルギーに占める各種粒子の寄与は、荷電粒子が約 62%、 光子が約 27%、中性ハドロンが約 10%、ニュートリノが約 1 % である。荷電粒子の大部分は荷電ハドロ ンであるため、ジェットのエネルギーの約 2/3 は荷電ハドロンによる寄与である。PFA を用いない従来 の検出器では荷電ハドロンと中性ハドロンの両方をカロリメータを用いて測定していた。PFA を用いる 場合は、カロリメータよりエネルギー分解能の良い飛跡検出器で荷電ハドロンのエネルギー測定を行なう ことにより検出器全体でのジェットエネルギー分解能を向上させる(図 1.4)。[1]

粒子の種類	ジェットエネルギーに占める割合 [%]	測定に使用する検出器
荷電粒子	62	飛跡検出器
光子	27	電磁カロリメータ
中性ハドロン	10	ハドロンカロリメータ
ニュートリノ	1	検出不能

表 1.1 ジェットを構成する各粒子のエネルギー分解能.



図 1.4 従来型の検出器 (左図) と PFA を用いる検出器 (右図) の概念図. PFA では飛跡検出器で荷 電ハドロンのエネルギー測定を行なう. (p^{\pm} :荷電ハドロン、 γ :光子、 h^{0} :中性ハドロン) [2].

図 1.5 はシミュレーションによるジェットイベントのイベントディスプレイである。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におけるクラスターを1対1対応させてジェット中の粒子 の再構成を行なう。対応する飛跡が存在するクラスターを荷電粒子由来、対応する飛跡が無いクラスター を中性粒子由来と判定し、カロリメータでは中性粒子由来のクラスターのエネルギーのみを再構成する。 したがってカロリメータおける荷電粒子(主に荷電ハドロン)由来のクラスターと中性粒子由来のクラス ターを精度よく分離することが重要であり、検出器の高精細化が求められる。



図 1.5 イベントディスプレイ [3].

第2章

AHCAL (Analog Hadronic Calorimeter)

AHCAL(Analog Hadronic Calorimeter) はドイツ、アメリカ、ロシアや日本のグループなどで研究開発が行われている、プラスチックシンチレータと SiPM を組み合わせた読み出し方式を採用するサンプリング型ハドロンカロリメータである。この章ではカロリメータの一般的な事項にふれた後に AHCAL について述べる。

2.1 カロリメータ

2.1.1 カスケードシャワー

高エネルギーで物質に入射された粒子は物質と相互作用を起こし2次粒子を生成する。さらに、生成された粒子が同様に物質と相互作用しその2次粒子を生成する。このような入射粒子が物質と相互作用し、 粒子数が指数関数的に増加して物質中をシャワーのように時間的に発展していく現象をカスケードシャ ワーと呼ぶ。カスケードシャワーは2次粒子のエネルギーが新しく粒子を生成するのに必要なエネルギー 以下になるまで続く。

カスケードシャワーは電磁相互作用によって引き起こされる電磁シャワーと強い相互作用によって引き 起こされるハドロンシャワーの2種に大別できる。電磁シャワーは電子や陽電子や光子などの粒子が電子 陽電子対生成と制動放射を繰り返すことにより発展していく。ハドロンシャワーはハドロンと物質中の原 子核との強い相互作用によってK中間子、π中間子、中性子、陽子などの2次粒子が生成され発展して いく。ハドロンシャワーは電磁シャワーよりも長く続くため奥行きが長く広がりの大きいシャワーとなる のでハドロンカロリメータ中でシャワーを止めるために大きな物質量が必要となる。

2.1.2 補償型カロリメータ

一般に、カロリメータに同じエネルギーの光子とハドロンが入射された場合に測定されるエネルギーは ハドロンの方が小さい。これは、ハドロンシャワー中ではエネルギーの測定が難しい中性子が出ること、 そしてミューオンやカロリメータでとらえる事ができないニュートリノが入射ハドロンのエネルギーを持 ち去ってしまうからである。

また、ハドロンシャワー中で π⁰ 粒子が生成されると 2 個の光子に崩壊するため、ハドロンシャワー中 では電磁シャワーも共に起こる。電磁シャワーではハドロンシャワーに見られる先述のようなエネルギー の測定ロスがないためハドロンシャワー中で π⁰ 粒子が生成される量によって測定される入射ハドロンの エネルギーは変動する。ハドロンシャワー中で生成される π⁰ 粒子の数は事象ごとに異なるため、ハドロ ンシャワーのエネルギーは事象ごとに揺らぎが大きい。これらの問題に対し、ハドロンシャワーの応答と 電磁シャワーの応答を同等に扱えるように最適化されたカロリメータを補償型カロリメータと呼ぶ。

AHCAL は補償型カロリメータではないため、ハドロンシャワーと電磁シャワーを同等に扱う事ができ ないが、検出器の構造ではなくソフトウエアにおいてハドロンシャワーと電磁シャワーの扱いを変えるこ とによって上記の問題に対処する方針をとっている。ソフトウエアの開発は現在行われているがまだ ILC のシミュレーションのソフトウエアには実装されていない。

2.1.3 サンプリング型カロリメータ

サンプリング型カロリメータはカスケードシャワーを起こす吸収層とシャワー中の粒子をとらえる検出 層からなる。吸収層には鉛や鉄など重い金属を使用しシャワーを効率的に起こすようにする。検出層では プラスチックシンチレータやガスシンチレータなどを用いて通過するシャワーのエネルギーの一部を測定 する(サンプリングする)。カロリメータに入射された粒子のエネルギーの大部分は吸収層で落とされる ため、検出層では全体のエネルギーうちの一部しか測定できない。よって検出器の全体で粒子の検出をで きる全吸収型のカロリメータに比べるとエネルギー分解能は劣る。しかし、安価で規模の大きい検出器を 作る事ができる。また、高精細化がしやすく PFA に最適化するために高精細なカロリメータが求められ る ILC の検出器に適している。AHCAL はサンドイッチ型のサンプリング型カロリメータであり、吸収 層と検出層が交互に並べられた構造になっている。サンプリング型カロリメータのエネルギー分解能は経 験的に下式 2.1 で与えられる。

$$\frac{\sigma_E}{E} \simeq \frac{\sigma_{\rm stochastic}}{\sqrt{E({\rm GeV})}} \oplus \sigma_{\rm constant}$$
(2.1)

 $\sigma_{\text{stochastic}}$ は統計項と呼ばれる統計的なゆらぎによる項である。統計項にはサンプリングのゆらぎが影響する(検出層内を通過する粒子数のゆらぎ)。また、ハドロンカロリメータではハドロンシャワー中で発生する電磁シャワーの原因である π^0 粒子の生成個数のゆらぎの影響も大きい。 σ_{constant} は定数項と呼ばれる。定数項には検出器の系統誤差やカロリメータの応答の非線形性、キャリプレーションの誤差、シャワーの漏れなどが含まれる。

2.2 AHCAL の構造と粒子検出原理

第1章でも述べたように、AHCAL の役割は中性ハドロンのエネルギーの測定である。AHCAL には 中性ハドロン以外に荷電ハドロンも飛来しハドロンシャワーを起こす。ILD では荷電ハドロンはよりエ ネルギー分解能の良い飛跡検出器において測定を行い、エネルギー分解能の劣るハドロンカロリメータ では中性ハドロンのみのエネルギーを測定することによって検出器全体でのジェットエネルギー分解能 を向上させる。よってハドロンカロリメータにおける中性ハドロンと荷電ハドロンの分離が検出器全体 の性能にも重要であり、クラスターの分離が可能な高精細なカロリメータデザインとなっている。図 2.1 は ILD ハドロンカロリメータの模式図である(断面図)。AHCAL はバレル部分(HCAL Barrel)とエン ドキャップ部分(HCAL Endcaps)、およびバレルとエンドキャップの隙間を埋めるための部分(HCAL Endcap Rings) の3つの部分で構成されている。図 2.2 の緑色の部分はAHCAL のバレル部分を示して いる。現在考えられているAHCAL の大きさは、バレルの内径は約4m でバレルの厚さは約1m であ る。また、図 2.1 にあるように AHCAL のバレル部分はビーム軸方向で2つに分割されている(z>0 の 部分と z<0 の部分)。それぞれのバレルは計 16 個のプロックに分けられており、バレル全体は計 32 個の ブロックで構成されている(ブロック単体の模式図は図 2.3)。AHCAL のバレルの内側にある青色の部 分は電磁カロリメータのバレル部分である。電磁シャワーはハドロンシャワーにくらべて短い時間で終わ り、シャワーの形状はハドロンシャワーよりも小さく終わる。よって電磁カロリメータの厚さは AHCAL に比べ薄くデザインされている。



図 2.1 AHCAL 模式図(断面図)[6].

図 2.2 AHCAL のバレル部分 [2].

図 2.3 はバレルを構成するブロックであり、このブロック 16 個で上下流各バレル部が構成されている。 AHCAL はサンプリング型カロリメータであり吸収層と検出層からなる。図 2.3 のブロックは約 1 m の 厚さに対して 48 層の吸収層と 48 層の検出層に分割され交互に並べられている。AHCAL の吸収層の物 質は厚さ約 20 mm の鉄が考えられている。



図 2.3 AHCAL のバレルを構成するブロック [5].

AHCAL の検出層は図 2.4 のような HBU(HCAL Base Unit) と呼ばれる ASIC 搭載の読み出し基板 にシンチレータセルユニットと呼ばれる 30×30 mm² のセルが図 2.5 のように敷き詰められた、ピクセ ル化された構造になっている。部品の厚さを除いた HBU の基板のみの厚さは約 0.8 mm に抑えられ、 粒子のエネルギー損失を可能な限り小さくするように設計されている。シンチレータセルユニットは、 荷電粒子が通過する際に発光するプラスチックシンチレータタイルとその光を検出する半導体光検出器 SiPM(Silicon PhotoMultiplier) から構成される (プラスチックシンチレータタイルは反射材で覆われて いる)。AHCAL では吸収層で入射粒子にハドロンシャワーを起こさせ低エネルギーの多数の粒子に変 換する。その粒子が検出層のプラスチックシンチレータを通過した際に発生するシンチレーション光を SiPM で検出する。



 $\boxtimes 2.4$ HBU(HCAL Base Unit)[2].



図 2.5 HBU 背面. 30 mm×30 mm に細分化され たシンチレータセルユニットがしきつめられてい る [2].

2.3 シンチレータセルユニット

シンチレータセルユニットは読み出し基板 (HBU) 上にピクセル状に並べられて基板と一体となってお り、SiPM の信号を HBU から読み出す事ができるようになっている。AHCAL はサンプリング型カロリ メータであり、層ごとにセグメント化されている。よってシャワーの形状を 3 次元的に測定できる高精細 な検出器になっている。

プラスチックシンチレータタイルと半導体光検出器 SiPM で構成されているシンチレータセルユニットは複数のデザインが考案されている。



図 2.6 様々なシンチレータセルユニット案 [5][7].

図 2.6 は様々なシンチレータセルユニットのデザイン案である。得られる光量の一様性向上のためにプ ラスチックシンチレータに波長変換ファイバーを埋めこんだデザインや、SiPM の周辺のプラスチックシ ンチレータに溝をもうけるデザイン等がある。また、SiPM によるシンチレーション光の読み出し方法に ついてはプラスチックシンチレータタイルの 3 mm 厚の端面から横方向に読み出すデザインや、シンチ レータタイルの下面から表面実装型の SiPM でシンチレーション光を読み出すデザインがある。SiPM 付 近のプラスチックシンチレータには SiPM 直近を荷電粒子が通過した場合の光量の著しい増加を防ぐた めにドーム状の溝が作られている (AHCAL グループではこのドーム状の溝のことをゴルフボールの溝に なぞらえて Dimple と呼んでいる)。

2.3.1 SiPM

シンチレータセルユニットでシンチレーション光を検出するための SiPM(Silicon PhotoMultiplier) は ピクセル化された APD(Avalanche PhotoDiode) から構成される半導体光検出器であり、フォトンカウ ンティングが可能という特徴を持つ。各国の企業で開発が進められており、日本の浜松ホトニクス社製の MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) やイタリアの AdvanSiD など複数存在する。また、表面実装タイ プ(図 2.7) やピン実装タイプ(図 2.8) があり、用途によって選択できる。本修士論文における研究では MPPC を使用した。ここでは SiPM の原理等について述べる。



図 2.7 表面実装型 MPPC[10].



図 2.8 ピン型 MPPC[10].

動作原理

SiPM は複数の APD ピクセルからなり、逆バイアス電圧を印加しガイガーモードで駆動させる。図 2.9 は APD ピクセルの模式図である。光子が SiPM に入射すると、光子によって励起された電子がバン ドギャップを超えて電子正孔対が発生する。空乏層内で発生した電子正孔対は電場によりドリフトする (電子はアバランシェ層の方向、正孔は基板層の方向)。このとき電場が大きいとドリフト速度が速くな り、結晶格子とキャリアが衝突するとイオン化が起き新たな電子正孔対を発生させる。二次的に発生した キャリアがさらに電子正孔対を発生させ指数関数的にキャリアが増える現象をアバランシェ増幅という。



図 2.9 SiPM 断面の模式図 [13].

