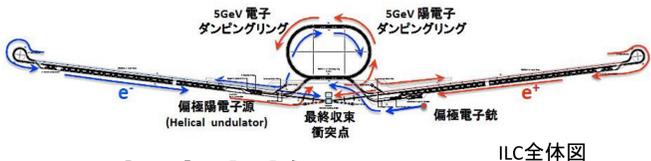


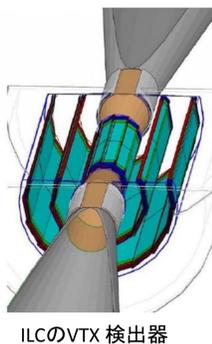
1.国際リニアコライダー(ILC)

- 特徴
 - 電子陽電子を衝突させる線形型の加速器
 - 重心エネルギー: 250GeV~500GeV(→1TeV)
 - ルミノシティ: $1.8 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ @500GeV
 - 全長: 約30km
- 主な目的
 - ヒッグスの結合定数の測定
 - b,cクォークの識別が必要。b-jetが3つ、c-jetが2つの崩壊点を持つことを利用する
 - 衝突径数分解能 $\sigma \leq 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^{3/2}\theta} (\mu\text{m})$ が要求される



2.ILCの崩壊点検出器

- 特徴
 - バックグラウンド排除のため2層×3層の構造
 - b,cの寿命が短いため(~1ps)高い衝突径数分解能が必要
 - 衝突点の近くに配置(最内層半径1.6cm)
 - 精密な飛跡再構成のためピクセル占有率≦数%が必要
- 問題点
 - ペアバックグラウンドにより電子陽電子が大量に生成されピクセル占有率が增加する
 - ILCのビームは1トレイン=1312バンチとして199msの間隔で衝突
 - 20μm×20μmピクセルの場合、1トレインデータを蓄積するとピクセル占有率が10%以上になってしまう



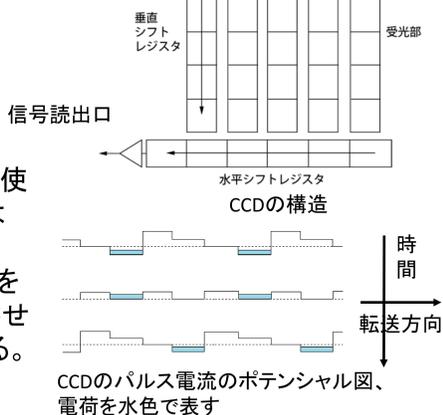
3.解決策

- ①トレインを分割し読みだすことで占有率を下げる
 - CMOS(フランス)等(ビーム由来の高周波ノイズが問題)
- ②1トレインの間全てデータを蓄積するが、ピクセルを小さくし占有率を下げる

→FPCCD

3.FPCCDの特徴

高精細な(Fine Pixel)CCD
 CCDとはCharge Coupled Deviceの略で広く使われているイメージセンサーだが、本質的には半導体中の電荷を転送するデバイスである。
 半導体上のピクセル状に並んだ電極に電圧を加えることで電位の井戸を作る。電圧を変化させることで、バケツリレーのように電荷を転送する。



FPCCDの特徴

- ピクセルサイズ: $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ → 高い位置分解能、衝突径数分解能
 - 総ピクセル数: 約 4×10^9 ピクセル → ピクセル占有率の低下
 - 全空乏型 → 高い2粒子分解能
 - トレイン間で読み出し → ビーム由来のノイズの影響を受けない
 - 1チャンネル13000×128pixelで最も遠いpixelは約10000回転送される
 - 放射線ダメージを受けやすい
 - CCDの半導体に格子欠陥が発生し、信号電荷がトラップされる
 - 最大で約10000回転送されるため、格子欠陥によるトラップ頻度が多い
- 実際に中性子をCCDにあて、転送効率があどの程度変化するか調べる

