

修士論文

次世代電子・陽電子コライダー実験のためのPPDを用いた
細分型電磁カロリメータの研究

Study of a segmented electromagnetic calorimeter using Pixelated
Photon Detector for next-generation electron-positron collider
experiments

東京大学大学院 理学系研究科物理学専攻
山下研究室 修士課程2年

茂木 駿紀

2020年1月31日

概要

現在の素粒子物理学では標準理論を超えた物理の探索が最重要課題であるが、ヒッグス粒子を通してこれに迫ろうとするのがヒッグスファクトリーである。ヒッグスファクトリーでは電子・陽電子衝突によるクリーンな環境でヒッグス粒子と他の標準理論素粒子との結合の強さを精密に測定し、標準理論からのずれを高精度で検証する。またヒッグス粒子の不可視崩壊を通じた新物理の直接探索も可能である。しかしながら、これらの測定を不足なく行うためには従来の測定器とは一線を画した測定器の開発が不可欠である。

本研究の対象であるヒッグスファクトリーの電磁カロリメータに対してはジェットエネルギー分解能を高めるために $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ の高精細な読み出しが求められる。これを実現するために現在シリコン検出器による読み出し (SiWECAL) と、シンチレータストリップによる読み出し (ScECAL) が研究されており、特にシンチレータを使用した場合はより低コストなカロリメータを実現可能である。シンチレータオプションではシンチレーション光の読み出しに、高い増倍率をもった Pixelated Photon Detector (PPD) を使用する。PPD とシンチレータを組み合わせるエネルギーを測定する際に重要となるのが、

1. PPD のダイナミックレンジが十分広いこと
2. シンチレータへの荷電粒子の入射位置に依存しない光子数を検出できること

である。1 は測定可能なエネルギー範囲に直結し、PPD のピクセル密度を高めることでダイナミックレンジを広げることができるが同時に 1 ピクセルの面積減少に伴う増倍率低下の問題もあり、S/N の改善・アンプの低消費電力化のためには現状の増倍率よりも一桁高い増倍率を持った PPD の開発が求められている。2 はエネルギー分解能を悪化させないために不可欠な事項であるが、現状検討されているシンチレータの読み出し方法ではシンチレータの減衰長・反射材による光の吸収によって検出光子数が位置依存性を持つてしまうため、依然として改善の余地がある。そこでこれらを解決するために本研究では PPD のさらなる増倍率の向上をめざしたシミュレーションによる新型 PPD の設計と、実測とシミュレーションに基づいたエネルギー分解能を損なわないシンチレータの新しい形状開発を行った。

本論文の構成は以下の通りである。

- 第 1 章では世界中で計画されているヒッグスファクトリー実験の概要と、各エネルギーにおける測定対象の例を示し、第 2 章ではヒッグスファクトリーの一例として、ILC の加速器と測定器の構成要素について詳しく述べる。
- 第 3 章では本研究の主題である ScECAL の詳細とシンチレータストリップ・PPD の測定原理について述べる。
- 第 4 章ではシンチレータの形状改善に向けた検出光量の位置依存性の測定結果について示し、第 5 章でその結果を基に作成した形状最適化のためのシミュレーションの詳細と結果を示す。
- 第 6 章では、測定環境を更新した上で新たに行った 2 次元の光量測定に関する結果を示す。

- 第7章ではシミュレーションの精度を改善するためのパラメータに関する検討について、そしてシミュレーションによる形状の最適化とカロリメータとして性能評価について示す。
- 第8章ではPPDのさらなる増倍率の改善を目標とした、TCADシミュレータを用いたPPDの開発について記した。
- 最後に第9章に本研究の結論と今後の課題について記す。

目次

第 1 章 序論	1
1.1 標準理論とヒッグス機構	1
1.2 ヒッグスファクトリー	2
1.2.1 International Linear Collider (ILC)	3
1.2.2 Circular Electron Positron Collider (CEPC)	4
1.2.3 Compact Linear Collider (CLIC)	4
1.2.4 Future Circular Collider-ee (FCC-ee)	5
1.3 Higgs Factory の物理	6
1.3.1 $\sqrt{s} = 250$ GeV	7
1.3.2 $\sqrt{s} = 500$ GeV	8
1.3.3 $\sqrt{s} > 1$ TeV	8
第 2 章 ILC の構成	9
2.1 ILC の加速器	9
2.1.1 電子・陽電子生成源	9
2.1.2 ダンピングリング	10
2.1.3 主線形加速器	11
2.1.4 ビーム輸送系	12
2.2 ILC の測定器	13
2.2.1 International Large Detector (ILD) と Silicon Detector (SiD)	13
2.2.2 崩壊点検出器: Vertex Detector (VTX)	14
2.2.3 中央飛跡検出器・前方飛跡検出器	15
2.2.4 主飛跡検出器: Time Projection Chamber (TPC)	16
2.2.5 電磁カロリメータ (ECAL)	17
2.2.6 ハドロンカロリメータ (HCAL)	17
2.2.7 ソレノイドコイル	18
2.2.8 ミューオン検出器	18
2.2.9 ルミノシティカロリメータ (LumiCal)・ビームカロリメータ (BeamCal)	19
第 3 章 ヒッグスファクトリーにおける電磁カロリメータ	20
3.1 Particle Flow Algorithm (PFA)	20
3.2 Silicon Tungsten ECAL (SiWECAL)	21
3.3 Scintillator ECAL (ScECAL)	22
3.3.1 Strip Splitting Algorithm (SSA)	23
3.3.2 シンチレータストリップ	23
3.3.3 半導体光検出器	24
3.3.4 読み出し手法	28

第 4 章	光量位置依存性の測定	31
4.1	測定の構成	31
4.1.1	シンチレータストリップ	32
4.1.2	EASIROC Module	34
4.1.3	PPD	36
4.2	測定方法	38
4.3	測定結果	39
第 5 章	光量測定シミュレーション	42
5.1	GEANT4 による光子追跡シミュレーション	42
5.1.1	DetectorConstruction	43
5.1.2	PhysicsList	44
5.1.3	PrimaryGeneratorAction	45
5.2	粒子追跡の流れ	46
5.2.1	物質境界条件の指定	47
5.2.2	媒質境界における光子の扱い	47
5.3	シミュレーションパラメータと光量評価方法	48
5.4	シミュレーション結果	49
5.4.1	パラメータの影響	50
5.4.2	形状ごとの違い	52
第 6 章	2次元光量測定	54
6.1	光量測定環境のアップグレード	54
6.1.1	1次元測定	55
6.1.2	2次元測定	56
第 7 章	シンチレータストリップの最適化	58
7.1	光学的特性の検証	58
7.1.1	反射フィルム	58
7.1.2	シンチレータ	59
7.2	位置依存性改善を目指した新形状の開発	60
7.2.1	シンチレータ形状の設計	62
7.2.2	シンチレータストリップの量産に向けて	65
7.3	カロリメータとしての位置依存性の評価	66
7.3.1	シミュレーションの概要	66
7.3.2	シミュレーションの結果	68
第 8 章	TCAD シミュレータを用いた新型 PPD の設計	70
8.1	Technology CAD (TCAD)	70
8.1.1	プロセスシミュレーション	70
8.1.2	デバイスシミュレーション	71
8.2	TCAD による PPD 動作の再現	71
8.3	PPD の完全再現に向けて	73
第 9 章	結論	74
9.1	本研究のまとめ	74
9.2	今後の研究課題	74

付 録 A 光子追跡シミュレーションのソースコード	76
A.1 シンチレーション光	76
A.2 Cherenkov 光	76
A.3 バルク吸収	77
A.4 境界条件	77
付 録 B 自動測定スクリプト	78
B.1 ステージ制御	78
参考文献	81

目 次

1.1	標準理論の素粒子	1
1.2	ILC 加速器の構成	3
1.3	CEPC の構成	4
1.4	CLIC の構成	5
1.5	FCC-ee の構成	6
1.6	電子・陽電子コライダーでのヒッグス生成過程のダイアグラム	7
1.7	ヒッグス生成断面積	7
1.8	ヒッグス 3 点結合	8
1.9	トップ湯川結合測定	8
2.1	電子生成源	10
2.2	陽電子生成源	10
2.3	ダンピングリング	11
2.4	主線形加速器	11
2.5	超伝導加速空洞	11
2.6	ビーム輸送系	12
2.7	ILC 衝突点	13
2.8	ILD と SiD	13
2.9	ILD の内部構成	14
2.10	崩壊点検出器	15
2.11	中央・前方飛跡検出器	16
2.12	TPC	16
2.13	ECAL	17
2.14	AHCAL	17
2.15	ソレノイドコイル	18
2.16	ミュオン検出器	19
2.17	LumiCal, BeamCal	19
3.1	従来のジェットエネルギー測定方法と PFA の違い	20
3.2	PFA カロリメータの技術オプション	21
3.3	SiWECAL の構造	21
3.4	ScECAL の構造	22
3.5	ScECAL におけるゴーストヒット	22
3.6	SSA によるエネルギーの割り当て方法	23
3.7	シンチレータストリップ	24
3.8	浜松ホトニクス社製 PPD である MPPC	24
3.9	PPD 出力のヒストグラム例	25
3.10	PPD の 1 ピクセルの等価回路	25
3.11	PPD ピクセルの拡大図	26

3.12	APD ピクセル中でのアバランシェ増幅過程	26
3.13	MPPC(S-12571-010/015) の外観	27
3.14	ScECAL における読み出し方法	28
3.15	Side readout に使用するシンチレータ	29
3.16	Bottom readout に使用するくさび形シンチレータ	29
3.17	Dimple readout に使用するくぼみ付きのシンチレータ	30
4.1	光量測定環境の概要	31
4.2	光量測定のセットアップ	32
4.3	測定機器の接続図式	32
4.4	シンチレータの dimple 部分拡大図	33
4.5	Dimple readout シンチレータの設計図	33
4.6	BC-408 の発光スペクトル	34
4.7	反射フィルムの形状	34
4.8	EASIROC モジュールの内部	34
4.9	EASIROC チップの概要	35
4.10	S12571-015	36
4.11	PPD と dimple の位置関係	36
4.12	各逆電圧ごとの ADC ヒストグラム	37
4.13	ゲインプロット (ADC 値)	38
4.14	Sr の放出ベータ線スペクトル	38
4.15	光量の位置依存性測定結果	39
4.16	各ベータ線入射位置における ADC 分布	40
4.17	光量と dimple の位置関係	41
5.1	シミュレーション上で実装したオブジェクト	43
5.2	GEANT4 上で作成した dimple シンチレータの形状	43
5.3	GEANT4 でのシンチレータと反射フィルム	44
5.4	コリメータ通過直後のベータ線のエネルギー分布と天頂角分布	46
5.5	光子追跡のフローチャート	46
5.6	表面における反射	48
5.7	シミュレーションの光量分布フィット例	49
5.8	シミュレーションと実測の光量の比較	50
5.9	反射率 95%, 吸収長 200 cm での光量	51
5.10	反射率 96%, 吸収長 100 cm での光量	51
5.11	反射率ごとの光量	51
5.12	シンチレータの吸収長ごとの光量	51
5.13	乱反射の割合ごとの光量	51
5.14	PPD パッケージとシンチレータ表面の距離ごとの光量	52
5.15	Dimple の深さごとの光量	52
5.16	空気層有り・無しでの光量	53
6.1	シグマ光機製ステージコントローラ	54
6.2	自動計測用セットアップ	55
6.3	1次元の光量測定結果	55
6.4	シンチレータの dimple まわりの俯瞰図	56

6.5	2次元での光量測定結果	56
6.6	2次元測定 ($y = 1.0$ mm)	57
6.7	2次元測定 ($y = 2.0$ mm)	57
6.8	2次元測定 ($y = -1.0$ mm)	57
6.9	2次元測定 ($y = -2.0$ mm)	57
6.10	2次元測定 ($y = 0.0$ mm)	57
7.1	反射率の波長依存性	59
7.2	屈折率の測定に使用した分光エリプソメータ	60
7.3	シンチレータの屈折率・消失係数の波長依存性測定結果	60
7.4	最適化で使用するパラメータによる光量位置依存性	61
7.5	最適化で使用するパラメータによる2次元光量ヒストグラム	61
7.6	ベータ線の広がり無くしたときの光量の位置依存性	62
7.7	PPD 断面図	63
7.8	Dimple readout で検出された光子のPPD受光面への入射角分布	63
7.9	Dimple の深さが0.45 mm ときの光量位置依存性	64
7.10	Dimple の反対側に新しいくぼみを設けたシンチレータ	64
7.11	追加のくぼみがあるときの光量位置依存性	65
7.12	シンチレータ層	66
7.13	ScECAL の1つの層	67
7.14	ScECAL 層を並べた様子	67
7.15	ECAL への電子の入射位置	67
7.16	箱型 dimple シンチレータの光量一様性	68
7.17	実測で使った dimple 形状におけるエネルギーごとの全検出光子数	69
7.18	実測で使った dimple 形状における入射位置ごとの全検出光量線形性	69
7.19	箱型 dimple におけるエネルギーごとの全検出光子数	69
7.20	箱型 dimple における入射位置ごとの全検出光量線形性	69
8.1	TCAD で作成した PPD ピクセルの構造と I-V 曲線	71
8.2	TCAD で作成したピクセル内部のボロン濃度とリン濃度	72
8.3	$V_R = 55$ V, $R_q = 1$ M Ω における出力端子間電流の時間変化	72
8.4	$V_R = 60$ V, $R_q = 1$ M Ω における出力端子間電流の時間変化	72
8.5	キャリアの離散化方法	73

第1章 序論

2012年、CERNのLHC加速器におけるATLAS・CMS両実験でのヒッグス粒子発見によって素粒子標準理論が完成したが、暗黒物質の正体・重力の起源など、標準理論だけでは説明できない観測事実が未だ多く存在する。それゆえ、素粒子物理学の次なる目標はこれらの観測事実を説明できる新物理理論の導入である。標準理論を超えた物理理論は数多提唱されてきたが、中でも有力視されてきた理論には、超対称性理論・余剰次元理論などがあり、これらが予測する新たな現象はヒッグス粒子を観測することによって検証できると期待されている。また、ヒッグス粒子自身の詳細な検証も十分されておらずこれも最重要課題の一つである。ヒッグス粒子の精密測定、ヒッグス粒子を用いた新物理の検証を目的として現在世界中の研究機関で計画されているのがヒッグスファクトリー実験である。本章では、ヒッグスファクトリー実験の概要について説明する。

1.1 標準理論とヒッグス機構

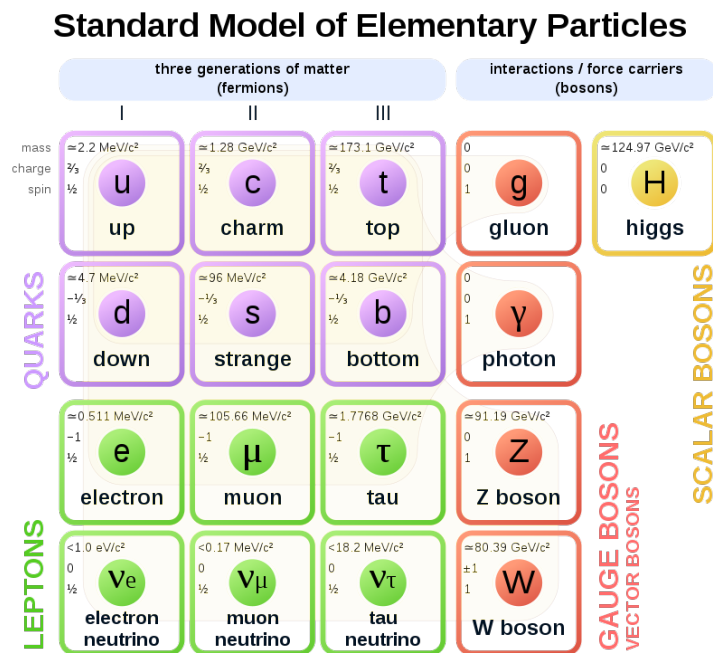


図 1.1: 標準理論の素粒子 [1]

標準理論は素粒子物理学の基礎理論として確立され、素粒子の性質や相互作用に関する現在までの実験結果がその理論予測値を支持している。自然界に存在する4つの相互作用の内、重力以外を標準理論は記述し、特に電磁相互作用と弱い相互作用は電弱相互作用として統一され、1つの枠組みであつかうことができる。標準理論には17種の素粒子(図 1.1)が登場し、物質を構成する

クォークとレプトン、相互作用を媒介するゲージボソン、素粒子に質量を与えるヒッグスボソンからなる。素粒子標準理論の根幹を支える重要な枠組みは、主に以下の3つである。

- 電弱相互作用
- ゲージ理論
- ヒッグス機構

ゲージ理論はラグランジアンがゲージ変換の下で不変であることを要求し、このゲージ対称性が電荷などの保存量を定める。しかし、このゲージ不変性のためにラグランジアン中にゲージボソンの質量項をいれることができなくなってしまう。そこで考えられたのがヒッグス機構であり、 $SU(2)$ 二重項のスカラー場を導入することで自発的に対称性が破れ、ゲージボソンが質量獲得する。以下にその仕組みを示す。

複素スカラー場であるヒッグス場のポテンシャルを

$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 \quad (1.1)$$

とする。ただし、 Φ は

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

である。 $\mu^2 < 0$, $\lambda > 0$ のとき、ポテンシャル $V(\Phi)$ の極小点は原点 ($\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi_4 = 0$) から

$$\Phi^\dagger \Phi = \frac{1}{2}(\phi_1^2 + \phi_2^2 + \phi_3^2 + \phi_4^2) = -\frac{\mu^2}{2\lambda} \quad (1.3)$$

を満たす点へと移動する。このとき、 $V(\Phi)$ の極小となる真空期待値を

$$\langle \Phi \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

ととり、場をこの点の周りで $\phi^0(x) = v + h(x)$ と展開する。ただし、 h は実数となるようにゲージを選ぶ。これを標準理論のラグランジアンに代入すると、3つのゲージボソン (W^\pm, Z) の質量項として

$$m_W = \frac{g}{2}v, \quad m_Z = \frac{\sqrt{g^2 + g'^2}}{2}v \quad (1.5)$$

を得る。また、

$$m_h = \sqrt{2\lambda v^2} = \sqrt{2|\mu^2|} \quad (1.6)$$

であり、これがヒッグス粒子の質量を表す。 $m_h \sim 125$ GeV, $v \sim 246$ GeV であることが現在までに実験で確かめられている。

1.2 ヒッグスファクトリー

ヒッグスファクトリーは、その名が示す通りヒッグス粒子を大量に生成する加速器の総称であり、未だ謎が多く残るヒッグス粒子の性質を調べると共に標準理論を超えた物理の検証を目的としている。ヒッグスファクトリーでは基本的に電子・陽電子衝突を利用するが、これは後述するヒッグス随伴生成過程を通してヒッグス粒子の生成断面積、全崩壊幅などを精密に測定するためには始状態の運動学的性質が明確である必要があるからである。加速器としては線形加速器を用いる場合と円形加速器を使用する場合があり、線形加速器では線形加速器部分の延長や、技術的

な発達による加速勾配の性能向上により TeV スケールコライダーへの拡張が可能であること、また円形加速器では Z/W ファクトリーとしての運転ができることや、LEP から LHC へのアップグレードのようにトンネルを再利用してビームエネルギー数十 TeV のハドロンコライダーへ拡張可能という利点がある。以下では、現在世界中で建設計画として上がっている 4 つのヒッグスファクトリー実験の概要について述べる。

1.2.1 International Linear Collider (ILC)

ILC は東北地方の岩手県から宮城県にまたがる北上山地の山中に建設が検討されている、電子・陽電子衝突型の線形加速器である。図 1.2 に ILC 加速器の構成模式図を、表 1.1 に各重心系エネルギーごとの設計値を示す。

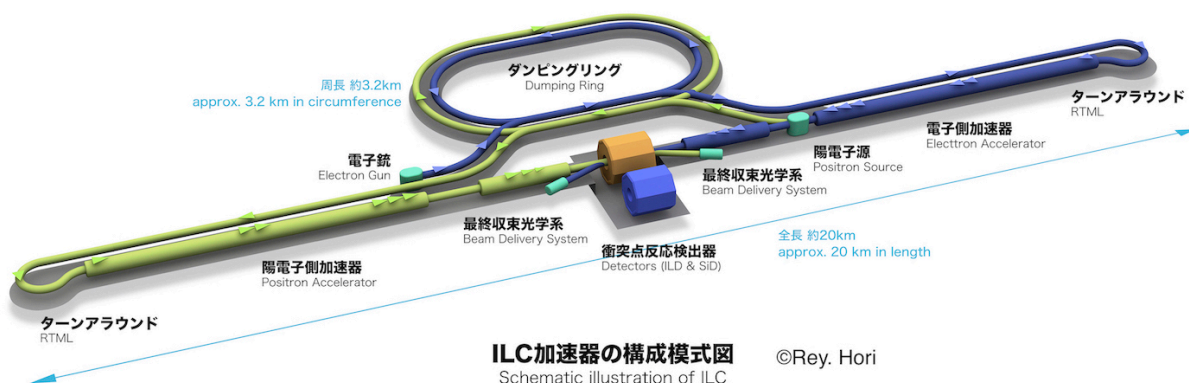


図 1.2: ILC 加速器の構成

表 1.1: ILC の設計値 [2], [3]

E_{CM} [GeV]	250	500	1000
長さ [km]	20.5	31	50
ルミノシティ [$\times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	1.35	1.8/3.6	3.6
積分ルミノシティ [fb^{-1}/yr]	100	600	—
衝突頻度 [Hz]	5	5	4
バンチ数	1312	1312/2625	2450
バンチ中の粒子数 [$\times 10^{10}$]	2.0	2.0	1.74
衝突点ビームサイズ σ_x [nm]	516	474	481
衝突点ビームサイズ σ_y [nm]	7.7	5.9	2.8

ILC の運転計画では、250 GeV \rightarrow 350 GeV \rightarrow 500 GeV \rightarrow 1 TeV の様に統計を溜めながら順次エネルギーを上げていく。加速器には超伝導 RF を使用し、初期段階では 250 GeV を想定して全長約 20 km の設計である。線形加速器部分を延長することで重心系エネルギーのアップデートに対応する。また、線形であるために電子・陽電子の偏極を制御して特定の反応を推進・抑制することが容易である。ILC の加速器と測定器については次章で詳しく説明する。

1.2.2 Circular Electron Positron Collider (CEPC)

CEPCは中国の秦皇島市に建設が計画されている、周長 100 km の電子・陽電子衝突型円形加速器である。重心系エネルギー 91, 160, 240 GeV で稼働し、240 GeV では7年の運転で100万以上のヒッグス粒子を生成する計画である。CEPCの運用後は、トンネル内の加速器を入れ替えて陽子・陽子衝突型加速器 (Super Proton Proton Collider: SppC) を稼働する計画である。CEPCの加速器の構成を図 1.3 に示す。加速器は線形加速器部分 (Linac)、ブースター、メインリング、2つの衝突点で構成され、衝突点にはそれぞれ測定器が配置される。メインリング部は電子リングと陽電子リングの2重リングになっている。CEPCの加速器の設計値を表 1.2 に示す。

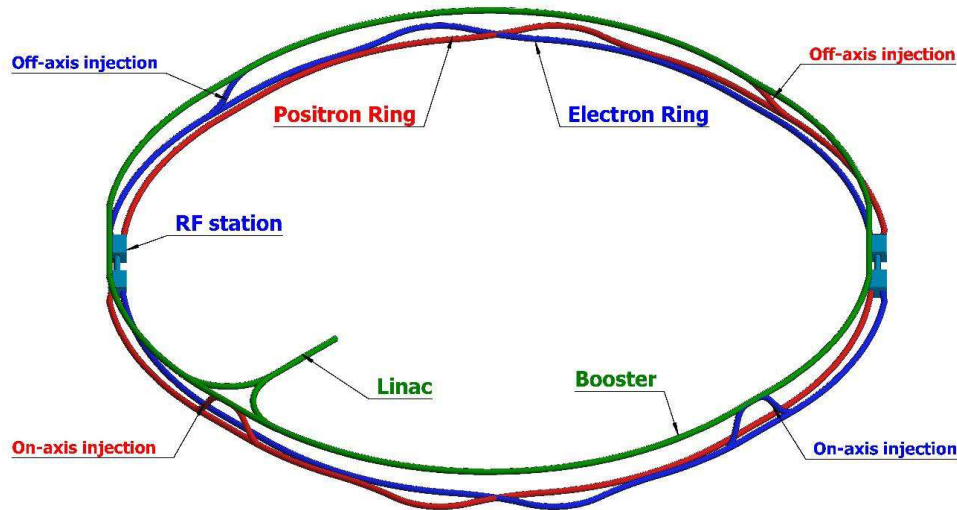


図 1.3: CEPC の構成 [4]

表 1.2: CEPC の設計値 [4]

E_{CM} [GeV]	91	160	240
周長 [km]	100	100	100
ルミノシティ [$\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	17/32	10	3
バンチ数	12000	1524	242
バンチ中の粒子数 [$\times 10^{10}$]	8.0	12.0	15.0
バンチ長 σ_z [mm]	8.5	5.9	4.4
衝突点ビームサイズ σ_x [nm]	6000	13900	20900
衝突点ビームサイズ σ_y [nm]	78/40	49	60

1.2.3 Compact Linear Collider (CLIC)

CLICはフランスとスイスの国境付近に建設が計画されている、全長 50.1 km (第3段階、 $\sqrt{s} = 3 \text{ TeV}$) の電子・陽電子衝突型線形加速器である。重心系エネルギー 380 GeV, 1.5 TeV, 3 TeV の運用が計画されており、100 MV/m の非常に高い加速勾配が要求される。これを実現するのが2重ビーム加速機構である。加速する粒子を入れる常伝導加速空洞のメインビームパイプと、メインビームを駆動するための駆動ビームパイプを平行に配置し、駆動ビームパイプには通常の方法で高周波をかけてビームを加速する。この駆動ビームパイプから高周波の電場を取り出してメインパイプへと供給することで、従来よりも高い加速勾配を実現する。

CLIC は線形であるため ILC 同様ビーム偏極が容易で、電子の偏極率 80% で駆動する計画である。CLIC の構成を図 1.4 に、加速器の設計値を表 1.3 に示す。

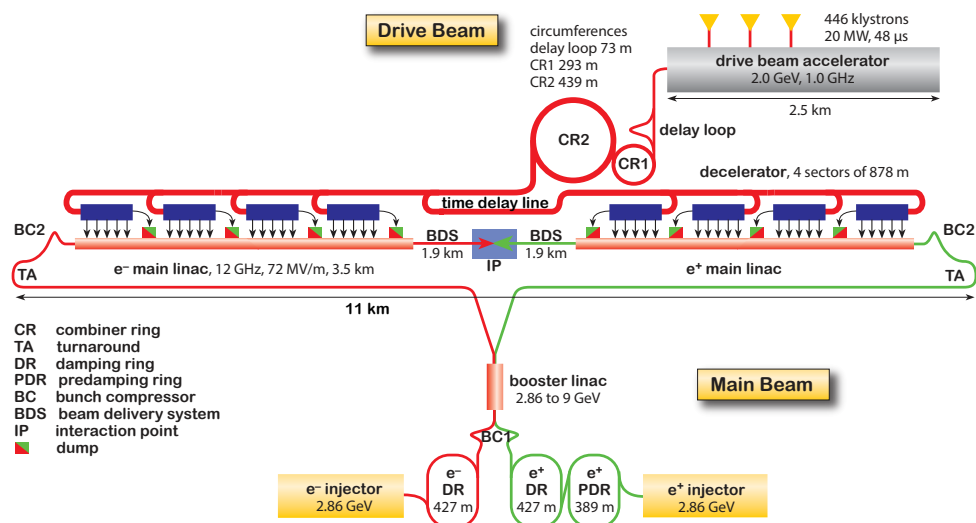


図 1.4: CLIC の構成 [5]

表 1.3: CLIC の設計値 [3], [5]

E_{CM} [GeV]	380	1500	3000
長さ [km]	11.4	29.0	50.1
加速勾配 [MV/m]	72	72/100	72/100
ルミノシティ [$\times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	1.5	3.7	5.9
積分ルミノシティ [fb^{-1}/yr]	180	444	708
衝突頻度 [Hz]	50	50	50
バンチ数	352	312	312
バンチ中の粒子数 [$\times 10^9$]	5.2	3.7	3.7
バンチ長 σ_z [mm]	70	44	44
衝突点ビームサイズ σ_x [nm]	149	60	60
衝突点ビームサイズ σ_y [nm]	2.9	1.5	1

1.2.4 Future Circular Collider-ee (FCC-ee)

FCC-ee は現在 CERN で稼働している LHC の後継として建設が計画されている、周長約 100 km の電子・陽電子衝突型円形加速器である。LHC を前段加速器として用いて重心系エネルギー 365 GeV というエネルギーを実現する。運転計画では、 Z ボソン生成閾値の $\sqrt{s} = 91$ GeV、 WW 対生成の 160 GeV、ヒッグス随伴生成の 250 GeV、 $t\bar{t}$ 対生成の 365 GeV の順に稼働させる。FCC-ee 運用後に、ハドロンコライダー (FCC-hh) へとアップグレードされる予定である。図 1.5 に FCC-ee の概要を、表 1.4 に $\sqrt{s} = 240$ GeV、365 GeV での加速器パラメータを示す。

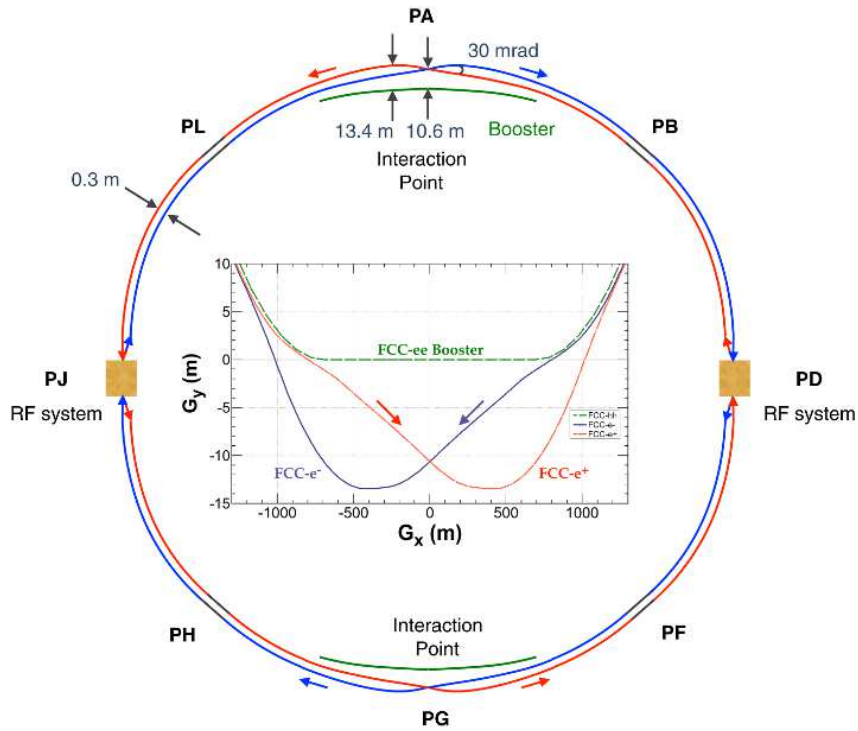


図 1.5: FCC-ee の構成 [6]

表 1.4: FCC-ee の設計値 [6]

E_{CM} [GeV]	240	365
周長 [km]	97.756	97.756
ルミノシティ [$\times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	8.5	1.55
バンチ数	328	48
バンチ中の粒子数 [$\times 10^{11}$]	1.8	2.3
バンチ長 σ_z [mm]	3.15/5.3	1.97/2.54
衝突点ビームサイズ σ_x [nm]	636	3820
衝突点ビームサイズ σ_y [nm]	2.8	6.8

1.3 Higgs Factory の物理

ヒッグスファクトリーではヒッグス粒子を大量に作り出すことによってヒッグス結合定数の測定などを行い、標準理論の予測からのずれを非常に高い精度で検証する。鍵となるのはヒッグス粒子の崩壊モデルに依存しない断面積、崩壊幅測定である。また、電子・陽電子衝突のクリーンな環境を生かした新粒子探索も可能であり、重心系エネルギーのアップグレードで探索可能範囲も拡張できる。以下では、各重心系エネルギーごとの代表的な測定対象例を上げる。

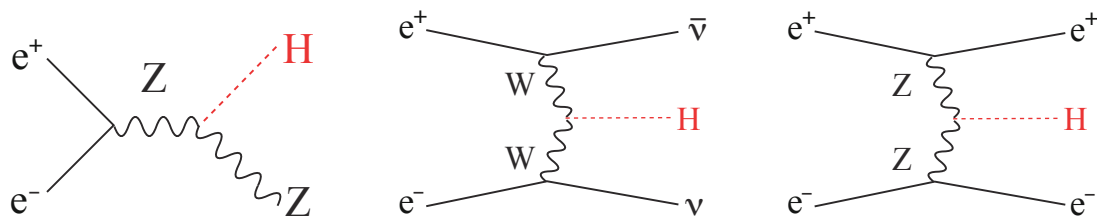


図 1.6: 電子・陽電子コライダーでのヒッグス生成過程のダイアグラム [7]