ガイガーモードの APD ピクセルに光子が入射されると電子と正孔の両方がアバランシェ増幅を引き起 こし増倍率が発散する。発散を抑えるためにクエンチング抵抗がそれぞれの APD ピクセルに接続されて おり、電流値が一定値以上になると APD に印加されている電圧をさげ、アバランシェ増幅を止める。ク エンチング抵抗により、1 つの APD ピクセルからの出力は入射光子数に関係なく一定値となるため、出 力ピクセル数を数えることにより光子数をカウントする事が可能である。図 2.10 は SiPM の波形である。 検出した光子数に応じた波形を見る事ができる。

アバランシェ増幅が起き始める電圧値をブレークダウン電圧 (*V_{bd}*) と呼ぶ。図 2.11 のように、ブレー クダウン電圧を超えると SiPM のリーク電流は急激に増える。SiPM にブレークダウン電圧より大きい逆 バイアス電圧を印加する際、印加電圧値とブレークダウン電圧値との差をオーバー電圧 (*V_{OV}*) と呼ぶ。 SiPM の増倍率はオーバー電圧に比例する。以下で述べるダークノイズ、クロストーク、アフターパルス もオーバー電圧依存性があり、オーバー電圧が大きいほど発生確率は大きくなる。



図 2.10 SiPM の波形. [12].



図 2.11 MPPC のリーク電流の印加電圧依存性 (IV 曲線)[14]. ブレークダウン電圧(65.5 V 付 近)を超えるとリーク電流が増大する.

基本特性

SiPM は動作電圧 30 V から 100 V 程度で使用し、約 10^6 の増倍率を得ることができる。光電子増倍管の動作電圧の数 kV に比べ低電圧で使用でき、かつ同程度の増倍率を得る事ができる。また磁場耐性が強く高磁場耐性を要求される実験においても有用である。さらに 1 つ 1 つの SiPM は数 mm 角と小さいため多数の SiPM を使用することにより高精細でかつ広い面積をカバーするようなデザインの検出器を実現する事ができる。

SiPM のいくつかのパラメータには温度依存性があるため、温度を一定に管理した状況における使用が 求められる。また、SiPM はシリコンデバイスであるため放射線による損傷を受けやすく、中性子照射線 量の高いハドロンカロリメータなどにおける使用では放射線耐性が課題となる。

ダークノイズ

熱励起によりバンドギャップを越えて生成される自由キャリアがアバランシェ増幅を起こす事によって 発生するランダムな信号である。ダークノイズは光子の入射とは無関係に発生する。ダークノイズは自由 キャリア由来なので1光子が入射した場合と同様の信号であるため、1光子が入射したことによる信号と ダークシグナルは見分けがつかない。

クロストーク

ある APD ピクセルでのアバランシェ増幅中に 2 次的に発生した光子が隣接する APD ピクセルに入射 されアバランシェ増幅を起こすことにより起こる、実際に入射された光子数よりも多い光子数が測定され る現象である。1 光子が入射された場合でも 2 光子(またはそれ以上の光子数)が入射された場合と同じ 信号が出力され見分けがつかない。

アフターパルス

SiPM では、光子が入射されて出力される信号(もしくはダークノイズの信号)から一定時間遅れて出 力される信号がありアフターパルスと呼ばれる。アフターパルスの原因は諸説あり、アバランシェ増幅中 の電子がシリコンバルク中の格子欠陥に捕獲され、一定時間後に放出されてアバランシェ増幅を起こすと いう説や、アバランシェ増幅中に発生した光子が基板層まで達しそこで発生したキャリアがキャリア拡散 により電場のある空乏層領域に達してアバランシェ増幅を起こすという説がある。

2.4 シンチレータセルユニットの研究開発及び本研究の目的

シンチレータセルユニットのデザインを考える上では得られる光量が大きくかつ光量の位置依存性が小 さいデザインが求められる。また、AHCAL は PFA に最適化するために高精細なカロリメータデザイン になっており、それにともなって読み出し数は約 800 万チャンネルと膨大な数になる。よって大量生産に 適したデザインが求められる。基板に表面実装された SiPM で読み出すシンチレータセルユニットデザ インは大量生産の観点からも利点があるといえる。さらに、ハドロンカロリメータでは想定される放射線 環境に耐え、長期間運用可能であることが求められるため SiPM やプラスチックシンチレータタイルの放 射線耐性が重要である。

AHCAL のデザイン案は複数存在するがどのデザインが採用されるかはまだ決定されていない。そこで、プラスチックシンチレータタイルと SiPM というシンチレータセルユニットを構成する要素それぞれの研究と、シンチレータセルユニットの新しい読み出し方法の研究開発を行い、AHCAL のシンチレータ セルユニット全体としての開発を行った。

プラスチックシンチレータタイルについては、大量生産に適する射出成形プラスチックシンチレータの 特性の評価を行った。SiPM については、複数の種類の MPPC の放射線耐性の比較評価を行なった。シ ンチレータセルユニット自体については1枚のシンチレータタイルを4個の SiPM で読み出す、新しい 読み出し方法の開発を行なった。

第3章

シンチレータマテリアルの比較

ILD の AHCAL の読み出し数は約 800 万チャンネルと膨大であり、大量生産を考慮した検出器デザインが重要である。この章では、大量生産に適した射出成形有機プラスチックシンチレータの性能評価について述べる。

3.1 有機プラスチックシンチレータの製法と材料

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の材料に蛍光物質(シンチレーション物 質)を混ぜ込んで作成したもので、蛍光物質として主にアントラセンやスチルベンなどの有機物を用い る。有機プラスチックシンチレータの製法は様々あり、市販されている一般的な有機プラスチックシンチ レータはキャスト成形で作成したものが多い。以下ではプラスチックシンチレータの製法と特徴について 述べる。

キャスト成形

鋳型成形とも呼ばれる。材料物質(レジン)として、常温では液体状態のものを使用する。レジンに 硬化剤を混合し重合反応を利用して作成をする。ベースとなるプラスチックとして主に PVT(Polyvinyl toluene)を用いる。キャスト成形プラスチックシンチレータの特徴として以下が挙げられる。

- 利点
 - 透明度と光量に優れており、プラスチックシンチレータとして品質が良い
 - AHCAL のデザインを用いたこれまでの先行研究で十分な光量が得られることがわかっている。
- 欠点
 - キャスト成形の重合過程の後に、求める形状にするために機械加工が必要
 - 重合という化学的な反応過程を経るため、作成に時間がかかる

キャスト成形のプラスチックシンチレータはこれらの欠点により現実的なコストでの AHCAL の建設 が難しい。 射出成形

ペレット状にした原材料を 200 程度の高温にして溶かしたものを金型に流し込んで成形する。金型 はあらかじめ要求するプラスチックシンチレータの形状にしておく。特徴として以下が挙げられる。

利点

- 安価
- 重合反応を経ないため、短期間で製作可能
- 機械加工が必要ない
- 金型を作れば複雑な形状も実現可能
- 欠点
 - キャスト成形に比べ、光量が小さい
 - キャスト成形に比べ、透明度が低く減衰長が短い

3.2 発光量の比較

上記のように大量生産に適した利点を持つ射出成形プラスチックシンチレータが AHCAL で使用可能な 性能を有するかを調べた。比較の基準としてシンチレーション光の光量を使用し、プラスチックの成形方 法・ベース素材の異なるサンプルごとに ⁹⁰Sr 線源を用いて 線を照射し発光量の比較を行った。使用した プラスチックシンチレータは、キャスト成形プラスチックシンチレータのサンプルとして PVT(Polyvinyl toluene) ベースのもの (EJ-212)、射出成形プラスチックのサンプルとして PS(Polystyrene) ベースのも のと Estyrene-MS ベースのものを使用した (Estyrene-MS 樹脂はメチルメタクリレート・スチレン共重 合樹脂と呼ばれ、レンズ等の光学材料や家電など幅広く使用されている物質である)。1 枚のプラスチック シンチレータタイルのシンチレーション光を 2 個の MPPC を用いて個別に読み出し、それぞれの MPPC で光量の評価を行った。

3.2.1 測定セットアップ

プラスチックシンチレータ

プラスチックシンチレータは図 3.1 のような AHCAL のデザインと同様の 30mm 角・厚さ 3mm のタ イル状のものを使用した。また、図 3.2 のように MPPC での受光量を増やすためにリフレクターを巻 いた。



図 3.1 射出成形(左)とキャスト成形(右)のプラ スチックシンチレータタイル (30 mm×30 mm×3 mm). 目視では透明度の違いは確認できない.



図 3.2 リフレクターを巻いたプラスチックシンチ レータタイル. MPPC が接する面以外をリフレク ターで覆った.

射出成形プラスチックシンチレータの製作にはジーテック社の協力を得た [15]。射出成形プラスチック シンチレータは本来機械加工をせずに製作が可能であるが、目的のサイズの金型はジーテック社に無かっ たため、すでにあった金型を使用して成形した 3 mm 厚のタイルから機械加工で切り出した。よってシン チレータタイルの側面のみ機械加工を施した。それ以外の面については射出成形面をそのまま使用した。 以下にサンプルリストを記す。

- キャスト成形プラスチックシンチレータ: ELJEN 社 EJ-212(PVT ベース)
- 射出成形プラスチックシンチレータ:ジーテック社による加工品 (PS ベース、MS ベース)
- リフレクタ: 3M 社 ESR2 厚さ 32µm
- SiPM

シンチレーション光を検出する SiPM は浜松ホトニクス社製の MPPC を使用した。

- MPPC スペック
 - 型番:s12571-025P(受光面:1 mm x 1 mm、表面実装型、アフターパルス抑制モデル)
 - ピクセルサイズ: 25 μ m×25 μ m, 1600 pixels
 - 感度波範囲: 320 から 900 nm (最大感度波長: 450 nm)



図 3.3 MPPC の光子検出効率 (PDE) の波長依 存性 [11].



図 3.4 EJ-212 の発光波長分布 [16]. MPPC の検 出効率が最大になる波長付近にピークがある. 図 3.3 は MPPC の光子検出効率の波長依存性を表している。キャスト成形のプラスチックシンチレー タは図 3.4 のように、MPPC の検出効率が最大になる波長付近にピークがあるような発光波長分布をも つもの (EJ-212) を使用した。

> MPPC (受光面1 mm²) プリント基板 00000000 Lemoケーブル

MPPC は図 3.5 のようにプリント基板にはんだでマウントした。

図 3.5 MPPC マウント回路

DAQ

DAQ としては PSI(Paul Scherrer Institute) で開発された DRS(Domino Ring Sampling Chip) とい う高速波形デジタイザーを使用し、波形を取得した。図 3.6 は DRS の動作原理を表す概念図である。 DRS は 1024 個の電圧を記憶するためのセルを持っており、インバータ遅延回路を周回する高速のサンプ リング信号がそれぞれのセルのコンデンサに記憶される。トリガー信号が入るとコンデンサに蓄えられた 電荷がシフトレジスターを通して順に出力されていく。最大サンプリング速度は 5 GHz であり、その場 合 200 ps ごとのサンプリングで 200 ns の時間幅の波形を出力できる。今回の測定ではサンプリング速度 を 1.6 GHz に設定したので 1 回のトリガー時に出力される波形の時間幅は 640 ns である。取得した波形 をオフラインで解析し charge, haight, timing などの情報を得た。



図 3.6 DRS 概念図 [17].

セットアップ

図 3.7 のような、MPPC・プラスチックシンチレータ・⁹⁰Sr 線源・トリガーカウンターを固定し、目的 の位置に 線を照射しシンチレーション光を検出するためのジグを 3 次元 CAD を用いて設計した。



図 3.7 ジグ全体図.



図 3.8 シンチレータ・MPPC 固定部.

図 3.8 のようにアクリルのフレームでプラスチックシンチレータタイルと 2 個の MPPC を固定し、シ ンチレーション光を読み出す。アクリルのフレームは手動 XY ステージ固定されおり、 線の照射位置を 変えて測定をする事ができる。また、図 3.9 のようなトリガーカウンターの作成も行った。5 mm 角のプ ラスチックシンチレータ (EJ-212) と受光面 3 mm 角の MPPC(S12572-025C) をオプティカルセメント で光学的に接着し、テフロンテープで覆った。トリガーカウンターは PSI 製のプリント基板にマウント したものをジグに固定した。



図 3.9 トリガーカウンター (テフロンテープ無し).

今回の測定のセットアップの略図を図 3.10 に示す。コリメータ (ϕ =0.5 mm) でサイズをしぼった 線をプラスチックシンチレータタイルに入射した。使用した線源 ⁹⁰Sr は半減期 28.8 年で 崩壊し最大 0.546 MeV の 線を放出して ⁹⁰Y になる。この ⁹⁰Y はさらに半減期 64.1 時間で 崩壊し最大 2.28 MeV の 線を放出し ⁹⁰Zr になる。本測定では ⁹⁰Y の 崩壊により放出される 線(最大 2.28 MeV)がプラス チックシンチレータに入射されたイベントをトリガーし、そのときのシンチレータタイルでのシンチレー ション光を測定した。MPPC を 2 個使用し、シンチレータタイルの両端から読み出しを行った。今測定 では MPPC とシンチレータとの接触にオプティカルグリス等は使用せず、アクリルを固定するねじの力 を利用して良く接触するようにした。MPPC には Keithley picoammeter 6487 を用いて逆バイアスを印 加した。各 MPPC、トリガーカウンターは別個に読み出しを行い、DRS で波形を記録した。MPPC の 信号は小さいため、図 3.11 に示した PSI 製の HV スプリッター付きアンプを使用した (ゲイン: 30 倍)。



図 3.10 セットアップ略図.



図 3.11 PSI アンプ.