4.中性子照射ビームテスト@CYRIC

- 2014年10月15-17日にCYRICでFPCCDへの中性子照射試験を行った。
 - 中性子ビームは70MeV陽子ビームを使いLi+p→Be+p反応によって作られ、約65MeVとなる。
 - 2時間照射しFluenceは $2.4 \times 10^9 / \text{cm}^2$
 - ILCでの中性子fluenceは年間 $1.85 \times 10^9 / \text{cm}^2 / \text{year}$ で、今回の照射はILCの稼働26年分に相当する
- 今回使用した試作FPCCD
 - 全部で4チャンネルあり各チャンネルで水平転送レジスタのサイズが異なる。レジスタのサイズを変えることにより格子欠陥にトラップされる回数を変化させ、電荷転送効率の変化を見る。
 - 上からチャンネル1、2、3、4でチャンネル1には水平転送不良がある。



試作FPCCD

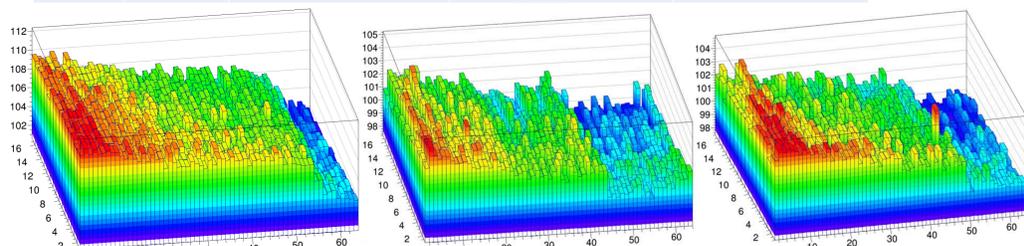
5.CTI (Charge Transfer Inefficiency)

CCDは理想的には電荷をすべて転送するが、実際には転送損失が存在する。1ピクセル間の電荷転送非効率(CTI)を測定し性能を評価する。水平転送と垂直転送は動作パルスが異なるため、それぞれのCTIについて考える。

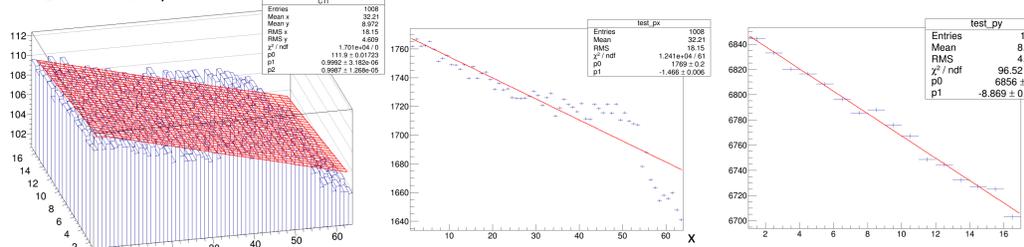
- 測定方法
 - 線源としてFe55を使用しγ線を照射する。
 - シングルヒットイベント(ガンマ線が1つのピクセルだけを通るイベント)を選択しCCDの2次元グラフを $f(x, y) = Aa^x b^y$ でfitする。ここで $a = 1 - CTI_x, b = 1 - CTI_y$
 - 温度を-40°Cに設定し暗電流を抑制。
 - CCDの周波数を6MHz,25MHzの2種類で測定した(実際の稼働では100MHzが目標)。

