



TOHOKU
UNIVERSITY



国際リニアコライダーのための 崩壊点検出器FPCCDの 中性子耐性についての研究

2016年10月27日 Flavor Physics Workshop 2016

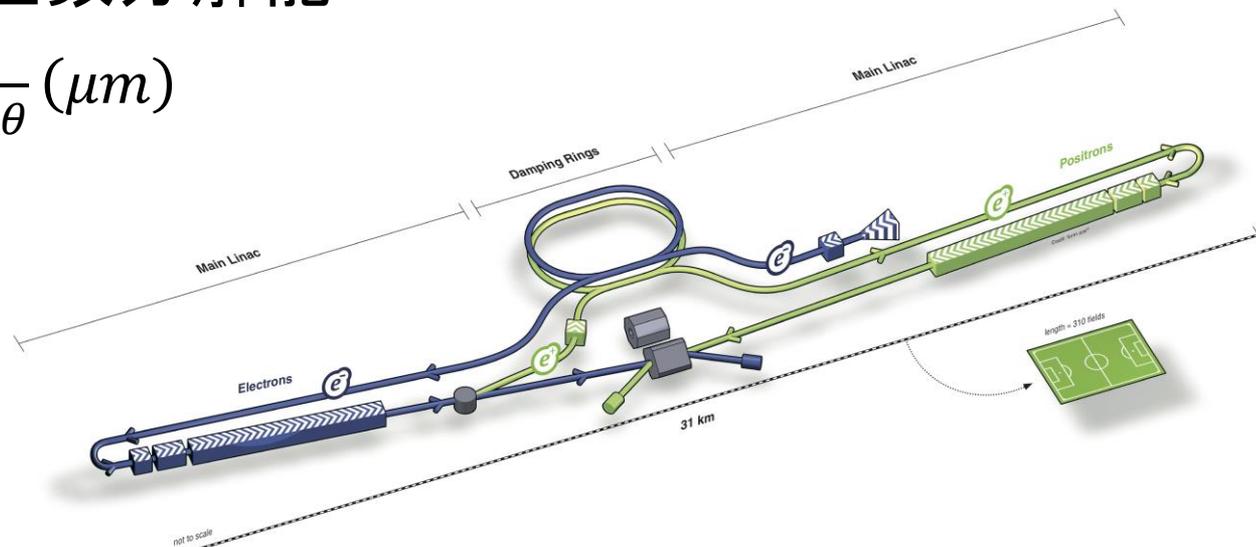
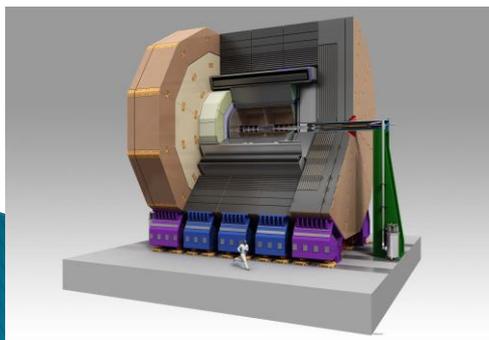
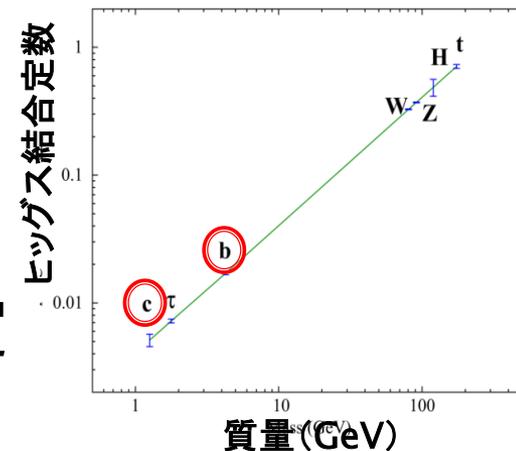
東北大学修士2年 村井峻亮
on behalf of FPCCD group