3.2.2 測定方法

2 個の MPPC でゲインを合わせるためにそれぞれブレークダウン電圧を求め、等しいオーバー電圧を
 設定した (OV = 3.5 V)。また、MPPC のゲインは温度依存性があるため、恒温槽を用い温度一定 (24)の状態で測定を行った。図 3.12 のように、 線を 2 個の MPPC の直線上に 5mm 間隔で計 5 ヵ所照

射しそれぞれの位置ごとに光量の評価を行い、さらに位置依存性も確認した。

図 3.13 が DRS で得られたシンチレーション光の波形である。1 イベントあたり記録している波形の 時間幅は約 640 ns でシグナルは-120 ns 付近にある。シンチレーション光の光量を評価する際に 1 p.e. 分の charge が必要であり、シンチレーション光の解析と同時に dark signal の解析も行った。図 3.14 は ダークシグナルの波形である。シンチレーション光の解析範囲は-200 ns から-80 ns に設定した。シンチ レーション光より後ろの時間の領域はシンチレーション光のアフターパルスの影響があるため、シンチ レーション光より前の時間領域-620 ns から-190 ns を dark signal の解析範囲とし、この時間領域でラン ダムに発生する dark signal の解析から 1 p.e. 分の charge を求めた。



図 3.13 シンチレーション光の波形と解析範囲.



図 3.14 ダークシグナルの波形と解析範囲.

3.2.3 結果と考察



図 3.15 シンチレーション光の charge 分布 (横軸の単位: C/1.6×10⁻¹⁰).

図 3.15 がシンチレーション光の charge 分布である。ペデスタル付近のピークはシンチレーション光の 解析範囲に偶然入ったダークシグナルが原因であると考えられる (charge 分布の mean 値を出す際には これらのピークも含まれている)。得られた charge 分布の mean 値を用いて 線照射位置ごと、ベース素 材ごと光量の比較を行った。

図 3.16 と図 3.17 にプラスチックシンチレータの材料ごとの光量プロットを示す。横軸は MPPC と 線照射位置との距離を表す。MPPC1、MPPC2 ともに PVT ベースのキャスト成形プラスチックシンチ レータの光量が一番大きく、次いで射出成形の PS が大きく、MS ベースの射出成形プラスチックシンチ レータの光量が最も小さい結果となった。MPPC1 と MPPC2 で、 線照射位置との距離が等しい場合 でも光量が約 7% 異なっている。これは MPPC1 と MPPC2 のオーバー電圧の差によるクロストーク確 率の違いによるものであると考えられる。



図 3.18 と図 3.19 はキャスト成形 (PVT ベース) プラスチックシンチレータで得られた光量に対する、

射出成形プラスチックシンチレータの光量の比を表している。MS ベースは PVT に対して 60% から 70% 程度の光量であったが、PS ベースは約 80% の光量が得られた。位置ごとの光量の比の変化が小さ い事く、ベース素材間で光量の位置依存性の大きな違いは見られなかった。そのため減衰長も射出成形と キャスト成形で大きな違いは無いと考えられる。先行研究における AHCAL のデザインを用いたキャス ト成形プラスチックシンチレータタイルで得られる光量は十分な量であることがわかっている。今回測定 した射出成形プラスチックシンチレータは光量、減衰長ともにキャスト成形と比べて大きく劣ってはいな かった。特に、PS ベースのものではキャスト成形に近い良い光量を得られた。





今後は発光量以外にもシンチレーション光の波長スペクトルや減衰長自体の測定を計画している。ま た、今回の測定で使用した射出成形プラスチックシンチレータは発光材のマテリアルの最適化は行ってい ないものであり、発光材を変えた射出成形プラスチックシンチレータの測定も計画している。また、荷電 粒子が入射した際の発光量の絶対値を見積もるため Geant4 による photon tracking のシミュレーション も行う。発光材・ベース素材の両方の最適化を行い、性能がよく大量生産に適する射出成形プラスチック シンチレータの開発を行っていく。

第4章

MPPC の放射線耐性の評価

ILCの検出器は想定される放射線環境で長期間動作することが求められる。特に SiPM はシリコンデ バイスであるため放射線による損傷を受けやすい。そのため SiPM が実際の ILC の検出器の放射線環境 下で正常に動作するかを評価する必要がある。この章では浜松ホトニクス製 SiPM である MPPC の放射 線照射試験の結果について述べる。

4.1 背景

ハドロンカロリメータにはビームパイプ由来の中性子やその他検出器中で発生した放射線が飛来し、検 出器に損傷を与える。中性子は長い距離を走るので、検出器のうちの半径の大きい部分にある検出器に損 傷を与える放射線は主に中性子である。以下は ILC のハドロンカロリメータで予想される 10 年間での中 性子総線量の参考値である。この値は ECAL におけるものであり、特に下記の ECAL の endcap での値 は ILC ではなく CLIC(Compact Linear Collider) の ECAL の endcap における値だが、ILC のハドロ ンカロリメータでも同様の放射線環境が予想される。これらの中性子は主にビームパイプ由来のものであ ると見積もられている。

- 約 10^7 n/cm^2 (ECAL)[18]
- 約 2×10^{11} n/cm² (CLIC ECAL endcap)[19]

4.1.1 放射線による SiPM の損傷

シリコンデバイスである SiPM は放射線による影響で損傷を受ける。損傷には非電離過程 (NIEL: Non Ionizing Energy Loss) による損傷と電離過程による損傷とに分けられる。

非電離過程 (NIEL) による損傷

中性子や陽子、その他重粒子を照射した際に支配的になる損傷である。MPPC に入射された粒子がシ リコンバルク中のシリコン原子を弾性散乱によりはじき出すことによってバルク中に格子欠陥が生じる (図 4.1)。この格子欠陥により、図 4.2 のようにシリコンのバンドギャップ中に新しく準位が生成され、 熱励起によりバンドキャップを超えて発生するダークノイズ多くなる。その結果、波形のベースラインが 変動し、1 光子の分離能力が無くなる。また、バンドギャップ中に新しく生成された準位にキャリアがと らえられる事により(キャリア捕獲)、アフターパルスが増加する。また、逆バイアスをかけて使用する 際のリーク電流が増大する [20]。





図 4.1 中性子のはじき出し効果によるバルク損傷 の模式図.

図 4.2 バンドギャップ中に新たに生成される準位.

図 4.3 は先行研究における中性子照射後の MPPC (アフターパルス抑制無しの MPPC)のダークシグ ナルの波形である [21]。中性子照射量は 3.0×10^8 n/cm² から 3.0×10^{11} n/cm² である。中性子照射量 が増えるにしたがってダークシグナル・アフターパルスが増加しており、 3.0×10^{10} n/cm² 以上ではとく にベースラインが変動し、1 光子のシグナルの分離能力がなくなっている。



図 4.3 先行研究における中性子照射量に対する MPPC のダークシグナル波形の変化 [21].

電離過程よる損傷

ガンマ線などを照射したときに支配的になる損傷である。ガンマ線が照射されると SiPM は電離過程 による損傷をうけ、絶縁層とシリコンバルクの境界領域の化学結合が破壊される。その結果バンドギャッ プ中に新しい準位が生成され、ダークシグナル及びリーク電流の増加が見られる。

また、ガンマ線照射中は、一定の閾値を超えたガンマ線の照射により急激なリーク電流の増加が見られ る。図 4.4 は先行研究におけるガンマ線照射中のリーク電流のプロットである [20]。浜松ホトニクス製の SiPM(MPPC) に逆バイアス電圧を印加しながらガンマ線を照射し続けている。ガンマ線の吸収線量があ る一定の閾値を超えると MPPC のリーク電流が急激に増加している。この現象が起きるガンマ線吸収線 量の閾値は MPPC の種類 (MPPC 表面の絶縁層を構成する物質の違い) ごとに異なることがわかってい る。これは、絶縁層で新しい準位にキャリアが捕獲されることの影響で電気的性質が変化し、局所的なブ レークダウン電圧の減少が起きたためであると考えられている [20]。



図 4.4 先行研究におけるガンマ線照射中のリーク電流の急激な増加 [20].

4.2⁶⁰Co 線源を用いた MPPC のガンマ線照射試験

MPPC へのガンマ線照射試験を行いガンマ線への耐性を調べた。線源は高崎量子応用研究所の食品照 射棟の施設にある ⁶⁰Co 線源 (16 TBq) を用いた。

4.2.1 ガンマ線照射試験の目的及び使用したサンプル MPPC

今回使用した MPPC は以下の2種類である。

- New type 3 mm MPPC, 型番: S12572-025C, アフターパルス抑制モデル, 有感領域: 3×3 mm², 25 µm pixel pitch (図 4.5)
- New type VUV MPPC, 型番: S10943-3186(X), 真空紫外光に感度あり, アフターパルス抑制モデル, 有感領域: 6×6 mm², 50µm pixel pitch (図 4.6)



⊠ 4.5 S12572-025C[11].



 $\boxtimes 4.6$ VUV MPPC.

New type 3 mm MPPC は市販品の浜松ホトニクス社製 SiPM である。new type の MPPC はアフ ターパルス抑制機構を持つ。new type VUV MPPC は MEG 実験と浜松ホトニクスが共同で開発した真 空紫外光 (VUV) に感度のある特殊な MPPC である。 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ の有感領域のセンサーが 1 つのパッ ケージに 4 個組み込まれており、それぞれ個別に読み出す事ができる。VUV MPPC は真空紫外光に感 度を待たせるために市販品の MPPC と異なる組成を持ち、絶縁層の物質が異なる可能性がある。 先述の通り、ガンマ線が MPPC に照射されると MPPC は電離過程による損傷をうけ、絶縁層とシリ コンバルクの境界領域の化学結合が破壊され、ダークシグナル及びリーク電流の増加が見られる。また、 ガンマ線照射中は絶縁層でのキャリア捕獲の影響で電気的性質が変化し、局所的なブレークダウン電圧の 減少が起き、一定の閾値を超えたガンマ線の照射により急激なリーク電流の増加が見られる。これらのよ うな電離過程による損傷の度合いは、MPPC の絶縁層を構成する物質によって異なるとされている。本 照射試験の目的は、絶縁層を構成する物質の異なる2種類の MPPC のガンマ線耐性を評価・比較する事 である。ただし、New type 3 mm MPPC の絶縁層は SiO₂ だといわれているが、VUV MPPC につい てはわかっていない。

今回の照射試験では先行研究と同様に、ガンマ線照射中の MPPC に逆バイアス電圧を印加し、ガンマ 線照射量に対するリーク電流の変化をリアルタイムで測定した。また、ガンマ線照射後の損傷の影響を見 るために照射試験後の MPPC の IV 曲線を取得し、ガンマ線を照射していない同型の MPPC サンプル と比較を行った。

4.2.2 ガンマ線照射セットアップ

図 4.7、図 4.8、図 4.9 は今回の照射試験のセットアップ模式図である。高崎量子応用研究所食品照射棟 の ⁶⁰Co 線源は 3 本の円柱状になっている (密封型)。⁶⁰Co 線源は普段は地下のプールに格納されており、 使用するときのみ照射室の穴からせりあがってくる。線源からの位置ごとに単位時間あたりの吸収線量が わかっており、今回は 30Gy/hour の位置(線源から横方向に 40 cm、床からの高さ 22.5 cm)に MPPC を設置した。MPPC サンプル及び温度計 (Pt100) はラボジャッキの上に設置し目的の高さに調節した。 また、光を遮断するためにラボジャッキとセットアップ全体をブラックシートで覆った。図 4.9 の写真は ガンマ線照射中のセットアップと線源棒の様子である。線源は金属の網に囲われている。

それぞれの MPPC と温度計に 6 m の LEMO ケーブルを直接つなぎ,隣室の DAQ へと接続した。ガ ンマ線照射試験中は MPPC に常にバイアス電圧(浜松ホトニクス推奨電圧)をかけ続け、リアルタイム でリーク電流と温度を記録した。バイアス電圧の印加及び電流値の計測は Keithley 製 picoammeter6487 を使用し、それぞれの MPPC に別個の picoammeter を接続して逆バイアス電圧を印加し、電流値を測 定した。picoammeter で測定した電流値および印加電圧値は PC を用いて記録した。温度は logger を用 いて記録した。



図 4.7 セットアップ模式図 1.



図 4.8 セットアップ写真.



図 4.9 セットアップ模式図 2.

4.2.3 ガンマ線照射条件

今回の照射試験は2回に分けて、MPPCサンプルを交換して行った。1回目に使用したサンプルと2 回目に使用したサンプルをそれぞれサンプルセット1、サンプルセット2と呼ぶ事にする。

サンプルセットごとのガンマ線総線照射線量

- 1回目 サンプルセット 1: New type 3 mm MPPC 1 個と new type VUV MPPC1 個、ガンマ線総照 射線量:約1.4 kGy
- 2回目 サンプルセット 2: New type 3 mm MPPC 1 個と new type VUV MPPC1 個、ガンマ線総照 射線量:約4.1kGy

1回目の照射試験では DAQ などの問題が生じデータの取得がうまくいかなかったため、ガンマ線照射 中のリーク電流変化のリアルタイムの測定については 2回目の照射試験の結果のみを使用した。ただしガ ンマ線照射後の、IV 曲線の測定については 1回目と 2回目両方の照射試験のサンプルを使用した。

照射試験中の温度変化

図 4.10 はガンマ線照射試験中(2回目の照射試験)の温度変化を示している。横軸はその時点でのガン マ線の総吸収線量を表す。約 3.3 kGy 照射した後から急激に温度が変化していることがわかる。MPPC の特性には温度依存性があり、リーク電流値も温度により変化する。3.3 kGy 後は温度変化があまりに大 きかったため、これより後のデータは使用せず、3.3 kGy までのリーク電流の変化のみを見ることとした。 3.3 kGy までの間にも温度変化はあるが約2 以下と小さいため、リーク電流値に与える影響は小さく2 種類の MPPC の比較をする上では問題が無いとし、温度によるリーク電流値の較正は行っていない。



図 4.10 照射試験中の温度変化.

