

修士論文

国際リニアコライダーのための崩壊点検出器

FPCCD の中性子耐性の研究

～ A study of the neutron tolerance of the vertex detector

FPCCD for the International Linear Collider ～

東北大学大学院理学研究科

物理学専攻

村井 峻亮

平成 28 年

概要

国際リニアコライダー (International Linear Collider: ILC) は電子陽電子衝突型の線形加速器であり、ヒッグス粒子の精密測定を目的の一つとする実験である。そのために従来の性能を上回る高精度の検出器が必要とされる。ヒッグス粒子の結合定数を測定するために b クォーク、c クォークを uds クォークやグルーオンから識別することが必要であり、崩壊点検出器はそのために導入される。

崩壊点検出器は高精度の識別を達成するために崩壊点に最も近い場所に置かれるため、多数のビームバックグラウンドによりピクセル占有率が增大する。ピクセル占有率を抑えるために、我々は $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ のピクセルサイズでの Fine Pixel CCD (FPCCD) を崩壊点検出器として開発している。

FPCCD は前述の通り多数のビームバックグラウンド等に曝されるため、放射線耐性が要求される。放射線により悪化する CCD の性能の一つに電荷転送非効率 (CTI) があり、信号を検出するために十分に小さい CTI が必要になる。本研究では試作 CCD への中性子照射試験を行い、性能が低下することを確認した。LED を用い光を照射することで CCD に電荷を注入し、悪化した CTI が改善することを確認した。

目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	国際リニアコライダー (ILC) 実験	3
2.1	概要	3
2.2	ILC で期待される物理	3
2.2.1	ヒッグス生成過程	4
2.2.2	ヒッグス崩壊分岐比の測定	4
2.2.3	ヒッグス自己結合定数の測定	5
2.2.4	トップ湯川結合の測定	5
2.3	ILC 加速器	5
2.3.1	電子源 (Electron Source)	5
2.3.2	陽電子源 (Positron source)	6
2.3.3	減衰リング (Damping Ring)	7
2.3.4	主線形加速器 (Main Linac)	7
2.4	ILC の測定器	8
2.4.1	PFA(Particle Flow Algorithm)	8
2.4.2	飛跡検出器	9
2.4.3	カロリメータ	12
2.4.4	ミューオン検出器	13
2.4.5	前方検出器	14
第 3 章	FPCCD	17
3.1	概要	17
3.2	FPCCD の特徴	18
3.3	FPCCD 崩壊点検出器の構造	18
3.4	CCD センサー	18
3.4.1	CCD の検出原理	19
3.5	FPCCD の開発状況	22
第 4 章	FPCCD の放射線耐性	27
4.1	ILC での放射線	27
4.2	放射線ダメージ	27
4.2.1	Dark current	28
4.2.2	Hot pixel	28

4.2.3	Charge Transfer Inefficiency (CTI)	29
4.2.4	Flat band voltage shift	29
第 5 章	中性子照射試験	31
5.1	概要	31
5.2	FPCCD への中性子照射試験	32
5.2.1	試作 FPCCD	32
5.3	中性子ビームフラックス	32
第 6 章	試作 CCD の性能測定	35
6.1	測定方法	35
6.1.1	測定環境	35
6.2	Dark current	35
6.2.1	計算方法	35
6.2.2	結果	36
6.3	Hot pixel fraction	37
6.3.1	計算方法	37
6.3.2	結果	38
6.4	Charge Transfer Inefficiency	38
6.4.1	計算方法	38
6.4.2	結果	40
6.5	Flat band voltage shift	40
6.5.1	計算方法	40
6.5.2	結果	41
6.6	放射線耐性に関する要求性能	41
6.6.1	Dark current への要求	42
6.6.2	Hot pixel fraction への要求	42
6.6.3	CTI への要求	42
第 7 章	CTI の改善	44
7.1	Fat-zero charge injection	44
7.2	実験セットアップ	44
7.3	結果	44
7.4	要求性能	45
7.5	改善案	46
7.5.1	水平転送ピクセルの小型化	46
7.5.2	ノッチチャンネル	47
7.5.3	アニーリング	47
7.5.4	ノイズの低減	47

第 8 章	まとめ	50
8.1	試作 FPCCD の中性子試験	50
8.2	試作 FPCCD の放射線ダメージ	50
8.2.1	Dark current	50
8.2.2	Hot pixel	50
8.2.3	Charge transfer inefficiency	51
8.2.4	Flat band voltage shift	51
8.3	中性子照射試験の結論	51
8.4	今後	51
謝辞		52

目次

2.1	ILCにおける主なヒッグス生成過程	4
2.2	質量 125GeV のヒッグス粒子生成過程の断面積 [3]	4
2.3	ヒッグス粒子の崩壊分岐比 [5]	5
2.4	ヒッグス粒子との結合の強さ [3]	5
2.5	ILC の全体図 [1]	6
2.6	電子源 [7]	6
2.7	陽電子源 [7]	7
2.8	キャビティ [7]	8
2.9	RF ユニット [7]	8
2.10	ILD 測定器 [1]	9
2.11	100GeV ジェットの PFA による再構成 [4]	10
2.12	崩壊点検出器 [6]	11
2.13	b, c ハドロンの崩壊点	11
2.14	中央飛跡検出器 [8]	12
2.15	シリコン飛跡検出器 [8]	12
2.16	ILD 測定器断面図 [8]	12
2.17	電磁カロリメータ [6]	13
2.18	ハドロンカロリメータ [6]	14
2.19	ミューオン検出器 [8]	15
2.20	ミューオン検出器の有無による π 中間子エネルギー分解能比較 [8]	15
2.21	前方検出器 [8]	16
3.1	ILC のビーム構造	17
3.2	Z 方向と ϕ 方向のヒット分布	19
3.3	FPCCD の構造	20
3.4	ラダーの構造 1	20
3.5	ラダーの構造 2	20
3.6	バンドギャップ図	21
3.7	MOS キャパシタのポテンシャル図	22
3.8	2相 CCD の動作原理図 [12]	24
3.9	CCD 模式図	25
3.10	CCD の電荷検出機構 (FDA)[12]	25
3.11	試作 FPCCD	26

4.1	ペアバックグラウンド事象の分布	28
4.2	dark charge の ADC 分布と hot pixel	29
4.3	MOS キャパシタの酸化膜内での電離	30
5.1	930 型 AVF サイクロトロン [16]	31
5.2	CYRIC 中性子ビームライン 32 コース [17]	32
5.3	中性子ビームのスペクトラム [17]	33
5.4	試作 FPCCD の模式図	34
5.5	ビームプロファイル [18]	34
6.1	実験セットアップ模式図	35
6.2	信号読み出しセットアップ	36
6.3	AFROC ボード	36
6.4	インターフェイスボード	36
6.5	クロックドライバカード	37
6.6	SEABAS ボード	37
6.7	中性子照射前の dark charge の ADC 分布 (蓄積時間 5 秒、-40 °C)	37
6.8	中性子照射後の dark charge の ADC 分布 (蓄積時間 5 秒、-40 °C)	37
6.9	中性子照射前の dark charge と蓄積時間の関係	38
6.10	中性子照射後の dark charge と蓄積時間の関係	38
6.11	hot pixel fraction と温度の関係	39
6.12	Fe55 からの 5.9keV の X 線のピーク	39
6.13	中性子照射前の Fe55 ピークの CCD 上での分布	40
6.14	中性子照射後の Fe55 ピークの CCD 上での分布	40
6.15	中性子照射前の dark charge と印加電圧の関係	41
6.16	中性子照射後の dark charge と印加電圧の関係	41
6.17	中性子照射後の dark charge の ADC 分布 (蓄積時間 200msec、-40 °C)	42
6.18	S/N 比と CTI の関係	43
7.1	8 個の LED	45
7.2	基板にセットされた試作 FPCCD	45
7.3	実験セットアップ	45
7.4	LED 最大電圧時の ADC 分布 (蓄積時間 5sec、-40 °C)	46
7.5	CTI と fat zero charge の関係	47
7.6	S/N 比と CTI の関係	48
7.7	ノッチチャンネルの概要図	49

表 目 次

2.1	ILC の重心エネルギーと目的となる物理	3
5.1	試作 FPCCD の仕様	32
6.1	中性子照射後、蓄積時間 200ms の dark charge	36
6.2	-40 °C での hot pixel fraction	38
6.3	中性子照射前後の CTI	40
7.1	CTI_h の改善率と水平転送ピクセルサイズの関係	46

第1章 はじめに

現在の素粒子物理は標準模型と呼ばれる理論に基づき素粒子の性質や相互作用が記述されており、数多くの実験でそれらの正しさが証明されている。しかし、標準模型では説明できない現象が観測されており、標準模型を超える新物理が数多く提唱されている。それらの検証の手がかりとなるのがヒッグス粒子である。ヒッグス粒子は標準模型の最後の未発見粒子であり 2012 年に CERN にある LHC で発見されたが、標準模型で予言されているヒッグス粒子であるかはいまだ確認されていない。ヒッグス粒子と他の粒子との結合定数が標準模型からどの程度ずれているかを測定することで、新物理について探ることができる。

ヒッグス粒子の精密測定のために高エネルギーのレプトンコライダーが必要とされる。レプトンコライダーとハドロンコライダーの大きな違いは、衝突粒子が素粒子であるか複合粒子であるかという点である。ハドロン同士を衝突させると膨大な背景事象が発生し解析が困難になるのに対し、レプトン同士の衝突は素粒子同士の反応であるため信号抽出が比較的容易であり精密測定が可能になる。現在までの最も高エネルギーのレプトンコライダーは 1989-2000 年まで CERN で運用された Large Electron-Positron Collider(LEP) である。電子陽電子衝突型円形加速器であり重心系エネルギーは最終的に 209GeV まで到達した。しかし円形加速器には制動放射によるエネルギー損失が存在し、素の大きさはビームエネルギーの 4 乗に比例し加速器半径に反比例する。重心系エネルギーを上げるには、それ以上に加速器半径を大きくする必要があり現実的ではない。制動放射によるエネルギー損失を避けるために考えられているのが線型加速器である。制動放射によるエネルギー損失が存在しないため、効率よく重心系エネルギーを上げることができる。

そのため線型のレプトンコライダー計画が進められており、その一つが国際リニアコライダー(International Linear Collider: ILC) である。ILC は電子陽電子衝突型の線形加速器であり、全長は 30-50km、重心系エネルギーは 250-500GeV、その後アップグレードを行い 1TeV までの到達を予定している。

我々は ILC のための検出器の一つ、崩壊点検出器の候補として Fine Pixel CCD (FPCCD) を開発している。崩壊点検出器は b クォーク、c クォークを uds クォークやグルーオンから識別するために導入される。b、c ハドロンの寿命はそれぞれ 1.5ps、0.4ps 程度と非常に短いため高い崩壊点分解能が必要になる。そのため崩壊点検出器はビームの衝突点最近傍に設置されるが、大量の放射線に曝され高い放射線耐性を要求される。主な放射線としてビーム相互作用により発生するペアバックグラウンドと呼ばれる電子陽電子ペアと、ビームダンプからの中性子が存在する。FPCCD においては、放射線によるダメージの中で格子欠陥を発生させるバルクダメージの影響が大きい。放射線が物質内で失うエネルギーのうち原子の移動に使用されるものを NIEL と呼び中性子の NIEL は電子に比べて非常に大きいため、試作 FPCCD へ中性子照射実験を行った。

本研究では、ILC 実験で用いられる崩壊点検出器の候補である FPCCD の放射線耐性について、中性子を照射した試作 FPCCD の性能評価を行った。その結果性能の悪化が見られ、十分な電荷

転送効率が得られなかった。更に電荷転送効率を向上するために Fat zero charge injection と呼ばれる手法を用い性能を回復できることを確認した。

本論文の構成は次のようになっている。第 2 章で ILC 実験の紹介、第 3 章で FPCCD についての説明、第 4 章で放射線耐性について述べる。その後第 5 章で中性子照射実験概要について述べ、第 6 章にその結果を示す。第 7 章で性能の改善についての結果を示し。第 8 章でまとめとする。

第2章 国際リニアコライダー (ILC) 実験

2.1 概要

国際リニアコライダー実験は電子陽電子衝突の線形加速器を用いた次世代の高エネルギー実験である [1]。全長約 30km で重心系エネルギーは 250GeV から 500GeV、のちにアップグレードを行い 1TeV まで到達する。ピーク luminositi は $2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ で、最初の 4 年間で積分 luminositi 500fb^{-1} を目標とする。内部構造を持たない素粒子同士の衝突であるため背景事象が少なく、精密測定を可能にしている。初期状態の電子、陽電子のエネルギーやスピン偏極率を指定することができ、信号事象の生成率向上や背景事象の抑制ができる。

ILC 実験の目的として、ヒッグス粒子の精密測定、トップクォークの精密測定、標準理論を超える物理の検証、暗黒物質の候補となる粒子の探索などがある。本章では ILC で期待される物理、ILC 加速器、ILD 測定器について述べる。

2.2 ILC で期待される物理

ILC の重心エネルギーによりターゲットとなる物理事象が異なる。以下の表 2.1 に現在考えられている重心エネルギーとその物理ターゲットを示す。また全ての重心エネルギーにおいて新物理の探索が可能である。

重心エネルギー	積分 luminositi	主崩壊過程	目的
250GeV	500fb^{-1}	$e^+e^- \rightarrow Zh$	ヒッグス粒子の精密測定
350GeV 付近	200fb^{-1}	$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$	トップクォークの精密測定
		$e^+e^- \rightarrow \nu\nu h$	ヒッグス粒子の精密測定
500GeV	$1000(4500) \text{fb}^{-1}$	$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}h$	トップ湯川結合測定
		$e^+e^- \rightarrow \nu\nu h$	ヒッグス粒子の精密測定
		$e^+e^- \rightarrow Zh h$	ヒッグス自己結合測定
1000GeV	未定	$e^+e^- \rightarrow \nu\nu h h$	ヒッグス自己結合

表 2.1: ILC の重心エネルギーと目的となる物理。積分 luminositi のカッコ内はアップグレード後の値である [2]。

2.2.1 ヒッグス生成過程

ILC で観測される主なヒッグス粒子生成過程として Zh 随伴過程と WW 融合過程の 2 つが存在する (図 2.1)。250GeV から 500GeV までは Zh 随伴過程が、それ以降は WW 融合過程が支配的な事象となる (図 2.2)。Zh 随伴過程については反跳質量法と呼ばれる手法でヒッグス粒子の崩壊に依存しない解析をすることができる。ILC では始状態である電子陽電子対のエネルギーが既知であるため、Z を再構成し 4 元運動量を測定することによりヒッグス粒子の崩壊を見ずに質量を計算することが可能である。

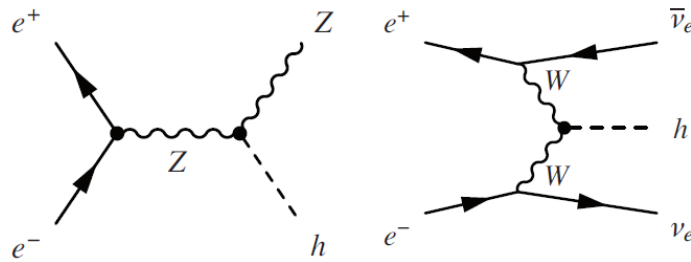


図 2.1: ILC における主なヒッグス生成過程。(左)Zh 随伴過程。(右)WW 融合過程。

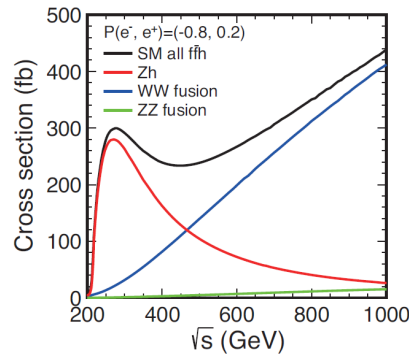


図 2.2: 質量 125GeV のヒッグス粒子生成過程の断面積 [3]

2.2.2 ヒッグス崩壊分岐比の測定

ヒッグスの崩壊分岐比の測定によりヒッグスの結合定数を導出できる。ヒッグスは主に b クォークペア、 τ ペア、グルーオンペア、c クォークペア、W ボソンペアに崩壊するため、これらを高い分解能で同定することが必要となる。この測定精度はフレーバータグの精度を決める崩壊点検出器に依存している。

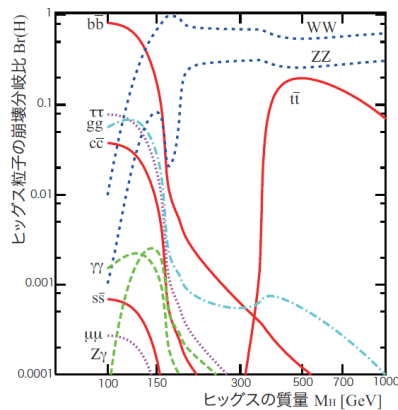


図 2.3: ヒッグス粒子の崩壊分岐比 [5]