6.最近の結果

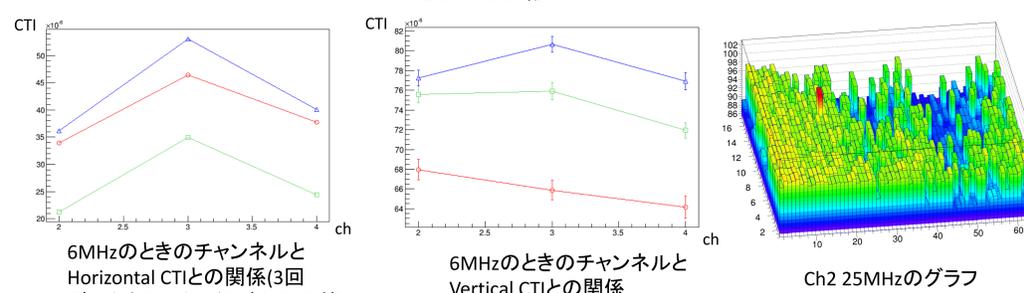
Channel	Frequency	Horizontal CTI (CTI_x)	Vertical CTI (CTI_y)	Horizontal register size
Ch2	6MHz	$(3.61 \pm 0.02) \times 10^{-5}$	$(7.72 \pm 0.08) \times 10^{-5}$	$6 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$
Ch3	6MHz	$(5.30 \pm 0.02) \times 10^{-5}$	$(8.07 \pm 0.08) \times 10^{-5}$	$6 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$
Ch4	6MHz	$(4.01 \pm 0.02) \times 10^{-5}$	$(7.70 \pm 0.09) \times 10^{-5}$	$6 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$
Ch2	25MHz	$(6.41 \pm 0.04) \times 10^{-5}$	$(20.8 \pm 0.16) \times 10^{-5}$	$6 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$
Ch3	25MHz	$(3.38 \pm 0.02) \times 10^{-5}$	$(6.08 \pm 0.09) \times 10^{-5}$	$6 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$
Ch4	25MHz	$(1.56 \pm 0.02) \times 10^{-5}$	$(3.06 \pm 0.08) \times 10^{-5}$	$6 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$



Ch3 6MHzのグラフ、x,y軸はCCDのピクセル領域番号、z軸はADC value(γ線が落とす電子数に相当)



上のグラフを $f(x, y) = Aa^x b^y$ でfitしたもの



6MHzのときのチャンネルとHorizontal CTIとの関係(3回データを取った、緑が上記の値)

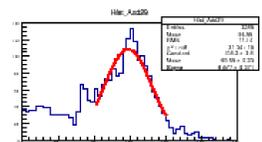
6MHzのときのチャンネルとVertical CTIとの関係

Ch2 25MHzのグラフ

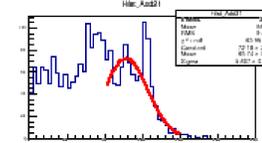
- 6MHzについて
 - x,y軸の射影はともに直線でfitしているが、x軸の射影はx~50で明らかに傾きが変わって、特にch3で大きく変化している。一方、y軸の射影はどのチャンネルも綺麗に直線になっている。
 - Ch毎の関係は水平方向はch3>ch4>ch2、垂直方向には関係がみられなかった。水平レジスタの大きさが小さくなるほどトラップ回数が減りCTIが改善する、という予想とは異なる結果となった。
- 25MHzについて
 - Ch3,4では6MHzと同様にfitできCCDのグラフも同じようなものになったが、Ch2では中心に凹みのようなものがありうまくfitできていない。

7.考察と今後

- 実際のFPCCDでは、最も読出し口から遠いpixelでは約10000回転送を行うが、今回の結果より電荷転送効率は最も悪くて70%程度で中性子のダメージに関しては問題はない。しかし、ペアバックグラウンドによって転送効率の悪化が想定されるため、今後もCTIの改善を続ける必要がある。
- 6MHzのx≥50でのへこみの原因が、CCD由来のものか読み出し回路によるものか調べる。
- Ch2の25MHzでfitできていない原因は、他と同じカットでFe55のsingle hit peakが右図のように他と異なる形で出てきているためであり、この現象を理解しCTIを求められるようにする。



Ch2 6MHzのある領域のCCDのADC valueのヒストグラムにsingle hit eventを選択するカットをかけたもの、横軸はCCDに落とされた電荷量に対応し、縦軸はカウント数



Ch2 25MHzで上と同じ領域の同じヒストグラム、上ではピークが1つでfitできているがここでは3つのピークがたち、うまくfitできていない