4.2.4 測定結果と考察

ガンマ線照射試験中のリーク電流

図 4.11 と図 4.12 はガンマ線照射中のそれぞれの種類の MPPC のリーク電流の変化である。リーク電 流値は同じ型の MPPC でも受光面積の大きさによって異なるため、単位面積あたりの電流値をプロット した。電流値が急激に落ちている部分はガンマ線の照射を止めているときである。



図 4.11 ガンマ線照射中のリーク電流 (New type 3 mm MPPC).

図 4.12 ガンマ線照射中のリーク電流 (new type VUV MPPC).

図 4.11 と図 4.12 を見ると、どちらの MPPC も 3.3 kGy 付近から急激にリーク電流が増加している事がわかる。温度が急激に変化したのが 3.3 kGy 後であることと、どちらの MPPC のリーク電流の急激
な増加も温度変化に同期している事、さらに MPPC のリーク電流は温度が低下すると増大すること*1か ら、このリーク電流の急激な増加は先行研究に見られるようなガンマ線による損傷由来の物ではなく温度 変化によるものと判定した。よって、急激な温度変化の起きる 3.3 kGy より前のデータを用いて 2 種類 の MPPC の比較を行った。

温度変化の小さい領域でのリーク電流は2種類の MPPC のどちらも先行研究に見られるような急激な 増加は見られなかった。3 mm 角の New type 3 mm MPPC は 0.6 kGy 付近までは緩やかにリーク電流 が増加し、その後はあまり変化していない。6 mm 角の New type VUV MPPC のリーク電流はガンマ 線照射中緩やかに増加し続けた。この2種類の MPPC のリーク電流増加の振る舞いについてはまだ理解 できていない。

ガンマ線照射試験後に測定した IV 曲線

図 4.13 と図 4.14 はそれぞれ 3 mm 角の New type 3 mm MPPC と 6 mm 角の New type VUV MPPC の IV 曲線である。MPPC の電流値は受光面積に比例して増加するので、2 種類の受光面積の 異なる MPPC の電流値を比較するために単位受光面積 (1 mm²) あたりの電流値でをプロットした (3 mm 角の New type 3 mm MPPC は受光面積 9 mm²、6 mm 角の New type VUV MPPC は受光面積 36 mm²)。青線が 1.4 kGy のガンマ線を照射後のサンプルセット 1 の IV 曲線、赤線が 4.1 kGy 照射後 のサンプルセット 2 の MPPC の IV 曲線である。黒線はガンマ線を照射しなかった同タイプの別のサン プルの IV 曲線である。図 4.13 と図 4.14 のどちらもガンマ線の吸収線量に応じてリーク電流の増加が見 られる。このリーク電流の増加は、ガンマ線照射による損傷でダークシグナルが増加したためと考えられ る。ガンマ線照射中のリーク電流の増加は照射を止めると無くなるが、この IV 曲線より測定した電流値 の増加はガンマ線照射後も残る。

それぞれの MPPC ごとで吸収線量とリーク電流の増加の関係を見た。ガンマ線吸収線量は 1.4 kGy と 4.1 kGy であったので、2回目の照射試験では1回目の約 2.9 倍のガンマ線を照射したことになる。リー ク電流値が大きくなると使用しているアンプの HV 回路の抵抗において電圧降下の影響で正しい電圧を MPPC に印加することができなくなり、正しくリーク電流を測定する事ができなくなる。よって、今回 はブレークダウン電圧より大きく、かつ電流値があまり大きくない 66 V における電流値を使用した。

3 mm 角の New type 3 mm MPPC と 6 mm 角の New type VUV MPPC のガンマ線照射後のサンプ ルとガンマ線を照射しなかった別のサンプルの 66 V におけるリーク電流値は表 4.1 のようになった。3 mm 角の MPPC の方では、4.1 kGy 照射サンプルの 66 V におけるリーク電流値は 1.4 kGy 照射サンプ ルの約 1.9 倍であった。6 mm 角の VUV MPPC の方では、4.1 kGy 照射サンプルの 66 V におけるリー ク電流値は 1.4 kGy 照射サンプルの約 3.3 倍であった。この結果をみるとガンマ線照射量に対するリー ク電流の増え方は今回使用した 2 種類のサンプル MPPC ではあまり違いが見られなかった。ガンマ線照 射後のリーク電流測定からは 2 種類の MPPC でガンマ線に対する影響は大きな違いは見られなかった。

^{*1} 温度が下がるとアバランシェ増幅が起きやすくなるためリーク電流値が大きくなる.アバランシェ増幅を起こすためには、 キャリアは空乏層内の電場によって一定以上の速度に加速されてから結晶と衝突してイオン化を起こす必要がある.温度が 高いときは結晶の格子振動が激しくなるためキャリアの速度が十分に速くなる前に結晶と衝突する確率が大きくなり、アバ ランシェ増幅が起きにくくなる.対して温度が低いときは格子振動が小さくなるためアバランシェ増幅が起きやすくなる [12][22].

MPPC 種類	電流値 (照射無し) [A/mm ²]	電流値 (1.4 kGy)	電流値 (4.1 kGy)
New type 3 mm	1.9×10^{-9}	2.0×10^{-8}	3.9×10^{-8}
VUV	8.9×10^{-9}	1.1×10^{-7}	3.5×10^{-7}

表 4.1 66 V における単位受光面積あたりのリーク電流値



図 4.13 ガンマ線照射後の New type 3 mm MPPC の IV 曲線.



図 4.14 ガンマ線照射後の new type VUV MPPC の IV 曲線.

4.3 神戸大学タンデム加速器をもちいた MPPC 中性子照射試験

MPPC の中性子照射試験を行い、中性子照射に対する耐性を調べた。中性子照射には、神戸大学タン デム加速器を使用した。

4.3.1 中性子照射試験の目的及び使用したサンプル MPPC

先述の通り、ILCの検出器は想定される放射線環境での長期間の実験に耐えることが求められる。今回は AHCALのシンチレータセルユニットの構成要素である MPPCの中性子に対する耐性を評価するために神戸大学タンデム加速器を使用し、MPPCへの中性子照射試験を行った。

今回使用したサンプル MPPC は以下の 3 種類である。これら 3 種類の MPPC を 1 個の MPPC セットとした。5 個の同様な MPPC セットを用意し、それぞれ中性子総照射量を変えた。

- New type 1 mm MPPC, 型番: S12571-025C, アフターパルス抑制モデル, 有感領域: 1×1 mm², 25 μm pixel pitch
- New type VUV MPPC, 型番: S10943-3186(X), 真空紫外光に感度あり, アフターパルス抑制モデル, 有感領域: 6×6 mm², 50µm pixel pitch (図 4.16)
- Old type 1 mm MPPC, 型番: S10362-11-025C, アフターパルス抑制機構無し, 有感領域: 1×1 mm², 25µm pixel pitch (図 4.15)



図 4.15 S10362-11-025C[12].(S12571-025C も 外観に違いは無い.)



☑ 4.16 VUV MPPC.

中性子照射試験で使用した New type 1 mm MPPC と Old type 1 mm MPPC は市販品の浜松ホ トニクス社製の MPPC である。New type VUV MPPC はガンマ線照射試験で使用したものと同型の MPPC である。New type はアフターパルス抑制機構があり、Old type には無いという違いがある。先 述の通り、中性子により MPPC が受ける損傷は主に中性子によるシリコンバルク中のシリコン原子のは じき出し効果であり、バルク中に欠陥が生じる。結果、ダークノイズやアフターパルスの増加、リーク電 流の増大が起きる。New type の MPPC と Old type の MPPC はアフターパルス抑制機構の有無の違い があるが、New type ではアフターパルス抑制のためにバルク中の構造が変更されている可能性があり、 中性子への耐性も違いが見られる可能性がある。バルク内部の構造に違いのある可能性のある New type の MPPC と Old type の MPPC で中性子照射への耐性に違いがあるかどうかを評価することが本照射 試験の目的である。

4.3.2 中性子照射セットアップ及び中性子照射条件

中性子の照射には神戸大学のタンデム加速器(図 4.17)を使用した。タンデム加速器にて 3 MeV に加速されたデューテロン (d⁺) をベリリウム (^{9}Be) ターゲットに入射し、中性子を得た。反応は以下である。



 $^9\mathrm{Be} + \mathrm{d}^+ \rightarrow ^{10}\mathrm{B} + \mathrm{n}$

図 4.17 神戸大学タンデム加速器.

MPPC はターゲットのビーム軸から 90°方向に設置した。照射する中性子の量を調整するためにター ゲットからの距離と照射する時間の異なる複数の目標照射量を設定した。中性子フラックスは後述する方 法で別に測定した。また、ベリリウムターゲットからは中性子以外にも即発ガンマ線が出ているとされ ていたため、ガンマ線の照射量の評価も行った。下表 4.2 では MPPC の設置位置と中性子照射時間とを 示す。

MPPC セット名	ターゲット中心からの距離 [cm]	照射時間 [hour]
MPPC セット1	3.6	48
MPPC セット 2	10	48
MPPC セット 3	14	24
MPPC セット 4	10	8
MPPC セット 5	40	12

表 4.2 MPPC 設置位置と中性子照射時間.

図 4.18 は中性子照射セットアップの模式図である。3 種類の MPPC のセットはビーム軸に対して 90° 方向に設置した。(ビーム軸方向 (0°方向) には別の実験グループの装置が設置されていたため)



図 4.18 中性子照射セットアップ模式図.



図 4.19 中性子照射セットアップ写真.

4.3.3 中性子フラックスのとガンマ線照射量の測定

以下の方法で神戸大学タンデム加速器の中性子フラックスの測定を行った。中性子フラックスの測定 には ELMA ダイオード(図 4.20)というリーク電流の増加と中性子照射量がキャリプレート済みのシリ コンダイオードを使用した。ELMA ダイオードは中性子照射前と照射後の全空乏電圧(60 V)における リーク電流値の差から中性子フラックスを求めることができる[23]。MPPC と同じシリコンダイオード のリーク電流増加による測定なので、中性子による MPPC への影響という観点では、より信頼性の高い 中性子フラックスの測定が可能である。

ガンマ線照射量の測定には日立金属製のアミノグレイ(図4.21)を使用した。アミノグレイに含まれる アラニンに放射線が照射されるとラジカルが生じる。アラニンラジカルはアミノグレイ中に長期的に安定 して存在し続け、さらにラジカルの量は吸収線量に比例する。よって電子スピン共鳴装置 (ESR) でアミ ノグレイ素子中のラジカル濃度を測定する事により放射線の線量を知ることができる。アミノグレイで測 定できる線量は 10 Gy から 10^5 Gy である。 10^2 Gy から 10^5 Gy の吸収線量の範囲では 1%、10 Gy か ら 10^2 Gy の吸収線量の範囲では 2% の精度でガンマ線の線量を測定することができる。



図 4.20 ELMA ダイオード拡大写真 [24].



図 4.21 アミノグレイ [25].



図 4.22 ELMA ダイオード及びアミノグレイ中性子照射セットアップ.

図 4.19 と図 4.22 は ELMA ダイオードとアミノグレイの中性子照射セットアップ図である。ELMA ダ イオードはフランジ内部にあるベリリウムターゲットの中心から 3.5 cm の位置に固定した(半径 3.5 cm のフランジの側面に固定)。測定前はガンマ線の線量がどの程度か不明であったためアミノグレイは 3 種 類の異なる線量(予想)を照射した(照射時間、照射位置を調節)。ELMA ダイオードに中性子を照射し ていた期間の総ビームカレントは 2.1×10⁴ µC であった。

ELMA ダイオードを用いた中性子フラックス測定

ELMA ダイオードによる中性子照射量測定の流れは以下のようになっている。

- 1. 中性子照射をする前に IV 曲線を測定し、全空乏化電圧におけるリーク電流値を求める.
- 2. 中性子を照射する.
- 3.60 のアニーリングを 80 分間行う.
- 4. 再び IV 曲線の測定を行い、最大空乏化電圧 (60 V) におけるリーク電流値を求める.
- 5. 中性子照射前と後の全空乏化電圧におけるリーク電流値の変化 ΔI と IV 曲線測定時の温度、ア ニーリング温度とアニーリング時間から中性子フラックスを計算する.

ELMA ダイオードの IV 測定は以下のように行った。ELMA ダイオードに逆倍バイアス電圧を印加し、 印加電圧値に対するリーク電流値をプロットした。図 4.23、図 4.24、図 4.25 はセットアップ図である。 ELMA ダイオードのバルク領域と第一ガードリングをマイクロプローブで押さえ、さらにプローブ同士を ケーブルでつないでバルクと第一ガードリングに同じ電圧がかかるようにした。Keithley picoammeter を用いて ELMA ダイオードに逆バイアス電圧を印加しリーク電流値を測定した。セットアップは温度を 一定に保つため恒温槽に入れた。



図 4.23 ELMA ダイオード IV 測定セットアップ模式図.





図 4.24 ELMA ダイオード IV 測定セットアップ.

図 4.25 プローブと ELMA ダイオード拡大図.

図 4.26 は測定した ELMA ダイオードの IV 曲線である。青が中性子照射前、赤が中性子照射後のア ニーリング後の IV 曲線である。全空乏化電圧 60 V における電流値の差は $\Delta I = 110$ nA であった。



図 4.26 ELMA ダイオード IV 曲線.