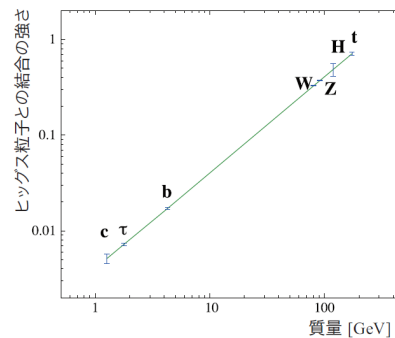


図 2.4: ヒッグス粒子との結合の強さ [3]

2.2.3 ヒッグス自己結合定数の測定

ILC では $e^+e^- \rightarrow Zhh$ モードを利用し、ヒッグスの自己結合を測定することができる。ヒッグス粒子は主に $ee \rightarrow Zhh \rightarrow bbbb + (ll \text{ もしくは } qq)$ に崩壊し、終状態は 4 つの b ジェット+レプトンまたは 6 つの b ジェットとなる。主なバックグラウンドとして $ee \rightarrow tt$ 事象が存在する。反応断面積が 1000 倍以上大きいため精度よく b クォークジェットを同定する必要がある。

2.2.4 トップ湯川結合の測定

重心エネルギー 500GeV 以上で $e^+e^- \rightarrow tth$ モードでトップクォークとヒッグスの湯川結合を測定できる。この事象でも $ee \rightarrow tth \rightarrow bWbWbb$ の崩壊が主であり、終状態に複数の b ジェットが存在する。主なバックグラウンドは $ee \rightarrow ttZ$ で、 tth の反応断面積よりも 3 桁大きい b クォークを精度よく同定できれば十分に排除できる。

このようにフレーバー同定が測定精度に大きくかかわっており、高精度な崩壊点検出器が求められる。

2.3 ILC 加速器

ILC 加速器は主に電子・陽電子源 (Electron Positron source)、減衰リング (Damping Ring)、主線形加速器 (Main Linac) の 3 要素から成る。ILC の全体図を図 2.5 に示す。電子・陽電子源で生成されたビームは減衰リングで収束され、主線形加速器で加速され衝突する。以下でこれらの各要素について説明する。

2.3.1 電子源 (Electron Source)

電子源では偏極レーザーが半導体 (GaAs 等) の光電面に照射され、光電効果により偏極した電子が生成されビームとして利用される。電子の偏極率は 80 % が目標とされる。図 2.6 に電子源の

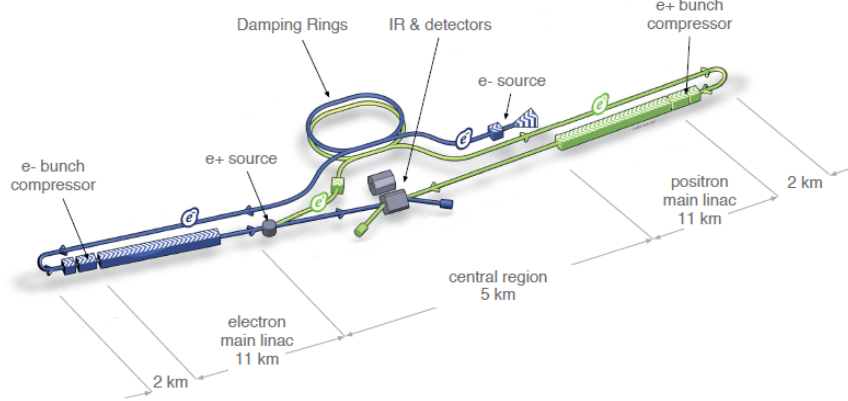


図 2.5: ILC の全体図 [1]

概要図を示す。生成された電子は 140-160keV のエネルギーを持ち、常伝導加速管でバンチと呼ばれる電子 3×10^{10} 個程度の集合を形成しながら 76MeV まで加速され、さらに超伝導加速空洞で 5GeV まで加速される。減衰リングに入射する前に超伝導ソレノイドによりスピンの垂直方向にそろえられる。

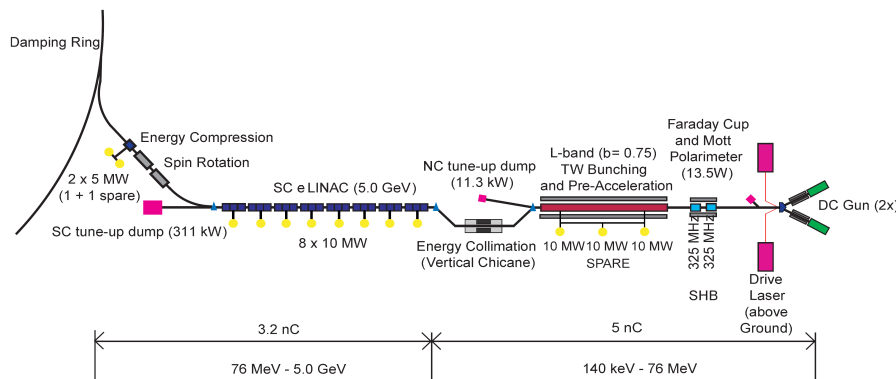


図 2.6: 電子源 [7]

2.3.2 陽電子源 (Positron source)

陽電子は電子ビームを利用して生成される。電子源で生成された電子ビームは主線形加速器で 150GeV まで加速された後、らせん状のアンジュレーターに運ばれる。その中で周期的に磁場の向きが変化しており、通過した電子ビームは蛇行し制動放射により光子が放出される。最大エネルギーは電子ビームのエネルギーにより 10MeV から 30MeV 程度になる。その後磁石により光子ビームは電子ビームから分けられ、1.4cm のチタン合金の円盤に衝突し、電磁シャワーが発生し大量の電子陽電子対が得られる。得られたビームは 125MeV まで加速され、磁場をかけることで

電子と陽電子が分離される。陽電子ビームは常伝導加速空洞で 400MeV まで加速され、その後超伝導加速空洞で 5GeV まで加速される。スピン方向とエネルギーをそろえられダンピングリングへ送られる。偏極率は基本設計で 30 %、アップグレード後には 60 %までが可能になる。

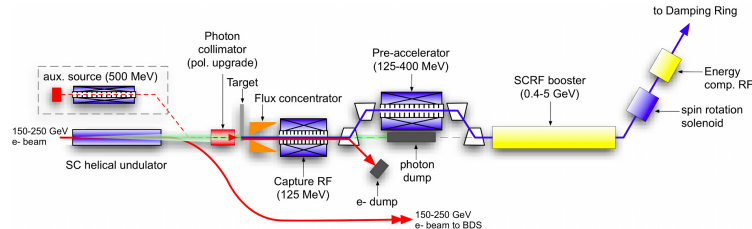


図 2.7: 陽電子源 [7]

2.3.3 減衰リング (Damping Ring)

減衰リングは高いルミノシティを達成するために電子・陽電子ビームの広がりを小さくする。ビームの広がりにはエミッタンス (ϵ) で表され、ビームの位置の広がり (Δx) と運動量の広がり (Δp) の積で表される (式 2.1)。

$$\epsilon = \Delta x \times \Delta p \quad (2.1)$$

ビームサイズ $\sigma_{x,y}$ は加速器のパラメーターである β 関数とエミッタンスにより表され、

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\beta_{x,y} \cdot \gamma \epsilon_{x,y}} \quad (2.2)$$

γ は $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ ($c\beta$:ビーム速度、 c :光速) である。電子・陽電子ビームは 5GeV でそれぞれの減衰リングに入射し周回する。減衰リングは直線部と円弧部分で構成され、円弧部分を通過するときに制動放射によりエネルギーを失い、直線部で加速される。この時制動放射による光子は電子の進行方向に放射されるため、方向は変わらず運動量が減少する。しかし加速時は基準軌道方向に加速されるため、結果として横方向運動量が減ることになる。これを周回中に繰り返しビームを収束させる。

2.3.4 主線形加速器 (Main Linac)

減衰リングから取り出されたビームは RTML(Ring To Main Linac) で主線形加速器まで運ばれる。その際に 5GeV から 15GeV まで加速される。電子・陽電子合わせて全長 23km の主線形加速器で、ビームは 15GeV から最大で 250GeV まで加速される。ビームの加速は 8 または 9 個のセルを持ったキャビティと呼ばれる超伝導加速空洞で行われ (図 2.8)、平均加速勾配は 31.5MV/m である。

主線形加速器は RF ユニットと呼ばれる構造で構成される (図 2.9)。RF ユニットはクライストロン 1 台、クライオモジュール 4.5 台、キャビティ 39 台で構成される。クライストロンが高周波電力をキャビティに供給し加速電場を発生させる。ニオブ製キャビティを 2K の液体ヘリウムで冷

却すると超伝導状態となり効率よく加速電場を生成できる。クライオモジュールはキャビティを冷却するための装置であり、内部に8または9台のキャビティを収容する。



図 2.8: キャビティ [7]

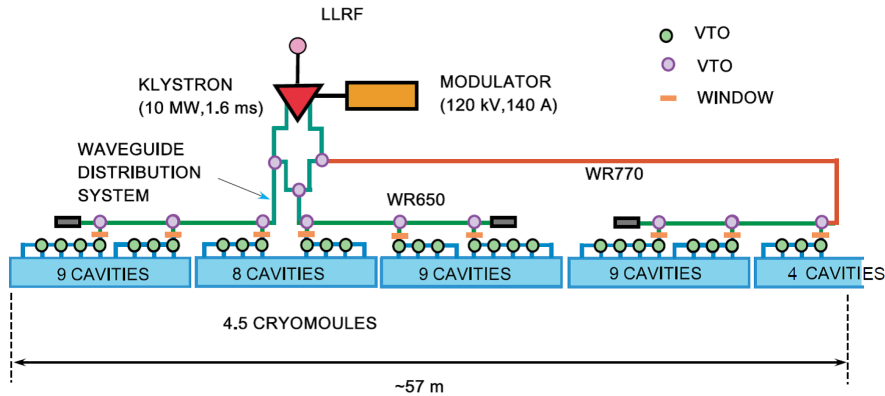


図 2.9: RF ユニット [7]

2.4 ILC の測定器

衝突点で起きる反応を正確に捉えるために、高精度で粒子の崩壊点、運動量、エネルギーを測定する必要がある。ILC で期待される物理を測定するためには従来の測定器を大幅に超える性能が要求される [5]。

現在2つの測定器の開発が進行して、アジア・ヨーロッパを中心とする ILD(International Large Detector) と北米中心の SiD(Silicon Detector) が存在する。ILC には衝突点が一つしかなく同時に測定できないため、push-pull 方式を用いて衝突点を共有する計画になっている。ILC で発生する物理事象の多くが終状態に複数のジェットを含みこれを高分解能で再構成するために、2つの測定器は PFA(Particle Flow Algorithm) とフレーバー・タグに最適化されている。PFA はジェットの分解能を向上させる解析手法であり、フレーバー・タグはジェットの起源になる粒子を識別する方法である。

2.4.1 PFA(Particle Flow Algorithm)

PFA とは ILC においてジェットのエネルギー、運動量を測定する際に用いられる検出アルゴリズムである。ILC の検出器は複数の検出器から構成されており、それぞれが位置測定、運動量測定、エネルギー測定等を行う。ジェット中には 64 % の荷電ハドロン、25 % の光子、11 % の中性ハ

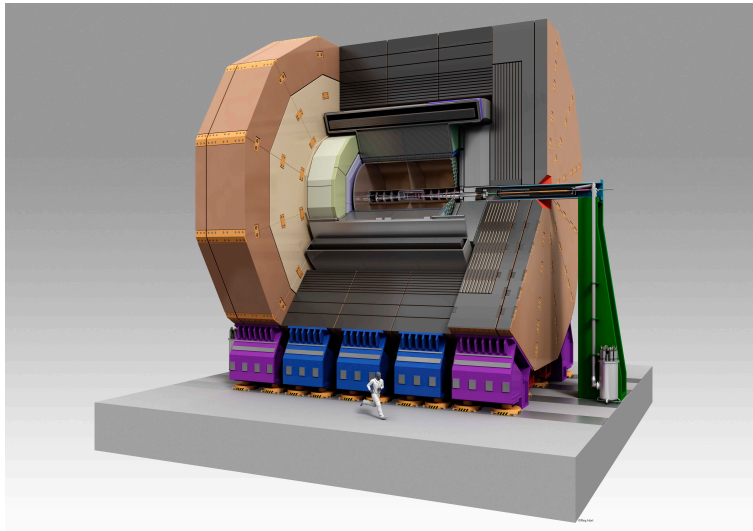


図 2.10: ILD 測定器 [1]

ドロンが存在するが、エネルギー測定を行うハドロンカロリメータの分解能が最大で 50 % と最も悪い。しかし荷電粒子については飛跡検出器が高い精度で測定することができる。そこで、検出器全体の情報を用いてジェットから生じる粒子を最も精度よく測定できる検出器で個別に再構成する手法をとり、Particle Flow と呼ばれる。つまり、荷電粒子を飛跡検出器、光子を電磁カロリメータ、中性ハドロンをハドロンカロリメータで測定することでジェットエネルギー分解能を最大化することができる。PFA では次のような手順でジェットの再構成を行う。

1. 飛跡検出器で荷電粒子を再構成
2. 電磁カロリメータで光子の再構成
3. ハドロンカロリメータで中性ハドロンの再構成
4. 以上の情報からジェットエネルギーを再構成

我々は ILD 測定器のための検出器開発を行っているため、以下では特に ILD の具体的な検出器について述べる。

2.4.2 飛跡検出器

ILD の飛跡検出器は崩壊点検出器 (VTX: Vertex detector)、シリコン飛跡検出器 (SIT: Silicon Inner Tracker)、中央飛跡検出器 (TPC: Time Projection Chamber) の 3 つで構成されている。

2.4.2.1 崩壊点検出器 (Vertex detector)

崩壊点検出器は ILD 測定器の最内層に位置し、目的は粒子の崩壊位置を決定することである。ILC での主な物理解析では高精度にジェットが b クォークと c クォークのどちらに由来するか識別

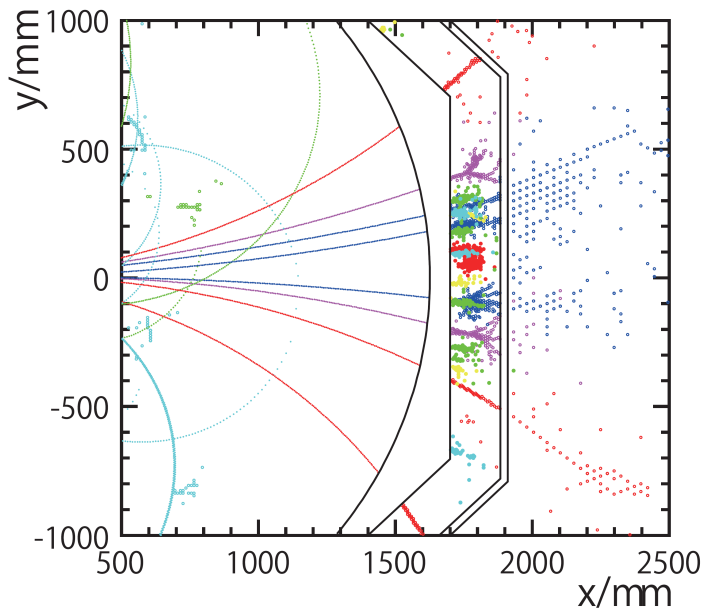


図 2.11: 100GeV ジェットの PFA による再構成 [4]

することが求められる。b ハドロンと c ハドロンはそれぞれ 1.5ps、0.4ps の寿命を持ち生成点 (一次反応点) から数百 μm から数 mm 飛んだ後崩壊する (図 2.13)。また崩壊は $b \rightarrow c \rightarrow s$ と起こるため b クォーク由来のジェットは一次反応点、2 次崩壊点 ($b \rightarrow c$)、3 次崩壊点 ($c \rightarrow s$) の 3 つの崩壊点を持ち、c クォーク由来のジェットは 2 つの崩壊点を持つ。つまり、崩壊点を正確に検出することでクォークを識別することができる。そのために必要とされる崩壊点分解能は式 2.3 で表される [5]。

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

ここで第 1 項は検出器の分解能、第 2 項は多重散乱による影響を表す。この分解能を達成し、また正確にトラッキングをするために崩壊点検出器には以下の性能が要求される。

1. 位置分解能が $3\mu\text{m}$ 以下
2. 多重クーロン散乱を防ぐため 1 層あたりの物質量が $1X_0$ 以下
3. 最内層の半径が 1.6cm
4. ピクセル占有率が数%以下

崩壊点検出器について詳しくは次章で述べる。

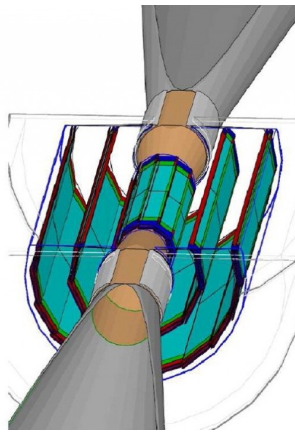


図 2.12: 崩壊点検出器 [6]