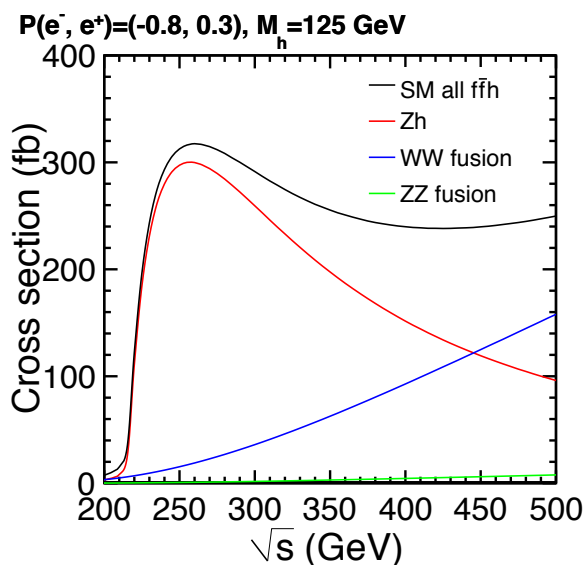


図 1.7: ヒッグス生成断面積 [7]

1.3.1 $\sqrt{s} = 250$ GeV

ヒッグス質量精密測定

ヒッグスファクトリー実験では重心系エネルギー $\sqrt{s} = 250$ GeV 付近での運転が鍵となる。これは、250GeV でヒッグス随伴生成過程 ($e^-e^+ \rightarrow Zh$: 図 1.6 左) によるヒッグス生成断面積が最大となるためである (図 1.7 参照)。電子・陽電子の衝突により始状態のエネルギーが明確であることおよび反応事象がシンプルであることを生かし、ヒッグス粒子の質量・生成断面積をヒッグス粒子の崩壊モードに依らずに精密に測定可能である。

質量の測定では、 $e^-e^+ \rightarrow Zh$, $Z \rightarrow l^-l^+$ ($l = e, \mu$) の崩壊モードを使用する (反跳質量法)。 Z の崩壊で生じたレプトンのみを使用するので、ヒッグス粒子の崩壊モードの影響を受けない。ヒッグス随伴生成過程における反跳質量の計算方法を式 (1.7) に示す。

$$m_h = \sqrt{(\sqrt{s} - (E_{l^-} + E_{l^+}))^2 - |\vec{p}_{l^-} + \vec{p}_{l^+}|^2} \quad (1.7)$$

1.3.2 $\sqrt{s} = 500$ GeV

ヒッグス全崩壊幅測定

$\sqrt{s} > 450$ GeV で $e^-e^+ \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ 過程 (図 1.6 中央) が支配的になるため、部分崩壊幅 $\Gamma(h \rightarrow WW)$ を精度よく測定できる。さらに反跳質量法で求めた σ_{Zh} と、同じくヒッグス随伴生成過程で測定した $\sigma_{Zh} \cdot BR(h \rightarrow WW)$ から $BR(h \rightarrow WW)$ を求めることで、式 (1.8) によりヒッグス粒子の崩壊全幅が定まる。

$$\Gamma_h = \frac{\Gamma(h \rightarrow WW)}{BR(h \rightarrow WW)} \quad (1.8)$$

ヒッグス 3 点結合直接測定

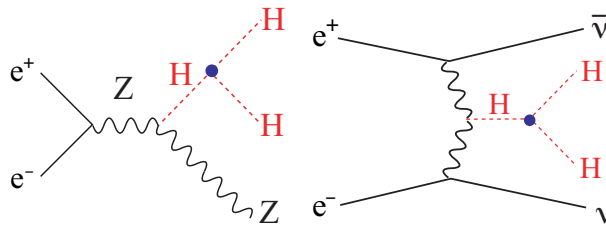


図 1.8: ヒッグス 3 点結合 [7]

図 1.8 に示すような $e^-e^+ \rightarrow Zh h$ や $e^-e^+ \rightarrow \nu\bar{\nu}h h$ 過程により、ヒッグス自己 3 点結合を測定できる。

トップ湯川結合直接測定

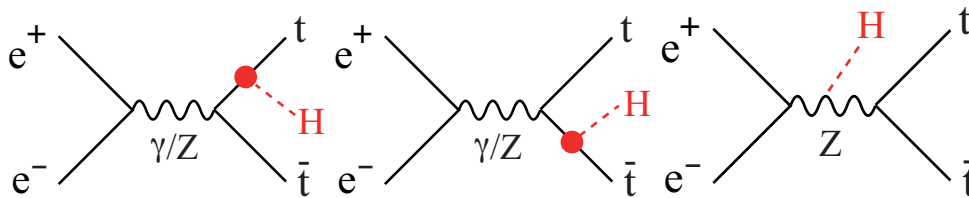


図 1.9: トップ湯川結合測定 [7]

図 1.9 に示すような $e^-e^+ \rightarrow t\bar{t}h$ 過程の生成閾値 470 GeV を超えるため、トップ湯川結合の直接測定が可能である。

1.3.3 $\sqrt{s} > 1$ TeV

エネルギー 1 TeV 以上の領域ではヒッグス自己結合や全崩壊幅のさらなる精密測定が可能となる。また、始状態がクリーンであることを生かし、未知の重い新粒子の直接生成を始状態の単光子生成過程から探索すること、そしてヒッグス粒子と他の粒子との結合を精密に測定し、標準理論が予測する値とのずれを検証することによる新粒子間接探索が可能である。

第2章 ILCの構成

本章では、ヒッグスファクトリーの一例として、ILC 加速器と検出器の構成要素とその詳細を説明する。ただし、加速器のデザインは各実験ごとに様々であり、ビームの生成方法や加速方法は加速器によって大きく異なる。一方検出器に関しては、測定対象の物理が同じであるため基本的に全てのヒッグスファクトリーで同じ様な構造をとっている。ヒッグスファクトリーではヒッグス粒子の精密検証のために高精細な検出器が要求され、従来の実験で使用されてきた測定器とは違った設計になっている。

2.1 ILCの加速器

ILC のビームは複数のバンチを繋げたバンチトレイン構造になっており、第一段階の 250 GeV では、1312 個のバンチからなるバンチトレインを 5 Hz の頻度で衝突させる。また、線形加速器であるためビーム中粒子のスピンの偏極を制御することが容易で、現在の設計では電子・陽電子の偏極をそれぞれ $(P_-, P_+) = (\mp 0.8, \pm 0.3)$ に制御する予定である。ここでスピン偏極の定義は、右偏極・左偏極粒子の数をそれぞれ N_R, N_L として

$$P = \frac{N_R - N_L}{N_R + N_L} \quad (2.1)$$

である。高エネルギーにおいては偏極を制御できると、例えば P_- が負の場合には左巻き電子のみが関与する W ボソンを含んだ反応 ($e^-e^+ \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ など) の割合を無偏極の場合に比べて増やすことができる。あるいは P_- が正の場合には、 $e^-e^+ \rightarrow Zh, Z \rightarrow ll$ 過程において W ボソンの介在する背景事象を抑制するといったこともできる。

ILC ではビームの生成から衝突までを以下の 4 つの要素で行う。

- 電子・陽電子生成源
- ダンピングリング
- 主線形加速器
- ビーム輸送系

2.1.1 電子・陽電子生成源

電子生成源

円偏光したレーザーを GaAs フォトカソードに入射することで偏極電子を取り出す。生成した電子は加速空洞によって 5 GeV のバンチ化されたビームとなり、さらにソレノイドによってスピンを垂直向きに変えた後、ダンピングリングへと向かう。電子生成源の概要を図 2.1 に示す。

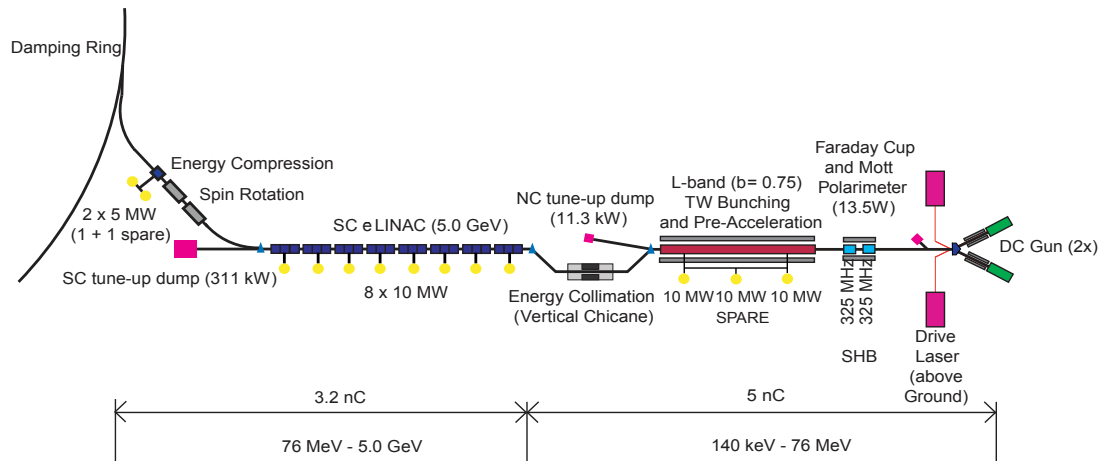


図 2.1: 電子生成源 [8]

陽電子生成源

陽電子生成源の概要を図 2.2 に示す。陽電子の生成には、ビームラインを通る電子ビームを使用する。主線形加速器で加速された電子を超伝導のヘリカルアンジュレータに通し、この中で電子を螺旋運動させることで数十 MeV 程度の円偏光した放射光を発生させる。この光をチタン合金のターゲットに照射し、電子・陽電子を対生成させ、電磁石で偏極陽電子を取り出す。その後電子生成源と同様に 5 GeV まで加速し、ソレノイドによってスピン方向を垂直に変え、ダンピングリングへと送る。なお、放射光の生成に使用した電子は再びビーム輸送ラインへと戻る。

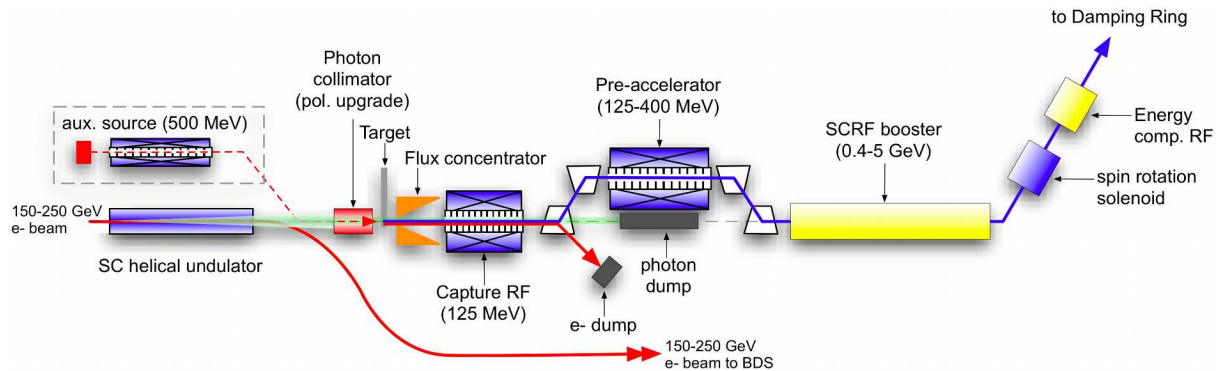


図 2.2: 陽電子生成源 [8]

2.1.2 ダンピングリング

電子・陽電子源から送られてきたビームは収束性が悪いため、図 2.3 に示す様な直線部分と曲線部分からなる周長 3.2 km のダンピングリングを用いてビームのエミッタンスを減らす。電子・陽電子ビームはダンピングリングの曲線部でシンクロトロン放射によってエネルギーを失って運動量を落とし、直線部の加速空洞で進行方向の運動量を伸ばす。ダンピングリング内を何度も周回させてこれを繰り返す、収束性を高めたビームを次の主線形加速器へと送る。

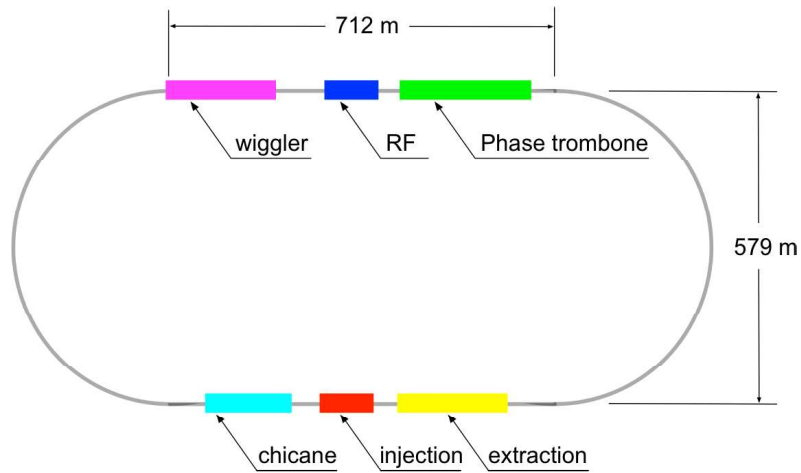


図 2.3: ダンピングリング [8]

2.1.3 主線形加速器

図 2.4 に示す様に、ダンピングリングから送られてきたビームを加速器の端まで輸送し (ELTL)、進行方向を反転させる (ETURN)。ESPIN では粒子のスピンを進行方向または逆方向へと転換し、EBC1 と EBC2 でバンチ長を数 mm から数百 μm へと圧縮しながら 5 GeV のビームを 15 GeV まで加速させる。その後主線形加速器 (Main Linac) の加速空洞を使って一気に最大エネルギーまで加速する。

加速空洞としては 1 m 長のニオブ超伝導加速空洞 (図 2.5) を使用する。加速空洞 9 台と超伝導の冷却系をセットにしたクライオモジュールをおよそ 800 台連結してトンネル内に設置し、加速空洞を 2 K の超低温状態にして高周波をかけて運転する。平均 31.5 MV/m の加速勾配を設計値としている。

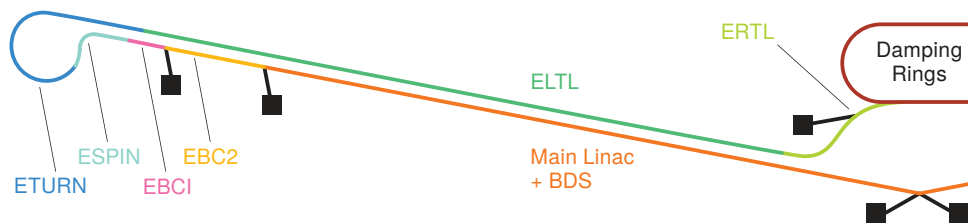


図 2.4: 主線形加速器 [8]



図 2.5: 超伝導加速空洞 [9]

2.1.4 ビーム輸送系

ビーム輸送系では加速したビームを絞りながら衝突点へと輸送して衝突させ、残った粒子はビームダンプで停止させる。輸送系の概要を図 2.6 に示す。ビームの輸送中においてはビームのエネルギーや広がり具合を測定し、その情報を最終収束系へとフィードバックして微調整を行う。最終ビーム収束系では四重極電磁石でビームを絞り、衝突点 (図 2.7) で電子と陽電子を 14 mrad の角度で衝突させる。ビームに角度をつけて交差させているのは、衝突しなかった粒子を回収しやすくするためである。

ビーム衝突において重要となる瞬間ルミノシティ \mathcal{L} は式 (2.2) で表される。

$$\mathcal{L} = f_{rep} \frac{N^- N^+}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \quad (2.2)$$

ただし、 f_{rep} はビームの繰り返し周波数、 N^- , N^+ は 1 バンチあたりの電子・陽電子数、 σ_x , σ_y は水平・垂直方向のビームサイズである。各パラメータの詳細は表 1.1 に示した通りである。線形加速器では衝突の機会が一度きりであるため、ルミノシティを高めるためには衝突点において $\sigma_x \cdot \sigma_y$ を極限まで小さくする必要があるが、ここでのビームは電子・陽電子であるため、電子・陽電子間の相互作用 (ビーム・ビーム効果) によるビームエネルギー損失の影響を非常に受けやすい。実際、このエネルギー損失は $\sigma_x + \sigma_y$ に反比例するため、そのままビームを絞ったのでは損失が大きくなってしまう。そこで、ビームを扁平状に絞ることで周長 ($\sigma_x + \sigma_y$) を保ったまま面積 ($\sigma_x \cdot \sigma_y$) を小さくするナノビームスキームという方法をとる。

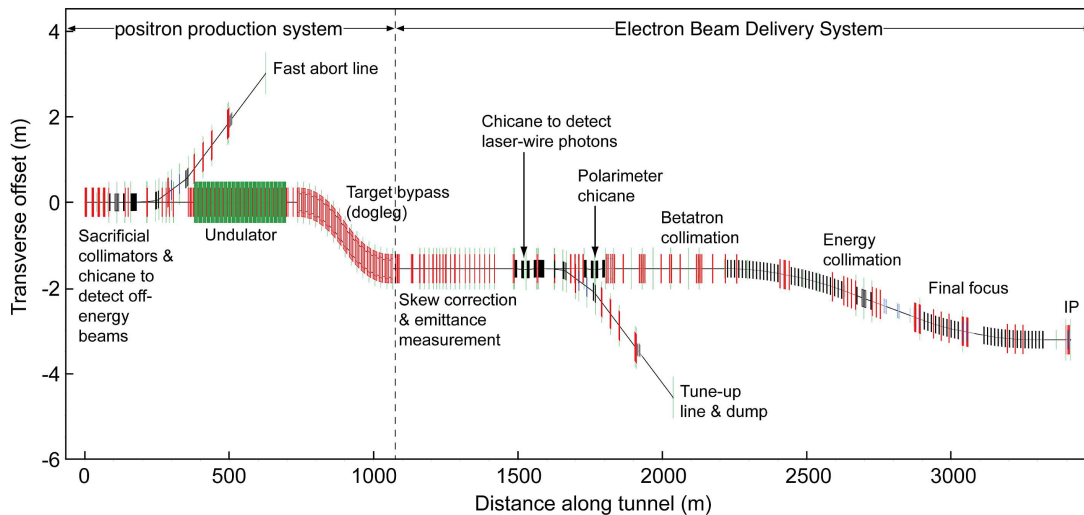


図 2.6: ビーム輸送系 [8]

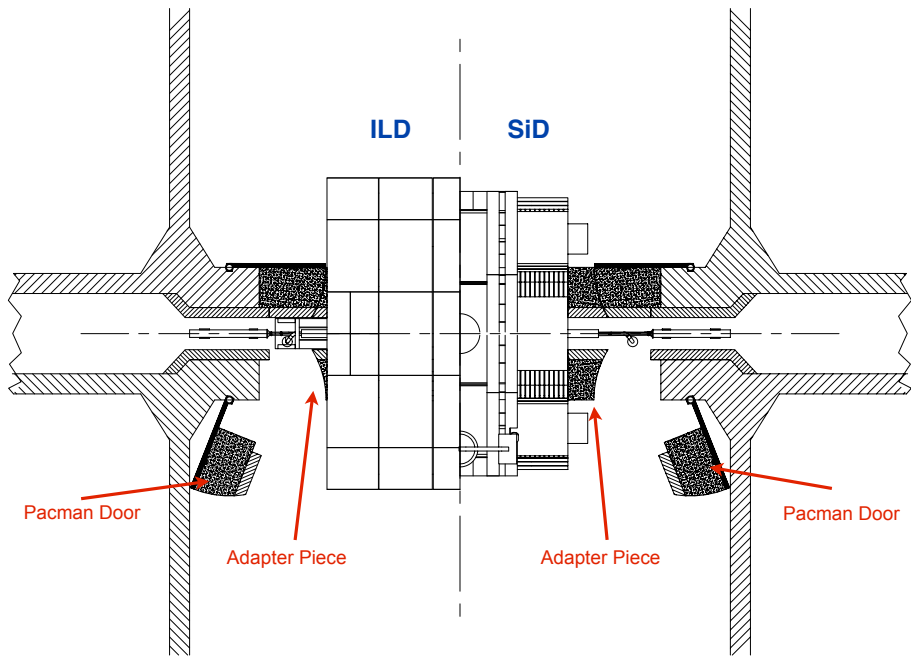


図 2.7: ILC 衝突点 [8]

2.2 ILC の測定器

2.2.1 International Large Detector (ILD) と Silicon Detector (SiD)

ILC の検出器には、主に日本・ヨーロッパを中心に開発されてる International Large Detector (ILD) と、主にアメリカを中心に開発されている Silicon Detector (SiD) がある (図 2.8)。ILD は飛跡検出器としてガス TPC を用いており、一方の SiD はシリコン検出器を使用する。ILD は SiD と比べ大型であり、ガス TPC を用いることによって空間点情報をより多く取得できる。一方 SiD は小型であり、低コストという利点がある。ILC 稼働時には、プッシュプル方式によってこの2つの検出器を一方ずつビームライン上に載せてデータを取得し、両者の結果によって相補的な検証を行う。ILC の測定器の DAQ は 5 Hz のバンチトレインの間にデータを転送することで消費電力を抑える設計になっている。以下では、特に ILD の構成要素について述べる。

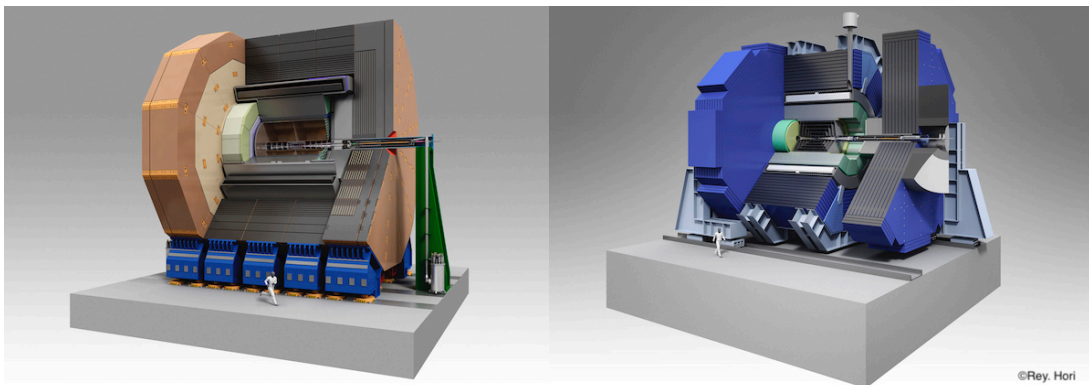


図 2.8: ILD(左) と SiD(右)

ILD の内部構成を図 2.9 に示す。崩壊点 (IP) から検出器外側に向かって、以下のような構成になっている。

- 円筒方向
 - 崩壊点検出器
 - シリコン飛跡検出器
 - TPC
 - 電磁カロリメータ
 - ハドロンカロリメータ
 - ソレノイドコイル
 - ミューオン検出器
- ビーム軸方向
 - ルミノシティカロリメータ
 - ビームカロリメータ

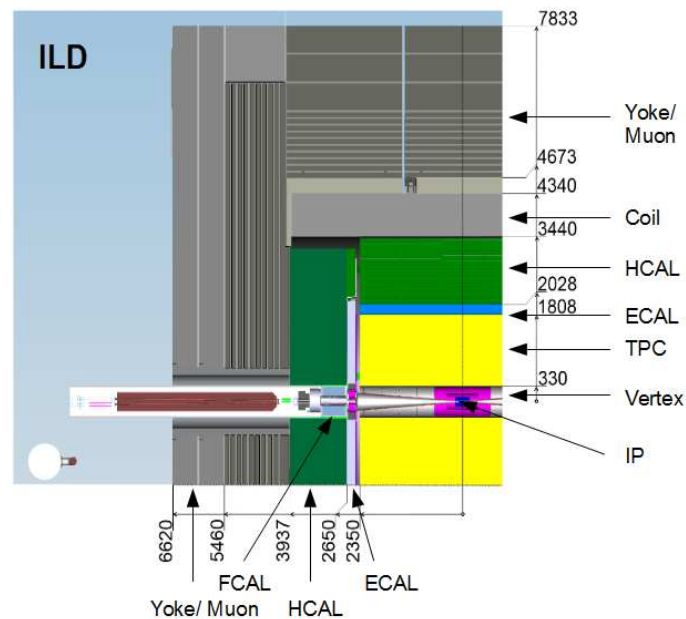


図 2.9: ILD の内部構成 [10]

2.2.2 崩壊点検出器: Vertex Detector (VTX)

崩壊点検出器は、ビームの衝突で生じた 1 次粒子の生成点や短寿命な粒子の崩壊点を測定するための半導体検出器である。粒子の通過点を飛跡として繋ぎ合わせることで崩壊点を再構成する。ILD で目標とされるインパクトパラメータ分解能は

$$\sigma_b < 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^{3/2} \theta} \quad [\mu\text{m}] \quad (2.3)$$

である。崩壊点検出器は、円筒型同心円状の3つのラダー層から成り、各々のラダーは両面にピクセルセンサー層を2mm離して配置した2層構造である(図 2.10)。これにより荷電粒子一つの飛跡につき6つの位置を検出する。最初のラダー層のラダーはバックグラウンド軽減の為に他の2つのラダーの半分の長さになっている。ピクセルセンサーには、

- CMOS Pixel Sensors (CMOS)
- Fine Pixel CCD (FPCCD)
- Depleted Field Effect Transistor (DEPFET)

の3つが研究されている。

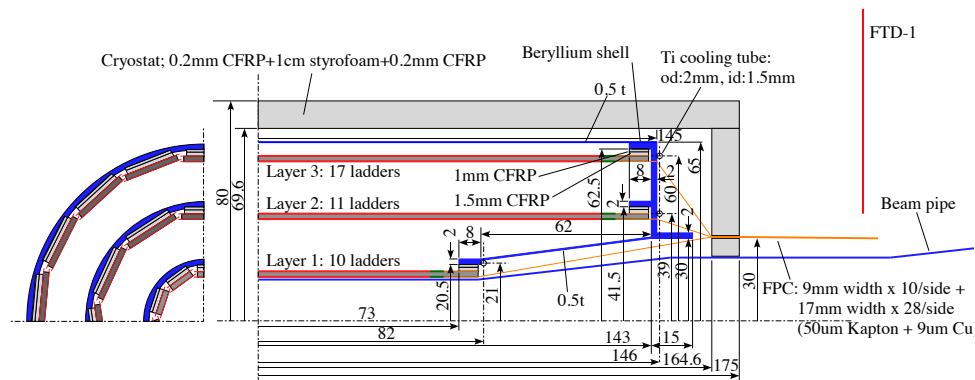


図 2.10: 崩壊点検出器 [10]

2.2.3 中央飛跡検出器・前方飛跡検出器

飛跡再構成の為に、粒子の通過点・通過時間を得ることを目的としたシリコン飛跡検出器である。各検出器の位置関係を図 2.11 に示す。シリコン検出器の高い時間分解能を活かし、TPC のヒット情報と組み合わせることで、飛跡の高精細なタイムスタンプを可能とする。役割に応じて以下の4つがある。

- Silicon Inner Tracker (SIT)
VTX と TPC の間に存在し、VTX の情報と TPC の情報を繋ぐ役割がある。これによって小さな p_T を持った荷電粒子の再構成、長寿命粒子の再構成を改善する。
- Silicon External Tracker (SET)
円筒方向の TPC と ECAL の間に存在し、TPC を通過した荷電粒子の ECAL への突入点を取得、運動量分解能を改善する。
- End Cap Component behind the Endplate of the TPC (ETD)
TPC エンドプレートとエンドキャップカロリメータの間に存在し、カロリメータへの突入点を取得、運動量分解能を改善する。飛跡検出器全体の被覆率を向上させる役割もある。
- Forward Tracker (FTD)
ビームパイプと TPC のフィールドケージの間に存在し、前方領域の運動量分解能を高める。

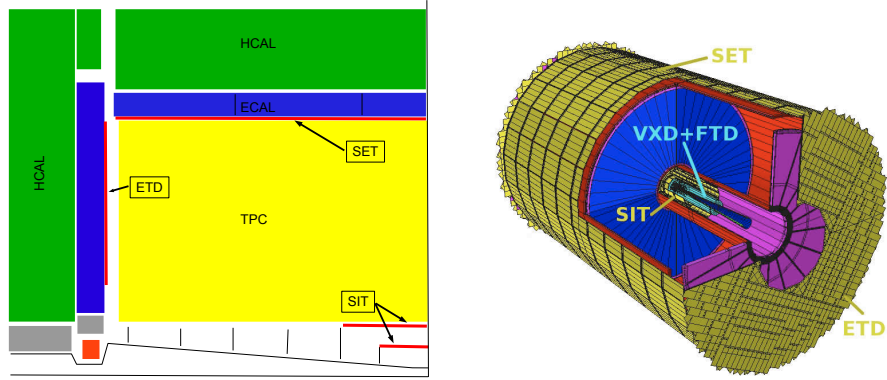


図 2.11: 中央・前方飛跡検出器 [10]

2.2.4 主飛跡検出器: Time Projection Chamber (TPC)

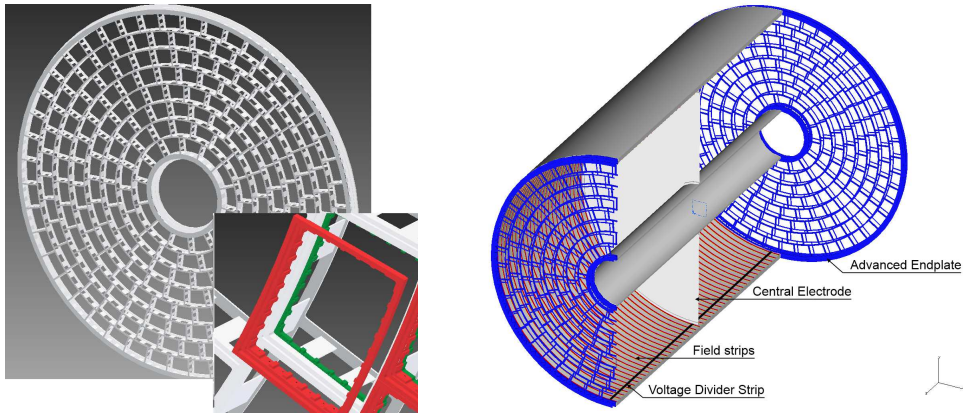


図 2.12: TPC [10]

カロリメータで測定するエネルギーを正確にするために飛跡検出器は低物質質量であることが求められるが、ILDの飛跡検出器には大型のガスTPCを使う。TPCを用いることで飛跡を大量の3次元空間点として取得でき、またシリコン検出器の場合に比べてより連続的な飛跡を得ることができるので位置分解能を高めることが可能である。図2.12にTPCの構造を示す。中央にカソードがあり、両端のエンドプレート上に電子の増幅層と検出層が配置される。電子の増幅にはGas Electron Multipliers (GEM) や Micromegas などの方法が検討されている。

TPC全体は z 軸方向の磁場で覆われ、荷電粒子の飛跡を曲げることで

$$p_T = 0.3BR = \frac{0.3BL^2}{8s} \quad [\text{GeV}/c] \quad (2.4)$$

によって運動量を求められる。ここで、 $B = 3.5 \text{ T}$ は z 方向の磁場、 R は曲率半径であり、実際には飛跡の弦の長さを L として弦と弧の距離を表すサジッタ s を使って運動量を割り出す。また、TPCに求められている運動量分解能は $\sigma/p_T^2 \leq 5 \times 10^{-5} [\text{GeV}/c]^{-1}$ である。TPCでは運動量の測定のみならず dE/dx を用いた粒子の同定も可能である。TPCに使うガスはAr-CF₄などの混合ガスが検討されている。

2.2.5 電磁カロリメータ (ECAL)

電磁カロリメータの配置を図 2.13 に示す。ILD では、ジェットエネルギー分解能 $\sigma/E_{jet} \leq 30\%/\sqrt{E_{jet}}$ が要求され、これを達成するために電磁カロリメータは光子のエネルギー測定を担当する。低コストで高い分解能を実現するために、ILD では 30 層の検出層とタングステンの吸収層を並べたサンプリングカロリメータを使用する。タングステンは放射長 $X_0 = 3.5$ mm、Moliere 半径 $R_M = 9$ mm であり、シャワーが重なりにくい利点がある。検出層には (1) シリコン検出器、(2) シンチレータ+光検出器の 2 つのオプションがあるが、これらの詳細は次章で説明する。