国際リニアコライダー(ILC)実験

- ▶ e^+e^- 衝突型の線型加速器
 - 重心系エネルギー: 250~500GeV(→1TeV)
 - ルミノシティ: $1.8 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} @ 500 \text{GeV}$
- ▶ 主な目的としてヒッグスの結合定数の測定
 - b,cクォークの識別→崩壊点検出利用
- ▶ 要求される衝突径数分解能

$$\sigma \leq 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^{3/2} \theta} (\mu\text{m})$$

質量と結合定数の関係

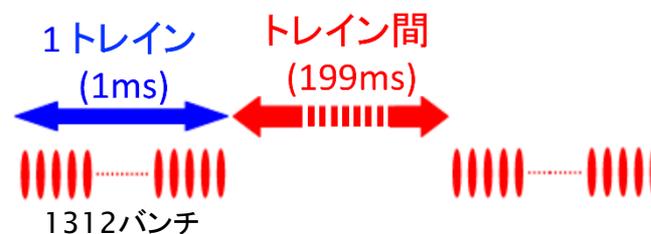


ILCにおける崩壊点検出器

- ▶ 正確なトラッキングのためにピクセル占有率数%以下が要求される
 - 通常サイズ($25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$)のピクセル検出器で1トレイン信号を蓄積すると、最内層(半径1.6cm)で占有率が10%以上

占有率を下げる2つの方法

- ① 1トレイン中に何回も読み出す
- ② ピクセルサイズを小さくする



ILCのビーム構造

②を採用したのが

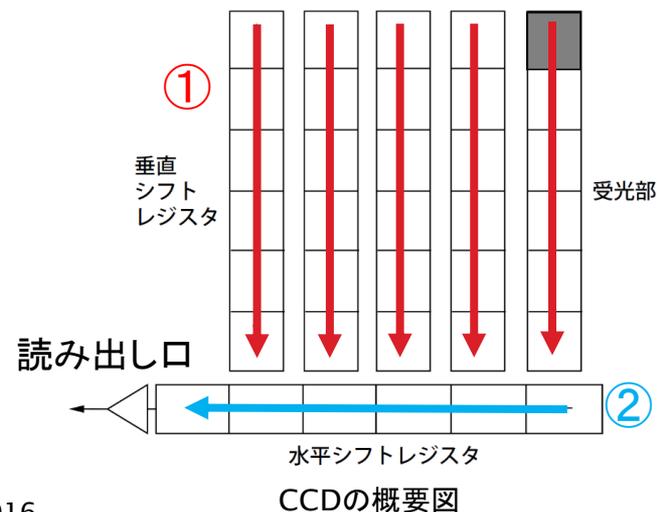
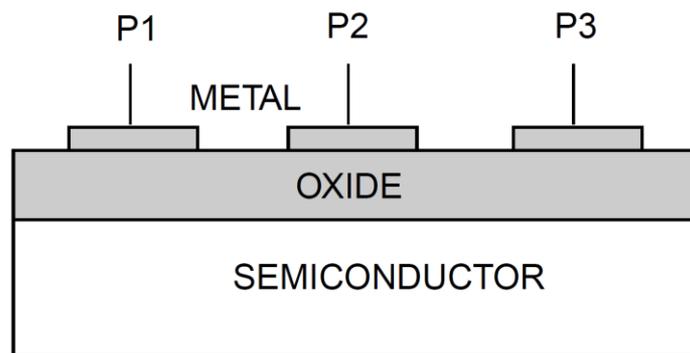


Fine Pixel CCD
= FPCCD

ピクセルサイズ
 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ で
ピクセル占有率~数%
を達成!