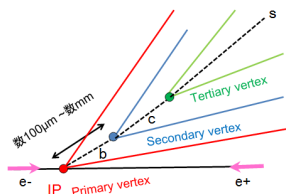


図 2.13: b, c ハドロンの崩壊点

2.4.2.2 中央飛跡検出器

中央飛跡検出器 (TPC: Time Projection Chamber) は荷電粒子の飛跡を 3 次元的に再構成するためのガス検出器である (図 2.14)。内部にガスが充填してあり、荷電粒子が通過すると飛跡に沿ってガスがイオン化される。生じた電子は電場によってビーム軸方向 (z) にドリフトされエンドキャップ部 (x, y) の検出器 MPGD (micro-pattern gas detector) に到達する。信号電子は微量であるため高電場により電子雪崩を起こすことで MPGD で検出され、2 次元的な飛跡が得られる。その後電子のドリフト時間から得られる z 軸の情報と合わせ、3 次元飛跡を再構成する。TPC 内部はソレノイドにより 3.5T の磁場がかけられているため、荷電粒子飛跡の曲率半径を図ることで、運動量を測定することができる。

TPC の主な利点として、ガス検出器であるため低物質質量であること、TPC 中でのエネルギー損失 dE/dx から粒子識別が可能であること、内部の電場と磁場の向きがほぼ平行であるためドリフト中の信号電子の拡散が抑えられ高い位置分解能 ($< 100\mu m$) を達成することなどが挙げられる。

2.4.2.3 シリコン飛跡検出器

シリコン飛跡検出器はシリコン内部飛跡検出器 (SIT: Silicon Inner Tracker)、シリコン外部飛跡検出器 (SET: Silicon External Tracker)、ETD (: End cap component behind the endplate of the TPC)、FTD (: Forward Tracker) の 4 つの検出器から構成される (図 2.15)。シリコンによる飛跡検出は磁場に依存しないため、TPC を補完し高い分解能を達成する。TPC はガス検出器で

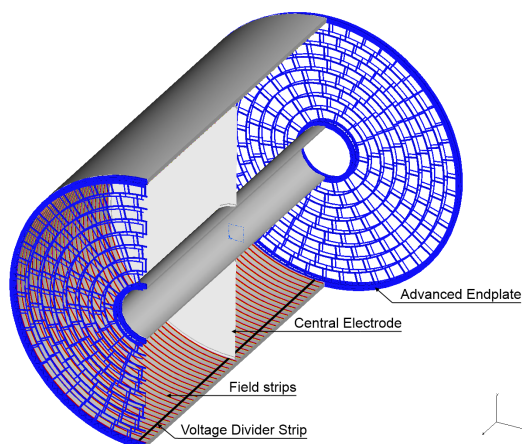


図 2.14: 中央飛跡検出器 [8]

あり、飛跡再構成にバンチ衝突間隔の 369ns よりはるかに長い μs オーダーの時間が必要とされ、バンチ識別ができない。そのため SIT と SET が TPC を挟むように設置され、時間情報を取得し飛跡のタイムスタンプを行う。ETD は TPC のエンドキャップ部に位置し、電磁カロリメータへの入射位置の同定、荷電トラックの運動量分解能を改善する。FTD は飛跡検出器の最内層に位置し、前方方向をカバーする。

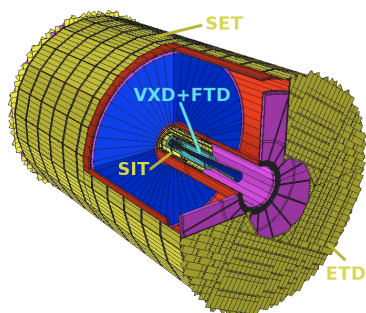


図 2.15: シリコン飛跡検出器 [8]

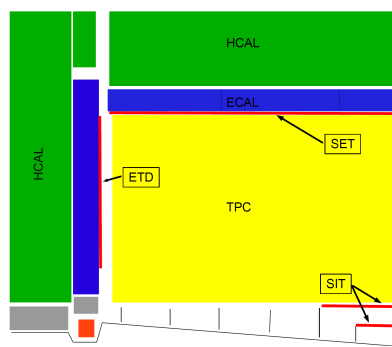


図 2.16: ILC 測定器断面図 [8]

2.4.3 カロリメータ

ILD のカロリメータは内層に電磁カロリメータ (ECAL)、外層にハドロンカロリメータ (HCAL) が設置される。カロリメータの主な役割は、通過した粒子に内部でシャワーを発生させエネルギーを測定することである。電磁カロリメータが電磁シャワーを測定し、ハドロンカロリメータは強い相互作用や原子核との衝突によるハドロンシャワーを測定する。カロリメータはシャワーを発生させる吸収層と落としたエネルギーを検出するセンサー層で構成される。また前述のとおり PFA

は粒子を個々に識別するため、カロリメータには高いエネルギー分解能の他、高いパターン識別性能も必要とされる。以下ではそれぞれのカロリメータについて説明する。

2.4.3.1 電磁カロリメータ

電磁カロリメータはジェット中の光子と電子のエネルギーを測定する。基本設計は30層のタングステン吸収層とセンサー層の組み合わせから成る。ECALの小型化と粒子分解能のため、放射長とモリエール半径が短いタングステンを吸収層に使用する。モリエール半径はシャワーの横方向の広がりを表し、全シャワーの90%が収まる半径を表す。これにより鉛などの吸収材を用いた場合と比較してシャワーが小さいため、シャワーの重複が減少し粒子分解能が向上する。センサー層にはシリコンを用いるもの、シンチレータを用いるもの、両者のハイブリッドなどが研究されている。

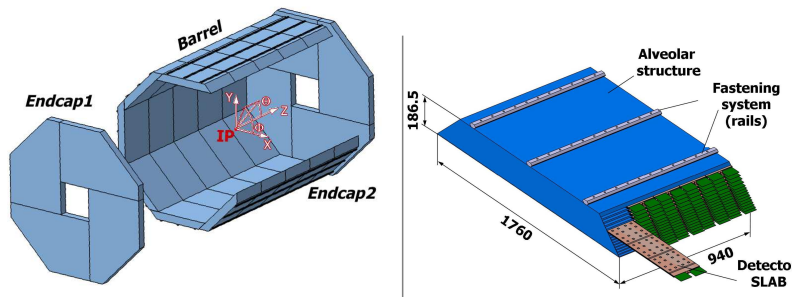


図 2.17: 電磁カロリメータ [6]

2.4.3.2 ハドロンカロリメータ

ハドロンカロリメータはジェット中の中性ハドロンを測定する。中性ハドロンが作るシャワーは同時に電磁シャワーも発生しているため、電磁シャワー単独の場合に比べ反応が複雑で分解能が悪くなる。またハドロンシャワーは相互作用長が長く範囲が広いので、大きな物質を持つ鉄が吸収層に使用される。また鉄は他の重金属よりもハドロン相互作用長が放射長との差が小さく ($\lambda_I/X_0 = 9.5$)、ハドロンシャワー中で電磁相互作用の成分の観測もできる。センサー層にはシンチレータを使用するものとガス検出器を用いるものなどが候補として研究が進められている。

2.4.4 ミューオン検出器

ミューオン検出器はILD測定器の最外層に位置する。リターンヨークとしての鉄とミューオン検出器としてのシンチレータのサンドイッチ構造になっている。主な役割として、ミューオンの識別、カロリメータに収まらなかったシャワーの同定がある。カロリメータとミューオン検出器を併用することでジェットエネルギー分解能が向上する(図 2.20)。

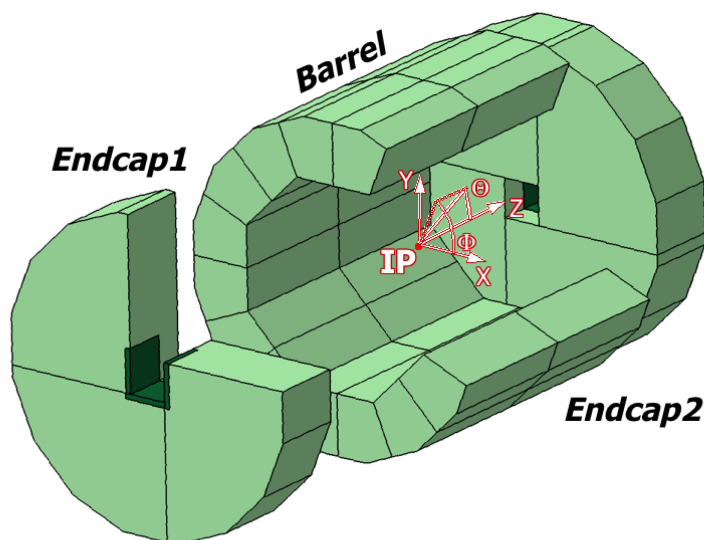


図 2.18: ハドロンカロリメータ [6]

2.4.5 前方検出器

ビーム軸近辺に設置される検出器をまとめて前方検出器をと呼び、具体的にはルミノシティを測定する LumiCal、ビームパラメータやバンチ毎のルミノシティを測定する BeamCal、ペアモニタによって構成される。

2.4.5.1 LumiCal

LumiCal は積分ルミノシティを測定するための電磁カロリメータであり、ビーム軸から 32-74mrad の範囲をカバーするように設置される。ルミノシティの測定には反応断面積の大きい Bhabba 散乱 ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-$) が用いられ、断面積は理論から精度よくわかっているため以下の関係式から計算できる。

$$L = N/\sigma \quad (2.4)$$

ここで N は Bhabba 散乱のイベント数、 σ は反応断面積を表す。ILD 検出器では断面積 σ の計算精度から、ルミノシティの測定精度として 0.1 % を目指している。

2.4.5.2 BeamCal

BeamCal はバンチごとのルミノシティを測定することを目的としたカロリメータである。最終収束マグネットの手前かつビームパイプのすぐ外側に位置し、ビーム軸から 5-40mrad の範囲をカバーする。ビーム衝突時に置いてペアバックグラウンドと呼ばれる大量の電子陽電子バックグラ

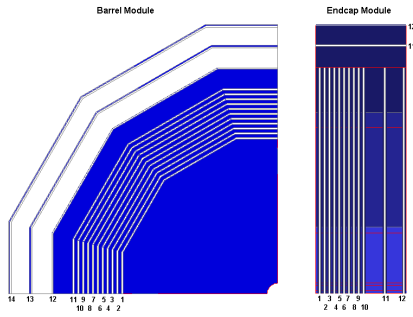
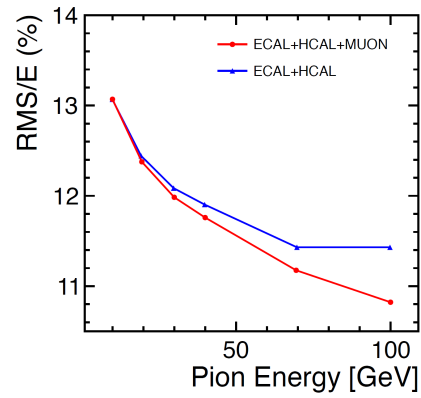


図 2.19: ミューオン検出器 [8]

図 2.20: ミューオン検出器の有無による π 中間子エネルギー分解能比較 [8]

ウンドが発生するが、BeamCal でそれによるエネルギー損失を測定することでバンチ衝突ごとの瞬間ルミノシティの測定とビームパラメータの決定が可能になる。

2.4.5.3 ペアモニター

ペアモニターは衝突点に置けるビーム形状を測定するためのシリコンピクセル型検出器である。ILC でのビームはナノサイズまで絞り込むため、精度の高いビーム情報を得ることは重要であり、ペアモニターはペアバックグラウンドのヒット分布からビーム形状を測定できる。

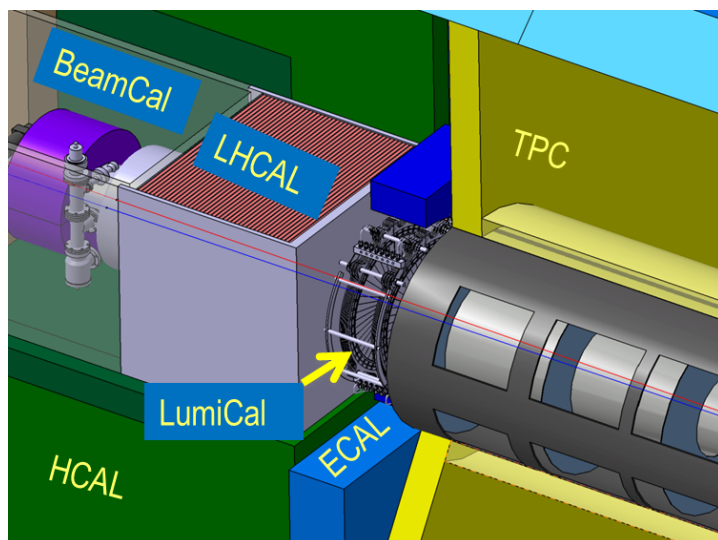


図 2.21: 前方検出器 [8]

第3章 FPCCD

ILCにおける崩壊点検出器には前章で述べた通り主に4つの要求性能があり、その中でも特に問題とされているのがピクセル占有率である。これを解決するために世界中で様々な種類の崩壊点検出器の開発が行われている。我々は占有率の問題への解決策としてピクセルサイズを小さくするという方法を採用した、 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 角のピクセルを持つFine Pixel CCD(FPCCD)の開発を行っている。

この章では崩壊点検出器の候補であるFPCCDの概要、特徴の説明をし、その後CCDセンサーの原理について述べる。

3.1 概要

崩壊点検出器は崩壊点の測定精度を上げるために、ビーム衝突点の最近傍に位置する。しかし衝突点周辺ではビームビーム相互作用による比較的低エネルギーの電子陽電子対が大量に存在し、これはペアバックグラウンドと呼ばれている。それによりピクセル占有率が增大するが、トラッキングのためにピクセル占有率は数%以下に抑えなければならない。図3.1にILCのビーム構造を示す。ILCでは1312バンチが1msecの間に衝突し、199msecビームの衝突は起こらない。この1312バンチのまとまりをトレインと呼ぶ。1トレイン分のペアバックグラウンドにより最内層では $160 - 220\text{hits}/\text{mm}^2$ が発生する。標準的なピクセル検出器の例としてSLD実験で用いられた $22\mu\text{m} \times 22\mu\text{m}$ 角のCCD検出器で1トレイン分信号を蓄積すると、占有率が10%を越えてしまう。これに対する解決方法として2つの方法が考えられている。一つは1トレイン分の信号を分割して蓄積するために複数回読み出しを行う方法がある。このためには高速の読み出しが必要とされ、またトレイン衝突時に読み出しを行うためEMIノイズの影響を受けてしまう。もう一つの方法は1トレインの信号をすべて蓄積するが、ピクセルサイズを小さくするという方法で占有率を下げる。我々は2つ目の方法を採用した検出器として高精細CCD(Fine Pixel CCD)を開発して[9]。 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 角のピクセルサイズにより占有率を数%以下に抑えることができる。



図 3.1: ILC のビーム構造

3.2 FPCCD の特徴

FPCCD の主な特徴として以下の 4 点が挙げられる。

1. 空間分解能が $1.4\mu\text{m}$ と非常に良い
2. 全空乏化
3. EMI ノイズを受けない
4. ヒット分布からバックグラウンドを除去できる

全空乏とは有感領域がすべて空乏層になっていることであり（空乏層については後述）、信号による電荷が周囲のピクセルへの拡散が抑制される。これにより粒子のトラック分解能が向上している。

EMI (ElectroMagnetic Interference) ノイズは高周波電流による電磁波で、電子陽電子ビームにより発生する。EMI ノイズは SLD 実験で問題になり、ILC でも対処が必要と考えられる [10]。トレイン中に読み出しをするセンサーの場合 EMI ノイズの影響を受けながら読み出しをすることになるが、FPCCD はトレイン間に読み出すため EMI ノイズを受けない。