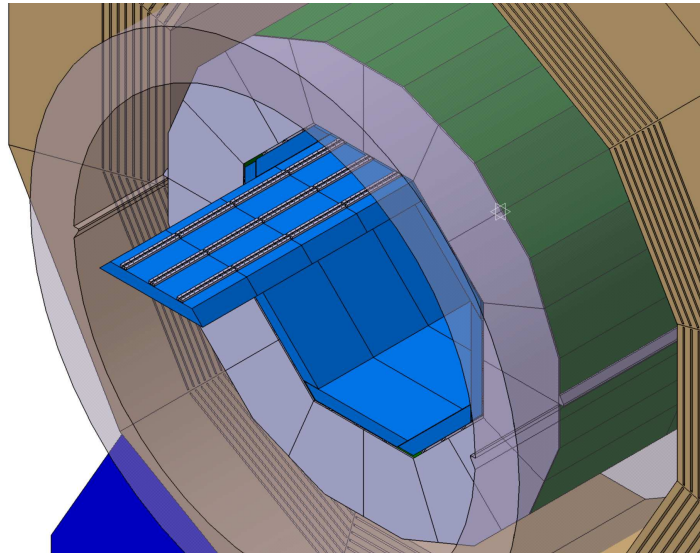


図 2.13: ECAL [10]

2.2.6 ハドロンカロリメータ (HCAL)

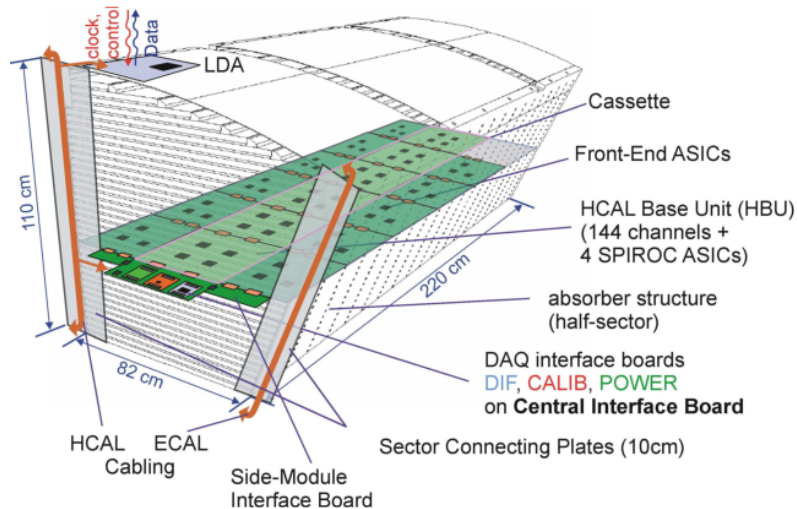


図 2.14: AHCAL [10]

ハドロンカロリメータは、ジェットのエネルギーの 10% を占める中性ハドロンエネルギーを正確に測定することを目的としている。HCAL も電磁カロリメータ同様サンプリングカロリメータであり、吸収体として鉄 (ハドロン相互作用長 $\lambda_I = 16.8$ cm、放射長 $X_0 = 1.8$ cm) を用いる

ため、ハドロン相互作用で生じた電磁シャワーのエネルギーの測定にも適している。検出層には $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ のシンチレータタイルと光検出器を使用する analog HCAL (AHCAL) と $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ セルのガラス RPC を用いる semi-digital HCAL (SDHCAL) の 2 つが検討されている。AHCAL は SDHCAL よりもチャンネル数が少なく低コストで済み、一方 SDHCAL は効率や位置分解能に優れる。AHCAL の構成図を図 2.14 に示す。

2.2.7 ソレノイドコイル

超伝導ソレノイドコイルによって検出器全体に 3.5 T の磁場をかけ、荷電粒子の飛跡を曲げて運動量を測定する。コイルの配置は図 2.15 に示す通りであり、従来の測定器と異なり PFA のためにカロリメータもコイルの内側に配置される。また、コイルの外側には anti-DiD (Detector-Integrated-Dipole) がある。これはビームビーム効果で生じたガンマ線同士の影響でできる電子・陽電子対バックグラウンドから崩壊点検出器や飛跡検出器を保護する磁場を発生させるためのものである。

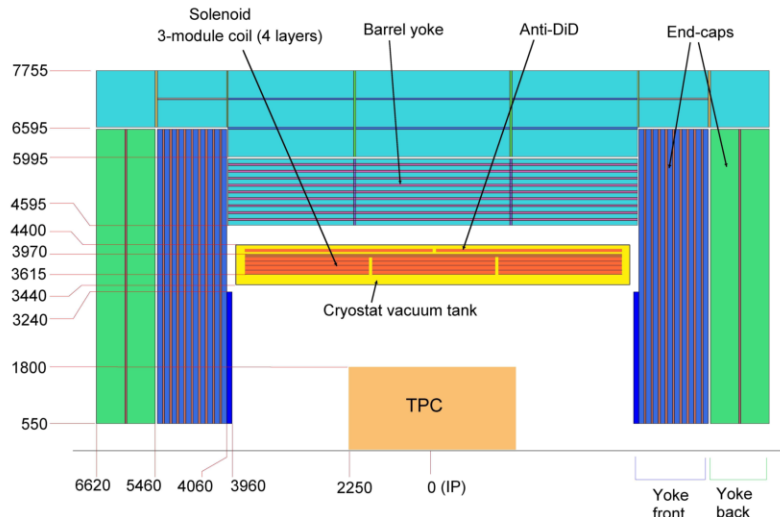


図 2.15: ソレノイドコイル [10]

2.2.8 ミューオン検出器

鉄ヨークと読み出し層によってミューオンの測定を行うとともに、カロリメータを抜けた粒子のエネルギー測定を行うテイルキャッチャーでもある。信号の読み出しには波長変換ファイバーを備えたシンチレータストリップと半導体光検出器を使用する方法と、RPCを使用する方法が検討されている。読み出し層は図 2.16 に示すように円筒方向には 14 層、ビーム軸方向には 12 層が鉄ヨークの間に挿入されている。センサー層同士が密集している検出器内側はテイルキャッチャーとしてデザインされており、センサーが隔てて配置されている外側はミューオン検出を目的として設計されている。鉄ヨークはミューオン検出やハドロンシャワーの発生だけでなく、ソレノイドの磁場を閉じ込める役割もある。

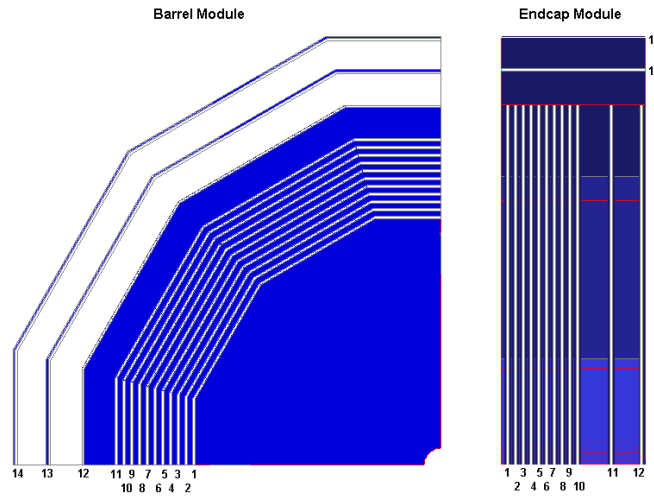


図 2.16: ミューオン検出器 [10]

2.2.9 ルミノシティカロリメータ (LumiCal) ・ ビームカロリメータ (BeamCal)

LumiCal、BeamCal の配置図を図 2.17 に示す。主にビームのルミノシティ測定を行い、さらには ECAL でカバーできないビーム軸方向を覆うことで、ミッシングエネルギー測定精度改善の役割もある。LumiCal では Bhabha 散乱の測定から積分ルミノシティを推定する。BeamCal ではビームビーム効果で生じたガンマ線同士が対生成する電子・陽電子対のエネルギー損失から、各バンチ衝突ごとの瞬間ルミノシティとビームパラメータを測定する。BeamCal は特に被曝量が多いため放射線耐性の高い検出器を使用することが求められる。

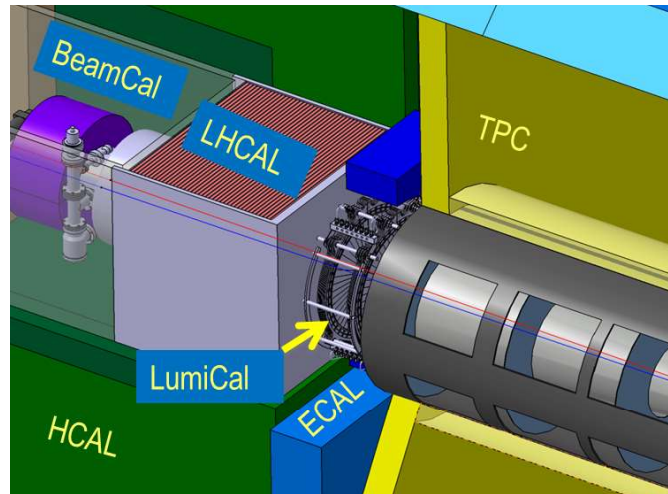


図 2.17: LumiCal, BeamCal [10]

第3章 ヒッグスファクトリーにおける電磁カロリメータ

ヒッグスファクトリーでは、Particle Flow Algorithm (PFA) の要求する位置分解能 (5 mm × 5 mm) を達成するために、従来とは違った高精細な電磁カロリメータの設計が必要である。本章ではまずジェット再構成の鍵となる PFA について説明した後、電磁カロリメータのオプションとして検討されているシリコン ECAL とシンチレータ ECAL の詳細を述べる。

3.1 Particle Flow Algorithm (PFA)

従来、ジェット中粒子のエネルギー・運動量を測定する際、荷電粒子は電磁カロリメータ情報、中性粒子はハドロンカロリメータ情報を使用していた。しかし、カロリメータのエネルギー分解能のみではヒッグスファクトリー実験において求められる精度のジェットエネルギー分解能は到底実現できない。そこで PFA では、中性粒子はハドロンカロリメータ、光子は電磁カロリメータでエネルギーを測り、荷電粒子については飛跡検出器で測定した運動量と粒子識別で判定した質量からエネルギーを求めることによって、ジェットエネルギー分解能を改善する (図 3.1)。PFA では飛跡検出器のトラック情報とカロリメータでのヒット情報を対応付けて粒子の飛跡を一つ一つ識別するため、ILD の場合、電磁カロリメータには 5 mm × 5 mm の位置分解能が要求され、これまでのコライダー実験の電磁カロリメータを遥かに凌ぐ高精細さが必要である。ヒッグスファクトリーにおける PFA カロリメータの技術オプションを図 3.2 に示す。以下の節では、電磁カロリメータの2つのオプションについて詳細を示す。

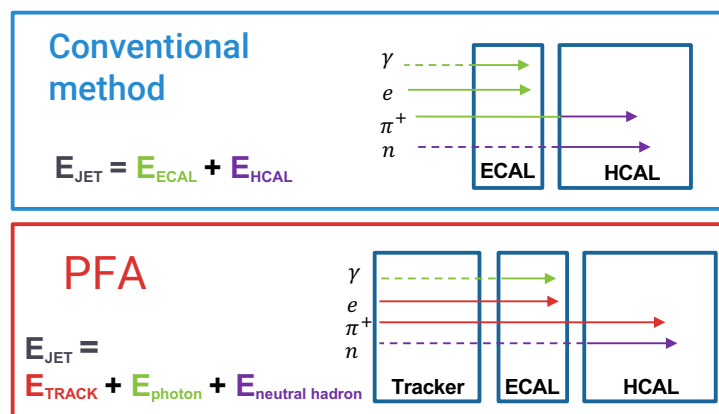


図 3.1: 従来のジェットエネルギー測定方法と PFA の違い

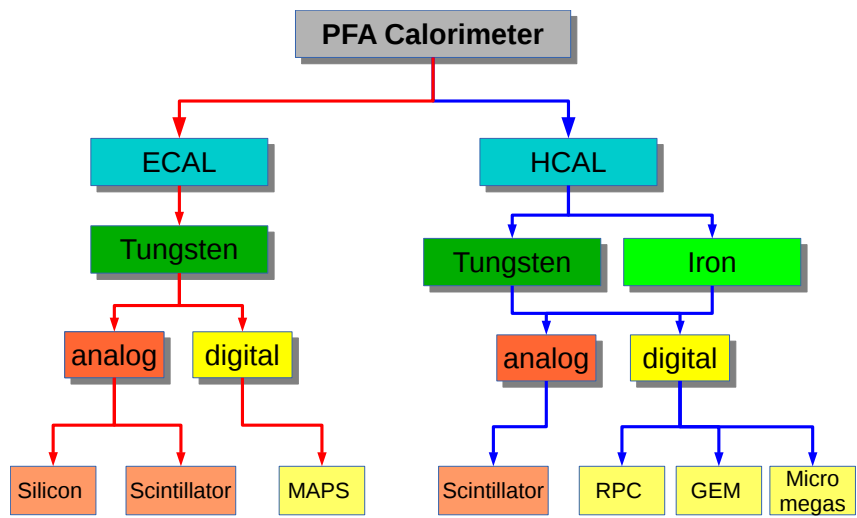


図 3.2: PFA カロリメータの技術オプション [10]

3.2 Silicon Tungsten ECAL (SiWECAL)

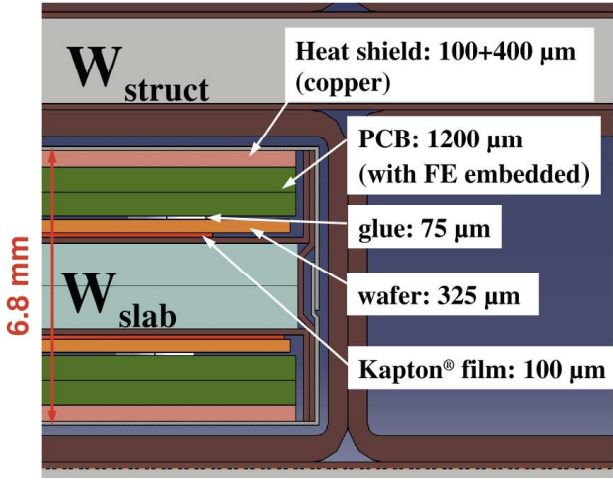


図 3.3: SiWECAL の構造 [10]

SiWECAL の構造を図 3.3 に示す。SiWECAL では読み出し層としてシリコン半導体検出器を使用する。ILD の場合、読み出しチャンネルはおよそ 100,000,000 チャンネルに及ぶが、シンチレータオプションに比べて S/N が良く、読み出しの精度が高い利点がある。5 mm × 5 mm サイズのシリコンセルを並べたシリコンパッドをタングステン板の両側に配置して検出層を形成する。シンチレータよりも読み出し層を薄くできるため、ECAL 層の全体を小型化できる。

3.3 Scintillator ECAL (ScECAL)

ScECALでは読み出し層にシンチレータストリップと光検出器を使用する。プラスチックシンチレータを使用することでシリコン検出器に比べて安価なカロリメータを実現できる。実際にシンチレータを5 mm × 5 mm サイズにカットして読み出すのではなく、短冊状のシンチレータを図 3.4 のように前後の層で直行させるように配置することで、擬似的な5 mm × 5 mm のピクセルを作る。現在の設計では、プラスチックシンチレータを幅5 mm、長さ45 mm、厚さ2 mmの短冊状にして、表面に光検出器を取り付ける。こうすることによって、SiWECALよりも読み出しチャンネルの数を1/10程度に減らすことが可能である。一方でScECALではストリップを交差させることにより、2つの粒子が近い距離で同時にECALに入った際に真のヒットと偽のヒット(ゴーストヒット)が発生してしまう問題もあるため(図 3.5)、ゴーストヒットを減らすためにはなるべくストリップを短くする必要がある。

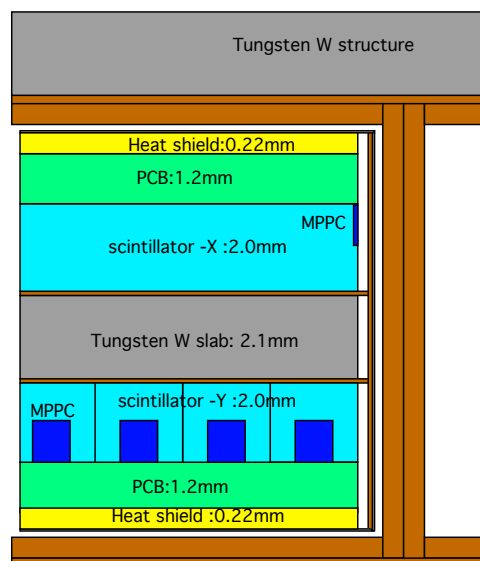


図 3.4: ScECAL の構造 [10]。上から見たときにシンチレータ X とシンチレータ Y は直交する配置になっている。

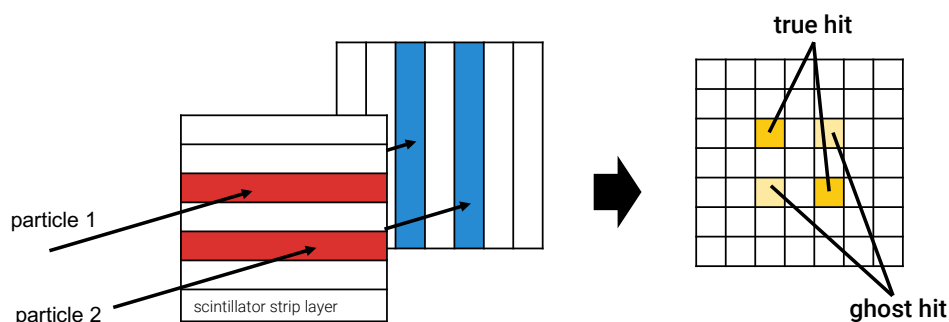


図 3.5: ScECAL におけるゴーストヒット。真のヒットペアに加えて偽のヒットペアが発生し、どちらが正しいか組み合わせかは判定できない。

3.3.1 Strip Splitting Algorithm (SSA)

シンチレータストリップ層を直行させて実際に $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ の位置分解能を実現するためには Strip Splitting Algorithm (SSA) という手法を使用する。具体的な方法は以下の通りである [11]。図 3.6 左に示すように、 n 個のストリップからなるシンチレータストリップ層が上下の層で直交向きに配置されており、この層を粒子が通過したとする。このとき図 3.6 右に示すように中央のストリップ層を上下のストリップに合わせて n 個の仮想セルに分割する。ここで、 k 番目の仮想セル ($k = 1, \dots, n$) に対して、

$$w_k = \sum_i E_i \quad (3.1)$$

によって重み付け係数 w_k を求める。ただし、 \sum_i は上下の同じインデックスを持ったストリップに対する和であり、 E_i はストリップ i でのエネルギー損失を表す。このとき、

$$E_k = E_{\text{strip}} \frac{w_k}{\sum_j w_j} \quad (3.2)$$

の様に中央層のストリップのエネルギー損失 E_{strip} を重み付けすることによって仮想セル k でのエネルギー損失を求めることができる。ただし、 \sum_j は上下の全てのストリップに対する和を表す。

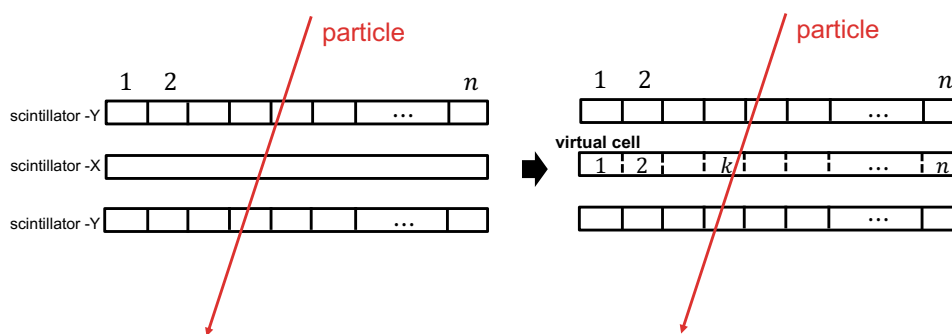


図 3.6: SSA によるエネルギーの割り当て方法。シンチレータ X をシンチレータ Y にあわせて n 分割する。

3.3.2 シンチレータストリップ

ScECAL で用いられるプラスチックシンチレータストリップを図 3.7 に示す。典型的なプラスチックシンチレータはポリビニルトルエンベースの密度 1.02 g/cm^3 、屈折率 1.58 程度であり、ns スケールの時間応答性能を持つ。また、電子のエネルギー損失 1 MeV あたり約 10,000 個のシンチレーション光を放出する。発光スペクトルは可視光領域であり、光検出器もこれにあわせて可視光に感度をもったものを使用する。シンチレータに巻きつける反射フィルムは 3M 社の ESR (Enhanced Specular Reflector) フィルムなどを使用し、これは可視光範囲において 98% 以上の反射率を持っている (メーカー公称値)。

シンチレータの成形方法としては主に、(1) キャスト成形、(2) 射出成形、(3) 押し出し成形がある。キャスト成形はシンチレータ材を低温で成形することにより発光量の良い高品質なものを作れるが、成形に時間がかかるため高価である。また、基本的に板状で成形されるため使用したい形状に機械加工する必要がある。射出成形は金型に入れて高温で成形する方法で、発光量はキャスト成形に劣るが任意の形状を安価に作れるためカロリメータ用シンチレータの様な大量生産に適している。押し出し成形は高温の材料を圧力によって押し出して加工する方法である。射出成形同

様に発光量はキャスト成形よりも劣るが安価である。しかし、射出成形と異なり任意の形状に直接成形することはできない。

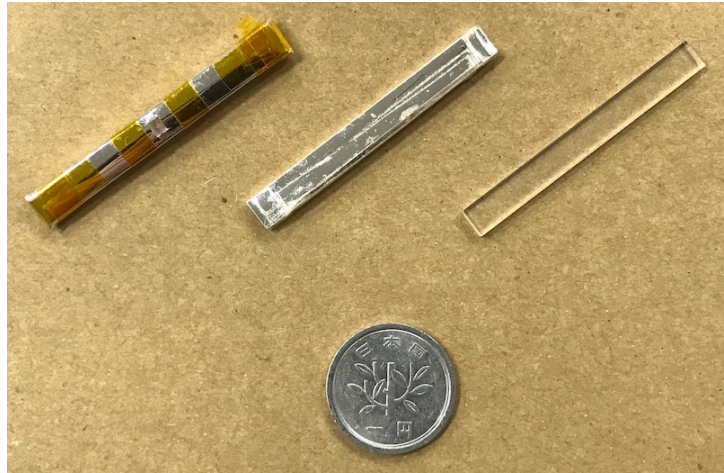


図 3.7: シンチレータストリップ。写真は幅 5 mm、長さ 45 mm、厚さ 2 mm のシンチレータとそれに反射材を巻いたもの。

3.3.3 半導体光検出器

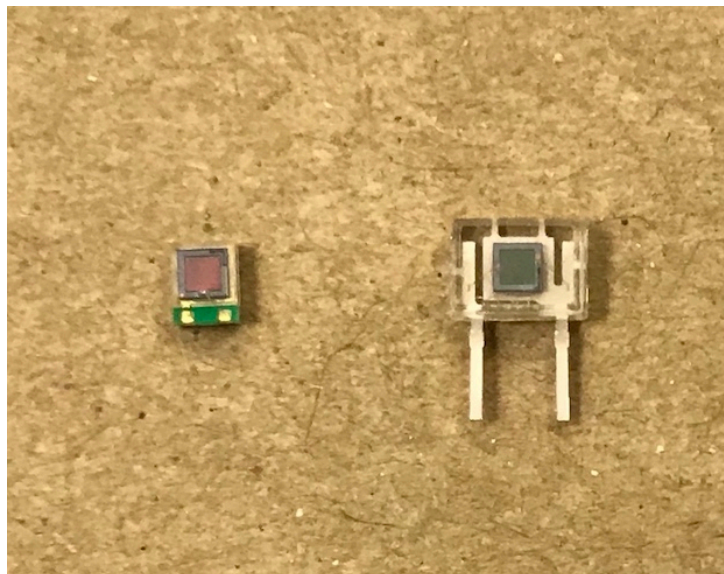


図 3.8: 浜松ホトニクス社製 PPD である MPPC。写真は受光面 1 mm のサイズのもの。

シンチレータストリップと組み合わせる光検出器には、図 3.8 の様な Pixelated Photon Detector (PPD)¹を使用する。PPD は、ガイガーモードという増幅状態で動作する Avalanche Photo Diode (APD) の微細なピクセルを平面上に並列に並べた光検出器である。各 APD ピクセルは入射光子数に依らず一定のパルスを出力するので、光子が全て別のピクセルに入ったとすると光子数に比例する出力が得られる (図 3.9)。PPD では、1 光子に相当する信号を 1 p.e. (photoelectron) と表

¹SiPM, MPPC[®], GAPD などとも呼ばれるが、本論文では PPD で統一する。

記する。PPDはPMTと違い磁場に対する耐性が強いので、カロリメータ全体を強磁場中に入れることができる。

一方で、PPDにはキャリアの熱励起に起因するダークノイズに加え、クロストーク・アフターパルスといったPPD特有のノイズ問題がある。クロストークは増幅過程で生じたキャリアが再結合して光を放出し、それが他のピクセルで増幅される現象であり、アフターパルスは増幅過程でキャリアが欠陥にトラップされ、時間差をおいて解放された後に増幅される現象である。これらのノイズ源は光子由来の信号と同じ増幅過程を経るため、アフターパルスは1 p.e. 信号と区別できず、クロストークは光子1つ由来の信号が2光子以上の信号に見えてしまう。クロストーク・アフターパルス確率は印加する逆バイアスを増やすほど増加するため、ノイズを減らすためには増倍率に支障をきたさない程度に印加電圧を抑える必要がある。

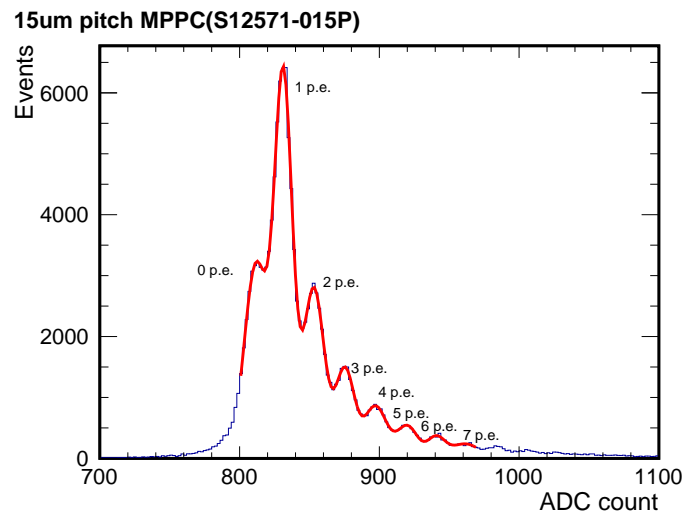


図 3.9: PPD 出力波高のヒストグラム例 (図は測定によるもの)

PPD の原理

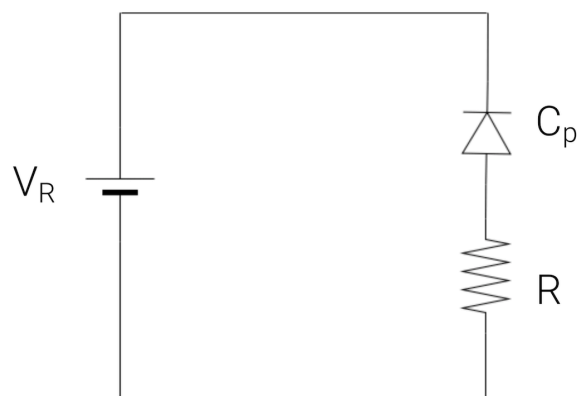


図 3.10: PPD の 1 ピクセルの等価回路

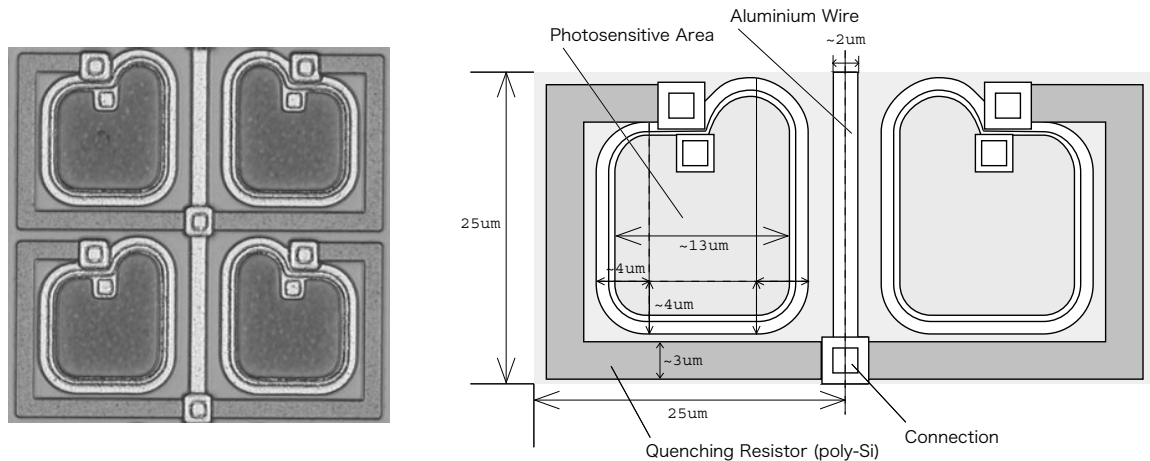


図 3.11: PPD ピクセル (4 ピクセル) の拡大図 (左) と、ピクセル (2 ピクセル) のイラスト (右) [12]

PPD の 1 ピクセルの等価回路を図 3.10 に示す。図の C_p はピクセルの持つ静電容量、 R_q はクエンチング抵抗、 V_R はピクセル印加する逆バイアスである。実際の PPD ではこのピクセルが図 3.11 の様に並列に多数接続されている。PPD における光子の増倍機構は以下の通りである。

1. 光子が素子中で吸収されると電子・正孔対が励起される
2. 電子が電場によりドリフト・加速され、結晶格子と衝突しイオン化
3. 衝突を繰り返し、雪崩増幅が生じる (図 3.12)
4. 雪崩増幅によって放電 (ガイガー放電) が起き、電流が流れる
5. クエンチング抵抗に電流が流れることで動作電圧が電圧降下
6. 電圧が降伏電圧以下まで下がることで増幅が収束し、増幅前の状態に戻る

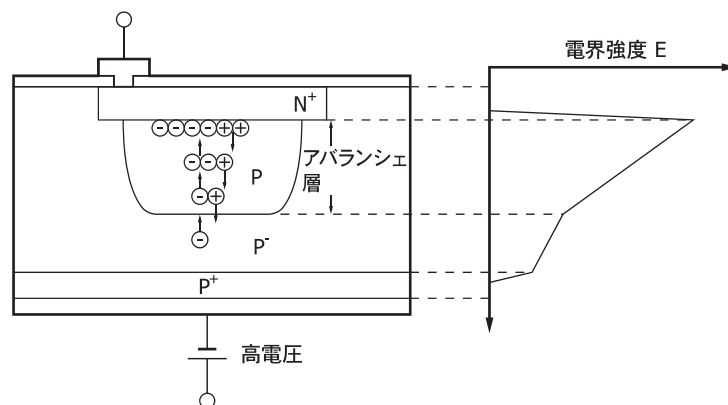


図 3.12: APD ピクセル中でのアバランシェ増幅過程 [13]

PPD の増倍率 M は式 (3.3) で与えられる。

$$M = \frac{C_p(V_R - V_{BR})}{e} \quad (3.3)$$

ここで、 C_p は1ピクセル当たりの静電容量、 V_R はピクセルにかかる逆電圧、 V_{BR} は降伏電圧、 $e \simeq 1.602 \times 10^{-19}$ Cは素電荷である。また、光子検出効率 (Photon Detection Efficiency: PDE) は、

$$\text{PDE} = (\text{開口率}) \times (\text{量子効率}) \times (\text{アバランシェ確率}) \quad (3.4)$$

で表される。ここで開口率とは1ピクセル当たりの有感面が占める割合である。

ScECAL に向けた PPD

ScECAL用のPPDとしては、ピクセルピッチが $10 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ のPPDが検討されている。図 3.13 に浜松ホトニクス製のPPDであるMPPC(S-12571-010/015)の外観を、表 3.1 に各ピクセルピッチの特性を示す。