FPCCDとは

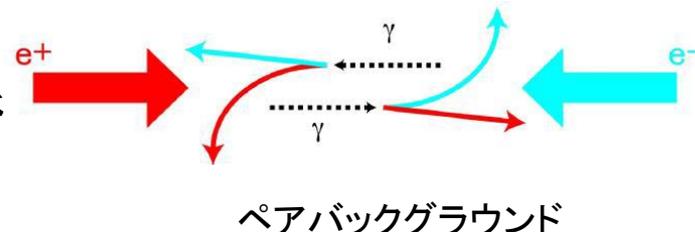
- ▶ FPCCDとはFine Pixel CCDの略でピクセルサイズが非常に小さなCCDのこと
- ▶ そもそもCCDとは？
 - 一般的にビデオカメラ、デジタルカメラなどに使用されているイメージセンサー
 - 半導体のピクセル検出器でMOS素子が並んでできている
 - CCDはcharge coupled device(電荷結合素子)の略で、本質的には電荷転送装置
 - 1つの読み出し口に対してピクセルが複数つながっていて、電荷をピクセル内をバケツリレーのように転送させることにより信号を読み出す



放射線ダメージ

▶ 崩壊点検出器に照射される主な放射線

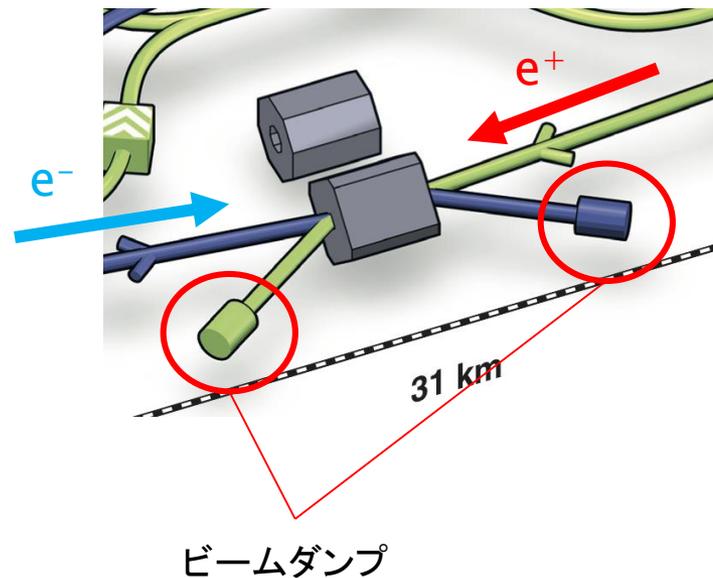
- ペアバックグラウンドからの電子陽電子
- ビームダンプからの中性子



▶ 放射線によるCCDへの主な影響

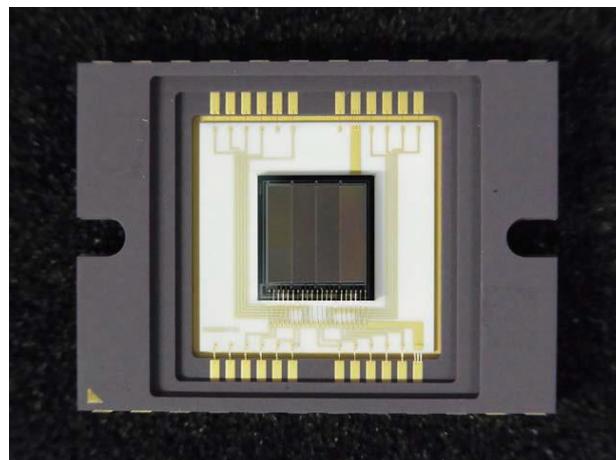
- ダークカレントの増加
- ホットピクセルの増加
- 電荷転送効率の悪化
- フラットバンド電圧のシフト
- スプリアスチャージの発生

→ 今回は中性子をCCDに照射し
影響を調べる



中性子ビームテスト

- ▶ 日付: 2014/10/15-17
- ▶ 場所: CYRIC@東北大学(東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター)
- ▶ Fluence: $1.78 \times 10^{10} n_{eq}/cm^2$ (1.5h)
 - ILCのビームタイム 10^7 秒が2つの検出器(ILD, SiD)に分けられるとすると、重心系エネルギー500GeVでのILC稼働19年に相当する。
- ▶ CCD試作機
 - ピクセルサイズ: $(6\mu m)^2$
 - ピクセル数: 1024x255
 - 浜松ホトニクス製
 - 型番: CPK1-14-CP502-07