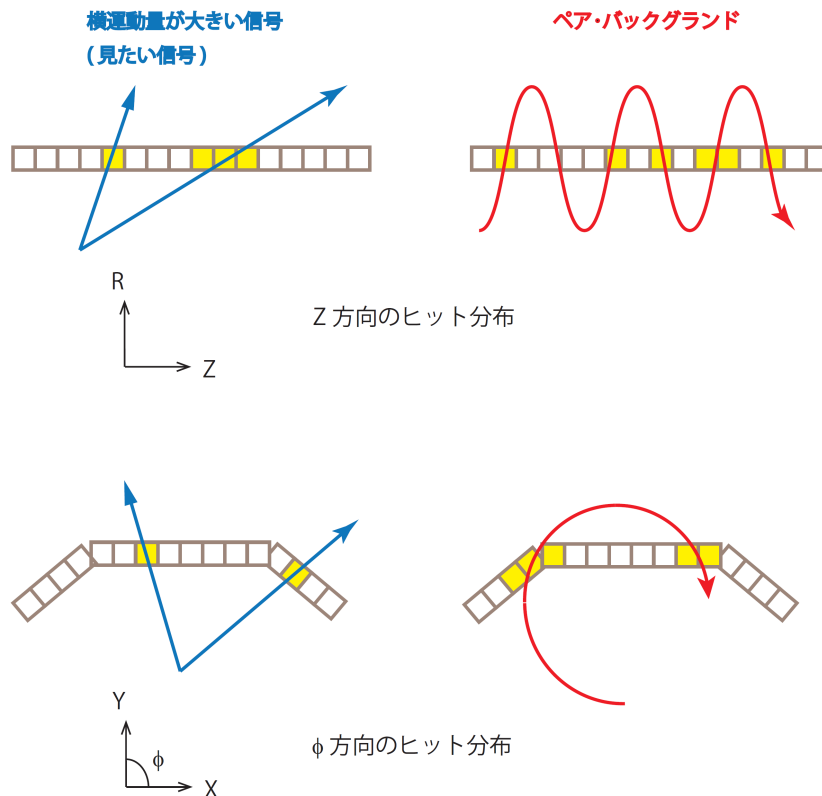
FPCCD は衝突点の最近傍に位置し大量のペアバックグラウンドが存在するため、バックグラウンド除去は重要である。ペアバックグラウンドの横方向運動量は数 MeV/c 程度と小さいため 3.5T の磁場中では半径数 cm の螺旋運動を行う。 $r-\phi$ 平面において CCD に浅い角度で入射し複数のピクセルを通過する。その結果 Z 方向には複数のヒット分布、 ϕ 方向には連続的なヒット分布が生じる (図 3.2)。一方ペアバックグラウンドではない粒子、つまり大きな横方向運動量を持つ粒子は ϕ 方向には少ないピクセルのヒットを作り、Z 方向には衝突点からの距離に比例して広がるヒット分布を作る。これらヒット分布の違いを利用して、バックグラウンドを除去することができる。

3.3 FPCCD 崩壊点検出器の構造

図 3.3 に FPCCD 崩壊点検出器の全体図を示す。CCD チップと読み出し ASIC を設置したラダーが円筒状に 3 層配置される。図 3.3 右は断面図を表し、各層の設置位置が z 軸、y 軸に表記されている。ラダーは CFRP と Kapton FPC からなる支持基板の両面に CCD チップと ASIC が設置されるダブルレイヤー構造になっている (図 3.4, 3.5)。両面にヒットすることでヒット位置をベクトルとして捉えることができ、他のレイヤーと組み合わせることでバックグラウンドを除去できる。

3.4 CCD センサー

CCD (Charge Coupled Device) は電荷転送デバイス的一种である。構造は半導体に酸化膜を接合し金属の電極を取り付けた MOS (Metal Oxide Semiconductor) 素子が多数結合することでできている。各電極に異なる電圧を加えることで電位の井戸を作り出し、信号による電荷を蓄積させることができる。電圧を変化させることで蓄積された電荷はバケツリレーのように転送され、半導体中の読み出し口に到達することで信号として検出される。現在はイメージセンサーとしてデジタルカメラなどに広く利用されているが、今回はピクセル検出器として利用する。

図 3.2: Z方向と ϕ 方向のヒット分布

3.4.1 CCDの検出原理

CCDの信号検出は以下の4つの動作から成り立つ。

1. 粒子の検出
2. 信号電荷蓄積
3. 信号電荷の転送
4. 信号電荷の検出

3.4.1.1 粒子検出

粒子の検出は半導体と放射線の反応により生成された電荷が電位の井戸に蓄積されることで行われる。周期的な結晶構造を持つ物質は帯状のエネルギーバンドを形成し、電子の取りうるエネルギー準位が価電子帯と伝導体の2つに分かれる(図3.6)。2つの準位の間には禁制帯と呼ばれる電子が存在することのできないエネルギーギャップが存在する。電子はエネルギー準位の低い価電子帯を満たしているが、禁制帯を超えることのできるエネルギーを与えられると伝導帯へ励起さ

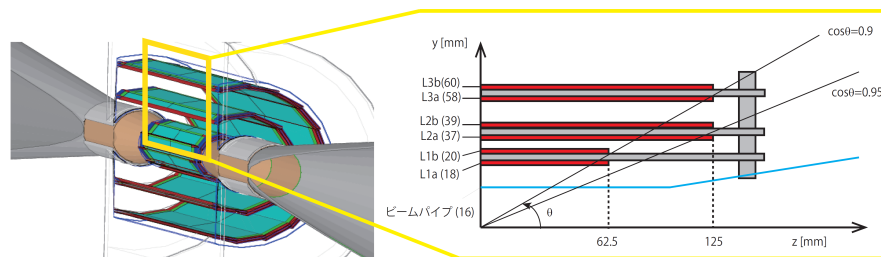


図 3.3: FPCCD の構造

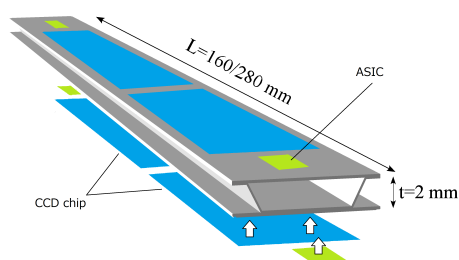


図 3.4: ラダーの構造 1

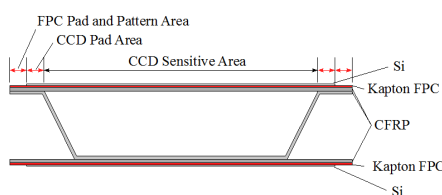


図 3.5: ラダーの構造 2

れ結晶中を自由に動き回れるようになる。一方価電子帯に電子が存在していた場所がホールと呼ばれる空席となり、あたかも正電荷であるように振る舞う。これらの半導体中を自由に動き回れる電子と正孔を総称してキャリアと呼ぶ。禁制帯の幅が広いものは絶縁体と呼ばれ、電子の励起が起こりづらい。禁制帯の幅が数 eV 程度に狭いものは半導体と呼ばれ、わずかなエネルギーで電子の励起が起こる。金属は禁制帯が存在しないため、電子が自由に結晶中を動き回ることができる。不純物を含まない半導体はキャリアとして励起された電子のみが供給される。半導体素子として用いるためにはキャリアが少ないため、微量の添加物を混ぜる（ドーピング）ことでキャリアとしての正孔または電子を増加させる。半導体がシリコンの場合、リンを混ぜると電子、ホウ素を混ぜると正孔が増加しそれぞれが多数キャリアとして伝導現象を支配する。多数キャリアが電子のものを p 型半導体、正孔のものを n 型半導体と呼ぶ。FPCCD には p 型半導体を使用されていて、今後の説明はすべて p 型半導体について行う。

粒子の検出には、結晶との反応を通して励起された電子を信号電子として検出する。物質に入射した放射線は、光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成の 3 種類の相互作用を通して物質中の価電子帯の電子にエネルギーを渡す。そのエネルギーにより電子が励起されるが、受け取ったエネルギーに比例した数の電子正孔対が生成される。つまり信号電荷量は放射線のエネルギー損失に比例するため、エネルギー損失を知るために生成された電子が正孔と再結合する前に収集する必要がある。

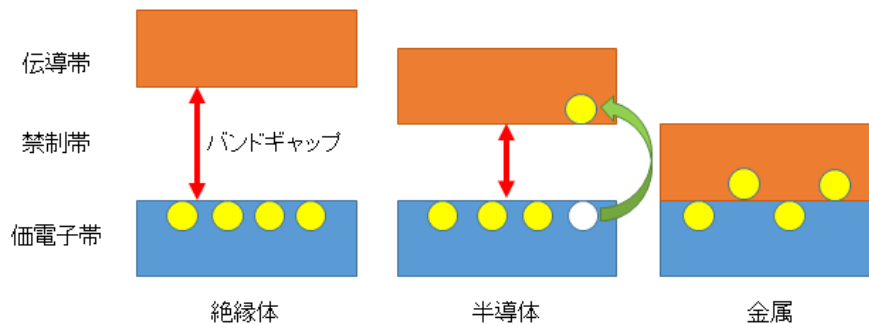


図 3.6: バンドギャップ図

3.4.1.2 信号電荷蓄積

生成された電子を転送動作までに蓄積しておくために、電位の井戸を作る。電極に正の電圧をかけることで、酸化膜を挟み半導体中に電場が発生する。電場により多数キャリアである正孔は電極から遠ざかり、電極周辺にキャリアの存在しない空乏層と呼ばれる領域が作られる。この領域は電位が高くなっていて正孔が存在しないため、電子を蓄積することができる。

原理的には p 型 (n) 型半導体のみで電荷を蓄積することができるが、この場合酸化膜との境界面に電位の井戸が生じる。境界面には製造過程に起因する格子欠陥が多数存在し、後述する電荷転送時に電荷損失が発生する。そのため境界面を避けて電位の井戸を作るために酸化膜と p 型半導体の間に n 型半導体を挿入する。p 型と n 型が接すると p 型の正孔と n 型の電子が境界付近で結合し、空乏層が生じる。さらに電極に正の電圧 (逆バイアス電圧) をかけることにより空乏層が広がり、電位の井戸がシリコン中にできる (図 3.7)。前者を表面型 MOS キャパシタ、後者を埋め込み型 MOS キャパシタと呼び [11]、FPCCD では後者を採用する。

3.4.1.3 信号電荷の転送

信号電荷の読出し口はピクセルの終端についており、検出するために電荷を転送する必要がある。転送の原理は電荷が蓄積されている電位の井戸を移動させることである。1 ピクセルに割り当てられる電極の数や駆動パルスの違いにより CCD の転送方式には種類があるが、FPCCD では 1 ピクセルに 2 本 (P1、P2) の電極が割り当てられた 2 相方式を採用している。この方式では、ハイレベルとローレベルの 2 つの電圧レベルを交互に繰り返す駆動パルスを印加することで転送が行われる。それぞれの電極下に不純物を添加することで、一つの電極下でのポテンシャル差をつけている。以下で転送の原理について図 3.8 に基づいて説明する [12]。

ある時刻 t_1 で P1 をハイレベル、P2 をローレベルにすることで、P1 下に電荷が蓄積される。それぞれの電極のレベルを切り替えると時刻 t_2 の状態を経由して、時刻 t_3 で隣の電極下に転送する

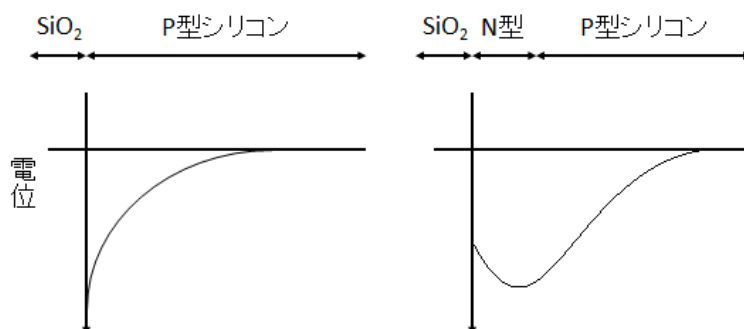


図 3.7: ポテンシャル図 (左: 表面型 MOS キャパシタ、右: 埋め込み型 MOS キャパシタ)

ことができる。以上の動作を繰り返すことにより電荷は転送される。

次に CCD 上での電荷の動きを説明する。図 3.9 は CCD の模式図を表す。CCD のピクセルは電荷転送の方向により、垂直転送ピクセルと水平転送ピクセルの 2 種類に分けられる。始めに水平転送ピクセルに蓄積した電荷が水平方向に転送され、読出し口に近いものから順次読み出される。次に垂直転送ピクセルで垂直方向への転送が一回行われる。つまり最も下段の垂直転送ピクセルに蓄積していた電荷は水平転送ピクセルへ転送され、最も上段のピクセルは空になる。その後もう一度水平方向へ電荷が転送される。この動作をすべての電荷を読み出すまで繰り返すことで、電荷転送が完了する。

3.4.1.4 信号電荷の検出

転送された信号電荷は読み出し口において電荷量に対応した電圧に変換されて出力される。FPCCD では電荷の検出方式として広く利用されている FDA (Floating Diffusion Amplifier) を用いる。この方式では電荷を検出するノードと、それに接続された 1 組のリセット用 MOSFET と電荷電圧変換用 MOSFET により構成される。検出ノードに転送された電荷は電荷電圧変換用 MOSFET で $Q=CV$ の関係で電圧へ変換される。その後次の信号を読み出すために検出ノードはリセット用 MOSFET によりリファレンスレベルの電圧にリセットされる。このため電圧の読出し自体は非破壊であるが FDA は一般に破壊読み出しに分類される。

3.5 FPCCD の開発状況

FPCCD の開発状況を報告する。現在までに浜松ホトニクス株式会社と共同でいくつかの試作 FPCCD を制作している。2004 年度には有感領域が全空乏化した、ピクセルサイズが $24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ の試作品を制作した。その後ピクセルサイズの小型化を進め、2009 年度にはピクセルサイズを

6 μm \times 6 μm まで小さくした小型の試作品に成功した。2012 年度にはピクセルサイズが 6 μm \times 6 μm で有感領域が 15 μm のエピタキシャル層になっている試作 CCD を制作し、2013 年度には実際に使用される大きさに近い 12mm \times 64mm の大型のチップを制作した。

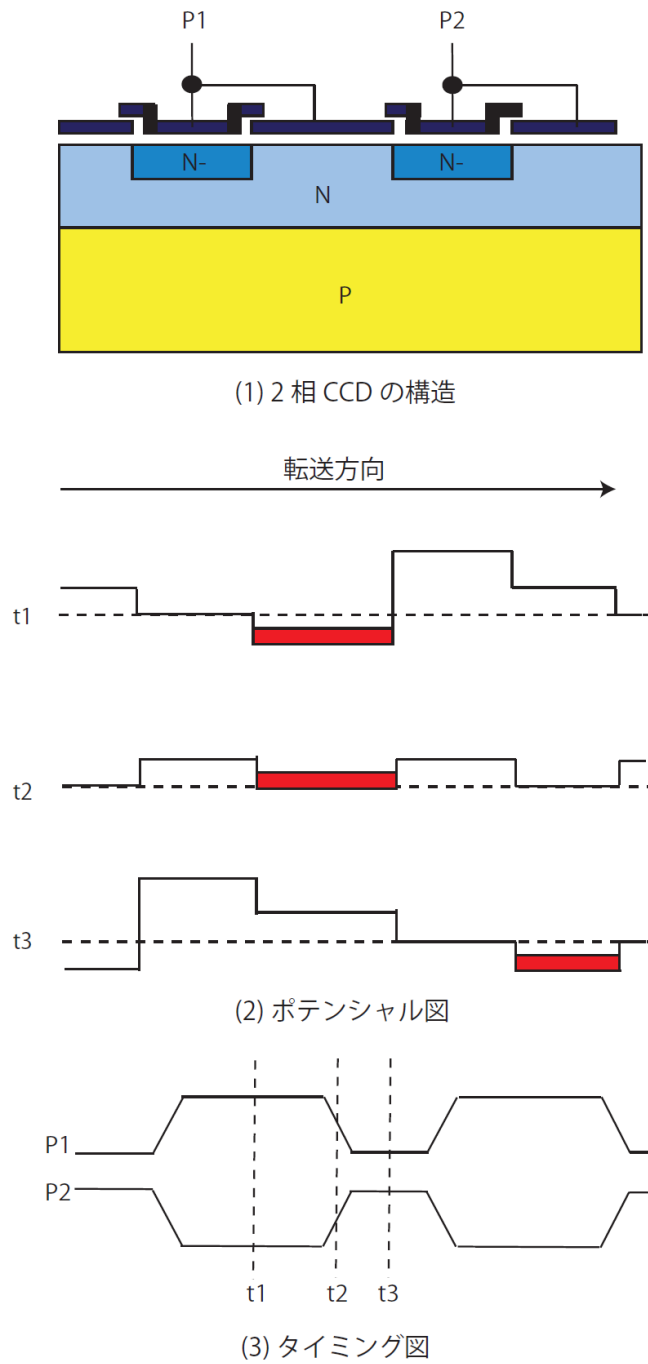


図 3.8: 2相 CCD の動作原理図 [12]

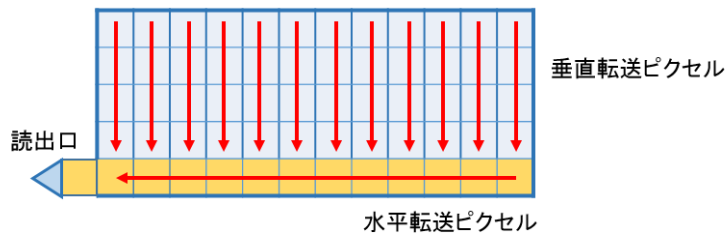


図 3.9: CCD 模式図

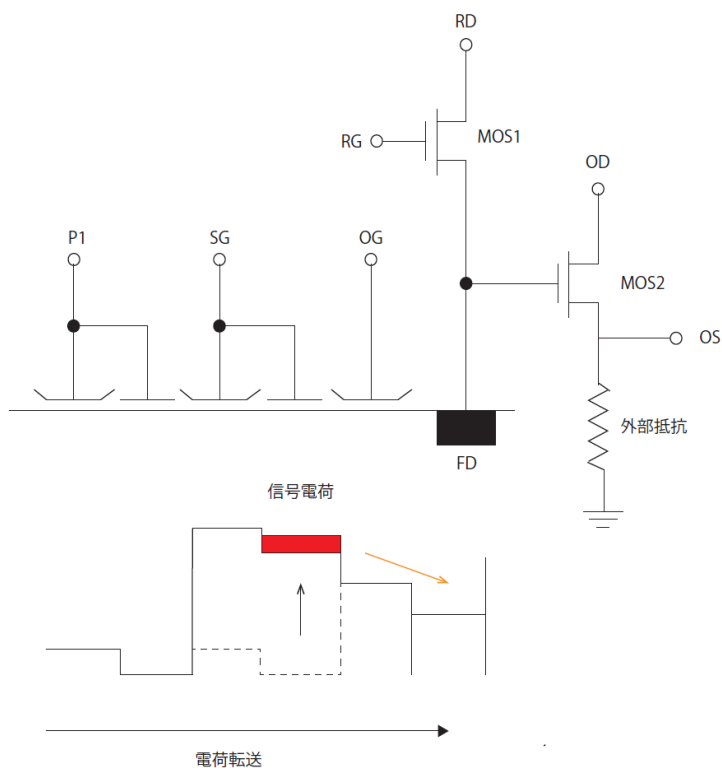


図 3.10: CCD の電荷検出機構 (FDA)[12]