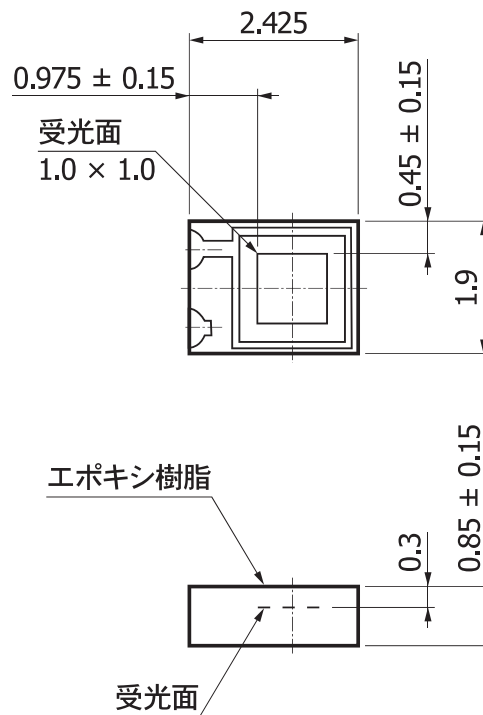


図 3.13: MPPC(S-12571-010/015) の外観 [14]

表 3.1: MPPC のピクセルピッチごとの特性 [14]

ピクセルピッチ	$10 \mu\text{m}$	$15 \mu\text{m}$
ピクセル数	10,000	4,489
感度波長範囲	320 – 900 nm	320 – 900 nm
降伏電圧 V_{BR}	65 ± 10 V	65 ± 10 V
増倍率	1.35×10^5 at $V_{BR} + 4.5$ V	2.3×10^6 at $V_{BR} + 4.0$ V
開口率	33%	53%
PDE	10%	25%

ピクセルピッチが小さいPPDを用いるメリットは、(1) 一つのピクセルに複数の光子が入る確率が小さくなること、(2) ピクセル数の増加によりダイナミックレンジが拡大し、最大検出可能光子数が増加することである。特に(1)については、PPD出力の飽和を抑え、PMTによる光電子

数校正の手間を省略することに繋がる。一方で PPD のゲインはピクセル間の静電容量に比例するため、ピクセルピッチの減少に伴って面積が減少し、増倍率が下がるという問題点もある。また、ピクセルが小さいほどクエンチング抵抗や配線の占める割合が増加するため、開口率 (PDE) の面で不利になる。より小さなピクセルピッチの PPD を使用するためには、開口率を損なわずに増倍率を大幅に改善できるような新しい PPD の開発が求められる。第 8 章で PPD のさらなる増倍率向上に向けた開発について述べる。

3.3.4 読み出し手法

ScECAL ではシンチレータ中を荷電粒子が通過することでエネルギー損失に比例したシンチレーション光が発生し、その光を光検出器で計数することによってエネルギー損失を求めるわけであるが、ここで重要となるのは以下の 2 つの事項である。

- MIP のような発光量の少ない粒子に対して十分な量の光を検出できる
- 荷電粒子がシンチレータストリップのどこを通過しようとも、入射する粒子のエネルギーが同じならば検出光子数の従う分布は同じになる

1 点目に関してはノイズに対する S/N を良くするために必要であり、先行研究によれば MIP に対しておよそ 10 p.e. 以上の光量が要求される [15]。また ScECAL の場合、検出エネルギーの統計的ばらつきがカロリメータ全体での検出光量 N に対して $\sqrt{E}/E = \sqrt{N}/N = 1/\sqrt{N}$ となるため、平均光量の増加はエネルギー分解能の向上に寄与する。2 点目はエネルギーの再構成やエネルギー分解能に影響する性能であるが、実際のシンチレータではシンチレータが持つ減衰長や反射フィルムでの光の吸収により場所ごとの検出光子数の差異が生じてしまう。現在の ScECAL で検討されている 3 つの読み出し手法を以下に示す。

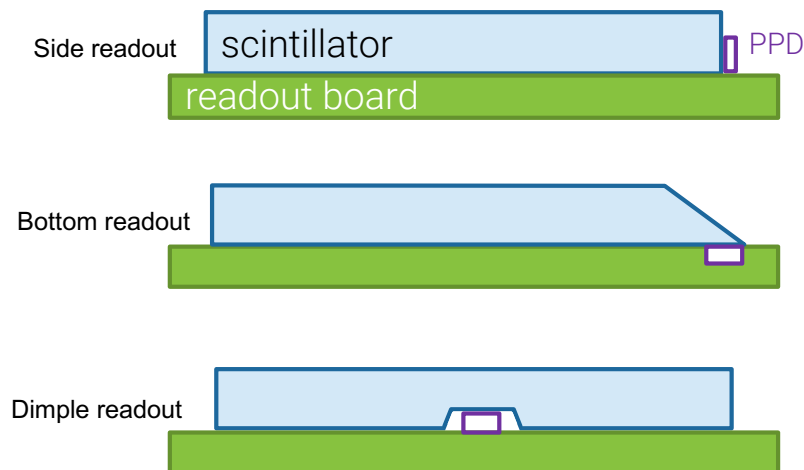


図 3.14: ScECAL における読み出し方法。(上)Side readout (中央)Bottom readout (下)Dimple readout

Side readout

最も基本的な読み出し方法で、図 3.14(上)、3.15 に示す様にシンチレータストリップの一つの面に PPD を取り付け、他の面を反射材で覆うことによって光を読み出す。30 p.e. 程度の十分な光量が得られる利点がある一方で、荷電粒子の入射位置が読み出し口から離れるにつれてシンチレー

タ中の減衰や反射回数の増加により検出光量が下がってしまうという問題がある。また、PPDを側面に取り付ける都合上、PPDの厚さ 0.85 mm によって約 1.9%の不感領域が生じてしまう。



図 3.15: Side readout に使用するシンチレータ

Bottom readout

Side readout の光量の一様性を改善するために提案された手法で、図 3.14(中央)、3.16 に示すような先端の尖ったくさび形のシンチレータ底面に PPD を取り付けて光を検出する。PPD 近傍でのシンチレータの厚さを薄くすることにより、side readout で問題だった光量が PPD 付近で高い問題を改善している。また、PPD が基盤に埋め込まれるため side readout で生じた不感領域が存在しない。しかし、side readout に比べて読み出せる光子が少なく、MIP に対しておよそ 10 p.e. 程度しか検出できない問題もある。これは side readout ではシンチレータ中を反射してきた光は読み出し口に比較的小角度で入射するのに対し、bottom readout では読み出し口が底面にあることによって反射してきた光の読み出し口への入射角度が大きくなってしまい、全反射 (臨界角 $\theta_c \sim 40$ [deg]) によってシンチレータ外へ光が抜け出しづらいためであると考えられる。



図 3.16: Bottom readout に使用するくさび形シンチレータ

Dimple readout

近年中国の研究グループ (USTC, IHEP²) により提案された読み出し方法で、図 3.14(下)、3.17 に示すような中央にくぼみのついたシンチレータに PPD の受光面を上向きにして入れて光を読み出す方法である。これは、検出光量の多くなる PPD 真上の領域を薄くすることで、全体の光量一

²中国科学技術大学、中国科学院高能物理研究所

様性を改善するという考えに基づいている。この方法では bottom readout と同様に PPD が基盤上にあるため不感領域が存在しない。また、シンチレータを機械加工する場合には bottom readout の様なくさび形の加工よりも加工が容易で、大量生産性に優れるという利点もある。

この dimple readout に関しては、MIP に対する発光量と光量の一様性が十分に検討されていないため、本研究ではまず荷電粒子の入射位置に対する光量を評価する測定を行った。測定の詳細は第 4 章に示すが、この測定によって dimple readout が従来の読み出し方法に比べて比較的良い性能を持っているが判明した。そのため、dimple readout をベースにシンチレータストリップの形状を改善すればより良いストリップの形状が求まるはずである。そこで第 5 章以降では ScECAL の性能改善をめざしたシンチレータストリップ形状の最適化に関して述べる。



図 3.17: Dimple readout に使用するくぼみ付きのシンチレータ

第4章 光量位置依存性の測定

シンチレータストリップからの光の読み出し方法として、従来検討されてきた2つの方法に加えて新たに dimple からの読み出しが提案されたが、この方法が従来の方法と比べて MIP に対する光量・光量の一様性の面で優れているのかを検証する必要がある。本章では dimple readout に関して行った荷電粒子の入射位置に対する検出光量の評価について述べる。

4.1 測定の構成

粒子の入射位置に対する検出光量を評価するために、図 4.1 の様な測定環境を構築した。測定対象の dimple シンチレータはストリップ全体が反射フィルムで巻かれ、その dimple 部分に受光面を上にして PPD を入れる。シンチレータの上面からアルミニウムのコリメータを通したベータ線を入射し、シンチレータ下部に設置したトリガーカウンターにヒットがあった時のストリップの検出光量を粒子の入射位置ごとにカウントする。コリメータとトリガーカウンタの位置は固定し、シンチレータストリップ自体がステージによって移動する。実際に組み上げた測定環境の写真を図 4.2 に示す。

測定に使用した機器の接続図式は図 4.3 の様になっている。PPD には浜松ホトニクス製の $15\ \mu\text{m}$ ピッチサイズの MPPC を使用し、PPD の信号は EASIROC モジュールという ASIC 内蔵モジュールで取得する。PPD への電圧印加も EASIROC モジュールによって可能であり、ストリップ用シンチレータとトリガー用シンチレータ別々に電圧をかけることができる。以下の節で測定に使用した各要素の詳細を示す。

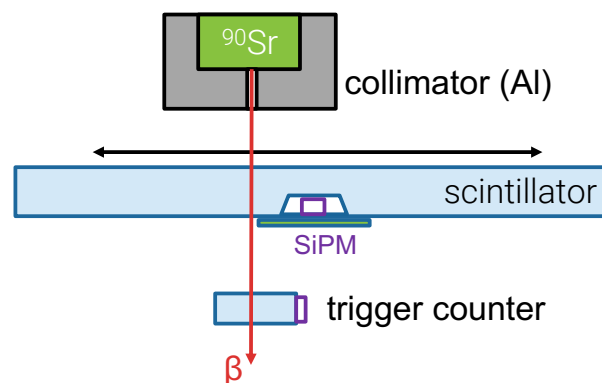


図 4.1: 光量測定環境の概要。ステージによってシンチレータを左右に動かしベータ線の入射位置を変える。

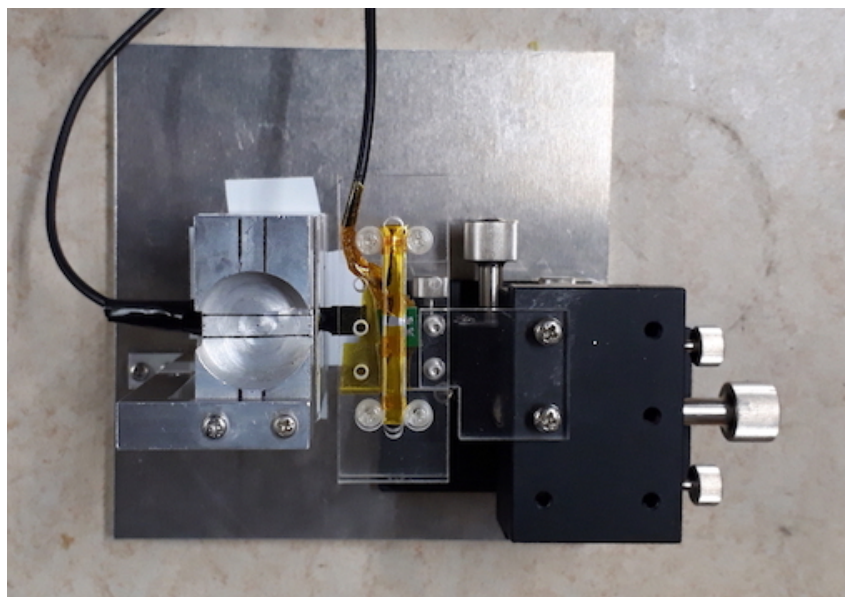


図 4.2: 光量測定のセットアップ

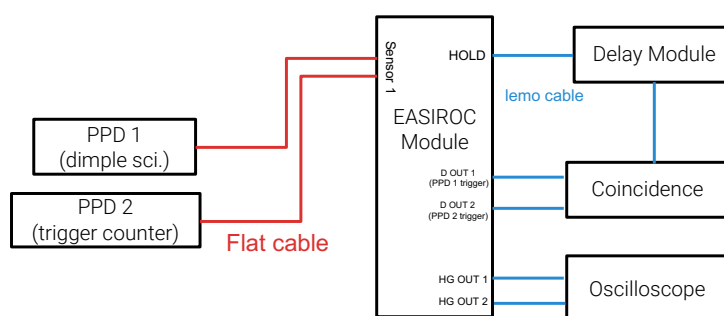


図 4.3: 測定機器の接続図式

4.1.1 シンチレータストリップ

シンチレータストリップは図 4.4 のようにドリルによる掘削加工で中央にくぼみが開けてある¹。シンチレータの設計図を図 4.5 に示す。ベースとなったシンチレータは SAINT-GOBAIN 社の BC-408 である。表 4.1 にシンチレーション光の発光特性を、図 4.6 に発光スペクトルを示す。

シンチレータに巻きつける反射フィルムは 3M 社製の Enhanced Specular Reflector (ESR) フィルムを使用する。このフィルムは公称値によると可視光 (410 – 800 nm) の波長域で平均 98% 以上の反射率を持っている。ESR フィルムは図 4.7 の様に PPD がちょうど入る大きさにくり抜かれて巻いてある。

¹dimple シンチレータとその設計図は中国 USTC より提供頂いた。

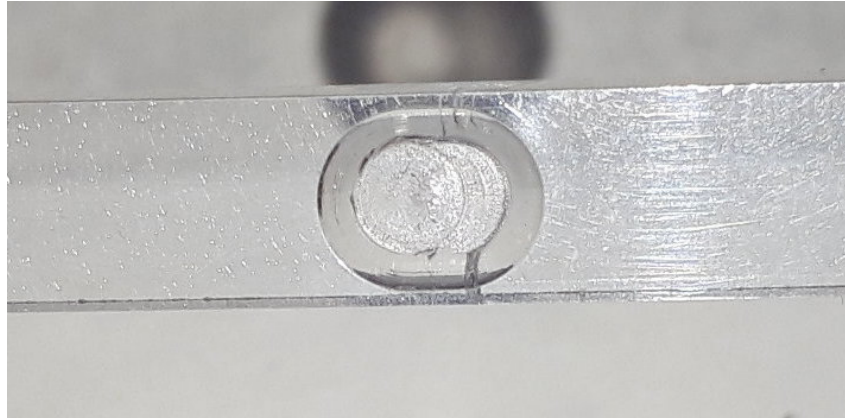


図 4.4: シンチレータの dimple 部分拡大図

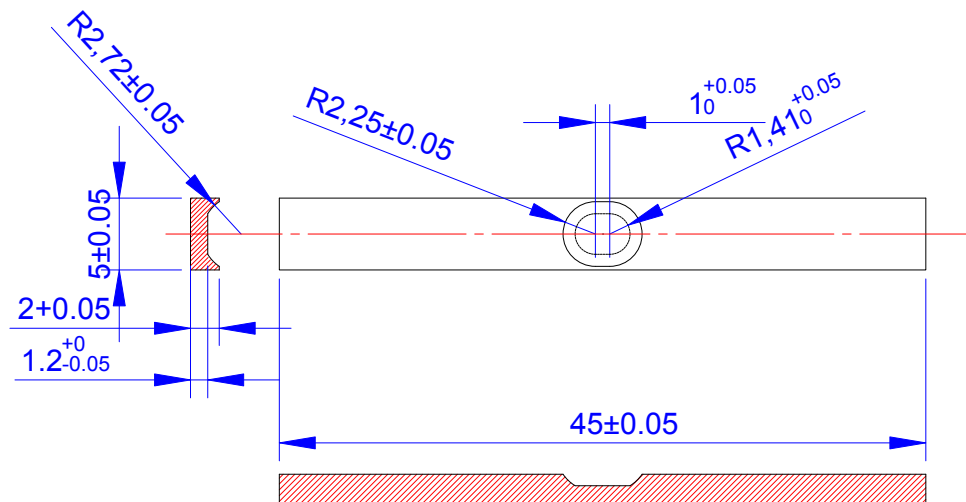


図 4.5: Dimple readout シンチレータの設計図

表 4.1: BC-408 シンチレータの特性 [16]

BC-408	
発光量 [photons/1 MeV e^-]	10,000
立ち上がり時間 [ns]	0.9
下降時間 [ns]	2.1
パルス幅 [ns]	2.5
最大発光波長 [nm]	425
バルク吸収長 [cm]	380
密度 [g/cm^2]	1.023
屈折率	1.58

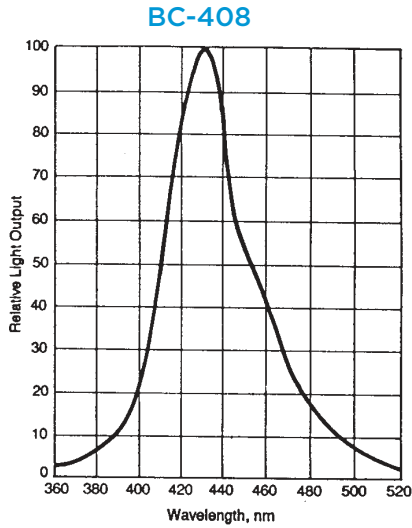


図 4.6: BC-408 の発光スペクトル [16]



図 4.7: 反射フィルムの形状

4.1.2 EASIROC Module

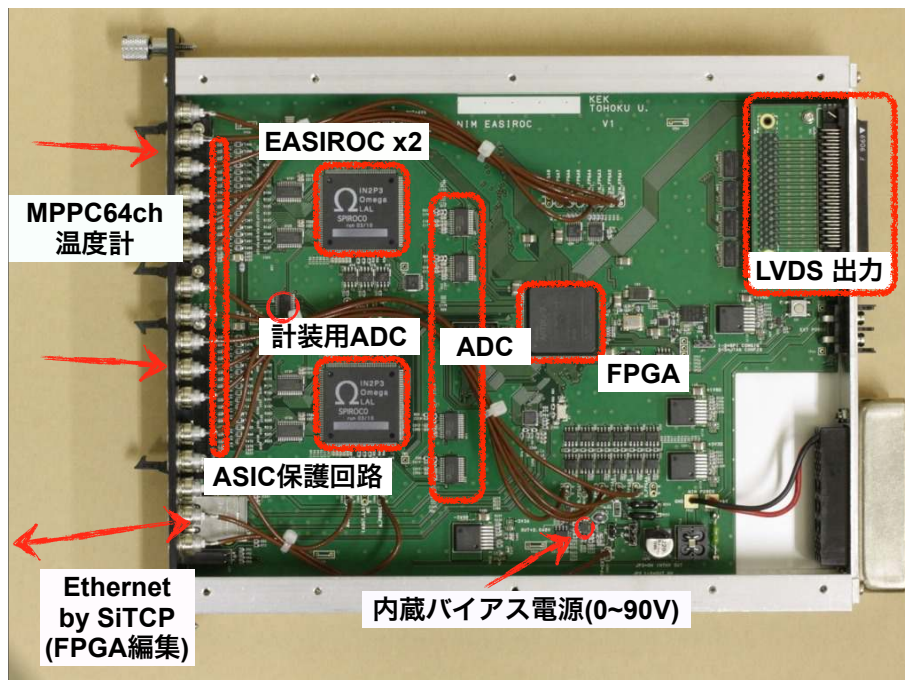


図 4.8: EASIROC モジュールの内部 [17]

EASIROC モジュールは大阪大学・東北大学・KEK によって開発された、ASIC チップ内蔵の PPD 用信号読み出しモジュールである。PPD の信号取得に必要な以下の機能を備えており、電圧印加からデータ収集までが 1 台で可能である。今回はストリップ用とトリガー用に 2ch ののみを使用した²。EASIROC モジュールの内部構成を図 4.8 に示す。

²EASIROC モジュールは、東京大学素粒子物理国際研究センターの大谷航研究室より借用した。また EASIROC モジュールの FPGA 用 firmware と PC 制御用 software は信州大学高エネルギー物理学研究室の竹下徹教授より提供頂いた。

- 最大 64ch の PPD 同時駆動
- 内蔵バイアス電源 (最大 90 V)
- プリアンプ・シェイパーによる波形増幅整形
- 内蔵ディスクリミネータによるトリガー信号生成
- 各チャンネルのバイアス調整 ($[-4.5, 0]$ V)
- Ethernet 接続による PC からの制御

EASIROC chip

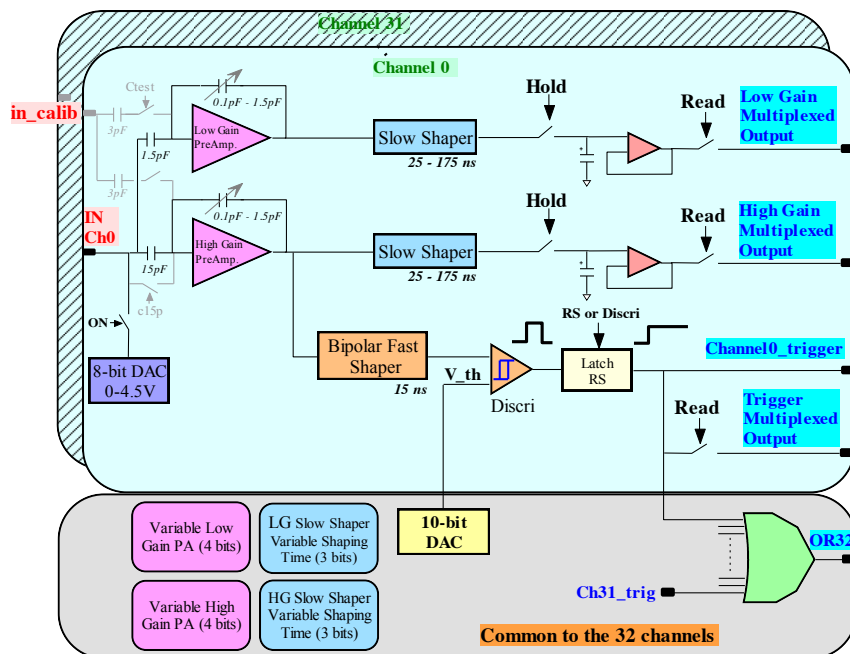


図 4.9: EASIROC チップの概要 [18]

Extended Analogue Silicon pm Integrated Read Out Chip (EASIROC) チップは PPD 用の読み出し ASIC チップで、フランスの Omega グループにより開発された。チップにはプリアンプ・シェイパー・ディスクリミネータがチャンネル数分内蔵されており、チップ 1 枚で 32ch の PPD 読み出しが可能である。EASIROC モジュールは EASIROC チップを 2 枚内蔵しているため最大 64ch の PPD を同時に動作させられる。チップの内部構成を図 4.9 に示す。プリアンプには low gain と high gain の 2 種類があり、キャパシタの容量を変化させることで low gain 側は 1~15 倍、high gain 側は 10~150 倍で増倍率を変化させることができる。今回は使用した PPD のピクセルピッチが小さく、ゲインが一般的な PPD よりも小さいため、最大の 150 倍に設定した。

High gain 側のプリアンプ後段には slow shaper と fast shaper の 2 種類のシェイパーがあり、fast shaper は時間測定、slow shaper は電荷測定に使用される。fast shaper の信号はディスクリミネータを通り、NIM レベルのトリガー信号が生成される。EASIROC では slow shaper 信号から電荷を求めるとは、波高による電荷測定を行うため信号のピークの位置を適切に設定してやる必要があり、EASIROC モジュールの hold 端子にピークのタイミングでトリガー信号を入力する。例えば PPD のセルフトリガーにより信号を取りたい場合は fast shaper から来たトリガー信号を

hold 端子に入力するわけだが、そのまま入力しても信号のピークよりも早い位置でホールドしてしまうため、適切に遅延させてから hold 端子へと入れる。

4.1.3 PPD

シンチレータストリップから光を読み出す PPD には浜松ホトニクス製 $15\ \mu\text{m}$ ピッチの表面実装型 MPPC(S12571-015P:図 4.10 左) を使用した。この PPD の各種特性は表 3.1 に示した通りである。動作電圧はメーカーの推奨動作電圧である $V_{BR} + 4.0\ \text{V}$ を使用する。今回の測定では図 4.11 のように PPD パッケージとシンチレータストリップが垂直になる向きで dimple に入れた。これにより PPD の受光面はシンチレータの短辺方向 (図の y 方向) に中央からわずかにずれている。



図 4.10: S12571-015P(左) と基盤に取り付けた様子 (右)

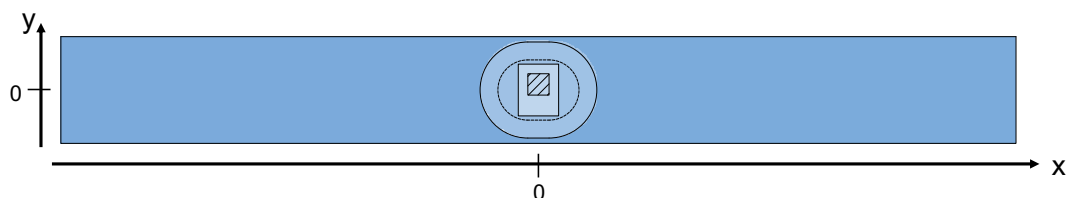


図 4.11: PPD と dimple の位置関係。受光面の中央はシンチレータの中央から y 正方向におよそ $0.26\ \text{mm}$ ずれている。

PPD のキャリブレーション

シンチレーション光を計数するためには、あらかじめ EASIROC の使用するチャンネルの ADC 値と光電子数 (p.e.) の対応を調べておく必要がある。今回 PPD のキャリブレーションは以下の方法で行った。まず PPD のダークノイズでセルフトリガーをかけたときの出力 ADC 分布 (図 4.12) をバイアス電圧を様々に変えて取得する。ここで見えている各ピークは左からそれぞれ $0\ \text{p.e.}, 1\ \text{p.e.}, \dots$ の光電子ピークに相当する。ただし、光電子ピークの分離が可能な $V_{\text{Bias}} > 73\ \text{V}$ の範囲のみを使用した。この ADC 分布を Gaussian でフィットし、1 番目のピークと 2 番目のピークの差を各電圧値における $1\ \text{p.e.}$ 相当の ADC 値 (ΔADC) と定め、バイアス電圧に対する ΔADC のゲイン

ロット (図 4.13) を描く。これを 1 次関数でフィットして外挿することで、 $\Delta\text{ADC} = 0$ のときの電圧値から降伏電圧が求まる。このゲインプロットより、PPD の降伏電圧を $V_{BR} = 64 \text{ V}$ 、動作電圧 (オーバー電圧 $dV = 4 \text{ V}$) における 1 p.e. 相当の ADC 値は 11.5 ADC count と推定した。

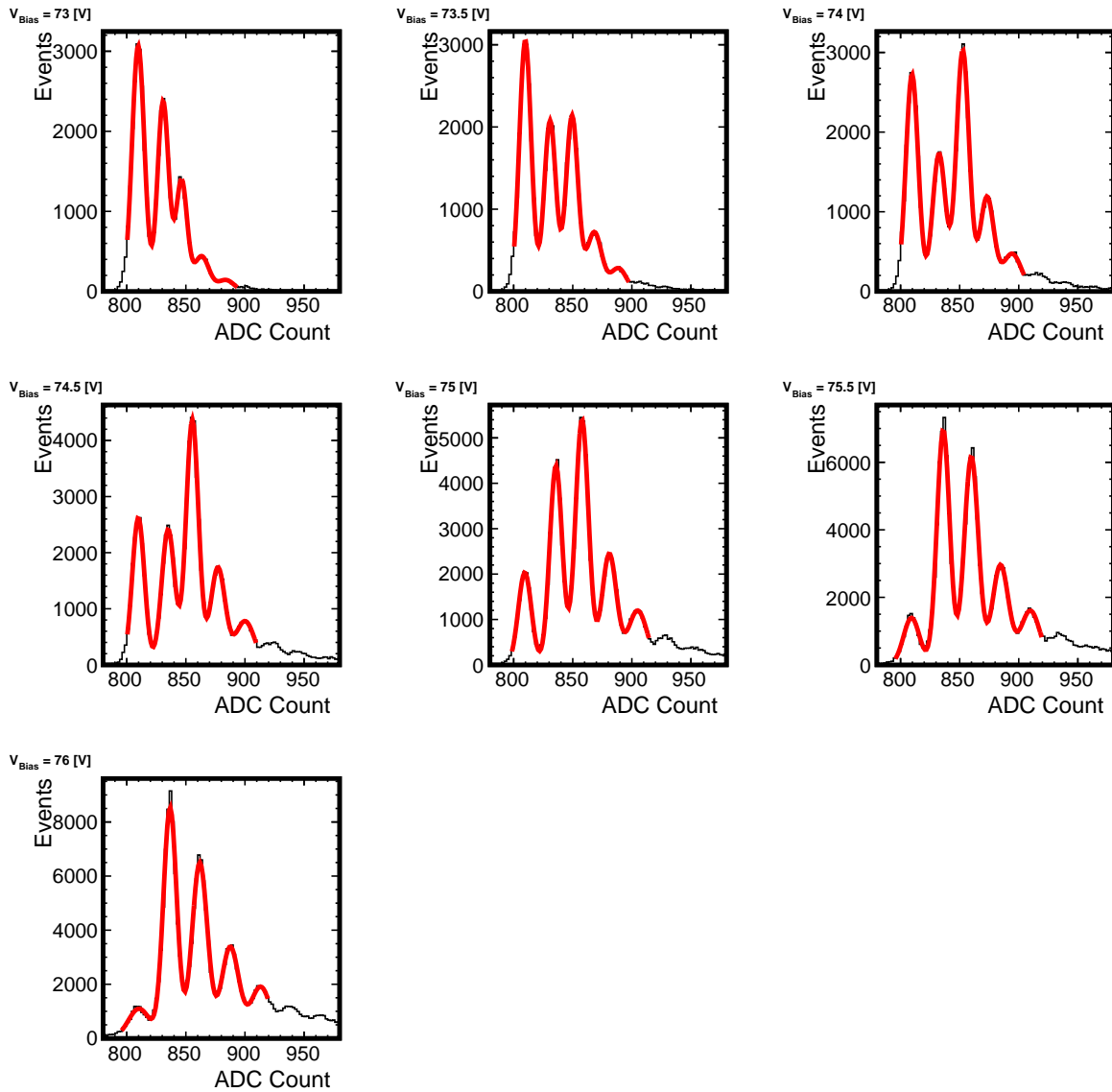


図 4.12: 各逆電圧ごとの ADC ヒストグラム

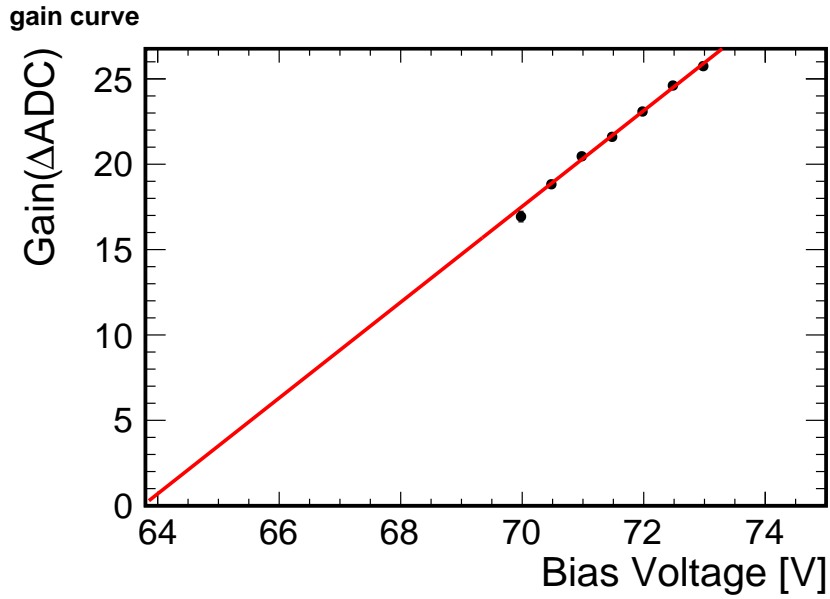


図 4.13: ゲインプロット (ADC 値)

4.2 測定方法

シンチレータに入射する荷電粒子の線源には ^{90}Sr を使用した。 ^{90}Sr は、半減期 28.8 年で ^{90}Y に β^- 崩壊し、 ^{90}Y は半減期 64 時間で安定核である ^{90}Zr に β^- 崩壊する [19]。放射平衡状態にある ^{90}Sr の放出ベータ線スペクトルを図 4.14 に示す。 ^{90}Sr は最大エネルギー 546 keV・平均エネルギー 196 keV のベータ線を放出し、 ^{90}Y は最大エネルギー 2.28 MeV・平均エネルギー 0.934 MeV のベータ線を放出する。