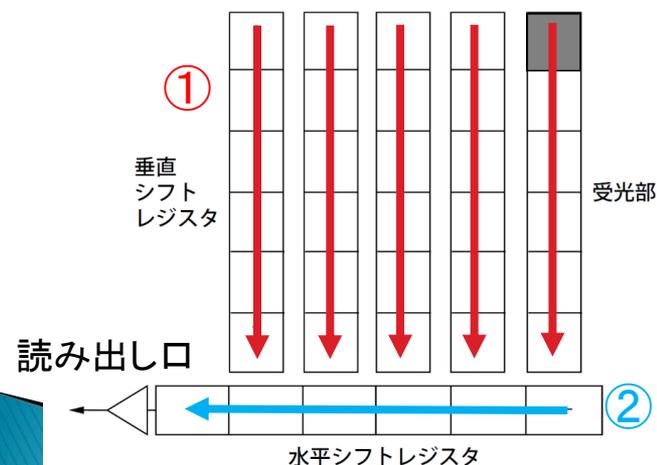
電荷転送効率

CCDは信号電荷をピクセルからピクセルに転送し最後に読み出す。理想的には電荷は完全に転送されるが、格子欠陥によってトラップされ電荷損失が起こる。放射線により格子欠陥が増加するため、電荷転送効率は悪化する。

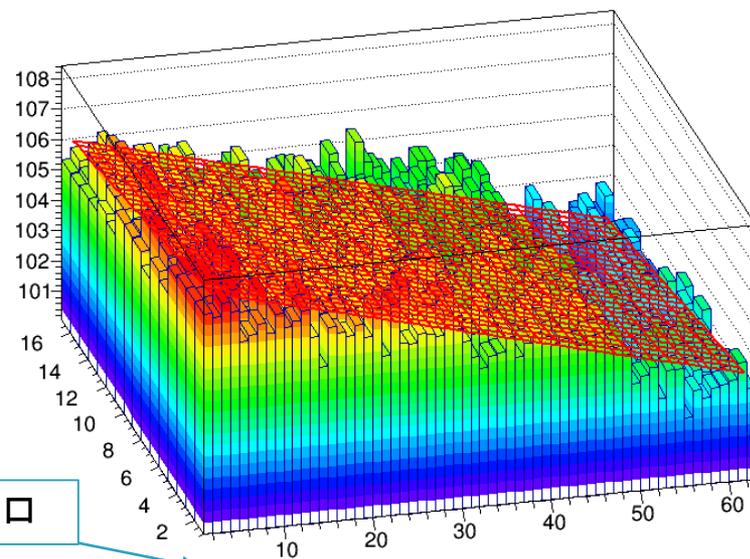
▶ Charge Transfer Inefficiency (電荷転送非効率)

- CTIをピクセルからピクセルに一回転送したときの非効率と定義する
- 信号電荷を Q_0 とすると、 n 回転送後には下の式で示される Q_n になる。

$$Q_n = Q_0(1 - CTI)^n$$



CCDの概要図



Fe55のX線信号のピクセルごとの大きさ

CTI

▶ 結果

- $CTI_h = (5.52 \pm 0.05) \times 10^{-5}$
- $CTI_v = (7.00 \pm 0.20) \times 10^{-5}$

照射前CTIの参考値

ピクセルサイズ($12\mu\text{m}$)²FPCCD

$$CTI_h = (1.84 \pm 0.55) \times 10^{-5}$$

$$CTI_v = (4.66 \pm 0.10) \times 10^{-5}$$

浜松ホトニクス製CCDは

標準的に $CTI = 1.0 \times 10^{-5}$ を実現

- ▶ 実際の実験では一つの読出し口につき13000×128ピクセルが割り当てられる。最も読出し口から遠いピクセルは水平方向に13000回、垂直方向に128回転送される。

$$(1 - 5.52 \times 10^{-5})^{13000} \times (1 - 7.00 \times 10^{-5})^{128} = 0.48$$