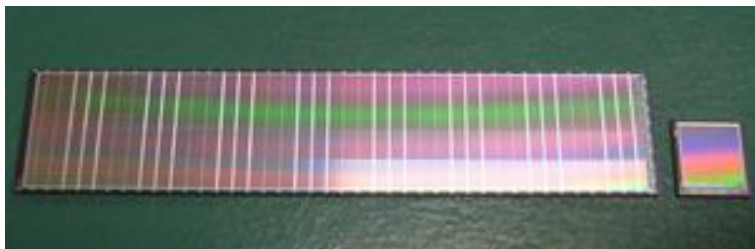


図 3.11: 試作 FPCCD

第4章 FPCCDの放射線耐性

4.1 ILCでの放射線

崩壊点検出器は最内層で衝突点から半径 1.6cm に設置されるため大量の放射線に曝される。主に以下の 2つの種類がある。

1. ビームビーム相互作用によるペアバックグラウンド
2. ビームダンプからの中性子

ペアバックグラウンド事象はビーム衝突時に光子から生成される電子陽電子ペアであり、衝突点の周辺で大量に発生する。ペアバックグラウンドは運動量が小さいため磁場により曲げられ、衝突点周辺では図 4.1 のような分布になる。これにより最も密度の高い場所を避けて検出器を配置できる。その結果、ビームの重心エネルギー 500GeV の場合 1 バンチあたりのヒット数が最内層の 1.6cm では $6.32\text{hits}/\text{cm}^2/\text{BX}$ と見積もられている。ここで BX は一回のバンチ衝突を表す。ILC の 1 年間の稼働時間は $1.0 \times 10^7\text{sec}$ と予定されている。ILD と SiD の 2つの検出器で均等に測定すると仮定すると、ILD の稼働時間は $0.5 \times 10^7\text{sec}$ となる [13]。1 トレインが 1312 バンチから成り、1 秒に 5 回トレインが衝突すると、ペアバックグラウンドによる年間ヒット数は $2.07 \times 10^{11}\text{e}/\text{cm}^2/\text{year}$ と見積もられる。

ビームダンプからの中性子は $9.25 \times 10^8\text{1MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2/\text{year}$ と見積もられている [14]。ILC は線形加速器であるため衝突したビームは再利用できず、捨てる必要がある。衝突後の電子・陽電子ビームはそれぞれビームダンプへ運ばれる。ビームダンプには高い熱容量のため水が使用され、ステンレスのコンテナの中に入っている。ビームダンプの水分子とビームが反応すると EMF シャワーが起き、中性子フラックスが生成される。大抵はそのまま直進するが、反対方向に飛び検出器に到達することがある。

崩壊点検出器はこれらの放射線への耐性が要求される。

4.2 放射線ダメージ

FPCCD は MOS 素子からなる検出器であるため、放射線ダメージによって性能が低下する。放射線ダメージにはサーフェイスダメージとバルクダメージの 2種類があり、様々な影響を及ぼす [15]。サーフェイスダメージはシリコンと酸化シリコン膜の境界周辺での電離によって発生する。バルクダメージは高エネルギー放射線によってシリコン原子が動くことによって生じる。以下に放射線ダメージによる性能低下の種類について述べる。dark current、hot pixel、charge transfer inefficiency はバルクダメージによって生じ、flat band voltage shift はサーフェイスダメージによって生じる。

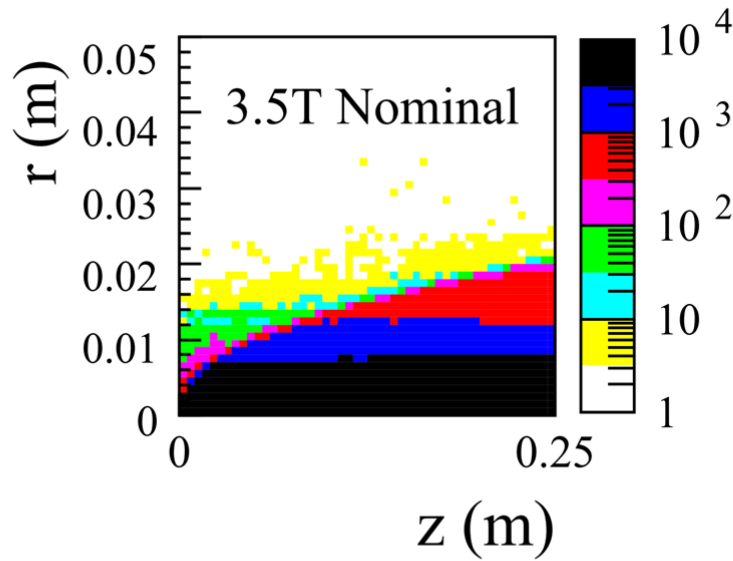


図 4.1: ペアバックグラウンド事象の分布

4.2.1 Dark current

CCD は入射粒子によって励起された電子を転送し信号として検出するが、熱によって励起された電子も同時に出力される。本論文では熱励起によって発生した電子を暗電荷 (dark charge)、単位時間あたりの dark charge の発生量を暗電流 (dark current) と定義する。

Dark current はシリコン結晶のバンドギャップを超えて電子が励起されることで発生する。通常のシリコン結晶ではバンドギャップは 1.1eV だが、格子欠陥や不純物によりバンドギャップ内にエネルギー準位が作られる。それにより価電子帯から伝導帯へ励起される確率は上昇し、Dark current は増加する。製造過程で酸化シリコン膜との界面には格子欠陥が多数存在するため、界面での発生が支配的になっている。高エネルギー放射線がシリコン結晶に照射されると原子を動かし格子欠陥が増加するため、dark current が増加する。

4.2.2 Hot pixel

電子や X 線などの軽い粒子の場合一つの原子を動かすだけだが、中性子などの重い粒子が原子に衝突すると動いた原子がさらに他の原子に衝突することで多重衝突が発生する。一つの原子の移動による欠陥を point defect、複数の原子の移動による欠陥を defect cluster と呼ぶが、defect cluster によって dark current 空間分布の不均一性が生じる。dark current が他のピクセルよりも大きなピクセルを hot pixel と呼ぶ。本論文では、全ピクセルの平均 dark charge 分布の 5 シグマ以上の大きさの dark charge を持つピクセルを hot pixel とする (図 4.2)。hot pixel による信号と粒子による信号は区別することができないため、hot pixel の増加はピクセル占有率の増加につながる。

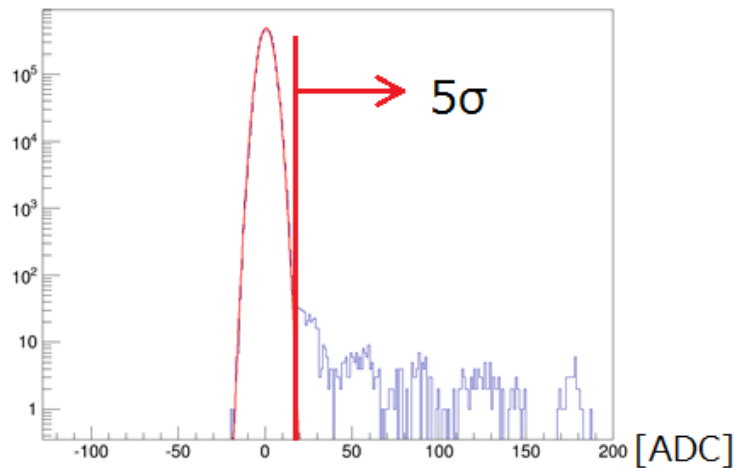


図 4.2: dark charge の ADC 分布と hot pixel

4.2.3 Charge Transfer Inefficiency (CTI)

信号電荷が格子欠陥によるバンドギャップのエネルギー準位にトラップされることがある。CCD は信号電荷が読み出されるまでにシリコン中を転送されるため、転送中に格子欠陥を通ると電荷損失が発生する。電荷損失は格子欠陥の存在密度と転送距離によって決定されるが、一般に CCD ではピクセル間の信号電荷の転送効率で表される。一回のピクセル間の転送効率を CTE(Charge Transfer Efficiency) と呼び、転送非効率を CTI(Charge Transfer Inefficiency) と呼ぶ。転送前の信号電荷を Q_0 とすると n 回転送後の信号電荷 Q_n とすると以下の式で表せる。

$$Q_n = Q_0(CTE)^n = Q_0(1 - CTI)^n \quad (4.1)$$

転送回数 n は読み出し口からのピクセルの位置に依存し、最も遠いピクセルで転送回数が最大となり電荷損失も最大となる。CCD が信号電荷を検出するためには、読み出しから最も遠いピクセルでも十分な信号電荷を検出することが必要とされる。つまり CTI は信号の検出効率に影響を与える。放射線により格子欠陥が増加すると CTI も悪化するため、検出効率が低下する。

4.2.4 Flat band voltage shift

18eV が電子正孔対を作るために必要とされるエネルギーであり、それを超えるエネルギーが放射線から電子に渡されることで電子正孔対が生成される。酸化シリコン膜内で生成された大抵の電子正孔対は再結合するが、いくつかは電場によりドリフトされる。電子は移動度が高くすぐに電極に到達するが、正孔の移動度は低く酸化シリコン内の格子欠陥にトラップされる。正孔が酸化シリコン膜に蓄えられ正に帯電すると、シリコンに加えられる実行電圧が変化する。通常 MOS 構造には電極とシリコンの仕事関数の差によりシリコンのバンドに曲がりがあるが、これをなくすように掛ける電圧がフラットバンド電圧と呼ばれている。酸化シリコン膜に蓄積した正孔によりフラットバンド電圧が変化するため、この現象はフラットバンド電圧シフトと呼ばれる。

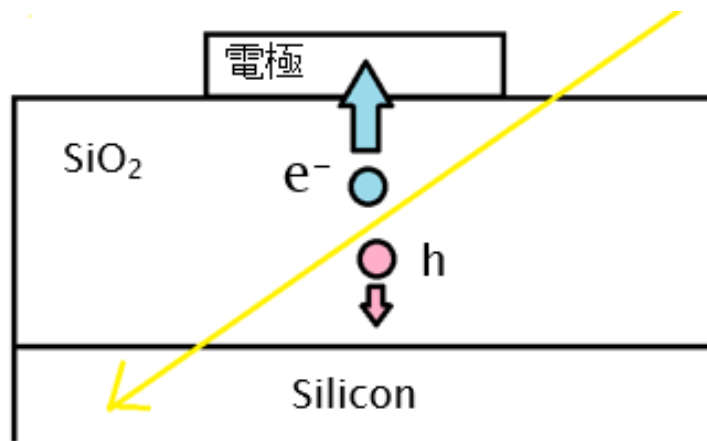


図 4.3: MOS キャパシタの酸化膜内での電離

第5章 中性子照射試験

5.1 概要

前章で述べた CCD の性能について放射線ダメージでの影響を調べるために、試作 FPCCD への中性子照射実験を行った。本実験は 2014 年 10 月に東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (Cyclotron and Radioisotope Center:CYRIC) の 32 ビームコースにて行われた [16]。中性子ビームは CYRIC の 930 型 ATF サイクロトロン (図 5.1) によって加速された陽子ビームをターゲットに照射することで生成される。図 5.2 にビームラインの外観を示す。

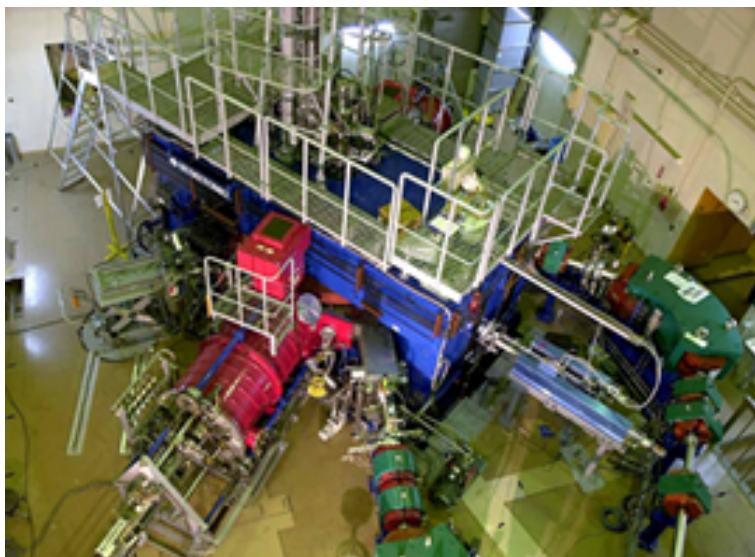


図 5.1: 930 型 AVF サイクロトロン [16]

加速器によって生成された 70MeV の陽子ビームは電磁石によってビームコースへ輸送される。中性子ターゲットであるリチウムに照射され、 $\text{Li} + \text{p} \rightarrow \text{Be} + \text{n}$ の反応を介して中性子ビームが生成される。生成される中性子ビームのエネルギーは 20-80MeV に分布し約 65MeV にピークを持つ (図 5.3)。反応しなかった陽子ビームは電磁石によりビームストッパーへと輸送され、ダンプされる。

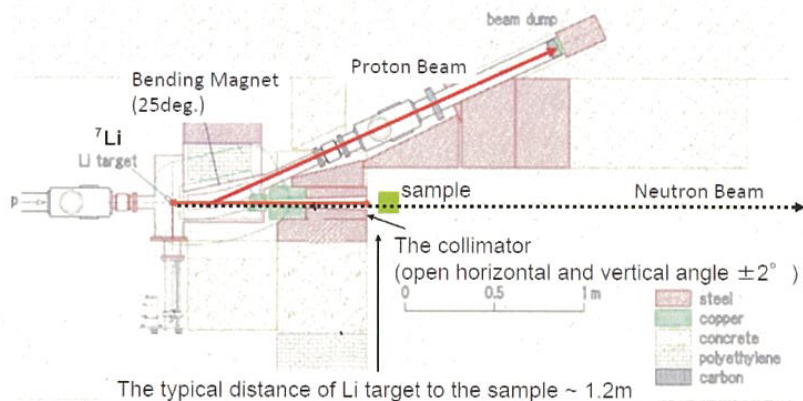


図 5.2: CYRIC 中性子ビームライン 32 コース [17]

5.2 FPCCD への中性子照射試験

性能調査のために試作 FPCCD を用意した。試作 FPCCD は、ビームポートから 105mm の位置に固定された。ビームカレント強度を $1\mu\text{A}$ に設定し 1 時間半の照射を行った。

5.2.1 試作 FPCCD

今回使用した試作 FPCCD の仕様について以下の表 5.1 にまとめる。また、ピクセルサイズについての模式図を図 5.4 に示す。なお全 4 チャンネルのうちチャンネル 1 は製造段階で欠陥があり、作動しないことがわかっている。本研究では要求サイズに最も近いチャンネル 2 を主に使用する。以降特に断りがない限り、本論文の結果についてはチャンネル 2 を表すものとする。

	ch1	ch2	ch3	ch4
垂直転送ピクセルサイズ	$6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$			
水平転送ピクセルサイズ	$6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$	$6\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$	$6\mu\text{m} \times 18\mu\text{m}$	$6\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$
ピクセル数	1024×255	1024×254	1024×253	1024×252
有感層の厚さ	$15\mu\text{m}$			
型番	CPK1-14-CP502-07			

表 5.1: 試作 FPCCD の仕様

5.3 中性子ビームフラックス

22MeV-70MeV の中性子ビームは CYRIC によって $1.4 \times 10^6 \text{n/cm}^2/\text{sec}/\mu\text{A}$ と測定されている [17]。また 22MeV 以下のフラックスについては 22MeV 以上のフラックスのおよそ $1/3$ という結