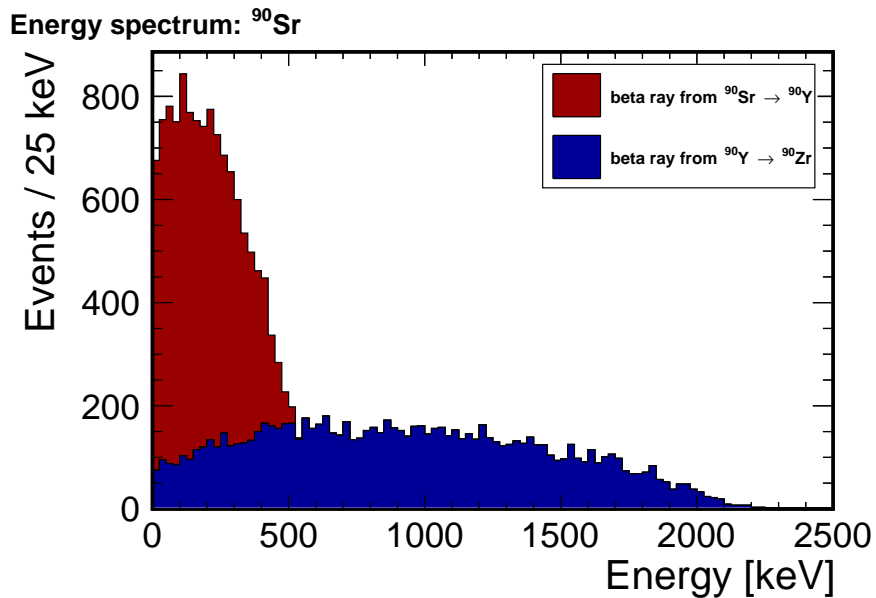


図 4.14: Sr の放出ベータ線スペクトル (図は GEANT4 シミュレーションによるもの)

ベータ線は直径 0.5 mm、深さ 3 mm のコリメータを通してシンチレータストリップへと入射する。今回の測定ではコリメータ底面とシンチレータストリップ上面の距離は 3 mm、シンチレータストリップ底面とトリガーカウンタ表面の距離は 9 mm に設計した。トリガーカウンタは、厚さ 2 mm のシンチレータに直径 4 mm のアルミのコリメータをつけて適切なサイズに調整した。ベータ線の入射位置は、シンチレータ短辺方向については中央で固定し、長辺方向に関して ±20 mm 程度の範囲で動かしてデータを取った。データ取得はシンチレータストリップ用の PPD とトリガー用の PPD の信号のコインシデンスをとり、ストリップの PPD 信号をピークの位置で適切にホールドできるように遅延モジュールで遅延させてから hold 端子に入力する。

EASIROC モジュールで取得したデータは ADC 値なので以下の方法で光電子に変換する。シンチレータを通過する荷電粒子のエネルギー損失は Landau 分布に従うが、実際に得られるデータは検出器の分解能や、検出光子数の統計的なばらつきがあるので、得られる ADC 分布は Landau 分布と Gauss 分布の畳み込み関数に従う。よって ADC 分布を Landau 分布と Gauss 分布の畳み込みでフィットする。続いてフィットパラメータの Landau 分布の最頻値 (MPV) を求め、ペDESTAL に相当する ADC 値と 1 p.e. 相当の ADC 値 (ΔADC) から、

$$\# \text{ of photoelectron} = \frac{\text{MPV} - \text{pedestal}}{\Delta\text{ADC}} \quad (4.1)$$

によって光量を算出する。

4.3 測定結果

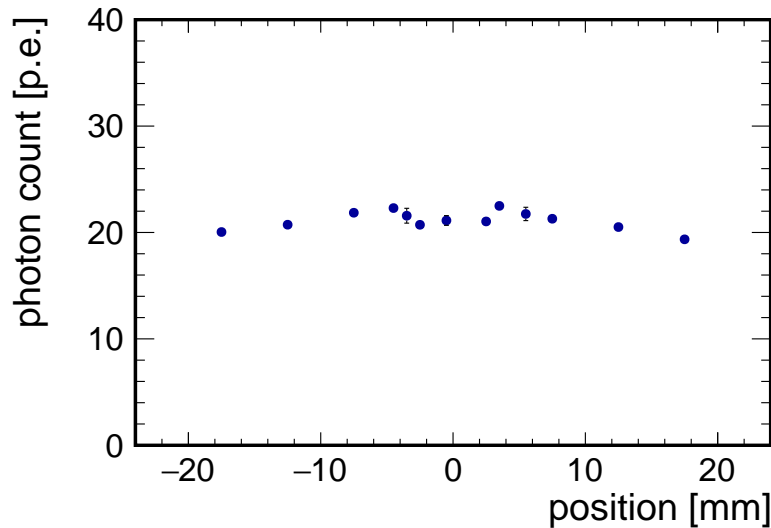


図 4.15: 光量の位置依存性測定結果。横軸はシンチレータに対するベータ線の入射位置、縦軸は検出光量を表す。

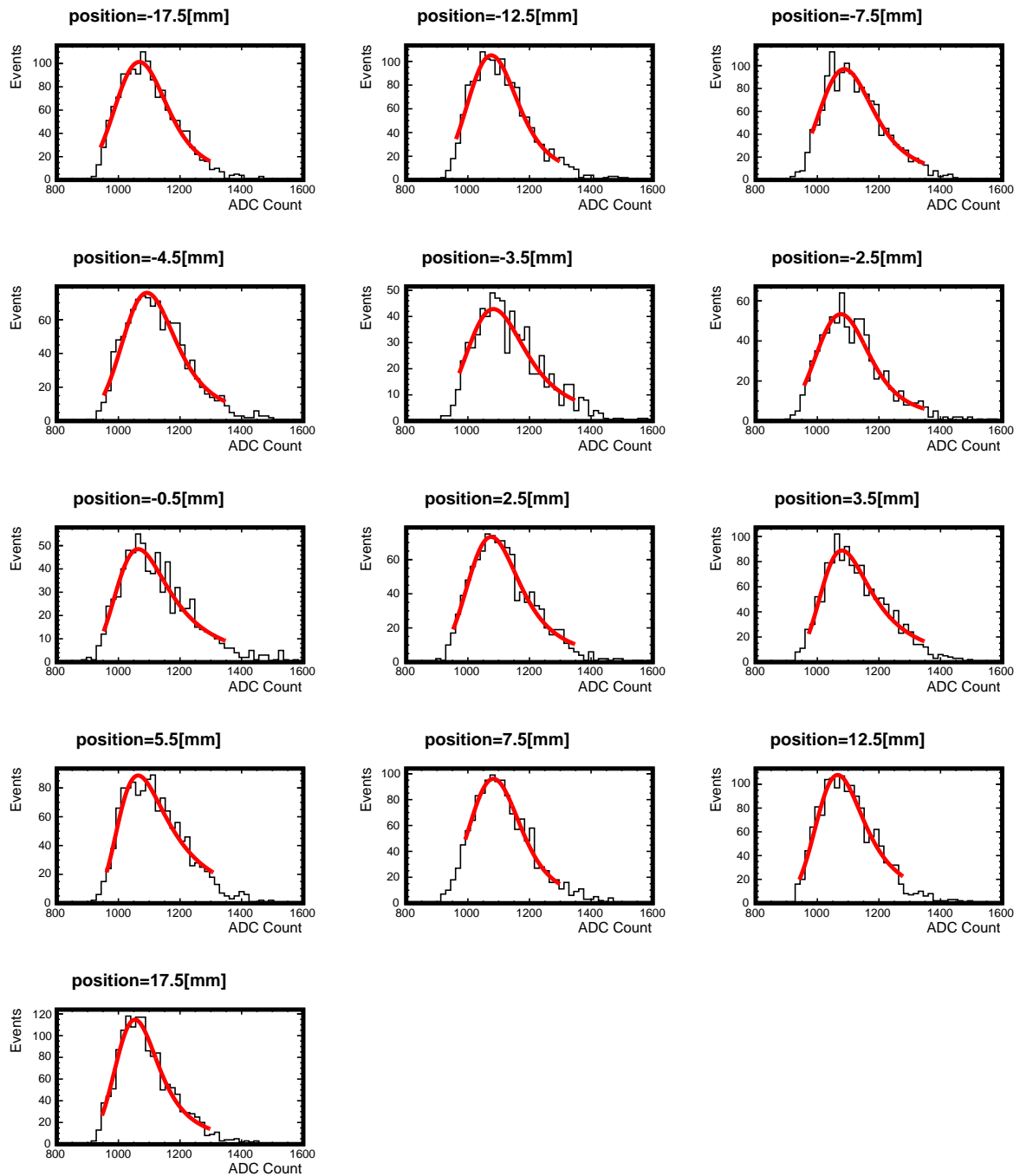


図 4.16: 各ベータ線入射位置における ADC 分布

光量の位置依存性測定結果を図 4.15 に、ベータ線の各入射位置における出力 ADC 分布を図 4.16 に示す。図 4.15 の横軸はシンチレータに対するベータ線の入射位置(コリメータの中央の位置)を表し、縦軸は PPD で検出された光電子数 (p.e.) を表す。この測定より dimple readout では平均 20 p.e. 程度の十分な光量が得られており、全体の光量の一様性も非常に良いとわかる。dimple のある中央付近の位置では光量がその外側よりも若干減少しており、dimple の外では中央から離れるにしたがって徐々に光量が減少している。図で見える光量のくぼみと実際の dimple の大きさとの位置関係は図 4.17 のようになっている。実際の dimple の横方向の大きさは 5.5 mm であるが、光量プロットのくぼみの大きさはおよそ 9 mm であり、長さに差が生じている。これは、コリメータを通過したベータ線がある程度の広がりを持つために dimple の大きさがぼやけて見えているためだと考えられる。

今回取ったデータでは全体の光量の傾向が見えてはいるものの dimple のある中央近傍でのプロット間隔があまり密でない。中央付近での測定点の不足は本測定時点では重要視されていなかったが、後のシミュレーションの結果により、さらなるデータ点の追加が必要であると判明した。このことについては第 6 章で新しい測定結果を示す。

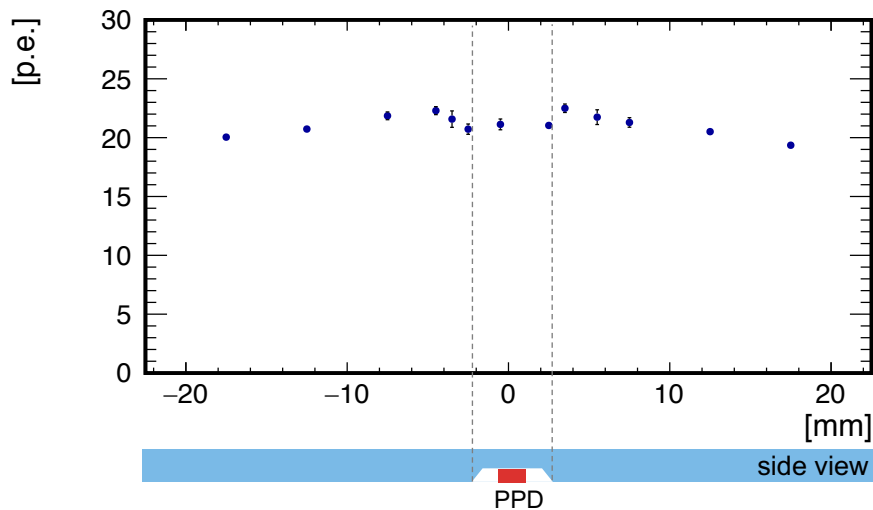


図 4.17: 光量と dimple の位置関係。dimple 自体の大きさよりもプロットに現れるくぼみの方が大きい。

第5章 光量測定シミュレーション

Dimple readout 型シンチレータの測定によって、この読み出し方法は従来の読み出しと比較して十分良い性能を持っていることが判明したが、位置依存性を極限まで良くするためにはさらなる形状の最適化が必要である。シンチレータの形状、PPDの取り付け位置を最適化するためには、ストリップを大量に試作して一つずつ測定することも可能だが、時間・コストの面で現実的ではない。そこで任意の形状・読み出し位置に対する平均検出光子数を計測するシミュレーションを行うことによって形状の最適化を実現するツールを作成した。本章では作成したシミュレーションの詳細と実測結果との比較、および様々に条件を変えたときの結果について考察する。

5.1 GEANT4による光子追跡シミュレーション

シミュレーションの利点は実機を用いることなく条件を様々に変化させての検証ができる点である。実測の場合、例えば第4章の位置依存性の測定だけでも半日ほどの時間がかかるため、シンチレータストリップの形状を最適化するためには開発コストや時間の観点からシミュレーションを行うことがベストである。また、シミュレーションを拡張することで、サンプリングカロリメータとしての性能評価を行うことも可能になる。シミュレーションによるシンチレータカロリメータとしての性能評価については第7章で述べる。本研究においては、まずシンチレータ中の光の運動を追跡するシミュレーションを作成し、位置依存性の実測結果をシミュレーションで再現させる。そして最終的には完成したシミュレータによって、カロリメータとして最適なシンチレータストリップの形状を量産性も考慮に入れた上で決定することを目指す。

シンチレータ中の光子追跡のシミュレーションは、C++言語のツールキットであるGEANT4 (GEometry ANd Tracking) を用いて行う [20]。GEANT4では、質点としての粒子の運動を量子力学に基づいて計算することで検出器内部での複雑な粒子反応過程をシミュレートすることが可能であり、大規模な素粒子実験から放射線医療分野まで幅広く使用されている。今回のシミュレーションでは、GEANT4に用意されている可視光領域の光子を扱うためのクラスG4OpticalPhysicsと一般的な電磁相互作用のクラスを用いて、ベータ線の放出からシンチレーション光の発生、光子の吸収などを扱う。

GEANT4ではオブジェクト指向の考えに基づいて多くのクラスが抽象クラスとして用意されており、ユーザーは必要な機能に応じてこれらのクラスを継承したクラスを記述することで目的のシミュレーションを行う。シミュレーションを実行するにあたって、最低限実装すべきクラスは以下の3つである。

- G4VUserDetectorConstruction
- G4VUserPhysicsList
- G4VUserPrimaryGeneratorAction

以下で各クラスの詳細と、作成したシミュレーションでの実装内容について記す。

5.1.1 DetectorConstruction

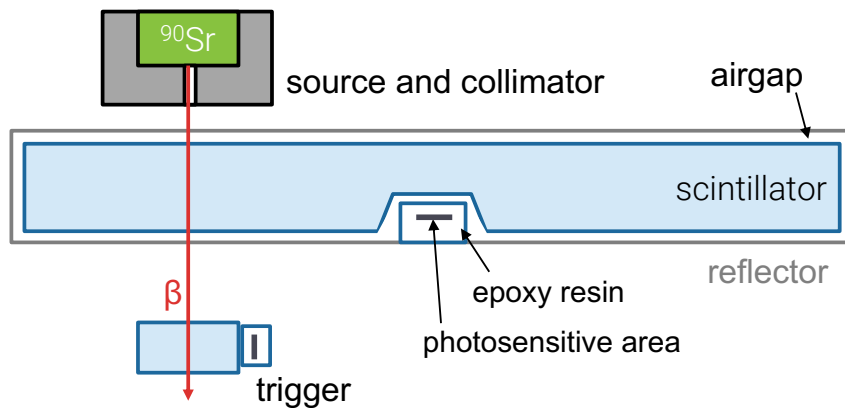


図 5.1: シミュレーション上で実装したオブジェクト

このクラスでは、物質の存在する物理空間の定義と、オブジェクトの配置を行う。まず、物体の形状を作成し (G4Solid)、そこに物質情報を付加させ (G4LogicalVolume)、最後に位置情報を与えることでシミュレーション対象のオブジェクトが定義される (G4PhysicalVolume)。本シミュレーションではシンチレータストリップ・反射フィルムやトリガーカウンタなど、実測で使用した物質を定義した。実際に定義したオブジェクトの位置関係を図 5.1 に示す。

シンチレータストリップの dimple 形状は、スライスした円錐と台形をブール演算によって組み合わせることで再現した。実測で使用したシンチレータの dimple はドリルの形状によって斜面が図 4.5 のように曲率を持っているが、シミュレーション上で完全に再現することが困難であるため曲率無しの斜面として扱った。シミュレーションで作成したシンチレータストリップを図 5.2 に示す。このシンチレータは、図 5.3 の様に反射フィルムで包まれており、シンチレータと反射フィルムの間には薄い空気層がある。反射フィルムには長方形の穴を開けてそこに PPD を配置する。なお、PPD パッケージとシンチレータの dimple 底面部分との間にも非常に薄い空気層を設定する。PPD はエポキシ樹脂のパッケージの中にシリコンのセンサー部分を配置することで作成した。

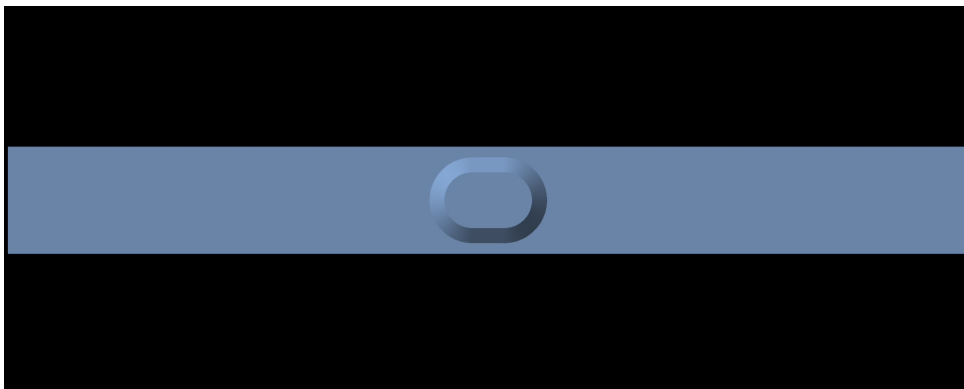


図 5.2: GEANT4 上で作成した dimple シンチレータの形状

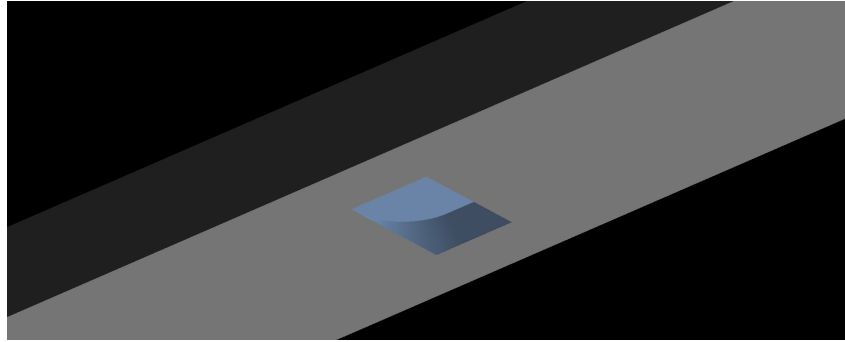


図 5.3: GEANT4 でのシンチレータと反射フィルム。青がシンチレータ、グレーが反射フィルムであり、反射フィルムには PPD を入れるための切り抜きがある。

5.1.2 PhysicsList

シミュレーション対象となる粒子がどのエネルギーにあるのかに応じて、計算に使用したい物理相互作用のリストを指定する。本シミュレーションでは以下の 3 つを指定した。

- FTFP_BERT
- G4OpticalPhysics
- G4RadioactiveDecayPhysics

FTFP_BERT は電磁相互作用とハドロン相互作用をまとめた PhysicsList で、およそ 100 TeV までの標準的な相互作用を扱う。ここでは荷電粒子と物質の相互作用を計算させるために使用する。G4RadioactiveDecayPhysics は、原子核の放射性崩壊を扱うための PhysicsList で、 ^{90}Sr のベータ崩壊を発生させるために用いる。G4OpticalPhysics は、シンチレーション光や Cherenkov 光の発生と可視光の輸送・吸収などを扱うための PhysicsList である。GEANT4 では可視光 (G4OpticalPhoton) とガンマ線 (G4Gamma) は別粒子として扱われており、反射や屈折などの光学的な振る舞いは可視光のみが対象となる。

G4OpticalPhysics には使用する物理過程をさらに詳細に指定する必要があり、以下の過程を指定している。各項目の具体的な実装例は付録 A に示す。

- G4Scintillation
- G4Cerenkov
- G4OpAbsorption

G4Scintillation

この過程では物質中のシンチレーション過程を記述する。発生するシンチレーション光はランダムな向きに直線偏光になっており、発生点から等方的に飛んでいく。このときの光のエネルギーは設定されたエネルギースペクトルを基に決定される。シンチレーション過程を扱うためには、発光体となる物質の物質情報に以下のパラメータを指定する。

- 発光スペクトル
- エネルギー損失に対する発光量 (シンチレーション効率)

- 発光減衰時間
- 発光上昇時間
- Birks 定数

ここで、Birks 定数とはエネルギー損失が大きいときのシンチレーション光の飽和を表す値で、エネルギー損失と発生光子数の関係は式 (5.1) のようになることが知られている [21]。

$$\frac{dN}{dx} = \frac{\mathcal{L} \frac{dE}{dx}}{1 + C_B \frac{dE}{dx}} \quad (5.1)$$

ここで C_B が Birks 定数、 \mathcal{L} はエネルギー損失が小さい時のシンチレーション効率である。Birks 定数は実験的に求められる値で実測に使用した BC-408 シンチレータの場合、その値は $0.015 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{MeV}} \right]$ である [22]。厚さ 2 mm の BC-408 シンチレータでは、MIP に対して平均でおよそ 4,000 個のシンチレーション光が発生する。

G4Cerenkov

荷電粒子が媒質中を飛ぶ時の Cherenkov 過程を記述する。Cherenkov 光は屈折率 n の物質中において、

$$\beta = \frac{v}{c} > \frac{1}{n} \quad (5.2)$$

のときに発生する。GEANT4 で Cherenkov 過程を扱うためには物質に屈折率を与えてやれば良い。

Cherenkov 光の発光量は

$$\frac{dN}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right) \quad (5.3)$$

によって与えられる [23]。屈折率が一定であるとするとき波長 λ_1 から λ_2 の範囲で

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \sin^2 \theta_c \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (5.4)$$

だけの Cherenkov 光が発生する。厚さ 2 mm のシンチレータの場合、MIP が PPD の感度波長域に対してつくる Cherenkov 光はおおよそ 90 個で、シンチレーション光の約 2% である。

G4OpAbsorption

誘電体中での光子のバルク吸収を記述する。物質に吸収長 λ を設定することでこの値が可視光の平均自由行程として使用され、各ステップごとの吸収確率が計算される。

5.1.3 PrimaryGeneratorAction

このクラスでは、各イベントの最初に発生させる初期粒子の定義を行う。粒子の種類・位置・方向・エネルギーを与えることで初期粒子が発生する。今回のシミュレーションでは、あらかじめ ^{90}Sr の崩壊で生じた電子のうち、コリメータを通過する電子のエネルギーと運動量ベクトルを別のシミュレーションで計算しておき、その値を初期値として使用した。ここで、コリメータを通過した直後のベータ線のエネルギー分布と天頂角分布は図 5.4 の様になっており、ある程度の広がりを持ってシンチレータに入射する。エネルギーの平均値は 627 keV、天頂角 $\cos \theta$ の平均値は 0.81 である。

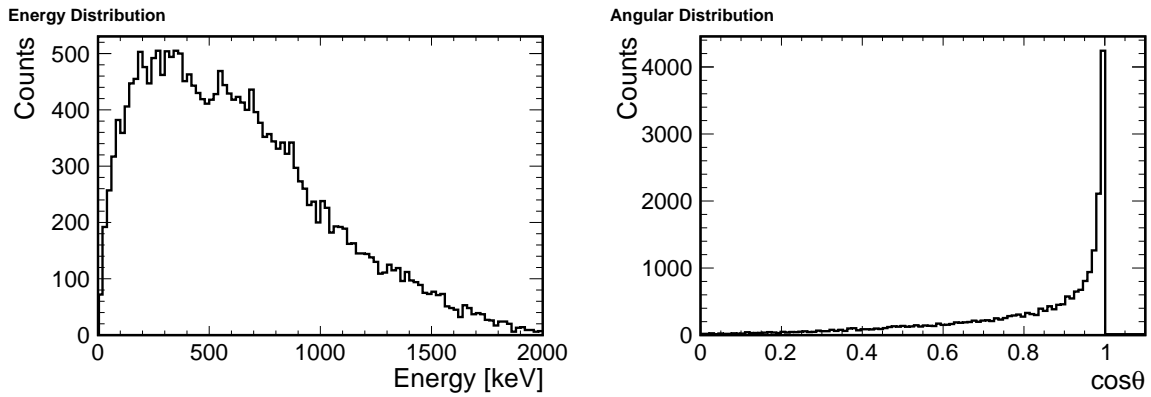


図 5.4: コリメータ通過直後のベータ線のエネルギー分布 (左) と天頂角分布 (右)

5.2 粒子追跡の流れ

シミュレーションにおける光子追跡の流れを図 5.5 に示す。

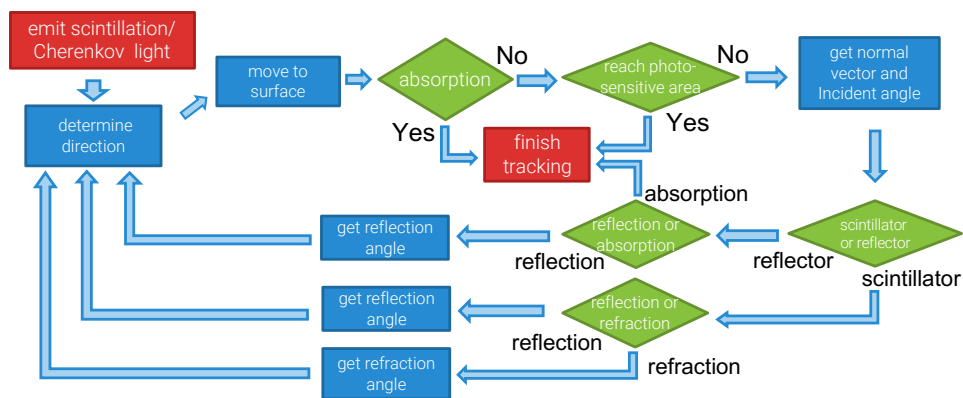


図 5.5: 光子追跡のフローチャート

各過程における動作は以下の通りである。

1. シンチレーション光 (Cherenkov 光) を発生させ、ランダムに移動方向を決定
2. 物質境界まで移動し、平均自由行程と移動距離からバルク吸収が起こるかを判定
3. 境界面の表面状態 (表面粗さ) から入射角と法線ベクトルを計算
4. 媒質の屈折率と入射角を基に (1) 反射、(2) 透過、(3) 吸収を決定
5. 反射角、屈折角の計算

以上の動作を光子が吸収されるか、PPD の受光領域に達するまで繰り返す。これらは、物質の境界条件を記述するクラス G4OpticalSurface に適切な情報を与えることで実行される。

5.2.1 物質境界条件の指定

異なる媒質間での光子の運動を決定するために必要な情報を G4OpticalSurface クラスによって設定する。境界条件の実装例は付録 A に示す。物質の境界条件を設定する方法は、(1) 物質の表面全体がある別の物質で覆われているとみなして境界条件を与える、(2) 2つの異なる物質が接触しているときの境界条件を与える、の 2つの方法がある。今回は全て (2) の方法で設定した。本シミュレーションで境界条件を設定すべきオブジェクトの組み合わせは、以下の通りである。

- シンチレータと空気層
- 空気層と反射材
- 空気層と PPD パッケージ
- PPD パッケージとシリコンセンサー部

境界条件には、境界を構成する物質が誘電体か導体を指定する必要がある。

- 誘電体から誘電体
シンチレータ ↔ 空気層、空気層 ↔ PPD パッケージでの光子の移動が該当する。誘電体から誘電体への光子の移動を指定するためには、G4OpticalSurface の SetType メソッドに dielectric-dielectric を指定する。このとき光子は境界面で反射または屈折する。反射と屈折のどちらが生じるかは境界面への入射角と媒質の屈折率によって Fresnel の式から決定される。
- 誘電体から導体
空気層 → 反射フィルム、PPD パッケージ → シリコンセンサーでの光子の移動が該当する。誘電体と金属などの導体との境界を表すためには G4OpticalSurface の SetType メソッドに dielectric-metal を指定する。このとき光子は境界で反射されるか吸収されるかのどちらかである。境界面に反射率 R_{ref} を与えることで、確率 R_{ref} で反射され、確率 $(1 - R_{ref})$ で吸収される。また、パラメータとして効率 ε を設定することで、吸収された光子のうちの ε の割合の光子を検出された光子として扱うことができるため、PPD のパッケージとシリコンセンサーの境界条件に効率を PDE として設定する。

5.2.2 媒質境界における光子の扱い

誘電体から導体への光子の移送で吸収が選ばれた場合、単に光子のトラッキングを終了する。誘電体から誘電体への光子の輸送で屈折が選択された場合は、光子は境界面を通過し、計算で求められた屈折角によって方向ベクトルが決定される。一方で反射が選択された場合はさらにいくつかの過程に分類される。GEANT4 においては誘電体から誘電体、誘電体から導体の場合共に、反射が生じる場合は以下の 4 種類の反射が起こりうる [24]。

- Specular spike reflection (SSR): 物質の平均表面での反射 (完全鏡面反射)
- Specular lobe reflection (SLR): 粗い物質表面での反射 (Oren-Nayar 反射)
- Back scatter spike reflection: 後方散乱
- Diffuse lobe reflection: 乱反射 (Lambert 反射)

これらの反射の内、どの反射がどの割合で生じるかはシミュレーション内部で計算することができないので、ユーザーが設定する必要がある。具体的には、0 から 1 の間の値をとる以下の 3 つの定数

- SPECULARSPIKECONSTANT (SSC): SSR の割合
- SPECULARLOBECONSTANT (SLC): SLR の割合
- BACKSCATTERCONSTANT (BSC): 後方散乱の割合

を AddProperty メソッドによって指定する。乱反射の割合については $(1 - SSC - SLC - BSC)$ によって与えられる。例えば $SSC=1, SLC=BSC=0$ とすれば完全鏡面反射 (SSR) のみが考慮される。

上で挙げた 4 つの反射は図 5.6 のような関係になっている。SSR は完全にフラットな面での Fresnel 反射を表すが、今回はすべての物質に微小な表面粗さがあるとして扱うため、SSR 過程は発生させない ($SSC=0$)。また後方散乱は、ファイバー中を伝搬する光が欠陥等によって逆方向へと反射される過程を再現するために通常使用される。今回のシミュレーションでは後方散乱は生じないものとした ($BSC=0$)。よって、本シミュレーションでは粗さを持つ面での Fresnel 反射 (SLR) が割合 SLC で発生し、乱反射が割合 $(1 - SLC)$ で発生するようになっている。なお、通常乱反射という言葉には粗い表面での反射も含まれるが、ここでいう乱反射は物質表面近傍での多重反射 (Lambert 反射) のみのことを表す。物質表面の粗さは図 5.6 におけるマイクロファセットとして与えられる。物質の平均表面とマイクロファセットのなす角を α としたときの、 α の標準偏差 σ_α を G4OpticalSurface に与えることで表面粗さが設定できる。

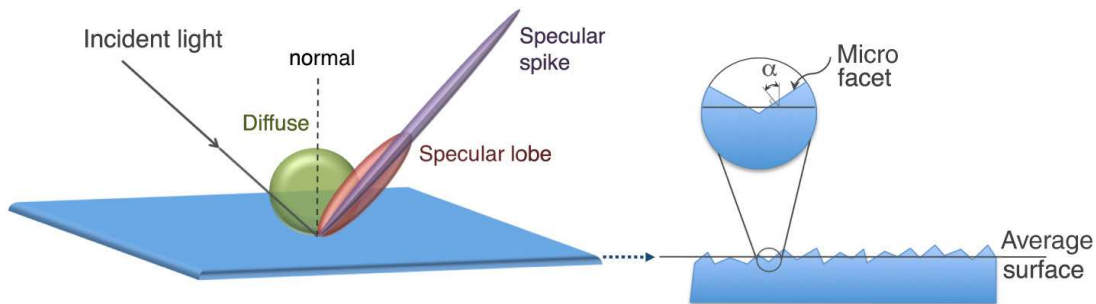


図 5.6: 表面における反射 [25]

5.3 シミュレーションパラメータと光量評価方法

シミュレーションに使用したジオメトリと光学特性のパラメータ一覧を表 5.1 に示す。正確な値の分かっているパラメータは実測と同じ値を使用し、反射材の反射率、シンチレータの屈折率・吸収長などのパラメータはデータシート上の値を使用する。ここで PDE と発光量に関しては、本来 PDE が約 20%、シンチレータの発光量が 10,000 photons/MeV であるが、今回は検出光量の平均値がシミュレーションによって分かれば良いため、個々の光子が PDE によって検出されるか否かは無視して PDE を 100%、発光量を 2,000 photons/MeV として計算時間を短縮することにした。PDE と発光量の積は元の値と変わらないので、シミュレーションでの検出光子数はそのまま光電子数 (p.e.) として扱うことができる。なお、Cherenkov 光についてもシンチレーション光同様に発生光子数を抑えてある。