- ▶ 最も遠いピクセルでは、48%の信号電荷が残る。(最大52%の損失)



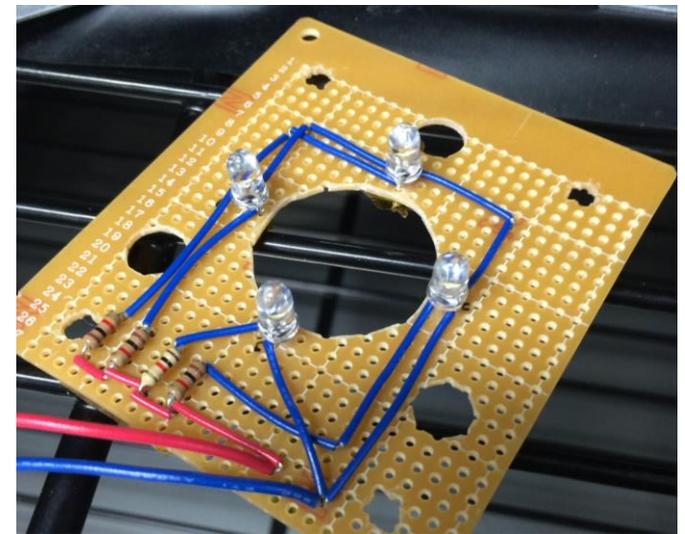
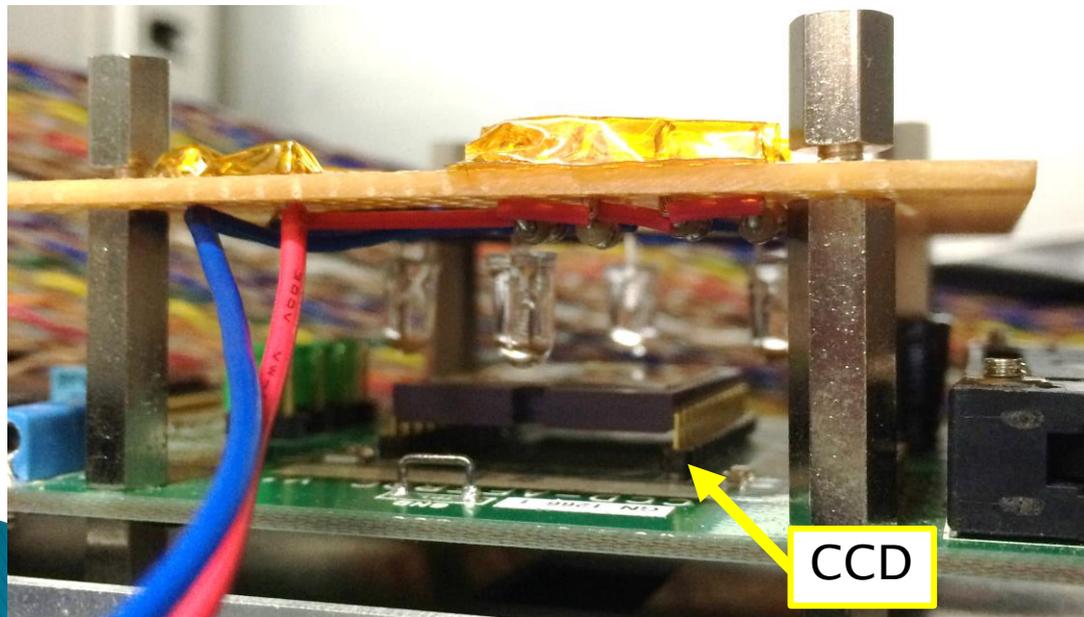
CTIの改善を目指す