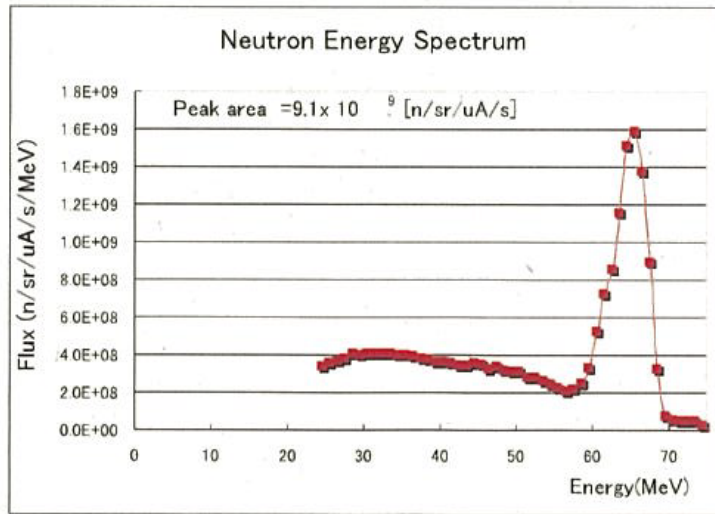


図 5.3: 中性子ビームのスペクトラム [17]

果が出ている。1MeV 中性子相当に変換すると $3.3 \times 10^6 \text{1MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2/\text{sec}/\mu\text{A}$ となる。1 μA で一時間半の照射を行ったため、Fluence は $1.78 \times 10^{10} \text{1MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ と見積もられた。これは ILC でのビームダンプからの中性子線量の 19 年分に相当する。

図 5.5 にビームプロファイルの結果を示す。四角の黒線はビームポートの大きさである 77mm \times 77mm に対応しており、円形の赤線は液体シンチレーターを表す。試作 CCD はビームポートの中心である図 5.5 の (0,0) に位置する。ビームプロファイルの結果、FPCCD チップに一様に中性子ビームが照射されていることがわかった [18]。

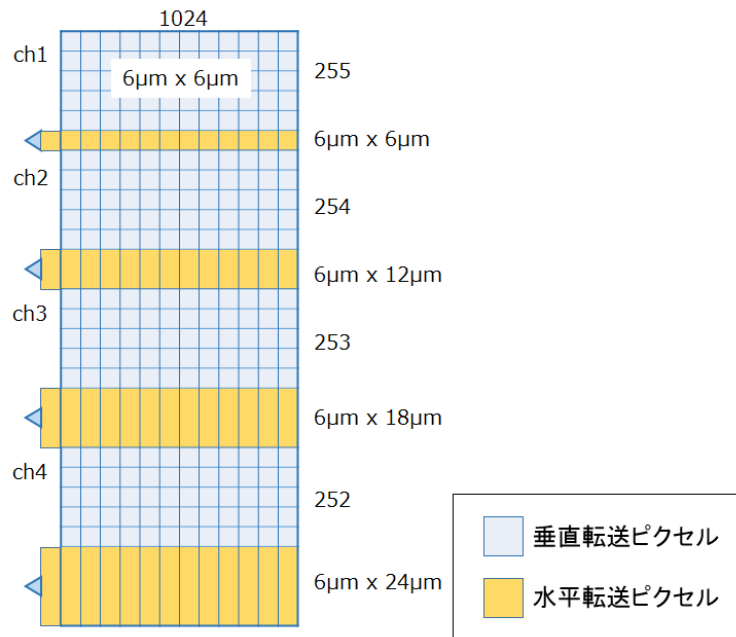


図 5.4: 試作 FPCCD の模式図

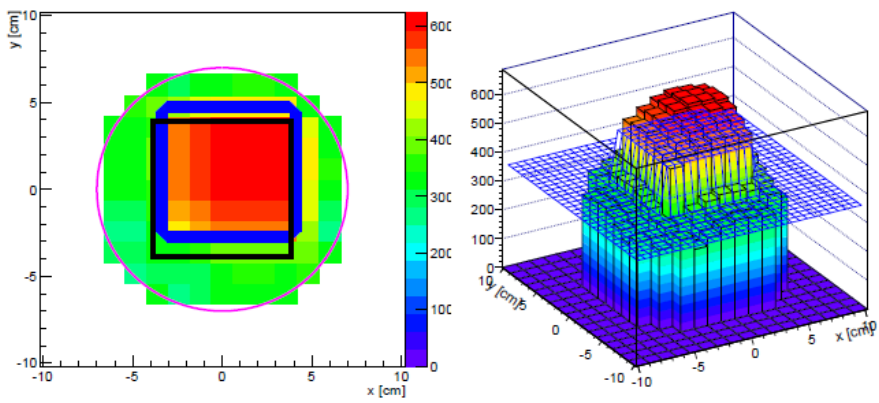


図 5.5: ビームプロファイル [18]

第6章 試作 CCD の性能測定

4章で説明した放射線により悪化する性能の測定を行った。CCD のデータの測定方法について説明した後、各項目について中性子照射前後の結果について述べる。

6.1 測定方法

6.1.1 測定環境

FPCCD の読み出し回路は ASIC を搭載した AFFROC ボード、クロックドライバーカードを搭載したインターフェイスボード、FPGA、SiTCP を搭載した SEABAS ボードの 3 種から成る。図 6.1 に実験セットアップの模式図を示す。AFFROC ボードには CCD チップを搭載する。検出された信号電荷は電圧に変換され、アナログ信号として ASIC へ送られ AD 変換が行われる。その後インターフェイスボードを介し SEABAS ボードの SiTCP に転送される。TCP データとなり、最終的に PC へ転送される。PC へ転送されたデータを DAQ-Middleware で収集する。図 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 に読み出し回路の写真を示す。

雑音低減のために FPCCD は -40°C での運用を予定されている。その環境での性能を測定するため、CCD チップの搭載されている AFFROC ボードを恒温槽内に設置した。

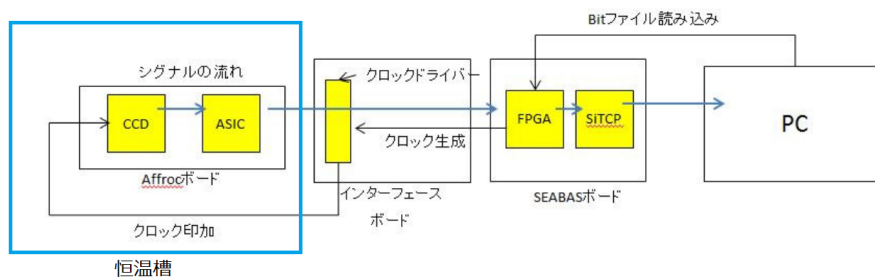


図 6.1: 実験セットアップ模式図

6.2 Dark current

6.2.1 計算方法

dark current は単位時間あたりに生じる dark charge と定義した。dark charge を蓄積時間を 5、10、30、60sec と変えて測定し、dark charge を蓄積時間の一次関数としてフィットを行う。傾き

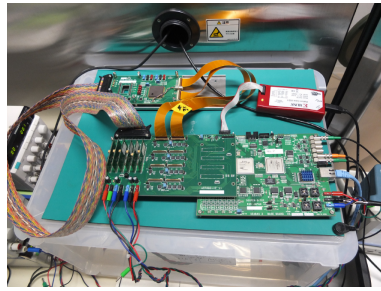


図 6.2: 信号読み出しセットアップ

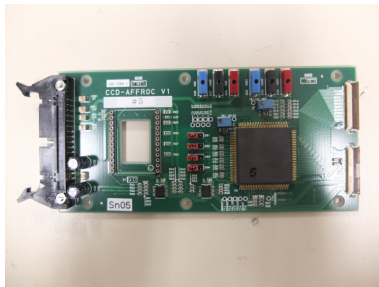


図 6.3: AFROC ボード

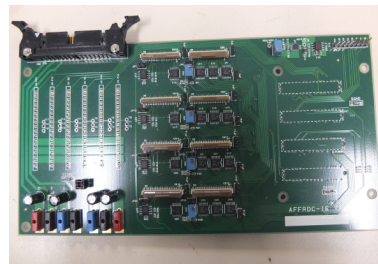


図 6.4: インターフェイスボード

が dark current に相当する。各ピクセルの dark charge はガウシアン分布をとるが、全ピクセルを見た場合 hot pixel の影響によりテールがみられる (図 6.8)。dark charge の値としてガウシアンのピーク位置を使うと hot pixel を考慮せず、平均値を使うと hot pixel の影響を含んだものになる。-30 °C と -40 °C でそれぞれ 10 フレームずつ測定した。

6.2.2 結果

dark charge と蓄積時間の関係を以下の図 6.9, 6.10 に示す。横軸が蓄積時間、縦軸が dark charge、傾きが dark current を表す。赤線がピーク位置、青線が平均値を表し、実線が -40 °C、破線が -30 °C を表す。平均値がピーク位置よりも大きく、hot pixel の影響を受けていることがわかる。中性子照射前の dark current の平均値は -0.003 電子と十分に小さい。マイナスの値だが非常に小さく誤差の範囲で 0 と考えられる。照射後には増加し 3.8 電子となった。ILC のトレインは 200ms 毎に衝突するため dark current を 1/5 にスケールすることで 200ms での dark charge を計算できる。中性子照射後には最大で数電子程度と非常に小さい (表 6.1)。

	-30 °C	-40 °C
平均	2.5 電子	0.76 電子
ピーク位置	0.23 電子	0.22 電子

表 6.1: 中性子照射後、蓄積時間 200ms の dark charge

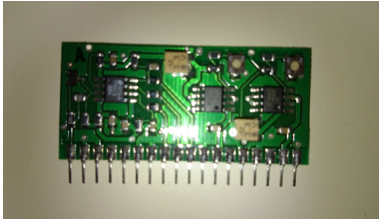


図 6.5: クロックドライバーカード

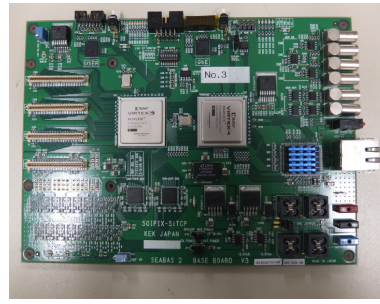
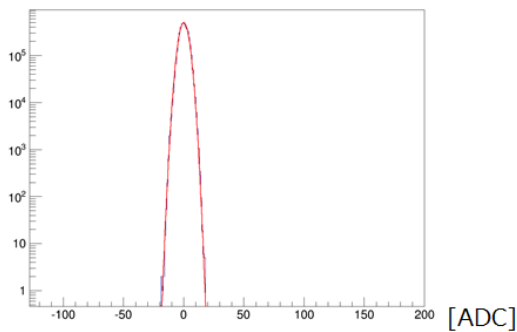
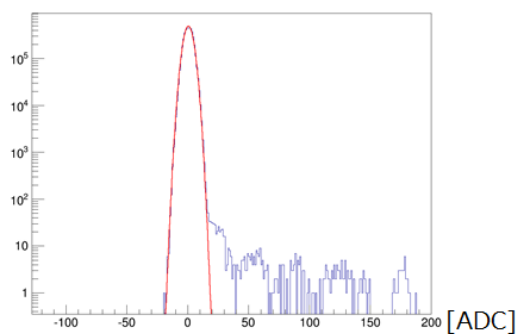


図 6.6: SEABAS ボード

図 6.7: 中性子照射前の dark charge の ADC 分布 (蓄積時間 5 秒、 -40°C)図 6.8: 中性子照射後の dark charge の ADC 分布 (蓄積時間 5 秒、 -40°C)

6.3 Hot pixel fraction

6.3.1 計算方法

本研究では全ピクセルの dark charge のガウス分布の 5 シグマ以上の dark charge を持つピクセルを hot pixel と定義する。この定義には 2 種類の hot pixel が当てはまる。一つ目は dark charge のピーク位置が他のピクセルよりも大きなピクセルである。これはそのピクセルに格子欠陥が発生し、常に dark charge が大きくなってしまうことによる。もう一つは通常のピクセルのように振る舞うが、まれに大きな dark charge が発生し hot pixel となる。この現象は Random Telegraph Signal (:RTS) と呼ばれる [20]。hot pixel の数はピクセル占有率を求める際に重要であるため、hot pixel であるかどうかの判定を 1 フレームごとに行った。つまり前者を常に hot pixel としてカウントし、後者はまれに hot pixel としてカウントした。

dark charge の ADC 分布をみると中性子照射前 (図 6.7) では hot pixel は見られないが、中性子照射後 (図 6.8) には hot pixel が増加しガウシアン分布のテールとして観測された。(hot pixel の数/全ピクセル数) を hot pixel fraction と定義し hot pixel の性能を表す指標とした。蓄積時間を 200msec とし、温度を -40°C から 0°C まで変化させそれぞれ 10 フレームずつ測定した。

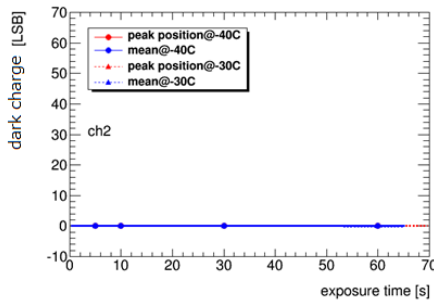


図 6.9: 中性子照射前の dark charge と蓄積時間の関係

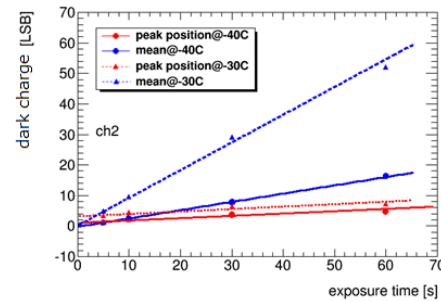


図 6.10: 中性子照射後の dark charge と蓄積時間の関係

6.3.2 結果

表 6.2 に -40°C での hot pixel fraction を、図 6.11 に温度との関係を示す。中性子照射前は温度によらず hot pixel fraction は小さい。中性子照射後は 0°C では非常に大きい、 -40°C まで冷却することで十分に小さくすることができた。

中性子照射前	$(7.49 \pm 1.91) \times 10^{-7}$
中性子照射後	$(1.03 \pm 0.19) \times 10^{-6}$

表 6.2: -40°C での hot pixel fraction

6.4 Charge Transfer Inefficiency

6.4.1 計算方法

CTI は電荷損失の指標として導入され、1 回のピクセル間の転送時の非効率として定義される。転送される信号電荷のソースとして Fe55 を使用した。Fe55 は放射線同位体であり電子捕獲過程により Mn55 へ崩壊し半減期は 2.737 年である。放射される主な X 線は 5.9keV の Mn-K α 線、 6.5keV の Mn-K β 線であり、Mn-K α 線は Mn-K β 線よりも 9 倍ほど高い確率で放射される。今回の実験では 5.9keV の M-K α 線を信号として使用する。

シリコンでは電子正孔対を一組生成するために 3.65eV が必要とされ、 5.9keV の X 線が入射すると光電効果によりピクセル内におよそ 1620 電子が発生する。発生した電子は別のピクセルにも拡散する場合があるため、一つのピクセルのみに蓄積したものをシングルピクセルイベントと呼び、それを抽出する。シングルピクセルイベントの条件として、以下の 2 つを課す。

1. あるピクセルの信号が 70ADC より大きい
2. 同じフレームで周り 8 ピクセルの信号がそれぞれの dark charge の 5 シグマよりも小さい

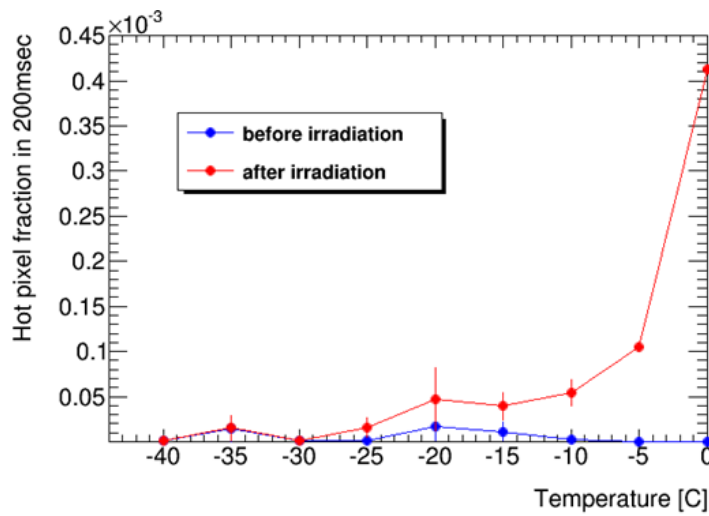


図 6.11: hot pixel fraction と温度の関係

条件 1 の 70ADC は図 6.12 に示す Fe55 の X 線のピークを十分検出できる下限として決定した。

16 × 16 ピクセルをスーパーピクセルと定義し、1024 × 255 ピクセルを 64 × 16 スーパーピクセルとして扱う。シングルピクセルイベントのヒストグラムをスーパーピクセル毎に作り、それぞれのピーク位置 (信号電荷に対応) を決定する (図 6.12)。CCD 上での信号電荷の分布を作ることができ、電荷損失を表す式 6.1 でフィットし CTI を求める。

$$Q(x, y) = Q_0(1 - CTI_h)^x(1 - CTI_v)^y \quad (6.1)$$

x, y はピクセルの位置を示し、つまり転送回数に相当する。 Q_0 は転送前の信号電荷、 $Q(x, y)$ は転送後の各ピクセルでの信号電荷を表す。 CTI_h, CTI_v はそれぞれ水平方向、垂直方向の電荷転送非効率を表す。