シミュレーションにおける光量の算出方法は以下の通りである。ベータ線の入射位置一点につき検出光子計測シミュレーションを多数回を行い、図 5.7 のような光電子数のヒストグラムを作る。このヒストグラムを Landau 分布と Gauss 分布の畳み込み関数でフィットし、フィットパラメータの Landau 最頻値 (MPV) をシミュレーションにおける検出光量として評価する。

表 5.1: シミュレーションに使用するパラメータ

パラメータ名	設定値
シンチレータの大きさ	45 mm × 5 mm × 2 mm
dimple の深さ	0.8 mm
シンチレータの屈折率	1.58
シンチレータのバルク吸収長	380 cm
発光量	2000 photons/MeV
Specular Spike Constant (SSC)	0
Specular Lobe Constant (SLC)	0.1
Back Scatter Constant (BSC)	0
シンチレータの表面粗さ	0.1 rad
ESR film の反射率	98%
PPD の大きさ	2.425 mm × 1.9 mm × 0.85 mm
PPD 受光面サイズ	1 mm × 1 mm
PDE	100%
コリメータ深さ	3 mm
コリメータ直径	0.5 mm
トリガーシンチレータの大きさ	φ 4 mm, depth 2 mm

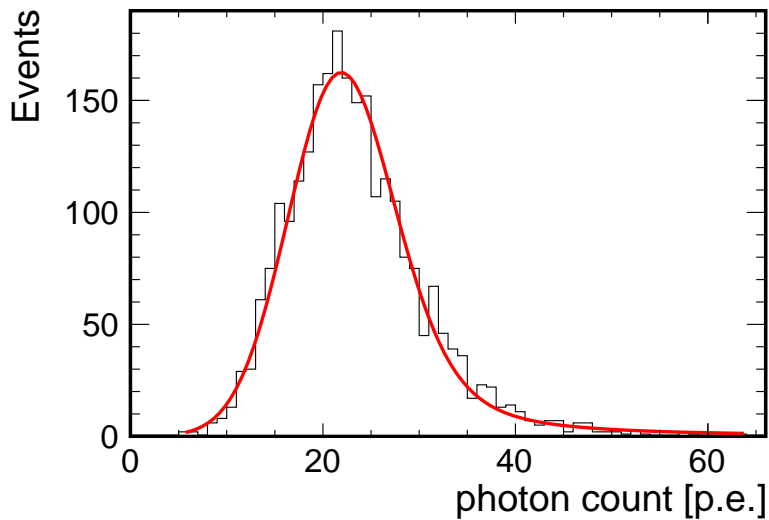


図 5.7: シミュレーションの光量分布フィット例。実測同様一つの入射位置に対して光量のヒストグラムを作り、それを赤線のように Landau 分布と Gauss 分布の畳み込み関数でフィットする。

5.4 シミュレーション結果

5.3 節のパラメータを使用した場合のシミュレーション結果と実測結果の比較を図 5.8 に示す。図の横軸はベータ線の入射位置、縦軸はフィットで求めた光電子数である。シミュレーション結果の傾向としては、全体の光量は実測より 1.5 倍程度高いものの、dimple の外側では外側に向かって光量が下がるという特徴は再現されている。しかし、dimple 内での光量の減少はシミュレーショ

ンの方が顕著であり、また PPD の受光面の真上に相当する 0 mm の入射位置においてその周りの点よりもわずかに光量が多いという結果になっている。この中心付近の振る舞いが正しいとすると形状の最適化の際には PPD の受光面の位置を工夫する必要が出てくる。実測の結果においてこの特徴は見えていなかったが、実測では中央付近でのデータ点の間隔が広いために丁度この傾向が見えていない可能性がある。これに関しては第 6 章で示すようにより細かいデータ取得を行い、このシミュレーション結果が正しいことが確認された。

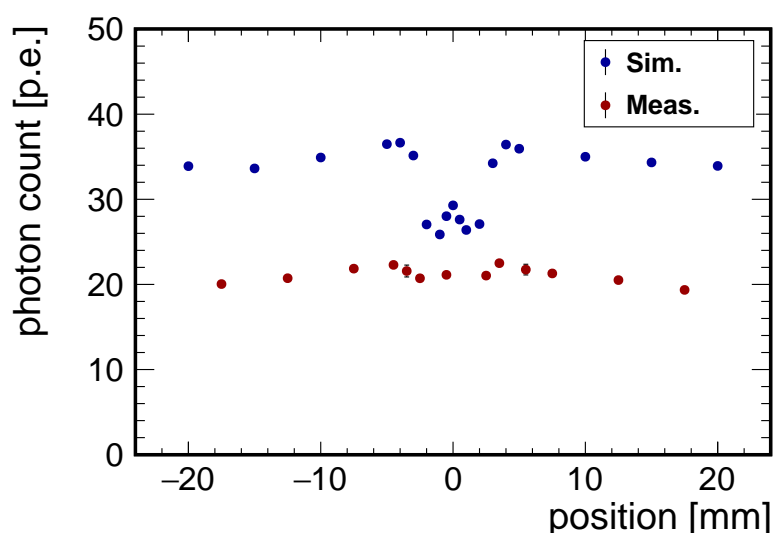


図 5.8: シミュレーションと実測の光量の比較。青がシミュレーション、赤が実測の結果を表す。

5.4.1 パラメータの影響

これまでシンチレータや反射フィルムの光学特性に関するパラメータはデータシートの値を使用してきたが、これらの値には波長依存性が入っていないため、シンチレーション光の波長によってはその値が大きく変化する可能性がある。また、シンチレータの発光量や吸収長などの特性はその製造過程によって変化し得る。例えば、反射フィルムの反射率とシンチレータのバルク吸収長を変化させた場合、図 5.9 のような結果を得ることができる。このシミュレーション結果は実測の結果とかなり良く一致しており、シミュレーションで実測の結果を再現可能であることが伺える。一方で、図 5.10 に示すような異なる値の組み合わせもまた実測の結果を良く再現しており、シミュレーションによって一意に正しい値を定めることはできない。

各パラメータがどの程度効くのかを調べるために、反射フィルムの反射率・シンチレータの吸収長・乱反射の割合 ($1 - \text{SLC}$) の値を変化させた時の光量の位置依存性をシミュレーションによって求めた。各パラメータごとの結果を図 5.11、5.12、5.13 に示す。これらの結果より、値のわずかな違いで光量と位置依存性が大きく変わってしまうこと、特に光量の大きさは反射率と吸収長に強く依存することが分かる。反射率については 1% 程度の違いで光量が半分近く減少している。このためシミュレーションと実測の結果を合わせるためには光学特性に関する詳細な検討が必要となる。

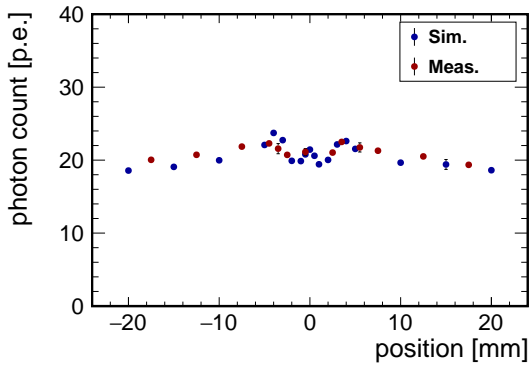


図 5.9: 反射率 95%, 吸収長 200 cm での光量。青がシミュレーション、赤が実測の結果を表す。

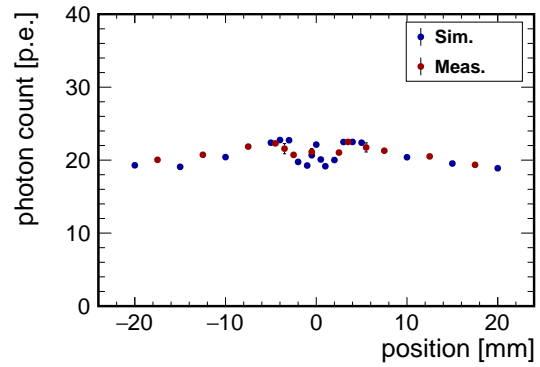


図 5.10: 反射率 96%, 吸収長 100 cm での光量。青がシミュレーション、赤が実測を表す。

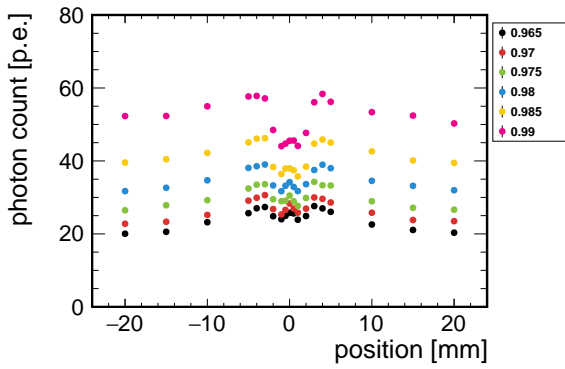


図 5.11: 反射率ごとの光量。各色は反射材の反射率を示す。

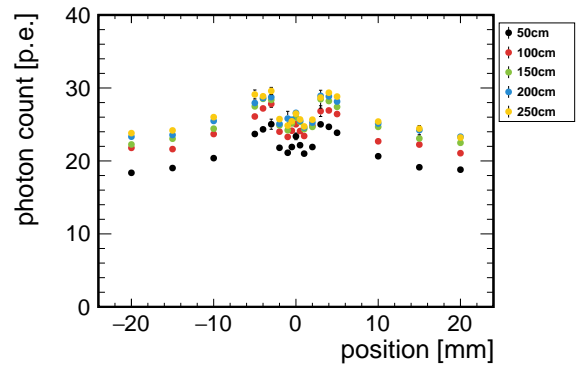


図 5.12: シンチレータの吸収長ごとの光量。各色はバルク吸収長を示す。

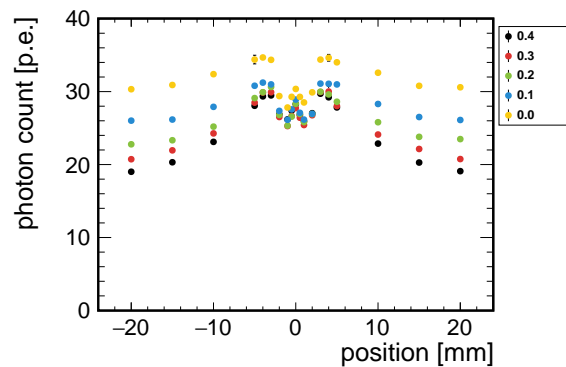


図 5.13: 乱反射の割合ごとの光量。各色はシンチレータ表面で起こる反射のうち、乱反射 (Lambert 反射) が起こる割合 ($1 - \text{SLC}$) を示す。

5.4.2 形状ごとの違い

dimple の形状

Dimple の形状に関する値を変化させたときの光量の違いをシミュレーションによって評価した。図 5.14 は、PPD パッケージ表面とシンチレータ表面の間の空気層の厚さを変化させたときの光量である。PPD の位置のみを変化させており、dimple 形状は全て同じである (深さを 0.85 mm として固定)。このとき全体の光量位置依存性はあまり変化せず、光量の大きさのみが距離が開くにつれて減少していくことが確認できる。

図 5.15 は dimple の深さを変えたときの光量を示す。ただし、dimple の最深部と開口面の形状は変化させず、深さのみを変えている。このとき dimple の外側領域での光量はほとんど変化せず、dimple が深くなる (シンチレータ部分が薄くなる) に従って dimple 内部での光量が減少していることが分かる。

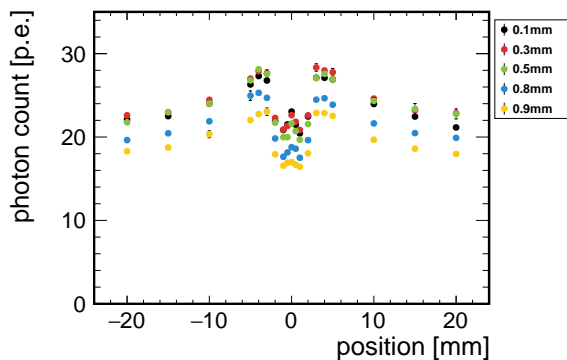


図 5.14: PPD パッケージとシンチレータ表面の距離ごとの光量。dimple 形状などの条件は全て同じである。

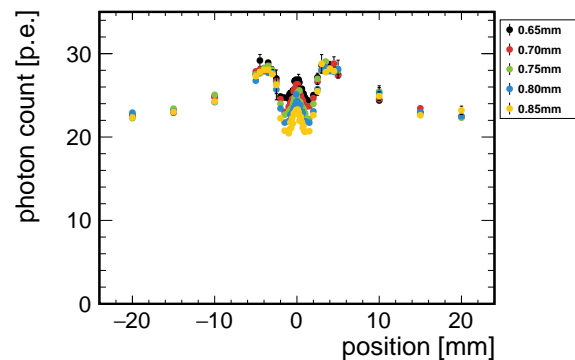


図 5.15: Dimple の深さごとの光量。dimple の底面と開口部の形状は全て同じで、dimple の深さのみが異なる。

反射フィルムとアルミ蒸着

反射材の反射率を同じにして空気層の有り・無しを変えたときの検出光量を図 5.16 に示す。空気層ありというのは反射フィルムを巻きつけた場合に相当し、空気層なしはシンチレータストリップ表面をアルミ蒸着でコーティングした場合に相当する。ただしアルミ蒸着の場合、図 5.3 のような形に反射材を加工することはできないため、このシミュレーションにおいては両方とも反射材は dimple 以外の部分のみを覆っている。このシミュレーションによって、空気層がある場合に比べて空気層がない場合の光量は 2/3 程度に減少するという結果が得られたが、これは空気層があることによってシンチレータ内の光子が全反射できるのに対し、空気層がないと反射材によって反射するしかないので、反射材の吸収による影響を受けやすいためである。よって、同程度の反射率の場合にはアルミ蒸着なども方法よりも反射フィルムの方が適していると言える。

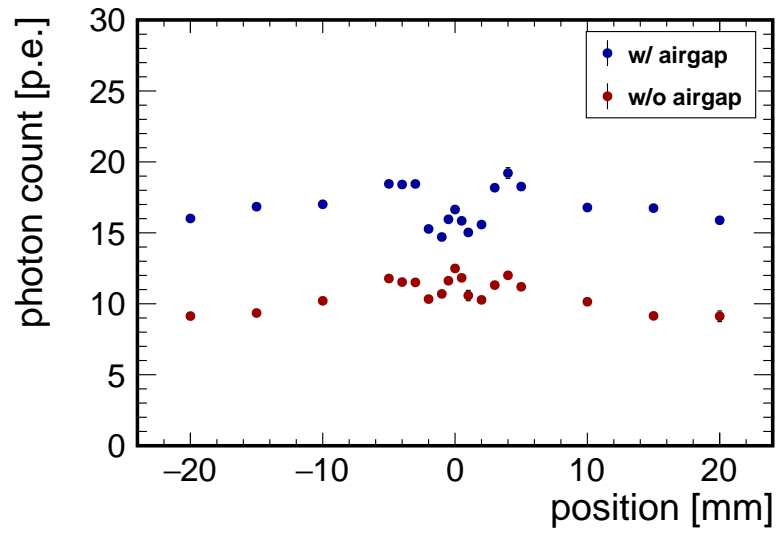


図 5.16: 空気層有り・無しでの光量。青が空気層有り (反射フィルム)、赤が空気層無し (アルミ蒸着) を表す。

第6章 2次元光量測定

シミュレーションと実測の比較によって、dimple readout では PPD の受光面の位置が重要になる可能性が浮上したが、第4章の測定ではこの傾向が見えなかった。また、シンチレータ全体での光量の一様性を主張するためには2次元での光量分布も調査する必要がある。そこで、新たに0.5 mm 間隔での光量測定と2次元での光量測定を行った。

6.1 光量測定環境のアップグレード

2次元測定を行うに当たって測定環境のアップグレードを行った。第5章の測定では手動でステージを動かしていたため、2次元測定に向けて新たに自動測定環境を整えた。ステージの制御にはシグマ光機製の2次元ステージ (OSMS20-85(XY)) と、ステージコントローラ (GSC-02: 図 6.1) を使用した。このコントローラは PC から RS232C インターフェイスによってシリアル通信でステージ移動を制御できるため、ステージ制御用のスクリプトと EASIROC モジュールの自動測定スクリプトを作成し、2次元の自動測定を行った。ステージコントローラ制御スクリプトの例は付録 B に示す。

新たに作成した光量測定環境を図 6.2 に示す。前回同様コリメータ・トリガーカウンタの位置は固定し、ステージによってシンチレータを動かす。コリメータは直径 0.5 mm、深さ 3 mm のものを使用し、コリメータ底面とシンチレータ表面の距離は 3 mm、シンチレータ底面とトリガーカウンタ表面の距離は 7 mm に設計した。PPD の読み出しには前回と同様に EASIROC モジュールを使用し、PPD とシンチレータ・反射フィルムは前回と同じ種類のものを使用した。PPD の位置は第4章と同様に dimple の中心に PPD の中心がくるように配置し、シンチレータストリップと垂直向きになっている。



図 6.1: シグマ光機製ステージコントローラ

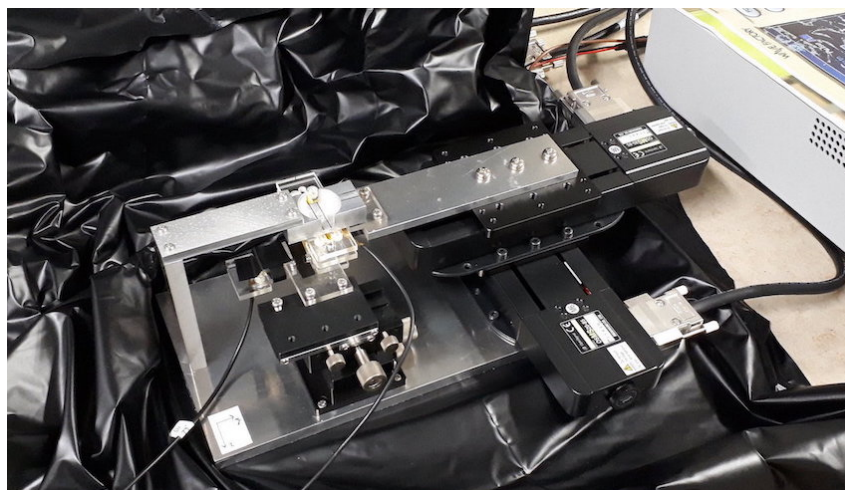


図 6.2: 自動計測用セットアップ

6.1.1 1次元測定

ベータ線の入射位置をシンチレータの短辺方向について中央で固定し、長辺方向について光量の位置依存性の測定を行った。特に中央付近については 0.5 mm の間隔でデータを取った。図 6.3 にその結果を示す。光量の平均値は 19 p.e. 程度で、前回の実測結果と同じように中央付近で光量が減少している。一方で前回と異なり入射位置が $-0.5\text{ mm} \sim +0.5\text{ mm}$ のときに光量はその外側よりも高くなっており、これはシミュレーションの示す結果と同じになっている。よってシミュレーションの結果は光量の絶対値を除いて実際の結果を十分再現できるといえる。光量の一様性改善を目指したシンチレータストリップの設計のためには、このことを考慮してPPDの受光面の位置とシンチレータの厚さを調整する必要がある。形状の最適化については第7章で述べる。

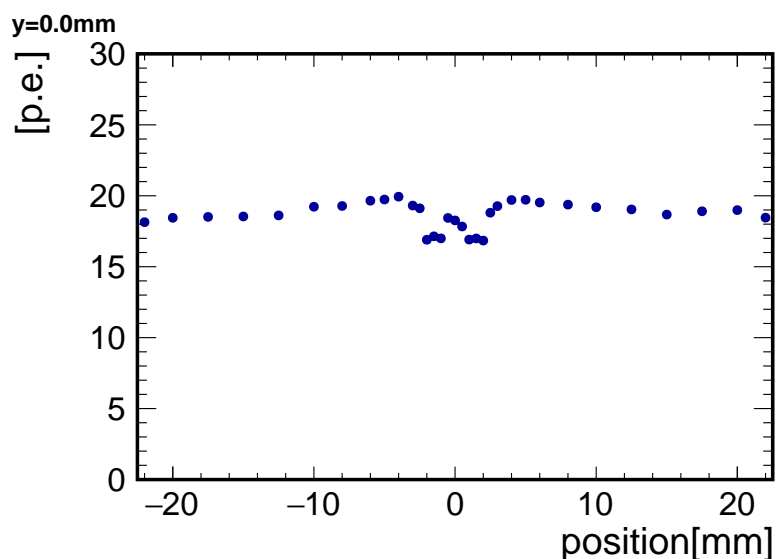


図 6.3: 1次元の光量測定結果。中央付近は 0.5 mm 間隔でデータを取得してある。

6.1.2 2次元測定

前節と同様の光量位置依存性測定を y 方向 (図 6.4 参照) の値を変えて行い、2次元の位置依存性を調べた。測定結果の光量の2次元ヒストグラムを図 6.5 に、図 6.6~6.10 には y 方向の各場所での光量の詳細を示す。全体の光量の平均値は 19.2 p.e.、最大値は 21.3 p.e.、最小値は 15.6 p.e. であり、標準偏差 1.04 である。図 6.5 の中央 ($x=0$ mm) を見てみると y 正方向に向かって光量が高くなっており、 $y=0$ mm, 1 mm で特に高くなっているのが分かるが、これは図 6.4 に示すようにちょうど PPD の受光面真上に相当する。このような結果になる理由としては、発生したシンチレーション光の内、一度も反射されることなく直接 PPD 受光面に到達できる光の割合が関係していると考えられる。つまり、 $y=0$ mm, 1 mm のときの $x=0$ mm の位置ではシンチレーション光の発生位置から見た PPD 受光面に対する立体角が大きいために、反射フィルムでの吸収やバルク吸収の影響を受けずに直接受光面に達する光の割合が $x=\pm 1.0$ mm の入射位置よりも多くなるためだと考えられる。

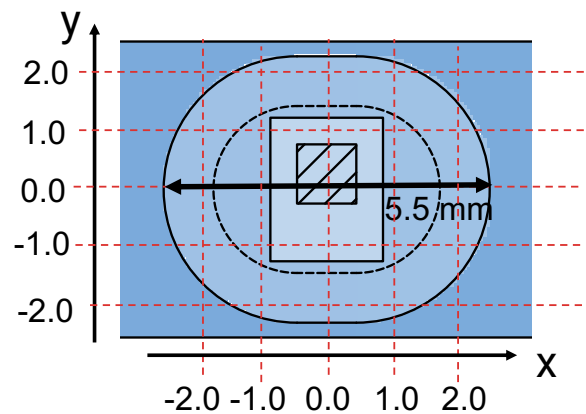


図 6.4: シンチレータの dimple まわりの俯瞰図

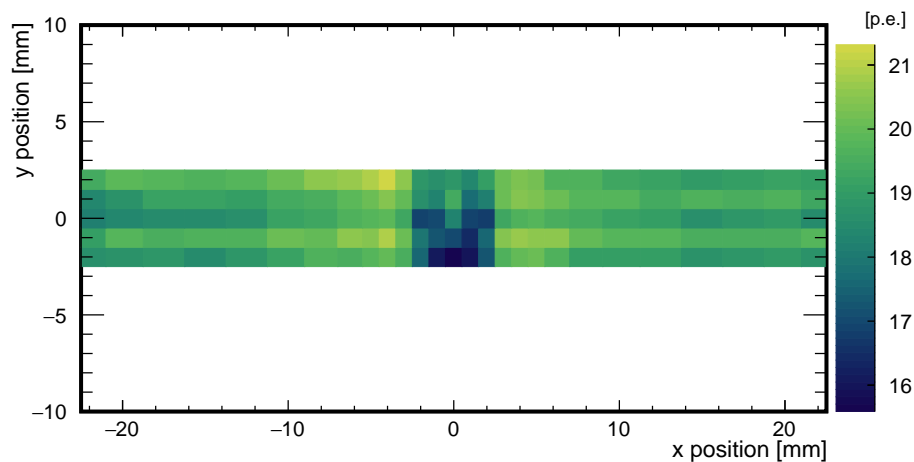
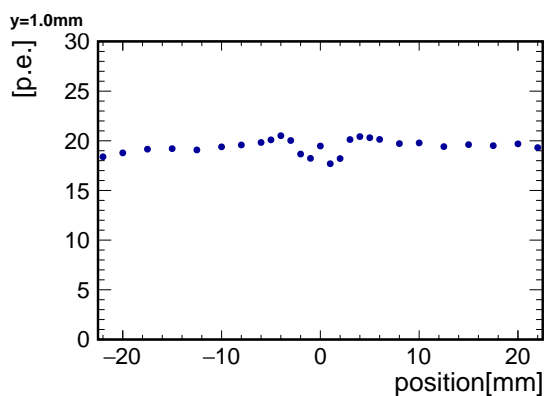
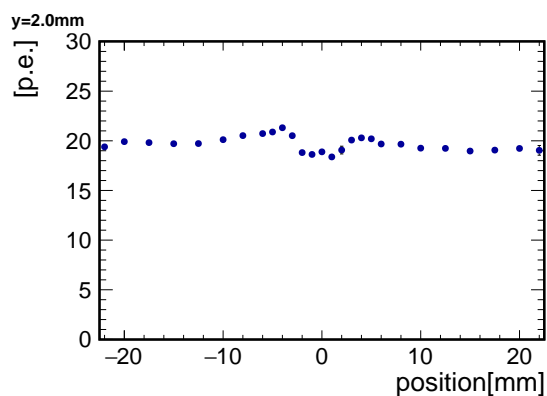


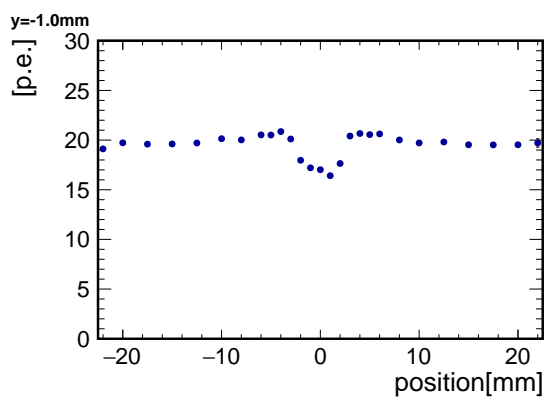
図 6.5: 2次元での光量測定結果。dimple 内部では全体的に光量が低いですが、PPD 受光面真上に相当する部分では光量が多くなっている。



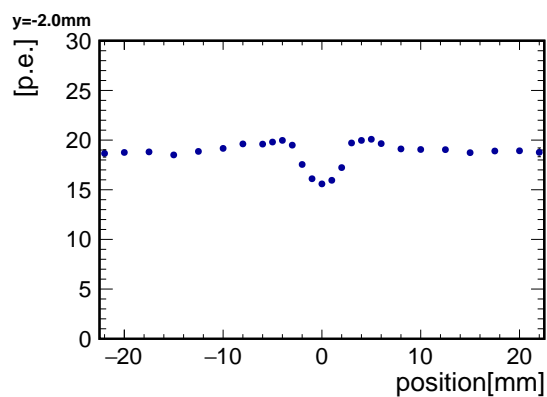
☒ 6.6: $y = 1.0$ mm



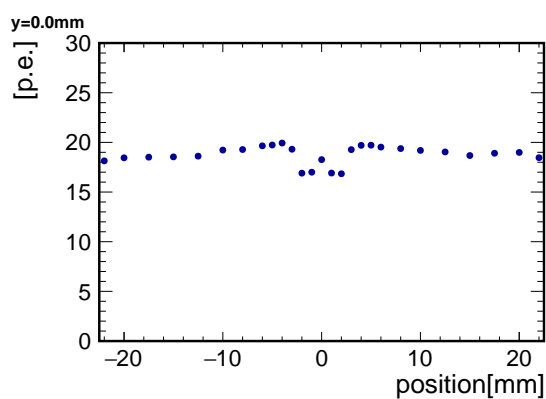
☒ 6.7: $y = 2.0$ mm



☒ 6.8: $y = -1.0$ mm



☒ 6.9: $y = -2.0$ mm



☒ 6.10: $y = 0.0$ mm

第7章 シンチレータストリップの最適化

これまでの測定とシミュレーションの比較によって、dimple readout には改善すべき点があると判明したが、実際にシミュレーションによる形状の開発を行うにあたっては実測結果を良く再現できるパラメータを決定すべきである。本章では光学的特性の検証によるシミュレーションパラメータの改善と、改良した位置依存性シミュレーションに基づく新形状の設計について述べる。また、位置依存性の電磁シャワーに対する影響も検証するために、シンチレータストリップとタングステンの吸収体を層状に配置して新たにカロリメータシミュレーションも行った。

7.1 光学的特性の検証

第5章で示した通り、シミュレーションに使用しているパラメータには波長依存性が入っておらず、データシート上の値をそのまま使用したのでは結果が一致しない。実測の結果を再現するためには各パラメータの値について詳しく検討する必要がある。シミュレーションの精度を向上させるために検証すべきパラメータは以下の通りである。

- 反射フィルム
 - 反射率
 - Fresnel 反射の割合 (乱反射の割合)
 - 表面粗さ
- シンチレータ
 - 屈折率
 - バルク吸収長
 - Fresnel 反射の割合 (乱反射の割合)
 - 表面粗さ

本来ならこれら全てについて測定による値の決定が望ましいが、本研究では都合上、検出光量の変化にさほど寄与しないパラメータである Fresnel 反射の割合・表面粗さについては詳しい検証はせずに先行研究 [15] の値を参考に設定した。

7.1.1 反射フィルム

GEANT4 シミュレーションの G4OpticalSurface の境界条件として dielectric-metal を指定した場合、その境界面での反射率を入力する方法は第5章で述べたように波長ごとの反射率を直接入力する方法に加え、物質の波長ごとの複素屈折率を入れる方法がある。複素屈折率を入れる場合、Fresnel の式によって角度ごとに異なる反射率が計算されるため、反射率を直接入力するよりもより実際に近い振る舞いを再現できる。

しかし今回使用している反射材の ESR フィルムは、屈折率の異なるポリエステル系樹脂を多層膜状に積層させた厚さ 65 μm のフィルムである。厚さ数 μm 以下の薄膜を多数重ねた構造になっている上に、各層のポリエステル樹脂は異方性屈折率をもつ構造になっているため測定による屈折率の推定は困難であり、シミュレーションに厳密に取り込むことはできない。そのため、ここでは単純に波長ごとの反射率として入力する。ESR フィルムの反射率の波長依存性については測定結果がいくつか報告されている [26]。その結果によると、反射率はおよそ 410 nm から 800 nm の波長範囲で平均 98% 程度の反射率を持っており、メーカー公称値から大きなずれは無い。しかし、このフィルムは紫外領域に対する吸収が強く 410 nm 以下の波長域では反射率が急激に低下する。BC-408 シンチレータの発光波長はこの範囲にも重なっているため、実効的な平均反射率は 98% よりも低下すると考えらえる。今回はすでに報告されている測定結果を基に図 7.1 のような波長ごとの反射率を設定した。

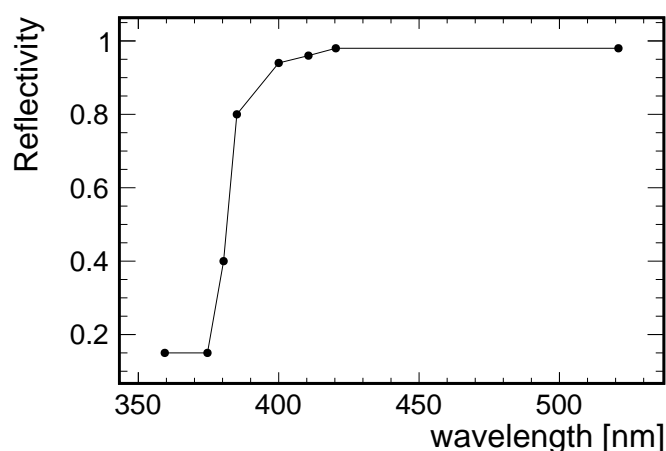


図 7.1: 反射率の波長依存性

7.1.2 シンチレータ

シミュレーションによると検出光量の平均値はおおよそ反射材の反射率とシンチレータの吸収長で決まる。シンチレータの吸収長についても波長ごとの値をシミュレーションパラメータに入力すべきであり、これは物質の厚さと透過率の関係から求めることができるが、空気とサンプルの境界面での反射による損失を除いた純粋な透過率の正確な測定は困難であるため、今回は波長に依存しない平均的な値をシミュレーションで使用するものとする。反射率は測定値を基に波長ごとの値を設定してあるため、シンチレータの吸収長については入力した反射率の下で検出光量の平均値がシミュレーションと実測で合うような値を設定する。また、屈折率は実測により波長ごとの値を求めた。