この電流値より計算した、ビームカレント 1 μ C あたりの中性子照射量は表 4.3 のようになった。([24] の中性子フラックス計算プログラムを用いた)。 ΔI の誤差は約 5% 程度であった。また、アニーリン グ時間を変えて (60°で 48 時間)IV 測定を行い同様の方法で計算した中性子フラックスは、 1.0×10^7 n/(cm² μ C) であった。アニーリング時間を変えた場合に得られた中性子フラックスの変化と ΔI の誤差 から、今回 ELMA ダイオード求めた中性子フラックスは約 12% 程度の誤差を見込んでいる。

$\Delta I[\mathrm{nA}]$	総ビームカレント [µC]	ターゲットからの距離 [cm]	中性子フラックス $[n/(cm^2 \mu C)]$
110	2.1×10^4	3.5	9.0×10^{6}

表 4.3 MPPC 設置位置と中性子照射時間

このデューテロン1 µC あたりの中性子フラックスをもとに求めた第一回目の照射試験における MPPC への中性子総照射線量は表 4.4 である。MPPC への中性子照射では照射していた期間の総ビームカレン

トに約 10% 程度の不定性を見込んでいる。ELMA ダイオードの測定から得たフラックスの誤差と、総 ビームカレントの不定性から、MPPC への中性子照射量は約 15% 程度誤差を見込んでいる。

MPPC セット名	ターゲット 中心からの距離 [cm]	照射時間 [hour]	総照射線量 $[n/cm^2]$
MPPC セット 1	3.6	48	2.0×10^{12}
MPPC セット 2	10	48	2.6×10^{11}
MPPC セット 3	14	24	7.9×10^{10}
MPPC セット 4	10	8	4.4×10^{10}
MPPC セット 5	40	12	4.8×10^{9}

表 4.4 MPPC への中性子総照射線量

アミノグレイを用いたガンマ線照射量の測定

先述の通りベリリウムターゲットからは中性子以外にもガンマ線が出ているとされている。中性子による MPPC への損傷を評価するうえで、どの程度のガンマ線が中性子と同時に MPPC に照射されている かを知りたい。照射試験でガンマ線を照射したアミノグレイサンプルの測定は日立金属に依頼した。結果 として、最も長く照射したサンプル以外の吸収線量測定値はアミノグレイの測定可能照射線量以下であっ たため、ガンマ線の吸収線量の評価については最も長く照射を行ったアミノグレイサンプル C のみを使 用する。アミノグレイ C の総吸収線量は 0.107 kGy であった。

アミノグレイサンプル C の測定結果は表 4.5 にまとめた。アミノグレイのカタログより、ガンマ線照吸 収線量の誤差は 1% が見込まれる [25]。

総ビームカレント [µC]	ターゲットからの距離 [cm]	ガンマ線吸収線量/ビームカレント $[kGy/\mu C]$
8.18×10^5	3	1.3×10^{-7}

表 4.5 アミノグレイサンプル C の測定結果

ELMA ダイオードの測定より、ターゲット中心から 3.5 cm の位置でのビームカレントあたりの中性 子フラックスは 9.0×10^6 n/cm² であった。この値と表 4.5 のビームカレントあたりのガンマ線吸収線量 1.3×10^{-7} kGy/ μ C より、中性子フラックスあたりのガンマ線吸収線量は 1.5×10^{-14} kGy/(n/cm²) で あった。中性子照射試験における MPPC への最大中性子照射量は 1.5×10^{12} n/cm² であったので、アミ ノグレイの測定結果を用いいるとこのときの MPPC のガンマ線吸収吸収線量は 2.2×10^{-2} kGy である。

$$1.5 \times 10^{12} \text{n/cm}^2 \times 1.5 \times 10^{-14} \text{kGy/(n/cm}^2) = 2.2 \times 10^{-2} \text{kGy}$$
 (4.1)

高崎量子応用研究所におけるガンマ線照射試験の結果より、New type(受光面 3 mm 角)の MPPC の IV 曲線における、ガンマ線 4.1 kGy 照射後のリーク電流値は照射無しの MPPC の約 20 倍であったの で、ガンマ線吸収吸収線量が 2.2×10^{-2} kGy 程度の場合ガンマ線による損傷は中性子による損傷に比べ て無視できると考えられる。

4.3.4 結果と考察

中性子照射後のダークシグナルの波形の変化

図 4.27 はそれぞれの種類の MPPC の中性子照射量ごとのダークシグナルの波形である。



図 4.27 中性子照射量ごとのダークシグナル.

先行研究のダークシグナル波形(図 4.3)と今回測定した波形を比較してみると、図 4.27 の照射量 $4.8 \times 10^9 \text{ n/cm}^2$ における、同じ時間幅内のダークシグナルの数は New type 1 mm 角と Old type 1 mm 角 MPPC ではおおよそ先行研究の照射量 $3.0 \times 10^9 \text{ n/cm}^2$ の波形と同じに見える。今回の測定では、さらに照射量が多い場合はダークシグナルの数が大変多く比較が難しい。また、約 $4.4 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$ の照射量以上では 1 光子のシグナルの分離能力が無くなっている。New type VUV MPPC は受光面積が 6 mm 角と大きく素子全体で受ける中性子量が 1 mm 角の MPPC よりも多いためダークシグナルの増加が大きく、1 mm 角の MPPC よりも少ない中性子照射量 ($4.8 \times 10^9 \text{ n/cm}^2$)ですでに 1 光子分離能力が無くなっている。

リーク電流の測定

今回は3種類の MPPC の中性子照射に対する耐性をリーク電流を用いて評価した。図 4.28、図 4.29、 図 4.30 はそれぞれの種類の MPPC の中性子照射量ごとの IV 曲線である。縦軸は単位受光面積 (mm²) あたりの電流値である。それぞれの種類の MPPC で中性子照射量が多くなるにつれてリーク電流値が大 きくなっていることがわかる。



図 4.28 IV 曲線 (New type 1 mm 角 MPPC).



図 4.29 IV 曲線 (Old type 1 mm 角 MPPC).



図 4.30 IV 曲線 (New type VUV MPPC).

ブレークダウン電圧より大きい印加電圧ではリーク電流値が大きいため使用していたアンプの HV 回路 の抵抗 ($3.6 \text{ k}\Omega$) にて電圧降下が起き、MPPC に正しい電圧値を印加できない。よって、正しいリーク電 流値で MPPC ごとの比較を行うためにブレークダウン電圧より小さい、アバランシェ増幅が起きる前の 領域でのリーク電流値を用いて比較を行った (New type 1 mm 角 MPPC と New type VUV MPPC は 62.5V から 63 V の範囲、Old type 1 mm 角 MPPC は 68.5 V から 69.0 V の範囲のリーク電流値の平 均値を用いた。)。中性子照射無しの MPPC では、アバランシェ増幅が起きる前の領域のリーク電流は表 面電流の影響が大きくなるが中性子照射により急激にリーク電流値が大きくなっている場合は中性子によ る損傷の影響を見る事ができる。図 4.31 はブレークダウン電圧以前の領域の IV 曲線がフラットな部分 のリーク電流値の平均をプロットした図である。リーク電流値は単位受光面積あたりの値になっている。



図 4.31 中性子照射済み MPPC の種類ごとの電流値の比較.

一番中性子照射が少ない場合は New type 1 mm 角 MPPC と Old type 1 mm 角 MPPC はリーク電 流値が小さいため不安定だが、それ以外の中性子照射量の領域を見てみると、おおむね中性子照射量に 比例してリーク電流値が増加している。また、それぞれの MPPC で単位受光面積あたりのリーク電流値 も大きな違いは見られなかった。結論として、今回の中性子照射試験ではリーク電流値で比較では New type の MPPC と Old type の MPPC では中性子照射への耐性に大きな違いは見られなかった。

4.4 放射線照射試験まとめ

高崎量子応用研究所におけるガンマ線照射試験で MPPC の絶縁膜の構成物質の異なる 2 種類のサンプ ルのガンマ線耐性の比較を行った。逆バイアス電圧を印加しながらのガンマ線照射中のリーク電流の変化 を観測した。どちらの MPPC も先行研究に見られるような、ある一定の閾値のガンマ線吸収線量を超え たときに急激にリーク電流が増加する現象は見られず、リーク電流は緩やかに上昇した。これはガンマ線 照射による損傷の影響で絶縁層とシリコンバルク界面に生成された新しい順位にキャリアが捕獲されてい くことにより電荷が蓄積し、MPPC の内部の電気的性質が変化したことが原因の可能性がある。しかし、 ガンマ線照射中のリーク電流の振る舞いについては完全には理解でできていない。次に、ガンマ線照射 後にも残るリーク電流増加の測定の結果についてであるが、New type 3 mm MPPC と New type VUV MPPC のどちらも、同様にガンマ線照射量に対してリーク電流が増加した。

神戸大学タンデム加速器を使用した中性子照射試験ではアフターパルス抑制機構のある New type の MPPC と抑制機構のない Old type の MPPC の中性子照射への耐性の比較が目的であった。New type の MPPC ではアフターパルス抑制のためにシリコンバルク中の構造に変更があった可能性があり、それ に伴い中性子照射への耐性も変化している可能性があったからである。リーク電流値で比較を行なった結 果としては、今回の中性子照射試験では New type と Old type の MPPC に中性子照射への耐性の大き な違いは見られなかった。(ベリリウムターゲットからはガンマ線も飛来してくるが、アミノグレイを用 いた線量測定の結果、今回の中性子照射試験ではガンマ線の損傷の影響は中性子の損傷に対して小さいこ とがわかり、ガンマ線による損傷の影響は無視できた。)

第5章

新しいシンチレーション光読み出し方法 の開発

現在 AHCAL の研究は1 つのプラスチックシンチレータタイルと1 個の SiPM からなるシンチレータ セルユニットデザインを用いて行われている。シンチレータセルユニットのデザインについては複数考案 されているがいずれも1 つのプラスチックシンチレータと1 個の SiPM からなるものである。我々は1 つのプラスチックシンチレータあたり4 個の SiPM で読み出しを行う、シンチレータセルユニットのシ ンチレーション光の新しい読み出し方法の開発を行った。この章では新しい読み出し方法の動作原理及び プロトタイプを用いた測定による新読み出し方法の性能評価について述べる。また、ILC の検出器シミュ レーションソフトウエアを用いた新読み出し方法の性能評価についても述べる。

> プラスチックシンチレータタイル é Mainz SM HBU 読み出し基板HBU SiPM

5.1 4 点読み出し法

図 5.1 読み出し基板にマウントされたシンチレータセルユニット.

図 5.1 は現在 AHCAL グループで考えられている標準的なデザインのシンチレータセルユニットの読み出しデザインの模式図であり、例として計 25 個のシンチレータセルユニットを読み出し基板に並べた図である。30 mm×30 mm×3 mm のプラスチックシンチレータタイルと1 個の SiPM とで1 個のシンチレータセルユニットが構成されており、このデザインではシンチレータセルユニットごとに個別の SiPM でシンチレーション光を読み出す。(SiPM は読み出し基板に表面実装されている。)

対して、図 5.2 は現在開発している 4 点読み出し法を表す模式図である。シンチレータタイルは現行デ ザインと同様のサイズである。新デザインではシンチレータセルの頂点が重なる部分に SiPM を配置し、 1 つのシンチレータセルあたり 4 個の SiPM でシンチレーション光を読み出す。また、1 個の SiPM は隣 接している 4 つのシンチレータセルから伝播してくるシンチレーション光を読み出すとも言い換えること ができる。新デザインではシンチレータセルの 4 隅の SiPM のコインシデンスで hit 判定を行う。



図 5.2 新読み出しデザイン.

利点

新デザインでは 4 個の SiPM のコインシデンスで hit 判定を行なうため、個々の SiPM のダークノイ ズやエレキのノイズによるランダムな hit を取り除くことが可能である。また、4 個の SiPM を用いるこ とでタイル内の hit 位置ごとに得られる光量の一様性が向上し、かつ十分大きな総光量が得られる。また dead SiPM が生じてもセルは死なないという利点もある。また、現行 AHCAL デザインではセルごとに 個別にキャリブレーション用の LED を付けているが、新デザインでは全てのセルに個別に付ける必要は 無くなる。

想定される課題

図 5.3 左図の赤いセルは実際に荷電粒子が通過した True hit を表し、橙色の SiPM は True hit により 信号が得られた SiPM を示す。先述の通り、新デザインでは 4 個の SiPM のコインシデンスで hit 判定 を行う。図 5.3 右図の黄色セルはコインシデンスにより hit 判定をした後の再構成 hit を表す。セルの周 りの 4 個の SiPM がなっていると hit と見なされるため、タイル のように Ture hit が無い場合でも再 構成 hit と判定される場合があり、これが fake hit となる。

それぞれの SiPM の信号は自身に隣接する複数の hit セルからのシンチレーション光の総和であるの で、SiPM の Charge を隣接する hit セルに振り分ける事により各々の hit セルの Charge の再構成を行う。fake hit が存在する場合でも鳴っている SiPM の信号が変わるわけではないため Charge の損失は無 く、総量は保存される。





- 想定される課題
 - hit セルに囲まれたセルが intrinsic な fake hit となり、Cluster の形がぼやける
 - – 隣接タイルへのシンチレーション光の漏れ出しによる fake hit によって同様に、Cluster の形
 がぼやける
 - チャンネル数が約16% 増加する

1 枚の読み出し基板 (HBU) には 12 個 ×12 個のタイルをマウントする。図 5.4 のように各 HBU の一 番外側のみ 1 個おきに SiPM を配置すれば、新デザインを用いた場合でも増加は数 % 程度に抑える事が できる。



≥ 5.4

5.1.1 シンチレータセルユニットデザイン

新読み出し方式のシンチレータセルユニットの実装方法として最初に下記の二案を検討した。



図 5.5 Dimple 式概念図.

図 5.6 WLS 式概念図.