Fat-zero charge injection

- ▶ 電荷転送効率の改善
 - 転送効率悪化の原因は格子欠陥
⇒ 格子欠陥にあらかじめ電荷をトラップさせることにより、信号電荷のトラップを減らす
- ▶ Fat-zero charge injection
 - バックグラウンド電流を流すことにより、トラップを埋めCTIを改善させる
 - LEDで光をCCDに照射し、発生した電荷をFat-zero charge とする

セットアップ

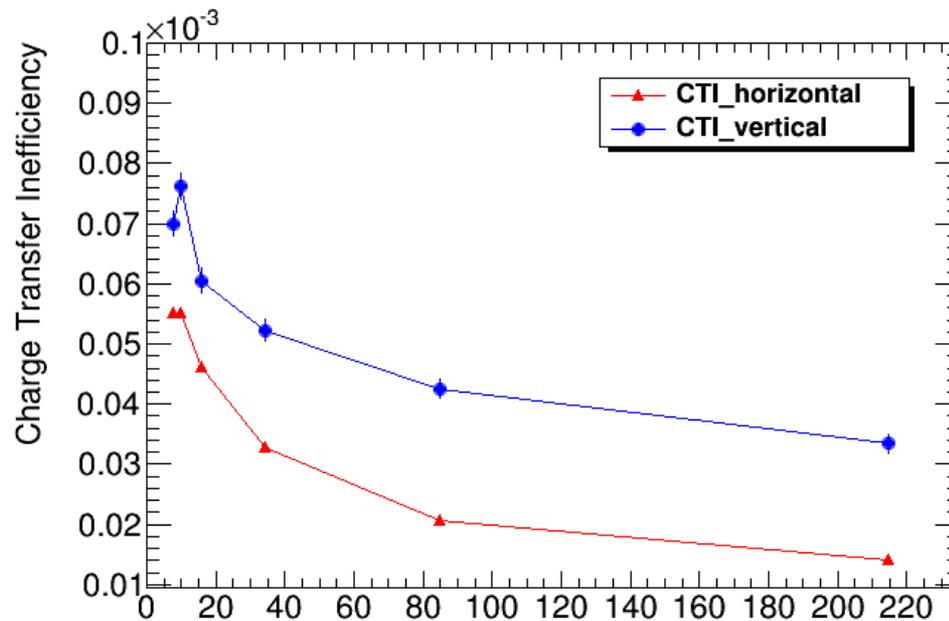
- ▶ 白色LEDを4つをCCDの周りに図のようにセット
- ▶ LEDは並列につないであり、同じ電圧がかかる
- ▶ 真ん中の穴の上にFe55線源が置かれる
- ▶ -40°C まで冷却し、LEDの電圧を変化させながら測定した。



CTI improvement

LEDの光によりダークカレントが増加しトラップを埋める電荷になるため、ダークカレントの大きさとCTIの関係を調べた。

- ▶ ダークカレントの増加に伴いトラップが埋まり、CTIが小さくなっている。
- ▶ トラップが埋まってくるにつれて、一定値に漸近していく様子が見られる。



ダークカレントとCTIの関係 Dark current [electron/pixel]