分光エリプソメータによる屈折率測定

分光エリプソメータ (図 7.2) は入射光と反射光の偏光状態の差を測定し、物質の屈折率や消失係数をフィッティングにより推定する測定器である。この装置を使用して BC-408 シンチレータの波長ごとの屈折率・消失係数を測定し、波長ごとの屈折率をシミュレーションに入力した。屈折率の測定結果を図 7.3 に示す。



図 7.2: 屈折率の測定に使用した分光エリプソメータ (M-2000DI-T, J.A.Woollam)

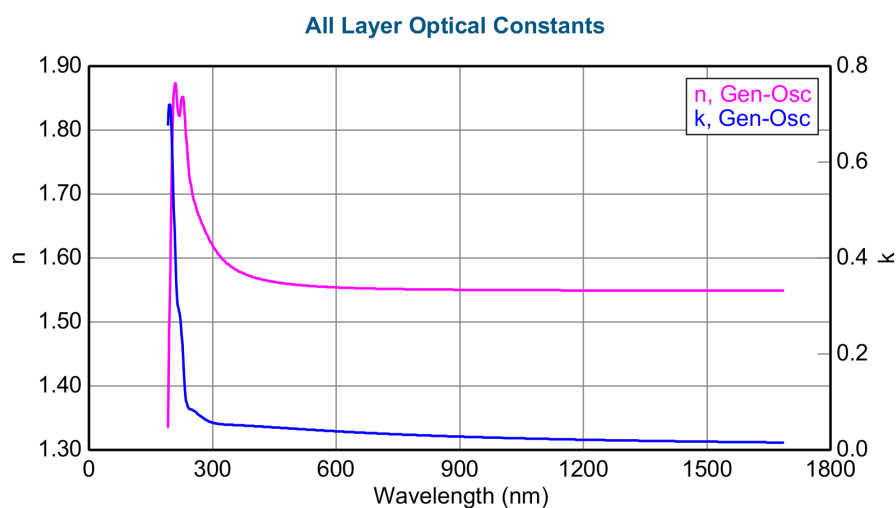


図 7.3: シンチレータの屈折率・消失係数の波長依存性測定結果

7.2 位置依存性改善を目指した新形状の開発

形状の最適化を行うためのシミュレーションで最終的に使用するパラメータを表 7.1 に示す。ただし、屈折率・反射率は図 7.1、7.3 に示した通りである。このときの光量の位置依存性シミュレーション結果は図 7.4、7.5 のようになっており、概ね測定結果と一致している。

表 7.1: 最適化に使用するシミュレーションパラメータ

パラメータ名	設定値
シンチレータの大きさ	45 mm × 5 mm × 2 mm
バルク吸収長	40 cm
発光量	2000 photons/MeV
シンチレータ表面の荒さ	5°
シンチレータ表面の Fresnel 反射の割合	95%
反射材表面の荒さ	5°
反射材表面の Fresnel 反射の割合	95%
PDE	100%

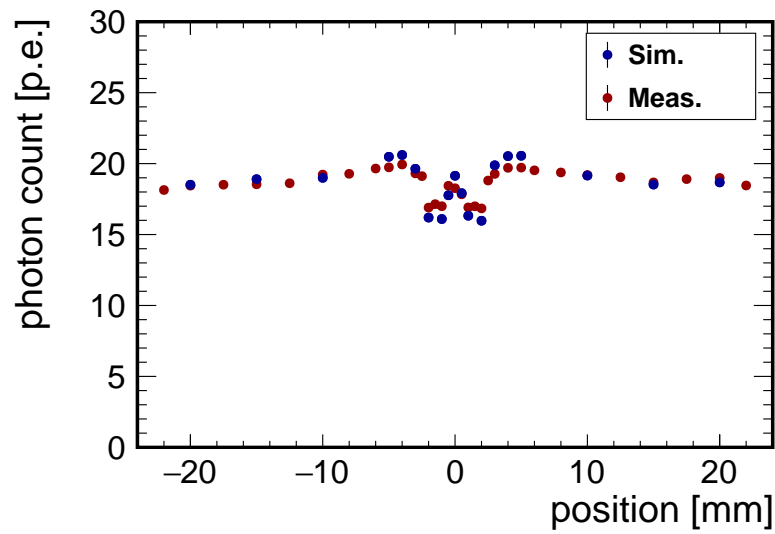


図 7.4: 最適化で使用するパラメータによる光量位置依存性

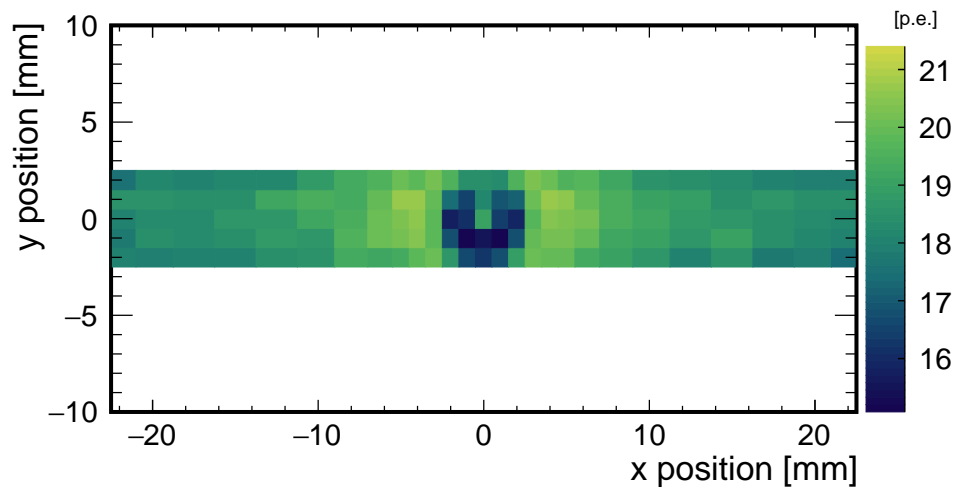


図 7.5: 最適化で使用するパラメータによる 2次元光量ヒストグラム (Simulation)

以上の結果を基に、位置依存性の良い最適なシンチレータ形状と読み出し方法について検討する。まず、PPDの取り付け位置はdimple readoutの様にシンチレータを削ってそこに入れ込む方法が良いと思われる。この方法では不感領域も無く、またbottom readoutの様に光量が低い問題もないため、カロリメータとしての設計、読み出し基盤の設計の両方の観点から見ても優れている。そこで、dimple readoutについて、dimpleの形状のみを変化させて最適化を行う。

ここで、これまでのシミュレーションと実測においてはカロリメータによって絞られたベータ線を使っていたが、このときのベータ線はある程度の広がりを持ってシンチレータに侵入しており、シミュレーションによればベータ線の広がりを完全に無くしたときの光量の位置依存性は図7.6に示す様な結果となる。実測の場合はベータ線がある程度の大きさで広がっていたことによって、あるいは斜めに入射していたことによって中央付近の光量が平均化されたものを見ていたことになる。中央で光量が高くなるのは反射せずに受光面に到達する光子が多いためである。つまり、現状のdimpleシンチレータのデザインはMIPなど貫通性が高くまっすぐカロリメータを通過する粒子に対しては都合が悪い。そこで、この点を考慮した上でシンチレータ形状の設計を行う。

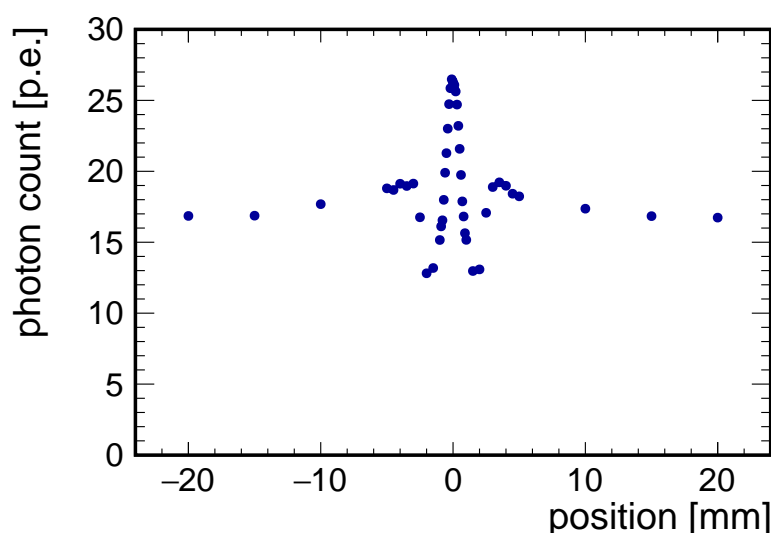


図 7.6: ベータ線の広がりを無くしたときの光量の位置依存性。中央で局所的な光量の増減が見られる。

7.2.1 シンチレータ形状の設計

図7.6の結果で見えている局所的な光量の増減を無くするためには、シンチレータをPPD受光面の真上で薄くし、その周りでは厚く設定することが良いと考えられる。また、第5章の図5.15で見た様にdimple自体の深さを変化させてもdimple外側での光量はほとんど変化しないため、dimpleの全体の深さをdimple内側の平均光量が増えるように変化させ、PPDの受光面のあたりに追加のくぼみを設けるようなシンチレータを設計する。但し、dimpleの深さは自由に設定できる訳でなくPPDの構造によって制限が付く。そもそもbottom readoutよりもdimple readoutで検出光量が多いのは、図7.7に示すようにPPDパッケージ側面からも光子が侵入できるためである。実際、シミュレーションによればdimple readoutで検出された光子のPPD受光面とのなす角は図7.8のような分布になっている。40°を境に2つのピークがあるが、これは全反射の臨界角に相当しており40°以上の入射角の光子はPPD側面から侵入していることを意味している。よっ

て、側面からも光子が入れる利点を活かすためには、dimple の深さは最低でも 0.3 mm 以上にする必要があると考えられる。

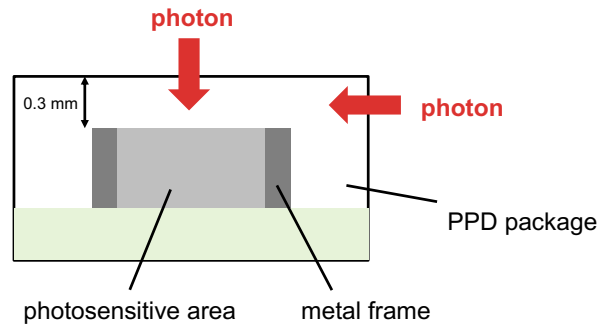


図 7.7: PPD 断面図。dimple readout では上からの光子に加え、パッケージ側面からの光子も検出される。

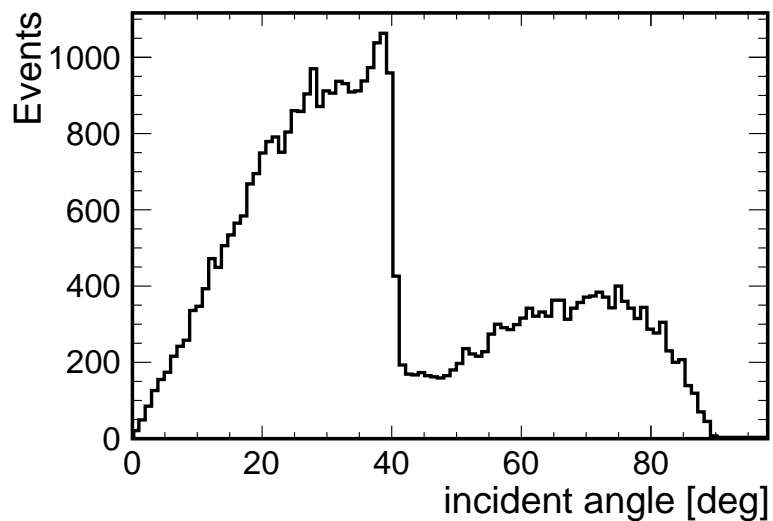


図 7.8: Dimple readout で検出された光子の PPD 受光面への入射角分布 (図はシミュレーションによるもの)。全反射臨界角 40° を境に 2 つのピークがある。

まず、dimple 内部での光量を増やすために、実測で使用した形状について dimple の深さを検討する。図 7.6 において、一番光量が低くなる点で 13 p.e. である。エネルギー損失は物質の厚さに比例するため、この点での光量を平均値 17 p.e. 程度まで上げるためには dimple 内部のシンチレータの厚さを 1.3 倍すれば良い。即ち dimple の深さを 0.45 mm に設定すれば良く、0.3 mm 以上という要求も満たしている。dimple の深さを 0.45 mm にしたときの光量は図 7.9 のようになる。

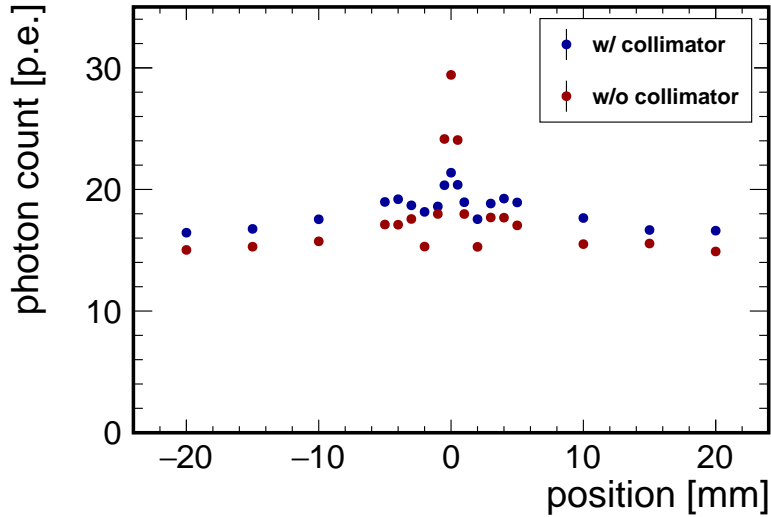


図 7.9: Dimple の深さが 0.45 mm のときの光量位置依存性。青がコリメータで広がったベータ線、赤が広がりのないベータ線による光量を表す。

続いて中央の光量を減らすために、中央付近の厚さを部分的に減らすことを検討する。光量が一番多い中央の位置では 27 p.e. であり、これを平均値まで下げるために中央での厚さを 0.63 倍してシンチレータの厚さが 0.75 mm になるよう設定する。ここではシンチレータの dimple がある面とは反対側に図 7.10 のような直方体の穴を開けることで中央での厚さを調整することにした。直方体の大きさは PPD 受光面にあわせて 1 mm 角とし、受光面真上にくるよう図の x 方向へずらして配置する。シンチレータの厚さは 2 mm、dimple の深さは 0.45 mm であるため、シンチレータ部分の厚さを 0.75 mm にするために直方体の深さは 0.8 mm に設定した。このときの光量位置依存性は図 7.11 のようになっている。シンチレータの厚さを調整することで入射粒子が広がりを持たない場合でもおおよそ一定の光量が得られることが確認でき、透過性の高い粒子に対しても光量一様性が良い形状が設計できていると言える。

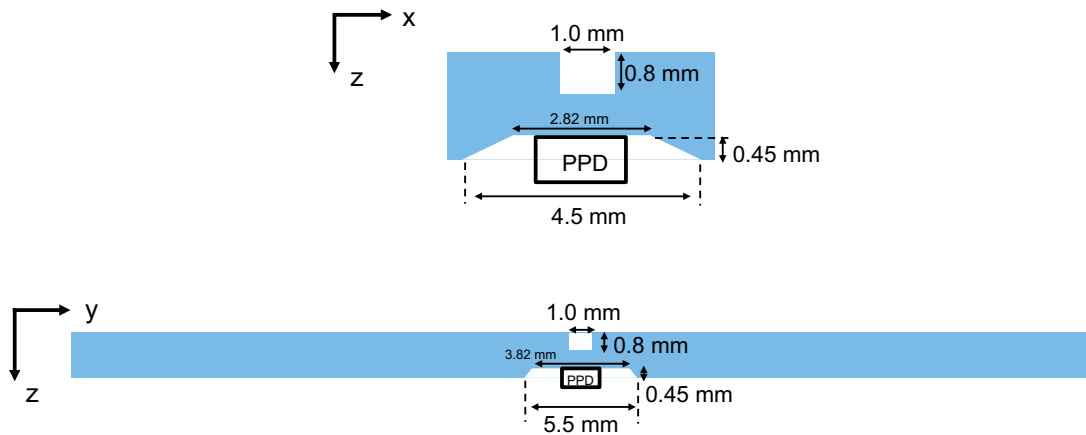


図 7.10: Dimple の反対側に新しいくぼみを設けたシンチレータ。直方体のくぼみは PPD 受光面の真上にくるよう配置されている。

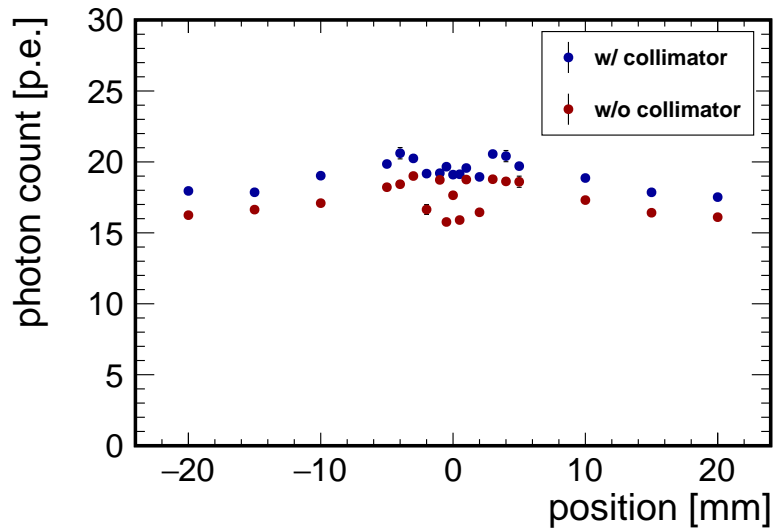


図 7.11: 追加のくぼみがあるときの光量位置依存性。青がコリメータで広がったベータ線、赤が広がりのないベータ線による光量を表す。

7.2.2 シンチレータストリップの量産に向けて

前節で光量の一様性に優れるシンチレータストリップ形状について検討したが、現状は大量生産性については考慮しておらず、今後は量産性も考慮した設計が必要である。シンチレータの大量生産には、製造コストを抑えるために射出成形による加工が適しているが、今回実測でテストしたシンチレータは発光量に優れるキャスト成形によって製造されており、射出成形シンチレータでは平均光量が減少することが危惧される。平均検出光量を上げる方法は、以下のようなものが考えられる。

- 使用するシンチレータ・反射材の種類を変える
 実測で使用した反射材の ESR フィルムは可視光で平均反射率 98% を持っており、この反射率を上回る反射材を使用すればさらに検出光量を増やせるが、現在のところ商用に販売されている反射材でこれを上回るような製品は無いようである。また、アルミ蒸着による方法は空気層が無いことによって光量が減少するため適していない。シンチレータについては、製品ごとの発光量の違いはほとんどなく概ね 10,000 photons/MeV である。一方、発光スペクトルは様々であり ESR フィルムの反射率が低下する 410 nm よりも長い波長の光を発するシンチレータを使用すれば光量が多少改善される可能性はある。
- 光学グリッドを使用する
 シンチレータの dimple 部分と PPD パッケージ表面との間には、わずかながら薄い空気層ができてしまうため、反射を抑えるためにこの間を屈折率の近い光学グリッドで満たすことによって検出光量が増加すると考えられる。一般に光学グリッドは高価であるため、どの程度光量の改善が見込めるのか費用対効果を検証する必要がある。

7.3 カロリメータとしての位置依存性の評価

これまでシンチレータストリップの各種読み出し手法について、個々のシンチレータの検出光量一様性について議論してきたが、実際のカロリメータではシンチレータストリップから成る層に複数の粒子がシャワーとして広がっていくため、シンチレータの形状ごとの優劣を判定するためには実際に電磁シャワーを発生させたときのカロリメータとしての位置依存性も考慮すべきである。そこで、光量測定のために作成した光子計数シミュレーションを拡張して、カロリメータ中で検出される全光子数を評価するシミュレーションを行うこととした。

7.3.1 シミュレーションの概要

光量位置依存性測定シミュレーションで作成したシンチレータストリップを図 7.12 のように 81 個並列に並べて検出層を作り、この層とタングステンの吸収層を重ねてカロリメータを形成する。そこに電子ビームを入射してエネルギーを全て吸収させたときの、PPD で検出される全光子数の分布をビームの入射位置を様々に変化させて計測する。実際に作成したカロリメータの 1 つの層は図 7.13 の様な構成になっており、灰色が厚さ 3 mm のタングステン層、水色がシンチレータストリップ層で緑色が厚さ 1.2 mm の読み出し基盤層である。これを図 7.14 のように全部で 30 層並べて ECAL を形成する。但し、前後の層でシンチレータストリップの向きが直交するように 90 度回転させながら交互に配置する。

ここで、カロリメータ全体の Moliere 半径 R_M は、

$$\frac{1}{R_M} = \sum_i \frac{w_i}{R_M^i} \quad (7.1)$$

の様に各層の Moliere 半径 R_M^i と質量比 w_i から求められる。タングステンは $R_M = 0.9327$ cm, 密度 $\rho = 19.3$ g/cm³、プラスチックシンチレータ (ポリビニルトルエン) は $R_M = 9.586$ cm, $\rho = 1.032$ g/cm³、基盤層 (PCB) は $R_M = 6.3$ cm, $\rho = 1.86$ g/cm³ であるので [27]、全体として $R_M = 0.99$ cm になる。ECAL 層の 1 辺の長さは 13.5 cm であり、Moliere 半径よりも十分長くとってある。

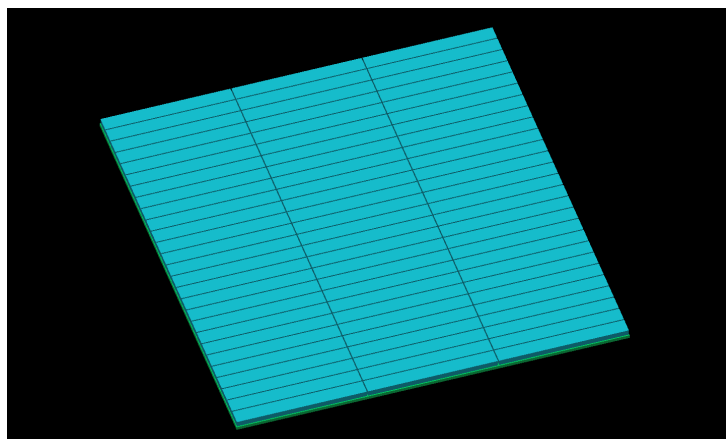


図 7.12: シンチレータ層。正形状に配置された 3 × 27 個のシンチレータストリップから構成される。

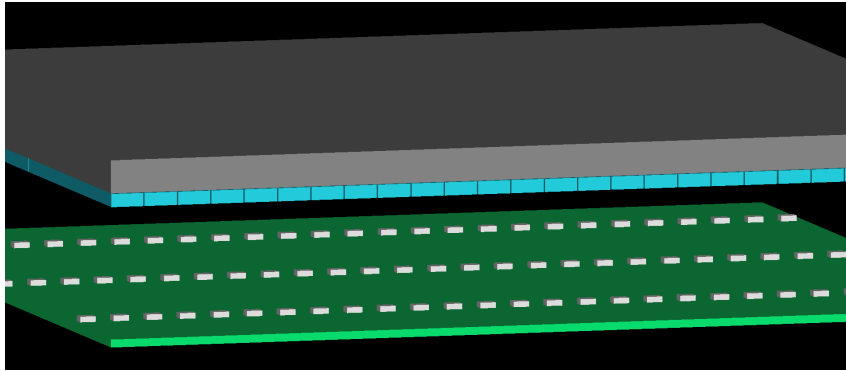


図 7.13: ScECAL の1つの層。シンチレータ層がタングステン (グレー) と読み出し基盤 (緑) で挟まれる。

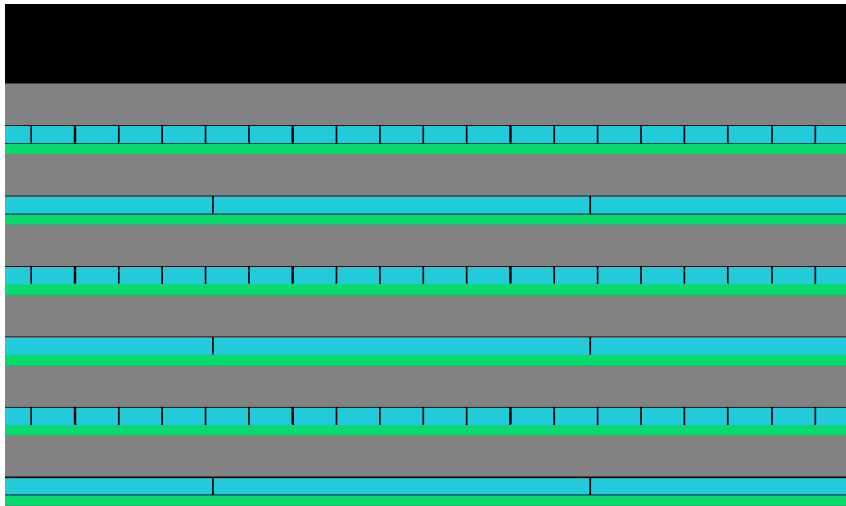


図 7.14: ScECAL 層を並べた様子。シンチレータ層は前後で直行するように配置されている。

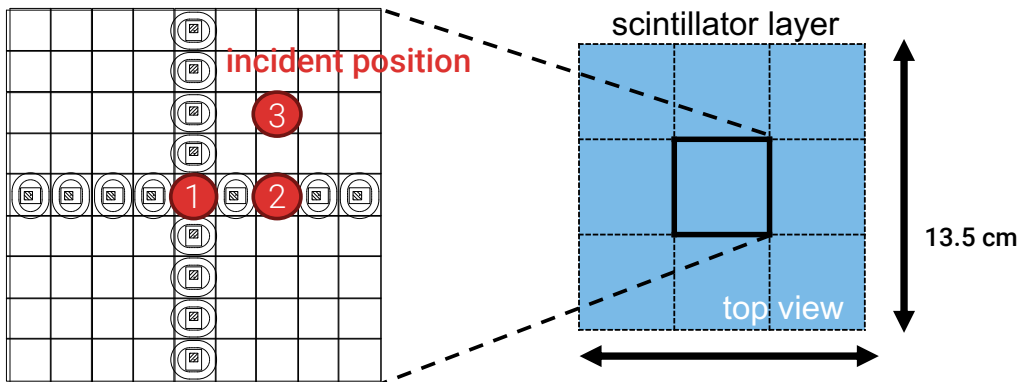


図 7.15: ECAL への電子の入射位置。全ての層で dimple を通る位置、奇数層で dimple を通る位置、dimple を通らない位置にそれぞれ電子を入射する。

シミュレーション上に実装した 30 層のシンチレータカロリメータに対して、図 7.15 に示す位置に電子を入射し、エネルギーを全吸収させたときの全検出光量を求める。ここで、各入射位置は次のようになっている。

1. center: 上から見たときに全ての dimple が重なる位置。
2. side: 中央から 1 mm 横にずれた位置。奇数番の層で dimple を通過する。
3. corner: 中央から横に 1 mm、縦に 1 mm ずれた位置。dimple を通過しない。

入射する電子のエネルギーはそれぞれの位置につき、1 GeV, 2 GeV, 3 GeV と変化させる。

シミュレーション対象のシンチレータとしては、実測で使用した dimple 形状のシンチレータ (図 7.4) と、意図的に一様性が悪くなるように設計した箱型 dimple シンチレータを使用する。この箱型 dimple は PPD がちょうど収まるサイズの直方体形状で、図 7.16 のような光量一様性を持っており、中央で特に光量が多く検出されるようになっている。この 2 つの形状に関して、電磁シャワーに対する位置ごとの検出光量の差が見えるのかをシミュレーションによって確認する。

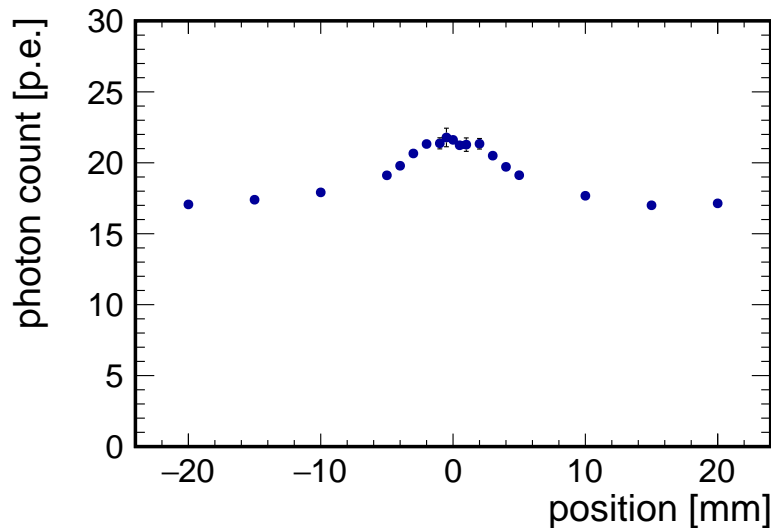


図 7.16: 箱型 dimple シンチレータの光量一様性

7.3.2 シミュレーションの結果

実測の dimple 形状でのシミュレーション結果を図 7.17、7.18 に、箱型 dimple のシミュレーション結果を図 7.19、7.20 に示す。図 7.17、7.19 は各エネルギー・入射位置における全検出光子数のヒストグラムを、図 7.18、7.20 は各入射位置について、電子のエネルギーに対する平均全検出光子数の線形性プロットを表している。これらの図から明らかなように、一様性の比較的良好な実測と同じ形状の dimple シンチレータでは入射位置ごとの全検出光量のずれが小さいのに対し、一様性の悪い箱型 dimple ではエネルギーを増やすと入射位置ごとの光量のずれが顕著になっている。このことからシンチレータストリップ単体の一様性の違いは電磁シャワーに対しても見えていることが確認でき、光量の一様性は電磁カロリメータそのものの性能に影響することが分かる。

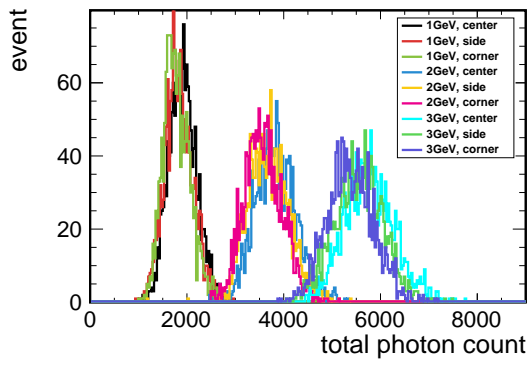


図 7.17: 実測で使した dimple 形状におけるエネルギーごとの全検出光子数

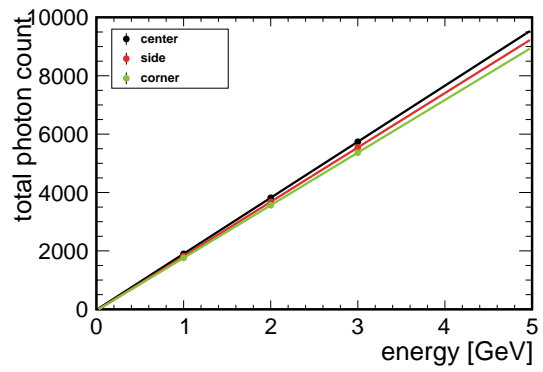


図 7.18: 実測で使した dimple 形状における入射位置ごとの全検出光子線形性

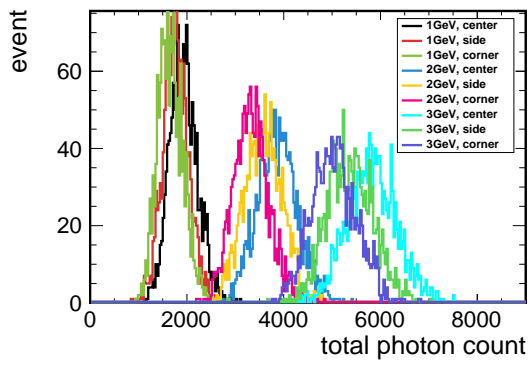


図 7.19: 箱型 dimple におけるエネルギーごとの全検出光子数

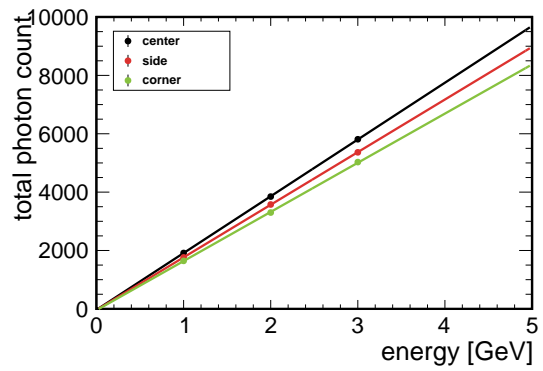


図 7.20: 箱型 dimple における入射位置ごとの全検出光子線形性

第8章 TCADシミュレータを用いた新型PPD の設計

ScECALの性能を改善するためには、シンチレータストリップの性能を向上させるアプローチと、PPDの性能を改善する2つのアプローチがある。PPDで改善すべき点は増倍率を一桁程度向上させることであり、これが可能になればアンプの省略による低消費電力化や、ノイズの影響の低減、さらにはよりピクセルピッチの小さいPPDを開発できるなどの利点がある。本章ではPPDの増倍率の向上を目指して行っている、TCADデバイス・プロセスシミュレータのHyENEXSSを用いた新しいPPDの設計についてまとめる。