Dimple 式

図 5.5 のようにシンチレータタイルの 4 隅の部分にくぼみを入れ、SiPM 周辺に Dimple ができるよう なデザインである (Dimple とはゴルフボールのくぼみを表す語句であり、AHCAL グループでは加工済 シンチレータタイルのくぼみを"Dimple"と呼称している)。SiPM 直近の部分のシンチレータを薄くする 事により、その付近に hit があった場合に光量が特に大きくなってしまう事を防いでいる。また、Dimple を SiPM の受光部よりも大きめに作る事により、シンチレータタイルと SiPM のアラインメント時のず れなどによる SiPM の受光量への影響を小さくする事ができる。アセンブリが容易という利点もある。 Dimple 式では、シンチレーション光はシンチレータを飛び出し、空気中を伝播して MPPC に到達する。

WLS 式

図 5.6 に示す通り、SiPM との接触部に WLS(Wave Length Shifter)を配置するデザインである。WLS 式では、シンチレータで発生したシンチレーション光は WLS に到達すると吸収・波長変換プロセスを経 た後に等方的に再発光し、MPPC に到達する。WLS は吸収スペクトルと発光スペクトルに重複がないも のを使用することにより、隣のセルに波長変換後のシンチレーション光が漏れ出した場合でもそのセルの WLS では 2 回目の発光はしない。Dead space が約 1% 生じる。図 5.7 と表 5.1 に WLS(EJ-280)の基本 情報を示す [26]。



EJ-280 OPTICAL SPECTRA

図 5.7 WLS EJ-280 の吸収・発光波長分布 [26].

ベース素材	PVT(Polyvinyltoluene)
屈折率	1.58
密度 g/cc	1.023

表 5.1 WLS EJ-280 基本データ [26].

5.2 新デザインのプロトタイプを用いた測定

Dimple 式と WLS 式共にプロトタイプ・セットアップを製作し、新しい読み出し方法の性能評価を 行った。以下では 3D CAD で設計したセットアップと測定について述べる。

5.2.1 セットアップ

ジグの製作

シンチレータマテリアルの比較で使用したジグと同様に照射位置を変えながらプラスチックシンチレー タタイルに⁹⁰Sr 線源を用いて 線を照射し MPPC でシンチレーション光を測定することのできるのセッ トアップを製作した。今回は Dimple 式、WLS 式でそれぞれ 9 枚のプラスチックシンチレータタイルと 及び 10 個の MPPC がマウントされている読み出し基板を使用した。トリガーカウンターはシンチレー タマテリアルの比較の測定で使用したものを使用した。9 枚のプアスチックシンチレータタイルと読み出 し基板はデルリン製のフレームを用いて固定されている。図 5.8 にセットアップの模式図を示す。それぞ れの MPPC とトリガーカウンターは別個に読み出され、DRS で波形を記録しオフライン解析を行った。



図 5.8 ジグ模式図.

シンチレータセルユニットプロトタイプ

新しい読み出し方法の2種類の方式(Dimple 式・WLS 式)のテストを行うため、プラスチックシンチ レータタイルの加工をジーテック社に依頼した。どちらの方式も 30 × 30 × 3 × mm³ のキャスト成形プ ラスチックシンチレータタイル(ELJEN 社 EJ-212)を元に機械加工を行った。

図 5.9 が Dimple 式、図 5.10 が WLS 式のプラスチックシンチレータである。Dimple 式はシンチレー タタイルの 4 隅の頂点をカットし、MPPC 周辺にピラミッド型の Dimple ができるように加工した。 Dimple の大きさは図 5.14 のようにした。WLS 式はシンチレータタイルの 4 隅の辺の部分をカットし、 タイルの頂点が集まる部分 (MPPC との接触部分) に $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ の大きさの WLS (図 5.13)をは め込む事ができるようにした。

図 5.11 及び図 5.12 はリフレクタを巻いたプラスチックシンチレータタイルである。Dimple 式ではピ ラミット型 Dimple の表面を除いて、WLS 式では WLS とシンチレータタイルが接触する部分を除いて リフレクタで覆った。リフレクタは 3M 社 ESR2(厚さ 32µm)を使用した。





図 5.9 プラスチックシンチレータタイル Dimple 式.

図 5.10 プラスチックシンチレータタイル WLS 式.

図 5.11 プラスチックシンチレータタイル Dimple 式.

図 5.12 プラスチックシンチレータタイル WLS 式.

⊠ 5.13 WLS EJ-280.

MPPC が 10 個マウントされた読み出し基板(図 5.16)の上にこれらのプラスチックシンチレータ 9 枚を図 5.14、図 5.15 のように固定した。固定には、デルリン製のフレーム(図 5.17)を用いた。図 5.18 は Dimple 式のタイル 9 枚をデルリンフレームに固定した図である。WLS 式ではシンチレータタイル と PCB との間に MPPC の厚さ分の隙間ができるため、力学的に安定な構造にするためにデルリン製の 0.8mm のスペーサを間に挟んだ。MPPC と WLS の接触にオプティカルグリス等は使用していない。

図 5.14 プロトタイプセットアップ Dimple 式.

図 5.15 プロトタイプセットアップ WLS 式.

読み出し基板は 10 個の MPPC(型番: S12571-025P、受光面: 1 mm x 1 mm、表面実装型、アフター パルス抑制モデル)がマウントされており、それぞれ個別に読み出しができるようになっている。また、 基板の下部にトリガーカウンターが位置するため、 線を遮蔽しないように穴があけられている。

図 5.16 MPPC 読み出し基板.

図 5.17 プラスチックシンチレータ固定用デルリ ンフレーム.

デルリンフレームでプラスチックシンチレータタイルと読み出し基板を固定したものが図 5.19 である。

図 5.18 9 枚並べたシンチレータタイル (Dimple 式). 図 5.19 固定済みシンチレータタイルと基板.

DAQ

シンチレータマテリアルの比較の測定と同様に、それぞれ MPPC のチャンネルごとに PSI アンプを 接続して増倍したシグナルの波形を DRS で記録し、その後オフライン解析を行いシンチレーション光 の光量を求めた。今回の測定では読み出しチャンネルが多かったため図 5.20 のように DRS2 個を数珠 つなぎにして使用した。DRS 同士は複数個接続して読み出し数を増やして使用する事が可能である。ま た、MPPC に印加する逆バイアス電圧は PSI 製のモジュールである SCS(Slow Control Sysytem) と HV カードを使用した(図 5.21)。HV カードは SCS を通してネットワークに接続されており、PC 上から操 作可能である。複数チャンネルの電圧の制御が可能であり、チャンネル数が多い際に有用である。

図 5.20 数珠つなぎにした 2 個の DRS(チャンネル数 8).

図 5.21 複数チャンネル HV 源 (HV カード)を 搭載した SCS2000.

5.2.2 測定方法

今回のセットアップでは 9 枚のプラスチックシンチレータタイルを 10 個の MPPC で読み出す事ので きるセットアップを作成したが、測定では図 5.22 の様に A, B, C, D の計 4 枚のシンチレータタイルと ch1 から ch7 の計 7 個の MPPC のみを使用した。今回は中心にある橙色のタイル A をメインタイル、隣 接するタイル B, C, D を隣接タイルとした。メインタイル A に 線を照射し、ch1, ch2, ch3, ch4 の 4 個 の MPPC を用いたときのメインタイル A の光量の一様性を見た。また、メインタイル A に 線を照射 したときの隣接タイル B, C, D への光漏れの量を評価した。図 5.23 はタイル A 内で 線を照射した位置 を表している。タイルの端から 6 mm 間隔で 線を照射した。また、MPPC に近い部分に照射したとき の応答も見るために、タイルの端から 3 mm の点にも 線を照射した。さらに、タイルの中心にも照射し た。計 37 点に 線を照射してそれぞれの点でのシンチレーション光を見た。

MPPC に印可した逆バイアス電圧は、それぞれの MPPC のゲインをそろえるために浜松ホトニクス 推奨電圧を用いた (オーバー電圧 = 3.5V)。

図 5.22 測定セットアップ上面模式図.

5.3 測定結果と考察

図 5.24 がメインタイル A の MPPC 1 個のみで得られたシンチレーション光の charge 分布である。図 5.25 は隣接タイルの MPPC1 個のみで得られたシンチレーション光 (及びダークシグナル)の charge 分 布である。

5.3.1 光量の一様性

図 5.26 は Dimple 式のメインタイルの 4 個の MPPC(ch1, ch2, ch3, ch4) それぞれで得られた光電子 数の分布である。

図 5.26 メインタイル A のそれぞれの MPPC で得られた光電子数の分布 (Dimple 式).

図 5.27 メインタイル A の 4 個の MPPC を使用した場合に得られる光電子数の分布 (Dimple 式).

図 5.27 はトリガーがかかったイベントごとに、Dimple 式のメインタイルの 4 個のそれぞれの MPPC で得られる光電子数を足し合わせたときに得られる光電子数の分布であり、MPPC が 4 個全て鳴っているイベントと、4 個のうちのどれかしらが鳴っていないイベントの両方を含んでいる。図 5.27 をメインタイルで得られた光電子数の分布と定義し、この分布の Mean 値をもちいてメインタイルでの光量の評価を行った。

照射位置ごとに、メインタイルの MPPC 1 個のみを使用した場合に得られる光量の分布は図 5.28 と図 5.29 である。横軸はタイル A 内での 線照射位置、縦軸は得られた光量 (p.e.) を表している。光 量が著しく大きくなっている所は MPPC 直近に 線を照射したときに得られた光量である。使用した MPPC の位置は図 5.28 では (x,y)=(30,30) であり、図 5.29 では (x,y)=(0,30) である。MPPC 直近に

線を照射したときは特に多くの光量が得られるがそれ以外では得られる光量は小さく、光量の位置依存 性が大きい事がわかる。

図 5.28 MPPC1 個のみを使用したときのメイン タイルで得られる光量 (Dimple 式)

Light Yield with 1 MPPC (WLS)

図 5.29 MPPC1 個のみを使用したときのメイン タイルで得られる光量 (WLS 式)

図 5.30 と図 5.31 はそれぞれ Dimple 式と WLS 式においてメインタイルの 4 個の MPPC の charge の 合計を使用した場合に得られた光量の 線照射位置ごとの分布である。横軸はメインタイル A 内での 線照射位置を表している。1個の MPPC を使用した場合に比べ、光量と一様性ともに圧倒的に向上して いることがわかる。

ບ່₃₅₋

30

25

20-

15-

10

5-

0-30

³⁰ 25 20 15 10 5 00

₽ ₽

図 5.30 4 個の MPPC を使用したときのメインタ イル光量 (Dimple 式)

図 5.32 4 個の MPPC を使用したときの光量分布 (Dimple 式)

図 5.31 4 個の MPPC を使用したときのメインタ イル光量 (WLS 式)

5

Light Yield with 4 MPPC (WLS)

図 5.33 4 個の MPPC を使用したときの光量分布 (WLS 式)

図 5.32 と図 5.33 は、図 5.30 と図 5.31 で得られた 線照射位置ごとの光量の分布である。

Dimple 式では、メインタイルで平均で約 34 p.e.の光量を得る事ができた。光量のばらつきは RMS/Mean = 2.7%であった。WLS式では、メインタイルで平均で約31 p.e.の光量を得る事ができ た。光量のばらつきは RMS/Mean = 5.2% であった。

5.3.2 Hit 判定の inefficiency

続いて、hit 判定の Inefficiency の評価を行った。図 5.22 に示したように、トリガーカウンターはシン チレータタイルの下側に設置されており、シンチレータタイルの上から 線を照射しているため、 線に

35

30

25

20

15

10

30

25

x [mm]

20

15

10

よりトリガーがかかったイベントでは必ずシンチレータタイルで hit があったといえる。しかし実際には hit があったにもかかわらず hit 判定されないイベント、つまりセルに hit があってもそのセルの 4 個の MPPC の全ては鳴らずコインシデンスがとれないようなイベントは確率的に存在する。これは、光量の 平均値が小さい場合のポアッソン分布で N=0 となる確率がゼロではないためである。

hit があるにもかかわらず hit 判定がなされない事象が起きる確率を hit 判定の Inefficiency として評価 した。Inefficieny は式 5.1 のように定義した。各 MPPC の threshold は 0.5 p.e. とした。

Inefficiency =
$$1 - \frac{$$
メインタイルの 4 個の MPPC 全てが同時に鳴っているイベント数
全トリガーイベント数 (5.1)

図 5.34 と図 5.35 はそれぞれ、Dimple 式、WLS 式の hit 位置ごとのメインタイルの Inefficiency を 表している。Dimple 式の Inefficiency は平均 3.2 %、WLS 式の Inefficiency は平均 3.7 % であった。 Dimple 式では MPPC 付近の hit では Inefficiency が大きかった。これは、Dimple 式では DImple を作 るために MPPC 付近はプラスチックシンチレータが薄くなっており発光量が小さくなったことが原因と して考えられる。WLS 式では 2 ヵ所だけ特に Inefficiency が大きくなっている。これは手動 XY ステー ジでの 線照射位置の調節ミスにより、スポットサイズ $\phi = 2 \text{ mm}$ の 線のうちの一部がプラスチック シンチレータではなく WLS に直接照射されてしまった事により発光しなかったイベントが原因であると 考えられる。

図 5.34 4 個の MPPC を使用したときの Inefficiency (Dimple 式)

Inefficiency with 4 MPPC (WLS)

図 5.35 4 個の MPPC を使用したときの Inefficiency (WLS 式)

5.3.3 光漏れによる fake hit の評価

図 5.36 は隣接タイル B における 3 つの MPPC (図 5.22 における MPPC ch5, ch6, ch7)のそれぞれ で得られる光電子数をメインタイルでトリガーがかかったイベント毎で足し合わせた光電子数の分布で ある。この分布もメインタイルの場合と同様に MPPC3 個が全て鳴っているイベントと 3 個のうちいず れかが鳴っていないイベントとの両方を含んでる。メインタイル A に 線を照射したときのメインタイ ル A から隣接タイル B へ漏れ出してきたシンチレーション光の光量を、メインタイル A と共有している MPPC ch4 を除いたセル B の 3 個の MPPC の光量の和で定義した。

The number of p.e.