CTI improvement

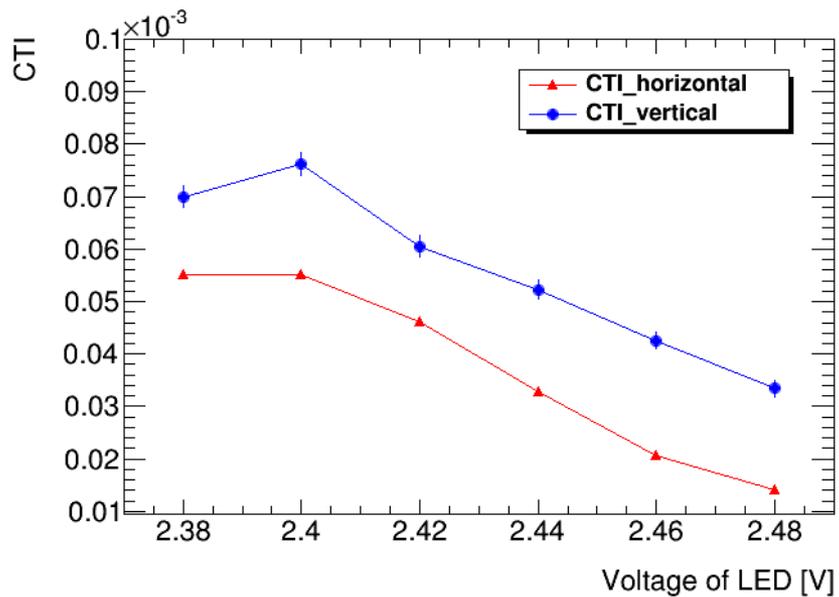
- ▶ LED未照射
 - $CTI_h = (5.52 \pm 0.05) \times 10^{-5}$
 - $CTI_v = (7.00 \pm 0.20) \times 10^{-5}$
- ▶ LED照射(215電子/pixel)
 - $CTI_h = (1.41 \pm 0.04) \times 10^{-5}$
 - $CTI_v = (3.35 \pm 0.16) \times 10^{-5}$
- ▶ CTI_h は4倍、 CTI_v は2倍程度の改善が見られた。
- ▶ 13000×128ピクセルのCCDで改善後のCTIだった場合、最も遠いピクセルでも信号は83%残る。(最大17%の損失)

まとめ

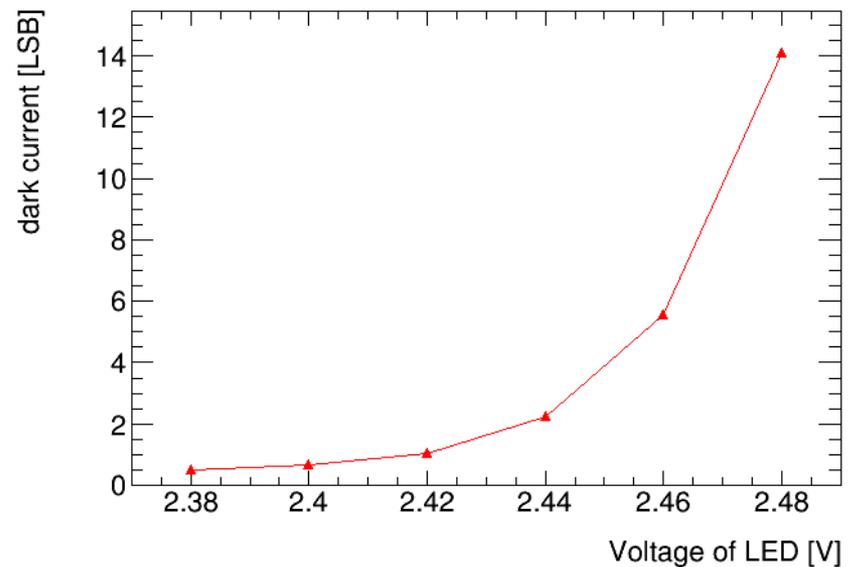
- ▶ ILC実験の崩壊点検出器の候補となっているFPCCDの中性子耐性について試験した。
 - 中性子照射によりCTIの悪化が見られた。
 - Fat-zero charge injectionにより、CTIが数倍改善することがわかった。

今後

- ▶ そのほかの中性子耐性についての測定を行う
- ▶ LEDの光を一様に当てられるように工夫



LEDの電圧とCTIの関係



LEDの電圧とダークカレントの関係

FPCCDとは

- ▶ FPCCDとはFine Pixel CCDの略でピクセルサイズが非常に小さなCCDのこと
- ▶ そもそもCCDとは？
 - 一般的にビデオカメラ、デジタルカメラなどに使用されているイメージセンサー
 - 半導体のピクセル検出器でMOS素子が並んでできている
 - CCDはcharge coupled device(電荷結合素子)の略で、本質的には電荷転送装置
 - 1つの読み出し口に対してピクセルが複数つながっていて、電荷をピクセル内をバケツリレーのように転送させることにより信号を読み出す