8.1 Technology CAD (TCAD)

半導体デバイスを新規に作成する場合、通常は設計から完成まで半年以上の期間を要し、また数百万円以上のコストがかかるため、実機を大量に試作するといった設計方法は困難である。一方でシミュレータによる設計では、製造プロセスの微調整、デバイス動作の確認などが短時間・低コストで可能である。TCADとは、半導体デバイスの開発を目的としたシミュレータの総称であり、製造工程を扱うプロセスシミュレータとデバイスの応答を扱うデバイスシミュレータからなる。TCADは新しいデバイスの性能予測、デバイス内物理現象の解析、特性のばらつきの影響調査、デバイスの最適化などにも用いられている。本研究では、日本国内で開発された3次元のTCADであるHyENEXSS ver.8.5K¹を使用した。

8.1.1 プロセスシミュレーション

通常、半導体製造過程においてはシリコンウェハをデバイスに加工するまでに(1)フロントエンドプロセス、(2)配線付加などのバックエンドプロセス、(3)シリコンウェハから素子を分離するダイシング、(4)パッケージングの工程が行われる。このうちデバイスの特性を決定するのは(1)のフロントエンドプロセスであり、プロセスシミュレータで扱うのもこの工程である。フロントエンドプロセスの詳細は以下の通りである。

- 酸化
シリコンウェハ上に酸化膜の薄膜を生成する。
- デポジット
パターンの形成に必要な材質を堆積させる。
- リソグラフィ
エッチング前に加工したくない部分をフォトマスクで覆う。

¹HyENEXSS ver.8.5KはKIOXIA株式会社により開発され、TCADアカデミック委員会によってライセンス管理・配布されており、学術目的での無償利用が可能である。(2020年1月現在)

- エッチング
不要なパターン・絶縁膜部分を削る。エッチングの方法は、加速イオンによるエッチングと薬液によるエッチングがある。
- イオン注入
イオンビームを使用して不純物を注入する。
- アニーリング
炉で加熱することで不純物濃度を拡散させる。

8.1.2 デバイスシミュレーション

デバイスシミュレーションでは、プロセスシミュレーションで得たデバイス構造を基に電気的特性を計算する。デバイスシミュレーションでは以下の方程式を連立して解き、時間発展を順次追っていく。

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla \psi + q(p - n + N_D - N_A) = 0 \quad (8.1)$$

$$q \frac{\partial n}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{J}_n - qG + qR = 0 \quad (8.2)$$

$$q \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_p - qG + qR = 0 \quad (8.3)$$

式 (8.1) は Poisson 方程式、式 (8.2)・(8.3) はそれぞれ電子・正孔の電流連続の式である。ここで、 $\varepsilon, \psi, q, N_D, N_A, G, R$ はそれぞれ誘電率・電位・電気素量・ドナーイオン濃度・アクセプタイオン濃度・電子-正孔対発生レート・電子-正孔対再結合レートであり、 $n(p), \mathbf{J}_n(\mathbf{J}_p)$ はそれぞれ電子(正孔)の濃度・電流密度である。

8.2 TCAD による PPD 動作の再現

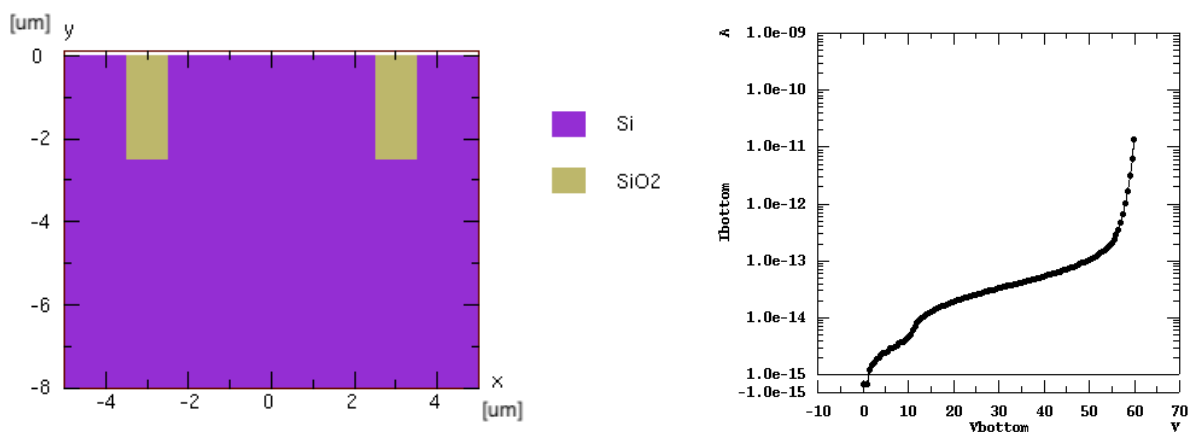


図 8.1: TCAD で作成した PPD ピクセルの構造 (左) と I-V 曲線 (右)。ピクセルサイズは $10 \mu\text{m}$ であり、降伏電圧が 60 V 付近となっている。

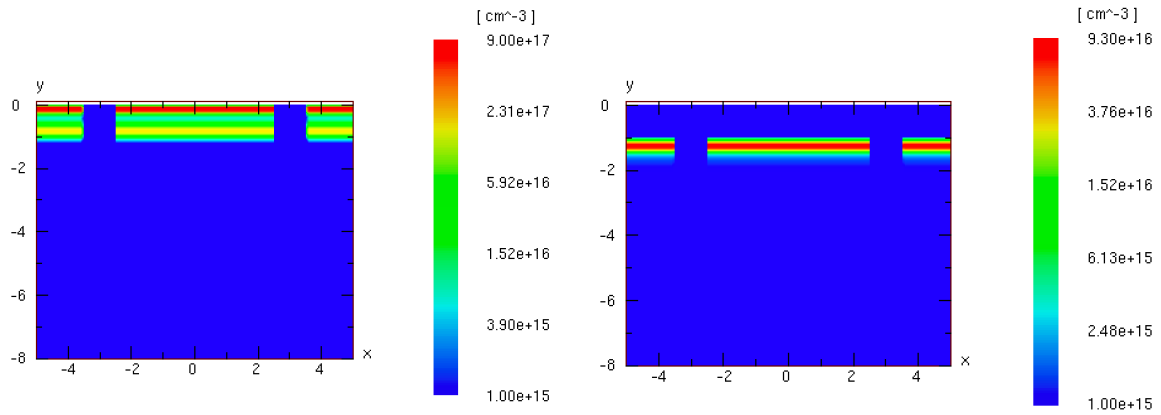


図 8.2: TCAD で作成したピクセル内部のボロン濃度 (左) とリン濃度 (右)

HyENEXSS を用いて図 8.1 左のような PPD の 1 ピクセル ($10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$) を作成し、PPD の増幅機構を再現するために過渡解析を行った。このピクセルは図 8.1 右の I-V 曲線が示すように降伏電圧が 60 V 程度である。不純物濃度のプロファイルは、先行研究 [28] で使用されたものを参考に設定しており、図 8.2 のようになっている。各逆バイアス時における、初期キャリア数ごとの出力電流の時間変化を図 8.3, 8.4 に示す。この初期キャリア数は PPD ピクセルで吸収された光子の数に相当する。降伏電圧以下の $V_R = 55 \text{ V}$ では、キャリア数に比例した電荷量が得られており、APD としての振る舞いが再現できていることが確認できる。また、降伏電圧以上の $V_R = 60 \text{ V}$ ではキャリアの数を変化させたときの電流波形が完全に重なっており、これは先行研究で再現できていなかった PPD のガイガー増幅を再現できていると思われる。

しかし、本来ならクエンチング抵抗によって時間の経過と共に電流が 0 に収束するはずだが、一度下がった電流が下がりきらずに一定の電流値が流れてしまっている。この現象は先行研究 [28] でも確認されており、増幅が収束しない理由としては、シミュレータで計算されているのはキャリアの密度であるため計算過程においてキャリア数が 1 電子以下の状態をとることができ、この 1 電子以下のキャリアが延々と増幅されてしまうためであると考えられている。

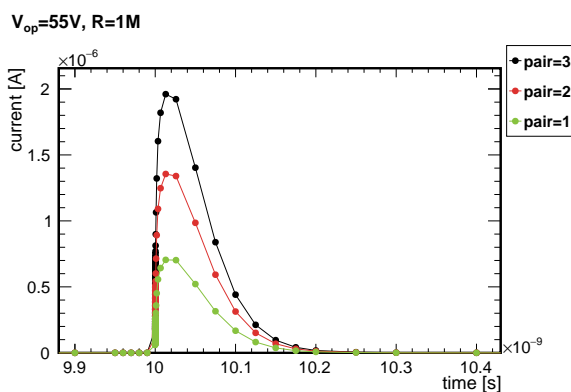


図 8.3: $V_R = 55 \text{ V}$, $R_q = 1 \text{ M}\Omega$ における出力端子間電流の時間変化

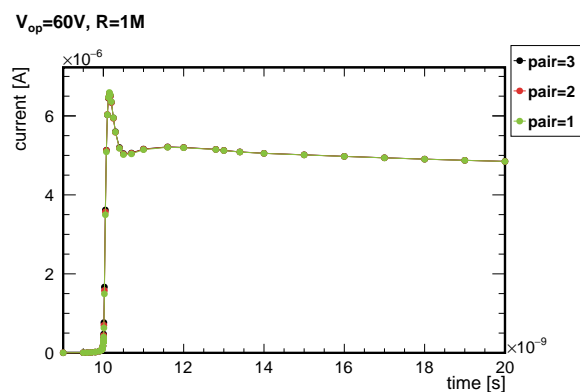


図 8.4: $V_R = 60 \text{ V}$, $R_q = 1 \text{ M}\Omega$ における出力端子間電流の時間変化

8.3 PPDの完全再現に向けて

TCAD上で初期キャリアの数に依らない増幅過程までは再現することができたが、クエンチングによる増幅過程の収束までは未だ再現できていない。この状態では増倍率を計算することができないので、増倍率の良いPPDを設計するためのツールとしては不十分である。そのため今後はクエンチング機構がTCADで再現できるようにすることを目指す。

増幅が収束しないのは1電子以下になってもキャリアが消失しないためであり、キャリア数を離散化できれば自然に増幅が収束するはずである。シミュレーションでこのキャリアの離散化を実装する方法として、以下の3つが考えられる。

1. Monte Carlo法により電子・正孔を完全に離散化して扱う
2. 計算の途中で電荷濃度を積分し電荷量を算出、1電子以下になったら計算を止める
3. ある計算領域における濃度と体積から電子数の期待値を求め、Poisson統計で乱数を生成し整数個の電子をつくる(図8.5)

1については最も正確なシミュレーションが可能であるが、3次元でのシミュレーションを想定しているため計算時間が膨大になってしまう問題がある。一方、2や3の方法では比較的簡単に既存のシミュレータにモデルを導入することが可能であり、特に3の方法だとキャリア数の期待値が小さくなれば自然にキャリアが消滅し、増幅が止まってくれるはずである。また乱数を振ることによって計算領域の体積依存性を吸収でき、さらにはPPDのノイズもPoisson分布の期待値として組み込めるという利点がある。そこで3の方法を用いることとする。このモデルをシミュレーションに組み込むためには、計算ステップ毎に式(8.1), (8.2), (8.3)の n, p に乱数で生成した整数個のキャリアの電荷から計算した濃度を代入するよう指定すれば良い²。このモデルの実装は現在未完成なので引き続き実装を行っていく。

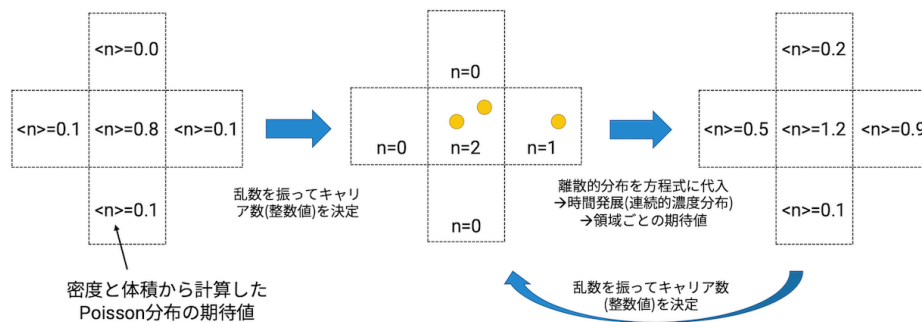


図 8.5: キャリアの離散化方法。時間発展方程式を解くことによる連続的濃度の計算と Poisson 統計による離散化を繰り返す。

²HyENEXSS ver.8 より、User Defined Model(UDM) と呼ばれる機能が実装され、ユーザーがデバイスシミュレーションに物理モデルを追加することが可能となった。

第9章 結論

9.1 本研究のまとめ

本研究では、将来のヒッグスファクトリー実験に向けたシンチレータ電磁カロリメータの性能向上を目指して、シンチレータストリップと PPD の両方に関する開発を実測・シミュレーションを通して行ってきた。シンチレータストリップにはサンプリングカロリメータとしての性能を損なわないために十分な光量が粒子の入射位置に依らずに検出できることが求められているが、従来の方法では一様性・検出光量の大きさに問題があるためこの点の改善を行った。まず、新しく提案された dimple readout シンチレータの検出光量に関して 1 次元・2 次元で位置依存性を測定した。この測定によって dimple readout では十分な光量が得られることが判明した一方で、dimple の形状には改善の余地があるため、シミュレーションによる形状の最適化を行った。まずはシミュレーションの結果が実測を再現できるのか確かめるために、光量の位置依存性を実測結果と比較した。その結果シミュレーションで実測の結果が再現できることが確認でき、さらには光学的特性、特に使用する反射フィルムの反射率とシンチレータの吸収長が検出光量に強く影響することが判明した。また、入射する粒子のビームサイズを実測では不可能なサイズに絞ることで、実測では見えなかった位置依存性の細かな振る舞いまでが見える様になり、dimple readout では PPD の受光面位置付近のシンチレータの厚さを微調整しなければならないことが判明した。さらには、カロリメータ全体に対しても光子計数シミュレーションを行うことにより、シンチレータ単体の光量の一様性が電磁シャワーのように広がりを持ったものに対しても影響することが確認された。現在はこれらのシミュレータによる一様性の評価によって最適化なシンチレータ形状の設計を行っている。

PPD の開発では、カロリメータのダイナミックレンジ拡大を目的として、現状のものよりもピクセルサイズの小さい高増倍率 PPD の設計を行ってきた。半導体デバイスの開発はシミュレーションによる設計が必須であり、本研究では 3 次元デバイス・プロセスシミュレータの TCAD である HyENEXSS を使用した。HyENEXSS による新型 PPD の設計を可能とするために、PPD の増幅機構を TCAD で再現することを試みてきた。現在は増幅後の電流が収束しないために完全な動作の再現には至っていないものの、従来は再現できていなかった初期キャリアの数に寄らない増幅の飽和状態であるガイガー増幅を TCAD で実現させることに成功した。さらに電流の増幅が収束しない原因はキャリアが完全に離散化されていないためだと考え、Poisson 統計を利用してキャリアを離散化することでクエンチング機構を再現するような物理モデルの導入を検討した。

9.2 今後の研究課題

シンチレータカロリメータのさらなる改善のために、今後も引き続きシンチレータストリップと PPD を改良していく。シンチレータ開発については、シンチレータ・反射フィルムの光学的特性がシミュレーションの精度に大きく寄与するため、これらの波長依存性を含んだ光学的性質を測定し、測定したパラメータを位置依存性シミュレーションに組み込むことで、より現実に近い振る舞いを再現できるシミュレーションを完成させる。さらには、現在のところ光量の一様性を評価するための定量的な目標値が存在しないため、今回作成したカロリメータシミュレーション

によって明確な目標値を設定することを目指す。これらのシミュレーションによって平均光量の大きさ・光量の一様性・エネルギー分解能が最適となるようなシンチレータの形状を調査する。また、実際のカロリメータでは数千万ものシンチレータストリップを使用するため、シンチレータを作成する際の加工精度のやアライメントのずれがどの程度性能に影響するのかについても、シミュレーションのパラメータに不確かさを入れることによって検証する。これによって、量産性までも考慮した最適なシンチレータ形状を決定する。

PPDの開発では、使用しているTCADのHyENEXSSでユーザーが新たに物理モデルを導入できるようになったため、その機能を利用してPoisson統計によるキャリアの離散化モデルをTCADに組み込み、PPDのクエンチング機構の完全再現を目指す。そして、完成したTCADを用いて新しく設計したPPDの増倍率シミュレーションを行う。また、ダークノイズ・アフターパルスなどPPD特有のノイズも再現できるように物理モデルを拡張し、ノイズレートも考慮したPPDの開発を行っていく。

これらの達成を目指してヒッグスファクトリー用シンチレータカロリメータのさらなる改善を行っていく。

付録A 光子追跡シミュレーションのソースコード

A.1 シンチレーション光

シンチレーション光を発生させるために、以下のパラメータを設定する。

- 発光スペクトル
- エネルギー損失に対する発光量 (シンチレーション効率)
- 発光減衰時間
- 発光上昇時間
- Birks 定数

```
G4Material* sciMat = nist->FindOrBuildMaterial("G4_PLASTIC_SC_VINYLTOLUENE");
G4MaterialPropertiesTable *sciMPT = new G4MaterialPropertiesTable();
const G4int sciNum = 33;
G4double sciSCINT[] = {0.025, 0.03, 0.05, 0.075, 0.08, 0.1,
                       0.125, 0.15, 0.18, 0.22, 0.25, 0.35,
                       0.40, 0.50, 0.55, 0.60, 0.80, 0.95,
                       1.00, 0.95, 0.85, 0.65, 0.50, 0.35,
                       0.225, 0.15, 0.10, 0.08, 0.075, 0.05,
                       0.04, 0.03, 0.025};
G4double sciEnergy[] = {2.38431*eV, 2.40746*eV, 2.43106*eV,
                        2.45513*eV, 2.47968*eV, 2.50473*eV,
                        2.53029*eV, 2.55638*eV, 2.583*eV,
                        2.61019*eV, 2.63796*eV, 2.66633*eV,
                        2.69531*eV, 2.72493*eV, 2.7552*eV,
                        2.78616*eV, 2.81782*eV, 2.85021*eV,
                        2.88335*eV, 2.91728*eV, 2.952*eV,
                        2.98757*eV, 3.024*eV, 3.06134*eV,
                        3.09961*eV, 3.13884*eV, 3.17908*eV,
                        3.22037*eV, 3.26274*eV, 3.30625*eV,
                        3.35092*eV, 3.39683*eV, 3.44401*eV};

sciMPT->AddProperty("FASTCOMPONENT", sciEnergy, sciSCINT, sciNum);
sciMPT->AddConstProperty("SCINTILLATIONYIELD", 10000./MeV);
sciMPT->AddConstProperty("FASTTIMECONSTANT", 2.1*ns);
sciMPT->AddConstProperty("FASTSCINTILLATIONRISETIME", 0.9*ns);
sciMat->SetMaterialPropertiesTable(sciMPT);
sciMat->GetIonisation()->SetBirksConstant(0.1466*mm/MeV);
```

A.2 Cherenkov 光

Cherenkov 光を発生させるためには、屈折率”RINDEX”を指定する。但し、屈折率を指定したエネルギー範囲内のエネルギーを持った Cherenkov 光のみが生じる。

```

const G4int sciNum = 2;
G4double sciEnergy[] = {2.8431*eV, 3.44401*eV};
G4double sciRIND[] = {1.58, 1.58};
sciMPT->AddProperty("RINDEX", sciEnergy, sciRIND, sciNum);

```

A.3 バルク吸収

光子の平均自由行程として、吸収長”ABSLENGTH”を指定する。

```

const G4int sciNum = 1;
G4double sciEnergy[] = {3.*eV};
G4double sciRIND[] = {380.*cm};
sciMPT->AddProperty("ABSLENGTH", sciEnergy, sciABSL, sciNum);

```

A.4 境界条件

ここでは、シンチレータと空気層の間の反射・屈折を表すための境界条件の指定例を示す。

```

G4OpticalSurface* sciSurface = new G4OpticalSurface("Scintillator_Surface");
G4MaterialPropertiesTable* borderSciMPT = new G4MaterialPropertiesTable();
G4MaterialPropertiesTable* borderHoleMPT = new G4MaterialPropertiesTable();
const G4int borderSciNum = 1;
G4double borderSciEnergy[] = {3.00*eV};
G4double borderSciReflectivity[] = {1.};
G4double borderSciSLC[] = {0.95};
G4double borderSciSSC[] = {0.0};
G4double borderSciBSC[] = {0.0};
borderSciMPT->AddProperty("REFLECTIVITY", borderSciEnergy,
    borderSciReflectivity, borderSciNum);
borderSciMPT->AddProperty("SPECULARLOBECONSTANT", borderSciEnergy,
    borderSciSLC, borderSciNum);
borderSciMPT->AddProperty("SPECULARSPIKECONSTANT", borderSciEnergy,
    borderSciSSC, borderSciNum);
borderSciMPT->AddProperty("BACKSCATTERCONSTANT", borderSciEnergy, borderSciBSC
    , borderSciNum);
borderHoleMPT->AddProperty("REFLECTIVITY", borderSciEnergy,
    borderSciReflectivity, borderSciNum);
borderHoleMPT->AddProperty("SPECULARLOBECONSTANT", borderSciEnergy,
    borderSciSLC, borderSciNum);
borderHoleMPT->AddProperty("SPECULARSPIKECONSTANT", borderSciEnergy,
    borderSciSSC, borderSciNum);
borderHoleMPT->AddProperty("BACKSCATTERCONSTANT", borderSciEnergy,
    borderSciBSC, borderSciNum);
sciSurface->SetMaterialPropertiesTable(borderSciMPT);
sciSurface->SetModel(unified);
sciSurface->SetType(dielectric_dielectric);
sciSurface->SetFinish(ground);
sciSurface->SetSigmaAlpha(5.*deg);
new G4LogicalBorderSurface("Sci_to_airgap", physSci, physAirgap, sciSurface);
new G4LogicalBorderSurface("airgap_to_Sci", physAirgap, physSci, sciSurface);

```

付録B 自動測定スクリプト

B.1 ステージ制御

シグマ光機ステージコントローラ用の制御スクリプトを以下に示す。スクリプトは python3 用に記述してある。使用するステージのステップ角とリード長を適切に設定することで、指定した範囲でステージを動かすことができる。

```
#!/usr/bin/env python3

import serial, time

def len_to_pulse(length):
    step_ang = 0.36 # step angle per pulse(half step) [deg]
    lead = 1.0 # lead length of screw [mm]
    mpp = lead/(360.0/step_ang) # movement per pulse [mm]
    return int(length/mpp)

# unit of x,y is [mm]
x_start = -22.
x_end = 22.
x_inc = 1.
y_start = 0.
y_end = 0.
y_inc = 1.

with serial.Serial(
    port = '/dev/ttyS0',
    baudrate = 9600,
    parity = serial.PARITY_NONE,
    bytesize = serial.EIGHTBITS,
    stopbits = serial.STOPBITS_ONE,
    timeout = 1.0) as ser:

    print('set current position to x=0[mm], y=0[mm]')
    ser.write(b'R:W\r\n')
    time.sleep(1.0)
    ser.write(b'Q:\r\n')
    recv_data = ser.readline()[:-2].decode('utf-8')
    print('current status: ' + recv_data + '\n')
    time.sleep(1.0)

    x = x_start
    y = y_start
    x_pre = 0.0
    y_pre = 0.0
    spd_avg = 4000 # average speed [PPS]

    while y <= y_end:
        mv = len_to_pulse(y - y_pre)
        send_data = 'M:2{1:P={0}}'.format(len(str(abs(mv)))+2, mv)
        print('send data to controller: ' + send_data)
        ser.write(send_data.encode('utf-8') + b'\r\n')
        time.sleep(1.0)
        ser.write(b'G\r\n')
```

```

wait_time = abs(mv)/spd_avg + 5.0
print('waiting for {0}s ...'.format(wait_time))
time.sleep(wait_time)

x = x_start
while x <= x_end:
    mv = len_to_pulse(x - x_pre)
    send_data = 'M:1{1:P=+{0}}'.format(len(str(abs(mv)))+2, mv)
    print('send data to controller: ' + send_data)
    ser.write(send_data.encode('utf-8') + b'\r\n')
    time.sleep(1.0)
    ser.write(b'G\r\n')
    wait_time = abs(mv)/spd_avg + 5.0
    print('waiting for {0}s ...'.format(wait_time))
    time.sleep(wait_time)
    ser.write(b'Q:\r\n')
    recv_data = ser.readline()[:-2].decode('utf-8')
    print('current status: ' + recv_data)
    time.sleep(1.0)
    #DAQ start
    print('=====')
    print('x={0}mm, y={1}mm'.format(x, y))
    print('=====')
    print('start data acquisition')
    ##command for DAQ start ##

    print('end data acquisition\n')
    x_pre = x
    x += x_inc

y_pre = y
y += y_inc

ser.close()

```


謝辞

本研究を進めるにあたってご協力いただきました全ての方々に感謝申し上げます。指導教員の山下了特任教授には、ご多忙の中毎週のミーティングにおいて多くのご助言をいただき、研究方針に迷ったときも常に的確なコメントをいただきました。また、研究を進める上で何不自由ない環境を与えてくださりました。おかげさまでどんなに悩むことがあってもここまで挫折することなく研究を進めることができました。山下研の田辺友彦特任助教には、研究の進め方に関する相談から実験のサポート、解析の仕方までたくさんのことを教えていただき、さらには学会の発表資料や本論論文作成に関しても長時間お付き合いいただき、非常に多くの有意義なコメントをいただきました。本研究の完成はお二人の多大なる支援無くしてはありえませんでした。まずはこのお二方に感謝の意を表したく思います。

CALICE-Asia メンバーの方々には毎週のミーティングにおいて多くのご意見・ご助言を賜りましたことを感謝申し上げます。特に、信州大学の竹下徹教授には、本研究を始めるにあたって必要な実験機材を提供していただき、研究を進めていく上での多くのご意見をいただきました。ICEPP の大谷航准教授には、測定で使用する EASIROC モジュールをお貸しくださったのみならず、実験を行う上で非常に多くのご助言をいただきました。そのほか、大谷研究室の劉靈輝さん、辻直希さんには私が実験を初めたばかりのころに様々なサポートをしていただきました。経験のなかった自分でもなんとか測定を遂行できたのは皆様のご尽力の賜物です。本当にありがとうございます。

山下研の加藤悠さんには、入学当初から今まで大変お世話になりました。ゼミでの指導から筑波大学での実験における指南までしていただき、些細な質問にも丁寧に納得するまでつき合っていました。今後も研究を続けていく上で重要なことをたくさん教わったと思います。今後ご迷惑をおかけするとは思いますが、何卒よろしくお願い致します。また、山下研 OB の長倉直樹さん、藤井一毅さんにもゼミやミーティングを通して多くのご助言をいただきました。山下研 OG の家城齊さんにも、私がこの研究に着手し始めたばかりの頃に過去の研究に関することを丁寧に教えていただきました。山下研同期の梶原昇吾君には、ゼミでの議論から普段の何気ない会話・相談にまでつき合ってもらい、おかげさまでこの2年間本当に楽しく過ごすことができました。KEK の三島賢二特別准教授には、J-PARC での中性子寿命測定実験のビームシフトを通して実験に必要なノウハウを多く教えていただきました。度々出題される問題には非常に悩まされましたが、普段の勉強では学べないような、実験を行う上で知っておくべき知識を得るきっかけにもなり、自分の研究を進める上でも非常に役立ったと思います。

Kioxia 株式会社の松澤一也様には、TCAD の利用に関して何度も相談に乗っていただき、今後の研究で HyENEXSS を使った PPD の開発を推し進めていくために必要な知見を与えていただきました。誠にありがとうございます。そのほか福田浩一様をはじめとする産総研の皆様には、2 度の TCAD 講習会を通して TCAD を使い始めるための基礎を学ばせていただきましたこと、感謝致します。

最後に、23 年間私をここまで育て支えてくださった私の両親と、学生生活のサポートをしてくれた姉にこの場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Elementary_particle.
- [2] Ties Behnke *et al.* The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary. 2013. arXiv: 1306.6327[physics.acc-ph].
- [3] European Strategy for Particle Physics Preparatory Group. Physics Briefing Book: Input for the European Strategy for Particle Physics Update 2020. 2019. arXiv: 1910.11775 [hep-ex].
- [4] CEPC Study Group. CEPC Conceptual Design Report: Volume 1 - Accelerator. 2018. arXiv: 1809.00285[physics.acc-ph].
- [5] CLIC and CLICdp collaboration. Updated baseline for a staged Compact Linear Collider. 2016. arXiv: 1608.07537[physics.acc-ph].
- [6] A. Abada *et al.* FCC-ee: The Lepton Collider. *Eur. Phys. J. ST* 228.2 (2019), pp. 261–623.
- [7] Howard Baer *et al.* The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 2: Physics. 2013. arXiv: 1306.6352[hep-ph].
- [8] Chris Adolphsen *et al.* The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 3.II: Accelerator Baseline Design. 2013. arXiv: 1306.6328[physics.acc-ph].
- [9] Chris Adolphsen *et al.* The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 3.I: Accelerator R&D in the Technical Design Phase. 2013. arXiv: 1306.6353[physics.acc-ph].
- [10] Ties Behnke *et al.* The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 4: Detectors. 2013. arXiv: 1306.6329[physics.ins-det].
- [11] Katsushige Kotera, Daniel Jeans, Akiya Miyamoto, and Tohru Takeshita. A novel strip energy splitting algorithm for the fine granular readout of a scintillator strip electromagnetic calorimeter. *Nucl. Inst. Meth. A* 789 (2015), pp. 158–164.
- [12] 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. 東京大学, 2008.
- [13] HAMAMATSU. 光半導体素子ハンドブック 第3章. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03_handbook.pdf.
- [14] HAMAMATSU. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12571-010_etc_kapd1044j.pdf.

- [15] 家城齊. 国際リニアコライダーのためのシンチレーター電磁カロリメーターの新しいシンチレーション光読み出しデザインの開発. 修士論文. 東京大学, 2015.
- [16] SAINT-GOBAIN. <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/bc400-404-408-412-416-data-sheet.pdf>.
- [17] 石島直樹, 仲居勇樹. EASIROC MODULE user Guide. 2014.
- [18] Omega group. EASIROC DATA SHEET. 2011.
- [19] M. Tanabashi *et al.* Review of Particle Physics. *Phys. Rev. D* 98 (3 2018), p. 030001.
- [20] GEANT4. <https://geant4.web.cern.ch>.
- [21] Erik Dietz-Laursonn. Peculiarities in the Simulation of Optical Physics with Geant4. 2016. arXiv: 1612.05162[physics.ins-det].
- [22] Zhang Jian-Fu *et al.* Measurements of the light output functions of plastic scintillator using ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$ reaction neutron source. *Chinese Phys. C* 34.7 (2010), pp. 988–992.
- [23] William R. Leo. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach; 2nd ed. Springer, 1994.
- [24] Geant4 Collaboration. Geant4 Book For Application Developers Release 10.5. https://geant4.web.cern.ch/support/user_documentation. 2019.
- [25] Vesna Cuplov, Irene Buvat, Frederic Pain, and Sebastien Jan. Extension of the GATE Monte-Carlo simulation package to model bioluminescence and fluorescence imaging. *Journal of biomedical optics* 19 (2014), p. 26004.
- [26] Akira Okumura *et al.* Prototyping Hexagonal Light Concentrators Using High-Reflectance Specular Films for the Large-Sized Telescopes of the Cherenkov Telescope Array. 2017. arXiv: 1711.02367[astro-ph.IM].
- [27] Particle Data Group. Atomic and Nuclear Properties of Materials. <http://pdg.lbl.gov/2019/AtomicNuclearProperties/>.
- [28] 村瀬拓郎. プロセス・デバイスシミュレータを用いた半導体光検出器 PPD の基本特性における研究. 修士論文. 東京大学, 2010.