図 5.36 隣接タイルの 3 個の MPPC を使用した場合に得られる光電子数の分布.

隣接タイルへの光漏れの量

図 5.36 の光電子数の分布の Mean 値を用いてメインタイル A に 線を照射したときの、メインタイル A から隣接タイル B への光漏れの光量を評価した。図 5.38 と図 5.39 はそれぞれ Dimple 式と WLS 式に おける、隣接タイル B の 3 個の MPPC で得られた光量和の 線の hit 位置ごとの分布である。横軸はメ インタイル A 内の 線照射位置を表している。

図 5.38 光漏れの量 (Dimple 式)

図 5.39 光漏れの量 (WLS 式)

隣接タイルに近い位置に 線を照射した場合は特に光漏れの量が大きくなっている事が見える(図 5.37 における ch4 の MPPC 付近に照射した場合)。Dimple 式では隣接タイル付近に照射した場合は約 1.5 p.e. の光漏れであり、位置ごとの平均は 1.3 p.e. であった。WLS 式の光漏れの量は、隣接タイル付近の 場合は約 3 p.e.、位置ごとの平均は 2.4 p.e. であった。

WLS 式の方が Dimple 式よりも隣接タイルへの光漏れが多い結果となった。理由としては以下のこと が考えられる。図 5.40 は WLS 式でのシンチレーション光の隣接タイルへの伝播の模式図である。メイ ンタイルで発生したシンチレーション光は隣接タイルと共有されている WLS1 に入り、吸収・波長変換 過程を経た後に入射角度によらず等方的に再発光する。波長変換後のシンチレーション光は隣接タイル B を通過し WLS2 に到達する。今回使用した WLS は吸収波長スペクトルと発光波長スペクトルに重複が ないため、WLS2 では再発光は行われない。よって WLS1 から隣接タイル B を直進して進んできたシン チレーション光は WLS2 直下にある MPPC では検出されにくいが、隣接タイル B 内を反射しながら進 んで WLS2 に入射されたシンチレーション光は、MPPC に直接入射するような角度で WLS2 に入って きた場合に検出されやすい。WLS 式で光漏れの量が大きかったのはこの反射しながら隣接タイル B を進 んできたシンチレーション光が原因であると考えられる。また、Dimple 式ではプラスチックシンチレー タと MPPC との間に空間(空気の層)があるためこの影響が小さく、WLS 式よりも検出される光漏れ が少なかったと考えられる。

図 5.40 シンチレーション光の伝播模式図 (WLS 式)

光漏れによる fake hit 確率

続いて、隣接タイルへの光漏れにより生じる fake hit 発生確率の評価を行った。光漏れによる fake hit は、隣接タイルの MPPC4 個が全て鳴り hit 判定されることにより生じる。図 5.37 の隣接タイル B 周辺 の ch4, ch5, ch6, ch7 の 4 個の MPPC が同時に鳴っているときのイベントを隣接タイル B の fake hit イ ベントと判定した。式 5.2 のように fake hit 発生確率を全トリガーイベント数に対する隣接タイル B の fake hit イベント数 (隣接タイルの MPPC の 4 個コインシデンスイベント数) で定義した。

Fake hit probability =
$$\frac{隣接タイル B \ o \ 4 \ @ o \ MPPC \ o \neg 4 \neg 2
ightarrow \ddot{z}$$
 (5.2)
全トリガーイベント数

図 5.41 と図 5.42 はそれぞれ Dimple 式と WLS 式の隣接タイル B における fake hit 発生確率の 線照 射位置ごとの分布である。縦軸は fake hit 発生確率、横軸はメインタイル A 内の 線照射位置を示して いる。

Fake hit probability (WLS)

図 5.41 光漏れにより起こる fake hit 確率 (Dimple 式)

図 5.42 光漏れにより起こる fake hit 確率 (WLS 式)

Dimple 式よりも WLS 式の方が光漏れが大きいため、fake hit 発生確率も WLS 式の方が大きくなっている。平均の fake hit 発生確率は、Dimpe 式では 2.1% で WLS 式では 6.2% であった。また、隣接タ イル B と共有している MPPC ch4 付近では光漏れの量が多いためそれにともなって fake hit 発生確率 も大きくなっていることがわかる。ch4 付近に 線を照射した場合の fake hit 確率は、Dimple 式では約 3.5% で WLS 式では 7% から 10% であった。

つぎにメインタイル A と MPPC2 個を共有する隣接タイル D における fake hit 確率の評価を行った。 本来であれば隣接タイル D への光漏れによる fake hit 確率の評価も際には隣接タイル D 周辺の 4 個の MPPC のコインシデンスイベント数を用いるべきである。しかし今回使用したプロトタイプセットアッ プでは図 5.43 のセル D の右下の MPPC (以下 ch N と呼称)を設置していなかった。そのため、他の ch の MPPC を用いて隣接タイル D における fake hit 発生確率を暫定的に評価した。今回はメインタイ ルの中心に 線を照射したイベントのみを使用した。また、 線照射位置から ch N の位置へのシンチ レーション光がたどるパスと同等なパスをもつ、ch 5 の MPPC を ch N のかわりに使用した。つまり、 図 5.43 の ch 3, ch4, ch5, ch6 の MPPC のコインシデンスイベント数を用い隣接タイル D での fake hit 発生確率を評価した (式 5.3)。

結果は Dimple 式では約 10%、WLS 式では約 25% となった。これは、隣接タイル D のヒット判定に使う 4 つの SiPM の内、2 つの SiPM がメインタイル A と共有しているため fake hit 確率が高くなったと考えられる。

図 5.43 隣接タイル D 光漏れ模式図

5.3.4 測定結果まとめ

新しい読み出し方法のプロトタイプセットアップを作成し、Dimple 式と WLS 式の2 種類のシンチ レータセルユニットデザインの最初の性能評価を行った。メインタイルで得られる光量は Dimple 式と WLS 式ともに約 30 p.e 程度と、現在の AHCAL の読み出しデザインと同程度かそれ以上の光量を得る 事ができた。この光量は AHCAL の先行研究において十分な量であることがわかっている。また、新し い読み出し方法では非常に良い光量の一様性が得られた。図 5.44 は AHCAL の現行デザイン案 (タイル 下面からの読み出し)のシンチレータセルユニットで得られる光量の 線照射位置ごとの分布である。図 5.44 は受光面積 $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ の SiPM を用いているため、 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 角の SiPM よりも約 1.7 倍の光量 が得られる。 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 角あたりの光量に直した場合、図 5.44 で得られる光量は最大約 26 p.e. ほどであ る。これと比較すると、今回の測定のメインタイルの 4 個の MPPC で得られた光量は現在の AHCAL の 読み出しデザインと同程度かそれ以上であることが確認できる。

図 5.44 現行デザインの光量の一様性 [9].

隣接タイルでの fake hit 発生確率は WLS 式の方が大きい結果となった。今回はメインタイルと MPPC1 のみを共有する隣接タイルでの fake hit 発生確率を評価したが、MPPC2 個を共有する隣接タイ ルの方が光漏れの量が多く、fake hit 発生確率も高い。fake hit を減らすためにどちらのシンチレータデ ザインでも隣接タイルへの光漏れの量を抑えることが課題である。

今回使用したシンチレータセルユニットは、まだシンチレータの形状や MPPC との光学的なカップリ ングについての最適化は行っていない物であった。今後 Geant4 の optical photon のシミュレーション を行い光量増加と隣接タイルへの光漏れがより小さいデザインを模索していく。hit 判定の Inefficiency については、光量の増加により小さく抑える事ができると考えられる。また、検出器シミュレーションを 行い Inefficency と検出器性能の相関の評価を行なう。しかし光量の増加にともない隣接タイルへの光漏 れも大きくなるため、光量増加と光漏れ抑制のバランスが重要である。

今回使用したプロトタイプでは結果全体をみても Dimple 式のが良い性能が得られた。アライメントの 観点からも Dimple 式は WLS 式よりも単純な構造をしているため利がある。また、WLS を使う大きな 動機があるわけでは無いので今回使用したプロトタイプでは Dimple 式の方が優れていると言える。

新しい読み出し方法の性能評価をする上で、検出器シミュレーションを用いた検出器性能への影響の評価も行う必要がある。Inefficency や光漏れの量と検出器性能の相関の評価も行なっていく。新読み出し デザインでは隣接タイルへの光漏れ由来の fake hit と、hit セルに囲まれる事により生じる intringic な fake hit の2種類があり、fake hit によりクラスターの形がぼやけることが見込まれる。PFA ではカロリ メータで生じたクラスターがどの粒子由来の物であるかを全て追跡する。ゆえにクラスターの分離能力が 重要であり、クラスター形状の smearing がクラスター分離にどう影響するかを評価する必要がある。次 の項では ILC の検出器シミュレーションソフトウエアを用いた新しい読み出し方法の性能評価について 述べる。

5.4 シミュレーションを用いた新しい読み出し方法の評価

5.4.1 目的

新しいシンチレーション光読み出し方法では1個の MPPC が4枚のプラスチックシンチレータタイル から来る光を読み出す。4個の SiPM ノコインシデンスで hit 判定を行なうことから、hit セルに囲まれ たセルが intrinsic な fake hit になる。また、隣接するシンチレータセルユニットへの光漏れによる fake hit が存在する。この fake hit については SiPM とシンチレータタイルの結合方法を工夫することにより 抑えられる可能がある。fake hit はクラスターの形状を smear し、クラスター分離能力が低下する可能性 がある。また、SiPM1 個で hit 判定をする現行デザインとはカロリメータを用いた粒子のエネルギーの 再構成方法にも違いがある。新しい読み出し方法を用いることによるこれらの効果が検出器性能に与える 影響を評価することが目的である。シミュレーションの側面から Inefficiency や光漏れの量の制限を評価 し、新しい読み出し方法を用いたシンチレータセルユニットデザインの最適化につなげる。

また、現行デザインについえても現実的な効果を入れたシミュレーションを行なう。現行デザインについては、隣接セルへの光漏れやセル内のhit 位置依存性といった現実的な効果を加味したシミュレーションはまだ行なわれていない。現行デザインでも隣接セルへの光漏れは想定されており、新しい読出し方法の性能評価だけではなく、現デザインについても現実的な効果を入れたシミュレーションを行なった上で総合的にデザイン間の比較していくことが目的である。

5.4.2 ILCsoft を用いた検出器シミュレーション

ILC Soft

ILC Soft は ILC の検出器や物理解析のシミュレーションで使用されているツールである。以下では ILC Soft について及び ILC Soft を用いたシミュレーションの流れについて具体的に述べる。

Mokka

Mokka は Geant4 ベースの Full MC シミュレーションツールである。粒子を検出器モデルに入射し、 粒子と検出器との相互作用を MC シミュレーションすることにより各検出器での hit を作り出す事がで きる。各 hit は hit 時間や hit した粒子、hit した物質におけるエネルギー損失などの情報を持つ。この hit 情報をもとに、次で説明する Marlin をもちいて事象の再構成を行なう。ILC の複数の検出器モデル が用意されており、ユーザは容易に ILC の検出器を用いた MC シミュレーションを行える。

Marlin

Marlin(Moduler Analysis & Reconstruction for the LINear collider) は Mokka で生成した hit 情報 を用いて digitization、イベントの reconstruction 等を行う事ができる C++ で記述されたシミュレー ションフレームワークである(一部 FORTRAN のコードも含む)。Marlin を使用する際は複数ある Processor のうち、必要な物を選択して使用する。Processor とはいわゆるタスクのようなものであり、1 つ1つの Processor がそれぞれ異なる役割の処理を担う(Tracking、Clustering、Digitization、PFA を 用いたイベントの Reconstruction、など様々)。まず、Mokka でシミュレートした検出器の hit 情報をも とに、飛跡検出器とカロリメータそれぞれで digitization を行なう。その後、digitization を行なった後 の現実の状況に近い検出器情報をもとに PFA で事象の再構成を行なう。 図 5.45 は ILC soft を用いた検出器シミュレーションの一般的な流れである。

図 5.45 ILC Soft を用いたシミュレーションの一般的な流れ

PFO(Particle Flow Object) とはは PFA によって再構成された 1 粒子由来の hit 群である。例えば、 ハドロンカロリメータに K_L^0 が入射した場合、それによって引き起こされるハドロンシャワー全体が 1 つ の PFO である (ハドロンシャワーのどこまでを PFO と定義するかは PFA が判断する)。

Digitization とは、MC シミュレーションで蓄積した hit 情報をもとに現実に近い検出器の応答を作り 出す工程である。MC シミュレーションで生成したイベントによって検出器がどのように振る舞うかを 再現する。Digitization を行なうことにより現実的な効果を考慮したシミュレーションを行なう事がで きる。

5.4.3 4 点読み出し方法の Digitization コードへの実装

4 点読み出し方を用いた検出器シミュレーションを行なうために、4 点読み出し法を用いる digitization の実装を行なった。以下では現状の AHCAL シンチレータセルユニットデザインを用いた digitization と、新しく実装した 4 点読み出し法を用いる digitization のそれぞれの処理の流れについて述べる。

Digitization の流れ

図 5.46 読み出し基板にマウントされたシンチレータセルユニット.