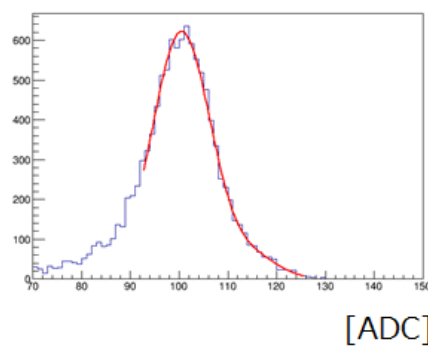


図 6.12: Fe55 からの 5.9keV の X 線のピーク

6.4.2 結果

中性子照射前の Fe55 信号分布を示す (図 6.13)。図の x 軸 y 軸はピクセルの位置を表し (0,0) に読み出し口が位置する。また z 軸は各スーパーピクセルでの Fe55 信号の大きさを表す。電荷損失による構造ではなく中心部にへこんだ構造がみられ、 CTI_h を求めることができない。これはポテンシャル形状とクロック波形の場所による違いが原因と推測されており、設計に起因する。一般に浜松ホトニクス製の CCD は $CTI = 1 \times 10^{-5}$ を達成する。中心部のへこみは電荷損失によるものではないが、読み出し口から中心部までを式 6.1 でフィットすることで CTI_h の上限を設定した。

中性子照射後の信号分布 (図 6.14) を示す。読み出し口から離れるに従い信号電荷が小さくなっていることがわかる。フィットすることで CTI を求めた。

以上の結果を表 6.3 に示す。水平方向、垂直方向ともに CTI が悪化していることを観測した。

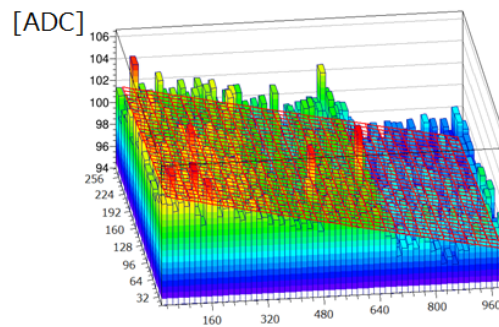
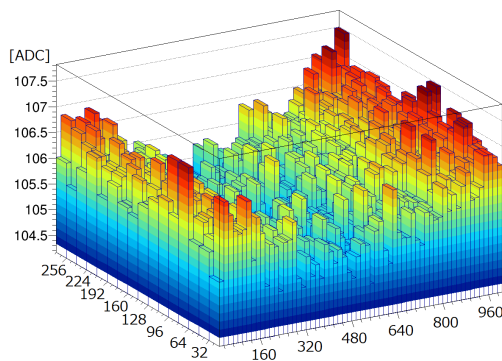


図 6.13: 中性子照射前の Fe55 ピークの CCD 上での分布 図 6.14: 中性子照射後の Fe55 ピークの CCD 上での分布

	中性子照射前	中性子照射後
CTI_h	$< 2.2 \times 10^{-5}$	$(5.93 \pm 0.05) \times 10^{-5}$
CTI_v	$(4.45 \pm 1.03) \times 10^{-6}$	$(7.32 \pm 0.22) \times 10^{-5}$

表 6.3: 中性子照射前後の CTI

6.5 Flat band voltage shift

6.5.1 計算方法

フラットバンド電圧シフトは 4 章で説明した通り、放射線により酸化シリコン膜に正孔が蓄積し実行電圧が変化することである。今回の実験では実行電圧の変化を測定するための閾値電圧として、MPP モードへ移行するときの電圧を使用する。MPP (Multi Pinned Phase) モードとは dark current の発生を抑えるための CCD の駆動方法である [12]。電極へ掛ける電圧を負にするこ

とで境界面のポテンシャルが負になり、周りから正孔が供給され結果として境界面のポテンシャルが0に固定される。また境界面で発生した電荷は正孔と結合するため dark current が抑えられる。そのため電極へ掛ける電圧を変化させながら dark current を測定すると dark current が急激に増加する電圧が存在し、そこが MPP モードの閾値電圧となる。

6.5.2 結果

中性子照射前後での dark current と電圧の関係を以下の図 6.15, 6.16 に示す。照射前後ともに-8.6V から dark current が増加していて、フラットバンド電圧シフトは見られなかった。この現象は電子照射により起きるが中性子照射ではほぼ変化しないことが先行研究で測定されており、矛盾のない結果となった [15]。

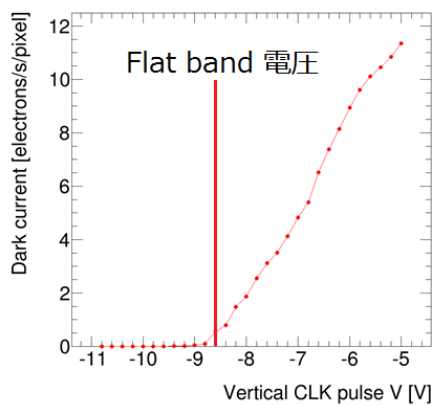


図 6.15: 中性子照射前の dark charge と印加電圧の関係

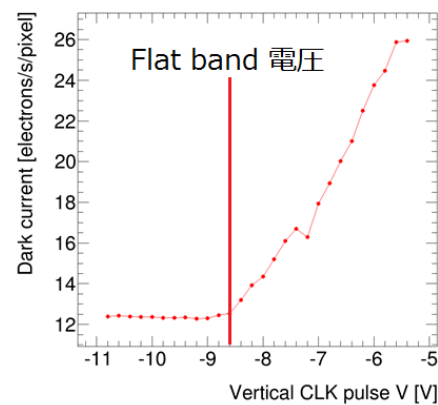


図 6.16: 中性子照射後の dark charge と印加電圧の関係

6.6 放射線耐性に関する要求性能

中性子照射実験により性能の低下が確認された。ILC で予想される放射線量と今回の中性子照射量を比較し、ILC での性能低下を推定する。また要求性能について考察し、実験結果と比較する。

4章で述べたように崩壊点検出器は主に2つの放射線の影響を受ける。ペアバックグラウンドによる電子陽電子が $2.07 \times 10^{11} \text{e/cm}^2/\text{year}$ で、ビームダンプからの中性子が $9.25 \times 10^8 \text{1MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2/\text{year}$ と予想される。今回の中性子照射実験では $1.78 \times 10^{10} \text{1MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 照射した。比較のために、電子陽電子と中性子のバルクダメージへの影響の大きさを考える。バルクダメージは原子のずれであり、放射線が物質内での損失エネルギーのうち原子の移動に使用されたものを Non-ionizing energy loss (NIEL) と呼ぶ。半導体のバルクダメージは NIEL に比例すると仮定 (the NIEL hypothesis) すると、30MeV 電子の NIEL ダメージは 1MeV 中性子の 1/16 であるためペアバックグラウンドによる照射量は $1.29 \times 10^{10} \text{1MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2/\text{year}$ に相当する [21]。3年間の使用と安全のために係数

3 を仮定すると、 $1.24 \times 10^{11} \text{MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ の放射線耐性が必要とされる。これは今回の中性子照射試験の 7 倍に相当するため、それぞれの性能を 7 倍悪化させ比較していく。

6.6.1 Dark current への要求

Dark current はショットノイズの発生源となるため十分に小さい必要がある。そのため現在のノイズを測定する。ノイズは dark charge をガウシアンでフィットしたときの幅とする。ILC のトレイン間隔である 200msec での dark charge を図 6.17 に示す。幅は 42 電子となり、それがノイズに相当する

比較のために -40°C で蓄積時間 200msec での dark charge の値 0.76 電子を用いる。7 倍すると 5.32 電子となるがノイズと比較して十分小さいため、問題にはならないと考えられる。

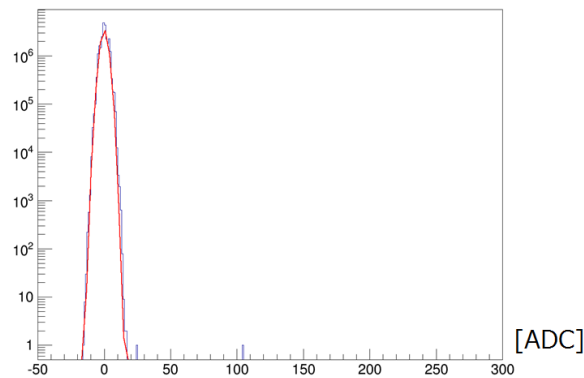


図 6.17: 中性子照射後の dark charge の ADC 分布 (蓄積時間 200msec、 -40°C)

6.6.2 Hot pixel fraction への要求

Hot pixel は信号と区別がつかないため問題となり、ピクセル占有率に影響を与える。 -40°C での hot pixel fraction を 7 倍悪化させると 7.21×10^{-6} となるが、これは要求性能である数%のピクセル占有率に比べ 4 桁ほど低いため問題にはならない。

6.6.3 CTI への要求

CTI は電荷損失を表す指標であり、CTI が大きいと信号電荷が小さくなり S/N 比が悪化する。まずは ILC での最も小さい信号について考える。粒子が物質を通過するときのエネルギー損失はベーテブロッホの式で表され、最小のエネルギー損失の粒子を MIP (Minimum ionizing particle) と呼ぶ。入射粒子が高エネルギーの場合エネルギー損失は MIP より少し大きい値に漸近するため、高エネルギー粒子を近似的に MIP として扱う。シリコンに MIP が入射すると $1\mu\text{m}$ あたり 110 電子を生成する。実際の ILC 実験で使用される FPCCD のピクセルの大きさは $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$

であり、MIP の入射する方向によって生成電子数が変化する。MIP が FPCCD に垂直入射した場合 1650 電子生成されるが、平行に入射した場合 $5\mu\text{m}$ 通過し 550 電子のみ生成される。ノイズについては 6.6.1 で述べた通り dark charge の幅が FPCCD のノイズとなり、42 電子である。このままであれば S/N 比 10 を達成しているが、式 6.1 の通り電荷損失により信号電荷が小さくなる。

実際の実験では $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ の CCD で 13000×125 のピクセル数が一つのチャンネルに割り当てられる予定だが、今回の実験では $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ ピクセルの CCD を使用している。電荷損失は格子欠陥の数に依存し、格子欠陥の存在密度がピクセルサイズに依らず一定だとすると、電荷損失量は電荷の転送距離に依存する。そのため実際の FPCCD での最大の転送回数 13125 を $5/6$ することで本実験での CTI を実際の FPCCD へ対応させる。つまり最大転送回数は 11000 となる。また水平転送と垂直転送により CTI が異なるが、水平転送 13000 回、垂直転送が 125 回で水平転送が電荷損失に占める割合が支配的である。ここでは水平転送の CTI について考えることとして、以下に S/N 比の式を示す。

$$S/N = \frac{(1 - CTI)^{11000} \times 550}{42} \quad (6.2)$$

S/N 比と CTI の関係について式 6.2 をグラフにしたものを図 6.18 に示す。中性子照射後、 -40°C では $CTI_h = 5.93 \times 10^{-5}$ であり 7 倍悪化させると 41.5×10^{-5} となる。式 6.2 に代入すると $S/N = 0.14$ となり非常に小さく、CTI を改善する必要がある。目標として S/N 比 10 を設定すると、 $CTI < 2.45 \times 10^{-5}$ が要求される。

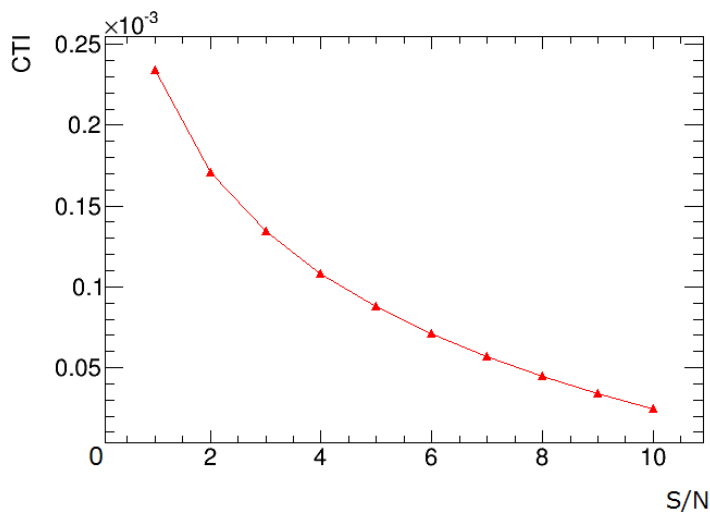


図 6.18: S/N 比と CTI の関係

第7章 CTIの改善

7.1 Fat-zero charge injection

CTIの原因は信号電荷が格子欠陥にトラップされ電荷損失が発生するためである。そのためあらかじめ格子欠陥に電荷を注入しトラップさせることで信号電荷の損失を防ぐことができる。この方法は Fat-zero charge injection と呼ばれる。

ILC 実験のために電荷注入の方法が今のところ 2 種類考えられている。一つは電氣的に直接ピクセルに注入する方法である。しかしピクセル全体に均一に電荷注入することは技術的に難しいため、水平転送ピクセルのみに注入する。FPCCD は一つの読出しにつき水平方向に 13000 ピクセル、垂直方向には 125 ピクセル割り当てられており水平方向の転送が支配的であるため、有効であると考えられる。もう一つの方法は dark charge を利用することである。通常は信号蓄積時間の間 MPP モードで動作させて dark charge を抑えている。しかしクロックパルスの電圧を調節し MPP モードでの動作時間を短くすることで、dark charge を増加させることができる。この方法ではピクセル全体に均一な電荷を発生させることができる。

7.2 実験セットアップ

今回は LED で光を照射することで電荷を注入した。セットアップの写真を以下に示す (図 7.1, 7.2, 7.3)。3mm 角の LED を 8 個 CCD の周りに等間隔で配置する。LED は並列に接続されずべてに等しい電圧が加えられ、電圧を調整することで LED の光量を調整し、電荷の発生量を変化させる。格子欠陥を埋めるための電子は、LED からの光がシリコンに入射し光電効果を起こすことで生成される。信号として Fe55 線源を CCD の上に設置した。

7.3 結果

図 7.4 に LED の最大電圧での ADC 分布を載せる。Fat-zero charge によりピーク位置が大きくなったことがわかる。LED 未使用時のピーク位置との差を Fat-zero charge とする。

図 7.5 に CTI と Fat-zero charge の関係を載せる。LED の電圧が小さい間は発生した電子の多くが格子欠陥にトラップされるため CTI が大きく改善し、電圧を上げるにつれトラップされる電子の割合が減りゆるやかに改善されている様子が見られる。今回の実験では最大で 1 ピクセル ($6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$) あたり 600 電子注入すると、 $CTI_h = 6.75 \times 10^{-6}$ 、 $CTI_v = 3.07 \times 10^{-5}$ となり、 CTI_h は 9 倍、 CTI_v は 2 倍の改善を達成した。現在の読出し回路では測定レンジの限界まで達したためこれ以上電荷を注入して測定することはできないが、CCD 自体は問題ないためさらなる改善が見込まれる。

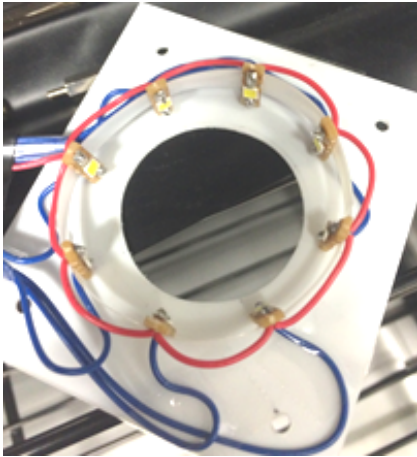


図 7.1: 8 個の LED



図 7.2: 基板にセットされた試作 FPCCD

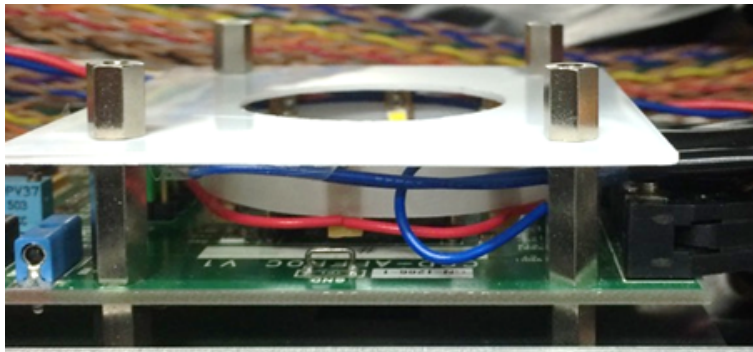


図 7.3: 実験セットアップ

7.4 要求性能

電荷を注入することで CTI は改善するが、同時にノイズも増加する。dark charge によるノイズはショットノイズと呼ばれ、電子の統計的な揺らぎによるものである。ポアソン統計に従い、標準偏差は電子数の平方根になる。ノイズの増加を式 6.2 へ追加すると、S/N 比は以下の式で表される。

$$S/N = \frac{(1 - CTI)^{11000} \times 550}{\sqrt{42 + N_{Fatzero}}} \quad (7.1)$$