図 5.46 は第 2 章にいおいて述べた AHCAL の検出層の模式図で、SiPM がマウントされた読み出し基 板状に並べられた 30 mm² 角のシンチレータセルユニットが並べられている状態を表す。この図では図 中の写真のようなシンチレータタイルの中央下面から SiPM でシンチレーション光を読み出すデザイン のシンチレータセルユニットを用いている状況を表している。各シンチレータセルユニットは反射材で 覆われており、隣接するセルへの光漏れは小さいと考えられている。図 5.47 は現状 AHCAL デザインで の digitization の過程の模式図である。それぞれの四角形は 1 つ 1 つのシンチレータセルユニットを表 している。隣接セルへの光漏れが小さいと考えれているため、digitization はセルごとに個別に行なわれ る。現行デザインでの隣接セルへの光漏れの効果についてのシミュレーションはまだあまり行なわれてい ない。

Mokka における MC シミュレーションによって粒子の hit があったセルには粒子が落としたエネル ギーが蓄積されている (digitization 前のシンチレータタイルのエネルギー)。このセルに蓄積されている エネルギーを digitization を通して現実の検出器の応答に近い値に変換する。まずセルに蓄積されてい る、粒子ががプラスチックシンチレータに落としたエネルギーを SiPM で検出される光電子数に変換す る。その後、得られた光電子数にポアソン分布によるばらつきや SiPM の saturation の効果など、SiPM の現実的な効果を加える。最後に、現実的な値に変換された光電子数をプラスチックシンチレータでのエ ネルギー損失に再変換する。再変換によって得られたセルのエネルギーはプラスチックシンチレータと SiPM の現実的な効果の影響を受けた現実的な値に変換されている。

図 5.47 現状の AHCAL シンチレータセルユニットデザインでの digitization の流れ(概念図).

次に今回実装した 4 点読み出し法を用いた digitization の流れについて述べる(図 5.48)。4 点読み出 し法では hit セルから隣接セルへの光漏れがあるため、digitization は複数セルにまたがって行なう。今 回は SiPM の応答の hit 位置依存性を考慮するために 30 mm² 角のセルを 6 mm² の virtual なセルに分 割し、digitization 後に 30 mm² 角のセルを再構成する方法をとった。

最初に Mokka でシミュレートした virtual セルに粒子が落としたエネルギーを hit があったプラスチッ クシンチレータタイルの SiPM 及び隣接するタイルの SiPM に振り分ける。この振り分け方は、測定か ら得られた SiPM の応答の hit 位置依存性を使用する。次に、振り分けられたエネルギーを持つ SiPM 群 それぞれで、現状の AHCAL の digitization と同様のプラスチックシンチレータと SiPM の影響の効果 を付与する。そうして出来上がるのがシンチレーション光によって鳴った SiPM 群である。この鳴って いる SiPM 群をもとに 4 個の SiPM のコインシデンスによってセルの hit 判定を行い、hit があるセルに SiPM のエネルギーを再分配することにより、4 点読み出し法を用いた場合の現実的な影響の効果 (隣接 セルへの光漏れ、プラスチックシンチレータと SiPM の現実的な効果) を考慮した hit 及びその hit のエ ネルギーを作り出す。

図 5.48 4 点読み出し法を用いた digitization の流れ(概念図).

5.4.4 今後の展望

現在上記の様な digitization を Marlin のコードに実装中である。今後この digitization を使用した検 出器シミュレーションで 4 点読み出し方法の性能評価を行なう。

Cluster 分離能力の評価

4 点読み出し法のプロトタイプを用いた測定からもわかるように、このデザインでは隣接セルへの光漏 れがあり、光漏れによる fake hit 及び hit セルに囲まれたセルの fake hit がある。これらの fake hit は 粒子が作るクラスターの形状をぼやけさせる効果があると見込まれる。AHCAL では中性ハドロンと荷 電ハドロンの分離のためにクラスター分離能力が重要であるため、4 点読み出し法を用いた場合の評価を 行なう。また、シミュレーションの側面から、クラスター分離能力と隣接セルへの光漏れの量や hit の Inefficiency の相関を hit 判定のための coincidence の閾値などを変えながら評価し、4 点読み出し法のシ ンチレータセルユニットのデザインの最適化につなげる。

エネルギー分解能の評価

4 点読み出し法を用いた場合の、単一ハドロン粒子のエネルギー分解能及びジェットエネルギー分解能の評価を行い、現行 AHCAL デザインとの検出器性能の比較評価を行なう。また、Cluster 分離能力の評価の項で述べたことと同様に、4 点読み出し法のシンチレータセルユニットのデザインの最適化につなげる。

第6章

結論と今後の展望

本研究ではプラスチックシンチレータと SiPM の性能評価を行い、シンチレータセルユニットの構成要素の開発を行なった。さらに、4 点読み出し方法という新しい読み出し方法のシンチレータセルユニットの研究開発を行なった。シンチレータセルユニットの構成要素とシンチレータセルユニット自体のデザインの開発を通して、全体として AHCAL のシンチレータセルユニットのデザインの開発を行なった。

プラスチックシンチレータタイルの開発では、AHCAL の約 800 万チャンネルという膨大な読み出し 数に対して、大量生産に適した射出成形プラスチックシンチレータタイルが使用可能な性能を有するかを 調べた。AHCAL のシンチレータタイルのデザインを用いた射出成形プラスチックシンチレータの性能 はキャスト成形に比べ大きくは劣っておらず、特に PS ベースのものではキャスト成形のものに近い光量 を得られた。今回の測定で使用した 射出成形プラスチックシンチレータは発光材についての最適化はさ れておらず、今後発光剤等の比較及び最適化などを行ない、さらに性能の良い射出成形プラスチックシン チレータの開発を目指す。また射出成形プラスチックシンチレータの発光波長等、今回評価しなかった項 目についての評価も行なっていく。

SiPM の性能評価では、長期の安定的な使用に重要な放射線耐性についての評価比較を行なった。ガン マ線照射試験の結果はまだ理解できていない事項があり、さらなる研究が必要である。中性子照射試験 ではアフターパルス抑制機構のある New type の MPPC と無い Old type の MPPC の比較を行なった。 今回の中性子照射試験では中性子照射後のリーク電流を用いて MPPC ごとの比較を行い、中性子照射量 の増加に対する MPPC の単位受光面積あたりのリーク電流に大きな違いが無いことがわかった。そのた め、リーク電流の観点からは New type と Old type で中性子照射への耐性に大きな差は無いと判断した。 今後、原子炉を用いた MPPC とプラスチックシンチレータの中性子照射試験を計画しており、MPPC に いてはリーク電流以外にも増倍率やダークノイズレート、クロストークアフターパルス確率、光子検出効 率(相対値)など複数の観点から放射線耐性の比較評価を行なう。プラスチックシンチレータについては 中性子照射による、得られる光量や減衰長、発光波長の変化についての評価を行なう。

シンチレータセルユニットのデザインの開発では、1枚のプラスチックシンチレータタイルのシンチ レーション光を4個のMPPCで読み出す4点読み出し法という新しい読み出し方法の開発を行なった。 4点読み出し法のプロトタイプを用いた測定ではAHCAL使用するうえで十分な光量が得られ、かつ光 量の非常に良い一様性を得ることができた。また、隣接セルへの光漏れを抑える事が課題であることが わかった。今後、Geant4のoptical photonのシミュレーションを行い読み出しデザインの最適化を行 なう。光漏れの量やHitのInefficiencyの検出器性能への影響やそれらの量の許容値については検出器シ ミュレーションを用いて評価を行なっていく。

シミュレーションを用いた4点読み出し方法の評価のために、ILCの検出器シミュレーションソフト
ウエアの digitization に新しい読み出し方法を実装し、シミュレーション環境の構築を行なっている。今 後この digitization を組み込んだ ILC のソフトウエアを用いての検出器シミュレーションを行い、4 点読 み出し方法を用いた場合の検出器性能の評価を行なう。また、検出器シミュレーションの面から光漏れや Inefficiency の量と検出器性能の相関の評価を行ない、シンチレータセルユニットデザインの最適化につ なげる。

それぞれの研究開発を通して性能及び生産性の両方の観点で優れるシンチレータセルユニットの開発を 行い、検出器性能の向上を目指す。

謝辞

本研究を進めるにあたって、また大学院生活を送るなかで多くの方にお世話になりました。大谷航准教 授には基礎的なことから丁寧に指導していただき誠にありがとうございました。入学時点ではほぼ知識ゼ ロの状態から実験、解析さらには装置の製作にいたるまで様々なことを教えていただきました。また、発 表スライドの修正なども夜遅くまで対応していただきありがとうございました。森俊則教授にはゼミや ミーティングなど大変お世話になりました。鋭いご指摘をいただき、自分の研究に対して考えを深めるこ とができました。岩本敏幸助教には M1 の夏など PSI を訪れたときなど大変お世話になりました。PSI では同じオフィスでいろいろとお心遣いをいただきありがとうございました。澤田龍特任助教には東京の DAQ PC やサーバ関係で問題が発生したときなどスイスからいろいろと助けていただきありがとうござ いました。内山雄祐特任助教には M1の夏 PSI 滞在期間に MEG 実験タイミングカウンターグループに 参加させていただき基礎的なことから丁寧に教えていただきました。西村美紀氏にもタイミングカウン ターグループでの研究において大変お世話になりました。また、明るい人柄で、研究生活を楽しく愉快に 過ごすことができました。家城佳氏には DRS や SCS の使い方など細かく教えていただき大変ありがと うございました。金子大輔氏には研究を行なっていくなかで出てくる細かい質問についても丁寧に教えて いただきました。また、一緒においしいものを探索にいったり秋葉原のパーツ屋にいったりと、大変楽し い生活を送ることができました。Daniel Jeans 氏には ILC のシミュレーションのソフトについて基礎か ら教えていただきました。週に何度も質問にいっても懇切丁寧におしえていただき本当にありがとうござ いました。CALICE-Asia グループの皆様にはミーティングにおいて様々なアドバイスをいただきありが とうございました。信州大学の小寺克茂氏には CERN での Test Beam において大変お世話になりまし た。また、AHCAL についての様々な質問についても丁寧に教えていただき誠にありがとうございまし た。同室の山道智博氏には研究生活についてや趣味についてなどよく話し、楽しい研究室生活を送ること ができました。またノイズ落としなどについてアドバイスをいただきありがとうございました。山下研究 室の家城斉氏には ILC 全般についてや測定についてなどいろいろと教えていただきありがとうございま した。同じ研究室の中浦正太氏は非常に愉快な御仁であり、笑いと感動にあふれた学生生活をおくること ができました。また、物事へのきめ細かい対応や気配りなど見習っていきたいと思います。小川真治氏に は研究の非常に基礎の部分から何度も何度も質問に答えていただきありがとうございました。吉田昂平氏 とは糟谷健登氏や長倉直樹氏たちとおいしいものを求めて本郷周辺のラーメン店(に限らず)のあちこち に出向き、おいしい生活をおくることができました。後輩の岩井遼斗氏と中尾光孝氏は楽しい時間をあり がとうございました。また、お二人の実験に対する粘り強い姿勢など見習っていきたいと思います。

最後に、ここまで私をささえてくれた家族に感謝を記しこの論文の結びとさせていただきます。

... ...



- [1] Mark Thomson. Progress with Particle Flow Calorimetry. LCWS/ILC, 2007.
- [2] Oskar Hartbrich, Commissioning and LED System Tests of the Engineering Prototype of the Analog Hadronic Calorimeter of the CALICE Collaboration, Master thesis, 2012.
- [3] M.A. Thomson . Particle flow calorimetry and the PandoraPFA algorithm. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 611 (2009).
- [4] 山田作衛.素粒子物理学ハンドブック.
- [5] THE INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER Technical Design Report Volume 4. 2013.
- [6] Angela Lucaci-Timoce, Ralf Diener. Description of the HCAL Detector in Mokka. LC-TOOL-2008-001.
- [7] Felix Sefkow. The Scintillator Analogue HCAL for ILD status and goals. ILD Meeting, Oshushi, 2014.
- [8] ILD Concept group. "INTERNATIONAL LINEAR DETECTOR DBD",2012
- [9] Yong Liu. Scintillator tile studies: towards AHCAL mass assembly. ahcal meeting, 2015.
- [10] 浜松ホトニクス社. セレクションガイド.
- [11] 浜松ホトニクス社. MPPC データシート.
- [12] 浜松ホトニクス社. MPPC 技術資料
- [13] 浜松ホトニクス社. Physics and Operation of an MPPC.
- [14] 浜松ホトニクス社. Technical Information MPPC, MPPC modules.
- [15] http://www.ggg-tech.co.jp
- [16] ELJEN TECHNOLOGY. EJ-212 PLASTIC SCINTILLATOR Data Sheet.
- [17] 西村美紀. MEG 実験アップグレードに向けた分解能 30 ピコ秒の陽電子タイミングカウンターの研 究開発. 修士論文, 2014.
- [18] V. Bartsch et.al. Estimation of radiation effects in the front-end electronics of the Electromagnetic Calorimeter using physics events. LC-DET-2007-013
- [19] A. Sailer. Saturation and Radiation Doses in the ECal. CLIC Detector and Physics Meeting, 2013.
- [20] 松村徹. MPPC の放射線耐性. 次世代光センサーに関するワークショプ, 2010.
- [21] 中村勇. MPPC の中性子耐性の研究. 日本物理学会 2008 年秋期大会.
- [22] 生出秀行. 半導体光検出器 PPD の基本特性の解明と, 実践的開発に向けた研究. 修士論文, 2009.
- [23] M. Moll et.al. Leakage current of hadron irradiated silicon detectors material dependence. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 426 (1999) 87 - 93
- [24] Neutron flux measurements with ELMA diodes.

- [25] 日立金属. アミノグレイカタログ.
- [26] ELJEN TECHNOLOGY. WAVELENGTH SHIFTING PLASTICS EJ-280(Green) EJ-284(Red) Data Sheet.
- [27] Daniel Jeans, Oskar Hartbrich. Realistic calorimeter hit digitisation in the ILDCaloDigi processor. LC-TOOL-2014-011.