ここで $N_{Fatzero}$ は Fat zero charge として注入された電子数を表す。

S/N 比と CTI の関係について式 6.2 をグラフにしたものを図 7.6 に示す。ここでは Fat-zero charge が 0 の場合を赤線、600 電子の場合を青線で表した。また Fat-zero charge 注入時の実験データを緑点でプロットした。

600 電子注入時 $CTI_h = 6.75 \times 10^{-6}$ となるため 7 倍し計算すると、 $S/N = 6.7$ となった。目標とする S/N 比 10 には届かないため、更に改善する必要がある。S/N 比 10 を達成するためには

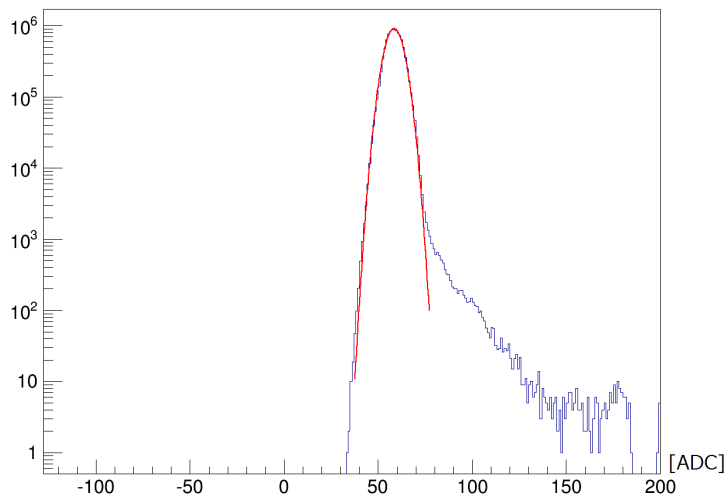


図 7.4: LED 最大電圧時の ADC 分布 (蓄積時間 5sec、 -40°C)

$CTI < 1.24 \times 10^{-5}$ が要求される。

7.5 改善案

CTI 改善のためにいくつかの改善案が考えられている。

7.5.1 水平転送ピクセルの小型化

試作 FPCCD は複数のチャンネルを持ち、水平転送ピクセルの大きさが異なる。測定の結果、Fat zero charge injection の効果がチャンネルによって違うことがわかった。表 6.2 に結果を示す。

水平転送ピクセルサイズ	電荷注入無し	600 電子注入	改善率
$6\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$	$CTI_h = 5.93 \times 10^{-5}$	$CTI_h = 0.68 \times 10^{-5}$	Factor 9
$6\mu\text{m} \times 18\mu\text{m}$	$CTI_h = 5.45 \times 10^{-5}$	$CTI_h = 1.05 \times 10^{-5}$	Factor 5
$6\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$	$CTI_h = 4.85 \times 10^{-5}$	$CTI_h = 1.89 \times 10^{-5}$	Factor 3

表 7.1: CTI_h の改善率と水平転送ピクセルサイズの関係

チャンネル間の違いは水平転送ピクセルの大きさであり、水平転送ピクセルが小さいほど改善率が高くなっている。つまり水平転送ピクセルを小型化することにより、CTI の改善が期待される。

もともと水平転送ピクセルサイズがチャンネルによって異なるのは、 CTI_h とサイズの関係を調べるためであった。水平転送ピクセルが大きいと転送される電荷は広い体積を通過し、より多くの格子欠陥に接する。よってトラップされる電荷が増加し、CTI は水平転送ピクセルの大きさに

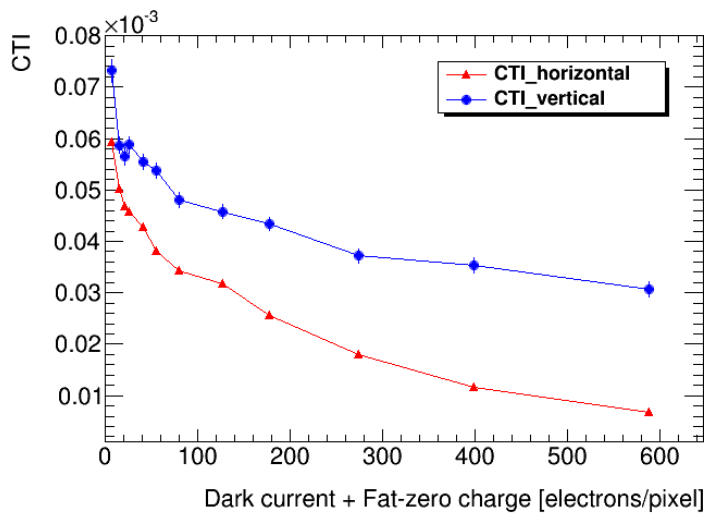


図 7.5: CTI と fat zero charge の関係

比例して減少する予想されていた。しかし表 7.1 の通り予想とは異なる結果となった。電荷注入後は CTI と水平転送ピクセルサイズは比例する結果で、今後詳しく調べる必要がある。

7.5.2 ノッチチャンネル

電荷損失の原因は電子が格子欠陥にトラップされることであるため、電子が通過する格子欠陥の数を減らせば電荷損失も減るという方法で考えられたのがノッチチャンネルである。シリコン内に添加物を入れることでポテンシャルの井戸中にさらにポテンシャルの高いノッチチャンネルを作る。電荷転送の際にノッチチャンネルを通して転送することで、電子のシリコン内を通る体積が減るため通過する格子欠陥も減少する。また水平転送ピクセルサイズが小さいほど Fat zero charge injection の効果が大きくなるため、ノッチチャンネルによりさらに効果が大きくなると考えられる。

7.5.3 アニーリング

アニーリングによる CTI の回復も報告されている [22]。アニーリングとは結晶に熱を加えその後ゆっくり冷却することで結晶構造のゆがみを取り除く熱処理である。これにより格子欠陥が回復し、CTI が改善する。現在 100 °C で 168 時間の加熱により約 3 倍 CTI が改善する。

7.5.4 ノイズの低減

ノイズを低減することにより CTI への要求を下げるができる。ノイズにはピクセルごとのダークカレントの違いによる固定パターン雑音、ダークカレントと信号電子の統計的なふらつきによるショットノイズ、読出し回路からの電氣的な雑音から構成されている。ダークカレントは数

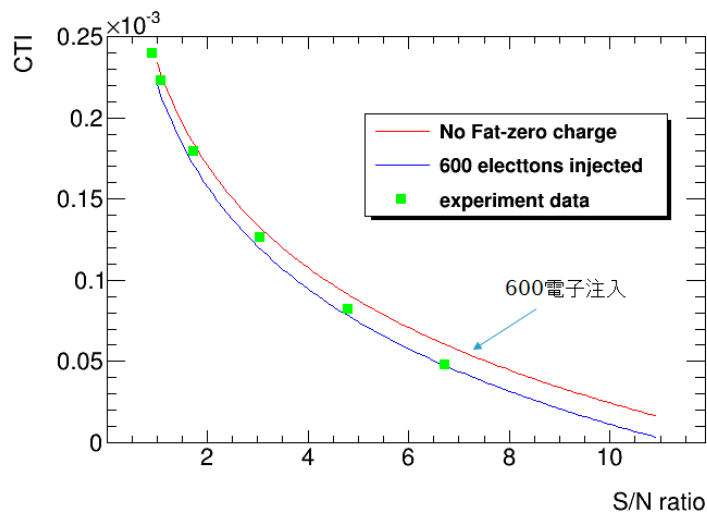


図 7.6: S/N 比と CTI の関係

電子と非常に小さいため固定パターン雑音とショットノイズの低減は難しい。読み出し雑音には改善の余地がある。

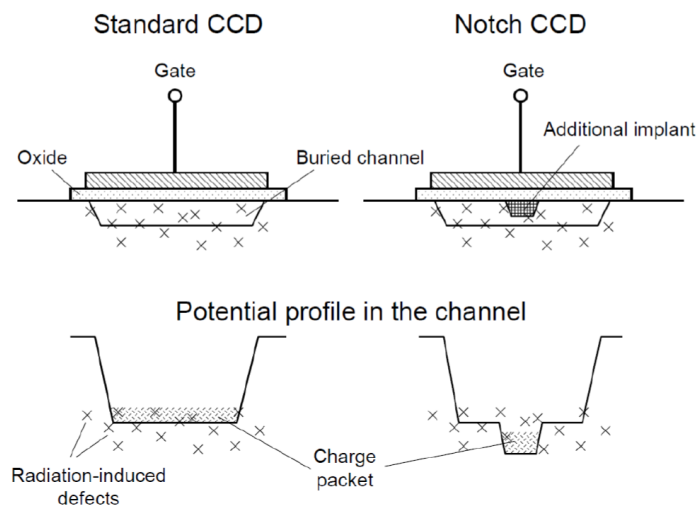


図 7.7: ノッチチャンネルの概要図

第8章 まとめ

我々は ILC のための崩壊点検出器の候補として Fine Pixel CCD を開発している。ILC の崩壊点検出器は主にビームダンプからの中性子とペアバックグラウンドによる電子陽電子の被曝を受ける。衝突点に最内層で 1.6cm と非常に近い場所に設置されるため、高い放射線耐性が必要になる。

本研究では FPCCD の放射線耐性の性能評価のため、試作 FPCCD への中性子照射試験を行った。その結果 CTI が ILC 実験で使用されるための要求を満たさなかったため、改善を行った。

8.1 試作 FPCCD の中性子試験

東北大学の CYRIC で試作 FPCCD への中性子照射実験を行い、その性能評価を行った。Fluence は $1.78 \times 10^{10} \text{1MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ と見積もられ、ILC 実験で 3 年間での予想ダメージの 1/7 程度に相当する。放射線ダメージにはサーフェイスダメージとバルクダメージの 2 種類があり、それにより性能へ異なる影響を与える。バルクダメージにより dark current、hot pixel、CTI が悪化し、サーフェイスダメージにより flat band voltage shift が発生すると予想した。

8.2 試作 FPCCD の放射線ダメージ

8.2.1 Dark current

dark current は 1 秒間に発生する暗電荷のことである。中性子照射前は -0.003 電子で誤差の範囲で 0 である。中性子照射後には増加がみられ、3.8 電子となった。Dark current はショットノイズの原因となるがノイズの 42 電子と比較して十分に小さく、ILC で運用するうえで問題にはならない。

8.2.2 Hot pixel

Hot pixel は dark charge が他のピクセルよりも大きいものを指し、全ピクセルでの hot pixel の割合を hot pixel fraction とする。中性子照射前は $(7.49 \pm 1.91) \times 10^{-7}$ であったが中性子照射後には増加し、 $(1.03 \pm 0.19) \times 10^{-6}$ となった。Hot pixel fraction はピクセル占有率に影響を与えるが、要求性能である数%に比べ十分に小さい。よって ILC で使用可能である。

8.2.3 Charge transfer inefficiency

CTIはピクセル間での電荷転送非効率であり、電荷損失の指標となる。中性子照射後には悪化が見られ、 $CTI_h = (5.93 \pm 0.05) \times 10^{-5}$ 、 $CTI_v = (7.32 \pm 0.22) \times 10^{-5}$ となった。このCTIの場合実際のFPCCDではS/N比が0.14になると見積もられ、改善が必要になった。目標とするS/N比10を達成するために、 $CTI < 2.45 \times 10^{-5}$ が要求される。

格子欠陥に電荷を注入するFat zero charge injectionという方法でCTIを改善した。本研究ではLEDによる光を試作CCDへ照射し電荷を注入した。測定の結果、fat zero chargeとして600電子を注入すると $CTI_h = 6.75 \times 10^{-6}$ 、 $CTI_v = 3.07 \times 10^{-5}$ となり CTI_h は9倍、 CTI_v は2倍改善した。しかしfat zero chargeによるショットノイズが発生し、S/N比に影響を与える。600電子注入時にはS/N比が6.7となり改善した。

8.2.4 Flat band voltage shift

Flat band voltage shiftは放射線により電離した正孔が酸化膜に蓄積することで、実行電圧が変化することである。ある閾値電圧を超えるとdark chargeが急激に増加するため、その閾値電圧を測定した。中性子照射前後で閾値電圧は変化せず、つまりFlat band voltage shiftは発生しなかった。

8.3 中性子照射試験の結論

中性子照射により各種性能の低下を確認した。Dark current、Hot pixel fractionは照射後でも十分にILCでの要求性能を満たす。Flat band voltage shiftは確認されなかった。しかし、照射後のCTIは要求性能を満たさなかった。そのためCTIの性能回復が必要となる。Fat zero charge injectionによりCTIの改善を確認したがいまだ要求性能を満たさず、更なる改善が必要である。

8.4 今後

CTIを改善するために複数の案を検討している。ノッチチャンネルによりCTIをより小さくする方法や、水平転送ピクセルの小型化とアニーリングにより悪化後のCTIを回復する方法、ノイズを減らすことでCTIへの要求を下げるなど複数のアプローチが存在する。

今回の実験では中性子照射を行い、電子によるダメージについてはNIEL仮定に基づき推定した。しかし実際に電子の照射を行い、CCDへの影響を調べる必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東北大学素粒子実験研究室の方々、VTX グループ等のたくさんの人にお世話になりました。大変感謝しています。

山本先生には様々な形でお世話になりました。学会の発表内容やスライドについてアドバイスを頂いたり、グループミーティングの際には研究に関する助言など大変参考になりました。また、国際学会やたくさんのワークショップに参加する大変貴重な機会を与えていただきました。佐貫先生には普段の研究の進め方でとてもお世話になりました。またセミナーでは詳しい説明がためになりました。長嶺先生にはネットワーク関係のことでお世話になりました。石川先生には FPCCD について一から教えて頂きました。また質問に対する的確な指導などお世話になりました。ありがとうございました。KEK の杉本さんと宮本さんには毎週の VTX ミーティングでたくさん助言を頂きました。また KEK に訪問した際には直接のアドバイスも大変参考になりました。信州大の佐藤さんには DAQ-Middleware や ASIC、FPGA について指導していただきました。信州大を訪問したとき大変お世話になりました。研究室の先輩方や、同期、後輩にもお世話になりました。特に伊藤さんには FPCCD について研究をしていくために必要なことを教わりました。ありがとうございました。

たくさんの方々の協力のおかげで、無事修士課程を終えることができました。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report Volume 1 - Executive Summary,
<https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] ILC Technical Design Report Volume 2 - Physics,
<https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [3] D. M. Asner *et al.*, "ILC Higgs White Paper," arXiv:1307.0763 [hep-ph]
- [4] M. A. Thomson, "Particle Flow Calorimetry and the PandoraPFA Algorithm,"
arXiv:0907.3577
- [5] ILC Reference Design Report Volume 2 - Physics at the ILC
<http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Reference-Design-Report>
- [6] The International Large Detector Letter of Intent, the ILD Concept Group, February, 2010
- [7] ILC Technical Design Report Volume 3 II - Accelerator,
<https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [8] ILC Technical Design Report Volume 4 - Detector,
<https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [9] Y. Sugimoto, Proceedings of International Linear Collider Workshop LCWS05, Stanford, CA, March 2005, pp 550-554.
- [10] C. J. S. Damerell, "Vertex Detectors and the Linear Collider," Nucl.Instrum.Meth. A568 (2006) 240-251 LCWS-2005-0014
- [11] 米本和也、「CCD/CMOS イメージセンサの基礎と応用」 CQ 出版社
- [12] 「技術資料 FFT-CCD エリアイメージセンサの特性と使い方」 浜松ホトニクス株式会社
- [13] Snow mass year, desired at Snowmass '88 meeting, which corresponds to 1×10^7 seconds operation time per year by taking into account down time of acceralator or detector.
- [14] S. Darbha, "Siulation of Backgrounds from ILC Extraction Line Beam Dump", SLAC-TN-07-013, 2007.

-
- [15] Konstantin D. Stefanov, "Radiation Damage Effects in CCD Sensors for Tracking Applications in High Energy Physics," Saga University, February 2001
- [16] 東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター
<http://www.cyric.tohoku.ac.jp>
- [17] CYRIC Annual Report 2010-2011
<http://www.cyric.tohoku.ac.jp/publications/report.html>
- [18] 伊藤周平、修士論文「国際リニアコライダーに置ける崩壊点検出器 FPCCD の基本性能および放射線耐性の研究」、東北大学、2015
- [19] R. Nolte *et al.*, "High-energy neutron reference fields for the calibration of detectors used in neutron spectrometry," NIMA 476 (2002) 369
- [20] D.R. Smith, A.D. Holland, and I.B. Hutchinson, "Random telegraph signals in charge coupled devices", Nuclear Instruments Methods in Physics Research A, vol 530, pp. 521-535, 2004
- [21] A. Vasileseu, "Notes on the fluence normalisation based on the NIEL scaling hypothesis," ROSE/TN/2000-2
- [22] E. Martin *et al.*, "Dose Rate and Static/Dynamic Bias Effects on CCDs Degradation," IEEE Trans. Nucl. Sci. , vol. 58 No. 3, June, 2011